

# 공백역 지진에 의한 동해에 연한 해안에서의 지진해일 위험도 산정

## Estimation of Tsunami Risk Zoning on the Coasts Adjacent to the East Sea from Hypothetical Earthquakes

최 병 호\*      에핼 펠리놉스키\*\*      이 제 신\*\*\*      우 승 범\*\*\*\*  
Choi, Byung Ho      Pelinovsky, Efim      Lee, Jei Shin      Woo, Seung Buhm

### 국문요약

전회의 논문(Choi et al<sup>(1)</sup>)에 이어 본 논문에서는 동해에서의 가상해저지진에 의한 지진해일의 예단적 특성을 동해에 연한 전해안에 걸쳐 논하였는데 재해를 유발시킬 수 있는 지진해일의 근원역은 공백역이론으로부터 선택되었다. 선형장파이론에 근거한 수치모형을 채택하여 28개의 선정된 자세한 단층 파라미터를 갖는 가상지진(4 경우 실제지진 포함)과 단순화시킨 형태의 초기 수면형에 의한 76개 사상의 지진해일 시뮬레이션을 수행하여 전파 및 해안에서의 지진해일의 파고를 산정하는 데 적용되었다. 결과로서 동해에 연한 전해안 전역에 전파되는 지진해일의 특성과 해안역에서의 지진해일의 파고 분포가 산정되어 지진해일 재해위험도가 상대적으로 낮은 지리적 위치를 구획화하여 제시함으로써 해안재해경감대책의 도구로서 활용될 수 있게 하였다.

주요어 : 지진해일, 장파이론, 공백역 지진, 재해위험도 구획화

### ABSTRACT

Prognostic characteristics of hypothetical tsunamis in the East Sea are further discussed based on numerical simulations using linear long wave theory than the last paper(Choi et al<sup>(1)</sup>). As for choice of source zones, we used 28 cases based on fault parameters of hypothetical earthquakes and 76 cases based on simple initial surface shapes of tsunamigenic earthquakes selected by the seismic gap theory. As a result, the wave heights along the whole coastline adjacent to the East Sea of tsunamis due to these hypothetical earthquake are presented. Analyses also lead us to conclude that the selection of geographical zones with low risk of tsunamis can be used as a tool for coastal disaster mitigation planning.

Key words : tsunami, long wave theory, hypothetical earthquake, risk zoning

### 1. 서 론

역사적으로 볼 때 동해(Fig. 1)에서의 지진해일은 더 이상 드문 자연현상이 아니다. 동해안에서 지진해일의 발생 진원들은 동해의 동측, 일본의 서안을 따라 위치한 유라시아판과 북미 대륙판사이에 위치해 있으며, 이 진원들에 의한 지진해일은 우리나라의 동해 연안보다는 일본과 러시아의 연안에 더욱 심각한 피해를 입힌다. 20세기에 들어서 동해에서는 많은 지진해일들이 있었는데, 1939년 3월 1일, 1940년 8월 2일(샤코탄-오키 지진), 1983년 5월 26일(동해 중부 지진)과 1993년 7월 12일(북해도 남서부 지진)의 지진해일이었다. 그러나 1983년 5월 26일의 해안재해가 있기 전까지는 지진에 의해 야기되는 지진해일은 한반도 동해안을 위협하는 심각한 자연재난으로써 받아들여지지 않았다. 따라서 지진해일의 내습에 대처하기 위한 설계기준이 항만, 해안 구조물 및 해양시설물에 대해 고려되지 않았다. 또한, 1983년의 지진해일 사상은 일본에서는 지진발생 후 수분내에 경보방송이 전파되었음에도 불구하고 우리나라에서는 공식적인 경보가 전혀 발령되지 않았다.

일본의 경우 일본기상청은 1993년 북해도 남서부 지진해일을 교훈삼아 지진해일 조기검지망과 긴급정보위성통보시스템을 정비하였으며, 3분 정도에 지진해일을 경보할 수 있는 지진해일(쓰나미) 예경보 체계를 마련하였다. 이 체계에서 정량적 지진해일 예경보를 위해서 DB구동형 수치모형이 수립되었는데, 진앙과 단층파라미터 값을 이산적으로 변화시켜가며 각지의 지진해일고를 구하면 이 벡터장의 형태를 이산적으로 구할 수 있게 되는데, 변화를 준 진앙과 단층파라미터에 대한 지진해일의 높이를 구할 수 있는데, 모든 단층파라미터를 변화시켜가며 일본근해역을 망라한 방대한 DB를 작성하여, 66구획으로 세분화된 각각의 예보구역에 대해 지진해일고와 내습시각을 예보하는 개선된 체계로서 작성하였다.

현재 국립방재연구소와 우리나라 기상청은 공동으로 우리나라해안역이 더 상세한 격자로 구성된 수치모형의 시뮬레이션을 통한 DB구동형 수치모형에 의한 예보체계를 구성 중에 있는데, 방대한 시뮬레이션시간 때문에 향후 2-3년 후에나 체계수립이 가능한 실정이다. 본 논문에서는 이러한 직접 예보체계의 수립연구와는 다른 접근으로서 공백역 지진에 의한 동해에 연해 있는 전해안에서의 지진해일 위험도를 낮은 위험도와 중간 및 높은 위험도 지역으로 구획화시키는 연구 결과를 다루었다. 또한, 전회의 논문에서는 최대해일고의 공간분포, 가능범람고 산정등의 분석을 한반도 동해안에 국한시켰으나, 본 논문에서는 동해에 연한 전지역(연해주,

\* 정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과, 정교수(대표저자 : bhchoi@yurim.skku.ac.kr)

\*\* 러시아과학원 응용물리연구소, 교수

\*\*\* 성균관대학교 토목환경공학과, 석사과정

\*\*\*\* 코넬대학교 토목환경공학과, 박사후연구원

본 논문에 대한 토의를 2002년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2002. 6. 16 / 심사종료일 : 2002. 8. 7)

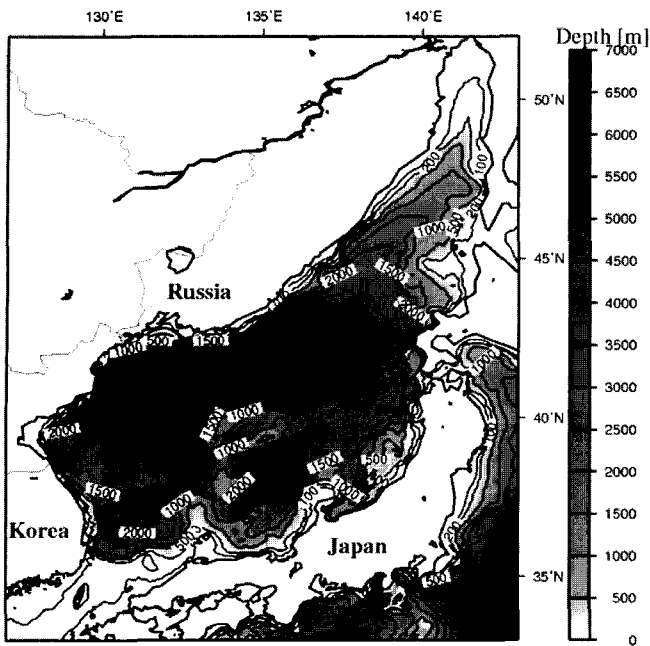
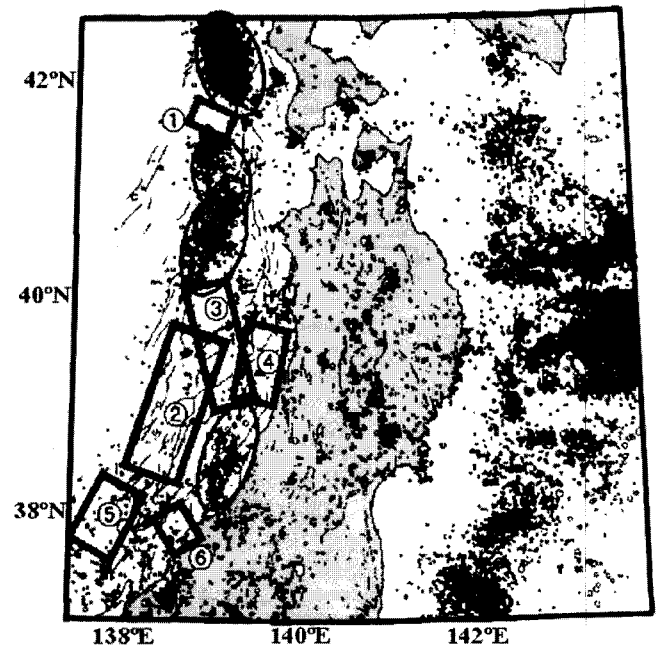


Fig. 1 Bathymetry of the East Sea

Fig. 2 Seismic gap (Ichikawa, 1994)<sup>(6)</sup>

사할린섬, 홋카이도, 일본 본주 서해안)으로 분석영역을 확대시켰으며, 최종의 결과로서 동해의 지진해일 위험 구획도를 제시하였다. 일본 서안의 지진공백역에서 발생하여 한반도 동해안에 내습하는 지진해일의 내습특성이 전파과정에 의해 초기파형의 특성과는 무관하다는 가정하에 지진공백역에 꼬갈형태의 초기파형을 발생시켜(76 경우) 이의 결과도 병행하여 제시하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 제2절에서는 본 연구에서 사용된 가상지진에 대하여 설명하였다. 지진파라미터의 추정식이 제시되어 있으며, 단순화시킨 형태의 지진해일에 대한 설명이 제시되어 있다. 선형장과방정식이 적용된 수학적 모델이 사용되었으며 제3절에 설명되어 있다. 계산결과의 자세한 분석은 제4절과 제5절에 요약되어 있다. 수치모형 시뮬레이션에 기초하여 지진해일 위험도가 낮은 지역들의 판별은 산정결과를 총합시킨 통합 지진해일 목록의 데이터에서 최대파고의 평가를 수행하였는데, 통계적 분석에 의하여 제시되었다. 산정된 최대 지진해일 파고들은 관측데이터와 크게 상이하지 않았다. 궁극적인 목적은 동해에서 발생한 지진에 의한 지진해일재해경감의 방법을 제시하는 데 있어, 실시간적인 예경보체계를 더불어 본 연구에서는 지진해일 위험도 구획화를 위한 기초골격을 제시하였다.

## 2. 지진 공백역의 추정

지진해일과 관련된 지진공백역은 기존의 연구결과를 통해 추정되었다. 과거에 발생한 지진의 진원분포 위에 대규모의 기왕 지진의 여진역(Sato<sup>(2)</sup>)을 표시하면, 플레이트 경계상에 늘어서 있는 여진역의 사이에, 지진활동이 적은 공백역이 존재하는 것을 알 수 있다. 이것을 지진 제1 공백역이라 하며, 장래 지진해일을 동반할 대규모 지진의

발생 가능성이 지적되고 있는 지역이다. 羽鳥<sup>(3)</sup>는 과거의 지진·지진해일의 역사자료를 근거로, 플레이트 사이의 기왕의 지진해일 파원역을 추정하였다. 플레이트 경계상의 이들 파원역에 둘러싸인 영역이 지진 제1공백역이 된다.

