



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

온배수 및 염배수의 근역혼합특성 분석을
통한 방류시스템 연구

A Study on Outfall System by Analyzing Mixing
Characteristics of Heat and Brine Discharge
at Near Field Region



指導教授 李 重 雨

2010年 2月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

金 佖 聲

은배수 및 염배수의 근역혼합특성 분석을 통한 방류시스템 연구



2010年 2月

金 秘 聲



工學碩士 學位論文

온배수 및 염배수의 근역혼합특성 분석을
통한 방류시스템 연구

A Study on Outfall System by Analyzing Mixing
Characteristics of Heat and Brine Discharge
at Near Field Region



指導教授 李 重 雨

2010年 2月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

金 佖 聲

本 論文을 金必聲의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

위원장 工學博士 김 인 수 (印)

위 원 工學博士 국 승 기 (印)

위 원 工學博士 이 중 우 (印)



2009 年 12 月 24 日

韓國海洋大學校 大學院
土木環境工學科 金 必 聲

A Study on Outfall System by Analyzing Mixing Characteristics of Heat and Brine Discharge at Near Field Region

PILL-SUNG KIM

*Department of Civil & Environmental Engineering
Graduate School of Korea Maritime University*

Abstract

When planning outfall system, the first target of design is to maximize initial dilution of discharge effluent. To achieve effectively this, it should be analyzed the characteristics of mixing phenomenon between ambient and discharged water. Especially the analysis at the Near-Field-Region(NFR) as initial dilution zone should be preceded. Usually, the initial behavior of effluent through outfall system is rising toward the surface due to mixing with ambient water for heat discharge and sinking toward the bottom due to the difference of density for brine discharge. After mixed with eddies accompanied by the ambient water, the plumes are showing the same density and internal current pattern by advection and diffusion. Until recently, lots of studies are being carried out for the optimum design of outfall system. but it is difficult to find any studies of heat and brine discharge at the same time. Therefore, the initial behavior and NFR characteristics of heat and brine discharge at once have been examined in this study and it is hoped to provide some basic data for optimum design of outfall system.

목 차

ABSTRACT	i
LIST OF TABLES	iv
LIST OF FIGURES	v
NOMENCLATURE	vii
제1장 서론	1
1.1 연구의 내용 및 목적	1
1.2 연구의 동향	3
제2장 해양방류시스템 설계	4
2.1 해양방류시스템의 개요	4
2.2 확산관의 설계	5
2.3 확산관의 형태	7
2.4 확산관의 유형	10
2.5 방류공의 종류 및 설계요건	11
제3장 수치모형의 기초이론	14
3.1 부력제트 이론	16
3.2 난류제트이론	22
3.3 다공제트 이론	28
3.4 등슬롯확산관 이론	31
3.5 근역·원역에서의 혼합거동	33
제4장 수치모형의 검증 및 적용	37

4.1 CORMIX 모델의 구성	37
4.2 모델의 검증	42
제5장 모형실험 및 결과분석	46
5.1 주변수 및 환경조건	46
5.2 입력자료	49
5.3 결과분석	51
5.4 민감도 분석	60
제6장 결론	69
참 고 문 헌	71



LIST OF TABLES

Table 3.1 Summary of properties for turbulent jet	21
Table 3.2 Spreading ratio with processing merging	29
Table 4.1 Comparison of the results (Experimental value/ Theoretical value/ Cormix2 value)	47
Table 5.1 Water quality standard	47
Table 5.2 Ambient characteristic per case	47
Table 5.3 Characteristics of discharge type	48
Table 5.4 Input data for CORMIX	49
Table 5.5 Input data for CASE 1	51
Table 5.6 Input data for CASE 2	54
Table 5.7 Input data for CASE 3	57
Table 5.8 Summary of case study for surface discharge	61
Table 5.9 Summary of case study for discharge of single-port diffuser	61
Table 5.10 Summary of case study for discharge of multi-port diffusers for sensitivity analysis	63



LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 Design flow of outfall system	6
Fig. 2.2 Diffuser arrangement and discharge type	7
Fig. 2.3 Discharge port type	12
Fig. 3.1 Detailed near field region	14
Fig. 3.2 Schematic of round jet and slot jet	16
Fig. 3.3 Postulated a two dimensional flow field induced at the center of diffuser in a stagnant ambient fluid	23
Fig. 3.4 Flow regimes for a plume of infinite length in a perpendicular current	24
Fig. 3.5 Classification of zone of flow establishment and zone	25
Fig. 3.6 Effects of the environmental conditions on the jet behavior	26
Fig. 3.7 Jets merging in unidirectional diffuser	30
Fig. 3.8 General stability diagram for line buoyant discharges into stagnant ambient	36
Fig. 3.9 General stability diagram for line buoyant discharges into confined depth comprising stagnant and flowing ambient	36
Fig. 4.1 System elements of CORMIX	39
Fig. 4.2 Definition diagram CORMIX2	41
Fig. 4.3 Limits of applicability CORMIX	41
Fig. 4.4 Comparison of dilution for coflowing diffusers	45
Fig. 5.1 Bathymetry chart and plan view	50
Fig. 5.2 Change of temperature (CASE 1-1, CASE 1-2, CASE 1-3)	52
Fig. 5.3 Change of salinity (CASE 1-1, CASE 1-2, CASE 1-3)	52
Fig. 5.4 Change of dilution rate (CASE 1-1, CASE 1-2, CASE 1-3)	53
Fig. 5.5 Change of temperature, salinity and dilution rate (CASE 1)	53
Fig. 5.6 Change of temperature (CASE 2-1, CASE 2-2, CASE 2-3)	55
Fig. 5.7 Change of salinity (CASE 2-1, CASE 2-2, CASE 2-3)	55
Fig. 5.8 Change of dilution rate (CASE 2-1, CASE 2-2, CASE 2-3)	56
Fig. 5.9 Change of temperature, salinity and dilution rate (CASE 2)	56
Fig. 5.10 Change of temperature (CASE 3-1, CASE 3-2, CASE 3-3)	58
Fig. 5.11 Change of salinity (CASE 3-1, CASE 3-2, CASE 3-3)	58
Fig. 5.12 Change of dilution rate (CASE 3-1, CASE 3-2, CASE 3-3)	59
Fig. 5.13 Change of temperature, salinity and dilution rate (CASE 3)	59

Fig. 5.14 Change of temperature, salinity, dilution rate (surface discharge) 62

Fig. 5.15 Change of temperature, salinity, dilution rate (single-port discharge) 62

Fig. 5.16 Change of temperature, salinity (CASE 1) 65

Fig. 5.17 Change of temperature, salinity (CASE 2) 65

Fig. 5.18 Change of temperature, salinity (CASE 3) 66

Fig. 5.19 Change of temperature, salinity (CASE 4) 66

Fig. 5.20 Change of dilution rate (CASE 1, CASE 2) 67

Fig. 5.21 Change of dilution rate (CASE 3, CASE 4) 68



NOMENCLATURE

A	Plume cross-sectional area
a	Thickness of spreading layer
a_0	Port area
α	Entrainment coefficient
B	Equivalent slot width
b	Jet lateral dimension where velocity is 37% of maximum
b_l	b / l
b_T	λb
C	Depth averaged concentration
C_a	Ambient concentration
C_e	Effluent concentration
C_f	Waste concentration
C_m	Time averaged centerline concentration
D, D_0	Port diameter
D_x, D_y	Diffusion coefficients in x, y directions
E	Entrainment function
E	Equilibrium temperature
F	A source Froude Number
F_L	Local Froude Number
F_s	Safety factor
f	Darcy-Weisbach friction coefficient

g	Gravitational acceleration
g'_0	Reduced gravitational acceleration
H	Total depth
h	Mean depth
I_q	Shape constants of volume flux
J_0	Kinematic buoyancy flux
j_0	Kinematic buoyancy flux per unit length
K	Velocity ratio ($= u_j/u_a$)
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 inter 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'	Momentum flux
m_0	Initial kinematic momentum flux per unit length
m_a	In relative to ambient velocity kinematic momentum flux per unit length
n	Number of ports, Manning's coefficient
p_0	Boundary flux
Q_0	Volume flux
q_m	Discharge volume flux
q_0	Source discharge volume flux
r	Lateral dimension in cylindrical polar coordinates
S	Dilution ratio
S_a	Average dilution
S_c	Centerline dilution
S_m	Minimum dilution
U_m	Mean centerline velocity
U, V	Depth mean velocities in x, y directions
M, N	Flow rates per unit-width x, y directions
U_0	Port discharge velocity
u_a	Current speed
u_j	Jet velocity
v_e	Entrainment velocity
v_t	Eddy viscosity coefficient



w	Wastewater field lateral width
x	Streamwise Cartesian coordinate
x_l	x / l
y	Transverse coordinate in plane jet or plume
z	Vertical coordinate
β_0	Initial buoyancy flux per unit length
γ_b^2	Bottom friction coefficient
ε	Ambient buoyancy 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
ρ	Fluid density
ρ_0	Density of jet or plume
ρ_m	Mean centerline density
ρ_a	Ambient density
σ	Horizontal angle of discharge measured counterclockwise for the ambient current direction to the plan projection of the port centerline
ζ	Water surface elevation



제1장 서론

1.1 연구의 내용 및 목적

과거 수십년간 무분별한 개발과 발전으로 인한 해양수온상승은 해수면 상승, 백화현상, 난류성 어류의 어획량 급증, 북태평양 태풍 진원지의 북상등과 같은 해양환경파괴 및 생태계의 변화를 일으키고 있다. 이를 해결하기 위한 일환으로 해양수온상승 원인중 하나인 산업단지에서 배출되는 배출수의 해양방류와 관련하여 최적의 방류시스템(outfall system) 구현을 위한 근역(initial zone)에서의 온배수 방류에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다.

최근 국외적으로 종합 플랜트 사업이 활발히 진행되고 서남아시아 지역을 비롯한 아프리카, 동남아등 물 부족 국가에서 담수 설비 수요가 급증하고 있다. 또한, 담수플랜트뿐만 아니라 발전과 화공시설을 겸한 종합 플랜트 건설이 활발해짐에 따라 플랜트에서 냉각수로 사용되고 난 후 배출되는 온배수와 담수화의 폐기물인 고농도의 염배수에 의한 주변해역의 수질환경 변화를 예측하고 저감시키기 위한 노력이 시급한 과제로 부각되고 있다. 그러나 국내의 경우 온배수만 방류하는 플랜트 시설이 대부분이기 때문에 염배수(brine discharge)방류 영향을 고려한 연구 성과물은 온배수(heat discharge)의 연구 성과물에 비해 찾기 어려운 실정이다. 이에 이번 연구는 온배수와 염배수를 동시에 고려한 방류시스템의 최적설계를 위한 기초자료를 제공하기 위하여 방류수의 거동양상, 특히 근역에서의 혼합특성을 초기혼합 및 희석과정을 모의하도록 개발된 모형인 CORMIX(cornell mixing zone expert system)모형을 사용하여 온·염배수 동시방류와 관련된 예측, 설비 및 설계에 관한 연구를 수행하고자 하였다.

본 연구에서는 온배수 및 염배수를 대상으로 하는 담수화플랜트 단지에서 최적설계안을 도출하기 위한 과정으로 실효해역에서 표층방류 및 수중방류 부분을 분석하고 이에 따른 최적설계안을 도출하는 것에 목적을 두고, 온배수 및 염배

수를 동시에 처리할 수 있는 수치모형을 적용을 위해 수리모형실험값과 이론식 값을 비교·분석하였으며, 이어 적용될 현장에 대한 해양환경 조건을 파악하고 제 조건에 대한 고찰을 거쳐 최종실험안을 선정하여 실험을 실시하였다. 방류수에 의한 주변수역의 오염영향과 범위를 평가하기 위해 온배수는 주변수와 방류수의 온도 변화량(초과온도, excess temperature)의 1℃로, 염배수는 주변수와 방류수의 염도 변화량(초과 염도, excess salinity) 2ppt로 수질기준(WQS; Water Quality Standard)을 설정하였으며, 설정된 수질기준은 방류지점에서 300m지점까지로 하여 초기혼합역(initial mixing zone)을 평가하였다. 또한 이를 바탕으로 방류공 개수, 방류공 각도등 다양한 파라메타의 변화를 조건으로 수온변화, 염도변화, 희석률에 대한 민감도 분석을 시행하여 이 중 희석률에 가장 큰 요인을 주는 인자를 찾고 이를 실험역에 적용하여 희석률을 높일 수 있는 이상적인 설계방안을 제시하여 효과적인 온배수·염배수의 방류시스템을 갖출 수 있는 발판을 마련코자 한다.



1.2 연구의 동향

해양방류시스템의 기본철학과 온배수 같은 방류수를 해양으로 방류하여 희석시키는 방법 등은 Rawn(1960), Fisher(1979), Harleman and Stolzenbach, (1972), Brooks & Koh(1975) 등을 통해 1960년대부터 미국 등 선진국을 중심으로 많은 연구와 적용이 광범위하게 이루어져 왔다.

Jirka & Harleman(1973)은 2차원 슬롯제트 개념을 이용하여 수중 다공확산관에 대한 이론적이고 실험적인 연구를 수행하였고, Roberts(1979)는 다공확산관을 선 부력류(Line Plume)로 가정하여 하수확산관 해석에 이용하였으며, Miller & Brighthouse(1984)는 초기 희석효과 및 온배수 귀환 억제기능이 가장 우수한 시스템은 수공확산관을 이용하여 온배수를 방류하는 것이라고 하였다.

국내에서는 발전소의 온배수 방류에 관해서는 정태성(1992)이, 수중다공 확산관에 관하여는 서일권(1994), 김홍제(1997), 강시환(2000), 김대근(2000)등이 연구하였으며 정태성(1992)은 성층화에 따른 연직 확산계수의 시공간적 분포가 고려되어야 하며 대상이 된 고리발전소의 지역특성상 조류방향에 따른 제트의 확산의 양상이 변화함으로 다양한 난류모형이 필요하다고 하였다. 그 외에도 김강민(2000)이 CORMIX 모델의 사용하여 도시하수의 해양방류 및 근역 혼합특성 분석이란 주제로, 김지연(2001)이 방류설계 시스템의 최적설계에 관한 연구란 주제로 온배수 및 하폐수의 방류에 대해 연구하였다. 또한 김대근(2002)은 방류관 방류인자별 민감도 분석 및 방류관 최적 설계에 관해 모의하였으며 최근에는 온배수 방류 시스템에 관해서 곽(2005)이, 해양생태계 보전을 위한 온배수 관리방안에 대해 해양수산부(2008)등에서 연구하였으나 주로 온배수에 관한 연구에 국한되어 있다. 국외에서는 염배수와 관련된 방류시스템 설계에 대한 연구가 활발히 진행됨과는 달리 국내에서는 염배수를 고려한 연구 사례는 찾아보기 어려운 실정이다.

제2장 해양방류시스템 설계

2.1 해양방류시스템의 개요

해양 방류시스템의 목적은 온배수 같은 방류수 등을 초기에 최대한 희석시켜서 방류수역에서의 위해를 최소화시키는데 있다. 해양방류는 방류형태별로 표층방류, 해안선방류, 수중방류 등으로 나눌 수 있지만 연안에서의 환경적, 생태학적, 시각적 영향을 고려한다면 수중방류 즉 심해방류가 선호되고 있다. 방류시스템은 방류물질이 도수관(feeder pipe)을 따라 방류지점으로 수송된 후, 확산관(diffuser)을 통하여 수중에서 확산, 혼합되도록 한다. 방류관거는 육상 방류관거와 해양 방류관거로 구성되며 육상 방류관거는 방류수를 외해로 수송하기 위한 것으로 중력식 터널구간과 역사이폰 구간으로 구성되며, 해양 방류관거는 해양수질 기준에 부합되도록 충분한 혼합과 희석을 달성하기 위해 설치되는 것으로 방류관과 확산관으로 구성된다.

방류관거의 길이는 유속, 수두손실, 구조물의 경제성 등을 고려하여 결정된다. 확산관은 일반적으로 조류와 수직방향으로 수심 10m 이상에 매설되고 관s 내의 유속은 세굴(scouring)을 유발하여 입자의 퇴적을 막을 수 있는 0.5m/s 이상이 되어야 한다. 방류수가 해양으로 방류되면 방류공을 통해 해수가 유입되지 않아야 하는데, 이것은 방류공에서 밀도프루드수 (densimetric froude number)를 1보다 크게 유지하고, 각 방류공의 단면적을 합한 총 방류공 단면적이 도수관 및 확산관의 단면적을 넘지 않도록 하면 된다(Brooks, 1960).

2.2 확산관의 설계

주어진 조건하에서 최적의 초기혼합(희석)을 만들어 내는 방류시스템을 도출하기 위한 단일 또는 다공확산관의 설계 절차 및 각 단계에서 고려하여야 할 요소들은 Fig. 2.1과 같다.

방류시스템의 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 혼합 특성 계산과 수리계산을 통하여 결정된다.

이 과정에서 적용되는 기초적인 물리 요소들은 다음과 같다.

①설계유량, ②관의 직경, ③관로 경사, ④관 재질에 따른 마찰저항, ⑤방류수의 밀도, ⑥주변해역의 밀도, ⑦방류 수심, ⑧작용 수두(operating head)

확산관의 설계유량은 방류되는 하수 및 온배수의 방류량에 따라 결정된다. 방류량은 하루, 주중 또는 계절별로 다를 수 있으므로 이러한 변동을 고려하여 설계유량을 결정하여야 하며, 설계유량은 최대 방류량뿐만 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.

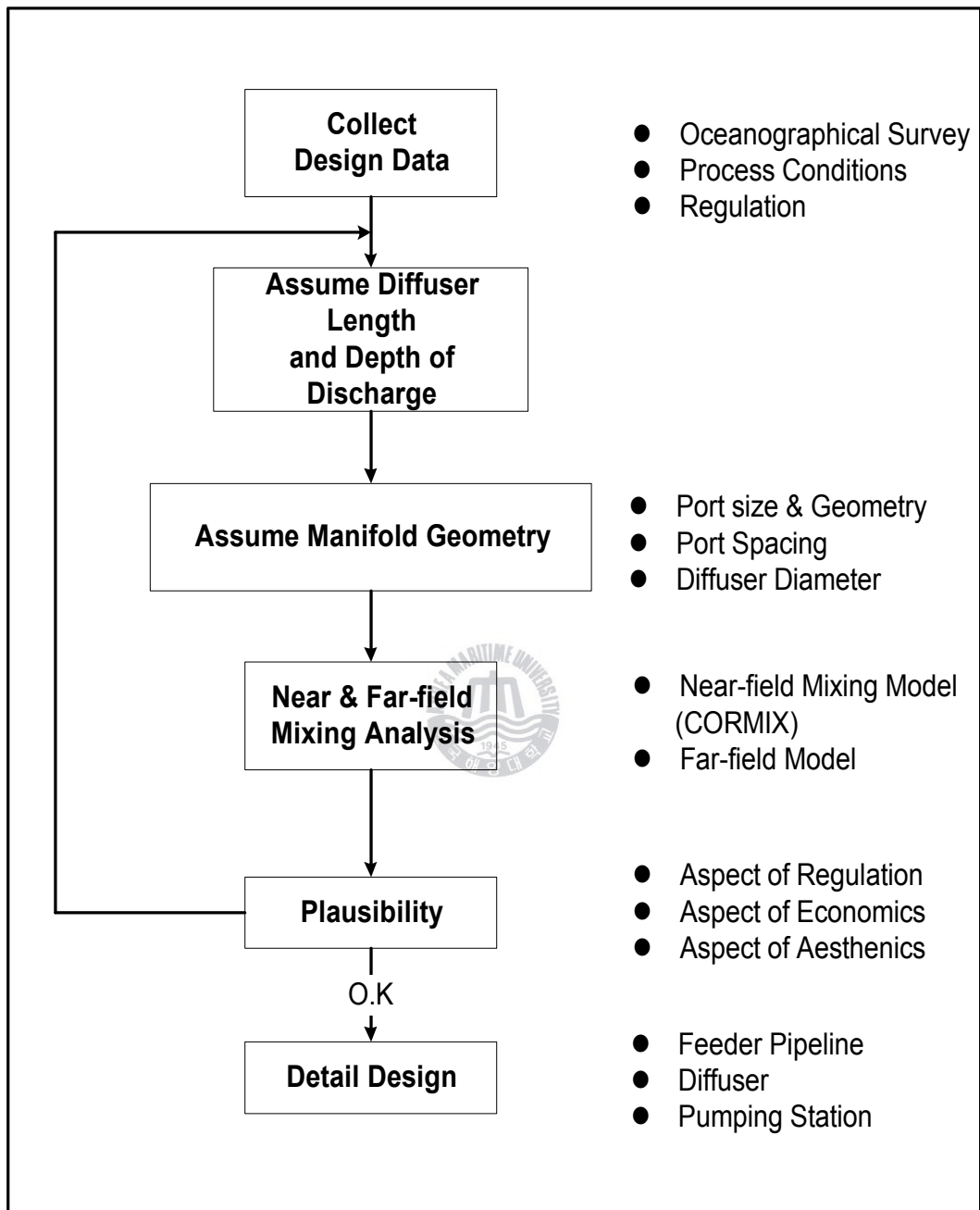


Fig. 2.1 Design flow of outfall system

2.3 확산관의 형태

방류수의 초기희석률을 높이는 가장 효율적인 방법은 수중다공확산관을 이용하여 방류하는 것인데 확산관의 방향 및 형태에 따라 희석률이 다르게 나타난다. 확산관의 방향은 해역의 조류 방향에 따라 결정되며 희석을 최대화하기 위하여 주조류 (net currents) 방향에 직각으로 설치하는 것이 원칙이나 해역의 조건과 혼합특성, 경제성 및 시공성등을 고려하여 이를 변형하기도 한다. 조류 방향이 교차하는 경우는 변형형태의 Y자 모양의 확산관을 채택하여 확산관이 조류방향에 대하여 직각을 유지할 기회를 부여하기도 한다(김홍제, 1997). 조류방향에 대한 확산관의 배치에 따른 다공확산관의 형태는 일반적으로 일방향 확산관(unidirectional diffuser), 축방향확산관(staged diffuser), 그리고 양방향 확산관(alternating diffuser)등으로 구분한다.

