

1993年 東海 쓰나미의 算定 A Numerical Simulation of the 1993 East Sea Tsunami

崔秉昊*·禹承範*·에핌 페리놉스키**

Byung Ho Choi*, Seung Buhm Woo* and Efim Pelinovsky**

要 旨 : 1993年 7月 12日 오후 10시 17분 日本 北海道 南西 海域 奥尻島 附近에서 震度(Ms - 7.6)의 地震이 發生하였다. 2~5分 사이에 큰 쓰나미가 發生되어 奥尻島와 北海道 西側海岸을 휩쓸어 엄청난 被害와 死傷者를 내었는데 局地的으로 30 m의 높은 쓰나미波의 初올림이 관측되었다. 이 쓰나미는 東海를 가로질러 우리나라 東海岸에 來襲하였는데 7月 17~19日 期間에 27個所에서 쓰나미 越波高가 觀測되었다. 觀測된 쓰나미 높이는 1983年 5月 26日의 쓰나미보다 全般的으로 낮았는데 0.8 m~2.6 m의 範圍이었다. 本 研究의 目的은 數值模型과 動畫化技法에 의한 科學的 可視化로 이 쓰나미의 波及現象을 이해하는데 있다.

Abstract □ On July 12, 1993 at 22:17 local time (-9h, KST), an earthquake of surface magnitude (Ms) 7.6 occurred on the west coast of the Hokkaido and small offshore island of Okushiri in the East Sea. A major tsunami was generated and within 2 to 5 minutes, extremely large tsunami waves engulfed the Okushiri coastal area and the central west coast of the Hokkaido. This tsunami caused tremendous casualties and damage. A giant tsunami runup of more than 30 m in height was recorded. The tsunami crossed the East Sea and feeled at 27 sites of the eastern Korean coast during the survey on 17~19, July, 1993. The observed tsunami runup at southern part of the eastern Korean coast were generally weaker than the 1993 Japan Sea Central Earthquake tsunami and varied from 0.8 m to 2.6 m. The present paper intends to understand the propagation on this tsunami with the aid of numerical computation model and computer graphic aided video animation.

1. 緒 論

1993年 7月 12日 22時 17分 日本 北海道 南西海 (北緯 42°47', 東京 139°12') 海底 34 km 附近에서 發生한 地震은 1983年 5月 26日 12時 日本 秋田縣 및 青森縣 西側海域에서 發生한 東海中部 地震에 이어 10年만에 發生한 地震(震度 M7.8)으로 東海에서 發生한 地震중 가장 威力的인 것이었다. 同 地震 및 쓰나미에 의한 被害는 日本 西海岸 뿐만 아니라 韓國의 東海岸, Russia 沿海州 海岸까지 擴大되어 수많은 人命 및 財產被害가 發生하였으며 특히 震央地 附近인 奥尻島의 경우 185名의 死傷者가 發生하였다. 韓國 東海岸의 境遇에는 日本에서 地震 發生後 1時間

50分~2時間餘 後에 江原道内 64個 漁浦口에 쓰나미 가 來襲하여 被害를 입혔으며 翌日 3時頃에 平時海面으로 回復됨으로써 翌日 午前 5時에는 海溢警報가 解除되었다. 中央災害對策本부의 江原道 風水海狀況 集計에 의하면 船舶被害 33隻으로 약 2億원의 財產 被害가 發生하였다. 이 쓰나미에 의한 우리나라 東 海岸의 쓰나미調査는 韓國海岸·海洋工學會의 쓰나미 調査團(1994)의 報告로서 既 發表되었다.

本 研究에서는 1983年 東海 쓰나미를 다룬 前回の 研究(崔와 李, 1993)에 이어 1993년 쓰나미의 傳播過程을 數值模型 및 科學的 可視化技法으로 提示하고 또한 數值模型에 의한 우리나라 東海岸 쓰나미의 豫報 妥當性에 대해서도 言及코져 한다.

*成均館大學校 工大 土木工學科 (Department of Civil Engineering, Sung Kyun Kwan University, Suwon Science Campus, Suwon, Korea)

**러시아 科學院 應用物理研究所 (Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia).

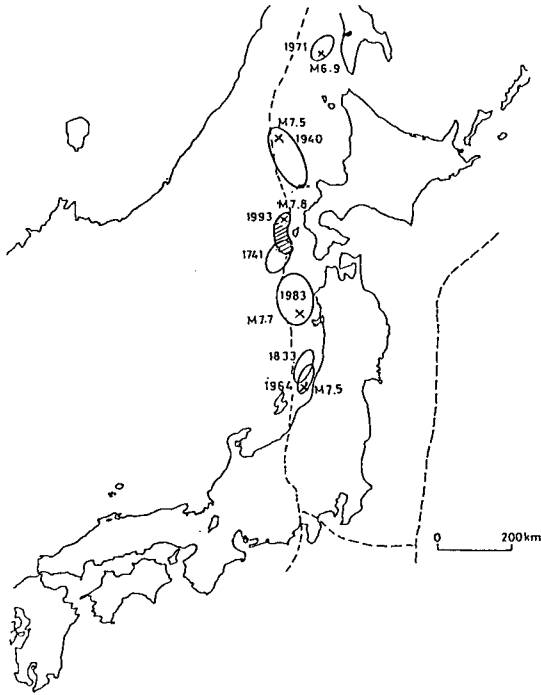


Fig. 1. The source regions of large earthquakes in the East Sea in this century. They are, from north, the 1971 Sakhalin, the 1940 Shakotan-oki, the 1993 Hokkaido, the 1983 Japan Sea, and the 1964 Oga-oki earthquakes. Dotted line indicates the possible boundary between the Eurasian and the North American plates (after Tsuji, 1994).

