지진해일 범람이 해안도시에 미치는 영향에 대한 3차원 수리모형실험 Three-Dimensional Laboratory Experiments for Tsunami Inundation in a Coastal City

김규한* · 박형수** · 신성원*** · Daniel Cox**

Kyuhan Kim*, Hyongsu Park**, Sungwon Shin*** and Daniel T. Cox**

요 지 : 본 연구에서 건물이 밀집되어 있는 해안도시에서의 지진해일 범람에 대한 평면수리모형실험을 수행하였다. 해안도시는 미국 서해안에 위치한 도시인 Seaside를 1/50으로 축소하여 평면수조에 설치하였다. 본 실험에서 범람지역에서의 지진해일의 파고 및 수평속도 측정하였는데, 31개 지점에서 측정하였으며 입사된 지진해일의 파고는 원형 스케일 10 m로 설정하였다. 범람양상과 속도는 건물의 위치 및 배열상태에 따라 크게 다르게 측정되었다. 또한, 도시의 주요 도로를 따라 측정된 지진해일 범람 파고 및 수평속도를 이용하여 모멘텀 플럭스(Momentum flux)를 계산하였다. 모멘텀 플럭스는 해안선에서부터 육지방향으로 파가 진행하면서 감소하는 일반적인 경향을 나타내었다. 범람파고와 모멘텀 플럭스는 도로가 형성된 구역에서 감쇄가 적게 나타났다. 본 연구를 통해 수평 유속이 구조물에 미치는 외력에 중요한 영향을 준다는 것을 알게 되었다.

핵심용어 : 지진해일, 범람, 수리모형실험, 수치모델링, large eddy simulation, 모멘텀 플럭스

Abstract : Laboratory experiments were conducted for tsunami inundation to an urban area with large building roughness. The waterfront portion of the city of Seaside which is located on the US Pacific Northwest coast, was replicated in 1/50 scale in the wave basin. Tsunami heights and velocities on the inundated land were measured at approximately 31 locations for one incident tsunami heights with an inundation height of approximately 10 m (prototype) near the shoreline. The inundation pattern and speed were more severe and faster in some areas due to the arrangement of the large buildings. Momentum fluxes along the roads were estimated using measure tsunami inundation heights and horizontal fluid velocities. As expected, the maximum momentum flux was near the shoreline and decreased landward. Inundation heights and momentum flux were slowly decreased through the road with buildings on each side. The results from this study showed that the horizontal inundation velocity is an important factor for the external force of coastal structures.

Keywords : tsunami, inundation, experiment, numerical modeling, large eddy simulation. and momentum flux

1. 서 론

최근에 발생한 일련의 지진해일 사례를 통해 해안도시에서 지진해일로부터 인명과 재산을 보호하기 위해서는 물리적 현상을 이해하는 것이 중요하다는 것을 인식하였다. 특히 해상 및 육상 구조물이 지진해일의 범람을 저감시키는 연구는 매우 중요하다. 지금까지 많은 연구자들이 지진해일 발생 후 현장 조사를 수행하였으나, 지진해일이 발생 시 범람과 유속의 시간적 변화를 포함한 수력학적 자료를 얻는 것은 거의 불가능하다. 그런데, 수치모델의 검증에 위해서 현장조사뿐만 아니라 이러한 시간적 변화를 포함한 수력학적 자료도 필요로 한다.

지난 최근 수십 년간 지진해일 범람을 모의할 수 있는 수치모델이 다 수 개발되어 복잡한 지형에서 지진해일의 범람 양상을 계산하였다. 몇몇 모델(Tomita 등, 2006; Lynett, 2007)은 육상구조물에 군집지역에서 지진해일의 복잡한 범람 양상과 흐름의 패턴에 대한 수치모의를 시도하였고, 계속하여 모델을 개선 발전시키고 있는 실정이다 (Cox 등, 2008). 일반적으로 수치모델을 검증하기 위해 현장관측 자료 및 수리모형실험자료가 필요하다. Rueben등(2011)은 대형수리모형 실험에서 지진해일의 범람양상을 영상자료를 분석하여 지진해일 범람시 일반적인 측정기기로 측정이 어려운 선단의 속도를 측정하는 성과를 나타내었다.

