

2차원 뿔기형 구조물의 슬래밍 현상에 대한 수치 유동해석

염덕준^{†*}, 윤범상^{**}

군산대학교 조선공학과^{*}
울산대학교 조선해양공학부^{**}

Numerical Simulation of Slamming Phenomena for 2-D Wedges

Deuk Joon Yum^{†*} and Bum Sang Yoon^{**}

Dept. of Naval Architecture, Kunsan National University^{*}
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan^{**}

Abstract

Numerical analysis for slamming impact phenomena has been carried out when 2-dimensional wedge shaped structure with finite deadrise angles enter the free surface by using a commercial CFD code, FLUENT. Fluid is assumed incompressible and entry speed of the structure is kept constant. Geo-reconstruct scheme (or PLIC-VOF scheme) is used for the tracking of the deforming free surface. User defined function of 6 degrees of freedom motion and moving dynamic mesh option are used for the expression of the downward motion of the structure and deforming of unstructured meshes adjacent to the structure. The magnitude and the location of impact pressure and the total drag force which is the summation of pressures distributed at the bottom of the structure are analyzed. Results of the analysis show good agreement with the results of similarity solution, asymptotic solution and the solution of BEM.

※Keywords: Slamming(슬래밍), Impact pressure(충격압력), Wedge structure(뿔기 구조물), CFD(계산유체역학), VOF scheme, Geo-reconstruct scheme(도형-재구성법),

1. 서론

접수일: 2008년 6월 4일, 승인일: 2008년 8월 29일

† 교신저자: djyum@kunsan.ac.kr, 011-9336-7698

대파고 파랑 중 발생하는 선박의 과도한 운동은 슬래밍 현상을 동반하게 되며 이 때 선체에는 매우 큰 충격하중이 발생한다. 특히, 최근에는 컨테이너 운반선의 대형화 및 고속화가 지속적으로 진행됨에 따라 컨테이너 운반선의 선수부 플래어 및

선미부에 대한 슬래밍 충격력의 정도 높은 추정치 구조적으로 안전한 선박의 건조에 매우 중요하게 되었다.

슬래밍 현상에 대한 많은 이론적, 실험적 및 수치적인 연구가 von Karman(1929)과 Wagner(1932)의 선구적인 연구를 시작으로 해서 최근까지 지속적으로 수행되고 있다. Armand and Cointe(1986), Howison et al.(1991)은 선저경사각이 작은 경우 점근법(method of matched asymptotic expansion)을 이용하여 Wagner의 이론을 더욱 발전시켰다. Dobrovol'skaya(1969)는 2차원 뿔기 형상의 구조물이 정속으로 입수 시 발생하는 유체현상에 대하여 처음으로 완전한 상사해(similarity solution)를 제시하였다. Zhao and Faltinsen(1993)은 경계요소법(boundary element method)을 이용하여 2차원 구조물의 슬래밍 문제에 대한 비선형, 시간영역해를 제시하였고, Zhao et al. (1996), Faltinsen and Zhao(1997) 및 Faltinsen and Chezhian(2005)등의 연구를 통하여 임의의 2차원 및 3차원 구조물에 대한 슬래밍 해석 방법이 개발되어 왔다. 실험적 연구로서는 선저경사각이 없는 평판과 뿔기 형상이 구조물에 대한 Chuang(1966, 1967)의 체계적인 연구가 이론적인 연구의 검증에 위하여 많이 이용되어 왔으며, 최근의 실험적 연구로서는 Lee et al. 2005, Chung et al. 2007, Yang et al. 2007 등이 있다. 또한, 최근 들어서 선박 해양 유체의 모든 분야에 전산유체역학에 의한 수치해석이 광범위하게 사용됨에 따라 슬래밍, 슬로싱 등 과격한 유체 유동 현상과 그에 따른 유체 충격력 문제의 해석에도 전산유체역학을 이용한 많은 연구가 수행되고 있다(Yoon 1991, Lee et al. 2005, Yang et al. 2007 및 Lee et al. 2008 등).

본 연구에서는 유한한 크기의 선저경사각(deadrise angle)을 갖는 2차원 뿔기형 구조물이 자유수면에 입사할 때 발생하는 충격현상에 대하여 RANS 방정식에 기반한 수치해석 프로그램인 FLUENT(2006)를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 선저경사각이 10°, 20° 및 30°인 경우에 대해서 해석을 수행하였으며, 비압축성 유체를 가정하였다. 자유수면의 대 변형 및 동적 거동의 해석을

위해서 VOF(Volume of Fluid)모델에 사용하는 해석법 중에서 자유수면 형상의 추적에 비교적 정도가 높은 수치해석법으로 평가되고 있는 Geo-reconstruct scheme(또는 PLIC-VOF scheme)을 사용하였다. 또한, 일정한 속도로 낙하하는 구조물과 구조물 주위 비정형 격자계의 이동 및 변형을 표현하기 위해서 6 자유도 운동을 구현하는 사용자 정의 함수(UDF)와 이동격자계(moving dynamic mesh)를 사용하였다.

