工學碩士 學位 論文

都市 下水의 海洋放流 및 近域混合特性 分析

Analysis of Ocean Discharges of Municipal Water and its Near-Field Mixing Characteristics

指導敎授 李 重 雨

2000년 2월

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科(土木工學專攻)

金 康 民

Analysis of Ocean Discharges of Municipal Water and its Near-Field Mixing Characteristics

Kim, Kang Min

Department of Civil & Environmental Engineering

Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

Due to the growth of population and industrial development at the coastal cities, there have been much increase in necessity to effective disposal of the wastewater. The amount of municipal water has been increased rapidly and it is necessary to treat and dispose the wastewater effectively. The recent trend, in terms of disposal of it, is discharge through diffusers into the ocean, either at the coastline or at the deep water, or between these two.

For this end, we need to predict near-field characteristics of discharged water. We adopted CORMIX model for the analysis of the near-field behavior of discharged water and made certain comparison with the existing experimental results.

We found the early dilution is important, especially for the numerical simulation by a depth averaged hydrodynamic model of diffusion mechanism at the existing flow field.

We also applied it to the Pusan Jungang Effluent Outfall System, which is planned to be in the Gamchun harbour and will be completed in 2011. The

model output showed the trajectoral variation of dilution and mixing behavior for three cases of outfall system. Dilution differences have been simulated and found the highest dilution condition under the different displacement of outfall system. On the basis of these outputs it will be proposed the optimum outfall system type and location.

Through the case study, dilution is dependent on the discharge depth, the ambient velocity and total flow rate. This approach might contribute to deal with serious water quality problems caused by the ocean discharge.

目　　次

Page

ABSTRACT i

NOMENCLATURE v

LIST OF TABLES ix

LIST OF FIGURES x

1. 서론 1

1.1 연구의 배경 1

1.2 연구의 목적 및 방법 2

1.3 연구의 내용 4

2. 방류시스템의 공학적 검토 6

2.1 설계의 기본 6

2.2 확산관의 설계 7

2.2.1 도수관의 노선 및 확산관의 위치 9

2.2.2 확산관의 형태 10

2.2.3 도수관과 확산관 길이 12

2.2.4 확산관의 유형 12

3. 수치모델의 기초이론 17

3.1 단일제트 이론 18

3.2 다공제트 이론 24

3.3 등슬롯확산관 이론 28

3.4 근역에서의 혼합특성 29

4. 수치모델의 구성 및 검증 34

4.1 수치모델의 구성 34
4.1.1 혼합모델(Mixing Model)의 개요 34
4.1.2 EPA 근역혼합모델 35
4.1.3 CORMIX 모델 37
4.2 CORMIX 모델의 검증 44
4.2.1 실험조건 44
4.2.2 실험결과 및 검증 45
4.3 확산모델에의 적용성 검토 50

5. 모델의 적용 59
5.1 모의 조건 59
5.1.1 방류 특성 59
5.1.2 확산관의 배치 61
5.1.3 주변 해역의 특성 62
5.2 입력자료 63

6. 결과 및 분석 65
6.1 방류수의 거동분석 65
6.1.1 단일확산관 65
6.1.2 다공확산관 73
6.2 근역 혼합특성 및 희석률 분석 81
6.2.1 단일확산관 81
6.2.2 다공확산관 82
6.3 희석인자의 중요도 분석 85

7. 결론 및 제언 95
7.1 결 론 95
7.2 제 언 97

참고문헌 99

NORMENCLATURE

A	Plume cross-sectional area
A_q	Shape constants of volume flux
a_0	Port area
B	Equivalent slot width
b	Jet lateral dimension where velocity is 37% of maximum mean
b_T	$\lambda \times b$
C	Mean concentration
	Depth averaged concentration
C_m	Time averaged centerline concentration
C_{av}	Flow-weighted average concentration
C_b	Background concentration
C_c	Contraction coefficient
D, D_0	Port diameter
D_x, D_y	Diffusion coefficient in x, y directions
F_n	Densimetric Froude Number
F_L	Local Froude Number
f	Darcy-Weisbach friction coefficient
	Coriolis parameter
g	Gravitational acceleration
g_0'	Reduced gravitational acceleration
H	Total depth
H_A	Mean ambient depth
H_D	Discharge depth

H_{int}	Pycnocline heights
h_0	Port height
h_e	wastefield thickness
h_s	Thickness of lateral buoyancy spreading
J_0	Kinematic buoyancy flux
j_0	Kinematic buoyancy flux per unit length
k	Decaying coefficient
L_b	Plume/crossflow length scale
L_b'	Plume/stratification length scale
L_D	Diffuser length
L_M	Jet/plume transition length scale
L_m	Jet/crossflow length scale
L_m'	Jet/stratification length scale
L_Q	Discharge geometric length scale
l	Port space
l_a	Crossflow/stratification length scale per unit length
l_b'	Slot plume/stratification length scale per unit length
l_M	Slot jet/crossflow length scale per unit length
l_M'	Slot jet/stratification length scale per unit length
l_Q	Characteristic length scale
M, M_0	Kinematic momentum flux

m_0	Kinematic momentum flux per unit length
n	Number of ports, Manning's n
Q	Volume flux
Q	Initial discharge flow rate
q	Pollutant load
q_0	Source discharge volume flux
r	Lateral dimension in cylindrical polar coordinates
S	Dilution
S_i	Minimum dilution at the edge of near-field region
S_m	Minimum dilution
s	Centerline trajectory in jet or plume
t	Time
T_0	Port temperature
T_a	Ambient average temperature
T_{ref}	Reference temperature
U	Mean centerline velocity
U, V	Depth mean velocities in x, y directions
M, N	Flow rate per unit-width x, y directions
U_0	Port discharge velocity
u_a	Current speed
u_w	Wind speed
v_e	Entrainment velocity
v_t	Eddy viscous coefficient
W	Water surface width

w	Wastewater field lateral width
w_m	Maximum time-averaged velocity
X_i	Distance to the edge of near-field mixing zone
x	Streamwise Cartesian coordinate
y	Tranverse coordinate in plane jet or plume
z	vertical coordinate
z_e	Height of rise
α	Entrainment coefficient
β	Relative orientation angle measured either clockwise or counterclockwise from the averatge plan projection of the port centerlines to the nearest diffuser axis
β_0	Initial buayancy flux per unit lengthe
γ	Average alignment angle measured counterclockwise from the ambient current direction to the diffuser axis
γ_b^2	Bottom friction coefficient
ε	Ambient buyancy gradient
θ	Vertical angle of discharge between the port centerline and a horizontal plane
λ	Measure of the difference in the spread of velocity and concentration
μ	Volume flux in jet
ρ	Fluid density
ρ_0	Density of jet or plume

ρ_a	Ambient density
σ	Horizontal angle of discharge measured counterrclockwise for the ambient current directionto the plan projection of the port centerline
ζ	Water surface elevation

LIST OF TABLES

Page

Table 2.1 Introduction of domestic sewage diffuser 16
Table 3.1 Summary properties of turbulent jet (after Fischer et al. 1979) 23
Table 3.2 Spreading ratio with processing merging (after Wood et al. 1993) 27
Table 3.3 The spread constants for a two-dimensional flow 27
Table 3.4 The spread constants for an axisymmetric flow 27
Table 4.1 Summary of numerical model characteristics 36
Table 4.2 Length Scales for single port submerged discharges (Used in CORMIX 1 and CORMIX 2) 42
Table 4.3 Dynamic Length Scales for multiport diffuser (CORMIX 2) in the 2-dimensional slot discharge representation 42
Table 5.1 Characteristics of discharges 60
Table 5.2 Water quality standards on COD 60
Table 5.3 Summary of diffuser characteristics in Station A, B, C (unit : m) 61
Table 5.4 Density distribution 63
Table 5.5 Summary of input data 64
Table 6.1 Near-field characteristics at the edge of N.F.R. using CORMIX 1 83
Table 6.2 Near-field characteristics at the edge of N.F.R. using CORMIX 2 83

LIST OF FIGURES

Page

Fig 1.1 Actual diffusion of pollutant particles 3

Fig 1.2 Pollutant source - (a) theoretical source (b) practical source 4

Fig 2.1 Design process of submerged multiport diffuser 8

Fig 2.2 Diffuser type and flowfield 11

Fig 2.3 Orientation and alignment of diffuser 11

Fig 2.4 Examples of diffuser type 15

Fig 3.1 Detailed near field region 17

Fig 3.2 Classification of zone of flow establishment and zone of established flow 22

Fig 3.3 Schematics of a round buoyant jet 22

Fig 3.4 Jets merging in unidirectional diffuser 26

Fig 3.5 Examples of near-field stability and instability conditions for submerged discharges in limited water depth 32

Fig 3.6 Stability diagram for line buoyant discharges into stagnant ambient 33

Fig 3.7 General diagram for line buoyant discharges into confined depth comprising stagnant and flowing ambient 33

Fig 4.1 CORMIX system elements and processing sequence 39

Fig 4.2 Definition diagram CORMIX 2 43

Fig 4.3 Limits of applicability CORMIX 43

Fig 4.4(a) Density profiles for data on January and April, 1996 (Case 1 and Case 2) 46

Fig 4.4(b) Density profiles for data on July and October, 1996 (Case 3 and Case 4) 47

Fig 4.5(a) A comparison of the dilution by UM, RSB and CORMIX model

..... 48
Fig 4.5(b) A comparison of the wastefield thickness by UM, RSB and CORMIX model 49
Fig 4.6 Calculated result (max. flood tide) 53
Fig 4.7 Comparison of diffusion between point source and processed source after 0.1 period 54
Fig 4.8 Comparison of diffusion between point source and processed source after 0.3 period 55
Fig 4.9 Comparison of diffusion between point source and processed source after 0.5 period 56
Fig 4.10 Comparison of concentration profile for A - A' cross section according to the 0.1, 0.3, 0.5 tidal cycles between point source and processed source 57
Fig 4.11 Comparison of concentration profile for B - B' cross section according to the 0.1, 0.3, 0.5 tidal cycles between point source and processed source 58
Fig 5.1 Location map 60
Fig 5.2 Schematic drawing of submerged multiport diffuser 62
Fig 6.1 CORMIX 1 output diagrams of Case A in winter 67
Fig 6.2 CORMIX 1 output diagrams of Case A in summer 68
Fig 6.3 CORMIX 1 output diagrams of Case B in winter 69
Fig 6.4 CORMIX 1 output diagrams of Case B in summer 70
Fig 6.5 CORMIX 1 output diagrams of Case C in winter 71
Fig 6.6 CORMIX 1 output diagrams of Case C in summer 72
Fig 6.7 CORMIX 2 output diagrams of Case A in winter 75
Fig 6.8 CORMIX 2 output diagrams of Case A in summer 76
Fig 6.9 CORMIX 2 output diagrams of Case B in winter 77
Fig 6.10 CORMIX 2 output diagrams of Case B in summer 78

Fig 6.11 CORMIX 2 output diagrams of Case C in winter 79
Fig 6.12 CORMIX 2 output diagrams of Case C in summer 80
Fig 6.13 Centerline dilution at the edge of N.F.R. 84
Fig 6.14 Wastefield thickness at the edge of N.F.R. 85
Fig 6.15 Dilution, wastefield thickness, height of rise computed by CORMIX model according to the variations of discharge depth 88
Fig 6.16 Dilution, wastefield thickness, height of rise computed by CORMIX model according to the variations of ambient velocity 89
Fig 6.17 Dilution, wastefield thickness, height of rise computed by CORMIX model according to the variations of total flow rate 90
Fig 6.18 Dilution, wastefield thickness, height of rise computed by CORMIX model according to the variations of effluent concentration .. 91
Fig 6.19 Dilution, wastefield thickness, height of rise computed by CORMIX model according to the variations of discharge angle 92
Fig 6.20 Dilution, wastefield thickness, height of rise computed by CORMIX model according to the variations of port diameter 93
Fig 6.21 Dilution, wastefield thickness, height of rise computed by CORMIX model according to the variations of port spacing 94

1. 서론

1.1 연구의 배경

우리나라 대부분의 해안은 천연의 모래사장이 발달하여 수려한 경관과 깨끗한 해양환경이 유지되어 왔으나, 점차 해안을 따라 인구밀도가 증가하고 임해지역공단 등 산업시설이 밀집하여 처리되지 않은 산업폐수나 도시생활하수의 배출이 현저하게 늘어나고 있는 실정이다. 또한, 내륙지역에서의 축산 및 양식장의 폐수와 사료, 비료 및 농약 등의 과다 사용으로 인해 잔류량이 하천에 유입되는 정도도 매우 높아지고 있다. 실제로, 연안역 및 항만의 반폐쇄수역에서의 수질오염은 주로 도시하수에 의해 발생하고 있으며, 무분별하게 진행되고 있는 연안역 및 항만개발로 해수유통구간이 좁아져 선박 및 해상에서 투기되는 제반 오염물질과 함께 도시하수의 최종착지인 이들 해역에서 그냥 방관만 할 경우에는 다시 살릴 수 없는 폐수의 장으로 전락하고 말 것이다.

Baalstad(1975)는 '해양은 최후의 처리장이므로 최대한 보호할 필요가 있으며, 처리되지 않은 하폐수의 방류는 심각한 문제와 폐해를 가져온다' 고 역설하였다. 특히, 해저를 통하도록 하는 유도부는 다른 목적의 해양 이용자와 이해관계가 얽혀 있으므로 배출전 처리과정으로 오염물질을 제거할 수 있음을 강조하였다.

세계적으로 거의 모든 국가의 주요 해안도시는 하폐수를 바다로 방류하고 있다. 그러나, 배출기준은 국가에 따라, 지역에 따라 다르다. 내수에서의 방류를 포함하여 해양방류의 목적은 당연히 주변환경의 악화를 가져옴이 없이 안전하고, 효과적이고 경제적인 배출물의 투기에 있으며, 해양을 이용하는 모든 이들에게 유익하도록 하는 것에 있다. 최근 해양은 생산의 장이라는 것 외에 유람선, 세일링, 수영, 서핑, 스킨스쿠버, 낚시 등 해양스포츠 및 레크리에이션의 장으로 귀중한 자산이 되고 있다. 따라서, 지속적으로 이들의 자산을 유지하기 위해서는 도시하수로부터의 방류가 해수의 탁도, 색, 유막형성 등 수권을

변화시키는 등으로 시민의 건강에 위해를 가져오지 않도록 유의하여야 한다.

일반적으로 어떠한 형태의 해양방류시스템에서 만족시켜야 할 방류수역의 해양수질의 기준은 다음과 같은 파라메타를 다루도록 하고 있으며 특히, 산업분야에서 발생한 물질은 실질적으로 해양방류에서 제외하도록 하고 있다.

① **외관**(physical appearance)
② **퇴적**(deposition of solids)
③ pH **및 생물학적 산소요구량**(BOD)
④ **박테리아**(bacteriological)
⑤ **미생물**(biological)
⑥ **금지물질**(restricted substances) - **잔류성 독성물질**

바다를 끼고 있는 천혜의 해양국가에서는 지속적인 수질의 유지를 위해서도 합리적인 방류방안을 찾는 것이 급선무라 할 수 있다. 이러한 관점에서 하폐수의 해양방류 처리는 방류수역의 주변환경특성을 이용하여 방류초기에 방류수를 최대로 희석·분산시켜서 고농도 오염물질로 인한 악영향을 최소화시키는데 그 목적이 있으며, 현재 도시 하수의 처리방안의 하나인 하수 확산관을 통한 도시 하수방류의 초기 희석과 오염물 거동에 관한 하수의 혼합특성을 예측하고 그 주변 해역에 미치는 환경영향을 검토할 필요가 있다(이, 1999).

1.2 연구의 목적 및 방법

항만과 같은 반폐쇄수역에서 일반적인 오염의 메카니즘은 대체로 1) 폐쇄수역내 자체 오염물질의 발생량의 증가, 2) 외부 자연환경으로부터의 유입, 3) 폐쇄수역내 오염의 질적·양적인 진행, 4) 생태계 피해의 심각화라고 하는 과정을 거친다. 이에 대하여 이들 환경보전을 위한 우리의 대응책은 첫째, 오염의 진행을 예측하여 오염물질이 폐쇄수역으로 방출되지 않도록 미리 조정해 가는 것과, 둘째, 환경감시와 추적을 충실하게 수행하여 그 결과를 발생원에

재구성(feedback)함으로써 오염의 영향과 피해를 최소한으로 줄이는데 노력을 기울이는 것이다.

본 연구는 이러한 일련의 과정 중에서 현재 계획 중인 하수 처리장의 방류자료를 토대로 하여 주변해역과 방류시스템(outfall system)의 조건 등을 모델에 적용하여 방류물질의 거동을 파악하는 것이 1차적인 목적이다. 이러한 현황 파악을 통해, 수중 방류시 확산인자별 중요도를 분석하고, 하수 확산관 설계시 기초자료를 제공하고자 한다.

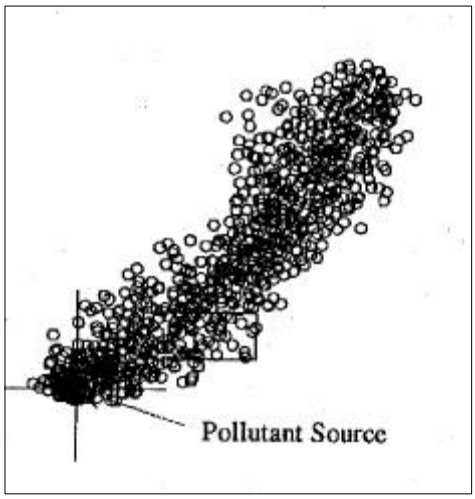


Fig. 1.1 Actual diffusion of pollutant particles

도시 하수처리방안의 하나인 하수확산관을 통한 도시 하수방류의 초기희석과 오염물 거동에 관한 하수 혼합특성을 하수종말처리장 계획지점을 대상으로 하여 예측하고 장래 설치 후 운영시 그 주변해역에 미치는 환경영향을 검토하고자 한다. 이러한 연구는 연안해역에서 오염물의 거동을 수치실험으로 예측할 때 단순히 배출점에서 2차원 광역 수심평균확산실험으로 다루는 경우(Fig. 1.1 및 1.2 참조)에 나타나게 되는 차이를 규명하여 보다 더 현실적인 확산예측에도 활용될 것으로 본다.

본 연구에서 하수방류시 초기희석에 적용할 모델은 미국 환경청(U.S. EPA)에서 제공되는 근역혼합모델인 CORMIX (Cornell Mixing Zone Expert System)모델이다. CORMIX모델은 미국 환경청의 지원을 받아 미국 Cornell 대학에서 개발한 길이축척 모델(Akar & Jirka, 1991)이다. 이 모델은 오염물질과 독성 오염물질의 초기혼합 및 희석과정을 모의하도록 개발된 전문가시스템(Expert system)으로 3개의 부프로그램으로 이루어져 있다. CORMIX 1, 2, 3은 각각 수중단일확산관, 수중다공

확산관, 표층방류에 의해 방류되는 오염물질의 초기혼합과 희석을 모의하는 프로그램이다(Jirka 등, 1996).

본 연구에서는 수중방류를 대상으로 하기 때문에 CORMIX1과 CORMIX2 모델을 사용하기로 한다.

또한 유동장과 방류수의 장기 확산을 재현하기 위하여 수심평균 2차원 장주기 파동방정식과 2차원 물질확산 기초방정식을 유한차분으로 구성한 수치모델을 활용하였다.

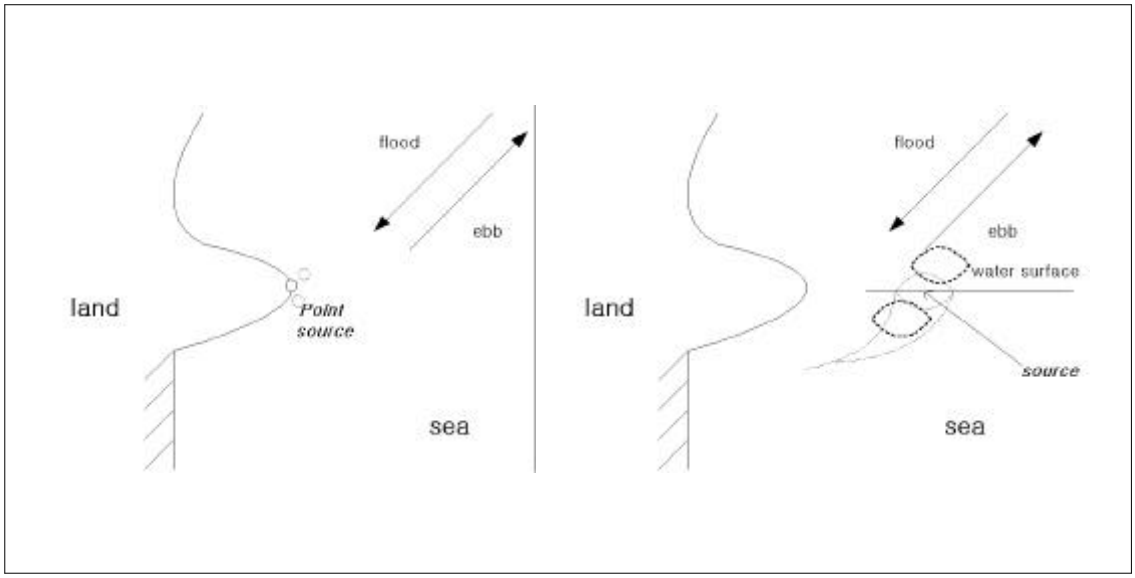


Fig. 1.2 Pollutant source - (a) theoretical source (b) practical source

1.3 연구의 내용

대도시 인근 해역에서의 도시하수의 방류문제를 다루기 위하여 먼저 최근 제안되고 있는 방류시스템에 대한 구성 및 설계의 기본적인 문제를 다루고, 방류시 초기거동을 분석하기 위한 기본적인 수단으로 수치모델을 이용한다. 방류수의 수학적 거동에 대한 이해와 물리적인 혼합과정에 대한 이해는 단일

제트이론, 다공제트이론, 등슬롯확산관이론 등의 기초이론으로 접근하였다.

기초이론의 이해를 통해서 가장 적합하며 적용과 분석이 용이한 수치모델을 선택한다. 아울러 수치모델의 검증은 현장측정자료의 분석 및 비교를 통하여 수행하였으며, 유동장이 형성된 시험역을 선정하여 2차원 수심평균 확산실험과의 차이를 분석하였다. 방류시스템의 공학적인 접근을 통하여 적용대상지역으로 선정한 감천항 매립지를 중심으로 부산중앙하수처리장 계획에 대한 기초자료를 수집, 분석하여 모델의 입력치로 삼았다.

모델의 적용결과를 분석하여 근역희석률과 오염물 혼합거동 양상 등을 예측하여, 확산인자별 중요도를 파악하였으며 결과에 따라 확산실험에 누락시킬 수 있는 중요한 초기범위의 설정문제까지도 다루었다.

2. 방류시스템의 공학적 검토

해양 방류시스템의 목적은 하폐수를 초기에 최대로 희석시켜서 방류수역에서의 위해를 최소화시키는데 있다. 본 장에서는 해양 방류시스템의 공학적인 관점을 다루어 방류시스템을 구성하는 각 부분의 특성을 파악하고 방류조건 및 주변해역의 여건을 고려한 방류시스템의 확산인자별 중요도를 추후 수치실험으로 평가하고자 한다. 해양방류시스템 설계의 기본과 기준은 예로부터 Rawn(1960), Brooks(1980, 1983), Fisher(1979), Brooks & Koh(1975), Koh(1977) 등의 연구에서 광범위하게 다루어져 왔으며, 여기서는 방류특성을 이론적으로 규명할 때 필요한 제분야를 정리하였다.

2.1 설계의 기본

방류 및 내륙처리시설은 방류 수역의 수질표준을 반드시 유지할 수 있는 시스템적 관계로 간주하여야 한다. 처리수준을 높이면 방류수질도 향상되며 도수관(feeder pipe) 및 확산관을 연장하고 심해에 방류함으로써 그 효과를 증대시킬 수 있다는 점에서 상호보완의 관계에 있다고 볼 수 있다. 방류시스템은 유기탄소화합물과 영양염과 같은 유출이 생태계의 허용한계 이내로 유지되도록 충분히 희석되어야 한다.

이러한 이유로 현재 채택되고 있는 최적의 방류 수심은 70m에 달하며, 극한 상황에서는 이보다 더 깊게 하여 방류시 짧은 거리에서 수백분의 1정도로 하폐수의 희석이 이루어지도록 한다. 방류수역은 생태계에 치명적인 영향을 가져오지 않는 곳, 또는 제한적인 영향만 있는 곳으로 하여야 하며, 반폐쇄수역과 같은 해수 순환이 어려운 지역은 피해야 한다.

수리학적 관점에서의 설계는 먼저 모든 흐름장에서 방류공 간격이 같도록 설정하여야 한다. 관내의 유속은 세굴(scouring)이 유발하여 입자의 퇴적을 막을 수 있어야 하며, 유속이 약 0.5m/sec 이상이어야 한다. 일단 해양으로 방류되면 방류공을 통해 해수가 유입되지 않아야 하는데, 이것은 방류공에서 밀도

프루드수(densimetric Froude Number)를 1보다 크게 유지하고, 각 방류공의 단면적을 합한 총 방류공 단면적이 도수관 및 확산관의 단면적을 넘지 않도록 하면 된다.

수리용량(hydraulic capacity)은 기록된 최고조에 대응한 방류 최대량이 될 수 있도록 시스템을 설계하여야 한다. 이러한 경우 지나치게 안전성을 고려한 설계가 되지만 고고조와 최대유량의 결합확률을 고려하여 다소 완화시킬 수도 있다. 최대의 희석을 얻기 위해서는 방류가 수평으로 유지되도록 방류공을 배치하여야 하며, 관벽에서 단순한 원형의 구멍을 낸 형태나, 확산관이 매설된 경우에는 연직유도관(riser)의 형태를 취하도록 한다.

2.2 확산관의 설계

주어진 조건하에서 최적의 초기혼합을 만들어 내는 방류시스템을 도출하기 위한 다공확산관의 설계 절차 및 각 단계에서 고려하여야 할 요소들은 Fig. 2.1과 같다(서, 1996).

확산관 설계에서는 확산관의 형태와 설치위치, 도수관 및 확산관의 크기 및 길이, 연직유도관과 방류공의 형상 및 직경을 결정한다. 도수관 및 확산관, 연직유도관 또는 방류공의 크기와 간격은 일련의 복잡하고 반복적인 혼합특성 계산과 수리계산을 통하여 결정된다.

이 과정에서 적용되는 기초적인 물리 요소들은 다음과 같다.

① 설계유량
② 관의 직경
③ 관로 경사
④ 관재질에 따른 마찰저항
⑤ 방류수의 밀도
⑥ 주변해역의 밀도

⑦ 방류 수심

⑧ 작용 수두(operating head)

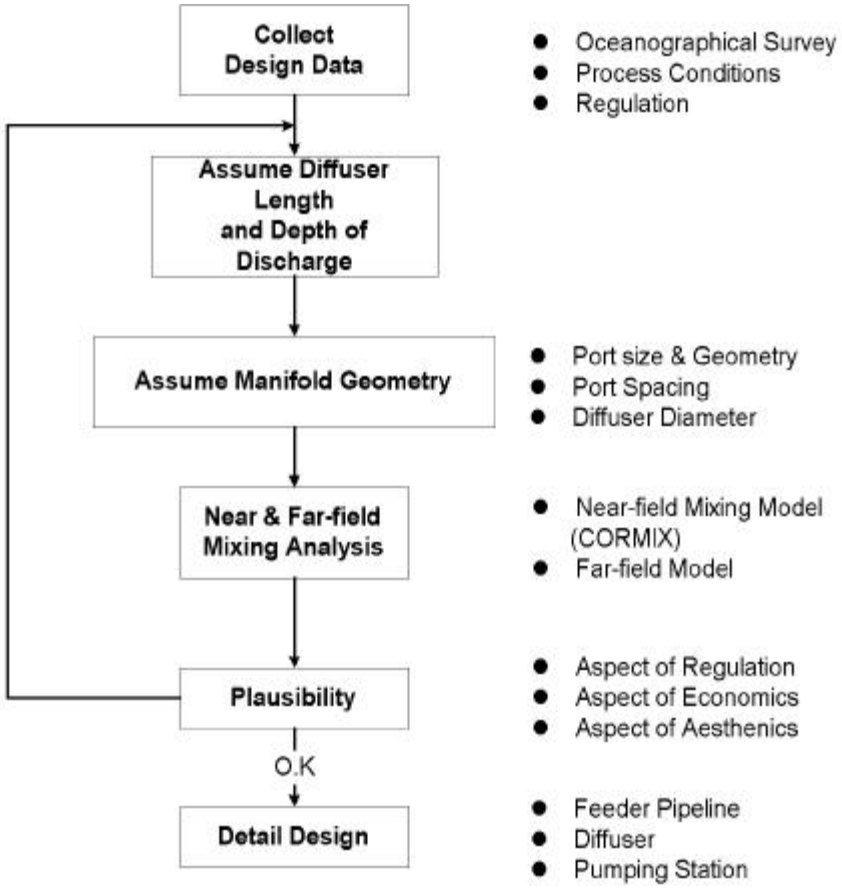


Fig. 2.1 Design process of submerged multiport diffuser

확산관의 설계유량은 방류되는 하수 및 온배수의 방류량에 따라 결정된다. 방류량은 하루, 주중 또는 계절별로 다를 수 있으므로 이러한 변동을 고려하여 설계유량을 결정하여야 한다. 설계유량은 최대 방류량 뿐만 아니라 최소인 경우도 고려하여야 한다. 유량이 적을 경우는 해수가 확산관 내로 역류할 수 있고 일부는 방류되지 못하여 확산관 전체에 균등한 희석을 촉진할 수 없기 때문이다.

육상의 방류지점과 확산관 사이의 수두가 작아 설계유량을 중력 흐름으로 보낼 수 없거나 소요 유속을 만족하지 못한다면 펌프장을 설치하여 방류하는 방법을 고려하여야 한다.

2.2.1 도수관의 노선 및 확산관의 위치

도수관의 매설 및 부설거리가 가장 짧게 되도록 시점과 종점을 직선으로 연결하는 노선을 선정하는 것이 가장 경제적이나 기존 시설물이나 해상교통을 배려하여 안전한 노선을 선정한다. 도수관이 안전하게 유지될 수 있는 평면 및 종단형상을 갖는 노선을 선정함에 있어 고려하여야 할 사항들은 다음과 같다.

① 기존 시설물의 현황과 장래 계획
② 해상교통과 해수면 이용
③ 해양의 물리적, 환경적 특성

해양의 물리적 조건은 도수관을 매설하거나 부설한 후의 안정성, 매설깊이의 결정 및 부설 방법 등 시공에 있어서 중요한 사항이며, 해저의 지형, 해저의 지질, 파랑, 조류, 바람 등을 고려하여 설계하고 기상을 고려하여 시공계획을 수립하여야 한다. 도수관은 일정한 하향경사를 유지한 지형을 따라 설치하는 것이 바람직하다.

확산관 설치지역의 지반경사에 대한 일정한 기준은 없으나 방류공의 위치가 동일하면 각 방류공의 방류량을 균등하게 유지하는데 유리하게 때문에 편평하거나 비교적 완만한 경사를 가진 지역을 선정하는 것이 합리적이다. 가파른 경사지역에 확산관을 설치하면 각 방류공의 방류량 등, 확산관의 수리특성이 동일하지 않을 뿐만 아니라 방류량이 적을 경우 일부 방류공에서는 전혀 방류되지 않는 현상이 발생할 수도 있다.

온배수 및 하수를 방류하기 위하여 설치되는 확산관은 방류에 따른 방류구

주변역의 고온, 고농도역을 줄이고 이에 따른 악영향을 최소화하도록 확산관의 위치를 선정하여야 한다. 확산관 위치 선정시 고려 사항은 다음과 같다.

① 냉각수 취수구의 온도 상승
② 인근 어장 및 수산업 관련 지역에 대한 영향
③ 법적 규제 기준

확산관에 의한 희석률은 방류구 주변역의 해양 수리학적 조건에 많은 영향을 받게 되며 특히 주변수의 유속과 방향 그리고 수표면으로부터 방류공까지의 수심과 밀접한 관련이 있다. 이러한 이유로 인해 확산관은 근역 희석률을 증가시키고 해안선으로 재순환되는 시간을 길게 하기 위하여 가능한 수심이 깊은 곳에 설치할 것을 권장한다.

2.2.2 확산관의 형태

확산관의 형태는 방류공의 배치형태와 확산관축의 조류방향에 대한 상대적인 각도에 따라 분류되며 그 형태의 조합은 다양하다. 그러나, 어떤 형태의 확산관이 가장 바람직한가를 일률적으로 결정할 수 있는 기준은 없고 주변역의 해양 수리학적 조건과 지형 조건에 따라 최적 확산관형태는 달라지는 것이 일반적이며 선박의 항행과 어로작업에 의해 영향을 받기도 한다. 일반적으로는 희석을 최대화하기 위하여 주 조류(net currents)방향에 직각으로 설치하는 것이 원칙이나 해역의 조건과 혼합 특성, 경제성 및 시공성 등을 고려하여 이를 변형하기도 한다(Layton, 1976).

확산관은 크게 일방향 확산관(unidirectional diffuser), 축방향 확산관(staged diffuser), 양방향 확산관(alternating diffuser)으로 구분할 수 있다. 일방향 확산관은 흐름이 없거나 유속이 작은 정체수역에 효과적인 형태로 공류형 확산관(coflowing diffuser)과 Tee형 확산관이 있다. 축방향 확산관은 조류방향에 관계없이 대칭적인 흐름을 발생시키는 형태로 주로 온배수확산관에 사

용되며, 양방향 확산관은 확산관 축을 따라 좌우 양측에 방류공을 설치한 것으로 최근에 변형된 형태의 구조를 취한 것이 많다. 각각의 개략도는 Fig. 2.2와 같다.

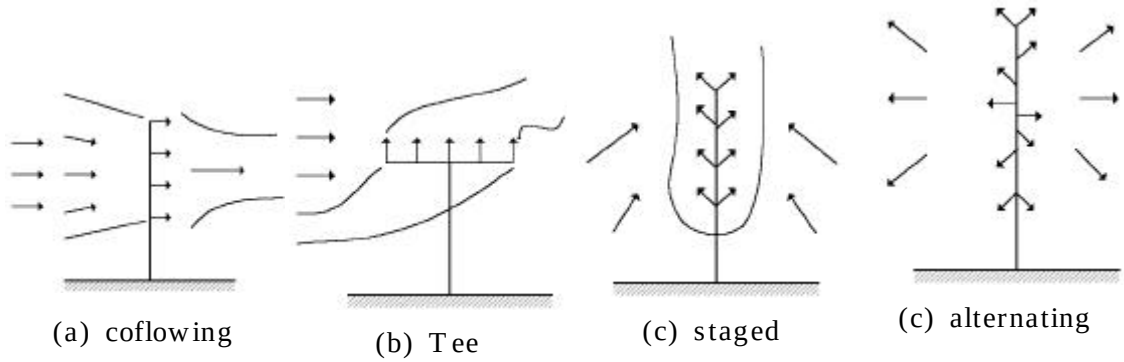


Fig. 2.2 Diffuser type and flowfield

조류방향에 따른 확산관의 배치예는 Fig. 2.3과 같으며, Y자형[Fig. 2.3(c)]과 O자형[Fig. 2.3(d)]은 확산관축과 조류방향이 직각을 유지할 수 있는 기회를 많이 주어 조류방향의 불규칙성을 개선하기 위한 것이다.

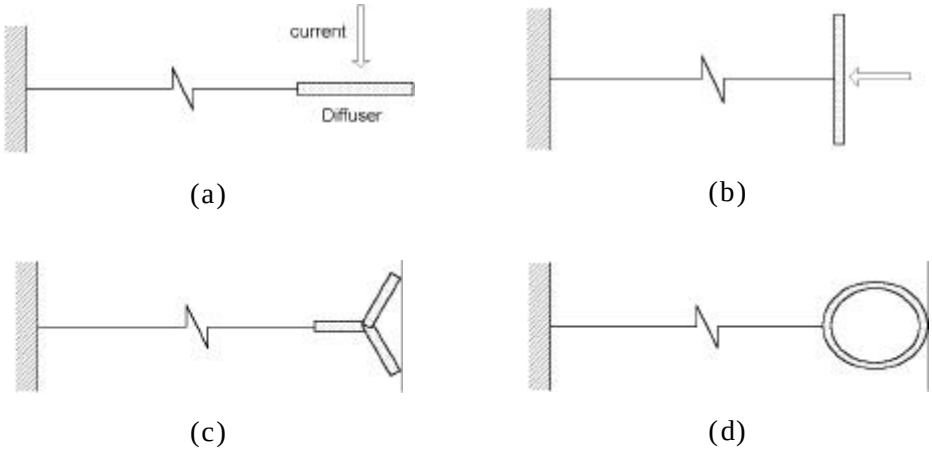


Fig. 2.3 Orientation and alignment of diffuser

2.2.3 도수관과 확산관 길이

도수관과 확산관의 길이는 수리학적으로는 소정의 희석률을 얻기 위해 요구되는 희석률과 수심에 밀접한 관련이 있고, 구조적인 측면에서는 방류공의 수와 이들의 간격에 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 확산관이 길면 길수록 희석률은 커진다. 그러나 확산관이 조류와 평행하고 유속이 큰 경우는 오히려 희석률이 떨어지는 경향을 보인다. 따라서, 유속이 강할 경우 평행 배치법을 하고 있는 확산관은 바람직하지 않다. Tee형 확산관의 경우는 다른 형태의 확산관에 비해 도수관의 길이가 근역의 초기 혼합에 미치는 영향이 크다. 이때는 도수관의 길이를 확산관의 길이만큼 취해야 초기희석률에 대한 해안선의 영향을 작게 할 수 있다. 주어진 조건이 동일한 경우 근역에서 같은 희석률을 얻기 위하여 요구되는 확산관의 길이는 양방향 확산관(alternating diffuser)의 경우가 축방향 확산관(staged diffuser) 및 공류형 확산관(coflowing diffuser)에 비하여 비교적 크다.

