

OD1) 3차원 연안 해수유동 및 부영양화 모델

최양호*, 노영재¹, 정창수, 김숙양

국립수산과학원 남해수산연구소, ¹충남대학교 해양학과

1. 서 론

연안 해역은 육지와 경계에 위치하고 있기 때문에 해양자체의 변동뿐 만 아니라 육지를 포함한 주변 환경 변화에 지배적인 영향을 받게 되며, 특히 연안개발과 인구 증가에 따른 환경 변화가 완충작용 없이 직접 전달되면서 환경적인 충격을 많이 받는다.

한반도 서해 연안은 해안선의 굴곡이 심하고 넓은 조간대를 보유하고 있어 방조제와 대단위 간척 사업 등의 연안 개발 사업이 지속적으로 진행되고 있으며, 그에 따른 연안 환경 파괴와 해양 생태계 변화가 심각하다. 서해 중부연안에 위치한 천수만도 방조제 건설과 연안 개발에 따른 극심한 환경 변화를 겪고 있다. 충청남도(1998)의 보고에 의하면 유속 변화에 따라 수질과 퇴적물 조성이 변하고 있으며 그에 따른 해양 생태계가 변하고 있는 것으로 나타났다. 그럼에도 불구하고 천수만 해역의 수질 관리를 위한 연구는 아직 미진한 상태이다.

본 연구에서는 천수만 해역의 수질 변수에 대한 공간 및 시계열 분석을 통하여 해수유동과의 관계를 알아보고, 3차원 수질 예측 모델을 적용하여 수질 변수의 시·공간적인 변동 특성을 상세하게 파악하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구해역

천수만은 한반도 서해 중부연안에 위치한 반 폐쇄성 내만으로서 오염물질의 유입이 거의 없는 청정수질로 양식 및 어업활동이 활발한 천혜의 해역이었다. 그러나 1983년에 방조제가 건설되고 연안 개발로 인한 급격한 해양 환경 변화를 겪으면서 수질 악화 및 수산업 피해가 늘고 있다(충남대학교 해양연구소, 1996).

천수만은 길이 약 30 km, 폭 약 10 km로 남-북 방향으로 길게 놓여 있으며, 만 내의 평균 수심은 약 10 m이고 입구에서 약 30 m의 최대수심을 보인다(Fig. 1). 조석은 형태수(Tidal Factor) 0.22로 일조부등이 작은 반일주조가 특징적이며, 만 입구에서 대조 및 소조 시 평균조차는 각각 7.0 m, 5.2 m이고, 평균 고조간격은 3시간이다. 유속은 입구에서 창·낙조류 각각 1.8 m/sec, 1.6 m/sec이며, 만 내에서는 각각 0.6 m/sec, 0.9 m/sec로 약화되고 방조제 인근에서는 0.2 m/sec 내외이다(수로국, 1992).

2.2. 관측 자료 및 분석

본 연구를 위해 만 입구에 위치한 월도 인근 양식장 1개 정점을 포함한 총 11개 정점에서 수온, 염분, pH 및 용존산소 등을 관측하였다(Fig. 1). 양식장 인근에 위치한 정점은 저층(해저 2 m 수심)에서 2001년 6월 ~ 2002년 6월까지 1년 동안 10분 간격으로 연속 관측하였으

며, 같은 지점에서 조류 관측도 실시하였다. 조석 자료는 고정항 검조소의 자료를 활용하였다. 만 입구에서부터 약 3 km 간격의 10개 정점에서는 1개월 간격으로 만조 기준 약 3시간 동안 수심별로 관측하였다. 모델의 개방 경계 및 담수호에 의한 오염 부하를 위하여 최근 5년 동안 천수만에서 실시된 수질 관측 자료들을 근간으로 한 겨울철(2월)과 여름철(7, 8월)의 평균값을 이용하였다.

2.3. 사용 모델

3차원 해수유동 및 부영양화 모델 수행을 위하여 EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code)를 바탕으로 하는 HEM-3D (3-Dimensional Hydrodynamic-Eutrophication Model)를 사용하였다.

