

조류의 대·소조 변동이 존재하는 연안역에서의 점열원에 의한 열오염의 이동 예측을 위한 해석해 모형

An Analytical Model for Predicting Heat Transport due to a Point Source in Coastal Water under a Spring-Neap Modulation of Tidal Currents

이호진* · 김종학**

Ho Jin Lee* and Chong Hak Kim**

요 지 : 본 논문은 조류의 대·소조 변동이 존재하는 해역에서의 점열원에 대한 초과수온 분포를 예측하는 해석해를 다룬다. 해석해는 Jung et al.(2003)이 제시한 2차원 해석해를 기본으로 하여 조류의 대·소조 변동과 수평 확산계수의 대·소조 변화를 반영할 수 있는 형태로 확장되었다. 일련의 해석모형 실험을 통해 조류 및 난류 확산의 변동에 따른 열오염의 이동·확산 변화를 검토하였다. 실험결과 열오염의 이동·확산은 tidal excursion 거리 이내에서는 조류의 크기에 좌우되며 tidal excursion 거리를 벗어난 해역에서는 주로 수평 확산에 의해 결정되는 것으로 나타났다. 특히 tidal excursion 거리 이내 해역에서 초과수온 분포는 수평 확산계수의 대·소조 변동에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉, 1°C이상의 비교적 높은 초과수온이 발생하는 범위는 수평 확산계수의 대·소조 변동을 고려하는 경우가 상대적으로 더 멀리 확장하는 경향을 보여주었다.

핵심용어: 해석해, 초과수온, 대·소조변동, tidal excursion 거리

Abstract : In this paper, an analytical solution of calculating the excess temperature field due to a point heat source is presented in the presence of spring-neap modulation of convective alongshore flow. The basic form of the solution is identical to that given by Jung et al. (2003) but the convective term in the exponential kernel function is extended and a spring-neap variation in the horizontal eddy diffusivity is newly introduced. A set of calculations have been performed to examine the sensitivity of the heat build-up to the change in current fields and turbulent dispersion. Results indicate that the excess temperature field is confined within the tidal excursion distance, while the excess temperature field beyond the distance is mainly controlled by the horizontal diffusion. The heat build-up within the distance is considerably affected by the spring-neap variation in the horizontal eddy diffusivity; the relatively high excess temperature more than 1°C is extended further when the eddy diffusivity has spring-neap modulation.

Keywords : analytical solution, excess temperature, spring-neap modulation, tidal excursion distance

1. 서 론

임해발전소의 경우 대량의 온배수를 연안역으로 방출하게 되면서 열오염(또는 열영향)이라는 환경 문제를 야기시킨다. 이와 관련하여 주로 관측과 수치모델링을 이용한 많은 환경영향평가 연구가 국내에서 진행되어 왔다(한

국전력공사, 1992; 한국전력공사 기술연구원, 1993; 부경대학교 해양과학공동연구소, 1996; 한국전력공사, 1996; 한국수력원자력주식회사, 2001). 수치모델링을 이용한 온배수 영향 범위의 해석의 경우에는 다양한 변수와 수치기법을 이용하여 보다 복잡한 현상을 재현하고 예측할 수 있다는 장점이 있는 반면에 여러 가지 제약 또한 존재한

*한국해양대학교 해양과학기술대학 해양과학부 (Corresponding author, Division of Ocean Science, Korea Maritime University, 1, Dongsam-dong, Youngdo-gu, Busan 606-791, Korea. hjlee@hhu.ac.kr)

**한국수력원자력(주) 원자력환경기술원 (Nuclear Environment Technonology Institute, Korea Hydro and Nuclear Power Company, Ltd.)

다. 특히 모델 범위, 격자구성, 외해측 개방경계처리 및 모델계산시간에 따라 그 결과가 크게 달라질 수 있게 된다. 이외에도 수치적 기법에 수반되는 오차가 존재하며 오염물질의 확산과 관련해서도 실제 해양에서 존재하는 물리적인 확산 현상 이외에 수치계산에 따른 수치확산(numerical diffusion)이 추가로 발생된다는 문제점이 있다. 특히 열오염 확산의 경계 부근, 즉 수온의 급격한 변화가 존재하는 수온전선 부근에서는 수치 확산에 의해 과도한 수평 확산이 유발될 수 있으며 그 결과 이류에 의한 온배수의 이동 범위를 결정하기 쉽지 않게 된다. 컴퓨터 계산 능력의 향상에 따라 세밀한 격자망 구성, 고정밀의 차분기법(higher order differential scheme) 도입, 복잡한 현상 재현을 위한 다양한 변수도입 등으로 수치모델의 정확도 또한 점차 개선되고 있지만 한편으로 수치모델이 복잡한 구조로 발전하게 됨에 따라 수치모델의 개발자 이외의 일반 연구자들은 모델구조를 이해하기가 쉽지 않게 되었으며 더불어 세밀한 격자망 구성에 따른 방대한 양의 결과에 대한 해석과 분석 또한 쉽지 않다는 단점도 있다.

이러한 문제점을 보완할 수 있는 하나의 대안으로 해석모델(analytical model)을 들 수 있다. 해석모델은 불가피하게 현장조건(수심, 안선 및 조류)을 단순형태로 가정하는 단점이 있으나 수치적 오차와는 무관하다는 장점을 지닌다. 또한 비교적 간단한 구조를 가진다는 점에서 모델 계산시간이 크게 단축되며 결과 해석이 상대적으로 용이하다. 따라서 이상화된 영역에서 수치모델과 해석모델을 동일한 조건을 적용한 결과를 상호비교 분석하는 과정을 통해 수치기법(numerical scheme)에 따른 오차의 원인을 명확하게 규명하는데 활용될 수 있을 뿐만 아니라 모델에 대한 전문적인 지식이 없는 비전문가들도 현장에서 정성적인 오염실태 파악 및 예측에 간단히 활용할 수 있다.

발전소 온배수의 이동·확산과 관련한 비교적 간단한 구조의 현장용 예측모델로 Jirka and Hinton(1992)의 CORMIX (CORnell MIXing zone expert system)가 있다. CORMIX는 해역의 흐름이 시간적으로 변화가 없이 일정한 방향으로 존재한다는 가정 하에서 준정상상태(quasi-steady state)의 해를 구하는 비교적 간단한 예측 모델로 국내에서도 발전소 폐열의 이동·확산 예측이나 발전소의 배수 방식 설계 등에 활용된 바 있다(Jung et al., 2002). CORMIX는 다른 오염물질 이동·확산 수치모델들과 비교할 때 구조가 비교적 간단하며 상대적으로 짧은 시간 내에 안정된 수치해를 얻을 수 있다는 장점이 있는 반면에 해역의 흐름이 시간에 따라 변화하지 않는 경우에만 적용 가능하

고 정상상태(steady state) 도달 후의 열오염 분포 특성만을 규명할 수 있다는 단점이 있다. 즉, 우리나라의 서해안, 남해안과 같이 조류가 우세한 해역에서는 적용이 불가능하며 열오염이 이동·확산되어 가는 과정(transient feature)에 대한 정보는 얻을 수 없다.

