

연구논문

## 경기만내 담수 유입으로 인한 시·공간적인 염분변화에 대한 연구

정정호 · 김국진 · 양근호\* · 장윤영\* · 박선환\* · 김영택\*\*

(주)이엔씨기술연구소, 광운대학교 환경공학과\*, 국립해양조사원\*\*

(2007년 9월 12일 접수, 2007년 10월 22일 승인)

### Study on the Temporal and Spatial Variations of Salinity by Freshwater Discharge in Gyeonggi Bay

Jeong Ho Jeong · Kuk Jin Kim · Keun Ho Yang\* · Yoon Young Chang\*  
· Sun Hwan Park\* · Young Taeg Kim\*\*

Environmental Engineering and Consulting Technology Institute  
Department of Environmental Engineering, Kwangwon University\*  
National Oceanographic Research Institute\*\*

(Manuscript received 12 September 2007; accepted 22 October 2007)

### Abstract

To investigate temporal and spatial variations of hydrodynamics and environmental conditions in Gyeonggi Bay, including Han River estuary, numerical experiments were performed using 3-dimensional fine grid numerical ocean model. The model successfully reproduced the physical phenomena already known in Gyeonggi Bay where tide and fresh water discharge are dominant forcings.

The calculated harmonic constants of tide and tidal current agreed well with those of observations at nine tide stations and two tidal current stations. Tidal asymmetries along the Yeomha Waterway, mainly caused by non-linear effect, were well reproduced and agreed well with observations. Time series of salinity at four stations(A, B, C and D) and horizontal distributions of monthly averaged salinity show that Gyodong and Seokmo Waterways play an important role in fresh water discharge into the Gyeonggi Bay rather than Yeomha Waterway.

Key words : Salinity Simulation, EFDC, Fresh Water Discharge, Tide, Tidal Current

## 1. 서론

### 1. 경기만의 일반적인 현황

본 연구의 대상인 경기만은 한반도 황해 중부에 위치한 해역으로, 크고 작은 섬들과 섬 사이의 협소한 수로들이 많이 존재한다(그림 1). 특히 주변의 한강, 임진강, 예성강 등으로부터 담수가 유입되며, 간석지(tidal flat)가 넓게 발달해 있어서 항만, 공항, 공업단지, 방조제, 담수호 조성 등의 대규모 연안개발 사업이 활발한 해역이다.

수리학적 측면에서 경기만의 특성을 살펴본다면 우선 조석의 영향이 우세한 해역으로 큰 조차와 강한 조류를 들 수 있다(김영택, 1990). 경기만의 평균수심은 약 40 m로 반일주조( $M_2$ )가 우세한 천해역이며, 평균대조차가 약 8 m로 주 수로에서는 대조기 때 최대 조류의 유속이 2~3 m/sec에 이른다. 특히 계절에 따른 담수유입량의 차이가 큰 해역으로 풍수기인 여름철(7~9월)의 월평균 유량은 갈수기에 비하여 4배 이상이 된다(김홍선, 1997). 경기만으로 유입되는 담수유입량은 한강, 임진강 그리고 예성강의 순이며 이는 각 하천의 유역면적과 비례하여 증가한다. 오재경·방기영(2003)에 따르면

한강의 유역면적은 34,473 km<sup>2</sup>이며 임진강 및 예성강의 유역 면적은 각각 8,118 km<sup>2</sup>과 4,048 km<sup>2</sup>이다.

지질학적인 측면에서 경기만의 특성을 살펴본다면 넓게 발달한 갯벌 및 조류방향으로 평행한 사질 퇴적체(Sand Bar)를 들 수 있다(장현도, 1989). 경기만에 가장 큰 영향을 미치는 한강 유역의 형태는 수지상(dendritic)과 선상형(fanshape)이 혼합된 형태로 알려져 있다(오재경·방기영, 2003). 경기만 퇴적물은 대부분 육상기원으로 한강, 임진강과 예성강을 통한 점오염원(point source)과 그 주변 유역을 통한 비점오염원(non-point source)이 있다.

### 2. 경기만에 대한 기존 연구

#### 1) 관측

경기만의 한강 하구는 군사분계선에 인접하고 있어서 조석이나 조류와 같은 기본적인 관측이 수행되지 못 하였다. 또한 이 해역은 수심이 얇고 유속이 강하며, 겨울철 유빙과 여름철 홍수 및 태풍 등의 영향으로 관측 장비의 분실 및 불량 자료의 발생과 같은 많은 문제점에 노출되어 있다. 따라서 현재까지도 한강 하구의 물리적 특성에 대한 연구는 상당히 부족한 실정이다.

기존의 관측 성과로 김영택(1990)은 염하수로와 석모수로를 포함하는 한강하구의 수온, 염분 및 유속의 관측 성과를 바탕으로 Hansen and Rattray (1966)가 제안한 성층-순환 도형(Stratification-Circulation Diagram)을 이용하여 한강하구의 형태를 완전혼합형 하구(well-mixed estuary)로 판단하였다. 다만 주 수로의 일부에서는 부분혼합(partially-mixed)의 형태가 보이며, 전체적으로 이와 같은 하구의 형태나 공간적 범위가 계절적인 변화를 보인다고 하였다. 특히 강수가 집중되는 우기 때는 주 수로를 따라 하구의 형태가 부분혼합형을 넘어 염분썩기(salt wedge) 형을 보이고, 공간적 범위는 세어도 남쪽까지 확장될 것으로 추정하였다.

한편, 최근의 관측성과로 윤병일(2006)은 경기만 및 염하수로를 따른 조석과 조류 관측을 통하여 비



그림 1. 연구해역도(화살표는 한강하구역의 주요한 4개 수로)

선형 천해분조의 중요성을 강조하였다. 즉, 조석파가 외해에서 하구역으로 전파되면서 바닥마찰, 담수영향, 수심변화 및 불규칙한 지형 등으로 인한 비선형 효과로 천해분조가 발생하며, 이로 인해 조석의 비대칭성이 야기되어 수로에 따라 창조, 낙조의 우세현상이 다르게 나타난다고 하였다(Aubrey and Speer, 1985). 또한, 수집된 조석 관측 자료의 분석 결과를 바탕으로 담수의 영향이 배제된 Friedrichs and Aubrey(1988)의 방법을 적용한 결과 염하수로와 석모수로 모두 뚜렷한 창조우세가 나타남을 제시하였다.

