

## 해일유발지진의 응력강하 특성

이덕기\* · 오석훈 · 윤용훈 · 양준모 · 김수경

기상연구소 해양기상지진연구실, 156-720 서울특별시 동작구 신대방동 기상청 460-18

## Stress Drop Characteristics of the Tsunami Generating Earthquake

Duk Kee Lee\*, Seokhoon Oh, Yonghoon Youn, Junmo Yang, and Suekyung Kim

Marine Meteorology & Earthquake Res. Lab., METRI, Seoul 156-720, Korea

**Abstract:** A study for analysing the characteristics of the 'Tsunami Earthquake' and 'Tsunamiogenic Earthquake' has been done in terms of stress drop and tectonic characteristics using previous studies on magnitude, moment, energy, and length of fault. The 'Tsunami Earthquake' seemed to occur mainly on the subduction environment with a very low stress drop of about 10 bars and a thrust dip angle comparing those of the 'Tsunamiogenic Earthquake' or other earthquakes. Released energy to moment ratio of the 'Tsunami Earthquake' also seemed to be lower. Earthquakes which generated tsunami in the East Sea seemed to be 'Tsunamiogenic Earthquake' with a stress drop of about 30~50 bars, and an average energy to moment ratio. Hence, stress drop, energy to moment ratio, and thrust dip angle seem to be indicators of earthquakes that produce tsunamis.

**Key words:** stress drop, dip angle, energy to moment ratio, tsunami earthquake

**요약:** 해일지진 및 해일유발지진의 특성을 기존의 연구결과인 규모, 모멘트, 에너지 그리고 단층의 길이 등의 자료를 이용하여 응력강하량 및 지체구조 관점에서 분석을 하였다. 해일지진(Tsunami Earthquake)은 일반 지진이나 해일유발지진(Tsunamiogenic Earthquake)보다는 약 10bar 정도의 매우 낮은 응력강하량을 가지며 에너지/모멘트 비가 매우 작으며 주로 해구의 매우 낮은 경사의 스러스트 단층에서 발생하는 것으로 분석이 된다. 한편 동해에서 해일을 유발한 지진들은 약 30~50bar의 응력강하량로서 에너지/모멘트비가 세계평균과 비슷한 스러스트 단층에서 발생하는 것으로 유추된다. 따라서 응력강하, 에너지/모멘트 비, 그리고 스러스트 단층의 경사각은 지진해일 발생특성을 나타내는 인자로 대표될 수 있다.

**주요어:** 응력강하, 경사각, 에너지 모멘트 비, 해일지진

## 서론

지진해일은 일명 “쓰나미”라고도 하며 해저에서 일어나는 지진이나 화산폭발, 또는 중력에 의한 지형붕괴 등에 의하여 유발되는 해일현상을 지칭한다. 바람에 의한 해일과는 달리 지진해일은 매우 긴 주기의 장파가 빠른 속도로 멀리까지 전파되며 연안에서는 매우 높은 파고로 전환이 된다. 지진해일을 유발하는 여러 요인 중에는 대표적인 것으로 해저단층의 움직임에 의한 해저지진, 해저 화산의 폭발, 그리고 해저사태와 같은 해저 지형의 붕괴 등을 들 수 있다. 이

중에 한반도 해안가에 큰 영향을 미칠 수 있는 지진해일을 유발하는 원인은 해저지진이라 할 수 있다.

현재 우리나라에 직접적으로 영향을 미친 지진해일은 대부분 동해 북동부해역 역단층대에서 발생한 지진에 의한 것이다. 이런 해저지진 발생은 일본분지와 유라시아판과 오호츠크해판이 만나는 북해도 서쪽해역과 대화해령(Yamato ridge)에서 은기반상해분(Oki trough)으로 연결되는 은기해령(Oki ridge) 등지에 집중되어 있다고 알려져 있다. 1960년대 이후 일본 서안에서 발생하여 동해안에 도달한 지진해일은 1964년 6월 16일에 발생한 니이가타 지진해일, 1983년 5월 26일 발생한 동해중부 지진해일, 1993년 7월 12일 발생한 북해도 지진해일로서 약 10년에 한 번 정도의 빈도를 보이고 있다. 이러한 동해 북동부 해역에서의 지진해일은 일본 서부해역이 배호분지의 경사

