



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

다기능보 퇴적거동에 대한 실험적 연구

**Experimental Investigation of
Sedimentation at Multi-purposed Weir**

2014년 2월

서울대학교 대학원

건설환경공학부

최 현 수

초 록

4대강 살리기 사업의 일환으로 수행된 하도 준설 및 다기능보의 설치는 하천의 흐름 및 유사 특성 등의 급격한 변화를 가져왔으며, 이로 인해 하도 내의 퇴적 및 침식 양상이 과거에 비해 크게 달라지고 하상재료 특성, 하천단면 형태, 하상경사의 변화가 예상된다. 또한 낙동강 등에 설치된 다기능보는 관리수위의 유지와 유량 조절 등으로 인해 배수위 효과를 발생시켜 점차적으로는 저수지 삼각주(Reservoir delta)의 형성을 야기할 것으로 예상된다. 이러한 저수지 삼각주는 상류에서부터 흘러온 하천이 저수지를 만나면서 유속이 급격히 줄어들어 따라 하천흐름을 따라 흘러오던 유사가 하상에 퇴적되어 형성되는 지형으로서 이는 저수지 유효용량의 감소와 하천의 홍수위 상승을 유발하며 홍수기의 범람 위험성을 초래할 수 있다(우효섭, 2001). 저수지 삼각주는 단기적인 측면에서는 큰 지형변화를 일으키지는 않지만, 장기적으로는 매우 큰 저수용량의 감소를 가져올 수 있으며, 이는 궁극적으로 홍수위 저하, 안정적인 용수 공급 등에 대한 이용 편익을 저감시키게 된다. 저수지 유사퇴적으로 인한 저수지 저수용량 감소는 전 세계적으로 매년 약 0.5 ~ 1 %가 해당되는 것으로 연구된 바 있다(White, 2001). 이러한 유사퇴적에 대한 해결방안으로는 유역침식 제어, 기계적인 준설, 배사, 사이펀 등이 있으며 유사관리과정에서 발생하는 준설토, 경제적인 관점에서의 효율성을 고려하였을 때 배사를 통한 저수용량 확보가 적절할 것으로 예상된다. 이를 위해 저수지 내에서 발생하는 유사퇴적에 대한 보다 심도있는 연구가 필요하다.

본 연구에서는 1차원 수치해석 모의와 수리모형 실험을 통해 저수지 삼각주 퇴적양상에 대해 분석하였다. 하상변동 수치해석 모의는 1차원 Exner 방정식을 기반으로 구성되어 있고 이를 통해 다기능보 상류 유사의 퇴적량 및 공간적 분포를 예측하였으며, 이러한 저수지 삼각주 생성양상과 수리인자가 미치는 영향에 대한 분석을 위해 폭 78 × 길이

1,550 × 높이 110 mm 이동상 실험수로를 이용한 기초 수리실험을 수행하였다. 실험에 사용된 유사의 경우 균등한 입경($d = 0.2$ mm)의 모형사와 $d_{50} = 0.62, 1.2$ mm의 실험사를 이용하였으며, 유량의 경우 0.215와 0.368 l/sec 2가지 조건에 대해 하류단 수심, 하상경사 등의 변화에 따른 수리모형 실험을 통해 저수지 퇴적양상을 연구하였다. 또한 실제 자연하천의 수리모형 상사법칙을 고려하기 위해 폭 300 × 길이 10,000 × 높이 600 mm의 중규모 유사수로를 이용하여 추가적인 퇴적실험을 수행하였다. 자연하천에서의 저수지 퇴적양상에 대한 수치해석 모의 및 수리모형 실험을 수행한 결과, 유사입경, 유량, 하상경사, 관리수위, 하류단 수심 등의 매개변수들 중 무차원 단위수류일률(Dimensionless unit stream power)과 Shields 매개변수가 하도내 퇴적량과 상관관계가 가장 뚜렷한 것으로 분석되었다. 이를 토대로 단위수류일률과 Shields 매개변수로 토대로 다중회귀분석을 통해 저수지 삼각주 생성에 따른 퇴적량을 예측할 수 있는 경험식을 개발하였다.

주요어: 다기능보, 저수지 삼각주, 유사퇴적, 저수용량 감소, 수치해석, 수리실험, 다중회귀분석, 경험식

학번: 2012-20927

목 차

초록	.....	i
표 목차	.....	iii
그림 목차	.....	iv
1 서론	.....	1
1.1 연구의 배경 및 필요성	.....	1
1.2 연구의 목적 및 내용	.....	2
1.2.1 연구의 목적	.....	3
1.2.2 연구의 내용 및 방법	.....	3
1.3 연구동향	.....	5
2 이론적 연구	.....	8
2.1 저수지 퇴적거동	.....	8
2.2 수리모형실험 이론	.....	12
2.2.1 상사법칙	.....	12
2.2.1.1 개요	.....	12
2.2.1.2 일반 상사법칙	.....	13
2.2.2 이동상 모형 이론	.....	15
2.2.3 흐름의 상사	.....	15
2.2.3.1 유사이동의 상사	.....	18
2.2.3.2 하상변동의 상사	.....	19
2.3 1차원 수치모형	.....	23
2.3.1 모형의 개요	.....	23
2.3.2 지배 방정식	.....	24
3 수리 실험	.....	27
3.1 기초 수리실험	.....	27

3.1.1	실험시설 및 계측기기	27
3.1.2	실험조건의 수립	32
3.1.3	실험결과 분석	36
3.1.3.1	AS 시리즈	36
3.1.3.2	AM 시리즈	37
3.1.3.3	AL 시리즈	37
3.2	퇴적실험	41
3.2.1	실험시설 및 계측기기	41
3.2.2	실험조건 및 수행방법	50
3.2.3	실험결과 분석	52
4	경험식 유도	56
4.1	차원해석	56
4.2	퇴적량에 영향을 미치는 인자 분석	56
4.3	회귀식 유도	72
4.3.1	다중회귀분석	72
4.3.2	경험식 유도	73
4.4	경험식 검증	75
5	결론	79
	부록	82
	참고문헌	118
	Abstract	122
	감사의 글	124

표 목차

표 3.1 AS 시리즈 실험조건 (유사입경 d_{50} : 0.2 mm)	33
표 3.2 AM 시리즈 실험조건 (유사입경 d_{50} : 0.62 mm)	34
표 3.3 AL 시리즈 실험조건 (유사입경 d_{50} : 1.2 mm)	35
표 3.4 SMI 시리즈 실험조건 (유사입경 d_{50} : 0.62 mm)	51
표 3.5 SMO 시리즈 실험조건 (유사입경 d_{50} : 0.62 mm)	51
표 4.1 수리모형 실험결과 무차원 매개변수 (AS 시리즈)	58
표 4.2 수리모형 실험결과 무차원 매개변수 (AM 시리즈)	60
표 4.3 수리모형 실험결과 무차원 매개변수 (AL 시리즈)	63
표 4.4 수리모형 실험결과 무차원 매개변수 (SMO 시리즈)	66
표 4.5 기초 수리실험 매개변수	74
표 4.6 실험결과에 대한 통계적 분석.....	77

그림 목차

그림 1.1 연구방법 흐름도	4
그림 2.1 하도 내 유사거동 개념도	9
그림 2.2 다기능보 퇴적양상 및 관리수위 개념도	11
그림 3.1 수리모형 실험 수로 측면도	29
그림 3.2 수리모형 실험 현장 사진	30
그림 3.3 수리모형 실험수로의 측면 사진	30
그림 3.4 모눈금 설치 이후 수로 우측면 사진	31
그림 3.5 실험수행에 따른 저수지 삼각주	31
그림 3.6 하상경사에 따른 하상변동 특성 (AS 시리즈; $Q=0.215$ l/sec; $H=30$ mm)	38
그림 3.7 가변경사 유사수로 측면도	43
그림 3.8 흐름의 정류를 위한 상류탱크의 정류장치	44
그림 3.9 수로 통합제어를 위한 조절 패널	44
그림 3.10 수로위에 설치된 레일과대차	45
그림 3.11 하류단 수심확보를 위한 전면 고정보 모형 설치	45
그림 3.12 유사이송 실험을 위한 슬러리 펌프	46
그림 3.13 상류 유사 안정화 장치	46
그림 3.14 Auto traverse를 이용한 자동이송장치	47
그림 3.15 Auto traverse와 하상고 및 수심 계측장비	47
그림 3.16 유사 설치를 위한 하상 평탄화 장치	48
그림 3.17 포인트 게이지를 이용한 계측	48
그림 3.18 하상고 및 수심 계측장비	49
그림 3.19 계측장비 설치 이후 수로 모습	49
그림 3.20 하상경사에 따른 하상변동 특성 (SMO 시리즈; $H=100$ mm)	53

그림 4.1	퇴적량과 무차원변수와의 상관관계 (S)	.....	68
그림 4.2	퇴적량과 무차원변수와의 상관관계 ($\omega t/D$)	.....	68
그림 4.3	퇴적량과 무차원변수와의 상관관계 (D/d)	.....	69
그림 4.4	퇴적량과 무차원변수와의 상관관계 (U^*/ω)	.....	69
그림 4.5	퇴적량과 무차원변수와의 상관관계 ($\omega d/\nu$)	.....	70
그림 4.6	퇴적량과 무차원변수와의 상관관계 (H/D)	.....	70
그림 4.7	퇴적량과 무차원변수와의 상관관계 ($\nu S/\omega$)	.....	71
그림 4.8	퇴적량과 무차원변수와의 상관관계 (τ^*)	.....	71
그림 4.9	경험식 검증을 위한 실측값과 예측값의 비교	.....	76
그림 4.10	기초 수리실험의 불일치율	.....	78
그림 4.11	퇴적실험의 불일치율	.....	78

Latin Uppercase

A_d	단위 폭 당 퇴적량
C_t	농도(ppm)
D	상류 등류수심
D_r	유사입경 비
F	Froude 수
F_s	Shields 의 유입함수
F_{sr}	입자의 Froude 수
H_r	수직 길이 비
J	실험 데이터의 수
L	기준길이
L_d	다기능보 보 본체로부터 저수지 삼각주 시작지점까지의 거리
L_r	수평 길이 비
H	다기능보 하류단 수심
R_j	특이 불일치율(special discrepancy ratio)
R_r	동수반경 비
R_e^*	입자의 Reynolds 수
Re	Reynolds 수
S	수로 하상경사
S_s	입자의 비중
S_r	경사축척 비
T_{2r}	유사시간
U	기준유속
U_r	유속 비

U_j	각 방향 유속
U^*	마찰유속
U^* / ω	마찰유속과 유사 침강속도의 비
V_c	한계유속
VS	단위수류일률
VS / ω	유사의 침강속도를 고려한 단위수류일률
X_{ij}	j 번째 설명변수 X_j 의 i 번째 관측치
Z	하상고
Z_m	수리모형 실험으로 측정한 무차원 퇴적량

Latin Lowercase

d	유사 입경
f_e	마찰계수
n_r	조도계수 비
p	공극률
q	단위 폭 당 유량
q_s	단위 폭 당 유사량
q_{sr}	단위 폭 당 유사량의 비
r	원형과 모형의 비
s	유체 내에서의 거리
t	시간(sec)
t_r	유사시간 비

t_r^*	원형의 홍수수문곡선을 모형에서 재현할 때의 시간축척
x	흐름방향 거리
x_j	각 방향 길이
z	하상고

Greek Lowercase

β	회귀계수
γ	물의 단위중량
γ_s	유사의 단위중량
ε_i	동일한 분포를 따르는 오차항
ρ	밀도
ρ_0	기준밀도
τ^*	Shields parameter
τ_0	마찰응력
ν	유체의 동점성계수
ψ	전단강도
ϕ_e	무차원 유사량
ω	유사 침강속도

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 필요성

근년에 시행된 4대강 살리기 사업에서 하도 준설 및 다기능보의 설치로 인해 하천의 흐름 및 유사이동 특성 등이 급격하게 변화함에 따라 하도 내의 퇴적 및 침식 양상이 판이하게 달라지고 하상재료 특성, 하천단면 형태, 하상경사의 변화가 예상된다. 나아가서 낙동강 등에 설치된 다기능보는 관리수위의 유지와 유량 조절 등으로 인해 배수위 효과를 발생시켜 점차적으로는 저수지 삼각주(reservoir delta)의 형성을 야기할 것으로 예상된다. 이러한 저수지 삼각주는 상류에서부터 흘러온 하천이 저수지를 만나면서 유속이 급격히 줄어들어 따라 유사 퇴적되어 형성되는 지형으로서 이는 저수지 유효용량의 감소와 하천의 홍수위 상승을 유발하며 홍수기의 범람 위험성을 초래할 수 있다(우효섭, 2001). 또한 이러한 저수지 삼각주는 단기적인 측면에서는 큰 지형변화를 일으키지는 않지만, 장기적으로는 하천의 통수단면 및 저수용량의 큰 감소를 가져올 수 있으며, 이는 궁극적으로 홍수위 저하에 따른 홍수범람 규모 확대, 안정적인 용수 공급 등에 대한 이용 편익을 저감 등을 야기할 수 있다. 또한 저수지 퇴적현상은 하천 제방이나 수리 구조물 등의 안전을 위협하여 하천 시설물 운영 및 관리에도 영향을 미칠 수 있다. 전 세계적으로 저수지 유사 퇴적으로 인해 매년 약 0.5~1 %의 저수용량이 감소하고 있는 것으로 알려져 있다(White, 2001).

저수지내 유사 퇴적으로 인한 저수용량 감소의 문제점은 유역침식 제어, 기계적인 준설, 배사, 사이펀 등을 통해 해결할 수 있다. 가장 일반적으로 시행되는 기계적인 준설의 경우 준설 과정에서 발생하는 준설토의 처리와 탁류 문제가 있기 때문에 배사를 통한 적절한 저수용량 확보는 기계적 준설, 유역침식 제어 등의 대안이 될 수 있다(김대근, 2013). 저수지에

퇴적된 유사의 방안을 수립하기 위해서는 우선 저수지 내 유사 퇴적양상을 규명하여야 한다.

1.2 연구의 목적 및 내용

1.2.1 연구의 목적

본 연구에서는 다기능보에 의한 준설 하도 내의 퇴적에 대한 실험적 연구를 통해 다기능보 상류 유사의 퇴적량 및 공간적 분포를 규명하였다. 하천에서의 퇴적 거동에 영향을 유량, 하상경사, 관리수위, 수심 등의 변수들과의 상관관계를 분석하여 퇴적량에 대한 경험식을 유도하였다. 본 경험식은 1차원 흐름 및 유사이송 모의 수치해석을 통해 이루어진 2,646개의 조건에 대한 분석 결과와 2가지 형태로 구성된 가변경사 유사실험수로를 이용하여 다양한 조건의 수리모형 실험을 수행을 통해 도출되었다. 이에 따라 본 연구에서는 무차원 퇴적량(A_d/qt)과 무차원 매개변수들(시간, 유량, 유사의 침강속도, 단위수류일률, 다기능보 관리수심, 상류 수심, 마찰유속, 하상경사)의 상관관계 분석을 통해 가장 큰 연관성을 갖는 단위수류일률(unit stream power)과 Shields 매개변수로 이루어진 다중회귀 분석식을 유도하였다.

개발된 경험식의 검증을 위해, 수리모형 실험결과를 무작위로 derivation항과 validation항으로 분류하여 연관성을 확인하였으며, discrepancy ratio curve와 RMSE, MAE, AGD 분석을 통해 정확성을 확인하였다. 또한 퇴적실험조건 수립에 있어 사용된 상사법칙은 향후 저수지 퇴적에 대한 장기모의를 할 수 있도록 적용하여 유량, 하상경사, 다기능보 관리수심, 유사공급량 등에 대한 정보를 얻을 수 있도록 하였다. 개발된 경험식을 이용하여 실제 자연하천의 유량, 하상경사, 유사 입경 등의 조건에 의해 발생할 수 있는 저수지 삼각주 퇴적거동을 사전에 예측함으로써 하천에 미치는 영향을 대비할 수 있다.

1.2.2 연구의 내용 및 방법

본 연구에서는 수치해석과 수리모형 실험을 통해 4대강 살리기 사업 이후 설치된 다기능보에 의한 저수지 내 퇴적양상을 확인하고, 저수지 삼각주의 제거를 위한 배사 효율에 영향을 미치는 수리인자에 대해 분석하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 우선 소형 유사이송 실험수로를 통해 다기능보에 의한 퇴적거동 예비실험을 수행하고 1차원 수치해석 모형으로 동일 조건으로 모의한 후 그 결과값을 비교하여 검증한다. 이후 중형 유사 실험수로를 이용하여 본 실험을 수행하며, 퇴적량 및 배사량에 미치는 다양한 수리인자의 영향을 분석한다. 예비실험에서는 폭 $78 \times$ 길이 $1,550 \times$ 높이 110 mm의 가변경사 유사 실험수로를 이용하여 퇴사거동에 대한 기초실험을 수행하여 유량, 유사 입경 d_{50} , 실험수로의 경사, 다기능보 하류단 관리수위의 변화에 따른 유사 퇴적과 저수지 삼각주 생성양상을 확인한다.

기초 퇴적실험에서는 하상고와 수위를 측정하여 퇴적량(A_d)과 매개변수인 시간(t), 단위유량(q), 유사 침강속도(ω), 단위수류일률(VS), 다기능보 수위(H), 상류 등류수심(D), 마찰유속(U^*), Shields parameter(τ^*), 유체의 동점성계수(ν), 유사 입경(d), 수로 경사(S)와의 상관관계를 수치해석 및 수리모형 실험을 통하여 분석한다.

퇴적에 대한 수리실험에서는 폭 $300 \times$ 길이 $10,000 \times$ 높이 600 mm의 가변경사 유사수로를 이용하여 원형과 모델간의 상사법칙을 고려한 실험조건을 기반으로 수리실험을 수행한다. 예비실험에서 확인한 다기능보에 의한 퇴적거동을 보다 정량으로 수리모형 실험하여 결과를 분석하였다. 이후 최종적으로는 하천에서의 하상변동 연구를 위해 퇴적량(A_d)의 예측을 할 수 있는 무차원 매개변수를 이용한 비선형 다중회귀분석 관계식을 도출한다.

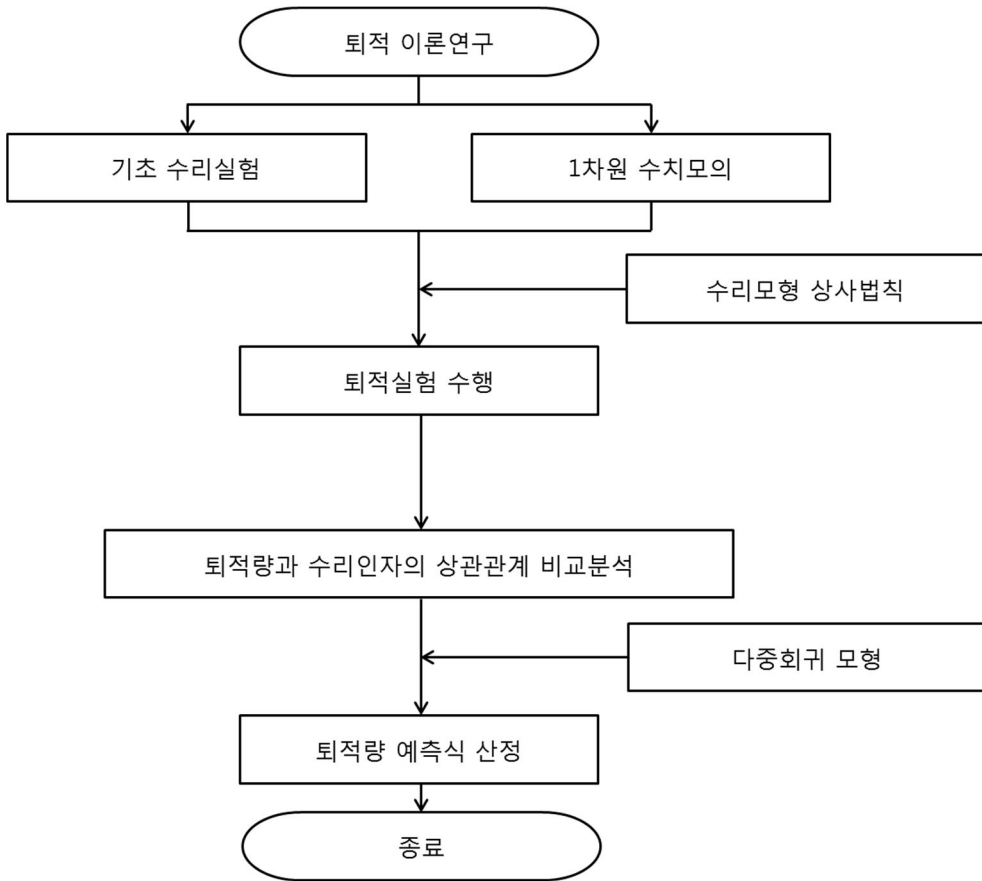


그림 1.1 연구방법 흐름도

1.3 연구동향

저수지에서 발생하는 유사 퇴적을 예측, 분석하기 위해서는 저수지 포착률에 대한 개념이 필요하다. 저수지 포착률은 저수지 상류에서 유입되는 유사량에 대한 저수지 내에 퇴적되는 양의 비율(%)로서, Churchill(1948)은 침사지, 소규모의 저수지, 홍수조절 시설물 등을 대상으로 저수지 포착률을 조사하여 관련 곡선을 도식한 바 있다. 또한 Brune(1950, 1953)는 대형 저수지와 댐을 기반으로 유사의 포착률을 조사하여 이를 결정할 수 있는 경험적 곡선을 개발하였으며, 이는 현재까지도 저수지, 댐 등에서의 유사 퇴적량 추정에 많이 사용되고 있다. Lee 등(1995)과 이광만 등(1997)은 댐에서 발생하는 퇴사량을 댐 운영에 있어서 하나의 변수로 고려할 수 있는 Information Variable Dynamic Programming 개념을 도입하여 예측하였으며, 이 시스템을 중국 황하유역에 적용하여 30년간의 댐 운영을 모의하고 평평-저수지 시스템의 최적화 모형을 제안하였다.

저수지 유사 퇴적 및 하상 변동 예측을 위해서 실측 데이터를 분석하는 경험적 방법과 수치해석 방법이 활용되고 있다. 자연하천에서의 퇴적 유사에 대한 수치해석 연구는 수치모형의 차원에 따라 1, 2, 3차원 모형으로 나눌 수 있으며, 이 중 3차원 수치해석 모형은 교각, 배사구 직상류, 다기능보 하류부 등의 수리 구조물 주변의 단기적인 하상 변동을 예측하는데 유용하며, 긴 구간에서의 장기 모형에는 많은 노력과 시간이 소모된다. White (2001), Morris와 Fan (1997), Yang과 Simões (2008), Simões와 Yang (2008), Yang (2010)은 장기간의 긴 구간에 대한 수치해석은 1차원 모형이 적합하다고 제시한 바 있다. Yucel과 Graf(1973)는 하천 흐름에 따라 발생하는 소류사에 의해 형성되는 저수지 삼각주를 수치적으로 모의한 바 있으며, Asada(1973)는 유한요소 차분법을 이용하여 개발한 수치해석모형을 일본의 여러 저수지에 적용하여 모의한 결과 실제 퇴적량과 대부분 일치한다는 것을 확인하였다. Nakato와 Vadnal(1981)은 다수의 수치해석 모형을 미시시피 강에 적용하여 검증하였으며, Javier와

Moises(1987)는 사류에서의 이동상 사질 하상 수치해석 모형을 개발하였다. 또한 Chollet과 Cunge(1980)는 유한요소 차분법 기반의 수치해석 모형을 개발하여 수단, Setit강과 Atbara강 및 방글라데시의 Padma강에 적용하여 저수지 유사 퇴적과 홍수기의 배사에 대한 모의를 수행하였다. Soni 등(1980), Hotchkiss와 Parker(1988), Rollin(1990)은 저수지 유사 퇴적에 대해 수치해석과 수리모형 실험을 병행하여 그 결과값을 비교 분석하였으며, Fan과 Morris(1992a, b)는 중국 황하 유역에 설치된 Sanmenxia 저수지의 하상 변동을 실측된 데이터를 바탕으로 홍수 사상 및 배사 전후에 대하여 예측하였다. Yang과 Ahn(2011)은 미국 미주리강에 위치한 Lewis and Clark 저수지의 경우 50년의 장기 하상변동 모의를 한 결과, 저수지의 저수용량이 초기에 비해 약 21 % 감소하는 것으로 밝혀낸 바 있다.

저수지 내에서 발생하는 유사 퇴적에 관한 실험적·현장 연구는 주로 국외에서 수행되었는데, Fournier (1960)가 북 아메리카 지역의 96개 하천에 대한 부유사 퇴적량을 연구한 것을 시작으로 많은 연구자들에 의해 이루어져 왔다. Zhang (2013)은 실측된 데이터를 바탕으로 중국에 설치된 저수지의 퇴사특성을 비교하였다. 실험 연구로서는 KanTouss et al. (2008)은 직사각형 수로에서의 퇴적에 대해 수리실험과 수치해석을 연구한 바 있으며, Gökçen and Güney (2008)는 수리실험을 수행한 후 기존에 개발된 경험식을 이용하여 유사이송에 영향을 미치는 주요 매개변수를 분석하였다. Matthieu et al. (2010)은 수리모형 실험을 통해 저수지 퇴적과 매개변수(수로 폭, 무차원 길이, 수심)와의 상관관계를 분석하여 경험식을 도출한 바 있으며, Souza et al. (2010)은 수리실험과 수치해석을 통해 퇴적거동을 예측하는 연구를 하였다. Walling과 Webb (1983), Dedkov와 Mozzherin (1984)은 전 세계 약 5000여개 저수지의 퇴적량에 대해 조사한 바 있으며, Walling (1984)은 전 세계 저수지의 총 퇴적량 및 연간 퇴적량을 정리하였다. 그의 연구에 따르면 중국에 있는 저수지의 경우 대부분의 반 생애주기(half-life expectancy)가 약 22년으로 가장 짧으며, 한국의 대형 저수지의 경우 연간 저수용량 감소율이 약 0.7% 이하로

낮은 편이며 반 생애주기는 상당히 긴 것으로 분석되었다. 이러한 이유 때문에 국내에서의 댐, 저수지 재퇴적에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 이에 따라 최근에 완료된 4대강 살리기 사업으로 설치된 다기능보에 의한 저수지 재퇴적 예측 및 퇴적토 배사 방안연구가 시급한 상황이다.

2. 이론적 연구

2.1 저수지 퇴적거동

홍수위 조절, 용수 공급, 농경지 확보 등의 다양한 목적을 갖고 만들어진 댐 및 다기능보와 같은 하천구조물의 상류 저수지에는 배수위 구간이 형성된다. 이러한 배수위 구간에 유입되는 흐름은 통수면적이 증가하고 유속 및 난류가 감소하여 결과적으로 유사이송 능력이 감소하여 상류에서 들어오는 유사가 저수지 바닥에 가라앉으면서 퇴적이 발생한다. 이에 따라 자갈이나 모래와 같은 굵은 유사가 우선적으로 저수지 유입부에 퇴적되면서 점차적으로는 저수지 삼각주가 생성된다. 이러한 저수지 삼각주의 상류부는 경사가 매우 급하고 짧은 반면, 하류구간은 기존 하상경사에 비해 굉장히 길고 완만한 형태를 보이게 되며 이에 따라서 미립 토사는 미립 토사는 저수지 내 약한 흐름을 따라 하류로 유입된 후 하류에서 급속도로 약해진 흐름으로 퇴적된다. 실트와 점토의 미세한 입자들은 밀도류의 형태로 저수지삼각주를 지나 저수지 내에 퇴적되나 주로 유효저수공간 아래인 사수역에 위치한다. 그러나 유역으로부터 유입되는 유사 중에서 미세한 입자가 많을 경우에는 밀도류에 의한 세립자 퇴적이 저수지 용량 감소의 주요 원인이 된다.

본 연구에서는 일반적인 자연하천에서 발생하는 침식 및 퇴적양상 이해를 위해 그림 2.1과 같은 하도 내 유사거동 개념을 도입하였다. 여기서 V 는 유속, S 는 하상경사, ω 는 유사 침강속도, U^* 는 마찰유속, τ^* 는 Shields 매개변수로서 다음과 같이 정의된다. 이 중 VS/ω 의 경우 Yang(1971)에 의해 연구된 단위수류일률(VS , unit stream power)의 확장된 개념으로, 물이 단위 무게당 갖는 에너지 소산률을 유사의 침강속도로 나눈 값으로 힘의 의미를 갖는다. τ^* 는 Shields(1936)의 한계소류력으로서 토사에 작용하는 흐름의 항력이 토사의 마찰 저항력을 넘기 시작하는

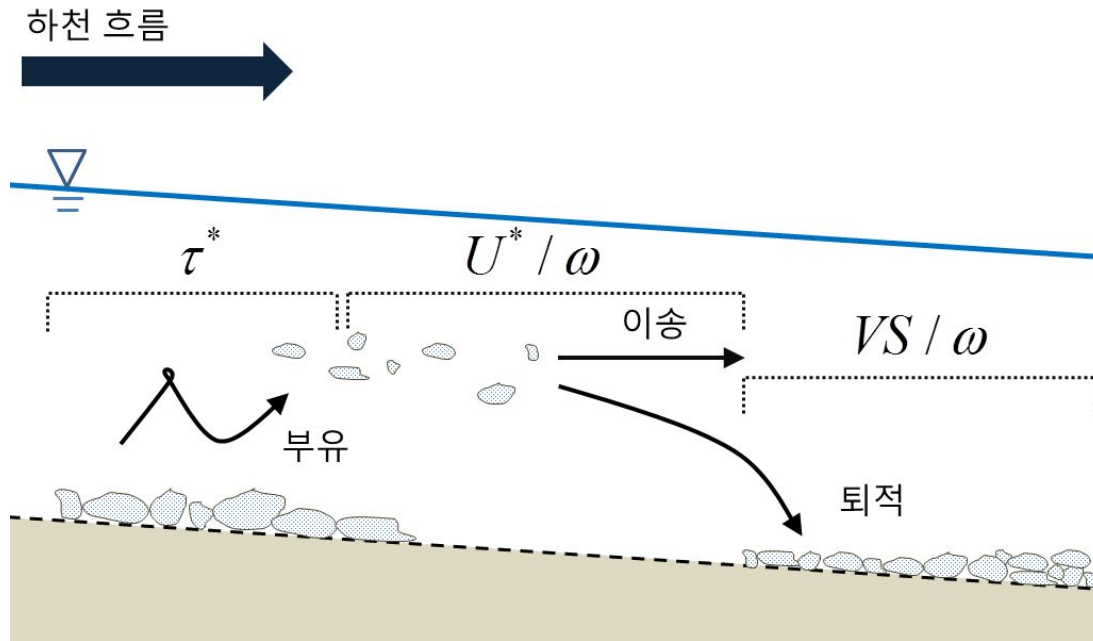


그림 2.1 하도 내 유사거동 개념도

임계조건(threshold condition)을 의미한다. τ^* 는 유사의 입경 및 단위중량, 마찰유속에 의해 계산되며, 이에 따라 유사가 부유되면서 이동을 시작할지, 기존의 위치에 그대로 퇴적되어 있을지 여부를 알 수 있다. U^*/ω 의 경우 유사에 가해지는 마찰유속(friction velocity)과 중력방향으로 작용하는 유사의 침강속도의 비를 의미하며, 이 무차원 매개변수의 값에 따라 부유상태인 유사가 이동을 계속할지, 하도내 바닥으로 하강한 후 퇴적이 될지를 결정할 수 있다.

본 연구에서는 다기능보 설치로 인한 보 상류의 삼각주 생성 특성을 규명하기 위하여 그림 2.2와 같은 다기능보 퇴적양상 및 관리수위 개념을 도입하였다. 이 그림에서 A_d 는 단위 폭 당 퇴적량, L_d 는 다기능보 보 본체로부터 저수지 삼각주 시작지점까지의 거리이다. 다기능보의 관리수위 유지로 인해 저수지 내에 배수위 구간이 발생하며, 이는 유속을 매우 느리게 하여 상류로부터 지속적으로 유입되는 유사가 점차적으로는 저수지내에 퇴적되게 되어, 점토와 같은 입경이 작은 유사는 하류에 퇴적되고 자갈, 모래와 같은 입경이 큰 유사는 상류에 퇴적되어 점차적으로 저수지 삼각주가 확장되는 양상을 보인다. 이러한 저수지 삼각주의 생성 및 확장은 4대강 살리기 사업 직후에 비하여 하상과 수위 상승을 야기하여 점차적으로는 저수용량 감소와 홍수위 상승을 초래할 수 있다. 이러한 저수지 삼각주의 퇴적양상을 확인하기 위해 1차원적인 퇴적양상 및 퇴적량(A_d)을 산정하는데 초점을 맞추었다. 특히 그림 2.2에 나타난 퇴적량(A_d)과 무차원 변수들의 상관관계를 수치해석 및 수리모형 실험을 통하여 도시하고자 한다.

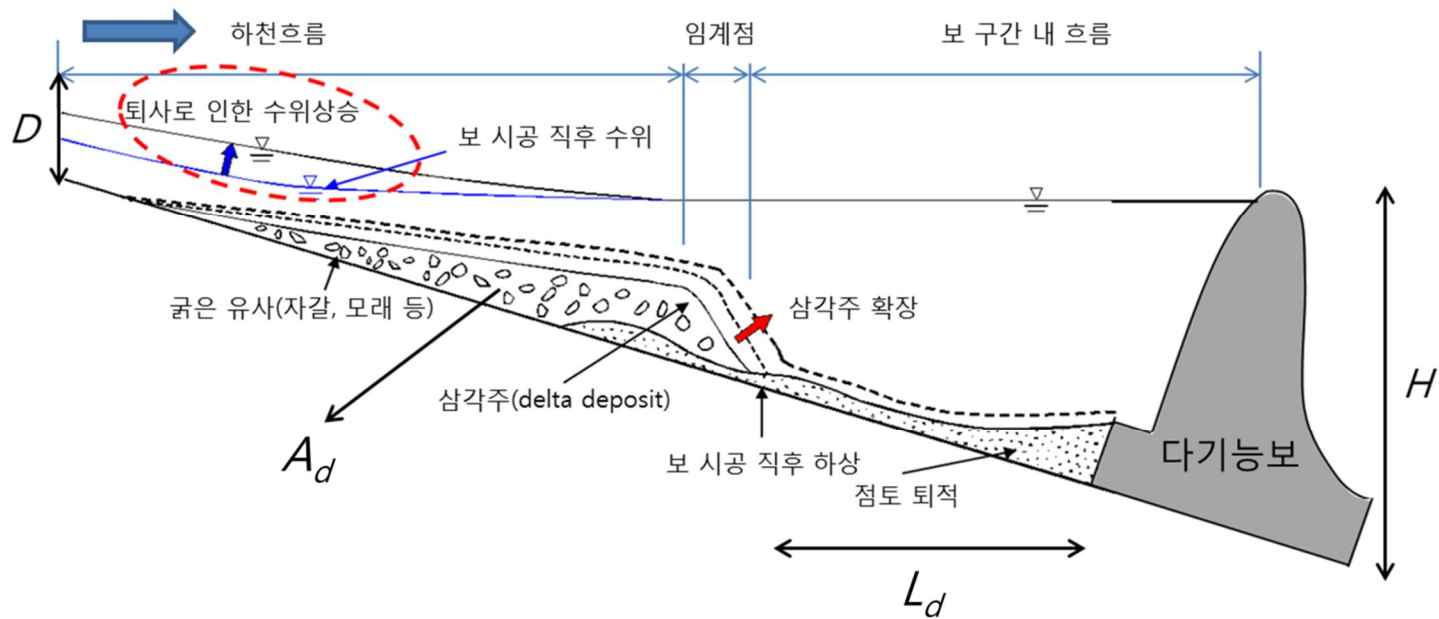


그림 2.2 다기능보 퇴적양상 및 관리수위 개념도

2.2 수리모형실험

2.2.1 상사법칙

2.2.1.1 개요

하천거동을 규명하기 위한 수리실험은 대개 실험대상 수역에 걸쳐서 수면경사의 변화가 완만한 경우에 수행한다. 하천수리모형은 수로내의 수위 및 유속, 그리고 흐름분포를 규명과 유사이동 및 하상변동을 연구하는 두 가지로 분류되며 전자의 경우 고정상 모형을 이용, 후자의 경우 이동상 모형을 이용한다. 일반적으로 하천수리모형을 사용하여 연구하는 문제들은 자유수로 하천에서 특정수로 흐름의 개폐에 따른 영향, 교각 설치 등에 따른 흐름 축소부에서의 수리손실, 수중보, 교각 등의 수리구조물 주변에서의 세굴, 조류나 파랑이 주운에 미치는 영향, 하천 하구에서의 흐름특성 등이다.

본 연구와 같이 자연하천에서 일어나는 수리학적 거동을 파악하기 위하여 축소된 모델에 의한 수리모형 실험을 하고자 할 때는 수리학적 이론에 대한 이해가 전제되어야 한다. 원형과 모델이 갖는 흐름거동 사이에는 수리학적 상사성이 보장되어야 하는데 이를 수리학적 상사법칙이라 하며, 모델실험은 이를 근거로 하여 수행, 분석하여야 적합한 의미를 갖게 된다고 할 수 있다. 물론 모델과 원형의 크기차이, 즉 축척의 영향으로 인해 모델과 원형간의 완전한 상사를 유지한다는 것은 불가능하나, 모델을 가능한 크게 제작함으로써 축척의 영향은 어느 정도 극복할 수 있으며 또한 흐름을 주로 지배하는 힘을 고려하여 특정한 상사법칙으로 실험결과를 분석함으로써 원형에서의 흐름 거동을 예측할 수 있다.

수리학적 상사는 원형과 모델간의 기하학적 상사, 운동학적 상사 및 동역학적 상사가 만족될 때 이루어지며, 완전한 기하학적 상사를 만족하기 위해서는 길이와 면적 및 부피뿐만 아니라 원형과 모델의 표면 조도계수도 상사성을 가져야 한다. 일반적인 유체의 흐름문제에 포함되는 힘의 성분은 유체의 기본질량으로 인한 관성력, 압력, 중력, 점성력,

표면장력 및 탄성력 등이며, 이들 힘의 크기 비가 원형과 모델에서 전부 동일하면 동역학적 상사가 성립된다고 볼 수 있지만 실제 모델과 원형에서 흐름의 완전한 상사를 얻는다는 것을 불가능하다고 할 수 있다. 하지만 실제 자연현상과 같은 수리현상에서는 몇 개의 성분력이 작용하지 않거나 혹은 무시될 정도로 작은 경우가 대부분이므로 흐름을 지배하는 주된 힘 하나만을 고려해도 충분한 것이 보통이다. 수리 현상을 주로 지배하는 힘이 점성력일 경우에는 Reynolds 모형법칙, 중력이면 Froude 모형법칙, 표면장력이면 Weber 모형법칙, 탄성력이면 Cauchy 모형법칙을 따르게 되며, 수리현상에 따라 한 개 이상의 지배력을 고려해야 하는 경우도 있다.

2.2.1.2 일반 상사법칙

흐름의 상사성이 갖는 첫 조건은 원형과 모형은 기하학적 상사(geometric similarity)를 만족하여야 한다는 것이다. 이는 흐름경계의 각 대응점에서 길이의 비가 같아야 한다는 의미로서, 기하학적 상사성이 만족된다면 원형과 모형의 대응점에서 두 흐름의 특성에 대해 논하는 것이 의미를 갖게 됨을 말한다. 한 흐름의 변수가 다른 흐름의 대응점의 변수와 비례관계에 있으면 두 흐름은 동역학적 상사성(dynamic similarity)을 갖는다고 정의될 수 있다.

동역학적 상사성의 충분 조건을 결정하는데 있어서 문제를 단순화하기 위하여 일정한 점성을 가지나 밀도는 일정하지 않은 비압축성 유체의 동역학을 고려할 필요가 있다. 운동의 지배방정식, 즉, Navier - Stokes 방정식, 비압축성 유체에 관한 식, 연속방정식을 무차원화하면 다음과 같다.

$$\rho' \left(\frac{\partial}{\partial t'} + u'_k \frac{\partial}{\partial x'_k} \right) u'_j = - \frac{\partial \rho'}{\partial x'_j} + \frac{\rho' L}{U^2} f_j + \frac{\nu}{UL} \frac{\partial^2 u'_j}{\partial x'_i \partial x'_i} \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t'} + u'_k \frac{\partial \rho'}{\partial x'_k} = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial u'_k}{\partial u'_k} = 0 \quad (2.3)$$

여기서 u_j 는 각 방향 유속, U 는 기준유속, ρ 는 밀도, ρ_0 는 기준밀도, p 는 압력, x_j 는 각 방향 길이, t 는 시간, L 은 기준길이, ν 는 동점성 계수이며, 체적력으로서 중력만을 고려한다면 $f_1 = f_2 = 0$, $f_3 = -g$ 가 되며 무차원 변수들은 다음과 같다.

$$u'_j = \frac{u_j}{U}, \quad \rho' = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad p' = \frac{p}{\rho_0 U^2}, \quad x'_j = \frac{x_j}{L}, \quad t'_j = \frac{tU}{L} \quad (2.4)$$

기하학적 상사성이 성립되면 동역학적 상사를 만족시키기 위하여 한 흐름에서 식 (2.4)의 무차원 변수들이 다른 흐름의 해당 변수와 같아야 한다. 식 (2.1) ~ 식 (2.3)에서 알 수 있듯이 두 흐름에서 u'_j , ρ' , p' 의 초기값이 어디에서나 같고 흐름 경계에서의 그 이후 값들이 같을 뿐만 아니라 두 무차원 변수 gL/U^2 과 ν/UL 와 같아야만 동역학적 상사성이 만족한다는 것을 알 수 있다. 초기조건과 경계조건이 상사성이 만족되었다고 가정했을 때 $F \equiv U/\sqrt{gL}$ 와 $R_e \equiv UL/\nu$ 이 두 흐름에서 같으면 두 흐름은 상사조건을 성립한다. 여기서 F 는 Froude 수, 그리고 R_e 는 Reynolds 수이다. 따라서 식 2.1은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\rho' = \frac{D}{Dt} u'_j = -\frac{\partial p'}{\partial x'_j} - \frac{\rho'}{F^2} \delta_{j3} + \frac{1}{R_e} \nabla^2 u'_j \quad (2.3)$$

여기서 Froude 수는 관성력과 중력의 비, Reynolds 수는 관성력과 점성력의 비를 나타내므로 이들 두 수가 같아야 한다는 조건은 한 흐름에

작용하는 힘들의 비와 다른 흐름에서 상응하는 힘들의 비가 같아야 한다고 말할 수 있다.

위에서 논의된 Navier - Stokes 방정식은 비압축성, 체적력으로서 중력, 표면력(surface force)으로서 점성력만을 고려하였다. 그러나 이 외에도 다른 힘들과 연관된다면 그 힘과 관성력의 비가 상사성에 중요한 역할을 하게 되는데, 예를 들면 압축성에 관계해서 Mach 수, 표면장력에 관계하여 Weber 수 등을 들 수 있다.

2.2.2 이동상 모형 이론

이동상 모형실험에 있어서 유사량, 하상변동 등의 상사성에 부합하는 모형을 제작하기 위해서는 수평, 연직축척, 모형사의 비중과 입경의 축척 등을 임의로 선택하여서는 안되고 일정한 관계식에 의하여 결정하여야 한다. 그러나 실험장소, 모형사의 제한으로 위의 변수들을 이상적으로 만족시킬 수 없으므로 각 상사율의 제한을 완화시켜야 한다. 특히 이러한 문제의 해결을 위해서 흐름의 상사를 위한 Froude 상사법칙과 소류사의 유사이동의 상사를 만족하기 위한 방법과 하상변동 방정식과 Brown 공식(1950), Engelund - Hansen 공식(1967), Yang 공식(1979)으로부터 유사시간 비를 결정하여야 한다(서일원 등, 1997).

2.2.2.1 흐름의 상사

이동상 모형실험에서는 중력이 가장 중요한 힘으로 작용함에 따라 관성력과 중력의 비인 Froude 수의 상사를 만족하여야 하나 현실적으로 정확하게 Froude 수의 상사를 만족하는 것을 매우 어렵다. Henderson(1966)은 하천에서의 수심이 깊은 경우 즉, Froude 수가 매우 작은 경우에 대해 원형에서의 Froude 수와 모형에서의 Froude 수를 다른

값으로 선정함에 따라 모형 축척 결정에서 자유도를 확보할 수 있다고 주장한 바 있으며, 하천 모형의 Froude 수가 1보다 매우 작아 Froude 상사가 그다지 중요하지 않다고 판단될 때 Froude 수의 상사를 다음과 같이 완화할 수 있다고 제안하였다.

$$\Delta F = U_r H_r^{-1/2} \quad (2.4)$$

여기서 F 는 Froude 수, U_r 은 유속비, H_r 은 수직 길이 비, 첨자 r 은 원형(첨자 m)과 모형(첨자 p)의 비로써, 이후의 모든 첨자 r 은 원형의 값을 모형의 값으로 나눈 비율을 나타내는 것으로 한다. 식 2.3에서 ΔF 의 값이 1이면 모형과 원형간의 정확한 Froude 상사가 이루어짐을 의미하며, 원형의 Froude 수가 작은 경우 ΔF 를 1이 아닌 값으로 선정함에 따라 Froude 상사를 완화시킬 수 있다.

이동상 모형실험에서는 중력 이외에도 점성력의 영향을 고려해야하지만 점성력의 상사를 위해 Reynolds 수를 만족시키면 Froude 수의 상사가 만족되지 않는다는 한계점이 있다. 원형과 모형의 유체를 다르게 하여 이 문제를 해결할 수 있으나 대규모 모형의 경우 이것은 비현실적이므로, 전체 항력 중 형상항력(form drag)이 중요한 경우 원형과 모형에서의 흐름이 난류로 유지되면 항력계수가 같아진다고 볼 수 있으므로, 모형에서의 난류를 유지함에 따라 점성력의 상사가 만족된다고 가정할 수 있다. 그러나 하쪽에 비해 흐름방향으로 매우 긴 세장 하천과 같이 마찰항력(friction drag)이 중요한 경우, 원형과 모형 모두에서 Manning의 평균유속 공식이 적용된다는 조건을 이용하여 조도 계수를 결정함으로써 점성력의 상사가 만족되는 것으로 가정할 수 있다. 이 때 모형에서 흐름을 난류로 유지하여야 하는데, Allen(1947)은 이 조건으로서 Reynolds 수가 1,400 이상이 되도록 할 것을 제시한 바 있다.

