

1992年 플로레스 쓰나미의 算定 Computation of Tsunamis of the 1992 Flores Island Earthquake

崔秉昊* · 禹承範*

Byung Ho Choi* and Seung Buhm Woo*

要 旨 : 1992년 인도네시아의 플로레스 섬에서 地震으로 인해 發生한 쓰나미는 莫大한 人命被害와 損傷을 招來하였다. 이 쓰나미 現象은 數值模型에 의하여 再現되었는데 Havard CMT solution의 單層 파라미터에 의한 地殼變動 및 Hading만 內側, Riang Krok 그리고 Leworahang 海岸에서의 追加的인 海底沈下(subaqueous slump)를 考慮한 初期條件을 취하였다. 計算結果는 國際 쓰나미 調査團의 觀測 資料와 全般的인 一致를 보였다. 極甚한 被害를 입은 Babi섬 남측의 越波現象을 調査하기 위해서 50 m의 細格子體系의 越波模型을 수립하였다. 一連의 計算結果는 影像으로 作成되어 비디오 動畫로 錄畫하였다. 이 컴퓨터 그래픽을 이용한 비디오 動畫는 海岸으로의 쓰나미전파와 Babi섬 남측의 越波現象을 可視的으로 잘 再現하였다.

Abstract □ Tsunamis generated by of the 1992 Flores Island Earthquake in Indonesia caused tremendous casualties and damages. This tsunami event was hindcasted via numerical tsunami models. Initial conditions were taken from fault parameters from Havard CMT (Centroid Moment Tensor) solution and additional subaqueous slump consideration at the Inner Hading Bay and Riang Krok, Leworahang coasts. The computed results showed general agreements with observations made by the International Tsunami Survey Group. Subsequently a runup model was developed to investigate catastrophic runup at southern shore of the Babi Island with fine grid resolution of 50 m. Computed results were recorded to construct rendered images for video animation. The computer-graphic aided video animation showed a remarkable reproduction of tsunami propagation and runup at southern coast of the Babi Island.

1. 緒 論

1992년 12월 12일 世界時 5시 29분(현지시각 13시 29분), 強度 Mw-7.8(모멘트 強度)의 強震이 인도네시아의 플로레스섬 東部地域에 發生하였다(Fig. 1). 26 m가 넘는 큰 쓰나미 越波가 記錄되었고 鉛直方向의 20 m를 넘는 큰 海底沈下가 觀測되었다. 플로레스섬의 동북쪽 海邊에 있는 Riang Krok의 마을들은 완전히 붕괴되었고 Maumere市の 북서쪽 2 km지점에 있는 Wuring地域에서는 3.2 m 정도 크기의 쓰나미로 87 명이 死亡하였다. Maumere市로부터 45 km 北東쪽에 위치한 Babi섬에는 약 1,100명 정도가 살고 있었는데 이번 쓰나미로 인해 모든 家屋은 완전히 쓸려나갔고 263명이 사망하였다. 총 사망자수는 1,712명으로

報告되고 있는 데 이중 약 반가량이 쓰나미에 의한 것으로 여겨진다. (崔, 1993; Tsuji, 1993). 이 쓰나미 災害記錄은 1883년 자바섬 서측 Sunda 海峽에 위치한 크라카토아 火山의 대폭발에 의해 인근해안에 30~40 m의 높은 쓰나미가 來襲한 歷史的인 기록에 버금가는 것이다. 本 研究는 數值計算과 computer-graphic aided video animation을 이용하여 플로레스 쓰나미의 發生과 그 傳波樣相을 理解하는 데 目的을 두고 있다.

