
 論 文

大韓造船學會論文集
 제 30 卷 第 4 號 1993 年 11 月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 30, No.4, November 1993

Sloshing 충격압력의 추정을 위한 수치기법에 관한 연구

김용환*, 박용진*, 이화룡**

A Numerical Study on the Prediction of Sloshing Impact Pressure

by

Y.H. Kim*, Y.J. Park* and H.R. Lee**

요 약

본 연구에서는 탱크 내에 부분적으로 적재되어 있는 액체화물의 유동문제를 유한차분법을 이용해 해석하였다. 자유표면의 변화를 추적하고 유체장 내의 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 만족시키기 위해 SOLA-SURF 기법이 적용되었다. 특히, 심한 유동으로 인한 탱크 상부에서의 충격압력을 예측하기 위해 충격완화영역의 개념을 도입하여 갑작스런 경계조건의 변화를 억제함으로써, 보다 현실적인 압력값을 예측할 수 있도록 하였다. 수치계산에서는 실험결과가 알려진 세가지 모델들에 대한 계산을 수행하였는데, 계산결과가 실험결과에 비교적 잘 일치하고 있었다. 그리고, 이 기법의 실선적용에 대한 가능성을 살펴보기 위해 30만톤급 초대형 유조선에 대한 실선계산도 수행하였다. 이러한 적용을 바탕으로 본 연구에서 적용된 수치기법이 sloshing 충격압력의 추정에 실용적으로 적용할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

In the present study, sloshing problem is analyzed by the application of Finite Difference Method. SOLA-SURF scheme is applied to the analysis of fluid motion considering free surface. Especially, the concept of impact buffer zone is introduced for the prediction of more realistic impact pressure on tank. Numerical computation is carried out for the typical three models, and the computed results show good agreement with experimental data. The computation is also performed for 300,000 tons VLCC as a real-ship application. From the present study, it is proved that this numerical technique is quite practical to the prediction of sloshing impact pressure.

접수일자 : 1993년 6월 14일, 재접수일자 : 1993년 8월 7일

* 정회원, 대우조선공업(주), 기술연구소,

** 대우조선공업(주), 영업설계부

1. 서 론

Sloshing 현상은 유체가 임의의 탱크안에 부분적으로 차있는 경우에 이 탱크의 운동으로 인해 발생하는 유동현상을 칭하는 것이다. 이 현상은 우리가 흔히 볼 수 있는 음료수병 혹은 커피잔의 유동현상으로부터 자동차 및 항공기의 연료탱크, 원유 혹은 액화 가스를 적재하는 선박의 화물창(cargo hold), 그리고 우주선의 액체연료를 담은 연료탱크의 유동에 이르기까지 매우 여러 분야에서 관찰되는 현상이다.

조선공학분야에서의 sloshing 현상에 대한 해석은 횡동요감쇠탱크(anti-rolling tank)의 설계를 위해 필요하기도 하지만, 무엇보다도 액체화물로 인한 충격압력의 발생과 이에 기인하는 구조적인 손상의 방지에 있다고 할 수 있다. 특히, 최근 이중선체구조의 유조선과 액화가스운반선(LNG carrier)의 국내건조 등을 위해 sloshing 문제에 대한 해석은 필수적이다.

Sloshing 문제에 대한 해석방법으로는 모형실험법과 수치계산법을 들 수 있다. 모형실험법은 LNG 선에 대한 건조가 활발하던 1970년대 유럽과 일본 등지에서 연구가 활발히 진행되어 많은 실험자료들이 발표된 바 있고, 이들 자료들은 sloshing 현상에 대한 현상학적 이해와 충격압력의 크기정도를 살펴보는 데 많은 공헌을 하였다. 그러나, 모형실험방법은 많은 실험장비와 비용이 소요된다는 사실 외에도 모형실험 결과를 실선으로 확장하는데 있어 적지않은 문제를 가지고 있어 그 적용에 한계를 가지고 있다고 볼 수 있다. 이러한 한계의 극복방안으로 최근 수치계산을 이용한 해석방법이 시도되고 있는데, 주로 유한차분법(FDM)이 널리 이용되고 있다. Sloshing 해석에 있어 유한차분법이 경계요소법(BEM)이나 유한요소법(FEM)보다 더욱 유효한 것은 충격압력의 구현 가능성 때문이다. 이러한 노력들은 Bridges[1], Mikelis[2], Kim[3], 그리고 Eguchi[4] 등의 연구에서 살펴볼 수 있는데, 특히 LLOYD 선급의 해석프로그램 LR.FLUIDS[5]는 여러 조선소에서 널리 사용되고 있다.

본 연구에서는 SURF 기법을 이용하여 sloshing 해석을 수행하였다. SURF 기법은 VOF 기법보다 sloshing 문제의 해석에서 보다 안정된 계산결과를 주고 있는 것으로 판단되며[2,5], 특히 탱크 상부영역에서 발생하는 충격압력의 추정에 있어 다른 기법들에 비해 탁월한 결과를 기대할 수 있다. 본 연구에서는 실선과 동일한 모델에 대해 적용할 수 있도록

내부재 및 경사면을 포함하여 계산을 수행하였다. 또한, 충격압력을 보다 현실적으로 구현하기 위해 탱크 상부, 경사면(chamfer) 및 수평부재(horizontal baffle)에 대해 충격완화지역(impact buffer zone)의 개념을 도입하기도 하였다. 계산모델은 Mikelis 등의 실험모델[2]과 Eguchi 등의 모델[4]이고, 계산 결과는 실험결과와 비교되었다. 또한, 이러한 계산방법의 실용성을 보여주기 위해 30만톤급 초대형 원유 운반선에 대해서도 적용하여 보았다.

2. 문제의 해법

2.1 기본 방정식 및 경계조건

비압축성의 점성유체를 가정하고 Fig.1과 같은 탱크고정좌표계를 설정하면, 유체장 내의 2차원 유동에 대해서는 다음과 같은 연속방정식(Continuity equation)과 Navier-Stokes 방정식이 만족되어야 한다.

