

연안역의 냉배수 확산모델링

김종규 · 김종화

(부경대학교)

1. 서 론

연안해역의 대규모 산업시설인 발전소, 정유공장, 제철공장 등에서의 냉각수 사용에 따른 온배수(thermal discharge)에 의한 생태계의 영향과 마찬가지로 최근 액화천연가스(LNG, liquefied natural gas) 터미널에서 배출되는 냉배수(cold discharge)에 따른 생태계의 영향이 대두되고 있다.

LNG 저장기지에서부터 천연가스를 공급하기 위한 재기화과정에는 열매체로서 다량의 해수가 이용되며, 이 과정에서 실제 해수의 수온보다 낮은 온도의 냉배수를 배출하게 된다. 한편, 냉배수의 해양생태계의 영향은 온배수와 유사하므로 열오염(thermal pollution)으로 분류할 수 있다.

열오염이 해양생태계에 미치는 영향은 수온의 변화에 따른 해수유동의 변화로 수질과 저질의 변화가 발생하여 연안역의 수산생물상의 변화 및 수산자원량의 변화를 야기시킨다. 이러한 변화는 냉·온배수의 연안해역 방류에 따라 수온이 변화하면서 해양생물의 대사율이 변하고 동시에 산소소모량도 변하기 때문이다(정용·옥치상, 1996).

한편, 냉배수 문제에 대한 연구로서는 Adorjan(1991)은 냉배수에 의한 해양생태계의 피해를 최소화하기 위해서는 유입해수와 유출해수의 온도차의 한계치(2.8℃)에 관한 연구를 수행한 바 있으며, 국내의 연구로서는 해양생태계에 대한 냉배수의 영향을 검토한 김성재(2000)의 연구 외에 아직 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 진해만 내해역에서의 LNG Terminal 가동시에 방류되는 냉배수로 인한 해양생태계에의 영향을 파악하기 위한 기초적 연구로서 해수유동 및 물질확산에 관한 수치모형실험을 통하여 냉배수의 확산특성을 파악하고자 한다.

II. 해수유동 및 냉배수 확산모델링

조석에 의한 조위와 조류를 실제상황과 같이 예측하는 실시간 해수유동의 수치모형실험으로써 조석조화상수의 주요 4대분조인 M_2 , S_2 , K_1 및 O_1 분조의 실측자료를 이용하여 대조기와 소조기를 연속적으로 모의하여 45일이상 조석에 의한 해수유동의 수치계산을 수행한다. 수치계산결과의 정확도를 판단하기 위하여 인근의 조위실측자료와 계산결과를 비교·검토하고, 해수유동의 실측자료와 계산결과를 비교·검토하여 모형의 검증을 수행한다.

한편, 모형의 검증이 입증된 후 냉배수의 방류조건 하에서 조석에 의한 해수유동의 수치계산을 수행하여 냉배수의 방류로 인한 확산영향범위를 파악한다.

1. 해수유동모형의 개요

1) 기본방정식

본 연구에서 사용된 해수유동모형은 2차원 수심적분 모형으로서 수심이 비교적 얇은 연안해역의 유동장을 계산하는 데 주로 사용된다. 모형에서 사용하고 있는 기본방정식은 2차원 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 연직면 ($-h \leq z \leq \zeta$)에 대해 평균하고, 외력으로 지구자전에 의한 영향, 바닥의 마찰력 및 중력을 포함시켰다. 뿐만 아니라 만내에서의 표층의 흐름은 바람에 의한 영향이 크므로 바람에 의한 응력을 포함하도록 다음과 같은 방정식을 수립하였다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(\zeta + h)U] + \frac{\partial}{\partial y} [(\zeta + h)V] = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + U \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2(\zeta + h)} \\ - \rho_a \chi_s^2 \frac{W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho(h + \zeta)} - A_h \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + V \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2(\zeta + h)} \\ - \rho_a \chi_s^2 \frac{W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho(h + \zeta)} - A_h \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

U , V 는 수심평균한 x , y 방향의 유속,

f 는 Coriolis 계수 ($= 2\omega \sin \phi$, ϕ 는 위도),

- g 는 중력가속도,
- ζ 는 수면변위,
- h 는 평균수면하의 수심,
- C 는 Chezy 의 조도계수,
- W_x, W_y 는 각각 x, y 방향에서의 풍속,
- ρ 는 해수 밀도(=1.025 g/cm³),
- ρ_a 는 대기밀도(=0.00123 g/cm³),
- χ_s^2 는 해면에서 바람에 의한 마찰계수(=1.2×10⁻³),
- A_h 는 수평와동점성계수이다.

