



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

수질 인자의 퍼지 합성 방법에 의한  
하천 레크리에이션 지수 모델의 개발

Development of River Recreational Index  
Model by Fuzzy Synthetic Evaluation  
of Water Quality Parameters

2014 년 02 월

서울대학교 대학원

건설환경공학부

최수연



## 초 록

하천의 다양한 이수 기능 중 수영, 뱃놀이 등과 같은 레크리에이션 활동은 가장 중요한 비소모적(non-consumptive) 용도 중 하나로 최근 한국에서 하천에서의 레크리에이션 활동이 각광을 받고 있으며 이를 즐기는 사람이 증가하고 있다. 시민들이 하천에서 레크리에이션을 즐길 때, 수질이 좋지 않을 경우 질병이 발발하는 등의 문제가 생길 수 있으며 불쾌감을 느낄 수 있다. 따라서 하천의 수질은 하천 레크리에이션에 있어 매우 중요하며 하천 관리 기관은 시민이 이해하기 쉬운 수질 정보를 제공하여 수질의 상황에 따라 시민들이 하천 레크리에이션을 즐길 수 있도록 서비스를 제공할 필요가 있다. 국내에서는 실시간 수질 지수가 시민들을 대상으로 기존에 서비스되고 있으나 수질 기준 상에 존재하는 모호함과 불확실성을 고려하지 않은 점, 그리고 수상 레크리에이션 활동에 많은 영향을 미치는 대장균과 같은 중요 수질 지표의 정보를 종합하지 않았다는 점 등에서 한계를 가진다. 따라서 기존 모델의 한계를 보완하는 새로운 레크리에이션을 위한 수질정보 제공 모델이 필요하다.

본 연구에서는 시민들의 하천에서 레크리에이션 활동의 안전성 및 쾌적함을 확보하기 위해 일반 시민에게 실시간 수질 정보를 제공하는 모델인 하천 레크리에이션 지수 산정 모델(River Recreational Index Model, RRIM)을 개발하였다. 본 연구에서는 하천 레크리에이션 지수(River Recreational Index, RRI)를 하천에서 레크리에이션 활동을 할 때에 필수적인 수질이 어느 정도 안전하고 쾌적한지를 나타내는 지수로 정의하여 일반 시민이 이해하기 쉽도록 0에서 100까지 점수 형태로 나타내었으며 나아가서 ‘우수’, ‘양호’, ‘보통’, ‘불량’의 등급의 형태인 하천 레크리에이션 등급(River Recreational Grade, RRG)으로 변환되어 제공되도록 모형을 개발하였다. 이 때 우수와 양호는 직접접촉 가능, 보통은 간접접촉 가능 그리고 불량은 접촉활동 불가를 의미하였다.

본 연구에서는 RRIM을 크게 분변성 대장균 모델(Fecal

Coliform Model)과 수질 지수 모델(Water Quality Index Model, WQIM)로 구성하여 별도로 개발하였다. 분변성 대장균은 실시간으로 측정되기 어려운 수질 지표이기 때문에 로지스틱 회귀분석을 통해 개발된 FCM을 통해 분변성 대장균 등급(Fecal Coliform Grade, FCG)을 예측하였다. 또한, WQIM에서 분변성 대장균 외의 다른 수질 지표들을 종합하여 수질 지수(Water Quality Index, WQI)를 산정하였다. 이 때 수질 기준에 존재하는 모호함을 고려하기 위하여 퍼지 합성 방법을 이용하여 WQIM을 개발하였다. 마지막으로 RRIM에서는 FCG와 WQI를 이용하여 RRIM 알고리즘을 따라 최종적으로 RRI와 RRG를 산정하였다.

첫 번째 단계의 분변성 대장균 모델은 수상 활동에 중요한 대장균 수치의 범위를 예측하고 그 범위에 따라 수질의 안전성을 판단하도록 개발하였다. 분변성 대장균 모델에서는 종속변수가 실수형 변수가 아닌 범주형 변수일 때 사용되는 로지스틱 회귀 분석을 통하여 접촉 가능 여부에 따라 구분되는 세 개의 FCG를 예측하는 회귀함수를 도출하였다. FCG에서 1등급은 직접접촉 가능, 2등급은 간접접촉 가능 그리고 3등급은 접촉활동 불가의 의미하였다. 개발된 분변성 대장균 모델은 검증 결과 0.63의 정분류율을 보였다. 두 번째 단계의 수질 지수 모델은 분변성 대장균 외에 하천 레크리에이션 활동에 중요한 수질 지표들인 DO, pH, 탁도, 클로로필 a을 종합하도록 개발하였다. 수질 지수 모델에서는 수질 기준의 모호함과 불확실성을 보완하기 위해 퍼지 합성 방법을 사용하여 수질 지표를 종합하였다. RRI 등급에 따라 각 수질 인자의 수질 기준은 국내외 수질 기준을 참고하여 정하였으며 소속함수는 변형-삼각형 형태로 정의하였다. 또한, 소속함수를 통해 도출된 소속 값을 WQI로 종합하는 식을 제안하였다. WQI는 퍼지 합성 방법이 적용되지 않았을 때와 비교하였을 때 수질 기준의 모호함을 잘 반영하고 있음을 확인하였다.

RRIM 은 낙동강의 구미보 상류 지점과 강정고령보 상류 지점에 적용되었다. 구미보 상류 지점은 적용 기간 동안의 FCG 가 모두 1 등급으로 나타났으며 강정고령보 상류 지점의 경우 1 등급 외에도 2 등급과 3 등급이 관측되었다. WQI 는 두 지점 모두 수질 인자 중 클로로필 a 와 pH 의 변동을 잘 반영하고 있음을 확인할 수 있었다. DO 는 두 지점 모두 좋은 수질 상태를 보여 WQI 에 많은 영향을 미치지 못하였고 탁도의 경우 클로로필 a 와 영향력이 상쇄되어 WQI 에 많이 반영되지 못하였다. FCG 와 WQI 를 RRI 로 종합한 결과, 구미보 상류의 경우 FCG 가 모두 1 등급이었기 때문에 RRI 는 WQI 와 같았다. 또한, RRI 를 RTWQI 와 비교하였을 때 두 지수는 약 0.65 의 상관계수를 보여 수질 변화에 따라 비슷한 거동을 보임을 확인할 수 있었다. 강정고령보 상류의 경우, FCG 가 2 등급이거나 3 등급일 때, 모델의 알고리즘에 의해서 RRI 가 WQI 보다 낮게 조정되었다. 이를 RTWQI 와 비교하였을 때, 예측된 FCG 에 따라 RRI 가 RTWQI 보다 평균 52.5 점이 낮은 보수적인 결과를 보일 수 있음을 확인하였다.

주요어: 하천 레크리에이션 지수 산정 모델, 하천 레크리에이션 지수, 분변성 대장균 모델, 로지스틱 회귀분석, 수질 지수 모델, 퍼지 합성 방법, 낙동강

학번: 2012-20924

# 목 차

초 록 .....	i
목 차 .....	iv
표 목차 .....	vii
그림 목차 .....	viii
기 호 .....	x
1. 서론 .....	1
1.1 연구 배경 및 필요성 .....	1
1.2 연구의 목적 및 내용 .....	3
2. 현황 분석 및 연구 동향 .....	7
2.1 현황 분석 .....	7
2.1.1 하천 레크리에이션 현황 분석 .....	7
2.1.2 레크리에이션용 수질정보제공 시스템 .....	8
2.2 연구 동향 .....	14
2.2.1 대장균 예측 .....	14
2.2.2 종합수질지수 .....	17
3. 이론적 연구 .....	20
3.1 분변성 대장균 모델의 이론적 연구 .....	20
3.1.1 대장균 개요 및 기준 .....	20
3.1.2 분변성 대장균의 영향 인자 .....	23
3.1.3 통계 분석 .....	24

3.2 수질 지수 모델의 이론적 연구 .....	31
3.2.1 퍼지 집합 이론 .....	31
3.2.2 소속 함수 .....	32
3.2.3 퍼지 합성 방법 .....	35
4. RRIM의 개발 .....	38
4.1 RRIM 구성 및 FCG, RRG 정의 .....	38
4.2 분변성 대장균 모델의 개발 .....	39
4.2.1 데이터 수집	
4.2.2 데이터 추출 및 독립 변수 선택 .....	46
4.2.3 로지스틱 반응함수 도출 .....	46
4.3 수질 지수 모델의 개발 .....	59
4.3.1 수질 인자 선정 .....	59
4.3.2 등급 정의 및 수질 기준 선정 .....	63
4.3.3 소속함수의 정의 .....	69
4.3.4 종합화 방법 개발 .....	83
4.4 RRIM 알고리즘 .....	85
4.5 소속함수의 적합도 판단 .....	88
4.5.1 퍼지 소속함수와 크리스프 소속함수 적용의 비교 .....	88
4.5.2 가우스 형태와의 비교 .....	89
5. 모델의 적용 .....	92
5.1 적용 지점 .....	92
5.2 RRIM 적용 결과 .....	92
5.2.1 구미보 상류 지점 .....	92
5.2.2 강정고령보 상류 지점 .....	104



5.2.3 RTWQI와 RRI의 비교 .....	104
6. 결론 및 향후 연구 계획 .....	117
7. 참고 문헌 .....	119
Abstract .....	127

## 표 목차

표 2.1 RTWQI 수질 기준 .....	11
표 2.2 수상 레크리에이션을 위한 수질 정보 제공 시스템 ...	12
표 2.3 대장균 예측 방법의 비교 .....	16
표 2.4 종합수질지수 개발 방법 비교 .....	19
표 3.1 분변성 대장균의 국내외 수질 기준 .....	22
표 4.1 지점별 데이터 특성 .....	42
표 4.2 데이터 측정 및 관측소 특성 .....	42
표 4.3 분변성 대장균 모델 개발 및 검증 입력자료 및 결과	48
표 4.4 분변성 대장균 모델 검증 입력 자료의 정분류표 .....	50
표 4.5 수질자동측정망 선택항목 측정 현황 .....	60
표 4.6 RRIM의 수질 기준 .....	64
표 4.7 DO의 국내외 수질 기준 .....	65
표 4.8 pH의 국내외 수질 기준 .....	66
표 4.9 탁도의 국내외 수질 기준 .....	67
표 4.10 클로로필 a의 국내외 수질 기준 .....	68
표 4.11 등급의 중간값과 경계값 인자 점수 .....	86
표 5.1 구미보 상류 지점 수질 데이터 특성 .....	95
표 5.2 구미보 상류 지점 수질 인자의 등급별 해당 수 .....	95
표 5.3 구미보 상류 지점 적용 데이터 및 결과 .....	100
표 5.4 강정고령보 상류 지점 수질 데이터 특성 .....	106
표 5.5 강정고령보 상류 지점 수질 인자의 등급별 해당 수	106
표 5.6 강정고령보 상류 지점 적용 데이터 및 결과 .....	111
표 5.7 RTWQI의 등급 .....	116

## 그림 목차

그림 1.1 RRIM 모식도 .....	6
그림 3.1 수학적 집합의 소속함수 개념 .....	33
그림 3.2 퍼지 집합의 소속함수 개념 .....	33
그림 3.3 소속함수의 형태 .....	36
그림 4.1 분변성 대장균 모델 개발을 위한 데이터 수집 지점 .. .....	41
그림 4.2 구미보 상류 지점의 2004-2012년의 분변성 대장균 농도 .....	43
그림 4.3 칠곡보 상류 지점의 2004-2012년의 분변성 대장균 농도 .....	43
그림 4.4 칠곡보 하류 지점의 2004-2012년의 분변성 대장균 농도 .....	44
그림 4.5 강정고령보 상류 지점의 2004-2012년의 분변성 대장 균 농도 .....	44
그림 4.6 달성보 상류 지점의 2004-2012년의 분변성 대장균 농도 .....	45
그림 4.7 창녕함안보 상류 지점의 2004-2012년의 분변성 대장 균 농도 .....	45
그림 4.8 분변성 대장균 모델 검증 입력자료의 실측치와 예측치 의 비교 .....	49
그림 4.9 DO의 삼각형 소속함수 .....	71
그림 4.10 pH의 삼각형 소속함수 .....	71
그림 4.11 탁도의 삼각형 소속함수 .....	72
그림 4.12 클로로필 a의 삼각형 소속함수 .....	72
그림 4.13 DO의 가우스형 소속함수 .....	73
그림 4.14 pH의 가우스형 소속함수 .....	73
그림 4.15 탁도의 가우스형 소속함수 .....	74

그림 4.16	클로로필 a의 가우스형 소속함수	74
그림 4.17	DO 가우스형 소속도의 합	75
그림 4.18	DO의 변형-삼각형 소속함수	81
그림 4.19	pH의 변형-삼각형 소속함수	81
그림 4.20	탁도의 변형-삼각형 소속함수	82
그림 4.21	클로로필 a의 변형-삼각형 소속함수	82
그림 4.22	RRIM 모델 알고리즘	87
그림 4.23	DO의 인자점수	90
그림 4.24	pH의 인자점수	90
그림 4.25	탁도의 인자점수	91
그림 4.26	클로로필 a의 인자점수	91
그림 5.1	RRIM 적용 지점	93
그림 5.2	구미보 상류 지점의 FCG 결과	96
그림 5.3	구미보 상류 지점의 WQI, 탁도, 클로로필 a의 변화 거동	97
그림 5.4	구미보 상류 지점의 WQI, pH, DO의 변화 거동	98
그림 5.5	구미보 상류 지점의 RRI, WQI, RTWQI의 변화 거동	99
그림 5.6	강정고령보 상류 지점의 FCG 결과	107
그림 5.7	강정고령보 상류 지점의 WQI, 탁도, 클로로필 a의 변화 거동	108
그림 5.8	강정고령보 상류 지점의 WQI, pH, DO의 변화 거동	109
그림 5.9	강정고령보 상류 지점의 RRI, WQI, RTWQI의 변화 거동	110

# 기 호

## Latin Uppercase

$A$	수학적 집합
$\tilde{A}$	퍼지 집합
$D$	데비언스 검정통계량
$D^*$	데비언스 검정통계량 추정치
$F_1$	실시간수질지수 산정 시 12시간 동안 기준을 1회 이상 위반하는 수질 인자 개수
$F_2$	실시간수질지수 산정 시 12시간 동안 기준을 위반한 횟수
$F_3$	실시간수질지수 산정 시 12시간 동안 기준을 위반하는 정도
$GV_i$	RRI $i$ 등급별 할당 값
$L$	우도
$LR$	우도비검정통계량
$LR^*$	우도비검정통계량 추정치
$P_i$	$i$ 번째 인자의 인자 점수
$W_j$	왈드검정통계량
$W_j^*$	왈드검정통계량 추정치
$Z_j$	표준화 통계량

## Latin Lowercase

$w_i$   $i$ 번째 인자의 가중치

## Greek Uppercase

$\Omega$  승산(odds)

## Greek Lowercase

$\alpha_m$  로지스틱 회귀함수의 절편

$\hat{\alpha}_m$  로지스틱 회귀함수의 절편 추정치

$\beta_j$  로지스틱 회귀함수의  $j$ 번째 독립변수의 기울기

$\hat{\beta}_j$  로지스틱 회귀함수의  $j$ 번째 독립변수의 기울기 추정치

$\mu$  소속도

$\chi^2$  카이제곱값

# 1. 서론

## 1.1 연구의 배경 및 필요성

하천의 기능은 치수, 이수 그리고 환경의 세가지로 분류하며 그 중 이수 기능은 용수공급, 주운, 수력발전, 어업, 골재 채취 등을 포함한다. 이러한 다양한 이수 기능 중 수영, 뱃놀이, 낚시 등의 수상 레크리에이션 활동은 가장 중요한 비소모적(Non-consumptive) 용도 중 하나이다. 최근 한국에서는 소득 증가와 함께 여가 활동에 대한 관심이 상승하여 하천에서의 레크리에이션 활동에 대한 관심 또한 상승하였다. 또한 근년에 시행된 4 대강 복원사업에 의해서 하천의 수변 공간이 재정비되면서 시민들이 하천에서 레크리에이션 활동을 즐길 수 있는 장소가 많아졌으며, 기존의 수상스키, 요트, 카누 등의 활동 외에도 패러세일링(parasailing), 리버버깅(river bugging), 셔틀 바이크(shuttle bike), 워터 제트팩(water jetpack), 워터 워킹 볼(water walking ball) 등 다양한 신종 수상 레크리에이션 활동이 도입됨에 따라 하천은 레크리에이션 활동의 또 다른 장소로 더욱 각광을 받고 있다.

시민들이 하천에서 다양한 활동을 즐기면서 레크리에이션을 할 때에 안전성과 쾌적함을 확보하는 것이 중요하다. 이러한 측면에서 하천 레크리에이션에서 가장 중요한 것 중 하나는 하천의 수질이라고 할 수 있다. 하천의 수질은 안전성과 쾌적함에 모두 직결되는 문제이기 때문이다. 하천에서의 안전성을 확보한다는 것은 높은 수위나 큰 유속으로 인한 익사를 방지하는 것 외에도 수질적인 문제로 인한 질병의 발생을 예방하는 것 또한 포함한다. 수질이 낮은 수체와 인체가 접촉할 경우, 심각한 경우 병원성 미생물 등에 감염되어 수인성 질병이 발발할 수 있으며, 소화기 장애, 눈과 피부의 질병 등이 발생할 수 있다. 또한, 하천의 수질에 따라 시민은 쾌적함 혹은 불쾌함을 느낀다. 수질이 낮을 경우 악취가 날 수 있고 물의 색이

탁하여 하천의 미관 등의 심미적인 면을 저해할 수 있기 때문이다. 이처럼 하천의 수질은 매우 중요하기 때문에, 하천 관리 기관은 시민에게 수질에 대한 적절한 정보를 제공하여 수질의 상황에 따라 시민들이 하천 레크리에이션을 즐길 수 있도록 서비스를 제공할 필요가 있다. 즉, 하천의 수질이 어떠한 정도인지를 시민에게 알려 시민이 하천에서 레크리에이션 활동 여부를 결정하는 데에 도움을 주어야 한다.

현재 국내에서는 수질 관리 주체인 환경부가 크게 두 가지 방법을 통하여 국민에게 하천 수질 정보를 제공하고 있다. 첫 번째는 물환경정보시스템 (<http://water.neir.go.kr>)을 통해 과거의 수질 지표들에 대한 월 혹은 년 농도 값을 제공하고 있다. 홈페이지에서 제공되는 수질 정보들은 DO, BOD, COD, SS, 탁도, pH, 수온, 대장균, TN, TP 등 개별적인 수질 지표들로서 일반 국민이 그 지표들이 뜻하는 바를 알고 하천의 수질이 어느 정도인지 판단하기에는 한계가 있다. 또한 이러한 개별 지표들은 해당 하천에서의 수질 상태를 단편적으로만 나타내고 있을 뿐 수질의 종합적인 상태에 대한 지식을 제공하지 못하고 있다(최지용, 1996). 그러므로 일반 시민이 종합적인 수질 상태를 쉽게 이해하고 현 상태가 하천 레크리에이션에 알맞은지 판단할 수 있는 수질 정보를 제공해야 할 필요가 있다.

두 번째로 환경부에서 최근에 운영하기 시작한 실시간 수질 정보시스템([www.koreawqi.go.kr](http://www.koreawqi.go.kr))에서 수질자동측정망에서 측정되고 있는 일 수질 데이터와 실시간 수질지수(Real Time Water Quality Index, RTWQI)를 제공하고 있다. 여기서 제공되는 실시간 수질지수는 앞에서 제시한 첫 번째 방법과는 달리 일반 시민들이 수질 상태를 쉽게 이해할 수 있도록 지수로 수질정보를 종합적으로 표현하고 있다. 그러나 실시간 수질지수는 시민들의 수상 활동을 위해 제공되는 정보이나, 수상 활동 시 가장 고려되어야 할 대장균과 같은 수질 지표는 고려하지 않는다. 또한, 일곱 개의 수질 지표를 종합하여 하나의 수질 지수를 만드는 과정에 있어서 이 때에 수질 기준 상의 모호함이나 불확실성은 고려하지 않는다. 수질 기준에



따라 물이 깨끗한지 깨끗하지 않은지를 판단한다고 할 때, 만약 깨끗한 물의 기준이 용존산소량의 경우 5 mg/L 이하라고 할 때 4.95 mg/L 를 깨끗하다고 할 수 있고 5.05 mg/L 는 깨끗하지 않다고 말할 수 있을까라는 의문에서 수질 기준 상의 모호함에 대해 생각해 볼 수 있다. 또한, 수질 기준은 명확히 정해지지 않고 각 국가별, 기관별로 기준이 상이하기 때문에 불확실성이 존재하기도 한다.

위에서 살펴본 바와 같이 현재 우리나라에 존재하는 수질정보제공 시스템들은 시민들이 쉽게 그 의미를 이해할 수가 없거나 레크리에이션에 매우 중요한 수질 정보를 포함하지 않는다. 또한 수질 기준의 모호함이나 불확실성을 고려하지 않은 한계를 지닌다. 그러므로 이러한 한계를 보완할 수 있는 적절한 하천 레크리에이션용의 수질정보제공 모델을 제공할 필요가 있다.

## 1.2 연구의 목적 및 내용

본 연구의 목적은 시민들의 하천에서 레크리에이션 활동의 안전성 및 쾌적함을 확보하기 위해 일반 시민에게 실시간으로 수질 정보를 제공하는 모델인 하천 레크리에이션 지수 산정 모델(River Recreational Index Model, RRIM)을 개발하는 것이다. 본 연구에서는 하천 레크리에이션 지수(River Recreational Index, RRI)를 하천에서 레크리에이션 활동을 할 때에 수질이 어느 정도 안전하고 쾌적한지를 나타내는 지수로 정의하여 일반 시민이 이해하기 쉽도록 0에서 100까지 점수 형태의 지수로 산정하였으며 나아가서 '우수', '양호', '보통', '불량'과 같은 등급의 형태로도 변환되어 제공되도록 모형을 개발하였다. 이러한 등급을 하천 레크리에이션 등급(River Recreational Grade, RRG)라 하였다. 하천 레크리에이션 활동은 수체와 직접 접촉하는 수영과 같은 직접접촉활동, 보트와 같은 간접접촉활동, 혹은 접촉이 아예 불가능한 산책과 같은 무접촉활동의 세 가지 종류의 활동으로 나뉘는데,

RRI 와 RRG 를 현재 수질 상태가 세 가지 종류의 활동 중 어떠한 것이 가능한지를 의미하도록 개발하였다.

본 연구에서는 그림 1.1 과 같이 RRIM 을 크게 분변성 대장균 모델(Fecal Coliform Model)과 수질 지수 모델(Water Quality Index Model, WQIM)로 구성하여 별도로 개발하였다. 분변성 대장균 모델은 분변성 대장균 등급(Fecal Coliform Grade, FCG)을 예측하고, 수질 지수 모델에서는 분변성 대장균 외의 다른 수질 지표들을 종합하여 수질 지수(Water Quality Index, WQI)를 산정하였다. 이 두 가지 결과값은 RRIM 의 알고리즘에 따라 최종적으로 RRI 와 RRG 로 종합되었다. 본 모델이 분변성 대장균 모델과 수질 지수 모델로 나뉘는 이유는 하천 레크리에이션에 있어서 매우 중요한 수질 지표인 분변성 대장균이 실시간 측정이 불가능하기 때문이다. 분변성 대장균과 같은 수질 지표는 실시간 측정이 불가능하기 때문에 일반 수질측정소에서 주 혹은 월마다 직접 채수를 통해 측정된다. 분변성 대장균과 같이 일 데이터가 측정되지 않는 수질 인자는 실시간으로 지수를 산정하는 RRIM 에 이용될 수 없는 한계가 있다. 그러므로 본 연구에서는 분변성 대장균 모델을 개발하고 이를 이용하여 분변성 대장균을 예측하여 한계점을 보완하고자 하였다.

분변성 대장균 모델은 RRIM 의 알고리즘에서 첫 번째 단계이다. 본 연구에서는 분변성 대장균 모델은 분변성 대장균을 예측하는데 그 수치를 예측하지 않고 수치에 따른 분변성 대장균 등급(Fecal Coliform Grade, FCG)을 예측하여 등급에 따른 수질의 안전성을 평가하는 것을 목표로 하였다. 분변성 대장균 모델에서는 종속변수가 실수형 변수가 아닌 범주형 변수일 때 사용되는 로지스틱(logistic) 회귀함수를 사용하여 분변성 대장균 등급을 예측하도록 하였다. 두 번째 단계의 수질 지수 모델은 분변성 대장균 외에 하천 레크리에이션 활동에 중요한 개별 수질 지표들을 종합하여 수질 지수(Water Quality Index, WQI)를 산정하도록 개발하였다. 수질 지수 모델은 수질 기준의 모호함과 불확실성을 보완하기 위해 퍼지 합성 방법을

사용하여 개발되었다. 인자로 종합될 수질 지표들을 수질 인자라 하며 하천 레크리에이션에 중요한 수질 지표들을 수질 인자로 선택하여 하천 레크리에이션이 가능한 등급에 따라 수질 기준을 설정하였다. 퍼지 합성 방법에서 소속함수를 정의하는 것이 중요하여 다양한 소속함수의 형태를 적용하고 비교하여 가장 적합한 형태를 선택하였다. 또한, 수질 인자들을 종합화 하는 방법을 개발하였다. 마지막으로 분변성 대장균 등급과 수질 지수를 하나의 하천 레크리에이션 지수로 종합할 알고리즘을 개발하였다.

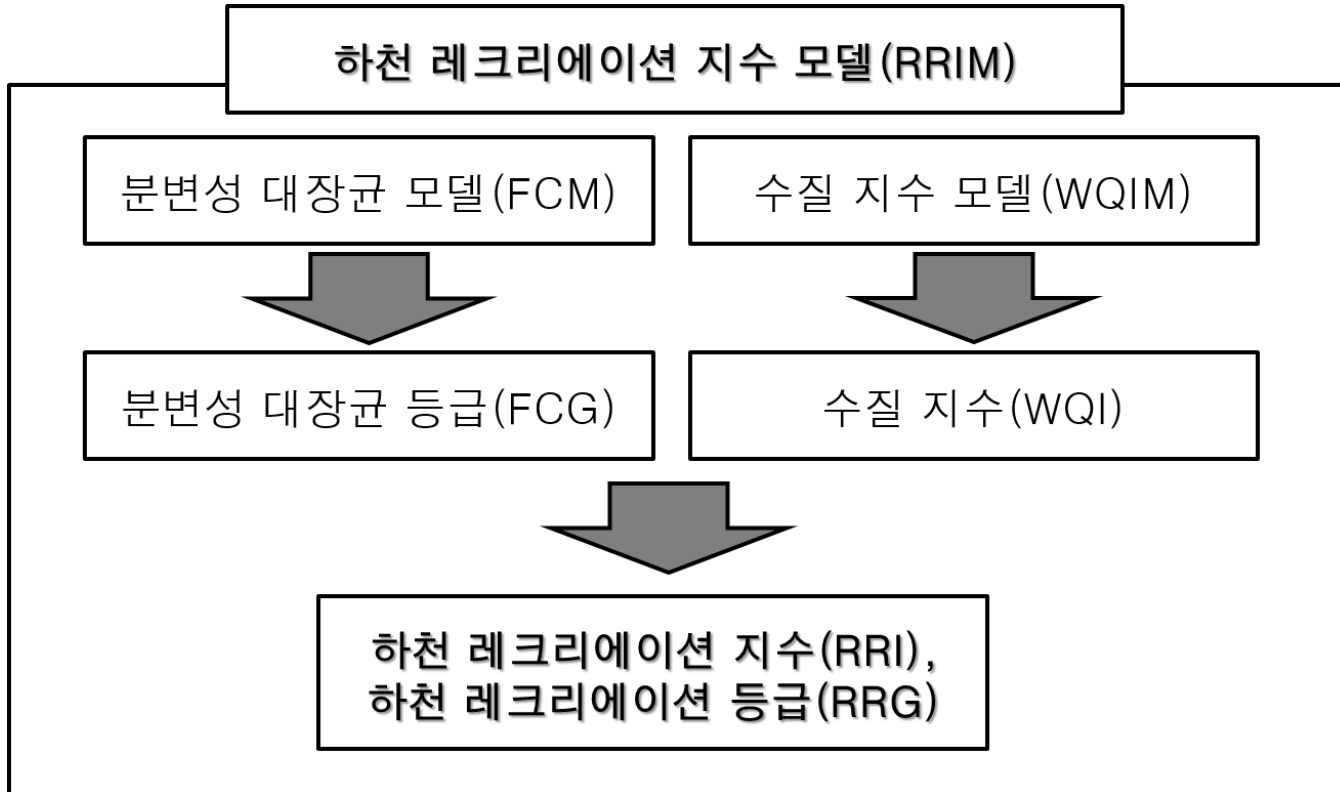


그림 1.1 RRIM 모식도

## 2. 현황 분석 및 연구 동향

### 2.1 현황 분석

#### 2.1.1 하천 레크리에이션 현황 분석

하천에서의 레크리에이션 시장은 현재 확대되고 있는 중이며 그에 따라 RRIM 과 같은 레크리에이션용 수질 정보를 제공하는 모델의 개발은 필수적이라고 볼 수 있다. 실제로 2010 년 국내에서 수상 레크리에이션을 즐긴 인구는 5,540,000 명에 달하였으며 이 중 75%는 하천과 같은 내수면에서 활동을 즐겨 하천에서 여가를 보내는 시민의 수가 상당함을 알 수 있다. 또한, 2011 년 기준 주요 포털 사이트에 등록된 수상 레크리에이션 활동 온라인 동호회는 총 496 개로 집계되었고 회원 수가 많은 상위 10 개 온라인 동호회 회원 수는 87,704 명으로 집계되어 수상 레크리에이션을 중심으로 활동하는 커뮤니티들이 활발히 운영되고 있음을 알 수 있다(김윤영, 2011).

국가 차원에서 수상 레크리에이션을 활성화 시키기 위해 무료 체험 프로그램을 운영하고 있다. 지난 2011 년에는 무료 체험 프로그램을 통해 수상 레크리에이션을 즐긴 이용자의 수가 180,000 명이었으며 이 중 140,000 명이 국내 주요 강에서 한강해양레포츠 체험교실, 세종보, 4 대강, 낙단보 개장 행사 및 카약 탐사단 프로그램을 체험하였다. 또한, 하천에서 레크리에이션 기반 시설을 조성하기 위해 기반시설 조성계획을 세우고 사업을 추진 중에 있다. 문화 및 생태녹색관광자원 개발사업 중 수상 레크리에이션 기반시설 조성계획을 포함하고 있는 사업은 5 개로, 약 107 억 원의 사업예산을 투입하였다. 또한, 2015년까지 강변문화관광개발계획을 세워 수상 레크리에이션 기반 조성사업을 한강, 낙동강, 금강에 걸쳐 진행하고 있으며 이에 약 784 억 원이 투입되고 있다(김윤영, 2011). 이처럼 국민적인 관심과 정부의 투자에 힘입어 하천 레크리에이션에 대한 관심은 더욱 증가할 것으로 보인다.

### 2.1.2 레크리에이션용 수질정보제공 시스템

본 절에서는 일반적인 수질정보제공 시스템 외에 현재 레크리에이션을 위해 수질 정보를 제공하는 시스템들을 살펴보고자 한다. 하천이나 해안 등의 수상 레크리에이션 활동을 위한 수질정보제공 시스템은 주로 미국에서 활발하게 개발되어 왔다. 미국에서는 주 별로 하천 혹은 해안에서의 수상활동이 안전한지 혹은 그렇지 않은지를 판단하여 시민들을 대상으로 웹 상으로 정보를 제공하고 있다. 미국의 시스템들은 주로 분변성 대장균(fecal coliform), E. coli, Enterococci 등 미생물의 단일 지표 수치에 근거하여 직접접촉을 요하는 수상활동이 가능한지를 판단한다. California주의 Beach advisories는 1주마다 박테리아를 측정하여 그 수치에 따라 해변을 폐쇄할지 결정한다. 또한, 바다로의 오수의 유입이 예상되는 경우가 발생할 때에는 수시로 해변을 폐쇄한다. Louisiana주의 Beach Monitoring Program은 enterococci와 분변성 대장균의 수치를 측정하고 해변의 폐쇄를 결정한다. 그러나 이 두 시스템은 좀 더 신속한 정보를 시민에게 제공하지 못한다는 한계를 지닌다. 대장균의 측정이 단기간에 이루어지지 않고 18~24시간 정도가 걸리기 때문에 시민들에게 실제 제공되는 정보는 측정을 위해 물을 채수하는 과거 시점의 정보이기 때문이다.

Massachusetts주의 Flagging Program, Ohio주의 Nowcasting beach advisories, Philadelphia주의 Philly Rivercast 등은 대장균과 상관관계가 높은 다른 인자들의 분석을 통해 대장균을 예측하여 예측된 대장균 수치가 수영과 같은 접촉 레크리에이션 활동에 적합한가를 판단하여 실시간 수질 정보를 시민들에게 알리고자 한다. Flagging Program은 강우량, 강우세기, 강우사상 기간, 풍속, 유량, 방사능 세기를 독립변수로 한 선형회귀분석을 통해 E.coli를 예상한다. 또한, Nowcasting beach advisories는 탁도, 새의 수, 파도 높이, 수온, 수위 등을 독립변수로 한 선형회귀분석을 통해 E.coli를 예상하여 이에 따라 가능한 레크리에이션 활동에 대한 정보를 제공한다. Philly Rivercast의 경우, 탁도, 강우량,

유량을 입력 자료로 한 알고리즘을 만들어 세 개의 자료의 범위에 따라 분변성 대장균의 수치를 예상한다. 그러나 이러한 미국의 시스템은 대장균과 같은 단일 지표로 수준을 판단함으로써 인해 종합적인 수질 정보를 제공할 수 없다는 점에서 한계를 지니는 것으로 판단된다.

뉴질랜드에는 Wellington 지역에서 Suitability for Recreation Grade (SFRG)이라는 시스템을 운영하고 있다. SFRG 는 Microbial Assessment Category (MAC)와 Sanitary Inspection Category (SIC)로 나뉘는데 MAC는 E.coli를 측정하여 가능한 수중 활동 수준을 결정한다. SIC 는 분변성 대장균 발생 오염원의 면적, E. coli, 수온, 탁도, 조류 등을 측정한 후 이를 종합하여 가능한 레크리에이션 활동 수준을 판단한다. 그러나 이 시스템의 경우 본격적인 수상활동이 시작되는 여름에 연 1 회 정보를 제공한다는 점에서 그 한계점을 가진다.

국내에서는 수질 정보 제공에 있어서 두 개의 시스템을 찾아볼 수 있다. 우선 환경부에서 최근 제공하기 시작한 실시간 수질지수(Real Time Water Quality Index)는 수질자동측정망을 통해 실시간으로 측정되는 7 개의 수질 인자를 종합하여 하나의 지수로 변환하여 친수 활동의 적합도를 평가한다. 여기에 사용된 7 개의 수질 인자는 수온, pH, 용존산소량(DO), 전기전도도, 총유기탄소(TOC), 총인(TP), 총질소(TN)이며 각 인자 별로 기준을 정하여 12 시간 동안 이 기준을 1 회 이상 위반하는 수질 인자 개수, 위반횟수, 위반 정도를 측정하여 식 (2.1)에 이를 대입하여 실시간 수질지수를 계산한다.

$$RTWQI = 100 - \sqrt{\frac{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}{3}} \quad (2.1)$$

여기서,  $F_1$  은 12 시간 동안 기준을 1 회 이상 위반하는 수질 인자 개수를 전체 측정하고 있는 수질 자료 개수로 나누어 산정한 분율,  $F_2$  는 각 수질 항목별로 12 시간 동안 수질 기준치를 위반한 항목들의 총 위반

횃수를 총 측정횃수로 나누어 산정한 분율,  $F_3$  는 각 수질 지표별로 기준치를 위반한 정도를 분율화한 것을 총 합한 것이다. 이 시스템에서 사용하고 있는 수질 기준은 표 2.1 과 같다. 식 (2.1)은 현재의 수질 상태가 표 2.1 에서 제시하고 있는 수질 기준을 위반하고 있는 종합적인 정보를 나타낸다. 그러나, 식 (2.1)은 수질 기준 자체에 존재하고 있는 모호함과 불확실성은 고려하지 않는다. 또한, 하천 레크리에이션 활동에 매우 중요한 수질 지표인 대장균이 수질자동측정망에서 측정되고 있지 않기 때문에 수질 인자로 고려하지 않는다는 한계를 지닌다.

국내의 시스템 중 우수 해수욕장 선정 프로그램은 피서 철을 맞아 해수욕장의 종합적인 수질을 측정하고 그 우수성을 판단하는 프로그램이다. 이 시스템은 SFRG 와 같이 연 1 회만 수질을 평가하고, 수질 기준의 모호함을 고려하지 않는 한계를 지닌다. 또한, 앞에서 소개된 기존 시스템들은 모두 예보 형태가 아닌 실시간 혹은 과거의 정보를 제공하고 있어 시민들이 내일의 정보를 제공받고 하천에서의 레크리에이션 계획을 세우는 일이 불가능하다는 단점을 지닌다. 표 2.2 에 앞에서 소개한 국내외 수질 정보 제공 시스템을 정리하였다.



표 2.1 RTWQI의 수질 기준

수질 인자	수질 기준
Temp.	$(10 \text{ 년간 평균 수온}) - 10^{\circ}\text{C} \leq \text{Temp.} \leq (10 \text{ 년간 평균 수온}) + 10^{\circ}\text{C}$
pH	$6.5 \leq \text{pH} \leq 9.0$
DO	$0.8 \times D_{os} \leq \text{DO} \leq 1.3 \times D_{os}$
EC	$\leq 200 \mu\text{S/cm}$
TOC	$\leq 3 \text{ mg/L}$
TN	$\leq 3 \text{ mg/L}$
TP	$\leq 0.1 \text{ mg/L}$

표 2.2 수상 레크리에이션을 위한 수질 정보 제공 시스템

시스템	지역	제공 정보	제공 주기	정보 생성 방법	정보 제공 매체	예보 여부
Flagging Program	미국 Massachusetts 주 Charles 강	가능한 수상 활동의 수준을 나타내는 등급	주 단위	강우량, 강우세기, 강우사상 기간, 풍속, 유량, 방사능 세기 데이터를 이용한 회귀분석을 통해 E. coli 수치 예측 후 가능한 수상활동의 수준 판단	웹 사이트 ( <a href="http://www.crwa.org/water_quality/daily/programhome.html/">http://www.crwa.org/water_quality/daily/programhome.html/</a> )	-
Nowcasting Beach Advisories	미국 Ohio 주 Erie 호수	가능한 수상 활동의 수준을 나타내는 등급	일 단위	탁도, 새의 수, 파도 높이, 수온, 수위 등의 데이터를 이용한 회귀분석을 통해 E. coli 수치 예측 후 가능한 수상활동의 수준 판단	웹 사이트 ( <a href="http://www.ohiocast.info">http://www.ohiocast.info</a> )	now-cast
Philly Rivercast	미국 Philadelphia 주 Schuylkill 강	가능한 수상 활동의 수준을 나타내는 등급	일 단위	강우량, 유량, 탁도 데이터를 이용하여 분변성 대장균 수치 예측한 후 가능한 수상활동의 수준 판단	웹 사이트 ( <a href="http://schuylkillrivercast.org">http://schuylkillrivercast.org</a> )	now-cast
Beach Advisories	미국 California 주 주요 해변	수상활동의 가능성	주 단위	박테리아 측정 후 수상 활동의 가능성 판단	웹 사이트 ( <a href="http://ph.lacounty.gov/phcommon/public/eh/water_quality/beach_grades.cfm">http://ph.lacounty.gov/phcommon/public/eh/water_quality/beach_grades.cfm</a> )	-

표 2.2 수상 레크리에이션을 위한 수질 정보 제공 시스템 (계속)

시스템	지역	제공 정보	제공 주기	정보 생성 방법	정보 제공 매체	예보 여부
Beach Monitoring Program	미국 Louisiana 주 주요 해변	수상 활동의 가능성	주 단위	Enterococci, 분변성 대장균 측정 후 수상 활동의 가능성 판단	웹 사이트 ( <a href="http://new.dhh.louisiana.gov/index.cfm/page/288">http://new.dhh.louisiana.gov/index.cfm/page/288</a> )	-
Suitability for Recreation Grade (SFRG)	뉴질랜드 Wellington	가능한 수상활동의 수준을 나타내는 등급	년 단위	E. coli, 분변성 대장균 발생 오염원의 면적, 수온, 탁도, 조류 등 측정 후 정보를 종합하여 가능한 수상활동의 수준 판단	웹 사이트 ( <a href="http://www.gw.govt.nz/beachgrades/">http://www.gw.govt.nz/beachgrades/</a> )	-
실시간 수질지수 (Real Time Water Quality Index, RTWQI)	대한민국 전국 하천 및 호소	가능한 수상활동의 수준을 나타내는 등급	시 단위	수온, pH, DO, 전기전도도, TOC, TP, TN 의 실시간 측정 후, 기준값을 12 시간동안 1 회이상 위반하는 수질 인자 개수와 위반횟수, 위반 정도를 종합하여 가능한 수상활동의 수준 판단	웹 사이트 ( <a href="http://www.koreawqi.go.kr/">http://www.koreawqi.go.kr/</a> )	now-cast
우수 해수욕장 선정	대한민국 전국 해수욕장	종합적 수질 수준을 나타내는 등급	년 단위	총 대장균, COD, TP, 암모니아성 질소, SS 측정 후 종합하여 수질 수준 판단	-	-

## 2.2 연구 동향

### 2.2.1 대장균 예측

전 절에서 제시된 레크리에이션용 수질정보제공 시스템들 중 미국의 모델과 같이 많은 연구들에서 유량, 강우량과 같은 수문 인자 혹은 탁도와 같은 수질 지표와 대장균과의 상관관계를 연구하고 이를 이용하여 대장균의 수치를 예측하고자 하였다. Ferguson 등(1996)은 강우량과 하수 유입량과 분변성 대장균(Fecal Coliform, FC), 분변성 연쇄상구균(Fecal Streptococci, FS) 등의 여섯 가지의 수인성 질병을 나타내는 미생물 지표들과의 상관관계를 분석하였다. 그 결과, 분변성 대장균은 강우량에 큰 영향을 받았으며, 하수 유입량과도 유의한 상관관계가 존재하였으며 이 두 인자를 독립변수로 한 선형회귀분석에서 결정계수( $r^2$ ) 0.80로 분변성 대장균의 수치를 예측하였다. Christensen 등(2000)은 분변성 대장균 등의 실시간으로 측정되지 않는 수질 인자들을 실시간으로 측정되는 수질 인자들로 예측하고자 하였다. 분변성 대장균은 탁도, 시간과의 상관관계가 큰 것으로 밝혀졌으며, 이와는 선형회귀분석은 결정계수 0.04~0.62의 결과를 보였다. Clark와 Norris(2000)는 유량, 전도도, pH, 수온, DO를 독립변수로 한 선형회귀분석에서 결정계수 0.10~0.50의 결과를 보였다. 또한, Crowther 등(2001)은 유량, 일조량, 풍향 및 풍속, 조수 높이 등으로 총 대장균(Total Coliform, TC), 분변성 대장균 그리고 분변성 연쇄상구균을 선형회귀분석으로 예측하고자 하였고 적용 지역에 따라 결정계수가 8.1에서 53.0%의 값을 보였다.

앞에서 제시된 시스템인 Flagging Program을 개발한 Eleria와 Vogel(2005)는 강우량, 강우세기, 강우사상 기간, 풍속, 유량, 방사능 세기를 독립변수로 한 선형회귀분석을 통해 E.coli를 예상하여 0.60의 결정계수를 보였다. 또한 로지스틱 회귀분석을 적용하여 보트 레크리에이션 활동 시 적합한 E.coli의 수치인 1000 CFU/100mL 보다 낮은 기준을 만족하는지 혹은 만족하지 않은지를 예상하였으며 그 결과 만족하는 경우는 0.98의 높은 결정계수를 보였으나 만족하지 않는 경우는

0.44로 비교적 낮은 결정계수를 보였다. Nowcasting beach advisories를 개발한 Francy와 Darner(2007)는 탁도, 새의 수, 파도 높이, 수온, 수위 등을 독립변수로 한 선형회귀분석을 통해 결정계수 0.38의 예측 결과를 보였다. Philly Rivercast를 개발한 Maimone 등(2007)은 분변성 대장균의 범위를 나누어 200 counts/100mL 이하일 경우 직접접촉 레크리에이션 활동이 가능하고 1000 counts/100mL 이하인 경우는 간접접촉 레크리에이션 활동이 가능하다고 정하고, 탁도, 강우량, 유량의 세 인자를 입력데이터로 한 알고리즘을 만들어 세 인자의 범위에 따라 분변성 대장균의 범위를 예측하여 0.66의 예측률을 보였다. 최근에는 다양한 데이터마이닝 기법을 이용하여 미생물지표를 예측하고자 한 연구도 수행된 바 있다. He와 He(2007)는 인공지능신경망(Artificial Neural Network, ANN)을 통해 대장균을 예측하였고 Kim 등(2012)은 SVM을 이용하였다.

표 2.3에 앞에서 언급된 연구들을 정리하였다. 대부분의 연구들은 선형회귀분석이나 비선형회귀분석 등을 사용하여 수치를 예측하고자 하였다. 그러나 Eleria와 Vogel의 연구와 같이 로지스틱 회귀분석을 이용하여 대장균의 등급을 하천에서의 레크리에이션 시 직접접촉이 가능한 정도, 간접접촉이 가능한 정도 그리고 어떠한 접촉활동도 불가능한 정도로 나누어 이를 예측하는 것이 레크리에이션 용도의 수질 예측에 더 유용할 것으로 판단된다.

표 2.3 대장균 예측 방법의 비교

저자	예측 변수 (종속변수)	입력데이터(독립변수)	예측 방법	Goodness-of-Fit Statistic (R <sup>2</sup> or MSE)
Ferguson 등 (1996)	FC	강우량, 하수 유입량	선형회귀분석	R <sup>2</sup> =0.80
Christensen 등 (2000)	FC	탁도, 시간(월)	선형회귀분석	R <sup>2</sup> =0.012~0.775
Clark와 Norris (2000)	FC	유량, 전기전도도, pH, 수온, DO	선형회귀분석	R <sup>2</sup> =0.10~0.50
Crowther 등 (2001)	TC, FC, FS	강우량	선형회귀분석	R <sup>2</sup> =0.81~0.53
Eleria와 Vogel(2005)	E.coli	강우량, 강우세기, 강우사상 기간, 풍속, 유량, 방사능 세기	선형회귀분석, 로지스틱회귀분석	R <sup>2</sup> =0.60
Francy와 Darner(2007)	E.coli	탁도, 새의 수, 파도 높이, 수온, 수위 등	선형회귀분석	R <sup>2</sup> =0.38
Maimone 등(2007)	FC	탁도, 강우량, 유량	선형회귀분석	0.66
He와 He (2007)	TC, FC	수온, 전기전도도, 탁도, 조류 높이, pH 등	ANN	R <sup>2</sup> =0.84~0.91
Kim 등 (2012)	TC, E.coli	일사량, 수심, 유속, 염도, pH, 탁도 등	SVM	MSE=0.23~0.31

## 2.2.2 종합수질지수

대장균, DO 등과 같은 단일 수질 지표는 종합적인 수질의 척도가 될 수 없다는 이유로 1960년대 중반 이후부터 미국을 선두로 하여 영국, 일본, 뉴질랜드, 캐나다 등의 국가에서 종합적인 수질을 평가하고자 하는 종합수질지수를 개발하고자 하는 연구가 활발히 진행되어왔다. 종합수질지수의 첫 연구는 Horton(1965)에 의해 행해졌다. 그는 델파이 기법(Delphi method)를 사용하여 pH, DO, 전기전도도, Cl<sup>-</sup>, FC, 알칼리도를 하나의 지수로 종합하였다. 델파이 기법은 다수의 전문가의 의견을 하나로 수렴하고자 반복적인 설문조사를 익명으로 실시하는 기법으로 이를 이용해 다음과 같은 세 단계로 종합수질지수가 개발되었다.

(a) 수질 지표 중 종합될 인자 선택

(b) 각 인자의 상호비교가 가능하도록 공통의 가치로 변환시키는  
부지수 함수 개발

(c) 각 수질항목별로 공통가치화 한 부지수 함수를 집약하는 종합  
화 함수 개발

이 후 많은 종합수질지수가 이러한 방법을 이용해 개발되었다. Brown(1970)은 미국의 National Sanitation Foundation(NSF)에서 종합수질지수, NSF-WQI를 개발하였다. Prati 등(1971), Deininger 등(1971), O'connor 등(1972), McDuffe와 Johnathan(1973), Walski와 Parker(1974), Harkins(1974), Dunnette 등(1979), Joung 등(1979), House(1987), 그리고 Dinius(1987) 등 1970년대와 1980년대에 미국을 시작으로 영국과 유럽 등지에서 델파이 기법을 이용하여 종합수질지수를 개발하였다. 우리나라에서는 한국환경기술개발원의 최지용(1996)이 “종합수질지표의 개발”에서 델파이 기법을 이용해 종합수질지수를 개발하였다. 델파이 기법은 대학교수 17명, 연구원 10명 공무원 3명으로 구성된 전문가 설문단을 대상으로 이루어졌으며, 그 결과, 주요 수질

인자로 선정된 pH, DO, BOD, SS, COD, TN, TP, TC, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N를 이용하여 종합수질지수를 개발하였다. 델파이 기법을 이용한 방법은 전문가의 의견을 수렴하여 의사결정을 진행한다는 점에서 주관성을 줄이고 객관성을 확보했다는 장점을 지닌다. 그러나 델파이 기법은 여러 번에 거친 설문조사에 의해 비용이 크다는 한계를 지닌다. 또한, 앞에서 언급한 바와 같이 수질 기준은 다른 자연현상과 마찬가지로 모호함과 불확실성을 지니기 때문에 종합수질지표를 정하는데 있어 델파이 기법과 같이 명확한 기준을 정하는 것은 한계를 지닐 수 있다.

1990년대 들어서 델파이 방법과는 다른 방법을 이용해 종합수질지수를 개발하려는 연구가 시작되었으며 그 중 대표적인 방법은 퍼지 이론을 적용한 방법이다. Lu(1999)는 퍼지 집합 이론을 적용한 의사결정방법 중 하나인 Fuzzy Synthetic Evaluation(FSE) 기법을 적용하여 저수지의 부영양화 정도를 평가하고자 하였다. 이 기법을 사용하여 종합수질지수를 만드는데 있어 0부터 100까지의 숫자로 표현되는 부지수 함수가 아닌 0부터 1까지의 숫자로 표현되는 퍼지 소속함수의 개념을 적용하여 수질 등급 간 존재하는 모호함을 표현하고자 하였다. Chang(2001) 또한 같은 방법을 적용하여 종합수질지수를 개발하였다. 또한, Icaga(2007), Lermontov(2009)는 퍼지 규칙을 적용한 로직을 사용하여 종합수질지수를 산정하는 방법을 고안하였다.

종합수질지수를 개발하기 위하여 적용된 방법 들 중 FSE 기법은 다양한 정보를 하나의 정보로 종합화할 수 있기 때문에 지표를 개발하는데 적절하다. 또한, 과거에 많이 사용되었던 델파이 기법에 비해 비용이 적게 들며, 모델이 성공적으로 설계되었을 경우 수질 등급에 존재하는 모호한 경계를 잘 설명할 수 있다는 장점을 지닌다. 그러나 기존의 FSE 기법을 적용한 연구는 FSE 기법의 핵심인 소속함수(Membership function)을 설계하는데 있어 충분한 고찰을 거치지 않고 제시함을 확인할 수 있었다. 표 2.4에서 앞에서 언급된 종합수질지수의 용도와 방법, 그리고 입력 인자들을 정리하였다.



표 2.4 종합수질지수 개발 방법 비교

저자	용도	종합화방법	입력 인자
Horton (1965)	일반종합수질	델파이 기법	pH, DO, 전기전도도, Cl <sup>-</sup> , FC, 알칼리도
Brown 등 (1970)	일반종합수질	델파이 기법	수온, pH, DO, BOD, TS, NO <sub>3</sub> -N, PO <sub>4</sub> -P, 탁도, FC
Prati 등 (1971)	일반종합수질	델파이 기법	pH, DO, BOD, SS, COD, NH <sub>3</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N, Cl <sup>-</sup> , Fe, Mn
Harkins (1974)	일반종합수질	델파이 기법	DO, BOD, pH, TP
Walski와 Parker (1974)	레크리에이션용 종합수질	델파이 기법	수온, 기름, 투명도, 냄새, TP, TN, FC, NO <sub>3</sub> -N, SS, pH, DO
Dunnette (1979)	일반종합수질	델파이 기법	수온, pH, DO, BOD, FC, 탁도, SS, 전기전도도, 총부유물질, 용존고형물, 중금속, COD,
House (1987)	일반종합수질	델파이 기법	수온, pH, DO, BOD, 염화물, TC, SS, 질산염
Dinius (1987)	일반종합수질	델파이 기법	수온, pH, DO, BOD, 색도, PO <sub>4</sub> -P, Cl <sup>-</sup> , TC
최지용 (1996)	일반종합수질	델파이 기법	pH, DO, BOD, SS, COD, TN, TP, TC, NH <sub>3</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N
Lu 등 (1999)	부영양화	FSE	TP, 클로로필 a, 투명도
Chang 등 (2001)	일반종합수질	FSE	pH, DO, E.coli, SS, BOD, COD, SS, NH <sub>3</sub> -N, Cl <sup>-</sup>
Icaga (2007)	일반종합수질	Fuzzy logic	수온, pH, DO, 염화물, 황, 암모니아, TP, TDS, 색도 등
Lermontove 등 (2009)	일반종합수질	Fuzzy logic	수온, pH, DO, BOD, 대장균, DIN, TP, TS, 탁도

### 3. 이론적 연구

#### 3.1 분변성 대장균 모델의 이론적 연구

##### 3.1.1 대장균 개요 및 기준

수질의 좋고 나쁨의 정도를 나타내는 수질 지표 중 대장균은 수인성 질병과 관련이 있는 지표로써 하천 위락에 있어서 가장 먼저 고려해야 한다. 대장균은 사람을 포함한 온혈동물의 대장에 서식하고 있는데 이 자체로 위험한 것이 아니라 이것이 분변과 함께 대량, 즉  $10^5 \sim 10^9$  (개체 수/g) 정도 배설되므로 대장균은 물의 분변에 의한 오염도를 나타낸다고 볼 수 있기 때문에 중요하다(환경부, 2008). 이러한 이유로 1900년대 초부터 전세계적으로 대장균의 존재 유무 및 그 수에 따라 물의 위생적인 안전성이 평가되고 있다. 수인성 질병 중 우리나라에서 가장 많이 발생하는 질병은 장티푸스로 이것은 살모넬라균에 의한 것이고 두 번째로 많이 발생하는 질병은 세균성 이질로 이는 쉬겔라균 감염에 의해 발병한다. 그러나 살모넬라균과 쉬겔라균은 검출에 장시간이 소요되기 때문에 물의 오염 지표로 사용하기에 적절하지 못하다. 따라서 이들 병원균 대신 검출이 비교적 용이한 대장균을 이용하여 수인성 질병 원인균의 존재 가능성, 즉 공중 보건적인 안전성 여부를 평가한다.

대장균 지표에는 총 대장균, 분변성 대장균, 그리고 *E. coli* 가 있다. 선행 연구들에 따르면 세 대장균 지표 중 *E. coli* 가 수인성 질병과의 상관도가 가장 큰 것으로 나타났다(환경부, 2008). 하지만 현재 우리나라에서는 수질일반측정망에서 총 대장균군과 분변성 대장균군만 월 1회 혹은 주 1회 간격으로 측정하고 있어 *E. coli*는 사용이 불가능하다. 그러므로 국내에서는 레크리에이션 수준을 판단하기 위한 지표로서 총 대장균 혹은 분변성 대장균을 사용하는 것이 적절하다. 본 연구에서 개발하는 RRIM의 분변성 대장균 모델은 분변성 대장균을 이용하여 어떠한 레크리에이션 활동의 종류가 가능한가를 첫 번째 절차로 판단하였다.

하천 레크리에이션 시 수상 접촉 활동에 따라 안전한 대장균의 기준

을 정하기 위하여 국내 및 해외에서 기준을 제시하고 있다. 국내와 해외에서 정하고 있는 분변성 대장균의 기준은 아래 표 3.1에 제시된 바와 같다. 특히 미국 EPA(Environmental Protection Agency)에서는 1980년대부터 대장균 농도와 그 시기에 수상 레크리에이션 활동을 한 시민들의 배탈 등과 같은 질병의 발발 횟수를 측정하여 대장균의 기준을 제시해왔다. 국내에서는 하천 생활환경기준에서 7개의 등급에 따라 분변성 대장균의 범위를 제시하고 있다. 그 중 약간 좋음 이상의 등급에서 수영이 가능하다고 표시되어 있는데 이 때의 분변성 대장균의 범위는 200 CFU/100mL 이하이다. 또한, 약간 나쁨 이하의 등급에서 접촉활동이 불가능하다고 되어 있는데 이 때의 분변성 대장균의 범위는 1000 CFU/100mL 이하이다. 그 외의 기준에서도 이와 같은 기준을 제시하고 있음을 확인할 수 있었다.

표 3.1 분변성 대장균의 국내외 수질기준

	등급	기준 (CFU/100mL)
국내	매우 좋음	$\leq 10$
	좋음	10 ~ 100
	약간 좋음 (수영 가능)	100 ~ 200
	보통	200 ~ 1000
	약간 나쁨 ~ 매우 나쁨 (접촉 불가)	1000 <
미국 EPA	직접접촉	$\leq 200$
	간접접촉	200 ~ 1000
미국 Massachusetts 주	직접접촉	$\leq 200$
	간접접촉	200 ~ 1000
미국 Newyork 주	직접접촉	$\leq 200$
	간접접촉	200 ~ 1000

### 3.1.2 분변성 대장균의 영향 인자

분변성 대장균 모델에서는 대장균이 빠른 시간 내에 측정이 불가능하기 때문에 대장균과 상관관계가 큰 다른 환경 인자들을 이용하여 이를 예측하고자 한다. 분변성 대장균과 상관관계가 크다고 알려진 인자들은 분변성 대장균 생장에 영향을 미치는 것과 감소에 영향을 미치는 것으로 나뉠 수 있다. 먼저 생장에 영향을 미치는 것들은 다음과 같다.

- (a) 가정, 산업용 폐수
- (b) 오수와 우수의 합류식 하수도
- (c) 도시 혹은 교외 지표면을 따라 유입되는 유출수
- (d) 수채 혹은 지표면에 버려진 폐슬러지

다음으로 대장균 감소율(decay rate)에 영향을 미치는 요인은 다음과 같다(Thomann, 1987).

- (a) 일조량
- (b) 수온
- (c) 염분
- (d) 포식관계(predation)
- (e) 영양 결핍(nutrient deficiencies)
- (f) 독성물질
- (g) 대장균의 침전율
- (h) 대장균이 흡착된 입자의 재부유
- (i) 대장균의 성장률

위에서 제시된 인자들에 의해 대장균 수치는 감소하거나 혹은 증가한다. 대장균은 강우 여부와도 그 상관관계가 크다고 알려져 있다. 그 이유는 큰 강우가 발생했을 경우, 앞에서 대장균 생장에 영향을 미치는

인자들이 강으로 유입될 확률이 커지기 때문이다. 강우가 발생하면 유량도 증가하기 때문에 유량과도 상관관계가 있다고 알려져 있다. 또한, 탁도와 같은 수질 지표와도 그 연관성이 존재한다. 탁도가 높을수록 강 속의 부유물질이 증가하는데 대장균은 부유물질과 흡착하여 햇빛을 피할 수 있기 때문이다. 또한, 영양, 독성물질 등으로 인해 그 외의 다른 수질 지표, 예를 들어, TN, TP, pH, DO 등과 상관관계를 보인다.

### 3.1.3 통계 분석

본 연구에서 분변성 대장균 모델은 로지스틱 회귀분석을 적용하여 분변성 대장균을 예측한다.

#### 3.1.3.1 로지스틱 회귀분석

로지스틱 회귀 (logistic regression) 이론은 일반적인 선형회귀분석과는 달리 종속변수가 범주형 변수 즉, 0과 1 혹은 참과 거짓 등일 때, 사용되는 방법이다. 더 나아가 종속변수가 3개 이상인 경우, 즉 순서형인 경우에도 적용 가능하다. 종속변수가 범주형 변수일 때 일반 선형회귀분석을 적용하게 되면 모형에서 독립변수의 회귀계수가 변화하여 종속변수가 변화할 때 종속변수의 기대값의 범위가 0과 1을 벗어난다는 오류가 야기된다. 이 때 비선형 함수형태의 회귀모형을 설정할 수 있다면 종속변수의 기대값인 확률은 0과 1로 수렴할 수 있을 것이다(성웅현, 2009). 그러므로  $P(Y_i = 1 | \mathbf{x}_i)$ 의 적절한 변환을 통해서 범위가  $-\infty$ 와  $\infty$ 이 되도록 하여  $P(Y_i = 1 | \mathbf{x}_i)$ 을 아래 식 (3.1)과 같은 승산(odds)으로 변환한다.

$$\Omega(\mathbf{x}_i) = \frac{P(Y_i = 1 | \mathbf{x}_i)}{P(Y_i = 0 | \mathbf{x}_i)} = \frac{P(Y_i = 1 | \mathbf{x}_i)}{1 - P(Y_i = 1 | \mathbf{x}_i)} \quad (3.1)$$

여기서,  $\Omega(\mathbf{x}_i)$  는 어떤 사건이 발생되지 않을 확률에 대한 발생될 확률의 비율이고  $P(Y_i = 1 | \mathbf{x}_i)$  는 독립변수  $\mathbf{x}_i$  가 주어졌을 때, 범주형 종속변수  $Y_i$  가 1일 확률,  $P(Y_i = 0 | \mathbf{x}_i)$  는 독립변수  $\mathbf{x}_i$  가 주어졌을 때, 범주형 종속변수  $Y_i$  가 0일 확률이다. 위의 식을 로짓변환을 통해 범위를  $-\infty$  와  $\infty$  로 변하게 하고 이를  $P(Y_i = 1 | \mathbf{x}_i)$  정리하여 식(3.2)와 같은 로지스틱 반응함수를 나타낼 수 있다.

$$P(Y_i = 1 | \mathbf{x}_i) = \frac{\exp(\mathbf{x}_i' \boldsymbol{\beta})}{1 + \exp(\mathbf{x}_i' \boldsymbol{\beta})} = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \dots + \beta_k X_{ki})}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \dots + \beta_k X_{ki})} \quad (3.2)$$

여기서,  $\boldsymbol{\beta}$  은  $k$  차 기울기 계수벡터이다. 위 식 (3.2)를 종속변수가 3개 이상의  $g$ 개이고 결과는 1부터  $g$ 까지의 순위로 측정되는 경우로 식을 확장해보면 위 식 (3.2)는 순위가  $m$  이하일 누적 확률을 나타내며 이는 식 (3.3)과 같다.

$$P(Y \leq m | \mathbf{x}) = \frac{\exp(\alpha_m + \mathbf{x}' \boldsymbol{\beta})}{1 + \exp(\alpha_m + \mathbf{x}' \boldsymbol{\beta})} \quad (3.3)$$

여기서  $P(Y \leq m | \mathbf{x})$  는 독립변수  $\mathbf{x}$ 가 주어졌을 때 범주형 종속변수  $Y$ 가 순위  $m$  이하일 확률이고,  $\alpha_m$  은 절편,  $\boldsymbol{\beta}$  은  $k$  차 기울기 계수벡터이다. 위 식 (3.3)에서 순위에 따라 절편만 다르고 기울기 계수벡터가 모두 같다는 평행회귀 가정을 하므로 위 식에서  $\boldsymbol{\beta}$  는 순위  $m$  과 관계없이 동일하다. 만약 종속변수의 결과가 세가지 순위로 측정될 때 각 순위에 대한 확률은 다음 식 (3.4), (3.5), (3.6) 그리고 (3.7)과 같다.

$$\pi_1(\mathbf{x}) = P(Y = 1 | \mathbf{x}), \quad \pi_2(\mathbf{x}) = P(Y = 2 | \mathbf{x}), \quad \pi_3(\mathbf{x}) = P(Y = 3 | \mathbf{x}) \quad (3.4)$$

$$\pi_1(\mathbf{x}) = \frac{\exp(\alpha_1 + \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta})}{1 + \exp(\alpha_1 + \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta})} \quad (3.5)$$

$$\pi_2(\mathbf{x}) = \frac{\exp(\alpha_2 + \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta})}{1 + \exp(\alpha_2 + \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta})} - \frac{\exp(\alpha_1 + \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta})}{1 + \exp(\alpha_1 + \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta})} \quad (3.6)$$

$$\pi_3(\mathbf{x}) = 1 - \pi_1(\mathbf{x}) - \pi_2(\mathbf{x}) \quad (3.7)$$

여기서,  $\pi_1$ 는 순위가 1일 확률,  $\pi_2$ 는 순위가 2일 확률 그리고  $\pi_3$ 은 순위가 3일 확률을 말한다. 또한,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ 는 각각 순위가 1, 2, 3일 때의 절편이다. 순위로짓모형에서 절편과 기울기 모수들은 최대우도법(Maximum Likelihood Estimation, MLE)으로 추정된다. 이 때 최대우도함수에 자연대수를 취하여 구하며 자연우도 함수는 식 (3.8)과 같다.

$$\ln[L(\alpha, \boldsymbol{\beta} | \mathbf{x})] = \sum_{m=1}^g \sum_{Y_i=m} \ln \left[ \frac{\exp(\alpha_m + \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta})}{1 + \exp(\alpha_m + \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta})} - \frac{\exp(\alpha_{m-1} + \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta})}{1 + \exp(\alpha_{m-1} + \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta})} \right] \quad (3.8)$$

여기서,  $L$ 은 최대우도를 나타낸다. 자연대수우도함수를 최대로 하는  $g-1$ 개 절편  $\alpha_m$ 's들과 기울기 계수벡터  $\boldsymbol{\beta}$ 의 값을 추정하기 위해 일반적으로 Newton-Raphson 방법을 사용하게 된다. 최대우도 추정값이 구해지면 독립변수들의 수준  $\mathbf{x}_i$ 에서  $Y$ 의 결과가  $m$ 으로 예측될 확률은 아래와 같은 식 (3.9)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\pi_m(\mathbf{x}_i) = \frac{\exp(\alpha_m + \mathbf{x}'\hat{\boldsymbol{\beta}})}{1 + \exp(\alpha_m + \mathbf{x}'\hat{\boldsymbol{\beta}})} - \frac{\exp(\alpha_{m-1} + \mathbf{x}'\hat{\boldsymbol{\beta}})}{1 + \exp(\alpha_{m-1} + \mathbf{x}'\hat{\boldsymbol{\beta}})} \quad (3.9)$$



여기서,  $\pi_m$  는  $Y$  의 결과가  $m$  으로 예측될 추정확률,  $\alpha_m$  는 이 때의 추정 절편,  $\hat{\beta}$  는 추정 기울기 계수 벡터이다.

### 3.1.3.2 변수 선택

모형에서 유의한 변수를 선택하기 위해 전진선택법(forward selection), 후진소거법(backward elimination), 단계별선택법(stepwise selection) 등과 같은 변수선택법을 사용할 수 있다. 전진선택법이란 설정된 유의수준을 충족시키는 변수를 각 단계마다 모형에 하나씩 추가적으로 포함시키는 방법이고, 후진소거법은 설정된 유의수준을 충족시키지 못하는 변수를 각 단계마다 모형에서 하나씩 제거하는 방법이다. 단계별 선택법은 이 둘을 혼합하여 사용한다(성웅현, 2009).

단계별 선택법은 식 (3.10)과 같은 가설설정에서부터 시작 된다.

$$H_0 : \beta_j = 0, H_1 : \beta_j \neq 0 \quad (3.10)$$

여기서,  $\beta_j$  는  $j$  번째 독립변수  $X_j$  의 계수이다. 귀무가설  $H_0$  은  $j$  번째 독립변수  $X_j$  가 어떤 사건이 발생할 확률에 유의한 영향을 미치지 않는다는 의미이고 대립가설  $H_1$  은 유의한 영향을 미친다는 의미이다(성웅현, 2009). 이러한 대립가설에 대해 스코어 카이제곱검정(score chi-square test)을 실시하여 모형에 유의한 변수를 선택한다. 스코어 카이제곱 검정통계량은 자연대수우도에 대한 편미분의 비율이다. 이 때  $j$  번째 독립변수를 모형에서 제외하고 구한 최우추정량을  $\tilde{\beta}$  이라 할 때, 이 것의 일차편미분값을  $U(\tilde{\beta})$ , 그리고 이차편미분값을  $I(\tilde{\beta})$  라 표시한다. 이 경우 귀무가설에 대한 스코어 카이제곱 검정통계량은 식 (3.11)와 같다.

$$S_j = U'(\tilde{\beta})[I(\tilde{\beta})]^{-1}U(\tilde{\beta}) \quad (3.11)$$

여기서,  $S_j$  는 스코어 카이제곱 검정통계량이다. 유의수준이  $\alpha$  일 때, 임계값은 자유도가 1인 카이제곱분포에서 카이제곱값인  $\chi_{\alpha,1}^2$  이 된다. 이 때  $S_j^*$  가  $\chi_{\alpha,1}^2$  보다 크면 귀무가설이 기각되고 그 반대일 경우, 귀무가설을 채택한다.

로지스틱 회귀분석은 선형 회귀분석과 마찬가지로 독립변수들 간의 강한 선형상관관계가 존재하는 다중공선성(multicollinearity)의 문제가 발생할 수 있다. 다중공선성이 발생하는 경우 독립변수들의 종속변수에 대한 영향이 제대로 반영되지 않을 수 있다. 다중공선성은 표준오차를 크게 하고 각 변수들의 영향력을 과소평가할 수 있다. 이러한 문제를 방지하기 위해서는 독립변수들간의 다중공선성을 일으키는 변수를 제거해야 한다. 이를 위해 공차한계(tolerance)와 분산팽창계수(variance inflation, VIF)을 검사해 볼 수 있다. 공차한계는 각 독립변수를 그 외의 다른 독립변수와 회귀분석실시 후, 결정계수를 구해서 이를 1에서 빼면 나오는 값으로 낮은 공차한계는 높은 다중공선성을 뜻하며, 0.40이하일 경우, 다중공선성이 존재하는 것으로 볼 수 있다. 분산팽창계수란 다중공선성이 존재하지 않을 때와 비교하여 추정된 계수의 분산이 얼마나 높게 평가되었는가를 뜻한다(Allison, 2012).

