

단층 파라미터에 따른 확률론적 지진해일 재해곡선의 민감도 분석 Sensitivity Analysis According to Fault Parameters for Probabilistic Tsunami Hazard Curves

조명환* · 김건형** · 윤성범*

Myeong Hwan Jho*, Gun Hyeong Kim** and Sung Bum Yoon*

요 지 : 확률론적 지진해일 재해도 평가를 위한 로직트리는 지진발생 패턴의 다양성을 고려하기 위해 많은 변수를 고려하여 구성된다. 고려되는 변수가 많아질수록 재해도 평가 결과는 다양한 패턴으로 변화한다. 본 연구에서는 로직트리에 제시되어 있는 다양한 단층 파라미터 변수와 스케일링 규칙이 부산 근해에서의 지진해일 재해도에 미치는 영향을 평가하였다. 로직트리에 제시된 변수 중 주향각, 경사각 및 단층변위분포 변수의 값을 변화시켜가며 지진해일 전파모의를 수행하고, 그 결과를 이용하여 민감도 분석을 수행하였다. 그 결과 주향각 변수가 재해도 평가 결과에 미치는 영향은 예상보다 크지 않은 반면, 초기수면의 공간적 분포에 영향을 줄 수 있는 경사각과 단층변위분포의 영향이 크게 나타났다. 이는 주향각보다는 초기수면의 형상을 결정하는 경사각과 단층변위의 공간분포가 동해 지진해일의 재해도 평가에서 중요한자임을 보여준다.

핵심용어 : 확률론적 지진해일 재해도 분석, 로직트리, 민감도 분석

Abstract : Logic trees for probabilistic tsunami hazard assessment include numerous variables to take various uncertainty on earthquake generation into consideration. Results from the hazard assessment vary in different way as more variables are considered in the logic tree. This study is conducted to estimate the effects of various scaling laws and fault parameters on tsunami hazard at the nearshore of Busan. Active fault parameters, such as strike angle, dip angle and asperity, are adjusted in the modelling of tsunami propagation, and the numerical results are used in the sensitivity analysis. The influence of strike angle to tsunami hazard is not as much significant as it is expected, instead, dip angle and asperity show a considerable impact to tsunami hazard assessment. It is shown that the dip angle and the asperity which determine the initial wave form are more important than the strike angle for the assessment of tsunami hazard in the East Sea.

Keywords : tsunami hazard analysis, logic trees, sensitivity analysis

1. 서 론

확률론적 지진해일 재해도 평가는 지진의 발생과 지진해일로 인한 해수위에 관한 불확실성을 고려하여 지진해일고가 발생할 가능성의 범위를 평가한다. 지진의 불확실성을 설명하기 위한 여러 가지 방법 중의 하나로서 로직트리가 사용된다. 로직트리는 수형도와 유사한 시각적 디자인을 가지고 있으며 사용자가 고려하고자 하는 변수와 그 변수 값의 범위를 구조화하여 관리하기에 용이하므로 확률론적 지진해일 재해도 평가에 자주 활용된다. 지진해일의 재해도 평가를 위한 로직트리에서는 주로 지진해일 초기수면을 재현하기 위한 지진 파라미터(단층 길이, 단층 폭 등)가 분기요소로 고려된다. 동해 동연부에서 발생하는 지진에 대한 로직트리는 일본 토목학회

(이하 JSCE)에서 발간한 보고서(JSCE, 2002, 2011, 2016)에서 얻을 수 있으며, 일본 서안에 대한 파라미터 연구 자료가 제시되어 있다. 우리나라 해안에 대한 지진해일 재해도 평가는 Rhee et al.(2015)이 일본 원자력학회(Atomic Energy Society of Japan, 2011)가 제시한 방법을 기반으로 우리나라 동해안 중부지역에 대한 확률론적 지진해일 재해도 평가와 로직트리 변수의 민감도 분석을 수행한 바 있다. 그러나 근거리에서 발생한 지진해일로서 영향을 받게 되는 일본과는 달리 우리나라에 내습한 지진해일은 원지에서 발생한 지진해일을 고려할 필요가 있다. 따라서 Jho et al.(2019)은 Rhee et al.(2015)과 비슷한 방법을 사용하면서도 원지지진해일의 전파특성을 고려하기 위해 기존 로직트리를 보완하여 우리나라 동해안 남부지역에 대한 확률론적 지진해일 재해도 평가를 수

*한양대학교 건설환경공학과(Corresponding author : Sung Bum Yoon, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, 55 Hanyangdaehak-ro, Sangnok-gu, Ansan, Gyeonggi-do 15588, Korea, Tel: +82-31-400-5144, sbyoon@hanyang.ac.kr)

** (주)하이씨그(HYCERG Inc.)

행하였다. 그러나 Jho et al.(2019)에서 사용된 스케일링 법칙은 Rhee et al.(2015)이 사용한 방법과 달리 JSCE(2016)에서 제시된 스케일링 규칙을 적용하였다. 지진해일 수치모의와 재해도 평가에 있어 초기수면의 형태는 매우 중요한 요소이므로 스케일링 규칙의 변경에 의해 지진해일 재해도 평가 결과에 변화가 따를 것으로 예상된다. 본 연구에서는 Jho et al.(2019)에서 고려한 로직트리에 다른 스케일링 규칙 분기를 추가하여 우리나라 부산 해안지역에서의 확률론적 지진해일 재해도 평가를 수행하고 로직트리 변수에 따른 지진해일 재해곡선의 민감도를 분석하였다.

2. 지진해일 발생해역 및 민감도 분석을 위한 로직트리 변수 구성

본 연구에서 지진해일 재해도의 민감도 분석을 위해 사용한 로직트리와 지진해일 발생해역은 Jho et al.(2019)이 제시한 바를 기반으로 하였다. 해당 연구에 제시된 지진해일 발생해역은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 세그먼트 A와 세그먼트 B에 해당하는 장소이고, 각 영역에 대한 로직트리는 Fig. 2에 보인 바와 같이 지진 규모, 재현기간, 단층 주향(Strike angle), 경사각(Dip angle), 경사위치, 단층 변위분포(Asperity), 표준편차와 타절범위 등, 총 8개 변수로 구성된다.

지진규모에 따른 지진 파라미터 설정을 위한 스케일링 규칙은 많은 연구자들에 의해 제시된 바 있다(Somerville et al., 1999; Irikura and Miyake, 2001; Murotani et al., 2010; Tajima et al., 2013). Jho et al.(2019)이 사용한 스케일링 규칙은 2016년도에 출간된 원자력발전소 지진해일 평가기술(JSCE, 2016)에 제시된 방법이다. 일본 토목학회에서 현재까지 사용한 이력이 있는 스케일링 규칙은 2가지 방법이 존재한다. 먼저, 지진의 규모와 단층의 길이가 비례한다는 가정을 바탕으로 한 Takemura(1998)의 방법을 사용한 스케일링 규칙(규칙 1)이다. 이 방법은 2011년도 일본 토목학회에서 출간한 확률론적 지진해일 해저드 해석의 방법에 적용되었다. 두 번째 방법은 2016년도 원자력발전소 지진해일 평가기술에 제안된 방법으로 Somerville et al.(1999), Irikura and Miyake(2001), 일본 국토교통성(Ministry of Land,

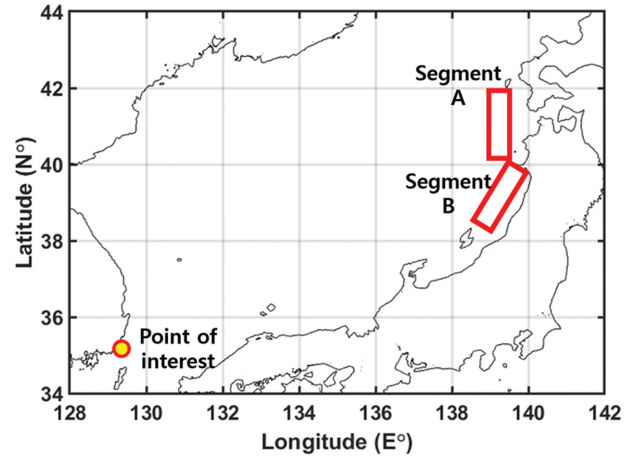


Fig. 1. Tsunamigenic active segments and a point of interest.

