

# 지진 매개변수에 따른 지진해일 초기 수면변화

글 | 김재홍 | 토목기술부 사원 | 전화 02-3433-7771 E-mail : jhkim@ssyenc.com

본 연구는 기존의 지진해일 연구와 달리 지진 매개변수에 따른 초기 수면변화의 영향에 대해 알아보았다. 1983년 동해 중부 지진의 지진 매개변수이며, 매개변수를 변화시키면서 영향이 큰 매개변수를 찾고 그 조합을 이용하여 극한의 조건을 구하였다. 그 결과, 본 연구에서는 strike angle( $\theta$ )이 초기 수면변화에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알았다. 또한, 극한의 조건에서 초기 수면변위가 증가한 것을 볼 때 지진해일 전파와 처오름에 대한 연구 이전에 매개변수에 따른 초기 수면변화를 예측하는 것이 중요함을 알 수 있었다.

## 1

### 서론

지진해일은 해저지진, 해저붕괴, 해저 화산분출 및 핵실험 등에 의하여 발생할 수 있지만, 대부분의 지진해일은 해저지진에 의하여 발생한다. 2004년 12월 발생하여 수십만의 인명피해와 막대한 재산피해를 입힌 남아시아 지진해일 역시 해저지진이 그 발생 원인이었다.

해저지진이 발생하게 되면 수면에 약 3~5m 정도의 초기 수면변화가 발생하게 된다. 이렇게 생성된 물기둥은 중력에 의하여 모든 방향으로  $\sqrt{gH}$ 의 속도로 전파되며, 수심이 얇은 해안 지역에 도달하게 되면 천수효과(Shoaling Effects)에 의하여 파고가 증가하게 되어 해안지역에 대규모 범람을 일으켜 인명과 재산피해를 초래할 수 있다.

지진해일은 세계 각국에서 관측되고 있다. 특히, 일본과 미국에서 많이 관측되고 있으며, 연구 활동 또한 활발히 이루어지고 있다. 우리나라도 1983년 동해중부 지진해일과 1993년 북해도 남서 외해 지진해일에 의하여 인명 및 재산피해를 입은 후 지진해일에 대한 연구 활동이 진행되고 있다.

조용식 등(2001)은 이미 발생하였거나 발생 가능성이 높은 지진해일을 수치 해석하여 최대 범람도를 작성하여 향후 지진해일의 발생 시 범람에 의한 피해를 최소화할 수 있도록 하였다. 이호준 등(1999)은 동해에서의 지진해일 거동특성에 대해 연구하여 대륙퇴에 의한 렌즈효과를 확인하였다. 최병호 등(2000)은 현재 우리나라의 해안재해경감 대책이 미흡함을 지적하고 해안재해에 적극적으로 대처하기 위한 방안을 연구하였다. 특히, 미국과 일본의 해안재

해 대처방안을 검토하여 우리나라 실정에 맞는 대책 수립의 필요성을 제기하였다.

우리나라에서는 위와 같이 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 우선 시 되어야 한다. 이는 초기 수면변화가 제대로 산정되지 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 지진이며, 지진 매개변수는 Aida의 모델 10을 이용하였다(Aida, 1984).

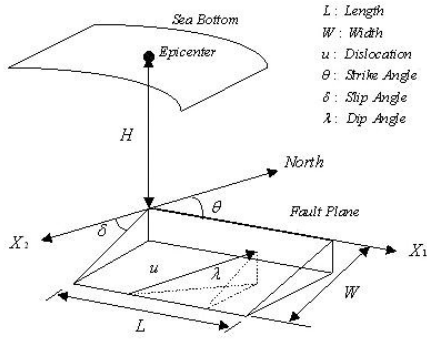
본 연구에서는 매개변수에 따른 초기 수면변화의 결과를 1983년 동해 중부 지진해일의 초기 수면변화와 비교하였다.

## 2

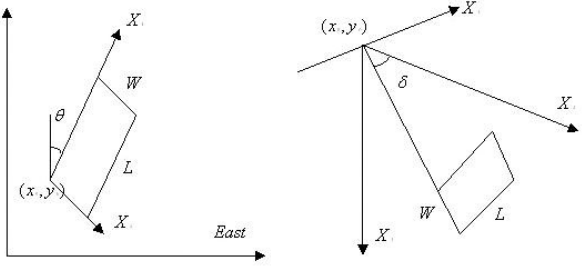
### 초기 수면변화 산정

지진을 발생시키는 단층은 여러 매개변수들로 구성되어 있다.

