

고립파작용에 의한 육상구조물군에 작용하는 3차원파력해석 Three-Dimensional Wave Force Analysis on Land structure under the Solitary Wave(Tsunami) Action

하선욱¹, 이귀섭², 김도삼³
 Sun Wook Ha¹, Kui Seop Lee² and Do Sam Kim³

1. 서 론

2004년 발생한 인도양 지진해일은 태국 Phuket 에 서 육상으로 전파하여 단파상으로 연안구조물에 충 격파력을 미친 것으로 당시의 영상으로부터 알 수 있다. 이것은 가옥을 포함한 연안시설물 등에 미치 는 지진해일이 인명피해 이외에도 사회간접자본의 파괴에 직접적인 원인이라는 측면에서 중요한 문제 로 인식되고 있다. 하지만, 연안구조물의 배후역에서 는 그 위세가 감쇠되어 범람역의 시가지로 유입되는 현상이 목격된다. 즉, 연안에 설치된 구조물에 의하 여 지진해일파력이 감쇠된다는 것을 알 수 있다.

지금까지 여러 측면에서 연안구조물에 작용하는 지진해일파력의 평가 및 해석방법이 활발하게 논의 되고 있지만(예로, 이광호 등, 2009; 有川 등, 2005, 2006; Yeh et al., 2006) 육상구조물에 작용 하는 지진해일파력에 관한 검토는 몇몇 수치모형실 험에 의한 연구(이광호 등, 2009; Arikawa et al., 2005; Xiao and Huang, 2008)를 제외하면 대부분 수 리모형실험에 의존하고 있는 실정이다. 본 연구에서 는 복수의 육상구조물군에 대한 지진해일파력의 평 가 및 연안에 구조물의 유무에 따른 그 배후에서의 파력감쇠효과에 대한 수리실험(Simamura et al, 2007)과 비교·분석하여 지진해일파력에 관한 3차원 수치해석의 유용성을 검토한다. 수치해석에서는 3차 원혼상류를 대상으로, 수면형의 추적에는 VOF법 (Hirt & Nichols, 1981)을, 이산방정식에는 SMAC법 (Amsden & Harlow, 1970)을, 난류해석에는 LES모델

(Smagorinsky, 1963)을 각각 적용하였으며, 대상파 랑을 조파소스에 의해 조파하고, 파랑의 무반사에 스폰지층을 사용하는 3차원수치과동수로를 적용하였 다.

2. 수치해석이론의 개요

서로 혼합되지 않는 점성·비압축성의 혼상의 Newton유체를 고려하여 단일유체모델을 적용하면 혼 상의 유체는 다음의 식(1)의 연속방정식 및 식(2)의 운 동방정식으로 기술될 수 있다.

$$\nabla \cdot \vec{V} = \tilde{q} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \vec{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \left\{ \nabla^2 \vec{V} + \frac{1}{3} \nabla \tilde{q} \right\} + \vec{f} \quad (2)$$

여기서, \vec{V} 는 유속벡터, p 는 압력, \vec{g} 는 중력가속도, $\hat{\rho}$ 는 밀도, ν 는 동점성계수, \tilde{q} 는 수치조파를 위한 소스항 을 각각 나타낸다. 한편, 위의 식에서 밀도 $\hat{\rho}$ 및 동점성 계수 ν 는 기체 혹은 액체를 결정하는 공간과 시간의 함 수이다. 즉, 서로 다른 유체(액체와 기체)는 밀도와 점성 을 고려함으로써 동일한 운동방정식에 의해 표현된다.

또한, 기체와 액체가 구성하는 접면의 추적법으로 VOF (Hirt & Nichols, 1981)법을 적용한다. VOF법은 0 (기체의 경우)에서 1(액체의 경우)까지의 범위를 갖는 컬러함수(color function) F 에 기초를 두고 있다. VOF함수 를 사용하면, $0 < F < 1$ 을 갖는 각 계산셀에서 접면이 결정 된다. 게다가, 접면셀에서 각 유체의 밀도 $\hat{\rho}$ 와 동점성계

1 한국해양대학교 대학원 석사과정
 2 한국해양대학교 대학원 박사과정(부산지방해양항만청)
 3 한국해양대학교 건설·환경공학부 교수

수 $\hat{\nu}$ 는 다음과 같이 주어지는 VOF함수에 의해 평가된다.