최근 Jung et al.(2003)은 Holley(1969)와 Harleman(1971)등에 의해 제안된 바 있는 1차원 해석해(analytical solution)를 확장하여 조류와 같은 왕복성 흐름이 존재하는 해역에서의 온배수 방출에 따른 초과수온(excess temperature)의 이동·확산에 관한 2차원 해석모델을 제안하였다. 구체적으로 기술하면, 안선방향(축 방향)으로 반일주기(M_2 분조의 주기)의 조류가 존재하고 비등방성 난류확산의 특성을 갖는 반 무한평면(semi-infinite plane)의 일정수심 해역을 가정하고 점열원(point heat source)으로부터 지속적인 열유입이 존재하는 경우에 대해 열손실 계수에 따른 열평형 도달시간, 난류계수에 따른 초과수온 분포 특성등을 분석하여 원역을 중심으로 한 온배수 이동 확산 특성에 대해 유용한 자료를 제공하였다. 본 연구는 Jung et al.(2003)이 제시한 2차원 해석해에 S_2 분조를 추가하여 15일 주기의 조류의 대·소조 변동에 따른 온배수의 이동·확산의 변화를 검토한다. 특히 본 연구에서는 조류의 대·소조 변동과 더불어 수평 확산계수 또한 조류속에 비례하여 대·소조 변동하는 조건을 고려하여 초과수온의 이류(advection) 뿐만 아니라 수평 확산의 대·소조 변동까지 반영할 수 있도록 확장한다.

2. 해석해 모델

일정 수심을 가지는 무한 영역의 해양을 가정하고, 축 방향으로 흐름이 존재하는 경우 2차원 수심평균 열보존 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - k_d T \quad (1)$$

여기서, t 는 시간, x , y 는 직교좌표계, T 는 열오염 유입에 의한 초과수온(excess temperature), k_d 는 해표면에서의 열 교환에 의한 열손실 계수이다. k_x , k_y 는 각각 x 축, y 축 방향으로의 수평 확산계수로 다음과 같은 관계식을 사용한다(Jung et al., 2003).

$$k_y = \frac{k_x}{\alpha^2} \quad (2)$$

여기서, α 는 상수계수이다. (2)의 관계식을 이용하여 (1) 식을 다음과 같이 변환할 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = k_x \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - k_d T \quad (3)$$

본 연구에서 축 방향으로만 흐름(u)은 다음과 같은 반일주기 조류성분의 합으로 고려한다.

$$u = u(t) = U_M \sin w_M t + U_S \sin w_S t \quad (4)$$

여기서, U_M , U_S 는 각각 M_2 , S_2 조류 성분의 진폭을 $w_M (= 2\pi/T_M)$, T_M 은 M_2 조석 주기: 12.45시간과 $w_S (= 2\pi/T_S)$, T_S 는 S_2 조석 주기: 12시간)는 각 조류성분의 각주파수(angular frequency)를 나타낸다. U_M , U_S 는 상수값으로 본 연구에서 고려되는 조류는 공간적으로 차이가 없고 시간에 따라 변화한다.

Jung et al.(2003)의 경우에는 Hydraulic Research Station (1978)에서 제안한 수평 확산 식을 근거로 다음과 같은 일정한 수평 확산 계수(k_x)를 사용하였다.

$$k_x = \theta h U_{max} \quad (5)$$

여기서, θ 는 상관계수로 0.6에서 8.7까지의 값을 사용할 수 있으며(Talbot, 1973), h 는 수심, U_{max} 는 최강 유속값으로 Jung et al.(2003)은 M_2 조류의 진폭(U_M)을 사용했다. 본 연구에서는 최강 유속값(U_{max})이 15일 주기의 대·소조 변동을 하는 점을 고려하여 다음과 같이 수평 확산 계수가 대·소조 변동하는 것으로 가정한다.

$$k_x = k_x(t) = \theta h U_{max}(t) = \theta h [U_S \cos((w_S - w_M)t) + U_M] \quad (6)$$

식 (3)의 해를 구하기 위해서 다음과 같은 변수변환을 도입한다. 즉, 시간 τ 에 순간적인 열오염이 발생하는 것을 가정하여 초과수온 T 를 새로운 농도 변수 C 로 치환한다.

$$T = C e^{-k_d(t-\tau)} \quad (7)$$

식 (7)을 식 (3)에 대입하여 다음과 같은 농도 C 에 대한 미분방정식을 구한다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u(t) \frac{\partial C}{\partial x} = k_x(t) \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (8)$$

다음으로 변수변환과 더불어 직교좌표(x, y, t)를 (χ, y, λ) 좌표로 좌표변환한다(Holley, 1969).

$$\chi = x - \int_{\tau}^t u(t) dt \quad (9)$$

$$\lambda = \int_{\tau}^t \frac{k_x(t)}{K_0} dt \quad (10)$$

여기서, K_0 는 θh 이다. 연쇄법칙(chain rule)을 적용하면 (x, y, t) 좌표와 (χ, y, λ) 좌표 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial C \partial \lambda}{\partial \lambda \partial t} = \frac{\partial C \partial \chi}{\partial \chi \partial t} = \frac{k_x(t) \partial C}{K_0 \partial \lambda} - u(t) \frac{\partial C}{\partial \chi} \quad (11)$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C \partial \lambda}{\partial \lambda \partial x} + \frac{\partial C \partial \chi}{\partial \chi \partial x} = \frac{\partial C}{\partial \chi} \quad (12)$$

식 (11)과 식 (12)을 식 (8)에 대입하면 다음과 같은 농도 C 에 대한 확산방정식의 형태로 변환된다.

$$\frac{\partial C}{\partial \lambda} = K_0 \left(\frac{\partial^2 C}{\partial \chi^2} + \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (13)$$

오염원의 위치를 원점(0,0)으로 가정하고 $t=\tau(\lambda=0)$ 에 순간적인 단위 열오염이 부과된다고 가정할 경우, (13)식의 해는 다음과 같이 구할 수 있다(Holley, 1969; Jung et al., 2003).

$$C = \frac{\alpha}{4\pi K_0 \lambda} \exp \left[-\frac{\chi^2 + (\alpha y)^2}{4 K_0 \lambda} \right] \quad (14)$$

식 (14)는 순간적인 단위 열오염 유입(unit-impulse of heat)에 대한 오염 농도의 반응함수(response function)이다. (χ, y, λ) 좌표상의 해 (14)를 구하고자 하는 직교좌표계 (x, y, t)에서의 해로 변환한다. 식 (4)와 식 (6)을 각각 식 (9)과 식 (10)에 대입하면

$$\chi = x + \frac{U_M}{w_M} (\cos w_M t - \cos w_M \tau) + \frac{U_S}{w_S} (\cos w_S t - \cos w_S \tau) \quad (15)$$

$$\lambda = U_M (t - \tau) + \frac{U_S}{\Delta w} (\sin \Delta w t - \sin \Delta w \tau) \quad (16)$$

여기서, Δw 는 S_2 조석 주파수와 M_2 조석 주파수의 차이 ($w_S - w_M$)이다. (15)식과 (16)식을 (14)식에 대입하고, 그 결과를 (7)식에 대입하면

$$T = \frac{\alpha}{4\pi K_0 J(t, \tau)} I(x, y, t, \tau) e^{-k_d(t-\tau)} \quad (17)$$

$$I(x, y, t, \tau) = \exp \left[-\frac{(x + f_M + f_S)^2 + (\alpha y)^2}{4 K_0 J(t, \tau)} \right] \quad (18)$$

$$J(t, \tau) = U_M(t-\tau) + \frac{U_S}{\Delta w} (\sin \Delta w t - \sin \Delta w \tau) \quad (19)$$

이 된다. 여기서,

$$f_M = \frac{U_M}{w_M} (\cos w_M t - \cos w_M \tau) \quad (20)$$

$$f_S = \frac{U_S}{w_S} (\cos w_S t - \cos w_S \tau) \quad (21)$$

이다.

