가능최대범람확률에 근거한 지진해일 위험지역 예측

Prediction of Tsunami Hazard Area based on Probable Maximum Flooding Probability

김용철* · 박진원** · 조용식***

Kim, Yong Cheol · Park, Jin Won · Cho, Yong-Sik

Abstract

The mitigation against tsunami hazard is increasingly significant due to huge casualty of human beings and property damage. However, available researches on tsunami mitigation are mainly focused on prediction of run-up height through numerical simulations with some numerical models. In this study, a hazard area due to unexpected tsunami attacking is predicted by employing a probabilistic concept. To predict a hazard area, a probability distribution type of flooding data is first determined, and the probability of flood exceeding a criterion height is then estimated by the cumulative distribution function. The probability of flood exceeding a prescribed criterion height is calculated for 83 cases. Finally, the tsunami hazard area is predicted by employing the probable maximum flooding probability.

Key words : Tsunami, Tsunami hazard area, Probable maximum flooding probability

요 지

지진해일에 의한 막대한 인명 및 재산피해로 인해 지진해일 위험에 대한 방재연구가 증가하고 있다. 하지만 지진해일 방재에 관한 기존의 연구는 주로 수치모형실험을 통해 처오름 높이를 예측하는 것에 초점이 맞추어졌다. 본 연구에서는 확률론적 개념을 도입함으로써 급작스런 지진해일에 의한 위험지역을 예측하였다. 위험지역 예측을 위해 먼저 범람자료의 확률분포형이 결정되고, 이후 누적분포함수를 이용하여 기준높이를 초과하는 범람이 발생할 확률이 산출되었다. 앞서 언급한 기준높이를 초과하는 범람 발생 확률은 83가지 지진해일의 경우에 대해 계산되었다. 최종적으로 지진해일 위험지역은 가능최대범람확률(Probable Maximum Flooding Probability) 개념을 도입하여 예측되었다.

핵심용어 : 지진해일, 지진해일 위험지역, 가능최대범람확률

1. 서 론

최근 강력한 지진해일로 인해 막대한 인명 및 재산피해가 빈번히 발생하고 있다. 미국 해양대기국(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)의 조사에 따르면, 2004년 12월 26일 인도네시아 수마트라 지진해일로 인해 약 22만 여명의 사망자와 100억 달러 규모의 재산피해가 발생하였다. 또한, 2011년 3월 11일 발생한 동일본 지진해일은 막대한 인명 및 재산피해 뿐만 아니라 원자력 발전소까지 피해를 주어 현재까지도 해결에 어려움을 겪고 있는 상황이다.

우리나라의 경우 과거 1983년 동해 중부 지진해일에 의해 동해안의 주요 항구들이 큰 피해를 받았으며, 특히 임원항은

우리나라에서 유일하게 지진해일로 인하여 사망 1명, 실종 2명의 인명피해가 발생하였다. 현재까지 우리나라에서는 일본, 인도네시아와 같이 막대한 인명피해가 발생하지는 않았지만, 일본 홋카이도와 혼슈의 서해안을 따라 남북으로 길게 발달된 단층대가 존재하기 때문에 우리나라 동해안은 항상 지진해일의 위험성을 내포하고 있다. 이러한 이유로 지진해일 발생 시 인명 및 재산피해를 최소화하고 주요 국가시설물을 보호하기 위해서 지진해일에 관한 연구가 필요하다.

지진해일에 관한 연구는 주로 고정확도의 수치모형을 개발하는데 초점을 맞추어 왔으며, 개발된 수치모형을 활용하여 침수심 예측 및 지진해일 재해정보도를 제작하여 왔다(Cho, 1995; Cho et al., 2007; Cho and Yoon, 1998). 특히, Cho

*정회원. 한양대학교 일반대학원 건설환경공학과 석사과정(E-mail: atdoyou@hanyang.ac.kr)
Member. Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

