황해 및 북서태평양 확장해역 정밀조석모의 Precise Tidal Simulation on the Yellow Sea and Extended to North Western Pacific Sea

서승원* · 김현정**

Seung Won Suh* and Hyeon Jeong Kim**

요 지 : 정밀조석모의를 위한 유한요소 격자가 황해 영역에서 절점밀집도 14 K, 52 K 및 211 K 등으로 세련화되어 구축되었으며, 북서태평양을 포함하는 광역에 대해 57K의 절점을 갖는 격자체계가 구축되었다. 수치실험은 32개의 병렬프로세서에서 pADCIRC v 49.21 모형을 이용하여 수행하였다. 조석모의는 YS-G52K, YS-G211K 격자에서 KorBathy30s와 ETOPO1 수심자료를 적용하고, FES2004로부터 추출된 4 분조를 개방경계에 적용하여 모의한 결과 관측치와는 진폭에서 RMS오차 0.138 m, 위상은 RMS오차 14.80 deg로 이전 황해 연구에 비해 개선된 결과가 나타났다. 북서태평양으로 확장된 영역인 NWP-G57K 격자의 개방경계에서 8 분조를 정의하여 모의한 결과 황해 조석모의 결과와 유사한 매우 만족스러운 결과가 도출되었다.

핵심용어 : 황해, ADCIRC, 조석모의, 격자상세화, 병렬계산

Abstract : Finite element grid refinements with different intensities having 14 K, 52 K and 211 K on the Yellow Sea (YS) have been constructed to make precise tidal simulations. In the meanwhile 57 K grid was made to the extended North Western Pacific (NWP) sea. Numerical simulation were done based on 32 parallel processors by using pADCIRC v 49.21 model. In the YS tidal simulation on YS-G52K and YS-G211K grid structure, KorBathy30s and ETOPO1 bathymetry data are used and 4 major tidal constituents are prescribed from FES2004. Computed results are in good agreement within 0.138 meter in RMS error for amplification and 14.80 degree of phase compared to observed tidal records. Similar error bounds are acquired in the extended NWP tidal simulation on NWP-G57K grid with 8 tidal constituent prescription on the open boundary.

Keywords : Yellow Sea, ADCIRC, tide simulation, grid refinement, parallel computation

1. 서 론

근래 점증하는 연안재해 저감방안의 하나로 폭풍해일로 인한 우리나라 서남해안 범람에 관한 연구가 진행되고 있다(변 등, 2009; 박 등, 2010; 서, 2011; 국립해양조사원, 2010; 한국해양연구원, 2010 등). 해석도구로 연구기관 또는 연구자마다 사용하는 모델이 다르지만 비구조화된 격자체계가 우리나라 서남해안과 같이 불규칙한 해안선을 해상하는데 적합하며, 모델 계산의 병렬화가 마련되어(FVCOM, ADCIRC 등) 이를 적용한 연구결과가 한 축을 이룬다. 연안범람을 모의하기 위한 기초적인 단계는 연안역을 적절한 밀도로 해상하고 조석수동역학을 정밀 재현하고, 이후 저기압과 폭풍에 의한 바람장 이동 및 해파를 고려하여 그 위험성을 평가하게 된다.

황해 전역에서 비구조화 격자를 이용한 본격적인 연구는 10여 년 전 서(1999a; 1999b)에 이어 활성화되고 있는데, 당시 적용

하였던 전지구 5 분간격의 수심자료 및 기존조석자료(China Ocean Press, 1992)에 근거한 개방경계의 불확실성이 있었다. 그렇지만 현재는 전지구 1 분간격 수심(ETOPO1, 2009)과 우리나라 서해안의 30초 간격수심(서, 2008)이 제공되고, 일본 주위의 조석(NAO.99Jb) 및 비교적 잘 해상된 전지구 조석모델 FES2004(Lyard et al., 2006)로부터 추출할 수 있는 개선된 개방경계조건이 다수 있어 황해조석모의의 재평가가 필요하다.