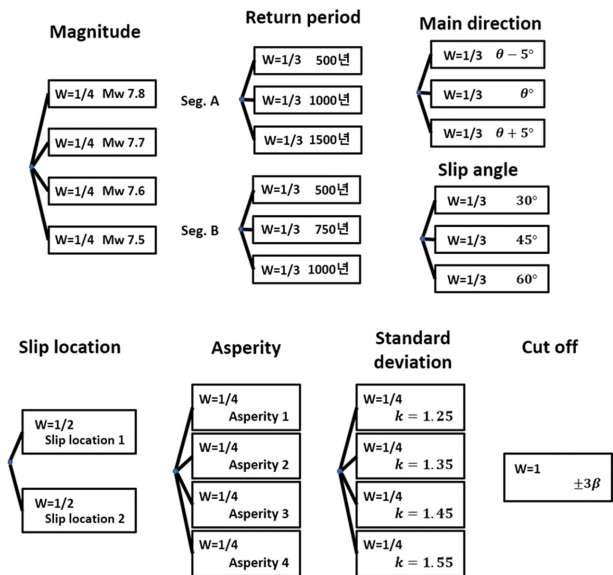


Fig. 2. Logic tree for tsunami hazard assessment by Jho et al. (2019).

Infrastructure, Transport and Tourism, 2014)이 제시한 지진 모멘트와 단층활동면적의 관계를 종합하여 구성한 스케일링 규칙(규칙 2)이다. 각각의 스케일링 규칙이 적용되는 절차는 Fig. 3과 같이 진행된다. 지진의 모멘트 규모(M_w)로부터 지진 모멘트량(M_0)을 결정하는 과정, 경사각(δ)과 지진발생역의 지

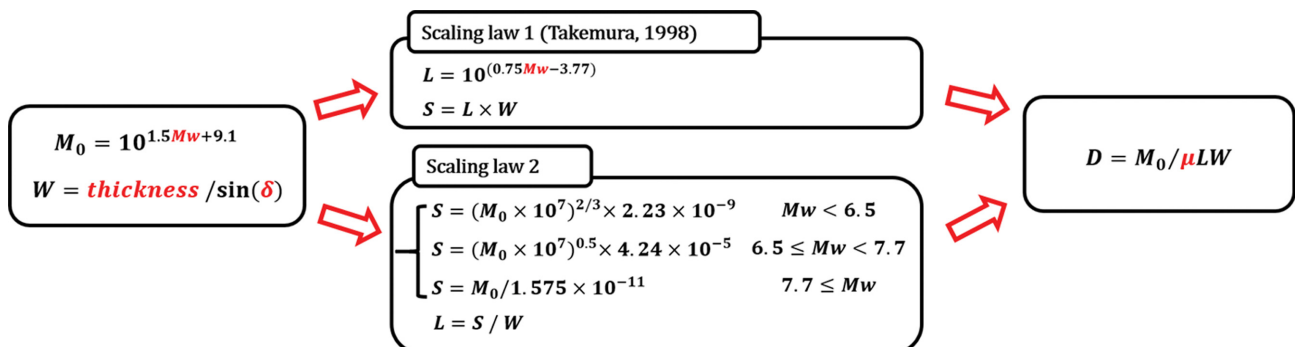


Fig. 3. Procedure to determine fault parameters in scaling laws.

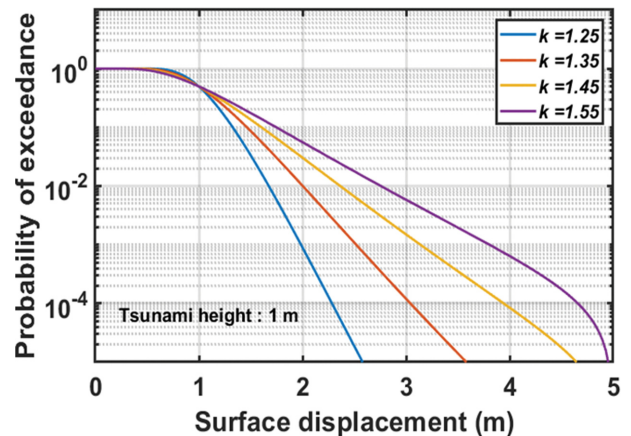
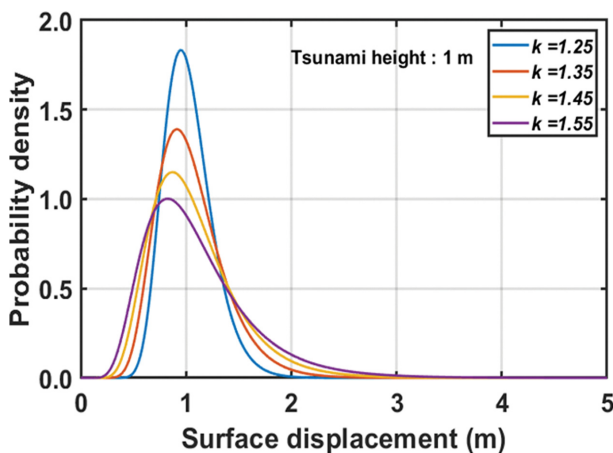
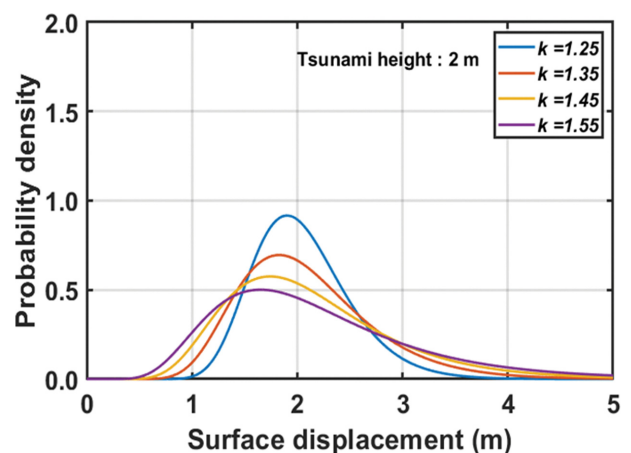
Table 1. Comparison of fault parameters obtained from two different scaling laws

Magnitude (M_w)	Scaling law 1			Scaling law 2			Remarks
	Length (km)	Width (km)	Disp. (m)	Length (km)	Width (km)	Disp. (m)	
7.5	71.61	28.28	3.15	70.93	28.28	3.19	Dip angle (δ)
7.6	85.11	28.28	3.75	84.30	28.28	3.79	45°
7.7	101.15	28.28	4.46	100.27	28.28	4.50	Thickness
7.8	120.22	28.28	5.30	141.64	28.28	4.50	20 km
7.9	142.89	28.28	6.30	200.07	28.28	4.50	Stiffness (μ)
8.0	169.82	28.28	7.49	282.60	28.28	4.50	3.5×10^{10} N/m ²

각 두께로부터 단층의 폭(W)을 산정하는 부분은 공통적으로 진행된다. 스케일링 규칙 1은 지진모멘트로부터 단층의 길이(L)를 정하고, 스케일링 규칙 2는 지진모멘트로부터 단층의 활동면적(S)을 산정한다. 이 단계까지 수행하면 단층의 길이, 폭, 면적이 결정된 단계이므로 지진모멘트를 지진발생지역의 강성률(μ)과 단층활동면적($S=L \times W$)으로 나누면 단층활동변위의 평균값을 구할 수 있다. Table 1에 나타난 바와 같이 스케일링 규칙 2는 4.5 m의 단층변위 상한이 내포되어 있으며, 이에 따라 지진규모가 커져서 단층 변위량이 상한에 도달하면 단층 길이의 변화량이 급격히 커지게 된다. 따라서 규모와 단층경사각, 단층의 두께가 동등하다면 스케일링 규칙 2는 스케일링 규칙 1에 비해 단층 길이가 길고 변위량은 작은 특성을 가지게 된다. 지진해일의 전파모의에 있어서 초기 수면의 형상은 매우 중요하므로 적용할 스케일링 규칙 선택 또한 재해도 평가에 큰 영향을 미칠 것이라고 판단된다. 따라서 스케일링 규칙에 관한 분기를 Jho et al. (2019)의 로직 트리에 추가하여 파라미터 설정 방법 선택에 따른 불확실성을 고려하였다.

