

해수순환과 온배수 확산에 관한 3차원 수치모델링

정태성⁽¹⁾, 김상익⁽²⁾, 강시환⁽²⁾

Three-Dimensional Numerical Modelling of Water Circulation and Thermal Diffusion

by

Tae Sung Jung⁽¹⁾, Sang Ik Kim⁽²⁾ and See Whan Kang⁽²⁾

요약

연안해역에서 해수순환과 오염물질의 확산과정을 연구하기 위해 수치모형이 널리 사용되어 왔으며, 최근에는 3차원 모형의 개발과 적용이 증가하고 있다. 연안해역에서 해수유동과 확산현상을 해석할 수 있는 3차원 수치모형을 수립하여 발전소 주변해역에서 해수유동과 온배수 문제에 적용하고 현장관측자료와 비교하였다. 수치모형은 실제 연안해역에서 유속분포와 수온분포를 비교적 정확히 재현하였다. 따라서, 수립된 모형은 연안해역의 해수유동 및 확산문제를 해석하는 데 널리 활용될 수 있을 것이다.

Abstract

Numerical models have been widely used to understand the structure of coastal currents and the transport mechanisms in regard to the fate of pollutants. This study focuses on the development of a three-dimensional model of coastal circulation and mass transport. The model was used to calculate coastal currents and temperature distributions of the thermal plume discharged from a power plant. The model results were compared with field-observed data. They showed the relatively good agreements with the data. The model can be used to estimate the currents and its mass transport in coastal waters.

Keywords : 3차원 모형, 온배수 확산, 난류모형, 3-D Model, Thermal Diffusion, Turbulence Model

(1) 정회원, 한남대학교 토목환경공학과

(2) 한국해양연구소 연안공학연구부

1. 서론

연안해역의 도시화 및 산업화가 증가하면서 육상으로부터 많은 양의 도시하수와 공장폐수가 연안해역으로 유입되어 연안수질이 악화되고 있다. 임해 발전소로부터 방출되는 온배수, 각종 연안 구조물의 건설로 인해 연안해역에서 해수유동 및 수질환경이 변화하고 있다. 우리나라 서·남해 연안해역은 복잡한 해안선과 섬들로 구성되어 있어, 대부분 폐쇄성 해역이다. 따라서, 오염물질이 유입되면 외해수와 내해수의 혼합에 의한 오염물질 농도의 희석이 미약하여 연안해역에 오염물질이 축적되고 있다. 이로 인한 수질오염으로 어장, 휴양공간 등 바다의 생산성과 활용성이 크게 상실되고 있는 실정이다. 따라서, 이러한 연안 수질환경의 오염원인을 정확히 분석하고, 최적의 수질관리 대책을 수립하여 깨끗한 수질로 유지하기 위해서는 무엇보다도 연안해수중에서 발생하는 물리, 화학, 생물학적 제현상들을 정확히 이해하여야 한다. 특히 연안 해수의 유동은 플랑크톤, 어란, 각종 쓰레기, 기타 오염물질 등을 확산에 중요한 인자로 수질오염 문제를 이해하는데 필수적이며, 연안해역으로 유입된 오염물질의 이동·확산 과정을 정확히 파악하여 수질변화를 정확히 이해하고 현재와 장래의 수질관리 및 개선 대책을 수립하는 데 있어서 반드시 필요하다.

연안해역의 해수유동은 주로 달, 태양, 지구 사이의 인력 작용에 의해 발생하는 해수면의 승강작용인 조석에 의해 발생하는 조류, 바람에 의하여 발생하는 취송류, 수온과 염분 차에 의해 발생하는 밀도류에 의하여 주로 일어난다. 이외에도 하천수의 유입에 의한 흐름, 온배수 등의 유입에 의한 흐름 등이 복잡한 연안 지형에 의하여 영향을 받는 곳으로 연안수의 유동은 시·공간적으로 변화하는 3차원 비정상류이다. 특히, 하구역(estuary)은 담수와 해수가 교차하는 해역으로 밀도차에 의한 성층화는 해수유동 및 해수중에 있는 물질(염분, 오염물질 등)의 이동 및 확산에 중요한 영향을 미친다. 임해 발전소에서 냉각수로 사용한 후에 방출하는 온배수는 주변 해수의 수온을 상승시켜 연안 수질환경 및 생태계에 영향을 끼치며, 온배수 확산은 성층 하구역에서

의 흐름과도 유사하여, 주변해수의 유동, 배출된 온수와 주변 해수사이의 온도차에 의한 밀도류, 온배수 젯트류, 난류 확산 등의 복합작용에 의하여 일어난다. 따라서, 이러한 연안해역의 해수유동 및 확산현상을 정확히 규명하기 위해서는 3차원적 유동과 확산 특성에 대한 이해가 필요하며, 이를 위해 신뢰성 있는 3차원 비정상 수치모형의 개발 및 적용이 필요하다. 3차원 수치모형에 의해 연안해역에서의 오염물질의 순환과정을 정확히 이해할 수 있게 되면, 연안 수질환경 변화를 보다 정확히 평가할 수 있으며, 이는 연안 수질환경을 보호할 수 있는 수질 관리대책을 수립하는 데 기여할 것이다.

