

공백역 지진에 의한 동해안의 지진해일 예측 Simulation of Hypothetical Tsunamis on the Eastern Korean Coast

최병호¹·홍성진¹·이제신¹
 Byung Ho Choi¹, Sung Jin Hong¹, and Jei Shin Lee¹

1. 서론

동해에 연한 해안국의 해안에 지진해일을 유발시킬 수 있는 공백역 가상지진이 최근의 관심사인데, 일본은 특히 이 공백역 가상지진의 추정과 이에 대한 대비연구를 수행해 오고 있다. 일본 연안에 가까운 지진 공백역에서의 가상지진에 의한 한국 동해안에서의 지진해일분포를 예단적으로 간단한 동수력학적 모형과 파선모형의 결과로서 검토하였다.

2. 지진 공백역의 추정 및 초기변위 산정

지진 공백역 추정은 과거의 지진, 오토츠크 판 경계부의 단층대의 지진공백역을 근거로 산정한 6개의 지진 공백역 (Ichikawa, 1994; Tohoku University, 1995) 과 과거 우리나라 동해안에 피해를 주었던 4개의 지진해일을 기본으로 하여 각 지진의 진원지의 위치에서 경도기준 동·서방향으로 0.2°~1°씩 이동하여 총 28개의 가상지진을 추정하여 본 연구에 사용하였으며 (Fig. 1), 공백역 가상지진의 단층 파라미터를 추정하기 위해 아래와 같이 제시한 식 (1)와 (2)을 이용하였다 (Sato, 1995). 우선, 가상 지진의 위치, 면적 S , 주향 θ 은 설정한 공백역에 의해 직접 구하고, 지진 모멘트 M_0 는 식(1)을 이용하여 단층 면적으로부터 추정하였다.

$$\log S = \frac{2}{3} \log M_0 - 14.9 \quad (1)$$

또한, 변위량 u 는 지진 모멘트 M_0 , 단층면의 면적

S , 강성률 μ (dyne/cm)로부터,

$$M_0 = \mu \times u \times L \times W \text{ (dyne} \cdot \text{cm)} \quad (2)$$

와 같이 구할 수 있다.

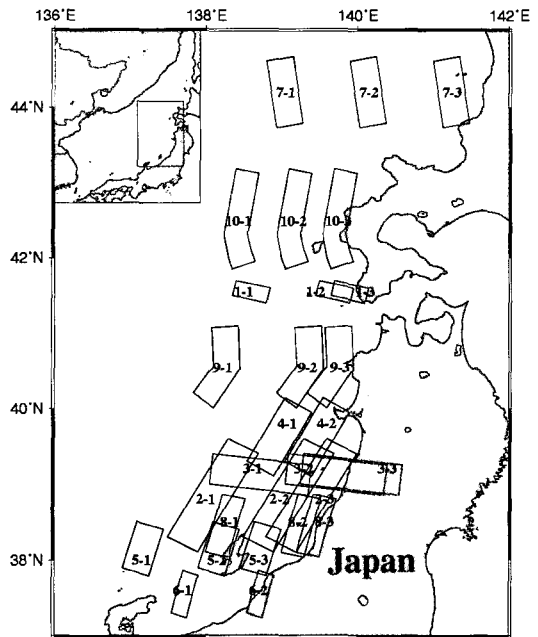


Figure 1. Locations of the tsunamigenic earthquakes used for numerical experiment (28 cases).

이상으로부터 지진 공백역 모형에 대해 추정된 단층 파라미터를 Table 1에 제시하였으며, 설정한 지진 중

¹ 성균관대학교 토목환경공학과 (Department of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Chunchun-Dong 300, Jangan-Ku, Suwon, 440-746, Korea)

Case 2-1, 2-2, 2-3 의 경우는 지진 모멘트가 1.31×10^{28} *dyne·cm* 로서 최대 규모이다. 이 28개의 가상지진 (4개 경우의 실제지진포함)은 동북대 재해제어센터 (Tohoku University, 1995)의 보고서에 제시된 가상지진의 제원으로부터 확장시킨 것이다.

3. 수치모형

3.1 동수력학적 지진해일 시뮬레이션 모형

본 연구에서는 동해에서 발생한 지진해일에 의한 우리나라 동해안에서의 영향을 연구하기 위하여 대상영역을 동해 전역으로 하였으며, Coriolis 효과가 고려되었으며, 좌표는 구면좌표계를 사용하였다. 즉, 지진해일의 거동은 다음과 같은 바닥마찰항을 포함하지 않는 선형 장파방정식에 의해 지배 받는다 (Shuto et al., 1986).

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mu}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \left[\frac{\partial M}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial \theta} (N \cos \theta) \right] &= 0 \\ \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{gh}{R \cos \theta} \frac{\partial \mu}{\partial \lambda} &= fN \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{gh}{R} \frac{\partial \mu}{\partial \theta} &= -fN \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 θ, λ : latitude, longitude
 μ : elevation of the sea surface
 M, N : discharge per unit width in the direction of θ and λ respectively
 g : gravitational acceleration
 h : undisturbed depth of water
 f : coriolis parameter ($f = 2\omega \sin \theta$)

초기해수면형상은 초기해수면형상이 장파의 유속보다 빠른 플레이트의 수직변위 속도에 의한 수직변위의 움직임과 같다고 가정하는 Manshinha and Smylie(1971)에 의해 제시된 방법을 사용하여 결정하였다. 수심자료는 동해 전역의 재편집, 작성된 1분 격자 수심체계 (최 등, 2001) 을 사용하였다. 이 모형은 수직벽 연안경계를 가정하므로 산정된 결과는 상대적인 연안역에서 쓰나미 파고 크기를 추정하는데 이용되는 간단한 모형이며 실제적인 쓰나미파고는 관측자료에 의한 월파비 (Togashi, 1981), Greens theorem, 해석적 월파모형 (Shuto, 1991; Pelinovsky, 1992)에 따른다. 모형 시뮬레이션 결과는 영역 전체 및 연안을 따른 최대파 분포로서 제시하였다. 등치선의 밀도가

높은 분포는 지진해일 에너지집중을 제시하며 또한 분포도로부터 지진해일 에너지전파의 방향성 (directivity)이 제시된다.

3.2 Ray-tracing 모형

파선방정식에 근거한 이 모형에서는 지진해일 에너지의 전파경로와 도달시간을 산정함으로써 동해안에서의 지진해일에 의한 에너지 집중 현상이 발생 가능한 지역을 예측할 수 있으므로 본 연구에서는 전질의 동수력학적 지진해일 모형과 Ray tracing 모형을 이용하여 28개의 가상 지진에 대한 수치실험을 수행하였다. 이에 사용된 지배방정식은 다음과 같다 (Sobel and Von Seggern, 1978; Satake, 1988).

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dT} &= \frac{1}{nR} \cos \zeta \\ \frac{d\varphi}{dT} &= \frac{1}{nR \sin \theta} \sin \zeta \\ \frac{d\zeta}{dT} &= -\frac{\sin \zeta}{n^2 R} \frac{\partial n}{\partial \theta} + \frac{\cos \zeta}{n^2 R \sin \theta} \frac{\partial n}{\partial \varphi} - \frac{1}{nR} \sin \zeta \cot \theta \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, θ 와 φ 는 각각 시간 T 에서의 ray의 위도와 경도이며, n 은 slowness ($=1/\sqrt{gh}$)이다. R 은 지구의 반경이며, ζ 는 남쪽으로부터 시계반대방향으로 측정된 ray의 방향이다. 모형은 Satake(1988)에 의해 구면격자체계에서 적용할 수 있도록 프로그래밍되었으며, Generic Mapping Tools (Wessel and Smith, 1999)으로 표출 시킬 수 있게 설계되었다. 본 연구에서는 과거의 점원 또는 임의적 타원형 진원역 설정을 탈피하여 진원모형 (Manshinha and Smylie, 1971)에 의한 초기수면 변형역에서부터의 파선추적이 가능하게 하였다.

