

흐름에 수직한 방향으로 급격한 수심 변화가 존재하는 해역에서의 열오염 이동 예측 해석해 모형

An Analytical Model for Predicting Heat Transport with a Sharp Depth Change in Cross-Flow Direction

이호진* · 김영호**

Ho Jin Lee* and Young Ho Kim**

요 지 : 본 연구에서는 흐름에 수직한 방향으로 급격한 수심 변화가 존재하는 해역에서 점열원에 의한 열오염 분포를 예측할 수 있는 해석 모델을 개발하였다. 개발된 모델을 이용하여 열오염 분포에 있어 수심 변화와 흐름 효과를 검토하였다. 계산 결과 흐름에 수직한 방향으로 수심 변화가 존재할 경우 수평 확산 플럭스의 증감으로 인해 수심 변화 경계를 가로 지르는 열의 이동이 증가하거나 감소하는 것으로 나타났다. 조류와 동시에 잔차류 성분을 포함할 경우에는 이류에 의한 열오염 수송 효과가 증가하여 수심 변화 경계를 가로 지르는 수평 확산은 상대적으로 감소하였다.

핵심용어 : 수평 확산 플럭스, 수심 변화, 열오염

Abstract : In this study, an analytical model has been developed to predict the build-up of heat field due to a point heat source in the presence of sharp cross-flow depth change. The model has been applied to investigate the effect of the depth change and flow pattern on the heat field. Model results show that, when there is a sharp depth change in cross-flow direction, the heat transport across the boundary of the depth change is enhanced or diminished according to the increasing or decreasing of the horizontal diffusion flux. Including residual components as well as tidal currents give rise to reduce the effect of the horizontal diffusion on the heat transport because of increasing the advection of heat.

Keywords : horizontal diffusion flux, depth change, heat

1. 서 론

오염물질의 이동·확산 예측을 위한 예측 모델로 해석 모델(analytical model)은 수치모델(numerical model)에 비해 간단한 구조를 가지고 있어 결과 해석이 비교적 쉽고 계산 시간이 단축된다는 장점이 있다. 또한 수치모델의 경우 소위 수치 확산(numerical diffusion)이라는 수치적분(numerical integration)에 따른 필연적인 오차를 가질 수밖에 없지만 해석모델은 이러한 오차와 무관하다는 장점이 있다. 따라서 모델에 대한 전문적인 지식이 없는 비

전문가들이 실무 현장에서 간단한 오염실태 파악이나 정성적인 예측을 할 수 있는 현장용 예측모델로 해석모델이 활용되기도 한다. 그러나 해석모델은 근본적으로 대상 영역이나 현상을 단순화해서 해를 구하는 모델로 불가피하게 흐름이나 수심 등 해양 조건을 간단한 형태로 가정해야 하는 단점이 있다.

임해발전소 주변 온배수의 이동·확산 예측과 관련한 비교적 간단한 구조의 현장용 예측모델인 Jirka and Hinton (1992)의 CORMIX(CORnell MIXing zone expert system)도 해석모델로 국내에서도 발전소의 배수 방식 설계 연

*한국해양대학교 해양과학기술대학 해양환경·생명과학부(Corresponding author: Ho Jin Lee, Division of Marine Environment & Bioscience, Korea Maritime University, 1, Dongsam-dong, Youngdo-gu, Busan 606-791, Korea, hjlee@hhu.ac.kr)

**한국해양연구원 (Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea)

구 등에 활용된 바 있다. CORMIX는 해역의 흐름이 시간에 따라 변화하지 않는다는 가정 하에서 정상상태(steady state)의 열오염 분포 특성을 계산한다. 따라서 우리나라의 서해안, 남해안과 같이 조류가 우세한 해역에서 흐름 방향이 변화함에 따라 열오염이 다른 방향으로 이동되고 확산되는 과정을 재현할 수 없는 단점이 있었다.

Jung et al.(2003)은 Holley(1969)와 Harleman(1971)의 1차원 해석해를 근간으로 하여 조류와 같이 흐름 방향이 변화하는 해역에 적용할 수 있는 현장용 2차원 해석 모형을 제안하였다. Jung et al.(2003)의 해석 모델은 수심이 일정한 해역에서 점열원(point heat source)으로부터 지속적인 열 유입이 존재할 때 대기를 통한 열손실을 포함하여 반일주기(M_2 분조) 조류에 의한 열오염의 이동·확산을 계산할 수 있는 모델로 고조시 열오염의 이동에 따른 tidal excursion 거리 부근에서의 급격한 수온 변화를 잘 재현하였다. 이·김(2004)은 Jung et al.(2003)의 2차원 해석 모델에 S_2 분조를 추가하고 수평 확산계수 또한 조류의 유속에 비례해서 시간에 따라 변화하도록 하여 열오염의 이류(advection) 뿐만 아니라 수평 확산에 있어서도 15일 주기의 대·소조 변동 효과가 반영될 수 있도록 확장하였다.

본 연구에서는 일정한 수심을 가정한 기존의 2차원 해석 모델을 개선하여 흐름 방향에 수직한 방향으로 급격한 수심 변화를 고려할 수 있는 해석 모델로 확장하고자 한다. Kay(1987)는 가상의 오염원(image source)을 고려하는 방법으로 수심이 불연속으로 변화하고 일정한 방향으로의 흐름이 존재하는 해역에서의 오염물질 이동확산에 관한 정상상태(steady state) 해석해를 제시한 바 있다. 본 논문에서는 Kay(1987)의 방법을 이용하여 수심이 불연속으로 변화하고 조류와 같은 왕복성 흐름이 존재하는 해역에서의 열오염 분포에 관한 시간 적분 형태(time-integral form)의 새로운 해석해를 유도한다. 유도된 해석해를 이용하여 수심 변화에 따른 열오염 분포의 변화 양상을 검토하고 조류와 시간 평균 흐름인 향류 성분을 동시에 고려할 경우와 조류의 유속이 수심에 따라 변화할 경우의 열오염 이동·확산 특성 변화를 살펴본다.

2. 해석해 모델

무한 평면(infinite plane)의 해양을 가정하고, x 축 방향으로 흐름이 존재할 경우 2차원 수심 평균 열보존 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u(t)\frac{\partial T}{\partial x} = K_h \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - k_d T \quad (1)$$

여기서, t 는 시간, x, y 는 직교좌표계, T 는 열오염 유입에 의한 초과수온(excess temperature), k_d 는 해표면에서의 열 교환에 의한 열손실 계수, K_h 는 수평 확산계수, α 는 비등방 확산(non-isotropic diffusion)을 고려하기 위한 상관계수이며 $u(t)$ 는 x 축 방향으로 흐르는 흐름 성분을 나타낸다. (1) 식의 마지막 항을 소거하기 위해 $t = \tau$ 에 순간적인 열오염이 발생하는 것으로 가정하여 초과수온 T 를 새로운 농도 변수 C 로 치환한다.

$$T = C e^{-k_d(t-\tau)} \quad (2)$$

식 (2)을 식 (1)에 대입하여 다음과 같은 농도 C 에 대한 미분방정식을 구한다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u(t)\frac{\partial C}{\partial x} = K_h \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

다음으로 직교좌표(x, y, t)를 (χ, y, t^*) 좌표로 좌표변환한다(Holley, 1969).

$$\chi = x - \int u(t) dt \quad (4)$$

$$t^* = t \quad (5)$$

연쇄법칙(chain rule)을 적용하면 식 (3)은 다음과 같은 농도 C 에 대한 확산방정식의 형태로 변환된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K_h \left(\frac{\partial^2 C}{\partial \chi^2} + \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (6)$$