### 3.1.3.3 로지스틱 회귀모형의 검증

최우추정법에 의하여 로지스틱 회귀계수가 추정되었으므로, 개별 회귀계수가 독립변수를 예측하는데 있어 유의한 영향을 미치는지 알아보기 위해 왈드검정(wald test)를 행한다. 왈드검정의 귀무가설은 식 (3.12)와 같이 나타날 수 있으며 이는 로지스틱 회귀모형에 포함된 j번째 독립변수  $X_j$ 가 어떤 사건이 발생할 확률에 전혀 영향을 미치지 못한다는

의미이다. 대립가설은 어떤 사건이 발생할 확률에  $j$ 번째 독립변수  $X_j$ 가 유의한 영향을 미친다는 의미이다.

$$\begin{aligned} H_0 : \beta_j &= 0 \\ H_0 : \beta_j &\neq 0 \end{aligned} \tag{3.12}$$

여기서,  $\beta_j$ 는  $j$ 번째 독립변수  $X_j$ 의 계수이다. 왈드검정통계량은 식 (3.13)과 같이 추정량  $\beta_j$ 의 표준화 통계량  $Z_j = \frac{\beta_j}{\sqrt{\text{Var}(\beta_j)}}$ 를 사용한 값으로 주어진다.

$$W_j = \left( \frac{\beta_j}{\sqrt{\text{Var}(\beta_j)}} \right)^2 \tag{3.13}$$

여기서,  $W_j$ 는 왈드검정통계량이다. 유의수준이  $\alpha$ 일 때, 귀무가설의 기각여부를 결정하는 임계값은 자유도가 1인 카이제곱값,  $\chi_{\alpha,1}^2$ 이다. 자료로부터 계산된 검정통계량의 값을  $W_j^*$ 와 임계값  $\chi_{\alpha,1}^2$ 을 비교하여 귀무가설 채택 혹은 기각여부를 결정한다.

우도비 검정은 절편을 제외한 모든 회귀계수가 동시에 0이라는 귀무가설에 대한 유의성검정이다. 우도비 검정통계량은 다음 식 (3.14)와 같다.

$$LR = -2\ln L(\beta_0) + 2\ln L(\beta) \tag{3.14}$$

여기서,  $LR$  은 우도비 검정통계량이다. 자료에서 구해진 우도비 검정통계량  $LR^*$  는 유의수준이  $\alpha$  일 때, 자유도가  $k$  인 카이제곱값  $\chi_{\alpha,k}^2$  을 임계값으로 두고 귀무가설의 기각여부를 결정한다.

데비언스 검정은 설정된 로지스틱 회귀모형이 완전정보를 가진 모형과 비교해서 유의한 차이가 있는지 여부를 평가하는 방법이다. 귀무가설은 식 (3.15)과 같으며 이는 로지스틱회귀모형이 어떤 사건이 발생할 확률을 설명하는데 충분한 정보를 제공한다는 의미이다.

$$H_0 : \pi(x_i) = \frac{\exp(x_i' \beta)}{1 + \exp(x_i' \beta)} \quad (3.15)$$

$$H_0 : \pi(x_i) \neq \frac{\exp(x_i' \beta)}{1 + \exp(x_i' \beta)}$$

완전정보를 가진 모형의 우도는 다음 식 (3.16)과 같다.

$$L(F) = \prod_{i=1}^n \pi_i^{y_i} (1 - \pi_i)^{1-y_i} \quad (3.16)$$

여기서,  $L(F)$  는 모형의 우도이다. 데비언스 검정통계량은 다음 식 (3.17)과 같다. 설정된 로지스틱 회귀모형의 우도는  $L(\beta)$  이며 설정된 로지스틱 회귀모형의 예측력이 충분하다면, 우도  $L(\beta)$  는 1에 가까운 값을 갖게 되므로  $L(F)$  와의 차이가 작아진다. 데비언스 검정통계량은 이 두가지 우도의 비율에 자연대수를 취해서 구해진다.

$$D = -2 \ln L(\beta) \quad (3.17)$$

여기서,  $D$ 는 데비언스 검정통계량이다. 데비언스 검정통계량이 작을수록 현재 설정된 로지스틱 회귀모형의 적합도는 좋아진다. 자료에서 구해진 데비언스 검정통계량  $D^*$ 는 자유도가  $n-k-1$ 인 카이제곱값인  $\chi^2_{\alpha, n-k-1}$ 을 임계값으로 한다.

## 3.2 수질 지수 모델의 이론적 연구

### 3.2.1 퍼지 집합 이론

퍼지 집합 이론은 1965년 Zadeh에 의해 처음 제안된 이론으로 명확한 구분이 없어 전통적인 수학 집합으로 나타내기 힘든 개념을 표현하기 위한 이론이다. 즉, 어떤 원소가 ‘집합 A에 속한다’ 혹은 ‘속하지 않는다’라는 이진 논리로 나타나는 전통적인 집합 표시 방법으로는 표현될 수 없는 개념들, 즉, 이진 논리에서 벗어난 다치성으로 나타내기 위한 이론이다. 예를 들어 ‘키가 180 cm보다 큰 사람’ 혹은 ‘수온이 20°C보다 높은 지역’은 수학적 집합으로 나타낼 수 있으나 ‘키가 큰 사람’ 혹은 ‘물이 따뜻한 지역’이라는 개념들은 그 기준이 명확하지 않기 때문에 그럴 수 없다. 퍼지 집합 이론에서는 이러한 분명한 기준이 없는, 즉 모호한 기준을 가진 개념들을 다룬다. 퍼지 집합이론에서는 0에서 1사이의 값을 가지는 소속도(membership value)를 이용하여 퍼지 집합에 어떤 원소가 속할 수 있는 자격이 어느 정도인지 표현한다. 소속도가 1일 경우, 그 원소는 퍼지 집합에 속할 수 있는 자격이 완전하며, 0일 경우, 자격이 아예 없다. 다음 식(3.18)과 (3.19)는 각각 소속도의 개념으로 전통적으로 사용되는 수학적 집합,  $A$ 와 퍼지 집합,  $\tilde{A}$ 를 표현한다.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x \in A \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.18)$$

$$\tilde{A} = \{[x, \mu_{\tilde{A}}(x)]: x \in U, 0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x) \leq 1\} \quad (3.19)$$

여기서,  $\mu_A$ 는 집합  $A$ 의 소속도,  $\mu_{\tilde{A}}$ 는 집합  $\tilde{A}$ 의 소속도를 말한다.

퍼지 집합 이론은 인간의 사고 능력과 같이 불확실성 아래 부정확하고 모호한 의사결정을 내리는 경우에 많이 사용된다. 실제 퍼지 집합은 다양한 자동제어 분야, 패턴 인식 분야, 게임 이론과 같은 경제학 등 다양한 분야에 활발히 적용되고 있다. 수자원과 같은 환경적 요소를 다룰 때도 퍼지 논리는 유용하게 사용될 수 있다. 환경적 요소를 표현할 때에는 명확한 기준이 없는 추상적인 표현이 사용되는 경우가 많다. 또한, 환경적 요소는 그 안에 사회 전체가 동의한 명확한 기준이 존재하지 않는 경우가 일반적이다. 이러한 특징으로 인해 환경적 요소에 대한 평가 혹은 의사결정을 내릴 때 퍼지 집합 이론의 적용이 적절하다. 본 연구에서도 하천 레크리에이션에 적절한 수질 기준이 어느 정도인지 그 명확한 기준이 모호하고, 하천 레크리에이션을 위한 수질이 얼마나 '깨끗'한지를 표현하기 위해 퍼지 집합 이론의 적용이 적절하다.

### 3.2.2 소속함수

소속함수는 소속도와 변수와의 관계를 나타낸 식을 말하며 이를 그래프로 표현할 수 있다. 그림 3.1과 3.2는 각각 앞에서 제시한 수학적 집합,  $A$ 와 퍼지 집합,  $\tilde{A}$ 를 소속함수로 표현한 것이다. 퍼지 집합 이론에서 모든 정보는 소속도를 통해 나타나므로 소속함수를 적절하게 정의하는 것이 매우 중요하다.

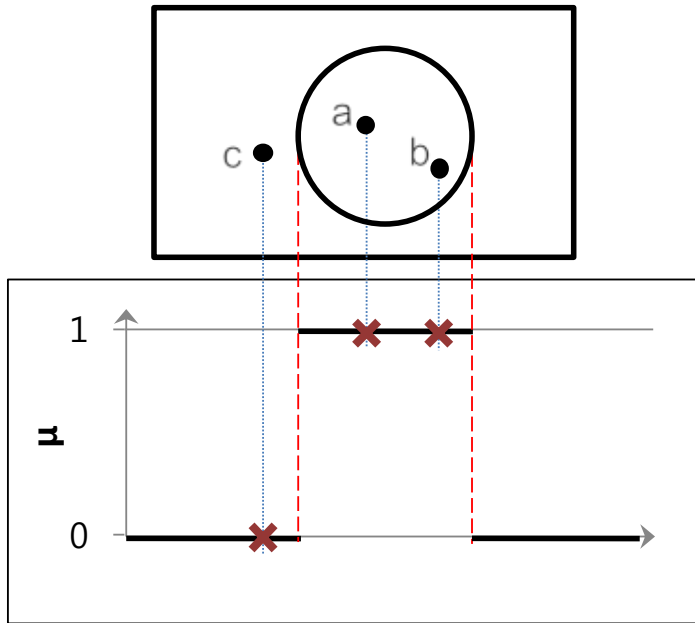


그림 3.1 수학적 집합의 소속함수 개념

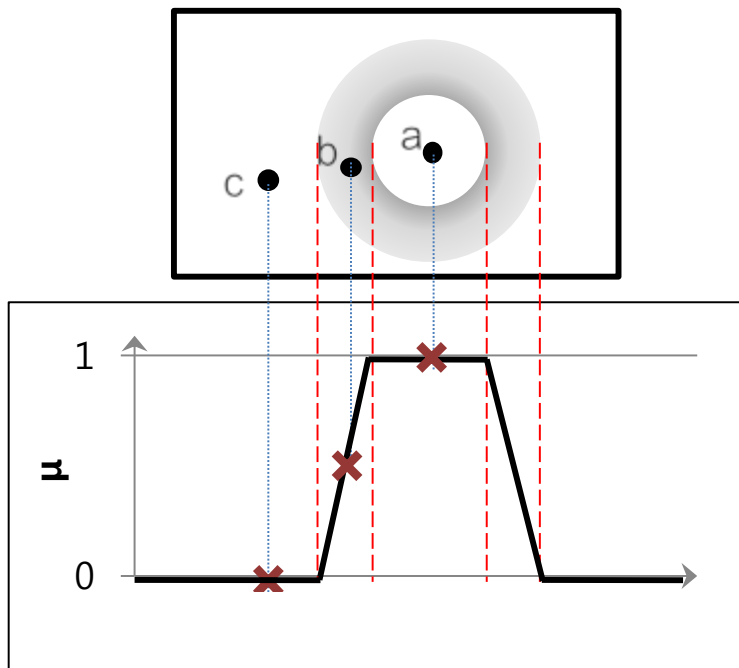


그림 3.2 퍼지 집합의 소속함수 개념

소속 함수는 그 형태가 다양한데 대표적인 형태로는 가장 기본적인 형태인 삼각형형 (triangular type) 과 사다리꼴형 (trapezoidal type) 부터 가우스형 (Gaussian type), 벨형 (bell type) 그리고 S자형 (s-shaped type) 등이 있다. 다음 식 (3.20), (3.21), (3.22), (3.23) 그리고 (3.24) 은 각각 삼각형형, 사다리꼴형, 가우스형, 벨형, S자형의 소속함수의 함수이며 그림 3.3은 각 함수의 형태를 나타낸다. 이외에도 소속함수는 다양한 형태로 나타낼 수 있다.

$$\text{triangle}(x : a, b, c) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x - a) / (b - a) & a \leq x < b \\ (c - x) / (c - b) & b \leq x < c \\ 0 & c \leq x \end{cases} \quad (3.20)$$

$$\text{trapezoid}(x : a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x - a) / (b - a) & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ (d - x) / (d - c) & c \leq x < d \\ 0 & c \leq x \end{cases} \quad (3.21)$$

$$\text{Gaussian}(x : m, \sigma) = \exp\left(-\frac{(x - m)^2}{\sigma^2}\right) \quad (3.22)$$

$$\text{bell}(x : a, b, c) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x - c}{a}\right|^{2b}} \quad (3.23)$$

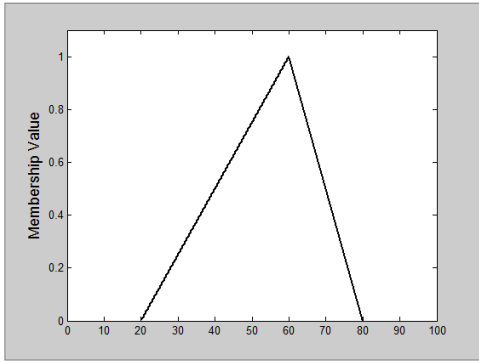


$$S(x : a, b) = \begin{cases} 0 & x < a \\ 2 \left( \frac{x-a}{b-a} \right)^2 & a \leq x < \frac{a+b}{2} \\ 1 - 2 \left( \frac{x-b}{b-a} \right)^2 & \frac{a+b}{2} \leq x < b \\ 1 & b \leq x \end{cases} \quad (3.24)$$

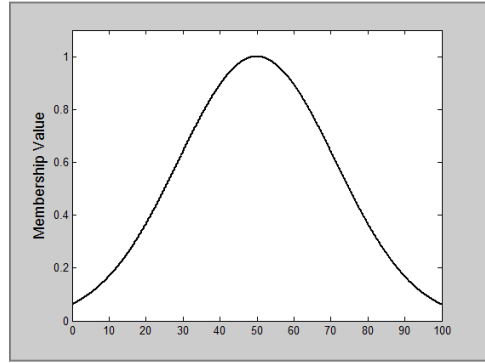
### 3.2.3 퍼지 합성 방법

퍼지 집합 이론을 적용한 의사결정방법으로 다양한 방법이 개발되어 왔으며 그 중 퍼지 합성 방법(Fuzzy Synthetic Evaluation, FSE) 방법은 다양한 정보를 하나의 정보로 축약시킬 수 있다는 점에서 종합수질지수를 비롯한 환경 지수를 개발할 때 적용이 많이 되어 왔다. FSE는 다음과 같이 네 단계로 이루어진다.

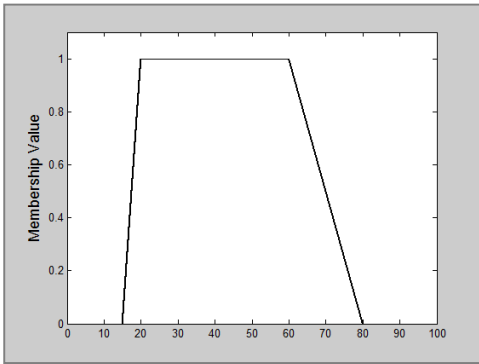
- (1단계): 하나의 정보로 축약될 인자 선택
- (2단계): 각 인자의 등급 및 등급에 따른 기준 선정
- (3단계): (2단계)의 기준을 토대로 한 인자들의 등급별 소속함수 정의
- (4단계): 소속함수를 통해 산출된 소속도로 이루어진 평가행렬 생성과 소속도들을 지수로 축약할 종합화 방법 선정



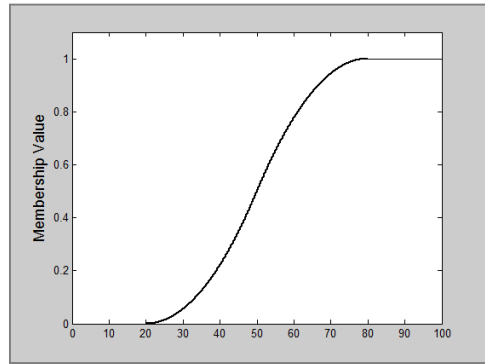
(a) 삼각형형



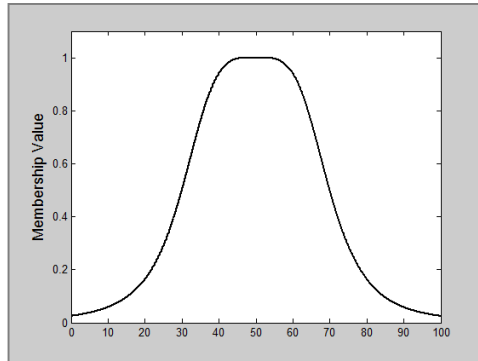
(b) 가우스형



(c) 사다리꼴형



(d) S자형



(e) 벨형

그림 3.3 소속함수의 형태

FSE의 첫 단계로 인자로 축약되어 나타날 인자를 선택해야 한다. 인자는 연구의 목적과 방향에 맞게 기준에 따라 선택된다. 또한, 연구의 목적에 따라 최종 정보의 등급, 예를 들어, 아주 좋음, 좋음, 나쁨 등을 설정해야 한다. 인자와 등급을 설정한 후, 각 인자의 등급별 기준을 선정한다. 그 후 이러한 기준을 소속함수로 나타내어 기준에 존재하는 모호함을 표현한다. 소속함수는 그 형태와 정하는 방법이 다양하므로 충분한 비교와 고찰을 통해 적절한 소속함수를 정해야 한다. 소속함수에 의해 각 인자는 등급별로 소속도를 가지게 되며 이러한 소속도로 이루어진 식(3.25)와 같은 평가행렬을 만들 수 있다.

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \dots & \mu_{1j} & \dots & \mu_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_{i1} & \dots & \mu_{ij} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_{m1} & \dots & \dots & \dots & \mu_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

여기서,  $\boldsymbol{\mu}$ 는 소속도를 말하며,  $i$ 는 인자,  $j$ 는 등급이다. 평가행렬에 나열된 소속도를 나타내는 값들은 적절한 최종화 방법을 통해 하나의 정보로 요약될 수 있다.

## 4. RRIM의 개발

### 4.1 RRIM 구성 및 FCG, RRG 정의

RRIM은 분변성 대장균 모델과 수질 지수 모델로 구성되었다. 분변성 대장균 모델에서는 분변성 대장균의 농도에 따라 가능한 수상 레크리에이션의 수준을 첫 번째로 결정하였다. 이를 위하여 분변성 대장균 모델에서는 분변성 대장균 등급을 예측하였으며 본 연구에서는 분변성 대장균 등급을 수체와 인체의 접촉 정도에 따라 가능한 레크리에이션 활동에 따라 세 가지로 나누었다. 200 CFU/100mL 이하일 때를 1등급으로 보고 이 때에는 수영, 수상스키 등과 같은 직접접촉 활동이 가능하다고 보았다. 200 CFU/100mL를 초과하고 1000 CFU/100mL 이하일 때에는 2등급으로 보고 직접접촉과 보트, 낚시 등과 같은 간접접촉 활동이 가능하다고 정하였다. 마지막으로 1000 CFU/100mL 초과 시에는 어떠한 접촉활동도 불가능하다고 판단하였다.

이 후 수질 지수 모델에서 수질 점수, WQI를 결정하였다. 또한, RRIM 알고리즘을 개발하고 이에 따라 WQI를 앞에서 예측된 FCG에 따라 최종적으로 RRI와 RRG로 변환하였다. RRIM 모델에서 RRG는 네 개로 나누어 정의하였다.

- 우수(Excellent, I): 수체와의 직접접촉이 일어나는 활동, 수영, 수상스키 등의 직접접촉 활동을 할 시 매우 안전할 정도로 수질이 훌륭함.
- 양호(Good, II): 수체와의 직접접촉이 일어나는 활동, 수영, 수상스키 등을 할 시 비교적 안전할 정도로 수질이 좋음.
- 보통(Acceptable, III): 수체와의 간접접촉이 일어나는 활동, 보트, 낚시 등을 할 시 안전할 정도로 수질이 보통 수준임.
- 불량(Unacceptable, IV): 수체와의 직접, 간접접촉이 불가능할 정도로 수질이 불량함.

## 4.2 분변성 대장균 모델의 개발

하천의 특성에 따라 분변성 대장균이 어떤 인자와 어느 정도의 상관관계를 갖느냐는 다르므로 분변성 대장균 모델 또한 하천에 따라 다르다. 본 연구에서는 낙동강을 적용 지점으로 선정하여 낙동강의 분변성 대장균 모델을 개발하였다. 분변성 대장균 모델을 개발하기 위하여 실시간 데이터로 측정가능한 인자들과 분변성 대장균의 데이터를 수집하였고 이를 이용하여 로지스틱 회귀분석을 행하였다. 도출된 로지스틱 반응함수를 이용하여 FCG를 예측할 수 있었다.

### 4.2.1 데이터 수집

낙동강의 분변성 대장균 모델을 개발하기 위하여 낙동강에 위치한 수질측정소와 유량관측소를 통해 분변성 대장균과 상관관계가 있다고 판단되는 수질 데이터 및 유량 데이터를 수집하였다. 데이터를 수집한 지점은 구미보 상류 지점, 칠곡보 상류 지점, 칠곡보 하류 지점, 강정고령보 상류 지점, 달성보 상류 지점, 창녕함안보 상류 지점으로 각 지점의 위치는 그림 4.1에 나타낸 바와 같다.

각 지점에서 데이터를 수집한 일반수질측정소, 유량관측소의 명칭과 수집된 데이터 세트의 기간은 표 4.1과 같다. 또한, 일반수질측정소, 유량관측소에서 수집된 데이터의 종류와 측정 주기는 표 4.2에 제시된 바와 같다. 데이터 수집 지점들에는 수질일반측정소와 유량관측소가 동시에 위치하고 있으므로 본 연구에서는 같은 시점에 같은 위치에서 측정된 수질과 유량데이터를 하나의 일차료 세트로 구성하여 통계 분석의 입력 자료로 이용하였다. 이용

된 데이터는 2006년 이후의 자료에 해당하였는데 그 이유는 창녕 함안보 상류지점을 제외한 다른 지점들에서 2006년을 기점으로 DO나 pH와 같은 수질 지표들은 비슷한 추이를 보여 변화가 없었지만 이와는 반대로 분변성 대장균은 변화를 보였기 때문이다. 그림 4.2 ~ 4.7은 각 지점의 분변성 대장균의 농도 변화를 보여주며 분변성 대장균의 평균 농도가 2006년 이후로 낮아짐을 볼 수 있었다.



그림 4.1 분변성 대장균 모델 개발을 위한 데이터 수집 지점

표 4.1 지점별 데이터 특성

위치	데이터 측정 지점		데이터 기간
	수질일반 측정소	유량관측소	
구미보 상류 지점	산곡	일선교	2006년~2012년
칠곡보 상류 지점	구미	구미	2006년~2010년
칠곡보 하류 지점	왜관	왜관	2006년~2010년
강정고령보 상류 지점	성주	성주	2006년~2012년
달성보 상류 지점	고령	고령교	2006년~2012년
창녕함안보 상류 지점	남지	진동	2006년~2011년

표 4.2 데이터 측정 및 관측소 특성

	데이터 측정 및 관측소	
	수질일반측정소	유량관측소
데이터 종류	분변성 대장균, 수온, DO, pH, TN, TP	유량, 1일 전 유량, 2일 전 유량, 3일 전 유량
데이터 측정 주기	주 혹은 월 단위	일 단위



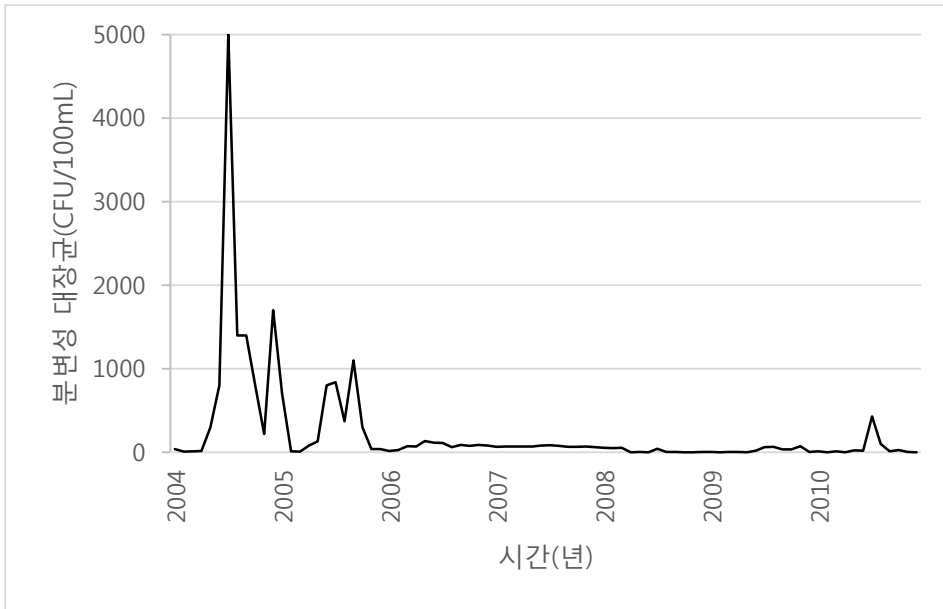


그림 4.2 구미보 상류지점의 2004 - 2012년의 분변성 대장균 농도

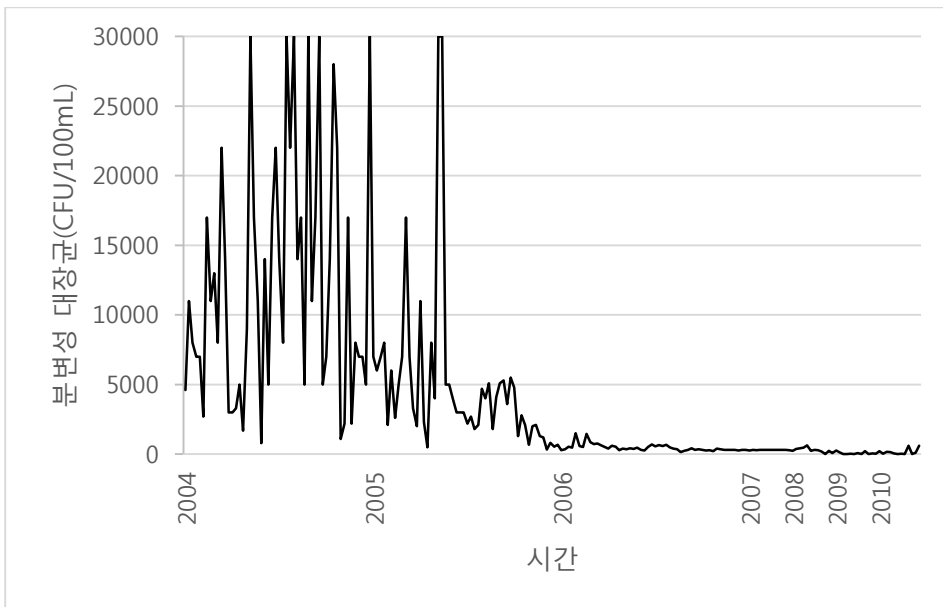


그림 4.3 철곡보 상류지점의 2004 - 2012년의 분변성 대장균 농도

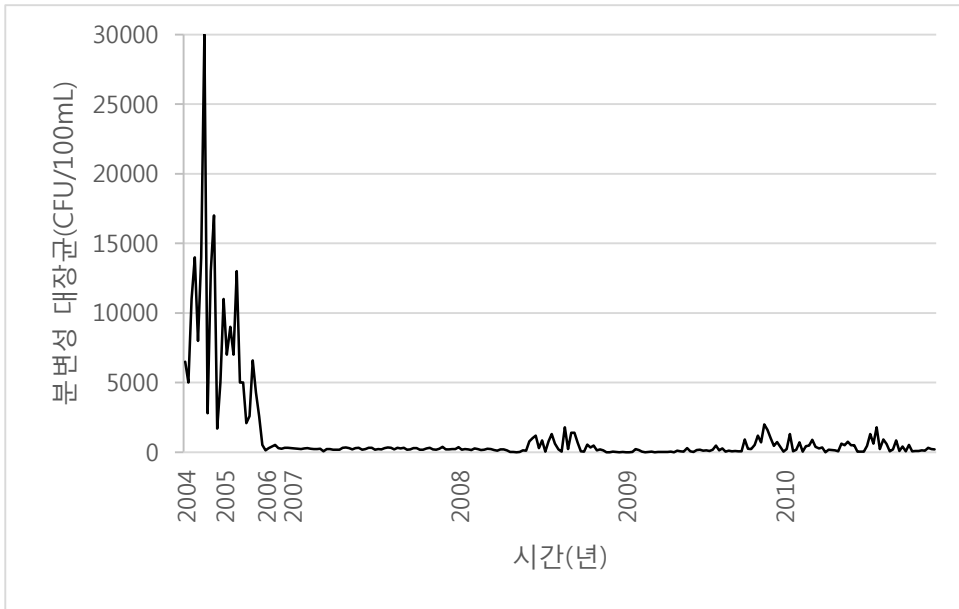


그림 4.4 칠곡보 하류지점의 2004 - 2012년의 분변성 대장균 농도

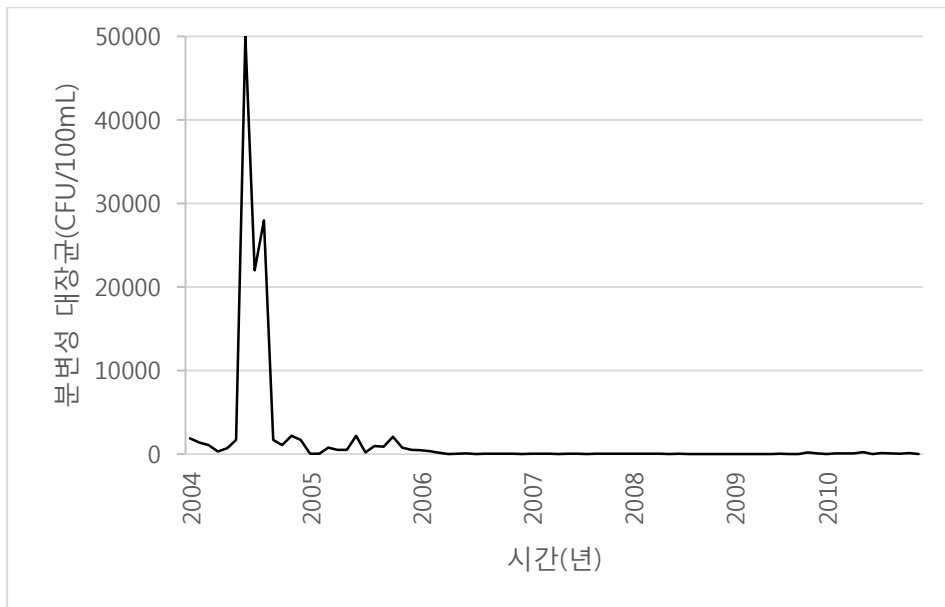


그림 4.5 강정고령보 상류지점의 2004 - 2012년의 분변성 대장균 농도

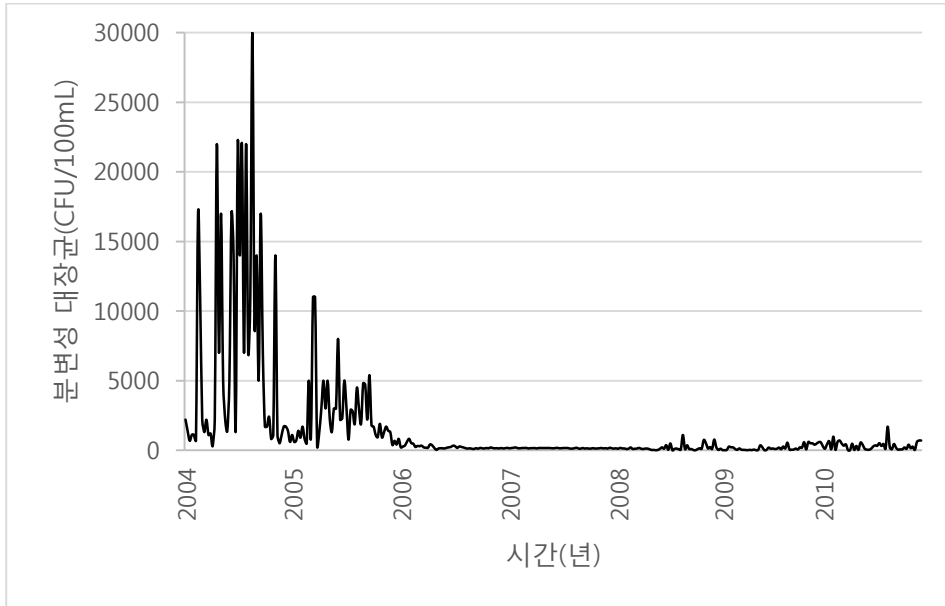


그림 4.6 달성포 상류지점의 2004 - 2012년의 분변성 대장균 농도

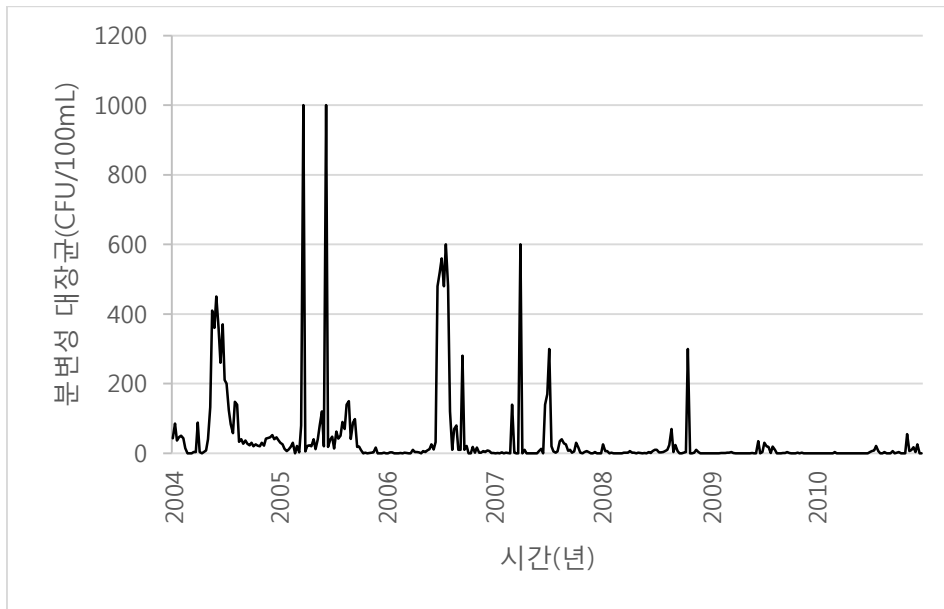


그림 4.7 창녕함안보 상류 지점의 2004 - 2012년의 분변성 대장균 농도

#### 4.2.2 데이터 추출 및 독립 변수 선택

본 연구에서의 통계분석은 SAS(Statistical Analysis System)을 사용하였다. 각 지점에서 수집한 전체 데이터 셋을 분석한 결과, 분변성 등급 중 1등급, 2등급 그리고 3등급에 해당하는 데이터 수는 각각 790개, 299개, 18개로 1등급에 매우 편향된 분포를 보였다. 만약 모든 데이터셋을 통계분석에 사용한다면 수가 상대적으로 적은 3등급을 과소평가하여 3등급을 적게 예측하고 1등급 혹은 2등급을 많이 예측하게 되는 편향된 결과를 보이게 된다. King과 Zeng은 이러한 경우 많은 수의 데이터셋의 수를 적은 수의 데이터셋의 수의 1배 ~ 5배가 되도록 하여 편향된 결과를 막을 수 있음을 연구한 바 있다. 이에 따라 본 연구에서는 1등급에 해당하는 전체 데이터에서 데이터셋을 90개, 2등급에 해당하는 데이터에서 데이터셋을 80개로 추출하였다.

분변성 대장균과 상관관계가 있어 분변성 대장균을 예측할 시 유의한 독립 변수를 선택하기 위하여 수온, DO, pH, TN, TP, 유량, 1일 전 유량, 2일 전 유량, 3일 전 유량, 유량의 로그 값, 1일 전 유량의 로그 값, 2일 전 유량의 로그 값, 3일전 유량의 로그 값의 총 13개를 검토하였다. SAS를 통해 단계별선택법을 수행하였고 그 결과 유의수준 0.05에서 분변성 대장균에 유의한 영향을 미치는 독립변수를 pH와 1일 전 유량의 로그 값으로 선택하였다. 두 변수 사이에 다중공선성이 없음을 확인하기 위하여 공차한계와 분산팽창계수를 계산하였으며 그 결과, 공차한계는 0.99, 분산팽창계수는 1.01으로 다중공선성이 없음을 확인하였다.

#### 4.2.3 로지스틱 반응함수 도출

모델의 개발 및 검증을 위하여 각 지점 별로 수집된 데이터를 훈련집단(training set)과 검증집단(validation set)으로 나누었다. 이 때 훈련집단과 검증집단의 비는 80대 20로 하여 각각 데이터셋의 수를 150개와 38개로 하였다. 두 인자를 독립변수로 하여 로지스틱 회귀함수를

통해 로지스틱 반응함수를 도출하였다. 이 때 앞에서 제시한 바와 같이 분변성 대장균의 등급, 1등급, 2등급, 3등급에 따라 종속변수를 1, 2, 3과 같은 범주형 변수로 주었다. 분변성 대장균의 각 등급에 따른 반응함수는 식 (4.1), (4.2), (4.3)과 같다.

$$P_1 = \frac{\exp(-4.23 + 0.89PH - 1.44LOGQ_1)}{1 + \exp(-4.23 + 0.89PH - 1.44LOGQ_1)} \quad (4.1)$$

$$P_2 = \frac{\exp(-1.68 + 0.89PH - 1.44LOGQ_1)}{1 + \exp(-1.68 + 0.89PH - 1.44LOGQ_1)} \quad (4.2)$$

$$P_3 = 1 - (P_1 + P_2) \quad (4.3)$$

여기서,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ 는 각각 분변성 대장균 등급이 1, 2, 3등급을 예측할 확률이다. 또한,  $PH$ 는 pH,  $LOGQ_1$ 는 하루 전 날 유량의 로그값을 말한다. 개별 회귀계수의 왈드검정을 유의수준 0.05에서 실시하였으며 그 결과 pH와 유량의 로그값의  $p$ -값은 각각 0.0033, 0.0002로 모두 유의한 영향을 미침을 확인하였다. 다음으로 우도비 카이제곱 검정 통계량의  $p$ -값은 0.0001보다 작은 값을 나타내어 모형에 유의한 독립 변수가 포함됨을 확인하였다. 데비언스 검정통계의  $p$ -값은 0.9475로 매우 높은 값을 보여 완전정보를 가진 모형과 비교하여 추정된 모형이 유의한 차이가 없다고 판단하였다.

본 연구에서 유도한 식을 검증집단에 적용하여 모형을 검증하였다. 적용 결과, 38개의 검증 데이터 중 24개 데이터가 올바르게 예측되어 정분류율은 0.63으로 나타났다. 검증 결과를 표 4.3와 그림 4.8에 나타내었으며, 표 4.4에 분변성 대장균 모델 유도 및 검증에 사용한 전체 입력자료와 결과를 수록하였다. 표에서  $Q_{t-1}$ 는 1일 전 유량,  $\text{Log}(Q_{t-1})$ 는 1일 전 유량의 로그값, FC는 분변성 대장균의 측정치,  $FCG_m$ 는 분변성 대장균 측정치의 등급,  $FCG_p$ 는 분변성 대장균 예측치의 등급을 말한다.

표 4.3 분변성 대장균 모델 검증 입력자료의 정분류표

		관측 데이터 수			합계
		1	2	3	
예측 데이터 수	1	15	8	1	21
	2	3	8	2	9
	3	0	0	1	2
합계		18	16	4	38

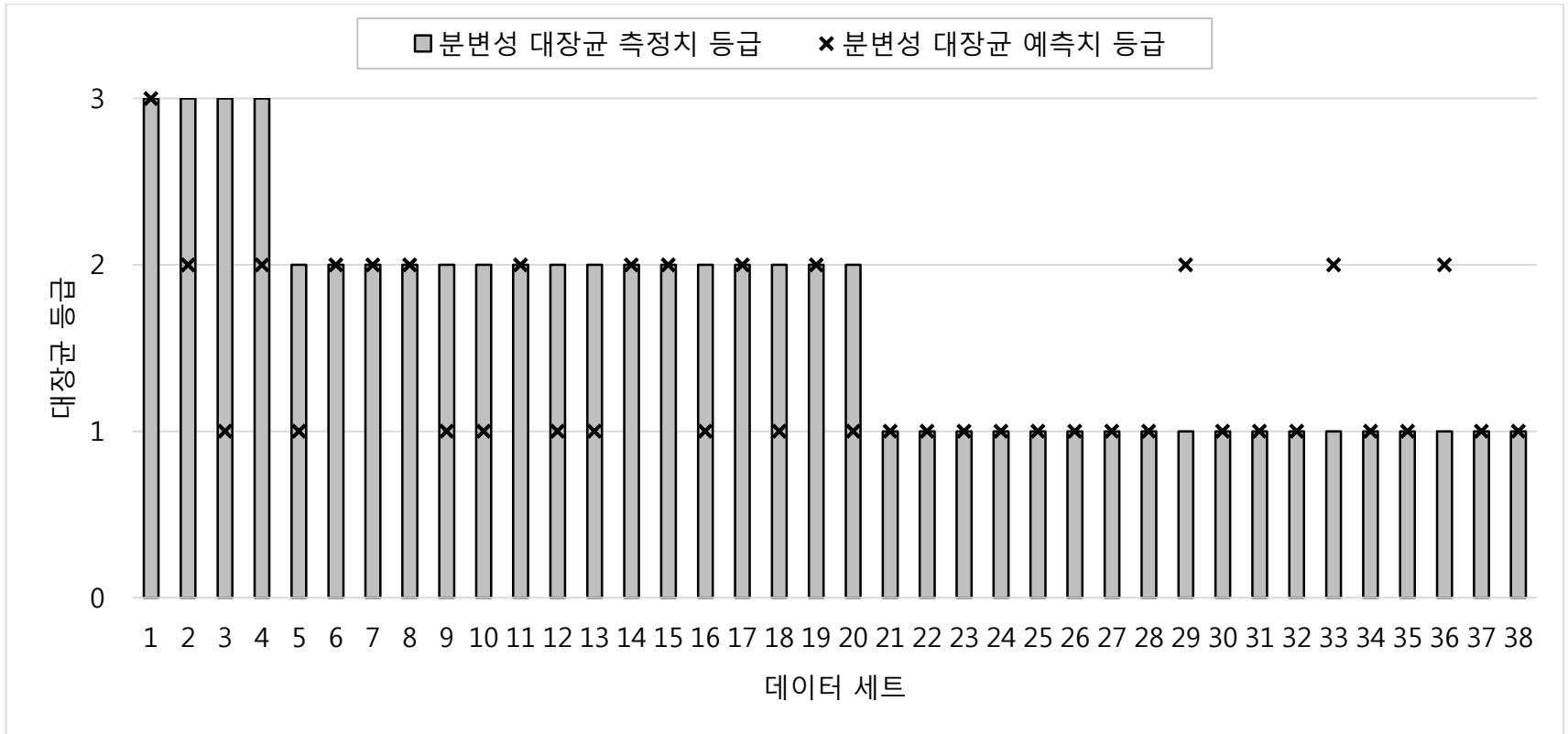


그림 4.8 분변성 대장균 모델 검증 입력자료의 실측치와 예측치의 비교

표 4.4 분변성 대장균 모델 개발 및 검증 입력자료 및 결과(계속)

종류	No.	지점	날짜	pH	$Q_{t-1}$ (m <sup>3</sup> )	$\text{Log}(Q_{t-1})$ (CFU/100mL)	FC	FCG <sub>m</sub>	FCG <sub>p</sub>	일치여부
유도 데이터	1	왜관	2010-08-12	7.5	858.90	2.93	1800	3	2	불일치
	2	왜관	2008-08-21	7.9	681.46	2.83	1800	3	2	불일치
	3	고령	2010-08-27	7.6	253.95	2.40	1700	3	2	불일치
	4	왜관	2009-11-26	7.8	46.48	1.67	1600	3	1	불일치
	5	왜관	2009-11-19	6	349.88	2.54	1500	3	3	일치
	6	구미	2006-02-02	7.1	79.26	1.90	1500	3	2	불일치
	7	구미	2006-02-23	7.1	80.00	1.90	1460	3	2	불일치
	8	왜관	2008-09-11	8.3	123.54	2.09	1400	3	1	불일치
	9	왜관	2010-07-29	8.2	68.82	1.84	1300	3	1	불일치
	10	왜관	2010-01-21	8.3	49.54	1.69	1300	3	1	불일치
	11	왜관	2008-07-24	7.6	126.00	2.10	1300	3	2	불일치
	12	고령	2012-09-20	7.2	1559.33	3.19	1300	3	3	일치
	13	왜관	2008-06-19	7.8	104.25	2.02	1200	3	2	불일치
	14	고령	2008-08-22	6.5	608.88	2.78	1100	3	3	일치
	15	왜관	2009-12-03	8	49.98	1.70	1000	3	1	불일치
	16	왜관	2010-08-26	8.1	124.70	2.10	920	2	1	불일치
	17	왜관	2010-06-03	7.5	168.88	2.23	760	2	2	일치
	18	구미	2006-03-16	8.5	70.92	1.85	230	2	1	불일치
	19	고령	2010-03-05	7.3	193.68	2.29	200	2	2	일치



표 4.4 분변성 대장균 모델 개발 및 검증 입력자료 및 결과(계속)

종류	No.	지점	날짜	pH	Q <sub>t-1</sub> (m <sup>3</sup> )	Log(Q <sub>t-1</sub> ) (CFU/100mL)	FC	FCG <sub>m</sub>	FCG <sub>p</sub>	일치여부
유도 데이터	20	구미	2006-07-14	7.2	876.86	2.94	660	2	2	일치
	21	고령	2010-01-29	7.8	65.72	1.82	650	2	1	불일치
	22	왜관	2010-05-20	7.8	183.60	2.26	620	2	2	일치
	23	왜관	2008-07-30	7.5	491.83	2.69	620	2	2	일치
	24	고령	2010-12-10	8.1	54.69	1.74	600	2	1	불일치
	25	고령	2010-02-26	7.8	73.18	1.86	600	2	1	불일치
	26	구미	2006-02-09	7.1	79.75	1.90	580	2	2	일치
	27	구미	2006-07-06	7.7	111.82	2.05	560	2	2	일치
	28	왜관	2010-10-28	7.6	72.35	1.86	540	2	1	불일치
	29	왜관	2006-07-14	6.9	1048.87	3.02	520	2	3	불일치
	30	구미	2006-02-16	7	79.30	1.90	510	2	2	일치
	31	구미	2006-08-04	7.7	305.28	2.48	500	2	2	일치
	32	고령	2009-12-11	7.5	27.10	1.43	480	2	1	불일치
	33	왜관	2010-07-22	8.2	193.30	2.29	460	2	2	일치
	34	구미	2006-06-01	6.9	88.97	1.95	460	2	2	일치
	35	고령	2011-03-04	7.3	47.32	1.68	450	2	1	불일치
	36	구미	2006-08-09	7.6	131.42	2.12	400	2	2	일치
	37	고령	2010-05-28	8.5	70.92	1.85	230	2	1	불일치
38	고령	2010-11-12	7.3	193.68	2.29	200	2	2	일치	

표 4.4 분변성 대장균 모델 개발 및 검증 입력자료 및 결과(계속)

종류	No.	지점	날짜	pH	Q <sub>t-1</sub> (m <sup>3</sup> )	Log(Q <sub>t-1</sub> ) (CFU/100mL)	FC	FCG <sub>m</sub>	FCG <sub>p</sub>	일치여부
유도 데이터	39	구미	2006-05-10	7.3	106.42	2.03	360	2	2	일치
	40	구미	2006-01-12	7.1	79.00	1.90	350	2	2	일치
	41	왜관	2010-04-08	7.2	188.82	2.28	340	2	2	일치
	42	고령	2010-03-19	7.5	181.13	2.26	330	2	2	일치
	43	왜관	2007-08-08	8.1	398.25	2.60	320	2	2	일치
	44	왜관	2007-05-30	7.9	177.58	2.25	320	2	2	일치
	45	고령	2011-09-16	8	325.80	2.51	320	2	2	일치
	46	왜관	2007-08-22	8.1	144.67	2.16	320	2	1	불일치
	47	왜관	2007-04-25	8.2	111.96	2.05	320	2	1	불일치
	48	구미	2006-11-15	8.2	78.01	1.89	320	2	1	불일치
	49	왜관	2007-01-05	7.6	91.00	1.96	300	2	2	일치
	50	왜관	2007-05-23	7.9	106.58	2.03	300	2	1	불일치
	51	왜관	2007-05-08	8.7	96.29	1.98	300	2	1	불일치
	52	구미	2007-11-07	8.1	54.00	1.73	300	2	1	불일치
	53	구미	2007-02-07	7.3	56.00	1.75	300	2	2	일치
	54	구미	2006-10-04	8.1	80.62	1.91	300	2	1	불일치
	55	구미	2006-09-06	7.9	86.01	1.93	300	2	1	불일치
	56	구미	2006-04-27	8.5	70.92	1.85	230	2	1	불일치
	57	왜관	2006-05-10	7.3	193.68	2.29	200	2	2	일치

표 4.4 분변성 대장균 모델 개발 및 검증 입력자료 및 결과(계속)

종류	No.	지점	날짜	pH	$Q_{t-1}$ (m <sup>3</sup> )	$\text{Log}(Q_{t-1})$ (CFU/100mL)	FC	FCG <sub>m</sub>	FCG <sub>p</sub>	일치여부
유도 데이터	58	왜관	2009-08-13	9	169.13	2.23	280	2	1	불일치
	59	고령	2010-01-08	8.1	65.72	1.82	280	2	1	불일치
	60	왜관	2006-10-25	8.9	74.00	1.87	260	2	1	불일치
	61	구미	2006-12-13	7.8	78.56	1.90	260	2	1	불일치
	62	구미	2006-10-11	7.8	79.58	1.90	260	2	1	불일치
	63	고령	2010-11-26	8	52.03	1.72	260	2	1	불일치
	64	고령	2012-07-19	7.7	405.72	2.61	250	2	2	일치
	65	왜관	2009-10-15	7.8	66.40	1.82	250	2	1	불일치
	66	왜관	2010-08-20	8	1246.59	3.10	240	2	2	일치
	67	왜관	2007-12-27	7.5	79.21	1.90	240	2	2	일치
	68	성주	2012-09-13	7.5	425.51	2.63	240	2	2	일치
	69	왜관	2010-12-16	7.7	72.45	1.86	240	2	1	불일치
	70	성주	2010-06-10	8.3	96.84	1.99	240	2	1	불일치
	71	왜관	2007-02-28	7.7	96.00	1.98	230	2	2	일치
	72	고령	2011-07-28	7.8	376.47	2.58	220	2	2	일치
	73	왜관	2008-04-10	7.5	81.33	1.91	210	2	2	일치
	74	왜관	2007-08-14	7.8	409.13	2.61	210	2	2	일치
	75	왜관	2007-11-07	8.4	87.67	1.94	210	2	1	불일치
76	왜관	2008-08-07	9.4	140.42	2.15	200	2	1	불일치	

표 4.4 분변성 대장균 모델 개발 및 검증 입력자료 및 결과(계속)

종류	No.	지점	날짜	pH	$Q_{t-1}$ (m <sup>3</sup> )	$\text{Log}(Q_{t-1})$ (CFU/100mL)	FC	FCG <sub>m</sub>	FCG <sub>p</sub>	일치여부
유도 데이터	96	왜관	2008-05-22	8.3	82.00	1.91	130	1	1	일치
	97	고령	2009-08-21	9.4	127.74	2.11	130	1	1	일치
	98	고령	2008-01-18	7.8	87.83	1.94	130	1	1	일치
	99	고령	2007-08-24	8.1	69.50	1.84	130	1	1	일치
	100	고령	2007-03-09	8	215.67	2.33	130	1	2	불일치
	101	왜관	2009-08-27	8.4	93.26	1.97	120	1	1	일치
	102	고령	2009-09-25	8.2	44.79	1.65	120	1	1	일치
	103	고령	2008-04-11	8.1	73.92	1.87	120	1	1	일치
	104	고령	2007-12-20	7.5	23.08	1.36	120	1	1	일치
	105	고령	2007-08-03	8.5	99.92	2.00	120	1	1	일치
	106	고령	2006-08-18	8.3	87.59	1.94	120	1	1	일치
	107	성주	2010-02-11	7.5	46.43	1.67	110	1	1	일치
	108	고령	2011-02-01	7.8	25.94	1.41	110	1	1	일치
	109	고령	2009-06-26	8	67.88	1.83	110	1	1	일치
110	고령	2012-09-27	7.6	49.44	1.69	100	1	1	일치	
111	고령	2008-05-30	7.2	126.17	2.10	100	1	2	불일치	
112	고령	2008-01-31	7.6	71.58	1.85	90	1	1	일치	
113	고령	2011-01-07	7.9	41.46	1.62	80	1	1	일치	
114	왜관	2010-05-13	7.6	112.21	2.05	80	1	2	불일치	

표 4.4 분변성 대장균 모델 개발 및 검증 입력자료 및 결과(계속)

종류	No.	지점	날짜	pH	$Q_{t-1}$ (m <sup>3</sup> )	$\text{Log}(Q_{t-1})$ (CFU/100mL)	FC	FCG <sub>m</sub>	FCG <sub>p</sub>	일치여부
유도 데이터	115	성주	2010-03-11	7.8	115.57	2.06	80	1	2	불일치
	116	산곡	2006-03-08	7.6	30.34	1.48	74	1	1	일치
	117	산곡	2007-03-07	7.7	76.95	1.89	70	1	1	일치
	118	성주	2011-11-10	7.8	136.37	2.13	70	1	2	불일치
	119	고령	2011-03-11	8.2	28.32	1.45	65	1	1	일치
	120	산곡	2007-09-11	8.1	420.54	2.62	65	1	2	불일치
	121	왜관	2009-05-07	9.9	26.65	1.43	60	1	1	일치
	122	산곡	2007-12-04	8.4	40.00	1.60	60	1	1	일치
	123	산곡	2009-07-27	8	309.75	2.49	60	1	2	불일치
	124	구미	2009-11-10	8	44.47	1.65	58	1	1	일치
	125	남지	2010-11-08	7.6	121.45	2.08	55	1	2	불일치
	126	성주	2007-02-01	8.2	206.83	2.32	50	1	2	불일치
	127	성주	2008-04-10	7.6	64.67	1.81	44	1	1	일치
	128	왜관	2010-02-18	8.2	81.15	1.91	40	1	1	일치
	129	왜관	2009-05-14	8.4	18.69	1.27	40	1	1	일치
	130	성주	2007-05-31	9	77.83	1.89	40	1	1	일치
	131	남지	2011-12-06	7.7	349.69	2.54	39	1	2	불일치
	132	산곡	2009-10-08	7.3	48.08	1.68	34	1	1	일치
133	산곡	2009-09-09	8.6	41.79	1.62	34	1	1	일치	

표 4.4 분변성 대장균 모델 개발 및 검증 입력자료 및 결과(계속)

종류	No.	지점	날짜	pH	Q <sub>t-1</sub> (m <sup>3</sup> )	Log(Q <sub>t-1</sub> ) (CFU/100mL)	FC	FCG <sub>m</sub>	FCG <sub>p</sub>	일치여부
유도 데이터	134	구미	2010-07-14	7.9	279.34	2.45	30	1	2	불일치
	135	구미	2009-05-12	7.9	4.87	0.69	28	1	1	일치
	136	고령	2011-09-30	8.2	65.14	1.81	26	1	1	일치
	137	고령	2008-12-19	7.9	38.54	1.59	25	1	1	일치
	138	구미	2009-12-10	7.1	39.81	1.60	24	1	2	불일치
	139	왜관	2008-12-10	8.1	66.67	1.82	20	1	1	일치
	140	산곡	2010-06-14	8.1	35.95	1.56	20	1	1	일치
	141	구미	2009-03-11	8	32.63	1.51	20	1	1	일치
	142	고령	2010-04-30	7.9	183.25	2.26	20	1	2	불일치
	143	남지	2011-04-14	8	156.56	2.19	18	1	2	불일치
	144	산곡	2006-01-04	7.3	28.00	1.45	16	1	1	일치
	145	남지	2011-06-14	7.9	278.40	2.44	12	1	2	불일치
	146	구미	2009-08-20	9.2	118.01	2.07	10	1	1	일치
	147	남지	2011-06-02	7.8	234.47	2.37	10	1	2	불일치
	148	남지	2008-08-12	8	171.50	2.23	10	1	2	불일치
149	남지	2008-07-08	8.6	335.42	2.53	10	1	2	불일치	
150	남지	2006-09-05	8.1	248.39	2.40	10	1	2	불일치	

표 4.4 분변성 대장균 모델 개발 및 검증 입력자료 및 결과(계속)

종류	No.	지점	날짜	pH	$Q_{t-1}$ (m <sup>3</sup> )	$\text{Log}(Q_{t-1})$ (CFU/100mL)	FC	FCG <sub>m</sub>	FCG <sub>p</sub>	일치여부
검증 데이터	1	남지	2006-07-20	6.2	10288.72	4.01	1500	3	3	일치
	2	왜관	2008-09-04	8.0	181.88	2.26	1400	3	2	불일치
	3	왜관	2009-11-05	7.4	46.79	1.67	1200	3	1	불일치
	4	왜관	2008-06-12	7.9	152.88	2.18	1000	3	2	불일치
	5	고령	2010-12-17	7.7	70.85	1.85	700	2	1	불일치
	6	왜관	2010-09-02	7.6	726.61	2.86	600	2	2	일치
	7	고령	2010-05-20	7.5	134.45	2.13	550	2	2	일치
	8	성주	2006-02-02	7.1	147.44	2.17	480	2	2	일치
	9	왜관	2006-02-16	7.4	49.92	1.70	420	2	1	불일치
	10	구미	2006-11-08	8.2	79.00	1.90	360	2	1	불일치
	11	왜관	2007-06-27	8.1	577.67	2.76	320	2	2	일치
	12	구미	2007-06-13	7.8	67.88	1.83	320	2	1	불일치
	13	남지	2008-10-21	8.8	75.00	1.88	300	2	1	불일치
	14	고령	2006-07-07	7.4	114.87	2.06	290	2	2	일치
	15	왜관	2007-03-08	7.8	243.25	2.39	260	2	2	일치
	16	고령	2010-07-09	8.7	111.33	2.05	260	2	1	불일치
	17	왜관	2007-03-21	7.7	100.83	2.00	240	2	2	일치
	18	왜관	2008-02-14	8.5	70.92	1.85	230	2	1	불일치
	19	고령	2006-08-04	7.3	193.68	2.29	200	2	2	일치

표 4.4 분변성 대장균 모델 개발 및 검증 입력자료 및 결과(계속)

종류	No.	지점	날짜	pH	$Q_{t-1}$ (m <sup>3</sup> )	$\text{Log}(Q_{t-1})$ (CFU/100mL)	FC	FCG <sub>m</sub>	FCG <sub>p</sub>	일치여부
검증 데이터	20	왜관	2007-05-16	7.8	84.46	1.93	200	2	1	불일치
	21	왜관	2008-01-10	8.3	85.42	1.93	180	1	1	일치
	22	고령	2007-02-23	8.1	62.17	1.79	160	1	1	일치
	23	고령	2007-02-02	7.9	48.00	1.68	150	1	1	일치
	24	고령	2006-10-27	7.6	21.74	1.34	140	1	1	일치
	25	고령	2007-10-26	7.8	43.50	1.64	130	1	1	일치
	26	고령	2009-09-25	8.2	44.79	1.65	120	1	1	일치
	27	왜관	2009-06-25	8.9	70.09	1.85	120	1	1	일치
	28	고령	2008-11-28	7.6	41.00	1.61	100	1	1	일치
	29	왜관	2007-03-14	7.4	111.58	2.05	80	1	2	불일치
	30	산곡	2006-04-05	7.7	32.00	1.51	68	1	1	일치
	31	남지	2011-12-13	7.8	90.07	1.95	60	1	1	일치
	32	고령	2011-11-04	7.9	53.92	1.73	50	1	1	일치
	33	남지	2011-03-10	7.7	140.07	2.15	40	1	2	불일치
	34	산곡	2012-10-17	9.4	78.23	1.89	28	1	1	일치
	35	남지	2008-09-09	8.4	158.58	2.20	24	1	1	일치
	36	남지	2009-08-10	7.2	474.78	2.68	19	1	2	불일치
	37	구미	2010-06-14	7.8	88.90	1.95	10	1	1	일치
38	성주	2011-03-10	8	60.12	1.78	10	1	1	일치	



## 4.3 수질 지수 모델의 개발

### 4.3.1 수질 인자 선정

본 연구에서 정보가 종합될 적절한 수질 인자는 다음의 기준을 근거로 선정하였다. 수질 인자는 (1) 국내 수질자동측정망에서 측정되어 실시간 데이터를 수집할 수 있는 항목, (2) 하천에서의 레크리에이션 활동에 중요한 항목, 이렇게 두 가지 기준을 두어 선정하였다. 하천 레크리에이션 지수는 실시간으로 산정되므로 본 모델에 입력 데이터로 사용되는 수질 인자 데이터의 실시간 데이터의 존재 여부가 중요하다. 그러므로 국내 수질자동측정망에서 매일 실시간으로 측정되는 수질 인자를 선택하였다. 또한, 기준 (1)을 만족하는 수질 인자 중 인체가 하천수와 접촉할 시 그 위험성과 안전성을 잘 설명할 수 있는 수질 인자들을 선택하였다.

#### 4.3.1.1 수질자동측정망의 측정 항목

수질측정망에서 수질 자동측정망은 실시간 모니터링이 가능하여 수질감시정보 체계를 가능하게 하며, 수질예보제 운영에 필요한 일 데이터 생산으로 월 데이터를 생산하는 수질 일반측정망을 보완한다. 수질자동측정망에서 측정되는 항목은 공통항목으로 수온, pH, 전기전도도, DO, 총유기탄소가 있으며 선택항목으로는 탁도, 클로로필 a, 총질소(TN), 총인(TP), 암모니아성 질소, 질산성 질소, 인산염 인, 중금속, 페놀, VOCs, 물벼룩, 조류, 미생물 등이 있다. 다음 표 4.5는 주요 네 개의 강(한강, 낙동강, 금강, 영산·섬진강)의 30개소 이상에서 측정되고 있는 항목을 정리한 것이다. 표에 따르면 클로로필 a가 50개소에서 가장 많이 측정하고 있었고 TN, TP는 49개소, 탁도는 39개소에서 측정되고 있어 활용 가능성이 비교적 높은 편에 속하였다. 따라서, 본 연구에서는 앞에 제시한 기준 (1)에 따라 RRIM의 수질 인자 후보를 공통항목인 수온, pH, 전기전도도, DO, 총유기탄소와 선택항목 중 가장 많이 측정되는 클로로필 a, TN, TP 그리고 탁도로 선택하였다.

표 4.5 수질자동측정망 선택항목 측정 현황

	클로로필 a	TN	TP	탁도	VOCs	물벼룩
한강	12	17	17	14	7	4
낙동강	20	13	13	13	17	17
금강	10	11	11	7	4	5
영산· 섬진강	8	8	8	5	4	5
계	50	49	49	39	32	31

#### 4.3.1.2 하천 레크리에이션의 중요 항목

수질오염현상 중에는 혐기성 상태에 의한 오염 현상, 부영양화 현상 그리고 전염성 세균에 의한 오염 현상이 있다. 혐기성 상태에 의한 오염 현상은 용존산소량 부족에 따라 어류 폐사, 부패 가스, 악취, 검은 물 등이 발생하는 현상이다. 부영양화 현상은 질소나 인과 같은 무기물 다량 유입으로 인해 조류가 과다 번식하여 산소를 소모하고 미관을 저해하며 독성 물질을 발생시키는 수질 오염 현상이다. 전염성 세균에 의한 오염 현상은 수인성 질병을 야기함을 말한다(김좌관, 2010). 이러한 오염현상들은 모두 하천 레크리에이션에 중요한 미관과 안전관리 측면과 관련되므로 모두 고려할 필요가 있다. 그러므로 본 연구에서는 수질 인자 선정에 있어서 앞의 오염현상들을 나타내는 수질 지표들을 고려하였다.

전염성 세균에 의한 오염현상을 나타내는 수질 지표로 대장균을 선택할 수 있으나, 이는 분변성 대장균 모델을 통해 고려되므로 본 수질 지수 모델에서는 제외하였다. 혐기성 상태에 의한 오염 현상은 DO를 통해 고려하고자 하였다. DO는 수중에 용해되어 있는 산소의 양을 의미한다. DO는 가장 대표적인 수질 지표 중 하나로 수생생태계의 일반적인 상태를 나타내며, 그 수치가 낮을 경우 어류사망률이 증가함에 따라 생태계의 불균형을 초래하고 냄새와 미관에 영향을 미친다. DO는 다음 식(4.4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V \frac{dc}{dt} = \text{reaeration} + (\text{photosynthesis} - \text{respiration}) \\ - \text{oxidation of CBOD, NBOD (from inputs)} \\ - \text{sediment oxygen demand} + \text{oxygen inputs} \\ \pm \text{oxygen transport (into and out of segment)} \quad (4.4)$$

위의 식에서 나타난 바와 같이 산소가 하천에 유입되고 유출되는 과정이 DO에 종합적으로 반영이 된다. 다음으로 부영양화와 관련된 지표

를 수질 인자로 선택하기 위해 국내에서 제시하고 있는 조류 경보 기준을 참고하였다. 국내의 조류 경보는 클로로필 a와 남조류 세포수의 기준을 통해 경보 발령 여부가 결정된다. 특히 남조류 세포수는 독소를 발생하기 때문에 중요하지만 현재 국내에서 남조류 세포수를 모니터링하는 수질자동측정망은 구축되어 있지 않다. 따라서, 부영양화를 나타내는 수질 지표로 클로로필 a만을 선정하였다.

수질자동측정소에서 측정되어 수질 인자의 후보로 선정되었던 지표 중 pH와 탁도도 수질 인자로 최종 선택되었다. pH는 수체의 산염기 평형상태를 나타내는 지표로 기존 자연수의 성질에 따라 좌우되나 하수, 공장폐수에 의해서도 영향을 받아 수질의 변화를 감지하는데 중요한 지표이다. 대부분의 pH는 6.5와 8.5 사이에 속하나 pH가 이보다 높거나 낮은 수체는 인체에 악영향을 미칠 수 있다. WHO(1998)에 따르면 pH가 11보다 높으면 피부 질환을 일으킬 수 있고, pH가 10에서 12.5 사이일 때 머리카락 섬유가 부풀며, pH가 4 이하에서 눈의 충혈 혹은 자극이 일어난다. 또한 인체가 민감할 경우 위장장애를 일으킬 가능성도 있는 것으로 보고되었다. pH는 금속의 부식과 소독의 효율과도 연관이 크기 때문에 직간접적으로 인체의 건강에 영향을 미치는 지표이다.

탁도는 수체의 상대적인 투명도를 나타내는 지표이다. 빛을 비추었을 때 산란되는 빛의 양으로 표현되는 광학적인 특성이기 때문에 수체에 부유하는 입자들에 의해 빛이 산란되는 정도가 크면 탁도 또한 높아진다. 보통 수체에는 점토, 실트, 유기물 혹은 무기물 세립자, 조류, 플랑크톤 등이 존재하며 이것들의 탁도 상승의 원인이 된다. 탁도가 높을 경우 수체의 투명도가 떨어져 미관적 가치가 하락하며 탁도와 병원균 증식에는 높은 상관관계가 존재하여 탁도가 높을 경우 병원균 증식의 위험이 존재한다. 또한, 탁도가 높은 수체는 하천 레크리에이션 활동 시 수체 안에서의 시야를 확보하기가 어려워 수체에 잠겨있는 다른 물체를 보기 힘들어 사고의 위험을 증가시킨다.

수온, 전기전도도, TN 그리고 TP는 수질 인자로 선택되지 않았는데

수온의 경우, DO와 상관성이 높은 항목이라 제외되었다. 전기전도도는 레크리에이션에 있어 크게 중요하지 않기 때문에 제외되었다. 또한, TN과 TP는 보통 부영양화를 나타내는 수질 지표로 사용되나 본 모델에서는 클로로필 a를 부영양화를 나타내는 수질 인자로 선정하였기 때문에 중복성을 피하기 위하여 두 지표는 모델에서 제외되었다.

#### 4.3.2 등급 정의 및 수질기준 선정

수질 지수 모델에서 등급은 앞에서 정한 RRG의 우수, 양호, 보통, 불량,의 네 개의 등급과 같다. 수질기준은 네 개의 등급에 따라 정하였으며 결과는 표 4.6과 같다. 표에 제시된 기준은 국내 하천 및 호소 생활환경기준, 조류경보 기준 등과 국외의 미국 전국 및 주별 수질 기준, 캐나다 수질기준, WHO(World Health Organization) 및 UN(United Nations) 수질 기준 등을 참고로 하였다. 참고한 수질기준들은 선택된 수질인자인 DO, pH, 탁도 클로로필 a별로 정리하여 다음 표 4.7 ~ 4.10에서 각각 제시하였다.

표 4.6 RRIM의 수질 기준

등급	DO (mg/L)	pH	탁도 (NTU)	클로로필 a (mg/m <sup>3</sup> )
우수(I)	7.5 ≤	7.0 ~ 8.0	< 10	< 10
양호(II)	5.0 ~ 7.5	6.5 ~ 7.0, 8.0 ~ 8.5	10 ~ 25	10 ~ 15
보통(III)	3.0 ~ 5.0	6.0 ~ 6.5, 8.5 ~ 9.0	25 ~ 50	15 ~ 25
불량(IV)	< 3.0	< 6.0, 9.0 ≤	50 ≤	25 ≤

표 4.7 DO의 국내외 수질 기준

구분	수질 기준(mg/L)		
국내 하천 생활환경기준	등급	매우 좋음	7.5 ≤
		보통 ~ 좋음	5.0 ~ 7.5
		나쁨 ~ 약간 나쁨	2.0 ~ 5.0
		매우 나쁨	≤ 2.0
미국 Illinois 주 수질기준	등급	직접접촉 가능	· 3월 ~ 7월: 5.0 ≤ · 8월 ~ 2월: 3.5 ≤
		간접접촉 가능	4.0 ≤
미국 Massachusetts 주 수질기준	등급	직접접촉 가능	· 차가운 물: 6.0 ≤ · 따뜻한 물: 5.0 ≤
		간접접촉 가능	3.0 ≤
미국 Florida 주 수질기준	5.0 ≤		

표 4.8 pH의 국내외 수질 기준

구분	수질 기준		
국내 하천 생활환경기준	등급	보통 ~ 매우 좋음	6.5 ~ 8.5
		나쁨 ~ 약간 나쁨	6.0 ~ 6.5
		매우 나쁨	≤ 6.0
미국 Aquatic life criteria	6.5 ~ 9.0		
미국 Human health criteria	5.0 ~ 9.0		
미국 New York 주 수질기준	등급	직접접촉 가능	6.5 ~ 8.0
		간접접촉 가능	6.0 ~ 6.5, 8.5 ~ 9.5
미국 Illinois 주 수질기준	용도	일반용도	6.5 ~ 9.0
		위락용도 (간접접촉 가능)	6.0 ~ 9.0
미국 Massachusetts 주 수질기준	등급	직접접촉 가능	6.5 ~ 8.3
		간접접촉 가능	8.3 ~ 9.5
미국 Florida 주 수질기준	간접접촉 가능		6.0 ~ 8.5
WHO 먹는 물 기준	6.5 ~ 9.5		



표 4.9 탁도의 국내외 수질 기준

구분	수질 기준(NTU)		
국내 먹는 물 기준	≤ 0.5		
국내 먹는 샘물 기준	≤ 1.0		
캐나다 British Columbia 주 수질기준	≤ 50.0		
미국 Alabama 주 수질기준	≤ 50.0		
미국 Arizona 주 수질기준	≤ 50.0		
미국 Missouri 주 수질기준	등급	A	10.0
		B, C	25.0

표 4.10 클로로필 a의 국내외 수질 기준

구분	수질 기준(mg/m <sup>3</sup> )		
국내 호소 생활환경기준	등급	매우 좋음	≤ 5.0
		좋음	5.0 ~ 9.0
		약간 좋음	9.0 ~ 14.0
		보통	14.0 ~ 20.0
		약간 나쁨	20.0 ~ 35.0
		나쁨	35.0 ~ 70.0
		매우 나쁨	70.0 ≤
국내 조류 경보 기준	등급	조류주의보	15 ~ 25
		조류경보	25 ~ 100
		조류대발생	100 ≤
WHO 건강상 급 성효과 가능성에 대한 가이드라인	등급	낮음	< 10
		보통	10 ~ 50
		높음	10 ~ 5,000
		매우 높음	> 5,000
UN의 영양상태 관리기준 (하천)	등급	I, 빈영양상태	< 4
		II, 중영양상태	4 ~ 15
		III, 중·부영양상 태	15 ~ 45
		IV, 부영양상태	45 ~ 165
		V, 과영양상태	> 110

### 4.3.3 소속함수의 정의

#### 4.3.3.1 소속함수 선정 조건

앞에서 정해진 수질 기준을 토대로 선정된 수질 인자의 소속함수를 등급(우수, 양호, 보통, 불량)별로 정의하였다. 본 연구에서는 가장 적절한 소속함수를 정의하기 위해 다섯 가지 조건을 정하고 이를 모두 만족하는 소속함수의 형태를 선택하였다. 다섯 가지 조건은 다음과 같다.