2. 數值模型과 단층 파라미터

2.1 數值模型

震源附近과 플로레스海에서의 쓰나미 傳波를 調査

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

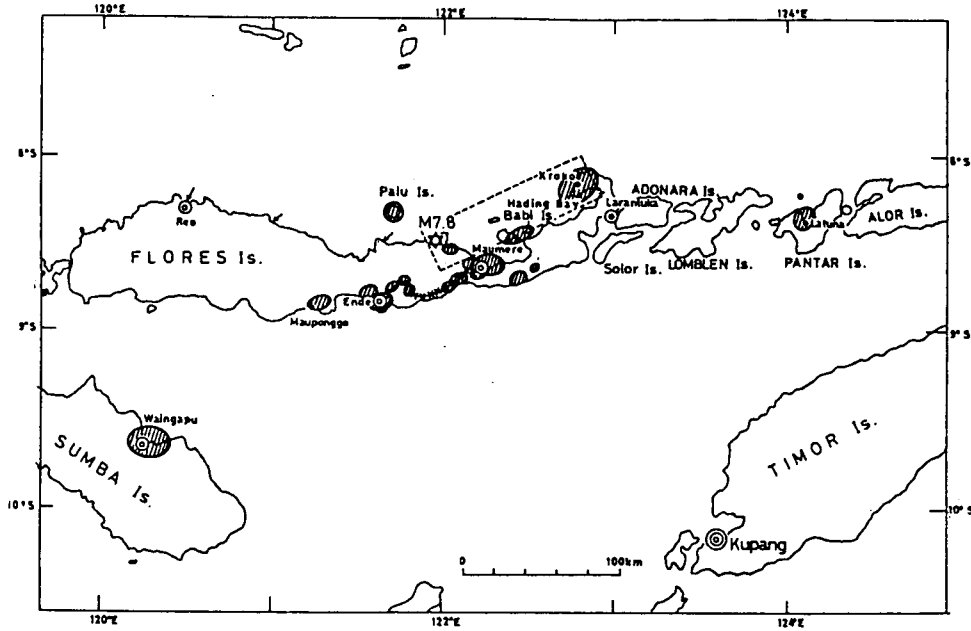


Fig. 1. Damaged area (shaded line) due to Flores Earthquake with the zone of fault dislocation in broken lines (Tsuji, 1993).

하기 위하여 近域과 廣域모형이 수립되어 플로레스 해와 플로레스섬 북측의 길이 830 km, 폭 800 km 범위의 地域에 線形長波理論을 適用하여 計算을 수행하였다. 다음으로 Babi섬을 포함하는 近域의 模型 領域에 非線形項과 自乘摩擦項을 포함하는 淺海波理論의 越波模型을 수립하였다. 廣域模型의 計算을 위하여 數值模型에서는 線形 Boussinesq式에서와 같이 分散項을 포함하여야 한다. 分散項의 必要性을 判斷하기 위하여 Kajiura(1970)가 제시한 방법이 사용되었다. 만약 $Pa = (6h/R)^{1/3}(a/h)$ 이 4보다 작으면 分散效果가 考慮되어야 한다. 여기서 h는 水深, R은 傳波距離 그리고 a는 傳波方向으로의 쓰나미 source의 길이이다.

廣域模型에서는 線形 Boussinesq式 대신 物理分散項을 포함하지 않는 線形長波理論을 사용하였는데 物理分散項 대신 Imamura數(Imamura and Shuto, 1990)에 의해 決定되는 數值分散項을 사용하였다. 즉, 數值分散을 위해 空間格子길이를 결정하여 物理分散과 同一한 效果를 갖도록 하는 方法을 採擇하였다. 支配方程式은 廣域模型에서는 Coriolis影響을 포함하였고 球面座標系를 利用하였으며 近域 및 월파모형에서는 직교좌표계를 이용하였다. 適用된 數值計算方



Fig. 2. Grid system of far-field tsunami model.

法은 staggered Leap Frog scheme(Shuto, 1991)이다. Fig.2와 Fig.3은 각기 廣域模型과 近域模型의 格子體系를 제시하는 데 數值計算에 사용된 條件들은 Table 1에 정리되어있다.



Fig. 3. Grid system of near field tsunami model.

2.2 斷層 파라미터와 初期 條件

今回の 플로레스地震은 Silver와 Reed(1988)이 제시하는 플로레스섬 부근의 地殼構造에서 東 Sunda arc의 back arc지역에서 back thrust가 발생한것으로 추정되는 데 1983년 東海中部地震, 1991년 Costa Rica 地震 및 1993년 7월 北海道 南西部地震 역시 이 back arc 메카니즘인 것으로 說明되고 있다. 이 地震의 강도는 美國地質調査局이 初期에 Richter 強度 M-7.5 로 발표하였으며 後에 Mechanism解로부터의 모멘트 強度 Mw-7.8로 추산되었다. 地震은 초기에 美國地質調査局의 National Earthquake Information Center의 Quick Epicenter Determination 方法에 의해 8.48°S, 121.93°E로 추정되었으며 後에 8.36°S, 122.37°E로 수정되었다.