2) 기초방정식의 이산화 수법

본 모형에서는 수치계산을 위해서 Leendertse (1971)에 의해 조류·확산 계산에 응용되어 현재 널리 사용되고 있는 ADI법(Alternating Direction Implicit method)을 사용하였다. ADI법은 양해법(explicit method)과 음해법(implicit method)을 동시에 사용하여 계산하는 방식으로, 해의 수렴성과 계산시간의 경제성 면에서의 효율성으로 인하여 널리 사용되고 있는 방법이다.

3) 계산격자망 및 수심도

본 연구를 위한 계산격자망은 Fig. 1과 같이 냉배수 방류대상지구를 포함하는 진해만 전역을 대상영역으로 구성하였다. 격자간격은 계산영역의 크기 및 계산시간 효율에 적합한 $\Delta x, \Delta y$ 를 300 m로 x 방향으로 160개의 격자와 y 방향으로 130개의 상세격자로 구성하였다.

대상해역의 수심도는 국립해양조사원에서 발행하는 해도를 이용하여 작성하였다. 실제 계산 수행시의 수심은 이 자료에 평균해면(M.S.L.) 값을 더하여 수심을 보정하였다.

4) 수치모형의 입력조건

기존 진해만 주변에서 관측된 조위자료로부터 주요조화상수인 4대분조(M_2, S_2, K_1, O_1)의 값을 구하고 모형에서의 조위경계조건으로 사용하였다. 관측치가

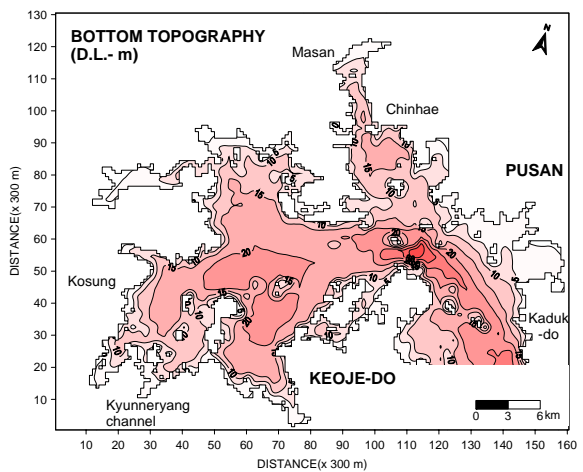


Fig. 1. Model domain and bottom topography of Chinhae Bay.

존재하지 않는 경계부분에서는 주위에서 기관측된 자료를 시행착오(trial and error)적으로 보정을 거듭하여 수치모형실험을 수행하였다. 한편, 수치모형실험을 위한 주요입력자료들의 계산조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Computation conditions

| 항 목 | 계 산 조 건 |
|----------------------|---|
| 격자간격 (ΔS) | 300 m ($\Delta x = \Delta y$) |
| 수심 (h) | 국립해양조사원 발행 해도에서 취득 (단위 : m) |
| 계산시간간격(Δt) | 10 sec |
| Coriolis 계수 (f) | $f = 2\omega \sin \phi$, $\omega = \frac{2\pi}{24 \times 60 \times 60}$, $\phi = 35.30^\circ$. |
| 조도계수 (C) | $C = 19.4 \ln(0.9h)$ |
| 강제수위 (조석) | 진폭(H)과 지각(κ)을 각 개방경계에 대입 |
| 초기수위 및 유속 | 공통으로 전해역에서 0 |

2. 냉배수 확산모형의 개요

물질확산의 예측에 있어서 확산물질은 염분과 같이 보존성 물질이 있는가 하면, 대부분의 유기물·무기물에서 볼 수 있듯이 이류·확산의 과정 중에 물질 자체가 분해 또는 합성되어 증감하는 비보존성인 것들이 있다. 물질확산을 보존성 물질로 가정해서 계산한다는 것은 대부분의 해수 중 환경인자가 비보존성 물질의 성질을 가지고 있는 점을 고려하면 실제 현상을 정확히 재현할 수 있다고 보기는 어렵다. 그러나, 분해·합성, 열교환 등의 복잡한 기구를 제외하고는 보존성 물질로서의 이류·확산은 물질확산의 기본량이라 말할 수 있다. 이러한 이유로 해역의 수질예측에는 보존성 물질의 확산이 빈번하게 이용되고 있다.

냉배수의 확산형태는 주로 조류의 유속과 유향에 의하여 결정되며, 수온강하영역은 배수구를 중심으로 긴 타원형태를 나타낸다. 또한, 수온강하영역은 여름철에 좁고 겨울철에 넓은데 이러한 계절별 차이는 대기와의 열교환 차이와 관련된다.