본 연구에서는 연안해역의 해수유동과 확산현상을 해석하기 위하여 개발되어 온 3차원 수치모형들의 연구개발 동향에 대해 고찰하였으며, 3차원 유한차분수치모형을 발전소 인근해역에서 해수유동과 온배수 확산 해석에 적용하고 관측자료와 비교하여 모형의 현장 적용성을 평가하였다.

2. 해수유동 및 확산 수치모형

3차원 수치모형에 관한 연구추이를 고찰한 결과(정태성 등[1997])에 의하면, 최근에 널리 사용되는 연안 해수유동에 관한 수치모형은 밀도효과를 적절히 고려할 수 있는 다단모형이며, 모드분리기법과 연직좌표변환을 도입하고 있다. 본 연구에서는 연직변환좌표에서 모드분리기법과 난류모형을 도입한 3차원 다단모형을 사용하여 연안해역에서 해수순환과 온배수 확산현상을 해석하였다. 수치모형의 지배방정식, 경계조건, 수치해석 방법은 다음과 같다.

2.1 지배방정식

직교좌표계에서 3차원 연속방정식, 운동량방정식, 물질 확산방정식, $k-\epsilon$ 난류방정식을 σ -좌표에서의 식으로 변환하고, 무차원 변수를 도입하여 무차원화한 후에 유한차분법을 사용하여 수치해석하였다. 3차원 밀도류를 표현할 수 있는 Reynolds 평균된 3차원 연속방정식, 운동량방정식, 물질 확산방정식은 직교좌표계(x 가 동쪽, y 가 북쪽, z 가 수면에서 바닥으로 증가하는 좌표)에서 Boussinesq 근사와 정수압 가정하에 다음과

같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} - f v = \\ - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} (A_V \frac{\partial u}{\partial z}) + F_u \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} + f u = \\ - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} (A_V \frac{\partial v}{\partial z}) + F_v \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial z} (B_V \frac{\partial T}{\partial z}) + F_T \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $(u, v, w) = (x, y, z)$ 방향의 유속성분, $f = \text{Coriolis 상수}$, $\rho_0 = \text{해수의 기준밀도}$, $p = \text{압력}$, $A_V = \text{연직방향 운동량 확산계수}$, $\rho = \text{해수의 밀도}$, $g = \text{중력가속도}$, $T = \text{수온}$, $B_V = \text{연직방향 수온 확산계수}$, F_u, F_v, F_T 는 각각 u, v, T 의 수평확산항이다.

연직 확산계수 (A_V 와 B_V)를 구하기 위하여 $k-\epsilon$ 난류방정식을 사용하였다. $k-\epsilon$ 난류방정식은 난류 운동에너지와 난류 감쇠율에 대한 방정식으로 구성되며, 다음과 같다 (Rodi[1984]).

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(uk)}{\partial x} + \frac{\partial(vk)}{\partial y} + \frac{\partial(wk)}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{A_V}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P_v + G_w - \epsilon + F_k \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial(u\epsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(v\epsilon)}{\partial y} + \frac{\partial(w\epsilon)}{\partial z} =$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{A_v}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_{1\epsilon} P_v - C_{2\epsilon} \epsilon) + F_\epsilon \quad (7)$$

여기서, $k = \text{난류의 운동에너지}$, $\epsilon = \text{난류 감쇠}$

율, $\sigma_k = 1.0$, $P_v = A_V [(\partial u/\partial z)^2 + (\partial v/\partial z)^2]$, $G_w = -g B_V (\partial \rho/\partial z)/\rho_0$, F_k 와 F_ϵ 은 각각 k 와 ϵ 의 수평방향 확산항, $C_{2\epsilon}$ 은 격자 난류(grid turbulence)의 감소율을 측정된 결과에 의하면, 1.8부터 2.0사이의 값(ASCE Task Committee [1988])으로 알려져 있으며, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $C_{1\epsilon} = C_{2\epsilon} - \chi^2/(\sigma_\epsilon c_\mu^{0.5})$ (Rodi[1984]), $\chi = \text{von Karman 상수}$, c_μ 는 국부 평형전단층에서 $(\overline{u'w'}/k)^2$ 로 실험결과에 의하면 0.09, u' 와 w' 은 각각 수평방향과 연직방향의 난류 변동속도이다.