2. 震源模型 및 斷層係數

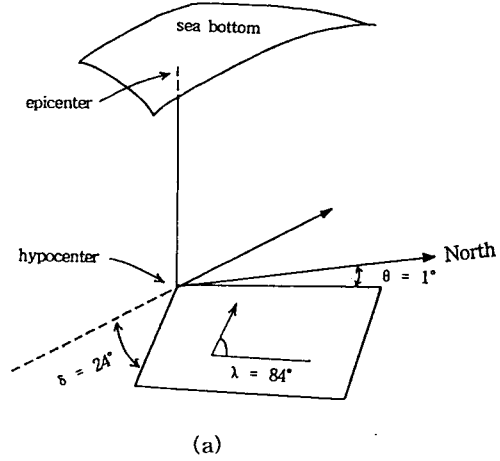
1993年 7月 12日 22時 17分 北海道 附近海域(北緯 42°47', 東京 139°12') 海底 34 km 地點에서 發生한 이번 地震은 Okusiri 西쪽 方向으로 南北 약 150 km, 東西 약 50 km로 斷層이 擴張(shear modulus: Harvard University CMT 模型 算出)된 것으로 思料되는데 지난 83年 東海中部地震, 64年 니이가다縣 地震, 40年 사코탄 半島 地震이 同 一한 斷層線上에서 發生 하였던 것으로 推測된다(Fig.1 參照).

初期의 變位 $\mu=3.7$ m와 길이 100 km, 너비 50 km의 斷層이 쓰나미 模型 算定을 위하여 適用되었는데 Table 1은 本 研究에서 採擇된 斷層 係數이다.

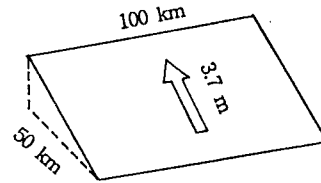
쓰나미의 初期 波形은 斷層의 垂直變位速度가 長波의 傳播速度보다 빠른 境遇일 때 斷層運動에 의한

Table 1. Fault parameters of the 1993 Hokkaido earthquake

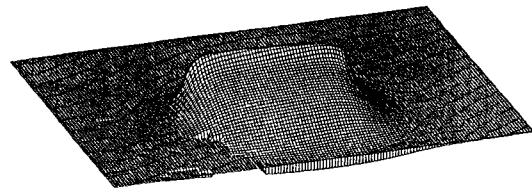
길이	변위	폭	Slip	주행방향	Dip
100 km	3.7 m	50 km	84°	1°	24°



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. Estimated fault dislocation (a) based on Havard University CMT solution with schematized sea-bed displacement (b) and corresponding initial sea level motion (c).

海底의 垂直變位와 同 一한 것으로 Manshinha and Smylie(1971)의 方法에 의해 考慮하였다. Fig.2는 Havard CMT 解에 의해 初期推定된 斷層變位와 相應하는 初期水面變位를 제시하는데 이 初期의 震源,

斷層模型은 餘震分布, 奧尻島의 地殼變動, 檢潮所資料를 利用한 改善(Kato와 Tsuji, 1994)이 이루어지고 있으나 本 研究에서는 우선 初期推定值를 이용하였다.

3. 쓰나미 模型 및 算定

東海를 가로질러 韓國 東海岸으로 향하는 쓰나미의 전파를 조사하기 위하여 광역모형의 계산을 수행하였다. 이 광역의 수치모형을 위하여 동해 전역에 걸쳐 선형 장파이론을 적용하였다.

쓰나미의 수치모형에 사용되는 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \left[\frac{\partial M}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial \theta} (N \cos \theta) \right] = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{gh}{R \cos \theta} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} = fN \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{gh}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \theta} = -fM \quad (3)$$

여기서 θ 는 經度, λ 는 緯度, η 는 水位, M , N 은 각각 θ , λ 방향의 線流量, g 는 重力가속도, h 는 靜止水面에서의 水深, f 는 편향력 계수($f=2\omega \sin \theta$)이다. 이를 $\Delta \theta$ 와 $\Delta \lambda$ 가 서로 다른 格子上에서 Staggered Leap Frog法에 의해 차분하여 그 해가 구해진다. 模型内の 水深 50 m 以上の 淺海領域에 대해서는 (1), (2), (3) 식을 사용할 수 있으나 50 m 以下の 영역에 대해서는 식 (2), (3)식 대신에 (4) 및 (5)의 비선형항 및 마찰항이 고려된 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{R \cos \theta \partial \lambda} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{R \partial \theta} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{R \cos \theta \partial \lambda} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{(M^2 + N^2)} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{R \cos \theta \partial \lambda} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{R \partial \theta} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{R \partial \theta} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{(M^2 + N^2)} = 0 \quad (5)$$

이 때 D 는 總水深이고 n 은 Manning의 粗度係數이다.