- (1) 각 등급(우수, 양호, 보통, 불량)의 중앙값에 해당하는 수질인자의 농도 값은 소속도를 1로 갖는다.
- (2) 특정 수질 농도 값이 어떤 한 등급에서 소속도를 1로 가질 때, 그 등급의 양 옆에 위치한 등급은 소속도를 0으로 가진다.
- (3) 수질 기준의 한 쪽이 열린 상태인 우수와 불량의 경우 소속도를 1로 가진 평평한 부분인 코어를 가진다.
- (4) 특정 수질인자의 농도 값에서 모든 등급의 소속도의 합은 1이다.
- (5) 수질 기준의 경계 값이 되는 농도 값에서 서로 이웃한 두 개의 소속함수가 만난다.

소속함수의 형태는 다양하게 존재하나 가장 대표적인 형태인 삼각형 소속함수와 가우스형 소속함수에 위의 조건을 적용해 보았다. 그러나 삼각형 소속함수는 조건 (1), (2), (3), (4)를 모두 만족하게 할 경우, 조건 (5)는 만족하지 못하는 것으로 나타났으며, 가우스형 소속함수는 조건 (1), (2), (3), (5)를 만족하게 할 경우 조건 (4)를 만족하지 못하는 것으로 밝혀졌다.

삼각형 소속함수는 각 인자 별로 그림 4.9 ~ 4.12과 같다. 그래프에서 나타난 바와 같이 삼각형 소속함수에서는 규칙 (5)가 만족되지 못한다. 규칙 (5)를 만족하지 못하는 소속함수들은 논리적으로 타당하지 못하다. 예를 들어 DO의 3 mg/L은 보통과 불량 등급의 경계값이다. 그런데 삼각형 소속함수에 따르면 DO 3 mg/L는 불량보다 보통에 속할 자격

을 크게 가진다. 이는 다른 인자들에서도 마찬가지이다. 클로로필 a가 10 mg/m<sup>3</sup>일 때는 우수와 양호 등급의 경계값이지만 삼각형 소속함수를 적용하였을 때에 양호에 속할 자격을 더욱 크게 가지는 논리적인 오류가 발생하게 된다.

가우스형 소속함수는 다음 그림 4.13 ~ 4.16과 같다. 그래프에서 나타난 바와 같이 삼각형 소속함수에서는 규칙 (4)가 만족되지 못한다. 대표적으로 DO의 모든 값에서의 소속도 합을 구해보면 1로 일정하지 않음을 알 수 있고 이를 그래프로 나타내면 그림과 4.17 같다. 그림 4.17을 보면, DO이 5 mg/L일 때 총 소속도의 합이 약 0,2이고, 4 mg/L일 때에는 1.0이다. 이 때 추후에 지수 종합 시 5 mg/L가 4 mg/L보다 수질 수준이 높음에도 불구하고 총 인자 점수가 더 낮게 책정되게 된다. 이에 대해서는 추후 소속함수의 적합도 판단 부분에서 더 살펴보도록 한다.

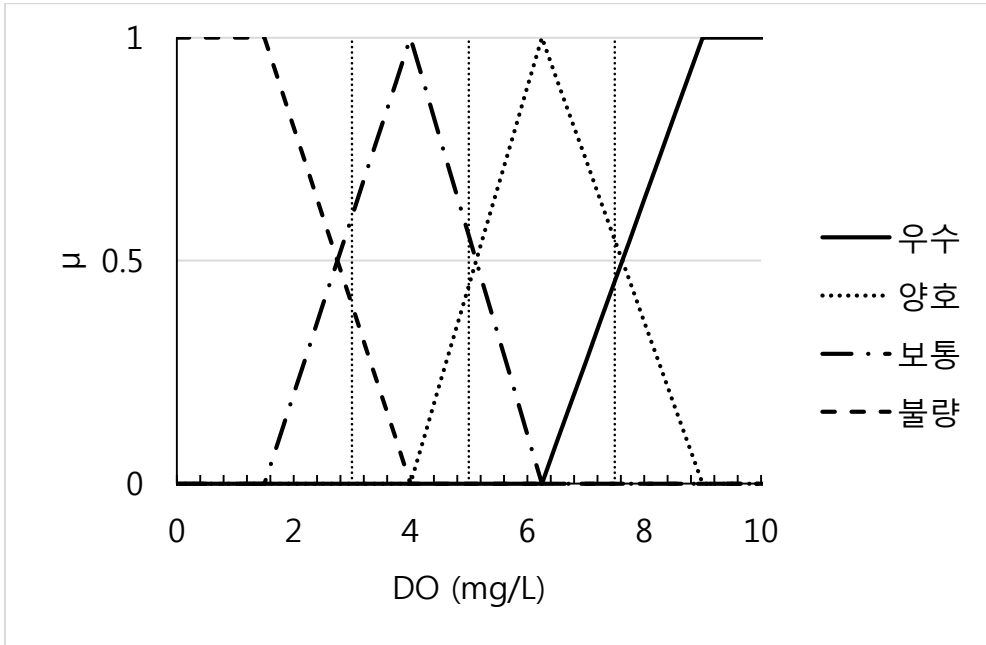


그림 4.9 DO의 삼각형 소속함수

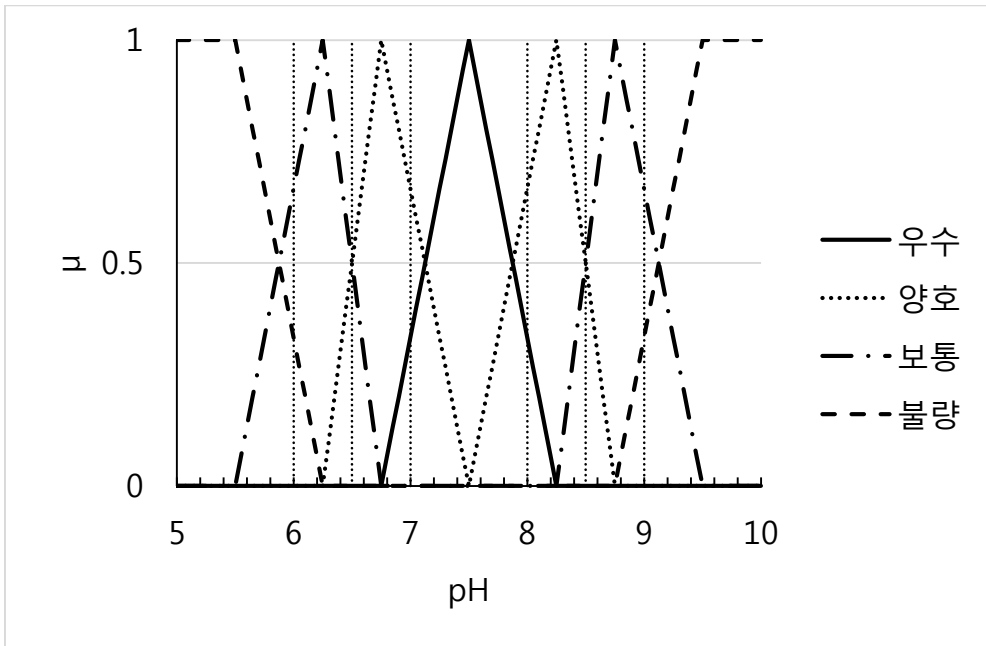


그림 4.10 pH의 삼각형 소속함수

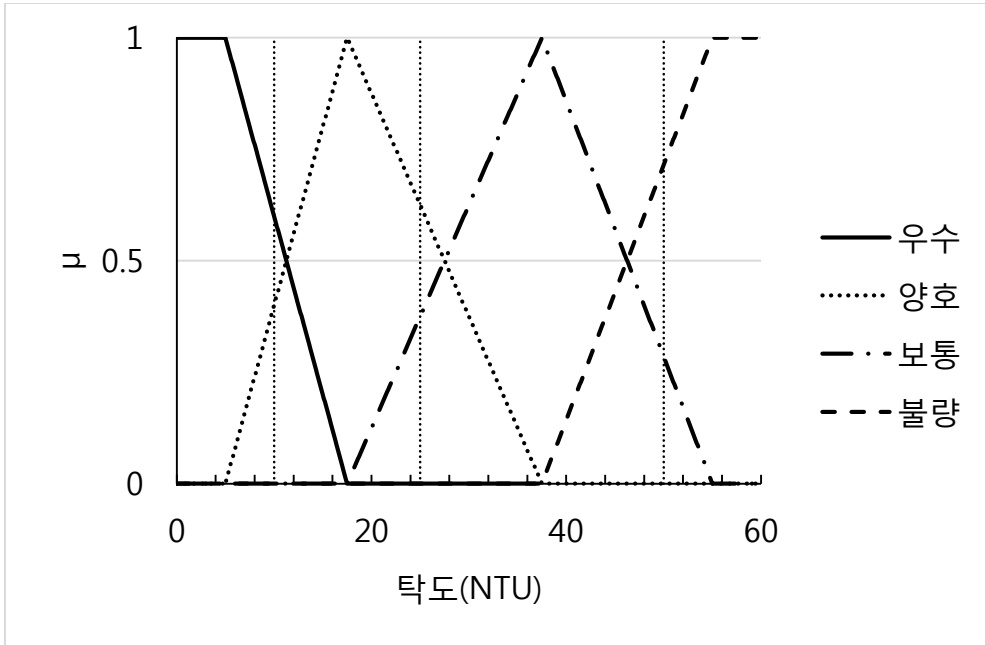


그림 4.11 탁도의 삼각형 소속함수

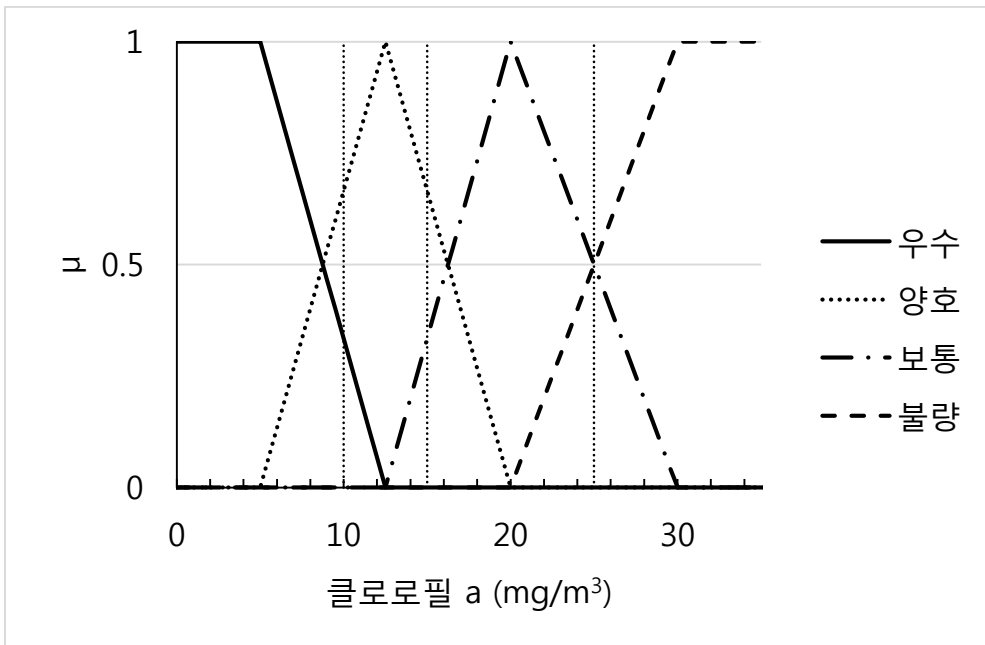


그림 4.12 클로로필 a의 삼각형 소속함수

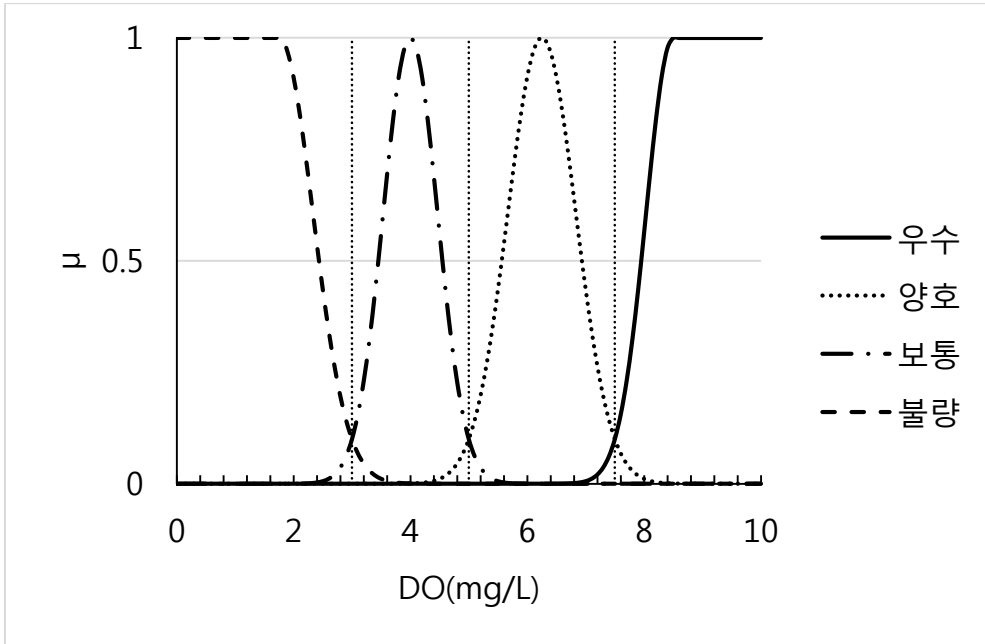


그림 4.13 DO의 가우스형 소속함수

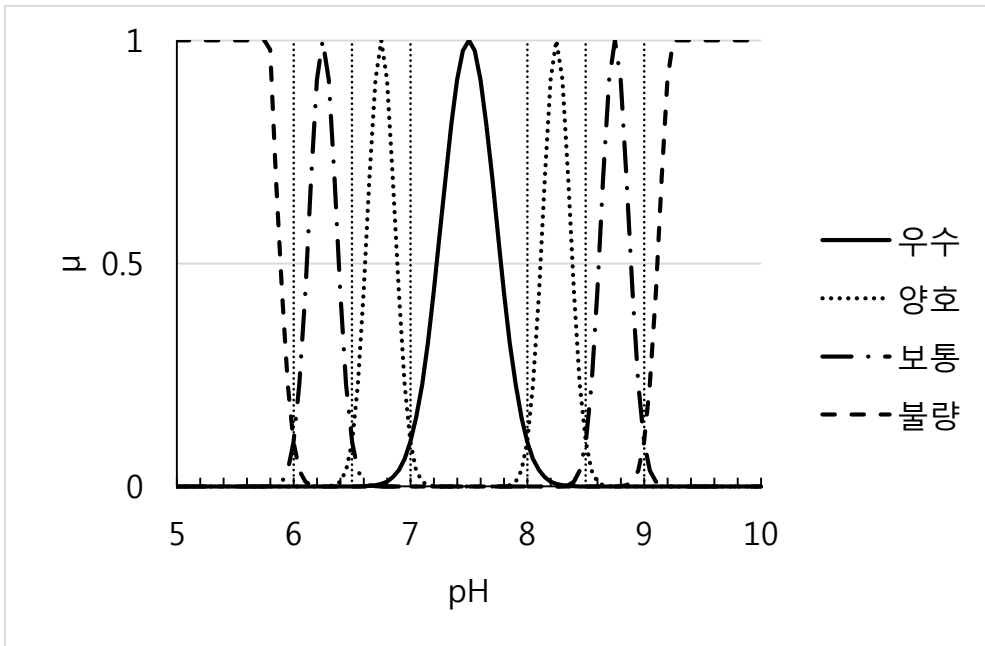


그림 4.14 pH의 가우스형 소속함수

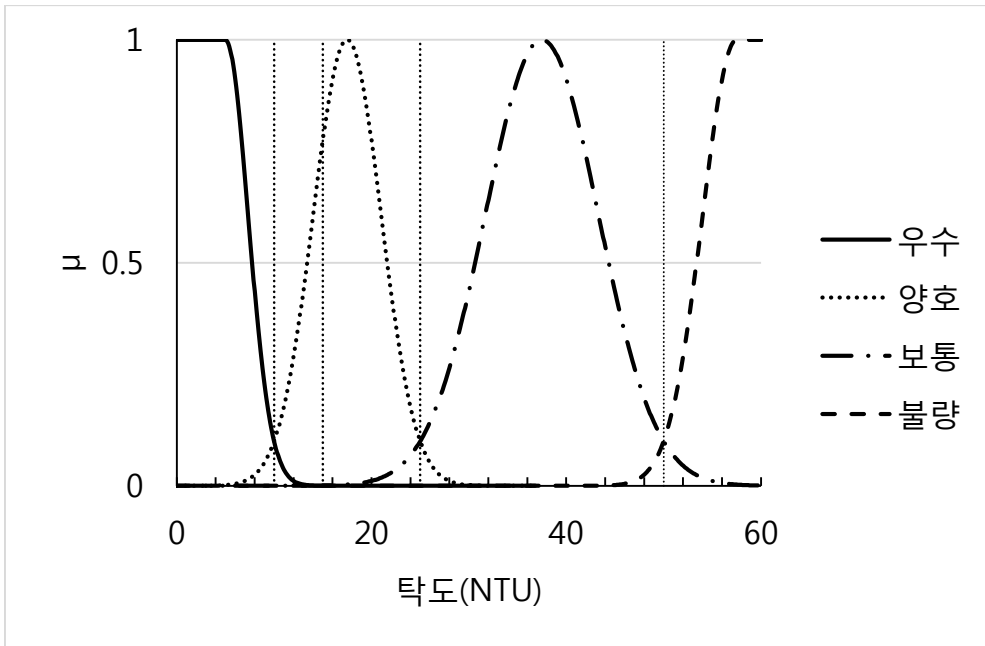


그림 4.15 탁도의 가우스형 소속함수

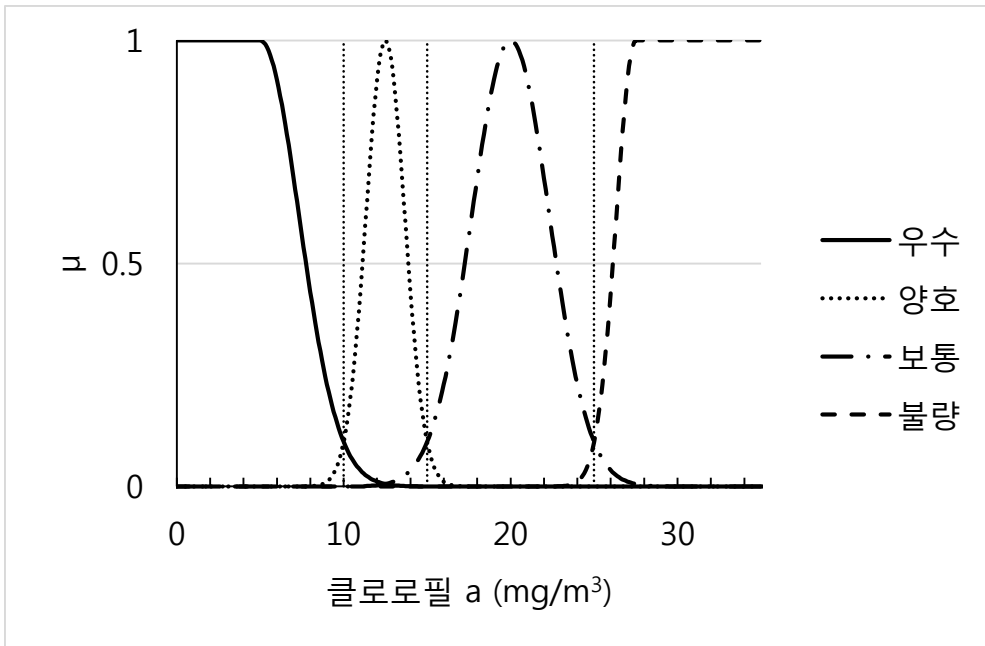


그림 4.16 클로로필 a의 가우스형 소속함수



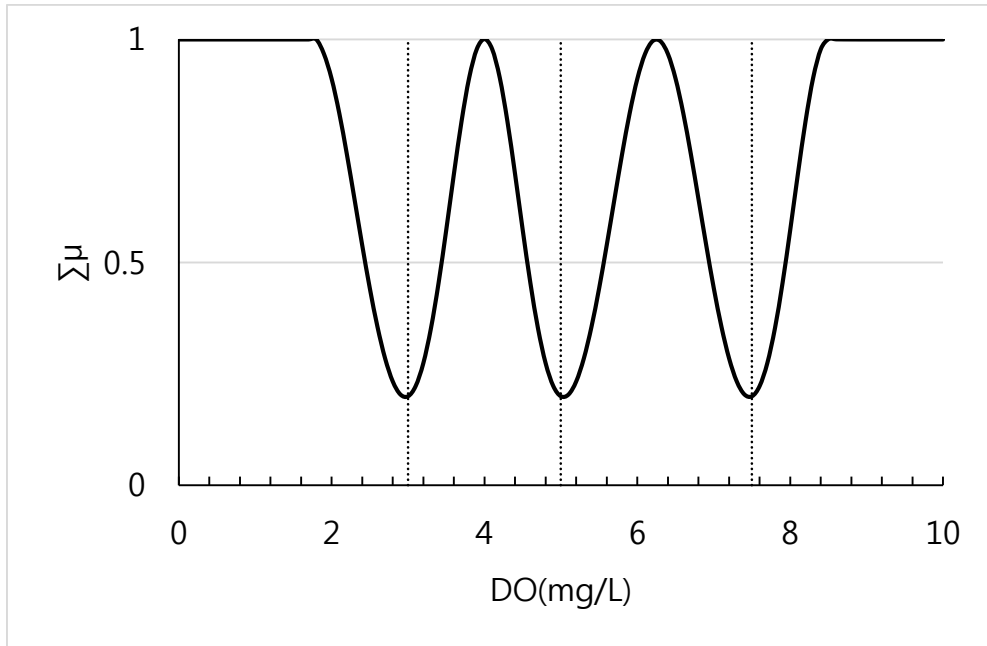


그림 4. 17 DO 가우스형 소속도의 합

#### 4.3.3.2 새로운 소속함수 형태의 개발

전 절에서 검토한 두 개의 형태의 소속함수가 다섯 가지 규칙을 만족시키지 못하기 때문에 다른 소속함수 형태를 제시할 필요가 있었으며, 본 연구에서는 그 대안으로 변형-삼각형 형태를 개발하였다. 변형-삼각형 형태란, 기존 삼각형 소속함수에 지수를 부여하여 직선이 아닌 곡선의 형태로 나타나는 형태이며 함수의 형태는 식 (4.5)와 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{curved} - \text{triangle}(x : a, b, c, d, e) \\
 & = \begin{cases} 0, & x < a \\ [(x - a) / (b - a)]^d, & a \leq x < b \\ [(c - x) / (c - b)]^e, & b \leq x < c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (4.5)
 \end{aligned}$$

위의 식을 이용하여 수질 기준을 토대로 하며 앞에서 제시한 다섯 가지 규칙을 모두 만족시키는 소속함수를 제시하였다. DO의 소속함수는 각 등급 별로 식 (4.6) ~ (4.9)와 같다.

$$\mu_{DO,1} = \begin{cases} 0, & x < 6.25 \\ \left(\frac{x - 6.25}{2.75}\right)^{0.8791}, & 6.25 \leq x < 9 \\ 1, & 9 \leq x \end{cases} \quad (4.6)$$

$$\mu_{DO,2} = \begin{cases} 0, & x < 4 \\ 1 - \left(\frac{6.25 - x}{2.25}\right)^{1.1792}, & 4 \leq x < 6.25 \\ 1 - \left(\frac{x - 6.25}{2.75}\right)^{0.8791}, & 6.25 \leq x < 9 \\ 0, & 9 \leq x \end{cases} \quad (4.7)$$

$$\mu_{DO,3} = \begin{cases} 0, & x < 1.5 \\ \left(\frac{x-1.5}{2.5}\right)^{1.3569}, & 1.5 \leq x < 4 \\ \left(\frac{6.25-x}{2.25}\right)^{1.1792}, & 4 \leq x < 6.25 \\ 0, & 6.25 \leq x \end{cases} \quad (4.8)$$

$$\mu_{DO,4} = \begin{cases} 1, & x < 1.5 \\ 1 - \left(\frac{x-1.5}{2.5}\right)^{1.3569}, & 1.5 \leq x < 4 \\ 0, & 4 \leq x \end{cases} \quad (4.9)$$

여기서,  $\mu_{DO,1}$   $\mu_{DO,2}$   $\mu_{DO,3}$   $\mu_{DO,4}$  는 각각 DO가 우수, 양호, 보통, 불량 등급에 속하는 소속도, 이다. 식 (4.10) ~ (4.13) 은 pH의 소속함수이다.

$$\mu_{pH,1} = \begin{cases} 0, & x < 6.75 \\ \left(\frac{x-6.75}{0.75}\right)^{0.6309}, & 6.75 \leq x < 7.5 \\ \left(\frac{8.25-x}{0.75}\right)^{0.6309}, & 7.5 \leq x < 8.25 \\ 0, & 8.25 \leq x \end{cases} \quad (4.10)$$

$$\mu_{pH,2} = \begin{cases} 0, & x < 6.25 \\ 1 - \frac{6.75-x}{0.5}, & 6.25 \leq x < 6.75 \\ 1 - \left(\frac{x-6.75}{0.75}\right)^{0.6309}, & 6.75 \leq x < 7.5 \\ 1 - \left(\frac{8.25-x}{0.75}\right)^{0.6309}, & 7.5 \leq x < 8.25 \\ 1 - \frac{x-8.25}{0.5}, & 8.25 \leq x < 8.75 \\ 0, & 8.75 \leq x \end{cases} \quad (4.11)$$

$$\mu_{pH,3} = \begin{cases} 0, & x < 5.5 \\ \left(\frac{x-5.5}{0.75}\right)^{1.7095}, & 5.5 \leq x < 6.25 \\ \frac{6.75-x}{0.5}, & 6.25 \leq x < 6.75 \\ 0, & 6.75 \leq x < 8.25 \\ \frac{x-8.25}{0.5}, & 8.25 \leq x < 8.75 \\ \left(\frac{9.5-x}{0.75}\right)^{1.7095}, & 8.75 \leq x < 9.5 \\ 0, & 9.5 \leq x \end{cases} \quad (4.12)$$

$$\mu_{pH,4} = \begin{cases} 1, & x < 5.5 \\ 1 - \left(\frac{x-5.5}{0.75}\right)^{1.7095}, & 5.5 \leq x < 6.25 \\ 0, & 6.25 \leq x < 8.75 \\ 1 - \left(\frac{9.5-x}{0.75}\right)^{1.7095}, & 8.75 \leq x < 9.5 \\ 1, & 9.5 \leq x \end{cases} \quad (4.13)$$

여기서,  $\mu_{pH,1}$ ,  $\mu_{pH,2}$ ,  $\mu_{pH,3}$ ,  $\mu_{DpH,4}$  는 각각 pH가 우수, 양호, 보통, 불량 등 급에 속하는 소속도, 이다. 다음 식 (4.14) ~ (4.17)은 탁도의 소속함수 이다.

$$\mu_{Tur,1} = \begin{cases} 1, & x < 5 \\ \left(\frac{17.5-x}{12.5}\right)^{1.3569}, & 5 \leq x < 17.5 \\ 0, & 17.5 \leq x \end{cases} \quad (4.14)$$

$$\mu_{Tur,2} = \begin{cases} 0, & x < 5 \\ 1 - \left(\frac{17.5-x}{12.5}\right)^{1.3569}, & 5 \leq x < 17.5 \\ 1 - \left(\frac{x-17.5}{20}\right)^{0.7067}, & 17.5 \leq x < 37.5 \\ 0, & 37.5 \leq x \end{cases} \quad (4.15)$$

$$\mu_{Tur,3} = \begin{cases} 0, & x < 17.5 \\ \left(\frac{x-17.5}{20}\right)^{0.7067}, & 17.5 \leq x < 37.5 \\ \left(\frac{55-x}{17.5}\right)^{0.5533}, & 37.5 \leq x < 55 \\ 0, & 55 \leq x \end{cases} \quad (4.16)$$

$$\mu_{Tur,4} = \begin{cases} 0, & x < 37.5 \\ 1 - \left(\frac{55-x}{17.5}\right)^{0.5533}, & 37.5 \leq x < 55 \\ 1, & 55 \leq x \end{cases} \quad (4.17)$$

여기서,  $\mu_{Tur,1}$   $\mu_{Tur,2}$   $\mu_{Tur,3}$   $\mu_{Tur,4}$  는 각각 탁도가 우수, 양호, 보통, 불량 등 급에 속하는 소속도, 이다. 다음 식 (4.18) ~ (4.21)은 클로로필 a의 소속함수이다.

$$\mu_{Chl,1} = \begin{cases} 1, & x < 5 \\ \left(\frac{12.5-x}{7.5}\right)^{0.6309}, & 5 \leq x < 12.5 \\ 0, & 12.5 \leq x \end{cases} \quad (4.18)$$

$$\mu_{Chl,2} = \begin{cases} 0, & x < 5 \\ 1 - \left(\frac{12.5-x}{7.5}\right)^{0.6309}, & 5 \leq x < 12.5 \\ 1 - \left(\frac{x-12.5}{7.5}\right)^{0.6309}, & 12.5 \leq x < 20 \\ 0, & 20 \leq x \end{cases} \quad (4.19)$$

$$\mu_{Chl,3} = \begin{cases} 0, & x < 12.5 \\ \left(\frac{x-12.5}{7.5}\right)^{0.6309}, & 12.5 \leq x < 20 \\ \frac{30-x}{10}, & 20 \leq x < 30 \\ 0, & 30 \leq x \end{cases} \quad (4.20)$$

$$\mu_{Chl,4} = \begin{cases} 0, & x < 20 \\ 1 - \frac{30-x}{10}, & 20 \leq x < 30 \\ 1, & 30 \leq x \end{cases} \quad (4.21)$$

여기서,  $\mu_{Chl,1}$ ,  $\mu_{Chl,2}$ ,  $\mu_{Chl,3}$ ,  $\mu_{Chl,4}$  는 각각 탁도가 우수, 양호, 보통, 불량 등 급에 속하는 소속도, 이다.

위의 소속함수들을 그림 4.18 ~ 4.21에 그래프로 표현하였다.

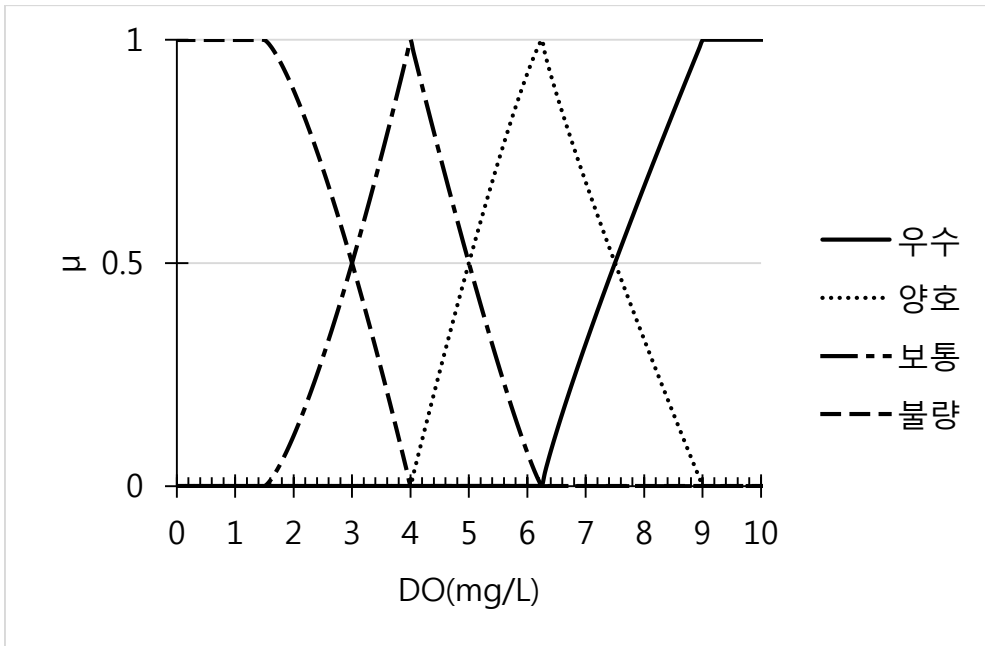


그림 4.18 DO의 변형-삼각형 소속함수

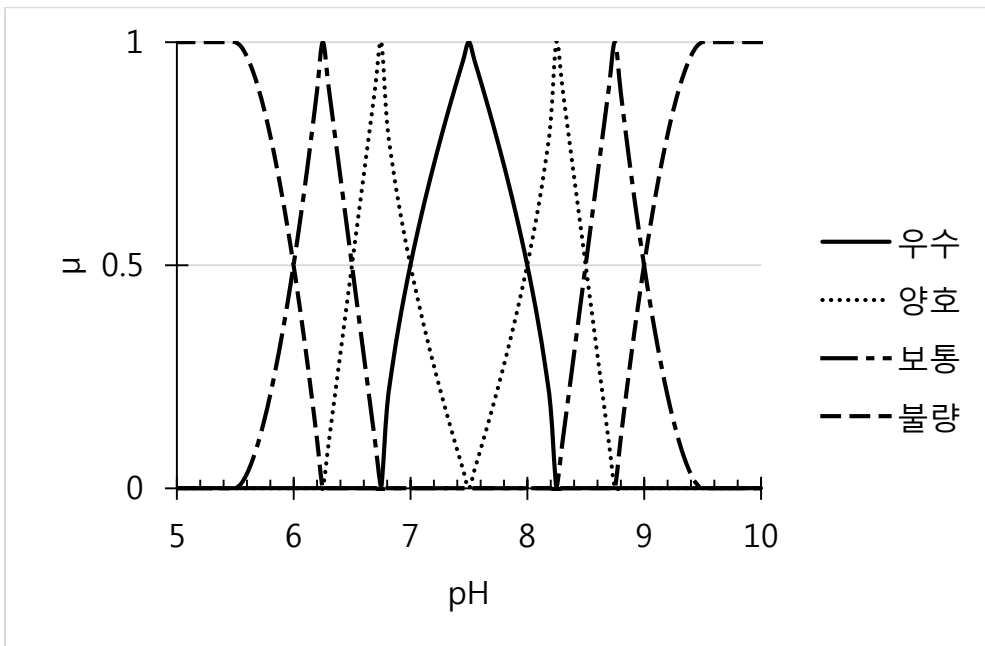


그림 4.19 pH의 변형-삼각형 소속함수

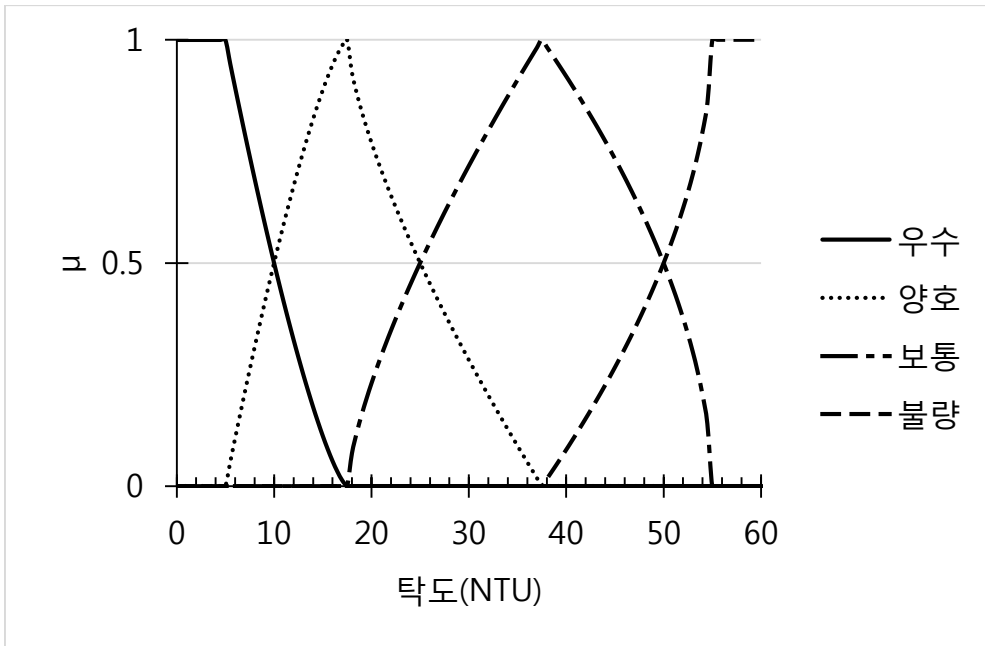


그림 4.20 탁도의 변형-삼각형 소속함수

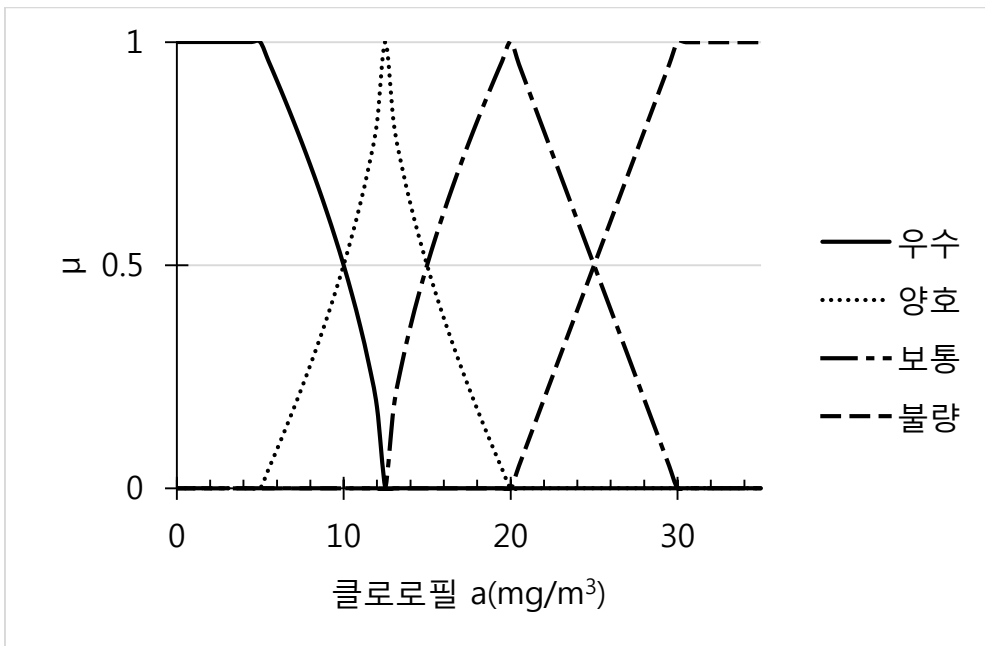


그림 4.21 클로로필 a의 변형-삼각형 소속함수



#### 4.3.4 종합화 방법 개발

소속함수를 통해 한 인자는 등급별로 네 개의 소속도를 가지게 되어 식 (4.22)와 같은 총 16개의 소속도를 구할 수 있다. 이 때, 한 인자가 가지는 네 개의 소속도는 각각 각 등급에 속하는 정도를 의미한다.

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_{DO,1} & \mu_{DO,2} & \mu_{DO,3} & \mu_{DO,4} \\ \mu_{pH,1} & \mu_{pH,2} & \mu_{pH,3} & \mu_{pH,4} \\ \mu_{Tur,1} & \mu_{Tur,2} & \mu_{Tur,3} & \mu_{Tur,4} \\ \mu_{Chl,1} & \mu_{Chl,2} & \mu_{Chl,3} & \mu_{Chl,4} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

여기서,  $\mu_{i,j}$ 는  $i$ 의 수질 인자가  $j$ 번째 수질 등급에 따라 가지는 소속도로,  $j$ 가 1, 2, 3, 4를 가질 때 각각은 우수, 양호, 보통, 불량 등급을 나타낸다. 본 연구에서는 위 식 (4.22)의 16개의 소속도를 하나의 지수로 종합하기 위한 방법을 두 단계로 구성하였다. 첫 번째 단계로 식 (4.23)과 같이 인자 별로 네 개의 소속도를 종합하여 각 인자 점수,  $P$ 를 계산하였다. 다음 단계로 수질 인자들의 하천 레크리에이션에서의 중요성을 판단하여 이를 가중치,  $w$ 로 나타내고 이를 이용하여 식 (4.24)과 같이 각 인자 점수를 가중합하여 수질 지수 모델의 인자인 DO, pH, 탁도, 클로로필  $a$ 를 종합한 수질 점수, WQI를 구하였다.

$$P = \mu \cdot GV = \begin{bmatrix} \mu_{DO,1} & \mu_{DO,2} & \mu_{DO,3} & \mu_{DO,4} \\ \mu_{pH,1} & \mu_{pH,2} & \mu_{pH,3} & \mu_{pH,4} \\ \mu_{Tur,1} & \mu_{Tur,2} & \mu_{Tur,3} & \mu_{Tur,4} \\ \mu_{Chl,1} & \mu_{Chl,2} & \mu_{Chl,3} & \mu_{Chl,4} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} GV_1 \\ GV_2 \\ GV_3 \\ GV_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{DO} \\ P_{pH} \\ P_{Tur} \\ P_{Chl} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

여기서,  $GV_1$ 는 각 인자 별로 우수에 해당되는 소속도에 할당되는 값을 말하며,  $GV_2$ 는 양호,  $GV_3$ 는 보통,  $GV_4$ 는 불량에 할당되는 값이다.  $P_{DO}$

는 DO의 네 개의 소속도를 종합하여 나온 점수,  $P_{pH}$ 는 pH,  $P_{Tur}$ 는 탁도,  $P_{chl}$ 는 클로로필 a의 점수이다.

$$WQI = w \cdot P = \begin{bmatrix} w_{DO} & w_{pH} & w_{Tur} & w_{Chl} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{DO} \\ P_{pH} \\ P_{Tur} \\ P_{Chl} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

여기서,  $w_{DO}$ ,  $w_{pH}$ ,  $w_{Tur}$ ,  $w_{Chl}$ 는 각각 DO, pH, 탁도, 클로로필 a에 부여되는 가중치이다.

각 등급에 할당되는 적절한  $GV$ 를 구하기 위하여 각 인자 별로 수질 지수 모델에서 우수 등급이 소속도를 1으로 가질 때의 인자 점수가 100점, 불량 등급이 소속도를 1으로 가질 때의 인자 점수가 0점을 갖게 하였다. 또한, 양호와 보통 등급의 경계값에서 인자 점수가 50점이 되게 하여  $GV_1$ 는 100,  $GV_2$ 는 66.7,  $GV_3$ 는 33.3,  $GV_4$ 는 0으로 구하였다. 또한, 앞에서 구한  $GV$ 를 적용하여 인자 점수를 계산하여 보면, 수질 지수 모델의 우수 등급은 점수 83.4점 초과 100점 이하, 양호 등급은 점수 50점 초과 및 83.4점 이하, 보통 등급은 점수 16.6점 초과 및 50점 이하, 불량 등급은 점수 16.6점 이하인 점수임을 확인할 수 있었다. 이는 표 4.12에 정리하였다. 우수와 불량 등급 구간의 길이는 16.6이고 양호와 보통 등급 구간의 길이는 두 배인 33.4이다. 이러한 등급 구간 길이의 불균형은 수질 기준 선정 시 우수와 불량은 하나의 경계값을 기준으로 그보다 높거나 낮은, 열린 형태의 범위로 주어지고, 양호와 보통은 두 개의 경계값을 기준의 범위로 정하였기 때문에 발생하였다. 인자의 가중치는 연구동향에서도 언급한 바 있는 한국환경기술개발원의 최지용(1996)의 "종합수질지표의 개발"을 참고로 하여 정하였다.

여기서 개발된 종합수질지표는 하천 레크리에이션 용도가 아닌 종합적 용도이지만 논문에서는 용수를 이용도별로 생활용수, 공업용수,

농업용수, 위락 및 친수기능 용수, 생태계유지용수로 구분하여 각각의 수질 인자의 가중치를 선정하였다. 본 논문에서는 위락 및 친수기능 용수의 가중치를 참고로 하여 DO의 가중치,  $w_{do}$ 는 0.26, pH의 가중치,  $w_{pH}$ 는 0.26, 탁도의 가중치,  $w_{tu}$ 는 0.23 그리고 클로로필 a의 가중치,  $w_{ch}$ 는 0.25로 정하였다.

#### 4.4 RRIM 알고리즘

앞에서 언급한 바와 같이 RRI와 RRG는 분변성 대장균 모델과 수질 지수 모델을 종합하여 산정된다. 그림 4.22는 RRI를 산정하는 알고리즘을 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 분변성 대장균 모델에서 1등급이 나온 경우, RRI와 그 등급은 수질 지수 모델에서 평가된 바와 같다. 그러나 2등급이 나온 경우에는 수질 지수 모델에서 WQI가 50점 초과되는 경우, 즉, 우수, 양호 등급이 나올 때는 다음 식 (4.26)을 사용하여 RRI가 결정되며 이에 따라 RRG는 보통 등급이 된다. 반면, 50점 이하, 즉 보통과 불량 등급이 나오면 RRI와 RRG는 수질 지수 모델의 결과와 같다. 마지막으로 분변성 대장균 모델에서 분변성 대장균이 3등급으로 예측되는 경우는 수질 지수 모델에서 WQI가 16.6점 초과, 즉 우수, 양호, 보통에 해당되는 경우는 식 (4.27)를 사용하여 RRI가 산정되며 이에 따라 RRG는 불량으로 조정되게 된다. 반면, 16.6점 이하, 즉 불량 등급이 나오는 경우는 RRI와 RRG는 수질 지수 모델의 결과와 같다. RRIM은 MATLAB 코드로 개발하였다.

$$RRI = 0.668WQI - 16.8 \quad (4.26)$$

$$RRI = 0.199WQI - 3.3 \quad (4.27)$$

표 4.11 등급의 중간값과 경계값의 인자 점수

수질 인자				소속도				인자 점수
DO (mg/L)	pH	탁도 (NTU)	Chl-a (mg/m <sup>3</sup> )	$\mu_{DO,1}$	$\mu_{DO,2}$	$\mu_{DO,3}$	$\mu_{DO,4}$	
9.0	7.5	5	5	1	0	0	0	100
7.5	7, 8	10	10	0.5	0.5	1	1	83.4
6.25	6.75, 8.25	15	12.5	0	1	0	0	66.7
5	6.5, 8.5	25	15	0	0.5	0.5	0	50
4	6.25, 8.75	37.5	20	0	0	1	0	33.3
3	6, 9	50	25	0	0	0.5	0.5	16.6
1.5	5.5, 9.5	55	30	0	0	0	1	0

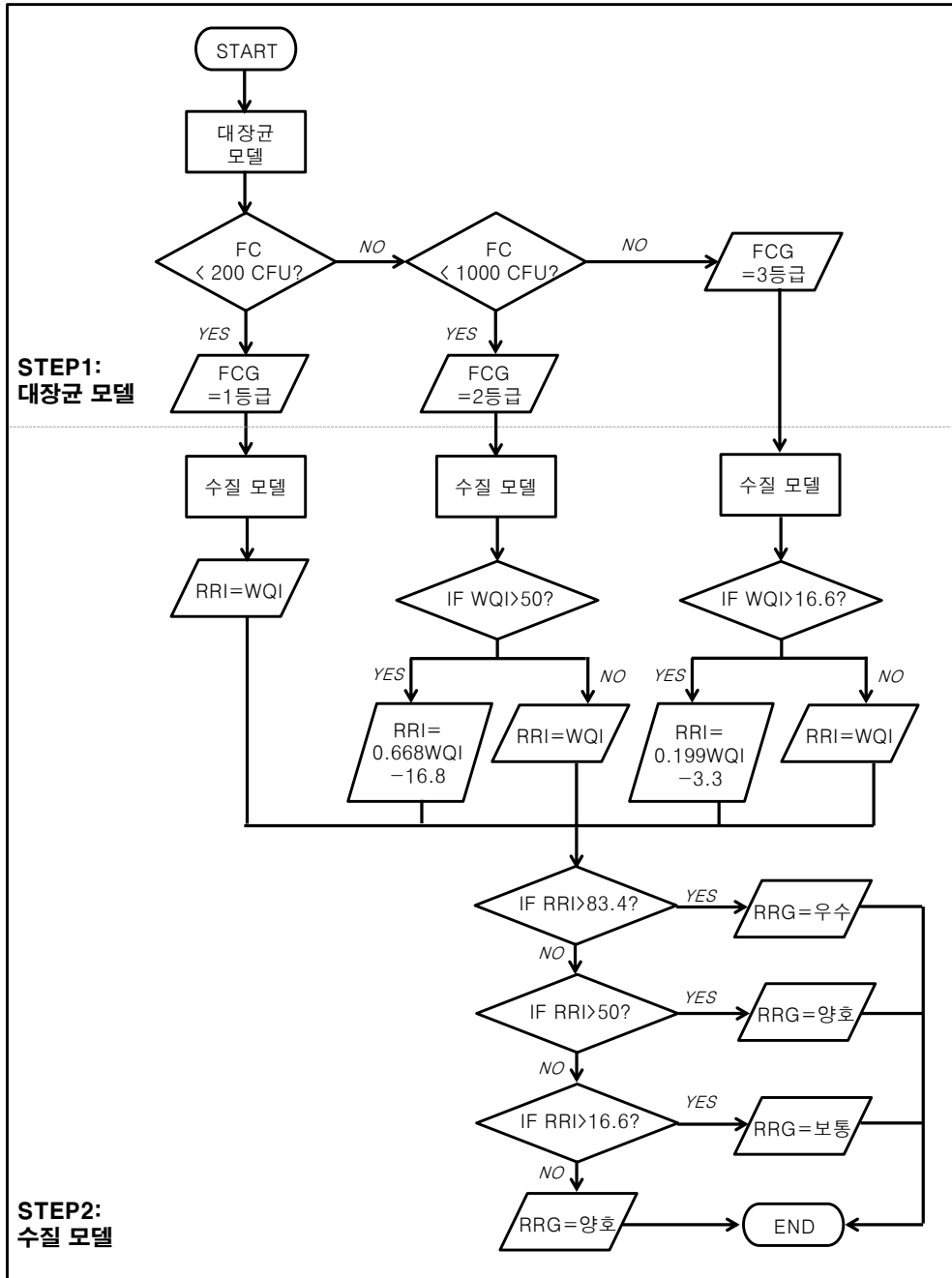


그림 4.22 RRIM 모델 알고리즘

## 4.5 소속함수의 적합도 판단

본 연구에서 개발한 변형-삼각형 소속함수의 타당성을 살펴보았다. 우선, 퍼지 집합 이론의 소속함수가 적용되지 않은 경우, 즉 소속함수를 크리스프(crisp)함수로 이용하였을 때의 인자 점수를 구해보고 퍼지 함수를 적용했을 때와 비교해보고 퍼지 함수의 타당성을 살펴보았다. 크리스프 함수란, 일반적인 집합 개념이 적용된 소속함수로, 이에 따라 소속함수는 어떤 등급에 속할 자격이 완전히 주어지거나 혹은 전혀 주어지지 않는다. 즉, 이 때 소속함수는 소속도,  $\mu$  를 1 혹은 0으로 갖는다. 다음으로는 가우스형 소속함수를 이용했을 때의 인자 점수를 구하고 이를 변형-삼각형 소속함수를 적용했을 때의 경우와 비교해 보고 앞에서 제시하였던 조건 (4)의 타당성을 살펴보았다.

### 4.5.1 퍼지 소속함수와 크리스프 소속함수 적용의 비교

본 모델에서는 퍼지 집합 이론을 적용하여 소속함수를 경계가 명확하지 않는 퍼지 소속함수로 나타내었다. 본 장에서는 퍼지 소속함수와 크리스프 소속함수가 적용된 경우 모델이 어떠한 차이를 보이는지 살펴보았다. 아래 그림 4.22 ~ 4.25에 제시된 그래프는 퍼지 소속함수와 크리스프 소속함수가 적용된 경우의 각 인자의 점수를 나타낸다. 점선은 크리스프 소속함수가 적용되었을 결과이고 실선은 퍼지 소속함수가 적용된 결과이다. 모든 수질 인자의 기준 경계값, 예를 들어 DO가 3mg/L, 5mg/L 그리고 7.5mg/L일 때 크리스프 소속함수는 점수가 갑자기 상승하는 불연속적인 계단 형태의 모습을 보였다. 반면, 퍼지 소속함수는 연속적으로 상승하는 형태를 보였다. 이러한 측면에서 보았을 때, 퍼지 소속함수가 수질 변동을 더욱 합리적으로 반영하는 점을 확인할 수 있었다.

#### 4.5.2 가우스 형태와의 비교

가우스형 소속함수는 수질인자의 모든 값에서 소속도의 합이 1로 일정하지 않음을 확인할 수 있었다. 본 장에서는 가우스형 소속함수가 적용된 경우 모델이 어떠한 차이를 보이는지 살펴보고자 한다. 가우스형 소속함수가 적용된 경우 인자 점수가 감소하였다가 증가하는 모습을 볼 수 있다. 이는 인자의 모든 값이 어딘가에 속할 수 있는 평등한 자격이 주어지지 않고 어떤 인자는 자격을 많이 부여받고 다른 인자는 자격을 적게 부여받기 때문에 일어난 현상이다. 따라서, 본 연구에서는 모든 값에서 소속도의 합이 1이 되어야 한다는 조건 (4)를 타당한 것으로 판단하였다.

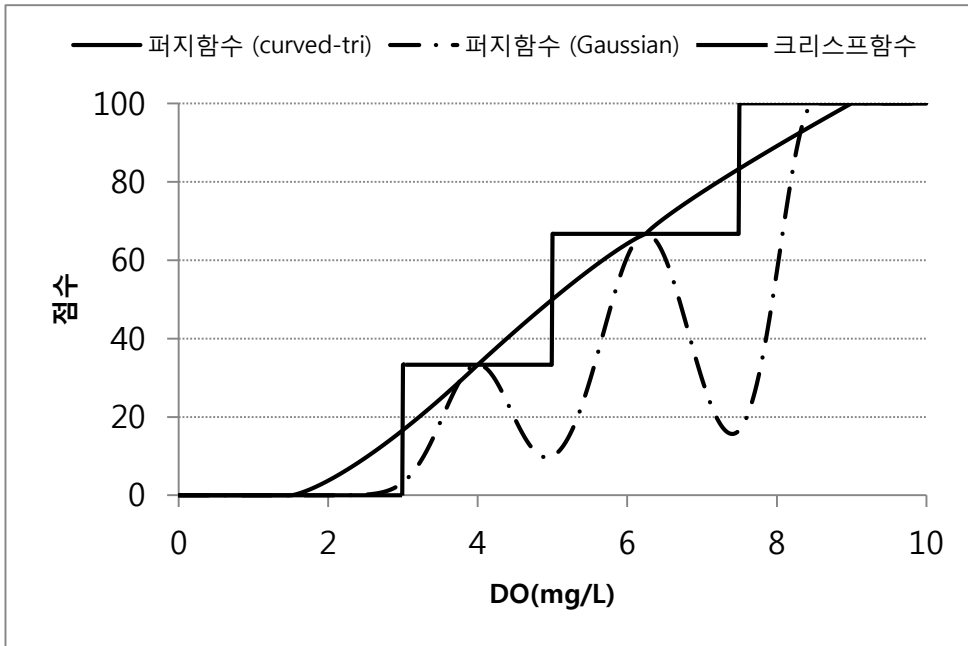


그림 4.23 DO의 인자 점수

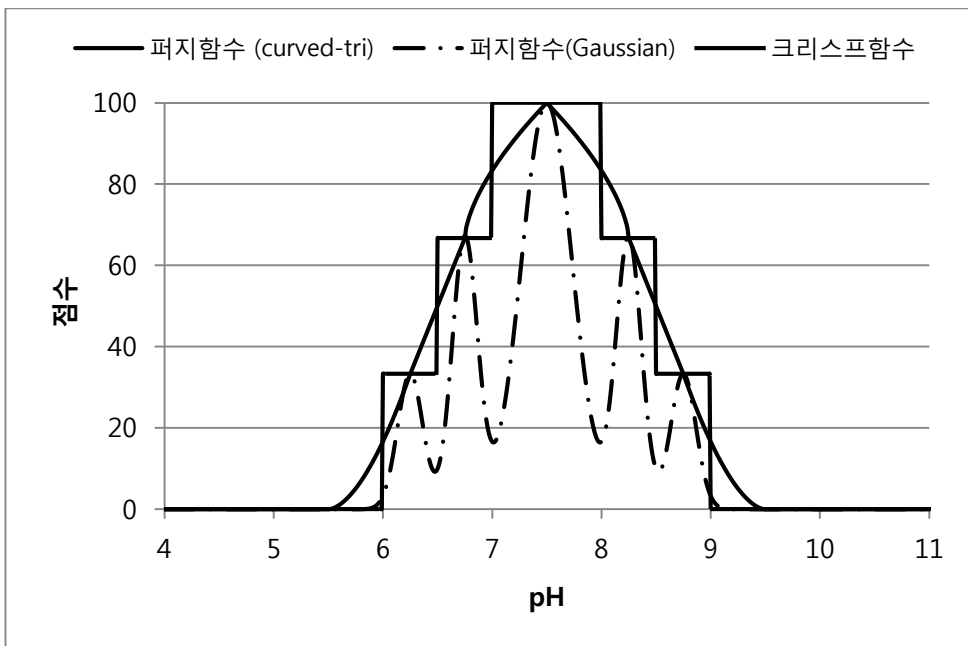


그림 4.24 pH의 인자 점수



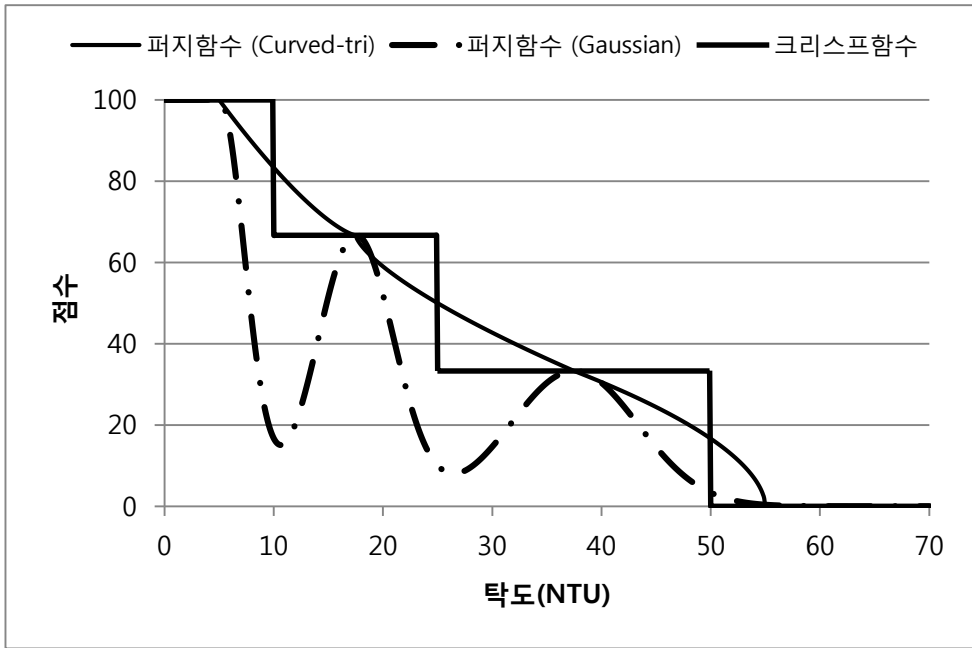


그림 4.25 탁도의 인자 점수

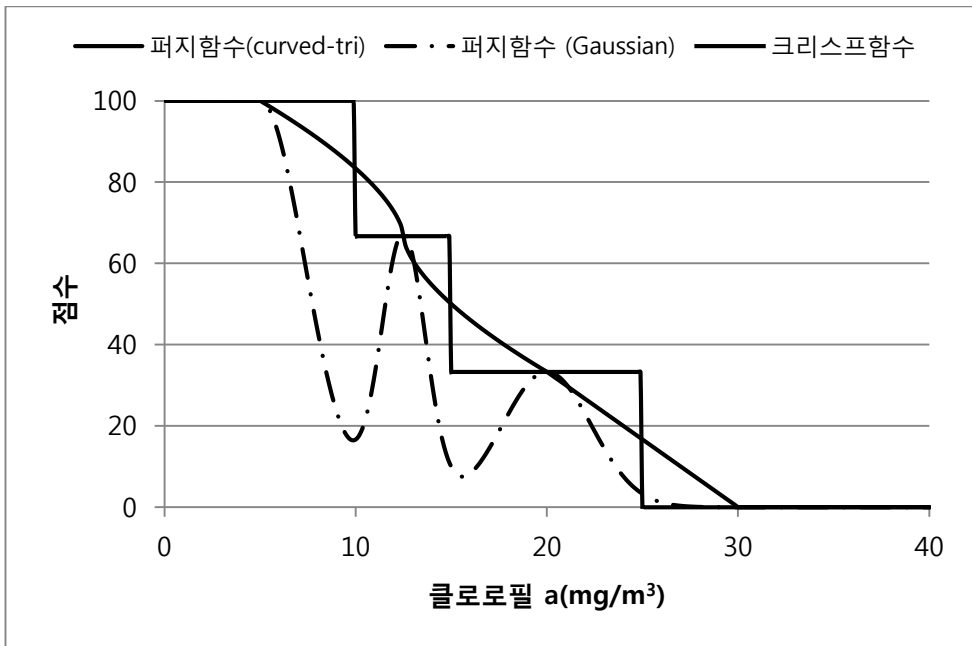


그림 4.26 클로로필 a의 인자 점수

## 5. 모델의 적용

### 5.1 적용 지점

RRIM의 적용지점은 낙동강의 구미보 상류 지점, 강정고령보 상류 지점이며 그 위치는 그림 5.1과 같다. 적용 지점에서 수집된 데이터 중 수질 데이터는 DO, pH, 탁도, 클로로필 a이며 이는 수질자동측정소에서 수집하였다. 또한, 유량 데이터로는 분변성 대장균 모델의 입력 인자인 1일 전 유량을 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 수집하였다. 두 적용지점에 위치한 수질자동측정소는 구미보, 강정고령보 상류 순대로 도개, 다산이며, 유량관측소는 일선교, 성주이다. 마지막으로 각 지점에서 산정된 WQI와 RRI는 기존 서비스되고 있는 RTWQI와의 비교를 통해 결과의 타당성 및 의의를 살펴보고자 하였다.

### 5.2 RRIM 적용 결과

#### 5.2.1 구미보 상류 지점

구미보 상류 지점의 7월부터 8월까지 두 달간의 데이터를 이용하여 RRIM를 적용하였다. 첫 단계로 분변성 대장균 모델을 적용한 결과, 그림 5.2와 같이 두 달 동안 FCG가 1등급으로 나타나 계속 직접접촉 활동이 가능한 것으로 판단되었다. 다음으로 수질 지수 모델을 적용하였는데 이 때 수질 데이터의 분포 특성을 알아보기 위하여 표 5.1과 같이 평균, 최소값, 최대값, 표준편차를 계산하였다. 또한, 본 모델에서 제시하는 수질 등급 별 데이터 수는 표 5.2와 같다. 이를 통해 DO, 탁도 그리고 클로로필 a는 비교적 우수한 수질 상태를 나타냄을 확인하였다. 이 중 DO와 탁도는 우수와 양호 등급에만 속하였고 클로로필 a는 빈도는 적으나 다양한 등급에 모두 분포하고 있었다. pH는 네 등급에 모두 골고루 분포하고 있어 변동폭은 작지만 등급을 고려하였을 때에는 pH에 따른 수질 상태가 꾸준히 변화하고 있음을 확인할 수 있었다.

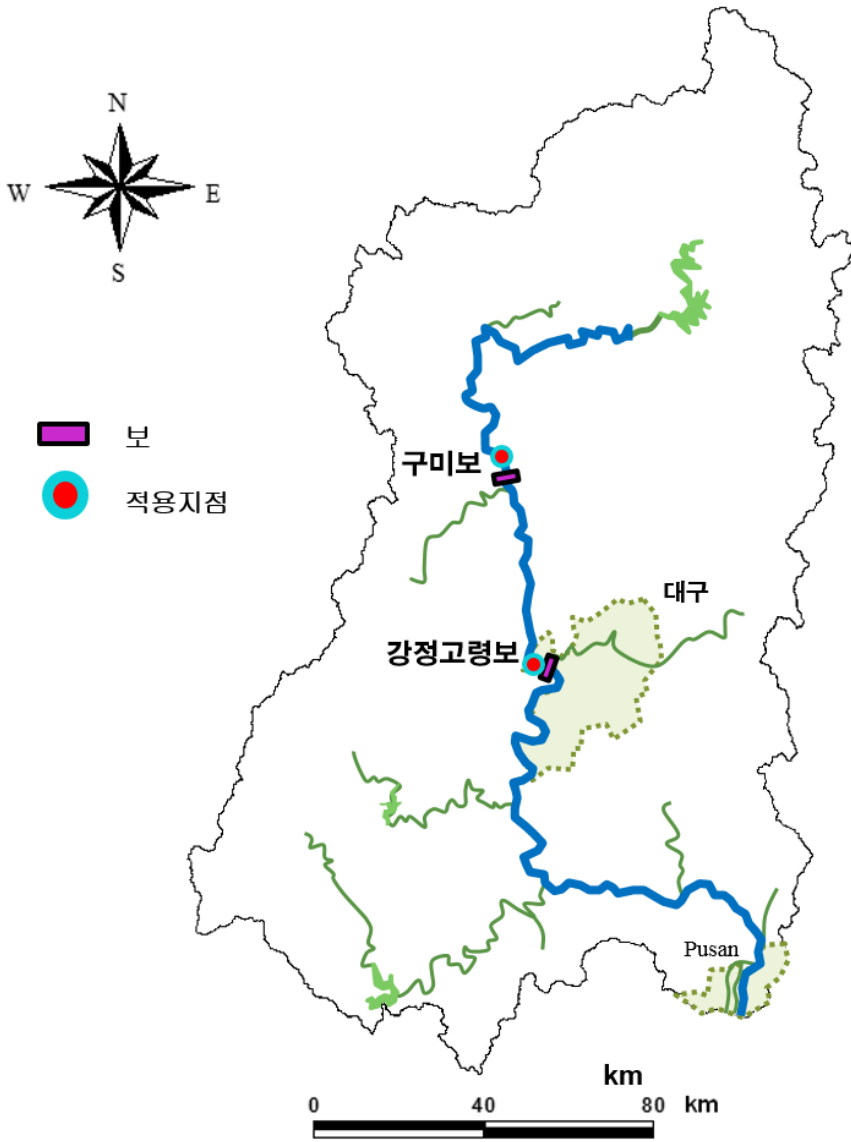


그림 5.1 RRIM 적용 지점

수질 지수 모델의 결과인 WQI와 수질 인자는 그림 5.3, 5.4과 같다. 수질 지수 모델의 입력 값인 각각의 수질 데이터가 WQI에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기로 상관을 조사하였다. 그 결과, 클로로필 a와 WQI의 피어슨 상관계수가  $-0.84$ 로 네 개의 인자 중 클로로필 a가 WQI에 가장 큰 영향을 미침을 확인하였다. 또한, pH와 WQI의 피어슨 상관계수는  $-0.78$ 로 pH 또한 WQI와 높은 상관계수가 있음을 확인하였다. DO와 탁도의 경우 상관계수가 작게 나타났는데 그 이유는 두 수질 인자의 경우 대부분의 기간 동안 우수 등급에 해당하고 있어 WQI를 산정하는데 있어 많은 영향을 미치지 못하였기 때문이다. 이 중 탁도의 경우 7월 7일 과 8월 5일에 극댓값이 발생하였을 때에는 WQI가 하락하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 탁도의 갑작스런 상승폭에 비해 WQI가 소폭 하락하였는데 그 이유는 그 시점에 클로로필 a가 감소하여 그 영향이 상쇄되었기 때문이다.

그림 5.5 는 RRI, WQI, 그리고 RTWQI 를 나타낸다. WQI 는 앞에서 예측된 FCG 에 따라 그 값이 조정되어 RRI 로 변환되었다. FCG 가 모두 1 등급으로 예측되었기 때문에 RRI 는 모두 WQI 와 같은 값을 가졌다. 이 때 우수는 14 일, 양호는 48 일에 해당되었으며 보통, 불량에 해당하는 날은 없었다. RRI 에 따라 모든 날에 직접접촉이 가능한 것으로 판단하였다. 또한, RRI 와 기존 제공되고 있는 RTWQI 의 관계를 살펴보기 위하여 둘 사이의 상관계수를 조사하였으며 그 결과 피어슨 상관계수가  $0.65$  으로 유의한 상관계수가 있음을 확인하였다. 모든 적용 결과는 표 5.3 에 수록하였다.