**정회원. 한양대학교 일반대학원 건설환경공학과 박사과정
Member. Ph.D Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

***교신저자. 정회원. 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수(Tel: +82-2-2220-0393, Fax: +82-2-2220-1945, E-mail: ysc59@hanyang.ac.kr)
Corresponding Author. Member. Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

et al. (2007)은 지배방정식의 차분과정에서 발생하는 수치적 오차를 지진해일의 물리적 분산효과와 같아지도록 분산보정 계수를 활용하여, 높은 정확도의 결과를 얻을 수 있었다. 또한, 박강욱 등 (2012)은 가능최대지진해일(Probable Maximum Tsunami)이란 개념을 도입하여 우리나라 실정에 맞는 지진해일 재해정보도를 제작하였으며, 이를 효과적으로 활용할 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 수치모형실험을 통해 침수심을 예측할 뿐만 아니라 얻어진 침수심 시계열 자료에 대한 최적 확률분포형을 결정하고 이를 통해 기준높이 이상의 범람 발생 확률을 계산하였다. 또한, 가능최대범람확률(Probable Maximum Flooding Probability)이란 개념을 도입하여 최대범람확률도를 제작하였으며, 최대범람확률도를 바탕으로 삼척항에서의 지진해일 위험지역을 예측하였다.

2. 연구수행과정

본 연구에서는 다음과 같은 순서로 연구가 진행되었다. 일본 서해안을 따라 지진 발생가능성이 높은 가상지진해일과 실제 발생하였던 역사지진해일을 선정하고, 선정된 지진해일 Case에 따른 전파와 범람을 수치모의 하였다. 이를 통해 대상지역에서 각 정점별로 지진해일 침수심 시계열 데이터를 확보하였다. 얻어진 정점별 침수심 시계열 데이터에 대해서 확률도시 상관계수 검정을 수행하였다. 확률도시 상관계수 검정을 위해서 확보한 침수심 시계열 데이터의 확률분포형으로는 Normal, Log-Normal, Exponential, Gumbel 분포를 가정하였다. 확률도시 상관계수 검정을 통해 각 정점별로 최적 확률분포형을 결정하였으며, 결정된 확률분포형에 따라 정점별로 해당되는 누적분포함수를 사용하여 기준높이 이상의 범람 발생 확률을 계산하였다. 지진해일 Case별로 위의 과정을 반복하여 얻어진 기준높이 이상의 범람 발생 확률 결과를 가능최대범람확률이라는 개념을 활용하여 하나의 결과로

취합하였다. 이러한 연구수행과정에 관한 흐름을 Fig. 1을 통해 간략히 도시하였다.

앞서 언급한 가능최대범람확률이라는 용어가 혼란을 야기할 수 있기 때문에 용어에 관한 정의가 필요할 것으로 판단된다. 수공학과 지진해일 분야에서 사용하는 가능최대(Probable Maximum)라는 용어는 개념이 다르다. 수공학에서 가능최대라는 개념은 주어진 지속기간에서 특정유역에 걸쳐 물리적으로 가능한 이론적 최대 값으로 정의하여 가능최대홍수량(Probable Maximum Flood)과 가능최대강수량(Probable Maximum Precipitation)을 산정한다. 반면 지진해일 분야에서는 가능최대지진해일(Probable Maximum Tsunami)이라는 용어를 사용한다. 가능최대지진해일이란 역사지진해일과 발생가능성이 높은 가상의 지진해일을 바탕으로 구성된 시나리오를 이용해 얻어진 결과를 의미한다. 즉 발생가능성이 높은 시나리오를 구성하고, 각 시나리오에 따른 결과들 중 최고값만을 추출하는 개념이다. 지진해일 분야에서 사용하는 가능최대라는 용어의 개념이 수공학과 다른 이유는 지진해일은 주기적으로 발생하지 않고 발생시간 및 규모에 대한 정확한 예측이 불가능하기 때문이다. 따라서 본 연구에서 제시한 가능최대범람확률은 각 시나리오 별 범람 발생 확률들 중 최고값만을 기록하는 방법으로서 수공학에서 언급하는 가능최대홍수량 또는 가능최대강수량과는 다른 개념이다.

