

해양방류 수치모형에 관한 최근 연구동향 및 성과(Ⅱ)

제2편: 원역확산 모형의 근역모의 방법

서 일 원 (서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수)

김 영 도 (서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정)

1. 서론

수중방류수의 근역혼합 특성은 주로 특성길이 모형이나 제트적분 모형 등의 근역모형을 이용하여 예측하며, 이에 관한 최근 연구동향은 전편(서일원과 김영도, 2001)에 기술한 바와 같다. 그림 1은 다공확산관에서 수중방류된 부력제트의 혼합거동 및 각각의 영역을 개념적으로 도시한 것이다. 근역혼합 모형을 이용한 부력제트의 초기혼합거동 해석은 모형의 개발에 사용된 여러 가지 가정으로 인하여 다음과 같은 제한점을 갖는다. 특성길이 모형은 부력제트의 다양한 혼

합거동을 무차원화된 특성길이를 이용하여 분류하고 각각의 경우에 대하여 차원해석을 통해 얻어진 특성길이 방정식을 사용하여 회석물과 평형상승고 등을 계산한다. 그러므로 각각의 흐름형태의 경계에 해당하는 조건에 대해서는 모형의 결과가 불연속적으로 나타난다. 또한 특성길이 방정식에 사용된 비례상수를 결정함에 있어서 선형의 밀도성층화 수조에서의 모형실험에 의존하므로 일정한 방향의 주변흐름에서만 모의가능하고(김대근과 서일원, 2000), 주변수역의 밀도성층이 비선형인 경우에는 혼합거동을 정확하게 예측하기 어렵다. 제트적분 모형의 경우 부력제트

