

수온 변화의 영향을 고려한 방류관 플룸의 혼합역 분석

김지연* · 이종우**

* 한국해양대학교 산업기술연구소 객원연구원,

** 한국해양대학교 토목환경시스템공학부 교수

Mixing Zone Analysis on Outfall Plume considering Influence of Temperature Variation

Ji-Yeon Kim* · Joong-Woo Lee**

*Research Institute of Industrial Technology, Busan 606-791, Korea

** Division of Civil and Environmental System Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요 약 : 연안에서 대규모 항만개발이 단계적으로 진행되고 항만 부근역에서의 인구가 더욱 더 증가되면서 항만의 오폐수 및 도시하수의 처리방안에 대한 문제가 관심을 끌고 있다. 오폐수를 1차 또는 2차 처리한 후 수중 방류관을 통해 해안이나 심해 또는 그 중간지점에서 방류하는데, 오폐수가 방류되면 주변 해수를 연행하여 플룸, 제트 또는 부양성 제트의 형태로 해수면까지 상승하면서 크게 희석된다. 본 연구는 효율적인 해양방류시스템의 설계시 간과되어온 계절적, 공간적인 해수온도의 변화에 따른 플룸의 거동 및 희석 특성에의 영향을 다루고자 한다. 방류수의 수온 뿐 아니라 방류지점의 계절적 주변수의 온도변화를 고려하여 CORMIX-GI를 적용하였다. 결과를 방류수의 혼합역 특성을 평가하는데 사용시에는 주의하여야 한다. 이 연구가 방류관의 효율적 운영, 바람직한 방류관의 설계, 수질보호, 발전소의 온배수 방류문제 등에 도움이 되기를 바란다.

핵심용어 : 방류관, 해양방류, 코넬 혼합역 전문가 시스템, 초기희석, 혼합 특성

Abstract : As a large scale port development in coastal waters proceeds step by step and populations in the vicinity of port are getting increased, the issue on "how to dispose the treated municipal water and wastewater in harbor" brings peoples' concern. The submarine outfall system discharges the primary or secondary treated effluent at the coastline or in deep water, or between these two. The effluent, which has a density similar to that of fresh water, rises to the sea surface forming plume or jet, together with entraining the surrounding sea water and becomes very dilute. We intended in this paper to investigate the impact on dilution of effluent and the behavior of flume under the conditions of the seasonal and spatial temperature variations, which have not been noticeable in designing effective marine outfall system. To predict and analyze the behaviour and dilution characteristics of plume not just with the effluent temperature, but also with the seasonal variation of temperature of surround water, CORMIX(Cornell Mixing Zone Expert System)-GI have been applied. The results should be used with caution in evaluation the mixing zone characteristics of discharged water. We hope to help for the effective operation of outfall system, probable outfall design, protection of water quality, and warm water discharges from a power plant, etc.

Key words : Outfall, Ocean discharge, CORMIX(Cornell Mixing Zone Expert System) Initial dilution, Mixing characteristics

1. 서 론

1.1 연구의 목적

부산, 인천, 마산 등 기존의 대규모 항만에서 연안개발의 가속화로 인해 광범위한 해양오염이 발생되고 있으며 항만주변부의 오폐수 및 약 22,072,000(톤/일)에 이르는 육지로부터의 도시하수(국립환경연구원, 1996)가 그 중요한 원인이 되고 있다.

오폐수 방류에 기인하는 해양오염의 최소화를 위해서는 방류와 관련된 예측, 설비 및 설계, 관리 및 운용 등에 관한 체계적인 연구가 시급하다.

해양방류시스템의 기본철학과 기준은 Fisher(1979)

Brooks & Koh(1975)등의 연구에서 광범위하게 다루어져 왔고, 90년대 후반 이후 국내의 연구도 이루어 지고 있다. 마산하수처리장의 하수확산관의 근역혼합특성에 대한 연구로는 강등(2000) 등이 있으며, 장파나 밀도성층화 등 현실적인 인자를 방류수와 주변수와의 혼합이 이루어진 직후부터 일컫는 플룸(plume)의 상승이나 초기희석 문제에 도입하는 문제 등에 대해서도 권 및 이(1997) 등이 연구하였다.