3. 대상지역

본 연구에서는 강원도 동해안에 위치한 삼척항을 대상지역으로 선정하였다. 삼척항은 동해안의 주요 무역항이며, 북위 37° 26' 11", 동경 129° 11' 20"에 위치하고 있다. 삼척항의 주요 제원으로 안벽 776 m, 방파제 1,030 m, 방사제 361 m, 물양장 1,388 m, 호안 746 m, 연간 8,694천톤의 하역능력을 갖추고 있다. Fig. 2는 본 연구의 대상지역이자 수치모형실험에 사용된 삼척항의 지형도 및 수심도를 나타내고 있다. Fig. 2에 따르면 북방파제와 방사제가 삼척항의 앞쪽에 위치하고 있으며, 오십천이 삼척항의 아래쪽에 존재한다. 또한 항구 북쪽으로는 고지대가 위치하고 있으나, 항구 접안시설 뒤쪽으로

Fig. 1. Flow chart

Fig. 2. The detailed topography and bathymetry of the Samcheok port

는 대부분 평지로 이루어져 지진해일 발생 시 범람이 항구 안쪽으로 넓게 발생할 것으로 예상된다. 삼척항은 지진해일로 인한 인명피해가 발생하지는 않았지만, 과거 1983년 동해 중부 지진해일과 1993년 북해도 남서 외해 지진해일에 의해 상당량의 재산피해가 발생하였다. 과거 지진해일 피해 기록을 통해 알 수 있듯이 일본 서해안에서 지진해일 발생 시 삼척항은 물론 동해안 전역에 피해가 발생할 수 있기 때문에, 동해안 주요 항구에 대해서 재해방지 연구 및 방재정책의 보완이 필요하다고 판단된다.

2. 지진해일 수치모의

2.1 지배방정식

지진해일의 전파과정에서는 수심에 비해 자유수면변위가 매우 작기 때문에 비선형항을 무시할 수 있는 반면, 지진해일

의 파장은 조석에 비해 짧고 매우 먼 거리를 전파하기 때문에 분산효과를 고려하여야 한다. 따라서 지진해일 전파과정은 선형 Boussinesq 방정식을 지배방정식으로 사용한다. 하지만 선형 Boussinesq 방정식의 경우 높은 미분차수의 분산항이 존재하기 때문에 수치해석상의 어려움이 존재한다. 따라서 지배방정식의 차분과정에서 발생하는 수치적 오차가 지진해일의 물리적 분산효과를 대체할 수 있도록 분산보정계수를 사용하였다(Cho et al., 2007; Sohn et al., 2009).

지진해일이 해안지역으로 전파되면 파장은 점차 짧아지는 반면, 파고는 증가한다. 따라서 지진해일 전파과정과는 다르게 분산효과의 중요성이 약해지고, 비선형성이 중요해진다. 또한, 해안지역에서는 바닥마찰효과가 매우 중요한 역할을 하기 때문에 바닥마찰항이 고려되어야 한다. 따라서, 지진해일 범람과정은 바닥마찰항이 추가된 비선형 천수방정식이 지배방정식으로 사용된다. 또한, 지진해일의 거동에 따른 해안선의

Fig. 3. The location information for 3 historical and 8 virtual tsunamis

Table 1. The fault parameters for 3 historical and 8 virtual tsunamis (KEDO, 1999)

Case	단층발생지점		H (km)	θ ($^{\circ}$)	δ ($^{\circ}$)	λ ($^{\circ}$)	L (km)	W (km)	D (m)	M^1 (규모)
	경도 ($^{\circ}$ E)	위도 ($^{\circ}$ N)								
1964	139.42	38.74	1.0	189	56	90	80	30	3.30	7.5
1983	138.84	40.21	2.0	22	40	90	40	30	7.60	7.8
	139.02	40.54	3.0	355	25	80	60	30	3.05	
1993	139.30	42.10	5.0	163	60	105	24.5	25	12.00	7.8
	139.25	42.34	5.0	175	60	105	30	25	2.50	
	139.40	43.13	10.0	188	35	80	90	25	5.71	
1	137.5	37.5	1.0	0.0	40	90	125.899	62.945	6.31	8.0
2	137.7	38.3		14.5						
3	138.0	39.0		27.5						
4	138.4	39.7		17.0						
5	138.7	40.2		10.0						
6	138.9	40.9		1.0						
7	139.0	41.7		1.0						
8	139.1	42.1		4.0						

