

육상의 직립구조물에 미치는 지진 해일에 의한 수평 파력 및 파압에 대한 수리모형실험

Physical Modeling of Horizontal Force on the Inland Vertical Structure by Tsunami-like Waves

박형수* · Daniel Cox* · 신성원**
Hyongsu Park*, Daniel Cox* and Sungwon Shin**

요지 : 지진해일은 그 파랑이 연안 도시로 범람하여 육상 구조물에 피해를 주게 된다. 육상 구조물에 미치는 파압 및 파력에 대한 연구는 육상 구조물의 안정성 설계의 중요한 요인 중 하나이다. 본 연구에서는 단순화한 박스 구조물에 미치는 지진 해일의 수평 파력 및 파압에 대한 2차원 단면 수리모형실험을 수행하였다. 시간에 따른 수평 파압의 수직 분포와 파력을 파압계와 파력계를 사용하여 측정하여 상호 비교하였다. 또한, 쇄파의 형태도 다양하게 고려하여 측정하였다. 쇄파된 파랑이 입사하는 경우 구조물에 미치는 수평 파력이 최대가 되는 순간에는 수평 파압이 수직적으로 균일하였고, 그 외의 경우에는 육상 저면에 가까울수록 수평 파압이 커지는 분포를 보였다. 최대 수평 파력을 다양한 입사파랑 조건에 대한 함수로 표현하기 위해 쇄파상사계수를 사용하여 수평 파력과 관계식을 산출하였다. 그 결과 무차원화된 수평 파력은 쇄파상사계수가 증가함에 따라 지수적으로 감소하는 경향을 있음을 보였다.

핵심용어 : 지진해일, 직립구조물, 수평파력, 수평파압, 수리모형실험

Abstract : The tsunami flood the coastal cities and damage the land structures. The study on wave pressure and force on land structures is one of the important factors in designing the stability of inland structures. In this study, two - dimensional wave flume tests on the horizontal wave force and pressure of tsunamis on a simplified box-type structure was conducted. Vertical distribution and wave power of horizontal wave pressure over time were measured by pressure sensors and force transducer. Also, those were measured from the different wave breaking types. The vertical distribution of horizontal wave pressure was uniform at the moment when the horizontal wave force to the structure was maximum under the breaking wave condition. A surf similarity parameter was employed in order to figure out the relationship between the maximum horizontal wave force on the structure as a function of various incident wave conditions. As a result, the non - dimensionalized horizontal wave force tends to decrease exponentially as the surf similarity parameter increases.

Keywords : tsunami-like wave, vertical structure, horizontal wave force, horizontal wave pressure, physical model test

1. 서 론

지진해일은 입사하는 파랑이 연안에 접근하면서 쇄파(wave breaking)되고, 연안 도시로 범람하여 육상 구조물에 피해를 주게 된다. 그러므로 육상 구조물에 미치는 파압 및 파력에 대한 연구는 육상 구조물의 안정성 설계의 중요한 요인 중 하나이다. 지진해일은 단파(bore) 형식으로 연안 및 육상에서 진행되며, 흐름의 형태이기 때문에 수평 방향의 파력 및 파압이 수직방향에 비해 크게 작용한다.

지진해일의 피해에 대해서는 사후 현장 조사, 수치계산과

수리모형실험을 통해 범람 수위, 속도 및 침수 범위를 주로 파악한다(Mori et al., 2011; Lee et al., 2014; Park et al., 2013).

Cho et al.(2017)은 고립파(solitary wave)를 이용하여 직립 벽에 미치는 파력과 파압에 대한 2차원 단면 수리모형실험과 RANS 기반 수치모형실험을 수행하여 입사하는 파고와 해안으로부터 구조물의 수평 거리의 변화에 따른 최대 수평 파력에 대한 경험식을 제안하였다. 이와 같이 지진해일이 연안 구조물에 미치는 영향에 대해서 주로 Goring(1978)이 제안한 고립파 조파이론을 이용하였으나, 파고가 작은 경우 범람이

*Department of Civil and Construction Engineering, Oregon State University, Corvallis, OR 97331, U.S.A.

