

직교격자계 기반의 수치계산법을 이용한 슬래밍 충격압력의 연구

김기용¹ · 이영길^{2,†} · 하윤진³ · 강익하¹ · 박정호¹ · 이선규¹ · 이창진¹
인하대학교 대학원 조선해양공학과¹
인하대학교 조선해양공학과²
선박해양플랜트연구소 해양플랜트·에너지연구본부³

A Study on Slamming Impact Pressure by a Numerical Method based on the Cartesian-grid System

Ki-Yong Kim¹ · Young-Gill Lee^{2,†} · Yoon-Jin Ha³ · Ui-Ha Kang¹ · Jeong-Ho Park¹ · Sun-Kyu Lee¹ · Chang-Jin Lee¹
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Graduate School, Inha University, Incheon, Korea¹
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea²
Offshore Plant and Marine Energy Research Division, KRISO/KIOST, Daejeon, Korea³

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In this study, numerical simulations of slamming impact pressure acting on the flat plate and wedge type models using the cartesian-grid system and Modified Marker-Density Method (MMD method) were performed and the results were examined. The flat plate and wedge type models were selected as target objects, the turbulence characteristics were considered by applying the Sub-Grid Scale (SGS) turbulence model. Through this study, how the pressure acting on the target objects according to the incident angle influences the slamming impact pressure was examined and the results were compared with the flow characteristics of other experimental results. Also, the degree of slamming impact pressure is evaluated with respect to the cartesian-grid system and MMD method, which is easy to use and has a high degree of calculation for free surface.

Keywords : Cartesian-grid system(직교격자계), Modified marker-density method(수정된 밀도함수법), Numerical computation(수치계산), Slamming impact pressure(슬래밍 충격압력), Flat plate model(평판 모델), Wedge type model(뿔기형 모델), Drop test(입수시험)

1. 서론

파랑에 의해 발생하는 충격압력은 주로 선박 및 해양구조물의 상하동요에 의한 상대파고 상승으로 갑판 상에 유입되어 발생하는 갑판침입수 충격압력(greenwater impact pressure)과 선체하부 및 선체측면이 파도에 의해 수면과 충돌하여 발생하는 슬래밍 충격압력(slamming impact pressure)으로 구분할 수 있다. 특히, 이와 같은 문제를 신중하게 고려해야 하는 구조물들 중에는 특정 해상지역에 장기간 계류되어 채굴한 원유를 저장하고, 이송 선박에 하역할 수 있는 부유식 해양구조물 FPSO(Floating Production Storage and Off-loading)가 있다. 이러한 부유식 해양구조물에 발생하는 슬래밍 충격압력은 구조물의 변형을 야기하며, 이에 따라 충격압력

을 고려한 구조설계의 중요성이 대두되고 있다. 슬래밍 현상에 대한 이론 및 실험적 연구는 1920년대 엔진의 발전과 선박의 고속화가 진행됨에 따라 선체하부 슬래밍에 의한 구조손상이 빈번하게 발생하면서 시작되었고, Von Karman(1929)과 Wagner(1932)의 연구를 시작으로 지금까지 수많은 연구가 진행되고 있다.

최근에는 경사각을 가지는 뿔기형 모델의 자유낙하 모형시험을 통해 선체에 가해지는 슬래밍 충격압력의 정확한 물리적 현상과 특성을 파악하고자 최대 충격압력, 최대 압력부의 지속시간 및 압력 이동속도 등을 계측하였다(Shin et al., 2010). 또한 뿔기형 모델을 대상으로 슬래밍 충격압력에 관하여 VOF법을 이용한 수치계산을 수행하였다(Yum and Yoon, 2008). 공압 실린더를 이용한 평판의 강제입수를 통해 입수각에 따른 충격압력을 계측하였으며, 입수각이 0°일 경우 충격압력에 큰 영향을 미치는 요인인 Air pocket의 상관

관계 및 발생 원리에 대하여 썰기형 모델과 원통형 실린더를 비교하는 연구가 진행되었다(Park and Chun, 1999a).

CFD(Computational Fluid Dynamics)의 자유수면 추정기법 중 하나인 VOF(Volume of Fluid)법은 공기와 물의 체적비율을 계산하여 자유수면을 정의한다. 그러나 계산 시간이 지속될 경우 공기와 물의 체적비율로 인한 해의 정도가 크게 떨어지는 문제를 야기한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위한 방안으로 본 연구에서는 공기와 물의 밀도만을 이용하여 자유수면을 정의하는 밀도함수법(Park et al., 1999b)과 유사한 계산기법이며, 해를 안정적으로 구하기 위해 밀도차이로 인한 지배방정식의 공간적 불연속성이 없도록 수정된 밀도함수법(MMD, Modified Marker-Density Method)을 이용한 INHAWAVE-II가 사용되었다(Lee et al., 2012). 본 연구에서는 수정된 밀도함수법을 이용하여 물체에 작용하는 슬래밍 충격압력에 관한 수치계산을 수행하였으며, 그 결과들을 기존의 모형시험결과들과 비교 및 검토하였다. 기존의 결과들과 비교하기 위해 평판 및 썰기형 모델을 대상물체로 선정하였으며, 층류 계산조직에 Sub-Grid Scale(SGS) 난류모델을 적용하여 난류 특성도 고려하였다.

본 연구를 통해 입수각에 따라 대상물체에 작용하는 압력이 슬래밍 충격압력에 어떠한 영향을 미치는지 검토하였으며, 그 결과들과 기존의 모형시험결과들의 유동특성을 비교 및 검토하였다. 또한 자유수면의 계산정도가 높고, 사용하기에 간편한 수정된 밀도함수법에 관하여 슬래밍 충격압력에 대한 정도를 파악하였다.

