

병렬 클러스터 시스템 구축 및 유한요소모형을  
이용한 황해 조석재현  
Setting Up of Parallel Cluster System and Reproduction of the Yellow Sea  
Tidal Hydrodynamics Using a FEM Model

서승원\* · 이화영\*\*  
SeungWon Suh\* and HwaYoung Lee\*\*

**요 지 :** 서해연안역의 폭풍해일고 산정을 위한 초기 연구 단계로, 8 node 병렬 리눅스 클러스터의 효율성과 함께 황해 조석 모의결과의 신뢰성을 검토하였다. NPB 벤치마크 결과 7배에 이르는 계산 효율의 성능향상을 보였다. pADCIRC 모델을 이용한 황해 조석재현 결과는 선행된 연구들과 비교하여 만족스런 신뢰성을 나타냈다. 모델 변수 선정에 따른 영향을 살펴본 바에 따르면, 우리나라 서해연안과 같은 천해역의 조석수동역학 해석에는 수심에 따른 바닥마찰계수의 적절한 사용이 필수적인 것으로 분석되었다.

**핵심용어 :** 병렬처리, 리눅스 클러스터, pADCIRC, 조석모의, 바닥마찰계수

**Abstract :** In this study 8 nodes parallel linux cluster system is constructed and tested for the evaluation of computational efficiency and reliability of the Yellow Sea tidal hydrodynamics prior to compute storm surge inundation along the west coast of the Korean Peninsular. Computational efficiency increases up to 7 times based on NPB bench-marking test. Simulated results by pADCIRC on reproduction of the Yellow Sea tidal hydrodynamics resemble well with previous studies. According to model parameter tests, bottom friction coefficient, which should be appropriately represented shallow depth along the west coast, is essential factor in simulation.

**Keywords :** parallel computing, linux cluster, pADCIRC, tidal modeling, bottom friction coefficient

## 1. 서 론

해양 및 해양공학 분야의 모델링에서 상세격자를 이용한 정밀한 해상과 빠른 속도의 연산에 관한 연구가 점차 활성화 되고 있다. 불과 수 년 전만 하더라도 황해와 같은 광역을 모의하기 위해서는 4~5만 여개의 절점으로 이루어진 격자망으로 해상하여 모델링을 실시한 것(서, 1999a, 1999b, 2000; 최 등, 2001)이 최신의 기술이었다. 그러나 정 규격자를 이용한 해석에서 Nested 기법으로 서해연안역의 시화호나 새만금과 같은 대규모 공사로 인한 영향을 모의하기가 어려웠고, 설사 가능하더라도 불규칙경계 해 상에 따른 오차들을 내포하고 있었다. 물론 슈퍼컴퓨터의

대규모 연산능력을 이용한 정밀한 모의가 가능하였지만, 고가의 사용료와 이용하기 어려운 점 등이 있어 활성화 되지는 못하였다. 황해처럼 불규칙 해안으로 구성된 해역 을 정밀 모의하기 위해서는 수십만에서 수백만에 이르는 절점으로 이루어진 비 구조화된 격자체계에서 대규모 연 산을 필요로 하는 격자망 운용의 필요성이 대두되고 있 다. 이러한 요구에 부응하기 위해 최 등(2001)은 병렬 클 러스터 시스템을 활용하였고, 연안역의 대규모 개발에 따 른 황해 조석체계 변화에 대한 연구(Choi and Lee, 2003)에 서 우수한 결과를 제공하고 있다.

컴퓨터 하드웨어의 발전상은 Fig. 1에서 보듯이 지난 40 여 년간 무어의 법칙(Moore's Law, [www.intel.com/technology/](http://www.intel.com/technology/)

\*군산대학교 해양시스템공학전공 (Corresponding author: SeungWon Suh, Dept. of Ocean System Engineering, Kunsan National University, Miryong, Kunsan, Chonbuk 573-701, Korea, [suh@kunsan.ac.kr](mailto:suh@kunsan.ac.kr))

\*\*군산대학교 대학원 해양산업공학과 석사과정

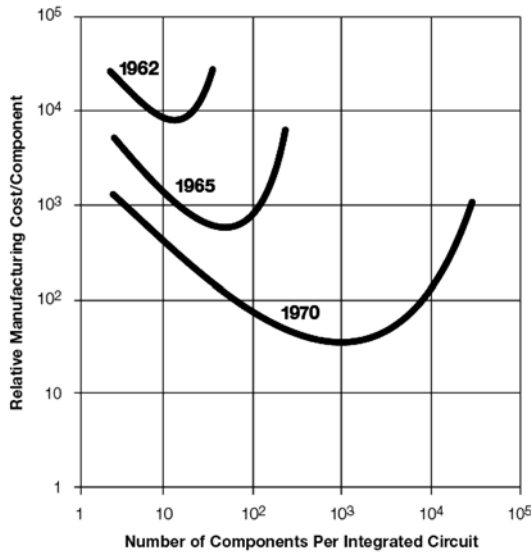


Fig. 1. Moore's Law.

moore's law)에 따라 지속적으로 CPU(Central Processing Unit)의 연산능력 향상과 더불어 Hardware(이하 H/W)의 가격은 크게 하락하였다. 이런 장점을 활용하여 클러스터(Cluster) 기술을 이용한다면 낮은 비용으로 슈퍼컴퓨터에 준하는 대규모 연산을 용이하게 할 수 있다. PC(Personal Computer)의 구조 또한 32비트에서 64비트로 발전되고 있어 클러스터도 32비트의 제약에서 벗어난 보다 고성능의 64비트 구축으로 변환되고 있다.

본 논문에서는 황해 조석 및 태풍 모의를 통해 재해 방지 및 연안관리 체계를 구축하는 일련의 연구 중 초기 단계의 성과를 제시하는데, 본 연구에서 구축된 64비트 병렬 클러스터 시스템은 기 선행된 연구(국립방재연구소, 2004; Choi et al., 2004)와 달리 변화된 조석체계와 해안선의 변화 등을 보다 정밀하게 반영할 수 있으며, 이에 따른 계산시간 또한 효율적인 장점이 있다. 연구에 이용된 모형은 시간진행형 병렬 유한요소 모형인 pADCIRC Ver. 46으로, 이 모형의 폭풍해일 적용사례는 Hurricane Katrina에 의하여 New Orleans가 범람된 것을 매우 근접하게 사전모의(Westerink et al., 2004) 및 사후에 평가한 성과(www.nd.edu/~adcirc/katrina.htm)가 있다. 그러므로 이 모형을 적용하는 본 연구에서 구축된 병렬 클러스터 시스템은 태풍으로 인한 서해연안의 폭풍해일을 실시간적으로 효율적인 모의를 할 수 있을 것으로 기대되나, 현 단계에서는 조석 예측에 관한 초기 연구 성과만을 제시한다.

## 2. 병렬 클러스터 시스템

### 2.1 병렬 클러스터(Parallel Cluster)의 구성

컴퓨터의 눈부신 발전과 H/W의 가격하락으로 네트워크에 접속된 다수의 컴퓨터들이 하나의 공통된 작업을 처리할 수 있도록 하는 병렬 컴퓨팅 환경을 구축하기 위한 연구들이 활발히 진행되어 왔다. 이러한 클러스터라 불리는 시스템이 제안되면서 슈퍼컴퓨터의 계산에 의존해야 했던 대규모 수치연산 문제들이 근자에는 PC에서도 이에 준하는 성능을 사용할 수 있게 되었다.

클러스터 기술은 크게 세 가지로 구분할 수 있는데, 서버의 장애 발생시 대처를 위해 2~3중으로 서버를 구성한고가용성 클러스터인 HA(High Availability), 대규모 수치연산을 위한 고성능 컴퓨터 클러스터인 HPC(High Performance Computer), 그리고 서버의 부하를 줄이기 위한 부하 분산용 클러스터인 LVS(Linux Virtual Server)가 있다.

