

## 지진 매개변수에 따른 지진해일 초기 수면 Initial Free Surface Profile of Tsunamis by Earthquake Parameters

조 용 식\* / 김 재 홍\*\* / 손 대 희\*\* / 김 성 민\*\*  
Cho, Yong-Sik / Kim, Jae-Hong / Sohn, Dae-Hee / Kim, Sung-Min

### Abstract

The earthquake parameters are known to be responsible for determination of the initial free surface profiles of tsunamis. This study investigates the effects of earthquake parameters to variation of initial free surface profiles of tsunamis triggered by an impulsive undersea earthquake. The target event is the 1983 Central East Sea Tsunami recorded as the most devastating tsunami in Korea during last several decades. Among the earthquake parameters, the strike angle may play a most significant role in determining the initial free surface.

**key words** : tsunami, undersea earthquake, earthquake parameter, initial free surface profile

### 요 지

지진 매개변수에 의해 지진해일의 초기 수면형상이 결정된다. 본 연구에서는 해저지진에 의해 발생하는 지진해일의 초기 수면형상의 변화에 대한 지진 매개변수의 영향을 연구한다. 대상 지진해일은 지난 수십 년 동안 우리나라에 가장 큰 피해를 입힌 1983년 동해 중부 지진해일이다. 지진 매개변수 중에서는 *strike angle*( $\Theta$ )이 초기 수면형상에 가장 큰 영향을 주었다.

**핵심어** : 지진해일, 해저지진, 지진 매개변수, 초기 수면

### 1. 서 론

지진해일은 해저지진, 해저붕괴, 해저 화산분출 및 해저 핵실험 등에 의하여 발생할 수 있지만, 대부분의 지진해일은 해저지진에 의하여 발생한다. 2004년 12월 26일 발생하여 약 30만의 인명피해와 72억 달러에 이르는 막대한 재산피해를 입힌 서아시아 지진해일 역시 강력한 해저지진이 그 발생 원인이었다. 해저지진이 발생하게 되면 약 3-5m 정도의 초기 수면변화가 발생하게 된다. 이렇게 생성된 수면변화는 중력에 의하여 모든 방향으로  $\sqrt{gh}$  ( $g$ 는 중력가속도,  $h$ 는

현지 수심)의 속도로 전파되며, 수심이 얇은 해안 지역에 도달하게 되면 천수효과(shoaling effects)에 의하여 파고가 증가하게 되어 해안지역에 대규모 범람을 일으켜 엄청난 인명과 재산피해를 초래할 수 있다.

지진해일은 여러 나라에서 발생되고 있으며, 특히 일본을 비롯한 태평양 연안 지역에서 많이 관측되고 있다. 지진해일에 관한 연구 활동 또한 일본을 비롯한 태평양 연안국가에서 활발히 이루어지고 있다. 우리나라도 1983년 5월 26일 발생한 동해 중부 지진해일과 1993년 7월 12일 발생한 홋카이도 남서 외해 지진해일에 의하여 인명 및 재산피해를 입은 후 지진

\* 정회원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail : ysc59@hanyang.ac.kr)

\*\* 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정

해일에 대한 연구활동이 일부 진행되고 있다. 이호준 등(1999)은 동해에서의 지진해일 거동특성에 대해 연구하여 대화퇴에 의한 렌즈효과를 확인하였다. 최병호(2000)는 현재 우리나라의 해안재해경감 대책이 미흡함을 지적하고 해안재해에 적극적으로 대처하기 위한 방안을 연구하였다. 특히, 미국과 일본의 해안재해 대처방안을 검토하여 우리나라 실정에 맞는 대책 수립의 필요성을 제기하였다. 조용식과 서승원(2001)은 이미 발생하였거나 발생 가능성이 높은 지진해일을 수치해석하여 최대범람도를 작성하여 향후 지진해일의 발생 시 범람에 의한 피해를 최소화할 수 있도록 하였다.

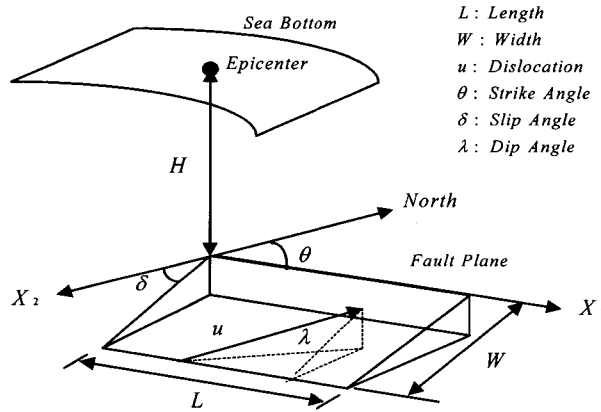
우리나라에서는 최근 들어 지진해일에 관한 연구가 활발히 진행되고 있지만, 이는 지진해일의 전파와 처오름높이 산정에 중점을 두고 이루어져 왔다. 지진해일의 전파나 처오름높이에 관한 연구에 앞서 해저지진에 의한 초기 수면변화를 정확히 예측하는 것이 매우 중요하다. 초기 수면변화가 제대로 결정되지 않는다면 지진해일의 전파나 처오름높이에 대한 수치해석의 결과 또한 신뢰할 수 없기 때문이다.