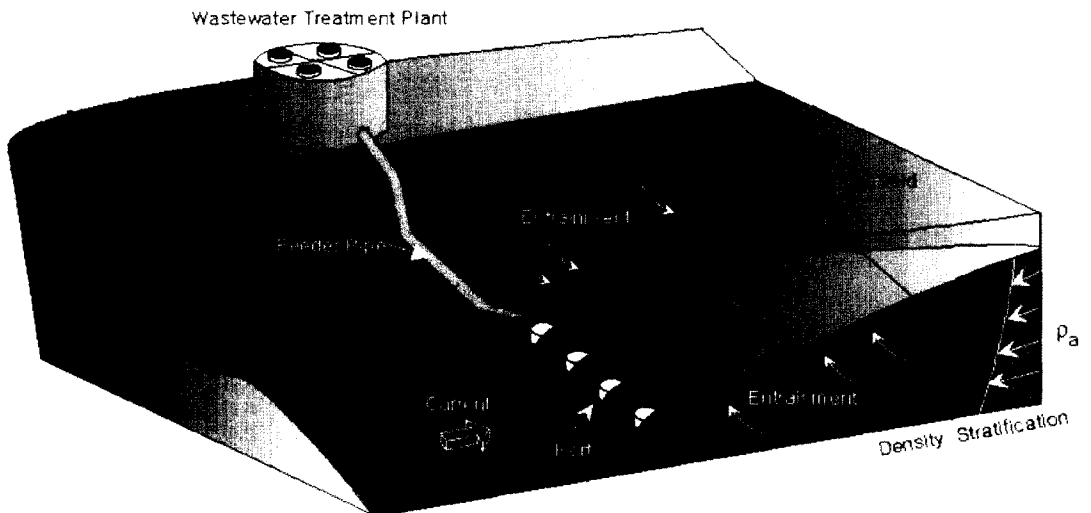


그림 1. 수중확산관에서 방류된 부력제트의 혼합거동

의 단면을 Gaussian 분포나 쌍와(vortex-pair) 분포 등의 일정한 형태로 가정하여 적분을 수행하므로(이재형과 서일원, 2000), 단면내의 유속분포나 농도분포의 형태가 일정하지 않은 다공확산관에서나 흐름방향과 확산관 축이 일치선상에 놓여 단면이 중첩되는 경우에는 적용하기 어렵다. 대부분의 하수확산관의 경우 그 형태가 양방향 확산관인 경우가 많으므로 이러한 제트적분 모형을 적용할 수 있는 경우는 매우 적다. 또한 두 가지 근역모형 모두가 정상상태를 가정하는 경우가 대부분인데 연안의 해양조건은 공간적, 시간적인 측면에서 매우 변화가 심한 비정상상태이다. 특히 주변 해수의 흐름과 밀도성층화 구조의 급속한 변화는 근역에서의 플룸상승고와 초기회석률에 크게 영향을 미치지만 근역모형은 이러한 변화를 고려하기 어렵다. 또한 조석환경에서의 방류해역에서는 조류가 평균흐름보다 훨씬 큰 폭으로 주기적인 운동을 하므로 플룸이 평균 잔차류에 의해 이송되기 전에 얼마동안 방류구 주위에 머무르는 현상이 나타나는데, 근역모형은 이러한 현상을 모의할 수 없다(김영도 등, 2000).

최근 들어 이러한 근역모형의 한계점을 극복하고자 3차원 미분방정식의 해를 구하는 원역모형을 이용하여 근역의 혼합특성을 예측하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 본 고에서는 최근 제안된 원역모형을 이용한 근역혼합 모의방법에 관해 비교·검토하고, 이를

바탕으로 국내의 해양방류에 적합한 방류경계 부여방법과 이에 대한 향후 연구방향을 제시하고자 한다.

2. 원역모형을 이용한 근역모의 방법

2.1 부력방류경계 방법

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla C + W \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(Kc \frac{\partial C}{\partial z} \right) + Fc \quad (1)$$

여기서 Kc 는 농도장의 연직확산계수이고, Fc 는 수평확산항이다. 식(1)을 다음과 같이 분리연산자 C 를 삽입하면 식(2)~(3)으로 나눌 수 있다.

$$\frac{C - C^{n-1}}{2\Delta t} = -V \cdot \nabla C^n - W \frac{\partial C^n}{\partial z} + Fc^{n-1} \quad (2)$$

$$\frac{C^{n+1} - C}{2\Delta t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(Kc \frac{\partial C^{n+1}}{\partial z} \right) \quad (3)$$

식(2)를 이용하여 이송과정과 수평 확산과정을 첫 번째 모드에서 계산하고, 식(3)를 이용하여 연직확산과정을 두 번째 모드에서 계산한다. 이송과 수평확산은 양해법을 사용하고, 연직확산은 음해법을 사용함으로써 계산의 효율성을 높일 수 있다.