## 2) 수치모델

경기만에서 사용된 기존의 모델들은 대부분 2차원 수치모델로 김홍선(1997)은 평균적인 민물 유입에 의한 15일 동안의 평균 조석, 조류 및 염분도 분포에 대한 연구를 수행하였으며, 임효혁(1999)은 1년 동안의 민물 유입량을 고려하여 조석과 염분, 수온 분포를 연구하였다. 또한 윤병일(2006)은 장기간 동안의 조류관측을 통하여 조류변형 특성 및 잔차류에 대하여 연구를 수행하였다. 따라서 현재까지 수행된 기존의 2차원 수치모델로는 계절에 따른 해양의 수직적인 구조를 재현할 수 없었다.

한편, 조간대 처리를 위한 3차원 모델로 POM (Princeton Ocean Model) 모델을 응용하여 semi-implicit 모델을 수립한 후, semi-implicit 모델의 유효성과 계산 효율을 확인하기 위하여 조석 및 조류의 크기 및 전파 양상에 대한 연구가 있다(이경선 등, 2000). 3차원 수질모델의 적용으로는 VIMS에서 개발된 HEM-3D (Three Dimensional Hydrodynamic-Eutrophication Model) 모델을 이용한 경우가 있는데,  $M_2$  단일 분조를 입력하여 조간대와 유동장을 재현하고 이를 이용하여 수질모델을 수행한 바가 있다(한국해양연구소, 2000). 그러나 위와같은 3차원 수치모델을 사용한 경우에도 조석, 조류 및 부유사 확산 등과 같은 해수유동에 초점을 두고 연구가 진행되었기 때문에 수온, 염분과 같은 해수특성 및 해양환경의 시공간적인 변화를 잘 재현하지 못하였다(이경선 등, 2000; 한국해

양연구소, 2000).

## 3. 연구 목적

본 연구의 궁극적인 목적은 경기만 해역을 중심으로 기존에 수행된 연구사업 및 보고서 등 장기간 축적된 자료를 수집하여 면밀히 분석하고, 적합한 해수유동 모델을 수립함으로써 경기만 해역에서 해수의 수리학적 거동 및 해수특성의 시·공간적 분포를 모의하고자 하며, 나아가 경기만의 해수유동 및 해양환경 변화에 대한 예측시스템을 구축하고자 하는데 있다.

그 일환으로 본 연구에서 수치모델을 이용하여 경기만에서의 3차원 해수유동과 염분의 시공간적 변화 양상을 재현하고자 한다. 특히 한강, 임진강 및 예성강으로부터 유입되는 담수에 의하여 저염의 수괴가 계절적으로 어느 정도 범위까지 영향을 미치는지를 정량적으로 산정하려고 한다. 해양에서 염분은 보존성 물질로 여겨지며 수치모델을 통하여 염분이 잘 재현된 경우 그 모델에 대한 신뢰도가 향상되며, 더불어 염분 이외에 수치모델을 통해 모의된 다른 수질 변수들에 대한 정확도를 평가하는 기준이 되기 때문이다.

## II. 연구방법

본 연구의 해수유동 수치실험에 사용된 HEM-3D 모델은 연안, 하구, 호소, 습지, 저수지 등의 유동 및 물질수송을 모의할 수 있는 3차원 수치모델링 시스템이다. 미국 Virginia 연안 및 하구 연구를 위한 장기 연구사업의 일환으로 미국 VIMS(Virginia Institute of Marine Science)에서 개발되었으며(Park, *et al.*, 1995), 대학, 연구기관, 국가기관 및 엔지니어링업체 등에서 널리 사용되어 검증된 수치모델로서, 특히 미국 환경청 (US EPA)의 일일오염총량(TMDL; Total Maximum Daily Load) 평가용 모델로 지정되어 있다. 본 연구에서는 HEM-3D 모델 중에서 수리역학 부분인 EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code)를 이용하였다.

## 1. 지배방정식

EFDC 모델의 지배방정식은 연속방정식과 수평·수직방향 운동방정식, 열·염 보존방정식, 그리고 퇴적물을 포함한 물질 보존방정식들로 구성되어 있다. 열·염 보존방정식은 밀도차에 의한 경압력에 의하여 운동방정식과 연계되어 있다.

본 모델은 수직방향으로  $\sigma$ 좌표계를 사용하고, 수평방향으로는 직교-곡선(orthogonal-curvilinear) 좌표계를 사용한다. 수직 와동점성계수, 수직 와동확산계수를 계산하기 위하여 Mellor and Yamada (1982)의 turbulence closure(level 2.5) 모델을 사용하며, 질량보존 scheme을 사용함으로써 경기만의 가장 큰 특성 중 하나인 조간대의 처리가 가능하다 (Hamrick, 1994; Moustafa and Hamrick, 2002). 수평 와동점성계수의 산정에는 Smagorinsky (1963) 형태의 식을 이용하여 수평방향의 유속 변형(velocity shear)에 의하여 점성계수가 산정되도록 하였다. 유체 정역학적(hydrostatic) 가정과 Boussinesq 근사를 적용하면 기본방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

### 연속방정식

$$\frac{\partial m\eta}{\partial t} + \frac{\partial m_y Hu}{\partial x} + \frac{\partial m_x Hv}{\partial y} + \frac{\partial mw}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

### 운동방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial mHu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(m_y Huu) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x Hvu) + \frac{\partial}{\partial z}(mwu) \\ & - \left( mf + v \frac{\partial}{\partial x} m_y - u \frac{\partial}{\partial y} m_x \right) Hv \\ & = -m_y H \frac{\partial}{\partial x} (g\eta + p) - m_y \left( \frac{\partial h}{\partial x} - z \frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{\partial p}{\partial z} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left( mH^{-1} A_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + Q_u \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial mHv}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(m_y Huv) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x Hvv) + \frac{\partial}{\partial z}(mwv) \\ & + \left( mf + v \frac{\partial}{\partial x} m_y - u \frac{\partial}{\partial y} m_x \right) Hu \\ & = -m_x H \frac{\partial}{\partial y} (g\eta + p) - m_x \left( \frac{\partial h}{\partial y} - z \frac{\partial H}{\partial y} \right) \frac{\partial p}{\partial z} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left( mH^{-1} A_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + Q_v \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -gH(\rho - \rho_0)\rho_0^{-1} = -gHb \quad (4)$$