기본적으로 수치 모형은 Boussinesq식처럼 분산항

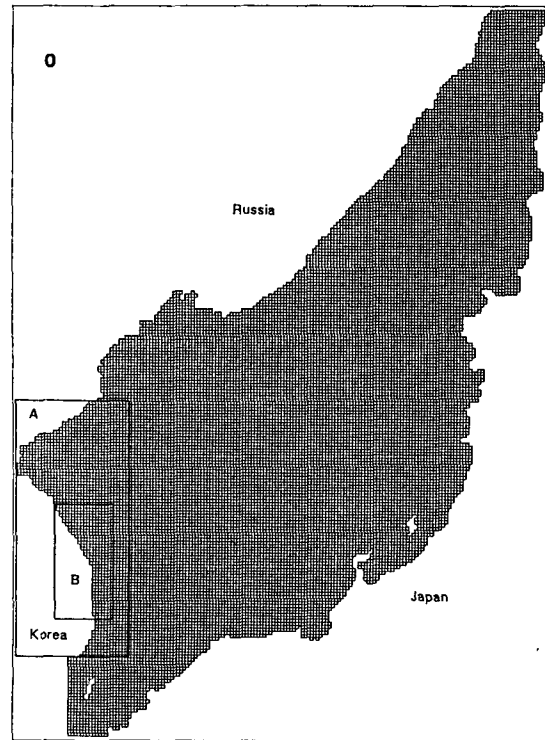


Fig. 3. Modeled area for tsunami simulation.

(dispersion term)을 포함해야 하는데 이 분산항의 필요여부를 판단하기 위하여 Kajiura(1970)가 제시한 조건이 사용되었다. 만약 $Pa = (6h/R)^{1/3}(a/h)$ 가 4보다 작으면 분산효과는 무시할 수 없다. 여기서 h 는 수심, R 은 전파거리, a 는 초기파형의 전파방향쪽 길이이다. 이번 계산에서는 선형 Boussinesq식 대신에 물리분산항을 포함하지 않는 선형 장파이론을 사용하였는데 격자크기를 적절하게 선택함으로써 수치분산이 물리분산항과 같은 효과를 가질 수 있도록 Imamura number(Imamura and Shuto, 1993)를 이용하였다. 모형의 산정은 우선 前回の 1983년(崔와 李, 1993) 東海 쓰나미 산정에 이용된 동해 전역의 大格子模型($1/12^\circ \times 1/15^\circ$ 解像度)과 2회의 1:3 細分化에 의한 동해안의 세격자모형(subregion A: $1/36^\circ \times 1/45^\circ$ 解像度와 subregion B: 약 900 m 격자)의 복합적인 運用에 의하여 算定하였는데(Fig. 3) 산정된 쓰나미 최대파고(평균해면기준)가 Fig. 4에 제시되어 있다. 다음 단계로서 格子細分化 技法이 아닌 동해전역의 세격자모형에 의한 쓰나미 산정이 이루어졌다. 이는 슈퍼컴에 의한 쓰나미 豫報 妥當性を 檢討하기 위해서 TIT 시스템

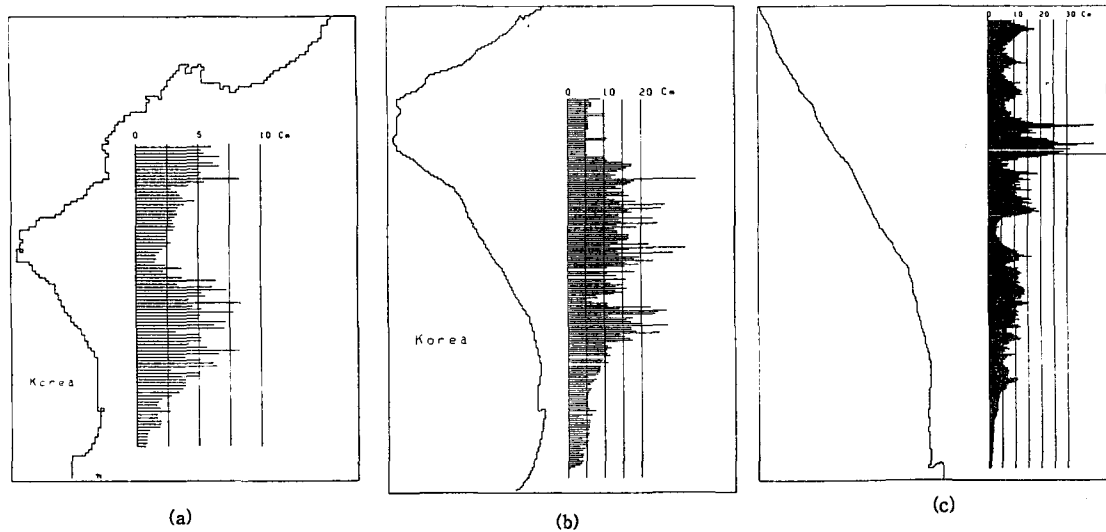


Fig. 4. Computed tsunami heights along the coast from model of region O (a), subregion A (b), subregion B (c).