**한양대학교 ERICA 해양융합공학과(Corresponding author: Sungwon Shin, Department of Marine Science and Convergence Engineering, Hanyang University ERICA, Ansan, Kyunggi 15588, Korea, Tel: +82-31-400-5533, Fax: +82-31-400-5457, sungwshin@hanyang.ac.kr)

제한적이다(Thomas and Cox, 2012).

이를 보완하기 위해 수조실험에서 조파기의 구동변위를 최대로 설정하고, 조파판 변위의 형태를 오차함수(error function) 적용하고, 그 변위에 따른 조파판의 이동 시간 및 속도를 조절하는 방식으로 조파를 하여, 해당 파고에서 범람을 최대화하는 방법으로 조파하여 실험을 수행한 사례가 증가하고 있다(Baldock et al., 2009; Thomas and Cox, 2012; Park et al., 2013).

본 연구에서는 오차함수(error function)를 이용한 조파 방법을 활용하여 유사 지진해일파(tsunami-like wave)에 대한 직립 구조물의 파력과 파압을 측정하고, 입사파랑 조건에 대한 최대 파압 경험식을 도출하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험기기 및 모형 설정

수리 모형실험은 오레곤 주립대학교 파랑연구소(Hinsdale Wave Research Laboratory, Oregon State University)의 2차원 대형단면수로에서 수행하였다. 수로의 규모는 길이 104 m, 폭 3.7 m, 깊이 4.6 m이며, 피스톤형 조파기가 장착되어 있다. 조파기는 최대 변위가 4 m이고, 최대 이동 속도가 4 m/s로 지진해일의 파형을 재현하는데 최적화되어 있다(Fig. 1).

수로 저면에는 경사를 구현하기 위해 콘크리트 판을 수로 벽면에 고정하는 방식으로 하였으며, Fig. 1과 같이 1:12의 경사로 시작하여 1:24의 경사가 평면과의 접점까지 이어지는 구조로 설정하였다. 육상을 모의하기 위한 평면에 상자 구조물을 설치하여 수직 방향으로 위치가 조절될 수 있게 하였으며, 본 연구에서는 당시 수행했던 다양한 실험 조건 중에 육상에 부착된 실험 조건에서 조파하였다. 조파판 전면에서의 수위는 평면 육상의 높이와 일치하는 1.75 m로 설정하였다. 입사하는 파랑 조건과 변형을 측정하기 위하여 3개의 저항식 파고계(resistance type wave gages)와 5개의 초음파식 파고계(ultrasonic wave gages)를 설치하였다.

Fig. 2는 상자 구조물의 형태와 설치방법, 측정기기의 위치를 보여준다. 구조물 전면에 9개, 저면에 4개, 후면에 1개의 파압 측정기(pressure sensors)를 설치하였다. 또한, 구조물에 미치는 파력을 측정하기 위해 상판에 4개, 후면에 1개의 파력계(load cells)를 설치하였다. 본 연구에서는 후면의 파력계와 전면의 파압계를 사용하여 수평 파력과 수평 파압을 측정하였다.

Fig. 1과 Fig. 2는 Park et al.(2017)의 연구에서 수행한 실험과 유사한 설정이나, Park et al.(2017)은 육상 구조물을 가정한 상자형 구조물을 수직으로 상승시키고 수위도 상승시켜, 폭풍해일에 의한 침수된 상황에서 필로티 형태의 구조물에 미치는 파력과 파압에 대한 연구하였다. 이와는 달리 본 연구에서는 육상 구조물로 가정한 상자형 박스를 수직으로 상승시키지 않고 저면에 설치하고, 수위가 경사면이 끝나는 부분

