

해수순환모델(FVCOM)을 이용한 하구의 조위 변화에 미치는 국부적 바람의 영향 Local Winds Effects on the Water Surface Variation at the Shallow Estuary, Mobile Bay

이정우[†] · 윤상린 · 오혜철 · 김석구 · 이 준*

Jungwoo Lee[†] · Sang-leen Yun · Hye-cheol Oh · Seog-ku Kim · Jun Lee*

한국건설기술연구원 환경연구실 · *한국기후변화대응전략연구소

Environmental Engineering Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

*Korea Research Institute of Climate Change Countermeasure Strategies

(2014년 7월 31일 접수, 2014년 8월 29일 수정, 2014년 8월 29일 채택)

Abstract : A three-dimensional ocean circulation model was applied to a shallow estuary, Mobile Bay, to study local wind setup and setdown. Tides started from the northern Gulf of Mexico propagates up to the Mobile River system which is located in the north of the Mobile Bay. However, the tides started in the south of Mobile Bay were distorted when travelling upstream while affected by river discharge and local winds. The water surface elevation was less/over predicted responding north/south winds, respectively, when winds only at the Dauphin Island station (DPI) were used. However, the model predicted water surface elevation better when using two local winds from DPI and Mobile Downtown Airport (MDA). Wind speeds were greatly reduced (~88%) in about 43 km distance between DPI and MDA, and the canopy effects may be the reason for this. For this reason, the local winds are greatly responsible for local surface elevation setup and setdown especially at the shallow estuary like Mobile Bay.

Key Words : Local Winds, Shallow Estuary, Numerical Model, Skill Assessment, Water Surface Elevation

요약 : 수심이 낮은 하구에서 바람이 국부적인 해수면 상승/하강에 미치는 영향을 연구하기 위해 Mobile Bay에 3차원 해수 순환모델을 적용하였다. Mobile Bay의 남단 경계면, 즉 northern Gulf of Mexico에서 시작된 조위는 Mobile River system 북부 까지 직접적인 영향을 준다. 그러나 Mobile Bay 남단에서 발생한 조위변화는 Mobile Bay 북부로 이동하면서 Mobile River system으로부터 들어오는 담수와 국부적 바람의 영향으로 왜곡된다. Mobile Bay 남단에 위치한 기상관측소에서의 바람정보를 Mobile Bay 전체에 적용하였을 경우 Mobile Bay 북부에서 실제보다 강한 바람의 영향으로 과대한 수위 상승과 하강 현상이 발생하였다. 그러나 Mobile Bay 남단과 중단에 위치한 두 개의 관측소에서 측정된 바람 정보를 활용하였을 경우 Mobile Bay 북부에서의 조위 변화를 보다 정확하게 재현하는 것으로 나타났다. 특히 바람의 강도가 센 경우 Mobile Bay 남단과 북단의 풍속이 현저하게 차이나는 것으로 나타났으며(~88%), 이는 Mobile Bay 북단에서 나무와 건물 등의 영향으로 바람의 강도가 급격하게 줄어들었기 때문으로 판단된다. 따라서 Mobile Bay와 같이 수심이 낮고 국부적으로 풍속이 다른 하구 또는 만에서의 수위변화 재현 또는 예측을 위해서는 국부적인 바람 정보가 매우 중요한 것으로 연구되었다.

주제어 : 국부적 바람, 얕은 만, 수치모델, 모델오차평가방법, 해수면 변화

1. 서론

하구(estuary)는 두 개의 독특한 특성을 가진 해수와 담수가 만나는 지역으로써 물리적으로 또는 생물학적으로 중요한 연구 대상지역이다. 하구에서의 수위 변화는 외해의 조위변화, 강을 통한 담수의 영향, 그리고 바람에 직접적인 영향을 받는다. 이 중에서 바람은 국부적인 변화의 폭이 상대적으로 크기 때문에 하구에서의 수위변화에 매우 중요한 변수라고 할 수 있다.

연안 해안에서의 물리화학적 또는 생태학적 연구를 위해 물의 거동을 파악하는 것은 매우 중요하며 이를 위해 직접적인 유동분포 측정 방법과 수치 모델을 활용한 방법이 사용되고 있다. 이 중에서 수치 모델을 활용한 방법은 실측 방법이 갖고 있는 시간과 장소의 한계에 영향을 덜 받음으로써 널리 활용되고 있다. 수치모델은 현장 실측 자료와 모델

의 수치해를 비교하여 각각의 연구 지역에 맞게 수치 모델을 보정 한다. 이때 실측 자료와 모델의 결과 값을 비교하여 수치 모델의 정확도를 예측하고 평가한다.¹⁻³⁾ 수치모델의 보정 시 가장 먼저 선행되어야 하는 것은 물리적 일치성 확인이다. 이를 위해 해수유동모델에서는 조위를 재현하는 것이 가장 중요하다고 할 수 있다. 하구에서의 수위변화는 다양한 요소에 영향을 받지만 다음과 같은 3가지 영향이 가장 크다고 할 수 있다: 지형학적 요인, 담수의 영향, 바람의 영향. 이 중에서 지형학적 요인은 모델의 격자와 밀접한 관련이 있다. 따라서 격자의 구성은 연구 대상 지역을 최대한 정확하게 표현할 수 있도록 이루어져야 하며, 특히 정확한 수심의 반영은 조위의 전파 속도와 밀접한 관련이 있어 매우 중요하다. 담수의 영향은 해수와 담수가 만나는 지역에서 특히 중요하며 이 지역에서는 밀도류의 형성을 통해 유속장의 변화에 영향을 줄 수 있다. 바람은 표층의 유속에 직

[†] Corresponding author E-mail: jungwoo33@kict.re.kr Tel: 031-995-0892 FAX: 031-910-0291

접적으로 영향을 미쳐 해수 순환에 영향을 주고 해수면의 수위 상승 및 하강에 영향을 준다. 특히 수심이 낮은 연안 해안에서는 그 영향이 크다고 할 수 있다. 예로써 west Florida shelf에서 관측된 수위자료와 수치모델 결과를 비교하여 본 결과 수심이 상대적으로 낮은 만 내부에서는 수위와 유속장이 바람에 직접적인 영향을 받는 것으로 연구되었다.⁴⁻⁶⁾ 특히 바닥저항계수(bottom drag coefficient)는 수심이 5 m 인 지역이 55 m인 지역보다 약 1 order of magnitude 정도 크고,⁷⁾ 수심이 낮은 연안해안에서는 바람의 방향에 따라 wind setup과 setdown이 발생하기 때문에⁸⁾ 수심이 낮은 연안 해안에서 바람의 영향은 해수면 상승 및 하강에 크게 작용한다고 할 수 있다.