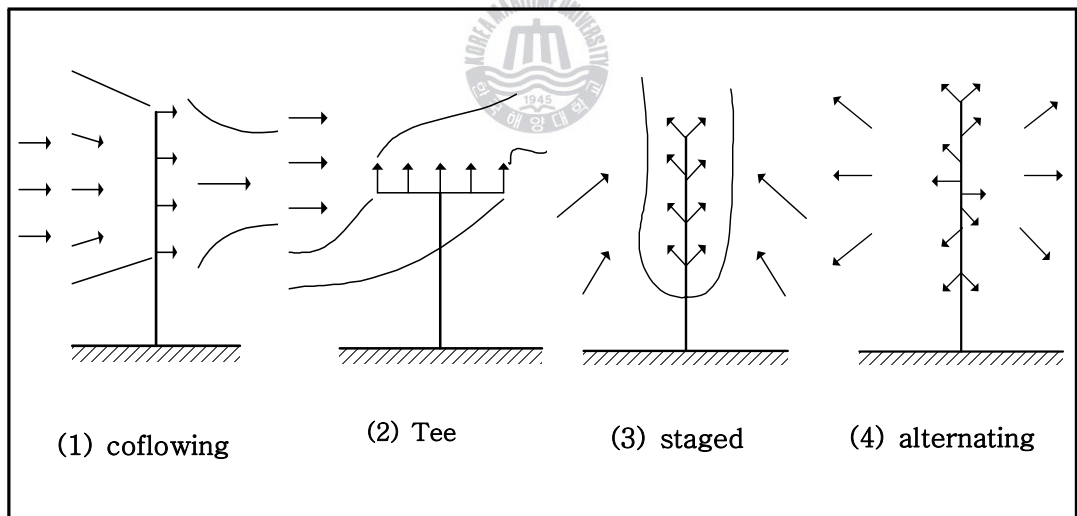


Fig. 2.2 Diffuser arrangement and discharge type

1) 일방향확산관(unidirectional diffuser)

일방향확산관은 모든 방류구가 확산관측에서 일방향만 향하는 것으로 이는 다시 Fig. 2.2(1)의 공류형확산관(coflowing diffuser)과 Fig. 2.2(2)의 T형확산

관(tee diffuser) 2가지 형태로 분류할 수 있다. 일방향확산관의 시공사례는 온테리오 호수에 위치한 Fitz Patrick발전소, 미시간호수에 위치한 Zion발전소, 테네시 강에 위치한 Browns Ferry발전소와 미시시피 강에 위치한 Quad Cities발전소가 있다(Miller & Brighthouse , 1984).

공류형확산관(coflowing diffuser)은 주변수흐름에 수직으로 설치되어 있는 확산관축을 따라 직각방향으로 포트가 설치되어 있고 저면의 세굴을 방지하기 위하여 통상적으로 수평면에서 약 20° 정도 상향으로 방류가 이루어진다. 이 형태는 확산관의 배면 및 측면의 주변수를 유입하므로 흐름의 유속이 거의 없는 해역 혹은 하천에서의 흐름과 같이 조류의 방향은 일방향흐름이 지배적인 곳에 설치하면 가장 효율적이다. 하지만 방류방향과 반대의 주변수흐름을 가지는 곳에서는 효율이 떨어지는 것으로 알려져 있다.

T형확산관 (tee diffuser)은 주변수흐름과 확산관축이 평행인 형태로 주변수흐름이 교대로 바뀌는 경우에는 공류형확산관보다 효율적인 구조라 할 수 있다. T형확산관은 주변수흐름이 없는 곳에서 가장 높은 회석률을 보이고, 주변수흐름이 있는 곳에서는 회석률이 감소하는 경향이 있는 것으로 알려져 있으며, 주변수의 유입이 주로 확산관의 배면을 통하여 이루어지므로 육지에서 확산관까지의 도수관(feeder pipe)의 길이가 길어지는 단점이 있다. 따라서 공류형확산관과 T형확산관의 중간 형태로서 주변수흐름 방향과 일정한 각을 이루는 확산관 형태가 많이 이용되고 있다.

2) 축방향확산관(staged diffuser)

축방향확산관은 Fig. 2.2(3)처럼 확산관 축을 따라 양쪽에 노즐을 설치한 확산관으로, 축과 방류 방향이 이루는 각도는 20° 정도 이내로 설계한다. 일방향 확산관과 마찬가지로 축방향확산관도 큰 운동량을 생성하므로 방류수의 순환구역이 크다. 이러한 구조는 조류가 확산축과 평행하게 흐르면 회석률이 증가하는 경향이 보이므로 해안선에 수직방향으로서의 흐름이 지배적인 곳에 사용하면 효율적이며, 양방향확산관의 장점(증가하는 조류크기에 대한 개선)에 Tee확

산관의 단점(외해운동량 선분의 자가유발)을 보완한 형태이며 조류속도가 낮은 경우를 제외한 모든 경우에 대해 바람직한 형태이다. 축방향확산관의 시공사례는 태평양연안에 위치한 San Onofre발전소와 이리호에 위치한 Perry발전소가 있다(Miller & Brighthouse, 1984).

3) 양방향확산관(alternating diffuser)

Fig. 2.2(4)와 같은 양방향확산관은 확산관에 포트가 직각으로 설치되어 있는 경우와 확산관축을 따라 방류각이 변화하는 경우로 나눌 수 있으며, 대부분 확산관 축방향은 우세한 조류방향에 수직이다. 외해방향으로 운동량이 발생하지 않으며 방류유속이 크지 않아도 되며, 양방향확산관의 희석은 Tee형 확산관과는 달리 조류속도가 증가할수록 개선되는 경향이 있다. 강하지 않은 보통의 규칙조류를 나타내는 현장에 주로 사용되며 느린 조류의 경우에 긴 확산관의 길이가 요구된다. 양방향확산관은 처리시설과 방류수역의 에너지수두 차가 작은 지역에 적합하고, 주변수흐름이 주기적으로 계속 변하는 경우에 사용하면 효율적이며 시공사례는 Long Island에 위치한 Shoreham발전소와 Northport 발전소 등이 있다(Miller & Brighthouse, 1984).

2.4 확산관의 유형

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 공기 혼입이 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 증가시킨다. 이러한 모든 영향은 근본적으로 공기혼입을 방지해야 하며, 이것이 불가능한 경우 관내의 유속은 공기밸브 혹은 통풍장치가 설치된 지점까지 공기를 수송시킬 수 있을 만큼 커야한다.

2.5 방류공의 종류 및 설계요건

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.

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 반비례관계가 성립하는데, 방류공의 단면적이 작을수록 방류유속이 커지고 결과적으로 큰 운동량을 갖게 된다.

최근에는 연직유도관(riser)의 간격을 크게 하고(보통 10m이상), 연직유도관의 상단에 2개 이상의 방류공(port)을 설치하고 있으며 예를 들어 2개의 방류공(울산), 4개의 방류공(마산/창원, 온산, 녹산), 6개(시드니) 및 8개의 방류공(USA,시드니/보스톤항) 등이 있으며 이는 필요한 희석 요건을 만족시키기 위한 것이다.

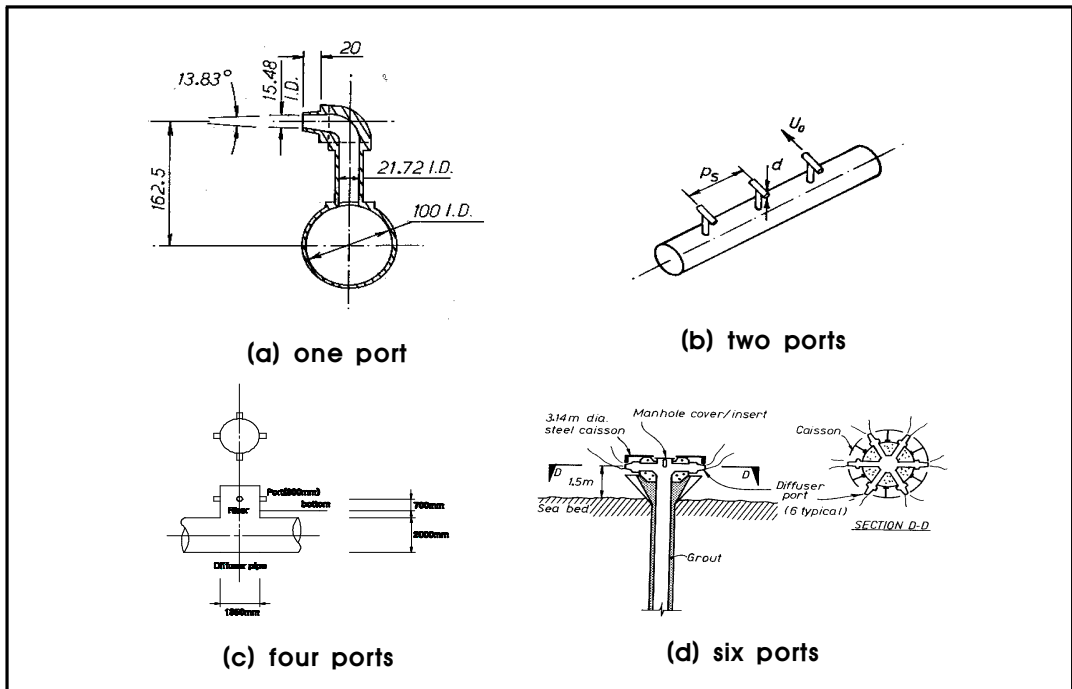


Fig. 2.3 Discharge port type

Fig. 2.3은 방류공을 1, 2, 4, 6개로 한 경우의 확산관 유형을 나타낸 것이다. 방류공은 확산관의 관 벽에 구멍을 뚫어 제작하거나 확산관의 상단에 상향의 튜브를 붙여 이를 방류공으로 활용하기도 한다. 또한 관로가 바닥의 퇴적에 의해 메워지는 것을 방지하거나 파랑에 의한 확산관의 파손을 방지하기 위하여 확산관의 상단에 확산관보다 상대적으로 적은 직경의 연직유도관을 부착하고, 그 상단에 임의의 방향의 방류공을 부착할 수도 있다. 방류공이 확산관에 부착되는 간격은 다음과 같이 제한하고 있다(Almquist & Stolzenbach, 1976).

$$s/L \leq 0.20 \quad (2.1)$$

$$k = \sqrt{\frac{sH}{a_o}} \geq 10 \quad (2.2)$$

이 확산변수 k 를 통해 중심선 희석이 구해지기도 한다.

$$S_c = c\kappa \quad (2.3)$$

일반적으로 큰 방류유속은 근역의 희석률을 극대화시키는 이점을 지나 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 세굴 속도에 의해 결정된다. 확산관의 직경이 결정되면 방류공의 크기는 주변 조건 및 방류 조건을 고려하여 시행착오적(trial and error)으로 선정할 수 있으며, 방류공의 조류에 대한 방향과 배치는 많은 조합이 가능하다.



제3장 수치모형의 기초이론

해양방류 계획시 설계의 우선목표는 방류수의 초기희석을 극대화하는 것이다. 이를 효과적으로 달성하기 위해서는 소위 운동량이 현저해지는 제트(jet)나 부력이 현저해지는 플룸(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.

동수역학적으로 유사한 혼합과정을 가지는 근역과 원역으로 구역을 구분하면, 근역에서는 방류모멘텀플럭스, 부력플럭스 및 다공확산관의 기하학적인 형상에 의해 희석률 및 방류수의 궤적과 같은 혼합특성이 결정되며, 원역에서는 주변수조건에 의해 혼합특성이 결정된다.

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.

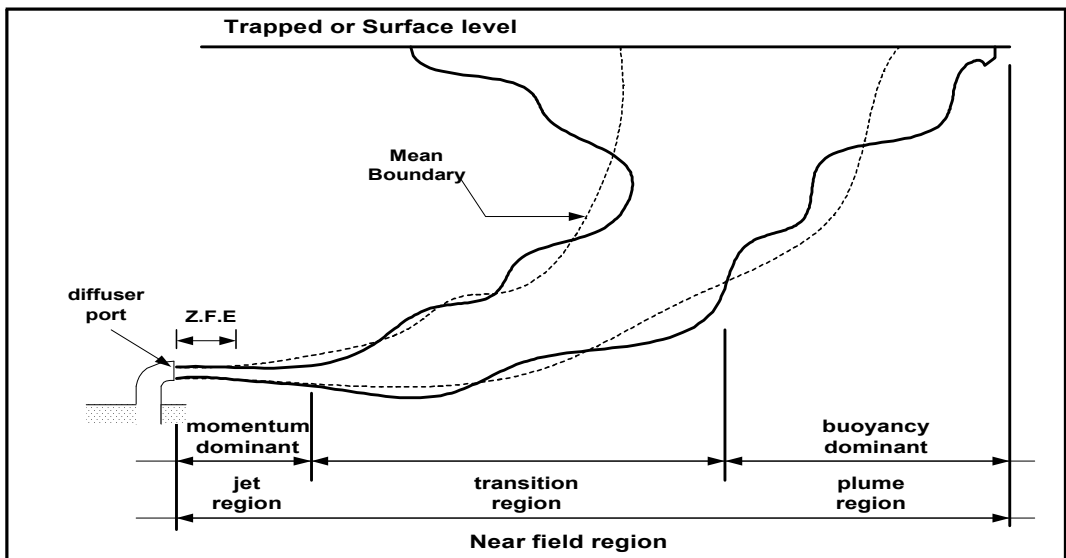


Fig. 3.1 Detailed near field region

Fig. 3.1에 나타낸 바와 같이, 근역은 운동량(momentum)이 지배적인 제트영역, 천이영역(transition region), 부력(buoyancy)이 지배적인 플룸영역 등 세 부분으로 나눌 수 있다. 제트의 역학적 거동을 설명할 수 있는 유용한 인자들은 다음과 같이 정의하며, 원형부력제트의 회석에 중요한 변수들이다. Q , M , B 는 각각 체적플럭스, 특성 운동량플럭스, 특성 부력플럭스이며 초기 값들과 관련된다.

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 W \quad (3.1)$$

$$M = \frac{\pi}{4} D^2 W^2 \quad (3.2)$$

$$B = \left(\frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_a} \right) g Q = g'_0 Q \quad (3.3)$$

여기서, D 는 제트의 직경, W 는 평균유출속도, g'_0 는 유효중력가속도를 가리킨다.



3.1 부력제트 이론

부력 제트는 수중에서 방류되는 제트로서 주변수와 밀도차, 온도차 등에 의해 부력효과를 받는 경우의 제트를 의미한다. Fig 3.2는 각각 원형부력제트(round buoyant jet)와 슬롯부력제트(slot buoyant jet)의 개략도이다.

방류수의 수중방류시 부력제트는 밀도프루드 수 $F_D = \frac{u_0}{(g_0' D)^{1/2}}$, 속도를 $k = \frac{u_j}{u_a}$, 유량 플럭스율 $V = \frac{u_a H}{q}$, 방류각도 θ 등 네 가지의 무차원수로 표현된다. 단 슬롯 제트로 가면 수심이 무한대이므로 k, F, θ 로 함축되며 벽제트(wall jet)는 k 와 θ 로 표시된다. Fan(1967)은 k, F 로 희석률 및 제트궤적을 나누었으며, F 를 통해 강제연행 및 유상(upstream)의 유무를 확인할 수 있다 (Koh & Fan, 1970).

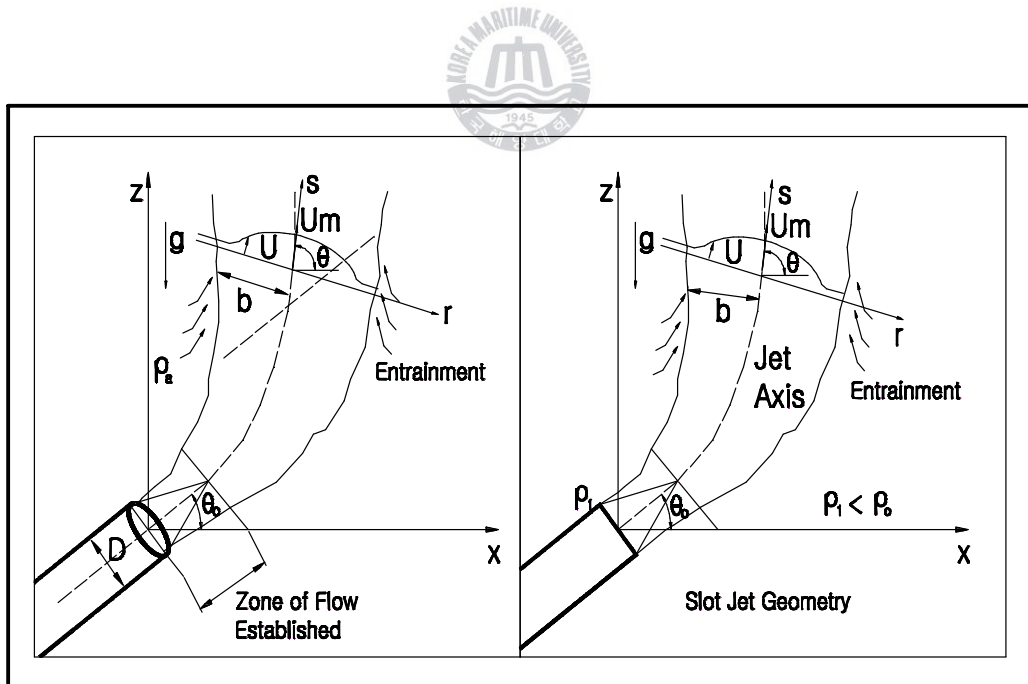


Fig. 3.2 Schematic of round jet and slot jet

1) 원형부력제트

제트의 궤적은 S자형이며 주변유체의 상승 및 연행에 따라 제트도 성장하며 밀도성층화된 환경에서 처음에는 부력에 의한 수직 운동량 플럭스로 인해 상방으로 다시 휘어지며 난류혼합으로 인해 고밀도의 주변수와 연행한다.

부력의 진행이 감소하면서 더 무겁게 성장하며 주변유체와 같은 밀도가 된다. Baumgartner(1971, 1994)의 실험에 의하면 제트의 궤적은 속도, 밀도손실(또는 온도), 질량의 분포가 축방향 대칭을 이루는 Gaussian 분포를 가진다.

이를 근거로 원형부력 제트(round buoyant jet) 문제를 해석하면 속도는 다음과 같다(Fan, 1969).

$$U = U_m e^{-(r/b)^2} \quad (3.4)$$

밀도 손실 및 농도는 아래와 같다.

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

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

여기서 r 는 단면분포의 특성길이이며 λ 은 원형제트의 난류 Schmidt 수로서 보통 1보다 조금 큰 값이다.

이상의 가정에 의해 방류유체의 유량 Q 는 아래가 된다.

$$Q = \int_A U dA = 2\pi \int_0^\infty U dr = \pi U_m b^2 \quad (3.7)$$

Morton(1956)에 의하면 제트의 유효폭(effective width)인 b 에서의 횡방향 유입유속, v_e 는 다음과 같다.

$$v_e = -\alpha U_m \quad (3.8)$$

여기서 연행계수는 실험을 통해, 다음과 같은 국부 프루드 수, F_L 의 함수의 형태로 표현되는 것으로 알려져 있으며(Rodi, 1992), 많은 연구자에 의해 연행계수를 구하기 위한 연구가 수행되고 있다.

$$F_L = \frac{U_m}{\left(\frac{\rho_a - \rho_m}{\rho} gb\right)^{1/2}} \quad (3.9)$$

또한, Fox(1970)는 연직방향으로 방류시 연행계수를 식 (3.10)로, Hirst(1971)는 Fox의 이론을 확장하여 일정한 각 θ 로 방류될 때의 연행계수를 식 (3.11)으로 표현하였다. 일반적으로 원형제트의 경우에는 0.082이며 슬롯제트는 0.16으로 한다.

$$\alpha = \alpha_1 + \frac{\alpha_2(\lambda)}{F_L^2} \quad (3.10)$$

$$\alpha = \alpha_1 + \frac{\alpha_2(\lambda)}{F_L^2} \sin\theta \quad (3.11)$$

여기서 λ 또한 원형제트인 경우에는 1.16이며, 슬롯제트의 경우에는 1.0 이다. 또한 운동량은

$$M = \frac{M'}{\rho_0} = \frac{1}{\rho_0} \int_A U^2 \rho dA \approx \int_A U^2 dA \quad (3.12)$$

여기서 M 을 동역학적 운동량이라 할 때 M 은 실 운동량이다.
 방류유체의 밀도손실 플럭스 F 는 아래가 된다.

$$F = \int_A (\rho_a - \rho) U dA \quad (3.13)$$

제트와 주변유체의 밀도차에 의해 부력이 발생하는데 이는 아래와 같다.

$$f = g \int_A (\rho_a - \rho) dA \quad (3.14)$$

이상의 가정에 의해 종방향을 따르는 유량 플럭스의 변화율을 구하면 다음과 같다.



$$\frac{dQ}{ds} = E = 2\pi abw \quad (3.15)$$

여기서 $w = \sqrt{(2)}b$, 즉 제트 폭의 반이다.

한편 밀도손실 플럭스의 변화율을 구하면

$$\frac{dF}{ds} = \frac{d}{ds} \left\{ \int_A U(\rho_a - \rho) dA \right\} = E(\rho_a - \rho) \quad (3.16)$$

원형제트의 속도형상(velocity profile), 밀도손실 형상(density deficiency

profile)을 상사로 가정하면 이는 이차원 슬롯제트로 가정된다. 제트는 수평으로 θ_0 기울어진 z축으로부터 흐르고 있으며 s축에 대한 수직거리는 n좌표(원형 슬롯제트의 r좌표에 해당)로 표시된다(Fig. 3.2).