¹⁾Table 1에서 H 는 단층면의 상연깊이(focal depth), θ 는 진북과 이루는 단층면의 주향각(strike angle), δ 는 단층면의 경사진 각(dip angle), λ 는 단층면이 미끄러지는 방향(slip angle), L 은 단층의 길이(length), W 는 단층의 폭(width), D 는 단층의 변위(dislocation) 그리고 M 은 지진의 규모(magnitude)

연속적인 움직임을 정확히 추적하기 위해서 이동경계조건을 사용하였다(Liu et al., 1994).

앞서 언급한 수치모의에 관한 내용은 기존의 연구에서 충분히 검증이 되었고, 많은 연구논문이 나와 있기 때문에 본 연구에서는 참고문헌으로 대체하였다(Liu et al., 1994; Cho et al., 2007; Sohn et al., 2009).

2.2 수치모의 조건

본 연구에서는 과거 동해안에 영향을 주었던 3개의 역사지진해일(1964년 나카타 지진해일, 1983년 동해 중부 지진해일, 1993년 북해도 남서 외해 지진해일)과 지진공백역에 속하여 지진발생 가능성이 높은 80개의 가상지진해일을 수치모의하였다. Fig. 3은 초기수면변위의 발생위치를 나타내며, Table 1은 각각 3개의 역사지진해일과 한반도에너지개발기구에서 제시한 8개의 가상지진해일의 위치정보 및 단층매개변수를 나타내었다(KEDO, 1999).

각 지진해일 Case에 따라 한반도에너지개발기구(KEDO, 1999)가 제시한 단층매개변수를 기준으로 주향각(strike angle)은 10° 간격으로 $\pm 20^\circ$ 까지 변화시켰으며, 단층면의 상연깊이는 기존 1.0 km에 5.0 km를 추가하였다. 단층면의 경사진각(dip angle) δ 와 단층면이 미끄러지는 방향(slip angle) λ 는 단층면의 주향각(strike angle) θ 에 비해 초기수면변위에 미치는 영향이 상대적으로 적다는 연구결과에 근거하여 한반도에너지개발기구에서 제시한 값을 변화시키지 않고 사용하였다(조용식 등, 2006; 심주열 등, 2009). Table 2는 한반도에너지개발기구에서 제시한 기본 값을 기준으로 본 연구에서 주향각(strike angle)과 단층면의 상연깊이(focal depth)를 변화시킨 범위를 나타낸다. 지진해일 초기수면변위 재현에는 초기수면변위가 해저면위의 연직성분과 같다는 가정을 기초로 한 Mansinha 등 (1971)의 모형을 활용하였다.

수치모의에 사용된 계산영역은 총 6개의 A-F영역을 사용했으며, 영역구성은 Fig. 4와 Table 3에 제시하였다.

Table 2. The basic values and shift range of the fault parameters

단층매개변수	Case	기본 값	변화범위
Strike angle, $\theta(^{\circ})$ $\Delta\theta = 10.0^{\circ}$	1	0.0	340.0~20.0
	2	14.5	354.5~34.5
	3	27.5	7.5~47.5
	4	17.0	357.0~37.0
	5	10.0	350.0~30.0
	6	1.0	341.0~21.0
	7	1.0	341.0~21.0
	8	4.0	344.0~24.0
Focal depth, $H(\text{km})$	1~8	1.0	5.0

Table 3. The computational information for each region

영역	공간격자 크기 (m, $\Delta x = \Delta y$)	공간격자 수		시간격자 크기 (sec, Δt)
		x	y	
A	1215.0	970	1027	3.00000
B	405.0	1090	1228	1.00000
C	135.0	706	649	0.33333
D	45.0	757	709	0.11111
E	15.0	517	457	0.03704
F	5.0	301	262	0.03704