본 연구에서는 정확도 높은 지진해일의 연구를 위하여 지진해일을 유발하는 해저지진의 단층 매개변수에 따른 초기 수면변화에 대해서 알아본다. 대상 해저지진은 1983년 동해 중부 지진해일을 발생시킨 해저지진이며, 지진 매개변수는 Aida의 모델 10을 이용하였다(Aida, 1984).

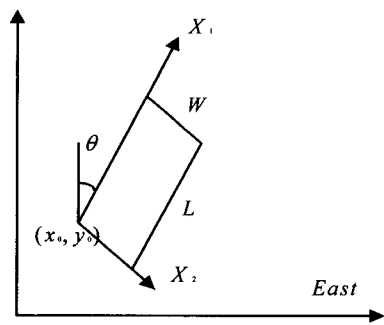
본 연구에서는 1983년 5월26일 발생한 동해 중부 지진의 매개변수를 다양하게 변화시켜 지진해일의 초기 수면변화를 조사한다. 특히, 기존의 많은 연구자들이 수치해석에서 주로 사용하는 초기수면이 매개변수에 따라 어떻게 변화하는가를 중점적으로 연구한다.

## 2. 초기 수면변화 산정

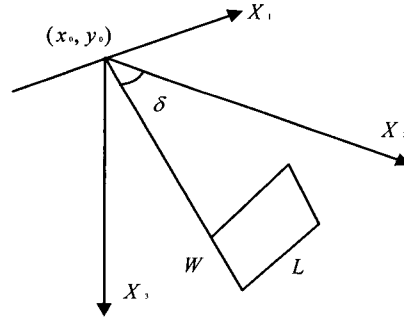
지진을 발생시키는 단층은 여러 매개변수들로 구성되어 있다. 지진해일의 초기 수면변화는 그림 1에 정의된 단층 매개변수를 이용하여 추정할 수 있다. 단층 매개변수는 정적 매개변수( $L$ ,  $W$ ,  $u$ , strike  $\angle$ , slip  $\angle$ , dip angle)와 동적 매개변수(파괴속도, 변형시간)의 두 가지로 크게 분류된다.



(a) 단층 매개변수 정의도



(b) 평면적 관점의 매개변수 정의도 (평면도)



(c) 측면적 관점의 매개변수 정의도 (측면도)

그림 1. 단층모형과 관련된 각종 매개변수 정의도

Mansinha와 Smylie(1971)에 따르면 지진에 의한 초기수면 변화는 strike-slip 변위와 dip-slip 변위 등 두 개의 요소로 구성되어 있으며, 그림 2에 도시된 것과 같이 단층 침하대 아래가 양의 값으로 측정된 좌표축  $\xi$ 를 도입하였다.

먼저, strike-slip 변위는 다음 식 (1)과 같이 주어진다.

또한, dip-slip 변위는 다음 식 (2)와 같이 주어진다.

직사각형 단층 표면은  $-L \leq \xi_1 \leq L$  과  $d \leq \xi_2 \leq D$  범위에 걸쳐있다고 가정한 후 strike-slip 변위와 dip-slip 변위에 대한 적분을 수행한다.

$$R = [(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 - \xi_3)^2]^{1/2} \quad (3)$$

$$Q = [(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 + \xi_3)^2]^{1/2}$$

여기서, R과 Q는 각각 현장 지점( $x_1, x_2, x_3$ )과 단층대 위의 진원지점( $\xi_1, \xi_2, \xi_3$ ) 사이의 거리와 이에 대응하여 가상의 단층대 위의 진원지점( $\xi_1, \xi_2, -\xi_3$ ) 사이의 거리를 나타낸다.

$$r_2 = x_2 \sin \delta - x_3 \cos \delta, \quad r_3 = x_2 \cos \delta + x_3 \sin \delta \quad (4)$$

$$q_2 = x_2 \sin \delta + x_3 \cos \delta, \quad q_3 = -x_2 \cos \delta + x_3 \sin \delta$$

$$u_i = \mu U_1 \int_d^D \int_{-L}^L \left[ \left( \frac{\partial u_i^1}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_1} \right) \sin \delta - \left( \frac{\partial u_i^1}{\partial \xi_3} + \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_1} \right) \cos \delta \right] d\xi_1 d\xi_2 \quad (1)$$

$$u_i = \mu U_1 \int_d^D \int_{-L}^L \left[ 2 \left( \sin \delta \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi} + \cos \delta \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi} \right) + \left( \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_3} \right) \right] d\xi_1 d\xi_2 \quad (2)$$

