

병렬 유한요소 모형을 이용한 황해의 실시간 조석 및 태풍해일 산정

Realtime Tide and Storm-Surge Computations for the Yellow Sea Using the Parallel Finite Element Model

변상신* 최병호** 김경옥***
Sang-Shin Byun Byung-Ho Choi Kyeong-Ok Kim

Abstract

Realtime tide and storm-surge computations for the Yellow Sea were conducted using the Parallel Finite Element Model. For these computations a high resolution grid system was constructed with a minimum node interval of 300m in Gyeonggi Bay. In the modeling, eight main tidal constituents were analyzed and their results agreed well with the observed data. The realtime tide computation with the eight main tidal constituents and the storm-surge simulation for Typhoon Sarah(1959) were also conducted using parallel computing system of MPI-based LINUX clusters. The result showed a good performance in simulating Typhoon Sarah and reducing the computation time.

Keywords : Parallel Advanced Circulation Model(병렬유한요소모형), Realtime Tide(실시간조석), Storm-Surge(태풍해일), Gyeonggi Bay(경기만), Typhoon Sarah(태풍사라)

1. 서론

황해는 대륙붕 해역의 주요한 특성 중에서 조석현상이 가장 뚜렷한 해양외력으로 작용하고 있으며, 황해남부 연안의 목포항에서의 조차는 3m, 서한만의 압록강 입구에서는 6m, 경기만의 인천항 부근에서는 최

대 8m의 대조차를 보인다. 특히, 큰 조차를 가진 인천항을 포함하는 경기만 일대의 해역은 수많은 섬들의 산재와 연안 매립 및 간척 사업 등으로 인해 복잡한 해안선이 형성되어 있다. 또한, 인적·물적 교류와 군사 전략상 중요한 역할을 담당하는 인천항과 평택항 등 주요 항구 시설도 분포되어 있다. 이러한 복잡한 해안선과 중요한 부대시설이 분포되어 있는 경기만 해역에 대하여, 현업에서 실질적으로 활용될 수 있는 다양한 동수역학적 연구의 수행이 필요할 것이며, 이를 위해서는 상세 격자체계를 활용한 조석 수치모형의 연구가 선행되어야 할 것이다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 복잡한 해안선을 잘 해상시킬 수 있는 고해상도 유한요소 모형을 이용하

† 2008년 11월 27일 접수~2009년 1월 16일 게재승인

* 서울대학교(Seoul National University)

** 성균관대학교(Sungkyunkwan University)

*** 한국해양연구원(Korea Ocean Research and Development Institute)

책임저자 : 변상신(sangsin@snu.ac.kr)

여 경기만 해역을 최소 절점간격 300m인 상세격자 체계로 구성하고, 계산 효율의 극대화를 위해 MPI Library를 이용한 병렬계산 체계를 활용하여 주요 8개 분조($M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1$)에 대한 조석을 산정하였다. 또한, 이를 바탕으로 황해전역에 대한 실시간 조석산정 체계를 구성하였고, 그 결과에 부가하여 1959년 한반도에 막대한 피해를 초래한 바 있는 태풍 Sarah 내습 당시의 해일고를 산정하였다.

2. 모형의 개요

병렬 유한요소 모형인 PADCIRC(Parellel ADvanced CIRCulation model for oceanic, coastal and estuarine waters)는 유한요소 모형인 ADCIRC(Luetlich et al., 1992)^[9]를 기반으로 계산 효율성 향상을 위해 병렬화(Chipada et al., 1996)^[6] 작업이 이루어진 것으로 2차원 모형(2DDI)과 3차원 모형(3DVS)으로 구성되어 있다. 본 연구에 사용된 모형은 김(2001)^[2]이 수립한 바 있는 황해 전역의 유한요소 격자 체계에 경기만 해역의 국지 해상도를 높인 상세 격자 체계를 결합한 것으로, 국지 고 해상도의 황해 조석모형이며, PADCIRC의 2차원 모형(2DDI)을 이용하여 그 결과를 산정하였다.

가. 지배 방정식

PADCIRC의 2DDI 버전의 구면격자체계 지배 방정식은 다음과 같다.

