

수치파 수조를 이용한 파랑 충격력 수치해석

신영섭* · 홍기용**

*한라대학교, **한국해양연구원

Numerical Analysis of Wave Impact Forces in Numerical Wave Basin

Young-Seop. Shin* · Key-Yong. Hong**

*Halla University, Wonju 220-712, Korea

**MOERI, Daejeon 305-343, Korea

요 약 : 해양구조물 설계시 급격한 파랑에 의한 충격력은 구조물 안전을 위한 중요한 설계 인자이다. 이러한 충격력은 과도한 하중이 극히 짧은 시간 사이에 발생하는 현상으로 실험적 또는 수치해석적으로 해석하기 매우 어려운 문제이다. 본 연구에서는 급격한 파랑에 의한 충격력을 해석하기 위하여 수치파수조를 이용하여 N.S. 방정식에 기반한 수치해석을 수행하였다. 임의파를 선형중첩에 기반하여 조파기를 작동시켜 재현하였고 다블록격자하에서 수직실린더에 작용하는 충격력을 수치해석하였다. 한편 자유표면은 V.O.F. 및 local height function을 이용하여 추적하였다. 수치해석 검증을 위하여 수치해석 및 실험 결과와 비교를 수행하였는데 비교적 만족할 수 있는 결과를 확인하였으나 해양구조물 설계시 유용한 결과를 얻기 위해서는 쇄파와 같은 극한파 재현과 극한파에 의한 충격력에 대한 많은 연구가 지속되어야 함을 알 수 있었다.

핵심용어 : 파랑, 충격력, 수치파수조, N.S. 방정식, 다블록격자, V.O.F., Local height function method

ABSTRACT : The impact forces of the highly nonlinear waves are one of the important factors in designing the ocean structures. The impact forces are very difficult to analyze numerically and experimentally because they are impulsive in magnitude and occur instantaneously. In this study the numerical program based on N.S. equations are used to investigate the impact forces of steep waves where the waves are generated by the wave maker in the numerical wave basin. The arbitrary steep waves are generated by the superposition of waves of single frequency and the impact forces on vertical cylinder are simulated on the multiblock grids. V.O.F. and the local height function methods are used to track the free surfaces. To validate the numerical analysis the numerical results are compared with the experimental ones and the acceptable agreements are found. It is thought that more studies on the simulations of the incoming breaking waves and the impact forces on the vertical cylinder should be made to obtain the useful results to be applied in the offshore design.

KEY WORDS : wave, impact force, numerical wave basin, N.S. equation, multiblock grid, V.O.F., Local height function method

1. 서 론

Freak wave가 해상에서 계속된 이래 강한 비선형성, 비대칭성 특성과 아울러 해양구조물에 작용하는 충격력에 대한 많은 관심과 연구가 이루어진 바 있다. 이러한 충격력은 매우 비선형적이고 충격적이며 고주파 성분들을 포함하고 있어 해양구조물에

충격력과 함께 ringing 현상을 유지시킬 수 있음이 밝혀진 바 있다. 해상에서 발생 가능성이 있으며 해양구조물에 심각한 영향을 미칠 수 있는 freak wave와 같은 기상 재난파하에서 해양구조물의 안전성을 평가할 수 있는 수치해석기법의 개발이 필요함을 알 수 있으며 이를 위한 freak wave의 생성과 해양구조물에 유지시키는 충격력을 예측할 수 있는 수치해석기법의 개발이

*ysshin@halla.ac.kr 033)760-1235

**kyhong@moeri.re.kr 042)868-7511

필요함을 알 수 있다.

본 연구에서는 freak wave 생성시 정밀도를 향상시키기 위하여 wave를 구성하는 주파수별 및 패러미터별 수치해석을 수행하여 정밀도를 향상시키고자 하였고 이를 기반으로 수직 실린더에 작용하는 충격력에 대한 수치해석을 수행하였다. 패러미터별 수치해석 결과 wave 생성시 비선형 대류항의 처리가 매우 중요함을 알 수 있었고 3rd order upwinding으로 대류항을 처리시 수치감쇄가 가장 작게 일어나고 있음을 확인할 수 있었으며 비교적 만족할 만한 파형 결과를 얻을 수 있었다.