본 논문은 폭풍해일로 인한 우리나라 서남해역의 위험성을 평가하는 일련의 연구 중 우선적으로 정밀조석을 재현하기 위해 진행되는 연구의 일부분이다. 본 논문에서는 선행연구(서, 1999b; 서·이, 2007; 서 등, 2010; 김·서, 2010)에서 상세히 해상한 동중국 및 황해 격자를 토대로 조석과 폭풍해일을 모의하기 위하여 황해, 동해, 동중국해, 남중국해 및 필리핀 해역 등을 포함한 북서태평양에 대한 새로운 격자를 구축하였다. 특히 태풍 발원지까지 다소 성근격자를 사용한 모델 영

*군산대학교 해양건설공학과 교수(Corresponding author: Seung Won Suh, Department of Coastal Construction Engineering, Kunsan National University, Daehak-ro 1170, Gunsan, Jeonbuk 573-701, KOREA, suh@kunsan.ac.kr)

**군산대학교 대학원 해양산업공학과 석사과정(Department of Ocean Science & Engineering, Kunsan National University)

역을 확장한 결과와 기존 상세역의 황해조석모델과 상호 비교를 통한 조석 수동역학의 재평가 및 개선점을 다룬다.

2. 황해 조석모의

2.1 격자체계

격자생성은 수심과 해안경계 및 조석특성과 연동하여 정교하게 생성되어야만 수치오차를 최소화 할 수 있어 그 중요성이 매우 크다. 황해 모의에서는 우리나라 서남해안과 중국 동안에 광범위하게 분포된 천해역의 격자생성이 중요하다(서, 2000). 본 연구와 병행 발표하는 논문(서, 2011)에서와 같이 격자생성에서는 해안경계 및 수심을 고려하고 Courant 수 및 격자간 확장비($\Delta/\Delta x$) 등을 고려한 격자간격 밀도 등을 종합적으로 검토하여야 한다. 금번 격자생성에서는 국부절단오차(LTEA)가 응용된 기법(Hagen et al., 2000; McDonald, 2006)이 가미되었으며, 최종적으로 생성된 황해의 격자체계는 Fig. 1에 제시되었다.

생성된 격자(YS-G211K, Yellow Sea Grid structure with 211 K nodes)는 최소격자간격이 약 150 m 내외로 해상되어 총 210,855 개의 절점과 411,669 개의 유한요소로 구성되었다. 이는 최근 서·이 (2007)의 격자(YS-G52K)보다 약 4배 해상된 것이지만 서(2011)가 구축한 격자(YS-G52K, Modified of YS-

G52K)와 같이 수심 5 m 이내 조간대 및 조하대의 천해역이 집중적으로 상세하게 해상되었다. 수평해상 상세화와 함께 서해연안 등 황해에 적용한 수심은 서(2008)가 우리나라 주변 해역에 대해 국립해양조사원 측심자료를 골격으로 구축한 30 초간격의 수심자료를 사용하였다. 이외의 해역은 전지구의 해양수심과 고도를 1 분 간격으로 제공한 ETOPO1(Amante and Eakins, 2009)을 활용하였다.

2.2 적용모형

본 연구에서 사용한 유한요소 모형은 ADCIRC(Luetlich et al., 1992)로 병렬화가 추가된 pADCIRC v 49.21을 사용하였다. ADCIRC모형은 Chippada et al.(1996)에 의해 병렬화를 수행하여 현재 미국 등 국외에서 폭풍해일 예보와 허리케인의 연구에 다수의 연구자를 통해 모형의 우수한 신뢰성을 확인한 바 있다. 본 고에서는 상세한 식의 전개는 생략한다. 기존 논문의 이론과 전개를 용이하게 파악할 수 있다.

모형 영역내의 절점 수가 증가할수록 단일 시스템에서 수치계산은 매우 곤란하며, 병렬화가 필수적인데, 가용한 클러스터 수에 맞추어 절점과 유한요소로 나누어 주는 것이 병렬 계산의 기본이다. 본 연구에서는 선행연구(서·이, 2007)에서 검증된 METIS Ver 4.0.1을 사용하여 40여만 개의 유한요소로

Fig. 1. FEM grid structure, YS-G211K, (a) for the whole Yellow Sea with depth distribution, (b) around Korean Peninsular, (c) in the vicinity of Gyunggi Bay and (d) domain decomposition for 32 parallel processors.

이뤄진 격자망을 32개의 병렬프로세서에 적합하도록 분할하였다. 분할된 개개 영역은 약 6,700여개의 절점과 13,400여개로 구성된다(Fig. 1(d)).