* 관동대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Kwandong University, 522 Naegok-dong, Gangneung, Gangwon-do, 210-701, Korea)

** Department of Civil and Construction Engineering, Oregon State University, 220 Owen Hall, Corvallis, OR 97331, U.S.A.

*** 관동대학교 에너지플랜트학과 (Corresponding author: Sungwon Shin, Department of Energy Plant, Kwandong University, 522 Naegok-dong, Gangneung, Gangwon-do, 210-701, Korea. Tel: 033-649-7267, Fax: 033-6473-436, sungwshin@kd.ac.kr)

본 연구에서는 대형평면수조에서 해안도시를 재현한 수 지진해일의 범람양상에 대한 수리모형실험을 수행하였다. 미국의 북서해안에 위치한 Seaside 도시를 1/50의 스케일로 축소 한 모형을 설치 후 지진해일에 의한 범람을 관찰하였으며, 관측된 범람파고와 수평유속을 통하여 모멘텀 플럭스를 계산하였다. 이 값은 현재 지진해일이 구조물에 미치는 파력 계산에 필수적인 요소로 사용되고 있다.

이와 같이 본 연구를 통해 수치모델검증을 위해 사용할 수 있는 요소를 갖춘 수리모형실험 자료를 획득 분석하고, 범람 파고와 수평유속을 이용한 모멘텀 플럭스를 산정하여 지진해일에 대비한 구조물의 설계지침 구축 및 수치모델 검증에 기여하는 데 목표를 두고 있다.

2. 수리모형실험

2.1 실험조건 및 절차

수리모형실험은 미국 오레곤 주립대학교가 보유하고 있는 O.H. Hinsdale Wave Research Laboratory의 3차원 지진해일용 평면수조에서 수행하였다(Fig. 1). 수조의 제원은 길이 48.8 m, 폭 265.5 m, 깊이 2.1 m이며 26개의 피스톤 형 조파기가 독립적으로 혹은 같이 움직임으로써 지진해일을 포함한 다양한 파랑을 조파하는 시설이다. 조파기의 최대 stroke은 2.1 m이며, 최대 속도는 2.0 m/s로써 고립파와 사용자가 고안한 지진해일 조파에 필요한 조건을 갖추고 있다. Cox 등 (2008)은 고립파와 error function을 이용한 두 가지 형태의 지진해일을 조파하여 범람의 양상을 파악하였다. Baldock 등 (2009)은 고립파 대신 조파기 stroke을 최대로 한 error function을 이용한 조파를 통해 범람의 효과를 극대화한 후 지진해일의 쇄파와 처오름에 대한 메커니즘 규명을 시도하였다. 본 연구에서는 error function을 이용한 지진해일을 조파하여 외해파고가 20 cm로 입사하는 파랑에 의한 해안도시의 범람 양상을 파악하였다. 해안지형은 단순화시켜 적용하였으며, 평면으로 시작하여 1:15의 경사 후 1:30의 경사로 이어지며 육상의 평지로 형성되는 지형위에 해안도시를 재현하였다.

실험은 네 쌍의 초음파식 파고계와 초음파식 유속계를 이용하여 도시의 네 주도로를 따라 움직여가며 파고와 유속에 대한 시계열자료를 획득하였다. 각 지점마다 자료의 신뢰도

Fig. 1. Site map of the experiment, Seaside, Oregon (left); 1:50 scale idealized model of Seaside (right). (출처: Cox 등 2008)

를 높이기 위해 반복된 자료를 얻었으며 총 134회의 실험을 수행하였다. 해안 지형에 대한 자세한 실험조건은 Cox 등 (2008)과 Rueben 등 (2011)에 기록되어 있다. 지진해일에 대한 파고와 유속을 측정하기 위하여 네 개의 저항식 파고계, 네 개의 초음파식 파고계 및 네 개의 초음파식 도플러 유속계(ADV)를 사용하였으며, 저항식 파고계는 외해의 입사파고(1,2번 파고계)와 경사면(3,4번 파고계)에서의 입사 파고를 측정하기 위하여 고정되었다. Fig. 2는 평면 수조에서의 지형과 모형 배치 및 계측기기의 위치를 나타내고 있다.