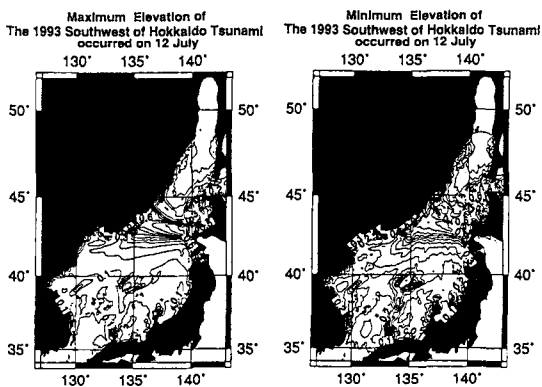


Fig. 5. Computed maximum and minimum elevation of the tsunami.

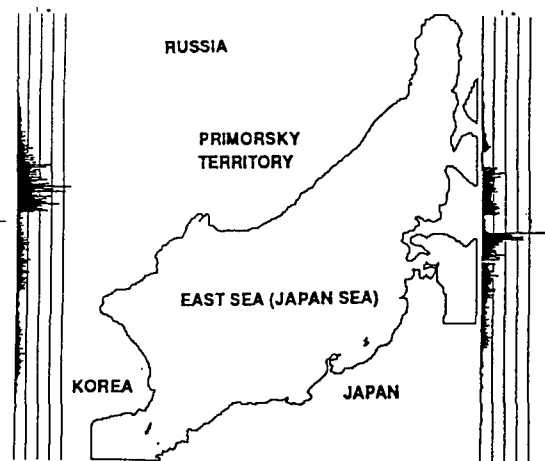


Fig. 6. Computed tsunami heights along the coast from 1'x1' grid model.

공학센터의 CRAY YMP C90의 Bench Mark Test 과정을 통해 수행되었으며, 細格子模型의 해상도는 위도 및 경도당 1분 간격으로 총 격자수는 960×1119 로서 Δt 는 3초를 취하였고 수심자료는 일본 해양자료센터(JODC)의 3분 자료를 보간시켜 작성되었다.

Fig. 5와 Fig. 6은 계산된 모형전역의 최대, 최소 쓰나미 파고분포와 연안을 따른 쓰나미 파고 분포를 나타낸다. 이번 모형에서는 월파에 대한 고려를 하지 않았으므로 해안선은 수직벽으로 가정되었다. 산정된 결과를 관측된 월파기록과 비교해 보면 연직해안에서의 파고는 월파비(runup ratio) (Togashi, 1981)에 의해 수정되어야 함을 알 수 있는데 쓰나미 조사단에

의해 관측이 수행된 동해안의 남측에 대해서 월파비는 약 4.0~5.0가 되어야 함을 알 수 있다. 쓰나미 진원의 북서쪽 방향에 있는 Russia의 Primorsky 지역의 연안을 따른 산정된 최대파고 분포가 약 2m가 된다는 것은 주목할 필요가 있다. 또한 북한연안을 따라서는 모형의 산정결과가 남한의 동해안지역보다 크게 산정되고 있어 83년 쓰나미의 관측치인 1.5-1.7m보다 큰 쓰나미가 해안에 도착했을 것으로 추정된다.

쓰나미 전파양상을 可視적으로 檢討하는 방법은 매 시간단계 마다 산정된 水位인 3次元 資料를 動畫의

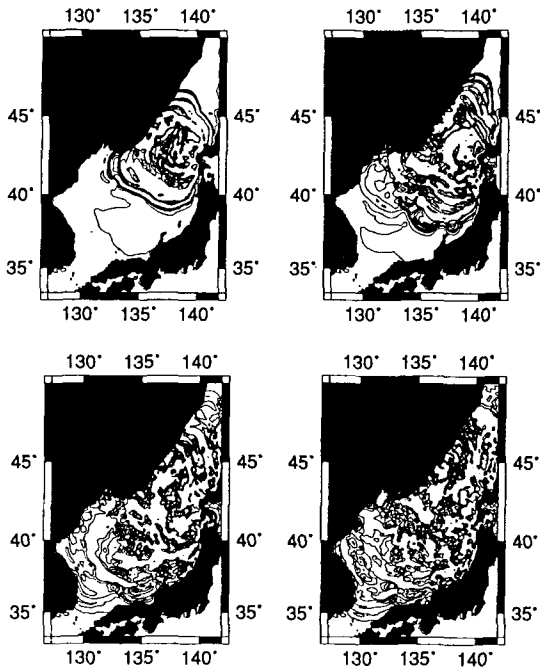


Fig. 7. A series of computed surface elevation contours at 0.5, 1.5, 2.0, and 3.0 hours after generation.

형태로서 제시하는 것이다. 일련의 wire mesh의 움직이는 動畵에 의한 쓰나미 可視化가 종래에 이용되던 技法이었으나 본 연구에서는 가상적인 光源, 色調에 의한 陰影 등을 채택하고 image rasterization(rendering) 기법(Imamura 등, 1993, Choi 등, 1993)을 擇하여 쓰나미 波의 擧動이 사실에 가깝도록 재현되게 하였다.

Fig. 7은 산정된 모형결과의 통상적인 等值線에 의한 波及양상을 제시한 것이며 Fig. 8은 이 결과를 rendering한 형상으로서 제시하는 것인데 일련의 이 영상들은 video 녹화기에 녹화시켜 動的擧動을 검토하였으며 쓰나미 파가 연해주 연안에서 반사되는 결과와 동해를 가로질러 전파된 쓰나미 파의 先端이 北韓沿岸을 따라 남쪽으로 우리나라 동해안에 파급되는 양상이 잘 재현되었다.

