韓國海岸海洋工學發表論文集 (2003)
第14券, pp. 199-207

근·원역 온배수 혼합의 예측을 위한 결합모형
A Hybrid Model for Predicting Near and Far Field Thermal Discharge Mixing

황인태[1] • 김덕호[2] • 이정렬[3]
In Tae Hwang[1], Deok Ho Kim[2] and Jung Lyul Lee[3]

1. 서 론

발전소 온배수와 같은 폐열의 방류는 여타 방류와는 달리 방류량이 단위 호기당 20~50ton/s 가량으로 매우 크며, 따라서 그 영향을 받는 해역도 매우 크다는 점이 특징이다. 최근 국내에서 시도되고 있는 심층 온배수 방류는 주변수에 비해 밀도가 작은 제트나 플룸의 형성 후 급격한 부력상승과 밀도차에 의한 수평 부력 확장(lateral buoyant spread)이 준 지배적인 현상으로 하수장의 혼합에 비해 좀 더 복잡한 양상을 띄게 된다.

심층 방류에 따른 근·원역 혼합 예측을 위한 기존의 연구는 두 영역의 시·공간적인 규모가 판이하기 때문에 근래까지도 각각 고유의 영역에서 연구되어 왔으나, Zhang(1995)에 의한 결합모형이 하수장의 혼합에 대해서 시도된 이후 두 영역의 모형을 결합하는 시도가 활발해지고 있다(Kim *et al.*,2002).

근역모형의 경우는 크게 제트 적분 모형(jet integral model)과 특성 길이 모형(length scale model)으로 구분되며, 기존에 결합모형(hybrid model)에 사용된 근역모형은 제트의 특성을 간단한 수식으로 표현할 수 있는 제트 적분 모형이 주로 사용되어 왔으나, 본 연구에서는 이송 해석에 유리한 라그란지안 입자추적 기법을 방류운동량(discharge momentum)에 의한 능동적인 이송(active advection)이 우세한 근역에 적용하였다. 근역에서의 입자의 거동은 길이축적 모형인 CORMIX1의 "방류 운동량 우세 근역(MDNF, Momentum Dominated Near Field; Wright,1977)" 해석식을 채용하여 CORMIX1과 근사한 거동을 한다. 방류 운동량 우세 근역에서 제트는 가로흐름보다는 방류 운동량에 의해 그 궤적이 결정된다(weakly deflected jet). CORMIX(Jirka *et al.*,1996)는 전문가 도구로써 많은 사용자를 확보하여 충분한 검증이 이루어진 특성 길이 모형이며, 특히 CORMIX1은 심층 단일 방류공에 대한 해석을 수행한다.

원역에서의 온배수 거동은 주변수에 의한 수동 이송-확산(passive advection-diffusion)이 주요 기작으로 작용하며, σ-좌표계를 사용하는 전형적인 3차원 차분모형이 원역해석에는 적합하다.

기존의 연구에서 개발된 동적 결합 기법 모형은 근역모형에서 계산된 포착고와 희석률을 원역모형에 덧대는 형태였는데, 이러한 방법은 근소하더라도 질량 또는 열량의 손실을 피할 수 없으며, 하수장의 혼합과는 달리 상대적으로 피해 영향 범위가 중요한 온배수의 영향 해석 시 과소 또는 과대 평가될 우려가 있다. 따라서 본 연구에서는 심층에서 방류된 온배수의 보다 정확한 영향권 해석을 위하여 근역과 원역을 결합하는 결합모형을 제시

1 한국해양과학기술 부설연구소(Research and Development Institute, Korea Ocean Science & Engineering Corp., Seoul 175-9, Korea)
2 한국전력기술 환경기술실 (Department of Environmental Technology, Korea Power Engineering Company Inc., Yongin 449-713, Korea)
3 성균관대학교 토목환경공학과 (Department of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea)

하고자, 다음과 같은 내용의 모형을 개발 및 검증하였다.

근역에서 방류수의 운동량, 유량, 질량, 열량의 정보를 담고있는 개개의 입자가 라그란쥐안 거동을 하는 입자추적 모형을 제시하였으며, CORMIX1 방류 운동량 우세 근역(MDNF) 해석식에 의해 제시된 능동 이송과 표준 정규 분포 확산으로 구성되어있다.

원역에서는 순환 및 수동 이송-확산에 유리한 3차원 차분 모형을 이용하였고, 두 모형은 매 시간 단계마다 상호 결합되는데, 원역 모형으로부터 얻은 유속장은 근역 모형에서 주변수의 유속으로 사용되어 방류수의 궤적, 포착고 등에 영향을 미치며, 근역 모형의 각 입자가 갖는 단위 유량, 질량 및 열량은 원역 모형의 해당 격자 수위 및 수온으로 반영되어 온배수의 확산 분포를 산정한다.