네 쌍의 초음파식 파고계와 ADV가 각각 같은 위치에 설치되어 한 지점에서 파고와 유속을 동시에 측정할 수 있도록 설정되었으며, 각지점당 7~50회 정도 실험을 반복하여 실험의 신뢰도를 확인하였다. Fig. 3는 초음파식 파고계와 ADV의 측정 위치를 나타내는 그림이며 네 개의 주도로(A, B, C, D)를 따라 파고와 유속을 측정하였다.

모든 계측자료는 National Instrument사에서 제작한 PXI 시스템을 통하여 50 Hz의 sampling 속도로 계측을 하였고, 동기화되어 저장되었다.

2.2 실험결과

각 지점에서 계측된 파고와 수평유속의 시계열 자료를 이용한 모멘텀 플럭스(M)를 계산하기 위하여 식(1)을 사용하였다.

$$M = h \times u^2 \quad (1)$$

위 식에서 M 은 모멘텀 플럭스, h 는 계측지점에서의 지진해일 범람 파고이며, u 는 수평유속을 의미한다. 모멘텀 플럭스는 지진해일이 구조물에 미치는 수평방향의 파력을 계산하는 경험식에 핵심적인 항으로 역할을 하고 있다(FEMA Coastal Engineering Manual, 2000). 통상적으로 유속을 천해역에서의 위상속도를 고려하여 추정하나, 본 연구에서는 유속을 직접 계측하여 모멘텀 플럭스를 계산함으로써 시간적으로

Fig. 2. A schematic view of experimental setup and instrumentation. “WG” stands for resistance type wave gage and “USWG” stands for ultrasonic wave gage. USWGs were collocated with ADVs to estimate momentum flux.

Fig. 3. Instrument locations along 4 major streets.

Fig. 4. Inundation height as a function of time measured along the street by using USWG.

변화하는 값을 얻을 수 있다.

Fig. 4는 각 계측지점에서의 지진해일 범람파고를 보여주 고 있다. Fig. 3에서 표시된 네 개의 주요도로에서 파고의 시 계열 자료를 계측한 것으로 식(1)의 h 값에 해당한다. 그림 에서 볼 수 있듯이 도로 B와 C에서의 범람파고가 A와 C에 비해 도시내로 진행하면서 상대적으로 감쇠가 적고 높은 파 고가 유지되는 현상이 나타났다. 이는 B와 C에서의 건물 배 열이 도파관의 역할을 할 수 있도록 되어 있어 파의 분산이 크게 이루어지지 않고 진행되었다고 볼 수 있다.

육상에서의 범람속도를 측정하기 위하여 ADV를 사용하였 으나, 파랑 전면에서 쇄파에 의한 공기방울과 작은 파고의 이 유로 파랑 전면(wave front)에서의 유속계측 값이 유실되어 수평속도 계측값의 보정이 필요하였다. 이를 위하여, Fig. 5 와 같이 Rueben 등 (2011)에서 영상자료를 통해 얻어진 파 랑 전면의 범람 속도를 이용하여 유실된 자료부분을 보정한 후 초음파식 파고계를 통해 얻어진 파고와의 곱으로 모멘텀

Fig. 5. Examples of tracking wave front using snapshots of video images (Ruben et al., 2011).

Fig. 6. An example of inundation water level(dots), horizontal fluid velocity interpolation using video image data (open triangles and solid line) and ADV data (open circles), and estimated momentum flux, thick solid line) at A1 (upper panel). Lower panel shows the number of data for averaging.

플럭스를 계산하였다.

Fig. 6는 이러한 방법으로 구해진 파랑전면의 유속과 ADV 자료를 내삽하여 유속을 추산하고, 그 값을 이용하여 모멘텀 플럭스를 계산한 예를 보여준다.