4. 쓰나미 월파고의 분포

금회의 쓰나미는 한국 쓰나미 조사단(1994)에 의해 Fig. 9과 같이 27개소에서 조사되었다. 쓰나미 월파고는 0.81~2.57 m의 범위였다(Fig. 10). 이 월파고의 분

포함수(Fig. 11)는 아래와 같이 표시된다.

$$P = 1.65 - 0.69R \tag{6}$$

여기서 R 은 월파고인데 피해가 큰 쓰나미의 경우가 아닌 밀도분포함수의 일양성에 기인하는 분포이다. Table 2와 Fig. 12은 1983년의 쓰나미와 금회 쓰나미의 월파고를 제시하는데 1983년의 쓰나미 분포는 지수형(Fig. 13)으로 아래와 같이 제시되는데 피해가 큰 전형적인 쓰나미의 분포함수 형태이며 Poisson 법칙의 극치확률형에 상응한다.

$$P = 1.37 \exp(-0.44R) \tag{7}$$

이 관측자료는 外海측의 쓰나미 파고를 개략적으로 추정하는데 이용하였다. 해안선은 직선이며 수심은 일방행으로 변화되고 해저경사가 매지점마다 일정할 경우 쓰나미 월파고는 다음식으로 비선형 천해파 이론으로 해석적으로 다음과 같이 제시된다(Carrier와 Greenspan, 1958; Pelinovsky, 1992; Pelinovsky와 Mazova, 1992).

$$\frac{R}{H} = \alpha \sqrt{\frac{L}{\lambda}} \tag{8}$$

여기서 H 는 일정수심 h 에서의 쓰나미 진폭, λ 는 h 에서의 파장, L 은 해안과 일정수심 사이의 거리이며 α 는 수치적 형상계수(form factor)이다. $h=70$ m, $T=4$ 분, $\lambda=6.3$ km일때 평균적인 형상계수는 5로써 산정된 결과는 Table 3과 Fig. 14에 提示되어 있다. 이 외해측의 쓰나미 높이의 분포는 완만히 변화하는데 해안에 접근할수록 수심변화에 의해 변화되는 물리적 양상에 잘 반영시킨다. 이 외해측 쓰나미 파고의 분포(Fig. 15)는 지수적으로 다음과 같이 제시된다.

$$P = 7 \exp(-8.2H) \tag{9}$$

이 결과는 $\sqrt{L/\lambda}$ 이 Table 3과 같이 1.0에 접근하므로 금회의 쓰나미의 경우 형상계수는 월파비와 유사한 값을 가졌다.

