

방류관의 설계 및 배치에서의 법적 혼합역의 필요

김지연*

* 한국해양대학교 산업기술연구소 객원연구원

Requirements for Regulatory Mixing Zone on Outfall design and positioning

Ji-Yeon Kim*

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

요약 : 해양에 방류되는 오폐수의 흐름형태 즉 혼합특성을 제어하고 설계하기 위해 다양한 연구가 진행되고 있다. 최근 들어 선진국을 중심으로 바람직한 수질관리를 목표로 법적혼합역과 관련한 수질기준을 정하여 오염부의 방류로 인한 해양수질환경의 오염을 최소화하고자 하는 노력이 진행되고 있다. 본 논문에서는 이러한 근역 및 원역에서의 법적혼합역을 CORMIX 모델로 구현하고 법적혼합역의 필요성을 강조하며 이를 효율적으로 규제하기 위한 방안을 모색하고자 하였다. 이는 보다 개선된 방류수 모델링을 제안하고 나아가 효율적인 해양방류관 설계뿐 아니라 건전한 항만의 설계 및 개발에 기여할 것이다.

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

ABSTRACT : The numerous investments have been introduced to design and assess mixing zone characteristics of wastewater discharges to the ocean. Specially It strive to meet water quality standard for persistent and bio-accumulative chemical contaminants at the point of discharge through continual improvement pollution prevention measures and other voluntary measures in the developed country. The goals that of this paper are to emphasize the regulatory mixing zone is defined as an allocated impact zone where the numeric water quality criteria may be exceeded as long as acutely toxic conditions are prevent. Furthermore, mixing zones be limited to an area or volume as small as practicable that with not interfere with the designated uses or the established community of aquatic life in the segment for which the uses are designated and the shape be a simple configuration that is easy to locate in the body of water and avoids impingement on biologically important areas and the shore h.iggng plumes should be avoided. This results should be used with caution in evaluation the mixing zone characteristics of a discharge and only in conjunction with information from the effective marine outfall design as well as for the sound harbour design. Thus the numerical investigation using CORMIX has been performed to show the regulatory mixing zone in the near and far field of the marine outfall.

KEY WORDS : Regulatory mixing zone, Outfall, Ocean discharge, CORMIX(Cornell Mixing Zone Expert System) Initial dilution, Mixing characteristics

1. 서 론

1.1 연구의 개요

도시하수나 발전소의 온배수 등 오염물의 방류기술에 있어서 세계적으로 다양한 기술적 시도가 이루어지고 있다. 이러한 기술들은 궁극적으로 해양의 공간적 능력과 자정능력을 심분 활용하고 이 오염물의 방류

로 인한 해양의 오염을 최소화하는데 그 의의가 있다. 그러나 현재 가장 일반적인 방류 방법인 방류관을 통한 방류 시 방류조건 및 주변수 조건에 따른 고려가 충분하지 않을 경우 실제 방류가 행해지는 확산관의 주변으로 제 2의 오염이 발생할 개연성이 충분히 있다. 이와 관련하여 방류수가 충분한 난류혼합이 이루어진 후 이류 및 혼합으로 이어지는데 이 영역을 공간적으로 농도 제한하는 법적혼합구역을 규정하는 것이 일반화되고 있다. 강이나 바다 등 여러 방류지역의 특수한 조건에 따라 그 기준이 세밀화 되어있으나 우리나라

* 대표저자 : 종신회원, yeonna@komet.net

라의 경우에는 현재 방류수의 혼합역을 법적으로 규제하지 않고 있으며 해양 방류 시 기본적인 처리 후 방류하면 된다고 여겨지고 있다. 현재 선진국을 중심으로 이에 더 나아가 법적혼합역의 설정에 있어서도 이를 반영구적이라고 볼 수 없으며 이에 대한 논의가 최근에 이슈화되고 있다(Mixing Zone Phase Out Strategy (2001)). 해당지역에 지속적으로 방류가 진행될 경우 법적혼합역의 경계부분에 장기적인 오염물의 농축이 우려되기 때문이다.

해양방류시스템의 기본철학과 기준은 Fisher(1979), Brooks & Koh(1975)등의 연구에서 광범위하게 다루어져 왔고, 90년대 후반 이후 국내의 연구도 이루어지고 있다. 마산 하수처리장의 하수확산관의 근역혼합특성에 대한 연구로는 강 등(2000) 등이 있으며, 장파나 밀도 성층화 등 현실적인 인자를 방류수와 주변수와의 혼합이 이루어진 직후부터 일컫는 플룸(plume)의 상승이나 초기회석 문제에 도입하는 문제 등에 대해서도 권 및 이(1997) 등이 연구하였다.