HEM-3D 모델은 버어지니아 해양연구소(VIMS)에 의해 개발된 3차원 수리역학-부영양화 모델로, 퇴적물 농도, 수온 및 염분의 시·공간적인 분포, 조석 및 취송류 뿐만 아니라 밀도 및 해저지형 변화에 의한 순환을 실시간으로 재현하는 EFDC 모델과 21개 수질 변수를 포함한 수질 모델이 접합되어 있다(Park *et al.*, 1995).

수질 모델을 위해서는 물질의 이동과 확산 과정을 나타내는 물리적인 현상 모델과 물질의 유입, 분해 및 재순환 과정을 나타내는 모델의 연계 운영이 필요하다. 기존의 수질 모델에서는 유속 계산으로부터 잔차류 또는 평균류를 계산한 후에 이를 수질 모델에 연계시키는 간접적인 방법을 통상적으로 사용하여 왔다. 그러나 HEM-3D 모델은 수리역학 방정식과 수질관련 방정식을 직접 연결하여 해를 구하는 방법을 채택하고 있다.

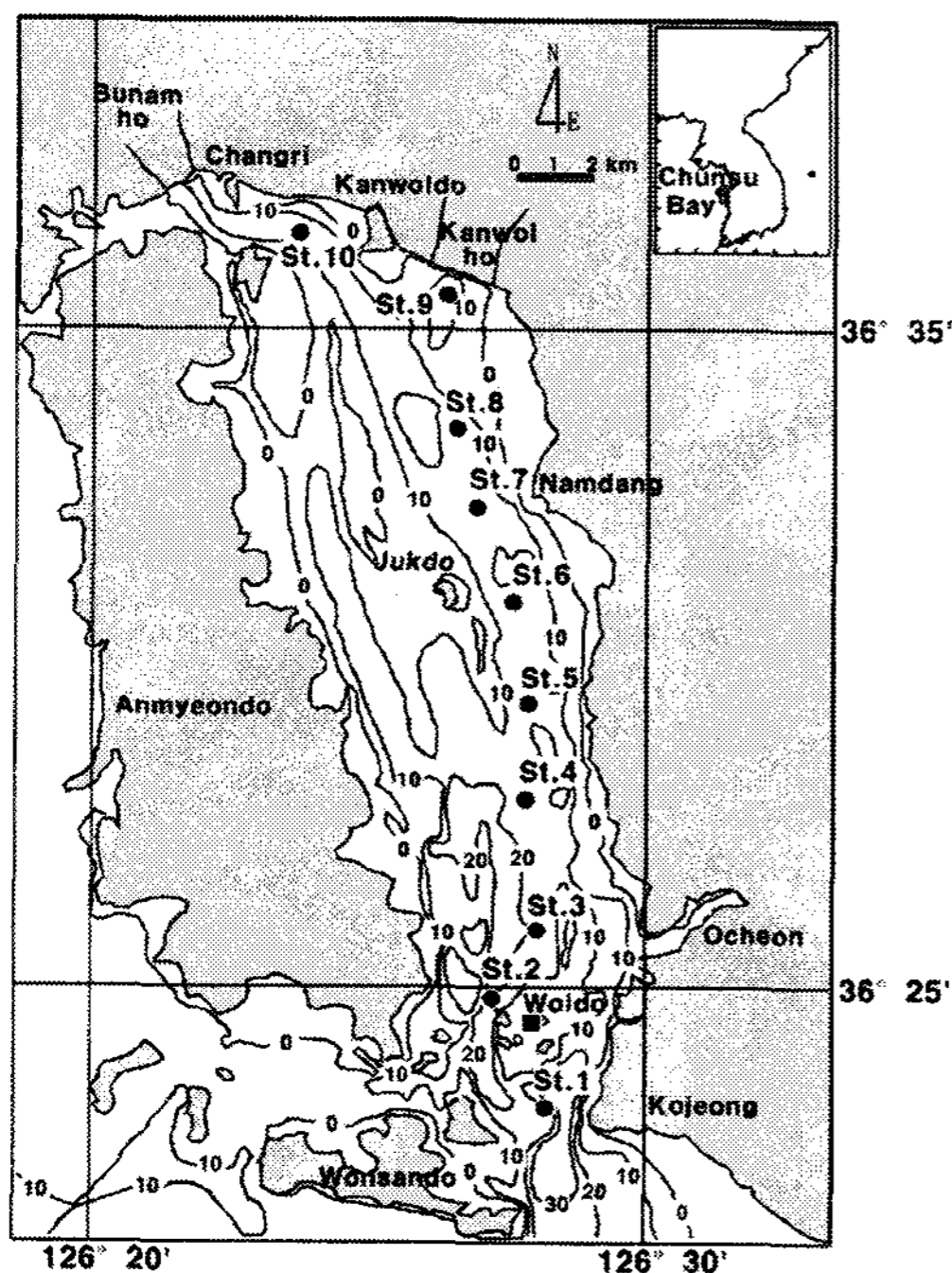


Fig. 1. Bathymetry and Station map of the Chunsu Bay.