2) 슬롯부력제트

슬롯부력제트의 연행관계식은 아래와 같다.

$$\frac{dq}{ds} = 2\alpha u \quad (3.17)$$

여기서 q는 z축을 따라서 단위길 이당 유량 플럭스이고 α 는 슬롯 부력제트의 연행계수이다.

속도 단면분포는 다음과 같다.

$$U = U_m e^{-(n/b)^2} \quad (3.18)$$



밀도손실식은 아래와 같다.

$$\rho_a - \rho = (\rho_a - \rho) e^{-(n/b)^2} \quad (3.19)$$

트레이서의 농도 단면분포는 다음과 같이 가정된다.

$$C = C_m e^{-(n/b)^2} \quad (3.20)$$

이상의 결과를 함수별로 정리하면 Table 3.1이 된다.

Table 3.1 Summary of properties for turbulent jet(Koh & Fan, 1970)

	For Round Jet	For Slot Jet of Length L
Volume flux Q	$\pi u b^2$	$\sqrt{\pi} u b L$
Momentum flux $M = \frac{M^1}{\rho_o}$	$\pi u^2 b^2 / 2$	$\sqrt{\pi/2} u^2 b L$
Density Deficiency flux F	$\frac{\lambda^2}{1+\lambda^2} \cdot \pi u b^2 (\rho_a - \rho)$	$\sqrt{\frac{\pi \lambda^2}{1+\lambda^2}} \cdot u b (\rho_a - \rho) L$
Temperature Deficiency G	$\frac{\lambda^2}{1+\lambda^2} \cdot \pi u b^2 (T_a - T)$	$\sqrt{\frac{\pi \lambda^2}{1+\lambda^2}} \cdot u b (T_a - T) L$
Buoyancy Force f	$\pi \lambda^2 b^2 (\rho_a - \rho) g$	$\sqrt{\pi} \lambda b L g (\rho_a - \rho)$
Entrainment Function E	$2\pi \alpha u b$	$2\alpha u L$



3.2 난류제트이론

방류수가 방류확산관을 통해 방류되면 혼합단계, 이송단계, 난류확산 및 이류로 이어지는 세 단계의 난류혼합을 거치는데 초기에는 운동량 과잉에 의해 부력 플룸(buoyant plume)이 떠오르면서 주변수를 연행(entrainment)시키며 주변수 밀도 성층화가 충분할 경우 표면수 혹은 표면수 아래의 끝부분에 있는 오염수를 희석시킨다. 이송단계는 Fig. 3.3의 (4)에 해당하며 수평 확산이 이루어진다. 이후 조류에 의해 역학적으로 수동적인 난류확산 및 이류의 과정이 뒤따른다. Fig. 3.3은 정체된 주변수 조건하에서 방류수의 흐름을 나타낸 것이다.

방류수체와 주변유체 사이의 밀도차가 없어서 부력은 작용하지 않고 운동량만 작용하는 경우를 완전제트(pure jet), 운동제트(momentum jet), 비부력제트(non-buoyant jet)라 하며 이 경우 고속분사의 형태로 초기 운동량 플럭스가 난류혼합을 야기한다.

이와 반대로 완전플룸(pure plume)은 주변수와의 밀도차, 온도차 등에 의해 부력효과를 받는 제트를 의미한다. 또한 주변수와의 밀도차, 온도차 등에 의한 부력효과와 운동량이 동시에 작용하는 경우를 부력제트(buoyant jet) 혹은 강제플룸(forced plume)이라고 한다.

방류유속이 커지고 유효중력가속도가 적어지면, 즉 밀도프루드수가 커지면 ($F_D \rightarrow \infty$) 방류수는 완전제트에 가까워지고 1 이상이 되면 상승고와 하수장의 두께가 크게 감소하며 밀도프루드수가 적어지면 ($F_D \rightarrow 0$) 완전플룸에 가까워진다.

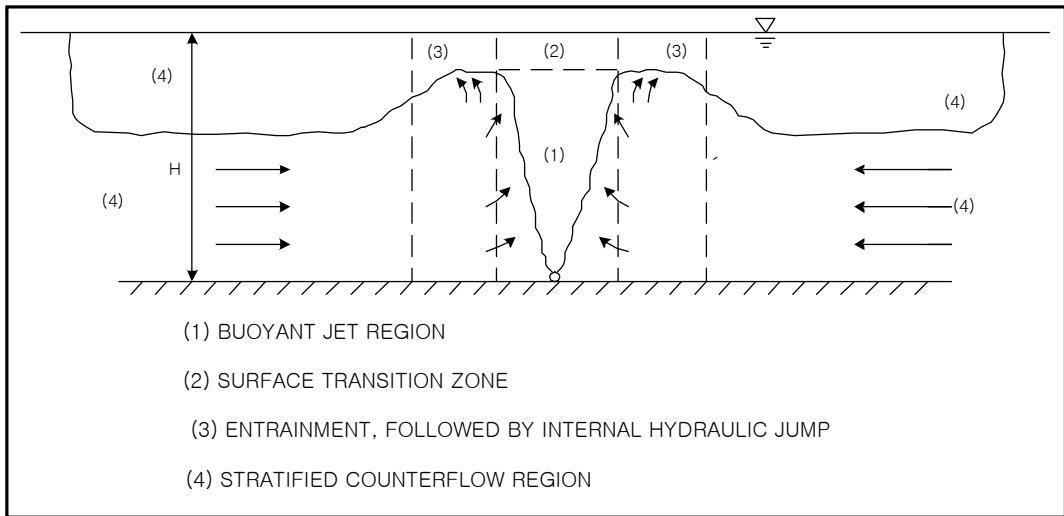


Fig. 3.3 Postulated a two dimensional flow field induced at the center of diffuser in a stagnant ambient fluid(Jirka and Halman, 1979)

플룸과 제트는 그 형성과정을 지배하는 물리적 특성이 다르므로, 많은 연구자들이 이를 분리하여 기술하려는 해석적 또는 실험 연구를 수행하였다. Fig. 3.4와 같이 프루드 수는 플룸 혹은 제트의 형태를 결정하는데 (b)일 경우에는 방류수가 강제 연행되어 유하(downstream)하는 경우이며 (c)는 플룸이 운동량이 부력보다 우세함으로서 하상부착(Bottom boundary attachment)이 발생하는 경우이다. 이러한 밀도 프루드 수는 다음과 같이 운동량(관성력)과 부력의 비로 나타내어진다.

$$F_D = \frac{u_0}{(g_0' D)^{1/2}} \quad (3.21)$$

여기서 유효중력가속도(reduced gravitational acceleration), $g_0' = g(\rho_a - \rho_0)/\rho_a$ 이며 ρ_0 는 방류수의 밀도, ρ_a 는 주변수 밀도이다(Roberts, 1977). 혼합구역이 제트의 중심선을 관통하는 지점까지를 흐름발달영역(zone of flow establishment), 즉 근역(near field)이라고 하며, 이 영역은 원형방류

공인 경우 방류공 직경의 약 6배, 사각형방류공인 경우에는 방류공 폭의 약 5배 정도의 거리까지인 것으로 알려져 있다(Brooks, 1960).

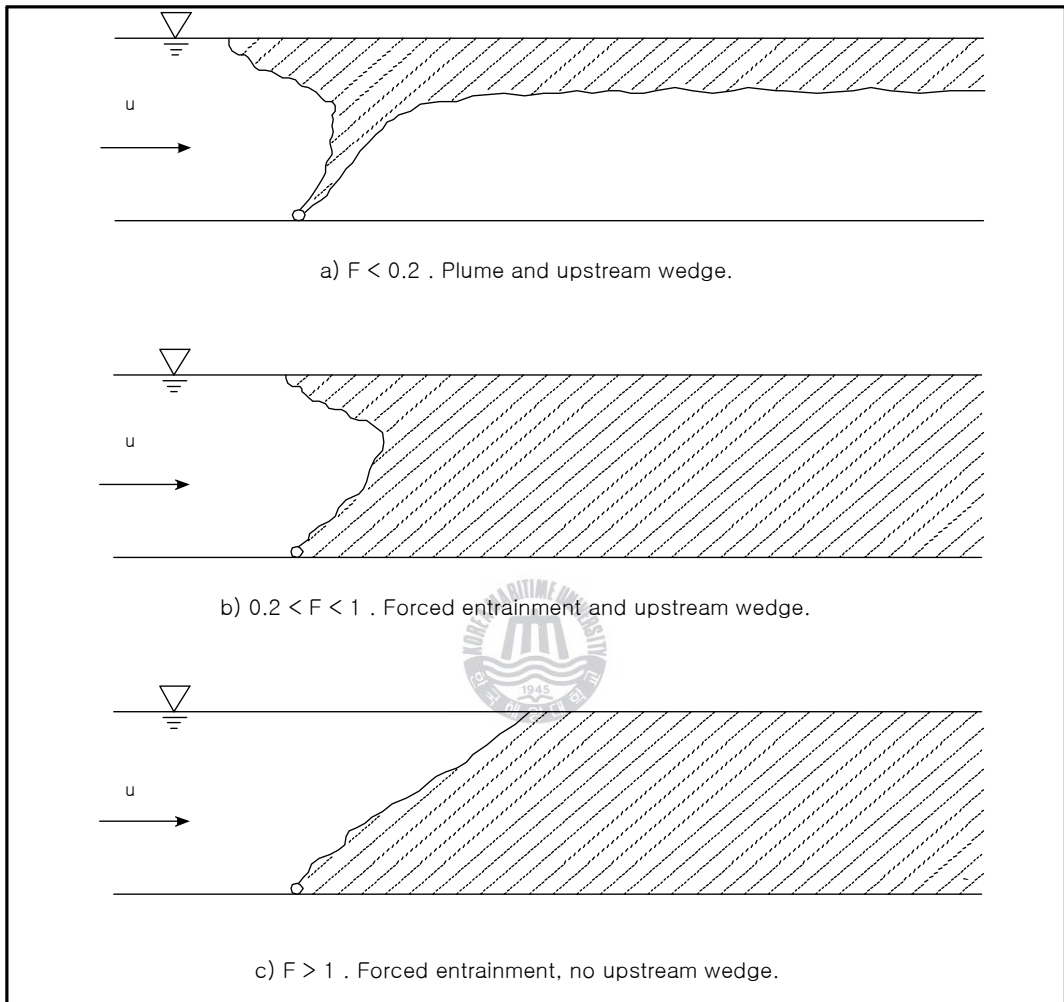


Fig. 3.4 Flow regimes for a plume of infinite length in a perpendicular current

한편, 흐름확립영역(zone of established flow), 즉 원역(far field)은 제트의 중심부가 교란되기 시작하는 지점부터 시작된다(Fig. 3.5). 이 영역은 수직적으로 평형영역(equilibrium region)과 플룸 혹은 제트의 유무에 따라 이중으로 나뉘지는 이중층영역(two layer region)으로 구분된다.

두 영역 간의 경계를 명확히 정의하기는 어려우며, 흐름발달영역 끝은 대략 중심선의 유속이 영이 되는 지점까지로 본다(Albertson, 1950). 일반적으로 초기의 유체확립영역(initial zone of flow establishment) 이후에는 제트의 형태가 자기상사성(self similarity)을 가진다.

결국 다공확산관을 통하여 방류된 오염물질의 속도 및 농도분포는 일반적으로 운동량과 부력의 상호관계로부터 운동량이 지배적인 근역(near field), 즉 흐름 발달영역과 부력이 지배적인 원역(far field), 즉 흐름확립영역으로 나누어진다.

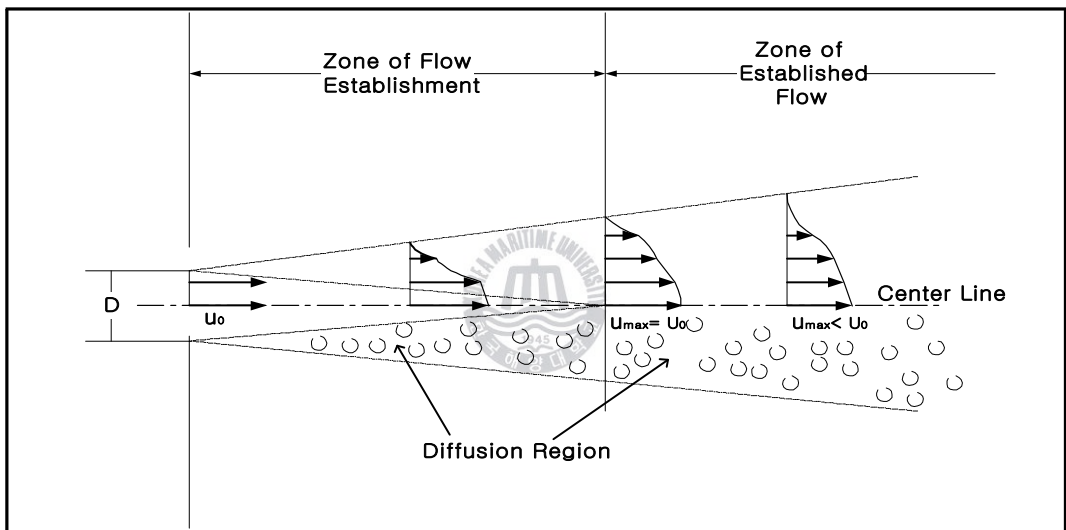


Fig. 3.5 Classification of zone of flow establishment and zone of established flow

난류제트에 대한 해석의 근거가 되는 수리학적 기본 가정은 Cederwall(1971)의 이론에 따른다. 난류제트의 가장 간단한 예는 제트와 주변수 사이의 밀도차가 없는 운동량제트(단순제트 혹은 비부력 제트)이지만 실제 해양처리문제에 있어서는 아래의 환경조건(Fig. 3.6)들이 반드시 고려되어야 한다.

1) 부력효과(buoyancy effect)

방류수의 밀도는 해수나 반염강수의 밀도와는 다르다. 즉 방류수는 거의 청수의 밀도와 같기 때문에 해수보다 2.6% 정도 가볍다. 그 차이는 적지만 제트의 거동에 미치는 부력의 효과는 상당하다. 예를 들어 이들 유체에 수평(혹은 경사진) 방류되는 제트는 위로 휘어지며 이를 운동량 플럭스 및 초기 부력 플럭스를 가지는 제트를 부력제트(혹은 강제 플룸)라 한다. 부력 제트는 산업수처리 및 발전으로 인한 스팀의 냉각회용 온수 방류에 의해 담수호에서도 발생한다(Fig. 3.6(a), (b)).

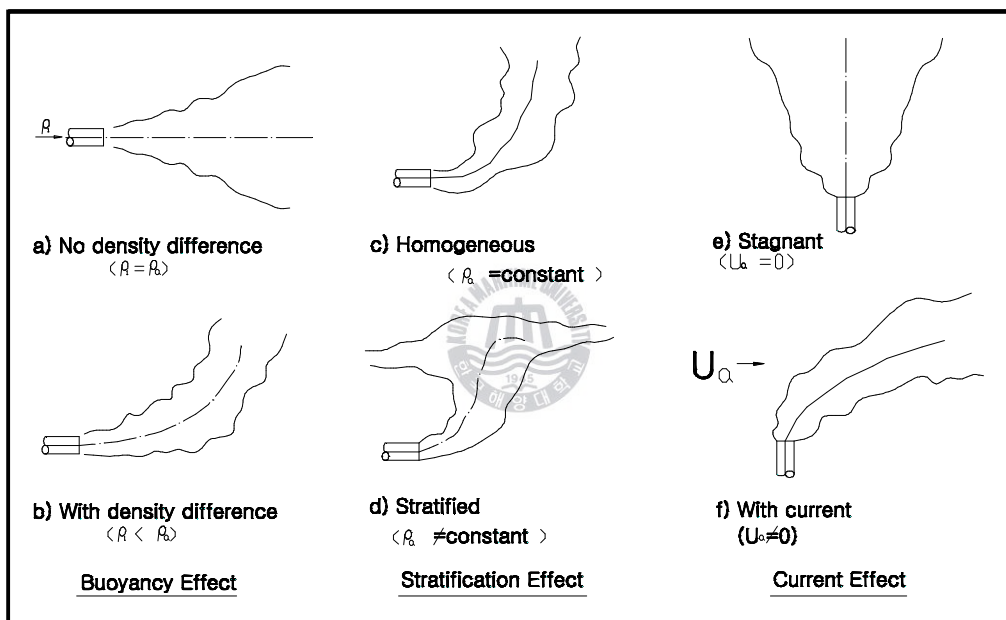


Fig. 3.6 Effects of the environmental conditions on the jet behavior

2) 밀도성층화(stratification effect)

대양 및 호수에서는 비균일 온도 및 염도에 기인한 성층화가 빈번히 이루어진다. 대기온도와 태양열에 의해 계절마다 다른 분포를 보이며, 수심이 깊을수록 성층화가 뚜렷하게 나타난다. 안정적으로 성층화된 대양에서는 무거운 해저면수와 부력 제트가 빠르게 혼합되어 부력 구름이 중립화되면서, 제트가 떠올

라 표면에 이르는 것을 막을 수 있다. 부력제트는 밀도가 큰 주변수를 연행하고 수직으로 상승하다가 주변수와 밀도가 같아지는 지점에서 수평방향으로 확장되기 시작하며, 연행되는 주변수의 유효높이가 적어지므로 결국 희석률이 낮아진다(Fig 3.6(c), (d)).

3) 조류효과(current effect)

조류 및 규칙적 조석운동은 설치된 하수장 혹은 해수면 근처의 운동 뿐 아니라 초기 제트의 혼합특성에 영향을 미친다. 조류가 플룸 내로 침입하면 연행되는 주변수가 많아지며 이 과정을 강제연행(forced entrainment)이라 한다. 조류속도가 제트방류속도에 비해 미약하지만 그 효과를 무시할 수는 없다. 필요한 경우에는 조류방향과 속도에 따라 혼합특성을 검토할 수도 있다.

이상의 세 가지 효과는 제트 거동에서 가장 중요한 인자이며 그 외에도 요인으로는 주변난류, 제트간섭등이 있다.

Albertson(1948)은 수중 난류제트를 경험적으로, 이론적으로 연구하였다.

List & Imberger(1973)는 부력제트의 난류연행을 연구하였는데, 이전에 발표된 실험 결과와 차원해석을 결합하여, 수직 상향의 난류부력제트들의 연행계수가 특정한 값을 가지지 않는다는 것과 연행함수가 제트의 국부적인 밀도 프루드 수와 제트의 국지적 퍼짐율에 의해 지배되고, 속도분포 실험으로부터 두 값을 상수로 유추할 수 있음을 밝혔다. 또한 실험에 의하여 원형의 수직부력제트의 연행함수가 밀도프루드 수와 반비례한다는 것을 보였다.

3.3 다공제트 이론

방류공의 직경 D , 초기 방류유속 U_0 , 방류공간의 간격이 l 인 다공확산관의 경우에 초기방류지점에서 일정거리까지 각각의 방류공에서 방류되는 제트는 독립적인 원형제트의 거동을 보이거나 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. 3.7은 각각의 방류공에서 방류되는 원형제트가 천이구간에서 유속이 중첩되는 과정을 도시한 것이다. 유속분포는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u(x, y, z) = U(z) \frac{\exp(-y^2/b) \sum_{-\infty}^{+\infty} \exp\left\{-\left(\frac{x_l + n}{b_l}\right)^2\right\}}{\sum_{-\infty}^{+\infty} \exp\left\{-\left(\frac{n}{b}\right)^2\right\}} \quad (3.22)$$

여기서, $y_b = y/b$, $x_l = x/l$, $b_l = x/l$ 이며 n 은 방류공의 개수이다. 농도장의 유속분포는 식(3.22)에 b 대신 $b_T (= \lambda b)$ 를 대입하는 식으로 표현된다. 일반적으로 방류공에서 떨어진 거리 l 과 b (nominal half width)는 선형관계를 가지는데 그 비례상수를 퍼짐상수(spread constant)라 하며 이에 따라 퍼짐율(spreading ratio)이 결정된다.

$b/l \ll 1$ 일 경우는 원형제트로 축방향 대칭의 유속분포를 가지며, $b/l \gg 1$ 일 경우는 슬롯제트와 같은 2차원 유속분포를 가진다.

제트가 천이구간에서부터 병합되어 점차 퍼짐율 λ 이 증가하게 되며 Table 3.2에서와 같이 2차원 슬롯제트의 경우에는 대략 1.07에서 1.35의 값을 가진다. 식 (3.22)을 이용하여 임의 단면에서의 하나의 방류공이 차지하는 체적플럭스, q 를 표현하면 다음과 같다.

$$q = \int_A u(x, y, z) dA = I_q U(z) b l \quad (3.23)$$

여기서 A는 대칭면 사이의 제트의 단면적이고 I_q 는 체적 플럭스의 형상상수 (shape constant)이다. 위와 같은 방법으로 임의단면에서의 운동량 플럭스 (momentum flux), 부력(buoyancy force), 부력 플럭스(buoyancy flux)를 계산할 수 있으며, 이는 제트의 제적 중앙에서의 유속 및 농도를 알면 적절한 형상상수의 값을 이용하여 임의 단면에서의 제트 체적, 운동량, 부력에 관한 정보를 쉽게 얻을 수 있다.

방류공 노즐의 직경 D , 초기방류유속 U_0 , 방류공간의 간격이 l 인 다공확산관의 경우에 초기방류지점에서 일정거리까지 각각의 방류공에서 방류되는 제트는 독립적인 원형제트의 거동을 보이거나 천이구간(transition zone) 이후부터는 제트들이 병합하면서 2차원 슬롯제트(slot jet)와 유사한 형태를 보인다(Fig. 3.7).