4. 결 과

Fig. 2는 Ray tracing 모형을 이용하여 산출한 각 유형별 전파도를 나타내고 있다. Case 2-1의 경우에서는 단층의 크기와 지진 모멘트가 상대적으로 크고 동해의 중앙부에 위치한 대화퇴의 영향으로 러시아 연안으로 향하던 에너지전파 방향이 우리나라 동해안 전역에 집중하는 것을 보여주고 있으며, 특히 임원, 울진지역에 에너지 집중현상이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었는데 과거의 초기과정의 연구에서는 이 임원향인근의 파집중을 렌즈효과로서 너무 단순화시켜 해석하기도 하였다. 이 Case 2-1의 경우는 역시 동수력학적 지진해일 모형을 이용하여 산정한 동

해 연안에서의 파고와 파고분포 (Fig. 3 and 4)를 통하여 다시 확인 할 수 있으며, 연안을 따른 파고의 경우 최대 2m 이상이 산정되었고, 동해 전역의 파고분포도 (Fig. 4)를 보면 등치선의 밀도가 한국 동해안전역

에서 매우 높은 것을 확인할 수 있었다. Case 4-1의 경우 파선추적도에서 알 수 있듯이 동해안 북부지역으로 향하던 에너지전파 방향이 대화퇴의 영향으로 인하여 한국 동해안 남부 지역과 일본 홋토리

Table 1. Fault parameters for the hypothetical earthquakes.

| Case | Lon(°E) | Lat(°N) | H(km) | θ (°) | δ (°) | λ (°) | L(km) | W(km) | u(cm) | M_0 | μ |
|-----------|---------|---------|-------|--------------|--------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1-1 (1) | 138.2 | 41.7 | 3 | 110 | 45 | 100 | 45 | 25 | 230 | 5.87 | 3.25 |
| 1-2 (2) | 139.2 | 41.7 | 3 | 110 | 45 | 100 | 45 | 25 | 230 | 5.87 | 3.25 |
| 1-3 (3) | 139.3 | 41.7 | 3 | 110 | 45 | 100 | 45 | 25 | 230 | 5.87 | 3.25 |
| 2-1 (4) | 137.5 | 38.3 | 1 | 23 | 35 | 90 | 140 | 50 | 500 | 13.1 | 3.70 |
| 2-2 (5) | 138.5 | 38.3 | 1 | 23 | 35 | 90 | 140 | 50 | 500 | 13.1 | 3.70 |
| 2-3 (6) | 138.7 | 38.3 | 1 | 23 | 35 | 90 | 140 | 50 | 500 | 13.1 | 3.70 |
| 3-1 (7) | 138.2 | 39.4 | 1 | 105 | 45 | 90 | 100 | 50 | 410 | 7.92 | 3.85 |
| 3-2 (8) | 139.2 | 39.4 | 1 | 105 | 45 | 90 | 100 | 50 | 410 | 7.92 | 3.85 |
| 3-3 (9) | 139.3 | 39.4 | 1 | 105 | 45 | 90 | 100 | 50 | 410 | 7.92 | 3.85 |
| 4-1 (10) | 138.4 | 39.3 | 1 | 23 | 45 | 75 | 100 | 50 | 200 | 1.17 | 4.25 |
| 4-2 (11) | 138.9 | 39.3 | 1 | 23 | 45 | 75 | 100 | 50 | 200 | 1.17 | 4.25 |
| 5-1 (12) | 136.9 | 37.9 | 1 | 15 | 20 | 90 | 70 | 40 | 320 | 3.12 | 3.70 |
| 5-2 (13) | 137.9 | 37.9 | 1 | 15 | 20 | 90 | 70 | 40 | 320 | 3.12 | 3.70 |
| 5-3 (14) | 138.4 | 37.9 | 1 | 15 | 20 | 90 | 70 | 40 | 320 | 3.12 | 3.70 |
| 6-1 (15) | 137.8 | 37.8 | 1 | 190 | 55 | 90 | 60 | 20 | 190 | 0.93 | 4.00 |
| 6-2 (16) | 138.8 | 37.8 | 1 | 190 | 55 | 90 | 60 | 20 | 190 | 0.93 | 4.00 |
| 7-1 (17) | 138.53 | 43.73 | 1 | 347 | 40 | 90 | 100 | 35 | 535 | 2.40 | 4.50 |
| 7-2 (18) | 139.53 | 43.73 | 1 | 347 | 40 | 90 | 100 | 35 | 535 | 2.40 | 4.50 |
| 7-3 (19) | 140.53 | 43.73 | 1 | 347 | 40 | 90 | 100 | 35 | 535 | 2.40 | 4.50 |
| 8-1 (20) | 138.42 | 38.74 | 1 | 189 | 56 | 90 | 80 | 30 | 781 | 4.20 | 4.00 |
| 8-2 (21) | 139.42 | 38.74 | 1 | 189 | 56 | 90 | 80 | 30 | 781 | 4.20 | 4.00 |
| 8-3 (22) | 139.60 | 38.74 | 1 | 189 | 56 | 90 | 80 | 30 | 781 | 4.20 | 4.00 |
| 9-1 (23) | 137.84 | 40.21 | 1 | 22 | 40 | 90 | 40 | 30 | 760 | 3.60 | 4.00 |
| | 138.02 | 40.54 | 1 | 355 | 25 | 80 | 60 | 30 | 305 | 2.20 | 4.00 |
| 9-2 (24) | 138.84 | 40.21 | 1 | 22 | 40 | 90 | 40 | 30 | 760 | 3.60 | 4.00 |
| | 139.02 | 40.54 | 1 | 355 | 25 | 80 | 60 | 30 | 305 | 2.20 | 4.00 |
| 9-3 (25) | 139.13 | 40.21 | 1 | 22 | 40 | 90 | 40 | 30 | 760 | 3.60 | 4.00 |
| | 139.32 | 40.54 | 1 | 355 | 25 | 80 | 60 | 30 | 305 | 2.20 | 4.00 |
| 10-1 (26) | 138.30 | 42.10 | 5 | 163 | 60 | 105 | 24.5 | 25 | 1200 | 0.34 | 0.46 |
| | 138.25 | 42.34 | 5 | 175 | 60 | 105 | 30 | 25 | 250 | 0.46 | 2.45 |
| | 138.40 | 43.13 | 10 | 188 | 35 | 80 | 90 | 25 | 571 | 2.39 | 1.86 |
| 10-2 (27) | 139.30 | 42.10 | 5 | 163 | 60 | 105 | 24.5 | 25 | 1200 | 0.34 | 0.46 |
| | 139.25 | 42.34 | 5 | 175 | 60 | 105 | 30 | 25 | 250 | 0.46 | 2.45 |
| | 139.40 | 43.13 | 10 | 188 | 35 | 80 | 90 | 25 | 571 | 2.39 | 1.86 |
| 10-3 (28) | 139.40 | 42.10 | 5 | 163 | 60 | 105 | 24.5 | 25 | 1200 | 0.34 | 0.46 |
| | 139.35 | 42.34 | 5 | 175 | 60 | 105 | 30 | 25 | 250 | 0.46 | 2.45 |
| | 139.50 | 43.13 | 10 | 188 | 35 | 80 | 90 | 25 | 571 | 2.39 | 1.86 |

H: focal depth (km), L: length (km), W: width (km), u: dislocation (cm), θ : strike angle (°), δ : dip angle(°), λ : slip angle (°), M_0 : seismic moment (x 10^{27} dyne·cm), μ : rigidity ratio (x 10^{11} dyne/cm²)

Case 7-2(18) is the Shakotan-oki earthquake in August 2, 1940.

Case 8-2(21) is the Niigata earthquake in June 16, 1964.

Case 9-2(24) is the East Sea central region earthquake in May 26, 1983.

Case 10-2(27) is the Southwest off Hokkaido earthquake in July 12, 1993.

