

병렬 FEM 모형에 의한 1983년 5월 동해 중부 지진에 의한 쓰나미 산정 Tsunami Computation by Parallel FEM Model for Tsunami due to May 1983 Central East Sea Earthquake

최병호¹ · 김두섭¹ · 홍성진¹ · 김경옥¹
Byung Ho Choi¹, Doo Seop Kim¹, Sung Jin Hong¹, and Kyeong Ok Kim¹

1. 서 론

1983년 5월 26일 동해안에 내습한 쓰나미는 일본 아키타현 서측 외해역에서 발생한 M7.2 진도의 해저 지진에 의해 발생하였다. 이 해저 지진에 의한 쓰나미는 동해를 가로질러 강원도에서 경상북도까지 약 70km에 걸쳐 피해를 주었다. 그 중에서 가장 피해가 심한 임원항에는 해수가 3.6~5.0m 높이까지 침수흔적을 남겼다 (국립방재연구소, 1999). 당시의 쓰나미 (사후) 월파고조사(Post Tsunami Runup Survey)는 수 개소에서만 이루어 졌는데 1990년 한국 방재연구소에서는 임원항을 중심으로 재조사한 월파고 기록을 보고하고 있다. 쓰나미 수치 시뮬레이션기법 역시 과거 18여년에 걸쳐 꾸준한 진전을 보이고 있어 초기의 해안선의 수직벽가정에 의한 시뮬레이션 결과에 월파고를 상관비(Runup Ratio)로서 관련짓는 형태에서 컴퓨터의 발전에 따라 해안역의 세격자모형에 의해 직접 범람 시뮬레이션을 수행하는 형태로서 발전되었다. 따라서 연안역의 상세한 수심 및 지형(Micro Topography)을 토대로한 범람 시뮬레이션 결과로서 쓰나미 위험재해도(Tsunami Hazardmap)의 작성과 이의 재해경감에의 활용에 의한 사업이 미국과 일본에서는 Impact 계획, 쓰나미 Hazardmap 사업으로 활발하게 전개되고 있다. 본 연구에서는 서로 다른 유한 격자 체계의 모형(Multi-grid Dynamic Nesting Finite Defference Model)에 의한 동해 쓰나미 산정과정과 병행하여 유한요소모형(Finite Element Model)에 의한

쓰나미 시뮬레이션을 새로이 시작하였는데 근년의 Beowulf 병렬계산은 동해 전 영역의 정밀산정이 가능하게 되었으므로 이 방법을 적용한 쓰나미의 전파와 임원항의 범람 시뮬레이션을 본 연구에서 시도하였다.

2. 모형 격자의 형성

FEM 격자를 생성할 때에는 Xmgredit와 Femeditor의 두가지 소프트웨어의 사용이 가능하다. Xmgredit는 유닉스환경에서 사용가능하고 Femeditor는 Window 환경에서 사용가능하다. Femeditor는 성균관대학교 해안·해양연구실의 김(2000)에 의해 개발된 프로그램이다. 동해의 쓰나미 FEM 격자는 동해 전체를 Xmgredit를 이용해서 만들고 쓰나미 공백역 지역을 약 1분의 세밀한 격자로 만들어 Femeditor를 이용하여 동해 전체의 FEM 격자와 병합하는 방법을 사용하였다. 임원항의 FEM 격자 (최소격자 2.89m) 또한 위와 같은 방법으로 격자를 생성하였다. Fig. 1은 동해와 임원항의 FEM 격자로서, 임원항의 FEM 격자는 절점수가 7714개 요소수가 14905개이고 임원항의 격자가 삽입되어 만들어진 동해 전체의 FEM 격자는 절점수가 106610개, 요소수가 207231개로서 쓰나미 공백역, 대화퇴 그리고 해안선 부근이 자세히 해상된 격자이다.

¹ 성균관대학교 토목환경공학과 (Department of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Chunchun-Dong 300, Jangan-Ku, Suwon, 440-746, Korea)

