

## 부가구조물 설치에 의한 파랑 하중 완화 효과 Mitigation effects of wave impact loads by installation of blent structures

이병혁<sup>1</sup>, 황성철<sup>2</sup>, 박중천<sup>3</sup>

Byung-Hyuk Lee<sup>1</sup>, Sung-Chul Hwang<sup>2</sup> and Jong-Chun Park<sup>3</sup>

### 1. 서 론

지진해일(Tsunami)은 해저에서의 지진, 해저 화산 폭발, 단층 운동 같은 급격한 지각변동이나 빙하의 붕괴, 핵실험 등에 의해 발생하는 파장이 긴 천해파를 말한다. 지진해일의 초기 형상은 약 0.5에서 1.0m에 불과하지만 그 길이(파장)는 수심에 비해 아주 길어서 수 100km가 넘기도 한다. 지진해일의 전파속도는 일반적으로 수심과 중력가속도의 곱에 대한 제곱근으로 계산되며, 예를 들어 3km의 수심에서는 시속 약 620km의 속도로 전파를 하게 된다. 그래서 심수역에서 발생한 지진해일은 처음에는 빠르게 전파되며 연근해역에 접근하면서 수심의 급격한 감소로 인해 파형은 급준화되고 전파속도는 감소하게 된다. 이때 천수해역인 해안, 만, 항구 등에 도달할 시점에는 파 에너지가 급준화된 파정부근에 집중하고 경우에 따라서는 파고가 수십 미터 이상이 되어 인근의 구조물이나 어장 등 인간의 생활환경에 큰 피해를 안겨다준다. 따라서 지진해일에 대한 정확한 예측과 피해를 최소화 할 수 있는 방제 시스템의 구축이 필요하다.

해안 근처에 작용하는 지진해일의 수치모사는 비선형성이 강한 자유표면 유동과 유체의 분열 및 합체를 동반한다. 따라서 격자법을 이러한 문제에 적용하는 것에는 한계가 있다. 한편 격자 대신 입자를 사용하는 입자법(Monaghan, 1980; Koshizuka and Oka, 1996)은 격자를 생성할 필요가 없어 공학적인 문제 적용에 보다 유연하다고 할 수 있다. 입자법은 격자를 이용하는 해석 방법보다 복잡한 물리 현상을 해석할 수 있는 가능성을 가지고 있고 이류향(Convection)의

계산을 입자의 이동으로 직접 계산함으로써 격자법에서 심각하게 유발되는 수치 확산을 줄일 수 있다. 또한 격자가 꼬이는 등의 위상관계(Topological relations)를 고려할 필요가 없다.

본 논문에서는 Koshizuka and Oka(1996)가 제안한 MPS(Moving particle semi-implicit)법을 기본으로 국소지역에서 지진해일과 같은 단일 대형 파도가 연안 구조물에 작용하는 충격력을 수치모사하여 Arnason (2005)의 실험결과와 비교였다. 또한 연안구조물 주변의 부가구조물 설치에 의한 파랑 충격 완화 효과에 대해서도 수치모사 하였다.

### 2. 지배방정식

비압축성 점성 유동에 관한 지배방정식은 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식이다.

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2\vec{u} + \vec{F} \quad (2)$$

여기서  $\rho$ 는 밀도,  $t$ 는 시간,  $\vec{u}$ 는 속도벡터,  $\nabla$ 은 구배 연산자,  $P$ 는 압력,  $\nu$ 는 동점성계수,  $\vec{F}$ 는 외력을 각각 나타낸다.

연속방정식 (1)은 격자법에서 일반적으로 속도의 발산(Divergence)으로 표시하는 반면, 본 연구에서는 밀도의 시간변화율로 표시하였다. Navier-Stokes 방정식 (2)의 좌변은 이류향을 포함한 라그랑지안의 전미

1 발표자: 부산대학교 조선해양공학과 박사과정

2 부산대학교 조선해양공학과 학부과정

3 부산대학교 조선해양공학과 교수

분(Total derivative) 형태이고, 입자의 직접적인 이동에 의해 계산된다. 한편, 우변은 압력 구배항, 점성항 그리고 외력항으로 구성되어 있다. 비압축성 점성 유동을 시뮬레이션 하기 위해서는 압력 구배항, 점성항 및 비압축성을 나타내는 입자간의 상호작용 모델이 필요하며, 본 연구에서는 이러한 모델들에 대하여 Koshizuka and Oka(1996)에 의해 제안된 MPS법을 도입하기로 한다. 각각의 모델들에 대한 상세한 검증은 Lee et al.(2007)에 소개되어 있다.