연속적으로 열오염이 유입되는 경우의 해석하는 순간적인 단위 열오염 유입에 대한 반응함수 식 (17)을 시간 t 에 대해 convolution 적분함으로써 구할 수 있다. 만약 $t = 0$ 에서부터 주변 해역에 비해 $T_0^\circ\text{C}$ 만큼 온도가 높은 해수가 $q(\text{m}^3/\text{sec})$ 의 비율로 수심이 $h(\text{m})$ 인 해역에 연속적으로 유입된다고 가정하면 열오염 이동·확산에 대한 해석하는 다음과 같다.

$$T(x, y, t) = \int_0^t \frac{qT_0}{h} \frac{\alpha e^{-k_d(t-\tau)}}{4\pi h K_0 J(t, \tau)} I(x, y, t, \tau) d\tau \quad (22)$$

3. 모델 영역과 변수

해석모형을 적용할 모델영역은 Fig. 1과 같은 반 무한 평면(semi-infinite plane)이며 열오염이 (x_0, y_0) 지점에서 발생한다고 가정한다.

육지와 해양의 경계는 $y = 0$ 에 위치하며 경계를 통한 수온의 전달은 없다고 가정한다. 즉,

$$\nabla T \cdot \hat{n} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (23)$$

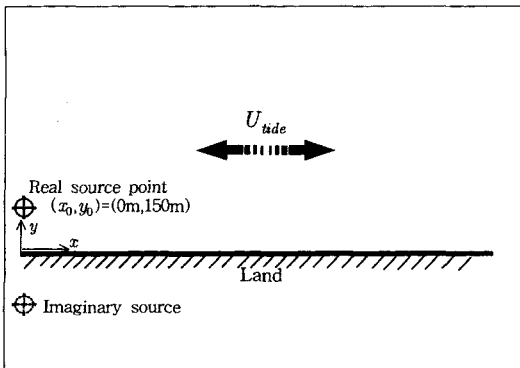


Fig. 1. Model domain and source points.

이다. 여기서, \hat{n} 은 경계에 수직한 방향의 단위벡터이다. 이러한 경계조건을 만족시키기 위해 실제 열 오염원과 대칭된 지점 $(x_0, -y_0)$ 에서의 가상 열 오염원(imaginary heat source)이 고려되어야 한다(Jung et al., 2003). 따라서 열오염으로 인한 반 무한평면에서의 초과수온 분포는 다음과 같다.

$$T(x, y, t) = \int_0^t \frac{\alpha q T_0 e^{-k_d(t-\tau)}}{4\pi h K_0 J(t, \tau)} I(x-x_0, y-y_0, t, \tau) d\tau + \int_0^t \frac{\alpha q T_0 e^{-k_d(t-\tau)}}{4\pi h K_0 J(t, \tau)} I(x-x_0, y+y_0, t, \tau) d\tau \quad (24)$$

식 (24)의 우변의 두 번째 항이 경계조건을 만족시키기 위해 도입된 가상 열 오염원에 의한 초과수온 분포에 해당한다.

본 연구에서는 수심(h)은 7 m로 일정하다고 가정하였다. 오염원의 좌표 (x_0, y_0) 는 (0 m, 150 m)에 위치하며 열오염의 유입량(q)을 $218\text{m}^3/\text{sec}$ 로 주고 오염원 좌표점에서의 초과수온(T_0)을 8.3°C 로 설정하였다. 해표면에서의 열 교환에 의한 열손실 계수 k_d 는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$k_d = \frac{Q_{net}}{\rho C_p h} \quad (25)$$

여기서 Q_{net} 은 해양으로부터 대기로 방출되는 순 열속(net heat flux)으로 $32\text{W}/\text{m}^2$ 의 열이 전 영역에서 일정하게 빠져나가는 것으로 가정하였으며, ρ 는 해수의 밀도로 $1025\text{ kg}/\text{m}^3$, h 는 수심, C_p 는 해수의 비열(specific heat)을 나타내며 $4186.0\text{J}/(\text{kg}^\circ\text{K})$ 이다. 각 계수값을 (25)식에 대입하여 구한 열손실 계수 k_d 는 $0.1065 \times 10^{-5}\text{sec}^{-1}$ 이다.

M_2, S_2 조류 성분의 진폭 U_M 과 U_S 는 각각 0.6 m/sec와 0.2 m/sec로 주는 경우를 기준값으로 하여 수평 확산의 대·소조 변동을 고려하는 경우(식(6))와 일정하게 주는 경우(식(5))의 해석해 특성을 분석하며, 또한 이류의 효과를 고찰하기 위하여 U_M 과 U_S 를 각각 0.7 m/sec와 0.1 m/sec, 0.5 m/sec과 0.3 m/sec 등으로 변화시키면서 열오염 이동·확산 특성을 비교 분석한다. 본 연구에서는 x 축, y 축 방향으로 균일한 수평 확산(isotropic dispersion)을 가정한다. 따라서 k_x 와 k_y 의 상관계수 α 는 1.0으로 준다. θ 는 8.4의 값을 사용하였다. 시간 간격($\Delta\tau$)은 $T_M/3600$ 초(T_M 은 M_2 조석 주기로 주었으며 총 100 태음일(lunar day) 동안 시간 적분하였다.

4. 계산 결과

4.1 $U_M=0.6\text{m/sec}$ 이고 $U_s=0.2\text{m/sec}$ 일 때 열오염의 이동 · 확산

Fig. 2는 주 흐름방향인 x 축 방향으로 (1.0 L, 150 m), (1.25 L, 150 m), (1.5 L, 150 m) 등 총 3개 정점에서의 M_2 주기 동안 최대 초과수온 상승치의 시간 변화를 나타낸 그림이다. 여기서 L은 조석 주기 동안 조류에 의해 이동할 수 있는 최대거리인 tidal excursion 거리로 $U_{\max} T_M / \pi$ 로 계산된다. 대조시의 최강유속($U_{\max} = U_M + U_s = 0.8 \text{ m/sec}$)을 고려할 때, L은 약 11.4km가 된다. 그림에서의 초과수온은 편의상 오염원에서의 초과수온($T_0 = 8.3^\circ\text{C}$)으로 나누어진 정규화(normalized)된 값이다.

그림은 조류의 대·소조 변동에 따른 뚜렷한 15일 주기의 수온 변동을 나타내고 있다. 오염원과 가장 가까운 정점인(1.0 L, 150 m) 지점에서 대조기에 최대 $0.2(=1.7^\circ\text{C})$, 소조기에 최대 $0.07(=0.6^\circ\text{C})$ 의 초과수온이 발생하는 것으로 나타났다. 오염원에서 17.5 km 떨어진(1.5 L, 150 m) 지점에서는 대조기에 최대 $0.045(=0.4^\circ\text{C})$ 의 초과수온이 발생하는 것으로 나타났다. 초과수온의 15일 주기 변동폭은 tidal excursion 거리에 위치한(1.0 L, 150 m) 지점에서 $0.13(=1.1^\circ\text{C})$ 로 가장 크며 오염원에서 멀어질수록 감소한다. 즉, 조류의 대·소조 변동에 따른 열오염의 이류($u \frac{\partial T}{\partial x}$) 변화가 주로 tidal excursion 거리 이내의 해역에서 15일 주기의 수온 변동을 유발하는 것으로 판단된다.