지진해일의 초기 수면변화는 [그림 1]에 정의된 단층 매개변수를 이용하여 추정할 수 있다. 단층 매개변수는 정적 매개변수(L, W, u, strike, slip, dip, Angle)와 동적 매개변수(파괴속도, 변형시간)의 두 가지로 분류된다.



L : Length  
W : Width  
u : Dislocation  
θ : Strike Angle  
δ : Slip Angle  
λ : Dip Angle



[그림 1] 단층모형과 관련된 각종 매개변수

Mansinha 등(1971)에 따르면 지진에 의한 초기 수면변화는 strike-slip 변위와 dip-slip 변위 등 두 개의 요소로 구성되어 있으며, [그림 2]에 도시된 것과 같이 단층 침하대 아래가 양의 값으로 측정된 좌표축  $\xi$  을 도입하였다.

먼저, strike-slip 변위는 다음과 같이 주어진다.

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

또한, dip-slip 변위는 다음과 같이 주어진다.

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

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.

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

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

여기서, S와 R은 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.

$$r_2 = x_2 \sin \delta - x_3 \cos \delta, r_3 = x_2 \cos \delta - x_3 \sin \delta$$

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

여기서,  $r_2, r_3$  및  $q_2, q_3$ 는 수직으로 측정되며, 이들은 단층 침하대와 가상의 단층대에서 아래 방향으로 관측된 현장 좌표들이다. 또한, 새로운 변수 S와 R을 다시 쓰면 다음과 같다.

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

$$R = [(x_1 - \xi_1)^2 + r_2^2 + (x_3 - \xi)^2]^{1/2}$$

여기서, h는  $x_1=0$  평면에 S를 투영한 값이며, k는 평면에  $q_3=0$  평면에 S를 투영한 값이다. 식(1)과 식(2)를 적분한 후 그 결과를 이용하여 간단히 정리하면 다음과 같다.

$$a_1 = \ln(R+r_3-\xi)$$

$$a_2 = \ln(S+q_3-\xi)$$

$$a_3 = \ln(R+x_3-\xi_3)$$

$$a_4 = \ln(S+x_3-\xi_3)$$

$$a_5 = \ln(R+x_1-\xi_1)$$

$$a_6 = \ln(R+x_1-\xi_1)$$

$$b_1 = 1+3\tan^2 \delta, \quad b_2 = 3\tan \delta \sec \delta$$

$$b_3 = 2r_2 \sin \delta, \quad b_4 = q_2 + x_2 \sin \delta$$

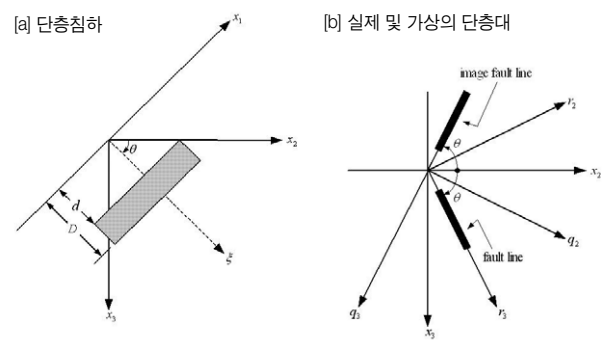
$$b_5 = 2r_2^2 \cos \delta, \quad b_6 = R+3\tan^2 \delta$$

$$b_7 = 4q_2 x_3 \sin^2 \delta, \quad b_8 = 2(q_2 + x_2 \sin \delta)(x_3 + q_3 \sin \delta)$$

$$b_9 = S(S+q_3+\xi), \quad b_{10} = 4q_2 x_3 \sin \delta$$

$$b_{11} = (x_3 + \xi_3) - q_3 \sin \delta, \quad b_{12} = 4q_2^2 q_3 x_3 \cos \delta \sin \delta$$