### 물질보존 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(mHS) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y HuS) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x HvS) + \frac{\partial}{\partial z}(mwS) \\ & = \frac{\partial}{\partial z} \left( mH^{-1} A_b \frac{\partial S}{\partial z} \right) + Q_s \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(mHT) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y HuT) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x HvT) + \frac{\partial}{\partial z}(mwT) \\ & = \frac{\partial}{\partial z} \left( mH^{-1} A_b \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_T \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(mHC) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y HuC) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x HvC) + \frac{\partial}{\partial z}(mwC) \\ & = \frac{\partial}{\partial z} \left( mH^{-1} A_b \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \omega C + mHR_c + Q_C \end{aligned} \quad (7)$$

### 상태방정식

$$\rho = \rho(p, S, T) \quad (8)$$

여기서,  $h$ 는 기준면 하 수심,  $\eta$ 는 기준면 상 수심,  $u$ 와  $v$ 는 직교하는 곡선좌표계  $x, y$ 에서의 수평유속,  $m_x$ 와  $m_y$ 는 곡선좌표계 임의거리  $ds^2 = m_x^2 dx^2 + m_y^2 dy^2$ 을 만족시키는 metric tensor의 대각성분의 제곱근( $m^2 = m_x m_y$ ),  $w$ 는 변환된 무차원 연직좌표계  $z$ 에서의 수직유속성분,  $H$ 는 전체수심( $h + \eta$ ),  $P$ 는 수압,  $f$ 는 Coriolis force,  $A_v$  수직와동점성계수,  $A_b$  수직와동확산계수,  $Q_u$ 와  $Q_v$ 는 운동량 source-sink 항,  $T$ 와  $S$ 는 수온과 염분,  $\rho$ 는 밀도,  $b$ 는 부력,  $\omega$ 는 침강속도,  $g$ 는 중력가속도를 나타내며,  $C$ 는 용존 또는 부유물질의 농도를 나타낸다.

## 2. 모델의 설정 및 적용

모델에 사용된 입력 자료는 수심, 조석, 바람, 담수유입 등이며 개방경계에서의 수온과 염분 그리고 조석이 고려되었다. 모델에서 일반적인 경기만의 해황을 모의하기 위하여 확보 가능한 다년간의 자료를 최대한 활용하였다. 기상조건은 1999~2005년의 7년간, 담수유입량은 한강의 경우 25년간(1974~1998), 임진강과 예성강은 27년간(1971~1997) 누년 평균된 월평균 자료를 사용하였다.

### 1) 수심 및 초기조건

수심은 가장 중요하고 기본적인 모델 입력 자료

로 본 연구에서는 국립해양조사원(National Oceanographic Research Institute)에서 발한 수치지도 F323과 경기만 일대 해도(No. 306, 307, 308, 309, 311, 323, 328, 331, 334, 338p, 350, 357) 및 연안해역기본도(영종, 월미, 신도, 삼목) 등을 이용하여 수심을 구한 후 모델에 입력하였으며, 한강하구 및 연안역에 대해서는 상세 수치지도를 이용하여 조간대를 포함하는 보다 정확한 수심을 입력하였다.

그림 2는 연구해역인 경기만의 수심과 관측 정점을 나타낸 것으로 약최저저조면을 기준으로 해저지형을 도시하였다. 그림에서 PT1~PT9는 조석 계산치를 보정·검증하기 위한 시계열 자료를 얻는 정점으로 국립해양조사원의 검조소 위치와 일치한다. 정점 A~D는 임효혁(1999)에 의해 구분된 수온과 염분의 시계열 자료를 얻는 정점으로 염하수로 입구의 정점 A, 석모수로를 나타내는 B, 인천 앞바다 C와 외해의 D로 각각 구분할 수 있다.

Line YH는 염하수로를 따라 인천 앞바다에 이르는 관측선으로 담수의 유입에 의해 유발되는 염분의 수직단면 변화 양상을 조사하기 위하여 설정되었다.

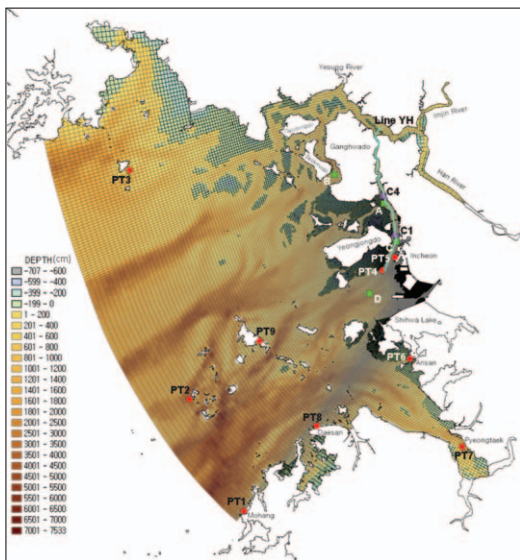


그림 2. 모델 검증을 위한 정점도와 약최저저조면 기준의 수심도(조위 비교(PT1~PT9; 수온 및 염분 비교(A~D); 염분 수직단면 비교(Line YH))

한편, 모델의 초기조건으로는 유동이 없는 상태에서 모델 계산을 시작하는 cold start 조건을 사용하며, 초기 수온과 염분은 겨울철을 기준으로 경기만의 전 해역이 균질하다는 가정 하에 전 층에 대하여 일정한 값(6.1°C, 32.0psu)을 부여하였다.

## 2) 표면경계조건

기상청에서 발간하는 기상월보(Monthly Weather Report)의 인천자료를 기준으로 1999~2005년의 7년 간 누년 평균한 월별 바람의 크기와 방향을 구하여 모델에 부여하였다. 경기만은 겨울철 강한 북서계절풍의 영향을 받으며, 여름철에는 이와 반대로 남서계절풍의 영향을 받는 것으로 나타났다.

## 3) 개방경계조건

### (1) 조석

외해의 개방경계에서 모델영역 내부로 전파되는 유동 현상을 재현하기 위해서는 조석과 같은 해수면 변동이나 법선 방향의 유속 성분이 지정되어야 한다. 이때 개방경계의 접선 방향 유속 성분은 0으로 지정된다. 유동이 모델영역 외부로 전파될 때는 개방경계에 직각인 속도 성분을 운동방정식에서 이류항과 수평외동항을 무시한 나머지 항들만으로 계산한다. 또한 육지 경계조건으로 육지에 직각인 유속 성분은 없다고 가정한다.

본 연구에서는 한국해양연구소(KORDI, 1996)에서 발한 ‘한반도 주변 조석 조화상수 자료집’을 근거로 주요 4개 분조( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ )의 조석 성분을 모델의 외해 개방경계에 부여함으로써 경기만에서의 조석을 재현하였다.