1) 연속 방정식

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial UH}{\partial \lambda} + \frac{1}{R} \frac{\partial VH}{\partial \phi} - \frac{VH \tan \phi}{R} = 0 \quad (1)$$

2) 운동 방정식

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial U}{\partial \phi} - \left(\frac{U \tan \phi}{R} + f \right) V = - \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left[\frac{P_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{s\lambda}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{b\lambda}}{\rho_0 H} + D \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial V}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial V}{\partial \phi} + \left(\frac{U \tan \phi}{R} + f \right) U = - \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \phi} \left[\frac{P_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{s\phi}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{b\phi}}{\rho_0 H} + D_\phi - B_\phi \quad (3)$$

여기서, 각 항은 아래와 같다.

$(\eta + \gamma)$: 기초력, 지구조석, 자기인력, 하중조석

$\zeta(\lambda, \phi, t)$: 지오이드에 따른 자유 수면 변위

λ, ϕ : 경도, 위도

λ_0, ϕ_0 : CPP 지도투영법의 기준 경도, 위도

ρ_0 : 기준유체 밀도

$\tau_0(\lambda, \phi)$: 원시연속방정식과 GWCE에 의한 운동 방정식에 사용되는 가중치

$\tau_{bx}, \tau_{by}, \tau_{sx}, \tau_{sy}$: 바닥과 자유수면의 응력

B_x, B_y : 2DDI 경압 가속항

D_x, D_y : 2DDI 운동량 확산항

f : Coriolis 인자

$H(\lambda, \phi, t) \equiv h + \zeta$: 지오이드에 따른 수심

p_s : 자유수면의 대기압

$Q_x, Q_y \equiv UH, VH$: 단위폭당 Flux의 체적

R : 지구반지름

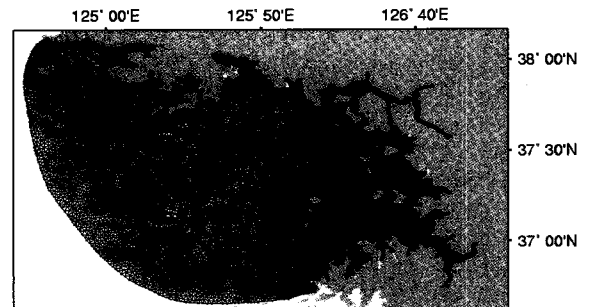
$S \equiv \cos \phi_0 / \cos \phi$: CPP 변환에 이용되는 Scale 인자

$U, V(\lambda, \phi, t)$: 2DDI 수평유속

수위는 2차원의 경우 일반화된 파랑 연속방정식(Generalized Wave Continuity Equation)형태로 수심 평균된 연속 방정식에서 구하며, 유속은 운동량 방정식으로부터 산정된다.

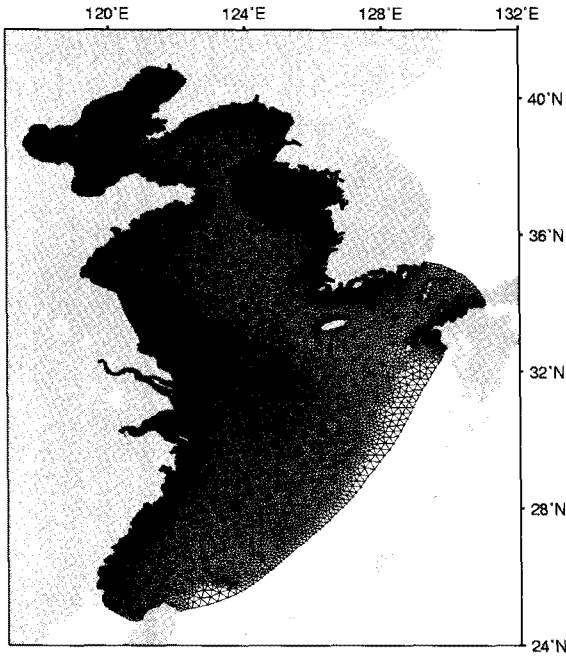
나. 모형의 격자체계

본 모형의 격자 체계는 김(2001)^[2]의 절점 38,090개, 요소 72,733개로 구성된 황해의 유한요소 격자 체계를 바탕으로 경기만을 국지 상세화 시킨 것으로, 황해 전역은 총 절점 66,399개, 요소 126,210개로 구성되어 있고, 이 중 경기만의 절점(약 3만개) 및 요소(약 7만개)가 황해 전체 격자수의 약 50%를 차지한다.