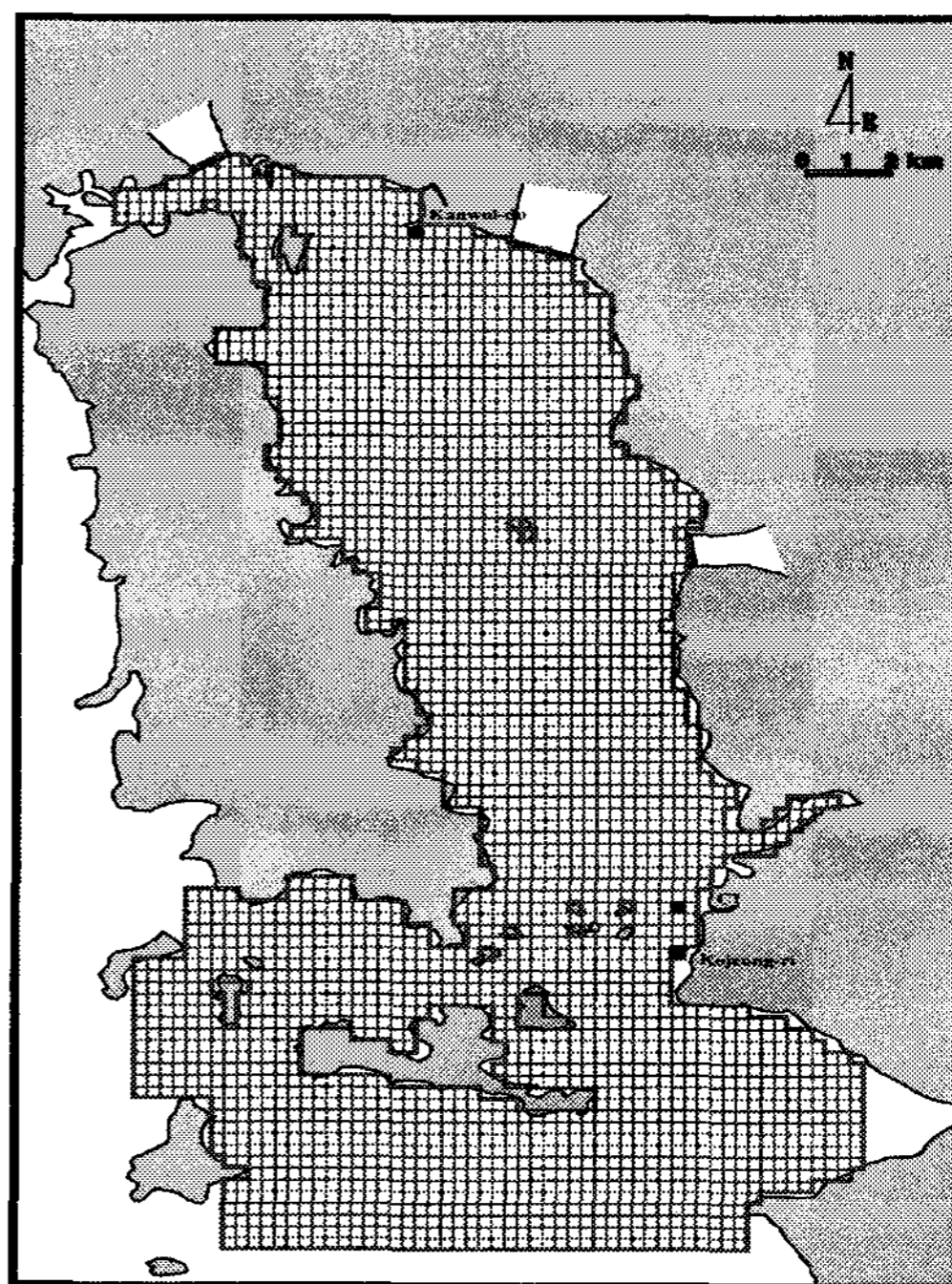


Fig. 2. Grid system of the Model

HEM-3D 모델은 연안 및 하구역, 특히 Chesapeake Bay와 인근 하구에 적용하기 위하여 개발된 모델로, Sisson *et al.*(1997)은 York River의 수질 평가를 위해 적용하였으며, 국내에서는 한국해양연구소(환경부, 1999)에 의해서 연안수질 평가 및 예측 기술 개발을 위하여 경기만 해역에 적용된 바 있다.

2.4. 모델 영역 설정 및 격자 구성

본 연구에서는 안면도와 육지로 둘러싸인 천수만 해역을 중심으로, 만 입구에 위치한 원산도 인근해역을 남측 경계로 하고, 서산방조제(간월호, 부남호)를 북측 경계로 하는 모델 영역을 설정하였다(Fig. 2). 격자는 수평적으로 x, y 방향에 대해 360 m의 등간격으로 60 x 95의 직교격자를 구성하고, 수직적으로는 4층으로 구분하였다. CFL 안정도 조건을 만족하는 계산시간 간격은 30초를 사용하였다.

지배방정식의 해를 구하기 위하여 초기조건 t=0에서 해수의 운동이 없다고 가정하였으며, 육지 경계면(lateral boundary)을 따라 no slip 조건을 적용하였다. 외해와의 경계면(open boundary)에서는 경계면 상의 각 격자점에 시간에 따른 조위 변화를 다음과 같이 지정하였다.

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^4 A_i(x, y) \cos(w_i t - k_i) \quad (\text{식 1})$$

여기서, $A_i(x, y)$ 는 각 분조의 반조차, w_i 는 각 분조의 각속도, k_i 는 각 분조의 지각이며 $i=4$ 는 사용된 분조의 개수이다. 조위 값은 대천항에서의 주요 4대 분조에 대한 조화 상수값을 이용하였다(한국해양연구소, 1996).

3. 결과 및 고찰

3.1. 모델 검증

조위 관측 자료와 모델의 결과, 조위는 두 지점 모두 모델 결과치가 관측치에 비해 약간 낮은 값을 보였으며, 지각은 모델 결과치가 고정항에서 낮고 간월도에서 빠르게 나타났다.

