Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 12, No. 8 pp. 3374-3383, 2011

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.8.3374

2차원 쐐기형 구조물 입수 시 발생하는 유체 충격 현상에 대한 수치 실험적 연구

염덕준[1], 두 훈[2], 김영철[2*]
[1]군산대학교 조선공학과, [2]군산대학교 기계자동차공학부

Numerical Experimentations on Flow Impact Phenomena for 2-D Wedge Entry Problem

Duek-Joon Yum[1], Hun Du[2] and Young-Chul Kim[2*]
[1]**Department of Naval Architecture, Kunsan National University**
[2]**School of Mechanical & Automative Engineering, Kunsan National University**

요 약 본 연구는 유한한 크기의 선저경사각을 갖는 2차원 쐐기형 구조물의 슬래밍 충격 현상을 수치 해석하였다. 비압축성 유체를 가정하였으며, 구조물의 입수 속도는 일정하게 유지하였다. 자유수면의 대 변형 및 동적 거동의 해석을 위해서 Geo-reconstruct(or PLIC-VOF) scheme을 사용하였다. 선저경사각이 10°, 20° 및 30°인 경우에 대해서 해석을 수행하였으며, 각각의 선저경사각에 대하여 입수면의 격자 크기 및 입수 속도를 변화시켜 슬래밍 충격력 수치해석 결과에 미치는 영향을 조사하였다. 수치해석 결과는 Dobrovol'skaya(1969)의 상사해(similarity solution), Wagner 방법에 기초한 점근해(asymptotic solution) 및 경계요소법(Zhao et al.(1993))에 의한 해석 결과와 비교하였다.

Abstract In this study, numerical analyses for slamming impact phenomena have been carried out using a 2-dimensional wedge shaped structure having finite deadrise angles. Fluid is assumed incompressible and entry speed of the structure is kept constant. Geo-reconstruct(or PLIC-VOF) scheme is used for the tracking of the deforming free surface. Numerical analyses are carried out for the deadrise angles of 10°, 20° and 30°. For each deadrise angle, variations are made for the grid size on the wedge bottom and for the entry speed. The magnitude and the location of impact pressure and the total drag force, which is the summation of pressure distributed at the bottom of the structure, are analyzed. Results of the analyses are compared with the results of the Dobrovol'skaya similarity solutions, the asymptotic solution based on the Wagner method and the solution of Boundary Element Method(BEM).

Key Words : 2-D Wedge, Slamming, Numerical Analysis, Finite Volume Method, Impact Pressure

1. 서론

최근 선박의 대형화 및 고속화에 따라 선박의 선저 및 선수부에 파도 또는 유체에 의한 충격현상 즉 슬래밍(slamming)이라고 불리는 현상이 자주 발생하고 있다. 또한 강한 풍파에 의하여 대파고 파랑 중에서 운항하는 선박의 경우에는 선체에 작용하는 충격력이 매우 크게 발생하며, 선박이 파도를 선수에서 받으면서 항주하면 선저 및 선수부는 더욱 더 강한 슬래밍 충격력을 받게 되고 결과적으로 선수미 외판 또는 구조부재에 충격하중으로 인한 손상이 발생하게 된다. 따라서 선박이 대형화, 고속화가 진행됨에 따라서 슬래밍에 의한 충격압력을 고려한 구조설계의 중요성이 대두되고 있다[1].

슬래밍 현상에 의하여 발생하는 충격압력을 정확히 추정하기 위한 이론적, 실험적 및 수치적인 연구가 von Karman(1929)과 Wagner(1932)의 선구적인 연구를 시작

본 논문은 군산대학교 신임교수 연구비와 교육과학기술부 한국연구재단의 연구비 지원(NRF-2010-0026391)을 받아 수행된 연구임.
*교신저자 : 김영철(kimyc@kunsan.ac.kr)
접수일 11년 05월 30일 수정일 11년 08월 03일 게재확정일 11년 08월 11일

으로 최근까지 지속적으로 수행되고 있다[2,3]. Armand and Coint(1986), Howison et al.(1991)은 선저경사각이 작은 경우 점근법(method of matched asymptotic expansion)을 이용하여 Wagner의 이론을 더욱 발전시켰다[4,5]. Dobrovol'skaya(1969)는 2차원 쐐기 형상의 구조물이 정속으로 입수 시 발행하는 유체 현상에 대하여 처음으로 완전한 상사해(similarity solution)를 제시하였다[6]. Zhao and Faltinsen(1993)은 경계요소법(boundary element method)을 이용하여 2차원 구조물의 슬래밍 문제에 대한 비선형, 시간영역해를 제시하였고, Zhao et al.(1996), Faltisen and Zhao(1997) 및 Faltinsen and Chezhian(2005)등의 연구를 통하여 임의의 2차원 및 3차원 구조물에 대한 슬래밍 해석 방법이 개발되어 왔다[7-10]. 실험적 연구로서는 구조물을 직접 수면에 투사하여 충격에 대한 특성을 알아보는 연구가 이루어졌고 이에 대한 것으로 Lee et al.(2005), Chung et al.(2007), Yang et al.(2007) 등이 있다[11-13]. 또한 최근 들어서 선박 해양 유체의 모든 분야에 전산유체역학에 의한 수치해석이 광범위하게 사용됨에 따라 유체 충격력 문제의 해석에도 전산유체 역학을 이용한 많은 연구가 수행되고 있다.