\*Corresponding author: dukkee@metri.re.kr

Tel: 82-2-847-2495

Fax: 82-2-847-2496

에 위치하고 작용하는 응력이 압축성이며 주로 해구 축과 평행한 방향으로 역단층대가 발달한 환경에서 비롯된다. 실제로 1983년과 1993년 동해 북동부 해역 역단층대에서 지진해일이 발생하여 한반도 동안에 피해를 유발하였다. 비록 일본 서부해역에서 한반도 동부해역으로 오면서 응력의 형태는 스러스트 형에서 압축성이 있는 주향이동 형으로 바뀌고 그 규모 또한 상당히 약해진다고 알려져 있지만 판 내부지진의 특성상 무작위적으로 큰 지진이 일어날 수도 있기 때문에 일본 서부해역 뿐만 아니라 향후 동해안 전체에서 지진해일 유발가능성에 대한 연구가 필요하다. 역사에 기록된 한반도 인근의 피해지진 중에는 해저지진에 의한 피해 기록을 찾을 수 있다. 그 중에 조선시대 인조 1643년 7월 승정원일기에 기록된 영덕에서 동래에 이르는 해일은 울산 앞바다에서 발생한 해저 지진에 의하여 유발된 것으로 평가 되고 있다. 또한 1681년 6월 숙종 때의 승정원일기에는 양양에서 삼척에 이르는 해역에서 해일이 있었다고 하는데 이 또한 한반도 동안 인근에서 발생한 해저지진에 의하여 유발된 것으로 평가된다. 이와 같이 한반도에 영향을 미칠 수 있는 지진해일을 수치적으로 모사하기 위해서는 여러 가지 입력 변수들이 필요하다. 예를 들면 해일을 유발하는 지진이 일어난 단층에 대한 종합적인 정보인데 이런 정보 중에는 단층의 주향, 경사, 이동방향, 단층의 길이 및 폭, 이동거리, 그리고 지진규모 등이 있다. 지진해일의 전파 현상에 대해 많은 연구가 이루어져 왔고 또한 활발하게 진행 중이지만 해일을 유발하는 지진자체에 대한 연구는 상대적으로 적었던 것이 사실이다. 따라서 지진과 해일발생을 연계하는 요소들에 대한 고찰이 부족한 실정이다.

본 연구에서는 해일을 일으키는 지진에 대한 응력강하, 규모, 및 단층의 길이를 연계하는 이론적인 식을 제시하였으며 기존의 연구결과 중 규모, 에너지, 모멘트, 그리고 단층의 길이를 연계하는 자료를 이용하여 해일지진 및 해일유발지진의 응력강하 및 단층의 특성에 대한 전반적인 고찰을 하고 동해 해일유발지진에 대한 기본적인 특성을 분석하였다.

## 해일을 유발하는 지진의 특성인자

해일을 유발하는 해저지진은 발생지점의 지체구조적인 특성에 따른 발생기작의 차이에 의하여 소위 “해일지진(Tsunami Earthquake)”과 “해일유발지진(Tsunamiogenic Earthquake)”로 나눌 수 있다. 해일지진은 일반적으로 표면파로부터 측정되어진 규모( $M_s$ )에 비하여 유발되는 해일의 파고가 예상보다 매우 큰 지진으로 정의 되어왔다. 이런 지진발생의 원인 중 하나로서 단층면에서의 소위 “느린 슬립(slow slip)”이 일반적으로 제시 되어 왔다. Sapiro *et al.*(1998)는 해구에서 해일을 유발하는 지진의 특성으로서 표면파 규모는 모멘트규모와 상당한 차이를 보인다고 하였으며 이러한 해일유발지진의 표면파 규모가 모멘트 규모보다 적게 평가되는 이유는 해일지진의 특성인 느린 슬립에 있다고 주장하였다. 그러나 이런 접근들은 매우 큰 저주파 지진의 경우도 역시 큰 지진해일을 유발할 수 없다는 가정에 위배된다. 이런 접근을 보완하기 위하여 Fukao (1979)는 완만한 섭입각의 해구 중에 부가대가 있는 퇴적분지에서 단층경사가 큰 모델을 제시하였다. 그러나 현대적인 관점에서 분석되어 일반적으로 해일지진이라고 인정이 되는 1992년 니카라과 지진

**Table 1.** Fault plane solution, moment, and energy of major events (modified from Newman and Okal (1998)). “TE” and “TGE” represent “Tsunami Earthquake” and “Tsunamiogenic Earthquake”, respectively. “ $\Theta$ ” in the table represents  $\log_{10}(E^E/M_0)$

