

직립호안 및 주상구조물에 작용하는 단파에 의한 2차원 및 3차원 파력해석 Two and Three Dimensional Wave Loads Acting on the Vertical Revetment and Cylindrical Pile due to a Bore

최현석¹, 김도삼², 조 성³
 Hyun Seok Choi¹, Do Sam Kim² and Sung Cho³

1. 서 론

2004년에 발생한 규모 8.9의 인도네시아 수마트라 지진은 높이 10m 이상의 엄청난 지진해일을 발생시켰고, 이로 인하여 30만명에 육박하는 인명피해와 수조원의 재산피해를 야기시켜 역사상 최악의 지진해일로 알려져 있다. 금세기의 빈번한 지진발생으로 비교적 안전지대에 놓여 있는 것으로 알려진 우리나라도 지진재해에 대한 경각심이 한층고조되어 있고, 무엇보다도 직접적인 영향을 받을 수 있는 일본연안에 위치하는 지진공백역에서의 지진해일로 막대한 피해가 우려된다(김도삼 등, 2007). 엄청난 에너지를 갖는 지진해일이 내습할 경우, 육·해역에 설치된 해안·항만구조물에 큰 파력(예로, Yeh, 2007)을 작용시켜 구조물을 파괴할 수 있고, 구조물의 주변에서 급격한 세굴(Nakamura, 2008)을 포함한 천해역의 지형변동(예로, Takahashi et al., 1999)을 야기할 수 있다. 또한, 매우 높은 파고와 빠른 파속으로 육상을 소상하여 도로 및 건물에 침수피해를 야기하거나 질병의 확산 및 피해지역의 복구로 인한 경제적 손실 등으로 2차피해를 초래하는 경우도 있다(Matsutomi and Shuto, 1994).

지진해일파는 쇄파시에 overturning tip이 전면의 수면에 강하게 접촉되면서 부서진 파로 되고, 이는 대단히 긴 파장 때문에 지진해일에 대해 단파(bore)로 고려될 수 있다. 이러한 특성에 따라 본 연구에서는 단파와 구조물과의 강비선형간섭현상에 의한 작용파력을 수치적으로 접근한다. 본 연구의 타당성

을 규명하기 위하여 댐과괴류와 같은 단파의 작용하에서 직립호안에 작용하는 파력의 특성을 검토한 Matsutomi(1991)의 실험결과 및 사각형상의 단면을 갖는 주상구조물에 작용하는 파력의 특성을 검토한 Yeh(SMU, 2009)의 실험결과와 본 실험에서 얻어지는 수치해석결과를 각각 비교·검토한다.

직립호안 및 주상구조물에 작용하는 단파파력을 수치적으로 접근하기 위하여 본 연구에서는 수면형의 추적에는 VOF법(Hirt & Nichols, 1981)을, 이산방정식에는 SMAC법(Amsden & Harlow, 1970)을, 난류해석에는 LES모델(Smagorinsky, 1963)을 각각 이용하는 2차원 및 3차원수치파동수로(이광호 등, 2008)를 적용하였다.

2. 수치해석 이론의 개요

서로 혼합되지 않는 점성·비압축성의 혼상의 Newton유체를 고려하여 단일유체모형을 적용하면 혼상의 유체는 다음의 식(1)의 연속방정식 및 식(2)의 운동방정식으로 기술될 수 있다.

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

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

1 한국해양대학교 대학원 석사과정

2 한국해양대학교 건설·환경공학부 교수

3 한국해양대학교 대학원 박사과정

여기서, \vec{V} 는 유속벡터, p 는 압력, \vec{g} 는 중력가속도, $\hat{\rho}$ 는 밀도, $\hat{\nu}$ 는 동점성계수, \hat{q} 는 수치조파를 위한 소스항을 각각 나타낸다. 한편, 위의 식에서 밀도 $\hat{\rho}$ 및 동점성계수 $\hat{\nu}$ 는 기체 혹은 액체를 결정하는 공간과 시간의 함수이다. 즉, 서로 다른 유체(액체와 기체)는 밀도와 점성을 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. VOF함수를 사용하면 $0 < F < 1$ 을 갖는 각 계산셀에서 접면이 결정된다. 게다가, 접면셀에서 각 유체의 밀도 $\hat{\rho}$ 와 동점성계수 $\hat{\nu}$ 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. 수치해석의 검증 및 결과

3.1 Matsutomi(1991)의 실험결과와 비교·검토

Matsutomi(1991)는 수조내에서 상류측과 하류측에 큰 수위차를 갖는 게이트의 급개방에 의해 발생한 단파가 하류측의 연직벽면에 작용하는 파력을 측정하였다. 이때, 실험에 사용된 수조의 크기는 길이 11m, 폭 0.3m, 높이 0.5m인 직사각형수조이며, 상류측에서 하류측으로 5m 지점에 게이트를 설치하였다. 실험에 대한 보다 자세한 사항은 Matsutomi(1991)를 참조하기 바란다.