2. 수치기법 및 수치모델

2.1 지배방정식과 수치해석기법

유체를 비압축성 점성 유체로 가정하여 연속방정식(식 (1))과 Navier-Stokes방정식(식 (2))이 지배방정식으로 사용되었으며, 고정된 직교 격자계에서 Two-step projection기법으로 속도와 압력을 연성시켰다. 아래 식의 t 는 시간, \bar{u} 는 공간 평균된 속도, ρ 는 밀도, p 는 압력, ν 는 점성계수, R 은 난류응력, F 는 중력과 물체의 이동에 의해 발생하는 관성력인 체적력을 의미한다.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_i} + \frac{F_i}{\rho} \quad (2)$$

지배방정식의 대류항에서 공간 이산화에는 3차 상류차분법인 Kawamura-Kawahara기법이 사용되었으며, 시간 이산화에는 Adams-Bashforth기법이 사용되었다. 대류항을 제외한 나머지 항들에 대하여 공간에 대해서는 2차 중심차분법이 사용되었으며, 시간에 대해서는 Euler explicit 방법이 사용되었다. 또한 사용된 격자크기 이하에서 난류특성을 고려하기 위해 SGS 난류모델을 적용하였다.

2.2 수치모델선정

대상물체의 경우 Park et al. (2009)과 Hong et al. (2017)을 참고하여 평판 및 썰기형 모델의 주요제원을 선정하였다. Fig. 1과 같이 자유수면과 만나는 평판 모델의 길이, 폭 및 두께는 각각 560mm, 280mm 및 10mm이며, 입수면에서 압력계측점 위치의 경우 평판 모델의 길이 방향에서 끝 면으로부터 P1까지 거리는 190mm이고, P1부터 각각 90mm, 180mm 떨어진 곳에 위치시켰다. P1, P2 및 P3의 폭 방향 위치는 끝 면으로부터 140mm인 지점이며, 평판 모델의 입수각은 3°부터 8°까지이다.

Fig. 2는 썰기형 모델의 주요제원 및 압력계측점이다. 두 가지 형태의 썰기형 모델을 이용하여 슬래밍 충격압력을 계측하였으며, 그 두 가지 모델의 선저경사각(dead-rise angle)은 20°와 30°이다. 단, 두 가지 썰기형 모델의 경우에 상부의 길이는 동일하다. 압력계측점 위치는 썰기형 모델 모서리로부터 대각선방향으로 50mm, 100mm 떨어진 곳이다.

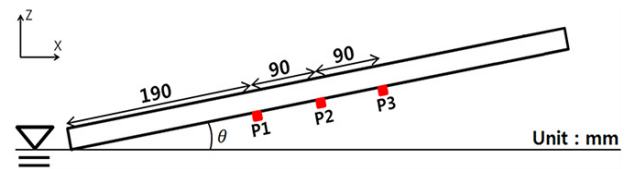


Fig. 1 Geometry of the flat plate model and the pressure measuring points on the bottom surface

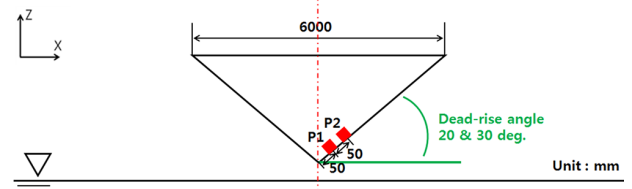


Fig. 2 Geometry of the wedge type model and the pressure measuring points on the bottom surface

2.3 직교격자계

본 연구에서 사용된 직교격자계(cartesian-grid system)는 물체 적합격자계(body-fitted grid system)와 달리 격자선과 물체면이 일치하지 않기에 상대적으로 물체주변에서 정도가 상대적으로 낮으나, 격자계 생성이 용이하고 이산화 된 지배방정식이 단순하여 자유수면을 포함하는 문제에서 그 처리가 단순해지게 되는 장점을 가지고 있다. 또한 물체적합격자계의 경우 물체의 이동에 따라 격자계의 재작성 또는 이동이 필요하나, 직교격자계는 격자계의 재작성과 이동을 하지 않아 계산의 속도가 상대적으로 빠르다. Lee et al. (2012) 및 Jeong and Lee (2014)에서 자세한 수치기법에 대한 내용을 찾아볼 수 있다.

평판 및 썰기형 모델의 격자는 Fig. 3과 같이 생성하였으며, 평판 모델의 경우 길이 방향으로 대상물체의 끝 단면부터 계산영역 -x축 방향 측면까지 거리는 평판 모델 길이인 L_1 로 표현하여 $0.8L_1$, +x축

방향 측면까지 거리는 $1.5L_1$ 이다. 이는 유동이 흐르는 방향으로 도메인을 길게 생성하여 제트유동(jet flow)을 재현하고자 하였다. 대칭 경계조건을 적용하여 폭 방향으로 절반만 수치계산을 수행하였으며, 대상물체의 끝 단면부터 +y축 방향 측면까지 거리는 $0.5L_1$ 이다. 또한 깊이 방향으로 자유수면에서 -z축 방향 바닥면까지 거리는 $1.5L_1$ 로 설정하였다.

썰기형 모델의 경우에는 길이 방향으로 대칭 경계조건을 적용하고 절반으로 수치계산을 수행하였으며, 길이 방향으로 대상물체의 끝단부터 +x축 방향 측면까지의 거리는 썰기형 모델의 상부길이 L_2 로 표현하여 $0.8L_2$ 로 설정하였다. 또한 폭 방향으로 대상물체의 끝 단면부터 +y축 방향 측면까지 거리는 $0.5L_2$ 이며, 깊이 방향으로 자유수면에서 -z축 방향 바닥면까지 거리는 $0.8L_2$ 이다. 두 계산 모두의 격자 수는 길이, 폭 및 깊이 방향으로 각각 240, 80, 145개를 사용하여 약 280만개의 격자를 사용하였다. 다만, 여기서 dx/dz 의 비율을 2로 고정시켰다.