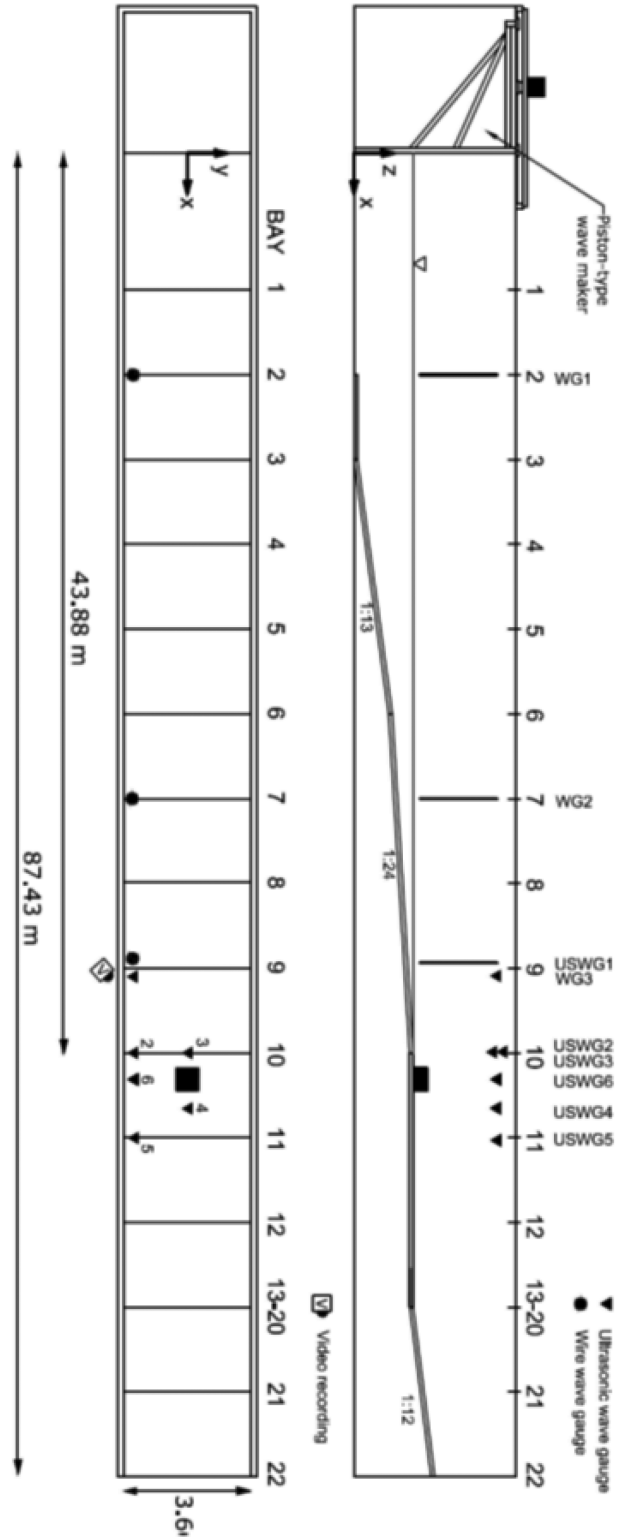


Fig. 1. Cross-sectional view (top) and top view (bottom) of the wave flume and instrumentation. (Park et al., 2017).

과 같이하여 수행하고 유사 지진해일파를 사용하여 실험을 수행하였다.