5. 結 論

格子크기의 調節에 의한 細分格子의 連結에 의한 방법보다 東海全域의 細格子體系上에서 1993年 7月 12日 北海道 南西海域의 지진에 쓰나미를 算

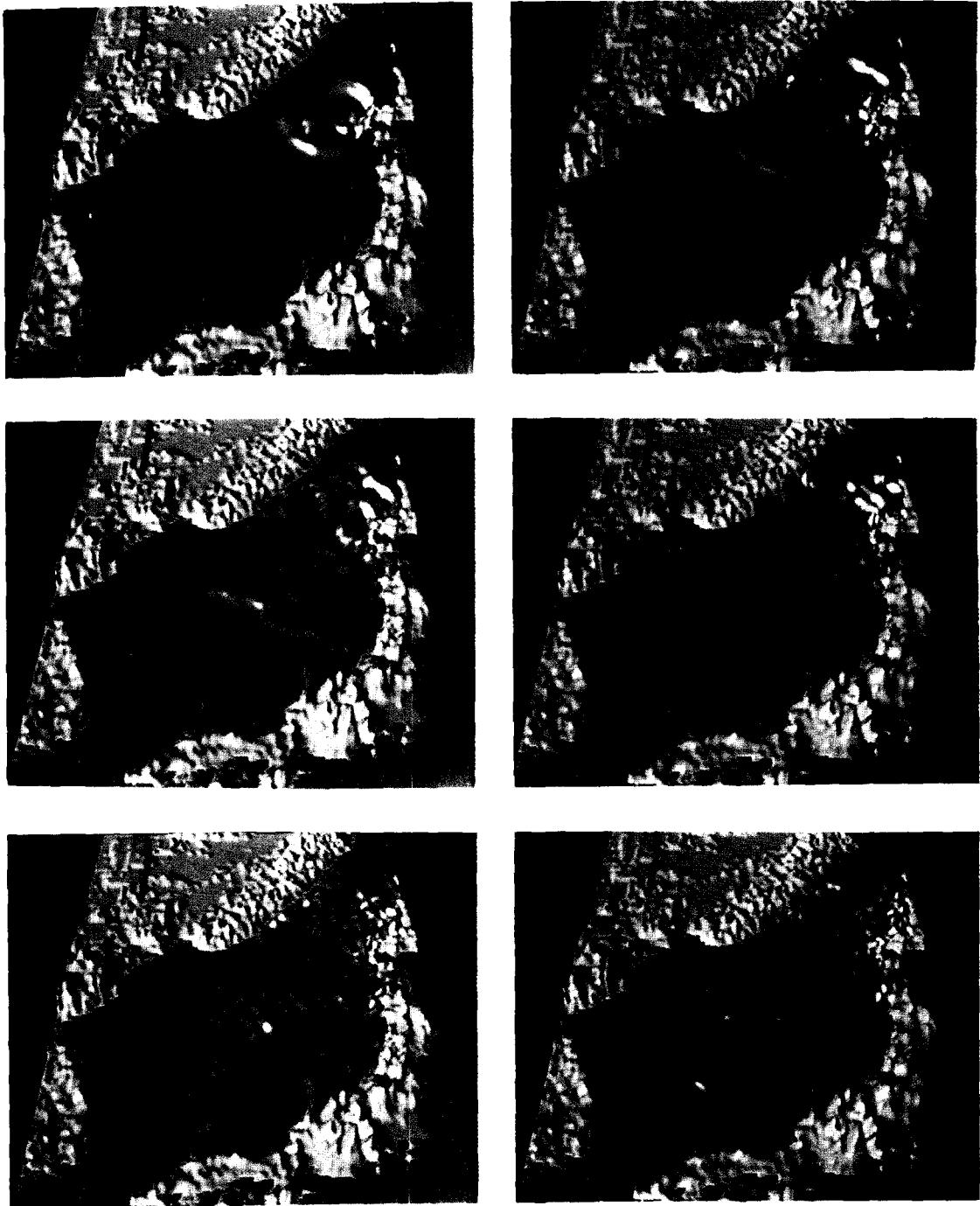


Fig. 8. A series of images showing the propagation of tsunami.

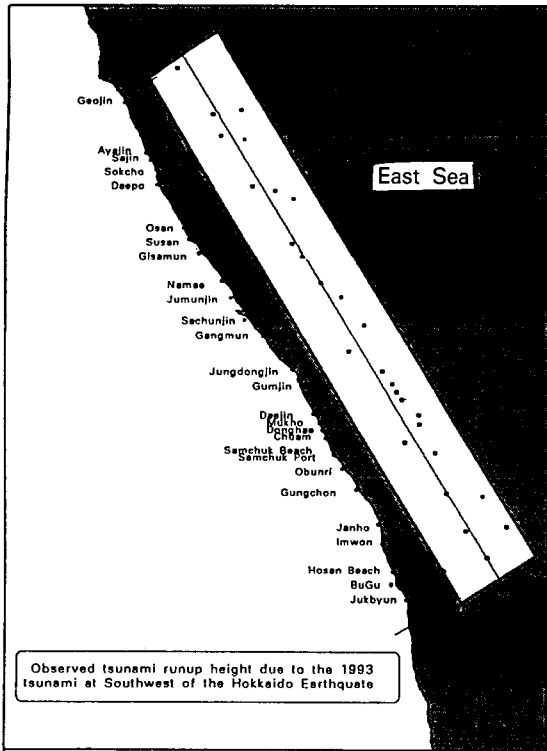


Fig. 9. Observed tsunami runup height along east Korean coast.

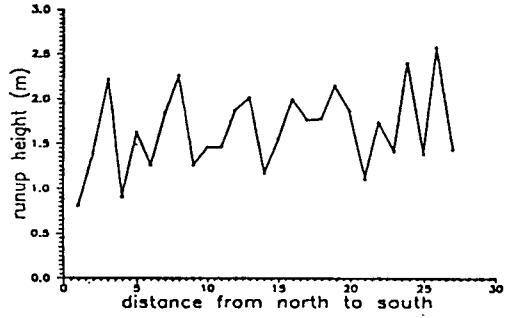


Fig. 10. Runup height distribution on east Korean coast for tsunami 12 July 1993.

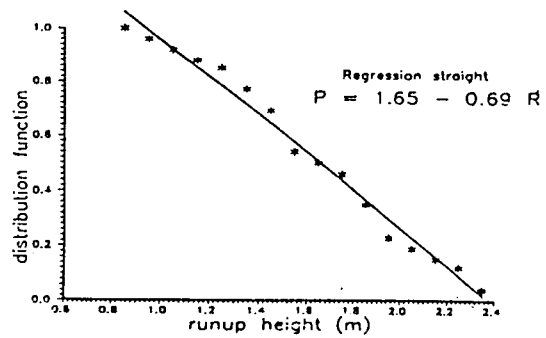


Fig. 11. Distribution function of runup height for tsunami 12 July 1993.