한편, 본 연구에서는 냉배수의 확산거동을 예측하는데 있어서 대기, 해저질과의 열교환은 무시하였으며, 일사량 등에 의한 영향 또한 무시하여 냉배수의 열량 손실이 없다고 가정하여 방류로 인한 최악의 환경영향을 파악하였다.

보존성 물질의 단위체적당 질량을 c 라 하면, 평균유속장 (u, v, w)에서의 확산은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(uc)}{\partial x} + \frac{\partial(v c)}{\partial y} + \frac{\partial(w c)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(D_x \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(D_y \frac{\partial c}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(D_z \frac{\partial c}{\partial z}) \quad (4)$$

여기서, D_x, D_y, D_z 는 x, y, z 방향의 난류확산계수이다.

식(4)에 대해 해면과 해저를 통해 물질이 이류·확산하지 않는다는 조건식을 사용하여

$-h \leq z \leq \zeta$ 의 영역에서 z 에 관해 적분하면 다음과 같은 2차원화된 확산방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial[(\zeta+h)c]}{\partial t} + \frac{\partial[(\zeta+h)uc]}{\partial x} + \frac{\partial[(\zeta+h)vc]}{\partial y} = \frac{\partial[(\zeta+h)K_x \frac{\partial p}{\partial x}]}{\partial x} + \frac{\partial[(\zeta+h)K_y \frac{\partial p}{\partial y}]}{\partial y} \quad (5)$$

여기서, u, v, c 는 $-h \leq z \leq \zeta$ 의 구간에서 수심방향으로 평균화된 수평유속성분과 물질농도를 나타내고, K_x 와 K_y 는 수평류의 연직분포에 의한 이류성분을 포함한 가시열확산계수를 의미한다. 이식에서 대기와 해양간의 열수지항은 생략되었다.

농도 c 를 수위점과 동일위치에서 계산하고, 확산계수 K_x, K_y 를 유속 u, v 의 위치에서 정의해 주면 유동에 대한 계산식에서와 같은 방법으로 식(5)에 대해서는 ADI 법으로 다음과 같은 순환식이 전반의 시간 step $(n+1/2)\Delta t$ 에 대해 얻어진다.

$$c_{i,j}^{n+1/2} = -E_{i+1,j} c_{i+1}^{n+1/2} + F_{i+1,j}$$

(6)

여기서, $-E_{i+1,j}, F_{i+1,j}$ 는 시간레벨 $n\Delta t$ 이하에서 결정되는 기지량이다.

후반의 시간 step $(n+1)\Delta t$ 에 대해서도 같은 일반식을 얻을 수 있다. 이러한 확산식을 이용한 냉배수 확산모형을 구성하였다. 계산의 격자망 등 기초 입력자료는 해수유동 계산의 경우와 같다. 수치모형의 계산시간간격은 유동계산 모형에 의하여 $\Delta t=10$ 초로 냉배수 방류 조건에 대하여 보존성 물질로 취급하여 확산계산을 실시하였다.

3. 해수유동 및 냉배수 확산모델링의 검증

1) 조위

본 냉배수 방류대상해역을 포함한 진해만 일대의 해수유동 모형실험의 결과를 검증하기 위하여 Fig. 2와 같이 성포(T-1), 운풍포(T-2), 진해(T-3) 및 가덕도(T-4)에서의 조위관측결과와 수치모형실험의 조위계산결과를 비교하였다.

Fig. 3은 성포(T-1), 운풍포(T-2), 진해(T-3), 가덕도(T-4)에서의 조위예측결과와 계산결과를 비교한 것이다. 여기서,

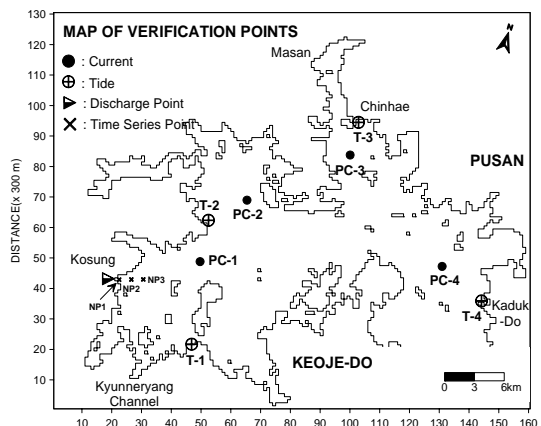


Fig. 2. Station map of model verification.