한편, 일정기간마다의 소지진 활동에 주목하여, 그 분포를 보면 지진공백역이 그 크기를 확대 또는 축소시켜, 변화하고 있는 지역이 있다. 이를 지진 제2공백역이라 한다. 이 때, 그 크기가 확대되고 있는 경향이 있을 경우에는 장래에 지진 발생의 가능성이 지적되는 지역이 된다.<sup>(4)(5)</sup> 지진공백역은 다수의 연구자에 의해 설정되어 기 제시된 바 있으며, 본 연구에서 채택한 공백역은 Ichikawa<sup>(6)</sup>가 지적한 공백역을 참고로 설정하였다(Fig. 2).

공백역의 추정 외에, 공백역 가상지진의 단층 파라미터를 추정하기 위해 아래와 같이 제시한 식 (1)과 (2)을 이용하였다.<sup>(2)</sup> 우선, 가상 지진의 위치, 단층 면적  $S$ , 주향  $\theta$ 는 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  $S$ (단층길이  $L(m)$ , 단층폭  $W(m)$ ), 강성률  $\mu$ (dyne/cm<sup>2</sup>)로부터,

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

와 같이 구할 수 있다(Fig. 3).

우선, 과거의 지진, 오토츠크 판 경계부의 단층대의 지진공백역(Ichikawa<sup>(6)</sup>, Tohoku University<sup>(7)</sup>)을 근거로 산정한 6개의 지진공백역(Lee<sup>(8)</sup>)과 과거 우리나라 동해안에 피해를 주었던 4개의 지진해일(1940년 8월 20일, 1964년 6월 16일,

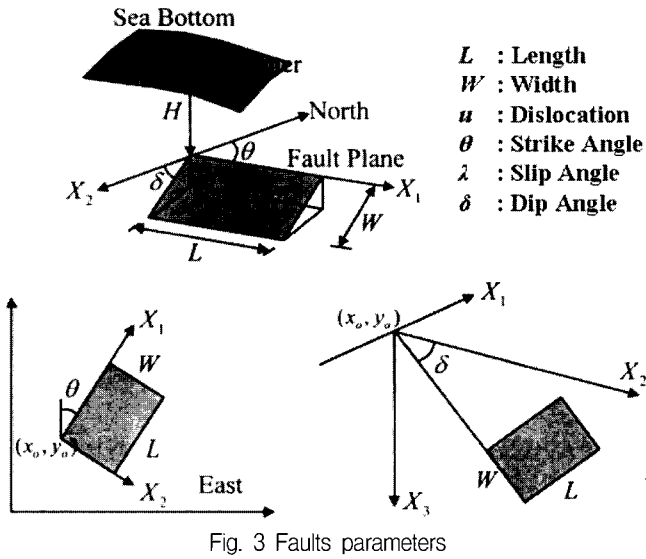


Fig. 3 Faults parameters

1983년 5월 26일, 1993년 7월 12일)을 기본으로 하여 10개의 가상지진을 가정하고, 각 지진의 진원지의 위치에서 경도기준 동·서방향으로  $0.2^{\circ} \sim 1^{\circ}$  씩 이동하여 총 28개의 가상지진을 추정하여 본 연구에 사용하였는데 전회의 추정(Choi et al.<sup>(9)</sup>)에 약간의 위치수정을 하였다(Fig. 4). 이러한 가상지진은 다소 임의적인 것으로 진앙의 위치변경과 초기 수면형의 변경으로 많은 수의 경우를 도출시킬 수 있으나, 본 연구에서는 일차적으로 28경우로 제한하였다.

이상으로부터 지진 공백역(Fig. 4 참조)에 대해 추정된 단층 파라미터는 전회의 논문(Choi et al.<sup>(1)</sup>)에 제시된 바 있으며, 설정한 지진 중 Case 2-1, 2-2, 2-3의 경우는 지진 모멘트가

1.31dyne·cm로서 최대 규모이다. 이 28개의 가상지진(4경우의 실제지진포함)은 동북대 재해제어센터(Tohoku University<sup>(7)</sup>)의 보고서에 제시된 가상지진의 제원으로로부터 확장시킨 것이다. 후술될 Manshina and Smylie<sup>(10)</sup>의 방법에 의한 가상지진의 초기파형을 Fig. 5에서 제시하였다.

단순화시킨 형태의 초기 수면형은 지진공백역에 대하여 공간적으로 30분 간격으로 76개 사상을 가정하였으며, 이 중 4개의 사상은 우리나라 동해안에 피해를 주었던 4개의 지진해일 사상과 동일한 위치이다(Fig. 4). 초기파형의 최대, 최저 수위는 자세한 단층파라미터에 기초한 28개의 가상지진의 크기로부터 추정하였다. 즉, 28개 경우에서 최대수위는 4.69m, 최저수위는 -1.13m로서 이 범위를 초과하지 않는 범위에서 최대수위 4m, 최저 -1m의 원추형 초기파형을 가정하였다. 초기파형의 최대 직경은 36km(약 20분)로서 취하였다(Fig. 6).

### 3. 수치모형

본 연구에서는 동해에서 발생한 지진해일에 의한 우리나라 동해안에서의 영향을 연구하기 위하여 대상영역을 동해 전역(동경  $127^{\circ}00'$ 부터  $142^{\circ}59'$ , 북위  $33^{\circ}6'$ 부터  $51^{\circ}44'$ , Fig. 1)으로 하였으며, 코리올리 효과가 고려되었으며, 좌표는 구면좌표계를 사용하였다. 격자 간격은 1분으로 하였으며, 총 격자 수는 1,074,240( $960 \times 1,119$ )개 이다. 즉, 지진해일의 거동은 다음과 같은 바닥마찰항을 포함하지 않는 선형 장파방정식에 의해 지배 받는다(Shuto et al.<sup>(11)</sup>).

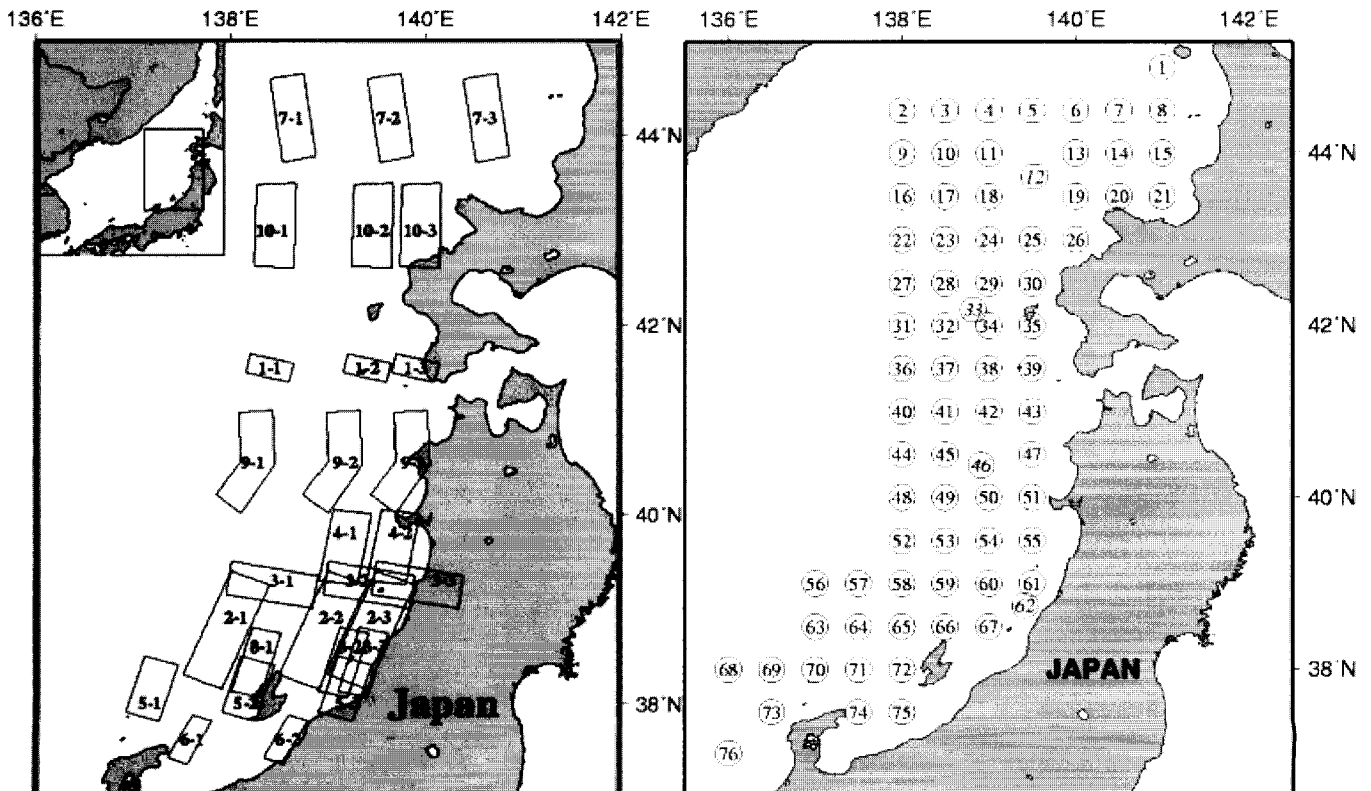
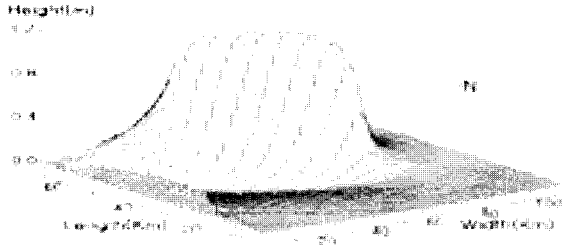
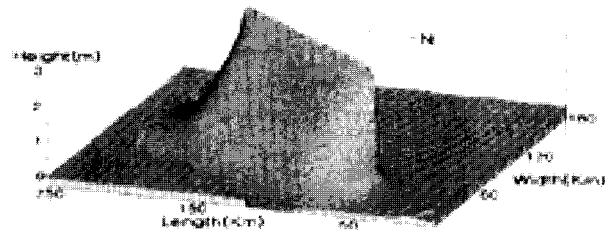


Fig. 4 The location of hypothetical tsunamigenic earthquakes with fault models of detailed parameters(left) and simple shape sources(right)