Event	Date	Epicenter °N, °E	Depth (km)	strike, dip, rake (deg)	$M_0$ ( $10^{27}$ dyn-cm)	$E^E$ ( $10^{23}$ erg)	$\Theta$	type
A	Sep. 02, 1992	11.20°N 87.81°W	15	303, 12, 91	3.4	0.017	-6.3	TE
B	June 02, 1994	11.03°S 113.04°E	15	278, 7, 89	5.3	0.052	-6.01	TE
C	Feb. 21, 1996	9.95°S 80.23°W	15	335, 14, 88	2.2	0.025	-5.94	TE
D	Dec. 22, 1991	45.58°N 151.55°E	31	226, 16, 99	2.8	0.089	-5.50	
E	Dec. 28, 1994	40.56°N 142.99°E	28	179, 12, 67	4.9	0.342	-5.16	
F	Dec. 03, 1995	44.82°N 150.17°E	26	225, 12, 95	8.2	0.487	-5.23	
G	Feb. 07, 1996	45.29°N 150.45°E	49	235, 28, 113	0.64	0.057	-5.05	
H	Oct. 04, 1994	43.60°N 147.63°E	68	158, 41, 24	30.0	13.60	-4.34	TGE
I	July 12, 1993	42.71°N 139.28°E	16	0, 35, 91	4.7	1.330	-4.55	TGE

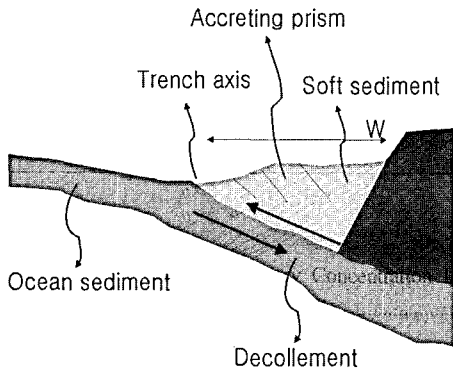


Fig. 1. An example of a model for generating "tsunami earthquake" (drawn from Pelayo and Wiens, 1992).

(Table 1의 (A)), 1994년 자바 지진(Table 1의 (B)), 그리고 1996년 페루 지진(Table 1의 (C))의 경우 단층해를 살펴보면 매우 낮은 경사의 스러스트 단층의 특성을 보여주고 있다.

한편 Pelayo and Wiens(1992)는 기존의 지진해일의 기작인 지진이 해저사면을 붕괴하게 하여 해일을 발생시킨다는 가설보다는 부가대의 기저 데콜망(decollement)을 따라 파열이 천천히 전파된다고 주장하였다(Fig. 1). Fig. 1에 제시된 모델에 의하면 하강하는 해양판이 해구에서 기존의 부가대에 퇴적물을 프리즘의 형태로 축적하면서 급한 스러스트 단층의 경사를 퇴적층간에 생성시키지만 지진은 이런 부가대인 데콜망(decollement)의 하부 기저에서 낮은 스러스트 형태의 경사로 일어난다고 한다. 한편 Kanamori and Kikuchi(1993)는 1992년 니카라과 해안가에 최대 10m의 치명적인 지진해일을 발생하였던 니카라과 지진을 연구한 결과 부가대가 없는 지역에서 발생하였음을 주장하고 지진해일의 발생기작은 크게 두 가지로 나눌 수 있다고 주장하였다. 첫 번째 기작은 하강판에서 하강하는 퇴적물에 의한 느린 파열이며 두 번째 기작은 1986년 Sanriku 그리고 1946년 Unimak 지진의 경우와 같이 지진에 의한 대규모 해저면 붕괴를 들 수 있다. 따라서 이런 낮은 경사의 스러스트 단층이 수직으로 높은 해수면 변동을 유발할 수 있는 상세한 메카니즘에 대하여서는 아직도 불분명하다.

동해에서 발생한 해일유발지진에 대한 직접적인 파형분석은 아직 이루어지지 않았지만 본 연구에서는 기존의 연구결과인 단층의 물리량, 단층의 형태 등을

통하여 동해 해일유발지진 발생특성을 지체구조적인 관점에서 조명하고자 한다. 일반적으로 해일지진을 결정하는 인자들로서는 판의 수렴대, 스러스트 경사, 에너지 방출 형태, 응력강하 등을 들 수 있다. 해구 부가대(accretionary prism)가 존재할 경우 해일지진의 특성은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 부가대 기저의 데콜망을 따라 아주 낮은 각도의 역단층 형태로 이동을 하는 모델로 제시될 수 있다. 이런 모델의 경우 응력강하, 지진의 지속시간, 단층의 물리량 등이 일반 지진과는 차별성이 있을 것으로 사료되기 때문에 이런 관점을 지체구조적 특성과 연관하여 살펴보고자 한다.