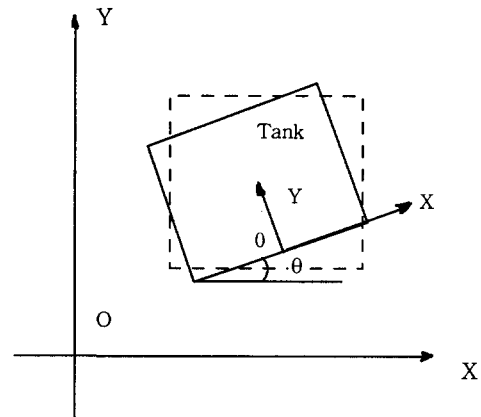


Fig.1 Coordinate system

$$u_x + v_y = 0 \quad (1)$$

$$u_t + uu_x + vv_y = -p_x / \rho + \nu(u_{xx} + v_{yy}) + F_x \quad (2-a)$$

$$v_t + uv_x + vv_y = -p_y / \rho + \nu(v_{xx} + v_{yy}) + F_y \quad (2-a)$$

이때, u, v 는 x, y 축에 대한 속도성분을 나타내고 하첨자는 미분치를, t, p, ρ, ν 는 각각 시간, 압력, 밀도, 동점성계수 등을 의미한다. 또한, F_x, F_y 는 x, y 방향에 대한 외력항으로 중력항을 포함하며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F_x = 2\theta'v + \theta''(y - y_{roll}) + \theta'^2(x - x_{roll}) - g \sin\theta - X'' \cos\theta - Y'' \sin\theta \quad (3-a)$$

$$F_y = -2\theta'u - \theta''(x - x_{roll}) + \theta'^2(y - y_{roll}) - g \cos\theta + X'' \sin\theta - Y'' \cos\theta \quad (3-b)$$

여기서, θ' , θ'' 는 탱크의 각속도 및 각가속도이고 g 는 중력가속도이며, X'' , Y'' 은 탱크의 수평방향 및 수직방향운동 가속도이다. 또한, (x_{roll}, y_{roll}) 은 각운동의 중심점 좌표를 의미한다.

탱크벽면 및 탱크 내부의 부재들에 대한 경계조건으로 free-slip 조건을 주는 것이 바람직하다. 또한 내부에 경사면이 있을 때는 Chan 등[6]이 사용한 경계조건이나 Vicelli[7]의 방법등이 있는데, 본 연구에서는 후자의 방법을 적용하여 경계면에서 법선방향의 속도는 0이 되게 하고 접선방향의 속도는 free-slip 조건을 만족하도록 하였다.

자유표면 경계조건은 다음과 같은 조건을 사용하는 것이 일반적이다.

$$p_s = p_a \quad (4)$$

$$H_t + u H_x = v \quad (5)$$

여기서, p_s , p_a 은 자유표면의 압력과 자유표면상의 공기압력을 각각 의미한다. 그리고, H 는 자유표면의 변위이다.

그러나, 이러한 조건들만으로 sloshing 현상을 제대로 해석하는 것은 쉽지 않은데, 특히 충격적인 특성을 지니는 압력이 발생하는 경우에는 더욱 그러하다. 일반적으로 충격압력이 발생하는 경우에는 특별한 처리가 필요한데, 충격완화지역의 도입이 그 대표적인 기법이다[4,5,8]. 본 연구에서도 충격적인 특성을 지니는 압력이 발생할 가능성이 높은 경계면에 충격완화의 개념을 도입하여 새로운 형태의 경계조건을 적용하였는데, 이는 지나치게 순간적인 경계조건의 변화를 방지하여 보다 현실적인 압력값을 얻기 위함이다. 본 계산에서 적용된 경계조건은 다음과 같은 자유표면경계조건과 벽면경계조건의 혼합경계조건이다.

$$F = (1-k)(V_w - V_s)H_B / \Delta t + k(p_s - p_a) / \rho = 0 \quad (6)$$

여기서, H_B , V_w , 그리고 V_s 는 각각 완화영역의 크기, 탱크벽면의 이동속도(탱크고정좌표계에 대해서는 0)

및 자유표면의 탱크벽면으로의 법선방향 이동속도를 의미하고, k 는 자유표면경계조건과 벽면경계조건의 적용비율로서 자유표면과 상부물체사이의 거리, η 를 도입하면 다음과 같이 정의된다.

$$k = \eta / H_B \quad 0 < \eta \leq H_B \text{ 인 경우} \quad (7)$$

$$= 0 \quad \eta \leq 0 \text{ 인 경우}$$

$$= 1 \quad \eta \geq H_B \text{ 인 경우}$$

즉, 일정한 높이의 영역에 자유표면이 들어가게 되면 유체가 벽면의 존재를 느낄 수 있도록 하고, 점차 자유표면이 벽면쪽으로 감에 따라 벽면경계조건을 강하게 작용하는 것이다.

Sloshing 문제의 해석에서 고려하여야 할 또다른 문제는 탱크 상부와 수평내부재에 대한 적절한 경계조건 처리이다. 이들 경계에서는 유체와 접촉하고 또한 분리되는 것이 빈번한데, no-flux 조건과 free-slip 조건을 무조건 적용하면 안된다. 이러한 문제에 대해서는 Navickas 등[9]이 제안한 방법을 사용하는 것이 바람직한데, 이 방법은 유체와 탱크 상부 혹은 수평부재면의 분리형태에 따라 그 특성에 맞는 조건을 적용하는 것이다.

2.2 유한차분식의 적용

연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 풀기 위한 방법은 몇가지가 있으나, 본 연구에서는 유한차분법을 적용하였다. 이를 위해 본 연구에서는 Fig.2와 같이 유동장을 균등분할하고 staggered grid를 적용하기로 한다. 그리고, 식 (1), (2)들은 다음과 같은 차분식으로 바뀌어져 적용된다.