평판 및 썰기형 모델은 자유수면에서 -z축 방향으로 등속 낙하하며, 낙하속도는 평판 및 썰기형 모델 순으로 각각 2.37m/s, 3.00m/s이다. 수치계산 시 시간간격은 1/10000초로 설정하였다.

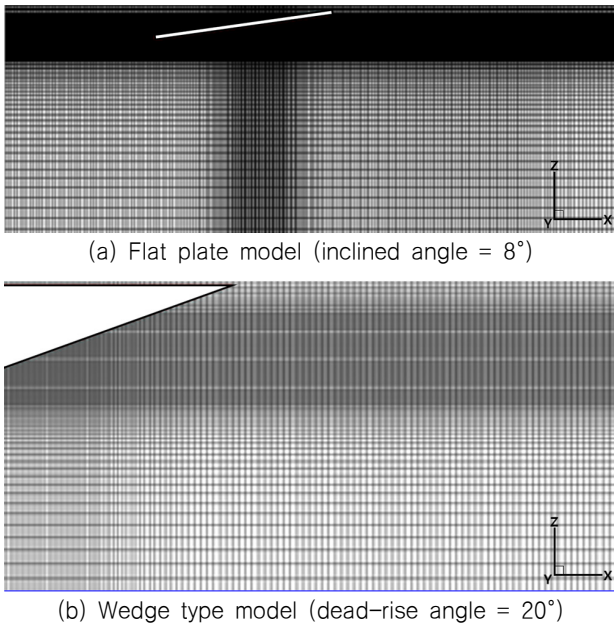


Fig. 3 Computational domain and the grid systems of the flat plate and wedge type model

3. 수치계산 결과 및 해석

3.1 평판 모델의 슬래밍 충격압력

Fig. 4는 평판 모델의 입수각 8° 에서 대표적인 시간에 따른 수치계산결과이며, 자유수면의 유동을 보여준다. 시간이 음수부터 시작되는 이유는 등속도의 수치계산이기 때문에, 수치계산 시간을 줄이기 위하여 평판 모델의 초기 높이를 자유수면으로 부터 10mm 정도

에 위치하였다. 따라서 모형시험과의 시간을 일치시키기 위하여 시간 축을 이동하였다. 평판 모델이 자유수면에 닿은 후 입수하는 순간에 평판 모델의 끝에서는 강하게 물의 뒤집힘 현상이 발생되며, 평판 모델의 아래에서는 경사면을 따라 물이 흘러나가는 현상을 확인할 수 있다.

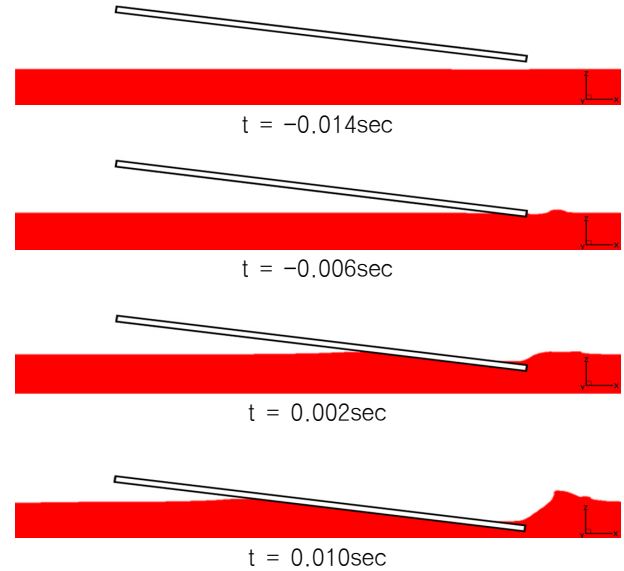
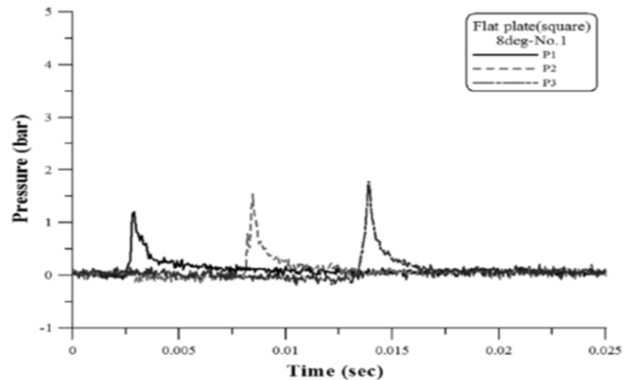
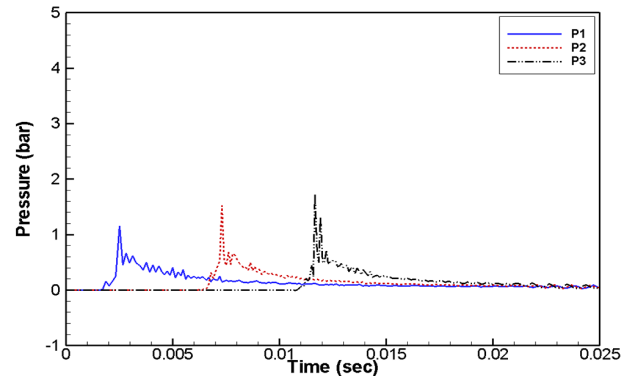


Fig. 4 Free surface flow on the flat plate model (inclined angle = 8°)



(a) Model test results (Park et al., 2009)



(b) Present computation results

Fig. 5 Comparisons of the time histories of slamming impact pressures on the flat plate model (inclined angle = 8°)

Fig. 5는 평판 모델의 입수각 8°에서의 슬래밍 충격압력 시계열을 나타내고 있다. Park et al. (2009)에서 공개된 모형시험결과와 본 연구에서의 수치계산결과들을 직접 비교하였다. 전체적으로 보았을 때, 충격압력의 크기는 최대 5%정도 차이가 발생하였으나, 전체적으로 압력이 발생하는 시간과 감소되는 시간이 정성적으로 근접한 것을 확인할 수 있다. 다만, 본 연구에서의 수치계산결과들에서 약 0.0001초 간격으로 압력이 진동하는 현상이 보이는데, 이는 직교격자계에서 푸아송 방정식(Poisson's equation)으로 압력을 계산할 때, 각 격자점에서 시간간격에 따라 그 압력을 얻어낼 때 발생하는 문제로 보이며, 향후 연구를 통한 개선이 필요한 것으로 판단된다.