Fig. 7은 각 주요도로별로 계산된 모멘텀 플럭스의 시계열 자료이다. Fig. 8은 도로별로 관측된 최대 범람 파고와 파고 및 유속의 시계열자료를 통해 계산된 모멘텀 플럭스의 최대 값을 그린 그림이다. 두 그림에서 볼 수 있듯이 파고와 모멘텀 플럭스 모두 파랑이 진행함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 최대범람파고의 관점에서 볼 때 도로 C에서의 파고가 A와 B에서의 파고보다 다소 작았으나, 파랑이 진행함에 따라 도로 A에서의 파고가 B와 C에 비해 빠르게 감소하였다. 앞서 언급했듯이 C와 D는 일종의 도파관의 형태를 보이고 있어, 파 고의 감쇠가 상대적으로 적은 상태에서 진행되는 것으로 볼 수 있다. 반면 최대 플럭스의 경우에는 도로 B와 C에서 도 로 A보다 초기에 큰 값을 보였다. 이는 모멘텀 플럭스의 경 우 파고보다 유속의 영향이 더 컸던 것으로 해석될 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서 지진해일의 범람에 대한 3차원 수리모형실험

Fig. 7. Estimated momentum fluxes as a function of time at all measurement locations.

Fig. 8. Cross-shore variations of maximum inundation heights (top) and maximum momentum flux (bottom).

결과를 통해 모멘텀 플럭스를 계산하고, 도심의 구조에 따른 범람 및 모멘텀 플럭스의 감쇄 양상을 파악하였다.

이를 통해 얻어진 결과를 다음과 같다.

(1) 최대 범람 파고는 도로 A의 입구에서 가장 큰 것으로 나타났고, 모멘텀 플럭스는 도로 B의 입구에서 가장 큰 것으로 수리모형실험을 통해 나타났다.

(2) 모멘텀 플럭스에 미치는 수평유속의 영향을 고려할 때, 수평유속은 범람에 의한 육상구조물에 미치는 파력 추정에도 중요한 요소가 될 것으로 해석될 수 있다.

(3) 수리모형실험을 통해 계측 및 계산된 최대범람파고와 최대모멘텀 플럭스는 지진해일이 육상으로 진행됨에 따라 감

소하였으나, 도로 A가 도로 B와 C에 비해 더욱 빠르게 감소하는 경향을 보였다. 이는 육상건물의 배치 구조에 따른 영향으로 볼 수 있다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 지식경제부지원 지역혁신센터 프로그램과 국토해양부의 지원으로 수행한 해양에너지 전문 인력 양성사업 및 미래해양기술, 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2012년도 지역기술혁신사업(12지역 기술혁신B01)의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

참고문헌

- Amsden, A.A. and Harlow, F.H. (1970). The SMAC method: a numerical technique for calculating incompressible fluid flow, Los Alamos Scientific Laboratory Report LA-4370, Los Alamos, N.M.
- Baldock, T.E., Cox, D.T., Maddux, T., Killian, J., Faylor, L. (2009). Kinematics of breaking tsunami wavefronts: a data set from large scale laboratory experiments. *Coastal Engineering*, 56, 506-516
- Coastal Construction Manual. (2000). Federal Emergency Management Agency (FEMA 55), U.S.A.
- Cox, D.T., Tomita, T., Lynett, P., and Holman, R.A. (2008). Tsunami inundation with macroroughness in the constructed environment, *Proc. 31st International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 1421-1432.
- Hirt, C. W and Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid(VOF) method for the dynamics of free boundaries, *J. Comput. Phys.*, 39, 201-225.
- Lynett, P.J. (2007). Effect of a shallow water obstruction on long wave runup and overland flow velocity. *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 133(6), 455-462.
- Nakamura, T. and Yabe, T. (1999). Cubic interpolated propagation scheme for solving the hyper-dimensional Vlasov-Poisson equation in phase space, *Comput. Phys. Commun.*, 120, 122-154.
- Rueben, M., Holman, R., Cox, D., Shin, S., Killian, J., and Stanley, J. (2011). Optical measurements of tsunami inundation through an urban waterfront modeled in a large-scale laboratory basin. *Coastal Engineering*, 58, 229-238.
- Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations, *Mon. Weath. Rev.*, 91(3), 99-164.
- Tomita, T., Honda, K., and Kakinuma, T. (2006). Application of three-dimensional tsunami simulator to estimation of tsunami behavior around structures. *Proc. 30th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 1677-1688.

원고접수일: 2012년 12월 2일

수정본채택: 2012년 12월 21일

게재확정일: 2012년 12월 24일