

지진 매개변수와 지진해일 최대파고의 상관관계

Relationship between Maximum Wave Heights of Tsunamis and Earthquake Parameters

심주열* · 하태민** · 조용식***

Sim, Ju-Yeol · Ha, Tae-Min · Cho, Yong-Sik

Abstract

The initial free surface profile and energy of a tsunami are closely related to the wave heights of a tsunami in nearshore and can be determined by using the earthquake parameters. Along the Western coast of Japan, the possibility of a tsunami triggering by undersea earthquakes is very high. Many seismologists have attempted to predict the parameters of earthquakes that could occur in these regions, but it is difficult to accurately predict them. As such, several case studies have been conducted involving behaviors of an unexpected tsunami that occurred in this region. If a relationship between the earthquake parameters and the wave heights of a tsunami is found, it would be easier to examine the effects of the tsunami. In this study, several virtual tsunami events have been simulated, and the wave heights of the tsunami are computed by varying the earthquake parameters to examine the relationship between the earthquake parameters and the tsunami wave heights. Numerical simulations have been conducted in virtual topography.

Key words : Tsunami, Earthquake parameter, Initial free surface profile, Maximum wave heights

요 지

지진해일 초기 수면변위의 형상과 에너지는 지진해일 최대파고에 많은 영향을 주며, 이는 지진 매개변수에 의해 결정된다. 일본 서북부 연안에는 지진해일을 발생시킬 가능성이 높은 지진대가 분포되어 있는데, 이러한 지진의 지진 매개변수를 정확히 예측하는 것은 매우 어려운 일이다. 그러므로 이곳에서 일어나는 지진해일의 거동을 파악하고 가장 위험한 상황을 예측하기 위해서는 다양한 경우에 대한 검토가 필요하다. 그런데 지진 매개변수와 지진해일 최대파고의 상관관계를 명확히 알 수 있다면 이러한 지진해일을 검토하는데 많은 도움이 될 것이다. 본 연구에서는 이러한 상관관계를 분석하기 위하여 가상의 지진해일을 대상으로 지진 매개변수의 변화에 따른 지진해일 최대파고 변화양상을 검토하였다.

핵심용어 : 지진해일, 지진 매개변수, 초기 수면변위, 최대파고

1. 서 론

지진해일은 초기파장이 수십에서 수백 km에 이르는 장파로서 큰 에너지 손실 없이 먼 거리를 전파할 수 있으며, 해안가에 도달하면 대규모 범람피해를 발생시키는 매우 위험한 자연재해이다. 지진해일은 해저지진, 해저 붕괴, 해저 화산 폭발 등에 의해서 발생하는데 대부분 해저지진에 의해 발생하게 되며 일반적으로 해저지진에 의해 발생하는 지진해일이 가장 위험하다. 해저지진으로 인해 해저면이 순간적으로 융기하게 되면 이로 인해 수면변화가 일어나게 되고, 이때 엄청난 양의 위치에너지가 생성된다. 이러한 위치에너지는 중력에 의해 운동에너지로 변환되어 모든 방향으로 전파되어 나가기에 이것이 바로 지진해일이다. 그러나 모든 해저지진이 지진

해일을 유발시킬 수 있는 것은 아니며, 단층의 규모와 형상 및 이동 양상에 따라 지진해일의 발생 여부가 결정된다. 또한 지진의 발생형태와 규모에 따라 지진해일의 규모가 달라지는데 지진 매개변수를 통해서 이러한 지진의 형태를 결정할 수 있다. 지진해일의 발생 위치는 대부분 판 경계를 따라 위치해 있으며 우리나라의 경우 유라시아판과 북미판의 경계인 일본 서북부 연안에서 발생하는 지진으로 인해 지진해일 피해를 입을 수 있다. 현재 많은 지진 연구자들의 연구에 의해 이러한 지진의 매개변수가 예측되고 있지만 실제 정확한 지진 매개변수를 예측하는 일은 매우 어렵다. 따라서 이러한 지진에 의한 지진해일의 영향을 예측하기 위해서는 각 지진 매개변수를 조금씩 변화시켜 가면서 다양한 경우에 대해 수치모의를 수행해야 하는데, 이때 지진 매개변수와 지진해일

*한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정(E-mail: simjuyul@hanyang.ac.kr)

**한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

***정희원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수(교신저자)

최대파고와의 상관관계를 정확히 알고 있다면 많은 도움이 될 것이다.

우리나라에서는 1983년 동해 중부 지진해일로 인해 피해를 입은 이후로 지진해일에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔지만 대부분 수치모형 개발을 통한 정확한 처리오류가 산정과 방재대책 마련에 초점이 맞추어져 있었고, 지진 매개변수와 지진해일 최대파고의 상관관계에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 조용식 등(2006)은 1983년 지진해일의 지진 매개변수를 이용하여 매개변수의 변화에 따른 지진해일 초기 수면변위의 형상과 최대 수면변위를 예측하였다. 하지만 1983년 지진해일은 2개의 단층변화에 의해 발생했기 때문에 지진 매개변수와 초기 수면변위와의 상관관계를 명확히 일대일로 대응시키는 어렵고, 초기 수면변위 결과를 지진해일 최대파고의 크기와 연관 지어 검토하지 않았다. Gica 등(2007)은 과거 태평양에서 발생했던 지진해일들의 매개변수를 기초로 하여 지진 매개변수의 변화에 따른 하와이 힐로만에서의 지진해일 최대파고 변화를 검토하였다. 하지만 실제 해저지형에 의한 영향 때문에 지진 매개변수와 지진해일 최대파고와의 일대일 상관관계를 명확히 했다고 보기는 어렵다.