Fig. 6은 평판 모델의 입수각이 3°인 경우에서 시간에 따른 자유수면의 유동을 보여준다. 여기서도 마찬가지로 모형시험과 수치계산결과들의 시간을 일치시키기 위해 수치계산결과들을 시간 축을 이동하였다. Fig. 4와 비교하면, 평판 모델의 입수각이 작아짐에 따라 자유수면이 평판 모델에 빨리 닿는데, 이는 평판 모델의 경사면을 따라 흐르는 물의 속도가 상대적으로 빠르기 때문이다.

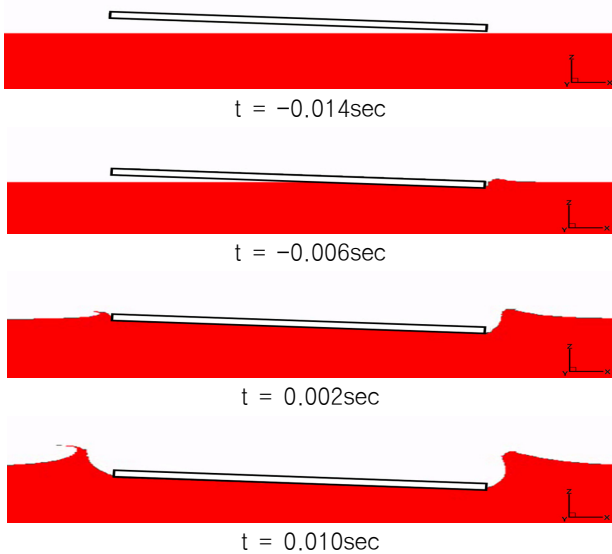
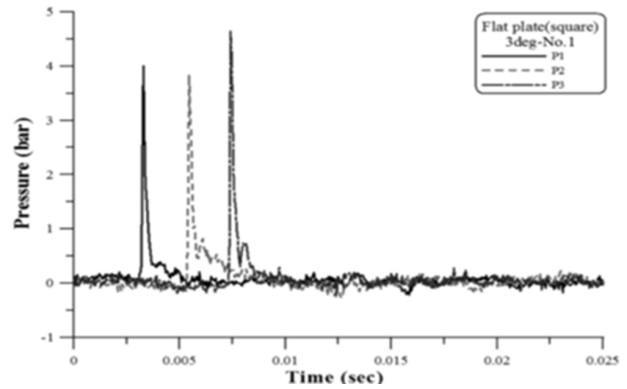


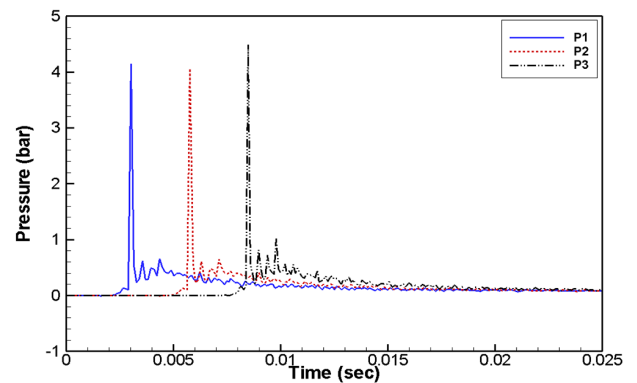
Fig. 6 Free surface flow on the flat plate model (inclined angle = 3°)

Park et al. (2009)에서는 평판 모델의 입수각을 0°부터 8°까지 모형시험을 수행하였으나, 본 연구에서는 3°에서 8°까지 평판 모델의 슬래밍 충격압력을 계산하였다. 이는 입수각이 소각도에 속한 0°부터 2°부근에서는 평판 모델과 자유수면 사이의 공기가 갇히면서 공기의 압축성에 의한 압력진동과 같은 영향들이 생기는 이유로, 수치계산이 상대적으로 어려웠기 때문이다.

Fig. 7에서 Park et al. (2009)의 모형시험결과들과 본 연구에서의 수치계산결과들을 비교하였을 때, 정량적으로 매우 근접함을 보이며, 여기서도 슬래밍 충격압력의 차이는 최대 5% 이하이다. 또한 압력의 발생 시간과 감소시간이 모형시험결과들과 수치계산결과들이 정성적으로 매우 근접함을 확인할 수 있다. 실제로 Fig. 5와 비교하면, P3의 최대압력 발생시간이 상대적으로 빠른 것을 확인할 수 있다.



