

병렬 FEM 모형을 이용한 1983년 동해 중부 지진해일 시뮬레이션 Simulation of 1983 Central East Sea Tsunami by Parallel FEM Model

최병호* · 에핌 페리놉스키** · 홍성진*
Byung Ho Choi*, Efim Pelinovsky** and Sung Jin Hong*

요 지 : 지진해일 위험재해도의 작성과 재해경감대책 수립을 위해서는 연안역의 상세한 수심 및 지형을 이용한 범람 시뮬레이션이 요구되고 있다. 본 연구에서는 Beowulf 병렬계산을 통해 동해 전 영역에서 정밀산정이 가능한 병렬유한요소모형을 이용하여 1983년 5월 26일 동해안에 내습한 지진해일에 대한 시뮬레이션을 수행하고, 그 계산 결과와 관측치와의 비교결과를 제시한다. 또한, 해안에서의 지진해일고의 통계적 분포에 대해 논하며, 해안에서의 지진해일고의 파고분포가 대수정규분포를 따르는 경향을 제시한다.

핵심용어 : 지진해일, 유한요소모형, 통계해석, 분포함수

Abstract : The simulation of tsunami inundation using detailed bathymetry and topography is required to establish the countermeasure of disaster mitigation and the tsunami hazard map. In this study, a simulation of the 1983 tsunami event in the East Sea using parallel finite element model, which is possible to simulate with suitable accuracy by the Beowulf parallel computation method, is performed to produce detailed features of coastal inundation. Results of simulations are compared with measured data. The evolution of statistic distribution of tsunami heights is studied numerically and the distribution functions of tsunami heights show a tendency to the log-normal curve along coastal area.

Keywords : tsunami, finite element model, statistic analysis, distribution function

1. 서 론

1983년 5월 26일 동해안에 내습한 지진해일은 일본 아키타현 서측 외해역에서 발생한 M7.2 규모의 해저지진에 의해 발생하였다. 이 해저 지진에 의한 지진해일은 동해를 가로질러 강원도에서 경상북도까지 약 70 km에 걸쳐 피해를 주었다. 그 중에서 가장 피해가 심한 임원항에서는 해수가 3.6~5.0 m 높이까지 침수흔적을 남겼다. 당시의 지진해일(사후) 월파고조사(Post Tsunami Runup Survey)는 일본의 방재연구소가 방한하여 관측을 주도, 수개소에 서만 사후조사가 이루어 졌는데 1999년에 국립방재연구소에서는 임원항을 중심으로 추가적인 재조사 월파고 기록을 보고하였다(국립방재연구소, 1999). 지진해일 수치 시뮬레이션기법 역시 과거 18여년에 걸쳐 꾸준한 진전을 보

이고 있다. 초기에 해안선의 수직벽가정에 의한 시뮬레이션 결과에 실제관측 월파고를 비례상수(월파비(Runup Ratio)라 칭하기도 함)로서 관련짓는 형태는 컴퓨터의 발전에 따라 해안역의 세격자모형에 의해 직접 범람 시뮬레이션을 수행하는 형태로 발전되고 있다. 따라서, 연안역의 상세한 수심 및 지형(Micro-Topography)을 사용한 범람 시뮬레이션 결과로서 지진해일 위험재해도(Tsunami Hazard Map)의 작성과 재해경감에의 활용사업이 미국과 일본에서는 TIME 계획(PMEL, 2005), 지진해일 Hazard Map 사업으로 전개되고 있다.

본 연구에서는 서로 다른 유한 격자 체계의 모형(Multi-grid Dynamic Nesting Finite Difference Model)에 의한 동해 지진해일 산정과정(최병호 등, 2002a)과 병행하여 유한요소모형(Finite Element Model)에 의한 지진해일 시뮬레이션

*성균관대학교 토목환경공학과 (Corresponding author : Sung Jin Hong, Department of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Chunchun-Dong 300, Jangan-Ku, Suwon 440-746, Korea. hongsj@skku.edu)

**러시아과학원 응용물리연구소 (Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia)

을 새로이 시작하였는데 근년의 Beowulf 병렬계산을 통해 동해 전 영역의 정밀산정이 가능하게 되었으므로 이 방법을 적용한 지진해일 전파 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 병렬 FEM 모형

2.1 모형 격자 형성

동해의 지진해일 FEM격자는 동해 전체를 Xmgredit(Turner and Baptista, 1999)를 이용해서 만들고 지진해일 공백역 지역을 약 1분의 세밀한 격자로 만들어 김경욱(2000)에 의해 개발된 Femeditor을 이용하여 동해 전체의 FEM격자와 병합하는 방법을 사용하였다. 임원항의 FEM격자(최소격자 2.89 m) 또한 위와 같은 방법으로 격자를 생성하였다. Fig. 1은 동해와 임원항의 FEM격자로서, 임원항의 FEM격자는 절점수가 7714개, 요소수가 14905개이고, 임원항의 격자가 삽입되어 만들어진 동해 전체의 FEM격자는 총절점수가 106610개, 총요소수가 207231개로서 일본 서해안에 위치한 지진해일 공백역, 대화퇴 그리고 해안선 부근이 자세히 해상된 격자이다.

2.2 병렬 ADCIRC 모형

본 연구에서 사용된 FEM모형인 ADCIRC모형은 지난 20여년에 걸쳐 개발된 2, 3차원 동수역학적 모형이고, 병렬화는 텍사스대학의 Mary Wheeler교수의 그룹(Chippada et al., 1996)이 만든 코드로서 현재는 수질, 생태모형과도 병렬연계하는 연구가 활발히 진행중에 있다. ADCIRC모형에 관해서는 여러 문헌(Luetlich et al., 1991; Westerink et al., 1992; Kolar et al., 1994)에 자세히 언급되어 있으므로 본 논문에서는 재언급하지 않기로 한다.

성균관대학교 토목환경공학과와 해안해양공학 연구실의 8개의 CPU로 구성된 Beowulf체계(Fig. 2)를 사용하였으며, Fig. 3은 동해 전체를 8개의 구역으로 분할(Domain Partition)한 각각의 격자영역을 나타낸다. 실제로 영역 분할은 Metis 및 HSFC(Hibert Space Filling Curve) 기법에 의해 수행될 수 있는데 Metis 기법은 spectral partitioning 방법보다 영역 분할 및 속도가 빠르며 행렬처리 및 저장에서 우월한 방법으로 알려져 있다(Karypis and Kumar, 1998; <http://www-users.cs.umn.edu/~karypis/metis>).

3. 초기파형

지진해일의 초기해수면형상은 파형의 형성이 장파의 유

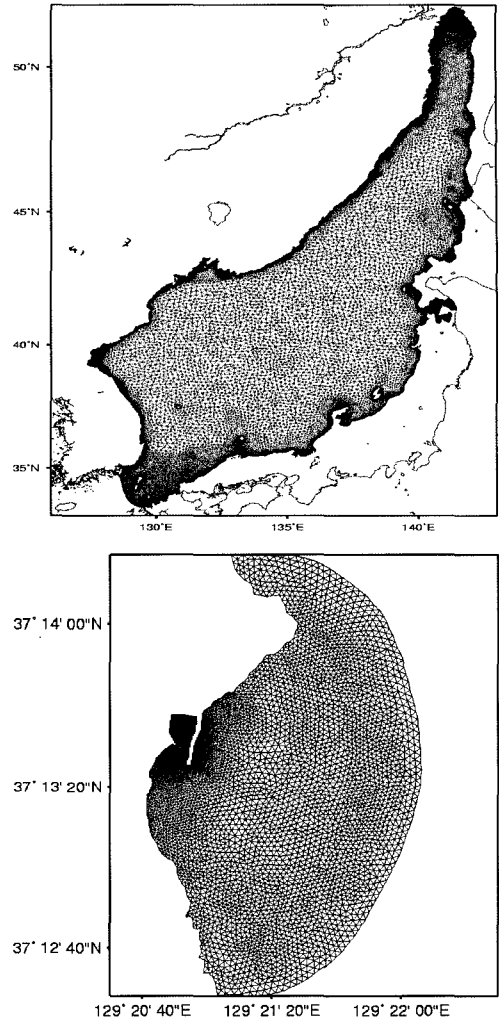


Fig. 1. FEM mesh of the East Sea and the Imwon port.

