

동적결합 쓰나미모형에 의한 동해쓰나미 산정 Computation of Tsunamis in the East Sea using Dynamically Interfaced Nested Model

최병호¹ · 홍성진¹ · 우승범² · 에핌 페리놉스키³

Byung Ho Choi¹, Sung Jin Hong¹, Seung Buhm Woo³, and Efim Pelinovsky²

1. 서 론

역사적으로 동해에서의 쓰나미는 자주 발생하지는 않았지만, 동해에서의 지진 진앙지가 유라시아와 북태평양 플레이트사이인 일본연안을 따라 위치하고 있어서 우리나라의 동해연안, 일본연안 및 러시아 연안에 큰 쓰나미에 의한 피해를 줄 수 있다. 20 세기에 동해에서 발생하였던 쓰나미로는 1939 년 5 월 1 일, 1940 년 8 월 2 일(Shakotan-oki earthquake), 1983 년 5 월 26 일(East Sea Central earthquake), 1993 년 7 월 12 일(Southwest of Hokkaido earthquake)이 있으며, 1983 년 5 월 26 일 및 1993 년 7 월 12 일에는 거대한 쓰나미가 동해에서 발생하여 일본연안에서 15m 보다 큰 파고(1983 년 동해중부 지진해일)와 오구도에는 국지적으로 30m 가 넘는 파고(1993 년 북해도 남서부 지진해일)가 관측되었으며, 또한 동해를 가로질러 우리나라의 동해연안에 큰 영향을 주었는데, 특히 1983 년 쓰나미의 경우 묵호항과 임원항에서는 쓰나미의 큰 범람이 이루어 졌었다. 그 당시 재해를 통하여 우

리나라의 과학자 및 기술자들에 의해 중요하지 않은 해상재해로 인식되었던 쓰나미에 대한 새로운 문제 인식이 대두되었다. 본 연구에서는 종래의 쓰나미시뮬레이션에서 대격자와 소격자결합을 일방향접합(one-way nesting)시키던 방법에서 개선하여 이방향 동적결합으로서의 동해쓰나미산정모형을 수립하여 시험 운용하였다.

2. 수치모형

2.1 기본방정식

동해의 쓰나미 전파와 범람을 시뮬레이션하기 위해서 동적결합유한차분모형(a leap-frog multi-grid finite difference model)을 수립하였으며, 이 모형은 천수방정식을 기본으로 하고 있다. 현재 모형에서는 좌표계(직교좌표계, 구면좌표계)에 따른 선형, 비선형 천수방정식이 해당영역의 특성에 따라 적용할 수 있으며 각각의 영역은 동적 결합되어 있으며, 또한 인접한 두 개의 영역사이의 격자비율을 자유롭게 조절

¹ 성균관대학교 토목환경공학과 (Department of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, 300 ChonChon-dong, Jangan-gu, Suwon 440-746, Korea)

² 코넬대학교 토목환경공학과(School of Civil and Engineering, Cornell University, NY14853, USA)

³ 러시아 과학원 응용물리연구소(Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia)

할 수 있다. 그림 1에 제시한 것과 같이, 전체의 계산 영역을 4개의 세부영역으로 나누어 각 영역별로 다른 시간간격과 공간적 격자간격을 사용하였으며, 다음과 같이 정의하였다.

- 영역 O, 동해전역을 포함하는 영역
범위: (127°0'E, 33°6'N) ~ (142°59'E, 51°44'N)
영역크기: (959×1118), 격자간격: 1분, 시간간격: 2초, 구면좌표계, 선형 천수방정식

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left[\frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (Q \cos \varphi) \right] = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{gh}{R \cos \varphi} \frac{\partial \zeta}{\partial \psi} - fQ = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{gh}{R} \frac{\partial \zeta}{\partial \varphi} + fP = 0$$

- 영역 A, 한반도전역의 동해연안을 포함하는 영역
범위: (128°9'40"E, 34°59'40"N) ~ (132°48'E, 40°0'N),
영역크기: (835×901), 격자크기: 0.333분, 시간간격: 1초, 구면좌표계, 선형 천수방정식