[그림 1] 경기만의 격자체계

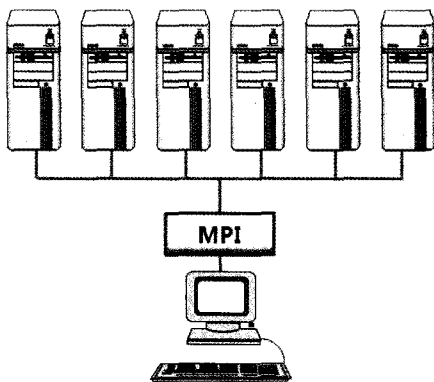
그림 1과 2는 경기만과 황해 전역의 격자 체계를 보여 주는 그림으로써, 국지 해상도를 높인 경기만의 격자 체계는 시화 방조제, 아산만 방조제, 삼교천 방조제를 포함시켜 서해안의 복잡한 해안선을 보다 잘 해상시킬 수 있도록 구성 하였으며, 최소 절점간 거리는 약 300m의 고해상도로 구성되어 있다.



[그림 2] 황해 전역의 격자체계

다. Parallel Computing System

성균관대학 해안·해양역학 실험실에 설치되어 있는 parallel computing system은 그림 3과 같이 6대의



[그림 3] Parallel Computing System 모식도

quad-core PC(총 24개의 CPU)를 gigabit ethernet으로 연결하여 구성된 Linux 기반 하의 병렬계산 체계이며, MPI Library를 이용하여 6대의 PC에 분산된 여러 CPU들을 하나의 CPU 처럼 동시에 활용할 수 있는 저 비용·고 효율의 계산 시스템 이다.

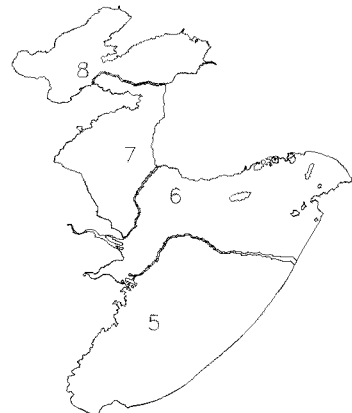
3. 분조별 조석산정 결과

가. 모형산정 결과

구성된 병렬 계산 체계에서 8개의 CPU를 이용하여 계산 시 유사한 격자수를 가지는 총 8개의 격자 영역으로 자동 분할되어(그림 4~5) 계산이 수행되었으며, 계산 소요 시간은 S_2 분조의 경우, 20주기 산정에 약 30분이 소요 되었다(계산시간 간격 15초 기준).