Fig. 1은 모델 영역과 열오염원의 위치를 나타내는 그림이다. 모델 영역은 무한 평면(infinite plane)이고 Fig. 1에서의 영역 범위는 계산의 편의상 설정된 것이다. 열오염은 $(0, -y_0)$ 지점에서 발생한다고 가정하며 $y=0$ 을 따라 수심의 불연속이 존재하여 y 가 0보다 작은 영역의 수심은 H_1 로 일정하고 y 가 0보다 큰 영역의 수심은 H_2 로 일정하다. 각 영역에서는 x 축과 평행한 방향으로 다음과 같은 M_2 조석 주기의 조류가 존재한다고 가정한다.

$$u(t) = U_1 \sin wt + u_m, \quad \text{if } y < 0 \quad (7a)$$

$$u(t) = U_2 \sin wt + u_m, \quad \text{if } y > 0 \quad (7b)$$

여기서, U_1, U_2 와 $w(=2\pi T_p^{-1})$, T_p 는 M_2 조석 주기는 각 영역에서의 조류의 유속 진폭과 각 주파수(angular frequency)이

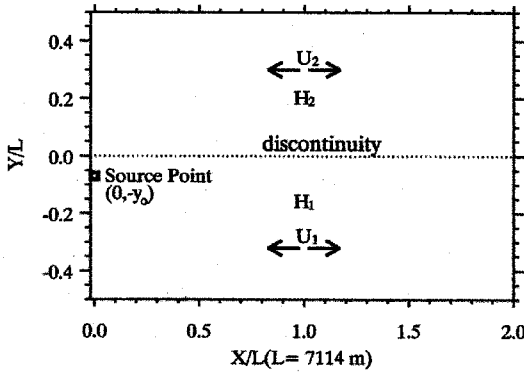


Fig. 1. Model domain and idealized situations. H_1 and H_2 are the water depth. U_1 and U_2 are the amplitude of tidal currents.

며 u_m 은 시간 평균 흐름인 항류 성분을 나타낸다. 연안역에서는 지형적 특성과 조류의 비선형 상호작용에 의한 조석 잔차류가 발생한다. 즉 왕복성 흐름인 조류를 시간 평균할 경우 0이 되지 않고 일정한 방향으로 흐르는 항류 성분이 존재한다. 이러한 효과를 고려하기 위해 식 (7)과 같이 진폭 U_1 , U_2 를 가지는 왕복성 흐름에 u_m 을 더해준다.

수평 확산계수는 Li and Kozłowski(1974)에 따라 다음과 같이 주어진다.

$$K_h = \frac{U_o^2}{4w\lambda} \quad (8)$$

여기서, U_o 는 조류의 유속 진폭, w 는 조류의 각 주파수 (angular frequency)이고 λ 는 조석 주기 동안 확산에 의한 오염물질의 수송에 대한 이류에 의한 수송의 비를 나타내는 것으로 본 연구에서는 Pumama and Al-Barwani (2006)와 같이 10으로 주었다. 각 영역별 유속 차이가 존재할 경우를 고려하여 (6)식의 확산 방정식은 다음과 같이 수심 변화 경계선 $y=0$ 을 기준으로 구분 될 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K_{h_1} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial \chi_1^2} + \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right), \quad \text{if } y < 0 \quad (9a)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K_{h_2} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial \chi_2^2} + \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right), \quad \text{if } y > 0 \quad (9b)$$

여기서, K_{h_1} 와 K_{h_2} 는 각각 $y < 0$ 와 $y > 0$ 영역에서의 수평 확산계수이며 χ_1 과 χ_2 는 식 (4)에 의해 변환되는 각 영역별 x 축의 변환 좌표이다. $(0, -y_0)$ 지점에서 $t = \tau$ 에 순간적인 단위 열오염(unit-impulse of heat)이 부하된다고 가정할

경우, Jung et al.(2003)의 해석해를 Kay(1987)의 방법을 적용하여 수심이 변화할 때의 해석해로 확장하면 다음과 같다.

$$C = \frac{\alpha}{4\pi K_{h_1}(t-\tau)} \left(\exp \left[-\frac{\chi_1^2 + \alpha^2(y+y_0)^2}{4K_{h_1}(t-\tau)} \right] + f_r \exp \left[-\frac{\chi_1^2 + \alpha^2(y-y_0)^2}{4K_{h_1}(t-\tau)} \right] \right), \quad \text{if } y < 0 \quad (10a)$$

$$C = \frac{\alpha}{4\pi K_{h_1}(t-\tau)} f_r \exp \left[-\frac{\chi_2^2 + \alpha^2(y+y_0)^2}{4K_{h_2}(t-\tau)} \right], \quad \text{if } y > 0 \quad (10b)$$

여기서, f_r 은 수심차이에 따른 반사 또는 흡수계수로 가상 열오염원(image heat source)의 상대적인 크기를 나타내며 f_i 는 수심 변화 경계를 지나가는 전달 계수로 virtual source의 상대적 크기, y_0 는 수심 변화 경계($y=0$)에서 virtual source까지의 거리이다.

f_r , f_i , y_0 는 수심 변화 경계($y=0$)에서의 경계조건 (boundary condition)으로부터 구할 수 있다. 즉, 수심 변화 경계를 따라서 오염물질 분포와 수평 확산 플럭스가 연속되어야 한다(Kay, 1987).

$$\lim_{y \rightarrow 0^-} C(\chi_1, y, t) = \lim_{y \rightarrow 0^+} C(\chi_2, y, t) \quad (11a)$$

$$\lim_{y \rightarrow 0^-} H_1 \frac{K_{h_1} \partial C}{\alpha^2 \partial y} = \lim_{y \rightarrow 0^+} H_2 \frac{K_{h_2} \partial C}{\alpha^2 \partial y} \quad (11b)$$

식 (10a)을 (11a)의 경계조건에 대입하면

$$(1 + f_r) \exp \left[-\frac{\chi_1^2 + \alpha^2 y_0^2}{4K_{h_1}(t-\tau)} \right] = f_r \exp \left[-\frac{\chi_2^2 + \alpha^2 y_0^2}{4K_{h_2}(t-\tau)} \right] \quad (12)$$

이고 식 (12)이 만족되기 위해서는 다음의 관계식이 성립 되어야 한다.

$$f_i = f_r + 1 \quad (13)$$

$$y_0^2 = \frac{K_{h_2} \left(\frac{\chi_1^2}{\alpha^2} + y_0^2 \right) - \frac{\chi_2^2}{\alpha^2}}{K_{h_1} \left(\frac{\chi_1^2}{\alpha^2} + y_0^2 \right) - \frac{\chi_2^2}{\alpha^2}} \quad (14)$$

식 (10b)을 (11b)의 경계조건에 대입하면

$$(f_r - 1)H_1 y_0 = -f_i H_2 y_0 \quad (15)$$

이고 관계식 (13)을 적용하면

$$f_r = \frac{y_0 H_1 - y_v H_2}{y_0 H_1 + y_v H_2} \quad (16)$$

$$f_i = \frac{2y_0 H_1}{y_0 H_1 + y_v H_2} \quad (17)$$

(x, y, t) 좌표상의 해 식 (10)을 직교좌표계(x, y, t)에서의 해로 변환한다. 식 (7)을 식 (4)에 대입하면

$$\chi_1 = x + \frac{U_1}{w}(\cos\omega t - \cos\omega\tau) - u_m(t - \tau) \quad (18a)$$

$$\chi_2 = x + \frac{U_2}{w}(\cos\omega t - \cos\omega\tau) - u_m(t - \tau) \quad (18b)$$