조위관측결과는 조석조화분해된 조화상수를 이용하여 예측한 조위이며, 조위계산결과는 수치 모형실험에 의한 대조기 25시간 동안의 결과를 나타낸다. 각각의 조위 검증점(T-1, T-2, T-3 및 T-4)에서 조위예측결과와 계산결과가 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있으며, 따라서 본 수치모형이 진해만 일대의 대상해역의 조위를 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

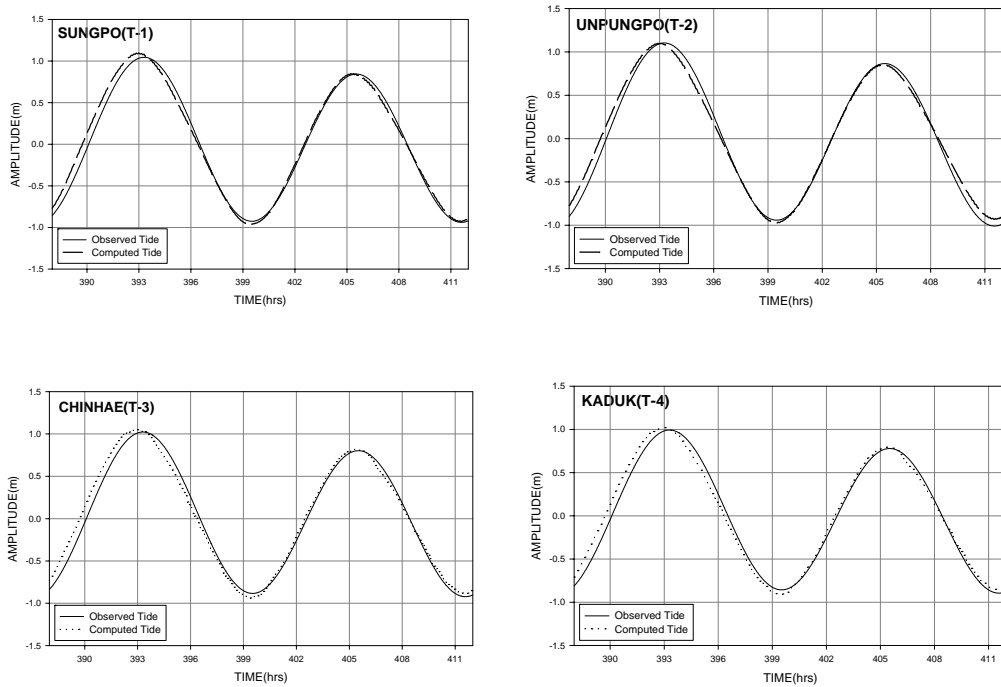


Fig. 3. Verification result of tide at each point.

2) 조류

본 냉배수 방류대상해역을 포함한 진해만 일대의 해수유동 모형실험의 결과를 검증하기 위하여 Fig. 4와 같이 정점 PC-1, PC-2, PC-3 및 PC-4에서 조류관측결과와 수치모형 실험의 조류계산결과를 비교하였다.