표 5.1 구미보 상류 지점 수질 데이터 특성

	용존산소량	pH	탁도	클로로필 a
평균	9.55	8.62	10.05	8.11
최소값	6.90	7.30	4.50	1.20
최대값	12.70	9.70	44.10	14.80
표준편차	1.52	0.56	8.12	3.65

표 5.2 구미보 상류 지점 수질 인자의 등급별 해당 수

	용존산소량	pH	탁도	클로로필 a
우수	61	17	13	0
양호	0	19	29	14
보통	0	23	18	33
불량	0	2	1	14

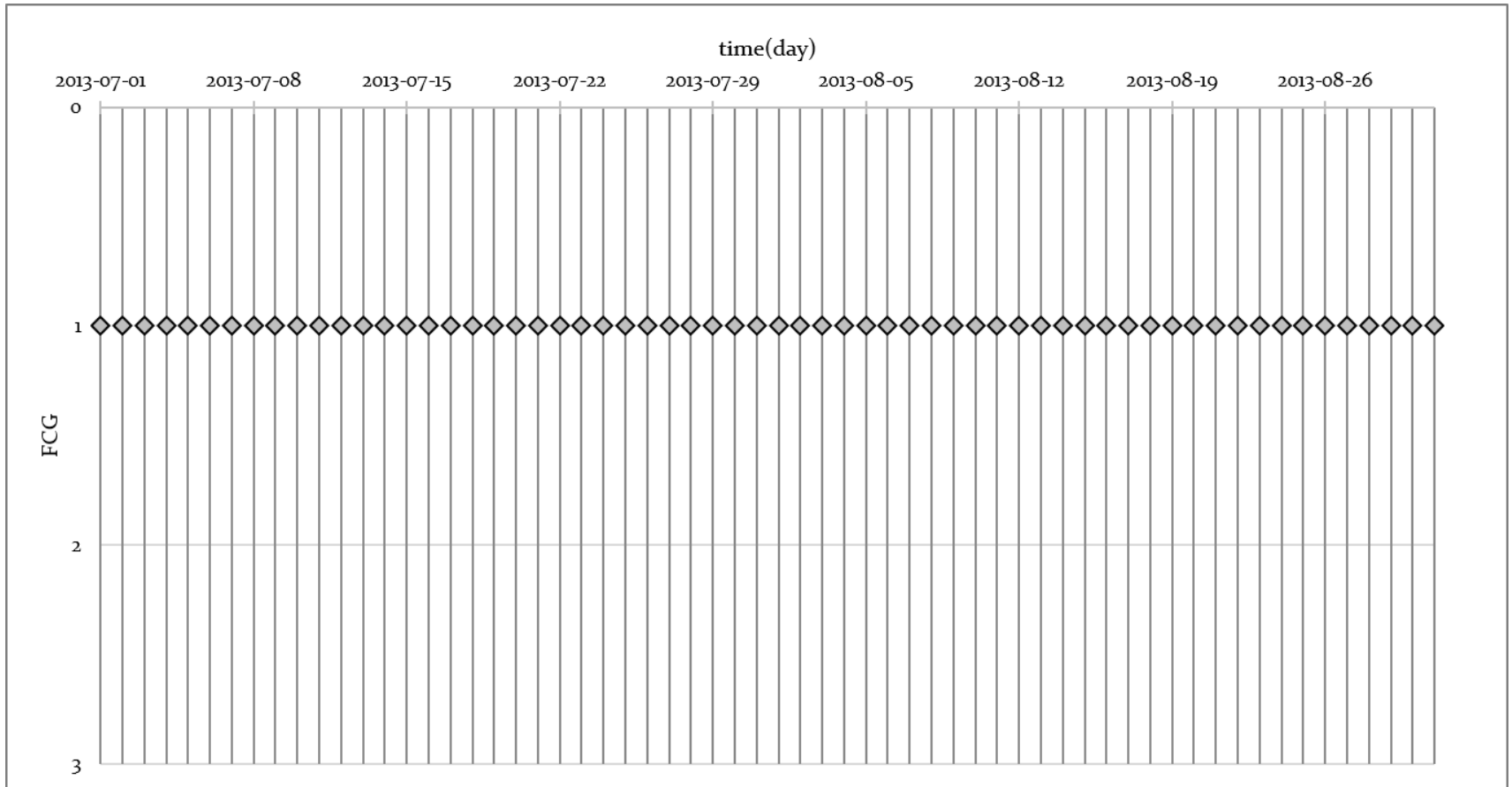


그림 5.2 구미보 상류 지점의 FCG 결과

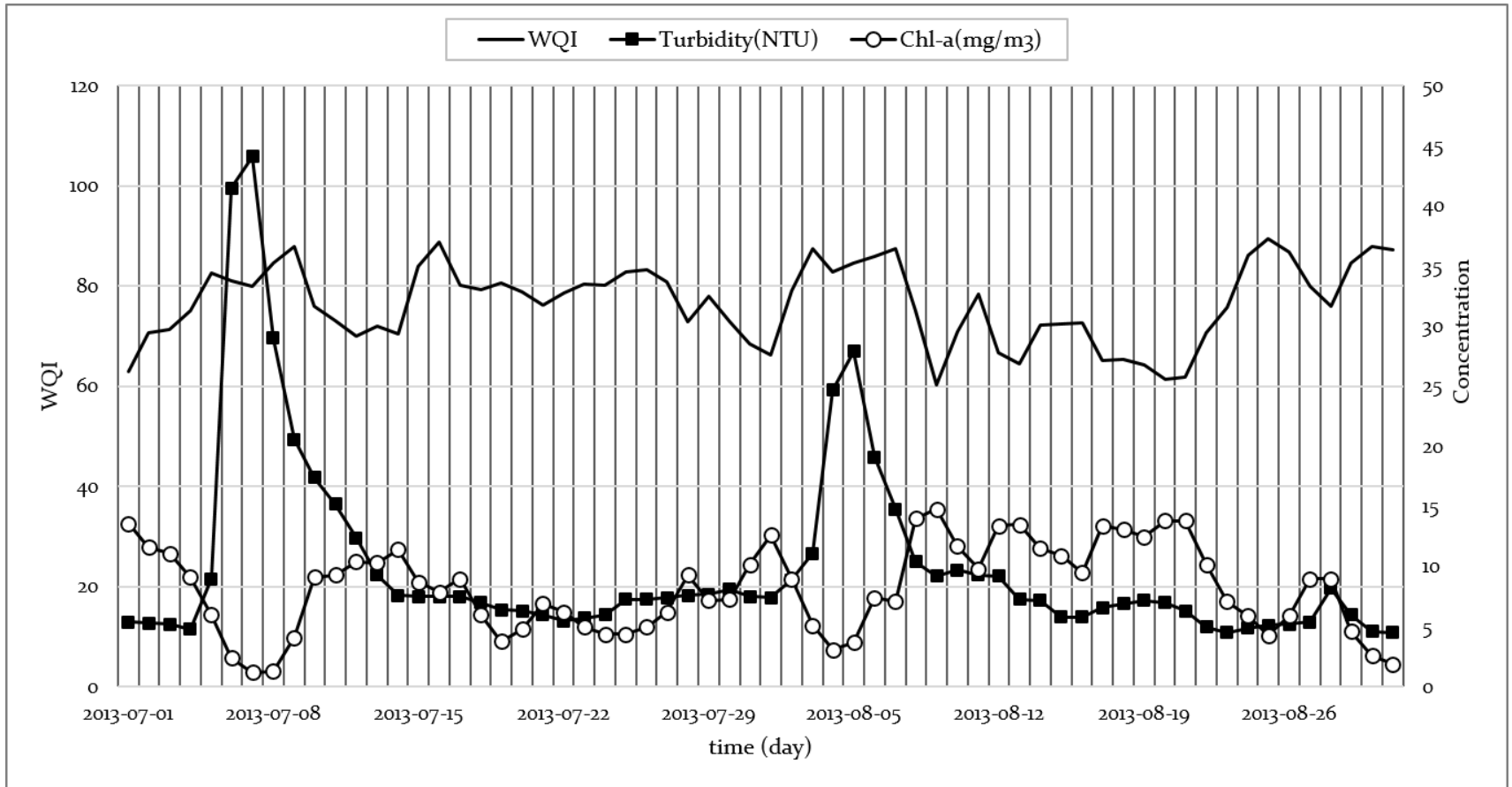


그림 5.3 구미보 상류 지점의 WQI, 탁도, 클로로필 a의 변화 거동

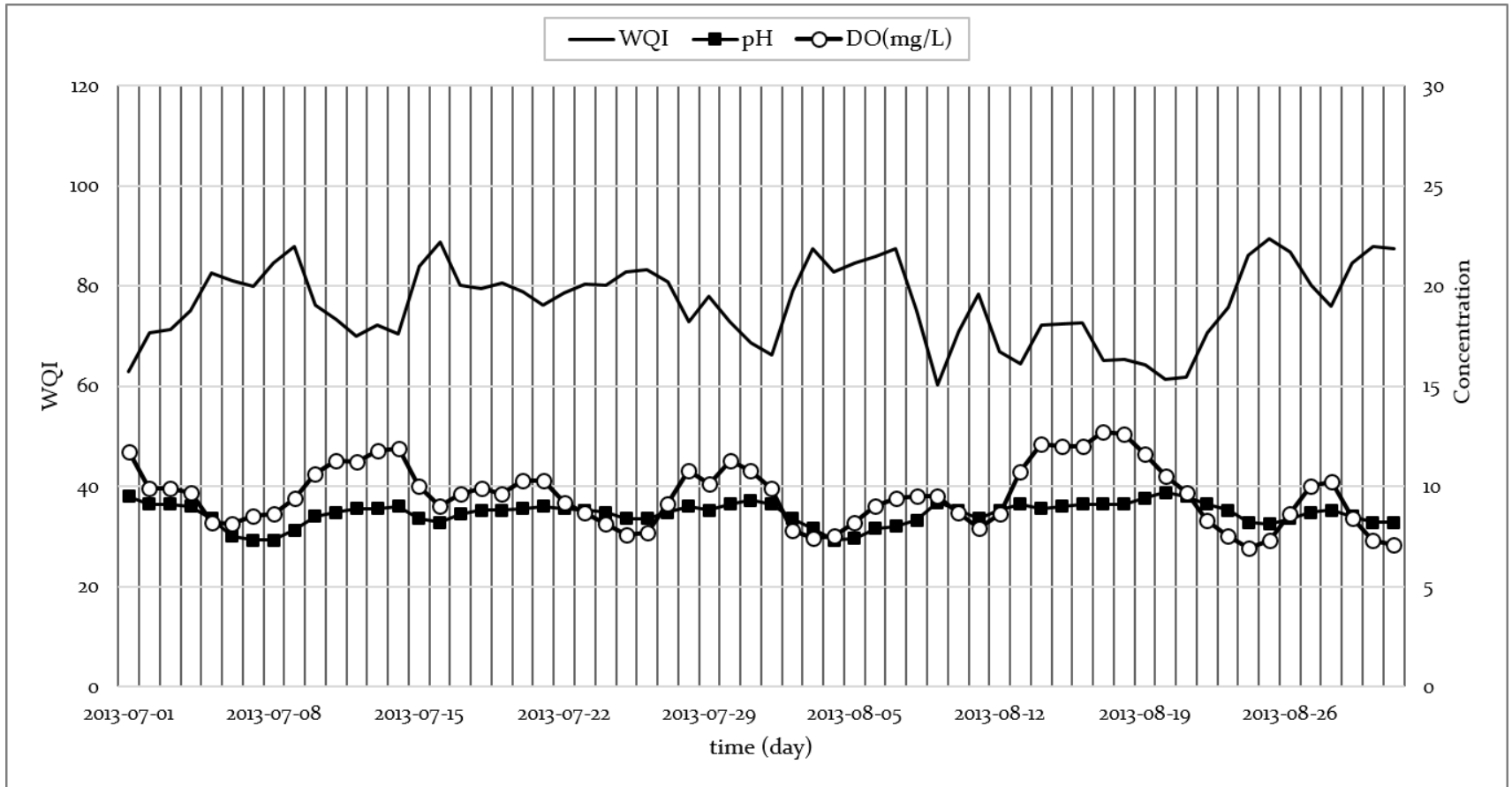


그림 5.4 구미보 상류 지점의 WQI, pH, DO의 변화 거동



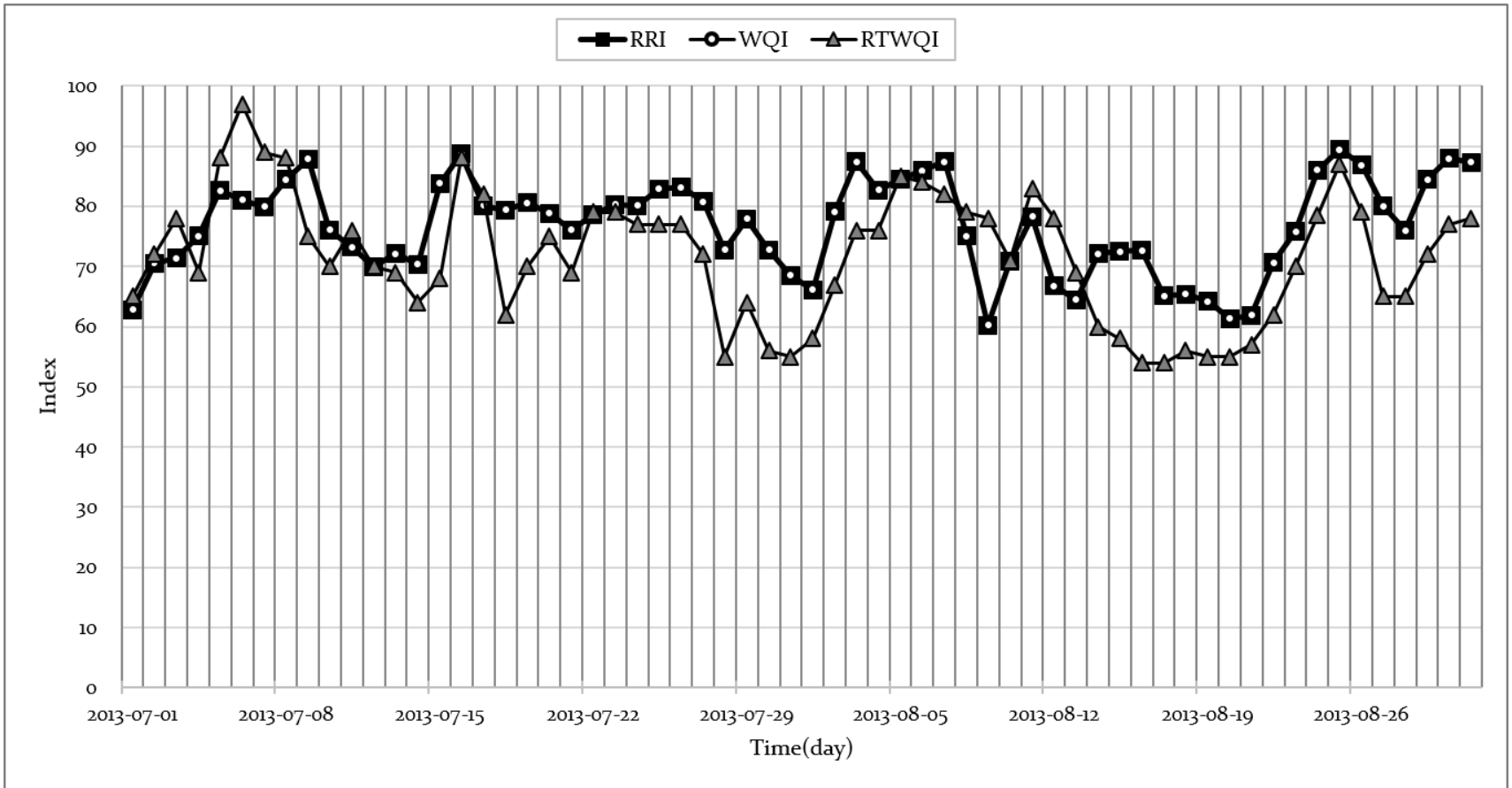


그림 5.5 구미보 상류 지점의 RRI, WQI, RTWQI의 변화 거동 표 5.3 구미보 상류 지점 적용 데이터 및 결과(계속)

표 5.3 구미보 상류 지점 적용 데이터 및 결과(계속)

일시	DO(mg/L)	pH	탁도 (NTU)	클로로필 a (mg/m3)	WQI	RRI	RRG	RTWQI	RTWQI 등급	유량 (m <sup>3</sup> /s)	FCG
2013-07-01	11.7	9.5	5.4	13.6	62.86	25.19	보통	65	양호	124.04	2
2013-07-02	9.9	9.1	5.3	11.6	70.57	30.34	보통	72	양호	117.30	2
2013-07-03	9.9	9.1	5.2	11.1	71.35	30.86	보통	78	양호	184.07	2
2013-07-04	9.7	9.0	4.8	9.1	75.06	33.34	보통	69	양호	239.05	2
2013-07-05	8.2	8.4	9.0	6.0	82.64	38.40	보통	88	우수	658.73	2
2013-07-06	8.1	7.5	41.5	2.4	81.09	37.37	보통	97	우수	1077.65	2
2013-07-07	8.5	7.3	44.1	1.2	79.95	36.61	보통	89	우수	571.41	2
2013-07-08	8.6	7.3	29.0	1.3	84.49	39.64	보통	88	우수	294.83	2
2013-07-09	9.4	7.8	20.6	4.1	87.90	41.92	보통	75	양호	259.15	2
2013-07-10	10.6	8.5	17.4	9.1	76.08	34.02	보통	70	양호	310.66	2
2013-07-11	11.3	8.7	15.2	9.3	73.18	32.08	보통	76	양호	256.74	2
2013-07-12	11.2	8.9	12.4	10.4	69.93	29.91	보통	70	양호	150.09	2
2013-07-13	11.8	8.9	9.3	10.3	72.09	31.36	보통	69	양호	210.66	2
2013-07-14	11.9	9.0	7.6	11.4	70.41	30.23	보통	64	양호	219.79	2
2013-07-15	10.0	8.4	7.5	8.7	83.83	39.20	보통	68	양호	367.31	2
2013-07-16	9.0	8.2	7.5	7.9	88.70	42.45	보통	88	우수	273.87	2

표 5.3 구미보 상류 지점 적용 데이터 및 결과(계속)

일시	DO(mg/L)	pH	탁도 (NTU)	클로로필 a (mg/m3)	WQI	RRI	RRG	RTWQI	RTWQI 등급	유량 (m <sup>3</sup> /s)	FCG
2013-07-17	9.6	8.6	7.5	9.0	80.08	36.70	보통	82	우수	246.54	2
2013-07-18	9.9	8.8	7.0	6.0	79.36	36.21	보통	62	양호	200.10	2
2013-07-19	9.6	8.8	6.4	3.8	80.55	37.01	보통	70	양호	192.02	2
2013-07-20	10.3	8.9	6.3	4.8	78.85	35.87	보통	75	양호	198.27	2
2013-07-21	10.3	9.0	6.0	6.9	76.11	34.04	보통	69	양호	229.65	2
2013-07-22	9.2	8.9	5.5	6.2	78.63	35.73	보통	79	양호	154.25	2
2013-07-23	8.7	8.8	5.7	5.0	80.28	36.83	보통	79	양호	192.60	2
2013-07-24	8.1	8.7	6.0	4.4	80.16	36.75	보통	77	양호	140.42	2
2013-07-25	7.6	8.4	7.3	4.4	82.86	38.55	보통	77	양호	269.16	2
2013-07-26	7.7	8.4	7.3	5.0	83.16	38.75	보통	77	양호	76.77	2
2013-07-27	9.1	8.7	7.4	6.2	80.74	37.13	보통	72	양호	179.25	2
2013-07-28	10.8	9.0	7.6	9.3	72.79	31.82	보통	55	보통	179.86	2
2013-07-29	10.1	8.8	7.7	7.2	77.90	35.24	보통	64	양호	111.16	2
2013-07-30	11.3	9.1	8.1	7.3	72.78	31.82	보통	56	보통	138.48	2
2013-07-31	10.8	9.3	7.5	10.2	68.53	28.98	보통	55	보통	205.17	2
2013-08-01	9.9	9.1	7.4	12.6	66.16	27.39	보통	58	보통	292.20	2

표 5.3 구미보 상류 지점 적용 데이터 및 결과(계속)

일시	DO(mg/L)	pH	탁도 (NTU)	클로로필 a (mg/m3)	WQI	RRI	RRG	RTWQI	RTWQI 등급	유량 (m <sup>3</sup> /s)	FCG
2013-08-02	7.8	8.4	8.9	9.0	79.08	36.03	보통	67	양호	335.13	2
2013-08-03	7.4	7.9	11.1	5.1	87.42	41.60	보통	76	양호	377.00	2
2013-08-04	7.5	7.3	24.7	3.1	82.74	38.47	보통	76	양호	127.57	2
2013-08-05	8.2	7.4	27.9	3.7	84.50	39.64	보통	85	우수	144.20	2
2013-08-06	9.0	7.9	19.1	7.4	85.95	40.61	보통	84	우수	140.27	2
2013-08-07	9.4	8.0	14.8	7.1	87.41	41.59	보통	82	우수	168.01	2
2013-08-08	9.5	8.3	10.4	14.0	75.02	33.31	보통	79	양호	248.80	2
2013-08-09	9.5	9.2	9.2	14.8	60.26	23.45	보통	78	양호	222.31	2
2013-08-10	8.7	8.8	9.7	11.7	70.94	30.59	보통	71	양호	182.48	2
2013-08-11	7.9	8.4	9.3	9.8	78.31	35.51	보통	83	우수	161.05	2
2013-08-12	8.6	8.8	9.2	13.4	66.80	27.82	보통	78	양호	126.60	2
2013-08-13	10.7	9.1	7.3	13.5	64.44	26.25	보통	69	양호	105.23	2
2013-08-14	12.1	8.9	7.2	11.5	72.15	31.40	보통	60	보통	84.51	2
2013-08-15	12.0	9.0	5.8	10.9	72.49	31.62	보통	58	보통	144.53	2
2013-08-16	12.0	9.1	5.8	9.5	72.64	31.73	보통	54	보통	141.43	2
2013-08-17	12.7	9.1	6.6	13.4	65.14	26.71	보통	54	보통	140.66	2

표 5.3 구미보 상류 지점 적용 데이터 및 결과(계속)

일시	DO(mg/L)	pH	탁도 (NTU)	클로로필 a (mg/m3)	WQI	RRI	RRG	RTWQI	RTWQI 등급	유량 (m <sup>3</sup> /s)	FCG
2013-08-18	12.6	9.1	6.9	13.1	65.40	26.89	보통	56	보통	124.92	2
2013-08-19	11.6	9.4	7.2	12.5	64.18	26.07	보통	55	보통	124.92	2
2013-08-20	10.5	9.7	7.0	13.8	61.30	24.15	보통	55	보통	124.92	2
2013-08-21	9.7	9.5	6.3	13.8	61.85	24.52	보통	57	보통	124.92	2
2013-08-22	8.3	9.1	5.0	10.2	70.61	30.37	보통	62	양호	124.92	2
2013-08-23	7.5	8.8	4.5	7.1	75.81	33.84	보통	70	양호	124.92	2
2013-08-24	6.9	8.2	4.9	5.9	86.04	40.68	보통	78.5	양호	124.92	2
2013-08-25	7.3	8.1	5.1	4.3	89.45	42.95	보통	87	우수	124.92	2
2013-08-26	8.6	8.4	5.2	5.9	86.81	41.19	보통	79	양호	124.92	2
2013-08-27	10.0	8.7	5.4	9.0	80.02	36.65	보통	65	양호	124.92	2
2013-08-28	10.2	8.8	8.2	9.0	75.99	33.96	보통	65	양호	124.92	2
2013-08-29	8.4	8.5	6.0	4.6	84.50	39.64	보통	72	양호	124.92	2
2013-08-30	7.3	8.2	4.6	2.6	87.97	41.96	보통	77	양호	124.92	2
2013-08-31	7.1	8.2	4.5	1.9	87.34	41.54	보통	78	양호	124.92	2

### 5.2.2 강정고령보 상류 지점

강정고령보 상류 지점은 5 월부터 6 월까지 두 달간의 데이터를 이용하였다. 분변성 대장균 모델을 적용하여 예측된 FCG 의 결과는 그림 5.6 과 같다. 구미보 상류 지점과는 다르게 1 등급은 34 일, 2 등급은 26 일 그리고 3 등급은 1 일로 나타나 다양한 분포를 보임을 확인할 수 있었다.

다음으로 수질 지수 모델을 적용하였다. 입력된 수질 데이터의 분포 특성은 표 5.4 과 같으며 본 모델에서 제시하는 수질 등급 별 데이터 수는 표 5.5 과 같다. 수질 지수 모델의 결과인 WQI 와 수질 인자는 그림 5.7, 5.8 과 같다. 본 적용 지점에서는 DO 는 항상 우수 등급을 유지하는 것으로 나타났고 pH 와 탁도는 우수, 양호, 보통 등급에 고루 분포하고 있었다. 또한, 클로로필 a 는 양호, 보통, 불량에 고루 분포하고 있으나 보통에 해당하는 수가 가장 많았다. 본 적용지점에서도 각 수질 인자와 WQI 의 상관계수를 계산하였고 그 결과, 구미보 상류 지점의 적용 시와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 클로로필 a 와 WQI 의 피어슨 상관계수가  $-0.85$  로 네 개의 인자 중 클로로필 a 가 WQI 에 가장 큰 영향을 미침을 확인하였고 pH 와 WQI 의 피어슨 상관계수는  $-0.67$  로 유의한 상관관계가 있음을 확인하였다. 이 경우에도 DO 와 탁도의 상관계수가 작게 나타났다. 표 5.5 와 같이 DO 는 전체 61 일의 데이터가 모두 우수 등급에 해당하고 있어 WQI 를 산정하는데 있어 많은 영향을 미치지 못하였고, 탁도의 경우에는 대부분의 기간에 변화의 정도가 크지 않고 클로로필 a 와 그 영향이 상쇄되었기 때문이다. 탁도가 5 월 29 일과 6 월 29 일에 급하게 상승하였으나 동시에 클로로필 a 가 감소하여 RRI 가 크게 감소하지 못함을 확인할 수 있었다.

그림 5.9 는 RRI 와 WQI, 그리고 RTWQI 를 나타낸다. 알고리즘에 의해 FCG 와 WQI 가 RRI 로 변환되었다. 이 중 FCG 가 2 등급이고 WQI 가 50 보다 큰 값인 경우와 FCG 가 3 등급이고 WQI 가 16.6 보다 큰 값인 경우에는 알고리즘에 제안된 식 (4.26)과 (4.27)에 따라 RRI 가

낮게 조정되어 계산되었다. RRI 는 RTWQI 와 비교되었는데 RRI 는 FCG 가 2 등급 혹은 3 등급일 때 평균 52.5 점 정도 낮은 지수를 산정하여 RRI 가 분변성 대장균을 고려하여 RTWQI 보다 보수적인 결과를 산정할 수 있음을 확인하였다. RRI 는 RRG 로 다시 변환되었는데 우수 등급은 존재하지 않았고 양호 등급은 29 일, 보통 등급은 31 일 그리고 불량 등급은 1 일에 해당되었다. 보통 FCG 가 2 등급 혹은 3 등급일 때 RRI 의 등급이 낮아짐을 확인하였다. 모든 적용 결과는 표 5.6 에 수록하였다.

표 5.5 강정고령보 상류 지점 수질 데이터 특성

	용존산소량	pH	탁도	클로로필 a
평균	9.40	8.22	19.24	23.71
최소값	7.80	6.90	4.70	10.40
최대값	11.80	9.00	50.70	80.50
표준편차	0.99	0.58	10.54	16.44

표 5.6 강정고령보 상류 지점 수질 인자의 등급별 해당 수

	용존산소량	pH	탁도	클로로필 a
우수	61	17	13	0
양호	0	19	29	14
보통	0	23	18	33
불량	0	2	1	14



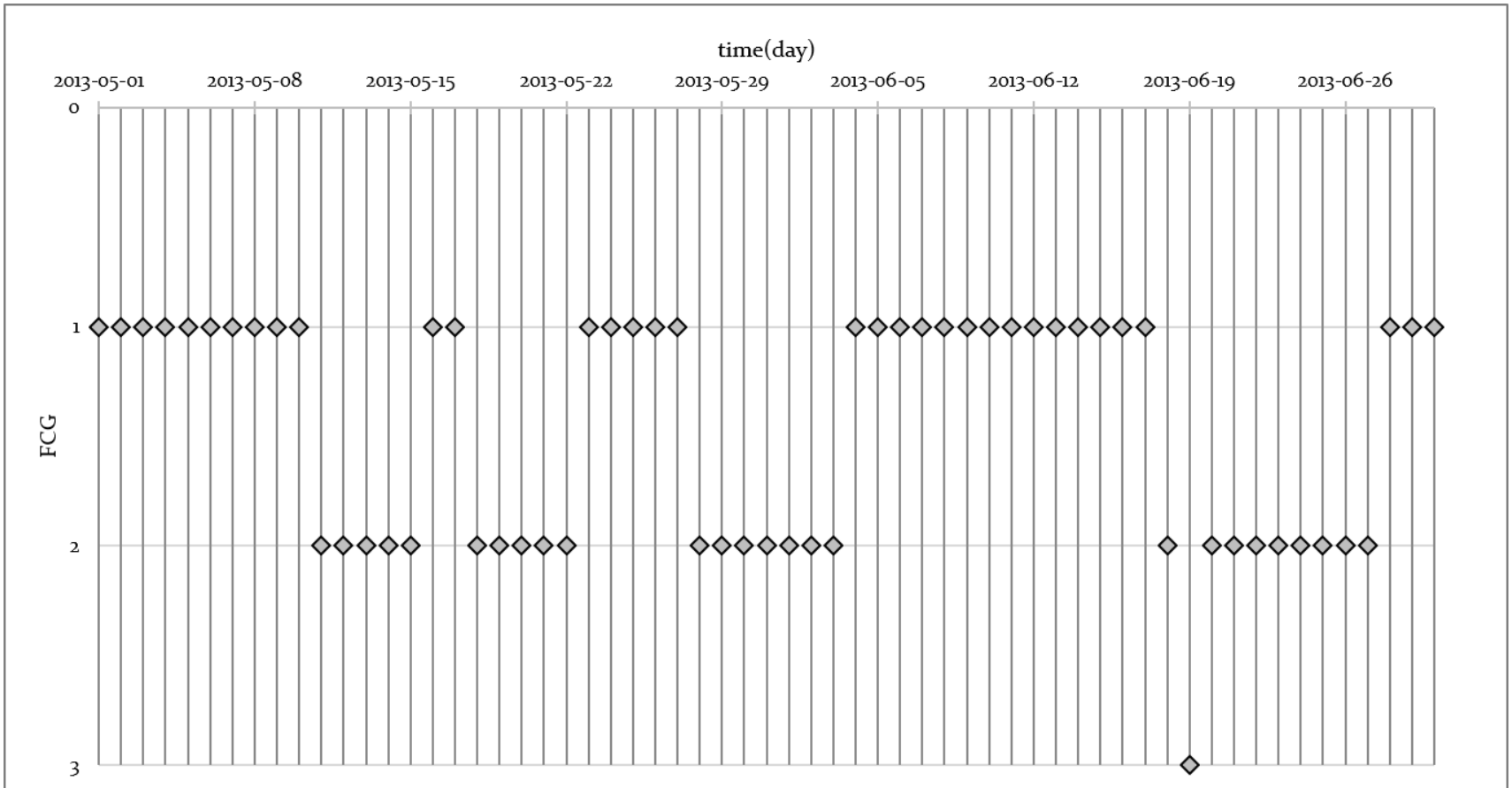


그림 5.6 강정고령보 상류 지점의 FCG 결과

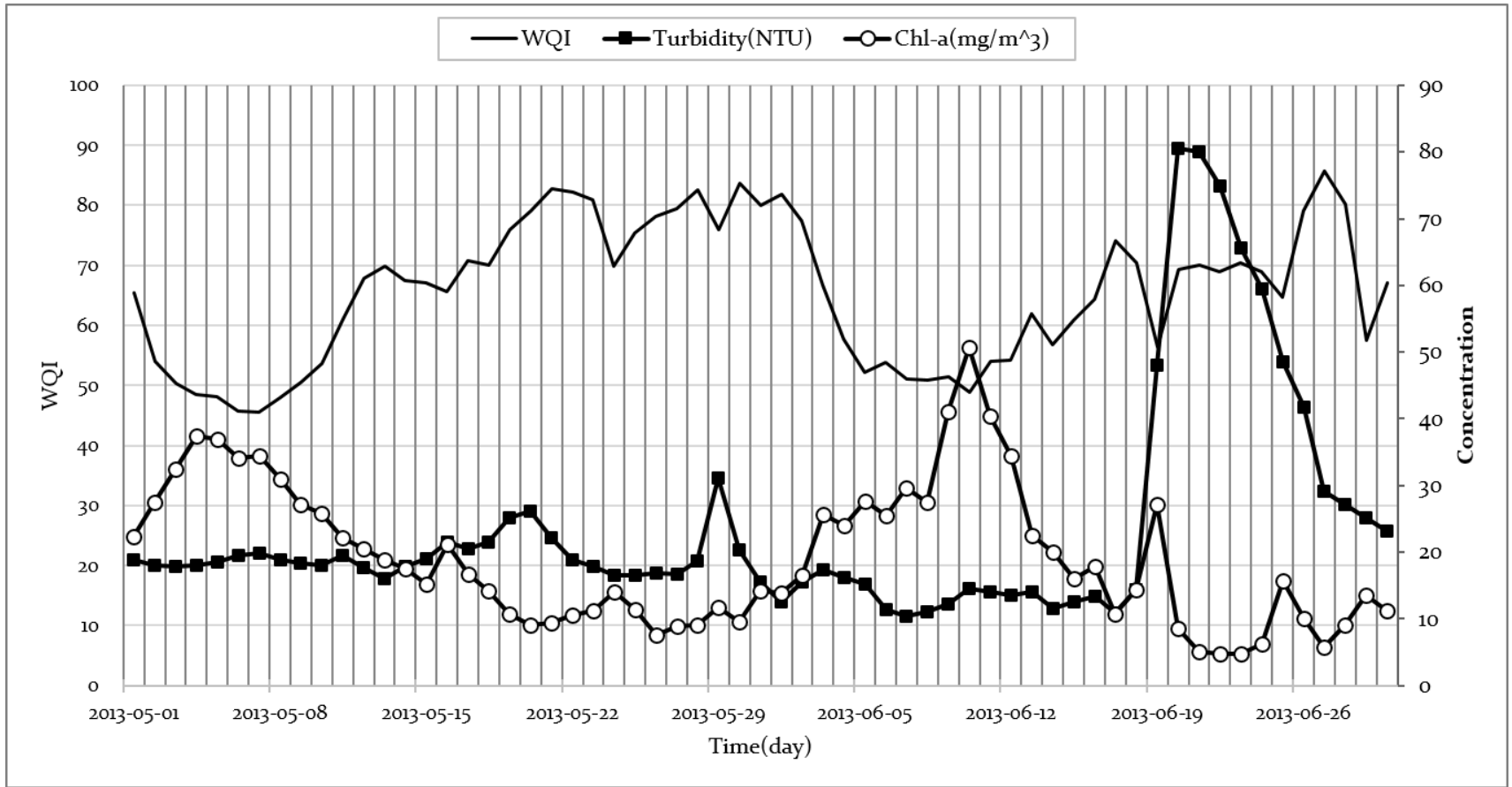


그림 5.7 강정고령보 상류 지점의 WQI, 탁도, 클로로필 a의 변화 거동

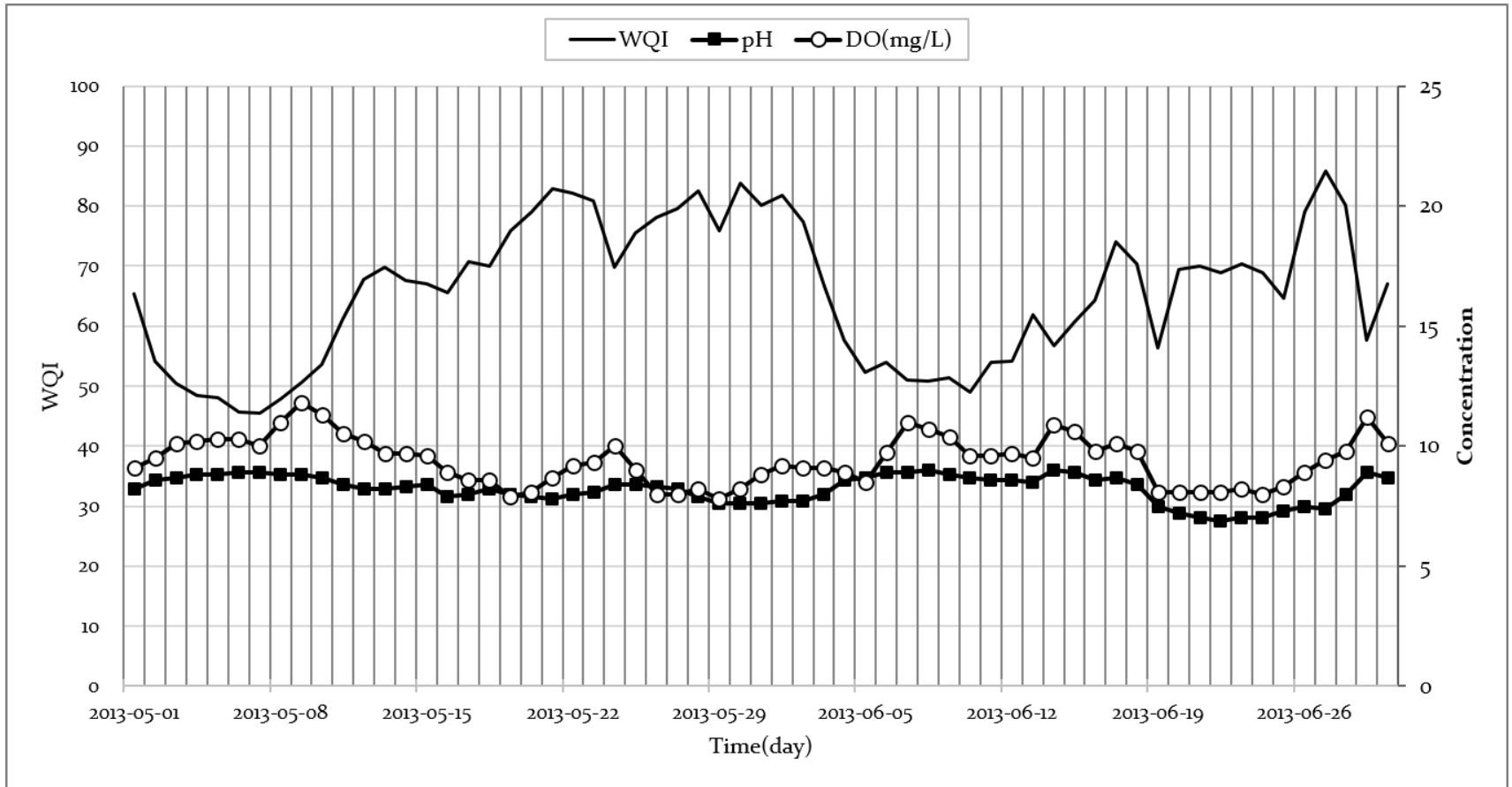


그림 5.8 강정고령보 상류 지점의 WQI, pH, DO의 변화 거동

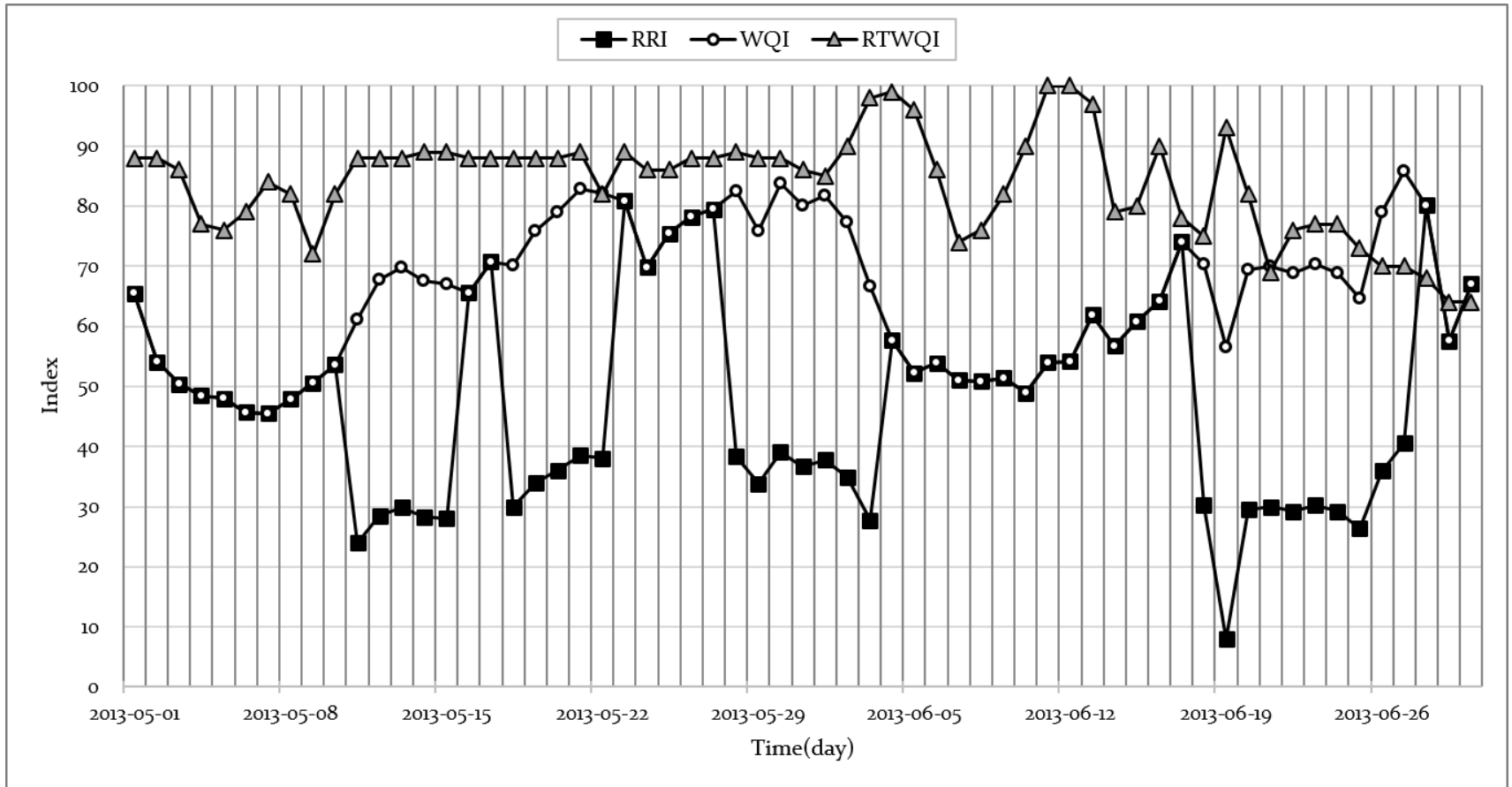


그림 5.9 강정고령보 상류 지점의 RRI, WQI, RTWQI의 변화 거동

표 5.6 강정고령보 상류 지점 적용 데이터 및 결과(계속)

일시	DO(mg/L)	pH	탁도 (NTU)	클로로필 a (mg/m3)	WQI	RRI	RRG	RTWQI	RTWQI 등급	유량 (m <sup>3</sup> /s)	FCG
2013-05-01	9.1	8.2	18.8	22.4	65.46	65.46	양호	88	우수	172.27	1
2013-05-02	9.5	8.6	18.1	27.43	51.96	51.96	양호	88	우수	211.54	1
2013-05-03	10.1	8.7	17.9	32.46	50.38	50.38	양호	86	우수	146.56	1
2013-05-04	10.2	8.8	18	37.5	48.47	48.47	보통	77	양호	88.24	1
2013-05-05	10.3	8.8	18.6	36.9	48.05	48.05	보통	76	양호	134.65	1
2013-05-06	10.3	8.9	19.5	34.1	45.74	45.74	보통	79	양호	111.55	1
2013-05-07	10	8.9	19.9	34.4	45.54	45.54	보통	84	우수	151.9	1
2013-05-08	11	8.8	18.8	30.9	47.92	47.92	보통	82	우수	240.8	1
2013-05-09	11.8	8.8	18.4	27.1	50.59	50.59	양호	72	양호	265.42	1
2013-05-10	11.3	8.7	18.1	25.9	53.64	53.64	양호	82	우수	349.55	1
2013-05-11	10.5	8.4	19.5	22.2	61.06	23.99	보통	88	우수	275.84	2
2013-05-12	10.2	8.2	17.73333	20.5	67.83	28.51	보통	88	우수	318.18	2
2013-05-13	9.7	8.2	15.96667	18.9	69.82	29.84	보통	88	우수	193.35	2
2013-05-14	9.7	8.3	17.9	17.5	67.54	28.32	보통	89	우수	330.24	2
2013-05-15	9.6	8.4	19.1	15.2	67.08	28.01	보통	89	우수	385.96	2

표 5.6 강정고령보 상류 지점 적용 데이터 및 결과(계속)

일시	DO(mg/L)	pH	탁도 (NTU)	클로로필 a (mg/m3)	WQI	RRI	RRG	RTWQI	RTWQI 등급	유량 (m <sup>3</sup> /s)	FCG
2013-05-16	8.9	7.9	21.5	21.2	68.62	68.62	양호	88	우수	22.79	1
2013-05-17	8.6	8	20.5	16.7	70.77	70.77	양호	88	우수	93.08	1
2013-05-18	8.6	8.2	21.5	14.2	70.07	30.01	보통	88	우수	207.53	2
2013-05-19	7.9	8	25.1	10.8	75.94	33.93	보통	88	우수	300.68	2
2013-05-20	8.1	7.9	26.1	9	79.08	36.02	보통	88	우수	129.91	2
2013-05-21	8.7	7.8	22.2	9.4	82.80	38.51	보통	89	우수	216.52	2
2013-05-22	9.2	8	18.8	10.5	82.19	38.10	보통	82	우수	146.01	2
2013-05-23	9.3	8.1	17.8	11.2	80.85	80.85	양호	89	우수	22.89	1
2013-05-24	10	8.4	16.5	14.1	69.85	69.85	양호	86	우수	59.26	1
2013-05-25	9	8.4	16.6	11.4	75.45	75.45	양호	86	우수	135.3	1
2013-05-26	8	8.3	16.8	7.6	78.17	78.17	양호	88	우수	140.95	1
2013-05-27	8	8.2	16.7	8.9	79.51	79.51	양호	88	우수	140.83	1
2013-05-28	8.2	7.9	18.7	9	82.55	38.34	보통	89	우수	507.2	2
2013-05-29	7.8	7.6	31.1	11.8	75.86	33.87	보통	88	우수	635.81	2
2013-05-30	8.2	7.6	20.4	9.5	83.72	39.12	보통	88	우수	282.41	2

표 5.6 강정고령보 상류 지점 적용 데이터 및 결과(계속)

일시	DO(mg/L)	pH	탁도 (NTU)	클로로필 a (mg/m3)	WQI	RRI	RRG	RTWQI	RTWQI 등급	유량 (m <sup>3</sup> /s)	FCG
2013-05-31	8.8	7.6	15.6	14.2	80.03	36.66	보통	86	우수	218.39	2
2013-06-01	9.2	7.7	12.5	13.9	81.79	37.84	보통	85	우수	208.63	2
2013-06-02	9.1	7.7	15.5	16.6	77.41	34.91	보통	90	우수	99.99	2
2013-06-03	9.1	8	17.3	25.6	66.70	27.76	보통	98	우수	182.31	2
2013-06-04	8.9	8.6	16.25	24	57.66	57.66	양호	99	우수	177.63	1
2013-06-05	8.5	8.7	15.2	27.6	52.24	52.24	양호	96	우수	217.82	1
2013-06-06	9.75	8.9	11.4	25.5	53.89	53.89	양호	86	우수	16.2	1
2013-06-07	11	8.9	10.4	29.7	51.06	51.06	양호	74	양호	141.31	1
2013-06-08	10.7	9	11.1	27.5	50.84	50.84	양호	76	양호	272.54	1
2013-06-09	10.4	8.8	12.2	41.1	51.43	51.43	양호	82	우수	172.15	1
2013-06-10	9.6	8.7	14.6	50.7	51.92	51.92	양호	90	우수	224.44	1
2013-06-11	9.6	8.6	14	40.4	53.97	53.97	양호	100	우수	315.7	1
2013-06-12	9.7	8.6	13.6	34.4	54.18	54.18	양호	100	우수	301.64	1
2013-06-13	9.5	8.5	14.1	22.5	61.89	61.89	양호	97	우수	78.08	1
2013-06-14	10.9	9	11.5	20.1	56.74	56.74	양호	79	양호	307.93	1

표 5.6 강정고령보 상류 지점 적용 데이터 및 결과(계속)

일시	DO(mg/L)	pH	탁도 (NTU)	클로로필 a (mg/m3)	WQI	RRI	RRG	RTWQI	RTWQI 등급	유량 (m <sup>3</sup> /s)	FCG
2013-06-15	10.6	8.9	12.6	16.1	60.82	60.82	양호	80	우수	196.01	1
2013-06-16	9.8	8.6	13.4	17.8	64.26	64.26	양호	90	우수	131.16	1
2013-06-17	10.1	8.7	10.9	10.8	74.03	74.03	양호	78	양호	15.4	1
2013-06-18	9.8	8.4	14.4	14.4	70.40	30.22	양호	75	양호	1005.75	2
2013-06-19	8.1	7.5	48.1	27.1	56.44	7.93	불량	93	우수	3225.69	3
2013-06-20	8.1	7.2	80.5	8.5	69.34	29.52	양호	82	우수	1236.7	2
2013-06-21	8.1	7	80	5.1	70.05	30.00	양호	69	양호	497.04	2
2013-06-22	8.1	6.9	74.9	4.7	68.93	29.25	양호	76	양호	732.4	2
2013-06-23	8.2	7	65.6	4.7	70.41	30.24	양호	77	양호	431.91	2
2013-06-24	8	7	59.5	6.3	68.89	29.22	양호	77	양호	479.49	2
2013-06-25	8.3	7.3	48.6	15.7	64.68	26.40	양호	73	양호	497.13	2
2013-06-26	8.9	7.5	41.7	10.1	79.03	35.99	양호	70	양호	90.85	2
2013-06-27	9.4	7.4	29.1	5.8	85.79	40.51	양호	70	양호	288.25	2
2013-06-28	9.8	8	27.1	9.1	80.17	80.17	양호	68	양호	106.46	1
2013-06-29	11.2	8.9	25.1	13.6	57.56	57.56	양호	64	양호	186.63	1
2013-06-30	10.1	8.7	23.1	11.3	67.04	67.04	양호	64	양호	98.48	1



### 5.2.3 RTWQI 와 RRI 의 비교

RRI와 RTWQI는 지수를 산정하는데 있어서 크게 세 가지 차이가 존재한다. 우선 두 지수는 고려하는 수질 인자가 다르다. RRI는 DO, pH, 탁도, 클로로필 a 그리고 분변 대장균을 고려하며 RTWQI는 DO, pH, 수온, 전기전도도, TN, TP, TOC를 고려한다. RRI는 RTWQI가 대장균을 고려하지 않는다는 한계를 보완하기 위하여 분변성 대장균 모델을 통해 FCG를 예측하였으며 FCG는 RRI와 RTWQI간의 중요한 차이를 만든다. 두 번째로 두 지수를 각각 산정하는 방법이 다르다. RTWQI는 단일한 수질 기준의 범위를 정하여 그것을 초과하는 정도에 따라 지수를 계산한다. 반면, RRI는 네 개의 수질 등급 기준에 따라 그 범위를 정하여 현재의 수질 상태가 어떠한 상태에 속하는지를 계산한다. 이 때, RRI는 수질 등급 기준의 모호성과 불확실성을 보완하기 위하여 퍼지 합성 방법을 사용하여 계산한다. 마지막으로 RRI와 RTWQI의 등급이 서로 다르다. RRI의 등급은 RRG이며 RRG는 수체와의 접촉 안전성 여부에 따라 네 등급으로 나뉘는 반면, RTWQI는 다섯 개의 등급으로 나뉘며 이는 표 5.7에 제시되어 있다. 그러나 RTWQI의 다섯 개의 등급은 그 해석에 있어서도 모호함을 지닌다. RRG는 각 등급마다 가능한 활동의 종류를 언급하나 RTWQI는 그런 점이 부족하여 시민들의 주관에 따라 이를 해석해야 하는 어려움이 존재한다.

두 인자의 차이로 인해 두 인자의 값을 비교하는 데에는 한계가 존재하나, 두 인자 모두 하천 레크리에이션 활동을 중점에 두고 수질을 종합적으로 평가하는 인자라는 측면에서 비교에 의의가 있었다. 또한, 서로의 값 자체보다는 두 지수의 수질 상태에 따라 변화하는 거동을 비교해 볼 수 있었다. 이러한 RRI와 RTWQI의 변화 거동은 각 지점마다 조금씩 다른데 그 이유는 지점마다 각 수질 지수에서 포함하고 있는 수질 인자들의 특성들이 다르기 때문이다. 또한, FCG에 따라 RRI가 하향 조정됨으로써 RTWQI와 큰 차이를 보이기도 하였다.

표 5.7 RTWQI의 등급

등급	RTWQI	의미
우수	80-100	오염물질이 거의 없는 청정수질의 상태로 항시 친수 활동이 적합함.
양호	60-79	비교적 양호한 수질을 유지하고 있어 친수활동에 적합함.
보통	40-59	대체로 양호한 수질이나 때때로 오염물질이 유입되어 친수 활동에 영향을 미칠 수 있음.
주의	20-39	빈번한 오염물질의 유입으로 수질이 오염되어 친수 활동에 주의가 필요함.
불량	0-19	수질오염도가 높은 상태로 친수 활동에 부적합함.

## 6. 결론 및 향후 연구 계획

본 연구에서는 하천에서의 레크리에이션 활동을 즐기는 시민들에게 수질적인 안전과 쾌적함을 제공하고자 종합적인 수질 정보를 하천 레크리에이션 지수, 즉 RRI라고 명명하고 이를 산정하는 모델인 RRIM을 개발하였다. 기존에 존재하는 레크리에이션에 초점을 맞춘 수질정보시스템은 종합적인 수질의 정도를 나타내지 못하거나 수질 기준 상에 존재하는 모호함과 불확실성을 고려하지 않은 점, 그리고 수상 레크리에이션 활동에 많은 영향을 미치는 대장균과 같은 중요 수질 지표의 정보를 종합하지 않았다는 점 등의 문제점이 있었다. RRIM은 이를 보완하기 위하여 두 개의 구성 모델, 분변성 대장균 모델과 수질 지수 모델을 통해 다양하고 수상 레크리에이션에 중요한 수질 지표를 모두 고려하여 종합된 수질 정보를 RRI와 RRIG로 제공하고자 하였다. 또한, 퍼지 집합 이론의 적용을 통해 수질 기준 상의 모호함과 불확실성을 RRI 산정에 반영하고자 하였다.

본 연구에서 개발된 분변성 대장균 모델은 분변성 대장균의 등급인 FCG를 예측하는 모델로 로지스틱 회귀분석을 이용하여 개발되었다. 그 결과 분변성 대장균 모델은 0.63의 정분류율을 보였다. 수질 지수 모델은 하천 레크리에이션에 중요한 수질 인자인 DO, pH, 탁도, 클로로필 a를 종합된 정보인 WQI로 나타내는 모델로 퍼지 합성 방법을 이용하여 개발되었다. WQI는 퍼지 합성 방법이 적용되지 않았을 때와 비교하였을 때 수질 기준의 모호함을 잘 반영하고 있음을 확인하였다. 이 두 모델의 결과인 FCG와 WQI를 종합하여 최종적으로 RRI와 RRG가 산정된다. 낙동강의 구미보 상류 지점와 강정고령보 상류 지점에 RRIM을 적용한 결과, 수질 인자의 변동성, 특히 클로로필 a와 pH의 변동을 잘 반영하고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 FCG 등급이 모두 1등급으로 나온 구미보 상류 지점의 경우, RRI와 RTWQI를 비교하였을 때 피어슨 상관계수

0.65의 유의한 상관관계를 보였다. 그러나 강정고령보 상류 지점에서는 FCG 등급이 2등급과 3등급을 보일 때 RRI 계산 시 결정적인 영향을 미쳤으며 그에 따라 RRI가 RTWQI에 비해 보수적인 결과를 낼 수 있음을 확인할 수 있었다.

RRIM은 시민들로 하여금 하천을 안전하고 쾌적하게 이용할 수 있도록 돕는다는 점에서 하천 이용의 효율성을 높이는 데에 기여할 수 있다. 또한, RRIM은 기존 존재하는 모델들과 지수를 산정하는 방법에 있어 새로운 방법을 제시하였다는 점에서 차별성을 두고 있다. 국내에 기존 존재하는 RTWQI와 비교하였을 때, 등급을 제시하는 방법에 있어 가능한 활동을 구체적으로 서술하고 있어 시민들이 더 많은 활용을 할 수 있도록 하였다. 또한, 고려하는 수질 인자에 대장균 지표를 포함함하고 수질 기준의 모호함을 반영함에 있어 더 바람직한 지수를 산정한다.

향후 연구 계획으로 우선 RRIM의 분변성 대장균 모델의 정확도를 높이기 위한 방안을 생각할 수 있다. 분변성 대장균 모델의 개발에 있어서 가장 어려웠던 점은 데이터의 수집이었다. 분변성 대장균 모델의 개발을 위하여 양질의 수질 및 유량 데이터의 확보가 필요하였으나 계측이 되지 않거나 합리적이지 못한 수치들이 존재함으로 인해 통계 분석에 어려움이 존재하였다. 따라서 추후 수질 데이터의 추가 수집과 데이터의 노이즈를 제거하는 통계적 기법들로 분변성 대장균 모델의 정확도를 높일 수 있을 것이다.

두 번째로 RRIM의 적용 시 검증과 관련하여 추가 연구를 진행할 수 있다. RRIM 적용 시 이것을 검증할 수 있는 방법이 명확히 존재하지 않아 어려움이 존재하였다. 그러나 추후 연구를 통해 실제 하천 이용자들을 대상으로 설문조사를 하거나 수상 활동 후 이들의 추적을 통해 질병 발생 횟수를 조사하는 등의 방법을 통해 RRI를 검증할 수 있을 것으로 기대된다.

## 7. 참고문헌

김윤영(2011). 수상관광 레저산업 활성화 방안: 내수면 무동력 수상관광 레저활동을 중심으로., 한국문화관광연구원.

김윤영(2011). 수상관광 이용 활성화를 위한 정책 방향 연구., 한국문화관광연구원.

김좌관(2010). 수질오염개론., 동화기술.

성웅현(2001). 응용 로지스틱 회귀분석., 탐진.

안태석 등(2008). 물놀이지역 수질조사 관리 매뉴얼., 환경부.

이태관 등(2012). 수생태 안전성 향상을 위한 조류저감기술., 한국환경공단.

최지용(1996). 종합수질지표의 개발., 한국환경기술개발원.

환경부(2012). 수질측정망 운영계획., 환경부.

Allison, P. D. (2012). *Logistic regression using SAS: Theory and application*. SAS Institute.

Brion, G. M., and Lingireddy, S. (2003). "Artificial neural network modelling: a summary of successful applications relative to microbial water quality." *Health-related Water Microbiology*, Vol. 47, No. 3, pp.

235–240.

Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A. and Tozer, R. (1970). “A water quality index – do we dare?.” *Water and Sewage Works*, Vol. 117, No. 10, pp. 339–343.

Chang, N.B. Chen, H.W. and Ning, S.K. (2001). “Identification of river water quality using the Fuzzy Synthetic Evaluation approach.” *Journal of Environmental Management*, Vol. 63, No. 3, pp. 293–305.

Christensen, V. G., Jian, X., and Ziegler, A. C. (2000). *Regression analysis and real-time water-quality monitoring to estimate constituent concentrations, loads, and yields in the Little Arkansas River, south-central Kansas, 1995–99*. US Department of the Interior, U.S. Geological Survey.

Clark, M. L., and Norris, J. R. (2000). *Occurrence of fecal coliform bacteria in selected streams in Wyoming, 1990–99* (No. 4198). U.S. Geological Survey.

Crowther, J., Kay, D., and Wyer, M. (2001). “Relationships between water quality and environmental conditions in coastal recreational waters: The Fylde Coast, United Kingdom.” *Water Resources*, Vol. 35, No. 17, pp. 4029–4038.

Dinius S. H. (1987). “Design of an Index of Water Quality.” *Water Resources Bulletin*, Vol. 23, No. 5, pp. 833–842.

Dunnette, D. A. (1979). "A Geographically Variable Water Quality Index Used in Oregon." *Journal of the Water Pollution Control Federation*, Vol. 51, No. 1, p. 5361.

Eleria, A., and Vogel, R. M. (2005). "Predicting fecal coliform bacteria levels in the Charles River, Massachusetts, USA." *Journal of American Water Resources*, Vol. 41, No. 5, pp. 1195–1209.

Ferguson, C. M., Coote, B. G., Ashbolt, N. J., and Stevenson, I. M. (1996). "Relationships between indicators, pathogens and water quality in an estuarine system." *Water Resources*, Vol. 30, No. 9, pp. 2045–2054.

Francy, D. S., and Darner, R. A. (2007). *Nowcasting beach advisories at Ohio Lake Erie beaches*. U. S. Geological Survey.

Harkins, R. D. (1974). "An objective water quality index." *Journal of Water Pollutants*, Vol. 46, No. 3, pp. 588–591.

He, L. M., and He, Z. L. (2008). "Water quality prediction of marine recreational beaches receiving watershed baseflow and stormwater runoff in Southern California, USA." *Water research*, Vol. 42, No. 10–11, pp. 2563–2573.

Horton, R. K. (1965). "An index number system for rating water quality." *Journal of Water Pollution Control Federation*, Vol. 37, No. 3, 300–305.

House, M.A., and Ellis, J. B. (1987). “The development of Water Quality Indices for Operational Management.” *Water Science and Technology*, Vol. 19, No. 9, pp. 145–154.

Icaga, Y. (2007). “Fuzzy evaluation of water quality classification.” *Ecological Indicators*, Vol. 7, No. 3, pp. 710–718.

Joung, H. M., Miller, W. W., Mahannah, C. N., and Guitjens, J. C. (1979). “A Generalized Water Quality Index Based on Multivariate Factor Analysis.” *Journal of Environmental Quality*, Vol. 8, No. 1, pp. 95–100.

Kim, K. B., Kim, J. H., Jeong, Y., Jeong, Y. S., and Chung, S. J. (2012). “Prediction of Coastal Fecal Indicator Bacteria Concentrations Using Multivariate Data Analysis.” *Journal of Environmental Science and Engineering A*, Vol. 1, No. 4, pp. 440–447.

King, G., and Zeng, L. (2001). “Logistic regression in rare events data.” *Political Analysis*, Vol. 9, pp. 137–163.

Lermontov, A., Yokoyama, L., Lermontov, M., and Machado, M. A. S. (2009). “River quality analysis using fuzzy water quality index: Ribeira do Iguape river watershed, Brazil.” *Ecological Indicators*, Vol. 9, No. 6, pp. 1188–1197.

Lu, R. S., Lo, S. L., and Hu, J. Y. (1999). “Analysis of reservoir water quality using fuzzy synthetic evaluation.” *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 13, No. 5, pp.



327–336.

Maimone, M. Crockett, C. S. and Cesanek, W. E. (2007). “ PhillyRiverCast: A Real–Time Bacteria Forecasting Model and Web Application for the Schuylkill River.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 133, No. 6, pp. 542–549.

Mas, D. M. L. and Ahlfeld, D. P. (2007). “Comparing artificial neural networks and regression models for predicting faecal coliform concentrations.” *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 52, No. 4, pp. 713–731.

McDuffie, B., & Haney, J. T. (1973). “A proposed river pollution index.” In *Spring 1973 Meeting of the American Chemical Society, Division of Water, Air and Waste Chemistry*.

Moore, D. R., and MacDonald, D. (1999). *Ambient water quality guidelines (criteria) for turbidity, suspended and benthic sediments*. Water Management Branch, 1997 [ie 1999].

Neelakantan, T. R., Brion, G. M. and Lingireddy, S. (2001). “Neural network modeling of Cryptosporidium and Giardia concentrations in the Delaware River, USA.” *Water Science and Technology*, Vol. 43, No. 12, pp. 125–132.

O’ Connor, F. M. (1972). *The application of multi–attribute scaling procedures to the development of indices of water quality*. Ph.D. dissertation, Univ. of Michigan.

Prati, L., Pavanello, R., and Pesarin, F. (1971). "Assessment of surface water quality by a single index of pollution." *Water Resources*, Vol. 5, No. 5, pp. 741–751.

Rasmussen, P. P., and Ziegler, A. C. (2003). *Comparison and continuous estimates of fecal coliform and Escherichia coli bacteria in selected Kansas streams, May 1999 through April 2002* (No. 3–4056). U.S. Geological Survey.

Ross, T. J. (2010), *Fuzzy Logic with Engineering Application*. John Wiley & Sons.

Sii, H. I., Sherrard, J. H., & Wilson, T. E. (1993). "A water quality index based on fuzzy set theory." In *ENVIRONMENTAL ENGINEERING—CONFERENCE* (pp. 1727–1727). AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS.

Smith, J. H., Wickham, J. D., Norton, D., Wade, T. G., and Jones, K. B. (2001). "Utilization of Landscape Indicators to Model Potential Pathogen Impaired Waters." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 37, No. 4, pp. 805–814.

Thomann, R. V., and Mueller, J. A. (1987). *Principle of Surface Water Quality Modeling and Control*. Haper & Row, Publishers.

United Nations. (1993). *Readings in International Environment Statistics*. United Nations.

U.S. Environmental Protection Agency. (1986). *Ambient Water Quality Criteria for Bacteria*. U.S. Environmental Protection Agency.

Walski, T. M., and Parker, F. L. (1974). “Consumers water quality index.” *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 100, No. 3, pp. 593–611.

World Health Organization. (1998). *Guidelines for drinking–water quality, 2nd ed. Addendum to volume 2. Health criteria and other supporting information*. World Health Organization.

World Health Organization. (2003). *Guidelines for Safe Recreational Water Environments, Volume 1: Coastal and Fresh Waters*. World Health Organization.

World Health Organization. (2006). *Guidelines for Safe Recreational Water Environments, Volume 2: Swimming Pools and Similar Environments*. World Health Organization.

Yan, H., Zou, Z., and Wang, H. (2010). “Adaptive neuro fuzzy inference system for classification of water quality status.” *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 22, No. 12, pp. 1891–1896.

Zadeh, L. A. (1965). “Fuzzy sets.” *Information and control*, Vol. 8, No. 3, pp. 338–353.

물환경정보시스템: [water.nier.go.kr](http://water.nier.go.kr)

실시간수질정보시스템: [www.koreawqi.go.kr](http://www.koreawqi.go.kr)

U.S. Environmental Protection Agency: [www.epa.gov](http://www.epa.gov)

## Abstract

# Development of River Recreational Index Model by Fuzzy Synthetic Evaluation of Water Quality Parameters

Soo–Yeon, Choi

Department of Civil and Environmental Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Recently, due to increase of income and interests in leisure and rehabilitation of riverside, popularity of recreational activities in the river is increasing in Korea. Water quality is crucial in river recreation because it is related to health issues such as outbreak of waterborne diseases. Therefore, it is necessary to provide the easily understandable integrated information about water quality for citizens. In Korea, integrated water quality information is provided through Real Time Water Quality Index (RTWQI). However, the system has limitation that it does not integrate coliform information which is the critical in river recreation and the lack of clear distinction between the water criteria is not considered in this index system. Therefore, there is need to develop new water quality information system to overcome the limitations of existing water quality information system.

In this research, River Recreational Index Model (RRIM) was developed to derive River Recreation Index (RRI) which is real time water quality index for the recreational river use to the public. Also, RRI was divided to River Recreational Grade (RRG) according to possibility of water contact during river recreation. RRG consists of four grade, 'excellent', 'good', 'acceptable' and 'unacceptable'. 'Excellent' and 'good' means that primary contact is possible, 'acceptable' means that secondary contact is possible and 'unacceptable' means that no contact activities are possible in rivers.

The RRI model consisted of two sub-models: a Fecal Coliform model (FCM) and Water Quality Index Model (WQIM). Fecal coliform is impossible to measure real time data. Therefore, FCM was developed to predict the fecal coliform using the logistic regression. The FCM predict Fecal Coliform Grade (FCG) in order to determine a level of available recreational activities in river. Then, the WQIM calculated Water Quality Index (WQI) which is a single index for the various recreational activities in the rivers by synthesizing important water quality parameters except fecal coliform. To consider the fuzziness of water quality criteria, the WQIM was developed using Fuzzy Synthetic Evaluation (FSE). The FCG and WQI was integrated by the RRIM algorithm.

FCM was developed on Nakdong River by logistic regression. pH and log of one day previous discharge were selected as explanatory variables and three regression equations which predict FCG were derived. Among FCG, grade 1 means that primary contact is possible, grade 2 means that secondary contact is possible and grade 3 means that no contact activities are possible in rivers. As a result of validation, correct classification rate was 0.63. WQIM was developed

using FSE. DO, pH, chlorophyll a and turbidity were selected as important water quality parameters. Water quality criteria of each parameters were determined according to RRG and curved triangular membership functions were designed. WQIM showed that it reflected ambiguity of water quality criteria.

RRIM was applied to upstream of Gumi weir and Gangjeong weir in Nakdong River. In Gumi weir, predicted FCGs were all grade 1. Otherwise, apart from grade 1, grade 2 and grade 3 were predicted in Gangjeong weir. In both sites, WQIs were affected by chlorophyll a and pH a lot. As a result of calculating RRI, RRI in Gumi weir were equal to WQIs since all FCGs were grade 1. Also, comparing to RTWQI, Pearson correlation coefficient was 0.65 between two index and it implied that these two index showed significant correlation. RRI in Gangjeong weir were corrected downward when they had grade 2 or 3. In those cases, RRI had more conservative results than RTWQI.

Keywords: River Recreational Index Model (RRIM), River Recreational Index (RRI), Fecal Coliform model (FC model), Water Quality model (WQ model), Logistic regression, Fuzzy synthetic evaluation approach, Nakdong River

Student number: 2012-20924

## 감사의 글

짧고도 긴 2년을 끝으로 논문을 완성할 수 있도록 도와준 많은 분들께 이 글을 통해 감사의 마음을 전하고자 합니다. 우선, 항상 저에게 가르침을 주시고 너그러이 좋은 방향으로 이끌어 주시고자 하셨던 서일원 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 아직도 한참 부족한 저지만 교수님 덕분에 많은 것을 배울 수 있었습니다. 또한, 수업을 통해서 많은 것을 가르쳐주시고 진정한 학자의 모습을 보여주신 김영한 선생님, 이길성 교수님, 서경덕 교수님, 김영오 교수님, Van Thinh 교수님, 황진환 교수님께 감사 드립니다.

지난 2년 간 귀중한 조언과 함께 맛있는 것도 많이 사주셨던 소중한 환경수리학 연구실 선배님들, 창근 오빠, 정규 오빠, 명은 언니, 성은 오빠, 성원 오빠, 황정 오빠, 재현 오빠, 인환 오빠, 주하 오빠와 선영 언니께 감사의 말을 전하고 싶습니다. 성현이와 준성 오빠에게도 고마움을 전하며 좋은 졸업 논문 쓰기를 기원합니다. 또한, 같이 입학하여 석사 과정 동안 많은 힘이 되어 주었던 동기, 현수에게 고마움을 전합니다. 함께 수공학 엠티도 가고 운동도 하면서 즐거운 대학원 생활을 하였던 다른 수공학 연구실 선배님, 동기, 후배님들께도 감사드립니다.

함께 대학교에 입학하고 또 함께 대학원에 와서 서로 많은 위로와 힘이 되어주었던 대학교 친구들과 이제는 사회인이 되어 자주 만나기 힘들지만 만날 때마다 좋은 경인고, 개웅중 친구들에게도 고맙고 각자 원하는 바 이루기를 기원합니다.

마지막으로 사랑하는 저의 가족들에게 감사합니다. 항상 딸들에게 가장 좋은 것을 해주고자 고생하시는 부모님, 언제나 저의 버팀목이 되어 주시고 믿어주셔서 감사하고 존경합니다. 또한, 항상 꿈을 이루도록 응원해주는 멋진 우리 언니에게도 고마움을 전하고 싶습니다.