속 보다 빠른 플레이트의 수직변위 속도에 의한 수직변위의 움직임과 같다고 가정하여 지진동에 의한 해저면 파괴를 3차원 공간상에 재현하는 Manshinha and Smylie (1971)에 의해 제시된 방법을 사용하여 결정하였으며, 수심은 최병호 등(2002b)에 의해 작성된 1분 격자 수심체계를 사용하였다. Manshinha and Smylie의 방법에 의해 해저지진의 초기수면 변위를 기존 FDM 모형에서 산정하고 이 격자점 자료(structured data)를 FEM 모형에서 사용되는 격자자료(unstructured data)로 변환시켜서 모형시뮬레이션의 초기조건으로 취했으며, Fig. 4는 1983년 지진해일에 대한 초기해수면형상을 나타내는 것으로 초기최대파고는 약 5 m으로 산정된 것을 알 수 있다.

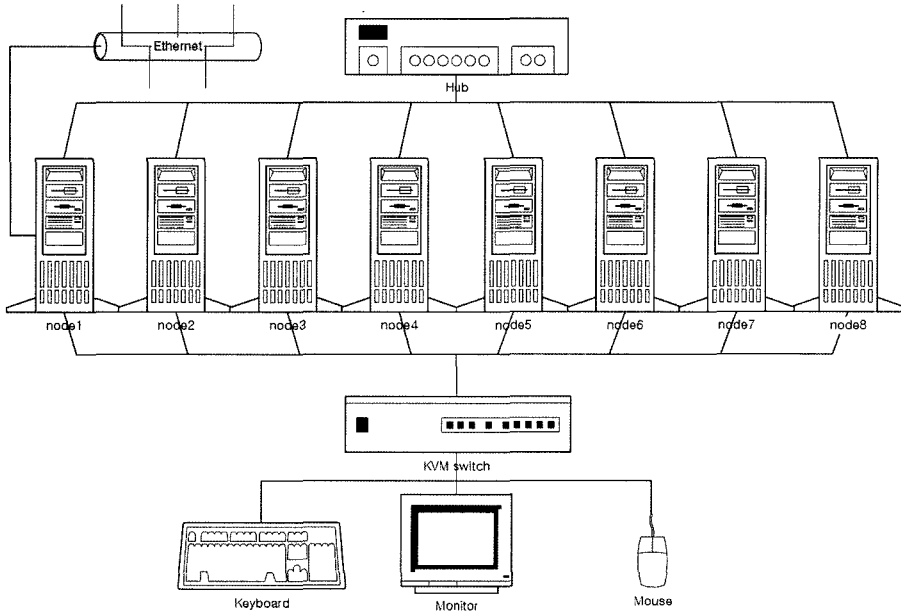


Fig. 2. Beowulf system.

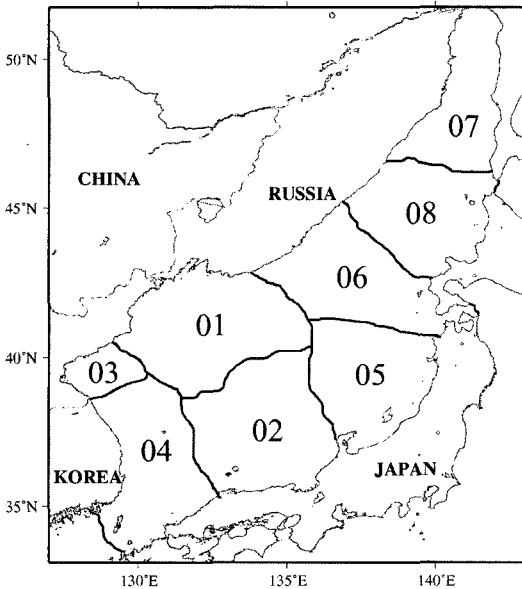


Fig. 3. Domain decomposition by Metis(Grid Partition Method) for the modeled region.

4. 수치시뮬레이션

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 사용하

는 경우에 따라 4가지의 경우에 대한 조격자 체계(Fig. 1)에서의 실험을 수행하였다(Table 1).

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

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

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)

Case 1과 Case 2는 hybrid friction을 사용한 실험으로 계수들은 Table 1과 같이 변화시켜주었고 Case 3과 Case 4는 quadratic friction을 사용하였으며, 바닥마찰계수를 0.01과 0.001으로 설정하였다. Case 1과 Case 2의 경우 임원항의 한 절점에서 최대 파고가 약 0.10 m로써 파고의 차이가 나타나지 않았다. 반면 Case 4는 최대파고가 0.11 m로 산정되었고, Case 3은 0.13 m로 다른 경우에 비

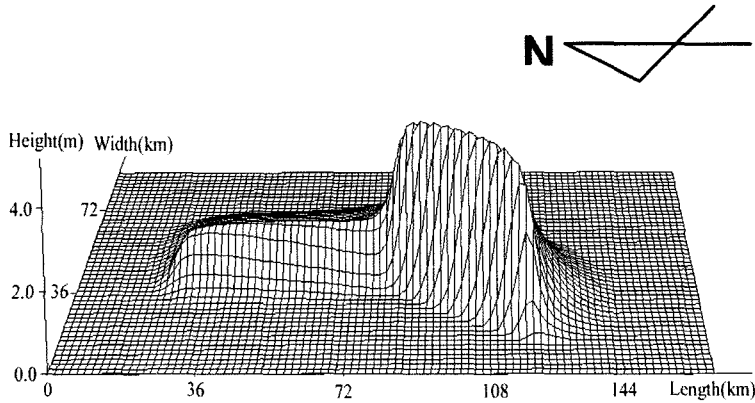


Fig. 4. Initial free surface profile of 1983 Central East Sea Tsunami.

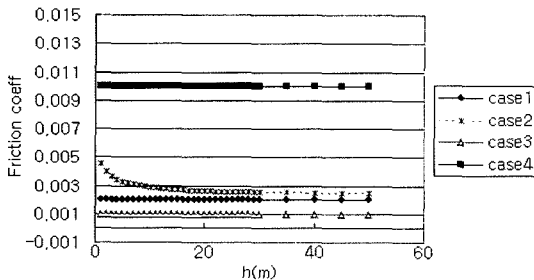


Fig. 5. Diagram of parameters concerned bottom friction coefficient and depth shown as Table 1.