온배수 및 적절히 처리된 하수를 해양으로 방류하여 희석시키는 방법(Harleman and Stolzenbach, 1972, Koh and Brooks, 1975)은 1960년대부터 미국 등 선진국을 중심으로 많은 연구와 적용이 이루어져왔으며 국내에서는 발전소의 온배수 방류에 관해서는 정(1992)이 연구하였다. 수중다공확산관에 관하여는 김(1997) 등이 연구하였으며 특히 정(1992)은 성층화에 따

* 대표저자 : 김지연(중신회원), yeonna@kornet.net 051)410-4981

** 중신회원, jwlee@hanara.hhu.ac.kr 051)410-4461

른 연직 확산계수의 시공간적 분포가 고려되어야 하며 대상이 된 고리발전소의 지역특성상 조류방향에 따른 제트의 확산의 양상이 변화함으로써 다양한 난류모형이 필요하다고 하였다. 김 (2001, 2002)은 방류관 방류인자별 민감도분석 및 방류관 최적 설계에 관해 모의하였다.

본 연구는 효율적 해양방류관 설계를 위한 방류수의 거동 및 희석 특성의 예측시 기존의 연구에서 간과되어온 해수온도 문제를 다루고자 한다. 방류수의 수온 뿐아니라 방류지점의 계절적, 공간적 해수온도 변화를 고려함으로써 방류관의 효율적 운영, 바람직한 방류관의 설계, 수질보호, 발전소의 온배수 방류문제 등에 도움을 주고자 한다. 엘니뇨 등과 같은 기상학적 수온 증가가 전세계의 해양에서 확인되는 바, 연안의 수온 변화는 오페수 방류관을 통한 방류수의 방류특성에도 영향을 미치게 되어, 방류지점을 중심으로 오페수 방류관 혹은 온배수 방류관 주변 해역이 충분히 희석되지 않을 경우에 해역의 수질환경에 더욱 악영향을 미치며 국지적이긴 하지만 수온에 민감한 생물군에 영향을 주어 연안 생태계에 영향을 줄 수도 있다. 따라서 수온이 방류수의 초기혼합의 과정에 미치는 영향을 충분히 고려하여 주어진 주변수 조건 및 방류수 조건 하에서 최적의 방류시스템을 설계 및 운영하는데 도입해야 할 것이다.

1.2 연구의 방법

임해 발전소에서 냉각수로 사용한 후에 방출하는 온배수는 주변 해수온도를 상승시켜 연안 수질환경 및 생태계에 영향을 끼칠 뿐 아니라 오페수와 달리 대부분 표층방류의 형태를 취하기 때문에 경우에 따라서 초기희석이 거의 이루어지지 않고 원역까지 일정온도의 온배수가 영향을 미칠 수도 있다. 발전소의 온배수 뿐 아니라 확산관을 통한 오페수도 관로를 통해서 거의 수온이 유지되는 상태로 방류지점에 투기되기 때문에 온배수 정도의 온도차는 아니지만 대기에 비해 항온성이 큰 해수는 계절에 따라 방류수와 방류지점의 주변수와 어느 정도의 수온 차이가 나타난다. 어느 경우이건 방류수는 주변해수 유동, 배출된 온배수 혹은 오페수와 주변수 사이의 온도차, 밀도차 등에 의한 밀도류, 난류 확산 등의 복합작용에 의해 희석 및 혼합의 양상이 달라진다.

본 연구는 방류수의 거동을 파악하기 위해 최근에 개발된 CORMIX(Cornell mixing zone Expert system)-GI를 사용하였으며 실험대상은 이전의 연구(김, 2001) 대상지점인 부산의 감천항 하수처리장 인접해역으로 하였다. 계절별 수온변화, 방류수 온도의 변화 등을 실험에 도입하여 방류수의 거동 특성 및 희석 변화를 살펴봄으로써 실험결과를 도출하고자 하였다. 적용 대상지의 방류 확산관의 제원은 부산 중앙하수처리장 및 방류 시스템의 관련 보고서, 실시설계 보고서 등을 참조하였으며, 감천 주변해역의 해양학적 특성인 동적 요소 및 수질환경의 현황을 파악하기 위하여 관측기록, 연구문헌 등을 참조하였다(부산지방해운항만청(1995), 해양수산부(1997)).

2. 기초이론

2.1 난류제트 이론

오페수가 방류확산관을 통해 방류되면 혼합단계, 이송단계, 난류확산 및 이류로 이어지는 세 단계의 난류혼합을 거치는데 초기에는 운동량과 온도차 혹은 밀도차에 의해 거동이 지배되는 부양성 제트(buoyant jet)로 떠오르면서 주변수를 연행(entrainment)하거나 주변수 밀도 성층화가 충분할 경우 밀도 약층에서 희석된다.