식 (18)을 식 (10)에 대입한 후 관계식 (2)를 적용하면

$$T = \frac{\alpha e^{-k_d(t-\tau)}}{4\pi K_{h_1}(t-\tau)} (I_1(x, y + y_0, t, \tau) + f_r I_1(x, y - y_0, t, \tau)), \quad \text{if } y < 0 \quad (19a)$$

$$T = \frac{\alpha f_i e^{-k_d(t-\tau)}}{4\pi K_{h_1}(t-\tau)} I_2(x, y + y_v, t, \tau), \quad \text{if } y > 0 \quad (19b)$$

여기서,

$$I_1(x, y, t, \tau) = \exp\left[-\frac{[x + U_1/w(\cos\omega t - \cos\omega\tau) - u_m(t - \tau)]^2 + \alpha^2 y^2}{4K_{h_1}(t - \tau)}\right] \quad (20a)$$

$$I_2(x, y, t, \tau) = \exp\left[-\frac{[x + U_2/w(\cos\omega t - \cos\omega\tau) - u_m(t - \tau)]^2 + \alpha^2 y^2}{4K_{h_2}(t - \tau)}\right] \quad (20b)$$

식 (19)은 순간적인 단위 열오염 유입에 대한 오염 농도의 반응함수(response function)이다. 연속적으로 열오염이 유입되는 경우의 해석해는 순간적인 단위 열오염 유입에 대한 반응함수 식 (19)을 시간에 대해 convolution 적분함으로써 구할 수 있다. 만약 $t = \tau$ 에서부터 주변 해역에 비해 $T_0^\circ\text{C}$ 만큼 온도가 높은 해수가 $q(\text{m}^3/\text{s})$ 의 비율로 연속적으로 유입된다고 가정하면 열오염 분포에 관한 2차원 해석해는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T(x, y, t) = \int_{\tau}^t \frac{\alpha q T_0 e^{-k_d(t-\tau)}}{4\pi H_1 K_{h_1}(t-\tau)}$$

$$(I_1(x, y + y_0, t, \tau) + f_r I_1(x, y - y_0, t, \tau)) d\tau, \quad \text{if } y < 0 \quad (21a)$$

$$T(x, y, t) = \int_{\tau}^t \frac{\alpha q T_0 f_i e^{-k_d(t-\tau)}}{4\pi H_1 K_{h_1}(t-\tau)} I_2(x, y + y_v, t, \tau) d\tau \quad \text{if } y > 0 \quad (21b)$$

3. 실험 조건 및 변수

오염원이 위치하는 $y < 0$ 영역에서의 수심(H_1)과 조류 유속의 진폭(U_1)은 각각 10m와 0.5 m/s로 일정한 값으로 고정하고 $y > 0$ 영역에서의 수심(H_2)을 각각 20m, 5m, 40m로 변화시키면서 수심 변화에 따른 열오염 분포의 변화를 비교 분석하였다. $y > 0$ 영역에서의 조류 유속의 진폭(U_2)은 U_1 과 같은 0.5 m/s인 경우와 Kay(1987)와 같이 수심에 따라 증가하도록 하여 $U_1 \sqrt{H_2/H_1}$ 인 경우를 고려하였다. 시간 평균 흐름인 항류 성분(u_m)을 포함하는 경우에는 각각 조류 진폭의 1/20과 1/10인 0.025 m/s와 0.05 m/s로 가정했다.

모델 계산 범위는 $0 < x < 2L$, $-L/2 < y < L/2$ 이며 L 은 tidal excursion 거리로 $\frac{2U_1}{w}$ 이며 U_1 이 0.5 m/s이라고 할 때 7114 m에 해당된다. 점열원(point heat source)은 (0 m, -500 m)에 위치하며 주변보다 $8.3^\circ\text{C}(T_0)$ 높은 해수가 연속적으로 유입되는 것으로 가정하였다. 열오염 유입량(q)은 $218 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 가정했다. 흐름방향인 x 축 방향으로의 수평 확산계수(k_x)가 y 축 방향으로 수평 확산계수(k_y)보다 상대적으로 큰 비등방 확산(non-isotropic dispersion)을 가정하여 상관계수 α^2 을 20.0으로 주었다.

해표면에서의 열 교환에 의한 열손실 계수 k_d 는 다음 식으로 계산된다.

$$k_d = \frac{Q_{net}}{\rho C_p H_1} \quad (22)$$

여기서 Q_{net} 은 해양으로부터 대기로 방출되는 순 열속(net heat flux)으로 32 W/m^2 의 열이 전 영역에서 일정하게 빠져나가는 것으로 가정하였으며, ρ 는 해수의 밀도로 1025 kg/m^3 , H_1 는 열오염원이 위치하는 영역($y < 0$)의 수심이며, C_p 는 해수의 비열(specific heat)로 $4186.0 \text{ J/(kg}^\circ\text{K)}$ 이다. H_1 이 10 m일 경우 식 (22)에 의해 계산되는 열손실 계수 k_d 는 $0.7458 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 이다.

적분 시간 간격($\Delta\tau$)은 $T_p/3600$ (T_p 는 M_2 조석 주기로 주었으며 열오염 분포가 정상상태(stationary steady state)에 도달한 후인 100 조석 주기 후의 열오염 분포를 계산하였다. 열오염은 식 (21)에 의해 계산된 초과수는 $T(x, y, t)$ 를 점열원에서의 초과수($T_0=8.3^\circ\text{C}$)로 나눈 정규화(normalized)

된 값으로 나타낸다.

4. 결 과

4.1 수심 변화

Fig. 2는 U_1 와 U_2 는 0.5 m/s이고 H_1 이 10 m 일 때 $y=0$ 을 경계로 H_2 가 20 m로 수심이 2배 증가할 경우의 저조, 최강창조, 고조시 열오염 분포를 나타낸다. 열오염 유입에 따른 수온 상승 범위를 나타내는 등온선이 각 조시별로 조류방향(+x 방향)으로 이동하여 고조시 최대로 확장되는 것을 확인할 수 있다. 점열원이 위치한 $y<0$ 영역에서는 $y=-0.07L$ (500 m)을 따라 최강 창조시 $x=0.5L$ 부근에서 +x 방향으로의 수온경사가 위치하며 고조시에는 tidal excursion 거리인 $x=1.0L$ 부근으로 이동한다. 이러한 이

동은 Jung et al.(2003)과 이·김(2004)에서도 확인한 바와 같이 tidal excursion 범위 내에서 열오염이 주로 이류(advection)에 수송된 결과로 나타나는 것으로 판단된다.

tidal excursion 범위를 벗어난 원역과 흐름방향에 수직 한 ±y 방향으로의 열오염의 분산은 주로 수평 확산에 의해 좌우된다. 특히 점열원이 위치하지 않은 $y>0$ 영역에서는 경계조건 식 (11)과 같이 수심 변화 경계($y=0$)를 가로지르는 수평 확산이 열오염의 공급원이 된다. $y>0$ 영역으로 유입된 열오염은 수심 증가에 따른 수평 확산 플럭스($-H_2K_y \frac{\partial C}{\partial y}$)의 증가로 $y<0$ 영역에 비해 상대적으로 더 크게 확산될 수 있다. 이러한 수평 확산 플럭스의 증가에 의한 결과로 $y=0$ 을 경계로 0.2(1.7 °C), 0.1(0.8 °C) 등온선의 곡률이 증가하고 y 방향의 수온 경사가 $y<0$ 영역에 비해 감소하게 된다(Fig. 2). 수평 확산 플럭스가 증가함에 따라 이류에 의한 +x 방향으로의 열오염의 수송 효과도 상대적으로 감소한다. 연속적으로 완전한 혼합을 가정하는 2차원 모델의 경우에는 수심이 증가함에 따라 열을 저장할 수 있는 열저장 용량이 더욱 증가하게 되어 유입된 열오염이 상대적으로 더 크게 희석되게 한다. 해석 모델에서의 수심 증가에 따른 열오염 수평 확산 플럭스의 증가는 이러한 효과를 반영한 것으로 사료된다.