모든 정점에서 계산 시작 후 30일이 경과하면 15일 주기의 변동 진폭이 거의 변화하지 않는 준 정상상태(stationary steady state)에 도달하는 것으로 나타났다. Jung et al. (2003)과 동일한 방법으로 총 계산기간 (100 lunar days) 내의 최대 초과수온값에 대한 M_2 주기내의 최대 초과수온값의 비율이 최초로 90%를 넘기는 시기를 정상상태에 도달하는 시점으로 정의한다고 할 때 (1.0 L, 150 m) 지점에서는 13.8일, (1.25 L, 150 m) 지점에서는 27.8일, (1.5 L, 150 m) 지점에서는 28.3일이 각각 걸리는 것으로 나타났다. 즉, 오염원 근처의 해역에 비해 tidal excursion 거리를 벗어난 원역의 수온변동이 준 정상상태에 도달하기 위해서는 훨씬 더 많은 시간을 필요로 하는 것으로 판단된다.

다음으로 오염원이 위치한 (0 m, 150 m) 지점에서부터 연안선을 따라 (2.0 L, 150 m) 지점까지의 초과수온의 변화 특성을 각 조시별로 고찰하였다. Fig. 3 과 Fig. 4는 75일이 경과한 후의 대조기와 소조기에 해당하는 시점에서 연안선과 평행한 단면에서의 초과수온의 공간분포를 도

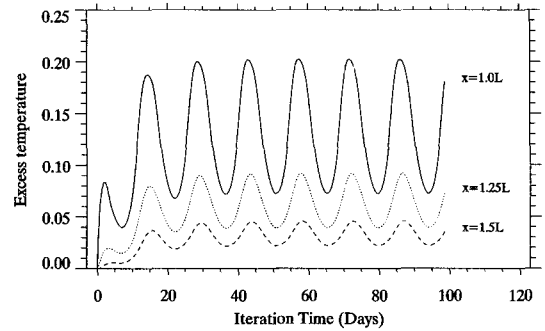


Fig. 2. Time variations in the maximum values of the excess temperature occurring within an M_2 tidal cycle at positions $(x, y)=(1.0L, 150\text{m})$ (solid line), $(1.25L, 150\text{m})$ and (dotted line), $(1.5L, 150\text{m})$ (dashed line).

시한 그림이다. 그림에서 실선(solid line)은 저조시, 점선(dotted line)은 최강창조시, 파선(dashed line)은 고조시, 쇄선(dash-dotted line)은 최강낙조시의 초과수온의 분포이고 축은 오염원으로부터의 거리를 나타낸다. 편의상 오염원으로부터의 거리는 대조기의 tidal excursion 거리 ($L = 11.4 \text{ km}$)로 나누어진 정규화(normalized)된 값이다.

창조시 조류 방향(x 축 거리가 증가하는 방향, $+x$ 방향)을 따라 열오염이 이동하여 고조시 최대로 확장한다. 대조기의 경우에는 tidal excursion 거리 이내의 해역에서는 $0.25(=2.1^\circ\text{C})$ 내외의 일정한 초과수온이 존재하며 (1.0 L, 150 m) 부근에서 급격히 변화하여 (1.5 L, 150 m) 지점 보다 먼 해역에서는 $0.05(=0.4^\circ\text{C})$ 이하로 열오염에 의한 수온 상승이 미미한 것으로 나타나고 있다(Fig. 3의 파선). 반면 소조기의 경우에는 고조시 (0.5 L, 150 m) 부근까지 약 $0.5(4.1^\circ\text{C})$ 내외의 일정한 초과수온이 분포하며 이후 급격히 감소하여 (1.0 L, 150 m) 지점 보다 먼 해역에서는 $0.05(0.4^\circ\text{C})$ 이하의 초과수온이 존재한다(Fig. 4의 파선). 대·소조기에 따른 초과수온 확장 범위의 차이는 소조기의 최강유속이 0.4 m/sec 로 tidal excursion 거리가 대조기의 50% 정도로 감소하는 것에 기인하는 것으로 판단된다.

낙조시에는 조류 방향이 반대로 바뀌면서 열오염은 오염원이 위치하는 쪽으로 이동한다. 그림에서 최강낙조시의 초과수온 분포(Fig. 3과 Fig. 4의 쇄선)는 최강창조시의 초과수온 분포(점선)에 비해 초과수온의 공간변화율이 급격히 감소되어 tidal excursion 거리 부근에서 완만한 프로파일을 보여 준다. 이러한 결과는 낙조시에 점열원에서 공급되는 열오염은 $-x$ 방향으로만 영향을 미치며 고조시 최대로 확장되

었던 초과수온이 낙조류에 의해 -x 방향으로 이루어지면서 추가적인 수평 확산이 일어나기 때문에 추정된다.

Fig. 3과 4에서 보는 바와 같이, 점열원으로부터 약 0.5 tidal excursion 이내의 영역에서 창조시의 초과 수온이 고조시의 초과수온보다 높게 나타나는 특징이 있다. 또한 간조시를 제외하고서 심지어 낙조시의 경우도 점열원의 영향을 크게 받는 것으로 나타나, 이 해역은 거의 대부분의 조석 주기동안 온배수의 영향을 받는 영역이라고 볼 수 있다. 초과수온이 최대가 되는 시점이 0.5 tidal excursion 이내의 경우와 이보다 먼 해역의 경우에 서로 다르게 나타나므로 온배수 영향역을 파악하기 위해서 동시 관측을 수행하거나 이런 자료를 해석할 경우에 주의가 필요함을 시사하고 있다.

Fig. 5는 대조기와 소조기의 고조시 초과수온의 수평분포를 나타낸 그림이다. x축과 y축은 각각 오염원과 연안선으로부터의 거리를 나타내며 tidal excursion 거리로 나누어진 값이다. 그림에서의 등수온선은 정규화된 값이 아

닌 실제 초과수온(°C)을 나타내며 0.5°C이하는 0.1°C간격으로 점선으로 표시하였다.

대조기의 경우(Fig. 5a) 2°C 이상의 초과수온 발생 범위가 연안선을 따라 x축 방향으로 오염원으로부터 약 0.85L(≈9.7 km) 떨어진 지점까지 확장하는 반면에 오염원으로부터 외해 쪽으로는 0.05L(≈0.6 km) 이내에 국한되어있다. 1°C의 경우에도 오염원으로부터 x축 방향으로 약 1.15L(≈13.1 km) 떨어진 지점까지 확장하는 반면 오염원으로부터 외해 쪽으로는 0.3L(≈3.4 km) 부근까지 확장한다. 소조기의 경우(Fig. 5b)에는 2°C 이상 초과수온 발생 범위가 연안선을 따라 0.6 L(6.8 km) 부근까지 확장하고 외해 쪽으로는 0.2 L(≈2.3 km)까지 확장되었다. 1°C의 경우에는 오염원으로부터 축 방향으로 약 0.8L(≈9.1 km) 떨어진 지점까지 확장하고 오염원으로부터 외해 쪽으로는 0.4L(≈4.6 km) 부근까지 확장한다. 즉, 1°C 이상 초과수온 발생 범위의 경우에는 대조기에 창조류 방향으로의 확장이 우세한 반면 소조기에는 상대적으로 연안에서 외해 쪽으로 확장이 우세한 것으로 정리할 수 있다. 특히 소조기의 경우에는 오염원 부근 해역의 초과수온이 3.5°C 이상으로 대조기에 비해 약 1.5°C이상 상승하며 각 방향으로의 수온 구배도 소조기의 경우가 훨씬 크게 나타난다. 이러한 결과는 소조기의 경우 확산계수가 대조기의 50% 정도로 감소하면서 상대적으로 수평 확산에 의한 열의 확

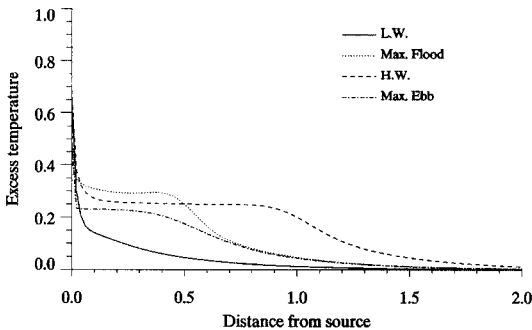


Fig. 3. The instantaneous alongshore distributions of the excess temperature at the four successive time steps of a spring tidal cycle (Low Water (solid line), Flood Maximum (dotted line), High Water (dashed line), Ebb Maximum (dash-dotted line)).

