

1994年 필리핀 민도로섬의 쓰나미 算定

Computation of a Tsunami at Mindoro, Philippine in 1994

崔秉昊* · 金德九** · 盧尙俊** · 李昊俊***

Byung Ho Choi*, Duk Gu Kim**, Sang Jun Roh** and Ho Jun Lee***

要 旨 : 1994年 11月 15日 Philippine의 Mindoro섬 북측에서 强震이 발생하였다. 이 地震으로 발생한 쓰나미는 Mindoro섬 북측 연안 및 Verde섬 등의 沿岸에 來襲하여 海안역이 氾濫, 沈水되었으며 이로 인하여 家屋破壞 등 큰 財産被害와 死傷者를 내었다. 이 쓰나미는 Luzon섬에도 傳播되어 Batangas에서 쓰나미 발생 약 10분후에 쓰나미가(株)韓進의 건설현장에서 관측되었다. 本 研究에서는 쓰나미 數值模型을 수립하여 遠域 및 氾濫域의 쓰나미 傳播 및 氾濫을 산정하고 現場觀測結果를 比較 檢討하였다. 震源이 Luzon섬과 Mindoro섬 사이에 위치하였으며 인근의 地震觀測網의 資料가 불충분하여 國際地震 Network상에서 제시한 基本資料를 근거로 여러 경우의 震源模型의 模數들을 가정하여 算定值가 觀測值와 類似한 結果를 가질 때까지 模型算定을 하였다. 또한 科學可視化技法에 의해 쓰나미 傳播와 氾濫模型 시뮬레이션 애니메이션 結果로서 제시하였다.

핵심용어 : 쓰나미, 수치 시뮬레이션, 민도로섬, 지진

Abstract □ On November 15, 1994 at 03:17 local time, an earthquake of surface magnitude (M_s) 7.0 occurred on the northern coast of the Mindoro in Philippine. A major tsunami was generated by this earthquake, extremely large tsunami waves engulfed the Mindoro and the Verde islands. This tsunami caused tremendous casualties and damage. The tsunami propagated to the Luzon island and felt at the Batangas after 10 minutes. The present paper intends to understand the propagation and inundation this tsunami with the aid of numerical computation model and computer graphic aided video animation.

Keywords : tsunami, numerical simulation, Mindoro Island, earthquake

1. 緒 論

1994年 11月 15日 午前 3時 17分(現地時刻) 필리핀 Mindoro섬 북측에서 리히터 規模로 震度 $M_s=7.0$ 의 地震이 발생하였다. 이 地震의 震央(13.5°N, 121.1°E)은 Verde섬 南側航路의 Lubang Fault상에 위치하였다. 地震에 의해 발생한 쓰나미는 Calapan, Malaylay, Baco 그리고 Puerto Galera에 큰 被害를 주었다.

이 地震에 의해 발생한 쓰나미는 Mindoro섬의 Calapan City, Malaylay, Baco town, Puerto Galera 및 Verde

섬 등의 지역에 來襲하여 6~8 m의 큰 波高의 海溢이 일어났으며, 상당지역이 氾濫, 沈水되었고 62명의 死亡者, 9명의 失蹤者 그리고 248명 이상의 負傷者가 발생하였다. 또한 민도로섬의 800여채 이상의 家屋이 被害를 입었다. 成均館大學에서는 前回の 플로레스섬 쓰나미 국제 관측(최, 1994)에 이어 금희의 國際 쓰나미 調査團에도 참가하여 관측을 수행하였다. 本 研究에서는 數值計算을 이용하여 Mindoro 쓰나미의 發生과 그 傳播樣相을 산정하고 現場觀測結果와 비교 검토를 수행하였다. 氾濫 및 沈水現象을 재현하고자 沿岸域 境界를

*成均館大學校 工科大學 土木工學科 (Department of Civil Engineering, Sung Kyun Kwan University, Suwon Science Campus, Suwon, 440-746, Korea)

**成均館大學 - 韓國海洋研究所 學研課程 (Sung Kyun Kwan University - KORDI Joint Program on Coastal and Ocean Engineering)

***日本 東北大學 災害制御센터 (Disaster Control Research Center, Tohoku University, Aoba, Sendai, Japan)

移動境界(moving boundary)로 채택하는 氾濫模型을 이용하여 氾濫 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 쓰나미 율파 관측

國際 쓰나미 調査團은 쓰나미가 발생한 10일후 1994년 11월 25일에 急派되어 Mindoro섬지역의 쓰나미에 의한 피해 및 海溢調査를 수행하였다. 쓰나미 조사단은 모두 8명으로, 두 그룹으로 나뉘어 조사를 수행하였다. 첫 번째 그룹은 Fumihiko Imamura(AIT, leader, 現 東北大 災害制御센터)를 비롯하여 Edison Gica(AIT, 통역), Seiichi Kawashima, Delfin Esplanada(Toyo Const. Company, Surveyor)로 구성되어 Calapan City, Verde Is. 및 Baco Is. 등지의 조사를 수행하였고, 두 번째 그룹은 Costas Synolakis(南加州大學, leader)를 비롯하여 Eddie Listanco(PHILIVOCS, 통역), Vasily Titov(南加州大學), 李昊俊(成均館大)로 구성되어 Baruyan River를 시작점으로 하여 Mindoro Is. 북측 해안을 따라 서측방향으로 조사를 수행하였고, Luzon의 Lobo지역의 조사를 수행하였다.

쓰나미 調査團은 11월 25일 Manila에 집결하여 26일 PHILIVOCS(Phillippine Institute of Volcanology and Seismology)를 방문, 사전에 조사된 자료를 습득하였고, 오후에 NHK Manila 지국에 들려 NHK에서 수행한 海底 斷層域의 水中攝影 및 각 지역의 被害狀況에 대한 비디오를 바탕으로 조사계획을 수립하였다. 調査團은 PHILIVOCS의 사전 조사내용을 기초로 하여 27일 두 대의 車輛과 두 대의 보트에 分乘하여 Batangas, Mindoro의 Calapan 그리고 Baco지역을 조사하였고, 28일에 Baco Is., Verde Is., Silonay Is., Anagahao Is., Mindoro의 Calapan, Pampisan, Ibaba, Baco, Malaylay, Wawa 및 San Teodoro를 그리고 29일에는 Mindoro의 Wawa, Charico, Balete, Puchuka, Baruyan, Luzon의 Lobo 및 Lagadla Rin의 조사를 마쳤다. 쓰나미 調査團에 의해 조사된 자료는 Mindoro와 Luzon지역의 60개소 이상에 대한 初음높이(runup height)와 쓰나미에 의한 피해상황, GPS에 의한 위치, 주민들의 증언, 사진 및 비디오 등이다. 최대 初음높이는 Baco Is. 동남측해안에서 7.29 m로 조사되었다. 큰 피해가 발생한 Malaylay 및 Baruyan River 하구에서는 약 3~4 m의 runup height를 그리고 그외의 Mindoro 섬. 북측해안에서는 2~3 m, Luzon의 Lobo지역에서도

2~3 m의 runup height가 조사되었다. 쓰나미가 내습한 주방향은 Subang Bay에서 南西向이고 Calapan Bay에서는 南東向으로 나타났다. 到達時間은 地震發生後 2~3분 내로 보고되었고, 거의 모든 지역에서 첫번째 波는 depression wave였고 그 주기는 짧았다고 하며, 첫번째波에이은 두번째波에 의해 Wawa의 해안에 쓰나미에 의한 피해가 발생되었다. 위 사실을 근거할 때 쓰나미 震源은 작고, 해저면의 변위는 negative일 것으로 Imamura는 일차 추정하였다.

조사된 각 지점에서의 runup height의 潮汐更正을 위해 쓰나미 발생당시(株)韓進에 의해 Batangas항에서 실측한 11월 15일의 15분 간격 조위자료와 쓰나미 조사가 이루어진 11월 27일~29일에 대해 부근 Lucena에서의 調和常數를 이용해 실시간추정된 10분간격 조위자료를 사용하였다. Batangas 항에서의 潮位와 Lucena에서의 潮位の 비교곡선을 제시하였는데, Batangas와 Lucena의 조위자료에서 調和常數를 구하여 潮位豫報에 의한 潮位更正을 成均館大學에서 수행하였다. 쓰나미 來襲時刻은 地震發生後 15분으로 하였다. 조사된 初음높이는 Table 1에 제시하였다.

쓰나미 調査團에 의해 觀測한 자료를 地點別로 보면 다음과 같다.