본 연구에서는 유한한 크기의 선저경사각(deadrise angle)을 갖는 2차원 쐐기형 구조물이 정속으로 입사할 때 발생하는 슬래밍에 의한 충격현상을 RANS 방정식을 기반으로 한 수치해석 프로그램인 FLUENT를 사용하여 수치해석을 수행하였다[14]. 특히, 본 연구에서는 10°, 20° 및 30°인 3가지 선저경사각에 대하여 선저경사각 10°인 경우 입수면 격자크기를 0.25mm, 0.5mm 및 1mm 로 3가지, 선저경사각 20° 및 30°인 경우 1mm, 2mm 및 3mm 로 3가지로 변화시키면서 해석을 수행하여 선저경사각 및 입수면 격자크기의 변화에 따른 충격력의 변화를 분석하였다. 또한, 선저경사각이 10°인 경우에는 3가지 입수속도를 사용하여 입수속도의 변화가 충격력에 미치는 영향을 알아 보았다.

해석시 자유수면의 대 변형 및 동적 해석을 위해 VOF(Volume of Fluid) 모델에 사용하는 해석법 중 자유수면 형상 추적에 정확성이 높게 평가되는 PLIC-VOF scheme을 사용하였으며, 일정한 속도로 낙하하는 구조물과 구조물 주위 비정형 격자계의 이동 및 변형을 표현하는 6자유도 운동을 구현하는 사용자 정의 함수(User Defined Function ;UDF)와 이동격자계(moving dynamic mesh)를 사용하였다.

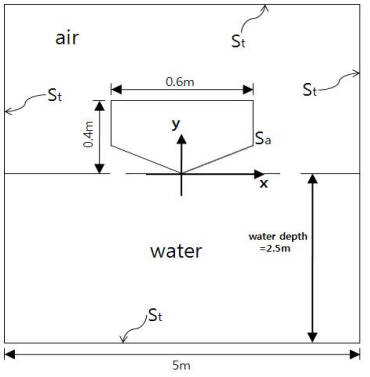
수치해석 결과는 Dobrovol'skaya(1969)의 상사해(similarity solution)와 Wagner 방법에 기초한 점근해(asymptotic solution) 및 경계요소법(BEM, Zhao et al.(1993))에 의한 수치해와 비교하여 봄으로서 본 연구결과의 타당성을 검토하였다[6,7].

2. 수치해석

유한한 크기의 선저경사각을 갖는 2차원 쐐기형 구조물은 교란되지 않은 자유수면에 일정한 속도를 유지하면서 수직 방향으로 입수한다. 그림 1과 같이 좌표계의 원점이 교란되지 않은 자유수면에 위치한다. 자유수면을 x-축, 구조물의 대칭축을 y-축으로 하고, y-축 위쪽 방향을 양의 방향으로 정의한다. 또한 구조물이 수면에 돌입하는 순간을 $t=0$ 로 한다.

수치해석에 사용되는 2차원 쐐기형 구조물은 폭 0.6m, 깊이 0.4m이며, 입수부의 선저경사각은 10°, 20° 및 30°의 3가지 경사를 사용하였다. 쐐기형 구조물은 일정한 속도(V)로 자유수면에 수직 하방으로 입수한다. 수치해석 영역은 다음과 같다.

$$-2.5\text{m} \le x \le 2.5\text{m}, \quad -2.5\text{m} \le y \le 2.5\text{m} \tag{1}$$



[그림 1] 좌표계 및 수치해석 영역
[Fig. 1] Coordinate system and computational domain

2.1 지배방정식과 경계조건

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

$$\nabla \cdot V = 0 \tag{2}$$

$$\frac{DV}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu \nabla^2 V + \vec{F} \tag{3}$$

여기서, ρ는 유체의 밀도, t는 시간, V 는 속도벡터, ∇은 구배 연산자, P는 압력, ν는 동점성계수, $\vec{F}$는 body force 를 나타낸다.

RANS(Reynolds-Average Navier-Stokes) 방정식과 연속방정식으로부터 전체 유체 영역에 있어서의 유속과 압력장의 해석을 위하여 압력-속도 연성은 PISO algorithm을 사용하고, 비정상 해석에 대해서는 수치해의 안정성을 위하여 1차 음해법을 사용한다. 운동방정식의 대류항에 대해서는 2차 풍상차분법(upwind differencing scheme)을 사용하고, 확산항에 대해서는 중심차분법(central differencing scheme)을 사용한다. 유체는 비압축성을 가정하는데, 이는 구조물의 충격 속도가 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 많은 연구가 포텐셜이론을 사용하였으나 본 연구에서는 층류 유동으로 가정하고, 쐐기형 구조물의 선저경사각이 충분히 커서 구조물이 자유수면에 입수로 인하여 생성되는 구조물과 자유수면 사이의 밀폐된 공기층(air pocket)이 형성되지 않음을 가정한다.

유체영역을 둘러싸고 있는 경계는 외부 탱크 경계 St와 쐐기형 구조물의 외부 경계 Sa 로 구성되어 있는데, 외부 탱크 경계 St는 고정된 벽조건(fixed wall condition)이 부과되어 있으며, 구조물의 외부 경계 Sa는 일정한 속도로 낙하한다.

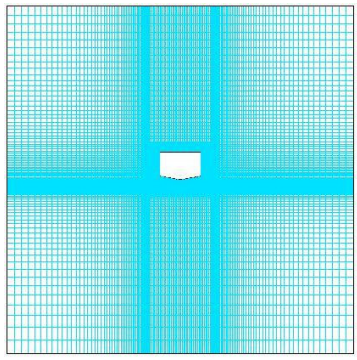
자유수면의 대 변형 및 동적 거동의 해석을 위해서는 다상유동 모델(multi-phase flow model) 중에서 비정상 유동 해석에 사용되는 explicit VOF(volme of fluid) 모델을 사용한다. VOF 모델은 Hirt and Nichols(1981)가 Donor-Acceptor 법을 제안한 이래 지속적인 개선이 이루어졌다[15].