온배수 및 적절히 처리된 하수를 해양으로 방류하여 회석시키는 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. 특히 정(1992)은 성층화에 따른 연직 확산계수의 시공간적 분포가 고려되어야 하며 대상이 된 고리발전소의 지역특성상 조류방향에 따른 제트의 확산의 양상이 변화함으로 다양한 난류모형이 필요하다고 하였다. 김(2001, 2002)은 방류관 방류인자별 민감도분석 및 방류관 최적설계에 관해 모의하였다.

수질환경의 보호라는 측면에서 심해방류가 권장되기는 하지만 경제적인 측면에서 방류관의 무조건적인 연장이 비현실적이기 때문에 방류관로 특히 환산관의 배치를 다양한 지점에 산재시키는 것이 바람직하다. 항만의 기능이 강화되면서 항만공간이 점점 더 제한적이라는 면을 고려할 때 이러한 법적혼합구역에 대한 제고는 항만시설 특히 항만수역시설 중 외곽시설의 배치에도 영향을 준다고 볼 수 있다. 이에 본 연구에서는 이러한 점에 대해 논의하고 CORMIX를 통해 이 지역을 수치해석으로 구현하여 법적혼합역에 대한 인식을 환기시키고자 한다.

1.2 연구의 방법

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 인접

해역으로 하였다. 계절별 수온변화, 방류수 온도의 변화 등을 실험에 도입하여(김, 2004) 방류수의 거동 특성 및 회석 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

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

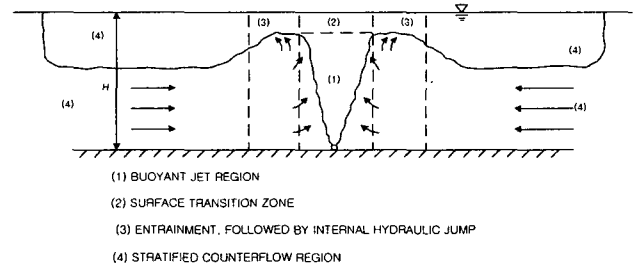


Fig. 1 Postulated a two dimensional flow field induced at the center of diffuser in a stagnant ambient fluid (Jirka and Halman, 1979)

혼합구역이 제트의 중심선을 관통하는 지점까지를 흐름발달영역(zone of flow establishment), 즉 근역(near field)이라고 한다. 이 영역은 원형방류공인 경우 방류공 직경의 약 6배, 사각형방류공인 경우에는 방류공 폭의 약 5배 정도의 거리까지인 것으로 알려져 있다(Brooks, 1960).

2.2 수중다공확산관 이론

천이구간에서의 유속분포는 각각의 원형제트의 유속을 선형적으로 중첩하여 표현할 수 있는 것으로 알려져

있다. 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 b 대신 $b_T (= \lambda b)$ 를 대입하는 식으로 표현된다. 일반적으로 방류공에서 떨어진 거리 l 과 b (nominal half width)는 선형관계를 가지는데(Fig. 2) 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. 다공확산관의 경우에 초기방류지점에서 일정거리까지 각각의 방류공에서 방류되는 제트는 독립적인 원형제트의 거동을 보이나 천이구간(transition zone)이후부터는 제트들이 병합하면서 2차원 슬롯제트(slot jet)와 유사한 형태를 보인다.

2.3 근역혼합

성층의 영향으로 자체의 부력에 의해서 난류가 쇠약해지는 지점을 초기 근역혼합역(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 주변수와 유속차에 따른 전단난류확산으로 인해 주변수와 연행을 야기하면서 제트의 폭은 증가되고 제트의 유속 및 농도는 감소된다. 제트는 부력 및 방류각 등에 따라 수면을 향하게 되며 해수면을 따라서 횡방향으로 이송 및 확산이 일어난다. 이 때 흐름의 안정성이 희석률에 영향을 미치며, 흐름이 불안정할 경우에는 혼합수가 다시 제트에 재 유입되기도 하며 이는 초기희석률의 감소를 초래한다.

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

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 등슬롯확산관

의 개념으로 보아도 크게 부리가 없음을 의미한다.