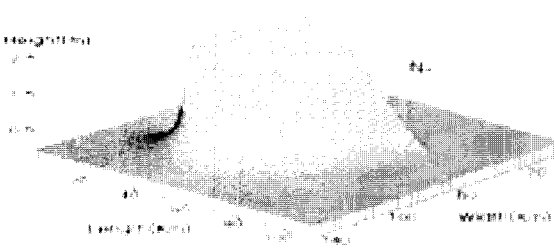
CASE 012



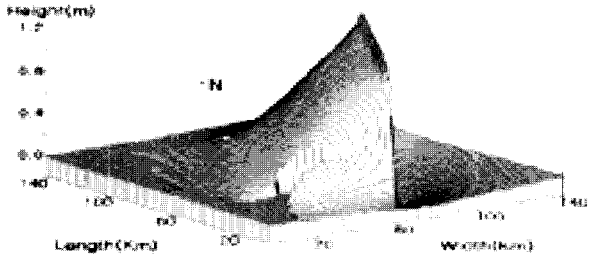
CASE 022



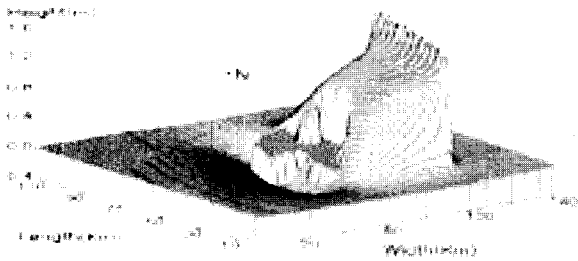
CASE 032



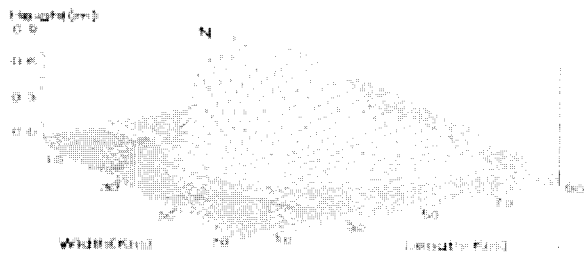
CASE 042



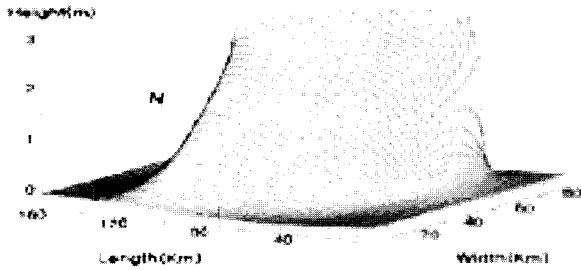
CASE 052



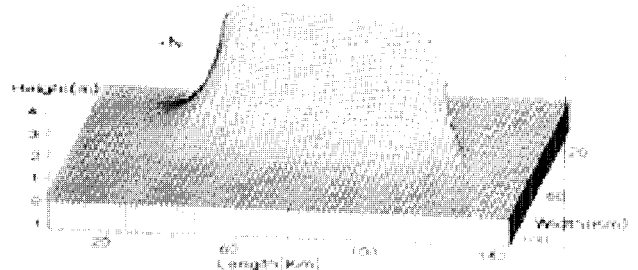
CASE 062



Shakotan-Oki earthquake(1940)



Niigata earthquake(1964)



Central East Sea earthquake(1983)



Hokkaido earthquake(1993)

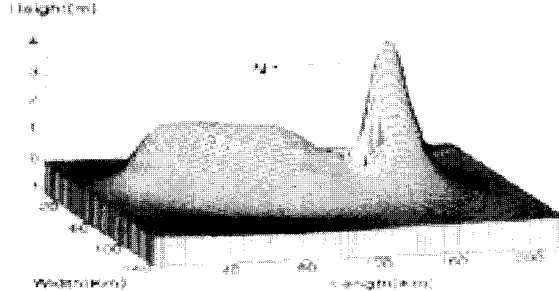


Fig. 5 Initial elevation of hypothetical tsunamigenic earthquakes with fault models of detailed parameters

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

여기서,  $\theta$ ,  $\lambda$ 는 각각 위도와 경도,  $\mu$ 는 파고이며,  $M$ ,  $N$ 은 각각 위도와 경도방향의 선유량,  $R$ 은 지구반경이며,  $g$ 는 중력가속도,  $h$ 는 정지수면에서의 수심,  $f$ 는 코리올리 계수 ( $f=2\omega \sin \theta$ )이다.

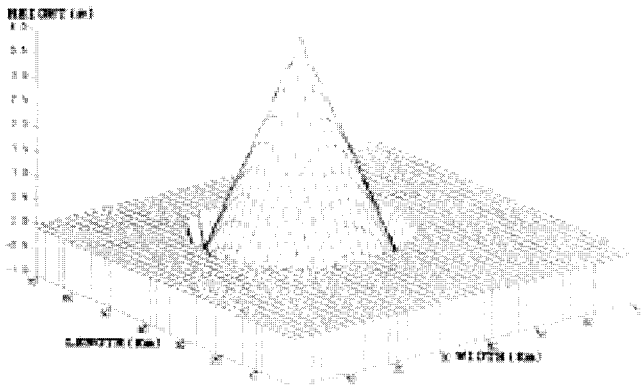


Fig. 6 Initial elevation of simple shape sources

초기해수면형상은 초기해수면형상이 장파의 유속 보다 빠른 플레이트의 수직변위 속도에 의한 수직변위의 움직임과 같다고 가정하는 Manshinha and Smylie<sup>(10)</sup>에 의해 제시된 방법을 사용하여 결정하였다. 수심자료는 동해 전역의 재편집, 작성된 1분 격자 수심체계(최 등<sup>(12)</sup>)를 사용하였다. 이 모형은 수직벽 연안경계를 가정하므로 산정된 결과는 상대적인 연안역에서 지진해일의 파고 크기를 추정하는데 이용되는 간단한 모형이며 실제적인 지진해일의 파고는 관측자료에 의한 율과비(Togashi<sup>(13)</sup>), Green's theorem, 해석적 율과모형(Shuto<sup>(14)</sup>, Pelinovsky<sup>(15)</sup>)에 따른다. 해안역의 정밀 수심, 표고(최 등<sup>(12)</sup>)를 이용한 등지형(nested), 동적결합이종격자(dynamically-interfaced multi-grid) 지진해일 범람모형(Choi et al.<sup>(16)</sup>)을 적용하여 직접적인 파고, 처울림, 범람산정을 많은 사상에 대해 시뮬레이션시키는 과업은 컴퓨터능력의 제약으로 현재에서 바람직하지 않아 초기접근은 간단한 선형장파모형에 의존하였다. 모형 시뮬레이션 결과는 영역 전체 및 연안을 따른 최대파 분포로서 제시하였다.

## 4. 결 과

### 4.1 지진해일 파고 분포

지진해일 파고(최대 지진해일고)의 공간적 분포를 제시하기 위하여 동해에 연한 지역들을 총 5개 지역으로 구분하였는데, 한반도 동해안(지역 01), 연해주(지역 02), 사할린 섬(지역 03), 북해도(지역 04), 일본 본주(지역 05)로서 편의상 구분하였으며, 각 지역에서 최대 지진해일고를 추출하기 위한 격자점들은 최북단의 격자점을 시작점으로 하여 일련번호를 부여하였다(Fig. 7). 자세한 단층 파라미터를 갖는 가상 지진 28개 사상과 단순화시킨 형태의 초기 수면형에 의한 76개 경우의 수치 실험 결과를 이용하여 Fig. 7에 제시된 격자점에서 28개 사상(또는 76개 사상)에 대하여 각각의 경우의 최대 지진해일고를 추출할 수 있으며, 추출한 최대 지진해일고의 공간적인 분포를 Fig. 8에 제시하였다. Fig. 8에 제시된 최대 지진해일고의 크기는 진원의 특성을 반영하며, Fig. 8와 같이 28(76)개 사상을 한 그림에 나타낼 경우 진원

의 에너지 크기가 큰 지진해일사상은 최대 지진해일고의 크기도 크기 때문에, 그 공간분포를 살펴보기 쉽지만, 진원의 에너지 크기가 작을 경우 최대 지진해일고의 크기도 작기 때문에 그 사상에 대한 공간적인 분포상황을 규명하기에 어려움이 있다. 따라서, 모든 최대해일고에 대하여 각 사상별로 해당 사상의 최대값에 대하여 정규화시킨 값들의 분포를 Fig. 9에 제시하였다. 정규화란 다음과 같다. 각 사상별로 최대 지진해일고를 추출할 수 있으며, 각 사상별로 추출된 값들중에서의 최대값을 구할수 있다. 이렇게 산정된 최대값으로 추출된 최대 지진해일고를 나누는 것을 정규화라하며, 이 과정을 수행하게 되면 모든 값들은 0과 1사이에 존재하며, 각 사상별로 최대값 1인 공간분포를 작성할 수 있으며, 진원의 에너지 크기가 상이함으로 인한 영향을 배제할 수 있게 된다. 지역 01의 경우 각 사상별로 431개의 최대 지진해일고를 추출할 수 있으며, 431개의 추출된 값에 대하여 최대값을 구할 수 있고, 이를 이용하여 431개의 추출된 값을 나누어 주면 된다. 즉, 각 사상별로 각사상에 대하여 정규화시킨 값들을 각 사상별로 0에서 1사이에 분포하게 되며, 정규화로 인하여 각 사상별로 지진해일을 유발시킨 지진사상의 에너지의 크기의 상이함으로 인한 영향을 배제하고, 지진해일 위험도 구획화를 할 수 있다.

진원의 비교적 복잡한 단층파라미터에 근거한 특성을 배제한 단순화시킨 형태의 초기 수면형을 적용한 실험의 결과로서 제시된 한반도 동해안의 파고의 공간적 분포는 자세한 단층 파라미터를 갖는 가상진원 실험과 유사하며, 동해에 연한 한반도 동해안, 연해주, 사할린 섬, 북해도, 일본 본주 전 지역에서 같은 특성을 가진다(Figs. 7-9). 이와 같은 결과로부터 진원의 특성과는 무관하게 지리학적으로 지진해일의 피해가 낮은 지역을 산정할 수 있다.

한반도 동해안의 최대해일고 분포는 150 - 200(모델 격자점 기준, 위도기준 39° 1'N - 39° 50'N)을 기준으로 두개의 부분으로 나뉘어 있다. 정규화된 파고 분포 역시 같은 공간분포 특성을 가진다. 이 지역은 동한만역으로서 이와 같은 파고 분포가 나타나는 이유는 동한만 입구의 수심에 따른 렌즈효과와 발달형의 해안에서의 분산굴절특성의 복합과정에 의해 지진해일파의 파고가 감소되며, 지진해일파가 분기되어 전파되기 때문이다(Choi et al.<sup>(1)</sup>). 동한만 지역은 동해에서 발생하는 모든 지진해일에 대해서 파의 입사방향과는 무관하게 안전하며, 지진해일로 인한 피해는 무시될 수 있다. 파고 및 정규화된 값들은 한반도 남쪽에서 감소된다. 이것은 한반도의 남부는 지진해일의 피해가 작다는 것을 의미하며, 1983년과 1993년 지진해일시에 부산의 검조소에서 기록된 경미한 해일고 관측치가 이를 증명한다. 또한, Fig. 8과 Fig. 9에서 제시된 공간분포에서 보면 청진만의 남부 해안(모델격자점 기준 40-50, 위도기준 40° 31'N - 40° 41'N)에서도 작은 공백이 보인다.