斷層運動에 따른 初期波형을 推定하기 위해서는 斷層 파라미터를 이용한 地盤變動量을 計算해야 할 필요가 있다. Seismic surface와 bodywaves의 分析을 통하여 斷層 파라미터는 Havard大의 CMT解(M121 292y)중 低角逆斷層의 解를 採擇하였는데 strike direction(θ) 61° , dip angle(δ) 32° , slip angle(λ) 64°

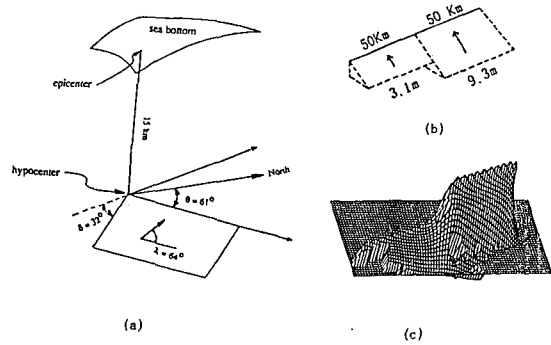


Fig. 4. Estimated fault dislocation (a) based on Havard University CMT solution with schematized sea-bed displacement (b) and corresponding initial sea level motion (c).

그리고 6.4×10^{27} dyne-cm의 地震모멘트를 취하였다. 餘震分布로부터 斷層模型은 길이 100 km, 폭 50 km로 일차 推定되었지만 추가적인 수정으로 각각 길이 50 km, 폭 25 km의 두개의 단층 모형을 채택하였다(F. Imamura, personal communication, Feb. 1993). 수 차례의 시산 결과 3.1 m와 9.3 m의 변위를 갖는 길이 50 km, 폭 25 km의 크기의 두개의 단층모형이 국제 쓰나미 조사팀에 의해 觀測된 波高分布를 再現하는데 適合한 것으로 研究에서 調査되었다. Table 2는 연구에 이용된 단층 파라미터를 나타낸다. 쓰나미의 초기파형은 斷層의 昇降速度가 長波의 傳波速度보다 빠를 경우 斷層變形으로 인한 海底의 變位와 같다고 알려지고 있다.

Fig. 4는 上記의 斷層파라미터를 근거한 Manshinha와 Smylie(1971)의 理論에 의해 地盤變動量計算을

Table 1. Numerical condition for tsunami propagation

	越波模型	近域模型	廣域模型
支配方程式	非線形 長波理論	線形 長波理論	數值分散項을 包含한 線形長波理論
座標系	直交座標系	直交座標系	球面座標系
格子크기	50 m	500 m	0.88' × 0.86'
Time step	1 秒	2 秒	3 秒
格子數	560 × 240	700 × 320	520 × 500

Table 2. Fault parameters for the Flores Earthquake of Dec. 12, 1992

길이①	폭①	변위①	길이②	폭②	변위②	Slip	Strike	Dip
50 km	25 km	3.1 m	50 km	25 km	9.3 m	64°	70°	32°