본 연구에서는 하나의 단층을 가지는 지진을 가상으로 설정하여 각각의 지진 매개변수의 변화에 따른 초기 수면변위의 규모와 형상을 확인하였으며 이를 지진해일 최대파고 결과와 비교하여 상관관계를 파악하였다. 또한 포물선 형태의 가상의 영역을 사용함으로써 해저지형의 형상에 따른 영향을 최소화하였다.

2. 수치이론

지진 발생에 의한 지진해일을 해석하기 위해서는 우선 지진해일 초기 수면변위를 예측하고 그에 따른 전파과정을 수치모의 할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 Mansinha 등(1971)의 이론에 따라 지진해일의 초기 수면변위를 예측하였으며, 초기 수면변위를 예측하기 위해 필요한 지진 매개변수를 그림 1에 나타내었다.

이 이론은 선형 탄성이론을 기본으로 하고 있으며 지진에 의한 해저면의 변화는 급격히 일어나므로 그에 따른 해수면의 변화 양상은 해저면의 변화 양상과 같다고 가정할 수 있다.

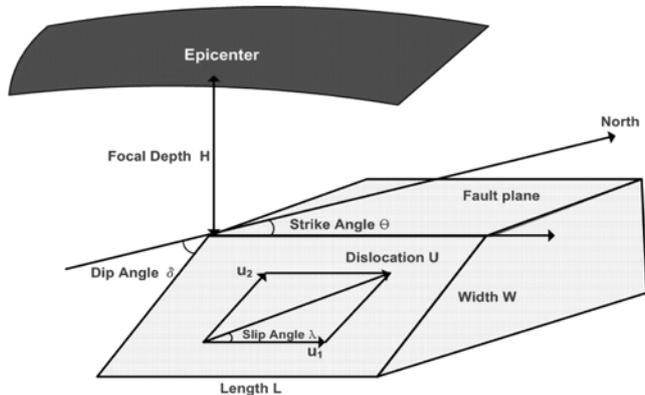


그림 1. 지진 매개변수 정의도

지진해일을 유발시키는 단층의 경우 보통 길이가 수십에서 수백 km에 이르며 수 m의 변위량 (Dislocation)을 갖는데 지진해일 초기 수면변위도 이와 비슷한 형태를 가진다. 따라서 지진해일의 전파과정에서 천수이론을 적용할 수 있으며, 수심에 비해 초기 수면변위가 매우 작기 때문에 비선형항과 바닥마찰항을 무시할 수 있다. 그러므로 지진해일의 전파과정을 해석하기 위해서는 선형 Boussinesq 방정식을 지배 방정식으로 사용하는 것이 바람직하다(Imamura 등, 1988; Liu 등, 1994). 그런데 Boussinesq 방정식에 포함되어 있는 분산항은 고차도함수이고 시간 미분항과 공간 미분항이 섞여 있어 차분하는데 제한이 따른다. 이 때문에 지진해일 전파과정을 해석하기 위해서 Boussinesq 방정식 대신 수치해석이 비교적 간단한 선형 천수방정식을 지배방정식으로 사용하고 차분 시 발생하는 수치분산 오차를 이용하여 물리적인 분산효과를 재현하는 것이 일반적이며, 본 연구에서도 선형 천수방정식을 지배방정식으로 사용하였다. 선형 천수방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

여기서, ζ 는 자유수면변위, P 와 Q 는 각각 $P = vh$ 및 $Q = vh$ 로 정의되는 와 축 방향의 체적흐름율(volume flux), h 는 정수면상의 수심을 의미한다. Cho 등(2007)이 개발한 수정기법을 사용하면 선형 천수방정식(1)-(3)를 다음과 같이 차분화할 수 있다.

$$\frac{\zeta_{i,j}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^{n-1/2}}{\Delta t} + \frac{P_{i+1/2,j}^n - P_{i-1/2,j}^n}{\Delta x} + \frac{Q_{i,j+1/2}^n - Q_{i,j-1/2}^n}{\Delta y} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{P_{i+1/2,j}^{n+1} - P_{i+1/2,j}^n}{\Delta t} + gh_{i+1/2,j} \frac{\zeta_{i+1,j}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta x} \\ & + \frac{\alpha g}{12\Delta x} h_{i+1/2,j} [\zeta_{i+2,j}^{n+1/2} - 3\zeta_{i+1,j}^{n+1/2} + 3\zeta_{i,j}^{n+1/2} - \zeta_{i-1,j}^{n+1/2}] \\ & + \frac{\gamma g}{12\Delta x} h_{i+1/2,j} [(\zeta_{i+1,j+1}^{n+1/2} - 2\zeta_{i+1,j}^{n+1/2} + \zeta_{i+1,j-1}^{n+1/2}) \\ & - (\zeta_{i,j+1}^{n+1/2} - 2\zeta_{i,j}^{n+1/2} + \zeta_{i,j-1}^{n+1/2})] = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{Q_{i,j+1/2}^{n+1} - Q_{i,j+1/2}^n}{\Delta t} + gh_{i,j+1/2} \frac{\zeta_{i,j+1}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta y} \\ & + \frac{\alpha g}{12\Delta y} h_{i,j+1/2} [\zeta_{i,j+2}^{n+1/2} - 3\zeta_{i,j+1}^{n+1/2} + 3\zeta_{i,j}^{n+1/2} - \zeta_{i,j-1}^{n+1/2}] \\ & + \frac{\gamma g}{12\Delta y} h_{i,j+1/2} [(\zeta_{i+1,j+1}^{n+1/2} - 2\zeta_{i,j+1}^{n+1/2} + \zeta_{i-1,j+1}^{n+1/2}) \\ & - (\zeta_{i+1,j}^{n+1/2} - 2\zeta_{i,j}^{n+1/2} + \zeta_{i-1,j}^{n+1/2})] = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