연해주 지역에는 타타르 해협에 연한 1 - 150지역에서 파고가 작게 나타나며, 이와 인접한 사할린 섬에서도 1 - 150지역에서의 파고가 작다. 타타르 해협은 수심이 200m 이하인

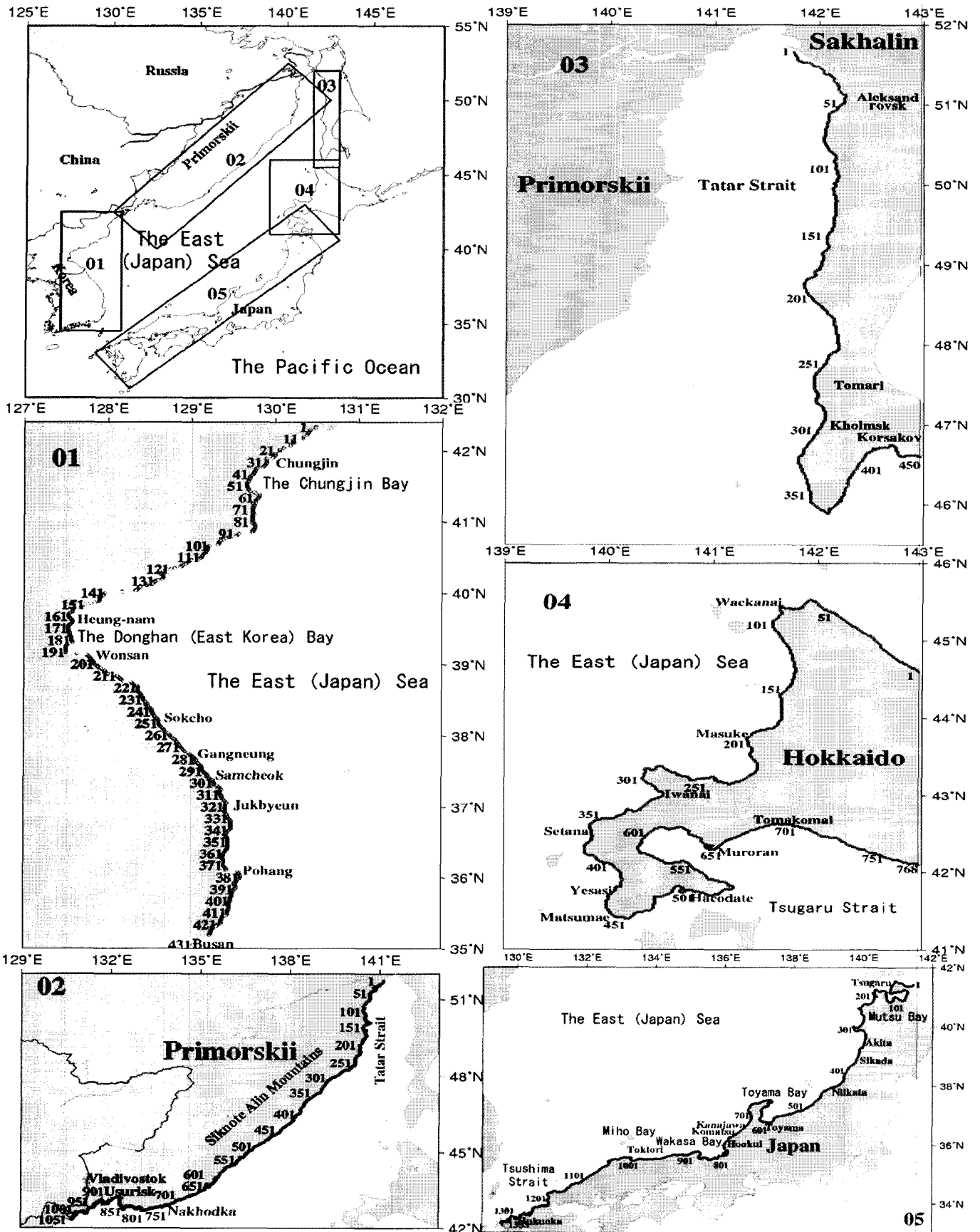


Fig. 7 Geographical locations of coasts adjacent to the East Sea divided by five regions

지역으로서, 동한반과 같은 지형적 특징을 보인다. 또한, 연해주와 사할린 섬의 해안선이 반달형으로 이루어져 있으므로 동한반과 같이 지진해일로부터 보호될 수 있다. 연해주에

서 나타나는 다른 공백들은 블라디보스톡의 남부 해안(810-1000)에 이르는 지역으로서 해안선이 반달형의 형상을 가지고 있다.

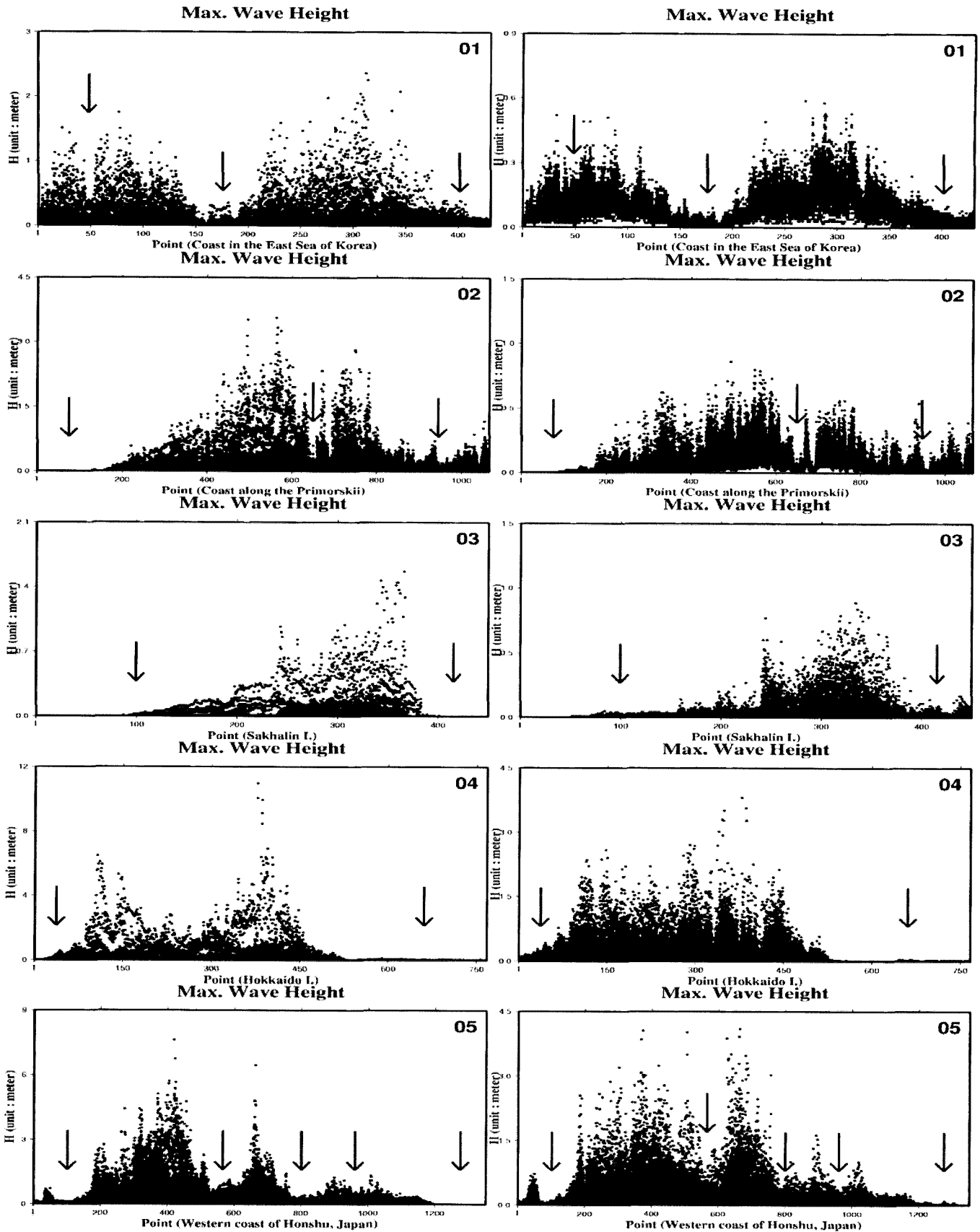


Fig. 8 Spatial distribution of the wave heights showing geographical zones with low risk of tsunami as arrows(left columned diagrams are based on hypothetical tsunamigenic earthquakes with fault models of detailed parameters and right column are based on simple shape initial elevation respectively)

일본의 본주에는 토야마 만(520 - 640), 와카사 만(780 - 880) 이 파고가 작게 산정되는 지역이며, 모두 만이라는 지형적 특성을 가진다. 또한, 아미노에서 미호만에 이르는 해안(920

- 1001), 쓰시마 해협에 연한 오오다 이남의 서해안에서도 파고가 작게 산정된다.

위의 실험결과로부터 지진해일로부터 위험도가 적은 지역을

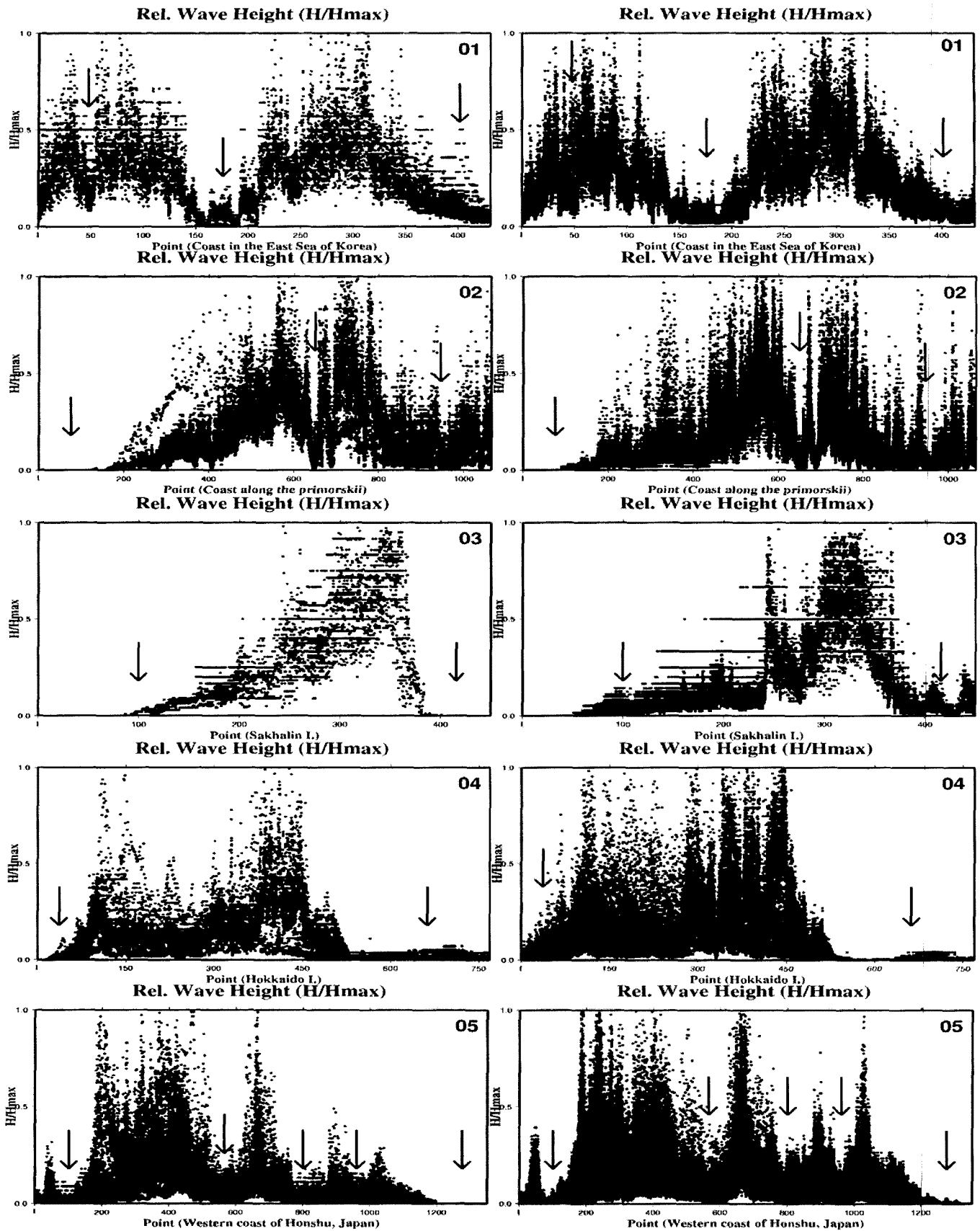


Fig. 9 The same normalized on maximum showing geographical zones with low risk of tsunami as arrows(left columned diagrams are based on hypothetical tsunamigenic earthquakes with fault models of detailed parameters and right column are based on simple shape initial elevation respectively)

추정하여 보면, 한반도 동해안의 동한만, 청진만 남부, 포항 이남의 남부해안, 연해주의 블라디보스톡 및 우수리스크 남부해안, 타타르 해협에 연한 연해주와 사할린 섬의 해안, 본

주의 토야마 만, 와카사 만, 아미노에서 미호만까지의 해안, 쓰시마 해협에 연한 본주서해안 남부 해안이 지진해일로부터 다른 지역에 비해 위험도가 적은 지역이다.