Jho et al.(2019)이 작성한 로직트리에서 고려되었던 변수 중 경사위치(slip location)는 경도방향의 위치변동을 내포하고 있으므로 경사각도 만의 효과를 확인할 수 없다 판단하여 본 연구의 민감도 분석에서 배제하였다. 재해기간의 내재적 불확실성과 관련된 변수(표준편차, 타절범위)는 지진해일 수

치모의에서 산출된 결과에 적용되는 변수이므로 해당 변수에 의한 지진해일 재해도의 변화는 수치모의 없이 확인이 가능하다. 관심지점에서 발생가능한 지진해일고 분포는 대수정규 분포를 따르며 구체적인 분포를 결정하는 데에는 해일고 산출값과 표준편차가 필요하다. 예를 들어 해일고가 1 m로 산출되었을 경우 Jho et al.(2019)에서 설정한 표준편차 4개($k=1.25, 1.35, 1.45, 1.55$)에 대하여 수치모의 및 지형의 불확실성을 고려한 해일고 확률밀도함수는 Fig. 4와 같이 결정된다. 표준편차가 증가함에 따라 확률밀도함수의 첨두치는 점차 줄고 분포의 형상이 전반적으로 고르게 형성되는 것을 확인할

**Fig. 5.** Hazard curves for 1 m calculated tsunami height.**Fig. 4.** Log-normal distribution of probability density for 1 m calculated tsunami height.**Fig. 6.** Log-normal distribution of probability density for 2 m calculated tsunami height.

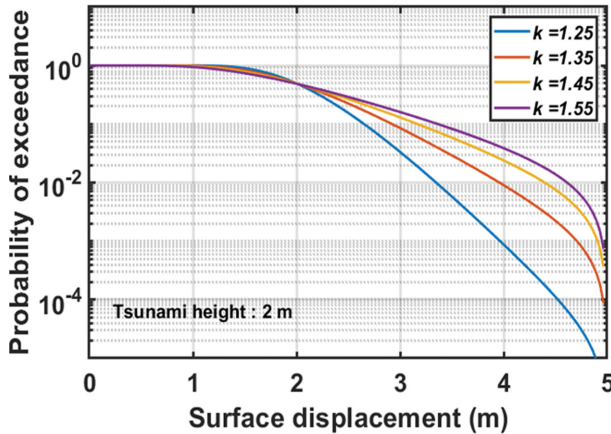
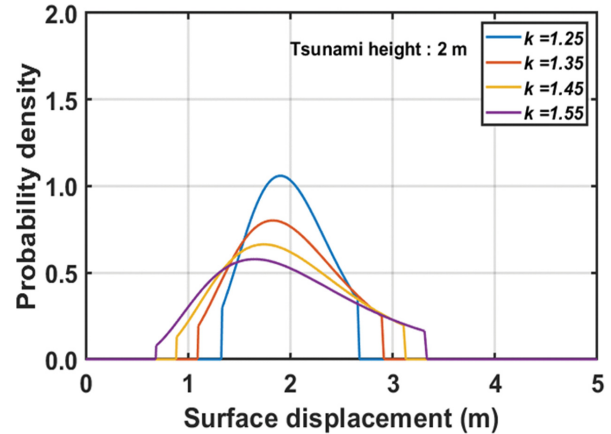
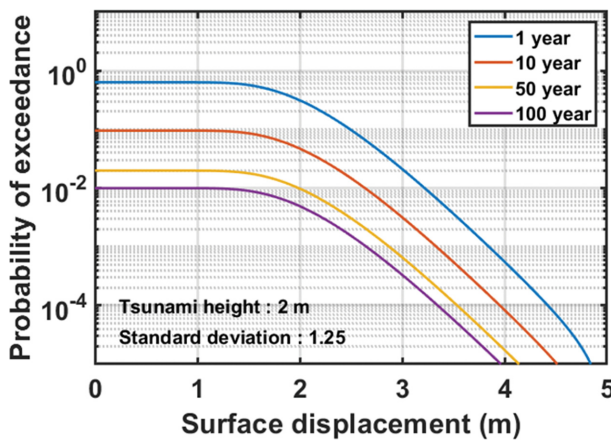
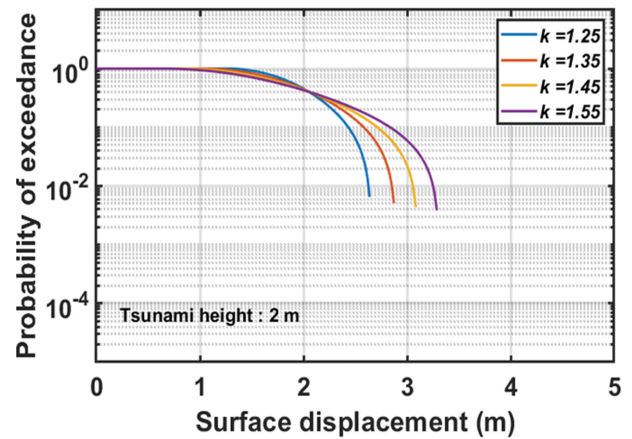


Fig. 7. Hazard curves for 2 m calculated tsunami height.

Fig. 9. PDF obtained by applying cut-off at $\pm 3\beta$ for 2 m calculated tsunami height.Fig. 8. Hazard curves for various return periods for the case of $k = 1.25$.Fig. 10. Hazard curves obtained by applying cut-off at $\pm 3\beta$ for 2 m calculated tsunami height.

수 있다. 이 확률밀도함수를 누적하고 1에서 감해주면 해당 해일고를 초과할 확률을 나타내는 재해곡선을 얻을 수 있으며 Fig. 5에 보인 바와 같다. 산출해일고가 2 m일 경우, 확률밀도함수는 해일고 2 m의 근처로 침두가 이동하며, 재해곡선 또한 해일고 2 m를 기준으로 표준편차에 따른 변동이 발생하는 것을 볼 수 있다(Fig. 6, Fig. 7).

재현기간의 경우는 포아송 분포에 근거하여 매년 1회 이상 지진이 발생할 연초과확률을 산정하고 재해곡선에 곱해준다. Fig. 8은 Fig. 7에 제시한 계산 해일고 2 m의 경우에 대해 지진발생 재현기간을 1년, 10년, 50년, 100년으로 가정하여 구한 지진해일고 재해도를 보여준다. 재현기간의 변동은 재해곡선을 연직방향으로 이동시키며, 따라서 재현기간의 분기 값을 설정하는 방법에 따라서 지진해일 재해도에 미치는 영향은 크게 달라질 수 있다. 본 연구에서는 지진 발생 재현기간을 고려하지 않고 다른 변수들에 대한 민감도를 분석한다.

타절범위는 해일고의 대수정규분포에서 발생가능성이 없다고 판단되는 극단적인 해일고를 제거하는 것으로 Jho et al. (2019)에서는 JSCE(2016)에서 추천하는 바와 같이 대수표준

편차 ($\lambda = \ln(k)$)의 3배를 적용하였다. 타절이 고려되면 타절영역의 확률밀도는 모두 0으로 처리되며, 0으로 처리되지 않는 부분은 다시 정규화 되어 전체 확률이 1로 설정되게 조정된다. 따라서 발생가능하다고 간주되는 해일고의 연초과확률은 소폭 상향 평가되며, 발생가능한 해일고의 재해도도 소폭 크게 평가된다. 이에 따른 확률밀도분포와 재해도는 Fig. 9 및 Fig. 10에 나타난 바와 같다.