2.2.4 확산관의 유형

방류량(flow rate)은 방류공 면적 및 방류속도와 밀접하게 관련이 있다. 즉, 작은 방류공은 높은 방류속도를 가지게 되므로, 높은 운동량플럭스가 발생한다. 즉, 높은 방류속도는 초기혼합을 증가시키지만, 바람직하지 않은 혼합패턴을 가지는 불안정한 근역 흐름을 형성할 수 있다. 반면, 원역에서는 희석률의 변화가 거의 없다.

1) 확산관의 직경

확산관의 크기는 확산관의 형태와 방류시스템의 운영방법에 따라 달라지고 방류량, 사용하는 관의 재질, 관내 토사, 공기, 유입해수를 고려하여 선정한다. 관내 유속이 작거나 유속이 0인 경우 해수가 관내로 유입되고 이렇게 해수가 유입되면 관내 토사 침전과 잡초 성장을 초래하게 된다. 방류가 이루어지고 있는 동안에는 방류공의 프루드수를 1이상 유지하면 해수의 침입을 막을 수 있다.(Brooks, 1960)

방류시스템에서 방출되는 일별 유량은 일정하지 않다. 최대유량의 시작점에서 침전물을 세척할 수 있도록 관의 크기를 결정하여야 한다. 또한 방류수가 관로에 유입되기 전에는 모든 공기를 배출하여야 한다. 방류가 이루어지는 동안 유입되는 경우는 여러 경우가 있을 수 있으나 특히 관이 부분적으로 차 있는 경우와 흐름이 사류($F_r>1$)인 경우 공기 유입이 심하다.

또한 방류수가 부분적으로 관에 차 있다가 만관으로 바뀌는 천이구역에서도 공기유입이 이루어지며, 자유수면으로 방류수가 유입되는 격실이 존재하는 경우에도 항상 공기혼입이 발생된다. 육상 펌프에서의 누출부와 잘못 설계된 펌프 취수구의 공기를 동반한 와류는 공기/물 혼합체의 흐름을 유발시키기도 한다. 관내에 존재하는 공기는 관의 통수능력 및 수중관로의 작용을 감소시키며 수격작용의 효과는 증가한다.

이러한 모든 영향은 지양되어야 하며 근본적으로 공기혼입을 방지해야 한다. 이것이 불가능한 경우 관내의 유속은 공기밸브 혹은 통풍장치가 설치된

지점까지 공기를 수송시킬 수 있을 만큼 커야 한다. 처리장의 휴지기 동안 확산관내에는 해수로 가득 차 있게 되고 가동을 시작하는 시점에서 해수를 관내에서 제거하여야 한다.

확산관이 해저바닥 위에 설치되어 있는 경우 해수의 유출은 가장 밑에 위치한 방류공의 압력차에 의존하며 관경을 결정하는 주된 요소는 해수의 배출속도이다. 해저면의 굴곡 및 파력으로 인해 해저바닥에 설치하지 못하는 경우엔 일반적으로 연직유도관이 설치된다. 이러한 확산관의 경우 방류 휴지기에 해수가 관로내로 유입된다. 이 해수의 제거는 방류수의 유속을 세굴속도보다 크게 함으로써 가능해진다.

2) 방류공

방류공은 확산관의 관벽에 구멍을 뚫거나 확산관의 상단에 상향의 튜브를 붙여 이를 제작한다. 또한 확산관의 상단에 확산관보다 상대적으로 작은 직경의 연직유도관을 부착하고, 그 상단에 임의 방향의 방류공을 부착할 수도 있다. 이런 형식의 방류공은 관로가 바닥의 퇴적에 의해 메워지는 것을 방지하거나 파랑에 의한 확산관의 파손을 방지하기 위하여 확산관을 해저에 매설할 때 사용한다. 최근에는 하나의 연직유도관 상단에 여러 방향으로 방류하는 형식이 사용되고 있다.

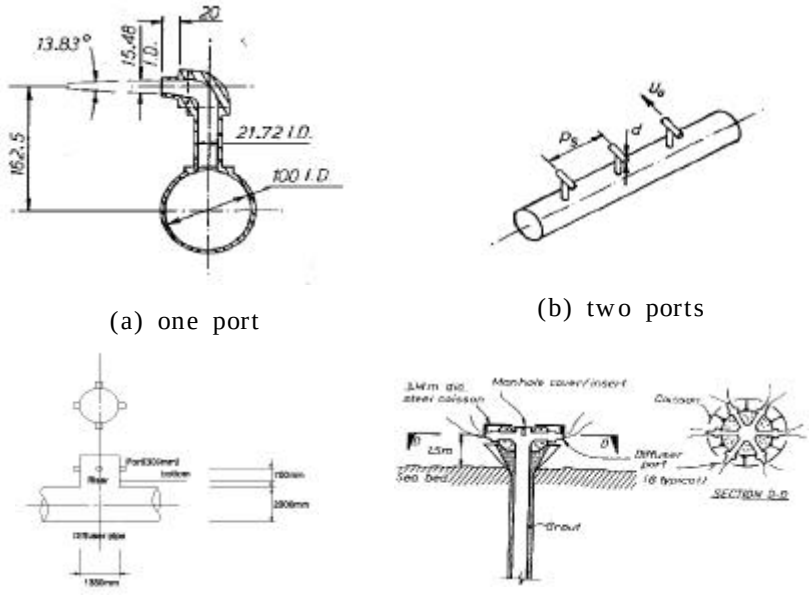
방류공의 방류 방향은 주변수와 방류수의 특성을 고려한 혼합특성 분석에서 함께 결정되는데 상향으로 약 20° 이상을 유지하는 것이 희석효과를 증대시킬 수 있다. 방류공은 매끈한 종구 형태이어야 하며 구멍 폐쇄가 일어나지 않을 만큼 충분히 커야 한다. 또한, 조개류와 잡초류에 저항성이 있는 재질로 만들어야 한다. 연직유도관 또는 방류공이 바닥위로 노출되어 있으면 외부의 충격력에 대하여 취약하므로 이를 보호하는 방법을 활용하거나 연직유도관 또는 방류공을 연성(flexible)의 관을 활용하기도 한다.

방류공의 수와 크기는 목표하는 희석률, 각 방류공의 방류량의 균등분배 확보, 해수 침입과 방출, 그리고 침전물에 대한 세굴속도 등을 고려하여 결정하여야 한다. 주어진 유량에 대하여 방류공의 단면적과 방류유속간에는 반비

례관계가 성립한다. 즉, 방류공의 단면적이 작을수록 방류유속이 커지고 결과적으로 큰 운동량을 갖게 된다.

일반적으로 큰 방류유속은 근역의 희석률을 극대화시키는 이점을 가지나 바람직하지 않은 흐름형태를 근역에서 발생시키기도 한다. 실제 설계에서 방류유속은 3 8m/sec의 범위에서 선택하는 것을 추천하고 있다(Jirka, 1996). 방류유속이 0.5m/sec보다 작은 경우는 확산관 혹은 도수관내에 토사의 침전이 발생하는 문제점이 발생한다. 가장 간단한 경우로써 확산관이 해저위에 위치하고 확산관의 가장 낮은 위치에 방류공이 있는 경우 확산관의 직경은 세굴속도에 의해 결정된다. 확산관의 직경이 결정되면 방류공의 크기를 시행착오적(trial and error)으로 선정할 수 있다.

주변 조건 및 방류 조건을 고려하여 그 유형을 선정하며, 방류공의 조류에 대한 방향과 배치는 많은 조합이 가능하다. 주변의 국부적인 수심과 그 밖의 조건에 의해 결정되어야 한다. 양방향 확산관의 경우, 직접적으로 주 운동량을 가지지 않는다. 희석률은 하수확산관의 경우 부력플럭스와 조류에 의한 초기 혼합에 좌우된다. 부채꼴 형상(fanned- out)으로 설계된 양방향 확산관은 천해역에서 희석률을 향상시키는 것으로 알려져 있다. Fig. 2.4는 방류공을 1, 2, 4, 6개로 한 경우의 확산관 유형을 나타낸 것이다.



(a) one port (b) two ports

(c) four ports (d) six ports

Fig. 2.4. Examples of diffuser type

국내의 경우, 1980년대에 5개 공단도시의 하수처리장 타당성조사에서 처리된 하수를 다공확산관에 의해 해양으로 방류하는 방안이 검토되었고, 마산/창원, 온산, 울산 하수처리장 등에서는 현재 운영 중에 있고, 가덕신항만 및 녹산/신호 산업단지와 연계한 녹산하수처리시설에도 다공확산관이 도입된 실시설계가 완료되었다. 국내 하수확산관의 시설개요는 Table 2.1과 같다.

하수확산관은 온배수확산관에 비하여 초기운동량이 작으므로 방류된 하수는 방류공 근처에서 곧바로 주변수와의 밀도차에 의한 부력 및 조류의 영향을 강하게 받는 플룸의 거동을 나타낸다. 방류 방향 및 주변 수역의 밀도분포, 조류 방향 및 크기에 따라 차이를 보인다.

Table 2.1 Introduction of domestic sewage diffuser

Subjects	Masan/Chang-won	Ulsan	Onsan	Noksan
Discharge volume (m^3/sec)	12.84 (planned maximum, 2011)			8.24 (planned maximum, 2011)
Discharge depth (m)	13.0	35.0	27.0	6.5
Feeder pipe dia.(㎜)/leng.(m)	2,000/680.0	2,200/4,500.0	1,800/2,000.0	2,500/126.0
Diffuser pipe dia.(㎜)/leng.(m)	2,000/210.0	2,000/1,300.0	1,800/180.0	2,200/56.0
Riser dia.(㎜)/spa.(m)/no.	1,350/10.0/20	200/10.01/130	1,350/18.0/9	1,200/9.0/6
Port dia.(㎜)/no.	200/80	200/260	250/36	500/24
		nozzle 150㎜		

3. 수치모델의 기초이론

해양방류 계획시 설계의 우선목표는 방류수의 초기희석을 극대화하는 것이다. 이를 효과적으로 달성하기 위해서는 소위 운동량이 현저해지는 제트(jet)나 부력이 현저해지는 플륨(plume), 또는 이 둘의 결합과 같이 방류수역에서 방류수에 의해 난류의 형태가 나타나도록 하는 것이다. 이와 같은 흐름은 주변수의 연행에 의한 체적플럭스를 증가시켜, 초기희석을 증가시키는 역할을 하게 된다.

대부분의 방류수는 방류수역과의 밀도차에 의해 해수표면 상향으로의 부력을 가지게 되며, 주변수가 성층화된 경우에는 이들 층에 포착(trapping)되거나 표면에 도달하게 된다. 이와 같은 과정을 나타내는 영역을 가리켜 근역(near field zone) 또는 초기영역(initial zone)이라 정의한다.

Fig. 3.1에 나타낸 바와 같이, 근역은 운동량(momentum)이 지배적인 제트영역, 천이영역(transition region), 부력(buoyancy)이 지배적인 플륨영역 등 세 부분으로 나눌 수 있다.

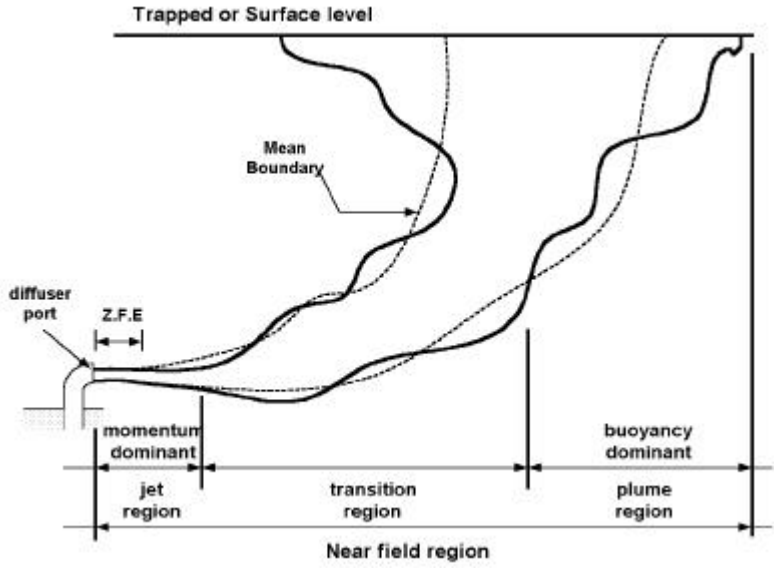


Fig. 3.1 Detailed near field region

제트의 역학적 거동을 설명할 수 있는 유용한 인자들은 다음과 같이 정의하며, 원형부력제트의 희석에 중요한 변수들이다. Q, M, B 는 각각 체적플럭스, 특성 운동량플럭스, 특성 부력플럭스이며 초기값들과 관련된다.

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 W \tag{3.1}$$

$$M = \frac{\pi}{4} D^2 W^2 \tag{3.2}$$

$$B = \left(\frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_a} \right) g Q = g_0' Q \tag{3.3}$$

여기서, D는 제트의 직경, W는 평균유출속도, ρ_a는 주변수의 밀도, ρ_0는 방류공에서의 방류수의 밀도, g는 중력가속도, g_0'는 유효중력가속도를 가리킨다.

3.1 단일제트 이론

단일제트(single jet)가 수중에 방류될 때 주변수와 부력의 차이가 없는 경우는 완전제트(pure jet), 운동량제트(momentum jet), 또는 비부력제트(non-buoyant jet)라 하며 초기 운동량플럭스가 난류혼합을 야기한다. 반면, 주변수와의 밀도차에 의해 부력효과를 받는 경우는 부력제트(buoyant jet) 또는 강제플륨(forced plume)이라 하며 초기 운동량플럭스와 부력플럭스가 함께 난류혼합에 영향을 미친다.

Fig. 3.2에 나타난 바와 같이, 혼합구역이 제트의 중심선을 관통하는 지점까지를 흐름발달영역(zone of flow establishment)이라고 한다. 이 흐름발달영역은 원형 방류공인 경우 방류공 직경의 약 6 7 배 정도이며, 사각형 방류공인 경우에는 방류공 폭의 약 5배 정도의 거리까지인 것으로 알려져 있다.

발달흐름영역(zone of established flow)은 제트의 중심부가 교란되기 시작하는 지점부터 시작된다. 와류영역의 확장으로 주변수를 계속 연행함으로써 제트 중심부의 속도는 계속 감소하여 중심선의 최대유속은 초기 유속보다 작아진다. 이 영역과 흐름발달영역의 경계를 명확히 정의하기는 곤란하다. 발달흐름영역의 끝은 이론적으로는 불가능하지만, 중심선의 유속이 영이 되는 지점까지가 된다(Albertson 등, 1948).

원형부력제트(round buoyant jet)의 개념도는 Fig. 3.3과 같다. 일반적으로 초기흐름발달영역(initial zone of flow establishment)이후에는 제트의 궤적이 자기상사(self similar)를 가지는 것으로 알려져 있다. 즉, 어떠한 단면상의 시간평균속도나 농도분포를 제트 궤적 중앙에서의 최대값과 횡방향 폭의 값으로 표현할 수 있다. 속도, 밀도손실(또는 온도), 농도의 분포가 다음 식과 같이 축방향 s에 대칭을 이루는 Gaussian분포를 가진다(Wood 등, 1993).

$$U = U_m e^{-\left(\frac{r}{b}\right)^2} \tag{3.4}$$

$$\rho_a - \rho = (\rho_a - \rho_m) e^{-\left(\frac{r}{\lambda b}\right)^2} \tag{3.5}$$

$$C = C_m e^{-\left(\frac{r}{\lambda b}\right)^2} \tag{3.6}$$

여기서, U 는 종방향 유속, U_m 은 제트 궤적 중앙에서의 종방향 유속, r 은 중심축 s에 직교하는 횡방향의 좌표, b 는 제트의 유효폭, ρ, ρ_m 은 제트의 밀도 및 제트의 궤적 중앙에서의 밀도, λ 는 유속과 농도사이의 퍼짐율(spreading ratio), C, C_m 은 방류물질의 농도 및 제트의 궤적 중앙에서의 농도이다. 퍼짐율 λ 는 실험결과 1 이상의 값이며 완전플륨인 경우 1.067, 완전제트의 경우 1.275를 가진다(Fischer 등, 1979).

유속의 분포를 식(3.4)와 같이 정의하면 종방향을 따르는 체적플럭스(volume flux)는 다음과 같이 유도된다.

$$Q = 2\pi \int_0^{\infty} U dr = \pi U_m b^2 \tag{3.7}$$

Morton 등(1956)은 제트의 유효폭인 b에서의 횡방향 유입속도 v_e와 제트 중앙에서의 평균유속 U_m이 다음과 같은 관계가 있다고 가정하였다.

$$\frac{v_e}{U_m} = -\alpha [F_L] \tag{3.8}$$

식 (3.8)에서 연행계수(entrainment coefficient) α는 국부 프루드수(local Froude Number) F_L의 함수이다(List & Imberger, 1973). 따라서, 종방향을 따르는 체적플럭스의 변화율은 다음과 같다.

$$\frac{dQ}{ds} = 2\pi b\alpha U_m \tag{3.9}$$

식(3.8)과 같이 연행계수는 실험을 통하여, 다음과 같은 국부 프루드수 F_L 의 함수의 형태로 표현된다(Albertson 등, 1950 및 Hirst, 1971).

$$F_L = \frac{U_m}{\left(\frac{\rho_a - \rho_m}{\rho} gb\right)^{1/2}} \tag{3.10}$$

Fox(1970)는 연직방향으로 방류시 연행계수를 식(3.11)로, Hirst(1971)은 Fox의 이론을 확장하여 일정한 각 θ로 방류될 때의 연행계수를 식(3.12)로 표현하였다.

$$\alpha = \alpha_1 + \frac{\alpha_2[\lambda]}{F_L^2} \tag{3.11}$$

$$\alpha = \alpha_1 + \frac{\alpha_2[\lambda]}{F_L^2} \sin\theta \tag{3.12}$$

여기서, θ는 제트의 궤적이 수평면과 이루는 각이고, α_1은 완전제트일 경우의 연행계수이며, α_2는 퍼짐율의 함수형태가 된다(Fischer 등, 1979 및 Wood 등, 1993).

Table 3.1에 완전제트의 특성을 정리하였다. 완전플륨, 부력제트의 특성치들이나 주변수의 밀도성층효과, 주변유속이 있는 경우에 대한 제트의 특성에 관한 세부적인 내용은 Fischer 등(1979)과 Wood 등(1993)을 참고하기로 한다.

Table 3.1에서 제트의 특성길이축척인 l_Q는 다음과 같이 체적플럭스 Q와 운동량플럭스 M의 항으로 정의된다.

$$l_Q = Q/M^{1/2} = \sqrt{A} \tag{3.13}$$

여기서, A는 제트의 초기 단면적이다. 특히, 원형제트의 경우 $l_Q = \sqrt{\pi/4}D$ 이며, 2차원 평면제트의 경우 등길이축척(equivalent length scale)은 슬롯의 폭이 된다. 제트의 오리피스(orifice)에서 하향 거리를 z로 하여 차원해석하면 제트특성들은 z/l_Q, Q, M의 함수로 중요한 의미를 가진다.

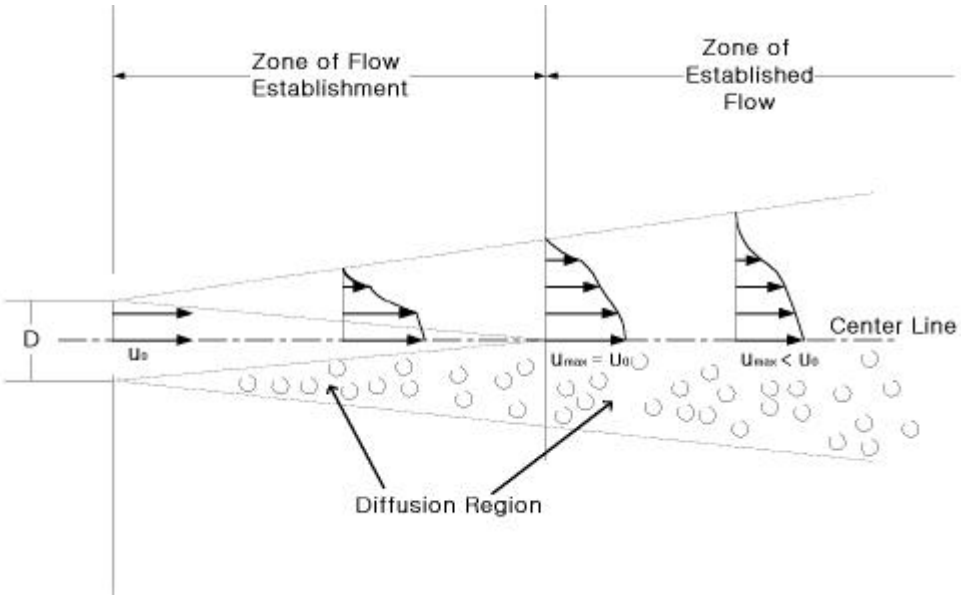


Fig. 3.2 Classification of zone of flow establishment and zone of established flow

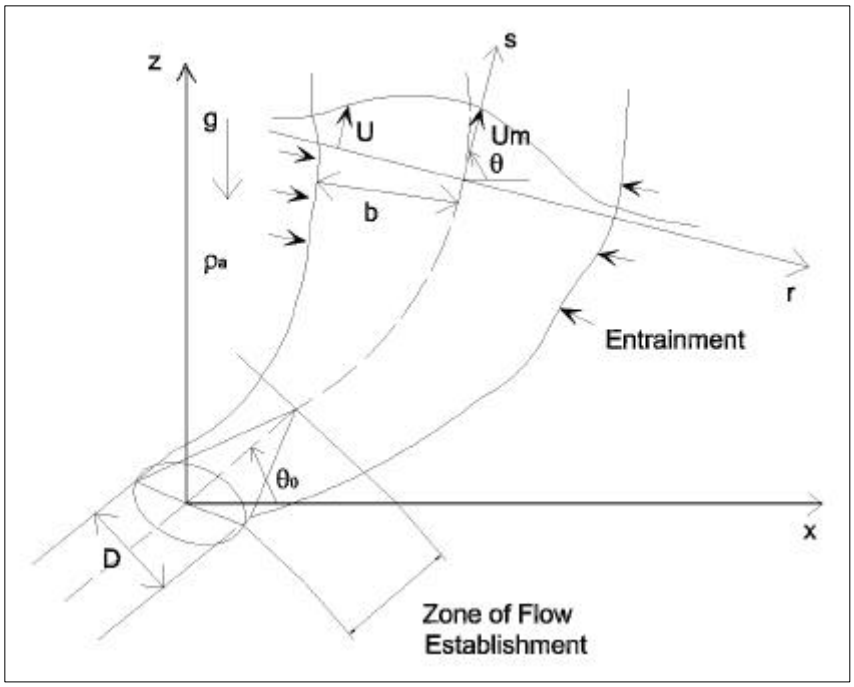


Fig. 3.3 Schematics of a round buoyant jet

Table 3.1 Summary properties of turbulent jet (after Fischer et al. 1979)

Parameter	Round jet	Plane jet
Initial volume flow rate, Q	$\frac{\pi D^2}{4} U_0$	BU_0
Initial specific momentum flux, M	$\frac{\pi D^2}{4} U_0$	BU_0^2
Characteristic length scale l_Q	$\frac{Q}{M^{1/2}}$	$\frac{Q^2}{M}$
Maximum time-averaged velocity, U_m / U_o	$\frac{U_m}{U_o} = (7.0 \pm 0.1)(\frac{l_Q}{z})$	$\frac{U_m}{U_o} = (2.41 \pm 0.04)(\frac{l_Q}{z})^{1/2}$
Maximum time-averaged tracer concentration, C_m / C_o	$\frac{C_m}{C_o} = (5.6 \pm 0.1)(\frac{l_Q}{z})$	$\frac{C_m}{C_o} = (2.38 \pm 0.04)(\frac{l_Q}{z})^{1/2}$
Mean dilution, μ / Q	$\frac{\mu}{Q} = (0.25 \pm 0.01)(\frac{z}{l_Q})$	$\frac{\mu}{Q} = (0.50 \pm 0.02)(\frac{z}{l_Q})^{1/2}$
Velocity scale of half-width, b_w / z	0.107±0.003	0.116±0.002
Concentration scale of half-width, b_T / z	0.127±0.004	0.157±0.003
Ratio, C_m / C_{av}	1.4±0.1	1.2±0.1

3.2 다공제트 이론

방류공의 직경 D, 초기 방류유속 U_o, 방류공간의 간격이 l 인 다공확산관의 경우에 초기방류지점에서 일정거리까지 각각의 방류공에서 방류되는 제트는 독립적인 원형제트의 거동을 보이나 제트들이 병합하면서 상호간섭이 발생하는 천이구간(transition region) 외곽부터는 슬롯제트(slot jet)와 같은 2차원적 거동양상을 보이게 된다. 천이구간에서의 유속분포는 각각의 원형제트의 유속을 선형적으로 중첩시켜 표현할 수 있는 것으로 알려져 있다(Wood 등, 1993). Fig. 3.4는 각각의 방류공에서 방류되는 원형제트가 천이구간에서 유속이 중첩되는 과정을 도시한 것이다. 유속분포는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u(x,y,z) = U(z)\frac{\exp(-y_b^2)\sum_{n=-\infty}^{+\infty}\exp\left\{-\left(\frac{x_l+n}{b_l}\right)^2\right\}}{\sum_{n=-\infty}^{+\infty}\exp\left\{-\left(\frac{n}{b}\right)^2\right\}} \qquad (3.14)$$

여기서, $y_b = y/b$, $x_l = x/l$, $b_l = b/l$ 이며 n은 방류공의 수이다. 이 유속분포는 두 개의 길이축척을 포함한다. 하나는 축대칭 제트를 포함하는 선이고 다른 하나는 이 선에 수직인 선이다. 이 두 길이를 각각 b와 l로 나누어 무차원화한 것이다. 유속분포는 다음과 같은 특징을 갖는다.

① $b/l \ll 1$: 원형제트로 축방향 대칭의 유속분포를 가진다.
② $b/l \gg 1$: 슬롯제트와 같은 2차원 유속분포를 가진다.
③ y축과 수직인 유속분포는 항상 Gaussian분포를 가진다.

다공확산관에서의 유속분포를 나타내는 식 (3.14)을 이용하여 임의 단면에서 하나의 방류공이 차지하는 체적플럭스 q를 표현하면 다음과 같다.

$$q = \int_A u(x, y, z)dA = I_q U(z)bl \tag{3.15}$$

위에서 A는 대칭면 사이의 제트의 단면적이고 I_q는 체적플럭스의 형상상수(shape constant)이다. I_q의 계산에는 λ의 거동이 주어져야 한다.

퍼짐율 λ의 값은 축대칭 플륨에서는 1.067의 값을 가지며, 축대칭 제트에서는 1.275의 값을 가진다. Kotsovinos(1975)의 연구에 근거한 Rodi(1984)의 연구에서는 2차원 플륨에 대한 λ의 값은 1.35로, 플륨이 병합함에 따라 값이 증가할 것이라 제안하였다. 부력 흐름상에서는 전체영역에 대한 제트 영역의 비가 작을 것이고 따라서 이 병합 흐름의 축대칭 부분에 대한 λ값은 1.067로 하였다. 그러나 부력제트가 병합함에 따라 이 값은 증가하여 Table 3.2에 나타난 것처럼 2차원에 대한 값은 1.35에 이른다.

식(3.14)에 b/l 대신 $\lambda b/l$ 을 사용하면 상사성을 가지는 부력분포(buoyancy distribution)를 나타내는데 이용할 수 있다.

일반적으로 방류공에서 떨어진 거리 s와 b는 선형관계를 가지는데 그 비례상수 $\Delta b/\Delta s$를 퍼짐상수(spread constant)라 하여 원형제트와 슬롯제트에서 다른 값을 가지는 것으로 알려져 있다(Wood 등, 1993). Table 3.3 및 Table 3.4는 퍼짐상수를 정리한 것이다.

위와 같은 방법으로 임의단면에서의 운동량플럭스, 부력, 부력플럭스를 계산할 수 있으며, 이는 제트의 궤적 중앙에서의 유속 및 농도를 알면 적절한 형상상수의 값을 이용하여 임의단면에서의 제트궤적, 운동량, 부력에 관한 정보를 쉽게 얻을 수 있다.

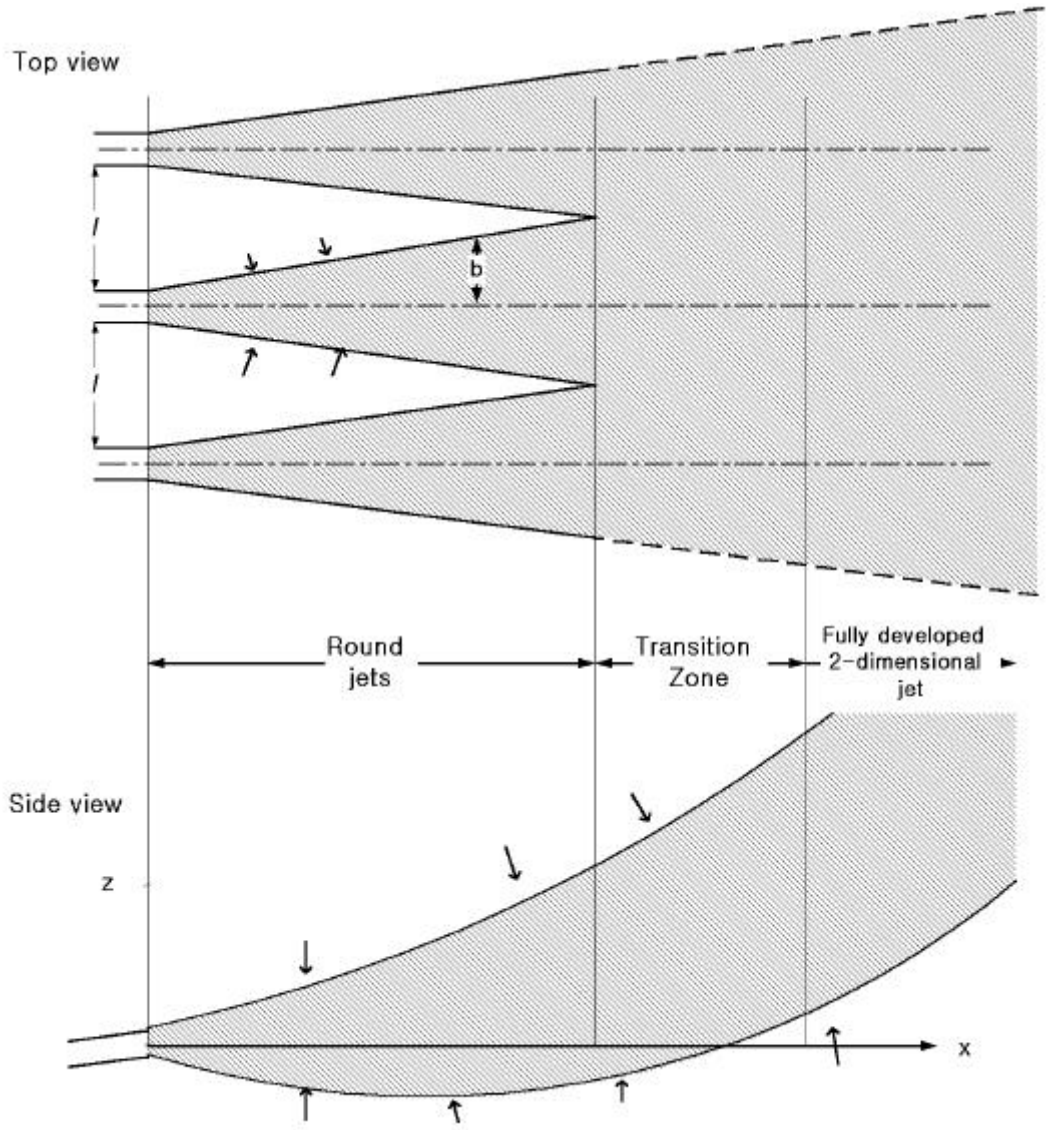


Fig. 3.4 Jets merging in unidirectional diffuser

Table 3.2 Spreading ratio with processing merging

(after Wood et al. 1993)

b/l	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
λ	1.07	1.08	1.09	1.11	1.15	1.21	1.27	1.31	1.34	1.35	1.35

Table 3.3 The spread constants for a two-dimensional flow

Jet	Plume	Reference
0.116	0.116	Fischer et al., 1979*
0.125	0.109	Patel, 1971**
	0.120	Kotsovinos, 1975
0.108-0.132		Evertt & Robins, 1978**
0.120	0.120	Chu & Baines, 1989

* averaged of the values obtained prior to the publication of Fischer et al.

** These values are deduced from experiments in a coflowing fluid

Table 3.4 The spread constants for an axisymmetric flow

Jet	Plume	Reference
0.107±0.003	0.105	Fischer et al., 1979*
0.109	0.109	Papanicolaou, 1984

* averaged of the values obtained prior to the publication of Fischer et al.

3.3 등슬롯확산관 이론

천이구역 이후부터는 해석의 용이함을 위해서 다공확산관을 등슬롯확산관(equivalent slot diffuser)의 형태로 해석하는 경우가 많은데, 이때 단위길이당 동일한 방류량과 운동량플럭스를 가지는 등슬롯확산관의 폭 B 는 다음과 같이 정의된다.

$$B = \frac{\pi D^2}{4l} \tag{3.16}$$

Cederwall(1971)은 다공확산관과 등슬롯확산관의 평균희석률을 비교하였는데 완전제트의 경우에는 다음과 같은 관계를 가진다고 하였다.

$$R = \frac{dilution\ of\ the\ multiport\ diffuser}{dilution\ of\ the\ equivalent\ slot\ diffuser} = 0.95 \tag{3.17}$$

또한 완전플륨(pure plume)의 경우는 R이 0.78임을 밝혔다. 이상의 결과는 실험의 불확실성을 고려한다면 다공확산관을 등슬롯확산관의 개념을 이용하여 해석해도 크게 무리가 없음을 시사해 준다. 수중다공확산관을 이용한 방류시 희석률을 구하기 위하여 사용하는 주된 변수 중의 하나로 방류유량의 관성력과 부력의 비로 정의되는 밀도프루드수(densimetric Froude Number)가 있는데 이는 다음 식과 같다.

$$F_n = \frac{U_0}{\left(\frac{\rho_a - \rho_o}{\rho_a} gD\right)^{1/2}} \tag{3.18}$$

등슬롯확산관의 개념을 사용할 경우의 밀도프루드수는 다음과 같다.

$$F_s = \frac{U_0}{\left(\frac{\rho_a - \rho_o}{\rho_a} gB\right)^{1/2}} \tag{3.19}$$

위에서 ρ_0는 방류물질의 초기농도이다.

방류유속이 커지고 유효중력가속도가 작아지면, 즉 밀도프루드수가 크면 방류수는 완전제트의 형태에 가까워지고, 밀도프루드수가 적어지면 완전플룸의 특성을 갖는다. 플룸과 제트는 그 형성과정을 지배하는 물리적 특성이 다르므로, 많은 연구자들이 이를 분리하여 기술하려는 해석적 또는 실험 연구를 수행하였다.

Albertson 등(1948)은 수중 난류제트(submerged turbulent jet)를 경험적·이론적으로 연구하였다. List와 Imberger(1973)는 부력제트의 난류연행을 연구하였는데, 이전에 발표된 실험 결과와 차원해석을 결합하여, 수직 상향의 난류부력제트들의 연행계수가 특정한 값을 가지지 않는다는 것과 연행함수(entrainment function)는 제트의 국부적인 밀도프루드수와 제트의 국부적인 퍼짐율에 의해 지배되는데, 속도분포 실험으로부터 두 값을 상수로 유추할 수 있음을 밝혔다. 또한 실험에 의하여 원형의 수직부력제트의 연행함수가 밀도프루드수와 반비례한다는 것을 보였다. 난류제트, 난류플룸과 부력제트에 대한 다양한 연구성과는 Fischer 등(1979)에 요약되어 있다.

3.4 근역에서의 혼합특성

다공확산관을 통하여 방류된 오염물질의 속도 및 농도분포는 많은 인자의 영향을 받게 되는데, 일반적으로 근역(near field region)과 원역(far field region)에서의 혼합과정으로 분류하여 설명된다. 근역에서의 혼합과정은 다공확산관의 기하학적인 형태, 방류 운동량 및 부력특성 등 확산관 그 자체의 특성에 의해 영향을 받는다. 즉, 방류공을 통하여 방류된 개개의 제트는 주변수와의 유속차에 의한 전단난류연행으로 인해 주변수의 연행을 야기하면서 제트

의 폭은 증가하면서 제트의 유속 및 농도는 감소하게 된다. 이러한 제트는 방류되는 부력 및 방류각 등에 따라 일반적으로 해수표면을 향하게 되며 방류공간의 간격에 따라 제트간의 상호간섭을 유발하기도 한다. 해수표면에 도달한 제트는 방류운동량과 부력, 주변수의 수심 등에 따라 제트의 궤적에 재연행(reentrainment)되는 수도 있다. 다공확산관의 특성 외에도 주변수의 유속 및 수심, 밀도성층화정도가 근역에서의 혼합효과에 크게 영향을 주게 된다.

원역에서의 혼합과정은 오염물질의 플륨이 밀도류를 이루며 중력확장을 계속하면서 이루어지며, 하수확산관의 경우에는 주변수와의 난류혼합, 온배수확산관(thermal diffuser)의 경우에는 대기와의 열교환 등에 의한 혼합이 지배적인 과정이 된다.

근역흐름의 안정성은 근역에서의 희석률에 영향을 미치는 중요한 인자이다. 근역에서의 흐름이 불안정하게 되면 이미 혼합이 이루어진 물이 다시 제트의 궤적에 재유입하게 되어 초기희석률을 감소시키게 된다. Fig. 3.5는 흐름이 안정한 경우와 불안정한 경우의 흐름형태를 도시한 것이다. (a)와 (c)는 주로 심해에 위치하면서 부력이 큰 하수확산관(sewage diffuser)의 형태에서 주로 볼 수 있는 안정된 흐름의 구조이고, (b)와 (d)는 천해에 위치하면서 부력이 상대적으로 적은 온배수확산관의 전형적인 흐름특성이다.