본 연구에서는 두 유체 사이의 접촉면을 구분 선형법(piecewise-linear approach)에 의하여 표현하는 Geo-reconstruct(or PLIC-VOF) scheme을 사용한다. 본 방법은 VOF 모델에 사용하는 기법 중에서 자유수면 형상의 추적에 비교적 정도가 높은 기법으로 평가되고 있으며, 비정형격자계에 대하여 적용이 가능하다[17].

일정한 속도로 낙하하는 구조물과 구조물 주위 비정형 격자계의 이동 및 변형을 표현하기 위해서 6자유도 운동을 구현하는 사용자 정의 함수(UDF)와 이동격자계(moving dynamic mesh)를 사용한다. 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[18].

2.2 해석조건

전체 격자계는 그림 2와 같이 정형격자와 비정형 및 변형 격자, 그리고 사각형 정형 격자로 3개의 구역으로 구성된다.



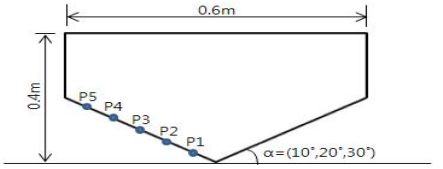
[그림 2] 수치해석 격자(선저경사각 : 10°)
[Fig. 2] Example of a computational grid (deadrise angle: 10°)

첫째 구역은 구조물에 접한 경계층 구역으로 유동이 구조물에 수평 방향으로 발생하며 사각형의 정형(structured)격자가 사용된다.

둘째 구역은 본 연구에서 중요한 구역으로, 경계층에 인접한 외곽구역으로 구조물이 입수함에 따라 유동장과 압력의 변화가 클 것으로 예상되는 구역으로 비정형(unstructured) 및 변형(deforming) 격자가 사용된다. 격자의 변형은 격자의 길이와 왜곡도(skewness)의 값에 범위를 두고 그 범위를 벗어나는 경우에 재격자(remeshing) 방법으로 격자의 질(quality)을 높였다.

셋째 구역은 첫째 구역과 둘째 구역을 제외한 구역으로 사각형의 정형 격자를 사용한다.

구조물의 쐐기 부분에는 중심선에서 바깥 방향으로 5개의 지점이 있다. 쐐기경사면을 따라 P1은 중심에서 50mm, P2는 100mm, P3은 150mm, P4는 200mm, P5는 250mm 거리에 있는 지점이다. 이 지점들은 해당되는 격자 위치에서 평균 압력 값을 얻어 정해진 위치에서 압력의 시간변화와 충격력의 크기를 알 수 있다. 이후 실험결과와의 비교 검증이 용이하도록 하였다. 그림 3은 각 지점이 위치를 도식적으로 나타내었다.



[그림 3] 2차원 쐐기 형상과 압력 비교 위치
[Fig. 3] 2-D Wedge configuration and locations of pressure comparison

[표 1] 수치해석 조건 (선저경사각: 10°)
[Table 1] Conditions of numerical simulation(deadrise angle: 10°)

선저경사각	10°	
입수면 격자 크기(mm)	총 격자수	Δt(sec)
0.25	870,232	2e-06
0.5	277,100	5e-06
1	71,016	2e-05

[표 2] 수치해석 조건 (선저경사각: 20°)
[Table 2] Conditions of numerical simulation(deadrise angle: 20°)

선저경사각	20°	
입수면 격자 크기(mm)	총 격자수	Δt(sec)
1	83,012	5e-05
2	42,346	5e-05
3	23,552	5e-05

[표 3] 수치해석 조건 (선저경사각: 30°)
[Table 3] Conditions of numerical simulation(deadrise angle: 30°)

선저경사각	30°	
입수면 격자 크기(mm)	총 격자수	Δt(sec)
1	92,212	5e-05
2	46,536	1e-04
3	24,782	1e-04

[표 4] 수치해석 조건 (낙하속도 변화)
[Table 4] Conditions of numerical simulation (variation of dropping velocity)

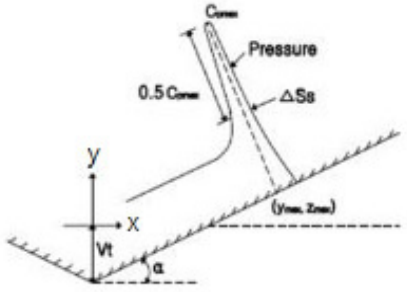
선저경사각	10°		
입수면격자 크기(mm)	0.5		
입수 속도(m/s)	0.5	1.0	1.5
Δt(sec)	8.57 e-06	5e-06	3.34 e-06

표 1 ~ 표 3은 구조물의 선저경사각 10°, 20°, 30°의 수치해석 조건을 보여주고 있다. 입수면의 격자 크기는 선저경사각에 따라 변화시켰으며 선저경사각이 10°인 경우에는 0.25mm, 0.5mm 및 1mm의 3가지, 20°와 30°인 경우 1mm, 2mm 및 3mm의 3가지 경우를 선택하여 선저경사각 및 입수면 격자크기의 변화에 따른 충격력의 변화를 수치실험적(numerical experi- ment)으로 검토하였다.

입수 속도의 경우 대부분의 해석에서 1.0m/s의 표준 입수속도를 사용하였다. 표 4는 선저경사각이 10°이고 입수면 격자 크기 0.5mm의 경우에는 표준 입수속도 외에 0.5m/s와 1.5m/s를 추가하여 속도 변화에 따른 충격력 변화를 검토하였다.