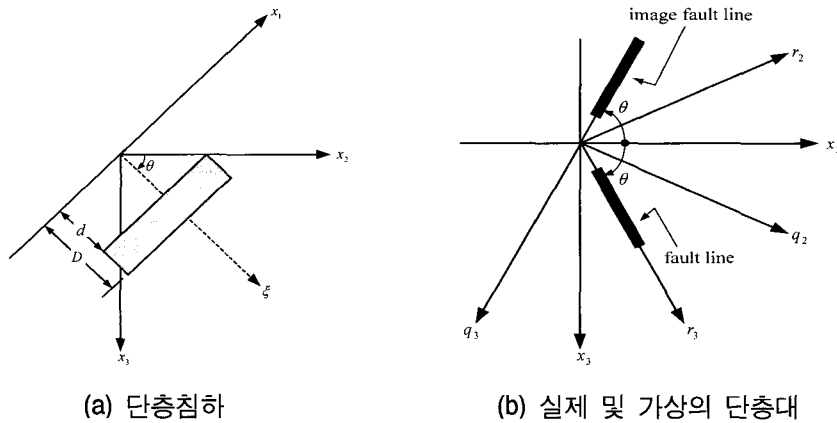


그림 2. 단층모형을 위한 정의도

여기서,  $r_2$  및  $r_3$ 와  $q_2$  및  $q_3$ 는 수직으로 측정되며, 이들은 각각 단층 침하대와 가상의 단층대에서 아래 방향으로 관측된 현장좌표들이다. 또한, 변수 R과 Q를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$R = [(x_1 - \xi_1)^2 + r_2^2 + (r_3 - \xi)^2]^{1/2} \quad (5)$$

$$Q = [(x_1 - \xi_1)^2 + h^2]^{1/2} = [k^2 + (q_3 + \xi)^2]^{1/2}$$

여기서, h는  $x_1 = 0$  평면에 Q를 투영한 값이며, k는  $q_3 = 0$  평면에 h를 투영한 값이다.

### 3. 수치해석

본 연구에서는 1983년 5월 26일 동해 중부 지진해일을 유발시킨 해저지진의 매개변수를 이용하여 초기 수면변화를 계산하였으며, 지진 매개변수는 표 1과 같다.

동해 중부 지진은 두 개의 단층을 가지며, 하나는 남측의 단층면으로 그 단층면이 상대적으로 크고, 다른 하나는 북측의 것으로 그 단층면이 작다. 각각의 지진 모멘트는  $3.6 \times 10^{27} \text{ dyne} \cdot \text{cm}$ 와  $2.2 \times 10^{27} \text{ dyne} \cdot \text{cm}$ 이다. 그림 3은 지진해일 초기파형의 등과고선을 평면에 그린 것이다. 초기파형을 평면으로 보면 두개의 단층으로 이루어진 것을 쉽게 알아볼 수 있다.

표 1. 동해 중부 지진의 매개변수 (Aida, 1984)

구분	$N(^{\circ}N)$	$E(^{\circ}E)$	$H(km)$	$\theta(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$	$L(km)$	$W(km)$	$u(cm)$
단층 1	40.21	138.84	2	22	40	90	40	30	760
단층 2	40.54	139.02	3	355	25	80	60	30	305

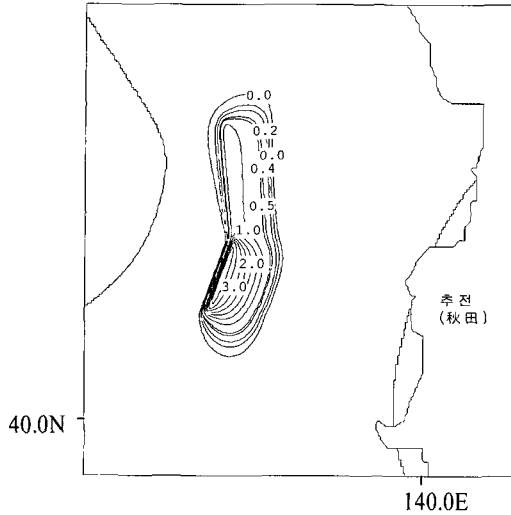


그림 3. 지진해일의 초기파형 (단위: m)

그림 4는 초기 수면변화의 한 단면을 나타낸다. 최대 수면변위는 4.6m 정도로 나타나고 있으며, 전체적으로 단층 1의 수면변위가 단층 2의 수면변위보다 크게 나타남을 알 수 있는데, 이는  $u$  (dislocation)의 값이 단층 1에서 2배 이상 크기 때문으로 생각된다.