제시된 모형에 대한 검증은 첫 번째로 근역모형의 입자 궤적 및 확산 분포를 CORMIX 모형의 궤적 및 분포와 비교하여 CORMIX 모형의 반영 정도를 검토하였으며, 두 번째는 근역모형에서 원역모형으로 전달된 열량이 모델의 폐경계 내에서 주어진 열량과 동일한지 비교하여, 동적 결합 알고리즘이 적합한지를 검토하였으며, 세 번째는 CORMIX에서 제시된 수표면 수평 확산 분포와 결합모형의 수평 확산 분포를 비교하여 모형의 실제 적용성을 검토하여 보았다.

본 모형은 실제 근역에 해당하는 부분의 물리현상은 정상상태에 도달하기까지 수 초에 불과하다는 점에 착안하여 비정상 상태에도 적용 가능토록 하여 일반적인 근역모형의 한계를 해결하며, 제트를 모의할 수 없는 정수압 가정의 3차원 차분 원역 모형에서도 제트에 의한 초기 희석을 반영할 수 있도록 한다는 기존의 혼합모형의 장점을 그대로 수용하면서 더불어 정확한 열량 전달에 의해 온배수의 영역 산정시 오류를 최소화하였다는 점, 근역에서 입자추적 기법을 사용함으로써 다중 방류공의 초기 중첩 효과를 미흡하게나마 반영 가능하다는 점, 또한 수리 실험에 의한 경험식을 토대로 한 CORMIX 모형을 적용하여 보다 정확한 초기 희석율을 제시할 수 있다는 특징을 가지고 있다.

2. 이 론

2.1 근역 입자 추적 모형

무작위 행보하는 입자의 거동은 다음의 (1)식으로 표현된다 (Lee and Wang, 1994).

$$\delta x = u_j \delta t + \sqrt{2K\delta t}\, Z_n \qquad (1)$$

여기서, δx와 u_j는 공간변위 벡터와 능동유속 벡터이며, 각각 $(\delta x, \delta y, \delta z)$와 (u_j, v_j, w_j)로 정의되며, δt는 근역모형의 시간간격이다. δt는 근역의 작은 시간규모를 고려하여 원역모형의 시간간격 Δt에 비해 10~100배 정도 작은 값을 갖는다. Z_n은 표준 정규 분포를 갖는 난수 발생 함수이며, K는 확산계수를 뜻한다. $u_j \delta t$항은 제트의 능동 이송에 의한 확정적인 변위 성분이며, $\sqrt{2K\delta t}\, Z_n$항은 확산에 의한 확률론적인 변위 성분으로 제트의 중심을 기준으로 정규 분포를 따르며 제트 단면에 입자가 원형으로 분포된다.

서(1998)에 의해 제시된 능동적 입자추적 기법은 무작위 행보(random walk)하는 입자의 확정적인 성분에 능동적인 이송에 해당하는 부력 특성을 부여토록 하였다. 본 연구에서는 이와 같은 능동적 입자 추적 기법을 이용하여 능동 이송을 심층에서 제트를 형성하는 경우인 CORMIX1의 방류 운동량 우세 근역(MDNF) 해석으로 대치하여, 근역 심층 제트의 이송 및 확산 해석에 CORMIX를 활용토록 하였다.

방류 운동량 우세 근역에 대해 CORMIX1이 주변수의 흐름에 대해 직각방향으로 방류할 경우로 간략화하면 다음의 식(2)와 같다(Doneker and Jirka, 1990).

$$\begin{aligned} x_{jc} &= \eta \\ y_{jc} &= \frac{u_a \eta^2}{T_{11}^2 \sqrt{u_0 Q_0}} \\ z_{jc} &= \frac{g' T_{11B} \eta^3}{u_0 \sqrt{u_0 Q_0}} \end{aligned} \qquad (2)$$

위 (2)식에서 (x_{jc}, y_{jc}, z_{jc})는 방류제트의 중심선 궤적 좌표이며, $g'(=g\Delta\rho/\rho_a)$에서 g는 중력가속도, $\Delta\rho$는 방류수와 주변수와의 밀도차, ρ_a는 주변수의 밀도이다. u_0와 Q_0는 방류수의 유속과 유량이며, u_a는 주변수의 유속, T_{11}과 T_{11B}는 실험상수로써 각각 2.3과 0.07이나 검증 과정에서 2.65와 0.055로 보정하였으며, η는 xz평면에 투영된 방류입자의 궤적이라고 정의된다.

위의 (2)식을 이용하여 입자가 방류된 이후의

시간 t_j로 미분하여 능동유속 u_j를 구하고자, 우선 η를 t_j에 관한 식으로 다음과 같이 정의하였다.

$$\eta = u_0 t_j^a \tag{3}$$

위 (3)식은 입자가 방류된 이후의 시간, t_j에 따라 방류입자의 초기유속, u_0가 제트 경계면의 마찰에 의해 지속적으로 감소된다고 가정하였으며, a는 CORMIX와의 확산 분포 비교 검증 과정에서 2/3으로 정하였다. 이러한 가정식은 여러 형태가 존재할 수 있으며, a 또한 확정적인 값은 될 수 없지만, η는 독립변수이기 때문에 중심선의 궤적은 변동이 없으며, 단지 확산분포와 방류제트의 수면 도달 시간만이 변화하게 되는데 이와 같은 영향은 확산계수의 보정으로 대신하였다.

