

해수유동모델 검증을 위한 오차평가방법 비교 연구

김태운 · 윤한삼[†]

Pacific Northwest National Laboratory/부경대학교 해양산업개발연구소

Skill Assessments for Evaluating the Performance of the Hydrodynamic Model

Tae Yun Kim and Han Sam Yoon[†]

Pacific Northwest National Laboratory, Seattle, WA98109, USA

Research Center for Ocean Industrial Development, Pukyong National Univ., Busan, Korea

요 약

해수유동모델의 검증 및 평가를 위해 적용되는 또는 적용가능한 10종류의 모델 오차평가방법 - 네가지의 정량적 평가방법(절대평균오차, 평균제곱근 오차, 상대적 절대평균오차, 백분율모델오차)과 여섯가지의 정성적 평가방법(상관계수, 신뢰지수, 일치지수, 모델효율성, 비용함수, 잔여량계수) - 을 소개하고, 실제 조위, 유속, 염분관측치와 3차원 곡선형 모델(CH3D)에서 구해진 플로리다 하구에서의 수치해에 이들 모델 오차평가방법들을 적용하였다. 조위 및 유속평가시 절대평균오차, 평균제곱근 오차, 상대적 절대평균오차, 상관계수, 일치지수, 모델효율성, 비용함수, 잔여량계수 등이 적합하였다. 그리고 염분평가시 절대평균오차, 평균제곱근 오차, 상대적 절대평균오차, 백분율모델오차, 상관계수, 신뢰지수, 비용함수, 잔여량계수 등의 사용이 타당하였다. 정량/정성적 평가방법들이 서로 유사한 평가경향을 보여 줌으로써, 상호간의 신뢰성도 보여 주었다. 다양한 모델 오차평가방법을 통하여 계산된 평가값을 토대로, 본 연구에서는 조위, 유속, 염분이 잘 재현된 해수유동모델의 평가범위를 제시하였다. 조위의 경우 상대적 절대평균오차는 10%이내, 상관계수는 0.95이상, 일치지수는 0.98이상, 모델효율성은 0.93이상, 비용함수는 0.21이내이며, 유속의 경우 상대적 절대평균오차는 20%이내, 상관계수는 0.7이상, 일치지수는 0.8이상, 모델효율성은 0.5이상, 비용함수는 0.5이내이며, 염분의 경우 상대적 절대평균오차와 백분율모델오차는 10%이내, 상관계수는 0.9이상, 신뢰지수는 1.15이내, 비용함수는 0.1이내 이다.

Abstract – To evaluate the performance of the hydrodynamic model, we introduced 10 skill assessments that are assorted by two groups: quantitative skill assessments (Absolute Average Error or AAE, Root Mean Squared Error or RMSE, Relative Absolute Average Error or RAAE, Percentage Model Error or PME) and qualitative skill assessments (Correlation Coefficient or CC, Reliability Index or RI, Index of Agreement or IA, Modeling Efficiency or MEF, Cost Function or CF, Coefficient of Residual Mass or CRM). These skill assessments were applied and calculated to evaluate the hydrodynamic modeling at one of Florida estuaries for water level, current, and salinity as comparing measured and simulated values. We found that AAE, RMSE, RAAE, CC, IA, MEF, CF, and CRM are suitable for the error assessment of water level and current, and AAE, RMSE, RAAE, PME, CC, RI, IA, CF, and CRM are good at the salinity error assessment. Quantitative and qualitative skill assessments showed the similar trend in terms of the classification for good and bad performance of model. Furthermore, this paper suggested the criteria of the “good” model performance for water level, current, and salinity. The criteria are RAAE < 10%, CC > 0.95, IA > 0.98, MEF > 0.93, CF < 0.21 for water level, RAAE < 20%, CC > 0.7, IA > 0.8, MEF > 0.5, CF < 0.5 for current, and RAAE < 10%, PME < 10%, CC > 0.9, RI < 1.15, CF < 0.1 for salinity.

Keywords: Hydrodynamic model(해수유동모델), Skill assessment(모델오차평가방법), Performance criteria(평가범위), Water level(조위), Current(유속), Salinity(염분)

[†]Corresponding author: yoonhans@pknu.ac.kr

1. 서 론

연안 및 해양분야에서 사용되고 있는 해수유동모델은 수치해와 실제 현장관측치의 오차계산을 통해 모델을 검증 또는 평가하고 있다(Haidvogel *et al.*[2008], Jolliff *et al.*[2009], Kim *et al.*[2010], Ma *et al.*[2011], Warner *et al.*[2005], Zhang *et al.*[2007]). 일반적으로 모델 평가방법들은 단순히 정량/정성적으로 모델 계산결과를 평가할 뿐만 아니라 보다 향상된 수치모델링을 위한 방향 등도 제시해 줄 수 있다. 많은 수치모델 평가방법들이 다양한 공학 분야에 사용되어지고 있음에도 불구하고, 실제 해수유동모델링에 적용되는 평가방법들은 한정되어 있는 실정이다. 그리고 많은 연구들이 한 두가지 모델평가방법만을 해수유동모델에 적용하고 있다.