구성된 원역확산 모형은 선형플룸의 가정하에서 부력경계조건을 도입함으로써 연안해역에서 하·폐수의

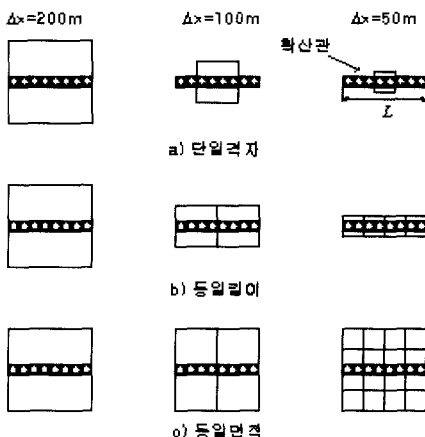


그림 2. 격자크기와 격자수에 따른 방류경계 부여방법

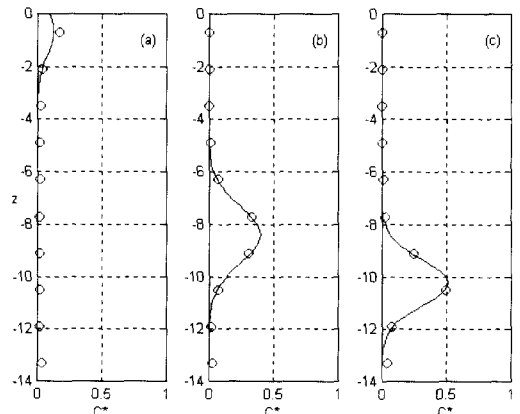


그림 3. Gaussian 곡선적합법에 의한 평형상승고 계산

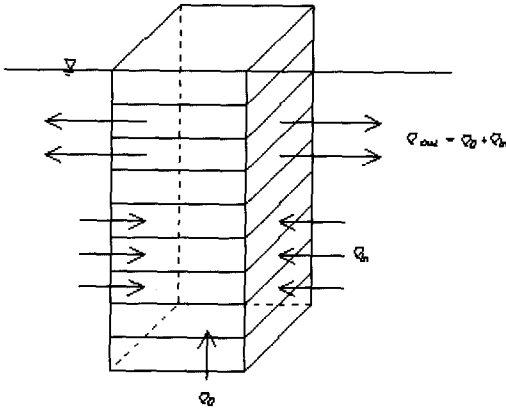


그림 4. 체적회석을 계산방법

수중방류에 따른 농도장을 계산할 수 있다. 수중확산관을 모의하는데는 격자크기에 따라 그림 2에 나타낸 바와 같이 여러 가지 방법이 있을 수 있다. 그림 2에서 a)는 일반적으로 많이 사용하는 확산관이 위치한 단일격자에 부력조건을 주는 방법을 나타내고, b)와 c)는 확산관의 길이에 따른 표현방법으로서 각각 동일

한 길이만큼의 격자수와 동일한 면적만큼의 격자수에 부력조건을 주는 방법이다. 부력방류경계조건으로 인해 초기혼합된 농도장으로 근역 혼합특성을 계산할 수 있는데 이는 다음과 같다. 먼저 플룸의 평형상승고는 일정한 거리가 떨어진 지점에서의 농도의 연직 분포값을 그림 3과 같이 Gaussian 곡선적합법을 통해 얻어진 최대 농도의 높이로 정의할 수 있다. 또한 그림 4에서와 같이 정체수역에 부력제트가 방류되는 경우에는 방류격자가 위치한 연직 격자기둥에서의 체적 흐름률의 가감을 계산하여 식(4)에서와 같은 체적회석을 계산할 수 있다.

$$S_m = \frac{Q_{in} + Q_0}{Q_0} \approx \frac{Q_{in}}{Q_0} \quad (4)$$

2.2 수치슬롯확산관 방법

Kim과 Seo(2000)에 의해 제안된 수치슬롯확산관 개념은 온배수방류에 있어서 심층방류경계조건을 부여하는 방식으로 온배수확산관의 방류포트는 주로 횡방향으로 향하기 때문에 포트에서의 방류는 횡방향으로만 일어나는 것으로 가정한다. 그림 5는 등슬롯확산관의 개념을 이용한 수치슬롯확산관의 개념을 설명하고 있으며, 수치슬롯확산관에서 Q_N 은 다공확산관에서 방류되는 Q_0 와 다공확산관의 배면 및 연직상향에서 유입되는 유량의 합으로서, 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$Q_N = n I_q b l U_c \quad (5)$$

여기서 n 은 하나의 수치슬롯확산관 격자에 포함된 방류포트의 개수, I_q 는 형상상수, b 는 제트의 유효폭, U_c 는 제트의 궤적중심에서의 유속으로 다음과 같이 산정한다.