근역 흐름의 안정성 여부에 관한 연구는 Jirka(1982)에 의해 이루어졌다. 수심이 H, 등슬롯확산관의 폭이 B, 방류공의 수평면에 대한 상향각이 θ_o인 경우에 흐름의 안정요소로 작용하는 단위길이당 초기 부력플럭스 β_0는 다음과 같다.

$$\beta_0 = g_0' U_0 B \tag{3.20}$$

위에서 g_o'은 초기유효가속도(initial effective acceleration)이다. 흐름의

불안정요소로 작용하는 단위길이당 초기 운동량플럭스 m_o는 다음과 같다.

$$m_0 = U_0^2 B \tag{3.21}$$

주변유속에 의한 운동량은 흐름을 불안정하게 하는 요소가 되는데 이의 단위길이당 운동량플럭스, m_a는 다음과 같다.

$$m_a = u_a^2 H \tag{3.22}$$

주변류가 없는 경우에 기존의 실험연구를 통하여 도출한 흐름의 안정조건의 경계를 결정하는 공식은 다음과 같다.

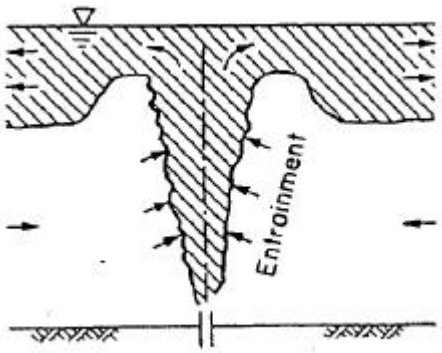
$$\frac{H}{B} = 1.84 \; F_s^{4/3} (1 + \cos^2 \theta_0)^2 \tag{3.23}$$

식(3.23)은 H/B 가 200 이상에서는 근역의 안정여부를 파악하는데 합리적인 기준을 제공해 주는 것으로 알려져 있다. Fig. 3.6은 식(3.23)을 나타낸 것으로 θ_0 에 따른 근역내에서의 안정여부를 알 수 있다.

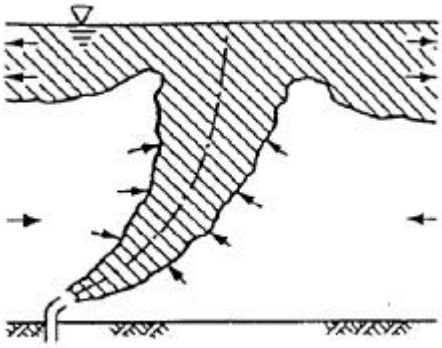
주변류가 있는 경우에 주변유속이 야기하는 흐름의 불안정 성분의 크기를 판단하는 변수로서, $m_a/(\beta_0^{2/3} H)$ 를 도입하여 다음과 같은 흐름의 안정성 여부를 판단하는 식을 유도할 수 있다(Jirka, 1982).

$$\frac{m_0}{\beta_0^{2/3} H} + \frac{m_a + m_0 \cos\theta_0}{\beta_0^{2/3} H} = 0.54 \tag{3.24}$$

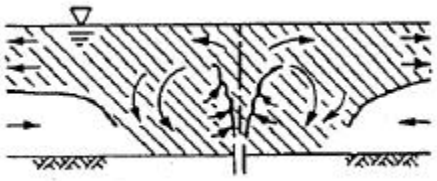
식(3.24)는 주변의 흐름이 있는 경우와 없는 경우에 모두 적용할 수 있는 식으로 Fig. 3.7에 나타내었다.



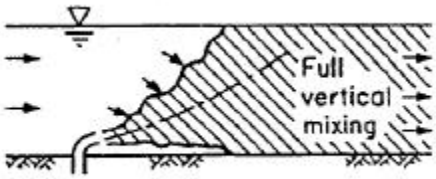
(a) Deep Water, High Buoyancy, Vertical: Stable Near-Field



(b) Deep Water, High Buoyancy, Near-Horizontal: Stable Near-Field



(c) Shallow Water, Low Buoyancy, Vertical: Unstable Near-Field with Local Mixing and Restratification



(d) Shallow Water, Low Buoyancy, Near-Horizontal: Unstable Near-Field with Vertical Mixing

Fig. 3.5 Examples of near-field stability and instability conditions for submerged discharges in limited water depth

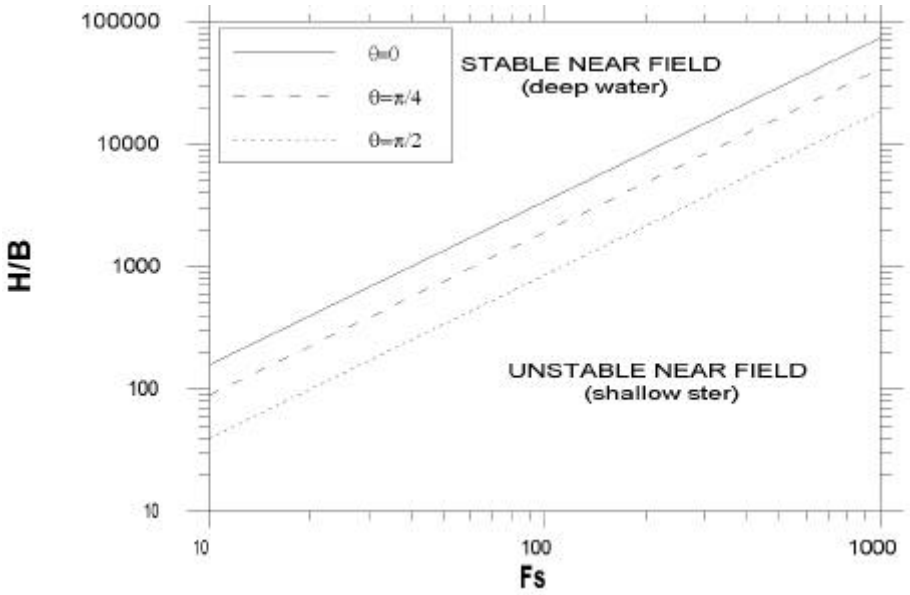


Fig. 3.6 Stability diagram for line buoyant discharges into stagnant ambient

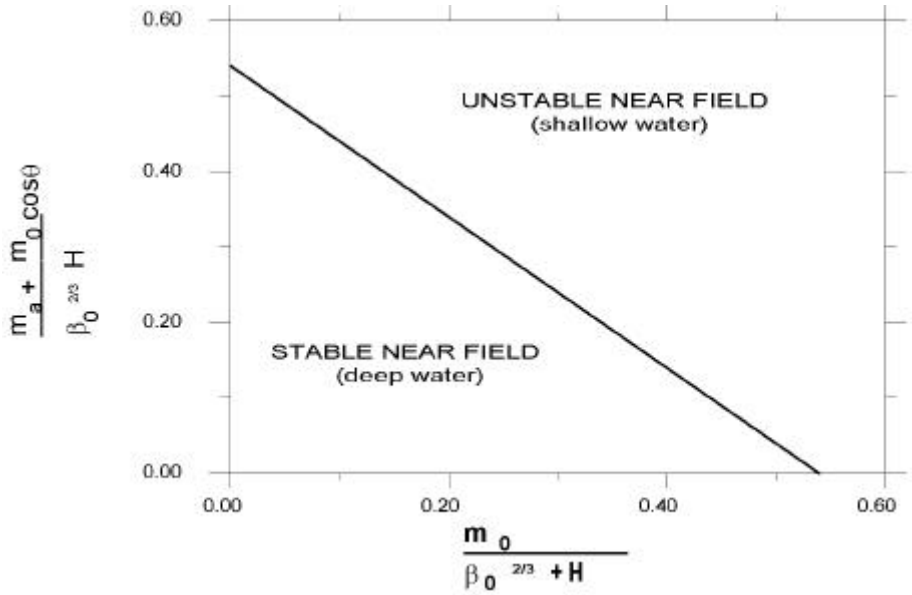


Fig. 3.7 General diagram for line buoyant discharges into confined depth comprising stagnant and flowing ambient

4. 수치모델의 구성 및 검증

4.1 수치모델의 구성

4.1.1 혼합모델(Mixing Model)의 개요

혼합모델은 크게 물리적 실험모델과 수학적 모델로 크게 나눌 수 있는데, 물리적 실험모델은 원형(prototype)을 모델화하거나 현장관측을 통하여 플륨의 거동을 파악하고, 방류수의 특성을 유속, 수온, 밀도 등을 정량적, 정성적으로 분석하는 기법으로 수학적 모델의 기초자료가 되며 추후 평가자료가 된다.(Fischer 등, 1979).

한편, 수학적 모델은 수치모델과 적분모델의 두 가지로 구분할 수 있는데, 이중 수치모델은 플륨의 흐름, 농도, 온도, 성층화 특성 등을 표현하는 연속방정식, 운동방정식, 상태방정식, Reynolds 방정식, 그리고 난류항들에 대한 완결방정식 등으로 구성된 일련의 연립 편미분 방정식들을 공간적으로 유한차분법(FDM) 혹은 유한요소법(FEM) 등을 수용하여 해석하는 방법이다. 여기에 질량, 운동량, 부력에 관한 보존방정식에 속도와 부력의 상사함수(similarity function)를 적용하고, 제트 단면에 대해 적분한 상미분 방정식을 해석하면 적분모델이 만들어진다. 상사함수는 제트의 중심선에서의 플륨의 특성이 되는 물리함수들을 상사로 가정하는 것을 뜻한다.

한편, 적분모델은 Eulerian 적분모델과 Lagrangian 적분모델의 두 가지로 나누어지며, 전자는 플륨의 중심선 궤적 s에 따른 여러 변수들의 변화율을 표현한 일련의 상미분방정식을 풀어서 연행된 질량 및 희석률을 계산하며, 후자는 시간에 따른 궤적상의 좌표(x, y, z)를 추이하여 각 물리량에 대한 보존방정식을 수립하고 플륨의 혼합특성을 계산해 낸다.

이들 모델은 주로 짧은 구간에 걸쳐 제트와 플륨의 해석을 위한 것으로 광역에 대한 해석을 위해서는 별도의 접근이 필요하다. 즉, 근역 및 원역을 모두

해석할 수 있는 전역모델(complete field model)은 각 영역에서의 혼합특성이 길이나 시간에 따라서 다양하게 나타나 실제 적용에는 한계가 있기 때문에 최근까지도 근역 및 원역으로 구분하고 각 영역별로 적절한 가정을 도입하여 방류수의 혼합특성을 연구해 오고 있는 점이 일반적인 경향이다(Zhang, 1995).

4.1.2 EPA 근역혼합모델

보편적으로 사용하고 있는 U.S. EPA의 근역혼합모델에 대한 적용성과 특성을 요약하여 정리하면 Table 4.1과 같다.

이중에 UPLUME은 Eulerian 적분모델로 흐름이 없고 밀도성층의 형태가 일정하지 않은 수역에 임의의 각도로 방류하는 부력플룸을 모의하기 위한 것으로 연직방향의 유속이 0이 되거나 중심선과 수평면이 이루는 각도가 0°또는 플룸이 수표면에 도달할 때 계산을 종료하도록 되어 있다.

UOUTPLM은 단일플룸을 모의하는 Lagrangian 적분모델로, 조류가 존재하는 수역에서 주변수를 연행하여 질량이 증가하는 플룸요소의 특성들을 연속적으로 모의한다. 계산의 종료는 UPLUME과 동일하다.

UDKHDEN은 단일확산관, 다공확산관 모두 적용 가능한 3차원 Eulerian 적분모델로 플룸의 병합과정과 흐름발달영역을 통한 다양한 플룸형상을 고려할 수 있는 모델이다.

UMERGE는 플룸의 궤적을 따라 플룸요소를 추적함으로써 양의 부력을 가진 흐름을 해석하는 Lagrangian 적분모델로, 인접 플룸간의 간섭과 확산관 축에 직각방향으로 흐르는 유속이 수심에 따라 다른 값을 가질 수 있으며, 수평면에 대한 방류각도도 임의로 설정할 수 있다.

ULINE은 균일한 밀도를 가진 주변수체로 방류되는 플룸의 실험에 근거하여 임의의 성층구조를 가진 주변수에서의 희석률을 계산할 수 있도록 확장된 모델이다.

UM은 UMERGE 모델을 개선, 발전시킨 모델로 음의 부력플룸과 표층방류를 모의할 수 있으며, 주변수의 농도를 고려할 수 있다. 또한 확산관의 한쪽

방향에서의 플륨의 병합만을 취급하므로 양방향확산관의 경우는 적용성이 떨어지는 것으로 알려져 있다.

RSB는 UM과 같이 U.S. EPA에서 발표한 PLUMES라는 공유프로그램에 포함되어 있는 모델로 수중다공확산관에 대한 실험에 근거하였기 때문에 많은 제약이 따르는 단점이 있다.

특히, 길이축척모델로 분류되는 CORMIX모델은 여러 상황의 주변 조건들을 충분히 고려할 수 있고 현재 많은 연구자들에 의해 그 적용성이 평가되어 널리 사용되고 있는 모델로 Table 4.1에서와 같이 유속을 제외한 모든 경우에서 제약조건이 작다는 것을 알 수 있으며 기존의 연구결과에 따르면 다른 EPA근역모델에 비해 우수한 결과를 보이는 것으로 알려져 있다.

4.1.3 CORMIX 모델

1) CORMIX 모델의 특성

CORMIX 모델은 방류시스템의 기하학적 형태에 따른 배출원 근처의 혼합거동을 예측하는데 주안점을 두고 개발되었기 때문에 이미 개발된 수치모델들에 비하여 방류된 주위에서 발생하는 복잡한 흐름상황을 보다 정확하게 설명할 수 있다. 특히 단면경계에서의 상호작용, 오염물질의 하상부착, 밀도성층 수역인 경우 발생하는 내부성층 현상, 가로흐름이 적을 경우에 방류구 상류쪽으로 오염물이 확산되는 상류침투과정 등을 묘사할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 확산관의 기하학적 변화에 따른 오염물질의 희석과정을 쉽게 예측할 수 있어, 최적의 확산관을 설계하는데 유용하게 이용할 수 있다.

CORMIX 모델은 하천, 호소 및 해안 등 대부분의 수계에 적용이 가능하도록 개발되었으나 단면 경계가 불규칙하고 하상의 수심이 변하는 수역의 경우에는 적용성이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 단면 경계를 일직선으로 수심을 일정하게 가정해야 하는 문제점이 있어 방류구 주위에 방파제와 같은 구조물 등이 있는 경우와 방류구로부터 멀리 떨어진 구역에서의 오염물 확산을 예측할 경우에는 결과에 대한 신중한 검토가 필요하다. CORMIX2 모델에서는 Tee형 확산관의 희석률 산정식이 확산관에서의 방류운동량에 비해 주변수의 운동량이 지배적인 경우에는 실측치에 비해 과소산정되는 경향이 있다.

이와 같은 CORMIX 모델의 장점은 다음과 같다.

① 오염물질이 방류되는 자연수계의 환경, 방류시스템의 환경 등의 상황에 적절한 모의를 수행한다.

② 모의된 오염물질의 확산거동 및 농도의 예측된 결과에 대하여 법적인 규제를 만족하는지의 여부를 기술하여 규제와의 비교 검토가 가능하다.

③ 오염물질의 초기 희석률을 높이기 위한 확산관의 설계 대안을 제시한다.

④ 복잡한 방류상황에 대하여 편리하고 간단하게 비교적 양호한 계산결과를 얻을 수 있다.

⑤ 방류환경의 변화 등에 대하여 즉각적인 대응으로 방류되는 오염물질의 확산과 혼합거동을 쉽게 모의하여 방류시스템의 최적화가 가능하다.

⑥ 모의 후, 계산 결과를 그래픽으로 제공한다.

반면, 단점은 다음과 같다.

① 복잡한 지형조건에 대한 세부적인 고려가 불가능하다.

② 자세한 유속분포를 제공하지 못한다.

③ 정상상태에 대해서만 모델을 적용할 수 있다.

2) CORMIX 모델의 구성

CORMIX모델은 Fig. 4.1과 같이 5개의 요소로 구성되어 있다.

DATIN은 주변 해역의 평균수심, 방류수심, 성층분포, 유속과 방향 등의 주변수 특성과 확산관 길이, 방류공의 수와 방류수 밀도, 방류량 등 방류특성을 입력자료로 취하는 요소이다.

PARAM은 일련의 길이축척들을 계산하는 요소이다. 차원해석에 의한 길이축척은 방류수의 체적플럭스, 운동량플럭스, 부력플럭스, 주변 수역의 조류와 밀도성층 등의 거동을 제어하는 변수들의 상대적인 중요도를 표현하는 값들이다. 각 축척의 물리량은 Table 4.2와 Table 4.3과 같다.

여기서, CORMIX1의 길이축척에서 주어진 변수들은 운동량플럭스 $M_0 = U_0 Q_0$, 부력플럭스 $J_0 = g_0' Q_0$, 체적플럭스 $Q_0 = U_0 a_0$이며, 여기서 a_0는

방류공 면적, u_a는 주변유속, U_0는 방류속도, ε는 주변 밀도경사, g_0'는 유효중력가속도[$g(\rho_a - \rho_0)/\rho_a$] 이다.

등슬롯확산관으로 해석되는 CORMIX2의 변수들은 등가슬롯 폭 $B = \frac{\pi D^2}{4l}$로 원형의 직경이 대체되고, 단위길이당 운동량플럭스 $m_0 = U_0 q_0$, 부력플럭스 $j_0 = g_0' q_0$, 체적플럭스 $q_0 = U_0 n a_0 / L_D$ 이며, 여기서 n 은 방류공의 개수, L_D 는 확산관의 길이이다.

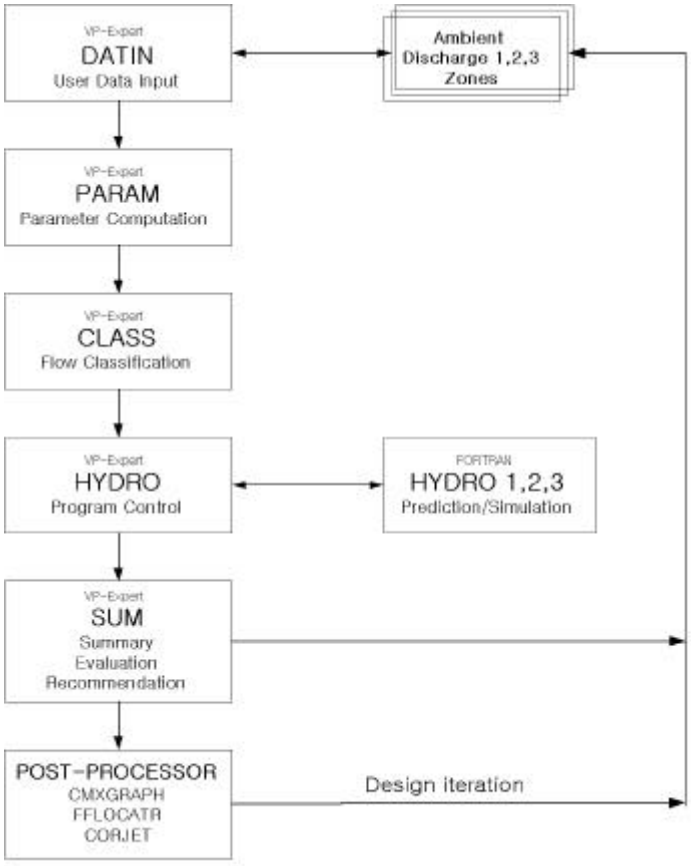


Fig. 4.1 CORMIX system elements and processing sequence

CLASS에서는 입력자료에 의해 계산된 길이축척을 근거하여 흐름을 분류한다. CORMIX1의 경우는 크게 4가지의 흐름으로 대별되며, 36개로 세분한다.

① 선형 밀도성층에 의한 수중에서의 포착이 발생하는 흐름(S 흐름)
② 균일한 밀도분포에서의 부력흐름(V와 H 흐름)
③ 균일한 밀도분포에서의 음의 부력을 갖는 흐름(NV와 NH 흐름)
④ 바닥에 부착되는 흐름(A 흐름)

CORMIX 2의 경우는 크게 3가지의 흐름으로 대별되며 31개로 흐름을 세분한다.

① 선형 밀도성층에 의한 수중에서의 포착이 발생하는 흐름(MS 흐름)
② 균일한 밀도분포에서의 부력흐름(MU 흐름)
③ 균일한 밀도분포에서 음의 부력을 갖는 흐름(MNU 흐름)

HYDRO에서는 확산관에서 방류된 하수의 확산을 모의하는 단계로 플룸의 중심선의 좌표, 플룸의 폭, 하수장의 두께, 횡단면에 대한 평균농도 등을 계산한다.

또한, SUM에서는 결과를 요약하고, 평가하여 더 좋은 대안의 확산관을 추천한다.

나아가 Post-Processor 과정에서는 SUM에서 얻어진 결과를 그래프로 나타내거나(CMXGRAPH), 근역 제트에 대한 적분해석프로그램인 CORJET, 원역에서의 플룸의 위치를 추적하는 부프로그램인 FFLOCATR이 있다.

3) CORMIX 모델의 입·출력 자료

주요 입력자료는 크게 네 가지로 나눌 수 있으며, 주변 해역의 자료(유속 및 방향, 밀도분포, 염도, 온도 등), 확산관의 제원(도수관의 길이 및 방향, 확

산관의 길이와 관경, 방류공의 수 및 관경, 확산관의 축의 방향, 방류공의 각도 등 확산관의 기하학적 특성), 방류수의 특성(방류수의 온도, 밀도, 유량 등), 법적혼합구역 자료(길이, 면적, 또는 체적으로 나타낸 법적혼합구역의 범위와 수질 기준 등) 등이 있다.

주변 해역이 큰 호수, 해양과 같은 수역에서는 불구속(unbounded) 경계조건으로 설정하고, 주변수체가 균일하지 않은 밀도분포일 경우에는 선형적인 분포, 다층 분포, 그리고 선형 분포와 다층 분포가 혼합된 경우 중 선택하여 입력한다.

방류 특성에 있어서, 확산관의 제원과 관련하여 CORMIX2의 각 입력변수들을 정의하면 다음과 같다. CORMIX1의 경우, 방류공에서 경계선까지의 거리, CORMIX2의 경우, 경계선에서 확산관까지 가장 가까운 거리와 가장 먼 거리를 입력한다. 또한, 확산관 길이 L_D, 수평면에 대한 방류각 θ, 조류방향에 대한 방류각 σ, 확산관 축과 방류공 사이의 각 β, 조류방향에 대한 확산관의 평면각 γ을 입력하여야 한다. 세부사항은 Fig. 4.2에 나타난 바와 같다.

Fig. 4.3은 CORMIX 모델의 적용시 제한요소들을 표시한 것이다. 즉, 방류공의 높이는 총수심의 1/3을 넘지 않아야 하며, 방류공 직경은 CORMIX1에서는 수평면에 대한 상향각 θ_0가 45° 이하일 때는 수심을 초과하지 않아야 하고, θ_0가 45°를 초과할 때는 수심의 1/3을 초과하지 않아야 한다. CORMIX2의 경우는 수심의 1/5를 초과하지 않아야 한다. 주변수의 밀도분포가 불연속적이라면 이 지점은 수심의 40%와 90% 사이에 있어야 한다.

CORMIX 모델의 출력자료는 제트 궤적의 중심선을 따르는 희석률 및 농도, 수평 방향의 반폭(half-width), 수직방향의 두께(thickness) 등이다.

Table 4.2 Length Scales for single port submerged discharges
(Used in CORMIX1 and CORMIX2)

Scales	Length Scales
Discharge geometric length scale	$L_Q = \frac{Q_0}{M_0^{1/2}}$
Jet/plume transition length scale	$L_M = \frac{M_0^{3/4}}{j_0^{1/2}}$
Jet/crossflow length scale	$L_m = \frac{M_0^{1/2}}{u_a^2}$
Plume/crossflow length scale	$L_b = \frac{J_0}{u_a^3}$
Puff/thermal transition length scale	$L_T = \frac{M_0^{2/3}}{(J_0 u_a)^{1/2}}$
Jet/stratification length scale	$L_m' = \frac{M_0^{1/4}}{\varepsilon^{1/4}}$
Plume/stratification length scale	$L_b' = \frac{J_0}{\varepsilon^{3/8}}$

Table 4.3 Dynamic Length Scales for multiport diffuser(CORMIX2)
in the 2-dimensional slot discharge representation

Scales	Length Scales
Discharge geometric scale	$l_Q = \frac{q_0^2}{m_0^{1/2}}$
Slot jet/plume transition length scale	$l_M = \frac{m_0}{u_a^2}$
Slot jet/crossflow length scale	$l_m = \frac{m_0^{1/3}}{\varepsilon^{1/3}}$
Slot jet/stratification length scale	$l_m' = \frac{m_0^{1/3}}{\varepsilon_{1/3}}$
Slot plume/stratification length scale	$l_b' = \frac{j_0^{1/3}}{\varepsilon^{1/2}}$
Crossflow/stratification length scale	$l_a = \frac{u_a}{\varepsilon^{1/2}}$

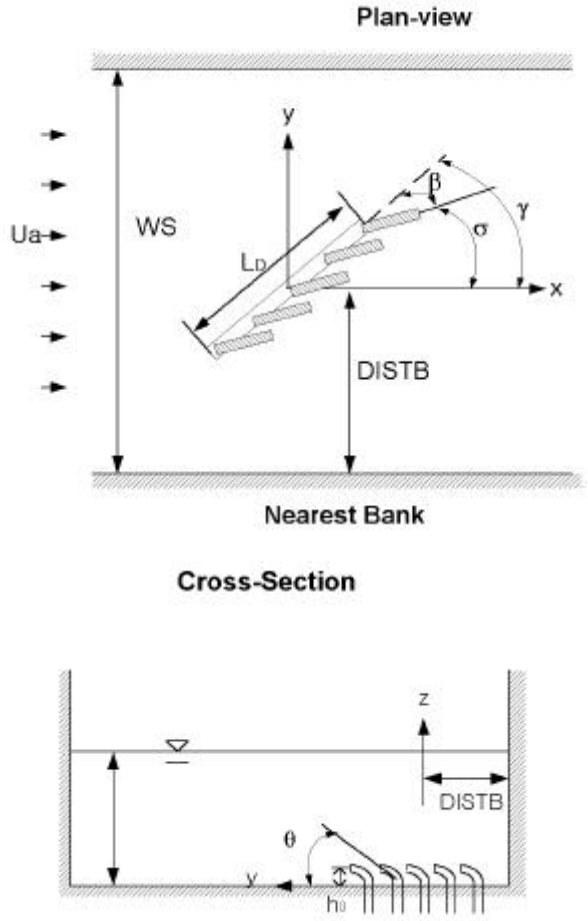


Fig. 4.2 Definition diagram CORMIX 2

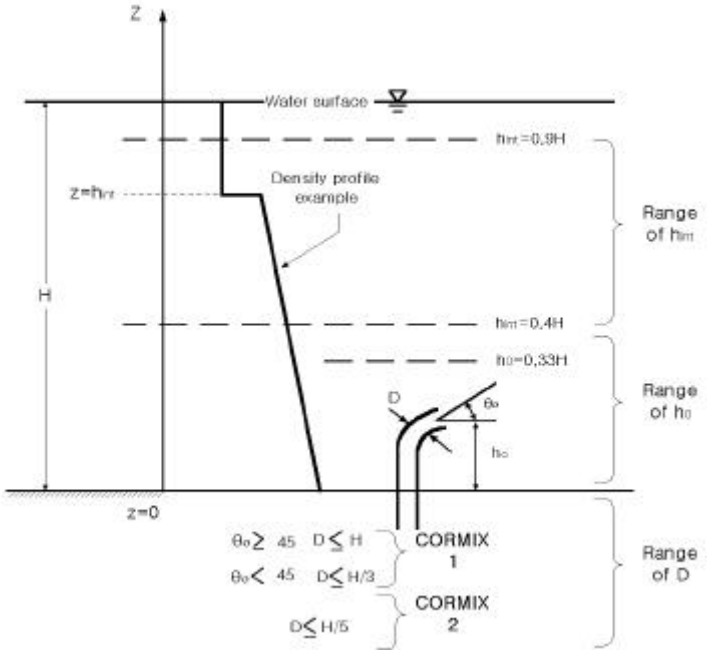


Fig. 4.3 Limits of applicability CORMIX

4.2 CORMIX 모델의 검증

CORMIX 모델의 검증을 위하여, 이전 연구(Kwon & Lee, 1997)의 실험조건을 모델에 도입하였다.

이전의 연구에서 사용한 수치모델은 U.S. EPA의 공유프로그램인 RSB와 UM으로 각 모델의 특징은 4.2절에서 설명한 것과 같이 UM 모델은 음의 부력플륨과 표층방류를 모의할 수 있다. 또한 주변수의 농도를 고려하며 한쪽 방향으로 방류시 플륨의 병합만을 취급하는 모델이다. RSB는 수중다공확산관에 대한 실험에 근거하였기 때문에 많은 제약이 따르는 단점이 있다.

4.2.1 실험조건

하와이의 Oahu섬에 위치한 Sand Island의 도시하수 방류시스템 중 다공확

산관을 대상으로 모형의 검증을 하였으며, 실험의 조건은 다음과 같다.

① 방류량(Q_0) - 4.469 m^3/sec

② 평균수심(H_A) - 93 m

③ 방류수심(H_D) - 70.1 m

④ 주변유속(u_a) - 0.1 m/sec

⑤ 확산관 길이(L_D) - 1040 m

⑥ 방류공 높이(h_0) - 22.9 m

⑦ 방류공 직경(D) - 0.085 m

⑧ 방류수 밀도(ρ_0) - 1000.417 kg/m^3

⑨ 확산관까지의 거리(YB / $DISTB1$, $DISTB2$) - 2520m / 2000m, 3040m

⑩ 주변수 밀도 - Fig. 4.4 참조

⑪ 방류방향 - 수평방류

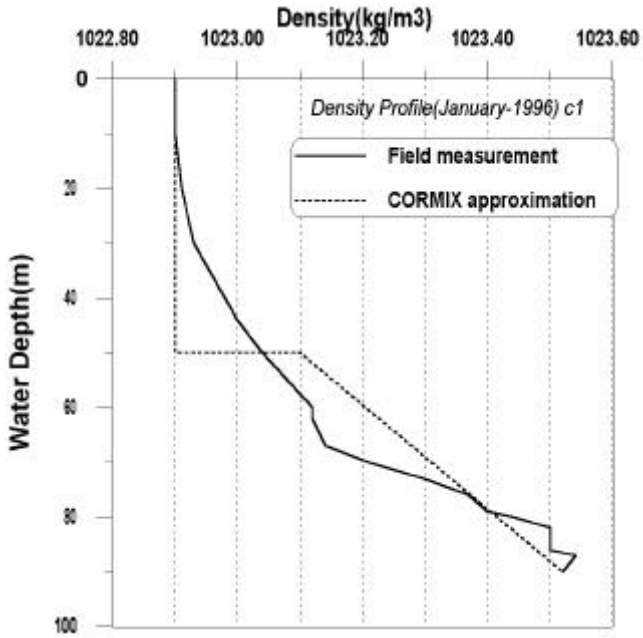
주변수의 밀도는 전 수심에 걸쳐 1m 간격으로 측정한 자료이며, 여기서 실제 사용한 밀도분포는 1996년 1월, 4월, 7월, 10월에 측정된 CTD(conductivity- temperature- depth) 자료이다. 밀도분포는 Fig. 4.4에 나타내었다. Fig. 4.4에서 파선으로 표시한 부분이 본 연구의 CORMIX 모델에 적용한 밀도분포이다.

4.2.2 실험결과 및 검증

본 연구에서 사용할 CORMIX 모델 중 CORMIX 1의 방류량은 CORMIX 2의 방류량과 동일한 밀도프루드수를 나타낼 수 있도록 조정하였으며, RSB와 UM모델의 출력값에 상응하는 값을 찾기 위해 CORMIX 1의 경우는 근역경계지점의 값을, CORMIX 2의 경우는 포착지점과 근역 경계지점에서의 중간치의 값을 선택하였다.

실험결과, 모든 경우에 있어서 플륨은 수중에 포착(trapping)되는 것으로 나타났으며, 이는 주변해역의 밀도분포가 상당히 중요한 영향인자이라는 것을 알 수 있다. Fig. 4.5는 실험결과를 정리한 것으로, Fig. 4.5(a)에서 입력값의 정확성을 감안하면 희석률에 있어서는 거의 유사한 결과를 보이는 것을 알 수 있다. 즉, 대략적으로 근사화시킨 밀도분포값을 입력값으로 하였으므로 밀도분포가 중요한 요인이라는 것을 고려하면 희석률에 있어서는 유사한 결과를 나타낸 것으로 간주할 수 있다.

Fig. 4.5(b)의 결과에서는 CORMIX 1을 통한 값이 병합을 고려하지 않은 단일확산관의 모의실험에 대한 하수장의 두께를 나타내므로 병합과정은 없고 부력이 지배적인 영역이 넓을 것을 예상할 수 있으며, 이는 곧 잔류부력의 영향으로 하수장의 두께는 그 만큼 얇아진다는 것을 의미한다. 따라서, CORMIX 1의 경우는 다공확산관의 모의실험시 단일방류공의 효과를 판단한 후, 다공확산관의 설계에 참고할 수 있는 자료로 사용할 수 있을 것으로 본다. CORMIX 2의 실험결과는 거의 동일하거나 유사한 결과를 보였다.



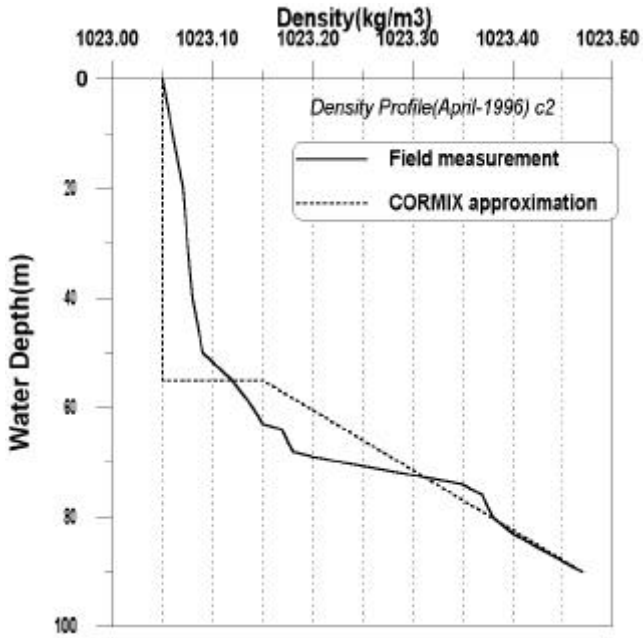


Fig. 4.4(a) Density profiles for input data on January and April, 1996 (Case 1 and Case 2)

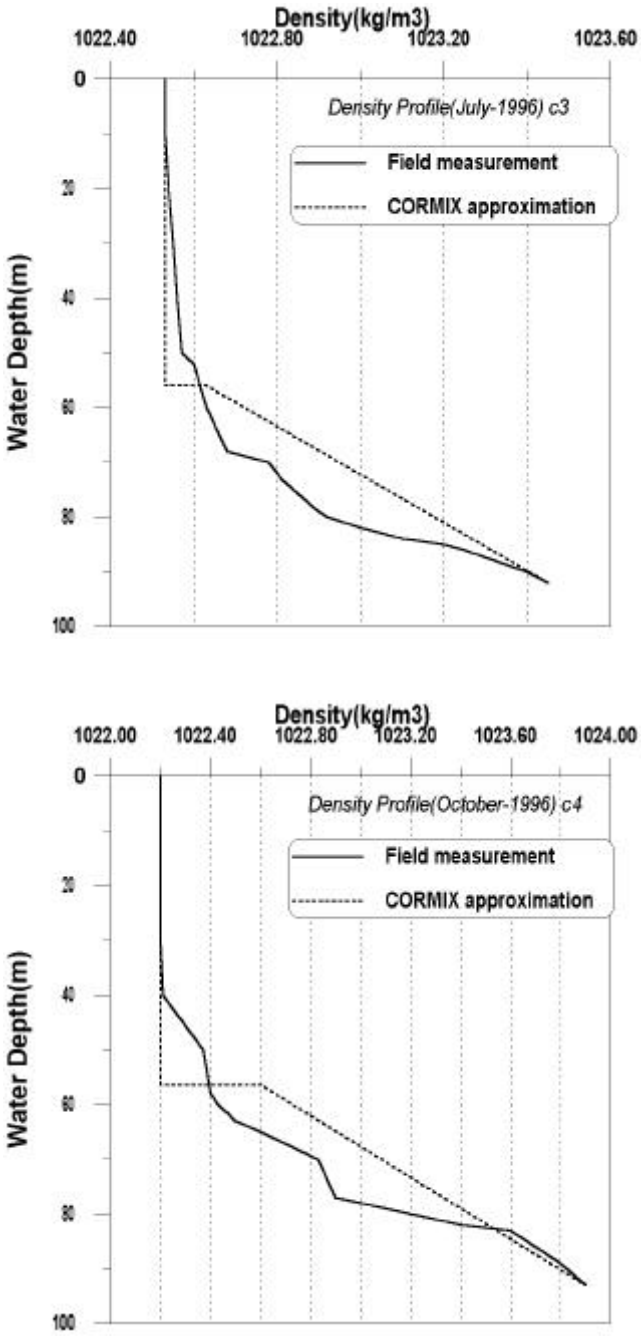


Fig. 4.4(b) Density profiles for input data on July and October, 1996 (Case 3 and Case 4)

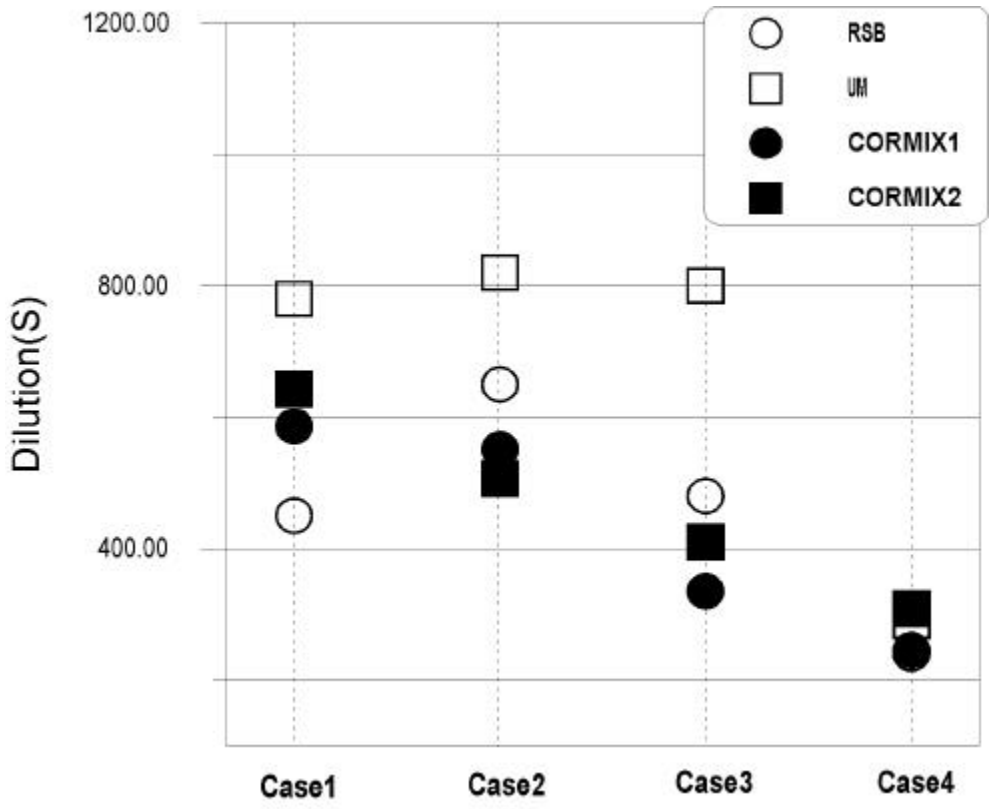


Fig. 4.5(a) A comparison of the dilution by UM, RSB and CORMIX model

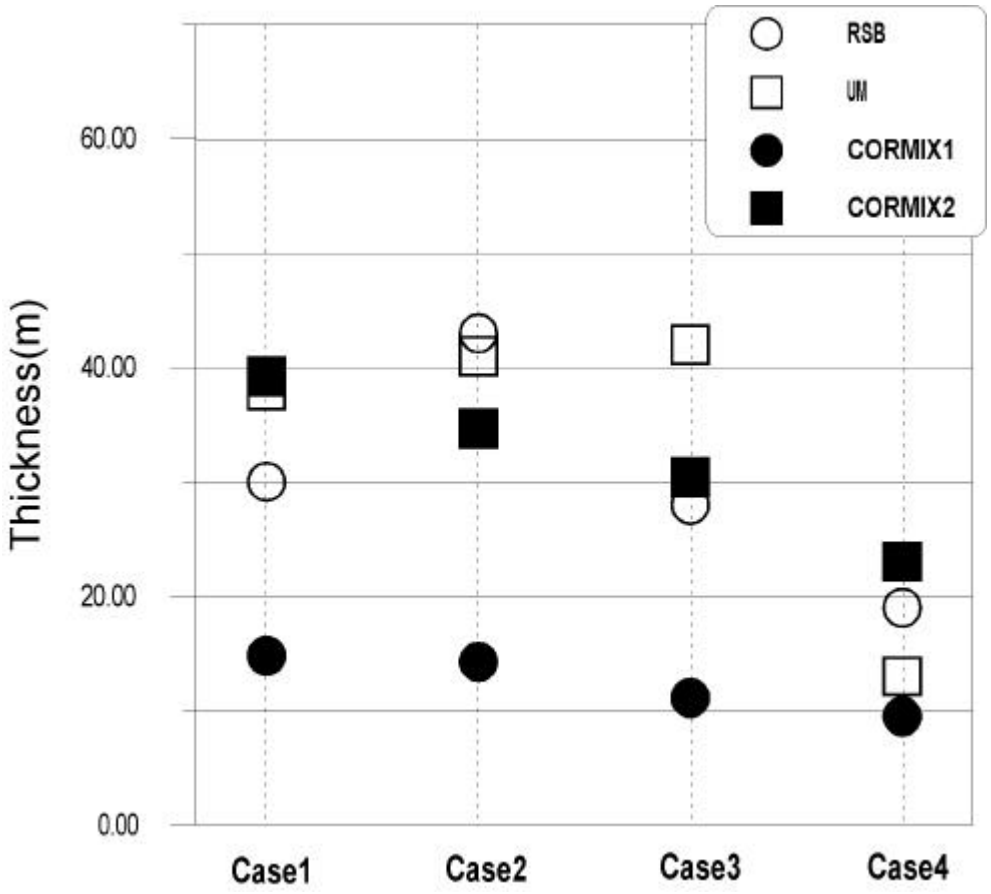


Fig. 4.5(b) A comparison of the wastefield thickness by UM, RSB and CORMIX model

4.3 확산모델에의 적용성 검토

해양방류에 따른 근역혼합특성이 파악됨에 따라 기존의 확산모델에서 단순히 점원(point source)으로 처리하는 것은 결과에 상당한 차이를 가져올 것으로 예상된다. 여기서는 기존의 확산모델에서 적용하였던 점원 방류의 경우와 본 연구에서 검증한 모델에서의 방류원을 사용한 경우에 대해 일반적인 2차원 확산모델을 적용시 그 차이점을 검토하였다.