Table 3.2 Spreading ratio with processing merging(Wood, 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

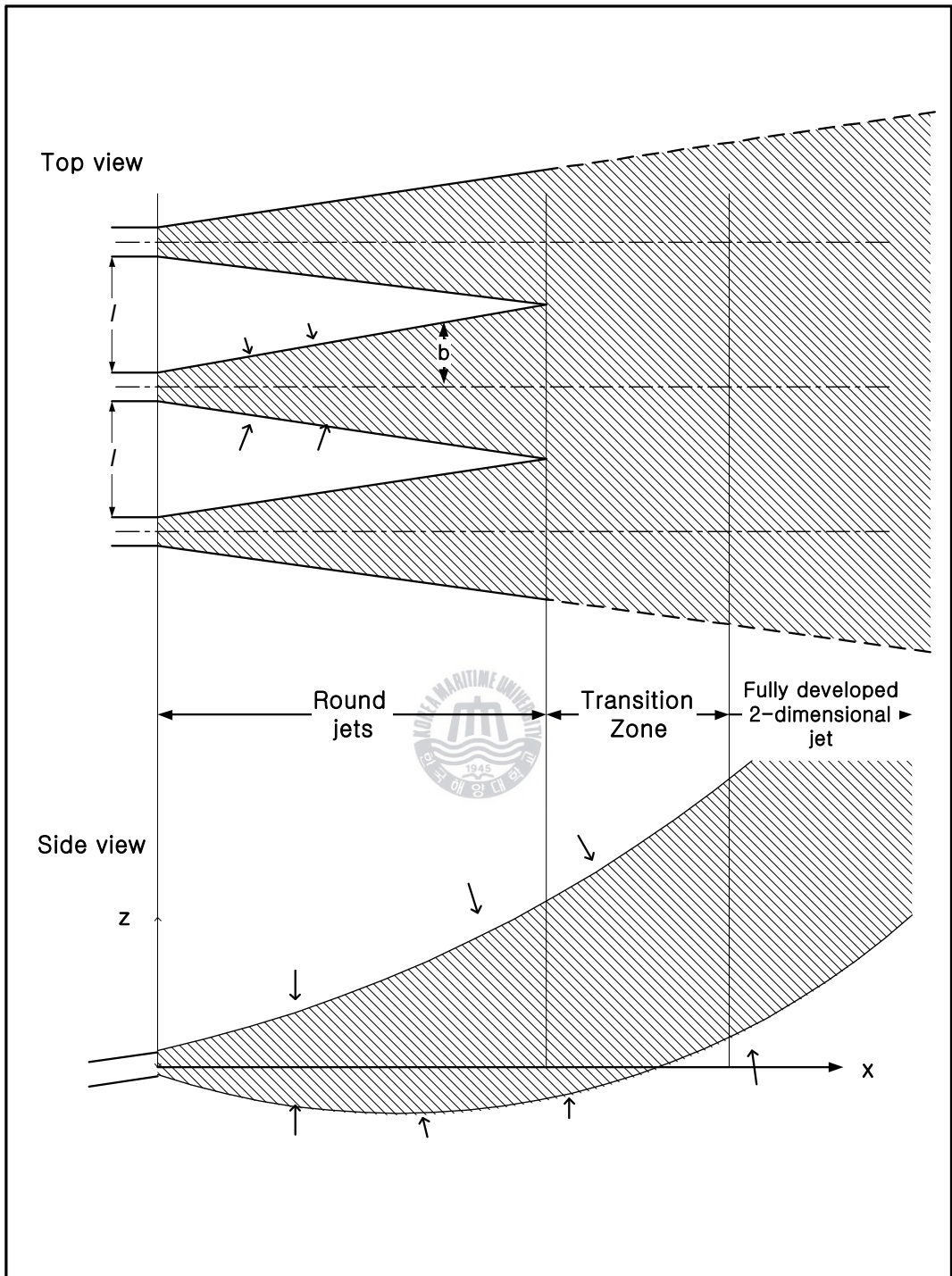


Fig. 3.7 Jets merging in unidirectional diffuser

3.4 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.

$$B = \frac{\pi D^2}{4l} \quad (3.24)$$

다공확산관의 거동이 등슬롯 확산관의 거동으로 전환되는 지점은 대략 $b = l/2$ 의 관계를 만족하는 지점이다. Cederwall(1971)은 다공확산관과 등슬롯 확산관의 평균희석률을 비교하였는데 완전제트의 경우에는 다음과 같은 관계를 가진다고 하였다.

$$R = \frac{\text{dilution of the multiport diffuser}}{\text{dilution of the equivalent slot diffuser}} = 0.95 \quad (3.25)$$

또한 완전플룸(pure plume)의 경우는 R 이 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 밀도푸르드수(densimetric froude number)가 있는데 이는 다음 식과 같다.

$$F_n = \frac{U_0}{\left(\frac{\rho_a - \rho_o}{\rho_a} gD \right)^{1/2}} \quad (3.26)$$

등슬롯확산관의 개념을 사용할 경우의 밀도프루드수는 다음과 같다.

$$F_s = \frac{U_0}{\left(\frac{\rho_a - \rho_o}{\rho_a} gB \right)^{1/2}} \quad (3.27)$$

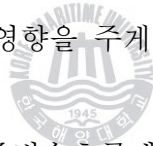
위에서 ρ_0 는 방류물질의 초기농도이다.

여기서, $g(\rho_a - \rho_0)/\rho_a$ 는 유효중력가속도(effective gravitational acceleration)로 정의하며, ρ_0 는 방류수의 밀도, ρ_a 는 주변수 밀도, 그리고 g 는 중력가속도이다. 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.



3.5 근역·원역에서의 혼합거동

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. 방류공을 통하여 방류된 개개의 제트는 주변수와의 유속차에 의한 전단난류연행으로 인해 주변수의 연행을 야기하면서 제트의 폭은 증가하면서 제트의 유속 및 농도는 감소하게 된다. 이러한 제트는 방류되는 부력 및 방류각 등에 따라 일반적으로 해수표면을 향하게 되며 방류공간의 간격에 따라 제트간의 상호 간섭을 유발하기도 한다. 해수표면에 도달한 제트는 방류 운동량과 부력, 주변수의 수심 등에 따라 제트의 궤적에 재연행 되는 수도 있다. 이밖에 다공확산관의 특성 외에도 주변수의 유속 및 수심, 밀도성층화정도가 근역에서의 혼합효과에 크게 영향을 주게 된다.



원역에서의 혼합과정은 주로 주변수흐름에 의한 오염운의 이송과 함께 부력확장, 주변수의 난류흐름으로 인한 확산, 온배수확산관의 경우에는 대기와의 열교환 등에 의한 혼합이 지배적인 과정이 된다.

부력확장은 방류수와 주변수의 밀도 차에 의한 부력에 의해 방류수가 수표면에 얇은 층을 형성하며 횡방향으로 확장되는 현상이다. 부력확장과정에서는 방류수의 두께가 감소하며 혼합이 상대적으로 적게 발생한다. 그러나 방류수의 부력이 작거나 없는 경우 부력확장이 발생하는 영역은 미소하며 주변수의 난류흐름으로 인한 확산영역이 주를 이루게 된다.

방류구로부터 멀리 떨어진 원역에서는 주변수흐름의 난류구조가 방류수와 주변수의 혼합과정을 지배하는 주된 요인으로, 난류확산영역에서는 방류수의 횡방향 및 연직방향폭이 고정경계의 영향을 받을 때까지 증가한다. 난류확산의 크기는 주변수체의 기하학적 형상, 동력학적 요소 및 밀도성층화정도 등과 같

은 많은 요소의 영향을 받는다. 특히, 주변수체가 안정하게 밀도성층화 되어 있는 경우에는 연직확산이 급격히 감소한다. 대 기와의 열교환은 대기의 풍속과 방류수의 초과수온 및 주변수의 수온에 따라 그 정도가 달라지는데 근역에서의 단기계산에서는 결과에 큰 영향을 미치지 않는다.

Jirka & Harleman(1979)은 수심 H, 등슬롯확산관의 폭 B, 방류공의 수평면에 대한 상향각 θ_0 인 경우에 흐름의 안정요소로 작용하는 단위길이당 초기부력플럭스, β_0 ,로 근역에서의 흐름의 안정여부를 검토하였다.

$$\beta_0 = g_0' U_0 B \quad (3.28)$$

위에서 g_0' 는 $g_0' = \Delta\rho_0/\rho_a g$ 이다. 흐름의 불안정요소로 작용하는 단위길이당 초기운동량플럭스 m_0 는 다음과 같다.

$$m_0 = U_0^2 B \quad (3.29)$$

주변유속에 의한 운동량도 흐름을 불안정하게 하는 요소가 되며, 이의 단위 길이당 운동량플럭스 m_a 는 다음과 같다.

$$m_a = U_a^2 H \quad (3.30)$$

기존의 실험연구를 통하여 도출한 안정조건의 경계는 아래와 같다.

$$\frac{H}{B} = 1.84 F_s^{4/3} (1 + \cos^2 \theta_0)^2 \quad (3.31)$$

H/B 가 200 이상이 되면(Fig. 3.8) 근역의 안정여부를 파악하는데 합리적인 기준을 제공해 주는 것으로 알려져 있다.

주변류가 있는 경우에 대해서는(Fig. 3.9) 주변유속이 야기하는 흐름의 불안정 성분의 크기를 판단하는 변수로서 $m_0 / (\rho_0^{2/3} H)$ 를 도입하여 다음과 같은 흐름의 안정성 여부를 판단하는 식을 유도할 수 있다(Jirka, 1990).

$$\frac{m_0}{\rho_0^{2/3} H} = \frac{0.54}{(1 + \cos^2 \theta_0)^2} \quad (3.32)$$

이상으로 각종 오염물질의 해양방류시 사용되는 수중다공확산관과 관련한 고전적인 이론 및 물리적 현상을 설명하였다. 이 이론은 모델을 적용하고 개선하는데 기본이 되며, 해양방류관의 수치모델링에서 필수적인 절차로 체트적분모델이나 CORMIX와 같은 길이규모모델(length scale model)의 기초이론으로 사용되고 있으며 단일 및 다공확산관을 통한 체트의 거동을 이해하는데 중요하다.

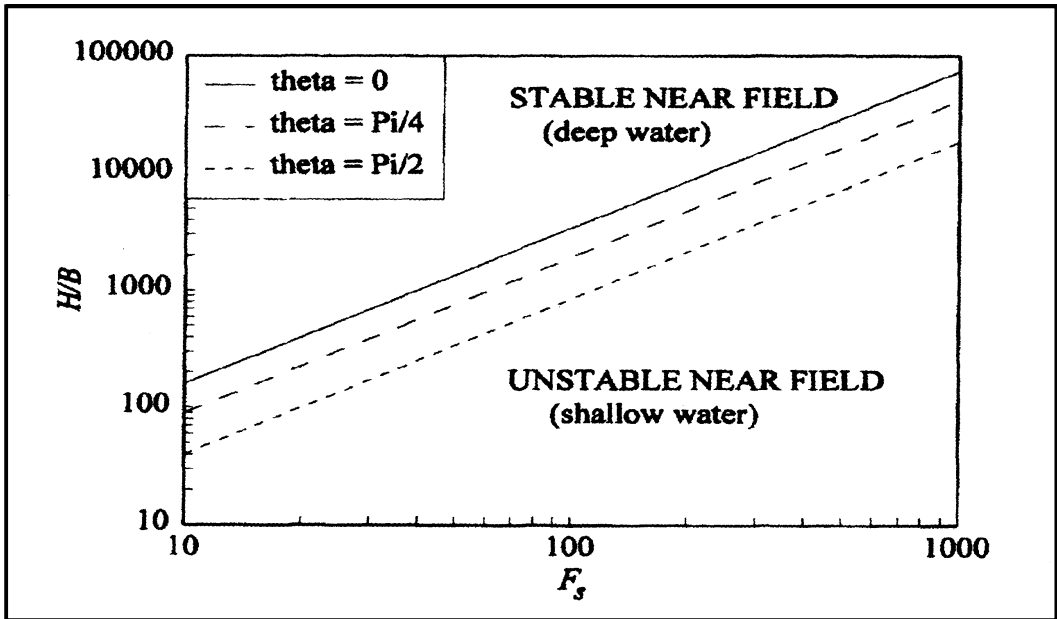


Fig. 3.8 General stability diagram for line buoyant discharges into stagnant ambient (Jirka, 1990)

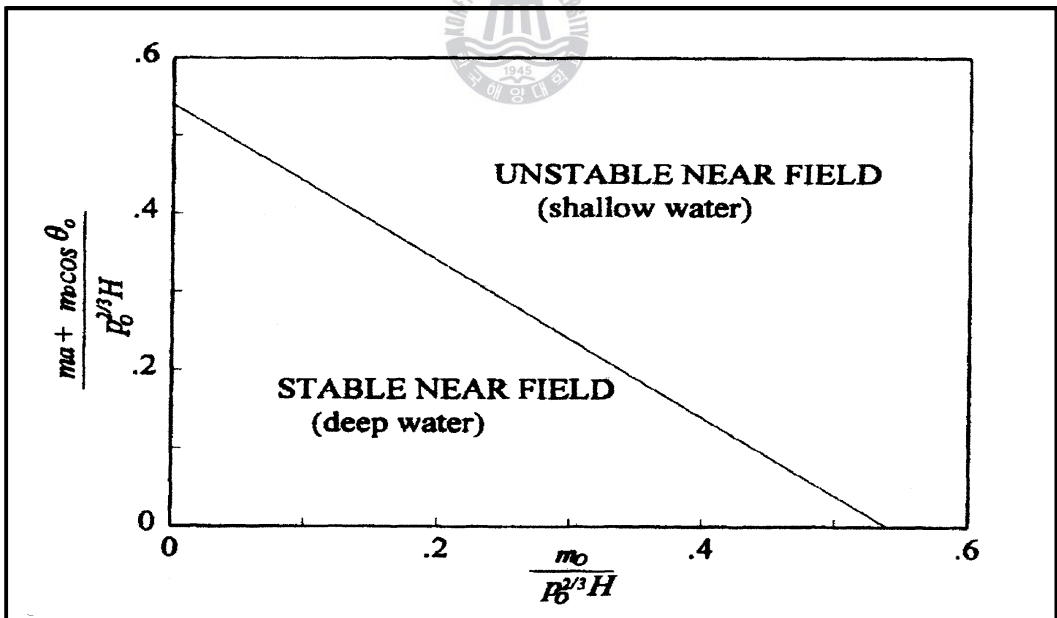


Fig. 3.9 General stability diagram for line buoyant discharges into confined depth comprising stagnant and flowing ambient (Jirka, 1990)

제4장 수치모형의 검증 및 적용

4.1 CORMIX 모델의 구성

CORMIX 모델은 방류시스템의 기하학적 형태에 따른 방류원 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 상류 쪽으로 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 방과제와 같은 구조물 등이 있는 경우와 방류구로부터 멀리 떨어진 구역에서의 확산을 예측할 경우에는 결과에 대한 신중한 검토가 필요하다.

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

언을 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.

CORMIX모델은 Fig. 4.1과 같이 5개의 요소로 구성되어있다.

DATIN은 주변 해역의 평균수심, 방류수심, 성층분포, 유속과 방향 등의 주변수 특성과 확산관 길이, 방류공의 수와 방류수 밀도, 방류량 등 방류특성을 입력 자료로 취하는 요소이다. PARAM은 일련의 길이축척들을 계산하는 요소이다. 차원해석에 의한 길이축척은 방류수의 체적 플럭스, 운동량 플럭스, 부력 플럭스, 주변 수역의 조류와 밀도성층 등의 거동을 제어하는 변수들의 상대적인 중요도를 표현하는 값들이다. CLASS에서는 입력 자료에 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.

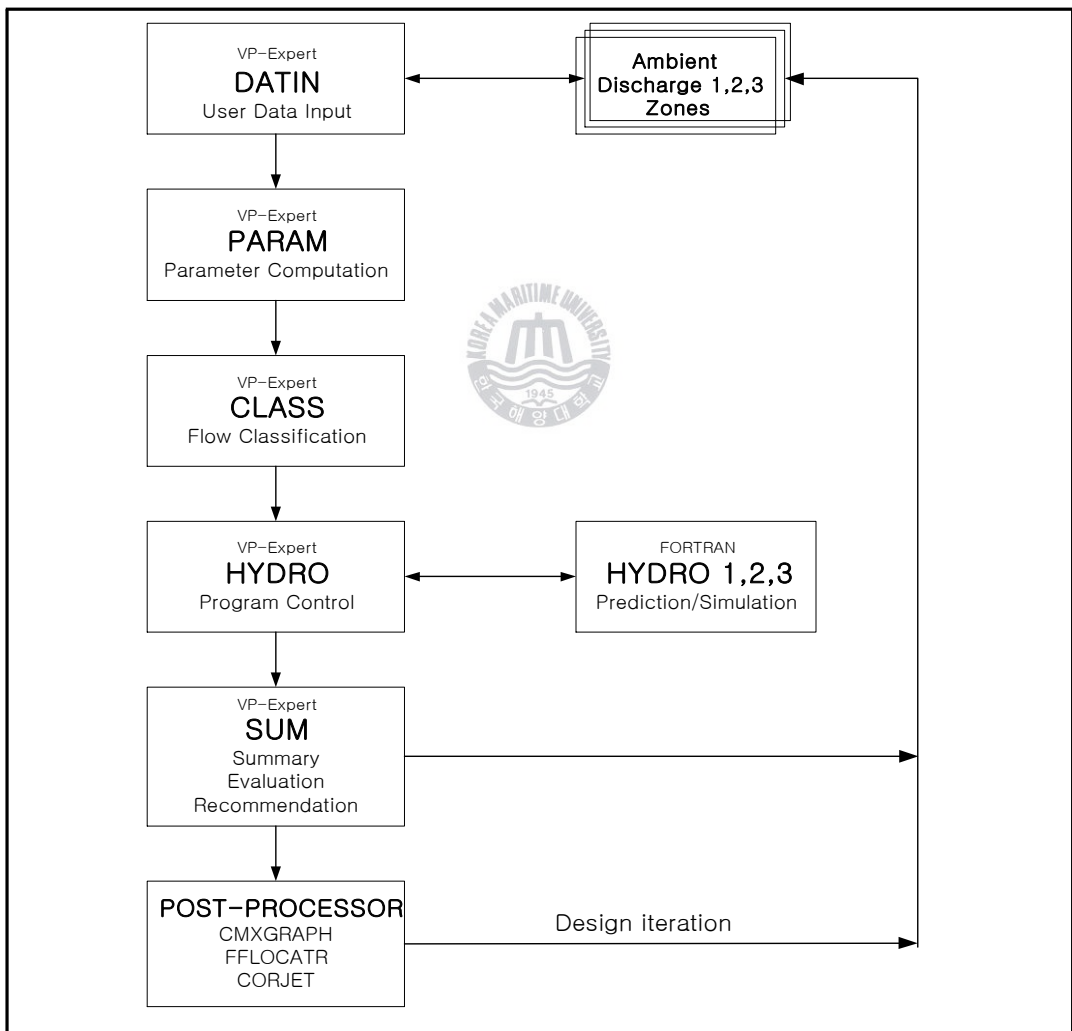


Fig. 4.1 System elements of CORMIX

SUM에서는 결과를 요약하고, 평가하여 더 좋은 대안의 확산관을 추천한다.

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

CORMIX의 주요 입력자료는 다음과 같다.

①주변 해역의 자료(평균수심, 방류관 수심, 유속 및 방향, 밀도분포, 염도, 온도 등)

②확산관의 제원(확산관의 길이, 포트간의 거리, 바닥면에서 포트 중심까지의 연직높이, 포트의 평균직경, 포트의 수축계수, 주변수 흐름방향과 확산관축과의 각, 수평면에 대한 포트의 연직상향각, 주변수의 흐름방향에 대한 방류수의 수평각, 확산관과 포트의 각등 확산관의 기하학적 특성)

③방류수의 특성(방류수의 온도, 밀도, 유량, 유속 등)

④법적혼합구역 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 비균질 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 γ 를 입력하여야 한다. 세부사항은 Fig. 4.2에 나타난 바와 같다.

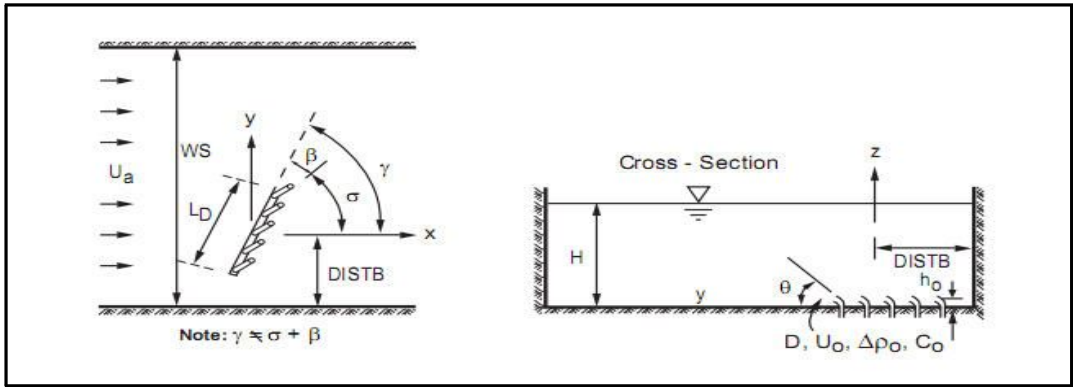


Fig. 4.2 Definition diagram CORMIX2

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_0 가 45° 이하일 때는 수심을 초과하지 않아야 하고, θ_0 가 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.