3. 확률분포형의 결정

지진해일 수치모의를 수행하여 범람이 발생한 모든 정점에서 침수심에 대한 시계열 자료를 확보한 후, 각 정점별로 지진해일 범람자료에 대한 확률분포형을 결정하였다. 주어진 자료의 확률분포형을 결정하는 기법을 적합도검정이라고하며, 카이제곱(Chi-Square) 검정, Cramer Von Mises(CVM) 검정, Kolmogorov-Smirnov(K-S) 검정, 확률도시 상관계수(Probability Plot Correlation Coefficient) 검정 등이 존재한다. 본 연구에서는 기각능력이 우수하고, 비교적 개념이 간단한 확률도시

Fig. 4. The composition of the computational domain and bathymetry of each region

Table 4. The plotting position formulas

저자	공식	확률분포형
Blom (1958)	$P_i = \frac{i-0.375}{n+0.25}$	Normal, Gamma, Log-Normal
Gringorten (1963)	$P_i = \frac{i-0.44}{n+0.12}$	Gumbel, Weibull
Cunnane (1978)	$P_i = \frac{i-0.40}{n+0.20}$	GEV, Log-Gumbel

Table 5. The inverse functions of the cumulative probability distribution

확률분포형	누적분포함수의 역함수
Normal	$Z_x = 5.0633[F^{0.135} - (1-F)^{0.135}]$
Log-Normal	$Z_y = 5.0633[F^{0.135} - (1-F)^{0.135}]$
Exponential	$x = -\frac{1}{\eta} \ln(1-F)$
Gumbel	$x = \xi - \alpha \ln[-\ln(F)]$

상관계수 검정을 활용하였다. 또한 지진해일 범람자료의 확률 분포형으로 Normal, Log-Normal, Exponential 및 Gumbel 분포를 가정하였다.

주어진 범람자료를 크기순으로 나열한 뒤 각 확률분포형에 따라 도시위치(Plotting Position)를 계산할 수 있다. 도시위치는 확률분포형에 따라 추천되는 공식이 존재하며, 이를 Table 5에 제시하였다. Table 4에서 i 가 1부터 표본크기 n 까지의 정수라면, P_i 는 i 번째 도시위치이다.

각 확률분포형에 따른 도시위치를 계산 후 i 번째 도시위치의 변위치 M_i 를 계산한다. M_i 는 각 확률분포형에 따른 누적 분포함수(Cumulative Distribution Function)의 역함수를 이용하여 계산할 수 있다. 즉, 계산된 도시위치 값을 누적분포함수의 역함수에 대입하면 M_i 를 얻을 수 있다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$M_i = \Phi^{-1}(P_i) \quad (1)$$

여기서 Φ^{-1} 는 누적분포함수의 역함수이며 이를 Table 5에 제시하였다.

여기서 x 는 확률변수(random variable), y 는 확률변수 x 의 자연로그 값(즉 $y=\ln(x)$), Z_x 와 Z_y 는 각각 Normal, Log-Normal 분포에서 정규화된 확률변수이며, F 는 변위치(Quantile), η , ξ 그리고 α 는 각각 shape parameter, location parameter, scale parameter이다. 각 매개변수는 추정방법이 간단하고, 실무에서 주로 사용되는 모멘트법(Method of Moments)을 사용하여 추정하였다.