- 1) Batangas Port: 약간의 흔들림이 감지되었고 해수가 아주 느린 속도로 밀려들어왔다고 한다. 항구의 이곳 저곳에서 배를 고정시키기 위해 도움을 요청하는 소리가 들려왔고 쓰나미에 의한 피해는 없었다고 한다.
- 2) Calapan Port: 지진에 의해 항구의 건물 및 시설이 파괴되어 아주 위험한 상태에 이르렀다. 주민들의 목격에 의하면 처음에 드림소리가 들리면서 수면이 하강하여 해수가 밀려나갔고, 동측으로부터 段波(bore)가 내습한 후 다시 수면이 상승하였다고 한다.
- 3) Baco: 해안의 수목은 쓰나미에 의해 모두 쓰러지고, 가옥도 침수하여 많은 피해를 입었다. 해안에 있는 수목들의 쓰러진 방향이 내륙을 향하고 있는 것으로 볼 때 상륙한 쓰나미는 인 근의 강을 통해 다시 바다로 나간 것으로 사료된다. 침수된 가옥 내부에서 발견된 water mark는 바닥으로부터 1.52 m 높이에 있었고, 그 가옥은 해수면으로부터 1.62 m 위치에 있었으므로 약 3 m의 쓰나미가 내습한 것으로 사료된다. 해안선으로부터 약 300~400 m까지 쓰나미가 상륙한 것으로 나타났다.
- 4) Baba: 쓰나미가 내륙으로 약 70 m까지 전파되었다.

Table 1. Observed runup heights for Mindoro tsunami.

No.	Place	Date (Nov)	Time (hh:mm)	Location (ddd:mm:ss) or (ddd:mm.mmm)	Observed Height	Tide (Surveying)	Corrected Height
1	Batangas Port	27	09:00	13:45:146N, 121:02:656E	1.14	0.56	1.25
2	Calapan Port	27	13:00	13:25:52N, 121:11:40E	4.02	0.39	3.96
3	Baco	27	16:20	13:24:800N, 121:07:309E	1.03	0.88	1.46
4	Baco	27	16:39	13:24:45N, 121:07:29E	3.29	0.90	3.74
5	Baco	27	16:39	13:24:45N, 121:07:29E	3.12	0.90	3.57
6	Baco Island	28	09:18	13:27:52N, 121:09:26E	6.31+1~2	0.72	6.58+1~2
7	Baco Island	28	09:18	13:27:52N, 121:09:26E	6.63	0.72	6.90
8	Baco Island	28	09:18	13:27:52N, 121:09:26E	7.15	0.72	7.29
9	Ibaba	28	10:00	13:24:736N, 121:07:32E	1.80	0.62	1.97
10	Verde Island	28	10:48	13:13:50N, 121:05:30E	2.74	0.52	2.81
11	Bambisan	28	11:00	13:24:43N, 121:08:08E	2.00	0.50	2.05
12	Bambisan	28	11:20	13:24:59N, 121:08:246E	2.15	0.47	2.17
13	Bambisan	28	11:40	13:24:606N, 121:07:969E	3.00	0.44	2.99
14	Verde Island	28	11:42	13:33:00N, 121:05:40E	3.56	0.44	3.55
15	Bambisan	28	12:15	13:24:46N, 121:07:45E	4.10	0.41	4.06
16	Bambisan	28	12:30	13:24:736N, 121:07:714E	2.75	0.41	2.71
17	Bambisan	28	12:35	30 m west from 15	4.30	0.41	3.90
18	Bambisan	28	12:45	13:24:790N, 121:07:618E	4.30	0.41	3.90
19	Baco Island	28	13:38	13:28:29N, 121:09:51E	1.63	0.46	1.64
20	Baco Island	28	14:00	13:28:10N, 121:09:34E	6.10	0.49	6.14
21	Baco Island	28	14:00	13:28:10N, 121:09:34E	3.50	0.49	3.54
22	Baco Island	28	14:42	13:29:04N, 121:10:51E	0.00	0.57	0.12
23	Malaylay	28	15:00	13:25:126N, 121:05:661E	1.05	0.62	1.22
24	Malaylay	28	15:30	13:24:27N, 121:04:16E	1.40	0.70	0.65
25	Wawa Island	28	15:50	13:24:800N, 121:02:815E	3.20	0.76	3.51
26	Wawa Island	28	15:55	13:24:836N, 121:02:874E	3.50	0.77	3.82
27	Capapan	28	16:23	13:25:43N, 121:11:41E	2.33	0.86	2.74
28	San Teodoro	28	16:35	13:26:444N, 121:01:072E	3.43	0.89	3.87
29	Capapan	28	16:56	13:25:03N, 121:11:02E	2.64	0.95	3.14
30	Capapan	28	17:18	13:24:54N, 121:10:41E	1.86	1.00	2.41
31	Villaflor	28	17:20	13:26:964N, 121:00:286E	2.35	1.00	2.90
32	Wawa	29	08:29	13:24:16N, 121:08:26E	0.71	0.93	1.19
33	Wawa	29	08:29	13:24:16N, 121:08:26E	1.44	0.93	1.92
34	Wawa	29	08:56	13:24:26N, 121:08:27E	3.98	0.91	4.41
35	Wawa	29	08:56	13:24:26N, 121:08:27E	2.02	0.91	2.48
36	Wawa	29	09:19	13:24:28N, 121:08:35E	1.65	0.87	2.07
37	Wawa	29	09:19	13:24:28N, 121:08:35E	2.17	0.87	2.59
38	Wawa	29	09:28	13:24:29N, 121:08:34E	1.55	0.85	1.95
39	Wawa	29	09:40	13:24:32N, 121:08:39E	2.39	0.84	2.78
40	Wawa	29	09:50	13:23:51N, 121:08:27E	2.86	0.82	3.23
41	Baruyan	29	09:50	13:24:377N, 121:08:268E	2.40	0.82	2.77
42	Charico	29	10:39	13:24:36N, 121:09:08E	1.70	0.72	1.97
43	Charico	29	10:39	13:24:36N, 121:09:08E	2.04	0.72	2.31
44	Charico	29	10:39	13:24:36N, 121:09:08E	1.05	0.72	1.32
45	Baruyan River	29	10:48	13:22:933N, 121:08:493E	0.50	0.70	0.75
46	Charico	29	10:51	13:24:37N, 121:09:21E	2.11	0.70	2.36
47	Balete	29	11:08	13:25:00N, 121:09:36E	2.18	0.66	2.39
48	Balete	29	11:08	13:25:00N, 121:09:36E	1.90	0.66	2.11
49	Pachuka	29	11:27	13:24:50N, 121:09:36E	2.23	0.62	2.40
50	Lobo	29	14:45	13:38:170N, 121:11:676E	2.15	0.55	2.25
51	Lobo	29	15:00	13:38:085N, 121:11:813E	2.55	0.58	2.68
52	Lagadra Rin	29	15:35	13:37:688N, 121:12:915E	3.15	0.67	3.37
53	Lagadra Rin	29	15:50	13:37:705N, 121:12:810E	3.37	0.71	3.63
54	Barangay Sawang	29	16:20	13:37:656N, 121:13:545E	3.85	0.80	4.20

5) Pampisan: 강한 물살이 내습하였고 이때 물고기와 조개류들이 떠밀려왔다고 한다.

6) Baruyan: 지진에 의해 아주 큰 피해를 입은 지역으로 너비 약 3.5 m의 균열을 볼 수 있었고 지반은 아주 부드러운 토양이었다. PHILIVOCS의 조사에 의하면 Malaylay로부터 Bani에 이르는 북측으로부터 남측으로 향하는 20~30 km의 Ground Rupture가 발견되었고 그 크기는 수평방향으로 최대 3~3.4 m, 수직방향으로 1.0 m였다고 한다. 斷層線(fault line)이 Baruyan을 통과하였음을 짐작할 수 있었는데 한 식당과 Protestant 교회가 완전히 붕괴되었고 또 다른 교회의 벽이 쓰러졌으며 지반이 침하하여 해안선이 약 20 m 내륙으로 이동하였으며 침하량은 약 1.7 m(潮位更正前)였다. 쓰나미에 의해 3세의 소녀 한명이 사망하였다고 전한다.

7) Baruyan River: 쓰나미가 강으로 밀려들어와 1 m 정도의 수위상승이 관측되었다. 쓰나미에 의한 큰 피해는 없었는데 다만 강하구에 있던 Diesel Power Plant Barge 한 척이 쓰나미에 의해 강 상류쪽으로 직선거리 1海里(약 5 m)을 이동하였다. 이 Barge의 크기는 32 m × 19 m, 吃水 2.80 m, 총 무게 1697 ton으로 묶어 놓은 밧줄이 끊어지면서 강을 따라 시속 약 10 m의 느린 속도로 이동하였다고 한다. 이 강의 수심은 약 3.2 m라고 하고 강은 굴곡이 심했다.