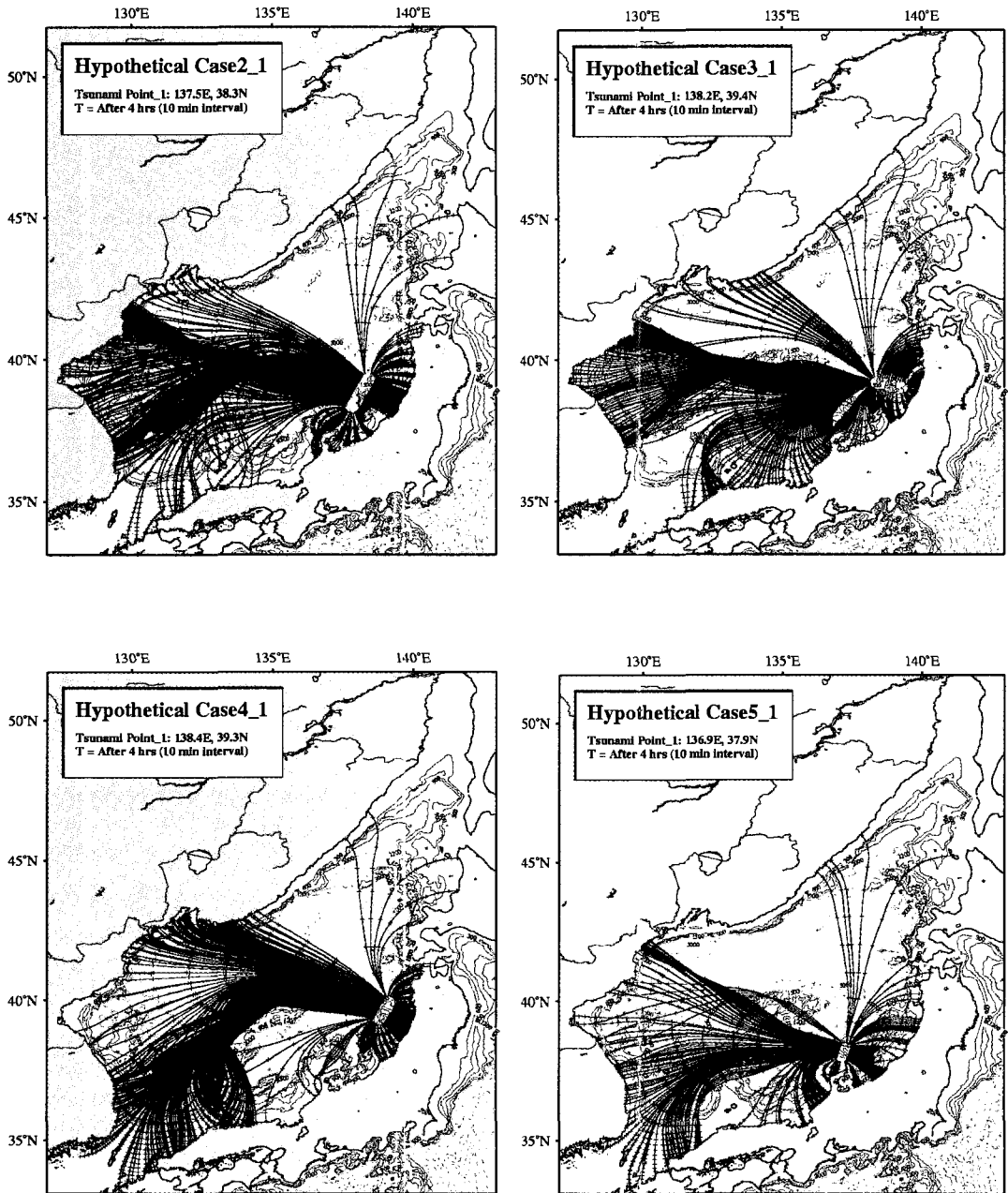


Figure 2(a). Wave ray diagrams for case 2-1, 3-1, 4-1 and 5-1.

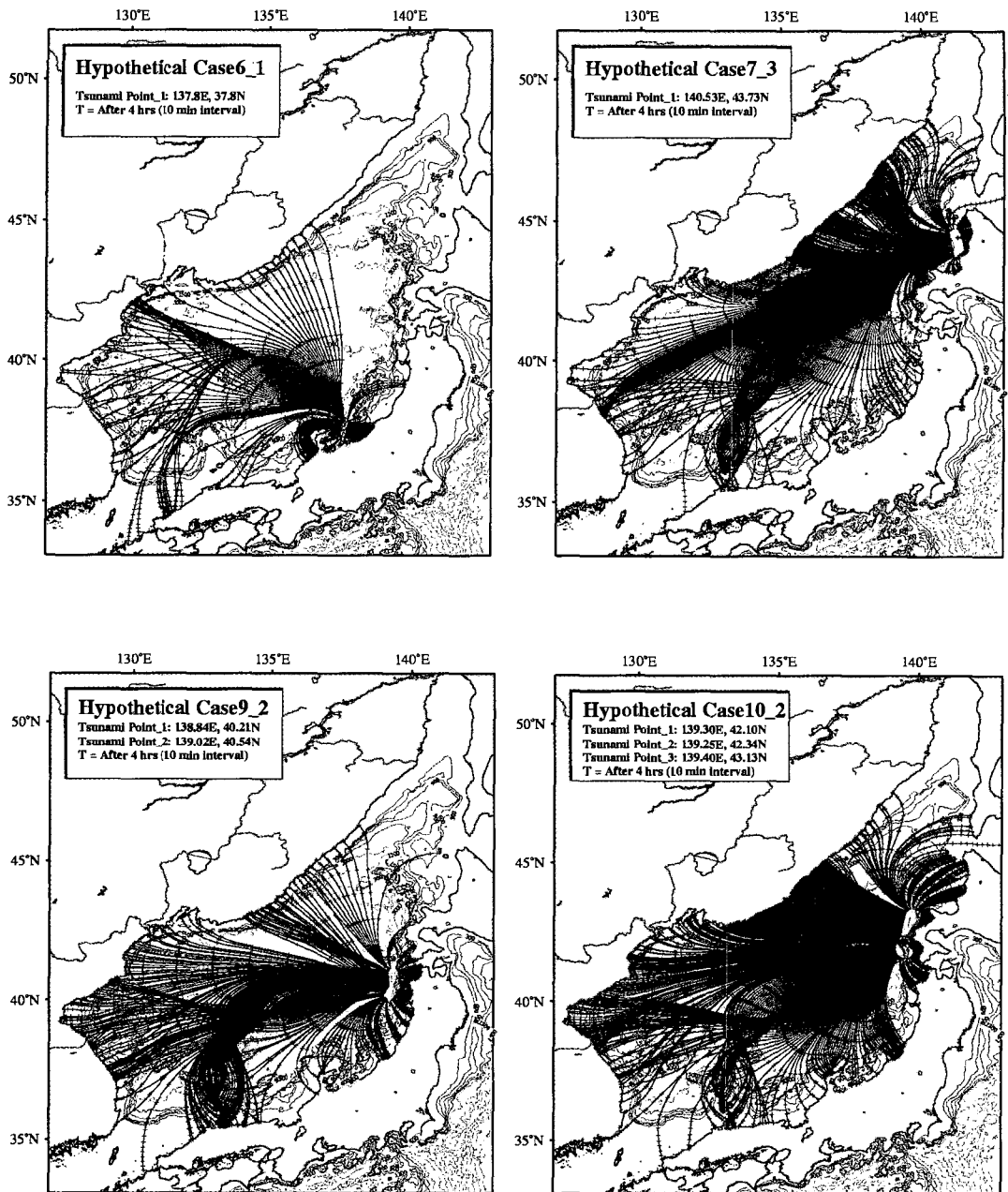


Figure 2(b). Wave ray diagrams for case 6-1, 7-3, 9-2 and 10-2.