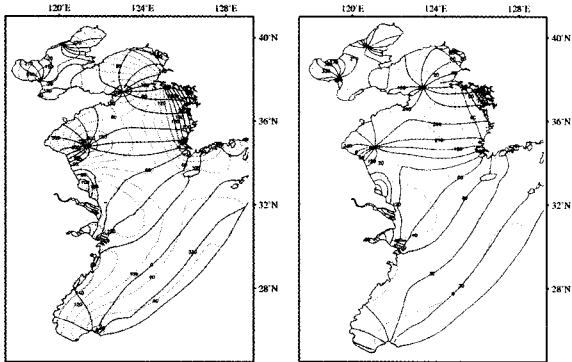
[그림 4] CPU Number 1~4에 의해 분할된 영역



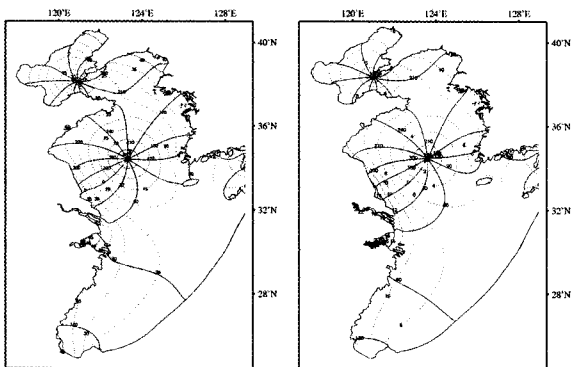
[그림 5] CPU Number 5~8에 의해 분할된 영역

나. 분조별 조석산정 결과

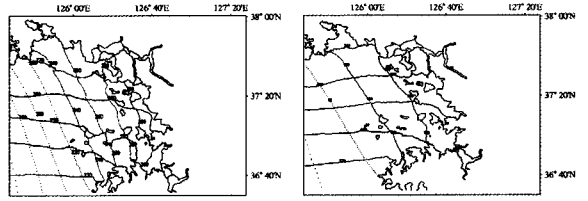
황해로 진입한 대양 조석의 거동은 우리나라 서해안을 따라 북상하여 북단에 이른 후 서진하고 발해만으로 전파된 뒤 반시계 방향으로 요동만과 발해만을 따라 남하하며, 중국 동해안을 따라 남 서진 및 남동진 하는 것으로 알려져 있는데, 본 모형을 이용하여 주요 8개 분조($M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1$)에 대한 조석 산정 결과, 전반적인 조석도의 형태가 기존 연구 결과^[1,7,8]와 잘 일치함을 확인하였으며, 그 결과는 그림 6~9와 같다. 해당 그림에서 점선과 실선은 각각 진폭과 위상을 나타낸다. 그림 10은 황해 전역과 경기만의 조위 관측 위치를 나타낸 것이며, 그림 11과 12는 해당 조위 관측 위치에서의 모형 결과와 관측 결과를 비교한 것이다. 황해 전역에 대한 비교 결과는 진폭 10cm, 위상 10% 이내로 잘 일치하였으며, 국지 해상도를 높인 경기만의 5개 정점에 대한 주요 4개 분조(M_2, S_2, K_1, O_1)의 계산 오차는 표 1에 제시하였다.