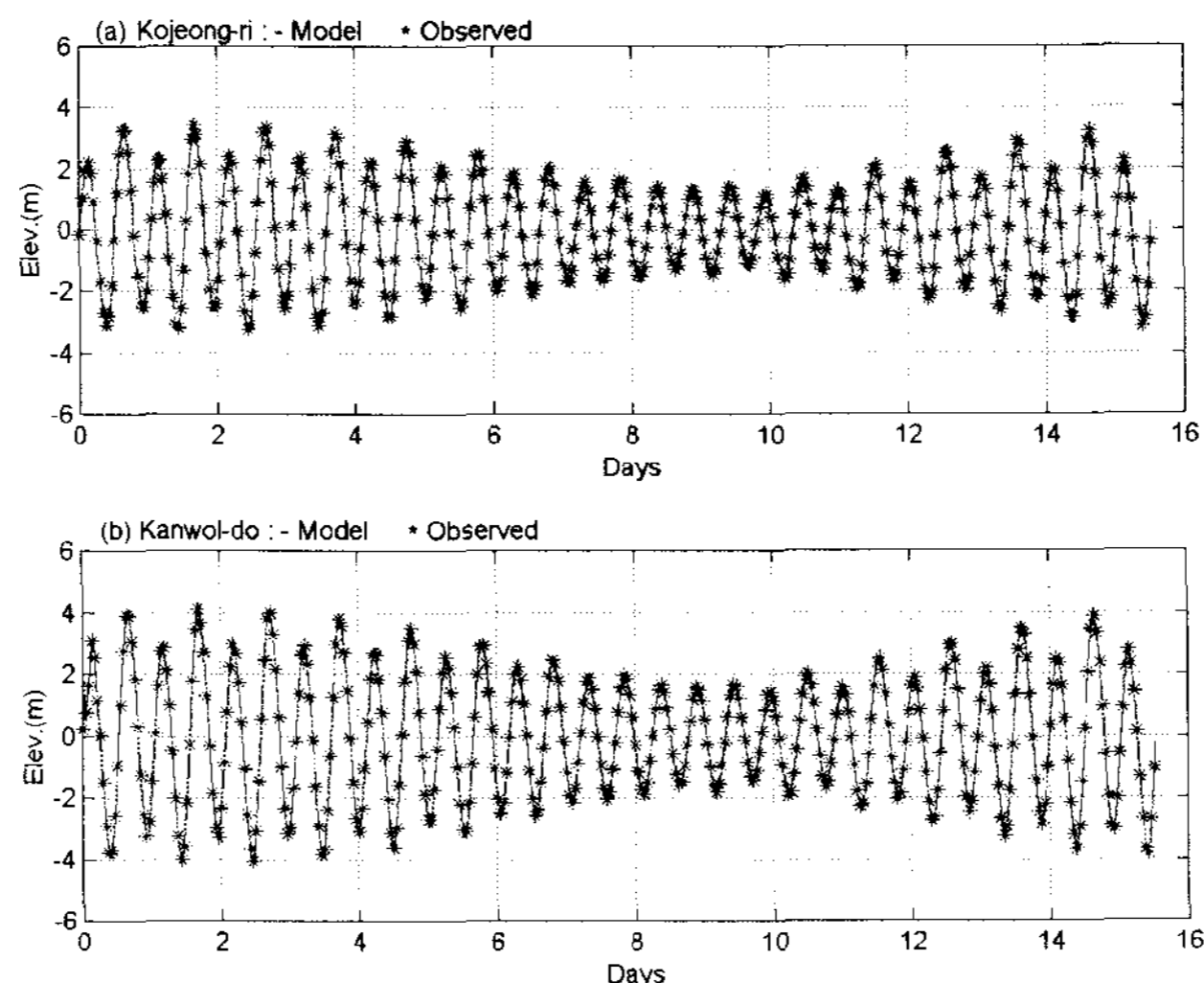


Fig. 4. Calibration results for surface elevation at (a) Kojeong-ri and (b) Kanwol-do.

조화분석 결과, 고정항의 조위는 O1 분조의 관측치 0.27 m에 대해서 -0.01 m의 오차를 보여 최대 상대 오차율 3.7%를 나타내고, 지각은 S2분조의 관측치 130.8°에 대해서 13.6°의 최대 오차를 보였다. 간월도의 조위는 S2분조의 관측치 1.01 m에 대해서 -0.07 m의 오차를 보여 최대 상대 오차율 6.9%를 나타내고, 지각은 S2분조의 관측치 170°에 대해서 10.2°의 최대 오차를 보였다(Fig. 4).

3.2. 모델 결과

창조류의 표층 유속 분포에 의하면 만 입구에서 1.85 m/s로 최대 유속을 보였으며, 만의 중앙부에서는 0.75 m/s, 방조제 부근에서는 0.27 m/s 이하의 유속을 보였다. 낙조류는 전반적으로 창조류에 비해 약하고, 특히 만 입구에서 0.40 m/s 정도의 큰 차이를 보였다. 저층 유속은 표층의 약 70% 크기였으며, 유동장은 표층과 같은 분포 양상을 보였다.

잔차류 분포는 원산도 동측 수로상의 반시계 방향의 와류와 남측의 시계방향의 와류가 대조를 이루고 있고, 만 내부에서는 월도 북측에 반시계 방향의 와류가 존재한다. 죽도를 중심으로 북측에 시계방향의 와류가 존재하고, 동측과 서측에 소규모 와류가 형성되면서 북류하는 흐름이 보이며, 황도와 안면도 사이에서는 남향하는 잔차류가 존재하였다. 잔차류 유속은 만 입구에서 5 ~ 10 cm/s를 보인 반면, 내만에서는 5 cm/s 이내로 약하게 나타났다 (Fig. 5).