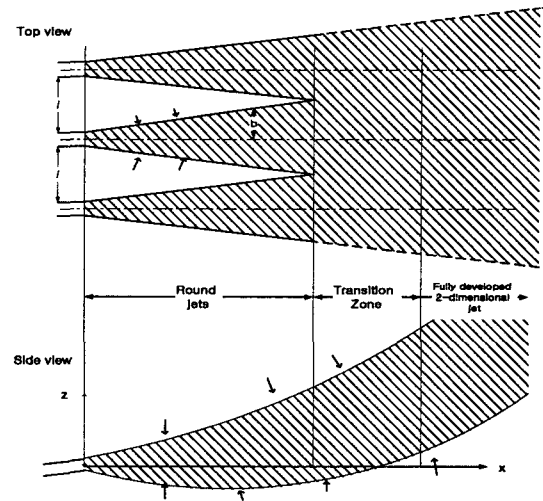


Fig. 2 Jets merging from the unidirectional diffuser

2.4 혼합역

혼합역(mixing zone)은 방류 시 초기희석이 이루어지는 영역을 의미하며 법적을 규제될 경우 독성물질 등에 대해 엄격히 규제된다. 해양의 자정범위와 이 법적 혼합역이 조화로워야만 오염물의 방류로 인한 수괴의 손상을 최소화할 수 있다.

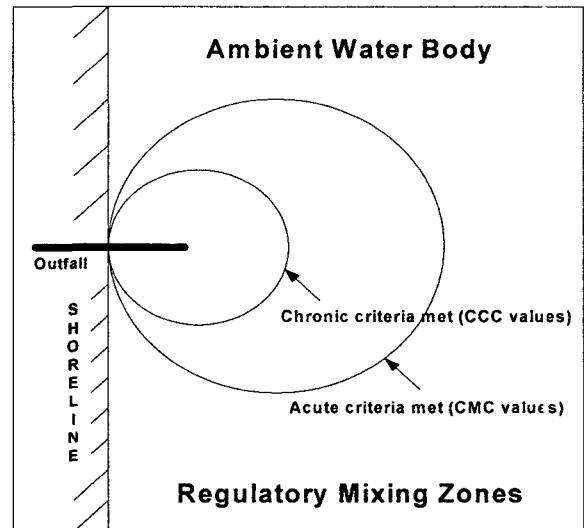


Fig. 3 Regulatory Mixing Zones

CMC(Criterion Maximum Concentration)에 따라 결정되는 TDZ(Toxic Dilution Zone)와 CCC(Criterion Cortinuous Concentration)에 따라 결정되는 RMZ(Regulatory mixing zone)는 Fig. 3과 같이 표시할 수 있으며 확산관을 통한 오폐수가 플룸의 형태로 해수면에 부상하는 경우 이와 같은 동심

원 형태의 이류 및 확산 영역이 육안으로 확인되기도 한다.

여기서 TDZ는 비교적 단기적으로 방류관 주변에서 수질에 치명적일 수 있는 오염을 예방하고자 하는 기준이며 RMZ는 이에 비해 장기간에 지속적으로 해양생태계에 영향을 줄 수 있는 위험을 제어하고자 하는 기준이다.

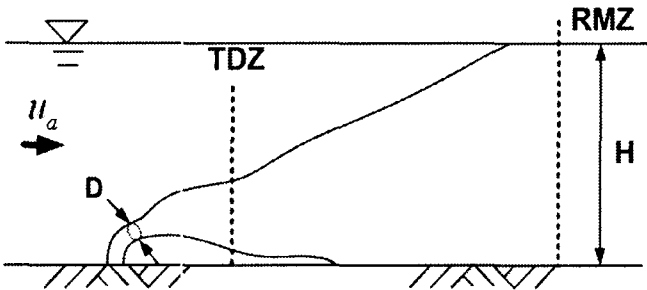


Fig. 4 The TDZ for toxic substances is located within the regulatory mixing zone

방류구 주변역을 수심방향의 단면으로 TDZ 및 RMZ를 나타낸 것이 Fig. 4이며 범적혼합역은 최초의 점원에서 시작해 플룸이 성장하는 단계를 거치면서 실제로는 단순한 거리나 단면의 제한이 아닌 수역공간의 제한으로 존재함을 알 수 있다.