## 규모, 응력강하, 그리고 단층물리량의 관계

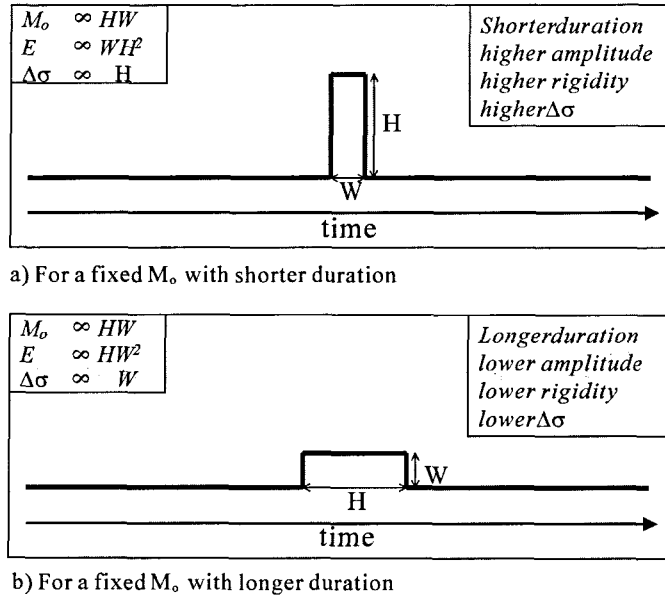
해일지진은 일반적으로 모멘트에 비하여 평가되는 에너지량이 작다는 특성이 있다. 이에 대한 분석으로서 먼저 지진의 상승시간 및 응력강하 관계에 대하여 알아보고자 한다. Abe(1975)는 응력강하( $\Delta\sigma$ )와 단층의 이동속도( $v=D/T$ )에 대해 다음과 같은 식으로 나타내었다.

$$\Delta\sigma = \beta \rho (D/T) \quad (1)$$

여기서  $\beta$ 는 황파속도,  $\rho$ 는 밀도,  $D$ 는 단층에서의 이동량을 나타내며,  $T$ 는 지진의 상승시간을 나타낸다. 지진의 상승시간은 단층에 작용하는 응력강하, 단층의 강성률( $\mu$ ) 등과 함께 지체구조에서의 해일유발 지진 특성을 나타낼 수 있는 인자라고 사료된다.

일반적으로 단층의 강성률( $\mu$ )이 작아지면 같은 응력강하에 대하여서  $T$ 는 상대적으로 커질 수 있으나 강성률의 변화에 대한 지체구조의 특징적인  $T$ 의 변화를 정량화하기에는 무리가 있다. 모멘트가 일정한 두 개의 지진형태를 Fig. 2와 같이 가정할 때 (a)의 경우  $T$ 가 작은 값을 가지므로 상대적으로 모멘트를 일정하게 하기 위하여 고주파의 진폭이 상대적으로 커지는 반면(b)의 경우  $T$ 가 큰 값을 가지므로 일정한 모멘트 가정 하에 상대적으로 저주파의 진폭이 작아지게 된다. 상기 이유가 해일지진의 특징인 큰  $T$  값에 대한 표면과 규모의 상대적인 평가절하의 원인의 하나가 될 수 있다.

해구에서 부가대의 기저인 데콜망에서는 섭입하는 해양판과 상부의 부가되는 퇴적물이 서로 다른 방향



**Fig. 2.** Simplified seismographs of an earthquake due to different rise time ( $T$ ) with constant moment ( $M_0$ ). a) with shorter rise time ( $T$ ) and b) with longer rise time. Simplified seismographs due to constant moment but different rise time are drawn with thick solid lines.

으로 이동하는 모델이 제시되어 왔는데 이 경우 기저 데콜망을 따라 적용되는 강성률은 일반적인 단층의 강성률에 비해 낮을 것으로 사료된다. 따라서 이 경우 매우 작은 응력강하량 으로부터  $D$ 의 변화를 보다 큰  $T$ 값이 가정 될 수 있으며 따라서 느린 슬립을 유발할 수 있다. 따라서 지진해일을 유발하는 단층의 물리량을 모사하기 위하여 규모에 대한 단층의 길이를 응력강하 및 강성률의 변화 관점에서 분석할 수 있는 정량적인 관계식을 유도하고자 한다.