본 논문에서는 해수유동모델링에 적용되는 또는 적용가능한 10가지의 모델평가방법(절대평균오차, 평균제곱근 오차, 상대적 절대평균오차, 백분율모델오차, 상관계수, 신뢰지수, 일치지수, 모델 효율성, 비용함수, 잔여량계수)을 소개하고, 해수유동모델에서 구해진 수치해와 실제 현장관측치에 이들 평가방법을 적용하고 그 적합성을 평가하고자 한다.

제시된 모델평가방법 중 실측치와 수치해의 차이를 정량적으로 표시하는 평가방법으로는 절대평균오차와 평균제곱근 오차의 두가지 방법이 있으며, 그 다음 두가지 방법(상대적 절대평균오차, 백분율모델오차)은 정량적으로 구해진 값을 상대적인 값으로 나누어, 그 값의 크기를 상대적 값의 백분율로 나타낸다. 또한 모델을 평가함에 있어 정량적 방법 이외에 다섯 가지 정성적 방법(상관계수, 신뢰지수, 일치지수, 모델효율성, 비용함수)을 통해, 수치해가 얼마만큼 관측치와 근접한 경향을 보이고 있는지를 제시할 수 있다. 마지막으로 소개된 잔여량계수는 수치해가 관측치보다 얼마만큼 과대 또는 과소계산(평가) 되어있는가를 나타낼 수 있다.

본 논문은 현장에서 일년간 관측된 조위, 유속, 염분의 현장관측치와 3차원 곡선형 모델(CH3D)을 구동하여 구해진 수치해를 이용하여 상술한 10가지 모델평가방법을 적용하고, 각각의 평가방법들에 의해 얻어진 오차 값들을 비교하는 과정을 통해 조위, 유속, 염분에 대한 수치해의 정확성을 논한다. 그리고 각각 계산된 값들을 비교검토하여 해수유동모델을 검증함에 있어 합리적인 평가방법들을 제시하고, 제시된 방법에 대한 평가범위도 서술한다.

2. 연구방법

2.1 현장 실측자료와 해수유동모델 수치해

본 논문에서는 미국 플로리다대학(University of Florida or UF)이 Fig. 1의 플로리다 Charlotte Harbor연안에 UF 관측타워를 설치하고 수집한 조위, 유속, 염분 자료를 실제 관측치로 이용한다. 관측타워에서 얻어진 자료는 2003년 6월12일부터 2004년 7월 15일까지 30분 간격으로 수집된 것이다. 조위 자료는 UF 관측타워에서 얻어진 자료 뿐만 아니라 미국 지질 조사원(US Geological Survey)이 Charlotte Harbor연안에 수집한 조위자료(Punta Gorda

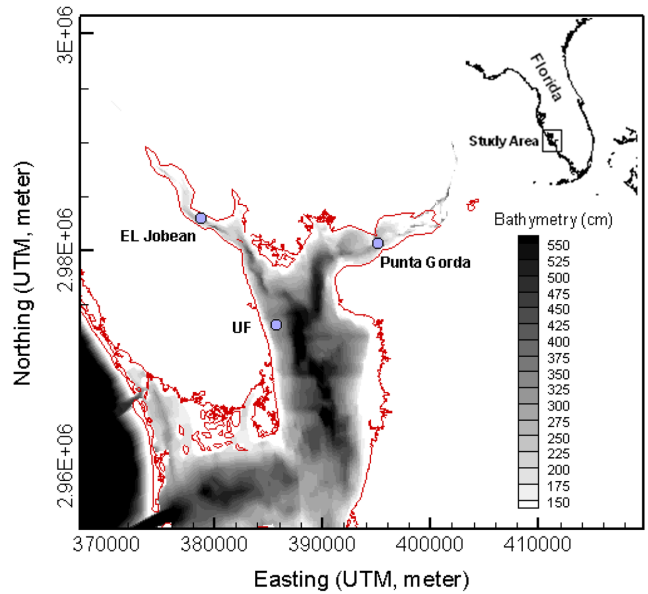


Fig. 1. Locations of UF, Punta Gorda, and El Jobean stations.

관측소, El Jobean 관측소)도 본 연구에서 사용한다. 그리고 유속의 경우 표층과 저층에서 관측된 자료를 동분유속(U velocity)과 북분유속(V velocity)으로 분리된 값을 이용한다. 마지막으로 염분은 수직 세 개층(표층, 중층, 저층)에서 각각 관측하였고, 측정 센서의 주기적 정비를 통해 신뢰성 있는 값을 얻고자 하였으며, 센서 측정 값과 실제 해역에서 계측된 값을 비교검토하여 정확도를 유지하였다.

Kim[2007]이 3차원 곡선형 모델(CH3D)을 Charlotte Harbor연안에 적용하여, 관측자료 기간동안 계산된 해수유동모델의 수치해(조위, 유속, 염분)를 실제 현장관측치와의 비교검토 자료로 이용

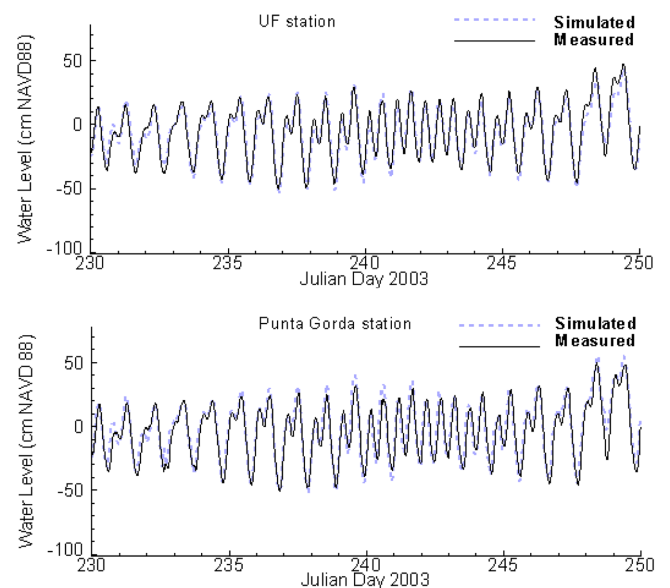


Fig. 2. Water level comparison between measured and simulated values at the UF and Punta Gorda stations (Kim[2007]).

