

실용적인 지진해일 파압 산정에 관한 연구

A Study for Estimation of Practical Wave Pressure by Tsunamis

홍성수*, 하태민**, 조용식***

Seong-soo Hong, Taemin Ha, Yong-sik Cho

요 지

국내 지진해일에 관한 연구는 범람 여부의 예측과 이에 대한 대비에 관하여 중점적으로 이루어지고 있다. 하지만 구조물에 직접적으로 피해를 주는 파력에 관한 연구는 거의 전무한 실정이다. 특히, 지진해일 1차 대피소는 지진해일 내습에 의한 파력에 대하여 안정하게 설계되어야 한다. 이를 연구하기 위한 방법으로 수리모형실험과 3D 모형을 이용한 수치모형실험의 두 가지 방법이 있으나 시간과 비용이 많이 소요되고 실제 지형에 적용하기에 곤란하다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 장파에 의한 파력식과 기존의 2D 수치모형을 이용하여 실용적으로 파력을 계산할 수 있는 방법을 제시하고, 이를 국내 무역항 중 하나인 동해항에 적용하였다.

핵심용어 : 지진해일, 파압, 대피소 선정

1. 서 론

지진해일은 파형의 별다른 변화 없이 빠른 속도로 전파되지만, 해안선에 가까워지면서 천수효과에 의하여 파고가 급격히 높아져 연안구조물 및 인명에 큰 피해를 초래한다. 그 예로 2004년 수마트라 지진해일은 인도네시아는 물론 스리랑카를 비롯한 인접 연안 국가들에 많은 인명과 재산 피해를 초래하였으며, 이에 지진해일에 대한 관심이 고조되면서 지진해일에 대한 피해 예측 및 최소화를 위한 연구가 세계적으로 진행 중에 있다. 그러나 지진해일에 관한 연구는 대부분 전파속도와 시간별 수위변동에 기초한 피해 예측 및 최소화에 중점을 두고 있다. 하지만 인도네시아 연안 구조물의 파괴는 지진해일의 파력에 의한 파괴로 연안구조물의 보호와 안전을 위하여 지진해일 파력에 대한 연구 역시 반드시 필요하다.

지진해일 파력에 관한 연구는 주로 미국과 일본 등, 지진해일의 피해가 빈번한 국가를 중심으로 이루어져 왔다. 이들의 연구는 대부분 1960년의 칠레 지진해일 발생 이후 시작되었다. 이들은 해안구조물에 대하여 연안건축매뉴얼(Coastal Construction Manual, CCM)에 따른 설계지침을 제시하여 지진해일에 대비한 합리적인 연안구조물을 건설하고자 노력하고 있다. 대부분의 지진해일 파력 연구는 수리실험에 의존하고 있으며, 수치해석에 의한 연구는 Navier-Stokes 운동방정식을 지배방정식으로 하는 3차원 수치해석법으로 접근하고 있으나 3차원의 수치해석 특성상 계산 시간의 소요가 많고 실제 지형에 적용하기에 곤란한 단점이 있다. 따라서 실용적이면서 합리적인 파력 연구가 필요한 실정이다.

* 정회원·한양대학교 건설환경공학과 석사과정 · E-mail : ssfeel@hanyang.ac.kr
** 정회원·한양대학교 건설환경공학과 박사과정 · E-mail : kevin4324@hanyang.ac.kr
*** 정회원·한양대학교 건설환경공학과 교수(교신저자) · E-mail : ysc59@hanyang.ac.kr

한편, 국내에서는 지진해일 파력에 관련된 연구를 거의 찾아볼 수 없다. 그나마 항만설계기준에서 해중구조물에 작용하는 지진해일 파력 산정식이 제시되어 있고 연안구조물에 직접적으로 작용하는 지진해일 파력에 대한 식은 찾아볼 수 없다. 따라서 본 논문에서는 지진해일 연구가 활발한 미국과 일본의 연구 결과를 바탕으로 2차원 수치모형을 사용하여 이를 동해항에 적용하여 파력에 대한 안전성을 분석하였다.