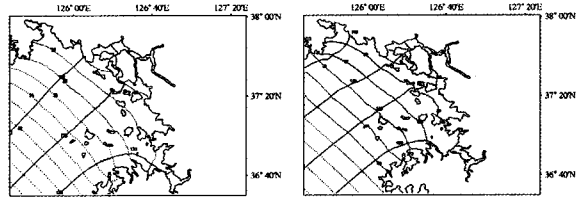
[그림 6] M_2 (좌) 및 S_2 (우) 조석도



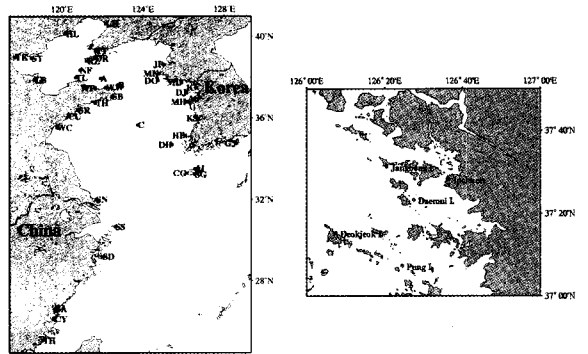
[그림 7] K_1 (좌) 및 O_1 (우) 조석도



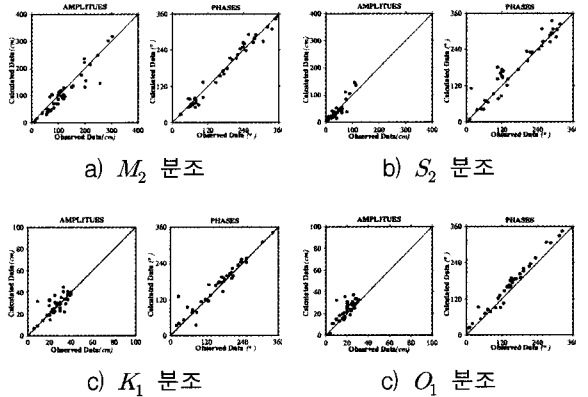
[그림 8] 경기만의 M_2 (좌) 및 S_2 (우) 조석도



[그림 9] 경기만의 K_1 (좌) 및 O_1 (우) 조석도

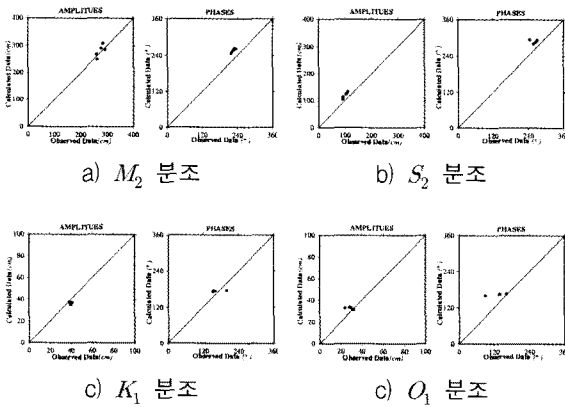


[그림 10] 황해(좌) 및 경기만(우)의 조위관측점



[그림 11] 황해 전역의 관측치와 계산치 비교결과

김(2001)^[2]의 결과와 경기만의 국지 해상도를 높인 본 모형의 결과를 상호 비교하기 위하여 황해 전역에



[그림 12] 경기만의 관측치와 계산치 비교결과

[표 1] 경기만의 관측치와 계산치의 오차

비 고	M ₂	S ₂	K ₁	O ₁
Amplitude(cm)	14.32	21.09	3.56	4.75
Phase(°)	29.49	29.58	17.78	36.39

대한 관측 치와 계산 치의 오차를 표 2에 제시하였다. 오차 비교를 위해 진폭과 위상을 동시에 고려한 식 (4)를 이용하였고, 표 2에 제시된 바와 같이, 본 모형에서 계산된 8개 분조의 오차가 모두 감소되었음을 확인 할 수 있다. 이는 경기만의 국지 해상도를 높인 본 모형의 결과 산정이 성공적임을 보여 주는 것이다.

ERMS =

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (A_{oi} \cos P_{oi} - A_{ci} \cos P_{ci})^2 + \sum_{i=1}^N (A_{oi} \sin P_{oi} - A_{ci} \sin P_{ci})^2}{N}} \quad (4)$$

여기서, 각 항은 아래와 같다.

A_o, A_c : 관측치와 계산치의 진폭(cm)

P_o, P_c : 관측치와 계산치의 위상(°)

N : 관측지점 수

[표 2] 황해 전역의 관측치와 계산치의 오차

비 고	M ₂	S ₂	N ₂	K ₂	K ₁	O ₁	P ₁	Q ₁
모형결과	46.8	19.9	15.4	11.0	8.4	10.0	3.1	5.8
값(2001)	52.9	29.1	22.2	14.9	16.9	12.4	4.9	5.9

4. 실시간 조석 산정

8개 분조에 대한 조석산정 결과는 관측 치와 비교 분석결과 양호한 일치성을 보여주었으며, 이에 따른 후속 시뮬레이션으로 외해경계에 8개 분조에 의한 조위 추정치를 입력으로 하는 실시간 조석산정 체계를 구성 하였다. 개방경계에서의 조석 입력은 식 (5)와 같이 표준조화 함수의 형태로 표시될 수 있다.

$$\zeta(x, \phi, t) = Z_0(x, \phi) + \sum_{i=1}^8 f_i H_i(x, \phi) \cos [V_i + \sigma_i t + u_i - g_i(x, \phi)] \quad (5)$$

여기서, 각 항은 아래와 같다.