본 연구에서 사용된 2차원수치파동수로의 길이와 폭

은 Matsutomi(1991)의 실험과 동일한 크기로 구성되었고, 하류측수심 $h_0 = 2\text{cm}$ 와 $h_0 = 4\text{cm}$ 의 경우에 수조의 높이는 0.7m, $h_0 = 8\text{cm}$ 의 경우에 높이 1.2m의 수조에서 실험이 수행되었다.

Fig. 1은 게이트의 상류측수심이 $h_1 = 40\text{cm}$ 이고, 게이트의 하류측수심이 각각 (a) $h_0 = 2\text{cm}$, (b) $h_0 = 4\text{cm}$, (c) $h_0 = 8\text{cm}$ 인 수조에서 측정된 2차원파력과 Matsutomi (1991)에 의한 수리실험치를 비교한 결과이다. 여기서, wave force gage와 wave pressure gage의 결과값에 약간의 차이는 압력계의 부착위치에 따라 등파압을 가정한 적분으로 산정되는 파력치와, 변위계에 의해 발생된 데이터의 보정과정에서 시간적인 변동을 나타내는 전파압의 중심점이 충분히 채워지지 않은 채로 전파력계에 의한 파력치가 산정되었기 때문이다(Matsutomi, 1988).

그림에서 단파발생 후에 파가 전파되어 연직벽에 충돌하는 시점을 시간축의 원점으로 하였다.

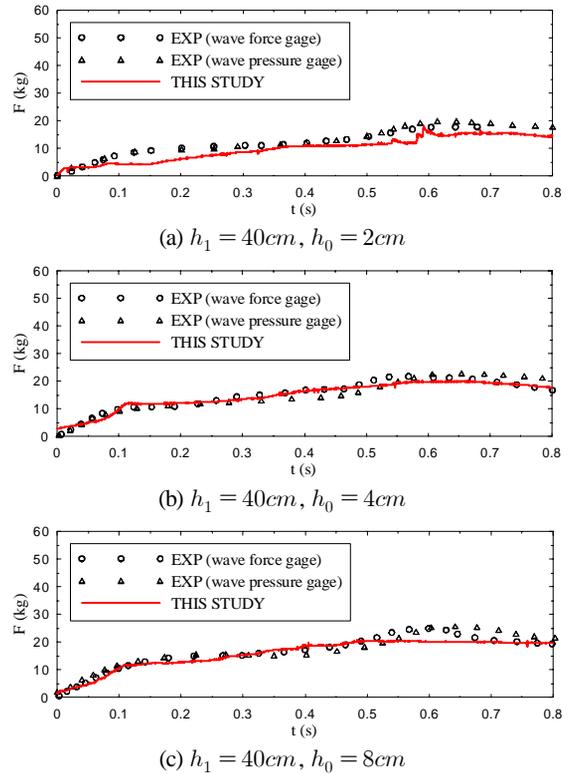


Fig. 1. Comparisons of experimental results of Matsutomi(1991) and numerical ones of this study for the bore force acting on the vertical revetment.

Fig. 1(a)에서 수직벽의 전면면에 작용하는 초기파력을 제외하고는 수리실험결과보다 파력이 다소 낮게 측정된 양상을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 하류측수심인

h_0 가 상류측수심 h_1 에 비해 매우 낮아 turbulent bore가 발생되고, 더불어 해저마찰이 상대적으로 큰 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 1(b)의 경우는 본 연구의 수치해석결과와 Matsutomi(1991)의 수리실험결과가 최대파력 및 작용파력의 변화과정에서 매우 잘 대응하는 것을 확인할 수 있고, Fig. 1(c)의 경우는 $t > 0.6s$ 에서 약간의 차이는 인정되나, (b)와 같이 두 결과 모두 매우 잘 대응하는 것을 알 수 있다.

여기서, CADMAS-SURF(CDIT, 2001)를 적용하여 동일한 단파의 수위변동 및 작용파력을 해석하고 있는 이광호 등(2008, 2009)의 수치해석결과와 비교하면 spike 현상이 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 혼상류의 해석결과에는 spike 현상을 제거하기 위한 수단, 예로 numerical low pass filter와 같은 방법을 적용하지 않아도 합리적인 결과를 산출할 수 있는 것으로 판단된다.

3.2 Yeh(SMU, 2009)의 실험결과와 비교·검토

Yeh(SMU, 2009)의 실험은 상·하류의 큰 수위차를 갖는 게이트의 급개방에 의해 발생된 단파가 사각형상을 갖는 주상구조물에 작용하는 3차원파력을 측정하였다. 실험에 사용된 수조크기는 길이 160cm, 폭 61cm, 높이 75cm인 직사각형수조이다. 게이트는 상류측에서 하류측으로 40cm 거리에 설치되었고, 주상구조물은 한 변의 길이가 12cm인 정사각형단면을 가지며, 높이는 수조의 높이와 동일하다. 실험에 대한 보다 자세한 사항은 Yeh(SMU, 2009)를 참조하기 바란다.

