

# 광양만 권역의 해수순환 수치모델 실험

## Numerical Modeling of Circulation Characteristics in the Kwangyang Estuarine System

김백진\* · 노영재\* · 정광영\* · 박광순\*\*

Baek Jin Kim\*, Young Jae Ro\*, Kwang Young Jung\* and Kwang Soon Park\*\*

**요 지 :** 광양만 권역의 해수 순환 양상과 섬진강 하천수 유입으로 발생하는 밀도류 이동 양상을 3차원 수치모델링 실험을 통해 연구하였다. 120 m<sup>3</sup>/s의 섬진강 연평균 유량을 부과하여 실험을 진행하였다. 조위와 유속장, 염분장에 대해 각각 스킬분석(skill analysis)을 이용하여 모델을 검증하였으며, 그 결과 대부분 90%가 넘는 재현율을 보였다. 모델은 조류, 담수유입에 의한 염분장의 변화를 잘 재현하였다. 창낙조시의 유속장의 분포는 1~2.5 m/s의 범위를 보였다. 특히 노랑과 대방, 그리고 창선수로에서 2.0 m/s 이상의 강한 흐름이 발생하는 것으로 나타났다. 지형적 요인에 의해 좌우되는 조석잔차류의 크기는 1~21 cm/s의 범위를 보였고, 섬진강 담수 유입으로 인해 형성된 표층의 밀도류는 여수해만으로 진행되는 12 cm/s의 이하의 남향류와 노랑수로로 진행되는 4 cm/s 이하의 동향류가 발생한다. 특히 여수해만에서의 밀도류 흐름은 서쪽 해안에 편향되어 남하하는 양상을 보였다. 모델 내 경계면에서의 체적 수송량과 밀도류 분포를 분석한 결과, 평수기시 섬진강으로부터 광양만 권역에 유입된 담수는 97.4 m<sup>3</sup>/s (81.5%)가 여수해만으로 유입되며 22.1 m<sup>3</sup>/s (18.5%)가 진주만으로 유입되는 양상을 보였다.

**핵심용어 :** 수치모델링, 광양만, 섬진강, 밀도류, 체적 수송량, 염분

**Abstract :** The ECOM3D is used to study the circulation characteristics and density current from the Sumjin River runoff in the Kwangyang Estuarine System, South Sea, Korea. Annual mean value of 120 m<sup>3</sup>/s was imposed from the Sumjin River. The numerical model results in terms of tidal height, current and salinity field show satisfactory with skill scores over 90%. The current velocity showed the range of 1~2.5 m/s during flood and ebb phases. In particular, very strong flow occur in the narrow Channels of Noryang, Daebang and Changson exceeding over 2.0 m/s. The tidal residual currents in the various locations in the Kwangyang Estuary showed the range of 1~21 cm/s, The density-driven current through the Yeosu and Noryang Channels are about 12 cm/s and 4 cm/s, respectively. The current path through the Yeosu Channel is deflected toward west Bank. Based on budget analysis of the volume flux, the volume flux through the Yeosu Channel and the Noryang Channel were estimated to be 97.4 and 22.1 m<sup>3</sup>/s accounting for the 81.5% and 18.5% of total flux, respectively.

**Keywords :** numerical modeling, KwangYang Bay, Sumjin River, density-driven current, volume flux, salinity

### 1. 서 론

하구 해역은 육지와 해양의 경계에 위치하고 있으며, 강이나 하천으로부터 유입되는 담수에 쉽게 노출되어 있는 해역이다. 이에 따라 하구 해역의 물리학적, 생지화학적 특성은 급격하게 변화하게 된다. 하구 해역의 물리적인 특성은 주로 하천수 유입, 조석, 바람 등에 의해 영향을 받는다. 하구 해역에서는 담수가 유입되면, 해수와 담수의 수온과 염분의 차이, 또는 부유물질의 농도분포 등으로 인해 밀도 변화가 야기된다. 특히 우리나라 하구 해역에서는 밀도차에 의한 밀도류의 형성과 강한 조류의 영향으로 난류혼합이 활발하게 진행되어 전

형적인 부분 혼합의 이중 흐름 구조(Pritchard, 1952)를 보이게 된다.

수치모델을 이용하여 연안 및 하구역에서의 순환과 관련된 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히 하구역에서의 담수 유입 관한 연구는 수많은 학자들에 의하여 연구되었다. Shin et al.(2002)은 금강 하구에서 조석과 담수 유입을 고려한 3차원 수치모델 실험을 통해 금강담수 플룸(plume)의 확장방향, 거리 및 구조를 재현하였고, Jung(2006)은 임진강과 한강의 담수가 유입되는 경기만을 대상으로 조석과 담수유입을 고려한 3차원 수치모델을 이용하여 해수 유동 재현과 담수 유입에 의한 저염의 확장 범위에 대해 연구하였다. 또한 Byun(2011)은

\*충남대학교 해양학과(Corresponding author : Young Jae Ro, Department of Oceanography, College of Natural Sciences, Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea, Tel: +82-42-821-6437, Fax: +82-42-822-8173, royoungj@cnu.ac.kr)

\*\*한국해양과학기술원(Korea Institute of Ocean Science & Technology, Ansan, Kyunggi 426-600, Korea)

담수 방류를 고려한 3차원 수치모델을 이용하여 낙동강 하구역 주변해역의 해수 유동 구조의 변화와 담수의 영향 범위에 대한 연구를 하였다. MacCready et al.(2009)는 수치모델을 이용하여 2004년 여름의 콜럼비아강 하구역의 순환과 플룸을 예측하였으며, Wang et al.(2008)은 발해에서 수치 모델을 이용해 황해 플룸의 계절 변동을 연구하였다. Guo and Valle-Levinson(2008)은 체사피크 만에서 조석과 담수 유입의 영향에 대한 수치모델링 실험을 연구한 바 있으며, Wong et al.(2011)는 필강을 대상으로 연안수의 유입에 따른 해수 순환과 염분장 변화, 물질 수송 양상에 대해 연구하였다.

Lee et al.(2006)은 1994년부터 1999년까지 광양만 북동부 해역에서의 해류관측을 실시했고, 그 결과 노량수로 서측해역에서 반시계방향의 순환이 존재하며 그 중 일부가 노량수로를 통해 진주만으로 유입되는데 이러한 순환은 여름철에 강하고 겨울철에 약화되는 것으로 보고한 바 있다. 또한 Lee and Kim(2007)은 2006년 봄철에 광양만의 남북 방향으로 두 지점에서 ADCP를 이용한 유속관측 연구를 진행하였으며, 광양만 서쪽의 남향류를 동반하는 반시계 방향의 순환이 있음을 보고한 바 있다. Kim et al.(2010)은 진주만의 서쪽인 노량수로와 동쪽인 대방수로에서 2005년부터 2008년까지 장기간 해수 유동 관측을 실시하였다. Han(1995)는 유한차분 격자망을 이용한 조석 수치모델 실험을 통해 광양만과 진주만의 평균 조석의 특성을 연구하였으며, Kwak(2008)은 EFDC 모델을 이용하여 섬진강 하천유출수의 시공간적 혼합특성에 대해 연구하였다. Kang et al.(2011)은 EFDC 모델을 이용하여 광양만과 진주만 해역에 대한 조석과 수온, 염분을 고려한 3차원 해수순환 양상을 재현하고, 섬진강과 남강댐 방류에 따른 밀도성층의 변화에 대해 연구하였다. 강진만에서는 조석과 조류 및 잔차류 특성(Ro, 2007; Ro et al., 2007), 남강댐 방류수가 강진만 해수 순환에 미치는 영향(Ro and Jung, 2010), 바람과 담수 유입에 의한 하계 해수순환 수치모델링 실험(Jung, 2007), 담수 유입에 따른 성층 형성과 성층 파괴 과정(Jung et al., 2010) 및 남강댐 방류수의 거동 특성과 체류시간(Jung et al., 2012) 등의 연구가 진행되었다.

기존의 연구결과들은 주로 노량수로를 경계로 하여 광양만과 진주만 해역을 분리하여 연구를 수행했다(Kwak, 2008; Park et al., 2005; Jung et al., 2010; Ro and Jung, 2010). 본 연구에서는 광양만-여수수로 소영역과 남해수로를 통해 진주만-강진만-사천만의 소영역으로 연결되어 있는 전 영역을 동시에 고려하였다. 이러한 시도는 두 가지 측면에서 대단히 중요하다. 첫째, 서로 연결되어 있는 두 천해만간의 체적 및 물질 수송을 동시에 고려함으로써 보다 정확한 수치 분석이 가능할 것이다. 둘째, 외부 물질(유류, 적조, 방사능 등)이 시스템 내에 우발적으로 유입되었을 경우, 보다 정확한 체류시간 산정과 물질(염분, 산소, 엽록소, 영양염류 등) 이동/확산에 따른 농도장의 변화 과정의 산정과 예측이 가능하다. 그러나 기존의 연구결과들은 광양만과 진주만 해역의 해수유동

특성(Ro, 2007; Ro et al., 2007)과 함께 섬진강 하천수(Kwak, 2008; Kang et al., 2011)와 남강댐 방류수(Jung et al., 2010; Ro and Jung, 2010; Jung et al., 2012)의 혼합특성에 대해 한정되어 있었다.

본 연구에서는 선행 연구와는 달리, 섬진강, 광양만과 진주만, 강진만 해역을 모두 포함한 광역 모델을 구성하였으며, 섬진강 하천수의 연평균 유입량을 지속 부과하여 평수기시 광양만 권역의 유속장, 염분장의 분포 변화를 연구하였다. 광양만 권역의 해수 유동은 크게 보면 조석과, 하천수의 유입에 따른 밀도류에 의해, 표층에서의 유속은 바람장에 의해 많은 영향을 받는다. 특히 섬진강 하천수의 유입량은 계절별로 변동성이 심하며, 그에 따른 주요 수로에서의 체적 수송량 또한 변동이 심할 것으로 추측된다. 각 경계면에서의 체적 수송량을 계산하였으며, 광양만 권역에 유입된 섬진강 하천수의 거동 양상을 파악하고자 하였다.