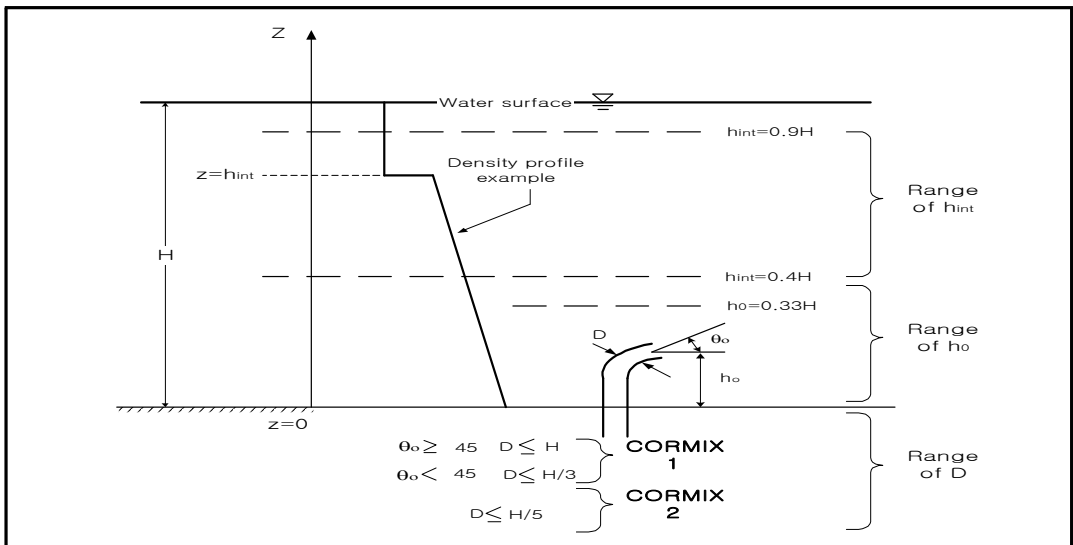


Fig. 4.3 Limits of applicability CORMIX

4.2 모델의 검증

방류영향 예측 및 근역혼합특성 분석을 통한 방류시스템의 최적 설계를 위한 수단으로 사용된 모형은 잘 알려진 CORMIX(cornell mixing zone expert system)다. CORMIX는 미 환경청의 지원을 받아 개발된 길이축적 모형으로, 초기혼합 및 희석과정을 모의하도록 개발되었다. 프로그램은 수중단일확산관(submerged single-port diffusers), 수중다공확산관(submerged multi-port diffusers), 표층방류(surface discharge)에 의해 방류되는 오염물질의 희석 및 거동양상을 모의하는 3개의 부프로그램으로 이루어져 있다.

이미 수차례에 걸쳐 많은 연구에 사용된 바 있지만 실험의 신뢰성을 확보하기 위하여 금회 연구에서 채택한 일방향확산관(unidirectional diffusers) 중 공류형확산관(coflowing diffusers)을 대상으로 한 기존의 수리모형실험 결과값(김홍제, 1997)과 희석률 산정공식(Aka & Jirka, 1991)값을 2007. 3월 버전인 CORMIX- V5.0GTR의 계산값과 비교하여 적용성을 확인하였다.

$$S = \frac{1}{2} \left[\frac{u_a H}{U_0 B} + \sqrt{\left(\frac{u_a H}{U_0 B} \right)^2 + \frac{2H \cos \theta_0 \sin \beta}{B}} \right] \quad (4.1)$$

식 (4.1)은 공류형 확산관의 희석률 산정공식(Aka & Jirka, 1991)이다. 각각의 입력치와 결과 값은 Table 4.1에 정리하였다. 수리실험 모형은 실제로 존재하는 원형(prototype)을 모형화한 것이 아니므로 상사법칙에 따라 제작하지 않았고, 실험의 목적인 다공확산관에 의해 발생하는 온도장 변화와 이에 따른 최소희석률을 분석하는데 주안점을 두었다. 사용한 확산관은 전체길이(Ld)가 0.95m이고 방류공(port)의 개수는 20개로 방류공간의 간격(spacing)은 0.05m이다. 그리고 포트의 수평방향에 대한 각은 전체적인 희석률에 대한 고려와 해저면의 세굴에 대한 영향을 고려하여 수평면에 대해 22.5도의 각이 유지되도록

하였다. 그리고 다음과 같은 무차원 변수를 변화시켜가며 실험을 수행하였다.

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_0} = f(F_s(\text{or } F_f), \theta_0, H/B, V, \gamma) \quad (4.2)$$

여기서, $\frac{\Delta T}{\Delta T_0} = \frac{T - T_a}{T_0 - T_a}$ 는 방류되는 온수와 주변수의 수온의 차이를 나타내는 무차원 초과수온, $F_s(\text{or } F_f)$ 는 밀도프루드수(Densimetric froude number) 또는 슬롯제트에서 방류되는 프루드수, θ_0 는 초기방류각도, H/B 는 상대수심(relative depth), V 는 체적플럭스비(volume flux ratio), γ 는 확산관측과 가로흐름방향이 이루는 경사각을 나타낸다. 여기서, V 는 다음과 같이 정의된다.

$$V = \frac{u_a H}{U_0 B} \quad (4.3)$$

여기서, u_a 는 주변수의 유속, U_0 는 초기방류유속, H 는 수심, B 는 등슬롯확산관의 폭을 나타낸다. 본 연구에서는 체적플럭스비에 대한 희석률의 변화 값을 추출하여 모형의 적용성을 확인하였다. 체적플럭스 V 에 대한 희석률 변화를 Fig. 4.4 에 도시하였다. 예상한 바와 같이 모두 체적플럭스가 증가함에 따라 희석률이 증가하는 경향을 보이며, 수리실험 값과 CORMIX2 값이 산정공식에 의한 값보다 다소 과소 추정되는 경향이 보이지만 그 변화는 아주 작으므로 나타났다. 이러한 결과로 근역에서의 희석률에 대한 계산의 신뢰성은 확보되었다고 판단되며 실험을 수행하였다.

Table 4.1 Comparison of the results (Experimental value/ Theoretical value/ Cormix2 value)

No.	H(cm)	Ua(cm/s)	Uo(cm/s)	B(cm)	H/B	V	Obs.	TheoryEq.	Cormix2
CO-1	10	2	30	0.029	344.83	22.99	16.6	28.56	26.8
CO-2	10	2	50	0.029	344.83	13.79	19.3	21.28	20.1
CO-3	10	2	70	0.029	344.83	9.85	14.5	18.47	25.9
CO-4	10	6	30	0.029	344.83	68.97	74.6	71.20	66.1
CO-5	10	6	50	0.029	344.83	41.38	32.7	44.92	41.9
CO-6	10	6	70	0.029	344.83	29.56	38.5	34.21	32.0
CO-7	10	10	30	0.029	344.83	114.94	77.5	116.31	107.9
CO-8	10	10	50	0.029	344.83	68.97	38.5	71.20	66.1
CO-9	10	10	70	0.029	344.83	49.26	33.8	52.31	48.7
CO-10	15	2	30	0.029	517.24	34.48	40.0	40.40	38.1
CO-11	15	2	50	0.029	517.24	20.69	25.5	28.94	27.5
CO-12	15	2	70	0.029	517.24	14.78	27.8	24.52	25.9
CO-13	15	6	50	0.029	517.24	62.07	62.5	65.71	61.6
CO-14	15	6	70	0.029	517.24	44.33	63.3	49.19	46.2
CO-15	20	2	30	0.029	689.66	45.98	41.7	52.09	49.2
CO-16	20	2	50	0.029	689.66	27.59	37.0	36.35	34.5
CO-17	20	2	70	0.029	689.66	19.70	45.9	30.24	28.8
CO-18	20	6	30	0.029	689.66	137.93	57.1	140.20	131.6
CO-19	20	6	50	0.029	689.66	82.76	69.4	86.44	81.3
CO-20	20	6	70	0.029	689.66	59.11	51.3	64.08	60.4

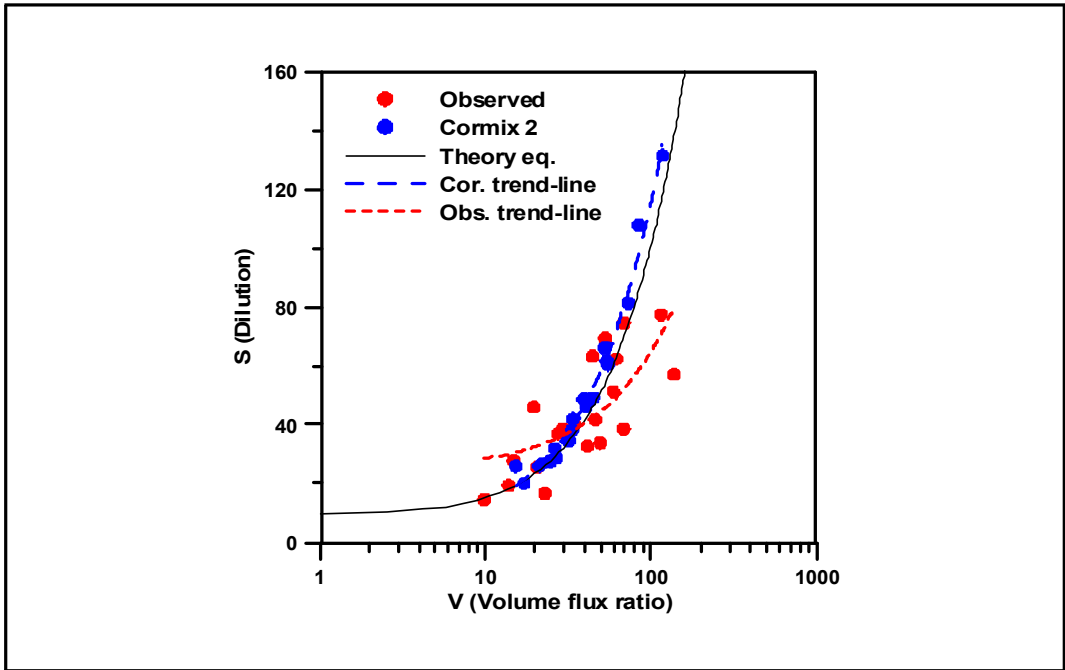


Fig. 4.4 Comparison of dilution for coflowing diffusers



제5장 모형실험 및 결과분석

방류수(온배수, 염배수)의 초기거동 특성을 분석하기 위한 실험은 플랜트(plant)로부터 방류량(discharge rate)과 방류수질, 해양방류 지점, 방류형태, 주변 해역의 자료를 입력치도 하여, 방류수의 근역혼합특성은 온배수, 염배수로 나누어 실험을 수행하였으며, 방류수에 의한 주변수역의 오염영향과 범위를 평가하기 위한 수질기준(regulation)은 온배수는 주변수와 방류수의 온도 변화량 1℃로, 염배수는 주변수와 방류수의 염도 변화량 2ppt로 설정하여 WQS/CCC의 선으로 나타내었다. 결과는 각 케이스별 수온변화(excess temperature), 염도변화(excess salinity), 희석률(dilution rate)등을 분석함으로써 실험 안별 결과를 검토하고, 다양한 파라메타를 변화시킨 민감도 분석을 통하여 최적의 설계조건을 파악하고자 한다.

5.1 주변수 및 환경조건



예상 방류량은 36,000m³/hr이며, 수질변수는 온배수는 40.0℃, 염배수는 75.0g/l이다. 방류수에 의한 주변수역의 오염영향과 범위를 평가하기 위한 수질기준(WQS; Water Quality Standard)은 Table 5.1과 같이 온배수는 주변수와 방류수의 온도 변화량(초과온도, excess temperature)의 1℃로, 염배수는 주변수와 방류수의 염도 변화량(초과 염도, excess salinity) 2ppt로 설정하였다. 설정된 수질기준은 방류지점에서 300m지점까지로 하여 초기혼합역(initial mixing zone)을 평가하였다.

Table 5.1 Water quality standard

Classification	Heat discharge	Brine discharge
Water quality	+1℃	±2ppm

연구해역은 서남아시아 중서부 연안으로 대상해역의 해저경사는 북측해안의 0.7m에서 남측의 13.3m까지 변화하는 완만한 양상을 보이고 있으며(Fig. 5.1), 실험시 방류지점인 CASE 1은 5.0m, CASE 2는 7.0m이며, CASE 3은 11.0m이다. 해류의 방향은 방류공과 직각으로, 실험에서 입력된 유속은 중층 수심을 평균 유속인 0.08m/sec를 사용하였다. 또한, 이 해역의 수온은 수질조사 결과, 해안에서 100m, 1000m에서의 거리별·수심별 변화가 없는 점을 감안하여 전자의 중층 수온인 21.1℃로 성층화현상이 없는 것으로 하였다(Table 5.2).

Table 5.2 Ambient characteristic per case

Parameters	CASE	CASE 1	CASE 2	CASE 3
Average Depth(m)		5	7	11
Distance from bank(m)		220	330	600
Temperature(℃)		21.1		
Current Vel.(m/sec)		0.08		

방류형태는 수중방류(submerged discharge)를 기본방류 형태로 하고, 확산관은 다중방류(multiport)와 수평방류를 원칙으로 하였으며, 일정한 흐름 방향을 고려하여 일방향확산관(unidirectional diffuser)을 채택하였다. 확산관의 위치는 흐름방향과 직각인 직교배치법을 선택하고, 연직유도관에 방류공을 부착하는 것으로 하였다. 배치된 확산관의 특성은 Table 5.3과 같다.

Table 5.3 Characteristics of discharge type

Characteristics \ CASE	CASE 1	CASE 2	CASE 3
Type	Multi-port		
Distance from shoreline to diffuser(m)	220	330	600
Port height(m)	1		
Port diameter(m)	0.5		
Port No.	13		
Channel width/depth(m)	-		
Diffuser type	Unidirectional Diffuser		



5.2 입력자료

CORMIX의 입력 자료는 크게 주변수역의 특성, 확산관 특성, 방류수 특성, 수질기준 등으로 나누어지며, 방류형태는 다중확산관 수중방류(submerged)로 결정하여 실험을 수행하였다. CASE별 입력 자료는 Table 5.4에 요약하였다.

Table 5.4 Input data for CORMIX

CASE	CASE 1	CASE 2	CASE 3
Input data			
Analysis situation	unbounded		
Average depth H_A	5m	7m	11m
Depth at discharge H_D	4m	6m	10m
Ambient temperature	21.1 °C		
Ambient density	1024.0 kg/m ³		
Friction value	0.025		
Darcy-Weisbach f	0.025		
Wind speed u_w	2m/sec		
Current speed u_a	0.08m/sec		
Nearest bank	220m	330m	600m
Diffuser type	unidirectional diffuser		
Diffuser length L_D	60m / 75m / 90m		
Number of openings	13		
Number of risers	13		
Space between risers/openings	4.6m / 5.8m / 6.9m		
Port height h_0	1.0m		
Average diameter D_0	0.5m		
Diffuser alignment angle γ	90°		
Vertical discharge angle θ	22.5°		
Horizontal discharge angle σ	0°		
Relative orientation angle β	90°		
Discharge temperature	40°C		
Discharge salinity	75g/L		
Port/Nozzle diameter with contraction ratio	1		
Discharge flow rate Q_0	36,000m ³ /hr		

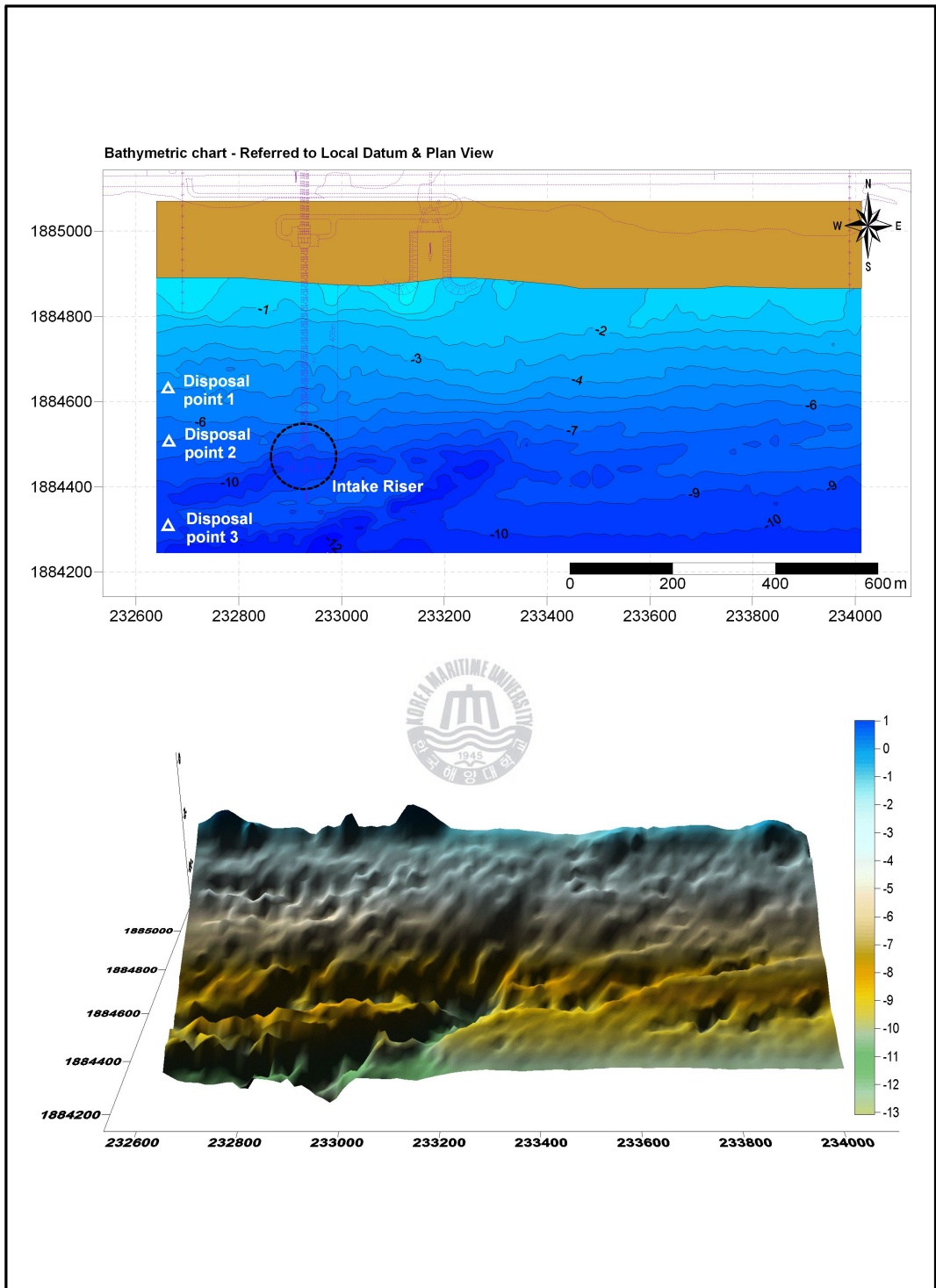


Fig. 5.1 Bathymetry chart and plan view

5.3 결과분석

1) CASE 1

CASE 1은 Table 5.5 입력 값을 평균수심 5m인 해역에 확산관 간격을 다음과 같이 변형시켜 수온변화, 염도변화, 희석률 변화 값을 얻었으며, 이를 바탕으로 케이스(CASE 1-1, CASE 1-2, CASE 1-3)별로 수온변화, 염도변화, 희석률 그래프를 나타내어 각각의 결과 값을 비교하여 보았다(Fig. 5.2, Fig. 5.3, Fig. 5.4, Fig 5.5). 그 결과 수온변화와 희석률 모두 법적 혼합구역으로 설정된 300m 이외에서 1℃ 이상의 수온증가가 모든 실험 안에서 나타나고 있으며 희석률 또한 케이스별로 약간의 차이는 있으나 모두 좋지 않은 결과를 나타내며 WQS(Water Quality Standard)에 만족하는 것이 없었으나 이와 다르게 염도변화에서는 CASE 1-2와 1-3이 제한조건에 만족하는 결과를 보였다.