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	-	-

해 높은 파고가 산정되었다. 실험결과를 통하여 hybrid friction 보다는 quadratic friction에 의한 파고의 변화가 크게 나타났다. Fig. 6은 병렬 ADCIRC 모형(unstructured data)에 의한 시간별 지진해일 전파형상을 보여주고 있으며, Fig. 7은 hybrid friction과 quadratic friction을 사용한 각각의 시뮬레이션에 대한 한국 동해안에서의 지진해일파고를 제시한다. Fig. 8은 각 경우에 대해 동해안 10개 지점에서의 시계열자료를 나타낸다. 최대파고는 임원항에서 hybrid friction일 때 1.7 m, quadratic friction일 때 2.5 m이고, 이는 실제 관측치(5.0 m; 국립방재연

구소, 1999)와 큰 차이를 보이고 있으나, 전체적인 동해안에서의 파고 분포는 비슷한 경향을 보이고 있다.

1983년 지진해일에 대한 수치실험에서의 모형운동에서는 quadratic friction과 절점수가 106610개, 요소수가 207231개의 동해의 FEM격자를 사용하여 지진해일 시뮬레이션을 수행하였다.

5. 해안에서의 지진해일파고의 통계적 분포

5.1 지진해일 파고분포

지진해일 파고(최대 지진해일고)의 공간적 분포를 제시하기 위하여 동해에 연한 지역들을 총 4개 지역으로 구분하였는데, 한국 동해안, 일본 서해안, 연해주, 사할린 섬의 해안으로서 편의상 구분하였다. 각 지역에서 최대 지진해일고를 추출하였으며, 추출한 최대 지진해일고의 공간적인 분포를 관측치(국립방재연구소, 1999; Shuto and Unohana, 1984)와 함께 Fig. 9, 10과 11에 제시하였다. Fig. 9에서 계산결과값들은 실제 관측치의 비교를 통하여 공간적인 분포경향을 알기 위해 임의의 월파비율(runup ratio=2.0) 곱하여 표현한 값이다. 이를 통하여, 1983년 동해 중부 지진해일의 경우, 우리나라 동해안, 특히 임원항 지역에서 높은 지진해일고가 산정되는 것을 확인 할 수 있었으며, 이는 파향선추적모형을 이용하여 동해에서의 지진해일 에너지전파에 대한 연구를 한 최병호 등(2002c)의 결과와도 동일한 경향을 보이는 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 한반도 남부에서는 지진해일고가 낮게 산정되었으며, 이는 1983년 지진해일시에 부산의 검조소에서 기록된 경미한 해일고 관측치가 이를 증명한다(최병호 등, 2002c).

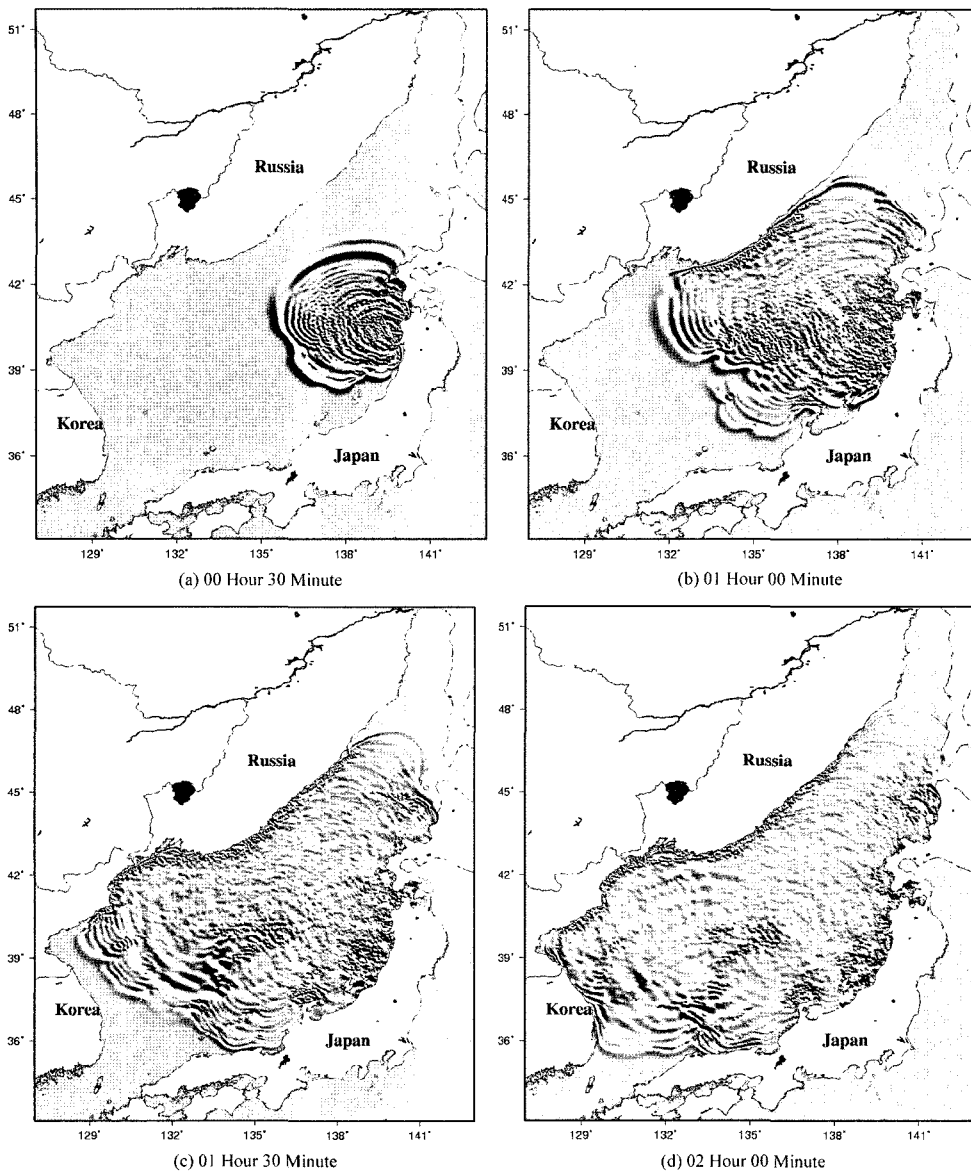


Fig. 6. Snapshots of computed sea elevation for tsunami using FEM model on the 1983 tsunami.

Fig. 10에서는 일본 서해안에서 산정된 파고들은 실제 관측치와의 비교를 통하여 공간적인 분포경향을 알기 위해 임의의 월파비율(runup ratio=2.7) 곱하여 표현한 값이다. 지진해일 진원지가 일본 서해안에 근접하여 위치하였기 때문에 일본서해안은 전체적으로 큰 지진해일파고가 산정된 것을 볼 수 있었으나, 그중 토야마반과 와카사만은 상대적으로 파고가 작게 산정되는 지역이며, 모두 만이라는 지형적 특성을 가지기 때문이며, 이는 관측된 지진해일파고 (Fig. 10b)와의 비교를 통하여서도 확인할 수 있다.