본 연구에 사용된 클러스터는 HPC로써 클러스터들 간의 병렬통신을 위한 규약인 MPI(Message Passing Interface) 병렬 라이브러리를 사용한다. 본 클러스터 구축에는 MPI 최신 Version인 MPICH 2-1.0.3을 사용하였다. 본 연구에서는 H/W의 성능향상을 반영하기 위해 Intel사의 X86\_64 계열의 EM64T(Extended Memory 64 Technology)기반의 HT(Hyper Threading)기술을 적용한 CPU를 장착하여, 총 8 node의 64비트 리눅스 머신으로 구성된 HPC를 구축하였다. Node들 간의 통신장비로는 3COM사의 Gigabit Ethernet Switch Hub를 사용하고, 각 node 마다 Gigabit Ethernet Lan card를 장착하여 Gigabit 대역의 네트워크 통신망을 구축하였다. 본 클러스터 시스템의 각 node별 H/W 구성을 살펴보면, 연산과 계산결과의 취합을 담당하는 Master node에는 2.8 GHz의 듀얼코어 CPU와 1 GB의 메모리 그리고 SCSI(Small Computer System Interface)방식의 380GB 하드디스크를 장착하여 연산과 결과의 취합 시 원활한 작동을 할 수 있도록 하였다. 이외의 계산을 담당하는 7대의 Slave node에는 3.0 GHz의 CPU와 512 MB의 메모리 그리고 80 GB의 하드디스크를 장착하여 총 4.5 GB에 이르는 기억공간과 900 GB에 이르는 저장공간을 마련하였다. 병렬 클러스터 시스템의 OS(Operating System)로는 64비트 REDHAT Enterprise WS Ver. 4를 사용하였고, 병렬 유한요소모형 pADCIRC 컴파일에는 Portland Group의 PGI Workstation 6.0(64비트)을 사용하였다. 본 연구에서 구축한 병렬 클러스터 시스템은 기 구축된 Beowulf 시스템(최 등, 2001)과 달리 병렬계산 이외의 용도로 사

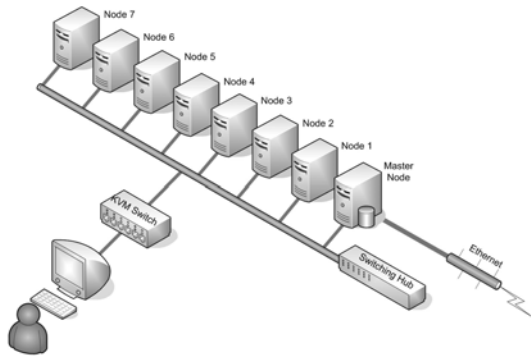


Fig. 2. Schematic diagram of parallel cluster systems used in this study.

용시 독립적 사용이 가능한 COW(Cluster Of Workstation) 시스템 방식을 사용하여 H/W 자원의 효율성을 높였다. 뿐만 아니라, 32비트의 제한사항을 보완한 64비트 머신과 Gigabit Ethernet을 사용하여 기본 대역폭을 확대 하는 등의 최신의 H/W와 S/W를 사용하여 성능향상을 꾀하였다. 본 8 node 리눅스 병렬 클러스터 시스템 구축에는 약 500만원(2006년 2월 기준)이 소요되었으며, 자세한 병렬 클러스터 구축 환경은 Fig. 2와 Table 1에 제시하였다.

### 2.2 병렬 클러스터 성능

병렬 클러스터의 성능은 메시지 전달을 다루는 네트워크 성능과 이를 통해 단위 시간당 얼마나 많은 연산을 하는가에 대한 계산 성능을 기준으로 종합적인 평가를 한다. 본 연구에서는 실제 모형실험에 앞서 8 node 병렬 클러스터의 성능을 알아보려고 네트워크 통신 대역폭과 계

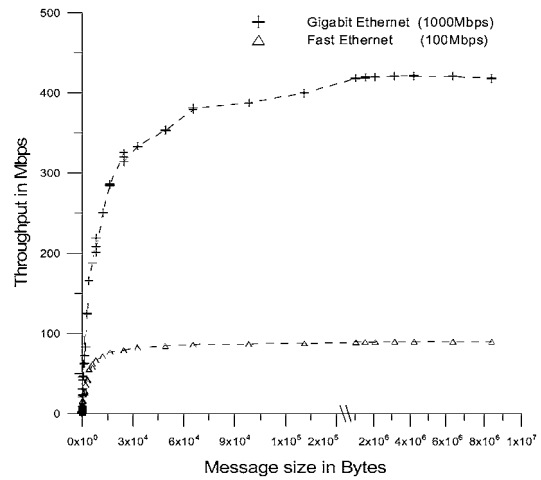


Fig. 3. Network bandwidth of cluster.

산 성능을 측정하여 Fig. 3과 Table 2에 각각 제시하였다. 네트워크 성능 측정은 NetPIPE([www.scl.ameslab.gov/netpipe](http://www.scl.ameslab.gov/netpipe))를 이용하였는데, 이는 SCL(Scalable Computing Laboratory)에서 개발한 도구로 네트워크에 연결된 컴퓨터들 간의 메시지 전송에 따라 소요되는 시간을 측정하여 네트워크의 전송 성능을 평가하는 것이다. 네트워크 성능 평가에 사용된 NetPIPE는 Ver. 2.4이며 대역폭 비교를 위해 Fast Ethernet과 Gigabit Ethernet을 상호 비교하여 Fig. 3에 제시하였다. 제시된 바와 같이 Fast Ethernet의 최대 대역폭은 90 Mbps에 가깝게 나타났다. 이는 Fast Ethernet의 이론적으로 가능한 최대 대역폭이 100 Mbps 정도인 것을 감안하면 상당히 만족스러운 결과로 판단된다. 그러나 Gigabit Ethernet의 경우 이론적으로 가능한 최대 대역폭

Table 1. Parallel cluster platform

<i>Master Node</i>	
Processor	Intel Pentium D(Dual Core) 820 Smith Field EM_64T 2.8 GHz(Front side bus 800MHz L1 cache 16KB×2 L2 cache 1MB×2)
MainBoard	INTEL D945GPIPL
Memory	DDR2 SDRAM 1GB (512×2) PC3200 400MHz
HardDisk	SCSI 380GB (10000rpm/68pin)
<i>Cluster Node</i>	
Processor	Intel Pentium4 630 3.0GHz EM_64T, Hyper Threading: HT (Front side bus 800MHz L1 cache 16KB L2 cache 2MB)
MainBoard	INTEL D915GAGL
Memory	DDR SDRAM 512MB (256×2) PC3200 400MHz
HardDisk	S-ATA 80GB (7200rpm/8M)
<i>Common</i>	
Network	Gigabit Ethernet Switch HUB, Intel Gigabit Lan card
MPI	MPICH2-1.0.3
OS	REDHAT Enterprise WS Ver. 4 (64 Bit)
Compiler	PGI Workstation 6.0 (64 Bit)

**Table 2.** Benchmark results of parallel system performance

LU Benchmark Completed.	
Class = A	Class = A
Size = 64×64×64	Size = 64×64×64
Iterations = 250	Iterations = 250
Time in seconds = 194.96	Time in seconds = 28.27
Total processes = 1	Total processes = 8
Compiled procs = 1	Compiled procs = 8
Mop/s total = 611.89	Mop/s total = 4219.99
Mop/s/process = 611.89	Mop/s/process = 527.50
Operation type = floating point	Operation type = floating point
Verification = SUCCESSFUL	Verification = SUCCESSFUL
Version = 2.4	Version = 2.4
Compile date = 17 Jul 2006	Compile date = 17 Jul 2006

이 1000 Mbps정도인 반면, 측정결과는 430 Mbps 정도로 나타났다. 이러한 저 대역폭 현상은 차후 진행되는 연구에서 개선되어야 할 점으로 남는다. 그렇지만 실제 계산에 응용한 10만 여개의 유한요소로 이루어진 황해 격자망을 가지고 병렬 처리한 결과 Fast Ethernet과 Gigabit Ethernet에 따른 계산 시간의 차이는 크게 나타나지 않는 것으로 이해된다.

두 번째로 수행한 계산 성능 평가는 미 항공우주국(NASA)에서 개발한 슈퍼컴퓨터 벤치마킹도구인 NPB(Bailey et al., 1995; [www.nas.nasa.gov/Resources/Software/npb.html](http://www.nas.nasa.gov/Resources/Software/npb.html))이다. 본 연구에서 사용한 NPB Ver. 2.4에는 네트워크 성능과 CPU의 계산 성능을 고려한 알고리즘이 8가지 존재하며, 필요한 계산 특성에 따라 클러스터의 성능을 종합적으로 판단할 수 있다. 구축한 8 node 병렬 클러스터 시스템을 사용하여 NPB의 8가지 계산 알고리즘 중 Navier-Stokes 방정식을 푸는 LU 알고리즘을 MPIF77로 컴파일 하였다. 벤치마크 결과 Table 2에서 보는 것처럼 약 7배에 달하는 계산 성능의 향상이 있었다. 이러한 성능은 계산 알고리즘 및 계산의 크기 그리고 컴파일러에 따라 달라질 수 있으나, pADCIRC모형이 소량의 메시지를 많이 주고받는 특성을 감안한다면 이와 같은 특성을 가진 LU 알고리즘을 사용한 분석이 타당한 것으로 이해된다.