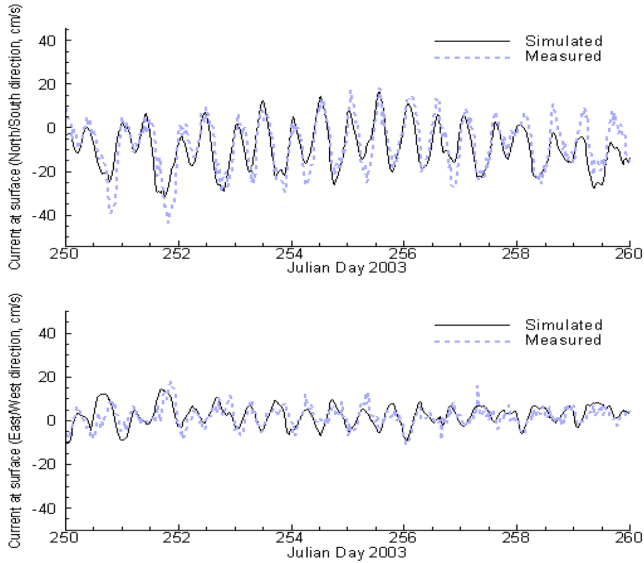


Fig. 3. Surface current velocity (upper: current velocity directed by North/South, lower: current velocity directed by East/West) at the UF station (Kim[2007]).

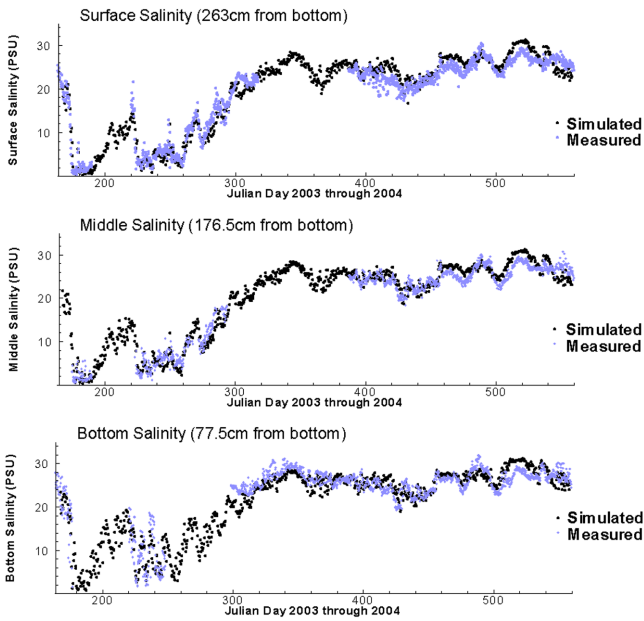


Fig. 4. Comparison between measured and simulated salinities at the UF station (Kim[2007]).

한다. Fig. 2부터 Fig. 4는 UF 관측소에서 관측되어진 조위, 유속, 염분과 해수유동모델로 계산되어진 수치해 값의 비교 시계열을 나타낸 것이다. 기타 세부적인 해수유동모델의 방정식 및 계산결과는 Kim[2007]의 연구논문에서 제시하였다.

2.2 모델 오차평가방법의 종류와 의미

해수유동모델 수치해과 실측치를 비교하기위해 적용되는 또는 적용가능한 10가지 모델 오차평가방법은 다음과 같다.

$$AAE = \frac{\sum_{i=1}^n |S_i - O_i|}{n} \tag{1}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \tag{2}$$

$$RAAE(\%) = \frac{AAE}{Relative\ Value} * 100(\%) \tag{3}$$

$$RME = \frac{\sum_{i=1}^n |S_i - O_i|}{\sum_{i=1}^n |O_i|} * 100(\%) \tag{4}$$

$$CC = \frac{n * \sum_{i=1}^n S_i * O_i - (\sum_{i=1}^n S_i) * (\sum_{i=1}^n O_i)}{\sqrt{[n * \sum_{i=1}^n S_i^2 - (\sum_{i=1}^n S_i)^2] * [n * \sum_{i=1}^n O_i^2 - (\sum_{i=1}^n O_i)^2]}} \tag{5}$$

$$RI = \exp \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\log \frac{O_i}{S_i} \right)^2 \right] \tag{6}$$

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |S_i - O_i|^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \tag{7}$$

$$MEF = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{O})^2]}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \tag{8}$$

$$CF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|S_i - O_i|}{\sigma} \tag{9}$$

$$CRM = \frac{[\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n S_i]}{\sum_{i=1}^n O_i} \tag{10}$$

S_i 는 i 번째 수치해, O_i 는 i 번째 실측치, n 은 총 실측치 갯수, \bar{O} 는 관측평균값, σ 는 관측치의 표준편차이다.