8) Baruyan Lake: PHILIVOCS에서 조사한 斷層線(fault line)상의 한 지역으로 사료되는 이 호수에서는 호수 밑바닥이 침하하여 모든 수목과 가옥이 침수되었다. 수목의 윗부분만이 물위로 나타나 있었고, 가옥의 경우 약 1 m정도 침하한 것으로 보였다. 낚시중이던 한 주민의 이야기에 따르면 호수의 수면이 평균 3 m정도 상승했고 어떤 지점에서는 약 6 m가 상승했다고 한다.

9) Lobo: Batangas에 작은 쓰나미가 발생된 반면 Lobo에는 2.15, 2.55 m(Table 1)의 쓰나미가 발생되었다고 한다.

10) Lagadla Rin: 30척의 船舶이 파괴되었고 3.15, 3.37 m의 파고가 조사되었다.

3. 數值模型과 斷層 파라메터

3.1 數值模型

本 研究에서는 쓰나미傳播와 沿岸氾濫을 산정하기 위해 模型을 3개 영역으로 구성하였는데, 遠域, 近域 模型과 氾濫域模型으로 각각 구성하였다. 氾濫域模型을 수립하기 위해 遠域과 近域모형을 운용하였는데 이는 沿岸地域에서의 쓰나미 증폭을 재현하기 위해 沿岸地域의 격자를 細分化하여 바깥쪽 모형의 산정결과를 이용하기 위한 것이다. 각 모형의 相互情報交換은 模型의 計算을 수행하는 중에 연결이 이루어지는 경계면에 과의 영향이 과급되면 外部格子(coarse mesh)와 內部格子(fine mesh) 사이의 水面變位와 流量을 서로 교환하는 방법이다. 本 研究에서는 連結模型에 의한 내부경계를 따라 수위를 일정 시간간격으로 저장하여 최종적인 氾濫域模型의 경계조건 값으로 입력한다. 이 방법은 서로 다른 격자체계를 動的連結(dynamic interfacing)시켜 계산을 수행하는 방법보다는 從屬的인 方法이지만 비교적 간단하게 모형을 수립하고 또한 迅速하게 쓰나미를 hindcast할 수 있는 長點이 있다. Table 2는 채택된 각 모형의 支配方程式, 格子크기, 시간간격, 格子數, 座標系를 나타낸다. Fig. 1과 Fig. 2는 遠域과 氾濫域模型의 水深圖를 提示한 것이다.

遠域模型 및 近域模型에 사용된 支配方程式은 線形 長波理論에 의한 方程式으로서 다음과 같다.(Shuto, 1991)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \tag{3}$$

Table 2. Numerical condition for tsunami propagation.

	遠域模型	近域模型	氾濫域模型
支配方程式	線形 長波理論	線形 長波理論	非線形 淺海波 理論
座標系	直交座標系	直交座標系	直交座標系
格子크기	200 m	71.7 m	50 m
時間間隔	1.0 sec	0.5 sec	0.5 sec
格子數	540 × 500	780 × 580	500 × 250

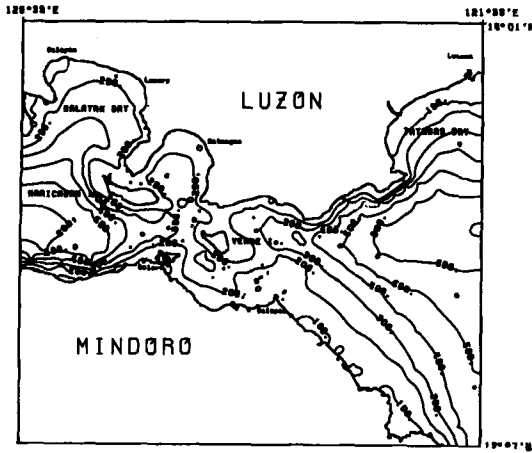


Fig. 1. Bathymetry of the far-field model.

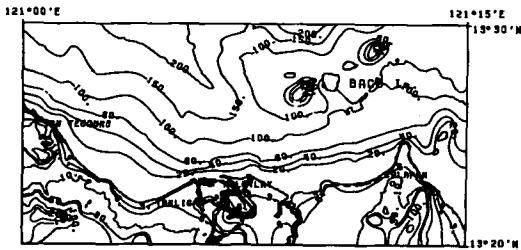


Fig. 2. Bathymetry of the inundation model.

여기서 η 는 水面變位, g 는 重力 加速度, M, N 은 x, y 방향의 線流量이다. 외해 경계에서는 다음과 같은 放射條件을 적용하여 경계내측의 유체운동에 의한 攪亂이 外側으로 波及되게 하였다.

$$\eta = \frac{\sqrt{M^2+N^2}}{gh} \tag{4}$$

遠域模型의 沿岸境界에서는 垂直壁을 假定하여 氾濫算定은 不可能하다.

氾濫模型의 連續方程式은 遠域模型과 마찬가지로 식(1)과 같고, 運動量方程式은 다음과 같은 移流項 및 摩擦項을 고려한 非線型 方程式을 사용하였다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2+N^2} = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2+N^2} = 0 \tag{6}$$

여기서 D 는 總 水深 ($h+\eta$)이며 n 은 Manning 조도계수로서 0.025를 취하였다.

Kajiura(1963)는 쓰나미 계산시 分散效果 고려의 여부를 설정하는 기준치를 제안 하였다. 즉, $P_a=(6h/R)^{1/3}(a/h)$ 에서 P_a 값이 4이하인 경우는 分散效果를 무시할 수 없다고 하였다. 여기서 h 는 水深, R 은 쓰나미 전파거리, a 는 傳播되는 방향으로의 쓰나미 波源域의 길이이다. 分散效果를 고려하기 위해서는 分散項을 포함하고 있는 Boussinesq식을 사용함이 적절하지만 상당한 계산시간과 기억용량을 요구한다. Imamura와 Shuto(1990)는 Boussinesq식의 물리적 분산항은 Imamura 수에 따라 적절한 격자간격을 설정하여 數值分散으로 代置하면 무시될 수 있음을 제안하였다. 즉,

$$Im = \Delta x \times \frac{\left[-\left(C_o \frac{\Delta t}{\Delta x} \right)^2 \right]^{1/2}}{2h} \tag{7}$$

$Im = 1.4$ 가 되도록 Δx 를 設定하면 線形長波理論式은 分散項을 포함하는 방정식의 해와 흡사한 결과를 가지게 된다. 여기서 C_o 는 線形長波의 波速, Δt 는 시간간격, Δx 는 格子間隔이고, h 는 水深이다. 이러한 조건을 Mindoro 쓰나미의 산정에 적용할 때 P_a 값은 6.55로서 分散效果를 고려할 필요가 없는 것으로 생각되어 초기 채택한 시간간격 및 격자간격을 그대로 채택하여 산정을 수행하였다. 적용된 수치계산 방법은 staggered leap-frog scheme(Shuto, 1991) 이었다.

3.2 斷層파라미터와 初期波形

斷層운동에 따른 初期波形을 추정하기 위해서는 斷層模數(파라미터)를 이용한 地殼變動量을 계산해야 할 필요가 있다. 그러나 인근의 地震觀測網의 자료가 불

Table 3. Fault parameters for 10 different cases.

case	length	width	dislocation	slip angle	strike angle	dip angle
1	7.4 km	3.5 km	5.0 m*	26.6°	140°	11.3°
2	7.4 km	3.5 km	7.5 m*	26.6°	140°	11.3°
3	7.4 km	3.5 km	10.0 m*	26.6°	140°	11.3°
4	7.4 km	3.5 km	2.5 m	26.6°	110°	11.3°
5	7.4 km	3.5 km	2.5 m	26.6°	120°	11.3°
6	7.4 km	3.5 km	2.5 m	26.6°	130°	11.3°
7	7.4 km	3.5 km	2.5 m	15.6°*	140°	11.3°
8	7.4 km	3.5 km	2.5 m	35.0°*	140°	11.3°
9	7.4 km	3.5 km	2.5 m	50.0°*	140°	11.3°
10	7.4 km	3.5 m	8.0 m	40.0°	110°	11.3°