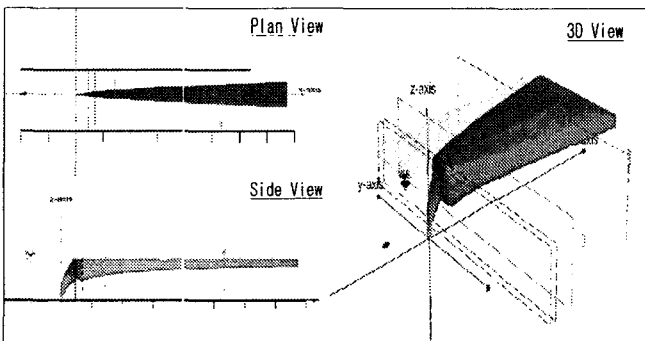


Fig. 5 3-D view of TDZ and RMZ locations for a CORMIX1

이를 3차원을 여러 가지 방향에서 구현한 것은 Fig. 5이며 법적으로 혼합역이 일정 공간 내로 범위가 제한되면 범적혼합역과의 상호작용에 의해 경계면에서 플룸이 충돌하여 Fig. 6과 같은 4가지 형태를 만들어낸다. a)는 난류제트가 횡흐름에 의해 굽으면서 점차적으로 해수면 혹은 해저면에 이르면서 평탄해져 부차적인 혼합이 이루어지며 안정화 되는 경우, b)는 주변유속이 약해서 정체되는 경우, c)는 운동량이 활발하여 재연행(re-entrainment) 혹은 재순환(recirculation)으로 이어지는 경우, (d)는 앞의 세 가지가 동시에 작용하는 경우를 보여준다.

범적혼합역은 방류지점을 중심으로 한 공간적 제한이며 실제로는 근역이나 원역 어디에든 있을 수 있다.

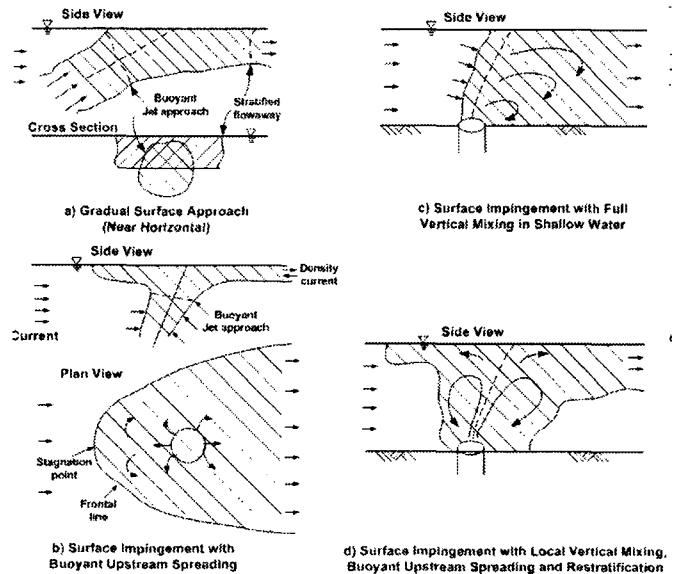


Fig. 6 Examples of boundary interactions for submerged jets in finite depth

3. 실험 및 분석

3.1 실험조건

본 연구에 사용하는 자료는 이미 설치되어 있는 부산시 중앙하수처리장을 근거로 하였으며(김(2001, 2002), 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.

비교적 수심이 깊지 않고 또한 해당지점의 보다 정밀한 해수온도 관측데이터를 얻어내는데 제약이 있으므로 본 연구에서는 방류지점의 해수 온도 및 해저면 온도만을 적용하여 선형적 온도성층화가 이루어지는 것으로 하여 실험하였다.

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

Table. 1 Summary of input data

Classification	Gamchun
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_0	0.8m
Port height h_0	0.8m
Discharge flow rate q_0, Q_0	2.78m³/sec
Water quality standard mg/l	2
Diffuser type	Alternating diffuser
Vertical angle of discharge $\theta(^{\circ})$	0

3.2 실험결과

Fig. 7에 나타난 바와 같이 근역의 경우 CMC에 근거한 TDZ가 나타나고 있으며 Fig. 8의 원역에서는 CCC에 근거한 RMZ가 나타나고 있다, 방류구에 인접하여 TDZ가 형성되어 있으며 하수장의 규모에 따른 희석률에 따라 다르게 나타난다.

대상해역은 여름의 해수온도 성층화로 인해 초기 운동량 플럭스에 기인하는 난류혼합은 거의 없고 플룸이 부력효과를 받아 급속으로 부양함으로써 초기근역의 불안정한 유동장을 형성하고 있다. 해수면에 노출된 오폐수는 유류의 유출과 마찬가지로 파랑운동과 바람의 영향으로 계속적으로 이류 및 확산되어간다.