### 3. 입자 상호작용 모델

연속 유체는 입자의 속도성분, 질량, 압력과 같은 물리량으로 나타내어진다. 유체의 흐름은 입자들의 상호작용 움직임에 의해 가시화되므로 지배방정식은 입자간 상호작용으로 표시할 수 있다. MPS법에서 입자 상호 작용은 커널 함수에 기초하여 이루어져 있다. 본 연구에서 사용한 커널 함수의 구체적인 식은 식(3)과 같다.

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & (0 \leq r < r_e) \\ 0 & (r_e < r) \end{cases} \quad (3)$$

여기서  $r$ 은 두 입자 사이의 거리이고,  $r_e$ 는 입자 상호 작용 범위를 나타내는 커널 크기(Kernel size)이다. 커널 함수는 두 입자 사이의 거리 즉 중심 입자에서 주변 입자까지의 거리에 따라 각각의 입자에 대하여 물리량의 가중치를 주는 것이다.

입자  $i$ 의 구배 모델은 입자  $i$ 와 그 주변 입자  $j$ 사이에서 구배 벡터를  $(P_j - P_i)(\vec{r}_j - \vec{r}_i) / |\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2$ 으로 계산하고 이것을 커널 함수로 평균 한 것이다. 단, 구배 모델에서 동일한 입자에 대한 구배 벡터는 고려하지 않는다.

$$\langle \nabla P \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[ \frac{P_j - P_i}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2} (\vec{r}_j - \vec{r}_i) w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \right] \quad (4)$$

여기서  $d$ 는 계산 공간의 차원이고,  $n^0$ 는 초기 입자 배치 상태에서의 입자수밀도(Particle number density)이다. 입자  $i$ 의 입자수밀도는 식(5)과 같이 정의한다.

$$n_i = \sum_{j \neq i} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \quad (5)$$

수학 연산자인 라플라시안(Laplacian,  $\nabla^2$ )은 물리적으로 확산을 의미하며, 입자  $i$ 가 갖는 물리량의 일

부를 주위의 입자  $j$ 쪽으로 커널 함수의 분포에 따라 분배해 주는 역할을 한다.

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle = \frac{2d}{\lambda n_i} \sum_{j \neq i} [(\phi_j - \phi_i) w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)] \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) |\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2}{\sum_{j \neq i} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)} \cong \frac{\int_V w(r) r^2 dv}{\int_V w(r) dv} \quad (7)$$

식(6)의  $d$ 는 계산 공간의 차원,  $\lambda$ 는 해석해와 동일한 분산을 유지하기 위해 사용하는 계수이다.

비압축성은 반응적 알고리즘을 사용하여 계산된다. 여기에서 압력장은 포아송 방정식을 사용하여 음적으로 계산하고, 나머지는 양적으로 계산한다.

$$\langle \nabla^2 P \rangle_i^{n+1} = -\frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{n_i^* - n^0}{n^0} \quad (8)$$

여기에서 위첨자 \*는 양적 계산이 끝난 후의 값을 나타낸다. 포아송방정식의 소스항은 초기 입자수밀도  $n^0$ 를 이용하여 입자수밀도의 미분으로 나타나 있다.

자유표면 경계조건 중 동역학적 경계조건은 자유표면 입자의 압력을 대기압과 동일한 0의 값으로 고정하고, 운동학적 경계조건은 자유표면 입자를 직접 이동하여 만족시킨다. 두 경계조건을 만족시키기 위해서는 자유표면 입자의 탐색이 선행되어야 한다. 자유표면 입자의 탐색은 식(9)에 따른다.

$$n_i^* < \beta n^0 \quad (9)$$

여기에서  $\beta$ 는 상수이며 1.0 미만으로 한다.

### 4. 수치모사

#### 4.1 연안구조물에 작용하는 파랑 충격 하중

앞서 설명한 입자 상호 작용 모델을 이용하여 지진 해일과 같은 단일 대형 파도가 연안 구조물에 작용하는 충격하중을 수치모사 하였다(Case0).

Fig. 1과 같이, Amason(2005)의 실험조건과 동일한 조건으로 수치모사하기 위하여 사용된 수조의 크기는 길이 1.6(m), 너비 0.6(m), 높이 0.75(m)이다. 단일 대형 파도를 생성할 물 기둥의 크기는 0.4×0.6×0.3(m<sup>3</sup>)이다. 중앙에 있는 사각구조물은 물기둥으로부터 0.5(m), 좌우 벽으로부터 각각 0.24(m) 떨어져 있다. 실험에서는 수문의 바깥으로 완벽한 배수가 불가능

하여 수조 바닥에 약 1(cm) 두께로 물이 분포되어 있었다. 따라서 본 연구에서는 이와 동일한 조건으로 수치모사 하였다.

수치모사에 사용한 입자의 개수는 약 18만개, 초기 입자간 거리는 0.01(m)이고, 점성과 표면장력의 영향은 무시하였다.