2. 연안구조물에 작용하는 지진해일 파력 산정

2.1 일본의 지진해일 파력 제안식

일본에서 지진해일에 대한 파력 연구는 1960년부터 시작되었으며 수치모형실험을 위주로 하는 연구들이 진행되어 왔다. 연안구조물에 작용하는 파력은 크게 범람된 파가 쇄파되지 않고 작용하는 경우와 쇄파되어 작용하는 경우 두 가지로 연구가 진행되었다. 일본의 Building Technology Research Institute(BTRI)에서 설계 지진해일 파력은 그림 1과 같이 제안하였다.

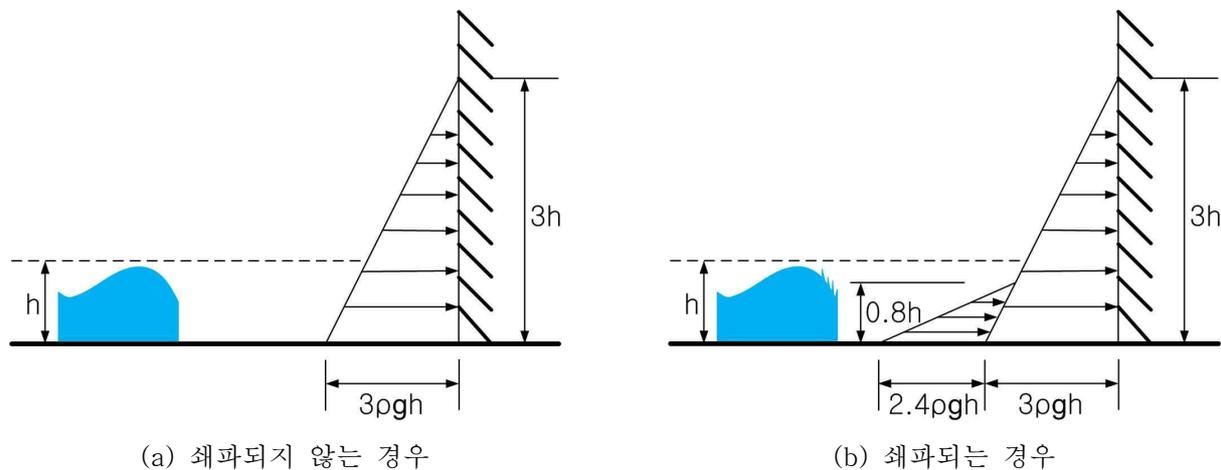


그림 1. 범람된 파의 지진해일 파압 분포

그림 1과 같이 범람된 파랑은 구조물에 수직으로 입사하며 대상 구조물은 직립벽으로 한정하였다. 이 식은 이상유체 조건에서 Bernoulli 이론으로부터 유도된 식으로 설계 파력을 산정하는데 있어서는 구조물이 받을 수 있는 최대 하중을 고려하는 것이 목표이므로 지진해일 파력을 견딜 수 있는 구조물의 설계에 있어서 적합한 식이라 할 수 있다. 또한 압력분포가 선형이라는 가정으로 인하여 계산과정이 간단하고 파압이 범람고의 함수이므로 기존의 수치모형으로부터 나온 범람고를 대입하여 파력을 손쉽게 산출할 수 있는 장점이 있다.

2.2 미국의 지진해일 파력 제안식

미국에서의 지진해일 파력 설계식은 미군의 Coastal Engineering Research Centre(CERC)에서 Technical Note III-29 (1990)에 나타나 있는데 이는 식 (1)과 같다.

$$F = \frac{\rho g h^2}{2} + 4C_F \rho g h^2 \quad (1)$$

C_F 는 파고 기울기와 관련된 계수로써, $30 < C_h < 100$ 의 범위에서 약 1.0의 값을 갖는데, 이는 일본에서 제안된 식과 같은 결과를 갖는다.

2.3 설계 기준식과 지지값이 다른 제안식

수리실험을 통해 일본과 미국 등지에서는 많은 경험식을 제안하였다. 이 경험식들 중 범람고를 지지값으로 하여 파력을 구하는 식은 제외하고 Morison 식을 기본으로 하는 파력 제안식을 소개하고자 하는데 대표적으로 Ohmori. et. al (2000)가 제안한 식을 들 수 있으며 이는 식 (2)와 같다.

$$F_H = \frac{1}{2} \rho C_D u |u| B \eta + \rho C_M \dot{u} B L \eta + \frac{1}{2} \rho C_S(\theta) u |u| B \eta + \rho g B L \eta \frac{d\eta}{dx} \quad (2)$$