2.2 실험절차 및 자료 분석

수위 변화, 파력, 파압의 측정율(sampling rate)은 모두 500

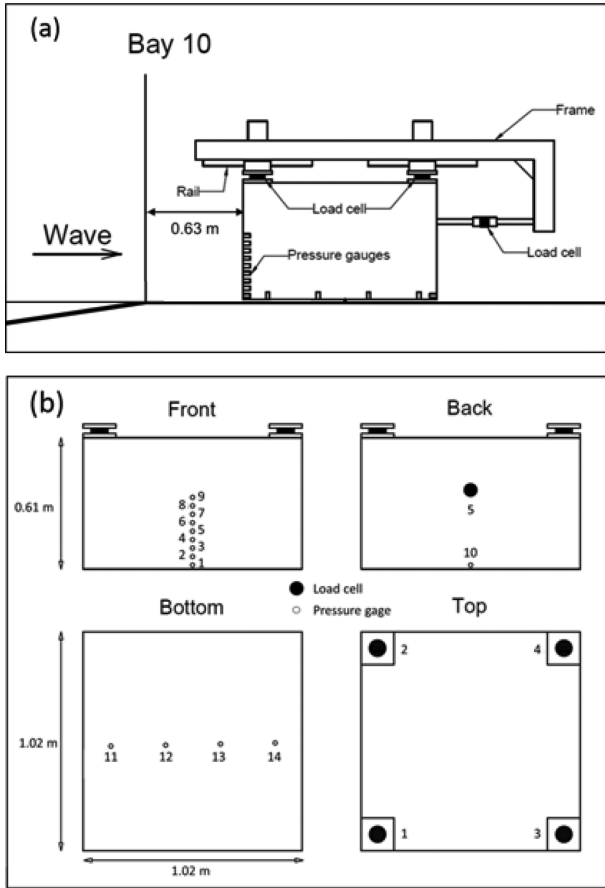


Fig. 2. Structural configuration and instrumentation: (a) cross-sectional view of the model setup and instrumentation; (b) top view of the model setup and instrumentation (Park et al., 2017).

Hz로 설정하고, 동기화 하여 각 장비별 계측 시각이 일치하도록 하였다. Tomiczek et al.(2016)은 지진해일에 대한 충격 쇄파압 계측 과정에서 독취율을 200, 500, 1000 Hz로 변경하며 민감도 테스트를 수행하였는데, 200 Hz로도 지진해일의 충격쇄파압을 계측할 수 있는 것으로 밝혀졌다.

유사 지진해일파는 Table 1에서와 같이 8개의 조건으로 조파하였다. 수로 내의 조파기 최대 이동 변위를 활용하기 위해 조파함수(error function)의 최대 변위를 4 m로 설정하고, 조파기 이동 변위 시간을 10~40초까지 조절하여 조파함수로써 파고를 변화시켰다.

Table 1. Input wave conditions for the wave flume tests

| Case | Wave height (A) (m) | Time duration of error function (Ts) (s) |
|------|------------------------|---|
| X1 | 0.51 | 10.0 |
| X2 | 0.34 | 15.0 |
| X3 | 0.28 | 20.0 |
| X4 | 0.21 | 25.0 |
| X5 | 0.18 | 30.0 |
| X6 | 0.16 | 35.0 |
| X7 | 0.14 | 40.0 |
| X8 | 0.13 | 45.0 |

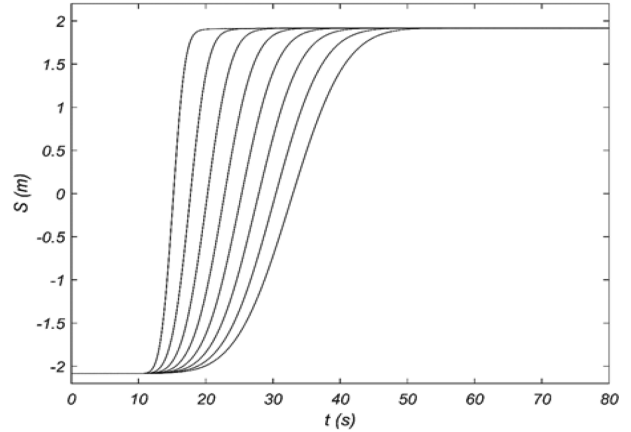


Fig. 3. Paddle displacement (S) as a function of time for all 8 cases. The steepest curve is X1 and the mildest curve is X8.

Table 1의 파랑조건에서 파고(A)는 외해의 1번 파고계에서 계측된 값으로, X1은 구조물 전면 근처에서 강하게 쇄파가 발생하는 경우이며, 다른 조건에서는 파고가 감소하며 충격 쇄파가 약하게 작용하거나(X2, X3) 단순한 쳐오름(X4~X8)이 발생하는 경우로 구분된다. 여기서 A는 최대 수위상승량으로 흔히 지진해일 파고를 의미하며, Ts는 오차함수의 총 곡선 길이만큼을 조파판이 움직이는데 소요되는 시간이다. Fig. 3은 여덟 개의 파랑조건에서 수학적 함수인 오차함수(error function)에 근거한 시간에 따른 조파판 이동 변위(S)를 나타낸 그림이다. 여기서 조파판 이동시간(Ts)이 짧을수록 파고가 커지고, 길수록 파고가 작아지며, 조파판의 이동거리가 같기 때문에 전체 물의 이동양은 같으며 실험실 내에서 최대값이 된다. 상세한 내용은 기존에 오차함수를 이용한 연구 사례(Baldock et al., 2009; Thomas and Cox, 2012; Park et al., 2013)에서 참조할 수 있다.