2.3 모형실험 및 분석

본 수치실험에서는 FES2004(Lyard et al., 2006)로부터 추출한 주요 4 분조의 진폭과 위상각을 개방경계로 입력하여 cold start를 초기조건으로 5일간 ramp up을 포함한 총 35일간을 10 sec로 취하여 모의하였다. 조석수동역학에 가장 큰 영향을 미치는 바다마찰계수는 서해연안지역을 혼합비선형 형

태로 수심에 따라 보간(서·이, 2007) 하였는데, 50 m 이하의 수심에 대해서 0.0021부터 0.0023까지 선형적으로 증가시켰고, 그 외의 지역은 0.0023을 동일하게 입력하였다. 이러한 수심별 차등화된 바다마찰계수 적용은 천해비선형 조석 재현에 중요하며 서·이(2007) 및 Weaver and Luettich(2010)에서와 같이 수치해의 신뢰성을 제고시키기 위해 채택된다.

조석수동역학의 정성적 비교를 위해 주요 4 분조(M_2 , S_2 , K_1 , O_1)와 비선형 천해조 M_4 , MS_4 에 대하여 각각의 등진폭과 등위상각으로 플로팅하여 Fig. 2에 도시하였다. 모의 결과가 도시된 결과를 선행 연구(서, 1999b; 서·이, 2007; 최·서, 2005)

Fig. 2. Computed tidal charts for the 4 major constituents and shallow tides, M_4 , MS_4 .

의 결과와 비교했을 때 서해연안 조석 진폭의 범위와 무조점의 위치 등 전체적으로 매우 잘 일치하고 있다. 또한 우리나라 서해 천해역의 비선형 조석 등은 기존연구(서, 1999b)에서 조화유한요소모형을 적용하여 평가한 결과와 비교하여 상세조석수동역학을 만족스럽게 재현하고 있는 것으로 평가된다.

3. 격자 상세화에 따른 황해 조석모의 평가

3.1 격자 해상에 따른 조석모의 결과 비교

해안 및 해양수리 모의에서 상세한 해석을 하기 위해 잘 해상된 격자체계를 이용하는 것이 필요하지만 어느 정도로 해상할 것인지에 대한 명확한 기준은 없다(Greenberg et al., 2007). 우리나라에서도 서해연안 및 황해에 대한 유한차분 및 유한요소 모형을 이용한 다수의 연구에서 하드웨어의 발전에 힘입어 격자 상세화가 꾸준히 진행되고 있다. 황해에 대해 상세 격자를 적용한 3차원 유한요소모의로 서(1999a)가 시도한 이후, 계속되는 연구에서는 서·이(2007)가 이 격자를 4배 해상하여 보다 상세한 격자체계를 구축한 후 병렬클러스터에서 연산을 실시한 바 있다. 본 논문에서는 황해모의에서 격자해상에 따른 영향을 평가하기 위해 상세화를 실시하였으며 그 격자체계가 Fig. 3에 제시된다.

각 격자체계(YS-G14K, YS-G52K, YS-G211K)에서 모의한 계산치와 관측치의 비교를 위해 Fig. 4와 같이 우리나라 서해

Fig. 4. Tidal observation stations around the Yellow Sea represented by green and magenta circles, while black and red stations are used for the comparison of extended to north western Pacific Sea, NWP, grid structure.

Fig. 3. Meshes of the Gyunggi Bay according to grid refinements with depth data improvement.

연안의 13개 검조소는 한국해양연구원(KORDI)의 관측치를 이용하였고, 발해만 인근의 2개 검조소와 동중국해 인근의 1개 검조소는 국제수로기구(IHO)의 관측치를 이용하였다. 진폭을 비교한 Fig. 5(a)를 살펴보면, 서로 매우 비슷한 양상을 보이고, 위상을 비교한 Fig. 5(b)를 살펴보면 위상 또한 상당히 일치하는 결과가 나타난 것으로 판단된다.