저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

수질 인자의 퍼지 합성 방법에 의한  
하천 레크리에이션 지수 모델의 개발

Development of River Recreational Index  
Model by Fuzzy Synthetic Evaluation  
of Water Quality Parameters

2014 년 02 월

서울대학교 대학원

건설환경공학부

최수연



## 초 록

하천의 다양한 이수 기능 중 수영, 뱃놀이 등과 같은 레크리에이션 활동은 가장 중요한 비소모적(non-consumptive) 용도 중 하나로 최근 한국에서 하천에서의 레크리에이션 활동이 각광을 받고 있으며 이를 즐기는 사람이 증가하고 있다. 시민들이 하천에서 레크리에이션을 즐길 때, 수질이 좋지 않을 경우 질병이 발발하는 등의 문제가 생길 수 있으며 불쾌감을 느낄 수 있다. 따라서 하천의 수질은 하천 레크리에이션에 있어 매우 중요하며 하천 관리 기관은 시민이 이해하기 쉬운 수질 정보를 제공하여 수질의 상황에 따라 시민들이 하천 레크리에이션을 즐길 수 있도록 서비스를 제공할 필요가 있다. 국내에서는 실시간 수질 지수가 시민들을 대상으로 기존에 서비스되고 있으나 수질 기준 상에 존재하는 모호함과 불확실성을 고려하지 않은 점, 그리고 수상 레크리에이션 활동에 많은 영향을 미치는 대장균과 같은 중요 수질 지표의 정보를 종합하지 않았다는 점 등에서 한계를 가진다. 따라서 기존 모델의 한계를 보완하는 새로운 레크리에이션을 위한 수질정보 제공 모델이 필요하다.

본 연구에서는 시민들의 하천에서 레크리에이션 활동의 안전성 및 쾌적함을 확보하기 위해 일반 시민에게 실시간 수질 정보를 제공하는 모델인 하천 레크리에이션 지수 산정 모델(River Recreational Index Model, RRIM)을 개발하였다. 본 연구에서는 하천 레크리에이션 지수(River Recreational Index, RRI)를 하천에서 레크리에이션 활동을 할 때에 필수적인 수질이 어느 정도 안전하고 쾌적한지를 나타내는 지수로 정의하여 일반 시민이 이해하기 쉽도록 0에서 100까지 점수 형태로 나타내었으며 나아가서 ‘우수’, ‘양호’, ‘보통’, ‘불량’의 등급의 형태인 하천 레크리에이션 등급(River Recreational Grade, RRG)으로 변환되어 제공되도록 모형을 개발하였다. 이 때 우수와 양호는 직접접촉 가능, 보통은 간접접촉 가능 그리고 불량은 접촉활동 불가를 의미하였다.

본 연구에서는 RRIM을 크게 분변성 대장균 모델(Fecal

Coliform Model)과 수질 지수 모델(Water Quality Index Model, WQIM)로 구성하여 별도로 개발하였다. 분변성 대장균은 실시간으로 측정되기 어려운 수질 지표이기 때문에 로지스틱 회귀분석을 통해 개발된 FCM을 통해 분변성 대장균 등급(Fecal Coliform Grade, FCG)을 예측하였다. 또한, WQIM에서 분변성 대장균 외의 다른 수질 지표들을 종합하여 수질 지수(Water Quality Index, WQI)를 산정하였다. 이 때 수질 기준에 존재하는 모호함을 고려하기 위하여 퍼지 합성 방법을 이용하여 WQIM을 개발하였다. 마지막으로 RRIM에서는 FCG와 WQI를 이용하여 RRIM 알고리즘을 따라 최종적으로 RRI와 RRG를 산정하였다.

첫 번째 단계의 분변성 대장균 모델은 수상 활동에 중요한 대장균 수치의 범위를 예측하고 그 범위에 따라 수질의 안전성을 판단하도록 개발하였다. 분변성 대장균 모델에서는 종속변수가 실수형 변수가 아닌 범주형 변수일 때 사용되는 로지스틱 회귀 분석을 통하여 접촉 가능 여부에 따라 구분되는 세 개의 FCG를 예측하는 회귀함수를 도출하였다. FCG에서 1등급은 직접접촉 가능, 2등급은 간접접촉 가능 그리고 3등급은 접촉활동 불가의 의미하였다. 개발된 분변성 대장균 모델은 검증 결과 0.63의 정분류율을 보였다. 두 번째 단계의 수질 지수 모델은 분변성 대장균 외에 하천 레크리에이션 활동에 중요한 수질 지표들인 DO, pH, 탁도, 클로로필 a을 종합하도록 개발하였다. 수질 지수 모델에서는 수질 기준의 모호함과 불확실성을 보완하기 위해 퍼지 합성 방법을 사용하여 수질 지표를 종합하였다. RRI 등급에 따라 각 수질 인자의 수질 기준은 국내외 수질 기준을 참고하여 정하였으며 소속함수는 변형-삼각형 형태로 정의하였다. 또한, 소속함수를 통해 도출된 소속 값을 WQI로 종합하는 식을 제안하였다. WQI는 퍼지 합성 방법이 적용되지 않았을 때와 비교하였을 때 수질 기준의 모호함을 잘 반영하고 있음을 확인하였다.

RRIM 은 낙동강의 구미보 상류 지점과 강정고령보 상류 지점에 적용되었다. 구미보 상류 지점은 적용 기간 동안의 FCG 가 모두 1 등급으로 나타났으며 강정고령보 상류 지점의 경우 1 등급 외에도 2 등급과 3 등급이 관측되었다. WQI 는 두 지점 모두 수질 인자 중 클로로필 a 와 pH 의 변동을 잘 반영하고 있음을 확인할 수 있었다. DO 는 두 지점 모두 좋은 수질 상태를 보여 WQI 에 많은 영향을 미치지 못하였고 탁도의 경우 클로로필 a 와 영향력이 상쇄되어 WQI 에 많이 반영되지 못하였다. FCG 와 WQI 를 RRI 로 종합한 결과, 구미보 상류의 경우 FCG 가 모두 1 등급이었기 때문에 RRI 는 WQI 와 같았다. 또한, RRI 를 RTWQI 와 비교하였을 때 두 지수는 약 0.65 의 상관계수를 보여 수질 변화에 따라 비슷한 거동을 보임을 확인할 수 있었다. 강정고령보 상류의 경우, FCG 가 2 등급이거나 3 등급일 때, 모델의 알고리즘에 의해서 RRI 가 WQI 보다 낮게 조정되었다. 이를 RTWQI 와 비교하였을 때, 예측된 FCG 에 따라 RRI 가 RTWQI 보다 평균 52.5 점이 낮은 보수적인 결과를 보일 수 있음을 확인하였다.

주요어: 하천 레크리에이션 지수 산정 모델, 하천 레크리에이션 지수, 분변성 대장균 모델, 로지스틱 회귀분석, 수질 지수 모델, 퍼지 합성 방법, 낙동강

학번: 2012-20924

# 목 차

초 록 .....	i
목 차 .....	iv
표 목차 .....	vii
그림 목차 .....	viii
기 호 .....	x
1. 서론 .....	1
1.1 연구 배경 및 필요성 .....	1
1.2 연구의 목적 및 내용 .....	3
2. 현황 분석 및 연구 동향 .....	7
2.1 현황 분석 .....	7
2.1.1 하천 레크리에이션 현황 분석 .....	7
2.1.2 레크리에이션용 수질정보제공 시스템 .....	8
2.2 연구 동향 .....	14
2.2.1 대장균 예측 .....	14
2.2.2 종합수질지수 .....	17
3. 이론적 연구 .....	20
3.1 분변성 대장균 모델의 이론적 연구 .....	20
3.1.1 대장균 개요 및 기준 .....	20
3.1.2 분변성 대장균의 영향 인자 .....	23
3.1.3 통계 분석 .....	24

3.2 수질 지수 모델의 이론적 연구 .....	31
3.2.1 퍼지 집합 이론 .....	31
3.2.2 소속 함수 .....	32
3.2.3 퍼지 합성 방법 .....	35
4. RRIM의 개발 .....	38
4.1 RRIM 구성 및 FCG, RRG 정의 .....	38
4.2 분변성 대장균 모델의 개발 .....	39
4.2.1 데이터 수집	
4.2.2 데이터 추출 및 독립 변수 선택 .....	46
4.2.3 로지스틱 반응함수 도출 .....	46
4.3 수질 지수 모델의 개발 .....	59
4.3.1 수질 인자 선정 .....	59
4.3.2 등급 정의 및 수질 기준 선정 .....	63
4.3.3 소속함수의 정의 .....	69
4.3.4 종합화 방법 개발 .....	83
4.4 RRIM 알고리즘 .....	85
4.5 소속함수의 적합도 판단 .....	88
4.5.1 퍼지 소속함수와 크리스프 소속함수 적용의 비교 ...	88
4.5.2 가우스 형태와의 비교 .....	89
5. 모델의 적용 .....	92
5.1 적용 지점 .....	92
5.2 RRIM 적용 결과 .....	92
5.2.1 구미보 상류 지점 .....	92
5.2.2 강정고령보 상류 지점 .....	104



5.2.3 RTWQI와 RRI의 비교 .....	104
6. 결론 및 향후 연구 계획 .....	117
7. 참고 문헌 .....	119
Abstract .....	127

## 표 목차

표 2.1 RTWQI 수질 기준 .....	11
표 2.2 수상 레크리에이션을 위한 수질 정보 제공 시스템 ...	12
표 2.3 대장균 예측 방법의 비교 .....	16
표 2.4 종합수질지수 개발 방법 비교 .....	19
표 3.1 분변성 대장균의 국내외 수질 기준 .....	22
표 4.1 지점별 데이터 특성 .....	42
표 4.2 데이터 측정 및 관측소 특성 .....	42
표 4.3 분변성 대장균 모델 개발 및 검증 입력자료 및 결과	48
표 4.4 분변성 대장균 모델 검증 입력 자료의 정분류표 .....	50
표 4.5 수질자동측정망 선택항목 측정 현황 .....	60
표 4.6 RRIM의 수질 기준 .....	64
표 4.7 DO의 국내외 수질 기준 .....	65
표 4.8 pH의 국내외 수질 기준 .....	66
표 4.9 탁도의 국내외 수질 기준 .....	67
표 4.10 클로로필 a의 국내외 수질 기준 .....	68
표 4.11 등급의 중간값과 경계값 인자 점수 .....	86
표 5.1 구미보 상류 지점 수질 데이터 특성 .....	95
표 5.2 구미보 상류 지점 수질 인자의 등급별 해당 수 .....	95
표 5.3 구미보 상류 지점 적용 데이터 및 결과 .....	100
표 5.4 강정고령보 상류 지점 수질 데이터 특성 .....	106
표 5.5 강정고령보 상류 지점 수질 인자의 등급별 해당 수	106
표 5.6 강정고령보 상류 지점 적용 데이터 및 결과 .....	111
표 5.7 RTWQI의 등급 .....	116

## 그림 목차

그림 1.1 RRIM 모식도 .....	6
그림 3.1 수학적 집합의 소속함수 개념 .....	33
그림 3.2 퍼지 집합의 소속함수 개념 .....	33
그림 3.3 소속함수의 형태 .....	36
그림 4.1 분변성 대장균 모델 개발을 위한 데이터 수집 지점 .. .....	41
그림 4.2 구미보 상류 지점의 2004-2012년의 분변성 대장균 농도 .....	43
그림 4.3 칠곡보 상류 지점의 2004-2012년의 분변성 대장균 농도 .....	43
그림 4.4 칠곡보 하류 지점의 2004-2012년의 분변성 대장균 농도 .....	44
그림 4.5 강정고령보 상류 지점의 2004-2012년의 분변성 대장 균 농도 .....	44
그림 4.6 달성보 상류 지점의 2004-2012년의 분변성 대장균 농도 .....	45
그림 4.7 창녕함안보 상류 지점의 2004-2012년의 분변성 대장 균 농도 .....	45
그림 4.8 분변성 대장균 모델 검증 입력자료의 실측치와 예측치 의 비교 .....	49
그림 4.9 DO의 삼각형 소속함수 .....	71
그림 4.10 pH의 삼각형 소속함수 .....	71
그림 4.11 탁도의 삼각형 소속함수 .....	72
그림 4.12 클로로필 a의 삼각형 소속함수 .....	72
그림 4.13 DO의 가우스형 소속함수 .....	73
그림 4.14 pH의 가우스형 소속함수 .....	73
그림 4.15 탁도의 가우스형 소속함수 .....	74

그림 4.16	클로로필 a의 가우스형 소속함수	74
그림 4.17	DO 가우스형 소속도의 합	75
그림 4.18	DO의 변형-삼각형 소속함수	81
그림 4.19	pH의 변형-삼각형 소속함수	81
그림 4.20	탁도의 변형-삼각형 소속함수	82
그림 4.21	클로로필 a의 변형-삼각형 소속함수	82
그림 4.22	RRIM 모델 알고리즘	87
그림 4.23	DO의 인자점수	90
그림 4.24	pH의 인자점수	90
그림 4.25	탁도의 인자점수	91
그림 4.26	클로로필 a의 인자점수	91
그림 5.1	RRIM 적용 지점	93
그림 5.2	구미보 상류 지점의 FCG 결과	96
그림 5.3	구미보 상류 지점의 WQI, 탁도, 클로로필 a의 변화 거동	97
그림 5.4	구미보 상류 지점의 WQI, pH, DO의 변화 거동	98
그림 5.5	구미보 상류 지점의 RRI, WQI, RTWQI의 변화 거동	99
그림 5.6	강정고령보 상류 지점의 FCG 결과	107
그림 5.7	강정고령보 상류 지점의 WQI, 탁도, 클로로필 a의 변화 거동	108
그림 5.8	강정고령보 상류 지점의 WQI, pH, DO의 변화 거동	109
그림 5.9	강정고령보 상류 지점의 RRI, WQI, RTWQI의 변화 거동	110

# 기 호

## Latin Uppercase

$A$	수학적 집합
$\tilde{A}$	퍼지 집합
$D$	데비언스 검정통계량
$D^*$	데비언스 검정통계량 추정치
$F_1$	실시간수질지수 산정 시 12시간 동안 기준을 1회 이상 위반하는 수질 인자 개수
$F_2$	실시간수질지수 산정 시 12시간 동안 기준을 위반한 횟수
$F_3$	실시간수질지수 산정 시 12시간 동안 기준을 위반하는 정도
$GV_i$	RRI $i$ 등급별 할당 값
$L$	우도
$LR$	우도비검정통계량
$LR^*$	우도비검정통계량 추정치
$P_i$	$i$ 번째 인자의 인자 점수
$W_j$	왈드검정통계량
$W_j^*$	왈드검정통계량 추정치
$Z_j$	표준화 통계량

## Latin Lowercase

$w_i$   $i$ 번째 인자의 가중치

## Greek Uppercase

$\Omega$  승산(odds)

## Greek Lowercase

$\alpha_m$  로지스틱 회귀함수의 절편

$\hat{\alpha}_m$  로지스틱 회귀함수의 절편 추정치

$\beta_j$  로지스틱 회귀함수의  $j$ 번째 독립변수의 기울기

$\hat{\beta}_j$  로지스틱 회귀함수의  $j$ 번째 독립변수의 기울기 추정치

$\mu$  소속도

$\chi^2$  카이제곱값

# 1. 서론

## 1.1 연구의 배경 및 필요성

하천의 기능은 치수, 이수 그리고 환경의 세가지로 분류하며 그 중 이수 기능은 용수공급, 주운, 수력발전, 어업, 골재 채취 등을 포함한다. 이러한 다양한 이수 기능 중 수영, 뱃놀이, 낚시 등의 수상 레크리에이션 활동은 가장 중요한 비소모적(Non-consumptive) 용도 중 하나이다. 최근 한국에서는 소득 증가와 함께 여가 활동에 대한 관심이 상승하여 하천에서의 레크리에이션 활동에 대한 관심 또한 상승하였다. 또한 근년에 시행된 4 대강 복원사업에 의해서 하천의 수변 공간이 재정비되면서 시민들이 하천에서 레크리에이션 활동을 즐길 수 있는 장소가 많아졌으며, 기존의 수상스키, 요트, 카누 등의 활동 외에도 패러세일링(parasailing), 리버버깅(river bugging), 셔틀 바이크(shuttle bike), 워터 제트팩(water jetpack), 워터 워킹 볼(water walking ball) 등 다양한 신종 수상 레크리에이션 활동이 도입됨에 따라 하천은 레크리에이션 활동의 또 다른 장소로 더욱 각광을 받고 있다.

시민들이 하천에서 다양한 활동을 즐기면서 레크리에이션을 할 때에 안전성과 쾌적함을 확보하는 것이 중요하다. 이러한 측면에서 하천 레크리에이션에서 가장 중요한 것 중 하나는 하천의 수질이라고 할 수 있다. 하천의 수질은 안전성과 쾌적함에 모두 직결되는 문제이기 때문이다. 하천에서의 안전성을 확보한다는 것은 높은 수위나 큰 유속으로 인한 익사를 방지하는 것 외에도 수질적인 문제로 인한 질병의 발생을 예방하는 것 또한 포함한다. 수질이 낮은 수체와 인체가 접촉할 경우, 심각한 경우 병원성 미생물 등에 감염되어 수인성 질병이 발발할 수 있으며, 소화기 장애, 눈과 피부의 질병 등이 발생할 수 있다. 또한, 하천의 수질에 따라 시민은 쾌적함 혹은 불쾌함을 느낀다. 수질이 낮을 경우 악취가 날 수 있고 물의 색이

탁하여 하천의 미관 등의 심미적인 면을 저해할 수 있기 때문이다. 이처럼 하천의 수질은 매우 중요하기 때문에, 하천 관리 기관은 시민에게 수질에 대한 적절한 정보를 제공하여 수질의 상황에 따라 시민들이 하천 레크리에이션을 즐길 수 있도록 서비스를 제공할 필요가 있다. 즉, 하천의 수질이 어떠한 정도인지를 시민에게 알려 시민이 하천에서 레크리에이션 활동 여부를 결정하는 데에 도움을 주어야 한다.

현재 국내에서는 수질 관리 주체인 환경부가 크게 두 가지 방법을 통하여 국민에게 하천 수질 정보를 제공하고 있다. 첫 번째는 물환경정보시스템 (<http://water.neir.go.kr>)을 통해 과거의 수질 지표들에 대한 월 혹은 년 농도 값을 제공하고 있다. 홈페이지에서 제공되는 수질 정보들은 DO, BOD, COD, SS, 탁도, pH, 수온, 대장균, TN, TP 등 개별적인 수질 지표들로서 일반 국민이 그 지표들이 뜻하는 바를 알고 하천의 수질이 어느 정도인지 판단하기에는 한계가 있다. 또한 이러한 개별 지표들은 해당 하천에서의 수질 상태를 단편적으로만 나타내고 있을 뿐 수질의 종합적인 상태에 대한 지식을 제공하지 못하고 있다(최지용, 1996). 그러므로 일반 시민이 종합적인 수질 상태를 쉽게 이해하고 현 상태가 하천 레크리에이션에 알맞은지 판단할 수 있는 수질 정보를 제공해야 할 필요가 있다.

두 번째로 환경부에서 최근에 운영하기 시작한 실시간 수질 정보시스템([www.koreawqi.go.kr](http://www.koreawqi.go.kr))에서 수질자동측정망에서 측정되고 있는 일 수질 데이터와 실시간 수질지수(Real Time Water Quality Index, RTWQI)를 제공하고 있다. 여기서 제공되는 실시간 수질지수는 앞에서 제시한 첫 번째 방법과는 달리 일반 시민들이 수질 상태를 쉽게 이해할 수 있도록 지수로 수질정보를 종합적으로 표현하고 있다. 그러나 실시간 수질지수는 시민들의 수상 활동을 위해 제공되는 정보이나, 수상 활동 시 가장 고려되어야 할 대장균과 같은 수질 지표는 고려하지 않는다. 또한, 일곱 개의 수질 지표를 종합하여 하나의 수질 지수를 만드는 과정에 있어서 이 때에 수질 기준 상의 모호함이나 불확실성은 고려하지 않는다. 수질 기준에



따라 물이 깨끗한지 깨끗하지 않은지를 판단한다고 할 때, 만약 깨끗한 물의 기준이 용존산소량의 경우 5 mg/L 이하라고 할 때 4.95 mg/L 를 깨끗하다고 할 수 있고 5.05 mg/L 는 깨끗하지 않다고 말할 수 있을까라는 의문에서 수질 기준 상의 모호함에 대해 생각해 볼 수 있다. 또한, 수질 기준은 명확히 정해지지 않고 각 국가별, 기관별로 기준이 상이하기 때문에 불확실성이 존재하기도 한다.

위에서 살펴본 바와 같이 현재 우리나라에 존재하는 수질정보제공 시스템들은 시민들이 쉽게 그 의미를 이해할 수가 없거나 레크리에이션에 매우 중요한 수질 정보를 포함하지 않는다. 또한 수질 기준의 모호함이나 불확실성을 고려하지 않은 한계를 지닌다. 그러므로 이러한 한계를 보완할 수 있는 적절한 하천 레크리에이션용의 수질정보제공 모델을 제공할 필요가 있다.

## 1.2 연구의 목적 및 내용

본 연구의 목적은 시민들의 하천에서 레크리에이션 활동의 안전성 및 쾌적함을 확보하기 위해 일반 시민에게 실시간으로 수질 정보를 제공하는 모델인 하천 레크리에이션 지수 산정 모델(River Recreational Index Model, RRIM)을 개발하는 것이다. 본 연구에서는 하천 레크리에이션 지수(River Recreational Index, RRI)를 하천에서 레크리에이션 활동을 할 때에 수질이 어느 정도 안전하고 쾌적한지를 나타내는 지수로 정의하여 일반 시민이 이해하기 쉽도록 0에서 100까지 점수 형태의 지수로 산정하였으며 나아가서 '우수', '양호', '보통', '불량'과 같은 등급의 형태로도 변환되어 제공되도록 모형을 개발하였다. 이러한 등급을 하천 레크리에이션 등급(River Recreational Grade, RRG)라 하였다. 하천 레크리에이션 활동은 수체와 직접 접촉하는 수영과 같은 직접접촉활동, 보트와 같은 간접접촉활동, 혹은 접촉이 아예 불가능한 산책과 같은 무접촉활동의 세 가지 종류의 활동으로 나뉘는데,

RRI 와 RRG 를 현재 수질 상태가 세 가지 종류의 활동 중 어떠한 것이 가능한지를 의미하도록 개발하였다.

본 연구에서는 그림 1.1 과 같이 RRIM 을 크게 분변성 대장균 모델(Fecal Coliform Model)과 수질 지수 모델(Water Quality Index Model, WQIM)로 구성하여 별도로 개발하였다. 분변성 대장균 모델은 분변성 대장균 등급(Fecal Coliform Grade, FCG)을 예측하고, 수질 지수 모델에서는 분변성 대장균 외의 다른 수질 지표들을 종합하여 수질 지수(Water Quality Index, WQI)를 산정하였다. 이 두 가지 결과값은 RRIM 의 알고리즘에 따라 최종적으로 RRI 와 RRG 로 종합되었다. 본 모델이 분변성 대장균 모델과 수질 지수 모델로 나뉘는 이유는 하천 레크리에이션에 있어서 매우 중요한 수질 지표인 분변성 대장균이 실시간 측정이 불가능하기 때문이다. 분변성 대장균과 같은 수질 지표는 실시간 측정이 불가능하기 때문에 일반 수질측정소에서 주 혹은 월마다 직접 채수를 통해 측정된다. 분변성 대장균과 같이 일 데이터가 측정되지 않는 수질 인자는 실시간으로 지수를 산정하는 RRIM 에 이용될 수 없는 한계가 있다. 그러므로 본 연구에서는 분변성 대장균 모델을 개발하고 이를 이용하여 분변성 대장균을 예측하여 한계점을 보완하고자 하였다.

분변성 대장균 모델은 RRIM 의 알고리즘에서 첫 번째 단계이다. 본 연구에서는 분변성 대장균 모델은 분변성 대장균을 예측하는데 그 수치를 예측하지 않고 수치에 따른 분변성 대장균 등급(Fecal Coliform Grade, FCG)을 예측하여 등급에 따른 수질의 안전성을 평가하는 것을 목표로 하였다. 분변성 대장균 모델에서는 종속변수가 실수형 변수가 아닌 범주형 변수일 때 사용되는 로지스틱(logistic) 회귀함수를 사용하여 분변성 대장균 등급을 예측하도록 하였다. 두 번째 단계의 수질 지수 모델은 분변성 대장균 외에 하천 레크리에이션 활동에 중요한 개별 수질 지표들을 종합하여 수질 지수(Water Quality Index, WQI)를 산정하도록 개발하였다. 수질 지수 모델은 수질 기준의 모호함과 불확실성을 보완하기 위해 퍼지 합성 방법을

사용하여 개발되었다. 인자로 종합될 수질 지표들을 수질 인자라 하며 하천 레크리에이션에 중요한 수질 지표들을 수질 인자로 선택하여 하천 레크리에이션이 가능한 등급에 따라 수질 기준을 설정하였다. 퍼지 합성 방법에서 소속함수를 정의하는 것이 중요하여 다양한 소속함수의 형태를 적용하고 비교하여 가장 적합한 형태를 선택하였다. 또한, 수질 인자들을 종합화 하는 방법을 개발하였다. 마지막으로 분변성 대장균 등급과 수질 지수를 하나의 하천 레크리에이션 지수로 종합할 알고리즘을 개발하였다.

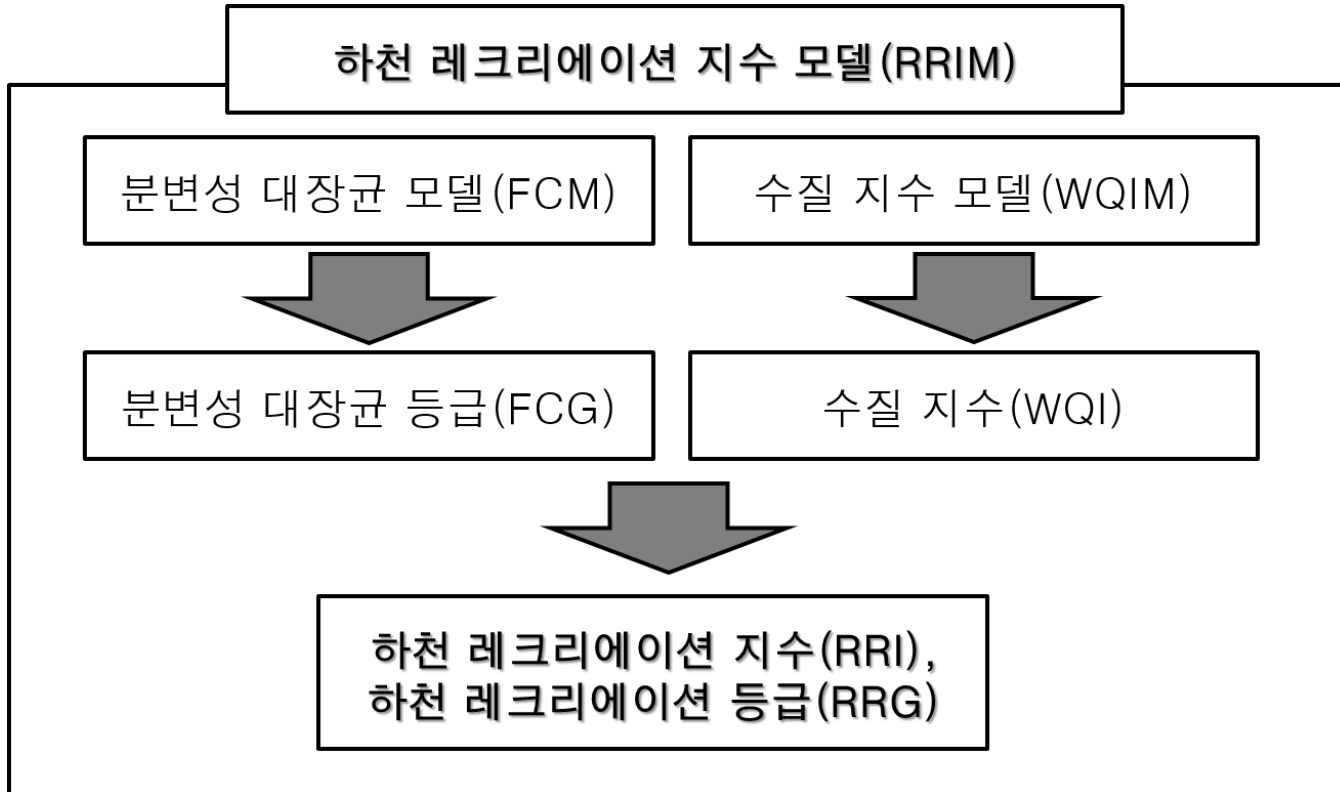


그림 1.1 RRIM 모식도

## 2. 현황 분석 및 연구 동향

### 2.1 현황 분석

#### 2.1.1 하천 레크리에이션 현황 분석

하천에서의 레크리에이션 시장은 현재 확대되고 있는 중이며 그에 따라 RRIM 과 같은 레크리에이션용 수질 정보를 제공하는 모델의 개발은 필수적이라고 볼 수 있다. 실제로 2010 년 국내에서 수상 레크리에이션을 즐긴 인구는 5,540,000 명에 달하였으며 이 중 75%는 하천과 같은 내수면에서 활동을 즐겨 하천에서 여가를 보내는 시민의 수가 상당함을 알 수 있다. 또한, 2011 년 기준 주요 포털 사이트에 등록된 수상 레크리에이션 활동 온라인 동호회는 총 496 개로 집계되었고 회원 수가 많은 상위 10 개 온라인 동호회 회원 수는 87,704 명으로 집계되어 수상 레크리에이션을 중심으로 활동하는 커뮤니티들이 활발히 운영되고 있음을 알 수 있다(김윤영, 2011).

국가 차원에서 수상 레크리에이션을 활성화 시키기 위해 무료 체험 프로그램을 운영하고 있다. 지난 2011 년에는 무료 체험 프로그램을 통해 수상 레크리에이션을 즐긴 이용자의 수가 180,000 명이었으며 이 중 140,000 명이 국내 주요 강에서 한강해양레포츠 체험교실, 세종보, 4 대강, 낙단보 개장 행사 및 카약 탐사단 프로그램을 체험하였다. 또한, 하천에서 레크리에이션 기반 시설을 조성하기 위해 기반시설 조성계획을 세우고 사업을 추진 중에 있다. 문화 및 생태녹색관광자원 개발사업 중 수상 레크리에이션 기반시설 조성계획을 포함하고 있는 사업은 5 개로, 약 107 억 원의 사업예산을 투입하였다. 또한, 2015년까지 강변문화관광개발계획을 세워 수상 레크리에이션 기반 조성사업을 한강, 낙동강, 금강에 걸쳐 진행하고 있으며 이에 약 784 억 원이 투입되고 있다(김윤영, 2011). 이처럼 국민적인 관심과 정부의 투자에 힘입어 하천 레크리에이션에 대한 관심은 더욱 증가할 것으로 보인다.

### 2.1.2 레크리에이션용 수질정보제공 시스템

본 절에서는 일반적인 수질정보제공 시스템 외에 현재 레크리에이션을 위해 수질 정보를 제공하는 시스템들을 살펴보고자 한다. 하천이나 해안 등의 수상 레크리에이션 활동을 위한 수질정보제공 시스템은 주로 미국에서 활발하게 개발되어 왔다. 미국에서는 주 별로 하천 혹은 해안에서의 수상활동이 안전한지 혹은 그렇지 않은지를 판단하여 시민들을 대상으로 웹 상으로 정보를 제공하고 있다. 미국의 시스템들은 주로 분변성 대장균(fecal coliform), E. coli, Enterococci 등 미생물의 단일 지표 수치에 근거하여 직접접촉을 요하는 수상활동이 가능한지를 판단한다. California주의 Beach advisories는 1주마다 박테리아를 측정하여 그 수치에 따라 해변을 폐쇄할지 결정한다. 또한, 바다로의 오수의 유입이 예상되는 강우가 발생할 때에는 수시로 해변을 폐쇄한다. Louisiana주의 Beach Monitoring Program은 enterococci와 분변성 대장균의 수치를 측정하고 해변의 폐쇄를 결정한다. 그러나 이 두 시스템은 좀 더 신속한 정보를 시민에게 제공하지 못한다는 한계를 지닌다. 대장균의 측정이 단기간에 이루어지지 않고 18~24시간 정도가 걸리기 때문에 시민들에게 실제 제공되는 정보는 측정을 위해 물을 채수하는 과거 시점의 정보이기 때문이다.

Massachusetts주의 Flagging Program, Ohio주의 Nowcasting beach advisories, Philadelphia주의 Philly Rivercast 등은 대장균과 상관관계가 높은 다른 인자들의 분석을 통해 대장균을 예측하여 예측된 대장균 수치가 수영과 같은 접촉 레크리에이션 활동에 적합한가를 판단하여 실시간 수질 정보를 시민들에게 알리고자 한다. Flagging Program은 강우량, 강우세기, 강우사상 기간, 풍속, 유량, 방사능 세기를 독립변수로 한 선형회귀분석을 통해 E.coli를 예상한다. 또한, Nowcasting beach advisories는 탁도, 새의 수, 파도 높이, 수온, 수위 등을 독립변수로 한 선형회귀분석을 통해 E.coli를 예상하여 이에 따라 가능한 레크리에이션 활동에 대한 정보를 제공한다. Philly Rivercast의 경우, 탁도, 강우량,

유량을 입력 자료로 한 알고리즘을 만들어 세 개의 자료의 범위에 따라 분변성 대장균의 수치를 예상한다. 그러나 이러한 미국의 시스템은 대장균과 같은 단일 지표로 수준을 판단함으로써 인해 종합적인 수질 정보를 제공할 수 없다는 점에서 한계를 지니는 것으로 판단된다.

뉴질랜드에는 Wellington 지역에서 Suitability for Recreation Grade (SFRG)이라는 시스템을 운영하고 있다. SFRG 는 Microbial Assessment Category(MAC)와 Sanitary Inspection Category(SIC)로 나뉘는데 MAC는 E.coli를 측정하여 가능한 수중 활동 수준을 결정한다. SIC 는 분변성 대장균 발생 오염원의 면적, E. coli, 수온, 탁도, 조류 등을 측정한 후 이를 종합하여 가능한 레크리에이션 활동 수준을 판단한다. 그러나 이 시스템의 경우 본격적인 수상활동이 시작되는 여름에 연 1 회 정보를 제공한다는 점에서 그 한계점을 가진다.

국내에서는 수질 정보 제공에 있어서 두 개의 시스템을 찾아볼 수 있다. 우선 환경부에서 최근 제공하기 시작한 실시간 수질지수(Real Time Water Quality Index)는 수질자동측정망을 통해 실시간으로 측정되는 7 개의 수질 인자를 종합하여 하나의 지수로 변환하여 친수 활동의 적합도를 평가한다. 여기에 사용된 7 개의 수질 인자는 수온, pH, 용존산소량(DO), 전기전도도, 총유기탄소(TOC), 총인(TP), 총질소(TN)이며 각 인자 별로 기준을 정하여 12 시간 동안 이 기준을 1 회 이상 위반하는 수질 인자 개수, 위반횟수, 위반 정도를 측정하여 식 (2.1)에 이를 대입하여 실시간 수질지수를 계산한다.

$$RTWQI = 100 - \sqrt{\frac{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}{3}} \quad (2.1)$$

여기서,  $F_1$  은 12 시간 동안 기준을 1 회 이상 위반하는 수질 인자 개수를 전체 측정하고 있는 수질 자료 개수로 나누어 산정한 분율,  $F_2$  는 각 수질 항목별로 12 시간 동안 수질 기준치를 위반한 항목들의 총 위반

횡수를 총 측정횡수로 나누어 산정한 분율,  $F_3$  는 각 수질 지표별로 기준치를 위반한 정도를 분율화한 것을 총 합한 것이다. 이 시스템에서 사용하고 있는 수질 기준은 표 2.1 과 같다. 식 (2.1)은 현재의 수질 상태가 표 2.1 에서 제시하고 있는 수질 기준을 위반하고 있는 종합적인 정보를 나타낸다. 그러나, 식 (2.1)은 수질 기준 자체에 존재하고 있는 모호함과 불확실성은 고려하지 않는다. 또한, 하천 레크리에이션 활동에 매우 중요한 수질 지표인 대장균이 수질자동측정망에서 측정되고 있지 않기 때문에 수질 인자로 고려하지 않는다는 한계를 지닌다.

국내의 시스템 중 우수 해수욕장 선정 프로그램은 피서 철을 맞아 해수욕장의 종합적인 수질을 측정하고 그 우수성을 판단하는 프로그램이다. 이 시스템은 SFRG 와 같이 연 1 회만 수질을 평가하고, 수질 기준의 모호함을 고려하지 않는 한계를 지닌다. 또한, 앞에서 소개된 기존 시스템들은 모두 예보 형태가 아닌 실시간 혹은 과거의 정보를 제공하고 있어 시민들이 내일의 정보를 제공받고 하천에서의 레크리에이션 계획을 세우는 일이 불가능하다는 단점을 지닌다. 표 2.2 에 앞에서 소개한 국내외 수질 정보 제공 시스템을 정리하였다.



표 2.1 RTWQI의 수질 기준

수질 인자	수질 기준
Temp.	$(10 \text{ 년간 평균 수온}) - 10^{\circ}\text{C} \leq \text{Temp.} \leq (10 \text{ 년간 평균 수온}) + 10^{\circ}\text{C}$
pH	$6.5 \leq \text{pH} \leq 9.0$
DO	$0.8 \times D_{os} \leq \text{DO} \leq 1.3 \times D_{os}$
EC	$\leq 200 \mu\text{S/cm}$
TOC	$\leq 3 \text{ mg/L}$
TN	$\leq 3 \text{ mg/L}$
TP	$\leq 0.1 \text{ mg/L}$

표 2.2 수상 레크리에이션을 위한 수질 정보 제공 시스템

시스템	지역	제공 정보	제공 주기	정보 생성 방법	정보 제공 매체	예보 여부
Flagging Program	미국 Massachusetts 주 Charles 강	가능한 수상 활동의 수준을 나타내는 등급	주 단위	강우량, 강우세기, 강우사상 기간, 풍속, 유량, 방사능 세기 데이터를 이용한 회귀분석을 통해 E. coli 수치 예측 후 가능한 수상활동의 수준 판단	웹 사이트 ( <a href="http://www.crwa.org/water_quality/daily/programhome.html/">http://www.crwa.org/water_quality/daily/programhome.html/</a> )	-
Nowcasting Beach Advisories	미국 Ohio 주 Erie 호수	가능한 수상 활동의 수준을 나타내는 등급	일 단위	탁도, 새의 수, 파도 높이, 수온, 수위 등의 데이터를 이용한 회귀분석을 통해 E. coli 수치 예측 후 가능한 수상활동의 수준 판단	웹 사이트 ( <a href="http://www.ohiocast.info">http://www.ohiocast.info</a> )	now-cast
Philly Rivercast	미국 Philadelphia 주 Schuylkill 강	가능한 수상 활동의 수준을 나타내는 등급	일 단위	강우량, 유량, 탁도 데이터를 이용하여 분변성 대장균 수치 예측한 후 가능한 수상활동의 수준 판단	웹 사이트 ( <a href="http://schuylkillrivercast.org">http://schuylkillrivercast.org</a> )	now-cast
Beach Advisories	미국 California 주 주요 해변	수상활동의 가능성	주 단위	박테리아 측정 후 수상 활동의 가능성 판단	웹 사이트 ( <a href="http://ph.lacounty.gov/phcommon/public/eh/water_quality/beach_grades.cfm">http://ph.lacounty.gov/phcommon/public/eh/water_quality/beach_grades.cfm</a> )	-

표 2.2 수상 레크리에이션을 위한 수질 정보 제공 시스템 (계속)

시스템	지역	제공 정보	제공 주기	정보 생성 방법	정보 제공 매체	예보 여부
Beach Monitoring Program	미국 Louisiana 주 주요 해변	수상 활동의 가능성	주 단위	Enterococci, 분변성 대장균 측정 후 수상 활동의 가능성 판단	웹 사이트 ( <a href="http://new.dhh.louisiana.gov/index.cfm/page/288">http://new.dhh.louisiana.gov/index.cfm/page/288</a> )	-
Suitability for Recreation Grade (SFRG)	뉴질랜드 Wellington	가능한 수상활동의 수준을 나타내는 등급	년 단위	E. coli, 분변성 대장균 발생 오염원의 면적, 수온, 탁도, 조류 등 측정 후 정보를 종합하여 가능한 수상활동의 수준 판단	웹 사이트 ( <a href="http://www.gw.govt.nz/beachgrades/">http://www.gw.govt.nz/beachgrades/</a> )	-
실시간 수질지수 (Real Time Water Quality Index, RTWQI)	대한민국 전국 하천 및 호소	가능한 수상활동의 수준을 나타내는 등급	시 단위	수온, pH, DO, 전기전도도, TOC, TP, TN 의 실시간 측정 후, 기준값을 12 시간동안 1 회이상 위반하는 수질 인자 개수와 위반횟수, 위반 정도를 종합하여 가능한 수상활동의 수준 판단	웹 사이트 ( <a href="http://www.koreawqi.go.kr/">http://www.koreawqi.go.kr/</a> )	now-cast
우수 해수욕장 선정	대한민국 전국 해수욕장	종합적 수질 수준을 나타내는 등급	년 단위	총 대장균, COD, TP, 암모니아성 질소, SS 측정 후 종합하여 수질 수준 판단	-	-

## 2.2 연구 동향

### 2.2.1 대장균 예측

전 절에서 제시된 레크리에이션용 수질정보제공 시스템들 중 미국의 모델과 같이 많은 연구들에서 유량, 강우량과 같은 수문 인자 혹은 탁도와 같은 수질 지표와 대장균과의 상관관계를 연구하고 이를 이용하여 대장균의 수치를 예측하고자 하였다. Ferguson 등(1996)은 강우량과 하수 유입량과 분변성 대장균(Fecal Coliform, FC), 분변성 연쇄상구균(Fecal Streptococci, FS) 등의 여섯 가지의 수인성 질병을 나타내는 미생물 지표들과의 상관관계를 분석하였다. 그 결과, 분변성 대장균은 강우량에 큰 영향을 받았으며, 하수 유입량과도 유의한 상관관계가 존재하였으며 이 두 인자를 독립변수로 한 선형회귀분석에서 결정계수( $r^2$ ) 0.80로 분변성 대장균의 수치를 예측하였다. Christensen 등(2000)은 분변성 대장균 등의 실시간으로 측정되지 않는 수질 인자들을 실시간으로 측정되는 수질 인자들로 예측하고자 하였다. 분변성 대장균은 탁도, 시간과의 상관관계가 큰 것으로 밝혀졌으며, 이와는 선형회귀분석은 결정계수 0.04~0.62의 결과를 보였다. Clark와 Norris(2000)는 유량, 전도도, pH, 수온, DO를 독립변수로 한 선형회귀분석에서 결정계수 0.10~0.50의 결과를 보였다. 또한, Crowther 등(2001)은 유량, 일조량, 풍향 및 풍속, 조수 높이 등으로 총 대장균(Total Coliform, TC), 분변성 대장균 그리고 분변성 연쇄상구균을 선형회귀분석으로 예측하고자 하였고 적용 지역에 따라 결정계수가 8.1에서 53.0%의 값을 보였다.

앞에서 제시된 시스템인 Flagging Program을 개발한 Eleria와 Vogel(2005)는 강우량, 강우세기, 강우사상 기간, 풍속, 유량, 방사능 세기를 독립변수로 한 선형회귀분석을 통해 E.coli를 예상하여 0.60의 결정계수를 보였다. 또한 로지스틱 회귀분석을 적용하여 보트 레크리에이션 활동 시 적합한 E.coli의 수치인 1000 CFU/100mL 보다 낮은 기준을 만족하는지 혹은 만족하지 않은지를 예상하였으며 그 결과 만족하는 경우는 0.98의 높은 결정계수를 보였으나 만족하지 않는 경우는

0.44로 비교적 낮은 결정계수를 보였다. Nowcasting beach advisories를 개발한 Francy와 Darner(2007)는 탁도, 새의 수, 파도 높이, 수온, 수위 등을 독립변수로 한 선형회귀분석을 통해 결정계수 0.38의 예측 결과를 보였다. Philly Rivercast를 개발한 Maimone 등(2007)은 분변성 대장균의 범위를 나누어 200 counts/100mL 이하일 경우 직접접촉 레크리에이션 활동이 가능하고 1000 counts/100mL 이하인 경우는 간접접촉 레크리에이션 활동이 가능하다고 정하고, 탁도, 강우량, 유량의 세 인자를 입력데이터로 한 알고리즘을 만들어 세 인자의 범위에 따라 분변성 대장균의 범위를 예측하여 0.66의 예측률을 보였다. 최근에는 다양한 데이터마이닝 기법을 이용하여 미생물지표를 예측하고자 한 연구도 수행된 바 있다. He와 He(2007)는 인공지능신경망(Artificial Neural Network, ANN)을 통해 대장균을 예측하였고 Kim 등(2012)은 SVM을 이용하였다.

표 2.3에 앞에서 언급된 연구들을 정리하였다. 대부분의 연구들은 선형회귀분석이나 비선형회귀분석 등을 사용하여 수치를 예측하고자 하였다. 그러나 Eleria와 Vogel의 연구와 같이 로지스틱 회귀분석을 이용하여 대장균의 등급을 하천에서의 레크리에이션 시 직접접촉이 가능한 정도, 간접접촉이 가능한 정도 그리고 어떠한 접촉활동도 불가능한 정도로 나누어 이를 예측하는 것이 레크리에이션 용도의 수질 예측에 더 유용할 것으로 판단된다.

표 2.3 대장균 예측 방법의 비교

저자	예측 변수 (종속변수)	입력데이터(독립변수)	예측 방법	Goodness-of-Fit Statistic (R <sup>2</sup> or MSE)
Ferguson 등 (1996)	FC	강우량, 하수 유입량	선형회귀분석	R <sup>2</sup> =0.80
Christensen 등 (2000)	FC	탁도, 시간(월)	선형회귀분석	R <sup>2</sup> =0.012~0.775
Clark와 Norris (2000)	FC	유량, 전기전도도, pH, 수온, DO	선형회귀분석	R <sup>2</sup> =0.10~0.50
Crowther 등 (2001)	TC, FC, FS	강우량	선형회귀분석	R <sup>2</sup> =0.81~0.53
Eleria와 Vogel(2005)	E.coli	강우량, 강우세기, 강우사상 기간, 풍속, 유량, 방사능 세기	선형회귀분석, 로지스틱회귀분석	R <sup>2</sup> =0.60
Francy와 Darner(2007)	E.coli	탁도, 새의 수, 파도 높이, 수온, 수위 등	선형회귀분석	R <sup>2</sup> =0.38
Maimone 등(2007)	FC	탁도, 강우량, 유량	선형회귀분석	0.66
He와 He (2007)	TC, FC	수온, 전기전도도, 탁도, 조류 높이, pH 등	ANN	R <sup>2</sup> =0.84~0.91
Kim 등 (2012)	TC, E.coli	일사량, 수심, 유속, 염도, pH, 탁도 등	SVM	MSE=0.23~0.31

## 2.2.2 종합수질지수

대장균, DO 등과 같은 단일 수질 지표는 종합적인 수질의 척도가 될 수 없다는 이유로 1960년대 중반 이후부터 미국을 선두로 하여 영국, 일본, 뉴질랜드, 캐나다 등의 국가에서 종합적인 수질을 평가하고자 하는 종합수질지수를 개발하고자 하는 연구가 활발히 진행되어왔다. 종합수질지수의 첫 연구는 Horton(1965)에 의해 행해졌다. 그는 델파이 기법(Delphi method)를 사용하여 pH, DO, 전기전도도, Cl<sup>-</sup>, FC, 알칼리도를 하나의 지수로 종합하였다. 델파이 기법은 다수의 전문가의 의견을 하나로 수렴하고자 반복적인 설문조사를 익명으로 실시하는 기법으로 이를 이용해 다음과 같은 세 단계로 종합수질지수가 개발되었다.

(a) 수질 지표 중 종합될 인자 선택

(b) 각 인자의 상호비교가 가능하도록 공통의 가치로 변환시키는 부지수 함수 개발

(c) 각 수질항목별로 공통가치화 한 부지수 함수를 집약하는 종합화 함수 개발

이 후 많은 종합수질지수가 이러한 방법을 이용해 개발되었다. Brown(1970)은 미국의 National Sanitation Foundation(NSF)에서 종합수질지수, NSF-WQI를 개발하였다. Prati 등(1971), Deininger 등(1971), O'connor 등(1972), McDuffe와 Johnathan(1973), Walski와 Parker(1974), Harkins(1974), Dunnette 등(1979), Joung 등(1979), House(1987), 그리고 Dinius(1987) 등 1970년대와 1980년대에 미국을 시작으로 영국과 유럽 등지에서 델파이 기법을 이용하여 종합수질지수를 개발하였다. 우리나라에서는 한국환경기술개발원의 최지용(1996)이 “종합수질지표의 개발”에서 델파이 기법을 이용해 종합수질지수를 개발하였다. 델파이 기법은 대학교수 17명, 연구원 10명 공무원 3명으로 구성된 전문가 설문단을 대상으로 이루어졌으며, 그 결과, 주요 수질

인자로 선정된 pH, DO, BOD, SS, COD, TN, TP, TC, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N를 이용하여 종합수질지수를 개발하였다. 델파이 기법을 이용한 방법은 전문가의 의견을 수렴하여 의사결정을 진행한다는 점에서 주관성을 줄이고 객관성을 확보했다는 장점을 지닌다. 그러나 델파이 기법은 여러 번에 거친 설문조사에 의해 비용이 크다는 한계를 지닌다. 또한, 앞에서 언급한 바와 같이 수질 기준은 다른 자연현상과 마찬가지로 모호함과 불확실성을 지니기 때문에 종합수질지표를 정하는데 있어 델파이 기법과 같이 명확한 기준을 정하는 것은 한계를 지닐 수 있다.

1990년대 들어서 델파이 방법과는 다른 방법을 이용해 종합수질지수를 개발하려는 연구가 시작되었으며 그 중 대표적인 방법은 퍼지 이론을 적용한 방법이다. Lu(1999)는 퍼지 집합 이론을 적용한 의사결정방법 중 하나인 Fuzzy Synthetic Evaluation(FSE) 기법을 적용하여 저수지의 부영양화 정도를 평가하고자 하였다. 이 기법을 사용하여 종합수질지수를 만드는데 있어 0부터 100까지의 숫자로 표현되는 부지수 함수가 아닌 0부터 1까지의 숫자로 표현되는 퍼지 소속함수의 개념을 적용하여 수질 등급 간 존재하는 모호함을 표현하고자 하였다. Chang(2001) 또한 같은 방법을 적용하여 종합수질지수를 개발하였다. 또한, Icaga(2007), Lermontov(2009)는 퍼지 규칙을 적용한 로직을 사용하여 종합수질지수를 산정하는 방법을 고안하였다.

종합수질지수를 개발하기 위하여 적용된 방법 들 중 FSE 기법은 다양한 정보를 하나의 정보로 종합화할 수 있기 때문에 지표를 개발하는데 적절하다. 또한, 과거에 많이 사용되었던 델파이 기법에 비해 비용이 적게 들며, 모델이 성공적으로 설계되었을 경우 수질 등급에 존재하는 모호한 경계를 잘 설명할 수 있다는 장점을 지닌다. 그러나 기존의 FSE 기법을 적용한 연구는 FSE 기법의 핵심인 소속함수(Membership function)을 설계하는데 있어 충분한 고찰을 거치지 않고 제시함을 확인할 수 있었다. 표 2.4에서 앞에서 언급된 종합수질지수의 용도와 방법, 그리고 입력 인자들을 정리하였다.



표 2.4 종합수질지수 개발 방법 비교

저자	용도	종합화방법	입력 인자
Horton (1965)	일반종합수질	델파이 기법	pH, DO, 전기전도도, Cl <sup>-</sup> , FC, 알칼리도
Brown 등 (1970)	일반종합수질	델파이 기법	수온, pH, DO, BOD, TS, NO <sub>3</sub> -N, PO <sub>4</sub> -P, 탁도, FC
Prati 등 (1971)	일반종합수질	델파이 기법	pH, DO, BOD, SS, COD, NH <sub>3</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N, Cl <sup>-</sup> , Fe, Mn
Harkins (1974)	일반종합수질	델파이 기법	DO, BOD, pH, TP
Walski와 Parker (1974)	레크리에이션용 종합수질	델파이 기법	수온, 기름, 투명도, 냄새, TP, TN, FC, NO <sub>3</sub> -N, SS, pH, DO
Dunnette (1979)	일반종합수질	델파이 기법	수온, pH, DO, BOD, FC, 탁도, SS, 전기전도도, 총부유물질, 용존고형물, 중금속, COD,
House (1987)	일반종합수질	델파이 기법	수온, pH, DO, BOD, 염화물, TC, SS, 질산염
Dinius (1987)	일반종합수질	델파이 기법	수온, pH, DO, BOD, 색도, PO <sub>4</sub> -P, Cl <sup>-</sup> , TC
최지용 (1996)	일반종합수질	델파이 기법	pH, DO, BOD, SS, COD, TN, TP, TC, NH <sub>3</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N
Lu 등 (1999)	부영양화	FSE	TP, 클로로필 a, 투명도
Chang 등 (2001)	일반종합수질	FSE	pH, DO, E.coli, SS, BOD, COD, SS, NH <sub>3</sub> -N, Cl <sup>-</sup>
Icaga (2007)	일반종합수질	Fuzzy logic	수온, pH, DO, 염화물, 황, 암모니아, TP, TDS, 색도 등
Lermontove 등 (2009)	일반종합수질	Fuzzy logic	수온, pH, DO, BOD, 대장균, DIN, TP, TS, 탁도

### 3. 이론적 연구

#### 3.1 분변성 대장균 모델의 이론적 연구

##### 3.1.1 대장균 개요 및 기준

수질의 좋고 나쁨의 정도를 나타내는 수질 지표 중 대장균은 수인성 질병과 관련이 있는 지표로써 하천 위락에 있어서 가장 먼저 고려해야 한다. 대장균은 사람을 포함한 온혈동물의 대장에 서식하고 있는데 이 자체로 위험한 것이 아니라 이것이 분변과 함께 대량, 즉  $10^5 \sim 10^9$  (개체 수/g) 정도 배설되므로 대장균은 물의 분변에 의한 오염도를 나타낸다고 볼 수 있기 때문에 중요하다(환경부, 2008). 이러한 이유로 1900년대 초부터 전세계적으로 대장균의 존재 유무 및 그 수에 따라 물의 위생적인 안전성이 평가되고 있다. 수인성 질병 중 우리나라에서 가장 많이 발생하는 질병은 장티푸스로 이것은 살모넬라균에 의한 것이고 두 번째로 많이 발생하는 질병은 세균성 이질로 이는 쉬겔라균 감염에 의해 발병한다. 그러나 살모넬라균과 쉬겔라균은 검출에 장시간이 소요되기 때문에 물의 오염 지표로 사용하기에 적절하지 못하다. 따라서 이들 병원균 대신 검출이 비교적 용이한 대장균을 이용하여 수인성 질병 원인균의 존재 가능성, 즉 공중 보건적인 안전성 여부를 평가한다.

대장균 지표에는 총 대장균, 분변성 대장균, 그리고 *E. coli* 가 있다. 선행 연구들에 따르면 세 대장균 지표 중 *E. coli* 가 수인성 질병과의 상관도가 가장 큰 것으로 나타났다(환경부, 2008). 하지만 현재 우리나라에서는 수질일반측정망에서 총 대장균군과 분변성 대장균군만 월 1회 혹은 주 1회 간격으로 측정하고 있어 *E. coli*는 사용이 불가능하다. 그러므로 국내에서는 레크리에이션 수준을 판단하기 위한 지표로서 총 대장균 혹은 분변성 대장균을 사용하는 것이 적절하다. 본 연구에서 개발하는 RRIM의 분변성 대장균 모델은 분변성 대장균을 이용하여 어떠한 레크리에이션 활동의 종류가 가능한가를 첫 번째 절차로 판단하였다.

하천 레크리에이션 시 수상 접촉 활동에 따라 안전한 대장균의 기준

을 정하기 위하여 국내 및 해외에서 기준을 제시하고 있다. 국내와 해외에서 정하고 있는 분변성 대장균의 기준은 아래 표 3.1에 제시된 바와 같다. 특히 미국 EPA(Environmental Protection Agency)에서는 1980년대부터 대장균 농도와 그 시기에 수상 레크리에이션 활동을 한 시민들의 배탈 등과 같은 질병의 발발 횟수를 측정하여 대장균의 기준을 제시해왔다. 국내에서는 하천 생활환경기준에서 7개의 등급에 따라 분변성 대장균의 범위를 제시하고 있다. 그 중 약간 좋음 이상의 등급에서 수영이 가능하다고 표시되어 있는데 이 때의 분변성 대장균의 범위는 200 CFU/100mL 이하이다. 또한, 약간 나쁨 이하의 등급에서 접촉활동이 불가능하다고 되어 있는데 이 때의 분변성 대장균의 범위는 1000 CFU/100mL 이하이다. 그 외의 기준에서도 이와 같은 기준을 제시하고 있음을 확인할 수 있었다.

표 3.1 분변성 대장균의 국내외 수질기준

	등급	기준 (CFU/100mL)
국내	매우 좋음	$\leq 10$
	좋음	10 ~ 100
	약간 좋음 (수영 가능)	100 ~ 200
	보통	200 ~ 1000
	약간 나쁨 ~ 매우 나쁨 (접촉 불가)	1000 <
미국 EPA	직접접촉	$\leq 200$
	간접접촉	200 ~ 1000
미국 Massachusetts 주	직접접촉	$\leq 200$
	간접접촉	200 ~ 1000
미국 Newyork 주	직접접촉	$\leq 200$
	간접접촉	200 ~ 1000

### 3.1.2 분변성 대장균의 영향 인자

분변성 대장균 모델에서는 대장균이 빠른 시간 내에 측정이 불가능하기 때문에 대장균과 상관관계가 큰 다른 환경 인자들을 이용하여 이를 예측하고자 한다. 분변성 대장균과 상관관계가 크다고 알려진 인자들은 분변성 대장균 생장에 영향을 미치는 것과 감소에 영향을 미치는 것으로 나뉠 수 있다. 먼저 생장에 영향을 미치는 것들은 다음과 같다.

- (a) 가정, 산업용 폐수
- (b) 오수와 우수의 합류식 하수도
- (c) 도시 혹은 교외 지표면을 따라 유입되는 유출수
- (d) 수체 혹은 지표면에 버려진 폐슬러지

다음으로 대장균 감소율(decay rate)에 영향을 미치는 요인은 다음과 같다(Thomann, 1987).

- (a) 일조량
- (b) 수온
- (c) 염분
- (d) 포식관계(predation)
- (e) 영양 결핍(nutrient deficiencies)
- (f) 독성물질
- (g) 대장균의 침전율
- (h) 대장균이 흡착된 입자의 재부유
- (i) 대장균의 성장률

위에서 제시된 인자들에 의해 대장균 수치는 감소하거나 혹은 증가한다. 대장균은 강우 여부와도 그 상관관계가 크다고 알려져 있다. 그 이유는 큰 강우가 발생했을 경우, 앞에서 대장균 생장에 영향을 미치는

인자들이 강으로 유입될 확률이 커지기 때문이다. 강우가 발생하면 유량도 증가하기 때문에 유량과도 상관관계가 있다고 알려져 있다. 또한, 탁도와 같은 수질 지표와도 그 연관성이 존재한다. 탁도가 높을수록 강 속의 부유물질이 증가하는데 대장균은 부유물질과 흡착하여 햇빛을 피할 수 있기 때문이다. 또한, 영양, 독성물질 등으로 인해 그 외의 다른 수질 지표, 예를 들어, TN, TP, pH, DO 등과 상관관계를 보인다.

### 3.1.3 통계 분석

본 연구에서 분변성 대장균 모델은 로지스틱 회귀분석을 적용하여 분변성 대장균을 예측한다.

#### 3.1.3.1 로지스틱 회귀분석

로지스틱 회귀 (logistic regression) 이론은 일반적인 선형회귀분석과는 달리 종속변수가 범주형 변수 즉, 0과 1 혹은 참과 거짓 등일 때, 사용되는 방법이다. 더 나아가 종속변수가 3개 이상인 경우, 즉 순서형인 경우에도 적용 가능하다. 종속변수가 범주형 변수일 때 일반 선형회귀분석을 적용하게 되면 모형에서 독립변수의 회귀계수가 변화하여 종속변수가 변화할 때 종속변수의 기대값의 범위가 0과 1을 벗어난다는 오류가 야기된다. 이 때 비선형 함수형태의 회귀모형을 설정할 수 있다면 종속변수의 기대값인 확률은 0과 1로 수렴할 수 있을 것이다(성웅현, 2009). 그러므로  $P(Y_i = 1 | \mathbf{x}_i)$ 의 적절한 변환을 통해서 범위가  $-\infty$ 와  $\infty$ 이 되도록 하여  $P(Y_i = 1 | \mathbf{x}_i)$ 을 아래 식 (3.1)과 같은 승산(odds)으로 변환한다.

$$\Omega(\mathbf{x}_i) = \frac{P(Y_i = 1 | \mathbf{x}_i)}{P(Y_i = 0 | \mathbf{x}_i)} = \frac{P(Y_i = 1 | \mathbf{x}_i)}{1 - P(Y_i = 1 | \mathbf{x}_i)} \quad (3.1)$$

여기서,  $\Omega(\mathbf{x}_i)$  는 어떤 사건이 발생되지 않을 확률에 대한 발생될 확률의 비율이고  $P(Y_i = 1 | \mathbf{x}_i)$  는 독립변수  $\mathbf{x}_i$  가 주어졌을 때, 범주형 종속변수  $Y_i$  가 1일 확률,  $P(Y_i = 0 | \mathbf{x}_i)$  는 독립변수  $\mathbf{x}_i$  가 주어졌을 때, 범주형 종속변수  $Y_i$  가 0일 확률이다. 위의 식을 로짓변환을 통해 범위를  $-\infty$  와  $\infty$  로 변하게 하고 이를  $P(Y_i = 1 | \mathbf{x}_i)$  정리하여 식(3.2)와 같은 로지스틱 반응함수를 나타낼 수 있다.

$$P(Y_i = 1 | \mathbf{x}_i) = \frac{\exp(\mathbf{x}_i' \boldsymbol{\beta})}{1 + \exp(\mathbf{x}_i' \boldsymbol{\beta})} = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \dots + \beta_k X_{ki})}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \dots + \beta_k X_{ki})} \quad (3.2)$$

여기서,  $\boldsymbol{\beta}$  은  $k$  차 기울기 계수벡터이다. 위 식 (3.2)를 종속변수가 3개 이상의  $g$ 개이고 결과는 1부터  $g$ 까지의 순위로 측정되는 경우로 식을 확장해보면 위 식 (3.2)는 순위가  $m$  이하일 누적 확률을 나타내며 이는 식 (3.3)과 같다.

$$P(Y \leq m | \mathbf{x}) = \frac{\exp(\alpha_m + \mathbf{x}' \boldsymbol{\beta})}{1 + \exp(\alpha_m + \mathbf{x}' \boldsymbol{\beta})} \quad (3.3)$$

여기서  $P(Y \leq m | \mathbf{x})$  는 독립변수  $\mathbf{x}$ 가 주어졌을 때 범주형 종속변수  $Y$ 가 순위  $m$  이하일 확률이고,  $\alpha_m$  은 절편,  $\boldsymbol{\beta}$  은  $k$  차 기울기 계수벡터이다. 위 식 (3.3)에서 순위에 따라 절편만 다르고 기울기 계수벡터가 모두 같다는 평행회귀 가정을 하므로 위 식에서  $\boldsymbol{\beta}$  는 순위  $m$  과 관계없이 동일하다. 만약 종속변수의 결과가 세가지 순위로 측정될 때 각 순위에 대한 확률은 다음 식 (3.4), (3.5), (3.6) 그리고 (3.7)과 같다.

$$\pi_1(\mathbf{x}) = P(Y = 1 | \mathbf{x}), \pi_2(\mathbf{x}) = P(Y = 2 | \mathbf{x}), \pi_3(\mathbf{x}) = P(Y = 3 | \mathbf{x}) \quad (3.4)$$

$$\pi_1(\mathbf{x}) = \frac{\exp(\alpha_1 + \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta})}{1 + \exp(\alpha_1 + \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta})} \quad (3.5)$$

$$\pi_2(\mathbf{x}) = \frac{\exp(\alpha_2 + \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta})}{1 + \exp(\alpha_2 + \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta})} - \frac{\exp(\alpha_1 + \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta})}{1 + \exp(\alpha_1 + \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta})} \quad (3.6)$$

$$\pi_3(\mathbf{x}) = 1 - \pi_1(\mathbf{x}) - \pi_2(\mathbf{x}) \quad (3.7)$$

여기서,  $\pi_1$ 는 순위가 1일 확률,  $\pi_2$ 는 순위가 2일 확률 그리고  $\pi_3$ 은 순위가 3일 확률을 말한다. 또한,  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 는 각각 순위가 1, 2, 3일 때의 절편이다. 순위로짓모형에서 절편과 기울기 모수들은 최대우도법(Maximum Likelihood Estimation, MLE)으로 추정된다. 이 때 최대우도함수에 자연대수를 취하여 구하며 자연우도 함수는 식 (3.8)과 같다.

$$\ln[L(\alpha, \boldsymbol{\beta} | \mathbf{x})] = \sum_{m=1}^g \sum_{Y_i=m} \ln \left[ \frac{\exp(\alpha_m + \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta})}{1 + \exp(\alpha_m + \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta})} - \frac{\exp(\alpha_{m-1} + \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta})}{1 + \exp(\alpha_{m-1} + \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta})} \right] \quad (3.8)$$

여기서,  $L$ 은 최대우도를 나타낸다. 자연대수우도함수를 최대로 하는  $g-1$ 개 절편  $\alpha_m$ 's들과 기울기 계수벡터  $\boldsymbol{\beta}$ 의 값을 추정하기 위해 일반적으로 Newton-Raphson 방법을 사용하게 된다. 최대우도 추정값이 구해지면 독립변수들의 수준  $\mathbf{x}_i$ 에서  $Y$ 의 결과가  $m$ 으로 예측될 확률은 아래와 같은 식 (3.9)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\pi_m(\mathbf{x}_i) = \frac{\exp(\alpha_m + \mathbf{x}'\hat{\boldsymbol{\beta}})}{1 + \exp(\alpha_m + \mathbf{x}'\hat{\boldsymbol{\beta}})} - \frac{\exp(\alpha_{m-1} + \mathbf{x}'\hat{\boldsymbol{\beta}})}{1 + \exp(\alpha_{m-1} + \mathbf{x}'\hat{\boldsymbol{\beta}})} \quad (3.9)$$



여기서,  $\pi_m$  는  $Y$  의 결과가  $m$  으로 예측될 추정확률,  $\alpha_m$  는 이 때의 추정 절편,  $\hat{\beta}$  는 추정 기울기 계수 벡터이다.

### 3.1.3.2 변수 선택

모형에서 유의한 변수를 선택하기 위해 전진선택법(forward selection), 후진소거법(backward elimination), 단계별선택법(stepwise selection) 등과 같은 변수선택법을 사용할 수 있다. 전진선택법이란 설정된 유의수준을 충족시키는 변수를 각 단계마다 모형에 하나씩 추가적으로 포함시키는 방법이고, 후진소거법은 설정된 유의수준을 충족시키지 못하는 변수를 각 단계마다 모형에서 하나씩 제거하는 방법이다. 단계별 선택법은 이 둘을 혼합하여 사용한다(성웅현, 2009).

단계별 선택법은 식 (3.10)과 같은 가설설정에서부터 시작 된다.

$$H_0 : \beta_j = 0, H_1 : \beta_j \neq 0 \quad (3.10)$$

여기서,  $\beta_j$  는  $j$  번째 독립변수  $X_j$  의 계수이다. 귀무가설  $H_0$  은  $j$  번째 독립변수  $X_j$  가 어떤 사건이 발생할 확률에 유의한 영향을 미치지 않는다는 의미이고 대립가설  $H_1$  은 유의한 영향을 미친다는 의미이다(성웅현, 2009). 이러한 대립가설에 대해 스코어 카이제곱검정(score chi-square test)을 실시하여 모형에 유의한 변수를 선택한다. 스코어 카이제곱 검정통계량은 자연대수우도에 대한 편미분의 비율이다. 이 때  $j$  번째 독립변수를 모형에서 제외하고 구한 최우추정량을  $\tilde{\beta}$  이라 할 때, 이 것의 일차편미분값을  $U(\tilde{\beta})$ , 그리고 이차편미분값을  $I(\tilde{\beta})$  라 표시한다. 이 경우 귀무가설에 대한 스코어 카이제곱 검정통계량은 식 (3.11)와 같다.

$$S_j = U'(\tilde{\beta})[I(\tilde{\beta})]^{-1}U(\tilde{\beta}) \quad (3.11)$$

여기서,  $S_j$  는 스코어 카이제곱 검정통계량이다. 유의수준이  $\alpha$  일 때, 임계값은 자유도가 1인 카이제곱분포에서 카이제곱값인  $\chi_{\alpha,1}^2$  이 된다. 이 때  $S_j^*$  가  $\chi_{\alpha,1}^2$  보다 크면 귀무가설이 기각되고 그 반대일 경우, 귀무가설을 채택한다.

로지스틱 회귀분석은 선형 회귀분석과 마찬가지로 독립변수들 간의 강한 선형상관관계가 존재하는 다중공선성(multicollinearity)의 문제가 발생할 수 있다. 다중공선성이 발생하는 경우 독립변수들의 종속변수에 대한 영향이 제대로 반영되지 않을 수 있다. 다중공선성은 표준오차를 크게 하고 각 변수들의 영향력을 과소평가할 수 있다. 이러한 문제를 방지하기 위해서는 독립변수들간의 다중공선성을 일으키는 변수를 제거해야 한다. 이를 위해 공차한계(tolerance)와 분산팽창계수(variance inflation, VIF)을 검사해 볼 수 있다. 공차한계는 각 독립변수를 그 외의 다른 독립변수와 회귀분석실시 후, 결정계수를 구해서 이를 1에서 빼면 나오는 값으로 낮은 공차한계는 높은 다중공선성을 뜻하며, 0.40이하일 경우, 다중공선성이 존재하는 것으로 볼 수 있다. 분산팽창계수란 다중공선성이 존재하지 않을 때와 비교하여 추정된 계수의 분산이 얼마나 높게 평가되었는가를 뜻한다(Allison, 2012).