## 2. 수치모델과 구성

### 2.1 연구해역 특성

연구해역인 섬진강-광양만(Sumjin River-Kwangyang Bay, SKY) 권역은 우리나라 남해안의 중앙에 위치하고 있으며, 남해도를 기준으로 서측의 광양만은 여수수로를 통해 외해와 연결되어 있고, 동측의 진주만과 사천만 그리고 강진만은 창선도 북측의 대방수로와 남측의 창선수로를 통해 외해로 연결되어 있다. 광양만은 남해를 향해 열려있는 여수해만에서 북쪽으로 가면서 좁아지다가 광양제철(POSCO)을 중심으로 묘도가 있는 서부 지역과 남해도가 있는 동부 지역으로 분리된다. 여수해만에서 남해도 서쪽 해안에 근접하여 형성된 수심 20m 이상의 골은 만의 상류로 가면서 광양제철을 사이에 두고 'Y'자 형태로 분기되며 그 중앙부는 30m 이상으로 깊다. 한편, 진주만 동측의 대방수로 부근의 수심은 20m 이상이며, 창선도 서측 강진만 해역의 수심은 5m 이내로 얕은 수심 분포를 보인다(Fig. 2). 또한 광양만과 사천만 북측은 섬진강과 남강댐이 각각 연결되어 담수의 영향을 직간접적으로 받는 해역이다. Youngsan River Flood Control Office(2014)에서 제공되는 2009~2011년의 수문조사연보 자료 중 섬진강 하구와 가장 근접한 하동2 관측소의 일유량표를 분석한 결과, 관측된 연평균 유량은 각각 145.78 m<sup>3</sup>/s와 164.39 m<sup>3</sup>/s 그리고 117.99 m<sup>3</sup>/s로 나타났다. 따라서 광양만은 연평균 약 120~160 m<sup>3</sup>/s의 섬진강 하천수가 지속적으로 유입되며 특히 겨울철 30~95 m<sup>3</sup>/s, 여름철 300~400 m<sup>3</sup>/s로 그 유입량이 시기별, 계절별로 변동성이 심하여 담수유입에 따른 해양 환경 변화를 예측하기가 매우 어려운 해역이다.

Fig. 1은 연구해역에서 취득한 해수면 변동, 유속, 수질 관측 결과와 체적 수송량 계산을 위한 횡단면, 그리고 연구해역 내 주요 정점의 위치를 나타내었다. 국립해양조사원(KHQA)의 여수 조위관측소의 자료를 해수면 변동자료로 환

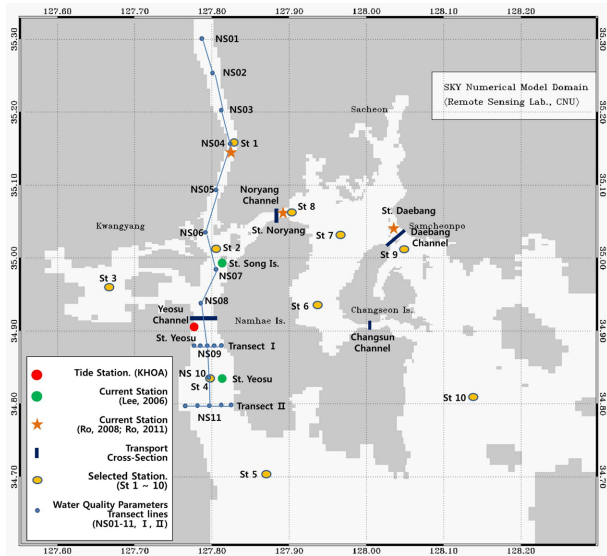


Fig. 1. Map for the study area with locations for various stations and selected points.

용하였으며, 유속 자료는 RCM9을 이용한 광양만 유속자료(Lee et al., 2006)와 노영재 교수 연구팀의 ADCP를 이용한 노랑 및 대방수로 유속관측자료(2008, 2011년)를 사용하였다. 또한 남북 방향의 총 11개의 정점과 여수 해만 내 동서 방향의 10개의 정점에서 2010년부터 2012년까지 수질측정기(YSI6600)를 이용하여 정기적(2개월 간격)으로 수질 관측을 진행하였다. 체적 수송량을 산정하기 위해 광양만 권역의 주요 수로를 기준으로 횡단면의 위치를 결정하였다.

## 2.2 초기 및 경계조건과 모델 입력 자료

본 연구에서는 광양만 권역에서의 해수 유동, 밀도류에 대해 ECOM-3D(Blumberg, 2002)를 이용한 3차원 수치모델링 실험을 통해 광양만 권역의 해수 순환의 변화에 대해 연구했다. 모델의 경계는 육지도를 중심으로 동쪽과 남쪽의 개방경계를 수립하였고, 수평 격자의 간격은 동서 방향으로 200~800 m, 남북 방향으로 100~800 m를 사용하여 167×180의 격자망을 구성하였다(Fig. 2). 격자는 해수 유동 및 염분 변화의 재현을 효과적으로 하기 위해 폭이 좁은 수로의 격자 크기를 100~200 m로 설정하였다(Fig. 2). 수직 방향의 경우 총 9개의 sigma level을 설정하였으며, 특히 표층과 저층 부분의 sigma level을 각각 3개 level로 집중 구성하여 밀도차에 따

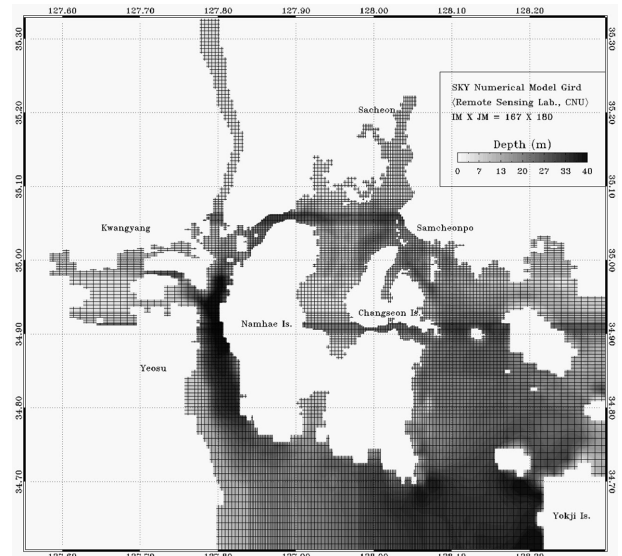


Fig. 2. Model grid system with bathymetry for the numerical model for the KwangYang Estuarine System.

른 수직 해수유동과 바닥 마찰 효과에 대해 효과적으로 재현할 수 있도록 구성하였다.

모델의 실험 조건은 Table 1과 같이 구분하였다. 본 연구의 사용된 시간간격은 external mode를 2초, internal mode를 20초를 사용하였다. 모델 모의 기간은 안정화 기간 3일을 포함하여 총 18일을 모의하였고, 결과는 1시간 간격으로 분석하였다. S10TN은 조석만 부과한 실험으로, 남측과 동측 개방경계의 각 격자점에 주요 4대 분조( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ )의 조화상수를 부과했다. 부과된 조위는 NAO.99Jb모델(Matsumoto et al., 2000)의 결과를 이용했다. 또한 수질관측 자료(2010~2012년, 총 26회)를 이용하여 평균 수온과 염분을 각 수층에 동일하게 부과하였다. S10TDA는 S10TN과 동일한 외력에 가상 담수 유입량을 추가로 부과하여 밀도류를 재현한 것이다. 본 연구해역은 시기별 담수 유입량의 변동성이 큰 해역이다. 따라서 전반적인 해수유동 양상을 파악하기 위해서는 연평균 유입량을 부과하는 것이 효과적일 것으로 판단된다. 이에 가상 담수 유입량은 수문조사연보의 하동2 관측소 일일량 자료를 이용하여, 연평균 값인  $120 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 유량을 북쪽 개방경계의 격자점에서 지속적으로 부과하였다. 부과되는 가상 담수의 초기 조건역시 수질관측 결과를 이용하여  $18^\circ\text{C}$ , 0 psu로 부과하였다.

Table 1. Model run cases for the numerical experiments in the SKY system in Feb. 2008

Case	Forcings	Discharge rate ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Remark	Initial condition	
				Temperature ( $^\circ\text{C}$ )	Salinity (psu)
S10TN	Tide	0	Tidal elevation and current only for the period of January 29, february 15, 2008.	17	32
S10TDA	Tide+Discharge(Annual)	120	S10TN plus the SJ River runoff to simulate the impact of the fresh water and density current .	17	32
S10TDD	Tide+Discharge(Dry)	30		7	32
S10TDF	Tide+Discharge(Flood)	400		21	32

### 3. 수치모델링 결과

#### 3.1 실험 결과 검증

본 수치모델 실험은 조석과 섬진강 하천수의 유입의 영향을 고려한 실험으로 해수면 변동과 조류타원, 그리고 염분장에 대한 검증은 스킬분석(Skill analysis)을 통해 시행하였다. 모델의 검증에 이용된 해수면 변동 자료는 국립해양조사원(KHOA)에서 제공하는 여수조위검조소의 2008년 관측 자료이며, 조류타원 자료는 광양만 북동부 해역의 현장 유속 관측 자료(이, 2006)와 2008년에 관측한 노량수로의 현장 유속 관측 자료이다. 염분장 검증에 이용된 자료는 동서 방향, 남북 방향의 수심에 따른 현장 관측 자료이다. 모델 결과의 정확도를 정량적으로 추정하기 위해 Wilmott(1981)가 제안한 평균 제곱근 오차(Root mean square Error, RMSE)를 식(1)과 같이 정의하여 해수위와 유속장 시계열 자료에 대해 비교하였으며, 관측 최대값과의 비율을 통해 식(2)와 같이 스킬 점수(Skill score,  $SS_m$ )를 계산하였다. 또한 Martin and McCutcheon(1999)이 제안한 상대오차(Relative error, RE)를 이용하여 스킬 점수(Skill score,  $SS_{re}$ )를 식(3)과 (4)와 같이 정의하여 해수위와 조류타원, 그리고 각 정점별 염분(S)에 대해 계산했다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{Obs(i)} - X_{Model,i})^2}{n}} \quad (1)$$

$$SS_m = [1 - RMSE/Max(X_{Obs})] \times 100 \quad (2)$$

$$RE = abs[(X_{Model} - X_{Obs})/X_{Obs}] \quad (3)$$

$$SS_{re} = [1 - RE] \times 100 \quad (4)$$

Table 2는 여수 조위검조소의 해수위 자료와 여수수로, 노량수로에서 관측한 유속 시계열 자료를 모델과 비교한 결과이다. 평균 제곱근 오차를 통한 스킬 점수 계산 결과, 해수위 자료는 92.5%의 스킬 점수를 보였다. 여수수로의 유속자료는 동서 성분이 70.7%, 남북 성분은 80.0%의 스킬 점수를 보였다. 또한 노량수로는 85.6%, 78.3%의 스킬 점수를 보였다.