수직실린더에 작용하는 충격력을 수치해석하고 실험 결과와 비교한 결과 실험과 같은 충격력을 재현하기 위해서는 파형이 쇄파 형태로 입사하도록 하여야 하며 격자크기 및 시간 간격은 10^{-4} 미만으로 하여야 하고 충격이 작용하는 시점에서는 충분히 수렴된 반복 계산이 이루어져야 실험과 같은 충격력을 재현할 수 있음을 알 수 있었다.

앞으로 실험에서 관측된 쇄파 과정에 대한 수치해석기법 연구와 함께 이러한 쇄파하에서 구조물에 작용하는 충격력에 대한 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다.

2. 기본방정식

무차원화된 질량 및 운동량 보존에 대한 기본방정식은 다음과 같다.

$$D \equiv \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{R_n} \nabla^2 u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{R_n} \nabla^2 v$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{R_n} \nabla^2 w - \frac{1}{F_n^2}$$

여기서 F_n 는 Froude 수를 의미하며 R_n 은 Reynolds 수를 의미한다. 격자 구조는 다블록 격자 기반이며 압력은 셀 중앙에 속도 성분은 절점에 정의하였다. 연속방정식을 만족시키기 위하여 압력 Poisson 방정식을 S.O.R. 방법을 이용하여 수치해석하였고, 상류차분법을 이용하여 비선형 대류항을 처리하였으며 시간 적분은 explicit 방식을 이용하였다.

3. Freak wave 생성

파랑 중첩 방법에 기초하여 수치수조내 조파기를 작동시켜 freak wave를 생성하였고 생성된 freak wave를 실험값과 비교함으로써 수치해석법의 타당성을 검증하고자 하였다. 먼저

주파수별 타당성을 살펴보기 위하여 다음과 같은 피스톤 타입의 조파기 문제를 수치해석하였다.

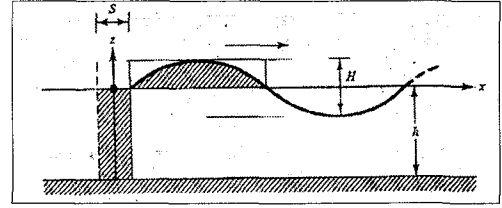


Fig.1 Diagram of the wave maker

이러한 조파기 운동인 경우 다음과 같은 해석해가 알려져 있다.

$$\frac{H}{S} = \frac{2(\cosh(2kh) - 1)}{\sinh(2kh) + 2kh} \quad (2)$$

여기서 S 는 조파기의 운동 변위를 k 와 H 는 파수와 파의 높이 h 는 수조의 깊이를 의미한다. 계산에 사용된 수조의 깊이는 0.5이며 주파수는 freak wave 생성시 사용되는 주파수의 최소값과 최대값인 0.5와 1.5를 택하였는데 주기로는 2초와 0.67초에 해당되고 파장으로 환산하면 4, 0.7에 해당된다. 이 경우 해석해로부터 파고대 조파기 변위비는 각각 다음과 같다.

$$\frac{H}{S} \approx 0.78 \text{ at } f = 0.5 \quad (3)$$

$$\frac{H}{S} \approx 2 \text{ at } f = 1.5$$

수치모사에 사용된 격자는 관심있는 파랑 영역은 파장당 30개의 격자를 분포하였고 그 이후로는 점차 크기를 증가시켰으며, 깊이 방향으로는 자유표면 부근에 조밀한 격자를 분포시켰다.