Gutenberg and Richter(1956)는 지진에너지( $E_s$ )와 지진규모( $M$ )의 관계를 다음과 같은 경험식으로 제시하였다.

$$\log E_s = 11.8 + 1.5M \quad (2)$$

Kostrov(1974)는 지진에 의하여 방사되는 에너지와 응력강하 사이의 관계식을 다음과 같이 제시하였는데 방사되는 에너지는 응력강하( $\Delta\sigma$ ) 및 모멘트( $M_0$ )에 비례하며 강성률( $\mu$ )에 반비례한다.

$$E_s = \frac{\Delta\sigma}{2\mu} M_0 \quad (3)$$

(2)와 (3)을 정리하면 모멘트를 규모, 응력강하, 그리고 강성률의 관점으로 다음과 같이 표현할 수 있

게 된다.

$$\log M_0 = 1.5M + 11.8 - \log \frac{\Delta\sigma}{2\mu} \quad (4)$$

Kanamori and Anderson(1975)은 단층길이의 크기를 모멘트 및 응력강하로부터 다음과 같이 표시하였다. 여기서 모멘트는  $\text{dyne} \cdot \text{cm}$ , 그리고 응력강하는  $\text{dyne}/\text{cm}^2$ 의 단위를 가진다.

$$L = 2 \left( \frac{M_0}{\Delta\sigma} \right)^{1/3} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)를 정리하면 단층의 길이를 규모, 응력강하, 그리고 강성률로 다음과 같이 유도하게 된다.

$$\log L = 0.5M_s - \frac{2}{3} \log \Delta\sigma + \frac{1}{3} \log \mu + 4.3347 \quad (6)$$

식 (6)에서 단층 길이의 물리량의 단위는  $\text{cm}$ 이며, 응력강하와 강성률은  $\text{dyne}/\text{cm}^2$ 이며, 모멘트는  $\text{dyne} \cdot \text{cm}$ 이다.

## 해일유발지진의 응력강하 분석

Table 1의 지진들에 대하여 에너지/모멘트( $\text{erg}/$

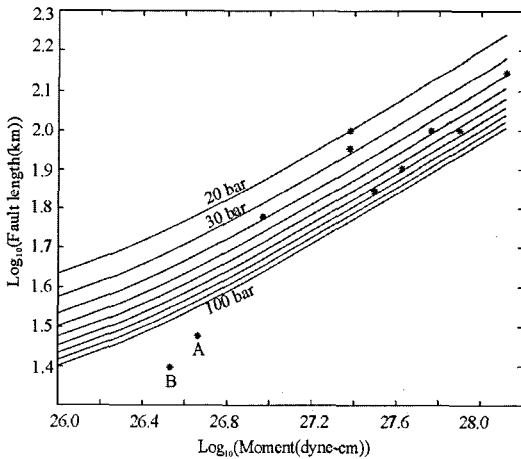


Fig. 3. Theoretical relationship between fault length and moment with different stress drop (solid line) using the equation (5). Data from Tohoku University(1995) has been plotted as stars.

dyne-cm) 값을 계산하면 소위 해일지진들은 약  $1.0 \times 10^{-6}$ 의 값을 가지나 해구에서 일어나는 일반 지진들은 약  $5.0 \times 10^{-6}$ 의 값을, 그리고 1993년 동해에서 일어난 해일유발지진의 경우 약  $30 \times 10^{-6}$ 의 값을 나타내었다. 해일지진의 강성률의 변화가 상대적으로 응력강하 변화보다 작다고 가정하면 식 (3)에서 알 수 있듯이 해일지진의 주된 특징은 낮은 응력강하에 있다고 가정할 수 있다.

식 (5)는 단층길이와 모멘트의 관계를 응력강하만의 관점에서 나타낸다. 동북대 재해제어센터(Tohoku University, 1995)의 보고서에 제시된 가상지진의 체원 (모멘트에 대한 단층의 길이)을 이용하여 식 (5)를 적용하면 Fig. 3과 같이 표현된다. Fig. 3의 A 및 B와 같은 낮은 모멘트를 가지는 지진들은 이 식을 적용하였을 때 잘 적용이 되지 않았다. 또한 복잡한 단층 세그먼트를 가지는 해일유발지진의 경우 각 세그먼트의 모멘트에 대한 가상단층의 길이는 변화가 심하여 본 연구에서는 하나의 지진에 대하여 각 세그먼트의 합을 이용한 총 모멘트 및 단층의 길이를 이용하였다. 대체적으로 동해의 일본 서안에서 발생하는 해일유발지진은 응력강하는 약 20bar에서 80bar 사이에 있을 수 있는 것으로 유추되나(Fig. 3) 이는 식 (5) 자체가 강성률의 변화에 대한 항목이 없기 때문에 만약 동해에서 해일유발지진이 발생하여 그 중 한 세그먼트의 강성률이 매우 낮다면 식 (5)을 적용하는 데에는 문제점이 있다.