식(4)-(6)의 모든 항을 Taylor 급수를 이용하여 기준 격자

점 (i, j, n) 에 대하여 전개한 후 P 와 Q 를 소거하면, 다음과 같은 ζ 에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} - C_0^2 \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right) - C_0^2 \frac{(\Delta x)^2}{12} (1 + \alpha - C_r^2) \left(\frac{\partial^4 \zeta}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \zeta}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \zeta}{\partial y^4} \right) + (1 + \alpha - \gamma) C_0^2 \frac{(\Delta x)^2}{6} \frac{\partial^4 \zeta}{\partial x^2 \partial y^2} = 0 \quad (7)$$

식(7)을 선형 Boussinesq 방정식과 같이하도록 분산보정계수 α 와 γ 를 조정하면 선형 천수방정식을 차별화하는 과정에서 나타나는 수치분산이 선형 Boussinesq 방정식의 물리적분산을 대신하는 효과를 얻을 수 있다. 식 (4)~(6)의 수치분산항을 이용하여 선형 Boussinesq 방정식의 분산항을 나타내기 위해서는 분산보정계수 α 와 γ 가 다음과 같은 관계식을 만족해야 한다.

$$\alpha = \frac{4h^2 + gh(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2}{(\Delta x)^2} \quad (8)$$

$$\gamma = \alpha + 1 \quad (9)$$

이 기법에 대한 자세한 내용과 이에 대한 검증은 Cho 등 (2007)에 자세히 설명되어 있다.

3. 수치모의

3.1 지진 매개변수

지진해일 최대파고의 크기는 지진해일 초기 수면변위가 가지고 있는 에너지, 초기 수면변위의 형상, 지진해일의 전파거리 및 해저지형의 형상 등에 의해 영향을 받는데, 특히 지진해일 초기 수면변위의 형상과 에너지는 지진 매개변수에 의해 결정된다. 본 연구에서는 각각의 지진 매개변수의 변화에 따른 지진해일 최대파고의 변화 양상을 확인하기 위해 각 지진 매개변수의 기본 값을 고정한 후 이를 하나씩 변화시켜 가면서 각 매개변수의 변화가 지진해일 최대파고에 미치는 영향을 확인하였다. 표 1에 본 연구에서 사용한 지진 매개변

표 1. 지진 매개변수의 기본 값과 변화 범위

지진 매개변수	기본 값	변화 범위
Strike angle, θ (°)	0	-45~45, 135~225
Dip angle, δ (°)	35	20~60
Slip angle, λ (°)	90	70~110
Focal depth, H (km)	5	1~9
Dislocation, U (cm)	500	100~900
Length, L (km)/ Width, W (km)	100/ 50	(1666.6~71.1)/ (30~70)

수의 값을 표시하였다.

표 1에 나타낸 지진 매개변수의 기본 값과 변화 범위는 최병호 등(2002)이 일본 서해안 지역의 공백역 지진에 대해 제시한 28개의 지진 매개변수의 값을 참고로 하여 결정하였다. 최병호 등(2002)은 지금까지 연구되어온 일본 서해안 지역의 공백역 지진에 대한 매개변수 값들을 참고로 하여 광범위한 범위의 매개변수 값을 제시하였으며 이 값을 이용하는 것이 현재로서는 매우 타당한 일이라고 생각된다.

3.2 수치모의 영역

본 연구에서는 지진 매개변수와 지진해일 최대파고의 일대일 상관관계를 파악하기 위하여 수치모의를 수행하였다. 그런데 실제 지형에서는 해저지형의 형상에 의한 영향 때문에 순수하게 지진 매개변수와 지진해일 최대파고와의 관계를 파악하기 힘들며, 특히 동해안에는 대화퇴(Yamato Rise)가 있어 이러한 영향을 더욱 많이 받는다. 따라서 본 연구에서는 이러한 해저지형에 의한 영향을 최대한 배제하고 순수하게 지진 매개변수의 변화에 따른 지진해일 최대파고 변화 양상을 확인하기 위해서 포물선 형태의 경사를 가지는 가상의 지형을 구성하였으며 이를 그림 2에 나타내었다.

그림 2를 보면 가상 영역의 평면 형상을 원형으로 하였는데, 이렇게 하면 한번만 수치모의 하여도 strike angle에 따른 영향을 확인할 수 있어 편리하다. 참고로, 앞으로 특별한 언급이 없는 한 수치모의 결과는 위치 0° 관측 값을 의미한다.