## 4.2 최고 수위 산정

연안에서의 많은 최대수위 변수를 사용한 표본에 의한 결과값은 매우 안정적이며, 새로운 표본이 추가되어도 이미 산정된 결과값에 영향을 미칠 가능성은 상대적으로 매우 작다 (Choi et al.<sup>(1)</sup>). 각 추출지점에는 비교적 복잡한 단층 파라미터에 근거한 진원에 의한 실험에서 산정된 최대해일고(28 사상), 단순화시킨 형태의 초기 수면형에 의한 실험에서 산정된 최대해일고(76 사상)들이 있다. 각 추출지점마다 이 값들의 최대값,  $H_{max}$ 와 평균값,  $H_{mean}$ 을 계산한다.  $H_{max}$ 와  $H_{mean}$ 의 관계로부터 우리는 발생가능한 지진해일파고의 상한치 (upper limit),  $H_m$ 을 산정할 수 있는데, 대상 영역의 거의 모든  $H_{max}$ 가 그에 대응하는 지점(동일한 추출지점)에서의  $H_{mean}$ (임의의 계수)보다 작게 하는 임의의 계수를 추정하는 과정을 필요로 한다. 이렇게 산정된 임의의 계수를 상한의 구배라 말할 수 있으며, 상한의 구배는 지역에 따라 다르게 추정된다. 상한치,  $H_m$ 은  $H_{mean}$ 에 상한의 구배를 곱한 값으로서, 이와 같은 분석방법에 의해 우리는 발생 가능한 지진해일파고의 상한치를 각 지역에 대하여 산정할 수 있다. Fig. 10에서는 자세한 단층 파라미터를 갖은 가상지진에 대한  $H_{max}$ 와  $H_{mean}$ 의 관계로부터 산정한  $H_m$ 의 관계식(상한의 구배)을 제시하였다. 산정된  $H_m$ 의 관계식은 다음과 같으며 각각은 한반도 동해안, (4); 연해주, (5); 사할린 섬, (6); 북해도, (7); 일본 본주, (8) 순으로 그 관계식이 제시된다.

$$H_m=6H_{mean}(\text{한반도 동해안}) \quad (4)$$

$$H_m=7H_{mean}(\text{연해주}) \quad (5)$$

$$H_m=10H_{mean}(\text{사할린 섬}) \quad (6)$$

$$H_m=10H_{mean}(\text{북해도}) \quad (7)$$

$$H_m=6H_{mean}(\text{일본 본주}) \quad (8)$$

일반적으로 식 (4) - (8)에 제시된  $H_m$ 은 많은 표본수로 인하여 그 결과가 대단히 안정적이며, 따라서 우리는  $H_m$ 을  $H_{prog}$ (가능최대해일고)라 말할 수 있다.  $H_{prog}$ 는 추후에 발생하는 지진해일사상에 대하여도 적용가능하며, 통계학적으로 추후에 발생할 사상에 의한 지진해일파고가  $H_{prog}$ 보다 크게 될 가능성이 매우 적다는 것을 의미한다. 그 결과, 식 (4) - (8)을 추정된 방법에 의해 어떤 지역에서든지 최대해일고의 상한치를 산정할 수 있으며,  $H_{mean}$ 을 사용하였으므로  $H_{max}$ 만을 사용한 경우보다 통계학적으로 안정하다.

다음은 단순화시킨 초기 수면형에 대한 실험의 결과이며, 제시한 순서는 위와 동일하다(Fig. 11).

$$H_m=4H_{mean}(\text{한반도 동해안}) \quad (9)$$

$$H_m=8H_{mean}(\text{연해주}) \quad (10)$$

$$H_m=12H_{mean}(\text{사할린 섬}) \quad (11)$$

$$H_m=12H_{mean}(\text{북해도}) \quad (12)$$

$$H_m=12H_{mean}(\text{일본 본주}) \quad (13)$$

한반도 동해안 지역은 식 (4)에 제시한 상한의 구배 '6'보다 작은 '4'로 산정되어, 자세한 단층 파라미터를 갖은 가상지진에 대한 실험 결과에 합당하다. 하지만, 다른 지역들의 경우 자세한 단층 파라미터를 갖은 가상지진에서 제시한 상한의 구배와 상이한 모수들이 산정되었다. 특히 일본 본주의 경우 그 차이가 2배나 된다. 식 (9) - (13)의 값들은 단순화시킨 초기수면형에 의한 실험이므로 상한의 구배를 산정한다는 것에 무리가 있지만, 위에 제시된 결과로부터 근지진해일의 영향을 받는 지역들의 파고는 원지진해일에 의한 것에 비하여 진원의 특성에 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 한반도 동해안의 경우 일본서해안에서 발생한 지진해일이 동해안을 거치면서 내습하므로, 지진해일파가 동해 지형의 영향을 많이 받는다. 하지만 일본 본주의 서해안과 같이 지진해일이 수분 또는 수십분내에 도달하는 지역의 경우는 지진해일파가 해안에 도달하기까지 지형의 영향을 많이 받지 않으므로, 진원의 특성에 따라 지진해일파고가 달라진다.

위에서 산정한 식 (4) - (13)으로부터 동해에 연한 해안의 49개 지점에 대한  $H_{prog}$ 를 산정하여 Table 1~Table 5에 제시하였다. 자세한 단층 파라미터를 갖은 가상지진의 경우와 단순화시킨 초기파형에 대한 실험의 결과로서 제시된  $H_{mean}$ 을 각각 2행과 4행에 제시하였으며, 2행과 4행에 제시된 결과와 각 지역의  $H_{prog}$  추정식을 사용하여 산정한  $H_{prog}$ 을 3행과 5행에 각각 제시하였다.  $H_{prog}$ 를 산정한 49개 지점의 위치는 1983년과 1993년 지진해일 사상의 관측치와 같이 Figs. 12-15에 제시하였다(Chung et al.<sup>(17)</sup>).

## 5. 범람고의 추정 및 재해위험도 구획화

### 5.1 동해안의 범람고 산정

수치실험에 사용된 수치모델은 수직벽 가정에 의하여 직접적인 범람고의 산정은 불가능하다. 그러나 전술한 바와 같이 범람모형(Choi et al.<sup>(16)</sup>)의 수행에는 대단히 많은 노력과 시간이 소요되므로, 본 연구의 선형장파이론에 근거한 모델의 결과를 이용하여 범람고를 추정한다. 첫번째 단계로, 해일파고( $H$ )에 대한 처울림 높이( $R$ )의 비인 증폭계수(amplification factor)를 사용하여 범람정도를 모수화한다. 증폭계수는 1983년과 1993년의 관측된 처울림 높이로부터 계산할 수 있다 (Choi et al.<sup>(18)</sup>). 증폭계수(처울림비)는 해저지형에 의해 영향을 받으며, 지역에 따라 다양한 값을 가진다. 또한, 파의 비선형성, 파의 입사각 등의 세부적인 요소에 의해서도 영향을 받는다. Fig. 12 - Fig. 15에 제시되어 있는 처울림 높이의 관측치(Chung et al.<sup>(17)</sup>)와 계산결과를 이용하여, Table 6에는 동해에 연한 지역에서의 1983년과 1993년 지진해일 사상에 대한 증폭계수가 제시되어 있으며, 대부분의 지역이 1983년 지진해일 사상에 의한 증폭계수와 1993년 지진해일에 의한

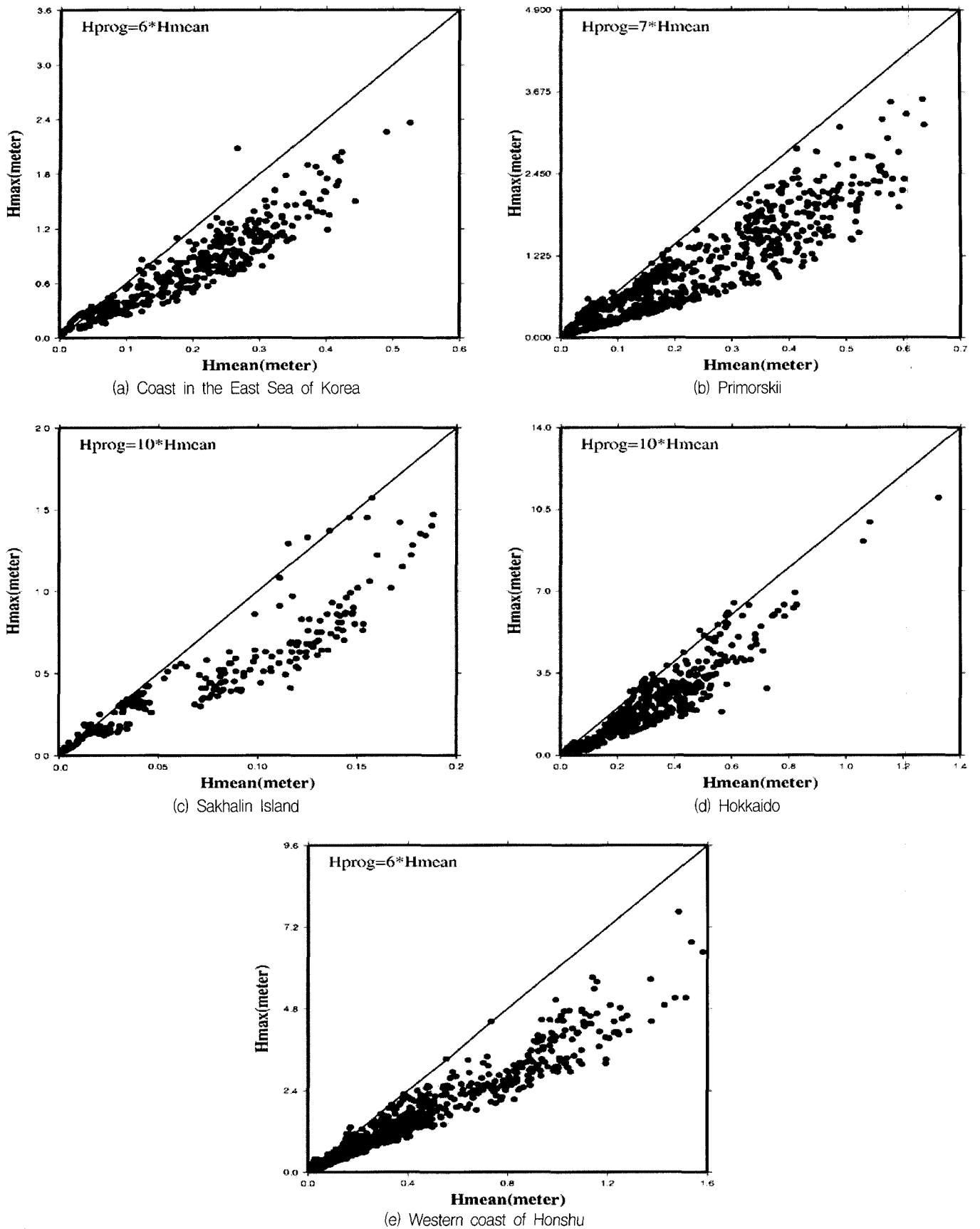


Fig. 10 Relation between max and mean values of the wave heights at different locations based on hypothetical tsunamigenic earthquakes with fault models of detailed parameters