위의 (3)식을 (2)식에 대입하여 t_j로 미분한 능동유속 u_j는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u_j &= \frac{dx_{jc}}{dt_j} = \frac{2u_0}{3t_j^{1/3}} \\ v_j &= \frac{dy_{jc}}{dt_j} = \frac{4u_a u_0^2 t_j^{1/3}}{3T_{11}^2\sqrt{u_0 Q_0}} \\ w_j &= \frac{dz_{jc}}{dt_j} = \frac{2g' T_{11B} u_0^2 t_j}{\sqrt{u_0 Q_0}} \end{aligned} \tag{4}$$

방류 지점에서 생성된 개개의 입자는 매 시간 t_j 마다 (4)식과 같은 유속을 갖게 되며, (4)식을 (1)식에 대입하면, 매 근역 시간 간격, δt 마다의 방류 운동량 의한 변위 δx를 구할 수 있다.

2.2 동적 결합 기법 및 원역 3차원 차분 모형

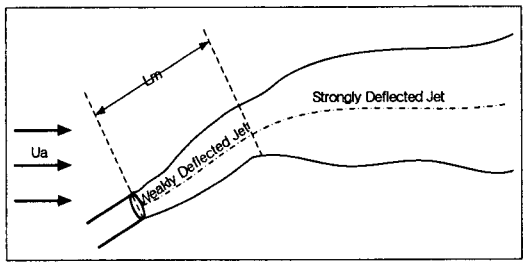

Fig. 1. 가로흐름이 있을 경우 제트의 거동 (Doneker and Jirka, 1990).

방류수가 제트를 형성하면서 방류 운동량과 가로흐름, 부력 등의 상호작용에 의해 확정적인 궤적을 따라 급격한 난류 혼합을 하면서 이동하는 방류 운동량 우세 근역의 영역은 $\psi \ll L_m$ 으로 정의되는데, ψ는 흐름을 따라 이동한 방류수의 궤적거리이며, L_m은 방류 운동량/가로흐름 특성길이로 $L_m = (u_0 Q_0)^{1/2}/u_a$로 정의된다(Fig. 1). 이 영역을 벗어나면 방류수는 천이 구간을 지나 수동이송 및 확산하는 원역으로 진행되므로 입자가 가지

continuity eq. :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

momentum eq. :

$$\begin{aligned} &\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = \\ &\quad fv - \frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(A_H \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(A_H \frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(A_V \frac{\partial u}{\partial z}\right) \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = \\ &\quad -fu - \frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(A_H \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(A_H \frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(A_V \frac{\partial v}{\partial z}\right) \end{aligned}$$

mass conserve. eq. :

$$\begin{aligned} &\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = \\ &\quad \frac{\partial}{\partial x}\left(K_H \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_H \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_H \frac{\partial T}{\partial z}\right) \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} + \frac{\partial wS}{\partial z} = \\ &\quad \frac{\partial}{\partial x}\left(K_H \frac{\partial S}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_H \frac{\partial S}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_H \frac{\partial S}{\partial z}\right) \end{aligned}$$

고 있는 방류수 정보는 원역모형으로 전달된다.

원역 모형은 수동 이송-확산 현상에 적합한 연직 정수압 가정 3차원 차분 모형을 사용하였으며, 수직적으로 σ 좌표계를 사용하고, 연직 난류 계산은 평형 폐합 기법(equilibrium closure, 2nd order scheme)을 이용한다. 위의 (5)식은 3차원 차분 모형의 데카르트 좌표계상의 지배 방정식이고, (6)식은 온도와 염분에 대한 보존 및 상태 방정식이다.

u, v, w는 각 x, y, z방향의 유속이며, p는 압력, T, S는 수온과 염분도이며, ρ는 밀도, A, K, D는 난류 점성계수 및 확산계수를 뜻한다.

원역 모형에서 계산된 유동장 u, v, w는 근역모형에서는 주변수의 유속 u_a로 정의되어 능동유속 계산식(4)에 활용되며 입자의 궤적에 매 계산 시간마다 영향을 미치게 되어, 비정상상태의 근역해석을 가능하게 하는데 이는 주기적인 조석 현상 등의 주변 환경을 고려한 근역해석을 포함한다.

반면 근역모형이 원역모형으로 전달해주는 물리량은 이보다 복잡한 양상을 띄게 되는데, 근역모형의 계산 값은 원역모형의 부하량(source loading)으로 작용하며, 분리된 두 모형 사이의 질량 및 열량은 보존되어야 한다. Zhang and Adams(1999)는 하수장 모의 결합기법에서 농도와 유량을 부여하는 방법을 Fig. 2와 같이 4가지 형태로 분류하여 제시하였다.