그림 4은 임의의 시간에 있어서의 충격력의 공간분포를 나타내고 있다. 충격력의 공간분포 파라메터인 $\triangle Ss$는 충격력의 첨예한 정도를 나타내는 지표로 그 크기는 충격력 크기의 반에 해당하는 위치에서의 공간상의 폭으로 확인할 수 있다. Zhao et al.(1993)에 의하면 $\triangle Ss$가 아래의 식으로 표현할 수 있다[7].

$$\frac{\triangle S_S}{c} = \frac{\pi Vt}{2\tan\alpha} \tag{4}$$



[그림 4] 2차원 쐐기 형상의 슬래밍 압력 분포 특성 정의
[Fig. 4] Definitions of parameters characterizing slamming pressure of a 2-D wedge shaped body

식 (4)에서 c는 선저경사각에 따라 정해지는 상수, V는 입수속도, t는 충격력이 발생할 때까지 경과한 시간, α는 선저경사각이다. 이 식으로부터 $\triangle Ss$는 선저경사각과 충격력이 발생할 때까지의 경과 시간 및 입수속도의 함수인 것을 알 수 있다. 슬래밍 수치해석에 있어서 충격력을 정도높게 추정하기 위하여 입수면 격자크기가 공간분포 파라메터인 $\triangle Ss$의 10% 이하가 되는 것이 바람직하다.

표 1 ~ 표 4에 나와 있는 계산 시간 간격은 비정상 자유수면 수치 해석의 안정성을 확보하기 위하여 하기 식에 보여지는 바와 같이 Courant 수가 0.25 이하인 조건을 만족하도록 결정되었다.

$$C = \frac{u_{\max} \cdot \triangle t}{\triangle x_{cell}} \leq 0.25 \tag{5}$$

식 (5)에서 C는 Courant 수, $u_{\max}$는 매 시간 최대 유속, $\triangle t$는 계산 시간 간격, $\triangle x_{cell}$은 매 시간 최소 격자 크기를 나타낸다.

3. 수치 해석 결과

그림 5는 선저경사각 10° 인 경우 P1 ~ P5 위치에서 슬래밍 압력의 시간 변화를 입수면의 격자 크기별로 보여주고 있다. 가로축은 시간 축으로 구조물이 자유수면에 접촉한 순간이 원점(t=0)을 나타내고, 세로축은 압력 축으로 미리 지정한 지점에서 받는 압력을 나타내고 있다. 또한 각각의 그림에는 상사해(similarity solution), 점근해(asymptotic solution) 및 경계요소법(BEM)에 의한 수치해의 결과가 일정한 값의 선으로 표시되어 있다.

수치해석 결과로부터 구조물의 입수가 진행될수록, 충격압력의 값이 증가함을 볼 수 있다. 이러한 결과는 쐐기형 구조물이 자유수면에 입수를 시작하면 구조물과 자유수면 사이에는 제트류(jet flow)가 형성되기 시작하며 제트류가 정상화 될 때까지 일정 시간이 진행되어야 한다는 것을 의미한다.

입수면 격자 크기가 0.25mm인 경우와 0.5mm인 경우 충격력의 증가가 거의 유사하게 나타나고, P5위치에서의 충격력이 3가지 이론 해석 결과에 수렴하는 경향을 보이고 있으나 입수면 격자의 크기가 1mm이상 크면 클수록 이론 결과와의 차이가 커짐을 알 수 있다. 따라서 경사각이 10°인 경우에는 입수면 격자의 크기를 0.5mm 이하로 해야 제트류가 정상화함에 따라 충격력을 정확하게 추정할 수 있다는 것을 보여준다.

그림 6은 선저경사각이 20°인 경우 P1 ~ P5 위치에서 시간의 변화에 따라 변하는 압력을 입수면의 격자 크기별로 보여주고 있다. 입수면 격자 크기가 3mm인 정도만 되어도 타 이론 결과들에 수렴하는 것을 알 수 있으며 슬래밍 충격압을 정확하게 추정할 수 있다는 것을 보여준다. 선저경사각이 20°인 경우에는 선저경사각이 10°인 경우에 비해서 식 (4)에 의하여 구해지는 충격압의 공간분포 $\triangle S_s$ 가 커서 입수면 격자의 크기를 3mm 정도까지 크게 할 수 있다는 것을 보여주고 있다.

그림 7은 선저경사각이 30°인 경우 P1~P5 위치에서 시간의 변화에 따라 변하는 압력을 입수면의 격자 크기별로 보여주고 있다. 입수면 격자의 크기 4mm 정도에서 충분히 정확한 충격압 결과를 보여주고 있다. 선저경사각이 20°인 경우보다 충격압 공간분포 $\triangle S_s$의 값이 커지고 그에 따라 허용되는 입수면 격자의 크기도 커지고 있다. 실험적 또는 수치해석적인 방법으로 슬래밍 문제를 다룬 다수의 논문에서 Wagner 방법 또는 점근법에 의한 결과가 충격압을 과대 추정하고 있다고 서술하고 있으나, 본 연구결과에 의하면 Wagner 방법 또는 점근법의 결과는 선저경사각이 과하게 크지 않는다는 가정 하에 슬래밍 충격압을 비교적 잘 추정하고 있는 것으로 평가할 수 있다.

그림 8은 선저경사각 10°, 20° 및 30°일 때, P1~P5 위치에 작용하는 최대 충격압을 무차원화한 충격압 계수(Impact pressure coefficient)를 나타낸다. 선저경사각이 10°인 경우에는 입수면 격자 0.5mm 이하일 때와 선저경사각이 20° 및 30°인 경우에는 격자 크기가 3mm 이하인 경우 타 이론 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

충격압 계수는 다음의 식으로 정의되며 그림 4에 충격압 계수와 충격압의 위치에 대한 도식적인 설명을 보여주고 있다.

$$C_{Pmax} = \frac{P_{\max}}{0.5\rho V^2} \tag{6}$$

$P_{\max}$는 충격압, V 는 입수 속도를 나타낸다.