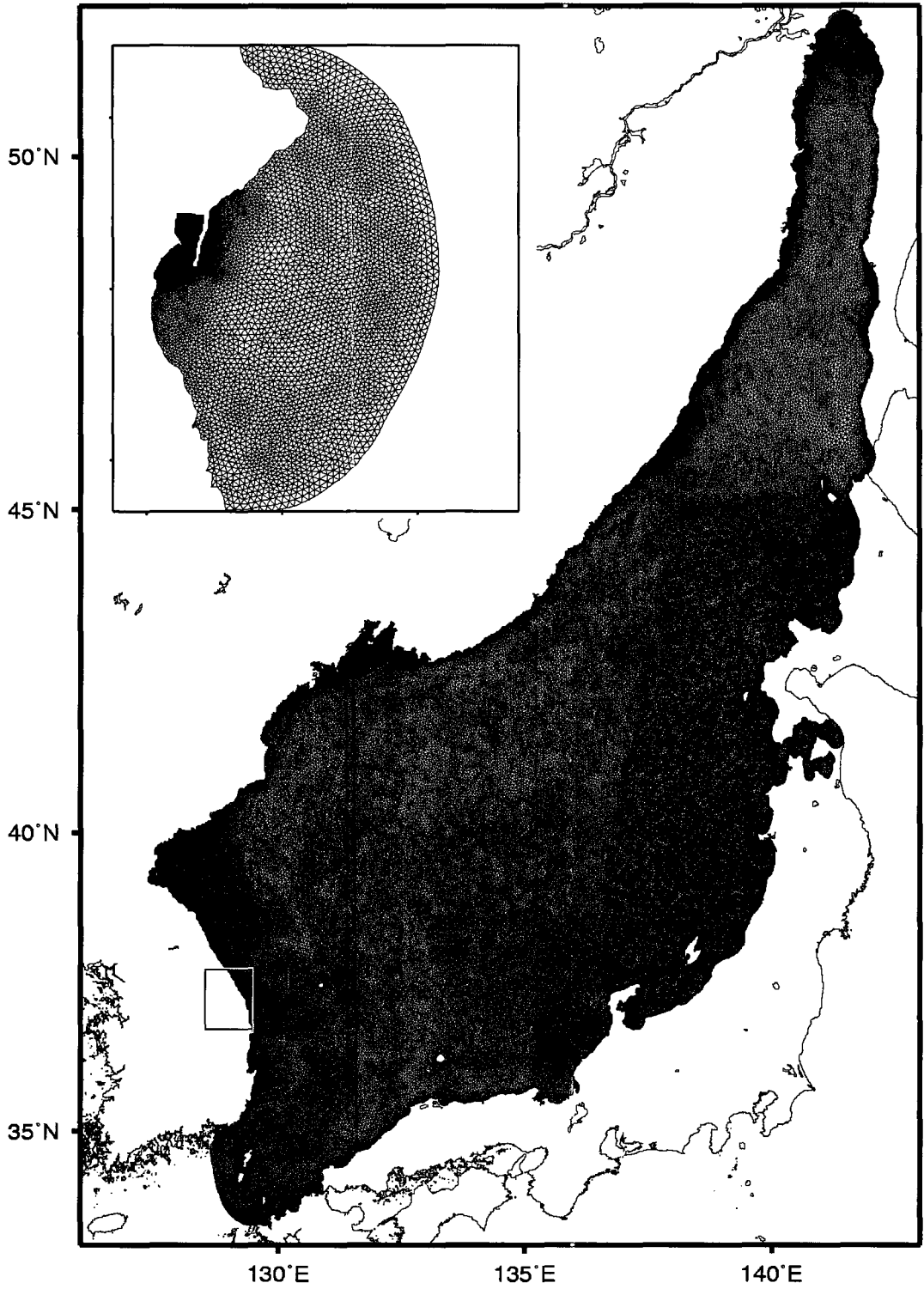


Figure 1. The FEM Mesh of the East Sea and Imwon Port.

2.1 FEM 격자 생성 방법

Femeditor (김, 2000)를 이용하여 격자가 필요한 지역의 가장 외각부분에 절점을 폐합이 되도록 만들어 주었다. 섬의 경우는 해안선을 따라 절점을 만들어 준다. Femeditor의 경계지정기능을 사용하여 위 방법으로 만들어진 절점을 바다, 섬, 육지로 구분을 해준다. 이 과정으로 격자정보와 경계정보 파일이 생성된다. 그리고 Femeditor의 파일을 변환기능을 사용하여 Xmgredit 경계정보파일로 변환시키고 모든 절점이 포함되는 지역의 수심자료를 유닉스 환경으로 가져온다. 단, 수심자료는 Cartesian 좌표계를 사용한다. Build Automatic placement의 기능을 이용하여 격자를 생성한다. 위에서 생성된 격자를 다시 Femeditor에서 해안선 부근과 이상격자들을 수정하여주고 격자의 최적화를 수행한 후 바다, 섬, 육지의 경계를 설정한다. 상용의 SMS 패키지의 ADCIRC Interface에서는 절점수가 제한되어 있어 본 모형과 같은 방대한양의 요소와 절점을 발생시키기에 문제가 있다.

2.2 병렬 ADCIRC 모델링 방법

ADCIRC 모형은 지난 20여년에 걸쳐 개발된 2, 3차원 동수역학적 모형으로 병렬화는 텍사스대학의 Mary Wheeler 교수의 그룹(Chippada et al., 1996)이 만든 코드로서 현재는 수질, 생태모형과도 병렬연계하는 연국가 활발한 모형이다. ADCIRC 모형에 관해서는 여러 문헌(Luettich et al., 1991; Westerink et al., 1992; Kolar et al., 1994)에 자세히 언급되어 있으므로 재술치 않기로 한다.

Fig. 2는 성균관대학교 토목환경공학과와 해안-해양공학 연구실의 8개의 CPU로 구성된 Beowulf 체계에서 동해의 영역이 8구획으로 영역분할(Domain Partition)된 각각의 격자영역(Fig. 3)을 나타낸다. 실제로 영역분할은 Metis 및 HSFC (Hibert Space Filling Curve) 기법에 의해 수행될 수 있는데 Metis 기법은 spectral partitioning 방법보다 영역분할 및 속도가 빠르며 행렬처리 및 저장에서 우월한 방법으로 알려져 있다 (<http://www-users.cs.umn.edu/~karypis/metis>).