격자 해상에 따른 오차를 정량적으로 평가하고자, 진폭은 RMS오차와 정규화(normalized)된 RMS오차, NRMS를 비교하였고, 위상은 RMS오차를 비교하여 Table 1에 제시하였다. 결과를 살펴보면, 격자체계별 진폭의 오차와 위상의 오차를 상호 비교하였을 때 거의 비슷한 크기의 오차를 포함하고 있어 모델 영역 전체적으로 격자해상이 오차를 크게 낮추지는 못하는 것으로 판단되며, 서(1999b)가 제시한 바와 같이 YS-G14 K 격자체계가 황해 전역에 대해서는 상대적으로 좋은 결과를 제공하는 것을 재확인 할 수 있었다. 그러나 국부적 관심이 집중된 천해역의 상세화는 모델 해석 목적에 맞게 해상해야 한다.

3.2 개방경계 및 수심자료 개선 효과

앞서 서론부에서 언급한 바와 같이 황해조석 모의에 관한 유한요소모형 적용 연구 (서, 1999a, b)에 비하여 최신의 정밀 수심자료 확보와 전지구 조석모델 FES2004로부터 개방경계의 불확실성을 해소할 수 있는 여건이 마련되었다. 본 논문에서는 이와 같은 개방경계의 개선과 수심자료의 정밀화가 수치모의 결과에 미치는 영향을 평가하기 위한 실험을 실시하였다.

최신의 수심자료 및 개방경계에 개선된 강제함수를 FES2004로부터 부여하여 계산된 결과를 16곳(Fig. 4)의 관측치와 비교하여 Fig. 6에 도시하였고, 정량적인 평가는 진폭과 위상의 RMS오차와 NRMS오차를 계산하여 Table 2에 제시하였다. 계산결과를 비교한 Fig. 6(a)에 의하면, 전반적으로 YS-G52K (case 2) 결과가 관측치와 일치하는 성향이 나타나며, 정량적으로 평가 했을때 진폭 RMS오차는 0.235 m에서 0.138 m로 0.097 m 줄어 전반적으로 오차 개선효과가 나타남을 알 수 있다. 위상에 대한 비교 결과가 수록된 Fig. 6(b)에 의하면, YS-G52K(case 1)에서는 전반적으로 계산치가 크게 상정된 성향을 보인 반면에 YS-G52K(case 2)에서는 기울기가 1인 상관관계 선과 잘 일치하는 것으로 나타나 개방경계 및 수심자료의 개선효과가 뚜렷하게 나타난다. 또한, 위상각의 정량적 비교 수치는 RMS오차가 33.98 deg에서 14.80 deg로 오차가 크게 줄어들어 수심자료 및 개방경계조건의 개선 효과가 상당함을 알 수 있다.

4. 북서태평양 확장영역 조석모의

4.1 배경 및 필요성

급변하는 기상현상은 예기치 못한 대형 태풍으로 해일을 발생시키고 해안 저지대의 침수범람 재해를 발생시켜 연안방재 차원에서 조석모의를 기반으로 정확한 해일 예측 필요성이 증대되고 있다. 그러나 앞서 검토하였던 황해 영역에서는 태풍의

Fig. 5. Comparison of simulated (a) tidal amplitude and (b) phases for the 4 major tidal constituents, M2, S2, K1, O1 according to grid refinement, blank marks are results by YS-G14K grid and filled marks are from YS-G52K. Observation stations are shown in Fig. 4, in which marked with green circles named as KORDI and magenta circles named as IHO stations are used.

Table 1. Comparison of RMS and normalized RMS errors depending on the grid structures for tidal amplitudes and phases on the observation stations mainly along the Korean coast.

Grid structure	Parameters	No. of nodes on f-plane	No. of horizontal elements	Amplitude RMSE (m)	Amplitude NRMS	Phase RMSE (deg)
Fine grid (YS-G14K)		13888	25402	0.113	0.039	15.52
Highly fine grid (YS-G52K)		52413	100084	0.138	0.048	14.80

Fig. 6. Comparison of (a)tidal amplitude and (b)phases improvement representing recent bathymetry data ETOPO1 and open boundary conditions using FES2004, which are marked with filled square while results are marked with blank square. Observation stations are shown in Fig. 4, in which marked with green circles named as KORDI and magenta circles named as IHO stations are used.