Fig. 11에서 볼 수 있듯이, 러시아 해안에서는 관측치와 비교가 어려워 월파비율을 사용하지 않았다. 연해주 지역에는 타타르 해협에 연한 지역에서 파고가 작게 나타나며, 이와 인접한 사할린 섬에서도 파고가 작다. 우리나라 동해안과 비교하여 상대적으로 진원지에서 가까운 거리에 있으면서도 작은 파고가 산정된 이유는 타타르 해협은 수심이 200 m 이하인 지역이고 해안선이 반달형으로 이루어져 있어, 얕은 수심에 따른 렌즈효과와 반달형의 해안에서의 분산굴절특성의 복합과정에 의해 지진해일

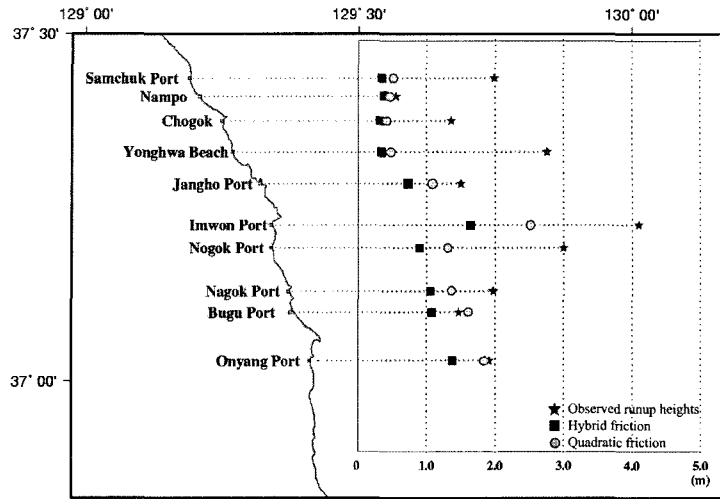


Fig. 7. Tsunami heights of ADCIRC models in Hybrid and Quadratic friction

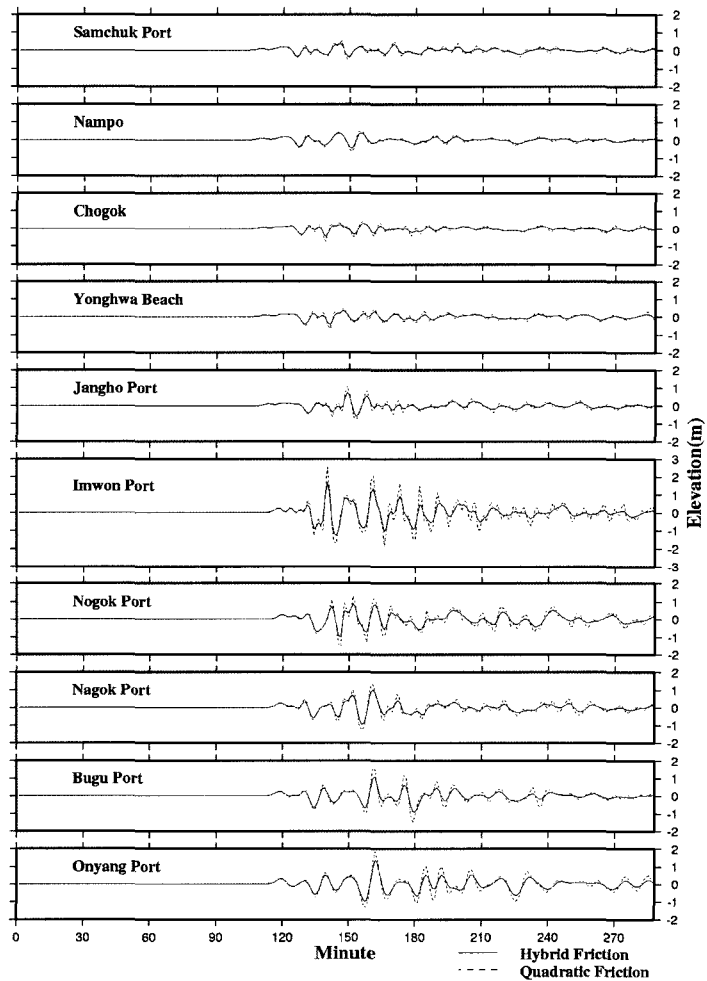


Fig. 8. Time series of ADCIRC models in Hybrid and Quadratic friction.

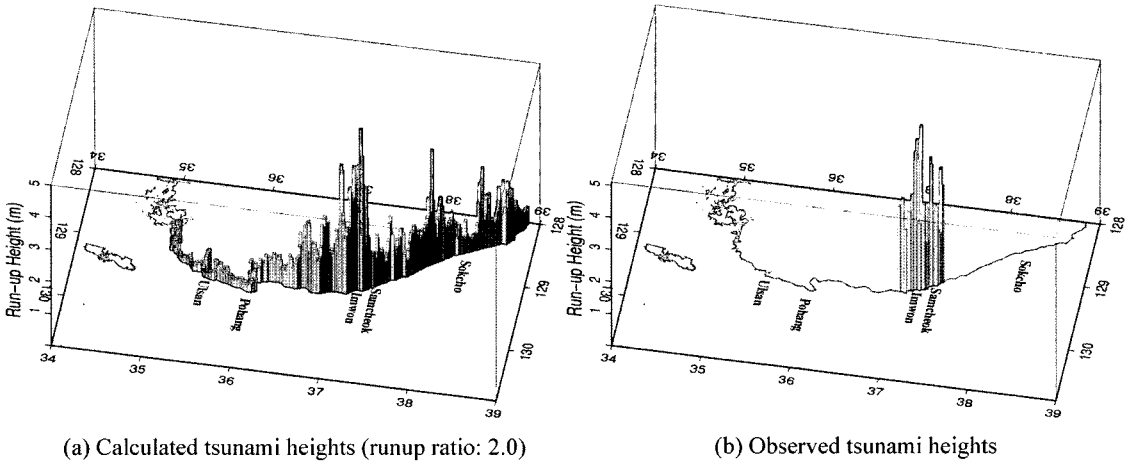


Fig. 9. Comparison between measured and calculated data by ADCIRC model in eastern coast of Korea.

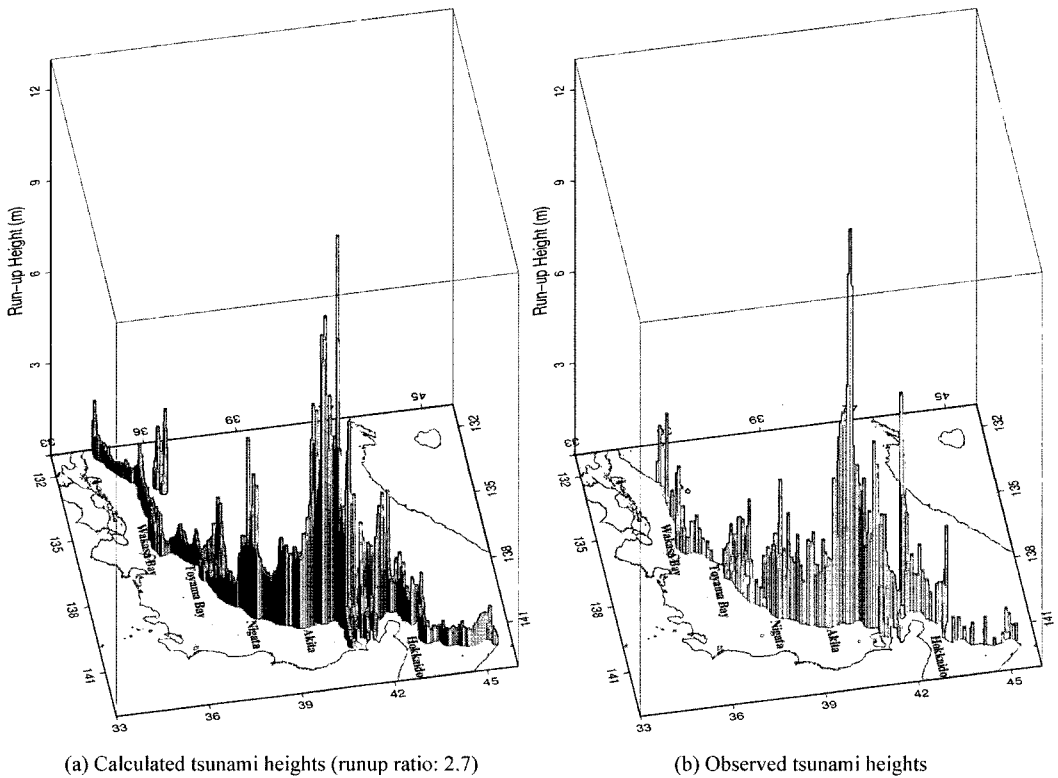


Fig. 10. Comparison between measured and calculated data by ADCIRC model in western coast of Japan.