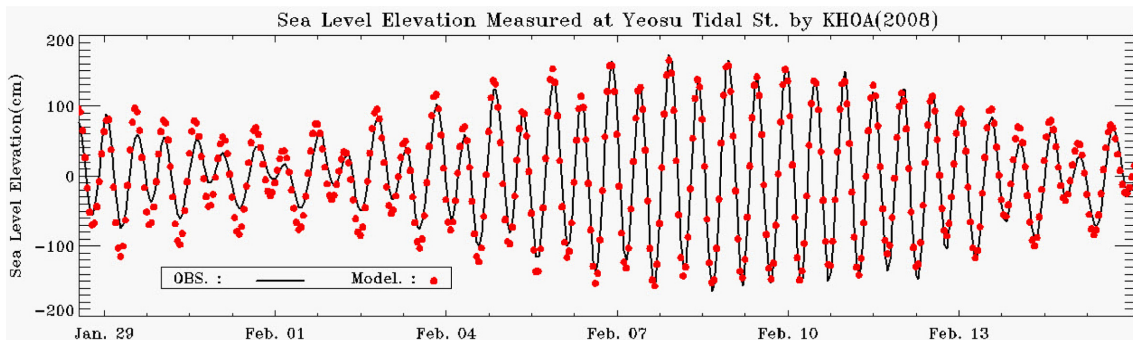
Fig. 3은 여수조위검조소의 조위관측 자료와 모델 결과를 시계열로 나타낸 것이며, Fig. 4와 5는 각각 여수수로와 노량수로에서의 유속관측 자료와 모델 결과를 시계열로 나타낸 것이다. 조위에 대한 비교 결과, 진폭과 위상 모두 관측 자료와 모델결과가 비교적 일치하는 모습을 보였다. 다만 소조시의 진폭은 모델 결과가 관측 자료보다 다소 크게 나타났다. 유속의 경우 노량수로의 남북 성분을 제외한 나머지의 진폭과 위상이 비교적 일치하는 모습을 보였다.

Table 3a에는 해수위 자료와 모델의 조화분석 결과 중 4대 분조에 대해 상대오차를 통한 스킬 점수를 나열하였다. 진폭(Amplitude)은 89.8%인  $O_1$ 을 제외하고 모두 90% 이상의 점수를 보였고, 지각(Phase)은 모두 93% 이상을 보였다. Table 3b는 여수수로, 3c에는 노량수로의 4대 분조의 조류타원 스킬 점수를 나열한 것으로, 여수수로의 경우 4대 분조 장축(Semi-major Axis, Sema)의 진폭이 85% 이상의 점수를 보였으며, 지각은 88%이상, 각도(Inclination, Inc.)는 97%이상을 보였다. 노량수로의 경우 장축이 86% 이상, 지각과 각도가 각각 89%와 97% 이상으로 높은 스킬 점수를 보였다.

모델이 재현한 염분장의 신뢰수준을 판단하기 위하여, 관측 자료와 모델의 각 수층별 염분값을 식 (4)의 스킬 점수 계산을 통해 정량적으로 비교하였다. Fig. 1에 표시된 수질관측 정점 및 단면에서의 염분장 스킬 점수는 Table 4과 같다. 비교에 사용된 관측 자료는 본 연구의 모델 조건(담수 유입량)과 가장 유사한 시기의 결과인 2011년 8월 20일의 정점별 수직

**Table 2.** Root-mean-square errors of difference between computed and measured tidal height and current

Model Validation	Tidal Height at Yeosu (cm)	Current at Yeosu (cm/s)		Current at Noryang Channel (cm/s)	
		U-comp.	V-comp.	U-comp.	V-comp.
Max Value of Measured Data	172.4	21.5	64.5	155.8	48.6
Root mean square error (RMSE)	12.9	6.3	12.9	22.4	10.6
$SS_m$ (%)	92.5	70.7	80.0	85.6	78.3



**Fig. 3.** Time series of sea level elevation measured at the Yeosu tidal station compared to the model result.

관측 결과(Fig. 6)를 사용하였으며, 관측 정점과 동일 위치의 모델 결과(Fig. 7)를 이용하였다. 관측치와 모델 결과를 비교하기 위해 6시간 주기의 이동평균법을 사용하였다. 그 결과 남북 횡단면(NS Section)의 경우 표층에서 88~99%의 점수를 보였으며, 나머지 모든 수층에서 92% 이상을 보였다. 동서 횡단면(Transect I, II)의 경우 전체 수층에서 대부분 95% 이상의 높은 점수를 보였다.

이상의 평균 제곱근 오차와 상대오차를 통한 스킬분석 결과를 통해 모델의 조위와 유속장 그리고 염분장 재현이 신뢰할만한 수준이라고 판단된다.

### 3.2 유속장 분포 특성

Fig. 8의 a와 b는 S10TDA의 표층 최강 창조시와 낙조시의 유속장을 보여준다. 최강 창조시 남해도 서측에서는 여수

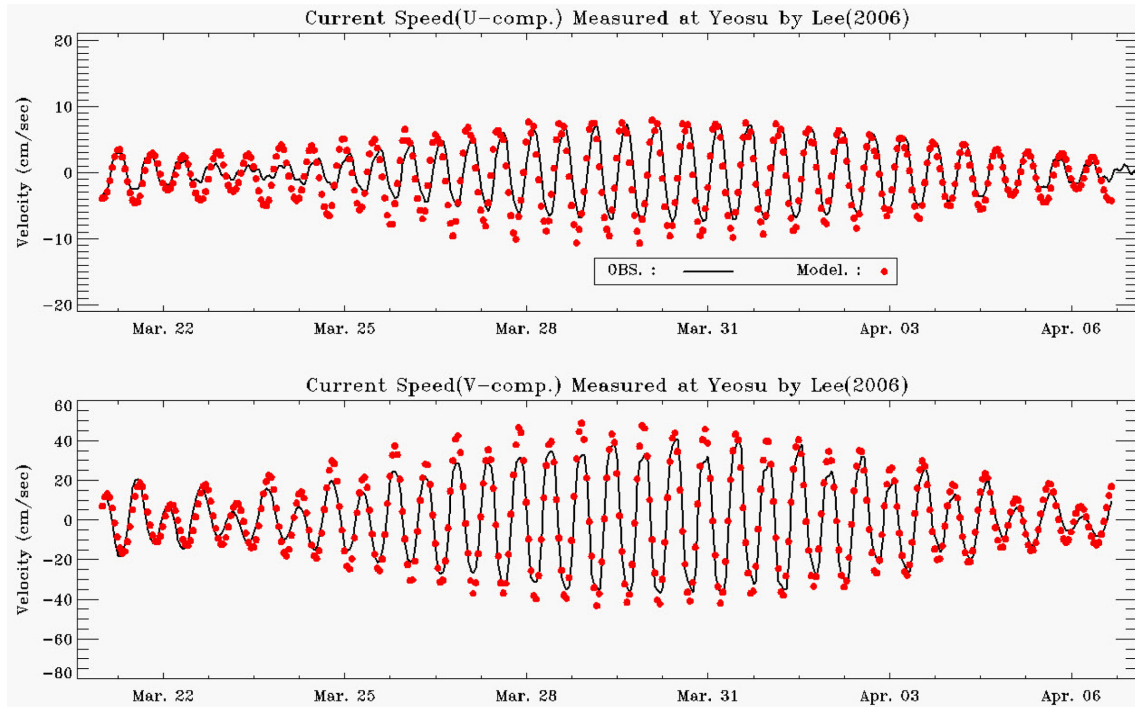


Fig. 4. Time series of tidal current speed measured at Yeosu Channel (a) U-comp. (b) V-comp. compared to model results.

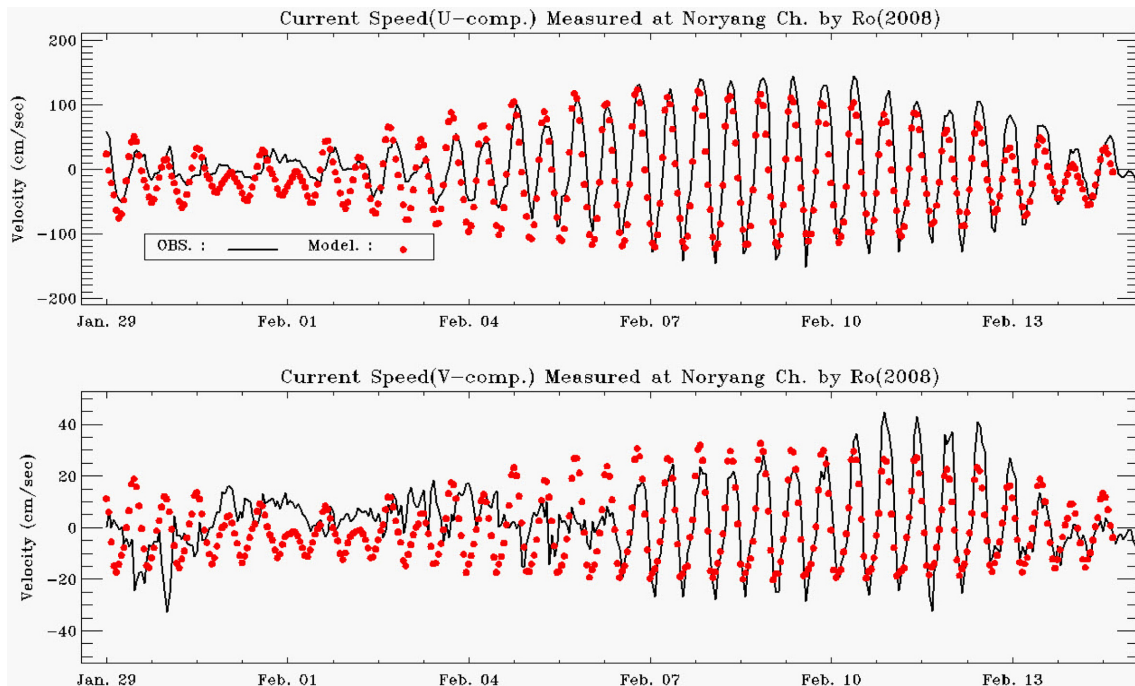


Fig. 5. Time series of tidal current speed measured at Noryang Channel (a) U-comp. (b) V-comp. compared to model results.

