

# 근역에서 부력입자추적모형을 적용한 Eulerian-Lagrangian 결합에 의한 온수확산 Thermal Dispersion Analysis Using Semi-Active Particle Tracking in Near Field Combined with Two-Dimensional Eulerian-Lagrangian Far Field Model

서 승 원\*  
Seung Won Suh\*

**요 旨** : 연안에서 표층 방류된 온수의 확산-이송을 모의하고자 배출구 인근의 근역에서는 반능동적 입자추적의 원리가 적용된 무작위행보모형과 원역에서는 Eulerian-Lagrangian 농도가 결합된 2차원 모형이 개발되었다. 근역에서 표층으로 부상되는 온수괴는 부력을 갖는 다수의 입자군으로 변환되어 초기 평면확산의 증가를 나타내고, 이러한 부력확산의 영향이 무작위행보의 기본식에 도입되었다. 개발된 모형의 초기평가는 단순한 지형의 해역과 실제 해역에서 수행되었다. 단순해역에서는 부력이 고려되지 않는 중립입자모형의 결과에 비하여 초기 확산이 크게 나타나고, 기존 근역모형인 CORMIX3과 유사하나 외해측으로 확장된 성향을 보인다. 천수만에서 실제 적용 결과도 배출구 근처에서 관측치에 유사한 퍼짐 효과가 나타나며 모형의 적용성이 인정된다.

**핵심용어** : 부력입자, 무작위행보, 근역, 온수확산, 플룸

**Abstract** □ In order to simulate surface discharged heat dispersion in coastal area, a 2-dimensional Eulerian-Lagrangian model for far field and semi-active particle tracking random walk model in near field has been combined. The mass of discharged heat water in near field has treated as particles with buoyancy and this is eventually converted to horizontal additive dispersion in random walk equations. This model is applied to both a simplified coastal geometry and a real site. In simple application it can simulate plume-like characteristics around discharging point than a near field model, CORMIX3. Actual application in the Chonsu Bay shows farther spreading of heat water in near field comparing the observed data, and this shows that the developed model might be applied with satisfaction.

**Keywords** : buoyant particles, random walk, near field, heat dispersion, plume

## 1. 서 론

확산-이송 모형에 관한 연구에서 수송방정식을 수치 모형으로 근사화 시킬 때 가상확산 혹은 인위적 확산 (artificial dispersion) 이라는 오차와 wiggles라는 수치적 진동을 제거하기 위한 여러 가지 유용한 접근방법이 시도되고 있다. 수송방정식에 관한 해석을 접근방법에 따라 분류하면 Eulerian 좌표계에서 FDM이나 FEM을 이용한 연구, Lagrangian 좌표계에서 FDM이나 FEM을 이용한 연구, 그리고 Eulerian-Lagrangian 혼

합방식에 의한 연구 등으로 구분될 수 있다.

확산-이송 해석에 있어서 개선된 수치모형을 이용하더라도 실제로 이용하는 기본방정식은 수체내에 용해된 농도를 포함한 미분방정식이지만, 물리적으로는 자연 상태에서 일어나는 물질의 확산이 농도로 표현된 기본식에 의해 설명되기보다는 물질입자 개개의 무작위 움직임으로 표현하는 것이 보다 타당하다. 따라서 이와 같은 이유 때문에 근래에 입자의 무작위 움직임을 표현한 random walk(무작위행보) 방법이 국내 연구진들 사이에 활발히 이용되고 있다(서·김, 1994; 이·

\*군산대학교 해양시스템학과 (Department of Ocean System, Kunsan National University, Kunsan 573-702, Korea)

김, 1995; 김 등, 1995). 입자추적에 의한 무작위행보모형이 유용하게 이용될 수 있는 경우는 점오염물질이 오염원으로 수체내에서 확산되는 경우에 격자체계 운용 면에서 오염원 근처를 매우 조밀하게 이산화 해야 됴에도 불구하고 현실적으로 조밀한 이산화를 실시하지 못하는 경우이다(서, 1996). 그러나 지금까지의 입자추적에 의한 해석은 중립입자를 대상으로 하였고, 여기에 일부토사에 한하여 침강특성을 고려하는 시도가 있었다.

본 연구에서는 연안에서 표층 방류된 온수의 이송-확산을 효율적으로 정밀하게 모의하고자 입자추적 방법과 농도로 표현된 방법을 결합한 모형을 Tompson *et al.*(1988), Dimou(1989)가 제시한 방법을 응용하고, 전회의 연구(서, 1996)에서 Eulerian-Lagrangian 개념에 입각하여 고농도 ( $VC \geq 0.005$ ) 발생 인근해역 즉, 근해역(near field)에서는 random walk 개념에 의한 입자추적모형으로 그리고 원해역(far field)에서는 Eulerian-Lagrangian 농도모형에 입각하여 전 해역의 확산현상을 조화롭게 해석한 성과를 토대로 확대 해석한다. 그러므로써 지금까지 온수확산에 대하여 200 m 혹은 300 m로 국한된 근역의 특성을 모의하지 않고 전역모형을 적용하여 비현실적인 결과가 도출된 문제점들을 개선한다.

Pearce *et al.*(1990)이 입자추적모형에 의하여 온배수 확산을 예측한 실험결과가 있으나, 이들은 기존의 여타 수동적 무작위행보(passive random walk) 모형과 마찬가지로 원역에 대한 것만 입자모형을 이용하였고 근역에 대해서는 언급이 없었다. 그러나 본 연구에서는 입자추적모형 운용시 입자의 부력성질 개념을 도입하여 온배수의 방출을 다수의 입자군으로 표현함으로써 온배수 방출입자의 부력특성이 평면확산 기여로 전환되는 것을 모의하고자 시도하였다. 본 연구는 부력특성 입자를 고려한 반능동적 입자추적(semi-active particle tracking) 연구의 초기 시도로서 물리적으로 3차원적인 거동을 하는 근역의 특성을 완벽히 재현하지 못하는 제한사항이 있을 수 있다. 그러나 부력특성 개념이 도입되므로써 부력확산이 평면확산으로 확대 전환되는 것을 용이하게 설명할 수 있다. 또한 이러한 부력특성 입자추적 방법은 해양에서의 기름유출오염에 의한 표층부유 확산이나 어란 혹은 플랑크톤 등의 해양 생물중 햇빛을 쫓아 표층으로 부유 이동하는 추광성 수산생물의 거동모의에 직접적으로 활용가능성이 있는 장점을 지닐 수 있다.