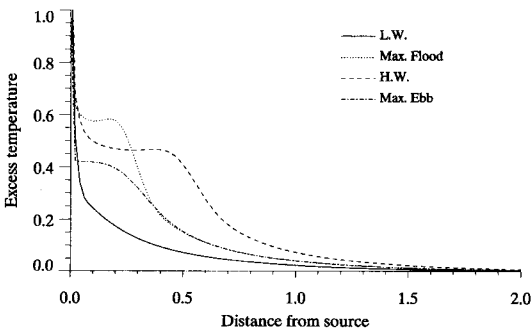


Fig. 4. Same as Fig. 3 except for neap tidal cycle.

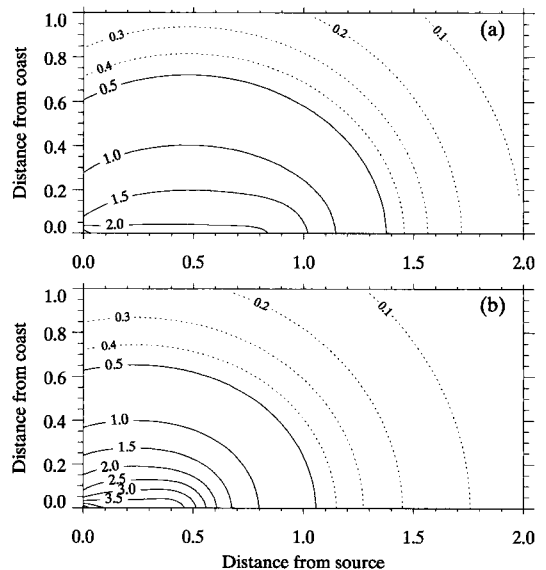


Fig. 5. The instantaneous horizontal distributions of the excess temperature at slack water in (a) spring tide and (b) neap tide.

산이 감소된 것에 기인한 것으로 판단된다.

0.5°C 이하의 초과수온 발생 범위는 대조기의 경우가 소조기 보다 모든 방향에서 더 넓게 분포하고 있다. 대조기의 수평 확산계수가 소조기에 비해 2배 이상 큰 점을 고려할 때 0.5°C 이하의 초과수온 발생 범위가 대조기에 비해 더 넓게 퍼져 있는 것은 수평 확산계수의 크기에 의해 결정된 결과로 추정된다. 즉, tidal excursion 범위를 벗어난 해역에서의 초과수온의 발생 범위는 수평 확산의 크기에 주로 좌우되는 것으로 판단된다.

4.2 수평 확산의 대·소조 변화

수평 확산의 대·소조 변동에 따른 수온분포의 변화 특성을 검토하기 위하여 동일한 조류 조건 하에서 (6)식과 같이 조류의 크기에 따라 확산 계수가 15일 주기의 변동을 하는 경우와 더불어 (5)식과 같이 확산계수를 일정하게 고정하는 경우의 해석해를 계산하였으며 두 결과를 비교하였다. 이때 (5)식에서의 U_{max} 는 편의상 M_2, S_2 조류 성분의 진폭의 합(U_M+U_S)으로 가정한다. 이 경우에도 해석해는 (24)식과 동일하지만 (19)식은 다음과 같이 간단한 형태로 변환된다.

$$J(t, \tau) = U_{max}(t - \tau) \tag{26}$$

Fig. 6은 확산계수 (k_x, k_y)가 변화하는 경우(좌)와 일정

한 경우(우)의 각각 대조기, 소조기별로 고조시의 초과수온의 수평분포를 나타낸 그림이다. 전체적으로 조류의 크기에 비례하는 확산계수를 사용할 때가 일정한 확산계수를 사용하는 경우와 비교해서 근역(near-field)에서 수온이 더 상승하는 것으로 나타났다. 두 경우의 초과수온의 차이는 오염원 부근 근역에서 대조기의 경우 최대 약 0.5°C 정도이고 소조기의 경우 약 1°C 이상인 것으로 나타났다. 특히 소조기의 경우에는 대조기 확산계수의 1/2로 감소하면서 수평 확산의 차이에 따른 초과수온 분포의 차이가 보다 명확하게 나타난다. 즉, 소조기의 경우 0.5L 부근 해역에서 연안에 수직인 방향이나 평행한 방향 모두 초과수온의 공간구배가 크게 증가되는 것을 확인할 수 있다.

대조기, 소조기 모두 1°C 이상 초과수온이 발생하는 범위는 수평 확산계수가 변화 하는 경우가 일정한 경우에 비교하여 x축 방향으로의 확장 범위가 증가하는 것을 확인할 수 있다. U_{max} 로 고정된 확산계수를 사용하는 경우는 조류의 크기에 따라 확산계수가 변화하는 경우에 비해 확산에 의해 열이 전달되는 비율을 상대적으로 과대 산정하는 결과를 초래한다. 확산계수가 상대적으로 작다는 것은 주변의 해수와의 혼합이 상대적으로 줄어들었다는 것을 의미한다. 이는 곧 이류에 의한 열오염의 이동에 있어서도 주변의 해수에 의해 희석되지 않고 높은 수온을 유지하면서 상대적으로 더 먼 거리까지 열을 전달할 수

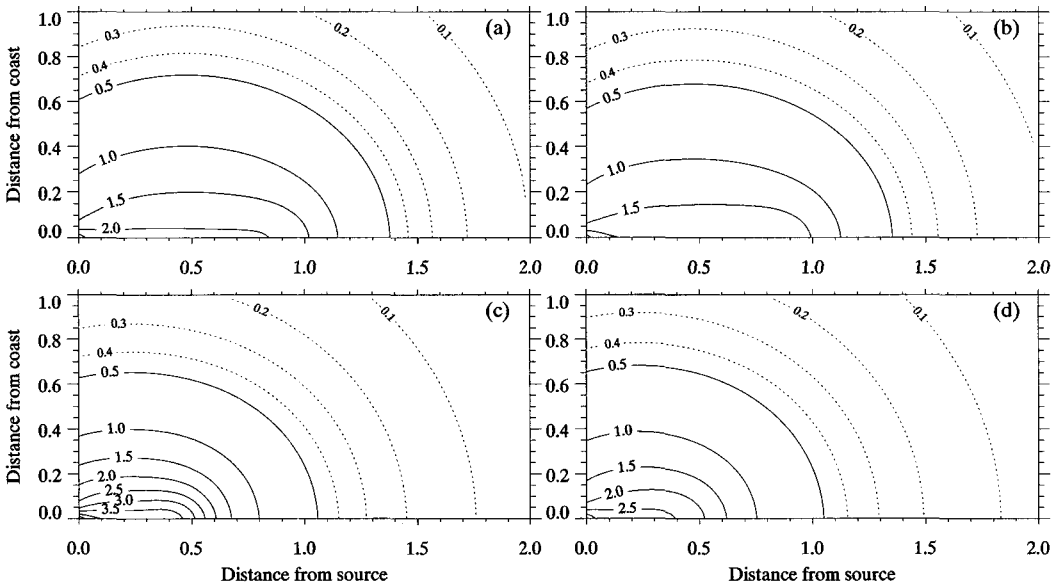


Fig. 6. Same as Fig. 5 except for (a) spring tide with variable k_x , (b) spring tide with constant k_x , (c) neap tide with variable k_x and (d) neap tide with constant .