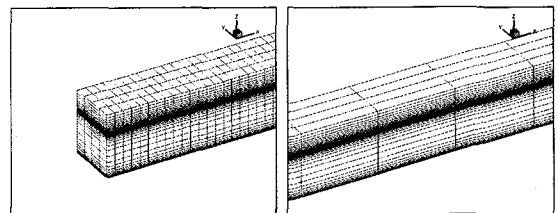


Fig.2 Generated meshes

Fig.3에는 파랑 전파에 따른 경계셀의 이동을 추적하여 도시하였다. 여기서 경계셀은 자유표면 경계를 포함하는 셀을 의미한다. 경계셀에는 대기압조건과 접선방향의 응력이 작용하지 않는 속도를 경계조건으로 사용하였고 운동학적 자유표면경계조건은 식(4)을 이용하였다.

$$x = \eta(y, z, t), \frac{D(\eta - x)}{Dt} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} + w \frac{\partial \eta}{\partial z} - u = 0 \quad (4)$$

$$y = \eta(x, z, t), \frac{D(\eta - y)}{Dt} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + w \frac{\partial \eta}{\partial z} - v = 0$$

$$z = h(x, y, t), \frac{D(h - z)}{Dt} = \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} - w = 0$$

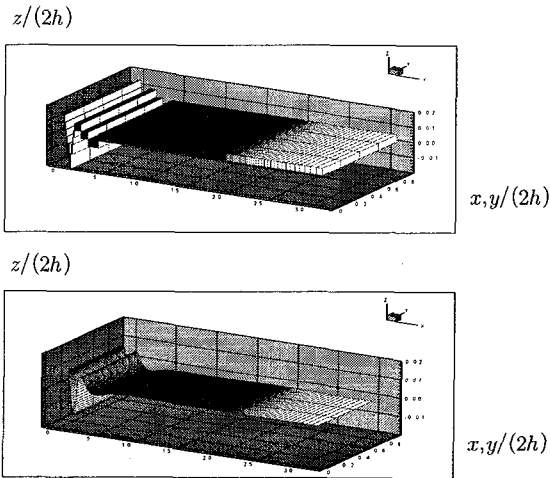


Fig.3 Movements of boundary cells and wave elevations

주파수 1.5인 경우 15주기 수치모사한 결과를 다음과 같이 도시하였다. 그림에서와 같이 자유표면 파장은 해석해 0.7에 근접하고 있음을 알 수 있으나 파고는 해석해 0.35에 비하여 다소 작은 값을 주고 있음을 알 수 있다.

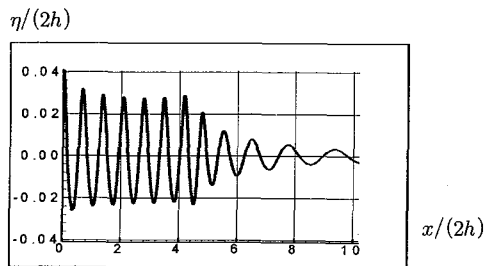


Fig.4 Wave elevations at 15T

선형파에 가깝도록 조파기 운동진폭을 1/10로 감소시켜 수치 해석하였고 Fig.5에 도시하였다. 이론치와 근접한 파고값을 갖고 있음을 알 수 있으며 이로부터 비선형항인 대류항의 처리가 파고의 크기에 큰 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.

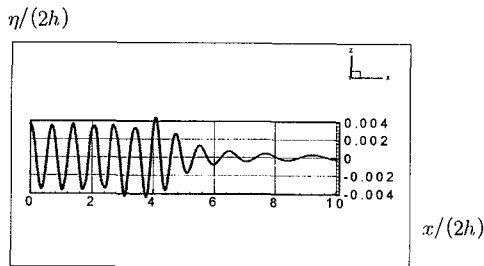


Fig.5 Wave elevations at 15T

상기한 대류항의 영향을 살펴보기 위하여 1st order 및 3rd order upwinding으로 대류항을 처리시 결과를 아래와 같이 도시하였다. 도시한 바와 같이 1st order는 감쇄효과가 매우 뚜렷하게 발생하여 파고의 크기가 작게 계산되고 있음을 알 수 있다.