### (2) 담수유입

경기만에 영향을 미치는 한강, 임진강, 예성강에서의 월별 담수유입량을 구하기 위하여 ‘경기만 연안개발에 따른 수리 및 수질 통합모델 개발(한국해양연구소, 2000)’ 보고서로 부터 한강은 1974~1998년까지 25년간, 임진강과 예성강은 1971~1997년까지 27년간 누년 평균한 월별 담수유입량을 발췌하여 모델에 사용하였다. 본 보고서에 따르면 한강으로부터의 담수유입량은 팔당댐의 방류량

으로부터 산정하며 임진강과 예성강의 유량은 각각의 유역면적과 한강유역 면적의 상대적인 비율로부터 산정한다.

(3) 수온, 염분

모델의 개방경계에 부여되는 수온 및 염분은 국립수산진흥원(1986)의 정선관측 자료와 함께 인하대학교 부설 해양과학기술연구소(1998)에서 간행한 황해해양도집(‘Yellow Sea Atlas’)을 이용하여 개방경계면을 따르는 월별 수온과 염분을 산정한 후 모델에 부여하였다.

4) 모델적용

연구해역인 경기만에 모델을 적용하였다. 격자는 수평적으로 217×369하여 총 80,073개로 해양을 나타내는 격자가 35,868개 이고 나머지 44,205개는 계산을 하지 않는 육지를 나타내는 격자이다. 격자크기는 DX가 77.2 m에서 1,543.6 m, DY가 63.5 m에서 2,103.0 m로 변하며 외양에서는 격자간격이 크고 연안으로 갈수록 점점 그 크기가 작아지도록 구성하였다(그림 2). 수직적으로는 5개의 레벨로 나누어 모델을 구성하였고, 좌표계의 특성상 수심에 따라 5개의 층이 항상 존재함으로써 수심이 얇은 곳에서도 일정한 수직 해상도를 유지할 수 있다. 계산간격 Δt는 8초로 총 1년간(365일) 수치 적분한 결과를 바탕으로 조위(elevation), 조류(tidal current), 담수 확산의 수평적, 수직적 분포 등을 분석하였다.

한편, 본 연구에서 사용하는 모델은 수평적으로 직교-곡선 좌표계(orthogonal-curvilinear coordinate)를 사용함으로써 그동안 직각 좌표계(cartesian coordinate)가 재현할 수 없는 문제점 중의 하나였던 강이나 수로를 따른 흐름을 잘 재현할 수 있었다.

III. 결과

1. 조석, 조류 및 향류

조석은 천체의 운행으로 인해 발생하며 약 반일,

약 1일 및 장시일의 주기를 갖는 3부분으로 성립된다. 각 주요 분조는 조석의 조화분화에 의해 결정되며, 현재 대한민국에서 사용하고 있는 해도의 수심 기준면은 M<sub>2</sub>(주태음반일주조), S<sub>2</sub>(주태양반일주조), K<sub>1</sub>(일월합성주조) 그리고 O<sub>1</sub>(주태음일주조)의 4개 분조를 합성하여 사용하고 있다. 앞서 언급한 분조는 실용적으로 매우 중요하며(이석우, 1983), 일반적으로 관측치와 모델의 결과를 상기의 4개 분조에 대해 비교 검토하며, 본연구에서도 모델이 재현한 조석과 실제의 관측치가 잘 일치하는지를 파악하기 위하여 9개의 정점에서 조석 관측치와 모델 결과를 비교 하였다. 표 1에서는 절대상대오차(ARE)와 평균오차(ME)을 나타낸 것으로 모든 분조에 대하여 ARE가 5% 미만으로 경기만의 해수유동 모델이 잘 재현되었음을 알 수 있다.

현장 관측 정점과 동일한 모델 상의 2개 정점(C1과 C4)에서 조류의 시계열 결과를 조화 분해하여 4개 주요 분조를 구한 후 현장 관측 결과와 서로 비교하였다(표 2). U, V 성분으로 구분하여 절대상대오차와 평균오차를 비교한 결과 관측치와 계산치의 오차가 많이 나는 것으로 나타났다. 그러나 두 성분을 합성한 유속으로 비교 시에는 절대상대오차와 평균오차의 계산치와 관측치가 잘 일치하는 것

표 1. 조석의 절대상대오차 및 평균오차(9개 정점 평균)

Tidal constituents		M <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>	K <sub>1</sub>	O <sub>1</sub>
Amplitude	ARE(%)	2.55	1.36	1.51	1.88
	ME(cm)	5.74	1.26	-0.38	-0.23
Phase	ME(deg.)	1.70	4.89	2.11	-1.03

표 2. 조류에 대한 모델결과와 관측치의 비교(정점 C1, C4)

구 분	Observed				Calculated				
	Amp.(cm)		Pha.(°)		Amp.(cm)		Pha.(°)		
	U	V	U	V	U	V	U	V	
C1	O <sub>1</sub>	1.1	4.0	28.8	188.9	0.8	3.2	20.6	199.0
	K <sub>1</sub>	1.8	6.1	83.6	230.8	1.3	5.2	12.1	189.7
	M <sub>2</sub>	19.0	88.1	254.0	71.4	22.4	96.0	233.4	38.6
	S <sub>2</sub>	8.3	35.2	312.5	122.3	8.5	34.5	75.5	253.1
C4	O <sub>1</sub>	0.3	2.8	317.0	157.5	0.5	3.6	202.2	212.3
	K <sub>1</sub>	1.1	5.3	64.8	225.3	0.6	6.2	191.2	208.7
	M <sub>2</sub>	24.7	109.5	267.7	87.4	4.8	114.6	94.6	67.1
	S <sub>2</sub>	9.2	37.9	323.8	142.0	1.6	37.0	316.6	286.2

으로 나타났다.

한편 이 해역은 외해로부터의 조석과 강으로부터의 담수유입 영향이 서로 만나는 지점으로 항류(residual current)의 형태가 복잡하게 나타난다(그림 3). 경기만의 경우 수심이 깊은 골을 따라서는 외해로부터의 창조 성분이 우세하게 나타나고 강을 따라서는 낙조성분이 우세한 것으로 알려져 있다. 그림으로부터 이 해역에서 창조와 낙조의 두 세력이 만나 접이지대를 형성하는 것으로 보이며, 따라서 본 연구의 결과는 강화도 남단을 포함하는 영종도 북쪽에서는 낙조성분이, 그 남쪽의 외해에서는 창조성분이 좀 더 우세한 것으로 나타났다. 이 결과는 해양수산부(2003)의 항류도와 대체로 일치하고 있다.