Manning의 평균 유속공식의 비로부터 다음과 같은 점성력의 상사를 만족하는 식을 유도할 수 있다.

$$\Delta M = U_r^{-1} n_r^{-1} R_r^{2/3} S_r^{1/2} \quad (2.5)$$

여기서 n_r 은 Manning공식의 조도 계수비, R_r 은 동수반경비, S_r 은 경사축척의 비, L_r 은 수평 길이비이며, n_r 은 다음과 같이 Stickler가 제안한 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$n_r = D_r^{1/6} \quad (2.6)$$

여기서 D_r 은 원형과 모형에서 사용되는 유사의 입경비이다. 식 (2.5)에서 ΔM 이 1이면 모형과 원형간의 정확한 점성력 상사법칙이 만족되는 것을 의미하며, ΔM 의 값을 1 이외의 값으로 설정하면 점성력의 상사를 완화시킬 수 있다. Novak과 Cábeka(1981)는 Manning의 평균유속 공식과 Stickler의 공식이 특정 조도 계수 범위내에서 정확하다고 주장한 바 있는데, 이는 ΔM 의 값이 1인 점성력의 상사조건을 완화할 수 있음을 의미한다. 유체 흐름의 상사법칙을 만족하기 위해서는 Froude 수와 Manning의 평균 유속공식 상사가 동시에 만족해야 하는데, 수심에 비해 하폭이 매우 큰 일반적인 자연하천의 경우 H_r 은 R_r 과 같다고 볼 수 있으며, 이를 식 (2.4) ~ 식 (2.6)의 결합을 통해 다음과 같은 흐름의 상사 조건식을 유도할 수 있다.

$$\Delta F \Delta M = H_r^{2/3} D_r^{-1/6} L_r^{-1/2} \quad (2.7)$$

여기서 $\Delta F \Delta M$ 이 1이면 정확한 흐름의 상사를 의미하나, 앞에서 서술한 바와 같이 $\Delta F \Delta M$ 의 값이 1 이외의 값을 갖도록 하여 완화된 상사법칙의 조건을 만족함과 동시에 실험에 필요한 모형사의 축척 결정에 있어서 자유도를 증가시킬 수 있다.

2.2.2.2 유사이동의 상사

자연하천에서 발생하는 하상변동을 야기하는 유사입자의 운동과 하상단면 형상은 Shields 곡선에 의해 결정되는 것으로 알려져 있으므로 유사이동과 관련된 상사법칙을 만족하기 위해서는 식 2.8과 2.9으로 표현되는 Shields의 유입함수와 입자 Reynolds 수가 원형과 모형에서 동일하게 유지될 수 있도록 조정하면 된다.

$$F_s = \frac{1}{\psi} = \frac{\tau_0}{\gamma(S_s - 1)D} = \frac{(u^*)^2}{g(S_s - 1)D} \quad (2.8)$$

$$R_e^* = \frac{U^*D}{\nu} = \frac{\sqrt{\tau_0 / \rho D}}{\nu} \quad (2.9)$$

여기서 F_s 는 Shields의 유입함수로서 일종의 Froude 수로 볼 수 있으며, ψ 는 전단강도, τ_0 는 마찰응력으로서 γRS 와 같으며, S_s 는 입자의 비중, R_e^* 는 입자의 Reynolds 수, U^* 는 마찰유속, ν 는 물의 동점성계수이다. Bogardi(1959)는 Shields의 곡선에서 R_e^* 가 100보다 크면 입자 주위에서의 흐름이 완전히 난류가 되기 때문에 원형과 모형간의 입자 Reynolds 수의 상사가 만족될 필요가 없다고 주장하였으며, Komura(1962)도 입경이 0.6 mm이상인 경우 입자 Reynolds 수의 상사조건이 불필요하다고 주장하였으며 Chauvin(1962)은 R_e^* 가 60보다 크면 입자 Reynolds 수의 상사조건이 불필요하므로 조건을 보다 완화할 수 있다고 연구한 바 있다. Novak과 Cábalka(1981)는 경험식을 이용하여 R_e^* 가 3.5이상이면 유사입자에 작용하는 힘이 주로 형상마찰에 의한 것으로서 점성력의 영향은 무시할 수 있다고 주장한 바 있다. 하지만 이 경우 원형과 모형의 하상형태가 다른 경우는 해당되지 못하므로 입자 Reynold 수 상사조건을 무시하는 경우에 대해서는 원형과 모형간의 유사이동에 대한 상사법칙 성립을 위해 다음 식과 같이 Shields의 유입함수 상사조건만을 만족하면 된다.

$$\Delta F_s = (S_s - 1)_r^{-1} D_r^{-1} H_r^2 L_r^{-1} \quad (2.10)$$

2.2.2.3 하상변동의 상사

이동상 하천모형에서는 유사이동의 상사와 더불어 하상변동의 상사를 만족해야 하는데 유사이동의 상사를 만족시킬 수 없는 경우에는 모형에서의 유사량과 통수시간을 조정하는 하상변동의 상사를 만족시키는 방향으로 모형실험을 수행하는 것이 더 적합할 수도 있다. 이런 경우 하상변동의 상사성은 다음에서 정의될 유사시간비에 의해 모형에서의 통수시간을 조절함으로써 얻을 수 있다.

유사량 공식으로는 Brown 공식(1950), Engelund - Hansen 공식(1967)과 Yang 공식(1979)이 대표적으로 사용되고 있다. Brown 공식의 경우 다음과 같다.

$$\frac{q_s}{U^* d} = 10 \left(\frac{1}{\psi} \right)^2 = 10 \left[\frac{U^{*2}}{(S_s - 1)gd} \right]^2 = 10 \left[\frac{\tau_0}{(S_s - 1)\gamma d} \right]^2 \quad (2.11)$$

$$q_s = 10 \frac{U^{*5}}{(S_s - 1)^2 g^2 d} \quad (2.12)$$

$$\left(\frac{q_s}{U^* d} \right)_r = \left(\frac{1}{\psi} \right)_r^2 \quad (2.13)$$

식 (2.12)로부터 유사량의 비는 쉽게 구할 수 있다.

$$q_{sr} = \frac{U_r^{*5}}{\alpha_r^2 d_r} = \frac{(\sqrt{gRS})_r^5}{\alpha_r^2 d_r} = Y_r^5 X_r^{-5/2} \alpha_r^{-2} d_r^{-1} \quad (2.14)$$

만약 상사조건에서와 같이 $\frac{1}{\psi} = F_{sr} = 1$ 을 만족한다면 식 2.38에서 유사량의 비는 단순히 다음과 같아진다.

$$q_{sr} = U_r^* d_r = \left(\sqrt{gRS} \right)_r d_r = Y_r^{1/2} Y_r^{1/2} X_r^{-1/2} d_r = Y_r X_r^{-1/2} d_r \quad (2.15)$$

여기서 유사량 계산을 위해 사용된 Englund - Hansen 공식(1967)과 Yang 공식(1973)은 다음과 같다.

$$q_t = 0.05 \gamma_s V^2 \frac{(dS)^{3/2}}{D_{50} \sqrt{g(s-1)^2}} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} \log C_t = & 5.435 - 0.286 \log \frac{\omega D}{\nu} - 0.457 \log \frac{U^*}{\omega} \\ & + \left(1.799 - 0.409 \log \frac{\omega D}{\nu} - 0.314 \log \frac{U^*}{\omega} \right) \times \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_c S}{\omega} \right) \end{aligned} \quad (2.17)$$

위 식에서 농도 C_t 는 무게 농도(ppm)이며, 한계유속 V_c 는

$$\frac{V_c}{\omega} = \frac{2.5}{\log(U^* D / \nu - 0.06)} + 0.66 ; 1.2 < \frac{U^* D}{\nu} < 70 \quad (2.18)$$

$$\frac{V_c}{\omega} = 2.05 ; \frac{U^* D}{\nu} > 70 \quad (2.19)$$

Yang은 1979년에 식 (2.17)에서 한계조건을 없애고 자료를 다시 회귀시켜 다음과 같은 식을 제안하였으며, 이는 C_t 의 값이 100이상일 때 일반적으로 사용되고 있다.

$$\log C_t = 5.165 - 0.153 \log \frac{\omega D}{\nu} - 0.297 \log \frac{U^*}{\omega} + \left(1.780 - 0.360 \log \frac{\omega D}{\nu} - 0.480 \log \frac{U^*}{\omega} \right) \times \log \left(\frac{VS}{\omega} \right) \quad (2.20)$$

식 (2.17)과 식 (2.20)으로 표시되는 Yang 공식은 균일 차원이므로 어느 단위를 이용하여도 무방하다. 또한 이 공식은 하상토 입경 전체를 하나로 묶어서 산정할 때는 D 를 d_{50} 로 이용할 수 있으며 Yang 공식을 이용하여 총 유사량을 추정하는 절차는 다음과 같다.

단위수류력 VS , $\omega D/\nu$, U^*/ω 등을 구한다.

사립자 경계 레이놀즈 수 U^*D/ν 를 구해 식 (2.18)이나 식 (2.19)에서 V_c/ω 를 구한다.

식 (2.17)에서 무게 농도 C_t 를 구한다.

하상변동에 대한 식은 비정상 개수로 흐름에서의 연속 방정식과 유사하며, 이는 Herderson(1966)에 의해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial z}{\partial t} \pm \frac{1}{1-p} \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0 \quad (2.21)$$

여기서 z 는 하상고, p 는 공극률, q_s 는 단위폭당 유사량으로서 공극을 제외한 순수한 입자의 부피를 의미하며, 원형과 모형의 기하학적 상사를 성립시키기 위해 z_r 은 H_r 이 되어야 하며, 이 경우 하상변동에 대한 상사조건 관련 식은 식 (2.10)으로부터 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$T_{2r} = q_{sr}^{-1} (1-\lambda)_r L_r H_r \quad (2.22)$$

여기서 T_{2r} 는 유사시간으로서 총 유사량으로 일정한 체적을 채우는데 소요되는 시간으로 정의되며, 유사시간에 대한 비율은 식 (2.12)로

주어지는 고정상 모형의 수리시간비와 구별되며 원형의 홍수수문곡선을 모형에서 재현할 때의 시간비로 사용하여야한다.

$$T_{1r} = L_r U_r^{-1} = L_r H_r^{-1/2} \quad (2.23)$$

식 (2.21)을 차분식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta Z = \pm \frac{1}{(1-p)} \frac{\Delta q_s}{\Delta x} \Delta t \quad (2.24)$$

이 식을 원형과 모형의 비로 나타내면 다음과 같다.

$$t_r^* = (1-p)_r X_r Z_r Q_{sr}^{-1} \quad (2.25)$$

여기서 원형과 모형의 기하학적 상사를 만족하기 위해서는 $Z_r = Y_r$ 되어야 하며, 이런 경우 식 (2.14)와 식 (2.25)로부터 유사시간 축척을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} t_r^* &= (1-p)_r X_r Z_r q_{sr}^{-1} \\ &= (1-p)_r X_r Y_r Y_r^{-5} X_r^{5/2} (S_s - 1)_r^2 d_r = (1-p)_r X_r^{7/2} Y_r^{-4} \alpha_r^2 d_r \end{aligned} \quad (2.26)$$

여기서 t_r^* 로 표시된 시간비는 보통으로 쓰이는 수리시간축척으로 $t_r = X_r / U_r$ 과 구별하였다. t_r^* 는 유사시간으로서 일정한 유사량 q_s 로서 일정한 체적을 채우는데 소요되는 시간으로 정의할 수 있다. t_r^* 은 원형의 홍수수문곡선을 모형에서 재현할 때의 시간축척이며 여기서 $F_{sr} = \frac{1}{\psi} = 1$ 이라면 식 (2.15)과 식 (2.25)로부터 t_r^* 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$t_r^* = (1-p)_r X_r Y_r q_{sr}^{-1} = \frac{(1-p)_r X_r Y_r}{Y_r X_r^{3/2} d_r} = (1-p)_r X_r^{3/2} d_r^{-1} \quad (2.27)$$

2.3 1차원 수치모형

2.3.1 모형의 개요

본 연구에서는 수리변량과 유사이송 계산을 각각 수행하는 비연계 방법(uncoupled scheme)을 기반의 1차원 수치해석 모형을 이용하였으며 그 계산과정은 다음과 같다.

(1) 주어진 하류단 관리수위(H)와 유량(Q)에 대하여 표준축차 계산법을 이용하여 수위와 유속 등의 수리량을 구한다.

(2) 앞선 과정에서 구한 수리량을 이용하여 유사이송 공식 중 하나인 Engelund-Hansen (1967)식을 이용하여 각 단면의 유사이송량을 계산한다.

(3) 식 (2.25)로 표현된 1차원 Exner 방정식을 이용하여 하상 변동량을 산정한다.

$$(1-p) \frac{\partial Z}{\partial t} = -\frac{\partial q_s}{\partial x} \quad (2.25)$$

여기서 p 는 하상의 공극률, Z 는 하상고 높이, t 는 시간, q_s 는 단위 폭당 유사이송량, x 는 흐름방향 거리이다.

(4) Exner 방정식으로 구한 하상 변동량을 통해 구한 하상고의 높이 Z 는 다음 계산시간의 경계조건으로 적용되어 이후 과정 (1)에서 (3)까지의 계산을 반복 수행한다.

2.3.2 지배 방정식

(1) 흐름 방정식

일반적인 개수로 자연하천 흐름에서의 베르누이 방정식은 정상류의 운동 방정식(The equation of motion)으로부터 유도된다.

$$\frac{d}{ds}(p + \gamma z) + \rho v \frac{dv}{ds} = 0 \quad (2.26)$$

여기서 s 는 유체내에서의 거리, p 는 유체에 가해지는 압력, γ 는 물의 단위중량, z 는 한 기준면에서 유체 요소의 중심까지 높이, ρ 는 물의 밀도, v 는 유체의 유속이다. 식 (2.26)을 유체의 길이 방향 s 에 대해 적분하여 정리하면 식 (2.27)와 같다.

$$\frac{p}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2g} = H \quad (\text{constant}) \quad (2.27)$$

여기서 g 는 중력가속도, H 는 총 에너지이며 위 식을 베르누이 방정식(Bernoulli equation) 또는 에너지 보존식이라고 한다. 또한 위압수두인 $\frac{p}{\gamma} + z$ 는 하상 경사가 매우 작고 흐름의 변화 즉, 가속도가 없는 개수로 정상류 흐름에서는 수심 y 와 수로 바닥면으로부터의 높이 h 와의 합과 같으므로 베르누이 방정식은 다음과 같이 정리된다.

$$y + z + \frac{v^2}{2g} = H \quad (2.28)$$

또한 식 (2.28)에서 정리한 베르누이 방정식은 비점성류에 기초한 오일러 방정식(Euler equation)에서 유도된 것이므로, 이상유체 흐름과 같은 비점성류에만 적용이 가능하다. 그러나 본 논문에서 다루는 자연하천과

같은 대부분의 개수로 흐름에서는 점성력이 상대적으로 매우 작은 난류이므로, 식 (2.28)과 같은 베르누이 방정식은 대부분의 개수로 흐름에 그대로 적용된다(우효섭, 2001). 이러한 베르누이 방정식은 자연하천에서의 수리량을 구하는 데 이용할 수 있으며, 특히 본 논문에서 실험조건의 변수로 선정한 다기능보 하류단 관리수위(H)와 유량(Q)를 이용하여 표준축차 계산법을 통해 수위와 유속을 계산할 수 있다.

유체의 흐름을 연구하는데 있어서 유속이나 유량에 영향을 주는 모든 변수들을 고려해야 하는데 각 변수들을 분리하지 않고 하나의 변수로 생각하려면 마찰 계수 f 와 Chezy (1768)가 도입한 계수 C 를 이용해야 한다. 특히 Gauckler (1868)와 Hagen (1881)에 의해 계수 C 는 $R^{1/6}$ 에 비례하는 것으로 밝혀진 바 있으나 Manning (1891)에 의해 Manning 공식으로 알려지게 되었으며 그 식은 다음과 같다.

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (2.29)$$

여기서 n 은 하상 경계면의 조도 계수, R 은 수리반경, S 는 하상 경사이다.

(2) Exner방정식

자연하천의 유수 흐름에 따라 변화하는 하상변동 예측 연구는 Exner(1925)가 처음으로 물과 유사의 질량이 보존된다는 개념의 연속방정식을 도입하면서 시작되었으며, 자연하천의 흐름 방향인 x 에 대해 하상이 움직인다는 2차원 흐름으로 가정하면 Exner 방정식은 다음과 같다.

$$(1-p) \frac{\partial Z}{\partial t} = -\frac{\partial q_s}{\partial x} \quad (2.30)$$

여기서 p 는 하상의 공극률, Z 는 하상고 높이, t 는 시간, q_s 는 단위 폭당 유사이송량, x 는 흐름방향 거리이다.

Exner 방정식에 필요한 유사량을 산정하는데 있어서는 Einstein(1950), Ackers-White(1973), Yang(1973, 1979), Brownlie(1981a), van Rijn(1984)과 같은 여러가지 공식이 있지만, 본 논문에서는 에너지 개념을 바탕으로 흐름 저항식을 고려한 Engelund - Hansen 공식(1967)을 이용하였다.

$$f_e \phi_e = 0.1 \tau_*^{5/2} \quad (2.31)$$

여기서 f_e 는 마찰 계수, ϕ_e 는 무차원 유사량, τ_* 는 Shields의 무차원 소류력이며 다음과 같이 정의된다.

$$f_e = \frac{2gdS}{V^2} \quad (2.32)$$

$$\phi_e = \frac{q_t}{\gamma_s \sqrt{(s-1)gD^3}} \quad (2.33)$$

여기서 g 는 중력가속도, d 는 수심, S 는 하상 경사, q_t 는 유사량, V 는 유속, γ_s 는 유사의 단위중량, s 는 사립자의 비중(ρ_s / ρ), D 는 유사의 중앙입경 d_{50} 이다. 식 (2.32)와 식 (2.33)을 식 (2.31)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$q_t = 0.05 \gamma_s V^2 \frac{(dS)^{3/2}}{D_{50} \sqrt{g(s-1)^2}} \quad (2.34)$$

해당 공식을 이용하여 수심 d 를 계산 할 수 있지만, Engelund와 Hansen은 보다 정확한 값 산정을 위해 가능한 경우 실측 데이터를 사용할 것을 추천하였다.

3. 수리 실험

3.1 기초 수리실험

3.1.1 실험시설 및 계측기기

(1) 수로설비 및 제원

다기능보 설치에 의한 퇴적양상 수리실험을 위해 그림 3.1과 같은 폭 78 × 길이 1,550 × 높이 110 mm의 제원을 갖는 직사각형 단면 유사실험 수로를 이용하였다. 본 수로는 유량 (Q)의 경우 $Q = 0.215, 0.368, 0.605$ l/sec 3가지에 대해 모의가 가능하며, 순환식 펌프가 설치되어 유사를 이용하는 이동상 실험이 가능하도록 하였다. 또한 경사 조절장치를 통해 수로의 경사를 조절하여 다양한 실험조건을 적용할 수 있어 실제 자연하천에 가까운 하상 경사를 설정할 수 있으며, 수로의 하류단에는 높이 조절이 가능한 전면 고정형 다기능보 모형을 제작 및 설치하여, 다기능보 관리수위 운영에 따른 수리모형 실험을 할 수 있도록 하였다.

실험수로의 벽면은 하상고와 수위 측정을 용이하게 하기 위해 아크릴로 제작되었으며, 실험에 사용되는 유량의 공급은 저류 탱크에 저장된 물을 순환식 펌프로 급수 탱크로 공급하여 일정 수위가 확보된 후에는 월류하면서 수로를 흐르도록 구성하였다. 급수 탱크에는 정류망 역할을 하는 구슬을 다수 설치하여 수로에 공급되는 유량이 지속적으로 정상상태의 흐름구조를 유지할 수 있도록 하였으며, 수로의 우측면에는 5 mm 단위의 모눈금을 표시하여 하상고와 수위를 측정할 수 있도록 하였다. 또한 수로 하류단에 설치한 다기능보 모형을 통해 0 ~ 60 mm의 관리수위를 확보할 수 있도록 하였으며, 저류 탱크와 순환식 펌프의 연결 부위에는 유사 필터링을 위한 스펀지 형태의 거름망을 설치하여 유사 펌프 내부에 쌓이는 것을 방지하였다.

(2) 계측기기 및 장치

실험수로 내 유사의 이동으로 인한 퇴적양상을 확인하기 위해 유사입경 d_{50} : 0.2 mm의 모형사와 유사입경 d_{50} : 0.63 mm의 실험사를 이용하였다. 또한 그림 3.2와 같이 수로 우측면에는 전체 1,550 mm 구간에 대해 5 mm단위의 모눈금을 설치하였으며, 이를 디지털 일안 반사식 카메라(DSLR; Digital single lens reflex)를 이용하여 실험과정을 30초 단위로 촬영하였으며, 이후 이미지 분석을 통해 각 실험조건에 따른 수위와 하상고를 측정하였다(그림 3.2, 3.3, 3.4).

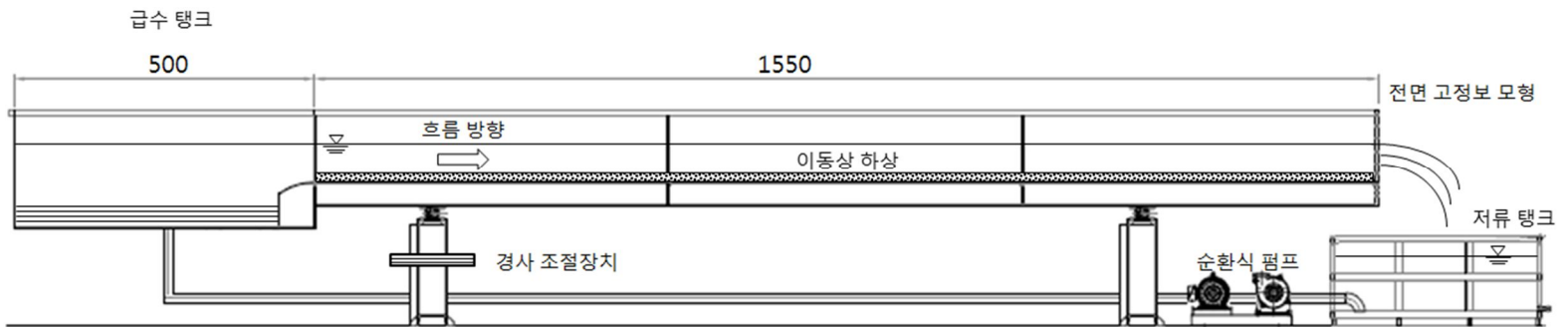


그림 3.1 수리모형 실험 수로 측면도



그림 3.2 수리모형 실험 현장 사진



그림 3.3 수리모형 실험수로의 측면 사진

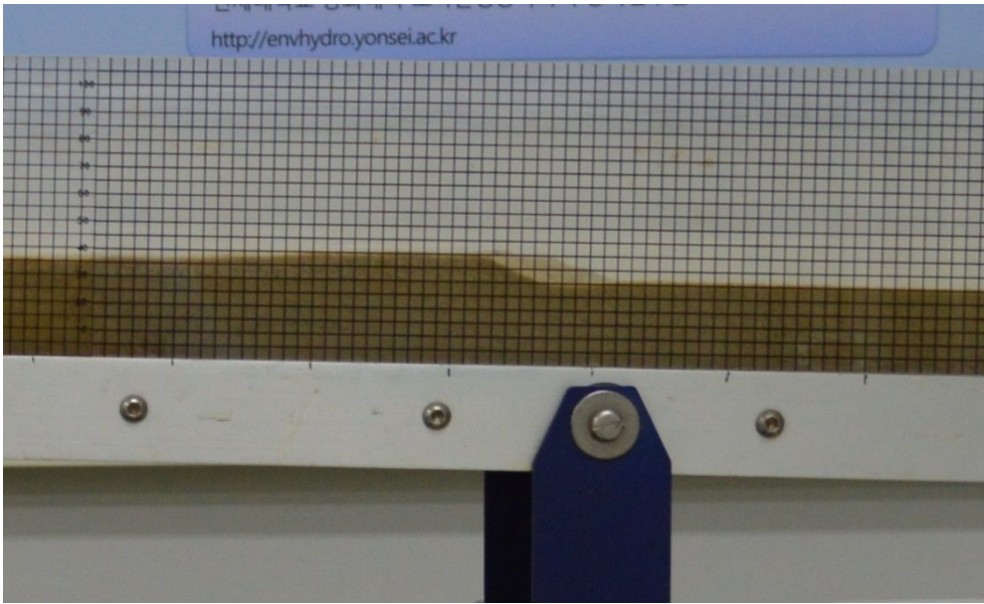


그림 3.4 모눈금 설치 이후 수로 우측면 사진

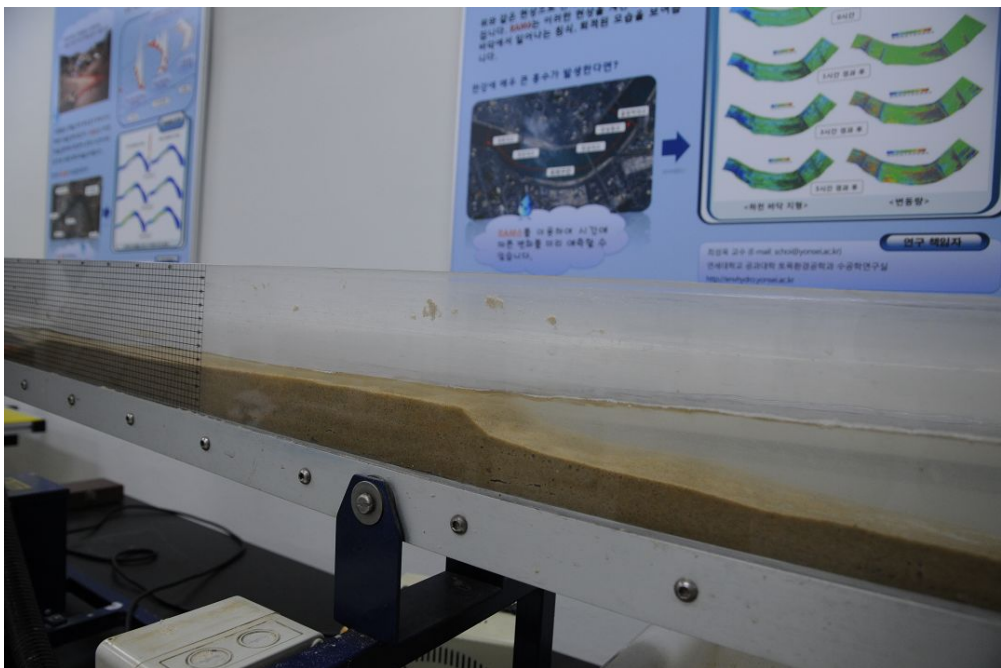


그림 3.5 실험수행에 따른 저수지 삼각주 생성양상

3.1.2 실험조건의 수립

하류단에 설치한 다기능보 모형을 이용하여 다양한 조건의 수심을 확보하고, 순환식 펌프를 통해 2가지의 유량을 선택하였으며, 수로 경사를 조절하여 표 3.1, 3.2와 같은 실험조건을 수립하였다. 또한 유사입경 d_{50} 가 0.2 mm인 모형사와 유사입경 d_{50} 가 0.63 mm인 실험사를 이용하여 유사입경 변화에 따른 퇴적양상의 차이를 확인하고자 하였으며, 각 실험조건에 대해 유사는 실험수로 전체 1,550 mm에 대하여 바닥면에 30 mm높이로 설치되었다.

실험을 수행하는데 있어서 유사입경 d_{50} 가 0.2 mm인 모형사를 이용한 경우 실험은 각 4분동안 진행되었으며, 매 30초에 대해 이미지를 촬영하였다. 또한 유사입경 d_{50} 가 0.63 mm인 실험사를 이용한 경우 각 실험조건 별로 저수지 삼각주가 최대로 확정되어 저수지 내에 유사가 모두 퇴적되어 가득찰 때까지 실험을 수행하였으며, 실험은 4분동안 진행되었다. 또한 실험수로에 유량을 공급한 후 하류단에 배수위가 생성되는 순간을 실험의 시점으로 하였으며, 유량은 각 실험조건이 완료될 때까지 중단없이 지속적으로 공급되었다.

표 3.1 AS 시리즈 실험조건 (유사입경 d_{50} : 0.2 mm)

Case	유량 Q (l/sec)	경사도 S (%)	하류단 수심 H (mm)	
AS111	0.215	2.2	20	
AS112			30	
AS121		2.4	20	
AS122			30	
AS131		2.6	20	
AS132			30	
AS141		2.8	20	
AS142			30	
AS151		3.1	20	
AS152			30	
AS211		0.368	2.2	20
AS212				30
AS221	2.4		20	
AS222			30	
AS231	2.6		20	
AS232			30	
AS241	2.8		20	
AS242			30	

표 3.2 AM 시리즈 실험조건 (유사입경 d_{50} : 0.62 mm)

Case	유량 Q (l/sec)	경사도 S (%)	하류단 수심 H (mm)
AM311	0.215	2.2	20
AM312			30
AM321		2.4	20
AM322			30
AM331		2.6	20
AM332			30
AM341		2.8	20
AM342			30
AM351		3.1	20
AM352			30
AM361		3.5	20
AM362			30
AM371		4.0	20
AM372			30
AM411	0.368	2.2	20
AM412			30
AM421		2.4	20
AM422			30
AM431		2.6	20
AM432			30
AM441		2.8	20
AM442			30
AM451		3.1	20
AM452			30
AM461		3.5	20
AM462			30
AM471		4.0	20
AM472			30

표 3.3 AL 시리즈 실험조건 (유사입경 d_{50} : 1.2 mm)

Case	유량 Q (l/sec)	경사도 S (%)	하류단 수심 H (mm)
AL511	0.215	2.2	20
AL512			30
AL521		2.4	20
AL522			30
AL531		2.6	20
AL532			30
AL541		2.8	20
AL542			30
AL551		3.1	20
AL552			30
AL561		3.5	20
AL562			30
AL571		4.0	20
AL572			30
AL611	0.368	2.2	20
AL612			30
AL621		2.4	20
AL622			30
AL631		2.6	20
AL632			30
AL641		2.8	20
AL642			30
AL651		3.1	20
AL652			30
AL661		3.5	20
AL662			30
AL671		4.0	20
AL672			30

3.1.3 실험결과 분석

3.1.3.1 AS 시리즈

표 3.1, 3.2, 3.3의 실험조건에 대해 수리모형 실험을 수행하였으며 시간 경과에 따른 실험조건 별 하상고와 수심의 변화를 그래프로 도시하였다(그림 3.6과 부록 1). 실험을 수행하기 전 수로 바닥면에 설치한 유사(initial bed)를 각 그래프에서 굵은 실선은 의미하며, 그래프 상단의 선들은 수심을, 하단의 선들은 하상고를 의미한다.

유사입경 d_{50} : 0.2 mm 실험조건인 경우 실험은 각 4분동안 수행하였으며 매 1분에 대해 하상고와 수심을 측정하여 시간 경과에 따른 하상고와 수위의 변화를 분석하였다. 하류단 수심 30 mm인 D112, D122, D132, D142, D152의 경우 수로의 경사도가 2.2 %에서 3.1 %로 증가함에 따라 저수지 삼각주가 수로 흐름방향으로 약 250 mm 확장됨과 동시에 연직방향으로는 약 5mm 상승하는 양상을 보였다. 또한 하류단 수심 20 mm인 D111, D121, D131, D141, D151의 경우 수로의 경사도가 2.2 %에서 3.1 %로 증가함에 따라 저수지 삼각주가 수로 흐름방향으로 약 50 mm가 확장되었으며 연직방향으로는 약 4 mm 상승하였다.

Mass balance 확인을 통해 단위폭 당 퇴적량(A_d)를 산정한 결과, 실험조건 D112, D122, D132, D142, D152의 경우 단위폭 당 퇴적량(A_d)이 수로의 경사도가 2.2 %에서 3.1 %로 증가함에 따라 1500 mm²에서 5100 mm²으로 약 3.4배 증가하는 경향을 보였다.

3.1.3.2 AM 시리즈

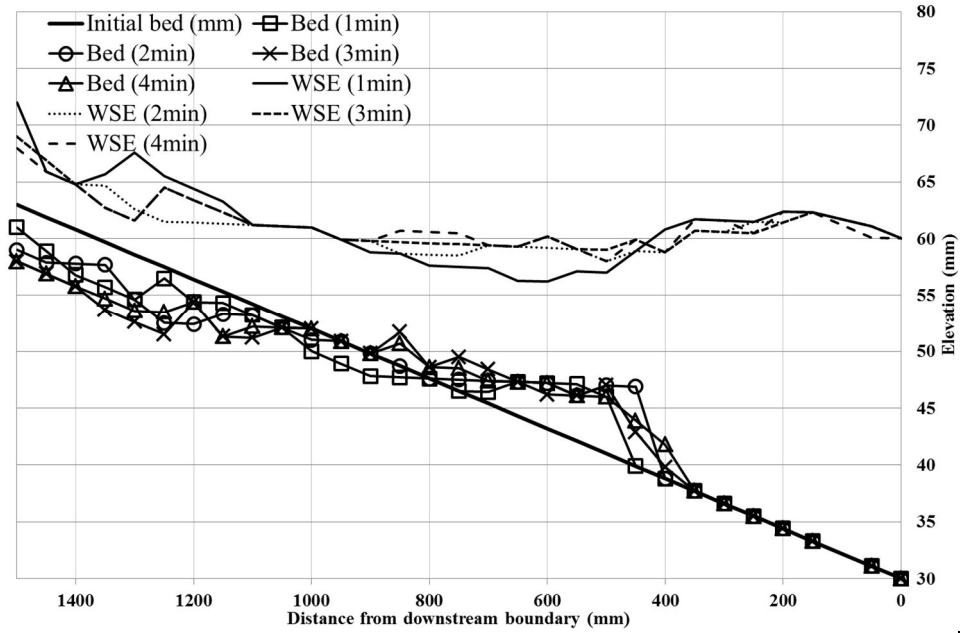
유사입경 d_{50} 가 0.63 mm인 실험조건인 경우 실험은 각 8분동안 수행하였으며 매 2분에 대해 하상고와 수심을 측정하여 시간 경과에 따른 하상고와 수위의 변화를 분석하였다. 하류단 수심이 30 mm일 경우 실험조건 D312, D322, D332, D342, D352를 분석하면 단위폭 당

퇴적량(A_d)이 수로의 경사도가 2.2 %에서 3.1 %로 증가함에 따라 3450 mm²에서 7300 mm²으로 약 2.1배 증가하는 경향을 보였다. 20 mm 실험조건의 경우 유속 저하와 저수지 삼각주 생성을 야기하는 배수위 구간이 생성되기 쉬운 조건으로 실험조건 D151의 경우 실험 시작 후 1분이 되기 이전에 저수지 내 유사가 모두 퇴적되어 초기에 설정한 하류단 수심 20 mm는 유사 퇴적에 의해 약 10 mm만 확보되어 다기능보의 관리수위 유지와 홍수위 저하에 부적합함을 알 수 있다. 또한 하류단 수심은 일반적으로 다기능보 관리수위에 비례하며, 다기능보 관리수위가 낮을 경우 저수지 내에 용수를 보관, 공급하는 것이 어려우므로 실제 다기능보 운영에 있어서는 일정 높이 이상의 하류단 수심을 확보하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

3.1.3.3. AL 시리즈

AL 시리즈의 경우 하상경사가 0.2 % 증가함에 따라 단위폭 당 퇴적량이 약 40 %씩 증가하는 경향을 보였으며, AS와 AM 시리즈와 같이 하류단 수심이 낮을수록 저수지 삼각주가 생성되는 속도와 저수용량이 감소하는데 걸리는 시간이 빨라지는 것으로 나타났다. 하지만, 하류단 수심과 하상경사가 동일한 조건에서 AS 시리즈의 경우 유량이 0.215 l/sec에서 0.368 l/sec으로 증가함에 따라 단위폭 당 퇴적량이 약 1.8배가 증가하였으나, AL 시리즈의 경우 같은 실험조건에서 약 2.6배의 단위폭 당 퇴적량 증가를 보임에 따라 유사의 입경이 작은 AS와 AL 시리즈에 비해 유사입경이 큰 AL 시리즈가 유량에 더 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다.

a) Case AS112



b) Case AS122

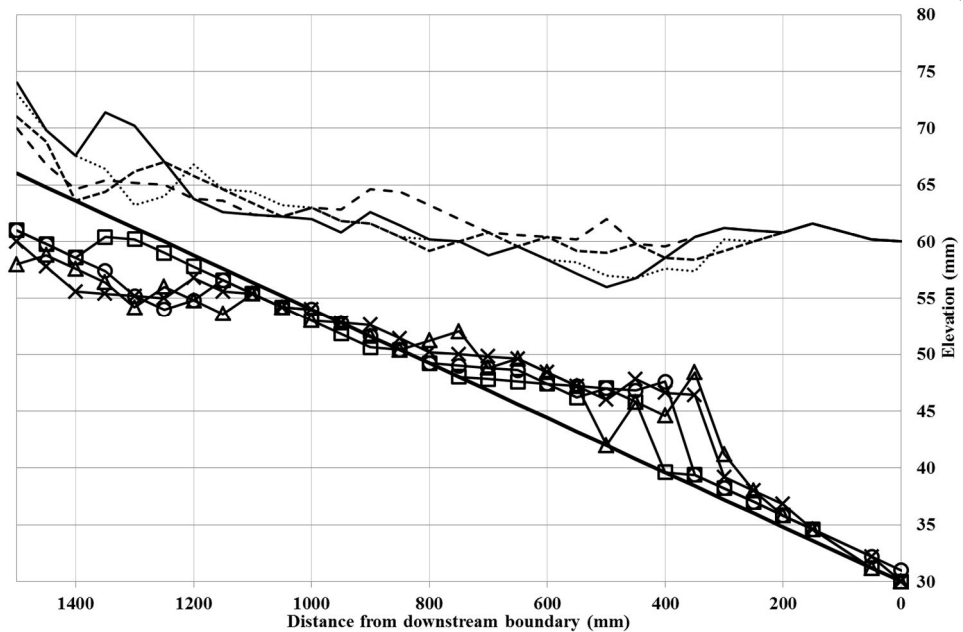
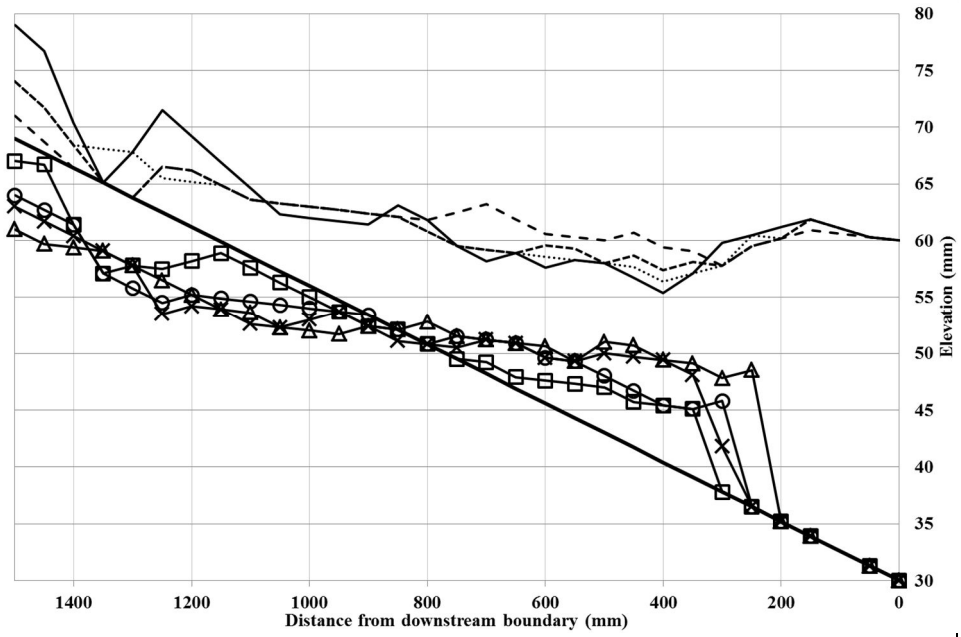


그림 3.6 하상경사에 따른 하상변동 특성 (AS 시리즈; $Q = 0.215$ l/sec; $H = 30$ mm)

c) Case AS132



d) Case AS142

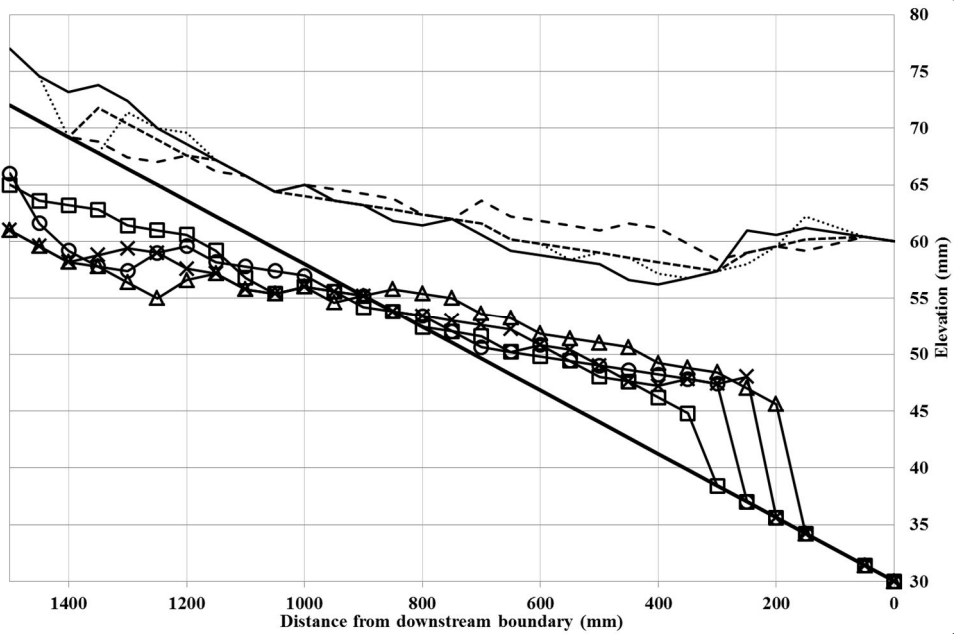


그림 3.6 하상경사에 따른 하상변동 특성 (AS 시리즈; $Q = 0.215$ l/sec; $H = 30$ mm, 계속)

e) Case AS152

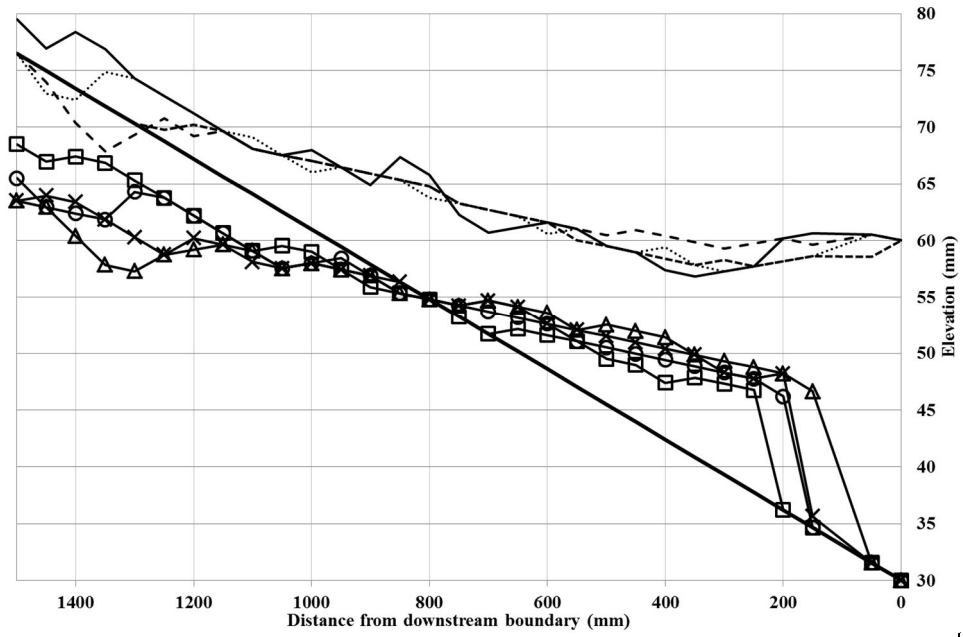


그림 3.6 하상경사에 따른 하상변동 특성 (AS 시리즈; Q= 0.215 l/sec; H= 30 mm, 계속)

3.2 퇴적 실험

3.2.1 실험시설 및 계측기기

다기능보에 의한 퇴적양상 및 배사효율에 대한 수리모형 실험을 위해 그림 3.7와 같은 가변경사 유사수로를 제작 및 설치하였다. 수로의 제원은 폭 $300 \times$ 길이 $10,000 \times$ 높이 600 mm 이며, 실험에 사용되는 유량의 공급은 저류 탱크에 보유한 물을 그림 3.12과 같이 슬러리 펌프(Slurry pump)를 이용하여 급수 탱크의 수위가 확보된 후에는 월류하면서 수로를 따라 흐르도록 하였다. 또한 공급되는 흐름의 정상상태의 흐름구조를 지속적으로 유지하기 위해 정류 탱크(head tank)에 그림 3.8과 같이 월류 게이트, sluice 게이트 및 타공망을 설치하였으며 실험과정에서 수위과 하상고 계측의 편리함을 위해 좌측과 우측의 벽면에는 강화유리를 설치하였다. 실험사를 이용하는 이동상 실험인 점을 감안하여 펌프는 유사를 순환시킬 수 있는 슬러리 펌프를 설치하였고 인버터(Inverter)를 이용하여 펌프의 유량을 조절할 수 있도록 하였으며, 실험자가 수로를 중앙에서 조정할 수 있도록 조절 패널을 제작 및 설치하여 수로의 유량, 경사를 전자식으로 조절할 수 있도록 하였다.