모형의 수행과정은 ADCIRC 프로그램의 Preprocessing 실행파일(adcprep)을 만들고 이 파일을 실행시켜서 모형의 Preprocessing을 해주면 병렬 ADCIRC 프로그램인 'pdcirc.f' 프로그램이 생성된다. 이 프로그램에 쓰나미 초기파형의 자료를 입력하도록 수정한 뒤 work 디렉토리로 복사한다. 그리고 병렬모형을 실행시키는 파일을 만들어서 MPI (Message Passing Interface)를 이용하여 모형을 실행시킨다. 병렬로 분

할되어 모델링이 된 자료들은 Post processing으로 병합할 수 있다.

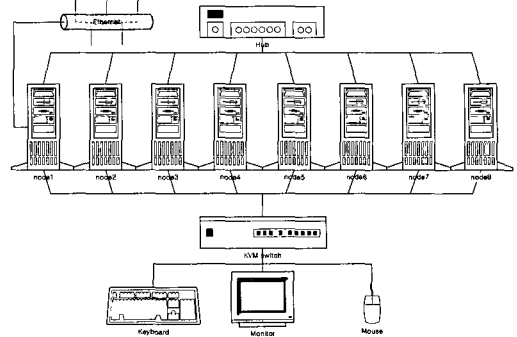


Figure 2. Beowulf System in Sungkwunkwan University.

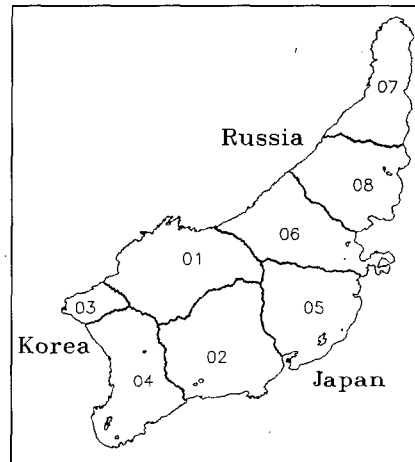


Figure 3. Domain decomposition by Metis(Grid Partition Method) for the modeled region.

3. 초기 파형

초기해수면형상은 초기해수면형상이 장파의 유속보다 빠른 플레이트의 수직변위 속도에 의한 수직변위의 움직임과 같다고 가정하는 Manshinha와 Smylie(1971)에 의해 제시된 방법을 사용하여 결정하였으며, 수심자료는 동해 전역의 재편집, 작성된 1분 격자 수심체계 (최 등, 2001)를 사용하였다. Manshinha와 Smylie의 방법에 의해 해저지진의 초기수면 변위를 기존 FDM 모형에서 산정하고 이 격자점 자료(structured data)를 FEM 모형에서 사용되는 격자자료(unstructured data)로 변환시켜서 모형시물레이션의 초기조건으로 취했으며, Fig. 4는 1983년 쓰나미에 대한 초기해수면형상을 나타내는 것이다.

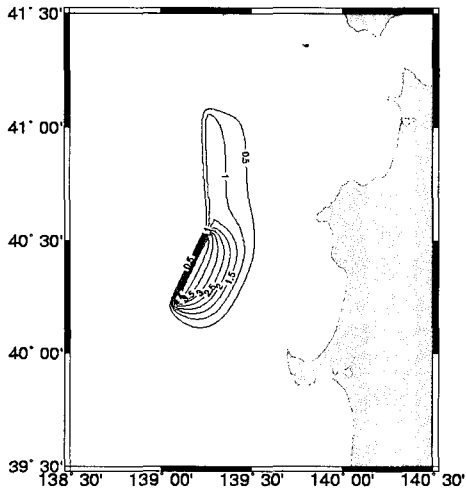


Figure 4. Initial Shape of May 1983 Central East Sea Tsunami.

4. 시험 산정 및 결과

유한요소모형에서의 해저마찰계수의 영향을 실험하기 위하여 식(1), (2)와 같이 일정한 해저마찰 계수를 사용하는 경우 (quadratic friction)와 수심에 따라 마찰계수가 변하는 혼합비선형 해저마찰계수 (hybrid friction)를 사용하는 경우에 대하여 Table 1 과 같은 경우에서의 조격자 체계의 동해모형(Fig. 5)에서의 실험을 수행하였으며, 절점수는 40224 개, 요소수는 75404 개가 사용하였고, 절점의 최소 간격은 316m 이다.

$$\tau_o = \frac{C_f(U^2 + V^2)^{1/2}}{H} \quad (1)$$

$$C_f = C_{f \min} \left[1 + \left(\frac{H_{break}}{H} \right)^\theta \right]^\gamma \quad (2)$$

여기서, C_f : bottom friction coefficient

$C_{f \min}$: minimum friction coefficient (dimensionless)

H_{break} : break depth (meter)

H : total depth

θ : parameter (determines how rapidly C_f approaches each asymptotic limit)

γ : Parameter (determines how rapidly the friction coefficient increases as the water depth decreases)

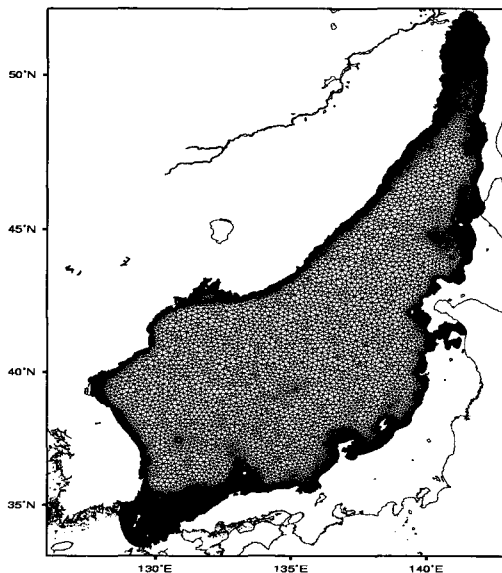


Figure 5. FEM Mesh for Numerical Experiment in the East Sea.