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left[\frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (Q \cos \varphi) \right] = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{gh}{R \cos \varphi} \frac{\partial \zeta}{\partial \psi} - fQ = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{gh}{R} \frac{\partial \zeta}{\partial \varphi} + fP = 0$$

- 영역 B, 우리나라 동해연안을 포함하는 영역
범위: (128°49'55"E, 35°19'55"N) ~ (131°20'E, 37°20'N), 영역범위: (1801×1441), 격자간격: 125m, 시간간격: 0.5초, 직교좌표계, 선형 천수방정식

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0$$

- 영역 C, 우리나라 동해연안 일부를 포함하는 지역
범위: (129°14'59"E, 35°24'59"N) ~ (129°40'E, 37°10'N), 영역크기: (1501×6301), 격자간격: 25m, 시간간격: 0.25초, 직교좌표계, 비선형 천수방정식, 이동경계조건

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \tau_x H = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \tau_y H = 0$$

본 모형에서는 2차원 공간과 2차 시간적분의 외삽기법을 사용하였으며, 상세한 수치적 기법과 연결부의 경계조건에 대한 내용은 Liu et al.(1998)에 설명되어 있으며, 각 영역별 연결비율을 보면, 영역 O와 영역 A의 격자간격비율은 1:3, 영역 A와 영역 B의 격자간격비율은 1:4 그리고 영역 B와 영역 C의 격자간격비율은 1:5로 이루어져 있으며, 비록 격자간격이 크더라도, 연결부의 경계조건에서는 비선형영향이 크지 않다고 생각한다.

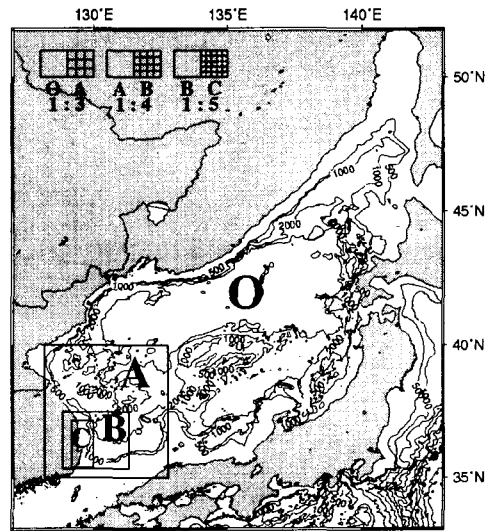


그림 1. 동해전역을 포함하는 동적결합 쓰나미모형의 격자체계.

2.2 쓰나미의 단층모형

2.2.1 1983년 중부 지진

1983년 중부 지진에 대한 여러 종류의 단층모형들 중 쓰나미 에너지와 쓰나미 에너지의 분포가 잘 설명되는 Aida Model-10을 선택하였으며, 표 1은 Aida Model-10에 의한 단층 파라미터를 보여주고 있다.

표1. 1983년 동해 부 지진해일 단층 파라미터.

N(°N)	E(°E)	H(km)	θ (°)	δ (°)	λ (°)	L(km)	W(km)	U(cm)
40.21	138.84	2	22	40	90	40	30	760
40.54	139.02	3	355	25	80	60	30	305

2.2.2 1993년 북해도 남서 외해 지진

하버드대의 CMT해석에 의한 지진단층 면적은 145km× 25km으로 측정되었으며, 진앙지가 과거의 지진 즉, 1983년 중부지진, 1964 Nigata지진, 1940 Sakotan지진과 같이 유라시아와 북아메리카 플레이트사이에 위치하였다. 사용된 단층모형은 일본 동북대 재해제어연구센터에서 제시한 DCRC-17a 모형을 사용하였으며, 단층 파라미터를 표 2에 제시하였다.