수치해석 결과는 Dobrovol'skaya(1969)의 상사해(similarity solution), Wagner 방법에 기초한 점근해(asymptotic solution) 및 경계요소법(Zhao et al(1993))에 의한 수치해와 비교하였다. 슬래밍에 의한 충격력의 크기, 충격력이 발생하는 위치, 입수 시 구조물 하부에 작용하는 압력의 적분치인 항력, 충격력의 시간 및 공간 분포 등에 대한 비교를 수행하였다.

2. 수치 해석

유한한 크기의 선저경사각 α 를 갖는 2차원 뿔기형 구조물이 교란되지 않은 자유수면에 일정한 속도, V 를 유지하면서 수직 하방으로 입수한다. Fig. 1과 같이 좌표계의 원점이 교란되지 않은 자유수면에 위치하고, 자유수면을 y -축, 구조물의 대칭축을 z -축으로 한다. z -축의 상방향을 양의 방향으로 정의한다. 또한, 구조물이 수면에 돌입하는 순간을 $t=0$ 로 한다.

수치해석에 사용된 뿔기형 구조물은 폭이 0.6m 이고 깊이가 0.4m이며, 입수부의 선저경사는 10°, 20° 및 30°의 3가지 경사를 사용하였다. 구조물의 입수 속도로는 단위 속도를 사용하였다. 수치해석 영역은 다음과 같다(Fig. 1).

$$-2.5m \leq y \leq 2.5m, \quad -2.5m \leq z \leq 2.5m \quad (1)$$

2.1 지배방정식과 경계조건

비압축성, Newtonian 유동을 가정하면 지배방정식은 다음과 같이 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식이다.

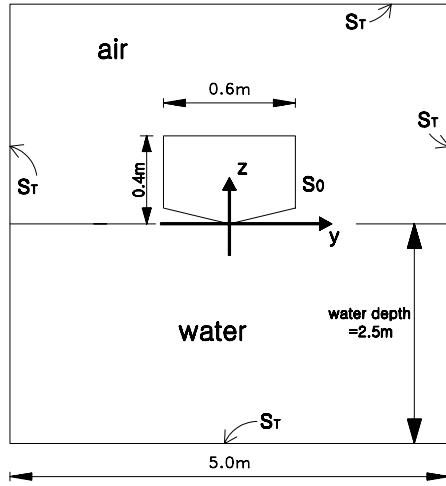


Fig. 1 Coordinate system and computational domain

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \vec{u} + \vec{F} \tag{3}$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도, t 는 시간, \vec{u} 는 속도 벡터, ∇ 는 구배 연산자, P 는 압력, ν 는 동점성계수, \vec{F} 는 body force를 나타낸다.

RANS 방정식과 연속방정식으로부터 전체 유체 영역에 있어서의 유속과 압력장의 해석을 위하여 압력-속도 연성은 PISO algorithm을 사용하였고 비정상(unsteady) 해석에 대해서는 수치해의 안정성을 위하여 1차 음해법을 사용하였다(FLUENT 2006). 운동방정식의 대류항에 대해서는 2차 풍상차분법(upwind differencing scheme)을 사용하였고, 확산항에 대해서는 중심차분법(central differencing scheme)을 사용하였다. 유체는 비압축성을 가정하였다. 이는 구조물의 충격 속도가 과히 크지 않아서 유체의 압축성이 해에 크게 영향을 미치지 않음을 의미한다. 또한, 슬래밍 현상은 대체적으로 매우 짧은 시간에 발생하므로 점성의 영향을 무시할 수 있다는 가정 하에 이전의 많

은 연구가 포텐셜이론을 사용하였으나 본 연구에서는 층류 유동을 가정하였으며, 뿔기형 구조물의 선저경사각이 충분히 커서 구조물이 자유수면에 입수 시 구조물과 자유수면 사이에 밀폐된 공기층 (air pocket)이 형성되지 않음을 가정하였다.

유체영역을 둘러싸고 있는 경계는 고정된 벽조건(fixed wall condition)이 부과되는 외부 탱크 경계 S_r 와 일정한 속도로 낙하하는 경계조건이 부과되는 뿔기형 구조물의 외부 경계 S_0 로 구성되어 있다(Fig. 1). 자유수면의 대 변형 및 동적 거동의 해석을 위해서는 다상유동 모델(multiphase flow model) 중에서 비정상 유동 해석에 사용되는 explicit VOF(volume of fluid) 모델이 사용되었다. VOF 모델은 Hirt and Nichols(1981)가 Donor-Acceptor 법을 제안한 이래 지속적인 개선이 이루어졌다. 본 연구에서는 두 유체 사이의 접촉면을 구분 선형법 (piecewise-linear approach)에 의하여 표현하는 Geo-reconstruct scheme(일명 PLIC-VOF scheme)을 사용하였다. 본 방법은 VOF 모델에 사용하는 기법 중에서 자유수면 형상의 추적에 비교적 정도가 높은 기법으로 평가되고 있으며, 비정형격자계에 대하여 적용이 가능하다(Youngs 1982).