$$\hat{\rho} = F < \rho_w > + (1 - F) < \rho_a > \quad (3)$$

$$\hat{\nu} = F < \nu_w > + (1 - F) < \nu_a > \quad (4)$$

여기서, 첨자 w 및 a 는 액체상과 기체상의 물리량을 각각 나타낸다. VOF함수의 이류는 다음과 같이 각 셀에서 액체의 보존을 고려함으로써 얻어진다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)F = F\tilde{q} \quad (5)$$

이상의 기초방정식을 교호격자를 이용한 유한차분법에 의해 해석하였다. 경계조건으로는 서로 혼합되지 않는 2상류의 유체운동을 고려하고 있으므로 액체만을 고려하는 단상류의 경우와 달리, 자유수면의 경계조건이 불필요하게 되며, 계산영역의 최상단에서는 압력의 일정조건을, 수로의 바닥 및 측면경계를 처리하기 위하여 불투과조건과 slip조건을 각각 적용하였다.

3. 수치해석결과

3.1 Simamora et al.(2007)의 수리실험

Simamora et al.(2007)의 수리실험에서는 폭 7m, 길이 11m의 평면수조를 사용하였으며, 대상의 고립파는 피스톤형의 조파기에 의해 조파되었다. 또한, 1/200 스케일을 상정하여 연안에 있어서 지진해일의 천수변형에서부터 육상으로의 처오름까지 재현하였다. 깊은 해역에서 수평상의 수심을 60cm로 설정하고, 연안에서의 천수변형을 재현하기 위하여 1:3의 경사면을 설치하여 수심 3cm의 천해역에 연결하였다. 직립호안의 배후는 평탄한 육지역이고, 지진해일파력(이하에서는 surge force로 통일함)을 측정하기 위하여 정사각형의 각목(한 변의 폭 $B=10\text{cm}$)으로 만든 구조물군을 배치하였다. 수리실험에서의 조파방법은 조파관을 약 4초간 5cm 정도 뒤로 당기고, 그 후에 중립위치에서부터 20cm의 위치까지 약 4초간 전방으로 밀고, 되돌아오는 과정으로 구성되어 있다. 조파개시부터 17초 뒤에 중립 위치로 되돌아온다. 이상의 과정으로 조파시킨 파는 zero-up-cross에서 zero-down-cross 사이의 시간은 약 7초, 파고는 2.5cm에 상당한다. 계측에서 파력은 3분력계를, 침수심의 측정에는 용량식파고를 각각 사용하였다. 샘플링간격은 3분력계에서는 1/100(sec), 수위변동은 1/200(sec)로 하였으며, 3번의 실험을 수행하여 그 평균치를 사용하였다. 그리고, 구조물군의 배치는 총 6 CASE를 설정하였으며, 모든 케이스에 대해 호안으로부터 거리를 10~80cm의 범위에서 변화시키고 있다. CASE 1의 경우는 대상구조물의 전면에 구조물이 없는

경우로 호안으로부터의 거리(D)를 변화시켰다. 그리고, CASE 2와 3의 경우는 대상구조물의 전면에 구조물이 존재하는 경우로, 호안으로부터의 거리(D)를 변화시켜 적용하였다. CASE 2의 경우 각각 $D=20, 40, 60, 80\text{cm}$ 로, CASE 3의 경우 $D=40, 60, 80\text{cm}$ 로 각각 변화시켜서 파력을 측정하였다. CASE 4와 5의 경우는 전면에 구조물을 지그재그로 설치하였으며, 기타조건은 CASE 2, 3과 동일하다. 또한, CASE 6의 경우는 구조물을 3열로 총 4줄을 배치하여 12개의 구조물을 설치하여 구조물군을 형성하였으며, 파력은 중앙의 구조물에서 측정하였다. Fig. 1은 수리실험에 사용된 수조의 개요이다.

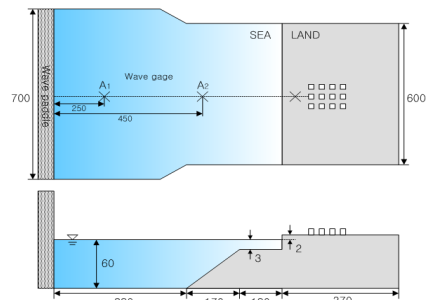


Fig. 1. Definition sketch of experimental wave tank.