초기해수면형상은 초기해수면형상이 장파의 유속보다 빠른 플레이트의 수직변위 속도에 의한 수직변위의 움직임과 같다고 가정하는 Mansinha 와 Smylie(1971)에 의해 제시된 방법을 사용하여 결정하였다. 그림 2는 하버드대 CMT해석에 의한 1983년 중부지진, 1993년 북해도 남서외해 지진의 단층변위와 이에 부합하는 초기해수면형상을 보여 주고 있다.

표 2. 1993년 북해도 남서외해 지진해일의 단층 파라미터.

N(°N)	E(°E)	H(km)	θ (°)	δ (°)	λ (°)	L(km)	W(km)	U(cm)
42.10	139.30	5	163	60	105	24.5	25	1200
42.34	139.25	5	175	60	105	30	25	250
43.13	139.40	10	188	35	80	90	25	571

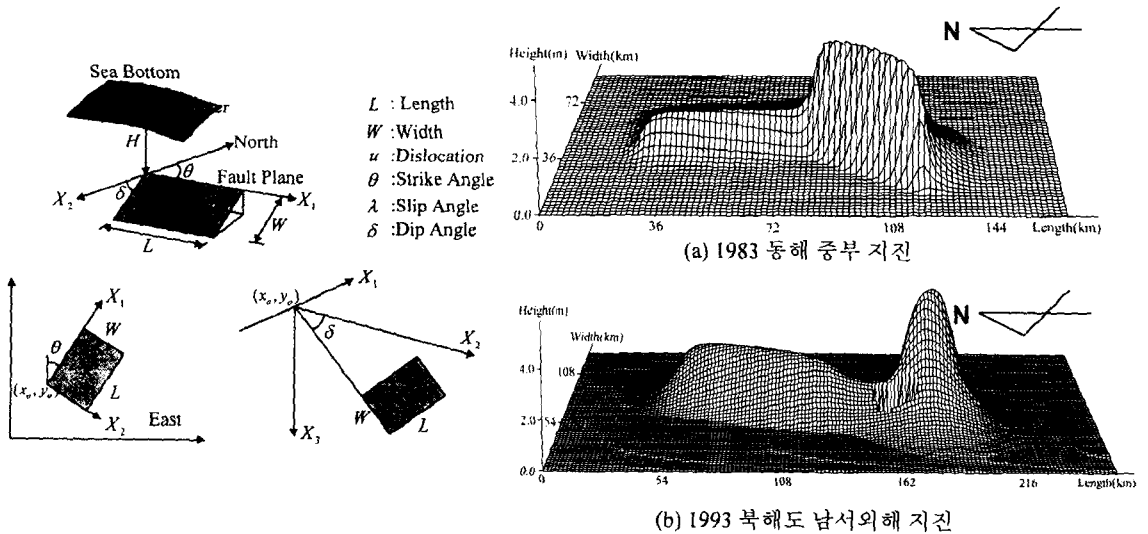


그림 2. CMT 해석에 의해 측정된 단층변위.

2.3 표고 및 수심 자료

한반도 서해안 및 남해안 해역에서의 수심, 표고결합작업을 시도하였는데 1초해상도(~30m) 표고수심과 결합시키기 위해서 서·남해안의 1:25,000 축척의 연안해역기본도(표고와 수심의 기준이 인천평균해

면을 취하고 있음)와 자원연구소의 수심도의 등심선을 디지털이정하여 30m 격자수심을 생성시켜 각 도엽의 경계부분의 불일치를 시행착오법에 의해 수정한 후 서남해안의 결합자료를 생성하였다. 동해안의 경우는 조차가 작아서 공통기준면의 중요성은 상대

적으로 낮아 1초 해상도 표고와 해도를 디지털화시킨 수심(전회의 해빈변형 시물레이션에서 10m, 20m, 해상격자수심을 생성하였음)을 직접 결합하였다. 육수경계(geohydraulic boundary)를 공통수직기준면을 기준하여 표고와 수심을 결합시키는 과업이 선진해양국에서도 비로소 시작하는 단계에 있는데 해안선의 재정의 및 확립에 따른 국토관리의 관점에서 중요한 일이다. 공통수직기준은 현재 평균해면이 널리 이용되고 있으나 정밀지오이드가 작성되면 이 새로운 기준으로 대체되어 GPS 체계와 연계된 표고, 수심이 21세기 초반에는 활용될 전망이다. 일차적으로 해안재해경감을 위한 범람시물레이션의 기초자료로 활용하는 데 초점을 두었다.