그림 9는 선저경사각이 10°, 20° 및 30°인 경우에 측정지점인 P1~P5 에 충격압이 작용할 때 구조물에 작용하는 항력계수 즉, 구조물 하면에 작용하는 압력의 적분 값을 무차원화한 결과를 나타낸다.

항력계수는 다음과 같이 정의된다.

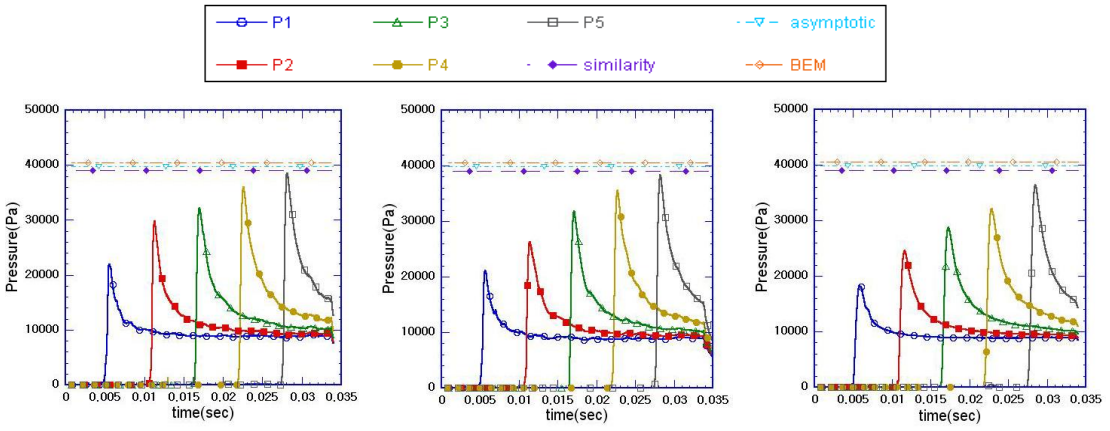
$$C_{Fy} = \frac{F_y}{\rho V^3 t} \tag{7}$$

V 는 입수 속도, t 는 시간, F_y 는 구조물 하부에 작용하는 압력의 적분값 즉, 항력을 나타낸다.

선저경사각 10° 인 경우 충격력의 크기는 입수면 격자의 크기에 따라 매우 큰 차이를 보이지만 입수면 전체에 대한 적분값인 항력의 경우는 격자의 크기가 1mm 정도에서도 항력계수의 값이 전시간 영역에서 타 이론결과와 잘 일치하는 결과를 보여주고 있다. 선저경사각이 20°와 30°의 경우 전 계산 조건에서 항력계수의 값이 타 이론결과와 잘 일치하고 있다. 이는 항력 추정을 위하여는 충격력 추정에 비하여 더 큰 격자의 사용이 가능함을 보여주고 있다.

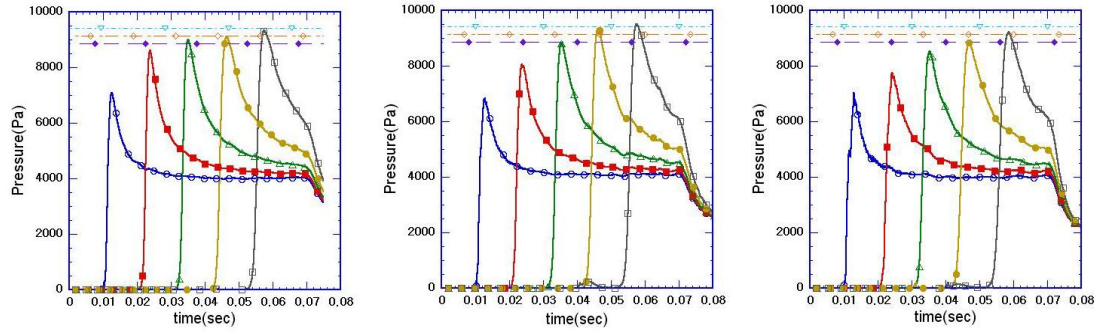
그림 10은 각각의 선저경사각에 대하여 측정지점인 P1~P5에 충격압이 작용할 때 충격압 발생지점을 식(8)에 따라 무차원화한 결과를 보여준다.

$$C_{Ymax} = \frac{Y_{\max}}{Vt} \tag{8}$$



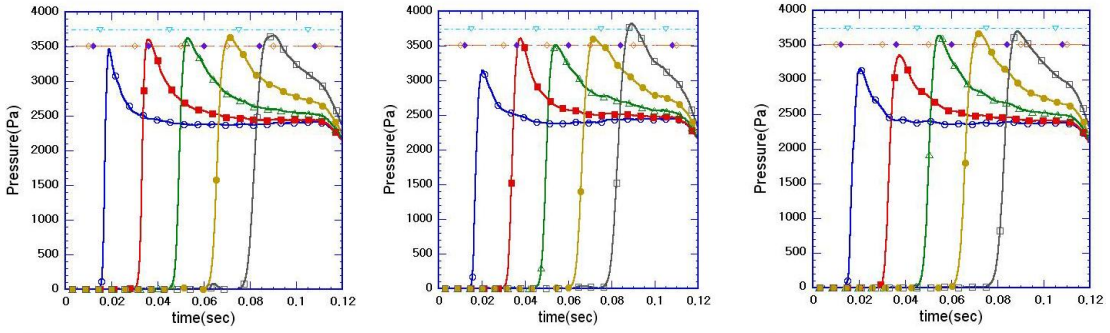
(a) mesh size : 0.25mm (b) mesh size : 0.5mm (c) mesh size : 1mm

[그림 5] P1 ~ P5에서 시간에 따른 압력 변화; 선저경사각: 10° ((a), (b), (c))
[Fig. 5] Pressure time histories at P1 ~ P5; deadrise angle : 10° ((a), (b), (c))