Table 2의 Mop/s는 Mega operation per second로 부동소수점과 정수 연산을 통틀어 기준으로 하는 단위로서, 본 벤치마크 결과 중 Operation Type이 Floating Point이므로 Mflops와 같은 의미로 사용될 수 있다. 본 연구의 클러스터 구축에 사용된 단일 PC(Pentium 4 3.0 GHz)의 성능은 약 600 Mflops를 나타내고 있으며, 8 node 클러스터는 4200 Mflops를 나타내고 있어, 단일 PC에 비해 7배의 계

산 성능을 지닌 것으로 판단된다. 후술되겠지만 실제 10만 여개의 유한요소로 이루어진 본 황해격자망을 가지고 테스트한 결과에서도 NPB 벤치마크 결과와 비슷한 7배 정도의 성능향상을 보이고 있다. 병렬 클러스터 시스템의 효율은 식 (1)과 같이 속도향상과 프로세서 수의 비율로 정의된다. 또한 효율은 투자비용에 따른 효과를 나타내는 척도이다(김, 2004). 정의된 식에 따라 본 연구에서 구축한 클러스터 시스템의 효율을 계산해보면 77%의 우수한 효율을 갖는 것으로 나타났다.

$$E_p = \frac{S_B}{p} = \frac{T_1}{pT_p} \quad (1)$$

$$S_p = \frac{T_1}{T_p} (1 < S_p < p) \quad (2)$$

여기서,  $E_p$ : 병렬컴퓨터에서의 효율(efficiency)

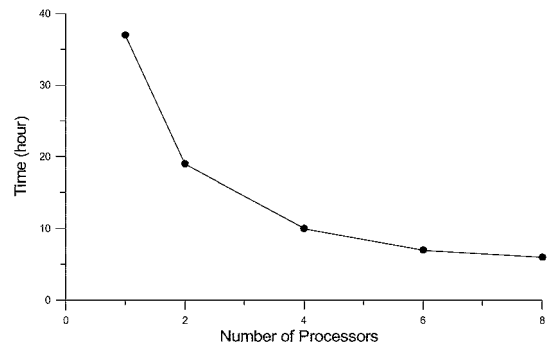
$S_p$ : 속도향상(speedup)

$p$ : 프로세서의 수(number of processors)

$T_1$ : 단일 프로세서에서 처리하는데 걸리는 시간

$T_p$ : p개의 프로세서를 가진 병렬컴퓨터에서 처리하는데 걸리는 시간

후술되는 황해 조석모의시 구축한 52472개의 절점과 100186개의 유한요소로 이루어진 격자망을 가지고 병렬 클러스터 node 수에 따른 성능을 측정하였다. 시간격자간격은 4초로 설정하고 35일간  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  4개 주요분조를 입력하여 계산한 결과, Fig. 4와 같은 계산 성능을 보이고 있다. Fig. 4에 제시된 바와 같이 병렬 클러스터의 node 수 즉, CPU 개수에 따라 계산시간은 지수 함수적으로 감소하는 것으로 나타났다. 1개의 CPU만을 사용하였을 경우 계산시간이 약 37시간이 소요 되었으며 8개의 CPU를 모두 사용하였을 경우 약 6시간이 소요되었다. 클

**Fig. 4.** Computing Time vs. number of processors.

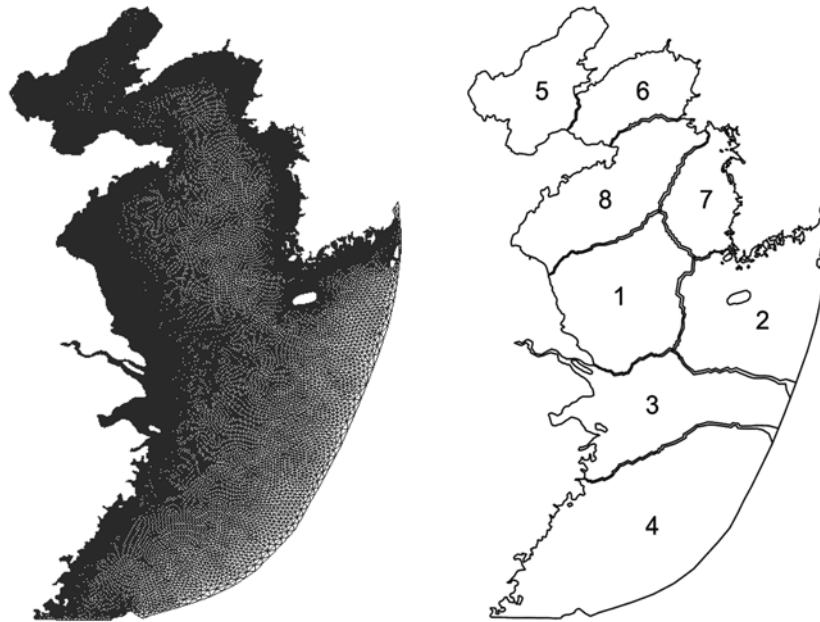


Fig. 5. FEM meshes on the Yellow Sea and domain decomposition.

러스터의 속도향상은 식 (2)처럼 정의될 수 있는데, 계산결과 약 6.2배의 향상을 보였다. 이는 위에서 언급한 NPB 결과와 매우 유사한 결과를 보이고 있다. 보다 우수한 시스템 효율을 위해 node 수의 확장을 고려할 수도 있으나, Fig. 4에 나타난 바와 같이 6-8개의 CPU를 사용한 경우, CPU 수 증가에 따른 시스템 효율의 향상은 크지 않은 것으로 판단된다. 이유는 일반적으로 node 수가 증가할수록 각 node 시스템의 상태 및 계산된 데이터의 전송시간에 따른 프로세서(CPU)들 간의 동작 시각을 일치시키기 위한 동기화에 필요한 시간이 증가하기 때문이다. 따라서 시스템 효율 향상을 위해 클러스터의 node 수를 확장해도 획기적인 성능의 향상은 기대하기 어려우며, 본 연구에서 구축한 8 node 병렬 클러스터 시스템이 비용이나 효율성 측면에서 수월한 것으로 판단된다.

### 3. 병렬 유한요소 모형

#### 3.1 영역분할 및 재구성

본 연구에 사용된 격자망은 선행 연구된(서, 1999a, 1999b, 2000) 격자망에 준거하여 ACE/Gredit(Turner and Baptista, 1993, 1999)을 이용하여 새만금 방조제와 같은 최근의 지형적 변화에 따른 영향을 평가하도록 하였고, 서해연안의 최소격자간격이 1 km 내외가 되도록 해상하여 총 52472

개의 절점과 100186개의 유한요소로 구성하였다. 이어지는 연구에서 검토될 서해연안역의 폭풍 해일고 산정에는 이 격자를 4배 이상 해상하여 최소격자간격이 250 m 정도가 되는 상세 격자망의 구축을 최종 목표로 한다. 본 연구에서 사용한 수심 또한 격자체계와 마찬가지로 선행연구에서 사용된 수심을 배경으로 연안역의 국부 해도 등을 이용하여 Fig. 6에서 보듯이 수심을 재현하였다.

10만 여개의 유한요소로 이루어진 하나의 격자망을 병렬 처리하기 위해서는 대상영역을 클러스터의 node 수에 맞추어 비슷한 절점과 유한요소로 나누어 계산하는 것이 중요하다. 이러한 병렬 계산을 위한 영역분할 방법으로 METIS Ver. 4.0(Karypis and Kumar, 1998)을 사용하였다. METIS는 기존의 Traditional Partitioning Algorithms보다 다양한 광역의 영역분할 능력이 우수하며 분할속도가 빠르고 행렬의 저장과 처리에 뛰어난 Multilevel Partitioning Algorithms을 사용하고 있다. 본 연구에서는 52472개의 절점과 100186개의 유한요소로 이루어진 황해전체 격자를 6500여개의 절점과 12500여개의 유한요소를 가진 8개 영역으로 분할하였다.

#### 3.2 병렬유한요소모형 pADCIRC

본 연구에서 사용한 pADCIRC(Parallel ADvanced CIRCulation model for oceanic, coastal and estuarine waters)모형은

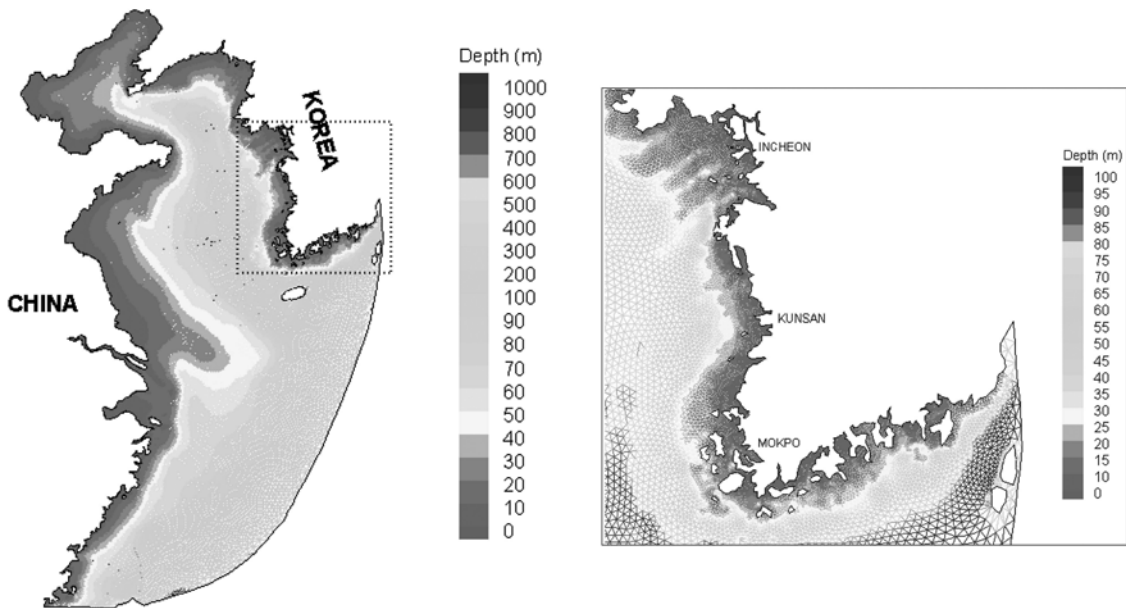


Fig. 6. FEM meshes and depth along the Korean Peninsular.