(a) Model test results (Park et al. 2009)



(b) Present computation results

Fig. 7 Comparisons of the time histories of slamming impact pressures on the flat plate model (inclined angle = 3°)

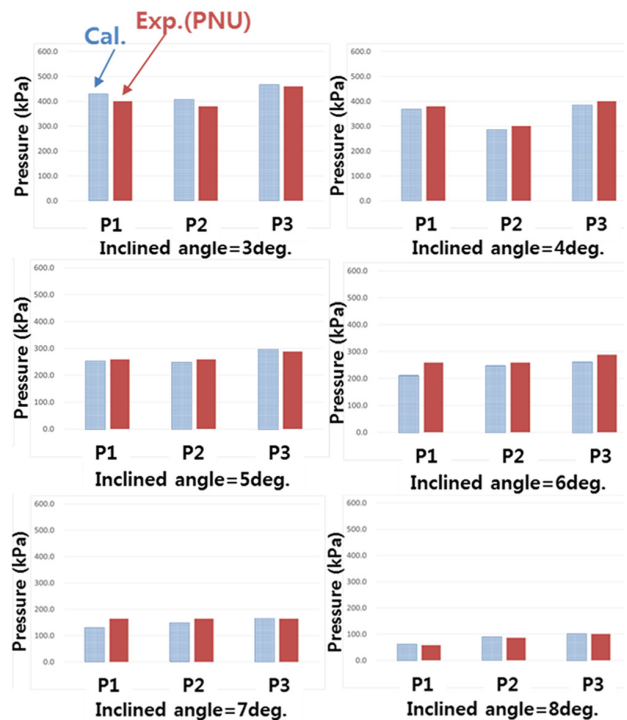


Fig. 8 Comparisons of the slamming impact pressures between the model tests and numerical computations according to the inclined angles on the flat plate model

Fig. 8은 KTTC(Korea Towing Tank Conference) 2015에 공개된 부산대학교 모형시험결과(Park et al., 2009)와 본 연구에서의 수치계산결과들에서의 슬래밍 충격압력 크기를 직접 비교한 그래프이다. 본 연구에서의 수치계산결과들은 각 슬래밍 충격압력 계측 위치별로 정성적인 경향이 모형시험결과들과 매우 근접함을 보인다. 또한 슬래밍 충격압력의 크기에 대한 수치계산결과들을 보면, 모형시험결과들과 비교하였을 때, 최대 10% 정도의 차이를 보인다. 이는 모형시험의 경우 충격압력에 대한 물리적인 현상에서 압축성 및 비압축성 유체를 동시에 계측하나, 수치계산에서는 비압축성 유체만을 고려하여 계산을 수행하기 때문에 모형시험 및 수치계산결과와의 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 전체적으로 보면, 평판 모델의 입수각이 증가함에 따라 점차 슬래밍 충격압력들은 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 평판 모델의 입수각이 증가함에 따라, 평판 모델의 경사면을 따라 흘러가는 물의 속도 즉, jet flow라고 하는 유동을 생성하기 위하여 에너지를 소모하기 때문에 상대적으로 슬래밍 충격압력이 감소된 것으로 판단된다.

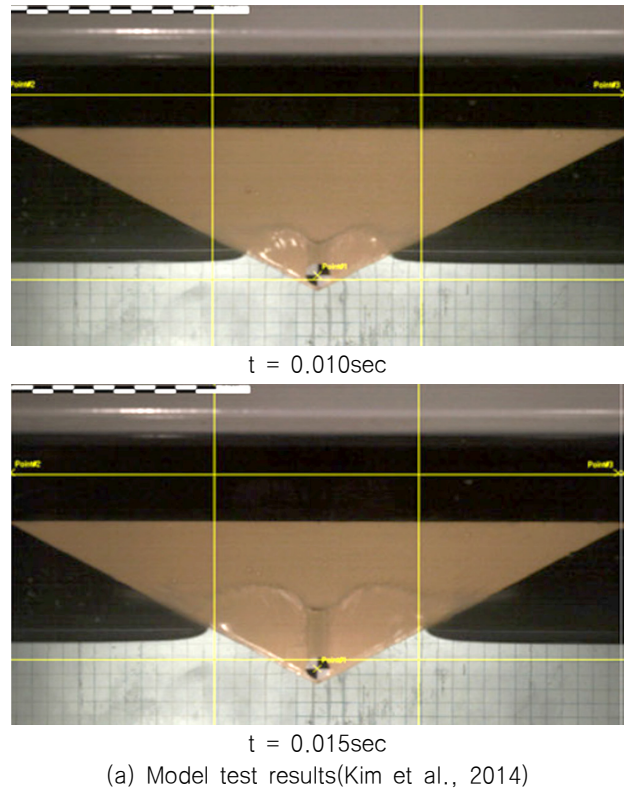
3.2 뿔기형 모델의 슬래밍 충격압력

뿔기형 모델의 경우에는 상대적으로 입수각 즉, 선저경사각이 크기 때문에 평판 모델의 입수 충격문제보다 수치계산이 어렵지 않다. 따라서 본 연구에서는 수치계산기법의 효율성을 판단하기 위해 상대적으로 입수각이 큰 뿔기형 모델을 이용하여 슬래밍 충격압력을 계산하였다. 여기서도, 평판 모델의 입수 충격문제와 마찬가지로 자유수면으로부터 10mm 정도 위에서 입수시켰다.

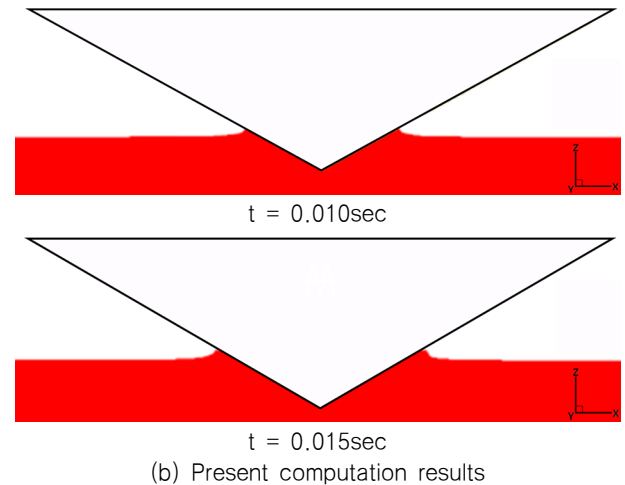
Fig. 9는 선저경사각 30°인 뿔기형 모델의 모형시험결과(Kim et al., 2014)와 수치계산결과들에서 자유수면의 유동을 보여준다. 뿔기형 모델의 경우에는 평판 모델과는 다르게 뿔기형 모델을 따라 물이 타고 오르는 현상을 확인할 수 있다. 압력의 발생시간이나 감소시간이 상대적으로 평판 모델의 입수 충격문제보다 길 수 있으며, 충격압력 또한 상대적으로 작을 수 있다. Fig. 10을 보면, 충격압력의 발생시간과 감소시간이 Fig. 5 및 7보다 긴 것을 확인할 수 있으며, 슬래밍 충격압력 또한 그 크기가 상대적으로 작은 것을 확인하였다.