해수의 유동은 풍속뿐만 아니라 풍향에 따라 크게 영향을 받으며, 특히 하구에서 바람은 조석(tidal) 또는 비조석(subtidal) 수위 및 염분장에 영향을 크게 미치는 것으로 많은 연구에서 논의되어 왔다.⁹⁻¹¹⁾ 그런데 연구 대상지역의 규모와 특징에 따라 풍향과 풍속은 크게 차이가 날 수 있으며, 이러한 차이는 동일한 시스템 안에서 해수 유동에 크게 영향을 줄 수 있다. 특히 수심이 낮은 하구에서는 지역적인 바람의 변화가 해수 유동과 수위에 직접적인 영향을 줄 수 있다. 예를 들어 멕시코만의 북쪽에 위치한 대부분의 하구는 대체로 수심이 낮고 담수의 영향을 많이 받는 지형학적 특징을 갖고 있다.¹²⁾ 이 중에서도 알라바마주의 남단에 위치한 Mobile Bay는 만 전체의 수심이 3 m 내외로 지역적인 바람의 영향이 수위변화에 미치는 영향이 크다고 할 수 있다. 국부적 바람의 영향은 담수의 유입에 의한 영향이 상대적으로 적은 시기에 더 크다고 연구된 바 있으며,¹³⁾ Cho¹⁴⁾는 Chesapeake Bay연구에서 local wind가 Chesapeake Bay 상류에서 wind setup·setdown에 대하여 remote wind와 상응하는 영향을 끼치는 것을 밝혀낸바 있다. 그러나 대부분의 wind setup·setdown 연구는 아직까지 remote wind에 대응하는 local wind의 역할에 대한 연구로 국한되어 있다. 즉, 해수면의 상승 및 하강에 대한 두 개 이상의 국부적 바람의 영향에 대한 직접적인 연구는 아직 부족하다. 따라서 본 연구에서는 지역적인 바람의 영향이 하구에서의 수위 변화에 미치는 영향을 평균 수심이 낮은 Mobile Bay를 대상으로 연구하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구 대상 지역

Mobile Bay는 미국 멕시코 만(Gulf of Mexico)의 북쪽에 위치하며 알라바마주의 최 남단에 위치하고 있다(Fig. 1). Mobile Bay는 남북 방향으로 약 55 km, 동서 방향으로 약 17 km 되는 종 모양의 형태를 갖고 있으며, 만 전체의 수심이 3 m 내외로 매우 낮고 미국에서 6번째로 큰 유량을 갖고 있는 Mobile River system과(평균 유량: 1,715 m³/s) 연결되어 있다.¹⁵⁻¹⁸⁾ 특히 이 지역은 플로리다 서부에서 관측

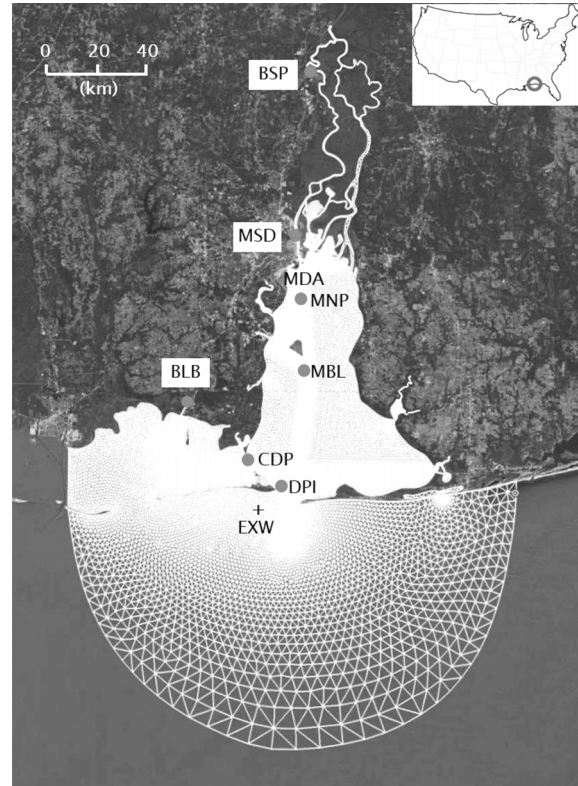


Fig. 1. Map of Mobile Bay, Alabama, with the model grid. The seven red dots denote the seven tide stations in Mobile Bay. The '+' sign shows the Exxon Well tide station, and the water level at the station was used for the open boundary condition.

되는 semi-diurnal 특징이 사라지고 diurnal system을 갖는 특징을 갖고 있다. Mobile Bay는 남단에 위치한 Main Pass와 Pass-aux-Herons를 통해 멕시코 만과 연결되어 있으며, 약 67-85%의 물 순환이 Main Pass를 통해 이루어진다.¹⁹⁾

Mobile River system으로부터의 비교적 큰 담수의 영향은 바닥 저항에 의한 혼합 작용에도 불구하고 Mobile Bay에서 비교적 강한 성층현상을 연중 나타나게 한다.^{16,20)} 또한 Gulf of Mexico에서부터 Mobile Bay의 상류까지 연결하는 뱃길은(폭: ~1.9 km, 수심: ~15 m) 염수썰기현상(salt wedge)을 일으켜 성층현상을 더욱 강화하는데 일조한다. Mobile Bay에서의 조위는 0.02 m (equatorial tides)에서 0.8 m (tropic tides)까지 변화하며 주로 K₁과 O₁에 가장 강하게 영향을 받는다.^{21,22)}

2.2. 모델의 구성

본 연구에서는 Mobile Bay내에서의 수위변화 재현을 위해 3차원 해수순환모델인 Finite-Volume Coastal Ocean circulation Model (FVCOM)을 사용하였다. FVCOM은 3차원 비격자구조(unstructured-grid), 자유수면(free-surface), 그리고 원시방정식(primitive equation) 모델이며, 유한체적법(finite-volume method)을 사용함으로써 유한차분법(finite-difference)이나 유한요소법(finite-element method)을 사용하는 모델에

비해 모델 내에서 질량보존에 용이한 장점을 갖고 있다.²³⁾ 또한 FVCOM은 unstructured-grid를 사용함으로써 복잡한 지형을 structured-grid를 기반으로 하는 모델보다 정확하게 표현할 수 있는 장점이 있다.