정밀한 경계 처리를 하며 장기간 동안 넓은 영역에서 해수순환을 모의할 수 있도록 개발된 유한요소 모형인 ADCIRC(Luetlich et al., 1992)를 기본으로 병렬화가 추가된 모형이다. 계산효율을 증진시키기 위한 병렬화는 Chipada et al.(1996)에 의해 수행되었으며, 미국 국립 허리케인 센터(National Hurricane Center)의 기본 모형으로 선정되어 대기-해양을 접목한 폭풍해일 예경보에 활용되어지고 있다. 이미 미국 연안의 Florida, Southern Louisiana, New Orleans등지에서 발생한 허리케인에 적용한 연구(Weaver and Slinn, 2004; Westerink et al., 2004)결과에서도 우수한 신뢰성을 나타내고 있다. 이 모형은 계속 보완 발전되는 단계이며, 해저마찰응력에 따른 변화를 효과적으로 모의할 수 있는 등의 개선점이 추가되어 본 모델링에서는 가장 최근의 모형인 pADCIRC Ver. 46이 사용되었다. 모형에 대한 기본적인 내용은 선행된 연구(서·김, 2003; 서·조, 2005)에서 이미 언급하였고 모형의 홈페이지(www.adcirc.org)에 자세히 기술되어 있으므로 본고에서는 생략한다.

#### 4. 황해의 조석 및 조류 재현

##### 4.1 조석 모의시의 마찰계수 영향

황해에서의 조석 수동역학을 모의하기 위한 실험은 선행된 연구(서, 1999a, 1999b, 2000)에서와 같이 개방경계

에 4개 주요 분조의 진폭과 위상을 부여하여 실시하였다. 조석 수동역학 모의에 가장 크게 영향을 미치는 변수로는 바닥마찰계수를 들 수 있는데, ADCIRC에서는 선형(linear), 비선형(quadratic), 혼합비선형(hybrid)등의 마찰계수 형태를 사용자가 정의할 수 있다. 본 연구에서는 이들 3가지 형태 중 비선형 형태와 혼합비선형 형태에 대한 상호 비교를 실시하며 마찰계수별 민감도 분석을 통해 황해영역에서 최적화된 바닥마찰계수를 산정하도록 하였다. 모델의 초기 입력 값으로는 선행된 연구(서, 1999a, 1999b)에서 사용되고 검증된 바 있는 0.0023을 사용하면서 실험을 실시하였다. 식 (3)은 마찰계수의 형태가 선형인 경우로써, 초기 입력된 바닥마찰계수( $C_b$ )값이 대상해역에 동일하게 적용되며, 주로 모형의 테스트에 이용된다. 식 (4)는 비선형 형태로써, 초기 입력된 바닥마찰계수가 수심에 따라 달리 적용 되는데, 선형 마찰계수 형태와 같이 전 해역에 동일한 값을 사용하는 경우와 각각의 절점에서 달리 정의된 바닥마찰계수를 사용하는 절점별 마찰계수(nodal friction) 형태로 구분된다. 비선형 마찰계수는 식 (5)와 같이 혼합비선형 형태로 나타낼 수 있는데, 이는 비선형 형태와 동일한 관계식을 사용하지만, 식 (5)에 의해 산출된 바닥마찰계수가 적용된다. 혼합비선형 형태의 특징은 수심이 얇은 천해역에서 쇄파특성 등을 효율적으로 모의 할 수 있는 장점이 있다.

$$\tau_* = C_f \tag{3}$$

$$\tau_* = \frac{C_f (U^2 + V^2)^{1/2}}{H} \tag{4}$$

$$C_f = C_{f\min} \left[ 1 + \frac{(H_{break})^\theta}{H} \right]^\gamma \tag{5}$$

- $U, V$  : 수심 평균된 유속
- $C_f$  : 바닥마찰계수
- $C_{f\min}$  : 최소 바닥마찰계수
- $H_{break}$  : 쇄파수심(m)
- $H$  : 총 수심(m)
- $\theta$  :  $C_f$ 가 접근 한계에 도달하는 속도
- $\gamma$  : 수심 감소에 따른 마찰계수의 증가 속도

황해 전 영역에서 수심이 다양하게 분포된 광역을 모의하기 위해서는 수심에 따른 적정 마찰계수가 반영되어야 한다. 최신의 pADCIRC Ver. 46에서는 이전 Version에서와 달리 각 절점별로 다양한 속성을 부여하는 기능이 새로 추가 되었다. 본 연구에서는 추가된 기능 중 「해저에서의 비선형 마찰계수」 기능을 사용하여 Fig. 7과 같이 서해연안의 수심 50 m 이하의 해역에서 바닥마찰계수 ( $C_f$ )를 수심별로 산정하여 이용하였다. 수심에 따라 상이한 마찰계수를 적용한 선행 연구로는 최-홍(2005)이 60 m 이하의 수심에서 특정 영역별로 0.0025~0.0030을 서해 중

부 연안역에서 적용한 바 있고, 동해 중부 지진해일 모의 시 해안에서의 지진해일파고 산정에 마찰계수의 형태를 달리 적용한 사례가 있다(최 등, 2006). 연안 수동역학 모의에서 해저마찰 영향이 지배적이기 때문에 서-김(2003)은 모델 초기 입력 값으로 0.0025를 적용하고 마찰계수의 형태가 비선형인 식 (4)를 사용하여 서해연안에 발달된 조간대의 효과가 수치 모의에 미치는 영향을 심도 있게 평가하기도 하였다.

그러나 위에서 언급한 비선형 및 혼합비선형 마찰계수를 변화시키며 수치실험을 실시하였으나, 서해연안의 천해역에서 만족할 만한 결과를 얻지 못하였다. 따라서 서해연안에서의 마찰 소산에 의한 에너지 감쇄와 진폭을 수월하게 모의하도록 Fig. 7에서 보는 바와 같이 50 m 이하의 수심에 대해서만 수심에 따라 0.0021부터 0.0023까지 선형적으로 마찰계수가 증가하도록 하였으며, 그 이외의 지역에서는 0.0023을 동일하게 부여하였다. 이렇게 각 절점별로 입력된 바닥마찰계수( $C_f$ ) 즉, 절점별 마찰계수는 식 (4)에 의해 비선형적으로 변환되어 모형에서 반영된다.

본 연구에서 제안한 해저마찰계수 산정 방법에 따른 모의 결과의 정량적인 비교를 위해 Fig. 8과 같이 서해연안의 특정 6개의 검조소를 택하여 조석진폭을 비교하였다. 군산 검조소는 서(1998)의 연구에서 실측한 군산외항의 자료값을 사용하였으며, 나머지 5개 지점은 한국해양연구소(1996)의 자료를 사용하였다. Table 3과 Table 4에 제시

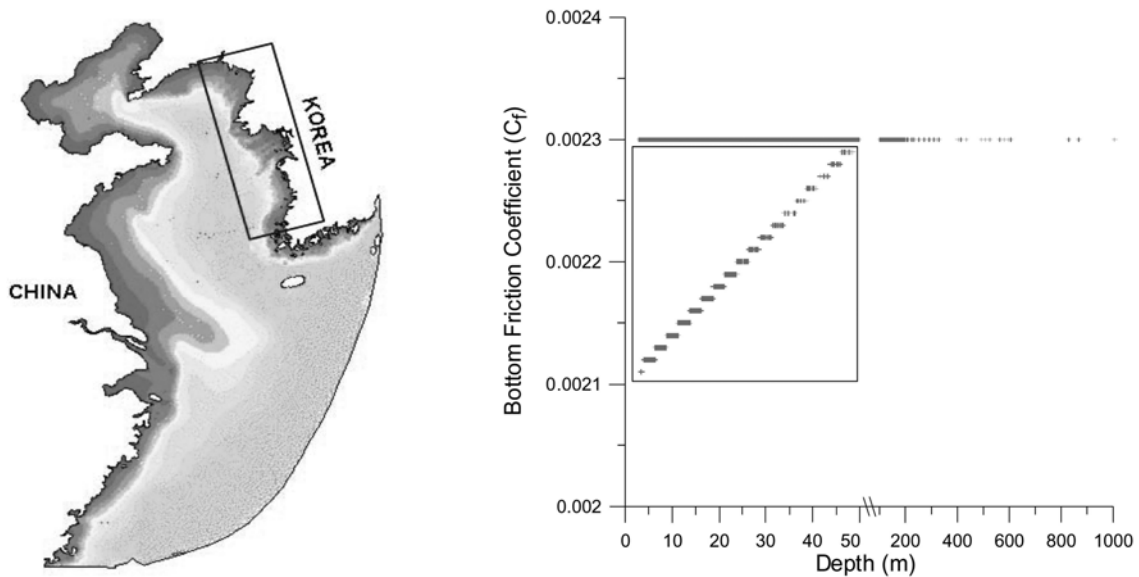


Fig. 7. Bottom friction coefficients applied on shallow region below 50 meters of depth.