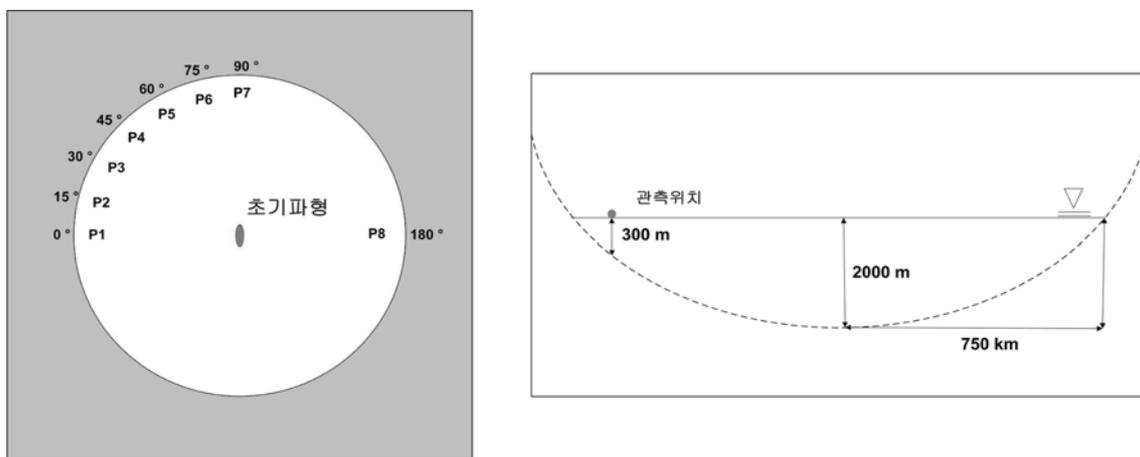


그림 2. 가상의 계산 영역 (원해)

3.3 수치모의 결과

3.3.1 Dip angle

먼저 dip angle의 변화에 따른 최대파고의 변화를 확인하였다. dip angle은 단층면이 수평면과 이루는 각도를 의미하며, 수치모의 결과를 그림 3과 표 2에 나타내었다.

표 2를 보면 $\sum_i^n A_i^2$ 란 값을 사용하였는데 이는 지진해일 초기 수면변위가 가지고 있는 에너지를 상대적으로 추정하기 위하여 사용한 값으로 위치에너지는 높이의 제곱에 비례한다는 사실을 이용하였다. 즉, A_i 를 각 격자점에서의 초기 수면변위의 값이라고 하면 $\sum_i^n A_i^2$ 는 초기 수면변위가 가지고 있는 전체 위치에너지의 크기와 비례한다고 볼 수 있다. 이 값의 절대적인 크기는 큰 의미가 없지만 지진해일 초기파형이 가지고 있는 에너지를 상대적으로 비교할 때 상당히 중요한 척도로 사용할 수 있다. 즉 이 값이 클수록 지진해일 초기 수면변위가 가지고 있는 에너지도 크다고 볼 수 있다.

그림 3에서 y 축은 지진해일 최대파고와 초기 수면변위가 가지고 있는 에너지의 상대적인 크기를 나타낸 것으로 기본 매개변수에서의 지진해일 최대파고와 초기 수면변위의 에너지 크기를 1로 봤을 때의 값이다. 그림 3을 보면 위치 0° (P1)에서는 dip angle이 50° 때 가장 높은 최대파고를 나타

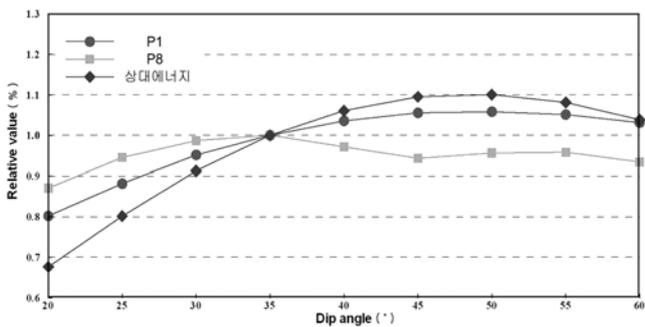


그림 3. Dip angle의 변화에 따른 지진해일 최대파고 변화양상

표 2. Dip angle의 변화에 따른 지진해일 최대파고 변화 양상

Dip angle (°)		20	25	30	35	40	45	50	55	60
$\sum_i^n A_i^2$		3627	4301	4897	5363	5690	5872	5902	5798	5570
최대파고 (m)	P1	0.564	0.620	0.669	0.703	0.728	0.742	0.744	0.739	0.725
	P8	0.398	0.432	0.451	0.457	0.444	0.431	0.437	0.438	0.427

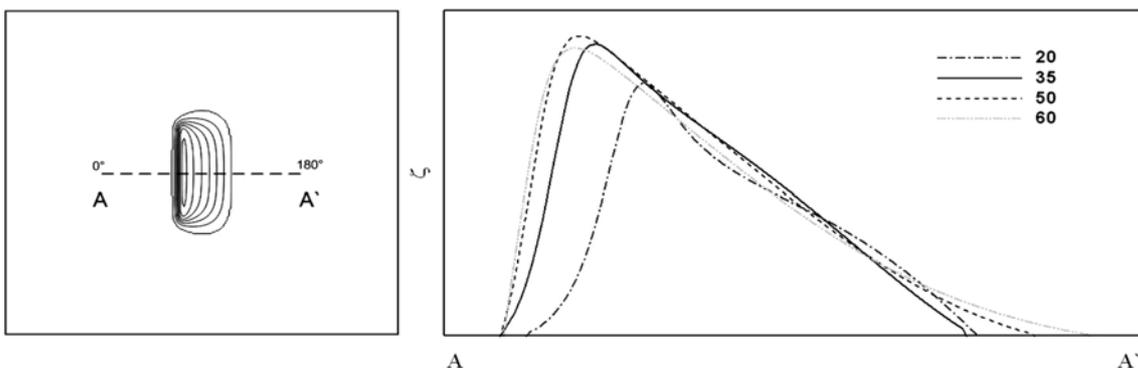


그림 4. Dip angle의 변화에 따른 초기 수면변위 단면 형상

냈으며, dip angle에 따른 지진해일 최대파고의 변화 양상이 초기 수면변위의 상대 에너지 변화 양상과 비슷하게 나타나는 것을 알 수 있다. 반면, 관측 지점의 위치가 180° (P8)인 경우에는 dip angle의 변화에 따른 특별한 양상이 나타나지 않았는데 이는 그림 4를 통해서 확인할 수 있다.