증폭계수가 상이하다. 하지만, 몇몇 지역에서는 그 편차가 크지 않으며, 주문진에서는 그 편차가 8% 정도이다. 예를 들어 주문진지역의 1983년과 1993년의 관측치에 의한 증폭계수

의 중간값인 2.79를 증폭계수로 취했을 경우, 우리는 증폭계수( $R/H$ ) 2.79, 가능최대해일고( $H_{prog}$ ) 1.41m로부터 3.94m ( $=2.79 \times 1.41$ )의 가능최대범람고( $R_{prog}$ )를 추정할 수 있다. 주

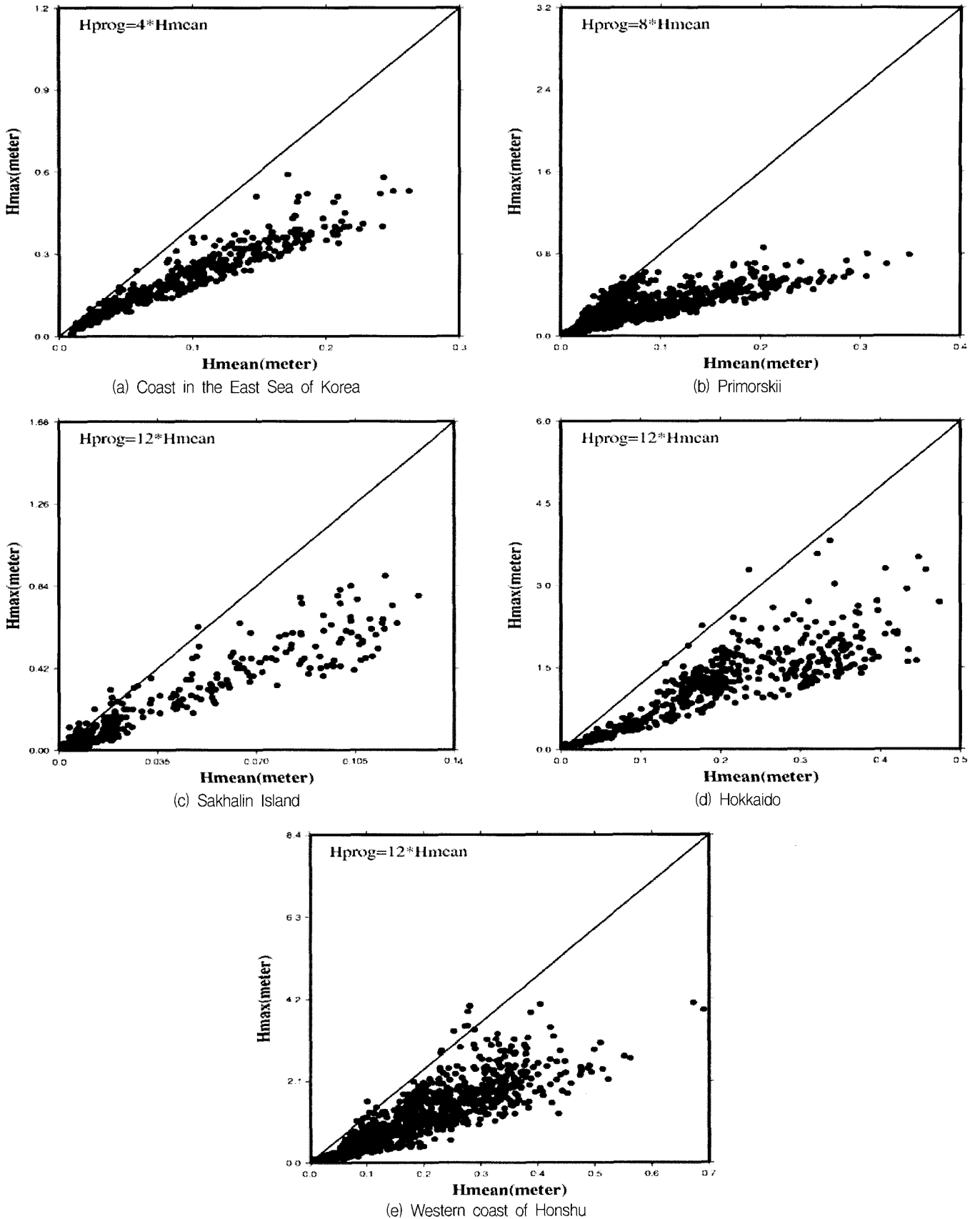


Fig. 11 Relation between max and mean values of the wave heights at different locations based on tsunamis by simple shape initial elevation

문진의 최대범람고의 관측치는 1983년에 0.9m, 1993년에 1.26m였으며, 우리가 추정된 가능최대범람고 3.94m보다 작다. Chung et al.<sup>(19)</sup>은 100년 빈도 지진해일에 대한 주문진 지역의 가능최대범람고를 0.69m였로 추정하였는데, 1983년과

1993년의 범람고보다 작다. 우리의 연구 결과가 실제사상의 관측치와 비교해 볼 때 보다 합당한 가능최대범람고를 제시한다. 주문진 이외에도 Table 6에 제시된 1983년과 1993년 지진해일사상에 의한 증폭계수의 편차가 작은 지점은 여러

Table 1 Prognostic wave height on the east coast in Korea( $H_{prog}(4)$  means using equation (4) for estimating a  $H_{prog}$ , and  $H_{prog}(9)$  means using equation (9) for estimating a  $H_{prog}$ )

Location	$H_{mean}$ (Detailed fault parameters)	$H_{prog}$ (4)	$H_{mean}$ (Simple shape)	$H_{prog}$ (9)
Geojin	0.20	1.16	0.13	0.52
Sokcho	0.17	1.01	0.15	0.58
Ducksan-ri	0.31	1.89	0.12	0.46
Joomoonjin	0.24	1.41	0.08	0.32
Gangrung	0.36	2.13	0.18	0.74
Mukho	0.39	2.36	0.25	1.00
Ulleung-do	0.12	0.70	0.09	0.37
Samchuk	0.42	2.52	0.18	0.71
Imwon	0.34	2.04	0.17	0.69
Pukmyun	0.69	4.13	0.24	0.97
Uijin	0.29	1.73	0.10	0.39
Byunggok	0.27	1.61	0.09	0.36
Pohang	0.04	0.23	0.01	0.05
Ulsan	0.05	0.32	0.02	0.08
Busan	0.01	0.03	0.01	0.05

Table 2 Prognostic wave height in the Primorskii( $H_{prog}(5)$  means using equation (5) for estimating a  $H_{prog}$ , and  $H_{prog}(10)$  means using equation (10) for estimating a  $H_{prog}$ )

Location	$H_{mean}$ (Detailed fault parameters)	$H_{prog}$ (5)	$H_{mean}$ (Simple shape)	$H_{prog}$ (10)
Terney	0.40	2.77	0.10	0.83
Rudnayn Primtan	0.34	2.38	0.09	0.70
Vladimir Gulf	0.20	1.40	0.05	0.42
Olga Gulf	0.36	2.50	0.11	0.89
Noryak Rybolov	0.16	1.09	0.04	0.28
Kit Bay	0.46	3.21	0.11	0.91
Nakhodka	0.10	0.71	0.02	0.16
Vladivostok	0.23	1.62	0.06	0.50
Posyet	0.19	1.33	0.04	0.36

Table 3 Prognostic wave height in the Sakhalin( $H_{prog}(6)$  means using equation (6) for estimating a  $H_{prog}$ , and  $H_{prog}(11)$  means using equation (11) for estimating a  $H_{prog}$ )

Location	$H_{mean}$ (Detailed fault parameters)	$H_{prog}$ (6)	$H_{mean}$ (Simple shape)	$H_{prog}$ (11)
Nevelsk	0.15	1.52	0.13	1.53
Kholmsk	0.13	1.32	0.09	1.11

Table 4 Prognostic wave height in the Hokkaido( $H_{prog}(7)$  means using equation (7) for estimating a  $H_{prog}$ , and  $H_{prog}(12)$  means using equation (12) for estimating a  $H_{prog}$ )

Location	$H_{mean}$ (Detailed fault parameters)	$H_{prog}(7)$	$H_{mean}$ (Simple shape)	$H_{prog}$ (12)
Wakkanai	0.15	1.49	0.14	1.71
Hanoro	0.44	4.43	0.21	2.53
Ishikari	0.36	3.62	0.25	2.94
Otaru	0.21	2.10	0.13	1.58
Osyoro	0.28	2.83	0.29	3.49
Iwanai	0.35	3.47	0.16	1.86
Esashi	0.54	5.35	0.15	1.82
Matsunae	0.59	5.94	0.31	3.67

Table 5 Prognostic wave height in the Honshu( $H_{prog}(8)$ ) means using equation (8) for estimating a  $H_{prog}$ , and  $H_{prog}(13)$  means using equation (13) for estimating a  $H_{prog}$ )

Location	$H_{mean}$ (Detailed fault parameters)	$H_{prog}(8)$	$H_{mean}$ (Simple shape)	$H_{prog}(13)$
Fukaura	0.52	3.10	0.25	3.00
Iwasaki	0.55	3.30	0.25	3.03
Noshiro	0.80	4.77	0.29	3.52
Oga	0.64	3.85	0.35	4.24
Funakawa	1.00	6.00	0.38	4.52
Tsuchisaki	0.75	4.49	0.20	2.37
Sikata	1.08	6.49	0.38	4.52
Iwafune	1.38	8.26	0.25	2.95
Niigata	1.01	6.03	0.31	3.75
Ogi	0.39	2.36	0.24	2.87
Naoetsu	0.37	2.21	0.21	2.48
Toyama	0.20	1.17	0.06	0.73
Wajima	0.88	5.30	0.52	6.28
Maisuru	0.07	0.44	0.02	0.23
Saigo	0.43	2.59	0.17	2.09

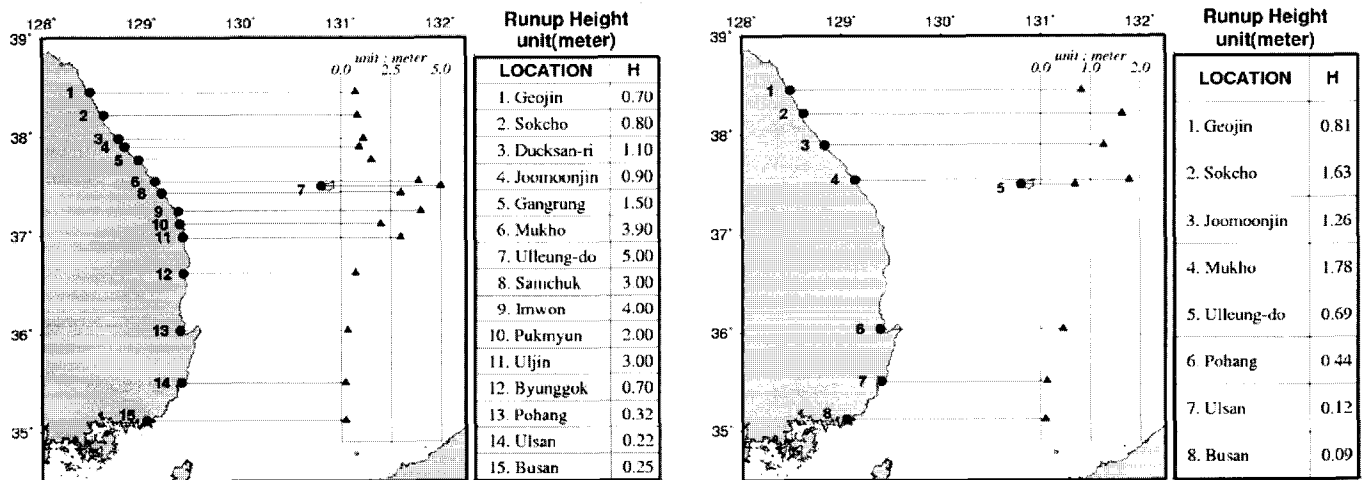


Fig. 12 Specific positions that are estimated  $H_{prog}$  and observed runup heights of 1983(left) and 1993(right) tsunamis on the East Coast in Korea