수위 변화와 파압 및 파력에 대해 민감도 테스트를 수행하기 위해 X2 조건에 대해 5회 반복하여 그 결과 값에 일관성이 있는지 확인하였으며, 5회 평균 오차율은 모든 파고계에서 1% 이하, 파압계 및 파력계에서 13% 미만의 값이 나왔으며, 그 결과는 Park et al.(2017)의 예비 실험 과정에 기록되어 있다.

3. 결 과

Fig. 4는 X1의 조건에서 계측된 9개의 전면 수평 파압(press 1~press 9)과 1개의 후면 수평 파압(press 10)에 대한 시계열 자료이다. 그림이 보여주듯이 최대 수평 파압의 수직 분포가 거의 균일한 것을 알 수 있다.

이와 동기화되어 계측된 수평 파력에 대한 시계열 자료는 Fig. 5와 같다. X1의 경우 가장 큰 수평 파력 값을 보이며, 입사 파고가 작아질수록 그 최대값이 감소하며 구조물에 도달하는 시각이 늦어지는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 X1 조건에서 수평 파력 시계열 자료의 각 순간

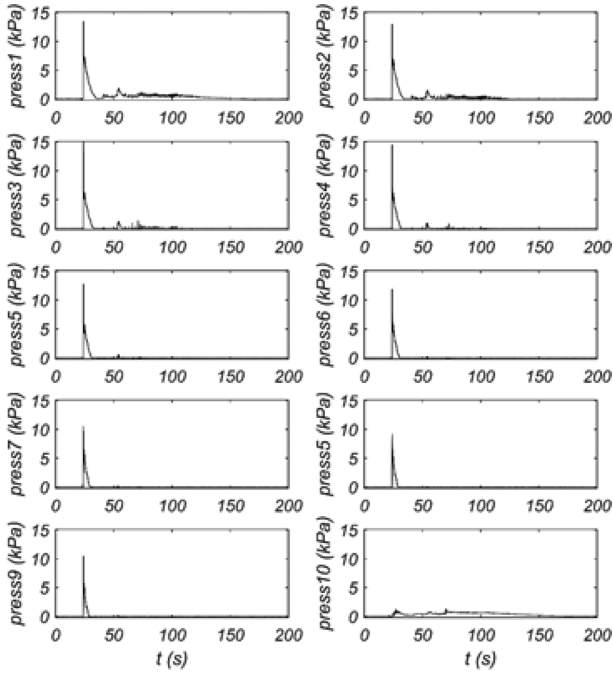


Fig. 4. Time variations of horizontal wave impact pressure on the structure (Case X1).

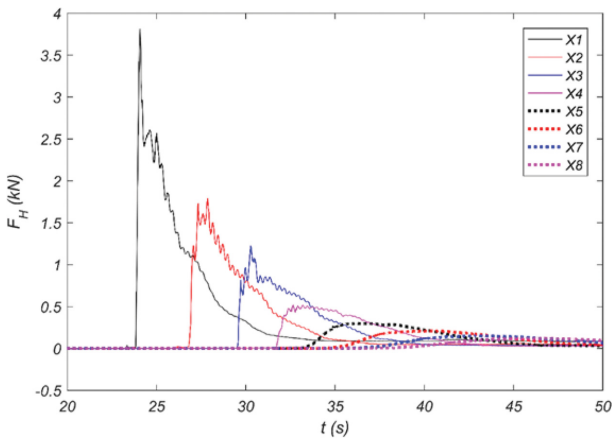


Fig. 5. Time history of horizontal wave impact forces on the structure under the different wave conditions.