그림 4를 보면 초기 수면변위의 경사가 0° 기울어져 있고, dip angle이 커질수록 경사가 더 급해지는 것을 알 수 있는데, 경사가 급해진다는 것은 dip angle이 커질수록 전체 에너지 중에서 0° 전파되어 가는 에너지의 비율이 더 커진다는 것을 의미한다. 따라서 위치 180° 곳에서는 dip angle이 커질수록 전체 에너지는 증가하지만 그 중에서 180° 전파되는 에너지의 비율이 낮아지기 때문에 dip angle에 따른 최대파고의 변화 양상이 두드러지게 나타나지 않은 것으로 보인다.

3.3.2 Slip angle

Slip angle은 단층면 상에서 단층이 움직이는 방향이 단층 길이방향 축과 이루는 각도를 의미하며, slip angle의 변화에 따른 결과를 그림 5와 표 3에 나타내었다.

표 3을 보면 위치 0° slip angle이 90° 때 가장 높은 최대파고를 나타내며, 90° 를 중심으로 대칭적인 값을 나타낸다. 그런데 위치 15° (P2)에서의 값을 보면 slip angle이 90° 때보다 95° 와 100° 때 더 큰 최대파고를 나타내는데 이는 초기 수면변위의 평면 형상을 통해 설명할 수 있다.

그림 6을 보면 초기 수면변위의 형상이 90° 중심으로 slip angle이 작아지면 아래쪽으로, 커지면 위쪽으로 치우치는 것을 알 수 있다. 이로 인해 위치 15° 상대 에너지가 더 작은 slip angle 100° 때가 90° 때보다 더 큰 최대파고를 나타낸 것으로 보인다.

3.3.3 Strike angle

Strike angle은 단층 폭 방향이 향하는 방향을 나타내는 것

표 3. Slip angle의 변화에 따른 지진해일 최대파고

Slip angle (°)		70	75	80	85	90	95	100	105	110
$\sum_i^n A_i^2$		4831	5059	5227	5330	5363	5330	5227	5059	4831
최대파고 (m)	P1	0.664	0.681	0.693	0.701	0.703	0.701	0.693	0.681	0.664
	P2	0.481	0.498	0.513	0.524	0.531	0.534	0.534	0.530	0.522

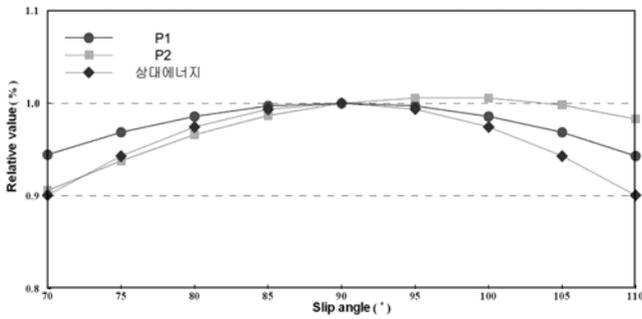


그림 5. Slip angle의 변화에 따른 지진해일 최대파고 변화 양상

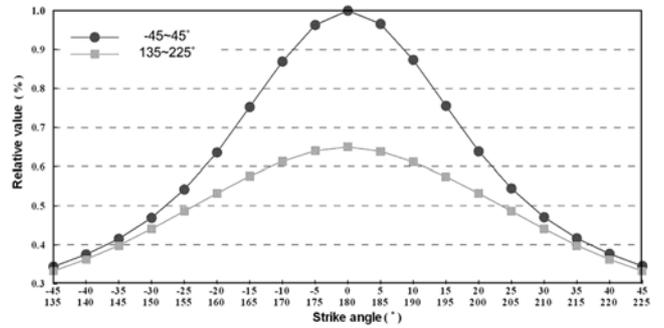


그림 7. Strike angle의 변화에 따른 지진해일 최대파고 변화 양상



그림 6. Slip angle의 변화에 따른 초기 수면변위 평면 형상

으로 초기 수면변위의 크기 자체에는 영향을 미치지 않지만 지진해일 최대파고에 매우 큰 영향을 줄 수 있는 요소이다. 수치모의 결과를 표 4와 그림 7에 나타내었다.

strike angle의 변화에 따른 최대파고는 단층면이 향하고 있는 방향인 0° 180° 중심으로 종 모양의 형태를 나타내고 있다. 또한 단층면 전면 방향인 0° 최대파고가 후면인 180° 값보다 크게 나타나는데 이는 그림 4에서 알 수 있듯이 초

기 수면변위의 경사가 단층면 전면 방향으로 기울어져 있기 때문인 것으로 보인다.

3.3.4 단층 폭(Width)과 길이(Length)의 비

지진의 규모나 지진 모멘트의 크기는 단층의 크기와 관련이 있으며, 이는 지진해일의 규모를 결정하는 매우 중요한 요인 중에 하나이다. 즉, 단층의 길이와 폭이 크면 클수록 지진해일의 규모도 당연히 커지게 된다. 그런데 지진해일 최대파고는 단순히 단층의 크기뿐만 아니라 단층의 형상, 즉 단층 폭과 길이의 비에 의해서도 영향을 받을 수 있다. 여기서는 단층의 전체 크기는 동일하게 유지 한 채 단층 폭과 길이의 비를 변화시켜 가면서 지진해일 최대파고에 미치는 영향을 확인하였다.