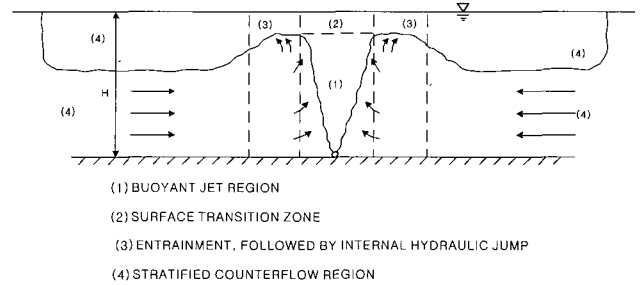


Fig. 1 Postulated a two dimensional flow field induced at the center of diffuser in a stagnant ambient fluid (Jirka and Halman, 1979)

이후 조류에 의해 역학적으로 수동적인 난류확산 및 이류의 과정이 따른다. Fig. 1은 정체된 주변수 조건하에서 방류수의 흐름을 나타낸 것이다.

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 부력효과, 밀도성층화, 조류효과, 주변난류, 제트간섭 등의 환경조건들이 고려되어야한다.

다공확산관을 통하여 방류된 오염물질의 속도 및 농도분포는 일반적으로 운동량과 부력의 상호관계로부터 운동량이 지배적인 근역(near field), 즉 흐름발달영역과 부력이 지배적인 원역(far field), 즉 흐름확립영역으로 나누어진다. 두 영역 간의 경계를 명확히 정의하기는 어려우며, 흐름발달영역 끝은 대략 중심선의 유속이 영이 되는 지점까지로 본다(Brooks, 1960).

2.2 수중다공확산관 이론

천이구간(transition zone)에서의 유속분포는 각각의 원형 제트의 유속을 선형적으로 중첩하여 표현할 수 있는 것으로 알려져 있다. Fig. 2는 각각의 방류공으로부터 방류되는 원형 제트가 천이구간에서 유속이 중첩되는 과정을 도시한 것이다.

경계의 영향을 받지 않는 확산관 내측의 유속분포는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$u(x, y, z) = U(z) \frac{\exp(-y_b^2) \sum_{n=0}^{+\infty} \exp\left\{-\left(\frac{x_l+n}{b_l}\right)^2\right\}}{\sum_{n=0}^{+\infty} \exp\left\{-\left(\frac{n}{b}\right)^2\right\}} \quad (1)$$

여기서, $y_b=y/b$, $x_l=x/l$, $b_l=x/l$ 이며 n 은 방류공의 개수이다. 농도장의 유속분포는 식(1)에 대신 $b_l(=lb)$ 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 원형제트로부터 축방향 대칭의 유속분포를 가지며, $b/l \gg 1$ 일 경우는 슬롯제트와 같은 2차원 유속분포를 가진다. 다공확산관의 경우에 초기방류지점에서 일정거리까지 각각의 방류공에서 방류되는 제트는 독립적인 원형제트의 거동을 보이나 천이구간 이후부터는 제트들이 병합하면서 2차원 슬롯제트(slot jet)와 유사한 형태를 보인다.

2.3 근역혼합

성층의 영향으로 자체의 부력에 의해서 난류가 쇠약해지는 지점을 초기근역혼합역(initial mixing zone, hydrodynamic mixing zone)으로 정의하며 이 때 희석을 초기희석이라고 한다. 초기희석에 대한 정확한 예측은 방류관 모델의 실험에 있어서 가장 중요한 단계가 된다. 방류된 제트는 주변수와의 유속차에 따른 전단난류확산으로 인해 주변수와의 연행을 야기하면서 제트의 폭은 증가되고 제트의 유속 및 농도는 감소된다. 제트는 부력 및 방류각 등에 따라 수표면을 향하게 되며 해수면을 따라서 횡방향으로 이송 및 확산이 일어난다. 이 때 흐름의 안정성이 희석률에 영향을 미치며, 흐름이 불안정할 경우에는 혼합수가 다시 제트에 재유입되기도 하며 이는 초기희석률의 감소를 초래한다.