Fig. 3는 H_2 가 5 m로 수심이 감소할 경우의 저조, 최강창조, 고조시의 열오염 분포를 나타낸다. 수심이 증가할 경우(Fig. 2)와 비교하여 전 영역에 걸쳐 열오염에 의한 수온 상승이 더 크게 나타나는데 이류에 의한 열오염 이동의 주축인 $y=-0.07L$ 을 따라서는 약 0.2(1.7 °C), 원역에서는 약 0.1(1.7 °C) 정도 더 높아진 것을 확인할 수 있다. 또한 $y=0$ 을 경계로 $y>0$ 영역에서의 0.1(0.8 °C)-0.4(3.4 °C) 등온선의 곡률은 감소하고 수온 경사는 상대적으로 증가하는 등 수심이 증가할 때의 결과와 반대되는 패턴을 나타낸다. 수심 증가와 감소에 따른 등온선의 곡률 변화 패턴은 일정한 방향으로의 흐름을 고려할 때의 Kay(1987)의 정상상태(steady state) 해석모델의 결과와 일치한다. 수평 확산효과가 감소함에 따라 Fig. 2에 비해 상대적으로 높은 열오염이 더 멀리 확장되는 경향을 나타내는데 0.3(2.5 °C) 이상의 수온상승 범위가 수심 변화 경계를 따라 $0 < y < 0.1L$ 범위 내에 국한되어 x방향으로 1.3L 지점까지 확장된다.

수심 변화에 따른 열오염 분포의 차이를 보다 자세히 살펴보기 위해서 수심 변화 경계에 수직인 방향으로의 초과수온 분포를 비교하였다. Fig. 4는 고조시 $x=1.0L$, $x=1.5L$, $x=2.0L$ 에서의 y방향으로의 초과수온 공간분포를

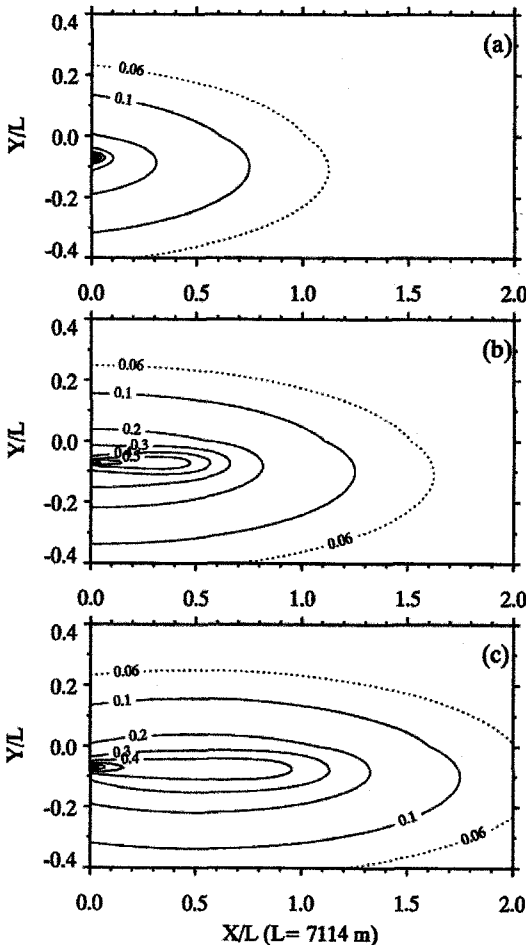


Fig. 2. The instantaneous horizontal distributions of the excess temperature at (a) Low Water, (b) Flood Maximum and (c) High Water computed with $H_2=20$ m, $u_m=0$, $U_2=U_1$.

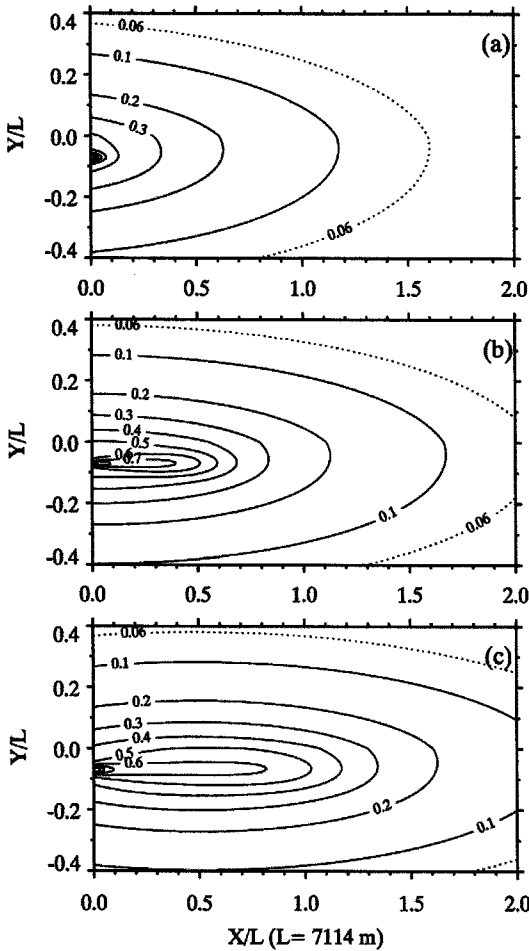


Fig. 3. Same as Fig. 2 except for $H_2=5$ m.

도시한 그림이다. 그림에서 실선(solid line)은 $H_2 = H_1/2$ ($H_2=5$ m), 점선(dotted line)은 $H_2=H_1$ ($H_2=10$ m), 파선(dashed line)은 $H_2=2H_1$ ($H_2=20$ m), 쇄선(dash-dotted line)은 $H_2=4H_1$ ($H_2=40$ m)인 경우의 초과수온 분포를 각각 나타낸다.