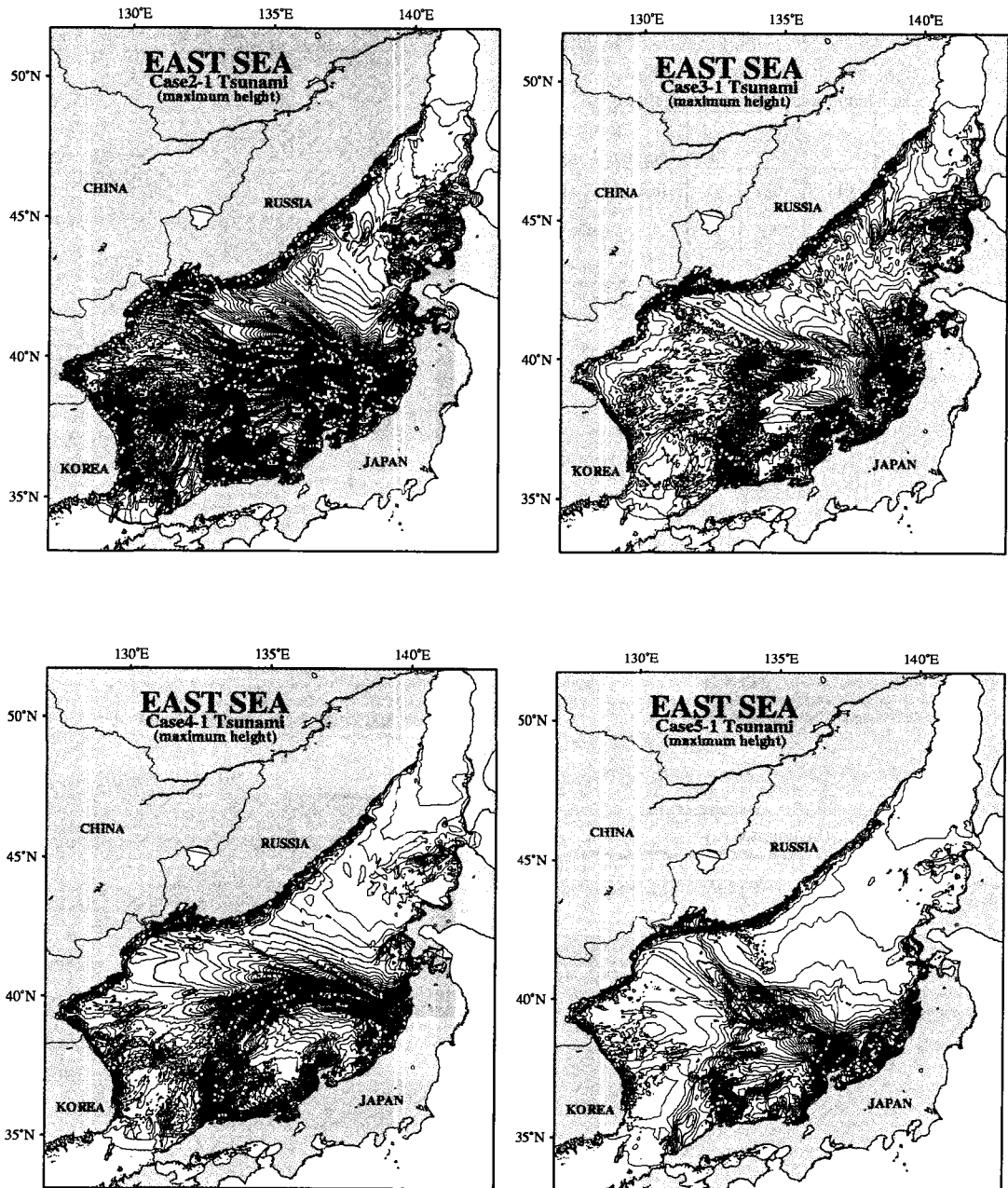


Figure 3(a). Maximum height distributions for case 2-1, 3-1, 4-1 and 5-1.

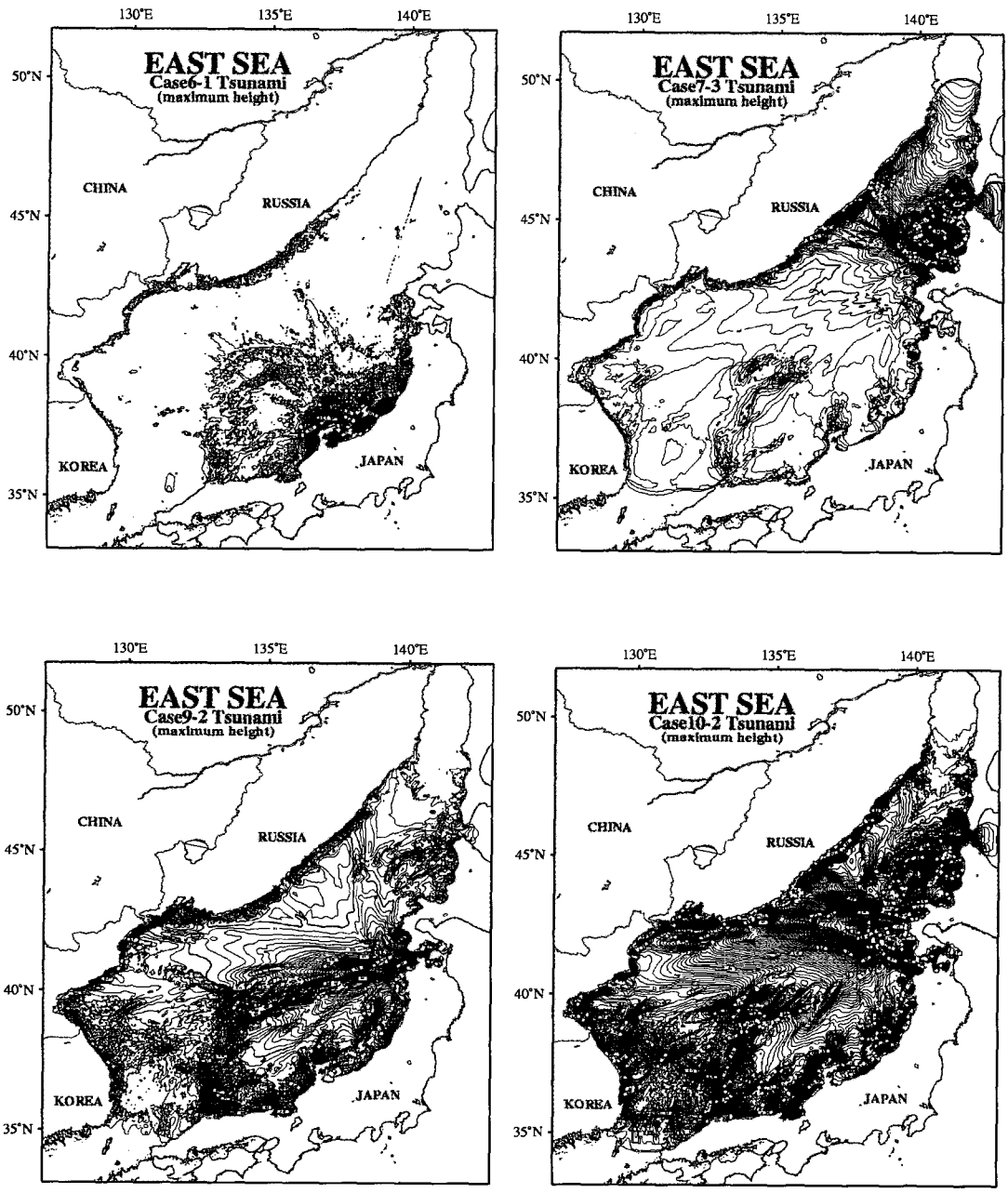


Figure 3(b). Maximum height distributions for case 6-1, 7-3, 9-2 and 10-2.

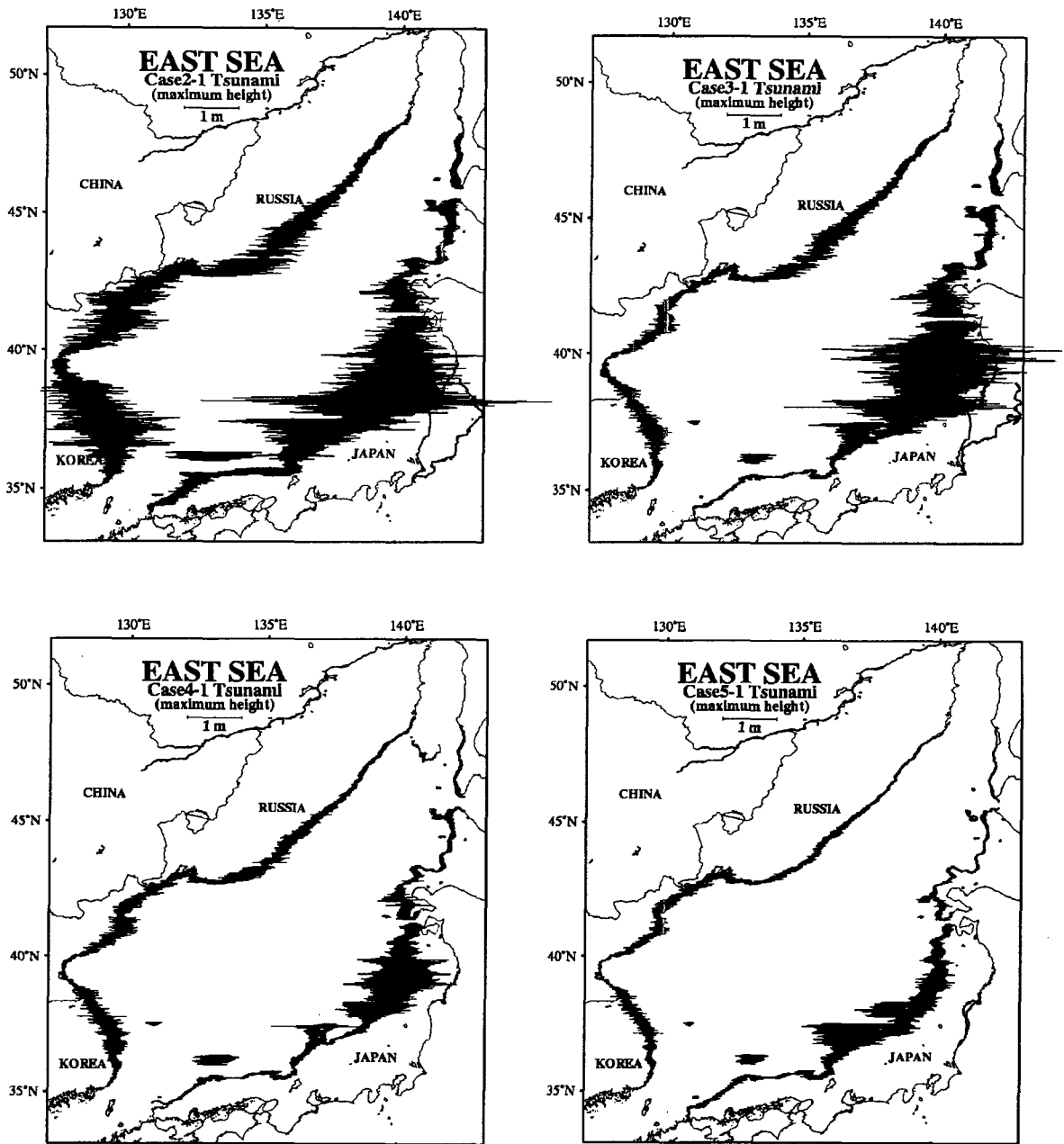


Figure 4(a). Maximum heights along coast for case 2-1, 3-1, 4-1 and 5-1.