있다는 것을 의미한다. 결국 1°C 이상 초과수온이 발생하는 범위가 확산계수가 변화하는 경우에 오염원으로부터 x축 방향으로 더 멀리 확장되는 것은 이러한 사실로 설명할 수 있다. 한편 tidal excursion 거리를 벗어난 해역에서의 0.5°C 이하의 초과수온 분포는 주로 수평 확산에 의해서 주로 결정된다. 따라서 그림에서 확인할 수 있듯이 일정한 확산계수를 사용하는 경우의 초과수온 발생 범위가 약간 더 확장되어 있다(Fig. 6의 0.1°C 등수온선).

그러나 수평 확산에 의해 tidal excursion 거리를 벗어난 해역으로 전달될 열량은 절대적으로 작은 값(0.5°C 미만)이므로 확산계수의 차이에 따른 초과수온의 차이는 큰 의미가 없다. 특히 본 연구에서는 모형의 전 영역에서 일정한 양의 열이 해양에서 대기로 방출되는 것으로 가정하고 있다. 따라서 수평 확산에 의해서 전달된 작은 양의 열은 거의 대부분 대기로 빠져 나가게 된다. 즉, 본 연구에 있어 tidal excursion 범위를 벗어난 외해역은 유입된 열오염을 일정부분 소비하는 역할을 한다고 할 수 있다.

Fig. 7은 고조시 연안과 평행한 방향으로 오염원이 위치한 (0 m, 150 m)지점에서부터 (2.0 L, 150 m)지점까지의 초과수온의 공간분포를 비교한 그림이다. 그림에서 실선과 점선은 각각 소조기에 확산계수가 변화 하는 경우와 일정한 경우의 초과수온 분포이며 파선과 쇄선은 대조기의 확산계수에 따른 초과수온 분포를 나타내고 있다. 대조기, 소조기 모두 tidal excursion 거리 이내의 해역에서는 확산계수가 변화 하는 경우의 초과수온 값이 더 크게 나타났다. 특히 확산계수 차이가 최대가 되는 소조기의 경우에는 약 0.2 (1.7°C)의 수온차가 나타나며 결과적으로 x축 방향으로의 초과수온의 공간 변화율도 크게 증가한다.

그러나 대조기의 경우 (1.5 L, 150 m), 소조기의 경우 (1.0 L, 150 m)지점을 벗어난 해역에서는 열오염에 의한 수온 상승이 미미할 뿐만 아니라 확산계수에 따른 수온 차이도 거의 없는 것으로 나타나고 있다. 즉, 이 해역으로는 주로 수평 확산에 의해 초과수온이 전달되지만 그 양이 상대적으로 작고 또한 일정한 양의 열이 해양에서 대기로 방출되는 관계로 확산계수의 차이에 따른 초과수온 분포의 차이가 크지 않는 것으로 판단된다. 그러므로 확산계수 크기의 변화는 주로 오염원 부근 해역의 초과수온의 절대값 및 tidal excursion 거리 부근에서의 공간 분포 특성에 영향을 미치는 것으로 사료된다.

4.3 이류의 대·소조 변화

조류의 대·소조 변동에 따른 열오염의 이류 변화를 검

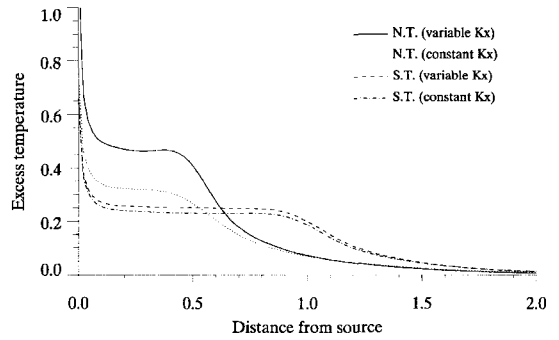


Fig. 7. The instantaneous alongshore distributions of the excess temperature according to different eddy diffusivity formula (neap tide with variable k_x (solid line), neap tide with constant k_x (dotted line), spring tide with variable k_x (dashed line), spring tide with constant k_x (dash-dotted line)).

토하기 위하여 수평 확산 계수를 (5)식과 같이 일정하게 주고 U_M 과 U_S 를 변화시키면서 열오염의 이동 특성을 비교하였다. 즉, $U_M=0.6$ m/sec와 $U_S=0.2$ m/sec의 경우와 더불어 $U_M=0.7$ m/sec와 $U_S=0.1$ m/sec, $U_M=0.5$ m/sec와 $U_S=0.3$ m/sec의 경우를 고려하였다. 모든 경우에 있어 대조기의 최강유속(U_{max})은 0.8 m/sec이며 따라서 대조기의 tidal excursion 거리($L=U_{max}T_M/\pi$)는 11.4 km로 동일하고 (5)식에 의해 계산되는 수평 확산계수 또한 모든 조건에서 동일하다. 소조기의 최강유속은 각각의 경우에 따라 0.4m/sec, 0.6m/sec, 0.2m/sec로 변화한다.

Fig. 8은 수평 확산 계수를 식(5)와 같이 가정할 경우 (1.0L, 150 m) 지점에서의 M_2 주기 내의 최대 초과수온 상승치의 시간 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 실선은 U_M 을 0.6m/sec, U_S 를 0.2m/sec로 준 경우, 점선은 U_M 을 0.7m/sec, U_S 를 0.1m/sec, 파선은 U_M 을 0.5m/sec, U_S 를 0.1m/sec로 준 경우의 계산 결과이다. 대조기의 경우에는 3가지 경우 모두 초과수온 열오염에 의한 초과수온이 최대 0.19(≈1.6°C)로 거의 일치한다. 그러나 소조기의 경우에는 조류속의 차이로 인한 초과수온의 차이가 뚜렷하게 나타난다. 최강유속이 가장 큰 $U_M=0.7$ m/sec와 $U_S=0.1$ m/sec의 경우에 (Fig. 8의 점선) 초과수온이 가장 큰 반면 $U_M=0.5$ m/sec와 $U_S=0.3$ m/sec의 경우에는(Fig. 8의 파선) 소조기의 조류속의 감소로 인해 초과수온이 크게 감소한다. 소조기의 초과수온 값을 대조기의 초과수온 값으로 나눈 비율을 계산하면 $U_M=0.7$ m/sec와 $U_S=0.1$ m/sec의 경우에 0.52, $U_M=0.6$ m/sec와 $U_S=0.2$ m/sec의 경우에 0.37, $U_M=0.5$ m/sec와 $U_S=0.3$ m/sec의 경우에 0.26으로 점차 감

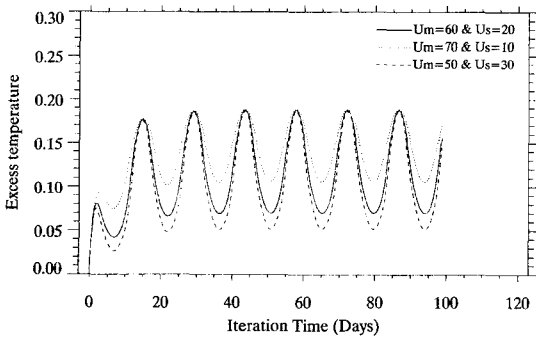


Fig. 8. Time variations in the maximum values of the excess temperature occurring within an M2 tidal cycle under three different velocity conditions: $U_M=0.6$ m/sec and $U_S=0.2$ m/sec (solid line), $U_M=0.7$ m/sec and $U_S=0.1$ m/sec (dotted line), $U_M=0.5$ m/sec and $U_S=0.3$ m/sec (dashed line).