본 연구에서 사용된 3차원수치파동수로의 상세조건은 Yeh(SMU, 2009)의 실험조건과 동일하며, 수조높이는 80cm로 수행되었다. Fig. 2에 본 연구에 사용된 3차원 수치파동수로의 개요를 나타낸다.

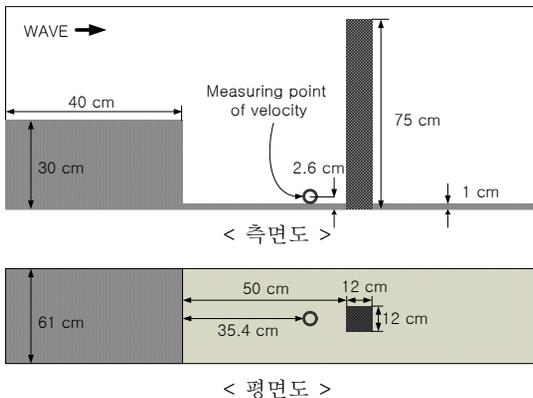


Fig. 2. Definition sketch of 3-dimensional numerical wave tank.

Fig. 3은 상류측수심이 30cm, 하류측수심이 1cm인 경우에 게이트의 급개방에 의해 발생된 단파가 전파하여 사각형상의 단면을 갖는 주상구조물에 작용된 3차원파력을 시간변화로 나타낸 것이다. Yeh(SMU, 2009)의 실험에서 측정된 값에 비하여 전체적으로 다소 낮은 파력을 나타내고 있으며, 단파파력이 주상구조물에 작용하는 순간부터 약간의 위상차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 수리실험에서 게이트의 급개방에 소요되는 시간에 의한 위상차에 기인한 결과로 판단된다. 따라서, 이러한 위상차를 고려하여 실험결과치를 좌측으로 위상이동시키는 경우를 생각하면 두 결과는 매우 잘 일치하는 것으로 판단된다. 그리고, $t=1.5s$ 근방에서 음(진행파의 반대방향)의 파력값이 나타나는 것은 전파된 단파가 수조벽면으로부터 반사되어 주상구조물의 배후면에 작용한 결과로, 결과를 살펴보면 실험값에 비하여 다소 큰 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 여기서, 단파의 최대파력 및 최소파력에서 수치해석결과와 약간의 차이 등은 바닥마찰을 고려하지 않는 본 해석법의 한계일 수도 있지만, 계산에서 시간스텝 및 공간스텝 등도 수치해석결과에 다소간의 영향을 미치므로 향후 수리실험 등을 통한 다각도적인 검토가 필요한 것으로 판단된다.

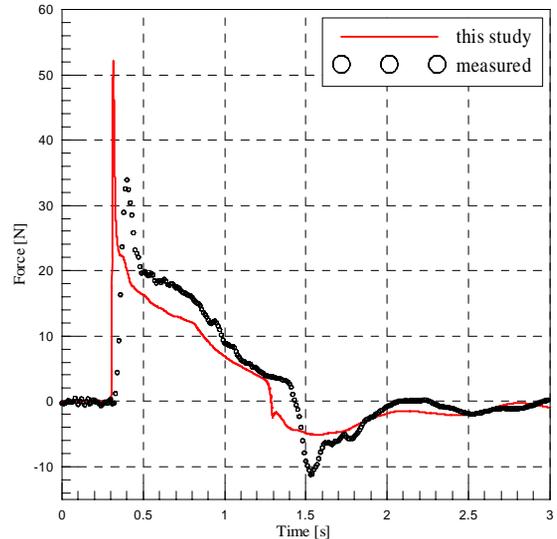


Fig. 3. Comparisons of experimental results of Yeh(SMU, 2009) and numerical ones of present study for the bore force acting on the vertical cylindrical pile.

Fig. 4는 게이트에서 하류측으로 35.4cm, 바닥상으로 2.6cm인 지점에서 유속을 측정된 것으로, 단파가 전파되어 측정점을 통과하는 순간을 시간에 대한 원점으로 나

타내었다. 전술한 바와 같이, 게이트의 급개방에 따른 위상차로 인해 최초의 유속값이 실험치가 수치계산치보다 약간 작게 나타나는 것으로 판단되며, 전반적으로 Yeh(SMU, 2009)의 실험값과 거의 유사한 양상을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한, 전술한 파력의 변화양상과 비교하면 파력의 시간위상이 다소 빠르지만 전반적인 변화양상은 유속의 변화양상과 거의 일치하는 것으로 판단된다. 여기서, 파력과 유속에서 위상차이는 Fig. 2에 나타나는 바와 같이 측정위치가 다르기 때문이다.