수심 변화가 없이 일정한 수심을 사용하는 경우(점선)의 열오염 분포는 열오염 이동의 주축인 $y=-0.07L$ 지점에서의 피크(peak)를 중심으로 Gaussian 분포 형태의 좌우 대칭 구조를 나타낸다(Fig. 4(a)). 반면 수심이 감소하거나 수심이 증가하는 경우의 초과수온 분포는 비대칭 분포를 나타내며 수심 변화 경계인 $y=0$ 을 기점으로 $+y$ 방향으로 곡선의 기울기가 변화하는 특성이 뚜렷하게 나타난다. 즉, $H_2 < H_1$ 인 경우(실선)에는 기울기가 더욱 가파르게 되지만 $H_2 > H_1$ 인 경우(파선, 쇄선) $y=0$ 을 기점으로 기울기가 완만하게 되는 경향을 보여준다. H_2 가 5 m에서

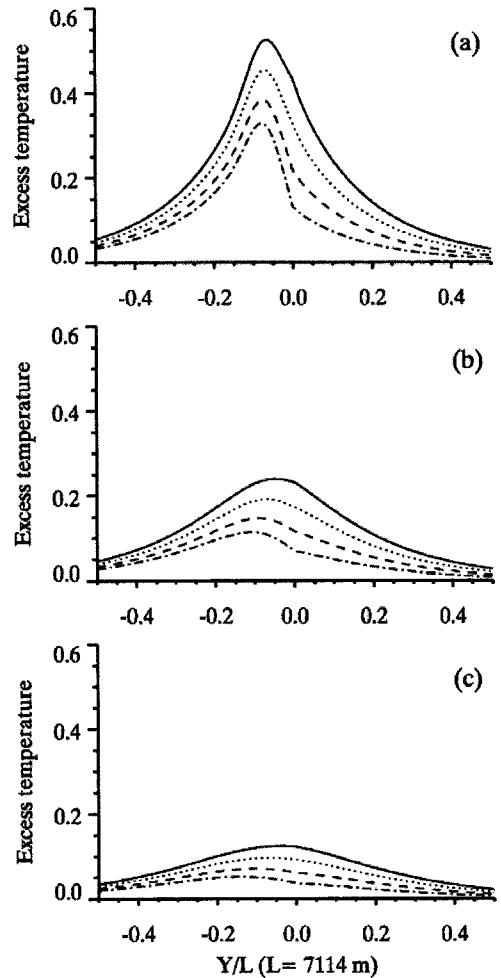


Fig. 4. The distributions of the excess temperature at the cross section of (a) $x=1.0L$, (b) $x=1.5L$ and (c) $x=2.0L$ computed with $H_2=H_1/2$ (solid line), $H_2=H_1$ (dotted line), $H_2=2H_1$ (dashed line) and $H_2=4H_1$ (dash-dotted line).

40 m까지 증가함에 따라 열오염의 절대량이 감소하는 경향을 나타내는데 변화폭이 $y=-0.07L$ 지점을 중심으로 $-y$ 방향에 비해 $+y$ 방향이 상대적으로 더 크다. 이러한 결과는 $y > 0$ 영역의 수심(H_2)이 증가함에 따라 더 많은 열이 수평 확산 플럭스에 의해 수심 변화 경계를 가로질러 $y > 0$ 영역으로 유입되고 분산되는 특성을 반영한 결과로 판단된다.

또한 열오염 분포에 있어서 피크의 형태가 $x=1.0L$, $x=1.5L$, $x=2.0L$ 로 이동함에 따라 확산에 의해 점차 약화되는 것과 더불어 피크의 중심 위치가 수심 차이에 따라 변화하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 4). 즉, 일정 수심을

사용하는 경우(점선)에는 피크의 중심은 $y=-0.07L$ 에서 거의 일정하게 유지되지만 $H_2 > H_1$ 인 경우(파선, 쇄선)에는 피크의 중심이 $-y$ 방향으로 이동한다. H_2 가 40 m일 경우(쇄선)에는 $x=1.0L$ 에서 $y=-0.07L$ 부근에 피크의 중심이 존재하지만 $x=1.5L$ 에서는 $y=-0.11L$ 부근으로 이동되고 $x=2.0L$ 에는 미약하나마 $-y$ 방향으로 더 이동되어 있는 것을 확인할 수 있다. 반대로 H_2 가 5 m일 경우(실선)에는 $x=1.0L$ 에서 $y=-0.07L$ 부근에 존재하는 피크가 $+y$ 방향으로 이동하는 경향을 나타낸다. 이와 같이 열오염 분포에 있어 피크의 위치가 이동되는 결과 또한 수심 증가에 따른 수평 확산 플럭스 증가에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 상대적으로 이류에 의한 영향을 적게 받고 확산에 의해 열오염 분포가 결정되는 원역에서는 $+y$ 방향으로 수심이 증가에 따른 $+y$ 방향으로의 수평 확산 플럭스가 증가할 경우 $+y$ 방향으로의 더 우세한 열오염 이동이 존재하게 되어 $-y$ 방향으로 피크의 중심이 이동하는 결과를 초래하는 것으로 설명될 수 있다.

4.2 조류와 항류

수심 변화와 더불어 조류와 동시에 조석 잔차류와 같은 일정한 방향으로 흐르는 항류를 고려할 경우의 열오염의 이동·확산 특성을 계산하였다. 본 연구에서는 $+x$ 방향으로 흐르는 잔차류를 고려하여 유속(u_m)을 조류 진폭(U_1)의 각각 1/20과 1/10에 해당하는 0.025 m/s와 0.05 m/s로 가정하였다. Fig. 5는 u_m , U_1 과 H_1 이 각각 0.025 m/s, 0.5 m/s, 10 m일 때 저조, 최강창조, 고조시의 열오염 분포를 나타낸다. $y > 0$ 영역의 수심(H_2)은 20 m이고 조류 진폭(U_2)은 U_1 과 같이 0.5 m/s이다.

잔차류를 고려하지 않을 경우(Fig. 2)와 비교하여 $y=0.07L$ 부근에서의 초과수온 값은 감소하지만 0.1(0.8 °C) 등온선이 $0 < y < 0.2L$ 범위 내에서 $+x$ 방향으로 더 많이 확장한 것을 확인할 수 있다. 고조시(Fig. 5(c))에는 0.3(2.5 °C)이상의 수온상승 범위가 패치(patch) 형태로 떨어져 $x=1.0L$ 부근에 위치해 있다. 왕복성 흐름인 조류에 $+x$ 방향으로 흐르는 잔차류가 더해져 $+x$ 방향으로의 열오염의 이류 수송이 $-x$ 방향으로의 열오염 수송보다 커지면서 독립적인 패치가 나타나는 것으로 판단된다. 극단적인 예로 잔차류의 크기를 조류의 진폭과 같게 할 경우에는 잔차류 흐름 방향으로 이동한 오염물질이 다시 조류가 반대방향으로 흐를 경우에도 되돌아오지 못해 연속적으로 독립적인 피크를 만들 수 있게 된다. 그러나 만약 수평 확산을 더 크게 증가시킨다면 상대적으로 이류의 효과가 줄어들면서 이러

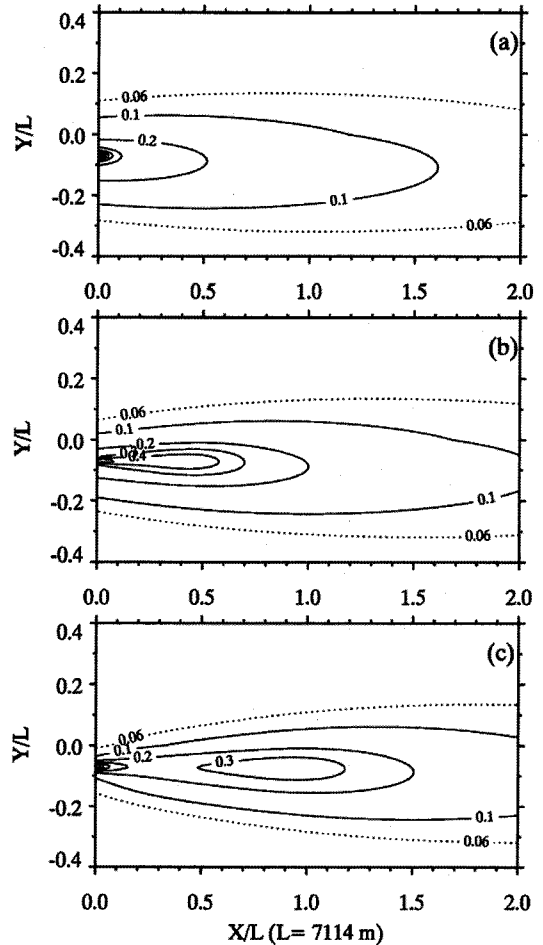


Fig. 5. same as Fig. 2 except for $u_m=0.025$ m/s.