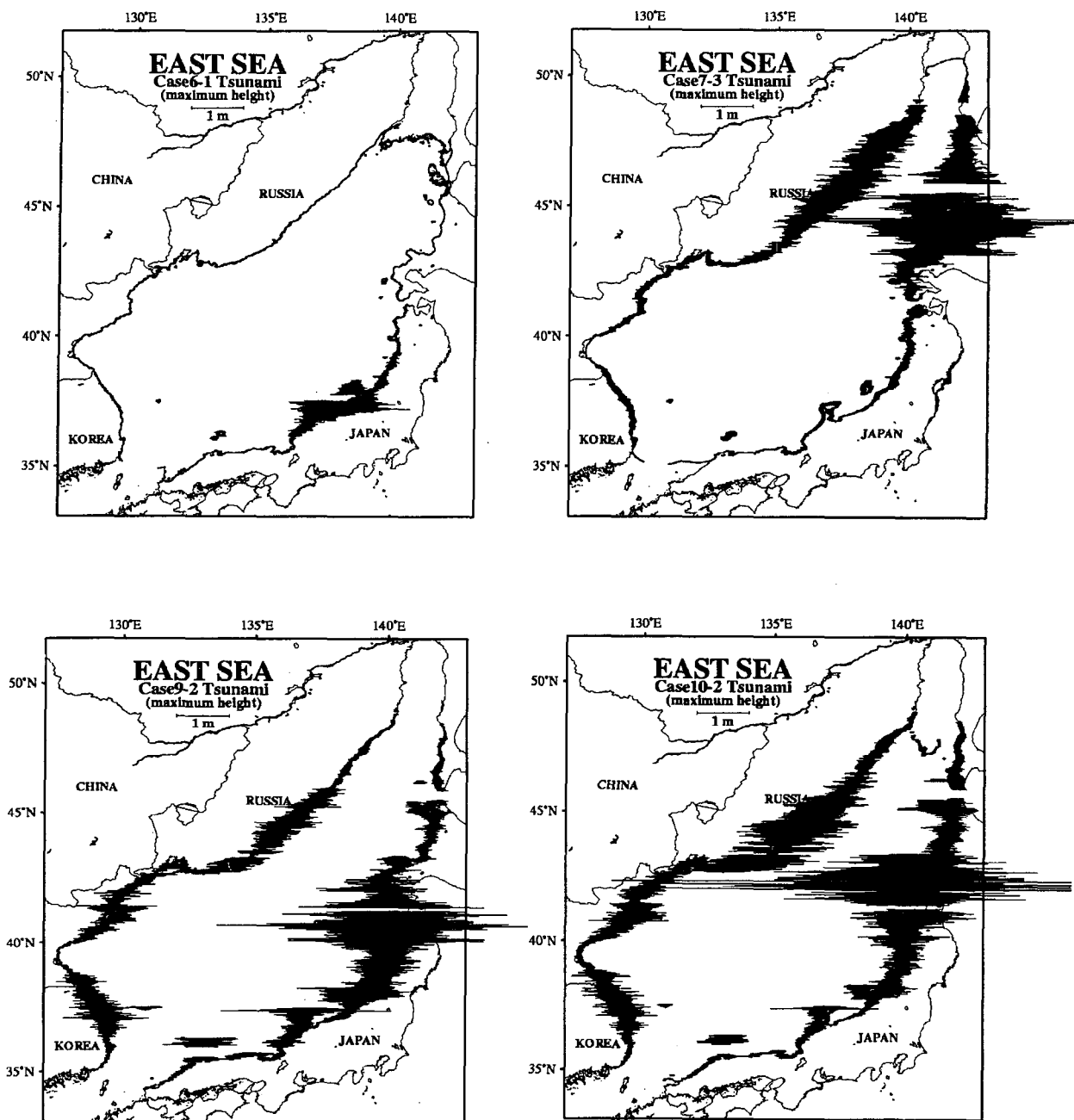


Figure 4(b). Maximum heights along coast for case 6-1, 7-3, 9-2 and 10-2.

Case 10-2는 1993년 일본 북해도 남서 외해에서 발생하여 한국 동해안에 영향을 주었고, 특히 부구지역에서 2.57m가 관측(쓰나미조사단, 1994)되었던 지진해일에 대한 전파도이다. 대부분의 에너지전파는 일본 서해안과 러시아 연안에 집중되는 것을 볼 수 있으나, 한국 동해안으로 향하는 에너지전파 방향이 동해 중앙부에 위치한 대화퇴의 영향으로 변화되어 일본 오키제도지역에 집중되는 것을 확인 할 수 있었다 (Fig. 7 and 8). 동수력학적 모형을 이용한 결과에서는 일본 오키제도지역의 경우 전파도의 결과와 비슷한 에너지집중현상을 보이고 있으나, 한국 동해안은 에너지전파 경향과는 달리 1m이상의 파고와 높은 밀도의 파고분포가 이루고 있음을 확인 할 수 있었다. 그러나, 전체적인 에너지전파 방향과 파고분포가 비슷한 경향을 나타내는 것을 확인 할 수 있었다. Table 2는 가상지진 28개의 경우에 대한 동수력학적 모형과 Ray tracing 모형에 의한 결과를 비교한 것으로 두 모형이 대체적으로 서로 비슷한 결과값을 산출하였다. 또한, Fig. 9는 각각의 가상지진에 대한 Ray tracing 모형의 결과를 이용하여 에너지전파 방향을 단순화한 그림으로써 에너지전파 방향성에 있어서 대화퇴의 영향이 잘 표현되었고, 한국 동해안에 영향을 미치는 가상지진의 위치 및 에너지전파 특성을 확인할 수 있었다.



Figure 7. Observation of tsunami height for the 1993 southwest Hokkaido earthquake (국립방재연구소, 1998).

Tsunami Heights

| Name of Points | Height (meter) |
|--------------------|----------------|
| 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 |

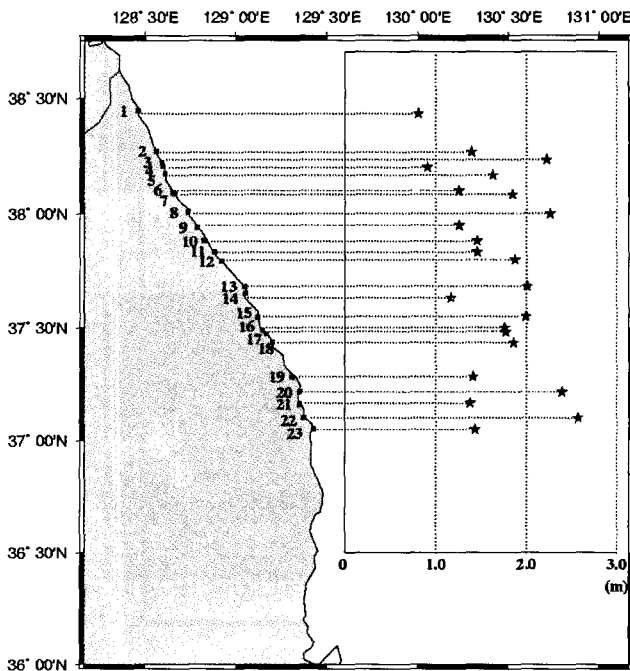


Figure 8. Observed tsunami runup height along east Korean coast for the 1993 tsunami(쓰나미조사단, 1994)