위에서 χ 값은 연구자에 따라 다르며, χ 값에 따라 $C_{1\epsilon}$ 의 값이 변화한다. Alfrink와 van Rijn[1983]은 개수로에서의 유속분포를 계산하고 0.35가 실험치와 일치하는 결과를 제시한다고 하였다. 본 연구에서도 $\chi = 0.35$ 를 사용하였다.

수심 z 에서의 압력은 식 (4)를 해수면 $z = -\eta$ 에서 수심 z 까지 적분하면 얻어지며 다음과 같다.

$$p = p_a + \int_{-\eta}^z \rho g dz \quad (8)$$

여기서, p_a 는 대기압이다.

식 (8)을 식 (2) ~ (3)에 대입하고, 식 (1) ~ (3), (5) ~ (7)을 연직방향으로 정규화한 σ -좌표(Freeman 등[1974])에서 무차원 변수를 사용하여 변환하여 사용하였다. 자세한 내용은 정태성 등[1994]에 기술되어 있다.

식 (6)과 (7)에 의한 계산결과로부터 연직 확산계수는 다음과 같이 계산된다(Rodi[1984]).

$$A_V = c_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (9)$$

$$B_V = \frac{A_V}{\sigma_t} \quad (10)$$

여기서, σ_t 는 운동량 확산과 물질 확산의 비로 수온의 경우는 Prandtl수이다.

해수의 밀도는 수온과 염분의 함수로 다음과 같다(Eckart[1958]).

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0 + \Delta \rho \\ &= (5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S)/[(1779.5 \end{aligned}$$

$$+ 11.25T - 0.0745T^2) - (3.8 + 0.01T)S + 0.698(5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S)] \quad (11)$$

여기서, 모형의 현장적용시 염분 S 는 적용해역 내의 공간변화가 크지 않아 관측된 평균값을 사용하였으며, 지형경사가 큰 경우에 발생하는 것으로 알려진 수치오차(Haney[1990])를 줄이기 위하여 밀도 ρ 는 기준밀도(계산영역의 평균치)를 제거한 $\Delta\rho$ 를 사용하였다.

2.2 초기 및 경계조건

초기조건으로는 유속, 수면변위, 난류값(k , ϵ)을 0으로 놓았으며, 초기수온은 평형수온으로 지정하였다. 평형수온은 관측결과중 온배수 방출로 인한 온도상승의 영향이 없는 지점에서 관측된 표층수온을 사용하였다.

해수면에서의 난류값은 경계면을 통한 교환이 없다는 가정하에 $\partial k/\partial z = \partial \epsilon/\partial z = 0$ 을 사용하였으며(Alfrink와 van Rijn[1983]), 수온에 대해서는 열교환을 고려하여 다음과 같은 조건을 사용하였다(정태성 등[1994]).

$$\rho_0 B_v \frac{\partial T}{\partial z} = K_T (T - T_e) \quad (12)$$

여기서, K_T = 해수면 열교환계수, T_e = 해수의 평형온도이다.

바닥경계에서 난류값에 대한 경계조건은 $k=0$ 과 $\partial \epsilon/\partial z=0$, 유속에 대해서 무활동조건(바닥유속 = 0), 수온에 대해서는 바닥면을 통한 열 교환이 없다고 가정하여 $\partial T/\partial z = 0$ 을 사용하였다. 유속에 대해 무활동조건은 많은 격자수로 분할하지 않으면, 유속의 수심분포를 정확히 표현하지 못한다. 그러나, 연직층 수의 증가는 계산시간의 증가를 가져와 실용성이 없다. 따라서, 벽면함수의 개념을 도입하여(Rodi[1984]), 바닥층에서 연직 와점성계수 A_{vb} 를 다음과 같이 표현하였다.

$$A_{vb} = c u_b \Delta z \quad (13)$$

여기서, c = 바닥조도와 관련된 상수, u_b = 바닥층에서 유속, Δz = 바닥으로부터 바닥층 유속계산점까지 거리이다.

해수면과 바닥 경계조건외에 모형경계내로 물

의 유입이 있는 곳에서는 유속과 수온을 지정하였으며, 개경계에서는 조석에 의한 수면변위를 지정하였다.