수로 위에는 그림 3.10와 같이 레일과 대차를 설치하여 수심 및 하상고 계측장비가 수로 흐름 방향을 따라 자유롭게 이동하면서 계측을 할 수 있도록 하였다. 유량의 경우 그림 3.9와 같이 조절 패널에 표시되는 유량, Hz를 통해 조절할 수 있도록 하였으며, 인버터를 통해 최소 8 Hz에서 최대 60 Hz까지 사용이 가능하며 유량의 경우 $0.6 \sim 8.0 \text{ l/sec}$ 까지 사용할 수 있다. 또한 수로 경사의 경우 경사조절 유닛이 장착된 부위를 기준, 연직방향으로 500 mm 까지 조정이 가능하도록 하였다. 또한 수로 하류단에는 실제 하천에서의 다기능보 관리수위를 확보할 수 있도록 그림 3.11과 같이 전면 고정보 모형을 설치하여 수로의 수심을 조절할 수 있도록 제작하였다.

또한 수로 상류에는 정류 탱크(head tank)로부터 유입되는 물에 흐름에 의해 유사라 급속도로 침식되는 것을 방지하기 위해 폭 $295 \times$ 길이 $600 \times$

높이 100 mm의 제원을 갖는 그림 3.13과 같은 유사 안정화 장치를 설치하였으며 유사를 100 mm 높이로 일정하게 설치하기 위해 그림 ##와 같이 유사 평탄화 장치를 설치하였다. 유사 평탄화 장치의 경우 실험자가 0 ~ 600 mm 범위내에서 원하는 높이의 유사를 설치할 수 있도록 가변형으로 설계하였으며 수로에 설치된 레일과 대차를 이용하여 수로 길이방향 전체에 대해 유사를 평탄하게 설치할 수 있도록 하였다.

다기능보가 설치된 자연하천에서 발생하는 퇴적양상을 확인하기 위해 d_{50} : 0.62 mm의 실험사를 사용하였다. 계측시설의 경우 2가지를 이용하였는데, 예비 퇴적 실험에서와 같이 수로 측면에서 DSLR을 이용하여 촬영한 후 이를 분석하는 image processing기법과 KENEK 社의 수면 측정계를 이용하여 하상고와 수심을 측정하였다. 해당 계측기기의 경우 4가지로 구성되며, 수로에 설치되어 레일을 따라 이동할 수 있는 대차, 수로 폭 방향과 수심 방향으로 계측기기를 실험자가 원하는 위치에 이동시킬 수 있도록 설계한 자동화 장치(auto traverse), 직접 수로의 물과 유사에 접촉하여 계측하는 시스템(그림 3.15), 계측된 데이터를 아날로그 데이터로 표현해주는 전자식 시스템(그림 3.18)으로 구성되어있다.

수리모형 실험수로 하류단에 설치한 전면 고정보 모형을 이용하여 다양한 조건의 수심을 확보하고, 슬러리 펌프, 인터버 및 조절패널을 이용하여 다양한 유량 조건을 선정하고자 한다. 동적 평형상태(dynamic equilibrium) 성립을 위해 수로 상류에서 유사를 유입하는 경우 유입유사량과 하상 경사의 변화에 따른 실험조건으로 이용하여 다기능보 설치에 따른 퇴적양상을 연구하고자 한다

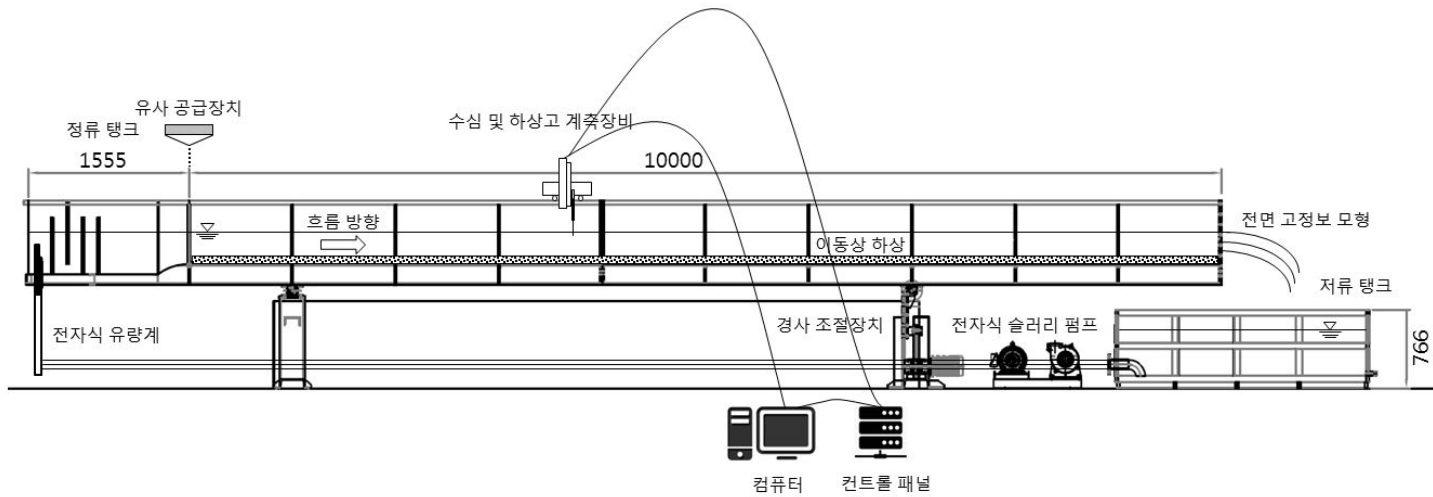


그림 3.7 가변경사 유사수로 측면도



그림 3.8 흐름의 정류를 위한 상류탱크의 월류장치

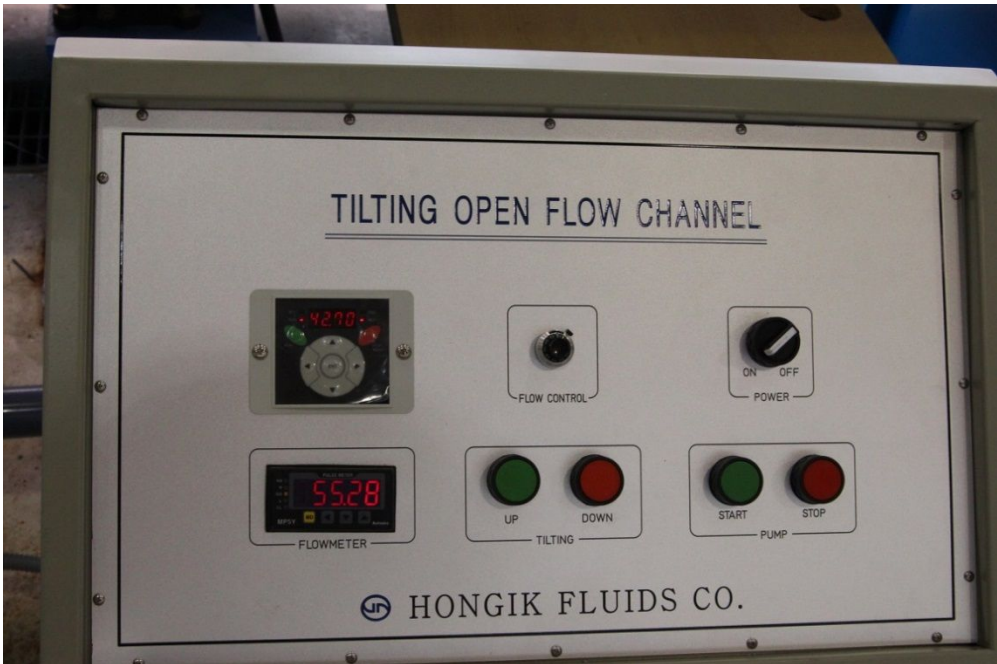


그림 3.9 수로 통합제어를 위한 조절 패널



그림 3.10 수로위에 설치된 레일과 대차

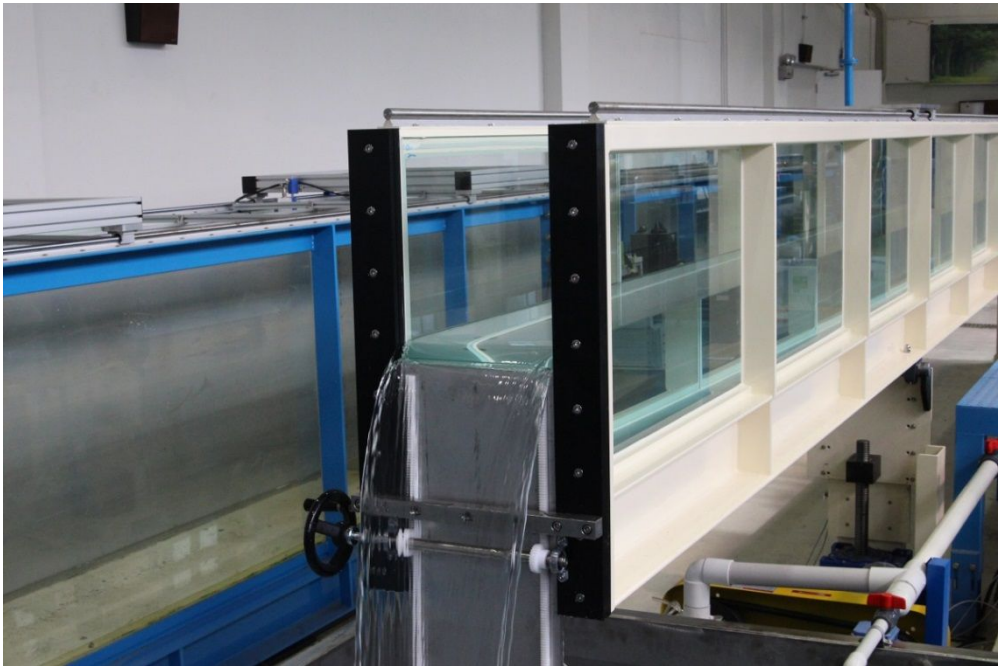


그림 3.11 하류단 수심확보를 위한 전면 고정보 모형 설치

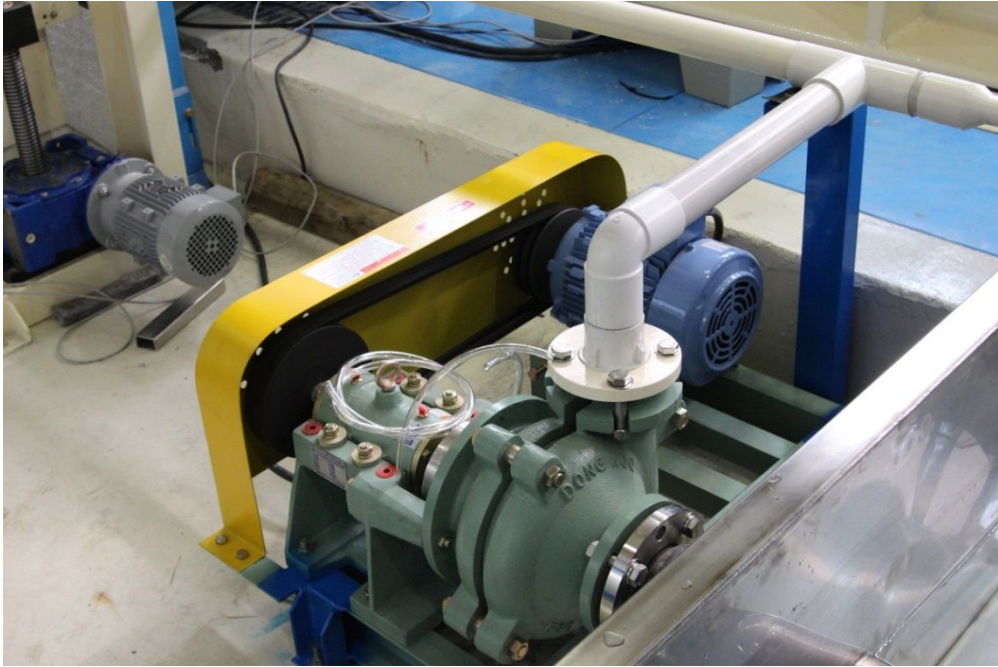


그림 3.12 유사이송 실험을 위한 슬러리 펌프

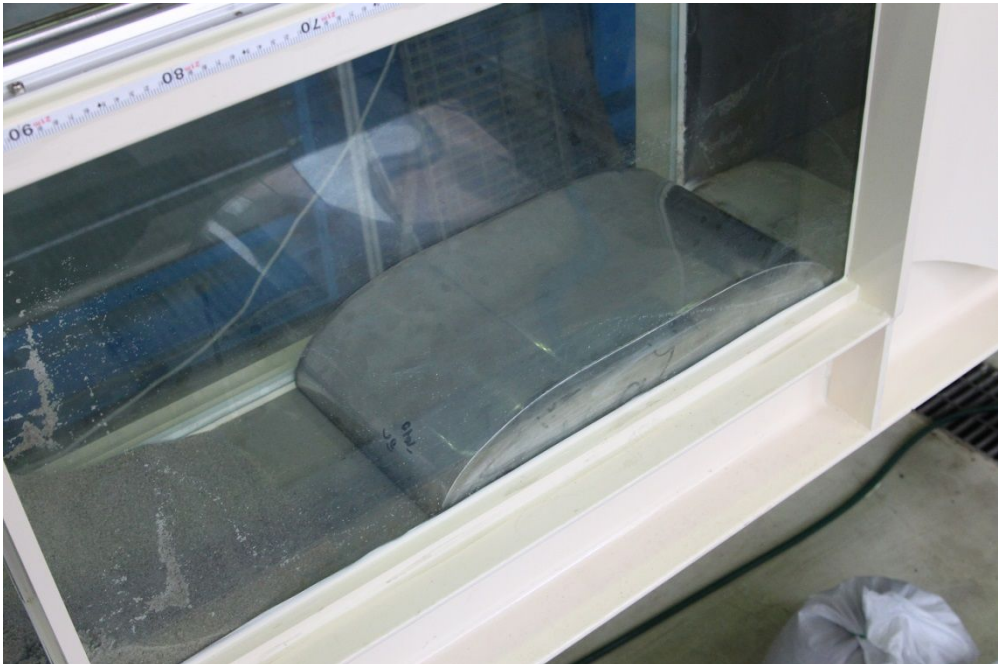


그림 3.13 상류 유사 안정화 장치



그림 3.14 Auto traverse를 이용한 자동이송장치

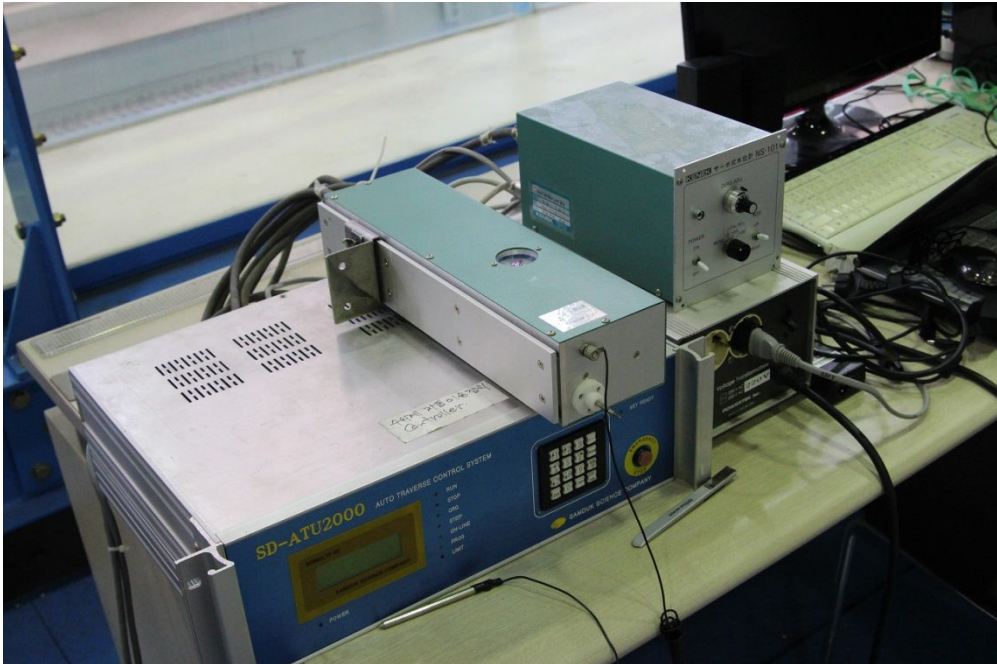


그림 3.15 Auto traverse와 하상고 및 수심 계측장비



그림 3.16 유사 설치를 위한 하상 평탄화 장치

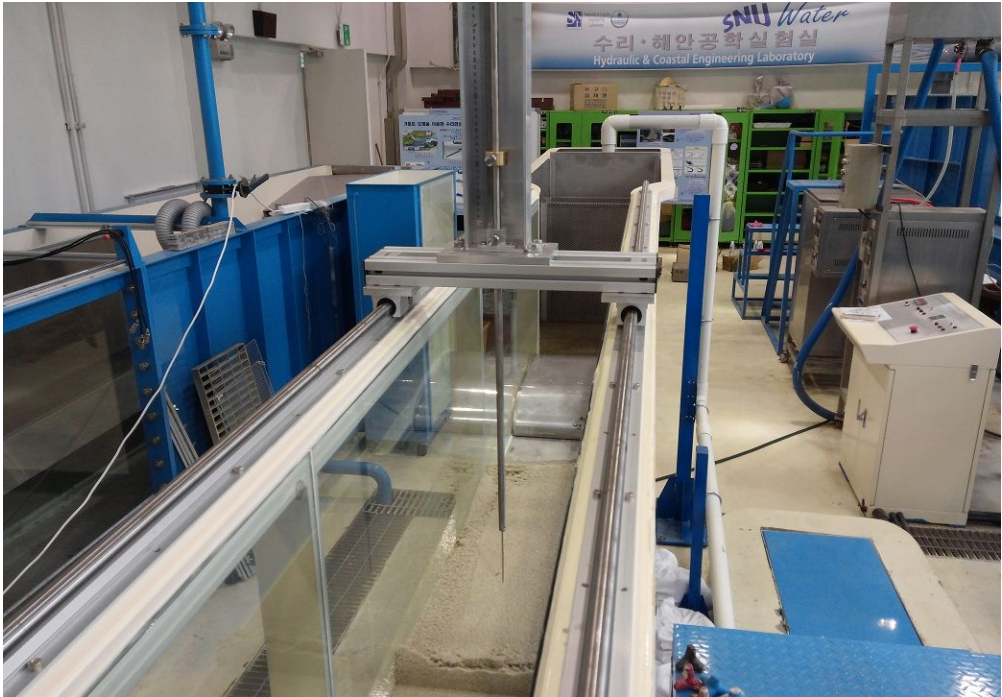


그림 3.17 포인트 게이지를 이용한 계측



그림 3.18 하상고 및 수심 계측장비



그림 3.19 계측장비 설치 이후 수로 모습

3.2.2 실험조건 및 수행방법

수로 상류 1 m와 7 m 지점에 설치된 가변경사 시스템을 통해 0 % ~ 2.38 % 범위내에서 실험자가 원하는 경사를 설정할 수 있도록 설계하였으며, 하류단에는 고정식 다기능보 모형을 설치하여 하류단 수심을 조절할 수 있도록 하였다. 이를 통하여 표 3.4, 표 3.5와 같은 2가지의 실험조건을 수립하였다. 표 3.4의 경우 3.1절에서 수행한 기초 퇴적 실험과 같은 조건으로 상류에서 유사유입이 없는 경우이며, 표 3.5의 경우 일반적인 자연하천에서 발생하는 동적 평형을 만족하기 위해 상류 유입유사량을 반영하였다. 유입유사량 계산의 경우 국가수자원 종합정보시스템(WAMIS; Water Management Information System)에서 제공하는 낙동강 화원관측소의 2000년 ~ 2011년 12년간의 일자료를 이용하여 구한 유량으로 산정하였다. 유사입경 d_{50} 가 0.62 mm인 실험사를 이용하였으며, 각 실험조건에 대해 유사는 실험수로 전체 10,000 mm 구간에 대하여 바닥면으로부터 100 mm 높이로 설치되었다.

수리모형 실험은 9분간 진행되었으며, 1분, 3분, 5분, 7분, 9분, 5번에 걸쳐 하상고와 수심에 대한 측정이 이루어졌다. 실험수로에 유량을 공급한 후 하류단에 배수위가 생성되는 순간을 실험의 시작으로 하였으며, 펌프를 통한 유량의 공급은 각 실험조건이 완료될 때까지 지속적으로 공급되었다.

표 3.4 SMI 시리즈 실험조건 (유사입경 d_{50} : 0.62 mm)

Case	유량 Q (l/sec)	경사도 S (%)	하류단 수심 H (mm)
SMI111	3	0.8	100
SMI112		1.4	
SMI113		2.0	
SMI111	6	0.8	
SMI112		1.4	
SMI113		2.0	

표 3.5 SMO 시리즈 실험조건 (유사입경 d_{50} : 0.62 mm)

Case	유량 Q (l/sec)	경사도 S (%)	하류단 수심 H (mm)	유사공급량 (g/min)	유사시간비 (Tr)	1일 모의를 위한 실험시간 (min)
SMO111	3	0.8	100	181	8858	59.3
SMO112		1.4		522	25548	20.6
SMO113		2.0		966	47279	11.1
SMO121	6	0.8		674	28093	18.7
SMO122		1.4		1718	84084	6.3
SMO123		2.0		3000	146830	3.6

3.2.3. 실험결과 분석

표 3.5의 SMO 시리즈 실험조건에 대해 퇴적실험을 수행하였으며, 기초 수리실험과 같이 시간경과에 따른 실험조건 별 하상고와 수심의 변화를 그래프 3.9로 도시하였다. 단위 폭 당 퇴적량의 경우 기초 수리실험의 결과와 비슷하게 유량과 하상경사에 비례하여 증가하는 양상을 보인다. 특히 Mass balance 분석결과 유량이 6 l/sec으로 고정된 경우 실험시작 후 1분 경과 지점에서 퇴적량은 9분 경과 후 퇴적량과 비교하면, 하상경사가 0.8 %인 SMO121의 경우 2.08배이지만, 1.4 %인 SMO122에서는 3.27배, 2.0 %인 SMO123에서는 4.53배로 하상경사가 0.6 % 증가함에 따라 약 120%의 퇴적량 증가추세를 보였다.

또한 하상경사가 0.8 %인 SMO111와 2.0 %인 SMO113의 하상고 및 수심 그래프를 비교하면 0.8 %의 실험조건에서는 배수위 생성이 확인되지 않고 저수지 삼각주 역시 높이가 굉장히 낮게 형성되지만, 2.0 %에서는 배수위가 수로 하류단으로부터 약 3 m 지점에 생성되면서 저수지 삼각주의 높이는 0.8 %에 비해 약 11% 높은 형태로 생성되는 양상을 보인다. 이는 정류탱크로부터 유입된 흐름이 배수위 효과가 더 크게 작용하면서 생성되는 SMO133 실험조건에서 유속이 급속도로 저하되면서 부유 및 이송하던 토사가 퇴적되면서 발생한 것으로 분석된다. SMO112와 비교하면 배수위 구간이 약 40% 짧아 저수용량은 상대적으로 더 적게 확보되는 것으로 확인되었다.

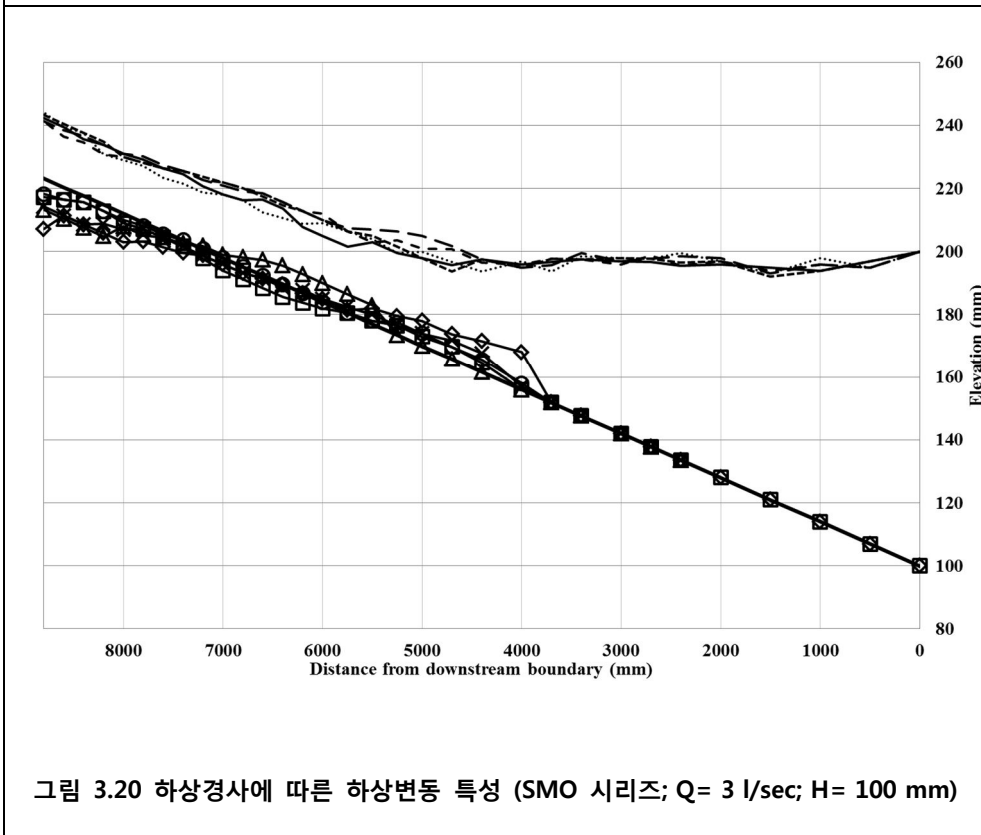
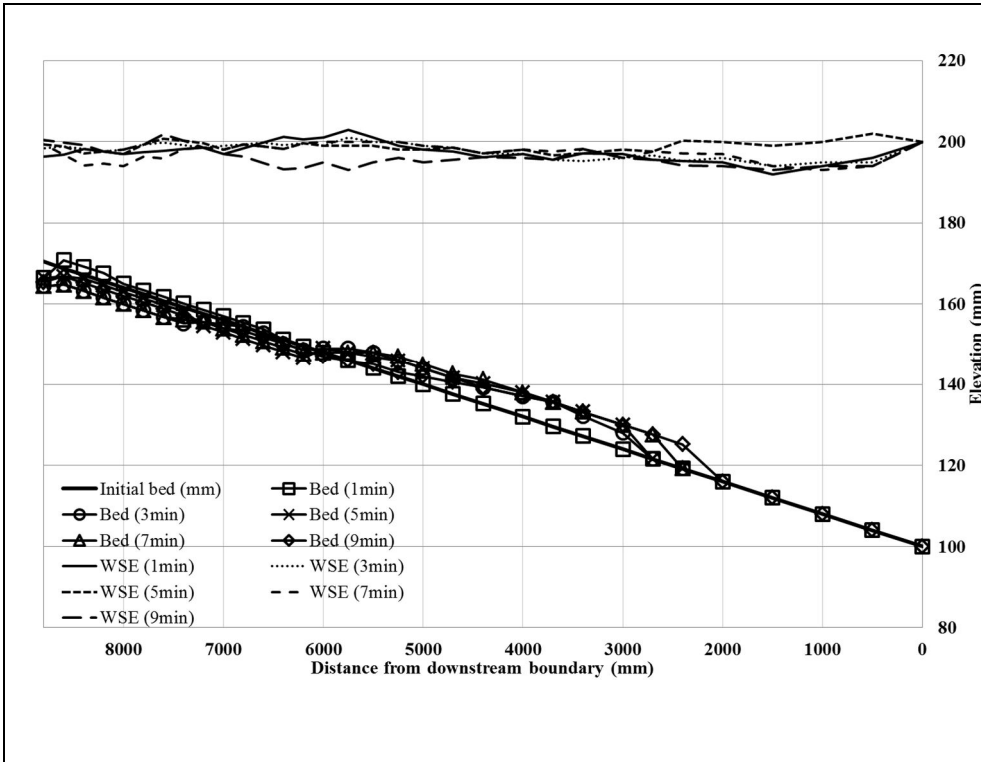


그림 3.20 하상경사에 따른 하상변동 특성 (SMO 시리즈; $Q = 3 \text{ l/sec}$; $H = 100 \text{ mm}$)

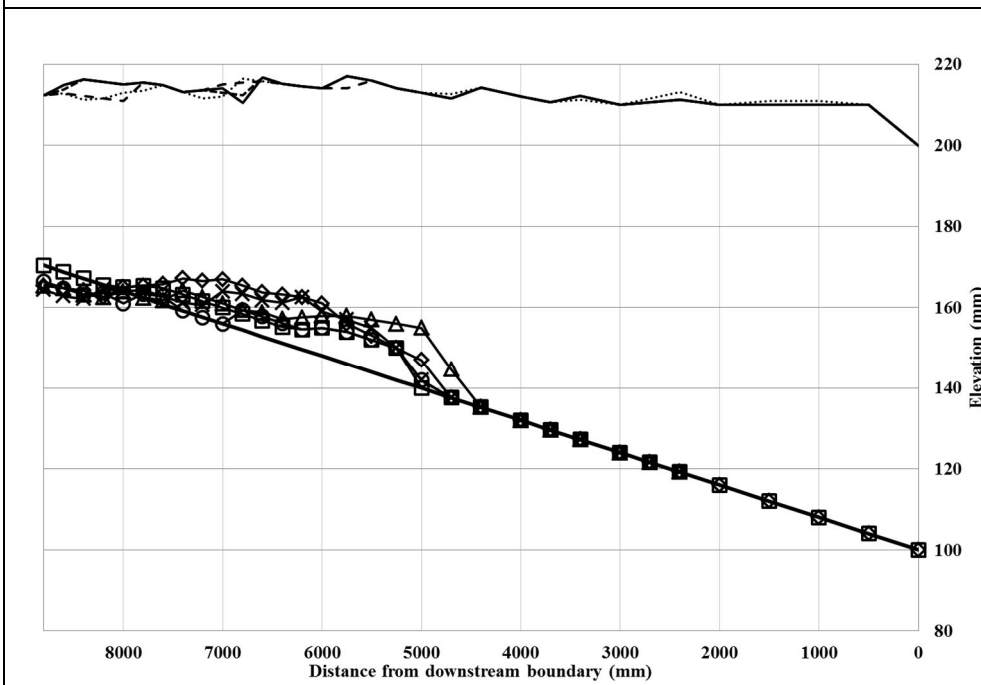
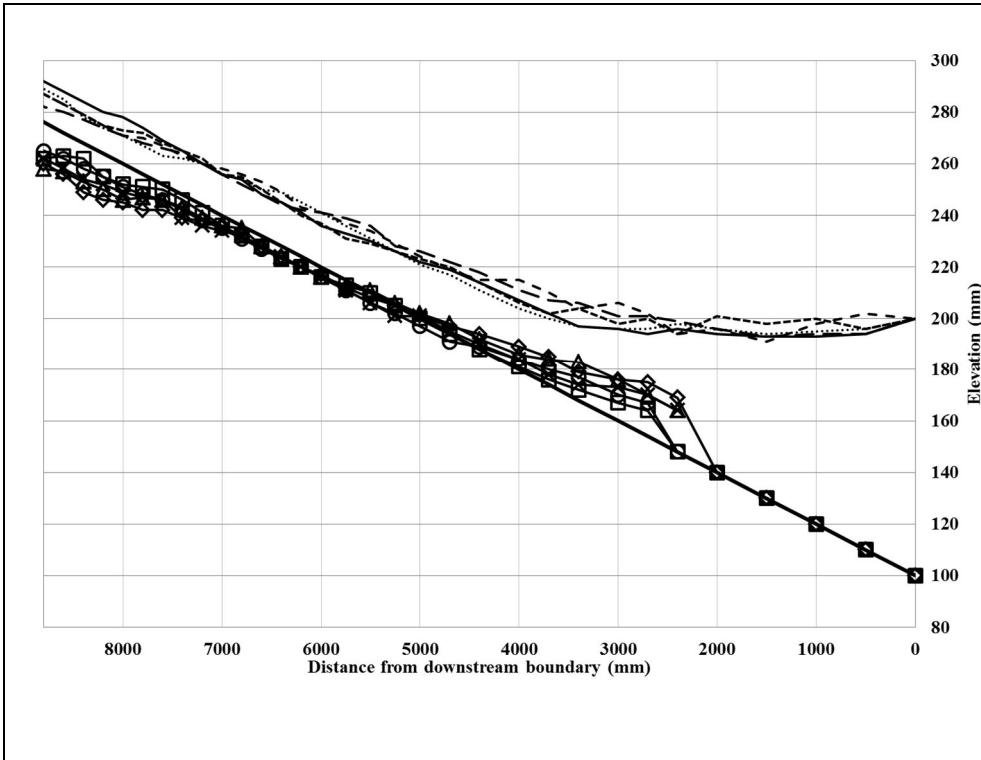


그림 3.20 하상경사에 따른 하상변동 특성 (SMO 시리즈; $Q = 3 \text{ l/sec}$; $H = 100 \text{ mm}$ 계속)

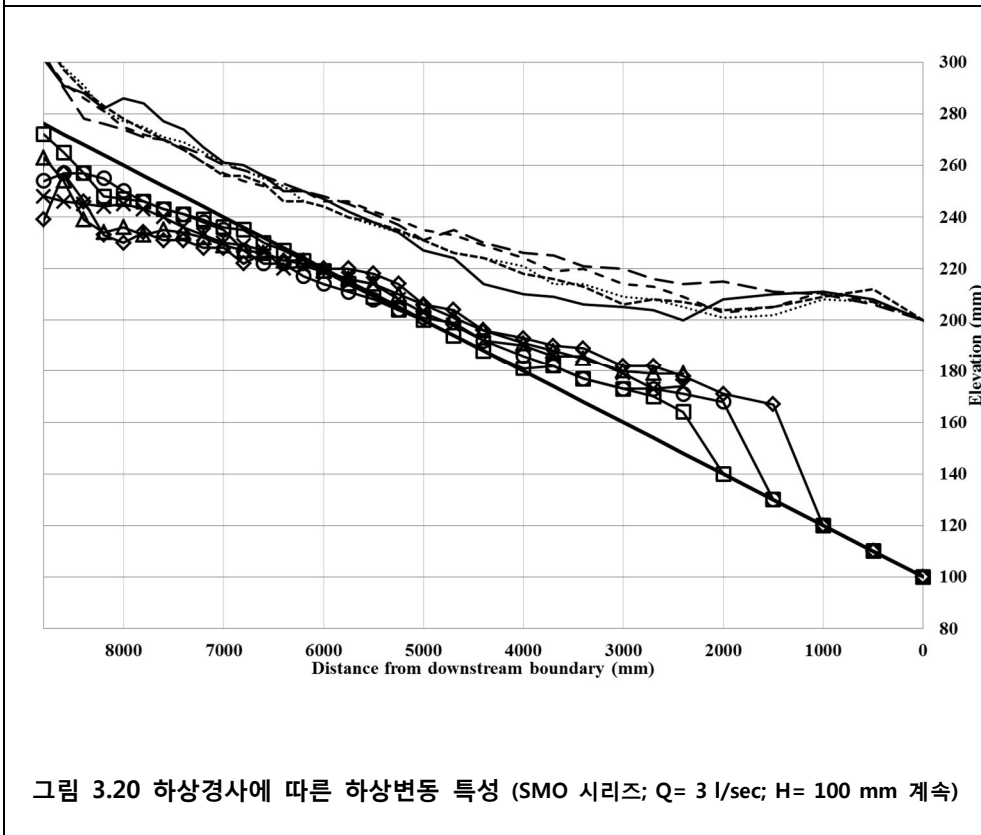
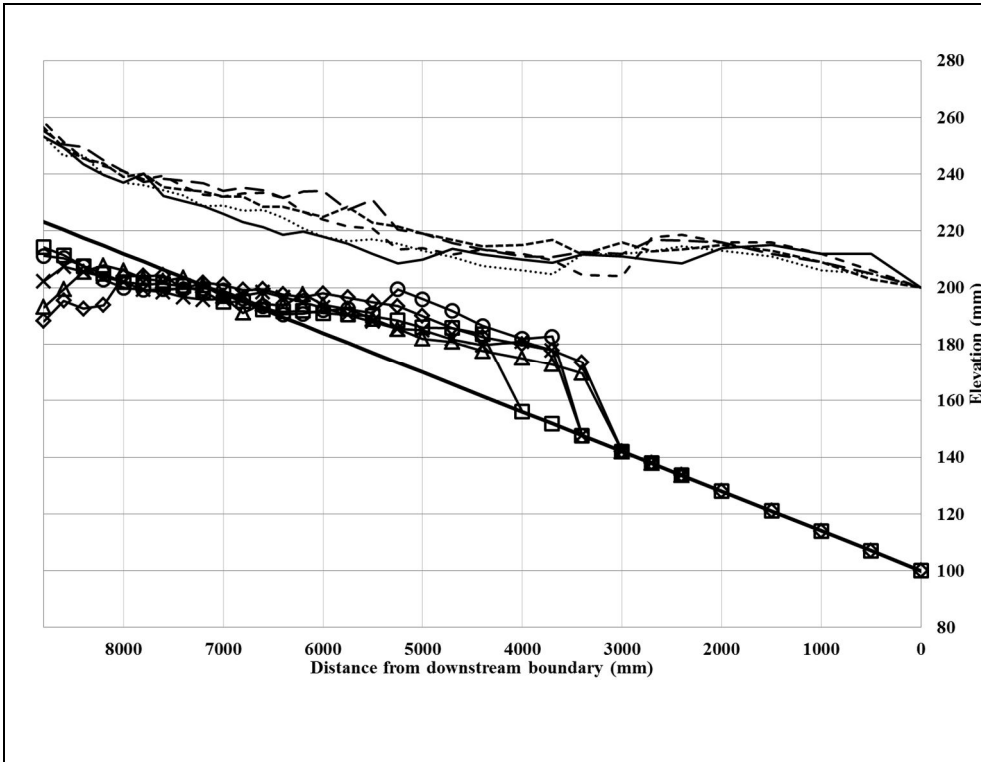


그림 3.20 하상경사에 따른 하상변동 특성 (SMO 시리즈; Q= 3 l/sec; H= 100 mm 계속)

4. 경험식 유도

4.1 차원해석

본 연구에서 수행한 퇴적량에 영향을 미치는 요인에 대해 분석하기 위해서 차원해석을 이용하여 각 매개변수를 무차원화하여 저수지 유사 퇴적량(A_d)에 영향을 미치는 대표적인 매개변수를 고려하면 다음과 같다.

$$A_d = f(t, q, \omega, VS, H, D, \nu, U^*, d, S) \quad (4.1)$$

여기서 t 는 시간, q 는 단위폭당 유량, ω 는 유사 침강속도, VS 는 단위수류, H 는 하류단 수심, D 는 상류부 수심, ν 는 유체의 동점성계수, U^* 는 마찰유속, d_{50} 는 유사의 입경, S 는 수로의 하상경사이다.

이를 상관관계가 높은 매개변수끼리 차원해석을 하여 무차원화하여 무차원 유사 퇴적량과 비교하면 다음과 같다.

$$\frac{A_d}{qt} = f\left(S, \frac{\omega t}{D}, \frac{D}{d}, \frac{VS}{\omega}, \frac{U^*}{\omega}, \tau^*, \frac{\omega d}{\nu}, \frac{H}{D}, \text{Re}, \text{Fr}\right) \quad (4.2)$$

4.2 퇴적량에 영향을 미치는 인자 분석

실험조건의 한계로 인하여 수리모형 실험으로 재현할 수 없는 유량, 유사입경을 변경시키며 총 2,646개의 조건에 대해 수치모의를 수행하여 단위폭 당 퇴적량(A_d)과 무차원 변수들과의 관계를 분석하였다. 수리모형 실험에서 측정된 퇴적량과 실험 변수들을 무차원화하여 표 4.1~4.4에 수록하였다.

수치해석 모의와 수리모형 실험 결과를 비교 및 분석한 결과, 단위폭 당 퇴적량(A_d)은 무차원 단위수류일률(Unit stream power), Shields 매개변수, U^* / ω , D/d 의 순서대로 상관관계가 큰 것으로 나타났으며, 그에 대한 결과는 그림 4.1 ~ 4.8에 도시하였다. 여기서 무차원 단위수류일률의 ω 는 유사 침강속도를 의미하며 체분석 시험에 따라 유사의 입경을 측정 한 후 Rubey(1993)에 의해 개발된 유사 침강속도 추정식을 통해 산정되었다. 또한 Shields 매개변수는 유사이송 초기조건 및 하상 변동량 모의 문제를 다루는 데 있어서 적용하는 Shields 곡선의 종축을 나타내는 무차원 변수로서, 식 4.3과 같이 정의된다.

$$\tau^* = \frac{\tau_0}{\gamma(G-1)d} \quad (4.3)$$

여기서 τ_0 는 바닥 전단력, γ 는 물의 단위중량, G 는 유사의 비중이다.

Yang (1996, 2003)은 단위 무게당 에너지 소진률을 의미하는 단위수류일률(Unit stream power)의 개념을 도입하여 하상 변동에 따른 유사 이송량을 연구한 바 있으며, 이러한 단위수류일률이 유사 이송량과 가장 큰 상관관계를 갖는다고 분석하였다.