상술한 식들 중에서 정량적 평가방법으로 가장 많이 쓰여지고 있는 식 (1)의 절대평균오차(Absolute Average Error or AAE)는 관측치와 수치해의 차를 절대값으로 표시하고 그 값들을 합하여 관측된 개수 만큼 나누는 방법이다. 또한 식 (2)는 평균제곱근오차(Root Mean Squared Error or RMSE)로서 정량적으로 관측치와 수치해 사이의 차이를 표시하는데, 특히 제곱근방식을 사용함에 따라 오차의 편차가 심할수록 그 값들이 커진다. 이 두가지 방법들은 단순히 오차를 숫자로 표시한 방법으로써 한 눈에 오차값을 알 수는 있으나 오차 정도가 어느 정도인지는 알기가 어렵다.

따라서 오차 정도를 알 수 있는 방법들이 요구되는데 식 (3)의 상대적 절대평균오차(Relative Absolute Average Error or RAAE)와 백분율모델경향(Percentage Model Bias or PMB)이 사용된다. 상대적 절대평균오차(RAAE)는 절대평균오차(AAE)를 상대적인 값(예를들어 조석비교시 관측치의 평균 일일 조차값)으로 나누어 상대적인 값의 백분율로 나타내는 방법이다. 백분율모델경향(PMB)은 관측치와 수치해의 오차합을 관측치의 합으로 나누어 백분율로 나타내는 방법으로 그 절대값이 10%이하일 때 ‘아주우수’, 10-20%사이일 때 ‘우수’, 20-40%사이일 때 ‘보통’, 40% 이상일 때 ‘부적합’함을 나타낸다(Marechal, 2004). 백분율모델경향(PMB)의 경우 관측치와 수치해의 오차합을 사용함으로써 양수 및 음수 오차 사이의 상쇄가 일어나 실제 오차값이 줄어들 수가 있다. 그래서 본 논문에서는 백분율모델경향(PMB) 대신에 관측치와 수치해의 절대오차합을 절대관측치합으로 나누어 그 오차를 백분율로 표시하는 식 (4)의 백분율모델오차(Percentage Model Error or PME)를

사용한다.

또한 정량적 평가방법이 아닌 정성적 평가방법으로서 상관계수, 신뢰지수, 일치지수, 모델효율성, 비용함수, 잔여량계수 등이 있다. 먼저 식 (5)의 상관계수(Correlation Coefficient or CC)는 수치해와 관측치의 상관관계를 나타내주는 방법으로 그 값이 1일 때 수치해와 관측치가 완벽하게 일치함을 나타낸다. 그리고 그 값이 0이하일 경우 수치해와 관측치가 서로 상관관계가 없음을 나타낸다. 모델의 신뢰도를 나타내는 식 (6)의 신뢰지수(Reliability Index or RI)는 그 값이 1일 때 수치해와 관측치가 일치함을 나타낸다. 신뢰지수의 값은 항상 1이상으로서 만약 2일 경우 모델수치해가 평균적으로 관측치와의 차이가 2배임을 의미한다(Leggett and Williams[1981]). 식 (7)의 Wilmott[1982]가 제시한 일치지수(Index of Agreement or IA)는 모델 결과가 얼마나 관측치와 일치하는가를 보여주는 방법으로 그 값이 1에 가까울수록 일치도가 높다. 반면에 그 값이 0에 근접할수록 모델수치해와 관측치가 완전히 불일치함을 나타낸다.

그리고 식 (8)의 모델 효율성(Modeling Efficiency or MEF)은 수치해-관측치 오차와 관측치 평균값-관측치 오차를 비교하여 얼마만큼 수치모델이 효율적인가를 나타내는 방법이다(Loague and Green[1991]). MEF값이 0이하이면 모델수치해가 관측치 평균값보다 더 부적합한 해를 생산해 내고 있음을 나타낸다. 그리고 그 값이 1에 가까울수록 수치해와 관측치가 일치함을 의미한다. 하지만, MEF의 모순점은 모델수치해가 관측치의 평균값 근처에서 일정한 값을 가질 때 MEF의 값이 과대평가될 수 있다. 식 (9)의 비용함수(Cost Function or CF)는 수치해와 관측치의 오차를 관측치의 표준편차로 나눔으로써 얼마나 수치해가 관측치에 근접한가를 나타내는 방법으로 그 값이 0에 가까울수록 모델수치해가 관측치에 가까움을 의미한다(OSPAR Commission[1998]). 제시된 CF값의 범위는 1이하일 때 '아주우수', 1-2사이일 때 '우수', 2-3사이일 때 '보통', 3 이상일 때 '부적합'함을 의미한다(Radach and Moll[2006]). 마지막으로 식(10)의 모델수치해가 관측치에 비해 전반적으로 얼마만큼 과소 또는 과대계산(평가) 되었는가를 보여주는 방법인 잔여량 계수(Coefficient of Residual Mass or CRM)는 그 값

이 0이상 또는 0이하 이면 각각 수치해가 관측치보다 과소 또는 과대계산 되었음을 나타낸다(Moreels *et al.*[2003]). 각각의 오차 계산방법의 특징들을 간략히 요약한 사항은 Table 1과 같다.