2.3 수치해석방법

유한차분법으로 수치계산상의 효율을 위하여 연직 확산항, Coriolis항, 수면경사항을 음해법으로 해석하여 수치안정조건에 영향을 미치지 않도록 하였으며, 이송항과 수평 확산항을 FTCS (Forward Time and Centered Space)법에 의해 해석하였으며, 표면중력파에 의한 계산시간 제약을 극복하기 위하여 모드분리개념을 도입하여 수면변위에 관한 타원형 차분식을 유도하여 해석하였다. 따라서, 수치해석시 안정조건은 수평방향 이송항과 확산항에 의하여 결정된다. 계산격자망, 연속방정식, 운동량방정식, 난류방정식의 차분화, 수면변위 계산식의 유도 및 차분화 과정은 정태성 등[1994]에 자세히 기술되어 있다.

3. 수치모형의 현장적용

연안해역에서 해수유동과 온배수 확산문제에 대한 모형의 현장 적용성을 검토하기 위하여 동해안에 위치한 월성원자력발전소 인근해역의 해수 순환과 온배수 확산문제에 대한 현장조사를 실시하고, 모형 해석결과와 관측자료를 비교분석하였다.

3.1 모형수립 및 입력자료

3차원 수치모형의 적용을 위해서는 계산격자망의 구성, 격자점에서 수심, 발전소에서 방출되는 온배수의 유량과 수온, 온배수 방출이전 주변해수의 수온 및 염분 분포, 모형의 개경계 격자점에서 해수면 변화 또는 유속 분포, 수온 및 염분 분포, 수면에서 열교환량이 필요하며, 다음과 같이 입력되었다. 모형격자는 배수구와 취수구 부근에서 최소격자 50 m, 외해역에서 최대격자 1 km인 가변 격자망(수평방향 59×38, 연직방향으로 6개층, 계산 격자점수 13,452개, 모델영역은 정자향에서 감포항까지로 남북으로 24 km, 동서로 11 km)을 구성하였으며(Fig. 1), 모형의 수심자료(Fig. 2)는 수로국 해도 No. 140과 144로부터

독취하여 입력하였다. 배수구에서 온배수 방출량은 발전소 설계치인 유량 $42.8 \text{ m}^3/\text{sec}$, 수온 상승치 $9.56 \text{ }^\circ\text{C}$ 를 사용하였으며, 배수형태는 표층방류 방식을 채택하고 있다. 개경계 조건으로는 Fig. 1의 북측경계와 남측경계에서 조위계를 1개월간 수중계류하여 조사한 조위 관측자료를 조화분석하여 얻은 주요 4개분조 (M_2, S_2, K_1, O_1)의 합성조석을 개경계 조건으로 부여하여 각 계산 격자점에서 조류를 발생시켰다. 바다와 육지가 만나는 모델영역의 북서와 남서의 경계점에서는 관측된 조석 조화상수를 부여하였으며, 바다에 위치한 격자점에서는 모델영역의 북동과 남동 꼭지점에서 조화상수 값을 가정하고 육지경계에서 값을 이용하여 선형내삽하였으며, 유속 및 조위 계산결과가 관측치와 일치할 때 까지 가정된 격자점에서 조화상수를 수정하는 작업을 반복하였다. 개경계에서 수온 분포는 온배수 영향이 미치지 않는 지점에서 관측된 수온을, 염분 분포는 1990년 여름에 조사된 자료를 활용되었으며, 해수면에서 열교환계수 (K_T)는 발전소내 기상관측소에 관측한 기상자료에 근거하여 결정한 여름철 대표값인 $22 \text{ W/m}^2 - ^\circ\text{C}$ 를 사용하였다(한국전력공사[1990]). 모형의 적용기간은 준정상상태에서 계산결과를 얻기 위하여 120시간(약 10조석주기) 계산후 대조기인 최종 조석주기에서 계산결과를 분석하였다. 계산결과에 신뢰성 검증을 위하여