방법 I은 방류구에서 유량과 농도를 부여하는 방법으로 원역모형 만을 사용하는 방법인데 이와 같은 경우는 격자 크기, 확산 계수 등에 의해 포착고 및 초기 희석률 등이 매우 민감하게 변화되

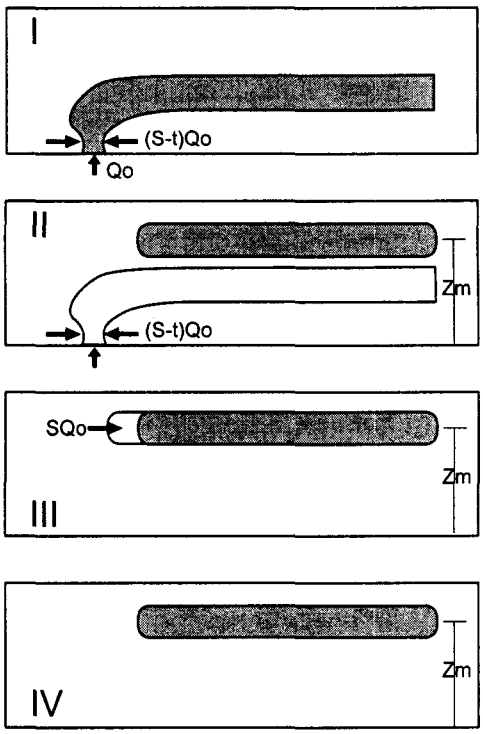

Fig. 2. 결합모형에서의 유량 및 농도부여방법 (Zhang and Adams, 1999).

며 이러한 물리 변수가 사용자의 경험에 의존하기 때문에 정밀도가 저하되며, 특히 본 연구와 같이 제트를 모의할 시에는 세밀한 격자가 요구되어 계산 효율이 떨어진다는 단점이 있다. 그러나 물리적인 가정이 최소화되어 있으므로 충분히 세밀한 격자를 사용할 경우 정확한 해를 구할 수 있다. 방법II는 유량은 방류구에서 부여하나 농도는

Table 1. 유량 및 농도 부여 방법 및 특징 (Zhang and Adams, 1999)

특 성	I	II	III	IV
유량 부여	방류구	방류구	근역	-
농도 부여	방류구	근역	근역	근역
부력 확장	○	×	○	×
질량 보존	○	○	×	○
근역 해석	정적결합	동적결합	동적결합	동적결합

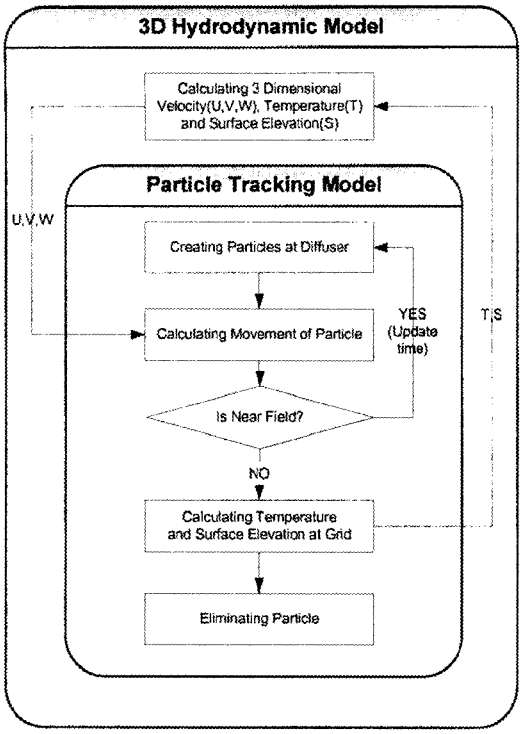

Fig. 3. 결합모형 계산 흐름도.

근역모형에서 계산된 포착고에서 부여하는 방법으로 근역모형과 원역모형간의 포착고 불일치가 생길 수가 있다. 방법Ⅲ은 포착고에서 유량과 근역모형에서 계산된 농도를 부여하는 방법이며, 심층에서의 포획연행이 반영되지 않고 유동장이 왜곡되게 된다. 방법Ⅳ는 오로지 근역모형의 농도만 포착고에서 부여되는 경우이며, 하수장과 같이 주변수와의 밀도차가 크지 않고 주변수에 미치는 영향이 작을 경우에 결합기법으로써 유용하다. 각 방법의 특징은 Table 1과 같다.

본 연구에서는 이와 같은 분류기준에서 하수장과는 달리 온배수 방류시 준지배적인 현상으로 영향을 미치는 부력 상승 및 부력 확장을 재현하고자 방법Ⅲ의 개념을 이용하였고, 입자추적기법의 특성을 이용하여 질량(열량) 및 유량의 손실을 최소화하여 방법Ⅲ의 단점을 보완하였다.