Rhee et al.(2015)이 우리나라 동해안에서의 지진해일 재해도 평가와 관련된 민감도 분석을 수행한 결과, 가장 큰 영향을 미치는 변수는 재현기간임을 확인하였으며, 본 연구에서의 재현기간, 표준편차, 타절범위의 변화에 따른 재해곡선 산출결과를 보면 Rhee et al.(2015)의 민감도 분석과 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이러한 변수들은 지진해일 초기수면형상이나 전파과정에서 발생할 수 있는 물리현상에 독립적이며 재해곡선에 미치는 영향은 입력변수 변화에 따라 관련 수식을 통해 추정 가능하므로 본 연구의 민감도 분석에서 제외하였다. 본 연구를 위해 수정한 로지트리는 Fig. 11과 같으며 붉은색으로 나타난 변수는 부산지역의 지진해일 재해도 민감도 분석에 고려되지 않은 변수이다. 지진해일고

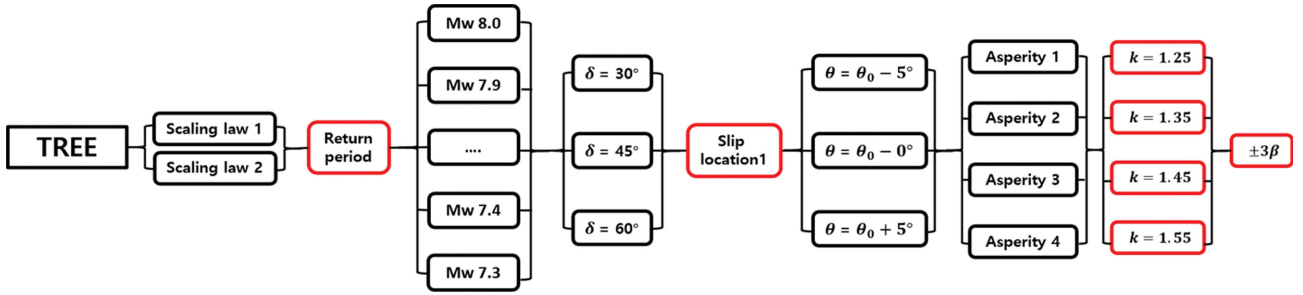


Fig. 11. Reconstructed logic tree for sensitivity analysis of tsunami hazard.

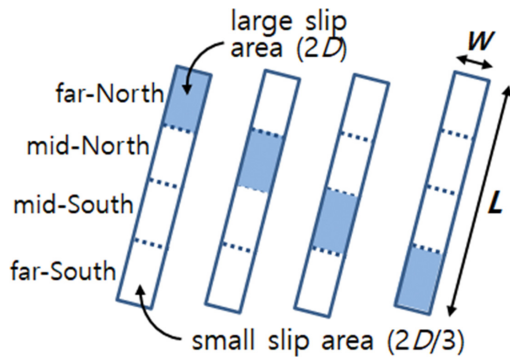


Fig. 12. Location of large slip area over a fault (Asperity 1, 2, 3, and 4 from right to left).

는 로직트리에 제시된 변수뿐만 아니라 관심지점의 해안지형에 의한 영향을 많이 받는 경향이 있다. 동일한 해일고가 수심이 같은 지역에 내습하더라도 만과 같은 폐쇄적인 지형을

가진다면 해일고가 높아지고, 개방된 해역에서는 상대적으로 낮은 해일고를 보이게 된다. 따라서 지형의 영향을 최대한 배제하고 입력변수만의 영향을 확인하기 위해 개방된 해역에서의 지진해일 재해도를 산출하고자 하였다. 선정해역은 부산광역시에서 25 km 정도 떨어진 수심 40 m의 개방된 해역으로 선정하였다. 지진해일 수치모의에 사용된 초기수면 재현 모델과 지진해일 전파모델은 각각 Mansinha and Smylie(1971)와 Yoon et al.(2007)의 방법을 적용하였다.

Fig. 11에서 Asperity는 단층 변위량의 불균일성을 고려하기 위한 변수로서 Fig. 12에 보인 바와 같이 전체 단층을 길이 방향으로 4등분하고 그 중 하나에 평균 변위량 D의 2배를, 나머지 3개에 각각 2D/3씩을 부여하며, 1~4는 부여 위치를 의미한다. 1993년 홋카이도 남서 외해에서 발생한 지진은 단층의 최남단에서 최대 단층변위량이 발생하였으며 Fig. 12의 분류 상 Asperity 1에 해당한다.

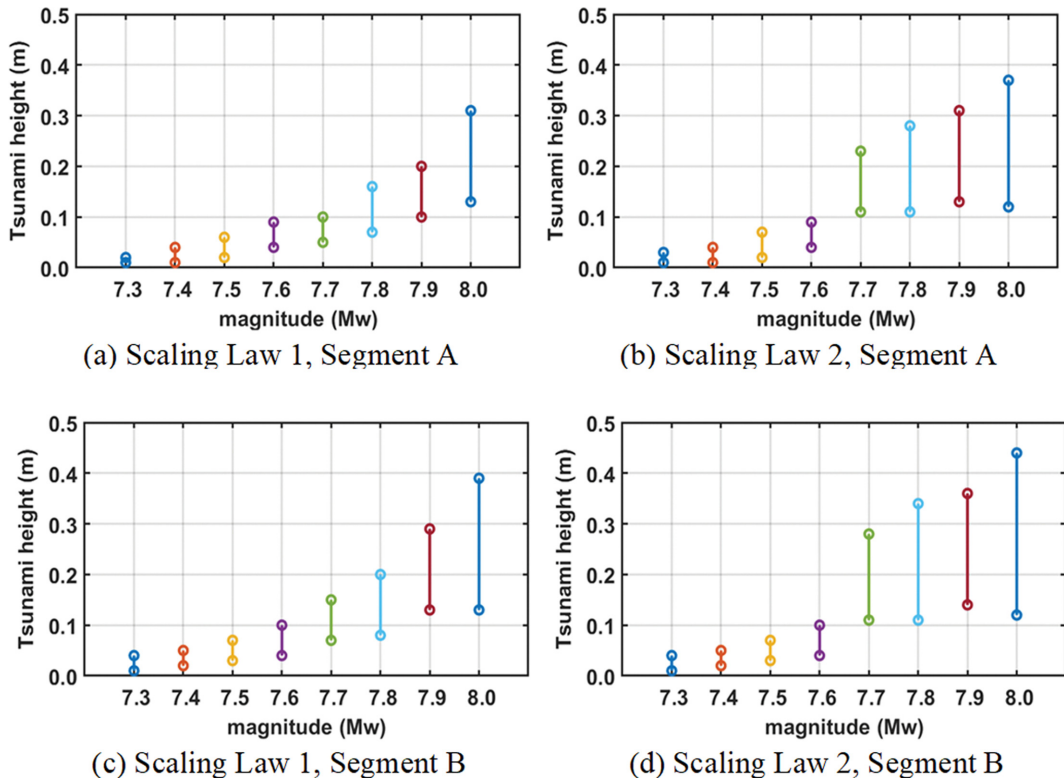


Fig. 13. Tsunami height distributions at the point of interest according to earthquake magnitude (M_w) and scaling law.