한 피크를 완화시킬 것으로 예상된다.

반면 접열원 부근과 tidal excursion 거리 내에서의 수평 확산에 의한 y 방향으로의 열오염 수송은 상대적으로 감소한 것으로 나타났다. $y=0$ 을 경계로 0.1(0.8 °C) 등온선의 곡률이 약간 증가하는 경향을 나타내지만 Fig. 2와 비교할 때 변화 폭은 상대적으로 감소하였다. 이러한 결과는 잔차류가 포함됨에 따라 이류에 의한 열오염의 수송이 강해져 수심 변화 경계($y=0$)를 가로 지르는 수평 확산이 상대적으로 감소한 결과로 사료된다. 이류에 의한 영향을 작게 받는 $x=1.5L$ 이상의 원역에서는 수평 확산의 영향이 점차 증가함에 따라 0.06(0.5 °C) 등온선이 넓게 퍼지는 경향을 나타낸다.

Fig. 6은 고조시 $y=-0.07L$, $y=0$, $y=0.07L$ 에서의 x 방향으로의 초과수온 공간분포를 도시한 그림이다. 그림에서 실선(solid line)은 $u_m=0$, 점선(dotted line)은 $u_m=0.025$ m/s,

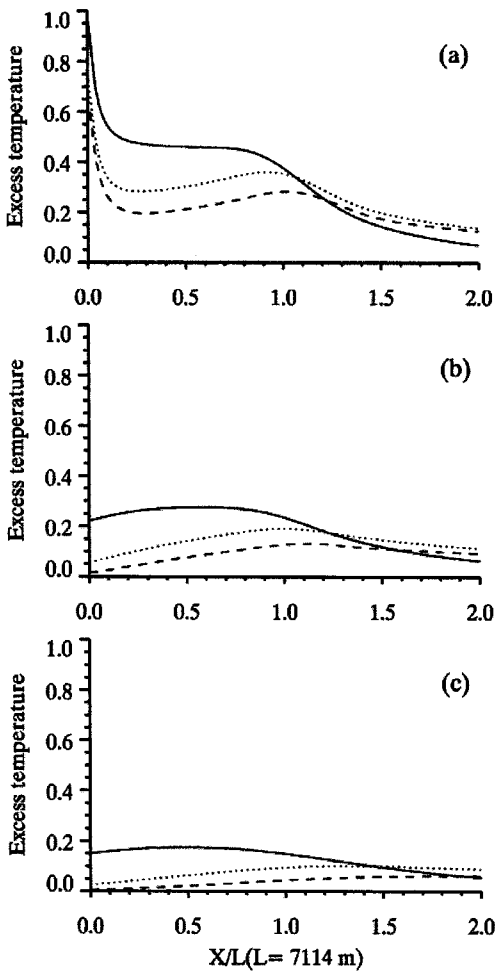


Fig. 6. The distributions of the excess temperature along (a) $y=-0.07L$, (b) $y=0$, (c) $y=0.07L$ computed with $u_m=0$ (solid line), $u_m=0.025$ m/s(dotted line), $u_m=0.05$ m/s (dashed line).

파선(dashed line)은 $u_m=0.05$ m/s인 경우의 초과수온 분포를 각각 나타낸다. U_1 와 U_2 는 0.5 m/s 이고 H_1 와 H_2 는 각각 10 m와 20 m이다. $y=-0.07L$ 을 따라서는 $+x$ 방향으로의 얼오염 수송 증가로 인해 $x=1.0L$ 부근에서 잔차류가 존재할 때의 초과수온이 잔차류가 없는 경우에 비해 상대적으로 낮다가 높아지는 경향을 보여준다(Fig. 6(a)). u_m 이 0.025 m/s에서 0.05 m/s로 증가함에 따라 초과수온 $x=1.0L$ 이내 범위에서의 초과수온은 더 낮아지고 $x=1.5L$ 이상의 원역에서는 거의 같은 값을 나타낸다. 또한 Fig. 5(c)의 패치와 같이 점열원($x=0$)외에도 초과수온의 피크가 나타나는데 u_m 이 0.025 m/s일 경우에는 $x=0.9L$ 부근에, u_m 이 0.05 m/s일 경우에는 $x=1.0L$ 부근에 피크가 위치한다.

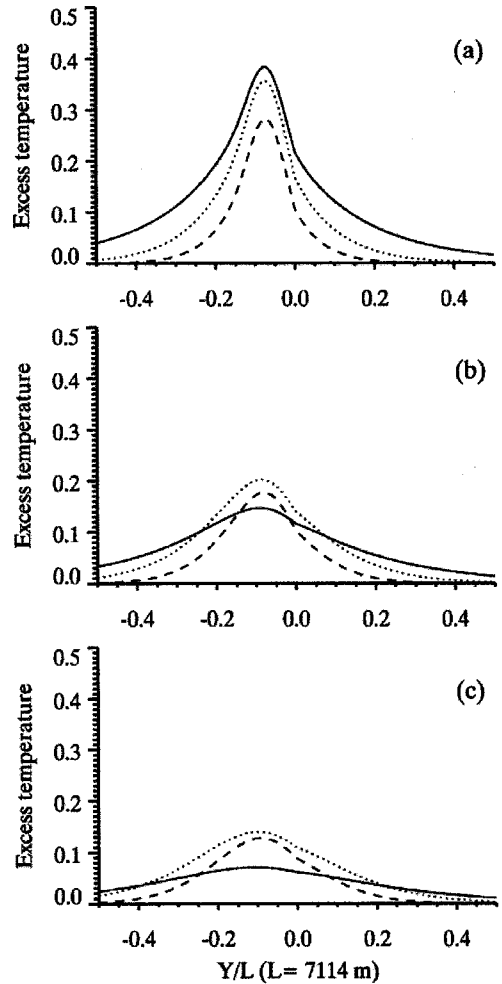


Fig. 7. The distributions of the excess temperature at the cross section of (a) $x=1.0L$, (b) $x=1.5L$ and (c) $x=2.0L$ computed with $u_m=0$ (solid line), $u_m=0.025$ m/s(dotted line), $u_m=0.05$ m/s(dashed line).

$y>0$ 영역에 위치한 $y=+0.07L$ 을 따라서는 초과수온이 $+x$ 방향으로 갈수록 증가하는 양상을 나타내는데 이는 수평 확산에 의한 얼오염 수송이 원역으로 갈수록 상대적으로 증가한 결과로 사료된다.