$$b_{13} = 2S + q_3 + \xi, \quad b_{14} = S^3 (S+q_3+\xi)^2$$



[그림 2] 단층모형을 위한 정의도

### 3

#### 수치해석

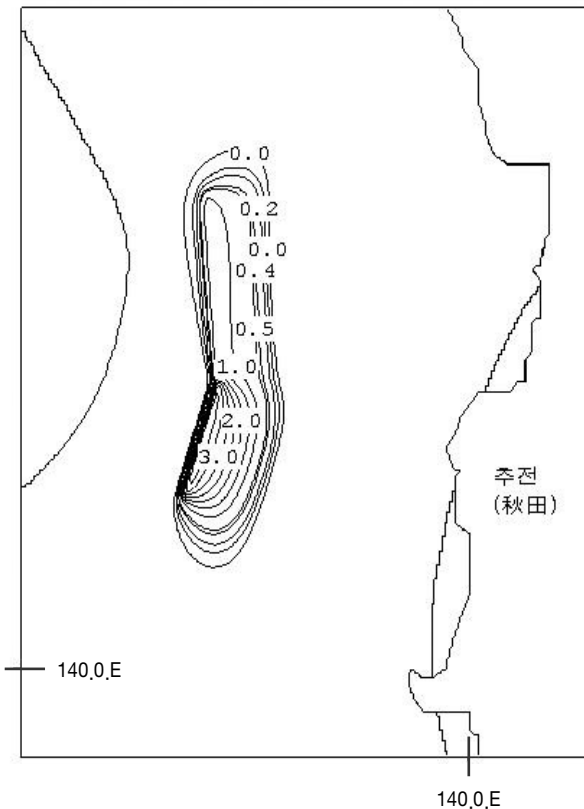
본 연구에서는 1983년 동해 중부지진 해일을 일으킨 동해 중부지진의 매개변수를 이용하여 초기 수면변화를 계산하였다.

동해 중부지진은 두 개의 단층을 가진다. 하나는 북측의 단층면으로 그 단층면이 크고, 다른 하나는 남측의 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 3]은 지진해일 초기파형의 평면도이다.

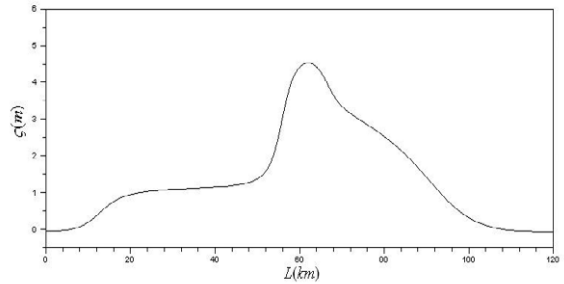
〈표 1〉 동해 중부지진의 매개변수 (Aida, 1984)

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



[그림 3] 지진해일 초기파형(단위 : m)

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

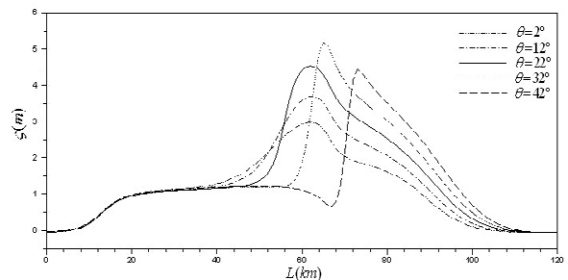


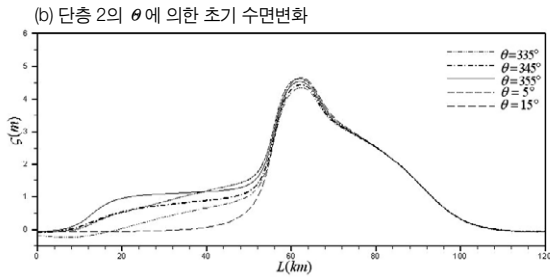
[그림 4] 1983년 동해 중부지진에 의한 초기 수면변화

본 연구에서는 지진 매개변수 중 strike angle ( $\theta$ ), slip angle ( $\delta$ ), 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 수면변위에 대한 영향을 평가한다.