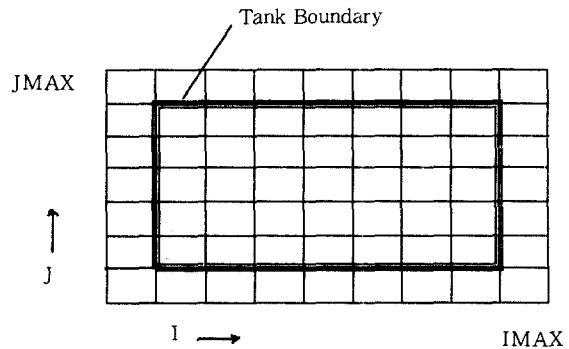


Fig.2 Mesh generation

$$u_{i,p+1} = u_{i,j} + \Delta t [(p_{i,j} - p_{i+1,j}) / \rho \Delta x + F_x - F_{UX} - F_{UY} + VISX] \quad (8-a)$$

$$v_{i,p+1} = v_{i,j} + \Delta t [(p_{i,j} - p_{i,j+1}) / \rho \Delta y + F_y - F_{VX} - F_{VY} + VISY] \quad (8-a)$$

이때, 상첨자 $n+1$ 은 $n+1$ 번째 시간단계를 의미하고 상첨자가 없는 것은 모두 n 번째 시간단계에서의 값이다. 또한, F_{UX} , F_{UY} , F_{VX} , F_{VY} 는 대류항 $u u_x$, $v u_y$, $u v_x$, $v v_y$ 에 대한 차분식이고 $VISX$, $VISY$ 는 확산항 $\nu(u_{xx} + u_{yy})$, $\nu(v_{xx} + v_{yy})$ 에 대한 차분식을 나타낸다. 이 식들을 이용하면 다음 시간단계에서의 속도성분을 알아낼 수 있으나, 이 식으로 부터 얻어지는 속도성분이 연속방정식을 그대로 만족시켜주지는 못한다. 연속방정식을 만족하도록 속도성분을 수정하기 위해 SOLA 기법에서는 다음과 같은 수정식을 적용한다.

$$u_{i,j} = u_{i,j} + \Delta p \Delta t / \rho \Delta x, \quad u_{i-1,j} = u_{i-1,j} - \Delta p \Delta t / \rho \Delta x \quad (9-a)$$

$$v_{i,j} = v_{i,j} + \Delta p \Delta t / \rho \Delta y, \quad v_{i,j-1} = v_{i,j-1} - \Delta p \Delta t / \rho \Delta y \quad (9-b)$$

이때, 압력변화량 Δp 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta p_{i,j} = -\omega D_{i,j} / ([2\Delta t(1/\Delta x^2 + 1/\Delta y^2)]) \quad (10)$$

이때, ω 와 D 는 각각 완화계수(relaxation factor)와 수치계산시 연속방정식(1)을 만족하게 하는 오차의 범위이다. 즉, (8)에서 구해지는 속도성분으로 부터 D 를 구하고 이를 식(10)에 대입하여 압력의 수정치를 구한다. 이러한 수정치를 식(9)에 적용하여 속도성분을 수정하고 다시 D 의 값을 계산한다. 그리고, 이러한 과정을 일정한 오차내에서 속도성분을 추정하게 될때까지 반복하게 된다.

물체경계조건은 앞에서 언급한 바와 같이 free-slip 조건을 적용하면 되는데, 특별히 유체가 경계면에서 바르게 분리하기 위해서 탱크 상부 및 수평내부재에 대해 다음과 같은 분리 조건을 주는 것이 필요하다.

(1) 자유표면이 좌측 혹은 우측에 존재하는 경우 혹은 좌우가 모두 유체영역이거나 압력이 기화압력(vapor pressure) 보다 낮을 경우

$$v_{i,j} = \begin{cases} 0 & v_{i,j} \geq 0 \\ v_{i,j} & v_{i,j} < 0 \end{cases} \quad (11-a)$$

(2) (1)의 경우가 아닌 경우

$$v_{i,j} = 0 \quad (11-b)$$

또한, 유체가 아직 접하지 않은 영역에 위치한 수평 경계면에서는 물체경계조건이 자유표면의 수직상승을 방해하지 않도록 처리하는 것이 바람직하다. 경사면에 대해서는 다음과 같은 조건식을 이용해 압력을 구할 수 있는데,

$$\Delta p_{i,j} = -\omega(1/\Delta x + 1/\Delta y)(U_p n_x + V_p n_y)_{i,j} \quad (12)$$

여기서 U_p , V_p 는 벽면에서의 u, v 속도 성분이고, n_x , n_y 는 벽면에서의 법선방향 단위벡터이다. 즉, $U_p n_x + V_p n_y = 0$ 이 만족되도록 하는 압력을 구하게 된다.

자유표면 경계조건으로는 SUMMAC[6]에서 적용된 바 있는 irregular-star 방법을 적용하여 자유표면상에서의 압력이 공기압이 되도록 하였다. 그런데, 이미 언급한 바와 같이 충격적인 압력이 발생하는 곳에서는 충격완화영역을 두었고 이 영역에서는 식(6)의 조건을 적용하였다. 그리고, 빠른 수렴성을 주기 위해 압력장 반복계산시 다음과 같은 Newton-Rapson식의 형태를 취하였다.

$$\Delta p_{i,j} = -F_{i,j} / (\partial F / \partial p)_{i,j} \quad (13)$$

일반적으로 완화영역의 높이 H_B 는 cell 높이의 반, 즉 $0.5\Delta y$ 을 택하는 것이 좋은 결과를 주는 것으로 알려져 있다. 본 계산에서는 탱크 상부외에도 수평내부재 및 상부와 접하고 있는 경사면의 일부 구부러진 영역(knuckle area)에서도 완화지역을 적용하여 계산을 수행하였다.

자유표면에서는 압력경계조건 외에 속도경계조건도 필요하다. 본 계산에서는 연속방정식이 만족되고 접선방향으로는 free-slip이 되도록 자유표면 cell의 속도를 결정하였다. 그리고, 자유표면이 내부재를 가로지르는 경우에 대해서는 유체의 영역을 올바르게 선정하고 유동의 이동을 방지하기 위한 처리가 필요하다.

한편, 자유표면의 시간별 변위를 추적하기 위해 식 (5)를 다음과 같은 형태로 적용하기로 한다.

$$\begin{aligned}
 H_i^{n+1} &= H_i + \Delta t \left[-\frac{1}{4\Delta x} [(u_{i,j} + u_{i-1,j})(H_{i+1} - H_{i-1}) \right. \\
 &\quad \left. - \beta |u_{i,j} + u_{i-1,j}| (H_{i+1} - 2H_i + H_{i-1}) + V_s \right] \quad (14)
 \end{aligned}$$

여기서, β 는 자유표면과의 기울기를 구하기 위해 적용되는 차분식의 계수로서 이 값에 따라 중앙차분 (central difference)과 일방향 차분(one-sided difference)의 조합정도가 좌우된다. 그리고, V_s 는 자유표면에서의 수직속도성분을 나타낸다.