각 근역을 벗어난 입자는 단위유량(Q_p), 단위질량(m_p) 및 단위열량(E_p)의 정보를 가지고 있으며 개개의 입자가 하나의 부하량으로써 역할을 하게된다. 방류구로부터 현 시각의 입자의 거리를 방류수 의 궤적거리, ϕ로 간주하였으며, ϕ가 방류 운동량 우세 근역인 L_m보다 크게 되면, 개개 입자의 정보는 원역 모형으로 다음과 같은 질량 및 열량 보존식(7)에 의해 수온과 수위로 변환되어 전달된다.

$$\zeta_{i,j} = \zeta_{i,j} + \Delta t \frac{\sum_{np} Q_p}{A_{i,j}}$$

$$T_{i,j,k} = \frac{E_{gi,j,k} + \sum_{np} E_p}{c(m_{gi,j,k} + \sum_{np} m_p)} \tag{7}$$

여기서, i, j, k는 입자가 위치한 해당격자 번호이며, np는 해당격자가 포함하고 있는 입자의 개수, ζ는 수위, A는 격자의 수평면적이다. c는 비열로 1kcal/kg/℃의 값을 갖는다. E_g는 해당격자가 기존에 가지고 있는 열량이며, m_g는 해당격자의 질량이다.

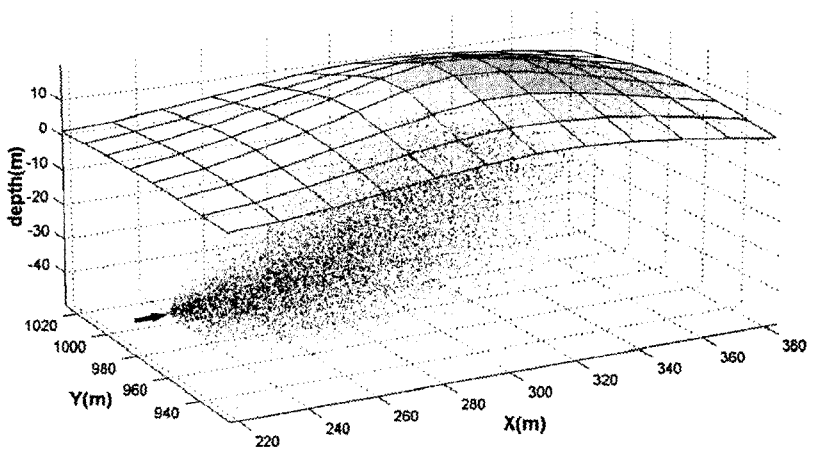

Fig. 4. 결합모형 3차원 모식도.

수온 및 수위로 변환된 입자는 더 이상 변위를 계산하지 않고 소멸된다. 따라서 입자의 생성과 소멸이 균형을 이루게 되면 수중에 존재하는 입자의 개수는 일정한 수준으로 유지되게 되며, 그 양은 사용자가 요구하는 정확도에 따라 조절 가능하므로 본 모형은 입자 추적 모형이 일반적으로 갖게되는 장기 모의시의 계산효율 저하가 발생하지 않는다. Fig. 3은 전체적인 결합모형 계산의 흐름도이며, Fig. 4는 결합모형 계산 시 방류된 입자가 3차원 모형의 격자에 수온으로 환산되는 상황에 대한 모식도이다.

3. 검 증

3.1 근역 부력 제트의 궤적 및 확산 분포 비교

능동유속 계산식 (4)에 의한 능동 이송과 무작위 행보하는 표준 정규 분포 확산에 의해 구성된 근역 입자추적 모형의 타당성을 CORMIX(ver. 4.1)와 비교하여 획득코자 하였다. 대표적인 검증 조건은 Table 2와 같으며 이에 대한 결과는 중심선 궤적 비교(Fig. 5)와 연직 수온 확산 분포(Fig. 6)로 도시하였다.

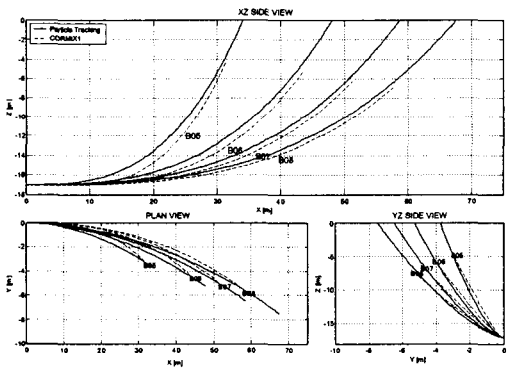

Fig. 5. CORMIX1과의 중심선 궤적 비교.