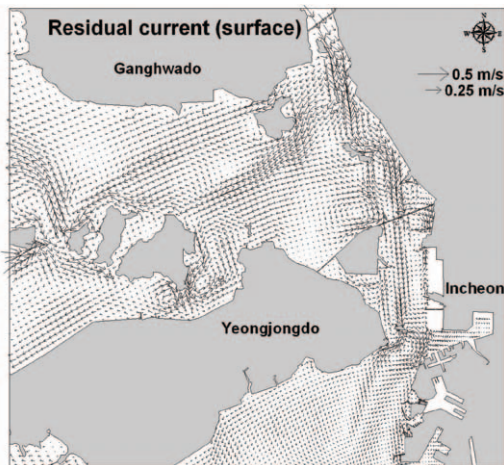


그림 3. 강화도 남단과 영종도 주변의 표층 잔류류 분포도

## 2. 염분

그림 5는 그림 2에서 나타나는 정점 A, B, C, D에서 표층염분의 시간변화를 도시한 것이다. 관측치는 그림 4와 같이 임효혁(1999)이 제시한 4개의 박스에서 누년 평균된 염분을 사용하였고, 모델 결과로 일평균 염분과 일 염분 최대치, 일 염분 최소치를 함께 도시하였다. 그림으로부터 4개 정점 모두에서 관측치와 모델 결과가 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 정점 B(석모수로)가 평균적으로 담수유입의 영향을 가장 많이 받는 것으로 나타났으며, 정점

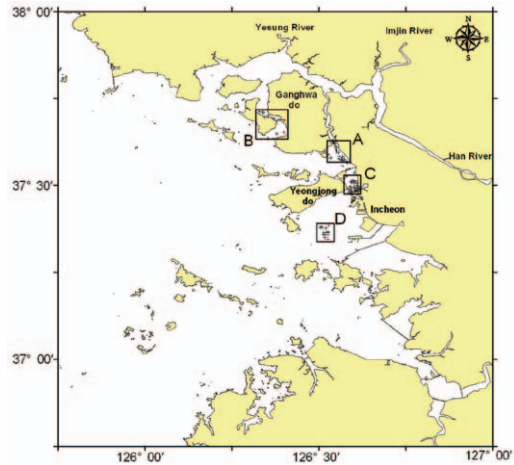


그림 4. 모델결과와 관측 자료의 비교를 위한 4개 박스구역

A(염하수로 입구)는 여름철 집중호우나 홍수 시에 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 정점 C로 갈수록 담수유입의 영향이 점차 작아지며, 정점 D에서는 외해의 특성을 잘 나타내고 있다.

그림 6은 월 평균된 월별 표층염분과 저층염분의 공간적 분포를 나타낸 것으로 2월에 담수유입의 영향이 최소로 나타났고, 8월에 그 영향이 최대로 나타났다. 수직적으로는 겨울철에 표층과 저층의 염분 차이가 거의 없는 반면, 여름철에는 표층의 염분이 저층보다 낮게 나타남을 볼 수 있다. 따라서 염분의 확장 범위도 저층보다는 표층이 더 넓게 분포함을 볼 수 있다. 그림으로부터 저염의 확장이 염하수로보다는 석모수로, 교동수로 방향으로 많이 분포함을 볼 수 있는데 이는 기존의 연구 결과와도 일치되며(조철호, 1988; 조철호·승영호, 1989; 김영택, 1990; 김홍선, 1997; 임효혁, 1999, Park *et al.*, 2002) 모델의 결과로 제시된 정점 A와 B의 염분 비교를 통해서도 잘 나타난다.

그림 7은 연평균 표층염분과 저층염분의 공간적 분포를 관측치(김나영, 2000)와 함께 비교한 것으로 전반적으로 모델 결과의 경향은 관측치와 잘 일치하지만 그 확장 범위는 관측치에 조금 못 미치는 것으로 나타났다. 그 이유는 담수유입량을 월별로 일평균 값을 부여했기 때문인 것으로 사료되며, 담수유입량을 일평균으로 부여한다면 개선된 결과를

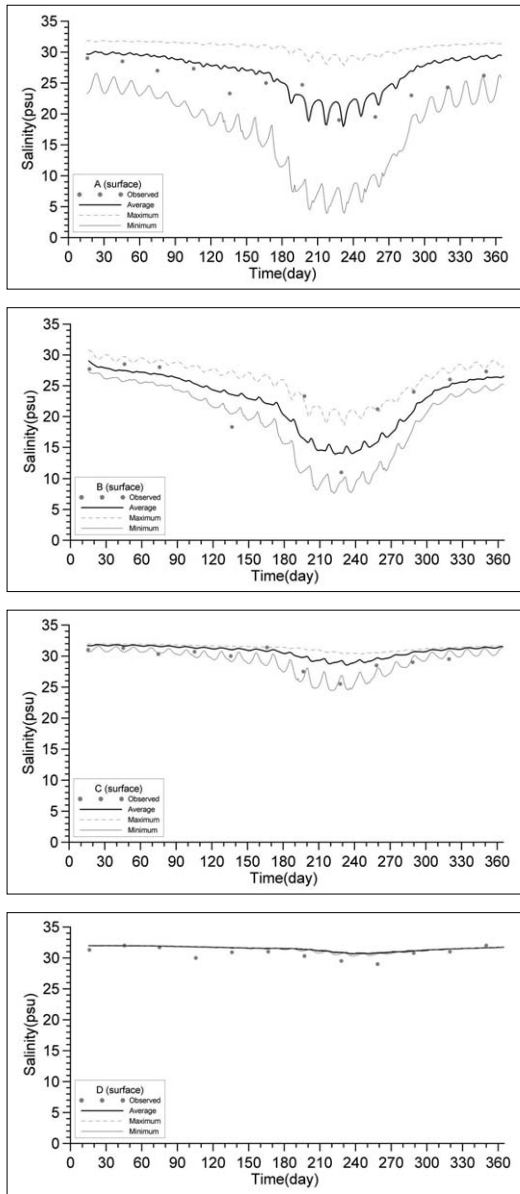


그림 5. 정점 A, B, C 및 D에서 일평균 표층 염분의 시계열

얻을 수 있을 것으로 기대한다.