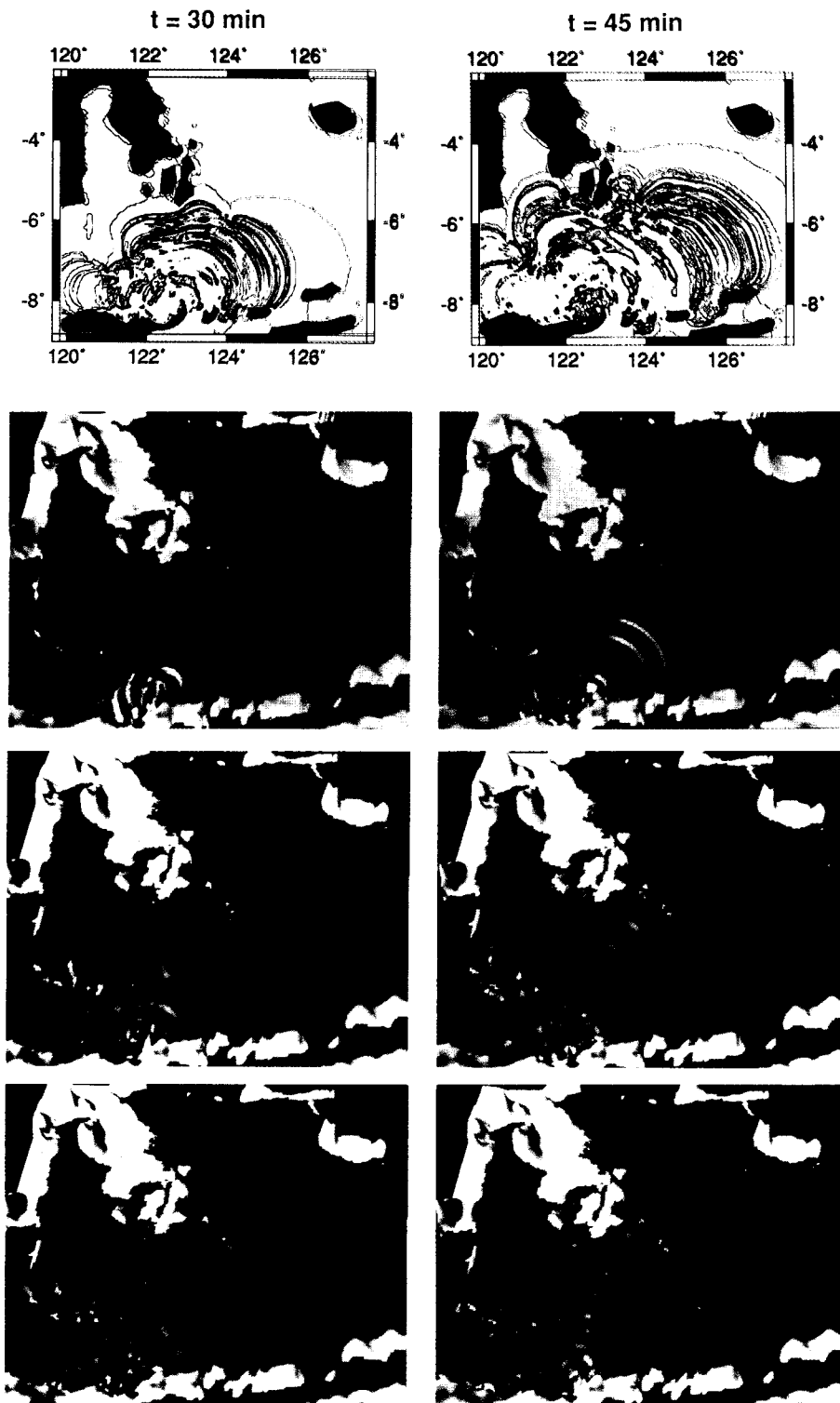


Fig. 5. Computed tsunami elevations and rendered images from far-field model.

逐行한 結果와 이에 상응하는 初期水面變位를 나타내고 있다.

3. 模型結果

3.1 廣域과 近域 數值模型

廣域모형은 플로레스海에서의 쓰나미 傳波를 調査하기 위해 수립되었다. 모형결과는 에너지전파의 방향이 斷層의 단축방향인 北쪽과 北西쪽사이임을 나타내고 있고 또한 Riang Krok과 Hading만 내측의 초기

海底沈下로 인해 北東쪽임을 나타내고 있다. Fig. 5는 모형에서 計算된 水位變化와 video animation에 사용된 rendered image의 예를 나타내고 있다. 이 비디오 動畫化方法은 Choi 等(1993) 및 Imamura 等(1993)에 紹介된 技法을 利用하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 앞 章에서 기술한 初期條件과 추가적인 海底沈下の 현상을 Riang Krok과 Hading만의 内側에서의 水位의 급격한 變化를 통해 考慮한 近域모형의 水位 變化算定결과와 상응하는 일련의 rendered image를 제시하고 있다. Fig. 8은 Tsunami Survey Group(Yeh *et*