연안역의 냉배수 확산모델링

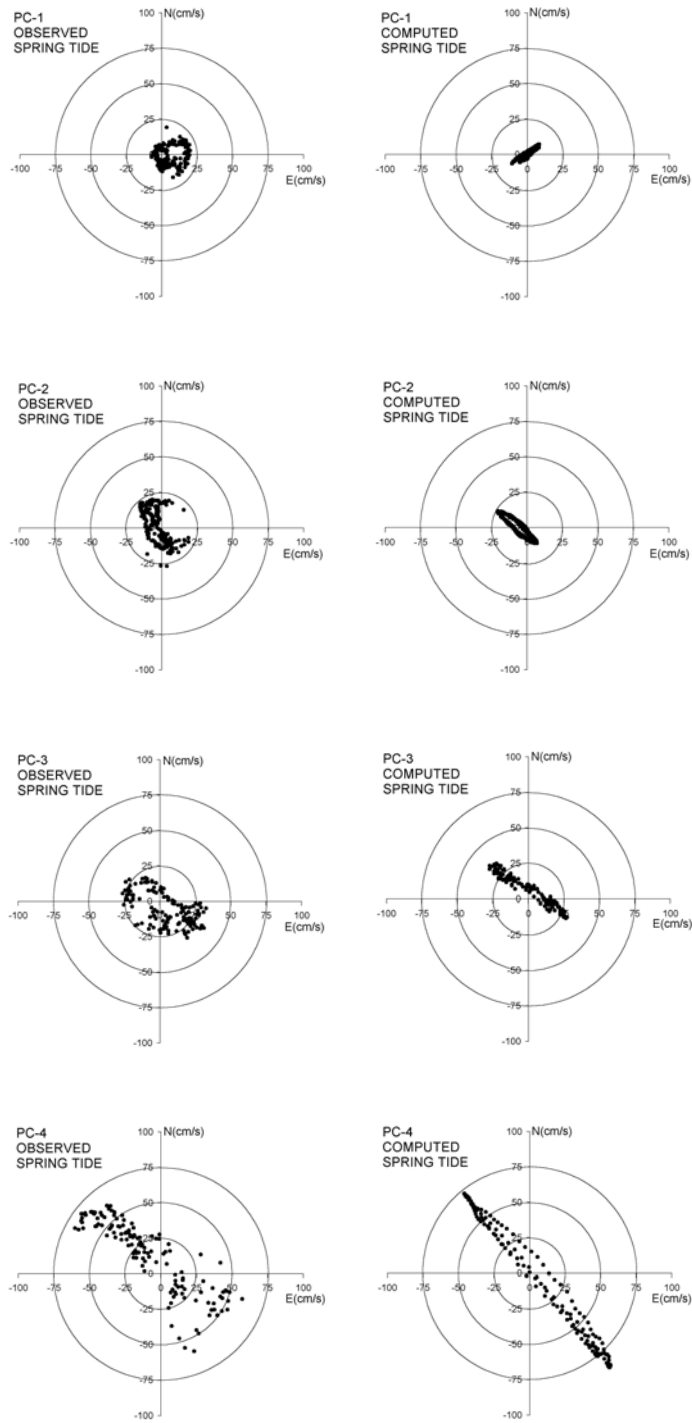


Fig. 4. Verification result of tidal currents at each point.

각각의 조류 검증점(PC-1, PC-2, PC-3 및 PC-4)에서 조류관측결과와 계산결과가 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있으며, 따라서 본 수치모형이 진해만 일대의 대상해역의 조류를 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

3) 수온

냉배수의 방류조건은 기존 운영(인천 LNG Terminal)되고 있는 냉배수 방류시설에서 관측된 방류량과 방류온도 및 생물치사 한계치에 관한 자료(김성재, 2000)로부터 냉배수 방류에 관한 계산조건을 추출하여 이용하였다(Table 2).

Table 2. Computational condition of cooling water discharge(Refer. Incheon LNG Terminal)

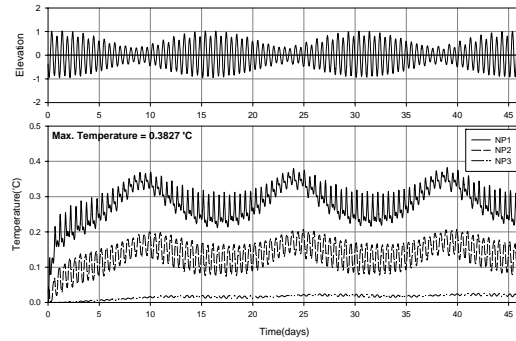
| 구 분 | 계 산 조 건 | 비 고 |
|----------|------------|--|
| 계획방류량 | 58,100 T/H | Sea Water Aporizaer 7 EA 총부하 운전의 해수유량 |
| 방류수 온도편차 | 3℃ | 해수온도변화 관측치 1999. 12. ~ 2000. 11. |
| | 5℃ | 생물치사 한계치 |

본 연구에서는 냉배수 방류에 의한 확산영향을 파악하기 위하여 Fig. 2에 나타난 NP1, NP2 및 NP3 에서의 해수온도를 약 45일 동안의 조위와 함께 그 변화를 Fig. 5((a), (b))와 같이 수온 시계열로 나타내었다.

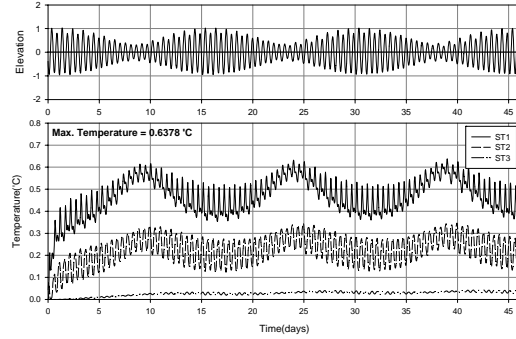
수온의 시계열을 살펴보면, 냉배수 방류의 영향은 방류후 한조석주기(약 15일)가 지나면 거의 정상상태에 달하는 것으로 나타났다. 이 때의 냉배수 방류로 인한 최대 영향수온은 0.3827℃(Fig. 5(a)) 및 0.6378℃(Fig. 5(b))로 나타났다. 여기서 최대영향수온의 의미 하는 바는 모델의 단위격자가 가지는 체적(300m×300m×수심)에서의 평균온도를 나타낸다. 그림에서 최상단의 그래프는 조위를 나타낸 것으로 소조기에 해수 체적이 줄어들어 냉배수의 영향이 크게 나타나며 대조기에는 해수체적이 증가되어 희석이 양호해져 영향이 상대적으로 작게 나타난다. 특히, 고조시보다는 저조시에 냉배수의 영향이 높게 나타나는데 이것은 앞에서 설명한 바와 같이 해수체적이 줄어드는 것에 의한 결과이다.