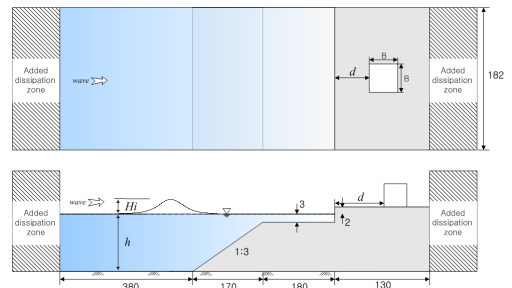


Fig. 2. Definition sketch of 3-dimensional numerical wave tank.

3.2 수치해석의 조건 및 결과

3.2.1 수치해석의 조건

본 연구에서는 Simamora et al.(2007)의 수리실험을 재현하기 위하여 Fig. 2와 같은 3차원수치파동수조를 사용하였다. 또한, 수리실험과 동일한 스케일을 적용하여 고립파의 천수변형을 유도하기 위한 경사면 및 육상구조물을 설치하였다. 하지만, 수치해석에서는 Fig. 2와 같이 수조폭을 182cm로 적용하여 수행하였다. 이는 수리실험에서 사용된 수조폭이 조파관 부근에서 700cm, 경사면의 전면에서 600cm로 폭을 감소시켜 경사면과 함께 고립파의 천수변형을 유도한 것으로 판단된다. 하지만, 수조폭의 변화에 따른 파고변화는 미소하고, 현재 수치해석상의 하드웨어적인 측면에서의

부족한 점으로 수조폭을 감소시켰다. 그러나, 수조폭의 변화에 따른 파고변화를 고려하기 위하여 수리실험의 파고측정지점 A2 에서 측정된 파고를 기준으로 하여 수치해석에서도 A2지점에서 수리실험과 동일한 파고를 나타내도록 입사파고를 조절하였다. 또한, 육상구조물군의 배치형상은 전술한 수리실험의 CASE 1과 CASE 6을 대상으로 하였으며, 추후에 다른 CASE에 대해서도 수치해석을 수행할 계획이다.

3.2.2 수치해석의 결과

1) CASE 1

Fig. 3은 호안으로부터의 거리(D)와 건물의 폭(B)의 비에 따른 최대파력의 수치해석결과를 수리실험결과와 비교한 것이다.

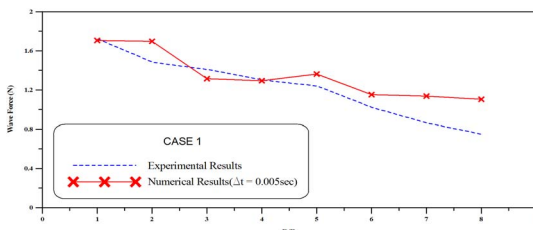


Fig. 3. Comparison of maximum surge force according to the change of distance from revetment.

결과를 살펴보면 $D/B=1$ 인 경우 최대 surge force가 수리실험과 수치해석의 결과가 거의 동일하게 나타난다. 하지만, D/B 의 값이 증가함에 따라(호안으로부터의 거리가 멀어짐에 따라) 두 결과에서 최대 surge force의 값에 차이가 나타나고 있다. 이러한 결과는 다음과 같은 몇 가지 요인에 기인한 것으로 판단된다. ①고립파는 조파된 이후 경사면에서 천수변형을 일으키고, 호안을 월파하여 선단부가 단파로 변형하여 육상구조물까지 전파한다. 이러한 과정에서 저면마찰을 고려하지 않는 수치해석의 결과는 D/B 가 커짐에 따라 수리실험에 비하여 최대 surge force가 크게 나타나는 것으로 판단된다. ②수치해석 중의 스파이크현상에 기인한 부분도 있는 것으로 판단된다. 스파이크현상은 실험이나 현장의 결과에서는 나타나지 않는 불연속변화의 현상으로, VOF법에 의한 자유수면의 추적과정에서 주변이 유체셀로 완전히 둘러싸인 기체셀에 약간의 유체가 유입하는 경우에 기체셀은 다음의 시간스텝에서 표면셀로 되지 않고 유체셀로 급격하게 변화된다. 그리고, 셀내에서 연속조건이 만족되어야 하므로 스파이크가 발생하게 된다(Kleefsman et al., 2005). 이러한 스파이크현상으로 인해 surge force의 산정에 오차가 발생할 수 있다.