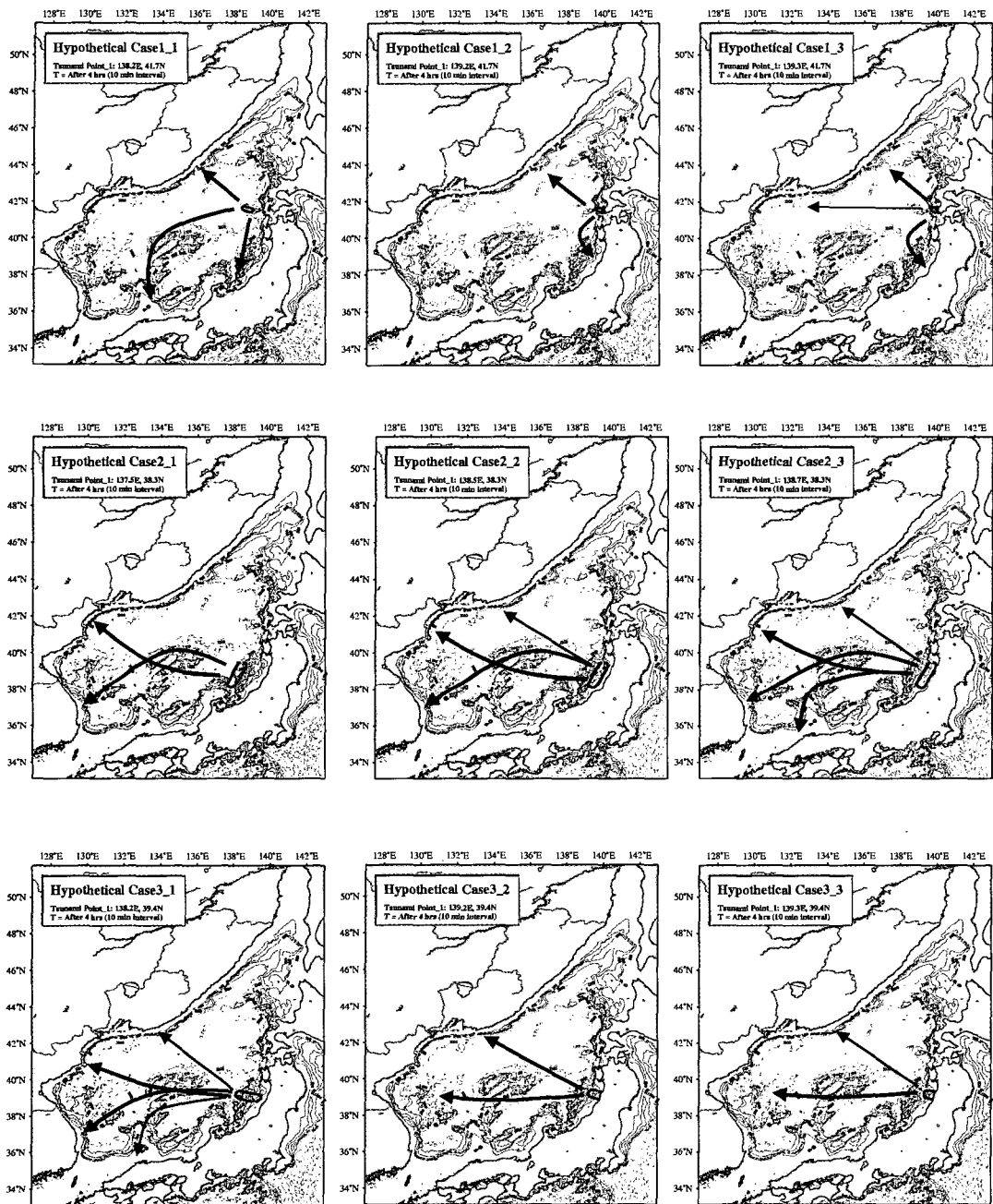


Figure 9. Directivity of tsunami energy for hypothetical tsunamis from wave ray tracing model (28 cases).