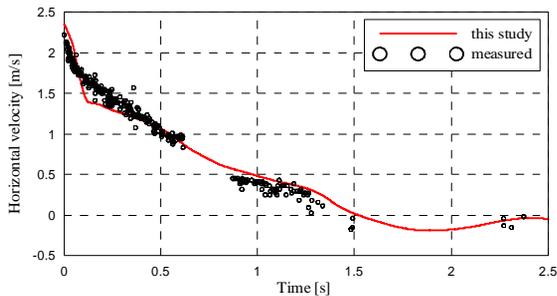


Fig. 4. Comparisons of experimental results of Yeh(SMU, 2009) and numerical ones of present study for the horizontal velocity of a bore.

4. 결 론

본 연구에서는 2차원 및 3차원혼상류해석법을 사용하여 2차원 및 3차원단파파력을 해석하였다. 본 연구의 수치해석결과의 타당성을 검증하기 위하여 게이트의 급개방에 따른 수직벽면에 작용하는 2차원단파파력에 관한 Matsutomi (1991)의 수리실험결과와 정사각형단면의 주상구조물에 작용하는 3차원단파파력 및 유속에 관한 Yeh(SMU, 2009)의 수리실험결과와를 비교·분석하였다. 수치해석결과에는 단파의 전파속도와 파력의 시간변화에서 약간의 위상차가 발생하였지만 혼상류를 이용하여 2차원수치과동수로에서 Matsutomi(1991)의 실험결과와 거의 동등한 단파파력의 결과치를 얻을 수 있었고, 동시에 3차원수치과동수로에서도 Yeh(SMU, 2009)의 실험결과와 잘 대응되는 수치해석결과를 얻을 수 있었다. 특히, CADMAS-SURF(CDIT, 2001)의 적용하에서 발생하는 spike현상이 본 해석법에서는 발생하지 않으므로 일반 단상류의 VOF법보다는 향상된, 그리고 합리적인 결과를 산출하는 것으로 판단된다. 하지만, 극히 짧은 시간에 발생하는 단파파력의 문제에서는 시간스텝 및 공간스텝의 크기, 해저마찰의 영향 등으로 파력의 크기 및 위상에서 다소의 차이가 발생하므로 이에 대해 향후 보다 심층적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 김도삼, 김지민, 이광호, 손병규(2007) 일본 지진공백역에서의 지진해일이 우리나라의 남동연안에 미치는 영향분석, 한국해양공학회지, 한국해양공학회, 제 21권 제6호, pp. 64-71.
- 이광호, 김창훈, 정성호, 김도삼(2008) 고립파(지진해일) 작용하의 수중방파제에 의한 파랑제어, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제28권 제3B호, pp.323-334.
- 이광호, 김창훈, 황용태, 김도삼(2008) CADMAS-SURF에 의한 단파의 수위 및 유속변화에 대한 예측정도의 검토, 한국해양공학회지, 제 22권 제5호, pp.52-60.
- 이광호, 김창훈, 김도삼, 황용태(2009) 2차원수조내에서 단파의 변형과 구조물에 작용하는 단파파력에 관한 수치해석, 대한토목학회논문집, 제29권 제5B호(인쇄중).
- 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.
- Fenton, J. (1972) A ninth-order solution for the solitarity 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.
- Matsutomi, H. (1991) An experimental study on pressure and total force due to bore, Proc. of Coastal Engrg., JSCE, Vol. 36, pp.626-630.
- Matsutomi, H. and Shuto, N. (1994) Tsunami inundation depth, current velocity and damage to houses, Proc. of Coastal Engrg., JSCE, Vol. 41, pp. 246-250.
- Matsutomi, H. (1998) Impulsive force on walls due to the collision of a bore, Proc. of the Japan society of civil Engineers, JSCE, Vol. 399, No. II-10, pp. 147-155.
- Nakamura, T. (2008) Sand foundation instability due to wave-seabed-structure dynamics interaction, Ph.D. Thesis, Nagoya University, Nagoya, Japan.
- Smagorinsky, J. (1963) General circulation experiments with the primitive equations. Mon. Weath. Rev., Vol. 91, No. 3, pp. 99-164.
- SMU(2009) : www.engr.smu.edu/waves .
- Takahashi, T., Shuto, N., Imamura, F. and Asai, D. (1999) A movable bed model for tsunami with exchange rate between bed land and suspend layer, Proc. of Coastal Engrg., JSCE, Vol. 46, pp. 606-610.
- Yeh, H. (2007) Design tsunami force for onshore structures, J. of Disaster Research, Vol.2, No. 6, pp. 1-6.