표 5를 보면 단층의 길이가 길어질수록 위치 0갈° 최대파고가 큰 폭으로 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 직사

표 4. Strike angle의 변화에 따른 지진해일 최대파고

Strike angle (°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
최대파고 (m)	0.703	0.679	0.614	0.531	0.449	0.383	0.331	0.293	0.265	0.243
Strike angle (°)	180	175	170	165	160	155	150	145	140	135
최대파고 (m)	0.457	0.450	0.431	0.405	0.374	0.342	0.310	0.280	0.255	0.234

표 5. 단층 폭과 길이 비에 따른 지진해일 최대파고

단층 폭/단층길이 (km/km)	30/166.7	40/125	50/100	60/83.33	70/71.43
$\sum_i^n A_i^2$	5317	5407	5363	5208	4967
최대파고 (m)	P1	0.905	0.803	0.703	0.619
	P2	0.523	0.536	0.531	0.505
	P8	0.814	0.624	0.457	0.337

표 6. 단층 변위량의 변화에 따른 지진해일 최대파고

단층 변위량 (cm)		100	200	300	400	500	600	700	800	900
$\sum_{i=1}^n A_i^2$		199	846	1924	3429	5363	7731	10525	13750	17405
최대파고 (m)	P1	0.134	0.279	0.420	0.563	0.703	0.844	0.986	1.128	1.269

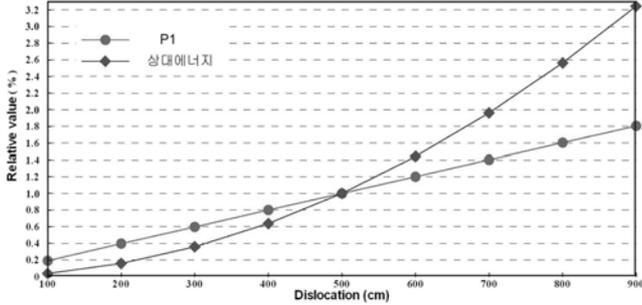


그림 8. 단층 변위량의 변화에 따른 지진해일 최대파고 변화 양상

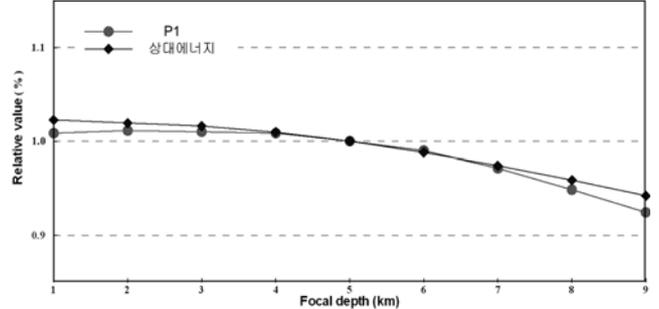


그림 9. 진앙깊이의 변화에 따른 지진해일 최대파고 변화 양상

각형 모항의 초기 수면변위가 있다면 주 에너지 전파방향은 길이가 긴 변 방향으로 되기 때문이다. 하지만 최대파고 관측 위치가 단층 전면 방향에서 조금 벗어나게 되면 단층 폭과 길이 비에 따른 영향은 현저하게 줄어들었다.

3.3.5 단층 변위량(Dislocation)

단층 변위량은 단층면이 움직인 거리를 의미하는 것으로 단층 변위량이 크다는 것은 지진의 규모가 크다는 것을 의미하며 그에 따라 지진해일의 규모가 커지는 것은 명백한 일이다. 단층 변위량과 진앙깊이에 따른 변화를 표 6과 그림 8에 나타내었다.

3.3.6 진앙깊이(Focal Depth)

진앙 깊이란 지표면으로부터 단층면 상연까지의 거리를 의

미하며 진앙 깊이가 작을수록 지진해일의 규모가 커지게 된다. 진앙깊이에 따른 변화를 표 7과 그림 9에 나타내었다.

표 7을 보면 진앙깊이가 작을수록 초기 수면변위가 가지고 있는 에너지가 더 커진다는 것을 알 수 있다.

3.3.7 근해에서의 영향

3.2절의 가상 영역에서 지진해일의 전파거리는 약 750 km 정도로 지진해일이 도달하는데 95분 정도가 소요되었다. 따라서 전파과정에서 최초 초기 수면변위의 형상에 의한 영향이 많이 감소되었을 가능성이 높다. 따라서 이번 절에서는 전파거리를 가깝게 하여 지진 매개변수가 근해 지진해일의 최대파고에 미치는 영향을 검토하였다. 수치모의 영역을 그림 10에 나타내었다.