Table 1. Parameters of Bottom Friction Coefficient for Numerical Experiment.

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
C_f	-	-	0.001	0.01
$C_{f \min}$	0.002	0.0025	-	-
H_{break}	1	20	-	-
θ	10	5	-	-
γ	0.3333	0.2	-	-

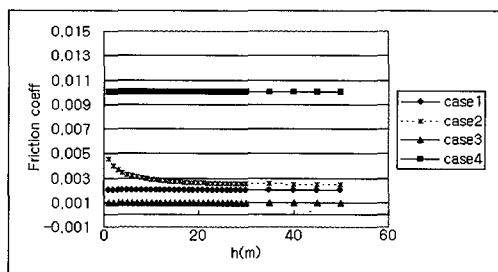


Figure 6. Diagram of Parameters concerned Bottom Friction Coefficient and Depth shown as Table 1.

Case 1 과 Case 2 는 hybrid friction 을 사용한 실험으로 계수들은 Table 1 과 같이 변화시켜주었고 Case 3 과 Case 4 는 quadratic friction 을 사용하였으며, 바닥

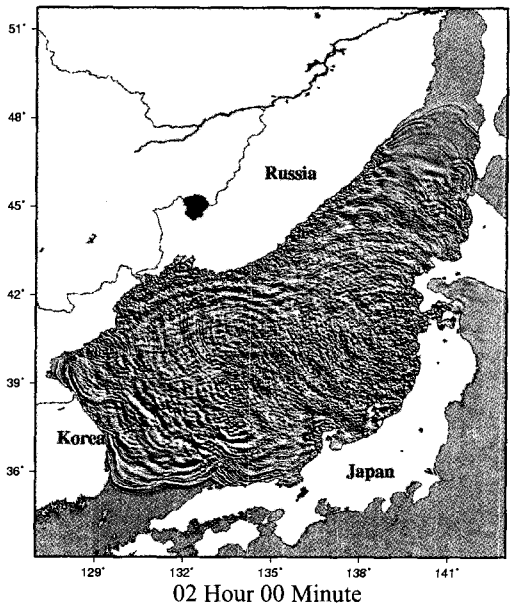
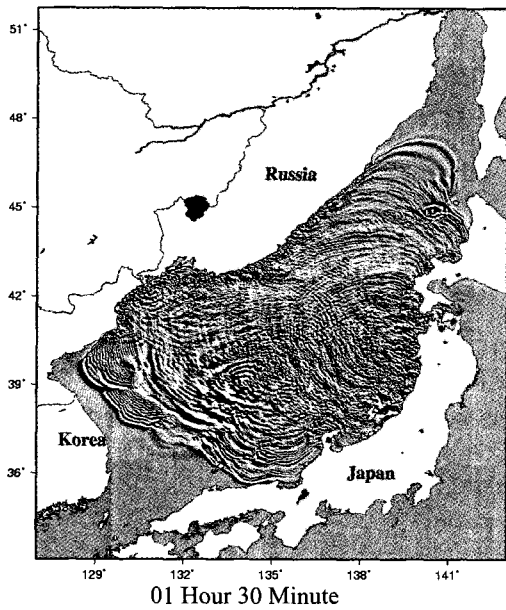
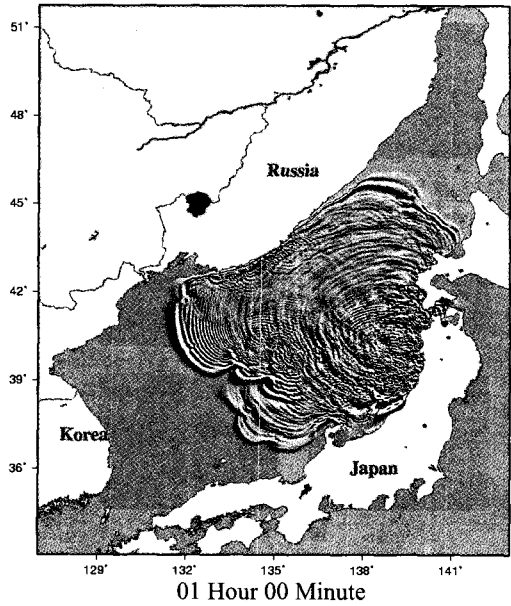
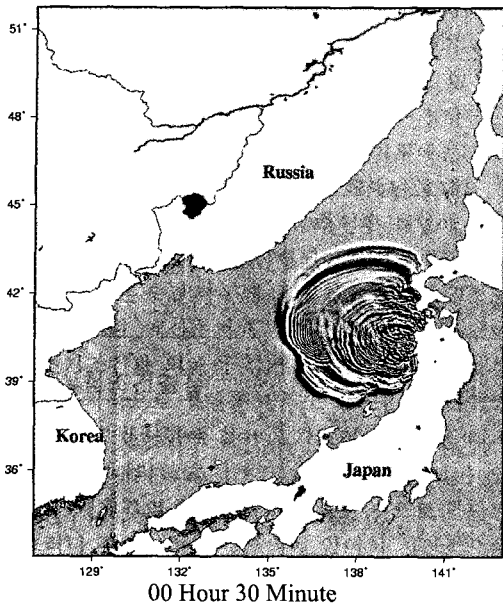
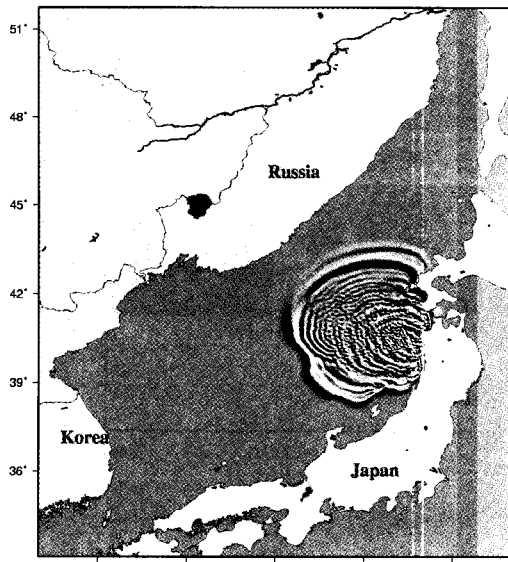
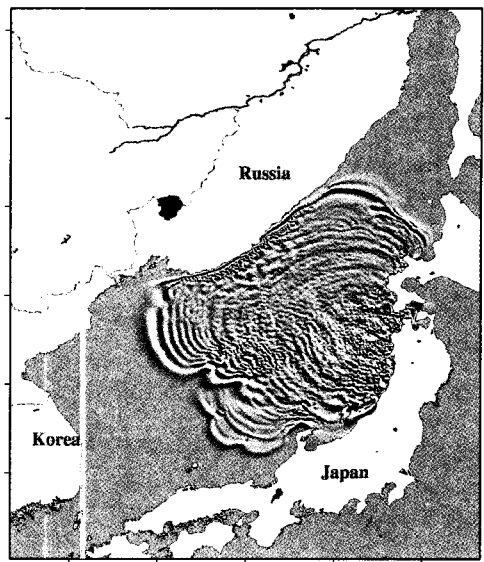