3. 지진해일고 산출결과

지진규모와 스케일링 규칙에 따른 관심지점에서 지진해일고 산출결과는 Fig. 13에 보인 바와 같다. 좌측 패널은 스케일링 규칙 1을 사용했을 경우이고, 우측 패널은 스케일링 규칙 2를 사용했을 때의 결과이다. 지진 규모가 증가할수록 해일고 산출값이 증가하며 각 규모에서 산정되는 해일고의 최대값과 최소값의 차이 또한 증가한다. 지진규모가 작을 경우 발생하는 지진의 특성이 해일고에 미치는 영향이 적음을 확인할 수 있다. 지진 규모가 7.7보다 작을 경우, 두 가지 스케일링 규칙에 따른 해일고 산출결과 차이가 비교적 크지 않으나, 7.7 이상의 규모부터 지진해일고 산출 값의 차이가 발생하기 시작하는 바, 이는 스케일링 규칙 2에서 사용하는 면적산정 공식이 규모 7.7부터 4.5 m의 단층변위 상한(포화 조건)을 가지는 식으로 전환되어 두 스케일링 규칙 간의 초기 수면 형상과 단층활동변위에 큰 차이가 있기 때문으로 판단된다(Table 1). 규모가 7.7보다 작은 경우 우리나라 부산지역에서 산출한 지진해일고가 스케일링 규칙의 선택에 크게 좌우되지 않으므로 재해도의 민감도를 판단하기에 적합하지

않다. 따라서 이후의 분석에서는 스케일링 규칙의 선택에 민감한 규모 7.7 이상의 지진에 대해서 민감도 분석을 수행하였다.

Fig. 14와 15는 주향각 분기에 따른 동해 동연부 지진해일의 동해상 해일고분포를 보여주는 그림으로서 재해곡선 산출에 반영된 많은 케이스 중 평균재해곡선이 큰 경우이다. 세그먼트 A와 세그먼트 B의 주향각은 기본적으로 각각 3°와 200°로 형성되어 있다(JSCE, 2016). Fig. 14에 제시된 지진해일고 분포도는 세그먼트 A에서 규모 8.0, 경사각 45°의 지진 중에서 세그먼트의 가장 남쪽에서 큰 단층변위가 발생(Asperity 1)하는 경우로서 기본 주향각으로부터 각각 $\pm 5^\circ$ 의 변화를 준 경우이다. 세그먼트 A에서 발생한 지진해일은 동해 중심부로 전파한 다음, 동해 중심에 위치한 대화퇴에 의해 굴절하여 일본 오키 섬 쪽으로 전파하게 되며(Baek, 2013) 이러한 현상은 모든 주향각 분기에 걸쳐 발생한다. 우리나라 해안에 미치는 영향은 기본 주향각에서 시계 반대방향으로 5°만큼 회전한 경우(Fig. 14a)가 시계 방향으로 5°만큼 회전한 경우(Fig. 14b)보다 강하게 나타났다.

Fig. 15는 동일한 조건의 지진이 세그먼트 B에서 발생한 경

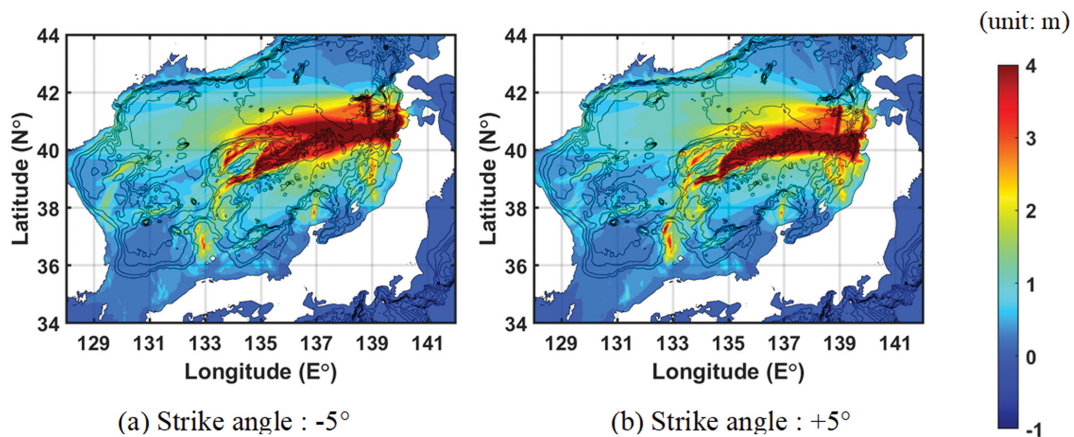


Fig. 14. Tsunami height distribution over East Sea according to the variation of strike angle (Segment A, M_w : 8.0, Dip angle: 45°, Asperity 1, Scaling law 1).

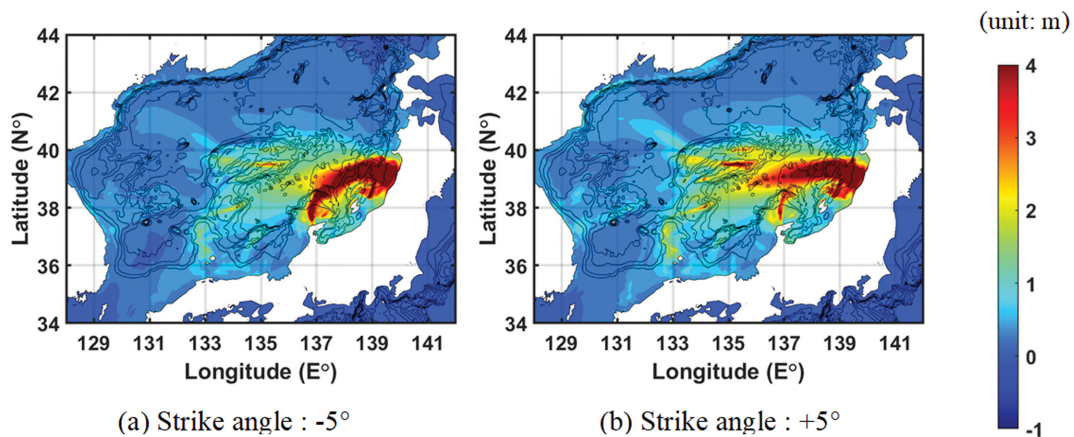


Fig. 15. Tsunami height distribution over East Sea according to the variation of strike angle (Segment B, M_w : 8.0, Dip angle: 45°, Asperity 3, Scaling law 1).

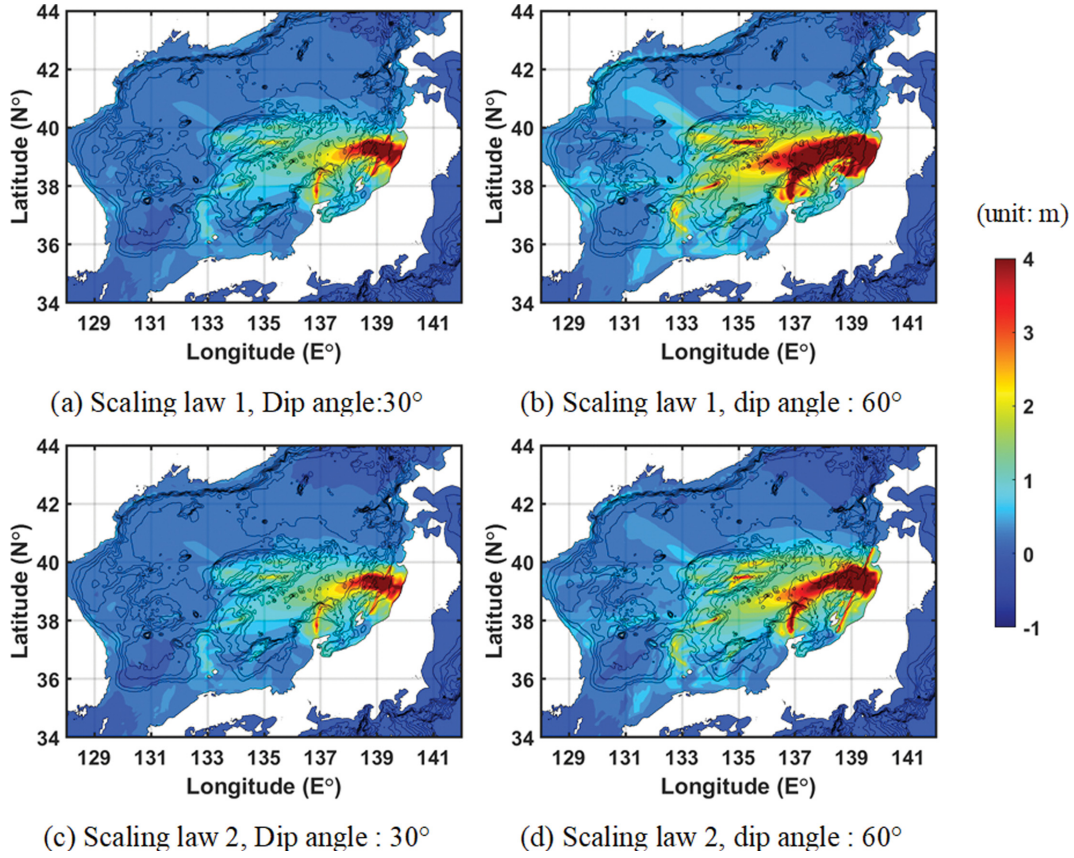


Fig. 16. Tsunami height distribution over East Sea according to the variation of dip angle (Segment B, M_w : 8.0, Strike angle: 0°, Asperity 3).