하지만, 호안으로부터의 거리가 멀어짐에 따라 최대

surge force가 감소하는 것으로 나타나며, 두 결과에서 유사한 변화양상을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

2) CASE 6

Fig. 4는 D/B 의 값의 변화에 따른 surge force의 시간변화를 수리실험과 비교한 결과이다. 두 결과에서 시간의 원점을 일치시켜 나타내었다.

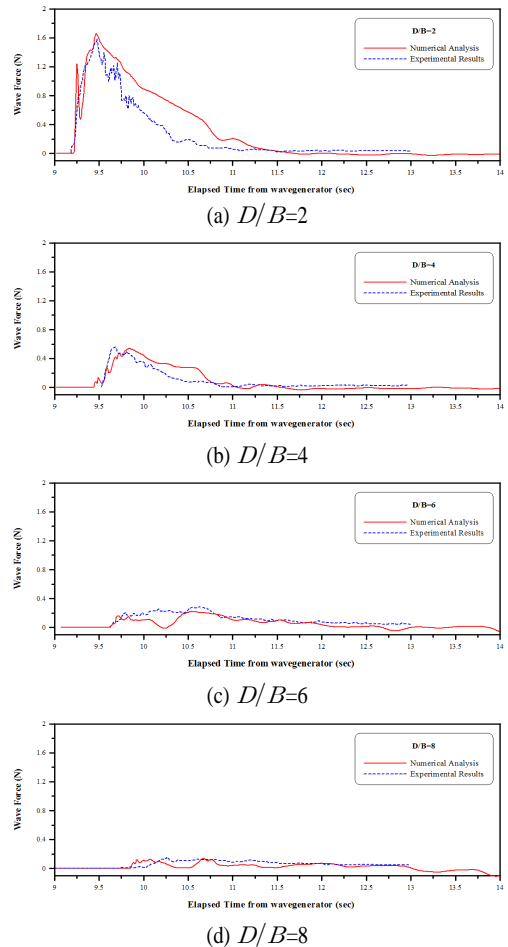


Fig. 4. Time Variation of the surge force according to the change of D/B .

결과를 살펴보면 $D/B=2$ 의 경우에 surge force의 측정이 시작되는 순간부터 최대 surge force가 나타나는 시간까지 유사한 변화양상을 나타내는 것을 알 수 있다. 하지만, surge force의 최대값이 측정된 이후로 수리실험의 경우는 짧은 시간에 걸쳐 감소하지만, 수치해석의 경우는 보다 완만한 감소를 나타낸다. 이러한 현상은 $D/B=4$ 인 경우에도 나타난다. 하지만, $D/B=6, 8$ 인 경우는 전술한 현상이 발생하지는 않고, 최대 surge force의 값의 변화가 유사하게 나타난다.

Fig. 5는 CASE 6에 대하여 측정된 최대 surge force

를 동일한 조건의 수리실험과 비교한 결과이다. 그림과 같이 최대 surge force는 수리실험의 결과와 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 CASE 1보다 호안을 월파한 고립파가 긴 거리를 전파하여 구조물에 도달한 것이 아니라, 호안을 월파한 직후 짧은 거리를 전파하여 구조물에 도달하였기 때문으로 판단된다. 여기서, 전술한 CASE 1과 함께 검토하면 구조물이 호안에서 멀어짐으로서 나타나는 파력의 감쇠보다도 대상구조물의 전면에 다른 구조물이 존재함으로서 차폐에 의한 파력의 감쇠가 더 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 본 연구에서 검토한 CASE 6에 있어서 시간에 따른 수면형(침수상황)의 변화를 나타낸 3차원 결과로써, 고립파의 조파후 경과시간 9.6초, 10.0초, 10.6초, 11.584sec시의 상황을 나타낸다.

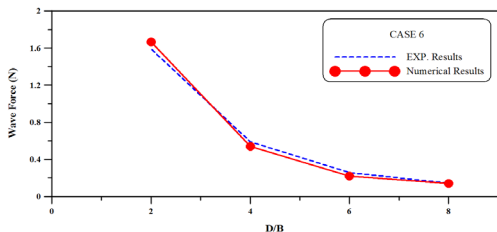


Fig. 5. Comparison of the maximum surge force in the CASE 6.