2.3 수치계산의 안정성

수치계산을 계속하여 진행하기 위해서는 기본적으로 수치안정성이 만족되어야 한다. 수치계산의 안정성을 만족하기 위하여 일반적으로 다음과 같은 조건이 적용된다.

$$u_{i,j}\Delta t < \Delta x \ \& \ v_{i,j}\Delta t < \Delta y \quad (15-a)$$

$$v\Delta t < 0.5\Delta x^2\Delta y^2 / (\Delta x^2 + \Delta y^2) \quad (15-b)$$

$$C\Delta t < 2\Delta x\Delta y / (\Delta x + \Delta y) \quad (15-c)$$

$$(H^{n+1} - H^n) < \Delta y \quad (15-d)$$

이때, C 는 자유표면상에 발생하는 자유표면파의 속도를 의미한다.

그런데, 충격완화지역의 존재를 고려하면 식 (15-d)는 부적절하다고 볼 수 있으며, 더욱 엄격한 조건식으로 다음과 같은 조건식을 사용하여야 할 것이다.

$$(H^{n+1} - H^n) < \alpha H_B \quad (16)$$

이때, α 는 0에서 1 사이의 값을 가지는 값으로 최소한 1번은 충격완화영역을 지나서 탱크 상부와 접촉할 수 있도록 하기 위한 값이다.

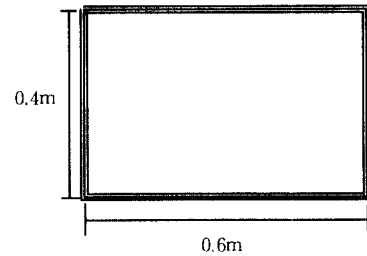
3. 수치계산

3.1 계산모델 및 계산조건

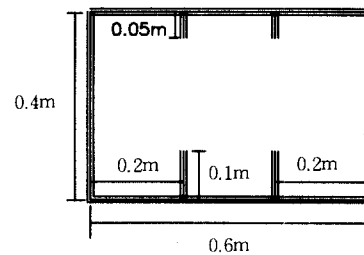
본 연구에서는 우선 수치계산의 정확도를 살펴보기 위해 실험결과가 이미 발표된 바 있는 Eguchi와 Niho의 모델들[4]과 LLOYD의 실험모델[10]에 대

해 계산을 수행하여 보았다. 또한, 실선적용에로서 30만톤급 초대형 유조선에 대한 계산도 수행하였다.

Eguchi와 Niho는 두가지의 모델에 대해 실험을 수행한 바 있는데, 이들은 본 연구에서 적용한 기법과 유사한 기법을 적용한 수치계산결과도 같이 발표하였다. 이들의 모델을 Fig.3에 도시하였는데, 본 연구에서도 이들과 동일한 조건을 적용하여 계산을 수행하고 그 결과를 비교하였다. Fig.4는 탱크 내부에 경



(a) Smooth rectangular tank



(b) Tank with vertical baffles

Fig.3 Rectangular tank model with and without vertical baffles (Eguchi [4])

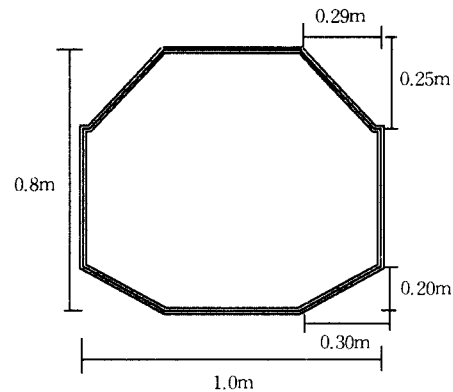


Fig.4 Tank with chamfers (LLOYD [11])

사면이 있는 경우로서 LLOYD에 의해 실험이 수행된 바 있다[11]. 이 실험에서는 대진폭의 운동이 적용되어 경사면에서 큰 충격압력이 계측되었는데, 본 계산에서도 실험조건과 동일한 몇가지의 강제운동에 대해 계산을 수행하였다.

수치계산을 위해서는 mesh의 크기, 시간간격, upwinding 계수 및 충격완화영역의 크기 등과 같은 몇가지의 조건들을 결정하여야 한다. 충격압력이 발생하는 경우, 압력의 크기와 지속시간은 이러한 변수의 값에 따라 때로 민감하게 변화하기도 하기 때문에 적절한 변수값들을 결정하는 것이 필요한데, 본 연구에서는 Kim등 [10]에 의해 행해진 연구를 바탕으로 하여 변수값을 선정하였다. 본 계산에서는 upwinding 계수의 값을 0.75로 하고, 충격완화영역의 크기를 mesh 높이의 절반으로 택하였다. 또한, 시간간격은 강제운동주기의 1/500~1/1000 정도의 값을 적용하였고 20~30개의 mesh로 탱크를 분할하여 계산하였다.

계산된 압력의 해석을 위해서 본 연구에서는 압력의 평균치 개념을 적용하는데, 평균압력은 다음과 같이 정의된다.

$$P_p = \frac{\sum_{j=-m/2}^{m/2} P_j^{n+1} \Delta t_j}{\sum_{j=-m/2}^{m/2} \Delta t_j} \quad (17)$$

이때, m은 압력을 평균할 시간단계를 의미한다. 압력의 평균개념은 수치계산결과와 해석에서 매우 중요하다. 이에 대해서는 많은 논란의 소지가 있으나, 유체영역 및 시간간격의 분할에 기인하는 수치계산에서의 많은 문제점을 극복할 수 있는 하나의 방법으로 제시될 수 있고, 특히 구조해석의 관점에서 더욱 중요한 의미를 지닌다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 4번의 시간단계에 걸쳐 평균압력을 계산하였는데, 이에 대한 자세한 내용은 문헌[5], [10]을 참조하기 바란다.