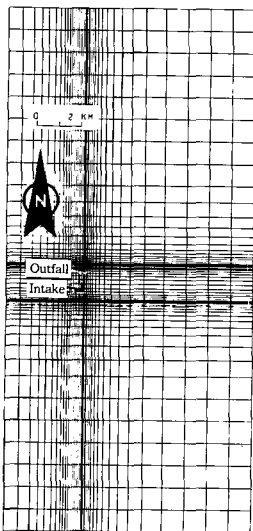


Fig. 1 Numerical modelling grid for Wolsung study

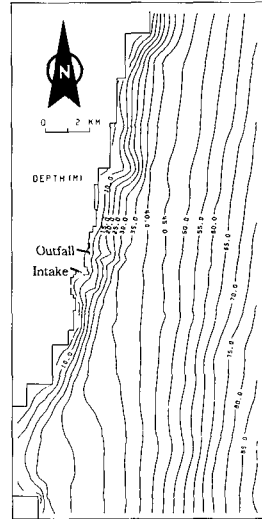


Fig. 2 Water depth profiles for numerical modelling

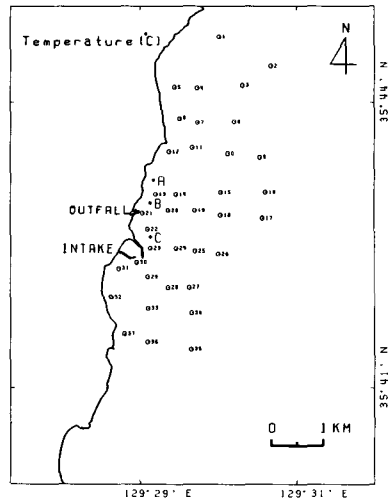


Fig. 3 Field measurement stations

Fig. 3의 정점에서 1993년 8월의 대조기에 실시된 정밀 현장관측자료가 사용되었다. A_H 와 B_H 는 $5 \text{ m}^2/\text{sec}$ 를 모형의 민감도 분석을 통하여 결정하여 사용하였다.

3.2 현장관측 자료와의 비교검증

Fig. 3에 표기된 정점에서 1993년 8월에 조사된 수심별 유속의 시간변화 관측자료, 수온 수평분포 모니터링 자료로부터 얻은 수온 상승치의 최대 확산범위와 비교검증을 수행하였다. Fig. 4 ~

Fig. 6은 Fig. 3의 정점 A, B, C에서 1993년 8월 22일 오전 8시 30분 ~ 오후 7시 30분에 30분간격으로 관측한 조석 1주기 동안의 수심별 유속 관측자료와 비교한 것이다. 유향은 관측치와 계산치 모두 해안선에 평행하여 유속크기의 시간변화를 비교하였다. 시간변화와 수심에 따라 유속이 감소하는 연직분포가 관측치와 계산치가 대체로 잘 일치하는 양호한 계산결과를 보였다. 수심 8 m인 정점 A(Fig. 4)에서는 관측기간동안 바람과 파도가 거의 없었고, 배가 흔들릴 때마다 사용한 전자유속계의 관측치가 심한 변동을 나타낸 점으로 보아 관측치에서 나타난 불규칙한 변동은 유속계의 흔들림에 의한 것으로 사료되며, 이를 감안하면 계산치와 관측치가 대체로 잘 일치하였다. 수심 9 m인 정점 B(Fig. 5)에서는 표층 계산 유속이 관측치와 차이를 보였는데, 이는 관측이 자동기록식 기기(RCM-7)를 수중에 층별로 계류하는 방법으로 수행된 것으로 중층과 저층에 계류된 기기는 정상이었으나 표층기기는 관측후 유속로타에 손상이 있는 것이 발견된 것으로 보아 계산상 오차보다는 관측기기의 손상에 의한 것으로 판단된다. 한편, 수심 10 m인 정점 C(Fig. 6)에서 관측치와 계산치가 수심에 따라 변화하는 양상은 대체로 일치하나 관측자료의 경우 큰 변동성을 보였다. 이는 유속분포 계산결과(Fig. 7과 8)에서 보이는 바와 같이 정점 C 부근은 지형적인 영향으로 흐름이 집중되어 유속이 크게 변화