먼저, strike angle ( $\theta$ )을 10 간격으로 수치해석 하였다. [그림 5]는 각 단층에서  $\theta$ 의 변화에 대한 수면변위의 변화를 나타낸다. [그림 5]에서 실선이 원래 지진의 매개변수이며, 이를 기준으로 하여 10 간격으로 변화시켜 그 영향을 알아보았다.  $\theta$ 를 증가시켰을 때 단층 1의 최대 수면변위가 앞쪽으로 이동하는 것을 알 수 있으며, 32 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.

(a) 단층 1의  $\theta$ 에 의한 초기 수면변화

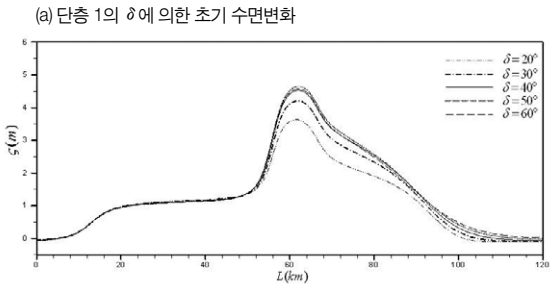




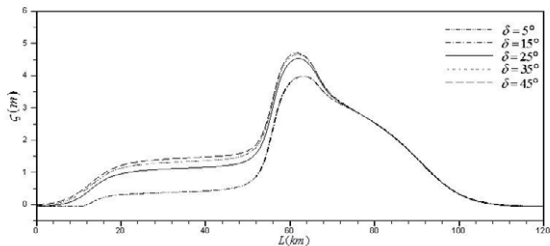
[그림 5] 각 단층의  $\theta$ 에 의한 초기 수면변화

slip angle( $\delta$ )에 대해서도 간격으로 수치해석 하였다. [그림 6]은 각 단층에서 의 변화에 대한 수면변위의 변화를 나타낸다. [그림 6]에서도 실선이 원래 지진의 매개변수이며, 이를 기준으로 하여 전후 10 간격으로 변화시켜 그 영향을 알아보았다.  $\delta$ 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  $\delta=50$ , 단층 2에서는  $\delta=45$ 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.



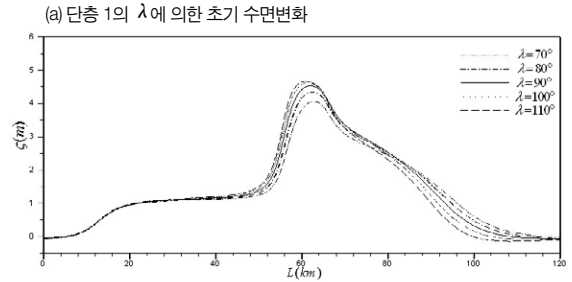
(a) 단층 1의  $\delta$ 에 의한 초기 수면변화



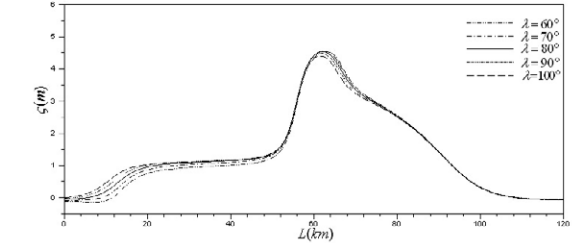
[그림 6] 각 단층의  $\delta$ 에 의한 초기 수면변화

Dip angle( $\lambda$ )에 대하여서도 간격으로 수치해석 하였으며, [그림 7]은 각 단층에서  $\lambda$ 의 변화에 대한 수면변위의 변화를 나타낸다. [그림 7]에서도 실선이 원래 지진의 매개변수이며, 이를 기준으로

하여 전후 간격으로 변화시켜 그 영향을 알아보았다. 단층 1에서  $\lambda$ 를 변화시켰을 경우  $\delta$ 와 비슷한 경향을 나타내고 있지만 그 영향은  $\delta$ 의 경우보다 작게 나타나고 있다. 최대의 수면변위는  $\lambda=110$ 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 거의 없음을 알 수 있었다.