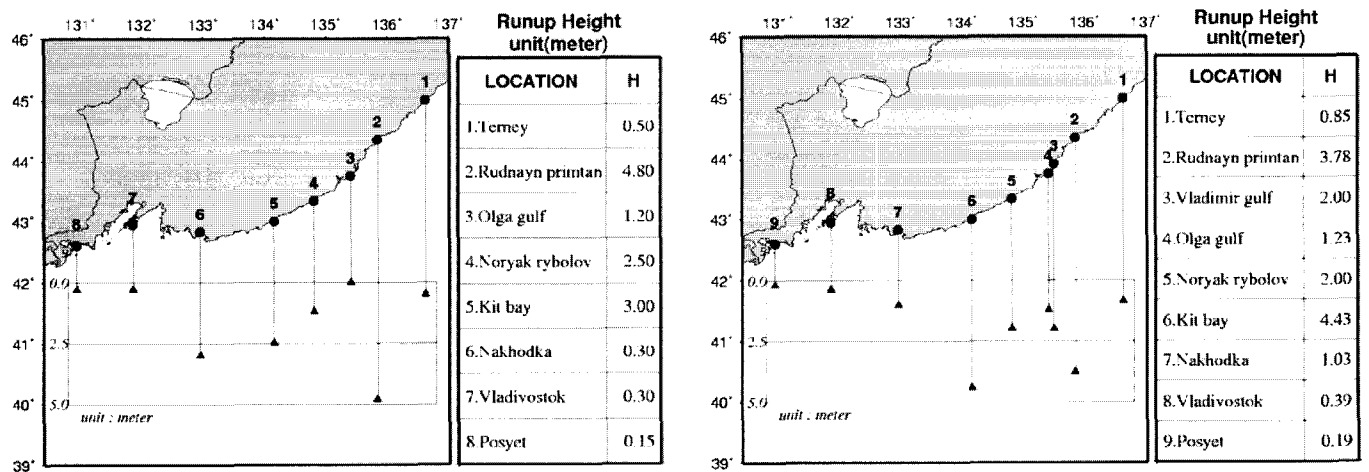


Fig. 13 Specific positions that are estimated  $H_{prog}$  and observed runup heights of 1983(left) and 1993(right) tsunamis in Primorsky Krai

곳이며, 이 지역에 대해서 자세한 단층파라미터를 이용한 가상지진의 결과로부터 산정한  $H_{prog}$ 를 이용하여  $R_{prog}$ 를 산정하고, Table 7에 제시하였다. 한반도 동해안의 포항의 경우

에도 우리가 산정한  $R_{prog}$  1.46m가 1983년과 1993년의 지진해일 범람고 관측치 0.32m, 0.44m보다 크게 산정되었으며, 사할린 섬의 Kholmsk의  $R_{prog}$ 는 2.41m로 산정되어 역시 1983년과

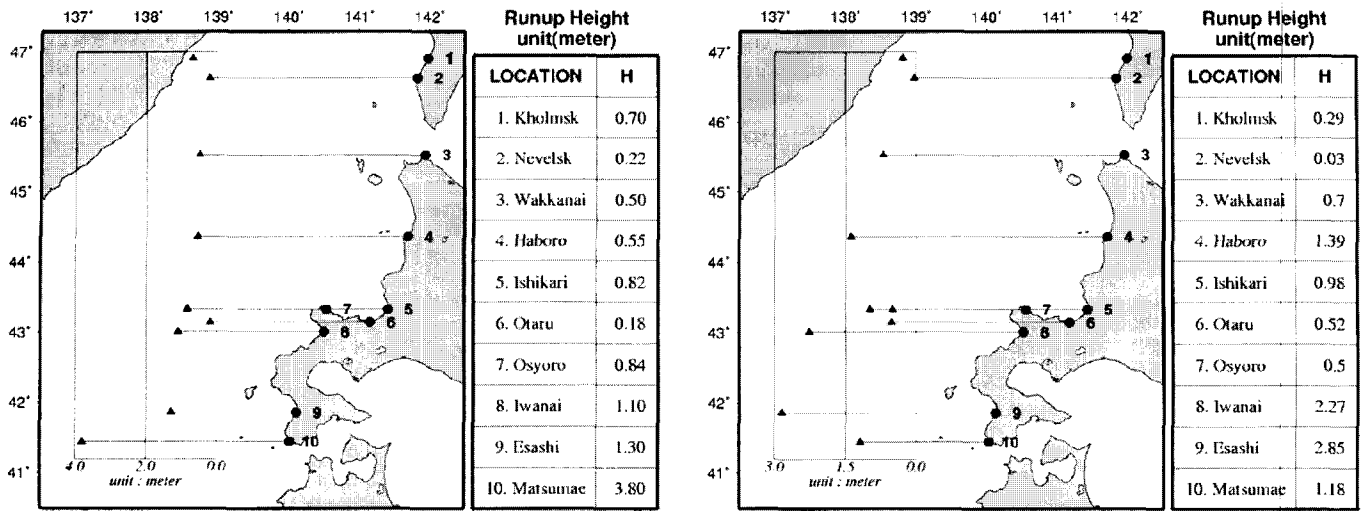


Fig. 14 Specific positions that are estimated  $H_{prog}$  and observed runup heights of 1983(left) and 1993(right) tsunamis in Sakhalin I. and Hokkaido

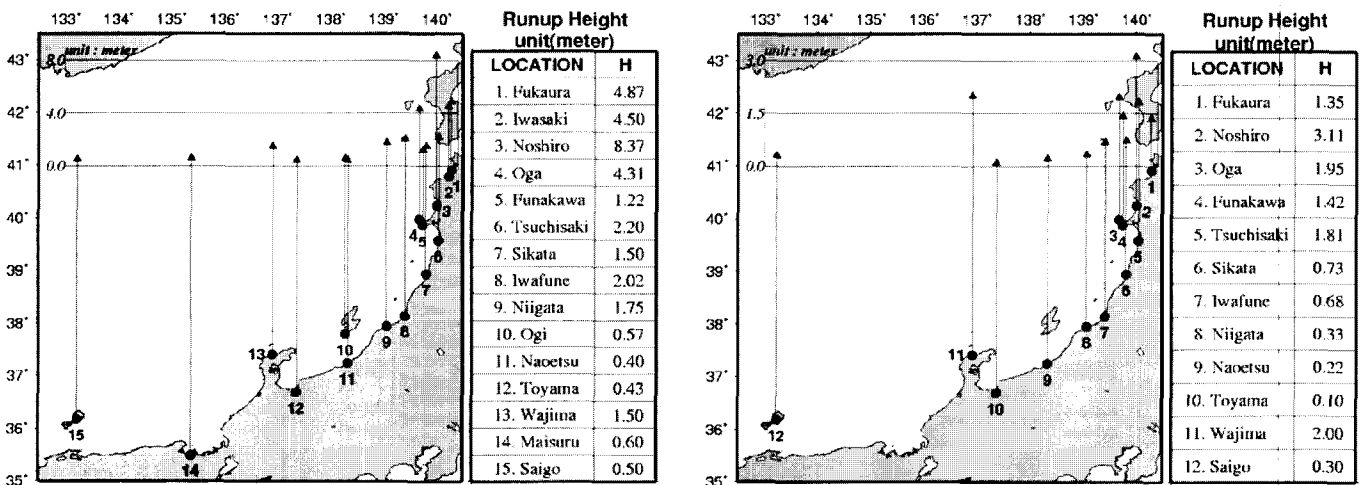


Fig. 15 Specific positions that are estimated  $H_{prog}$  and observed runup heights of 1983(left) and 1993(right) tsunamis in Honshu

Table 6 Amplification factor(continue)

Locations	R/H(1983)	R/H(1993)	Locations	R/H(1983)	R/H(1993)
Geojin	1.59	3.52	Kholmsk	1.83	1.81
Sokcho	2.86	7.41	Wakkanai	2.78	2.92
Dusan-ri	2.08		Haboro	4.58	2.21
Joomoonjin	2.90	2.68	Ishikari	4.32	1.53
Gangrung	3.33		Iwasaki	4.41	
Mukho	7.80	2.47	Osyoro	3.00	0.67
Ulleung-do	21.74	4.93	Iwanai	4.78	1.50
Samchuk	3.09		Esashi	3.02	1.04
Imwon	6.35		Matsumae	2.97	0.81
Pukmyun	0.93		Fukaura	6.01	0.93
Uljin	4.84		Iwasaki	4.41	
Byunggok	2.69		Noshiro	2.87	2.99
Pohang	6.40	6.29	Oga	1.91	5.13
Ulsan	4.40	1.50	Funakawa	0.60	1.35
Terney	1.85	0.83	Tsuchisaki	2.62	3.35
Rudnayn Primtán	16.55	4.30	Sikata	1.72	1.55
Vladimir Gulf		3.57	Iwafune	1.73	1.74
Olga Gulf	2.50	0.88	Niigata	2.46	0.69

Table 6 Amplification factor

Locations	R/H(1983)	R/H(1993)	Locations	R/H(1983)	R/H(1993)
Noryak Rybolov	27.78	6.45	Ogi	1.14	
Kit Bay	9.38	4.18	Naoetsu	2.11	2.20
Nakhodka	5.00	6.87	Toyama	5.37	1.43
Vladivostok	1.36	0.78	Wajima	1.88	3.03
Posyet	0.75	0.48	Maisuru	12.00	
Nevelsk	2.44	0.12	Saigo	0.83	0.38

Table 7 Comparison of  $R_{prog}$  and observed runup heights

Location	$R_{prog}$	Observed(1983)	Observed(1993)	Location	$R_{prog}$	Observed(1983)	Observed(1993)
Joomoonjin	3.94	0.90	1.26	Noshiro	13.97	8.37	3.11
Pohang	1.46	0.32	0.44	Sikata	10.63	1.50	0.73
Kholmok	2.41	2.41	0.29	Iwafune	14.33	2.02	0.68
Wakkanai	4.24	0.50	0.70	Naoetsu	4.76	0.40	0.22

1993년과 범람고 관측치, 0.22m, 0.29m이 2.41m를 초과하지 않았다. 홋카이도의 Wakanai 지역의 1983년과 1993년의 범람고는 각각 0.5m, 0.7m로 관측되었는데, 산정된  $R_{prog}$ 는 4.24m로 산정되어, 1983년과 1993년의 범람고보다 산정된 값보다 작았다. 일본 본주의 Noshiro, Sikata, Iwafune, Naoetsu의  $R_{prog}$ 는 각각 13.97m, 10.63m, 14.33m, 4.76m로 산정되었는데, 이 지역에서 관측된 1983년과 1993년의 지진해일 범람고는 모두 산정된  $R_{prog}$ 미만이다.