1) 지배방정식

확산에 적용할 해수유동장은 다음과 같이 장파근사에 기준을 둔 평면 2차원 유체 방정식이다. 단, 압력항은 정수압만을 고려하는 것으로 하였다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[M] + \frac{\partial}{\partial y}[N] = q_m \tag{4.1}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial UM}{\partial x} + \frac{\partial UN}{\partial y} - fN = \\ &-g(h+\zeta)\frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left[\nu_t \frac{\partial M}{\partial x}\right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial y}\left[\nu_t \frac{\partial M}{\partial y}\right] - \frac{\gamma_b^2}{(h+\zeta)^2} M\sqrt{M^2+N^2} \end{aligned} \tag{4.2}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial UN}{\partial x} + \frac{\partial VN}{\partial y} + fM = \\ &-g(h+\zeta)\frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left[\nu_t \frac{\partial N}{\partial x}\right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial y}\left[\nu_t \frac{\partial N}{\partial y}\right] - \frac{\gamma_b^2}{(h+\zeta)^2} N\sqrt{M^2+N^2} \end{aligned} \tag{4.3}$$

여기서, U, V 는 x, y 방향의 단면 평균 유속, M, N 은 x, y 방향의 선유량(㎥/sec), ζ는 조위, h 는 평균수심, ν_t 는 와동점성계수, γ_b^2 는 해저마

찰계수, f 는 코리올리 계수, q_m은 유입부하량이다.

또한, 오염물 확산 지배방정식은 2차원화된 물질확산의 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial[(\zeta+h)C]}{\partial t}+\frac{\partial[(\zeta+h)UC]}{\partial x}+\frac{\partial[(\zeta+h)VC]}{\partial y} = \frac{\partial\left[(\zeta+h)D_x\frac{\partial C}{\partial x}\right]}{\partial x}+\frac{\partial\left[(\zeta+h)D_y\frac{\partial C}{\partial y}\right]}{\partial y}+q_m \tag{4.4}$$

여기서, C는 수심 평균 농도, D_x, D_y 는 x, y방향의 확산계수이다.

2) 모델의 수립 및 수치시뮬레이션

해수유동 및 오염물 확산의 변화를 확인하기 위하여, 모델의 수립은 기존의 연구(Gug 등, 1999)를 참조하였으며, 수치계산은 ADI(Alternating Direction Implicit)법에 기초한 평면 2차원 단층 모델을 사용하였다.

실험조건은 격자(grid)의 수는 96×38, 간격은 25m, 시간간격은 3sec, 그리고 수심은 25m로 하였으며, 농도값은 점원 방류시 20㎎/ℓ의 값으로, 초기희석 과정을 거친 후의 오염원 방류시에는 실제 근역혼합의 실험치를 참조하여 0.155㎎/ℓ를 입력값으로 하였다. 또한, 수심 25m 및 최대유속은 0.25m/sec의 조건에서 표면에 이를 때의 플룸의 직경의 105m에 상당하여 방류오염원의 적용 격자가 4×4로 늘어나는 것으로 되었다. 또한, 초기희석 과정을 거친 경우에 0.155㎎/ℓ의 범위가 4×4의 격자로 이루어진 것을 1개의 격자에 해당하는 양으로 변환하면 농도가 2.48㎎/ℓ이 되고 이것을 다시 점원으로 하여 실험한 후 확산결과를 비교하였다.

단기간의 결과치를 비교하기 위하여, 창조류 시의 해수유동 결과를 사용하여 오염물 확산실험을 시행하였으며 주어진 계산영역에서의 창조류는 Fig. 4.6에 나타낸 바와 같다. 여기서, 점 O는 해양방류구의 위치를 가리킨다. 이러한

유동장에서 오염물 확산은 Fig. 4.7, Fig. 4.8, Fig. 4.9와 같이 기존의 점원 방류시[(a)]와 초기희석이 된 부하량을 점원 방류로 다룬 경우[(b)], 그리고 초기희석의 과정을 거친 후의 농도와 면적을 고려한 오염원[(c)]을 0.1, 0.3, 0.5조석주기에 해당하는 창조류 기간동안 방류할 때로 구분하여 검토하였다. 0.1조석 주기 후의 결과 배출원 주위의 농도분포가 많은 차이를 나타내었는데, 수중에서 방류한 오염물의 초기 거동 적용여부에 따라 수치실험결과는 상당한 차이를 가져올 수 있음을 알 수 있다. 0.3조석주기 후에도 초기희석을 적용했을 경우가 확산의 범위가 넓어지면서 농도가 낮아지고 희석률 또한 감쇄하는 것으로 나타났다. 0.5조석주기 후의 결과, 오염물의 농도분포는 0.3조석주기와 비슷한 양상을 나타내고 있으나 내만쪽과 유동 방향쪽으로 오염물의 농도분포가 크게 나타났다.

Fig. 4.10과 Fig. 4.11은 Fig. 4.6에 나타난 오염원을 중심으로 x축 방향으로의 단면(A-A')과 y축 방향으로의 단면(B-B')에서의 농도분포를 나타내고 있으며, 점원 방류시와 초기희석 과정 후의 오염원 방류시를 비교하였다. 각각 위쪽의 그림은 점원 방류시의 농도분포 추이를, 아래쪽의 그림은 초기희석 과정을 적용한 경우의 농도분포 추이를 0.1, 0.3, 0.5 조석주기로 나누어 나타내었다. 전반적으로 시간이 지남에 따라 방류지점을 제외한 해역에서 농도가 증가하고 있으며, 이것은 방류점에서 지속적으로 오염원이 배출되고 있는 까닭이다. 비록 점원 방류나 초기희석 과정 후의 확산이 x, y축 방향으로 각각 유사한 경향을 나타내지만 특히 점원 방류시에는 초기희석 과정이 포함되어 있지 않으므로 실험결과 실제보다 농도가 높은 것으로 평가하게 된다.

초기희석 과정 후의 오염원과 단순한 점원에 대한 수치계산결과 해석상에 차이가 발생하는 것이 확인되었고, 이는 현재 사용되고 있는 2차원 확산모델에 의한 수치계산에서 수중방류시 단순한 점원 해석으로는 상당한 오류를 범하게 됨을 유추할 수 있을 것이다. 따라서, 확산모델을 통한 오염물의 거동에 대한 분석에서는 이들 차이에 관하여 보다 세심하고 주의깊은 배려가 필요할 것으로 사료된다.

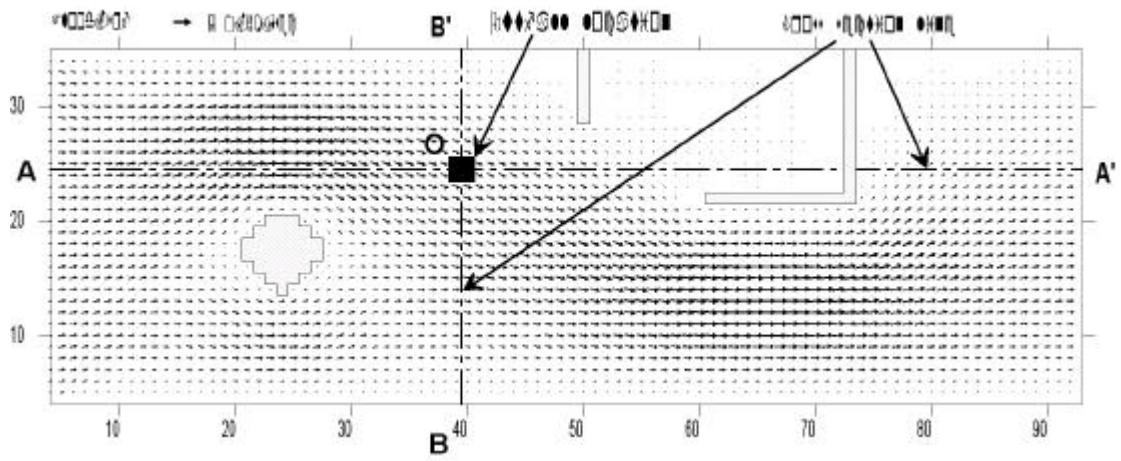


Fig. 4.6 Calculated result (max. flood tide)

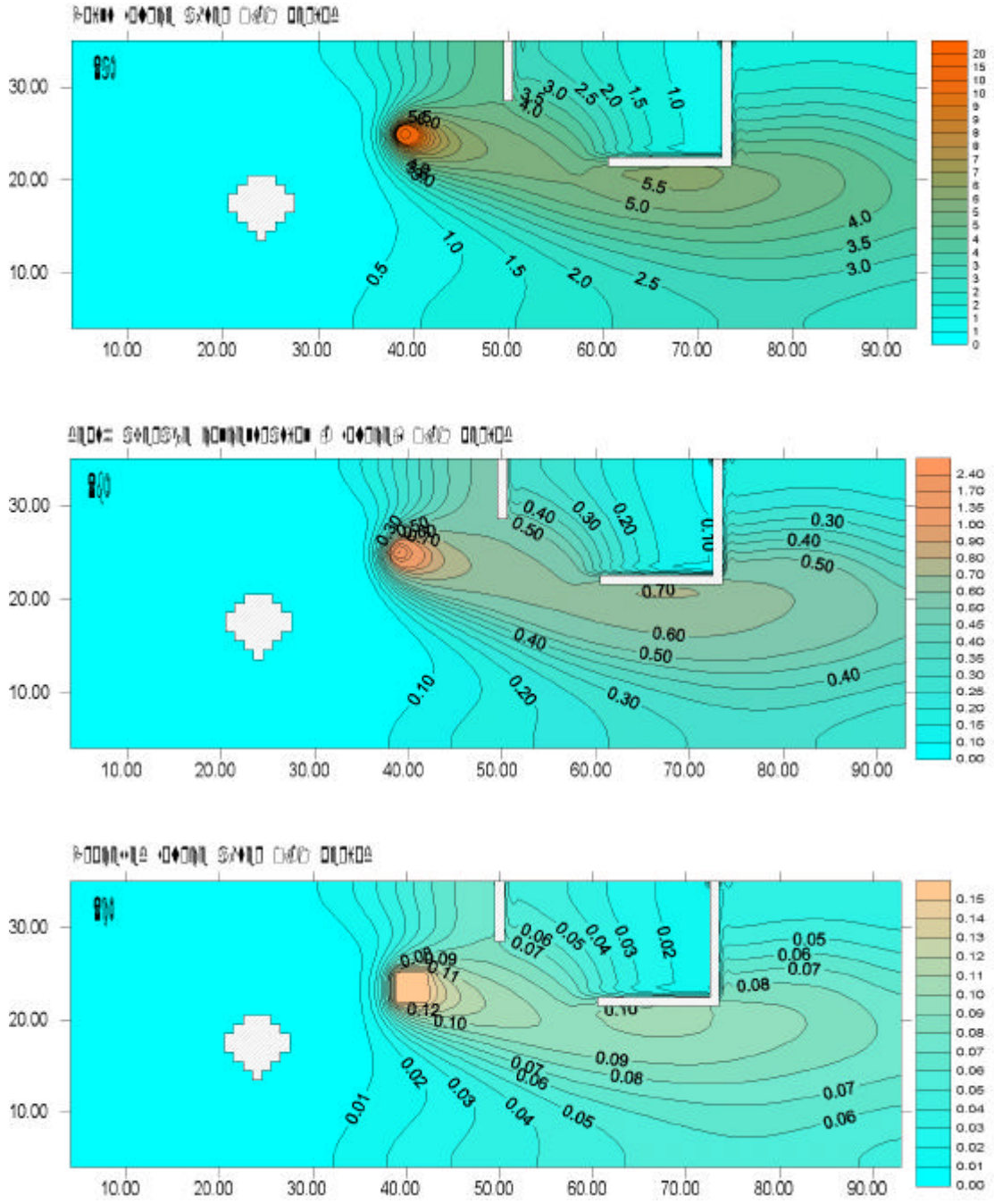


Fig. 4.7 Comparison of diffusion between point source and processed source

after 0.1 period

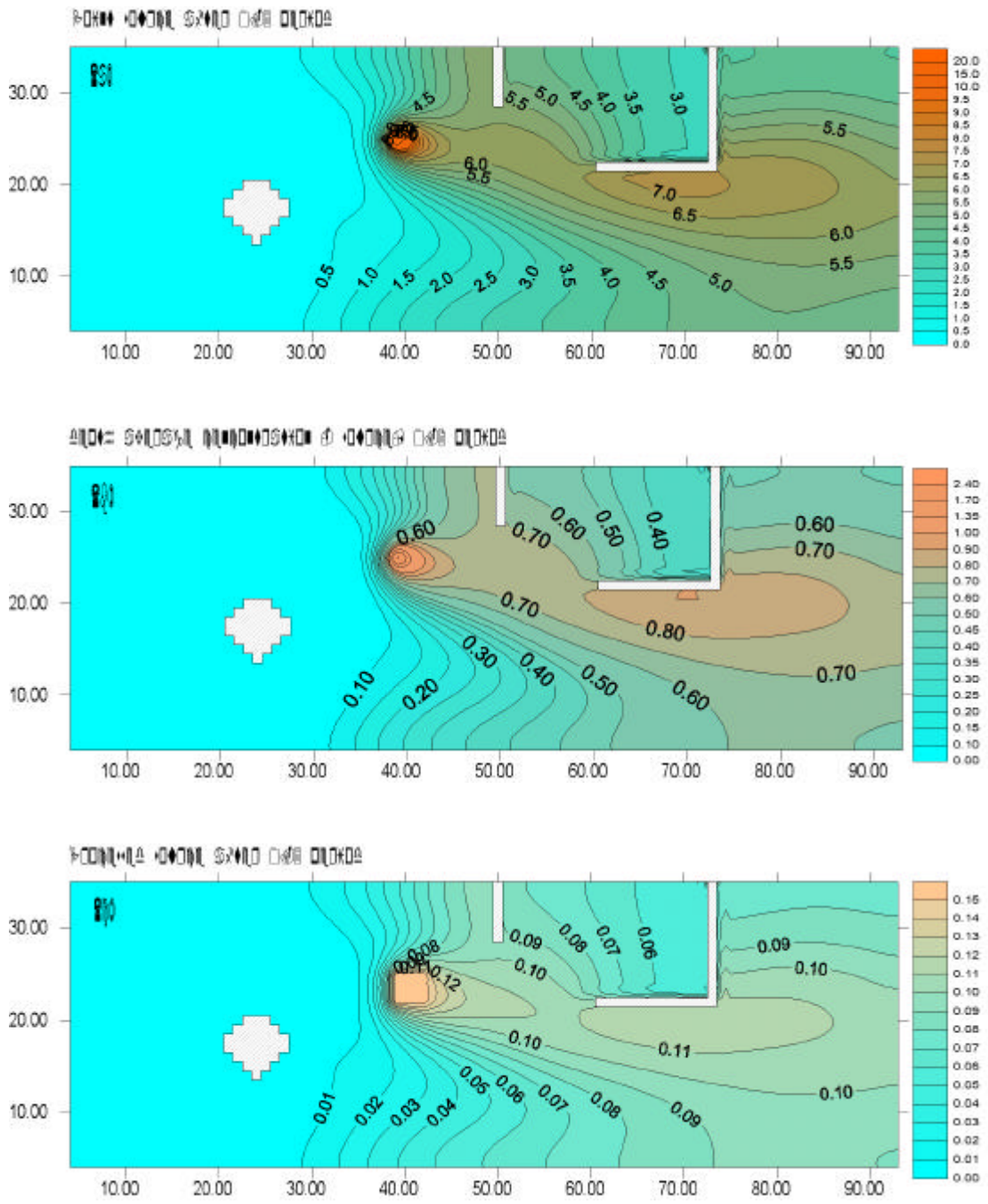


Fig. 4.8 Comparison of diffusion between point source and processed source

after 0.3 period

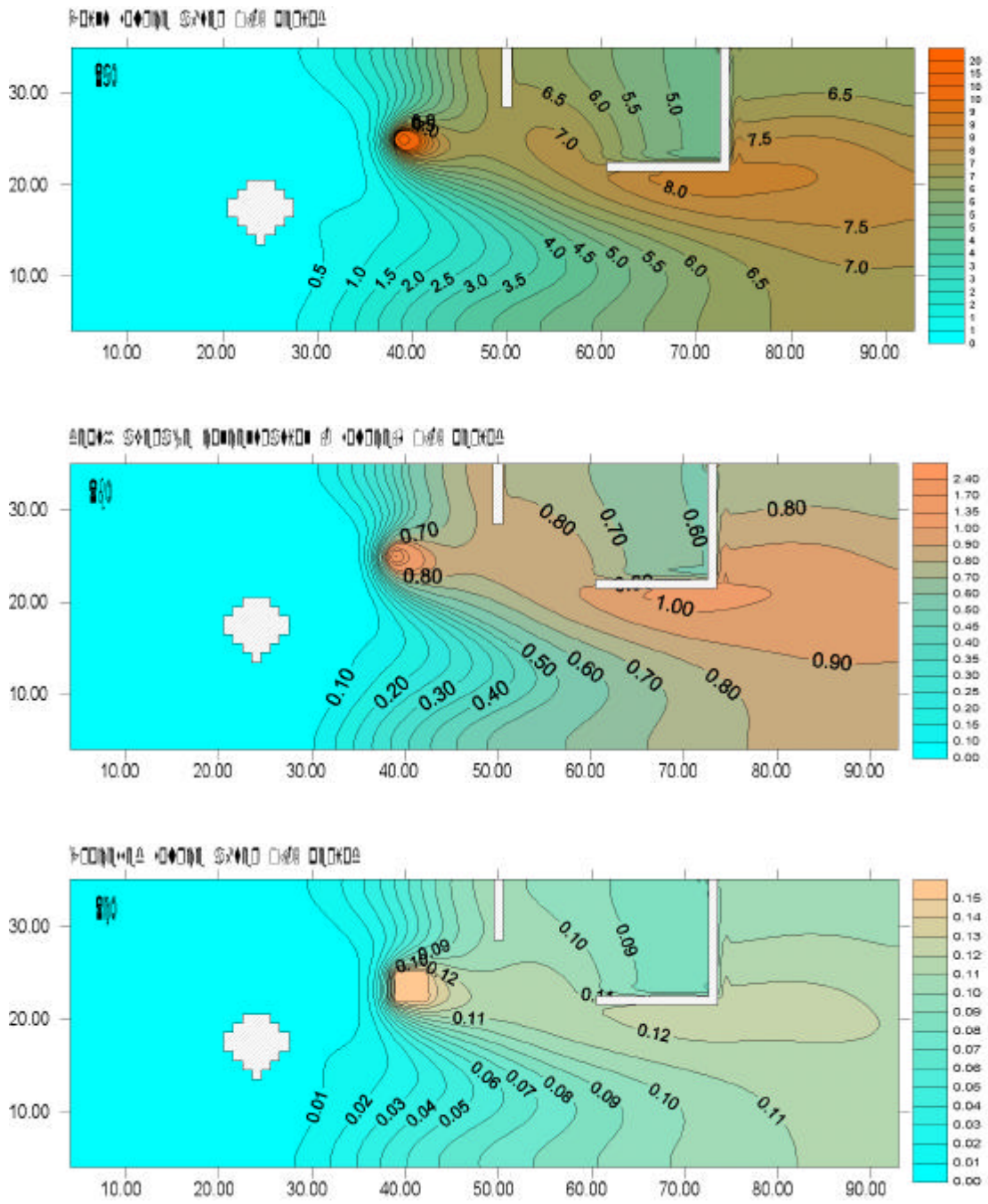
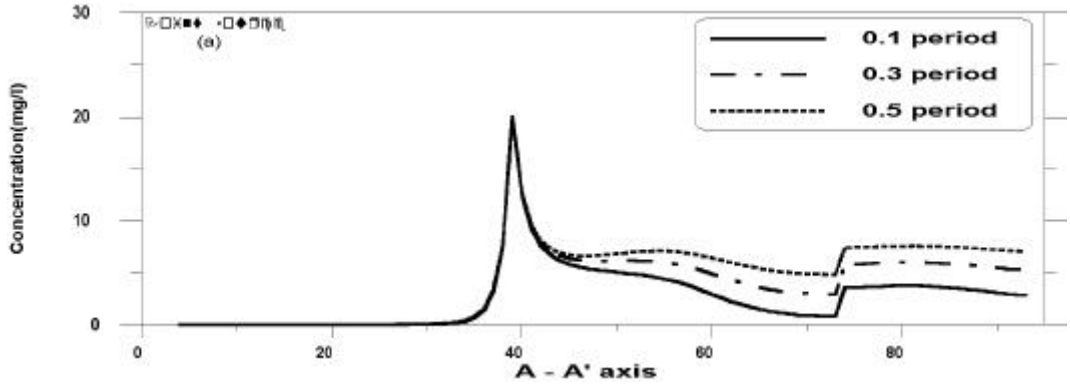
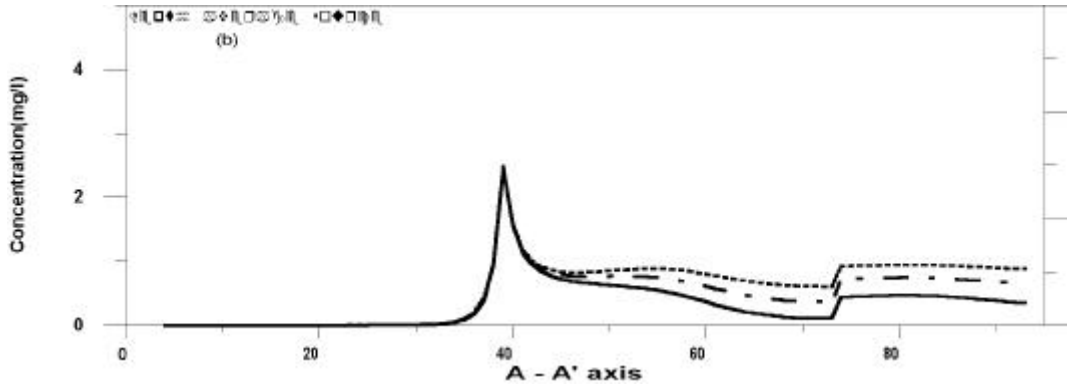


Fig. 4.9 Comparison of diffusion between point source and processed source

after 0.5 period


(a)
0.1 period
0.3 period
0.5 period
Concentration(mg/l)
30
20
10
0
0
20
40
60
80
A - A' axis


(b)
Concentration(mg/l)
4
2
0
0
20
40
60
80
A - A' axis

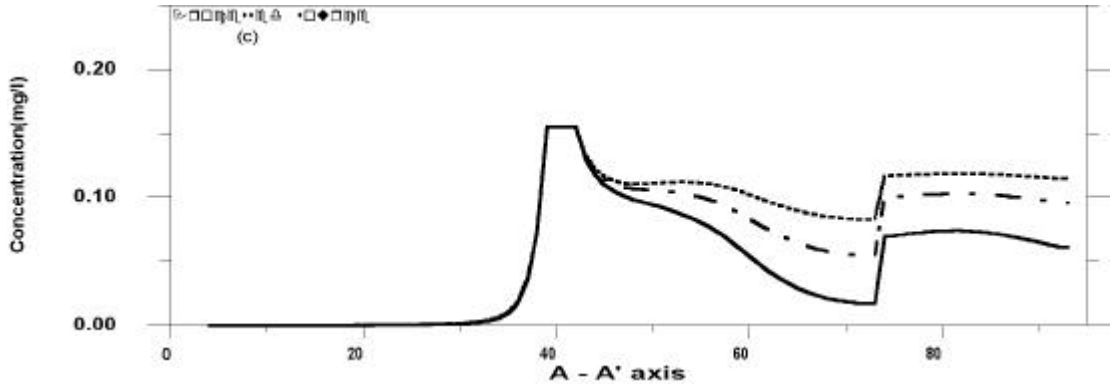

(c)
Concentration(mg/l)
0.20
0.10
0.00
0
20
40
60
80
A - A' axis

Fig. 4.10 Comparison of concentration profile for A - A' cross section according to the 0.1, 0.3, 0.5 tidal cycles between point source and processed source

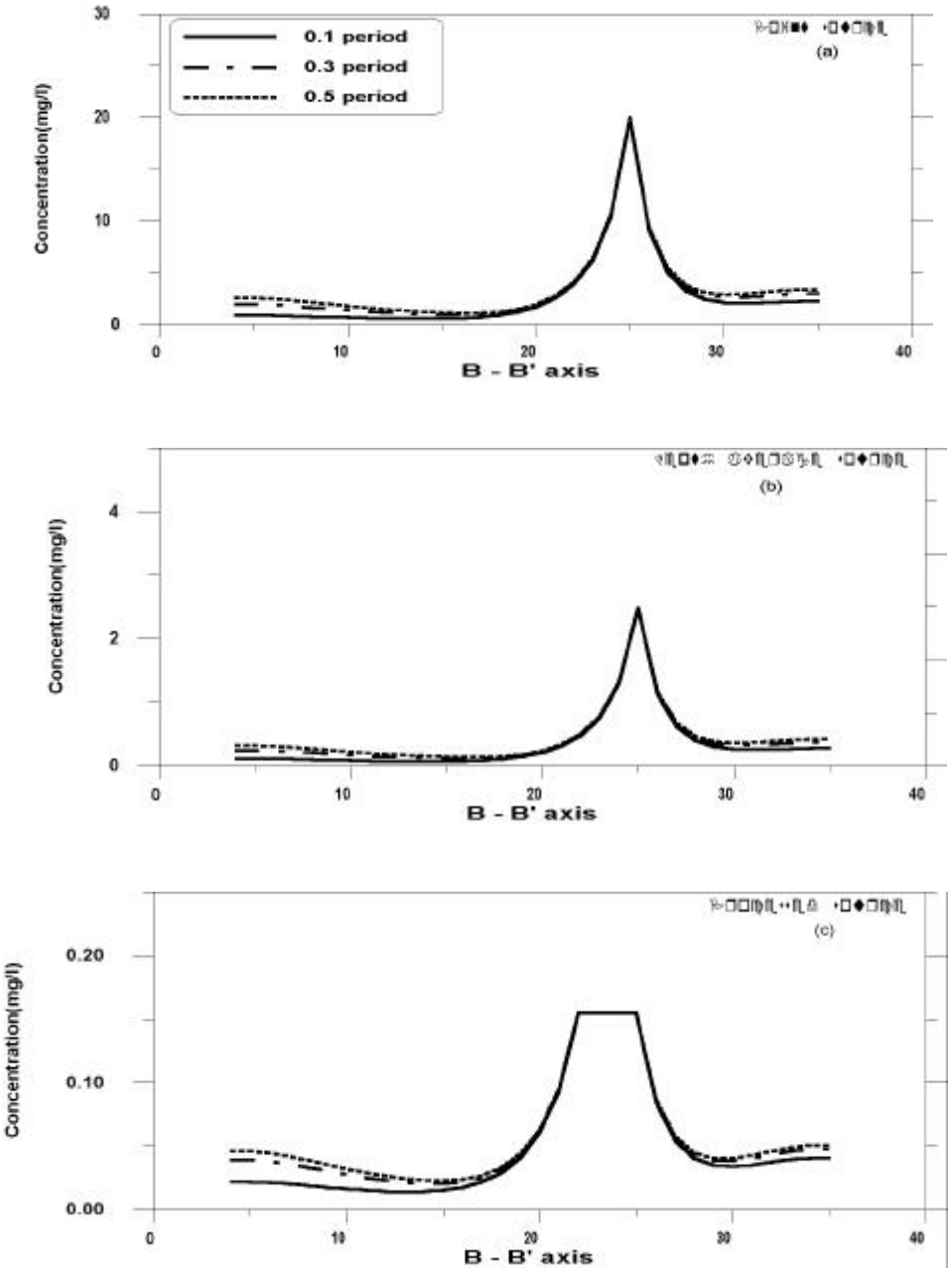


Fig. 4.11 Comparison of concentration profile for B - B' cross section according to the 0.1, 0.3, 0.5 tidal cycles between point source and processed source

Table 4.1 Summary of numerical model characteristics

Mode / Parameter	UPLUME	UOUTPLM	UDKHDEN	UMERGE	ULINE	UM	RSB	CORMIX1	CORMIX
Port	Single	Single	Single/ Multiple	Multiple	Slot/Closely spaced	Multiple	Multiple	Single	Multiple
Discharge Angle	-5° 90°	-5° 90°	-5° 130°	-5° 90°	Assumes 90°	-90° 90°	-90° 90°	Arbitrary	Arbitrary
Density Profile	Arbitrary	Arbitrary	Arbitrary	Arbitrary	Arbitrary	Arbitrary	Arbitrary	Arbitrary	Arbitrary
Current Speed	No	Constant with depth	Arbitrary	Arbitrary	Arbitrary	Arbitrary	Arbitrary	Constant with depth	Constant with dep
Current relative to the Diffuser	N/A	Assumes 90°	45° 135°	Assumes 90°	0° 180°	45° 135°	45° 135°	Arbitrary	Arbitrary

5. 모델의 적용

5.1 모의 조건

모델의 적용은 부산 중앙하수처리장의 계획년도의 방류량과 방류수질에 관련하여 설계한 확산관의 제원과 주변 해역의 자료를 입력치로 근역혼합특성을 분석하기로 하였다. 즉, 계획년도 2011년에 대한 계획 방류량 및 계획 방류수질에 대하여, 동계와 하계로 구분하여 주변의 밀도성층조건을 구분하였고, 주변유속은 수심 평균치를 사용하였다.

도시 하수의 방류로 인한 오염물의 근역혼합과정과 초기희석을 예측하기 위하여, 감천항 매립지를 중심으로 한 부산 중앙하수처리장을 대상지역으로 선정하였으며 Fig. 5.1의 대상지점내의 Station A, Station B, Station C 지점을 모의 지점으로 하였다. 또한, 자료 수집은 관련 보고서와 인터넷 자료를 근거로 하여 근사치를 추출하였다.

5.1.1 방류 특성

예상 방류량은 140,000㎥/day이다. 모델에서 적용한 수질변수는 호소 및 해역의 수질등급 기준인 COD를 채택하였으며, 계획년도의 방류수질은 20㎎/ℓ, 방류수 밀도는 1,000㎏/㎥이다. 이를 정리하면 Table 5.1과 같다. 또한, 법적 혼합구역에 대한 자료는 수질기준을 입력하여 방류수에 의한 주변수역의 오염영향과 범위를 평가하기 위해, Table 5.2의 COD 수질환경기준을 이용하였다. 본 연구에서의 방류해역은 Ⅱ등급에 해당되므로, 수질기준을 2㎎/ℓ이하로 하였다.

Fig. 5.1 Location map

Table 5.1 Characteristics of discharges

Year	Discharge rate (m^3/day)	COD(㎎/ℓ)	SS(㎎/ℓ)	Density of discharge(㎏/m^3)
2011	140,000	20	15	1000

Table 5.2 Water quality standards on COD

Classification	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
COD(㎎/ℓ)	1 이하	2 이하	4 이하

수중단일확산관에 대한 모의(CORMIX 1)에서는 방류량을 연직유도관의 수로 나눈 값을 사용하였다. 즉, 실제로 연직유도관을 하나의 방류공 역할을 하

는 것처럼 모의하였다.

근역혼합모델을 이용한 모의에서 COD농도는 현재 및 장래에 대한 혼합특성에 직접적인 영향을 주는 것이 아니고, 희석률에 의한 결과치만을 판단하게 한다.

5.1.2 확산관의 배치

위에서 언급한 내용을 토대로 하여, Fig. 5.2는 방류지점 A, B, C를 대상으로 적용할 확산관과 연직유도관 등의 대략적인 사항을 나타내었다. 주변 해역의 평균수심(H_A)은 각각 15m, 24m, 30m 이며 확산관까지의 근접 거리 ($DISTB$ 1)는 150m, 1250m, 3000m 이다.

단일확산관의 경우, 수평 방류(horizontal discharge)를 원칙으로 하였으며, 다공확산관의 경우, 불구속 해역에 적합한 양방향 확산관을 채택하였다. 확산관의 위치는 조류방향과 직각인 직교 배치법(perpendicular alignment)을 선택하였으며, 연직유도관에는 대칭으로 방류공 2개를 부착하는 것으로 하였다.

이상의 경우를 비교하기 위해, Table 5.3에 위의 내용을 정리하였다.

Table 5.3 Summary of diffuser characteristics in Station A, B, C (unit: m)

	Station A	Station B	Station C
Diffuser line length	100	100	100
Riser number	11	11	11
Distance from shore - line to diffuser	150	1250	3000
Port height	0.7	0.7	0.7
Port spacing	10	10	10
Port diameter	0.6	0.6	0.6
Diffuser type	Alternating diffuser		

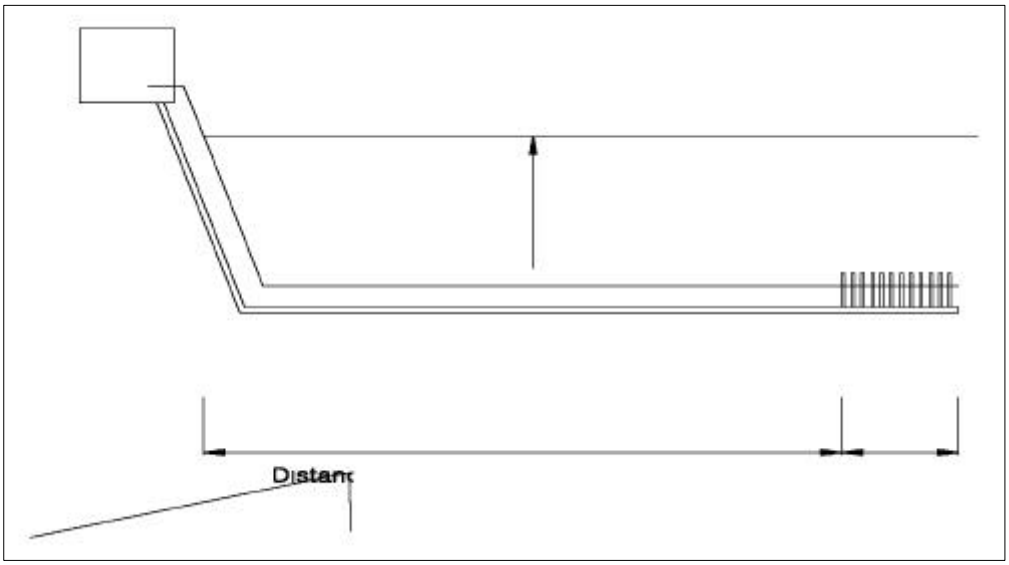


Fig. 5.2 Schematic drawing of submerged multiport diffuser

5.1.3 주변 해역의 특성

Station A의 경우, 주변 평균수심은 약 15m로 매우 얕은 편이다. 외국의 경우, 대체로 30 75m까지의 심해 방류수심을 채택하고 있다는 점을 감안하면 굉장히 얕은 수심이다. 조류의 방향은 확산관과 직각으로, 유속은 평균 0.15m/sec정도이다.