일정한 속도로 낙하하는 구조물과 구조물 주위 비정형 격자계의 이동 및 변형을 표현하기 위해서 6 자유도 운동을 구현하는 사용자 정의 함수 (UDF)와 이동격자계(moving dynamic mesh)를 사용하였다. 구조물이 입수함에 따라 급격히 변화하는 구조물 주위의 유동장을 효율적으로 추정하기 위하여 이동 및 변형하는 비정형 격자를 구조물 주위에만 집중적으로 배치함에 의하여 유동장 전체의 격자계를 효율적으로 구성할 수 있다.

2.2 격자계 및 해석조건

전체 격자계는 3개의 구역으로 구성되었다. 첫째 구역은 구조물에 접한 경계층 구역으로 유동이 구조물에 수평 방향으로 발생하며 사각형의 정형(structured) 격자가 사용되었다. 둘째 구역은 경계층에 인접한 외곽구역으로 구조물이 입수함에 따라 유동장과 압력의 변화가 클 것으로 예상되는

구역으로 비정형(unstructured) 및 변형(deforming) 격자가 사용되었다. 격자의 변형은 격자의 길이와 왜곡도(skewness)의 값에 범위를 두고 그 범위를 벗어나는 경우에 재격자(remeshing) 방법에 의하여 격자의 질(quality)을 향상시켰다. 셋째 구역은 그 외 구역으로 사각형의 정형 격자가 사용되었다. Fig. 2는 선저경사각이 10°인 경우 격자계의 예를 보여준다. 구조물에 근접한 영역에 배치된 비정형 격자계 부분을 확대하여 보여주고 있다. 입수면에 매우 작은 격자가 사용되었기 때문에 전체 격자의 대부분이 이 영역에 존재한다.

Fig. 3에 도시된 바와 같이 구조물 하면의 중심선으로부터 바깥 방향으로 50mm(P1), 100mm(P2), 150mm(P3), 200mm(P4) 및

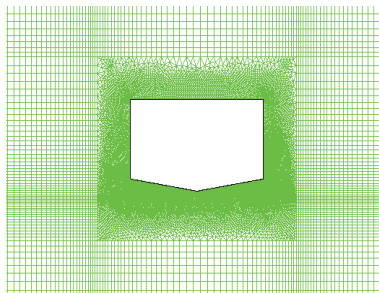


Fig. 2 Example of a computational grid (deadrise angle: 10°)

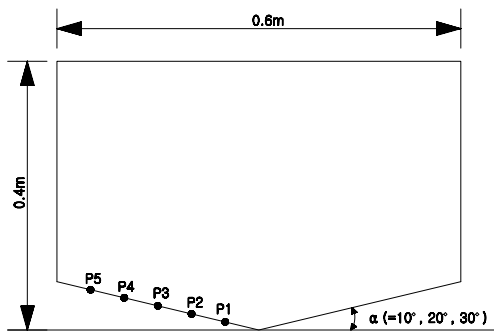


Fig. 3 2-D Wedge configuration and locations of pressure comparison

250mm(P5) 지점을 택하여 해당되는 격자 위치에서 평균 압력 값을 취함에 의하여 정해진 위치에서 압력의 시간변화와 충격력의 크기를 알 수 있으며, 향후 실험 결과와의 비교 검증이 용이하도록 하였다. Table 1에는 구조물의 선저경사각에 따른 수치해석 조건 즉, 입수 면에서의 격자의 크기, 총 격자수 및 계산 시간 간격 Δt 를 나타내었다. 선저경사각의 크기에 따라 서로 다른 크기의 격자를 사용한 이유는 슬래밍 충격력의 공간분포 형상이 다르게 나타나기 때문이다. Fig. 4에 도시된 바와 같이 어떤 정해진 시간에 슬래밍에 의한 충격력의 공간 분포를 고려하면, 충격력의 첨예한 정도를 나타내는 지표로 충격력 크기의 반에 해당하는 위치에서의 폭을 사용할 수 있다. 이 폭의 크기가 Fig. 4 에는 ΔS_s 로 표시되어 있다. Zhao et al.(1993)에 의하면 ΔS_s 가 다음의 식으로 표현될 수 있음을 알 수 있다.

$$\Delta S_s = c \cdot \frac{\pi V t}{2 \tan \alpha} \tag{4}$$

Table 1 Conditions of numerical simulation

| 선저경사각 | 10° | 20° | 30° |
|------------------|---------|--------|--------|
| 입수면 격자 크기(mm) | 0.5 | 2.0 | 2.0 |
| 총 격자수 | 183,386 | 20,902 | 22,008 |
| Δt (sec) | 5e-06 | 5e-05 | 1e-04 |