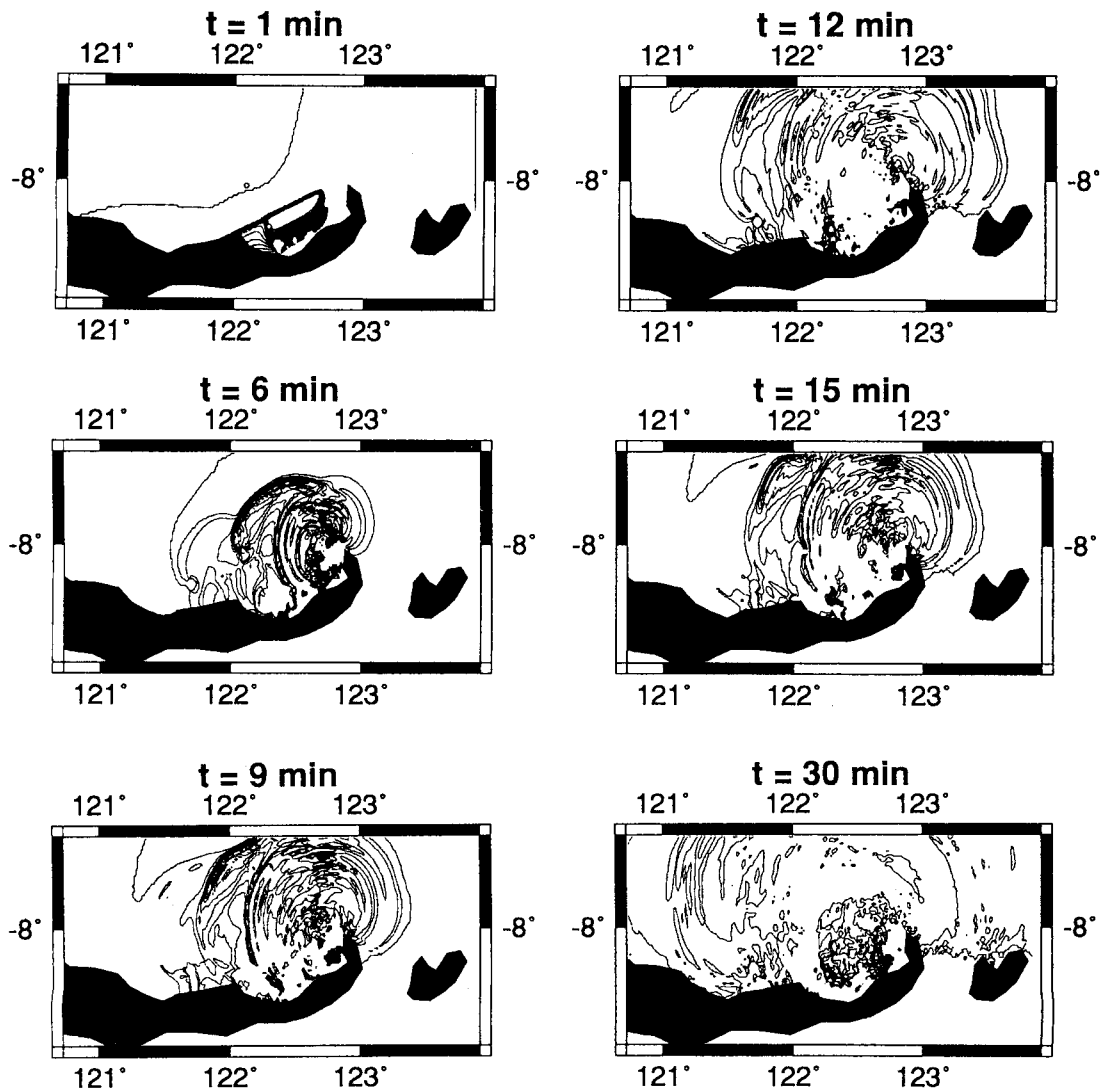


Fig. 6. Computed tsunami elevations from near-field model.