Table 5.5 Input data for CASE 1

Parameters	CASE	CASE 1-1	CASE 1-2	CASE 1-3
Space between opening/risers (m)		4.6	5.8	6.9
Number of opening/risers		13		
Port Diameter(m)		0.5		
Average Depth(m)		5		
Discharge Depth(m)		4		
Discharge Velocity(m/s)		3.92		
Vertical Discharge angle(deg)		22.5		

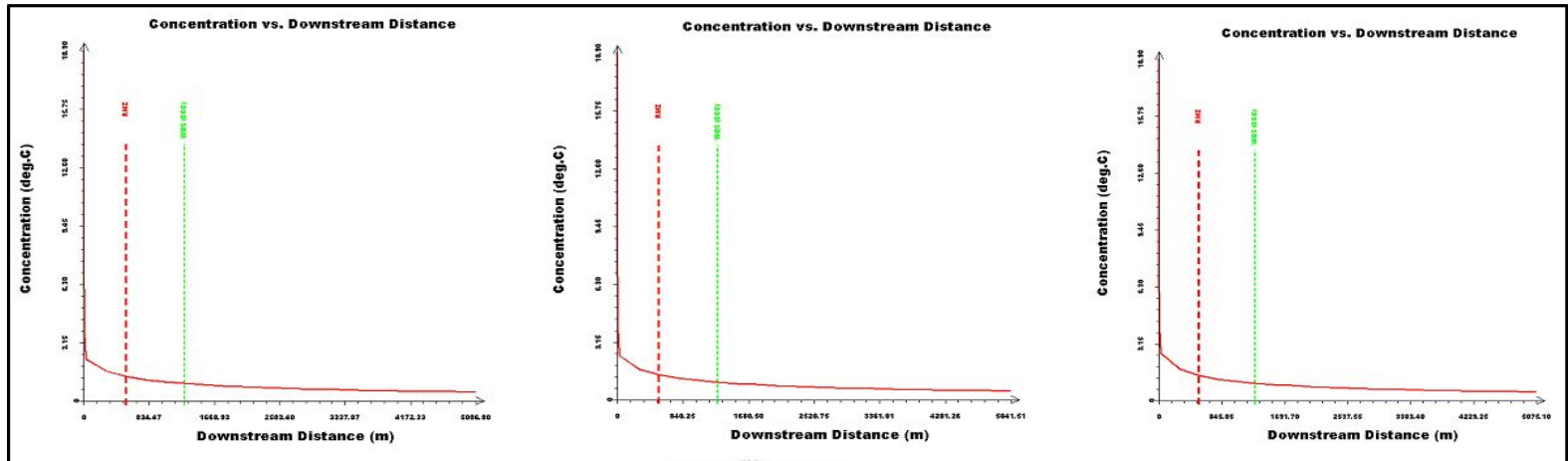


Fig. 5.2 Change of temperature (CASE 1, CASE 1-2, CASE 1-3)

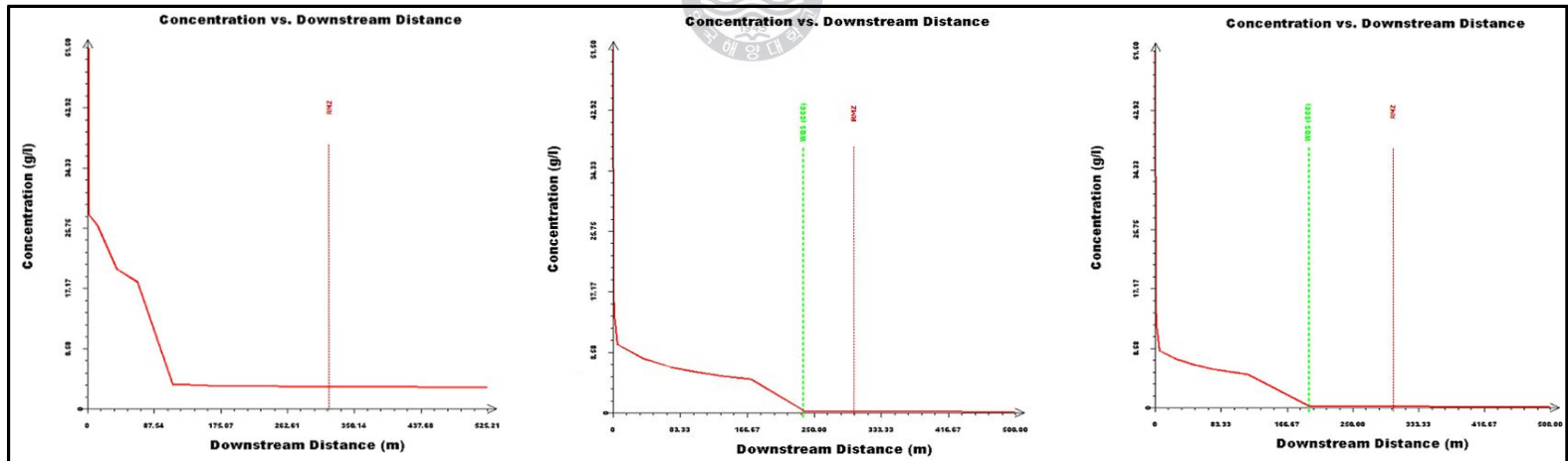


Fig. 5.3 Change of salinity (CASE 1-1, CASE 1-2, CASE 1-3)

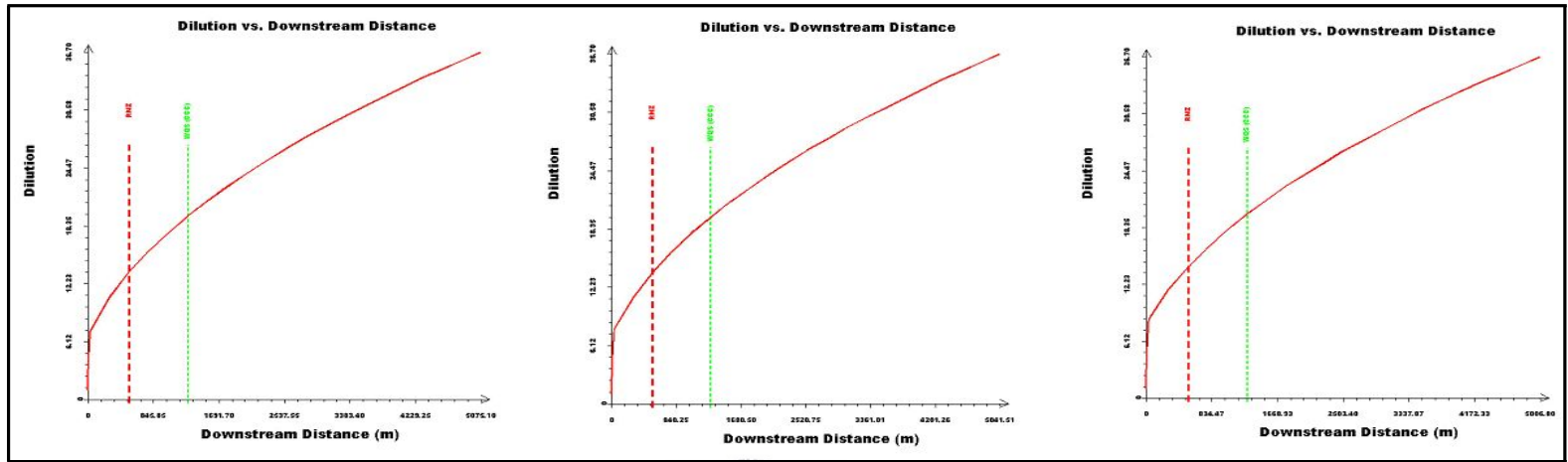


Fig. 5.4 Change of dilution rate (CASE 1-1, CASE 1-2, CASE 1-3)

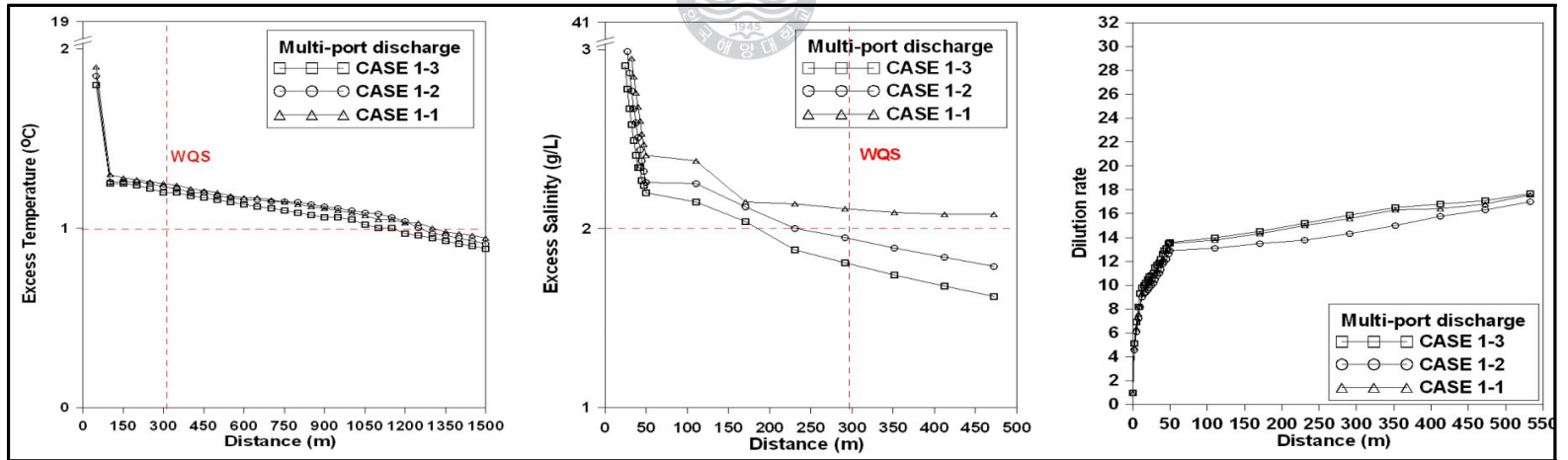


Fig. 5.5 Change of temperature, salinity and dilution rate (CASE 1)

2) CASE 2

CASE 2는 Table 5.6 입력 값을 평균수심 7m인 해역에 확산관 간격을 다음과 같이 변형시켜 수온변화, 염도변화, 희석을 변화 값을 얻었으며, 이를 바탕으로 케이스(CASE 2-1, CASE 2-2, CASE 2-3)별로 수온변화, 염도변화, 희석을 그래프를 나타내었으며 각각의 결과 값을 비교하여 보았다(Fig. 5.6, Fig. 5.7, Fig. 5.8, Fig. 5.9). 그 결과 염도변화중 CASE 2-3을 제외한 모든 케이스별 실험 안이 약간의 차이는 있으나 모두 좋지 않은 결과를 나타내며 WQS(Water Quality Standard)에 만족하지 않는 결과를 보였다.

Table 5.6 Input data for CASE 2

Parameters \ CASE	CASE 2-1	CASE 2-2	CASE 2-3
Space between opening/risers (m)	4.6	5.8	6.9
Number of opening/risers	13		
Port Diameter(m)	0.5		
Average Depth(m)	7		
Discharge Depth(m)	6		
Discharge Velocity(m/s)	3.92		
Vertical Discharge angle(deg)	22.5		

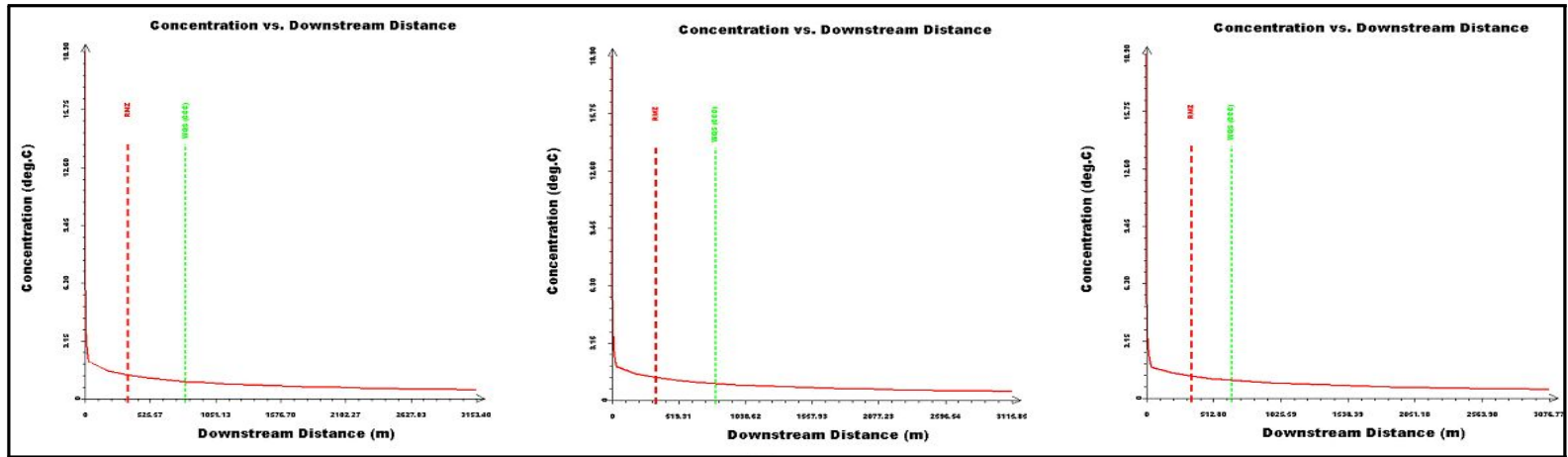


Fig. 5.6 Change of temperature (CASE 2-1, CASE 2-2, CASE 2-3)

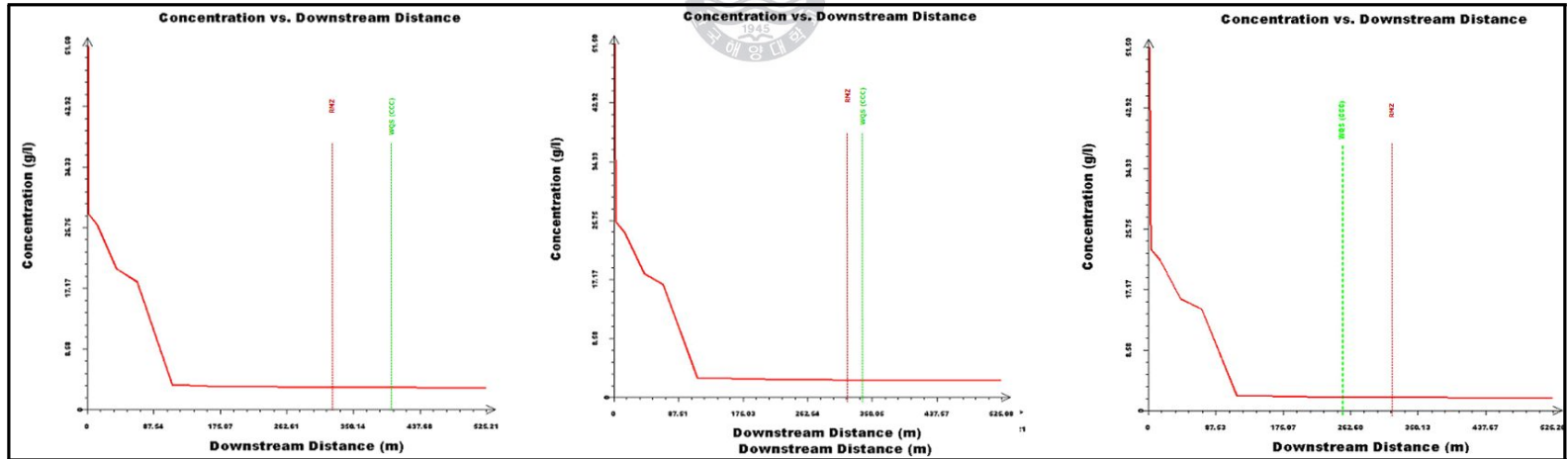


Fig. 5.7 Change of salinity (CASE 2-1, CASE 2-2, CASE 2-3)

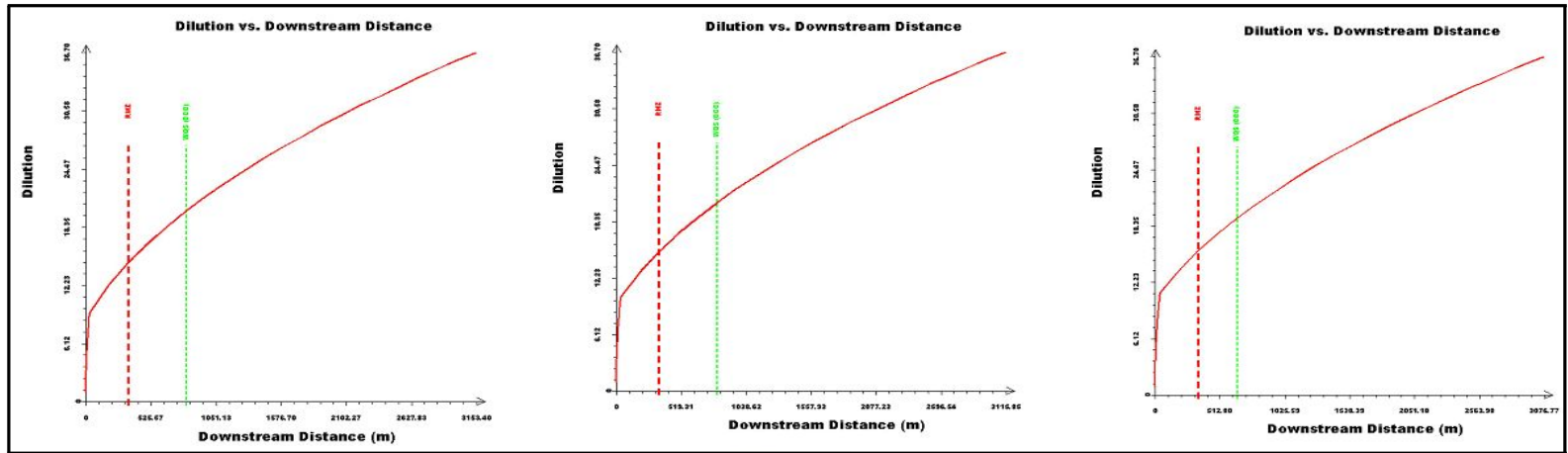


Fig. 5.8 Change of dilution rate (CASE 2-1, CASE 2-2, CASE 2-3)

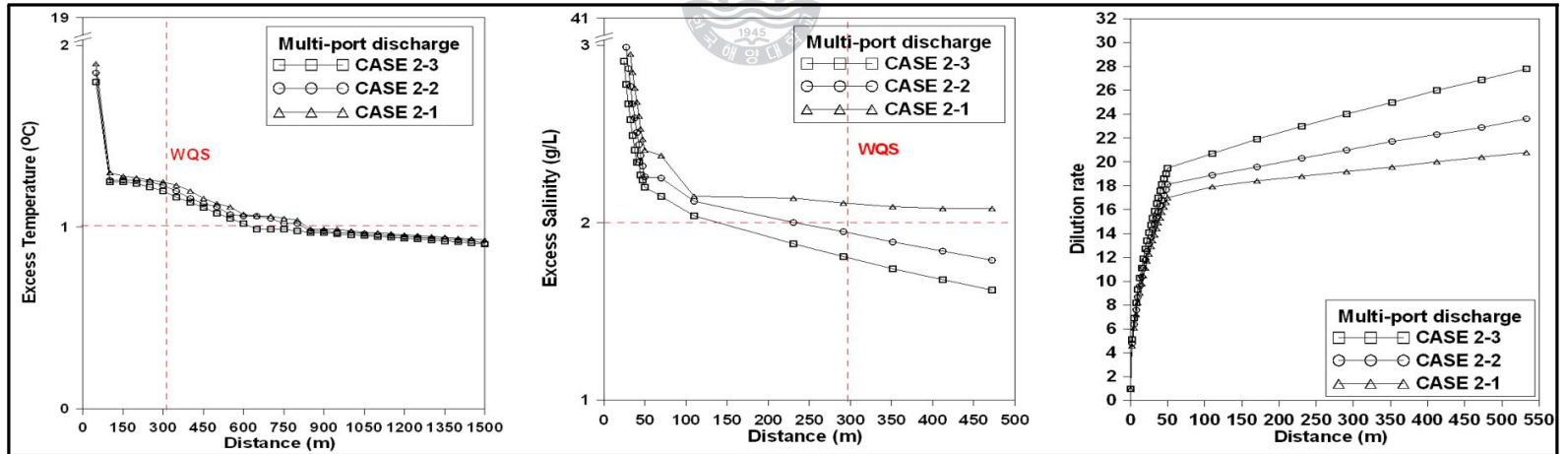


Fig. 5.9 Change of temperature, salinity and dilution rate (CASE 2)

3) CASE 3

CASE 3은 Table 5.7 입력 값을 평균수심 11m인 해역에 확산관 길이를 다 음과 같이 변형시켜 수온변화 ,염도변화 희석률 변화 값을 얻었으며, 이를 바 탕으로 케이스(CASE 3-1, CASE 3-2, CASE 3-3)별로 수온변화, 염도변화, 희석률 그래프를 나타내었으며 각각의 결과 값을 비교하여 보았다(Fig. 5.10, Fig. 5.11, Fig. 5.12, Fig. 5.13). 그 결과 수온변화에서는 CASE 3-1, CASE 3-2, CASE 3-3에서 제한조건 WQS(Water Quality Standard)에 만족하는 결 과를 보였으며, 염도변화도 모든 CASE 3이 좋은 결과를 나타내었다. 희석률 역시 모든 CASE 3가 만족하는 결과를 나타내었다.