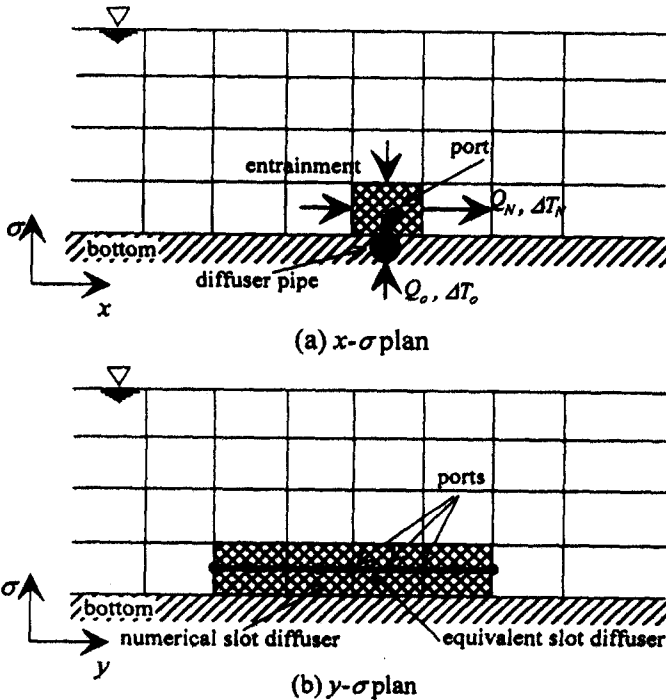


그림 5. 수치슬롯확산관의 개념도(Kim과 Seo, 2000)

$$b = \alpha_1 x \quad (6)$$

$$\frac{U_c}{U_0} = \alpha_2 \frac{l_q}{x} \text{ for } \frac{x}{l_q} \geq 7 \quad (7)$$

여기서 U_0 는 포트에서의 방류유속이고 l_q 는 특성길이로서 $\sqrt{A_p}$ 를 나타내며, A_p 는 포트의 단면적이다. α_1 과 α_2 는 비례상수로 이상적인 단일제트에서는 각각 0.107과 7.0의 값을 가진다. 식(5)에 식(6)~(7)을 대입하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$Q_N = \alpha n l_q l_q U_0$$

여기서 $\alpha = \alpha_1 \alpha_2$ 이다. 이상의 관계를 이용하여 수치슬롯관의 하나의 격자가 방류할 유량이 결정되고 이를 해당격자의 방류면적으로 나누면 방류유속을 구

할 수 있다. 수치슬롯확산관의 방류초과수은, 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta T_N = \frac{Q_0}{Q_n} \Delta T_0$$

여기서 Q_0 는 수치슬롯확산관의 하나의 격자에 포함된 포트에서 방류되는 총유량이다. ΔT_N 및 ΔT_0 은 각각 수치슬롯확산관 및 다공확산관의 방류초과수은이다. 수치슬롯확산관에서 방류되는 유량중 다공확산관에서 방류되는 유량은 바닥면에서 유입되는 것으로 가정하며 나머지는 수치슬롯확산관의 배면, 측면, 상부에서 유입된다.

3. 연구사례 및 토의

Blumberg 등(1996)은 Massachusetts 만의 해양 방류시스템에 대해 3차원 원역모형을 적용하여 근역혼합 특성을 예측한 바 있다. 그림 6은 Massachusetts 만에 사용된 모형의 격자를 나타내고 있으며, 곡선교격자를 사용하였고 최소 600 m에서 최대 8000 m의 격자크기를 갖는다. 방류 오염부하량은 확산관이 위치한 바닥층의 격자에 부여되었으며, 계산된 농도장으로부터 얻어진 근역혼합특성은 그림 7과 같다. 그들은 이 결과를 근역모형인 ULINE 모형의 결과와 비교함으로써 원역모형이 세부적인 근역혼합 과정을 생략하더라도 방류경계조건을 부여함으로써 근역혼합 특성을 근사하게 예측할 수 있음을 밝혔다.

Zhang과 Adams(1999)는 미국 하와이주의 Sand Island 수중확산관의 제원을 기반으로 한 가상영역의 격자를 구성하여 ECOM-si 모형을 이용하여 다양한 방류조건에 대한 수치모의를 수행하였다. 이 결과를 RSB 모형의 결과와 비교하여 민감도분석을 수행하였고,