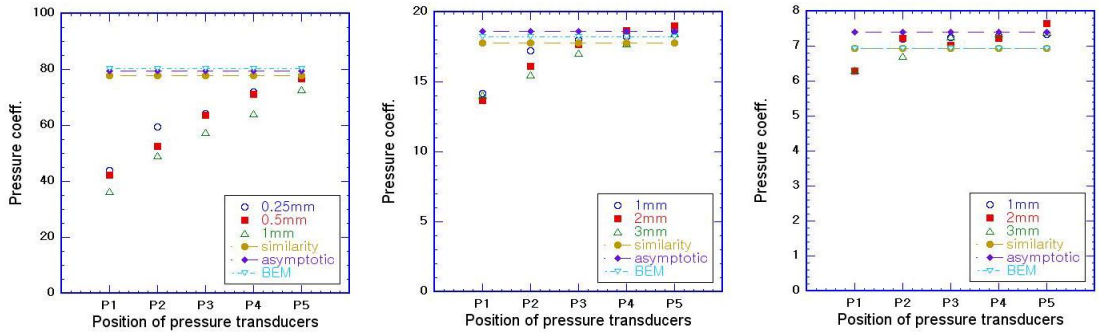
(a) mesh size : 1mm (b) mesh size : 2mm (c) mesh size : 3mm

[그림 6] P1 ~ P5에서 시간에 따른 압력 변화; 선저경사각: 20° ((a), (b), (c))
[Fig. 6] Pressure time histories at P1 ~ P5; deadrise angle : 20° ((a), (b), (c))



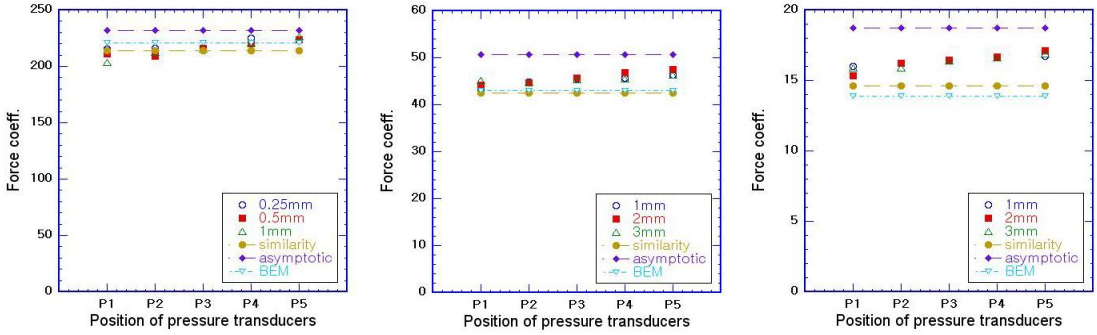
(a) mesh size : 1mm (b) mesh size : 2mm (c) mesh size : 3mm

[그림 7] P1 ~ P5에서 시간에 따른 압력 변화; 선저경사각: 30° ((a), (b), (c))
[Fig. 7] Pressure time histories at P1 ~ P5 ; deadrise angle : 30° ((a), (b), (c))



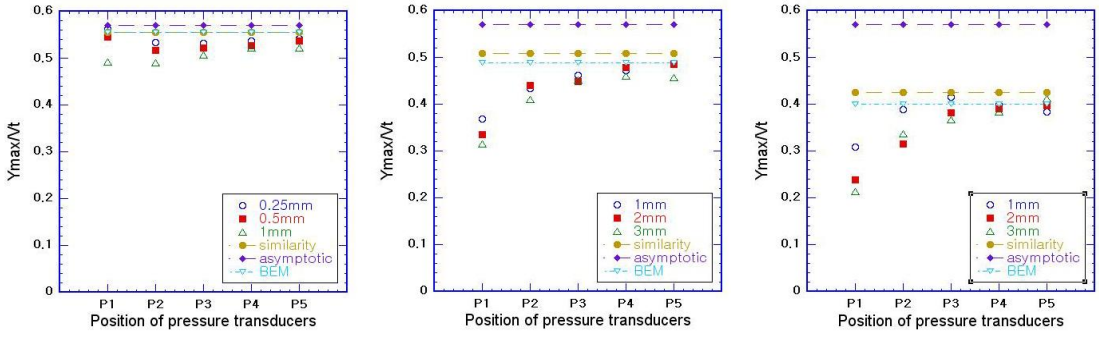
(a) deadrise angle : 10° (b) deadrise angle : 20° (c) deadrise angle : 30°

[그림 8] P1 ~ P5에서의 충격압 계수
[Fig. 8] Impact pressure coefficients ((a), (b), (c))



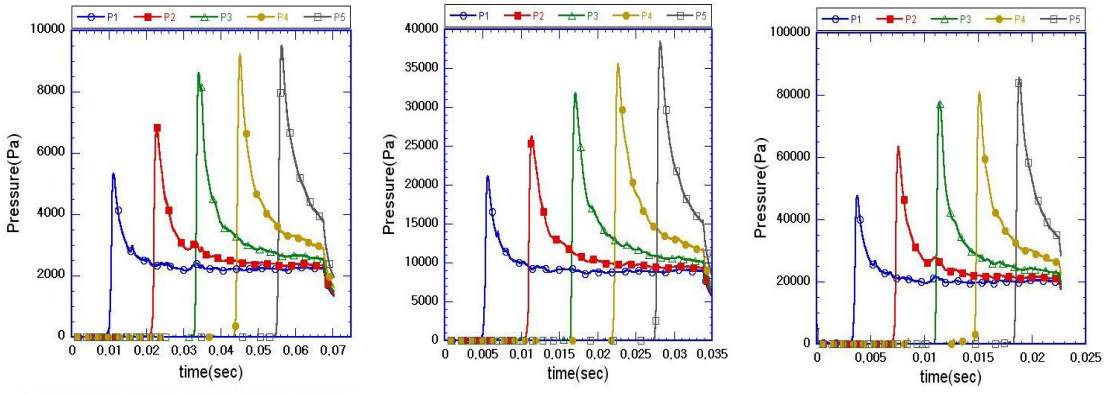
(a) deadrise angle : 10° (b) deadrise angle : 20° (c) deadrise angle : 30°