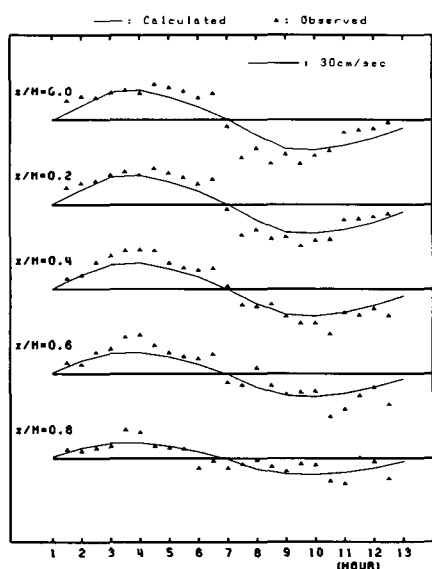


Fig. 4 Time variations of velocity at station-A

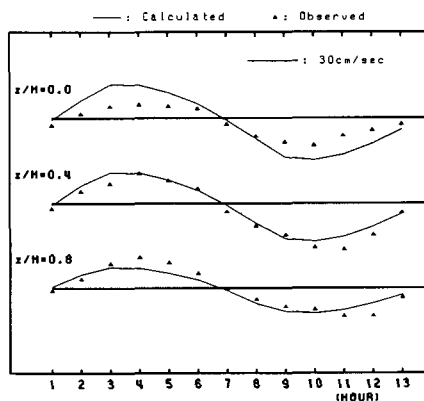


Fig. 5 Time variations of velocity at station-B

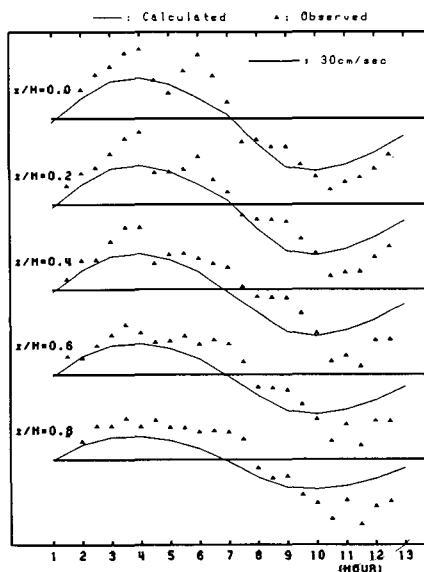


Fig. 6 Time variations of velocity at station-C

하는 지점으로 조류의 크기 및 유향변화에 의한 선박위치의 변동으로 인한 관측지점과 모형결과 비교지점의 위치오차에 기인할 가능성과 조사시 사용한 전자유속계가 해수면에서 조사선박의 요동에 따라 관측값이 민감하게 변하는 특성이 복합되어 나타난 것으로 보인다.

Fig. 7 ~ 10은 계산결과중 발전소 부근해역만을 확대도시한 각각 대조기 창조시와 대조기 낙조시의 유속분포도이다. 표층에서는 창조시(Fig. 7)는 남쪽으로 낙조시(Fig. 8)는 북쪽으로

연안을 따라 조류가 흐르고 있으며, 조류의 크기는 연안에서는 작고, 외해에서는 커져 최대 40 ~ 50 cm/sec에 달하였다. 한편, 발전소 배수구를 통해 북동방향으로 배출되는 온배수는 조류에 의해 창조시는 켈트의 영향이 비교적 강한 연안에서는 북동쪽으로 전진하다 켈트의 운동량이 약해지는 지점에서 강한 조류의 영향을 받아 남쪽으로 이동하였다. 낙조시는 방출된 온배수가 조류를 타고 북동쪽으로 이동하는 모습을 보였다. 온배수 켈트에 의하여 주변 해수유동이 영향을 받는 범위는 배수구 인근 약 200 ~ 300 m이다. 저층에서 유속분포(Fig. 9 ~ 10)는 표층류와 변화양상이 비슷하였으나, 유속크기가 작았다.