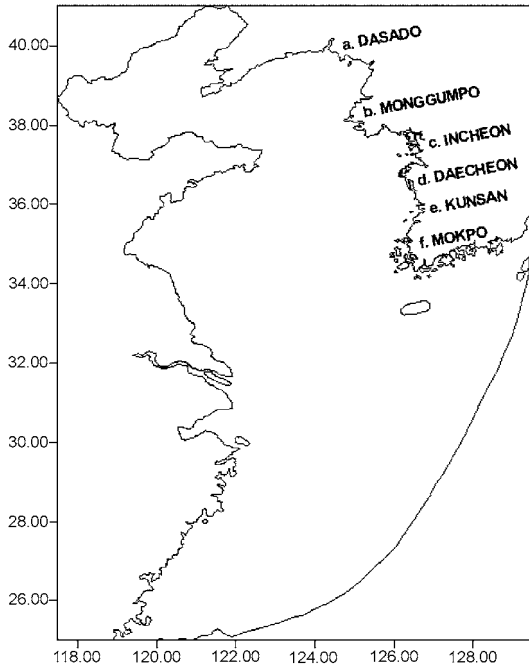


Fig. 8. Reference stations for tidal elevations comparison.

된 마찰계수 형태별 해석결과를 분석하여 보면 비선형 형태와 혼합비선형 형태를 적용한 차이가 나타나지 않으며, 50 m 이하 수심에서 수심별로 바닥마찰계수를 0.0021~0.0023으로 설정한 절점별 마찰계수 적용의 경우, 일정한 값이 이용된 비선형 형태에 비해  $M_2$  분조는 2~11 cm 정도가

증가 되어 나타나며,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  분조는 1~6 cm 내외의 증가가 나타난다. 위상의 경우  $M_2$  및  $S_2$ 는 3° 내외의 차이를,  $K_1$  및  $O_1$ 은 2° 내외의 차이를 보인다.

마찰계수를 비선형 및 혼합비선형의 형태로 사용하는 경우와 절점별 마찰계수를 산정하여 사용하는 경우의 정량적 비교를 RMS 오차분석을 통해 평가하였다. 비선형 및 혼합비선형 형태의 경우,  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  분조의 조석진폭 RMS 오차는 각각 19 cm, 12.4 cm, 11.2 cm, 8.6 cm를 보이고 있으며, 절점별 마찰계수 적용의 경우, 17.3 cm, 12.4 cm, 10.2 cm, 7.9 cm를 보인다. 위상 역시 비선형 및 혼합비선형 형태의 경우, 30.5°, 36.4°, 17.3°, 26.8° 보이며, 절점별 마찰계수 적용의 경우, 29.5°, 35.4°, 16.6°, 28.0° 보이고 있다. 이 결과는 서해연안과 같이 천해역을 모의하기 위해서는 절점별 수심에 따른 마찰계수를 사용하는 것이 타당한 것임을 보여준다. Table 3과 Table 4에 제시된 것처럼 우리의 관심이 집중되는 서해안의 몽금포, 인천, 대천, 군산 지역의 조석진폭과 위상은 대체로 만족스러운 결과를 보이고 있으나, 서한만에 위치한 다소도 및 목포의 경우, 다소 차이가 나타나는 것을 볼 수 있다. 특히 목포의 경우, 관측된 조석은 1980년대에 측정된 자료이므로, 정확한 조석 산정을 위해서는 이후의 변화된 목포구의 단면과 목포해역의 조간대 등을 반영하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

항해 전역에 대해 동시에 만족할 만한 조석결과를 얻지 못하는 사례는 여러 선행된 연구(서, 1999a, 1999b;

Table 3. Comparison of tidal amplitudes (cm) at reference stations shown in Fig. 8 according to bottom friction coefficient formular

	a	b	c	d	e	f	RMS error
$M_2$	observation value	215	112	294.9	226.4	224	136.2
	quadratic friction	187.3	97.7	281.9	224.3	224	168.1
	hybrid friction	187.3	97.7	281.9	224.3	224	168.1
	nodal friction	192.4	101	293.2	226.5	227.6	170.1
$S_2$	observation value	72	38	120.9	85.7	87	44.6
	quadratic friction	65.7	37.5	110.2	94	94	70
	hybrid friction	65.7	37.5	110.2	94	94	70
	nodal friction	67.9	38.6	116.3	95.6	96.5	71
$K_1$	observation value	38	34	35	36.2	35	31.6
	quadratic friction	26.1	23.4	23.6	23.7	23.3	23.1
	hybrid friction	26.1	23.4	23.6	23.7	23.3	23.1
	nodal friction	26.9	24.3	24.9	24.7	24.2	24
$O_1$	observation value	28	24	30.2	28.9	26	25
	quadratic friction	19.2	17.4	19.3	18.7	18.7	18.2
	hybrid friction	19.2	17.4	19.3	18.7	18.7	18.2
	nodal friction	19.7	18	20.4	19.3	19.3	18.8



**Table 4.** Comparison of tidal phases (degree) at reference stations shown in Fig. 8 according to bottom friction coefficient formular

		a	b	c	d	e	f	RMS error
$M_2$	observation value	263	202	129.1	83.4	117	54.1	
	quadratic friction	287.8	195.2	156.4	81.6	76.1	4.2	30.5
	hybrid friction	287.8	195.2	156.4	81.6	76.1	4.2	30.5
	nodal friction	287.8	196.5	153.1	81.4	77.1	5.2	29.5
$S_2$	observation value	307	245	180.1	128.2	169	107.2	
	quadratic friction	351.4	247.3	224.2	138.9	133.6	55.5	36.4
	hybrid friction	351.4	247.3	224.2	138.9	133.6	55.5	36.4
	nodal friction	352.2	249.5	221.0	138.9	135.2	56.9	35.4
$K_1$	observation value	336	315	297.9	274.1	297	261.8	
	quadratic friction	358.3	326.8	316.8	280.4	278.5	241.3	17.3
	hybrid friction	358.3	326.8	316.8	280.4	278.5	241.3	17.3
	nodal friction	356.3	329.1	317.6	282.2	281.0	243.5	16.6
$O_1$	observation value	299	266	270.5	240.3	259	227	
	quadratic friction	338.2	304.2	299.0	262.4	260.7	225.1	26.8
	hybrid friction	338.2	304.2	299.0	262.4	260.7	225.1	26.8
	nodal friction	340.2	306.2	299.5	263.7	262.9	226.9	28.0

최 등, 2001; 최·홍, 2005; Blain, 1995, 1997; Choi, 1989; Le Fevre et al., 2000; Naimie et al., 1998)등에서도 유사하다. 이처럼 조석 수치실험결과에 가장 민감하게 반응하는 바닥마찰계수를 변화시키면서 모델링을 실시하여 특정해역에 만족스러운 결과를 얻게 되면 타 해역에서는 비현실적인 결과가 나타나는 등 전역을 동시에 만족시키는 것은 매우 어려운데, 이는 조석에너지의 소산을 전역에서 일양하게 모의하지 못하기 때문인 것으로 사료된다.

조석 수동역학에 대한 모의결과 중 4개 주요 분조 각각의 분조별 등진폭과 등위상각을 플로팅하여 Fig. 9에 도시하였는데, 이는 기존의 선행된 연구(서, 1999a, 1999b; 최 등, 2001; 최·홍, 2005; Kang et al., 2003)와 비교하여 유사하며 오히려 서해연안의 조석진폭을 잘 재현하고 있는 것으로 분석된다. 발해만에서의  $M_2$ ,  $S_2$  분조의 무조점의 위치는 Kang et al.(2003)과 서(1999a)의 연구에서 무조점이 육지쪽으로 이동된 현상을 제시한 바 있으며, 최 등(2005)은 그 위치가 삼각주 발달에 의해 조금씩 변화됨을 제시한 바 있다. Fig. 9에 제시된 본 연구결과에서 반일주조 및 일주조 성분의 무조점 위치는 기존의 연구결과(최·홍, 2005; Kang et al., 2003) 및 관측된 자료(China Ocean Press, 1992)와 비교하여 발해만의 무조점을 포함한 황해전역에서의 무조점들을 비교적 잘 재현하고 있는 것으로 분석된다.