본 연구를 위해 모델의 격자를 남쪽으로는 northern Gulf of Mexico, 서쪽으로는 eastern Mississippi Sound, 동쪽으로는 그리고 북쪽으로는 Mobile River system을 포함하도록 구성하였다(Fig. 1). 격자의 북쪽 경계는 Mobile River (Fig. 1의 왼쪽 강)와 Tensaw River (Fig. 1의 오른쪽 강)의 합류점 상단에 위치하게 하였으며, 모델 격자는 Grand Bay와 Chacaloochee Bay 등 Mobile Delta의 중요한 지형을 최대한 포함하게 구성되었다. 모델은 18,866개의 격자점과 35,401개의 수평격자 그리고 총 5개의 수직 격자로 구성되었다. 수평격자는 최소 67 m (at ship channels)에서 최대 4.5 km (at the southern boundary)까지 변하며, 특히 Mobile Bay의 남북을 잇는 ship channel, Bon Secour Bay (Mobile Bay의 동쪽 남단에 위치)로 향하는 ship channel, eastern Mississippi Sound에서 Mobile Bay로 향하는 ship channel, 그리고 Bayou La Batre로 향하는 ship channel 등 모든 ship channel을 최대한 정확하게 묘사하였다. Mobile Bay는 이들 ship channel을 제외한 대부분의 지역이 매우 얇아(< 3 m) 이들 ship channel은 물질의 이동과 파랑의 전파에 매우 중요한 영향을 미친다. 따라서 이들 ship channel을 모델 내에 정확하게 표현하는 것은 매우 중요하다.^{12,24)}

어떤 현상을 수치모델로 재해석을 위해서는 각각의 물질 또는 현상에 대한 초기 값을 주어야 한다. 본 연구의 초점은 Mobile Bay내에서 수위 변화에 미치는 바람의 영향이다. 염분장은 물의 흐름에 직접적으로 영향을 주기 때문에 실제 대상 연구지역에서의 정확한 해수순환을 모의하기 위해서는 염분의 영향을 고려하는 것이 바람직하다(baroclinic simulation). 그러나 염분장의 영향은 비록 해수 순환 및 성층

등에 영향이 크다고 할 수 있지만 해수면 변화에 대해서는 바람의 영향에 비해 작다고 할 수 있다. 따라서 해수 순환에는 중요하지만 수위 변화에는 다소 영향이 적은 염분의 영향을 배제한 연구를 진행하였다(barotropic simulation only). 가장 이상적인 초기 값은 어떤 시점에서의 실측값을 주는 것이지만 현실적으로 초기 상태에 대한 각각의 실측값을 구하는 것은 어렵다. 따라서 본 연구에서는 초기 수위와 유속을 평균해면(zero elevation)과 정지상태(cold start)로 가정하였다.

해수면의 경계조건으로는 United States Army Corps of Engineers (USACE)에서 제공한 Exxon Well (EXW)에서의 실측 자료를 이용하였으며, EXW에서의 수위자료는 모든 경계면에 동일하게 적용되었다. 단 EXW과 모델의 경계면과의 거리를 고려하여 수위의 위상차(phase difference)를 계산하여 보정된 값을 사용하였다. 또한 USACE의 수위자료가 없는 때에는 National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA)의 Dauphin Island station (DPI)에서 제공하는 수위 자료를 이용하였다.

모델의 강 경계조건 입력자료는 United States Geological Survey (USGS)에서 제공하는 Caliborne Lock and Dam 에서의 유량 자료와 Coffeeville Lock and Dam(두 지점 모두 모델의 경계 북쪽에 위치하여 Fig. 1에는 표시하지 않음)에서의 유량 자료를 합산하여 이용하였다(Fig. 2). 바람 경계조건은 Mobile Bay에 인접한 두 관측소(DPI, Mobile Downtown Airport (MDA))에서의 풍속 및 풍향 자료를 이용하였다. 풍속 및 풍향 자료 중 관측이 되지 않은 시간에 대해서는 linear interpolation을 이용하였다.

2.3. 오차평가방법

본 연구는 Mobile Bay내 수위 변화 재현을 위해 2000년 9월 16일부터 2000년 11월 29일까지 76일간의(259-334 Julian

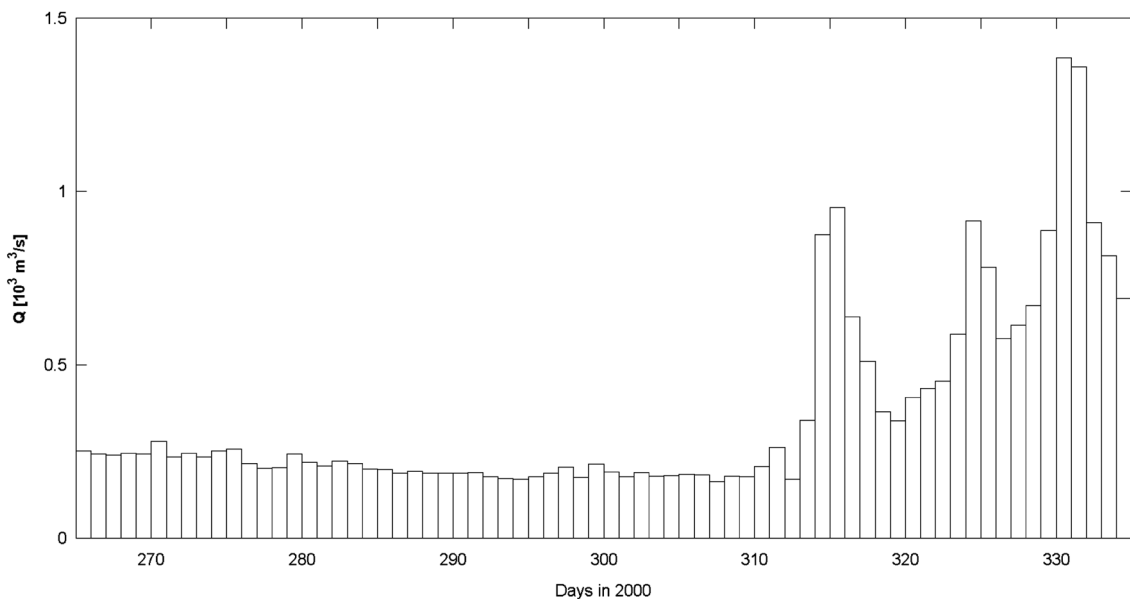


Fig. 2. Daily river discharge at the upstream river boundary.