Z_0 : 평균해면

f_i, u_i : 분조의 진폭과 위상의 18.6년 변화를 고려한 nodal factor

H_i : 분조 i 의 진폭

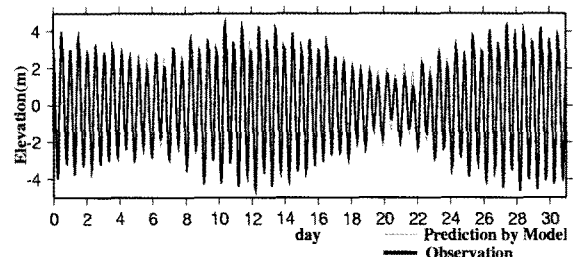
g_i : 분조 i 의 위상

V_i : Greenwich 기준 $t=0$ 에서 평균 분조에 상응하는 위상

σ_i : 분조 i 의 각속도

위 식에서 기원 시는 Greenwich 기준 1900년 1월 1일 00시이며, 18.6년 주기의 변화를 고려한 nodal factor를 각 분조의 진폭에 곱하고, 위상에 가감함으로써 실시간의 개방경계 조석 입력이 가능하게 된다.

이렇게 수립된 실시간 조석산정 체계를 바탕으로 1990년 1월 기간(30일) 동안 황해 전역의 조석을 산정하였고, 계산 소요 시간은 8개의 CPU를 이용 시 90분, 24개의 CPU를 사용시 약 30분이 소요 되었다. 산정된 모형 결과의 신뢰성을 확인하기 위해, 인천 검조소의 관측 조위와 모형의 비교 결과를 그림 13에 제



[그림 13] 실조석 계산 및 관측 결과(1990년 1월)

시하였는데, 경기만의 국지 해상도를 높인 본 모형의 계산 결과와 관측치가 양호한 일치성을 보임을 확인할 수 있다.

5. 태풍 사라(Sarah) 내습시의 해일고 산정

실시간 조석산정 체계의 수립과 그 결과의 신뢰성이 입증되어 태풍 Sarah 발생 당시의 풍속 및 해면 기압 자료를 입력하여 해일고를 산정하였다. 태풍 사라(Sarah)는 1959년 9월 우리나라에 가장 큰 영향을 끼친 태풍으로써, 류큐 열도를 지나 대한해협, 울릉도, 홋카이도를 지나는 경로를 갖고 이동하였다. 입력된 해면 기압 및 풍속 자료는 일본 기상협회가 제공하는 6시간 간격의 격자점 자료를 엄(2001)^[4]이 1시간 간격으로 내삽 한 5분 간격의 교호격자 체계의 바람자료로써, PADIRC 모형 내에 자동 내삽 기능이 있어 유효요소 모형의 격자체계로 변경이 필요 없이 사용 가능하였다. 태풍 사라의 경로는 그림 14와 같고, 매 1시간 간격의 해면 풍에 의한 풍속과 대기압이 모형 내에 입력되는데, 해면에서 바람에 의한 응력은 일반적으로 다음(식 6)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 F^{(s)} &= C_d \rho_a W_x W \\
 G^{(s)} &= C_d \rho_a W_y W
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

여기서, 각 항은 아래와 같다.

$F^{(s)}, G^{(s)}$: x, y 방향의 바람응력(Wind stress)

C_d : 바람응력 계수(Drag Coefficient)