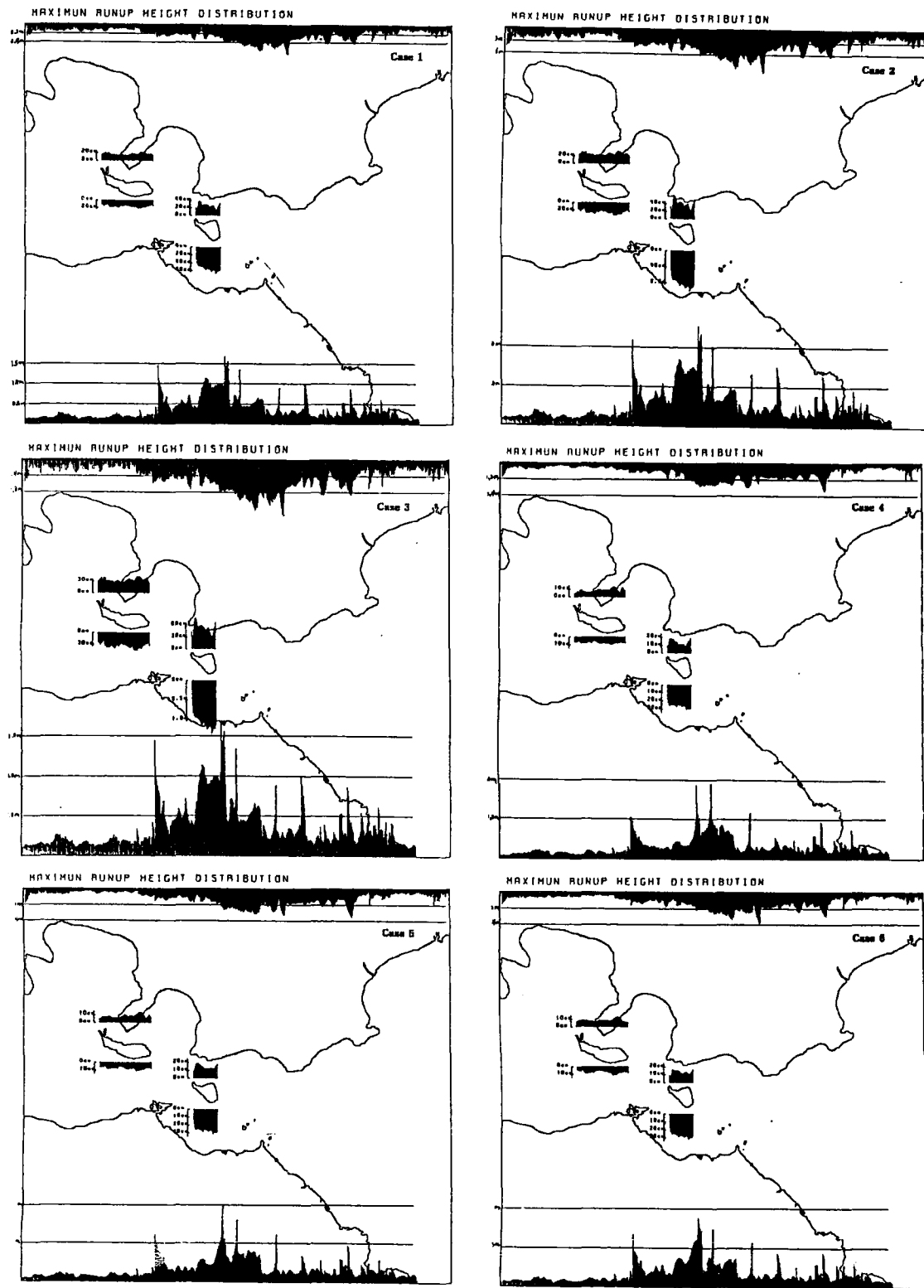


Fig. 3. Computed maximum tsunami heights from the far-field models for 10 different cases of fault parameters.

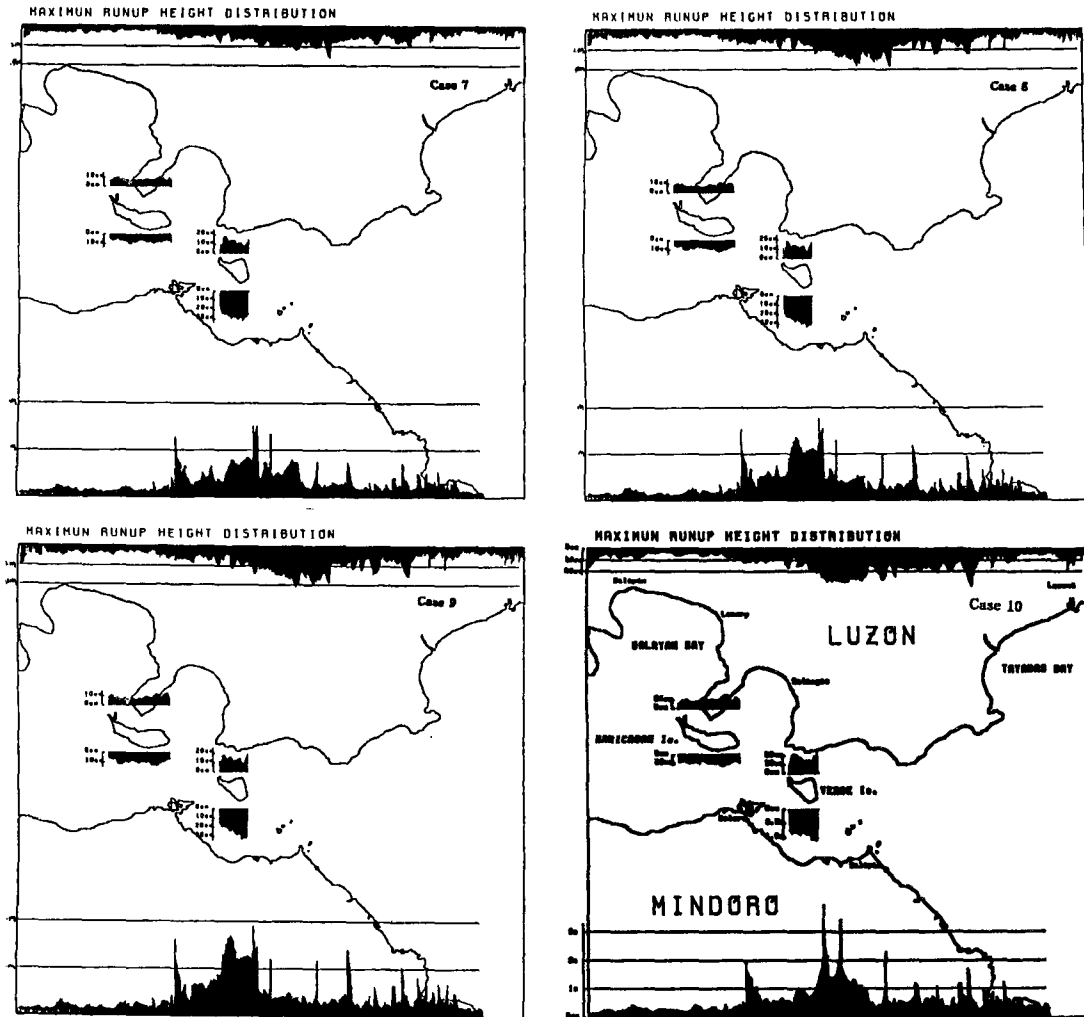


Fig. 3. Continued.

충분하여하여 震源模型에 사용되는 斷層파라미터를 CMT(Centroid Moment Tensor)의 해로 구할 수가 없었다. 이 민도로섬의 지진은 큰 쓰나미를 발생시키지 않는 것으로 알려진 Strike-Slip형 단층운동(Satake와 Imamura, 1995)에 의한 지진이었으나 그럼에도 쓰나미원 파고는 7m에 달했고 62명의 사망자가 발생하였다. 本研究에서는 여러 경우(Table 3)에 제시된 10경우의 source model)의 초기파형을 가정 하여 산정치가 관측치와 유사한 결과를 가질때까지 모형산정을 수행하였다. 여기서 단층파라미터의 가정은 餘震 分布로부터 斷層의 走行方向과 길이, 幅 등의 斷層파라미터를 추정하였다. 여러번의 施行錯誤의 과정을 거쳐 최종적으로는 case 10과 같은 斷層파라미터를 채택하였다. 즉

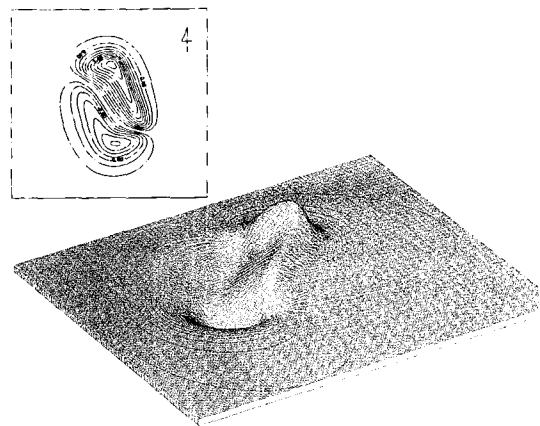


Fig. 4. Initial water surface from selected fault parameters (case 10).