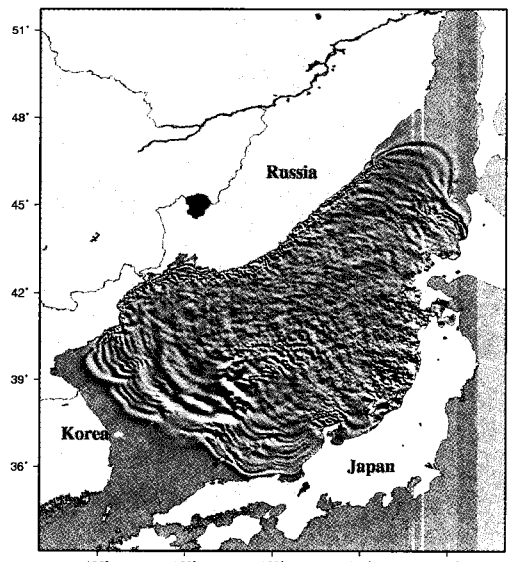
Figure 7. Snapshots Images of computed Sea Elevation for Tsunami using FDM Model on May 26, 1983 in the East Sea.



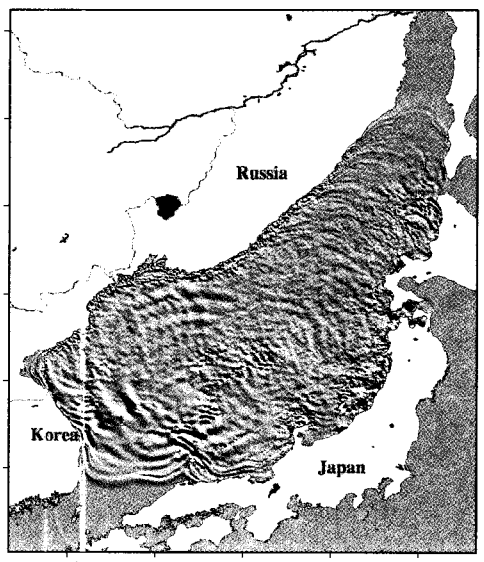
00 Hour 30 Minute



01 Hour 00 Minute