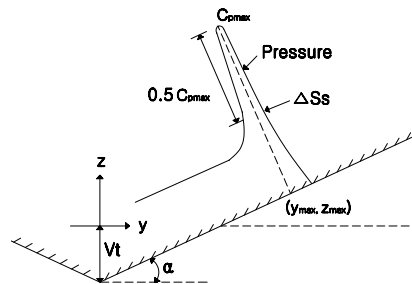


Fig. 4 Definitions of parameters characterizing slamming pressure of a two-dimensional wedge shaped body

여기서 c 는 선저경사각에 따라 정해지는 상수, V 는 입수속도, t 는 충격력이 발생할 때까지 경과한 시간, α 는 선저경사각이다. 이 식에 의하면 ΔS_s 는 선저경사각, 충격력이 발생할 때까지의 경과 시간 및 입수속도의 함수인 것을 알 수 있다. 충격력 추정 정도 향상을 위하여 충격력이 발생하는 입수면 격자 크기를 식 (4)를 이용하여 산출한 ΔS_s 값의 10%이하로 하였으며 그에 따라 Table 1의 입수면 격자 크기 및 총 격자수를 정하였다. 식(4)의 t 값으로는 보수적으로 P1 지점에 충격력이 발생하는 시간을 사용하였다. 선저경사각이 30°인 경우는 충격력의 크기가 작아지면서 ΔS_s 값이 정의가 안 되므로 선저경사각이 20°인 경우와 동일한 크기의 입수면 격자를 사용하였다.

비정상 수치 해석에 사용된 계산 시간 간격 Δt 는 모든 계산에 있어서 식 (5)의 조건을 만족하도록 선정되었다. 식(5)에서 요구하는 것보다 더 작은 시간 간격을 사용한 경우에 결과에 거의 영향이 없는 것으로 나타났으나 좀 더 체계적인 검증이 필요하다.

$$C = \frac{u_{max} \cdot \Delta t}{\Delta x_{cell}} \leq 0.25 \quad (5)$$

여기서, C 는 Courant 수, u_{max} 는 매 시간 최대 유속, Δt 는 계산 시간 간격, Δx_{cell} 은 매 시간 최소 격자 크기이다.

3. 해석 결과 및 비교

Fig. 5는 선저경사각이 10°인 뿔기형 구조물이 일정 속도로 입수할 때 유체장내 압력의 시간적 변화와 자유수면의 변형을 정성적으로 보여주고 있다.

Fig. 6 ~ Fig. 8은 선저경사각이 10°, 20° 및 30°의 경우 P1 ~ P5 위치에서 압력의 시간 변화를 보여주고 있다. 가로축은 시간 축으로 구조물이 자유수면에 접촉한 순간이 원점($t=0$)을 나타낸다. 또한, 각각의 그림에는 Dobrovol'skaya의 상사해(similarity solution), 점근해(asymptotic solution) 및 경계요소법에 의한 충격압력 결과가 일정한 값의 선들로 표시되어 있다. 수치해석 결

과로부터 구조물의 중심선에서 멀어질수록, 또는 구조물의 입수가 진행될수록, 충격압력의 값이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 현상은 뿔기형 구조물이 자유수면에 입수하기 시작하면 구조물과 자유수면 사이에는 제트류(jet flow)가 형성되기 시작하며 제트류가 정상화 될 때까지 일정한 시간이 소요됨을 의미한다. Fig. 9에 P1, P2 및 P3 지점에 충격력이 발생하는 시간에 제트류의 형상을 보여주고 있다. 시간의 경과에 따라 제트류가 성장하고 있음을 볼 수 있다. 경계요소법을 이용한 Zhao et al(1993)의 결과도 제트류가 정상화한 이후의 결과이다.

본 연구의 결과는 P3 지점 이후에 다른 3가지 방법에 의한 결과와 잘 일치함을 볼 수 있다. 실험적 또는 수치해석적인 방법으로 슬래밍 문제를 다룬 다수의 연구논문에서 Wagner 방법 또는 점근법에 의한 해석해가 충격압을 과대 추정하고 있다고 서술하고 있으나, 본 연구결과에 의하면 Wagner 방법 또는 점근법은 선저경사각이 과도하게 크지 않은 가정 하에 슬래밍 충격압을 비교적 잘 추정하고 있는 것으로 평가할 수 있다.