상기의 냉배수 확산 수온 시계열을 살펴본 결과, 본 연구의 냉배수 확산예측 수치모형은 조석주기별, 조시별로 확산영향을 잘 재현하고 있는 것으로 나타났다.

연안역의 냉배수 확산모델링



(a) Discharge Temp. = 3°C



(b) Discharge Temp. = 5°C

Fig. 5. Time series of cooling water with respect to discharge condition.

III. 결과 및 고찰

1. 해수유동 모델링의 결과

연구대상해역인 진해만 전해역에 대한 해수유동 수치모형실험의 결과인 조석잔차류의 특성은 Fig. 6과 같이 나타났다. 가덕수로와 진해만의 중앙수로 부근에서는 복잡한 해저지형 및 크고 작은 도서들에 의하여 지형적인 여러 개의 강한 와류가 형성되고 있음을 알 수 있으며, 진해만 내측이나 마산만내에 있어서의 조석잔차류의 크기는 작게 나타났다. 전술한 조류 및 조석잔차류의 계산결과로부터 연구대상해역인 진해만내의 전반적인 유동특성을 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

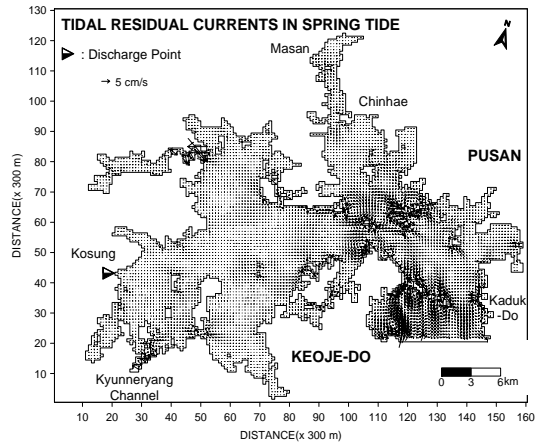


Fig. 6. Tidal residual currents in spring tide.

2. 냉배수 확산모델링의 결과

Fig. 7은 방류수 온도편차가 5℃인 경우의 냉배수 방류로 인한 수온분포가 정상상태에 달한 후의 공간분포장을 나타낸 것으로 최강창조시의 냉배수 확산범위를 나타낸다. 고조시 냉배수 확산범위는 해수체적이 증가 되어 다소 방류로 인한 영향이 작게 나타남을 알 수 있다. 최강낙조시의 냉배수 확산 범위는 흐름에 의한 이유현상이 잘 나타나고 있으며, 저조시의 냉배수 확산범위는 해수체적이 줄어들어 다른 조시에 비하여 냉배수 영향범위가 다소 크게 나타난다.

Fig. 8은 냉배수 방류로 인한 최대영향범위를 나타낸 것으로서 약 45일동안 방류되어 정상상태에 달하는 동안 흐름에 의한 냉배수의 확산거동을 평가한 것이다.

이상의 냉배수 확산의 분포특성으로부터 해역에 미치는 냉배수의 영향은 방류구 주변에서 약 0.3~0.7℃ 정도의 수온하강을 나타내었을 뿐 방류구 인근해역에는 적게 미치고 있음을 파악할 수 있었다. 이러한 이유는 냉배수 방류량의 규모 및 2차원 수치모형실험의 제약조건에 기인한 것으로 사료되므로 이를 고려한 연구가 요구되어진다.