### 3.1.3.3 로지스틱 회귀모형의 검증

최우추정법에 의하여 로지스틱 회귀계수가 추정되었으므로, 개별 회귀계수가 독립변수를 예측하는데 있어 유의한 영향을 미치는지 알아보기 위해 왈드검정(wald test)를 행한다. 왈드검정의 귀무가설은 식 (3.12)와 같이 나타날 수 있으며 이는 로지스틱 회귀모형에 포함된 j번째 독립변수  $X_j$ 가 어떤 사건이 발생할 확률에 전혀 영향을 미치지 못한다는

의미이다. 대립가설은 어떤 사건이 발생할 확률에  $j$ 번째 독립변수  $X_j$ 가 유의한 영향을 미친다는 의미이다.

$$\begin{aligned} H_0 : \beta_j &= 0 \\ H_0 : \beta_j &\neq 0 \end{aligned} \tag{3.12}$$

여기서,  $\beta_j$ 는  $j$ 번째 독립변수  $X_j$ 의 계수이다. 왈드검정통계량은 식 (3.13)과 같이 추정량  $\beta_j$ 의 표준화 통계량  $Z_j = \frac{\beta_j}{\sqrt{\text{Var}(\beta_j)}}$ 를 사용한 값으로 주어진다.

$$W_j = \left( \frac{\beta_j}{\sqrt{\text{Var}(\beta_j)}} \right)^2 \tag{3.13}$$

여기서,  $W_j$ 는 왈드검정통계량이다. 유의수준이  $\alpha$ 일 때, 귀무가설의 기각여부를 결정하는 임계값은 자유도가 1인 카이제곱값,  $\chi_{\alpha,1}^2$ 이다. 자료로부터 계산된 검정통계량의 값을  $W_j^*$ 와 임계값  $\chi_{\alpha,1}^2$ 을 비교하여 귀무가설 채택 혹은 기각여부를 결정한다.

우도비 검정은 절편을 제외한 모든 회귀계수가 동시에 0이라는 귀무가설에 대한 유의성검정이다. 우도비 검정통계량은 다음 식 (3.14)와 같다.

$$LR = -2\ln L(\beta_0) + 2\ln L(\beta) \tag{3.14}$$

여기서,  $LR$  은 우도비 검정통계량이다. 자료에서 구해진 우도비 검정통계량  $LR^*$  는 유의수준이  $\alpha$  일 때, 자유도가  $k$  인 카이제곱값  $\chi_{\alpha,k}^2$  을 임계값으로 두고 귀무가설의 기각여부를 결정한다.

데비언스 검정은 설정된 로지스틱 회귀모형이 완전정보를 가진 모형과 비교해서 유의한 차이가 있는지 여부를 평가하는 방법이다. 귀무가설은 식 (3.15)과 같으며 이는 로지스틱회귀모형이 어떤 사건이 발생할 확률을 설명하는데 충분한 정보를 제공한다는 의미이다.

$$H_0 : \pi(x_i) = \frac{\exp(x_i' \beta)}{1 + \exp(x_i' \beta)} \quad (3.15)$$

$$H_0 : \pi(x_i) \neq \frac{\exp(x_i' \beta)}{1 + \exp(x_i' \beta)}$$

완전정보를 가진 모형의 우도는 다음 식 (3.16)과 같다.

$$L(F) = \prod_{i=1}^n \pi_i^{y_i} (1 - \pi_i)^{1-y_i} \quad (3.16)$$

여기서,  $L(F)$  는 모형의 우도이다. 데비언스 검정통계량은 다음 식 (3.17)과 같다. 설정된 로지스틱 회귀모형의 우도는  $L(\beta)$  이며 설정된 로지스틱 회귀모형의 예측력이 충분하다면, 우도  $L(\beta)$  는 1에 가까운 값을 갖게 되므로  $L(F)$  와의 차이가 작아진다. 데비언스 검정통계량은 이 두가지 우도의 비율에 자연대수를 취해서 구해진다.

$$D = -2 \ln L(\beta) \quad (3.17)$$

여기서,  $D$ 는 데비언스 검정통계량이다. 데비언스 검정통계량이 작을수록 현재 설정된 로지스틱 회귀모형의 적합도는 좋아진다. 자료에서 구해진 데비언스 검정통계량  $D^*$ 는 자유도가  $n-k-1$ 인 카이제곱값인  $\chi^2_{\alpha, n-k-1}$ 을 임계값으로 한다.

## 3.2 수질 지수 모델의 이론적 연구

### 3.2.1 퍼지 집합 이론

퍼지 집합 이론은 1965년 Zadeh에 의해 처음 제안된 이론으로 명확한 구분이 없어 전통적인 수학 집합으로 나타내기 힘든 개념을 표현하기 위한 이론이다. 즉, 어떤 원소가 ‘집합 A에 속한다’ 혹은 ‘속하지 않는다’라는 이진 논리로 나타나는 전통적인 집합 표시 방법으로는 표현될 수 없는 개념들, 즉, 이진 논리에서 벗어난 다치성으로 나타내기 위한 이론이다. 예를 들어 ‘키가 180 cm보다 큰 사람’ 혹은 ‘수온이 20°C보다 높은 지역’은 수학적 집합으로 나타낼 수 있으나 ‘키가 큰 사람’ 혹은 ‘물이 따뜻한 지역’이라는 개념들은 그 기준이 명확하지 않기 때문에 그럴 수 없다. 퍼지 집합 이론에서는 이러한 분명한 기준이 없는, 즉 모호한 기준을 가진 개념들을 다룬다. 퍼지 집합이론에서는 0에서 1사이의 값을 가지는 소속도(membership value)를 이용하여 퍼지 집합에 어떤 원소가 속할 수 있는 자격이 어느 정도인지 표현한다. 소속도가 1일 경우, 그 원소는 퍼지 집합에 속할 수 있는 자격이 완전하며, 0일 경우, 자격이 아예 없다. 다음 식(3.18)과 (3.19)는 각각 소속도의 개념으로 전통적으로 사용되는 수학적 집합,  $A$ 와 퍼지 집합,  $\tilde{A}$ 를 표현한다.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x \in A \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.18)$$

$$\tilde{A} = \{[x, \mu_{\tilde{A}}(x)]: x \in U, 0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x) \leq 1\} \quad (3.19)$$

여기서,  $\mu_A$ 는 집합  $A$ 의 소속도,  $\mu_{\tilde{A}}$ 는 집합  $\tilde{A}$ 의 소속도를 말한다.

퍼지 집합 이론은 인간의 사고 능력과 같이 불확실성 아래 부정확하고 모호한 의사결정을 내리는 경우에 많이 사용된다. 실제 퍼지 집합은 다양한 자동제어 분야, 패턴 인식 분야, 게임 이론과 같은 경제학 등 다양한 분야에 활발히 적용되고 있다. 수자원과 같은 환경적 요소를 다룰 때도 퍼지 논리는 유용하게 사용될 수 있다. 환경적 요소를 표현할 때에는 명확한 기준이 없는 추상적인 표현이 사용되는 경우가 많다. 또한, 환경적 요소는 그 안에 사회 전체가 동의한 명확한 기준이 존재하지 않는 경우가 일반적이다. 이러한 특징으로 인해 환경적 요소에 대한 평가 혹은 의사결정을 내릴 때 퍼지 집합 이론의 적용이 적절하다. 본 연구에서도 하천 레크리에이션에 적절한 수질 기준이 어느 정도인지 그 명확한 기준이 모호하고, 하천 레크리에이션을 위한 수질이 얼마나 '깨끗'한지를 표현하기 위해 퍼지 집합 이론의 적용이 적절하다.

### 3.2.2 소속함수

소속함수는 소속도와 변수와의 관계를 나타낸 식을 말하며 이를 그래프로 표현할 수 있다. 그림 3.1과 3.2는 각각 앞에서 제시한 수학적 집합,  $A$ 와 퍼지 집합,  $\tilde{A}$ 를 소속함수로 표현한 것이다. 퍼지 집합 이론에서 모든 정보는 소속도를 통해 나타나므로 소속함수를 적절하게 정의하는 것이 매우 중요하다.

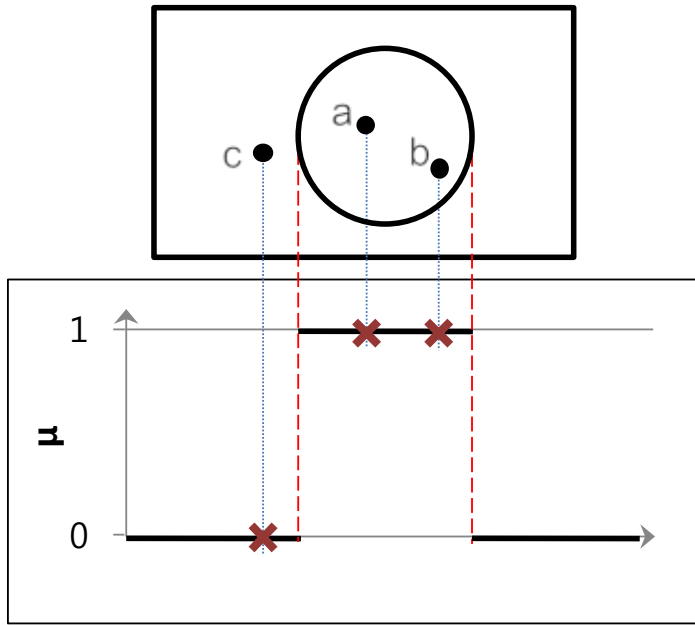


그림 3.1 수학적 집합의 소속함수 개념

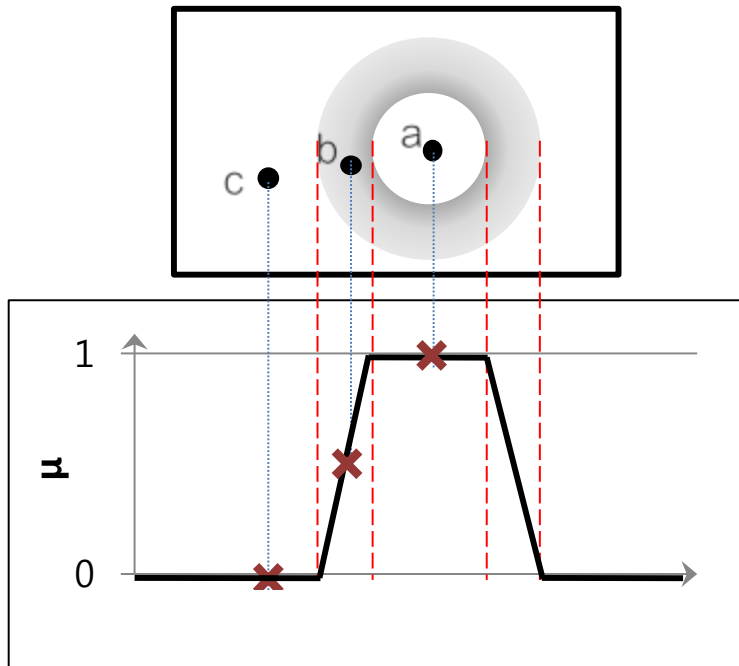


그림 3.2 퍼지 집합의 소속함수 개념

소속 함수는 그 형태가 다양한데 대표적인 형태로는 가장 기본적인 형태인 삼각형형 (triangular type) 과 사다리꼴형 (trapezoidal type) 부터 가우스형 (Gaussian type), 벨형 (bell type) 그리고 S자형 (s-shaped type) 등이 있다. 다음 식 (3.20), (3.21), (3.22), (3.23) 그리고 (3.24) 은 각각 삼각형형, 사다리꼴형, 가우스형, 벨형, S자형의 소속함수의 함수이며 그림 3.3은 각 함수의 형태를 나타낸다. 이외에도 소속함수는 다양한 형태로 나타낼 수 있다.

$$triangle(x : a, b, c) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x - a) / (b - a) & a \leq x < b \\ (c - x) / (c - b) & b \leq x < c \\ 0 & c \leq x \end{cases} \quad (3.20)$$

$$trapezoid(x : a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x - a) / (b - a) & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ (d - x) / (d - c) & c \leq x < d \\ 0 & c \leq x \end{cases} \quad (3.21)$$

$$Gaussian(x : m, \sigma) = \exp\left(-\frac{(x - m)^2}{\sigma^2}\right) \quad (3.22)$$

$$bell(x : a, b, c) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x - c}{a}\right|^{2b}} \quad (3.23)$$



$$S(x : a, b) = \begin{cases} 0 & x < a \\ 2 \left( \frac{x-a}{b-a} \right)^2 & a \leq x < \frac{a+b}{2} \\ 1 - 2 \left( \frac{x-b}{b-a} \right)^2 & \frac{a+b}{2} \leq x < b \\ 1 & b \leq x \end{cases} \quad (3.24)$$

### 3.2.3 퍼지 합성 방법

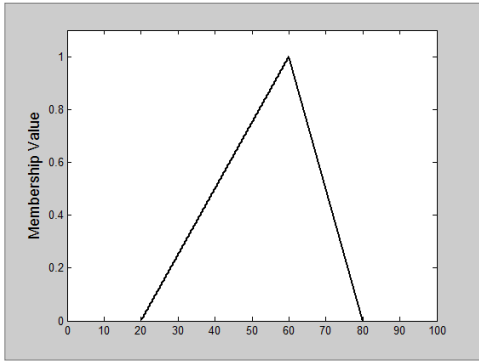
퍼지 집합 이론을 적용한 의사결정방법으로 다양한 방법이 개발되어 왔으며 그 중 퍼지 합성 방법(Fuzzy Synthetic Evaluation, FSE) 방법은 다양한 정보를 하나의 정보로 축약시킬 수 있다는 점에서 종합수질지수를 비롯한 환경 지수를 개발할 때 적용이 많이 되어 왔다. FSE는 다음과 같이 네 단계로 이루어진다.

(1단계): 하나의 정보로 축약될 인자 선택

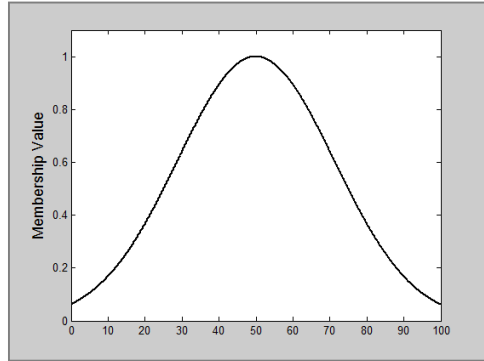
(2단계): 각 인자의 등급 및 등급에 따른 기준 선정

(3단계): (2단계)의 기준을 토대로 한 인자들의 등급별 소속함수 정의

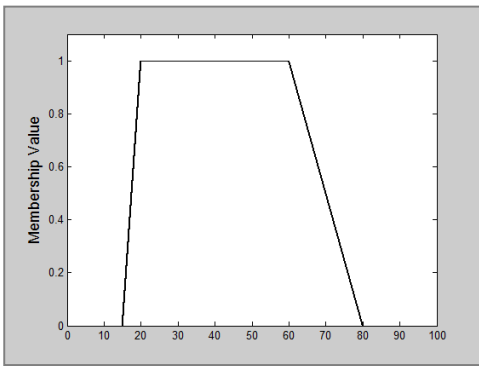
(4단계): 소속함수를 통해 산출된 소속도로 이루어진 평가행렬 생성과 소속도들을 지수로 축약할 종합화 방법 선정



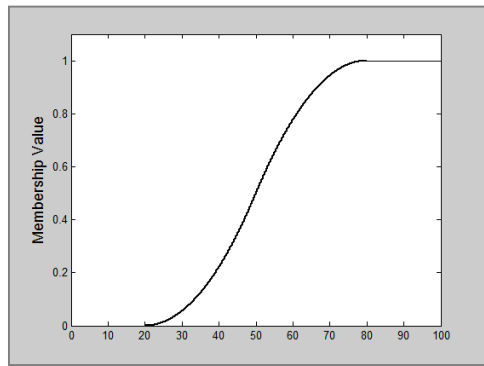
(a) 삼각형형



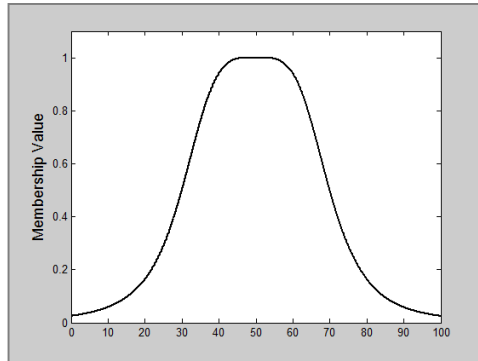
(b) 가우스형



(c) 사다리꼴형



(d) S자형



(e) 벨형

그림 3.3 소속함수의 형태

FSE의 첫 단계로 인자로 축약되어 나타날 인자를 선택해야 한다. 인자는 연구의 목적과 방향에 맞게 기준에 따라 선택된다. 또한, 연구의 목적에 따라 최종 정보의 등급, 예를 들어, 아주 좋음, 좋음, 나쁨 등을 설정해야 한다. 인자와 등급을 설정한 후, 각 인자의 등급별 기준을 선정한다. 그 후 이러한 기준을 소속함수로 나타내어 기준에 존재하는 모호함을 표현한다. 소속함수는 그 형태와 정하는 방법이 다양하므로 충분한 비교와 고찰을 통해 적절한 소속함수를 정해야 한다. 소속함수에 의해 각 인자는 등급별로 소속도를 가지게 되며 이러한 소속도로 이루어진 식(3.25)와 같은 평가행렬을 만들 수 있다.

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \dots & \mu_{1j} & \dots & \mu_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_{i1} & \dots & \mu_{ij} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_{m1} & \dots & \dots & \dots & \mu_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

여기서,  $\boldsymbol{\mu}$ 는 소속도를 말하며,  $i$ 는 인자,  $j$ 는 등급이다. 평가행렬에 나열된 소속도를 나타내는 값들은 적절한 최종화 방법을 통해 하나의 정보로 요약될 수 있다.

## 4. RRIM의 개발

### 4.1 RRIM 구성 및 FCG, RRG 정의

RRIM은 분변성 대장균 모델과 수질 지수 모델로 구성되었다. 분변성 대장균 모델에서는 분변성 대장균의 농도에 따라 가능한 수상 레크리에이션의 수준을 첫 번째로 결정하였다. 이를 위하여 분변성 대장균 모델에서는 분변성 대장균 등급을 예측하였으며 본 연구에서는 분변성 대장균 등급을 수체와 인체의 접촉 정도에 따라 가능한 레크리에이션 활동에 따라 세 가지로 나누었다. 200 CFU/100mL 이하일 때를 1등급으로 보고 이 때에는 수영, 수상스키 등과 같은 직접접촉 활동이 가능하다고 보았다. 200 CFU/100mL를 초과하고 1000 CFU/100mL 이하일 때에는 2등급으로 보고 직접접촉과 보트, 낚시 등과 같은 간접접촉 활동이 가능하다고 정하였다. 마지막으로 1000 CFU/100mL 초과 시에는 어떠한 접촉활동도 불가능하다고 판단하였다.

이 후 수질 지수 모델에서 수질 점수, WQI를 결정하였다. 또한, RRIM 알고리즘을 개발하고 이에 따라 WQI를 앞에서 예측된 FCG에 따라 최종적으로 RRI와 RRG로 변환하였다. RRIM 모델에서 RRG는 네 개로 나누어 정의하였다.

- 우수(Excellent, I): 수체와의 직접접촉이 일어나는 활동, 수영, 수상스키 등의 직접접촉 활동을 할 시 매우 안전할 정도로 수질이 훌륭함.
- 양호(Good, II): 수체와의 직접접촉이 일어나는 활동, 수영, 수상스키 등을 할 시 비교적 안전할 정도로 수질이 좋음.
- 보통(Acceptable, III): 수체와의 간접접촉이 일어나는 활동, 보트, 낚시 등을 할 시 안전할 정도로 수질이 보통 수준임.
- 불량(Unacceptable, IV): 수체와의 직접, 간접접촉이 불가능할 정도로 수질이 불량함.

## 4.2 분변성 대장균 모델의 개발

하천의 특성에 따라 분변성 대장균이 어떤 인자와 어느 정도의 상관관계를 갖느냐는 다르므로 분변성 대장균 모델 또한 하천에 따라 다르다. 본 연구에서는 낙동강을 적용 지점으로 선정하여 낙동강의 분변성 대장균 모델을 개발하였다. 분변성 대장균 모델을 개발하기 위하여 실시간 데이터로 측정가능한 인자들과 분변성 대장균의 데이터를 수집하였고 이를 이용하여 로지스틱 회귀분석을 행하였다. 도출된 로지스틱 반응함수를 이용하여 FCG를 예측할 수 있었다.

### 4.2.1 데이터 수집

낙동강의 분변성 대장균 모델을 개발하기 위하여 낙동강에 위치한 수질측정소와 유량관측소를 통해 분변성 대장균과 상관관계가 있다고 판단되는 수질 데이터 및 유량 데이터를 수집하였다. 데이터를 수집한 지점은 구미보 상류 지점, 칠곡보 상류 지점, 칠곡보 하류 지점, 강정고령보 상류 지점, 달성보 상류 지점, 창녕함안보 상류 지점으로 각 지점의 위치는 그림 4.1에 나타낸 바와 같다.

각 지점에서 데이터를 수집한 일반수질측정소, 유량관측소의 명칭과 수집된 데이터 세트의 기간은 표 4.1과 같다. 또한, 일반수질측정소, 유량관측소에서 수집된 데이터의 종류와 측정 주기는 표 4.2에 제시된 바와 같다. 데이터 수집 지점들에는 수질일반측정소와 유량관측소가 동시에 위치하고 있으므로 본 연구에서는 같은 시점에 같은 위치에서 측정된 수질과 유량데이터를 하나의 일차료 세트로 구성하여 통계 분석의 입력 자료로 이용하였다. 이용

된 데이터는 2006년 이후의 자료에 해당하였는데 그 이유는 창녕 함안보 상류지점을 제외한 다른 지점들에서 2006년을 기점으로 DO나 pH와 같은 수질 지표들은 비슷한 추이를 보여 변화가 없었지만 이와는 반대로 분변성 대장균은 변화를 보였기 때문이다. 그림 4.2 ~ 4.7은 각 지점의 분변성 대장균의 농도 변화를 보여주며 분변성 대장균의 평균 농도가 2006년 이후로 낮아짐을 볼 수 있었다.



그림 4.1 분변성 대장균 모델 개발을 위한 데이터 수집 지점

표 4.1 지점별 데이터 특성

위치	데이터 측정 지점		데이터 기간
	수질일반 측정소	유량관측소	
구미보 상류 지점	산곡	일선교	2006년~2012년
칠곡보 상류 지점	구미	구미	2006년~2010년
칠곡보 하류 지점	왜관	왜관	2006년~2010년
강정고령보 상류 지점	성주	성주	2006년~2012년
달성보 상류 지점	고령	고령교	2006년~2012년
창녕함안보 상류 지점	남지	진동	2006년~2011년

표 4.2 데이터 측정 및 관측소 특성

	데이터 측정 및 관측소	
	수질일반측정소	유량관측소
데이터 종류	분변성 대장균, 수온, DO, pH, TN, TP	유량, 1일 전 유량, 2일 전 유량, 3일 전 유량
데이터 측정 주기	주 혹은 월 단위	일 단위



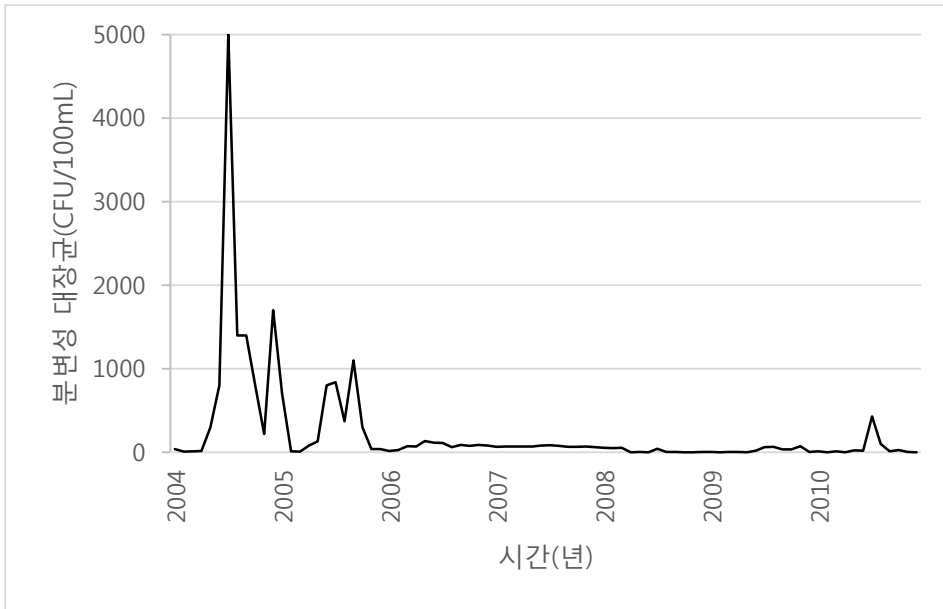


그림 4.2 구미보 상류지점의 2004 - 2012년의 분변성 대장균 농도

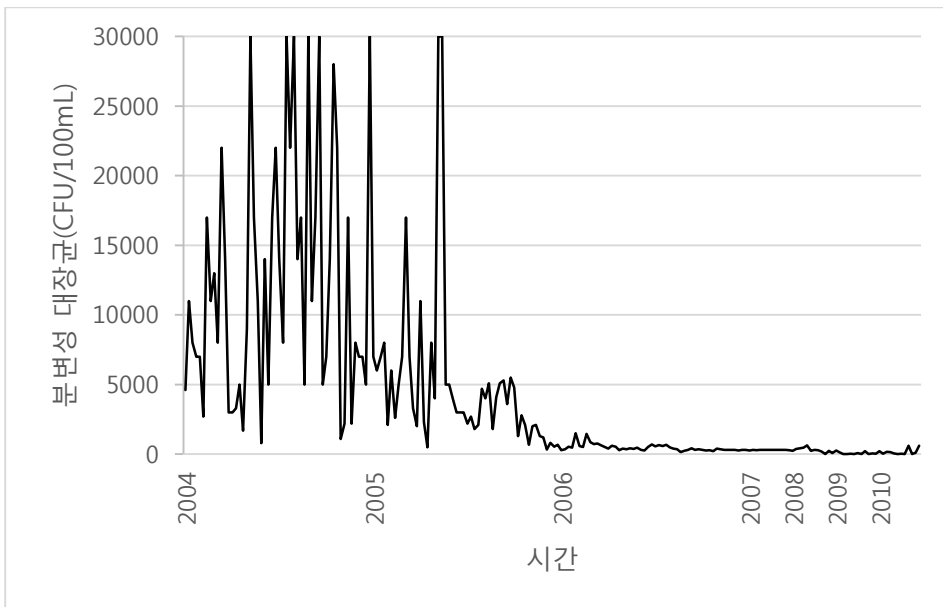


그림 4.3 철곡보 상류지점의 2004 - 2012년의 분변성 대장균 농도

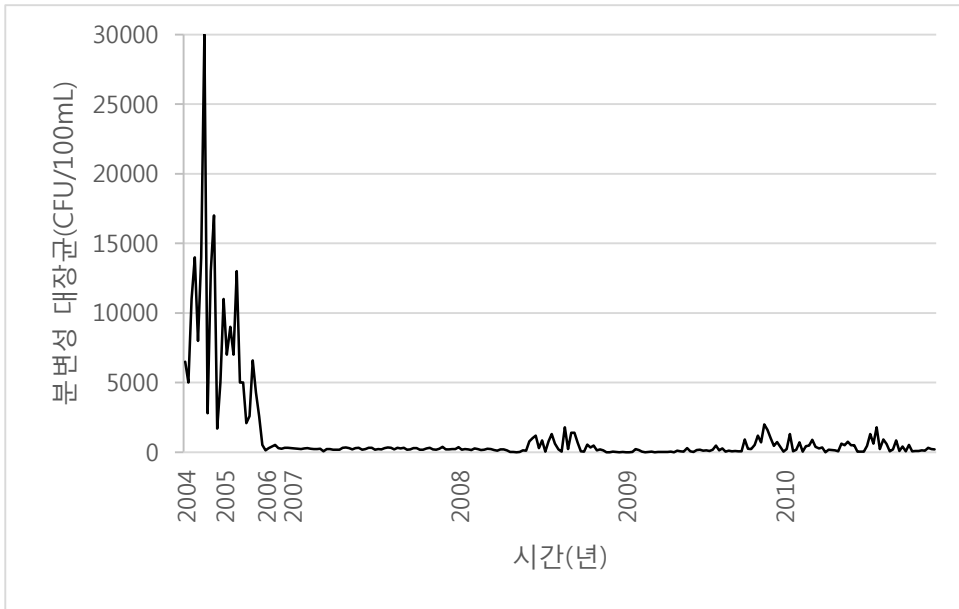


그림 4.4 칠곡보 하류지점의 2004 - 2012년의 분변성 대장균 농도

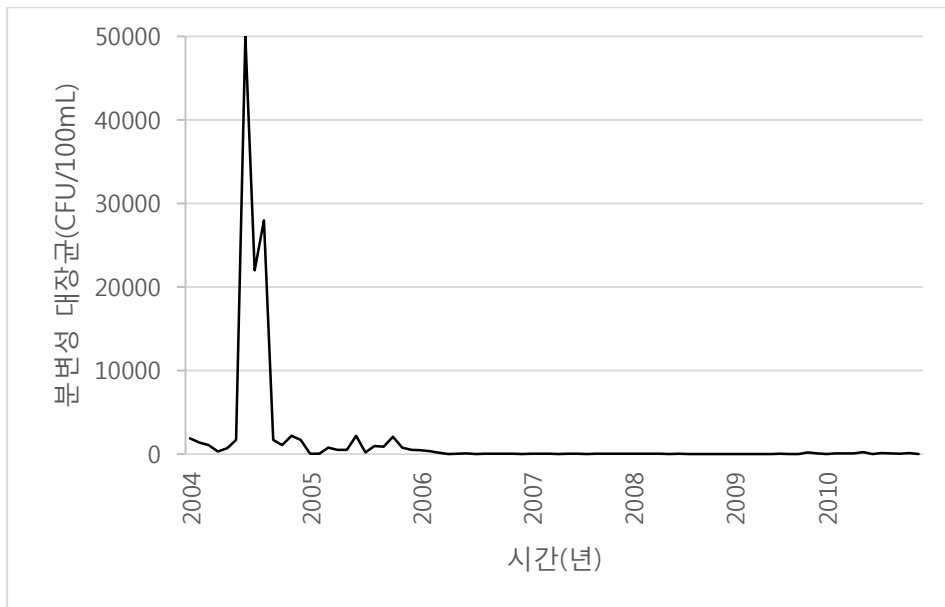


그림 4.5 강정고령보 상류지점의 2004 - 2012년의 분변성 대장균 농도

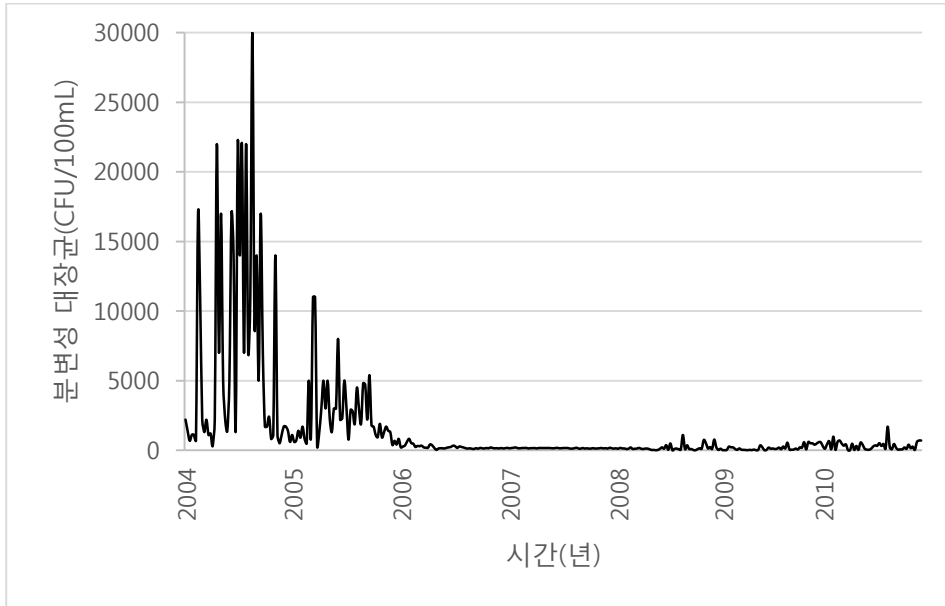


그림 4.6 달성포 상류지점의 2004 - 2012년의 분변성 대장균 농도

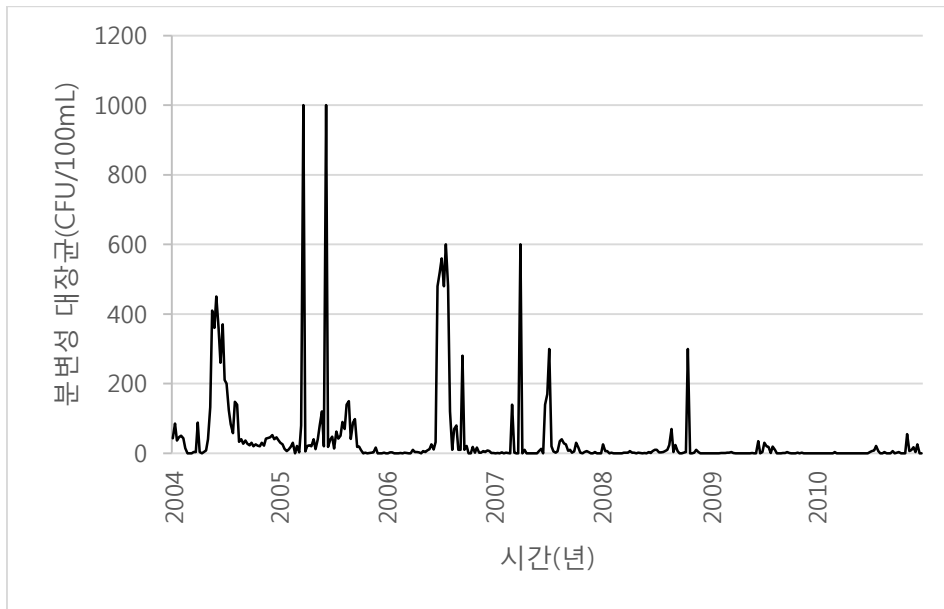


그림 4.7 창녕함안보 상류 지점의 2004 - 2012년의 분변성 대장균 농도

#### 4.2.2 데이터 추출 및 독립 변수 선택

본 연구에서의 통계분석은 SAS(Statistical Analysis System)을 사용하였다. 각 지점에서 수집한 전체 데이터 셋을 분석한 결과, 분변성 등급 중 1등급, 2등급 그리고 3등급에 해당하는 데이터 수는 각각 790개, 299개, 18개로 1등급에 매우 편향된 분포를 보였다. 만약 모든 데이터셋을 통계분석에 사용한다면 수가 상대적으로 적은 3등급을 과소평가하여 3등급을 적게 예측하고 1등급 혹은 2등급을 많이 예측하게 되는 편향된 결과를 보이게 된다. King과 Zeng은 이러한 경우 많은 수의 데이터셋의 수를 적은 수의 데이터셋의 수의 1배 ~ 5배가 되도록 하여 편향된 결과를 막을 수 있음을 연구한 바 있다. 이에 따라 본 연구에서는 1등급에 해당하는 전체 데이터에서 데이터셋을 90개, 2등급에 해당하는 데이터에서 데이터셋을 80개로 추출하였다.

분변성 대장균과 상관관계가 있어 분변성 대장균을 예측할 시 유의한 독립 변수를 선택하기 위하여 수온, DO, pH, TN, TP, 유량, 1일 전 유량, 2일 전 유량, 3일 전 유량, 유량의 로그 값, 1일 전 유량의 로그 값, 2일 전 유량의 로그 값, 3일전 유량의 로그 값의 총 13개를 검토하였다. SAS를 통해 단계별선택법을 수행하였고 그 결과 유의수준 0.05에서 분변성 대장균에 유의한 영향을 미치는 독립변수를 pH와 1일 전 유량의 로그 값으로 선택하였다. 두 변수 사이에 다중공선성이 없음을 확인하기 위하여 공차한계와 분산팽창계수를 계산하였으며 그 결과, 공차한계는 0.99, 분산팽창계수는 1.01으로 다중공선성이 없음을 확인하였다.

#### 4.2.3 로지스틱 반응함수 도출

모델의 개발 및 검증을 위하여 각 지점 별로 수집된 데이터를 훈련집단(training set)과 검증집단(validation set)으로 나누었다. 이 때 훈련집단과 검증집단의 비는 80대 20로 하여 각각 데이터셋의 수를 150개와 38개로 하였다. 두 인자를 독립변수로 하여 로지스틱 회귀함수를

통해 로지스틱 반응함수를 도출하였다. 이 때 앞에서 제시한 바와 같이 분변성 대장균의 등급, 1등급, 2등급, 3등급에 따라 종속변수를 1, 2, 3과 같은 범주형 변수로 주었다. 분변성 대장균의 각 등급에 따른 반응함수는 식 (4.1), (4.2), (4.3)과 같다.

$$P_1 = \frac{\exp(-4.23 + 0.89PH - 1.44LOGQ_1)}{1 + \exp(-4.23 + 0.89PH - 1.44LOGQ_1)} \quad (4.1)$$

$$P_2 = \frac{\exp(-1.68 + 0.89PH - 1.44LOGQ_1)}{1 + \exp(-1.68 + 0.89PH - 1.44LOGQ_1)} \quad (4.2)$$

$$P_3 = 1 - (P_1 + P_2) \quad (4.3)$$

여기서,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ 는 각각 분변성 대장균 등급이 1, 2, 3등급을 예측할 확률이다. 또한,  $PH$ 는 pH,  $LOGQ_1$ 는 하루 전 날 유량의 로그값을 말한다. 개별 회귀계수의 왈드검정을 유의수준 0.05에서 실시하였으며 그 결과 pH와 유량의 로그값의  $p$ -값은 각각 0.0033, 0.0002로 모두 유의한 영향을 미침을 확인하였다. 다음으로 우도비 카이제곱 검정 통계량의  $p$ -값은 0.0001보다 작은 값을 나타내어 모형에 유의한 독립변수가 포함됨을 확인하였다. 데비언스 검정통계의  $p$ -값은 0.9475로 매우 높은 값을 보여 완전정보를 가진 모형과 비교하여 추정된 모형이 유의한 차이가 없다고 판단하였다.

본 연구에서 유도한 식을 검증집단에 적용하여 모형을 검증하였다. 적용 결과, 38개의 검증 데이터 중 24개 데이터가 올바르게 예측되어 정분류율은 0.63으로 나타났다. 검증 결과를 표 4.3와 그림 4.8에 나타내었으며, 표 4.4에 분변성 대장균 모델 유도 및 검증에 사용한 전체 입력자료와 결과를 수록하였다. 표에서  $Q_{t-1}$ 는 1일 전 유량,  $\text{Log}(Q_{t-1})$ 는 1일 전 유량의 로그값, FC는 분변성 대장균의 측정치,  $FCG_m$ 는 분변성 대장균 측정치의 등급,  $FCG_p$ 는 분변성 대장균 예측치의 등급을 말한다.

표 4.3 분변성 대장균 모델 검증 입력자료의 정분류표

		관측 데이터 수			합계
		1	2	3	
예측 데이터 수	1	15	8	1	21
	2	3	8	2	9
	3	0	0	1	2
합계		18	16	4	38

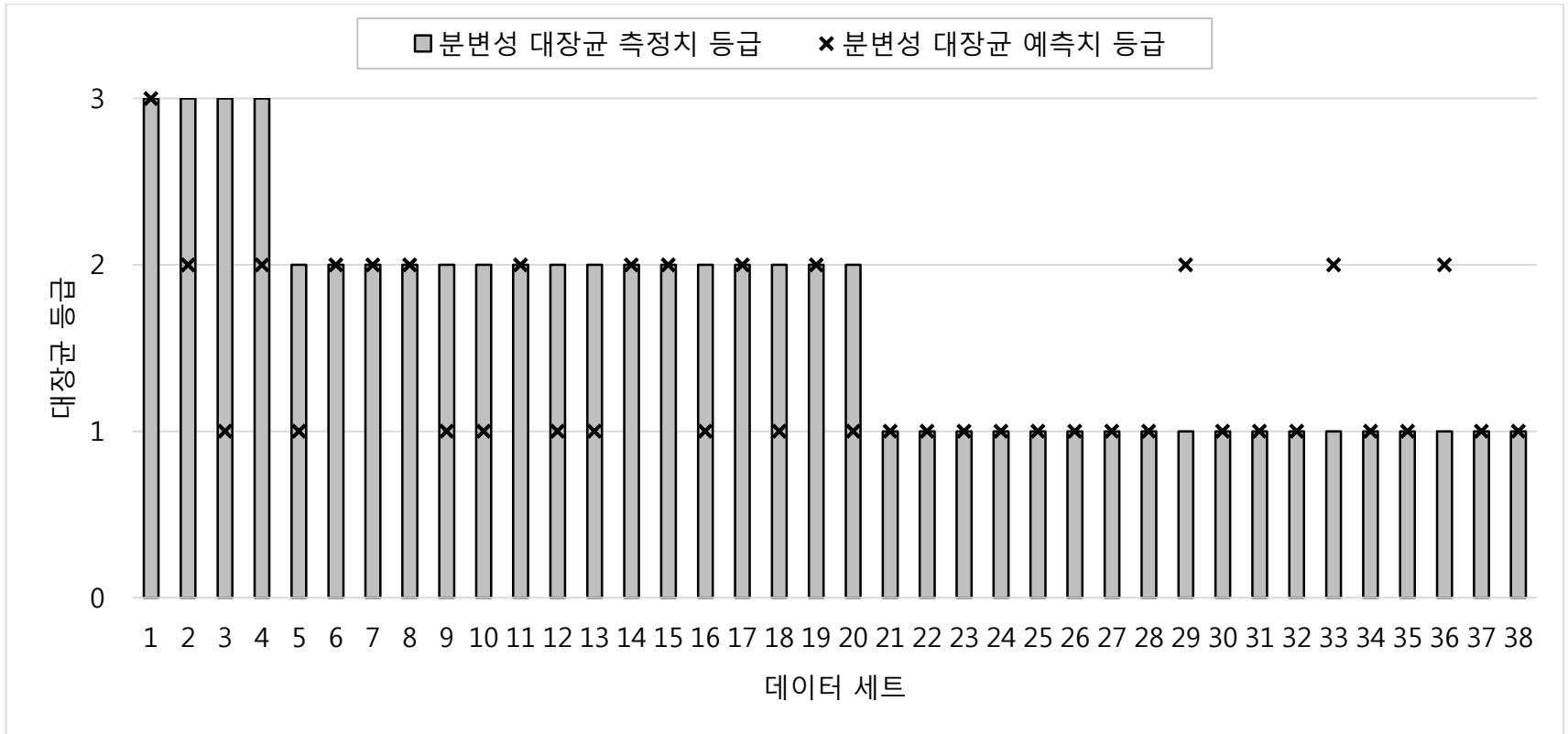


그림 4.8 분변성 대장균 모델 검증 입력자료의 실측치와 예측치의 비교

표 4.4 분변성 대장균 모델 개발 및 검증 입력자료 및 결과(계속)

종류	No.	지점	날짜	pH	$Q_{t-1}$ (m <sup>3</sup> )	$\text{Log}(Q_{t-1})$ (CFU/100mL)	FC	FCG <sub>m</sub>	FCG <sub>p</sub>	일치여부
유도 데이터	1	왜관	2010-08-12	7.5	858.90	2.93	1800	3	2	불일치
	2	왜관	2008-08-21	7.9	681.46	2.83	1800	3	2	불일치
	3	고령	2010-08-27	7.6	253.95	2.40	1700	3	2	불일치
	4	왜관	2009-11-26	7.8	46.48	1.67	1600	3	1	불일치
	5	왜관	2009-11-19	6	349.88	2.54	1500	3	3	일치
	6	구미	2006-02-02	7.1	79.26	1.90	1500	3	2	불일치
	7	구미	2006-02-23	7.1	80.00	1.90	1460	3	2	불일치
	8	왜관	2008-09-11	8.3	123.54	2.09	1400	3	1	불일치
	9	왜관	2010-07-29	8.2	68.82	1.84	1300	3	1	불일치
	10	왜관	2010-01-21	8.3	49.54	1.69	1300	3	1	불일치
	11	왜관	2008-07-24	7.6	126.00	2.10	1300	3	2	불일치
	12	고령	2012-09-20	7.2	1559.33	3.19	1300	3	3	일치
	13	왜관	2008-06-19	7.8	104.25	2.02	1200	3	2	불일치
	14	고령	2008-08-22	6.5	608.88	2.78	1100	3	3	일치
	15	왜관	2009-12-03	8	49.98	1.70	1000	3	1	불일치
	16	왜관	2010-08-26	8.1	124.70	2.10	920	2	1	불일치
	17	왜관	2010-06-03	7.5	168.88	2.23	760	2	2	일치
	18	구미	2006-03-16	8.5	70.92	1.85	230	2	1	불일치
	19	고령	2010-03-05	7.3	193.68	2.29	200	2	2	일치



표 4.4 분변성 대장균 모델 개발 및 검증 입력자료 및 결과(계속)

종류	No.	지점	날짜	pH	Q <sub>t-1</sub> (m <sup>3</sup> )	Log(Q <sub>t-1</sub> ) (CFU/100mL)	FC	FCG <sub>m</sub>	FCG <sub>p</sub>	일치여부
유도 데이터	20	구미	2006-07-14	7.2	876.86	2.94	660	2	2	일치
	21	고령	2010-01-29	7.8	65.72	1.82	650	2	1	불일치
	22	왜관	2010-05-20	7.8	183.60	2.26	620	2	2	일치
	23	왜관	2008-07-30	7.5	491.83	2.69	620	2	2	일치
	24	고령	2010-12-10	8.1	54.69	1.74	600	2	1	불일치
	25	고령	2010-02-26	7.8	73.18	1.86	600	2	1	불일치
	26	구미	2006-02-09	7.1	79.75	1.90	580	2	2	일치
	27	구미	2006-07-06	7.7	111.82	2.05	560	2	2	일치
	28	왜관	2010-10-28	7.6	72.35	1.86	540	2	1	불일치
	29	왜관	2006-07-14	6.9	1048.87	3.02	520	2	3	불일치
	30	구미	2006-02-16	7	79.30	1.90	510	2	2	일치
	31	구미	2006-08-04	7.7	305.28	2.48	500	2	2	일치
	32	고령	2009-12-11	7.5	27.10	1.43	480	2	1	불일치
	33	왜관	2010-07-22	8.2	193.30	2.29	460	2	2	일치
	34	구미	2006-06-01	6.9	88.97	1.95	460	2	2	일치
	35	고령	2011-03-04	7.3	47.32	1.68	450	2	1	불일치
	36	구미	2006-08-09	7.6	131.42	2.12	400	2	2	일치
	37	고령	2010-05-28	8.5	70.92	1.85	230	2	1	불일치
38	고령	2010-11-12	7.3	193.68	2.29	200	2	2	일치	

표 4.4 분변성 대장균 모델 개발 및 검증 입력자료 및 결과(계속)

종류	No.	지점	날짜	pH	Q <sub>t-1</sub> (m <sup>3</sup> )	Log(Q <sub>t-1</sub> ) (CFU/100mL)	FC	FCG <sub>m</sub>	FCG <sub>p</sub>	일치여부
유도 데이터	39	구미	2006-05-10	7.3	106.42	2.03	360	2	2	일치
	40	구미	2006-01-12	7.1	79.00	1.90	350	2	2	일치
	41	왜관	2010-04-08	7.2	188.82	2.28	340	2	2	일치
	42	고령	2010-03-19	7.5	181.13	2.26	330	2	2	일치
	43	왜관	2007-08-08	8.1	398.25	2.60	320	2	2	일치
	44	왜관	2007-05-30	7.9	177.58	2.25	320	2	2	일치
	45	고령	2011-09-16	8	325.80	2.51	320	2	2	일치
	46	왜관	2007-08-22	8.1	144.67	2.16	320	2	1	불일치
	47	왜관	2007-04-25	8.2	111.96	2.05	320	2	1	불일치
	48	구미	2006-11-15	8.2	78.01	1.89	320	2	1	불일치
	49	왜관	2007-01-05	7.6	91.00	1.96	300	2	2	일치
	50	왜관	2007-05-23	7.9	106.58	2.03	300	2	1	불일치
	51	왜관	2007-05-08	8.7	96.29	1.98	300	2	1	불일치
	52	구미	2007-11-07	8.1	54.00	1.73	300	2	1	불일치
	53	구미	2007-02-07	7.3	56.00	1.75	300	2	2	일치
	54	구미	2006-10-04	8.1	80.62	1.91	300	2	1	불일치
	55	구미	2006-09-06	7.9	86.01	1.93	300	2	1	불일치
	56	구미	2006-04-27	8.5	70.92	1.85	230	2	1	불일치
	57	왜관	2006-05-10	7.3	193.68	2.29	200	2	2	일치

표 4.4 분변성 대장균 모델 개발 및 검증 입력자료 및 결과(계속)

종류	No.	지점	날짜	pH	$Q_{t-1}$ (m <sup>3</sup> )	$\text{Log}(Q_{t-1})$ (CFU/100mL)	FC	FCG <sub>m</sub>	FCG <sub>p</sub>	일치여부
유도 데이터	58	왜관	2009-08-13	9	169.13	2.23	280	2	1	불일치
	59	고령	2010-01-08	8.1	65.72	1.82	280	2	1	불일치
	60	왜관	2006-10-25	8.9	74.00	1.87	260	2	1	불일치
	61	구미	2006-12-13	7.8	78.56	1.90	260	2	1	불일치
	62	구미	2006-10-11	7.8	79.58	1.90	260	2	1	불일치
	63	고령	2010-11-26	8	52.03	1.72	260	2	1	불일치
	64	고령	2012-07-19	7.7	405.72	2.61	250	2	2	일치
	65	왜관	2009-10-15	7.8	66.40	1.82	250	2	1	불일치
	66	왜관	2010-08-20	8	1246.59	3.10	240	2	2	일치
	67	왜관	2007-12-27	7.5	79.21	1.90	240	2	2	일치
	68	성주	2012-09-13	7.5	425.51	2.63	240	2	2	일치
	69	왜관	2010-12-16	7.7	72.45	1.86	240	2	1	불일치
	70	성주	2010-06-10	8.3	96.84	1.99	240	2	1	불일치
	71	왜관	2007-02-28	7.7	96.00	1.98	230	2	2	일치
	72	고령	2011-07-28	7.8	376.47	2.58	220	2	2	일치
	73	왜관	2008-04-10	7.5	81.33	1.91	210	2	2	일치
	74	왜관	2007-08-14	7.8	409.13	2.61	210	2	2	일치
	75	왜관	2007-11-07	8.4	87.67	1.94	210	2	1	불일치
76	왜관	2008-08-07	9.4	140.42	2.15	200	2	1	불일치	

표 4.4 분변성 대장균 모델 개발 및 검증 입력자료 및 결과(계속)

종류	No.	지점	날짜	pH	$Q_{t-1}$ (m <sup>3</sup> )	$\text{Log}(Q_{t-1})$ (CFU/100mL)	FC	FCG <sub>m</sub>	FCG <sub>p</sub>	일치여부
유도 데이터	96	왜관	2008-05-22	8.3	82.00	1.91	130	1	1	일치
	97	고령	2009-08-21	9.4	127.74	2.11	130	1	1	일치
	98	고령	2008-01-18	7.8	87.83	1.94	130	1	1	일치
	99	고령	2007-08-24	8.1	69.50	1.84	130	1	1	일치
	100	고령	2007-03-09	8	215.67	2.33	130	1	2	불일치
	101	왜관	2009-08-27	8.4	93.26	1.97	120	1	1	일치
	102	고령	2009-09-25	8.2	44.79	1.65	120	1	1	일치
	103	고령	2008-04-11	8.1	73.92	1.87	120	1	1	일치
	104	고령	2007-12-20	7.5	23.08	1.36	120	1	1	일치
	105	고령	2007-08-03	8.5	99.92	2.00	120	1	1	일치
	106	고령	2006-08-18	8.3	87.59	1.94	120	1	1	일치
	107	성주	2010-02-11	7.5	46.43	1.67	110	1	1	일치
	108	고령	2011-02-01	7.8	25.94	1.41	110	1	1	일치
	109	고령	2009-06-26	8	67.88	1.83	110	1	1	일치
110	고령	2012-09-27	7.6	49.44	1.69	100	1	1	일치	
111	고령	2008-05-30	7.2	126.17	2.10	100	1	2	불일치	
112	고령	2008-01-31	7.6	71.58	1.85	90	1	1	일치	
113	고령	2011-01-07	7.9	41.46	1.62	80	1	1	일치	
114	왜관	2010-05-13	7.6	112.21	2.05	80	1	2	불일치	

표 4.4 분변성 대장균 모델 개발 및 검증 입력자료 및 결과(계속)

종류	No.	지점	날짜	pH	$Q_{t-1}$ (m <sup>3</sup> )	$\text{Log}(Q_{t-1})$ (CFU/100mL)	FC	FCG <sub>m</sub>	FCG <sub>p</sub>	일치여부
유도 데이터	115	성주	2010-03-11	7.8	115.57	2.06	80	1	2	불일치
	116	산곡	2006-03-08	7.6	30.34	1.48	74	1	1	일치
	117	산곡	2007-03-07	7.7	76.95	1.89	70	1	1	일치
	118	성주	2011-11-10	7.8	136.37	2.13	70	1	2	불일치
	119	고령	2011-03-11	8.2	28.32	1.45	65	1	1	일치
	120	산곡	2007-09-11	8.1	420.54	2.62	65	1	2	불일치
	121	왜관	2009-05-07	9.9	26.65	1.43	60	1	1	일치
	122	산곡	2007-12-04	8.4	40.00	1.60	60	1	1	일치
	123	산곡	2009-07-27	8	309.75	2.49	60	1	2	불일치
	124	구미	2009-11-10	8	44.47	1.65	58	1	1	일치
	125	남지	2010-11-08	7.6	121.45	2.08	55	1	2	불일치
	126	성주	2007-02-01	8.2	206.83	2.32	50	1	2	불일치
	127	성주	2008-04-10	7.6	64.67	1.81	44	1	1	일치
	128	왜관	2010-02-18	8.2	81.15	1.91	40	1	1	일치
	129	왜관	2009-05-14	8.4	18.69	1.27	40	1	1	일치
	130	성주	2007-05-31	9	77.83	1.89	40	1	1	일치
	131	남지	2011-12-06	7.7	349.69	2.54	39	1	2	불일치
	132	산곡	2009-10-08	7.3	48.08	1.68	34	1	1	일치
133	산곡	2009-09-09	8.6	41.79	1.62	34	1	1	일치	

표 4.4 분변성 대장균 모델 개발 및 검증 입력자료 및 결과(계속)

종류	No.	지점	날짜	pH	$Q_{t-1}$ (m <sup>3</sup> )	$\text{Log}(Q_{t-1})$ (CFU/100mL)	FC	FCG <sub>m</sub>	FCG <sub>p</sub>	일치여부
유도 데이터	134	구미	2010-07-14	7.9	279.34	2.45	30	1	2	불일치
	135	구미	2009-05-12	7.9	4.87	0.69	28	1	1	일치
	136	고령	2011-09-30	8.2	65.14	1.81	26	1	1	일치
	137	고령	2008-12-19	7.9	38.54	1.59	25	1	1	일치
	138	구미	2009-12-10	7.1	39.81	1.60	24	1	2	불일치
	139	왜관	2008-12-10	8.1	66.67	1.82	20	1	1	일치
	140	산곡	2010-06-14	8.1	35.95	1.56	20	1	1	일치
	141	구미	2009-03-11	8	32.63	1.51	20	1	1	일치
	142	고령	2010-04-30	7.9	183.25	2.26	20	1	2	불일치
	143	남지	2011-04-14	8	156.56	2.19	18	1	2	불일치
	144	산곡	2006-01-04	7.3	28.00	1.45	16	1	1	일치
	145	남지	2011-06-14	7.9	278.40	2.44	12	1	2	불일치
	146	구미	2009-08-20	9.2	118.01	2.07	10	1	1	일치
	147	남지	2011-06-02	7.8	234.47	2.37	10	1	2	불일치
	148	남지	2008-08-12	8	171.50	2.23	10	1	2	불일치
149	남지	2008-07-08	8.6	335.42	2.53	10	1	2	불일치	
150	남지	2006-09-05	8.1	248.39	2.40	10	1	2	불일치	

표 4.4 분변성 대장균 모델 개발 및 검증 입력자료 및 결과(계속)

종류	No.	지점	날짜	pH	$Q_{t-1}$ (m <sup>3</sup> )	$\text{Log}(Q_{t-1})$ (CFU/100mL)	FC	FCG <sub>m</sub>	FCG <sub>p</sub>	일치여부
검증 데이터	1	남지	2006-07-20	6.2	10288.72	4.01	1500	3	3	일치
	2	왜관	2008-09-04	8.0	181.88	2.26	1400	3	2	불일치
	3	왜관	2009-11-05	7.4	46.79	1.67	1200	3	1	불일치
	4	왜관	2008-06-12	7.9	152.88	2.18	1000	3	2	불일치
	5	고령	2010-12-17	7.7	70.85	1.85	700	2	1	불일치
	6	왜관	2010-09-02	7.6	726.61	2.86	600	2	2	일치
	7	고령	2010-05-20	7.5	134.45	2.13	550	2	2	일치
	8	성주	2006-02-02	7.1	147.44	2.17	480	2	2	일치
	9	왜관	2006-02-16	7.4	49.92	1.70	420	2	1	불일치
	10	구미	2006-11-08	8.2	79.00	1.90	360	2	1	불일치
	11	왜관	2007-06-27	8.1	577.67	2.76	320	2	2	일치
	12	구미	2007-06-13	7.8	67.88	1.83	320	2	1	불일치
	13	남지	2008-10-21	8.8	75.00	1.88	300	2	1	불일치
	14	고령	2006-07-07	7.4	114.87	2.06	290	2	2	일치
	15	왜관	2007-03-08	7.8	243.25	2.39	260	2	2	일치
	16	고령	2010-07-09	8.7	111.33	2.05	260	2	1	불일치
	17	왜관	2007-03-21	7.7	100.83	2.00	240	2	2	일치
	18	왜관	2008-02-14	8.5	70.92	1.85	230	2	1	불일치
	19	고령	2006-08-04	7.3	193.68	2.29	200	2	2	일치

표 4.4 분변성 대장균 모델 개발 및 검증 입력자료 및 결과(계속)

종류	No.	지점	날짜	pH	$Q_{t-1}$ (m <sup>3</sup> )	$\text{Log}(Q_{t-1})$ (CFU/100mL)	FC	FCG <sub>m</sub>	FCG <sub>p</sub>	일치여부
검증 데이터	20	왜관	2007-05-16	7.8	84.46	1.93	200	2	1	불일치
	21	왜관	2008-01-10	8.3	85.42	1.93	180	1	1	일치
	22	고령	2007-02-23	8.1	62.17	1.79	160	1	1	일치
	23	고령	2007-02-02	7.9	48.00	1.68	150	1	1	일치
	24	고령	2006-10-27	7.6	21.74	1.34	140	1	1	일치
	25	고령	2007-10-26	7.8	43.50	1.64	130	1	1	일치
	26	고령	2009-09-25	8.2	44.79	1.65	120	1	1	일치
	27	왜관	2009-06-25	8.9	70.09	1.85	120	1	1	일치
	28	고령	2008-11-28	7.6	41.00	1.61	100	1	1	일치
	29	왜관	2007-03-14	7.4	111.58	2.05	80	1	2	불일치
	30	산곡	2006-04-05	7.7	32.00	1.51	68	1	1	일치
	31	남지	2011-12-13	7.8	90.07	1.95	60	1	1	일치
	32	고령	2011-11-04	7.9	53.92	1.73	50	1	1	일치
	33	남지	2011-03-10	7.7	140.07	2.15	40	1	2	불일치
	34	산곡	2012-10-17	9.4	78.23	1.89	28	1	1	일치
	35	남지	2008-09-09	8.4	158.58	2.20	24	1	1	일치
	36	남지	2009-08-10	7.2	474.78	2.68	19	1	2	불일치
	37	구미	2010-06-14	7.8	88.90	1.95	10	1	1	일치
38	성주	2011-03-10	8	60.12	1.78	10	1	1	일치	



## 4.3 수질 지수 모델의 개발

### 4.3.1 수질 인자 선정

본 연구에서 정보가 종합될 적절한 수질 인자는 다음의 기준을 근거로 선정하였다. 수질 인자는 (1) 국내 수질자동측정망에서 측정되어 실시간 데이터를 수집할 수 있는 항목, (2) 하천에서의 레크리에이션 활동에 중요한 항목, 이렇게 두 가지 기준을 두어 선정하였다. 하천 레크리에이션 지수는 실시간으로 산정되므로 본 모델에 입력 데이터로 사용되는 수질 인자 데이터의 실시간 데이터의 존재 여부가 중요하다. 그러므로 국내 수질자동측정망에서 매일 실시간으로 측정되는 수질 인자를 선택하였다. 또한, 기준 (1)을 만족하는 수질 인자 중 인체가 하천수와 접촉할 시 그 위험성과 안전성을 잘 설명할 수 있는 수질 인자들을 선택하였다.

#### 4.3.1.1 수질자동측정망의 측정 항목

수질측정망에서 수질 자동측정망은 실시간 모니터링이 가능하여 수질감시정보 체계를 가능하게 하며, 수질예보제 운영에 필요한 일 데이터 생산으로 월 데이터를 생산하는 수질 일반측정망을 보완한다. 수질자동측정망에서 측정되는 항목은 공통항목으로 수온, pH, 전기전도도, DO, 총유기탄소가 있으며 선택항목으로는 탁도, 클로로필 a, 총질소(TN), 총인(TP), 암모니아성 질소, 질산성 질소, 인산염 인, 중금속, 페놀, VOCs, 물벼룩, 조류, 미생물 등이 있다. 다음 표 4.5는 주요 네 개의 강(한강, 낙동강, 금강, 영산·섬진강)의 30개소 이상에서 측정되고 있는 항목을 정리한 것이다. 표에 따르면 클로로필 a가 50개소에서 가장 많이 측정하고 있었고 TN, TP는 49개소, 탁도는 39개소에서 측정되고 있어 활용 가능성이 비교적 높은 편에 속하였다. 따라서, 본 연구에서는 앞에 제시한 기준 (1)에 따라 RRIM의 수질 인자 후보를 공통항목인 수온, pH, 전기전도도, DO, 총유기탄소와 선택항목 중 가장 많이 측정되는 클로로필 a, TN, TP 그리고 탁도로 선택하였다.

표 4.5 수질자동측정망 선택항목 측정 현황

	클로로필 a	TN	TP	탁도	VOCs	물벼룩
한강	12	17	17	14	7	4
낙동강	20	13	13	13	17	17
금강	10	11	11	7	4	5
영산· 섬진강	8	8	8	5	4	5
계	50	49	49	39	32	31

#### 4.3.1.2 하천 레크리에이션의 중요 항목

수질오염현상 중에는 혐기성 상태에 의한 오염 현상, 부영양화 현상 그리고 전염성 세균에 의한 오염 현상이 있다. 혐기성 상태에 의한 오염 현상은 용존산소량 부족에 따라 어류 폐사, 부패 가스, 악취, 검은 물 등이 발생하는 현상이다. 부영양화 현상은 질소나 인과 같은 무기물 다량 유입으로 인해 조류가 과다 번식하여 산소를 소모하고 미관을 저해하며 독성 물질을 발생시키는 수질 오염 현상이다. 전염성 세균에 의한 오염 현상은 수인성 질병을 야기함을 말한다(김좌관, 2010). 이러한 오염현상들은 모두 하천 레크리에이션에 중요한 미관과 안전관리 측면과 관련되므로 모두 고려할 필요가 있다. 그러므로 본 연구에서는 수질 인자 선정에 있어서 앞의 오염현상들을 나타내는 수질 지표들을 고려하였다.

전염성 세균에 의한 오염현상을 나타내는 수질 지표로 대장균을 선택할 수 있으나, 이는 분변성 대장균 모델을 통해 고려되므로 본 수질 지수 모델에서는 제외하였다. 혐기성 상태에 의한 오염 현상은 DO를 통해 고려하고자 하였다. DO는 수중에 용해되어 있는 산소의 양을 의미한다. DO는 가장 대표적인 수질 지표 중 하나로 수생생태계의 일반적인 상태를 나타내며, 그 수치가 낮을 경우 어류사망률이 증가함에 따라 생태계의 불균형을 초래하고 냄새와 미관에 영향을 미친다. DO는 다음 식(4.4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V \frac{dc}{dt} = \text{reaeration} + (\text{photosynthesis} - \text{respiration}) \\ - \text{oxidation of CBOD, NBOD (from inputs)} \\ - \text{sediment oxygen demand} + \text{oxygen inputs} \\ \pm \text{oxygen transport (into and out of segment)} \quad (4.4)$$

위의 식에서 나타난 바와 같이 산소가 하천에 유입되고 유출되는 과정이 DO에 종합적으로 반영이 된다. 다음으로 부영양화와 관련된 지표

를 수질 인자로 선택하기 위해 국내에서 제시하고 있는 조류 경보 기준을 참고하였다. 국내의 조류 경보는 클로로필 a와 남조류 세포수의 기준을 통해 경보 발령 여부가 결정된다. 특히 남조류 세포수는 독소를 발생하기 때문에 중요하지만 현재 국내에서 남조류 세포수를 모니터링하는 수질자동측정망은 구축되어 있지 않다. 따라서, 부영양화를 나타내는 수질 지표로 클로로필 a만을 선정하였다.

수질자동측정소에서 측정되어 수질 인자의 후보로 선정되었던 지표 중 pH와 탁도도 수질 인자로 최종 선택되었다. pH는 수체의 산염기 평형상태를 나타내는 지표로 기존 자연수의 성질에 따라 좌우되나 하수, 공장폐수에 의해서도 영향을 받아 수질의 변화를 감지하는데 중요한 지표이다. 대부분의 pH는 6.5와 8.5 사이에 속하나 pH가 이보다 높거나 낮은 수체는 인체에 악영향을 미칠 수 있다. WHO(1998)에 따르면 pH가 11보다 높으면 피부 질환을 일으킬 수 있고, pH가 10에서 12.5 사이일 때 머리카락 섬유가 부풀며, pH가 4 이하에서 눈의 충혈 혹은 자극이 일어난다. 또한 인체가 민감할 경우 위장장애를 일으킬 가능성도 있는 것으로 보고되었다. pH는 금속의 부식과 소독의 효율과도 연관이 크기 때문에 직간접적으로 인체의 건강에 영향을 미치는 지표이다.

탁도는 수체의 상대적인 투명도를 나타내는 지표이다. 빛을 비추었을 때 산란되는 빛의 양으로 표현되는 광학적인 특성이기 때문에 수체에 부유하는 입자들에 의해 빛이 산란되는 정도가 크면 탁도 또한 높아진다. 보통 수체에는 점토, 실트, 유기물 혹은 무기물 세립자, 조류, 플랑크톤 등이 존재하며 이것들의 탁도 상승의 원인이 된다. 탁도가 높을 경우 수체의 투명도가 떨어져 미관적 가치가 하락하며 탁도와 병원균 증식에는 높은 상관관계가 존재하여 탁도가 높을 경우 병원균 증식의 위험이 존재한다. 또한, 탁도가 높은 수체는 하천 레크리에이션 활동 시 수체 안에서의 시야를 확보하기가 어려워 수체에 잠겨있는 다른 물체를 보기 힘들어 사고의 위험을 증가시킨다.

수온, 전기전도도, TN 그리고 TP는 수질 인자로 선택되지 않았는데

수온의 경우, DO와 상관성이 높은 항목이라 제외되었다. 전기전도도는 레크리에이션에 있어 크게 중요하지 않기 때문에 제외되었다. 또한, TN과 TP는 보통 부영양화를 나타내는 수질 지표로 사용되나 본 모델에서는 클로로필 a를 부영양화를 나타내는 수질 인자로 선정하였기 때문에 중복성을 피하기 위하여 두 지표는 모델에서 제외되었다.

#### 4.3.2 등급 정의 및 수질기준 선정

수질 지수 모델에서 등급은 앞에서 정한 RRG의 우수, 양호, 보통, 불량,의 네 개의 등급과 같다. 수질기준은 네 개의 등급에 따라 정하였으며 결과는 표 4.6과 같다. 표에 제시된 기준은 국내 하천 및 호소 생활환경기준, 조류경보 기준 등과 국외의 미국 전국 및 주별 수질 기준, 캐나다 수질기준, WHO(World Health Organization) 및 UN(United Nations) 수질 기준 등을 참고로 하였다. 참고한 수질기준들은 선택된 수질인자인 DO, pH, 탁도 클로로필 a별로 정리하여 다음 표 4.7 ~ 4.10에서 각각 제시하였다.

표 4.6 RRIM의 수질 기준

등급	DO (mg/L)	pH	탁도 (NTU)	클로로필 a (mg/m <sup>3</sup> )
우수(I)	7.5 ≤	7.0 ~ 8.0	< 10	< 10
양호(II)	5.0 ~ 7.5	6.5 ~ 7.0, 8.0 ~ 8.5	10 ~ 25	10 ~ 15
보통(III)	3.0 ~ 5.0	6.0 ~ 6.5, 8.5 ~ 9.0	25 ~ 50	15 ~ 25
불량(IV)	< 3.0	< 6.0, 9.0 ≤	50 ≤	25 ≤

표 4.7 DO의 국내외 수질 기준

구분	수질 기준(mg/L)		
국내 하천 생활환경기준	등급	매우 좋음	7.5 ≤
		보통 ~ 좋음	5.0 ~ 7.5
		나쁨 ~ 약간 나쁨	2.0 ~ 5.0
		매우 나쁨	≤ 2.0
미국 Illinois 주 수질기준	등급	직접접촉 가능	· 3월 ~ 7월: 5.0 ≤ · 8월 ~ 2월: 3.5 ≤
		간접접촉 가능	4.0 ≤
미국 Massachusetts 주 수질기준	등급	직접접촉 가능	· 차가운 물: 6.0 ≤ · 따뜻한 물: 5.0 ≤
		간접접촉 가능	3.0 ≤
미국 Florida 주 수질기준	5.0 ≤		

표 4.8 pH의 국내외 수질 기준

구분	수질 기준		
국내 하천 생활환경기준	등급	보통 ~ 매우 좋음	6.5 ~ 8.5
		나쁨 ~ 약간 나쁨	6.0 ~ 6.5
		매우 나쁨	≤ 6.0
미국 Aquatic life criteria	6.5 ~ 9.0		
미국 Human health criteria	5.0 ~ 9.0		
미국 New York 주 수질기준	등급	직접접촉 가능	6.5 ~ 8.0
		간접접촉 가능	6.0 ~ 6.5, 8.5 ~ 9.5
미국 Illinois 주 수질기준	용도	일반용도	6.5 ~ 9.0
		위락용도 (간접접촉 가능)	6.0 ~ 9.0
미국 Massachusetts 주 수질기준	등급	직접접촉 가능	6.5 ~ 8.3
		간접접촉 가능	8.3 ~ 9.5
미국 Florida 주 수질기준	간접접촉 가능		6.0 ~ 8.5
WHO 먹는 물 기준	6.5 ~ 9.5		



표 4.9 탁도의 국내외 수질 기준

구분	수질 기준(NTU)		
국내 먹는 물 기준	≤ 0.5		
국내 먹는 샘물 기준	≤ 1.0		
캐나다 British Columbia 주 수질기준	≤ 50.0		
미국 Alabama 주 수질기준	≤ 50.0		
미국 Arizona 주 수질기준	≤ 50.0		
미국 Missouri 주 수질기준	등급	A	10.0
		B, C	25.0

표 4.10 클로로필 a의 국내외 수질 기준

구분	수질 기준(mg/m <sup>3</sup> )		
국내 호소 생활환경기준	등급	매우 좋음	≤ 5.0
		좋음	5.0 ~ 9.0
		약간 좋음	9.0 ~ 14.0
		보통	14.0 ~ 20.0
		약간 나쁨	20.0 ~ 35.0
		나쁨	35.0 ~ 70.0
		매우 나쁨	70.0 ≤
국내 조류 경보 기준	등급	조류주의보	15 ~ 25
		조류경보	25 ~ 100
		조류대발생	100 ≤
WHO 건강상 급 성효과 가능성에 대한 가이드라인	등급	낮음	< 10
		보통	10 ~ 50
		높음	10 ~ 5,000
		매우 높음	> 5,000
UN의 영양상태 관리기준 (하천)	등급	I, 빈영양상태	< 4
		II, 중영양상태	4 ~ 15
		III, 중·부영양상태	15 ~ 45
		IV, 부영양상태	45 ~ 165
		V, 과영양상태	> 110

### 4.3.3 소속함수의 정의

#### 4.3.3.1 소속함수 선정 조건

앞에서 정해진 수질 기준을 토대로 선정된 수질 인자의 소속함수를 등급(우수, 양호, 보통, 불량)별로 정의하였다. 본 연구에서는 가장 적절한 소속함수를 정의하기 위해 다섯 가지 조건을 정하고 이를 모두 만족하는 소속함수의 형태를 선택하였다. 다섯 가지 조건은 다음과 같다.