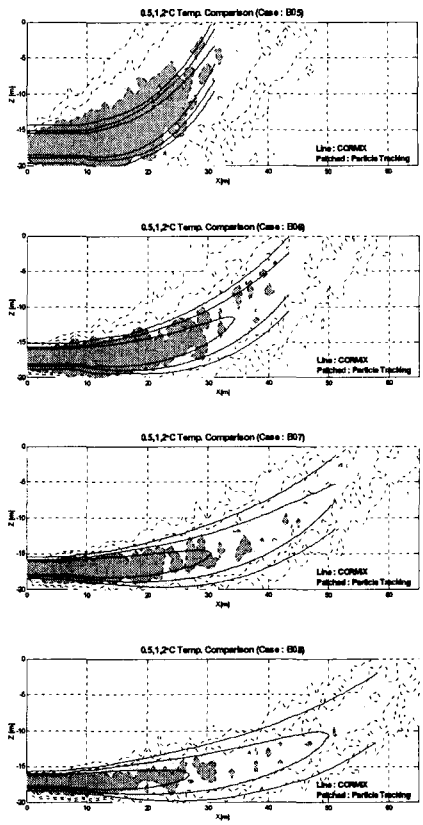

Fig. 6. CORMIX1과의 연직 확산 분포 비교.

이 외에도 방류량과 주변수 유속을 변경하면서 검증을 실시하였으며, 대체적으로 CORMIX와 일치하는 결과를 보였다.

3.2 열량 보존 실험

근역에서 원역으로 전달되는 물리량은 열량 및 질량이 있으며 각각 원역에서 질량 및 열량 보존식(7)에 의해 수온 및 수위로 환산된다. 이러한

Table 2. 근역모형 검증 조건

실험안	방류량 $Q_o(m^3/s)$	주변수유속 $u_a(m/s)$	방류 밀도차 $\Delta\rho(kg/m^3)$	방류 수심 $h_0(m)$	방류 초과수온 $\Delta T_0(℃)$	방류 유속 $u_0(m/s)$
CASE B5	5	0.05	1.78	18	8	1.0
CASE B6						2.0
CASE B7						3.0
CASE B8						4.0

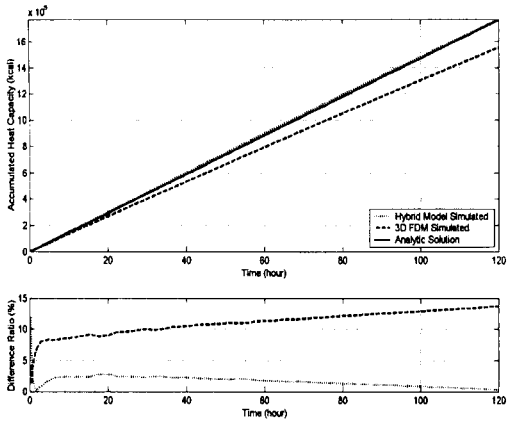

Fig. 7. 이상환경에서의 축적열량 및 오차 비교.

환산식의 타당성을 검증하기 위하여 외해의 경계는 모두 육지로 폐쇄하고, 수표면 열교환도 반영하지 않으며, 오로지 심층 방류에 의해서만 열량이 유입되며, 유출은 없는 이상적인 환경을 구성하였다.

열량의 유입은 온배수 방류에 의해 산정되며, 유출은 없기 때문에 다음과 같은 선형 축적 열량식이 가능하다.

$$E_a = c\rho_0 Q_0 t \Delta T_0 \tag{8}$$

여기서, E_a는 축적열량의 이론해, ρ_0는 방류수의 밀도, t는 방류 시작 후의 경과시간이다.

위 식(8)의 이론해와 본 결합모형 그리고 하천 경계를 이용하여 심층방류를 적용한 3차원 해수유동 모형의 축적 열량을 각각 비교해보았다. Fig. 7의 축적열량 비교 결과와 같이 일반적인 3차원 모형의 경우는 10% 가량에서 시간이 갈수록 오차가 발산하는 결과를 보인 반면 본 모형의 열량 오차는 초기에 최고 2.5%가량 발생하며, 이후 시간에 따라 점차 수렴하는 결과를 보였다. 따라서 식(7)과 같은 환산식이 신뢰할수 있다는 것을 보여준다.

3.3 수표면 수평 확산 분포 실험

심층 방류에 의해 형성된 온배수 제트로 인한 수온의 공간적인 확산 분포는 주변수 유속, 방류유량, 방류 유속, 방류 초과 수온 등과 같은 근역환경에 미치는 요인과 함께 수표면 열교환, 지형변화 및 유속장의 변화 등과 같은 원역 환경에 미치는 요인 등에 의해서도 민감하게 변화하며, 이를 동시에 만족시키는 실제 현상을 수치모형에서 재현하기는 매우 어려운 실정이다.

CORMIX는 원역에 대한 해석이 가능하며, 본 모형과의 비교 실험을 Fig. 8에 도시하였다. 실험안별 조건은 아래의 Table 3과 같다.