표 4.1 수리모형 실험결과 무차원 매개변수

Case	time	A_d / qt	VS / ω	D / d	U^* / ω	τ^*	H / D
AS111	60	0.26681	0.00151	45	1.74519	0.60000	2.22222
AS111	120	0.26681	0.00121	45	1.74519	0.60000	2.22222
AS111	180	0.26681	0.00151	45	1.74519	0.60000	2.22222
AS111	240	0.26681	0.00197	45	1.74519	0.60000	2.22222
AS112	60	0.21830	0.00544	55	1.92938	0.73333	2.72727
AS112	120	0.21830	0.00408	55	1.92938	0.73333	2.72727
AS112	180	0.21830	0.00302	55	1.92938	0.73333	2.72727
AS112	240	0.21830	0.00227	55	1.92938	0.73333	2.72727
AS121	60	0.23814	0.00529	55	2.01517	0.80000	1.36364
AS121	120	0.23814	0.00574	55	2.01517	0.80000	1.36364
AS121	180	0.23814	0.00459	55	2.01517	0.80000	1.36364
AS121	240	0.23814	0.00389	55	2.01517	0.80000	1.36364
AS122	60	0.26196	0.00695	50	1.92139	0.72727	2.00000
AS122	120	0.26196	0.00635	50	1.92139	0.72727	2.00000
AS122	180	0.26196	0.00655	50	1.92139	0.72727	2.00000
AS122	240	0.26196	0.00559	50	1.92139	0.72727	2.00000
AS123	60	0.26196	0.00741	50	1.92139	0.72727	3.00000
AS123	120	0.26196	0.00597	50	1.92139	0.72727	3.00000
AS123	180	0.26196	0.00554	50	1.92139	0.72727	3.00000
AS123	240	0.26196	0.00367	50	1.92139	0.72727	3.00000
AS131	60	0.25799	0.00801	55	2.09746	0.86667	1.36364
AS131	120	0.25799	0.00582	55	2.09746	0.86667	1.36364
AS131	180	0.25799	0.00413	55	2.09746	0.86667	1.36364
AS131	240	0.25799	0.00329	55	2.09746	0.86667	1.36364
AS132	60	0.25799	0.00952	55	2.09746	0.86667	1.81818
AS132	120	0.25799	0.00884	55	2.09746	0.86667	1.81818
AS132	180	0.25799	0.00665	55	2.09746	0.86667	1.81818
AS132	240	0.25799	0.00537	55	2.09746	0.86667	1.81818
AS133	60	0.25799	0.00786	55	2.09746	0.86667	2.72727
AS133	120	0.25799	0.00710	55	2.09746	0.86667	2.72727
AS133	180	0.25799	0.00544	55	2.09746	0.86667	2.72727
AS133	240	0.25799	0.00597	55	2.09746	0.86667	2.72727
AS141	60	0.38202	0.01149	40	1.85624	0.67879	2.50000
AS141	120	0.38202	0.00831	40	1.85624	0.67879	2.50000
AS141	180	0.38202	0.00756	40	1.85624	0.67879	2.50000
AS141	240	0.38202	0.00624	40	1.85624	0.67879	2.50000
AS142	60	0.38202	0.00937	40	1.85624	0.67879	3.75000
AS142	120	0.38202	0.00726	40	1.85624	0.67879	3.75000

표 4.1 수리모형 실험결과 무차원 매개변수

Case	time	A_d / qt	VS / ω	D / d	U^* / ω	τ^*	H / D
AS142	180	0.38202	0.00635	40	1.85624	0.67879	3.75000
AS142	240	0.38202	0.00688	40	1.85624	0.67879	3.75000
AS151	60	0.33836	0.01119	50	2.18369	0.93939	2.00000
AS151	120	0.33836	0.00915	50	2.18369	0.93939	2.00000
AS151	180	0.33836	0.00710	50	2.18369	0.93939	2.00000
AS151	240	0.33836	0.00590	50	2.18369	0.93939	2.00000
AS152	60	0.37596	0.01421	45	2.07163	0.84545	3.33333
AS152	120	0.37596	0.01043	45	2.07163	0.84545	3.33333
AS152	180	0.37596	0.00801	45	2.07163	0.84545	3.33333
AS152	240	0.37596	0.00771	45	2.07163	0.84545	3.33333
AS211	60	0.31616	0.00777	65	2.09746	0.86667	1.53846
AS211	120	0.31616	0.00534	65	2.09746	0.86667	1.53846
AS111	180	0.31616	0.00518	65	2.09746	0.86667	1.53846
AS211	240	0.31616	0.00373	65	2.09746	0.86667	1.53846
AS212	60	0.29358	0.00707	70	2.17663	0.93333	2.14286
AS212	120	0.29358	0.00592	70	2.17663	0.93333	2.14286
AS212	180	0.29358	0.00406	70	2.17663	0.93333	2.14286
AS212	240	0.29358	0.00364	70	2.17663	0.93333	2.14286
AS221	60	0.34490	0.00963	65	2.19072	0.94545	1.53846
AS221	120	0.34490	0.00574	65	2.19072	0.94545	1.53846
AS221	180	0.34490	0.00500	65	2.19072	0.94545	1.53846
AS221	240	0.34490	0.00305	65	2.19072	0.94545	1.53846
AS222	60	0.34490	0.00654	65	2.19072	0.94545	2.30769
AS222	120	0.34490	0.00371	65	2.19072	0.94545	2.30769
AS222	180	0.34490	0.00400	65	2.19072	0.94545	2.30769
AS222	240	0.34490	0.00373	65	2.19072	0.94545	2.30769
AS231	60	0.37364	0.00910	65	2.28017	1.02424	1.53846
AS231	120	0.37364	0.00521	65	2.28017	1.02424	1.53846
AS231	180	0.37364	0.00386	65	2.28017	1.02424	1.53846
AS231	240	0.37364	0.00364	65	2.28017	1.02424	1.53846
AS232	60	0.32383	0.00574	75	2.44930	1.18182	2.00000
AS232	120	0.32383	0.00693	75	2.44930	1.18182	2.00000
AS232	180	0.32383	0.00603	75	2.44930	1.18182	2.00000
AS232	240	0.32383	0.00497	75	2.44930	1.18182	2.00000
AS241	60	0.40239	0.00971	65	2.36625	1.10303	1.53846
AS241	120	0.40239	0.00556	65	2.36625	1.10303	1.53846
AS241	180	0.40239	0.00415	65	2.36625	1.10303	1.53846
AS241	240	0.40239	0.00378	65	2.36625	1.10303	1.53846

표 4.1 수리모형 실험결과 무차원 매개변수 (AS 시리즈)

Case	time	A_d / qt	VS / ω	D / d	U^* / ω	τ^*	H / D
AS242	60	0.37364	0.01095	70.00	2.45557	1.18788	2.14286
AS242	120	0.37364	0.00693	70.00	2.45557	1.18788	2.14286
AS242	180	0.37364	0.00659	70.00	2.45557	1.18788	2.14286
AS242	240	0.37364	0.00514	70.00	2.45557	1.18788	2.14286

표 4.2 수리모형 실험결과 무차원 매개변수 (AM 시리즈)

Case	time	A_d / qt	VS / ω	D / d	U^* / ω	τ^*	H / D
AM311	60	0.13916	0.00272	9.68	0.49546	0.12903	3.33333
AM311	120	0.13916	0.00461	9.68	0.49546	0.12903	3.33333
AM311	180	0.13916	0.00443	9.68	0.49546	0.12903	3.33333
AM311	240	0.13916	0.00419	9.68	0.49546	0.12903	3.33333
AM312	60	0.11928	0.00272	11.29	0.53516	0.15054	4.28571
AM312	120	0.11928	0.00219	11.29	0.53516	0.15054	4.28571
AM312	180	0.11928	0.00312	11.29	0.53516	0.15054	4.28571
AM312	240	0.11928	0.00280	11.29	0.53516	0.15054	4.28571
AM321	60	0.13012	0.00816	11.29	0.55895	0.16422	2.85714
AM321	120	0.13012	0.00620	11.29	0.55895	0.16422	2.85714
AM321	180	0.13012	0.00605	11.29	0.55895	0.16422	2.85714
AM321	240	0.13012	0.00393	11.29	0.55895	0.16422	2.85714
AM322	60	0.09108	0.00363	16.13	0.66808	0.23460	3.00000
AM322	120	0.09108	0.00227	16.13	0.66808	0.23460	3.00000
AM322	180	0.09108	0.00363	16.13	0.66808	0.23460	3.00000
AM322	240	0.09108	0.00302	16.13	0.66808	0.23460	3.00000
AM331	60	0.19735	0.00514	8.06	0.49169	0.12708	4.00000
AM331	120	0.19735	0.00771	8.06	0.49169	0.12708	4.00000
AM331	180	0.19735	0.00479	8.06	0.49169	0.12708	4.00000
AM331	240	0.19735	0.00435	8.06	0.49169	0.12708	4.00000
AM332	60	0.12334	0.00544	12.90	0.62195	0.20332	3.75000
AM332	120	0.12334	0.00348	12.90	0.62195	0.20332	3.75000
AM332	180	0.12334	0.00363	12.90	0.62195	0.20332	3.75000
AM332	240	0.12334	0.00295	12.90	0.62195	0.20332	3.75000
AM242	60	0.37364	0.01095	70.00	2.45557	1.18788	2.14286
AM242	120	0.37364	0.00693	70.00	2.45557	1.18788	2.14286
AM242	180	0.37364	0.00659	70.00	2.45557	1.18788	2.14286
AM242	240	0.37364	0.00514	70.00	2.45557	1.18788	2.14286

표 4.2 수리모형 실험결과 무차원 매개변수 (AM 시리즈)

Case	time	A_d / qt	VS / ω	D / d	U^* / ω	τ^*	H / D
AM311	60	0.13916	0.00272	9.68	0.49546	0.12903	3.33333
AM311	120	0.13916	0.00461	9.68	0.49546	0.12903	3.33333
AM311	180	0.13916	0.00443	9.68	0.49546	0.12903	3.33333
AM311	240	0.13916	0.00419	9.68	0.49546	0.12903	3.33333
AM312	60	0.11928	0.00272	11.29	0.53516	0.15054	4.28571
AM312	120	0.11928	0.00219	11.29	0.53516	0.15054	4.28571
AM312	180	0.11928	0.00312	11.29	0.53516	0.15054	4.28571
AM312	240	0.11928	0.00280	11.29	0.53516	0.15054	4.28571
AM321	60	0.13012	0.00816	11.29	0.55895	0.16422	2.85714
AM321	120	0.13012	0.00620	11.29	0.55895	0.16422	2.85714
AM321	180	0.13012	0.00605	11.29	0.55895	0.16422	2.85714
AM321	240	0.13012	0.00393	11.29	0.55895	0.16422	2.85714
AM322	60	0.09108	0.00363	16.13	0.66808	0.23460	3.00000
AM322	120	0.09108	0.00227	16.13	0.66808	0.23460	3.00000
AM322	180	0.09108	0.00363	16.13	0.66808	0.23460	3.00000
AM322	240	0.09108	0.00302	16.13	0.66808	0.23460	3.00000
AM331	60	0.19735	0.00514	8.06	0.49169	0.12708	4.00000
AM331	120	0.19735	0.00771	8.06	0.49169	0.12708	4.00000
AM331	180	0.19735	0.00479	8.06	0.49169	0.12708	4.00000
AM331	240	0.19735	0.00435	8.06	0.49169	0.12708	4.00000
AM332	60	0.12334	0.00544	12.90	0.62195	0.20332	3.75000
AM332	120	0.12334	0.00348	12.90	0.62195	0.20332	3.75000
AM332	180	0.12334	0.00363	12.90	0.62195	0.20332	3.75000
AM332	240	0.12334	0.00295	12.90	0.62195	0.20332	3.75000
AM341	60	0.21253	0.00620	8.06	0.51025	0.13685	4.00000
AM341	120	0.21253	0.00574	8.06	0.51025	0.13685	4.00000
AM341	180	0.21253	0.00539	8.06	0.51025	0.13685	4.00000
AM341	240	0.21253	0.00488	8.06	0.51025	0.13685	4.00000
AM342	60	0.15181	0.00363	11.29	0.60374	0.19159	4.28571
AM342	120	0.15181	0.00514	11.29	0.60374	0.19159	4.28571
AM342	180	0.15181	0.00514	11.29	0.60374	0.19159	4.28571
AM342	240	0.15181	0.00370	11.29	0.60374	0.19159	4.28571
AM351	60	0.29413	0.00333	6.45	0.48021	0.12121	5.00000
AM351	120	0.29413	0.00665	6.45	0.48021	0.12121	5.00000
AM351	180	0.29413	0.00549	6.45	0.48021	0.12121	5.00000
AM351	240	0.29413	0.00465	6.45	0.48021	0.12121	5.00000
AM352	60	0.23530	0.00847	8.06	0.53689	0.15152	6.00000
AM352	120	0.23530	0.00756	8.06	0.53689	0.15152	6.00000

표 4.2 수리모형 실험결과 무차원 매개변수 (AM 시리즈)

Case	time	A_d / qt	VS / ω	D / d	U^* / ω	τ^*	H / D
AM352	180	0.23530	0.00726	8.06	0.53689	0.15152	6.00000
AM352	240	0.23530	0.00665	8.06	0.53689	0.15152	6.00000
AM361	60	0.29413	0.00333	6.45	0.48021	0.12121	5.00000
AM361	120	0.29413	0.00665	6.45	0.48021	0.12121	5.00000
AM361	180	0.29413	0.00549	6.45	0.48021	0.12121	5.00000
AM361	240	0.29413	0.00465	6.45	0.48021	0.12121	5.00000
AM362	60	0.23530	0.00847	8.06	0.53689	0.15152	6.00000
AM362	120	0.23530	0.00756	8.06	0.53689	0.15152	6.00000
AM362	180	0.23530	0.00726	8.06	0.53689	0.15152	6.00000
AM362	240	0.23530	0.00665	8.06	0.53689	0.15152	6.00000
AM371	60	0.29413	0.00333	6.45	0.48021	0.12121	5.00000
AM371	120	0.29413	0.00665	6.45	0.48021	0.12121	5.00000
AM371	180	0.29413	0.00549	6.45	0.48021	0.12121	5.00000
AM371	240	0.29413	0.00465	6.45	0.48021	0.12121	5.00000
AM372	60	0.29413	0.00847	6.45	0.48021	0.12121	7.50000
AM372	120	0.29413	0.00756	6.45	0.48021	0.12121	7.50000
AM372	180	0.29413	0.00726	6.45	0.48021	0.12121	7.50000
AM372	240	0.29413	0.00665	6.45	0.48021	0.12121	7.50000
AM411	60	0.17864	0.00442	12.90	0.57211	0.17204	2.50000
AM411	120	0.17864	0.00353	12.90	0.57211	0.17204	2.50000
AM411	180	0.17864	0.00318	12.90	0.57211	0.17204	2.50000
AM411	240	0.17864	0.00274	12.90	0.57211	0.17204	2.50000
AM412	60	0.17864	0.00247	12.90	0.57211	0.17204	3.75000
AM412	120	0.17864	0.00221	12.90	0.57211	0.17204	3.75000
AM412	180	0.17864	0.00165	12.90	0.57211	0.17204	3.75000
AM412	240	0.17864	0.00190	12.90	0.57211	0.17204	3.75000
AM421	60	0.22272	0.00194	11.29	0.55895	0.16422	2.85714
AM421	120	0.22272	0.00212	11.29	0.55895	0.16422	2.85714
AM421	180	0.22272	0.00227	11.29	0.55895	0.16422	2.85714
AM421	240	0.22272	0.00245	11.29	0.55895	0.16422	2.85714
AM422	60	0.19488	0.00177	12.90	0.59755	0.18768	3.75000
AM422	120	0.19488	0.00177	12.90	0.59755	0.18768	3.75000
AM422	180	0.19488	0.00206	12.90	0.59755	0.18768	3.75000
AM422	240	0.19488	0.00170	12.90	0.59755	0.18768	3.75000
AM431	60	0.24128	0.00309	11.29	0.58178	0.17791	2.85714
AM431	120	0.24128	0.00269	11.29	0.58178	0.17791	2.85714
AM431	180	0.24128	0.00227	11.29	0.58178	0.17791	2.85714
AM431	240	0.24128	0.00223	11.29	0.58178	0.17791	2.85714

표 4.2 수리모형 실험결과 무차원 매개변수 (AM 시리즈)

Case	time	A_d / qt	VS / ω	D / d	U^* / ω	τ^*	H / D
AM432	60	0.21112	0.00247	12.90	0.62195	0.20332	3.75000
AM432	120	0.21112	0.00247	12.90	0.62195	0.20332	3.75000
AM432	180	0.21112	0.00236	12.90	0.62195	0.20332	3.75000
AM432	240	0.21112	0.00203	12.90	0.62195	0.20332	3.75000
AM441	60	0.25984	0.00283	11.29	0.60374	0.19159	2.85714
AM441	120	0.25984	0.00238	11.29	0.60374	0.19159	2.85714
AM441	180	0.25984	0.00271	11.29	0.60374	0.19159	2.85714
AM441	240	0.25984	0.00232	11.29	0.60374	0.19159	2.85714
AM442	60	0.25984	0.00265	11.29	0.60374	0.19159	4.28571
AM442	120	0.25984	0.00256	11.29	0.60374	0.19159	4.28571
AM442	180	0.25984	0.00291	11.29	0.60374	0.19159	4.28571
AM442	240	0.25984	0.00294	11.29	0.60374	0.19159	4.28571
AM451	60	0.33562	0.00450	9.68	0.58814	0.18182	3.33333
AM451	120	0.33562	0.00305	9.68	0.58814	0.18182	3.33333
AM451	180	0.33562	0.00300	9.68	0.58814	0.18182	3.33333
AM451	240	0.33562	0.00276	9.68	0.58814	0.18182	3.33333
AM452	60	0.28768	0.00530	11.29	0.63526	0.21212	4.28571
AM452	120	0.28768	0.00362	11.29	0.63526	0.21212	4.28571
AM452	180	0.28768	0.00312	11.29	0.63526	0.21212	4.28571
AM452	240	0.28768	0.00300	11.29	0.63526	0.21212	4.28571

표 4.3 수리모형 실험결과 무차원 매개변수 (AL 시리즈)

Case	time	A_d / qt	VS / ω	D / d	U^* / ω	τ^*	H / D
AL511	60	0.09286	0.00287	5.00	0.33063	0.06667	3.33333
AL511	120	0.09286	0.00181	5.00	0.33063	0.06667	3.33333
AL511	180	0.09286	0.00222	5.00	0.33063	0.06667	3.33333
AL511	240	0.09286	0.00197	5.00	0.33063	0.06667	3.33333
AL512	60	0.07960	0.00272	5.83	0.35712	0.07778	4.28571
AL512	120	0.07960	0.00227	5.83	0.35712	0.07778	4.28571
AL512	180	0.07960	0.00202	5.83	0.35712	0.07778	4.28571
AL512	240	0.07960	0.00197	5.83	0.35712	0.07778	4.28571
AL521	60	0.08683	0.00272	5.83	0.37300	0.08485	2.85714
AL521	120	0.08683	0.00227	5.83	0.37300	0.08485	2.85714
AL521	180	0.08683	0.00191	5.83	0.37300	0.08485	2.85714
AL521	240	0.08683	0.00234	5.83	0.37300	0.08485	2.85714

표 4.3 수리모형 실험결과 무차원 매개변수 (AL 시리즈)

Case	time	A_d / qt	VS / ω	D / d	U^* / ω	τ^*	H / D
AL522	60	0.10130	0.00423	5.00	0.34533	0.07273	5.00000
AL522	120	0.10130	0.00287	5.00	0.34533	0.07273	5.00000
AL522	180	0.10130	0.00459	5.00	0.34533	0.07273	5.00000
AL522	240	0.10130	0.00280	5.00	0.34533	0.07273	5.00000
AL531	60	0.09407	0.00287	5.83	0.38823	0.09192	2.85714
AL531	120	0.09407	0.00272	5.83	0.38823	0.09192	2.85714
AL531	180	0.09407	0.00101	5.83	0.38823	0.09192	2.85714
AL531	240	0.09407	0.00208	5.83	0.38823	0.09192	2.85714
AL532	60	0.10975	0.00302	5.00	0.35944	0.07879	5.00000
AL532	120	0.10975	0.00227	5.00	0.35944	0.07879	5.00000
AL532	180	0.10975	0.00343	5.00	0.35944	0.07879	5.00000
AL532	240	0.10975	0.00227	5.00	0.35944	0.07879	5.00000
AL541	120	0.11819	0.00272	5.00	0.37300	0.08485	3.33333
AL541	180	0.11819	0.00222	5.00	0.37300	0.08485	3.33333
AL541	240	0.11819	0.00189	5.00	0.37300	0.08485	3.33333
AL542	60	0.11819	0.00302	5.00	0.37300	0.08485	5.00000
AL542	120	0.11819	0.00348	5.00	0.37300	0.08485	5.00000
AL542	180	0.11819	0.00312	5.00	0.37300	0.08485	5.00000
AL542	240	0.11819	0.00302	5.00	0.37300	0.08485	5.00000
AL551	60	0.13085	0.00393	5.00	0.39248	0.09394	3.33333
AL551	120	0.13085	0.00393	5.00	0.39248	0.09394	3.33333
AL551	180	0.13085	0.00489	5.00	0.39248	0.09394	3.33333
AL551	240	0.13085	0.00427	5.00	0.39248	0.09394	3.33333
AL552	60	0.15702	0.00393	4.17	0.35828	0.07828	6.00000
AL552	120	0.15702	0.00401	4.17	0.35828	0.07828	6.00000
AL552	180	0.15702	0.00378	4.17	0.35828	0.07828	6.00000
AL552	240	0.15702	0.00393	4.17	0.35828	0.07828	6.00000
AL561	60	0.22160	0.00665	3.33	0.34050	0.07071	5.00000
AL561	120	0.22160	0.00612	3.33	0.34050	0.07071	5.00000
AL561	180	0.22160	0.00534	3.33	0.34050	0.07071	5.00000
AL561	240	0.22160	0.00446	3.33	0.34050	0.07071	5.00000
AL562	60	0.17728	0.00469	4.17	0.38070	0.08838	6.00000
AL562	120	0.17728	0.00348	4.17	0.38070	0.08838	6.00000
AL562	180	0.17728	0.00529	4.17	0.38070	0.08838	6.00000
AL562	240	0.17728	0.00340	4.17	0.38070	0.08838	6.00000
AL571	60	0.33768	0.00620	2.50	0.31525	0.06061	6.66667
AL571	120	0.33768	0.00718	2.50	0.31525	0.06061	6.66667
AL571	180	0.33768	0.00569	2.50	0.31525	0.06061	6.66667
AL571	240	0.33768	0.00453	2.50	0.31525	0.06061	6.66667

표 4.3 수리모형 실험결과 무차원 매개변수 (AL 시리즈)

Case	time	A_d / qt	VS / ω	D / d	U^* / ω	τ^*	H / D
AL572	60	0.33768	0.00514	2.50	0.31525	0.06061	10.00000
AL572	120	0.33768	0.00627	2.50	0.31525	0.06061	10.00000
AL572	180	0.33768	0.00670	2.50	0.31525	0.06061	10.00000
AL572	240	0.33768	0.00813	2.50	0.31525	0.06061	10.00000
AL611	60	0.11921	0.00185	6.67	0.38178	0.08889	2.50000
AL611	120	0.11921	0.00124	6.67	0.38178	0.08889	2.50000
AL611	180	0.11921	0.00168	6.67	0.38178	0.08889	2.50000
AL611	240	0.11921	0.00172	6.67	0.38178	0.08889	2.50000
AL612	60	0.09537	0.00177	8.33	0.42684	0.11111	3.00000
AL612	120	0.09537	0.00194	8.33	0.42684	0.11111	3.00000
AL612	180	0.09537	0.00177	8.33	0.42684	0.11111	3.00000
AL612	240	0.09537	0.00159	8.33	0.42684	0.11111	3.00000
AL621	60	0.13005	0.00212	6.67	0.39876	0.09697	2.50000
AL621	120	0.13005	0.00212	6.67	0.39876	0.09697	2.50000
AL621	180	0.13005	0.00209	6.67	0.39876	0.09697	2.50000
AL621	240	0.13005	0.00205	6.67	0.39876	0.09697	2.50000
AL622	60	0.11560	0.00141	7.50	0.42295	0.10909	3.33333
AL622	120	0.11560	0.00177	7.50	0.42295	0.10909	3.33333
AL622	180	0.11560	0.00159	7.50	0.42295	0.10909	3.33333
AL622	240	0.11560	0.00212	7.50	0.42295	0.10909	3.33333
AL631	60	0.14088	0.00318	6.67	0.41504	0.10505	2.50000
AL631	120	0.14088	0.00305	6.67	0.41504	0.10505	2.50000
AL631	180	0.14088	0.00141	6.67	0.41504	0.10505	2.50000
AL631	240	0.14088	0.00166	6.67	0.41504	0.10505	2.50000
AL632	60	0.14088	0.00459	6.67	0.41504	0.10505	3.75000
AL632	120	0.14088	0.00247	6.67	0.41504	0.10505	3.75000
AL632	180	0.14088	0.00212	6.67	0.41504	0.10505	3.75000
AL632	240	0.14088	0.00190	6.67	0.41504	0.10505	3.75000
AL641	60	0.15172	0.00212	6.67	0.43071	0.11313	2.50000
AL641	120	0.15172	0.00380	6.67	0.43071	0.11313	2.50000
AL641	180	0.15172	0.00171	6.67	0.43071	0.11313	2.50000
AL641	240	0.15172	0.00254	6.67	0.43071	0.11313	2.50000
AL642	60	0.17340	0.00389	5.83	0.40289	0.09899	4.28571
AL642	120	0.17340	0.00300	5.83	0.40289	0.09899	4.28571
AL642	180	0.17340	0.00247	5.83	0.40289	0.09899	4.28571
AL642	240	0.17340	0.00296	5.83	0.40289	0.09899	4.28571
AL651	60	0.14931	0.00230	7.50	0.48069	0.14091	2.22222
AL651	120	0.14931	0.00428	7.50	0.48069	0.14091	2.22222
AL651	180	0.14931	0.00221	7.50	0.48069	0.14091	2.22222

표 4.3 수리모형 실험결과 무차원 매개변수 (AL 시리즈)

Case	time	A_d / qt	VS / ω	D / d	U^* / ω	τ^*	H / D
AL651	240	0.14931	0.00283	7.50	0.48069	0.14091	2.22222
AL652	60	0.16798	0.00353	6.67	0.45319	0.12525	3.75000
AL652	120	0.16798	0.00309	6.67	0.45319	0.12525	3.75000
AL652	180	0.16798	0.00300	6.67	0.45319	0.12525	3.75000
AL652	240	0.16798	0.00261	6.67	0.45319	0.12525	3.75000
AL661	60	0.18965	0.00609	6.67	0.48155	0.14141	2.50000
AL661	120	0.18965	0.00393	6.67	0.48155	0.14141	2.50000
AL661	180	0.18965	0.00165	6.67	0.48155	0.14141	2.50000
AL661	240	0.18965	0.00254	6.67	0.48155	0.14141	2.50000
AL662	60	0.21674	0.00318	5.83	0.45044	0.12374	4.28571
AL662	120	0.21674	0.00512	5.83	0.45044	0.12374	4.28571
AL662	180	0.21674	0.00447	5.83	0.45044	0.12374	4.28571
AL662	240	0.21674	0.00378	5.83	0.45044	0.12374	4.28571
AL671	60	0.28899	0.00786	5.00	0.44582	0.12121	3.33333
AL671	120	0.28899	0.00530	5.00	0.44582	0.12121	3.33333
AL671	180	0.28899	0.00424	5.00	0.44582	0.12121	3.33333
AL671	240	0.28899	0.00318	5.00	0.44582	0.12121	3.33333
AL672	60	0.34679	0.00980	4.17	0.40698	0.10101	6.00000
AL672	120	0.34679	0.00768	4.17	0.40698	0.10101	6.00000
AL672	180	0.34679	0.00524	4.17	0.40698	0.10101	6.00000
AL672	240	0.34679	0.00400	4.17	0.40698	0.10101	6.00000

표 4.4 수리모형 실험결과 무차원 매개변수 (SMO 시리즈)

Case	time	A_d / qt	VS / ω	D / d	U^* / ω	τ^*	H / D
SMO111	60	0.00233	0.06884	25.80	0.487895	0.22678	6.25
SMO111	180	0.00277	0.06884	25.80	0.487895	0.22678	6.25
SMO111	300	0.00328	0.06884	25.80	0.487895	0.22678	6.25
SMO111	420	0.00296	0.06884	25.80	0.487895	0.22678	6.25
SMO111	540	0.00277	0.06884	25.80	0.487895	0.22678	6.25
SMO112	60	0.00291	0.06884	45.16	0.853816	0.38318	3.571429
SMO112	180	0.00191	0.06884	45.16	0.853816	0.38318	3.571429
SMO112	300	0.00255	0.06884	45.16	0.853816	0.38318	3.571429
SMO112	420	0.0020	0.06884	45.16	0.853816	0.38318	3.571429
SMO112	540	0.00287	0.06884	45.16	0.853816	0.38318	3.571429

표 4.4 수리모형 실험결과 무차원 매개변수 (SMO 시리즈)

Case	time	A_d / qt	VS / ω	D / d	U^* / ω	τ^*	H / D
SMO113	60	0.00366	0.12516	37.09	0.92491	0.43010	4.34782
SMO113	180	0.00333	0.12516	37.09	0.92491	0.43010	4.34782
SMO113	300	0.00306	0.12516	37.09	0.92491	0.43010	4.34782
SMO113	420	0.00361	0.12516	37.09	0.92491	0.43010	4.34782
SMO113	540	0.00462	0.12516	37.09	0.92491	0.43010	4.34782
SMO211	60	0.00604	0.08472	72.58	0.81822	0.20332	2.22222
SMO211	180	0.00350	0.08472	72.58	0.81822	0.20332	2.22222
SMO211	300	0.00312	0.08472	72.58	0.81822	0.20332	2.22222
SMO211	420	0.00314	0.08472	72.58	0.81822	0.20332	2.22222
SMO211	540	0.00264	0.08472	72.58	0.81822	0.20332	2.22222
SMO212	60	0.02547	0.19275	61.29	0.99466	0.27370	2.63157
SMO212	180	0.01622	0.19275	61.29	0.99466	0.27370	2.63157
SMO212	300	0.00774	0.19275	61.29	0.99466	0.27370	2.63157
SMO212	420	0.00577	0.19275	61.29	0.99466	0.27370	2.63157
SMO212	540	0.00623	0.19275	61.29	0.99466	0.27370	2.63157
SMO213	60	0.01631	0.34421	54.83	1.12454	0.31280	2.94117
SMO213	180	0.01155	0.34421	54.83	1.12454	0.31280	2.94117
SMO213	300	0.00879	0.34421	54.83	1.12454	0.31280	2.94117
SMO213	420	0.00746	0.34421	54.83	1.12454	0.31280	2.94117
SMO213	540	0.00821	0.34421	54.83	1.12454	0.31280	2.94117

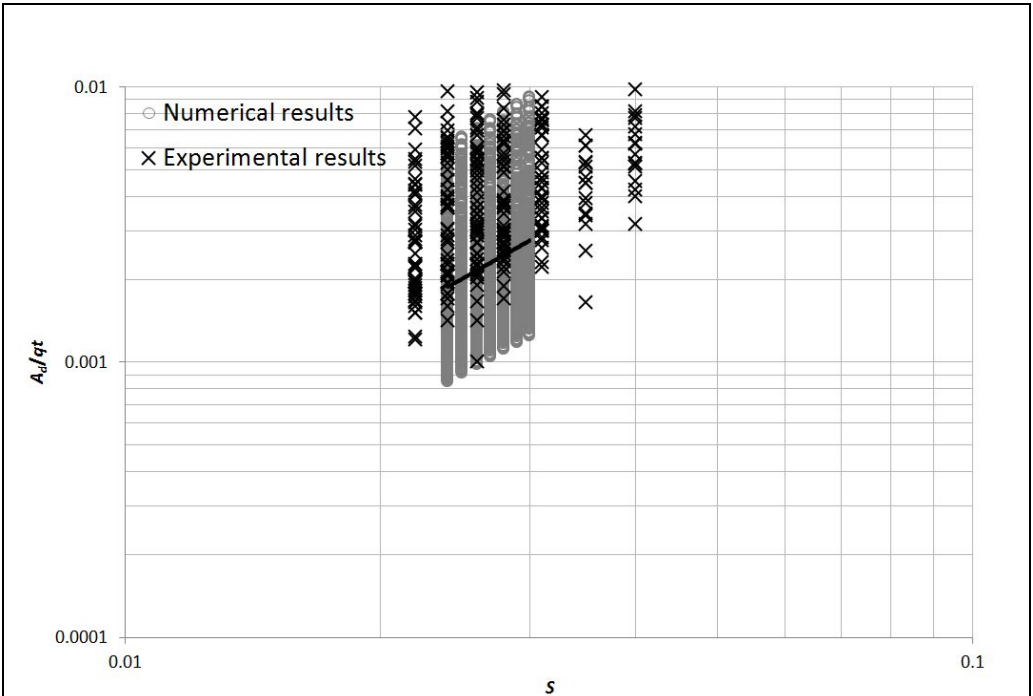


그림 4.1 퇴적량과 무차원변수와의 상관관계 (S)

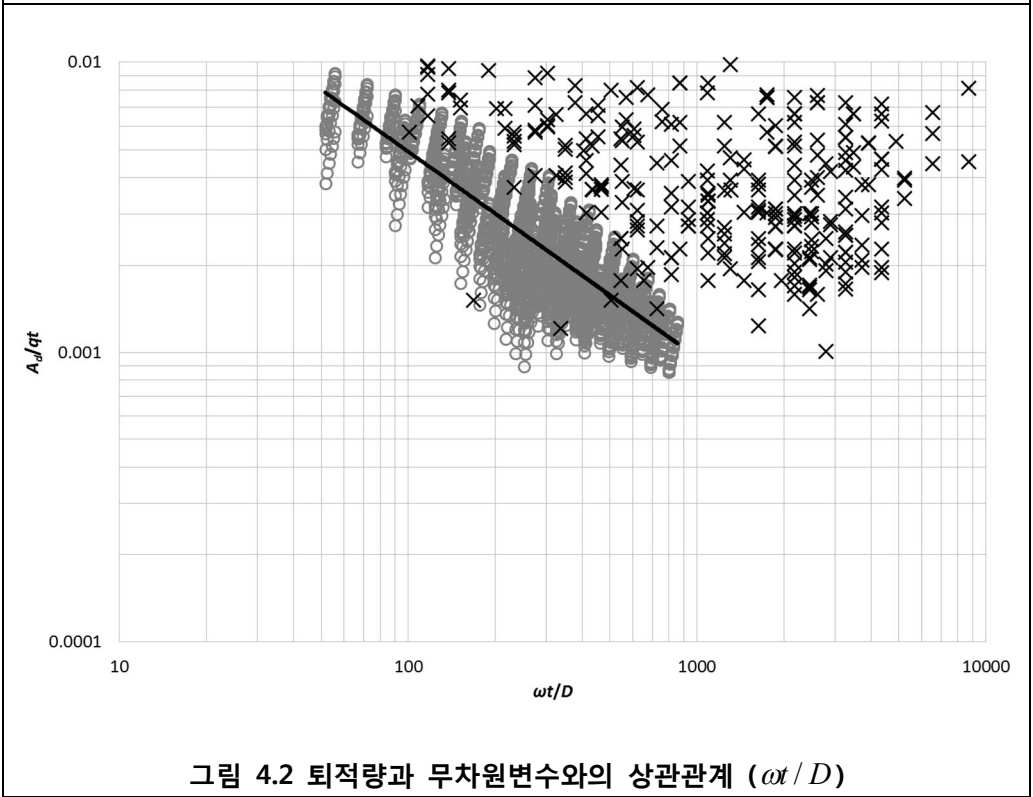


그림 4.2 퇴적량과 무차원변수와의 상관관계 ($\omega t/D$)

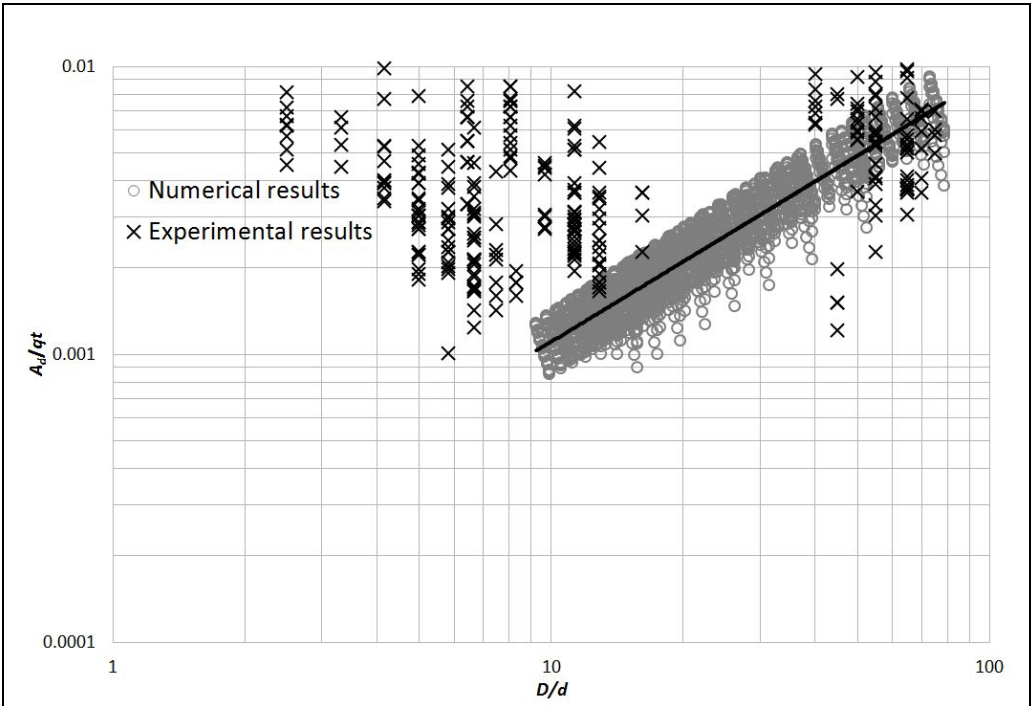


그림 4.3 퇴적량과 무차원변수와의 상관관계 (D/d)

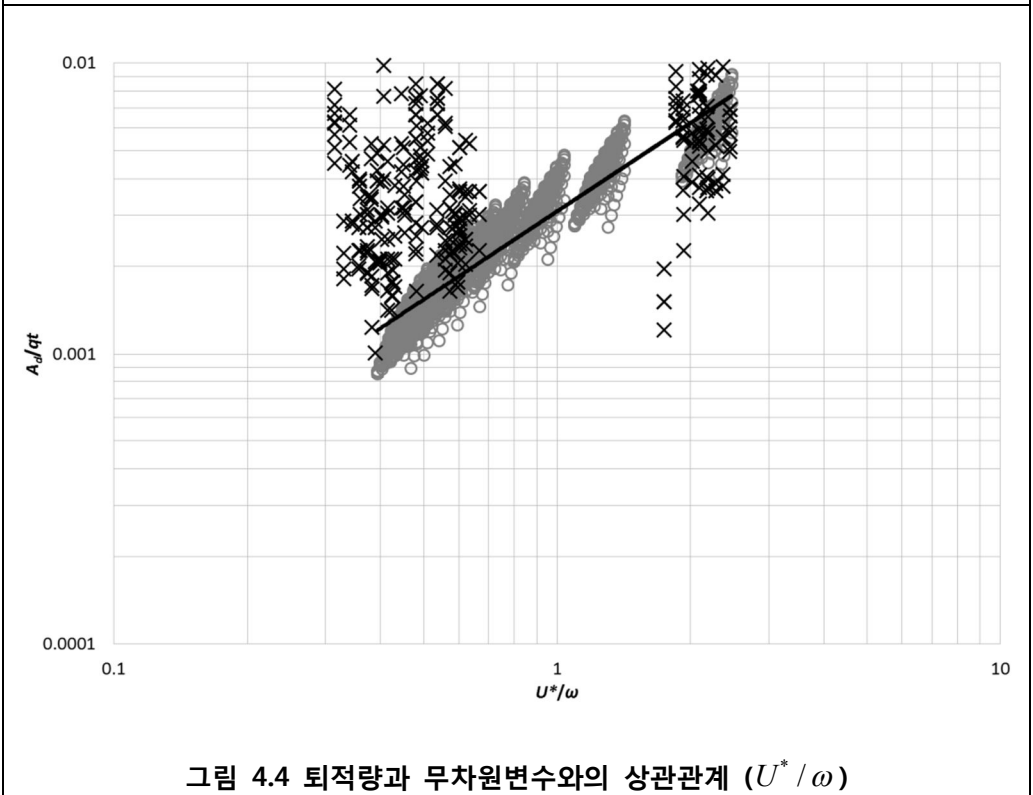


그림 4.4 퇴적량과 무차원변수와의 상관관계 (U^*/ω)

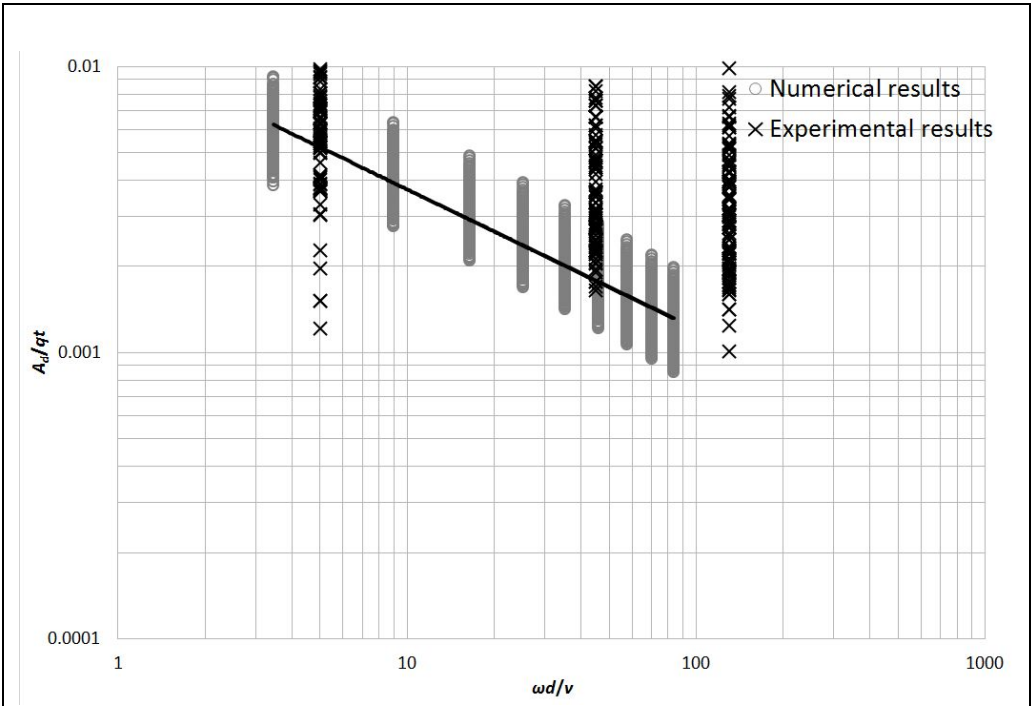


그림 4.5 퇴적량과 무차원변수와의 상관관계 ($\omega d/\nu$)

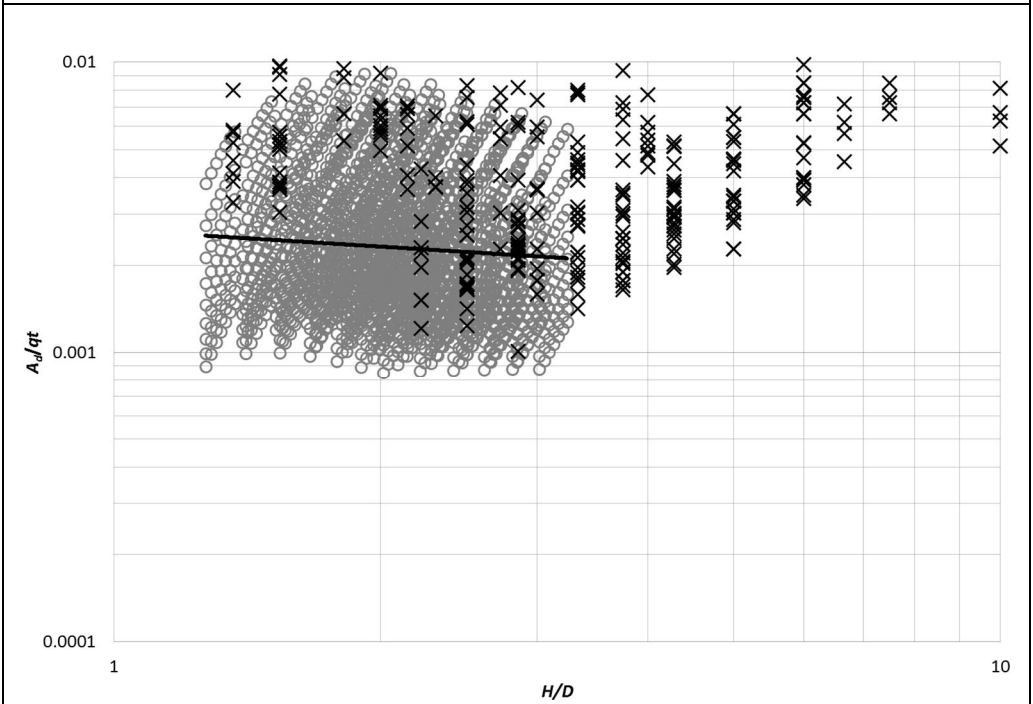


그림 4.6 퇴적량과 무차원변수와의 상관관계 (H/D)

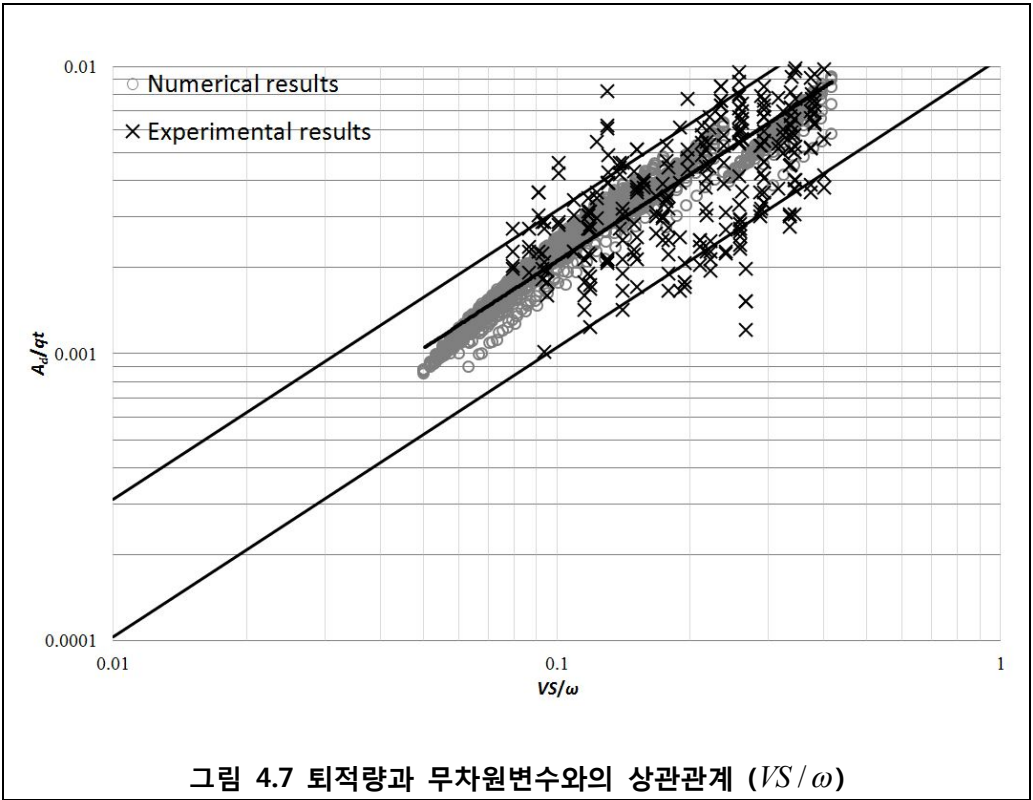


그림 4.7 퇴적량과 무차원변수와의 상관관계 (VS/ω)

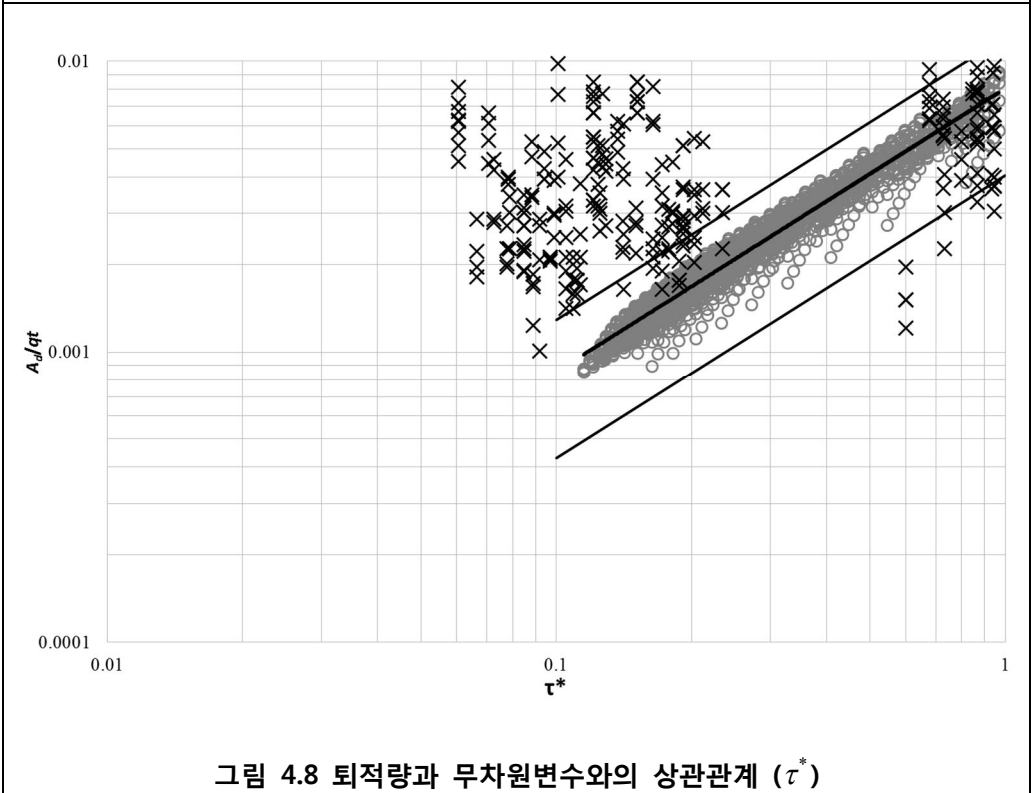


그림 4.8 퇴적량과 무차원변수와의 상관관계 (τ^*)

4.3 회귀식 유도

4.3.1 다중회귀분석 (Multiple Regression Analysis)

다중회귀분석은 하나의 종속변수에 독립변수가 2개 이상인 회귀모형에 대한 분석이다. 종속변수 Y 를 계산하는데 k 개의 설명변수인 X_1, X_2, \dots, X_k 를 도입할 때 다중회귀모형은 다음과 같이 정의된다.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_k X_{ik} + \varepsilon_i, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (4.4)$$

여기서 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ 는 추정되어야 할 회귀 계수들이며, ε_i 는 서로 독립이고 동일한 분포 $N(0, \sigma^2)$ 을 따르는 오차항이다. 위의 식에서 X_{ij} 는 j 번째 설명변수 X_j 의 i 번째 관측치를 나타낸다. 위의 회귀모형은 각 독립변수에 대한 1차항만을 포함하고 있는데 경우에 따라서는 2차항 이상의 고차항이나 교호작용(interaction)항이 모형에 다음과 같이 포함될 수도 있다(박예정 2008). 일반적인 다중회귀모형에서 회귀계수 β_1 은 모형에 포함되어 있는 모든 다른 독립변수들이 일정할 때 X_1 의 1단위 변화에 따른 Y 의 변화량을 의미한다(유성모 외 1인, 2006). 같은 방법으로 β_1 의 값은 모든 각각의 독립변수들이 일정할 때 X_2 의 1단위 변화에 따른 Y 의 변화량을 의미한다. 본 연구에서 비선형 다중회귀분석을 위해 수리모형 실험을 통해 계산한 데이터 $(X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ik}, Y_i)$ 를 이용하여 설정한 비선형 다중회귀모형,

$$Y = \beta_0 \times X_{i1}^{\beta_1} \times X_{i2}^{\beta_2} \quad (4.5)$$

에서 필요로 하는 가정은 다음과 같다.(김광수 등, 2012)

(1) 독립변수 $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ik}$ 는 고정된 상수이다.