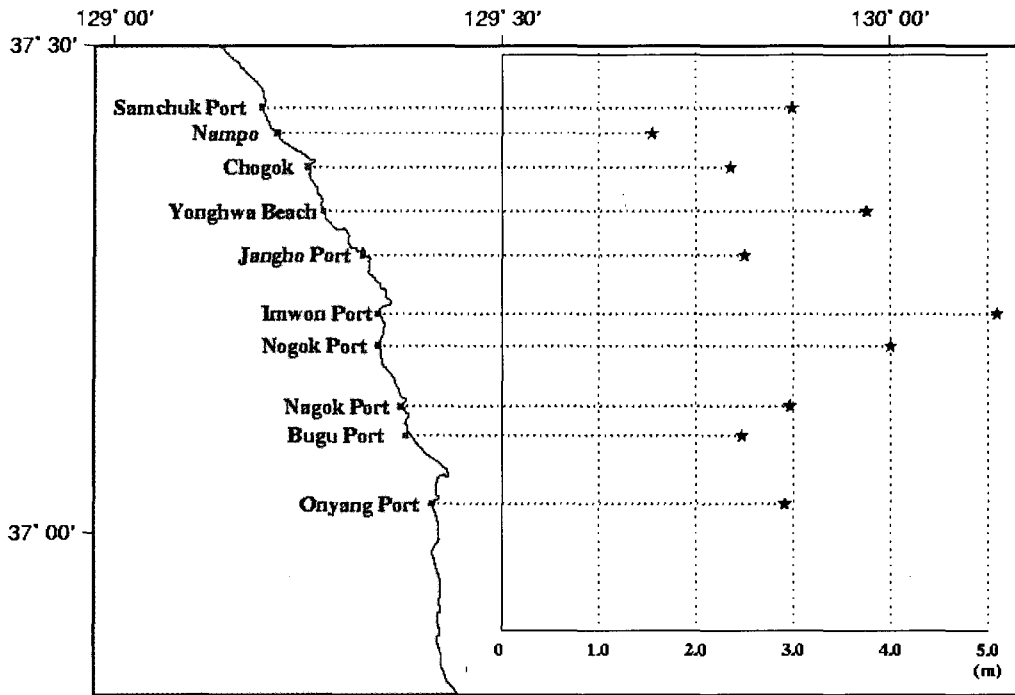


01 Hour 30 Minute

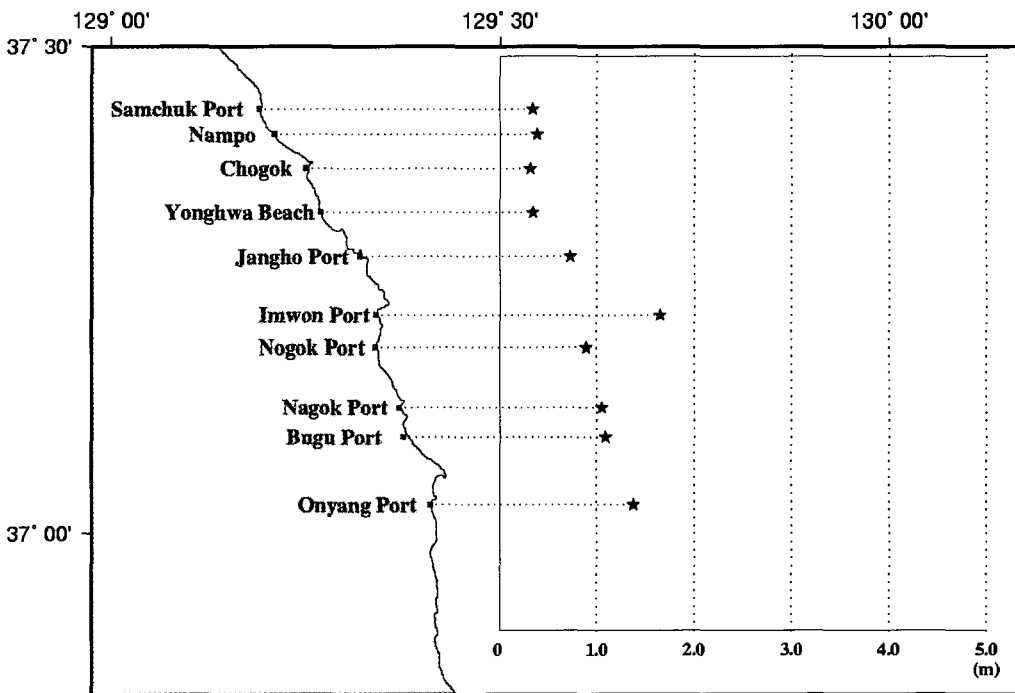


02 Hour 00 Minute

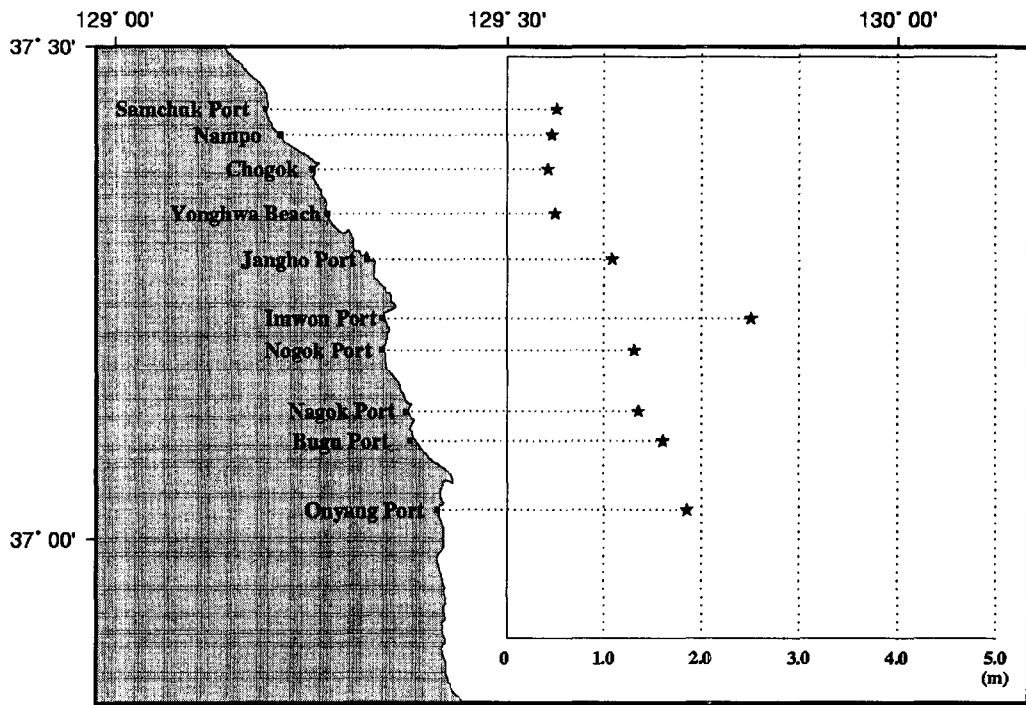
Figure 8. Snapshots Images of computed Sea Elevation for Tsunami using FEM Model on May 26, 1983 in the East Sea.