## 2. 입자추적모형

### 2.1 무작위행보

무작위 운동의 입자추적에 의한 확산해석방법은 Monte-Carlo 방법인 random walk 개념에 입각한 것으로 근본적으로 대상영역내에 농도개념이 아닌 입자가 존재한다고 고려한 것이다. 현재에는 지표수와 지하수의 모든 분야의 확산해석에 폭 넓게 이용되고 있으나 특히 지하수의 해석에 광범위하게 적용되었다(Tompson *et al.*, 1988). 이 방법은 수학적인 통계개념으로 출발하여 시도되었으나 개개 입자의 운동을 묘사하기 위해서는 막강한 computer를 필요로 하므로 근래에까지 보편적으로 이용되지는 못하였지만 꾸준히 연구되고 있는 분야이다.

Random walk 개념에 의한 입자추적모형의 기본 개념은 용존질량이 다수의 입자를 집합으로 이루어졌다고 간주하고, 이 입자들의 운동이 크게 다음의 두 가지 성분으로 되어 있다고 본다. 즉, 확정적인 이송역학에 의하여 움직이는 것과 어떤 특정 분포를 따르는 확률론적인 확산의 운동이다. 이와 같은 입자의 움직임은 매 계산시간 단계에서 농도로 전환되는데 입자의 총량을 그 입자가 위치하는 점에 대한 주위의 지배면적으로 나누어 환산한다.

입자의 위치를 다음과 같이 확정적인 인자  $a$ 와 확률론적인 인자  $b$ 의 관계로 표현하면 이른바 비선형의 Langevin 방정식이 된다(Tompson *et al.*, 1988; Dimou, 1989).

$$\frac{dx_i}{dt} = a(x_i, t) + b(x_i, t) \xi(t) \quad (1)$$

여기서  $i=1, 2$ 는 평면적인 좌표계를 나타내고,  $\xi$ 는 난수로써 다음의 관계를 만족해야 한다.

$$\langle \xi(t) \rangle = 0 \quad (2)$$

$$\langle \xi(t) \xi(t') \rangle = \delta(t - t') \quad (3)$$

여기서  $\langle \cdot \rangle$ 는 기대치 혹은 평균을 나타내고,  $\delta$ 는 delta 함수를 나타낸다.

식 (1)을 적분하면 다음의 식 (4) 및 식 (5)를 얻고, Ito 가정에 의하면 식 (6)과 같이 표현된다.

$$x_i(t) - x_i(0) = \int_0^t a(x_i(s), s) ds + \int_0^t b(x_i(s), s) \xi(s) ds \quad (4)$$

$$x_i(t+dt) - x_i(t) = a(x_i(t), t) dt + \int_t^{t+dt} b(x_i(s), s) \xi(s) ds \quad (5)$$

$$dx_i = x_i(t + dt) - x_i(t) = a(x_i(t), t)dt + b(x_i(t), t) dW(t) \quad (6)$$

여기서  $W$ 는 난수 Wiener 로서  $\langle dW \rangle = 0$ ,  $\langle dWdW \rangle = dt$ 의 관계가 있다.

식 (6)을 차분형태로 고쳐 쓰면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta x_i = x_i^n - x_i^{n-1} = a(x_i^{n-1}, t^{n-1})\Delta t + b(x_i^{n-1}, t^{n-1}) \Delta W(t^n) \quad (7)$$

여기서 입자의 움직임은 확정론적인 부분  $a(x_{n-1}, t_{n-1})\Delta t$ 와 이와는 별도로 독립된 무작위 Markovian 성분  $b(x_{n-1}, t_{n-1}) \Delta w(t_n)$ 으로 구성된다.

수심적분된 2차원 물질 수송식을 앞에서 전개한 random walk 이론과 비교하여 얻은 관계식은 다음과 같이 된다(서, 1996).

$$\Delta x_i = \left[ \frac{D_{x_i}}{h} \frac{\partial h}{\partial x_i} + \frac{\partial D_{x_i}}{\partial x_i} + u_i \right] \Delta t + \sqrt{2D_x \Delta t} Z_n \quad (8)$$

## 2.2 부력입자 무작위 행보

온배수 방출초기의 부력특성은 주변의 유속변화와 함께 온배수 해석을 어렵게 한다. 특히 심층에서 방류되는 온수는 연직방향의 부력확산이 크게 작용하여 근역의 특성이 전적으로 부력확산 꺾으로 설명된다. 국내의 임해 발전소는 거의 대부분이 표층배수방식을 택하고 있는데, 표층방류 온배수는 심층의 꺾분사에 비하여 방류초기의 부력확산이 미약하다. 본 연구에서는 이러한 표층온배수 방출의 근역 특성을 부유성을 지닌 입자의 무작위행보 기법에 의하여 해석한다.

새로운 접근방법을 제안하게된 배경은 기존 Eulerian-Lagrangian 방법에 의한 확산해석에서 나타난 문제점인 질량불보존성(Tang and Adams, 1995)을 극복하는 것이고, 또 다른 이유는 상세한 해석을 하기 위하여 3차원의 수동역학적 모형을 적용하여 온배수의 부력확산 특성을 밝힌다 하더라도 온배수 방출구 인근 300 m 정도를 매우 미세하게 10 m 이내로 이산화 하여야만 만족스럽게 근역의 온배수 방출을 모의할 수 있지만, 실제로는 계산의 효율성과 컴퓨터의 사용제한으로 이렇게 미세한 격자체계를 3차원 모형에서 운용하는 것은 현실적으로 어렵다. 따라서 실제적인 대안으로서 2차원의 확산모형을 적용하여 표층 방류된 온배수의 확산을 해석하는데, 문제는 2차원 모형에서 부

력의 작용을 효과적으로 나타낼 수 없다는 점이다. 즉, 2차원 평면상에서 온배수의 거동을 근역에서는 입자추적모형을 이용하고 원역에서는 농도모형을 혼합 이용하는 방법도 실제로는 근역의 꺾특성을 미리 계산한 근역의 결과에 맞추어 진행하는 것이 보통이다(서·김, 1996). 물론 이 방법도 효율적으로 온배수의 확산을 모의할 수 있다는 장점이 있으나 근역의 부력꺾 특성을 미리 CORMIX3(Jones and Jirka, 1993)로부터 계산하여 patch 형태로 정의하여 격자체계에 올려놓고 계산을 함으로써 모든 전 과정을 물리적으로 명쾌히 설명하지는 못하는 제한사항이 있다.