결합모형의 영역은 300m×500m이며, 10m 간격으로 30×50개의 격자로 구성하였고, 개방경계에서는 북에서 남으로 일정한 유속이 유지되도록 하여 CORMIX의 정상상태 가정 조건과 동일하도록 구성하였다. 계산 시간 간격은 원역은 $\Delta t = 10s$이며, 근역은 $\delta t = 0.5s$로 부여하였으며, 정상상태에 충분히 도달할 수 있도록 2시간 동안 모의하였다. 심층 방류는 Fig. 8과 같이 좌표상으로 X=85m, Y=400m, Z=-20m 지점에서 가로흐름이 되도록 서에서 동으로 방류토록 하였다.

Fig. 8과 같이 본 모의 조건하에서 CORMIX는 원역에서의 수온 분포를 수직 단면 균일 분포로 가정하는데 비하여 결합모형의 원역모형은 타원형과 유사한 동심원 분포를 형성하게되어, 직접적인 비교는 어려우나 방류 유량, 방류 유속 또는 주변

Table 3. 수표면 수평 확산 실험 조건

실험안	공 통 사 항	방류 유량 $Q_0(m^3/s)$	주변수 유속 $u_a(m/s)$
CASE A0	방류 수심 : 20 m 기저 수온 : 12 ℃ 초과 방류 수온 : 8 ℃ 기저 염분도 : 32 psu 방류 유속 : 2 m/s 열교환 계수 : 25 W/m²/℃	20	0.4
CASE A1		30	0.4
CASE A2		20	0.2

수 유속의 변화에 대해 CORMIX와 유사한 비율로 분포가 형성되는 것을 알 수 있다.

방류 모멘텀이 가로흐름에 비해 상대적으로 큰 CASE A1이나 CASE A2와 같은 경우 CORMIX의 결과는 결합모형의 결과에 비해 원역에서도 방류 방향으로 분포가 휘는데, 이는 본 모형이 근역에서 원역으로 전달되는 물리량 중 방류 운동량을 전달하지 못해서 생기는 것으로, 질량이나 열량과 같은 스칼라 값과는 달리 방류 운동량과 같은 벡터량을 전달하지 못하는 것은 본 결합모형의 한계라고 할 수 있다.

4. 결 과

모형의 수립 과정에서 여타 근역모형에서의 포착고에 해당하는 제트/가로흐름 특성길이, L_m이 원역에서 온배수의 시공간적인 분포에도 큰 영향을 미치는 것을 확인하였으며, L_m은 주변수 유속, 방류 모멘텀 등에 의해 매 시간 변화하는 값으로 조석 현상과 같이 창낙조가 반복될 경우, 일정한 방류 유량, 방류 유속이라도 주변수의 변화에 의해 수온의 공간적인 온도 분포 변화가 있을 수 있어, Fig. 9와 같이 창조나 낙조시와 같이 주변수의 유속이 강할 경우 낮은 수온 분포를 전류시와 같이 주변수의 유속이 0에 가까워지면 높은 수온 분포를 갖는 등 복잡한 양상을 띄게된다. 더욱이 조석이 있는 실제의 현상에 있어서는 피해범위 내에 잔류되는 열량과 함께 방류수가 혼합되므로 이러한 해석은 더욱 중요성을 띄게된다.

다중 방류공처럼 방류수가 서로 혼합되는 경우에 대해서 CORMIX모형은 원형 부력 제트가 아닌 직사각형 부력 제트로 가정하며 CORMIX2 모듈을 해석시 사용한다. 본 모형의 근역 해석은 기본적으로 원형 부력 제트를 가정하나 입자추적모형의 특성상 개개의 입자가 하나의 오염원으로써 작용하기 때문에 입자간의 상호 작용을 고려할 수는 없으나 서로간의 중첩이 가능하다(Fig. 10). 입자간의 상호작용은 근역에서의 제트 난류 확산계수