(a) The Observational Height of May 1983 Central East Sea Tsunami.

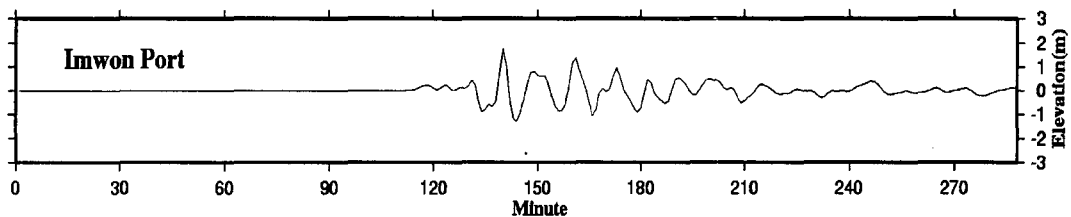


(b) The Tsunami Height in Hybrid Friction

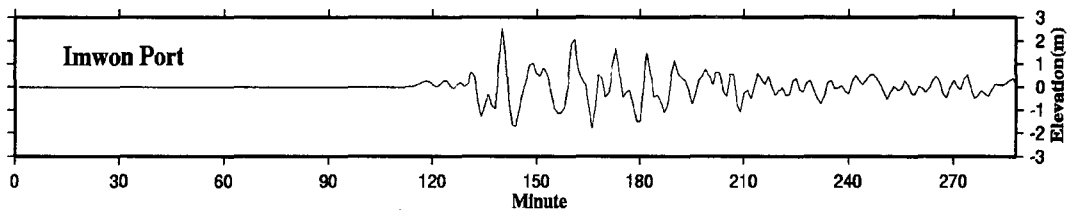


(c) The Tsunami Height in Quadratic Friction

Figure 9. The Tsunami Height of ADCIRC Models in Hybrid and Quadratic Friction.



(a) The Time Series in Hybrid Friction



(b) The Time Series in Quadratic Friction

Figure 10. The Time Series of The Imwon Port in Hybrid and Quadratic Friction.