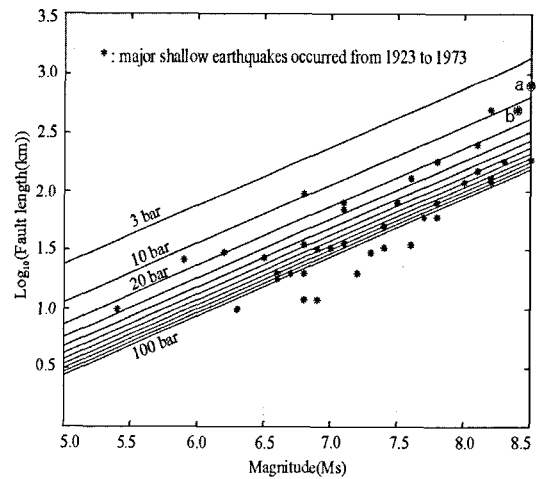


Fig. 4. Theoretical relationship between magnitude and fault length as function of stress drop (solid lines) using equation (6). Data from Abe(1995) has been plotted stars.

일반적으로 지진발생환경의 중요한 5개 파라미터를  $L$ (단층길이),  $W$ (단층폭),  $v$ (파쇄속도),  $D$ (이동량), 그리고  $T$ (상승시간)로 나눌 수 있다(Aki and Richards, 2002). 이런 5개의 파라미터는 단층의 주향, 경사, 레이크, 발생깊이, 그리고 규모를 포함하는 단층해와 강성률 및 응력강하 같은 요소와 함께 지진해일의 초기 해수면 변동 산출에 필히 고려되어야 할 사항이라고 사료된다. 지진요소 중 일반적으로 주어지는 규모는 단층의 이동량과 밀접한 관련이 있으며 파쇄속도는 규모, 강성률, 그리고 응력강하의 관점에서 설명되어질 수 있다. Abe(1995)는 1923년부터 1973년까지 전 세계적으로 일어난 주요 천발지진의 모멘트와 단층에 대한 정보로 실측된 규모와 단층의 길이를 제시하였다. 이 자료를 이용하여 본 연구에서 유도한 응력강하, 강성률 및 규모로부터 단층의 물리량을 규정하는 식 (6)을 이용하여 동 기간동안에 발생한 주요 천발지진에 대하여 규모 및 활성 단층의 길이와의 관계를 응력강하별로 Fig. 4와 같이 나타내었다. 이 때 강성률은  $3.16 \times 10^{11}$  dyne/cm<sup>2</sup>의 값을 사용한 경우이다. 규모가 커질수록 활성 되는 단층의 길이 또한 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 1923년부터 1973년까지 발생한 대부분의 큰 천발지진은 응력강하의 관점에서 10~100bar 사이의 값을 보이는 반면 역시 상당수의 지진이 100bar 이상의 응력강하량을 보이는데 이 지진들은 아주 불규칙적으로 발생하는 판내부 지진들로 사

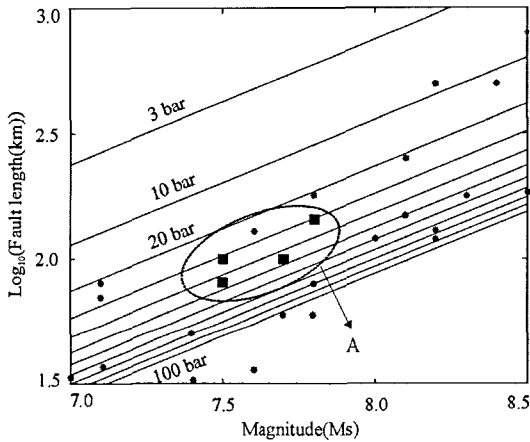


Fig. 5. Stress drop (solid line) as a function of magnitude and fault dimension using equation (6). Earthquake data in East Sea (Tohoku University, 1995) is plotted as solid square and other region (Abe, 1995) as stars.