**Table 3a.** Skill scores for sea level prediction for Model run S10TDA at Yeosu

Sea level (cm)		Obs.	Model	SS <sub>re</sub> (%)
M <sub>2</sub>	Amp.	93.3	101.7	91.0
	Phase	226.7	202.0	93.1
S <sub>2</sub>	Amp.	46.7	44.0	94.2
	Phase	255.8	235.8	94.5
K <sub>1</sub>	Amp.	22.7	22.9	98.9
	Phase	167.7	157.4	97.1
O <sub>1</sub>	Amp.	13.9	12.5	89.9
	Phase	128.1	131.1	99.2

**Table 3b.** Skill scores for velocity components for Model run S10TDA in terms of tidal ellipses at Yeosu

Velocity (cm/s)		Obs.	Model	SS <sub>re</sub> (%)
M <sub>2</sub>	Sema	22.5	25.0	88.9
	Phase	195.4	173.8	94.0
	Inc.	99.9	99.3	99.8
S <sub>2</sub>	Sema	11.7	13.4	85.5
	Phase	232.0	213.1	94.7
	Inc.	108.0	98.1	97.2
K <sub>1</sub>	Sema	2.7	3.0	89.3
	Phase	134.0	130.1	98.9
	Inc.	92.9	92.3	99.8
O <sub>1</sub>	Sema	3.0	2.6	85.3
	Phase	101.9	58.9	88.0
	Inc.	94.4	90.0	98.8

수로를 통해 1 m/s 이하의 유속으로 북향하다가 POSCO 남측을 기점으로 광양만과 노량수로로 분기한다. 이 중 POSCO 동측을 따라 북향한 흐름은 각각 섬진강과 노량수로로 분기하여 진행한다. 노량수로에서 2 m/s 이상의 강한 유속으로 진행한 흐름은 진주만으로 진입한다. 남해도 동측의 경우 대방 수로를 통해 2.5 m/s 이상의 강한 흐름이 진주만으로 진행하며, 창선수로를 통해서 진행되는 흐름 또한 2 m/s 이상의 빠른 유속으로 강진만으로 진행한다. 진주만 중앙 해역에서는 노량수로를 통해 진입한 흐름과 대방수로를 통해 진입한 흐름이 수렴하는 양상을 보인다. 최강 낙조시 섬진강 하구에서 2.5 m/s 이하의 강한 유속으로 남하하는 흐름과 노량수로에서

**Table 3c.** Skill scores for velocity components for Model run S10TDA in terms of tidal ellipses at Noryang Channel

Velocity (cm/s)		Obs.	Model	SS <sub>re</sub> (%)
M <sub>2</sub>	Sema	76.4	86.1	87.3
	Phase	220.9	183.8	89.7
	Inc.	9.3	16.9	97.9
S <sub>2</sub>	Sema	48.6	43.2	89.0
	Phase	258.1	224.1	90.5
	Inc.	12.9	19.7	98.1
K <sub>1</sub>	Sema	11.1	11.1	99.9
	Phase	155.4	114.8	88.7
	Inc.	8.0	18.4	97.1
O <sub>1</sub>	Sema	5.0	5.7	86.5
	Phase	124.3	94.8	91.8
	Inc.	4.0	14.3	97.1

**Table 4.** Skill score for Salinity at two vertical transects for Model run S10TDA

SS <sub>re</sub> (%)	North to South section					Transect I · II					Entire
Depth(m)	NS8	NS9	NS10	NS11	EW1	EW3	EW5	EW6	EW8	EW10	Average
0	95.4	96.6	96.9	95.8	98.8	95.7	96.2	96.5	98.7	96.7	96.7
-1	90.3	97.6	97.5	96.1	93.4	90.5	94.3	97.3	98.2	99.0	95.4
-2	99.6	93.3	98.1	95.7	93.5	95.3	97.3	96.7	95.8	98.8	96.4
-3	88.2	94.6	98.6	96.0	92.9	96.4	98.6	96.4	95.8	99.0	95.7
-4	96.0	94.8	98.6	96.1	94.4	97.0	97.9	97.2	95.9	97.6	96.6
-5	96.1	95.0	97.5	96.2	99.5	96.5	98.0	98.3	96.1	97.8	97.1
-6	94.6	96.5	97.3	96.3	99.2	96.8	98.0	98.6	96.4	98.2	97.2
-7	94.7	96.8	97.8	96.6	97.0	96.8	97.9	98.4	96.5	98.3	97.1
-8	94.5	97.3	97.9	95.4	97.1	97.0	97.4	99.6	98.1	98.4	97.3
-9	97.0	97.8	99.4	94.4	94.8	98.5	97.3	97.3	99.7	98.0	97.4
-10	96.7	99.1	99.3	94.0	95.3	99.9	97.2	96.8	99.3	97.8	97.5
-11	96.4	99.6	98.5	92.2	95.5	99.2	96.9	96.3	96.9	97.4	96.9
-12	96.1	99.4	97.7	92.1	-	98.3	96.9	-	96.4	97.2	96.8
-13	95.7	98.5	96.8	-	-	-	96.8	-	-	-	97.0
-14	95.6	97.5	-	-	-	-	96.2	-	-	-	96.4

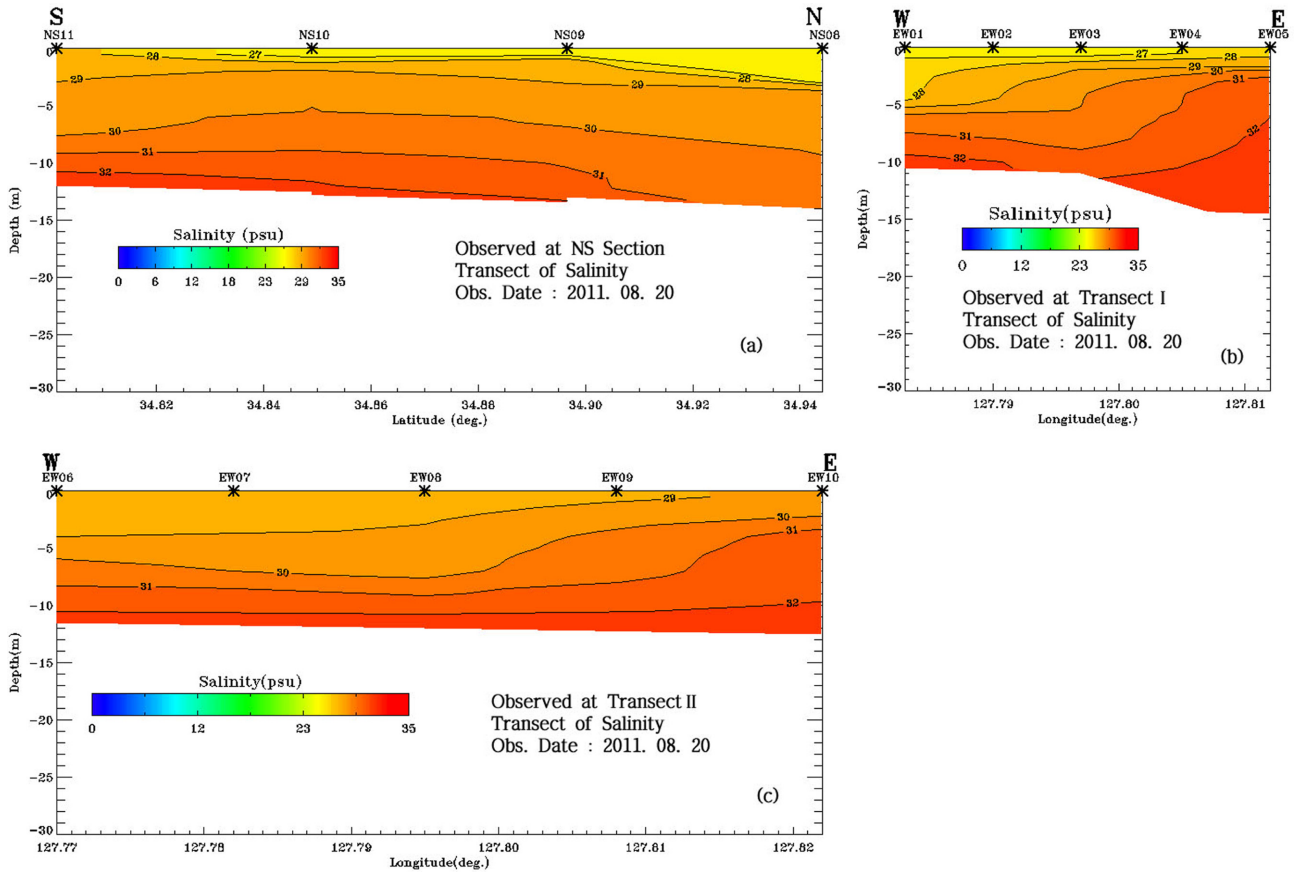


Fig. 6. Transects of observed salinity along (a) north-south and (b) Transect I and (c) Transect II by field measurements in August, 2011.

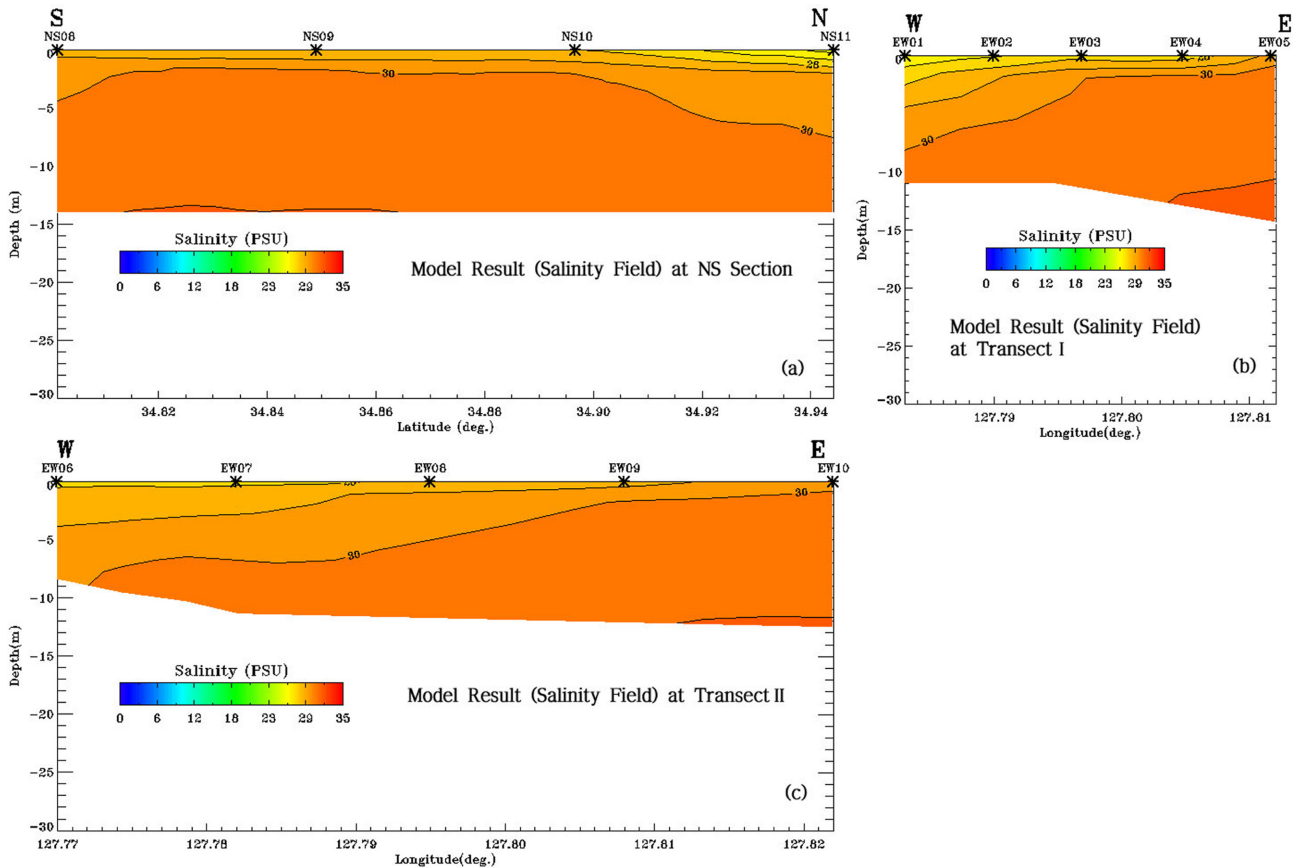


Fig. 7. Transects of salinity along (a) north-south and (b) Transect I and (c) Transect II by Model Run S10TDA.