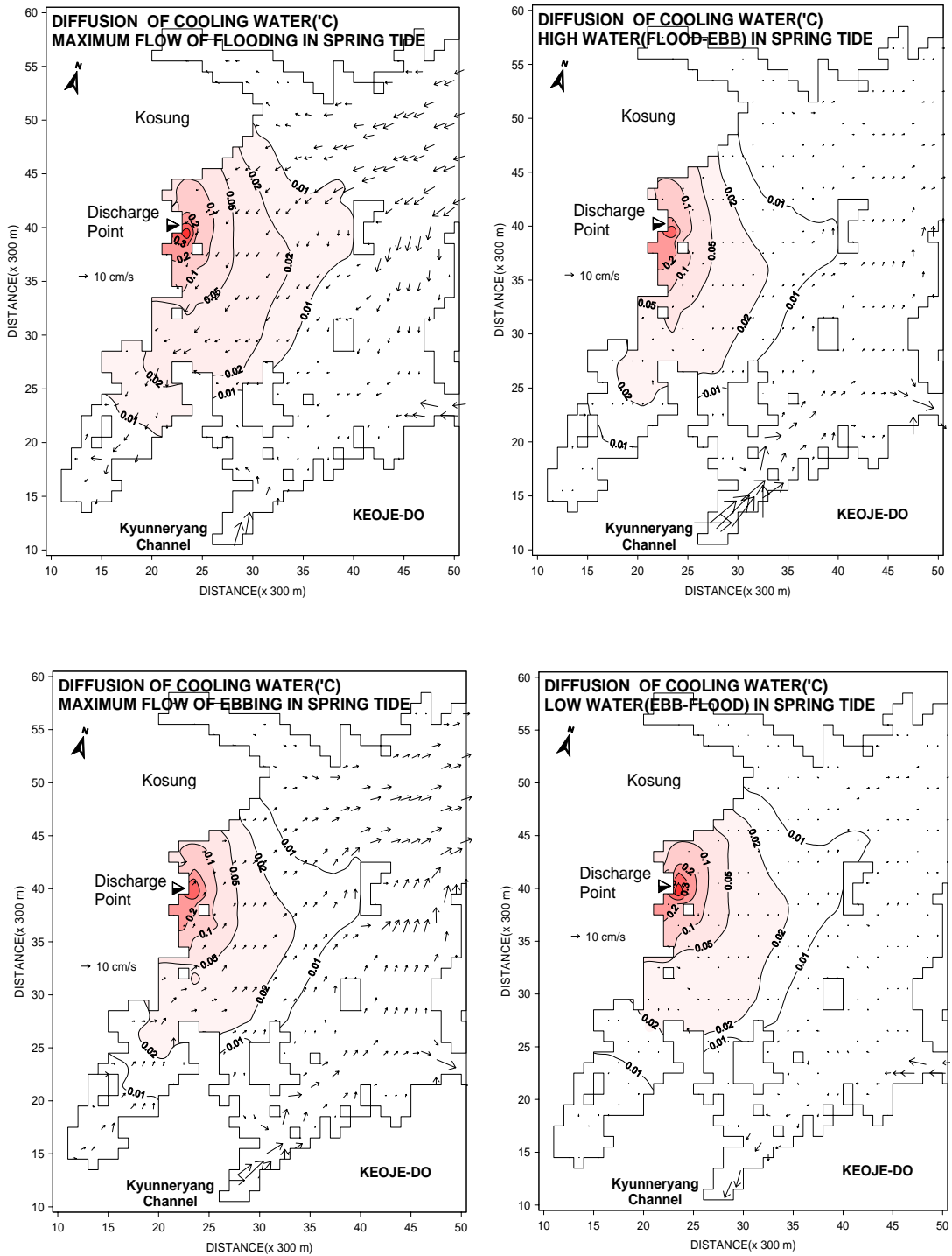
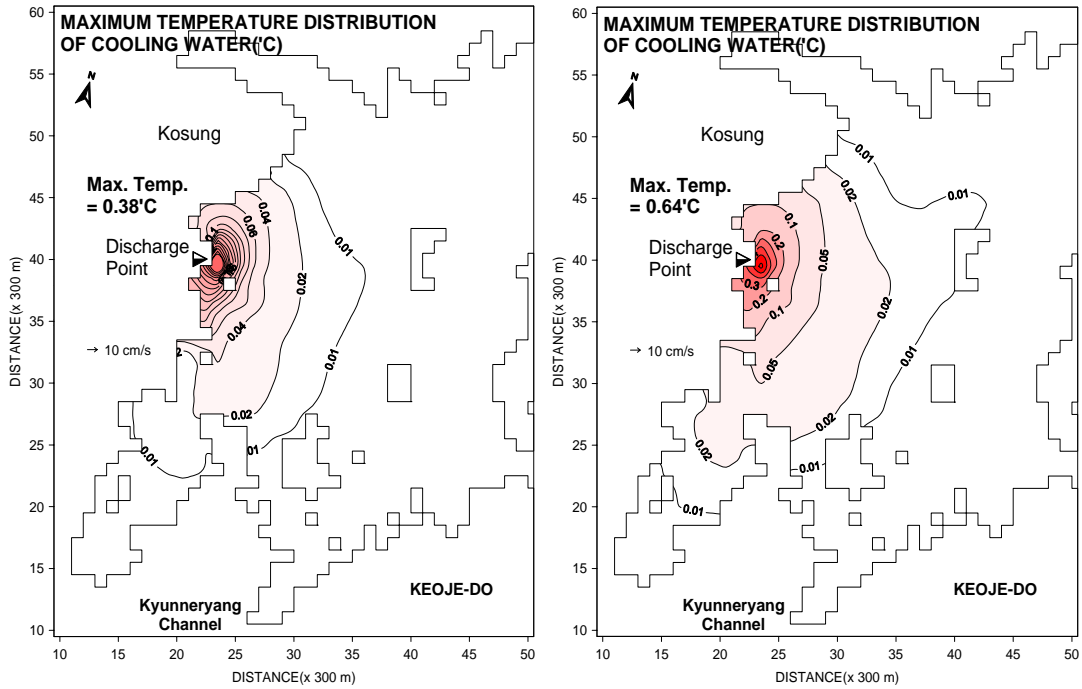