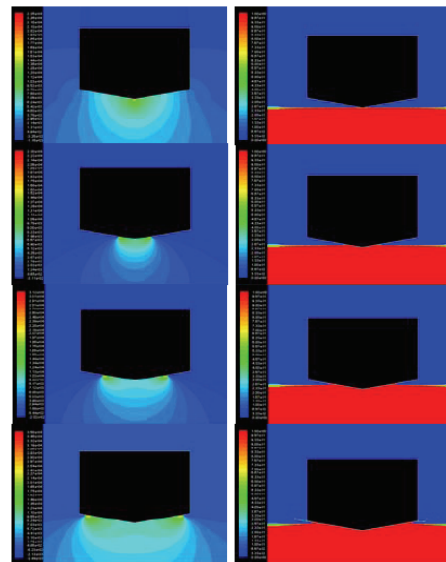


Fig. 5 Pressure changes and free surface deformation during entry of a wedge with 10 degree deadrise angle

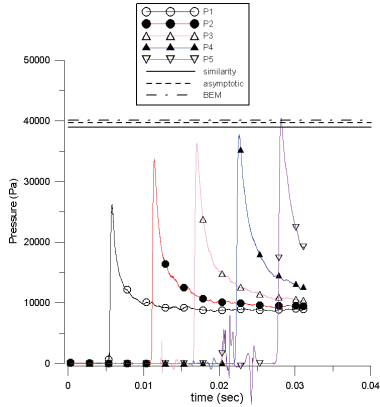


Fig. 6 Pressure time histories at P1~P5 (deadrise angle = 10°)

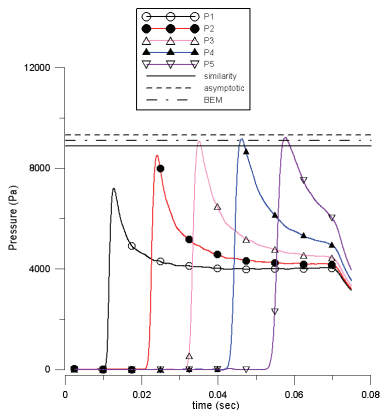


Fig. 7 Pressure time histories at P1~P5 (deadrise angle = 20°)

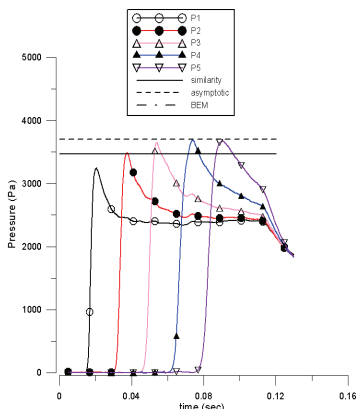


Fig. 8 Pressure time histories at P1~P5 (deadrise angle = 30°)

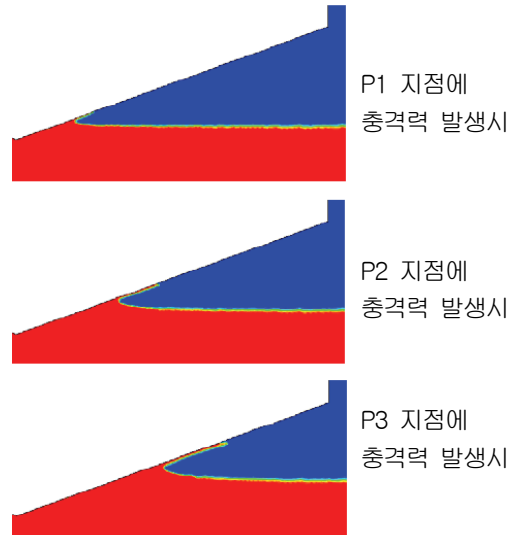


Fig. 9 Development of jet flow between body and free surface (deadrise angle: 20°)

Fig. 10 ~ Fig. 12는 각각의 선저경사각에 대하여 P1 ~ P5 위치에 충격압이 작용 할 때 구조물의 하면에 작용하는 압력의 공간 분포를 보여주고 있다. 입수 후 시간이 경과 할수록, 또한 선저경사각이 증가할수록 충격력의 공간분포가 완만해지고 그에 따라 Fig. 4와 식(4)에서 정의된 ΔS_s 의 값이 커짐을 알 수 있다.

입수면에서의 위치와 선저경사각의 크기에 따라서 격자의 크기를 다르게 해야 함을 본 결과로부터 알 수 있다. 시간분포의 경우와 마찬가지로 최대 충격압이 P3 위치에 발생한 이후에 충격압의 크기가 일정한 값에 수렴함을 볼 수 있다. 상사해, 점근해 및 경계요소법에 의한 충격압력 결과와 좋은 일치를 보여주고 있다.

Fig. 13 ~ Fig. 15는 선저경사각이 10°일 때 P1 ~ P5 위치에 작용하는 충격압 계수, 충격압이 작용하는 수직 위치 및 구조물에 작용하는 항력계수 즉, 구조물 하면에 작용하는 압력의 적분 값을 보여주고 있다. 충격압 계수, 무차원된 수직 위치 및 항력 계수의 정의는 다음과 같다. Fig. 4에 충격압 계수와 충격압의 위치에 대한 도식적 설명을 포함하였다.