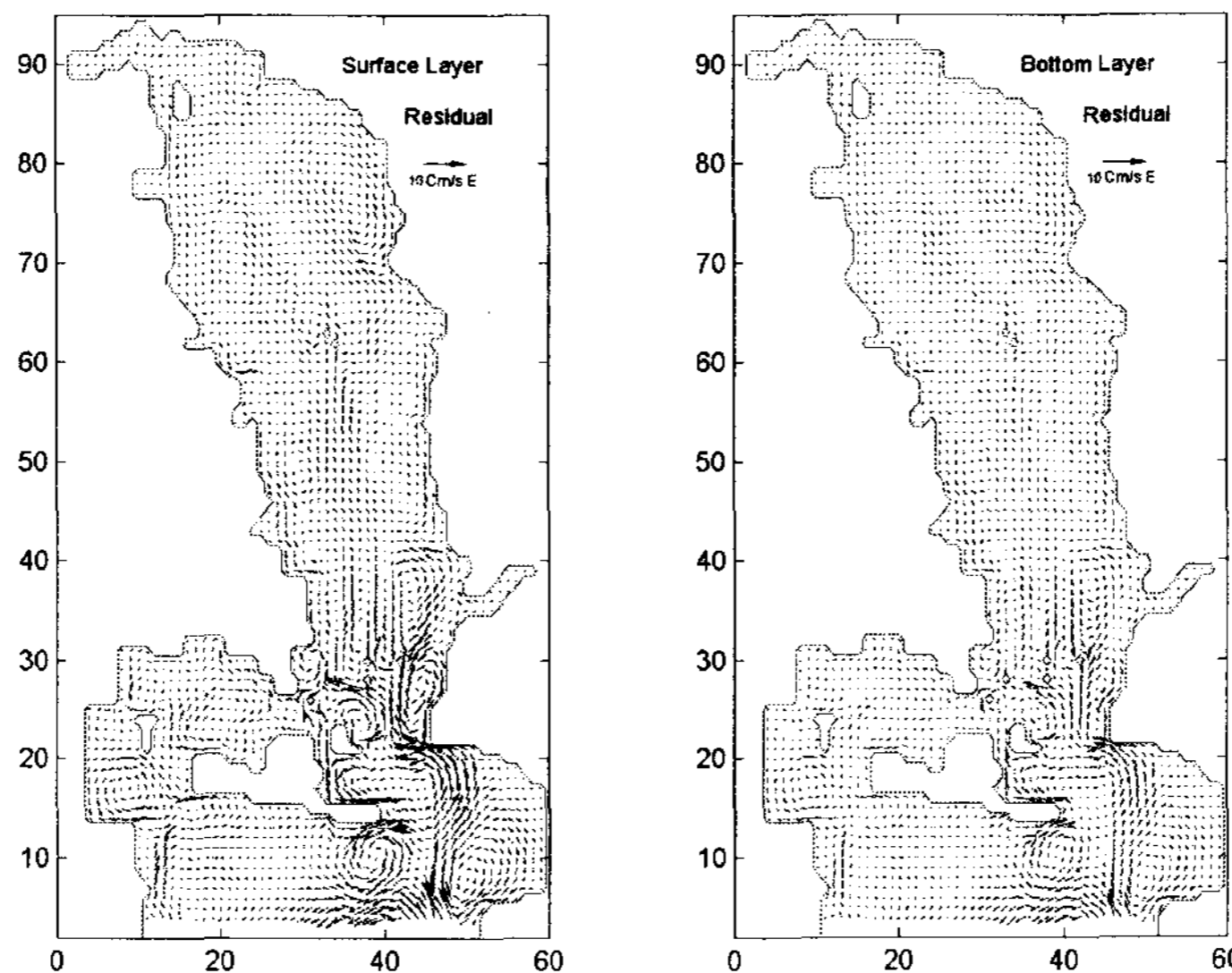


Fig. 5. Eulerian residual current field from the model results.