3. 수치실험 결과

3.1 지진해일파고의 분포함수

초기의 지진해일파고분포함수에 대한 연구는 하와이섬에서 지난 1946년에서 1957년까지 일어난 지진해일의 범람높이를 기초로 분포함수를 수립한 Van Dorn(1965)에 의해 처음으로 이루어 졌으며, 이 연구에 의하면 지진해일파고분포가 대수정규분포(log-normal distribution)을 따른다고 하였으며 관계식은 아래와 같다.

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

여기서, H : 연안에서의 지진해일파고
 a : 파고의 평균값, $a = \langle \log H \rangle$
 σ : 파고의 표준편차

이와 유사한 결과는 일본연안에 따른 지진해일특성을 분석한 Kajiura (1983)와 Kuril Islands의 연안에서의 지진해일연구를 한 Go (1987, 1997)에 찾을 수 있다. 최근에는 Pelinovsky and Ryabov (1999)이 1992-1998년 사이에 세계적으로 발생하였던 지진해일의 파고분포를 분석하였으며 대수정규분포가 가장 적합한 것으로 보고되었다(그림 3). 이론적으로, 지진해일파고의 대수정규분포는 연안에서의 복잡한 해안선 및 수심과 관계되어 진다.

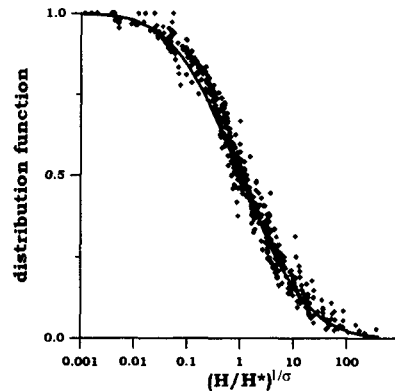


그림 3. 1992년~1998년 사이에 세계적으로 발생하였던 주요 쓰나미 파고분포.

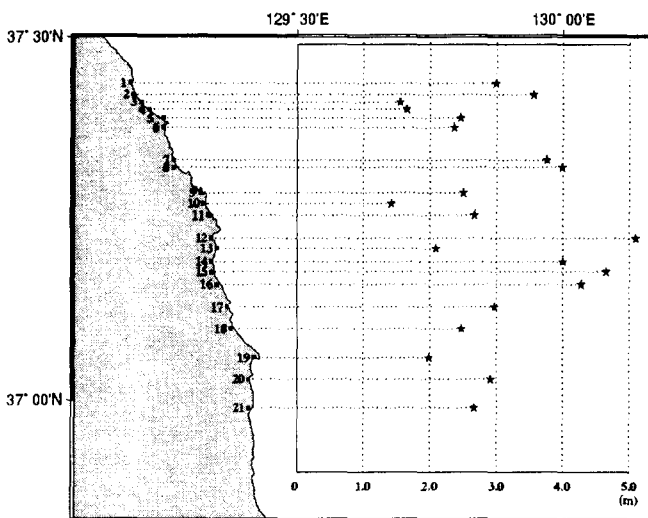


그림 4. 동해 연안에서 관측된 1983년 쓰나미의 관측치 (국립방재연구소, 1999).