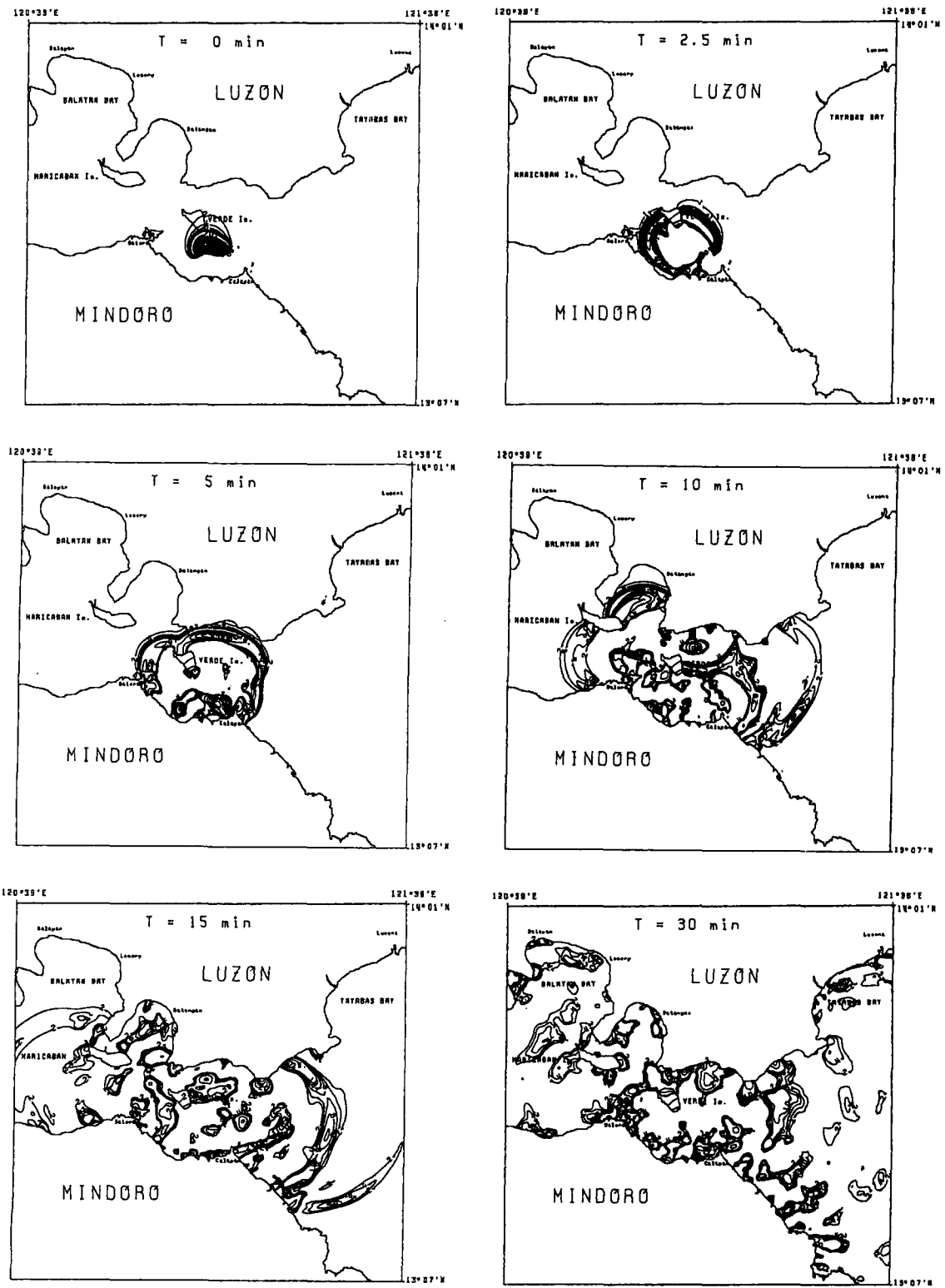
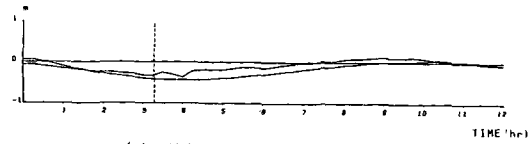


Fig. 5. Computed water levels from the far-field model.

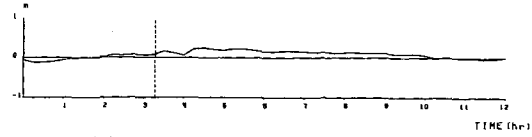
실제적인 10경우의 source model에 의해 원역모형의 쓰나미의 最大波高 分布를 산정(Fig. 3)하여 觀測値와 比較하여 최종적인 震源模型을 채택한 것이다. 쓰나미의 初期波形은 斷層의 伸張속도가 沿岸의 長波의 傳播速度보다 빠를 경우 斷層變形으로 인한 海底의 變位와 같다고 알려졌다. Fig. 4는 선택된 斷層과라매터(case 10)에 의해 Mansinha와 Smylic(1971)의 斷層理論에 따라 계산된 쓰나미의 初期水面變位를 나타내고 있다. 初期水面變位는 Verde섬 남측에서는 수면위로 약 2.0 m 상승되어 있고 Mindoro섬 남측에서는 平均水面 이하로 약 1.5 m 정도 下降된 形態이다.

4. 數值模型의 計算 結果

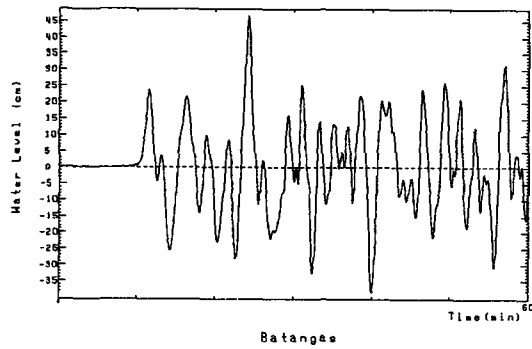
斷層模型에 의한 水面變位를 初期條件으로하여 $\Delta x = \Delta y = 200$ m 격자상에서 계산된 쓰나미의 遠域 傳播圖를 Fig. 5에 나타내었다. 쓰나미는 발생하자마자 Verde섬에 到達하였고 약 5분경에는 Mindoro섬과 Luzon섬 사이의 海峽 全域에 傳播되었으며 10분경에는 Batangas에 到達하였다. 그리고 약 15분 경에는 遠域模型의 左右側 境界에 도달하여 이후부터는 쓰나미가 計算領域範圍를 벗어나 傳播되는 樣相을 나타내며 약 30분후에는 Balayan만과 Tayabas만에 까지 傳播되어 遠域模型 全域에 傳播된 樣相을 보이고 있다. 또한 Verde섬 주위에서는 남측의 Mindoro섬과 북측의 Luzon섬에서 각각 反射된 파로 상당히 복잡한 波形을 나타내는 것을 볼 수 있다. 遠域에서 산정된 沿岸에서의 最高 水位分布는 이미 Fig. 3(case 10)에 제시하였다. Verde섬 남측에서는 약 1m의 파고를 보이고 있으며 Mindoro섬의 Baco 및 Malaya지역에서는 최고 4 m의 높은 파고가 나타나는 것이 제시된다. 쓰나미 발생시 Luzon섬의 Batangas에 위치한(株)韓進의 건설현장에서 관측한 潮位가 매 10분 檢測치를 獨취한 것이라 潮位 관측자료중 쓰나미 발생 약 10분 후에 나타난 水位 變動(Fig. 6(a), (b))이 쓰나미에 의한 것으로 간주되므로 遠域模型에서 계산된 Batangas에서의 시간별 水位 變化(Fig. 6(c))와 比較해보면 觀測潮位와 쓰나미 계산 결과가 초기파 도달 시간에서 약 10여분으로 잘 一致함을 볼 수 있다. 이로써 채택된 초기조건을 고려한 遠域模型의 결과는 쓰나미에 있어서 越波比(runup ratio)를 고려할 때 전반적으로 잘 再現되었다. 월파비는 Togashi(1981)가 제시한 연안에 인접한 수심에서의 쓰



(a) Tide records of Batangas.



(b) Detiding at tide records data.



(c) Computed tsunami elevations from far-field model.

Fig. 6. Observed and computed water levels at Batangas.

나미 높리와 실제 월파고와의 비로서 원역모형에서 Luzon섬 인근에서 3.3, Verde섬은 2.0, 민도로섬에서는 약 2.2, Baco에서는 5배의 분포를 보인다.

근역모형은 범람역 모형을 위한 경계조건을 부여하기 위해 운영되었는데 전파양상(Fig. 7)에 산정된 모형 전역 및 연안에서의 최대 파고의 분포가 Fig. 8에 제시되어 있으며 산정치와 연안관측치와의 비교가 Fig. 9에 제시된다. 이 모형은 원역모형 보다는 세격자 간격을 취해 개선된 결과를 가지나 수직벽의 가정이 채택된 관계로 전반적인 과소추정을 하고 있다.