마다 측정한 수평 파압의 수직 분포를 나타내고 있다. 수평 파력이 최대값에 이르기 전까지는 파압의 수직분포가 삼각형과 유사한 분포를 갖는 반면, 최대 파력이 발생하는 순간과 그 이후에는 수평 파압의 수직분포가 한동안 균일하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 주목할 것은 수평 파력이 최대가 되기 전에 4번 파압계 부근에서 가장 큰 충격쇄파압이 작용하는 것을 볼 수 있다. 그러나 국부적인 최대 충격쇄파압보다는 전면에 전반적으로 균일하게 작용하는 충격쇄파압이 수평 파력의 변위에 더욱 영향을 주는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 X1부터 X4의 파랑 조건 하에서 최대 수평 파력이 작용하는 순간에 측정한 수평 파압의 수직 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 구조물 전면에서 쇄파가 발생할수록 수평 파압의 수직분포는 약화되고, 파의 초오름의 영향

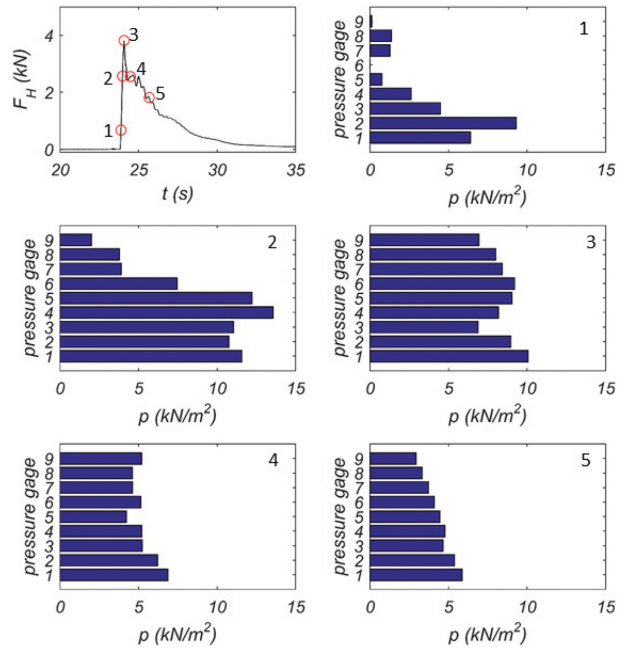


Fig. 6. Vertical distributions of the horizontal pressure on the structure at the certain moments of the horizontal forces. The numbers in the top left panel are the certain moments of the horizontal force and the numbers in the left of panels correspond to the number in the top left panel.

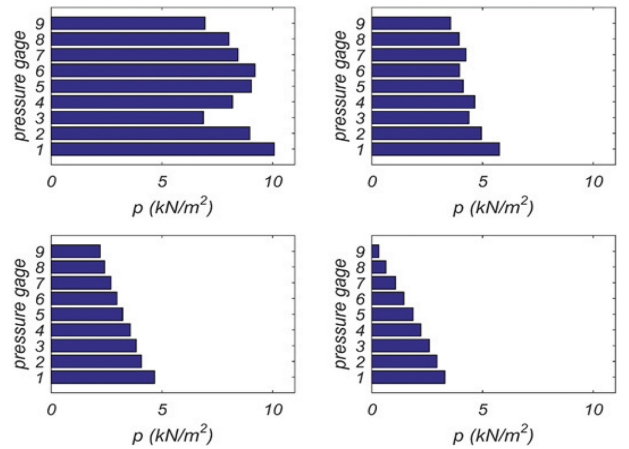


Fig. 7. Vertical distributions of the horizontal pressure on the structure at the moments of the maximum horizontal forces (Top left: X1; top right: X2; bottom left: X3; bottom right: X4).

으로 피라미드 혹은 삼각형 구조를 형성하는 것을 알 수 있다.

Table 2는 수평 파력(F_H)에 대한 경험식을 산정하기 위하여 각 파랑조건에 대한 파고(A_{max} , 최대 수위 상승량), 유사 지진해일 파랑의 파장(L)을 계산하고 이를 활용한 쇄파 상사계수(ξ_r)를 표시한 것이다. Baldock et al.(2009)은 유사 지진해일파의 수면 변위 시간을 이용하여 심해 파장을 이론식을 통해 계산한 후, 쇄파 상사계수를 활용하여 유사 지진해일파에 대한 초오름과 범람 수위에 대한 관계식을 도출한 바 있다. 본 연구에서도 동일한 방법으로 쇄파 상사계수를 계산하여 관계식을 도출하고자 하였다.