Tsunami Heights

Name of points	Height(m)
1. Samchuk Port	2.99
2. Geunduk	3.56
3. Namapo	1.55
4. Gungchun Beach	1.65
5. Gungchun	2.46
6. Chogok	2.36
7. Yongwha Beach	3.76
8. Yongwha Port	3.99
9. Jangho Port	2.50
10. Galnam Port	1.42
11. Shinnam Port	2.67
12. Imwon Port	5.10
13. Biwha Port	2.09
14. Nogok Port	4.00
15. Jakjin Port	4.65
16. Hosan Port	4.28
17. Nagok Port	2.97
18. Bugu Port	2.47
19. Chukbyun Port	1.99
20. Onyang Port	2.91
21. Eubnam Port	2.66

3.2 1983년 중부 지진에 대한 수치실험 결과

그림 4는 1983년 지진해일 이후 동해연안에서 관측된 지진해일파고를 나타내고 있으며(방재연구소, 1999), 그림 5는 관측치를 이용하여 계산된 지진해일 분포를 나타내고 있으며, 이론적인 대수정규분포곡선은 실선으로 나타내고 있다. 그림 5에서 제시되었듯이 관측된 지진해일파고의 파고가 대수정규분포를 잘 따르는 것을 알 수 있다. 그림 6은 1983년 지진해일에 대해 계산한 시물레이션을 보여주고 있으며, 그림 7은 시물레이션을 통해 계산된 동해연안에서의 계산치를 이용한 파고분포를 나타내고 있으며, 여기에서는 격자간격이 감소할수록 대수정규분포에 더욱 잘 따르는 경향을 볼 수 있다.

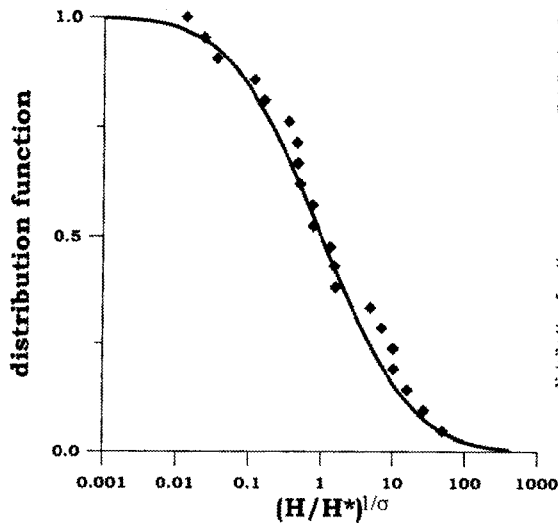


그림 5. 동해연안에서 관측된 1983년 쓰나미의 관측치의 파고분포.

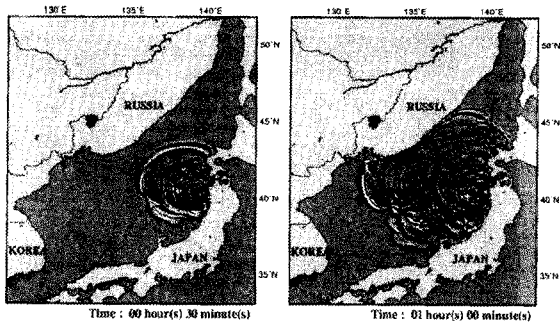


그림 6. 1983년 동해에서 발생한 쓰나미의 시물레이션

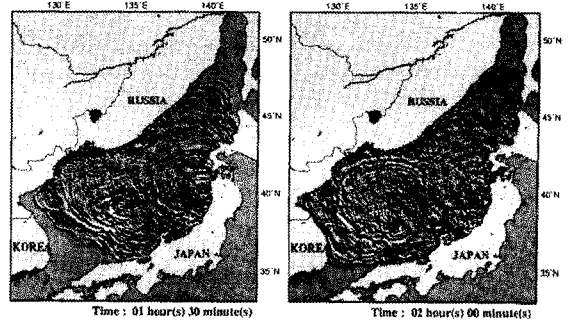


그림 6. (계속)