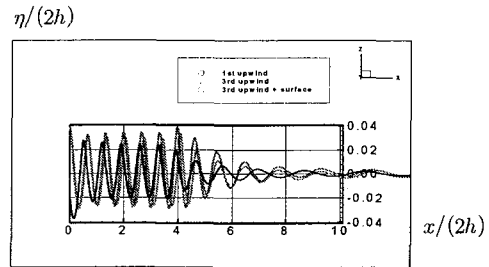


Fig.5a Wave elevations at 15T

주파수 0.5인 경우 14주기 수치모사한 결과를 다음과 같이 도시하였는데 자유표면 파장은 해석해 4에 근접하고 있음을 알 수 있으나 파고는 앞에서와 같은 이유로 해석해에 비하여 작은 값을 주고 있음을 알 수 있다.

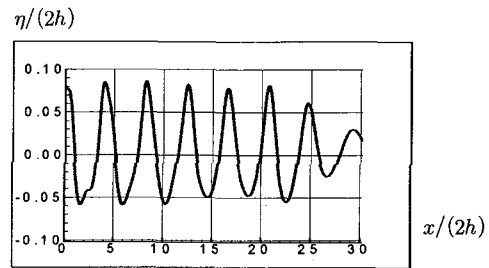


Fig.6 Wave elevations at 14T

파 중첩원리를 이용하여 freak wave를 생성하였는데 freak wave 생성을 위한 조파기 운동 데이터는 해양연구원에서 제공한 프로그램을 이용하여 생성하였고 생성된 조파기의 운동 변위 및 속도를 Fig.7에 도시하였다.

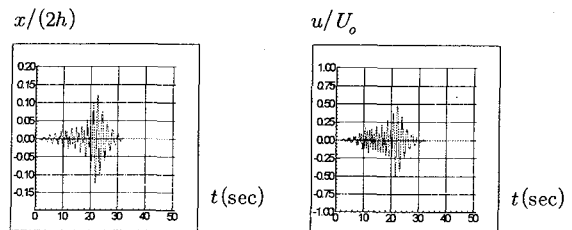


Fig.7 Displacement and velocity of the wave maker

Fig.7에서와 같은 조파기의 변위에 따라 수치해석을 수행하였으며 수치해석 결과 및 해양연구원에서 수행한 실험결과를 다음과 같이 도시하였다. 그림에서와 같이 시간에 따른 파랑 전파 및 최대치가 발생하는 부근의 전체적인 형태는 비교적 일치하고 있으나 최대치 크기를 보면 수치해석 결과가 실험값에 비해 작은 값을 주고 있는데, 이는 앞에서의 주파수별 수치결과에서 지적한 바와 같이 비선형 대류항의 영향으로 판단된다.

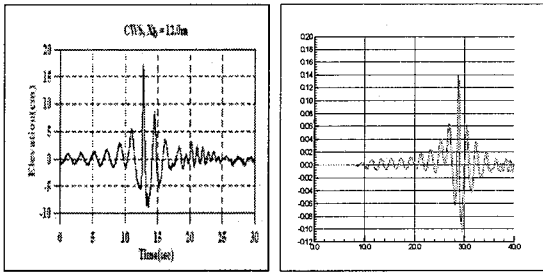


Fig.8 Comparison of numerical and experimental results

4. 충격력 수치해석

수직실린더에 작용하는 충격력을 수치해석하기 위하여 Fig.9 과 같은 수치격자를 이용하였다. 수치수조내에 수직실린더가 위치한 관계로 다블록을 이용하여 각각의 형상에 적합한 격자 계가 되도록 하였다. 전체적으로 3개의 블록으로 구성되었으며 수조의 길이, 폭 및 깊이 방향으로 240x16x34, 64x30x34, 230x16x34개의 격자로 구성하였다. 깊이 방향으로는 Fig.9에서와 같이 z=0 부근을 최소격자 0.005로 하여 조밀한 격자가 되도록 구성하였고 수직실린더 부근에도 최소격자 0.005로 조밀한 격자가 되도록 하였다.