Table 5.7 Input data for CASE 3

Parameters	CASE	CASE 3-1	CASE 3-2	CASE 3-3
Space between opening/risers (m)		4.6	5.8	6.9
Number of opening/risers			13	
Port diameter(m)			0.5	
Average Depth(m)			11	
Discharge Depth(m)			10	
Discharge Velocity(m/s)			3.92	
Vertical Discharge angle(deg)			22.5	

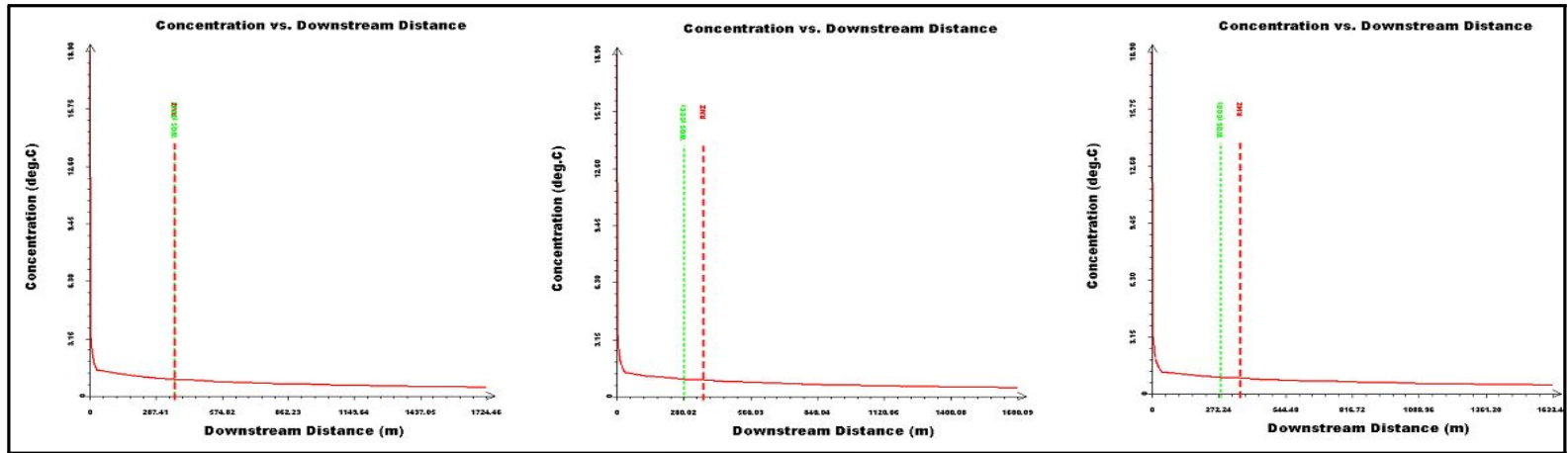


Fig. 5.10 Change of temperature (CASE 3-1, CASE 3-2, CASE 3-3)

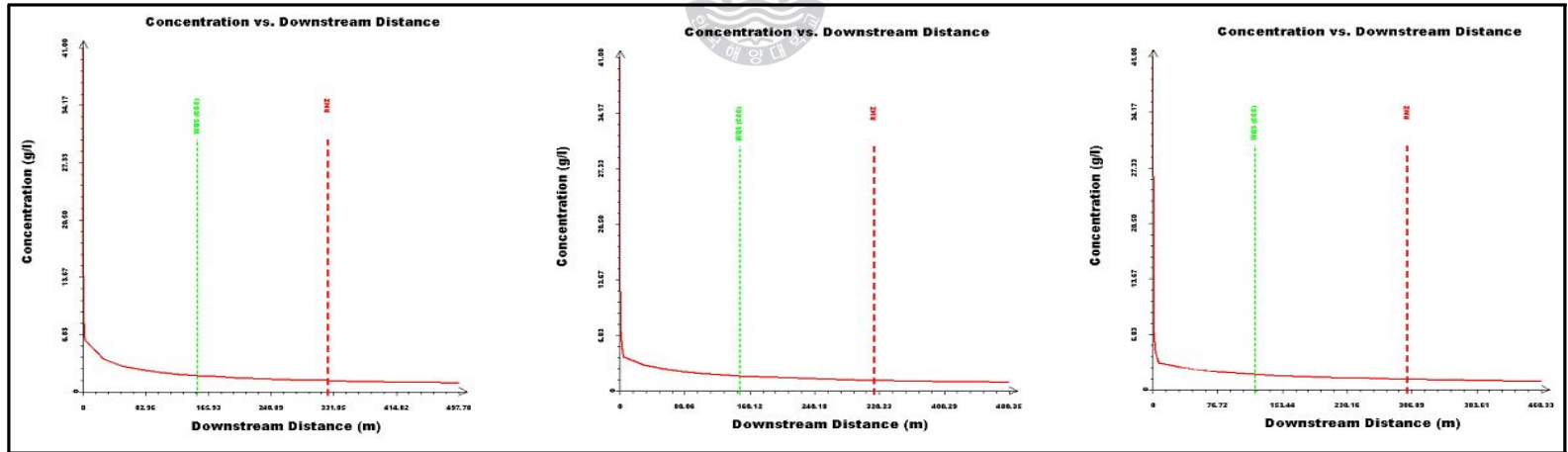


Fig. 5.11 Change of salinity (CASE 3-1, CASE 3-2, CASE 3-3)

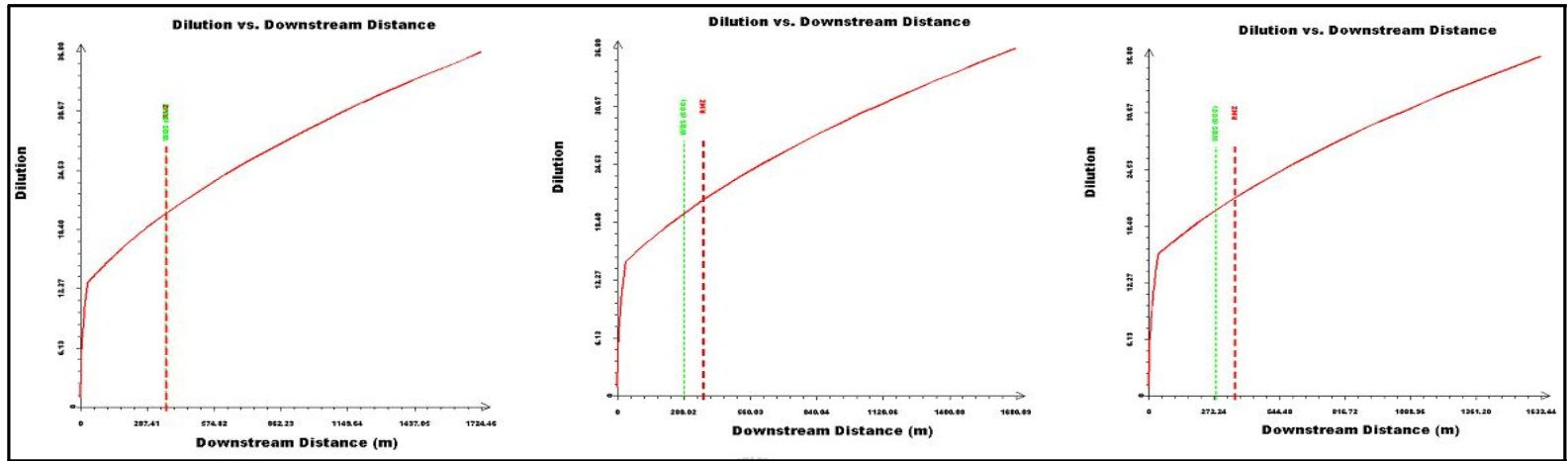


Fig. 5.12 Change of dilution rate (CASE 3-1, CASE 3-2, CASE 3-3)

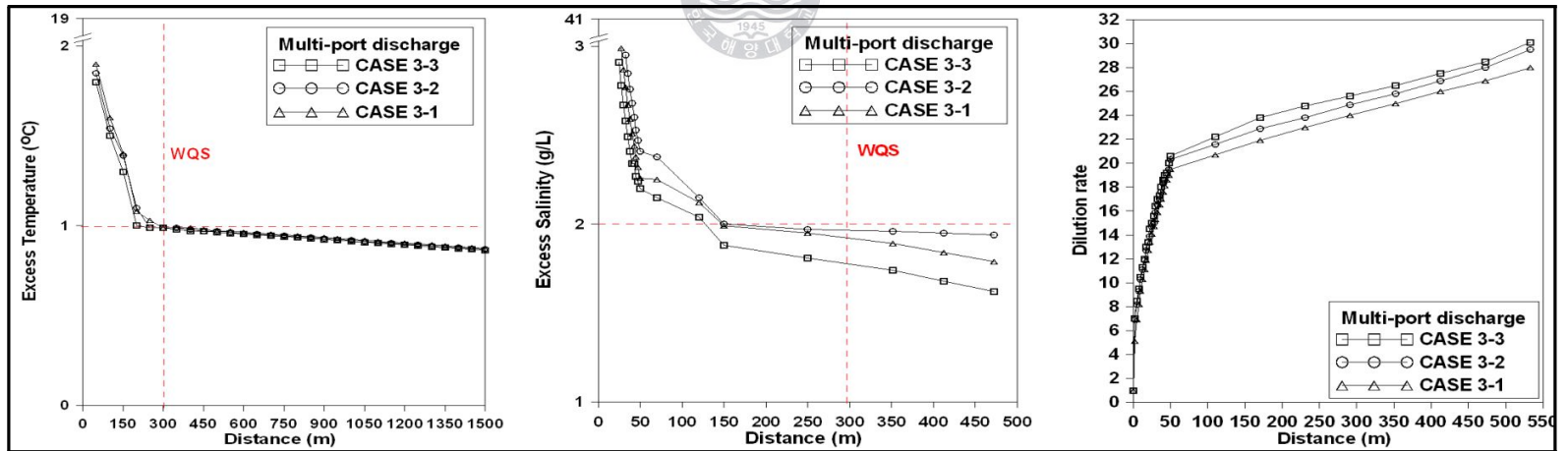


Fig. 5.13 Change of temperature, salinity and dilution rate (CASE 3)

5.4 민감도 분석

방류공 개수, 방류공 각도등 다양한 파라메타의 변화를 조건으로 각 인자별 비교를 방류관 설계의 관점에서 보다 다양한 인자를 선정하여 희석률(dilution), 수온변화(Excess Temperature), 염도변화(Excess Salinity)에 대한 민감도 분석을 시행하였다. 이 중 희석률에 가장 큰 요인을 주는 인자를 찾아 이 요인을 주 변형 파라메타로 실 해역에 적용하여 희석률을 높일 수 있는 이상적인 설계 방안을 제시코자 하였다. 본 민감도 분석에 사용한 입력 데이터는 CASE 3의 기본 데이터를 사용하였다. 유속은 중층 수심의 평균 유속인 0.08m/sec를, 해역의 수온은 수질조사 결과를 바탕으로 해안에서 100m, 1000m에서의 거리별 수심별 변화가 적은 점을 고려하여 전자의 중층 수온인 21.1℃로 성층화현상이 없는 것으로 하였으며, Table 5.4에 제시된 바와 같이, 총 방류량은 36,000m³/hr, 방류수 밀도는 1046.0kg/m³, 방류수 온도는 40℃이다.

방류 형식은 표층방류, 수중 단일방류, 수중 다중방류 이렇게 3가지 형태로 구분하여 수치실험을 실시하였다. 표층방류는 개수로를 사용하여 유출속도는 2.0m/s 가 되게 하였으며, 수중방류시 방류공의 직경은 관의 침식을 방지하고 펌프장의 양정고를 줄이기 위해 방류유속이 3.0m/s 정도가 나타날 수 있도록 선정하였다. 또한 다공확산관에 의한 방류일 경우에 초기희석을 높일 수 있는 수평방류를 원칙으로 하며, 일정한 흐름 방향을 고려하여 일방향확산관 중 공류형확산관을 채택하였다.

1) 표층 방류

Fig. 5.14는 개수로(폭 5m, 깊이 1m)를 통한 표층방류시 영향에 따른 온도 변화, 염도변화, 희석률변화를 나타내고 있다. 입력 자료는 Table 5.8과 같으며, 수질기준으로 설정한 300m 이외에서 1℃ 이상의 온도증가와 2ppt 이상의 염도증가를 보이고 있다. 이러한 불량한 결과는 초기에 희석률을 극대화하지

못하였기 때문에 보인다. 따라서 본 해역에서의 표층 방류 형식은 바람직하지 않은 것으로 사료된다.

Table 5.8 Summary of case study for surface discharge

Parameter	Distance to the bank(m)	Channel width(m)	Channel depth(m)	Discharge velocity (m/sec)	Discharge angle(deg)
Value	0	5	1	2	90

2) 단일확산관 방류

단일확산관 방류에 대한 민감도 분석에 입력 자료는 Table 5.9와 같이 해안에서부터 외해 쪽으로 600m 떨어진 수심 11m 지점에 수중 단일확산관에 의한 방류시 영향을 검토하였다. 단일공에 의한 방류시 영향예측은 방류공 직경에 따른 방류유속의 변화(2.63m/s, 3.18m/s, 3.93m/s)에 따라 수행하였으며, 결과는 Fig. 5.15에 나타내었다. 모든 실험 안에 대하여 기준으로 설정된 300m 이외에서 1℃ 이상의 수온증가가, 2ppt 이상의 염도증가가 나타나고 있다. 희석률에 있어서도 표층방류 보다는 큰 초기 희석률을 보이고 있지만 여전히 부족한 양상을 나타내고 있으며, 방류공 직경이 작을수록 즉, 방류시 유속이 클수록 희석률이 높아진다. 단일공 방류형식은 방류량이 많을 경우에는 초기 희석률이 만족한다 하더라도 주변해역의 유동 양상을 비정상적으로 만들 수 있기 때문에 선호하지 않는 방식이다.

Table 5.9 Summary of case study for discharge of single-port diffuser

Parameters	Port diameter(m)	Distance to the bank(m)	Average depth(m)	Discharge velocity(m/s)	Vertical discharge angle(deg)
Value	1.8	600	11	3.93	15
	2.0	600	11	3.18	15
	2.2	600	11	2.63	15

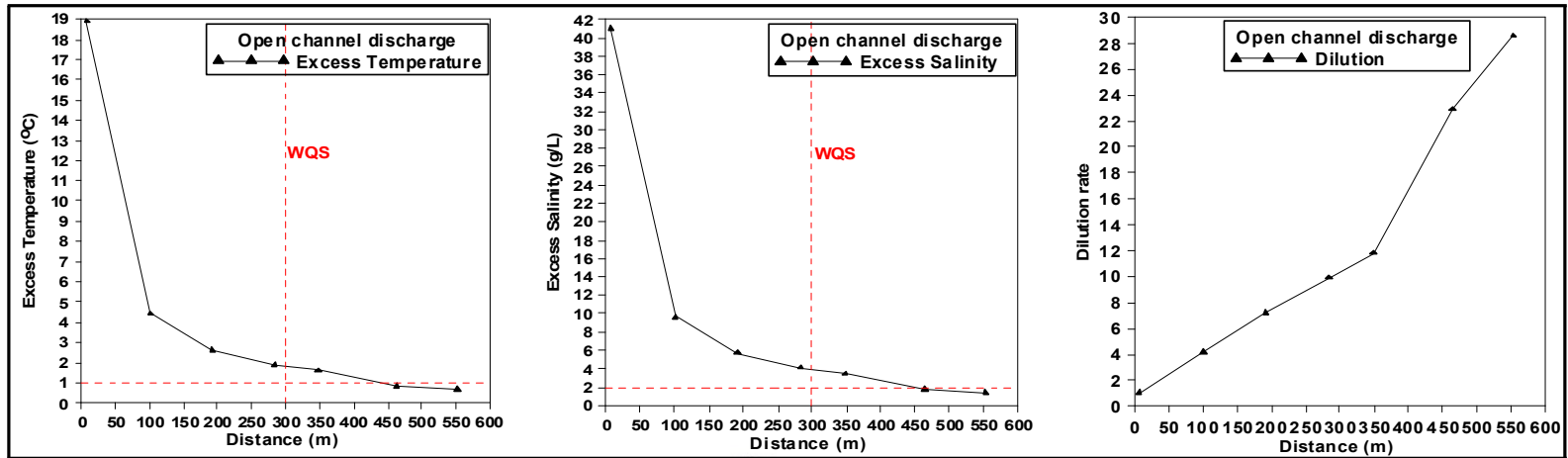


Fig. 5.14 Change of temperature, salinity, dilution rate (surface discharge)

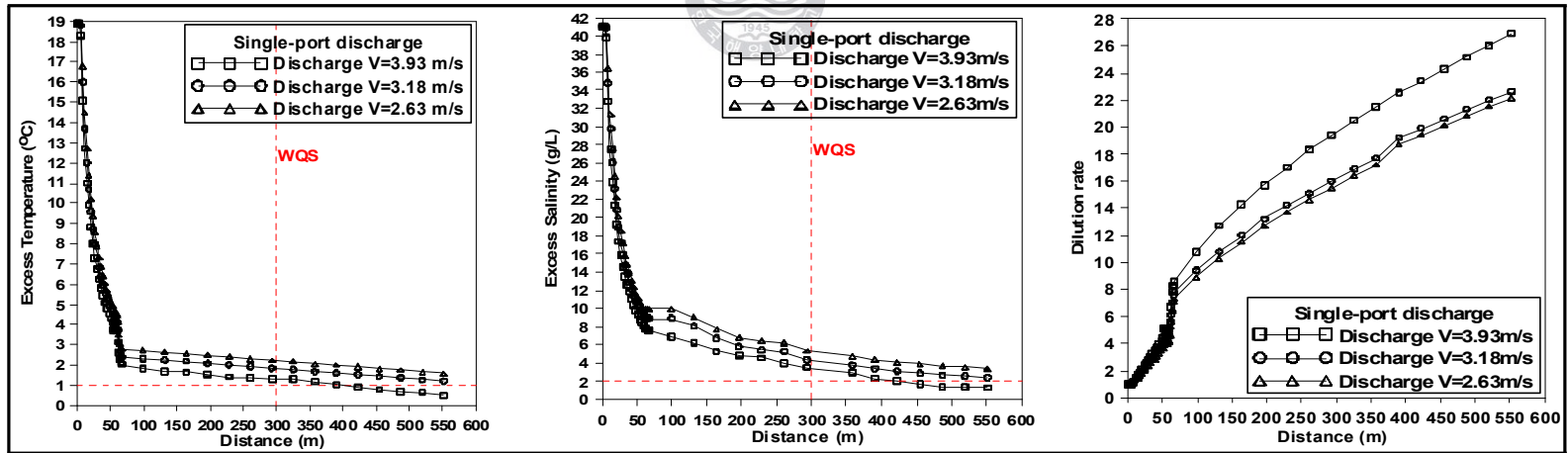


Fig. 5.15 Change of temperature, salinity, dilution rate (single-port discharge)

Table 5.10 Summary of case study for discharge of multi-port diffusers for sensitivity analysis

Parameter CASE & Var.	Port diameter(m)	Diffuser length(m)	Number of risers	Discharge velocity(m/s)	Risers spacing(m)	Vertical discharge angle(deg)
CASE 1 (discharge velocity)	0.45	100	16	3.93	6.67	15
	0.5	100	16	3.18	6.67	15
	0.55	100	16	2.63	6.67	15
CASE 2 (discharge spacing)	0.5	50	16	3.18	3.33	15
	0.5	100	16	3.18	6.67	15
	0.5	150	16	3.18	10.00	15
CASE 3 (discharge angle)	0.5	100	16	3.18	6.67	15
	0.5	100	16	3.18	6.67	30
	0.5	100	16	3.18	6.67	45
	0.5	100	16	3.18	6.67	60
CASE 4 (Number of risers)	0.5	100	16	3.18	6.67	15
	0.5	100	18	2.83	5.88	15
	0.5	100	20	2.55	5.26	15
	0.5	100	22	2.31	4.76	15

3) 다공확산관 방류

해안에서부터 600m 떨어진 동일한 위치에서 다공확산관으로 방류시 영향을 검토하였다. 실험 안은 다공확산관의 조건 중 희석률에 큰 영향을 주는 방류직경 변화에 따른 방류유속(discharge velocity)의 변화(2.63m/s, 3.18m/s, 3.93 m/s), 확산관의 길이(diffuser length)의 변화(50m, 100m, 150m), 방류각도(discharge angle)의 변화(15°, 30°, 45°, 60°), 방류공 개수의 변화(16개, 18개, 20개, 22개)를 조절하여 민감도 분석을 실시하였다. 실험 안별 입력 자료는 Table 5.10 에 정리하였다.

① 초과수온

CASE 1의 경우 방류유속이 3m/s 이상일 경우 기준으로 설정된 300m 이외에서 1°C 이상의 수온증가가 보이지 않고 있다(Fig. 5.16). CASE 2의 경우 전체 확산관의 길이를 100m이상인 경우(각 포트의 간격을 6.67m 이상일 경우) 기준으로 설정된 300m 이외에서 1°C 이상의 수온증가가 나타나지 않고 있다(Fig. 5.17). CASE 3의 경우 수직 방류각도를 15°, 30°, 45°, 60°로 변화시켰을 경우, 기준으로 설정된 300m 외에서 1°C 이상의 수온증가가 나타나지 않고 있다(Fig. 5.18). CASE 4의 경우 방류공 개수를 16, 18, 20개로 했을 경우, 기준으로 설정된 300m 외에서 1°C 이상의 수온증가가 나타나지 않고 있다(Fig. 5.19).

② 초과염도

CASE 1의 경우 방류유속이 3m/s 이상일 경우 기준으로 설정된 300m 이외에서 2ppt 이상의 염도증가가 보이지 않고 있다(Fig. 5.16). CASE 2의 경우 확산관의 길이를 100m이상인 경우(각 포트의 간격을 6.67m 이상일 경우) 기준으로 설정된 300m 이외에서 2ppt 이상의 염도증가가 나타나지 않고 있다(Fig. 5.17). CASE 3의 경우 수직 방류각도를 15°, 30°, 45° 로 변화시켰을 경우, 기준으로 설정된 300m 외에서 2ppt 이상의 염도증가가 나타나지 않고

있다(Fig. 5.18). CASE 4의 경우 방류공 개수를 16, 18, 20개로 했을 경우, 기준으로 설정된 300m 외에서 2ppt 이상의 염도증가가 나타나지 않고 있다(Fig. 5.19).