용존산소의 관측 결과에 의하면, 표층의 고농도와 저층의 저농도가 대비를 이루면서 성층화가 뚜렷하게 나타나며, 특히 만의 중앙부 표층에서 가장 높은 용존산소 농도를 보이고 방조제 인근 저층에서 가장 낮은 용존산소 농도를 보인다. 모델 결과에서도 절대 농도는 관측치와 차이가 있지만 이러한 분포 특성을 잘 보여주고 있다(Fig. 6). 상기의 결과들을 종합해 보면, 여름철 천수만의 용존산소 분포는 조위에 따라 약간의 변화가 있지만, 전반적인 분포 특성은 외해수와 만 내의 수괴가 대비를 이루고, 표·저층간의 성층화가 뚜렷하다는 것이

다. 특히 방조제 인근 해역의 저층에서 저산소 수괴가 관측되었으며, 본 수질 모델에서 이러한 분포 특성을 잘 재현하고 있는 것으로 판단된다.

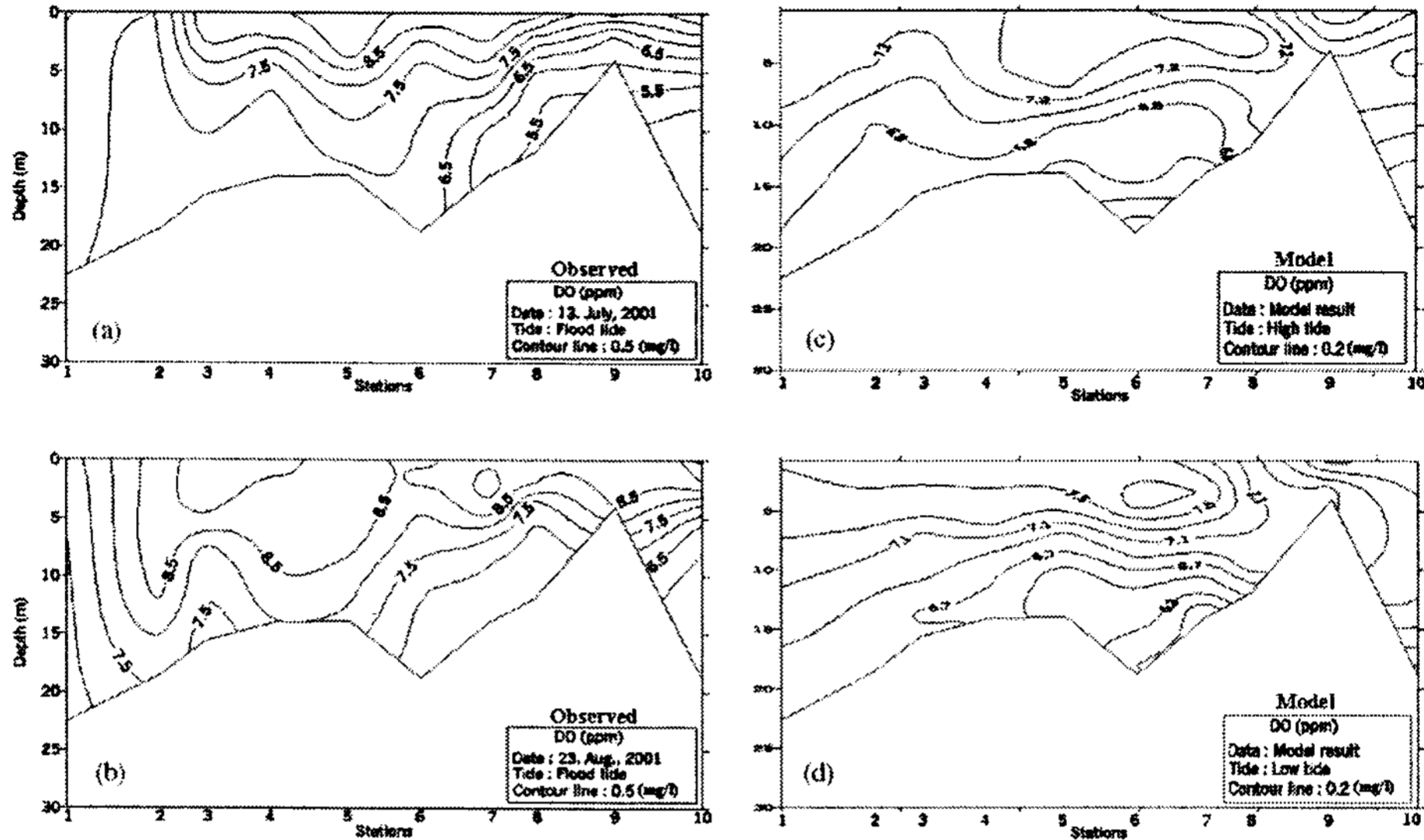


Fig. 6. Verification results of dissolved oxygen along the longitudinal section with observation data in (a) July, (b) August 2001 and (c, d) model(EXP-3) results.

4. 요약

천수만의 수리 역학 및 수질 모델을 위하여 3차원 수리역학 모델(EFDC)과 21개 수질 변수에 대한 수질 모델이 접합된 3차원 수리역학-부영양화 모델(HEM-3D)을 이용하였다. 관측 자료에 대한 모델 검증 결과, 조위는 관측치에 비해 5% 정도, 유속은 10% 정도 작은 값을 보였으며, 지각은 모델 결과치가 고정형에서 낮고 간월도에서 빠르게 나타났다. 수질 항목, 특히 용존산소의 관측치에 나타난 전반적인 분포 양상을 잘 재현하고 있었으며, 항목별 기여도 분석에서는 수질 모델이 퇴적물에 의한 산소 소비에 민감하게 반응하고 있으며, 용존산소 변화에 있어서 퇴적물에 의한 영향이 중요한 역할을 하고 있음을 보여주었다. 본 모델 결과는 기존의 모델들과 비교하여 천수만 해역의 해수 유동 특성을 잘 재현하고 있으며, 본 모델과 연계된 수질 모델의 오염물 확산과 수질 항목들의 거동을 이해할 수 있는 정보를 제공하였다.