Fig. 7은 Fig. 6과 같은 조건으로 $x=1.0L$, $x=1.5L$, $x=2.0L$ 에서 흐름 방향에 수직인 y 방향으로의 초과수온 공간분포를 도시한 그림이다. 잔차류를 고려하지 않을 경우(실선) $x=1.0L$ 에서 $x=2.0L$ 로 이동함에 따라 수평 확산에 의해 초과수온 분포가 점차 평탄한 형태로 변화하는 반면 잔차류가 존재할 경우에는 상대적으로 피크의 형태가 유지된다. 그 결과 $x=1.5L$ 이상 원역에서는 $y=-0.07L$ 을 중심으로 잔차류가 존재하는 경우의 초과수온이 잔차류가 존재

하지 않는 경우에 비해 점차 높아지게 된다. 이러한 분포로부터 잔차류가 포함됨에 따라 이류에 의한 열오염 수송이 $+x$ 방향으로 더 먼 거리까지 이루어진 반면 상대적으로 수평 확산에 의한 열오염 분산 효과는 감소했음을 추측할 수 있다. 이류에 의한 열오염 수송의 증가에 따른 상대적인 수평 확산 효과의 감소는 수심 변화와 관련한 열오염 분포 변화에도 영향을 미치는데 초과수온 분포의 비대칭 구조가 잔차류가 포함됨에 따라 상대적으로 완화되는 경향이 있으며 $y=0$ 을 경계로 나타나는 수심 변화에 따른 곡선의 기울기 변화도 잔차류가 포함될 경우 그 크기가 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 7).

4.3 조류 유속 변화

수심 변화와 더불어 조류 유속의 크기가 수심에 비례하여 변화할 경우의 열오염 이동-확산 특성을 계산하였다. 즉, H_1 과 H_2 가 각각 10 m와 20 m이고 U_1 이 0.5 m/s일 때 U_2 를 Kay(1987)의 경우와 같이 $U_1\sqrt{H_2/H_1}$ 로 수심에 비례하도록 주었다. u_m 은 0.025 m/s로 가장했다. Fig. 8은 일 때 저조, 최강창조, 고조시의 열오염 분포를 나타낸다. $U_2=U_1$ 인 경우(Fig. 5)와 비교할 때 고조시 0.3(2.5 °C) 이상의 수온상승 범위가 패치(patch) 형태로 떨어져 $x=1.0L$ 부근에 분포하고 있는 것은 유사하다. 그러나 0.1(0.8 °C) 등온선의 경우 $+y$ 방향으로의 확장 범위가 감소한 반면 $+x$ 방향으로의 확장 범위는 상대적으로 증가한 것을 확인할 수 있다. 또한 $y=0$ 을 경계로 0.1(0.8 °C) 등온선의 곡률 변화가 $U_2=U_1$ 인 경우(Fig. 5)에 비해 크게 증가한다. 이러한 결과는 조류 유속의 진폭(U_2)에 비례하여 수평 확산 계수($K_h=U_2^2/4w\lambda$)도 같이 증가하여 $y>0$ 영역에서의 수평 확산에 의한 열수송이 증가한 것에 기인한 것으로 사료된다. $y>0$ 영역에서의 수평 확산의 증가는 4.1절에서 확인한 바와 같이 수심 변화 경계를 가로 지르는 수평 확산에 의한 열오염 수송 증가를 초래한다.

Fig. 9는 고조시 $x=1.0L$, $x=1.5L$, $x=2.0L$ 에서 y 방향으로의 초과수온 분포를 도시한 그림이다. 그림에서 실선(solid line)은 $H_2=H_1(H_2=10\text{ m})$, $U_2=U_1$ 인 경우 점선(dotted line)은 $H_2=2H_1(H_2=20\text{ m})$, $U_2=U_1$ 인 경우 파선(dashed line)은 $H_2=2H_1$, $U_2=U_1\sqrt{H_2/H_1}$ 인 경우이며 모든 경우에 있어 u_m 은 0.025 m/s이다. 일정한 수심을 사용하는 경우(실선)의 열오염 분포는 4.1절에서 언급한 바와 같이 $y=0.07L$ 지점에 피크(peak)의 중심이 위치하는 Gaussian 분포 형태의 좌우 대칭 구조를 나타내며 피크의 중심 위치도 거의 일정하게 유지된다. 반면 수심이 증가하는 경

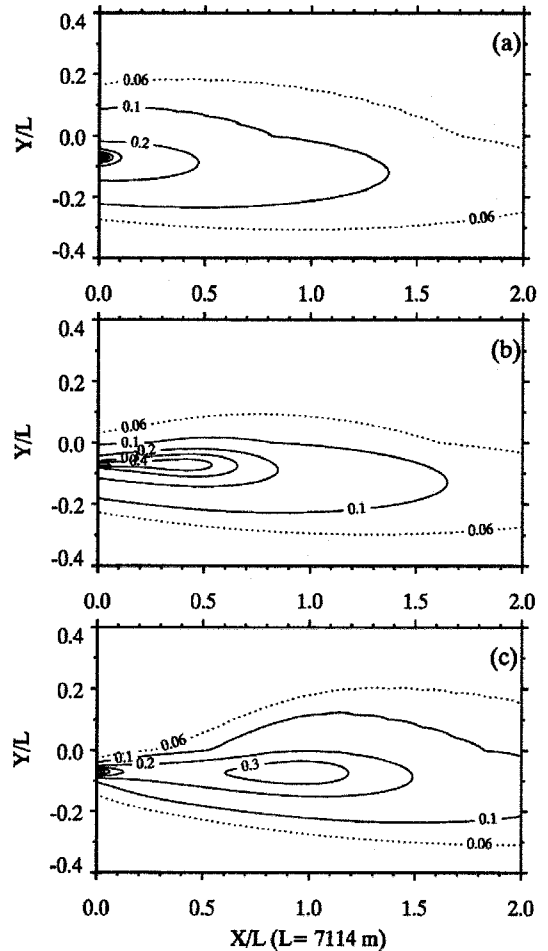


Fig. 8. Same as Fig. 2 except for $u_m=0.025$ m/s and $U_2=U_1\sqrt{H_2/H_1}$.

우(점선)의 초과수온 분포는 상대적으로 비대칭 분포를 나타내며 피크의 중심 위치가 점차 $-y$ 방향으로 이동하는 양상을 나타낸다. $U_2=U_1\sqrt{H_2/H_1}$ 일 경우(파선) 수온 분포의 비대칭 구조는 뚜렷해지는데 수심 변화 경계인 $y=0$ 을 기점으로 곡선의 기울기가 더욱 뚜렷하게 변화하는 것을 알 수 있다. 이러한 초과수온 분포 특성은 $y>0$ 영역의 수심이 증가함에 따라 열오염이 수평 확산 플럭스에 의해 수심 변화 경계를 가로질러 $y>0$ 영역으로 유입되고 분산되는데 유속(U_2)이 수심에 비례하여 증가할 경우에는 유속 증가에 따른 수평 확산 계수의 증가 효과가 더해져 더 많은 열오염이 $y>0$ 영역으로 유입되고 분산된 결과로 사료된다. $y>0$ 영역으로 유입된 열오염은 수평 확산뿐만 아니라 유속 증가에 따른 이류의 증가로 인해 $+x$ 방향으로 더 많이 이동되어 질 수 있다. $x=1.0L$ 지점에