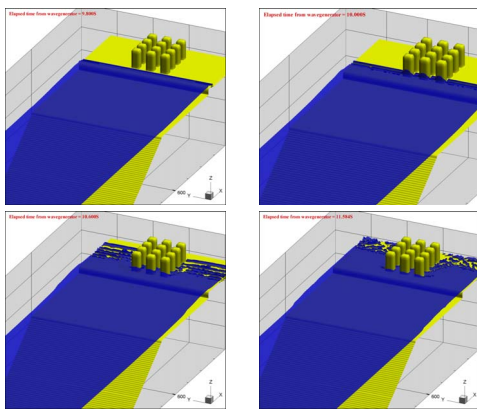


Fig. 6. Evolution of the computed water surface in the CASE 6.

4. 결 론

본 연구에서는 복수의 육상구조물군에 대한 지진해일파력의 평가 및 연안에 구조물의 유무에 따른 그 배후에서의 파력감쇠효과에 대한 수리실험결과(Simamura et al, 2008)과 비교 분석하여 지진해일파력에 관한 3차원 수치해석의 유용성을 확인하였다. 더불어, 결과로부터 ①surge force의 영향은 연안으로부터 후방으로 갈수록 작아지는 것을 확인하였고, ②연안에 구조물군이 존재하는 경우 전방의 구조물에 의한 영향으로 후방으

로 갈수록 surge force가 현저히 줄어드는 것을 알 수 있었다. 즉, 연안에 구조물군이 존재하는 경우에 후방에서는 파력에 의한 피해를 줄일 수 있으며, 연안에 구조물을 건설하는 경우에 구조물군을 적절히 배치함으로써 인명 및 재산의 피해를 줄일 수 있을 것이다.

참고문헌

- 이광호, 김창훈, 김도삼, Harry Yeh, 황용태. (2009) 해안 안벽과 육상구조물에서 지진해일파의 치오름 및 작용 파력에 관한 수치해석, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제29권 제3호, pp.289-301.
- 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.
- Arikawa, T., Yamada, F. and Akiyama, M. (2005) Study of the applicability of tsunami wave force in a three-dimensional numerical wave flume. Ann. J. of Coastal Engrg., JSCE, Vol. 52, pp. 46-50.
- Fenton, J. (1972) A ninth-order solution for the solitary wave: Part2, J. Fluid Mech., Vol. 53, pp. 257-271.
- Hirt, C.W and Nichols, B.D. (1981) Volume of fluid(VOF) method for the dynamics of free boundaries. J. Comput. Phys., Vol. 287, pp. 299-316.
- Huang, C.J., Chang, H.H., and Hwun, H.H. (2003). Structural permeability effects on the interaction of a solitary wave and a submerged breakwater, Coastal Engrg., Vol. 49, pp. 1-24.
- Kleefsman, K.M.T., Fekken, G., veldman, A.E.P., Iwanowski, B. and Buchner, B. (2005) A Volume-of-Fluid based simulation method for wave impact problems. J. of Comput. Phys., Vol.206, pp.363-393.
- Simamura, C., Shighara, Y. and Fujima, K. (2007) Experimental Study on Tsunami Forces Acting on Structures. J. of Coastal Engrg., JSCE, Vol.54, pp.831-835.
- Smagorinsky, J. (1963) General circulation experiments with the primitive equations. Mon. Weath. Rev., Vol. 91, No. 3, pp. 99-164.
- Xiao, H. and Huang, W. (2008) Numerical modeling of wave runup and forces on an idealized beachfront house. Ocean engng., Vol. 35, pp. 106-116.
- Yeh, H. (2006) Maximum fluid force in the Tsunami Runup Zone, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean engineering, pp.496-500.
- 有川太郎, 池辺淳光, 山田文則, 下迫健一郎, 今村文彦 (2005) 護岸・陸上構造物に対する津波力の大規模実験, 海岸工学論文集 第52巻, pp.746-750.
- 有川太郎, 大平大輔, 中野史丈, 下迫健一郎, 高橋重雄, 今村文彦, 松富英夫 (2006) 遡上津波力に関する大規模実験, 海岸工学論文集 第53巻, pp.796-800.