그림 8은 Line YH를 따른 월평균 염분의 수직 단면도를 나타낸 것이다. 여름철 대량의 담수유입으로 인하여 저염의 물이 염하수로를 따라 외해로 확장하다가 겨울철 다시 줄어드는 현상이 모델을 통해 잘 재현되었다. 특히 여름철(7~9월) 정점 A 부근에서는 15.0~25.0psu의 염분이 집중적으로

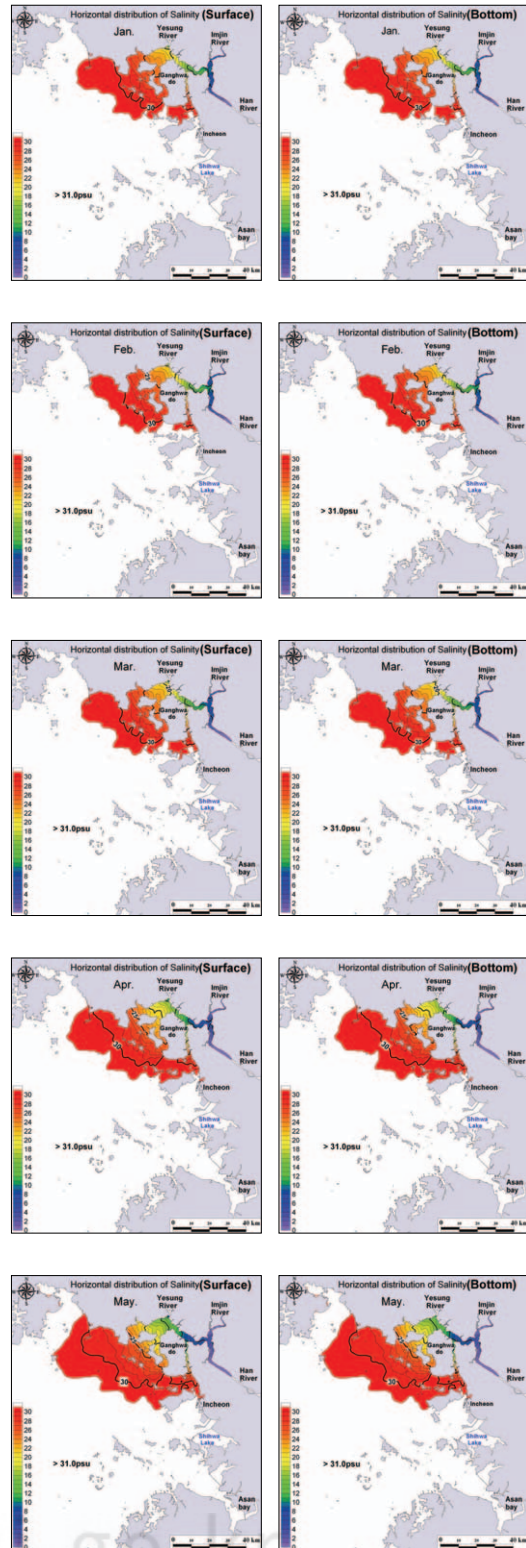


그림 6. 표층과 저층에서 월평균 염분의 수평 분포도



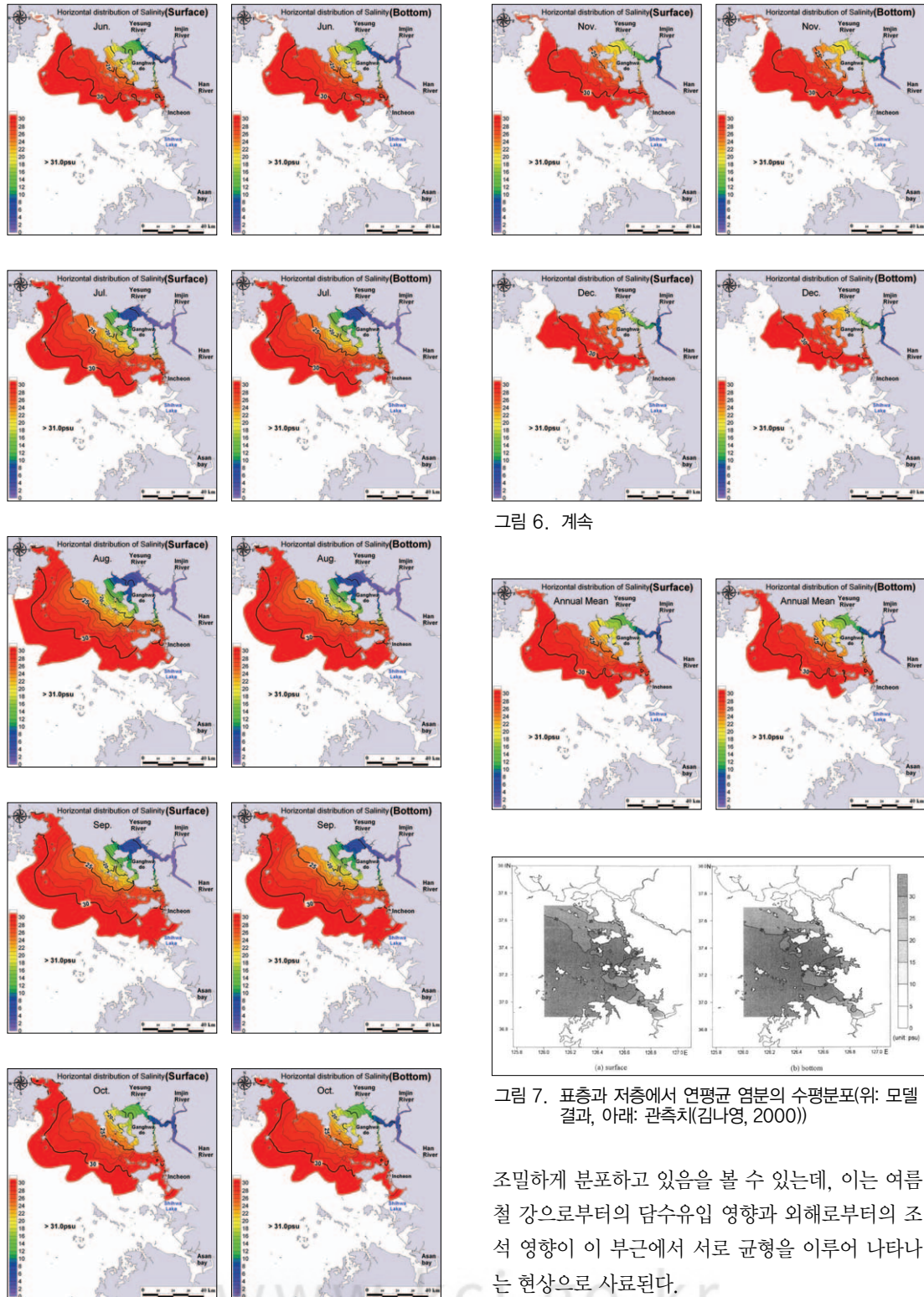


그림 6. 계속

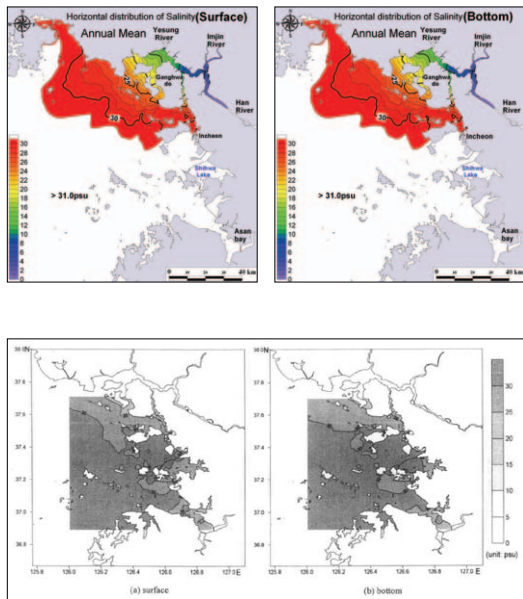


그림 7. 표층과 저층에서 연평균 염분의 수평분포(위: 모델 결과, 아래: 관측치(김나영, 2000))

조밀하게 분포하고 있음을 볼 수 있는데, 이는 여름철 강으로부터의 담수유입 영향과 외해로부터의 조석 영향이 이 부근에서 서로 균형을 이루어 나타나는 현상으로 사료된다.