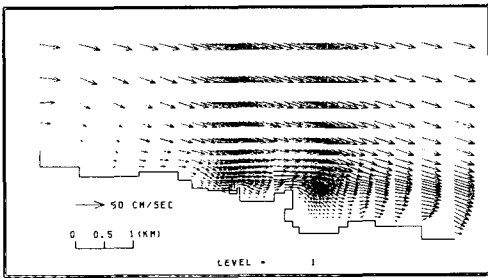


Fig. 7 Distribution of maximum flood currents at surface layer

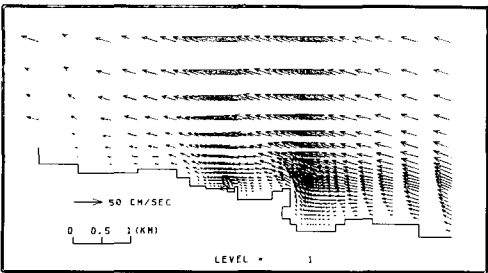


Fig. 8 Distribution of maximum ebb currents at surface layer

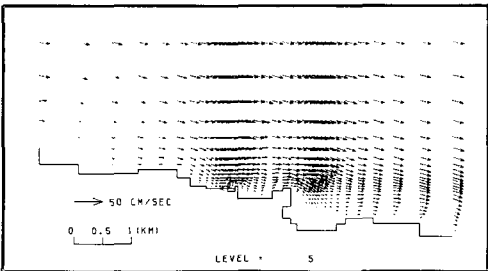


Fig. 9 Distribution of maximum flood currents at bottom layer

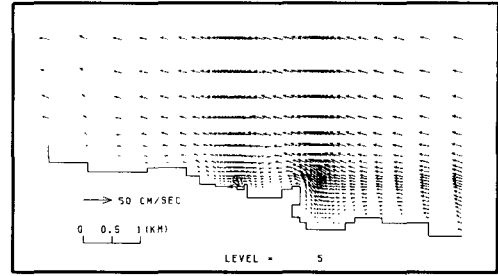


Fig. 10 Distribution of maximum ebb currents at bottom layer

Fig. 11은 1993년 8월 22일 ~ 23일에 Fig. 3의 37개 관측정점에서 정점별로 3회에서 7회 관측한 표층해수의 수온중 최고수온만을 취하여 도시한 수온 상승치의 분포도와 모형에서 계산된 표층 수온 상승치를 1시간 간격으로 저장한 결과에서 최고 수온 상승치를 구한 분포를 함께 비교 도시한 것이다. 온배수 방출로 인한 1 °C 수온상승선이 관측결과와 계산치가 거의 일치하는 양호한 계산결과를 보였다. 0.5 °C 수온상승의 등온선은 계산과 관측치 사이에 차이가 있으나, 연안해수의 수온이 온배수의 영향이 없더라도 해수의 조류 및 해류의 변화에 따라 시간적으로 차이가 있음을 감안하면, 대체로 만족할 만한 모형결과로 사료된다. 본 논문에는 제시되지 않았지만, 각 정점에서 층별로 관측된 수온의 시간변화를 보면 온배수 영향이 거의 나타나지 않는 일부 수심에서 수온이 시간에 따라 0.5 °C이상의 변화폭으로 변화하였으며, 온배수 영향이 나타나지 않는 주변해역에서 표층수온의 공간적인 변화폭은 0.5 °C이상이었다. 이유는 성층화된 주변해수가 조류 및 해류에 따라 이동하기 때문이며, 파랑이나 바람이 강할 경우에는 해빈류나 취송류도 영향을 미칠 것이다. 관측기간 중에는 바람과 파랑이 거의 없었다. 온배수의 분포양상은 주된 주변 해수 유동인 조류의 이동방향이 남북방향 축을 따라 움직임(Fig. 7과 8)에 따라 확산범위도 연안을 따라 남북으로 길게 분포하는 모습을 보였다.

Fig. 12는 정점 B(Fig. 3)에서 관측한 수온의 층별 시간변화와 계산결과를 비교한 것이다. 해수 수온이 표층에서 저층으로 가면서 낮아지는 변화양상과는 대체로 일치하였으나 시간대별로 변화하는 크기에는 계산치와 관측치 사이에 다소 차이가 있었다. 이는 계류된 관측장비의 시간에 따른 위치변화로 인한 오차, 주변해수의 수온이

조시에 따라 변화함에 따른 오차 등이 복합되어 나타난 것으로 이를 개선하기 위해서는 보다 정확한 관측 수행과 주변해수 특성의 시간변화를 모형에 보다 정확히 고려하기 위한 방법에 대한 연구가 필요하다. 정점 A와 C(Fig. 3)에서도 수온분포의 시간변화를 관측하였으나 온배수 방류로 인한 수온 상승폭이 조류 변화에 따른 주변해수의 수온 변화에 비하여 약하여 온배수 영향에 의한 수온 상승치를 정확히 구분하기가 어려웠다.