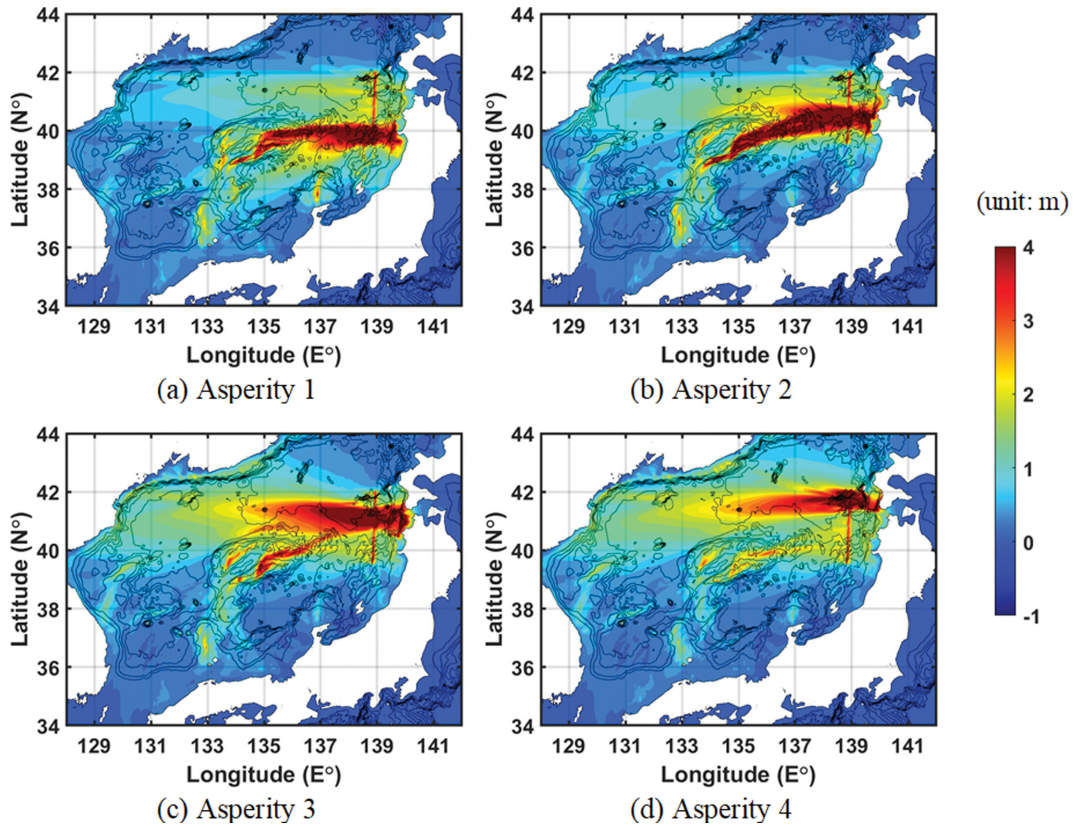


Fig. 17. Tsunami height distribution over East Sea according to the variation of asperity (Segment A, M_w : 8.0, Strike angle: 0°, Dip angle: 45°, Scaling law 2).

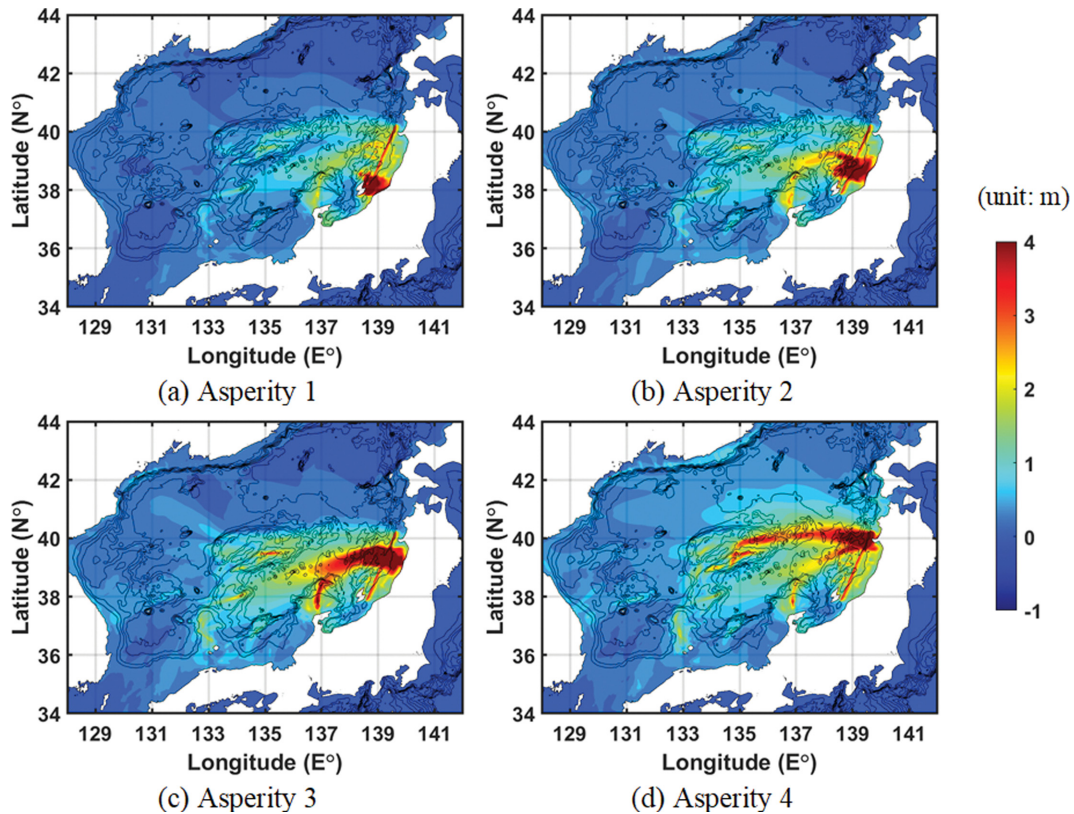


Fig. 18. Tsunami height distribution over East Sea according to the variation of asperity (Segment B, M_w : 8.0, Strike angle: 0° , Dip angle: 45° , Scaling law 2).

우의 예시이며 단층변위 분포는 북쪽에서 1단계 남측(Asperity 3)에 단층변위가 집중된 경우이다. 세그먼트 B에서 발생한 지진해일은 수심 변화에 의해 굴절되어 일본 이시카와 현으로 주로 전파하며, 우리나라 동해 중부 해안에서도 주향각 변화의 영향이 나타나는 바, 세그먼트 A의 경우와는 반대로 시계 방향으로 5° 회전한 경우(Fig. 15b)가 시계 반대 방향으로 5° 회전한 경우(Fig. 15a)보다 강하게 나타났다.

Fig. 16은 경사각 분기에 따른 지진해일고의 분포를 보인 것으로 세그먼트 B에 기본 주향각 200° 로 형성된 단층에서 규모 8.0의 지진이 발생한 경우에 해당한다. 스케일링 규칙 1을 적용한 경우 경사각의 변화에 따라 단층의 길이 변화가 크지 않으나(Fig. 16a, b), 스케일링 규칙 2를 적용하는 경우 단층의 길이가 매우 길어지는 것을 볼 수 있다(Fig. 16c, d). 또한 두 가지 스케일링 규칙 모두 경사각이 커질수록 단층의 폭이 줄어들고 변위량이 증가하므로 강한 지진해일이 발생하고, 따라서 우리나라 동해안에 미치는 영향이 증가한다.