Table 2. RMS and normalized RMS error comparison on YS-G52K grid structure according to open boundary forcing improvement by FES2004 and bathymetry by ETOPO1 and KorBathy30s.

case	FES2004	ETOPO1 and KorBathy30s	ETOPO5	Amplitude RMSE (m)	Amplitude NRMSE	Phase RMSE (deg)
1	X	X	O	0.235	0.082	33.98
2	O	O	X	0.138	0.048	14.80

발달과 이동에 관한 충분한 공간적 표현이 제한되어 본 연구에서는 태풍의 발원지인 북서태평양 영역까지 확장하여 황해는 물론 동해, 동중국 및 남중국해 등이 포함되는 광역 격자망을 구축하여 태풍의 발생부터 우리나라로 이동하여 접근하는 경로를 포함하도록 하였다. 여기서는 태풍모의에 앞서 광역 조석모의에 관한 평가를 수행하고 그 결과를 평가한다.

4.2 모형의 격자체계

본 연구의 격자망은 수치해의 안정성을 위해 국부절단오차

해석(LTEA) 방법(Hagen et al., 2000)을 가미한 자동화 방법을 응용하여, 태풍의 이동경로를 충분히 포함 할 수 있도록 북서태평양 해역까지 확대하여 Fig. 7(a)에 보이는 격자체계(NWP-G57K)를 구축하였다. 여기서는 서해연안의 최소격자간격이 약 150 m 내외로 해상되며, 총 56,617개의 절점과 104,094개의 유한요소로 구성된다. 전체 영역은 METIS ver 4.0.1을 사용하여 Fig. 7(b)와 같이 병렬클러스터의 32개 프로세서에 적합하도록 분할되었으며, 분할된 각 영역은 약 1,800여개의 절점과 3,400여개의 요소로 구성된다. 격자망 구축을 위

Fig. 7. FEM grid structure showing (a) extended to North Western Pacific region, NWP-G57K and (b) decomposed into 32 sub-domains.

해 크게 앞서 황해모의에서와 같이 개선된 수심자료를 사용하였다. 즉, 동경 117~131도, 북위 30~43도에 해당하는 영역에서는 30초 간격의 격자수심자료를 사용하여 우리나라의 연안 및 황해에 적용하였고, 이외의 지역인 필리핀해, 동중국해, 남중국해, 동해 등은 지구의 해양 수심과 고도를 1 분 간격으로 제공한 ETOPO1을 사용하였다.

수치모의에 사용한 모형은 ADCIRC (Luettich et al., 1992) 모형에 병렬화를 추가하여 수정한 pADCIRC(Chippada et al., 1996)로 v 49.21을 사용하였다. pADCIRC모형은 정밀한 경계처리를 하여 장기간동안 광역의 해수 순환을 모의 할 수 있도록 개발된 유한요소 모형으로 미국 국립허리케인센터(National Hurricane Center)의 기본모형으로 선정되어 폭풍해일 예경보에 활용되고 있다.

4.3 조석 모의결과

앞에서 실험하였던 황해모의에서는 이전연구(서, 1999; 서·이, 2007)에서 개방경계에 주요 4 대분조의 값을 대입한 결과와 비교하고자 동일하게 대입하였지만, 광역모의에서는 더 상세한 결과를 얻고자 FES2004(Lyard et al., 2006)로부터 추출된 주요 8 분조(M_2 , S_2 , K_1 , O_1 , N_2 , P_1 , K_2 , Q_1)의 진폭과 위상각을 입력하여 모의하였다. 계산 시간 간격 8 sec로 설

정하였으며, 초기 5 일을 ramp up 시키고 총 35일을 모의하였을 때 32개의 병렬 프로세서에서 wall clock으로 약 35분이 소요되므로 유한요소수에 비하여 매우 신속한 계산 속도를 확보하였다. 조석수동역학에 큰 영향을 미치는 바닥마찰계수는 비선형 바닥 마찰 법칙을 사용하여 수심에 따라 선형 보간 적용하였다. 적용된 바닥마찰계수는 서·이(2007)의 관계식을 사용하여 50 m 이하의 수심에 대해서만 0.0021부터 0.0023까지 선형적으로 증가시켰고, 그 외의 지역은 동일한 0.0023을 입력하였다.