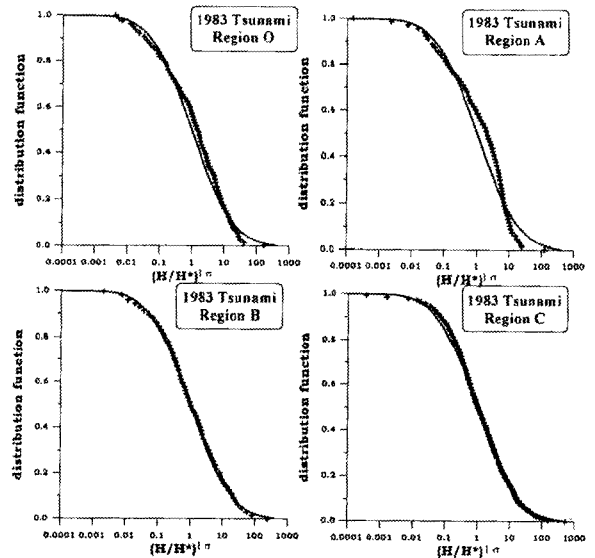
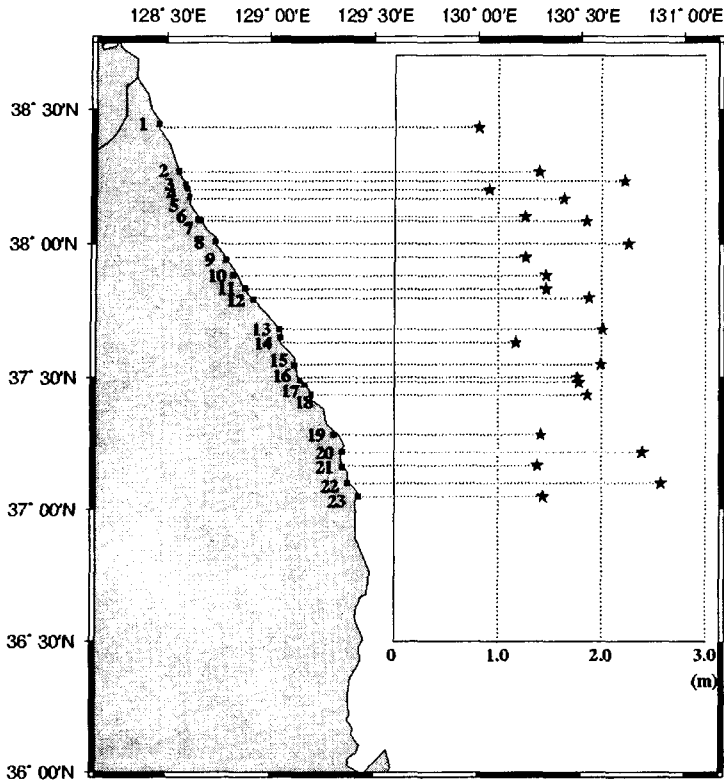


그림 7. 다른 격자간격을 각 영역별 계산된 쓰나미 파고분포(1983 쓰나미).

3.3 1993년 북해도 남서쪽의 지진에 대한 수치실험 결과

그림 8은 1993년 지진해일 이후 우리나라 동해연안에서 관측된 지진해일파고를 나타내고 있으며(쓰나미조사단, 1994), 우리나라 동해안에서 관측되는 지진해일파고의 분포를 산정한 결과 앞에서 제시한 대수정규분포를 가지는 것을 알 수 있었다(그림 9). 그림 10은 1993년 지진해일에 대해 계산한 시물레이션을 보여주고 있으며, 그림 11은 시물레이션을 통해 계산된 동해연안에서의 계산치를 이용한 파고분포를 나타내고 있으며, 역시 이번 경우에서도 격자간격이 감소할수록 대수정규분포에 더욱 잘 따르는 경향을 볼 수 있다.



Tsunami Heights

Name of points	Height(m)
1. Geojin Port	0.81
2. Ayajin Port	1.39
3. Sajin Port	2.22
4. Sockcho	0.91
5. Daepo Port	1.63
6. Osan Port	1.26
7. Susan Port	1.85
8. Gisamun	2.26
9. Namae Port	1.26
10. Jumunjin Port	1.46
11. Sachunjin Port	1.46
12. Gangmun	1.87
13. Jungdongjin	2.01
14. Gumjin Port	1.17
15. Mukho Port	1.99
16. Donghae Port	1.76
17. Chuam Beach	1.77
18. Samchuk Port	1.86
19. Jangho Port	1.41
20. Imwon Port	2.39
21. Hosan Port	1.38
22. Bugu	2.57
23. Junkbyun Port	1.43

그림 8. 동해 연안에서 관측된 1993년 쓰나미의 관측치 (쓰나미조사단, 1994).