Massachusetts Bays Model Grid

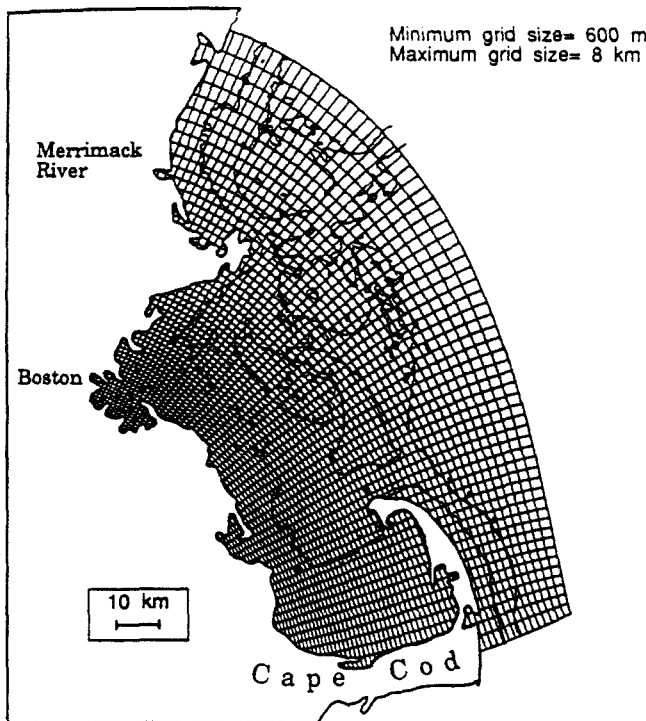


그림 6. Massachusetts만의 모형격자

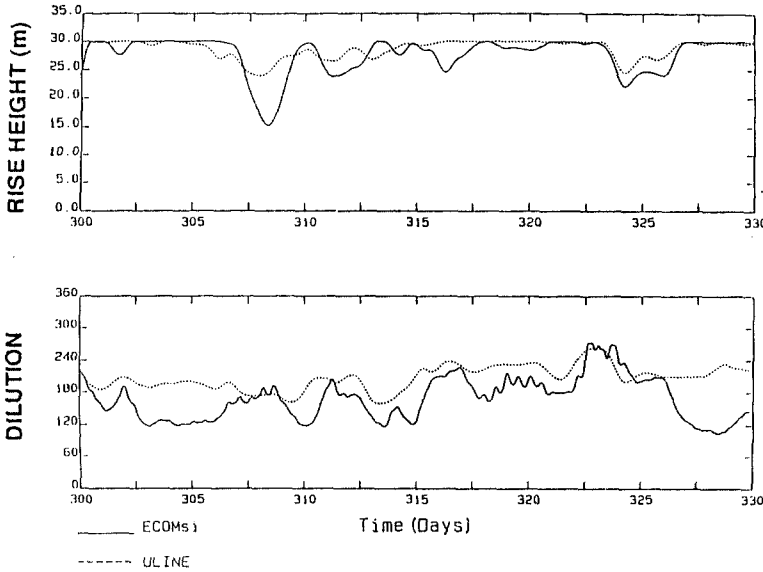


그림 7. 원역모형과 근역모형의 결과비교(Blumberg 등, 1996)