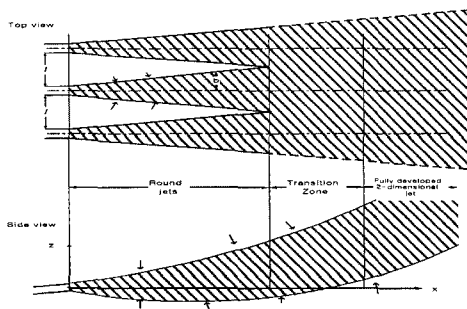


Fig. 2 Jets merging from the unidirectional diffuser

$$R = \frac{\text{dilution of the multiport diffuser}}{\text{dilution of the equivalent slot diffuser}} = 0.95 \quad (2)$$

Cederwall(1971)은 식(2)와 같이 다공확산관과 등슬롯확산관의 평균희석률을 비교하여 완전제트는 0.95, 완전플룸(plume)의 경우에는 R 이 0.78임을 밝혔다. 이는 해석의 용이함을 위해 다공확산관을 등슬롯확산관의 개념으로 보아도 크게 무리가 없음을 의미한다.

3. 실험 및 분석

해수유동의 변화와 처리수의 방류에 따른 확산을 확인하기 위해 최근의 CORMIX 관련연구 등을 토대로 하여 본 연구의 주관심사인 방류수 온도와 주변수 온도와의 관계, 주변수 온도성층화의 효과 등을 알아보았다. 이전 연구(김, 2001, 2002)를 근거로 하여 중앙하수처리장 건립예정지인 부산 감천 해역을 대상으로 실험을 수행하였다.(Fig 3).

3.1 실험조건

본 연구에 사용하는 자료는 이미 설치되어 있는 부산시 중앙하수처리장을 근거로 하였으며 Table 1과 같다.

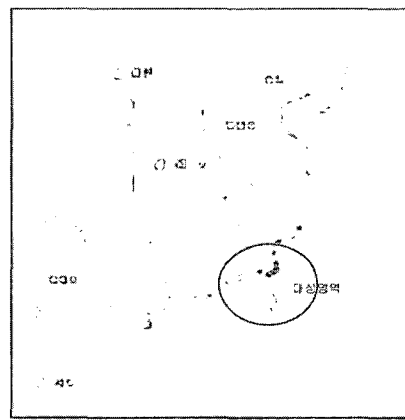


Fig. 3 Location of Gamchon site

Table 1 Summary of input data

Classification	Gamchon
Analysis situation	unbounded
Average depth H_A	15m
Discharge depth H_D	14.2m
Diffuser Length	200m
Friction value Darcy-Weisbach f	0.025
Wind speed u_w	2m/sec
Distance from the shore to the diffuser	c1: 350m c2: 550m
Vertical angle of discharge θ	0°
Horizontal angle of discharge σ	c1: 90° c2: 0°
Alignment angle γ	90°
Relative orientation angle β	90°
Port diameter D_b	0.8m
Port height h_b	0.8m
Discharge flow rate q_r Q_b	2.78m³/sec
Water quality standard mg/ℓ	2
Diffuser type	Alternating diffuser

실험에 사용하는 인자는 크게 방류수심, 주변유속 및 방향,

주변수 수심, 주변수 밀도 및 온도구조 등과 같은 주변수 조건, 방류유량, 방류수 온도, 방류수 밀도, 방류수 농도 등과 같은 방류수 조건, 확산관의 위치, 형태 및 길이, 방류공의 개수, 방류공의 높이 및 크기, 방류공의 기하학적 배치 등과 같은 확산관 조건 등으로 나눈다(Fig. 4).

방류수온은 발전소 온배수의 경우에는 계절에 무관하게 28°C 내외가 일반적이며, 오페수의 경우에는 계절적 영향을 받아 겨울에는 최저 10°C 정도이며 여름에는 최고 25°C 정도이다. 방류지점의 수온분포는 여름과 겨울의 수온차가 10°C 이상인데, 여름의 경우에는 표층과 저층의 수온차가 7°C 내외이다.

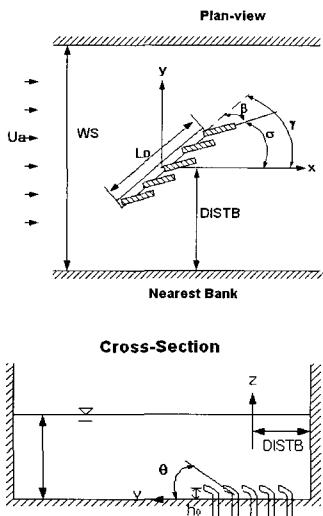


Fig. 4 Definition of symbols for CORMIX

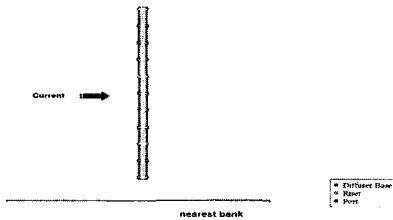


Fig. 5 Diffuser type in relation to port displacement

방류수심이 깊어질수록 보다 정밀한 수온분포의 적용이 필요할 것으로 여겨지나 여기서는 수심도 15M 내외로 일반적인 심해방류관이 수심 수십 미터 내외에서 설치되는 점을 감안할 때 비교적 수심이 깊지 않고 또한 해당지점의 보다 정밀한 해수온도 관측데이터를 얻어내는데 제약이 있으므로 본 연구에서는 방류지점의 해수온도 및 해저면 온도를 적용하여 선형적 온도성층화가 이루어지는 것으로 하여 실험하였다.

주변수 온도는 여름의 경우 22.9°C로 표층과 저층의 수온이 일정한 경우를 기준으로 점차적으로 해저면 수온과의 차이를 0.1°C부터 6°C까지 두어 온도성층화의 영향을 실험하였으며 방류수온도 21°C ~ 25°C까지 변화를 두어 방류수온과 주변수온과의 관계도 알아보고자 하였다.

확산관의 형식은 주로 설치되고 있는 다공확산관(CORMIX 2)으로 하고 조류방향에 수직으로 배치함으로써 희석의 효과를 극대화하도록 하였다(Fig. 5).

3.2 실험결과

대상해역은 여름의 해수온 성층화로 인해 초기 운동량 플럭스에 기인하는 난류혼합은 거의 없다.

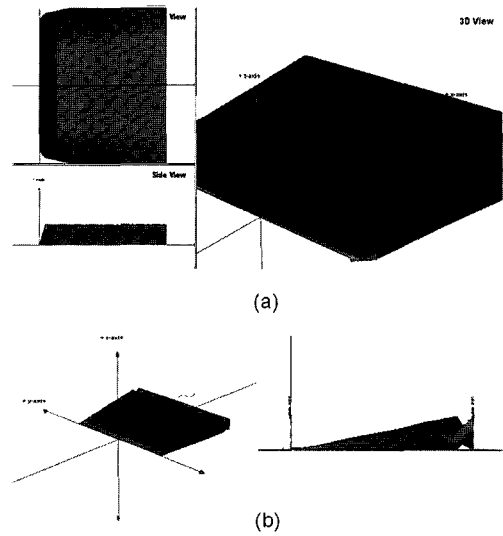


Fig. 7 Plume behavior with CORMIX2 (uniform ambient temperature)

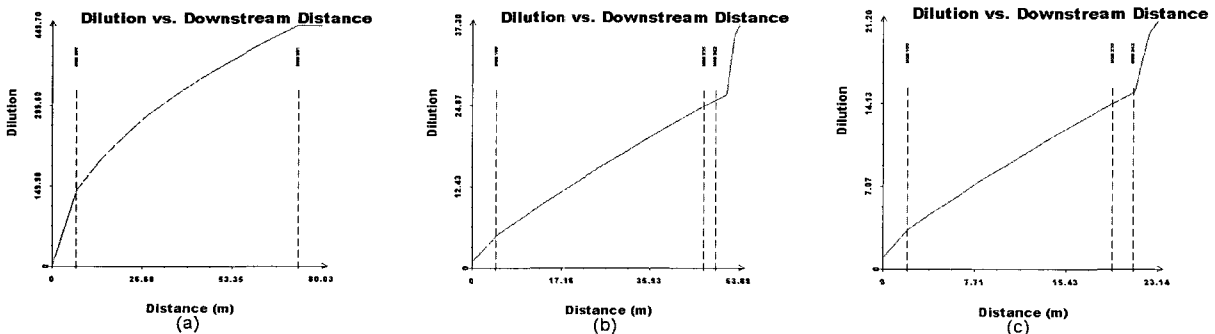


Fig. 6 Variation of downstream distance due to stratified ambient temperature

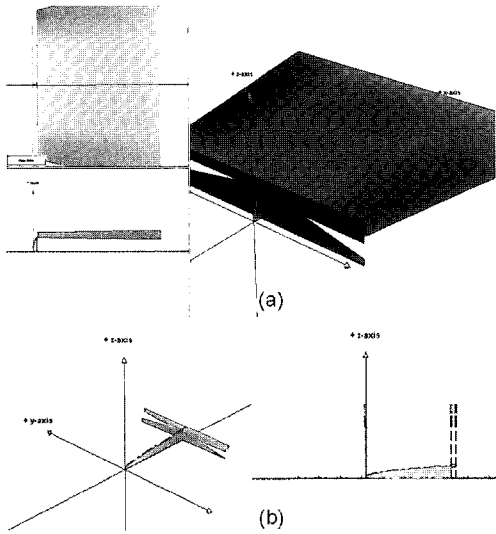


Fig. 8 Plume behavior with CORMIX2(stratified ambient temperature,1℃)

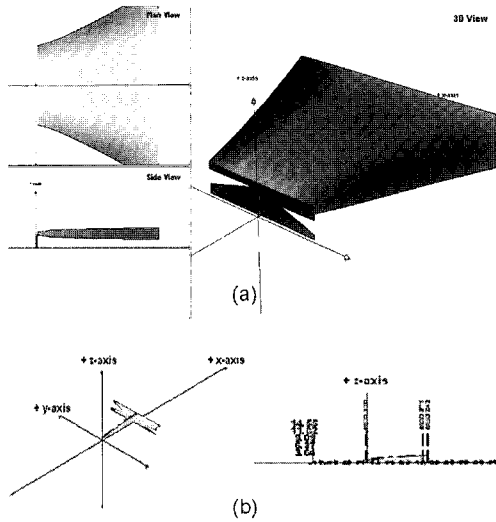


Fig. 9 Plume behavior with CORMIX2(stratified ambient temperature,1℃, effluent temperature 25℃)

플룸이 부력효과를 받아 급속으로 부양함으로써 초기근역의 불안정한 유동장을 형성하여 밀도프루드수가 감소하고 부력플렉스를 증가시켜 희석률은 크게 떨어지며 근역이 끝나는 지점의 유하거리나 플룸의 두께 및 폭도 감소한다(Fig. 11).

Fig.6의 (a), (b), (c)는 각각 주변수의 온도차가 전혀 없을 경우, 표층 및 저층의 온도차가 1℃일 경우, 표층 및 저층의 온도차가 6℃일 경우의 플룸의 초기근역에서의 유하거리를 나타낸다. 주변수의 온도차가 전혀 없을 경우에 플룸의 거동은 Fig. 7 과 같이 플룸이 수심 전체에 걸쳐 혼합이 이루어져 완전제트의 경향을 띠며 부력이 적어 불안정한 형태를 보이므로 확산관의 설치위치를 좀 더 조류속도가 빠르고 수심이 깊은 위치로 이동할 필요가 있다. 희석의 대부분이 이루어지는 초기근역에서의 희석률은 449.7로 표층 및 저층의 온도차가 1℃일 경우의 37.3에 비해 10배 이상이며, 근역까지의 유하거리도 온도성층화가

없을 경우보다 1/4 미만이며, 표층 및 저층의 온도차가 수심방향으로 6℃일 경우에는 초기근역에서의 유하거리는 더욱 감소하고 희석률도 21.2로 감소한다.

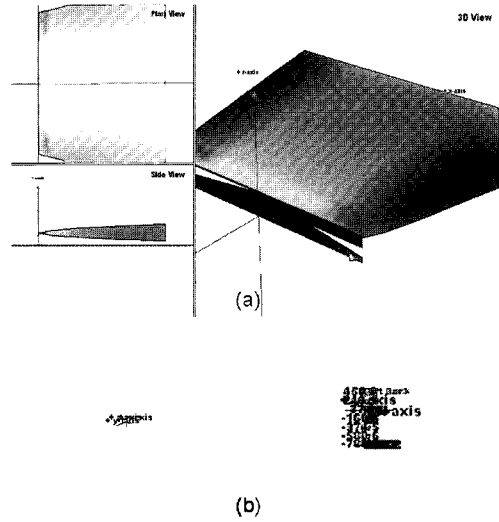


Fig. 10 Plume behavior with CORMIX2(stratified ambient temperature,1℃, effluent temperature 22℃)

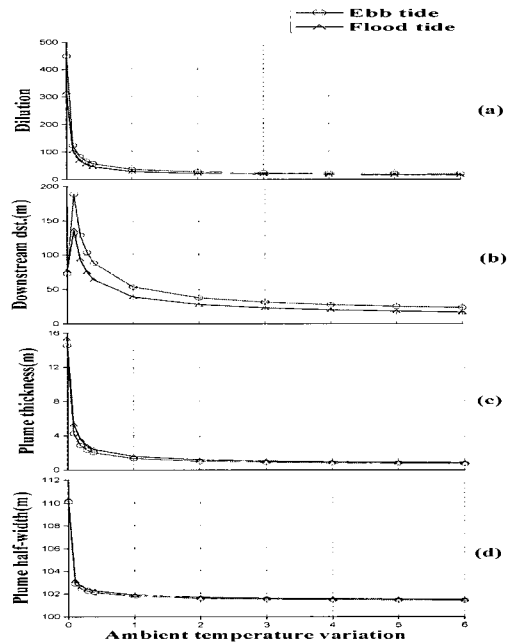


Fig. 11 Variation due to stratified ambient temperature

온도성층화가 없고 주변수온이 22.9℃인 경우에는 희석률이 449.7이며 표층 및 저층의 온도차가 0.1℃, 0.2℃, 0.3℃, 0.4℃, 1℃, 2℃, 3℃, 4℃, 5℃로 변화하면서 123.1, 82.9, 66.6, 57.3, 37.3, 28.6, 25.2, 23.2, 22.0, 21.2로 근역에서의 희석률이 변화하며 플룸의 이동거리, 형태 등도 변화한다. 일단 온도차가 발생하여 일정 온도차 이상이 되면 희석률 변화의 정도는 미약해지는 것으로 나타나는데 이는 주변수 표층 및 저층의 온도차의 정도보다는 온도차의 발생유무가 플룸의 혼합특성에 영향

을 미쳐 희석률에도 영향을 주게 됨을 의미한다. 온도성층화로 인한 밀도류로 인해 결국 초기혼합과정에서 희석이 거의 일어나지 않고 오페수가 수면 부근에서 그대로 상당히 먼 거리까지 이류 및 확산으로 이어지게 된다. 창낙조시 조류속도는 각각 0.39m/sec, 0.26m/sec이며 이러한 온도의 영향은 유사하게 나타난다. Fig. 8, 9, 10에서 나타난 바와 같이 하수장의 연행영역이 감소하면서 초기근역에서 희석이 거의 이루어지지 못하고 완전플룸의 형태를 띤다. 특히 Fig. 10의 경우에는 초기근역에서의 희석이 거의 이루어지지않음을 볼 수 있다. 이와 같이 하수장이 초기의 난류혼합영역이 없이 원역으로 그대로 진행되면서 해수면 부근에서 광범위하게 발달할 경우 미시적인 관점에서의 해양환경을 저해할 뿐만 아니라 여름 전후의 적조 등 수질오염에 가중되어 더욱더 해수수질 환경에 악영향을 줄 수 있다.

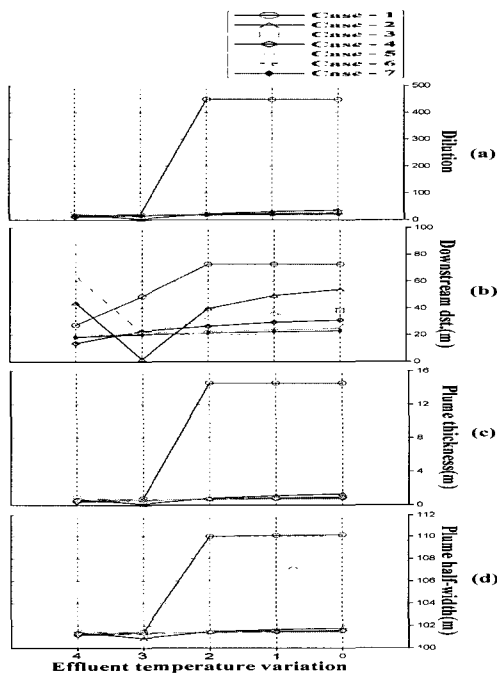


Fig. 12 Variation due to effluent temperature

방류수심이 깊어지면서 난류와 한류가 교차하는 지점, 원자력 발전소의 온배수가 방류되는 지점 등 온도변화가 보다 복잡한 양상을 띠는 경우에는 이러한 실험결과를 토대로 방류수와 주변수 온도성층화를 보다 면밀히 검토할 필요가 있다.

방류수의 온도 변화에 따른 플룸의 거동 및 희석특성은 Fig. 12와 같으며 x축에서는 여름의 방류수온 중 최고값인 25℃를 0 기준지점으로 하여 1℃ 씩 감소시켰다. y축에서는 방류수온이 감소할수록 근역에서의 유하거리, 플룸 두께, 플룸의 폭 등 하수장의 규모가 적어짐을 보인다. 이는 밀도성층화가 없는 경우(case1), 표층 및 저층의 온도차가 1℃(case 2), 2℃(case 3), 3℃(case 4), 4℃(case 5), 5℃(case 6), 6℃(case 7)인 경우 등 총 7가지의 경우에 대하여 표시하였다. 특히 주변수보다 방류수온의 온도가 낮아지기 시작하는 지점부터는 밀도프루드수

가 급변, 희석률도 급변하는 것으로 나타났다.