3. 모델 오차평가방법의 적용 결과

3.1 조위

Fig. 1에 나타난 3곳의 관측소(UF, Punta Gorda, El Jobean)에서 수집된 실측치와 해수유동모델 수치해를 사용하여 10가지 모델 오차평가방법에 따라 계산하고 그 결과를 Table 2와 같이 비교하여 나타내었다. 오차계산을 위해 사용된 표본 갯수는 UF 관측소의 경우 18,921개, Punta Gorda 관측소의 경우 15,121개, El Jobean 관측소의 경우 18,960개이다. 세 관측소의 절대평균오차(AAE)의 값은 5.754-6.163 cm였으며 평균제곱근오차(RMSE)는 7.158- 7.748 cm였다. 상대적 절대평균오차(RAAE)를 계산하기 위하여 상대적인 값으로 관측치의 평균 일일 조차값을 사용하였는데, 그 조차값은 UF 관측소의 경우 60.33 cm, Punta Gorda 관측소의 경우 68.20 cm, El Jobean 관측소의 경우 66.85 cm였다. 절대평균오차(AAE)에 상대적인 값으로 나누어 계산된 상대적 절대평균오차(RAAE)는 UF 관측소의 경우 10.215%, Punta Gorda 관측소의 경우 8.437%, El Jobean 관측소의 경우 9.106%였다. UF 관측소와 El Jobean 관측소의 절대평균오차(AAE) 값은 비슷하였으나, 관측치의 평균 일일 조차의 차이로 인해 UF 관측소의 수치해가 El Jobean 관측소보다 1%이상 더 오차가 있음을 알 수 있었다. 백분율모델오차(PME)의 경우 20%이상의 오차값을 보이는데, 이는 조위관측치값이 0을 중심으로 움직임으로 인해 평균절대관측치의 합이 과소평가되었기 때문이다. 따라서 백분율모델오차(PME) 값은 조위의 오차를 계산하는데 이상적인 방법이 아닌 걸로 여겨진다.

정성적 평가방법 중에 하나인 신뢰지수(RI)는 로그함수를 사용하는데, 조위오차계산시 로그함수에 음의 값이 사용됨으로 인해 신뢰지수가 계산되지 못한다. 따라서 신뢰지수(RI) 모델평가방법은 조위평가에 부적합한 것으로 사료된다. 나머지 정성적 평가방법들(상관계수, 일치지수, 모델효율성, 비용함수)의 조위평가결과

Table 1. Features of skill assessments

Skill assessments	Features
AAE (cm)	Demonstrate the error quantity as a number.
RMSE (cm)	Demonstrate the error quantity as a number. The larger error discrepancy becomes, the bigger value average error has.
RAAE (%)	Demonstrate the error quantity as a percentage, dividing AAE by a relative value. When RAAE is 100%, the magnitude of average error is as much as the relative value.
PME (%)	Demonstrate the error quantity as a percentage, dividing sum of absolute error by sum of measurements. PME<10% (excellent), 10%<PME<20%(good), 20%<PME<40%(average), PME>40% (bad)
CC	Demonstrate the correlation between model results and measurements. CC=1(Perfect correlation), CC<0(No correlation)
RI	Demonstrate the model reliability. RI is equal or above 1. When RI is equal to 1, model results perfectly match with measurements.
IA	Demonstrate the agreement between model results and measurements. IA=1(agree), IA=0(disagree)
MEF	Demonstrate the model efficiency. MEF=1(Perfect model efficiency), MEF<0(Bad model efficiency)
CF	Demonstrate how much model simulations are close to measurements. CF<1 (Excellent), 1<CF<2(Good), 2<CF<3(Average), CF>3 (Bad)
CRM	Demonstrate whether model results underestimate (CRM>0) or overestimate (CRM<0)

Table 2. Results of various skill assessments for water elevation simulation

Skill assessments	UF station	Punta Gorda station	El Jobean station	Value of skill assessment when simulated results are equal to measured data
AAE (cm)	6.163 cm	5.754 cm	6.087 cm	0.0 cm
RMSE (cm)	7.713 cm	7.158 cm	7.748 cm	0.0 cm
RAAE (%)	10.215 %	8.437 %	9.106 %	0.0 %
PME (%)	24.964 %	23.101 %	27.108 %	0.0 %
CC	0.942	0.956	0.954	1.0
RI	N/A	N/A	N/A	1.0
IA	0.983	0.985	0.982	1.0
MEF	0.936	0.945	0.925	1.0
CF	0.204	0.186	0.217	0.0
CRM	0.102	0.058	-0.2	0.0

를 분석하였다. 정량적 평가시 오차가 제일 적게 나온 El Jobean 관측소의 경우, 정성적 평가방법들도 다른 관측소보다 El Jobean 관측소에 대한 모델 평가가 높게 나왔다. 이는 정량적/정성적 평가방법이 조위평가에 어느 정도의 일치성을 보여줄 뿐만 아니라, 각각의 정성평가방법들의 상호신뢰성도 보여준다. 전반적으로 일치지수(IA)의 값(0.982-0.985)이 상관관계(CC)의 값(0.942-0.956) 또는 모델효율성(MEF)의 값(0.925-0.945)보다 1(완전일치)의 평가값에 더 근접한 값을 보이고 있다. 따라서 일치지수(IA)의 값에 대해서는 조위평가시 허용범위를 다르게 주어야 할 것으로 여겨진다. 마지막으로 잔여량 계수(CRM)를 통한 오차 계산결과, UF 관측소와 Punta Gorda 관측소에서의 수치해는 관측치보다 과소평가되었으며, 반대로 El Jobean 관측소는 과대평가되었다.