遠域模型에서 계산된 결과를 토대로 하여 汎濫模型(simulation)을 수행한 결과가 Fig. 10에 제시되어있다. 이 경우 斷層의 일부분이 모형 상층경계에 걸쳐 초기 조건에는 전 해역에 대해 중간역模型的 초기결과를 적용하였고 그 이후에는 外海境界에서만 중간역模型的 결과를 적용하였다. 범람모형의 격자는 50 m로서 육상표고는 정수면상의 높이(-)로서 수심의 정수면하 수심(+)으로 제시되어 범람에 따른 이동경계(moving boundary)를 취했는데 Iwasaki와 Mano(1979)가 제시하는 기법을 취하였다. Fig. 10에서 보면 약 4분 후에

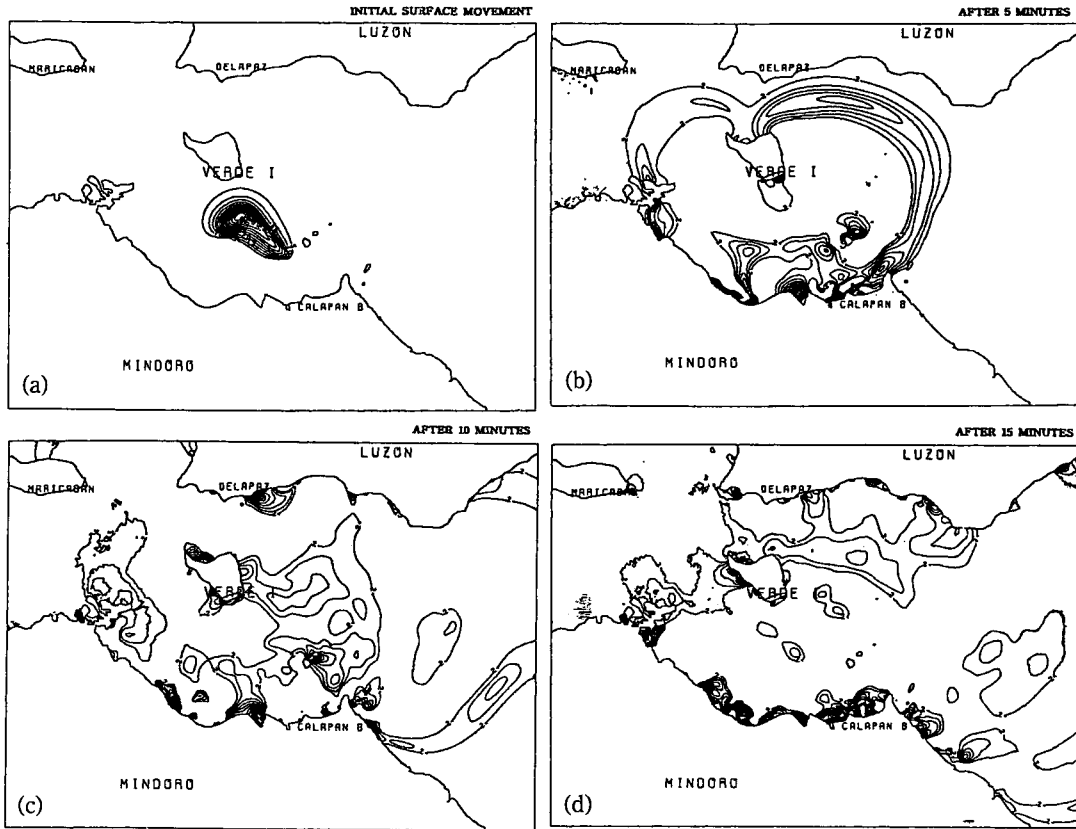


Fig. 7. Computed water levels from the near-field model.

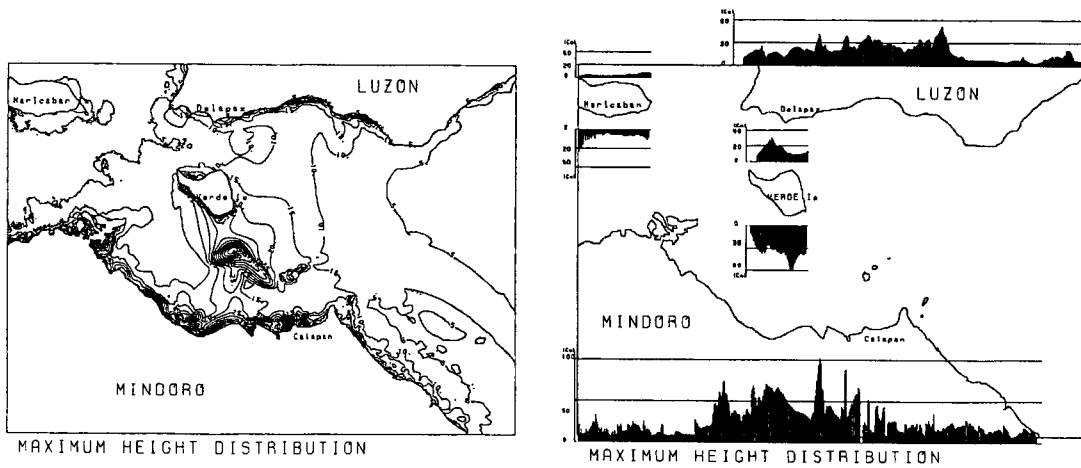


Fig. 8. Distribution of maximum tsunami heights from the near-field model.

Malaya지역의 三角洲가 氾濫되는 것을 보이고 있으며 약 8~9분 후에는 實際 觀測된 氾濫地域 全域에 氾濫이 이루어진 것을 볼 수 있다. 이러한 氾濫樣相을 把握하기 쉽게 Fig. 11과 같은 그림을 제시하였다. 4분

에 氾濫이 시작되고 있으며 7분에는 Malaya지역과 Baco지역이 완전히 氾濫되었으며 Wawa지역의 氾濫이 시작되고 있다. Fig. 12은 沿岸에서의 最高水位 分布를 제시하는데 대체적으로 2~3 m 정도의 쓰나미波

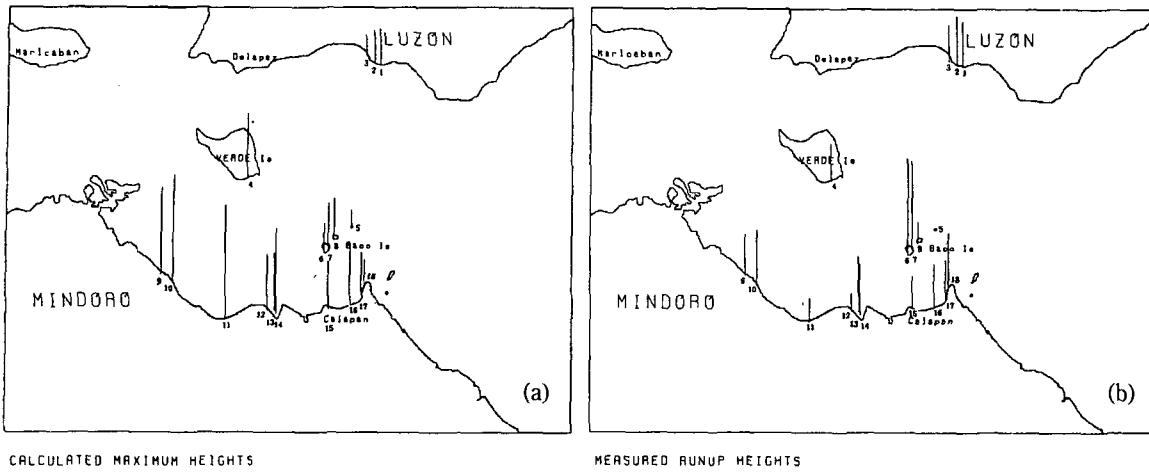


Fig. 9. Tsunami heights from (a) the near-field model and (b) observation.