파의 파고가 감소되기 때문이다.

5.2 이론적인 통계모형

Van Dorn(1965)는 1946년과 1957년의 지진해일에 의 해 하와이해안에서 관측된 지진해일파고 관측값들을 이용

하여 지진해일파고의 누적분포함수에 대한 연구를 하였다. 그 연구에서는 지진해일파고의 공간적인 분포가 대수정규 분포(log-normal distribution)에 의해 설명되는 것이 확인 되었다.

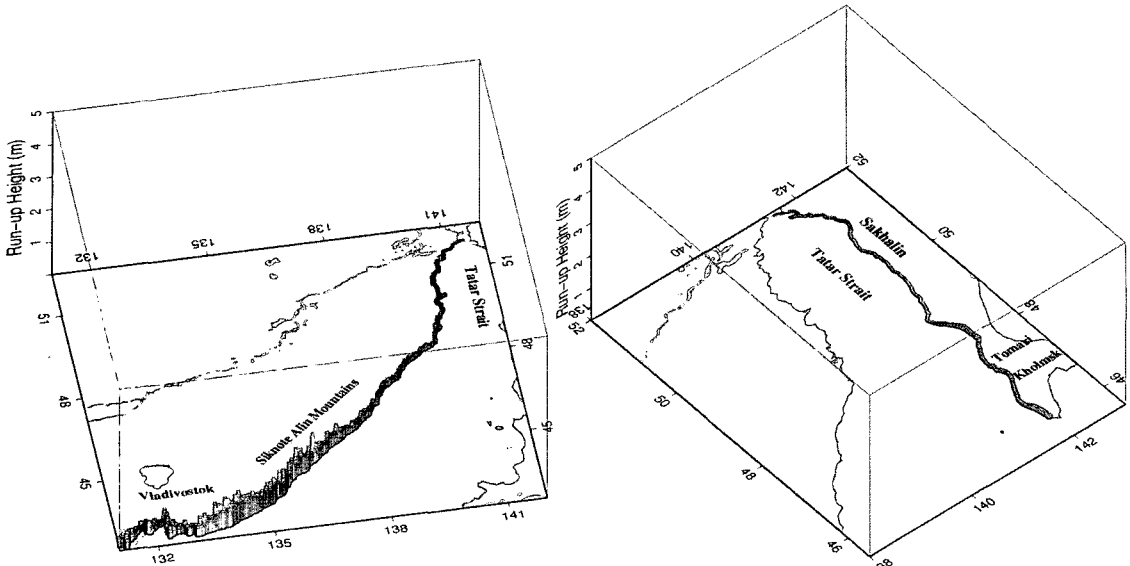


Fig. 11. Distribution of calculated data by ADCIRC model in Russian coasts.

$$fH = \frac{1}{H\sigma\sqrt{2\pi\ln 10}} \exp\left(\frac{(\log H - a)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

여기서, H 는 관측된 지진해일파고(해안을 따라 각 지점 별 최대값), a 는 대수파고($\log H$)의 평균값이며, σ 는 대수파고의 표준편차이다. 이는 지진해일파고의 실제분포가 단 2개의 매개변수(a, σ)로 설명되는 특성을 보여주고 있다.

이와 유사한 연구는 1896, 1933, 1946, 1960, 1964 그리고 1968에 발생하였던 지진해일에 대한 일본해안(산리쿠해안 중심)에서의 지진해일파고분포 연구가 Kajiura(1983)에 의해 이루어 졌으며, 이와 동일한 해석은 1896과 1981사이의 지진해일에 대한 일본과 쿠릴열도의 해안에 대해서도 Go(1987, 1997)에 의해 수행되었다. 이 이론은 평균적으로 지진해일파고의 공간적인 분포가 대수정규공식(식 (3))에 의해 잘 표현되는 것을 확인하였다.

지진해일파고의 대수정규분포의 이론적 설명은 Go (1987, 1997)에 제시되어 있다. 이 개념은 해안을 따른 지진해일파고변화는 해안역에서의 해저지형의 특수성에 의해 결정된다는 가정에 기초를 두고 있다. 지진해일파고(H)는 식 (4)와 같이 지진해일진원지에서의 초기파고(H_0)의 일정비율로써 나타낼 수 있다.

$$H = kH_0 \quad (4)$$

여기서, k 는 전파경로에 따른 수심변화에 의한 변형계

수이다(단순화된 해석에서, 지진해일파의 비선형성과 분산성과 같은 효과는 무시하였다). 만약 전파경로를 독립적인 구역들로 나눈다면, 지진해일변형요소는 각각의 구역에서의 지진해일전파에 대한 지역적 요소들에 의한 결과이다. 이 경우, 식 (4)는 대수함수로서 제시될 수 있다.

$$\log H = \log H_0 + \sum_i^n \log K_i \quad (5)$$

여기서, n 는 전파경로를 따른 구역들의 개수이다. 지진해일의 초기수면변위(H_0)는 지진해일 진원지로부터 100 km의 단위길이로 매끄럽게 변화한다. 다른 한편으로는 파 변형계수는 해안역에서 각기 다른 해안저면의 특성에 따라 두드러지게 변화한다. 중심극한정리(Central Limit Theorem)는 불규칙한 변수들의 합은 가우스과정(Gaussian Process)을 따르는 경향이 있다는 것을 말한다. 결과적으로, 식 (3)에 의해 지진해일파고는 대수정규분포(식 (5))를 따른다는 것을 알 수 있다.

다른모형(Mazova et al., 1989)은 지진해일 진원지로부터의 지진해일 전파에 의한 파에너지의 전개로서 기하학적인 요소를 중요하게 고려한다. 만약 일정한 변화를 갖는 원형 근원지와 직선의 해안선에 의해 제한된 일정한 수심의 유역에서의 기본적인 실험을 고려한다면, 아래의 관계식과 같은 예와 같이 파고는 거리에 따라 감소할 것이라는 것을 알 수 있다.

$$H = H_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^\alpha \quad (6)$$

여기서, R_0 는 지진해일진원의 유효한 반지름이며 α 는 비선형성, 분산과 소산에 의한 감소계수이다(선형천수이론에서는 기본적으로 α 는 1/2). 파고의 분포밀도함수는 식 (7)와 같이 지진해일흔적이 있는 해안선의 총길이와 지진해일파고가 관측된 해안선길이의 비율이다.

$$f = \frac{1}{\alpha H} \left(\frac{H_{\max}}{H} \right)^{2/\alpha} \frac{1}{\sqrt{\left[\left(\frac{H_{\max}}{H_{\min}} \right)^{2/\alpha} - 1 \right] \left[\left(\frac{H_{\max}}{H} \right)^{2/\alpha} - 1 \right]}} \quad (7)$$

여기서, H_{\max} 와 H_{\min} 는 각각 관측된 파고의 최대값과 최소값이다. 지진해일이 충분히 큰 경우($H_{\max} \gg H_{\min}$)에는 식 (7)는 파고의 기하학적 분포의 제곱식을 따른다.

$$f = \frac{1}{\alpha H} \left(\frac{H_{\max}}{H} \right)^{1/\alpha} \quad (8)$$

식 (8)은 8 m 이상의 파고가 관측된 알라스카(1964년)와 페루(1877년)의 지진해일분포의 해석을 위해 사용되었다.