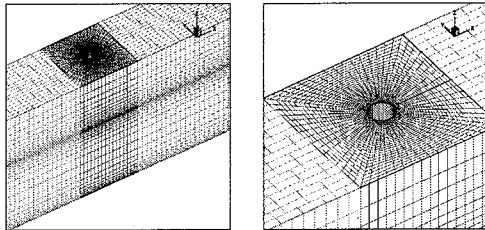


Fig.9 Generated meshes

아래와 같은 Freak wave 중 수직실린더에 작용하는 충격압력을 해양연구원에서 계측하였으며 이를 Fig.10에 도시하였다. 그림에서와 같이 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 정도의 매우 짧은 시간에 충격력이 작용하는 것을 알 수 있으며 정상파에 비해 매우 큰 압력이 작용하는 것을 알 수 있다.

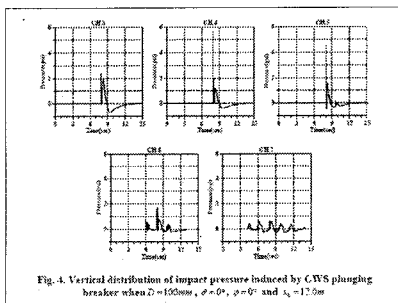


Fig.10a Vertical distributions of impact pressure

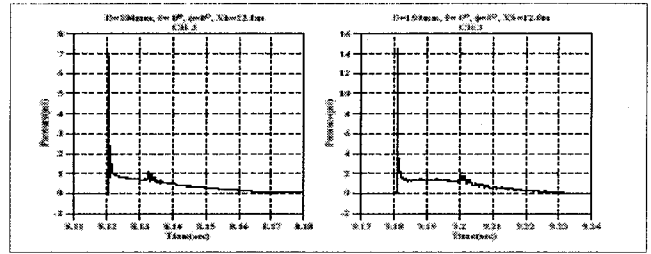


Fig.10b Impact pressure induced by CWS plunging breaker

충격력 실험결과를 보면 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 의 매우 짧은 시간 사이에 충격력이 작용하는 것을 알 수 있으나, 조파기 운동 시작부터 이러한 시간 간격으로 수치해석할 수 없으므로 먼저 시간 간격을 10^{-2} 으로 하여 28sec 까지 수치해석하였고 그 이후로는 시간간격을 10^{-3} 으로 하여 30.5sec 까지 수치해석하였다. Fig.11에는 freak wave가 x=0에 위치한 수직실린더를 29sec에서 29.5sec 사이에 통과하는 과정을 도시하였고 Fig.12에는 수직실린더 주위를 확대하여 진행과정을 도시하였다.

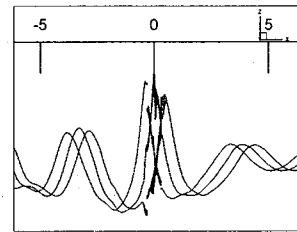


Fig.11 Wave elevations at t=29.0,29.25,29.5

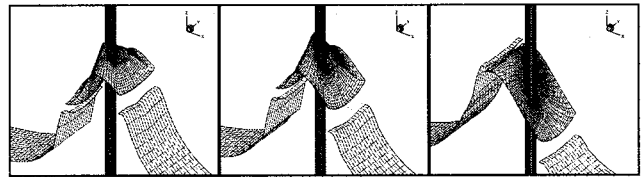


Fig.12 Wave elevations at t=29.10, 29.20, 29.25

수직실린더 부근 최소격자의 크기와 시간 간격이 충격력에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 최소격자크기 0.001, $\Delta t=0.001$ 인 경우와 최소격자크기 0.00025, $\Delta t=0.0002$ 인 경우에 대하여 수치해석하였고 시간에 따른 압력을 Fig.13에 도시하였다. Fig.13에서와 같이 최소격자 0.001 경우 시간 경과에 따라 파가 상승하면서 상승된 위치에 압력이 작용함을 알 수 있고, 격자크기가 작고 시간 간격이 작은 경우의 결과가 약 2 배 정도 큰 값을 주고 있음을 알 수 있으나 실험값에 비해 매우 작은 값을 주고 있음을 알 수 있다.