조석수동역학 모의 결과 중, 본 논문에서는 주요 8 분조를 개방 경계에 입력한 후 계산 하였지만 지면관계상 주요 4대 분조(M_2 , S_2 , K_1 , O_1)를 대표적으로 Fig. 8에 도시하였다. 이 결과는 선행 연구들(서·이, 2007; 최·서, 2005)과 중국에서 간행된 황해 조석자료(China Ocean Press, 1992)와 비교했을 때 정성적으로 관측치와 잘 일치되며, 서해연안 조석 진폭의 범위와 무조점의 위치 등이 전반적으로 잘 재현되고 있다. 우리나라 연안 96개의 관측소 검조자료(한국해양연구원, 1996)와 국제수로기구(IHO)의 153개 관측소(Fig. 4)의 관측치를 모델치와 비교한 결과를 Fig. 9(a), 10(a)에 진폭을, Fig. 9(b), 10(b)에 위상각을 도시하였다. 우리나라, 중국, 일본의 연안검조소에 대한 위상각 비교는 국지시간을 기준으로 하지 않고, 각 분

Fig. 8. Computed co-tidal charts for the 4 major tidal constituents(M_2 , S_2 , K_1 , O_1) on North Western Pacific Region grid, NWP-G57K.

Fig. 9. Simulated (a)tidal amplitude and (b)phases for the 2 major semi-diurnal constituents, M2, S2 on NWP-G57K grid structure compared to KORDI data marked with filled square and IHO data marked with blank square. Observation stations are shown in Fig. 4, in which marked with black circles named as KORDI and red circles named as IHO stations are used.

Fig. 10. Simulated (a)tidal amplitude and (b)phases for the 2 major diurnal constituents, K1, O1 on NWP-G57K grid structure compared to KORDI data marked with filled square and IHO data marked with blank square. Observation stations are shown in Fig. 4, in which marked with black circles named as KORDI and red circles named as IHO stations are used.

조별로 GMT를 기준으로 변환(서, 2011)하여 통일하였다. 우리나라 해역에 대해서는 진폭과 위상각의 계산이 관측자료와 대체로 잘 일치하는 경향을 보이거나 발해만과 중국 동해안 및 일본 연안 등에 대한 IHO 결과와는 특히 M_2 분조 비교에서 상대적으로 불일치되는 결과가 나타났는데, 이는 IHO 자료의 경우 상대적으로 오래된 자료 집적으로 자료의 신뢰성이 다소 빈약한 것이 원인 중의 하나로 평가된다.

관측점 전체에 대한 정량적 평가를 하기 위해 각 진폭과 위상의 RMS오차와 정규화된 RMS오차(NRMS)를 산출하였다. 진폭의 경우 RMS오차는 0.138 m로 나타났으며, 위상의 RMS오차는 20.53 deg로 나타났다. 이와 같은 수치는 황해 모델에 비해 광역 모델에서는 비교대상 검조소의 수가 약 16배나 많지만 황해에 국한된 모델의 RMS오차와 NRMS오차등과 비교하여 대등한 정도를 보이는 등 만족스러운 해석결과를 제

공하고 있다. 따라서 태풍의 이동경로까지 포함할 수 있도록 북서태평양 영역까지 광범위한 해역을 상대적으로 성근 격자에서 계산하였지만 도출된 조석모의 결과는 광역격자 NWP-G57K에서도 매우 잘 재현하고 있다.

5. 결과분석

본 논문에서는 폭풍해일로 인한 우리나라 서해연안 범람모의에 앞서 정밀조석모의를 위한 황해 격자체계(YS-G14K, YS-G52K, YS-G211K) 구축과 태풍의 이동경로를 포함한 북서태평양까지 확장한 격자체계(NWP-G57K)를 구축하여 조석수동역학을 모의하였다. 황해에서 격자해상에 따른 조석모의 결과 비교에서는 진폭 및 위상의 오차를 상호 비교 하였을 때 격자체계간 거의 비슷한 크기의 오차를 포함하고 있어 격자해상

상세화가 오차를 크게 낮추지는 못하는 것으로 나타났다. 이는 서(1999b)가 제시한 바와 같이 천해역이 잘 해상된 YS-G14K 격자체계가 황해 전역에 대해서는 상대적으로 우수한 결과를 제공하는 것을 재확인 할 수 있었다. 그러나 FES2004를 적용한 개방경계의 개선과 ETOPO1 및 KorBathy30s를 사용한 수심 자료의 세련화에 따른 정량적 평가 결과는 진폭의 RMS오차가 0.235 m에서 0.138 m로 크게 줄어들며, 위상의 RMS오차는 33.98 deg에서 14.80 deg로 줄어들어 수심자료 및 개방경계조건의 개선 효과가 상당함을 확인할 수 있었다.