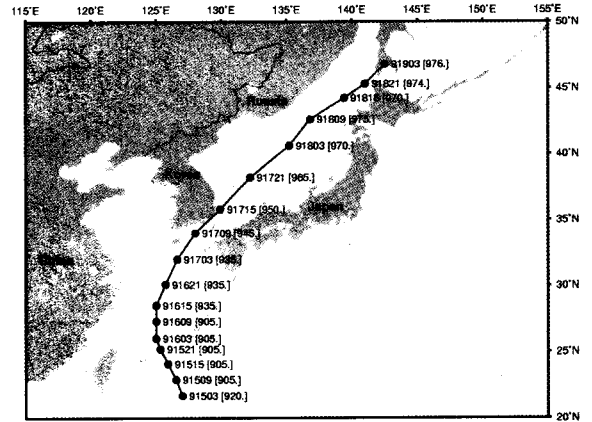
ρ_a : 공기의 밀도

W : 해면상 10m 에서의 풍속

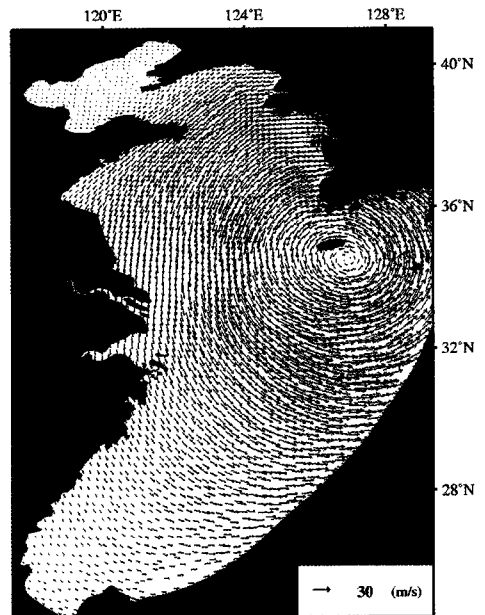
W_x, W_y : x, y 방향의 풍속 성분

PADIRC 모형내의 바람 응력계수(C_d)는 Garret's formula($C_d \times 10^3 = 0.75 + 0.067 W$)를 적용하였고, 모형 내에서 바람응력 계수가 0.003 보다 클 경우에는 0.003으로 제한하도록 되어 있다. PADIRC 모형 특성상 조석계산 시작 시부터 지정된 시간 간격의 바람 자료가 입력되어야 하므로 조석의 안정이 이루어지기 전인 계산 시작 시부터 약 3일간은 해면기압 1hpa과 풍속 0.0m/s를 입력하여, 태풍의 영향이 고려되지 않도록 하였으며, 조석이 안정되는 3일 이후부터 1959년

9월 15일 03시부터 19일 03시까지의 1시간 간격 바람 및 기압자료를 입력하여 해일고를 산정하였다. 5분 간격의 교호 격자체계의 바람 자료는 PADIRC 모형 내에 성공적으로 내삽 되었으며, 그 결과는 그림 15에서 확인할 수 있다.



[그림 14] 태풍 사라(Sarah)의 이동 경로도

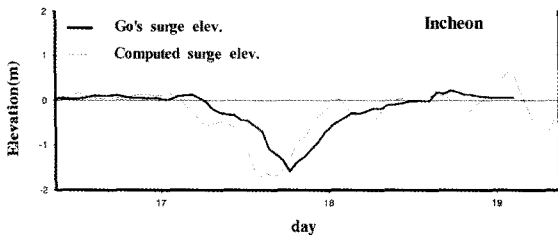


[그림 15] 모델에 내삽된 Wind Velocity(1959년 9월 17일 03시)

PADIRC로 산정된 최대 음의 해일고는 인천 -170cm, 목포 -114cm, 여수 -85cm, 대흑산도 -74cm로 나타났고, 최대 양의 해일고는 인천 64cm, 여수 50cm, 목

포 56cm, 대흑산도 33cm의 분포를 보였다. 이처럼 음의 해일고가 양의 해일고 보다 더 크게 나타나는 경향을 보이는데, 그 원인은 태풍 이동시 북동풍 및 북풍 계열의 효과가 해당 해역에 크게 작용한 때문인 것으로 판단된다.

태풍 사라(Sarah) 내습 당시 한국 연안에 대한 해일고 관측 결과가 없어 고(1998)^[1]가 수행한 바 있는 교호격자 체계의 Model 결과와 비교하였으며, 그 결과는 그림 16과 같다. 그림에서 붉은색 실선은 본 모형의 계산 결과이며, 파란색 실선은 고(1998)의 계산 결과이다. 비교 기간은 1959년 9월 16일 08시부터 19일 03시이며, 그림에서 태풍 사라(Sarah)가 남해안 및 동해안에 내습한 17일에 서해안의 인천항 부근에서 두 모형의 결과 모두 유사한 크기의 음의 해일고 분포를 보여주고 있다. 그러나, 황해 전역에 대하여 5분 간격(약 9km)의 교호 격자 체계를 활용한 고(1998)의 결과와 비교 시 그 시간과 패턴이 다소 상이한 이유는 8개 분조의 개방경계 입력에 의한 오차, 격자 체계의 상이, 그리고, 최소 절점간격 약 300m로 구성된 본 모형이 방조제를 포함하는 경기만의 복잡한 해안선을 보다 효과적으로 잘 반영하였기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 고(1998)의 모형에 비해 본 모형은 병렬화가 가능하여, 계산 효율을 극대화 할 수 있다는 장점이 있어, 다른 태풍에 대한 후속 시뮬레이션을 통해 모형 결과의 신뢰성을 보다 향상시킨다면 현업에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.