Table 2. Observed tsunami runup height

Number	Name of Point	Distance L(km) from Coast to h=70m	Observed runup Height R(m)	Calculated Amplitudes of Tsunami H(m)
1	Geojin Port	4.0	0.81	0.2
2	Ayajin Port	4.5	1.39	0.33
3	Sajin Port	4.5	2.22	0.53
4	Sokcho Port	5.0	0.91	0.2
5	Daepo Port	4.0	1.63	0.41
6	Osan Port	5.0	1.26	0.28
7	Susan Port	5.5	1.85	0.4
8	Gisamun	7.0	2.26	0.43
9	Namae Port	7.0	1.26	0.24
10	Jumunjin Port	7.0	1.46	0.28
11	Sachunjin Port	6.0	1.46	0.3
12	Gangmun	5.3	1.87	0.41
13	Jungdongjin	3.0	2.01	0.58
14	Gumjin Port	6.0	1.17	0.24
15	Daejin Port	5.5	1.56	0.34
16	Mukho Port	6.0	1.99	0.41
17	Donghae Port	4.0	1.76	0.44
18	Chuam Beach	3.5	1.77	0.46
19	Samchuk Beach	3.0	2.15	0.63
20	Samchuk Port	5.0	1.86	0.42
21	Obunri	5.0	1.1	0.25
22	Gungchon Beach	5.0	1.74	0.39
23	Jangho Port	10.0	1.41	0.22
24	Imwon Port	10.0	2.39	0.38
25	Hosan Port	8.0	1.38	0.25
26	Bugu	8.0	2.57	0.46
27	Junkbyun Port	4.0	1.43	0.3

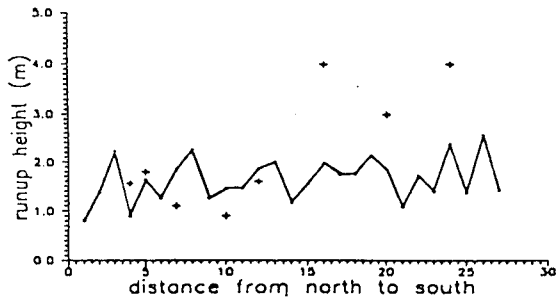


Fig. 12. Runup height distribution on Korea coast. (-: Tsunami of 12 July 1993). (+++: Tsunami of 26 May 1983).

Table 3. Calculated tsunami amplitudes for open sea

Number	Name of Point	Runup Height	
		(m) 12.07.93	(m) 26.05.83
1	Geojin Port	0.81	
2	Ayajin Port	1.39	
3	Sajin Port	2.22	
4	Sokcho Port	0.91	1.56
5	Daepo Port	1.63	1.8
6	Osan Port	1.26	
7	Susan Port	1.85	1.1
8	Gisamun	2.26	
9	Namae Port	1.26	
10	Jumunjin Port	1.46	0.9
11	Sachunjin Port	1.46	
12	Gangmun	1.87	1.6
13	Jungdongjin	2.01	
14	Gumjin Port	1.17	
15	Daejin Port	1.56	
16	Mukho Port	1.99	4
17	Donghae Port	1.76	
18	Chuam Beach	1.77	
19	Samchuk Beach	2.15	
20	Samchuk Port	1.86	3
21	Obunri	1.1	
22	Gungchon Beach	1.74	
23	Jangho Port	1.41	
24	Imwon Port	2.39	4
25	Hosan Port	1.38	
26	Bugu	2.57	
27	Jukbyun Port	1.43	

하였다. 이境遇 월파비는 약 5로써 쓰나미 월파고를 산정하였다. 슈퍼컴(KIST 시스템공학센터)에 의한 Bench Mark Test는 CRAY YMP C90에서 3개의 ... 으로서 豫報에 소요되는 CPU 시간은

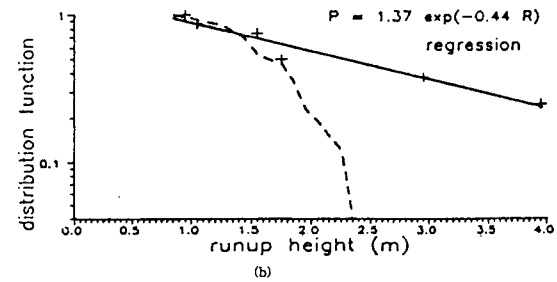
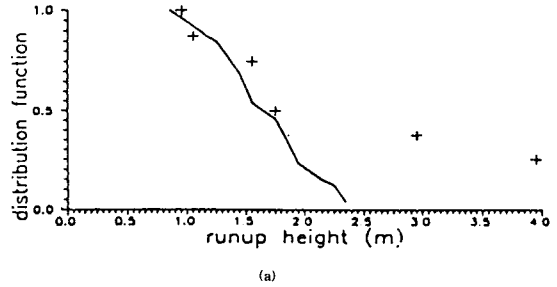


Fig. 13. Distribution function of runup height. (-: Tsunami of 12 July 1993). (+++: Tsunami of 26 May 1983).

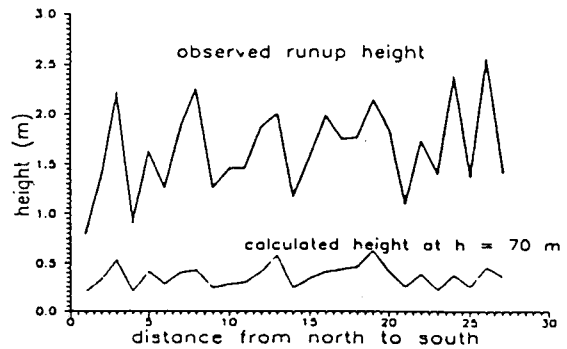


Fig. 14. Observed and calculated height distribution on east Korean coast.

約 5分 以内로써 東海의 遠域쓰나미의 경우 數値豫報의 妥當性을 賦與할 수 있음을 調査하였다. 또한 슈퍼컴과 連動하여 그래픽처리 체계를 適用하면 模型算定結果를 정연하게 動畵化시켜 거의 實時間에 가까운 效率的인 豫報에 活用시킬 수 있을 것이다.