Fig. 2는 구조물의 앞·뒷면에 작용하는 파력을 실험 결과와 비교한 것이다. 단, 실선으로 나타낸 계산 결과는 최종 충격력이 나타나는 시간에 맞추어 위상차를 보정하여 나타내었다. 전체적으로 실험과 수치모사의 정성적, 정량적으로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

Fig.3은 기둥에서 0.146(m) 앞, 바닥에서 0.026(m) 떨어진 곳에서 수평속도 성분의 시간변화를 실험과 비교한 것이다. 실험에서는 속도를 LDV(Laser doppler velocimetry)로 측정하였으며, 수치모사에서는 지정 위치에서 미소 영역 내를 지나치는 입자들의 속도를 나타낸다. 초기의 속도 분포를 제외하고 전체적으로 시간변화에 따른 속도의 감소 비율이 실험결과와 잘 일치한다.

#### 4.2 부가구조물 설치에 의한 파랑 하중 완화 효과

본 수치모사기법을 사용하여 Radd가 수행한 수치모사(<http://enr.smu.edu/waves/>)와 동일한 5가지 형태의 부가물 설치에 의한 파랑 충격 흡수 효과에 대해 수치모사 하였다. Fig.4는 수치모사를 위한 초기 형상을 나타내며, 부가구조물 설치를 위해 Fig.1로부터 수정 되었다. 연안구조물을 좌측으로 0.06(m) 이동하였고, 부가구조물들의 위치는 연안구조물 앞 0.03(m)이다. Fig.1에서 바닥의 물은 본 수치모사에서는 제거하였으며, 각 부가물의 설치 크기, 개수, 형태는 Table 1에 나타나 있다. Table 1에서 Case2의 경우 부가물간의 간격은 0.04(m)이다.

Fig. 5, 6은 시간에 따라 구조물에 작용하는 힘과 모멘트를 나타내고, Table 2는 Amason(2005)의 실험과 비교하기 위해 수행한 수치모사 결과와 부가구조물이 설치된 각각의 경우에 대해 구조물에 작용하는 최대 충격력과 최대 충격량 그리고 최대 회전충격량의 정량적 결과이다. 구조물에 작용하는 최대 힘은 단일 물기둥이 붕괴하기 시작한 0.3sec 후에 나타나며, Case3의 경우 부가구조물에 의해 수직 방향의 유속이 발생하여 구조물에 도달하는 시간이 지연되고, 최대 충격력, 충격량이 확연히 감소한다. 그러나 최대 회전충격량이 다른 경우와 비교하여 오히려 큰 것을 확인할 수 있는데, 이는 부가구조물을 율파한 파랑에 의해 회전충격량의 모멘트 팔이 증가하였기 때문이다.

앞서 수행한 수치모사와 비교하여 부가구조물을 설치할 경우 구조물에 작용하는 파랑 하중 완화 효과를 확인할 수 있다.

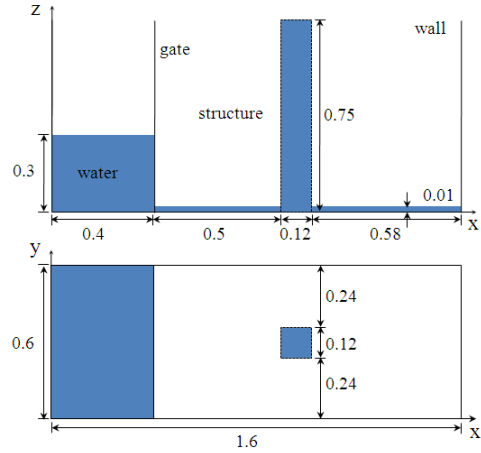


Fig.1. Schematic view of wave impact with a tall structure.

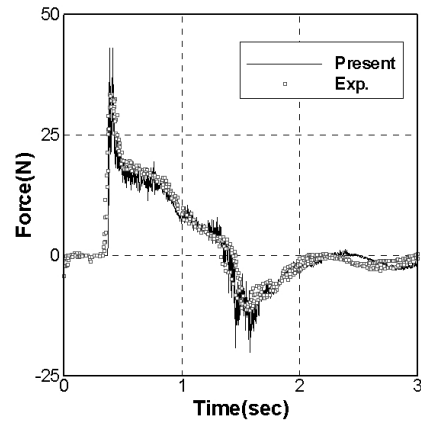


Fig. 2. Comparison with experimental data for the force.