Station B의 경우, 방류지점 주변의 평균수심은 24m정도로 일정하다. 조류의 방향은 확산관과 거의 직각을 이루며, 유속은 평균 0.20m/sec정도이다.

Station C의 경우, 방류지점 주변의 평균수심은 30m정도로 비교적 일정하다. 조류의 방향은 확산관과 거의 직각을 이루며, 조류속도는 평균 0.25m/sec 정도이다. 본 연구에서 사용한 조류의 속도는 수심을 평균한 경우의 수치실험 결과치를 사용하였다(부산시, 1998).

주변 해역은 온도가 일정하게 분포되어 있는 동계에는 성층화현상이 없는 것으로, 하계에는 해저면과 수표면간의 온도 차이로 인한 선형적인 성층화현상이 존재하는 것으로 간주한다. 적용한 밀도치는 대상지점에서 가장 가까운 측정치를 사용하였다.

Table 5.4 Density distribution

Classification		Winter (kg/m^3)	Summer (kg/m^3)
Station A	surface	1026.0	1019.5
	bottom	1026.0	1022.0
Station B	surface	1026.2	1021.6
	bottom	1026.2	1023.6
Station C	surface	1026.3	1021.6
	bottom	1026.3	1023.7

5.2 입력자료

본 연구에서 사용하는 CORMIX 모델은 크게 주변수역의 특성, 확산관 특성, 방류수 특성, 법적 혼합구역에 대한 자료 등으로 나누어 입력한다. 확산관과 관련된 몇 가지 변수를 제외하면 이 둘의 입력자료는 거의 유사하다.

각 Station 별 입력자료를 Table 5.5에 요약하였다.

수중단일확산관에 대한 모의에서도 연직유도관에 부착된 방류공 전체를 하나의 방류공으로 취급하여 방류량을 연직유도관의 수로 나눈 값을 사용하였다. 또한, 방류공의 직경은 방류공 2개와 동일한 면적을 가지도록 직경 0.42m를 입력값으로 취하여 모의하였다

Table 5.5 Summary of input data CORMIX1 /

Classification	Station A	Station B	Stati
Analysis situation	unbounded	unbounded	unbou
Average depth H_A	15m	24m	30
Actual water depth H_D	14.3m	23.3m	29.
Current speed u_a	0.15m/sec	0.20m/sec	0.25m
Friction value Darcy-Weisbach f	0.025	0.025	0.0
Wind speed u_w	2m/sec	2m/sec	2m/
Distance from the shore to the diffuser	200m / 150m, 250m	1,300m / 1,250m, 1350m	3,050m / 3,0
Diffuser type	Alternating diffuser	Alternating diffuser	Alternatin
Alignment angle γ	90 °	90 °	90
Horizontal angle of discharge σ	0 °	0 °	0
Vertical angle of discharge θ	30 °	30 °	30
Relative orientation angle β	90 °	90 °	90
Average diameter D_0	0.6m / 0.42m	0.6m / 0.42m	0.6m /
Port height h_0	0.7m	0.7m	0.7
Discharge flow rate q_0, Q_0	0.147㎥/sec / 1.62㎥/sec	0.147㎥/sec / 1.62㎥/sec	0.147㎥/sec
Water quality standard	2㎎/ℓ	2㎎/ℓ	2㎎

6. 결과 및 분석

5장에서 정리한 입력값으로 각 Station별 희석률과 COD농도 변화, 플룸 궤적에 따른 두께와 폭 등의 형상, 근역혼합구역까지의 거리 등의 근역혼합특성을 파악하였다. 이러한 결과를 근거로 하여 근역 뿐만 아니라 원역에서의 오염물 확산거동을 예측하였다. 또한 가장 적합한 위치를 선택하여 희석인자별 중요도를 파악하기 위해, 민감도 분석을 수행하였다.

6.1 방류수의 거동 분석

6.1.1 단일확산관

1) Station A

CORMIX1 모형으로 동계와 하계를 대상으로 모의한 결과를 Fig. 6.1과 Fig. 6.2로 나타냈다. 동계와 하계 모두 흐름의 분류는 H1으로 수평으로 방류된 경우, 초기 제트가 주변 유속에 의해 꺾이며, 전체적으로 흐름은 안정한 형상을 보인다. 즉, 주변수의 밀도차로 나타나는 내부성층에 대하여 운동량플럭스에 대한 방류력(discharge strength)이 약한 흐름을 보인다.

제트와 플룸이 공존하는 천이영역에서 흐름은 가로방향의 주변류로 인해, 휘어지게 되며 그 이후로 해수표면으로 약하게 상승한다. 따라서, 이러한 짧은 영역 내에서 농도는 플룸의 단면에 비교적 균일한 분포를 나타나게 한다(Fig. 6.1 및 Fig. 6.2 참조). mod131로 표시된 선은 근역혼합지역(near-field mixing region)으로 정의할 수 있으며, 이 영역 내의 강한 혼합으로 인한 희석의 증가를 기대할 수 있는 영역이다. Station A의 경우, 주변 밀도분포가 일정하지 않은 하계의 경우와 동계의 경우가 유사한 흐름의 양상을 보이며, 근역혼합특성도 비슷한 결과를 보인다. 이는 Station A의 수심이 얕고, 밀도 성층현상이 방류조건에 비해 상대적으로 미약하기 때문인 것으로 분석된다.

또한, 희석률의 차이를 보면, 근역경계지점에서의 희석률은 동계와 하계 각각 49.6, 37.4로 밀도분포가 균일하고, 혼합영역의 거리가 긴 동계의 결과가 높게 나타났다.

법적혼합구역으로 입력한 수질기준 2㎎/ℓ는 WQS/CCC의 선으로 나타나도록 하였다. CORMIX 1모형의 모의 결과에서는 동계, 하계의 경우 모두 근역에서 COD농도가 3.90, 4.46m가 지나면 2㎎/ℓ보다 작게 나타났다.

2) Station B

Fig. 6.3과 Fig. 6.4에 나타난 바와 같이 동계의 경우, Station A와 비슷한 흐름양상을 보이지만, 희석률은 201.3으로 49.6의 경우와 비교하여 상당히 높아진 것을 알 수 있다. 이는 Station A에 비해 방류수심이 깊고 주변조류가 강하며 주변해역의 밀도분포가 균일하여 플륨의 궤적이 길어졌기 때문으로 분석된다. 즉, 플륨의 궤적이 길어질수록 주변수의 연행이 많아져 체적플럭스가 증가하기 때문인 것으로 분석된다. 하계의 경우는 흐름의 분류는 S4이며, 부력플륨의 거동이 지배적이고 강한 가로흐름인 주변류에 의해 심하게 휘어지고 수중에 포착되는 흐름이다.

동·하계의 경우, 각각 근역경계지점에서의 희석률은 201.3, 79.7로 나타났다. 이는 방류운동량이 동일하지만 하계의 경우, 선형적인 밀도성층화로 인해 플륨의 거동이 방해를 받아 플륨의 궤적이 아주 서서히 이동하는 것을 알 수 있다. 법적혼합구역은 그래프에서와 같이 각각 6.77, 5.41m를 가리키고 있다.

3) Station C

Fig. 6.5와 Fig. 6.6을 살펴보면, Station B와 거의 유사한 흐름의 양상을 가지는 것을 볼 수 있다. 전체적으로 근역내에서의 플륨의 거동양상은 비슷하지만, 주변조류와 주변수역의 성층화로 Station B에 비해 높은 관계로 더욱 많이 휘어지고, 플륨의 폭과 두께도 얇아진 것을 볼 수 있다. 또한 희석률은 플륨의 궤적이 길어진 만큼 상승하였다. mod131로 표시된 선에서 플륨은 잔류부력의 영향으로 인한 부력확장을 시작하는 영역이며, 법적혼합구역으로 표

시한 WQS/CCC는 하향으로 각각 9.05, 5.54의 거리에 위치한다.

Station A CORMIX 1 Winter

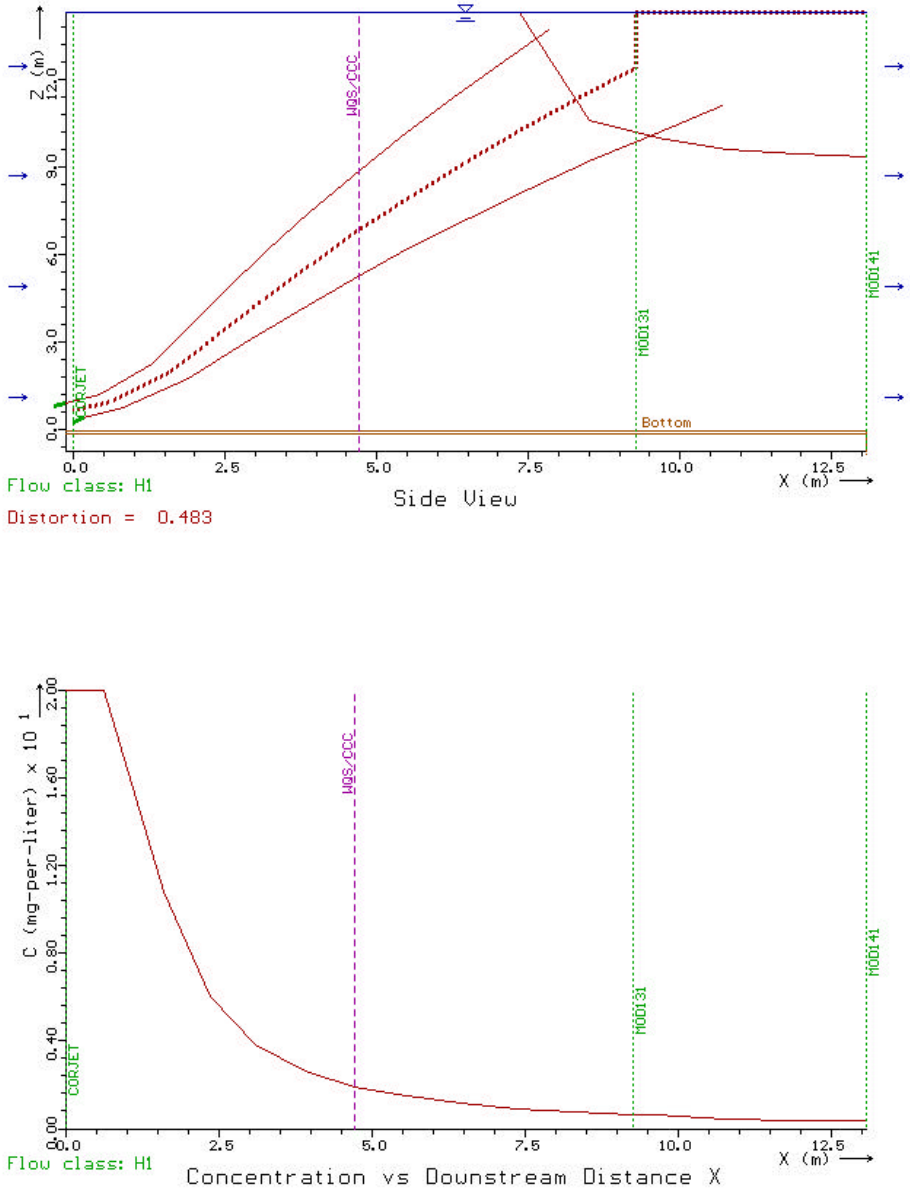


Fig. 6.1 CORMIX 1 output diagrams of Station A in winter

Station A CORMIX 1 Summer

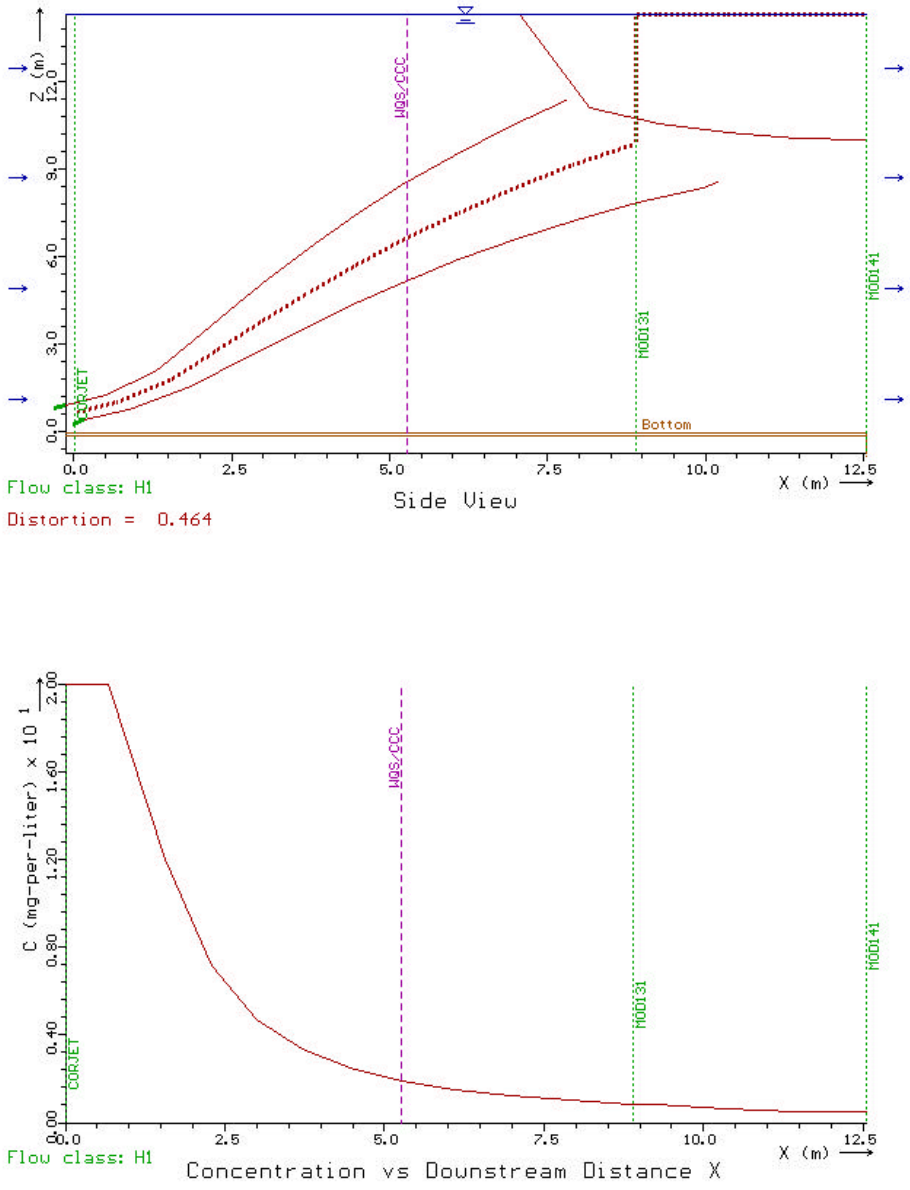


Fig. 6.2 CORMIX 1 output diagrams of Station A in summer

Station B CORMIX 1 Winter

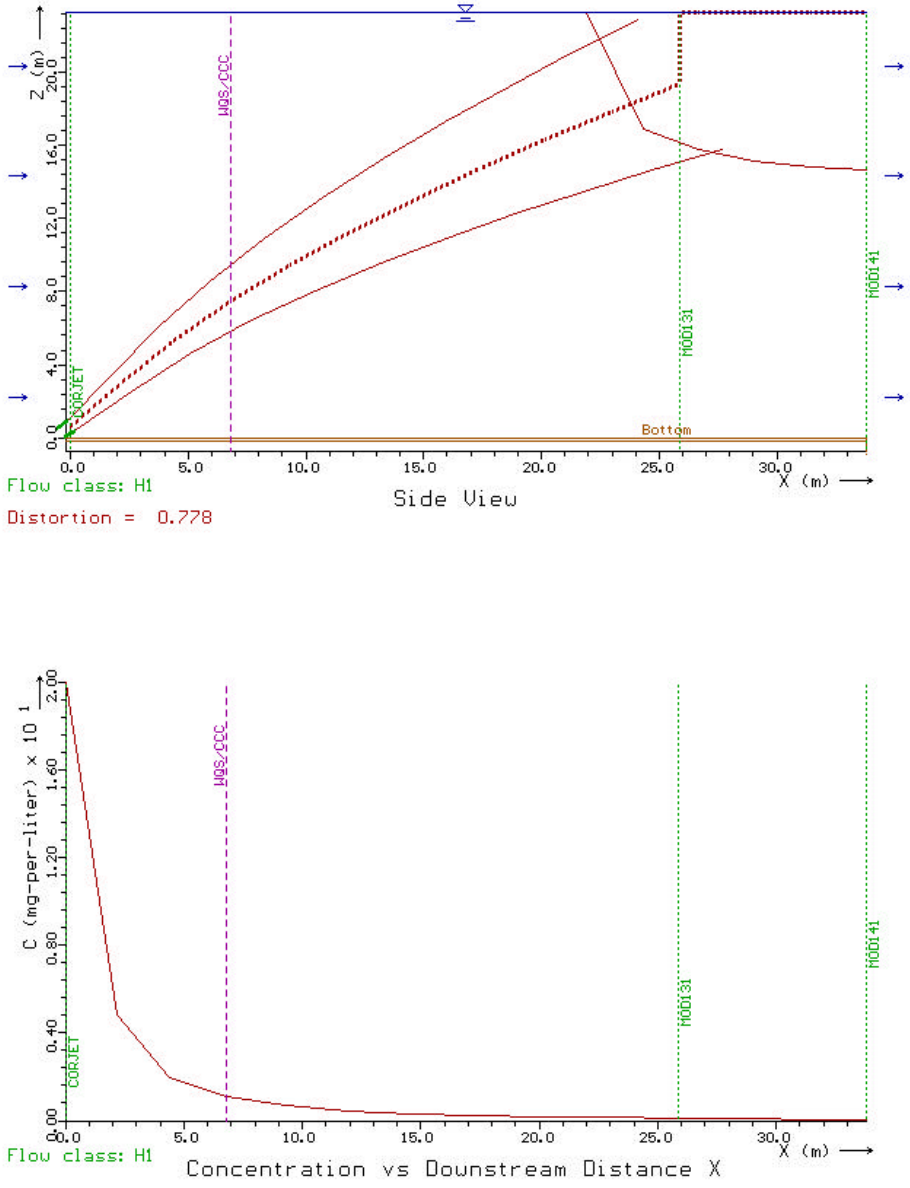


Fig. 6.3 CORMIX 1 output diagrams of Station B in winter

Station B CORMIX 1 Summer

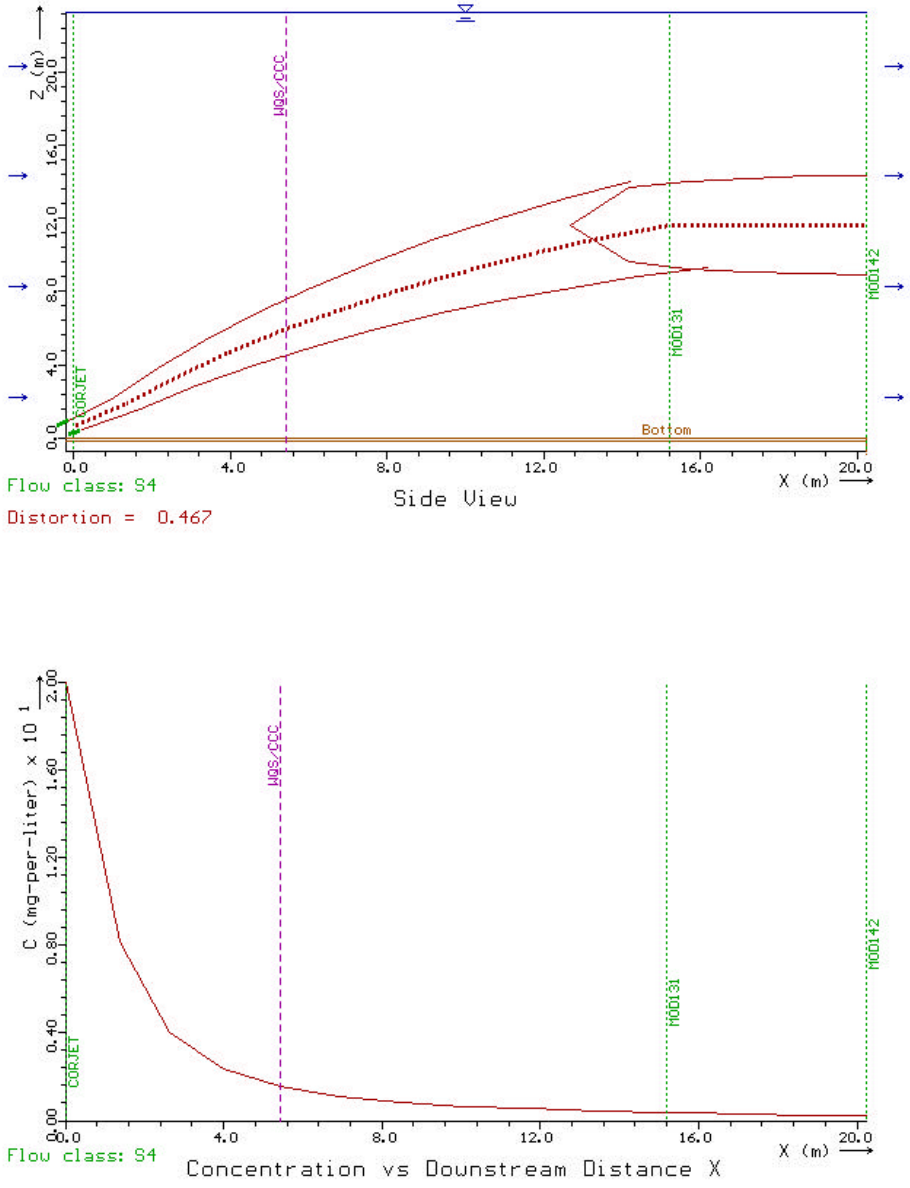


Fig. 6.4 CORMIX 1 output diagrams of Station B in summer

Station C CORMIX 1 Winter

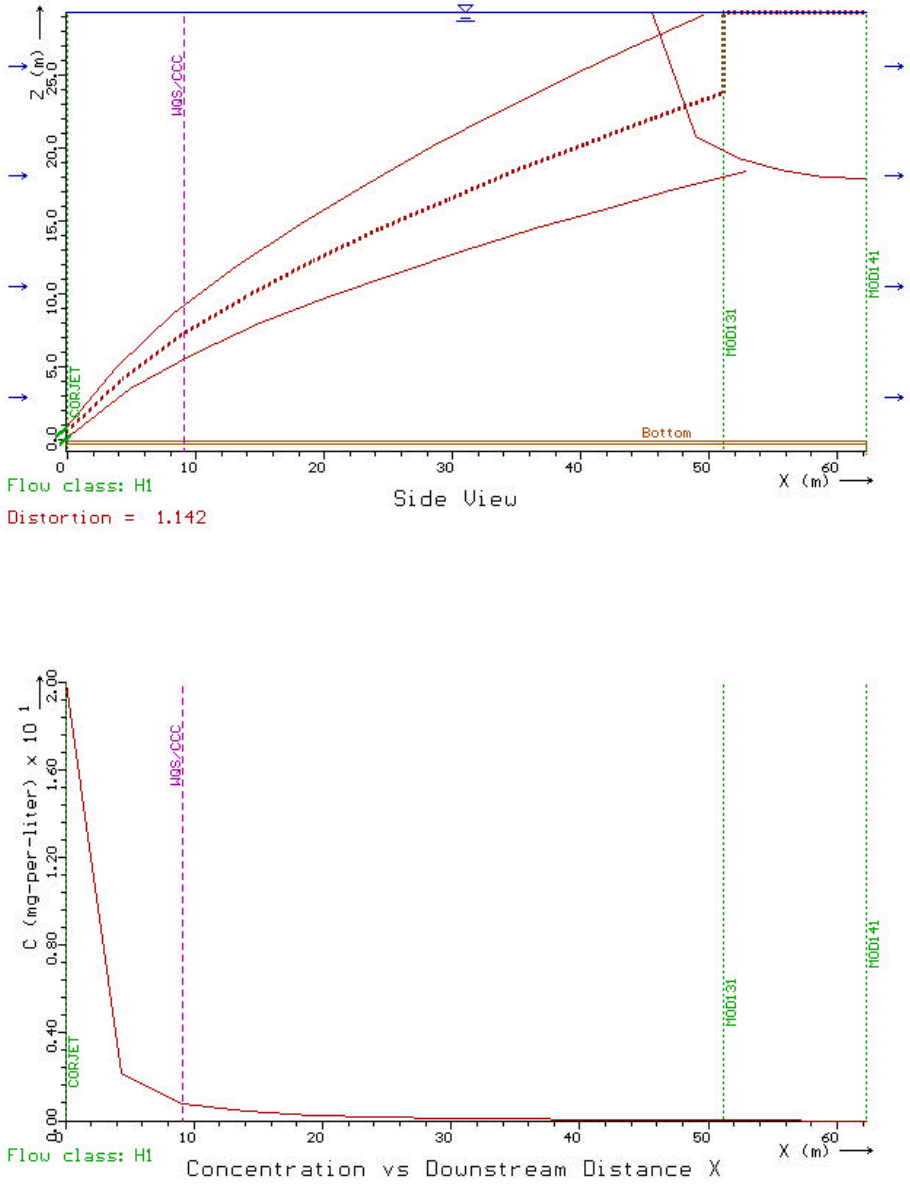


Fig. 6.5 CORMIX 1 output diagrams of Station C in winter

Station C CORMIX 1 Summer

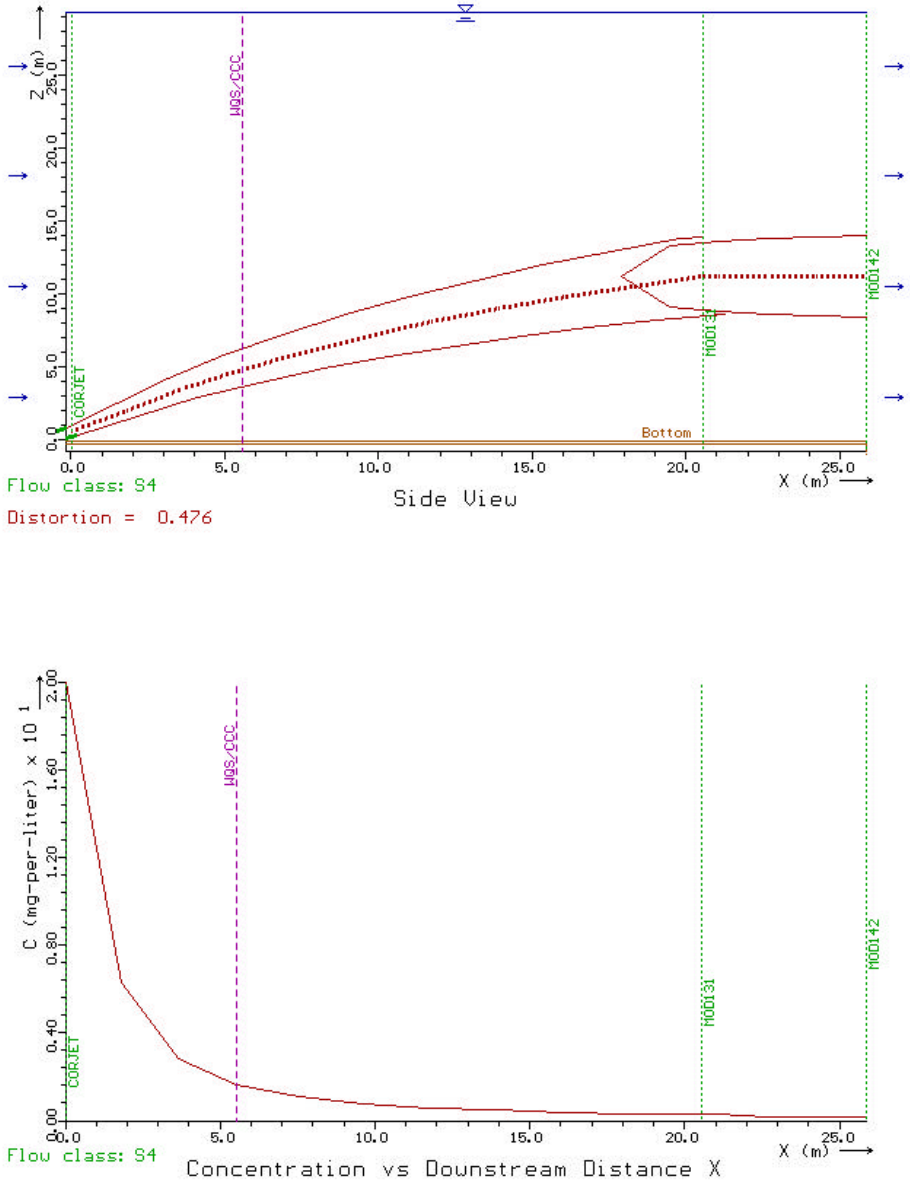


Fig. 6.6 CORMIX 1 output diagrams of Station C in summer

6.1.2 다공확산관

1) Station A

CORMIX 2모형으로 모의한 결과는 Fig. 6.7, Fig. 6.8과 같으며, 흐름의 분류는 동계의 경우 MU2, 하계의 경우 MS5로 나타났다. 동계의 경우는 Fig. 6.7에 나타난 바와 같이, 매우 불안정한 흐름의 양상을 보이고 있으며, 이는 내부밀도분포에 대해 방류운동량이 상당히 강하기 때문인 것으로 분석된다. 따라서, 이러한 빠른 초기혼합은 재순환(recirculation)을 발생시켜 완전수직혼합(full vertical mixing)을 야기하며 이후 재층리(restratification) 과정을 거치므로, 근역경계지점까지 그 효과가 지속된다. 하계의 경우는 초기의 제트운동량에 의해 수평으로의 운동량을 가지지만 주변류와 밀도 균형점(equilibrium level)에서 포착되는 양상을 보이고 있다. 플륨은 혼합영역을 지나 균형점으로 천천히 상승하는 거동하는 것을 알 수 있다. 농도의 감소가 이전과 비교해 적어지고 있다는 것을 알 수 있으며, 이후 점차적으로 완전수직혼합(full vertical mixing)의 양상을 보인다.

다공확산관은 수중방류가 그 목적이다. Station A의 경우와 같이 비교적 수심이 얕은 천해에서 수중방류를 적용한 결과, 근역에서의 집중적인 초기 혼합에 의해 단일확산관과 비교하여, 상당한 희석의 효과가 나타났다.

원역에서의 혼합이 난류전단연행이 주가 되므로 근역에서 플륨이 완전혼합되거나 수중에 포착하게 되면, 이미 혼합이 이루어진 하수방류가 재연행되는 과정을 거치게 되거나, 부력확장이 아주 서서히 진행되므로 원역에서의 희석률이 감소하게 될 것으로 예측할 수 있다.

2) Station B

흐름의 분류는 동계, 하계 모두 Station A와 동일한 MU2, MS5로 나타났다. 동계의 경우, 초기의 재순환의 과정 후, 플륨이 바닥에 부착되는 코안다효과(coanda attachment)를 보이고 있다. 이는 저생동물에 악영향을 준다. 또한 희석률은 완전수직혼합으로 주변류의 유속보다 수심의 영향이 더욱 클 것으로

예측되며 Station A의 동계와 비교하면 근역경계까지의 거리는 50.0m로 동일하지만 수치적으로 134.2, 289.0으로 큰 차이가 있다는 것을 알 수 있다. 반면, 하계의 경우는 수심보다는 주변류의 유속이 희석률에 더욱 큰 영향을 발휘하는 것으로 예측할 수 있다. 즉, 플룸은 수중에 포착되는 흐름이므로 주변류와 플룸의 속도차로 인한 전단난류연행으로 인한 희석치의 변화가 중요한 것으로 분석된다.

3) Station C

Fig. 6.11과 Fig. 6.12에 나타난 바와 같이, 흐름의 분류는 동계, 하계 모두 Station A, B와 같은 MU2, MS5이다.

동계의 경우, Station A, B의 결과와 같이, 플룸은 재순환과 재층리과정을 거치며, 플룸이 바닥에 닿기 전까지 희석률은 크게 증가하는데 이는 초기의 강한 재순환으로 결과인 것으로 분석되며 재순환의 과정이후 연행되어 희석된 하수오염물이 플룸으로 재연행되어 희석의 효과는 크게 떨어지는 것을 알 수 있다. 하계의 경우, 주변류와 선형 밀도성층현상으로 플룸은 수중에 포착되어 서서히 진행되는 양상을 보이며, Station B에서 언급한 것과 같이 전단난류연행이 희석의 중요한 요인으로 분석된다.