계산된 M_i 와 오름차순으로 정렬된 범람자료 X_i (Normal과 Log-Normal분포의 경우 X_i 대신 정규화된 통계량 Z_x 와 Z_y 를 사용)사이의 선형성을 측정하여 최적확률분포형을 찾는다. X_i 와 M_i 사이의 선형성은 적모멘트 상관계수(product moment correlation coefficient)를 사용하여 측정하며, 1에 가까울수록

가정한 확률분포형과 일치함을 나타낸다. 적모멘트 상관계수는 다음과 같이 계산할 수 있다(Filliben, 1975).

$$\gamma_c = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(M_i - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}} \quad (2)$$

확률도시 상관계수 검정은 적모멘트 상관계수와 검정통계량과의 비교가 필요하지만, 일반적으로 검정통계량은 표로 제시되며 표본크기와 유의수준(significance level)에 따라 다른 값을 갖기 때문에 본 연구의 경우 각 지점별로 모든 상관계수와 검정통계량을 비교하기에는 무리가 있다. 따라서 범람이 발생한 각 정점에 해당하는 범람자료를 가정한 4가지 확률분포형에 대해서 적모멘트 상관계수를 계산하여 1에 가장 가까운 값을 갖는 확률분포형을 해당 정점에서의 최적확률분포형으로 결정하였다.

4. 범람확률의 계산

각 정점에서의 범람자료의 확률분포형을 결정한 후 해당하는 확률분포의 누적분포함수를 이용하여 기준높이 이상의 범람이 발생할 확률을 계산하였다. 가정한 4가지 확률분포형에 따른 누적분포함수는 Table 6에 제시하였다. 여기서 기준높이는 인명피해를 유발할 수 있는 범람높이로서 일반적으로 성인 무릎 높이의 지진해일 범람이 발생할 경우 성인이 자력으로 버티지 못한다고 판단하기 때문에 기준높이로서 30 cm를 선정하였다. 여기서 계산된 기준높이 이상의 범람확률을 기준으로 지진해일 위험지역을 선정하였다.

총 83개의 지진해일 Case에 대해서 범람이 발생한 정점에서 기준높이 이상의 범람 발생 확률을 계산한 후 이를 가능 최대범람확률이라는 개념을 활용하여 최대범람확률도를 제작하였다. 가능최대범람확률이라는 개념은 총 83가지의 지진해일 Case에 따른 모의결과 중 최대값만을 기록하는 개념이다. 즉 범람이 발생한 각 정점별로 총 83개의 모의결과 중 최대 범람확률만을 최대범람확률도에 표기한다. 보수적으로 범람확률을 산정하는 이유는 지진해일이라는 자연현상은 태풍이나 홍수와 같은 자연재해와는 다르게 한번 발생할 경우 막대한 재산 및 인명피해를 발생시키고, 예측이 거의 불가능하며 인공적인 구조물로 위력을 감소시키는 것이 거의 불가능하기

Table 6. The cumulative distribution functions

확률분포형	누적분포함수
Normal	$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} e^{-\frac{1}{2\sigma_x^2}(x-\mu_x)^2} dx$
Log-Normal	$F(y) = \int_{-\infty}^y \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{-\frac{1}{2\sigma_y^2}(y-\mu_y)^2} dy$
Exponential	$F(x) = 1 - \exp(-\eta x)$
Gumbel	$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\xi}{\alpha}\right)\right]$

때문이다. 따라서, 지진해일 방재정책은 극히 보수적으로 수립하여 인명 및 재산피해를 최소화시키는 것이 바람직하다.

5. 지진해일 위험지역 산정결과

지진해일 수치모의실험을 통해 삼척항에서의 각 정점별 시계열 범람자료를 얻었다. 범람자료는 지진해일 발생 직후부터 200분까지 0.05분 간격으로 얻어졌다. Fig. 5는 총 83개의 지진해일 Case 중 비교적 범람영역이 넓고 높은 침수심을 보인 4개의 Case에 대한 최대침수예상도이다. 즉, Fig. 5는 수치모의를 수행하는 동안 각 정점별로 기록된 최대범람높이를 나타낸다.

Fig. 6은 각 정점별 최대적모멘트 상관계수 값을 나타내고 있다. 그림에 따르면 범람이 발생한 대부분의 정점에서 0.9에서 1.0사이의 적모멘트 상관계수 값을 나타내고 있다. 이는 지진해일 범람자료가 가정한 4가지 확률분포형 중 최소한 한 가지 이상의 확률분포형과 거의 일치함을 나타낸다.