결과적으로 본 논문에서는 상술한 평가방법을 통하여, 모델의 실측치와 관측치의 조위 오차 계산결과에 따른 모델평가범위를 결정하게 될 경우에 상대적 절대평균오차(RAAE)는 10%이내, 상관계수(CC)는 0.95이상, 일치지수(IA)는 0.98이상, 모델효율성(MEF)은 0.93이상, 비용함수(CF)는 0.21이내라고 할 수 있다.

3.2 유속

연안근처에서의 유속오차는 전반적으로 조위오차보다 큰 값을 보이는데 이는 유속이 조위에 비해 밀도류의 영향을 많이 받기 때문이다. 뿐만 아니라, 표층의 유속은 바람으로 인해 생기는 흐름

에 상당한 영향을 받는다. 본 논문에서는 UF 관측소에서 관측한 표층 및 저층유속을 이용하여 여러 가지 모델 오차평가방법을 적용하였으며, 관측된 유속의 표본자료의 수는 15,137개이다. 유속은 일정한 방향을 유지하지 않으므로 유속을 동분과 북분으로 분리하여 각 방향에 대하여 모델수치해를 평가하였다. 그 결과는 Table 3과 같이 제시하였다.

결과적으로 절대평균오차(AAE) 및 평균제곱근오차(RMSE) 값을 통하여 표층유속이 저층유속보다 큰 오차값을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 특히 북분 오차가 동분 오차보다 1.5-2.3 cm/s 정도 높은 수치를 나타내고 있었다. 하지만 절대평균오차(AAE)를 상대적인 값(평균 일일 유속차)으로 나누어 계산된 상대적 절대평균오차(RAAE)의 경우, 오히려 동분 오차가 북분 오차보다 1% 더 높게 제시되고 있다. 이는 북분의 평균 일일 유속차(28.5-29 cm/s)가 동분의 평균 일일 유속차(16.1-17.6 cm/s) 보다 크기 때문이다. 따라서 북분 유속의 크기가 빠르기 때문에 절대평균오차(AAE) 값이 크게 나왔을 뿐이지, 상대적 절대평균오차(RAAE) 값은 동분 유속과 유사하였다. 따라서 절대평균오차(AAE) 값뿐만 아니라 상대적 절대평균오차(RAAE) 값을 계산하여 유속의 정량적인 오차의 정도를 산출하는 것이 필요하다. 백분율모델오차(PME)의 경우, 조위오차 계산과 마찬가지로 평균절대관측치의 합이 과소평가되기 때문에 유속오차 계산시에도 적당하지 못한 방법으로 여겨진다.

Table 3. Results of various skill assessments for current simulation

Skill assessments	East/West direction of surface current	East/West direction of bottom current	North/South direction of surface current	North/South direction of bottom current	Value of skill assessment when simulated results are equal to measured data
AAE (cm/s)	3.286 cm/s	2.735 cm/s	5.556 cm/s	4.227 cm/s	0.0 cm/s
RMSE (cm/s)	4.3 cm/s	3.605 cm/s	7.25 cm/s	5.73 cm/s	0.0 cm/s
RAAE (%)	20.326%	15.546%	19.134%	14.812%	0.0%
PME (%)	91.806%	67.597%	78.968%	59.476%	0.0%
CC	0.5	0.736	0.742	0.768	1.0
RI	N/A	N/A	N/A	N/A	1.0
IA	0.686	0.845	0.856	0.873	1.0
MEF	0.083	0.509	0.41	0.59	1.0
CF	0.732	0.532	0.589	0.472	0.0
CRM	-0.68	0.688	-1.027	0.051	0.0

Table 4. Results of various skill assessments for salinity simulation

Skill assessments	Surface layer	Middle layer	Bottom layer	Value of skill assessment when simulated results are equal to measured data
AAE(ppt)	1.698 ppt	1.479 ppt	1.701 ppt	0.0 ppt
RMSE(ppt)	2.132 ppt	1.84 ppt	2.143 ppt	0.0 ppt
RAAE(%)	5.595%	4.813%	5.312%	0.0%
PME(%)	9.289%	7.662%	7.081%	0.0%
CC	0.974	0.982	0.934	1.0
RI	1.112	1.109	1.084	1.0
IA	0.997	0.998	0.998	1.0
MEF	0.989	0.993	0.993	1.0
CF	0.084	0.069	0.069	0.0
CRM	-0.022	-0.014	0.009	0.0

정량적 방법으로 계산시 오차가 제일 크게 나온 동분의 표층유속의 경우, 정성적 평가시에도 다른 유속보다 오차가 높게 나왔다. 정성적 평가시 두드러진 결과는 이들 평가방법(상관계수, 일치지수, 모델효율성, 비용함수)들이 일관성 있게 동분 방향의 표층유속에 대하여 비교적 높은 오차를 보여준다는 것이다. 이는 조위오차 계산시와 마찬가지로 정성적 평가방법들간의 상호신뢰성을 나타내어 준다고 볼 수 있다. 상관계수(CC)와 일치지수(IA)의 계산값이 모델효율성(MEF)과 비용함수(CF)의 계산값보다 유속오차의 경우 좀 더 좋은 평가값(즉 수치해가 관측치에 가까운 값)을 나타내 주고 있었다. 로그함수를 사용하는 신뢰지수(RI)는 조위오차 계산시와 마찬가지로 유속오차 계산시 그 값이 산출되지 못하였다. 마지막으로 잔여량 계수(CRM)를 통한 결과는 표층유속 수치해가 관측치보다 과대계산되었고 저층유속은 과소계산되었음을 보여주었다.