#### 4.2 조류 모의결과

pADCIRC 모형을 이용한 황해의 조류 모의결과를 정량적으로 비교 평가하기 위하여 1986년 6개의 정점에서 관측된 자료들 가운데 황해 중심부의 4개 정점에서의 측정된 중층 조류자료(Choi, 1989)를 가지고 RMS 오차를 비교분석하여 Table 5와 Table 6에 제시하였다.

유속의 경우  $M_2$  분조의 진폭은 각 방향별로 4 cm/sec 이내의 오차를 가지며, 위상은 20~26° 정도의 오차를 보인다.  $S_2$  분조의 경우 각 방향별로 2 cm/sec 이내의 오차가 나타났으며, 위상은 30° 정도의 오차가 나타났다.  $K_1$  및  $O_1$ 의 경우 U 방향의 성분에서는 1 cm/sec 이내의 오차를 나타냈으며, V 방향 성분은 2~3 cm/sec 정도의 오차를 보이고 있다. 위상의 경우, U 방향으로 25~38°, V 방향으로 5° 정도의 오차가 나타났다. 이는 조화유한요소 모형을 이용한 기존의 연구(서, 1999a) 및 Choi(1989)에 의한 유한차분 모델링 결과와 부합되는 것으로써 본 pADCIRC 모형의 결과가 만족스럽게 황해의 조류를 재현함을 의미한다.

#### 4.3 새만금 방조제 건설로 인한 조석체계 변화 해석

새만금 방조제 완공 이전부터 대규모 연안공사가 황해 전반의 조석체계변화에 미치는 영향을 살펴보기 위한 다수의 시도(김, 2000; Choi, 2000, 2001; Kang et al., 2003)가 있었다. Choi(2001)의 연구에서는 새만금 일대를 포함한

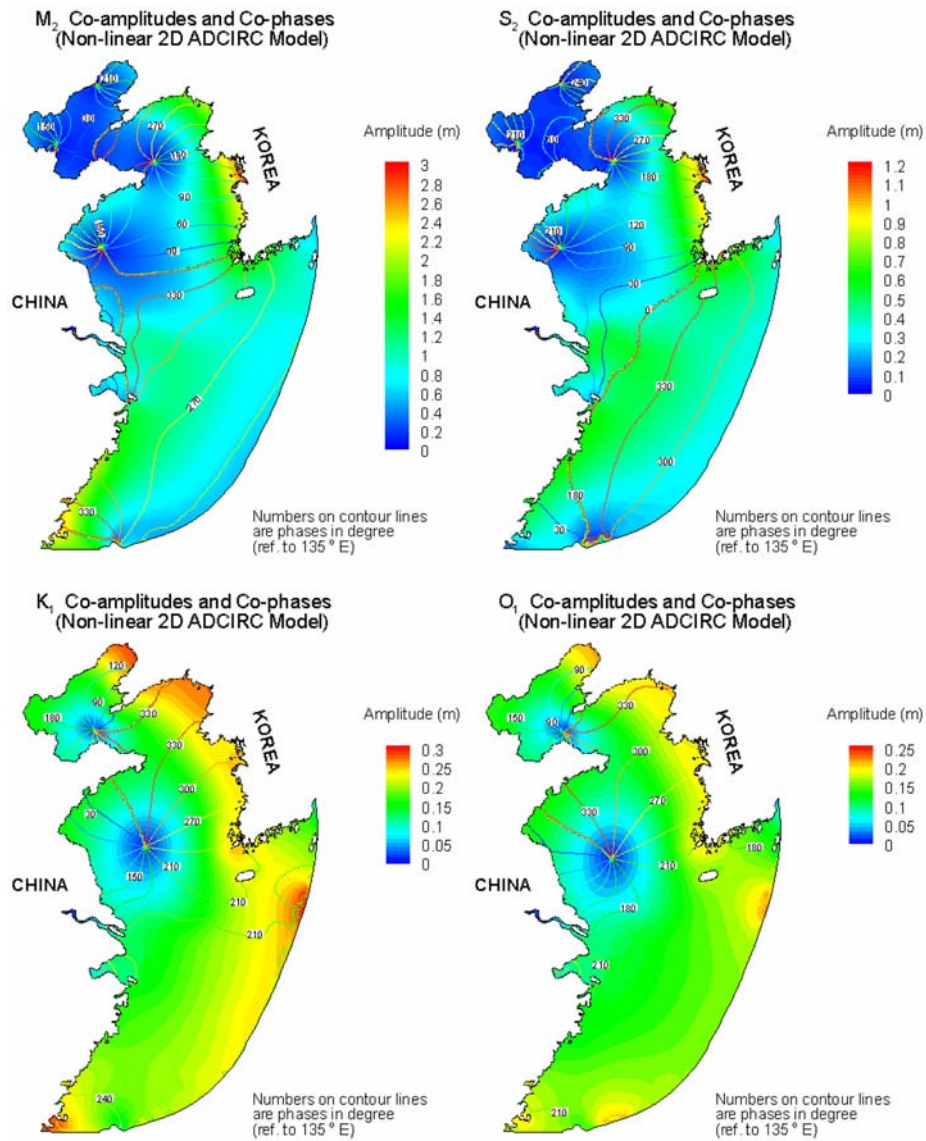


Fig. 9. Computed tidal chart.

**Table 5.** Comparison of tidal currents for semi-diurnal constituents,  $M_2$  and  $S_2$  in the Yellow Sea for fine grid system (Magnitude of amplitudes are cm/sec, all phases are referenced to 135°E and observed meter data are from Choi, 1989)

Location			$M_2$				$S_2$											
			U component		V component		U component		V component									
Lon.	Lat.	Depth	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase								
			Obs	Cal	Obs	Cal	Obs	Cal	Obs	Cal	Obs	Cal						
124°05.0'	36°56.9'	38 m middle	2.4	1.4	166	142.1	5.9	5.3	294	274.6	1.4	1	124	124.7	3.9	3.4	259	258
124°34.9'	36°00.1'	41 m middle	1.5	1.7	241	200.8	8.8	6.0	278	256.2	0.9	1.2	190	134.2	5.9	4.2	234	234.6
124°44.3'	35°13.8'	70 m middle	2.4	1.5	148	157	10.4	7.2	273	245.4	2.4	1.1	75	127.6	7.3	5.4	232	223.2
124°41.5'	34°18.1'	48 m middle	2.7	2.2	100	80.8	12.7	7.4	274	246.8	2.7	2.0	63	65.61	8.4	6.0	228	225.6
RMS error			0.7		25.7		3.4		24.3		0.8		38.5		1.8		4.6	

**Table 6.** Comparison of tidal current of tidal currents for diurnal constituents,  $K_1$  and  $O_1$  for fine grid system

Location			$K_1$								$O_1$							
			U component				V component				U component				V component			
Lon.	Lat.	Depth	Amplitude		Phase		Amplitude		Phase		Amplitude		Phase		Amplitude		Phase	
			Obs	Cal	Obs	Cal	Obs	Cal	Obs	Cal	Obs	Cal	Obs	Cal	Obs	Cal		
124°05.0'	36°56.9'	38 m middle	2.4	1.4	166	142.1	5.9	5.3	294	274.6	1.4	1	124	124.7	3.9	3.4	259	258
124°34.9'	36°00.1'	41 m middle	1.5	1.7	241	200.8	8.8	6.0	278	256.2	0.9	1.2	190	134.2	5.9	4.2	234	234.6
124°44.3'	35°13.8'	70 m middle	2.4	1.5	148	157	10.4	7.2	273	245.4	2.4	1.1	75	127.6	7.3	5.4	232	223.2
124°41.5'	34°18.1'	48 m middle	2.7	2.2	100	80.8	12.7	7.4	274	246.8	2.7	2.0	63	65.61	8.4	6.0	228	225.6
RMS error			0.7		25.7		3.4		24.3		0.8		38.5		1.8		4.6	

전라남북도와 충청남도 서해연안에서 새만금 방조제 건설로 인한  $M_2$ ,  $S_2$ 분조의 조석진폭 변화를 제시한 바 있다. Choi(2001)는 신시도 부근의 정점에서 새만금 방조제 건설로 인한  $M_2$ 분조의 변화폭을 약 20 cm로 제시하였으며, 새만금 건설의 영향이 황해전역에까지도 미칠 수 있음을 제시한 바 있다. 본 연구에서는 Fig. 11와 같이 새만금 해역 인근에 중/횡 방향으로 정점 5개를 선정하여 방조제 건설 전후의  $M_2$ ,  $S_2$ 분조의 조석진폭과 위상의 변화를 Table 7에 나타내어 비교 평가하였다. 이와 더불어 황해전역에서 새만금 방조제 건설로 인한 영향을 알아보기 위해  $M_2$ ,  $S_2$ 분조의 조석진폭 변화를 Fig. 10에 제시하였다. 결과를 분석하여 보면, 황해에 위치한 정점 W1~W5의 변화폭 보다 중측에 위치한 정점 N1~N5의 변화폭이 크게 나타나는 것으로 평가되었다. 즉, 새만금 방조제 건설로 인한 조석체계 변화는 외해역으로 확대되는 것 보다는 서해연안을 따른 조석진행 방향으로 영향을 더 미치고 있는 것으로 분석된다. 황해 전역에 대한 결과를 제시한 Fig. 10에 따르면 산동반도 하단 부근에서  $M_2$ 분조의 조석진폭은 2 cm 가량 상승되어 나타났으나, 크기의 정도가 상대적으로 크지 않기 때문에 새만금 방조제 건설로 인한 황해 전역까지 미치는 영향은 크지는 않고 국부적인 변화를 유발하는 것으로 평가된다. 새만금 방조제 건설로 인한 반일주조의 최대 진폭변화는 방조제 남측에서  $M_2$  분조 9 cm,  $S_2$  분조 4 cm 정도로 각각 감소되어 나타나며,  $M_2$  분조의 경우, 선행된 김(2000)과 Kang et al.(2003)의 연구 결과와 잘 일치한다.