료된다. Fig. 4의 a지진은 1960년 칠레해안에서 발생한 지진으로 칠레해안에 큰 지진해일 피해를 유발하였고 태평양을 횡단하여 하와이의 Hilo에 역시 큰 피해를 유발한 지진이다. b지진은 1964년 알래스카에서 발생하여 역시 큰 지진해일 피해를 유발한 지진이다. 이런 지진에 의하여 유발되는 지진해일은 매우 장주기의 전파 해일이며 대양을 건너면서 해수면 변동은 수십 센티미터에 불과하나 해안가에 접근하면서 해저부터 해수면까지 걸쳐있는 막대한 전파에너지가 수심이 낮아지면서 수직적인 파고의 높이로 전환되어 해안가에 막대한 피해를 유발한 경우이다. 이 두 지진은 본 연구에서 제시하는 관련식을 적용할 때 5~11 bar의 응력강하량을 보여주는 해일지진이며 해일유발 지진에 비하여 응력강하가 매우 낮다. 한편 Fig. 5의 A는 동해에서 발생하여 지진해일을 유발한 지진의 응력강하를 표시한 것으로 30~50bar의 응력강하를 나타내며 해일유발지진의 범주에 속한다고 할 수 있다. 이 지진들은 각각 1940, 1964, 1984, 그리고 1993년 일본 서안에서 발생한 규모 7.5 이상의 해일유발지진들이다. 여기서 제시된 규모 및 단층의 길이는 단층 각각의 세그먼트에 있어서 총 길이이며 만약 각각의 세그먼트에 대한 상세연구를 한다면 응력강하의 형태는 세그먼트별로 매우 차이가 날 수 있다.

해일지진과 동해에서 발생하는 해일유발지진의 차별성을 지체구조를 나타내는 파라미터로서 살펴볼 필요성이 있다. 해일지진 및 해일유발지진의 특징을 지

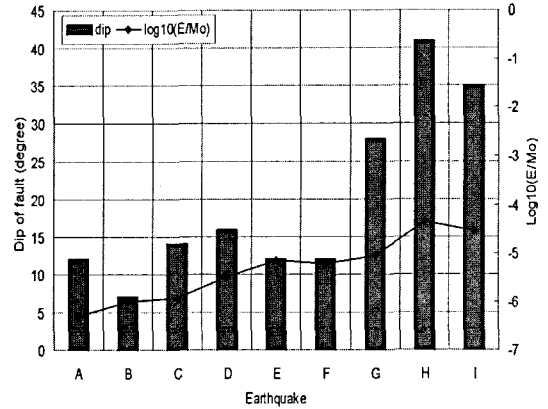


Fig. 6. E/Mo ratio and dip angles for the earthquakes described in Table 1.

체구조별로 분석하기 위하여 Newman and Okal (1998)이 분석한 주요지진에 대한 단층해, 모멘트, 에너지 그리고 에너지/모멘트비에 대하여 정리하여 검토하였다(Table 1). Table 1에서 TE는 해일지진을 TGE는 해일유발지진을 뜻한다.

Newman and Okal(1998)은 지진에너지와 모멘트의 관계식( $\Theta = \log_{10}(E^E/M_o)$ )을 설정하면서 일반적인 해일유발지진은 상기 값이 -4.5에서 -5.6사이이며 방출에너지에 비하여 해안에서의 파고가 비정상적으로 큰 지진을 해일지진이라고 정의하고( $\Theta$ 가 -5.6이하) 예로서 1992년 발생한 니카라과 지진해일, 1994년 발생한 자바 지진해일, 그리고 1996년 발생한 페루 지진해일을 예로 들었다(Table 1). 즉, Table 1에서 TE인 A, B, 그리고 C 지진은  $\Theta$ 가 -5.94에서 -6.3으로서  $14^\circ$  미만의 아주 낮은 스러스트 경사를 가지는 지진발생양상을 보여주고 있다. 해일지진의 경우 부가대 유무에 관계없이 모두 상기의 특징을 보여주고 있고 이는 본 연구에서 제시된 낮은 응력강하량과 함께 해일지진의 특성이라고 유추될 수 있다. Fig. 6은 Table 1의 특성을 정리한 것으로 일반적으로 E/Mo의 비가 낮을수록 작은 단층의 경사각을 가진다.