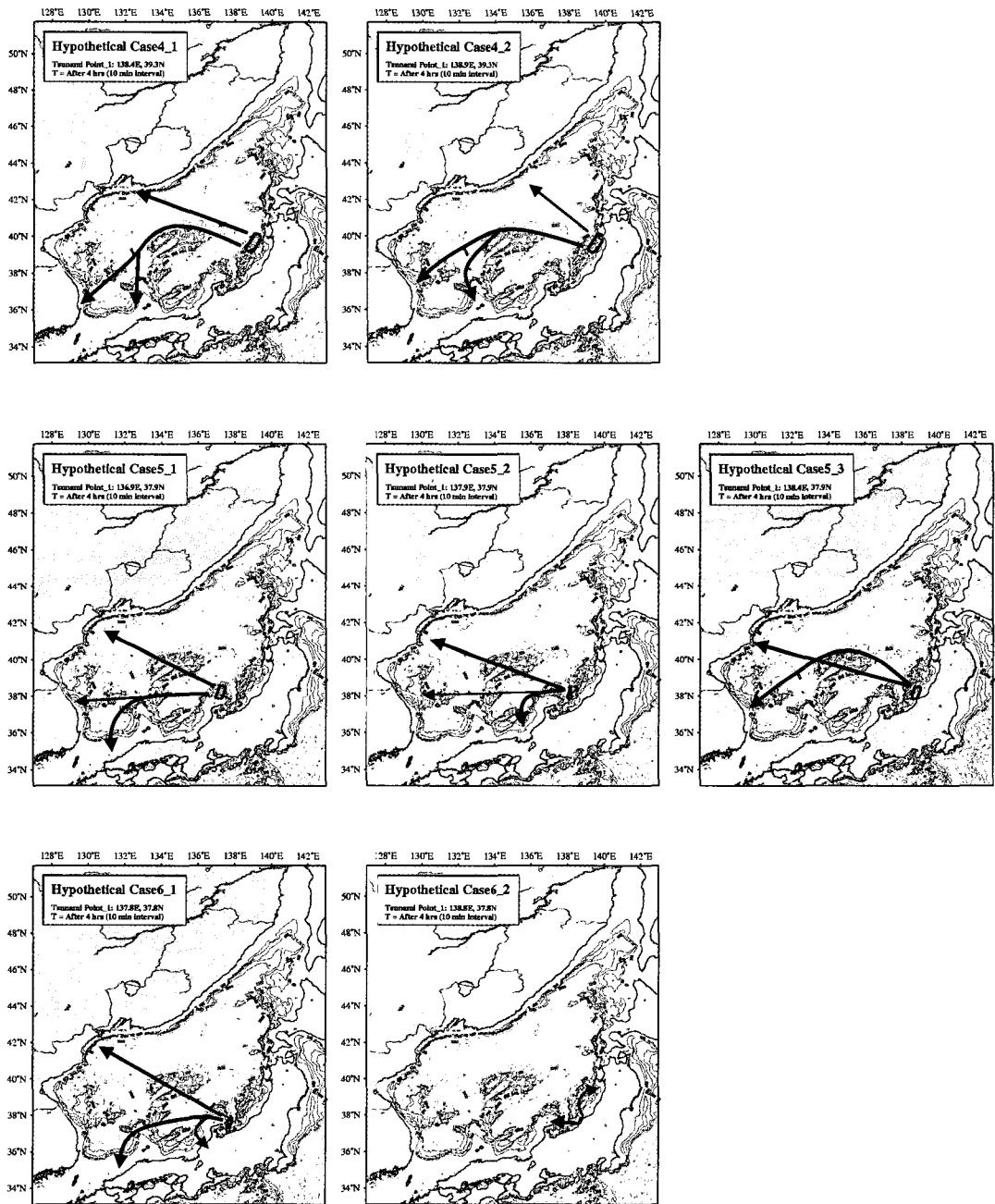


Figure 9. Continued

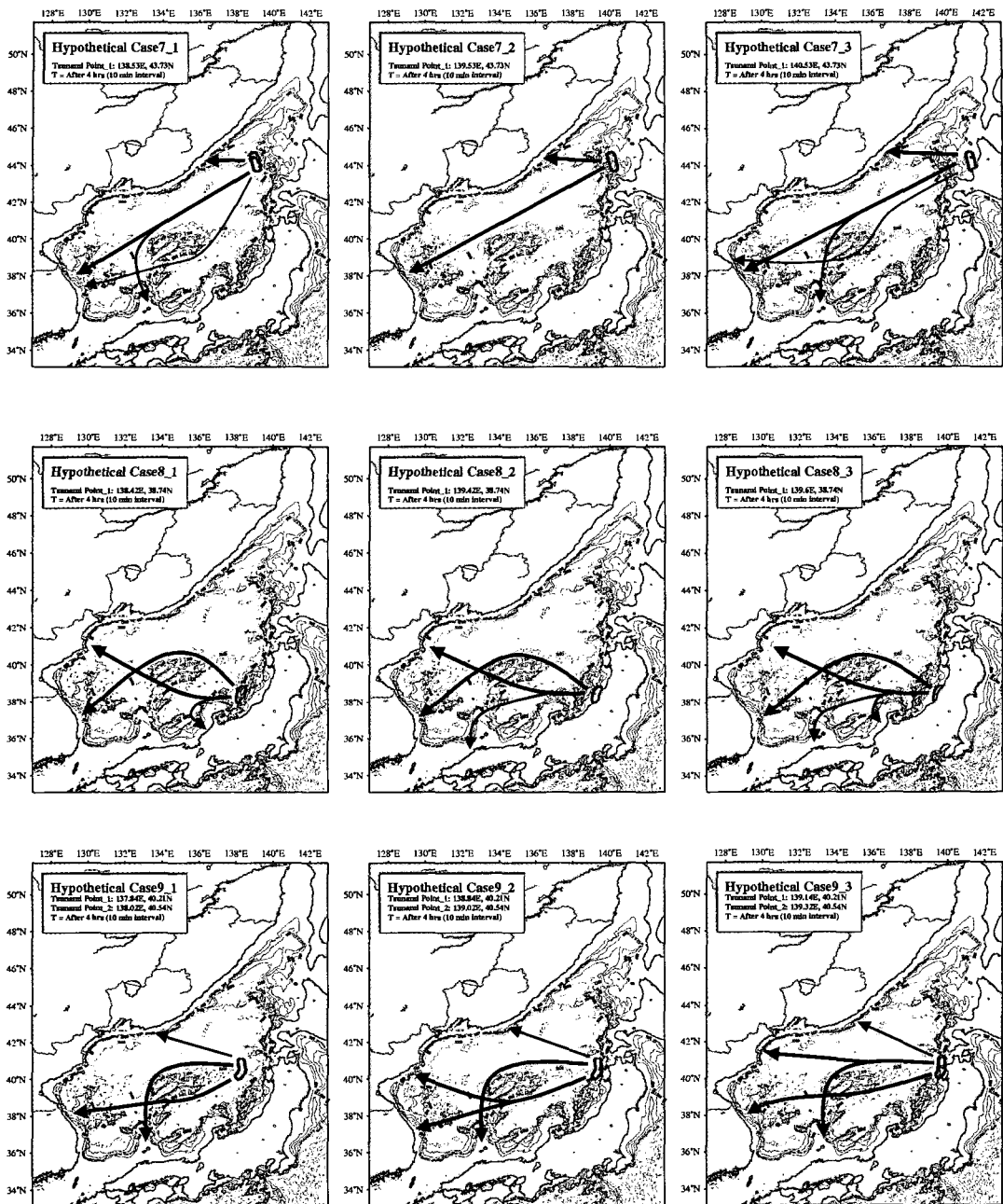


Figure 9. Continued

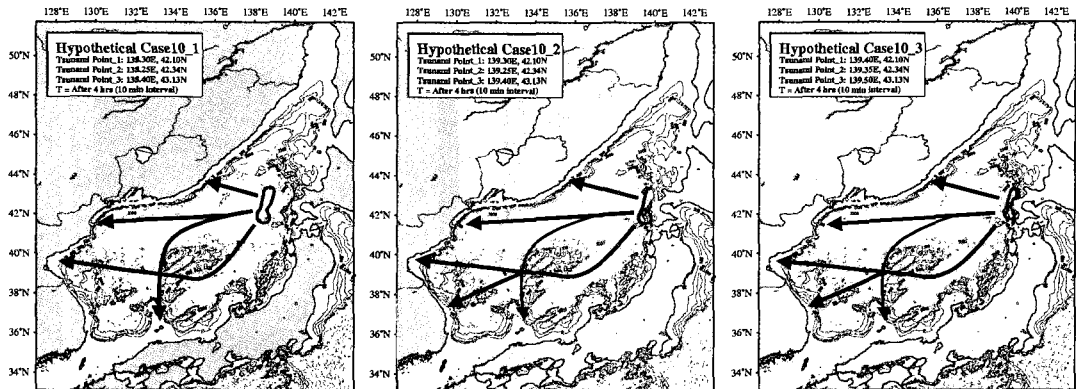


Figure 9. Continued

Table 2. Comparison of results between hydraulic tsunami model and ray tracing model.

| Case | Tsunami Model | Ray-tracing Model | Comparison |
|------|---|--|---|
| 1-1 | 지진단층크기가 상대적으로 작고 동해안과의 거리가 상당하여 미치는 영향이 작아 파고가 작게 측정되었다. | 에너지흐름이 동해안에 도달하지 않았다. | 비슷한 결과값을 갖는다. |
| 1-2 | // | // | // |
| 1-3 | // | // | // |
| 2-1 | 단층의 크기가 상대적으로 크고 동해안과의 거리가 가깝고 대화퇴의 영향으로 동해안에서 큰 파고가 측정 | 에너지 흐름이 대화퇴의 영향에 의해 동해안에 집중되는 것을 확인 | 비슷한 결과값을 가지며, 동해안에서의 에너지 집중현상이 Tsunami model 에서도 잘 표현되고 있다. |
| 2-2 | 단층의 위치가 동해안에서 가까워 연안에서 상당한 크기의 파고가 측정(동해안전역) | 대화퇴의 영향을 크게 받지 않고 에너지흐름이 동해안 전역 해안에 집중 | 동해안 북부에서의 에너지 집중현상이 Tsunami model 에서도 잘 표현되고 있다. |
| 2-3 | 단층의 위치가 일본 연안과 근접하였으나 우리나라 동해안에는 대화퇴의 영향으로 인해 1m 이상의 파고가 계산되었다. | 동해안에 크게 집중되는 에너지흐름이 산출되었다. | 비슷한 결과값을 가지며, 동해안에서의 에너지 집중현상이 Tsunami model 에서도 잘 표현되고 있다. |
| 3-1 | 단층의 크기는 크나 위치적으로 우리나라 동해안에 큰 영향을 주지 않았으나 동해안(속초,강릉)지역에 대체로 큰 파고가 측정 | 동해안으로의 에너지 흐름이 많지는 않았지만 에너지가 동해안(속초,강릉)지역으로 집중되는 것을 확인 | 동해안 강릉지역의 에너지 집중현상이 tsunami model 에서도 잘 표현되는 것을 확인할 수 있다. |
| 3-2 | 동해안에서 큰 파고를 관측할 수 없었다. | 에너지흐름이 동해안 전역에 영향을 주었다. | Ray tracing 모형에서 산출된 동해안에서의 에너지 집중현상이 tsunami model 에서는 산출되지 않아 두 모형이 상이한 결과값을 산출하였다. |
| 3-3 | // | // | // |
| 4-1 | 동해안에서 아주 큰 파고는 관측되지 않았으나 대체로 큰 파고 측정 (약 1m) | 대화퇴의 영향으로 큰 에너지 흐름의 집중이 동해 연안 남부 지역에서 관측 | 비슷한 결과값을 가지며, 동해안에서의 에너지 집중현상이 Tsunami model 에서도 잘 표현되고 있다. |
| 4-2 | 동해안에서 큰 파고가 측정되지 않았다. | 대화퇴의 영향으로 에너지흐름이 변화되어 동해연안에 에너지가 집중되는 것을 확인 | 에너지 집중현상이 동해안에서 보이나 tsunami model 에서의 큰 파고는 계산되지 않았다. |