여기서, C_D 는 항력계수, C_M 은 관성계수이다. 직립벽의 경우 일반적으로 $C_D = 2.0$, $C_M = 2.5$ 를 사용하지만 실험 조건과 환경에 따라 달라진다. Ohmori. et. al (2000)은 $C_D = 2.05$, $C_M = 2.19$ 를 제안하였지만. 일반적인 적용성 검토를 위하여 본 연구에서는 $C_D = 2.0$, $C_M = 2.5$ 를 사용하였다. 또한 u 와 \dot{u} 는 각각 지진해일 진행방향의 유속과 가속도를 나타낸다. C_S 는 충격계수로 $C_S = 3.6 \tan \theta$ 로 정의되며 θ 는 파의 방향각이다. B 와 L 은 대상 구조물의 폭과 길이로써 본 논문에서는 $15\text{m} \times 15\text{m}$ 구조물로 가정하였다.

3. 연구 제안식의 실제지형 적용과 비교

과거 지진해일 파력에 대한 연구들을 검토하여, 실용적이면서도 좀 더 정확하게 지진해일 파력을 산정할 수 있는 식을 제안하기 위하여 우선 기준에 제안된 식들을 적용하여 비교하였다. 지진해일의 특성상 파장이 길기 때문에 파장에 대한 구조물의 특성 길이(D/L)가 상당히 작은 편이다. 따라서 Morison 식을 적용할 수 있는 $D/L < 0.2$ 범위의 조건에서 상기의 제안식을 비교, 검토하였다. 일본과 미국에서 설계 기준으로 제안된 식과 Ohmori. et. al (2000)의 제안식은 항력, 관성력, 충격력, 정수력 등 구조물에 가해질 수 있는 모든 힘에 의한 식이므로 항력만을 고려한 Iizuka and Matsutomi (2000)의 제안식은 비교 대상에서 제외하였다. 또한, 미국에서 제안된 설계 파력식에서 C_F 값을 1.0으로 하면 일본에서 제안한 식과 결과가 같으므로 쇄파가 일어나지 않는 조건으로 일본 지진해일 설계 기준식과 Ohmori. et. al. (2000)의 제안식을 비교 하였다. 파력이 작용되는 구조물은 직립벽으로 가정하고, 구조물에 수직으로 파가 입사한다고 가정하여 구조물이 받을 수 있는 최대 파력을 구하였다.

제안식의 비교와 더불어 초기파형에 따른 파력의 변화를 살펴보기 위하여 지진매개변수의 길이와 폭을 변화시켜 세 가지 케이스에 대하여 수치모의 하였다. 지진매개변수는 표 1과 같으며, 범람고 산정을 위한 수치모형은 Cho 등(2007)의 모형을 이용하여 동해항을 대상으로 하여 수치모의 하였다. 계산조건은 표 2와 같다.

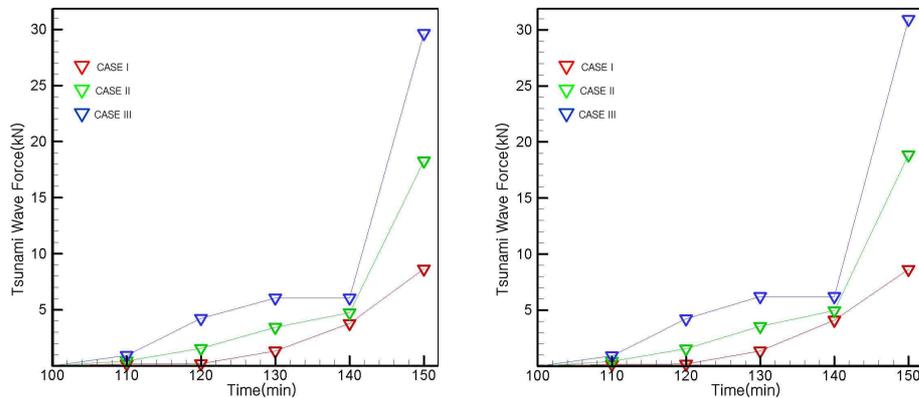
표 1. 지진매개변수

	$H(km)$	$\theta(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$	$L(km)$	$W(km)$	$u(cm)$
CASE I	2	22	40	90	40	30	760
CASE II	2	22	40	90	50	40	760
CASE III	2	22	40	90	60	50	760