2 m/s 이하의 유속으로 서향하는 흐름이 발생하며, 이 두 흐름이 POSCO 동측에서 만나 여수수로를 통해 1 m/s 이하의 흐름으로 남하한다. 진주만에서는 중앙 해역의 서측인 노량수로 입구 부근에서 창조시와는 반대로 발산하는 양상의 흐름이 보이며, 이 흐름은 각각 서쪽과 동쪽으로 이어져 노량수로와 대방수로를 향해 흐른다. 대방수로를 통해 외해로 2.5 m/s 이상의 강한 흐름이 진행된다. 대방수로와 창선수로를 통해 외해로 진출한 흐름들은 창선도 동측과 남해도 동측 해역을 따라 남하하는 흐름으로 나타난다.

Fig. 9a와 b는 저층에서의 최강 창조시와 최강 낙조시의 유속장을 보여준다. 최강 창조시 여수수로로 북향하는 0.5 m/s 이하의 약한 흐름이 발생한다. POSCO 남측을 기점으로 분기한 흐름은 노량수로로 1 m/s 이하의 유속을 보이며, 진주만으로 진행된다. 대방수로를 통해 북서향한 흐름 또한 1 m/s 이하의 유속을 가지며, 진주만 중앙부에서 노량수로를 통해 진입한 흐름과 수렴하는 양상을 보인다. 최강 낙조시의 경우 POSCO 동측 해역에서 1 m/s 이하의 남향류가 발생하며, 여수수로를 통해 0.5 m/s 이하의 흐름이 발생한다. 진주만 중앙

부에서 발산한 흐름은 대방수로를 통해 1~1.5 m/s의 유속으로 외해로 흐르는 양상을 보인다.

### 3.3 염분장 분포 특성

Fig. 8c와 8d는 S10TDA의 표층 염분 분포를 나타낸 결과이며, Fig. 9c와 9d는 저층 염분 분포의 결과이다. 염분장의 변화가 나타나지 않은 외해역을 제외하고 광양만 및 여수수로와 진주만과 사천만, 강진만 해역을 확대하여 나타내었다. 표층과 저층의 염분 분포 특성으로 보아 POSCO 동측 해역까지는 전 수층에서 섬진강 하천수의 직접적인 영향을 받아 염분이 크게 감소한 양상을 보였으며, 주요 수로인 여수수로와 노량수로에서는 표층에서 염분이 소폭 감소하였고, 저층에서는 변화가 나타나지 않았다. 특히 표층에서 POSCO 동측 해역은 17일간의 모델 결과 중 최소 19.4 psu, 평균 28.1 psu의 염분 분포를 보였으며, 저층 경우 최소 25.7 psu, 평균 2.5 psu의 염분 감소가 나타났다. 여수수로 및 여수해만 내의 염분은 표층에서 최대 3 psu, 평균 29.5 psu의 분포를 보였다. 노량수로는 최소 31 psu, 평균 31.6 psu의 염분 분포를 보였

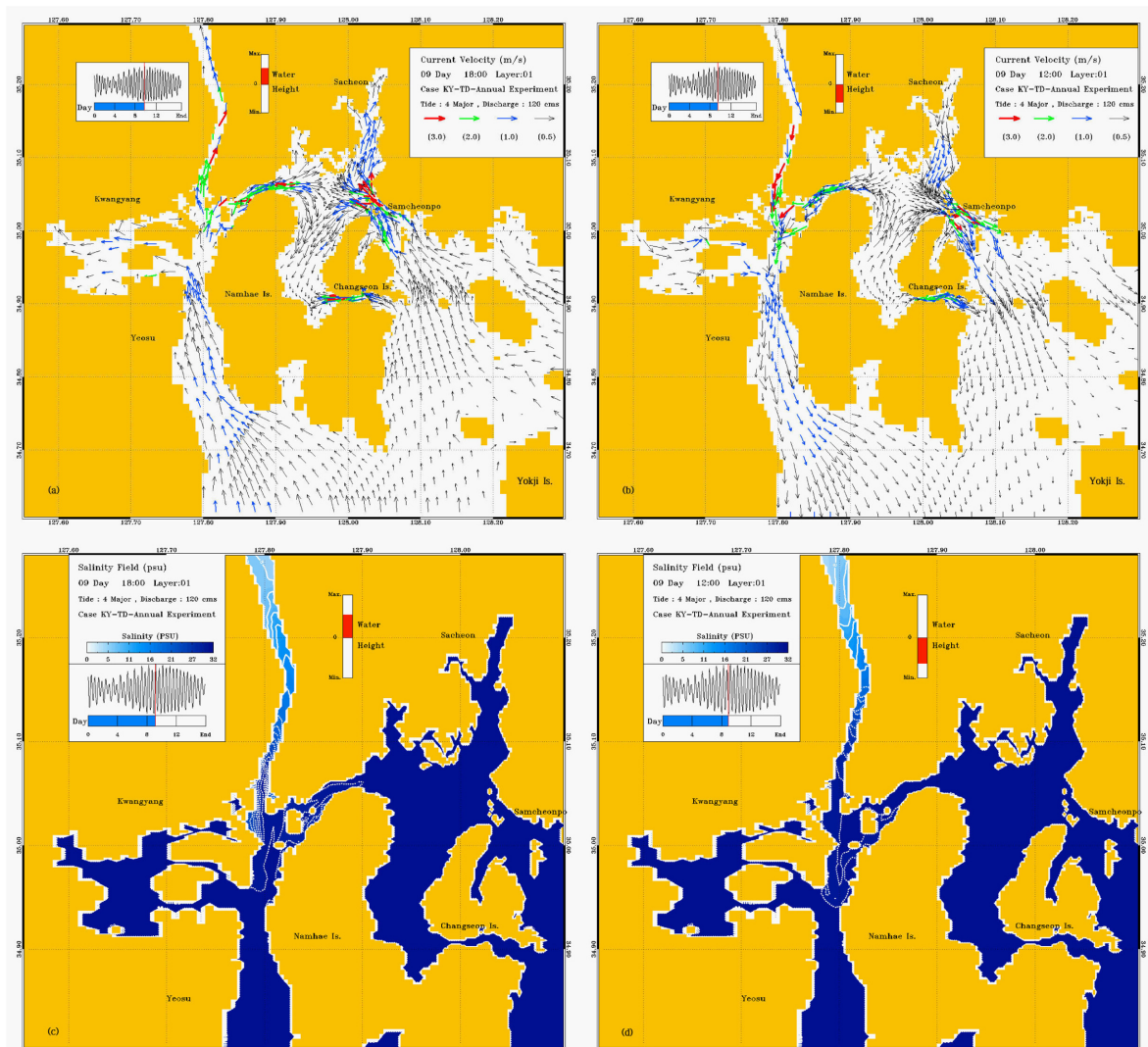


Fig. 8. Horizontal distribution of surface current velocity and salinity distribution (a,c) at flood, (b,d) ebb, by Model Run S10TDA.

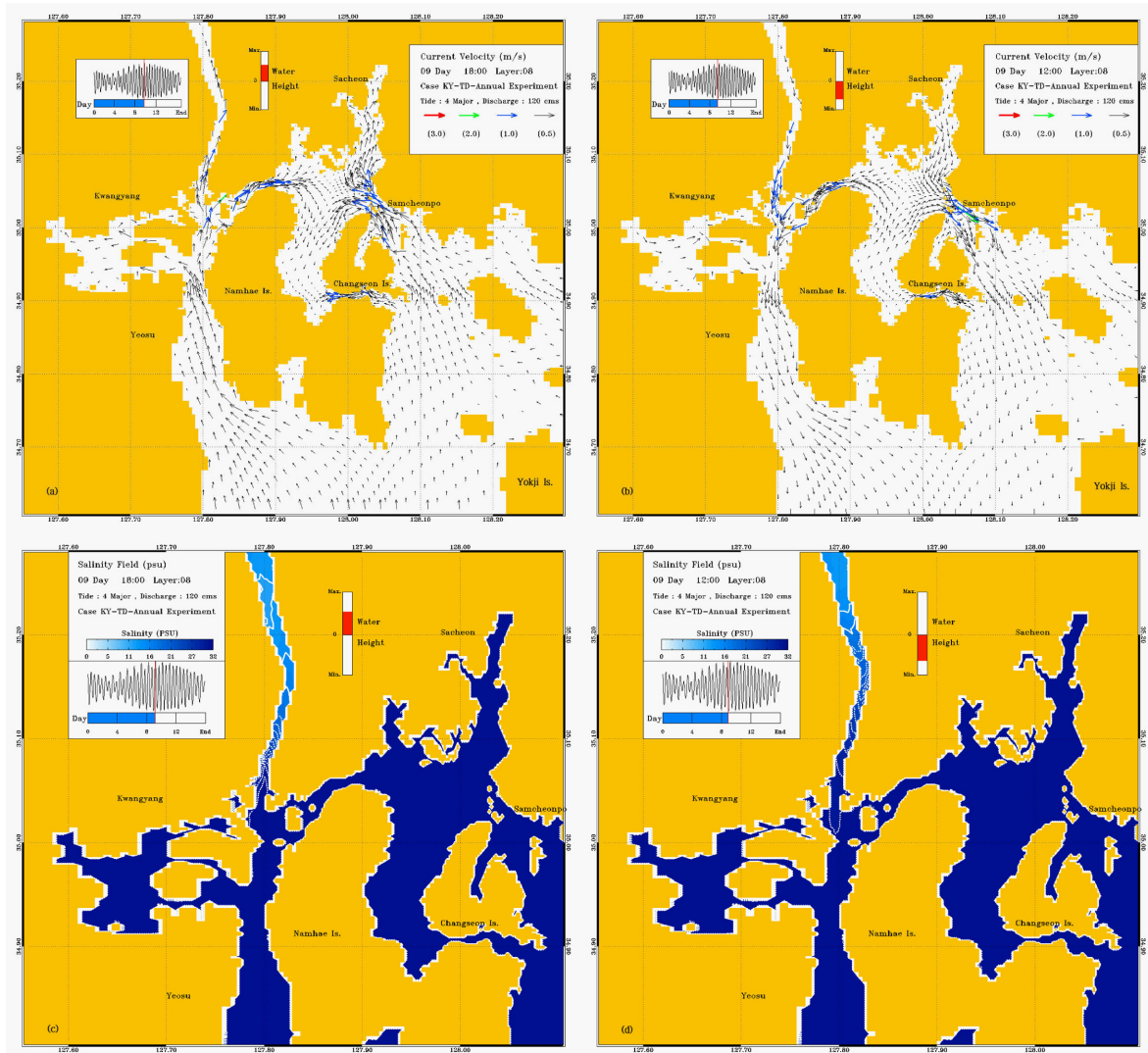


Fig. 9. Horizontal distribution of bottom current velocity and salinity distribution (a,c) at flood, (b,d) ebb, by Model Run S10TDA.