Station A CORMIX 2 Winter

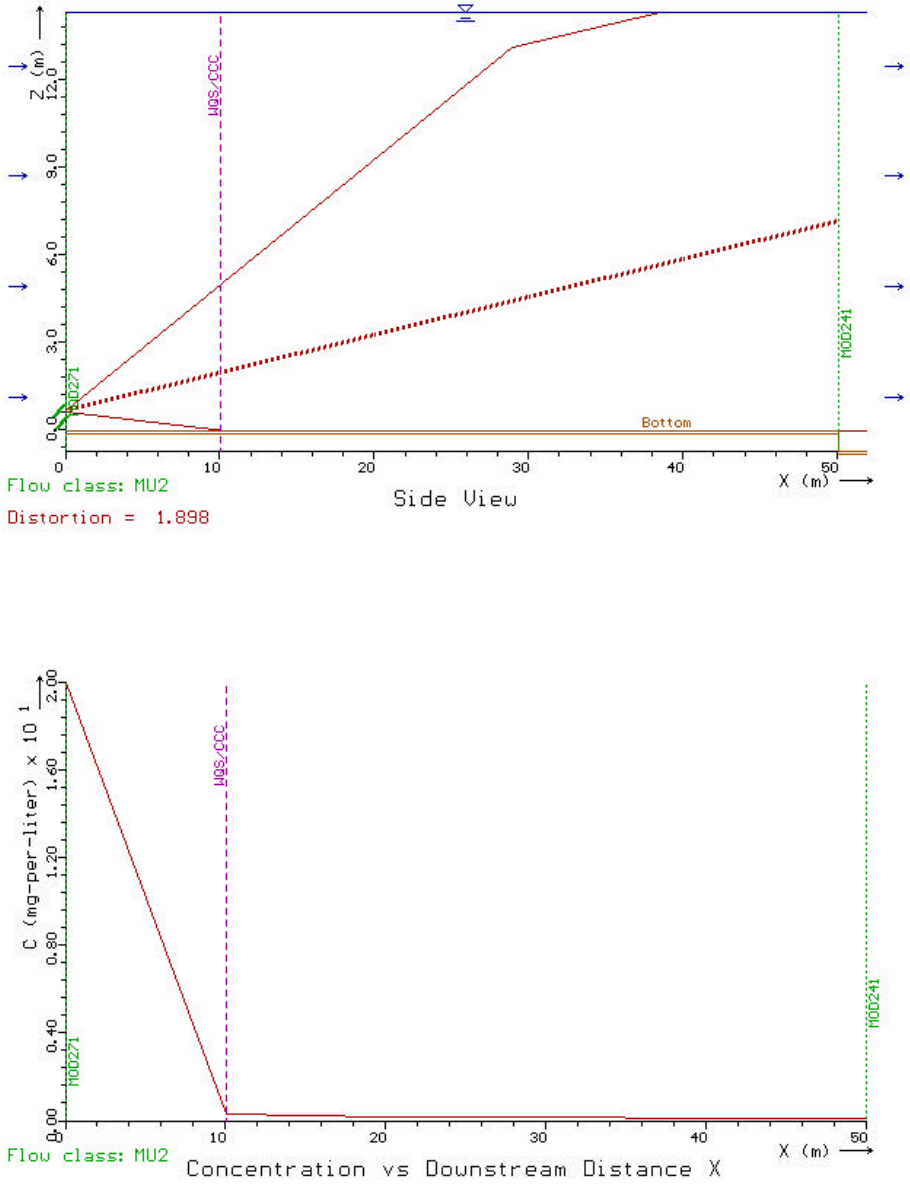


Fig. 6.7 CORMIX 2 output diagrams of Station A in winter

Station A CORMIX 2 Summer

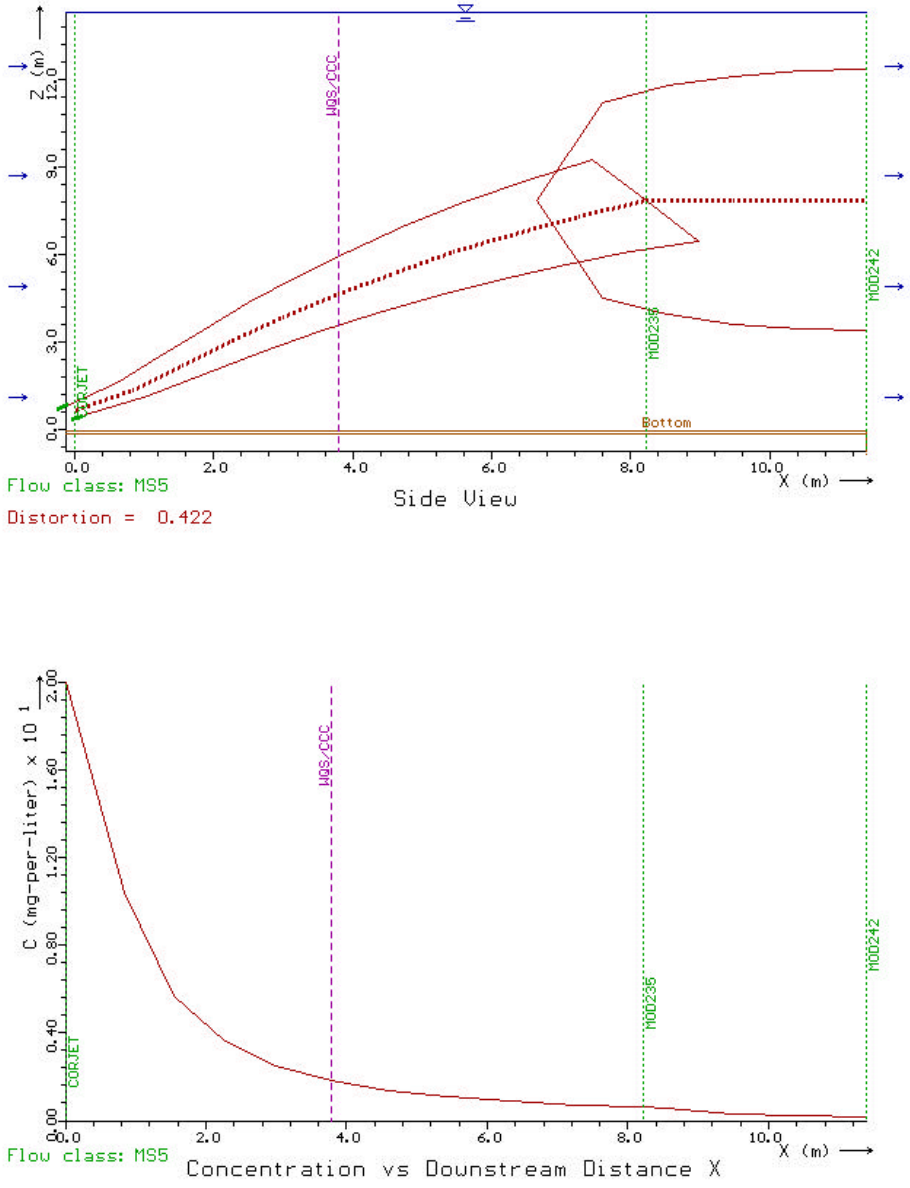


Fig. 6.8 CORMIX 2 output diagrams of Station A in summer

Station B CORMIX 2 Winter

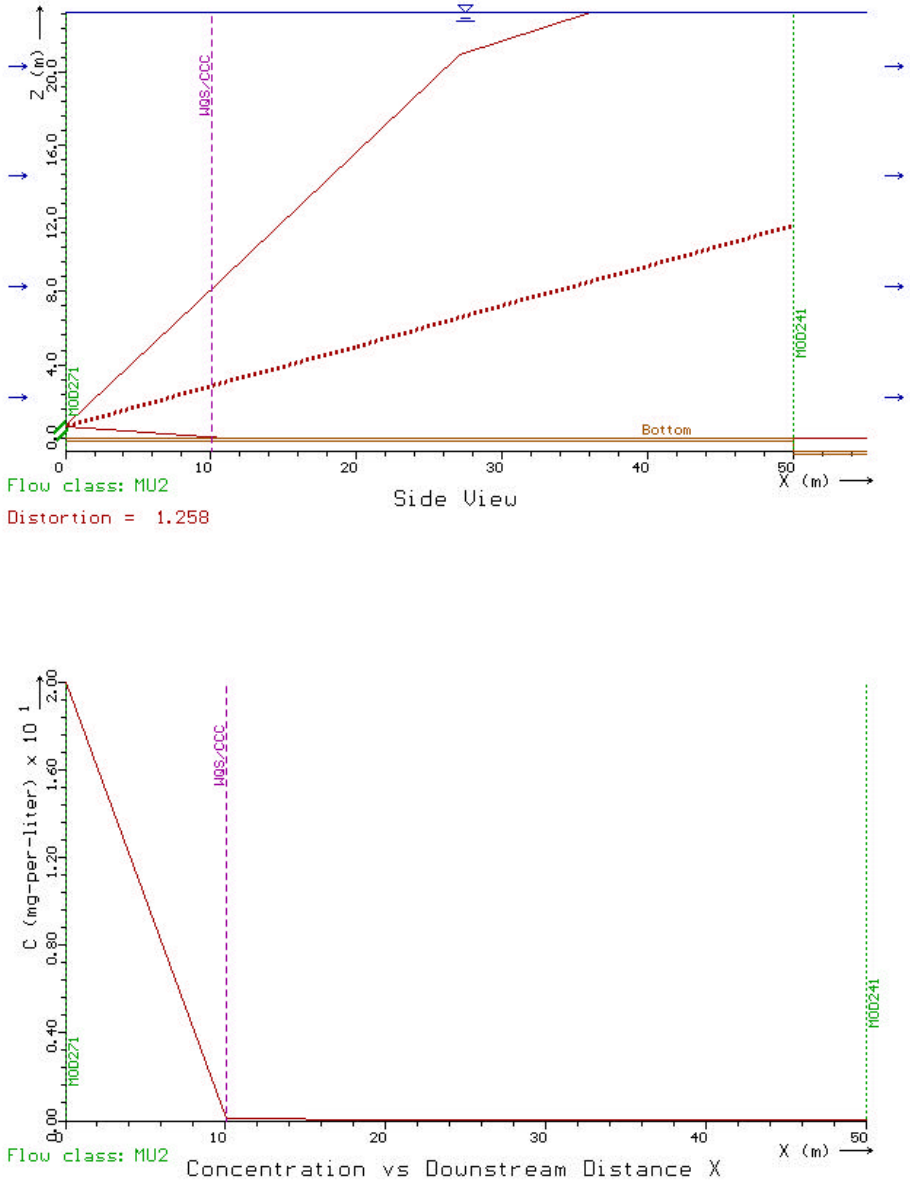


Fig. 6.9 CORMIX 2 output diagrams of Station B in winter

Station B CORMIX 2 Summer

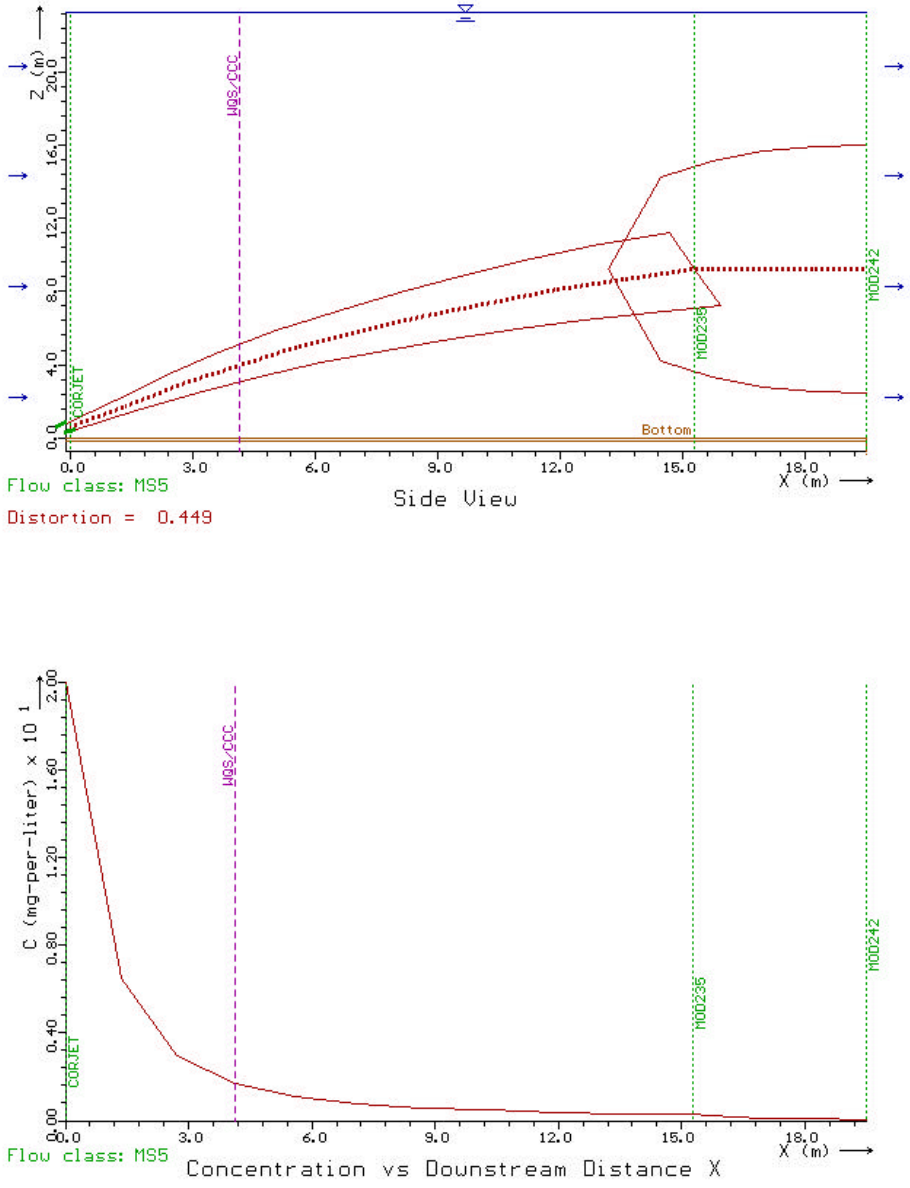


Fig. 6.10 CORMIX 2 output diagrams of Station B in summer

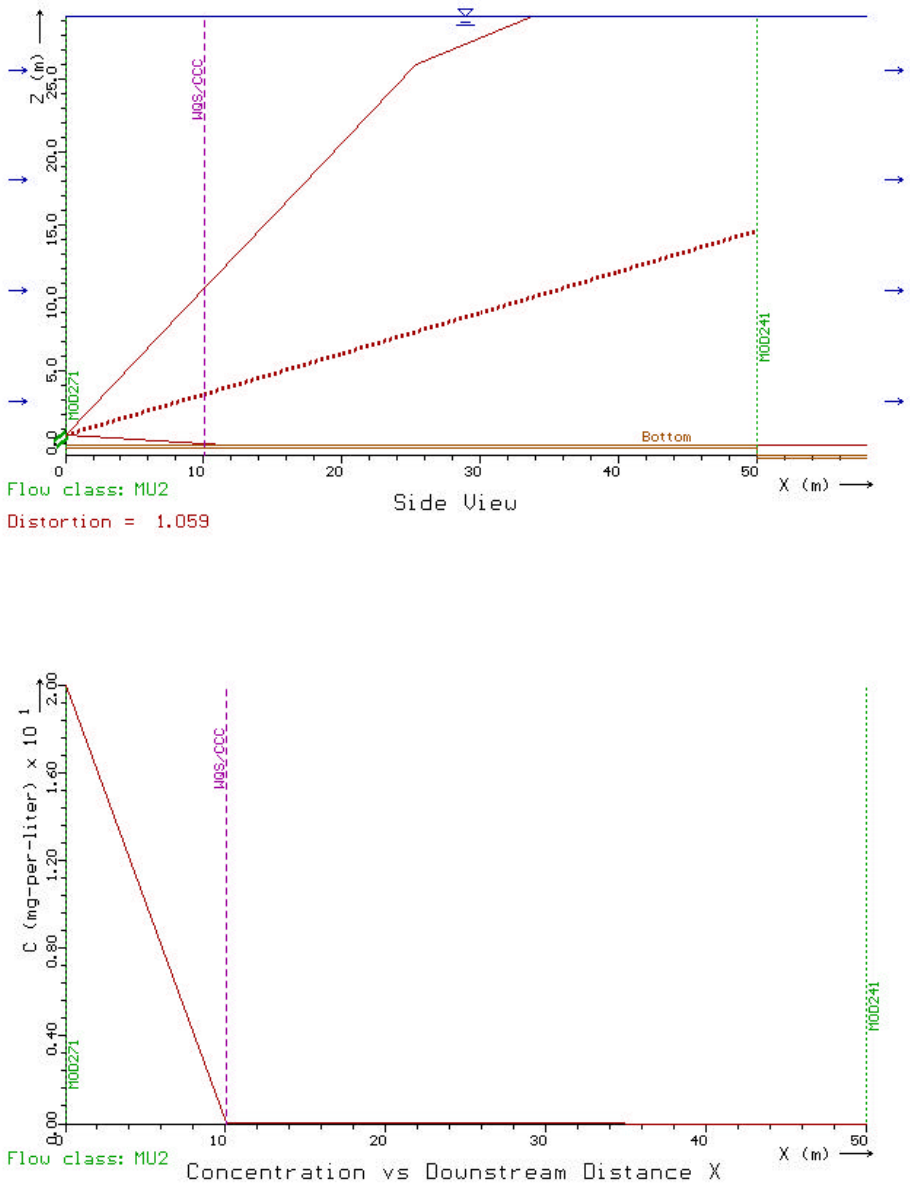


Fig. 6.11 CORMIX 2 output diagrams of Station C in winter

Station C CORMIX 2 Summer

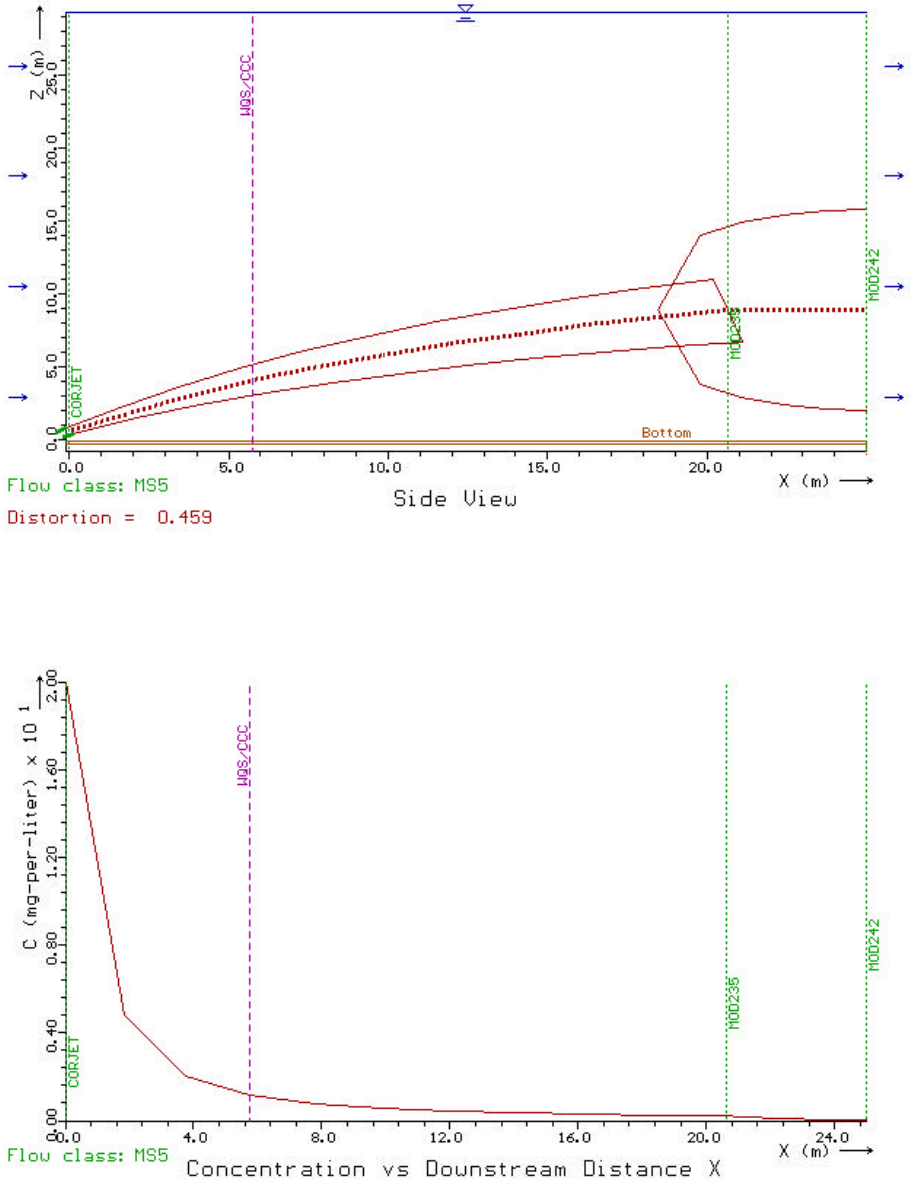


Fig. 6.12 CORMIX 2 output diagrams of Station C in summer

6.2 근역혼합특성 및 희석률 분석

6.2.1 단일확산관

CORMIX1 모형으로 모의한 근역혼합특성의 결과를 Station별로 정리하면 Table 6.1에 나타냈다.

Station A의 경우, 동계와 하계 모두 근역에서의 특성이 비슷하게 나타났다. 또한 플륨은 해수표면에 도달하는 것으로 예측되었다. 이러한 결과는 온배수확산관의 경우와는 달리, 하수확산관의 경우는 하수장이 해수표면에 떠오르게 되면 미관상 좋지 않고, 고도의 처리를 거치지 않고 방류될 경우 악취가 발생할 우려가 있기 때문이다. 또한 근역경계점에서의 희석률은 49.6, 37.4로 나타났다. 일반적으로 근역내의 희석률을 100 200을 원칙으로 하는 것을 고려한다면, Station A의 경우는 부적합한 위치라는 것을 알 수 있다.

Station B의 경우, 동계에는 플륨이 해수표면에 도달하지만 근역경계점에서의 희석률이 201.3으로 적절한 결과를 나왔다. 하지만 하계의 경우 희석률은 79.7로 알맞지 않은 결과를 나왔다. 즉, 수중에 포착되거나 해수표면에 도달한 플륨은 수동확산(passive diffusion)과 부력확장(lateral spreading)을 통해 희석이 된다. 따라서 원역에서의 희석은 근역과 비교해 적기 때문에 근역내에서의 희석률을 극대화시키는 이유가 된다.

Station C의 경우, 근역의 거리가 멀고 형성된 하수장의 폭과 두께가 희석률의 변화에 비해 증가률이 적기 때문에 Station B의 결과와 비교해서 동계 443.4, 하계 102.8로 최소 목표희석률 100을 충분히 충족하는 것으로 분석된다.

Fig. 6.13에 각 Station별의 희석률의 변화를 나타내었다. 분석결과, 수심이 낮은 Station A의 경우는 동계와 하계의 희석률 차이는 작으나, 수심이 비교적 깊은 Station B와 Station C는 동계와 하계의 희석률의 차이는 2 4배까지의 차이가 있다. 즉, 수평방류를 원칙으로 하는 경우, 균일한 밀도와 선형적인 밀도분포가 존재하는 해역에서는 계절별 희석률의 차이를 극복하는 방안을 고

려하여야 한다. 또한 수심이 깊어지고 주변유속이 클수록 희석률의 변화가 크다라는 것이 Fig. 6.13을 보면 나타나 있다. 또한 Fig. 6.14를 통해 근역경계에서의 적용 모델별/계절별 플룸의 두께를 파악할 수 있다.

6.2.2 다공확산관

CORMIX2 모형으로 모의한 근역혼합특성의 결과를 Station별로 정리하면 Table 6.2와 같다. 단일확산관에 비해 다공확산관을 모의했을 경우, Station A의 하계를 제외한 모든 사례에서 이상적인 희석 및 COD 농도를 유지한다.

모든 경우에서, 동계의 경우는 완전수직혼합이 발생하는 불안정한 흐름상태를 보이나 하계의 경우는 모두 주변 유속의 크기와 선형적인 밀도분포로 인해 플룸은 가로방향으로 심하게 꺾이어 거동하며 수중에 포착되는 것으로 분석된다.

동계의 경우, 초기에 플룸이 수중에 도달하기 때문에 희석률의 재고는 필수적이다. 즉, 완전수직혼합으로 인해 해수표면에 도달한 플룸은 계속적으로 표면플룸으로 희석이 진행되므로 높은 희석률을 가져야 한다. 이러한 이유로 Station C가 가장 높은 희석률 453.2를 나타내어 가장 적합한 결과를 보였다.

하계의 경우, 모든 흐름은 수중에 포착되는 안정한 흐름상태를 보인다. 이는 하수확산관의 설계에서 거론되는 문제점인 플룸의 해수표면 도달에 따른 미관상이나 악취의 문제점을 극복할 수는 있으므로 단기적인 관점에서는 바람직하나 장기적인 관점에서는 방류해역의 수중생태계에 위해를 가할 수도 있다. 수중에서 포착되는 플룸의 거동으로 가장 높은 희석률을 보인 Station C가 하계의 경우에서도 가장 적합한 결과를 보였다.

Fig. 6.13에 다공확산관(CORMIX 2)에 대한 희석률의 비교에서, 수심이 깊어지고 유속이 클수록 희석률이 크다는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 6.14에 나타난 바와 같이 플룸의 두께는 수심과 유속이 클수록 증가하는 것을 볼 수 있다.

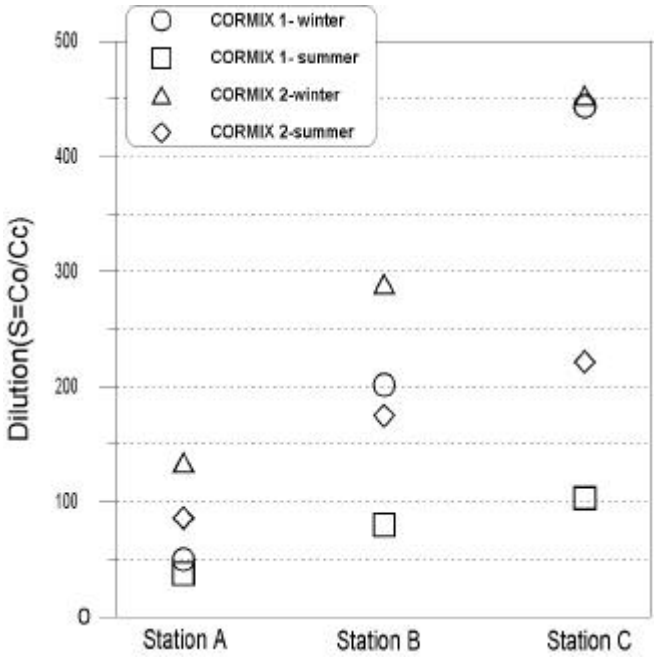


Fig. 6.13 Centerline dilution at the edge of N.F.R.

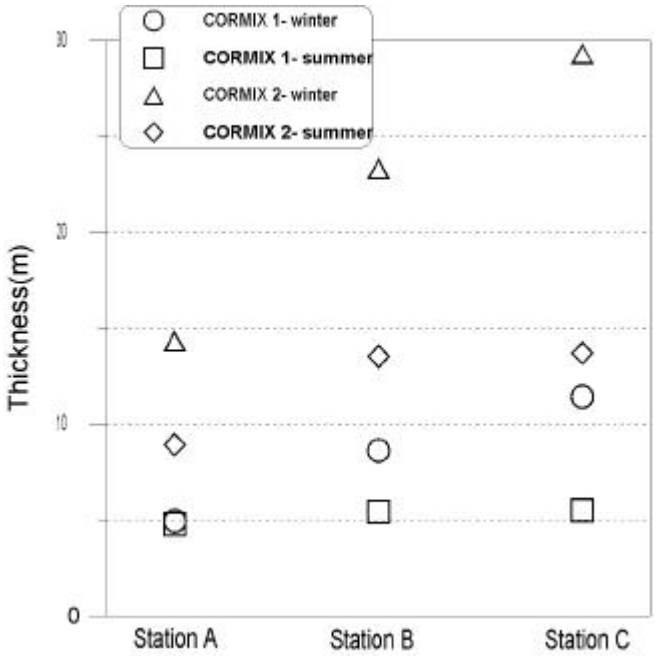


Fig. 6.14 Wastefield thickness at the edge of N.F.R.

Table 6.1 Near-field characteristics at edge of N.F.R using CORMIX 1

Classcification		Classification of flow	Height of rise z(m)	Distance to edge of N.F.R x(m)	Thickness BV(m)	Half-width BH(m)	Dilution S	Co
Station A	winter	H1	14.30	13.06	4.93	4.93	49.6	
	summer	H1	14.30	12.54	4.28	4.28	37.4	
Station B	winter	H1	23.30	33.77	8.60	8.60	201.3	
	summer	S4	11.67	20.22	5.41	5.41	79.7	
Station C	winter	H1	29.30	62.21	11.42	11.42	443.4	
	summer	S4	11.25	25.84	5.50	5.50	102.8	

Table 6.2 Near-field characteristics at edge of N.F.R using CORMIX 2

Classcification		Classification of flow	Height of rise z(m)	Distance to edge of N.F.R x(m)	Thickness BV(m)	Half-width BH(m)	Dilution S	Co
Station A	winter	MU2	7.15	50.0	14.30	14.30	134.2	
	summer	MS5	7.87	11.38	8.91	51.79	85.5	
Station B	winter	MU2	11.65	50.0	23.30	49.77	289.0	
	summer	MS5	9.26	19.48	13.51	52.31	174.6	
Station C	winter	MU2	14.65	50.0	29.30	49.88	453.2	
	summer	MS5	8.96	24.97	13.69	52.39	221.3	

6.3 희석인자의 중요도 분석

이전의 연구(Kwon, 1997)에 의하면 근역에서의 희석에 영향을 주는 인자는 방류량, 방류공의 수, 방류공의 직경, 주변류의 유속, 수심 등의 확산관 특성과 방류수 특성, 그리고 주변해역의 특성에 관련된 것이다.

본 연구에서는 전절에서 동계와 하계로 나누어 논의하였던 Station A, B, C 중 가장 적절한 위치라고 판단되는 Station C를 선정하여, 방류수심, 주변유속, 총방류량, 방류각도, 방류 오염물의 초기농도, 방류공의 간격, 방류공의 직경을 변수로 하여 오염물 거동과 희석에 어떠한 영향을 주는지를 분석하였다.

실험조건은 Station C와 동일하게 취하였으며, 각 변수에 대한 실험결과를 희석률과 오염물의 혼합특성 중 하수장 두께, 상승높이에 대하여 비교하여 그 중요도를 파악하였다.

1) 방류수심

방류수심을 15, 30, 60m로 하였을 경우에 희석률, 상승높이, 하수장 두께에 대한 결과를 Fig. 6.15에 나타내었다. 희석률의 값은 수심이 증가할수록 동계와 하계 모두 증가하고 있다. 동계의 경우를 단일확산관으로 모의한 경우, 60m의 수심에서 희석률의 값이 1,876으로 많은 차이가 나타난다. 이는 플룸이 주변수와 방류오염물과의 밀도차로 인해서 상향으로 거동하게 되는데, 동계의 경우 내부층이 존재하지 않는 균일한 밀도분포를 보이고 충분한 상승높이를 가질 수 있기 때문인 것으로 분석된다. 일반적인 하수확산관의 경우, 주변수의 밀도분포가 균일한 경우 수심이 아주 중요한 인자임을 예상할 수 있다. 또한 Fig. 6.15(b)에서 동계의 다공확산관의 경우가 가장 큰 하수장의 두께를 나타내는 것은 초기의 재순환으로 인한 효과로 완전수직혼합의 불안정한 흐름양상으로 인한 결과이며, 나머지의 경우는 모두 수중에 포착되는 경우이다. Fig. 6.15(c)에서는 주변의 밀도분포가 균일한 동계의 상승고가 하계보다 높게 나타났으며, 동계에는 상승고가 높을수록 희석률이 높아지고, 하계에는 희석률이 낮아진다는 것을 알 수 있다.

2) 주변유속

Fig. 6.16은 주변유속이 0.2, 0.25, 0.3m/sec인 경우에 대한 모의결과로 완전 수직혼합이 발생하는 동계의 경우 희석률에 변화를 가져오는 것 외에는 일정한 것으로 나타났다. 희석률의 경우, Fig. 6.16(a)에서처럼 동계의 경우가 하계의 경우보다 그 증가율이 큰 것은 주변유속은 근역의 범위를 확장시켜 주변수와의 상호작용의 기회를 증가시키므로 희석률이 그 만큼 증가하는 것으로 분석된다. 또한 Fig. 6.16(b)처럼 플룸의 두께는 거의 일정하나 하계에 다공확산관에서 미약하게 감소하는 것으로 나타났다. 상승고는 Fig. 6.16(c)에 나타난 바와 같이 동계에 플룸이 해수표면에 도달하였으며 하계에는 수중에 포착되는 것으로 나타났다. 희석률은 플룸이 해수표면에 도달하는 동계의 경우가 하계에 비해 높은 결과를 보였다. 즉, 주변의 유속이 클수록 희석률은 상승하며, 하계보다 동계의 경우 희석률에 미치는 영향이 크다라는 것을 알 수 있다.

3) 방류량

총방류량을 0.81, 1.62, 3.24㎥/sec인 경우의 결과는 Fig. 6.17과 같다. 방류량의 증가에 대한 희석률이 감소하며 동계에 그 경향이 두드러짐을 나타내고 있다. 하수장의 두께 변화는 Fig. 6.17(b)에 나타난 바와 같이 동계에는 일정하고 하계에 상승하는 경향을 보였다. Fig. 6.17(c)에서처럼 상승고는 동계에 해수표면에 도달하며 하계에 수중에 포착되어 점진적으로 증가하였다. 전반적으로 방류량이 증가함에 따라, 하수장 두께에 변화가 없이 해수표면에 도달하기 때문에 희석률은 감소하게 되는 것으로 분석된다.

4) 방류 오염물의 농도

초기 방류오염물의 농도를 10, 20, 30㎎/ℓ로 변화시켜 모의한 결과는 Fig. 6.18에 나타내었다. 모든 경우에 있어서 오염물의 초기농도는 희석률과 플룸의 거동에 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다.

5) 방류 각도

Fig. 6.19는 수평면에 대한 방류각도를 30, 60, 90°로 했을 경우의 모의결과를 정리한 것이다. 방류각도에 따른 하수장의 두께를 제외하고는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 90°로 방류하였을 경우, 하수장의 두께가 감소한 것은 30, 60°로 방류하였을 경우, 플룸은 완전수직혼합의 양상을 보인데 반해 90°의 경우는 초기의 재순환영역이 감소하여 완전수직혼합이 보이지 않은 결과로 분석된다. 또한 희석률의 변화는 거의 보이지 않는데 이는 하수확산관의 경우, 초기의 강한 운동량보다 주변수의 밀도차로 인한 부력운동량이 강하여 플룸은 상승하게 되는 양상을 가지게 되므로 방류각도가 희석률에 미치는 영향이 작다고 분석된다. 따라서, 상승고의 변화는 미약하다. 방류각도에 따른 희석률의 변화가 작다는 것은 온배수확산관과 하수확산관의 차이라 할 수 있다.

6) 방류공 직경

단일확산관으로 방류공의 직경을 0.3, 0.6, 0.9m로 하여 모의하였다. 결과는 Fig. 6.20과 같다. 방류공의 직경은 방류속도와 관계되며 방류속도가 커지게 되면 일반적으로 초기운동량이 증가하게 되어 초기 발달흐름영역의 길이가 증가하게 되어 희석의 증가를 가져온다. 하지만, 방류 각도에 변화를 주면서 실험한 Station C에서는 주변수와의 밀도차로 인한 부력운동량이 방류속도에 따른 동역학적 운동량을 무시할 만큼 크기 때문에 Fig. 20의 결과와 같이 모든 경우에 대해 변화가 미약하다.

7) 방류공 간격(방류공의 수)

확산관의 길이 100m에 총방류량은 동일하게 하고 연직유도관의 수를 11, 22, 33개로 하여 연직유도관이 하나의 방류공 역할을 하는 것으로 하여 실험을 실시하였다. 이 때, 방류공의 간격은 각각 10, 4.16, 3.13m로 하였다. 실험결과 Fig. 6.21에 나타내는데 여기서 희석률은 방류공의 간격이 넓을수록 감소하며, 동계의 경우는 완전수직혼합의 양상을 보여 하수장 두께에 차이가 없지만

하계의 경우 하수장의 두께가 점차적으로 작아졌다. 하수장의 상승고는 하계에 미약한 상승의 경향을 나타내며 겨울철에는 거의 일정한 것으로 나타났다.

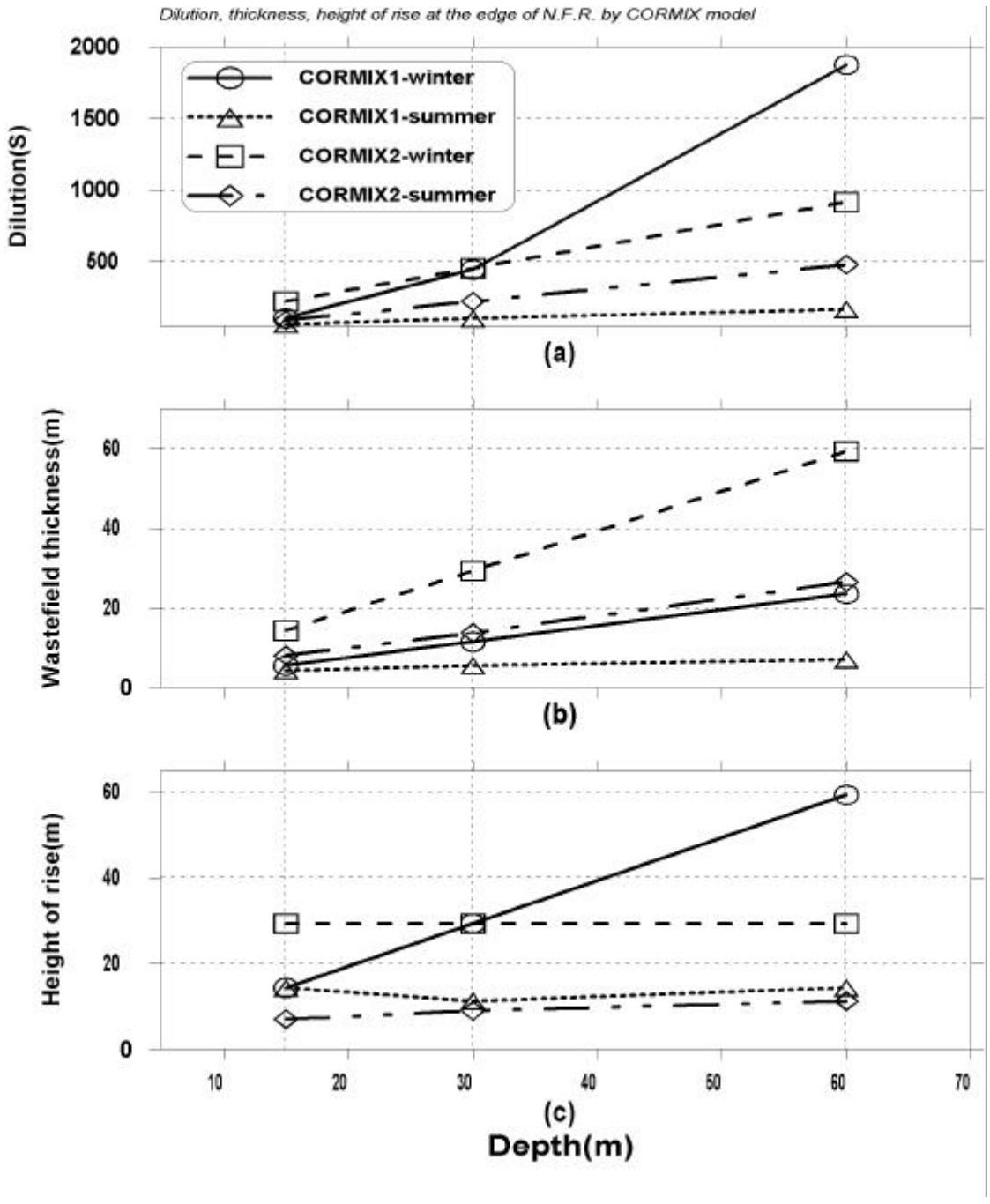


Fig. 6.15 Dilution, wastefield thickness, height of rise computed by CORMIX model according to the variation of discharge depth

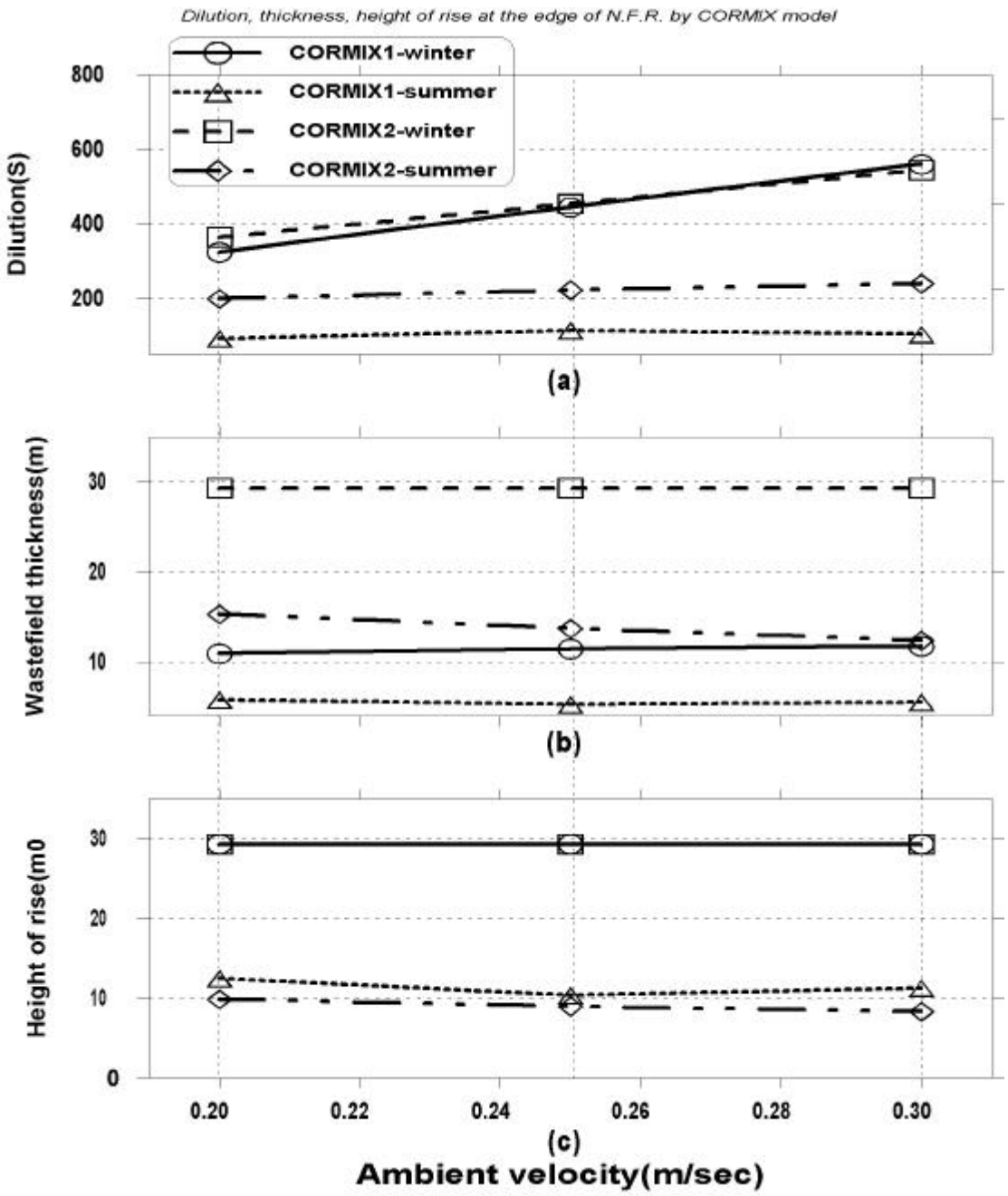


Fig. 6.16 Dilution, wastefield thickness, height of rise computed by CORMIX model according to the variation of ambient velocity