Choi(2001)는 신시도 부근의 정점에서 새만금 방조제 건설로 인한  $M_2$ 분조의 변화폭을 약 20 cm로 제시한 바 있는데, 본 실험에서 비교 정점으로 설정한 신시도 인근의 정점 W5에서 새만금 방조제 공사로 인한  $M_2$  분조의 변화폭은 4 cm정도로, Choi(2001)가 제시한 결과보다 낮은 결과치를 보인다. 이러한 경향은 김(2000)과 Kang et

al. (2003)의 결과와 일치되는 것으로, 새만금 방조제 건설로 인한 조석 변화폭이 다소 과다하게 산정된 것으로 인식되는 기존 연구결과에 대해 Kang et al.(2003)은 수치모델에 따른 결과의 차이에 대한 문제를 이론적으로 해석하는 연구의 필요성을 언급한 바 있는데, 이는 향후 조석 관측자료의 추가 보완 및 분석을 통하여 규명해야 될 것으로 판단된다.

### 5. 결과분석 및 토의

황해 조석모의를 위해 8 node 64비트 리눅스 병렬 클러스터 시스템을 구축하고 유한요소모형 pADCIRC를 사용하여 병렬계산에 대한 효율성과 결과 검토를 실시하였다. 64비트 머신으로 구축된 병렬 클러스터 시스템은 NPB 벤치마크에서 7배에 이르는 성능향상을 나타낸다. 네트워크 대역폭은 430 Mbps로 이론적인 Gigabit 대역에 근접하지는 못하였으나, 대역폭이 100 Mbps인 Fast Ethernet 보다 4배 이상 향상된 대역폭을 제공함을 알 수 있다. 이러한 고성능의 병렬 클러스터 시스템을 활용하여 10만 여 개의 요소로 이루어진 황해 격자망을 병렬유한요소모형 pADCIRC로 모의한 병렬 클러스터 시스템의 효율은 77%로 비교적 우수한 효율을 나타냈다. 모의결과에 있어서도 무조점의 위치 및 위상이 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다. 조류의 분석 결과 또한 반일주조의 경우 2 cm/sec~4 cm/sec 내에서 관측치와 일치하며 일주조 성분의 경우 다소 차이는 있지만, 1 cm/sec~3 cm/sec 내에서 관측치와 부합되며, 위상은 대체로 1시간 내외의 편차를 나타내어 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다. 조화유한요소 모형을 이용하여 선행된 황해에 대한 연구(서, 1999b)에서 황해 전역에 동일한 바닥마찰계수를 사용하면 조석에너지의 소산을 전역에 대해서 적절히 모의하지 못하는 문제점이 부각되었지만, 이러한 문제점을 해결하기 위해 황해역에서

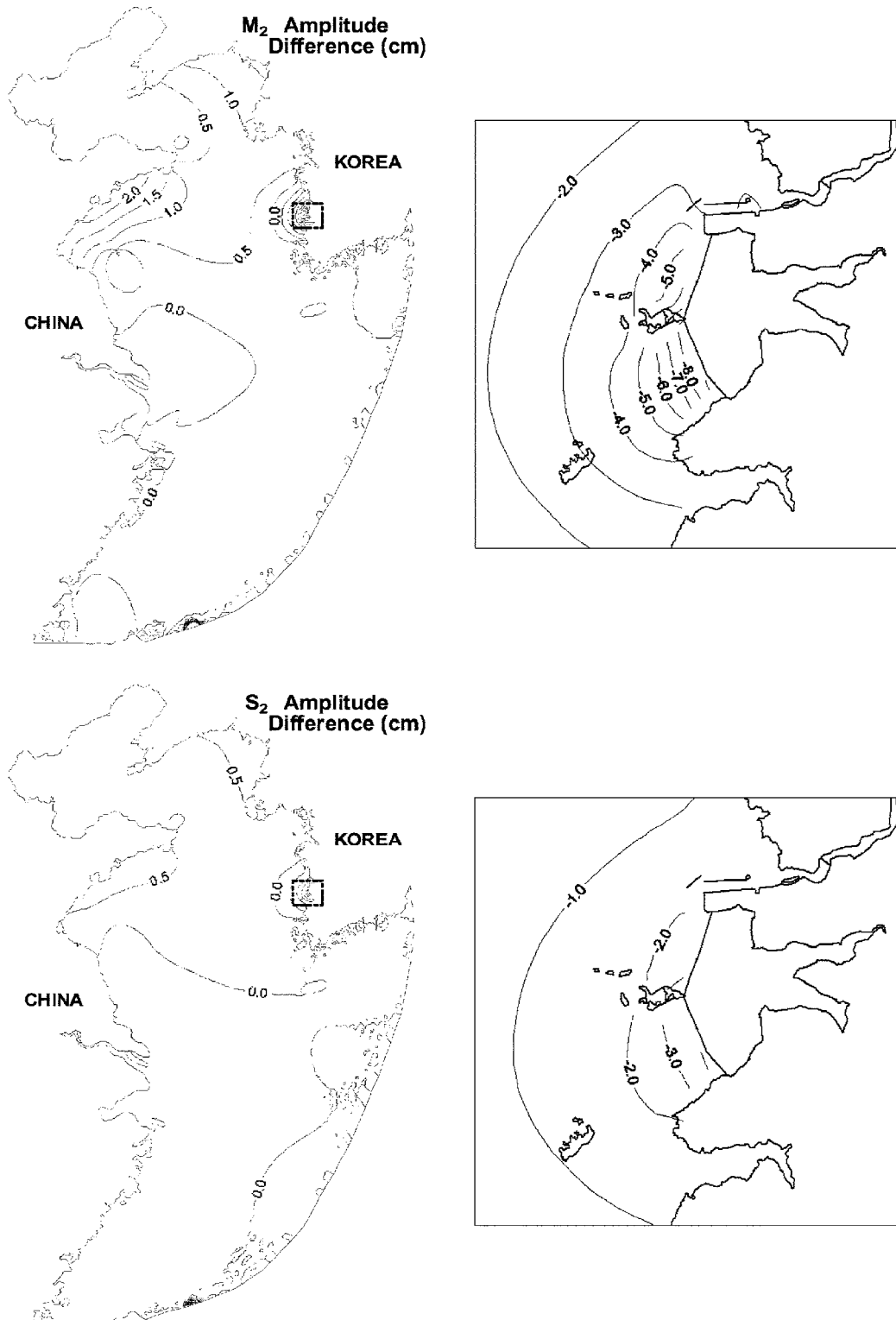


Fig. 10. Tidal amplitudes difference of  $M_2$  and  $S_2$  due to Saemangeum tidal barrier construction.

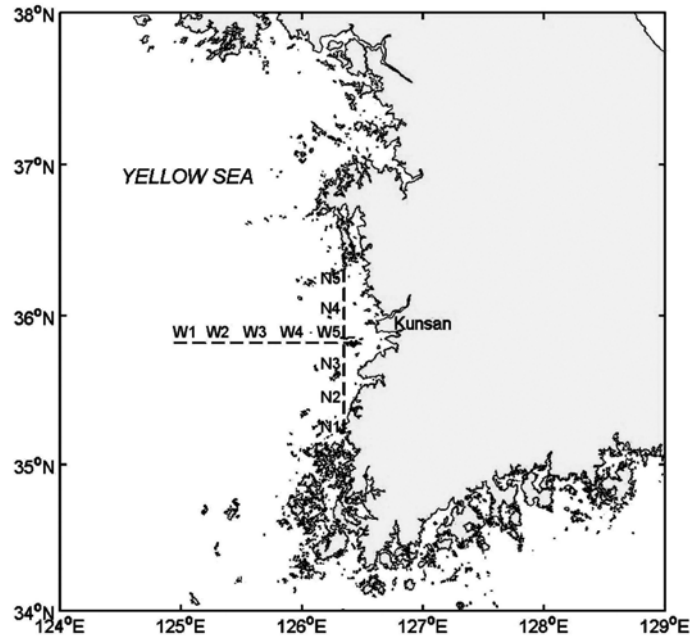


Fig. 11. Map showing references points for comparing Saemangeum effects.