(2) β_i ($i = 0, 1, 2, \dots, k$) 는 회귀계수(regression coefficients)로서 모수 추정에 의해 주어진 자료로부터 구한다(김광수 등, 1996).

4.3.2 경험식 유도

본 연구에서는 다기능보 설치로 인한 저수지 퇴적량을 예측하는데 이용할 수 있는 경험식을 개발하기 위하여 비선형 다중회귀분석식을 도입하였다. 수리모형 실험결과 288개 데이터를 경험식의 유도와 검증을 위한 2개의 세트로 분리하여 통계적 특성을 표 4.5에 수록하였다. 192개 실험결과 데이터를 이용하여 다중회귀분석식을 유도하였으며, 96개 실험결과 데이터를 통해 본 연구에서 개발한 경험식을 검증하였다. 유도된 경험식은 다음과 같다.

$$\frac{A_d}{qt} = 0.024 \left(\frac{VS}{\omega} \right)^{1.111} (\tau^*)^{0.049} \quad (4.6)$$

식 4.6에서, 상관계수(R, correlation coefficient)는 0.91, 표준오차(standard error)는 0.00071로 분석되었다.

표 4.5 기초 수리실험 매개변수

Parameter	Derivation Data Set			Verification Data Set		
	Range	Median	Quartile	Range	Median	Quartile
A_d / qt	0.0015-0.0142	0.0039	0.0025	0.0027-0.0085	0.0036	0.0028
VS / ω	0.08-0.40	0.2200	0.1307	0.14-0.34	0.2176	0.1720
τ^*	0.60-1.19	0.1225	0.0888	0.13-0.24	0.1681	0.1350

4.4 경험식 검증

288개의 실험결과 중 96개의 데이터와 중규모 수로에서 수립한 퇴적량 데이터를 이용하여 본 연구에서 유도한 경험식을 검증하였다. 기초 수리실험결과가 퇴적실험결과에 비해 높은 상관성을 갖는 것으로 분석되었다. 특히 그림 4.9에는 실제 수리모형 실험을 통해 예측한 퇴적량과 경험식 4.6을 통해 예측한 퇴적량의 불일치율을 보기 위하여 discrepancy ratio curve 개념을 도입하여 설명하였으며, 결정계수(R^2 , coefficient of determination)가 0.9096으로 일관성을 갖는 것으로 분석되었다.

또한 RMSE(root mean square error), MAE(mean absolute error), AGD(averaged geometric deviation) 개념을 도입하여 분석하였으며 각 과정은 다음과 같다.

$$RMSE = \left[\sum_{j=1}^J (Z_{cj} - Z_{mj})^2 / J \right]^{1/2} \quad (4.7)$$

$$MAE = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J |Z_{cj} - Z_{mj}| \quad (4.8)$$

$$AGD = \left[\prod_{j=1}^J R_j \right]^{1/J}, \quad R_j \begin{cases} Z_{cj} / Z_{mj} & \text{for } Z_{cj} \geq Z_{mj} \\ Z_{mj} / Z_{cj} & \text{for } Z_{mj} \leq Z_{cj} \end{cases} \quad (4.9)$$

여기서 Z_c 는 경험식으로 계산한 무차원 퇴적량, Z_m 은 수리모형 실험으로 예측한 무차원 퇴적량, J 는 실험 데이터의 수, R_j 는 특이 불일치율(special discrepancy ratio)으로, 검증 결과는 표 4.6에 표현되어 있으며 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient) 분석에 따라 강한 양적 상관관계를 갖는 것을 알 수 있다.

또한 그림 4.10에는 기초 수리실험 (검증 데이터)에 대한 불일치율, 그림 4.11에는 퇴적실험에 대한 불일치율을 그래프로 도시하였다.

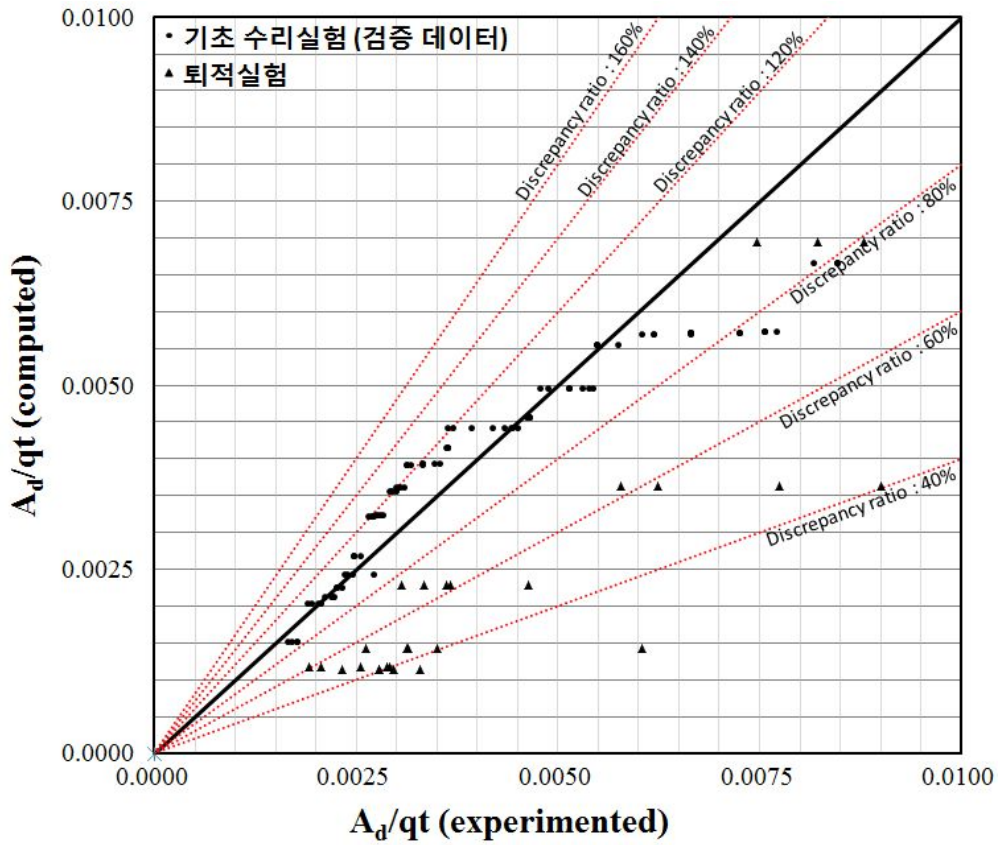


그림 4.9 경험식 검증을 위한 실측값과 예측값의 비교

표 4.6 실험결과에 대한 통계적 분석

Experimental Case	Data set	RMSE	MAE	AGD
Armfiled	96	0.0007	0.0005	1.0390
SNU Channel	30	0.0039	0.0026	1.1161

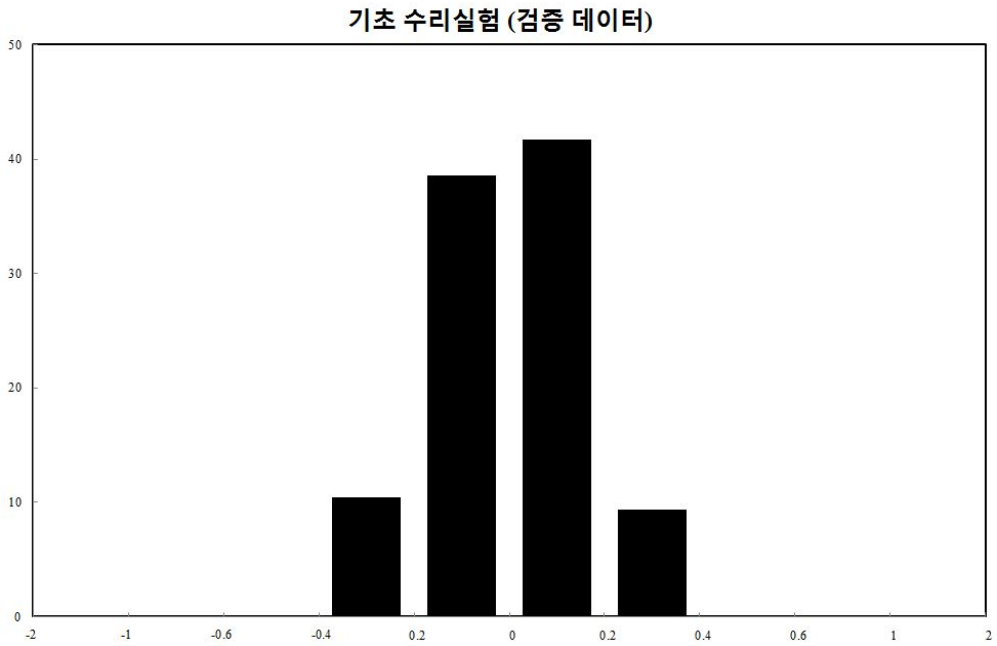


그림 4.10 기초 수리실험의 불일치율

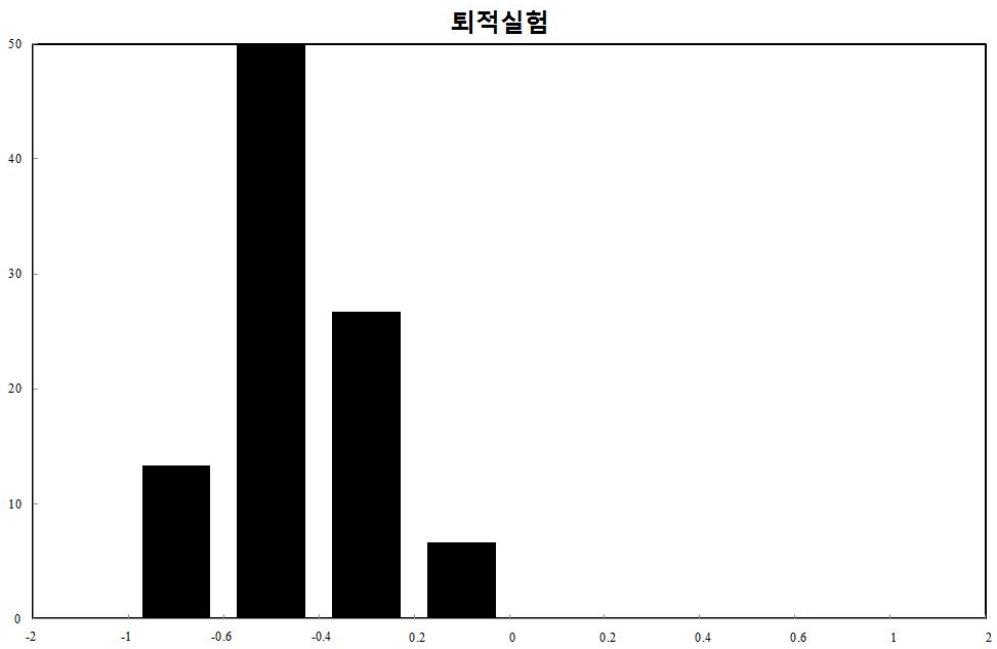


그림 4.11 퇴적실험의 불일치율

5. 결론

기초 수리실험을 통해 4대강 살리기 사업 이후 설치된 다기능보를 수로 하류단에 적용하여 연구를 수행하였다. 이를 토대로 저수지 삼각주 생성에 영향을 미치는 매개변수를 선정하여 이 중 가장 연관성이 높은 단위수류일률과 Shields 매개변수를 기반으로 다중회귀분석을 통해 퇴적량을 예측할 수 있는 경험식을 개발하였다. 또한 중규모 가변경사 유사수로에서 실제 자연하천의 흐름 및 유사이동 특성이 반영된 상사법칙을 적용시킨 실험을 수행하여 개발된 경험식에 적용시켜 추가적인 검증은 하였다.

본 연구의 목적은 퇴적량을 예측하는 경험식 개발과 이를 이용하여 실제 자연하천의 연간 퇴적량을 산정하여 다기능보 운영 및 관리에 활용하는 2가지로 구성되어있다. 기초 수리실험에서는 다소 소규모의 수리모형 실험시설을 이용하여 유사입경, 유량, 하류단 수심, 하상경사 등 다양한 조건의 실험을 수행하여 경험식을 개발하였다. validation과 derivation을 위해 2 set으로 분류하여 통계적인 분석을 한 결과, 불일치율(discrepancy ratio)과 RMSE, MAE, AGD의 오차범위가 크지 않은 것으로 분석되었다.

두 번째 목적인 자연하천의 적용을 위해 중규모의 수로에 수리모형 상사법칙이 적용된 실험을 수행하였다. 실험조건은 유입유사량이 고려된 SMI 시리즈와 유입유사량을 배제한 SMO 시리즈로 수립되었으며, SMO 시리즈의 경우 기초 수리실험에서 개발한 경험식으로 예측한 퇴적량과 10%내외의 오차율로 정확성을 갖는 것으로 분석되었다.

다기능보 설치로 인해 발생하는 저수지 삼각주는 크게 유사입경, 하상경사, 유량, 하류단 수심 등 4가지 조건에 의해 영향을 받는 것으로 확인되었다. 특히 하상경사의 경우 0.1% 증가에 따라 약 12%의 퇴적량 증가 추세를 보였으며 이는 실험결과와 경험식을 이용한 퇴적량 예측에서 모두 확인되었다. 하상경사가 0.8%인 경우 배수위가 관측되지 않았지만, 1.4%에서는 약 4.2 m의 길이로 배수위가 생성되는 양상을 보였으며

하상경사가 2.0 %로 증가함에 따라 약 2.6 m 감소하는 경향을 보였다. 하지만 수로의 바닥면과 거의 나란히 경사를 유지하던 수심이 배수위 구간을 만나면서 급격하게 경사가 거의 0도에 가깝게 감소함에 따라 흐름이 급격하게 감소하여 퇴적이 발생하는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서는 저수지 삼각주 생성 유사퇴적 양상을 알아봤다. 특히 다기능보의 관리수위 유지로 인해 다양한 수심이 확보되는 실험조건인 경우 관리수위에 따라 퇴적양상이 서로 상이하게 측정되었으며 저수 용량과 홍수위 저하 등의 다기능보 초기의 설치 목적 달성을 위해 추가적인 연구가 필요함을 알 수 있었다. 흐름에 따라 하상 변화가 발생하는 자연하천에서 하상경사와 유량에 따라 변화하는 마찰유속, Shields parameter, 단위수류일률은 저수지 삼각주의 변화를 잘 표현해주고 있음을 볼 수 있었다.

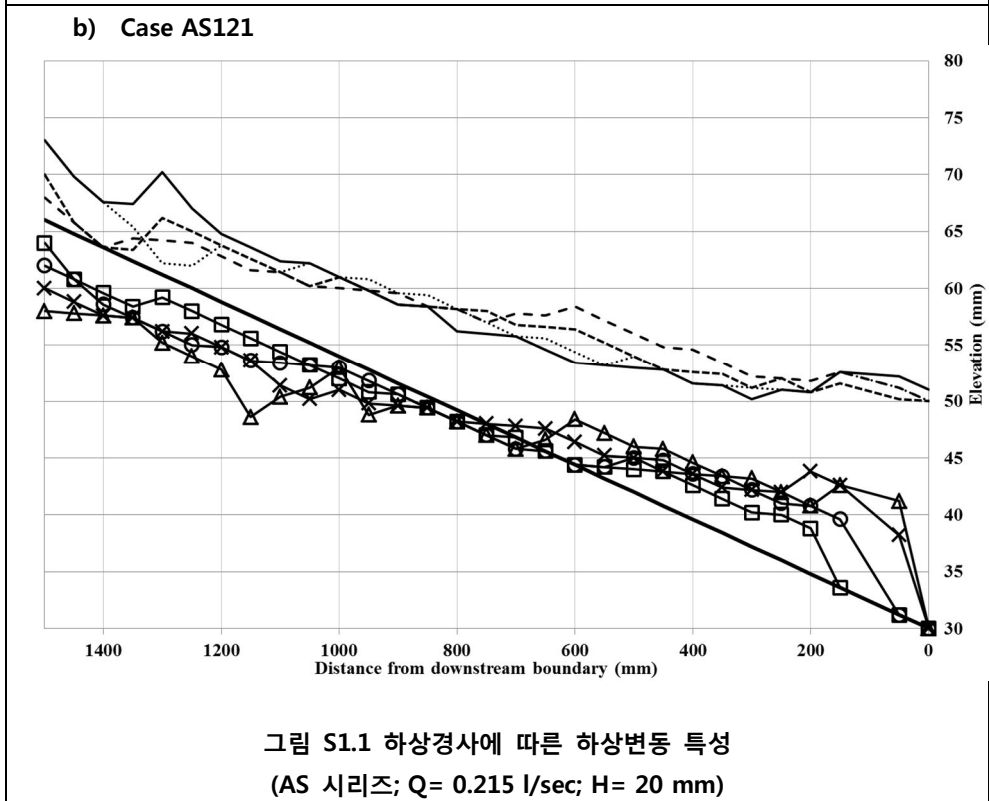
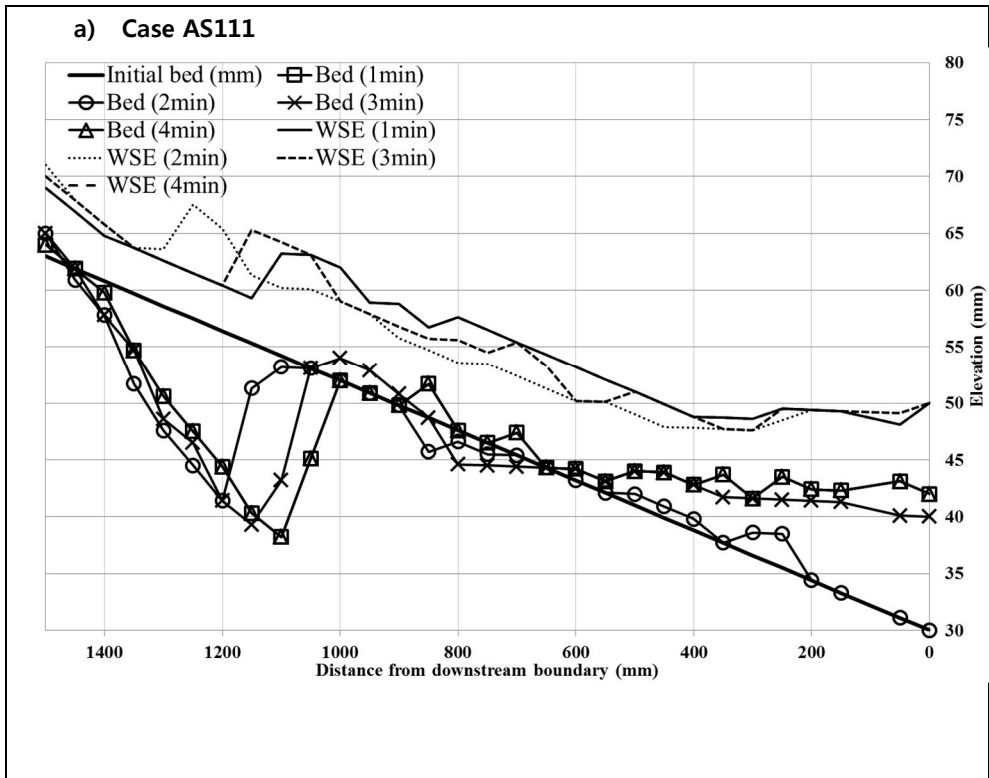
개발된 경험식을 이용하여 퇴적실험의 퇴적량을 예측한 결과 기초 수리실험에 비해 퇴적량이 다소 적게 예측되는 경향이 있었다. 이는 중규모 수로에 대해서도 유량, 유사입경, 하류단 수심 변화에 대한 추가적인 실험을 통해 개선해나가야 할 방향이라고 볼 수 있다.

본 연구를 통해 개발된 경험식은 향후 두 가지 방향으로 활용될 수 있다. 첫 번째로는 앞으로 국내외 저수지에 건설되는 다기능보 및 댐에 있어서 사전에 단기 및 장기에 대한 퇴적량을 예측하여 저수용량과 퇴적토사 관리방안 등을 모색하는 것이다. 이는 하천 구조물 건설에 필요한 제반사항, 규모, 관련 부속 구조물에 대한 필요성, 수요도에 대한 정보도 제공할 수 있다. 특히 장기간의 연구나 현장실측 과정 없이 퇴적량을 예측한 결과값으로 대체할 수 있어 저수지 삼각주의 퇴적과 이를 관리하기 위한 배사에 활용할 수 있는 가능성을 제시할 수 있다.

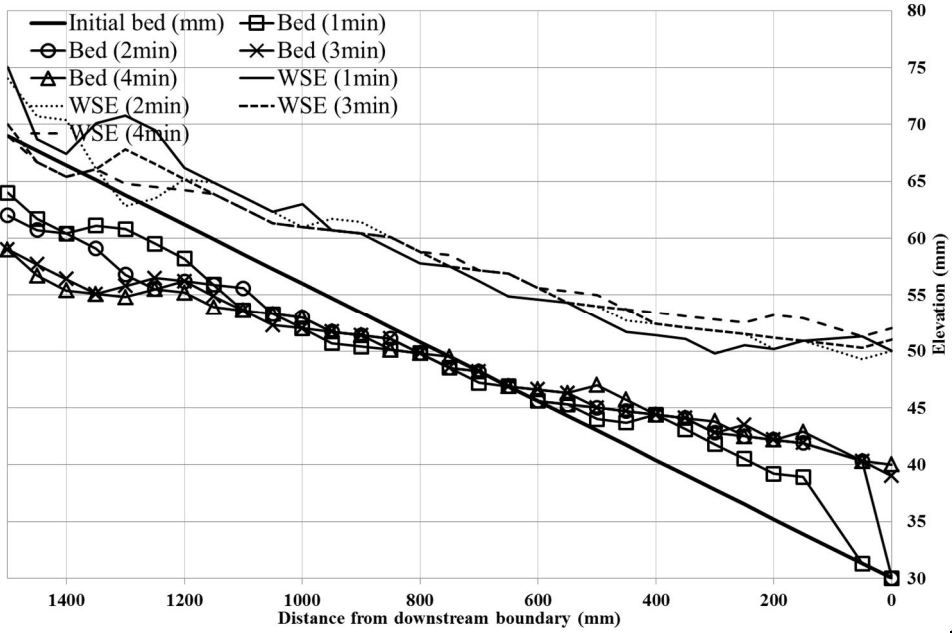
두 번째로는 본 연구에서 적용된 수리모형 상사법칙이 향후 장기간 퇴적 및 배사 관리방안 연구를 위한 수리모형 실험조건에 기여할 수 있다는 점이다. 고정상 모형과 다르게 상사법칙 만족이 까다로운 이동상 실험에 대해 본 논문에서 서술한 방식을 이용하면 보다 수월하게 상사성을 보장할 수 있는 것으로 보여진다.

부록 (Supplement)

S1. 하상경사에 따른 하상변동 특성



c) Case AS131



d) Case AS141

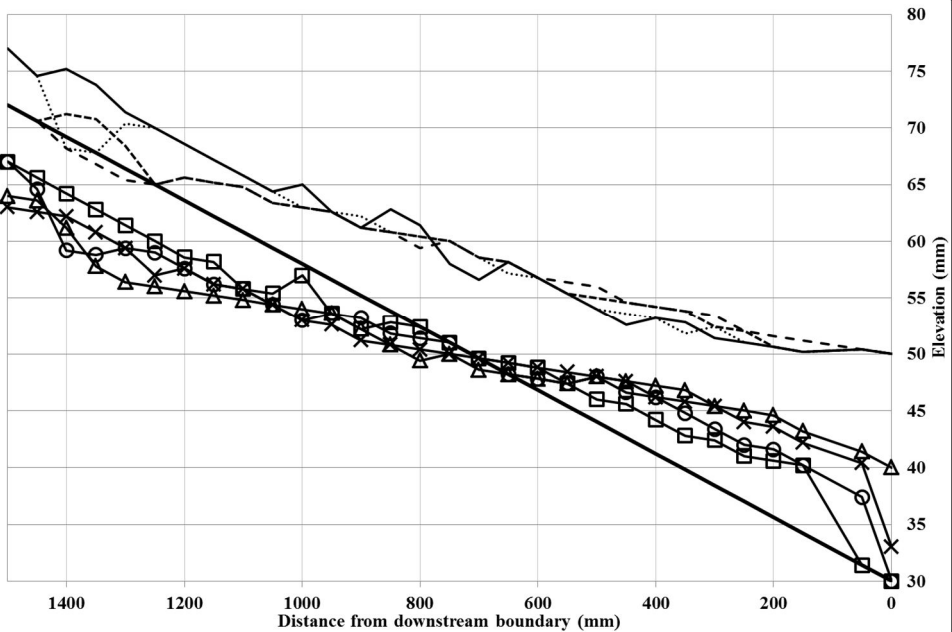


그림 S1.1 하상경사에 따른 하상변동 특성
(AS 시리즈; $Q = 0.215$ l/sec; $H = 20$ mm, 계속)

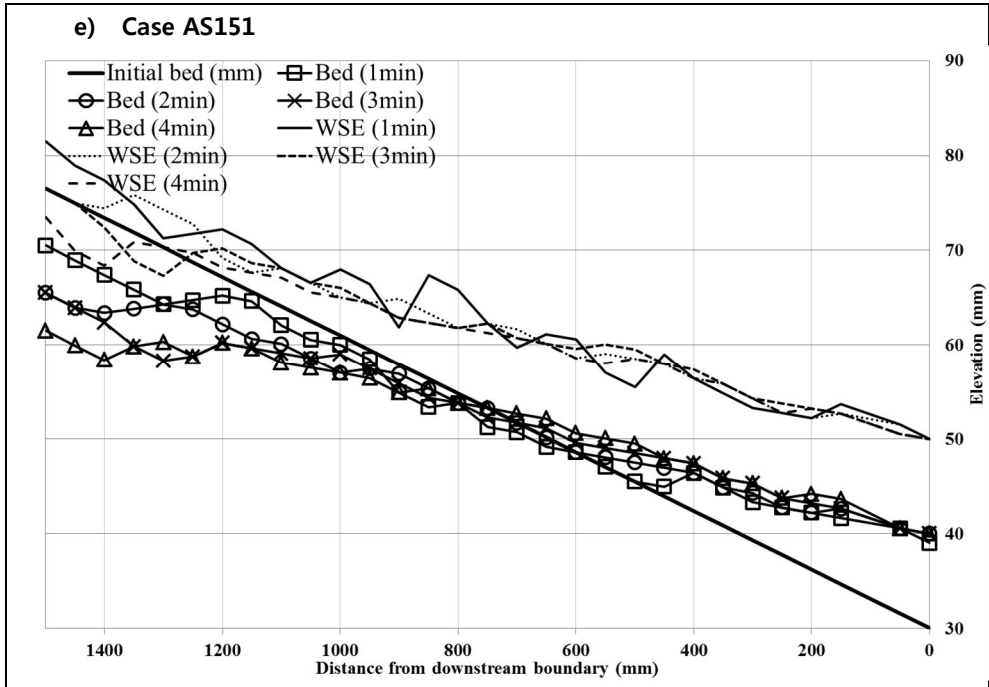


그림 S1.1 하상경사에 따른 하상변동 특성
(AS 시리즈; $Q = 0.215$ l/sec; $H = 20$ mm, 계속)

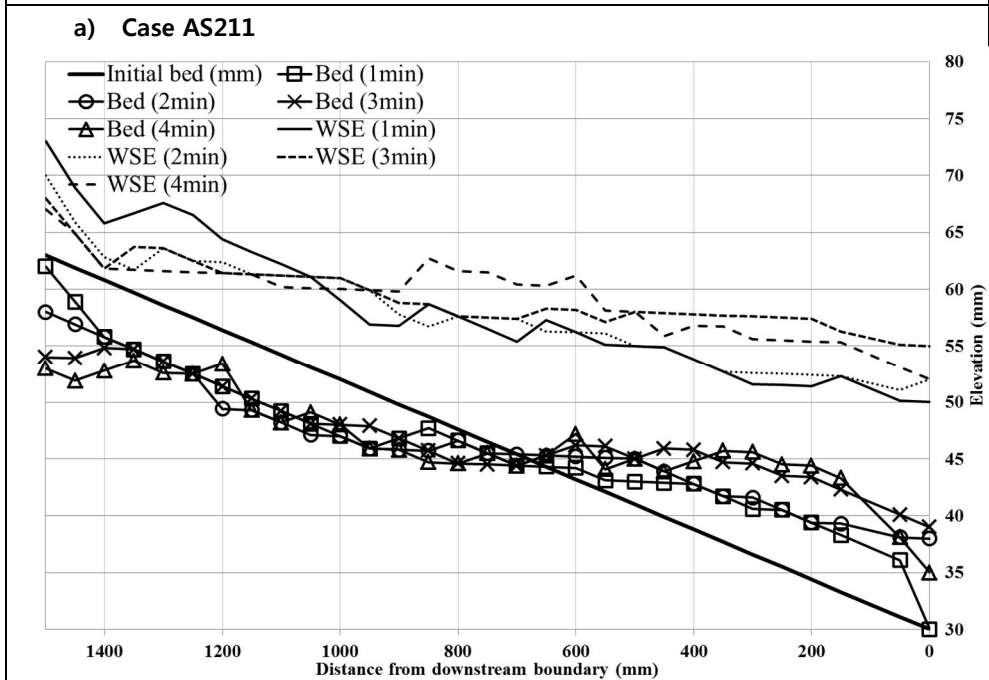
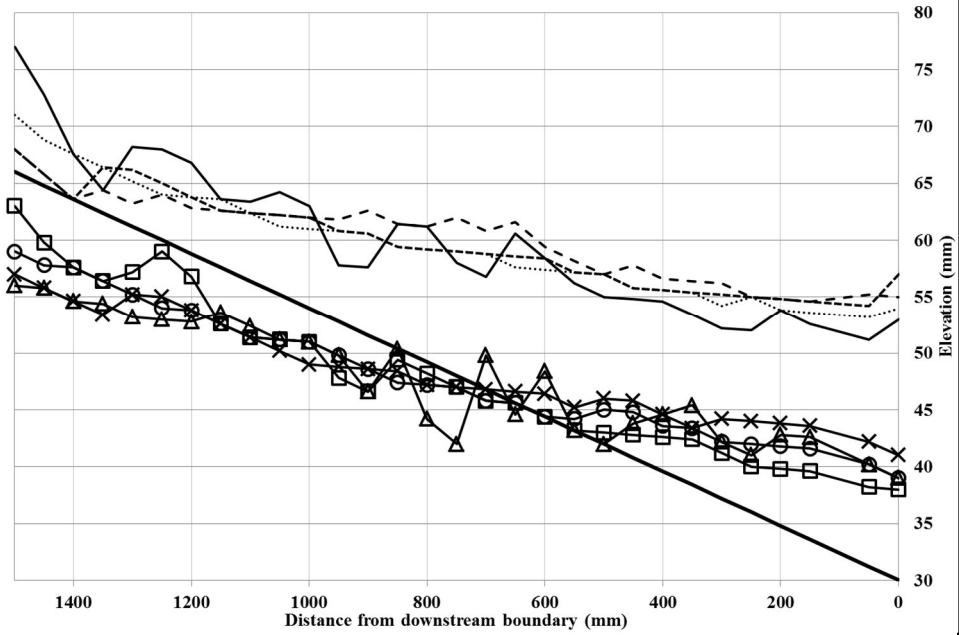


그림 S1.2 하상경사에 따른 하상변동 특성
(AS 시리즈; $Q = 0.368$ l/sec; $H = 20$ mm)

b) Case AS221



c) Case AS231

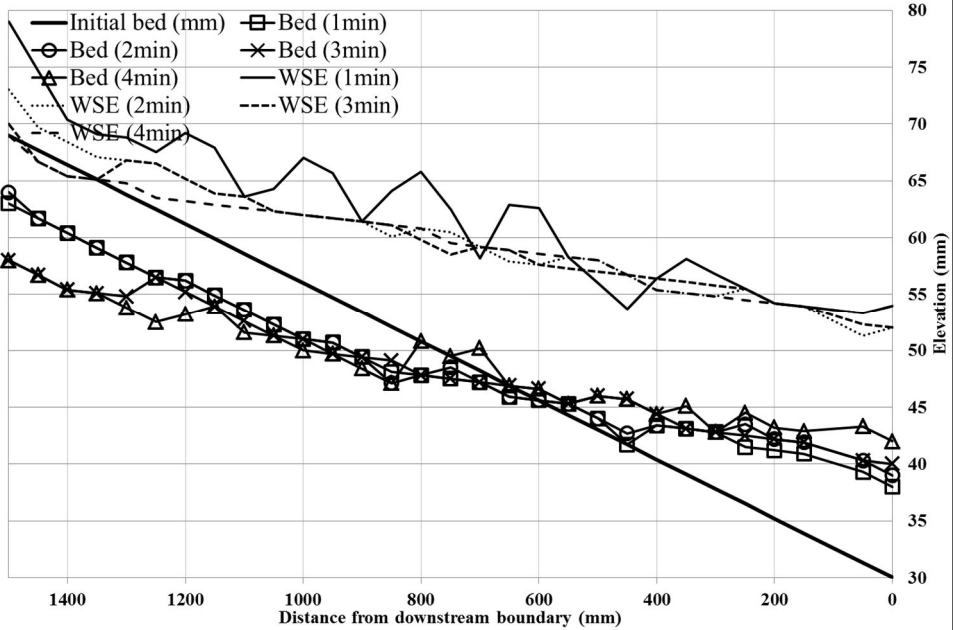
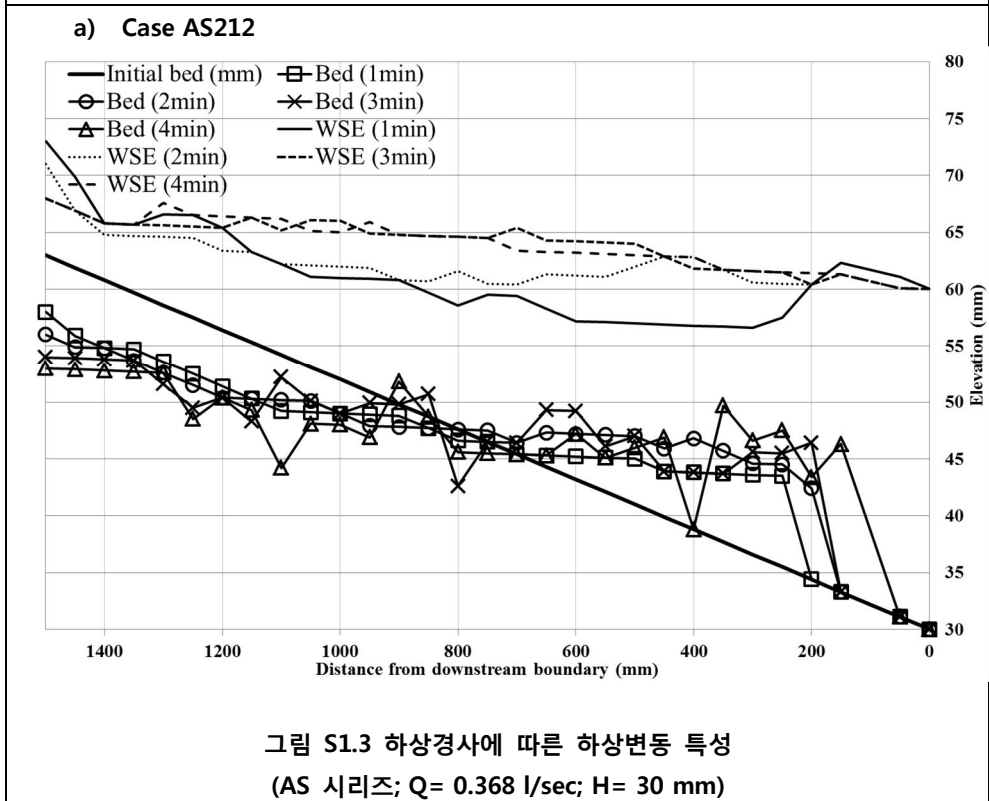
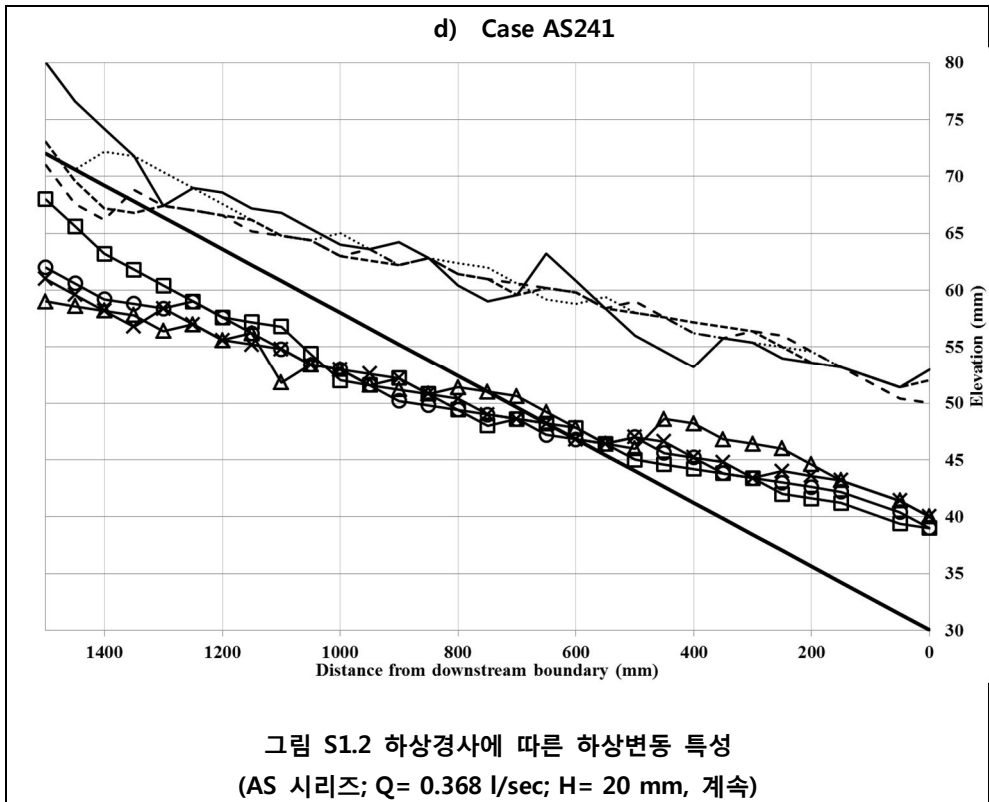
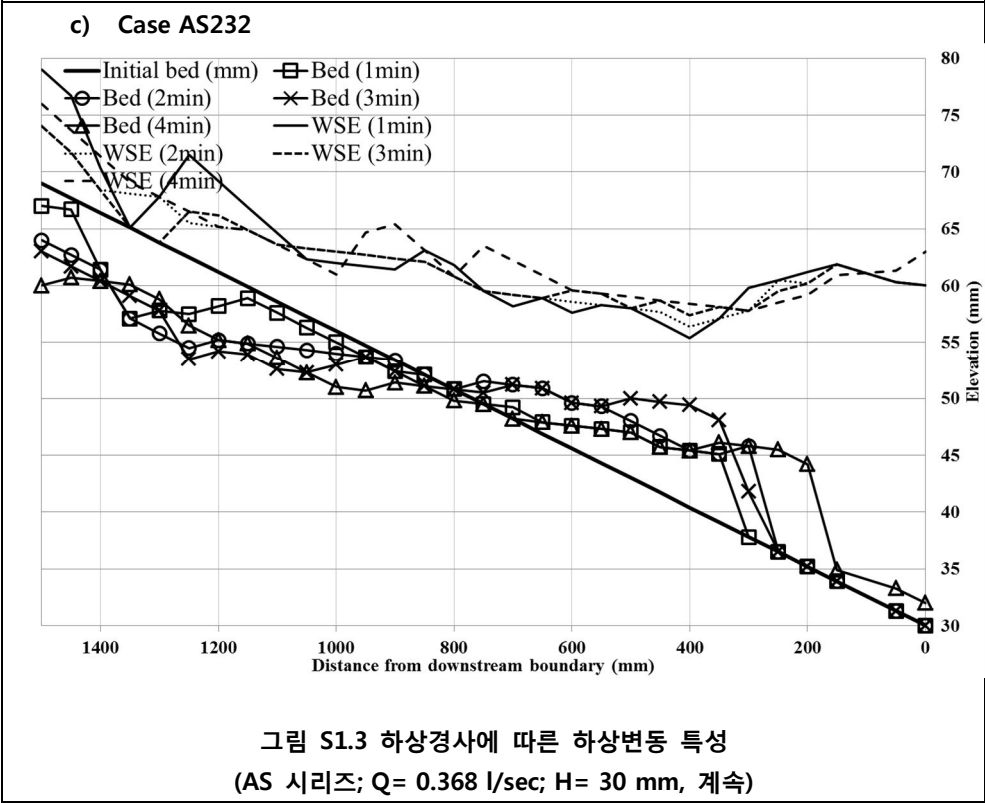
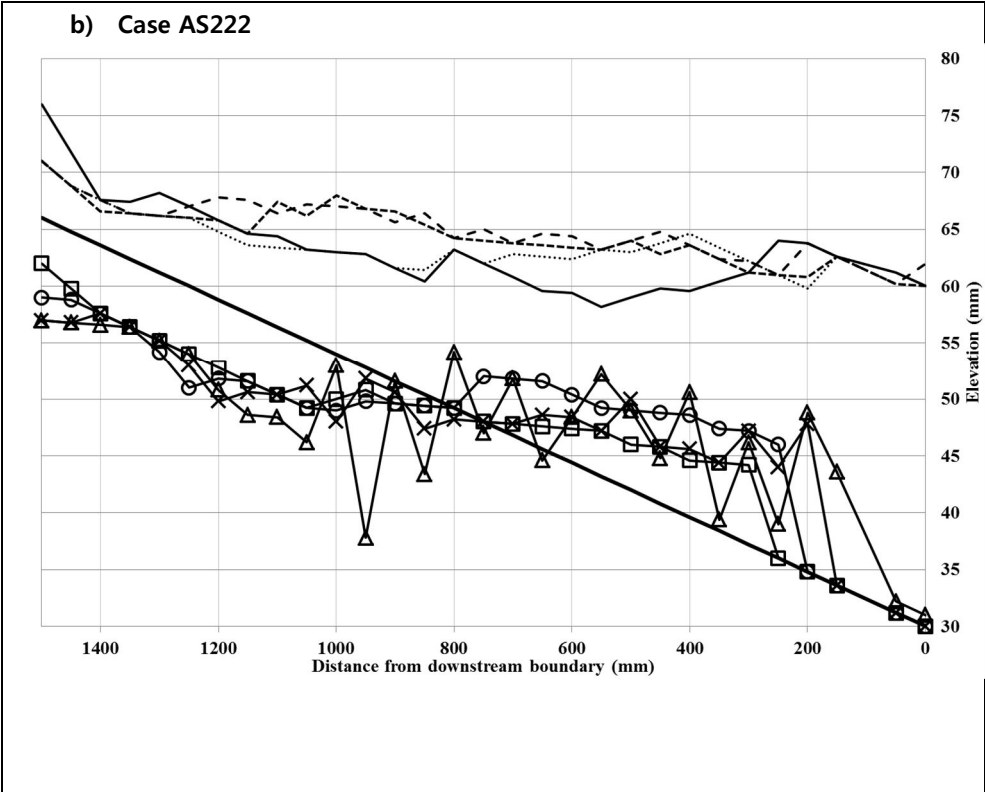
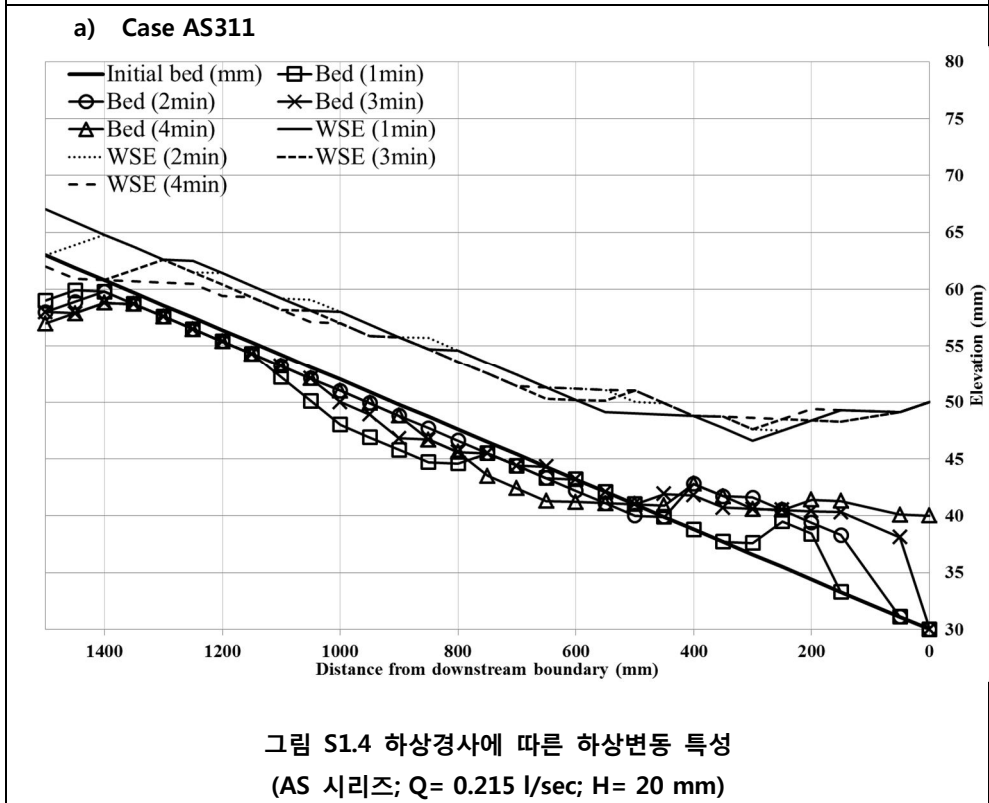
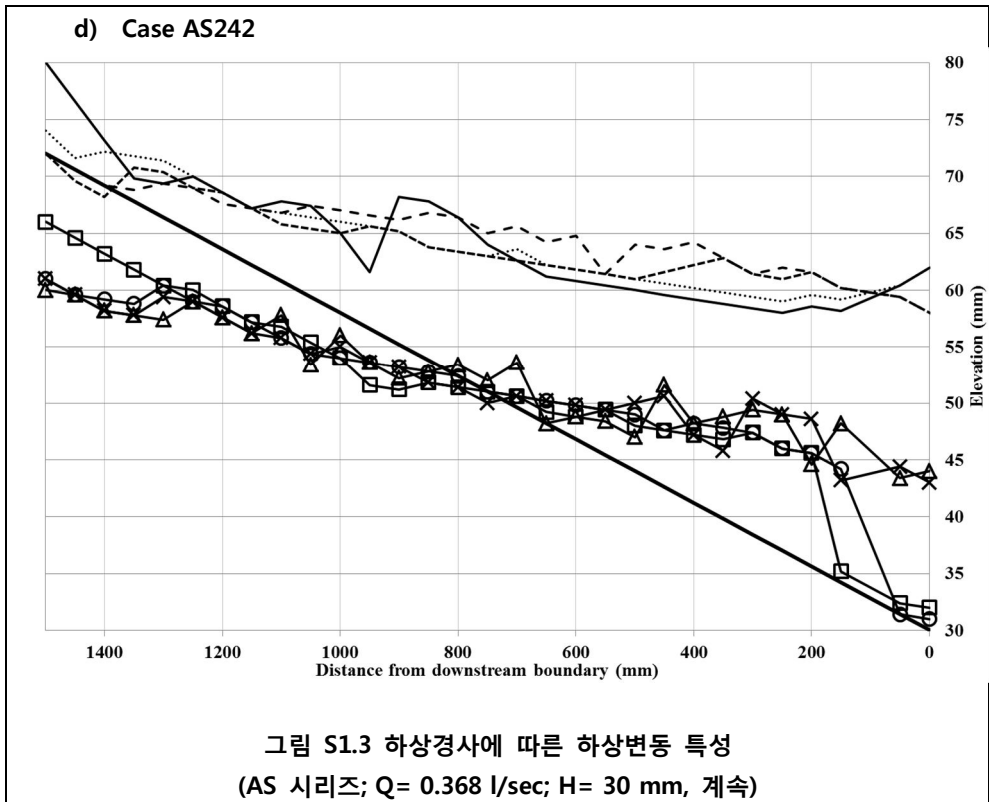