지진해일파고의 관측이 이루어진 근해 해안에서는 일반적으로 기하학적인 요소가 수심의 변화성과 해안선의 불규칙성보다 더 작은 역할을 한다. 그러므로 파고분포의 대수정규분포식이 해안에서의 지진해일파고분포를 더 잘 표현하는 것을 알 수 있다.

이론적인 관점에서부터, 극치해석 방법은 파괴적인 지진해일의 해석에 적용될 수 있다. 특히, 포아송분포(Poisson Distribution)는 이러한 문제에 유용하다. 이 통계적 접근은 1993년 일본 북해도 남서부 지진해일에 의한 우리나라 동해안에서 지진해일을 해석하기 위해 사용되었다(한국지진해일조사단, 1994).

5.3 1983년 동해 중부지진해일파고의 통계적 분포

5.2에서 언급한 바와 같이 불규칙적인 해저지형에 의해 해안에서의 지진해일고의 밀도분포함수는 대수정규분포를 따른다는 것을 확인 할 수 있었으며(Van Dom, 1965; Choi et al., 2002), 1983년 동해 중부지진해일에 대한 우리나라 동해안에서의 관측치의 통계적 분포 또한 대수정규분포를 따른다는 것이 Choi et al.(2003)에 의해 증명되었다. 이에 본 연구에서는 FEM 모형에 의해 산정된 결과값들의 통계적 분포를 산정하였다(Fig. 12). 우리나라 동

해안과 일본 서해안에서의 산정된 결과값들은 대수정규분포를 잘 따르는 것을 볼 수 있으며, 러시아 연해주 및 사할린섬 해안에서는 산정된 파고가 다른 지역에 비해 상대적으로 작아 파고분포가 일정하게 나타나지는 않지만, 전체적으로는 이 지역 역시 대수정규분포를 따르는 것을 확인 할 수 있다. 동해안의 지진해일분포가 대수정규분포를 따른다함은 동해안을 따른 지진해일파고변화는 해안역에서의 해저지형의 특수성에 의해 결정된다라는 의미를 갖는 것이며, 이는 일본 서해안에서 발생 가능한 지진해일에 대한 우리나라 동해안에서의 지진해일고의 특성이 해안의 해저지형의 특성에 따라 파고분포가 이루어지므로 과거 지진해일고가 높게 관측된 지역에서는 추후 발생가능한 지진해일에 대한 지진해일고 또한 높게 예측될 수 있음을 보여주고 있다.

6. 토의 및 결론

본 연구에서는 병렬FEM모형(ADCIRC)을 이용하여 1983년 동해중부지진해일에 대한 수치시뮬레이션을 수행함으로써 지진해일에 대한 병렬FEM모형의 적용성에 대한 검증을 하였다. 한편, 동해에서 발생되는 지진해일파는 조석에 비해 파장이 매우 짧아 상대적으로 분산항이 강하므로 먼 거리를 전파해 오는 경우에는 파의 분산성을 고려하여 해석되어야 한다는 문제점이 부각되었으며, 이러한 문제점을 해결하기 위해서, 윤성범 등(2003)은 ADCIRC 유한요소모형의 분산특성을 분석하였으며, 이를 통하여 물리적 분산항을 수치분산항으로 대체 할 수 있는 결과를 얻었으나, 수치적 기법으로 사용되는 음해법에 의해 많은 계산시간과 순수 양해법에 의한 실제 지형의 적용에서의 문제점이 대두되었다. 또한, 궁극적으로 임의 크기로 구성된 유한요소격자를 사용하면서도 순수 양해법을 사용하여 물리적인 분산효과를 적절히 고려할 수 있는 병렬처리용 유한요소모형을 개발하기 위한 연구가 필요하며, 그 일환으로 윤성범 등(2004)은 양해법을 이용한 일차원 지진해일전파 유한요소모형의 분산보정에 대한 연구를 하였으며, 2차원 확정을 진행 중에 있다. 이러한 일련의 연구들을 통하여 추후에 분산성이 고려된 병렬FEM모형을 구성함으로써 연안에서의 좀 더 세밀한 격자체계 및 동해에서의 분산성이 고려된 범람 시뮬레이션이 가능해질 것이라 생각된다.

지진해일 파고(최대 지진해일고)의 공간적 분포를 제시하기 위하여 동해에 연안 지역들을 총 4개 지역으로 구

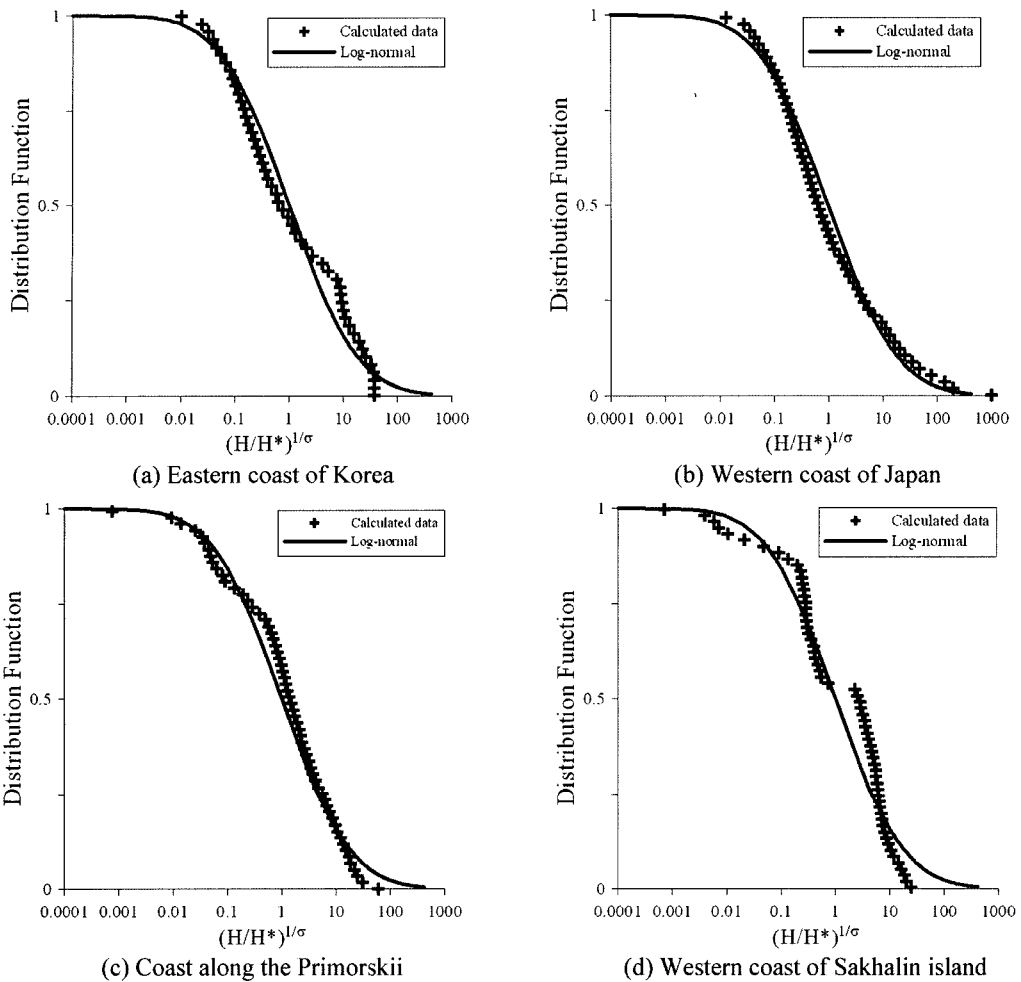


Fig. 12. Distribution of calculated tsunami heights by ADCIRC model.