Fig. 7에서는 각 정점별로 가정한 4가지 확률분포형 중 최적확률분포형을 표기하였다. 삼척항의 접안시설 부근에서는 모든 Case에서 공통적으로 Log-Normal 분포가 나타나고 있으며, 해안선 주변과 북방파제 근방에서는 Gumbel 분포와 Exponential 분포가 주로 나타나고 있다. 총 83가지의 Case

를 검토해본 결과 전반적으로 Log-Normal 분포형이 가장 많은 정점에서 최적확률분포형으로 나타났으며, 이는 지진해일 범람높이의 확률분포함수로 Log-Normal 분포형을 제시한 Choi 등 (2002)의 결과와 일치한다.

Fig. 8은 각 정점별 결정된 최적확률분포함수를 바탕으로 계산된 기준높이 이상의 범람 발생 확률이다.

전반적으로 북방파제 부근과 해안선을 따라 0.4 이상의 상대적으로 높은 범람확률이 나타나고 있으며, 내륙지역으로 갈수록 범람확률이 점차 낮아지는 것을 알 수 있다.

본 연구의 최종결과인 삼척항의 최대범람확률도 결과와 비교하기 위해 총 83가지 지진해일 Case의 침수예상도를 취합하여 각 정점별로 최대침수심만을 기록한 최대침수예상도를 Fig. 9에 제시하였다. 또한, 각 지진해일 Case에 따른 모의결과를 바탕으로 가능최대범람확률 개념을 도입하여 삼척항에서의 최대범람확률도를 Fig. 10에 제시하였다. 최대침수예상도와 최대범람확률도를 비교하여보면 전반적인 양상이 비슷하게 나오고 있음을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 10의 최대범람확률도에 따르면 북방파제 주변과 해안선을 따라 0.6 이상의 상당히 높은 범람확률이 존재하며, 접안시설 주변으로 넓은 범위에 걸쳐 0.4의 범람확률이 나타나고 있다. 이러한 결과를 바탕으로 항구의 북방파제 주변지역과 남측의 방사제 주변은 삼척항에서 지진해일 발생 시 인명피해가 발생할 가

(a) Virtual tsunami Case 2($\theta = 4.5^\circ$, $H = 1.0 \text{ km}$)

(b) Virtual tsunami Case 3($\theta = 17.5^\circ$, $H = 1.0 \text{ km}$)

(c) Virtual tsunami Case 5($\theta = 350.0^\circ$, $H = 1.0 \text{ km}$)

(d) Virtual tsunami Case 7($\theta = 1.0^\circ$, $H = 1.0 \text{ km}$)

Fig. 5. The maximum flooding height

Fig. 6. The map of the maximum correlation coefficient

Fig. 7. The map of the best-fit probability distribution type

(a) Virtual tsunami Case 2($\theta = 4.5^\circ$, $H = 1.0 \text{ km}$)

(b) Virtual tsunami Case 3($\theta = 17.5^\circ$, $H = 1.0 \text{ km}$)

(c) Virtual tsunami Case 5($\theta = 350.0^\circ$, $H = 1.0 \text{ km}$)

(d) Virtual tsunami Case 7($\theta = 1.0^\circ$, $H = 1.0 \text{ km}$)

Fig. 8. The probabilities of flooding exceeding the criterion height for each tsunami event

Fig. 9. The probable maximum flooding height

Fig. 10. The probable maximum flooding probability

6. 결 론

능성이 높고, 주요 시설물이 위치할 경우 피해가 클 것으로 예측이 된다. 따라서 해당 지점에서는 주요 국가 시설물의 배치를 피해야하며, 지진해일 인명피해를 줄이기 위해 해당 지점 부근에 대피자가 신속히 대피할 수 있도록 임시대피소 또는 지진해일 타워(tsunami tower)가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 가능최대범람확률이라는 개념을 도입하여 삼척항에서의 지진해일 위험지역을 선정하였다. 이를 위해 총 83가지 지진해일 Case에 대해 수치모의실험을 수행하였으며, 또한 얻어진 범람자료를 바탕으로 적합도검정을 수행하여 최적확률분포형을 선정하였다. 결정된 최적확률분포형에 따라