또한 모형시험결과와 본 연구에서의 수치계산결과를 비교하여 보면, 정성적 및 정량적으로 수치계산결과들이 모형시험결과와 근접함을 보인다. 그리고 상대적으로 평판 모델의 입수 충격압력보다 뿔기형 모델의 충격압력 크기가 작기 때문에 수치계산으로부터의 충격압력의 진동현상이 크게 감소함을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 상대적으로 선저경사각이 작은 20°의 뿔기형 모델의 입수 충격 시 자유수면의 유동을 보여준다. Fig. 9와 마찬가지로 뿔기형 모델이 입수될 때, 그 형상을 따라 물이 타고 오르는 현상을 확인할 수 있다. 여기서도 마찬가지로 상대적으로 선저경사각이 작지만 자유수면의 유동현상을 보았을 때, 충격압력의 발생시간과 감소시간이 길 것으로 보이며, 그 충격압력 또한 평판 모델의 입수 충격압력보다 작을 것으로 예상된다.



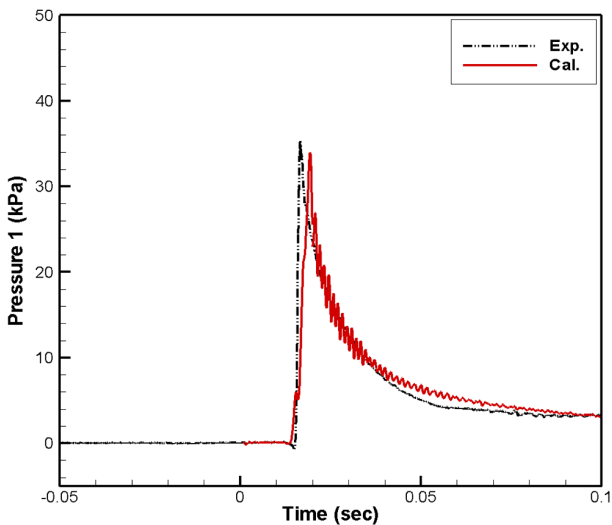
(a) Model test results(Kim et al., 2014)



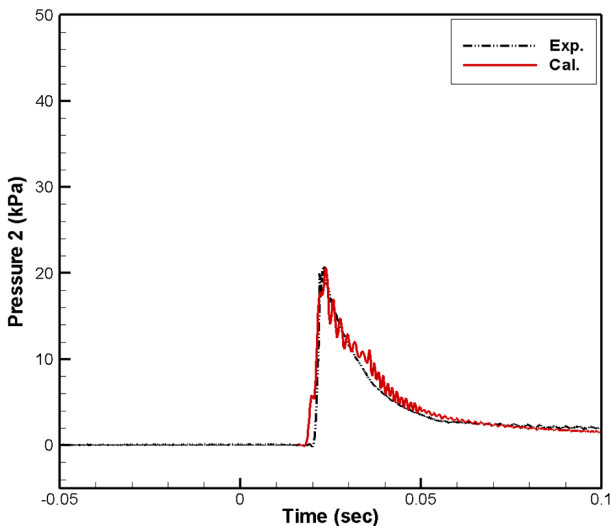
(b) Present computation results

Fig. 9 Comparisons of the free surface flows between the model test and numerical computation on the wedge type model (dead-rise angle = 30°)

실제로 Fig. 12와 같이 충격압력을 보면, 마찬가지로 충격압력의 발생시간과 감소시간이 평판 모델의 입수 충격압력에 비하여 긴 것을 확인할 수 있으며, 그 크기 또한 상대적으로 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 평판 모델과 다르게 뿔기형 모델의 입수각이 크게 증가함에 따라, 뿔기형 모델의 경사면을 타고 올라가는 물이 충격압력의 발생시간 및 감소시간을 지연시켜 충격압력이 상대적으로 감소한 것을 확인하였다. 또한 모형시험결과와 수치계산결과들을 비교하여보면, 정성적 및 정량적으로 매우 근접함을 확인할 수 있으며, Fig. 10 및 Fig. 12를 확인하였을 때, 모형시험결과와 본 연구에서의 수치계산결과들의 차이가 약 5% 이내임을 확인하였다.