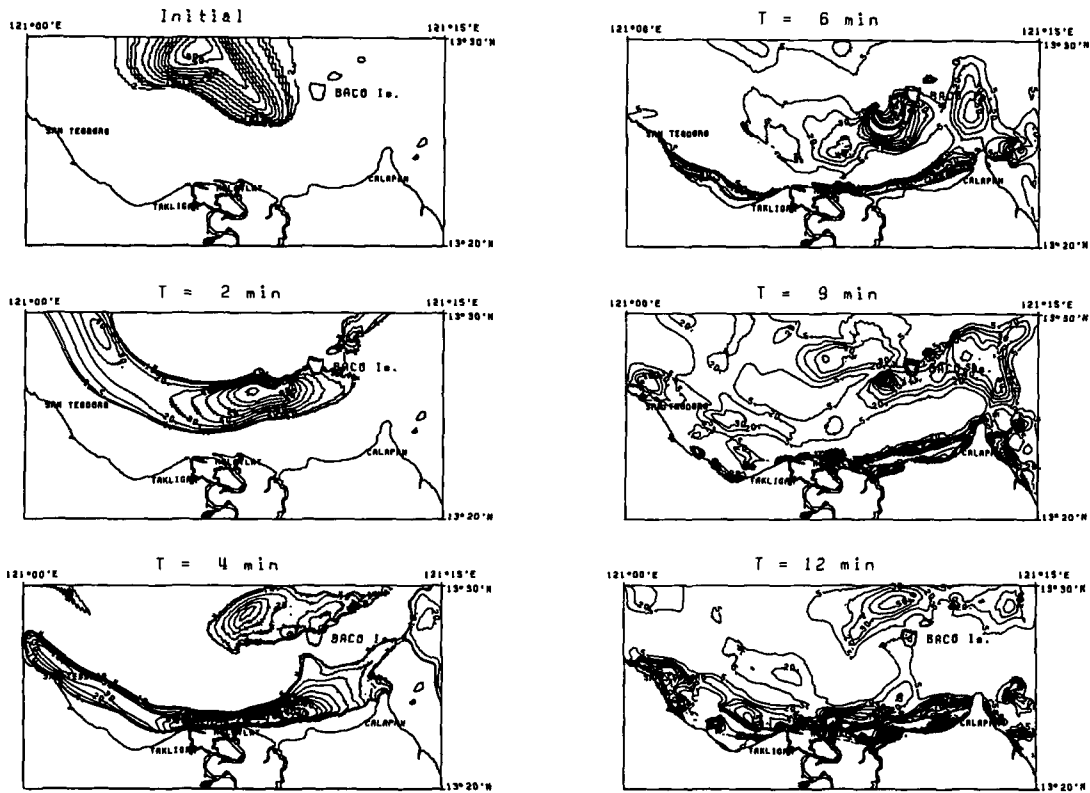


Fig. 10. Computed water levels from the inundation model.

높을 나타내고 있다. 國際 쓰나미 관측팀에 의한 Mindoro섬 북측의 沿岸 觀測値와 氾濫模型에 의한 산정치를 Fig. 13에 제시하였다. Malaya지역에서는 약 2~2.5배정도 산정치가 작으며 Wawa, Takligan지역에서

는 약 1.5정도 算定値가 작다. 그러나 대체적으로는 越波比를 감안할 때 全般的으로 一致하고 있는 양상이다. 쓰나미모형 시뮬레이션을 통한 매 timestep의 산정수위는 3차원 렌더링(rendering, photo-realistic ras-

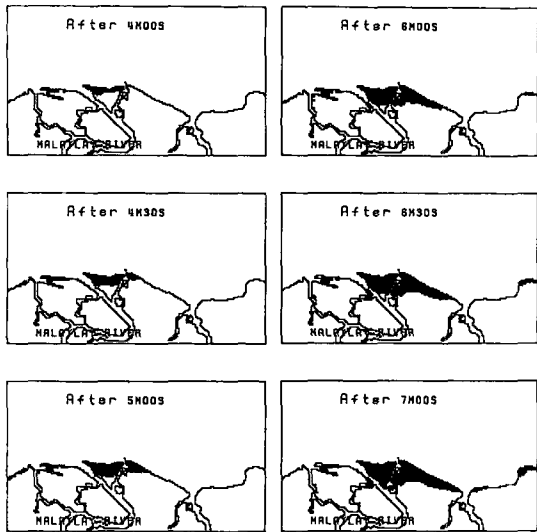


Fig. 11. Computed coastal flooding from the inundation model.

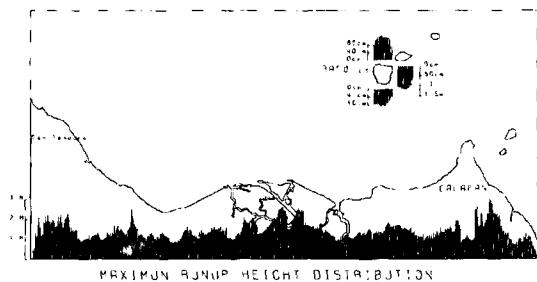


Fig. 12. Distribution of maximum runup heights from the inundation model.

terization) 소프트웨어를 이용하여 영상 자료화하였다. 각 영상은 비디오 녹화장비 및 컴퓨터상에서 디스플레이 시킬 수 있는 포맷(mpeg포맷을 취함)으로 작성하여 쓰나미의 전파양상을 현실감 있게 제시한다. Fig. 14와 Fig. 15는 작성된 쓰나미파급 양상을 나타내는 영상의 일부를 보여주는데 이러한 쓰나미재해에의 과학가시화기법은 현재에는 상용되는 기법으로 자리잡게 되었다.

5. 結 論

1994년 Mindoro 쓰나미를 遠域 및 氾濫域模型에 의해 算定하였으며 Mindoro섬 지역의 氾濫을 재현하였다. 쓰나미에 의한 Mindoro섬 북측 지역의 氾濫과 Batangas에서의 初期波 到達 時間 등이 實際 觀測値와 잘

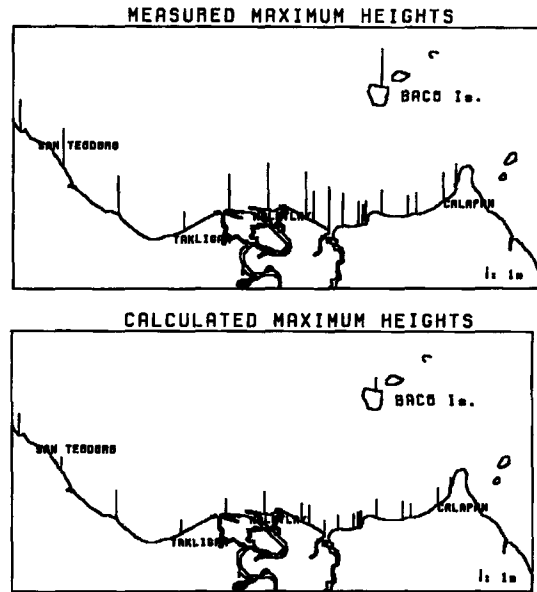


Fig. 13. Comparison between observation and computed runup heights from the inundation model.

一致하였다. 이는 수차례의 斷層模型의 假定에서 최종적으로 채택한 자료가 타당성을 가지고 있다는 것을 나타낸다. 좀더 정확한 단층자료와 자세한 수심 및 지형자료가 이용 가능한대로 越波力에 의한 Mindoro섬의 가옥피해 등의 氾濫模型을 개선시켜 나아갈 예정이다. 이러한 遠域模型에서의 쓰나미 전파와 氾濫模型에서의 Mindoro섬의 氾濫 樣相을 科學的 可視化 技法에 의해 고품질의 computer graphic video animation을 수행하여 재현하였다. 이러한 일련의 과정은 Supercomputer에서의 신속한 산정에 의존하는 수치모형을 기반으로 한 쓰나미 예경보체계의 타당성을 검토하는 좋은 계기가 된다.

謝 辭

본 研究는 成均館大學과 日本 東北大 災害制御센터間的 쓰나미 협력연구(TIME(Tsunami Inundation Modeling Exchange) 프로그램)의 一環으로 遂行되었다. Batangas의 潮位觀測資料는(株)韓進의 한상대박사에 의해 제공되었는 바 이에 謝意를 表한다. 本 研究는 97年度 韓國地震工學研究센터(Korea Earthquake Engineering Research Center)의 部分的인 財政支援을 받아 遂行하였다.