days in 2000) 실측자료를 이용하였다. Mobile Bay 내에는 7개의 수위 관측소(DPI, Cedar Point (CDP), Bayou La Batre (BLB), Middle Bay Light (MBL), McNally Point (MNP), Mobile State Dock (MSD), 그리고 Barry Steam Plant (BSP))가 존재하며, 이들 관측소 위치에서 모델 결과와 실측 수위와의 비교평가가 이루어 졌다. 모델의 결과는 7개의 관측소 지점에 대해 한 시간 단위로 추출 되었으며, 비조석 성분(subtidal components) 비교를 위해서는 Lanczos filter가 적용되었다; Lanczos filter 적용시 cut-off frequency로는 48시간이 적용되었다.

해수유동모델의 적용성 또는 정확도 평가에는 정량적(예, Relative Absolute Average Error, Percentage Model Error) 또는 정성적 평가 방법(예, Correlation Coefficient, Reliability Index, Index of Agreement, Modeling Efficiency, Cost Function)등 다양한 모델 평가방법이 사용되고 있다.²⁵⁾ 이 외에도 다양한 평가 방법이 존재하나, 본 연구에서는 Mean Error (ME), Mean Absolute Error (MAE), 그리고 Willmott에²⁶⁾ 의해 정의된 Predictive Skill (Skill, 또는 Index of Agreement)을 사용하였다. 이들 평가 방법은 다음과 같이 정의된다:

$$ME = \frac{\sum_{n=1}^N (M_n - O_n)}{N} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{\sum_{n=1}^N |M_n - O_n|}{N} \quad (2)$$

$$Skill = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (M_n - O_n)^2}{\sum_{n=1}^N (|M_n - O_n| + |O_n - \bar{O}|)}, (0 \leq Skill \leq 1) \quad (3)$$

여기서 M_n 과 O_n 은 n번째 수치해와 관측값, N 은 데이터의

총 개수, 그리고 \bar{O} 는 관측 평균값을 나타낸다. Mean Error는 모델값이 관측값과 비교하여 전체적으로 크게 예측되었는지($ME > 0$) 또는 낮게 예측되었는지를($ME < 0$) 나타내고, MAE는 모델값과 관측값의 평균 오차를 나타낸다. Skill은 모델값과 관측값의 일치성을 나타내며, 최소값인 0일 때는 모델이 관측값을 전혀 반영하지 못하는 것을 의미하며 최대값인 1일 때는 모델이 관측값을 정확하게 예측하는 것임을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 실측 수위자료와 수치해 비교(DPI wind only)

먼저 DPI 관측타워에서 수집된 바람 자료를 이용하여 Mobile Bay에서의 수위변화를 재현하였다. Dauphin Island station은 Mobile Bay 남단에 위치한 Dauphin Island의 동쪽 끝에 위치하고 있으며(Fig. 1), 주변이 바다로 둘러싸여 있어 외해 바람의 영향을 직접적으로 받는다. 연구기간 동안의 DPI 관측소에서의 풍향은 남·북풍이 우세한 것으로 관측되었으며, 최대 풍속은 281일 낮에 북풍이 약 0.36 Pascal (Pa)로 수면에 영향을 주는 것으로 관측되었다(Fig. 3). 또한 310일 이후에는 풍향과 풍속이 급격히 변화되는 것으로 관측되었다.

Dauphin Island station에서 수집된 바람 자료를 모델의 전 영역에 동일하게 적용했을 경우 수치모델은 수위에 대한 tidal 또는 subtidal components에 대해 7개의 수위 관측소 지점에서 대체로 잘($ME \sim -3$ cm) 재현하는 것으로 나타났다(Fig. 4~5, Table 1). 특히 모델의 외해 경계면과 가까운 지역일수록(예, DPI, CDP, and BLB) 모델값은 관측값을 잘 재현하는 것으로 나타났으며, 이는 경계조건에서의 수위변화가 Mobile Bay내부로 전파되면서 여러 영향(예, 바람, 지형, 또는 강물의 유입 등)에 의해 왜곡 또는 변화되기 전에 관측소가 위치하기 때문이다. 그러나 Mobile Bay 상류로 이동할수록 이들 영향에 의한 왜곡현상이 두드러짐을 알 수 있

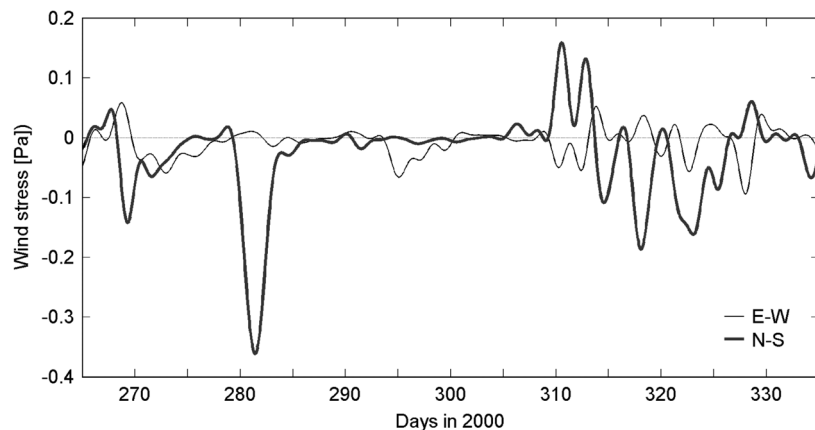


Fig. 3. Low-pass filtered wind stress at Dauphin Island station. A black and a blue (bold) lines denote the east-west and the north-south component of the wind stress, respectively.