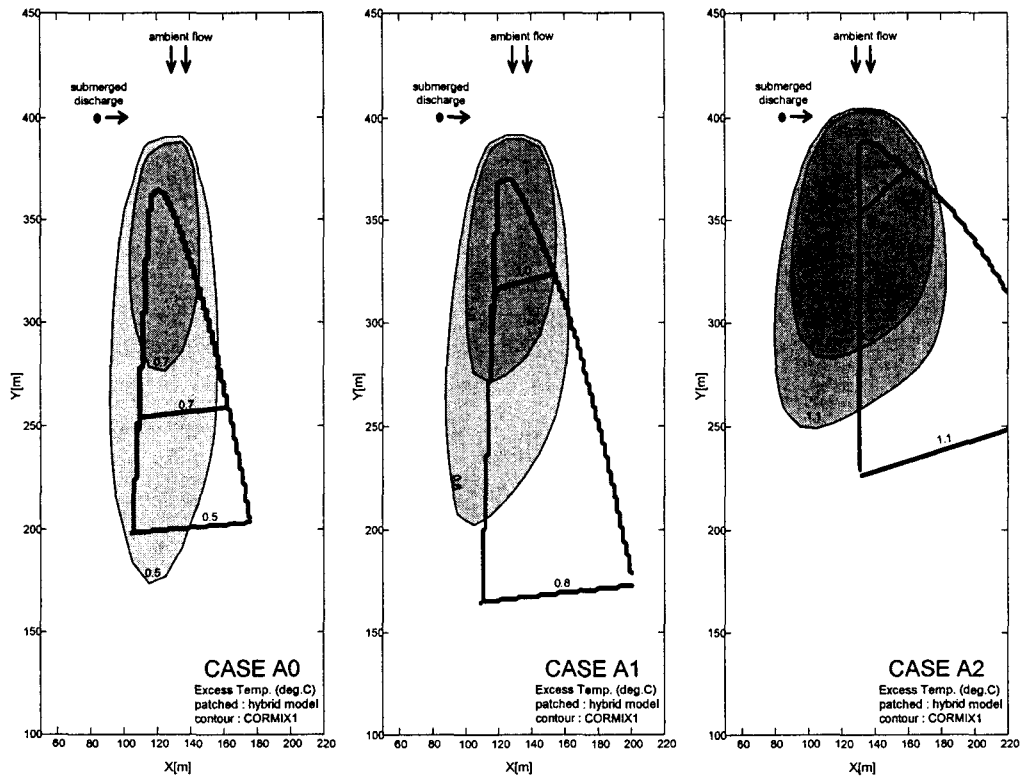

Fig. 8. CORMIX1과의 수표면 수평 확산 분포 비교.

와도 관련이 있어 차후 연구 되어야 할 과제로 생각된다.

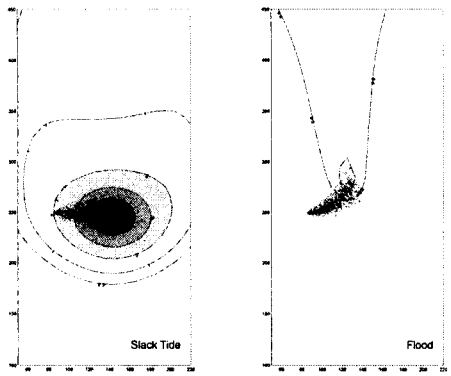

Fig. 9. 전류시와 창조류시의 분포 비교.

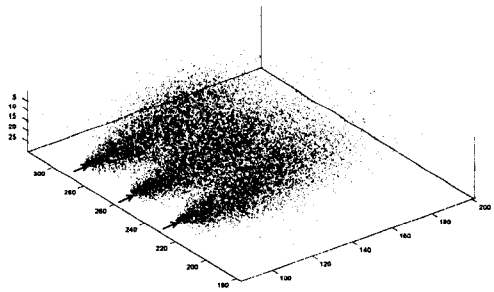

Fig. 10. 다중 방류시 중첩 모습.

5. 결 론

능동적 입자추적 기법과 CORMIX1의 궤적식을 이용하여 비정상상태를 반영할 수 있는 근역모형을 수립하였으며, 질량 및 열량을 보존하는 동적 결합 기법을 제시하여 3차원 차분 모형을 원역 모형으로 하는 결합모형을 수립하였다. 본 모형은 개발 초기 단계이며 CORMIX의 다양한 상황 해석 중 일부만을 차용하여 사용하였다. 그러나 본 연구에서 수립된 모형은 계산 효율과 피해 영역 산정 등에 장점을 가지고 있으므로 차후 현장에 대한 검증 과정을 거친다면 국내의 온배수 피해 영역 산정에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

서승원, 1998. 근역에서 부력 입자 추적 모형을 적용한 Eulerian-Lagrangian 결합에 의한 온수확산, 한국 해안·해양 공학회지, 10(2), 73-82.

Doneker, R.L. and Jirka, G.H., 1990. Expert system for hydrodynamic mixing zone analysis of conventional and toxic submerged single port discharge (CORMIX1), EPA/600/3-90/012, U.S. EPA, Environmental Research Lab., Athens, Georgia.

Jirka, G.H., Doneker, R.L. and Hinton, S.W., 1996. Users manual for cormix: a hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharge into surface waters, Office of Science and Technology, U.S.EPA, Washington D.C.

Kim, Y.D., Seo, I.W., Kang, S.W. and Oh B.C., 2002. Jet integral-particle tracking hybrid model for single buoyant jets, *J. of Hydr. Engrg.*, ASCE, 125(8), 753-760.

Lee, J.L. and Wang, H., 1994. One-D model prediction of pollutant transport at a canal network, *J. of the Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 6(1), 51-60.

Wright, S.J., 1977. Effects of ambient crossflows and density stratification on the characteristic behavior of round turbulent buoyant jets, Rep. KH-R-36, W.M.Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, Calif.

Zhang, X.Y., 1995. Ocean outfall modeling - interfacing near and far field models with particle tracking method, Ph.D. Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.

Zhang, X.Y. and Adams, E.E., 1999. Prediction of near field plume characteristics using far field circulation model, *J. of Hydr. Engrg.*, ASCE, 125(3), 233-241.