기준높이 이상의 범람확률이 각 정점별로 계산되었으며 이를 취합하여 각 정점별로 최대범람확률값만 기록한 최대범람확률도를 최종 결과물로 제시하였다. 본 연구결과는 기존의 지진해일 침수심만을 예측하는 단계에서 벗어나 확률론적 개념을 도입하여 지진해일 발생 시 삼척항에서의 지진해일 범람에 따른 위험지역을 정량적으로 판단할 수 있었다. 기존의 최대침수심만을 고려한 재해정보도는 매우 짧은 시간 동안이라도 높은 침수심이 기록된다면 그 결과가 그대로 반영되어 매우 위험한 지역으로 고려되었지만, 본 연구에서는 확률론적 방법을 사용하여 전체 수치모의 시간 동안 기준높이 이상의 범람이 얼마나 지속되는지 여부 또한 고려되었기 때문에 기존 방식에 비해 좀 더 효과적인 지진해일 위험도를 산정할 수 있었다. 이러한 결과는 지진해일 대피소, 원자력발전소와 같은 국가 주요 시설물의 위치 선정 및 지진해일 재해정보도 제작과 같은 방재정책에 있어 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업인 ‘지진해일에 의한 구조물 피해분석기술 개발’[NEMA-지진-2012-5]과제의 일환으로 이루어 졌습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Blom, G. (1958) *Statistical estimates and transformed beta-variables*. Wiley, New York, USA.
- Cho, Y.-S. (1995) *Numerical simulations of tsunami propagation and run-up*. Ithaca, New York, Cornell University, Ph.D. thesis.
- Cho, Y.-S. and Yoon, S.B. (1998) A modified leap-frog scheme for linear shallow-water equations. *Coastal Engineering Journal*, Vol. 40, No. 2, pp. 191-205.
- Cho, Y.-S., Kim, J.-H., Sohn, D.-H. and Kim, S.-M. (2006) Initial free surface profile of tsunamis by earthquake parameters. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 6, No. 2, pp. 61-68.
- Cho, Y.-S., Sohn, D.-H. and Lee, S.O. (2007) Practical modified scheme of linear shallow-water equations for distant propagation of tsunamis. *Ocean Engineering*, Vol. 34, No. 11-12, pp. 1769-1777.
- Choi, B.H., Pelinovsky, E., Ryabov, I. and Hong, S.J. (2002) Distribution functions of tsunami wave heights. *Natural Hazards*, Vol. 25, No. 1, pp. 1-21.
- Cunnane, C. (1978) Unbiased plotting positions-A review. *Journal of Hydrology*, Vol. 37, No. 3-4, pp. 205-222.
- Filliben, J.J. (1975) The probability plot correlation coefficient test for normality. *Technometrics*, Vol. 17, No. 1, pp. 111-117.
- Gringorten, I.I. (1963) A plotting rule for extreme probability paper. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 68, No. 3, pp. 813-814.
- KEDO (1999) *Estimation of tsunami height for KEDO LWR project*, Korea Power Engineering Company, Inc.
- 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, Dordrecht, Netherlands.
- Mansinha, L. and Smylie, D.E. (1971) The displacement fields of inclined faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 61, No. 5, pp. 1433-1440.
- Park, K.-W. and Cho, Y.-S. (2012) Hazard map with probable maximum tsunamis. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 2, pp. 263-270.
- Sim, J.-Y., Ha, T.-M. and Cho, Y.-S. (2009) Relationship between maximum wave heights of tsunamis and earthquake parameters. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 9, No. 3, pp. 135-142.
- Sohn, D.-H., Ha, T. and Cho, Y.-S. (2009) Distant tsunami simulation with corrected dispersion effects. *Coastal Engineering Journal*, Vol. 51, No. 2, pp. 123-141.

© 논문접수일 : 2012년 09월 17일

© 심사의뢰일 : 2012년 09월 18일

© 심사완료일 : 2012년 11월 21일