다. Fig. 7b와 c의 동서 방향 단면 염분장 결과를 살펴보면, 표층에서 동쪽 해역보다 서쪽에서 염분이 낮게 분포하고 있는 양상을 볼 수 있으며, 염분 값이 약 3 psu 정도의 차이를 보이고 있다. 이 같은 염분장의 분포 특성으로 볼 때, 섬진강 하천수의 유입으로 인한 염분 플럼의 분포는 여수수로의 서쪽 방향으로 휘어진 양상을 보인다고 할 수 있다.

### 3.4 밀도류 분포 특성

Fig. 10은 광양만 권역의 조석 잔차류와 밀도류의 분포 및 평균 염분장 분포를 나타낸 것이다. Pawlowicz et al.(2002)가 제안한 T\_TIDE Tool을 이용하여 모델 내 모든 격자점에서의 조석 예측값을 계산하였으며, S10TN의 유속결과에서 조석 예측값을 제거하여 조석 잔차류(Fig. 10a)를 계산하였다. 조석 잔차류와 밀도류가 합성된 Fig. 10b의 결과는 S10TDA의 결과에서 조석 예측값을 제거하여 계산하였으며, Fig. 10c의 밀도류 결과는 담수 유입을 제외한 모든 효과를 제거하기 위해 S10TN의 결과에서 S10TDA의 결과를 제거하여 계산하였다. 조석 잔차류의 결과인 Fig. 10a의 경우 남해도 서측 해역에서 북향류

가 우세하게 나타난다. 여수수로 부근에서 시계방향의 외류가 존재하며, POSCO의 북동쪽 해역인 섬진강 하구에서는 반시계 방향의 외류가 나타난다. 노량수로에서는 진주만 방향으로 동향하는 조석 잔차류가 나타난다. 대방수로에서는 조석 잔차류가 매우 복잡하게 나타난다. Fig. 10b는 조석 효과를 제거한 결과로 연구 해역의 물질 순이동의 양상을 확인 할 수 있다. 섬진강으로부터 여수수로를 지나 남쪽 개방경계 부근까지 남향하는 강한 흐름이 분포하고 있으며, 노량수로의 동쪽 입구에서 진주만, 대방수로로 이어지는 흐름이 나타난다. 또한 대방수로를 통해 외해로 진출하는 흐름이 강하게 나타난다. 조석 효과와 조석 잔차류를 모두 제외한 결과인 Fig. 10c는 섬진강 하천수의 유입에 따른 순수한 밀도류의 분포를 보여준다. 섬진강 하류로부터 진행한 밀도류는 POSCO 동측 해역에서 여수수로 부근으로 향하는 남향류와 노량수로로 진행하는 동향류로 분기하며, Fig. 10b의 결과와 마찬가지로 남쪽 개방경계까지 남향류가 지속되지만 그 흐름의 세기가 다소 약하게 나타난다. 노량수로를 통해 진주만으로 진행한 흐름은 바로 대방수로까지 이어지며, 여수수로로 진행하는 흐름보다 약하게 나타난다.

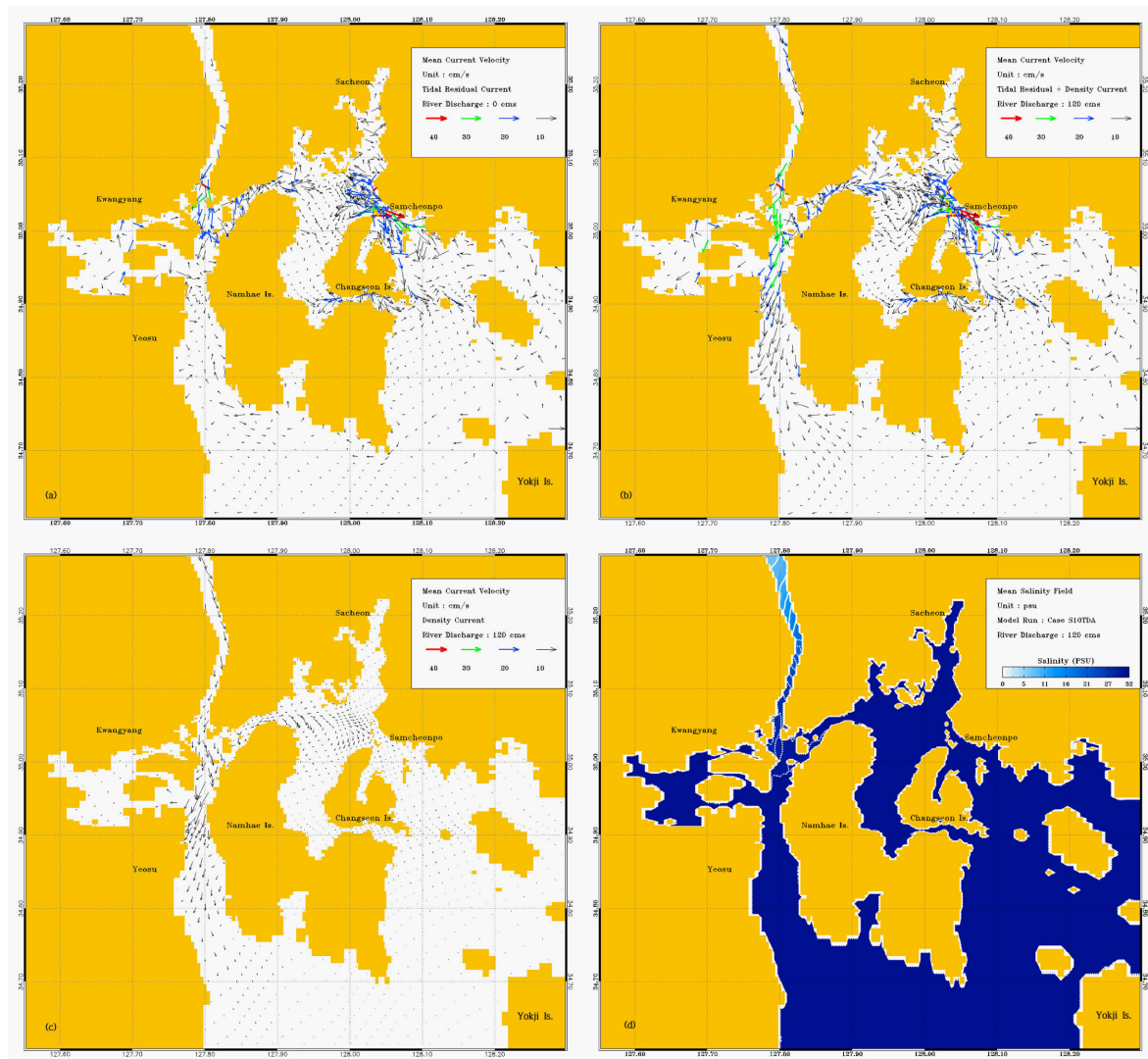


Fig. 10. Horizontal distribution of (a) mean tidal residual current, (b) mean tidal residual current plus density-driven current and (c) mean density-driven current and (d) mean salinity field by model run S10TN and S10TDA.

Table 5. Statistics of the residual current velocity for Model run S10TN and S10TDA

Comp.	St.	Tidal Residual Current (cm/s)				Tidal Residual Current + Density-driven Current (cm/s)				Density-driven Current (cm/s)			
		Ave.	sd	Min	Max	Ave.	sd	Min	Max	Ave.	sd	Min	Max
u-comp.	1	0.6	2.6	-13.3	12.3	-0.9	5.3	-24.2	15.8	-2.3	5.0	-24.4	14.4
	2	-4.5	2.8	-16.0	4.0	-5.8	9.9	-63.8	41.5	3.3	22.7	-43.9	54.5
	3	0.1	0.7	-2.7	3.1	-2.7	4.1	-20.6	8.0	-2.7	5.6	-32.8	6.7
	4	0.2	0.4	-0.7	1.7	2.0	3.0	-4.4	16.1	1.6	6.6	-15.6	24.2
	5	0.6	0.4	-0.4	1.5	-6.2	4.1	-18.7	7.3	-7.1	9.1	-22.2	24.9
	6	-0.4	0.3	-1.2	0.6	-0.3	3.2	-8.7	8.2	0.2	5.2	-11.0	9.8
	7	-1.2	0.5	-2.4	0.2	-6.1	6.9	-30.4	12.6	-3.4	11.3	-37.4	22.9
	8	1.1	1.8	-3.9	5.9	19.7	5.3	2.6	34.0	16.8	14.3	-9.2	50.7
	9	-6.8	2.7	-15.6	-2.1	-7.2	2.9	-16.3	2.2	6.1	4.5	-4.6	15.4
	10	-0.7	0.2	-1.2	-0.2	-1.2	2.0	-6.2	4.0	0.5	3.1	-10.4	7.5
v-comp.	1	5.6	12.0	-23.3	36.7	-16.3	12.4	-51.4	20.8	-28.0	4.7	-57.4	-28.7
	2	-21.5	6.5	-39.2	4.9	-60.5	25.7	-137.9	5.6	-16.8	17.1	-50.2	36.7