법적혼합역은 플룸의 진행방향 및 폭방향, 수심방향 등에 걸친 전체 수역 공간이며 Fig. 9에서는 근역이 끝나는 지점에서의 희석률은 399이며 이 지점은 방류구의 끝단을 기준으로 폭 방향으로 81.32m, 진행방향으로는 78.1m 정도의 지점이다. Fig. 10은 플룸이 원역으로 지속적으로 이류 및 확산되어가는 것을 나타낸다.

근역이나 원역 어디에 RMZ가 존재하든 이 지점의 경계부분에서는 지속적인 방류가 진행되면서 오염물의 장기적인 축적이 발생할 가능성이 농후하다.

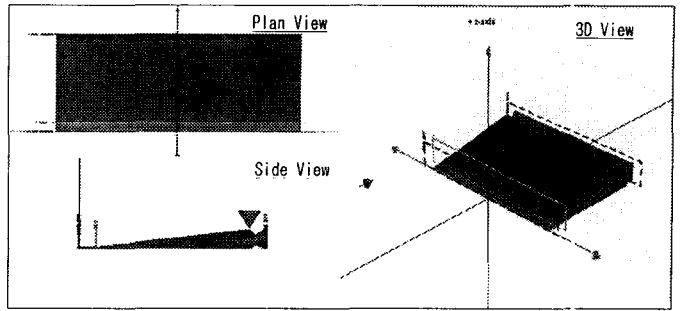


Fig. 7 3-dimensional plume behavior with CORMIX 2 (Near Field)

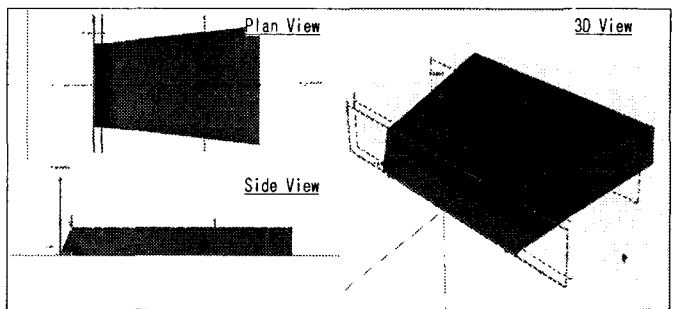


Fig. 8 3-dimensional plume behavior with CORMIX 2 (Far Field)

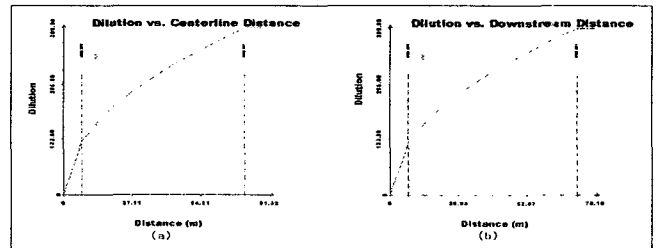


Fig. 9 Variation of dilution due to Near Field

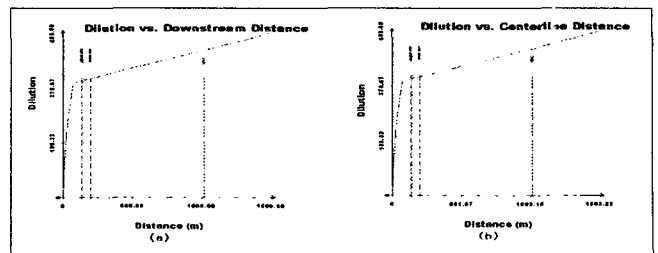


Fig. 10 Variation of dilution due to Far Field

그러한 점에서 일각에서는 법적혼합역으로 인해 특정 지점의 장기적 오염잔존이 우려되기도 한다. 이는 개방된 해역보다는 비교적 폐쇄된 형태의 항만이나 강과 바다가 만나는 지점 등 횡방향 조류속도의 영향이 적어 정체될 가능성이 높은 수역에 해당한다.

본 실험에서는 미 EPA의 기준에 따라 CMC는 1200mg/l, CCC는 600mg/l로 하였으며 혼합역의 범위

는 1000m로 하였다. 그러나 실제로 법적혼합역은 훨씬 적은 값이 일반적이며 본 그림에서는 설명을 위해 보다 큰 수치의 값을 임의적으로 사용하였다.