본 연구에서는 지진 매개변수 중 *strike angle* ( $\theta$ ), *slip angle* ( $\delta$ ) 및 *dip angle* ( $\lambda$ )을 변화시켜 초기 수면변화에 어떤 영향을 미치는지 알아보았다. 초기 수면변화를 알아보기 위하여 먼저 각각의 단층에 대하여 매개변수의 영향을 알아본 후, 각 단층에서 최대의 변위를 일으키는 매개변수를 조합하여 초기 수면변위

에 대한 영향을 평가한다.

먼저, *strike angle* ( $\theta$ )을  $10^{\circ}$  간격으로 모의하였으며, 그림 5는 각 단층에서  $\theta$ 의 변화에 대한 수면변위의 변화를 나타낸다. 그림 5에서 실선이 원래 지진의 매개변수  $\theta$ 이며, 이를 기준으로 하여  $10^{\circ}$  간격으로 변화시켜 그 영향을 알아보았다. 변수  $\theta$ 를 증가시켰을 때 단층 1의 최대 수면변위가 앞쪽으로 이동하는 것을 알 수 있으며,  $\theta = 32^{\circ}$  일 경우 최대의 수면변위가 발생하는 것을 알 수 있다. 단층 2에서는 단층 1보다는 그 변화가 작음을 알 수 있다. 그리고, 각각의 단층에서  $\theta$ 를 변화시켰을 때 단층간의 영향은 거의 없음을 알 수 있다.

다음은 *slip angle* ( $\delta$ )에 대해서도  $10^{\circ}$  간격으로 모의하였으며, 각 단층에서  $\delta$ 의 변화에 대한 수면변위의 변화를 나타낸다. 그림 6에서도 실선이 원래 지진의 매개변수  $\delta$ 이며, 이를 기준으로 하여 전후  $10^{\circ}$  간격으로 변화시켜 그 영향을 알아보았다. 변수  $\delta$ 를 변화시킨 결과 단층 1과 2에서 모두 최대 변위를 일으키는 위치는 변하지 않았지만,  $\delta$ 가 증가할수록 최대 변위값이 증가하였다. 그러나, 그 증가폭은 점점 감소하는 것을 알 수 있었다. 단층 1에서는  $\delta = 50^{\circ}$ , 단층 2에서는  $\delta = 45^{\circ}$ 에서 최대 변위가 발생하였다. 그리고, 단층 1에서  $\delta$ 를 변화시켰을 때는 단층 2의 수면변위에 영향이 거의 없었으나, 단층 2에서  $\delta$ 를 변화시켰을 때는 단층 1의 수면변위에도 영향을 미침을 알 수 있다.

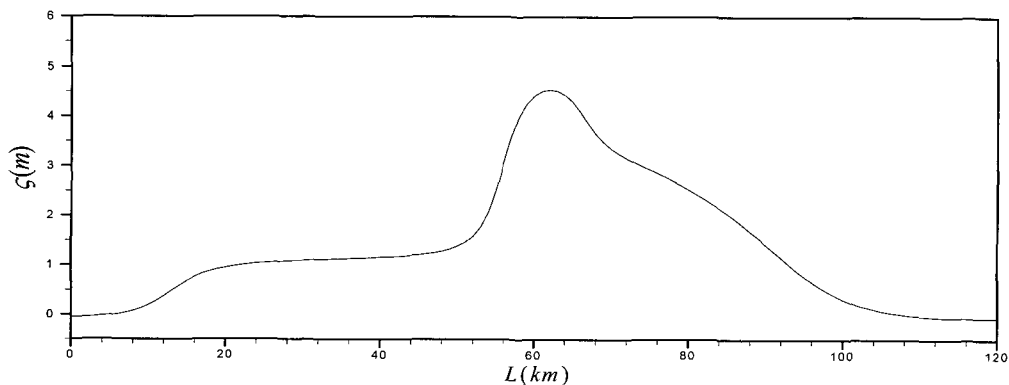
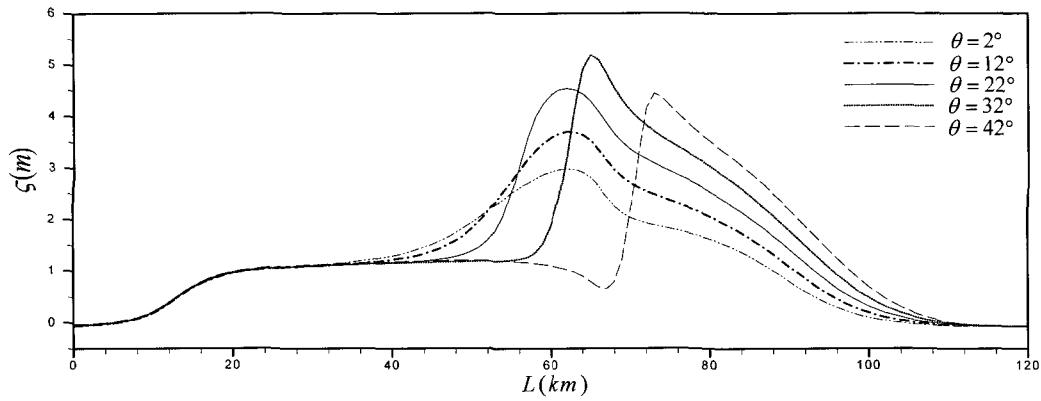