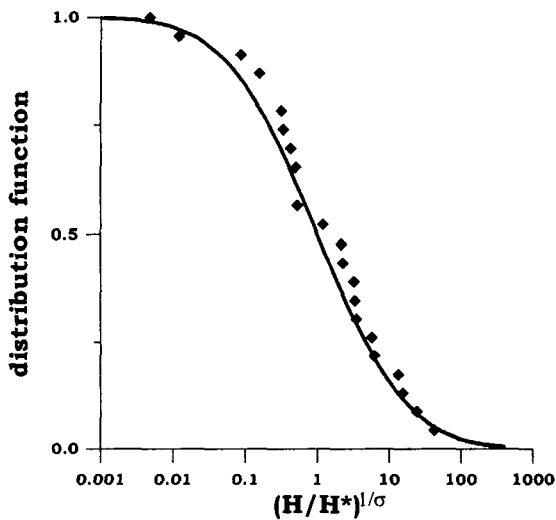


그림 9. 동해연안에서 관측된 1983년 쓰나미의 관측치의 파고분포.

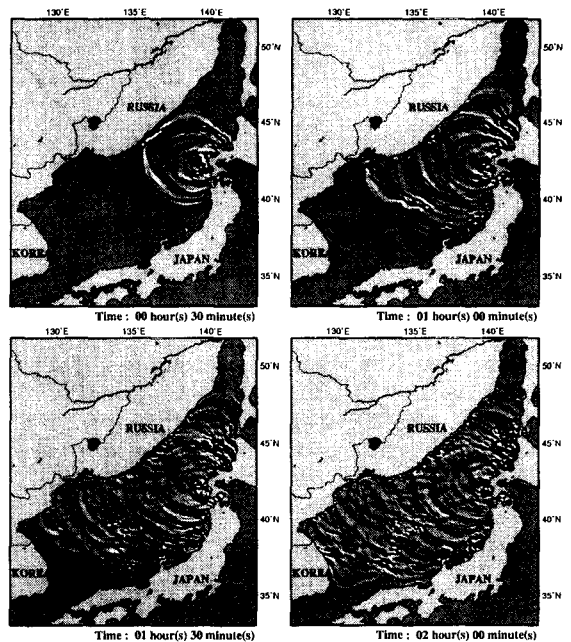


그림 10. 1993년 동해에서 발생한 쓰나미의 시뮬레이션.

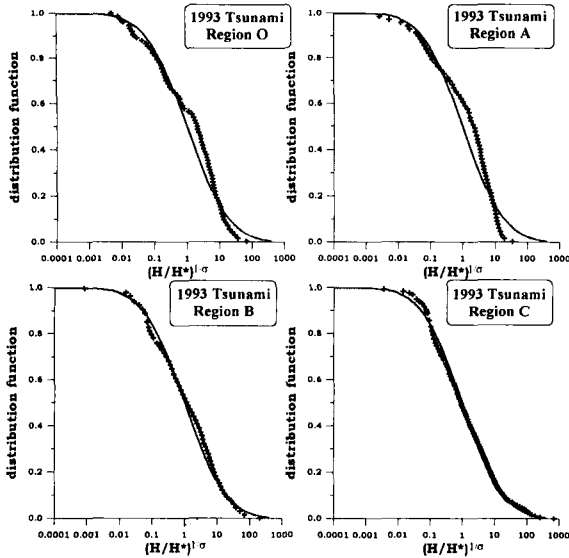


그림 11. 다른 격자간격을 각 영역별 계산된 쓰나미 파고분포(1993 쓰나미).