Fig. 17과 Fig. 18은 지진의 단층변위의 불균일 분포(Asperity)에 따른 동해상의 지진해일고 분포 예시이다. 각 세그먼트에서 주향각은 기본 주향각을, 단층 경사각은 45° 이며, 규모는 8.0인 지진이 발생한 경우이다. Fig. 12에 나타낸 바와 같이 최대 단층변위 위치에 따른 식별자는 최남단이 1, 최북단이 4에 해당한다. 전반적으로 단층변위분포 위치에 따라 지진해일의 전파 경향이 서로 상이한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 17에 보인 바와 같이 세그먼트 A의 경우는 강한 단층 활동변위의 위치에 무관하게 우리나라에 미치는 영향이 비교적 동등하게 발생한다. 반면 세그먼트 B의 경우는 Fig. 18에 보인 바와 같이 최대변위의 발생위치에 따라 지진해일의 지향성과 사도 섬에 의한 차폐효과로 우리나라 동해안에 미치는 영향에 차이가 나타났으며, 전반적으로 최대변위 발생 위치가 북에서 남으로 이동함에 따라 우리나라 해안에 미치는 영향은 감소하는 것으로 나타났다.

4. 지진해일 재해도 산출 결과

Fig. 19는 주향각 분기에 따른 지진해일 재해곡선 산정결과를 보인 것이다. 재해곡선은 논리분기의 수만큼 존재하여 그림에 전부 나타낼 수는 없으므로, 각각의 주향각 분기를 공통적으로 거치는 논리분기에서 산출된 재해곡선들을 산술평균하여 대표값으로 제시하였다. 재해곡선의 크기를 비교하면 세그먼트 A에서는 -5° 에서 $+5^\circ$ 로 갈수록 재해도 평가치가 감소하는 반면, 세그먼트 B에서는 반대로 지진해일 재해도가 점차 증가하는 경향이 있다. 주향각 분기 변화에 따른 재해곡선의 변화는 후술할 변수에 따른 결과와 비교하면 상대적으로 작은 수준이다. Fig. 14와 Fig. 15에서 확인한 바와 같이 주향각이 변하더라도 수심에 의해 굴절하여 서로 유사한 전파양상을 보이므로 재해곡선의 변동성이 크게 발생하지 않은

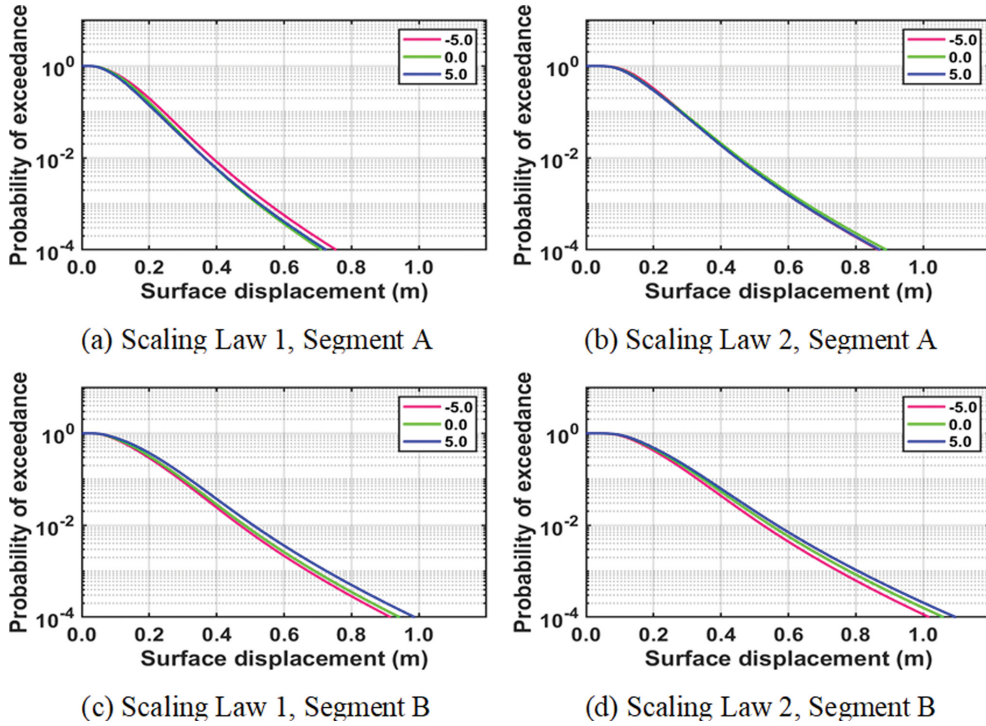


Fig. 19. Comparison of tsunami hazards according to the selection of logic branch for strike angle and scaling law.

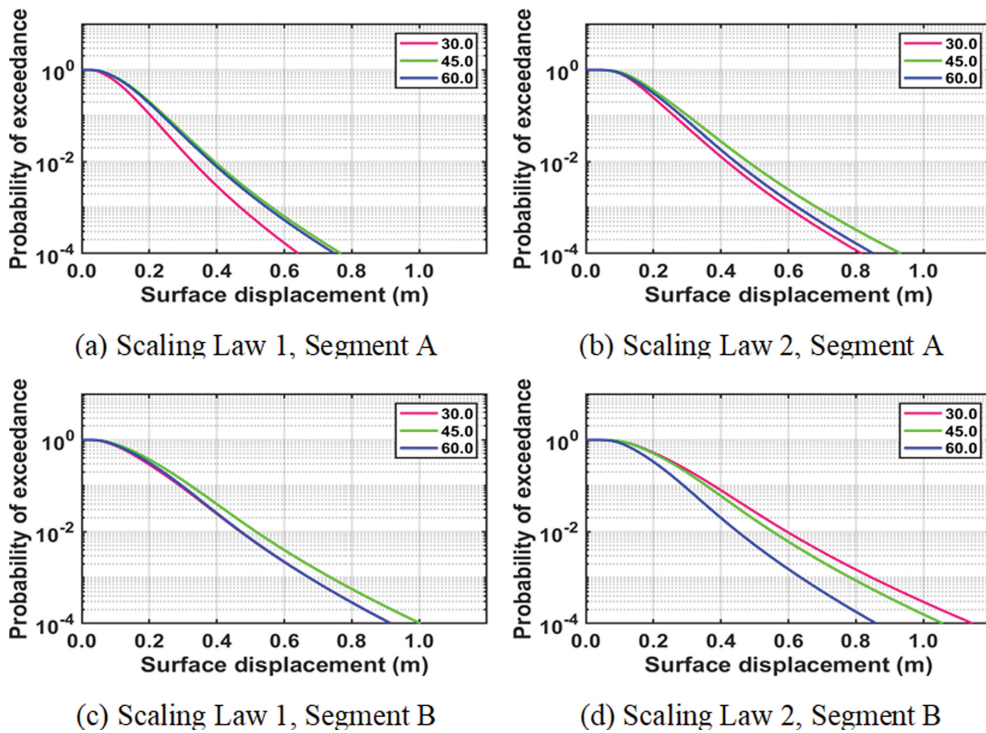


Fig. 20. Comparison of tsunami hazards according to the selection of logic branch for dip angle and scaling law.

것으로 판단된다.

경사각 분기에 따른 재해곡선은 경사각이 커질수록 재해도가 크게 평가되는 경향을 보이나, 세그먼트 B에서는 예외적으로 반대되는 현상도 발생한다(Fig. 20).