분하여, 각 지역별 최대 지진해일고의 공간적인 분포를 제시하였다. 또한 지진해일파고의 통계적 분포를 알아보기 위해 지진해일파고의 대수정규분포이론을 이용하여 각 지역별 지진해일 분포도를 제시하였고, 이를 통하여 불규칙적인 해저지형에 의해 해안에서의 지진해일고의 밀도분포 함수는 대수정규분포를 따른다는 것을 확인 할 수 있었으며, 또한 각 지역별 지진해일 분포도가 대수정규분포를 따르고 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단지원 한국지진공학센터 및 2005년 기상청 기상연구소 특정사업 '지진예지 및 지진해일 예

측기술개발' 지원으로 수행된 바 이에 사의를 표한다.

참고문헌

- 국립방재연구소 (1999). 동해안에서의 쓰나미 위험도 평가. 국립방재연구소 보고서.
- 김경옥 (2000). 유한요소모형을 이용한 황해 및 동중국해의 조석산정. 석사학위논문, 성균관대학교.
- 윤성범, 임채호, 윤기승, 최병호 (2003). 지진해일 전파수치 모의를 위한 ADCIRC 유한요소모형의 일차원분산특성 분석. 한국해양해양공학회지, 15(2), 108-115.
- 윤성범, 임채호, 윤기승, 최병호 (2004). 양해법을 이용한 일차원 지진해일전파 유한요소모형의 분산보정. 한국해양해양공학회지, 16(2), 57-63.

- 최병호, 홍성진, 이제신 (2002a). 공백역 지진에 의한 동해안의 지진해일 산정. 한국지진공학회논문집, 6(3), 73-86.
- 최병호, 김경욱, 엄현민 (2002b). 한국근해의 디지털 수심표고 데이터베이스. 한국해양해양공학회지, 14(1), 41-50.
- 최병호, 에팜 페리놉스키, 이제신, 우승범 (2002c). 공백역 지진에 의한 동해에 연한 해안에서의 지진해일 위험도 산정. 한국지진공학회 논문집, 6(5), 1-17.
- 한국지진해일 조사단 (1994). 일본 북해도 남서부 지진에 의한 한국동해안 지진조사. 한국해양해양공학회지, 6(1), 117-125.
- 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.
- Choi, B.H., Pelinovsky, E., Ryabov, I. and Hong, S.J. (2002). Distribution functions of tsunami wave heights. Natural Hazards, 25, 1-21.
- Choi, B.H., Pelinovsky, E., Hong, S.J. and Woo, S.B. (2003). Computation of tsunamis in the East (Japan) Sea using dynamically interfaced nested model. Pure and Applied Geophysics, 160(8), 1383-1414.
- Go, Ch.N. (1987). Statistical properties of tsunami runup heights at the coast of Kuril Island and Japan. Institute of Marine Geology and Geophysics, Sakhalin, Preprint.
- Go, Ch.N. (1997). Statistical distribution of the tsunami heights along the coast. Tsunami and accompanied phenomena, Sakhalin, 7, 73-79.
- Kajiura, K. (1983). Some statistics related to observed tsunami heights along the coast of Japan. Tsunamis - Their Science and Engineering. Terra Pub., Tokyo, 131-145.
- Karypis, G. and Kumar, V. (1998). A Fast and High Quality Multilevel Scheme for Partitioning Irregular Graphs. SIAM Journal on Scientific Computing, 20(1), 359-392.
- 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.
- Luetlich, 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.
- Manshinha, L. and Smylie, D.E. (1971). The displacement fields of inclined faults. Bull. of Amer. Seism. Soc., 61(5), 1433-1440.
- Mazova, R., Pelinovsky, E. and Poplavsky, A. (1989). Physical interpretation of tsunami height repeatability law. Volcanology and Seismology, 8(1), 94-101.
- PMEL (2005). National tsunami hazard mitigation program TIME(Tsunami Inundation Mapping Efforts), <http://www.pmel.noaa.gov/tsunami/time>.
- Shuto, N. and Unohana, M. (1984). Tsunami Engineering Technical Report, Disaster Control Research Center, Tohoku University, 1(2).
- Turner, P.J. and Baptista, A.M. (1999). ACE/gredit Online Documentation, <http://www.ccalmr.ogi.edu/CORIE/software/ace/docs/gredit>.
- Van Dorn, W.G. (1965). Tsunamis. Advances in Hydroscience. Ed. V.T. Chow. Acad. Press, London, 2, 1-48.
- Westerink, J.J., Luetlich, R.A. and Muccino, J.C. (1994). Modeling tides in the western North Atlantic using unstructured graded grids. Tellus, 4(6A), 178-199.

Received October 4, 2005

Accepted December 12, 2005

부록 (APPENDIX)

1983년 지진해일에 대한 일본 서해안에서의 관측치를 보고서 (Shuto and Unohana, 1984)로부터 추출하여 향후의 동해지진해일 산정모형의 개발을 위한 기초자료로서 정량적으로 도표화시켰다.

Number	Position		Height(m)
	Longitude ($^{\circ}$ E)	Latitude ($^{\circ}$ N)	
1	132.66	35.38	0.68
2	132.68	35.45	1.84
3	132.88	35.49	1.38
4	133.11	35.58	1.35
5	133.27	35.57	2.65
6	133.62	35.52	0.8
7	134.24	35.55	0.6
8	134.28	35.57	0.83
9	134.44	35.62	0.8
10	134.65	35.65	1.7
11	134.80	35.67	1.6
12	135.08	35.74	0.8
13	135.25	35.76	1
14	135.29	35.71	1
15	135.44	35.58	2.5
16	135.57	35.50	1
17	135.73	35.50	0.5
18	135.83	35.64	0.5
19	135.85	35.57	0.5
20	135.90	35.61	1
21	135.96	35.67	0.8
22	135.97	35.97	0.5
23	135.99	36.02	1
24	135.99	35.89	1
25	136.01	35.75	0.5
26	136.02	36.06	1.2
27	136.09	36.15	0.8
28	136.14	36.24	0.5
29	136.30	36.35	0.5
30	136.45	36.45	0.3
31	136.67	37.17	0.9
32	136.69	37.22	0.7
33	136.73	36.81	0.5
34	136.73	37.05	1.3
35	136.73	37.34	1.5
36	136.73	37.29	1.5
37	136.74	37.01	1
38	136.76	36.94	0.4
39	136.86	37.40	1.5
40	136.92	37.40	1.5
41	137.00	36.86	0.72