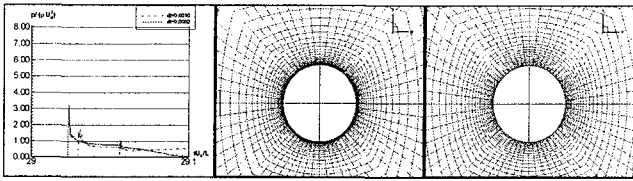


Fig.13 Effects of mesh size and time step on the impact force

Fig.14에는 수직 벽에 입사하는 입사파의 다양한 패턴을 도시하였는데, 관측결과 (c)에서와 같이 쇄파형태로 입사시 가장 큰 충격력이 작용하는 것이 많은 실험에서 확인되었으며, (e) 및 (f)도 입사파가 쇄파과정을 거치지만 수직벽에 도달 전에 쇄파과정이 형성되어 (c)에서와 같은 큰 충격력을 주지 못하는 것이 확인된 바 있다.

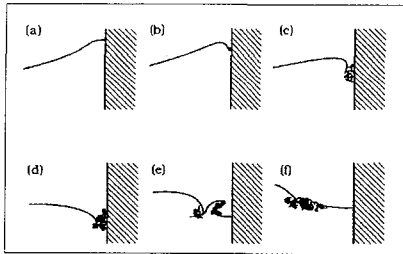


Fig.14 Effects of shape of incident waves on the impact force

충격력에 대한 차원해석을 하면,

$$F = \frac{d(mv)}{dt} = \dot{m}v + m\dot{v} \quad (5)$$

이고, q 를 시간당 유입량 a 를 압력이 작용하는 유효면적이라 면,

$$pa \sim \rho qv + \rho V \frac{\partial v}{\partial t} \quad (6)$$

로 표현할 수 있다. 여기서 V 는 체적을 의미한다. A 를 단면 적이라 면,

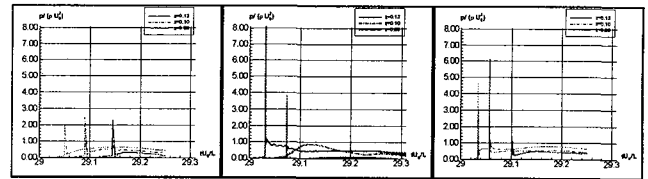
$$pa \sim \rho Av^2 + \rho V \frac{\partial v}{\partial t} \quad (7)$$

로 표현되고, 유체이동거리 $\Delta x \sim v\Delta t$ 이므로 $\Delta t \sim \Delta x/v$ 이다. 이상을 대입하면

$$pa \sim v^2 \quad (8)$$

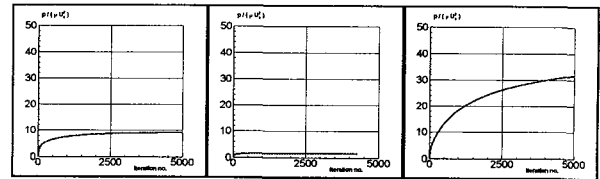
의 차원을 갖는다. 즉 충격량이 유입속도의 제곱에 비례하는 힘으로 작용함을 알 수 있다. 즉 파가 입사시 물체표면에 수직 방향으로의 속도성분이 매우 중요함을 알 수 있으며 쇄파상태에서 입사시 유체의 속도(particle velocity)가 파의 전파속도(phase velocity)에 해당되며 가장 큰 수평 방향으로의 속도를 갖게 되며 이러한 경우 가장 큰 충격력이 작용함을 알 수 있다.