단층변위분포에 관련하여 각 분기별 평균재해곡선 산출결과는 Fig. 21에 나타난 바와 같다. Fig. 17과 Fig. 18에서 확

인하였듯이 발생위치가 같더라도 단층변위분포에 따라 발생한 지진해일의 전파양상이 크게 달라지므로 분기별로 재해곡선이 상이하게 나타난다. 세그먼트 A에서는 Asperity 1에서, 세그먼트 B는 Asperity 3에서 재해도가 가장 크게 평가되었으며, 단층의 길이가 짧아 공간상 변동이 비교적 크지 않은 스케일링 규칙 1에 따른 결과는 작은 변동 폭을 보여준다. 단

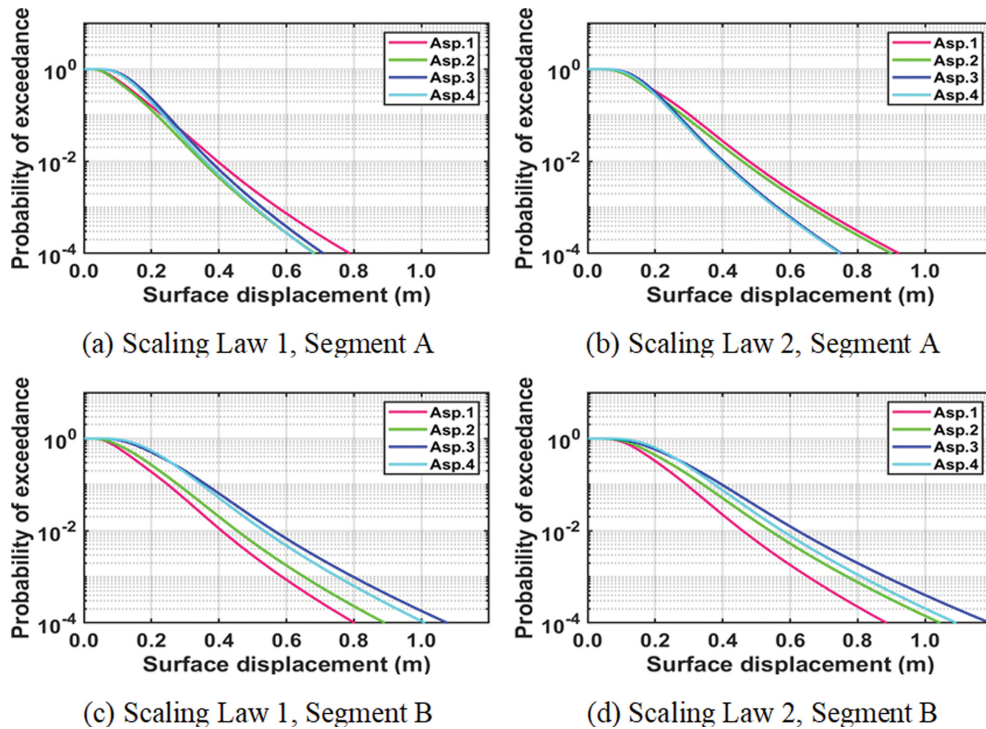


Fig. 21. Comparison of tsunami hazards according to the selection of logic branch for asperity and scaling law.

층변위분포 분기에 따른 재해곡선의 변동은 세그먼트 A가 세그먼트 B보다 작게 나타났는데 이는 세그먼트 B는 Fig. 18에서 볼 수 있듯이 큰 활동변위의 위치에 따라 주변 지형의 영향을 받는 정도가 달라지므로 지진해일이 전파하는 양상이 크게 변하기 때문이다. 반면 세그먼트 A에서는 단층변위분포의 위치에 따라 주변지형에 차폐될 가능성이 없으므로 재해도 변동폭이 작게 발생하였다. 단층변위분포와 경사각이 지진해일 재해도에 미치는 영향은 변수별로 독립적으로 발생하는 것이 아니라 발생하는 세그먼트에 따라 서로 결합하여 복합적으로 작용한다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 동해 동연부에서 지진해일이 발생 가능한 2개의 세그먼트에 대하여 우리나라 부산 근해에서의 지진해일 재해도의 민감도 분석을 수행하였다. 지진해일 전파 모의가 요구되지 않는 재현기간, 표준편차, 타절범위는 예시를 통해 재해도 평가결과에 미치는 영향을 검토하였으며, 단층의 주향각, 경사각, 단층변위분포에 따른 민감도는 동해 동연부 지진해일의 전파 수치모의 결과를 바탕으로 확인하였다. 주향각의 경우는 분기에 따른 변동성은 크지 않았으나 주향각의 증감에 따라 일정한 방향으로 변하였다. 그러나 경사각과 단층변위분포 분기에서는 주향각과 같은 경향을 보이지 않는 경우가 존재하였다. 경사각과 단층변위 분포는 지진해일이 발생하는 위경도상 위치와 관계되는 변수(경사각, 단층변위 분포)로서 값에 따라 지진해일 재해도에 큰 변화를 발생시키는

데 이는 동해의 해저 및 연안지형과 발생위치에의 상호작용으로 인한 것으로 판단된다. 동해 동연부에서 발생하는 지진해일의 재해도 평가는 Rhee et al.(2015)이 제시한 바와 같이 모든 변수를 고려하면 지진의 재현기간의 영향을 가장 크게 받는다고 할 수 있으나 단층 파라미터에 한정한다면 단층변위분포와 경사각에 대한 민감도가 크다고 평가할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한재난대응기반기술개발 사업의 연구비 지원(2018-MOIS31 -008)에 의해 수행되었습니다.

References

- Atomic Energy Society of Japan (2011). Implementation standard concerning the tsunami probabilistic risk assessment of Nuclear Power Plant:2011 AESJ-SC-RK004E : 2011, NISSEI EBLO INC., Tokyo, Japan.
- Baek, U. (2013). Effects of underwater topography of East Sea on propagation of tsunamis towards Korean Peninsula. Doctorate dissertation, Hanyang University.
- Irikura, K. and Miyake, H. (2001). Prediction of strong ground motions for scenario earthquakes. Journal of Geography, 110(6), 849-875 (in Japanese).
- Japan Society of Civil Engineers (2002). Tsunami assessment method for Nuclear Power Plants in Japan.
- Japan Society of Civil Engineers (2011). Method for probabilistic tsunami hazard analysis (in Japanese).

- Japan Society of Civil Engineers (2016). Tsunami assessment method for Nuclear Power Plants 2016 (in Japanese).
- Jho, M.H., Kim, G.H. and Yoon, S.B. (2019). Construction of logic trees and hazard curves for probabilistic tsunami hazard analysis. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31(2), 62-72 (in Korean).
- Mansinha, L. and Smylie, D. (1971). The displacement fields of inclined faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 61(5), 1433-1440.
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (2014). Report of the study group on investigation and assessment of large-scale earthquake in the Sea of Japan (in Japanese).
- Murotani, S., Matsushima, S., Azuma, T., Irikura, K. and Kitagawa, S. (2010). Scaling relations of earthquakes on active mega-fault systems. *Geophysical Bulletin of Hokkaido University* 73, 117-127 (in Japanese).
- Rhee, H.M., Kim, M.K., Sheen, D.H. and Choi, I.K. (2015). Application of probabilistic tsunami hazard analysis for the Nuclear Power Plant site. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 19(6), 265-271 (in Korean).
- Somerville, P., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N. and Kowada, A. (1999). Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion. *Seismological Research Letters*, 70(1), 59-80.
- Tajima, R., Matsumoto, Y., Si, H. and Irikura, K. (2013). Comparative study on scaling relations of source parameters for great earthquakes in inland crusts and on subducting plate-boundaries. *Journal of the Seismological Society of Japan*, 66(3), 31-45 (in Japanese).
- Takemura, M. (1998). Scaling law for Japanese intraplate earthquakes in special relations to the surface faults and the damages. *Journal of the Seismological Society of Japan*, 5, 211-228 (in Japanese).
- Yoon, S.B., Lim, C.H. and Choi, J. (2007). Dispersion-correction finite difference model for simulation of transoceanic tsunamis. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 18(1), 31-53.

Received 18 November, 2019

Revised 11 December, 2019

Accepted 14 December, 2019