수치모의는 초기 수면변위의 형상과 관련이 많은 dip

표 7. 진앙깊이의 변화에 따른 지진해일 최대파고

진앙깊이 (km)		1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\sum_{i=1}^n A_i^2$		5485	5467	5450	5415	5363	5300	5225	5143	5054
최대파고 (m)	P1	0.707	0.709	0.711	0.709	0.703	0.696	0.683	0.667	0.650

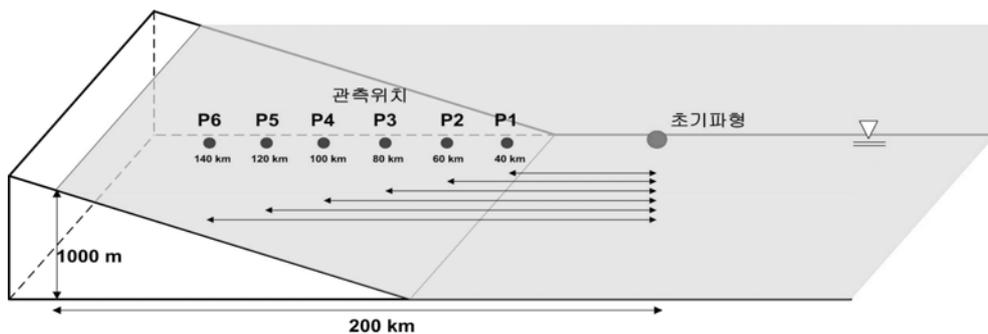


그림 10. 가상의 계산 영역 (근해)

표 8. Dip angle의 변화에 따른 지진해일 최대파고 (근해)

Dip angle (°)		20	25	30	35	40	45	50	55	60
$\sum_i^n A_i^2$		3627	4301	4897	5363	5690	5872	5902	5798	5570
최대파고 (m)	P2	1.196	1.296	1.397	1.469	1.525	1.568	1.585	1.578	1.584
	P4	1.229	1.360	1.495	1.581	1.647	1.693	1.712	1.709	1.701
	P6	1.633	1.801	1.963	2.059	2.130	2.178	2.201	2.191	2.161

angle 과 단층 폭과 길이 비에 대해 수행하였으며 결과를 표 8~9에 각각 나타내었다.

표 8을 보면 전파거리가 가까운 만큼 확실히 전체적인 최대파고 값이 증가한 것을 확인할 수 있다. 하지만 dip angle의 변화에 따른 최대파고 변화의 비가 3.2절과 비교해서 크게 달라지지 않아, 전파거리에 따른 차이를 확인하지는 못하였다.

dip angle의 경우와 달리 단층 폭과 길이 비에 따른 결과는 원해(그림 2 참조)에서의 결과와 차이를 보였다. 원해인 경우에는 단층 길이가 길어질수록 더 높은 최대파고를 기록

했지만 근해의 경우에는 그러한 경향이 특별히 나타나지 않았다. 이는 전파거리와 단층형상을 통해 어느 정도 설명 가능하다. 근해의 경우 전파거리가 원해에 비해 상대적으로 짧기 때문에 지진해일이 충분히 퍼져나가기 전에 관측 점에 도달하게 된다. 즉, 최초 초기 수면변위의 형상을 더 많이 유지한 채로 관측 점에 도달하게 된다는 의미이다.

그림 11을 보면 단층 길이가 짧아질수록 초기 수면변위의 경사가 급해지고 최대수면 변위의 높이도 증가하는 것을 알 수 있다. 관측 지점이 초기 수면변위의 바로 옆에 있다고 가정하면 단층 길이가 짧을(단층 폭이 길)수록 더 높은 최대파

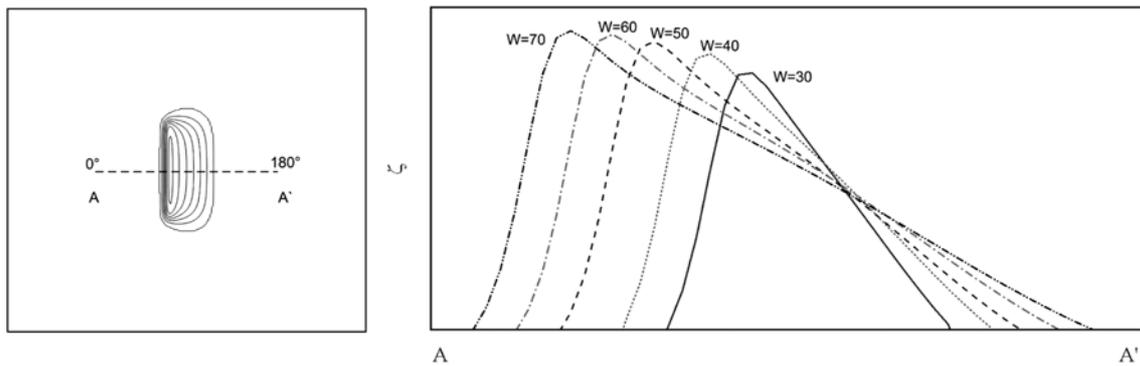


그림 11. 단층 폭과 길이 비의 변화에 따른 초기 수면변위 형상

표 9. 단층 폭과 길이 비에 따른 지진해일 최대파고 (근해)

단층 폭/단층 길이 (km/km)		30/166.7	40/125	50/100	60/83.33	70/71.43
$\sum_i^n A_i^2$		5317	5407	5363	5208	4967
최대파고 (m)	P2	1.363	1.458	1.469	1.436	1.380
	P4	1.573	1.656	1.581	1.458	1.335
	P6	2.205	2.248	2.059	1.851	1.653

표 10. 지진 매개변수의 변화에 따른 지진해일 최대파고 변화 결과

지진 매개변수	기본 값	변화 범위	상대에너지의 변화 범위	지진해일 최대파고의 변화 범위	위험 변수
Strike angle, (°)	0	0 ~ 45, 135 ~ 180	-	0.35 ~ 1.00	0
Dip angle, d (°)	35	20 ~ 60	0.69 ~ 1.10	0.68 ~ 1.10	50
Slip angle, (°)	90	70 ~ 110	0.9 ~ 1.0	0.94 ~ 1.00	90
진앙 깊이, H (km)	5	1 ~ 9	0.94 ~ 1.02	0.92 ~ 1.01	1 ~ 5
변위량, U (cm)	500	100 ~ 900	0.03 ~ 3.24	0.15 ~ 1.81	900
단층 길이 (km)/단층 폭 (km)	100/50	(166.7~71.4)/(30~70)	0.92 ~ 1.01	0.78 ~ 1.29	166.7/30

고를 기록하게 될 것이다. 하지만 실제 관측 지점이 초기 수면변위 바로 옆에 위치하고 있지는 않으므로 이러한 이유와 단층 길이에 의한 영향이 혼합되어 표 9와 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다.