태풍의 이동경로를 충분히 포함시킬 수 있도록 황해모형을 기반으로 북서태평양 해역을 포함한 격자망 NWP-G57K를 수치해의 안전성을 위해 국부절단오차해석 방법을 가미한 자동화 방법을 응용하여 생성하였다. 조석모의 결과에서는 선행 연구들(서·이, 2007; 최·서, 2005)과 중국에서 간행된 황해 자료(China Ocean Press, 1992)와 비교했을 때 서해연안 조석 진폭의 범위와 무조점의 위치 등이 잘 재현되었다. 우리나라 연안 96개의 관측소 검조자료(한국해양연구원, 1996)와 국제수로기구(IHO)의 153 개 관측소의 관측치와 모델치를 비교한 결과는 광범위한 해역에서 진폭의 RMS오차가 0.138 m로 나타났으며, 위상의 RMS오차는 20.53 deg로 나타남에 따라 상대적으로 성근 격자에서 계산하였지만 광역모델에서도 조석수동역학을 매우 잘 재현하고 있는 것으로 해석된다.

6. 결 론

폭풍해일로 인한 우리나라 서해연안 범람모의를 연구하는 사업의 첫 단계로 황해로 국한된 영역과 태풍의 발생부터 이동되는 경로를 포함한 북서태평양까지 확장한 광역에 대해 정밀 조석모의를 하였다. 이전의 연구(서, 1999)에서 불충분하였던 개방경계에서의 강제조건을 FES2004로부터 격자점에 자동 추출하여 입력하는 개선, ETOPO1에 근거하고 우리나라 인근 역에서는 30초 간격의 수심자료인 KorBathy30s 등 정밀 수심 사용 및 연안역에서 격자해상 밀도변화에 따른 조석모의실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 정밀조석모의의 전처리 단계인 격자생성에서는 해안경계 및 수심을 고려하고 Courant 수 및 격자간 파장비등을 고려한 격자 간격 밀도 등이 종합적으로 검토되어야 한다. 국부절단오차가 응용된 기법이 격자 자동생성에 응용되었고 이를 토대로 조석을 재현한 결과 서해연안 조석 진폭의 범위와 무조점의 위치 등 전체적으로 매우 잘 일치되는 결과를 보였다.
- 2) 황해 영역으로는 태풍의 발달과 이동에 관한 충분한 공간적 표현이 제한되어 있으며, 서남해안에 영향을 미치는 것이 충분히 표현되지 못한다. 본 연구에서는 이러한 제한사항을 극복하고자 태풍의 발원지인 북서태평양 영역까지 확장하여 격자를 생성하였다. 광역에서 조석모의와 함께 황해에 국한된 모델의 결과를 관측자료(IHO, KORDI)

와 비교해보면 진폭의 경우 RMS오차는 0.138 m로 대등하게 나타났으며, 위상의 RMS오차는 황해에서 14.80 deg로 나타났고 광역에서는 20.58 deg로 만족스러운 결과를 나타내었다.