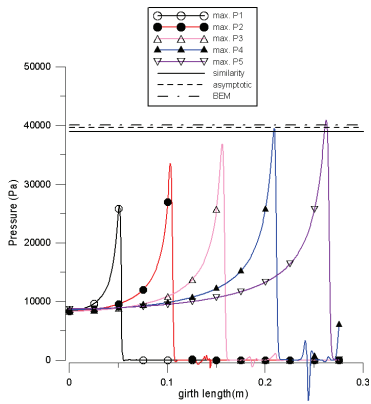


Fig. 10 Girthwise pressure dist. with impacts at P1~P5 (deadrise angle = 10°)

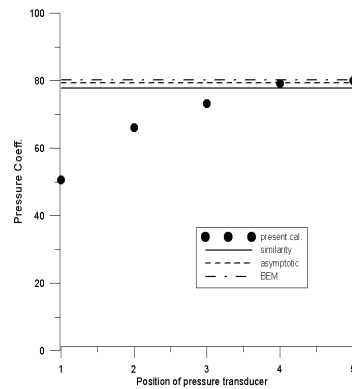


Fig. 13 Impact pressure coeff. at P1~P5 (deadrise angle = 10°)

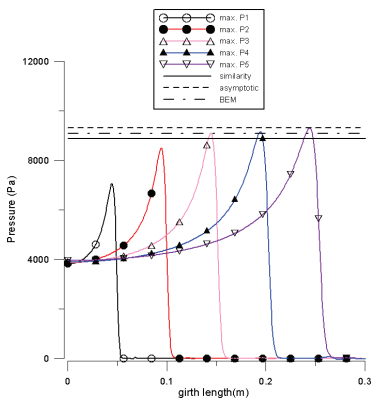


Fig. 11 Girthwise pressure dist. with impacts at P1~P5 (deadrise angle = 20°)

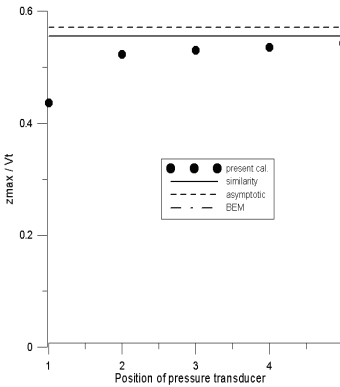


Fig. 14 Non-dimensionalized vertical locations of impact pressure with impacts at P1~P5 (deadrise angle = 10°)

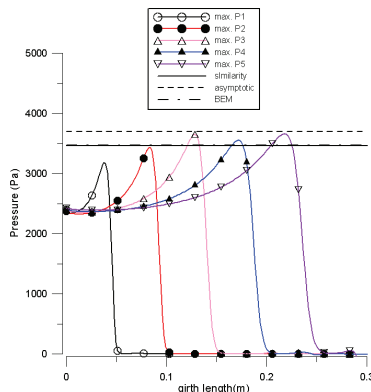


Fig. 12 Girthwise pressure dist. with impacts at P1~P5 (deadrise angle = 30°)

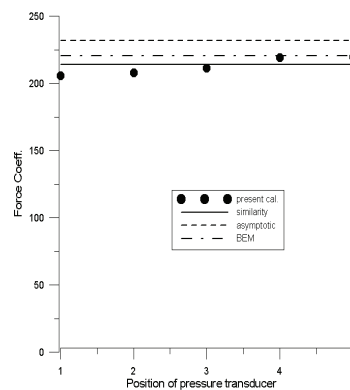


Fig. 15 Total drag force coeff. with impacts at P1~P5 (deadrise angle = 10°)

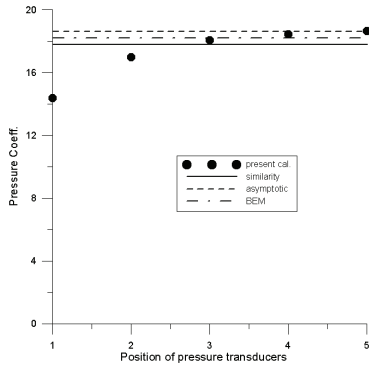


Fig. 16 Impact pressure coeff. at P1~P5 (deadrise angle : 20°)

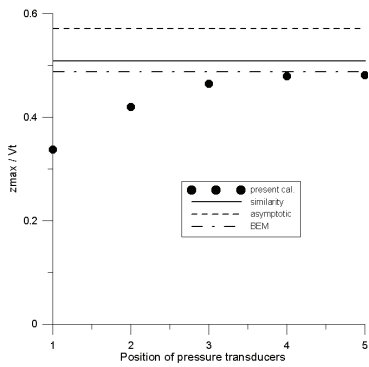


Fig. 17 Non-dimensionalized vertical locations of impact pressures with impacts at P1~P5 (deadrise angle : 20°)