- (1) 각 등급(우수, 양호, 보통, 불량)의 중앙값에 해당하는 수질인자의 농도 값은 소속도를 1로 갖는다.
- (2) 특정 수질 농도 값이 어떤 한 등급에서 소속도를 1로 가질 때, 그 등급의 양 옆에 위치한 등급은 소속도를 0으로 가진다.
- (3) 수질 기준의 한 쪽이 열린 상태인 우수와 불량의 경우 소속도를 1로 가진 평평한 부분인 코어를 가진다.
- (4) 특정 수질인자의 농도 값에서 모든 등급의 소속도의 합은 1이다.
- (5) 수질 기준의 경계 값이 되는 농도 값에서 서로 이웃한 두 개의 소속함수가 만난다.

소속함수의 형태는 다양하게 존재하나 가장 대표적인 형태인 삼각형 소속함수와 가우스형 소속함수에 위의 조건을 적용해 보았다. 그러나 삼각형 소속함수는 조건 (1), (2), (3), (4)를 모두 만족하게 할 경우, 조건 (5)는 만족하지 못하는 것으로 나타났으며, 가우스형 소속함수는 조건 (1), (2), (3), (5)를 만족하게 할 경우 조건 (4)를 만족하지 못하는 것으로 밝혀졌다.

삼각형 소속함수는 각 인자 별로 그림 4.9 ~ 4.12과 같다. 그래프에서 나타난 바와 같이 삼각형 소속함수에서는 규칙 (5)가 만족되지 못한다. 규칙 (5)를 만족하지 못하는 소속함수들은 논리적으로 타당하지 못하다. 예를 들어 DO의 3 mg/L은 보통과 불량 등급의 경계값이다. 그런데 삼각형 소속함수에 따르면 DO 3 mg/L는 불량보다 보통에 속할 자격

을 크게 가진다. 이는 다른 인자들에서도 마찬가지이다. 클로로필 a가 10 mg/m<sup>3</sup>일 때는 우수와 양호 등급의 경계값이지만 삼각형 소속함수를 적용하였을 때에 양호에 속할 자격을 더욱 크게 가지는 논리적인 오류가 발생하게 된다.

가우스형 소속함수는 다음 그림 4.13 ~ 4.16과 같다. 그래프에서 나타난 바와 같이 삼각형 소속함수에서는 규칙 (4)가 만족되지 못한다. 대표적으로 DO의 모든 값에서의 소속도 합을 구해보면 1로 일정하지 않음을 알 수 있고 이를 그래프로 나타내면 그림과 4.17 같다. 그림 4.17을 보면, DO이 5 mg/L일 때 총 소속도의 합이 약 0,2이고, 4 mg/L일 때에는 1.0이다. 이 때 추후에 지수 종합 시 5 mg/L가 4 mg/L보다 수질 수준이 높음에도 불구하고 총 인자 점수가 더 낮게 책정되게 된다. 이에 대해서는 추후 소속함수의 적합도 판단 부분에서 더 살펴보도록 한다.

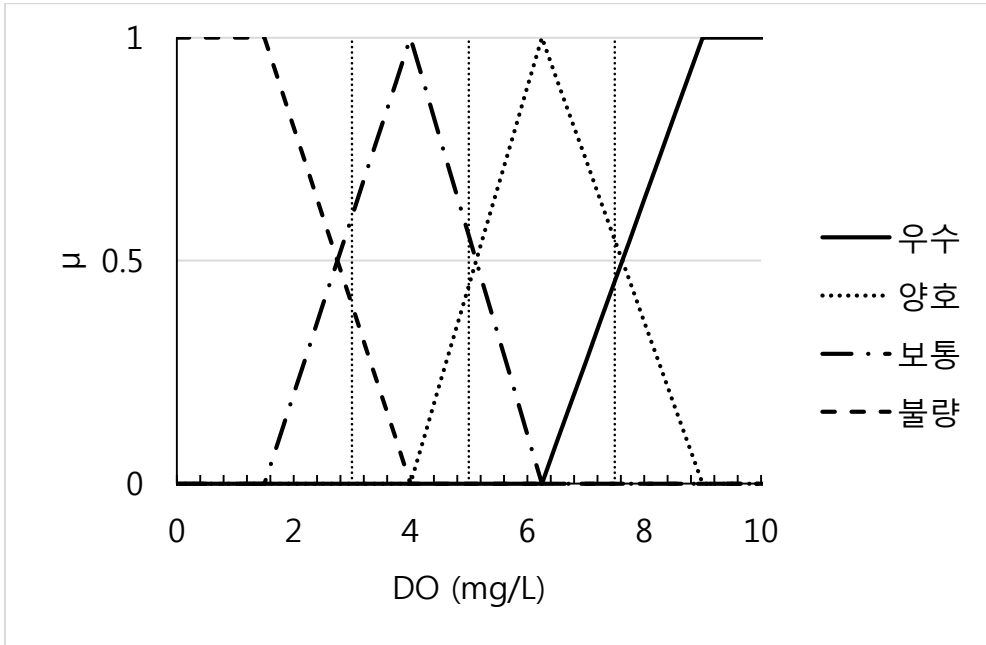


그림 4.9 DO의 삼각형 소속함수

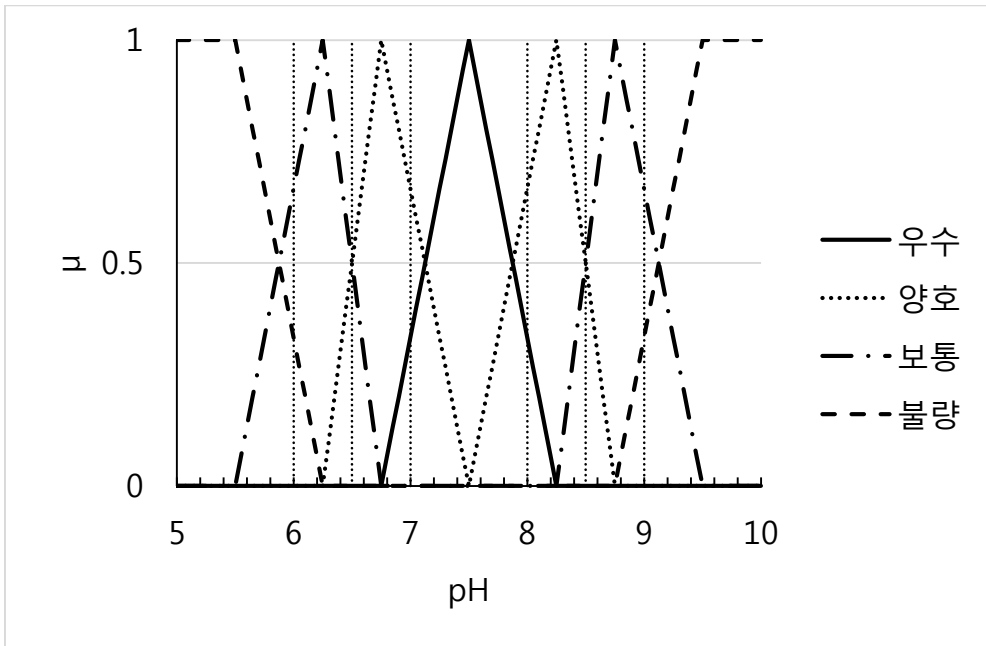


그림 4.10 pH의 삼각형 소속함수

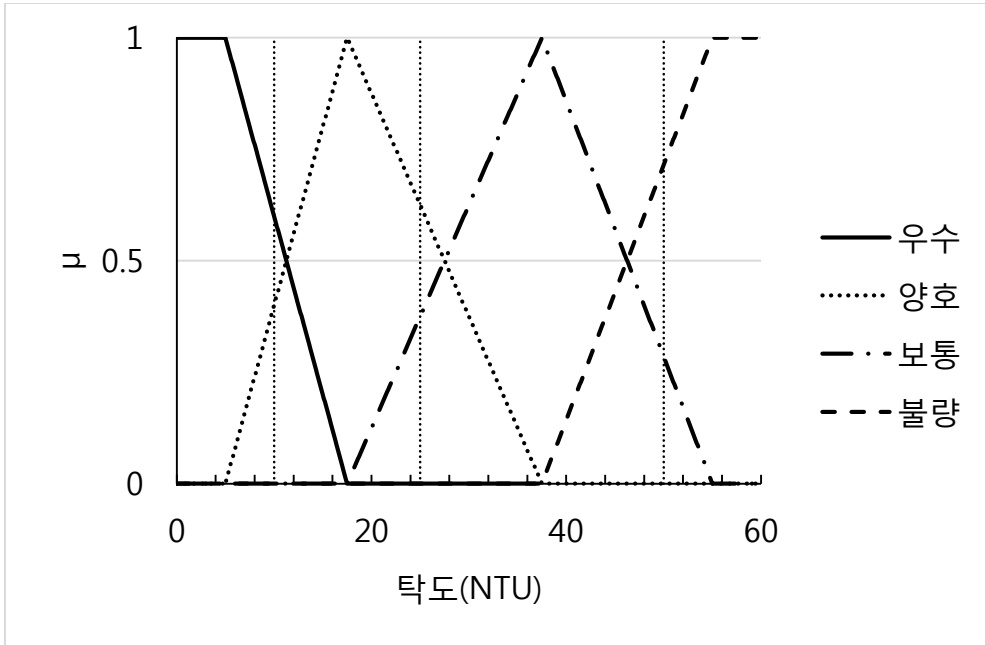


그림 4.11 탁도의 삼각형 소속함수

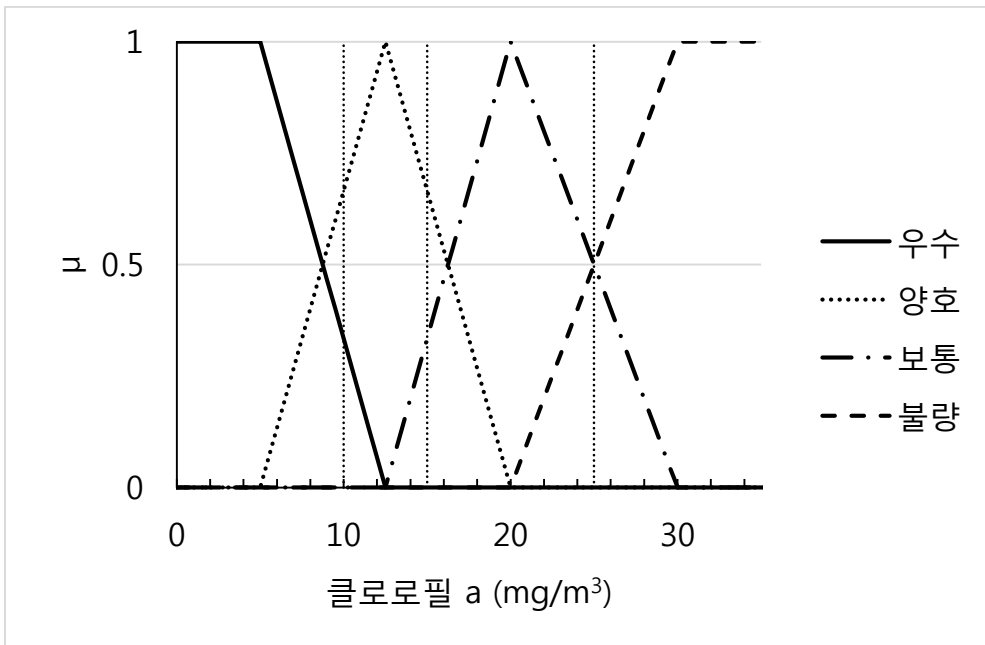


그림 4.12 클로로필 a의 삼각형 소속함수

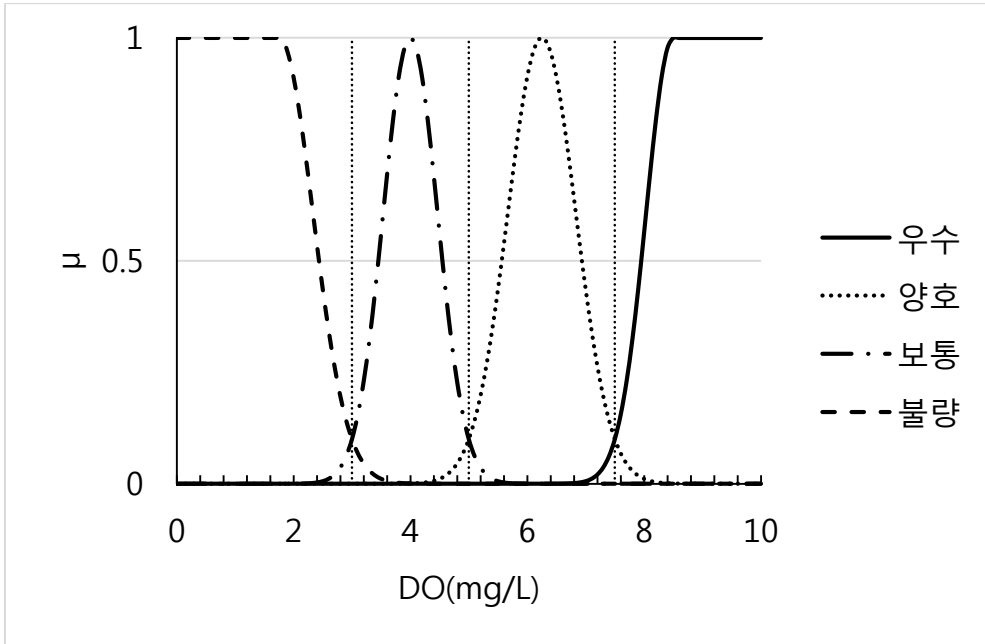


그림 4.13 DO의 가우스형 소속함수

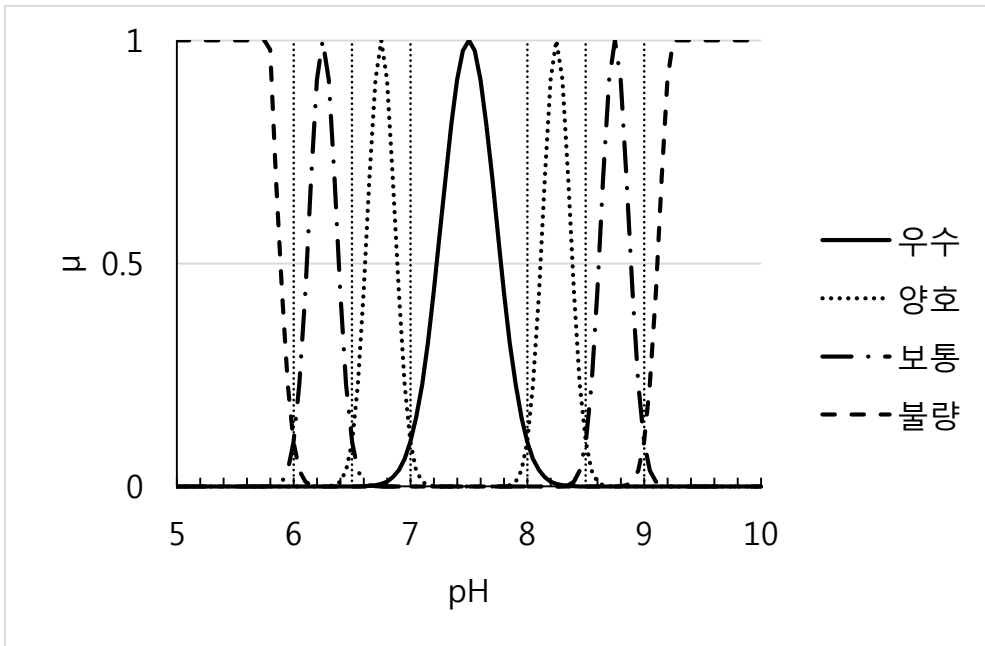


그림 4.14 pH의 가우스형 소속함수

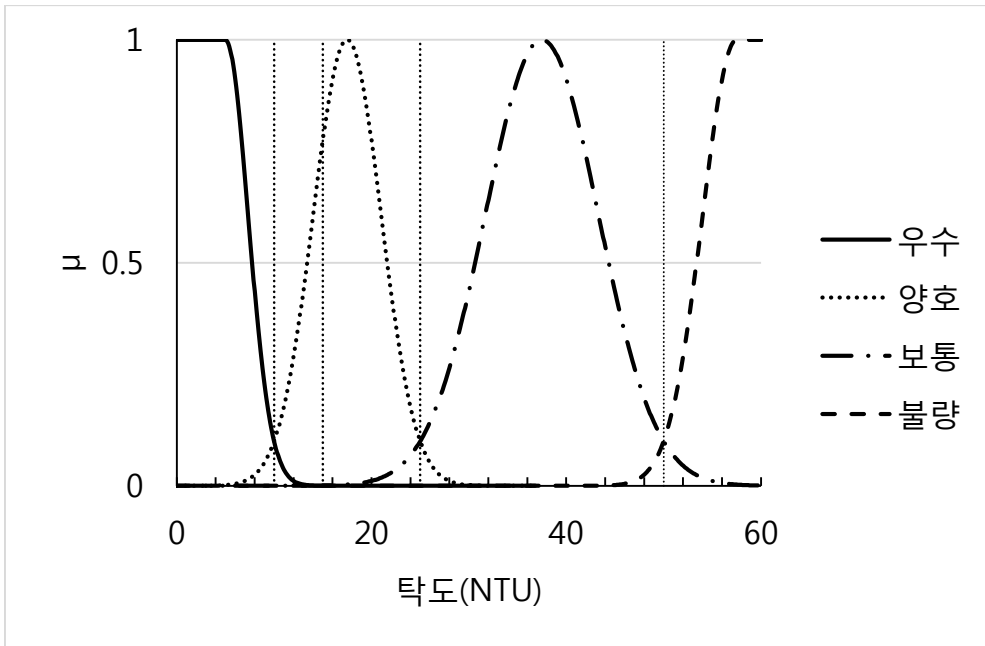


그림 4.15 탁도의 가우스형 소속함수

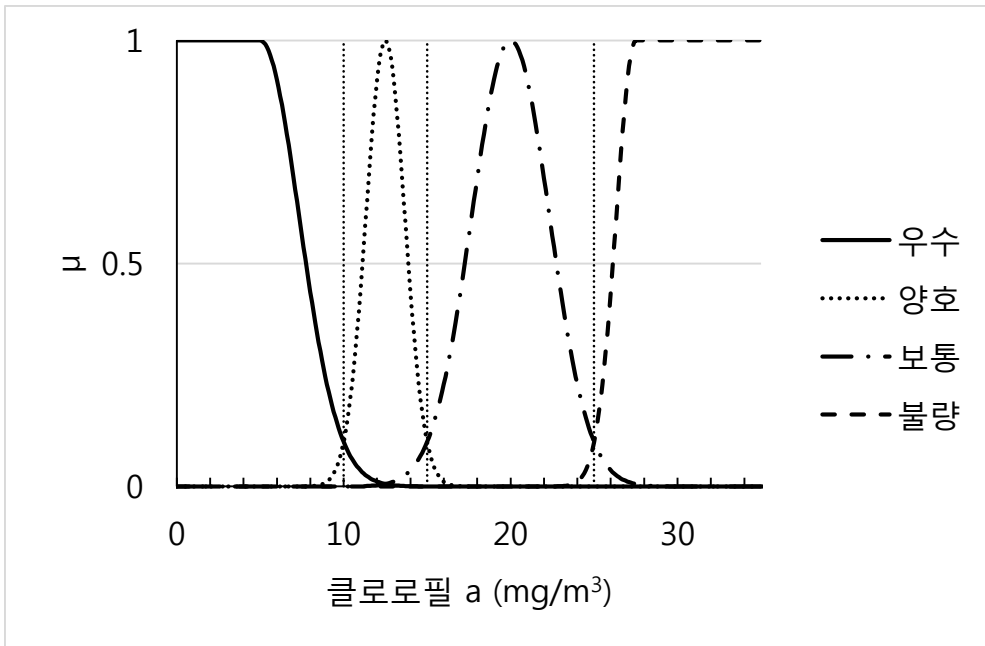


그림 4.16 클로로필 a의 가우스형 소속함수



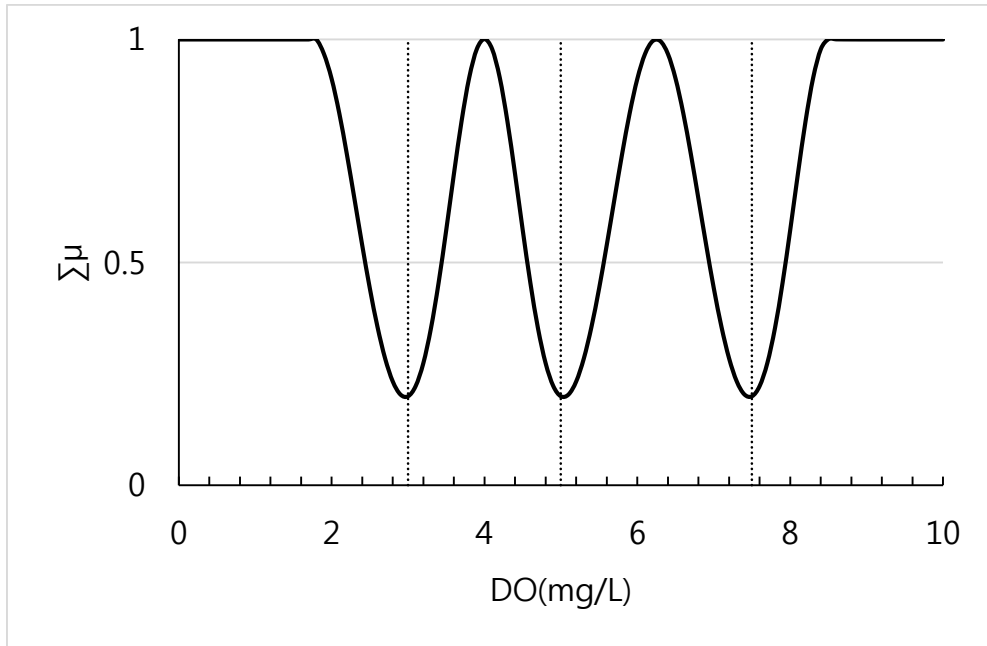


그림 4. 17 DO 가우스형 소속도의 합

#### 4.3.3.2 새로운 소속함수 형태의 개발

전 절에서 검토한 두 개의 형태의 소속함수가 다섯 가지 규칙을 만족시키지 못하기 때문에 다른 소속함수 형태를 제시할 필요가 있었으며, 본 연구에서는 그 대안으로 변형-삼각형 형태를 개발하였다. 변형-삼각형 형태란, 기존 삼각형 소속함수에 지수를 부여하여 직선이 아닌 곡선의 형태로 나타나는 형태이며 함수의 형태는 식 (4.5)와 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{curved} - \text{triangle}(x : a, b, c, d, e) \\
 & = \begin{cases} 0, & x < a \\ [(x - a) / (b - a)]^d, & a \leq x < b \\ [(c - x) / (c - b)]^e, & b \leq x < c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (4.5)
 \end{aligned}$$

위의 식을 이용하여 수질 기준을 토대로 하며 앞에서 제시한 다섯 가지 규칙을 모두 만족시키는 소속함수를 제시하였다. DO의 소속함수는 각 등급 별로 식 (4.6) ~ (4.9)와 같다.

$$\mu_{DO,1} = \begin{cases} 0, & x < 6.25 \\ \left(\frac{x - 6.25}{2.75}\right)^{0.8791}, & 6.25 \leq x < 9 \\ 1, & 9 \leq x \end{cases} \quad (4.6)$$

$$\mu_{DO,2} = \begin{cases} 0, & x < 4 \\ 1 - \left(\frac{6.25 - x}{2.25}\right)^{1.1792}, & 4 \leq x < 6.25 \\ 1 - \left(\frac{x - 6.25}{2.75}\right)^{0.8791}, & 6.25 \leq x < 9 \\ 0, & 9 \leq x \end{cases} \quad (4.7)$$

$$\mu_{DO,3} = \begin{cases} 0, & x < 1.5 \\ \left(\frac{x-1.5}{2.5}\right)^{1.3569}, & 1.5 \leq x < 4 \\ \left(\frac{6.25-x}{2.25}\right)^{1.1792}, & 4 \leq x < 6.25 \\ 0, & 6.25 \leq x \end{cases} \quad (4.8)$$

$$\mu_{DO,4} = \begin{cases} 1, & x < 1.5 \\ 1 - \left(\frac{x-1.5}{2.5}\right)^{1.3569}, & 1.5 \leq x < 4 \\ 0, & 4 \leq x \end{cases} \quad (4.9)$$

여기서,  $\mu_{DO,1}$   $\mu_{DO,2}$   $\mu_{DO,3}$   $\mu_{DO,4}$  는 각각 DO가 우수, 양호, 보통, 불량 등급에 속하는 소속도, 이다. 식 (4.10) ~ (4.13) 은 pH의 소속함수이다.

$$\mu_{pH,1} = \begin{cases} 0, & x < 6.75 \\ \left(\frac{x-6.75}{0.75}\right)^{0.6309}, & 6.75 \leq x < 7.5 \\ \left(\frac{8.25-x}{0.75}\right)^{0.6309}, & 7.5 \leq x < 8.25 \\ 0, & 8.25 \leq x \end{cases} \quad (4.10)$$

$$\mu_{pH,2} = \begin{cases} 0, & x < 6.25 \\ 1 - \frac{6.75-x}{0.5}, & 6.25 \leq x < 6.75 \\ 1 - \left(\frac{x-6.75}{0.75}\right)^{0.6309}, & 6.75 \leq x < 7.5 \\ 1 - \left(\frac{8.25-x}{0.75}\right)^{0.6309}, & 7.5 \leq x < 8.25 \\ 1 - \frac{x-8.25}{0.5}, & 8.25 \leq x < 8.75 \\ 0, & 8.75 \leq x \end{cases} \quad (4.11)$$

$$\mu_{pH,3} = \begin{cases} 0, & x < 5.5 \\ \left(\frac{x-5.5}{0.75}\right)^{1.7095}, & 5.5 \leq x < 6.25 \\ \frac{6.75-x}{0.5}, & 6.25 \leq x < 6.75 \\ 0, & 6.75 \leq x < 8.25 \\ \frac{x-8.25}{0.5}, & 8.25 \leq x < 8.75 \\ \left(\frac{9.5-x}{0.75}\right)^{1.7095}, & 8.75 \leq x < 9.5 \\ 0, & 9.5 \leq x \end{cases} \quad (4.12)$$

$$\mu_{pH,4} = \begin{cases} 1, & x < 5.5 \\ 1 - \left(\frac{x-5.5}{0.75}\right)^{1.7095}, & 5.5 \leq x < 6.25 \\ 0, & 6.25 \leq x < 8.75 \\ 1 - \left(\frac{9.5-x}{0.75}\right)^{1.7095}, & 8.75 \leq x < 9.5 \\ 1, & 9.5 \leq x \end{cases} \quad (4.13)$$

여기서,  $\mu_{pH,1}$ ,  $\mu_{pH,2}$ ,  $\mu_{pH,3}$ ,  $\mu_{DpH,4}$  는 각각 pH가 우수, 양호, 보통, 불량 등 급에 속하는 소속도, 이다. 다음 식 (4.14) ~ (4.17)은 탁도의 소속함수 이다.

$$\mu_{Tur,1} = \begin{cases} 1, & x < 5 \\ \left(\frac{17.5-x}{12.5}\right)^{1.3569}, & 5 \leq x < 17.5 \\ 0, & 17.5 \leq x \end{cases} \quad (4.14)$$

$$\mu_{Tur,2} = \begin{cases} 0, & x < 5 \\ 1 - \left(\frac{17.5-x}{12.5}\right)^{1.3569}, & 5 \leq x < 17.5 \\ 1 - \left(\frac{x-17.5}{20}\right)^{0.7067}, & 17.5 \leq x < 37.5 \\ 0, & 37.5 \leq x \end{cases} \quad (4.15)$$

$$\mu_{Tur,3} = \begin{cases} 0, & x < 17.5 \\ \left(\frac{x-17.5}{20}\right)^{0.7067}, & 17.5 \leq x < 37.5 \\ \left(\frac{55-x}{17.5}\right)^{0.5533}, & 37.5 \leq x < 55 \\ 0, & 55 \leq x \end{cases} \quad (4.16)$$

$$\mu_{Tur,4} = \begin{cases} 0, & x < 37.5 \\ 1 - \left(\frac{55-x}{17.5}\right)^{0.5533}, & 37.5 \leq x < 55 \\ 1, & 55 \leq x \end{cases} \quad (4.17)$$

여기서,  $\mu_{Tur,1}$   $\mu_{Tur,2}$   $\mu_{Tur,3}$   $\mu_{Tur,4}$  는 각각 탁도가 우수, 양호, 보통, 불량 등 급에 속하는 소속도, 이다. 다음 식 (4.18) ~ (4.21)은 클로로필 a의 소속함수이다.

$$\mu_{Chl,1} = \begin{cases} 1, & x < 5 \\ \left(\frac{12.5-x}{7.5}\right)^{0.6309}, & 5 \leq x < 12.5 \\ 0, & 12.5 \leq x \end{cases} \quad (4.18)$$

$$\mu_{Chl,2} = \begin{cases} 0, & x < 5 \\ 1 - \left(\frac{12.5 - x}{7.5}\right)^{0.6309}, & 5 \leq x < 12.5 \\ 1 - \left(\frac{x - 12.5}{7.5}\right)^{0.6309}, & 12.5 \leq x < 20 \\ 0, & 20 \leq x \end{cases} \quad (4.19)$$

$$\mu_{Chl,3} = \begin{cases} 0, & x < 12.5 \\ \left(\frac{x - 12.5}{7.5}\right)^{0.6309}, & 12.5 \leq x < 20 \\ \frac{30 - x}{10}, & 20 \leq x < 30 \\ 0, & 30 \leq x \end{cases} \quad (4.20)$$

$$\mu_{Chl,4} = \begin{cases} 0, & x < 20 \\ 1 - \frac{30 - x}{10}, & 20 \leq x < 30 \\ 1, & 30 \leq x \end{cases} \quad (4.21)$$

여기서,  $\mu_{Chl,1}$ ,  $\mu_{Chl,2}$ ,  $\mu_{Chl,3}$ ,  $\mu_{Chl,4}$  는 각각 탁도가 우수, 양호, 보통, 불량 등 급에 속하는 소속도, 이다.

위의 소속함수들을 그림 4.18 ~ 4.21에 그래프로 표현하였다.

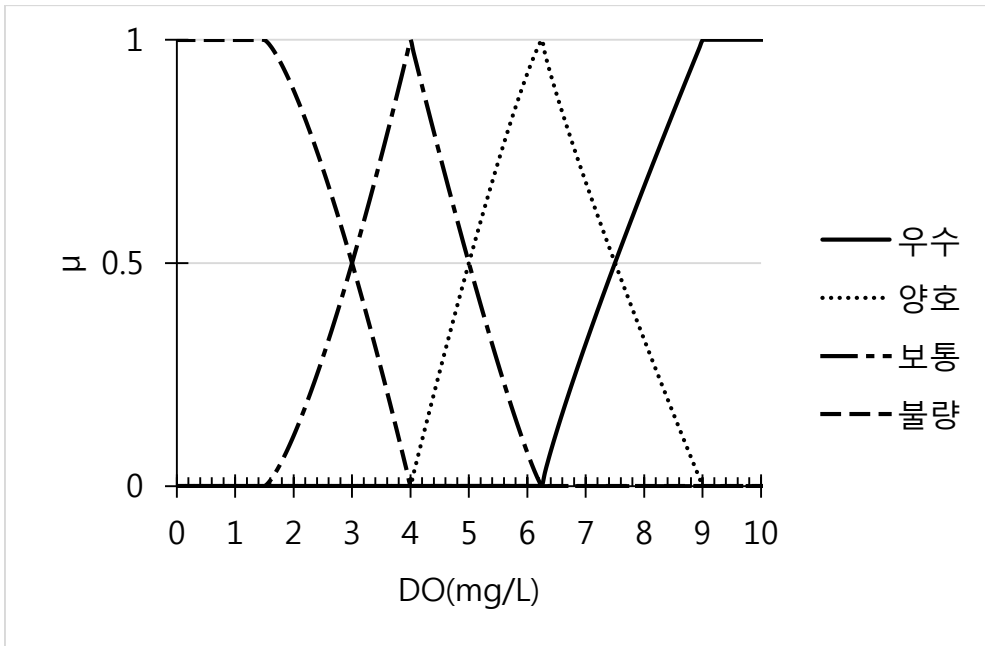


그림 4.18 DO의 변형-삼각형 소속함수

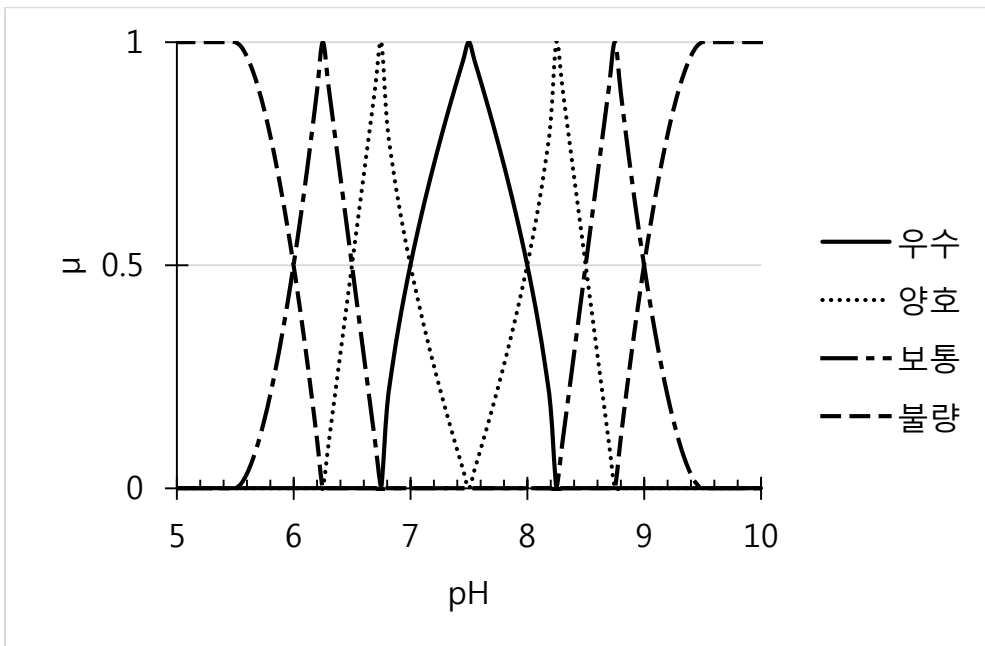


그림 4.19 pH의 변형-삼각형 소속함수

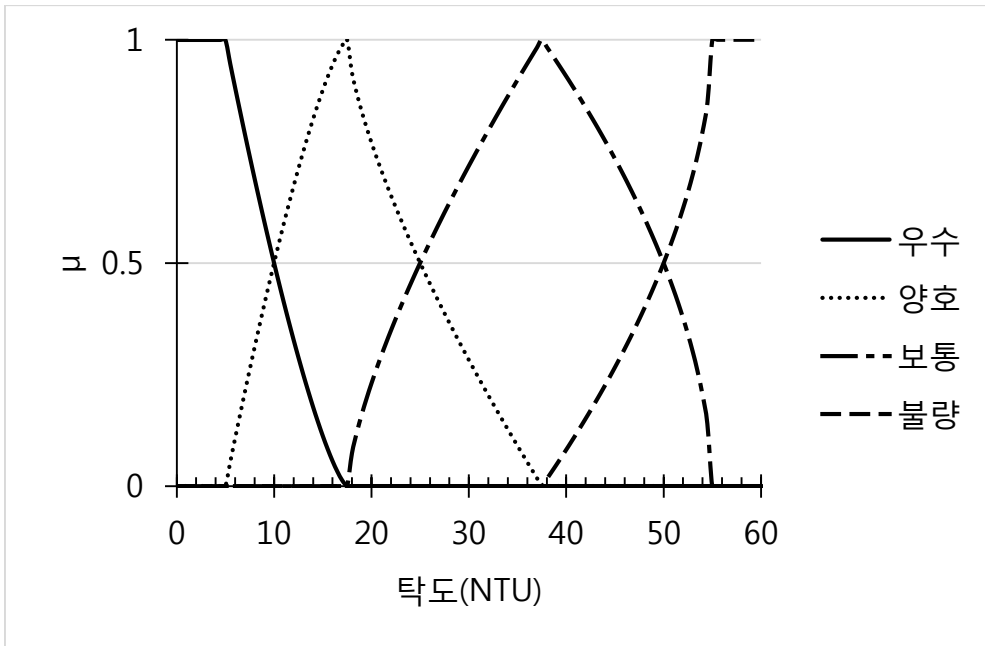


그림 4.20 탁도의 변형-삼각형 소속함수

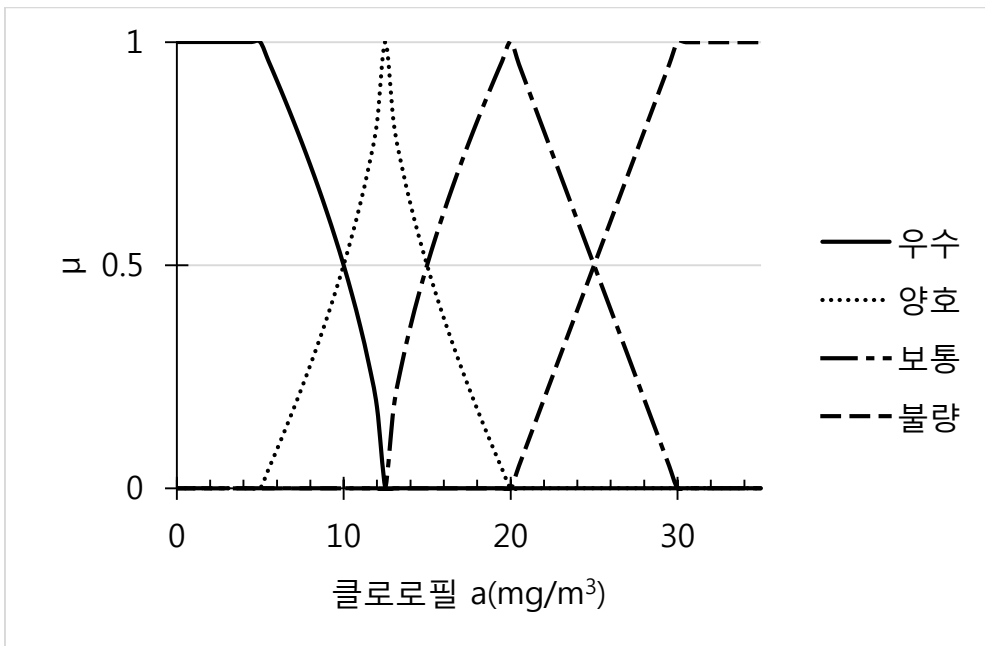


그림 4.21 클로로필 a의 변형-삼각형 소속함수



#### 4.3.4 종합화 방법 개발

소속함수를 통해 한 인자는 등급별로 네 개의 소속도를 가지게 되어 식 (4.22)와 같은 총 16개의 소속도를 구할 수 있다. 이 때, 한 인자가 가지는 네 개의 소속도는 각각 각 등급에 속하는 정도를 의미한다.

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_{DO,1} & \mu_{DO,2} & \mu_{DO,3} & \mu_{DO,4} \\ \mu_{pH,1} & \mu_{pH,2} & \mu_{pH,3} & \mu_{pH,4} \\ \mu_{Tur,1} & \mu_{Tur,2} & \mu_{Tur,3} & \mu_{Tur,4} \\ \mu_{Chl,1} & \mu_{Chl,2} & \mu_{Chl,3} & \mu_{Chl,4} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

여기서,  $\mu_{i,j}$ 는  $i$ 의 수질 인자가  $j$ 번째 수질 등급에 따라 가지는 소속도로,  $j$ 가 1, 2, 3, 4를 가질 때 각각은 우수, 양호, 보통, 불량 등급을 나타낸다. 본 연구에서는 위 식 (4.22)의 16개의 소속도를 하나의 지수로 종합하기 위한 방법을 두 단계로 구성하였다. 첫 번째 단계로 식 (4.23)과 같이 인자 별로 네 개의 소속도를 종합하여 각 인자 점수,  $P$ 를 계산하였다. 다음 단계로 수질 인자들의 하천 레크리에이션에서의 중요성을 판단하여 이를 가중치,  $w$ 로 나타내고 이를 이용하여 식 (4.24)과 같이 각 인자 점수를 가중합하여 수질 지수 모델의 인자인 DO, pH, 탁도, 클로로필  $a$ 를 종합한 수질 점수, WQI를 구하였다.

$$P = \mu \cdot GV = \begin{bmatrix} \mu_{DO,1} & \mu_{DO,2} & \mu_{DO,3} & \mu_{DO,4} \\ \mu_{pH,1} & \mu_{pH,2} & \mu_{pH,3} & \mu_{pH,4} \\ \mu_{Tur,1} & \mu_{Tur,2} & \mu_{Tur,3} & \mu_{Tur,4} \\ \mu_{Chl,1} & \mu_{Chl,2} & \mu_{Chl,3} & \mu_{Chl,4} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} GV_1 \\ GV_2 \\ GV_3 \\ GV_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{DO} \\ P_{pH} \\ P_{Tur} \\ P_{Chl} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

여기서,  $GV_1$ 는 각 인자 별로 우수에 해당되는 소속도에 할당되는 값을 말하며,  $GV_2$ 는 양호,  $GV_3$ 는 보통,  $GV_4$ 는 불량에 할당되는 값이다.  $P_{DO}$

는 DO의 네 개의 소속도를 종합하여 나온 점수,  $P_{pH}$ 는 pH,  $P_{Tur}$ 는 탁도,  $P_{chl}$ 는 클로로필 a의 점수이다.

$$WQI = w \cdot P = \begin{bmatrix} w_{DO} & w_{pH} & w_{Tur} & w_{Chl} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{DO} \\ P_{pH} \\ P_{Tur} \\ P_{Chl} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

여기서,  $w_{DO}$ ,  $w_{pH}$ ,  $w_{Tur}$ ,  $w_{Chl}$ 는 각각 DO, pH, 탁도, 클로로필 a에 부여되는 가중치이다.

각 등급에 할당되는 적절한  $GV$ 를 구하기 위하여 각 인자 별로 수질 지수 모델에서 우수 등급이 소속도를 1으로 가질 때의 인자 점수가 100점, 불량 등급이 소속도를 1으로 가질 때의 인자 점수가 0점을 갖게 하였다. 또한, 양호와 보통 등급의 경계값에서 인자 점수가 50점이 되게 하여  $GV_1$ 는 100,  $GV_2$ 는 66.7,  $GV_3$ 는 33.3,  $GV_4$ 는 0으로 구하였다. 또한, 앞에서 구한  $GV$ 를 적용하여 인자 점수를 계산하여 보면, 수질 지수 모델의 우수 등급은 점수 83.4점 초과 100점 이하, 양호 등급은 점수 50점 초과 및 83.4점 이하, 보통 등급은 점수 16.6점 초과 및 50점 이하, 불량 등급은 점수 16.6점 이하인 점수임을 확인할 수 있었다. 이는 표 4.12에 정리하였다. 우수와 불량 등급 구간의 길이는 16.6이고 양호와 보통 등급 구간의 길이는 두 배인 33.4이다. 이러한 등급 구간 길이의 불균형은 수질 기준 선정 시 우수와 불량은 하나의 경계값을 기준으로 그보다 높거나 낮은, 열린 형태의 범위로 주어지고, 양호와 보통은 두 개의 경계값을 기준으로 범위로 정하였기 때문에 발생하였다. 인자의 가중치는 연구동향에서도 언급한 바 있는 한국환경기술개발원의 최지용(1996)의 "종합수질지표의 개발"을 참고로 하여 정하였다.

여기서 개발된 종합수질지표는 하천 레크리에이션 용도가 아닌 종합적 용도이지만 논문에서는 용수를 이용도별로 생활용수, 공업용수,

농업용수, 위락 및 친수기능 용수, 생태계유지용수로 구분하여 각각의 수질 인자의 가중치를 선정하였다. 본 논문에서는 위락 및 친수기능 용수의 가중치를 참고로 하여 DO의 가중치,  $w_{do}$ 는 0.26, pH의 가중치,  $w_{pH}$ 는 0.26, 탁도의 가중치,  $w_{tu}$ 는 0.23 그리고 클로로필 a의 가중치,  $w_{ch}$ 는 0.25로 정하였다.

#### 4.4 RRIM 알고리즘

앞에서 언급한 바와 같이 RRI와 RRG는 분변성 대장균 모델과 수질 지수 모델을 종합하여 산정된다. 그림 4.22는 RRI를 산정하는 알고리즘을 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 분변성 대장균 모델에서 1등급이 나온 경우, RRI와 그 등급은 수질 지수 모델에서 평가된 바와 같다. 그러나 2등급이 나온 경우에는 수질 지수 모델에서 WQI가 50점 초과되는 경우, 즉, 우수, 양호 등급이 나올 때는 다음 식 (4.26)을 사용하여 RRI가 결정되며 이에 따라 RRG는 보통 등급이 된다. 반면, 50점 이하, 즉 보통과 불량 등급이 나오면 RRI와 RRG는 수질 지수 모델의 결과와 같다. 마지막으로 분변성 대장균 모델에서 분변성 대장균이 3등급으로 예측되는 경우는 수질 지수 모델에서 WQI가 16.6점 초과, 즉 우수, 양호, 보통에 해당되는 경우는 식 (4.27)를 사용하여 RRI가 산정되며 이에 따라 RRG는 불량으로 조정되게 된다. 반면, 16.6점 이하, 즉 불량 등급이 나오는 경우는 RRI와 RRG는 수질 지수 모델의 결과와 같다. RRIM은 MATLAB 코드로 개발하였다.

$$RRI = 0.668WQI - 16.8 \quad (4.26)$$

$$RRI = 0.199WQI - 3.3 \quad (4.27)$$

표 4.11 등급의 중간값과 경계값의 인자 점수

수질 인자				소속도				인자 점수
DO (mg/L)	pH	탁도 (NTU)	Chl-a (mg/m <sup>3</sup> )	$\mu_{DO,1}$	$\mu_{DO,2}$	$\mu_{DO,3}$	$\mu_{DO,4}$	
9.0	7.5	5	5	1	0	0	0	100
7.5	7, 8	10	10	0.5	0.5	1	1	83.4
6.25	6.75, 8.25	15	12.5	0	1	0	0	66.7
5	6.5, 8.5	25	15	0	0.5	0.5	0	50
4	6.25, 8.75	37.5	20	0	0	1	0	33.3
3	6, 9	50	25	0	0	0.5	0.5	16.6
1.5	5.5, 9.5	55	30	0	0	0	1	0

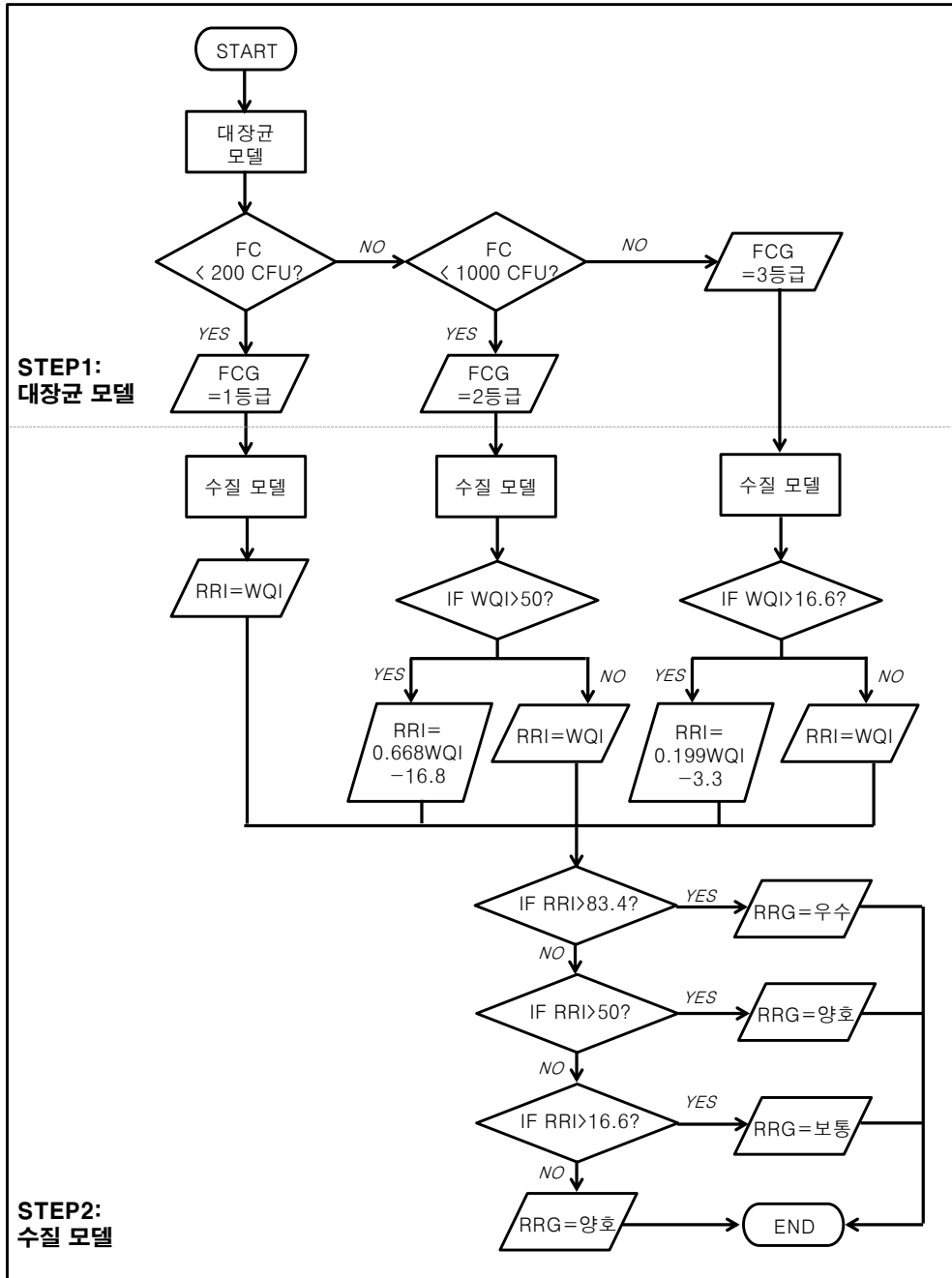


그림 4.22 RRIM 모델 알고리즘

## 4.5 소속함수의 적합도 판단

본 연구에서 개발한 변형-삼각형 소속함수의 타당성을 살펴보았다. 우선, 퍼지 집합 이론의 소속함수가 적용되지 않은 경우, 즉 소속함수를 크리스프(crisp)함수로 이용하였을 때의 인자 점수를 구해보고 퍼지 함수를 적용했을 때와 비교해보고 퍼지 함수의 타당성을 살펴보았다. 크리스프 함수란, 일반적인 집합 개념이 적용된 소속함수로, 이에 따라 소속함수는 어떤 등급에 속할 자격이 완전히 주어지거나 혹은 전혀 주어지지 않는다. 즉, 이 때 소속함수는 소속도,  $\mu$  를 1 혹은 0으로 갖는다. 다음으로는 가우스형 소속함수를 이용했을 때의 인자 점수를 구하고 이를 변형-삼각형 소속함수를 적용했을 때의 경우와 비교해 보고 앞에서 제시하였던 조건 (4)의 타당성을 살펴보았다.

### 4.5.1 퍼지 소속함수와 크리스프 소속함수 적용의 비교

본 모델에서는 퍼지 집합 이론을 적용하여 소속함수를 경계가 명확하지 않는 퍼지 소속함수로 나타내었다. 본 장에서는 퍼지 소속함수와 크리스프 소속함수가 적용된 경우 모델이 어떠한 차이를 보이는지 살펴보았다. 아래 그림 4.22 ~ 4.25에 제시된 그래프는 퍼지 소속함수와 크리스프 소속함수가 적용된 경우의 각 인자의 점수를 나타낸다. 점선은 크리스프 소속함수가 적용되었을 결과이고 실선은 퍼지 소속함수가 적용된 결과이다. 모든 수질 인자의 기준 경계값, 예를 들어 DO가 3mg/L, 5mg/L 그리고 7.5mg/L일 때 크리스프 소속함수는 점수가 갑자기 상승하는 불연속적인 계단 형태의 모습을 보였다. 반면, 퍼지 소속함수는 연속적으로 상승하는 형태를 보였다. 이러한 측면에서 보았을 때, 퍼지 소속함수가 수질 변동을 더욱 합리적으로 반영하는 점을 확인할 수 있었다.

#### 4.5.2 가우스 형태와의 비교

가우스형 소속함수는 수질인자의 모든 값에서 소속도의 합이 1로 일정하지 않음을 확인할 수 있었다. 본 장에서는 가우스형 소속함수가 적용된 경우 모델이 어떠한 차이를 보이는지 살펴보고자 한다. 가우스형 소속함수가 적용된 경우 인자 점수가 감소하였다가 증가하는 모습을 볼 수 있다. 이는 인자의 모든 값이 어딘가에 속할 수 있는 평등한 자격이 주어지지 않고 어떤 인자는 자격을 많이 부여받고 다른 인자는 자격을 적게 부여받기 때문에 일어난 현상이다. 따라서, 본 연구에서는 모든 값에서 소속도의 합이 1이 되어야 한다는 조건 (4)를 타당한 것으로 판단하였다.

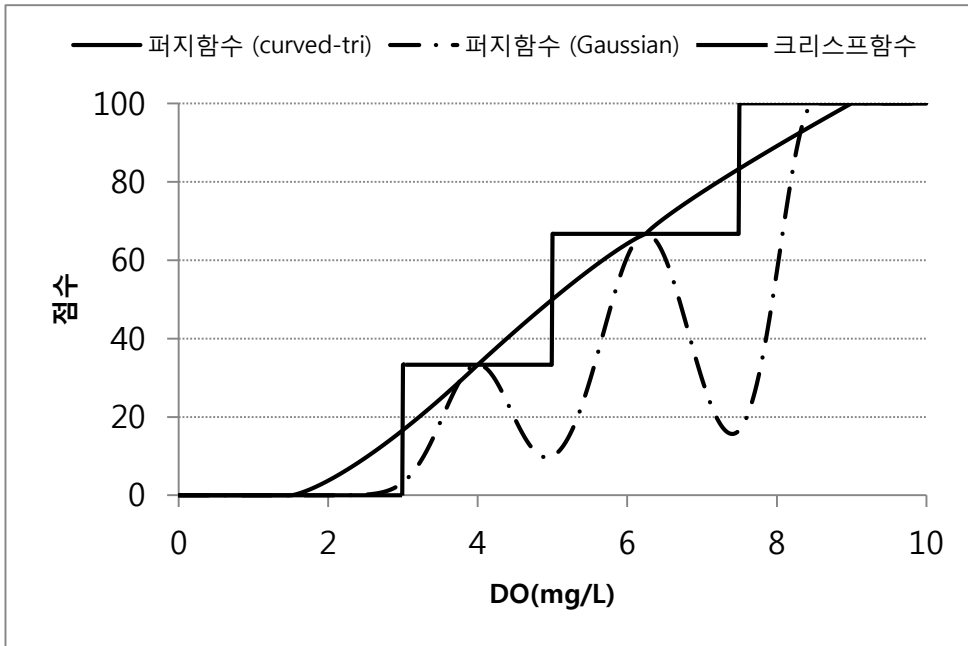


그림 4.23 DO의 인자 점수

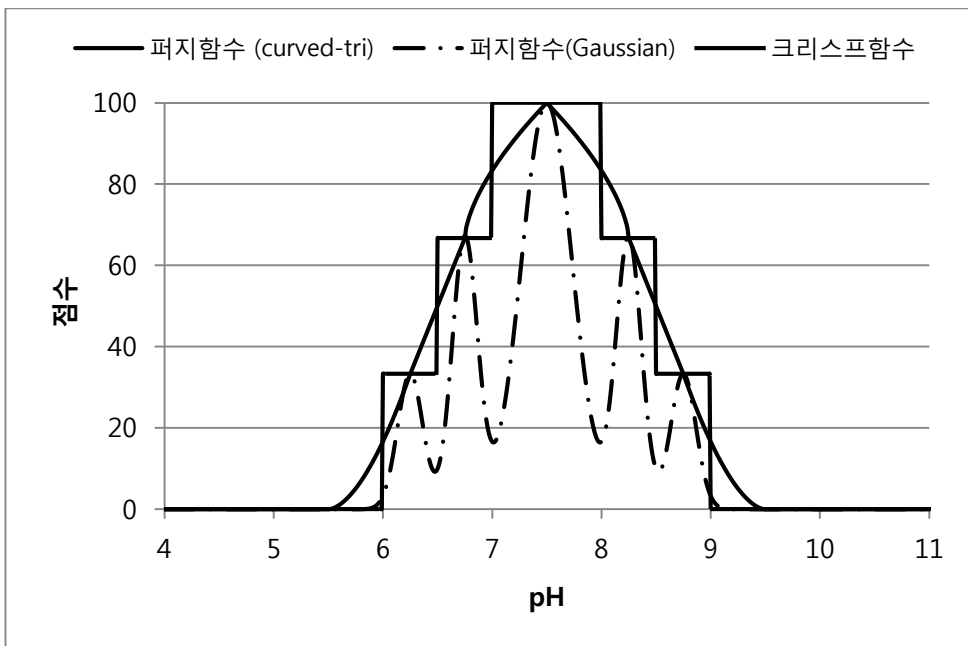


그림 4.24 pH의 인자 점수



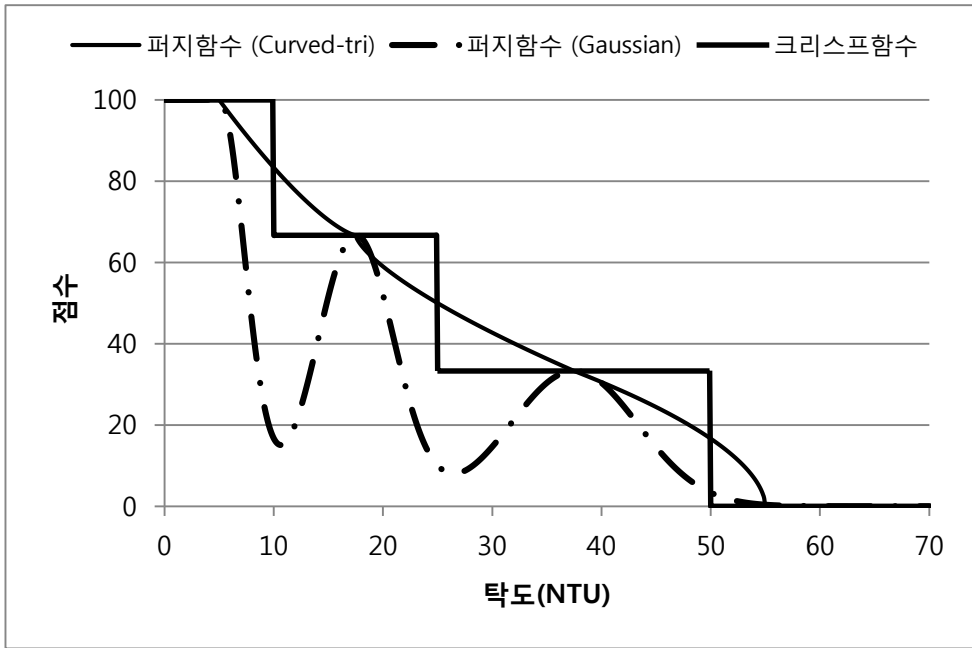


그림 4.25 탁도의 인자 점수

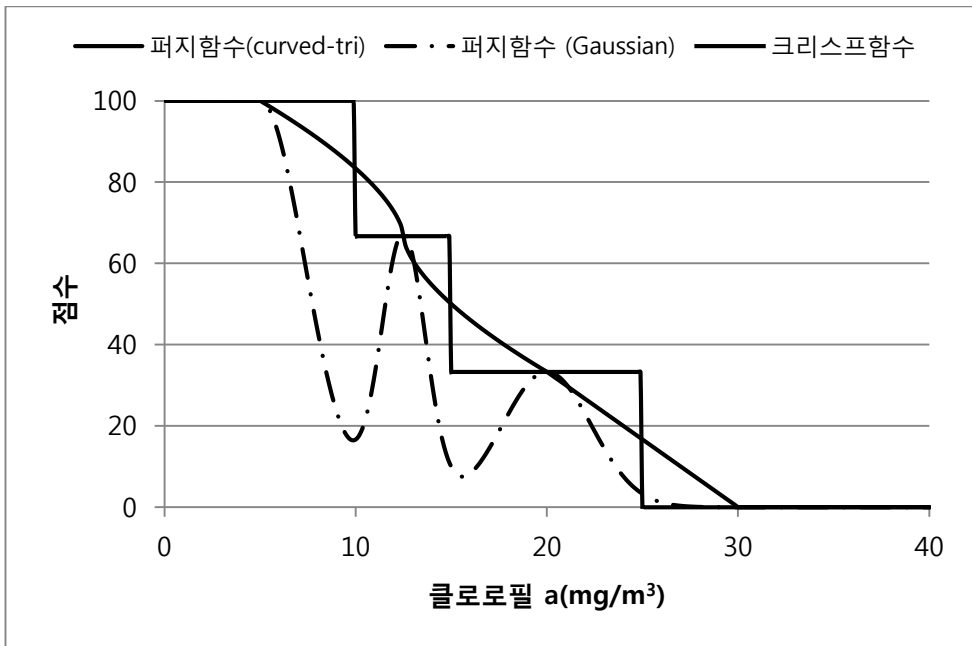


그림 4.26 클로로필 a의 인자 점수

## 5. 모델의 적용

### 5.1 적용 지점

RRIM의 적용지점은 낙동강의 구미보 상류 지점, 강정고령보 상류 지점이며 그 위치는 그림 5.1과 같다. 적용 지점에서 수집된 데이터 중 수질 데이터는 DO, pH, 탁도, 클로로필 a이며 이는 수질자동측정소에서 수집하였다. 또한, 유량 데이터로는 분변성 대장균 모델의 입력 인자인 1일 전 유량을 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 수집하였다. 두 적용지점에 위치한 수질자동측정소는 구미보, 강정고령보 상류 순대로 도개, 다산이며, 유량관측소는 일선교, 성주이다. 마지막으로 각 지점에서 산정된 WQI와 RRI는 기존 서비스되고 있는 RTWQI와의 비교를 통해 결과의 타당성 및 의의를 살펴보고자 하였다.

### 5.2 RRIM 적용 결과

#### 5.2.1 구미보 상류 지점

구미보 상류 지점의 7월부터 8월까지 두 달간의 데이터를 이용하여 RRIM를 적용하였다. 첫 단계로 분변성 대장균 모델을 적용한 결과, 그림 5.2와 같이 두 달 동안 FCG가 1등급으로 나타나 계속 직접접촉 활동이 가능한 것으로 판단되었다. 다음으로 수질 지수 모델을 적용하였는데 이 때 수질 데이터의 분포 특성을 알아보기 위하여 표 5.1과 같이 평균, 최소값, 최대값, 표준편차를 계산하였다. 또한, 본 모델에서 제시하는 수질 등급 별 데이터 수는 표 5.2와 같다. 이를 통해 DO, 탁도 그리고 클로로필 a는 비교적 우수한 수질 상태를 나타냄을 확인하였다. 이 중 DO와 탁도는 우수와 양호 등급에만 속하였고 클로로필 a는 빈도는 적으나 다양한 등급에 모두 분포하고 있었다. pH는 네 등급에 모두 골고루 분포하고 있어 변동폭은 작지만 등급을 고려하였을 때에는 pH에 따른 수질 상태가 꾸준히 변화하고 있음을 확인할 수 있었다.

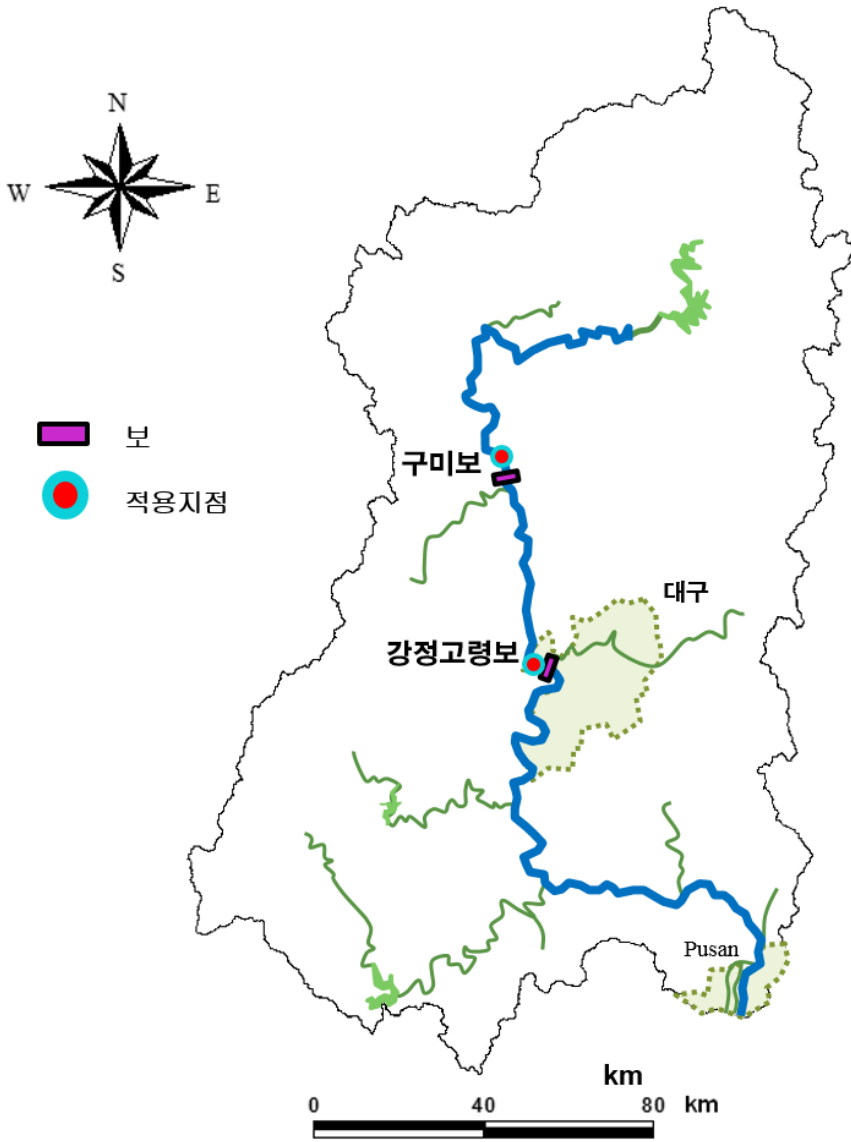


그림 5.1 RRIM 적용 지점

수질 지수 모델의 결과인 WQI와 수질 인자는 그림 5.3, 5.4과 같다. 수질 지수 모델의 입력 값인 각각의 수질 데이터가 WQI에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기로 상관을 조사하였다. 그 결과, 클로로필 a와 WQI의 피어슨 상관계수가  $-0.84$ 로 네 개의 인자 중 클로로필 a가 WQI에 가장 큰 영향을 미침을 확인하였다. 또한, pH와 WQI의 피어슨 상관계수는  $-0.78$ 로 pH 또한 WQI와 높은 상관계수가 있음을 확인하였다. DO와 탁도의 경우 상관계수가 작게 나타났는데 그 이유는 두 수질 인자의 경우 대부분의 기간 동안 우수 등급에 해당하고 있어 WQI를 산정하는데 있어 많은 영향을 미치지 못하였기 때문이다. 이 중 탁도의 경우 7월 7일 과 8월 5일에 극댓값이 발생하였을 때에는 WQI가 하락하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 탁도의 갑작스런 상승폭에 비해 WQI가 소폭 하락하였는데 그 이유는 그 시점에 클로로필 a가 감소하여 그 영향이 상쇄되었기 때문이다.

그림 5.5 는 RRI, WQI, 그리고 RTWQI 를 나타낸다. WQI 는 앞에서 예측된 FCG 에 따라 그 값이 조정되어 RRI 로 변환되었다. FCG 가 모두 1 등급으로 예측되었기 때문에 RRI 는 모두 WQI 와 같은 값을 가졌다. 이 때 우수는 14 일, 양호는 48 일에 해당되었으며 보통, 불량에 해당하는 날은 없었다. RRI 에 따라 모든 날에 직접접촉이 가능한 것으로 판단하였다. 또한, RRI 와 기존 제공되고 있는 RTWQI 의 관계를 살펴보기 위하여 둘 사이의 상관계수를 조사하였으며 그 결과 피어슨 상관계수가  $0.65$  으로 유의한 상관계수가 있음을 확인하였다. 모든 적용 결과는 표 5.3 에 수록하였다.