83년 쓰나미의 경우 大和堆(Yamato Rise)에 의한 볼록렌즈 효과로 인하여 쓰나미의 전파가 크게 영향을 받았으나 금번 1993년과 1940년, 1964년의 경우는 이러한 효과가 감지되지 못했다. 日本側연안의 지진

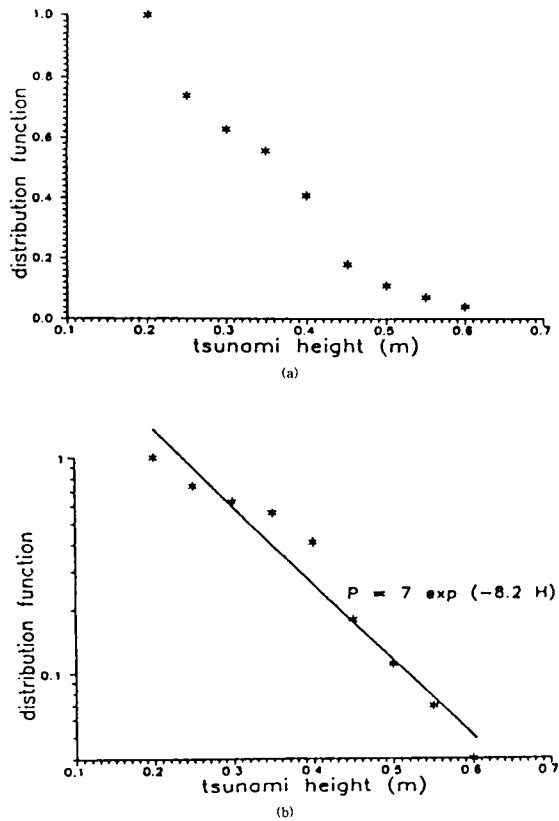


Fig. 15. Distribution function of tsunami height at depth 70 m.

발생시 쓰나미 파급의 대화퇴에 의한 진행경로의 변화로 인한 우리나라 동해안中部域의 에너지 집중현상은 1983년 경우를 제외하고는 일반화시킬 수 없었다.

謝 辭

本 研究는 成均館大學과 日本東北大의 協力研究 (Tsunami Inundation Modeling Exchange)로서 遂行되었으며 CRAY University R&D program의 財政的 支援을 받았다.

參考文獻

- 쓰나미 調査團, 1994. 日本 北海道 南西部 地震에 의한 韓國 東海岸 地震調査, 韓國海岸·海洋工學會誌, 6(1): pp. 117-125.
- 崔秉昊, 李昊俊, 1993. 1983년 東海 쓰나미의 算定, 大韓土木學會論文集, 13(3), pp. 207-209.
- Carrier, G.F. and Greenspan, H.P., 1958. Water waves of finite amplitude on a sloping beach, *J. Fluid Mech.* 4(1): pp. 97-109.
- Choi, B.H., Lee, H.J., Imamura, F. and Shuto, N., 1993. Computer animation of marine process: Tsunami events, *J. Korean Soc. Coastal and Ocean Engng.* 5(1): pp. 19-24.
- Imamura, F., Shuto, N., 1990. Tsunami propagation by use of numerical dispersion, *Proc. of Int. Sym. Comp. Fluid Dynamics*, Nagoya, pp. 389-395.
- Imamura, F., Shuto, N., Choi, B.H. and Lee, H.J., 1993. Visualization of Nicaraguan tsunami in September, *Proceedings, IUGG/IOC, International Tsunami Symposium*, Wakayama, Aug. 23-27, pp. 647-656.
- Kajiura, K., 1970. Tsunami source, energy and the directivity of wave radiation, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 48, pp. 835-869.
- Kato, K. and Tsuji, Y., 1994. The estimation of the fault parameters of the 1993 Hokkaido-Nansei-Oki Earthquake and the characteristics of the tsunami, Earthquake Research Institute, University of Tokyo.
- Manshinha, L. and Smylie, D.E., 1971. The displacement fields of inclined faults, *Bull. of Seismo. Soc. of America*, 61(5), pp. 1433-1440.
- Pelinovsky, E., 1992. Criteria of sea wave breaking in basins of complex topography, *Korean Soc. Coastal and Ocean Engng.* 4(2), pp. 59-62.
- Pelinovsky, E.N. and Mazova, R. Kh., 1992. Exact analytical solutions of nonlinear problems of tsunami wave run-up slopes with different profiles, *Natural Hazards*, 6, pp. 227-249.
- Satake, K., 1986. Re-examination of the 1940 Shakotan-oki earthquake and the fault parameters of the earthquakes along the eastern margin of the Japan Sea, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 43, pp. 137-147.
- Shuto, N., 1991. Numerical simulation of tsunami: Its present and near future, *Natural Hazards*, 4, pp. 171-191.
- Togashi, H., 1981. Study on tsunami run-up and countermeasure, translated Doctoral thesis (in English), Tohoku University.
- Tsuji, Y., 1994. Damages report and analytical discussions of the 1993 Hokkaido-Nansei-Oki earthquake tsunami. Annual Meeting of Korean Soc. of Coastal and Ocean Engineers.