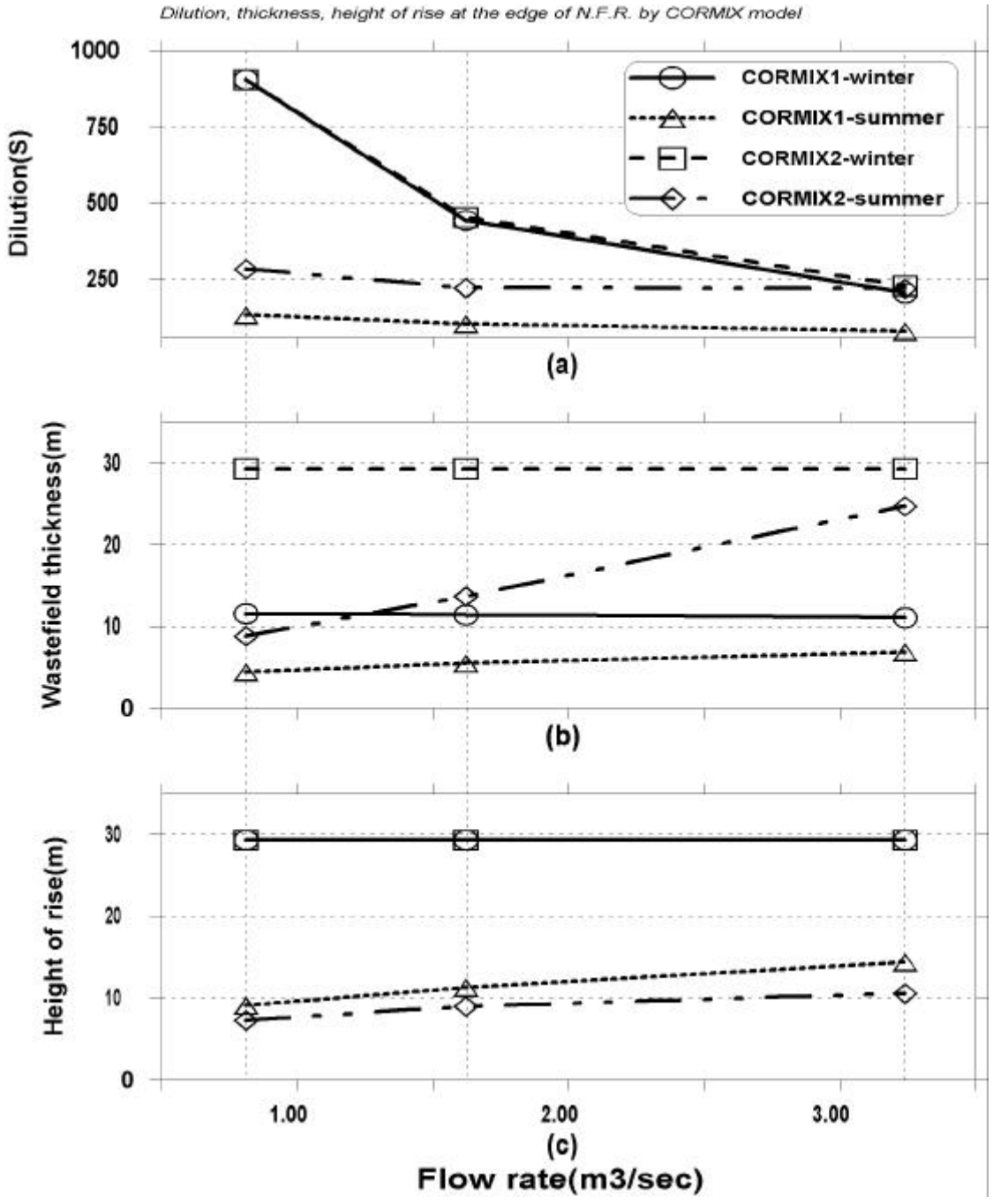


Fig. 6.17 Dilution, wastefield thickness, height of rise computed by CORMIX model according to the variation of total flow rate

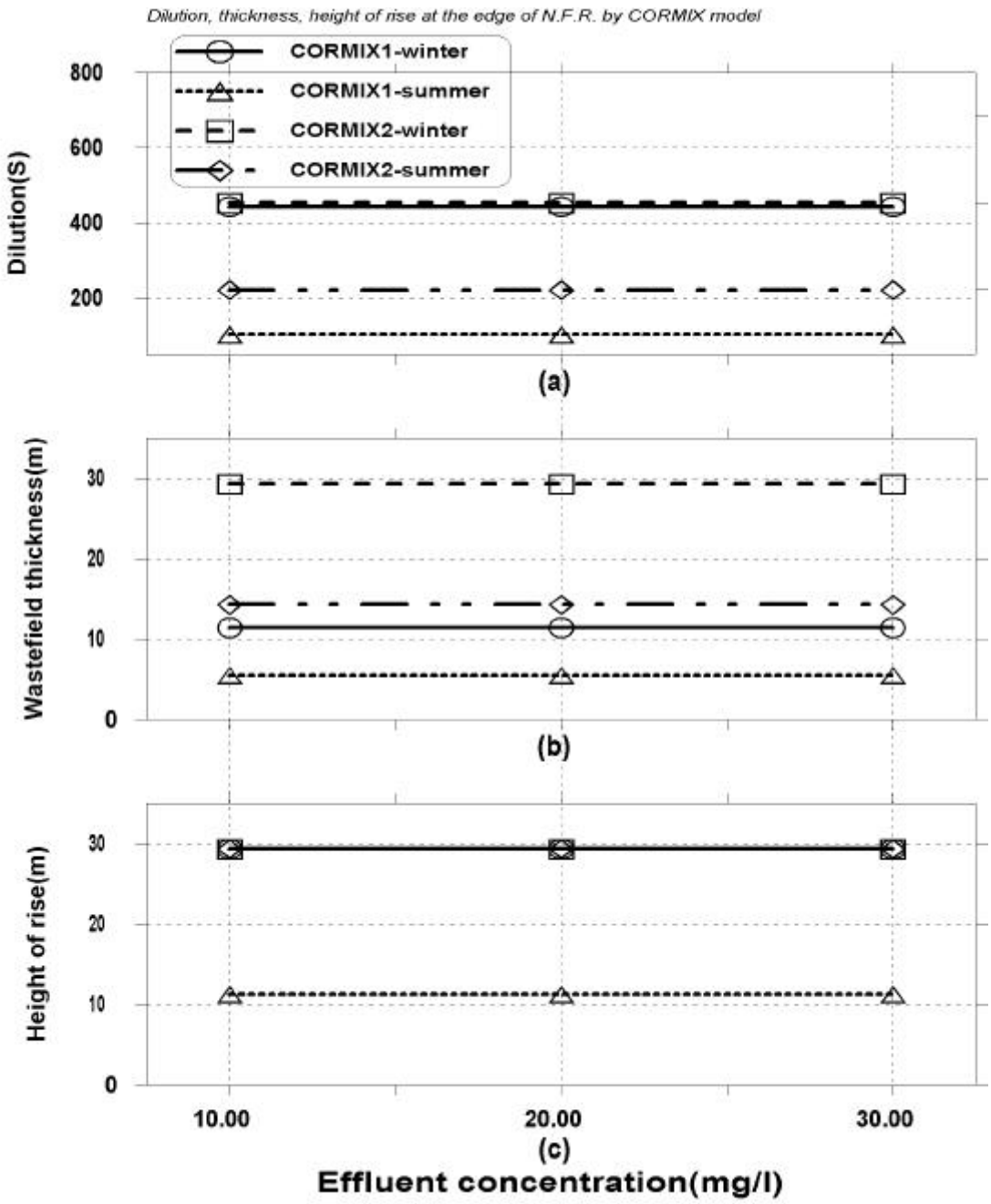


Fig. 6.18 Dilution, wastefield thickness, height of rise computed by CORMIX model according to the variation of effluent concentration

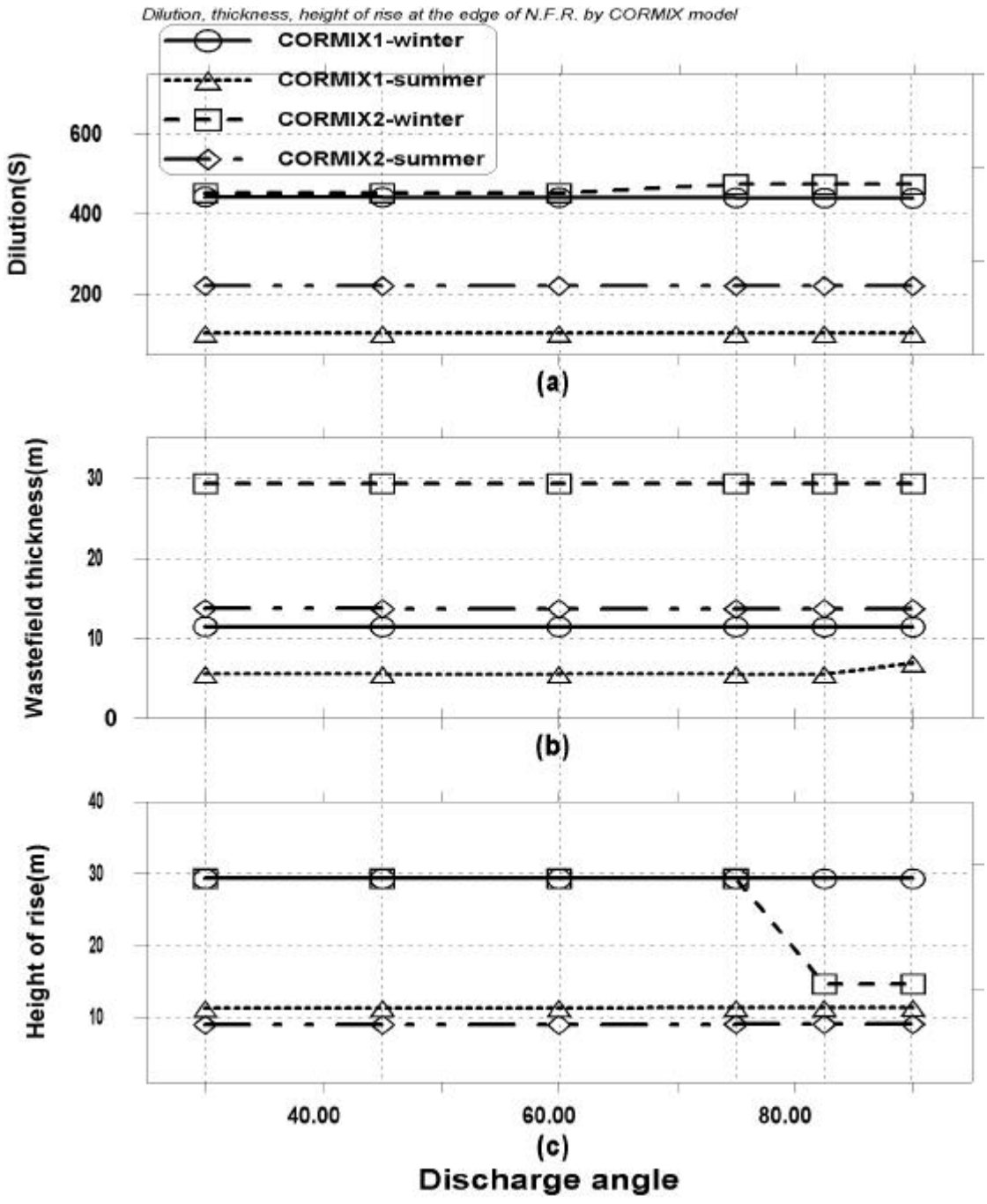


Fig. 6.19 Dilution, wastefield thickness, height of rise computed by CORMIX model according to the variation of discharge angle

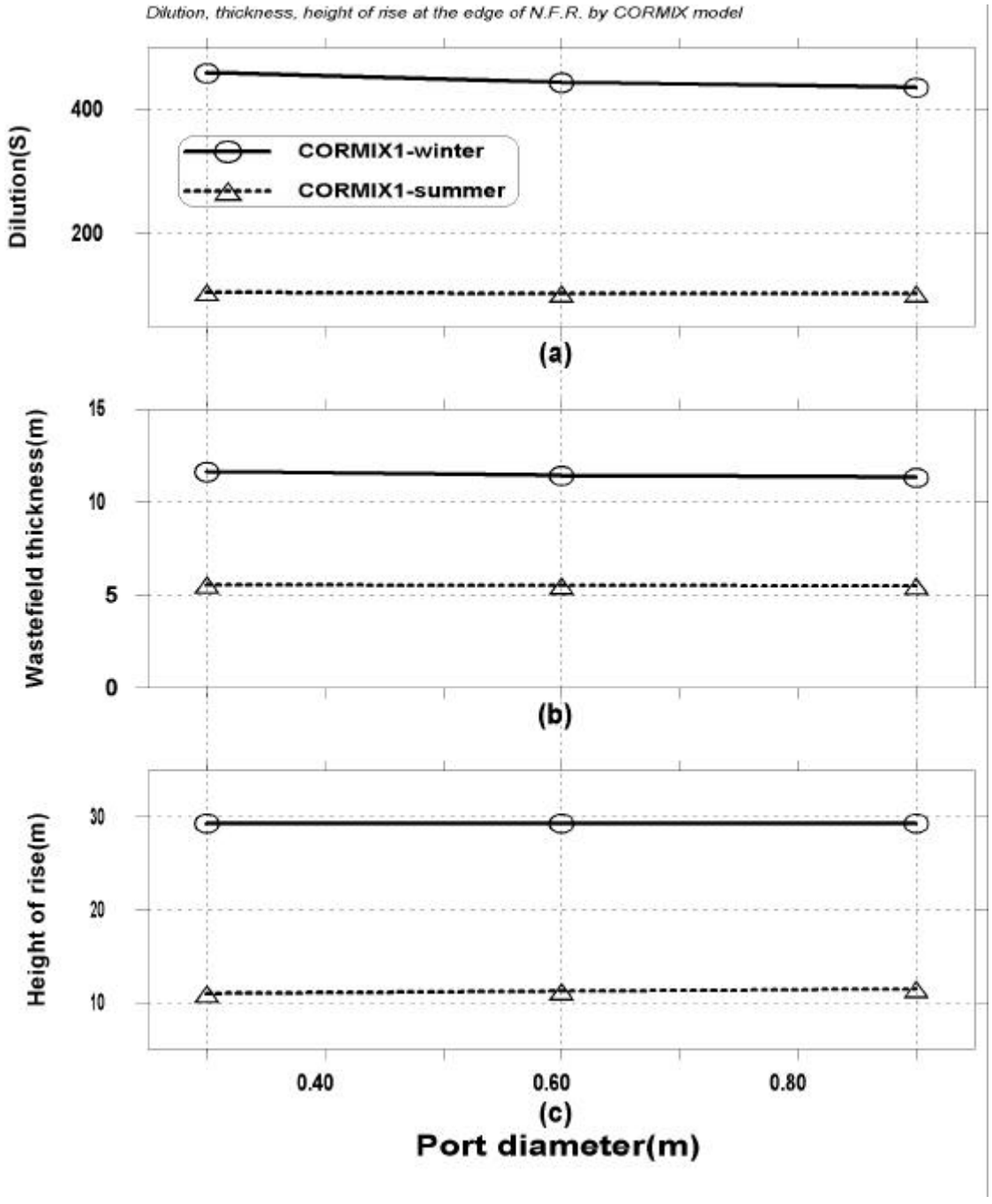


Fig. 6.20 Dilution, wastefield thickness, height of rise computed by CORMIX model according to the variation of port diameter

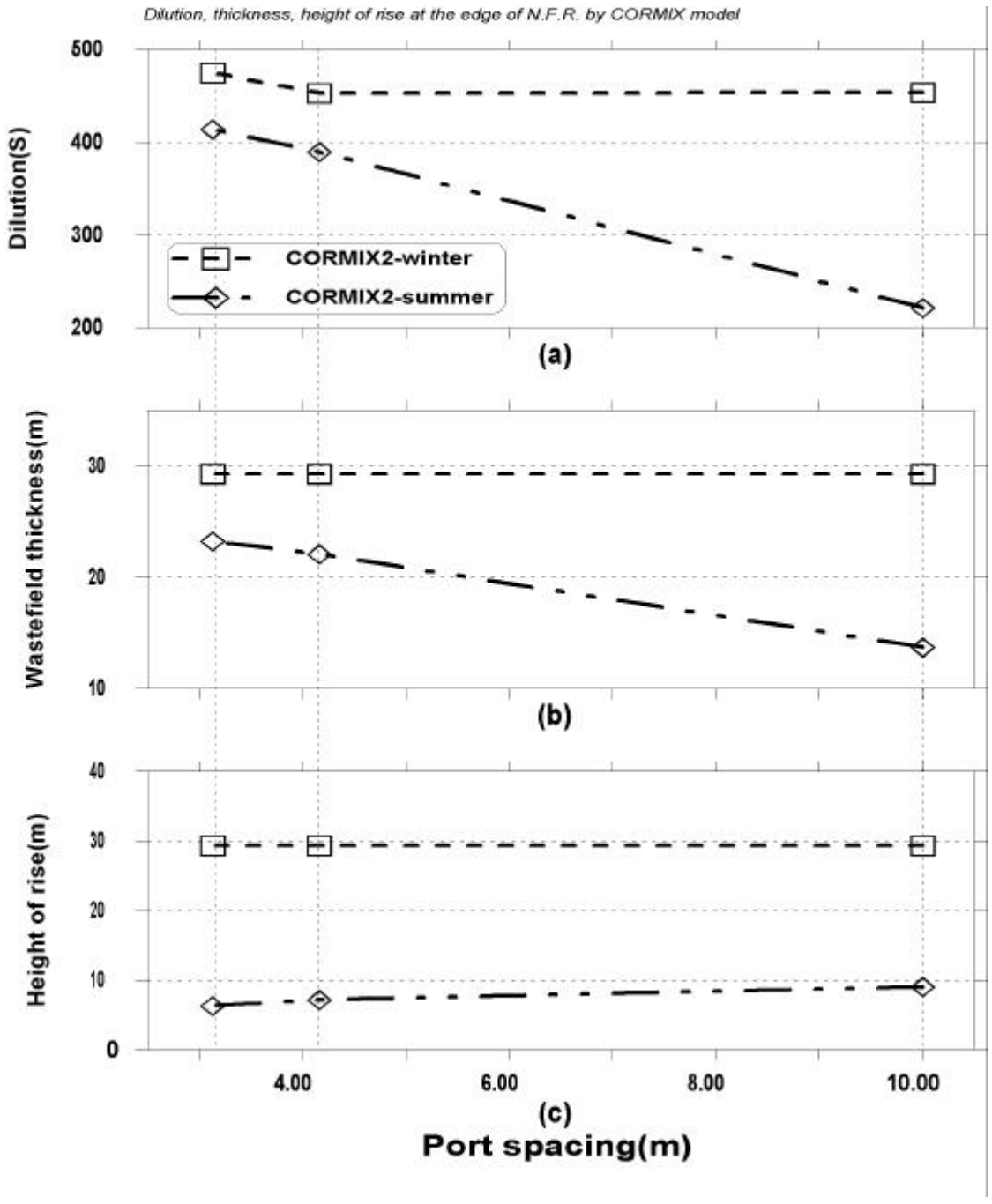


Fig. 6.21 Dilution, wastefield thickness, height of rise computed by CORMIX model according to the variation of port spacing

7. 결론 및 제언

본 연구는 하수의 수중 방류시 확산인자별 중요도를 분석하고, 하수확산관 설계시 기초자료를 제공할 목적으로 수행하였다. 도시 하수처리방안의 하나인 하수확산관을 통한 도시 하수방류의 초기희석과 오염물 거동에 관한 하수 혼합특성을 하수종말처리장 계획지점을 대상으로 하여 예측하고 장래 하수 방류시스템을 설치 후에 운영시 그 주변해역에 미치는 영향을 검토하였으며, 이것을 확장하여 연안해역에서 오염물의 거동을 수치실험으로 예측할 때 단순히 점원으로 방류할 때와 비교하여 2차원 광역 수심평균실험에서 나타나게 되는 차이를 도출하였다.

대도시 인근 해역에서의 도시하수 방류문제를 다루기 위하여 최근 다시 거론되고 있는 해양방류시스템에 대한 공학적인 접근을 행하고, 적용대상지역으로 선정한 감천항 매립지를 중심으로 부산중앙하수처리장에 대한 기초자료를 수집, 분석하였다. 방류수의 수학적 거동에 대한 이해와 물리적인 혼합과정에 대한 이해를 위해 단일제트이론, 다공제트이론, 등슬롯확산관이론을 등의 기초이론으로 접근하였으며, 이를 통해서 가장 적합하며 적용과 분석이 용이한 수치모델로 본 연구에서는 미국 환경보호국에서 제공한 근역혼합모델인 CORMIX 모델을 사용하였다.

모델의 적용결과를 분석한 후, 근역희석률과 오염물 혼합거동 양상 등의 관계를 예측하였으며, 확산인자별 중요도를 파악하였다.

7.1 결 론

모델 실험을 통하여 도출된 사항은 다음과 같이 요약할 수 있다.

① 실제 자료에 근거한 CORMIX 모델의 검증을 시도한 결과, 입력자료 중 혼합특성의 중요한 인자인 밀도분포의 부정확성에서 생기는 오차를 고려한다

면 근역혼합특성에서 만족할 만한 수준으로 나타났다.

② 초기희석과정 후에 얻어진 오염원과 기존의 점원을 이용한 2차원 확산모델의 수치실험 결과, 해석상에 차이가 발생하였다. 즉, 일반적인 수중방류시 단순한 점원해석으로는 결과에 상당한 차이를 가져오게 되며, 확산모델 실험시 초기희석 과정에 대한 분석과 이의 도입이 필요하다는 결과를 얻었다.

아울러, 부산중앙하수처리장을 대상으로 선정한 모의지점인 Station A, B, C에 대하여 기본자료를 입력하고 모의한 결과를 분석하여, 각 지점별 근역 희석률과 오염물 혼합거동 양상 등을 파악하여 최적의 지점을 선정하였으며, 선정된 지점을 대상으로 희석인자별 중요도를 분석하였다. 각 지점별의 분석결과를 정리하면 다음과 같다.

① 단일확산관의 경우, Station C의 경우가 동·하계의 경우 희석률이 심해방류의 추천치보다 높은 100이상의 값을 가지며, 나머지는 하계의 희석률이 모두 100이하로 나타나 Station C의 위치가 합리적인 것으로 평가할 수 있다. 또한 Station A, B, C의 오염물 거동은 동계의 경우, 초기의 주변류 영향으로 흐름방향으로 꺾이어 해수표면에 도달하며 하계의 경우, 수중에 포착되는 것으로 나타났다.

② 다공확산관의 경우, Station B와 C의 경우, 희석률은 동·하계 각각 적정한 수준을 나타내었으며, 모든 경우에서 오염물의 거동은 동계에 완전수직혼합의 불안정한 흐름을 보이고 하계에는 수중에 포착되는 안정한 흐름양상을 보였다.

③ 대상지점 Station A, B, C의 각각의 흐름양상은 모두 유사하게 나타났다. 그러나, Station A의 경우는 Station B, C보다 낮은 희석률을 기록하였는데, 이는 수심과 주변유속의 영향으로 인한 것으로 분석된다.

분석결과 최적위치인 Station C의 경우에 대하여, 희석인자별 중요도를 비교·정리한 결과는 다음과 같다.

① 동계와 하계 모두 방류수심 15m에서의 희석률은 비슷한 값을 나타냈으나, 30m, 60m로 수심이 깊어질수록 증가율이 높았다. 또한 단일확산관으로 모의했을 경우가 다공확산관으로 모의했을 경우보다 증가율이 높음을 알 수 있었다.

② 희석률은 주변유속이 빠를수록 증가하였다. 하계보다 동계가 증가율이 높았으며, 이는 주변해역의 밀도분포가 균일한 경우 주변유속이 희석률에 더욱 많은 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

③ 동계와 같이 주변수의 밀도분포가 균일한 경우에는 방류량이 작을 때엔 희석률이 높은 반면, 방류량이 증가하면 동계와 하계 모두 희석률이 거의 일정해지는 경향을 보였다.

④ 방류 오염물의 농도의 변화에 대한 희석률의 값은 변화가 없었다.

⑤ 방류 각도의 변화에 따른 전체적인 희석률의 변화는 미약하였으며, 하수확산관의 경우 초기 방류운동량보다 부력운동량이 지배적이기 때문인 것으로 분석된다.

⑥ 확산관의 길이를 100m로 고정하고 방류공의 간격을 변경하였을 때 동계와 하계 모두 방류공의 간격이 클수록 희석률은 감소하였으며, 이는 방류공의 수가 증가함에 따른 주변수와의 상호작용의 증가에 따른 결과로 본다.

7.2 제 언

부산중앙하수처리장의 Station C의 경우에 대하여 모의한 결과, 방류 오염물의 농도를 제외한 모든 값에 대해서 희석률의 값은 선형적인 변화를 가져왔으며, 플륨의 거동에 대한 희석률의 변화를 예측할 수 있었다. 이상의 분석결과를 바탕으로 향후의 연구과제는 다음과 같다.

① 국내의 기존연구에 따르면 대부분, 하수확산관에 따른 근역혼합특성의 분석시 현장의 적용에 그 의미를 부여하고 있으며, 검증의 과정없이 CORMIX

모델을 적용하고 있다. 이에 본 연구에서는 CORMIX모델의 적용시 검증과정을 거쳤으며, 실제 현장의 적용하여 각 희석인자별의 중요도를 현장중심으로 파악하였지만, 이 분야의 연구의 발전을 위해서는 실제의 물리실험으로 수치실험의 근거를 마련할 것으로 본다.

② 본 연구에서 적용한 기초자료는 보고서와 인터넷 자료를 토대로 하였다. 이러한 분야의 연구가 앞으로 향상되기 위해서는 기초자료의 지속적인 축척이 필수적이라 사료된다.

③ 본 연구에서 다룬 희석인자별 중요도 분석은 특정 지역에 대한 모의결과이기 때문에 국한된 실험으로 모든 일반적인 기준에 부합하지 않는다. 따라서, 일반적인 상황에서의 희석인자별 중요도를 분석이 필요하다고 사료된다.

참 고 문 헌

1. 강시환, 유승협, 오병철 (1999), *마산·창원 하수종말 처리장의 해양방류 처리수에 대한 초기·근역 희석연구(Ⅰ)*, Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering Vol.2, No.2, pp. 60～69.
2. 국승기 (1998), *폐쇄성 해역에 있어서의 새로운 수질개선책에 관한 연구*, 한국항만학회지 제 12권, 제 1호, pp. 95 104.
3. 김창시 (1998), *근역혼합모형을 이용한 해양방류 하수의 혼합특성 예측*, 서울대학교 토목공학과 석사학위 논문.
4. 부산광역시(1998), 부산 중앙하수처리장 건설사업
5. 서일원 등(1998), *오염물질의 해양방류 기술*, 한국수자원학회지
6. 이중우 (1999), *대도시인근 폐쇄수역 및 항만에서의 수질개선 방안*, 제1회 해양환경보전세미나자료, 한국해양감시단.
7. 안상준 (1998), *CORMIX 모형을 이용한 수중방류의 해석*, 한남대학교 토목공학과 석사학위 논문.
8. 최성용, 국승기, 김강민, 이중우, *항만개발에 따른 수질변화 및 개선책에 관한 연구*, 한국항만학회지 제 13권, 제 1호, pp. 123 131.
9. Akar, P.J. and Jirka, G.H. (1991), *CORMIX2: An Expert System for Hydrodynamic Mixing Zone Analysis of Conventional and Toxic Multiport Diffuser Discharges*. U.S. EPA, Environmental Research Laboratory, Athens., G.A.
10. Albertson, M.L., Dai, Y.B., Jensen, R.A. and Rouse, H. (1948), *Diffusion of Submerged Jets*. Trans. ASCE, Vol. 115, pp. 639 697.
11. Baalstad, K. (1975), The case for treatment, In Discharge of Seawage From Sea Outfalls, A.H.L. Gameson, (Ed.), Pergamon Press, 165 172, Paper No. 17.
12. Baumgartner, D.J., Frick, W.E. and Roberts, P.J.W. (1993), *Dilution Models for Effluent Discharges (Second Edition)*. EPA/600-R-93/139,

U.S. Environmental Protection Agency, ERL-Narragansett, Newport, Oregon.

13. Brooks, N.H. (1960), Diffusion of seawage effluent in an ocean current, In Proc. First Int. Confrence on Waste Disposal in the Marine Environment, University of California, E.A. Pearson (Ed.), Pergamon Press, New York, pp. 246 267.
14. Cederwall, K. (1971), *Buoyant slot jets into stagnant of flowing environments*. W.M. Keck Lab. for water resources and hydraulics, Report No. KH-R-25, California Institute of Technology.
15. Fischer, H.B., List, E.J., Imberger, J. and Brooks, N.H. (1979), *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Chap. 9 and 10, Academic Press, N.Y.
16. Fox, D., *Forced Plume in a Stratified Fluid*., *Journal of Geophysical Research*, Vol. 75, No. 33, pp. 6818 6835.
17. Hirst. E. (1971), *Buoyant jets discharged to quiescent stratified ambients*., Jouranl of Geophysical Research. Vol. 76, No. 30.
18. Jirka, G.A., Doneker, R.L. and Hinton, S.W. (1996), *Users Manual for CORMIX: A Hydrodynamic Mixing Zone Model and Decision Support System for Pollutant Discharges into Surface Waters*. Office of Science and Technology, U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C.
19, Kotsovinos, N.E. (1975), A study of the entrainment and turbulence in a plane buoyant jet, Ph.D. thesis, Report No KH-R-32, California Institute of Technology, Pasadena, California, p. 306.
20. Kwon, S.J. and Lee, J.W. (1997), *Plume Rise and Initial Dilution Determination Reflecting the Density Profile over Entire Water Column*, Journal of Korean Institute of Port Research, Vol. 11., No. 2., pp. 215 230.
21. Kwon, S.J. (1997), *Plume Rise and Initial Dilution Determination for The Sand Island and Honouliuli Outfalls*, Plan B Paper for Partial

Fulfillment for a Master of Science in Ocean Engineering.

22. Kwon, S.J., Cho, Y.K., Park, Y.W. and Park, K.Y. (1999), *Effects of Ocean Outfall on the Elimination of Oxygen-Poor Layer in Yongsan River Estuary, Korea,* International Symposium on Progress in Coastal Engineering and Oceanography, September 9-11.
23. Layton. J.A. (1976), *Design Procedures for Ocean Outfalls*., Coastal Endineering, Chap. 167.
24. List, E.J. and Imberger, J. (1973), *Turbulent Entrainment in Buoyant Jets and Plumes*., *Journal of Hydraulics Division*, Proceedings of the ASCE, Vol. 99, No. HY9, pp. 1461 1475.
25. Morton. B.R., Taylor. G.I. and Rurner. J. S. (1956), *Tubulent gravitational convection from maintained and instantaneus sources*., Proc. Roy. Soc.. London. A234.
26. Rodi, W. (1984), *Turbulence models and their application in hydraulics - a state of the art review*, Institute fur Hydromechanik, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Federal Republic of Germany.
27. Teeter, A.M. and Baumgartner, D.J. (1979), *Predictions of Initial Dilutions for Municipal Ocean Discharges*. CERL Pub. 043, U.S. Environmental Protection Agency, Corvallis, Oregon.
28. Waterways Experiment Station. Vicksburg. Miss.. Jirka. G.H. (1982), *Multiport Diffusers for Heat Disposal ; A Summary*., Journal of Hydraulic. Div.. ASCE. 108(12).
29. Wood. I.R., Bell. R.G. and Wilkinson. D.L. (1993), *Ocean disposal of wastewater*. World Scientific.
30. Zhang, X.Y. (1995), *Ocean outfall modeling Interfacing near and far field models with partical tracking method*, Submitted to the Department of Civil and Environmental Engineering in partial fulfillment of the requirements for the Ph. D at the MIT.

감 사 의 글

먼저, 날 낳으시고 기르신 부모님께 이 논문을 바칩니다.
언제나 저를 믿고 따라주는 동생 강일이, 저의 결정을 믿어준 누님에게도 고마움의 마음을 전합니다.

무엇보다도 대학원 생활 동안 저의 부족함을 채워주신 지도교수님이신 이중우 교수님께 감사의 마음과 함께 죄송스러운 마음을 전하고 싶습니다.

부족한 논문을 심사해 주신 김인수 교수님, 국승기 교수님께 깊이 감사드립니다. 그리고, 토목공학과 김태곤 교수님, 김도삼 교수님, 박대효 교수님께도 이 글을 빌어 감사의 마음을 전합니다.

대학원 생활 동안 항상 염려와 사랑을 아끼지 않으셨던 신승호, 염원기 선배님께, 멀리 목포에 계시면서 논문에 필요한 많은 도움을 주신 정대득 선배님께, 생활의 용기를 주시던 김한필 선배님께, 항상 편안한 느낌 주시는 양상용 선배님께, 멀리서 항상 걱정해 주시던 이상진, 최성용 선배님께, 그리고 대학원 생활을 할 수 있게 도와준 멀리 일본에서 공부 중이신 동진형, 논문 준비 중에 많은 힘이 되어 준 김지연 선배님, 호, 도경, 지훈, 태환, 위민, 상민에게, 4학년 논문팀이었던 상태, 정식, 정호, 성배, 형철, 성환, 은주, 현숙, 홍 C에게 감사의 마음을 전하고 싶습니다.

가장 힘들고 어려울 때, 든든한 버팀목이 되어 준 광식형, 동수형, 두행형, 유청형께, 동고동락했던 승길, 동현, 선구, 창표, 용기, 태호, 동훈에게도 고마움을 전합니다.

항상 내속에 있는 성민, 진삼, 호경, 효덕에게, 끝으로 항상 걱정해 주는 혁제, 성호, 그리고 제수씨에게도 고마움을 전합니다.

그밖의 너무도 많은 분들께도 감사의 마음을 전합니다.

도시 하수의 해양방류 및 근역혼합특성 분석

김 강 민* · 이 중 우**

Analysis of Ocean Discharges of Municipal Water and its Near-Field Mixing Characteristics

*K. M. Kim** · *J. W. Lee***

Key Words : 해양 방류(Ocean discharges), 코넬혼합역전문가시스템(CORMIX, Cornell Mixing Zone Expert System), 희석(Dilution), 혼합특성(Mixing characteristic), 방류시스템(Outfall system), 근역(Near-field region)

Abstract

Due to the growth of population and industrial development at the coastal cities, there have been much increase in necessity to effective disposal of the wastewater. The amount of municipal water has been increased rapidly and it is necessary to treat and dispose the wastewater effectively. The recent trend, in terms of disposal of it, is discharge through diffusers into the ocean, either at the coastline or at the deep water, or between these two.

For this end, we need to predict near-field characteristics of discharged water. We adopted CORMIX model for the analysis of the near-field behavior of discharged water and made certain comparison with the existing experimental results.

We found the early dilution is important, especially for the numerical simulation by a depth averaged hydrodynamic model of diffusion mechanism at the existing flow field.

We also applied it to the Pusan Jungang Effluent Outfall System, which is planned to be in the Gamchun harbour and will be completed in 2011. The

* 한국해양대학교 대학원 토목환경공학과

** 한국해양대학교 토목환경공학부 교수

model output showed the trajectoral variation of dilution and mixing behavior for three cases of outfall system. Dilution differences have been simulated and found the highest dilution condition under the different displacement of outfall system. On the basis of these outputs it will be proposed the optimum outfall system type and location.

Through the case study, dilution is dependent on the discharge depth, the ambient velocity and total flow rate. This approach might contribute to deal with serious water quality problems caused by the ocean discharge.

1. 서 론

1.1 연구배경

무분별하게 진행되고 있는 연안역 및 항만개발로 인해 해수유통구간이 좁아져 선박 및 해상에서 투기되는 제반 오염물질과 함께 도시하수의 최종착지인 이들 해역에서 그냥 방관만 할 경우에는 다시 살릴 수 없는 폐수의 장으로 전락하고 말 것이다. 이와 같이 바다를 끼고 있는 천혜의 해양국가에서는 연안역 개발시 지속적인 수질의 유지를 위해서 합리적인 방류방안에 대한 모색이 시급하다. 이러한 관점에서 하·폐수의 해양방류 처리는 방류수역의 주변환경 특성을 이용하여 방류초기에 방류수를 최대로 희석·분산시켜서 고농도 오염물질로 인한 악영향을 최소화시키는 것을 그 목적으로 한다(이, 1999).