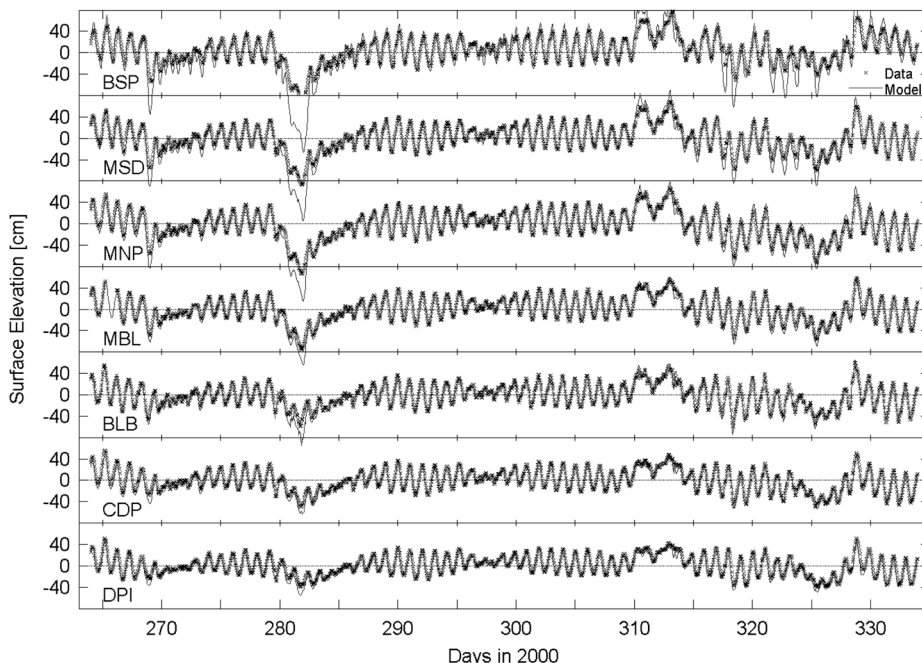


Fig. 4. Surface elevation comparison between measured (*) and simulated (blue solid lines) values at seven tide stations. Only DPI winds were used.

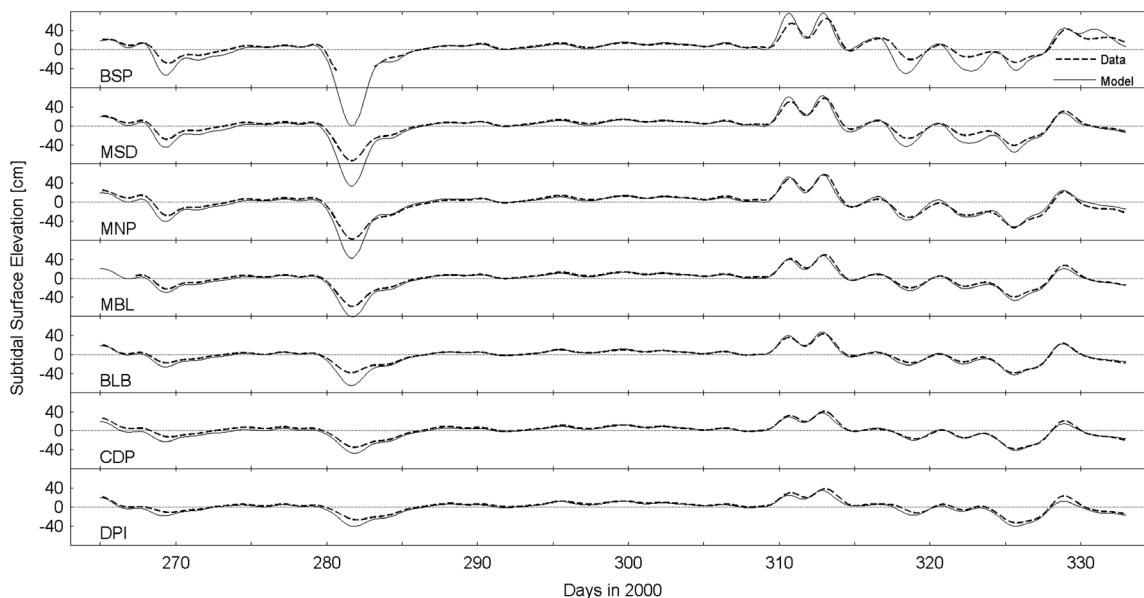


Fig. 5. Subtidal surface elevation comparison between measured (dotted lines) and simulated (solid lines) values at seven tide stations. Only DPI winds were used.

다(Fig. 4~5). 특히 최상류인 BSP 관측소 지점에서는 수위의 왜곡 현상이 매우 심하게(MAE = 11 cm, Skill = 0.92 for the total component) 나타남을 알 수 있다(Table 1). 이러한 수위의 왜곡 현상은 위에서 언급한 바와 같이 모델의 격자 구성이 지형을 정확히 반영하지 못했을 때(특히 수심의 반영이 잘못 되었을 때), 강물의 영향을 직접적으로 받는 경우, 또는 바람에 의한 수위의 상승·하강현상이 나타날 때 가장 크게 나타난다고 할 수 있다. 본 연구의 모델 도메인이 Mobile Bay를 잘 반영하였다는 전제를 하면 이와 같은

모델값과 관측값과의 차이는 크게 강물의 영향과 바람의 영향으로 좁혀진다. 그러나 가장 오차범위가 큰 281일경에 강물의 유입은 그 전·후와 비교하여 차이가 크지 않음을 알 수 있다(Fig. 2). 따라서 모델값과 관측값의 오차의 원인은 바람의 영향으로 좁혀질 수 있다.

위에서 언급한 바와 같이 모델에 의한 수위 예측값이 관측값에 비해 Mobile Bay 상류로 갈수록 오차가 커지는 현상이 발생했다. 특히 281일 경에는 모델 예측값이 관측값보다 BSP 지점에서 80 cm 이상 낮게 나타났으며, 310일 경에

Table 1. Error analysis for the surface elevation simulation

Winds Station	Total component				Subtidal component				
	ME (cm)	MAE (cm)	Skill	N	ME (cm)	MAE (cm)	Skill	N	
DPI only	BSP	-4	11	0.92	1668	-3	6	0.94	1572
	MSD	-5	6	0.96	1680	-5	5	0.96	1632
	MNP	-2	5	0.98	1680	-2	4	0.98	1632
	MBL	-2	4	0.99	1658	-2	3	0.99	1579
	BLB	-1	3	0.99	1680	-1	2	0.98	1632
	CDP	-2	3	0.99	1680	-2	3	0.98	1632
	DPI	-3	3	0.98	1680	-3	3	0.98	1632
Overall	-3	5	0.97	11726	-3	4	0.97	11311	
DPI & MDA	BSP	-0	7	0.97	1668	-0	3	0.98	1572
	MSD	-2	4	0.99	1680	-2	2	0.99	1632
	MNP	1	5	0.99	1680	1	4	0.99	1632
	MBL	-2	3	0.99	1658	-2	2	0.99	1579
	BLB	-1	3	0.99	1680	-1	2	0.99	1632
	CDP	-2	3	0.99	1680	-2	3	0.98	1632
	DPI	-3	3	0.98	1680	-3	3	0.98	1632
Overall	-1	4	0.99	11726	-1	3	0.99	11311	