[그림 9] P1 ~ P5에서의 항력계수
[Fig. 9] Total drag force coefficient with impact at P1 ~ P5 ((a), (b), (c))



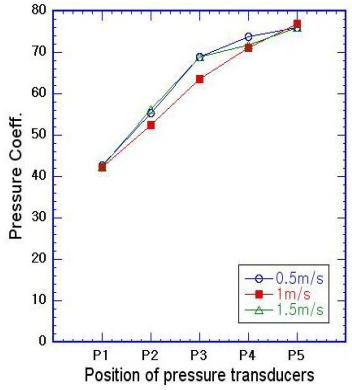
(a) deadrise angle : 10° (b) deadrise angle : 20° (c) deadrise angle : 30°

[그림 10] P1 ~ P5에서의 무차원 충격압 수직 위치
[Fig. 10] Non-dimensionalized vertical location of impact pressures

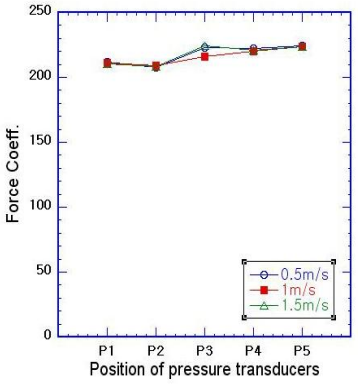


(a) entry velocity: 0.5m/s (b) entry velocity: 1.0m/s (c) entry velocity: 1.5m/s

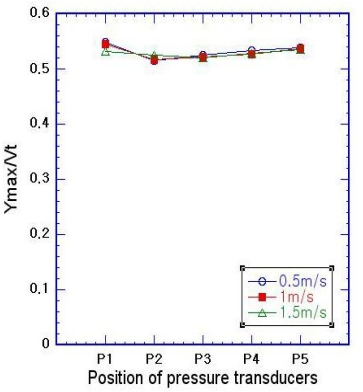
[그림 11] P1 ~ P5에서 시간에 따른 압력 변화 ((a), (b), (c)) (선저경사각: 10°, 격자간격: 0.5mm)
[Fig. 11] Pressure time histories at P1 ~ P5 ((a), (b), (c)) (deadrise angle : 10°, mesh size : 0.5mm)



[그림 12] 속도 변화에 따른 충격압 계수
[Fig. 12] Impact pressure coefficients



[그림 13] 속도 변화에 따른 항력계수
[Fig. 13] Total drag force coeff. with impact at P1 ~ P5



[그림 14] 속도 변화에 따른 무차원 충격압 수직 위치
[Fig. 14] Non-dimensionalized vertical location of impact pressures

무차원 충격압 위치는 선저경사각이 10°인 경우 입수면 격자의 크기가 1mm 이하인 경우에 타 이론의 결과치에 가깝게 수렴하는 것을 볼 수 있고, 20°와 30°인 경우에는 입수면 격지의 크기에 상관없이 측정위치 P3 이후부터 상사해(similarity solution)과 경계요소해(BEM) 비교적 일치하는 결과를 보이고 있다.

그림 11은 선저경사각 10°, 입수면 격자 크기 0.5mm인 경우, 측정위치 P1~P5 위치에서 시간의 변화에 따라 변하는 압력을 입수 속도별로 보여주고 있다. 입수 속도는 각각 2배, 3배씩 증가시켰지만 최대압력의 크기는 입수속도 0.5m/s를 기준으로 1.0m/s인 경우 약 4배, 1.5m/s인 경우 약 9배정도로 증가하는 것을 볼 수 있다.

그림 12는 선저경사각 10°, 입수면 격자 크기 0.5mm인 경우, 입수 속도를 0.5m/s, 1.0m/s 및 1.5m/s로 하여 측정 지점 P1~P5에 작용하는 무차원 충격압 계수 (impact pressure coefficients)를 나타낸다.

그림 13은 선저경사각 10°, 입수면 격자 크기 0.5mm일 때, 입수 속도를 0.5m/s, 1.0m/s 및 1.5m/s로 하여 측정 지점인 P1~P5에 충격압이 작용할 때 구조물에 작용하는 항력계수 즉, 구조물 하면에 작용하는 압력 적분 값을 무차원화한 결과를 나타낸다.

그림 14은 선저경사각 10°, 입수면 격자 크기 0.5mm인 경우, 입수 속도를 0.5m/s, 1.0m/s 및 1.5m/s로 하여 측정 지점 P1~P5에 충격압이 작용할 때 충격압 발생지점을 식 (8)에 따라 무차원화한 결과를 보여준다.

그림 12 ~ 그림 14의 결과에 의하면 충격압 계수, 항

[표 5] 상사해, 점근해, 경계요소법 결과와의 비교
[Table 5] 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	$C_{P_{\max}}$	77.065	77.847	79.36	80.2
	$Y_{\max}/Vt$	0.542	0.5556	0.5708	0.555
	C_{F_y}	224.9	213.98	231.97	220.8
20	$C_{P_{\max}}$	18.65	17.774	18.639	18.2
	$Y_{\max}/Vt$	0.487	0.5087	0.5708	0.488
	C_{F_y}	46.33	42.49	50.64	43.0
30	$C_{P_{\max}}$	7.325	6.927	7.40	6.94
	$Y_{\max}/Vt$	0.384	0.4243	0.5708	0.4
	C_{F_y}	16.73	14.604	18.747	13.9

력 계수, 무차원 충격압 위치 공히 운동학적 상사법칙에 따라 입수 속도에는 무관하게 동일한 값을 가짐을 알 수 있다.