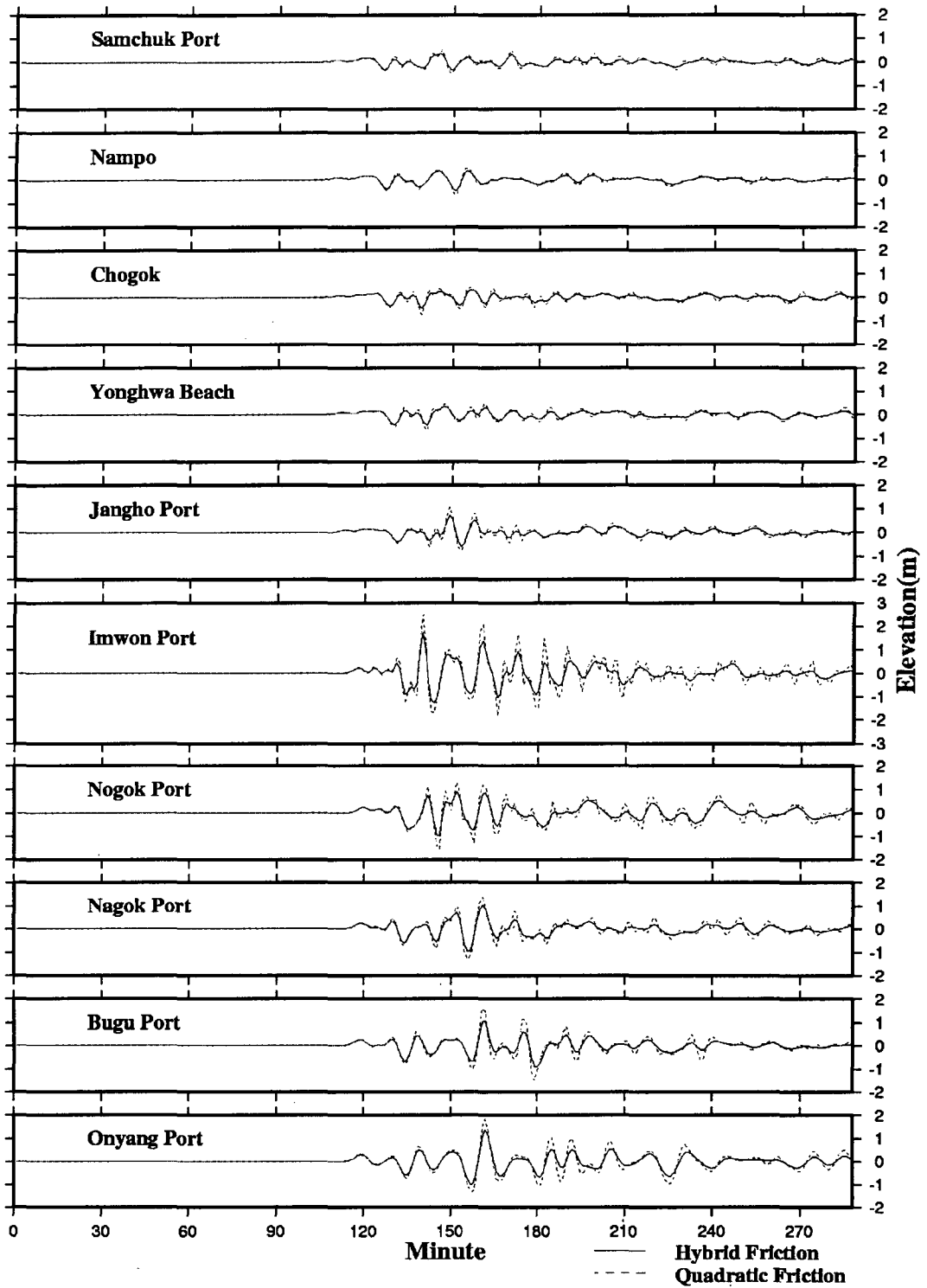


Figure 11. The Time Series of ADCIRC Models in Hybrid and Quadratic Friction

마찰계수를 0.01 과 0.001 으로 설정하였다. Case 1 과 Case 2 의 경우 입원항의 한 절점에서 최대 파고가 각각 0.1056389m와 0.1056356m로 파고의 차이가 나타나지 않았다. 반면 Case 3 과 Case 4 에서의 파고는 비교적 많은 차이가 생겼으며, Case 4 는 최대 파고가 0.1051588m 으로 산정되었고, Case 3 은 0.12565245m 로 다른 경우에 비해 높은 파고가 산정되었다. 실험결과를 통하여 hybrid friction 보다는 quadratic friction 에 의한 파고의 변화가 크게 나타났다. Fig. 7 과 Fig. 8 은 Comcot 모형(structured data)과 병렬 ADCIRC 모형(unstructured data)에 의한 시뮬레이션을 보여주고 있으며, Fig. 9 은 한국 동해안에서의 쓰나미파고를 나타내며 Fig. 10 은 입원항에서의 시계열자료를 나타내고 Fig. 11 은 동해안 10 개 지점에서의 시계열자료를 나타낸다. 최대파고는 입원항에서 hybrid friction 일때 1.7m, quadratic friction 일 때 2.5m 이고, 이는 실제 관측치(5.0m, 국립방재연구소, 1999)와 큰 차이를 보이고 있으나, 전체적인 동해안에서의 파고 분포는 비슷한 경향을 보이고 있다.

향후 모형운용에서는 quadratic friction 이 파고에 미치는 영향을 절점수가 106610 개, 요소수가 207231 개의 동해의 FEM 격자를 사용하여 분석하고, 이동 경계조건을 이용한 입원항에서의 최대 월파고를 병렬 ADCIRC 모형을 이용해서 산정하고자 하며, 실제 관측치와 비교를 통하여 모형의 신뢰성을 평가하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단지원 한국지진공학센터의 2001 년도 연구비 지원에 의해 수행된 바 이에 사의를 표한다.

참고문헌

국립방재연구소, 1999. 동해안에서의 쓰나미 위험도 평가, 국립방재연구소 보고서, 192pp.
 김경옥, 2000, 유한요소모형을 이용한 황해 및 동중국해의 조석산정, 성균관대학교 석사학위 논문, 244pp.
 최병호, 김경옥, 엄현민, 2001. 한국근해의 디지털 수심·표고 데이터베이스, 한국해안·해양공학회지 (제출중)
 Chippada, S., Dawson, C. N., Martinez, M. and Wheeler, M. F., 1996. Parallel computing for

finite element models of surface water flow, *Computational Methods in Water Resources XI*, Computational Mechanics Publications, Southampton, U. K. 63-70.
 Kolar, R. L., Westerink, J. J., Canterkin, M. E. and Blain, C. A., 1994. Aspects of nonlinear simulations using shallow-water models based on the wave continuity equation, *Computers Fluids* 23, 523-538.
 Luettich, R. A., Westerink, J. J. and Scheffner, N. W., 1991. ADCIRC: An advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries, Tech. Report 1, *Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.* 20314-1000, December.
 Westerink, J. J., Luettich, R. A. and Muccino, J. C., 1994. Modeling tides in the western North Atlantic using unstructured graded grids, *Tellus* 4(6A), 178-199.