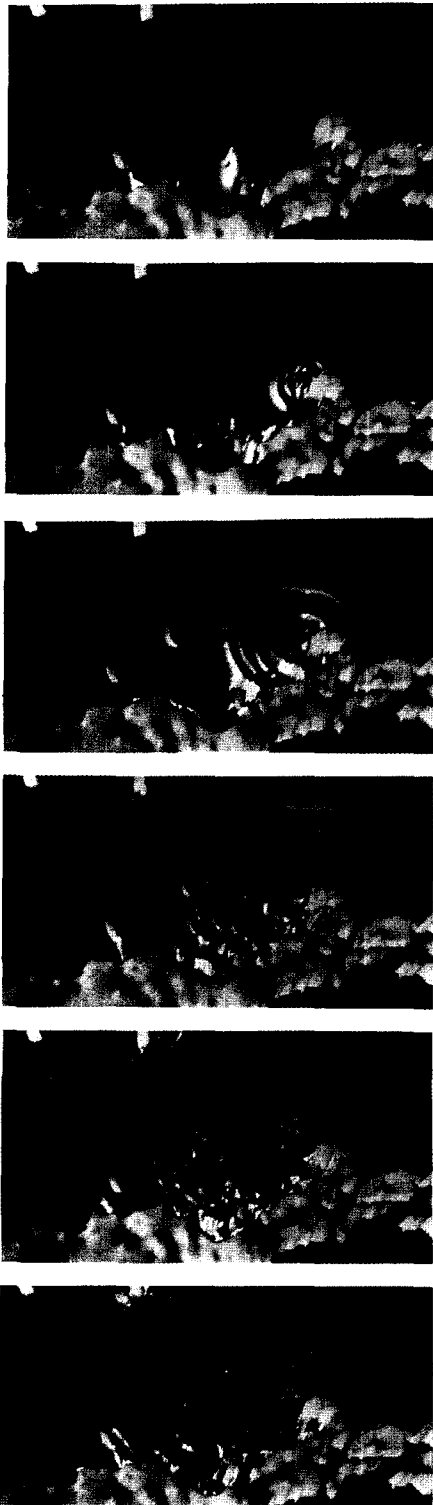


Fig. 7. Rendered images of tsunami elevations from near-field model.

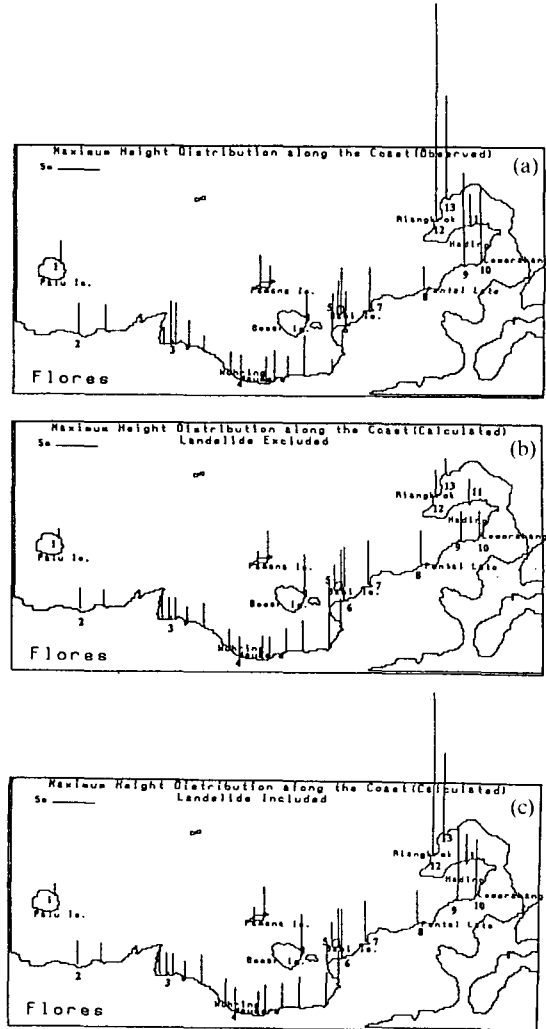


Fig. 8. Tsunami runup heights from sea level at the time of tsunami attack (a) measured values at each location, averaged from multiple measurements (b) near field numerical simulation based on initial condition shown in Fig. 2. (c) additional landslide consideration.

al., 1993)에 의해 관측된 쓰나미 越波높이와 近域모형에서 計算한 쓰나미 높이의 比較를 나타내고 있다. 採擇된 初期條件과 海底沈下에 대한 初期條件을 고려한 近域模型의 結果는 일파비(runup ratio) (Togashi, 1981)에 의하지 않고도 觀測結果와 滿足할만한 一致를 보이고 있음을 Table 3이 提示하고 있다.