Table 5. Continued

v-comp.	3	-0.3	0.3	-1.2	0.7	6.4	3.9	-7.2	19.1	6.9	7.5	-8.9	27.1
	4	1.7	0.7	0.1	3.3	-38.0	6.7	-60.4	-20.3	-41.7	9.8	-63.6	-23.1
	5	-0.8	0.4	-2.0	0.6	-8.4	5.2	-23.3	10.4	-8.0	12.0	-36.9	10.8
	6	-0.8	0.9	-3.3	2.1	-5.5	3.1	-12.3	4.0	-3.9	4.5	-16.5	3.9
	7	3.0	0.9	0.2	5.4	-1.8	4.1	-14.6	7.8	-7.0	7.4	-32.6	2.7
	8	-0.1	1.3	-3.2	2.5	-12.9	2.9	-23.6	-1.0	-12.3	7.7	-21.7	13.1
	9	-3.8	1.7	-8.4	0.8	-20.7	6.3	-42.2	-1.3	-12.2	8.2	-27.3	10.2
	10	-0.9	0.4	-2.0	0.5	-4.0	3.3	-15.4	4.4	-1.7	5.8	-25.3	4.9

광양만 권역의 조석 잔차류는 동서 방향으로 -5.6~11.9 cm/s, 남북 방향으로 -21.9~5.2 cm/s의 유속을 나타냈으며, 조석 잔차류와 밀도류는 동서 방향으로 -4.9~12.7 cm/s, 남북 방향으로 -31.9~3.1 cm/s의 유속을 보였다. 순수한 밀도류에 의한 흐름은 동서 방향으로 -1.3~2.9 cm/s, 남북 방향으로 -14.1~0.9 cm/s로 나타났다. 특히 섬진강 하구인 St.2에서 동서 방향으로 -0.6 cm/s, 남북 방향으로 -11.4 cm/s의 흐름을 보였고, 노량수로에 근접한 진주만 내 격자점인 St.8에서는 동서 방향으로 2.9 cm/s, 남북 방향으로 -0.9 cm/s의 흐름이 나타났다. 대방수로에 근접한 격자점인 St.9는 동서 방향이 0.6 cm/s, 남북 방향이 -1.8 cm/s로 밀도류의 세기가 비교적 약하게 나타났다(Table 5).

### 3.5 체적 수송량의 수지 분석

광양만 권역에서의 담수유입 영향을 이해하기 위하여 각 경계면에서의 체적 수송량을 계산하였다. 본 연구에서는 담수의 유입은 섬진강 하천수의 유입만이 고려대상이며, 모델 내 평균 해수면(Mean Sea Level; MSL)의 안정화 이후 총 15일간의 모델 결과를 이용하여 수송량을 계산하였다. 수송량의 계산을 위해 각 경계면의 모든 격자에서 매 시간별 해수위 변화를 포함한 체적을 계산하였고, 계산된 체적을 유속 결과와 함께 연산하여 체적 수송량을 계산하였다. 그 후 Ji et al. (2007)이 제시한 하구역 내 담수 체적 계산식을 이용하여 해수의 초기 염분값과 감소된 염분값의 비율을 통해 담수 체적 수송량을 계산하고, 전체 체적 수

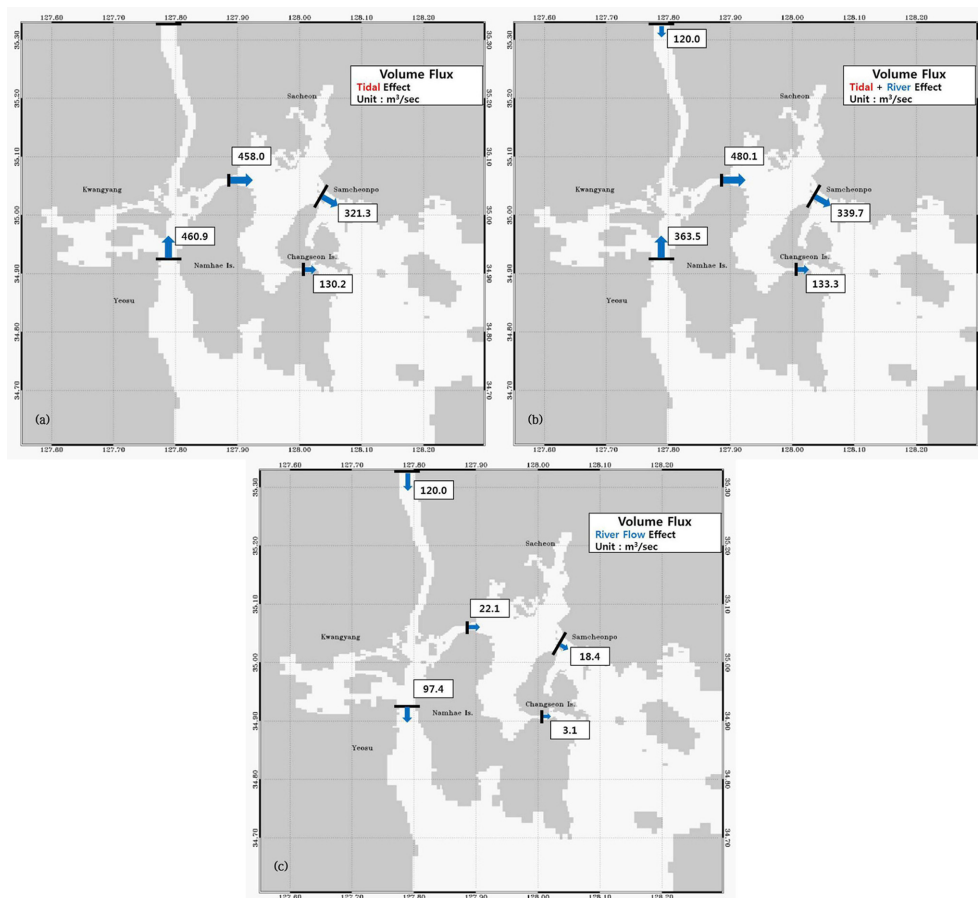


Fig. 11. Volume Flux for the SKY system by Model Run S10TN (a; only tide), S10TDA (b; tide+discharge) and S10TDA-S10TN (c; river discharge effect).

산하였다. 이 때 사용된 식은 식 (5)~(7)와 같다.

$$VT_t = A \times U \quad (5)$$

$$VT_t = \int \frac{S_0 - S}{S_0} dA \times U = A \left( 1 - \frac{S_m}{S_0} \right) \times U \quad (6)$$

$$VT_s = VT_t - VT_f \quad (7)$$

여기서  $VT_t$ : 전체 체적 수송량(Total Volume Transport;  $m^3/s$ ),  $VT_f$ : 담수 체적 수송량(Volume Transport of Fresh water;  $m^3/s$ ),  $VT_s$ : 해수 체적 수송량(Volume Transport of Sea water;  $m^3/s$ ),  $S_0$ : 해수의 초기 염분값,  $S$ : 계산된 염분값,  $S_m$ : 평균 염분값,  $A$ : 단면적( $m^2$ ),  $U$ : 유속( $m/s$ )

모델 내 각 경계면에서의 체적 수송량은 Fig. 11과 같다. 조석에 의한 수송량(a)과 담수 유입 효과만을 고려한 수송량(c), 그리고 두 효과를 합친 수송량(b)으로 구분하였다. 조석 효과만을 고려한 수송량에서는 여수수로로 통해 광양만으로 유입된 체적 중 99.3%가 노량수로를 통해 진주만으로 유입되었다. 진주만으로 유입된 해수는 대방수로를 통해 70.2%가 외해로 유출되며, 창선수로를 통해 28.4%가 유출되었다. 담수 유입 효과만을 고려한 수송량 계산 결과, 먼저 북쪽 경계면에서 광양만으로 유입된 담수 중 여수수로로 통해 외해로 81.2%가 유출되었으며, 18.4%가 노량수로를 통해 진주만으로 유입되었다. 조석과 담수 유입의 효과를 모두 고려한 결과, 여수수로에서 광양만으로 체적이 유입되는 양상을 보였다. 광양만으로 유입된 체적은 99.2%가 노량수로를 통해 진주만으로 유입되며, 대방과 창선수로를 통해 각각 70.8%, 27.8%가 외해로 유출되는 양상을 보였다.

#### 4. 요약 및 토의

본 연구에서는 3차원 수치모델을 이용하여 평수기시 광양만 권역의 유속장, 염분장의 분포 특성을 연구하였으며, 섬진강 하천수의 권역 내 주요 수로를 통한 수송량 분포를 파악하기 위해 체적 수송량을 계산하였다. 모델의 검증은 평균 제곱근 오차와 상대오차를 이용하여 해수위와 유속장의 조화분석 결과와 염분장에 대해 스킵 점수를 통해 분석하였다. 평균 제곱근 오차를 통한 스킵 분석 결과, 해수위 자료는 92.5%의 스킵 점수를 보였고, 유속자료는 70.0% 이상의 스킵 점수를 보였다. 상대오차를 통한 스킵 분석 결과는, 해수위가 90% 이상의 스킵 점수를 보였다. 유속장 결과는 장축, 지각, 각도에 대해 모두 85% 이상의 스킵 점수를 보였다. 염분장은 남북 횡단면에서 88% 이상, 동서 횡단면에서 95% 이상을 보였다.

여수수로의 동서 성분과 노량수로의 남북 성분의 결과에 있어서 유속의 평균 제곱근 오차 스킵 점수는 상대적으로 낮았다. 이는 유속 관측지점이 모델의 계산지점과 상이한 점에 기

인한다고 판단된다. 그러나 그 결과들이 연구 해역의 전체 유속장을 재현하는데 있어 큰 영향을 미치지 못한다고 판단되며, 그 이유는 크게 세 가지로 들 수 있다. 첫째, 여수수로와 노량수로는 남북방향과 동서방향으로 분포하는 지형적 특성에 의해 탁월한 왕복성 조류의 형태를 띠고 있으며, 이곳의 주방향과 부방향간 에너지 차이가 월등히 크다. 따라서 여수수로의 동서 성분, 노량수로의 남북 성분의 오차는 무시할 수 있는 수준이다. 둘째, 모델 결과는 격자 내 공간평균과 시간평균을 포함하고 있는 자료이며, 특정 위치에서 관측된 자료와는 차이가 있을 수 밖에 없다. 셋째, 관측된 유속 자료에는 바람의 영향 등의 기타 외력들이 포함되어 있지만, 본 연구의 모델은 조석과 가상 담수 유입만을 고려한 실험이기 때문에 모델과 관측 결과 간에는 오차가 존재할 수 밖에 없다.

또한 염분장 검증 시 시계열 염분 관측 자료와 모델 결과를 비교한다면 모델이 재현한 염분장의 신뢰수준을 판단함에 있어 도움이 될 수 있으나, 본 연구해역의 시계열 염분 관측 자료가 없어 직접적인 비교는 불가능 했다. 이러한 모델 검증의 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 모델 염분장 결과를 시간 이동평균하여 관측 자료와 비교하였다. 이동평균을 통하여 모델 결과에 포함된 단주기 성분들을 제거할 수 있었으며 그 결과를 관측 자료와 비교하여 모델 염분장 검증의 신뢰도를 높이하고자 하였다. 이상의 모델 검증 시 오차 발생의 이유들을 감안하였을 때, 모델이 광양만 전권역의 해수위와 유속장, 그리고 염분장을 비교적 잘 재현하였다고 판단된다.