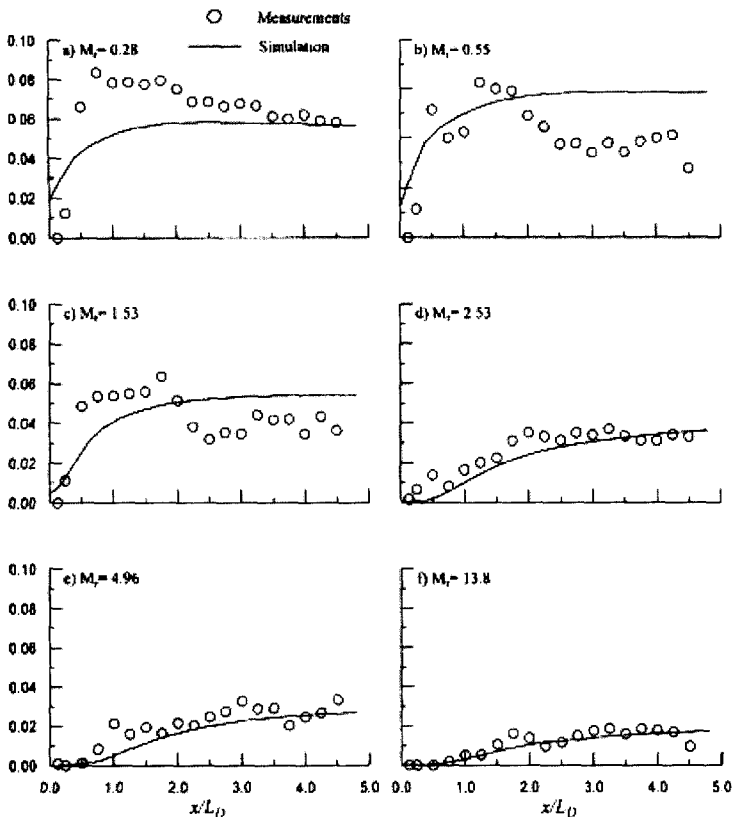


그림 8. 무차원 초과수온의 종분포(Kim과 Seo, 2000)

연구결과로서 원역모형이 플룸상승고와 초기희석률을 근역모형과 근사하게 예측하였지만, 플룸폭은 과대예측하고 예측된 근역 특성은 오염원 부여방법과 확산계수에 민감하다는 것을 제시하였다.

Kim과 Seo(2000)는 공유형확산관의 혼합특성을 해석하고, 제안된 수치슬롯확산관을 이용한 3차원 수치모형의 검증에 위한 자료를 확보하기 위하여 수리실험을 수행하였다. 그림 8은 계산치와 실험치의 수표면에서의 무차원 초과수온의 종분포를 비교·도시한 것이다. 특히 주변수 유속이 강한 경우에는 확산관주위 근역에서부터 하류까지 수온분포 특성을 잘 모의하고 있음을 알 수 있다. 운동량이 증가할수록 초과수온이 감소하며, 운동량이 작은 경우에는 예측치가 상대적으로 큰 진동을 나타낸다.

김영도 등(2000)은 부력방류경계 방법의 국내 하수확산관의 적용성을 검토하기 위하여 마산만 하수확산관의 제원을 고려한 정방형 형태의 가상영역을 구성하였다(표 1 참조). 대부분의 양방향확산관(alternating diffuser) 형태의 하수확산관에서는