- 3) 개방경계에서 FES2004로 부터 추출한 개선된 강제함수 부여 및 정밀한 최신의 수심자료인 ETOPO1을 사용한 결과에서는 진폭의 경우 RMS오차가 0.235 m에서 0.138 m로 0.097 m의 오차가 줄어들었고, 위상의 RMS오차는 33.98 deg에서 14.80 deg로 나타나 기존 연구에 비하여 상당한 개선 효과를 나타냈다.
- 4) 격자 상세화에 따른 황해 조석모의를 평가하였지만 격자해상의 세밀화에 따른 진폭과 위상의 RMS오차가 대등하여 격자 세밀화가 오차를 낮추는데 크게 기여하지 못하는 것으로 나타났다. 그러나 국부적으로 관심 해역의 격자 상세화는 모델 해석 목적에 맞게 해상해야 하는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단항만건설기술개발사업(과제명 : 항만권역 태풍 및 지진해일 재해 대응체계구축)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 국립해양조사원 (2010). 해안침수예상도 제작 및 보급 결과보고서.
- 김현정, 서승원 (2010). 황해를 포함한 북태평양 해역 조석모의 및 연안제방 해수범람 재현. 한국해양·해양공학회 학술발표논문집, 19, 73-76.
- 박선중, 강주환, 김양선, 문승록 (2010). 조석-해일 결합모형의 적용성 검토. 한국해양·해양공학회논문집, 22(4), 248-257.
- 변상진, 최병호, 김경옥 (2009). 병렬 유한요소 모형을 이용한 황해의 실시간 조석 및 태풍해일 산정. 한국군사과학기술학회지, 12(1), 29-36.
- 서승남 (2008). 한국 주변해역 30초 격자수심 - KorBathy30s. 한국해양·해양공학회논문집, 20(1), 110-120.
- 서승원 (1999a). 3차원 유한요소모형을 이용한 황해 및 동중국해의 조석 수동역학 해석. 대한토목학회논문집, 19(II-3), 375-387.
- 서승원 (1999b). 비선형 3차원 조화유한요소모형을 이용한 황해의 천해조석 발생. 대한토목학회논문집, 19(II-3), 389-399.
- 서승원 (2000). 유한요소 수동역학 모형에서의 질량보존 평가. 대한토목학회논문집, 20(2-B), 305-315.
- 서승원, 이화영 (2007). 병렬 클러스터 시스템 구축 및 유한요소 모형을 이용한 황해 조석재현. 한국해양·해양공학회지, 19(1), 1-15.
- 서승원, 유영칠, 김현정 (2010). 상세격자 모형을 통한 서해연안의 정밀 조석 재현. 한국해양·해양공학회지, 311pp.
- 서승원 (2011). 서해연안 상세해상을 통한 천해조석 및 조석비대칭 재현. 한국해양·해양공학회 논문집(투고중).
- 최병호, 홍성진 (2005). 등지형 동적결합 조석 모형을 이용한 황해

- 및 동중국해의 조석모형. 한국해양·해양공학회지, 17(4), 243-258.
- 한국해양연구원 (1996). 한반도 주변 조석 조화상수 자료집.
- 한국해양연구원 (2010). 해일피해 예측 정밀격자 수치모델 구축 및 설계 해면 추산 연구보고서.
- Amante, C. and Eakins, B. W. (2009). ETOPO1 1 Arc-minute global relief model : procedures, data sources and analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, National Geophysical Data Center Marine Geology and Geophysics Division Boulder, Colorado.
- China Ocean Press (1992). Marine atlas of Bohai Sea. Yellow sea. East China Sea hydrology. Beijing.
- Chippada, S., Dawson, C.N. and Wheeler, M.F. (1996). Parallel computing for finite element models on surface water flows. Computational Methods in Water Resources XI, Computational Mechanics Publications, Southampton, U.K. : 63-70.
- Greenberg, D.A., Dupont, F., Layard, F.H., Lynch, D.R. and Werner, F.E. (2007). Resolution issues in numerical models of oceanic and coastal circulation. Continental Shelf Research 7(9), 1317-343.
- Hagen, S.C., Westerink, J.J., Kolar, R.L. and Horstmann, O. (2000). Two-dimensional, unstructured mesh generation for tidal models. Int. J. Numer. Meth. Fluids, 35, 669-686.
- Luettich, R.A., Jr., Westerink, J.J. and Scheffner, N.W. (1992). ADCIRC : an advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts and estuaries. report 1 : Theory and methology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL, Dredging Research Program Technical Report DRP-92-6, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T. and Francis, O. (2006). Modelling the global ocean tides: a modern insight from FES2004. Ocean Dynamics, 56, 394-415.
- McDonald, C.L. (2006). Automatic, unstructured mesh generation for 2D, shelf-based tidal models. MS thesis, Brigham Young University.
- Weaver, R.J and Luettich, R.A. (2010). 2D&3D Studies with ADCIRC in a Long Narrow Channel. The 14th ADCIRC Model Workshop, Vicksburg.

원고접수일: 2011년 4월 12일

수정본채택: 2011년 5월 11일

게재확정일: 2011년 5월 12일