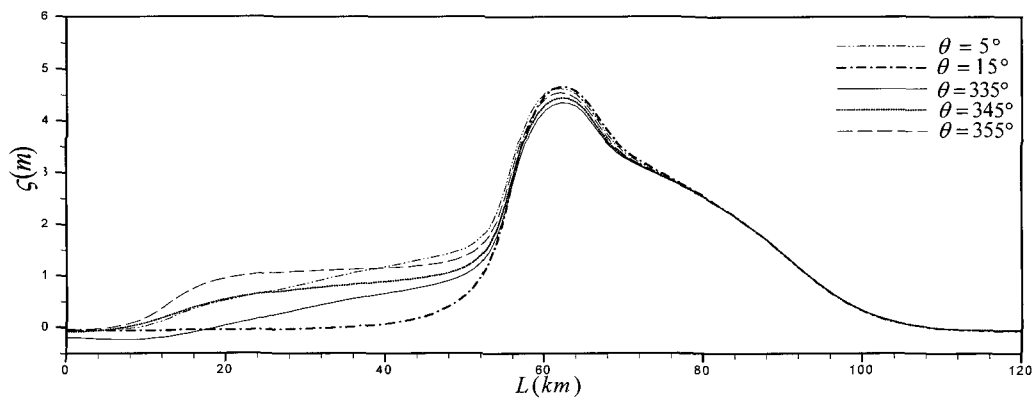
그림 4. 1983년 동해 중부 지진에 의한 초기 수면변화

또한,  $dip\ angle(\lambda)$ 에 대하여서도  $10^\circ$  간격으로 모의하였으며, 그림 7은 각 단층에서  $\lambda$ 의 변화에 대한 수면변위의 변화를 나타낸다. 그림 7에서도 실선이 원래 지진의 매개변수  $\lambda$ 이며, 이를 기준으로 하여 전후  $10^\circ$  간격으로 변화시켜 그 영향을 알아보았다. 단층 1에서  $\lambda$ 를 변화시켰을 경우  $\delta$ 와 비슷한 경향을 나타내

고 있지만 그 영향은  $\delta$ 의 경우보다 작게 나타나고 있다. 최대의 수면변위는  $\lambda = 110^\circ$ 에서 나타나고 있다. 그러나, 단층 2에서는  $\lambda$ 가 초기 수면변위의 변화에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 또한, 각각의 단층에서  $\lambda$ 를 변화시켰을 때 단층끼리 미치는 영향은 거의없음을 알 수 있었다.