4. 결 론

본 연구에서는 이방향 결합기법을 이용한 동적결합 쓰나미모형을 수립하여 과거 동해에서 발생하였던 쓰나미에 대한 시물레이션을 하였고, 또한 1983년과 1993년 쓰나미 발생 당시 관측된 파고를 이용하여 동해연안에서의 쓰나미파고 분포특성을 알아보았다. 관측된 파고를 이용한 쓰나미파고분포가 대수정규분포에 가장 근접한 분포를 나타내는 것을 알 수 있었으며, 또한 쓰나미시물레이션결과는 연안에서 세격자체계의 동적복합 격자체계와 동해연안에서의 이동경계조건을 적용하여 계산된 쓰나미파고분포가 대수정규분포에 좀 더 근접하는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 쓰나미가 연안에서의 해저지형의 특성에 큰 영향을 받는다는 것을 의미한다고 볼 수 있으며, 연안에서 쓰나미특성을 알기 위해서는 더욱 세밀한 수심자료를 이용한 모형의 운용이 필요하다는 것을 의미한다. 또한, 범람시물레이션을 나타내기 위해서 해안에서 세밀한 쓰나미파고를 산정하기 위해서는 역시 연안에서 좀 더 세밀한 격자체계를 가진 모형의 운용의 필요성을 재인식하게 되었으며, 범람산정 결과를 이용한 동해안의 쓰나미범람도작성의 근간이 되는 시물레이션체계를 갖추게 되었다.

사 사

본 연구는 과학재단지원 한국지진공학연구센터의 세부과제와 과기부 국가 중점과제인 자연재해저감기술(해안재해) 연구사업의 재정적 지원아래 수행된 바 이에 사의를 표합니다.

참고문헌

- 국립방재연구소, 1999. 동해안에서의 쓰나미 위험도 평가, *국립방재연구소 보고서*, 192.
- 쓰나미조사단, 1994. 일본 북해도 남서부 지진에 의한 한국동해안 지진조사, *한국해양해양공학회지*, 6(1), 117-125.
- 최병호, 김동훈, 홍성진, 1999. Tsunami Simulations for Korean Coast of the East Sea, *자연재해경감학술발표회(한국근해의 지진해일)*, 36-46.
- 최병호, 홍성진, Pelinovsky, E. and Ryabov, I., 1999. A Numerical Simulation of the 1993 East Sea Tsunami and Estimations of Potential Tsunamis, *한국원자력학회 추계학술발표회*, 366.
- 최병호, 우승범 and Pelinovsky, E., 1994. A Numerical Simulation of the 1993 East Sea Tsunami, *한국해안·해양공학회지*, 6(4), 404-412.
- Aida, I., 1984. A source models of the 1983 Nihonkai-earthquake tsunami, *Proceeding of 3rd UJNR Tsunami Workshop*, 57-76.
- Choi, B. H., Pelinovsky, E., Ryabov, I. and Hong, S. J., 2000. Distribution function of tsunami wave heights, *Natural Hazards*, Submitted.
- 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.
- Manshinha, L., and Smylie, D.E., 1971. The displacement fields of inclined faults, *Bull. of Amer. Seism. Soc.*, 61(5), 1433-1440.
- Pelinovsky, E., Ryabov, I., 1999. Distribution functions of tsunami runup heights (on data of International Surveys for 1992 - 1998). *Institute of Applied Physics, Nizhny Novgorod*, Preprint N 486.
- Philip L. F. Liu, Woo, S. B. and Cho, Y. S. 1998. Computer programs for tsunami propagation and inundation, *Technical Report*, School of civil and environmental engineering, Cornell University.
- Takahashi, T., Shuto, N., Imamura, F. and Ortis, M.,

1994. Fault model for a tsunami due to the 1993 southwest of the Hokkaido earthquake. *Proceeding of Coastal Engineering in Japan*, 41, 251-255.
- Van Dorn, W. G., 1965. Tsunamis. *Advances in Hydroscience (Ed. V.T.Chow)*. Acad. Press, London, 2, 1-48.
- Woo, S. B., Cho, Y. S. *et al.*, 1999. Application of Multi-grid Coupled Tsunami Model to 1986 Hwa-lien (Taiwan) Tsunami, 자연재해경감학술발표회(한국근해의 지진해일), 81-95.