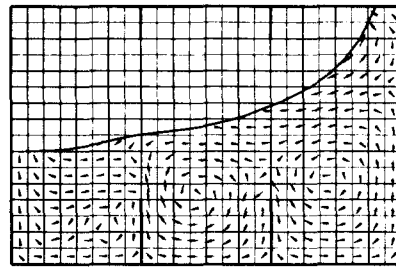
3.2 Eguchi 모델

이 모델에 대한 수치계산에서는 폭과 깊이방향에

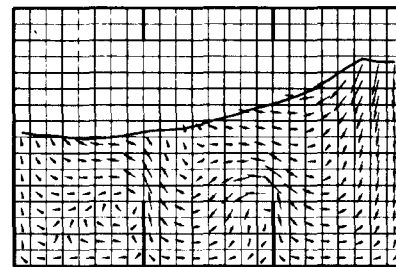
Table 1 Test conditions of Eguchi's model

Case	Tank Shape	Filling	Period	Amplitude	Roll Center
1	Smooth	75 %	0.943 sec	8.300°	y=0.200 m
2	Smooth	50 %	1.036 sec	9.150°	y=0.200 m
3	With Baffle	65 %	1.081 sec	9.200°	y=0.220 m

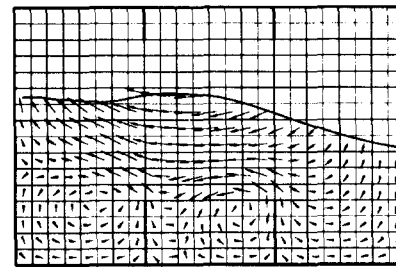
대해 24개 및 16개의 mesh로 분할하였고 시간간격은 0.001초를 적용하였다. 강제운동은 횡동요로서 Table 1과 같은 세가지 경우에 대한 계산이 이루어졌다.



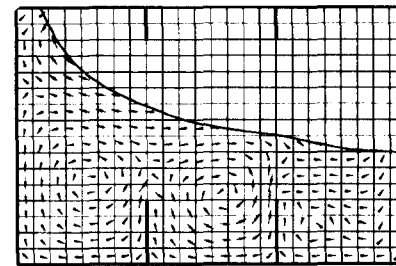
TIME:5.35 SEC



TIME:5.51 SEC



TIME:5.70 SEC



TIME:5.89 SEC

Fig.5 Velocity vector at 4 time steps (Eguchi's Model, Case 3)

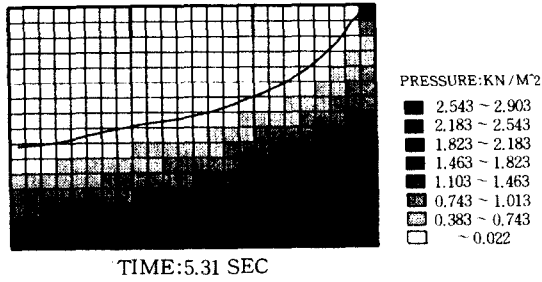


Fig.6 Pressure distribution at one time instance (Eguchi's Model, Case 3)

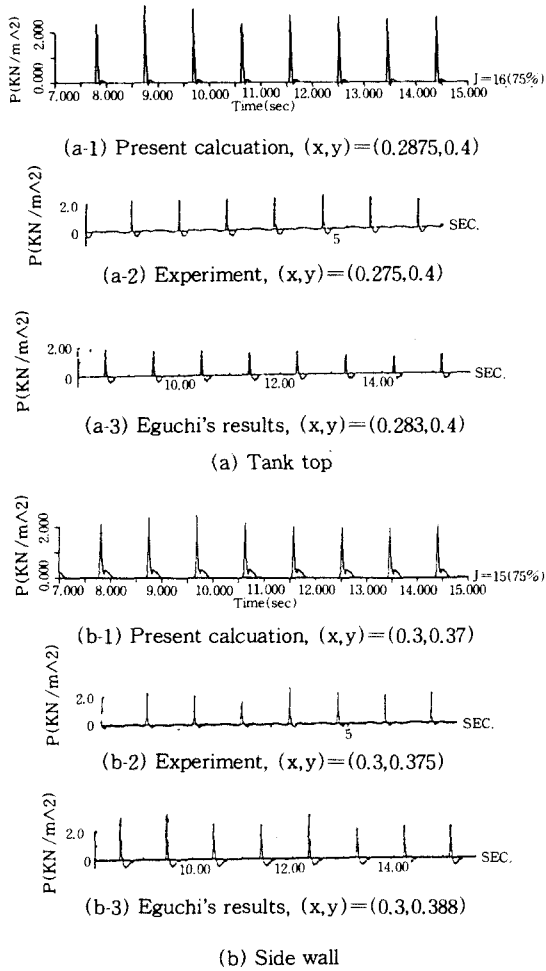


Fig.7 Comparison of time history of pressure (Eguchi's Model, Case 1)

계산 결과는 Fig.5에서 부터 Fig.9에 걸쳐 도시하였다. Fig.5는 Case 3에서의 속도벡터를 시간별로 나타내고 있고, Fig.6은 한 시간단계에서의 압력분포를 보여준다. 특히, Fig.6에서는 탱크의 왼쪽상부에서 충격적인 압력이 발생하고 있음을 볼 수 있다.

Fig.7, 8, 9는 세 지점에서 계측 및 계산된 압력의 시간별변화를 보여주고 있다. 계산결과와 실험결과와 잘 일치하는 것으로 판단되는데, 특히 탱크상부에서 계측되는 충격압력의 발생이 수치계산결과에서도 잘 나타나고 있다. 또한, 계산결과와 실험값에 비해 규칙적인 압력변화를 보이고 있는데, 다만 본 계산기법이 유체가 탱크 상부로 부터 분리되는 현상을 다소 정확히 구현하지 못하여 충격압력 이후 나타나는 음의 압력(suction)을 실험치와 같이 보여주지는 못하는 것 같다. Eguchi의 계산에서도 본 계산결과와 유

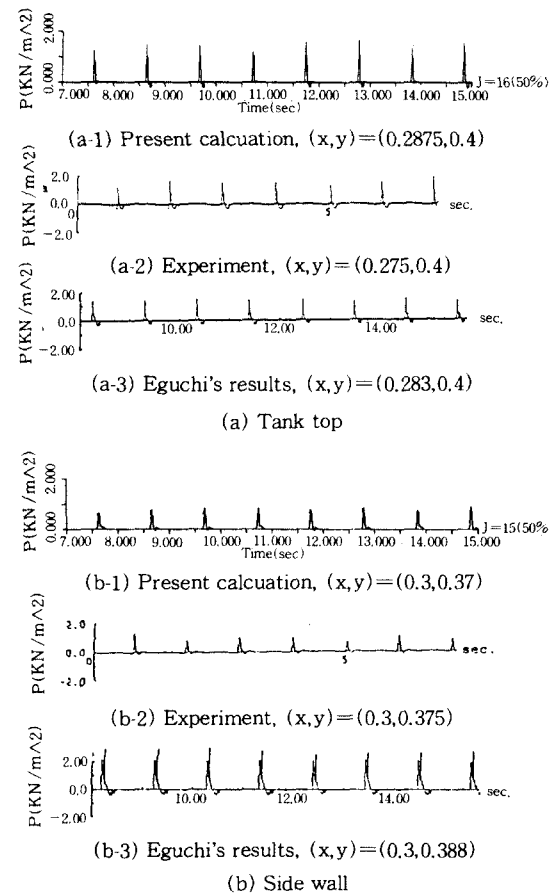
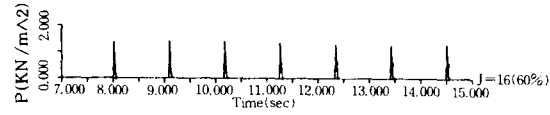
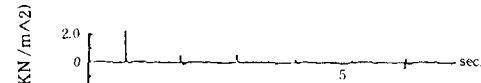