표 2. 각 영역의 세부조건(동해항)

구분	영역 A	영역 B	영역 C	영역 D	영역 E
격자간격(sec)	60	20	6.67	2.22	0.7407
시간간격(sec)	3.0	1.0	0.333	0.111	0.03704
격자수	900×931	925×1408	496×679	421×466	250×259
외해경계조건	자유투과	동시격자접속	동시격자접속	동시격자접속	동시격자접속
모형	선형모형	선형모형	선형모형	선형모형	비선형모형

세 가지 경우에 대하여 일본의 설계파력식과 Ohmori et. al.(2000)의 제안식으로 계산한 파력은 그림 2와 같다.



(a) 일본의 지진해일 파력 설계식 (b) Ohmori et. al.(2000)의 제안식

그림 2. 일본의 지진해일 파력 설계식과 Ohmori et. al.(2000)의 제안식에 의한 지진해일 파력

그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 두 가지 식 모두 큰 오차 없이 비슷한 계산 결과를 보이며, 지진매개변수의 폭과 길이가 크면 클수록 지진해일 파력값 역시 커진다. 이는 지진매개변수의 폭과 길이가 커짐에 따라 파고가 증가함과 동시에 유속 역시 증가하기 때문으로 사료된다. 케이스별 파력 최댓값은 표 3과 같다.

표 3. 케이스별 파력 최댓값(kN)

구분	CASE I	CASE II	CASE III
일본의 설계 파력식	8.64	18.28	29.64
Ohmori et. al.	8.64	18.85	30.93

표 3에서 알 수 있듯이 동해항의 연안구조물은 지진해일 파력에 대하여 안전하다고 볼 수 있다. 하지만 해저지진 규모가 크고, 파고가 클수록 파력은 급격히 상승하므로 과거 자료의 분석을 통하

여 구조물의 안전성을 확보할 필요성이 있다.

4. 결 론

지진해일 파력에 대한 연구는 대부분 수치모형실험을 통하여 이루어져 왔으며, 여러 가지 제안식이 존재한다. 하지만 일본과 미국등지에서만 연구가 진행되고 있을 뿐, 사실상 거의 연구가 전무하다고 볼 수 있다. 파력은 연안구조물의 파괴에 직접적인 원인이 되고, 특히 지진해일 대피소 설계시 구조물이 파괴되지 않도록 설계하기 위하여 반드시 연구가 필요하다. 하지만, 국내에서는 연안구조물에 관한 설계 기준식이 없어 합리적인 연안구조물을 설계하기 위하여 적절한 기준을 마련해야 한다.

이에 본 연구에서는 계산이 간단하면서 합리적으로 쓸 수 있는 기존의 지진해일 파력 제안식을 소개하고 이를 동해항에 적용하였다. 기존의 3차원 수치모형 연구에 비하여 실용적인 제안식을 적용함으로써 기존의 2차원 수치모형을 이용하여 실제 지형에도 무리 없이 적용할 수 있다. 계산 결과 지진해일 파력은 상당히 작게 나왔으나 해저지진의 규모가 커질수록 파력도 급격히 상승한다는 결과를 감안할 때 이에 대한 연구는 반드시 필요하다.

감 사 의 글

본 연구는 국토해양부 첨단항만건설기술개발사업(과제명: 항만권역 태풍 및 지진해일 재해대응 체계 구축)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Cho, Y.-S. (1995). *Numerical Simulations of Tsunami Propagation and Run-up*, Ph.D. Thesis, Cornell University, U.S.A.
2. Ohmori, M., Fujii, N., and Kyotani, O. (2000). The Numerical Computation of the Water Level, the Flow velocity and the Wave Force of the Tsunami which Overflow the Perpendicular Revetments. *Proceedings of Coastal Engr. of JSCE*, Vol. 47, pp. 376-380.
3. Okada, T., Sugano, T., Ishikawa, T., Ohgi, T., Takai, S., Hamabe, C. (2004). Structural Design Method of Building for Tsunami Resistance (proposed). *Building Technology Research Institute*, The Building Center of Japan.
4. US Army Corps of Engineers. (1990). Water Forces on a Wall Shoreward of the Still-Water Level. *Technical Note III-29*, Coastal Engr. Research Centre.