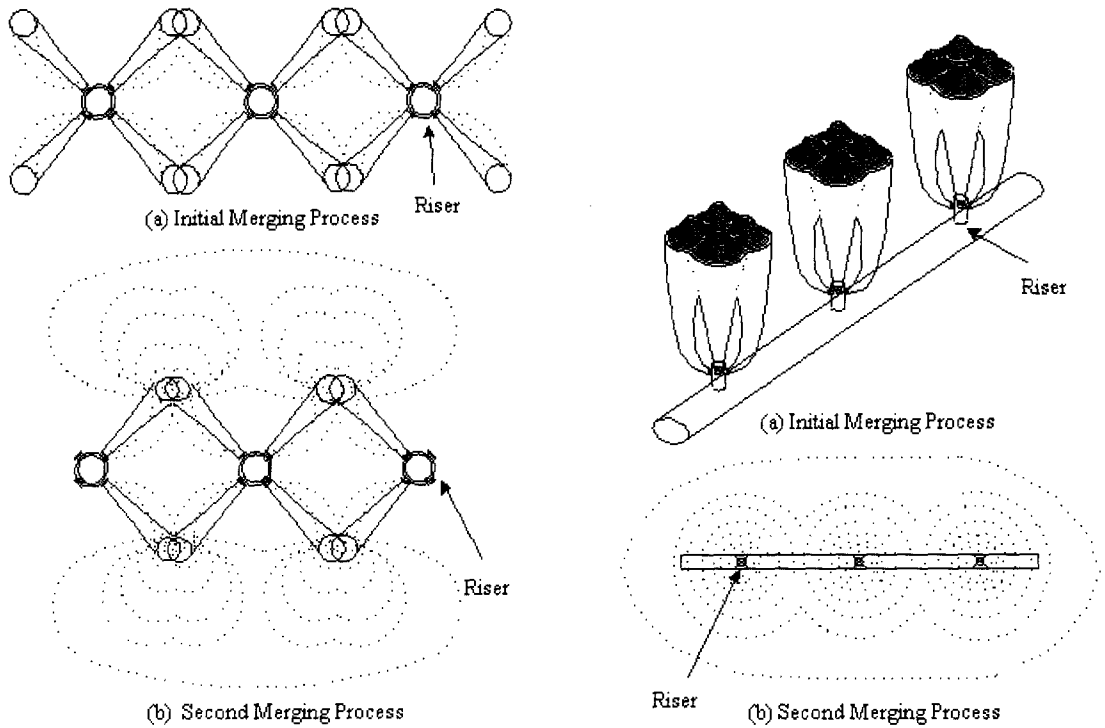


그림 9. 4공형태 양방향확산관의 병합현상

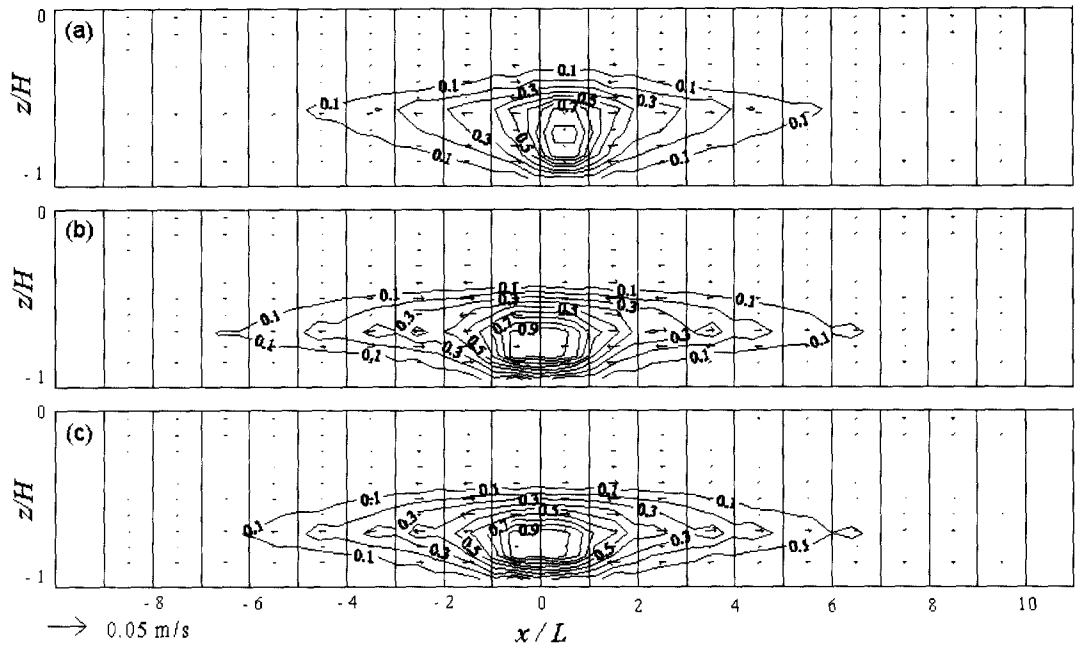


그림 10. 방류경계 부여방법에 따른 부력제의 거동
(a) 단일격자, (b) 동일길이, (c) 동일면적

유량이 작아 방류운동량의 크기가 작을 뿐만 아니라 확산관을 축으로 양쪽 방향으로 방류하므로 운동량에 의한 영향은 무시할 수 있다. 특히 마산만 하수확산관을 포함한 국내 대부분의 하수확산관에 사용된 4공유도관의 양방향확산관의 경우에는 그림 9와 같은 병합과정을 거치면서 운동량이 상쇄되어 선형플룸의 형태로 간주할 수 있으므로 운동량을 제외한 부력만을 확산관이 위치한 격자에 방류온도와 방류염분도를 방류경계조건으로 주었다. 그림 10은 100m 격자의 경우 밀도차가 6.5kg/m³일 때 정제수역에 방류한 경우에 대하여 단일격자, 동일길이, 동일면적 방법으로 모의한 것을 각각 나타낸 것이다. 단일격자에 부력조건을 주는 경우에는 상대적으로 플룸의 확산이 적게 나타났고, 동일길이 방법보다 동일면적 방법이 플룸폭이 두껍게 나타났다.