소한다. 이는 소조기의 조류속이 대조기에 비해 각각 75%, 50%, 25%로 감소하는 것에 기인한다.

Fig. 9는 수평 확산 계수를 식(5)와 같이 가정할 경우 정상상태에 도달한 후인 75일이 경과한 후의 소조기에 연안선을 따라 (0m, 150m) 지점에서부터 (2.0L, 150m) 지점까지의 초과수온의 공간분포를 도시한 그림이다. 그림에서 각 유속 조건별로 소조기의 tidal excursion 거리 부근에서 수온이 급격하게 변화하는 것을 확인할 수 있다. 즉, U_M 이 0.7 m/sec이고 U_S 가 0.1 m/sec일 경우에는 0.75L(L=11.4km) 부근에서 수온 변화율이 가장 크며(Fig. 9의 점선) U_M 이 0.6 m/sec이고 U_S 가 0.2 m/sec일 경우에는 0.5L 부근에서(Fig. 9의 실선), U_M 이 0.5 m/sec이고 U_S 가 0.3

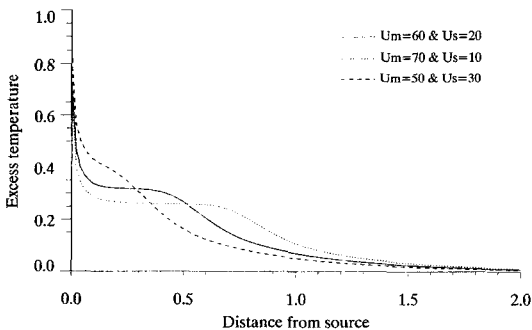


Fig. 9. The instantaneous alongshore distributions of the excess temperature at slack water with the constant eddy diffusivity under three different velocity conditions: $U_M=0.6$ m/sec and $U_S=0.2$ m/sec (solid line), $U_M=0.7$ m/sec and $U_S=0.1$ m/sec (dotted line), $U_M=0.5$ m/sec and $U_S=0.3$ m/sec (dashed line).

m/sec일 경우에는 0.25L 부근에서(Fig. 9의 파선) 급격한 수온변화가 존재한다. 이 범위를 벗어난 해역에서는 각 유속 조건별 초과수온 분포의 차이가 거의 없는 것으로 나타난다. 이 영역은 앞서 언급한 바와 같이 주로 수평 확산에 의한 열전달이 이루어지는 곳으로 상대적으로 이류의 영향이 미치지 않을 뿐만 아니라 일정한 양의 열이 해양에서 대기로 방출되는 관계로 초과수온의 차이가 크지 않는 것으로 판단된다.

오염원 인근 해역에서의 수온 상승은 소조기의 조류속이 가장 작은 U_M 이 0.5 m/sec이고 U_S 가 0.3 m/sec일 경우가 최대로 약 0.4(≈ 3.3°C) 정도이며 소조기의 조류속이 가장 큰 U_M 이 0.7 m/sec이고 U_S 가 0.1 m/sec일 경우가 최소로 약 0.25(2.1°C)로 나타났다. 이는 조류속이 클수록 강한 조류에 의해 상대적으로 더 먼 영역까지 열이 고루 분산되면서 초과수온 값이 감소한 결과로 여겨진다. 그림으로 제시하지는 않았지만 대조기의 경우에는 초과수온의 수평분포가 3가지 유속조건과 무관하게 서로 일치하였다. 이러한 결과는 대조기의 최강유속값이 0.8 m/sec로 동일하다는 사실로부터 충분히 예측 가능한 결과이다.

수평 확산이 (6)식과 같이 조류의 크기에 따라 15일 주기로 변화할 경우에는 오염원 인근 해역에서의 유속 조건별 수온 상승값의 차이가 크게 증가한다. Fig. 10은 확산 계수가 변화할 경우의 동일한 시기에 연안선을 따른 수온의 공간분포를 도시한 그림이다. 조류의 대·소조 변동폭이 가장 큰 $U_M=0.5$ m/sec, $U_S=0.3$ m/sec의 경우에는 tidal excursion 거리 이내의 영역에서 약 0.9(≈ 7.5°C) 내외의 초과수온이 발생하며 0.25L 부근에서 급격히 감소하여 오염원으로 0.5L 이상 떨어진 해역에서는 0.1(≈ 0.8°C) 이하의 초과수온이 존재한다(Fig. 10의 파선). 일정한 확산계수를 사용한 경우인 Fig. 9의 파선과 비교할 때 tidal excursion 거리내의 해역에서는 수평 확산에 의해 최대 4.5°C 이상의 수온차가 발생한다. 대조기와 비교하여 상대적으로 조류속의 차이가 크지 않은 $U_M=0.7$ m/sec, $U_S=0.1$ m/sec의 경우에는 tidal excursion 범위(0.75L)내의 초과수온이 0.3(≈ 2.5°C) 내외로 확산계수의 차이에 의한 초과수온 차이는 다른 두 경우와 비교하여 크게 감소한다. 그러나 tidal excursion 거리 부근에서 급격한 수온변화가 존재하는 패턴은 Fig. 9와 Fig. 10에서 동일하게 나타난다.

특이한 점은 열 오염원 근처에서 부하된 열오염(T_0)보다 큰 초과수온이 발생한다는 점이다. 이러한 결과는 Holley(1969)에서도 지적된 바와 같이 수평 확산 계수가 작을 경우 열원 부근에 국한되어 정조시(slack water) 나

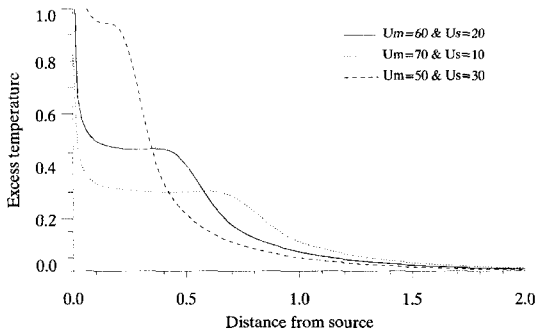


Fig. 10. Same as Fig. 9 except for the variable eddy diffusivity.