Table 2. Continued

| Case | Tsunami Model | Ray-tracing Model | Comparison |
|------|---|--|---|
| 5-1 | // | 큰 에너지흐름 또한 동해안에 도달하지 않았다. | 비슷한 결과값을 갖는다. |
| 5-2 | // | 동해안 북부지역(신포)에 에너지집중이 이루어짐 | 동해안 북부지역의 에너지집중현상이 tsunami model에서는 나타나지 않았다. |
| 5-3 | // | 에너지 집중 현상이 이루어지지 않음 | 비슷한 결과값을 갖는다. |
| 6-1 | // | // | // |
| 6-2 | // | // | // |
| 7-1 | 단층의 위치가 홋카이도 서측에 위치하여 러시아 연안에서는 큰 영향을 미쳤으나 우리나라 동해 연안에서는 약 1m의 파고도 도달하였다. | 에너지흐름의 대부분이 러시아 연안과 일본연안으로 집중되었으며 우리나라 동해연안에 도달하는 에너지는 동해연안 중부지역(삼척, 강릉)에 집중되었다. | 러이사연안에서의 에너지집중현상이 tsunami model에서 잘 표현되며, 동해안에서의 에너지집중현상 또한, tsunami model에서도 큰 파고가 측정되어 비슷한 결과값을 갖는다. |
| 7-2 | // | // | // |
| 7-3 | 단층이 일본 연안에 근접하여 일본연안에서만 큰 파고가 측정 | // | Raytracing 모형에서는 동해연안에서 에너지집중이 표현되었으나 tsunami model에서는 일본과 러시아연안에 큰 파고가 측정되었을 뿐 동해연안에서는 큰 파고가 측정되지 않았다. |
| 8-1 | 우리나라 동해안 전역에서 큰 파고가 관측되었다.(최대 2m, 울진, 평해) | 에너지흐름이 일본연안과 동해 연안 북부지역, 중부지역에 집중(울진, 평해). | 동해안전역에서 큰 파고가 측정되었으며, raytracing model에서도 역시 동해 북부, 중부연안에서 에너지집중현상이 표현되었다. |
| 8-2 | 동해연안에서 큰 파고가 관측되지 않았다. | 동해안으로의 에너지집중이 관측(동해, 울진) | 동해안에서 에너지집중현상이 보이나, tsunami model에서는 큰 파고가 측정되지 않았다. |
| 8-3 | 일본연안에서만 큰 파고가 관측될 뿐 우리나라 동해안에서는 큰 파고가 관측되지않았다. | // | // |
| 9-1 | 동해연안 전체에서 큰 파고가 측정되었다. | 대화퇴의 영향으로 에너지흐름의 방향이 바뀌어 일본 연안쪽으로 집중되었으며, 우리나라 연안에서 도 큰 에너지집중현상이 발생하였다. | 동해안과 일본 남측지역의 에너지 집중현상이 tsunami model에서도 잘 표현되었다. |
| 9-2 | 동해 연안 전체에서 큰 파고가 측정되었다(삼척, 동해 집중) | 9-1 과 거의 같은 모습을 보이나 우리나라에 에너지 집중현상이 나타난다. | 동해안과 일본 남측지역의 에너지 집중현상이 tsunami model에서도 잘 표현되었다. |
| 9-3 | 동해안에서 높은 파고가 관측되지 않았다. | 에너지 집중현상이 동해안 중부지역에 관측되었다. | 동해중부연안에서 에너지 집중현상이 측정되었으나, tsunami model에서는 동해에서 큰 파고가 관측되지 않았다. |
| 10-1 | 홋카이도와 러시아연안지역에 큰 파고가 측정되었고 동해연안에서의 파고가 1m 이상으로 관측 | 에너지흐름이 모두 러시아와 일본 연안으로 집중되었으며, 동해연안에는 에너지집중 | 러시아해안과 일본연안에서의 에너지집중현상은 tsunami model에서 잘 표현되었으나, 동해안에서 측정된 큰 파고를 설명하는 에너지 집중현상이 표현되지 않았다. |

Table 2. Continued

| Case | Tsunami Model | Ray-tracing Model | Comparison |
|------|---|---|---|
| 10-2 | 일본 홋카이도 연안과 러시아연안에서 큰 파고가 관측되었으며 우리나라 동해 북부 연안지역에서 큰 파고가 관측되었다. | 에너지흐름이 모두 러시아와 일본 연안으로 집중되었으며, 동해 북부연안의 2곳에서 에너지 집중현상이 일어났다. | 러시아해안과 일본연안에서의 에너지집중현상은 tsunami model 에서 잘 표현되었으나, 동해안에서 측정된 큰 파고를 설명하는 에너지 집중현상이 표현되지 않았다. |
| 10-3 | 홋카이도와 러시아 연안지역에 큰 파고가 측정되었고 동해연안에서의 파고역시 1m 이상으로 관측 | 에너지흐름이 모두 러시아와 일본 연안으로 집중되었으며, 대화퇴의 영향으로 동해북부연안에서 에너지 집중 현상이 보인다. | 러시아해안과 일본연안에서의 에너지집중현상은 tsunami model 에서 잘 표현되었으나, 동해안에서 측정된 큰 파고를 설명하는 에너지 집중현상이 표현되지 않았다. |

5. 결 론

동해의 과거지진해일 및 지진 공백역의 가상지진에 의한 예단적인 지진해일 시뮬레이션을 수행하였다. 과거지진해일에 대한 시뮬레이션을 통하여 얻은 결과를 통하여 두 모형의 신뢰성을 확인하였으며, 예단적인 지진해일 시뮬레이션을 통하여 한국 동해안에 영향을 미칠 수 있는 가상지진을 추정하였다, 그 결과 Case 2-1, 2-2, 2-3, 3-1, 4-1의 위치에서 일어난 가상지진 즉, 위도 38~39°, 경도 137~139° 사이에 진원지가 위치한 경우에 한국 동해안에 가장 큰 영향을 미치는 것을 추정할 수 있었다. 가상지진의 에너지전파 특성에 있어서 대화퇴의 영향을 확인할 수 있었다. 대부분의 경우에서는 대화퇴의 영향으로 에너지전파 방향이 한국 동해안으로 집중되는 것을 확인할 수 있었으나, Case 1-1 and 9-1 과 같은 경우에는 동해안으로 향하던 에너지전파 방향이 대화퇴의 영향으로 일본 남부 지역에 집중되는 것을 확인하였으며, 이를 통하여 에너지전파가 대화퇴의 영향으로 동해안에 집중되는 것이 아니라, 지진해일의 발생위치에 따라 달라 질 수 있음을 확인할 수 있었다. 마지막으로 동수력학적 지진해일 모형과 Ray tracing 모형의 비교(Table 2)를 통하여 모형의 신뢰성을 확인함으로써 가상지진의 동해안에서의 영향을 위해서는 Ray traing 모형만으로도 에너지집중지역을 예측할 수 있음을 확인할 수 있었으나, 동해안에서의 파고분포를 확인할 수 없는 단점이 있으며, 이는 동수력학적 지진해일 모형과의 상호보완으로써 개선할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 2001년 기상청의 “지진예지 및 지진해일 예측기술개발” 사업의 연구비의 지원하에 수행되었

다. 동수역학적 모형 및 파선방정식 모형은 동북대 재해제어센터의 Fumihiko Imamura 교수 및 일본지질연구소의 Kenji Satake 교수로부터 제공받은 바 이에 사의를 표한다.

참고문헌

국립방재연구소, 1998. 동해안에서의 쓰나미 위험도 평가, 국립방재연구소 보고서, 215pp.
 국립방재연구소, 1999. 동해안에서의 쓰나미 위험도 평가, 국립방재연구소 보고서, 192pp.
 쓰나미 조사단, 1994. 일본 북해도 남서부 지진에 의한 한국동해안 지진조사, 한국해양·해양공학회지, 6(1), 117-125.
 최병호, 홍성진, 우승범, 에펴 페리늬스키, 2000. 동적결합 쓰나미모형에 의한 동해 쓰나미 산정, 한국해양·해양공학논문집, 11, 47-54.
 최병호, 김경옥, 엄현민, 2001. 한국근해의 디지털 수심·표고 데이터베이스, 한국해양·해양공학회지 (제출중)
 Ichikawa, Y., 1994. Remaining earthquake vacant region, *Monthly Ocean*, 7, 102-104.
 Mansinha, L. and Smylie, D.E., 1971. The displacement fields of inclined faults, *Bull. of Amer. Seism. Soc.*, 61(5), 1433-1440.
 Pelinovsky, E., 1992. Criteria of sea wave breaking in basins of complex topography. *Korean Soc. Coastal and Ocean Engineers*, 4(2), 59-62.
 Satake, K., 1988. Effects of Bathymetry on Tsunami Propagation: Application of Ray Tracing to Tsunamis, *Pure appl. geophys.*, 26, 27-36.
 Sobel, P. A. and von Seggern, D. H., 1978. Application of surface-wave ray tracing, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 68, 1359-1380.
 Shuto, N., et al., 1986. A study of numerical technique on the tsunami propagation and run-up, *Sci. Tsunami Hazards*, 4, 111-124.
 Shuto, N., 1991. Numerical simulation of tsunami:

- Its present and near future, *Natural Hazards*, 4, 171-191.
- Togashi, H., 1981. Study on tsunami run-up and countermeasure, translated Doctoral thesis (in English), Tohoku University.
- Tohoku University, 1995. *Observation of continuous crustal change in Tohoku area*, Report of Disaster Control Research Center
- Wessel, P. and Smith. Walter H. F., 1999. *The Generic Mapping Tools Verion 3.2, Technical Reference and Cookbook*.
- (<http://www.soest.hawaii.edu/gmt>)