그럼에도 불구하고 본 연구를 통하여 나타난 문제점은, 수질 예측 모델에 필요한 수질 변수들의 관측 자료와 양식장에 의한 오염 부하량 자료가 충분하지 못하며, 퇴적물에 의한 수질 변화를 정량화할 수 있는 모델의 개발이 시급하다는 것이다. 특히 퇴적물에 의한 산소 요구량은 유기퇴적물이 미생물 등에 의해 분해되는 과정에서 요구되는 산소량으로서, 해수 유동 조건의 변화와 오염부하에 의한 유기퇴적물의 집적이 주된 요인이다. 방조제 건설 이후 해수유동 조건의 변화와 더불어 지속적으로 오염물이 유입되고, 담수 및 천수만의 수질이 점점 악화되고 있다. 따라서 이러한 오염부하와 퇴적물에 대한 관리대책이 시급한 것으로 판단되며, 향후 정확한 수질 예측을 위해서는 본 연구에서 나타난 문제점들에 대한 재고가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 충남대학교 해양연구소, 1996. 천수만의 해양환경. 해양연구소 심포지움 논문집, 67 pp.
- 충청남도, 1998. 천수만 지역 어장 환경 조사. BSPG96256-00-1063-3, 한국해양연구소.
- 한국해양연구소, 1996. 한반도 주변 조석 조화 상수 자료집. 282 pp.
- Hamrick, J. M., 1992. A three-dimensional environmental fluid dynamics: theoretical and computational aspects, SRAMSOE No. 317. VIMS.
- Park, K., A. Y. Kuo, J. Shen and J. M. Hamrick, 1995. A three-dimensional hydrodynamic eutrophication model (HEM-3D): Description of water quality and sediment process submodels. Special Report in Applied Marine Science and Ocean Engineering No. 327, School of Marine Science, VIMS.
- Sisson G. M., J. Shen, S. C. Kim, J. D. Boon and A. Y. Kuo, 1997. VIMS Three-Dimensional Hydrodynamic-Eutrophication Model (HEM-3D): Application of the hydrodynamic model to the York River system, Special Report in Applied Marine Science and Ocean Engineering No. 341, VIMS.