입자추적에 의한 기존의 Lagrangian 해석기법은 대상으로 삼고있는 입자가 수동적인 운동만을 하는 것으로 고려되었다. 즉, 용존물질의 총량이 사용되는 입자의 총수( $N_p$ )에 따라 개개의 입자가 갖는 질량이 주변의 유동장의 움직임에 의하여 이동되고, 무작위 행보에 의한 확산을 하는 것으로 표현되었다. 그러나 본 연구에서 제안하는 방법은 입자가 수동적인 운동을 하되, 대상으로 삼는 물질이 온수괴의 입자들로서 부력특성에 기인된 연직상향의 능동적인 운동도 함께 지니고 있으며, 이러한 부력특성은 종국적으로 표층에서의 광범위한 평면확산으로 전환된다고 가정하였다.

완전한 능동적인 운동을 하는 입자를 고려한다는 것은 Lagrangian 운동의 해석 일부가 Eulerian 운동계에도 기여를 한다는 것을 의미하며, 유동특성을 설명하는 수동역학적 모형결과가 직접적으로 이용되지 못하고 이와 같은 능동적 운동을 하는 입자들에 의하여 매 시간 단계마다 수동역학모형이 수정되어야 함을 의미한다. 따라서 완전한 능동적 운동을 하는 입자의 추적방법은, 입자추적모형의 장점을 전혀 지니지 못하는 비현실적인 모형이 될 수밖에 없다. 그러므로 본 연구에서는 반능동적 운동을 포함하고 또한 유동장에 직접적으로 영향을 미치지 않는 대안으로써, 부력의 효과를 지닌 입자의 운동을 다음과 같이 가정하여 해석한다(Suh, 1997).

가정 1: 방출구를 나온 온배수는 주변해수밀도  $\rho_a$ 와 온수의 밀도  $\rho_o$ 의 차이  $\Delta\rho = \rho_o - \rho_a$ 에 기인한 부력을 갖는다. Fig. 1에서와 같이 부력을 갖는 입자는 부력이 없는 경우에 입자군이 흐름방향의 좌우로 무작위행보에 의하여 움직이는 것과는 달리 표층으로 부상되면서 무작위로 움직인다고 가정한다.

가정 2: 표층으로 부상되는 무작위운동에 기인한 부력 효과  $D_b(D_{buoyancy})$ 는 Fig. 2와 같이 방출구를 지나면

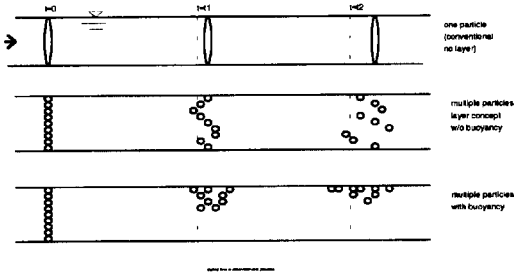


Fig. 1. Time dependent random walk of (a) single particle, (b) particles without buoyancy, (c) particles with buoyancy.

서 표층으로 부상되어 종국적으로는 평면적인 퍼짐에 기여한다.

가정 3:  $D_b$ 는 방출구로부터 시간과 위치에 따라 크기가 달라지며 공간적인 성분  $D_{bx_i}$ 와 시간적인 성분  $D_{bt}$ 로 구성된다.

가정 4:  $D_{bx_i}$ 는 다음과 같이 방출구로부터 거리가 멀어질수록 초기의 부력확산 효과는 급감하며, 초기부력확산은 원역의 확산보다 훨씬 큰 것으로 가정된다. 즉, 거리가 멀어지면서 지수적인 감소로써 표현된다. 이 가정이 적용되는 구간은 방출구를 나온 입자가 근역(NF) 내에 위치할 때만 적용되며, 초기 부력확산의 효과를 상실하는 근역의 경계에서는 부력확산이 없어지고 전역의 확산으로 전환된다. 구체적으로 다음식이 적용된다.

$$\begin{aligned} D_{bx_i} &= C_1 e^{-k_1 x_i}, \text{ for } x_i \leq x_{i_{NF}}, D_{bx_i} \geq D_x \\ D_{bx_i} &= D_{\max} \quad |_{x_i = x_{i_0}} \\ D_{bx_i} &\approx D_x \quad |_{x_i = x_{i_{NF}}} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,  $x_i$ 는 공간적인 좌표계( $i=1, 2$ )를 나타내며, 아

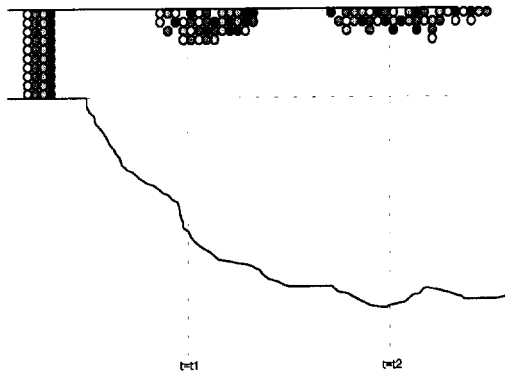


Fig. 2. Buoyant particles random walk of heated water around discharge point.

래점자  $o$ 는 방출구의 위치를,  $NF$ 는 근역의 위치를 나타낸다.  $C_1, k_1$ 은 수식의 전개에 사용된 계수로 위의 경계조건에 의해 결정된다.

가정 5:  $D_{bt}$ 역시 앞서의  $D_{bx_i}$ 와 마찬가지로 방출구를 나온 입자는 시간이 지나면서 부력특성을 급격히 잃어 버린다. 역시 지수적인 감소로 표현할 수 있으며 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D_{bt} &= C_2 e^{-k_2 t}, \text{ for } t \leq t_{NF}, D_{bt} \geq D_t \\ D_{bt} &= D_{\max} \quad |_{t=0} \\ D_{bt} &\approx D_x \quad |_{t=t_{NF}} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서  $C_2, k_2$ 도 위의 경계조건으로부터 결정되어지는 계수이다.

가정 6: 최대 부력확산( $D_{\max}$ )은 온수와의 밀도차( $\Delta\rho$ )에 의하여  $D_{\max} \propto \Delta\rho$ 와 같이 결정되며, 아래 식으로 표현되는데,  $n$ 은 실제 관측으로부터 결정되어야한다.

$$D_{\max} = (1 + n \Delta\rho) D_x \quad (11)$$

따라서 부력확산을 고려한 반능동적 입자추적(semi-active particle tracking)은 최종적으로 위에서 언급하였던 random walk의 식 (8)을 다음과 같이 변형함으로써 이루어진다. 즉, 확정론적인 부분에  $D_{bx_i}$ 를 도입하고 무작위부분에  $D_{bt}$ 를 도입하여 표현함으로써 온수방류의 효과를 고려할 수 있다.

$$\Delta x_i = \left[ \frac{D_{bx_i}}{h} \frac{\partial h}{\partial x_i} + \frac{\partial D_{bx_i}}{\partial x_i} + u_i \right] \Delta t + \sqrt{2D_{bt} \Delta t} Z_n \quad (12)$$

근역에서 계산된 부력입자의 무작위행보에 의한 입자들의 최종 위치는 격자체계상에서 해당되는 매 입자가 동일한 질량으로 이루어졌다고 가정하고 본 연구와 같이 유한요소법을 적용하면 임의의 요소에서의 농도는 다음과 같이 산정된다.

$$c = m \frac{P}{(A \bar{h})} \quad (13)$$

여기서  $m$ 은 계산에 이용된 총질량을 입자의 수로 나눈 개개의 입자가 갖는 질량이며,  $P$ 는 요소 내에 위치한 입자의 개수,  $A$ 는 유한요소의 면적 그리고  $\bar{h}$ 는 요소내의 평균수심이다. 위의 식으로 산정된 요소내의 농도는 다시 유한요소모형화 과정에서 이용한 보간방법을 통하여 절점에서의 값으로 치환된다.

### 3. Eulerian-Lagrangian 농도모형

입자추적방법에 의해서만 전역의 온수 확산을 계산하는 것은 부력특성이 상실된 원역에서도 연속적으로 입자추적을 실시해야 하므로 경제적인 면에서 불리하기 때문에 공간적으로 고농도 변화가 있는 source의 근처에서 본 입자추적모형을 적용하고, 공간적으로 농도의 변화가 크지 않은 원역에서는 기존의 농도모형을 적용하여 해석하는 것이 바람직하다. 그러나 문제는 여하히 이러한 공간적인 영역을 구분할 것인가와 함께 입자추적에 의하여 계산된 다수의 입자들을 계산영역 위의 격자체계에 여하한 방법으로 농도로 변환할 것인가가 관건이 된다. 공간적인 근역과 원역의 구분은 이미 전회의 연구(서·김, 1995)에 서술된 바와 같이 현장조건에 달려있다. 대부분의 수치모형에서 계산된 결과는 개개 입자의 위치 확인보다는 전반적으로 관심 있는 대상영역에서의 농도의 변화를 파악하는 것이 중요하므로 본 연구에서도 최종적인 계산의 결과는 농도로써 표현토록 한다.

농도로 표현된 물질수송방정식을 2차원 직각좌표계에서 기술하면 다음과 같다(서, 1996).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_i^* \frac{\partial C}{\partial x_i} = D_{ij} \frac{\partial^2 C}{\partial x_i \partial x_j} + kC \pm S \quad (14)$$

여기서,  $C$ 는 온수의 농도[ $M/L^3$ ],  $t$ 는 시간[ $T$ ],  $x_i$ 는 좌표계,  $D_{ij}$ 는  $x=1, 2$  방향의 확산계수[ $L^2/T$ ],  $u_i^*$ 는  $x_i$  방향의 유속[ $L/T$ ],  $k$ 는 반응계수[ $T^{-1}$ ],  $S$ 는 sink 혹은 source[ $M/L^3T$ ] 이고,  $h$ 는 수심[ $L$ ] 이다.

기본방정식은 쌍곡형과 포물형 연산자를 포함하고 있어 수치적인 풀이가 어려우므로 다음과 같이  $C^f$ 라는 보조 변수를 도입하고 이송항과 확산항으로 분리하여 정리하면 아래의 식과 같이 분할된다.

$$\frac{C^f - C^{n-1}}{\Delta t} + \left( u_i^* \frac{\partial C}{\partial x_i} \right)_{n-1} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{C^n - C^f}{\Delta t} = \left( D_{ij} \frac{\partial^2 C}{\partial x_i \partial x_j} \right)_n + (kC \pm S)_n \quad (16)$$

여기서  $\Delta t$ 는 적분시간 간격,  $n$ 과  $n-1$ 은 시간단계로  $n$ 이  $n-1$ 보다  $\Delta t$ 의 지체를 나타낸다. Eulerian-Lagrangian 모형에서 계산은 독립적으로 수행되어 이송방정식이 먼저 계산되고 난 후에 확산방정식이 계산된다.

이송방정식을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{DC}{Dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + u_i^* \frac{\partial C}{\partial x_i} = 0 \quad (17)$$

이 식은 농도  $C$ 가 다음의 특성곡선 혹은 궤적에서 항상 일정함을 의미한다.

$$\frac{dx_i}{dt} = u_i^*(x, y, t) \quad (18)$$

따라서 시간단계  $n$ , 절점  $j$ 의 위치를  $P \equiv (x_j, y_j)$ 라하면 이점은 시간단계  $n-1$ 에서  $(P, n-1)$ 이었고, 특성곡선을 따른 후방추적을 통하여  $P$ 가 결정된다. 이로부터  $C(P, n-1)$ 는 시간대  $n-1$ 에서의 공간적인 보간을 통하여 결정된다. 본 연구에서는 공간적인 보간으로 Galerkin의 가중잔차 유한요소 방법을 이용한다.

위의 확산방정식에 포함된 미지의 농도  $C$ 는 다음과 같은 근사해가 도입되어 전형적인 유한요소법에 의거 개개의 유한요소 절점에서 구해진다.

$$C(x, y, t) \cong \hat{C}(x, y, t) = \bar{C}(x, y, t) + \sum_{j=1}^N \alpha_j(t) \cdot \phi_j(x, y) \quad (19)$$

여기서  $\bar{C}$ 는 필수경계조건으로서 경계역의 밖에서는 0, 경계에서는 미지의 값을 갖는다.  $\alpha_j$ 는 절점  $j$ 에서의 미지치,  $\phi$ 는 보간함수이며,  $N$ 은 유한요소의 총절점수이다.

근사해  $C$ 를 확산방정식에 대입하고 Galerkin의 가중잔차 유한요소법을 적용한다. 가중함수로서 보간함수인  $\phi$ 를 취하여 유한요소영역에 관하여 적분하였을 때 생성되는 오차를 최소화시킨다. 이와 같은 일련의 과정을 거쳐 수립된 전체영역에 관하여 조합된 유한요소식은 다음의 행렬식으로 표현된다.

$$\underline{M} \underline{\dot{\alpha}} + (\underline{B} + \underline{A}) \underline{\alpha} = \underline{p} \quad (20)$$

여기서  $\underline{M}$ 은 질량행렬,  $\underline{A}$ 는 확산행렬,  $\underline{B}$ 는 반응이 고려된 행렬 그리고  $\underline{p}$ 는 생성 혹은 소멸과 경계조건이 고려된 열 벡터로 각각의 유한요소 내에서는 다음과 같다.  $\underline{\alpha}$ 는 유한요소 절점에서의 미지의 농도를 표현하는 열 벡터이다.

### 4. 모형실험 및 결과분석

부력특성이 없는 중립입자의 무작위운동에 대한 모형의 신뢰평가는 전회의 연구(서, 1996)에 서술되어 있

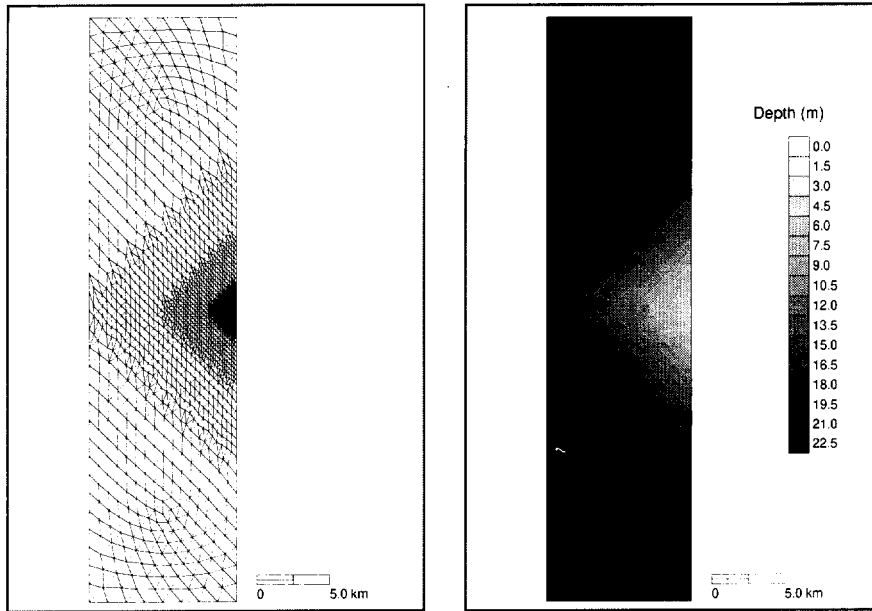


Fig. 3. Finite element meshes and topography for buoyant particle tracking tests.

으므로 생략하고, 부력입자추적에 의한 온수의 확산을 실제해역에 적용하기 전에 개발한 모형의 적용성을 평가하고자 단순한 이상적인 형태의 가상해역에 모형을 적용하여 부력입자추적 거동을 살펴본다.

모형실험에 이용된 가상적인 해역은 Fig. 3과 같이 가로 10 km, 세로 40 km 되는 직사각형의 만으로서 하단의 개방경계를 제외하고는 모두 폐경계로 설정되었다. 확산모형의 구동을 위해서 수동역학 해석이 선행되어야 하는데, 가상적인 만이지만 우리 나라의 연안에 본 모형을 적용한다는 전제하에 만의 평균위도를 북위 35°로 취하여 지구자전에 의한 Coriolis 영향을 고려하도록 하였다. 지형은 만의 우측 중앙부에 위치한 온수 방출구의 수심 4 m부터 점차 외해역으로 1/1000~3/1000의 경사로 일반해역에서의 경사를 가지고 깊어져 평균수심 20 m를 갖는 것으로 설정하였다. 공간적인 이산화는 최소 150 m에서 최대 4000 m로 방출구 인 근에서는 근역의 효과를 표현할 수 있도록 반경 800 m 이내에서는 격자간격을 150 m 정도로 하였다. 경계조건으로는 하단의 개방경계에서  $M_2$  조석의 성분인 주기 12.42 시간을 설정하였으며, 진폭은 1 m로 설정하였다.

온수 방류를 단순한 지형의 만에서 해석하고자 다음과 같이 제 조건을 설정하였다. 적용한 조건들은 가능하면 현재 연안해역에서 방출되는 실제의 발전소의 가

동조건과 동일하게 취하여 현지 적용에서의 적응성을 높이도록 하였다. 이용된 제 조건은 다음과 같다.