Fig. 7. Diffusion result of cooling water discharge(case of 5°C).



(a) Discharge Temp. = 3°C

(b) Discharge Temp. = 5°C

Fig. 8. Maximum distribution of cooling water discharge for 45 days.

IV. 요약 및 결론

LNG Terminal 가동시에 방류되는 냉배수의 확산특성을 2차원 물질확산 수치모형실험을 통하여 파악하였다. 실측된 조위자료로부터 조화분해된 주요 4대분조(M_2 , S_2 , K_1 및 O_1)를 이용하여 재현된 해수유동 결과는 모델영역에서 관측된 조위 및 조류결과와 비교하여 그 재현성을 확인한 후 냉배수 확산모델링을 수행하였다. 그 결과, 해역에 미치는 냉배수의 영향은 방류구 주변에서 약 0.3~0.7°C 정도의 수온하강을 나타내었을 뿐 방류구 인근해역에는 큰 영향을 미치지 못하였다.

본 수치모델링은 계절평균적이고 최악의 환경시나리오를 가상하기 위하여 2차원으로 수행되었으나 보다 엄밀한 영향 검토를 위해서는 3차원 냉배수 확산모델링이 요구된다. 냉배수

확산경향은 실제로 계절적인 기온 및 수온변화에 민감하게 반응하므로 연중 해역환경의 상시모니터링을 통하여 해역의 환경변화를 감시하고 예측할 필요가 있다.

열오염(냉·온배수)에 의한 해역환경피해를 최소화하기 위해서는 발전소 건설 이전의 충분한 환경영향평가와 오염확산예측을 위한 수치모형의 개발을 비롯하여, 발전소 가동과 함께 주변해양에 유출되는 열오염의 확산구조를 지속적으로 모니터링하여 해역환경의 피해를 최소화하여야 한다.

V. 참고 문헌

- 경상대학교 해양산업연구소, 안정 국가산업단지 개발사업 피해영향조사보고서. 한국가스공사·(주)대우, pp.403, 1998.
- 김영환, 발전소 온배수와 해양생태계. 전파과학사, pp.259, 2000.
- 김성재, 해양생태계에 대한 냉배수의 영향. 경상대학교 해양산업연구소보, 13, pp.20~31, 2000.
- 김종규, 강태순, 김헌태, 유동제어구조물에 의한 내만의 해수순환모델링. 한국해양공학회지, 14(3), pp.20~28, 2000.
- 이종화, 해양오염. 신광문화사, pp.440, 2000.
- 정용, 옥치상, 인간과 환경, 지구문화사, 서울, 1996.
- Adorjan, A.S., Heat Transfer in LNG Engineering. Hemisphere Publishing Co., New York, 1991.

Diffusion Modelling of Cold Discharge on Coastal waters

Jong-Kyu KIM · Jong-Hwa KIM

(Pukyong National University)

Abstract

The cold discharge from LNG(liquefied natural gas) terminal makes the water temperature around the terminal fall down. This temperature reduction may result in serious changes on marine ecosystem of the coastal area.

The numerical model experiments of material transport and tidal circulation in the inner bay, Chinhae Bay are investigated in the dispersion of cold discharge from LNG terminal. The condition of ambient water is exposed to tide, tidal current and cold discharge temperature. Simple numerical model experiments highlight the importance of tidal circulation and cold discharge at each case and some results are discussed.

The results of this study can be used as the guideline for the site selection of LNG terminals and long-term marine environmental impact assessment.