그림과 같이 RMZ의 범위내의 희석수준이 적절하고 플룸의 원역 및 근역이 그 범위 내에 있는 것이 가장 바람직하지만 RMZ가 근역에 근접할 경우에는 적절한 희석이 수반되지 않는 한 제 2의 오염을 초래할 가능성이 크다. 이러한 경우에는 확산관의 설계방식이나 위치 자체를 옮겨야만 한다.

방류관이 실제 운영되면서 오폐수의 유입으로 인한 해양수질환경의 오염을 최소화하기 위해서는 방류지점의 여건에 맞게 설계나 위치 선정면에서 충분히 최적화되어야 하며 법적혼합역에 의해 수질기준이 정해질 경우에는 수괴의 지속적인 모니터링도 동반되어야 한다.

4. 결론

법적혼합역은 확산관을 통한 플룸의 이동경로의 범위를 공간적으로 제한하는 것으로 방류관의 위치 및 배치, 설계형태에 따라 희석률이나 플룸의 패턴이 변화하는 것과 마찬가지로 CCC나 CMC의 기준도 달라진다. 법적혼합역의 지정은 방류지역의 지형학적, 지질학적 조건 및 방류수의 특성에 맞추어 보다 세밀히 규정되어야 한다.

특히 발전소나 온배수의 경우 오폐수의 오염과는 다른 측면에서 주변수와의 온도차에 따라 국지적으로 상당한 피해를 입힐 수 있기 별도의 기준이 필요하다. 또한 확산관의 위치를 중심으로 섬이나 외곽구조물과 같이 차폐물이 있는 경우나 강과 바다가 만나는 지점 등에서는 공간적 제약으로 인해 보다 강화된 법적 규제가 필요하다.

최근에는 항만공간이 다양한 어메니티로 활용되고 있고 수역 및 디팍시설도 공간적으로 보다 복잡해짐에 따라 이러한 혼합역 규제가 더욱 필요하다. 현재의 연안 수질 환경을 보호할 뿐 아니라 이후 지속적이고 장기적인 해양수질환경의 변화를 최소화하기 위해서도 중요하다. 혼합역에 대한 법적규제가 마련될 경우 이후 건설될 해양방류관은 그 설계에서만이 아니라 그 배치에 있어서도 그 기준에 따라야 한다. 법적혼합역은 전체 항만의 설계시 항만 내 및 외곽시설의 각종 배치에도 영향을 줄 수 있는 인자이다.

이러한 법적규제는 검사선박의 상시적인 관찰이 기본이 되겠지만 해양생물 분야 및 해양퇴적물의 관찰을 위한 해양지질분야의 지속적인 모니터링도 동반되어야 한다. 왜냐하면 법적혼합역을 기준으로 해당해역에 지속적으로 방류가 진행될 경우 법적혼합역의 경계부분에

장기적인 오염물의 농축이 우려된다는 점에서 이 기준 자체도 항구적이지 않기 때문이다.

참고문헌

- [1] 강시환, 유승협, 오병철, 박광순 (2000), Initial and near-field dilution at the ocean outfall of Masan-Changwon municipal wastewater treatment plant(II).
- [2] 권석재, 이중우(1997), Plume Rise and Initial Dilution Determination Reflecting the Density Profile over Entire Water Column, 한국항만학회 제11권 제2호, pp215-230.
- [3] 김지연 (2001), 해양방류 시스템의 최적설계에 관한 연구, 박사논문, 한국해양대학교
- [4] 김지연 (2002), 해양오폐수 방류구 주위의 유동특성 및 혼합특성, 한국항만학회, 제 14권 제 2호 pp.241-249.
- [5] 부산지방해운항만청, 부산항건설사무소 (1995), 감천항 중앙부두 확장 실시설계용역 보고서
- [6] 정태성 (1992), 연안해수유동 및 온배수 확산에 관한 3차원 수치모형, 서울대학교 박사논문.
- [7] 해양수산부 (1997), 부산 신항 개발사업 폐기물 해양배출조사평가보고서
- [8] Brooks, N.H. (1960), Diffusion of sewage effluent in an ocean current, In Proc. First Int. Conference on waste disposal in the marine environment, University of California, E.A. Pearson (Ed.), Pergamon Press, New York, pp. 246-267.
- [9] Mixing Zone Phase Out Strategy IC Draft-September 18, 2001
- [10] Harleman, D.R.F., and Stolzenbach, K.D., (1972), Fluid Mechanics of Heat Disposal from Power Generation. Ann. Rev. Fluid Mech., 4, 7-32.
- [11] 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.
- [12] 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.