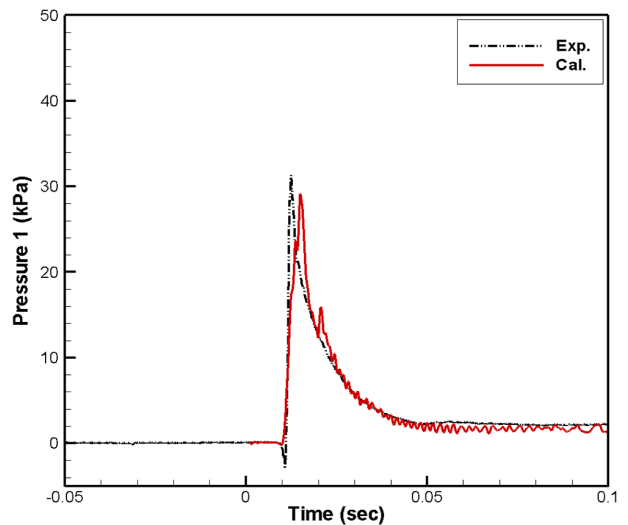


(a) Pressure 1

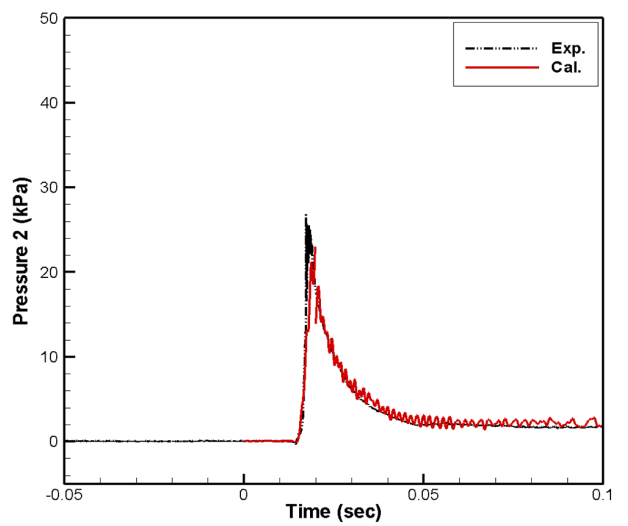


(b) Pressure 2

Fig. 10 Comparisons of the time histories of slamming impact pressures between the model test and numerical computation on the wedge type model (dead-rise angle = 30°)



(a) Pressure 1



(b) Pressure 2

Fig. 12 Comparisons of the time histories of slamming impact pressures between the model test and numerical computation on the wedge type model (dead-rise angle = 20°)

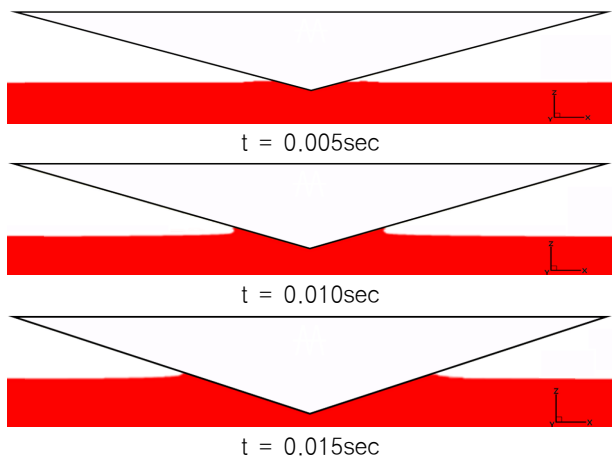


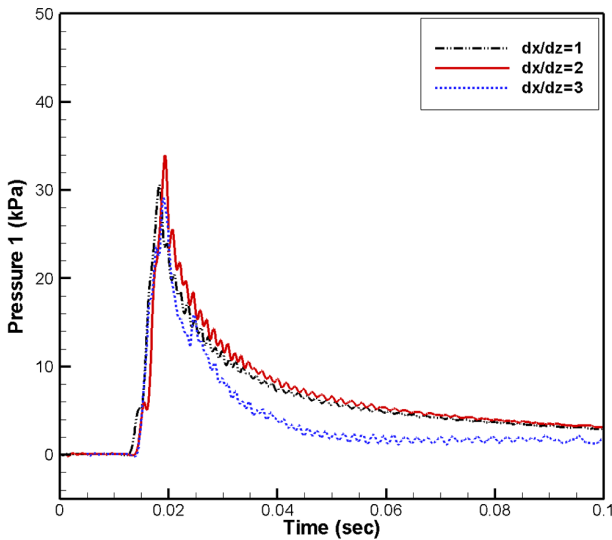
Fig. 11 Free surface flows on the wedge type model (dead-rise angle = 20°)

일반적으로 슬래밍 현상은 물리적으로 발생하는 시간이 상대적으로 짧은 현상이기에 수치계산의 격자형태 및 시간간격이 슬래밍 충격압력 변화에 민감한 요소로 작용된다. 따라서 본 연구에서는 격자의 종횡비 및 시간간격에 따라 슬래밍 충격압력의 변화를 확인하고, 적절한 Courant 수를 선정하여 수치계산을 수행하는 것이 효율적이라고 판단하였다.

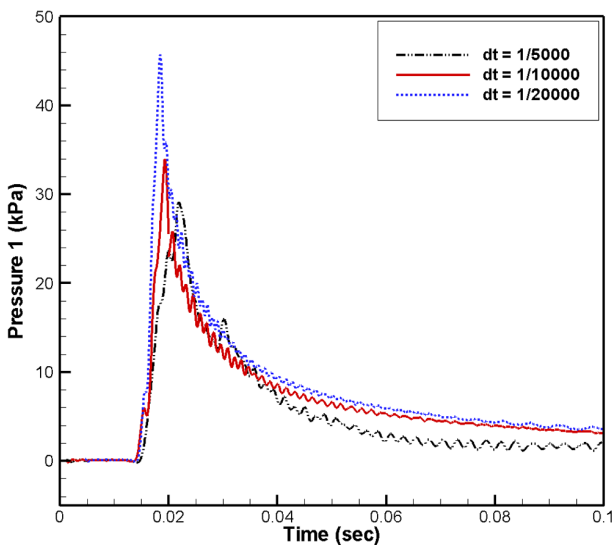
Fig. 13은 격자의 종횡비(dx/dz)와 시간간격에 따른 슬래밍 충격압력 시계열을 비교한 그림이며, 상대적으로 충격압력 변화가 덜 민감한 선저경사각 30°의 뿔기형 모델을 이용하여 수치계산을 수행한 결과 중에서 대표적으로 P1에서의 충격압력을 비교하였다. 먼저, 격자의 종횡비에 따른 충격압력 시계열을 비교한 결과, 격자 종횡비가 1일 경우에 격자 종횡비 2에 비하여 그 충격압력 크기가 상대적으로 작은 것을 확인할 수 있다. 또한 격자 종횡비 3의 경우에는 뿔기형 모델이 자유수면과 충격이 일어난 후 입수 후에도 그 체적의

변화를 제대로 추정하지 못하는 것을 확인하였다. 격자의 종횡비에 따라 그 충격압력 크기가 다른 것은, 유동현상이 미세하게 차이나기 때문으로 사료된다. 따라서 본 연구에서 사용한 격자 종횡비 중, 슬래밍 충격압력 수치계산 시 적절한 격자의 종횡비는 2로 생각된다.