3.2 Babi섬의 쓰나미

Maumere市 北東쪽 45 km 지점에 위치하고 있는

Table 3. Comparison between observation and calculation

Point	지 명	관 측 치	계산치(최대치)
1	Palu Is. Mage	2.6 m	1.34 m
2	Mausanbi	3.2 m	2.93 m
3	Detch	2.1 m	2.76 m
4	Maumere	2.0~3.2 m	2.80 m
5	Babi Is. (West)	6.9 m	4.16 m
	Babi Is. (East)	5.4 m	4.34 m
6	Nebe	3.1~4.4 m	4.40 m
7	Wailmung	5.3 m	5.14 m
8	Pantai Lato	3.3~6.7 m	4.39 m
9	Uepadung	10.8 m	8.65 m
10	Waibalan	7.7, 10.4 m	6.75 m
11	Patai Leta	3.0, 4.3 m	3.40 m
12	Riang Krok	18.2, 26.0 m	19.79 m
13	Bunga	12.3 m	9.77 m

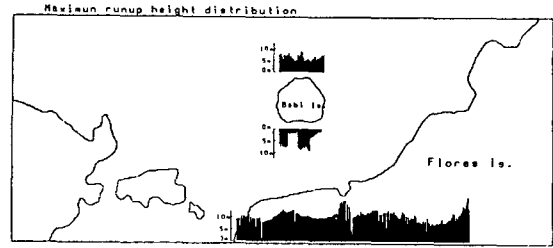


Fig. 9. Maximum runup height distribution computed from runup and inundation model.

Babi섬의 남측해안은 평상시에는 섬 북측의 산호들로 인해 플로레스해의 거센 風波와 너울로부터 防護되고 있는 데 이번 쓰나미로 인해 모든 家屋이 완전히 쓸려 나갔고 137명의 사망자가 發生하였다. 最大越波높이의 記錄은 東쪽에 位置한 기독교 마을에서 5.6 m 그리고 서쪽에 位置한 회교도 마을에서 4.6 m를 나타 내었다. 섬의 형상과 플로레스섬 북측에서 反射된 쓰나미의 反射波가 바비섬의 남측에서의 이러한 災害의 發生에 相當한 影響을 미치고 있음을 豫想할 수 있다(Yeh et al., 1993). 이러한 越波와 氾濫의 動的

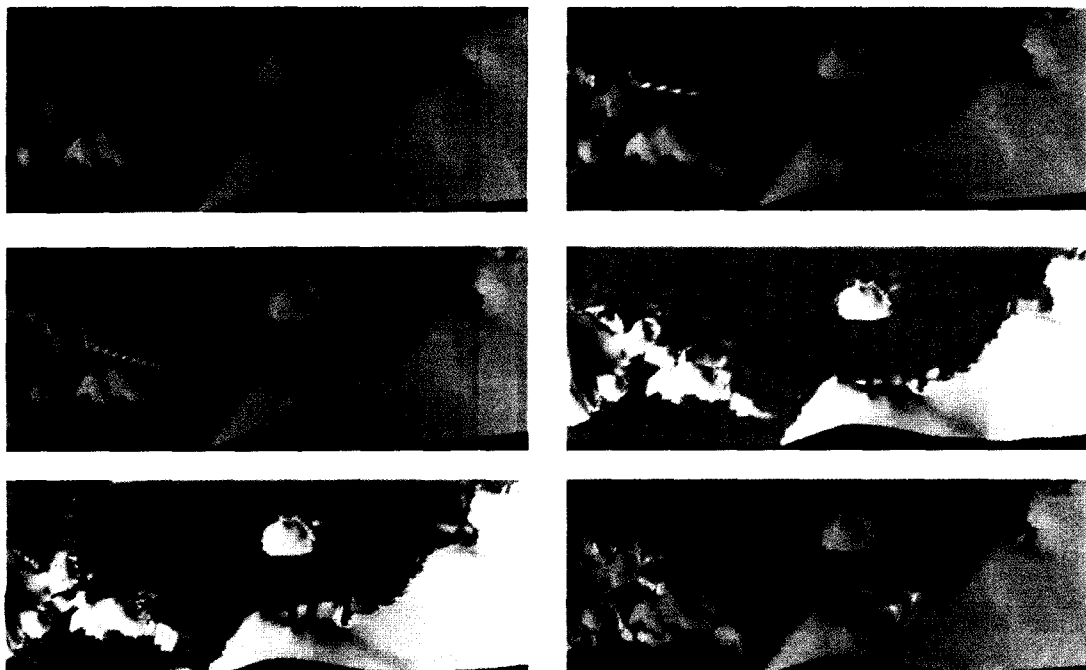


Fig. 10. A series of rendered images of computed elevations from runup and inundation model.