전술한 연구결과에서 보는 바와 같이 원역모형을 이용하여 근역혼합 특성을 모의할 수 있는데, 부력제트의 유입과정을 포함할 수 없는 원역모형이 근역특성을 해석할 수 있는 근거는 다음과 같다. 첫째, 원역모형이 정수압가정과 격자크기 때문에 근역에서의 유입과정을 모의할 수는 없지만 바닥면에서 부력에 의한 밀도순환류를 모의할 수 있고, 이것은 근역모형의 평형상승고와 비슷한 높이에서 플룸이 상승을 멈추게 한다. 둘째, 유입이 과대예측되면 평형상승고가 낮아지고 그만큼 희석률이 감소하여 과대 유입을 보상한다. 이러한 희석률과 평형상승고의 유기적인 관계는 근역혼합과정을 고려하지 않더라도 정확한 평형상승고를 예측 가능하게 한다. 셋째, 평형상승고는 주변수의 밀도성층화 구조에 민감하고, 실제 해양에서는 비선형적인 밀도성층화 구조가 대부분이다. 이런 경우에는 유입과정을 고려하지 않아도 불연속층에 플룸이

포착되어 정확한 플룸의 평형상승고의 예측이 가능해진다.

4. 결론

일반적으로 근역모형을 이용하여 플룸상승고와 최소희석률등의 근역혼합 특성을 구하는 방법은 흐름의 비정상성과 복잡한 지형적 특성을 갖는 방류해역조건을 고려하기 어렵다. 최근 이러한 문제점을 극복하고자 3차원 미분방정식의 해를 이용하여 근역혼합 특성을 예측하고자 하는 연구가 국내·외에서 활발하게 진행되고 있다. 본 기고에서는 현재까지 발표된 몇 가지 방법을 요약·비교하였으며 이러한 방법들의 타당성을 제시하였다. 향후 보다 다양한 조건에서의 모형 실험 및 현장측정 수행과 수치모형 결과와의 비교·분석을 통하여 국내의 해양방류환경에 적합한 방류경계 부여방법의 개발과 이를 이용한 모형의 개선이 필요하다고 판단된다. ●

표 1. 마산만 하수확산관의 제원

확산관 제원	확산관길이	210m
	유도관 간격	10m
	방류공 직경	0.2m×4개
방류수 특성	방류량	2.315m ³ /s
	방류온도	30℃
	방류염도	0 ppt
주변수 특성	조류속도	0.035 m/s (소조기)
		0.155 m/s (대조기)
	여름철 밀도	1019 kg/m ³ (수표면)
		1024 kg/m ³ (바닥)

〈참고문헌〉

- 김대근, 서일원 (2000). "수중다공확산관에서 방류된 온배수의 혼합거동 해석: I. 모형의 수립과 검증." 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 20권, 제 4-B호, pp. 461-470.
- 김영도, 서일원, 강시환, 오병철 (2000). "3차원 원역모형을 이용한 수중방류수의 근역 혼합특성 민감도 분석." 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 20권, 제 5-B호, pp. 689-700.
- 서일원, 김영도 (2001). "해양방류 수치모형에 관한 최근 연구동향 및 성과(1): 제1편 근역혼합 모형의 시각화 방법." 한국수자원학회지 학술기사, 한국수자원학회, 제 34권, 제 3호, pp. 68-75.
- 이재형, 서일원 (2000). "난류원형 부력제트의 혼합거동해석: I. 수치모형의 개발 II. 수치모형의 검증." 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 20권, 제 2-B호, pp. 231-250.
- Blumberg, A. F., Ji, Z. G., and Ziegler, C. K. (1996). "Modeling outfall plume behavior using a far field circulation model." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 122, No. 11, pp. 610-616.
- Kim, D. G. and Seo, I. W. (2000). "Modeling the mixing of heated water discharged from a submerged multiport diffuser." *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 38, No. 4, pp. 259-269.
- Zhang, X. Y., and Adams, E. E. (1999). "Prediction of near field plume characteristics using far field circulation model." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 125, No. 3, pp. 233-241.