(b) 단층 2의  $\lambda$ 에 의한 초기 수면변화



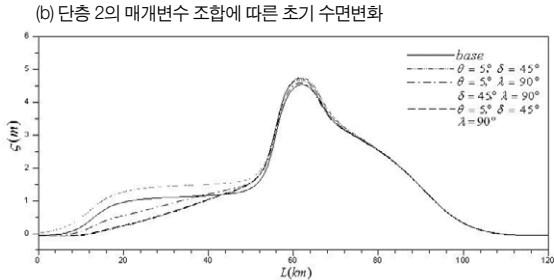
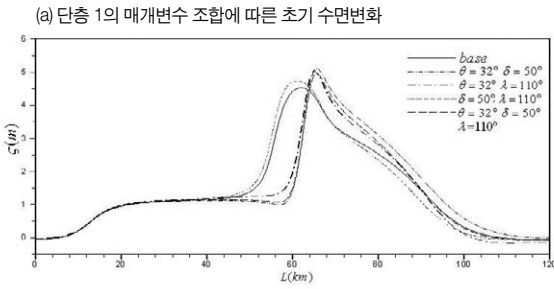
[그림 7] 각 단층의  $\lambda$ 에 의한 초기 수면변화

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 2>와 같다.

<표 2> 가변성 평가기준

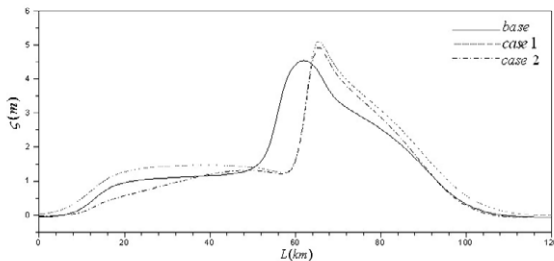
구분	$\theta$ (°)	$\delta$ (°)	$\lambda$ (°)
단층 1	32	50	110
단층 2	5	45	90

[그림 8]에서 단층 1에서는  $\theta$ 와  $\delta$ 를 각각 32°와 50°로 변화시키고  $\lambda$ 는 고정시킨 조합이 최대 수면변위를 발생시켰다. 그리고 단층 2에서는  $\delta$ 와  $\lambda$ 를 각각 45°와 90°로 변화시키고  $\theta$ 를 고정시켰을 때 최대 수면변위가 발생하였다. Base(동해 중부지진 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



[그림 8] 각 매개변수 조합에 따른 초기 수면변화

수면변화에 미치는 영향이 감소하기 때문으로 생각된다. 마지막으로 1983년 동해 중부지진의 단층 1과 단층 2에 수치모의 결과 얻어진 매개변수를 이용하여 최대 수면변위를 예상하여 보았다. [그림 9]에서 base는 1983년 동해 중부지진의 단층 매개변수이며, case 1과 case 2는 지금까지 수치모의 결과로 얻어진 최대 수면변위를 발생시킬 가능성이 있는 매개변수의 조합이다. 각 case의 값은 <표 3>과 같다. [그림 9]에서 case 1의 경우가 최대 수면변위를 발생시키는 것을 알 수 있다. case 1의 경우, base보다 단층 1과 단층 2 모두의 수면변위가 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있다. case 2의 경우 base보다 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 최대 값은 5.1m로 지진 발생 시의 초기 수면변위 보다 0.5m정도 높게 나타나는 것을 알 수 있다.



[그림 9] 1983년 동해 중부지진의 예상 최대 수면변화

<표 3> 각 case의 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

## 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 중부지진의 단층을 이용하였다. 그리고 지진 매개변수 중 strike angle( $\theta$ ), slip angle( $\delta$ ), dip angle( $\lambda$ )을 변화시켜 본래의 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, 원자력발전소와 같은 중요 구조물의 설계에도 이용될 수 있을 것이다. S

### 참고문헌

- 국립방재연구소(1999). 동해안에서의 지진해일 재해저감을 위한 연구(1). 연구보고서, NIDP-1999-07, 국립방재연구소.
- 이호준, Imamura, F., Shuto, N. (1999). 동해에서의 쓰나미 거동특성. 대한토목학회논문집, 제19권, 제2·3호, pp. 401-409.
- 조용식, 서승원(2001). 이동경계를 이용한 지진해일의 최대 범람구역 추산. 한국해양해양 공학회지, 제13권, 제2호, pp. 100-108.
- 최병호(2000). 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
- Manshina, L., Smylie, D.E. (1971). "The displacement fields of inclined faults." Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 61, pp. 1433-1440.