### 5.2 지진해일 위험도 구획화

동해에 연한 전지역에 대하여 지진해일에 의한 위험도가 낮은 지역과 그 이외의 지역을 구분하였다. 구획화를 위하여 Fig. 9에 제시된 정규화시킨 값들을 사용하였으며, 세가지 경우에 대하여 제시하였다. 먼저 비교적 복잡한 단층 파라미터에 근거한 진원 실험과 단순화시킨 초기 수면형실험에 의한 결과값을 모두 이용하여 104 (28+76) 사상에 대하여 구획화를 하였다. 추출지점에서의 정규화시킨 값들 중 0.25이하인 것이 전체 표본수의 99%이상인 지역을 낮은 위험도 지역으로 제시하였다(Fig. 16). 4.1 절에서 결론으로 제시하였던 저위험도 지역인 한반도 동해안의 동한만, 청진만 남부, 포항이남의 남부해안, 연해주의 블라디보스톡 및 우수리스크 남부해안, 타타르 해협에 연한 연해주와 사할린 섬의 해안, 본주의 토야마 만, 와카사 만, 아미노에서 미호만까지의 해안, 쓰시마 해협에 연한 본주서쪽의 남부해안이 낮은 위험도 지역으로 제시되었다. Fig. 17에는 두개의 실험결과에 대하여 각각 구획화를 실시한 결과가 제시되어 있으며 Fig. 16과 유사한 것을 알 수 있다.

### 6. 결 론

동해의 과거지진해일 및 지진 공백역의 가상지진 및 단순화시킨 형상의 지진해일에 의한 예단적인 지진해일 시뮬레

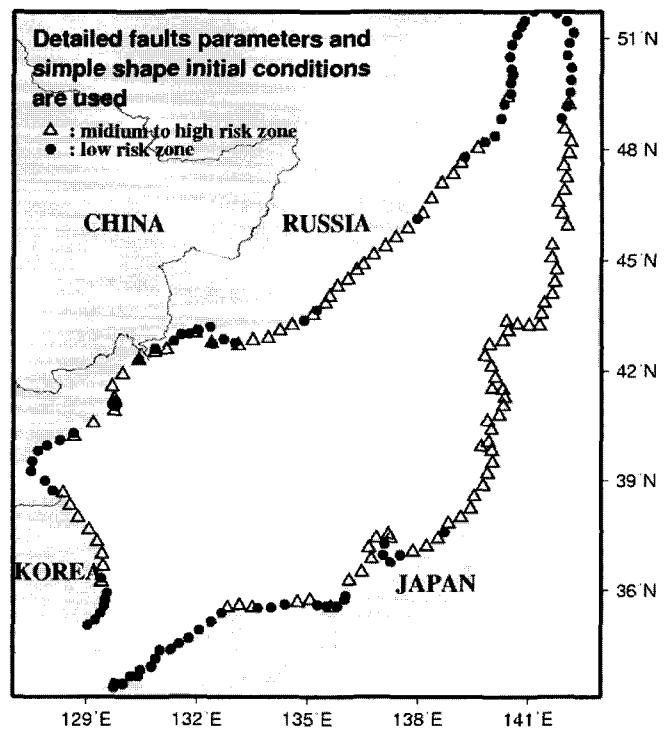


Fig. 16 Tsunami risk zonation for coasts adjacent regions to the East Sea(used by tsunamis by an earthquake with detailed faults parameters and simple shape initial elevation)

이션을 수행하였다. 그 결과 파고의 공간분포로부터 동해에 연한 전 해안에서의 지진해일 피해를 무시할 수 있는 저위험도지역을 추정할 수 있었다. 각 지점의  $H_{max}$ 와 통계학적으로 안정적인  $H_{mean}$ 의 관계에서 가능지진해일고의 상한을 추정하고, 이를 통하여 가능최대지진해일고( $H_{prog}$ )를 산정할 수 있었다. 지진 공백역의 가상지진 및 단순화시킨 형상의 지진해일에 의한 결과로부터 각지역의 가능최대지진해일고 추정식의 상한 구배를 산정하여 각각의 구배를 비교함으로써, 근지진해일에 의한 연안에서의 지진해일 파고는 원지진해일에 비하여 진원의 특성에 더 의존함을 알 수있었다. 지진해일파고를 정규화 시킨 값으로부터 각 지역의 위험도를 추

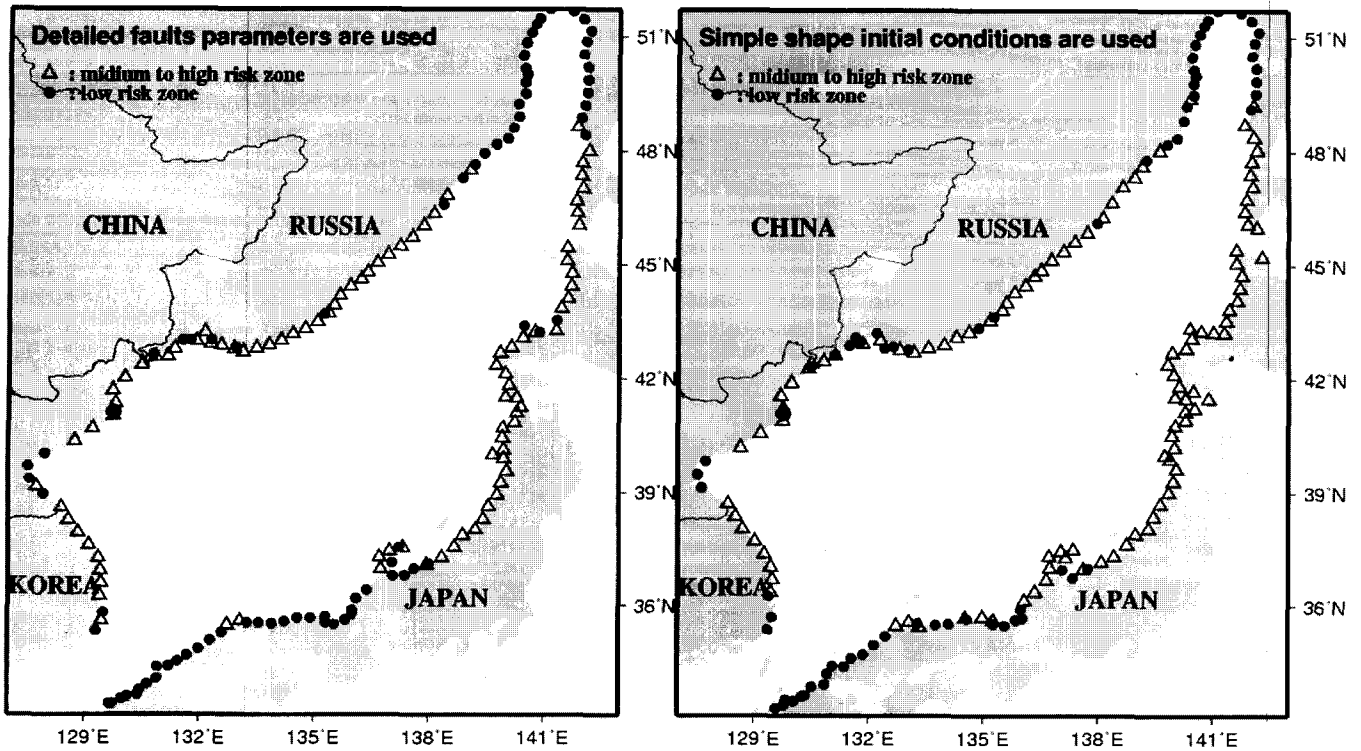


Fig. 17 Tsunami risk zonation for coasts adjacent regions to the East Sea(left columned map is for tsunamis by an earthquake with detailed faults parameters and right columned one is for tsunamis by simple shape initial elevation)

정하고, 저위험도 지역을 산정하여 구체화하였다. 일본연안을 비롯한 진원이 인접한 지역에 대하여 산정한 저위험도 지역 구체화에 대해서는 분산 및 비선형효과가 고려된 모형을 적용하여 추후에 확인하는 연구가 추가적으로 필요하다.

### 감사의 글

본 연구는 2002년 기상청 기상연구소 특정사업 '지진예지 및 지진해일 예측기술 개발'의 지원으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

1. Choi, B. H., Hong, S. J., and Lee, J. S., "Computation of hypothetical tsunamis on the East coast in Korea," *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 6, No. 3, 2002, pp. 73-86.
2. Sato, S., *Handbook of earthquake fault parameters*, Kashima Press, 1995.
3. 羽鳥徳太郎, 日本<sup>의</sup>歷史地震津波, 月刊海洋, No. 9, 1984, pp. 538-545.
4. 茂木清夫, 日本<sup>의</sup>地震豫知, 사이엔스社, 1982.
5. 松澤, "最近<sup>의</sup>秋田·山形縣沖<sup>의</sup>地震活動<sup>에</sup>ついて," 東北地域災害科學研究, 32, 1996, pp. 293-303.
6. Ichikawa, Y., "Remaining earthquake vacant region," *Monthly Ocean*, Vol. 7, 1994, pp. 102-104.
7. Tohoku University, "Observation of continuous crustal change in Tohoku area," *Report of Disaster Control Research Center*, 1995.
8. Lee, H. J., "Study on Characterisctcs of Tsunami Propagation and Hazards in the Japan Sea(East Sea)," Ph. D. Thesis, Tokohoku Univrsity, 1998.
9. Choi, B. H., Hong, S. J., and Pelinovsky, E., "Simulation of prognosic tsunamis on the Korean coast," *Geophysical Research Letters*, Vol. 28, No. 10, 2001, pp. 2013-2016.
10. Manshinha, L. and Smylie, D. E., "The displacement fields of inclined faults," *Bull. of Amer. Seism. Soc.*, Vol. 61, No. 5, 1971, pp. 1433-1440.
11. Shuto, N., Suzuki, T., Hasegawa, K., and Inagaki, K., "A study of numerical technique on the tsunami propagation and run-up," *Sci. Tsunami Hazards*, Vol. 4, 1986, pp. 111-124.
12. 최병호, 김경옥, 엄현민, "한국근해<sup>의</sup> 디지털 수심·표고 데이터베이스", 한국 해안·해양공학회지, 제14권, 제1호, 2002, pp. 41-50.
13. Togashi, H., "Study on Tsunami Run-Up and Countermeasure," Ph. D. Thesis, Tohoku University, 1981.
14. Shuto, N., "Numerical simulation of tsunami: Its present and near future," *Natural Hazards*, Vol. 4, 1991, pp. 171-191.
15. Pelinovsky, E., "Criteria of sea wave breaking in basins of complex topography," *J. Korean Soc. Coastal and Ocean Engs.*, Vol. 4, No. 2, 1992, pp. 59-62.
16. Choi, B. H., Pelinovsky, E., Hong, S. J., and Woo, S. B., "Computation of tsunami in the East (Japan) Sea



- using dynamically interfaced nested model," *Pure and Applied Physics*, 2002(Accepted).
17. Chung, J. Y., Chu, K. S., Go, C. N., Kaistrenko, V. M., and Tsuji, Y., "Tsunami hazard estimation for Japan Sea coast," 1996, unpublished manuscript.
18. Choi, B. H., Pelinovsky, E., Igor, R., and Hong, S. J., "Distribution functions of tsunami wave heights," *Natural Hazards*, Vol. 25, No. 1, 2002, pp. 1-21.
19. Chung, J. Y., Go, C. N., and Kaistrenko, V. M., "Tsunami hazard estimation for eastern Korean coast," *Proc. IUGG/IOC Int. Tsunami Symp., Wakayama, Japan*, 1993. 8, pp. 409-422.