Fig.15에는 현재의 수치계산에서는 쇄파를 구현하지 못하였으나, 입사시 쇄파의 입사속도로 입사한다는 가정을 하여 입사속도 1m/sec로 입사시 시간간격 및 격자 크기에 따른 충격력을 수치해석하였다. Fig.15(c)에서와 같이 입사속도가 1m/sec로 유입시 충격량이 무차원값으로 6정도의 값을 주고 있는데 실험 측정치 psi 단위로 환산하면 0.6psi의 충격력이 작용한 상태이다. (c)의 결과는 매시간 단계에서 연속방정식을 만족시키기 위하여 100번의 반복계산후 얻어진 압력 값을 도시하였는데 Fig.16(c)에는 반복계산 횟수에 따른 압력값의 수렴도를 도시하였다. Fig.16(c)에서와 같이 5000번 정도의 반복계산을 하면 무차원값 30 즉 3psi의 충격력이 얻어질 수 있음을 보여주고 있다. Fig.16에서와 같이 격자 크기가 감소할수록 반복 횟수를 증가시켜야 수렴된 압력값을 얻어낼 수 있음을 알 수 있다. Fig.15(c)보다 시간 간격을 더 줄여 실험과 유사한 상태인 격자 크기 10^{-4} 및 시간간격 10^{-4} 으로 수렴도를 확인 결과 무차원수로 90 즉 9psi의 압력이 작용할 수 있음을 확인할 수 있다.



(a) grid size=0.005,delt=0.005 (b) grid size=0.001,delt=0.001 (c) grid size=0.00025,delt=0.00025
iteration=200 iteration=200 iteration=100

Fig.15 Impact pressure induced by CWS plunging breaker



(a) grid size=0.005 (b) grid size=0.001 (c) grid size=0.00025

Fig.16 Impact pressure v.s. iteration number

이상에서와 같이 실험과 같은 충격력을 재현하기 위해서는 먼저 파형이 breaking 상태로 입사하도록 입사파를 재현하여야 하며 둘째 격자크기 및 시간간격은 10^{-4} 미만으로 하여야 하고 충격이 작용하는 시점에서는 5000번 정도 이상의 반복계산이 이루어져야 실험과 같은 충격력을 재현할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 freak wave 생성시 정밀도를 향상시키기 위하여 wave를 구성하는 주파수별 및 패러미터별 수치해석을 수행하였으며 이를 기반으로 수직 실린더에 작용하는 충격력에 대한 수치해석을 수행하였다.

패러미터별 수치해석 결과 3rd order upwinding으로 비선형

대류항을 처리시 수치감쇄가 가장 작게 일어나고 있음을 확인 할 수 있었다. 수직실린더에 작용하는 충격력을 수치해석하고 실험 결과와 비교한 결과 실험과 같은 충격력을 재현하기 위해서는 파형이 쇄파 형태로 입사하도록 하여야 하며 충격이 작용하는 시점에서는 충분히 수렴된 반복 계산이 이루어져야 함을 알 수 있었다.

앞으로 쇄파 과정에 대한 수치해석기법 연구와 함께 쇄파하에서 구조물에 작용하는 충격력에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 한국해양연구원 기본사업 “기상 재난파에 의한 해양구조물의 안전성 평가기술 개발(2)” 과제의 일부로 수행되고 있으며, 위 기관의 후원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1]Giorgio Contento, Fabrizio D'este, Mauro Sicchiero, Riccardo Codiglia and Marco Calza, 2004, " Run-up and Wave Forces on an Array of Vertical Circular Cylinders: Experimental Study on the Second Order near Trapping", *Proceedings of The Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp 402-409
- [2]Hongli Pang, Qinghe Zhang, Tao Han and Chongren Qin, 2004, "Numerical Study of Nonlinear Loads on Vertical Cylinders in Freak Waves", *Proceedings of The Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp 497-502
- [3]Natvig BJ, 1994, "A proposed ringing analysis model for higher order tether response," *Proc ISOPE'94*, Osaka, ISOPE, Vol.1, pp 40-51.
- [4]Robert G.D. and Robert, A.D., 1984, "Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists", Prentice-Hall, Inc., pp170-178