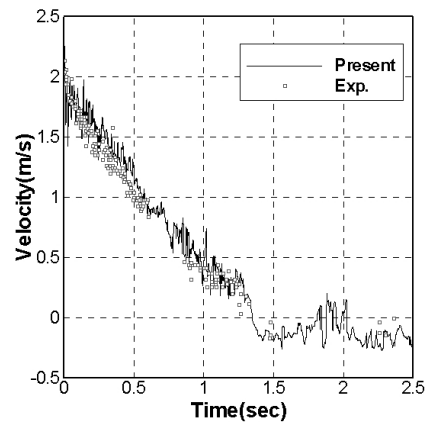
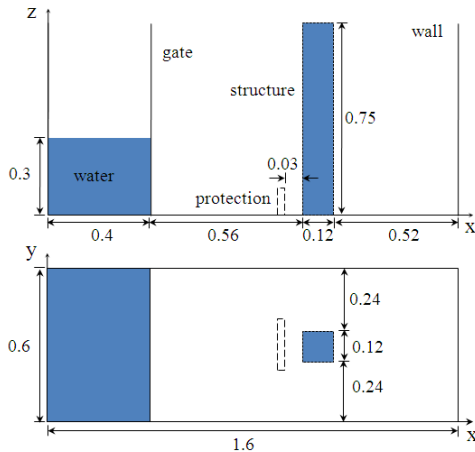


Fig. 3. Comparison with experimental data for the horizontal velocity.



**Fig. 4.** Schematic set-up for a 3D broken dam over column with various blent structures.

**Table 1.** Information of various blent structures.

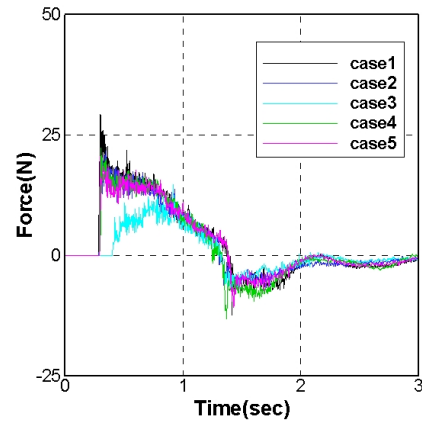
	Size(m <sup>3</sup> )	No.	Type
Case1	-	-	-
Case2	0.03×0.03×0.15	4	box
Case3	0.03×0.30×0.07	1	dike
Case4	0.03×0.30×0.07	1	groove
Case5	0.06×0.60×0.07	1	ditch

**Table 2.** Maximum impulsive force, impulse and angular impulse on the column.

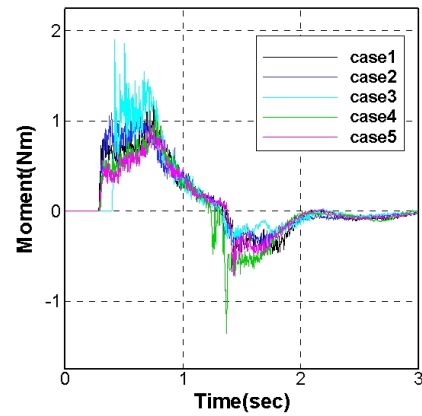
	Impulsive force (N)	Impulse (N·s)	Angular impulse (N·m·s)
Case0	42.85	12.29	0.63
Case1	29.21	12.38	0.54
Case2	21.66	11.09	0.58
Case3	14.66	5.95	0.58
Case4	22.27	11.17	0.47
Case5	20.52	11.25	0.45

## 5. 결 론

본 논문에서는 지배방정식에 대한 구배모델, 확산 모델, 비압축성 모델, 자유표면 모델을 적용하여 3차원 입자법 유동 해석 코드를 개발하였다. 3차원 입자법을 적용하여 댐 붕괴를 통해 지진해일과 같은 대형 파도를 생성하였고, 지진해일에 의한 연안구조물에 작용하는 파랑 충격을 수치모사하였다. 또한 연안구조물 앞에 다양한 부가구조물을 설치하여 파랑 충격 흡수 효과에 대해 수치모사 하였다. 연안구조물에 작용하는 파력과 특정 지점에서 유동의 속도는 실험 데이터와 잘 일치하였다. 본 연구에서 사용된 입자법은 비선형성이 강한 자유표면 유동 해석과 유체-구조 상호작용 문제에 유용하게 적용될 것으로 기대된다.



**Fig. 5.** Time history of force on the column with various blent structures.



**Fig. 6.** Time history of moment on the column with various protections.

## 참고문헌

- 이병혁, 박종천, 류민철, 김용수, 김영훈 (2007). 비압축성 유동 해석을 위한 입자법 수치 시뮬레이션 기술 개발. 한국해양공학회지, 제21권 제4호, pp 8-14.
- Arnason, H. (2005). Interactions between an Incident Bore and a Freestanding Coastal Structure. Ph.D thesis, Univ. of Washington, Seattle.
- Koshizuka, S. and Oka, Y. (1996). Moving-Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid. Nuclear Science and Engineering, Vol 123, pp 421-434.
- Monaghan, J.J. (1988). An Introduction to SPH. Comput. Phys. Commun., Vol 48, pp 89-96.
- Raad, P., Mitigation of Local Tsunami Effects, <http://enr.smu.edu/waves/>