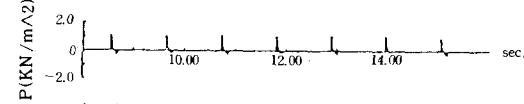
Fig.8 Comparison of Time History of Pressure (Eguchi's Model, Case 2)



(a-1) Present calculation, $(x,y)=(0.2875,0.4)$

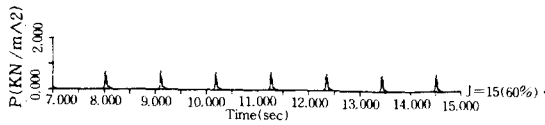


(a-2) Experiment, $(x,y)=(0.275,0.4)$

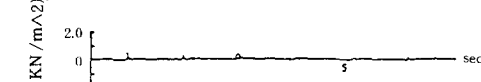


(a-3) Eguchi's results, $(x,y)=(0.283,0.4)$

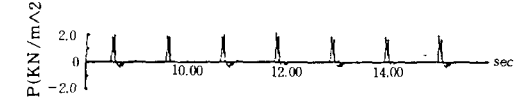
(a) Tank top



(b-1) Present calculation, $(x,y)=(0.3,0.37)$

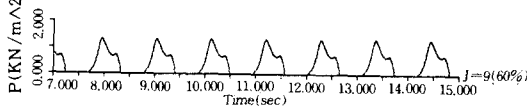


(b-2) Experiment, $(x,y)=(0.3,0.375)$

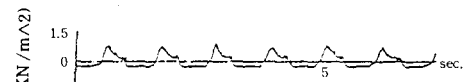


(b-3) Eguchi's results, $(x,y)=(0.3,0.388)$

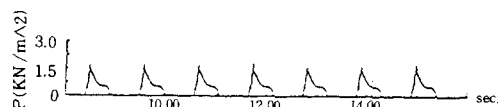
(b) Side wall



(c-1) Present calculation, $(x,y)=(0.3,0.2125)$



(c-2) Experiment, $(x,y)=(0.3,0.225)$



(c-3) Eguchi's results, $(x,y)=(0.3,0.2125)$

(c) Side Wall

Fig.9 Comparison of time history of pressure (Eguchi's Model, Case 3)

사한 결과를 주고 있으나, 탱크 상부근처의 벽면에서는 다소 큰 압력이 예측된 것으로 보여진다. 이들의 수치계산기법에서는 충격완화효과를 위해 완화영역의 설정 대신 자유표면이 물체경계와 만나는 곳에서 물체경계조건과 자유표면경계조건을 반반씩 적용하는 독특한 조건식을 적용하였다.

3.3 LLOYD 실험모델

본 연구에서는 경사면에서 발생하는 충격압력을 수치계산에서도 잘 구현할 수 있을지를 확인하기 위해 LLOYD에서 실험한 결과와 비교하여 보았다. 적용된 적재율은 50%이고 횡동요운동을 가정하였으며, 탱크는 폭방향과 깊이방향 모두 25개의 mesh로 분할하였다. 운동주기는 1.2초에서부터 1.8초까지의 범위에서 0.1초간격으로 계산하였으며, 시간간격은 0.002초였다. 특히, 운동의 진폭은 15°를 적용하였는데, 이 진폭은 실제로 선박이 해상에서 겪을 운동으로서 거의 최대운동이라고 볼 수 있다.

Fig.10은 유체입자의 속도벡터와 유체장 내부의 압력분포인데, 9.4초의 시간단계에서 충격압력이 경사면에서 발생하고 있다. Fig.11은 경사면과 벽면이 접하는 cell에서의 압력값을 보여주고 있는데, 1.3과 1.4초의 주기운동에서 큰 충격압력이 발생하고 있다. 그리고 이러한 충격압력의 최대값을 각 주기별로 정리하여 Fig.12에서 실험치와 비교하였다.

사실, 수치계산에서는 탱크형상을 적절히 모델링해야 하기 때문에 경사면의 크기와 높이등을 정확히 고려하기는 힘들고, 따라서 유사한 영역에서의 압력을 비교하는 것으로도 만족해야 할 것이다. Fig.12에서의 실험치는 경사면이 벽면과 접하고 있는 부근에서 계측된 결과이고 계산치는 경사면이 시작되는 첫번째 및 두번째 cell에서의 압력값이다. 이 결과에 의하면, 1.3초 주기부근의 운동에서 대단히 큰 압력이 계측되었으나, 본 계산에서는 1.3초와 1.4초의 운동에서 가장 큰 압력이 계산되었다. 그리고, 전체적인 경향을 살펴보면 계산결과와 실험결과와 유사한데, 다만 최대값에서 어느정도 차이를 보여주고 있다.

그런데, 충격압력에 대한 해석의 기준이 최대압력만이 아니라는 사실은 반드시 명심하여야 한다. 즉, 충격압력의 발생은 대단히 짧은 시간에 이루어지고 실험 뿐만 아니라 수치계산에서도 적용조건에 따라 심한 편차를 보일 수 있다. 따라서, 충격압력의 해석