Number	Position		Height(m)
	Longitude ($^{\circ}$ E)	Latitude ($^{\circ}$ N)	
42	137.00	36.89	0.85
43	137.01	37.15	0.15
44	137.03	37.19	0.4
45	137.06	36.97	0.1
46	137.06	37.02	0.52
47	137.06	36.80	0.65
48	137.07	37.46	1.15
49	137.09	36.79	0.34
50	137.10	37.48	1
51	137.19	37.51	1.5
52	137.25	37.40	0.7
53	137.25	37.31	0.45
54	137.26	37.34	0.5
55	137.28	37.44	0.7
56	137.29	37.53	1
57	137.33	36.77	0.43
58	137.34	37.53	2.5
59	137.36	37.45	0.5
60	137.42	36.91	0.56
61	137.83	37.03	0.53
62	137.97	37.09	1.18
63	138.09	37.16	0.86
64	138.23	37.98	0.81
65	138.24	37.84	1.24
66	138.24	38.06	1.23
67	138.26	38.11	0.82
68	138.28	37.91	0.5
69	138.29	37.82	0.57
70	138.32	38.19	2
71	138.37	37.83	0.76
72	138.38	38.23	1.39
73	138.42	37.87	1.16
74	138.43	37.32	0.5
75	138.45	38.30	2.39
76	138.46	38.07	1.44
77	138.46	38.16	1.45
78	138.47	38.32	3.89
79	138.49	37.91	0.68
80	138.50	38.33	3.31
81	138.50	38.22	1.14
82	138.50	38.22	1.14
83	138.52	38.32	1.43
84	138.55	37.37	1.4
85	138.55	38.03	0.53
86	138.56	38.09	1.01
87	138.67	37.53	0.79
88	138.77	37.66	0.6
89	138.91	37.86	2
90	139.02	37.92	1.79

Number	Position		Height(m)	Number	Position		Height(m)
	Longitude ($^{\circ}$ E)	Latitude ($^{\circ}$ N)			Longitude ($^{\circ}$ E)	Latitude ($^{\circ}$ N)	
91	139.12	37.96	1.95	140	139.80	39.87	2.36
92	139.15	37.97	1.64	141	139.81	41.36	3.29
93	139.16	37.98	2.24	142	139.81	42.22	1.61
94	139.18	37.98	2.04	143	139.83	42.60	2.15
95	139.19	37.98	1.64	144	139.83	39.98	4.05
96	139.23	38.45	3.28	145	139.84	38.98	2.64
97	139.24	38.47	2.3	146	139.84	42.55	1.17
98	139.25	38.45	1.37	147	139.84	38.99	2.77
99	139.26	38.02	1.94	148	139.85	42.44	1.19
100	139.34	38.06	2.38	149	139.86	39.88	2.09
101	139.37	38.10	2.02	150	139.87	42.21	1.4
102	139.40	38.15	1.58	151	139.87	39.05	2.62
103	139.40	42.17	4.65	152	139.87	40.61	4.4
104	139.42	42.07	6.95	153	139.87	39.11	2.68
105	139.42	42.10	5.38	154	139.87	39.99	5.54
106	139.42	42.13	4.93	155	139.89	40.64	4.44
107	139.44	38.27	2.28	156	139.89	40.59	3.7
108	139.45	38.31	1.33	157	139.90	39.23	1.62
109	139.45	38.37	1.42	158	139.92	40.03	6.61
110	139.45	42.05	3.7	159	139.92	39.28	1.98
111	139.47	38.41	1.58	160	139.93	39.90	2.86
112	139.49	42.08	3.9	161	139.93	40.65	3.39
113	139.51	42.10	3.6	162	139.93	40.56	5.16
114	139.51	38.49	1.06	163	139.94	40.54	4.94
115	139.52	42.14	3.61	164	139.94	40.43	5.78
116	139.52	42.17	3.33	165	139.96	42.13	1.36
117	139.54	38.52	2.04	166	139.96	40.09	6.94
118	139.54	42.24	3.03	167	139.96	42.69	1.38
119	139.54	38.56	1.25	168	139.96	40.69	3.7
120	139.55	39.19	1.23	169	139.96	39.29	1.7
121	139.55	42.20	1.13	170	139.97	40.40	5.3
122	139.56	39.21	2.8	171	139.98	40.13	6.5
123	139.57	39.20	1.17	172	139.99	41.54	1.69
124	139.57	38.61	1.91	173	139.99	40.73	4.3
125	139.61	38.67	2.21	174	140.00	39.36	1.76
126	139.62	38.69	2.84	175	140.01	41.67	1.5
127	139.65	38.70	1.86	176	140.01	40.24	7.85
128	139.67	38.71	2	177	140.01	40.21	3.14
129	139.70	40.01	5.95	178	140.01	40.27	11.5
130	139.71	39.93	3.74	179	140.02	39.84	4.74
131	139.72	39.95	3.27	180	140.02	40.29	10.36
132	139.73	38.76	1.89	181	140.02	40.37	11.08
133	139.74	39.98	5.19	182	140.02	40.31	12.98
134	139.74	39.91	3.34	183	140.02	41.48	2.19
135	139.75	38.78	1.9	184	140.02	39.44	2.86
136	139.76	39.87	3.46	185	140.03	40.34	10.18
137	139.78	42.35	1.83	186	140.04	40.76	4.76
138	139.79	39.97	3.12	187	140.05	39.51	2.44
139	139.79	38.84	1.41	188	140.05	41.74	1.4

Number	Position		Height(m)
	Longitude (°E)	Latitude (°N)	
189	140.05	39.78	4.9
190	140.05	39.55	2.01
191	140.06	39.60	2.27
192	140.06	39.67	2.2
193	140.09	41.42	1.88
194	140.10	42.73	1.17
195	140.13	41.42	3.5
196	140.13	41.86	0.94
197	140.14	40.76	3.66
198	140.22	42.80	1.11
199	140.22	40.79	2.61
200	140.22	41.42	0.76
201	140.25	42.77	1.29
202	140.26	41.48	1.2
203	140.27	40.83	3.08
204	140.29	41.14	5.34
205	140.30	40.89	3.82
206	140.31	41.14	5
207	140.31	40.96	2.86
208	140.32	40.99	3.08
209	140.33	41.03	6.14
210	140.34	41.24	3.34
211	140.35	42.86	0.91
212	140.37	43.33	1.42
213	140.39	41.24	2
214	140.42	43.33	1.65
215	140.43	43.14	1.29
216	140.46	41.69	1.45
217	140.49	41.19	1.45

Number	Position		Height(m)
	Longitude (°E)	Latitude (°N)	
218	140.51	43.04	1.29
219	140.52	43.35	3.17
220	140.54	41.22	1.45
221	140.63	43.29	1.25
222	140.64	41.20	0.96
223	140.72	41.79	0.69
224	140.80	43.19	1.56
225	140.81	41.33	1.35
226	140.86	41.44	0.65
227	140.86	43.21	0.84
228	140.95	41.72	0.4
229	140.98	41.20	0.01
230	140.99	40.96	0.01
231	141.05	45.29	0.43
232	141.14	41.78	0.5
233	141.15	45.16	0.7
234	141.16	43.14	0.2
235	141.33	44.44	0.2
236	141.37	43.78	0.4
237	141.38	43.59	0.75
238	141.42	43.41	0.82
239	141.43	44.44	0.7
240	141.59	45.26	0.43
241	141.63	43.95	0.53
242	141.65	43.99	0.7
243	141.68	45.40	0.5
244	141.70	44.96	0.3
245	141.72	44.39	0.55
246	141.78	44.69	0.21