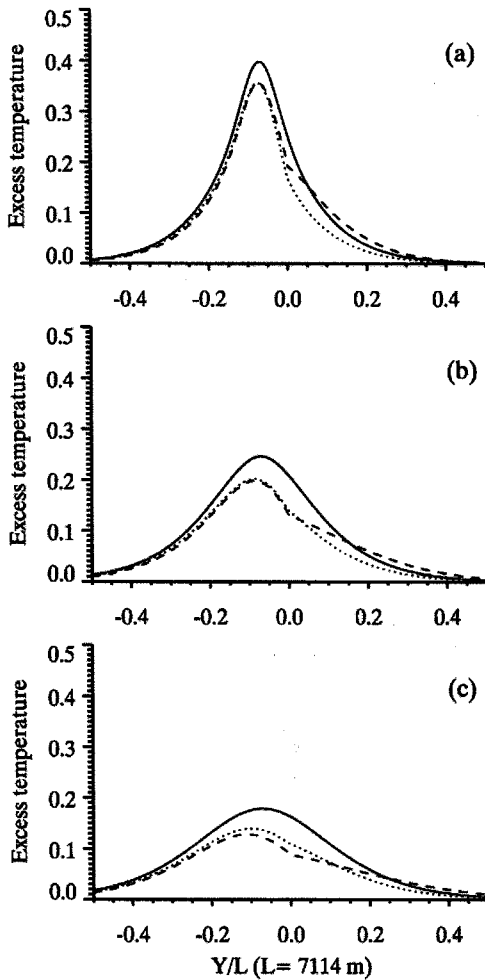


Fig. 9. The distributions of the excess temperature at the cross section of (a) $x=1.0L$, (b) $x=1.5L$ and (c) $x=2.0L$ computed with $H_2=H_1, U_2=U_1$ (solid line), $H_2=2H_1, U_2=U_1$ (dotted line), $H_2=2H_1, U_2=U_1\sqrt{H_2/H_1}$ (dashed line).

서 $U_2 = U_1\sqrt{H_2/H_1}$ 인 경우(파선)가 $U_2 = U_1$ 인 경우(점선)에 비해 상대적으로 초과 수온이 더 높게 나타나는 것은 이와 같은 이류에 의한 열오염 수송 증가 효과가 포함된 결과로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 일정한 수심을 가정한 Jung et al.(2003)의 2차원 해석 모델을 개선하여 흐름 방향에 수직인 방향으로 급격한 수심 변화를 고려할 수 있는 해석 모델을 개발하였다. 개발된 해석 모델을 이용하여 수심 변화에 따른 열오염 분포 변화 양상을 검토하였으며 조류와 더불어

어 시간 평균 흐름인 항류 성분을 동시에 고려할 경우와 조류의 유속이 수심에 따라 변화할 경우의 열오염 이동 확산 특성 변화도 살펴보았다.

새로 개발된 2차원 해석모형을 이용하여 점열원이 존재하는 해역($y < 0$)에 비해 점열원이 없는 해역($y > 0$)의 수심이 증가할 경우의 열오염 분포를 계산한 결과 수심 차이에 따른 수평 확산 플럭스의 증가로 인해 더 많은 열오염이 수심 변화 경계를($y = 0$) 넘어 수심이 깊은 해역으로 유입되고 분산되는 특성을 나타냈다. 수심 변화량을 2배에서 4배로 증가할 경우 수평 확산에 의한 열오염의 이동이 더 크게 일어나 열오염의 절대량도 감소였으며 이류에 의한 열오염의 수송 효과도 상대적으로 감소하는 것으로 나타났다. 반대로 수심이 감소할 경우에는 수평 확산 플럭스의 감소로 인해 전 영역에 걸쳐 열오염의 절대량이 증가하였다. 본 연구에서 개발된 2차원 모델은 연직으로의 완전한 혼합을 전제로 하는 것으로 수심 증가는 곧 열을 저장할 수 있는 열저장 용량의 증가를 의미한다. 따라서 수심이 증가할 경우에는 유입된 열오염이 상대적으로 더 크게 희석될 수 있게 되는데 해석모델에서의 수심 증가에 따른 열오염 수평 확산 플럭스의 증가는 이러한 효과를 반영한 것으로 사료된다. 해석모델을 3차원으로 확장할 경우에는 해역별 연직확산 효과에 차이에 의한 혼합층의 깊이 변화가 열오염 분산에 영향을 줄 것으로 추측된다.

수심 변화와 더불어 조류와 동시에 조석 잔차류와 같이 일정한 방향으로 흐르는 항류를 고려할 경우, 이류에 의한 열오염 수송 효과가 증가하여 수심 변화 경계를 가로 지르는 수평 확산은 상대적으로 감소하는 결과를 초래했다. 또한 잔차류가 존재할 경우 열오염 분포에 있어 독립적인 피크가 나타나는데 이러한 결과는 왕복성 흐름인 조류에 일정한 방향으로 흐르는 잔차류가 더해질 경우 이류에 의한 열오염 수송이 비대칭이 되는 데에 기인하는 것으로 추측된다. 조류 유속이 수심에 비례하여 증가할 경우에는 유속 증가에 따른 수평 확산 계수의 증가 효과가 더해져 단순히 수심 증가만을 고려한 경우에 비해 더 많은 열오염이 수심 변화 경계를 가로 질러 $y < 0$ 영역으로 유입되고 분산되는 결과를 나타냈다.

본 연구에서 개발된 해석모델은 수심 변화를 단순화하여 계단 형태의 불연속적인 수심 변화를 가정하였다. 그러나 오염물질 배출이 이루어지고 있는 연안역은 일반적으로 수심이 일정한 경사를 가지고 연속적으로 변화한다. 또한 연안역은 본 연구에서 가정한 무한평면이 아닌 육지

경계가 존재한다. 그러므로 연안역에서 적용되기 위해서는 본 논문에서 유도된 해석해를 육지 경계를 포함하는 해석해로 확장해야 한다. 그리고 평균 흐름인 항류가 수심에 따라 변화하는 경우도 고려 돼야 할 것으로 사료된다. 이러한 효과를 포함하여 연안역의 실제 상황과 더 유사한 조건을 반영할 수 있는 해석모델 개발은 다음 단계의 연구과제로 수행될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 영남씨그랜트 대학사업단 지원금(YSG-RC0510)에 의해 수행되었음. 제2저자는 한국해양연구원 기본사업 '하구역 관리 및 기능회복 기술 개발(PE97701)'의 지원을 받았음.

참고문헌

- 이호진, 김종학 (2004). 조류의 대소조 변동이 존재하는 연안역에서의 점열원에 의한 열오염의 이동 예측을 위한 해석해 모형. 한국해양해양공학회지, 16(2), 92-102.
- Harleman, D.R.F. (1971). One dimensional models. *Estuarine Modelling: An Assessment*, G.H. Ward, Jr., and W.H. Epsy, Jr., eds., 34-101.
- Holley, E.R. (1969). Discussion of difference modeling of stream pollution. *Journal of Sanitary Engineering*, 95(SA5), 968-972.
- Jirka, G.H. and Hinton, S.W. (1992). User's guide for the Cornell Mixing Zone Expert System(CORMIX). Technical Bulletin No. 624, U.S. Environmental Protection Agency, U.S..
- Jung, K.T., Kim, C.H., Jang, C.J., Lee, H.J., Kang, S.K. and Yum, K.D. (2003). An analytical investigation on the build-up of the temperature field due to a point heat source in shallow coastal water with oscillatory alongshore-flow. *Ocean and Polar Research*, 25(1), 63-74.
- Kay, A. (1987). The effect of cross-stream depth variations upon contaminant dispersion in a vertically well-mixed current. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 24, 177-204.
- Li, W.H. and Kozlowski, M.W. (1974). DO-sag in oscillating flow. *Journal of Env. Eng.-Div. ASCE*, 100, 837-854
- Purnama, A. and Al-Barwani H.H. (2006). Spreading of brine waste discharges into the Gulf of Oman. *Desalination*, 195, 26-31.

Received January 22, 2008

Accepted February 1, 2008