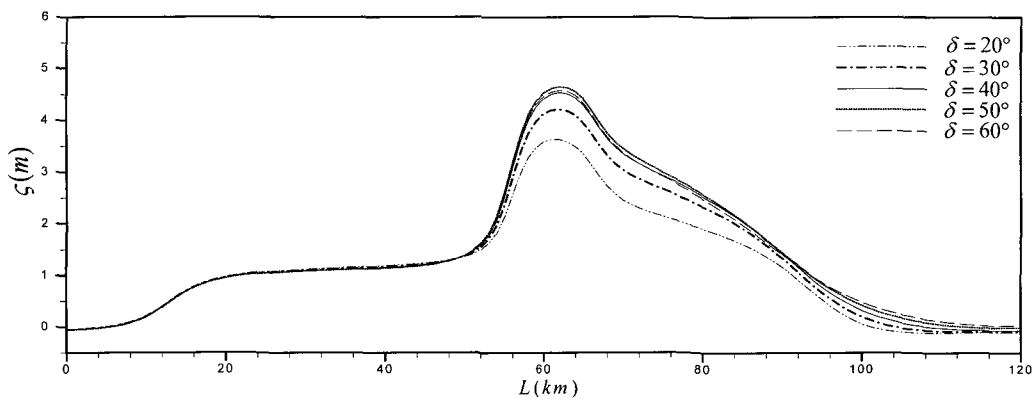


(a) 단층 1의  $\theta$ 에 따른 초기 수면변화



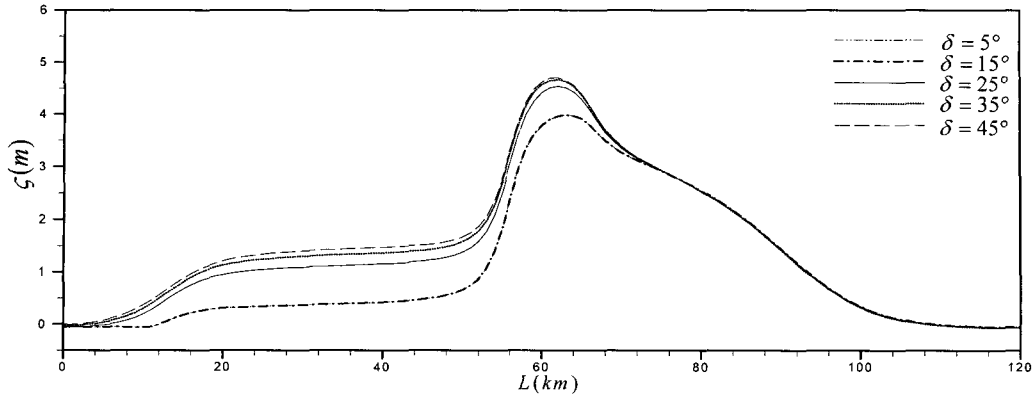
(b) 단층 2의  $\theta$ 에 따른 초기 수면변화

그림 5. 각 단층의  $\theta$ 에 따른 초기 수면변화



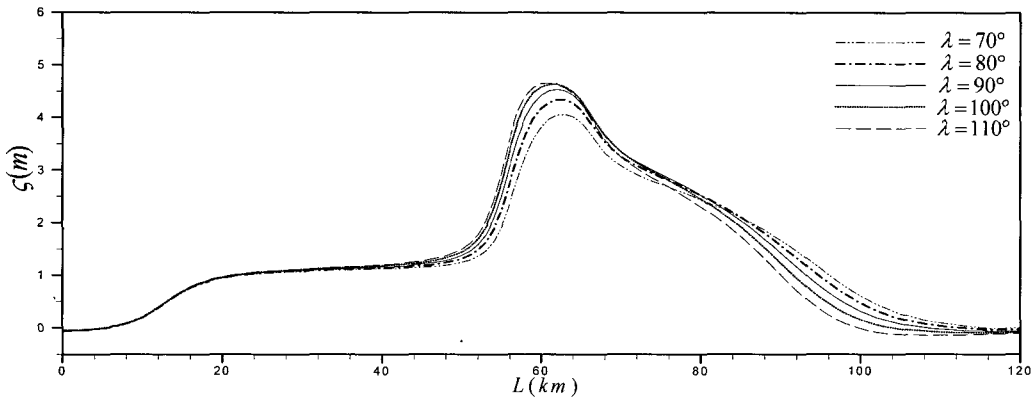
(a) 단층 1의  $\delta$ 에 따른 초기 수면변화

그림 6. 각 단층의  $\delta$ 에 따른 초기 수면 변화(계속)

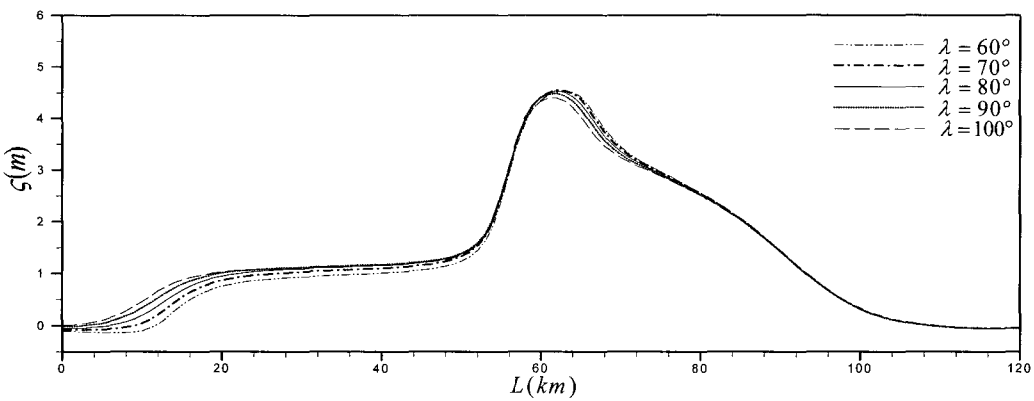


(b) 단층 2의  $\delta$ 에 따른 초기 수면변화

그림 6. 각 단층의  $\delta$ 에 따른 초기수면 변화



(a) 단층 1의  $\lambda$ 에 따른 초기 수면변화



(b) 단층 2의  $\lambda$ 에 따른 초기 수면변화

그림 7. 각 단층의  $\lambda$ 에 따른 초기 수면변화

지금까지는 단층 매개변수 하나만을 변화시켜 가면서 수면변위의 변화를 알아보았다. 이번엔 각 단층 별로 최대의 변위를 일으키는 매개변수의 값을 조합하여 수면변위의 변화를 알아보았다. 각 단층에서 최대의 변위를 일으키는 매개변수는 표 2와 같다.