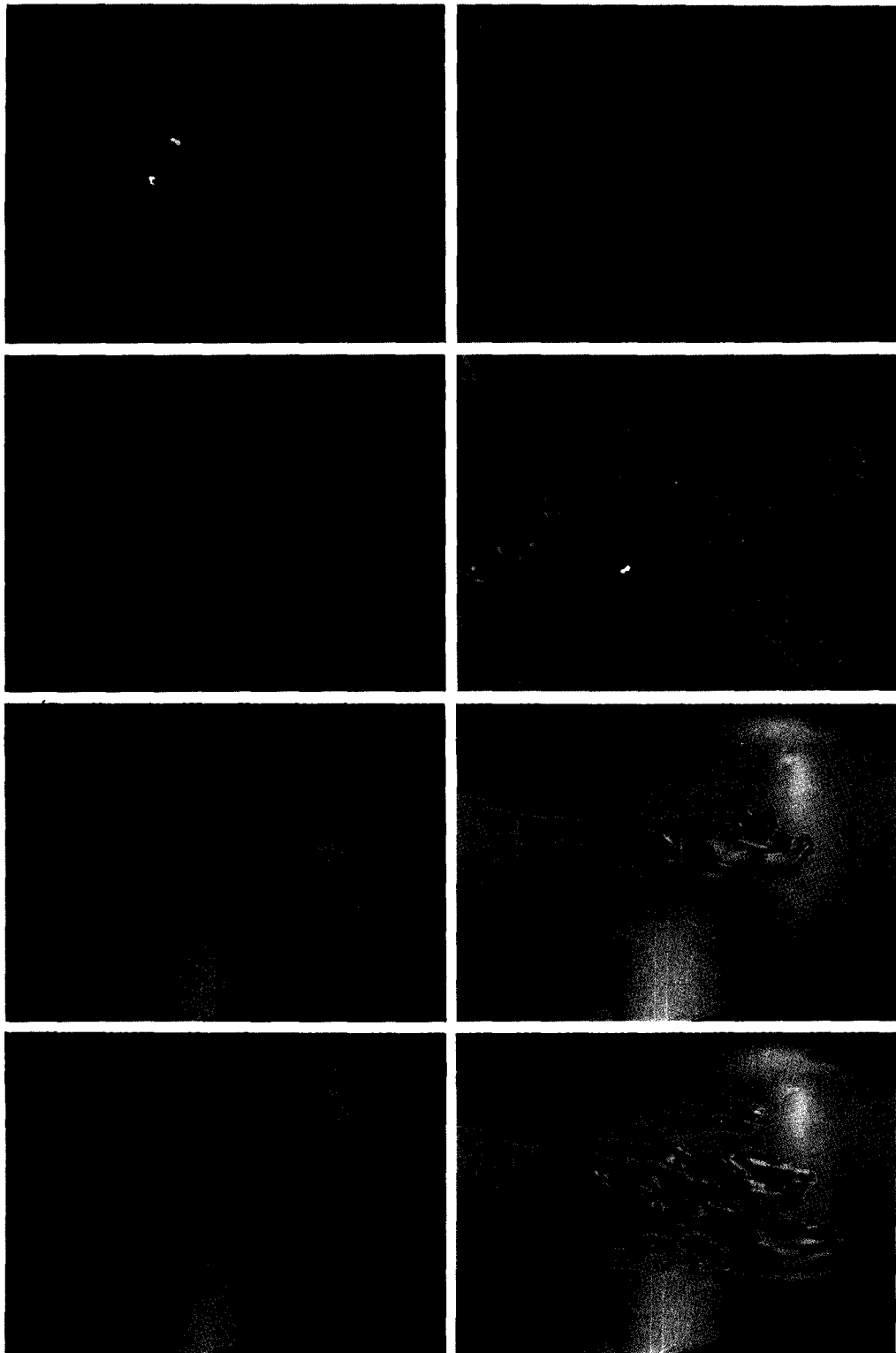


Fig. 14. Snapshots of computed water levels from the models. Upper half shows the results from the far-field model and lower half from the near-field model.

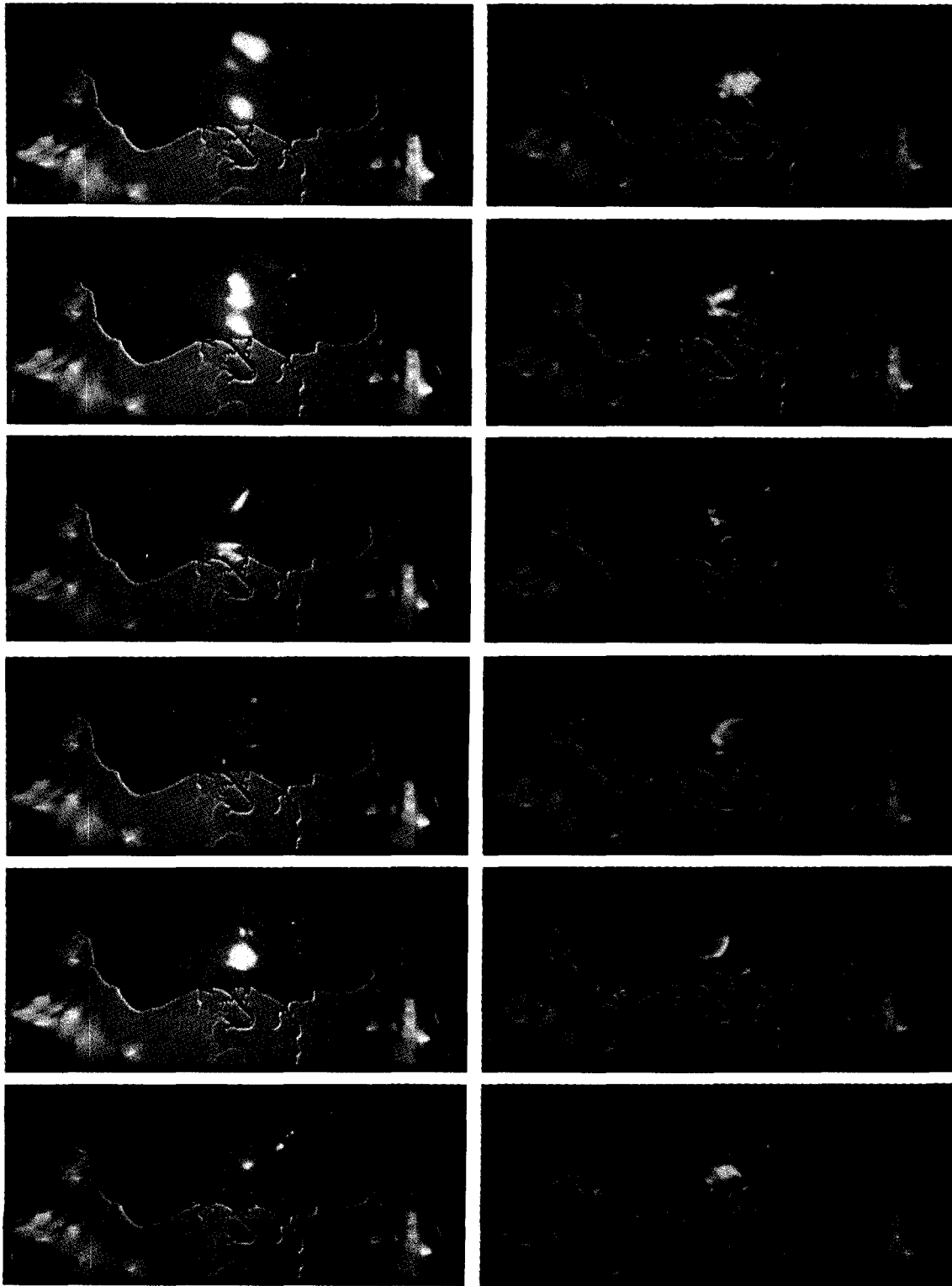


Fig. 15. Snapshots of computed water levels showing coastal flooding from the inundation model.

參考文獻

- 崔秉昊, 鄭紅和, 1994. 1995年 니카라구아 쓰나미의 氾濫算定, 韓國海岸 · 海洋工學會誌, 7(1): 24-32.
- 崔秉昊, 禹承範, 1994. 1992年 플로레스 쓰나미의 算定, 韓國海岸 · 海洋工學會誌, 9(1): 109-116.
- 崔秉昊, 李昊俊, 1993. 1983年 東海쓰나미의 算定, 大韓土木學會論文集, 13(3): 207-219.
- Choi, B.H., Lee, H.J., Imamura, F. and Shuto, N., 1993. Computer animation of marine process- tsunami events, *J. Korean Soc. of Coastal and Ocean Engrs.*, 5(1): 19-24.
- Imamura, F. and Shuto, N., 1990. Tsunami propagation by use of numerical dispersion, *Proc. 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, 1992, *Proc. IUGG/IIOC, International Tsunami Symposium*, Wakayama, pp. 647-656.
- International Tsunami Survey Team, 1994, Report of field survey on the 1994 Mindoro, Philippines, earthquake and tsunami (prepared by F. Imamura and Giga, E.C.).
- Iwasaki, T. and Mano, A., 1979. Two-dimensional numerical computation of tsunami run-up in the Eulerian description, *Proc. 26th Conf. Coastal Eng.*, JSCE, pp. 70-74.
- Kajiura, K., 1963. Tsunami source, energy and the directivity of wave radiation, *Bull. of Earthq. Res. Inst.*, Vol. 48, pp. 835-869.
- Mansinha, L. and Smylie, D.E., 1971. The displacement fields of inclined faults, *Bull. of Seisomo. Soc. of America*, Vol. 61, No. K, pp. 1433-1440.
- Satake, K. and Imamura, F., 1995. Introduction to "Tsunamis: 1992-1994", *PAGEOPH*, 145(3/4), pp. 373-379.
- Shuto, N., 1991. Numerical simulation of tsunami present and near future, *Natural Hazard*, 4, pp. 171-191.
- Togashi, H., 1981. Study on tsunami run-up and countermeasure, translated doctoral thesis (in English), Tohoku University.