Line YH을 따라 30.0psu의 등염선은 1, 2, 3월

그림 6. 계속

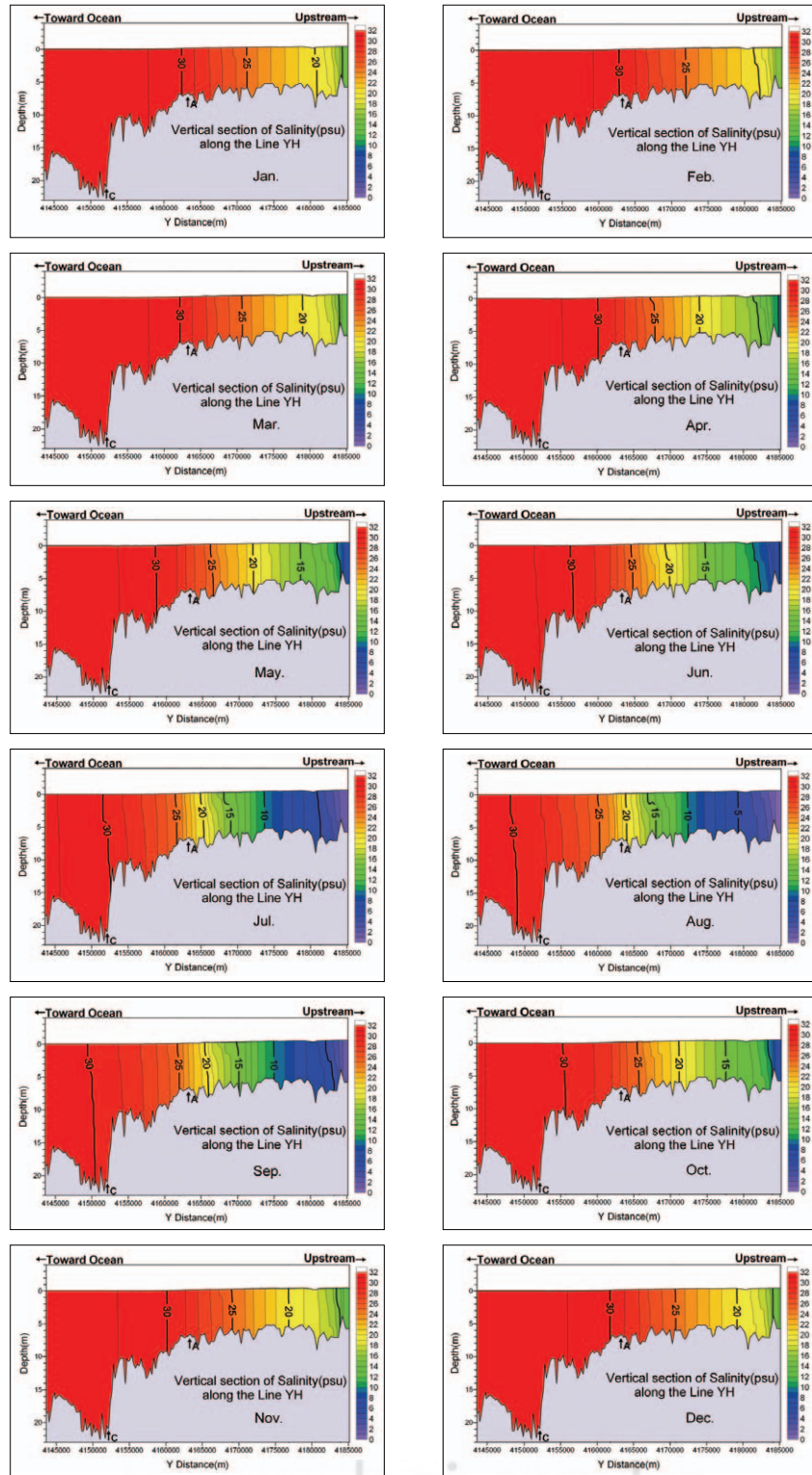


그림 8. Line YH(그림 2 참조)에서 염분의 월별 수직 단면도

에는 염하수로의 하부인 정점 A에 위치하고 있으나, 담수의 유입이 증가되는 4월부터 외해로 확장되어 7월에는 인천과 영종도 사이에 위치한 정점 C까지 그 영향이 나타나며 8월에는 외해역으로 최대로 확장된다. 그 이후 담수의 유입량이 감소되는 9월부터는 그 영향 범위가 축소되어, 12월에는 1월과 비슷한 위치에 30.0psu의 등염선이 위치하고 있다(그림 8).

한편 20.0psu의 등염선은 1, 2, 3월에는 염하수로 상부에 위치하고 있으며, 4월부터 그 범위가 점점 확장되어 8월에는 염하수로의 최하단부인 정점 A까지 그 범위가 확장되며, 그 이후 담수유입량이 감소되는 9월부터 그 영향 범위가 점점 축소되어 12월에는 1월과 비슷한 위치에 20.0psu의 등염선이 위치하고 있는 것으로 나타났다.