표 5는 각각의 선저경사각에 대하여 제트류가 정상화 이후 일정한 값에 수렴한 충격압 계수, 충격압이 작용하는 수직 위치 및 구조물에 작용하는 항력 계수를 정리하였다. 이것은 상사해, 점근해 및 경계요소법에 의한 결과와 전반적으로 좋은 일치를 보여 주고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 유한한 선저경사각을 가진 2차원 쐐기형 구조물이 자유수면에 입수 시 발생하는 슬래밍 현상에 대하여 RANS 방정식과 PLIC-VOF 법을 이용한 수치해석을 수행하고, 상사해(similarity solution), 점근해(asymptotic solution) 및 경계요소법(BEM) 결과와 체계적인 비교를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 입수면 격자 크기의 적절한 선택에 의하여 PLIC-VOF scheme에 의한 슬래밍 해석 결과가 상사해, 점근해 및 경계요소법 등 타 해석 결과와 잘 일치하는 결과를 얻었다.
2) 쐐기형 구조물이 자유표면에 입수할 때, 구조물과 자유수면 사이에서 발생하는 제트류가 정상화되기까지 어느 정도의 시간이 경과해야 하는 것을 확인하였으며, 그에 따라 충격력의 크기도 점차 증가하여 일정한 값을 수렴하는 것을 알 수 있다. 또한, 선저경사각이 커질수록 일정한 값을 수렴하는 시간이 짧아짐을 볼 수 있다.
3) 슬래밍에 의한 충격압력의 정도 높은 추정을 위해서는 입수면의 경사각에 따라 입수면 격자 크기를 다르게 하여야 한다. 즉, 경사각 10°인 경우에는 0.5mm이하, 경사각이 20° 및 30°인 경우에는 3.0mm 이하를 채택할 필요가 있음을 확인할 수 있다.
4) 임의의 선저경사각에 대하여 충격압 계수, 무차원 충격압 위치, 항력 계수 공히 입수 속도의 변화에 상관없이 동일한 값을 나타내고 있으며, 따라서 운동학적 상사가 성립함을 알 수 있다.
5) 본 연구결과는 향후 슬래밍 충격력 실험 결과와의 정도 높은 비교에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 보며 선저경사각의 변화에 따른 충격력 공간 분포의 형상과 폭 및 그에 따른 입수면 격자 크기의 선정에 대한 체계적인 후속 연구가 필요하다.

References

[1] Cho, S.R. and Seo, J.S, 2009, “Response characteristics of stiffened plates subjected to impulsive pressure loadings. (in Korean)”, J. Society of Naval Architects of Korea (to be appeared).

[2] von Karman, T., 1929, "The Impact of Seaplane Floats during Landing," N.A.C.A. TN321, Washington.

[3] Wagner, V.H., 1932, "Üer Stoss und Gleitvergäge an der Oberflähe von Flüsigkeiten," Aeitschrift fü Angewandle Mathematik und Mechanik, Vol. 12, pp. 193-215.

[4] Armand, J.L. and Cointe, R., 1986, "Hydrody- namic Impact Analysis of a Cylinder," Proc. of 5th OMAE Symp., Tokyo, Japan, Vol. 1, pp. 09-634.

[5] 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.

[6] 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.

[7] Zhao, R. and Faltinsen, O., 1993, "Water Entry of Two-dimensional Bodies," Journal of Fluid Mechanics, vol. 246, pp. 593-612.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] Chung, J.Y., Nahm, J.O., Kang, H.D. and Kwon, S.H., 2007, "A Novel xperimental Technique in Slamming," Proc. 22nd Int. Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Croatia, pp. 41-44.

[13] 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.

[14] ANSYS FLUENT v6.3 User Manual

[15] 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.

[16] 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.

[17] Youngs, D.L., 1982, "Time-dependent multi- material Flow with Large Fluid Distortion," Numerical Methods for Fluid Dynamics, Academic Press.

[18] Yum, D.J. and Yoon, B.S, 2008, "Numerical Simulation of Slamming Phenomena for 2-D Wedges", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 45, No. 5, pp.477-486.

염 덕 준(Deuk-Joon Yum) **[정회원]**

- 1982년 5월 : Univ. of California, Berkeley (공학석사)
- 1985년 5월 : Univ. of California, Berkeley (공학박사)
- 1985년 5월 ~ 2005년 12월 : 현대중공업 선박해양연구소
- 2006년 3월 ~ 2008년 3월 : 울산대학교 조선해양공학부 초빙교수
- 2008년 4월 ~ 현재 : 군산대학교 조선공학과 부교수

<관심분야>
조선해양유체, 부유체 운동 및 조종, 전산유체역학 등

두 훈(Hun Du) **[정회원]**

- 2008년 8월 : 군산대학교 기계자동차공학부(공학사)
- 2011년 2월 : 군산대학교 대학원 기계공학과(공학석사)

<관심분야>
기계전자, 로봇응용, 유한요소해석 등

김 영 철(Young-Chul Kim) **[정회원]**

- 1993년 2월 : 전북대학교 대학원 전기공학과(공학석사)
- 1998년 3월 : Tohoku Univ. 대학원 기계전자과(공학박사)
- 1998년 3월 ~ 2004년 12월 : 대불대학교 전기전자공학부 조교수
- 2005년 4월 ~ 현재 : 군산대학교 기계자동차공학부 부교수

<관심분야>
기계전자, 조선IT, 로봇응용, 유한요소해석 등