[그림 16] 인천의 해일고 산정결과 비교

6. 결론

병렬 유한요소모형을 이용하여 조석의 주요 8개 분조에 대한 황해 전역 및 상세격자 체계로 구성된 경기만의 조석 산정 결과는 관측 치와 양호한 일치를 얻었다. 이를 바탕으로 외해경계에 8개 분조의

조위 추정을 입력으로 하는 실시간 조석산정 체계가 성공적으로 구성되었으며, 이를 바탕으로 태풍 사라(Sarah)에 의한 해일고 산정 체계가 수립될 수 있었다.

이번 연구를 통하여, 관심 해역인 경기만 지역만 국지 해상도를 높여 상세 격자 체계로 구성하고, 그 외의 해역은 기존에 수립된 바 있는 김(2001)^[2]의 격자 체계를 그대로 활용할 수 있음을 확인 할 수 있었다. 또한, 병렬 계산 기법을 활용하여 30일간 실 조석 산정 시 약 90분(CPU 8개 이용 시)이 소요 되었고, 24개의 CPU를 활용 시 약 30분이 소요되어, CPU 수를 증가시키에 따라 계산 소요 시간을 획기적으로 단축시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서, 목적에 따라, 황해의 특정 관심 해역만 국지 해상도를 높이고, 그 이외의 해역은 본 모형의 격자체계를 그대로 활용 가능하므로, 격자체계의 구성을 위한 시간적 노력을 단축시킬 수 있을 것이다. 특히, MPI Library를 이용한 병렬 계산 체계의 신속한 계산 능력을 바탕으로 황해에서의 태풍-해일 산정 체계가 수립되어 해양 기상 중요한 현업에 실용적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

향후 다양한 태풍 Case 별 해일 산정 결과를 관측치와 비교·검증하여 모형의 신뢰성을 보다 향상 시켜 실용화 하려는 노력은 더 수반되어야 할 필요가 있을 것이다.

Reference

- [1] 고진석, 한반도 부근 해역의 극치해면 추정, 성균관대학교, 박사학위 논문, 1998.
- [2] 김경옥, 유한요소모형을 이용한 황해 및 동중국해의 조석산정, 성균관대학교, 석사학위 논문, 2001.
- [3] 변상신, 고해상도 수치모형에 의한 한국 서해안 조석산정, 성균관대학교, 석사학위 논문, 2002.
- [4] 엄현민, 한반도 주변해역의 악기상 상황에서의 유의과고 분포, 성균관대학교, 석사학위 논문, 2001.
- [5] 최병호, 변상신, 김경옥, 병렬 유한요소 모형에 의한 황해의 조석산정, 한국해안·해양공학 발표 논문집, pp. 108~118, 2001.
- [6] Chipada, S., Dawson, C. N., Martinez, M. L. and Wheeler, M. F., "Parallel Computing for Finite Element Models of Surface Water Flow",

- Computational Methods in Water Resources, 2, 1996.
- [7] Choi, B. H. "A Tidal Model of the Yellow Sea and the East China Sea", Korea Ocean Research and Development Institute Report 80-02, 1980.
- [8] Choi, B. H. and Fang, G., "A Review of Tidal Models for the East China and Yellow Seas", J. Korea Society of Coastal and Ocean Engineers, 5(2), pp. 151~171, 1993.
- [9] Luettich, R. A., Jr., Westerink, J. J. and Scheffner, N. W., ADCIRC : ADCIRC : An Advanced Three-Dimensional Circulation Model for Shelves, Coasts, and Estuaries. Report 1. Theory and Methodology 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., 1992.