는 관측값보다 높게 예측되었고, 315~325일 사이에도 모델 값이 관측값보다 낮게 모의되었다(Fig. 4~5). 이는 DPI 관측소에서의 풍향·풍속과 밀접한 관련이 있음을 Fig. 3을 통해 알 수 있다. 즉, 모델값이 관측값보다 과대하게 낮게 또는 높게 예측된 날짜에 상대적으로 강한 북풍과 남풍이 각각 분 것을 알 수 있다. 따라서 DPI 관측소의 바람 정보 외에 연구대상 지역에 인접한 다른 지역(특히 Mobile Bay 상류를 대변할 수 있는 바람 정보)의 바람 정보를 이용하는 것이 바람직하다고 판단되었다.

3.2. 실측 수위자료와 수치해 비교(DPI & MDA wind)

Mobile Bay 내에 위치한 기상 관측소는 DPI 관측소가 유일하다. 그러나 Mobile Bay 중·상류에 위치한 MDA 관측

소에서도 기상 자료를 제공하고 있다. Mobile Downtown Airport에서 서쪽으로는 Mobile Regional Airport에서 기상 자료를 제공하며, BSP 상류지역에는 인접한 지역에 기상관측소가 존재하지 않는다. 따라서 앞에서 언급한 바람의 영향으로 인한 수위의 상승·하강 문제를 해결하기 위해 DPI보다 상류에 위치하고 Mobile Bay에 최대한 가깝게 위치한 MDA 관측소의 바람 자료를 이용하였다.

Mobile Downtown Airport에서의 풍향은 DPI에서의 풍향과 매우 흡사한 것으로 나타났다. 그러나 풍속은 DPI에서 약 43 km 떨어진 MDA에서 현저하게 낮게 관측되었다(Fig. 6). 최대 북풍이 분 281일 낮에 MDA에서는 북풍이 0.08 Pa로써 0.36 Pa인 DPI에 비해 약 88% 약하게 관측되었다. 이는 비교적 Gulf of Mexico에 가까운 DPI 지점은 바람이 상대적으로 강하고 육지에 가까울수록 나무와 건물 등의 영향(canopy effects) 많이 받아 약해지기 때문으로 판단된다.

모델에 DPI와 MDA 관측소의 바람을 사용하기 위해 모델 격자를 세 개의 구역으로 구분하였다: (1) DPI 남쪽, (2) DPI~MDA 구간, 그리고 (3) MDA 북쪽. 첫 번째 구간(위도상으로 DPI 남쪽에 위치한 지점)은 모두 DPI 관측자료와 동일하게 사용하였으며, 두 번째 구간(위도상으로 DPI와 MDA 사이)은 두 관측소의 위도를 기준으로 거리에 대해 linear interpolation한 값을 이용하였다. 세 번째 구간(위도상으로 MDA 북쪽)에서는 MDA 관측자료와 동일하게 사용하였다. 따라서 Mobile Bay 상류는 DPI 관측자료만을 이용한 것에 비하여 바람의 영향이 상대적으로 낮게 적용되었다.

두 관측지점(DPI and MDA)에서의 바람 자료를 이용하였을 경우 DPI에서의 바람 자료만을 이용한 결과에 비해 수위변화를 더 잘 재현하는 것으로 나타났다(Fig. 7~8). 특히 Mobile Bay 상류에서는 DPI 바람만을 이용한 결과보다 수위 변화 예측에 상당한 개선 효과가 있었다. 가장 상류에 위치한 BSP 지점에서는 Skill값이 total component에 대해 0.97에서 0.99로, subtidal component에 대해 0.94에서 0.98로 개선되는 것으로 나타났다. 또한 DPI 바람만 사용한 경우 평균 약 3 cm 가량 낮게 예측되던 것이 DPI와 MDA 관측소의

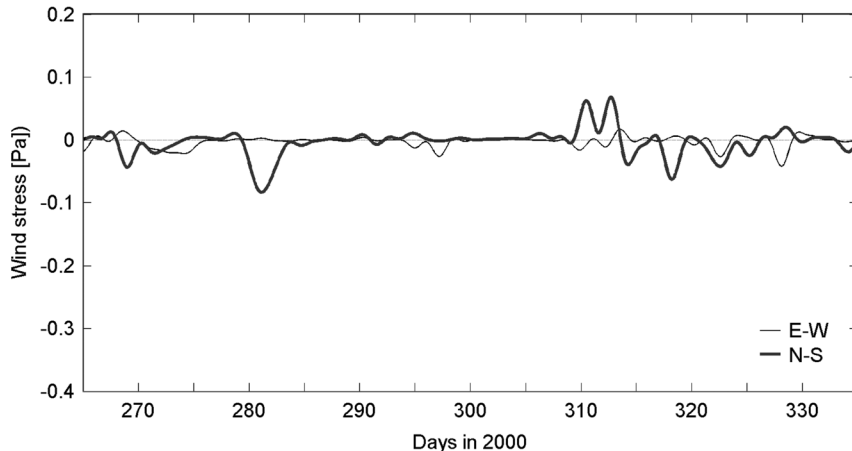


Fig. 6. Low-pass filtered wind stress at the Mobile Downtown Airport station. A black and a blue (bold) lines denote the east-west and the north-south component of the wind stress, respectively.