방류수와 주변수 사이의 온도차가 근역의 혼합특성에 영향을 미치며 주변수보다 방류수온이 낮아지는 시점에서는 희석률을 증가시키기 위해 방류관 설계나 방류시점의 결정 등과 관련하여 개선이 필요하다. 즉 온도성층화, 방류수의 수온은 여러 가지 해역의 수리학적 조건과 맞물려 플룸의 거동 및 희석에 상당한 영향을 미치고 있다.

4. 결론 및 제언

수온 변화에 따른 방류수의 거동 및 형태를 수치모델을 통하여 분석하였다.

- 1) 해수온도 성층화로 인해 초기난류혼합은 거의 일어나지 않고 급속으로 부양하여 불안정한 유동장을 형성하여 희석률은 크게 떨어지며 불안정한 형태로 원역에서의 이류 및 확산으로 이어진다.
- 2) 주변수보다 방류수온의 온도가 낮아지기 시작하는 지점부터 희석률이 급격히 감소하며, 방류수와 주변수 사이의 온도차가 근역의 혼합특성에 영향을 미치므로 방류관 설계나 방류시점의 결정 등과 관련하여 희석을 증가시키기 위한 개선이 필요하다.
- 3) 온도성층화, 방류수온의 변화를 고려하여 본 연구에 사용된 방류관의 설계사양에 따라 감전항 여름에 하수장의 방류특성을 모의한 결과 하수방류시 시스템의 운영면에서 해역의 수리학적 환경을 충분히 고려하여야 할 것으로 판단된다.

또한, 온배수확산관 및 오페수확산관에서 주변수와 방류수의 온도차, 조위차, 계절별 온도성층화의 영향을 이해하고 수온과 관련한 정량적인 법적혼합역(standard legal mixing zone)을 정함으로써 수질오염을 줄이고 효율적인 시스템 운영이 이루어지도록 하여야 한다.

한편으로는 4) 방류관이 심해로 옮겨 갈수록 난한류가 교차하는 등 수심방향의 온도가 변화무쌍함으로 해양방류관의 최적설계를 위해 이에 대한 상세한 관측자료가 필요하다.

참고 문헌

- [1] 강시환, 유승협, 오병철, 박광순 (2000), Initial and nearfield dilution at the ocean outfall of Masan Changwon municipal wastewater treatment plant(II).
- [2] 국립환경연구원 (1996), 해양오염과 적조
- [3] 김지연 (2001), 해양방류 시스템의 최적설계에 관한 연구, 박사학위논문, 한국해양대학교
- [4] 김지연 (2002), 해양오페수 방류구 주위의 유동특성 및 혼합특성, 한국항만학회, 제 14권 제 2호 pp.241-249.
- [5] 김홍식 (1997), 수중다공확산관에 의한 온배수 혼합특성, 박사학위 논문, 서울대학교
- [6] 권석재, 이중우(1997), Plume Rise and Initial Dilution

- Determination Reflecting the Density Profile over Entire Water Colmn, 한국항만학회 제11권 제2호, pp215-230.
- [7] 부산지방해운항만청, 부산항건설사무소 (1995), 감천항 중앙부두 확장 실시설계용역 보고서
- [8] 정태성 (1992), 연안해수유동 및 온배수 확산에 관한 3차원 수치모형, 서울대학교 토목공학과 박사학위 논문.
- [9] 해양수산부 (1997), 부산 신항 개발사업 폐기물 해양배출조사평가보고서
- [10] Brooks, N.H. (1960), Diffusion of sewage 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Harleman, D.R.F., and Stolzenbach, K.D., (1972), *Fluid Mechanics of Heat Disposal from Power Generation*. Ann. Rev. Fluid Mech., 4, 7-32.
- [14] 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.
- [15] Koh, R.C.Y., and Brooks, N.H. (1975), *Fluid Mechanics of Wastewater Disposal in the Ocean*. Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 7, pp. 187-211.
- [16] Wood. I.R., Bell. R.G. and Wilkinson. D.L. (1993), *Ocean disposal of wastewater*, World Scientific, S.G..

원고접수일 : 2004년 6월 14일

원고채택일 : 2004년 12월 17일