시간간격에 따른 슬래밍 충격압력 변화를 보면, 시간간격이 상대적으로 작을 경우 충격압력이 크게 발생되며, 시간간격이 상대적으로 큰 경우에는 그 크기가 작아짐을 확인할 수 있다. 본 연구에서의 x 방향 최소격자 크기는 0.004m이며, 각 시간간격에 따른 Courant 수는 시간간격이 1/5000일 때, 0.15, 1/10000일 때, 0.075 그리고 1/20000일 때, 0.0375이다. 따라서 본 연구결과를 보았을 때, 슬래밍 충격압력을 위한 적절한 Courant 수는 0.1부근으로 생각된다.



(a) Aspect ratio of grid



(b) Time step (dx/dz=2)

Fig. 13 Comparisons of the time histories of slamming impact pressures according to the aspect ratios of grids and time stpes (dead-rise angle = 30°)

4. 결론

본 논문에서는 평판 및 썰기형 모델에 작용하는 슬래밍 충격압력에 관한 수치계산을 수행하였으며, 그 결과들을 다른 기관의 모형시험결과들과 비교하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 평판 모델의 슬래밍 현상에 관한 수치계산결과들에서의 충격압력은 기존의 모형시험결과들에서의 충격압력과 비교했을 때, 정량적으로 약 10% 이내의 오차를 보이며, 그 정성적인 경향 또한 매우 근접함을 보였다. 그리고 슬래밍 충격압력의 발생시간과 감소시간 또한 수치계산결과 및 모형시험결과가 매우 근접함을 보였다. 공기의 압축성이 동반되는 평판 모델의 입수각 0°부터 2°의 수치계산은 어려울 수 있으나, 상대적으로 공기 압축의 영향이 적은 각도들에서는 본 수치계산방법의 신뢰성을 확인하였다.

(2) 썰기형 모델의 슬래밍 충격압력을 보면, 상대적으로 입수각이 크기 때문에 평판 모델의 입수 충격압력 결과들에 비하여 압력의 발생시간과 감소시간이 길며, 그 충격압력들이 작은 것을 확인할 수 있다. 본 수치계산결과들과 기존의 모형시험결과들을 비교하면, 정량적으로 최대 5% 이내의 오차를 보이며, 정성적인 경향 또한 매우 근접함을 확인할 수 있었다. 따라서 본 수치계산방법은 적어도 입수각이 3°이상인 각도에서 입수 충격압력 추정에 무리가 없음을 확인할 수 있다.

(3) 슬래밍 충격압력은 격자의 종횡비와 시간간격 즉, Courant 수에 매우 민감하다. 따라서 수치계산을 이용한 슬래밍 충격압력 추정 시, 본 연구결과 격자의 종횡비는 적어도 2정도가 되어야 하며, Courant 수는 0.1에 가까운 것이 유리할 것으로 생각된다.

본 연구를 통하여 공기 압축에 의한 압력의 진동을 수치계산으로 모사하기에는 격자크기나 시간간격의 제한으로 매우 어렵다. 따라서 압축성유체 유동에 대한 수치계산을 추후에 수행할 예정이다. 또한 수치계산 방법에서 다양한 요소들에 대한 검토를 통하여 수치계산을 이용한 슬래밍 충격압력에 관한 추정방법의 기초적인 자료를 제시할 예정이다.

후 기

본 연구는 인하대학교와 산업자원통신부 그린카 등 수송시스템 산업핵심기술개발사업 '선박의 운항효율 향상을 위한 부가저항이 고려된 선형설계 향상 기술 개발'(과제번호 : 10062881)의 지원으로 수행되었습니다.

References

Hong, S.Y., Kim, K.H. & Hwang, S. C., 2017. Comparative study of water-impact problem for ship section and wedge drops, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 27(2), pp.123-134.
Jeong, K.L. & Lee, Y.G., 2014. Numerical simulation of spilling

breaker using the modified marker–density method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(1), pp.58–66.

Kim, K.H. et al., 2014. Experimental study of water impact loads on symmetric and asymmetric wedges, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 28(3), pp.209–217.

Lee, Y.G., Jeong, K.L. & Kim, N.C., 2012. The marker–density method in cartesian grids applied to nonlinear ship waves. *Computer & Fluids*, 63(30), pp.57–69.

Park, I.R. & Chun, H.H., 1999a. Analysis of flow around a rigid body on water–entry & exit problem. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 36(4), pp.37–47.

Park, J.C., Kim, M.H. & Miyata, 1999b. Fully non-linear free-surface simulations by a 3D viscous numerical wave tank, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 29(6), pp.685–703.

Park, J.S., Oh, S.H., Kwon, S.H. & Chung, J.Y., 2009. A study on slamming impact pressure. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 23(1), pp.67–73.

Shin, H.K., Kim, S.C. & Cho, S.R., 2010. Experimental investigations on slamming impact by drop test. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47, pp.410–420.

Von Karman, T., 1929. The impact of seaplane floats during landing. *National Advisory Committee for Aeronautics*, No.321. Washington, pp.1–8.

Wagner, V.H., 1932. Über Stoss und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten, *Aeischrift fuer Angewandte Mathematik und Mechanik*, 12, pp193–215.

Yum, D.J. & Yoon, B.S., 2008. Numerical simulation of slamming phenomena for 2-D wedges. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(5), pp.477–486.