결과적으로 본 논문에서는 상술한 평가방법을 통하여, 모델의 실측치와 관측치의 유속 오차 계산결과에 따른 모델평가범위를 결정하게 될 경우에 상대적 절대평균오차(RAAE)는 20%이내, 상관계수(CC)는 0.7이상, 일치지수(IA)는 0.8이상, 모델효율성(MEF)은 0.5이상, 비용함수(CF)는 0.5이내라고 할 수 있다.

3.3 염분

UF관측타워에서 수집된 세 개층(바닥으로부터 표층은 265 cm 지점, 중층은 176.5 cm 지점, 저층은 77.5 cm 지점)의 염분 관측치와 모델수치해에 10가지 모델 오차평가방법을 적용하였다. 그 결과는 Table 4와 같이 제시하였다. 표층, 중층, 저층의 관측값수는 각각 13,232, 10,714, 13,617개이다.

결과적으로 세 개층에서의 평균제곱근오차(RMSE)가 절대평균오차(AAE) 값보다 대략 0.4 ppt 정도 높은 수치를 나타내고 있으며, 이 값은 절대평균오차(AAE)의 25% 정도의 값이다. 이는 실측치와 수치해의 편차로 인하여 평균제곱근오차(RMSE)가 절대평균오차(AAE)보다 25% 정도 더 증가함을 나타낸다. 상대적 절대평균오차(RAAE)를 구하기 위해서 관측된 최대값과 최소값의 차이를 상대적인 값으로 사용하였다. 세 개층의 상대적인 값은 대략적으로 30-32 ppt 정도였으며, 상대적 절대평균오차(RAAE)는 6%

이내였다. 하지만 백분율모델오차(PME) 값은 상대적 절대평균오차(RAAE)보다 높은 값을 나타내고 있다. 관측된 최대값과 최소값의 차이가 크면 클수록 상대적 절대오차가 줄어들기 때문에 염분오차의 결과가 좋게 보일 수 있다. 그래서 상대적인 값이 클 경우 백분율모델오차(PME) 값이 보다 더 염분오차를 평가하는데 적합하다고 여겨진다.

정성평가방법의 경우, 상관계수(CC), 신뢰지수(RI), 비용함수(CF) 값으로부터 모델의 성능을 파악할 수 있었다. 하지만 일치지수(IA)와 모델효율성(MEF)의 값은 거의 완벽에 가까운 값이 얻어졌다. 따라서 이 두가지 방법은 염분오차를 평가할 때 모델결과가 과대평가될 수도 있다. 잔여량계수(CRM)로부터 얻어진 결과는 표층과 중층에서는 수치해가 관측치보다 높은 값을, 반대로 저층에서는 수치해가 관측치보다 낮은 값으로 산출되었다.

결과적으로 다양한 모델 오차평가방법을 염분오차 계산에 적용한 결과, 절대평균오차(AAE), 평균제곱근오차(RMSE), 백분율모델오차(PME), 상관계수(CC), 신뢰지수(RI), 비용함수(CF), 잔여량계수(CRM) 등의 오차계산방법의 사용이 타당한 것으로 여겨진다. 상대적인 값이 크지 않을 경우 상대적 절대평균오차(RAAE) 방법도 적용가능하다. 따라서 모델의 실측치와 관측치의 염분 오차 계산결과에 따른 모델평가범위를 결정하게 될 경우에 상대적 절대평균오차(RAAE)와 백분율모델오차(PME)는 10%이내, 상관계수(CC)는 0.9이상, 신뢰지수(RI)는 1.15이내, 비용함수(CF)는 0.1이내라고 할 수 있다.

4. 요약 및 결론

해수유동모델을 연안이나 해양에 적용할 경우 그 수치해가 얼마만큼 관측치와 잘 부합하여 그 해역의 현상을 잘 재현하였나를 평가하는 10가지의 모델 오차평가방법들을 제시하였다. 제시된 모델 오차평가방법으로는 절대평균오차(AAE), 평균제곱근오차(RMSE), 상대적 절대평균오차(RAAE), 백분율모델오차(PME), 상관계수(CC), 신뢰지수(RI), 일치지수(IA), 모델효율성(MEF), 비용함수(CF), 잔여량계수(CRM)이다. 본 논문에서는 이들을 실제 현장관측치(조위, 유속, 염분)와 3차원 곡선형 해수유동모델을 플로

리다 하구에 적용해 얻어진 수치해에 적용하였다.