Table 7. Tidal amplitudes changes of  $M_2$  and  $S_2$  due to Saemangeum tidal barrier construction

St	$M_2$						$S_2$					
	Amplitude (cm)			Phase (deg)			Amplitude (cm)			Phase (deg)		
	After	Before	Diff	After	Before	Diff	After	Before	Diff	After	Before	Diff
W1	119.8	119.5	0.3	68.3	69.1	-0.8	50.0	49.8	0.2	122.6	123.4	-0.8
W2	137.5	137.6	0.1	68.1	69.0	-0.9	57.6	57.5	0.1	122.7	123.5	-0.8
W3	155.6	156.1	-0.5	66.6	67.5	-0.9	65.3	65.5	-0.2	121.4	122.3	-0.9
W4	179.7	181.5	-1.8	66.1	67.3	-1.2	75.7	76.5	-0.8	121.4	122.7	-1.3
W5	198.2	201.9	-3.7	66.2	68.2	-2	83.5	85.2	-1.7	121.9	124.2	-2.3
N1	188.5	189.3	-0.8	50.2	50.8	-0.6	78.6	79.0	-0.4	106.6	107.3	-0.7
N2	191.0	192.3	-1.3	57.5	58.3	-0.8	80.1	81.0	-0.9	113.3	114.3	-1
N3	192.4	195.3	-2.9	62.8	64.0	-1.2	81.0	82.4	-1.4	118.4	119.8	-1.4
N4	199.9	202.4	-2.5	71.2	73.0	-1.8	84.3	85.4	-1.1	127.1	129.2	-2.1
N5	208.3	209.8	-1.5	77.6	79.3	-1.7	87.9	88.4	-0.5	134.0	135.9	-1.9

최적화된 바닥마찰계수 산정을 위하여 수심 50 m 이하의 천해역에서 마찰계수를 수심에 따라 0.0021~0.0023으로 선형적으로 변화시켜 모의함으로써, 관측치와 부합되는 결과를 얻을 수 있었다. 이를 통해 황해와 같은 광역 및 천해역인 우리나라 서해안에서는 수심에 따른 마찰계수 사용이 필수적임을 확인하였다. 본 실험을 통해 계산정한 새만금 방조제 건설로 인한  $M_2$ 분조의 최대 변화폭은 9 cm 정도로, Choi(2001)가 제시한 20 cm 정도의 변화와는 유의할만한 차이를 보인다. 새만금 방조제의 건설이 황해 조

석체계 변화에 미치는 영향은 향후 조석 관측자료의 추가 보완 및 분석을 통하여 보다 자세하게 규명될 것이다.

## 6. 결 론

서해연안역의 폭풍해일고 정밀산정을 위한 초기 연구 단계로써 8 node 리눅스 병렬 클러스터의 효율성과 신뢰성을 알아보았다. 본 연구에서 구축된 병렬 클러스터는 7배에 이르는 계산 성능향상과 77%의 우수한 효율을 보

였다. 이러한 병렬 클러스터 시스템을 기반으로 황해 조석산정을 한 결과, 서해연안의 조석진폭과 위상 그리고 조류를 잘 재현하였다. 비선형 및 혼합비선형 형태의 마찰계수를 사용한 경우와 천해역에서 절점별 수심에 따른 마찰계수를 사용한 경우와의 비교를 통해 황해와 같은 광역 및 우리나라 서해연안과 같은 천해역을 모의하기 위해서는 절점별 수심에 따른 마찰계수를 사용하여 조석에너지의 소산을 적절히 모의하는 것이 타당함을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구에 사용된 pADCIRC Ver. 46의 제반사항을 협조해 주신 Luettich와 Westerink 교수께 감사의 뜻을 전한다. 본 연구는 새만금환경연구센터(SERC)의 연구지원, 해양수산부 2006 KSGP 지원에 의해 수행되었기에 심심한 사의를 표한다.

### 참고문헌

- 국립방재연구소 (2004). 태풍 「매미」 내습시 경남해역의 조석 및 폭풍해일 모의.
- 김경욱 (2000). 유한요소모형을 이용한 황해 및 동중국해의 조석산정. 석사학위논문, 성균관대학교.
- 김종현 (2004). 병렬컴퓨터구조론, 생능출판사.
- 서승원 (1998). 금강하구역의 수동역학적 변화(1) -관측자료 중심으로-. 한국해양·해양공학회지, 10(1), 10-17.
- 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, 김정훈 (2003). 조석수동역학 모의에서 조건대 침수-노출 고려효과 비교연구, 한국해양·해양공학회지, 15(2), 97-107.
- 서승원, 조완희 (2005). 홍수전파와 배수갑문 운영에 따른 새만금호 내부 수리특성의 동적응답. 한국해양·해양공학회지, 17(4), 269-279.
- 한국해양연구소 (1996). 한반도 주변 조석 조화상수 자료집.
- 최병호, 변상진, 김경욱 (2001). 병렬유한요소 모형에 의한 황해의 조석산정. 한국해양·해양공학회 발표논문집, 12, 108-118.
- 최병호, 홍성진 (2005). 동지형 동적결합 조석 모형을 이용한 황해 및 동중국해의 조석모형. 한국해양·해양공학회지, 17(4), 243-258.
- 최병호, 에픽 페리놉스키, 홍성진 (2006). 병렬 FEM 모형을 이용한 1983년 동해 중부 지진해일 시뮬레이션. 한국해양·해양공학회지, 18(1), 21-34.
- Bailey, D., Harris, T., Saphir, W., van der Wijngaart, R., Woo, A. and Yarrow, M. (1995). The NAS Parallel Benchmarks 2.0. Report NAS-95-020, December, 1995.
- Blain, C.A. (1995). An evaluation on tidal Predictions in the Yellow and East China Seas. in Proceedings of 4th intl. conf. on Estuarine and Coastal Modeling, 429-441.
- Blain, C.A. (1997). Development of a Data Sampling Strategy for semienclosed seas using a shallow-water model. J. of Atmospheric and Oceanic Technology, 14, 1157-1173.
- China Ocean Press (1992). Marineatlas of Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea hydrology, Beijing.
- Chipada, 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.
- Choi, B.H. (1989). A fine-grid three-dimensional tidal model of the East China Sea in Oceanography - Mathematical models I. 167-185, editor, Davies, A. M. CRC Press Inc.
- Choi, B.H. (2000). Predicting change in tidal regime. Proceedings of international workshop on Tides in the East Asian Marginal Seas (TEAMS). 133-141.
- Choi, B.H. (2001). Effect of Saemangeum Tidal Barriers on The Yellow Sea Tidal Regime. Asian and Pacific Coastal Engineering.
- Choi, B.H. and Lee, H.S. (2003). Perturbation in Yellow Sea tidal current regime due to barrier construction at Saemangeum. Proceedings of the Korean Society of Coastal and Ocean Engineers Conference, 14, 143-153.
- Choi, B.H., Eum, H.M., Kim, H.S. and Lavrenov, V. (2004). Coupled storm surge and wave simulation for neighboring seas of Korea Peninsula. Workshop on Wave, Tide Observations and Modelings in the Asian-Pacific Region, 173-209.
- Kang, S.K., Lee, S.R., Jung, K.T., Chang, C.J. and Kang, H.W. (2003). Tidal regime change of the Yellow and East China Seas due to the construction of Saemankeum tidal barrier. International Symposium for PEACE, 121-141.
- Karypis, G. and Kumar, V. (1998). A Software Package for Partitioning Unstructured Graphs, Partitioning Meshes and Computing Fill-Reducing Orderings of Sparse Matrices Version 4.0. University of Minnesota, Department of Com-

- puter Science/Army HPC Research Center.
- Le Fevre, F., Le Provost, C. and Lyard, F.H. (2000). How can we improve a global ocean tide model at a regional scale? A test on the Yellow Sea and the East China Sea. *Journal of Geophysical Research*, vol. 105, 8707-8725.
- 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 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.
- Naimie, C.E., Blain, C.A. and Lynch, D.R. (1998). Seasonal mean circulation in the Yellow Sea - A model-generated climatology. NML report 98-11, Dartmouth Coll., Hanover, N.H.
- Turner, P.J. and Baptista, A.M. (1993). ACE/Gredit user's Manual, CCALMR, Oregon Graduate Institute, OR.
- Turner, P.J. and Baptista, A.M. (1999). ACE/gredit Online Documentation, [www.ccalmr.ogi.edu/CORIE/software/ace/docs/gredit](http://www.ccalmr.ogi.edu/CORIE/software/ace/docs/gredit).
- Weaver, R.J. and Slinn, D.N. (2004). Effect of Wave Forces on Storm Surge, submitted to *Coastal Engineering*.
- Westerink, J.J., Feyen, J.C., Atkinson, J.H., Luettich, R.A., Dawson, C.N., Powell, M.D., Dunion, J.P., Roberts, H.J., Kubatko, E.J. and Pourtaheri, H. (2004). A New Generation Hurricane Storm Surge Model for Southern Louisiana. ICES Report, 04-43.
- 
- Received November 30, 2006  
Accepted January 25, 2007