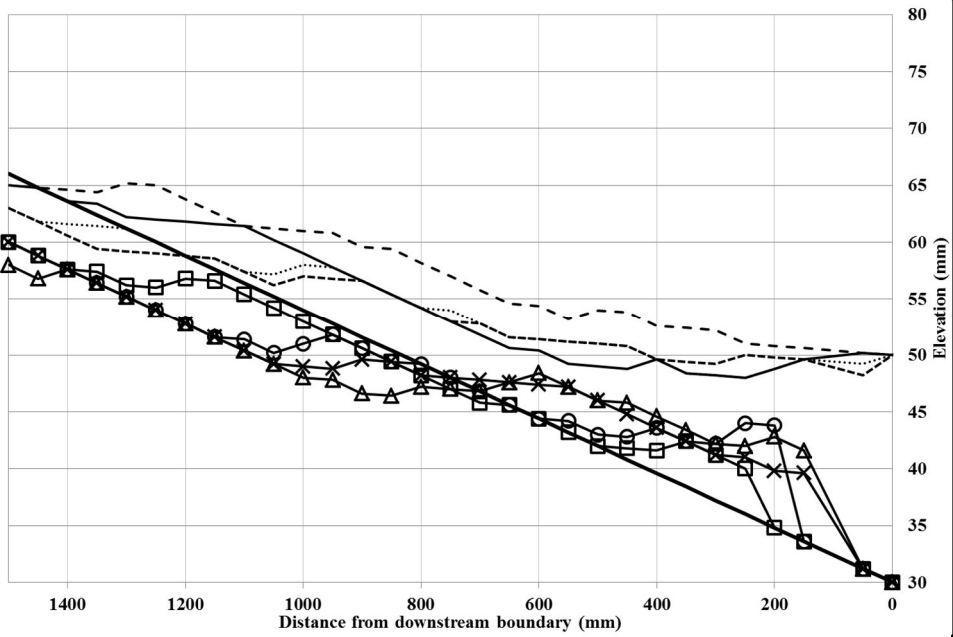
그림 S1.2 하상경사에 따른 하상변동 특성
(AS 시리즈; $Q = 0.368$ l/sec; $H = 20$ mm)







b) Case AS321



c) Case AS331

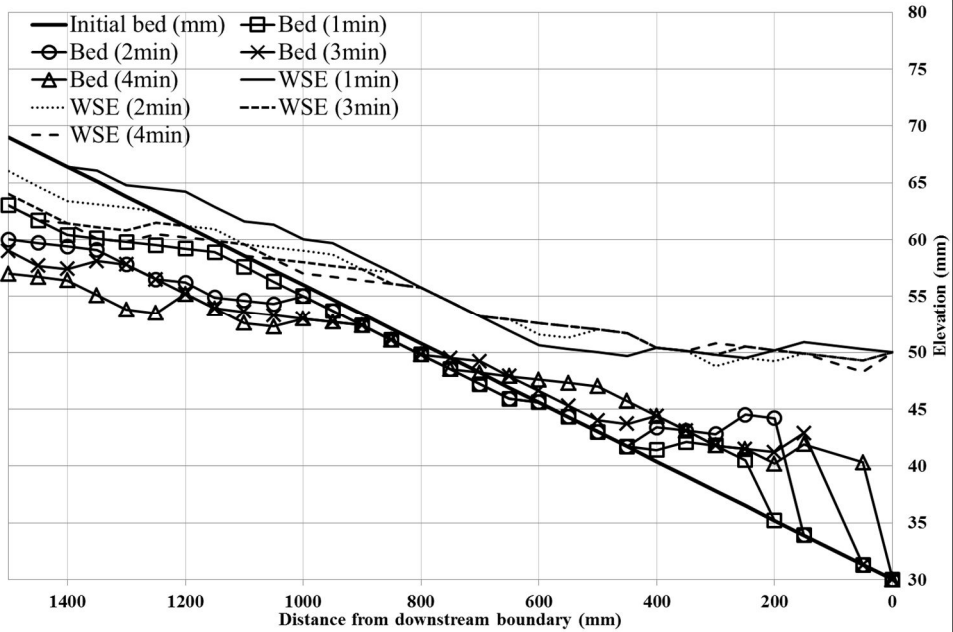
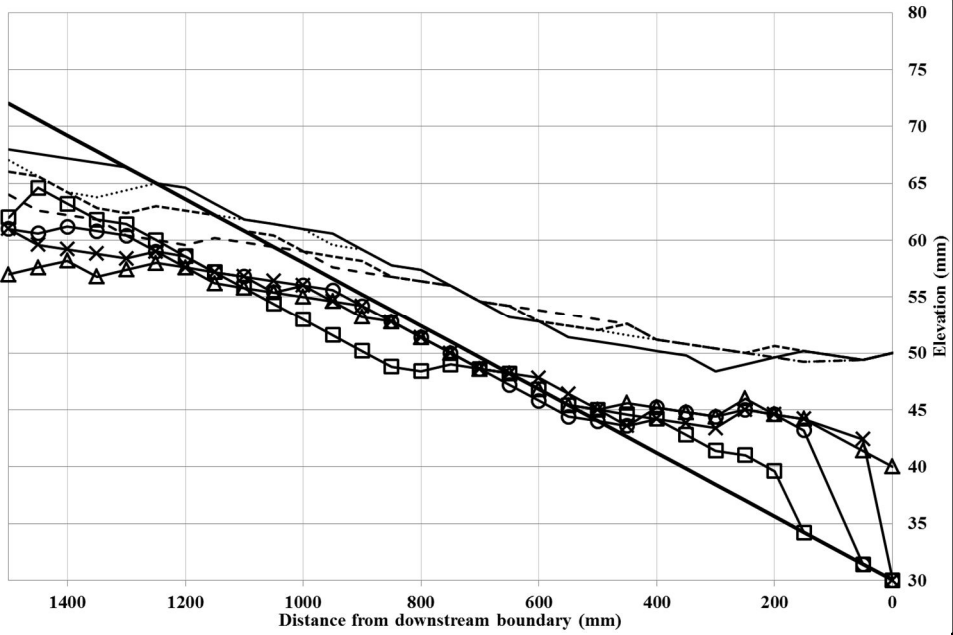


그림 S1.4 하상경사에 따른 하상변동 특성
(AS 시리즈; $Q = 0.215$ l/sec; $H = 20$ mm, 계속)

d) Case AS341



e) Case AS351

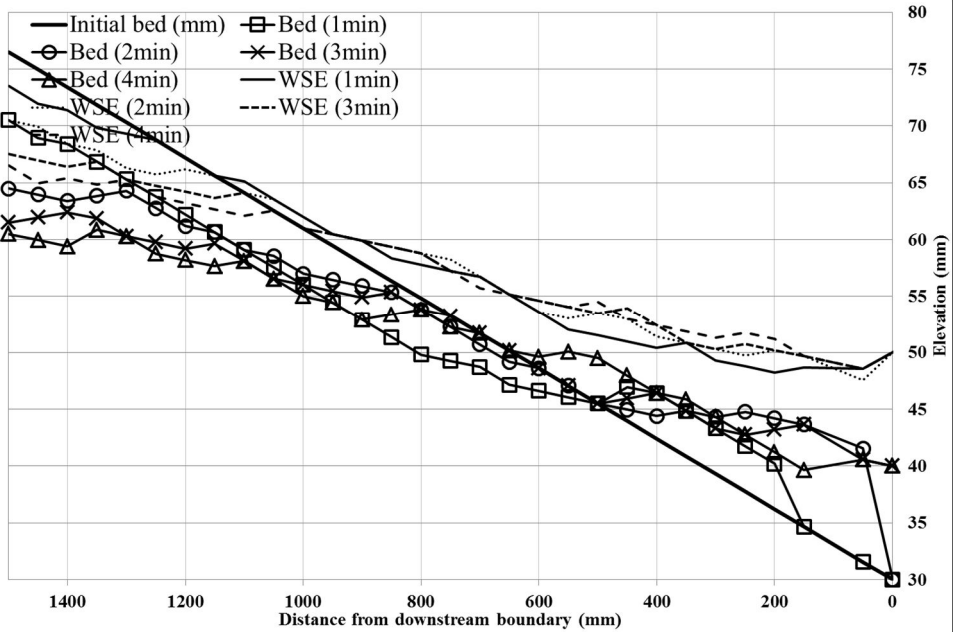
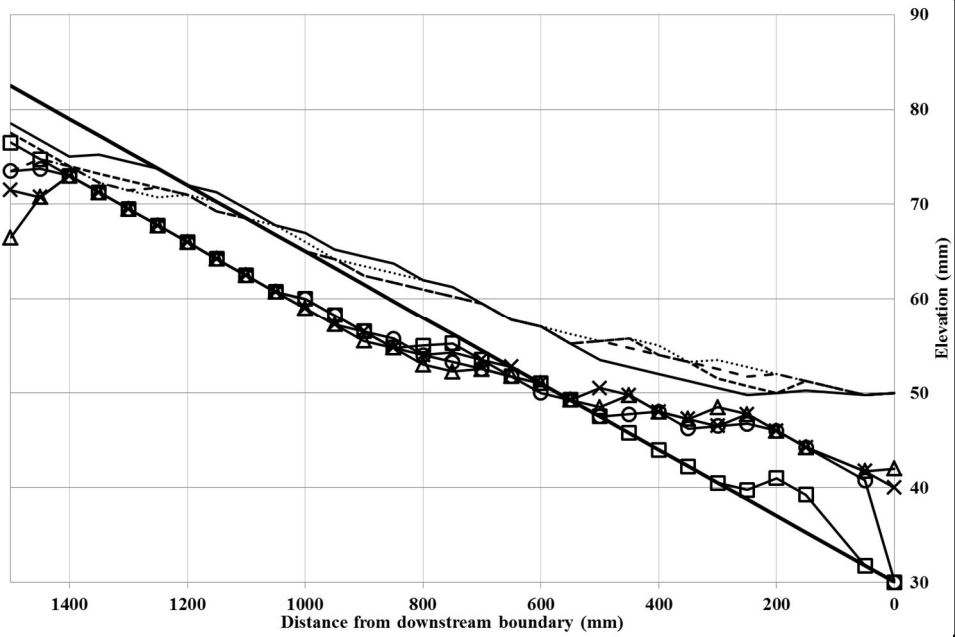


그림 S1.4 하상경사에 따른 하상변동 특성
(AS 시리즈; $Q = 0.215$ l/sec; $H = 20$ mm, 계속)

f) Case AS361



g) Case AS371

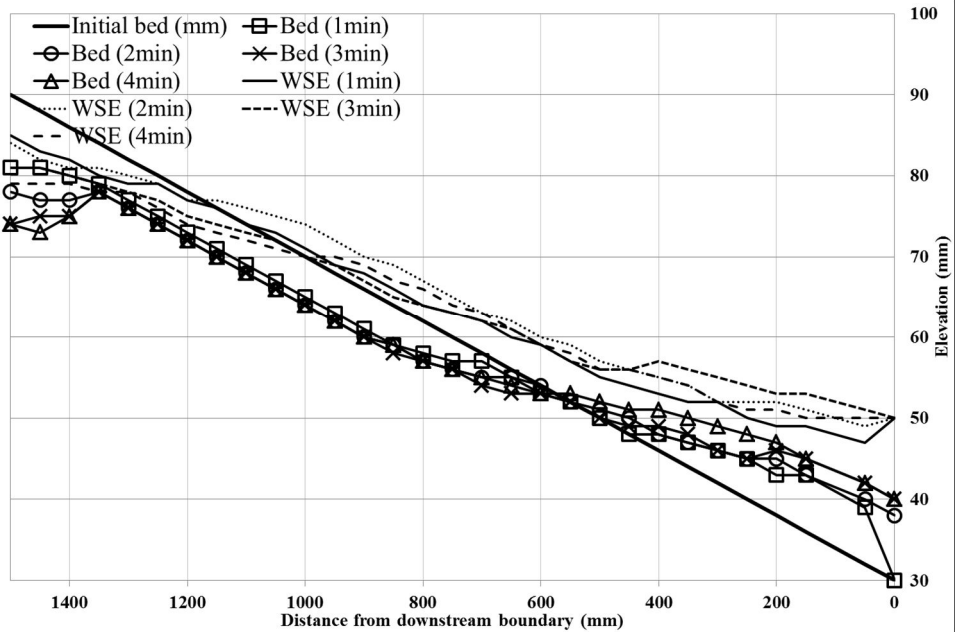
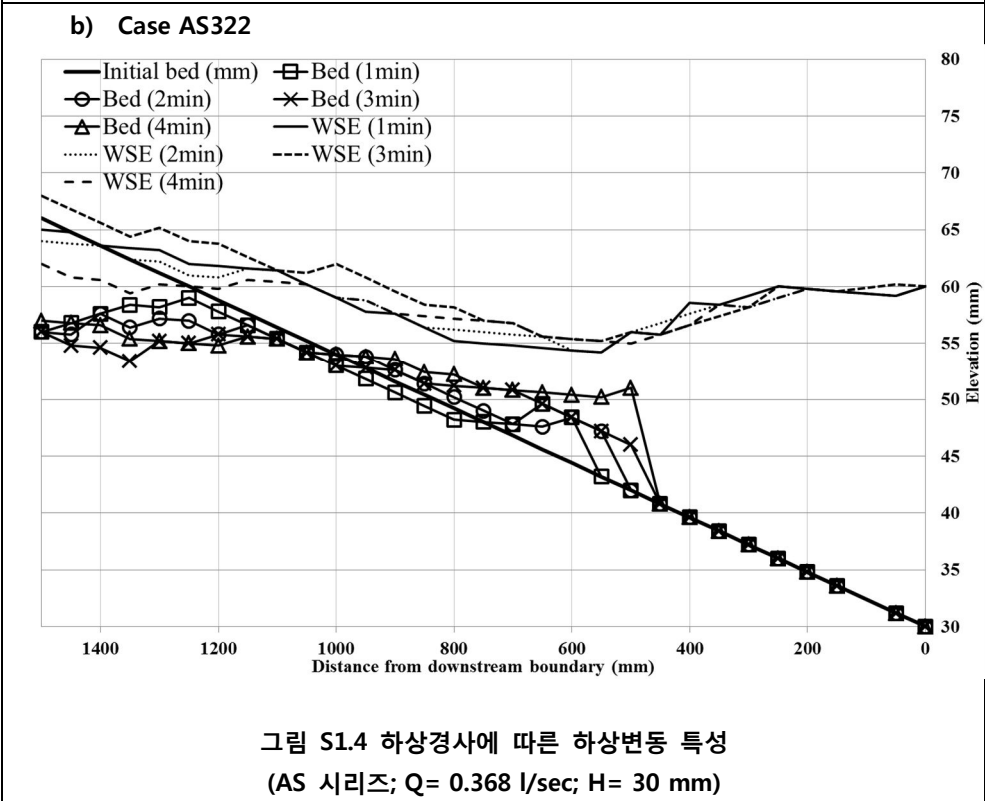
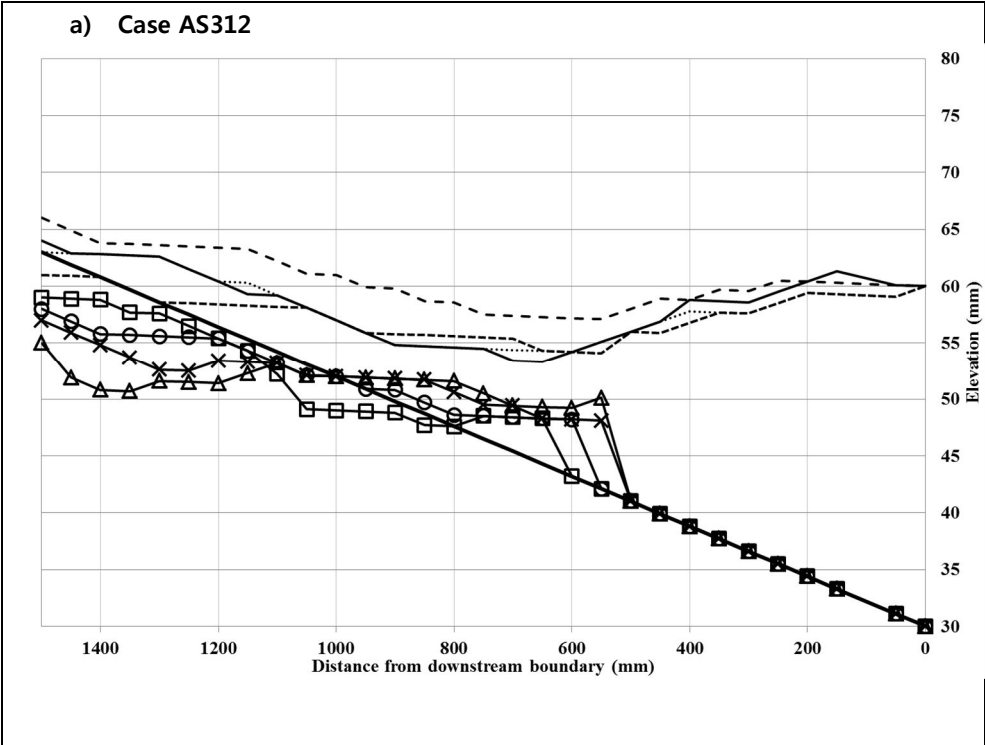
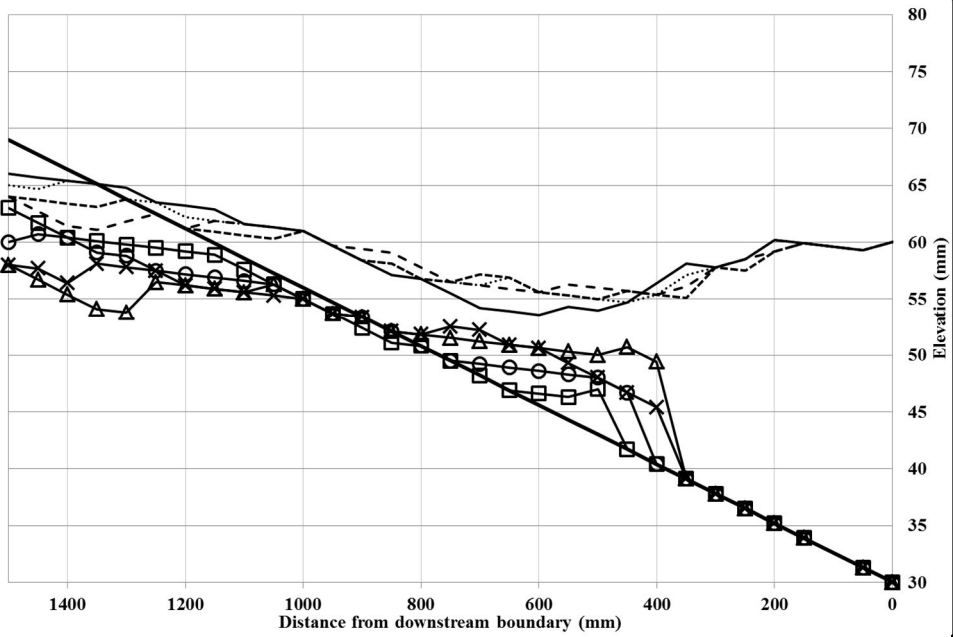


그림 S1.4 하상경사에 따른 하상변동 특성
(AS 시리즈; $Q = 0.215$ l/sec; $H = 20$ mm, 계속)



c) Case AS332



d) Case AS342

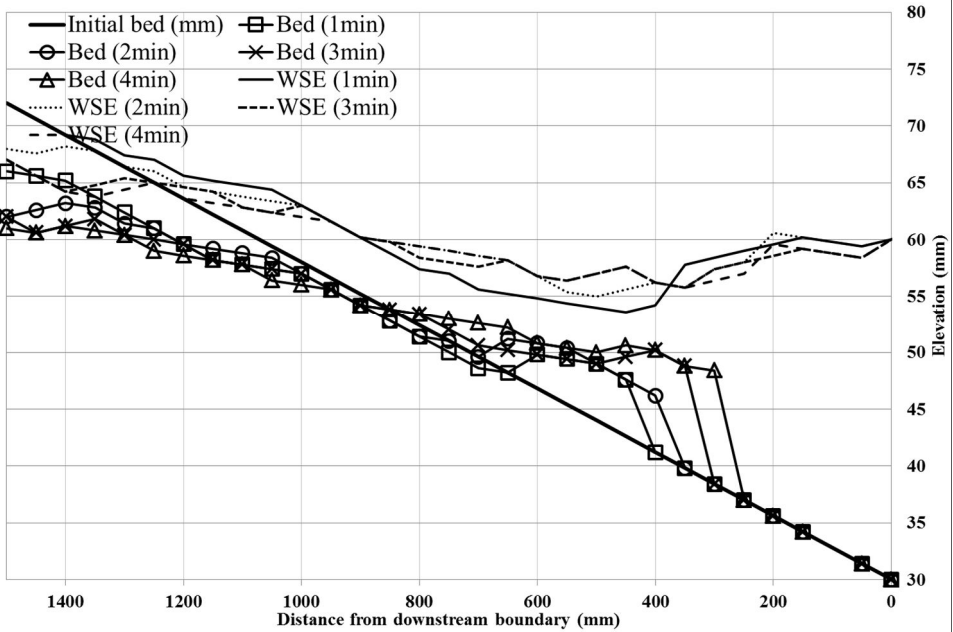
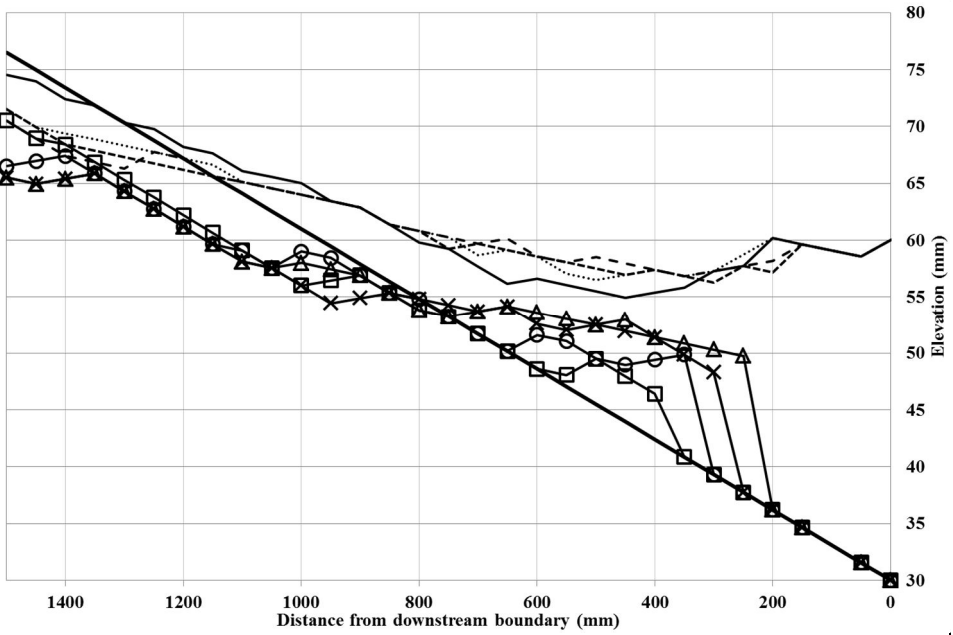


그림 S1.4 하상경사에 따른 하상변동 특성
(AS 시리즈; $Q = 0.368$ l/sec; $H = 30$ mm, 계속)

e) Case AS352



f) Case AS362

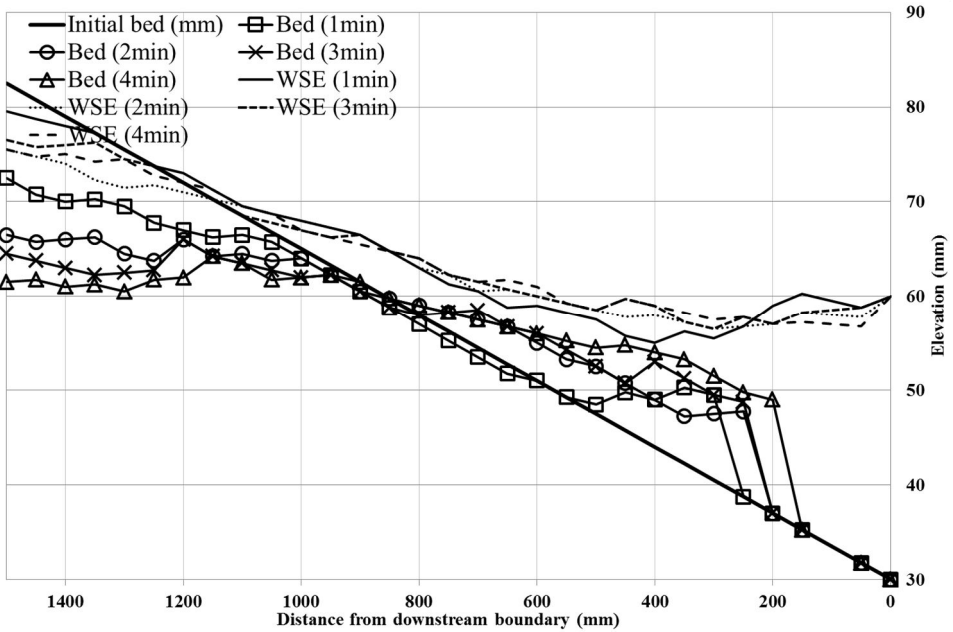


그림 S1.4 하상경사에 따른 하상변동 특성
(AS 시리즈; $Q = 0.368$ l/sec; $H = 30$ mm, 계속)

g) Case AS372

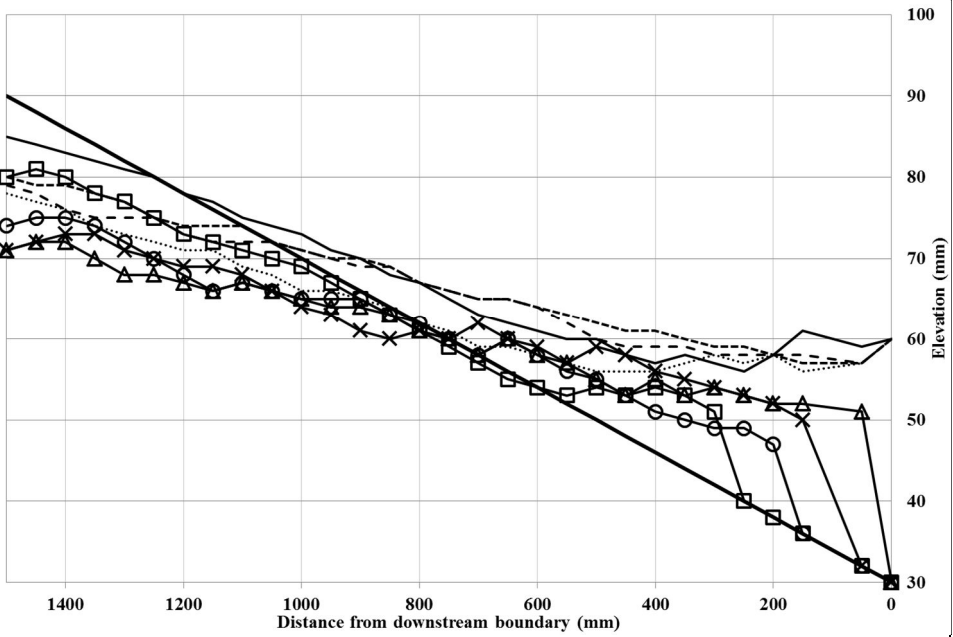


그림 S1.4 하상경사에 따른 하상변동 특성
(AS 시리즈; $Q = 0.368$ l/sec; $H = 30$ mm, 계속)

a) Case AS411

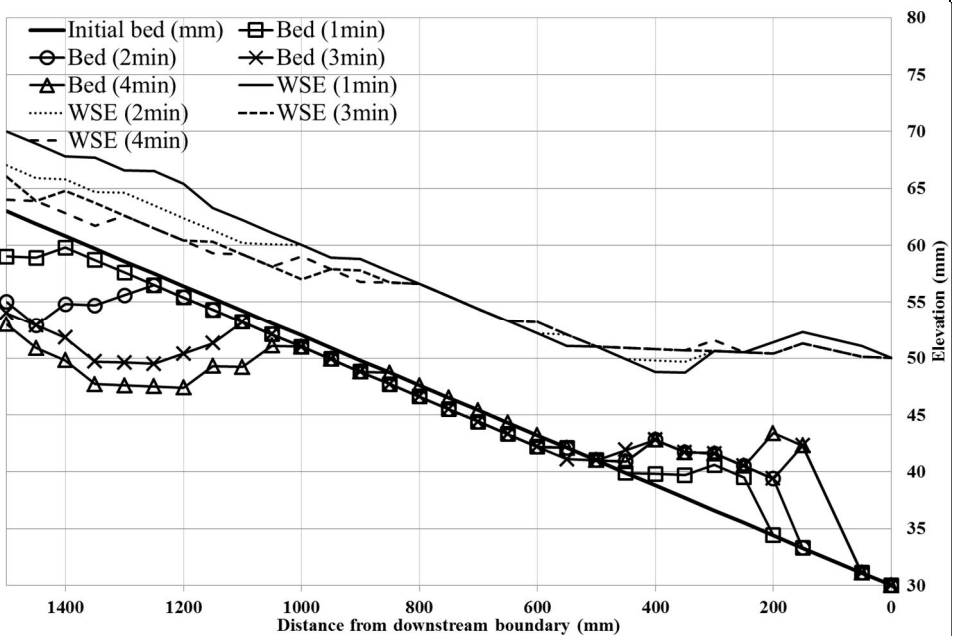
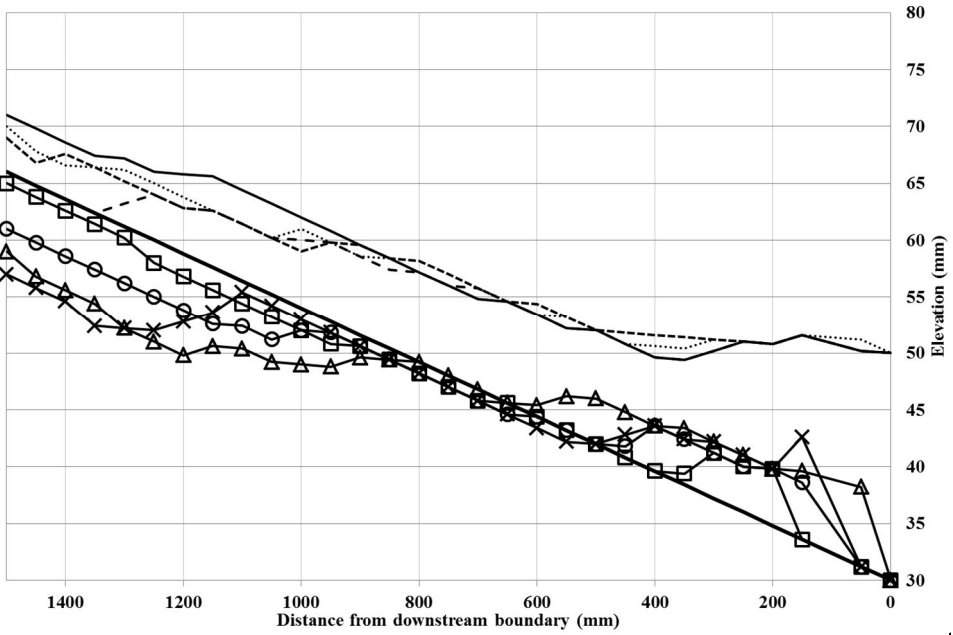


그림 S1.5 하상경사에 따른 하상변동 특성
(AS 시리즈; $Q = 0.215$ l/sec; $H = 20$ mm)

b) Case AS421



c) Case AS431

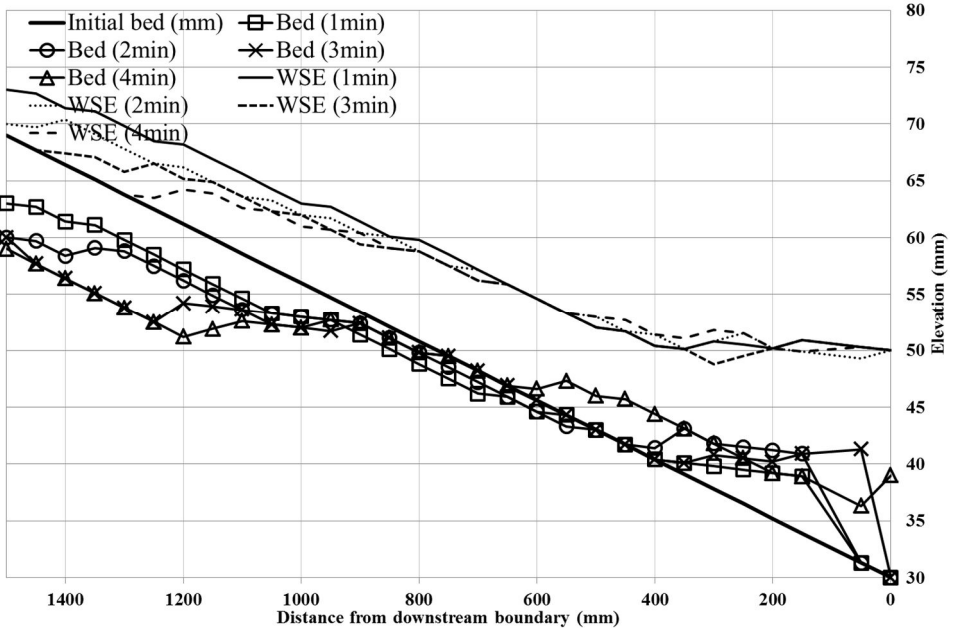
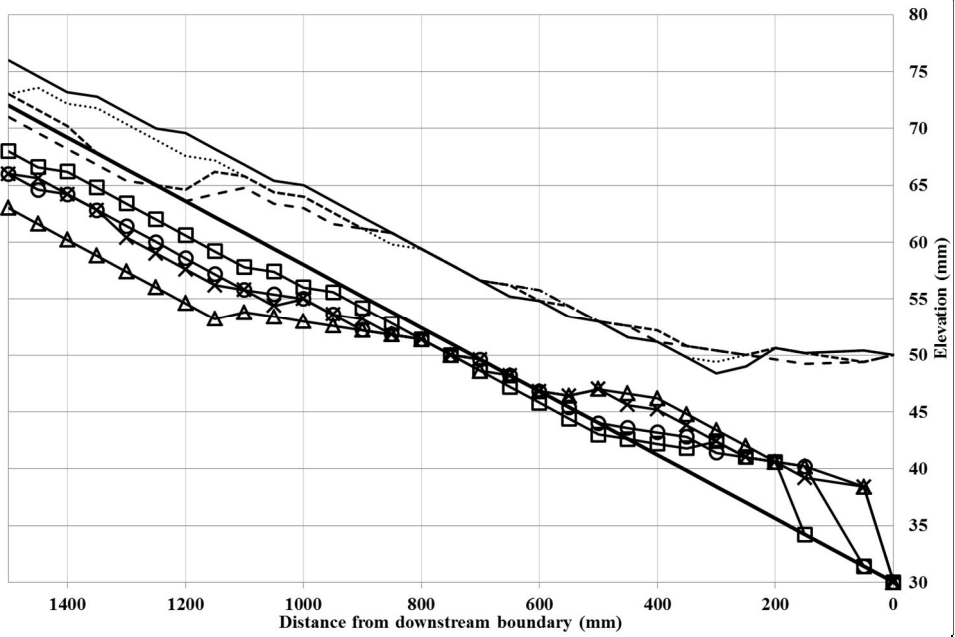


그림 S1.5 하상경사에 따른 하상변동 특성
(AS 시리즈; $Q = 0.215$ l/sec; $H = 20$ mm, 계속)

d) Case AS441



e) Case AS451

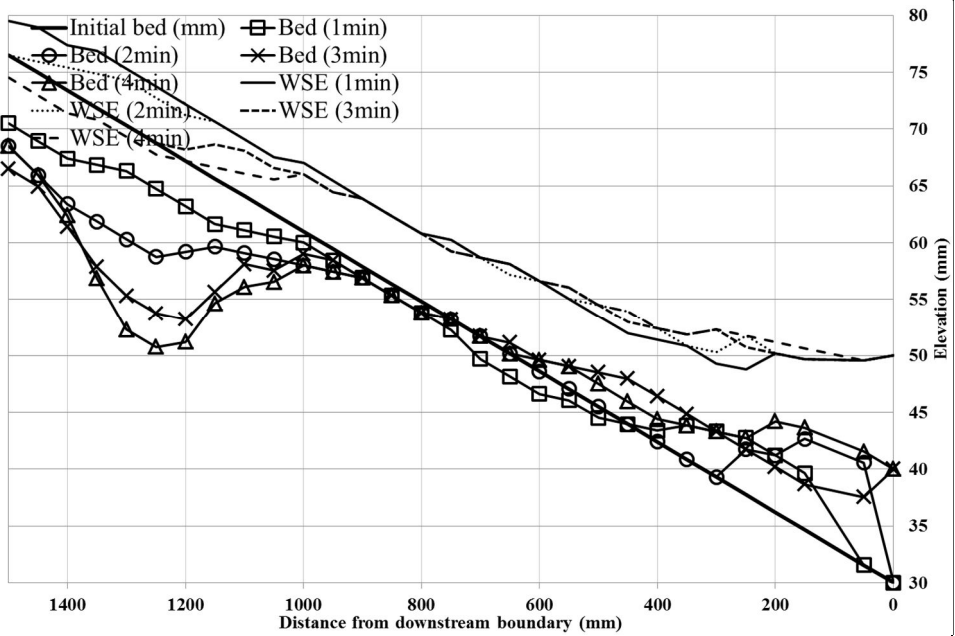
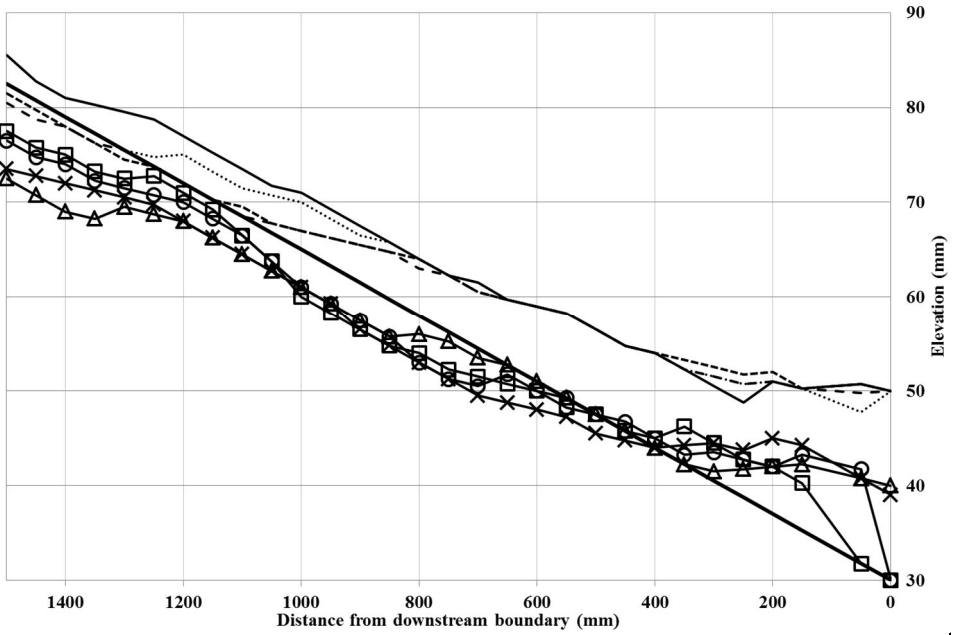