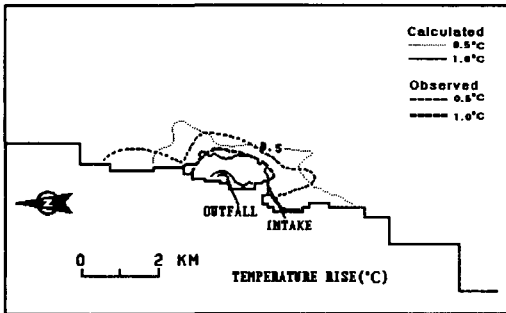


Fig. 11 Distribution of excess water temperature at water surface

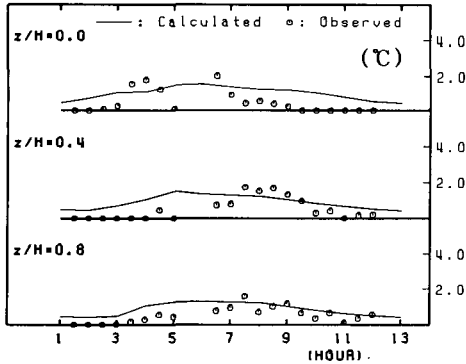


Fig. 12 Time variations of excess water temperature at station-B

5. 결론 및 토의

연안해역에서 해수순환과 물질 확산에 대한 3차원 수치모형의 개발과 활용에 대한 연구동향을 분석한 결과를 기초로 연안해역에서 흐름 및 확산의 해석에 광범위하게 활용할 수 있으며 계산상 효율적인 해수유동 모형을 수립하여, 월성원자력발전소 주변해역에서 연안 해수유동과 온배수 확산에 대해 모형의 현장 적용성을 검토하였다.

연안해역의 환경문제로 대두되고 있는 임해발전소의 온배수 방출에 따른 해수유동 변화와 온배수 확산문제를 수치모의하고 조사한 현장관측자료와 비교검증한 결과에 의하면, 계산결과가 대체로 관측결과와 일치하는 모습을 보여 모형이 발전소 주변해역의 연안 해수유동과 온배수 확산현상을 해석하는 데 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 그러나, 일부 결과에서 관측상의 오차, 모형 경계조건의 부정확한 입력 등으로 계산치와 관측치 사이에 오차를 나타내었다. 이는 보다 정밀하고 신뢰성있는 관측을 통해서 해결될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 연구 대상해역의 일부 정점에서 관측한 단기간의 유속 및 수온분포 시간변화 관측자료만을 이용하여 모형의 비정상 현상에 대한 현장적용 가능성을 검토하였다. 그러나, 연안해역의 해수유동은 수심변화와 연안의 지형적인 여건 등으로 인하여 장소에 따라 크게 변하고, 기상조건, 조석운동 등의 시간변화에 따라 변화한다. 따라서, 우수한 수치모형의 연구개발을 위해서는 연구해역의 시·공간적 분포를 정확히 파악할 수 있는 양질의 많은 관측자료 확보가 선결 과제이며, 이를 토대로 지속적인 모형 개선연구가 필요하다. 양질의 관측자료 확보는 많은 경비, 시간, 인력을 요구하는 어려운 일로 관련기관의 적극적인 관심과 지원이 요구되며, 현재 외국 모형의 수입, 적용에만 주로 의존하고 있는 국내 수치모형 연구분야에서도 국내 현장 관측결과를 토대로한 국내 실정에 적합한 수치모형의 개발 및 적용에 많은 관심을 가져야 할 것이다.

후기

본 연구에서 현장조사는 한국전력공사의 연구비 지원에 의해 실시된 것으로 연구비 지원에 감사하며, 현장조사에 함께 참여해 주신 모든 분들께 사의를 표합니다.

참고문헌

- [1] 정태성, 이길성, 1994, "연안 해수유동 및 배수 확산에 관한 3차원 수치모형", 한국해양안·해양공학회지, 제6권 제3호, 245-259.
- [2] 정태성, 김상익, 강시환, 1997, "연안 해수순환

과 확산에 관한 3차원 수치모형의 고찰과 적용”, 한국해양환경공학회 추계학술대회 논문집, 223- 231.

- [3] 한국전력공사, 1990, 월성원자력 2호기 건설 사업 환경영향평가서.
- [4] Alfrink, B. J., and van Rijn, L. C., 1983, "Two-equation turbulence model for flow in trenches", J. of Hyd. Eng., ASCE, Vol. 109, No. 3, 941- 958.
- [5] ASCE Task Committee on Turbulence Models in Hydraulic Computations, 1988, "Turbulence modelling of surface water flow and transport: Part I-IV", J. of Hyd. Eng., ASCE, Vol. 114, No. 9, 970-1073.
- [6] Eckart, C., 1958, "Properties of water, Part II. The equation of state of water and sea water at low temperatures and pressures", American J. of Science, Vol. 256, 225-240.
- [7] Freeman, N. G., Hale, A. M. and Donard, M. B., 1972, "A modified sigma equations' approach to the numerical modeling of Great Lake hydrodynamics", J. of Geophys. Res., Vol. 77, No. 6, 1050-1060.
- [8] Haney, R. L., 1990, "On the pressure gradient force over steep topography in sigma coordinate ocean models", J. of Phys. Oceano., Vol. 12, 610-619.
- [9] Rodi, W., 1984, *Turbulence models and their application in hydraulics - a state of the art review*, Institut fur Hydromechanik, Univ. of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany.