

# 와확산 모형을 이용한 마산 진해만의 수온 · 염도 · 용존산소 분포 모의

이길성\*, ○박상근\*\*

## 1. 서론

수온의 변화는 수중 생태계의 생물학적, 화학적 거동에 중요한 영향을 미친다. 특히 적조, 부영양화 등의 수환경 오염 문제의 심각한 대두로 이들과 밀접한 관련이 있는 수온 · 염도 · 용존산소의 분포에 대한 연구가 더욱 필요한 실정이다. 이러한 연구가 일반적으로 호수 등에서는 연구 사례가 많으나 국내 지역에 적용한 경우가 드물고, 특히 흐름 등의 영향을 받는 만에서의 적용 사례가 없어 마산, 진해만을 대상으로 수온 분포에 대해 일차원 와확산 모의를 하였다.

일반적으로 이러한 모의는 3 차원 난류 모형으로 해석을 하나, 조건을 간단히 하여 일차원 모형으로도 그 경향을 살펴볼 수 있는 것이다. 와확산 모형의 가장 중요한 값인 확산계수를 구하는 식은 많은 형태가 제시되어 있고 그 적용 지역에 따라 다양한 형태를 가진다. 여기서는 Henderson-Sellers(1985)가 제시한 방법과 Walters 등(1978)이 제안한 방법을 사용하여 그 값을 비교, 검토 해 보았다. 그리고, 이에 대한 민감도 분석을 수행하여 모형의 적용성에 대해서 알아보았다. 수온 분포 모의에 사용된 확산 계수 값을 이용하여 염도와 용존산소 분포 모의도 진행되고 있다.

## 2. 온도 분포 지배 방정식 및 확산계수 추정식

열 역학 제 1 법칙으로부터 유도된 연직방향의 일차원 와확산 모형의 온도 분포 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial H}{\partial z} \quad (1)$$

여기에서  $T$ 는 수온,  $z$ 는 수면을 기준으로 수심 방향으로 양의 값을 가지는 깊이,  $K$ 는 와확산 계수,  $c$ 는 비열,  $\rho$ 는 밀도,  $H$ 는 열원항이다. 태양 복사에 의한 에너지를 나타내는 이 항은 다음과 같다.

$$H = (1 - \beta) Q_0 e^{-\tau z}$$

---

\* 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

\*\* 서울대학교 대학원 토목공학과 석사과정

수면에서 태양 에너지의 흡수 정도를 나타내는  $\beta$ 와 소광 계수를 나타내는  $\eta$ , 두 가지 매개변수가 나온다. 그리고  $Q_0$ 는 수면에서의 순 태양 복사량이다. 와확산 모형에서 가장 중요한 와확산 계수를 구하기 위해 Henderson-Sellers가 제시한 다음의 식을 사용하였다.

$$K(z) = \frac{kw_s^*z}{P_0} \exp(-k^*z) (1 + 37R_i^2)^{-1} \quad (2a)$$

$$R_i = \frac{1}{20} \left[ -1 + \left\{ 40N^2k^2z^2 / (w_s^{*2} \exp(-2k^*z)) \right\}^{1/2} \right] \quad (2b)$$

$k$ 는 von Karman 상수,  $w_s^*$ 는 수면에서의 마찰속도,  $P_0$ 는 Prandtl 수로서 중립값(=1)을 사용함으로써 확산에 의한 에너지 전달과 운동량 전달이 같다고 보는 것이다.  $k^*$ 는 위도와 풍속으로 나타나는 Eckman profile의 매개변수이다.  $N^2$ 은 성층의 안정도를 나타내는 Brunt-Vaisala 진동수이다. 위의 식(2a)는 바람의 영향이 있는 수심까지가 적용 한계이기 때문에, 그 이하의 수심에서의 값에 대한 가정을 해 주어야 한다. 일반적으로 수온약층까지의 확산계수 값의 최소값을 수온약층 이하에서 상수로 사용한다. 이러한 접근과는 달리, Walters 등이 제시한 방법, 즉 혼합층 모형의 개념을 도입하여 층별로 다른 확산계수를 구하는 식을 사용하였다.

$$\text{표수층} \quad K(z) = K_s (1 + 0.048R_i)^{-1} \quad (3a)$$

$$\text{변수층} \quad K = K_{TC} \sqrt{N_{TC}^2 / N^2} \quad (3b)$$

$$\text{심수층} \quad K = 10K_{TC} \quad (3c)$$

$K_s$ 는 수면에서의 확산계수,  $K_{TC}$ 와  $N_{TC}^2$ 는 각각 수온약층(thermocline)에서의 확산계수와 Brunt-Vaisala 진동수이다. 여기에서  $R_i$  값은 Newbold와 Liggett(1974)이 제시한 방법으로 다음과 같이 구하였다.

$$R_i = -\alpha_v g z^2 (\partial T / \partial z) / w^*{}^2$$

$\alpha_v$ 는 열 팽창 계수이다. 이 식은  $R_i$ 가 적용 될 수 있는 층을 미리 표수층으로 한정한다. 특히 수심이 비교적 얇고, 바닥에서의 마찰 영향이 있어 변수층의 확산계수 값보다 심수층에서의 확산계수 값이 크게 나오는 특징을 보이는 모형에 적합하다. 이와 비슷한 경향을 보이는 연구는 McCormick과 Scavia(1981)의 연구에도 나타나있다. 이러한 연구의 대상지역 온도분포 특성은 수온의 변화가 가장 크게 발생하는 수온약층까지의 수심이 매우 얇다는 것이다. 이러한 거동을 보이는 마산·진해 만에 적용성을 검토 해 보겠다.

### 3. 수치 모형의 구성

모형의 안정을 위해 시간적, 공간적 2 차의 정도를 가지는 Crank-Nicholson 법을 사용하였다. (1)

식에서 확산항에 대해서는 중앙차분을 실시하여 다음의 차분식을 만들어 냈다.

$$\begin{aligned}
 & -\lambda(K_i^{n+1} + K_{i-1}^{n+1})T_{i-1}^{n+1} + \left\{ \lambda(K_{i+1}^{n+1} + K_i^{n+1}) + \lambda(K_i^{n+1} + K_{i-1}^{n+1}) + 1 \right\} T_i^{n+1} \\
 & \quad - \lambda(K_{i+1}^{n+1} + K_i^{n+1})T_{i+1}^{n+1} \\
 & = \lambda(K_i^n + K_{i-1}^n)T_{i-1}^n + \left\{ -\lambda(K_{i+1}^n + K_i^{n+1}) - \lambda(K_i^n + K_{i-1}^n) + 1 \right\} T_i^n \\
 & \quad + \lambda(K_{i+1}^n + K_i^n)T_{i+1}^n - \frac{\Delta t}{2\Delta z c_i \rho_i} (H_{i+1}^n - H_{i-1}^n)
 \end{aligned} \tag{4}$$

여기에서 확산계수의 평균값을 사용함으로,  $\lambda = \Delta t / 4\Delta z^2$ 의 형태를 가진다. 온도와 온도 경사의 항으로, 비선형 문제를 일으키는 확산계수 항은 Lagging 기법을 사용하여 선형화 하였다. 여기에 수면에서의 태양 에너지의 평형에 의해 경계 조건이 다음과 같이 주어진다.

$$-K \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{Q_R - (Q_{br} + Q_e + Q_c)}{c(0)\rho(0)}$$

$Q_R$ ,  $Q_{br}$ ,  $Q_e$  값과  $Q_c$  값은 모두 태양 에너지에 대한 값들이다(Thomann 과 Mueller; 1987).  $c(0)$ 와  $\rho(0)$ 는 수면에서의 값이다. 바닥면으로의 열 흐름이 없다는 조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=b} = 0$$

$b$ 는 바닥 수심을 말한다. 위의 경계 조건을 (4)식에 넣어서 tri-diagonal matrix 를 만들고 이를 Thomas algorithm 으로 풀면 된다.

#### 4. 모형의 적용

그림 1에 나타난 마산·진해만의 측정 장소 중 1, 2번 지점은 담수의 영향 등으로 인한 수면에서의 온도 값이 크게 나타나고 4, 5번 지점은 해류의 영향을 크게 받기에 3번 지점에 모형을 적용하였다. 마산·진해만은 지형적 특징으로 인한 성층화 현상이 발달하여 연직방향으로 큰 수질 변화를 보이고 있는 것으로 알려져 있다. 그래서 해양연구소(1989)에서 조사한 온도, 염분, 용존 산소 등에 대한 결과를 바탕으로 모의를 수행 하였다. 3번 지점인 마산만 내에서의 조석과 풍성류, 밀도류 등의 거동은 여름철 남동풍의 영향으로 만 내의 수환경이 더욱 고립된다고 할 때 흐름의 영향을 무시 할 수 있다고 가정을 한다. 기상 자료는 평균 기온, 상대 습도, 평균 풍속, 평균 운량등을 이용하였다.

2절에서 제시한 확산 계수 추정식 중 바람의 영향이 적어서 Henderson-Sellers의 추정식과 Walters 등이 제시한 식은 어느 것도 수면 바로 아래에서 수온이 급격히 변하는 현상을 제대로 나타내지 못했다. 다만, Walters 등이 제시한 식이 변수층 이하에서는 잘 맞았다. 실제 수온의 변화 현상을 나타내기 위해서는 수면 바로 밑에서부터 확산계수 값이 아주 작아져야 한다. 이를 위해서 Walters 등의 식에서 변수층에 적용되는 식을 수면 바로 아래 까지 확대하여 확산계수를

구하여야 한다(그림 2; Case 1). 이러한 표수층의 확산계수 추정결과로 나타난 값은 그림 3 과 같다. 하지만 이 모형도 민감도 분석을 수행하는 과정에서 열원항의 계산에 사용되는 매개변수값( $\beta$ )이  $\pm 0.05$  정도 변함에 대해 최대  $1^{\circ}\text{C}$  정도의 변화를 보였다(그림 4b). 이러한 이유는 Walters 등의 식이 주로 수심이 얇은 지역에서 일정한 상수 값을 심수층에 적용하는 것이기 때문에 태양 에너지에 대한 민감도가 다른 모형들에 비해 크다고 하겠다. 매개변수 추정은 RMS 가 최소가 되도록 하는 값으로 다음의  $\beta=0.9 \quad \eta = 0.8$  값들을 추정해 냈다.  $\beta=0.9 \quad \eta = 0.7$  일 경우는 5 m 까지의 오차가 최소가 되었다.

이러한 분석을 바탕으로 1989 년 같은 지역의 측정자료를 가지고 검증을 해보았다(그림 5). 그 결과 수면부와 심층부에서 각각 최대  $0.3^{\circ}\text{C}$  정도와  $1.3^{\circ}\text{C}$  정도의 과대 산정 함을 보이고, 변수층의 거동은 비교적 정확하게 모의하였다.

## 5. 결론

와확산 계수 추정식을 비교하여 일차원 와확산 온도 분포 모의를 수행하였다. 유속의 영향을 제외하고 일반적으로 와확산 계수 추정에 사용되는 Henderson-Sellers 의 식과 Walters 등이 제시한 식을 사용하여 모형 적용의 한계성을 보완하였으나, 수면부에서 바로 급격하게 변하는 현상에 대한 모의의 한계를 보였다.

이상의 모의에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) Walters 등이 제시한, 각 층에 따라 적용 식을 달리 하는 경우를 Henderson-Sellers 의 식의 단점을 보완하기 위해 사용한 결과 수심이 얇은 적용지역에 대해서 매개변수의 변화에 대해 매우 민감함을 나타내었다.
- (2) 수면 바로 아래에서 온도 값이 크게 변화하는 현상을 해석해 내기 위해서, 수면 바로 아래에서 확산계수 값이 급격히 줄어들어야 함을 보였다.
- (3) 호수와 달리, 전 수심으로 흐름의 영향을 받는 만에서는 호수와는 다른 확산계수 추정식이 필요하다.

## 5. 참고 문헌

- 해양연구소(1989). 연안환경 보전기술 개발연구, 한국과학기술원 해양연구소, BSPG 00083-242-4.
- Henderson-Sellers, B. (1985). "New formation of eddy diffusion thermocline models", *Appl. Math. Modelling*, Vol. 9, pp. 441-446.
- McCormick, M. J., and Scavia, D. (1981). "Calculation of vertical profiles of lake-averaged temperature and diffusivity in Lakes Ontario and Washington", *Water Resour. Res.*, Vol. 17, No 2, pp. 305-310.
- Newbold, J. D., and Liggett, J. A. (1974). "Oxygen depletion model for Cayuga Lake", *J. Environ. Eng. Div.*, ASCE, Vol. 100, No. EE1, pp. 41-59.
- Thomann, R. V., and Mueller, J. A. (1987). *Principles of surface water quality modeling and control*, Harper

and Rowe, New York, pp. 599-616.

Walters, R. A., Carey, G. F., and Winter, D. F. (1978). "Temperature computation for temperate lakes", *Appl. Math. Modelling*, Vol. 2, pp. 41-48.

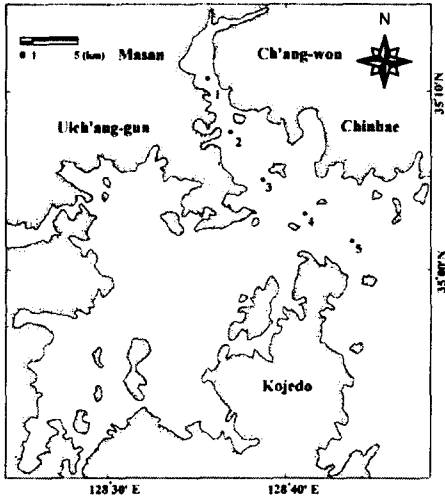


그림 1 마산 진해만의 자료 측정 장소

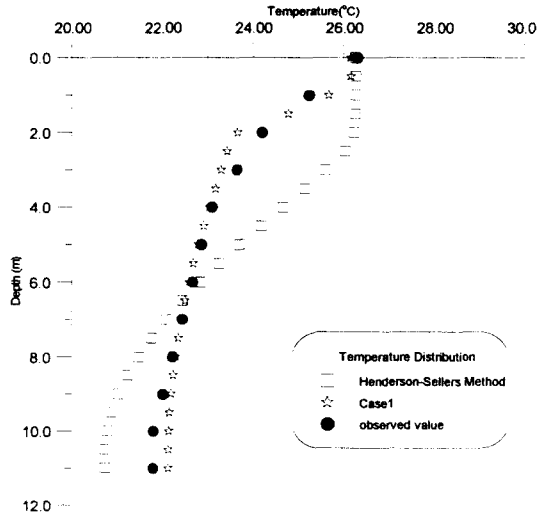


그림 2 모형의 적용

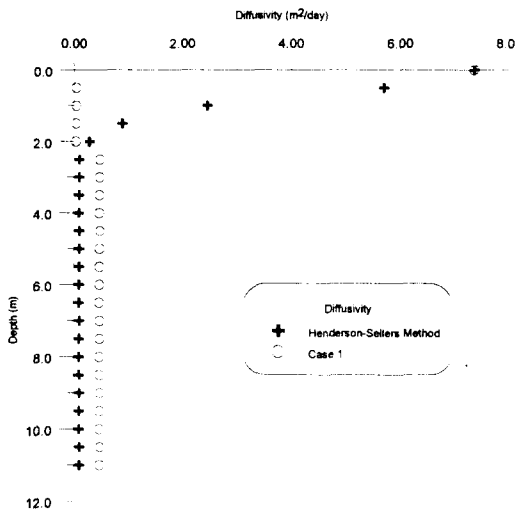


그림 3 확산계수 값

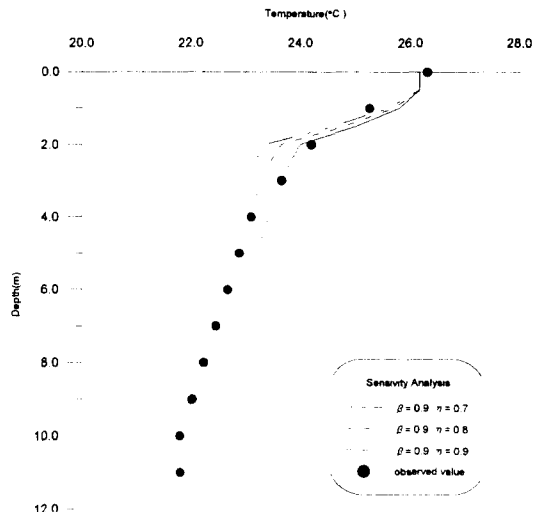


그림 4a 민감도 분석(  $\eta$  값을 변화 )

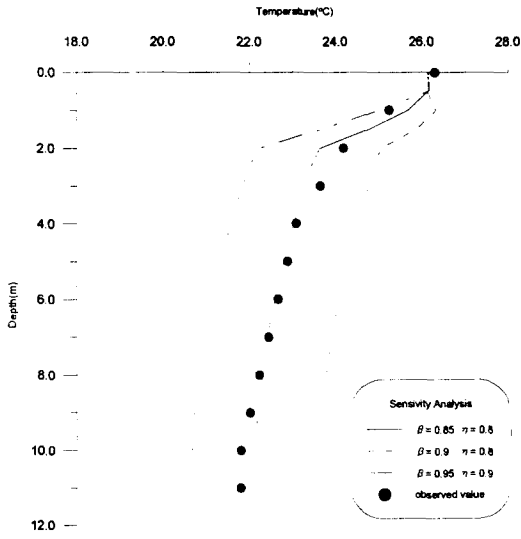


그림 4b 민감도 분석( $\beta$  값을 변화)

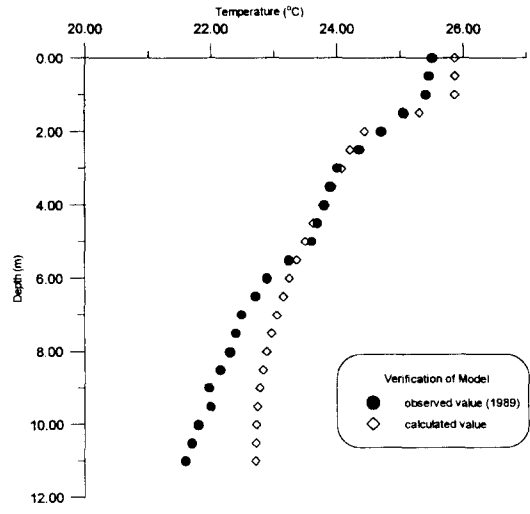


그림 5 모형의 검증 (1989년 8월 관측 자료)