결과적으로 조위와 유속의 오차계산시 정량적 평가방법으로 절대평균오차(AAE), 평균제곱근오차(RMSE), 상대적 절대평균오차(RAAE)가 적합하였다. 특히 유속계산시 상대적 절대평균오차(RAAE)의 계산이 필요함을 알 수 있었다. 또한 정성적 평가방법으로는 상관계수(CC), 일치지수(IA), 모델효율성(MEF), 비용함수(CF) 등이 조위나 유속오차를 계산하는 데 적합하였다. 염분의 오차계산시 백분율모델오차(PME)도 상대적 절대평균오차(RAAE)와 함께 정량적인 오차정도를 밝히는 데 유용하였다.

그리고 상관계수(CC), 신뢰지수(RI), 비용함수(CF)와 같은 방법들이 일치지수(IA)와 모델효율성(MEF)보다 좀 더 합리적으로 염분오차를 제시하였다. 정량적으로 좋은 결과와 나쁜 결과에 대하여 모든 정성적 평가방법들이 유사한 경향을 나타냄으로써 정성적 평가방법사이의 상호신뢰성도 보여주었다. 잔여량계수(CRM)의 경우 수치해가 얼마만큼 과대 또는 과소계산 되어있는가를 산출함으로써 해수유동모델의 보정에 도움을 줄 것으로 사료된다.

마지막으로 다양한 모델 오차평가방법을 통하여 계산된 평가값을 토대로, 본 연구에서는 조위, 유속, 염분이 잘 재현된 해수유동모델의 오차평가방법의 범위를 제시하였다. 조위의 경우 상대적 절대평균오차(RAAE)는 10%이내, 상관계수(CC)는 0.95이상, 일치지수(IA)는 0.98이상, 모델효율성(MEF)은 0.93이상, 비용함수(CF)는 0.21이내이며, 유속의 경우 상대적 절대평균오차(RAAE)는 20%이내, 상관계수(CC)는 0.7이상, 일치지수(IA)는 0.8이상, 모델효율성(MEF)은 0.5이상, 비용함수(CF)는 0.5이내이며, 염분의 경우 상대적 절대평균오차(RAAE)와 백분율모델오차(PME)는 10%이내, 상관계수(CC)는 0.9이상, 신뢰지수(RI)는 1.15이내, 비용함수(CF)는 0.1이내 이다. 본 연구를 통하여 해수유동모델평가시 정량 및 정성평가가 동시에 이루어져야 하며, 가능한 한 네가지 이상의 다양한 오차평가방법의 적용이 모델의 신뢰도를 제시하는데 타당할 것으로 여겨진다.

후 기

실측자료를 제공해주신 University of Florida와 Southwest Florida Water Management District에 감사합니다. 본 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0028157).

참고문헌

Haidvogel, D.B., Arango, H., Budgell, W.P., Cornuelle, B.D., Curchitser, E., Lorenzo, E.D., Fennel, K., Geyer, W.R., Hermann, A.J., Laneorlle, 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., 2008, "Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill

assessment of the Regional Ocean Modeling System", *Journal of computational physics*, No.227, 3595-3624.

Jolliff, J.K., Kindle, J.C., Shulman, I., Penta, B., Friedrichs, M.A.M, Helber, R., and Arnone, R.A., 2009, "Summary diagrams for coupled hydrodynamic-ecosystem model skill assessment", *Journal of Marine Systems*, No.76, 64-82.

Kim, T., 2007, *Modeling of Florida's estuaries: upper Charlotte Harbor and Indian River Lagoon*, Ph.D. Dissertation, University of Florida, USA, 305pp.

Kim, T., Sheng, Y.P., Park, K., 2010, "Modeling water quality and hypoxia dynamics in Upper Charlotte Harbor, Florida, U.S.A. during 2000", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, No.90, 250-263.

Leggett, R.W. and Williams, L.R., 1981, "A reliability index for models", *Ecological Modelling*, No.13, 303-312.

Loague, K. and Green, R.E., 1991, "Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application", *Journal of Contaminant Hydrology*, No.7, 51-73.

Ma, G., Shi, F., Liu, S. and Qi, D., 2011, "Hydrodynamic modeling of Changjiang Estuary: Model skill assessment and large-scale structure impacts", *Applied Ocean Research*, No.33, 69-78.

Marechal, D., 2004, *A soil-based approach to rainfall-runoff modeling in ungauged catchments for England and Wales*, PhD Thesis, Cranfield University, 157pp.

Moreels, E., De Neve, S., Hofman, G., and Van Meirvenne, M., 2003, "Simulating nitrate leaching in bare fallow soils: a model comparison", *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, No.67, 137-144.

OSPAR Commission, 1998, *Report of the modeling workshop on eutrophication issues. 5-8 November 1996*, Den Haag, The Netherlands, OSPAR report, 86pp.

Radach, G. and Moll, A., 2006, "Review of three-dimensional ecological modelling related to the North Sea shelf system. Part II: model validation and data needs", *Oceanog. Mar. Biol.*, No.44, 1-60.

Warner, J.C., Geyer, W.R., and Lerczak, J.A., 2005, "Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment", *Journal of geophysical research*, 110, C05001, doi:10.1029/2004JC002691.

Wilmott, C.J., 1982, "Some comments on the evaluation of model performance", *Bulletin American Meteorological Society*, No. 63, 1309-1313.

Zhang, A., Fan, W., and Ji, F., 2007, "The standards for skill assessment of operational marine forecast system", *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, No.25, 27-35.

2011년 3월 15일 원고접수

2011년 5월 5일(1차), 5월 12일(2차) 심사수정일자

2011년 5월 13일 게재확정일자