그림 S1.5 하상경사에 따른 하상변동 특성
(AS 시리즈; $Q = 0.215$ l/sec; $H = 20$ mm, 계속)

f) Case AS461



g) Case AS471

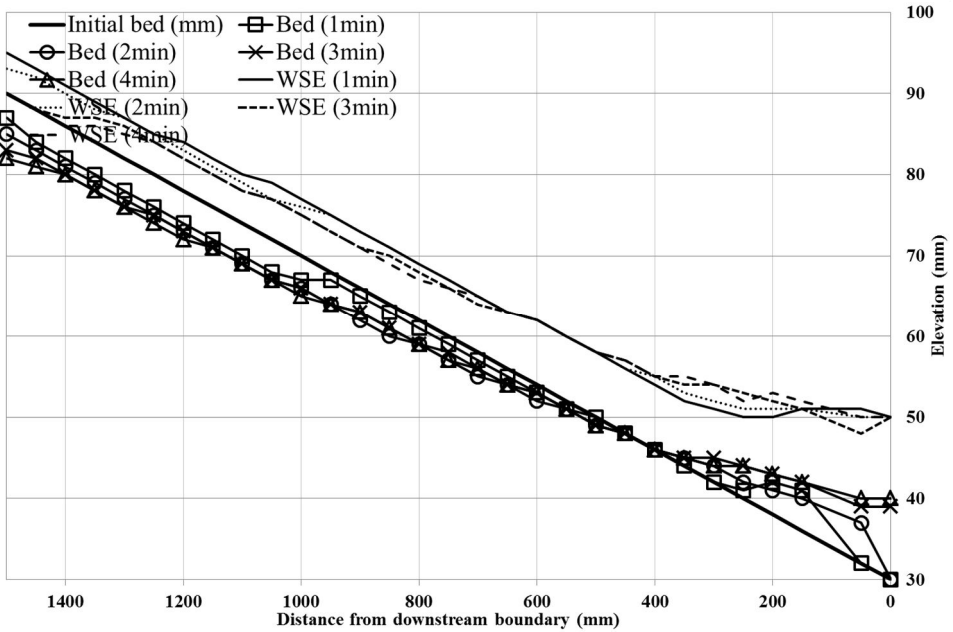
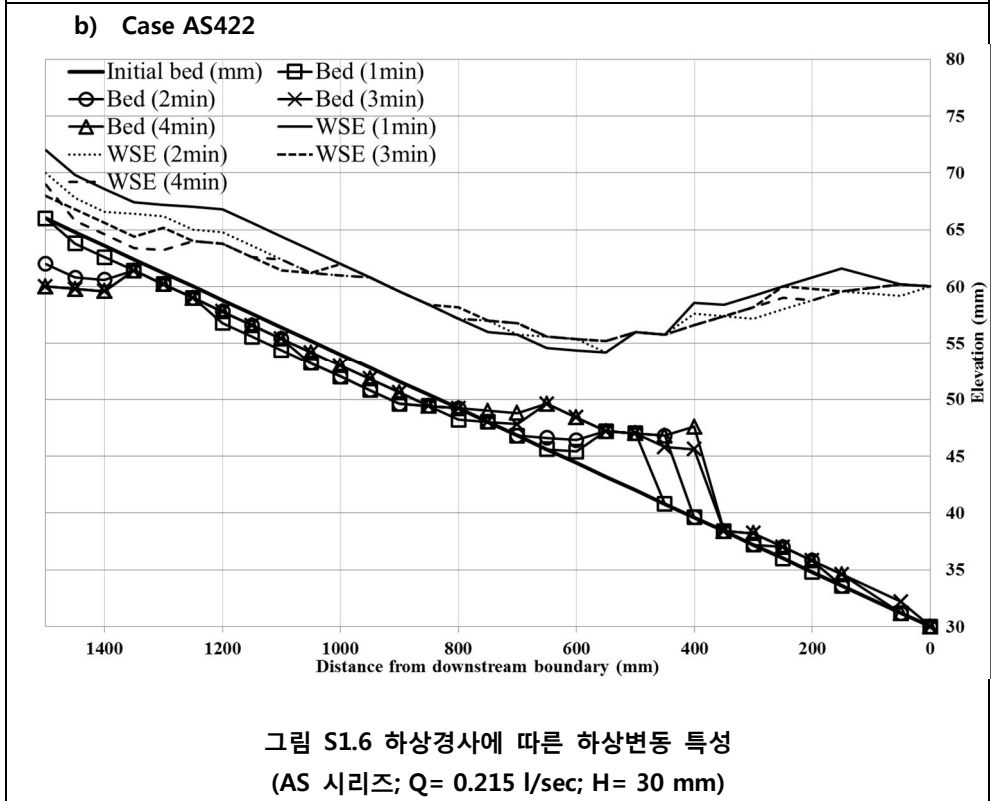
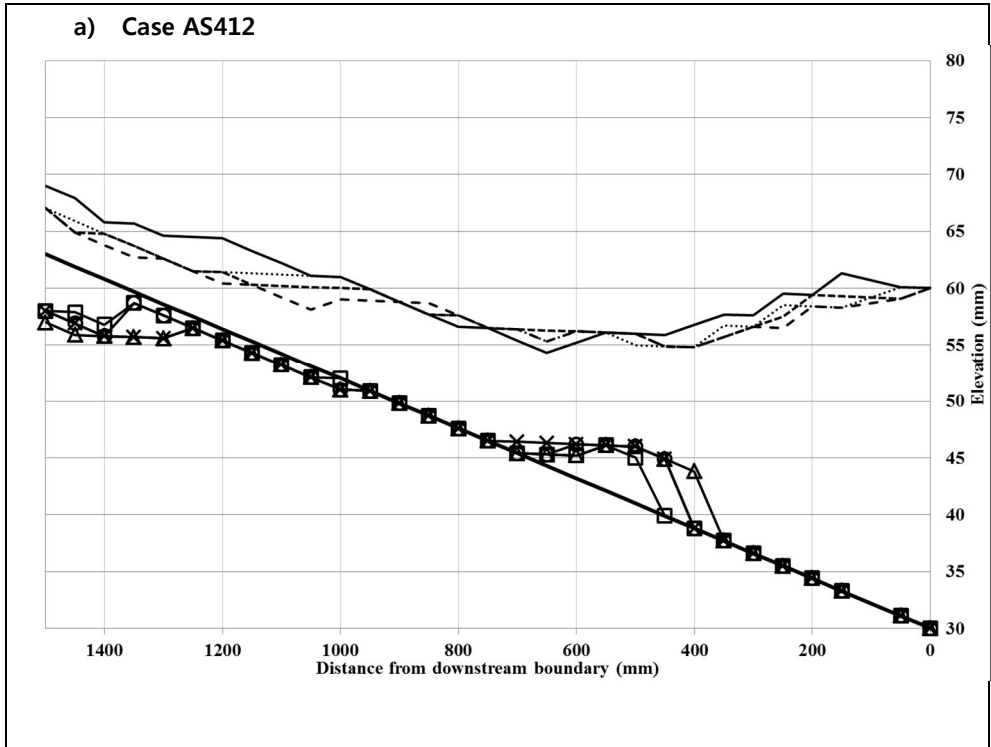
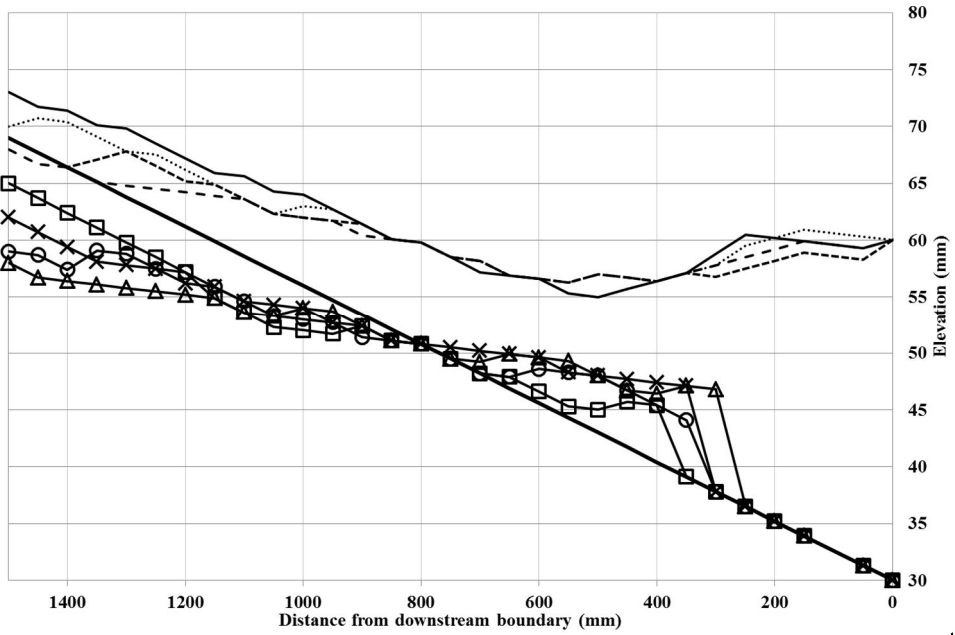


그림 S1.5 하상경사에 따른 하상변동 특성
(AS 시리즈; $Q = 0.215$ l/sec; $H = 20$ mm, 계속)



c) Case AS432



d) Case AS442

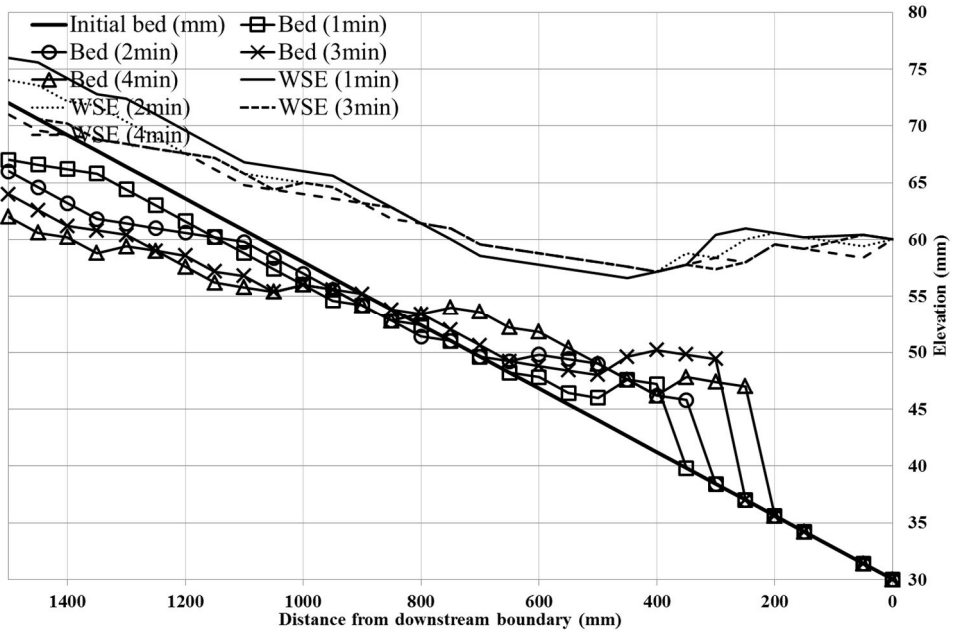


그림 S1.6 하상경사에 따른 하상변동 특성
(AS 시리즈; $Q = 0.215$ l/sec; $H = 30$ mm, 계속)

e) Case AS452

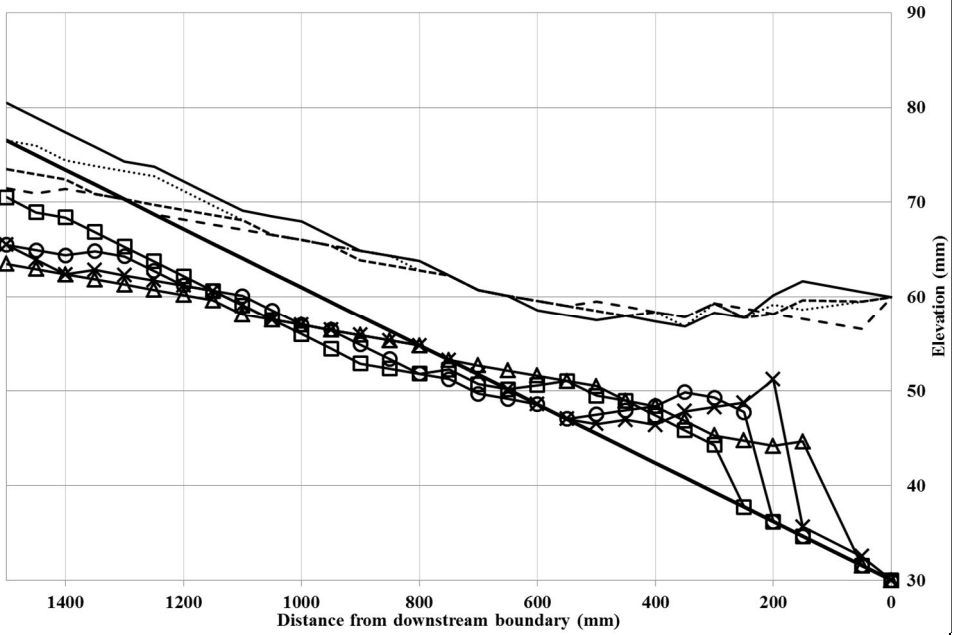


그림 3.13(e) Case D452(S= 3.1 %, H= 30 mm, Q= 0.368 l/sec, d_{50} = 0.62 mm)
시간 경과에 따른 하상고 변동

f) Case AS462

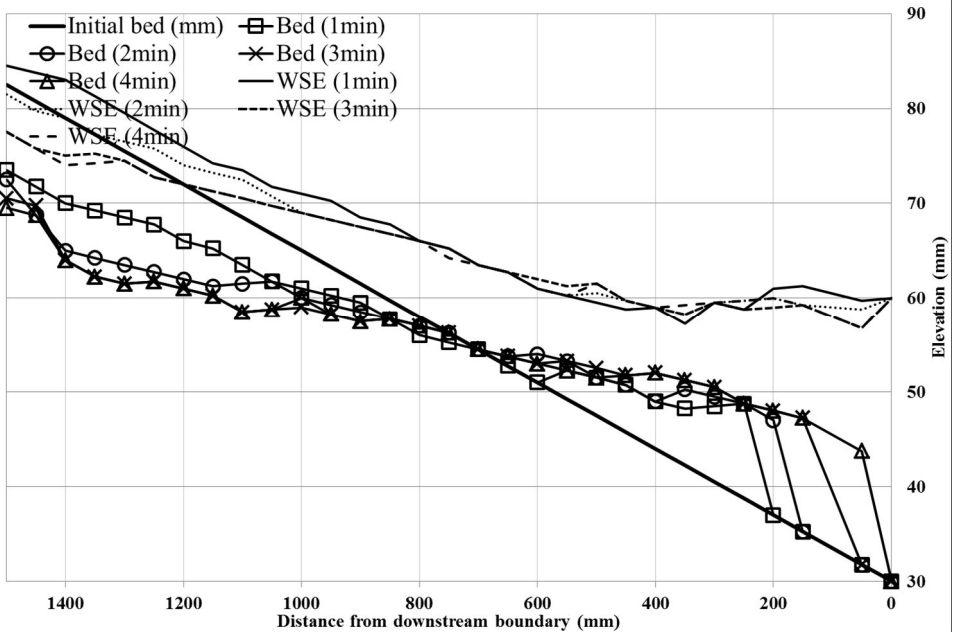


그림 S1.6 하상경사에 따른 하상변동 특성
(AS 시리즈; Q= 0.215 l/sec; H= 30 mm, 계속)

g) Case AS472

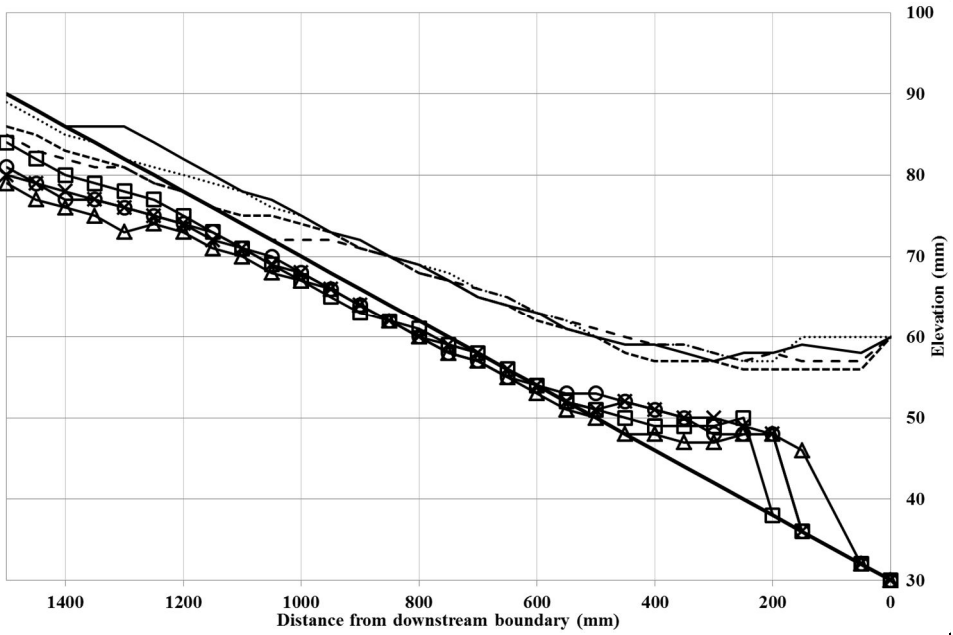


그림 S1.6 하상경사에 따른 하상변동 특성
(AS 시리즈; $Q = 0.215$ l/sec; $H = 30$ mm, 계속)

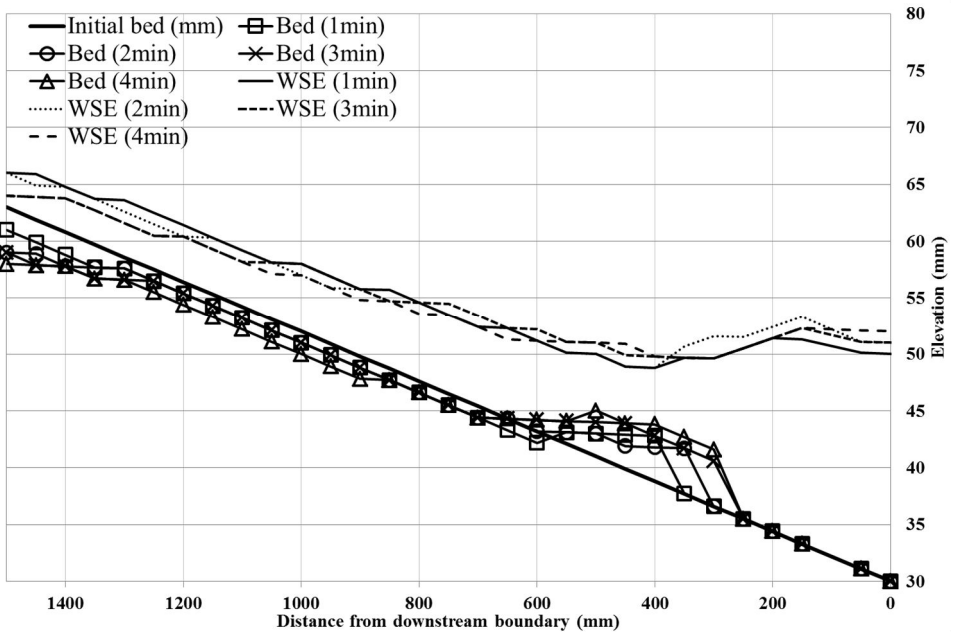


그림 S1.7 하상경사에 따른 하상변동 특성
(AS 시리즈; $Q = 0.215$ l/sec; $H = 30$ mm, 계속)

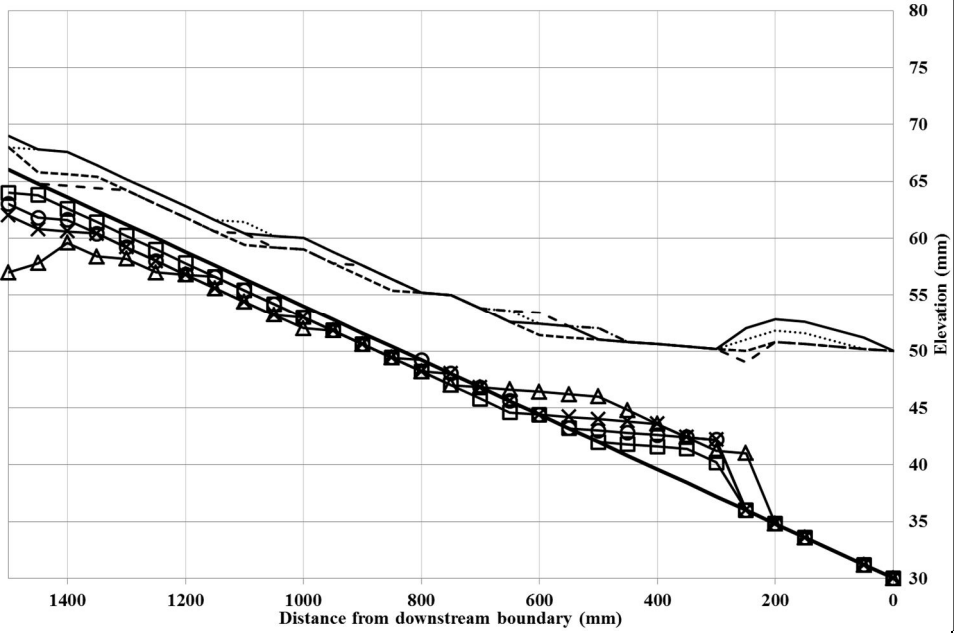


그림 3.14(b) Case D521($S= 2.4 \%$, $H= 20 \text{ mm}$, $Q= 0.215 \text{ l/sec}$, $d_{50}= 1.2 \text{ mm}$)
시간 경과에 따른 하상고 변동

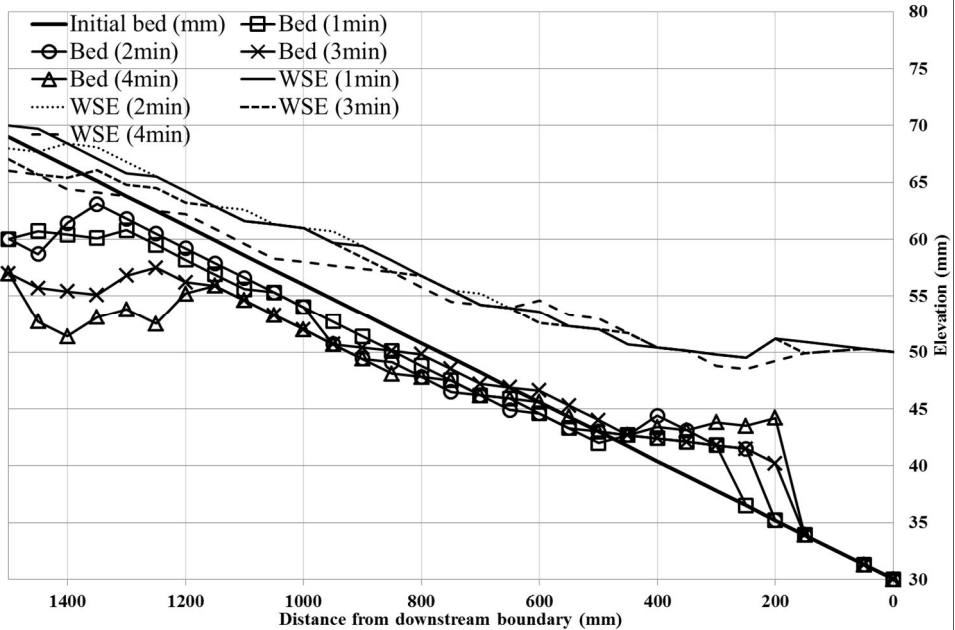


그림 3.14(c) Case D531($S= 2.6 \%$, $H= 20 \text{ mm}$, $Q= 0.215 \text{ l/sec}$, $d_{50}= 1.2 \text{ mm}$)
시간 경과에 따른 하상고 변동

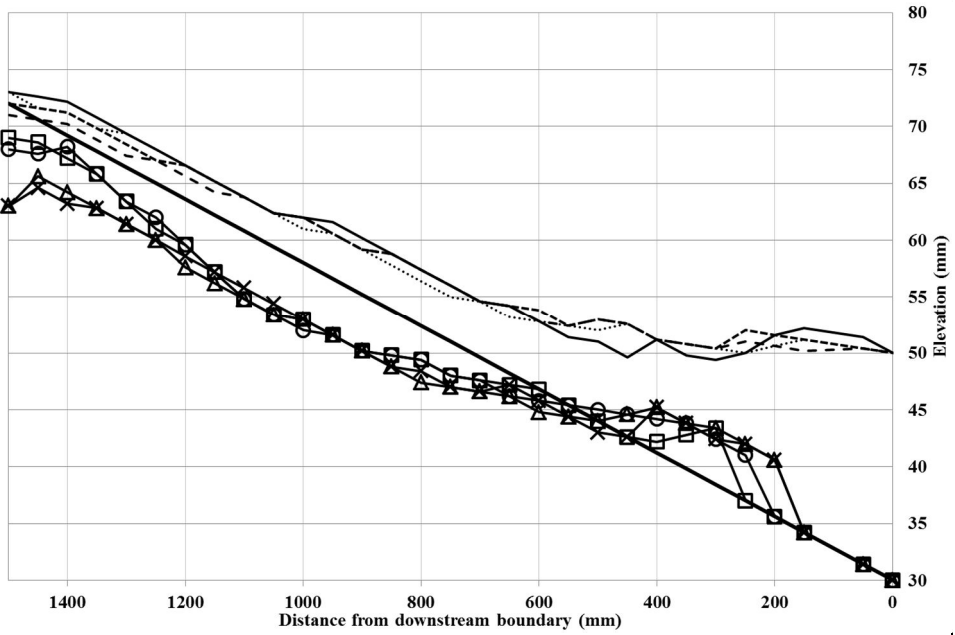


그림 3.14(d) Case D541($S = 2.8\%$, $H = 20\text{ mm}$, $Q = 0.215\text{ l/sec}$, $d_{50} = 1.2\text{ mm}$)
시간 경과에 따른 하상고 변동

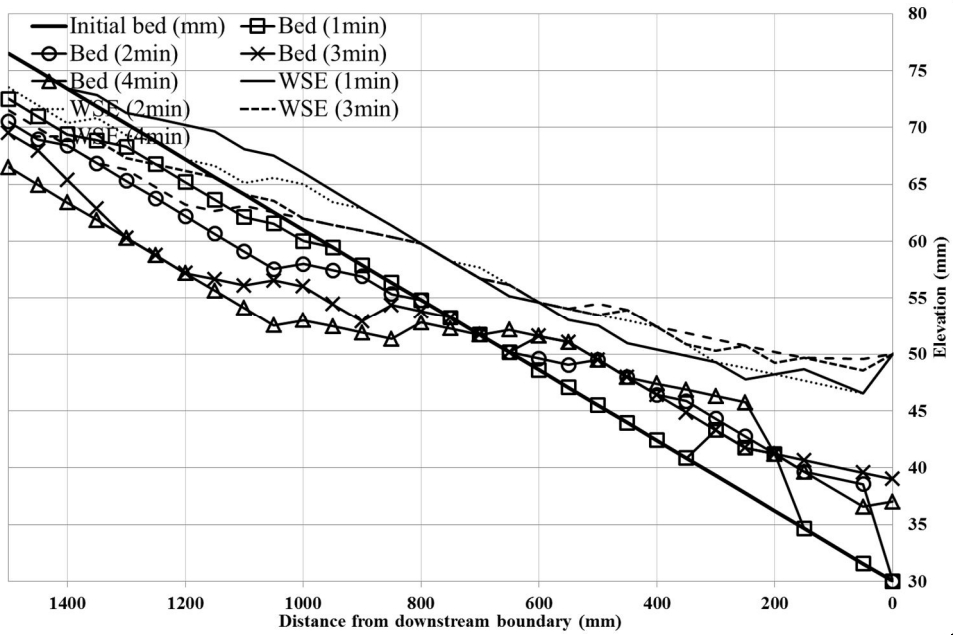


그림 3.14(e) Case D551($S = 3.1\%$, $H = 20\text{ mm}$, $Q = 0.215\text{ l/sec}$, $d_{50} = 1.2\text{ mm}$)
시간 경과에 따른 하상고 변동

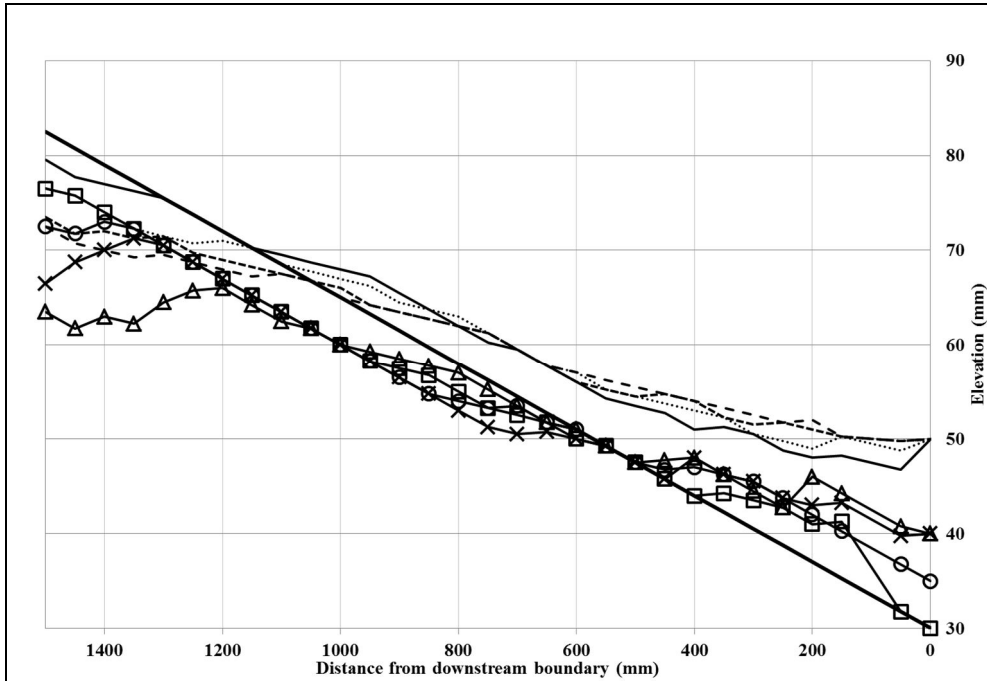


그림 3.14(f) Case D561($S = 3.5\%$, $H = 20\text{ mm}$, $Q = 0.215\text{ l/sec}$, $d_{50} = 1.2\text{ mm}$)
시간 경과에 따른 하상고 변동

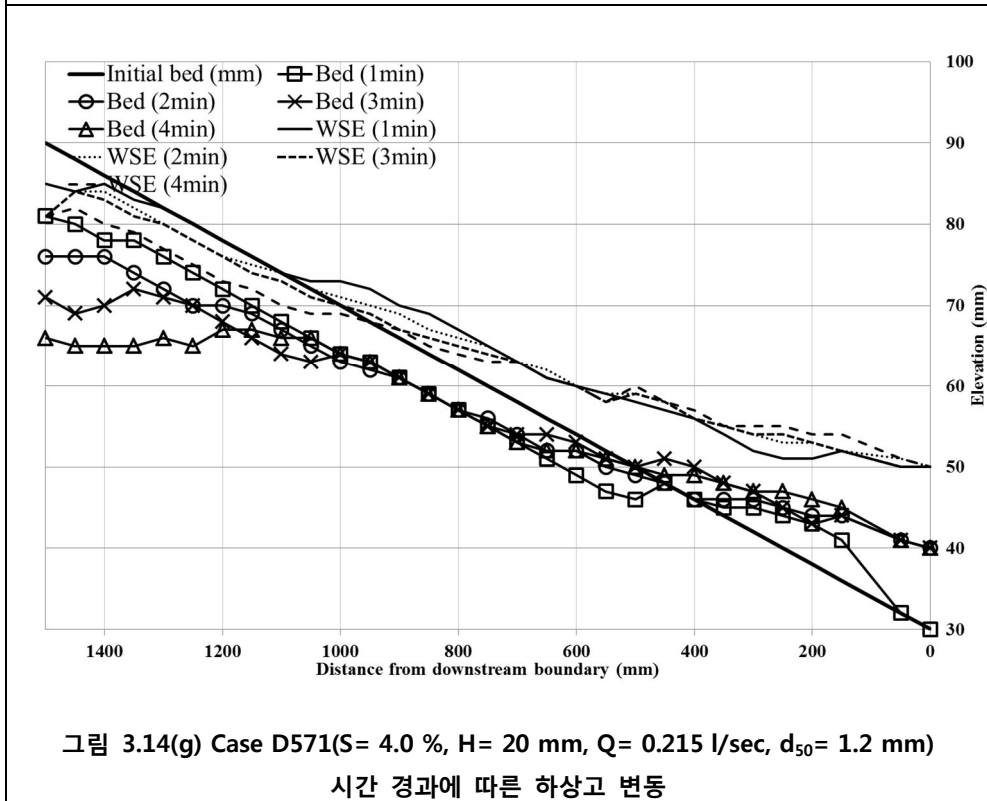


그림 3.14(g) Case D571($S = 4.0\%$, $H = 20\text{ mm}$, $Q = 0.215\text{ l/sec}$, $d_{50} = 1.2\text{ mm}$)
시간 경과에 따른 하상고 변동

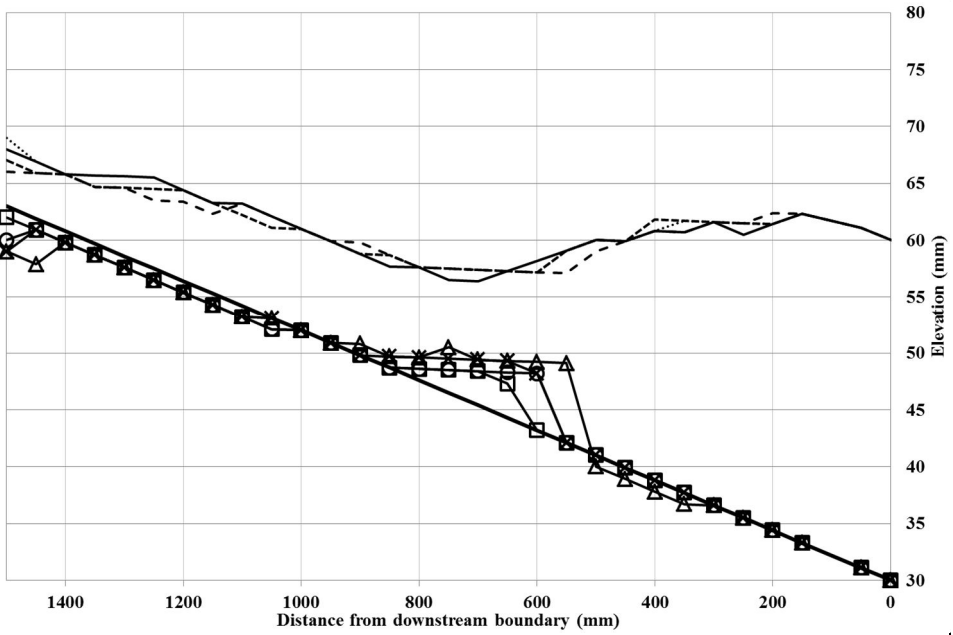


그림 3.15(a) Case D512($S= 2.2\%$, $H= 30\text{ mm}$, $Q= 0.215\text{ l/sec}$, $d_{50}= 1.2\text{ mm}$)
시간 경과에 따른 하상고 변동

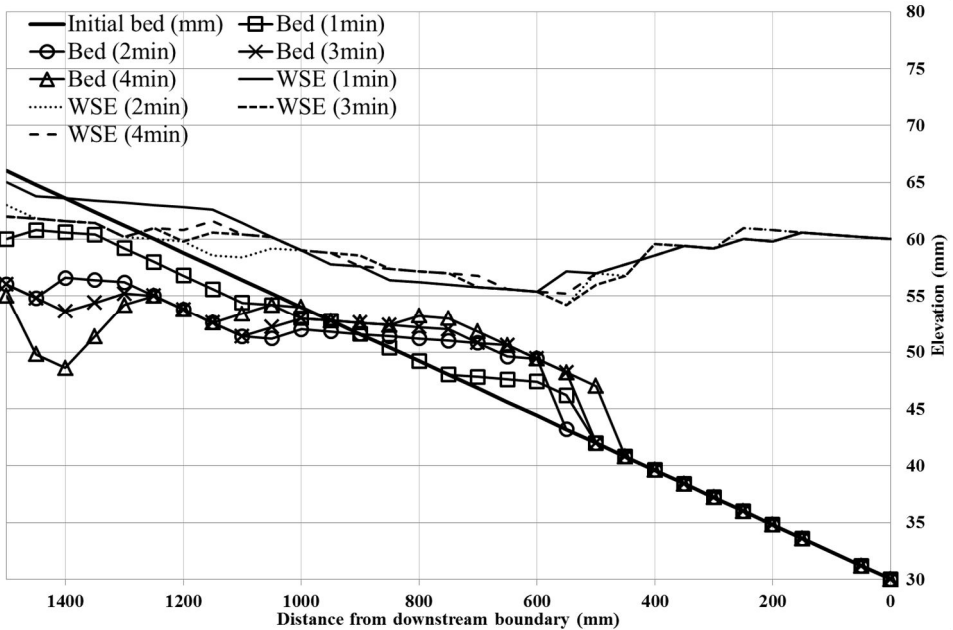


그림 3.15(b) Case D522($S= 2.4\%$, $H= 30\text{ mm}$, $Q= 0.215\text{ l/sec}$, $d_{50}= 1.2\text{ mm}$)
시간 경과에 따른 하상고 변동

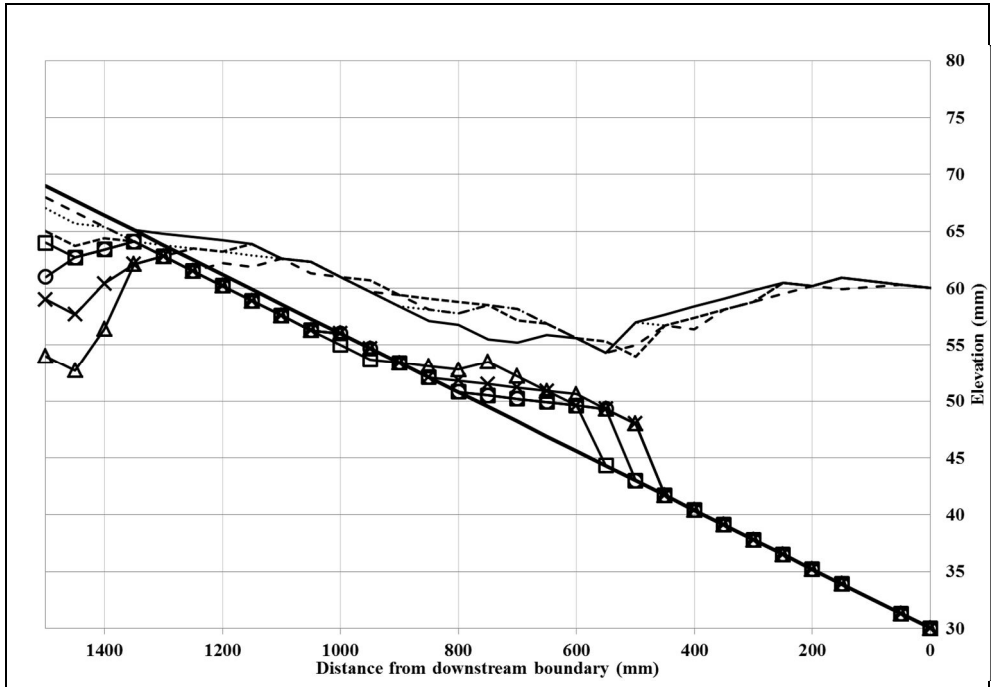


그림 3.15(c) Case D532($S= 2.6 \%$, $H= 30 \text{ mm}$, $Q= 0.215 \text{ l/sec}$, $d_{50}= 1.2 \text{ mm}$)
시간 경과에 따른 하상고 변동

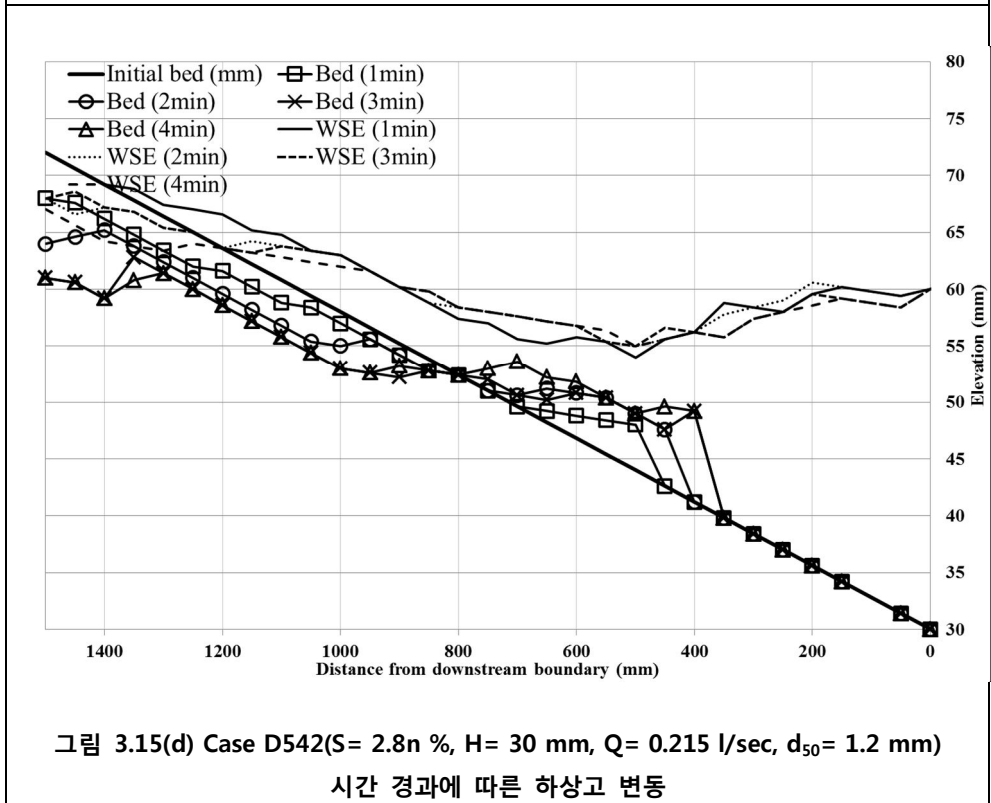


그림 3.15(d) Case D542($S= 2.8n \%$, $H= 30 \text{ mm}$, $Q= 0.215 \text{ l/sec}$, $d_{50}= 1.2 \text{ mm}$)
시간 경과에 따른 하상고 변동

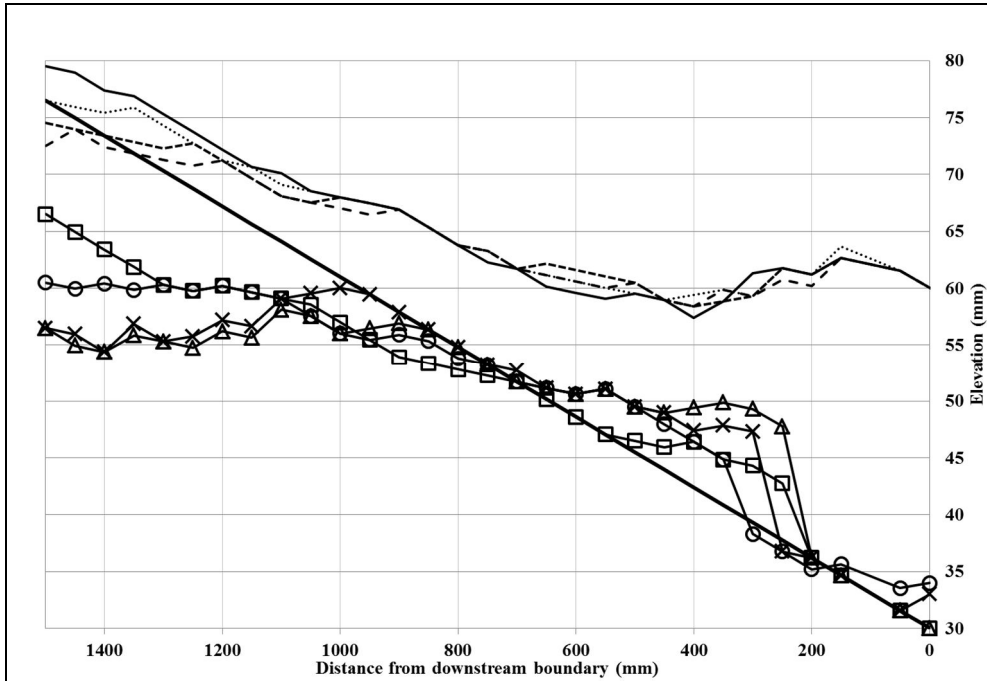


그림 3.15(e) Case D552($S= 3.1\%$, $H= 30\text{ mm}$, $Q= 0.215\text{ l/sec}$, $d_{50}= 1.2\text{ mm}$)
시간 경과에 따른 하상고 변동

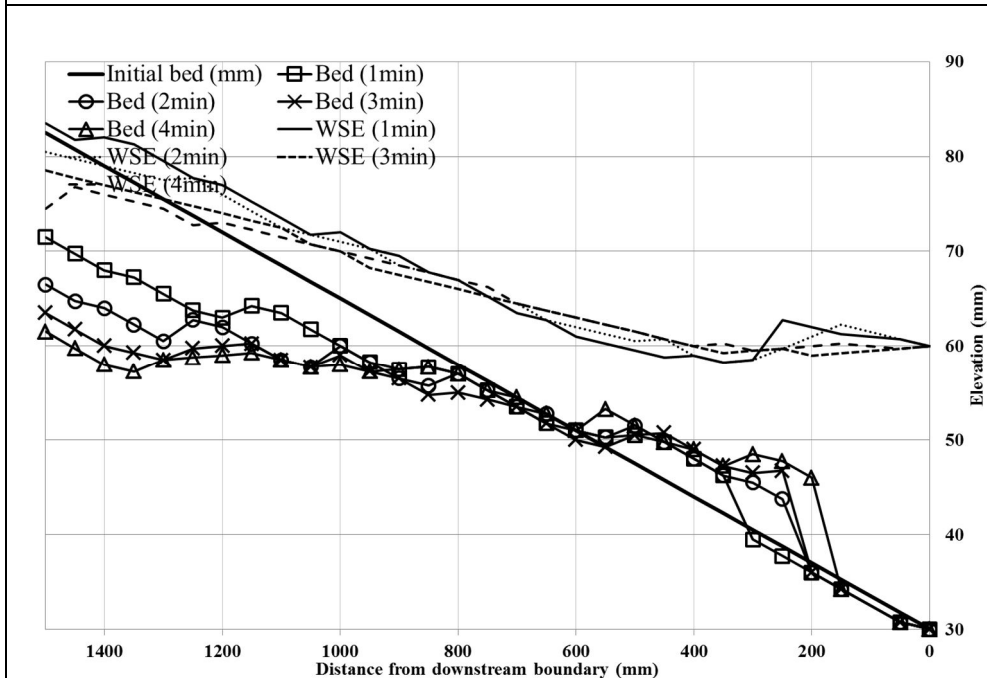


그림 3.15(f) Case D562($S= 3.5\%$, $H= 30\text{ mm}$, $Q= 0.215\text{ l/sec}$, $d_{50}= 1.2\text{ mm}$)
시간 경과에 따른 하상고 변동