온수는 초당 65 m<sup>3</sup>의 양으로 방출되고 이는 현재 충남 천수만의 보령화력발전소에서 방출되는 양과 같으며, 500 MW의 발전시설용량을 생각하는 양이다. 초과수온은 7°C로 하였는데 역시 이 값도 설계에서 제시된 초과수온이다. 주변수의 밀도는  $\rho_a = 1021.7 \text{ kg/m}^3$ 으로 하였고, 온수의 밀도는  $\rho_o = 1020.7 \text{ kg/m}^3$ 로 가정하였다. 온수는 폭 15 m, 높이 2 m의 구형단면을 통하여 표층에서 배출된다고 가정하였으며, 역시 이와 같은 조건은 현재 배출되는 기준조건과 동일한 것이다. 즉, 방출구에서 온수 켓유속은 2.17 m/s로 연안에 직각방향으로 분출된다고 가정하였다. 이 방출유속은 수동역학모의를 위한 조화모형에서 수평방향의 유속성분에 추가하여 표현하였고, 근역의 경계까지 지수적으로 감소한다고 설정하였다. 주변의 최대조류속은 수동역학모형에서 계산된 0.22 m/s로 하고, 수표면의 풍속은 없는 것으로 하였다. 모형실험에서는  $D_{max}$ 와  $N_p$ 를 변화시키며 실험하였지만, 결과의 도시는  $D_{max} = 100 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $D_x = 10 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $N_p = 1000$ 을 적용한 경우에 국한한다. 이때 근역의 경계는  $x_{np} = 300 \text{ m}$ 로 제한하였다.

이러한 제 조건을 가지고 수치실험한 결과중 한 경우를 도식화하여 Fig. 4에 수록하였다. 그림은 단순해

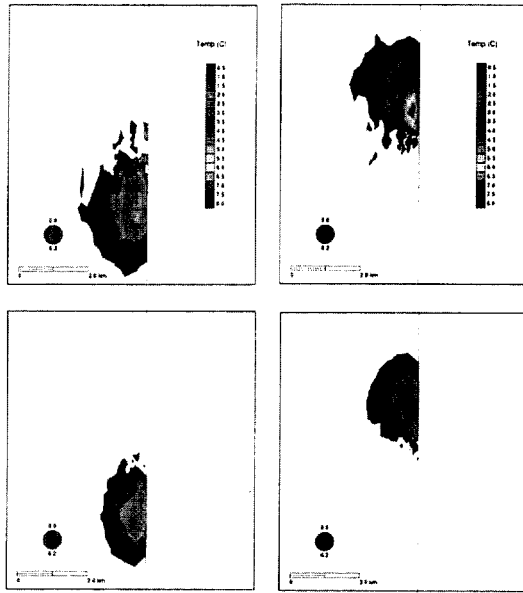


Fig. 4. Buoyant random-walk particle tracking results in terms of excess temperature around discharge point at ebb and flood tide. Upper figures represent considering NF buoyant effect in case of  $D_{max}=100 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $D_{xi}=10 \text{ m}^2/\text{s}$  for  $N_p=500$ . Lower ones are for neutral particles.

역의 온수방출구를 중심으로 일대를 확대하여 도시한다. 수치실험결과를 초과수온으로 표현하여 그렸는데, 온수확산은 자유젯 형태로써 외해로 약 1 km 떨어지고, 흐름방향으로는 약 2.5 km 정도까지 영향을 끼치는데, 연안귀환젯 형태로 온수의 흐름이 나타나며 영향역의 크기정도는 대체로 일치됨을 알 수 있다. 그리고, 본 모형의 실험결과가 근역의 모형인 CORMIX3를 적용하여 얻은 통상적인 결과보다는 배출구를 중심으로 플룸성격을 띄고 보다 확산된 결과를 나타내고 있다. 창·낙조시의 경우에도 외해 쪽으로의 확산이 다소 넓게 나타나고 있음을 알 수 있다. 중립입자인 경우로 해석한 결과에서는 퍼짐이 부력입자의 무작위행보 모형에 비하여 작게 나타나고 있다. 이러한 온수확산 성향을 실제해역에서 관측한 결과(서·김, 1995)와 비교 평가하면, 본 모형의 결과가 배출구 인근의 플룸특성을 만족스럽게 재현하는 것으로 판단되어 개발된 모형의 초기 적용성이 만족되는 것으로 사료된다.

### 5. 실제적용

부력입자 추적모형의 개발을 통하여 단순한에서 조

기 적용한 결과 모형의 응용성과 확장성이 제시되었으므로 실제 해역에 적용하여 현장적용성을 평가한다. 그러나 본 모형이 개발단계에 있으므로 현재의 단계에서는 모형의 검증보다는 현장관측치와의 비교평가에 주안점을 둔다.

실제해역에 적용하기 위하여 선정한 임해발전소는 천수만 내에 위치한 보령화력발전소로 현재 500 MW 급 6기가 가동 중에 있다. 천수만은 지형적인 특성상 바람 등의 외적인 영향을 거의 받지 않고 전적으로 만 입구에서의 조석에 의해 내부순환이 결정되는데 만내의 수심도 20 m~30 m 정도로써 대체로 일정하여 배출된 온배수가 성층화 되지 않으며 조간대의 영향을 크게 받지 않는다.

온배수 방출량은 계절 및 발전용량에 따라 다소 달라지나 설계용량인 500 MW당 초과수온 7°C의 13 m<sup>3</sup>/s에 버금가는 양이 배출된다. 수온의 연직구조와 근역 특성을 이해하기 위하여 현장관측이 실시되었던 4회에 걸친 배출량 및 수온은 이미 전회의 연구에(서·김, 1995; 서·김, 1996) 제시되었다. 냉각기를 통과한 온수는 표층으로 15 m×5 m의 콘크리트 박스를 통하여 배출된다. 방출된 온배수의 계절적인 분포변화는 전회의 연구에 제시되고 있어 본고에서는 생략하였다.