그런데 위의 결과가 근해 지진해일의 경우에는 단층 폭이 50° 경우가 단층 폭이 30° 경우에 비해 더 위험하다는 것을 의미하지도 않는다. 표 9의 결과는 단지 AA' 라인에 있는 지점에서의 관측 결과를 기록한 것이기 때문이다. 비록 그 지점에서의 관측 값은 단층 폭이 50° 경우가 더 크지만 단층 폭이 30° 경우는 단층 길이가 더 길기 때문에 더 광범위한 범위에 큰 피해를 입힐 수 있다.

표 10에 지진 매개변수의 변화에 따른 지진해일 최대파고 변화 결과에 대한 수치모의 결과 및 가장 높은 최대파고를 나타낸 지진 매개변수의 값을 전체적으로 요약하여 나타내었다.

수치모의 결과 지진해일 최대파고는 본 연구에서 사용한 상대 에너지의 크기가 클수록 높아지는 것을 확인할 수 있었으며 일부 예외적인 부분은 초기 수면변위의 형상으로 설명할 수 있었다. 특히 strike angle과 slip angle 및 단층 폭과 길이 비에 따른 결과는 초기 수면변위의 형상에 의한 영향을 잘 보여주었다.

4. 결 론

지진해일에 의한 최대파고는 최초 지진발생 직후의 지진해일 초기 수면변위의 규모와 형상 및 지진해일이 전파되는 해저지형의 형상에 의해 영향을 받게 되며 지진해일을 이와 관련하여 해석하는 일은 매우 중요한 일이다. 이 중에서 초기 수면변위의 규모와 형상은 지진 매개변수에 의해 결정되며, 본 연구에서는 지진 매개변수를 변화시켜 가면서 그에 따른 지진해일 최대파고의 변화 양상을 확인하였으며, 해저지형의 형상에 따른 영향은 포물선 형태를 가지는 가상의 영역을 사용함으로써 최소화하였다. 또한, 초기 수면변위의 규모를 예측하기 위하여 각 격자점에서의 수면변위를 제공한 값인 상대 에너지 개념을 도입하였다. 이 값은 초기파형을 구성하는 수치격자의 크기에 따라 값이 달라지므로 절대적인 크기는 큰 의미가 없지만, 정해진 격자크기에서 여러 가지 초기파형에 따른 지진해일 최대파고의 상대적인 크기를 예측하는데 상당히 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

1983년 동해 중부 지진해일이 발생한 이후 국내에서 지진해일에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔지만 주로 정확한 초오름높이 산정 및 방재대책에 초점이 맞추어져 있었으며 지진 매개변수와 지진해일 최대파고의 상관관계에 대한 연구는 미흡한 실정이었다. 물론 오랜 기간 지진해일을 연구한 전문가들은 어느 정도 이에 대한 감을 가지고 있지만 이를 제대로 검토해 볼 필요가 있었으며 본 연구의 결과는 앞으로 지진해일을 연구하는 석학들에게 좋은 참고자료로 사용될 것으로 기대한다. 마지막으로 본 연구에서는 지진해일의 최대파고 변화 양상을 지진 매개변수에 따른 초기 수면변위의 규모와 형상에 초점을 맞추어 연구를 진행하였는데 앞으로 이를 실제지형으로 확장시켜 해저지형의 형상에 따른 영향과 같이 검토한다면, 좀 더 일반적이고 유용한 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- 조용식, 김재홍, 손대회, 김성민 (2006) 지진 매개변수에 따른 지진해일 초기 수면. **한국방재학회 논문집**, 한국방재학회, 제6권, 제2호, pp. 61-68.
- 최병호, 홍성진, 이제신 (2002) 공백역 지진에 의한 동해안의 지진해일 산정. **한국지진공학회 논문집**, 한국지진공학회, 제6권, 제3호, pp. 73-86.
- Cho, Y.-S., and Sohn, D.-H. (2007) Practical modified scheme of linear shallow-water equations for distant propagation of tsunamis. *Ocean Engineering*, Vol. 34, No. 8, pp. 1769-1777.
- Gica, E., Teng, M.H., Liu, P.L.-F., Titov, V., and Zhou, H. (2007) Sensitivity Analysis of Source Parameters for Earthquake-Generated Distant Tsunamis. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 6, pp. 429-441.
- Imamura, F., and Goto, C. (1988) Truncation error in tsunami simulation by the finite difference method. *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 31, pp. 245-263.
- Liu, P.L.-F., Cho, Y.-S., Yoon, S.B., and Seo, S.N. (1994) Numerical simulations of the 1960 Chilean tsunami propagation and inundation at Hilo, Hawaii. *Recent Development in Tsunami Research*, Edited by M.I. El-Sabh, Kluwer Academic Publishers.
- Mansiha, L., and Smylie, D.E. (1971) The displacement fields of inclined faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 61, pp. 1433-1440.

- ◎ 논문접수일 : 09년 02월 01일
 ◎ 심사의뢰일 : 09년 02월 02일
 ◎ 심사완료일 : 09년 05월 04일