타날 수 있는 비현실적인 결과이다(식 (17) 참조). 본 연구에서는 수평 확산 계수의 공간적인 차이가 없으므로 가정했지만 일반적으로 온배수가 방출되는 열 오염원 주변에서는 정조시에도 온배수 방출에 따른 체트류 등 난류확산을 증가시킬 수 있는 요인이 존재한다. 따라서 보다 현실적인 예측을 위해서는 확산계수의 공간 구배를 고려하거나 열원 부근의 난류확산(background turbulence) 효과를 고려하여 최소 확산계수 값을 주는 형태로의 해석해 변형이 필요할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 Jung et al.(2003)이 제안한 열오염의 이동 및 확산에 관한 2차원 해석모형을 확장하여 M_2 조류와 S_2 조류를 동시에 고려한 조류의 대·소조 변동이 존재하는 해역에서의 열오염의 이동 및 확산에 관한 해석모형을 개발하였다. 특히 새로 개발된 모형은 15일 주기의 조류의 대·소조 변동과 더불어 수평 확산계수가 조류속에 비례하여 변화하는 경우를 고려할 수 있다. 일반적으로 난류 확산의 크기는 해역의 유속의 크기에 비례하여 변화하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 모형은 조류의 변동과 무관하게 확산계수를 일정한 값으로 고정하는 것에 비해 보다 현실을 반영하는 모형이라 할 수 있다. 개발된 2차원 해석모형을 점열원(point heat source)이 존재하는 반 무한평면의 이상 해양(idealized ocean)에 적용하여 열오염의 이류 및 수평 확산 양상을 검토하였다.

조류의 대·소조 변동에 의한 초과수온의 15일 주기 변동폭은 tidal excursion 거리에 위치한 정점에서 가장 크게 나타났으며 거리가 멀어질수록 감소하는 경향을 나타냈다. 또한 30일이 지나면 거의 모든 정점에서 수온의 변

동 진폭(15일 주기)이 거의 변화하지 않는 준 정상상태(stationary steady state)에 도달하는 것으로 나타났다. 특히 tidal excursion 거리내의 초과수온은 14일이 경과한 후엔 준 정상상태에 도달하는데 반해 원역에서는 약 28일 정도 소요되는 것으로 나타나 오염원 근처의 해역에 비해 tidal excursion 거리를 벗어난 원역의 수온변동이 준 정상상태에 도달하기 위해서는 훨씬 더 많은 시간을 필요로 하는 것으로 확인되었다. 이러한 수치는 M_2 조류 성분만을 고려한 Jung et al.(2003)의 결과와 비교하여 tidal excursion 거리 이내의 정점들의 경우에는 약 2일, tidal excursion 거리를 벗어난 정점의 경우에는 약 10일 정도 증가한 것이다.

수평 확산계수를 조류속에 비례하여 변화하는 경우와 일정한 값으로 고정하는 경우를 비교한 결과 대조기, 소조기 모두 1°C 이상 초과수온이 발생하는 범위는 수평 확산계수가 변화 하는 경우가 상대적으로 더 멀리 확장하는 경향을 보여주었다. 즉, 이류에 의한 열오염의 이동에 있어서도 수평 확산이 상대적으로 작을 경우에는 주변의 해수에 의해 희석되지 않고 높은 초과수온을 유지한 상태로 상대적으로 더 먼 거리까지 확장되는 것으로 판단된다. tidal excursion 거리를 벗어난 해역에서는 0.5°C 미만의 미약한 초과수온이 발생하는 것으로 나타났으며 확장 범위는 주로 수평 확산의 크기에 비례하여 증가하는 양상을 나타냈다. 그러나 확산계수의 차이에 따른 초과수온 분포의 차이는 오히려 tidal excursion 범위 이내의 해역에서 크게 나타났으며 이 범위를 벗어난 외해역에서는 차이가 거의 존재하지 않는 것으로 나타났다. 이는 수평 확산에 의해 외해역으로 전달된 초과수온은 이류에 의해 전달되는 양에 비해 상대적으로 미미한 수준이며 또한 대부분의 열이 해양에서 대기로 방출되기 때문으로 사료된다.

M_2 조류와 S_2 조류의 진폭을 변화시키면서 열오염의 이류의 효과를 검토한 결과, 각 유속조건별 소조기 tidal excursion 거리인 0.75L, 0.5L, 0.25L (L=11.4km) 부근에서 초과수온이 급격히 변화하는 수온전선이 존재하였다. 이 범위를 벗어난 해역에서는 각 유속 조건별 초과수온 분포의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 이 영역은 앞서 언급한 바와 같이 주로 수평 확산에 의한 열전달이 이루어지는 곳으로 상대적으로 이류의 영향이 미치지 않는 것으로 판단된다. 즉, tidal excursion 거리 부근 해역에서의 열오염의 이동·확산 특성은 주로 이류에 의해 결정되며 그 결과 tidal excursion 거리 부근에서 비교적 급격한 초과수온의 공간변화가 존재하는 것으로 판단된다.

본 연구에서 제안된 2차원 해석모형은 연직으로는 수층이 완전히 혼합된 해역을 전제로 하는 반면 실제의 해양은 계절에 따라 연직 성층이 뚜렷이 존재한다. 특히 열 오염은 주로 표층에 국한되어 이동·확산된다는 점에서 이러한 3차원적 구조를 재현할 수 있는 3차원 해석모형으로의 확장이 다음 단계의 연구과제로 수행될 예정이다. 그러나 해석모델은 근본적으로 실제해역을 이상화(idealized)한 단순 모델영역에서만 적용 가능하다는 점에서 한계를 내재하고 있다. 특히 본 연구에서는 해양으로부터 대기로 방출되는 순열속(Q_{net})을 $32W/m^2$ 로 고정하였으며 전 영역에서 일정하게 빠져나가는 것으로 가정하였으나 실제로는 바람과 습도, 기온, 해수면 온도 등에 의해 열속(Heat flux)은 시·공간적으로 크게 변화한다. 또한 Jung et al. (2003)은 민감도 분석을 통해 초과수온의 절대값은 순열속값에 의해 크게 좌우될 수 있음을 보인 바 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 해석모델의 결과와 실제 발전소 주변 해양환경의 결과와는 직접 관련이 없음을 밝힌다. 불규칙한 지형과 복잡한 외부 조건, 해류, 조류 등이 상존하는 실제 해양에 직접 적용할 수 있는 현장용 예측모델로 발전하기 위해서는 기존 수치모델과의 비교검증, 다양한 현장관측 결과와의 비교검증이 반드시 수행되어야 한다. 또한 필요할 경우 수치모델 기법을 부분적으로 도입하여 반수치해(semi-numerical) 혹은 반해석해(semi-analytical) 모델로의 변형도 추진할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었다(KRF-2003-003-C00159).

참고문헌

부경대학교 해양과학공동연구소 (1996). 영광 원자력발전소 주변 해양환경조사 보고서.

- 한국수력원자력주식회사 (2001). 구시포어항 사업지연에 따른 영광원전 온배수 저감방안 검토보고서.
- 한국전력공사 (1992). 영광원자력발전소 주변 해양환경조사 보고서.
- 한국전력공사 (1996). 울진원자력 5,6호기 건설사업 환경영향평가서.
- 한국전력공사 기술연구원 (1993). 발전소 가동이 주변 해양 환경에 미치는 영향.
- 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.
- Hydraulics Research Station (1978). A numerical model for background temperature fields. Hydraulics Research Station Report No. EX 806.
- 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.
- Jung, K.T., Kim, S.D., Park, C.W., Jin, J.Y. and Park, J.S. (2002). Far-field prediction of the dispersion of thermal effluents in a shallow coastal sea region using the CORMIX system. Proceedings of the KOSMEE spring annual meeting, Seoul, Korea, 257-263.
- Talbot, J.W. (1973). Measurement of dispersion. Water Pollution Research, Technical report No. 13, HMSO.

Received March 12, 2004

Accepted May 9, 2004