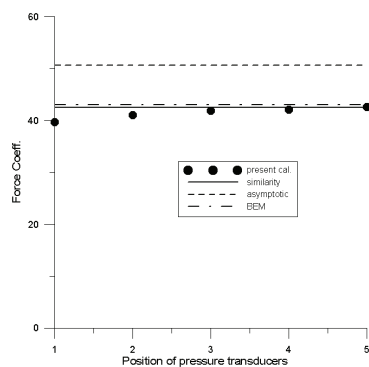


Fig. 18 Total drag force coeff. with impacts at P1~P5 (deadrise angle : 20°)

$$\text{충격압 계수} : C_{P_{\max}} = \frac{P_{\max}}{\frac{1}{2} \rho V^2}$$

$$\text{무차원 충격압 위치} : C_{Z_{\max}} = \frac{Z_{\max}}{Vt}$$

$$\text{항력 계수} : C_{F_z} = \frac{F_z}{\rho V^3 t}$$

여기서, P_{\max} 는 충격압, V 는 입수 속도, Z_{\max} 는 충격압이 작용하는 지점의 z-방향 좌표, F_z 는 구조물 하부에 작용하는 압력의 적분값 즉, 항력을 나타낸다. 충격압 계수, 충격압이 작용하는 수직 위치 및 구조물에 작용하는 항력 계수 공히 정상 수렴치의 경우 다른 이론의 결과들과 잘 일치하고 있다. Fig. 14와 Fig. 15로부터 점근법에 의한 결과가 충격압이 발생하는 수직 위치와 항력 계수에 있어서 상대적으로 큰 값을 주고 있음을 알 수 있다. 즉, 점근법은 선저경사각이 매우 작다는 가정 하에 개발된 이론이므로 선저경사각이 커짐에 따라 타 이론에 비해 정확도가 떨어짐을 알 수 있다.

Fig. 16 ~ Fig. 18는 선저경사각이 20°일 때 P1 ~ P5 위치에 작용하는 충격압 계수, 충격압이 작용하는 수직 위치 및 구조물에 작용하는 항력계수를 보여주고 있다. 선저경사각이 10°의 경우와 마찬가지로 본 연구의 결과가 타 이론의 결과와 잘 일치함을 보여 주고 있다. Fig. 17과 Fig. 18로부터 선저경사각이 커 질수록 점근법에 의한 결과와 타 이론 결과의 차이가 커짐을 확인할 수 있다.

Table 2에는 각각의 선저경사각에 대하여 제트류가 정상화한 이후 일정한 값에 수렴한 충격압 계수, 충격압이 작용하는 수직 위치 및 구조물에 작용하는 항력계수를 정리하였다. 또한, 상사해, 점근해 및 경계요소법에 의한 결과와 비교하였다. 전반적으로 매우 좋은 일치를 보여 주고 있으며,PLIC-VOF scheme을 사용한 본 연구의 결과가 슬래밍 충격 해석에 유용하게 이용될 수 있음을 보여주고 있다.

Table 2 Estimation of slamming parameters by present study, similarity solution, asymptotic method and boundary element method during water entry of a wedge

| Deadrise angle(deg) | Items | Present results | Similarity solution | Asymptotic solution | BEM |
|---------------------|---------------|-----------------|---------------------|---------------------|-------|
| 10 | $C_{P_{max}}$ | 80.059 | 77.847 | 79.36 | 80.2 |
| | Z_{max}/Vt | 0.5428 | 0.5556 | 0.5708 | 0.555 |
| | C_{F_z} | 219.55 | 213.98 | 231.97 | 220.8 |
| 20 | $C_{P_{max}}$ | 18.995 | 17.774 | 18.639 | 18.2 |
| | Z_{max}/Vt | 0.4874 | 0.5087 | 0.5708 | 0.488 |
| | C_{F_z} | 42.5 | 42.49 | 50.64 | 43.0 |
| 30 | $C_{P_{max}}$ | 7.384 | 6.927 | 7.40 | 6.94 |
| | Z_{max}/Vt | 0.4198 | 0.4243 | 0.5708 | 0.4 |
| | C_{F_z} | 13.98 | 14.604 | 18.747 | 13.9 |

4. 결론

본 연구에서는 유한한 선저경사각을 가진 2차원 뿔기형 구조물의 입수 시 발생하는 슬래밍 현상에 대하여 RANS 방정식과 PLIC-VOF법을 이용한 수치해석을 수행하고 상사해, 점근해 및 경계요소법 결과와 체계적인 비교를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) PLIC-VOF scheme에 의한 슬래밍 해석 결과 상사해, 점근해 및 경계요소법의 결과와 슬래밍 충격력, 충격력 발생 위치 및 항력 결과에 있어 잘 일치하는 결과를 얻었다.
- 2) 선저경사각이 과도하지 크지 않은 경우에 Wagner 해 또는 점근해는 슬래밍 충격력을 비교적 정도 있게 추정한다.
- 3) 뿔기형 구조물의 입수시 구조물과 자유수면 경계에 발생하는 제트류가 정상화하기까지 시간이 경과함을 확인하였으며, 그에 따라서 충격력의 크기도 점차 증가하여 일정한 값에 수렴한다. 다른 이론 및 실험 결과와의 비교 검증 시 이러한 현상에 대한 신중한 고려가 필요하다.
- 4) 뿔기형 구조물이 입수 후 시간이 경과할 수록, 또한, 선저경사각이 커질수록, 충격력의 공간 분포가 완만해지고 ΔS_s 의 값이 커짐을 알 수 있다. 수치 해석 시 구조물 하부의 격자 크기를 선