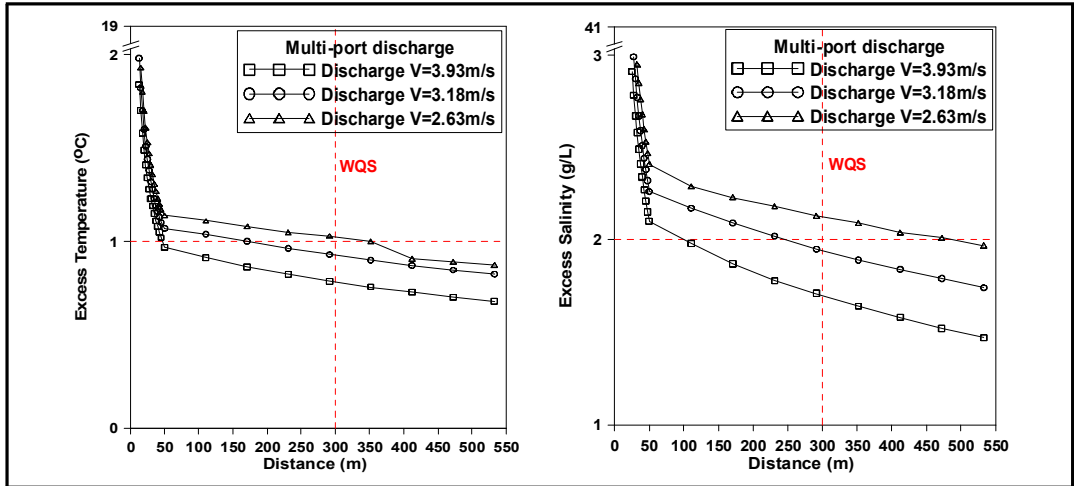


Fig. 5.16 Change of temperature, salinity (CASE 1)

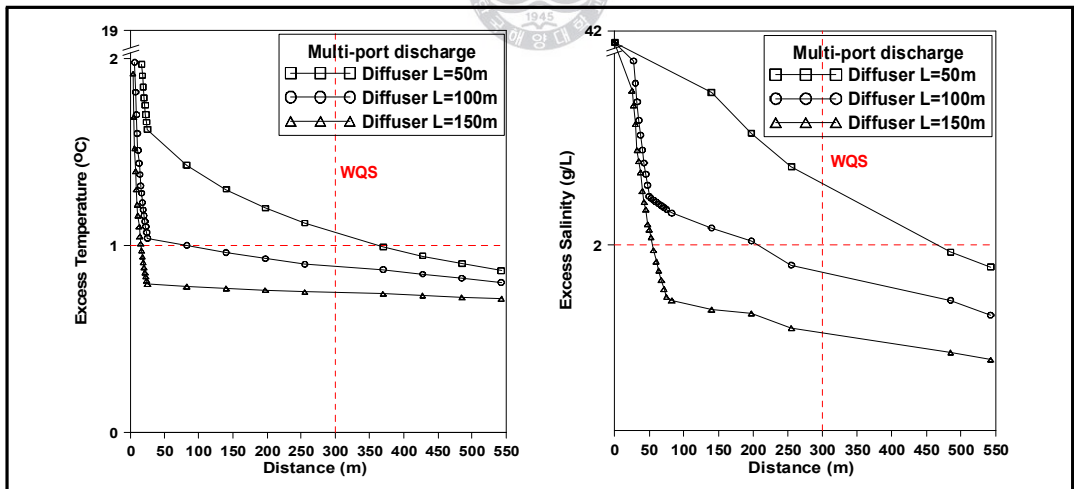


Fig. 5.17 Change of temperature, salinity (CASE 2)

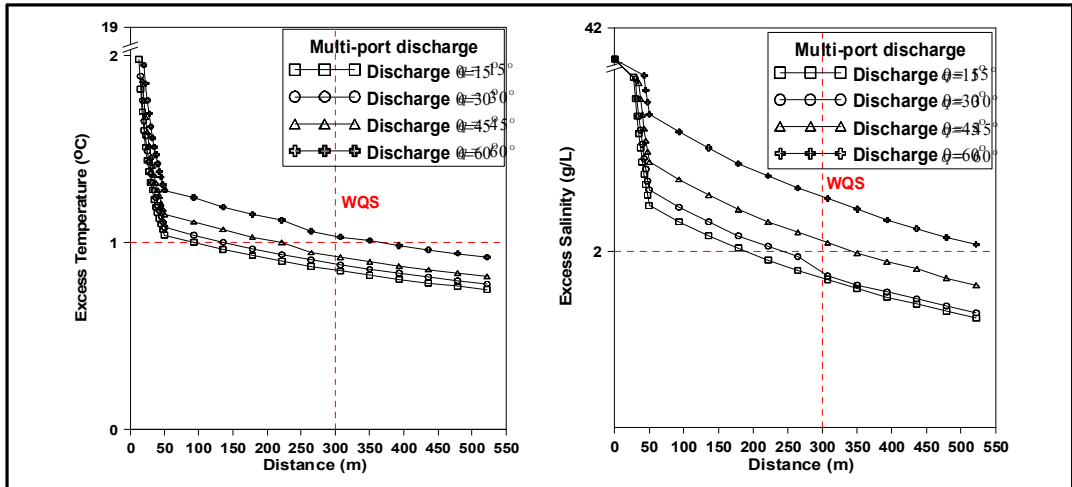


Fig. 5.18 Change of temperature, salinity (CASE 3)

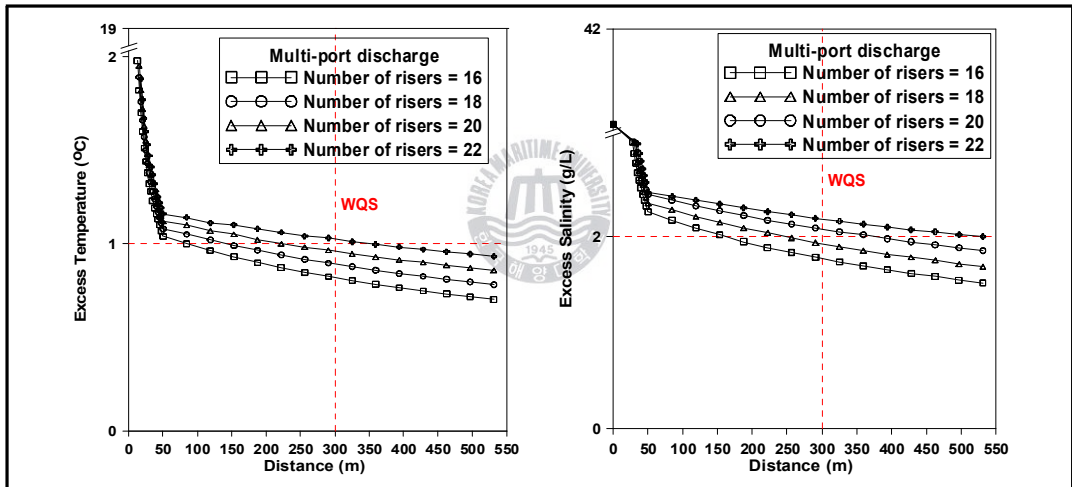


Fig. 5.19 Change of temperature, salinity (CASE 4)

③ 희석률

전체적으로 희석률은 표층방류나 단일확산관 방류에 비해 아주 높은 초기희석률을 나타냈다. CASE 1은 방류유속 변화에 따른 희석률을 나타낸다. 그래프에서 보듯이 방류유속을 증가시킬수록 희석률이 증가됨을 볼 수 있다. CASE 1의 경우에 따르면 방류유속이 커질수록 초기희석률에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. CASE 2는 확산관의 전체 길이 변화에 따른 희석률을 보여주

고 있다. 방류유속을 증가시키는 것보다 확산관의 전체 길이를 늘이는 것이 희석률 증가에 더욱 도움이 되는 것으로 나타났다. 이는 플룸의 중첩현상이 약해져 혼합장의 재유입이 감소하기 때문인 것으로 사료된다(Fig. 5.20). CASE 3은 수직방류각도 변화에 따른 희석률을 보여주고 있다. 그래프에서 보면 방류각도가 15°일때 희석률이 가장 높게 나타났으나, 15°~30°는 희석률의 큰 차이가 없기 때문에 수직 방류각도는 15°~30° 내에서 주변 환경의 조건에 따라 선택하면 문제가 없을 것이라 사료된다. CASE 4는 방류공 개수 변화에 따른 희석률을 보여주고 있다. 방류공의 개수가 증가할수록 희석률은 떨어지는데 이는 개수 증가에 따른 방류유속과 방류공 간격의 감소 때문인 것으로 보인다. 이는 방류공 개수만 증가시킨다고 희석률이 높아지는 것이 아니라 방류유속 및 방류공 간격이 복합적으로 고려되어야 한다는 것을 보여주고 있다(Fig. 5.21).

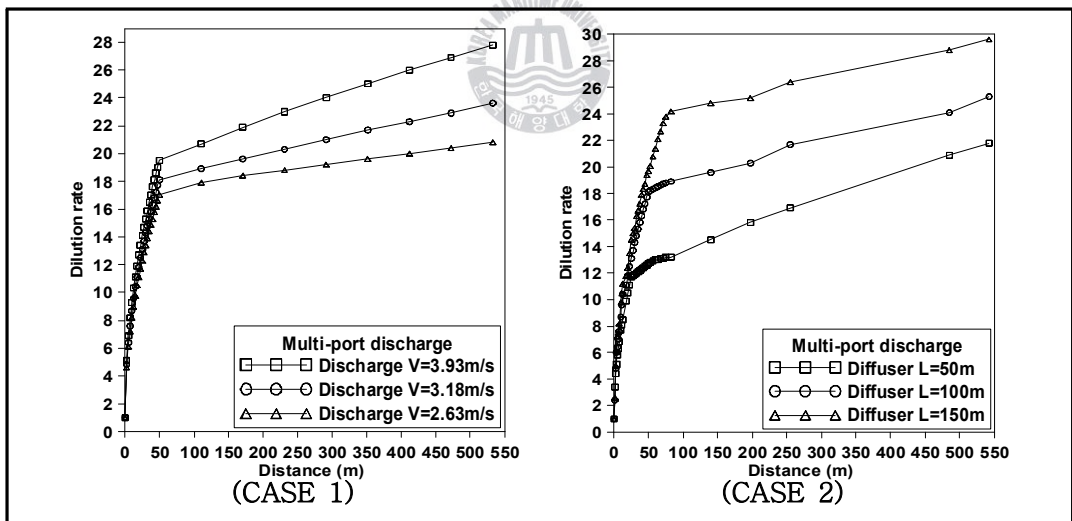


Fig. 5.20 Change of dilution rate (CASE 1, CASE 2)

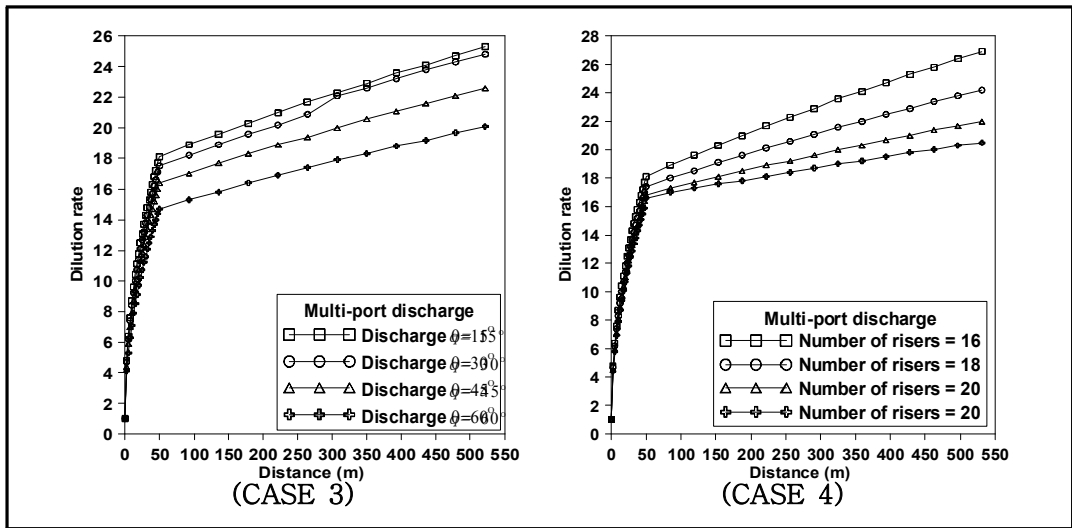


Fig. 5.21 Change of dilution rate (CASE 3, CASE 4))



제 6장 결론

근역혼합특성 및 희석률을 통한 분석결과, 방류수 거동에 미치는 인자는 방류위치, 방류수심, 방류형태별로 차별적인 결과가 나타났다. 상기의 분석결과를 토대로 결과를 요약하면 방류형식에 중 다공확산관에 의한 온·염배수의 방류가 초기희석률이 가장 높게 나타났으며, 법적 수질기준에도 가장 잘 부합하는 것으로 나타났다. 또한, 다공확산관의 각 영향인자별 민감도 분석결과, 확산관의 길이가 희석률에 가장 큰 영향을 주고 방류유속이 두 번째로 큰 영향인자인 것으로 나타났다. 그리고 수직방류각도 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 범위에서는 희석률의 변화가 작으나 30° 보다 크면 희석률이 감소되었다.

다공확산관의 희석률에 큰 영향을 주는 인자 :

- ① 확산관의 길이 - 플룸의 중첩의 최소화 할 수 있는 확산관의 길이 확보
- ② 방류유속 - 3m/s 이상의 방류유속 확보
- ③ 방류각도 - $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 의 방류각도 선정

즉 전체 확산관의 길이는 플룸의 중첩을 최소화 하고 3m/s 이상의 방류유속을 확보하여 주변수와의 연행을 촉진시키고 수직 방류각을 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 범위에서 방류할 수 있게 한다면 가장 희석률을 높일 수 있는 이상적인 설계가 될 것이다.

물론 방류수심이 깊어질수록, 주변의 흐름이 빨라질수록 희석률은 자연스럽게 높아지게 되지만, 이번 연구의 대상지역인 서남아시아 지역은 먼 바다로 나아감에 따라 수심의 변화가 미미하기 때문에 일정 수준의 수심을 확보하려면 아주 긴 도수관이 필요하다.

본 논문의 연구결과는 효과적인 방류관의 설계치를 구하는데 근거로 최적의 온배수·염배수의 방류시스템을 갖출 수 있는 발판을 마련할 계기가 될 것으로

사료된다. 본 실험으로 얻어진 결론은 다음과 같다.

① 온배수의 경우 기준치(regulation)를 만족하는 실험 안은 CASE 3-2, 3-3 이고, 염배수의 경우는 CASE 1-2, 1-3, 2-3, 3-1, 3-2, 3-3 로 이 실험에서 가장 좋은 결과를 나타낸 안은 CASE 3-2, CASE 3-3이다.

② CASE 1과 CASE 2는 유사한 결과를 나타내고 있는데, 이는 적절한 방류 유속과 방류각 확보 시에 방류공 간격이 늘어날수록 수질농도(온도, 염도), 희석률(dilution) 등이 양호한 결과를 나타냄을 알 수 있었으나, 기준치에는 미치지 못하는 것으로 나타났다.

③ CASE 2와 CASE 3을 비교하였을 때 모든 점에서 CASE 3이 양호한 결과를 나타내었다. 이는 방류유속, 도수관길이, 방류각, 방류공간격 이외에도 주변 수의수심 역시 영향을 주는 것을 알 수 있다.

④ 민감도분석 결과와 결론을 종합해 본 결과 방류시스템의 최적설계는 다공확산관에 의한 수중방류의 형의 방류유속, 수직형태로 플룸이 최소화 할 수 있는 충분한 확산관의 길이(충분한 방류공간격), 3m/s 이상방류각 15°~30° 확보와 방류수심이 깊어질수록, 주변의 흐름이 빠를수록 희석률을 높일 수 있는 이상적인 설계가 될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 김강민 (2000), “도시 하수의 해양방류 및 근역혼합 특성 분석”, 한국해양대학교 석사학위 논문
- 김강민, 김지연, 이중우 (1999), “도시하수의 해양방류 및 근역혼합특성 분석”, 한국항만학회 제 13권 제 2호, pp. 129-140.
- 이중우 (1999), "항만계획 및 설계", 한국해양대학교 부설 항만연구소.
- 감대근 (2000), “수중다공확산관에서 방류된 온배수의 혼합거동 해석”, 서울대학교 박사학위논문
- 김지연 (2001), “해양방류 시스템의 최적설계에 관한 연구“, 한국해양대학교 박사학위 논문
- 김홍제 (1997), “수중다공확산관에 의한 온배수 혼합특성”, 서울대학교 석사학위 논문.
- 서일원, 김대근, 김홍식 (1996), “수중다공확산관에 의한 온배수 혼합 특성”, 대한토목학회 학술발표회 논문집 pp. 99-103.
- 서일원, 이재형, 김대근, 김홍식 (1996), “원자력발전소 온배수 방류시스템 설계기법 개발을 위한 연구”, 기초전력 공학공동 연구소, 서울대학교.
- 서일원, 김대근, 김홍식 (1997), “수중다공확산관에 의해 방류된 온배수혼합에 관한 실험적 연구”. 대한토목학회 발표회 논문집 17(II-4), pp. 335-346.
- 안상준 (1998), “CORMIX 모형을 이용한 수중방류의 해석”, 한남대학교 석사학위 논문.
- 이재형, 서일원 (1996), "수중다공확산관에 의해 방류된 온수의 확산거동 예측", 대한토목학회논문집, 16(3), pp. 281-290.
- 정태성 (1994), “연안 해수유동 및 온배수 확산에 관한 3차원 수치모형”, 서울대학교 박사학위 논문.
- 정태성, 안상준 (1997), “저층방류 온배수의 확산 해석”, 대한토목학회 학술발표회 논문집 pp. 107-110.

정태성, 이길성 (1994), “3차원 수치모형에 의한 표면온배수 확산의 수치해석“, 대한토목학회논문집 14(6), pp. 1385-1394.

한국전력기술주식회사 (2007), “신고리 3,4호기 심층취배수 구조물 배치 및 구조형식 기술검토보고서”

해양수산부(2008), “해양생태계 보전을 위한 온배수 관리방안 연구 최종보고서”.

Adams, E.E. and Harleman, D. and Jirka, G., and Stolzenbach, K. (1981), “Heat Disposal in the Water Environment-Surface Heat Exchange Coefficient”, Course Notes, R.M. Parsons Laboratory, Massachusetts Institute of Technology.

Adams, E.E. (1987), “Predicting circulation and dispersion near coastal power plants: Applications using models TEA and ELA”, Energy Laboratory Report No. MIT-EL 87-008.

Albertson, M.L., Dai, Y.B., Jensen, R.A. and Rouse, H., (1950), Diffusion of submerged jets, Trans. ASCE 115, pp. 637-697.

Brooks, N.H. and Koh, R.C.Y. (1965), Discharge of sewage effluent from a line source into a stratified ocean, Eleventh international congress, International association for hydraulic research, leningrad, soviet Union.

Cederwall, K. (1971), Buoyant slot jets into stagnant or flowing environments. W.M. Keck Lab. for water resources and hydraulics, Report no. KH-R-25, California institute of technology.

Fan, L.N. and Brooks, N.H. (1969), Numerical solutions of turbulent buoyant jet problems, W. M. Keck laboratory of hydraulics & water resources, California institute of technology, Pasadena, Report KHR-18.

Fox, D. (1970), Forced plume in a stratified fluid., journal of geophysical research, vol. 75, no. 33, pp. 6818-6835.

James, A. (1993), An introduction to water quality modelling, department of civil engineering university of newcastle upon tyne, UK.

James, A. (1993), An introduction to water quality modelling (second edition), department of civil engineering university of newcastle upon tyne, UK.

Jirka, G.H., and Harleman, D.R.F. (1979), Stability and mixing of a vertical plane buoyant jet in confined depth, J. Fluid Mech., vol. 94, no. 2, pp. 275-304.

Jirka, G.H. and Adams, E.E. (1981), "Buoyant surface jets", J.of Hydraulics Division, ASCE, 107(HY11), pp. 1467-1487.

Robert L.Donker and Gerhard H.Jiraka, CORMIX USER MANUAL

Robert, L. Doneker. and Gerhard, H. jirka (2007), "A Hydrodynamic Mixing zone Model and Decision Support System for Pollutant Discharges into Surface Waters", DeFrees Hydraulics Laboratory School of Civil and Environmental Engineering Cornell University Ithaca, New York 14853-3501.

Stolzenbach, K.D., Adams, E.E. and Harleman, D.R.F. (1972), A User's manual for three-dimensional heated surface discharge computations report no. 156, New Jersey.



Williams, J. (1979), Introduction to marine pollution control, A Wiley-interscience Publication.

Wood, I.R., Bell, R.G. and Wilkinson, R.G. (1993), Ocean disposal of wastewater.

감사의 글

어느덧 시간이 흘러 졸업의 앞두고 이 글을 적는 저 자신을 돌아보며 조그마한 결실을 맺기까지 저에게 많은 조언과 도움을 주신 분들에게 지면을 통해서나마 감사의 마음을 전하고자 합니다.

먼저, 부족한 제가 여기까지 올 수 있도록 열(熱)과 성(誠)의 다하여 학문적, 인간적 길로 이끌어주신 존경하는 스승님 이중우 교수님께 깊이 감사드립니다. 아울러 학부생 때부터 항상 많은 조언과 도움을 주신 김인수 교수님, 김태형 교수님, 김도삼 교수님, 국승기 교수님, 경갑수 교수님, 김태형 교수님과 향만학회 정태권 교수님께도 감사드립니다.

멀리서나마 따뜻한 격려와 관심 가져주신 양상용 선배님, 신승호 선배님, 정대득 선배님, 김한필 선배님, 김지연 선배님, 허명규 선배님, 강석진 선배님, 박동진 선배님, 김지연 선배님, 김상호 선배님께 감사드리며, 항상 가까이서 보살피고 아껴주신 강민형, 이호형, 지훈형, 도경형, 성환형, 지훈형, 우철형, 학승형, 호동형, 동호형, 훈이형, 민수형, 언제나 바른길로 이끌어주신 방장 동훈형과 재현형, 존경하는 향만 엘리트 승철형, 학교생활 이외에도 제 삶에서 그 누구보다 많은 도움을 주셨던 대장 기담형, 잘생긴 동기 남박사 기대, 항상 고생 많은 박사갈 상길이, 오랜 기간 동안 막내로 잘따라와준 규광이와 존경하는 많은 향만연구실 선·후배님들에게도 감사의 말을 올립니다.

학교생활에 활력이 불어넣어준 친절한 은아 와 상냥한 유나, 현탁이형, 진은이형, 토질 황박사님, 항상 영양을 챙겨주시던 중호형, 사랑하는 용수형, 열혈남아 창교형, 재하형, 상훈형, 원재형, 동대형, 종태형, 신이형, 태윤형, 윤석형, 중호형, 현기, 남우, 영준, 진호, 선옥이, 진우, 꽃미현이, 종엽, 소연, 종성, 양록 언급하지 못한 많은 선·후배님들에게도 감사의 인사를 전합니다.

앞으로도 오랫동안 함께할 권, 동인, 병우, 경호, 종길, 도관, 철남, 지현, 병윤, 경진, 창훈, 소연, 인혜, David St. Fam. 밴쿠버 만인의 연인 민영, 허장이 태희, 문구, 영철, 경배, 은정, 경하, 효진, 원기용, 아직도 한국이름이 낯선 C'est La Vie 승용형, 성현형, 정희, 정원, 성민, 용택, 영국에 있을 영민, 도훈, 정곤, 주혁, 지현누나, 내생에 최고의 선생 Julian, 언제나 함께 했던 희식이, Fots 무주No.1 경수형, 영은누나, 재욱형, 영수형, 인환형, 윤영형, 태연이, 송학, 민호, 리수에게도 이 기쁨을 전하고 싶습니다.

언제나 저를 부족함 없이 넘치는 사랑으로 키워주신 존경하는 아버지, 사랑하는 어머니, 우리 집 김공주, 항상 반갑게 맞이해주던 내딸 Psyche와 저희 가족을 보살펴주시는 하나님 아버지께 깊이 감사드립니다. 마지막으로 존재만으로도 언제나 힘이 되어준 사랑하는 여자친구 수민이에게 고맙다는 말을 전하며 글을 마칠까 합니다.

2010년 2월, 어쩌면 제 삶속에서 가장 값진 시간일지도 모를 그 시간대에서 인연이란 이름으로 함께 웃고, 울며, 도와준 많은 분들을 잠시나마 떠올리며 이 논문을 바칩니다.