주변 조류속이 강할 때 측정하였던 1, 2회 관측시는 방류초기에 100 m 내외에서 방출초기의 젯 영향으로 약 8 m~10 m의 비교적 두터운 혼합수심을 보이던 것이 배출구로부터 거리가 멀어짐에 따라 부력의 영향을 받아 표층으로 부상되어 점차 혼합수심이 얇아진다. 대체적으로 배출구로부터 약 300 m 정도 유하된 이후에는 수온의 연직구조가 급격히 깨어지고 수심에 대한 수온의 연직온도구배가 둔화됨을 알 수 있다. 약 800 m 이후에는 수심 전층에 걸쳐 수온의 변화가 뚜렷이 나타나지 않는다. 상대적으로 주변 조류속이 약하였던 소조시인 3, 4회 관측시의 측정성과를 분석하면 배출구 인근의 100 m 내외에서는 약 7 m~8 m의 일정한 혼합수심이 유하거리가 증가하면서 연직혼합이 활발하게 나타나 혼합수심이 점차 두터워지고 수심에 대한 온도구배가 완만해진다. 이와 같이 표층 방류된 온수의 거동은 초기 부력특성에 의하여 급격한 표층부력확산을 보이나 일정거리 유하한 근역을 벗어나서부터 초기 부력특성을 상실하고, 난류확산에 지배되는 등 본 연구에서 부력입자추적 전개에서 가정한 사항들과 일치한다.

확산해석에 필요한 수동역학적 유동장의 확보를 위

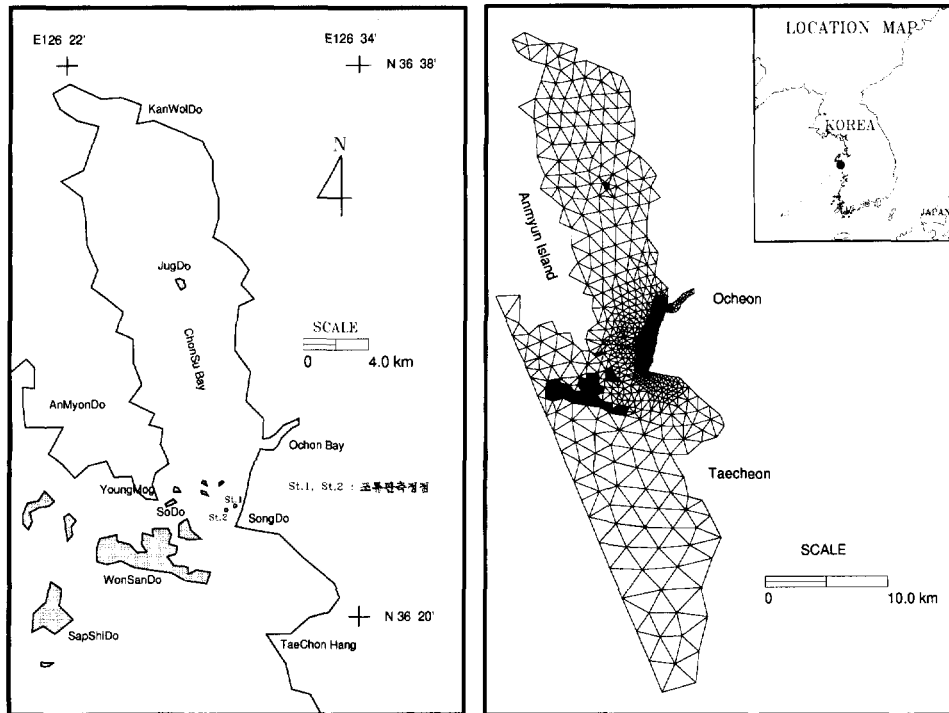


Fig. 5. Map showing study area (Chonsu Bay) and finite element grid system for real application of buoyant particle Eulerian-Lagrangian modeling.

하여 천수만을 Fig. 5와 같이 이산화 하여 조화모형을 이용하여 수치실험하였다.

온배수 방출의 모의를 효과적으로 하기 위하여 배출구 인근에는 방사상으로 유한요소망을 구성하였는데 이때 최소 격자간격은 배출구의 제원과 유사하도록 15 m로 설정하였다. 이러한 이산화는 Raithby(1988)가 3차원적인 온배수방출을 모의하며 접근하였던 것과 유사하다.

부력입자를 이용한 무작위행보에 의한 계산을 수행한 결과중 특정 시간대에 확산된 등수온 분포를 Fig. 6에 근역 모형인 CORMIX3를 이용한 결과와 비교하여 수록하였다. 이 때 적용된 조건은 부력입자의 수를  $N_p = 1000, 3000, 5000$ 으로 변화시키며 실험하였고, 부력의 효과를 유발하는 밀도차는  $\Delta\rho = 1.04 \text{ kg/m}^3$ 로 하였다.  $D_{\max} = 100 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $D_{x_1} = 5 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $D_{x_2} = 10 \text{ m}^2/\text{s}$ 으로 설정하였다.

실제해역에 초기 적용된 부력입자 확산의 실험결과, 외해역으로 플룸의 특성을 띠고 분포되고 있는 성향이 뚜렷하며, CORMIX3를 적용하여 해석한 결과와 비교하면 근역을 벗어나서도 근역에서의 표층확산 결과에

기인되어 공간적인 퍼짐이 크게 나타난다. 대체로 온수확산의 경향은 두 모형의 결과가 연안을 따른 분포에서는 유사하게 나타나고 있지만 외해방향으로는 확장된 성향을 보인다.

## 6. 결 론

연안에서 온배수의 확산 모의를 위하여 표층에서 방류되는 온수피를 다수의 부유성이 있는 입자군으로 보고 이들 입자가 무작위 행보에 의하여 확산되는 것으로 간주하여 해석한 본 연구의 실험결과는 다음과 같다.