표 2. 각 단층에서 최대 변위가 생기는 매개변수

단 층	$\theta(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$
단 층 1	32	50	110
단 층 2	5	45	90

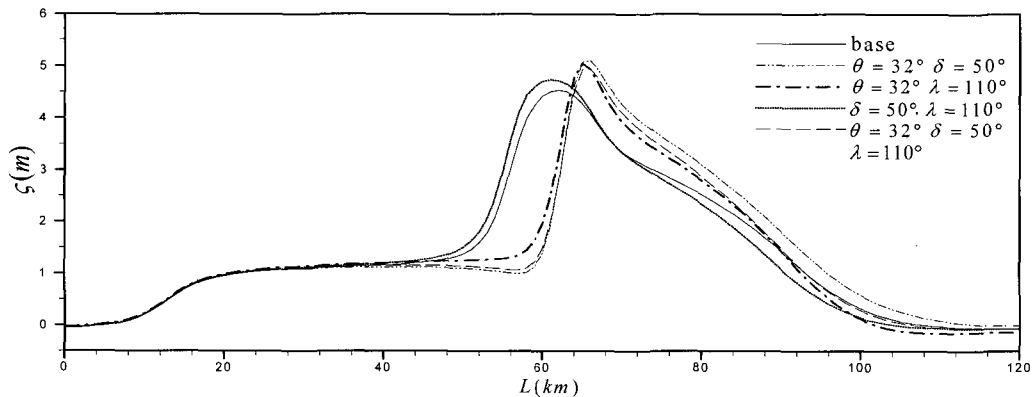
그림 8에서 단층 1에서는  $\theta$ 와  $\delta$ 를 각각  $32^\circ$ 와  $50^\circ$ 로 변화시키고  $\lambda$ 는 고정시킨 조합이 최대 수면변위를 발생시켰다. 그리고, 단층 2에서는  $\delta$ 와  $\lambda$ 를 각각  $45^\circ$ 와  $90^\circ$ 로 변화시키고  $\theta$ 를 고정시켰을 때 최대 수면변위가 발생하였다. base(동해 중부 지진 매개변수) 보다 각각의 단층에서 더 큰 수면변위가 발생함을 알 수 있었다. 각 단층에서 최대 수면변위를 발생시키는 매개변수들을 조합했음에도 불구하고 모든 매개변수를 변화시켰을 때 최대 수면변위가 나타나지 않은 것은 매개변수들의 상호작용으로 인하여 수면변화에 미치는 영향이 감소하기 때문으로 생각된다.

마지막으로, 1983년 동해 중부 지진의 단층 1과 단층 2에 수치모의 결과 얻어진 매개변수를 이용하여 최대 수면변위를 계산하여 보았다. 그림 9에서 base는 1983년 동해 중부 지진의 단층 매개변수이며, case 1과 case 2는 지금까지 수치모의 결과로 얻어진 최대 수면변위를 발생시킬 가능성이 있는 매개변수의 조합이다. 각 case의 값은 표 3과 같다. 그림 9에서 case 1의 경우가 최대 수면변위를 발생시키는

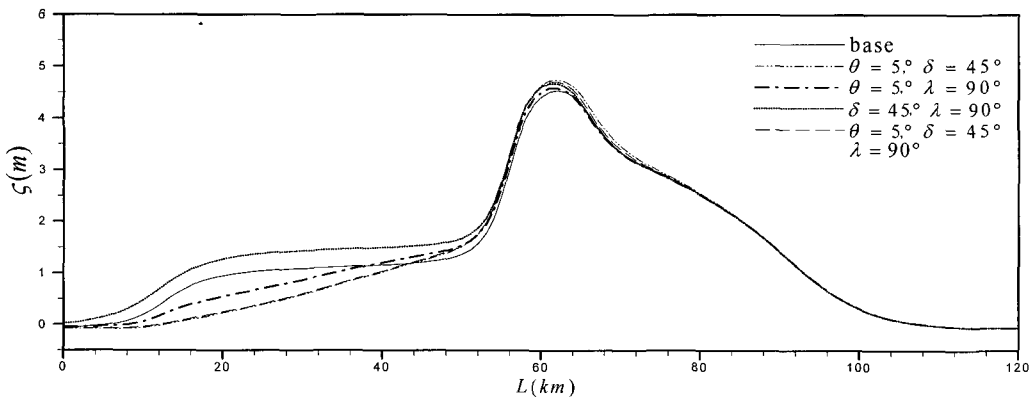
것을 알 수 있다. case 1의 경우, base 보다 단층 1과 단층 2 모두의 수면변위가 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있다. case 2의 경우 base 보다 단층 2의 수면변위는 크게 나타났으나 단층 1의 경우는 오히려 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서, 1983년 동해 중부 지진의 매개변수를 변화시켰을 때의 초기 수면변위는 case 1에서 가장 크게 나타나며, 예상 최대값은  $5.1m$ 로 지진 발생 시의 초기 수면변위 보다  $0.5m$  정도 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

표 3. 각 case의 지진 단층 매개변수

구분		$\theta(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$
base	단층 1	22	40	90
	단층 2	355	25	80
case 1	단층 1	32	50	90
	단층 2	355	45	90
case 2	단층 1	32	50	110
	단층 2	5	25	90