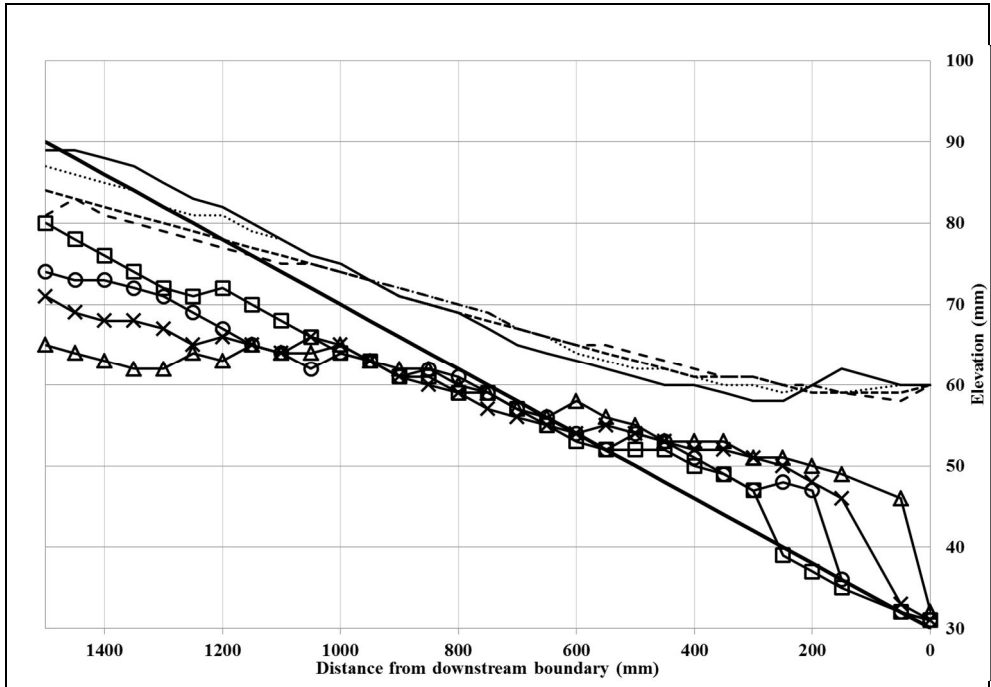


그림 3.15(g) Case D572($S= 4.0 \%$, $H= 30 \text{ mm}$, $Q= 0.215 \text{ l/sec}$, $d_{50}= 1.2 \text{ mm}$)
시간 경과에 따른 하상고 변동

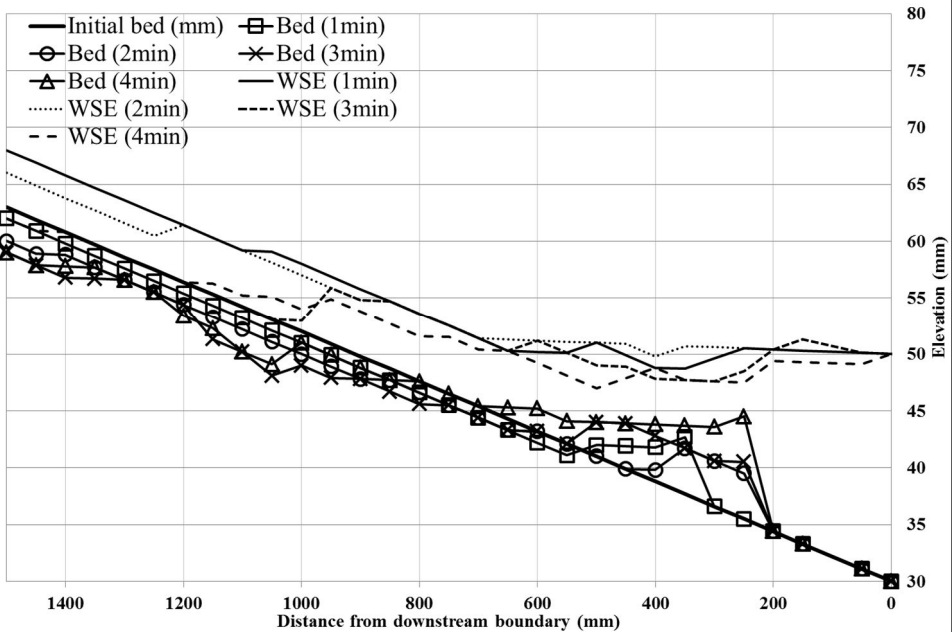


그림 3.16(a) Case D611($S= 2.2 \%$, $H= 20 \text{ mm}$, $Q= 0.368 \text{ l/sec}$, $d_{50}= 1.2 \text{ mm}$)
시간 경과에 따른 하상고 변동

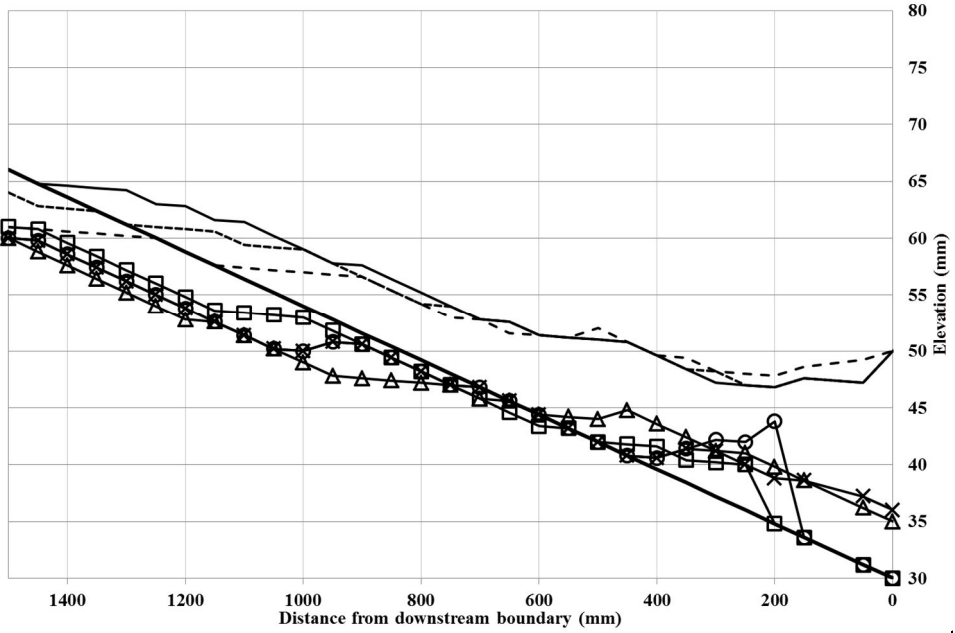


그림 3.16(b) Case D621($S = 2.4\%$, $H = 20\text{ mm}$, $Q = 0.368\text{ l/sec}$, $d_{50} = 1.2\text{ mm}$)
시간 경과에 따른 하상고 변동

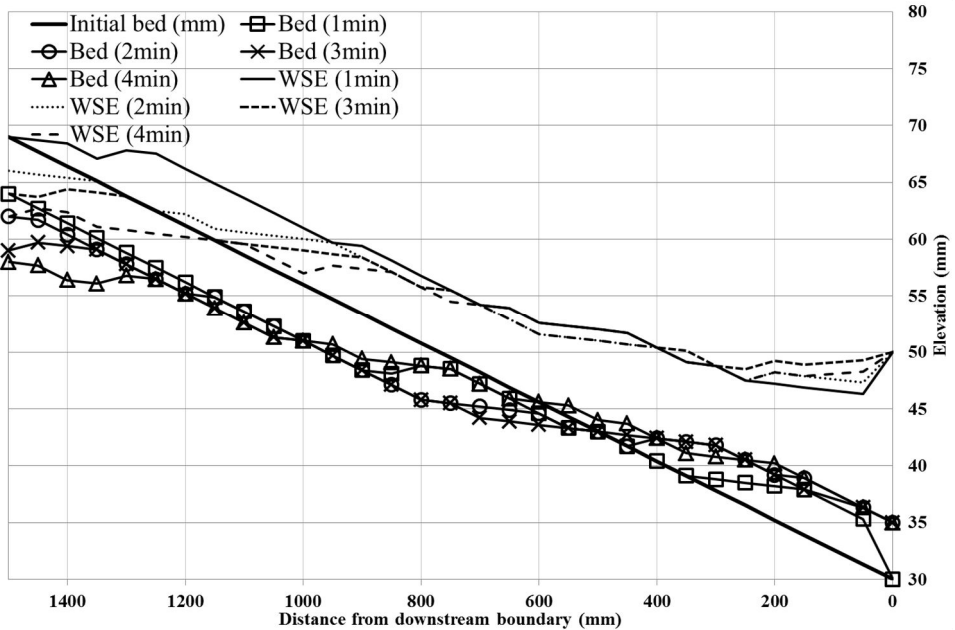


그림 3.16(c) Case D631($S = 2.6\%$, $H = 20\text{ mm}$, $Q = 0.368\text{ l/sec}$, $d_{50} = 1.2\text{ mm}$)
시간 경과에 따른 하상고 변동

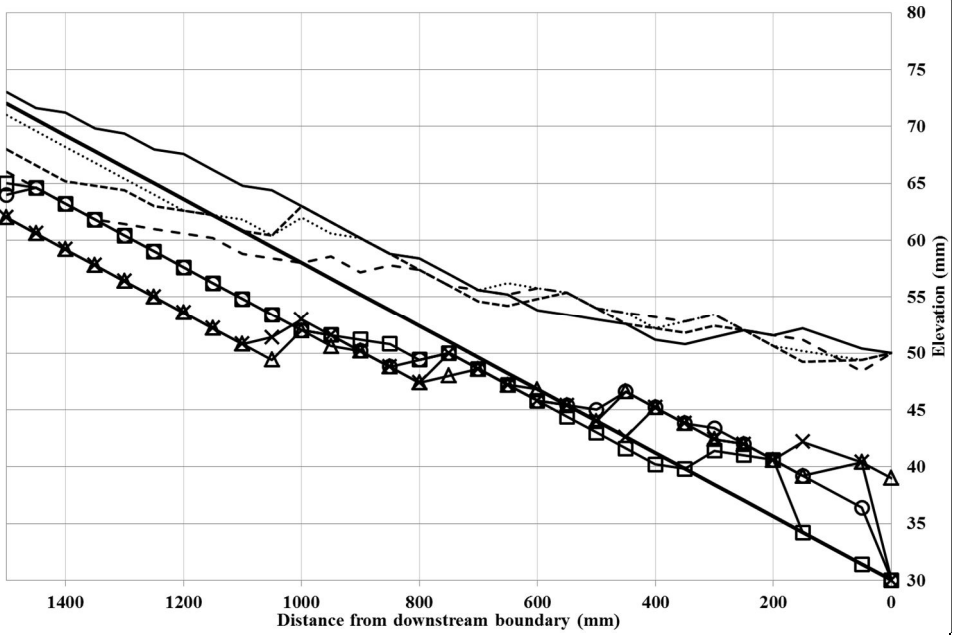


그림 3.16(d) Case D641($S = 2.8\%$, $H = 20\text{ mm}$, $Q = 0.368\text{ l/sec}$, $d_{50} = 1.2\text{ mm}$)
시간 경과에 따른 하상고 변동

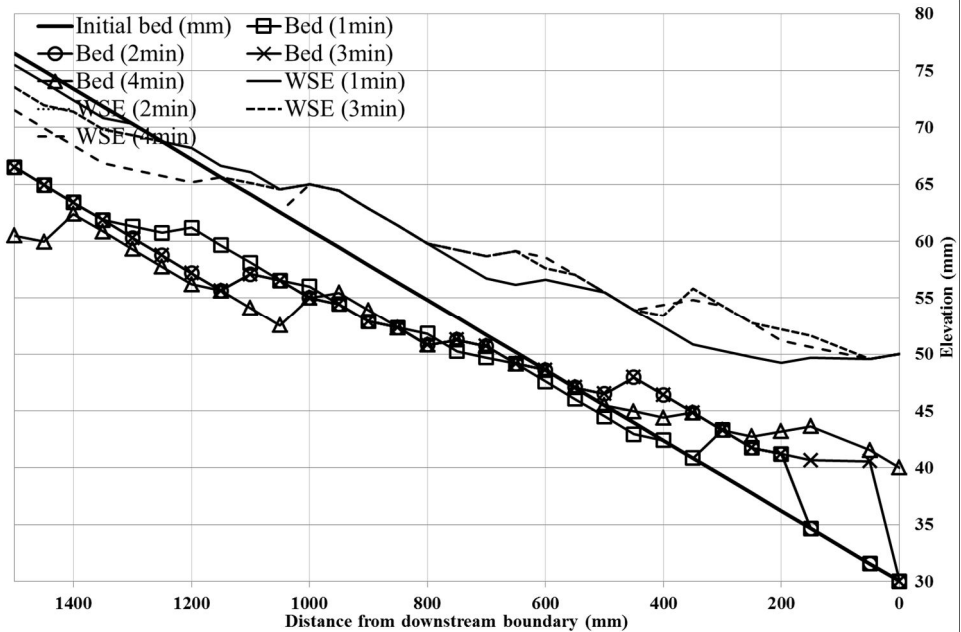


그림 3.16(e) Case D651($S = 3.1\%$, $H = 20\text{ mm}$, $Q = 0.368\text{ l/sec}$, $d_{50} = 1.2\text{ mm}$)
시간 경과에 따른 하상고 변동

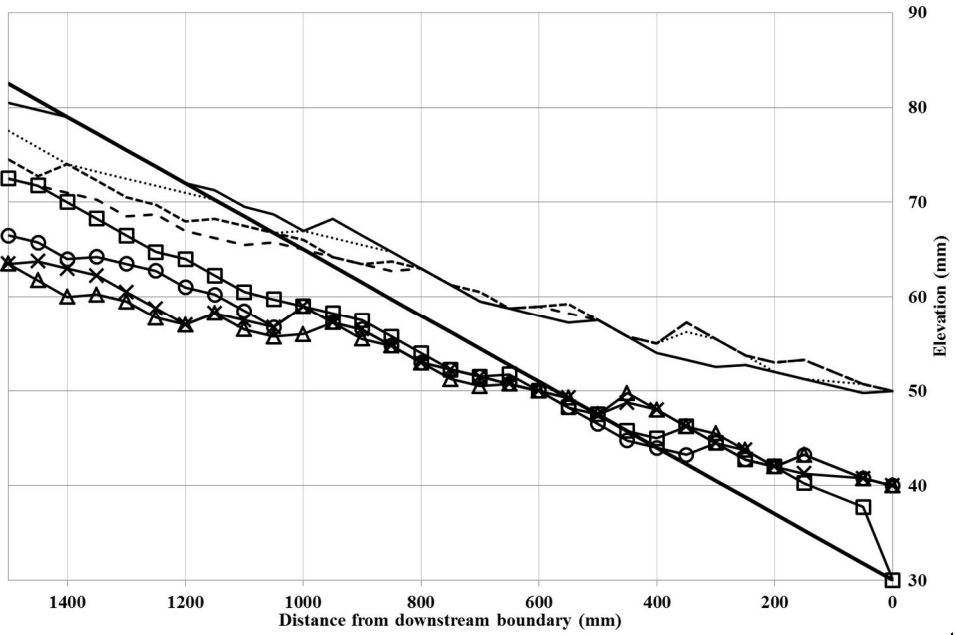


그림 3.16(f) Case D661($S = 3.5\%$, $H = 20\text{ mm}$, $Q = 0.368\text{ l/sec}$, $d_{50} = 1.2\text{ mm}$)
시간 경과에 따른 하상고 변동

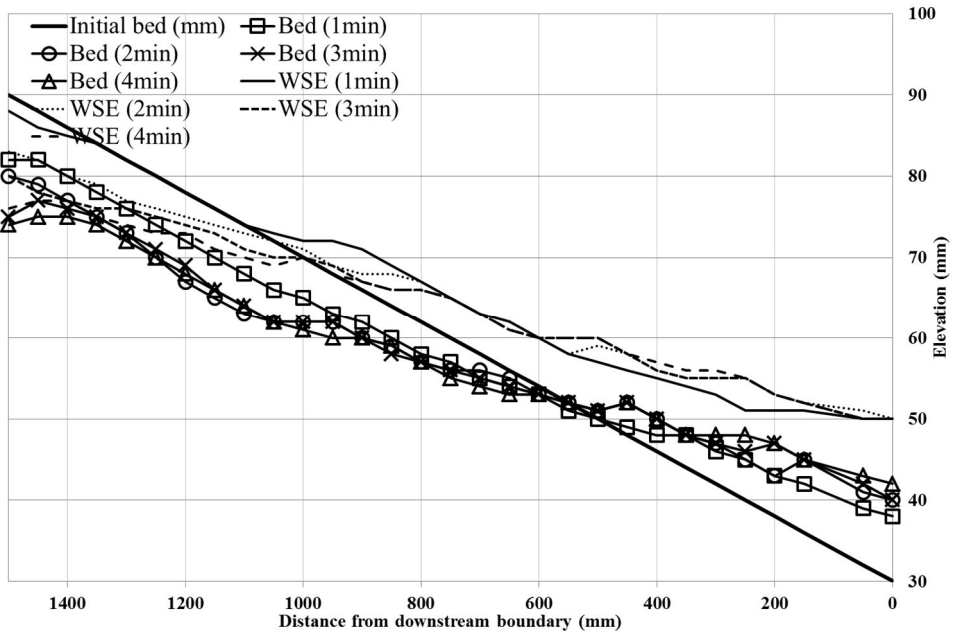


그림 3.16(g) Case D671($S = 4.0\%$, $H = 20\text{ mm}$, $Q = 0.368\text{ l/sec}$, $d_{50} = 1.2\text{ mm}$)
시간 경과에 따른 하상고 변동

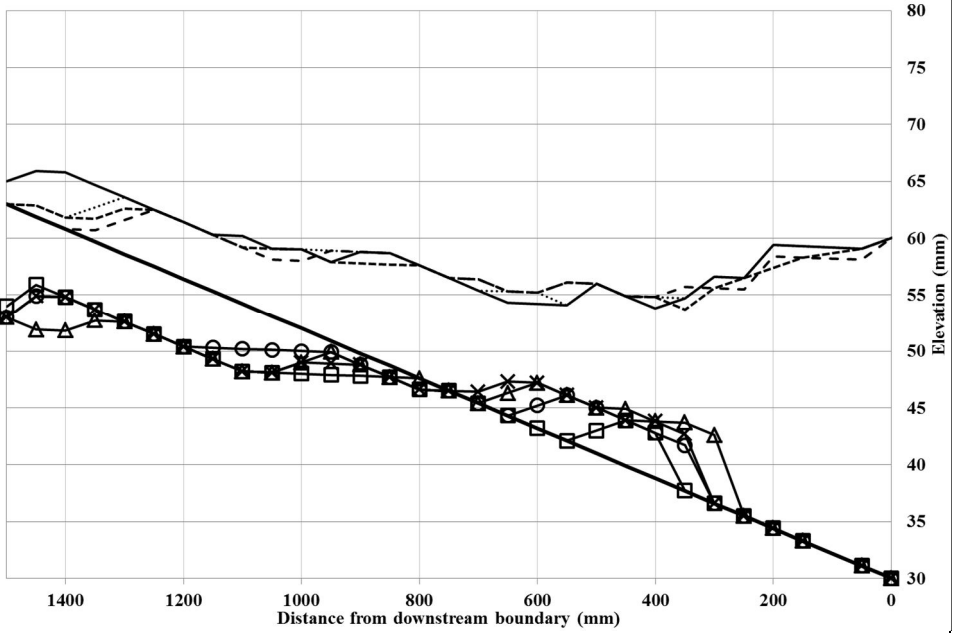


그림 3.17(a) Case D612(S= 2.2 %, H= 30 mm, Q= 0.368 l/sec, d_{50} = 1.2 mm)
시간 경과에 따른 하상고 변동

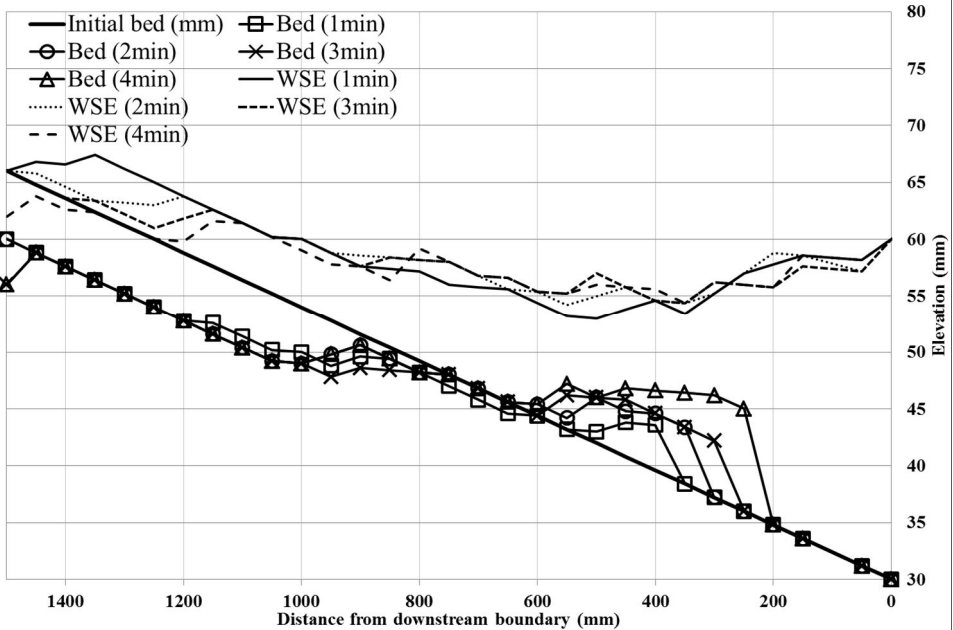


그림 3.17(b) Case D622(S= 2.4 %, H= 30 mm, Q= 0.368 l/sec, d_{50} = 1.2 mm)
시간 경과에 따른 하상고 변동

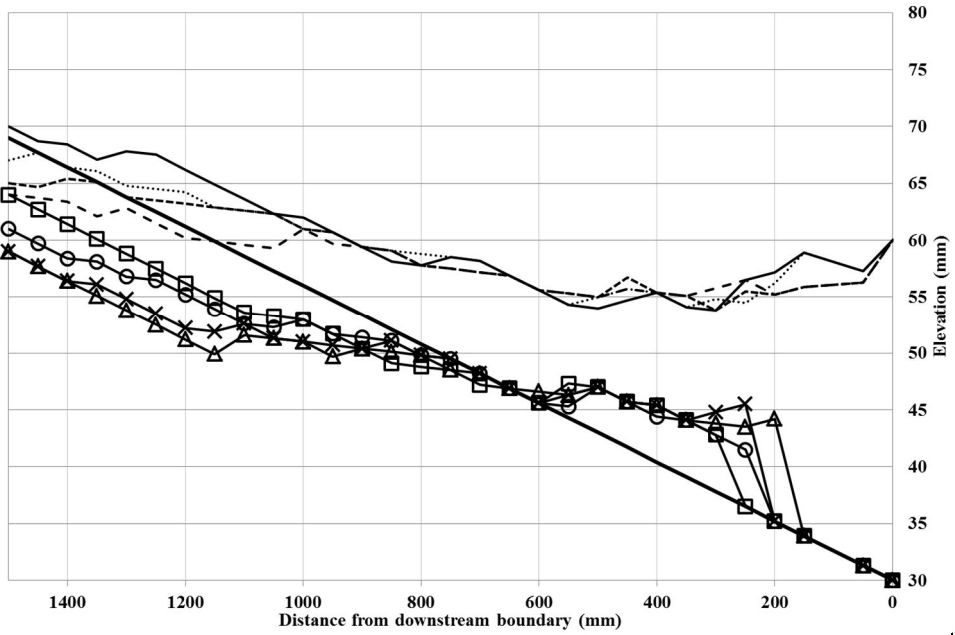


그림 3.17(c) Case D632($S = 2.6\%$, $H = 30\text{ mm}$, $Q = 0.368\text{ l/sec}$, $d_{50} = 1.2\text{ mm}$)
시간 경과에 따른 하상고 변동

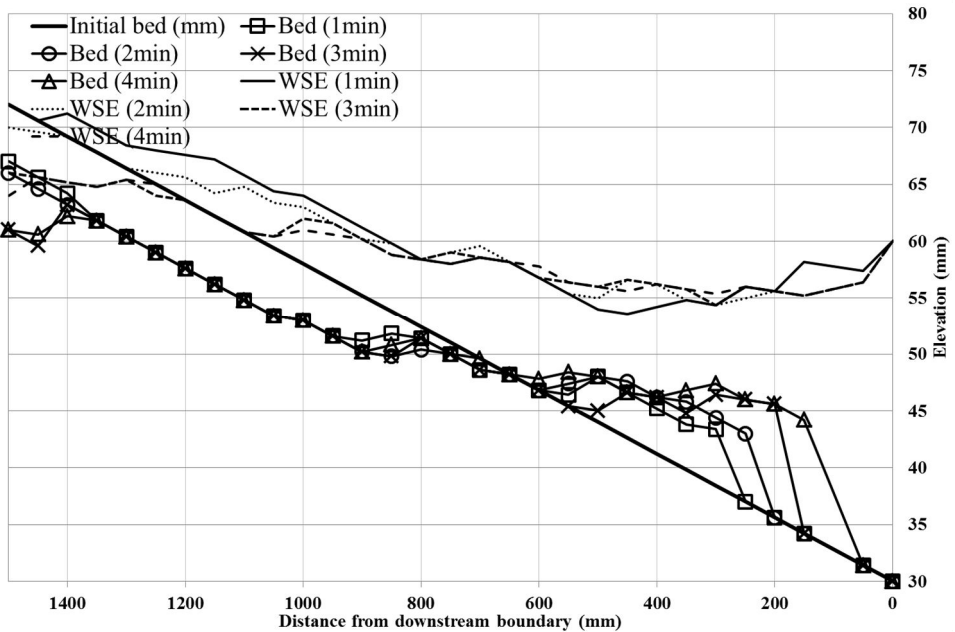


그림 3.17(d) Case D642($S = 2.8\%$, $H = 30\text{ mm}$, $Q = 0.368\text{ l/sec}$, $d_{50} = 1.2\text{ mm}$)
시간 경과에 따른 하상고 변동

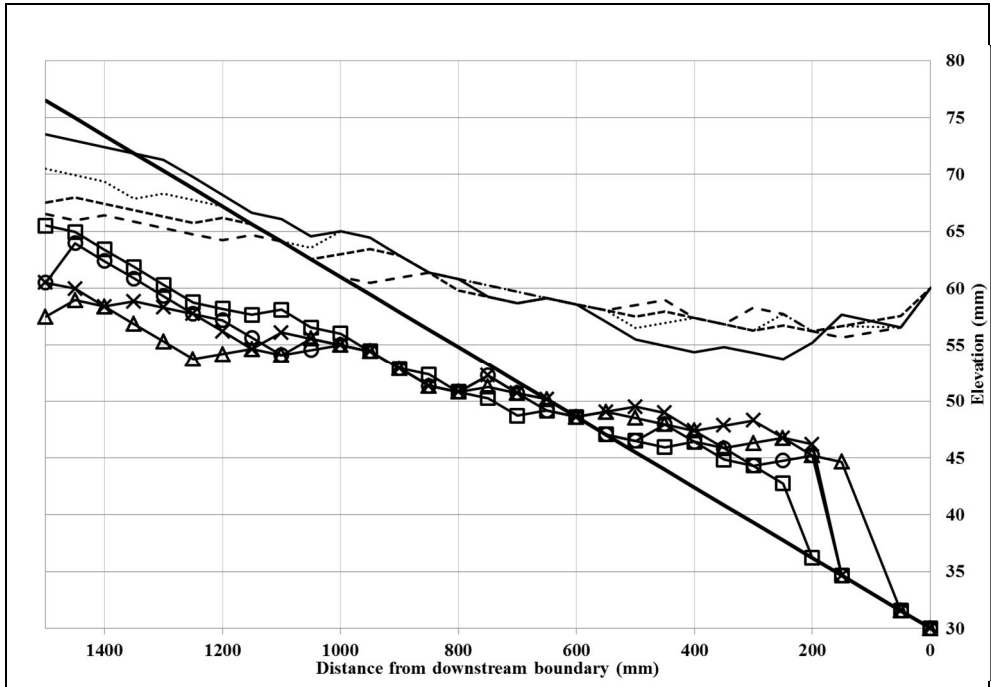


그림 3.17(e) Case D652($S= 3.1 \%$, $H= 30 \text{ mm}$, $Q= 0.368 \text{ l/sec}$, $d_{50}= 1.2 \text{ mm}$)
 시간 경과에 따른 하상고 변동

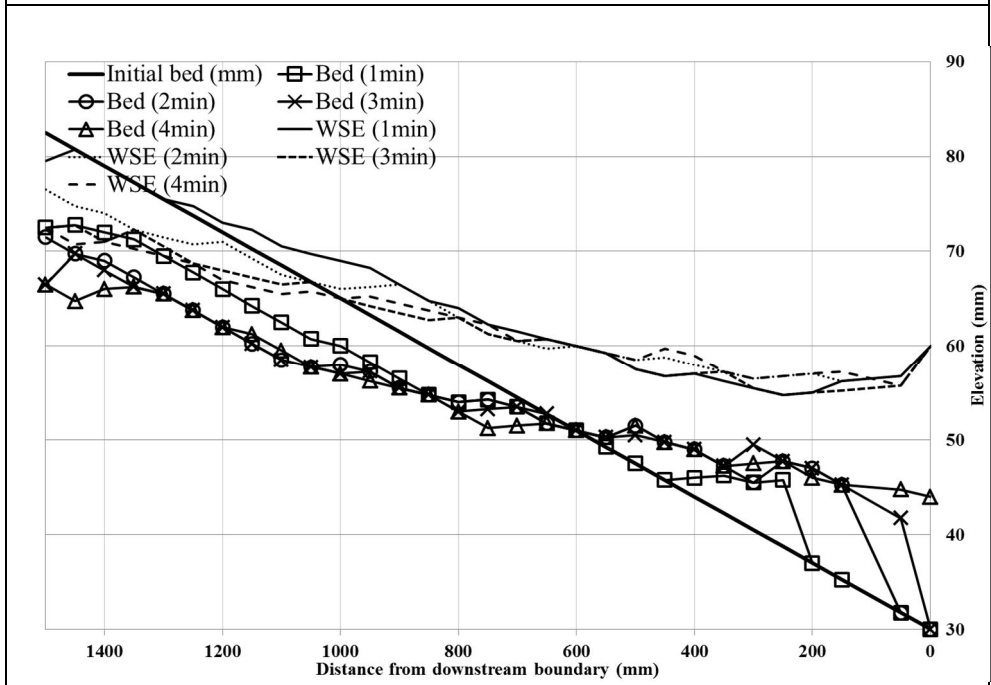
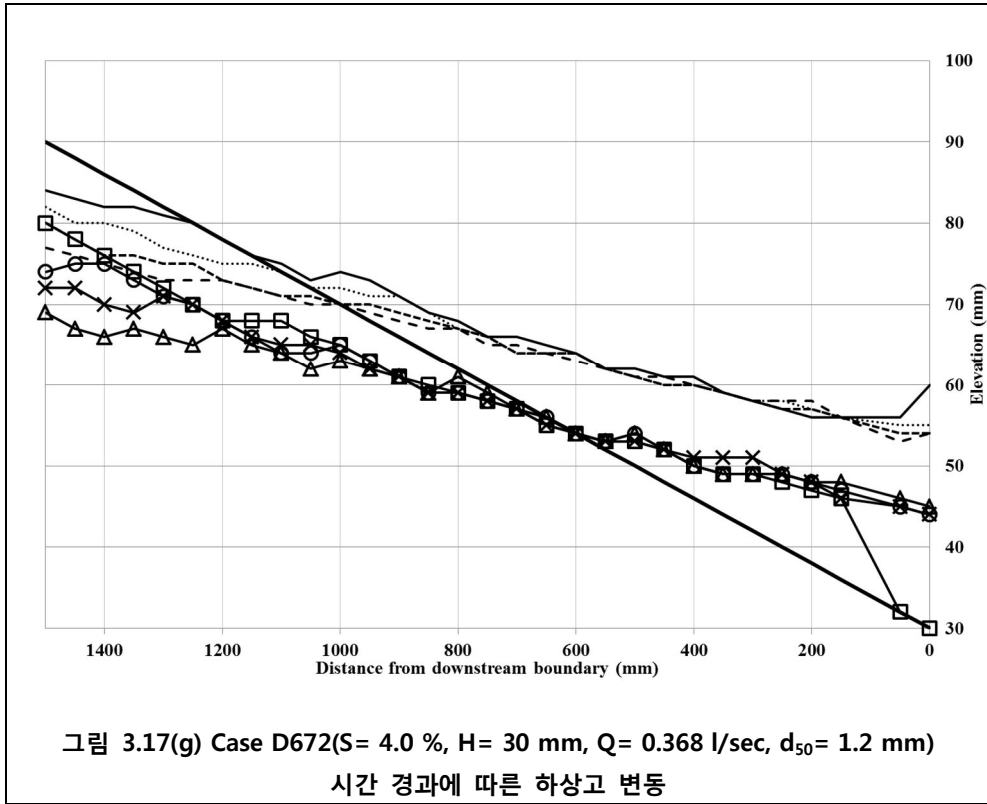


그림 3.17(f) Case D662($S= 3.5 \%$, $H= 30 \text{ mm}$, $Q= 0.368 \text{ l/sec}$, $d_{50}= 1.2 \text{ mm}$)
 시간 경과에 따른 하상고 변동



참고문헌

김대근 (2013). 부유사 및 하상토 입도분포를 고려한 저수지 퇴사의 장기모의, 한국수자원학회 논문집, 제46권 제1호, pp. 87-97.

박예정 (2008) 다중회귀와 회귀나무를 활용한 최적소득예측분포 연구. 석사학위 논문, 이화여자대학교

백승훈 (2012) 다중회귀분석을 이용한 ALC (Autoclaved lightweight concrete) 제조공정 경도예측에 관한 연구. 석사학위 논문, 이화여자대학교

손민영 (2002). 준정류모형을 이용한 저수지 퇴사 및 배사현상의 수치모의. 석사학위 논문, 연세대학교

유성모, 박현주 (2006). Minitab으로 배우는 기초통계, pp. 442-473, 이레테크.

배혜득 (2011). 1차원 준정류 모형을 이용한 저수지 퇴사 및 배사 모의. 석사학위 논문, 연세대학교

우효섭 (2001). 하천수리학, chap. 12.2, pp. 673-678, 구미서관.

Asada, H. (1973). "Prediction of sediment bed profile in reservoir and river bed formation: practical method and some examples of calculations." Proceedings of 11th ICOLD Congress, Madrid, Spain.

Brandt, S.A., 1999. "Reservoir Desiltation by Means of Hydraulic Flushing : Sediment logical and Geomorpho logical Effects in Reservoir and Downstream Reaches As Illustrated by the Cachi Reservoir and the Reventazon River, Costa Rica. Ph.D. Thesis submitted institute of Geography, University of Copenhagen.

Brune, G.M. (1953). "Trap efficiency of reservoirs. " Trans. Am. Geoph. Union, 34(3).

Chang, H.H. (1982). "Fluvial hydraulics of deltas and alluvial fans." Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 108(HY11), 1282-1295.

- Chollet, J.P. and Cunge, J.A. (1980). "Simulation of unsteady flow in alluvial streams." *Apply Mathematical Modelling*, 4, 43-55.
- Churchill, M.A. (1948). "Analysis and use of reservoir sedimentation data." *Proceedings of the Federal Inter-Agency Sedimentation Conference*, 139-140, Washington DC.
- Engelund, F. and Hansen, E. (1967), "A Monograph on Sediment Transport to Alluvial Streams", Copenhagen, TeknikVorlag.
- Exner, F. M. (1925), "Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen.", *Sitz. Acad. Wiss. Wien Math. Naturwiss. Abt. 2a*, 134, 165–203 (in German).
- Fan, J., and Morris, G.L. (1992a) Reservoir Sedimentation I: Delta and Density Current Deposits. *J. of Hydr. Engrg., ASCE*, Vol. 118, No. 3, pp. 354-369.
- Fan, J., and Morris, G.L. (1992b) Reservoir Sedimentation. II: Reservoir Desiltation and Long-Term Storage Capacity. *J. of Hydr. Engrg., ASCE*, Vol. 118, No. 3, pp. 370-383.
- Gökçen, B. and Güney, M. S. (2008). "Experimental investigation of sediment transport in steady flows." *Scientific Research and Essays*, Vol. 5, No. 6, pp. 582-591.
- Kantoush, S. A., Bollaert, E. and Schleiss, A. S. (2008). "Experimental and numerical modelling of sedimentation in a rectangular shallow basin." *International Journal of Sediment Research, IJSR*, Vol. 23, No. 3, pp. 212-232.
- Matthieu, D., Benjamin, J. and Sébastien E. (2010). "Flow and Sediment Deposition in Rectangular Shallow Reservoirs." *Novatech*, 2010.
- Guo, Q., Fan, C. Y., Raghaven, R. and Field, R. 2004. "Gate and Vacuum Flushing of Sewer Sediment : Laboratory Testing" *Journal of hydraulic Engineering*, Vol.130, No.5 pp.463-466.
- Haraba, S., Suzuki, N., Tokito, Y., and Asaka, M. (2001). "The Seasures for the Sediment at the Dam Reservoirs in Europe." *Water Resources Environment Technology Center*, Tokyo, 123–133 (in Japanese).
- Hotchkiss, R. and Parker, G. (1990). "Laboratory modelling of reservoir sedimentation and

sluicing: scale considerations.”

Hotchkiss, R. and Parker, G. (1988). Reservoir sediment sluicing – Laboratory study. *Hydraulic Engineering*, 1073-1078.

Jassen, R.H.A and Shen, H.W. (1997). "The development of equilibrium profile for slushing channels." *Energy and water: Sustainable Development. Proceeding of 27th IAHR Congress*, 10-15, 108-113, San Francisco, USA.

Lai, J.S. and Shen, H.W. (1996). "Flushing sediment through reservoirs." *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, 34(2), 1287-1301.

Liu, J., Minami, S., Otsuki, H., Liu, B. and Ashida, K., (2004). "Prediction of Concerted Sediment Flushing" *Journal of hydraulic Research*, Vol. 130, No. 11, pp. 1089-1096.

Matthieu, D., Benjamin, J. and Sébastien E. (2010) "Flow and Sediment Deposition in Rectangular Shallow Reservoirs." Novatech, 2010.

Morris, G.L. and Fan, J. (1997) *Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoir, and Watersheds for Sustainable Use*, McGraw Hill, New York, NY.

Shen, H.W. (1999). "Flushing sediment through reservoirs." *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, 37(6), 325-339.

Shields, A. (1936). "Anwendung der Ahnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebewegung Mitt." *Preuss. Versuchsanst. Wasserbau Schiffbau, Berlin*, 26 (1936) pp. 26 (in German).

Simões, F.J.M. and Yang, C.T. (2008) *GSTARS Computer Models and Their Applications, Part II: Applications. International Journal of Sediment Research, IJSR*, Vol. 23, No. 4, pp. 299-315

Soni, J.P., Raju, K. G. and Garde, R.J (1980) "Aggradation in Streams Due to Overloading", *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 106, No. 1, January 1980, pp. 117-132

Souza, L.B.S., Schulz, H.E., Villela, S.M. and Gulliver, J.S. (2010). "Experimental study and numerical simulation of sediment transport in a shallow reservoir." *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol. 3, No. 2, pp. 9-21.

Talebbeydokhti, N. and Naghshineh, A., 2004."Flushing Sediment through Reservoir" Iranian Journal of Science & Technology. Transaction B. Vol. 28 No. B1 pp.119-136

White R. (2001) "Evacuation of sediments from reservoirs, Thomas Telford Publishing, London.

Woo, H. S. (2001). *Hydrography in natural river*, chap. 12.2, pp. 673-678, Gumisugwan.

Yang, C.T. and Simões, F.J.M.(2002) User's Manual for GSTARS3 (Generalized Sediment Transport model for Alluvial River Simulation version 3.0). U.S. Bureau of Reclamation, Denver, CO.

Yang, C.T. and Simões, F.J.M. (2008) GSTARS Computer Models and Their Application, part I : Theoretical Development. International Journal of Sediment Research , IJSR, Vol. 23, No. 3, pp. 197-211.

Yang, C.T. and Ahn, J. (2009) Xiaolangdi Reservoir Scouring and Silting Mechanism and Numerical Simulation Study. Yellow River Engineering Consulting Company, China.

Yang, C.T. (2010) Discussion of "Sediment Transport Modeling Review – Current and Future Developments" by A.N. Papanicolaou, M. Elhakeem, G. Krallis, S. Prakash, and J. Edinger. J. of Hydr. Engrg., ASCE, Vol. 136, No. 8, pp. 552-555.

Yang, C.T. and Ahn, J. (2011) Lewis and Clark Lake sediment management study : sediment transport and flow analysis width GSTARS4. U.S. Army Corps of Engineers., Omaha, NB.

Yucel, O. and Graf, W.H. (1973). "Bed load deposition in reservoirs." Proceedings of 15th IAHR Congress, 72-81.7

Zhang, P. (2013). *Comparison of reservoir sedimentation characteristics in China*, Master Thesis, Donguei University.

Abstract

Experimental Investigation of Sedimentation at Multi-purposed Weir

HyunSoo CHOI

Department of Civil and Environmental Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Flow and channel characteristics along four major rivers have been changed due to The Four Major River Restoration Project including dredging and foundation of multi-purpose weirs. Scour and deposition, lateral channel migration, and bed material characteristics will not remain the same as before the project. Backwater effect due to operation of multi-purpose weir which is constructed near the Nakdong river may cause formation of reservoir delta and increase the vulnerability of inundation. These phenomenon can cause the loss of reservoir storage capacity and danger of flood. The annual rate of reservoir storage capacity loss to sedimentation in the world is 0.5–1%, and it varies dramatically from river basin to river basin due to different forest cover and geological conditions(White 2001). In order to control reservoir sedimentation, different approaches such as bypassing, dredging, flushing, sluicing, and upstream sediment trapping have been developed(Woo, 2001). Although combinations of these sediment control measures are usually adopted to gain the maximum effect, the flushing and sluicing methods play an important role

in the sediment removal and reduction, especially the flushing approach, as it is an efficient hydraulic sediment removal technique to restore the reservoir storage capacity(Liu et al. 2004). An accurate prediction of sedimentation and river geometric change is required for the development of long term operation plan from the beginning stage of river management after the project.

In this study, reservoir delta aspect was calculated in sediment open channel and applied to 1D numerical model to analyzed relationship between deposition volume and hydraulic parameters. By 1D numerical model which is based on Exner's equation, 2,545 cases were simulated and basic hydraulic experimental research was conducted by 78 mm width, 1,550 mm length, 110 mm height open channel flume. 3 types of sediments were used for this research which is 0.2, 0.62, 1.2 mm diameter and water discharge is 0.215 and 0.368 l/sec, various of water depth at the weir and slope was considered for the experimental cases. To satisfy the hydraulic similitude, 300 mm width, 10,000 mm length, 600 mm height open channel flume was used for the additional research. A short term prediction, 4 minutes and 9 minutes, were conducted and the results showed that dimensionless unit stream power and Shields parameter has the highest relationship between the dimensionless deposition volume. By the multiple regression method, an empirical equation was developed for the prediction of deposition volume near the multi-purposed weir at the natural river.

keywords: Multi-purposed weir, Reservoir delta, sedimentation, Loss of reservoir storage capacity, Numerical modeling, Experimental research, Multiple regression, Empirical equation

Student number: 2012-20927

감사의 글

대학원에 입학한 이후 벌써 2년이라는 시간이 지나 석사학위 논문을 쓰며 지난 시간을 되돌아보니, 학문적인 부분 이외에도 많은 것을 배우고 가는 것 같습니다. 장난기 가득하고 공부가 부족했던 저에게 넘치는 가르침을 베풀어주신 서일원 교수님, 서경덕 교수님, 김영오 교수님, Van Thinh Nguyen 교수님, 황진환 교수님, 김영한 교수님께 깊은 감사의 말씀을 전합니다. 특히 아버지 같은 넓은 마음으로 항상 저를 보살펴주신 지도교수 서일원 교수님께 진심으로 감사드립니다.

또한, 환경수리학 연구실의 모든 선배님들께 고마운 마음을 표합니다. 특히 친절한 문답으로 저의 부족한 공부를 채워주기 위해 2년 동안 많은 가르침을 주신 안정규 박사님께 큰 감사를 드립니다. 나아가 동기로서 학교생활부터 공부까지 많은 도움을 준 최수연에게도 고마움을 전하고 싶습니다. 저에게 토목공학이 단순히 기초를 세우고 건물을 짓는 것이 아닌, 지구를 가꾸고 고치는 의사와 같은 학문이라는 것을 알려주신 서울시립대학교의 이송 교수님, 임성순 교수님께도 감사드립니다.

대학원에서의 2년은 활동적이고 외향적인 저에게 끈기와 인내심, 의자에 앉아 차분히 공부하는 방법을 알려준 소중한 시간이었습니다. 지난 1년은 수도 없이 실험실에서 수로에 모래를 포설하여 수리모형실험을 하고, 밤새 실험한 결과를 정리하여 보고서를 작성하고 토론하는 과정을 통해 많은 것을 깨닫게 해준 소중한 시간이었습니다. 이렇게 대학원 2년 동안 쌓은 보석과 같은 경험과 추억들을 가지고 앞으로 더 멀리 나아가도록 하겠습니다.

누구보다 저에게 큰 힘이 되어주시는 부모님이 계셨기에 철이 없고 소심하던 제가 의젓하고 당당하게 성장할 수 있었습니다. 언제나 저를 믿고 지지해주시는 부모님, 항상 감사하고 사랑하며 존경합니다. 저를 위해 항상 기도해주시는 대전 판암동의 친할아버지, 친할머니, 문창동의 외할머니, 늘 건강하시고 앞으로도 오랜 시간 저와 함께 해주시길 기원합니다. 또한, 늘 저를 격려해주시고 응원해주신 친척들과 오래된 제 친구들에게도 고마움을 전합니다.

진인사 대천명(盡人事 待天命)이란 말이 있습니다. 사람이 할 수 있는 일에 최선을 다했다면 결과는 하늘의 뜻을 따른다는 말인데, 언제나 최선을 다하고 요행을 바라지 않는 사람이 되겠습니다. 감사합니다.