#### IV. 결론 및 고찰

3차원 정밀 수치모델을 이용하여 한강하구를 포함한 경기만 연안역에서 해수의 수리학적 거동과 환경조건 변화에 대한 예측을 수행하였다. 경기만에서 고려되어야 할 가장 큰 특성인 조석과 담수유입에 대한 연구를 수행 함으로써 기본적인 해양 물리적인 현상들을 잘 재현하였다.

조석의 경우 각 분조별로 관측치와 모델결과의 진폭과 위상의 상관관계를 비교함으로써 본 연구를 통해 수립된 수치모델이 잘 모의되었음을 확인하였다. 조류의 경우 관심 해역인 인천 연안역의 2개 정점에서 4개 분조에 대한 조류 조화분해를 실시하여 계산된 진폭의 크기가 관측치와 잘 일치함을 밝혔다.

A~D 정점에서의 염분 시계열 자료로부터 정점 B(석모수로)가 정점 A(염하수로 입구)에 비하여 평균적으로 담수유입의 영향을 더 많이 받고 있음을 확인했으며, 이는 기존의 연구 결과와도 잘 부합된다. 염분의 수평분포도로부터 여름철 담수유입으로 인한 저염의 확장범위를 보면 누년 평균된 연평균과 모델결과의 확장범위가 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 담수의 유입이 가장 큰 8월을 기준으로

Line YH를 따라 시간별로 변화하는 염분의 수직단면도(그림 8)로부터 정점 A의 상류부터 정점 C에 이르는 수로를 따라 조석 주기별로 부분혼합형의 하구형태가 형성됨을 확인하였다.

본 연구는 기본적으로 수질 모델을 구축하기 위한 예비 단계의 성격으로, 향후 퇴적물의 이동을 포함한 수질 및 더 나아가 생태계 모델을 구축하기 위한 기본 연구에 그 목적이 있다. 앞으로 추가될 연구과제로 퇴적물 모델로는 점착성, 비점착성, 소류사 형태의 퇴적물을 모의할 수 있으며, 부영양화 모델로 21개의 수질 변수를 모의하며, 그 외에 다른 오염물질 확산이나 기타 확산을 모의할 수 있는 종합적인 모델을 구축하여, 경기만에서의 해양환경 예측 모델링 시스템을 구축하고자 한다. 이를 위해서는 정확하고 신뢰성 있는 현장 관측 자료의 확보가 시급하며, 장기적인 관측 계획의 수립과 연구 기금의 마련이 선행되어야 할 것이다.

#### 참고문헌

- 김나영, 2000, 경기만에서 주요 수질변수들의 분포 특성 및 지화학적 조절요인, 인하대학교 석사학위논문.
- 김영택, 1990, 한강하구 및 경기만에서의 물리학적 특성, 인하대학교 석사학위논문.
- 국립수산진흥원, 1986, 한국 연근해 평년 해황도.
- 김홍선, 1997, 경기만에서의 해수유동과 염분 분포에 대한 수치모델링, 인하대학교 석사학위논문.
- 오재경, 방기영, 2003, 한강유역과 경기만 퇴적환경의 연계성. 한국해양학회지 바다, 8(3), 225-236
- 윤병일, 2006, 경기만 한강하구 조석/조류 전파 특성 및 비선형 천해분조에 대한 수치모델링, 인하대학교 석사학위논문.
- 이석우, 1983, 물리해양학통론, 서울 : 집문당, pp. 161-197
- 이경선, 박 경, 오정환, 2000, 조간대 처리 기법을

- 포함한 3차원 Semi-Implicit 수역학모델개발, 한국해양해양공학회지, 12(2), 70-80.
- 인하대학교 해양과학기술연구소, 1998. 황해해양도집.
- 임효혁, 1999, 경기만에서 수치모델링을 이용한 한강수 유입연구, 인하대학교 석사학위논문.
- 장현도, 1989, 한강종합 개발이후 한강하구 및 경기만에서 퇴적환경의 변화, 인하대학교 석사학위논문.
- 조철호, 1988, 한국 서해 중부 연안역에서 조석전선과 수온, 염분 변동조사. 인하대학교 석사학위논문.
- 조철호, 승영호, 1989. 경기만 일대의 조석전선 조사연구, 황해연구, 2, 51-61.
- 한국해양연구소, 1996. 한반도 주변 조석 조화상수 자료집.
- 한국해양연구소, 2000. 경기만 연안개발에 따른 수리 및 수질 통합평가모델 개발. KORDI Report, BSPE 99762-00-1249-2, 220pp.
- 해양수산부, 국립해양조사원, 2003, 조류도(인천항 및 부근), 서지 제634호.
- Aubrey, D. G. and P. E. Speer, 1985, A Study of Non-linear Tidal Propagation in Shallow Inlet/Estuarine Systems. Part I: Observation. *Estuarine, Coastal Shelf Science*, 21, 185-205.
- Friedrichs, C. T. and D. G. Aubrey, 1988, Nonlinear tidal distortion in shallow well mixed estuaries: A synthesis. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 26, 521-545.
- Hamrick, J. M., 1994, Linking hydrodynamics and biogeochemical transport and transformation models for estuarine and coastal waters. In M. L. Spaulding, K. W. bedford, A. F. Blumberg, R. T. Cheng, & J. C. Swanson (Eds.). *Estuarine and coastal modeling III* (pp. 591-608). New York: ASCE.
- Hansen, D. V. and Rattray, M. Jr., 1966, New dimensions in estuary classification, *Limnology and Oceanography*, 11(3), 319-326.
- Moustafa, M. Z. and Hamrick, J. M., 2002, Calibration of the Wetland Hydrodynamic Model to the Everglades Nutrient Removal Project, *Water Quality and Ecosystem Modeling*, 1, 141-167.
- Mellor, G. L. and Yamada, T., 1982, Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Review of Geophysics and space Physics*, 20, 851-875.
- 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*. SRAMSOE, No. 327, VIMS, VA.
- Park, K., Oh, J. H., Kim, H. S., and Im, H. H., 2002, Case study: mass transport mechanism in Kyunggi Bay around Han River mouth, Korea, *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 128(3), 257-267.
- Smagorinsky, J., 1963, General circulation experiments with the primitive equation, I. The basic experiment, *Monthly Weather Review*, 91, 99-164.