(a) 단층 1의 매개변수 조합에 따른 초기 수면변화



(b) 단층 2의 매개변수 조합에 따른 초기 수면변화

그림 8. 각 단층의 매개변수 조합에 따른 초기 수면변화

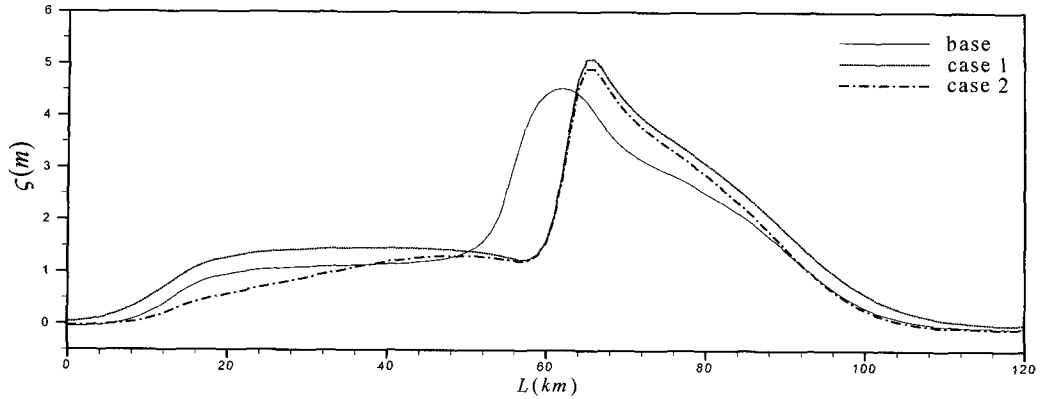


그림 9. 1983년 동해 중부 지진의 예상 최대 수면변화

도 이용될 수 있을 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 지진해일 해석을 위하여 지진에 의한 초기 수면변화에 대하여 연구하였다. 기존의 지진해일의 해석이 전파와 처오름 해석을 중심으로 이루어진 것과는 달리 본 연구에서는 최대 수면변위가 발생하는 매개변수의 조합을 구하여 최대 초기 수면변위를 예상하였다. 대상 지진 단층은 1983년 동해 중부 지진의 단층을 이용하였다. 그리고, 지진 매개변수 중  $strike\ angle(\theta)$ ,  $slip\ angle(\delta)$ ,  $dip\ angle(\lambda)$ 을 변화시켜 1983년 동해 중부 지진에 의한 초기 수면변화와 그 결과를 비교하였다.

매개변수를 변화시킨 결과  $\theta$ 가 초기 수면변위에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 또한,  $\theta$ 는 초기 수면변위의 크기뿐만 아니라 최대 수면변위가 발생하는 위치도 변화시킴을 알 수 있다. 그러나,  $\lambda$ 에 의한 영향은 극히 적은 것으로 나타났다. 각각의 매개변수를 변화시킨 후 이 매개변수들을 조합하였을 때 상호 작용에 의하여 초기 수면변화에 대한 영향이 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고, 각 단층 간의 초기 수면변화의 영향은 크지 않음을 알 수 있다. 1983년 동해 중부 지진에 의한 최대 초기 수면변위를 예측한 결과 5.1m로 지진 발생 당시의 4.6m 보다 0.5m 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

본 연구의 결과 지진에 의한 최대 초기 수면변위를 예측할 수 있었다. 향후 발생 가능한 가상 지진해일을 극한 조건에서의 초기 수면변화를 예측하여 해석함으로써 지진해일에 의한 피해를 최소화시킬 수 있을 것이며, 원자력발전소의 취수 및 배수 구조물의 설계에

#### 감사의 글

본 연구는 (주) 한국전력공사 전력연구원과 2006년 두뇌한국 21(BK21) 사업에 의해 지원되었습니다.

#### 참고 문헌

- 이호준, Imamura, F., Shuto, N. (1999). “동해에서의 쓰나미 거동특성.” 대한토목학논문집, 제19권, 제2-3호, pp. 401-409.
- 조용식, 서승원 (2001). “이동경계를 이용한 지진해일의 최대범람구역 추산.” 한국해양해양공학회지, 제13권, 제2호, pp. 100-108.
- 최병호 (2000). “한국 동해안의 쓰나미 범람재해도 작성.” 자연재해 Workshop 2000, pp. 43-46.
- Aida, I. (1984). “A source models of the 1983 Nihonkai-earthquakes tsunami.” Proc. Symp. Nihonkai Chubu Earthquake Tsunami, JSCE, pp. 9-21
- Mansiha, L., Smylie, D.E. (1971). “The displacement fields of inclined faults.” Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 61, pp. 1433-1440.

- © 논문접수일 : 2006년 04월 17일  
 © 심사의뢰일 : 2006년 04월 18일  
 © 심사완료일 : 2006년 06월 07일