Fig. 6의 D, E, F, 그리고 G는 일본해구에서 일어난 지진들로서(Table 1) 낮은 응력강하량을 가지는 해일지진과 비교하여 응력강하량이 상대적으로 크고 그리고 E/Mo의 비가 차이가 있어서 해일지진과 발생특성이 다를 수 시사한다. G 그리고 I는 일본해구 및 동해에서 발생한 해일유발지진들로서 해일지진(A, B, 그리고 C)과 일본해구에서 일어난 지진(D, E, F, 그

리고 G)와는 다른 양상을 가진다. Fig. 6에서는 TE에서 TGE로 갈수록 스러스트 단층의 경사각이 커지고 E/Mo의 비가 커지는 양상을 보여준다. 따라서 동해 해일유발지진 발생대에 대해 지질학적으로 정밀한 분석이 요구된다.

## 결 론

지진에너지 방출에 비하여 비정상적으로 높은 지진 해일을 발생시키는 해일지진의 자세한 발생 메커니즘은 아직도 불분명하다. 해구에서의 부가대 기저 데콜망을 따라서 지진이 느린속도로 일어나는 모델(1994 자바 지진, 1996 페루 지진)이나 해양판의 해양퇴적물이 부가되지 않고 해양판과 함께 섭입하여 해양퇴적층과 상부의 판사이에서 발생하는 모델 (1992 니카라과아 지진)이 제시 되어 왔다. 이런 해일지진의 특징은 지체구조적으로 볼 때 판의 수렴대인 해구에서 주로 발생하며 응력은 주로 스러스트 환경으로 아주 낮은 단층경사를 가지고 발생하는 경향이 있다. 에너지는 모멘트에 비하여 일반 지진이나 해일유발지진보다는 상대적으로 낮게 평가가 되며 이는 소위 느린 슬립의 기작을 보여주며 따라서 단층면의 강성률이 상대적으로 낮고 응력강하량이 10bar 정도로 상대적으로 매우 낮은 특성을 보여주고 있다. 한편 동해에서 일어난 해일유발지진은 배호분지 초입부분에서 주로 스러스트환경의 응력이 작용하며 단층경사는 해일의 경사에 비하여 급하며 응력강하량은 30~50 bar로서 보통이며 에너지/모멘트의 비가 세계 평균값과 비슷하다.

## 사 사

본 연구는 기상청 기상연구소 기상지진기술개발사업의 「지진예지 및 지진해일 예측기술 개발」의 지원으로 수행 되었으며 이에 사의를 표합니다.

## 참고 문헌

- Abe, K., 1975, Static and dynamic fault parameters of the Saitama earthquake of JULY 1, 1968. *Tectonophysics*, 27, 223-238.
- Abe, K., 1995, Magnitudes and Moments of Earthquakes, *Global Earthquake Physics, A Handbook of Physical Constants*. AGU Reference Shelf 1.
- Aki, K. and Richards, P.G., 2002, *Quantitative Seismology*. University Science Books, 2nd Edition.
- Fukao, Y., 1979, Tsunami earthquakes and subduction processes near deep-sea trenches. *Journal of Geophysical Research*, 84, 2303-2314.
- Gutenberg, B. and Richter, C.F., 1956, Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 46, 105-145.
- Kanamori, H. and Anderson, D.L., 1975, Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65, 1073-1095.
- Kanamori, H. and Kikuchi, M., 1993, The 1992 Nicaragua earthquake: a slow tsunami earthquake associated with subducted sediments. *Nature*, 361, 714-716.
- Kostrov, V.V., 1974, Seismic moment and energy of earthquakes, and seismic flow of rock. *Izv. Academy of Science USSR Physics of Solid Earth*, 1, 23-44.
- Newman, A.V. and Okal, E.A., 1998, Teleseismic estimates of radiated seismic energy: The E/Mo discriminant for tsunami earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 103 (26) 885-898.
- Pelayo, A.M. and Wiens, D.A. 1992, Tsunami earthquakes: Slow thrust-faulting events in the accretionary wedge. *Journal of Geophysical Research*, 97 (15) 321-337.
- Sapiro, N.M., Singh, S.K., and Pacheco, J., 1998, A fast and simple diagnostic method for identifying tsunami-genic earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 25 (3) 911-914.
- Tohoku University, 1995, Observation of continuous crustal change in Tohoku area. Report of Disaster Research Center.

2003년 8월 26일 원고 접수  
2003년 11월 15일 수정원고 접수  
2003년 11월 15일 원고 채택