본 연구에서는 도시 하수 처리방안의 하나인 하수 확산관을 통한 도시 하수 방류의 초기 희석과 오염물 거동에 관한 하수의 혼합특성을 하수종말처리장 계획지점을 대상으로 하여 예측하고 장래 설치후 운영시 그 주변 해역에 미치는 환경영향을 검토하고자 한다. 또한 본 연구의 결과는 광역 2차원 수심평균 유동장에서의 확산모델에 도입하여 보다 현실적인 거동을 파악하는데 이용할 수 있을 것이다.

1.2 연구의 목적 및 방법

본 연구의 목적은 현재 계획중인 하수 처리장의 방류자료를 토대로 하여 현재 주변해역과 방류 시스템(outfall system)의 조건 등을 모형에 적용하여 이를 적용하여 현황을 파악한 후, 이를 통해, 수중 방류시 확산인자별 중요도를 파악하여 하수 확산관 설계시 기초자료를 제공하는 것이다.

본 연구에서 적용할 모형은 미국 환경청(U.S. EPA)에서 제공되는 근역혼합 모형인 CORMIX모형이다. CORMIX모형은 미국 환경청의 지원을 받아 미국 Cornell 대학에서 개발한 길이축척 모형(Akar & Jirka, 1991)이다. 이 모형은 오염물질과 독성 오염물질의 초기혼합 및 희석과정을 모의하도록 개발된 전문가시스템(Expert system)으로 3개의 부프로그램으로 이루어져 있다. CORMIX 1, 2, 3는 각각 수중단일확산관, 수중다공확산관, 표층방류에 의해 방류되는 오염물질의 초기혼합과 희석을 모의하는 프로그램이다(Jirka 등, 1996).

2. 기초이론

2.1 단일제트 이론

단일제트(single jet)가 수중에 방류될 때 주변수와의 밀도차, 온도차 등에 의해 부력효과를 받는 경우는 부력제트(buoyant jet or forced plume), 주변수체와 부력의 차이가 없는 경우는 완전제트(pure jet)라 한다. 원형부력제트(round buoyant jet)의 개념도는 Fig. 1과 같다.

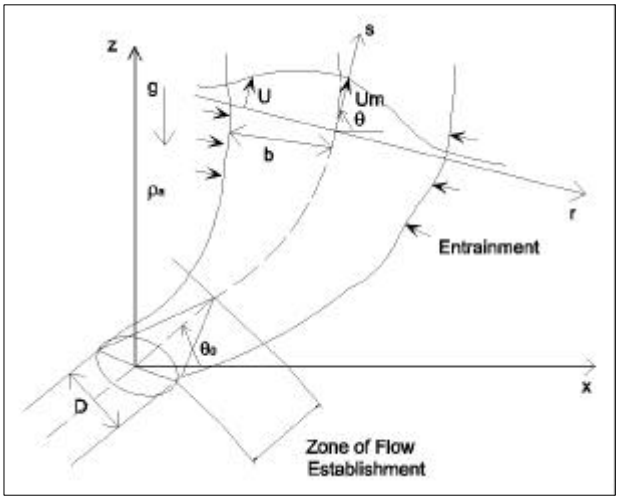


Fig. 1 Schematics of a round buoyant jet

일반적으로 초기흐름확립구간(initial zone of flow establishment)이후에는 제트의 궤적이 자기상사성을 갖는 것으로 알려져 있다. 실험적인 자료는 속도,

밀도손실(온도), 질량의 분포가 다음 식과 같이 Gaussian분포를 가진다.

$$U = U_m e^{-\left(\frac{r}{b}\right)^2} \tag{1}$$

$$\rho_a - \rho = (\rho_a - \rho_m) e^{\left(-\frac{r}{\lambda b}\right)^2} \tag{2}$$

$$C = C_m e^{-\left(\frac{r}{\lambda b}\right)^2} \tag{3}$$

여기서, U 는 종방향 유속, U_m 은 제트의 궤적중앙에서의 종방향유속, b 는 제트의 유효폭, ρ_a 는 주변수의 밀도, ρ, ρ_m 은 제트의 밀도 및 제트의 궤적 중앙에서의 밀도, λ 는 유속과 질량사이의 퍼짐율(spreading ratio), C, C_m 은 방류물질의 농도 및 제트의 궤적 중앙에서의 농도이다. 퍼짐율, λ 는 실험결과 1이상의 값을 갖는 것으로 알려져 있다(Fischer 등, 1979).

종방향에 대한 체적플럭스(volume flux)는 다음과 같다.

$$Q = 2\pi \int_0^{\infty} U dr = \pi U_m b^2 \tag{4}$$

Morton 등(1956)은 제트의 유효폭인 b 에서의 횡방향의 유입유속 v_e는 제트 중앙에서의 평균유속 U_m과는 $v_e = -\alpha U_m$와 같은 관계가 있다는 가정을 도입하였다. 가정한 식에서 α 는 연행계수(entrainment coefficient)라 한다. 종방향을 따르는 체적플럭스의 변화율은 다음과 같다.

$$\frac{dQ}{ds} = 2\pi b \alpha U_m \tag{5}$$

연행계수는 실험을 통해 얻어지는데, 국부적인 Froude수, F_L의 함수의 형태로 표현된다. 많은 연구자에 의해 연행계수에 대한 연구가 수행되었다(Albertson 등, 1950 & Hirst, 1971).

$$F_L = \frac{U_m}{\left(\frac{\rho_a - \rho_m}{\rho} gb\right)^{1/2}} \tag{6}$$

또한, Fox(1970)는 연직방향으로 방류시 연행계수를 식 (7)로, Hirst(1971)는 Fox의 이론을 확장하여 일정한 각으로 방류할 때의 연행계수를 식 (8)로 표현하였다.

$$\alpha = \alpha_1 + \frac{\alpha_2[\lambda]}{F_L^2} \tag{7}$$

$$\alpha = \alpha_1 + \frac{\alpha_2[\lambda]}{F_L^2} \sin\theta \tag{8}$$

여기서, θ 는 제트의 궤적이 수평면과 이루는 각이고, α_1 은 완전제트인 경우의 연행계수이며, α_2 는 퍼짐율의 함수형태가 된다(Fischer 등, 1979 & Wood 등, 1993).

2.2 다공제트 이론

방류공의 직경 D, 초기방류유속 U_o, 방류공간의 간격이 l 인 다공확산관의 경우에 초기방류지점에서 일정거리까지 각각의 방류공에서 방류되는 제트는 독립적인 원형제트의 거동을 보이나 그 이후에서는 제트들이 병합하면서 제트간의 상호간섭이 발생하게 되는데 이 구간을 천이구간(transition zone)이라 한다. 천이구간의 외곽부터는 슬롯제트(slot jet)와 같은 거동을 보이게 된다. 무한수체에 방류되는 원형제트의 경우에 유속분포는 축방향대칭을 이루는 Gaussian분포를 가지게 된다(Wood등, 1993).

$$u(x, y, z) = U(z) \frac{\exp(- y^2 b) \sum_{-\infty}^{+\infty} \exp\left\{- \left(\frac{b_l + n}{b_l}\right)^2\right\}}{\sum_{-\infty}^{+\infty} \exp\left\{- \left(\frac{n}{b}\right)^2\right\}} \tag{9}$$

여기서, $y_b = y/b$, $x_l = x/l$, $b_l = x/l$ 이며 n은 방류공의 수이다.

농도장의 유속분포는 식 (9)에 b 대신 $b_T (= \lambda b)$를 대입하는 식으로 표현된다. 퍼짐율의 값은 원형제트에서는 1.07의 값을 가지며 2차원 슬롯제트에서는 1.35의 값을 가진다(Wood 등, 1993). 이는 제트가 천이구간에서 병합되면서 점차 퍼짐율이 증가하게 됨을 의미한다. 또한, 다음과 같은 특성을 가지고 있는 것으로 평가되고 있다.

① $b/l \ll 1$: 원형제트로 축방향 대칭의 유속분포
② $b/l \gg 1$: 슬롯제트와 같은 2차원 유속분포

일반적으로 방류공에서 떨어진 거리와 b 는 선형관계를 가지는데 그 비례상수를 퍼짐상수(spread constant)라 하며, 이는 원형제트와 슬롯제트에서 다른 값을 가지는 식으로 알려져 있다(Wood 등, 1993). 다공확산관에서의 유속분포를 나타내는 식 (9)를 이용하여 임의 단면에서의 하나의 방류공이 차지하는 체적플럭스, q 를 표현하면 다음과 같다.

$$q = \int_A u(x, y, z)dA = I_q U(z) bl \tag{10}$$

2.3 등슬롯확산관 이론

천이구역 이후부터는 해석의 용이함을 위해서 다공확산관을 등슬롯확산관(equivalent slot diffuser)의 형태로 해석하는 경우가 많은데, 이때 단위길이당 동일한 방류량과 운동량플럭스를 가지는 등슬롯확산관의 폭 B 는 다음과 같이 정의된다.

$$B = \frac{\pi D^2}{4l} \tag{11}$$

등슬롯확산관 개념의 도입근거는 Cederwall(1971)의 실험결과 식(12)와 같은 관계를 가진다고 하였다.

$$R = \frac{dilution\ of\ the\ multiport\ diffuser}{dilution\ of\ the\ equivalent\ slot\ diffuser} = 0.95 \quad (12)$$

또한 완전플륨(plume)의 경우는 R 이 0.78임을 밝혔다. 수중다공확산관을 이용한 방류시 희석률을 구하기 위하여 사용하는 주된 변수중의 하나로 방류량의 관성력과 부력의 비로 정의되는 밀도푸르드수(densimetric Froude number)가 있는데 식(13)과 같으며, 등슬롯확산관의 개념을 사용할 경우의 밀도푸르드수는 식(14)와 같다.

$$F_n = \frac{U_0}{\left(\frac{\rho_a - \rho_o}{\rho_a} gD\right)^{1/2}} \quad (13)$$

$$F_s = \frac{U_0}{\left(\frac{\rho_a - \rho_o}{\rho_a} gB\right)^{1/2}} \quad (14)$$

2.4 근역혼합과정

일반적으로 오염물 플륨의 해석시 하수장이 형성되는 단계인 근역(Near-Field Region, N.F.R.)과 잔류부력에 의한 횡방향 부력확장을 하는 단계인 중간역(Intermediate zone)을 거쳐 하수의 이류 및 수동확산의 단계인 원역(Far Field Region, F.F.R.)으로 구분한다. 본 연구에서 논의할 근역에서의 하수 거동에 관한 혼합특성은 다음의 Fig. 2로 정의할 수 있다. 일반적으로 근역에서의 혼합거동은 확산관의 형태, 해저지형, 제트의 부력 및 방류특성에 의해 영향을 받는다. 희석률의 결정은 흐름의 안정성 여부가 중요한 인자가 된다. 방류구 근처의 흐름과 확산은 주변수와의 밀도차에 의한 부력플럭스와 방류수의 강한 유속에 의한 운동량 플럭스는 수심에 따라 다른 양상을 보이며, 일반적으로 천해역에서 방류되는 경우, 방류된 오염물은 부력제트의 형태로 수면으로 상승하여 수면에 도달하여 성층화되어 횡방향으로 부력확장이 일어나는 안정된 흐름을 형성한다. 원역에서의 주된 확산인자는 근역에서의 혼합과정 후, 밀도류의 형태로 혼합이 이루어지고 주변흐름의 특성에 의해 표면플륨(surface plume)의 거동과 혼합률이 결정된다.

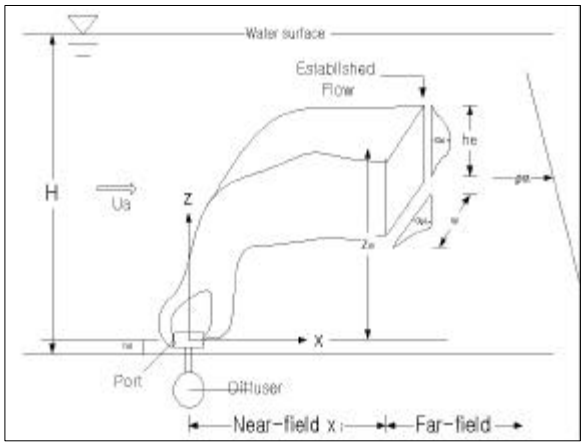


Fig. 2 Behavior of wastefield in near field.

3. 모델의 수립 및 적용

CORMIX1 모형은 총체적흐름률, 운동량흐름률, 부력흐름률, 주변유속과 밀도 경사 등 주어진 변수들을 이용하여 특성길이를 계산하고 이를 이용하여 흐름을 구역화한 다음, 혼합특성을 계산한다. 대한 혼합해석에서는 2차원 흐름변수들을 사용한다.

CORMIX 2모형은 방류공 세부특성, 즉 방류공 직경과 간격을 무시하고, 등가슬롯폭을 적용하여 초기조건을 설정한다. 즉, CORMIX 2모형에서는 2차원 슬롯방류의 개념을 기초로 확산관의 단위길이당 흐름률 변수들로 특성길이를 계산하여 혼합특성을 계산한다.

CORMIX 1과 2모형은 하천, 호소 및 해역 등 대부분의 수계에 적용이 가능하도록 개발되었으나, 단면경계를 직선으로 일정하게 가정하고 수심을 일정하게 가정해야 하는 단점이 있기 때문에 단면경계나 적용 수계의 바닥이 불규칙할 경우에는 오염물 확산의 검토시 주의를 요한다. 또한 근역혼합모형으로 원역에 대한 해석시 정확성이 떨어진다는 것을 주지하여야 한다.

CORMIX 1과 2모형의 특성을 아래의 Table 1에 정리하였다. 적용시 제한요소들은 방류공의 높이는 총수심의 1/3을 넘지 않아야 하며, 방류공 직경은 수평면에 대한 상향각 θ_0가 45이하일 때는 수심을 초과하지 않아야 하며 45를 초과할 때는 수심의 1/3을 초과하지 않아야 한다. CORMIX2인 경우는 수심의 1/5를 초과하지 않아야 한다. 주변수의 밀도분포는 불연속적이라면 이 지점은

수심의 40%와 90%사이에 있어야 한다.

Table 1 Features of CORMIX 1, 2 programs

	CORMIX 1	CORMIX 2
Port	Single	Multiple
Discharge angle	Arbitrary	Arbitrary
Density profile	Arbitrary	Arbitrary
Current speed	Constant with depth	Constant with depth
Current angle to the diffuser	Arbitrary	Arbitrary

3.1 자료분석 및 시스템의 도입

본 연구의 목적인 해양 방류와 이에 따른 근역혼합특성을 분석하기 위해 감천항 매립지를 중심으로 2011년 준공예정인 부산 중앙하수처리장을 그 대상으로 하였으며, 방류자료는 보고서(부산광역시, 1998)의 자료를 사용하였으며, 확산관의 경우 임의 자료를 이용하였으며, 주변해역 자료는 최대한의 근사치를 사용하기 위해 인터넷이나 연감 등을 참조하였다.

예상방류량은 140,000㎥/day, 모형에서 적용한 수질변수는 해역의 수질등급 기준인 COD농도를 선택하였다. 방류수질은 COD농도 20㎎/ℓ이며, 방류수 밀도는 하수처리장을 통해 처리된 경우로 청수(fresh water)의 경우로 1000㎥/㎏이다.

확산관은 단일 확산관의 경우, 수평상향 30°로 방류하는 것으로 하였으며, 다공 확산관의 경우, 불구속 해역에 적합한 양방향 확산관을 채택하였다. 확산관의 위치는 조류방향과 직각으로 직교 배치법(perpendicular alignment)을 선택하였으며, 확산관의 길이는 100m로 하였다. 확산관에는 11개의 연직유도관(riser)을 등간격으로 설치하였으며, 연직유도관에는 대칭으로 방류공 2개를 부착하였다.

단일확산관의 경우, 방류량을 연직유도관의 수인 11로 나눈 값인 0.147㎎/ℓ로 하였다. 즉, 연직유도관 하나를 하나의 방류공 역할을 하는 것으로 하였다.

3.2 주변해역의 특성

본 연구에서 적용할 해역은 Fig. 3에 도시하였다. 대상해역은 각각 15, 24, 30m의 평균수심을 가지며(부산광역시, 1998), 상하층의 밀도분포는 Table 2에 정리하였다.

동계의 경우는 주변밀도분포가 균일하였고, 하계의 경우는 주변밀도가 선형적인 분포를 가진다. 또한 조류의 경우, Station 1, 2, 3 각각 0.15, 0.20, 0.25m/sec이며, 이는 수심평균한 경우의 유속치이다.

일반적으로 근역희석률과 플륨의 형상은 수심과 조류속도에 영향을 받는다.

본 연구에서는 비교적 얕은 수심에서 조류와 수심의 두가지 경우를 대비해서, 결과치를 비교하였다.

Fig. 3 Location map

Table 2 Density distribution

Classification		Winter(kg/m^3)	Summer(kg/m^3)
Station A	surface	1026	1019.5
	bottom	1026	1022.0
Station B	surface	1026.2	1021.6
	bottom	1026.2	1023.6
Station C	surface	1026.3	1021.6
	bottom	1026.3	1023.7

4. 실험결과 분석

4.1 단일 확산관

동계와 하계를 대상으로 모의하였다. 흐름의 분류는 H1과 S4로 전자는 수평으로 방류된 경우, 초기 제트가 주변 유속에 의해 꺾이며, 전체적으로 흐름은 안정한 형상을 보이는 흐름인 반면, 부력플룸의 거동이 지배적이고 강한 가로흐름인 주변류에 의해 심하게 휘어지고 수중에 포착되는 흐름이다.
Station A의 경우, 주변 밀도분포가 일정하지 않은 하계의 경우와 동계의 경우가 유사한 흐름의 양상을 보이며, 근역혼합특성도 비슷한 결과를 보인다. 이는 Station A는 수심이 얕고, 밀도 성층현상이 방류조건에 비해 상대적으로 미약하기 때문인 것으로 분석된다. 또한, 희석률은 근역경계지점에서의 희석률은 동계와 하계 각각 49.6, 37.4로 밀도분포가 균일하고, 혼합영역의 거리가 긴 동계의 결과가 높게 나타났다.

Station B는 Station A에 비해 방류수심이 깊고 주변조류가 강하며 주변해역의 밀도분포가 균일하여 플룸의 궤적이 길어졌기 때문으로 분석된다. 즉, 플룸의 궤적이 길어질수록 주변수의 연행이 많아져 체적플럭스가 증가하기 때문인 것으로 분석된다.

Station C는 Station B와 거의 유사한 흐름의 양상을 가지는 것을 볼 수 있다. 전체적으로 근역내에서의 플룸의 거동양상은 비슷하지만, 주변조류와 주변수역의 성층화로 Station B에 비해 높은 관계로 더욱 많이 휘어지고, 플룸의 폭과 두께도 얇아진 것을 알 수 있다. Fig. 4에 수평방류시의 일반적인 플룸의 거동을 보여주는 Station C의 동계를 나타내었다.

4.2 다공확산관

모의한 흐름의 분류는 동계는 MU2, 하계는 MS5로 나타났다. 동계는 Fig. 5에 나타난 바와 같이, 매우 불안정한 흐름의 양상을 보이고 있으며, 이는 내부밀도분포에 대해 방류운동량이 상당히 강하기 때문인 것으로 분석된다. 따라서, 이러한 빠른 초기혼합은 재순환(recirculation)을 발생시켜 완전수직혼합(full verical mixing)을 야기하며 이후 재층리(restratification) 과정을 거치므로, 근역경계지점까지 그 효과가 지속된다. 하계의 경우는 초기의 제트운동량에 의해 수평으로의 운동량을 가지지만 주변류와 밀도 균형점(equilibrium level)에서 포착되는 양상을 보이고 있다. 플룸은 혼합영역을 지나 균형점으로 천천히 상승하는 거동하는 것을 알 수 있다. 농도의 감소가 이전과 비교해 적어지고 있다는 것을 알 수 있으며, 이후 점차적으로 완전수직혼합(full vertical

mixing)의 양상을 보인다.

Station A의 경우와 같이 비교적 수심이 얕은 천해에서 수중방류를 적용한 결과, 근역에서의 집중적인 초기 혼합에 의해 단일확산관과 비교하여, 상당한 희석의 효과가 나타났다. 하계의 경우, 주변류와 선형 밀도성층현상으로 플룸은 수중에 포착되어 서서히 진행되는 양상을 보이며, 전단난류연행이 희석의 중요한 작용인자인 것으로 분석된다.

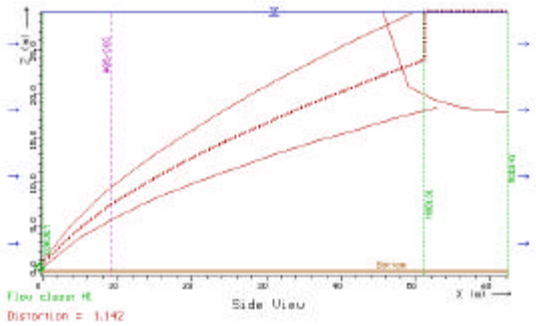


Fig. 4 CORMIX 1 output diagrams of Station C in winter

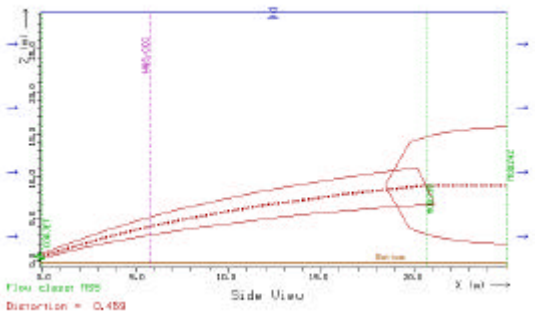


Fig. 5 CORMIX 2 output diagrams of Case C in summer

4.3 근역희석률 분석

근역에서의 희석률을 비교한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 수심이 깊을수록 근역에서의 희석률은 증가한다는 것을 쉽게 알 수 있다. 즉, 수심이 깊을수록 초기제트는 주변수와의 상호작용으로 동력학적 에너지가 감소하므로 하수는

희석된다는 것을 알 수 있다. 하수확산관의 경우, 앞에서 언급한 것처럼, 수표면에 달하기전에 밀도가 주변의 밀도가 같아지는 것이 가장 이상적이다. 앞의 Fig. 5에서와 같이 플륨이 수중에 포착되기전에 수표면에 도달할 경우, 하수오염물의 농도는 주변수에 비해 높기 때문에 연안역의 경우, 고도처리되지 않은 오염물이 방류될 경우 미관상이나 심한 악취 등의 문제가 동반될 것이다.

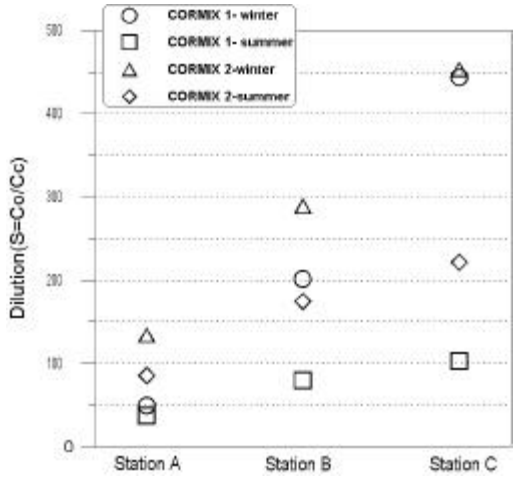


Fig. 6 Dilution at the edge of N.F.R.

5. 희석인자의 중요도 분석

실제 적용결과, Station C의 경우가 가장 적합한결과를 가졌다. Station C를 대상으로 하여, 희석에 영향을 미치는 인자별 중요도를 분석하였다.

분석결과는 방류수심과 주변유속이 희석률에 가장큰 영향인자였으며, 총방류량과 방류공간격은 희석을 감소시키는 인자였다. 즉, 방류수심과 주변유속이 클수록 플륨의 궤적은 길어지고 따라서 종방향으로의 연행량이 증가하여 희석률이 증가하는 것으로 분석되며, 총방류량이 많아질수록 똑같은 주변수의 유입으로 인한 희석의 정도는 감소한 것으로 분석되며, 방류공 간격은 병합으로 인한 주변수와의 상호작용의 면적이 감소하기 때문인 것으로 분석된다. 또한, 오염물 농도와 방류각도, 그리고 방류공 직경은 희석에 거의 영향을 끼치지 않는 인자였다. 이는 하수확산관의 경우, 온배수확산관과는 달리 주변수와의

밀도차로 인한 부력운동량이 절대적이기 때문인 것으로 분석된다. Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9은 각각 방류수심, 방류공 간격, 방류공 직경에 따른 희석률의 변화를 나타내었다.

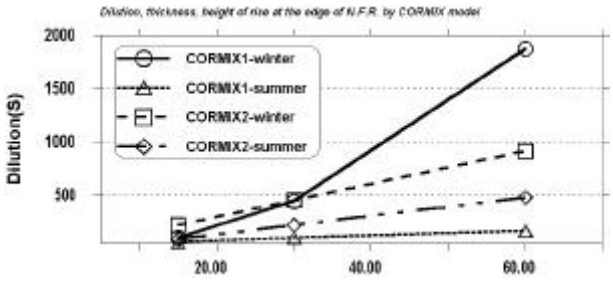


Fig. 7 Dilution computed by CORMIX model according to the variation of port depth

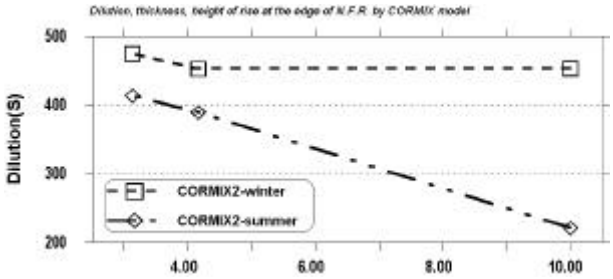


Fig. 8 Dilution computed by CORMIX model according to the variation of port spacing

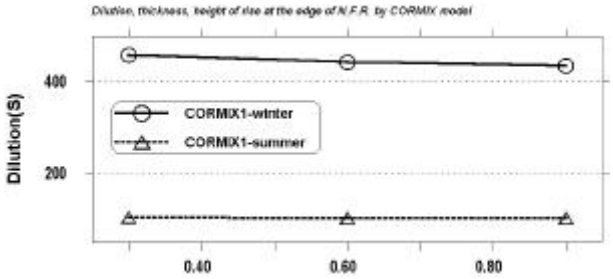


Fig. 9 Dilution computed by CORMIX model according to the variation of port diameter

6. 확산모델에의 적용성 검토

해양방류에 따른 근역혼합특성이 파악됨에 따라 기존의 확산모델에서 단순히 점원(point source)으로 처리하는 것은 결과에 상당한 차이를 가져올 것으로 예상된다. 여기서는 기존의 확산모델에서 적용하였던 점원 방류의 경우와 본 연구에서 검증한 모델에서의 방류원을 사용한 경우에 대해 일반적인 2차원 확산모델을 적용시 그 차이점을 검토하였다.

지배방정식은 기존의 연구(최, 1998)를, 모델의 수립은 기존의 연구(Gug 등, 1999)를, 수치계산은 ADI(Alternating Direction Implicit)법에 기초한 평면 2차원 단층 모델을 사용하였다.

실험조건은 격자(grid)의 수는 96×38, 간격은 25m, 시간간격은 3sec, 그리고 수심은 25m로 하였으며, 농도값은 점원 방류시 20㎎/ℓ의 값으로, 초기희석 과정을 거친 후의 오염원 방류시에는 실제 근역혼합의 실험치를 참조하여 0.155㎎/ℓ를 입력값으로 하였다. 또한, 수심 25m 및 최대유속은 0.25m/sec의 조건에서 표면에 이를 때의 플륨의 직경의 105m에 상당하여 방류오염원의 적용 격자가 4×4로 늘어나는 것으로 되었다. 또한, 초기희석 과정을 거친 경우에 0.155㎎/ℓ의 범위가 4×4의 격자로 이루어진 것을 1개의 격자에 해당하는 양으로 변환하면 농도가 2.48㎎/ℓ이 되고 이것을 다시 점원으로 하여 실험한 후 확산결과를 비교하였다.

단기간의 결과치를 비교하기 위하여, 창조류 시의 해수유동 결과를 사용하여 오염물 확산실험을 시행하였으며 주어진 계산영역에서의 창조류는 Fig. 10에 나타낸 바와 같다. 여기서, 점 O는 해양방류구의 위치를 가리킨다. 이러한 유동장에서 오염물 확산은 Fig. 11와 같이 기존의 점원 방류시[(a)]와 초기희석의 과정을 거친 후의 농도와 면적을 고려한 오염원[(b)]을 0.5조석주기 후의 창조류 기간동안 방류할 때로 구분하여 검토하였다. 0.5조석주기 후의 결과, 초기희석을 적용했을 경우가 확산의 범위가 넓어지면서 농도가 낮아지고 희석률 또한 감쇄하는 것으로 나타났다. 또한, 내만쪽과 유동 방향쪽으로 오염물의 농도분포가 크게 나타났다.

초기희석 과정 후의 오염원과 단순한 점원에 대한 수치계산결과 해석상에 차이가 발생하는 것이 확인되었고, 이는 현재 사용되고 있는 2차원 확산모델에 의한 수치계산에서 수중방류시 단순한 점원 해석으로는 상당한 오류를 범하게 됨을 유추할 수 있을 것이다. 따라서, 확산모델을 통한 오염물의 거동에 대한 분석에서는 이들 차이에 관하여 보다 세심하고 주의깊은 배려가 필요할

것으로 사료된다.

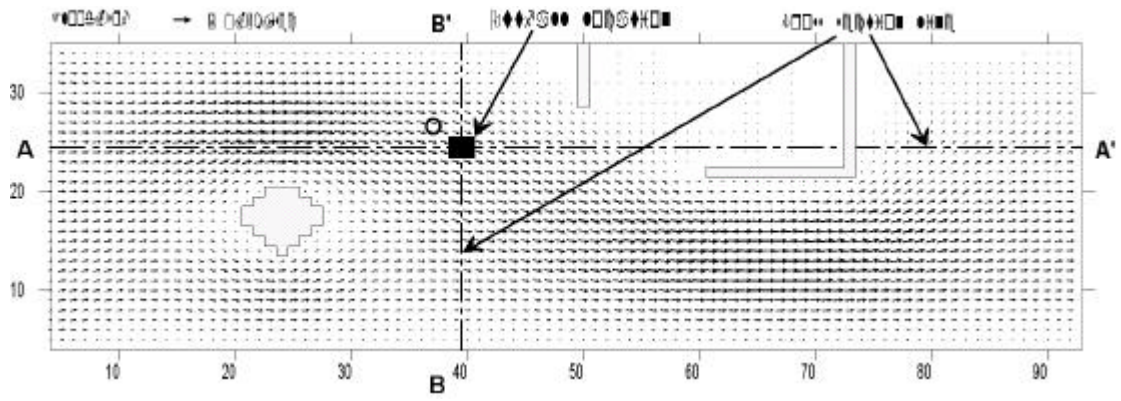
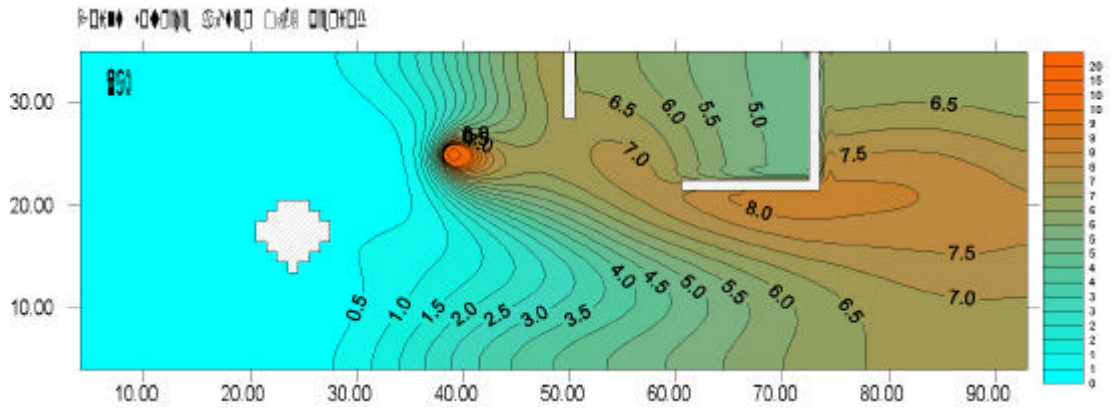


Fig. 10 Calculated result (max. flood tide)



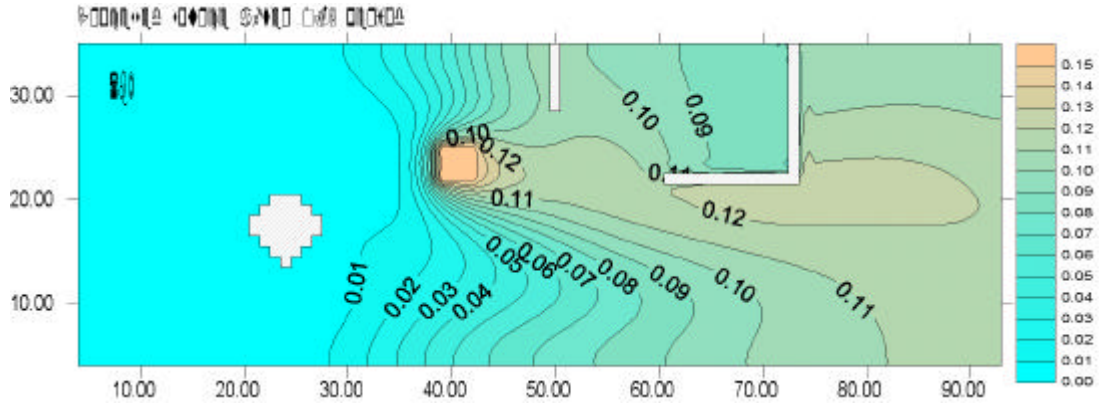


Fig. 11 Comparison of diffusion between point source and processed source after 0.5 period

6. 결 론 및 제 언

상기의 분석결과를 바탕으로 본 연구에서 실험한 결과를 정리하면 다음과 같다.

① 실제 자료에 근거한 CORMIX 모델의 검증을 시도한 결과, 입력자료 중 혼합특성의 중요한 인자인 밀도분포의 부정확성에서 생기는 오차를 고려한다면 근역혼합특성에서 만족할 만한 수준으로 나타났다.

② 초기희석과정 후에 얻어진 오염원과 기존의 점원을 이용한 2차원 확산모델의 수치실험 결과, 해석상에 차이가 발생하였다. 즉, 일반적인 수중방류시 단순한 점원해석으로는 결과에 상당한 차이를 가져오게 되며, 확산모델 실험시 초기희석 과정에 대한 분석과 이의 도입이 필요하다는 결과를 얻었다.

③ 동계와 하계 모두 방류수심 15m에서의 희석률은 비슷한 값을 나타냈으나, 30m, 60m로 수심이 깊어질수록 증가율이 높았다. 또한 단일확산관으로 모의했을 경우가 다공확산관으로 모의했을 경우보다 증가율이 높음을 알 수 있었다.

④ 희석률은 주변유속이 빠를수록 증가하였다. 하계보다 동계가 증가율이 높았으며, 이는 주변해역의 밀도분포가 균일한 경우 주변유속이 희석률에 더욱 많은 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

⑤ 동계와 같이 주변수의 밀도분포가 균일한 경우에는 방류량이 작을 때엔 희석률이 높은 반면, 방류량이 증가하면 동계와 하계 모두 희석률이 거의 일정해지는 경향을 보였다.

⑥ 방류 오염물의 농도의 변화에 대한 희석률의 값은 변화가 없었다.

⑦ 방류 각도의 변화에 따른 전체적인 희석률의 변화는 미약하였으며, 하수확산관의 경우 초기 방류운동량보다 부력운동량이 지배적이기 때문인 것으로 분석된다.

⑧ 확산관의 길이를 100m로 고정하고 방류공의 간격을 변경하였을 때 동계와 하계 모두 방류공의 간격이 클수록 희석률은 감소하였으며, 이는 방류공의 수가 증가함에 따른 주변수와의 상호작용의 증가에 따른 결과로 본다.

또한, 국내의 기존연구에 따르면 대부분, 하수확산관에 따른 근역혼합특성의 분석시 현장의 적용에 그 의미를 부여하고 있으며, 검증의 과정없이 CORMIX 모델을 적용하고 있다. 이에 본 연구에서는 CORMIX모델의 적용시 검증과정을 거쳤으며, 실제 현장의 적용하여 각 희석인자별의 중요도를 현장중심으로 파악하였지만, 이 분야의 연구의 발전을 위해서는 실제의 물리실험으로 수치실험의 근거를 마련할 것으로 본다. 본 연구에서 적용한 기초자료는 보고서와 인터넷 자료를 토대로 하였다. 이러한 분야의 연구가 앞으로 향상되기 위해서는 기초자료의 지속적인 축척이 필수적이라 사료된다.

참 고 문 헌

1. 부산광역시(1998), 부산 중앙하수처리장 건설사업

2. 이중우(1999), 대도시인근 폐쇄수역 및 항만에서의 수질개선 방안, 제1회 해양환경보전세미나자료, 한국해양감시단.

3. 국승기 (1998), *폐쇄성 해역에 있어서의 새로운 수질개선책에 관한 연구*, 한국항만학회지 제 12권, 제 1호, pp. 95 104.

4. 최성용, 국승기, 김강민, 이중우(1998), *항만개발에 따른 수질변화 및 개선책에 관한 연구*, 한국항만학회지 제 13권, 제 1호, pp. 123 131.

5. Albertson, M.L., dAI, y.b., Jenson, R.A. and Rouse, H.,(1950), Diffusion of submerged jets, Trans., ASCE, Vol. 115.

6. Fox, D. G.(1970), Forced plume in a stratified fluid, J. of Geophysical Research, Vol. 70, No. 33.

7. Fischer et. al.(1979), Mixing in inland and coastal waters, ACADEMIC PRESS.

8. Hirst, E.(1971), Buoyant jets discharged to quiescent stratified ambients, J. of Geophysical Research, Vol. 76, No. 30.

9. Jirka, Gerhard H., Donerker, Robert L., Hinston, Steven W. (1996), User's manual for CORMIX, Office of Science and Technology, U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C

10. Morton, B.R., Taylor, G.I. and Turner, J.S.(1956), Trubulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources, Proc. Roy. Soc., London, A234.

11. Wood, I.R., Bell, R.G. and Willkinson, D.L.(1993), Ocean disposal of wastewater, World Scienctific.