Table 2. Parameters for estimating the empirical formula (A_{max} : maximum water surface level at the wave gage 1; L : wave length at the wave gage 1; ξ_T : surf similarity parameter; F_H : Maximum horizontal wave force)

| A_{max} (m) | L (m) | ξ_T | F_H (N) |
|---------------|---------|---------|-----------|
| 0.51 | 87.8 | 0.53 | 3815 |
| 0.34 | 182.1 | 0.94 | 1792 |
| 0.28 | 360.7 | 1.52 | 1226 |
| 0.21 | 605.9 | 2.18 | 520 |
| 0.18 | 847.6 | 2.78 | 299 |
| 0.16 | 1,189.3 | 3.53 | 211 |
| 0.14 | 1,549.2 | 4.26 | 151 |
| 0.13 | 2,230.9 | 5.15 | 119 |

수평 파력에 대한 경험식 산정을 위한 쇄파 상사계수에 대한 식은 다음과 같다.

$$\xi_T = \frac{\beta}{\sqrt{A_{max}/L}} \tag{1}$$

여기서 β 는 저면 경사를 표현하며, 본 연구에서는 육상 전 면 경사인 1/24를 고려하여 0.04의 값을 사용하였다.

Fig. 8은 Table 2의 값을 사용하여 수평 파력과 쇄파 상사계수의 관계식을 도출하기 위한 그림으로, 붉은 점은 실험 결과 값을 나타내고, 붉은 실선은 최소자승법을 사용하여 도출한 근사값이다. 수평 파력을 무차원화하기 위하여 파고, 구조물의 높이($D = 1.02$ m) 및 폭($W = 0.61$ m)을 사용하여 무차원화 하였다. 관계식은 다음과 같이 가정하였다.

$$\frac{F_H}{\rho g A_{max} W D} = A e^{(B \xi_T)} \tag{2}$$

여기서, ρ 는 물의 밀도, g 는 중력 가속도를 의미한다. 본 연구에서 수행한 실험을 통해 도출된 A와 B는 각각 1.6과 -0.55이다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 무차원화된 수평 파력은

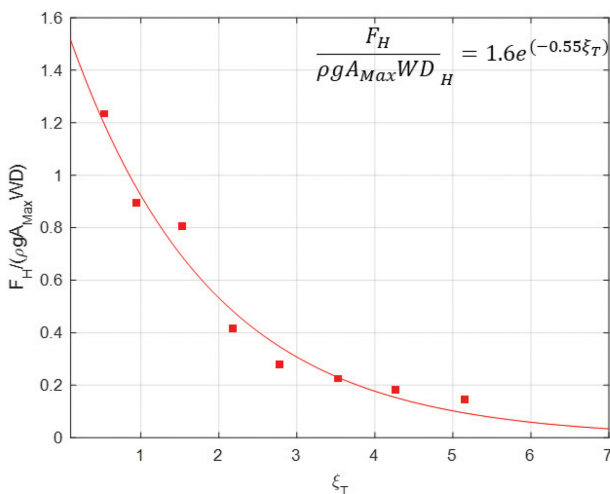


Fig. 8. Normalized horizontal forces as a function of surf similarity parameter (Dots: measured data; Solid line: fitted curve).

파랑조건을 고려한 쇄파상사계수가 증가함에 따라 자연 상수에 대해 음의 지수 관계로 감소하는 것으로 나타났다. 본 관계식은 입사파고에 대한 수평 파력의 관계식 산정에서 한 단계 개선되어 쇄파의 형태를 고려한 관계식을 도출하였다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 고립파에서 변형된 유사 지진해일파를 조파하여 입사하는 파랑 조건에 따른 수평 파력과 파압을 계측하였다. 기존의 고립파의 경우 조파판의 이동변위를 변화시켰으나, 본 연구에서는 조파판의 이동 변위를 최대로 설정하고, 조파기 이동 변위 시간을 조절함으로써 동일한 입사파고에서도 고립파에 비해 파장과 범람이 크게 발생하는 조건에서 실험을 수행하였다. 모든 자료는 동기화되어 순간 파력과 파압을 동시에 관찰할 수 있었다.