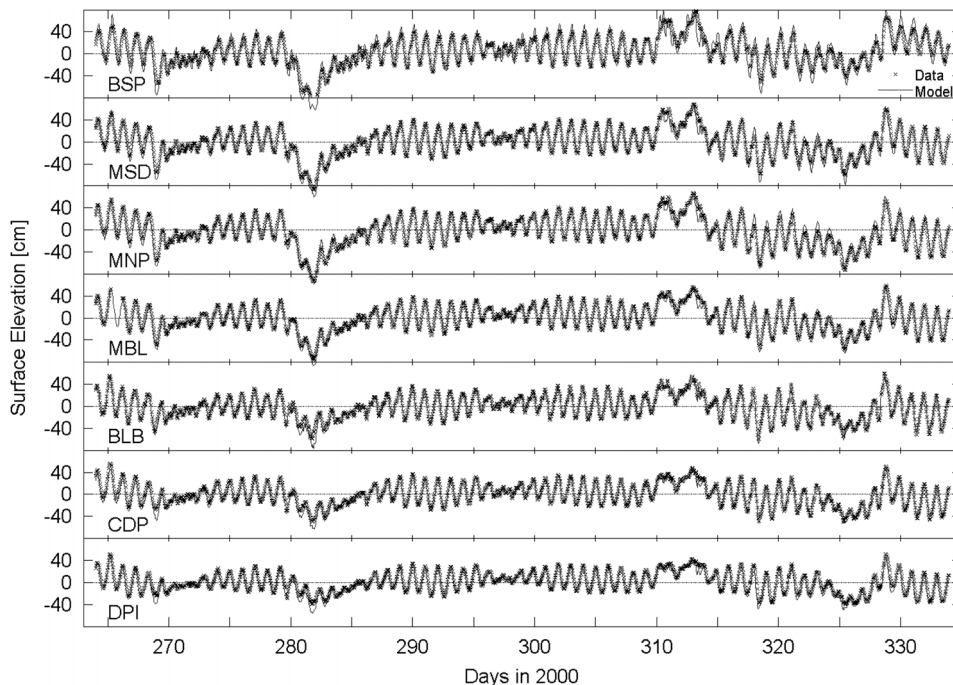


Fig. 7. Surface elevation comparison between measured (*) and simulated (blue solid lines) values at seven tide stations. Both DPI and MDA winds were used.

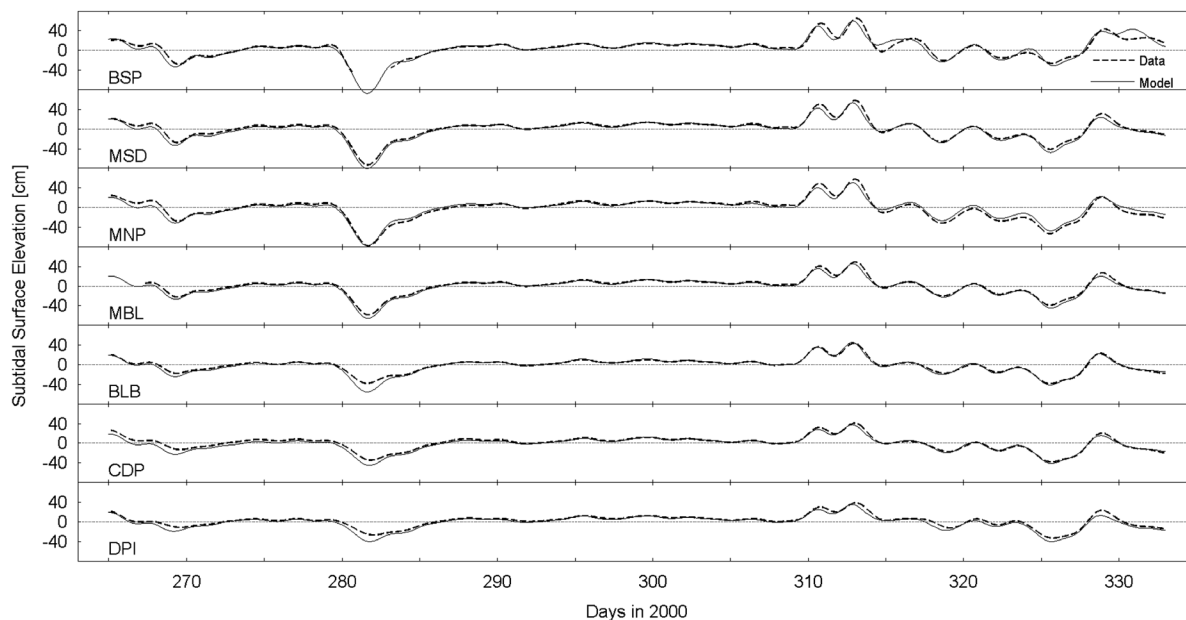


Fig. 8. Subtidal surface elevation comparison between measured (dotted lines) and simulated (solid lines) values at seven tide stations. Both DPI and MDA winds were used.

자료를 이용하였을 경우 약 1 cm 낮게 예측되어 대략 2 cm 정도 정확도가 향상되었다(Table 1).

4. 결론

3차원 해수유동모델을 이용하여 수심이 낮은 하구에서 수면의 상승·하강에 대해 바람이 미치는 영향을 Mobile Bay

내의 수위 변화 해석을 통해 연구하였다. 하구에서의 수위는 외해의 조위변화, 담수의 유입, 또는 바람 등에 직접적인 영향을 받는다. 이 중 바람은 조위나 강물의 유입량에 비해 지역적인 또는 시간적인 편차가 심한 특징을 갖고 있다. 특히 하구에서는 만의 중심부에 비해 지형적 영향으로 바람이 해수면에 미치는 영향이 급격히 줄어들 수 있다. 이는 지역적인 수위변화에 직접적인 영향을 미치며, 바람의 방향에 따라 국부적 또는 일시적 수위 상승·하강에 영향

을 준다.

본 연구에서는 Mobile Bay내에서의 조위 변화를 재현함에 있어 두 가지 바람 정보를 이용하였다. 먼저, 외해에 가까운 관측소(DPI 관측소)에서 측정된 바람정보만을 이용했을 경우 관측소와 인접한 지역에서는 모델이 관측값을 비교적 잘 재현했지만 관측소와 멀리 떨어진 만의 상류로 갈수록 오차가 커졌다(관측소 인접지역에서의 Skill = 0.99, N 상류에서의 Skill = 0.92). 상류로 갈수록 커지는 오차의 원인은 실제보다 바람이 크게 상류에 작용하여 과대한 수위 상승과 하강을 일으키기 때문인 것으로 판단되었다. 따라서 만의 중·상류에 위치한 관측소(MDA 관측소)에서 측정된 바람 정보를 이용하여 모델을 재구성하였다. 결과적으로 두 개의 바람 정보를 이용하였을 경우 이전에 상류에서 발생하였던 과대한 지역적인 수위 상승·하강 현상이 감소되었다(관측소 인접지역에서의 Skill = 0.99, 상류에서의 Skill = 0.97). 이러한 결과는 수심이 낮은 하구 또는 만에서 바람의 영향이 조위변화에 큰 영향을 주는 것을 나타낸다. 따라서 해수 유동모델을 이용하여 하구 또는 만에서 수위해석을 할 경우 국부적인 바람 정보의 활용이 반드시 필요할 것으로 여겨진다.