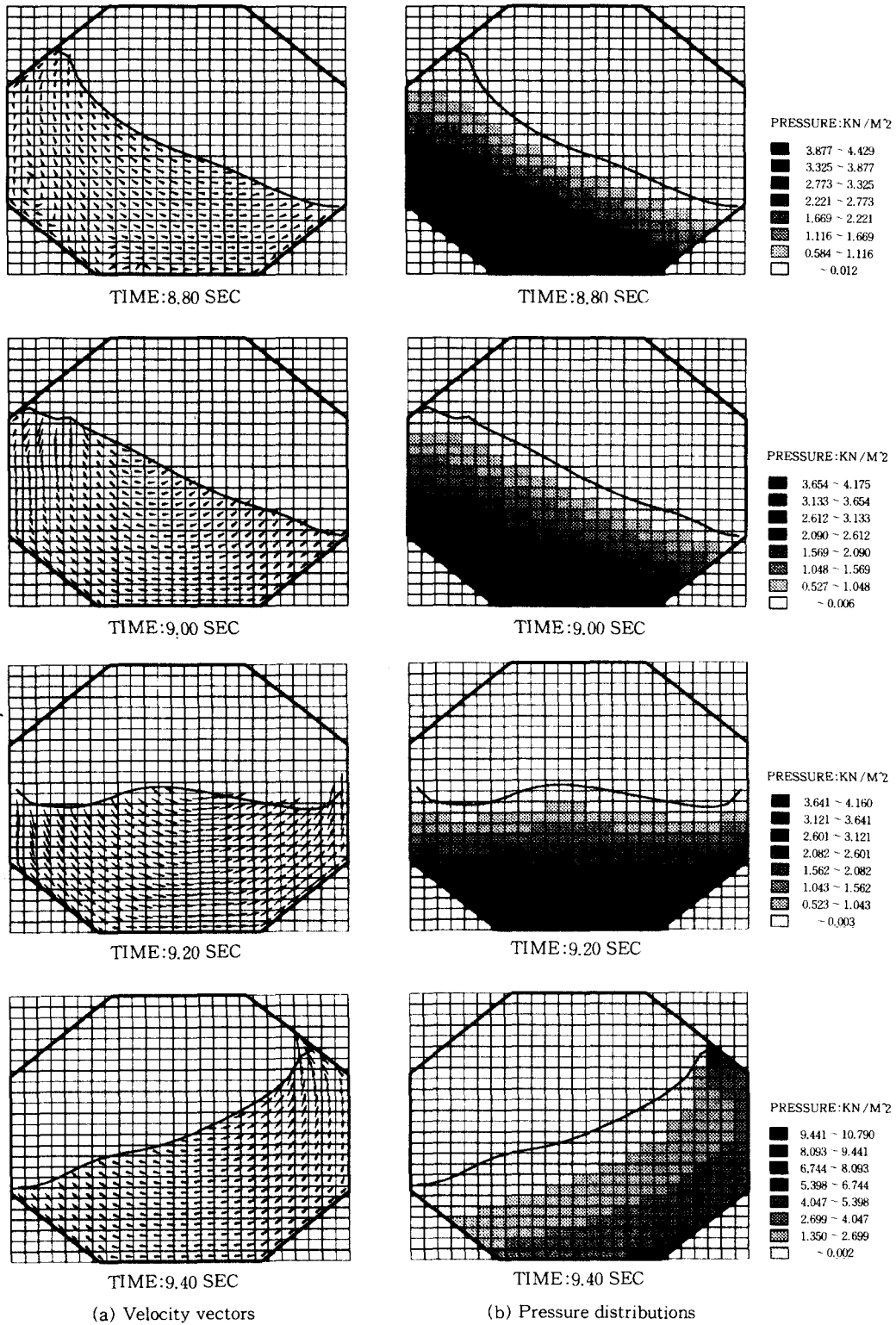


Fig.10 Velocity vector and pressure distribution at 4 time steps (LLOYD Model, Period = 1.4sec)

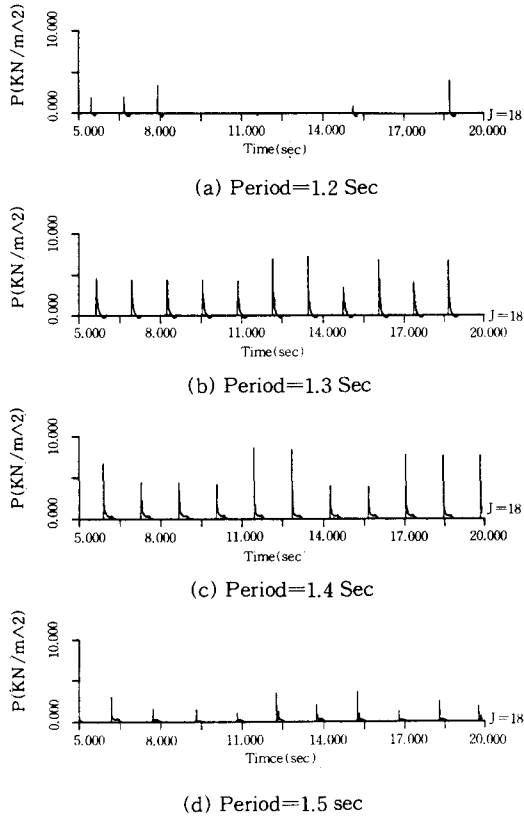


Fig.11 Impact pressure at knuckle point of top chamfer (LLOYD Model,y=24m)

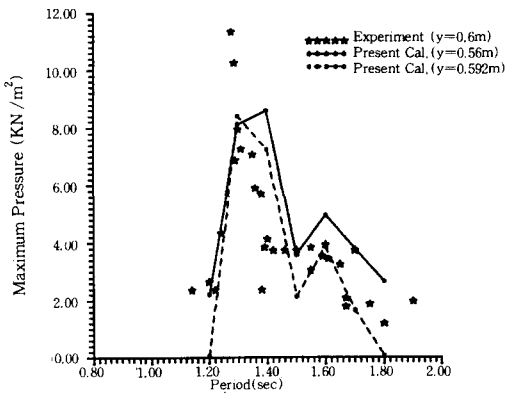


Fig.12 Comparison of maximum pressure with experiment

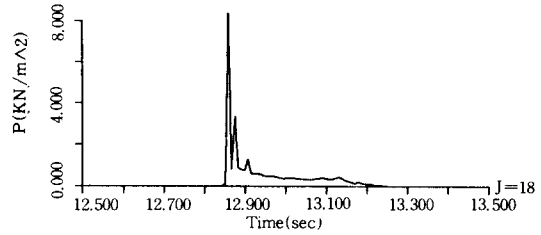


Fig.13 Time history of impact pressure (LLOYD Model, Period=1.4sec)

을 위해서는 압력의 시간별과정, 즉 최대압력값과 압력시간의 작용 등을 동시에 살펴 전체적인 경향이 어떠한가를 관찰해 보아야만 한다. 이러한 관찰은 유체 역학적인 관점보다는 구조해석적인 관점에서 더욱 중요하게 다루어진다[5],[10],[13].