모델 유속장의 결과를 전체적으로 살펴 보면, 창조시 광양만에서는 북향류의 흐름이 발생하며, POSCO 동측 해역을 지나 진주만으로 유입되는 동향류의 성분이 발생했다. 그러나 섬진강 입구에서는 하천수의 남하에 따른 표층 밀도류로 인해 북향류의 세기는 1 m/sec 이하로 약화되었다. 낙조시에는 섬진강입구에서 여수수로에 이르는 흐름이 남하속도 2.5 m/s 이하로서, 서쪽으로 편향된 양상을 보였다 (이때의 서향속도는 최대 0.4 m/s). 이것은 전향력에 의한 흐름방향의 우편기 결과로 이해할 수 있다. 이러한 유속장의 분포 양상은 염분장에서도 확인 할 수 있는데, 여수해만 동서 방향의 수직 염분장에서 동쪽 해역보다 서쪽의 표층 염분이 약 3 psu 정도 낮게 분포하는 것을 확인 할 수 있다(Fig. 6, 7). 이러한 유속장의 양상은 lee et. al.(2006)과 Lee and Kim(2007)의 광양만 해역에서의 해류 관측 결과와 잘 일치하고 있다. 한편 창조시 북부의 노량수로를 통해 진주만으로 진행되는 유속은 2 m/s 이상으로 매우 강하게 나타났다. 반대로 낙조시의 흐름은 낙조류와 밀도류의 합류 형태가 되며, 섬진강으로부터 여수수로 부근 해역까지의 남향류가 진주만에서 노량수로를 통해 광양만으로 진행되는 흐름과 합쳐져 창조시에 비해 2배 이상의 강한 흐름 (2.5 m/s)이 나타났다.

담수 유입에 따른 밀도류는 POSCO 동측 해역에서 여수수로로 진행되는 남향류와 노량수로를 통해 진주만으로 유입되는 동향류로 나타났다. 여수수로를 통과한 밀도류는 여수해

만의 서쪽 해역으로 편향되어 11 cm/s 이하의 남향류로 진행하는 양상을 보였다. 또한 노량수로를 통해 진주만으로 진입한 밀도류는 3 cm/s 이하의 동향류로서, 대부분 대방수로로 진행하며, 창선도 북측 해역에서 대방수로를 통해 만내로 진행하는 흐름과 수렴하는 양상을 보였다.

체적 수송량 수치 분석 결과, 광양만 권역으로 유입되는 섬진강 하천수는 80%가 여수수로를 통해 외해로 유출되며 나머지 20%가 노량수로를 통해 진주만으로 유입되었다. 평수기시의 섬진강 하천수는 광양만으로 유입된 후 여수수로를 통해 외해로 유출되는 양이 노량수로를 통해 진주만으로 유입되는 양에 비해 4배 정도 많다.

광양만 권역은 1980년대 이후 각종 해안 구조물 및 준설공사 등으로 인해 지형과 수심이 매우 크게 변화한 곳이다. 국내에서는 유일하게 자연 상태로 보존되어 있는 섬진강 하천수 유입은 광양만권역 해수순환 및 물질 수치 연구에 중요한 조건이 된다. 해양환경 변화의 모든 양상이 존재하는 광양만 권역에 대한 연구는 물리적 측면 외에도 생태계 전반의 문제와 연결되어 있으며, 중대한 자연 실험장이 되고 있다.

본 논문에서는 조석과 하천수유입이 포함된 순환 수치 모델링 실험을 하였고, 그 중 섬진강 하천수의 유입에 따른 광양만 권역의 해수순환 양상의 변화를 연구하였다. 이 결과는 각 계절별 담수 유입량 변동에 따른 해수 유동 변화와 바람의 영향 등 앞으로 진행될 후속 연구에 연결될 것이다. 체적 수송량 분석 결과는 광양만 권역의 체적수지 분석과 위해물질 유입 시 체류시간 및 농도장 산정에 있어 중요한 역할을 할 수 있다. 또한 앞으로 진행될 각 계절별 담수 유입량 변동에 따른 해수순환 수치모델 연구 결과와 함께 광양만 권역의 전반적인 수치 분석에 도움이 될 것으로 사료된다. 아울러 광양만 권역의 수질 환경 변화에 대한 기반 자료로 활용함으로써 수질, 생태계 문제 등 연구 해역의 다양한 당면 과제 해결에 있어 도움이 될 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 소관 연구개발사업 ‘운용해양(해양예보)시스템 연구’의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이 논문을 검토해주신 심사위원님들께 감사드립니다.

## References

- Blumberg, A. and Mellor, G.(1987). A description of three dimensional coastal ocean model. In: Heaps N (ed) Three dimensional coastal ocean model. American Geophysical Union, Washington DC.
- Blumberg, A.(2002). A primer for ECOMSED, Hydroqual Inc. 188pp.
- Byun, C.S.(2011). Prediction of marine environment changes around the Nakdong River during summer. Master's Thesis, Korea Maritime University (in Korean).
- Guo, X. and Valle-Levinson, A.(2007). Tidal effects on estuarine circulation and outflow plume in the Chesapeake Bay, Cont Shelf Res, 27, 20-42.
- Guo, X. and Valle-Levinson, A.(2008). Wind effects on the lateral structure of density-driven circulation in Chesapeake Bay, Cont Shelf Res, 28, 2450-2471.
- Han, S.D.(1995). Evaluation of mean tidal currents at Kwangyang and Chinju Bay, Connected into Noryang Channel. Theses Collection Vol. 13, 161-170.
- Jeong, J.H.(2006). Simulation study on the temporal and spatial variations of hydrodynamics and environmental conditions in Gyeonggi Bay using a three-dimensional numerical model. Ph.D. Dissertation, Kwangwon University (in Korean).
- Ji, Z., Hu, G., Shen, J., Wan, Y.(2007). Three-dimensional modeling of hydrodynamic processes in the St. Lucie Estuary, Estuarine Coastal and Shelf Science, 73, 188-200.
- Ji, X., Sheng, J., Tang, L., Liu, D. and Yang, X.(2011). Process study of circulation in the Pearl River Estuary and adjacent coastal waters in the wet season using a triply-nested circulation model, Ocean Modeling, 38, 138-160.
- Jung, K.Y., Ro, Y.J.(2010). Stratification and destratification processes in the Kangjin Bay, South Sea, Korea. Journal of the Korean Society of Oceanography, 15(3), 97-109.
- Jung, K.Y.(2007). Three-dimensional numerical modeling of tidal, wind-driven and density currents in the Kangjin Bay, South Sea, Korea, Master's Thesis, Chungnam National University (in Korean).
- Jung, K.Y., Ro, Y.J., Kim, B.J., Park, K.S.(2012). Model trajectory simulation for the behavior of the Namgang Dam water in the Kangjin Bay, South Sea, Korea. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 24(2), 97-106 (in Korean).
- Kang, Y.S., Chae, Y.K., Lee, H.R.(2011). Variation of density stratification due to fresh water discharge in the Kwangyang Bay and Jinju Bay, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 23(1), 126-137 (in Korean).
- Kim, C.K., Lee, J.T., Jang, H.S.(2010). Water circulation structure in Chinju Bay of Korea. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 22(4), 215-223 (in Korean).
- Kwak, G.I.(2008). Temporal and spatial mixing characteristics of Seomjin River discharges using a three-dimensional numerical model. Master's Thesis, Chonnam National University (in Korean).
- Lee, J.C., Kim, J.C. and Park, M.W.(2006) Observations of current in the Northeastern Gwangyang bay. Journal of the Korean Society of Oceanography, 11(4), 136-142.
- Lee, J.C., Kim, J.C.(2007). Current structure and variability in Gwangyang bay in spring 2006. Journal of the Korean Society of Oceanography, 12(3), 219-224.
- MacCready, P., Banas, N.S., Hickey, B.M., Dever, E.P. and Liu, Y.(2009). A model study of tide- and wind-induced mixing in the Columbia River Estuary and plume. Cont Shelf Res, 29(1), 278-291.
- Martin, J. and McCutcheon, S.C.(1999). Hydrodynamics and

- Transport for Water Quality Modeling. Lewis Publishers. 794P
- Matsumoto, K., Takanezawa, T. and Ooe, M.(2000). Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydro-dynamical model; A global model and regional model around Japan, *Oceanography in Japan*, 56, 567-581.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., Lentz, S.(2002). Classical harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE, *Computers and Geosciences*, 28, 929-937.
- Park, K., Jung, H.S., Kim, H.S. and Ahn, S.M.(2005). Three-dimensional hydrodynamic -eutrophication model (HEM-3D): application to Kwang-Yang Bay, Korea, *Marine Environmental Resarch* 60, 171-193.
- Pritchard, D.W.(1952). Salinity distribution and circulation in the Chesapeake Bay estuarine system. *Journal of Marine Research* 15, 33-42.
- Ro, Y.J.(2007). Tidal and Sub-tidal Current Characteristics in the Kangjin Bay, South Sea, Korea, *Ocean Sci J*, 42(1), 19-30.
- Ro, Y.J., Jun, W.S., Jung, K.Y. and Eom, H.M.(2007). Numerical Modeling of Tide and Tidal Current in the Kangjin Bay, South Sea, Korea, *Ocean Sci J*, 42(3), 153-163.
- Ro, Y.J., Jung, K.Y.(2010). Impact of the Dam Water Discharge on the Circulation System in the Kangjin Bay, South Sea, Korea, *Ocean Sci J*, 45(1), 7-25.
- Shin, E.J., Lee, S.H., Choi, H.Y.(2002). Numerical model study for structure and distribution of the Keum River plume. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 7(3), 157-170.
- Wang, Q., Guo, X. and Takeoka, H.(2008). Seasonal variations of the Yellow River plume in the Bohai Sea: A Model study, *Journal of Geophysical Research*, 113, C08046.
- Willmott, C.J.(1981). On the Validation of models. *Physical Geography*, 2(2), 184-194.
- Youngsan River Flood Control Office, Annual report of hydrologic investigation in Korea. <http://www.yeongsanriver.go.kr/phps/menu/menu.php?S=S01&M=060101000000>

---

원고접수일: 2014년 1월 23일

수정본채택: 2014년 4월 23일(1차)

2014년 7월 29일(2차)

2014년 8월 22일(3차)

게재확정일: 2014년 8월 27일