온수의 확산에 대해서 근역의 특성을 부력입자로 설정하여 해석하였는데, 이러한 접근 방법은 무작위행보에 대한 기존의 관념을 탈피하는 효시적인 연구로서 의의가 있고, 타분야로의 적용성도 유리하다고 할 수 있다. 단순해역에서 적용한 모형실험의 결과는 기존의 근역모형을 이용한 것과 현저히 차이가 나지 않고 유사한 경향을 보이나, 평면적으로 배출구 인근에서 플룸특성을 보이는 등 본 연구에서 제시한 새로운 접근



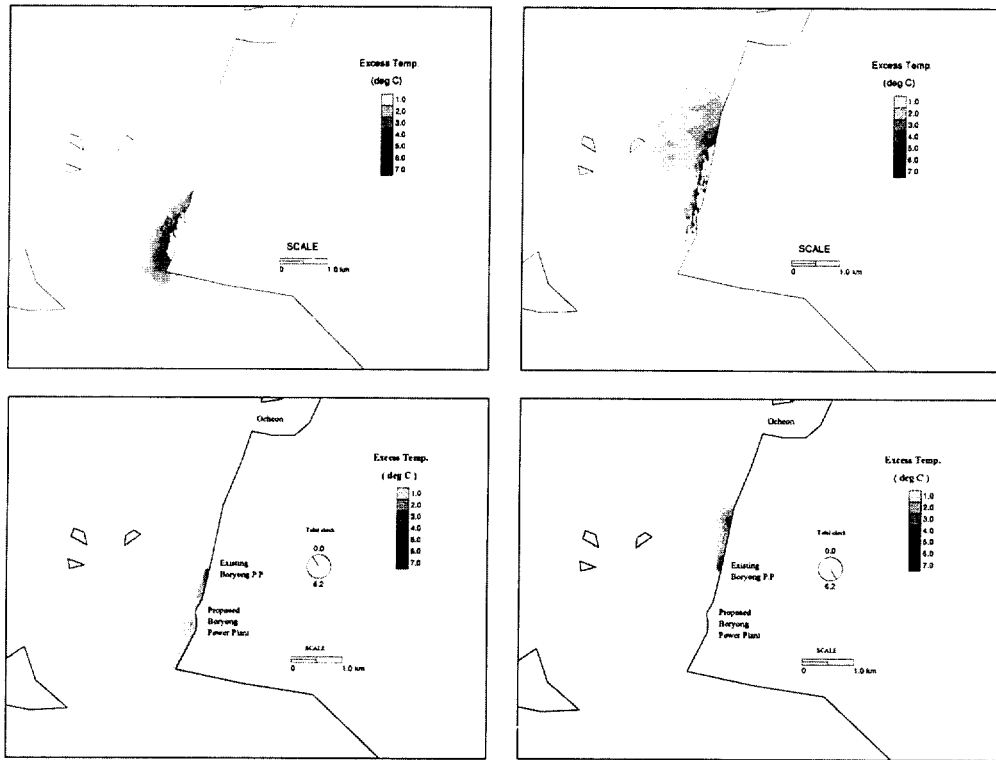


Fig. 6. Computed excess isotherms at ebb and flood flow by buoyant random-walk particle results comparing with hybrid model results of Eulerian-Lagrangian model with CORMIX3.

방법의 이용가능성을 확인시켜주고 있다. 그러나 본 모형은 연구의 초기단계로써 제한성도 없지 않으며, 실제 적용에서는 현장관측 자료로부터 분석된 최대 부력확산계수의 도입이 필수적이며 이와 관련된 계속적인 연구가 이어져야 할 것이다.

## 사 사

본 연구는 한국과학재단의 '95 핵심전문과제(951-1201-011-2)지원에 의하여 도출된 연구의 일부로 재단의 지원에 심심한 감사의 뜻을 전한다.

## 참고문헌

김지원, 양윤모, 권정곤, 1995. 수영만 해역의 오염물질 거동에 대한 수치평가모델의 개발, 대한토목학회회학술발표회 논문집, pp. 489-492.  
 서승원, 1996. Eulerian-Lagrangian 농도 및 입자 결합모형에 의한 연안의 부유사 확산해석, 한국해양·해양공학

회지, 8(2): 185-192.  
 서승원, 김덕호, 1995. 천해역에서의 표층온배수 확산해석, 한국해양·해양공학회지, 7(4): 340-345.  
 서승원, 김덕호, 1996. 근역특성이 고려된 수심적분모형을 이용한 표층온배수모의, 한국해양·해양공학회지, 8(1): 18-27.  
 서일원, 김대근, 1994. Eulerian-Lagrangian 방법을 이용한 1차원 종확산 방정식의 수치모형, 한국수문학회지, 27(2): 155-166.  
 이종섭, 김호진, 1995. Random Walk 모형에 의한 확산해의 민감도 분석, 대한토목학회논문집, 15(5): 1267-1277.  
 Dimou, K., 1989. Simulation of estuary mixing using a 2-dimensional random walk model, M.S. Thesis, MIT.  
 Jones, G.R. and Jirka, G.H., 1993. CORMIX3: An expert system for the analysis and prediction of buoyant surface discharges, *Tech. Rep.*, DeFrees Hydraulics Laboratory, Cornell University.  
 Pearce, B.P. et al., 1990. Thermal plume study in the Delaware River: Prototype measurements and numer-

- ical simulations, *Proc. Int. Conf. on Physical Modeling of Transport and Dispersion*, MIT, pp. 13B.7-13B.12.
- Raithby, G.D., Elliot, R.V. and Hutchinson, B.R., 1988. Prediction of three-dimensional thermal discharge flows, *J. Hyd. Div.*, ASCE, **114**(7), pp. 720-737.
- Suh, S.W., 1997. An Eulerian-Lagrangian particle dispersion modeling for surface heat transport, *Proc. 5th Int. Conf. on Estuarine and Coastal Modeling*, Alexandria, VA (in press).
- Tang, L. and Adams, E.E., 1995. Effect of divergent flow on mass conservation in Eulerian-Lagrangian schemes, *Proc. 4th Int. Conf. on Estuarine and Coastal Modeling*, pp. 106-115.
- Tompson, A.F., Vomvoris, E.G. and Gelhar, L.W., 1988. Numerical simulation of solute transport in randomly heterogeneous porous media: Motivation, model development and application, *Tech. Rep. 316*, R.M. Parsons Laboratory, Department of Civil and Environmental Engineering, M.I.T.