구조물 전면에서 쇄파가 발생하는 파랑조건인 경우 수평 파력이 최대치에 이르기까지 수평 파압의 수직 분포가 비교적 고르게 분포하는 것을 알 수 있었다. 그러나 쇄파가 발생하지 않는 파랑조건인 경우 처오름 효과에 의해 삼각형 구조로 수평 파압이 분포함을 관찰하였다.

발생시킨 파랑조건을 통해 파고와 파장을 계산하고, 이를 통해 쇄파 상사계수를 Baldock et al.(2009)과 동일한 방식으로 산정하고, 최대 수평 파력을 무차원화하여 서로의 상관관계를 파악하였다. 그 결과, 유사 지진해일파에 의한 최대 수평 파력은 쇄파상사계수와 지수적 관계에 있으며, 각각의 상수 A, B는 실험 자료를 통해 산정하였다.

본 연구를 통해 파고와 수평 파력의 관계에서 나아가 쇄파의 형태를 고려한 최대 수평 파력의 관계식을 도출하는데 그 의미가 있었다. 상수 A, B는 실험 조건에 따라 변동될 수 있으나, 본 연구에서 제안한 관계식의 범주 내에서 산정할 수 있을 것으로 기대한다.

향후에는 사각형 구조물을 수직적 위치를 변화시켜, 수평 및 수직 파력과 파압에 대한 관계에 대해 연구를 지속하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 2017년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 해양과학국제연구사업(과제번호: 20170265, 과제명: 극한 폭풍파 대응 연안 직립형 도시 구조물 취약성 함수 개발)과 경기씨그라프트(과제번호: 1525006552, 세부과제번호: 201703622) 및 한양대학교 교내연구지원사업(과제번호: 201700000000373)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

Baldock, T.E., Cox, D., Maddux, T., Killian, J. and Fayler, L.

- (2009). Kinematics of breaking tsunami wavefronts: A data set from large scale laboratory experiments. *Coastal Engineering*, 56, 506-516.
- Cho, M., Shin, S., Yoon, H.-D. and Cox, D.T. (2017). Numerical Simulation of Tsunami Force Acting on Vertical Walls. *Journal of Coastal Research*, SI 79, 289-293.
- Goring, D.G. (1978). Tsunamis. The propagation of long waves onto a shelf. REP Kh-R-38, W. M. Keck Laboratory of Hydraulic and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, CA.
- Lee, K.-H., Shin, S. and Kim, D.-S. (2014). Cross-shore variation of water surface elevation and velocity during the bore propagation. *Journal of Coastal Research*, SI 70, 533-538.
- Mori, N., Takahashi, T., Yasuda, T. and Yanagisawa, H. (2011). Survey of 2011 Tohoku earthquake tsunami inundation and run-up. *Geophysical Research Letters* 38.
- Park, H., Cox, D.T., Lynett, P.J., Wiebe, D.M. and Shin, S. (2013). Tsunami inundation modeling in constructed environments: A physical and numerical comparison of free-surface elevation, velocity, and momentum flux. *Coastal Engineering*, 79, 9-21.
- Park, H., Tomiczek, T., Cox, D.T., van de Lindt, J.W. and Lomonaco, P. (2017). Experimental modeling of horizontal and vertical wave forces on an elevated coastal structure. *Coastal Engineering*, 128, 58-74.
- Thomas, S. and Cox, D. (2012). Influence of finite-length seawalls for tsunami loading on coastal structures. *J. Waterw. Port, Coast. Ocean Eng.* 138 (3), 203-214.
- Tomiczek, T., Prasetyo, A., Mori, N., Yasuda, T. and Kennedy, A. (2016). Physical modelling of tsunami onshore propagation, peak pressures, and shielding effects in an urban building array. *Coastal Engineering*, 117, 97-112.
-

Received 28 November, 2017

1st Revised 15 December, 2017

2nd Revised 22 December, 2017

Accepted 23 December, 2017