표 5.1 구미보 상류 지점 수질 데이터 특성

	용존산소량	pH	탁도	클로로필 a
평균	9.55	8.62	10.05	8.11
최소값	6.90	7.30	4.50	1.20
최대값	12.70	9.70	44.10	14.80
표준편차	1.52	0.56	8.12	3.65

표 5.2 구미보 상류 지점 수질 인자의 등급별 해당 수

	용존산소량	pH	탁도	클로로필 a
우수	61	17	13	0
양호	0	19	29	14
보통	0	23	18	33
불량	0	2	1	14

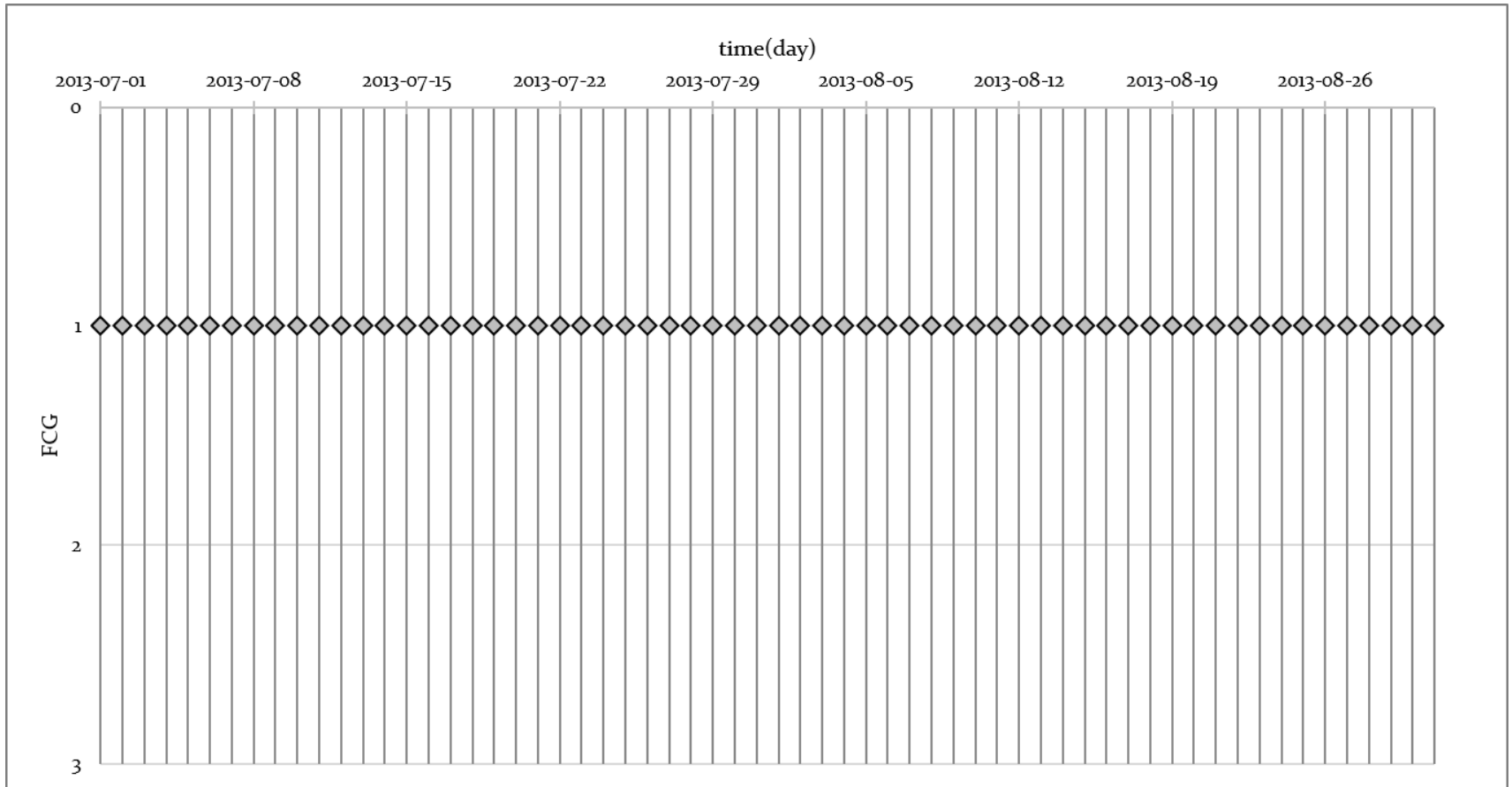


그림 5.2 구미보 상류 지점의 FCG 결과

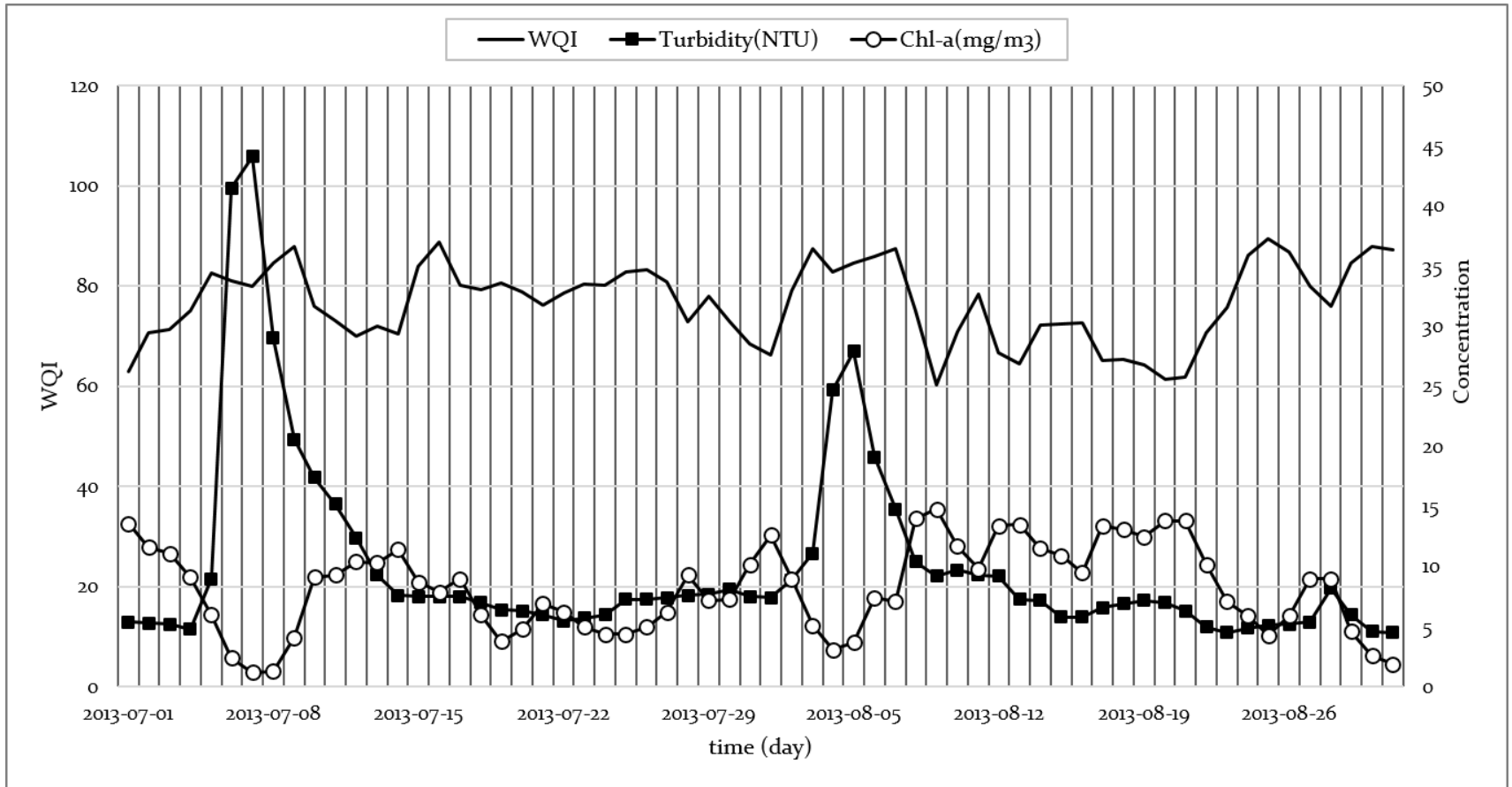


그림 5.3 구미보 상류 지점의 WQI, 탁도, 클로로필 a의 변화 거동

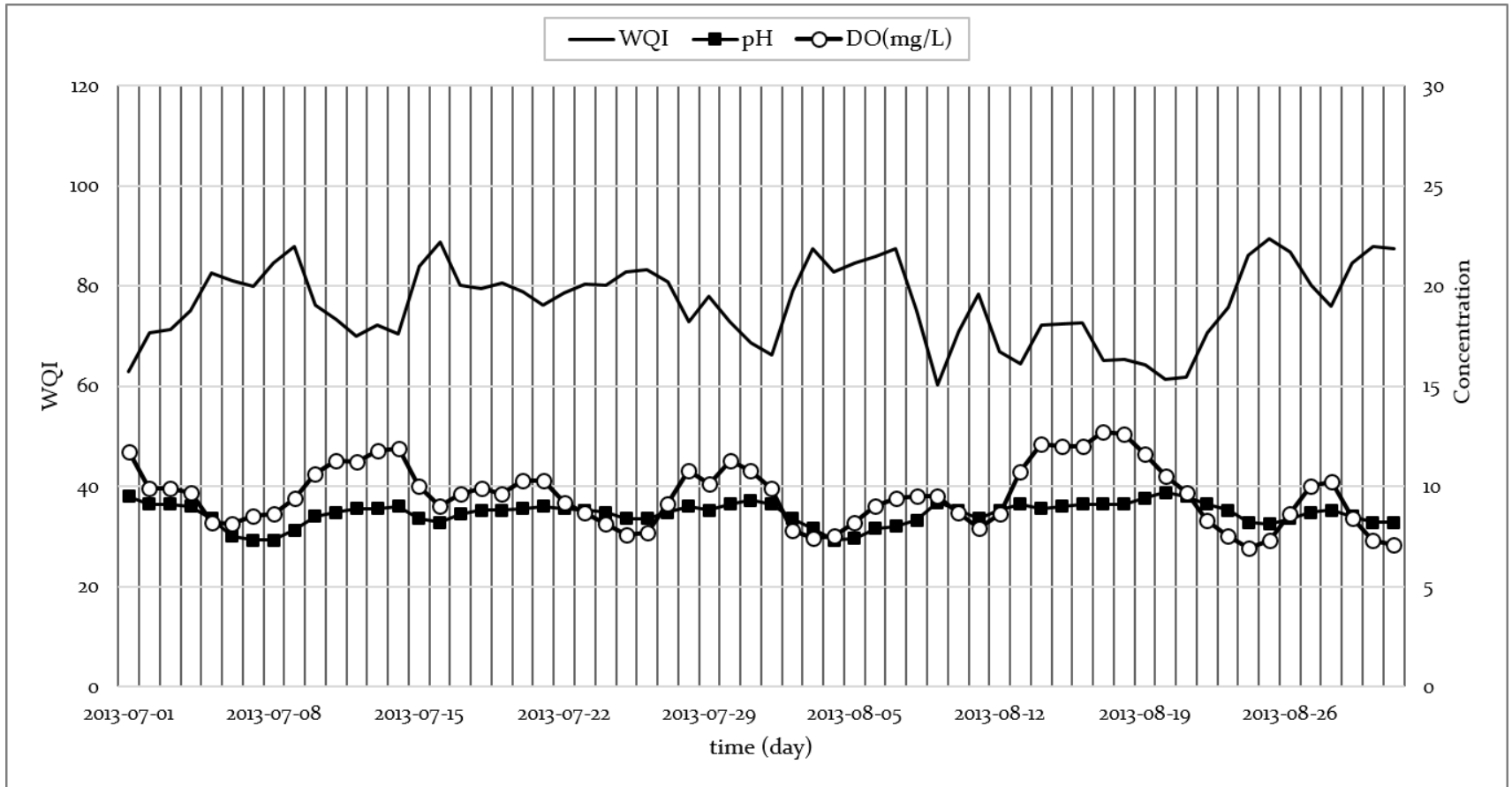


그림 5.4 구미보 상류 지점의 WQI, pH, DO의 변화 거동



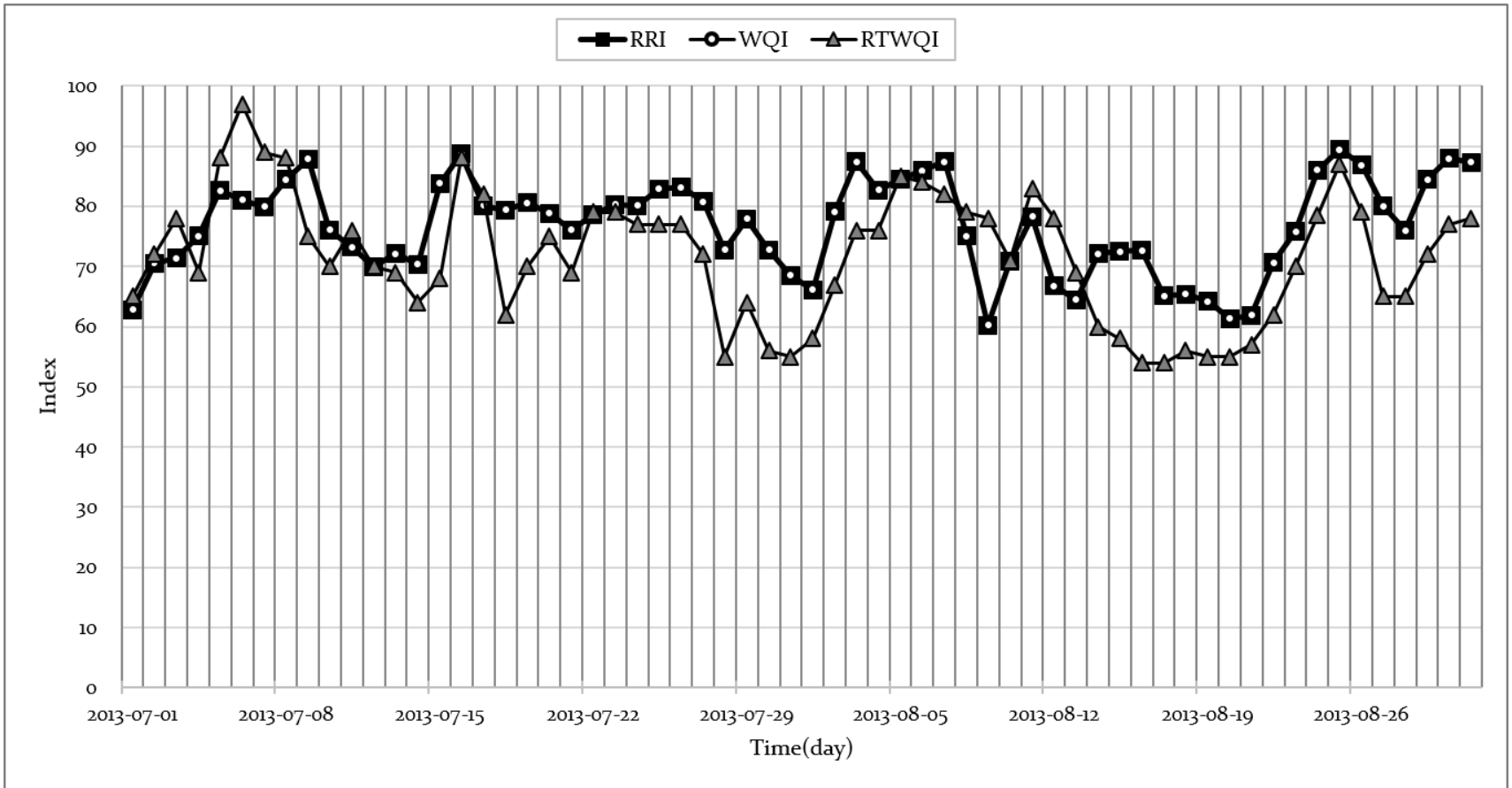


그림 5.5 구미보 상류 지점의 RRI, WQI, RTWQI의 변화 거동 표 5.3 구미보 상류 지점 적용 데이터 및 결과(계속)

표 5.3 구미보 상류 지점 적용 데이터 및 결과(계속)

일시	DO(mg/L)	pH	탁도 (NTU)	클로로필 a (mg/m3)	WQI	RRI	RRG	RTWQI	RTWQI 등급	유량 (m <sup>3</sup> /s)	FCG
2013-07-01	11.7	9.5	5.4	13.6	62.86	25.19	보통	65	양호	124.04	2
2013-07-02	9.9	9.1	5.3	11.6	70.57	30.34	보통	72	양호	117.30	2
2013-07-03	9.9	9.1	5.2	11.1	71.35	30.86	보통	78	양호	184.07	2
2013-07-04	9.7	9.0	4.8	9.1	75.06	33.34	보통	69	양호	239.05	2
2013-07-05	8.2	8.4	9.0	6.0	82.64	38.40	보통	88	우수	658.73	2
2013-07-06	8.1	7.5	41.5	2.4	81.09	37.37	보통	97	우수	1077.65	2
2013-07-07	8.5	7.3	44.1	1.2	79.95	36.61	보통	89	우수	571.41	2
2013-07-08	8.6	7.3	29.0	1.3	84.49	39.64	보통	88	우수	294.83	2
2013-07-09	9.4	7.8	20.6	4.1	87.90	41.92	보통	75	양호	259.15	2
2013-07-10	10.6	8.5	17.4	9.1	76.08	34.02	보통	70	양호	310.66	2
2013-07-11	11.3	8.7	15.2	9.3	73.18	32.08	보통	76	양호	256.74	2
2013-07-12	11.2	8.9	12.4	10.4	69.93	29.91	보통	70	양호	150.09	2
2013-07-13	11.8	8.9	9.3	10.3	72.09	31.36	보통	69	양호	210.66	2
2013-07-14	11.9	9.0	7.6	11.4	70.41	30.23	보통	64	양호	219.79	2
2013-07-15	10.0	8.4	7.5	8.7	83.83	39.20	보통	68	양호	367.31	2
2013-07-16	9.0	8.2	7.5	7.9	88.70	42.45	보통	88	우수	273.87	2

표 5.3 구미보 상류 지점 적용 데이터 및 결과(계속)

일시	DO(mg/L)	pH	탁도 (NTU)	클로로필 a (mg/m3)	WQI	RRI	RRG	RTWQI	RTWQI 등급	유량 (m <sup>3</sup> /s)	FCG
2013-07-17	9.6	8.6	7.5	9.0	80.08	36.70	보통	82	우수	246.54	2
2013-07-18	9.9	8.8	7.0	6.0	79.36	36.21	보통	62	양호	200.10	2
2013-07-19	9.6	8.8	6.4	3.8	80.55	37.01	보통	70	양호	192.02	2
2013-07-20	10.3	8.9	6.3	4.8	78.85	35.87	보통	75	양호	198.27	2
2013-07-21	10.3	9.0	6.0	6.9	76.11	34.04	보통	69	양호	229.65	2
2013-07-22	9.2	8.9	5.5	6.2	78.63	35.73	보통	79	양호	154.25	2
2013-07-23	8.7	8.8	5.7	5.0	80.28	36.83	보통	79	양호	192.60	2
2013-07-24	8.1	8.7	6.0	4.4	80.16	36.75	보통	77	양호	140.42	2
2013-07-25	7.6	8.4	7.3	4.4	82.86	38.55	보통	77	양호	269.16	2
2013-07-26	7.7	8.4	7.3	5.0	83.16	38.75	보통	77	양호	76.77	2
2013-07-27	9.1	8.7	7.4	6.2	80.74	37.13	보통	72	양호	179.25	2
2013-07-28	10.8	9.0	7.6	9.3	72.79	31.82	보통	55	보통	179.86	2
2013-07-29	10.1	8.8	7.7	7.2	77.90	35.24	보통	64	양호	111.16	2
2013-07-30	11.3	9.1	8.1	7.3	72.78	31.82	보통	56	보통	138.48	2
2013-07-31	10.8	9.3	7.5	10.2	68.53	28.98	보통	55	보통	205.17	2
2013-08-01	9.9	9.1	7.4	12.6	66.16	27.39	보통	58	보통	292.20	2

표 5.3 구미보 상류 지점 적용 데이터 및 결과(계속)

일시	DO(mg/L)	pH	탁도 (NTU)	클로로필 a (mg/m3)	WQI	RRI	RRG	RTWQI	RTWQI 등급	유량 (m <sup>3</sup> /s)	FCG
2013-08-02	7.8	8.4	8.9	9.0	79.08	36.03	보통	67	양호	335.13	2
2013-08-03	7.4	7.9	11.1	5.1	87.42	41.60	보통	76	양호	377.00	2
2013-08-04	7.5	7.3	24.7	3.1	82.74	38.47	보통	76	양호	127.57	2
2013-08-05	8.2	7.4	27.9	3.7	84.50	39.64	보통	85	우수	144.20	2
2013-08-06	9.0	7.9	19.1	7.4	85.95	40.61	보통	84	우수	140.27	2
2013-08-07	9.4	8.0	14.8	7.1	87.41	41.59	보통	82	우수	168.01	2
2013-08-08	9.5	8.3	10.4	14.0	75.02	33.31	보통	79	양호	248.80	2
2013-08-09	9.5	9.2	9.2	14.8	60.26	23.45	보통	78	양호	222.31	2
2013-08-10	8.7	8.8	9.7	11.7	70.94	30.59	보통	71	양호	182.48	2
2013-08-11	7.9	8.4	9.3	9.8	78.31	35.51	보통	83	우수	161.05	2
2013-08-12	8.6	8.8	9.2	13.4	66.80	27.82	보통	78	양호	126.60	2
2013-08-13	10.7	9.1	7.3	13.5	64.44	26.25	보통	69	양호	105.23	2
2013-08-14	12.1	8.9	7.2	11.5	72.15	31.40	보통	60	보통	84.51	2
2013-08-15	12.0	9.0	5.8	10.9	72.49	31.62	보통	58	보통	144.53	2
2013-08-16	12.0	9.1	5.8	9.5	72.64	31.73	보통	54	보통	141.43	2
2013-08-17	12.7	9.1	6.6	13.4	65.14	26.71	보통	54	보통	140.66	2

표 5.3 구미보 상류 지점 적용 데이터 및 결과(계속)

일시	DO(mg/L)	pH	탁도 (NTU)	클로로필 a (mg/m3)	WQI	RRI	RRG	RTWQI	RTWQI 등급	유량 (m <sup>3</sup> /s)	FCG
2013-08-18	12.6	9.1	6.9	13.1	65.40	26.89	보통	56	보통	124.92	2
2013-08-19	11.6	9.4	7.2	12.5	64.18	26.07	보통	55	보통	124.92	2
2013-08-20	10.5	9.7	7.0	13.8	61.30	24.15	보통	55	보통	124.92	2
2013-08-21	9.7	9.5	6.3	13.8	61.85	24.52	보통	57	보통	124.92	2
2013-08-22	8.3	9.1	5.0	10.2	70.61	30.37	보통	62	양호	124.92	2
2013-08-23	7.5	8.8	4.5	7.1	75.81	33.84	보통	70	양호	124.92	2
2013-08-24	6.9	8.2	4.9	5.9	86.04	40.68	보통	78.5	양호	124.92	2
2013-08-25	7.3	8.1	5.1	4.3	89.45	42.95	보통	87	우수	124.92	2
2013-08-26	8.6	8.4	5.2	5.9	86.81	41.19	보통	79	양호	124.92	2
2013-08-27	10.0	8.7	5.4	9.0	80.02	36.65	보통	65	양호	124.92	2
2013-08-28	10.2	8.8	8.2	9.0	75.99	33.96	보통	65	양호	124.92	2
2013-08-29	8.4	8.5	6.0	4.6	84.50	39.64	보통	72	양호	124.92	2
2013-08-30	7.3	8.2	4.6	2.6	87.97	41.96	보통	77	양호	124.92	2
2013-08-31	7.1	8.2	4.5	1.9	87.34	41.54	보통	78	양호	124.92	2

### 5.2.2 강정고령보 상류 지점

강정고령보 상류 지점은 5 월부터 6 월까지 두 달간의 데이터를 이용하였다. 분변성 대장균 모델을 적용하여 예측된 FCG 의 결과는 그림 5.6 과 같다. 구미보 상류 지점과는 다르게 1 등급은 34 일, 2 등급은 26 일 그리고 3 등급은 1 일로 나타나 다양한 분포를 보임을 확인할 수 있었다.

다음으로 수질 지수 모델을 적용하였다. 입력된 수질 데이터의 분포 특성은 표 5.4 과 같으며 본 모델에서 제시하는 수질 등급 별 데이터 수는 표 5.5 과 같다. 수질 지수 모델의 결과인 WQI 와 수질 인자는 그림 5.7, 5.8 과 같다. 본 적용 지점에서는 DO 는 항상 우수 등급을 유지하는 것으로 나타났고 pH 와 탁도는 우수, 양호, 보통 등급에 고루 분포하고 있었다. 또한, 클로로필 a 는 양호, 보통, 불량에 고루 분포하고 있으나 보통에 해당하는 수가 가장 많았다. 본 적용지점에서도 각 수질 인자와 WQI 의 상관계수를 계산하였고 그 결과, 구미보 상류 지점의 적용 시와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 클로로필 a 와 WQI 의 피어슨 상관계수가  $-0.85$  로 네 개의 인자 중 클로로필 a 가 WQI 에 가장 큰 영향을 미침을 확인하였고 pH 와 WQI 의 피어슨 상관계수는  $-0.67$  로 유의한 상관관계가 있음을 확인하였다. 이 경우에도 DO 와 탁도의 상관계수가 작게 나타났다. 표 5.5 와 같이 DO 는 전체 61 일의 데이터가 모두 우수 등급에 해당하고 있어 WQI 를 산정하는데 있어 많은 영향을 미치지 못하였고, 탁도의 경우에는 대부분의 기간에 변화의 정도가 크지 않고 클로로필 a 와 그 영향이 상쇄되었기 때문이다. 탁도가 5 월 29 일과 6 월 29 일에 급하게 상승하였으나 동시에 클로로필 a 가 감소하여 RRI 가 크게 감소하지 못함을 확인할 수 있었다.

그림 5.9 는 RRI 와 WQI, 그리고 RTWQI 를 나타낸다. 알고리즘에 의해 FCG 와 WQI 가 RRI 로 변환되었다. 이 중 FCG 가 2 등급이고 WQI 가 50 보다 큰 값인 경우와 FCG 가 3 등급이고 WQI 가 16.6 보다 큰 값인 경우에는 알고리즘에 제안된 식 (4.26)과 (4.27)에 따라 RRI 가

낮게 조정되어 계산되었다. RRI 는 RTWQI 와 비교되었는데 RRI 는 FCG 가 2 등급 혹은 3 등급일 때 평균 52.5 점 정도 낮은 지수를 산정하여 RRI 가 분변성 대장균을 고려하여 RTWQI 보다 보수적인 결과를 산정할 수 있음을 확인하였다. RRI 는 RRG 로 다시 변환되었는데 우수 등급은 존재하지 않았고 양호 등급은 29 일, 보통 등급은 31 일 그리고 불량 등급은 1 일에 해당되었다. 보통 FCG 가 2 등급 혹은 3 등급일 때 RRI 의 등급이 낮아짐을 확인하였다. 모든 적용 결과는 표 5.6 에 수록하였다.

표 5.5 강정고령보 상류 지점 수질 데이터 특성

	용존산소량	pH	탁도	클로로필 a
평균	9.40	8.22	19.24	23.71
최소값	7.80	6.90	4.70	10.40
최대값	11.80	9.00	50.70	80.50
표준편차	0.99	0.58	10.54	16.44

표 5.6 강정고령보 상류 지점 수질 인자의 등급별 해당 수

	용존산소량	pH	탁도	클로로필 a
우수	61	17	13	0
양호	0	19	29	14
보통	0	23	18	33
불량	0	2	1	14



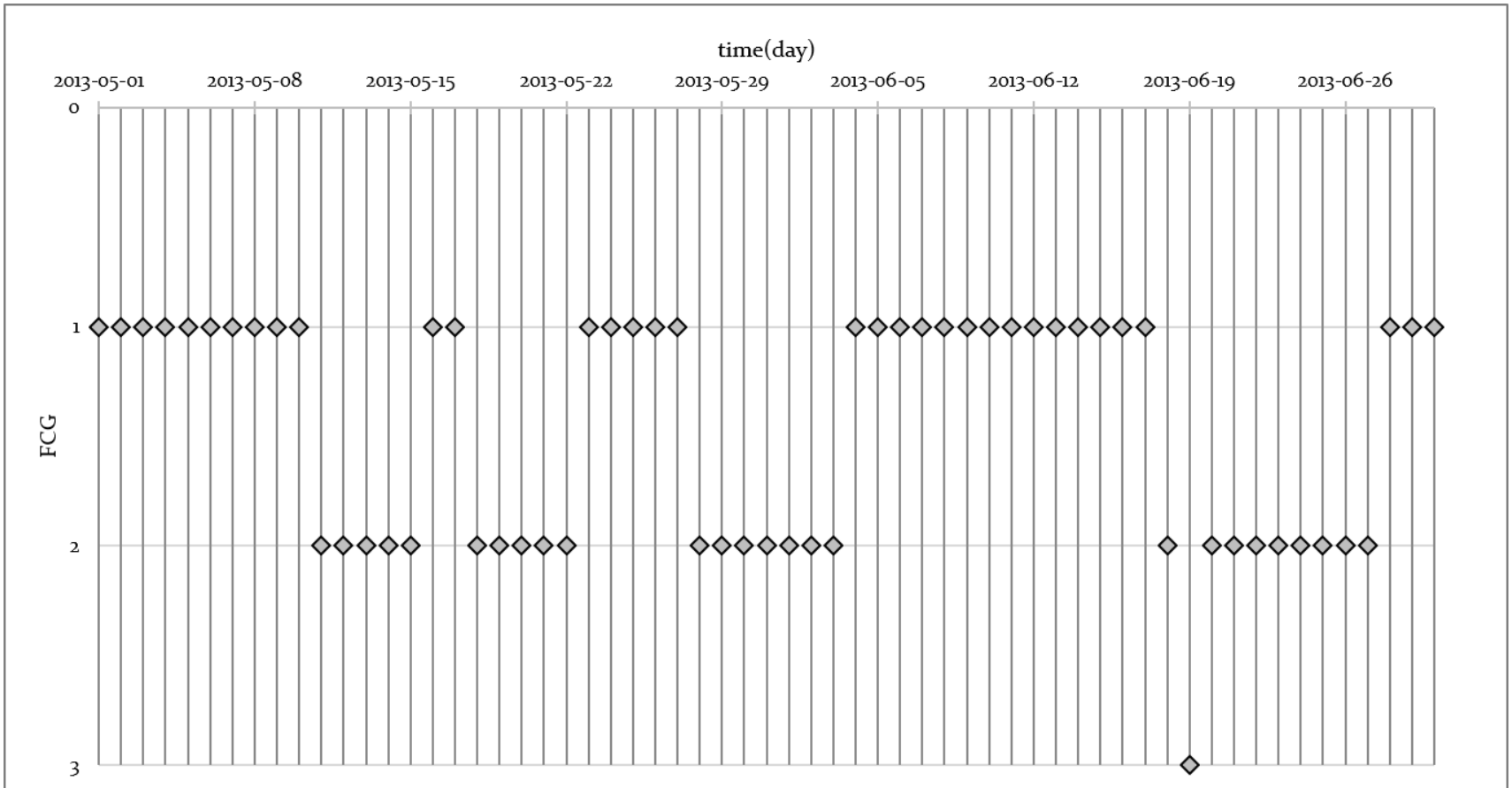


그림 5.6 강정고령보 상류 지점의 FCG 결과

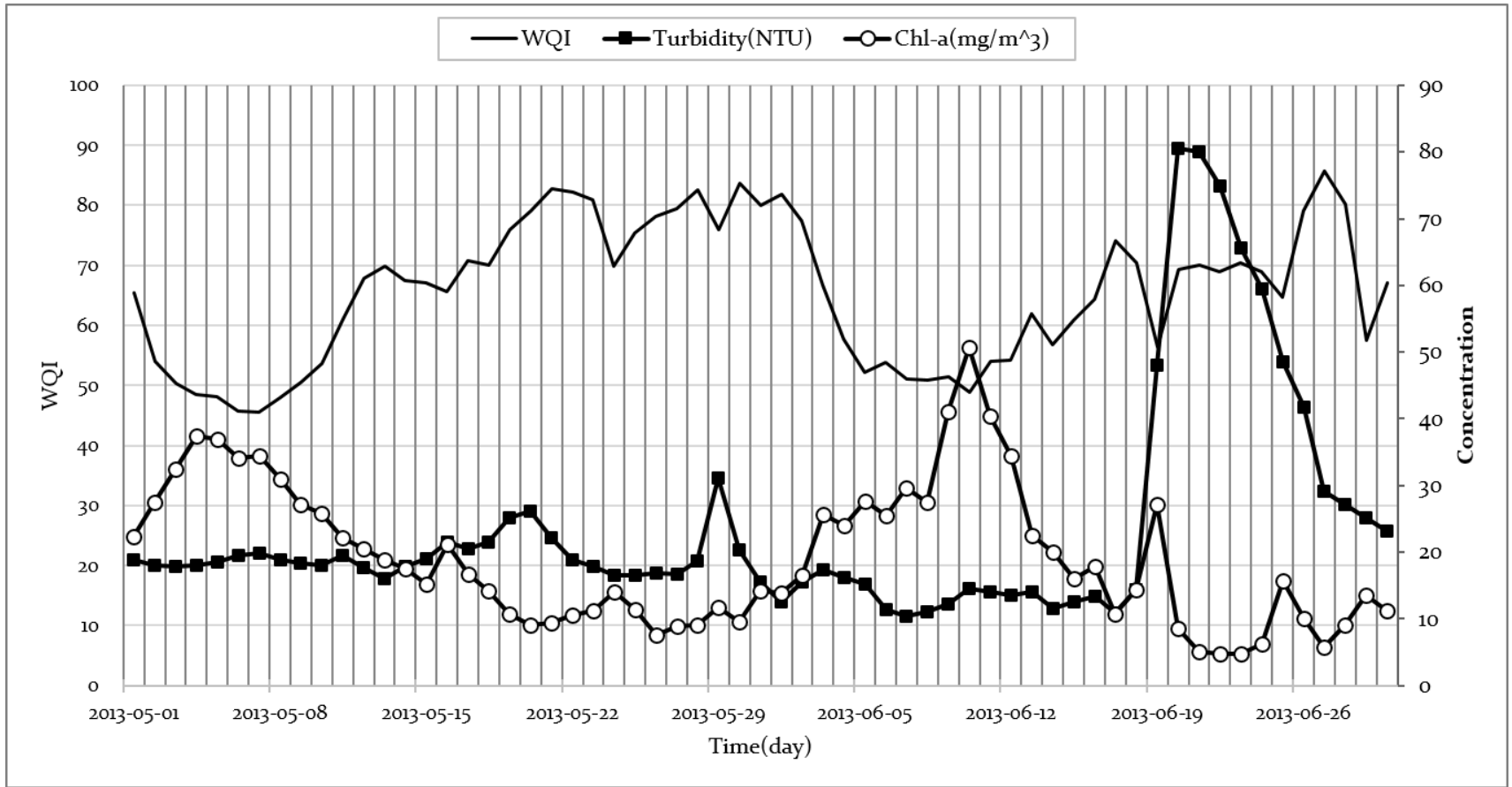


그림 5.7 강정고령보 상류 지점의 WQI, 탁도, 클로로필 a의 변화 거동

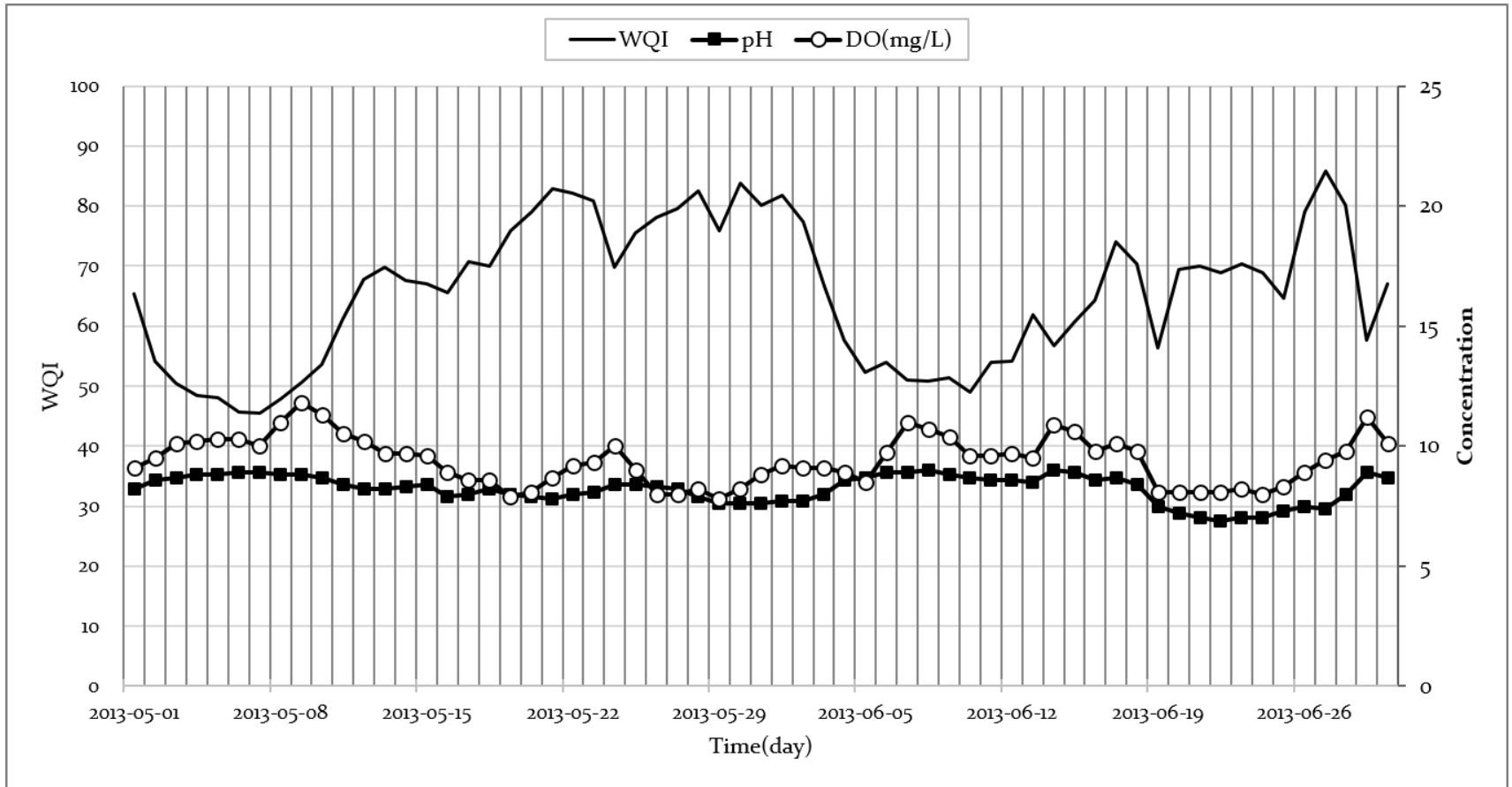


그림 5.8 강정고령보 상류 지점의 WQI, pH, DO의 변화 거동

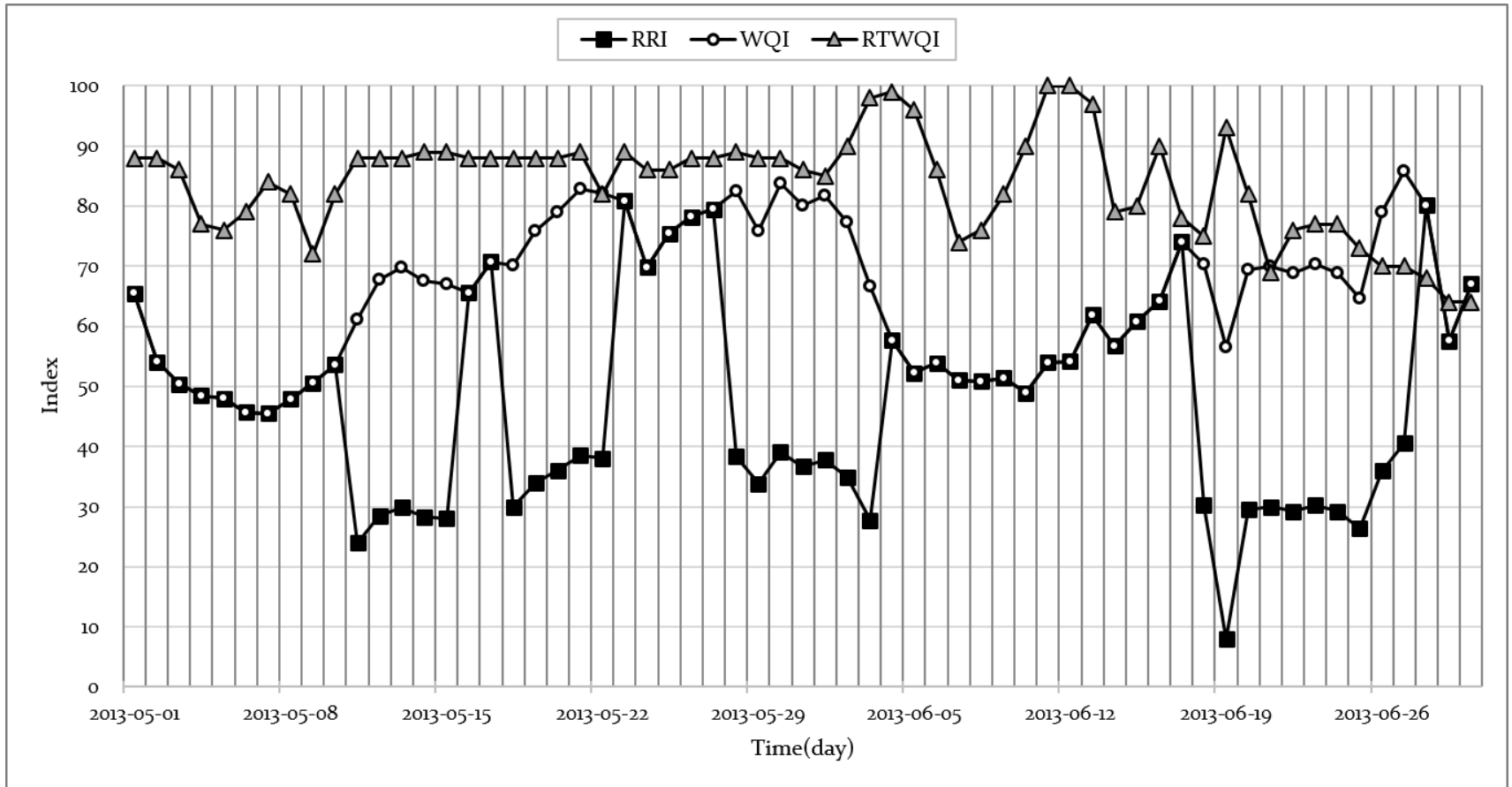


그림 5.9 강정고령보 상류 지점의 RRI, WQI, RTWQI의 변화 거동

표 5.6 강정고령보 상류 지점 적용 데이터 및 결과(계속)

일시	DO(mg/L)	pH	탁도 (NTU)	클로로필 a (mg/m <sup>3</sup> )	WQI	RRI	RRG	RTWQI	RTWQI 등급	유량 (m <sup>3</sup> /s)	FCG
2013-05-01	9.1	8.2	18.8	22.4	65.46	65.46	양호	88	우수	172.27	1
2013-05-02	9.5	8.6	18.1	27.43	51.96	51.96	양호	88	우수	211.54	1
2013-05-03	10.1	8.7	17.9	32.46	50.38	50.38	양호	86	우수	146.56	1
2013-05-04	10.2	8.8	18	37.5	48.47	48.47	보통	77	양호	88.24	1
2013-05-05	10.3	8.8	18.6	36.9	48.05	48.05	보통	76	양호	134.65	1
2013-05-06	10.3	8.9	19.5	34.1	45.74	45.74	보통	79	양호	111.55	1
2013-05-07	10	8.9	19.9	34.4	45.54	45.54	보통	84	우수	151.9	1
2013-05-08	11	8.8	18.8	30.9	47.92	47.92	보통	82	우수	240.8	1
2013-05-09	11.8	8.8	18.4	27.1	50.59	50.59	양호	72	양호	265.42	1
2013-05-10	11.3	8.7	18.1	25.9	53.64	53.64	양호	82	우수	349.55	1
2013-05-11	10.5	8.4	19.5	22.2	61.06	23.99	보통	88	우수	275.84	2
2013-05-12	10.2	8.2	17.73333	20.5	67.83	28.51	보통	88	우수	318.18	2
2013-05-13	9.7	8.2	15.96667	18.9	69.82	29.84	보통	88	우수	193.35	2
2013-05-14	9.7	8.3	17.9	17.5	67.54	28.32	보통	89	우수	330.24	2
2013-05-15	9.6	8.4	19.1	15.2	67.08	28.01	보통	89	우수	385.96	2

표 5.6 강정고령보 상류 지점 적용 데이터 및 결과(계속)

일시	DO(mg/L)	pH	탁도 (NTU)	클로로필 a (mg/m3)	WQI	RRI	RRG	RTWQI	RTWQI 등급	유량 (m <sup>3</sup> /s)	FCG
2013-05-16	8.9	7.9	21.5	21.2	68.62	68.62	양호	88	우수	22.79	1
2013-05-17	8.6	8	20.5	16.7	70.77	70.77	양호	88	우수	93.08	1
2013-05-18	8.6	8.2	21.5	14.2	70.07	30.01	보통	88	우수	207.53	2
2013-05-19	7.9	8	25.1	10.8	75.94	33.93	보통	88	우수	300.68	2
2013-05-20	8.1	7.9	26.1	9	79.08	36.02	보통	88	우수	129.91	2
2013-05-21	8.7	7.8	22.2	9.4	82.80	38.51	보통	89	우수	216.52	2
2013-05-22	9.2	8	18.8	10.5	82.19	38.10	보통	82	우수	146.01	2
2013-05-23	9.3	8.1	17.8	11.2	80.85	80.85	양호	89	우수	22.89	1
2013-05-24	10	8.4	16.5	14.1	69.85	69.85	양호	86	우수	59.26	1
2013-05-25	9	8.4	16.6	11.4	75.45	75.45	양호	86	우수	135.3	1
2013-05-26	8	8.3	16.8	7.6	78.17	78.17	양호	88	우수	140.95	1
2013-05-27	8	8.2	16.7	8.9	79.51	79.51	양호	88	우수	140.83	1
2013-05-28	8.2	7.9	18.7	9	82.55	38.34	보통	89	우수	507.2	2
2013-05-29	7.8	7.6	31.1	11.8	75.86	33.87	보통	88	우수	635.81	2
2013-05-30	8.2	7.6	20.4	9.5	83.72	39.12	보통	88	우수	282.41	2

표 5.6 강정고령보 상류 지점 적용 데이터 및 결과(계속)

일시	DO(mg/L)	pH	탁도 (NTU)	클로로필 a (mg/m3)	WQI	RRI	RRG	RTWQI	RTWQI 등급	유량 (m <sup>3</sup> /s)	FCG
2013-05-31	8.8	7.6	15.6	14.2	80.03	36.66	보통	86	우수	218.39	2
2013-06-01	9.2	7.7	12.5	13.9	81.79	37.84	보통	85	우수	208.63	2
2013-06-02	9.1	7.7	15.5	16.6	77.41	34.91	보통	90	우수	99.99	2
2013-06-03	9.1	8	17.3	25.6	66.70	27.76	보통	98	우수	182.31	2
2013-06-04	8.9	8.6	16.25	24	57.66	57.66	양호	99	우수	177.63	1
2013-06-05	8.5	8.7	15.2	27.6	52.24	52.24	양호	96	우수	217.82	1
2013-06-06	9.75	8.9	11.4	25.5	53.89	53.89	양호	86	우수	16.2	1
2013-06-07	11	8.9	10.4	29.7	51.06	51.06	양호	74	양호	141.31	1
2013-06-08	10.7	9	11.1	27.5	50.84	50.84	양호	76	양호	272.54	1
2013-06-09	10.4	8.8	12.2	41.1	51.43	51.43	양호	82	우수	172.15	1
2013-06-10	9.6	8.7	14.6	50.7	51.92	51.92	양호	90	우수	224.44	1
2013-06-11	9.6	8.6	14	40.4	53.97	53.97	양호	100	우수	315.7	1
2013-06-12	9.7	8.6	13.6	34.4	54.18	54.18	양호	100	우수	301.64	1
2013-06-13	9.5	8.5	14.1	22.5	61.89	61.89	양호	97	우수	78.08	1
2013-06-14	10.9	9	11.5	20.1	56.74	56.74	양호	79	양호	307.93	1

표 5.6 강정고령보 상류 지점 적용 데이터 및 결과(계속)

일시	DO(mg/L)	pH	탁도 (NTU)	클로로필 a (mg/m <sup>3</sup> )	WQI	RRI	RRG	RTWQI	RTWQI 등급	유량 (m <sup>3</sup> /s)	FCG
2013-06-15	10.6	8.9	12.6	16.1	60.82	60.82	양호	80	우수	196.01	1
2013-06-16	9.8	8.6	13.4	17.8	64.26	64.26	양호	90	우수	131.16	1
2013-06-17	10.1	8.7	10.9	10.8	74.03	74.03	양호	78	양호	15.4	1
2013-06-18	9.8	8.4	14.4	14.4	70.40	30.22	양호	75	양호	1005.75	2
2013-06-19	8.1	7.5	48.1	27.1	56.44	7.93	불량	93	우수	3225.69	3
2013-06-20	8.1	7.2	80.5	8.5	69.34	29.52	양호	82	우수	1236.7	2
2013-06-21	8.1	7	80	5.1	70.05	30.00	양호	69	양호	497.04	2
2013-06-22	8.1	6.9	74.9	4.7	68.93	29.25	양호	76	양호	732.4	2
2013-06-23	8.2	7	65.6	4.7	70.41	30.24	양호	77	양호	431.91	2
2013-06-24	8	7	59.5	6.3	68.89	29.22	양호	77	양호	479.49	2
2013-06-25	8.3	7.3	48.6	15.7	64.68	26.40	양호	73	양호	497.13	2
2013-06-26	8.9	7.5	41.7	10.1	79.03	35.99	양호	70	양호	90.85	2
2013-06-27	9.4	7.4	29.1	5.8	85.79	40.51	양호	70	양호	288.25	2
2013-06-28	9.8	8	27.1	9.1	80.17	80.17	양호	68	양호	106.46	1
2013-06-29	11.2	8.9	25.1	13.6	57.56	57.56	양호	64	양호	186.63	1
2013-06-30	10.1	8.7	23.1	11.3	67.04	67.04	양호	64	양호	98.48	1



### 5.2.3 RTWQI 와 RRI 의 비교

RRI와 RTWQI는 지수를 산정하는데 있어서 크게 세 가지 차이가 존재한다. 우선 두 지수는 고려하는 수질 인자가 다르다. RRI는 DO, pH, 탁도, 클로로필 a 그리고 분변 대장균을 고려하며 RTWQI는 DO, pH, 수온, 전기전도도, TN, TP, TOC를 고려한다. RRI는 RTWQI가 대장균을 고려하지 않는다는 한계를 보완하기 위하여 분변성 대장균 모델을 통해 FCG를 예측하였으며 FCG는 RRI와 RTWQI간의 중요한 차이를 만든다. 두 번째로 두 지수를 각각 산정하는 방법이 다르다. RTWQI는 단일한 수질 기준의 범위를 정하여 그것을 초과하는 정도에 따라 지수를 계산한다. 반면, RRI는 네 개의 수질 등급 기준에 따라 그 범위를 정하여 현재의 수질 상태가 어떠한 상태에 속하는지를 계산한다. 이 때, RRI는 수질 등급 기준의 모호성과 불확실성을 보완하기 위하여 퍼지 합성 방법을 사용하여 계산한다. 마지막으로 RRI와 RTWQI의 등급이 서로 다르다. RRI의 등급은 RRG이며 RRG는 수체와의 접촉 안전성 여부에 따라 네 등급으로 나뉘는 반면, RTWQI는 다섯 개의 등급으로 나뉘며 이는 표 5.7에 제시되어 있다. 그러나 RTWQI의 다섯 개의 등급은 그 해석에 있어서도 모호함을 지닌다. RRG는 각 등급마다 가능한 활동의 종류를 언급하나 RTWQI는 그런 점이 부족하여 시민들의 주관에 따라 이를 해석해야 하는 어려움이 존재한다.

두 인자의 차이로 인해 두 인자의 값을 비교하는 데에는 한계가 존재하나, 두 인자 모두 하천 레크리에이션 활동을 중점에 두고 수질을 종합적으로 평가하는 인자라는 측면에서 비교에 의의가 있었다. 또한, 서로의 값 자체보다는 두 지수의 수질 상태에 따라 변화하는 거동을 비교해 볼 수 있었다. 이러한 RRI와 RTWQI의 변화 거동은 각 지점마다 조금씩 다른데 그 이유는 지점마다 각 수질 지수에서 포함하고 있는 수질 인자들의 특성들이 다르기 때문이다. 또한, FCG에 따라 RRI가 하향 조정됨으로써 RTWQI와 큰 차이를 보이기도 하였다.

표 5.7 RTWQI의 등급

등급	RTWQI	의미
우수	80-100	오염물질이 거의 없는 청정수질의 상태로 항시 친수 활동이 적합함.
양호	60-79	비교적 양호한 수질을 유지하고 있어 친수활동에 적합함.
보통	40-59	대체로 양호한 수질이나 때때로 오염물질이 유입되어 친수 활동에 영향을 미칠 수 있음.
주의	20-39	빈번한 오염물질의 유입으로 수질이 오염되어 친수 활동에 주의가 필요함.
불량	0-19	수질오염도가 높은 상태로 친수 활동에 부적합함.

## 6. 결론 및 향후 연구 계획

본 연구에서는 하천에서의 레크리에이션 활동을 즐기는 시민들에게 수질적인 안전과 쾌적함을 제공하고자 종합적인 수질 정보를 하천 레크리에이션 지수, 즉 RRI라고 명명하고 이를 산정하는 모델인 RRIM을 개발하였다. 기존에 존재하는 레크리에이션에 초점을 맞춘 수질정보시스템은 종합적인 수질의 정도를 나타내지 못하거나 수질 기준 상에 존재하는 모호함과 불확실성을 고려하지 않은 점, 그리고 수상 레크리에이션 활동에 많은 영향을 미치는 대장균과 같은 중요 수질 지표의 정보를 종합하지 않았다는 점 등의 문제점이 있었다. RRIM은 이를 보완하기 위하여 두 개의 구성 모델, 분변성 대장균 모델과 수질 지수 모델을 통해 다양하고 수상 레크리에이션에 중요한 수질 지표를 모두 고려하여 종합된 수질 정보를 RRI와 RRIG로 제공하고자 하였다. 또한, 퍼지 집합 이론의 적용을 통해 수질 기준 상의 모호함과 불확실성을 RRI 산정에 반영하고자 하였다.

본 연구에서 개발된 분변성 대장균 모델은 분변성 대장균의 등급인 FCG를 예측하는 모델로 로지스틱 회귀분석을 이용하여 개발되었다. 그 결과 분변성 대장균 모델은 0.63의 정분류율을 보였다. 수질 지수 모델은 하천 레크리에이션에 중요한 수질 인자인 DO, pH, 탁도, 클로로필 a를 종합된 정보인 WQI로 나타내는 모델로 퍼지 합성 방법을 이용하여 개발되었다. WQI는 퍼지 합성 방법이 적용되지 않았을 때와 비교하였을 때 수질 기준의 모호함을 잘 반영하고 있음을 확인하였다. 이 두 모델의 결과인 FCG와 WQI를 종합하여 최종적으로 RRI와 RRG가 산정된다. 낙동강의 구미보 상류 지점와 강정고령보 상류 지점에 RRIM을 적용한 결과, 수질 인자의 변동성, 특히 클로로필 a와 pH의 변동을 잘 반영하고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 FCG 등급이 모두 1등급으로 나온 구미보 상류 지점의 경우, RRI와 RTWQI를 비교하였을 때 피어슨 상관계수

0.65의 유의한 상관관계를 보였다. 그러나 강정고령보 상류 지점에서는 FCG 등급이 2등급과 3등급을 보일 때 RRI 계산 시 결정적인 영향을 미쳤으며 그에 따라 RRI가 RTWQI에 비해 보수적인 결과를 낼 수 있음을 확인할 수 있었다.

RRIM은 시민들로 하여금 하천을 안전하고 쾌적하게 이용할 수 있도록 돕는다는 점에서 하천 이용의 효율성을 높이는 데에 기여할 수 있다. 또한, RRIM은 기존 존재하는 모델들과 지수를 산정하는 방법에 있어 새로운 방법을 제시하였다는 점에서 차별성을 두고 있다. 국내에 기존 존재하는 RTWQI와 비교하였을 때, 등급을 제시하는 방법에 있어 가능한 활동을 구체적으로 서술하고 있어 시민들이 더 많은 활용을 할 수 있도록 하였다. 또한, 고려하는 수질 인자에 대장균 지표를 포함함하고 수질 기준의 모호함을 반영함에 있어 더 바람직한 지수를 산정한다.

향후 연구 계획으로 우선 RRIM의 분변성 대장균 모델의 정확도를 높이기 위한 방안을 생각할 수 있다. 분변성 대장균 모델의 개발에 있어서 가장 어려웠던 점은 데이터의 수집이었다. 분변성 대장균 모델의 개발을 위하여 양질의 수질 및 유량 데이터의 확보가 필요하였으나 계측이 되지 않거나 합리적이지 못한 수치들이 존재함으로 인해 통계 분석에 어려움이 존재하였다. 따라서 추후 수질 데이터의 추가 수집과 데이터의 노이즈를 제거하는 통계적 기법들로 분변성 대장균 모델의 정확도를 높일 수 있을 것이다.

두 번째로 RRIM의 적용 시 검증과 관련하여 추가 연구를 진행할 수 있다. RRIM 적용 시 이것을 검증할 수 있는 방법이 명확히 존재하지 않아 어려움이 존재하였다. 그러나 추후 연구를 통해 실제 하천 이용자들을 대상으로 설문조사를 하거나 수상 활동 후 이들의 추적을 통해 질병 발생 횟수를 조사하는 등의 방법을 통해 RRI를 검증할 수 있을 것으로 기대된다.

## 7. 참고문헌

김윤영(2011). 수상관광 레저산업 활성화 방안: 내수면 무동력 수상관광 레저활동을 중심으로., 한국문화관광연구원.

김윤영(2011). 수상관광 이용 활성화를 위한 정책 방향 연구., 한국문화관광연구원.

김좌관(2010). 수질오염개론., 동화기술.

성웅현(2001). 응용 로지스틱 회귀분석., 탐진.

안태석 등(2008). 물놀이지역 수질조사 관리 매뉴얼., 환경부.

이태관 등(2012). 수생태 안전성 향상을 위한 조류저감기술., 한국환경공단.

최지용(1996). 종합수질지표의 개발., 한국환경기술개발원.

환경부(2012). 수질측정망 운영계획., 환경부.

Allison, P. D. (2012). *Logistic regression using SAS: Theory and application*. SAS Institute.

Brion, G. M., and Lingireddy, S. (2003). "Artificial neural network modelling: a summary of successful applications relative to microbial water quality." *Health-related Water Microbiology*, Vol. 47, No. 3, pp.

235–240.

Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A. and Tozer, R. (1970). “A water quality index – do we dare?.” *Water and Sewage Works*, Vol. 117, No. 10, pp. 339–343.

Chang, N.B. Chen, H.W. and Ning, S.K. (2001). “Identification of river water quality using the Fuzzy Synthetic Evaluation approach.” *Journal of Environmental Management*, Vol. 63, No. 3, pp. 293–305.

Christensen, V. G., Jian, X., and Ziegler, A. C. (2000). *Regression analysis and real-time water-quality monitoring to estimate constituent concentrations, loads, and yields in the Little Arkansas River, south-central Kansas, 1995–99*. US Department of the Interior, U.S. Geological Survey.

Clark, M. L., and Norris, J. R. (2000). *Occurrence of fecal coliform bacteria in selected streams in Wyoming, 1990–99* (No. 4198). U.S. Geological Survey.

Crowther, J., Kay, D., and Wyer, M. (2001). “Relationships between water quality and environmental conditions in coastal recreational waters: The Fylde Coast, United Kingdom.” *Water Resources*, Vol. 35, No. 17, pp. 4029–4038.

Dinius S. H. (1987). “Design of an Index of Water Quality.” *Water Resources Bulletin*, Vol. 23, No. 5, pp. 833–842.

Dunnette, D. A. (1979). "A Geographically Variable Water Quality Index Used in Oregon." *Journal of the Water Pollution Control Federation*, Vol. 51, No. 1, p. 5361.

Eleria, A., and Vogel, R. M. (2005). "Predicting fecal coliform bacteria levels in the Charles River, Massachusetts, USA." *Journal of American Water Resources*, Vol. 41, No. 5, pp. 1195–1209.

Ferguson, C. M., Coote, B. G., Ashbolt, N. J., and Stevenson, I. M. (1996). "Relationships between indicators, pathogens and water quality in an estuarine system." *Water Resources*, Vol. 30, No. 9, pp. 2045–2054.

Francy, D. S., and Darner, R. A. (2007). *Nowcasting beach advisories at Ohio Lake Erie beaches*. U. S. Geological Survey.

Harkins, R. D. (1974). "An objective water quality index." *Journal of Water Pollutants*, Vol. 46, No. 3, pp. 588–591.

He, L. M., and He, Z. L. (2008). "Water quality prediction of marine recreational beaches receiving watershed baseflow and stormwater runoff in Southern California, USA." *Water research*, Vol. 42, No. 10–11, pp. 2563–2573.

Horton, R. K. (1965). "An index number system for rating water quality." *Journal of Water Pollution Control Federation*, Vol. 37, No. 3, 300–305.

House, M.A., and Ellis, J. B. (1987). “The development of Water Quality Indices for Operational Management.” *Water Science and Technology*, Vol. 19, No. 9, pp. 145–154.

Icaga, Y. (2007). “Fuzzy evaluation of water quality classification.” *Ecological Indicators*, Vol. 7, No. 3, pp. 710–718.

Joung, H. M., Miller, W. W., Mahannah, C. N., and Guitjens, J. C. (1979). “A Generalized Water Quality Index Based on Multivariate Factor Analysis.” *Journal of Environmental Quality*, Vol. 8, No. 1, pp. 95–100.

Kim, K. B., Kim, J. H., Jeong, Y., Jeong, Y. S., and Chung, S. J. (2012). “Prediction of Coastal Fecal Indicator Bacteria Concentrations Using Multivariate Data Analysis.” *Journal of Environmental Science and Engineering A*, Vol. 1, No. 4, pp. 440–447.

King, G., and Zeng, L. (2001). “Logistic regression in rare events data.” *Political Analysis*, Vol. 9, pp. 137–163.

Lermontov, A., Yokoyama, L., Lermontov, M., and Machado, M. A. S. (2009). “River quality analysis using fuzzy water quality index: Ribeira do Iguape river watershed, Brazil.” *Ecological Indicators*, Vol. 9, No. 6, pp. 1188–1197.

Lu, R. S., Lo, S. L., and Hu, J. Y. (1999). “Analysis of reservoir water quality using fuzzy synthetic evaluation.” *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 13, No. 5, pp.



327–336.

Maimone, M. Crockett, C. S. and Cesanek, W. E. (2007). “ PhillyRiverCast: A Real–Time Bacteria Forecasting Model and Web Application for the Schuylkill River.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 133, No. 6, pp. 542–549.

Mas, D. M. L. and Ahlfeld, D. P. (2007). “Comparing artificial neural networks and regression models for predicting faecal coliform concentrations.” *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 52, No. 4, pp. 713–731.

McDuffie, B., & Haney, J. T. (1973). “A proposed river pollution index.” In *Spring 1973 Meeting of the American Chemical Society, Division of Water, Air and Waste Chemistry*.

Moore, D. R., and MacDonald, D. (1999). *Ambient water quality guidelines (criteria) for turbidity, suspended and benthic sediments*. Water Management Branch, 1997 [ie 1999].

Neelakantan, T. R., Brion, G. M. and Lingireddy, S. (2001). “Neural network modeling of Cryptosporidium and Giardia concentrations in the Delaware River, USA.” *Water Science and Technology*, Vol. 43, No. 12, pp. 125–132.

O’ Connor, F. M. (1972). *The application of multi–attribute scaling procedures to the development of indices of water quality*. Ph.D. dissertation, Univ. of Michigan.

Prati, L., Pavanello, R., and Pesarin, F. (1971). "Assessment of surface water quality by a single index of pollution." *Water Resources*, Vol. 5, No. 5, pp. 741–751.

Rasmussen, P. P., and Ziegler, A. C. (2003). *Comparison and continuous estimates of fecal coliform and Escherichia coli bacteria in selected Kansas streams, May 1999 through April 2002* (No. 3–4056). U.S. Geological Survey.

Ross, T. J. (2010), *Fuzzy Logic with Engineering Application*. John Wiley & Sons.

Sii, H. I., Sherrard, J. H., & Wilson, T. E. (1993). "A water quality index based on fuzzy set theory." In *ENVIRONMENTAL ENGINEERING—CONFERENCE* (pp. 1727–1727). AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS.

Smith, J. H., Wickham, J. D., Norton, D., Wade, T. G., and Jones, K. B. (2001). "Utilization of Landscape Indicators to Model Potential Pathogen Impaired Waters." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 37, No. 4, pp. 805–814.

Thomann, R. V., and Mueller, J. A. (1987). *Principle of Surface Water Quality Modeling and Control*. Haper & Row, Publishers.

United Nations. (1993). *Readings in International Environment Statistics*. United Nations.

U.S. Environmental Protection Agency. (1986). *Ambient Water Quality Criteria for Bacteria*. U.S. Environmental Protection Agency.

Walski, T. M., and Parker, F. L. (1974). “Consumers water quality index.” *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 100, No. 3, pp. 593–611.

World Health Organization. (1998). *Guidelines for drinking–water quality, 2nd ed. Addendum to volume 2. Health criteria and other supporting information*. World Health Organization.

World Health Organization. (2003). *Guidelines for Safe Recreational Water Environments, Volume 1: Coastal and Fresh Waters*. World Health Organization.

World Health Organization. (2006). *Guidelines for Safe Recreational Water Environments, Volume 2: Swimming Pools and Similar Environments*. World Health Organization.

Yan, H., Zou, Z., and Wang, H. (2010). “Adaptive neuro fuzzy inference system for classification of water quality status.” *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 22, No. 12, pp. 1891–1896.

Zadeh, L. A. (1965). “Fuzzy sets.” *Information and control*, Vol. 8, No. 3, pp. 338–353.

물환경정보시스템: [water.nier.go.kr](http://water.nier.go.kr)

실시간수질정보시스템: [www.koreawqi.go.kr](http://www.koreawqi.go.kr)

U.S. Environmental Protection Agency: [www.epa.gov](http://www.epa.gov)

## Abstract

# Development of River Recreational Index Model by Fuzzy Synthetic Evaluation of Water Quality Parameters

Soo–Yeon, Choi

Department of Civil and Environmental Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Recently, due to increase of income and interests in leisure and rehabilitation of riverside, popularity of recreational activities in the river is increasing in Korea. Water quality is crucial in river recreation because it is related to health issues such as outbreak of waterborne diseases. Therefore, it is necessary to provide the easily understandable integrated information about water quality for citizens. In Korea, integrated water quality information is provided through Real Time Water Quality Index (RTWQI). However, the system has limitation that it does not integrate coliform information which is the critical in river recreation and the lack of clear distinction between the water criteria is not considered in this index system. Therefore, there is need to develop new water quality information system to overcome the limitations of existing water quality information system.

In this research, River Recreational Index Model (RRIM) was developed to derive River Recreation Index (RRI) which is real time water quality index for the recreational river use to the public. Also, RRI was divided to River Recreational Grade (RRG) according to possibility of water contact during river recreation. RRG consists of four grade, 'excellent', 'good', 'acceptable' and 'unacceptable'. 'Excellent' and 'good' means that primary contact is possible, 'acceptable' means that secondary contact is possible and 'unacceptable' means that no contact activities are possible in rivers.

The RRI model consisted of two sub-models: a Fecal Coliform model (FCM) and Water Quality Index Model (WQIM). Fecal coliform is impossible to measure real time data. Therefore, FCM was developed to predict the fecal coliform using the logistic regression. The FCM predict Fecal Coliform Grade (FCG) in order to determine a level of available recreational activities in river. Then, the WQIM calculated Water Quality Index (WQI) which is a single index for the various recreational activities in the rivers by synthesizing important water quality parameters except fecal coliform. To consider the fuzziness of water quality criteria, the WQIM was developed using Fuzzy Synthetic Evaluation (FSE). The FCG and WQI was integrated by the RRIM algorithm.

FCM was developed on Nakdong River by logistic regression. pH and log of one day previous discharge were selected as explanatory variables and three regression equations which predict FCG were derived. Among FCG, grade 1 means that primary contact is possible, grade 2 means that secondary contact is possible and grade 3 means that no contact activities are possible in rivers. As a result of validation, correct classification rate was 0.63. WQIM was developed

using FSE. DO, pH, chlorophyll a and turbidity were selected as important water quality parameters. Water quality criteria of each parameters were determined according to RRG and curved triangular membership functions were designed. WQIM showed that it reflected ambiguity of water quality criteria.

RRIM was applied to upstream of Gumi weir and Gangjeong weir in Nakdong River. In Gumi weir, predicted FCGs were all grade 1. Otherwise, apart from grade 1, grade 2 and grade 3 were predicted in Gangjeong weir. In both sites, WQIs were affected by chlorophyll a and pH a lot. As a result of calculating RRIs, RRIs in Gumi weir were equal to WQIs since all FCGs were grade 1. Also, comparing to RTWQI, Pearson correlation coefficient was 0.65 between two index and it implied that these two index showed significant correlation. RRIs in Gangjeong weir were corrected downward when they had grade 2 or 3. In those cases, RRI had more conservative results than RTWQI.

Keywords: River Recreational Index Model (RRIM), River Recreational Index (RRI), Fecal Coliform model (FC model), Water Quality model (WQ model), Logistic regression, Fuzzy synthetic evaluation approach, Nakdong River

Student number: 2012-20924

## 감사의 글

짧고도 긴 2년을 끝으로 논문을 완성할 수 있도록 도와준 많은 분들께 이 글을 통해 감사의 마음을 전하고자 합니다. 우선, 항상 저에게 가르침을 주시고 너그러이 좋은 방향으로 이끌어 주시고자 하셨던 서일원 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 아직도 한참 부족한 저지만 교수님 덕분에 많은 것을 배울 수 있었습니다. 또한, 수업을 통해서 많은 것을 가르쳐주시고 진정한 학자의 모습을 보여주신 김영한 선생님, 이길성 교수님, 서경덕 교수님, 김영오 교수님, Van Thinh 교수님, 황진환 교수님께 감사 드립니다.

지난 2년 간 귀중한 조언과 함께 맛있는 것도 많이 사주셨던 소중한 환경수리학 연구실 선배님들, 창근 오빠, 정규 오빠, 명은 언니, 성은 오빠, 성원 오빠, 황정 오빠, 재현 오빠, 인환 오빠, 주하 오빠와 선영 언니께 감사의 말을 전하고 싶습니다. 성현이와 준성 오빠에게도 고마움을 전하며 좋은 졸업 논문 쓰기를 기원합니다. 또한, 같이 입학하여 석사 과정 동안 많은 힘이 되어 주었던 동기, 현수에게 고마움을 전합니다. 함께 수공학 엠티도 가고 운동도 하면서 즐거운 대학원 생활을 하였던 다른 수공학 연구실 선배님, 동기, 후배님들께도 감사드립니다.

함께 대학교에 입학하고 또 함께 대학원에 와서 서로 많은 위로와 힘이 되어주었던 대학교 친구들과 이제는 사회인이 되어 자주 만나기 힘들지만 만날 때마다 좋은 경인고, 개웅중 친구들에게도 고맙고 각자 원하는 바 이루기를 기원합니다.

마지막으로 사랑하는 저의 가족들에게 감사합니다. 항상 딸들에게 가장 좋은 것을 해주고자 고생하시는 부모님, 언제나 저의 버팀목이 되어 주시고 믿어주셔서 감사하고 존경합니다. 또한, 항상 꿈을 이루도록 응원해주는 멋진 우리 언니에게도 고마움을 전하고 싶습니다.