정할 때 또는 실험에 있어서 압력계의 크기를 선정할 때 충격압의 정도 높은 추정을 위해서는 엄밀한 검토가 필요하다.

5) 본 연구결과를 바탕으로 향후에는 입수면에서의 격자 크기와 계산 시간 간격 등의 체계적 변화에 따른 충격력의 변화, 실험과의 비교 연구 및 실제 선박의 선수미에 발생하는 슬래밍 충격력의 정도 높은 추정 등에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 울산대학교 조선해양공학부 세계일류화 프로그램인 'SOTOP'의 일환으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- Armand, J.L. and Cointe, R., 1986, "Hydrodynamic Impact Analysis of a Cylinder," Proc. of 5th OMAE Symp., Tokyo, Japan, Vol. 1, pp. 609-634.
- Chuang, S.L., 1966, "Experimental on Flat-bottom Slamming," Journal of Ship Research, Vol. 10, No. 1, pp. 10-17.

- Chuang, S.L., 1967, "Experimental on Slamming of Wedge-shaped Bodies," Journal of Ship Research, Vol. 11, No. 3, pp. 190-198.
- Chung, J.Y., Nahm, J.O., Kang, H.D. and Kwon, S.H., 2007, "A Novel Experimental Technique in Slamming," Proc. 22nd Int. Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Croatia, pp. 41-44.
- Dobrovol'skaya, Z.N., 1969, "On Some Problems of Similarity Flow of Fluid with a Free Surface," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 36, part 4, pp. 805-829.
- Faltinsen, O and Chezhian, M., 2005, "A Generalized Wagner Method for Three-dimensional slamming," Journal of Ship Research, Vol. 49, No. 4, pp. 279-287.
- Faltinsen, O. and Zhao, R., 1997, "Water Entry of Ship Sections and Axisymmetric Bodies," Proc., Advisory Group for Aerospace Research and Development(NATO), High Speed Body Motion in Water, Sept., Kiev, Ukraine.
- FLUENT 2006, Ver.6.3.26 User Manual.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D., 1981, "Volume of Fluid(VOF) Method for Dynamics of Free Boundaries," Journal of Computational Physics, Vol. 39, pp. 201-225.
- Howison, S.D., Ockendon, J.R. and Wilson, S.K., 1991, "Incompressible Water-entry Problems at Small Deadrise Angles," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 222, pp. 215-230.
- Lee, B.Y., Park, J.C., Jung, S.J., Ryu, M.C. and Kim, Y.S., 2008, "Numerical Simulation for Fluid Impact Loads by Flat Plate with Incident Angles," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 45, No. 1, pp. 1-9.
- Lee, H.S., Kwon, S.H., Song, K.J., Jung, B.H. and Kim, Y.B., 2005, "An Experimental and Numerical Study on Slamming Impact," Proc. of Annual Autumn Meeting, Society of Naval Architects of Korea, Yongin, pp. 1080-1084.
- von Karman, T., 1929, "The Impact of Seaplane Floats during Landing," N.A.C.A. TN321, Washington.
- Wagner, V.H., 1932, "Über Stoss und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten," Aeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, Vol. 12, pp. 193-215.
- Yang, S.H., Lee, H.H., Park, T.H., Lee, I.H and Lee, Y.W., 2007, "Experimental and Numerical Study on the Water Entry of Symmetric Wedges and a Stern Section of Modern Containership," Proc. of Practical Design of Ships and Offshore Structures Symp.
- Yoon, B.S., 1991, "Lagrangian Finite Element Analysis of Water Impact Problem," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 28, No. 1, pp. 60-68.
- Youngs, D.L., 1982, "Time-dependent multi-material Flow with Large Fluid Distortion," Numerical Methods for Fluid Dynamics, Academic Press.
- Zhao, R. and Faltinsen, O., 1993, "Water Entry of Two-dimensional Bodies," Journal of Fluid Mechanics, vol. 246, pp. 593-612.
- Zhao, R., Faltinsen, O. and Aarsnes, J., 1996, "Water Entry of Arbitrary Two-dimensional Sections with and without Flow Separation," Proc. of 21st Symp. on Naval Hydrodynamics, Trondheim, Norway, National Academy Press, Washington, D.C.



< 염 덕 준 >



< 윤 범 상 >