Acknowledgement

본 연구는 한국건설기술연구원 2014년 주요사업(2014-0214-1-1)의 연구비로 수행되었으며 이에 감사합니다.

KSEE

Reference

- Haidvogel, D. B., Arango, H., Budgell, W. P., Cornuelle, B. D., Curchitser, E., Lorenzo, E. D., Fennel, K., Geyer, W. R., Hermann, A. J., Lanerolle, L., Levin, J., McWilliams, J. C., Miller, A. J., Moore, A. M., Powell, T. M., Shchepetkin, A. F., Sherwood, C. R., Signell, R. P., Warner, J. C. and Wilkin, J., "Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the Regional Ocean Modeling System," *J. Comput. Phys.*, **227**(7), 3595~3624(2008).
- Jolliff, J. K., Kindle, J. C., Shulman, I., Penta, B., Friedrichs, M. A. M., Helber, R. and Arnone, R. A., "Summary diagrams for coupled hydrodynamic-ecosystem model skill assessment," *J. Mar. Syst.*, **76**(1-2), 64~82(2009).
- Kim, T., Sheng, Y. P. and Park, K., "Modeling water quality and hypoxia dynamics in Upper Charlotte Harbor, Florida, U.S.A. during 2000," *Estuarine, Coastal Shelf Sci.*, **90**(4), 250~263(2010).
- Li, Z. and Weisberg, R. H., "West Florida continental shelf response to upwelling favorable wind forcing: 2. Dynamics," *J. Geophys. Res.*, **104**(C10), 23427~23442(1999).
- Weisberg, R. H., Li, Z. and Muller-Karger, F., "West Florida shelf response to local wind forcing: April 1998," *J. Geophys. Res.*, **106**(C12), 31239~31262(2001).
- Weisberg, R. H., Liu, Y. and Mayer, D. A., "West Florida Shelf mean circulation observed with long-term moorings," *Geophys. Res. Lett.*, **36**(19), L19610(2009).
- Austin, J. A. and Lentz, S. J., "The Inner Shelf Response to Wind-Driven Upwelling and Downwelling," *J. Phys. Oceanogr.*, **32**(7), 2171~2193(2002).
- Parker, B. B., "Sea Level As an Indicator of Climate and Global Change," *Mar. Technol. Soc. J.*, **25**(4), (1992).
- Walters, R. A., "Low-Frequency Variations in Sea Level and Currents in South San Francisco Bay," *J. Phys. Oceanogr.*, **12**(7), 658~668(1982).
- Huang, W., Jones, W. K. and Wu, T. S., "Modelling Wind Effects on Subtidal Salinity in Apalachicola Bay, Florida, Estuarine," *Coastal Shelf Sci.*, **55**(1), 33~46(2002).
- Guo, X. and Valle-Levinson, A., "Wind effects on the lateral structure of density-driven circulation in Chesapeake Bay," *Continental Shelf Res.*, **28**(17), 2450~2471(2008).
- Kim, C.-K. and Park, K., "A modeling study of water and salt exchange for a micro-tidal, stratified northern Gulf of Mexico estuary," *J. Mar. Syst.*, **96-97**, 103~115(2012).
- Moller, O. O., Castaing, P., Salomon, J.-C. and Lazare, P., "The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of Patos Lagoon," *Estuaries*, **24**(2), 297~311(2001).
- Cho, K.-H., "A Numerical Modeling Study on Barotropic and Baroclinic Responses of the Chesapeake Bay to Hurricane Events," *ProQuest*, p. 276(2009).
- Stumpf, R. P., Gelfenbaum, G. and Pennock, J. R., "Wind and tidal forcing of a buoyant plume, Mobile Bay, Alabama," *Cont. Shelf Res.*, **13**(11), 1281~1301(1993).
- Ryan, H., Noble, M., Williams, E., Schroeder, W., Pennock, J. and Gelfenbaum, G., "Tidal current shear in a broad, shallow, river-dominated estuary," *Cont. Shelf Res.*, **17**(6), 665~688(1997).
- Dzwonkowski, B., Park, K., Ha, H. K., Graham, W. M., Hernandez, F. J. and Powers, S. P., "Hydrographic variability on a coastal shelf directly influenced by estuarine outflow," *Continental Shelf Res.*, **31**, 939~950(2011).
- Lee, J., Webb, B. M., Dzwonkowski, B., Park, K. and Valle-Levinson, A., "Bathymetric influences on tidal currents at the entrance to a highly stratified, shallow estuary," *Continental Shelf Res.*, **58**, 1~11(2013).
- Schroeder, W. W., "Riverine influence on estuaries: A case study," *Estuarine Interactions*, Academic Press, New York, pp. 347~364(1978).
- Park, K., Kim, C.-K. and Schroeder, W. W., "Temporal Variability in Summertime Bottom Hypoxia in Shallow Areas of Mobile Bay, Alabama," *Estuaries Coasts*, **30**(1), 54~65(2007).
- Seim, H. E., Kjerfve, B. and Sneed, J. E., "Tides of Mississippi Sound and the Adjacent Continental Shelf," *Estuar. Coast Shelf S.*, **25**, 143~156(1987).

22. Schroeder, W. W., Dinnel, S. P. and Wiseman, W. J., "Salinity stratification in a river-dominated estuary," *Estuar. Coast*, **13**(2), 145~154(1990).
23. Chen, C., Liu, H. and Beardsley, R. C., "An Unstructured Grid, Finite-Volume, Three-Dimensional, Primitive Equations Ocean Model: Application to Coastal Ocean and Estuaries," *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **20**, 159~186(2003).
24. Fischer, H. B., "Mass transport mechanisms in partially stratified estuaries," *J. Fluid Mechanics*, **53**(4), 671~687(1972).
25. Kim, T. Y. and Yoon, H. S., "Skill Assessments for Evaluating the Performance of the Hydrodynamic Model," *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Eng.*, **14**(2), 107~113(2011).
26. Willmott, C. J., "Some Comments on the Evaluation of Model Performance," *Bullet. Am. Meteor. Soc.*, **63**(11), 1309~1313(1982).