舉動을 解釋하기 위해 格子間隔 50 m의 細格子 體系를 갖는 淺海波理論의 數值模型이 수립되었다. 모형의 북측 開放境界는 앞서 기술한 廣域모형의 計算結果에서 추출한 값을 使用하였다. Fig. 9는 Babi섬 남측 해안과 플로레스섬 북측해안에서의 算定된 最大越波 높이의 分布를 나타내고 있다. 바비섬 남측 해안의 東쪽과 西쪽에서의 計算된 越波높이는 Tsunami Survey Group에 의해 조사된 관측치와 잘 一致하고 있음을 알 수 있다. Fig. 10은 video 동화에 使用한 越波模型에서 算定한 一連의 水位變化의 rendered image를 보여주고 있다. 이러한 computer-graphic aided video animation을 통해서 플로레스섬 북측에서 反射된 쓰나미의 反射波가 바비섬으로 集中되어 에너지의 集中이 일어나고 있음과 그에 따른 波의 振動現狀이 매우 잘 再現되고 있음을 알 수 있는데 원추형의 섬은 그 길이가 쓰나미波의 波長과 유사할 때 파의 屈折에 의해 에너지를 trapping시킨다는 理論을 再現시키고 있다.

4. 結 論

1992년 플로레스 쓰나미의 近域과 廣域에서의 舉動이 수치모형과 computer-graphic aided animation을 통해서 잘 再現되었다. 算定된 모형의 結果와 海岸에서의 관측치와의 이러한 좋은 일치는 採擇한 斷層模型과 Riang Krok과 Hading만 內側에서의 海底沈下를 考慮한 初期水面變位の 타당성을 잘 說明하고 있다. 또한 越波, 氾濫模型에서의 計算結果를 과학 加시화 기법을 통하여 Babi섬에서 발생한 災害의 動的 舉動을 잘 알 수 있었다.

謝 辭

이 研究는 부분적으로 System Engineering Resea-

rch Institute, KIST, Korea의 CRAY University R&D Program에 의해 지원받았다. 또한 成均館大學校와 共同으로 TIME(Tsunami Inundation Modeling Exchange) program을 수행하고 있는 東北大學 災害制御센터의 首藤伸夫教授와 今村文彦博士의 협조에 感謝드린다.

參考文獻

- 崔秉昊, 1993. 인도네시아 플로레스섬의 地震津波被害, 大韓土木學會誌, 제41권 제2호, pp. 12-17.
- Choi, B.H., Lee, H.J., Imamura, F. and Shuto, N., 1993. Computer animation of marine process-tsunami events, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 5, No. 1, pp. 19-24.
- Imamura, F. and 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, 1992, *Proceedings. IUGG/IOC, International Tsunami Symposium*, Wakayama, August 23-27, pp. 647-656.
- Kajiura, K., 1970. Tsunami source, energy and the directivity of wave radiation, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Vol. 48, pp.835-869.
- Manshinha, L. and Smylie, D.E., 1971. The displacement fields of inclined faults, *Bull. of Seisomo. Soc. of America*, Vo. 61, No. 5, pp. 1433-1440.
- Shuto, N., 1991. Numerical simulation of tsunami-its present and near future, *Natural Hazard*, Vol. 4, pp. 171-191.
- Siloer, E. and Reed, D., 1988. Backthrusting in accretionary wedges, *J. Geophy. Res.*, Vol. 93, No. 84, pp. 316-3126.
- Togashi, H., 1981. Study on tsunami run-up and countermeasure, translated doctoral thesis(in English), Tohoku University.
- Tsuji, Y., 1993. The Report of the field survey of the Flores Island Earthquake-Tsunami of December 12, 1992, Report No B-4-4 submitted to Japanese Ministry of Education, Science and Culture(in Japanese), 115p.
- Yeh, H. et al., 1993. The Flores Island Tsunamis, EOS, Transactions, American Geophysical Union, Vol. 74, No. 33, pp. 369, 371-373.