Fig.13은 하나의 충격압력이 발생하는 동안에 압력 변화를 관찰한 것으로 일단 큰 압력이 발생한 후 2차, 3차에 걸쳐 작은 충격압력이 발생하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 일단 자신의 cell에서 충격적인 압력이 발생한 후 인접한 cell에서 연속적으로 충격적인 압력이 발생하고 있다는 것으로 의미한다. 실제 현상에서는 이러한 과정이 연속적으로 발생하여 비교적 매끈한 변화를 보일 것이나, 수치계산에서는 공간과 시간의 분할로 인해 이처럼 불연속적인 압력이 발생하고 있다.

3.4 30만톤급 VLCC에 대한 적용예

본 연구에서는 실선에 대한 계산도 수행하여 본 연구의 실용성을 살펴보았는데, 대상선은 이중선체구조의 30만톤급 초대형 유조선이다[12]. Fig.14와 같은 G/A를 가지는 이 선박은 길이가 길고 폭이 좁은 탱크를 가지고 있기 때문에 횡동요보다는 종동요 (pitch)에 대한 sloshing 현상이 더욱 문제가 될 것이다. 이 선박의 탱크 내부에는 길이방향의 중앙부에 하나의 높은 swash bulkhead가 있고 한쪽 벽면에 3개의 stringer를 가지고 있는데, 탱크길이는 약 49m, 깊이는 약 29m 정도이다. 보다 현실적인 선체운동을 가정하기 위해 Fig.15와 같은 불규칙한 운동을 가정하였고, mesh는 길이, 폭방향으로 각각 30, 20개를 분포하였다. 또한, 계산에 적용된 적재율은 60, 80, 90%이고 시간간격을 0.02초로 택하였다.

계산결과는 Fig.16~Fig.20에 도시하였다. Fig.16

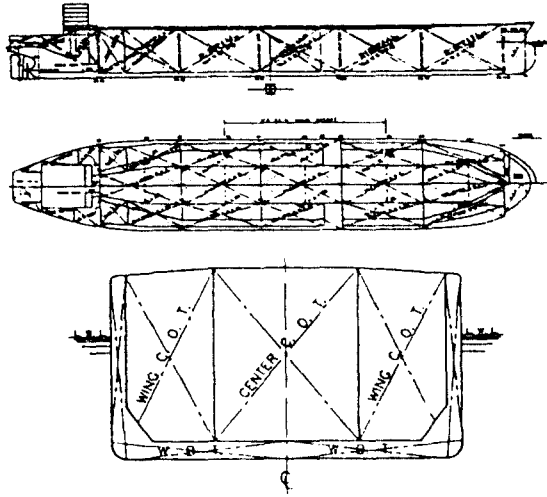


Fig. 14 General arrangement of 300,000 DWT COT

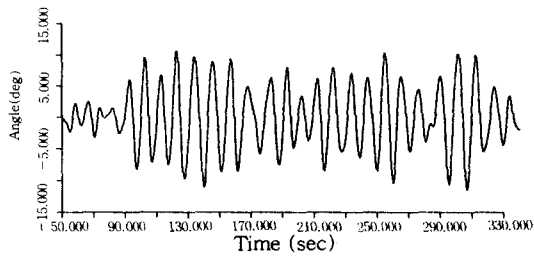
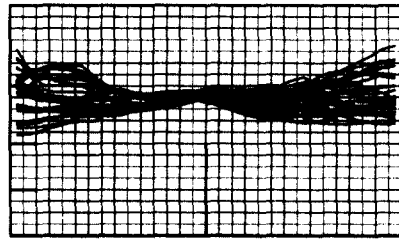


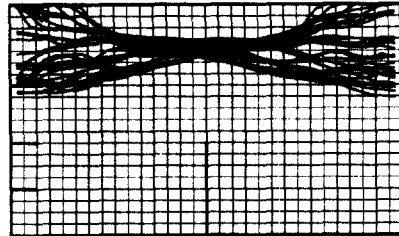
Fig. 15 Irregular motion of tank (COT Model)

은 자유표면이 30초동안에 자유표면이 위치하는 영역을 도시한 것으로, 이 그림으로 부터 80%와 90%의 적재에서 탱크상부에 충격압력이 발생할 것이라는 것을 예측할 수 있다. 또한, 60%의 적재상태에서는 가장 높은 곳에 위치한 3번째 stringer에서 충격적인 특성을 지니는 압력이 발생할 것이라는 예측도 가능하다. Fig.17은 한 시간단계에서의 속도벡터와 압력분포를 도시한 것으로 중앙부의 swash bulkhead로 인해 와류(vortex)의 발생을 볼 수 있고 이 내부재의 양쪽에서 압력의 차이가 있다는 것도 알 수 있다.

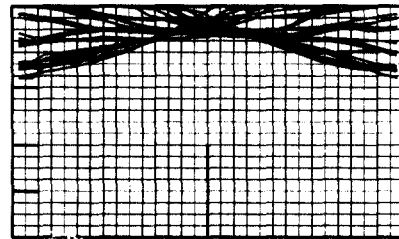
Fig.18은 60%의 적재경우에 3번째 stringer의 하단부와 벽면이 만나는 cell에서 계산된 압력값인데, 예상대로 충격적인 압력이 발생하고 있음을 볼 수 있다. Fig.19는 왼쪽의 탱크상부에서의 계산압력으로서 역시 충격압력이 발생하고 있음을 볼 수 있다. Fig.20



(a) 60% Filling



(b) 80% Filling



(c) 90% Filling

Fig. 16 Domain of free-surface movement (COT Model, T=100~130sec)

은 90%적재 경우에서 stringer가 있는 쪽(왼쪽)과 없는 쪽(오른쪽)의 탱크상부 및 아래 1번째 stringer에 작용하는 압력을 나타낸 것으로 stringer가 없는 쪽에서의 압력이 더욱 큰 값을 가짐을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 강제동요 중인 2차원 탱크 내부에 부분적으로 적재된 유체의 움직임과 이로 인한 유동압력을 수치계산기법을 사용하여 해석하여 보았다. 특히, 탱크 상부에 가해지는 충격압력의 예측을 위해 충격완화의 개념을 도입하였고, 실제 선박에 대한 적용도 가능토록 내부재와 경사면의 존재도 고려하였다. 이러한 연구로부터 다음과 같은 결론을 내리고자 한다.

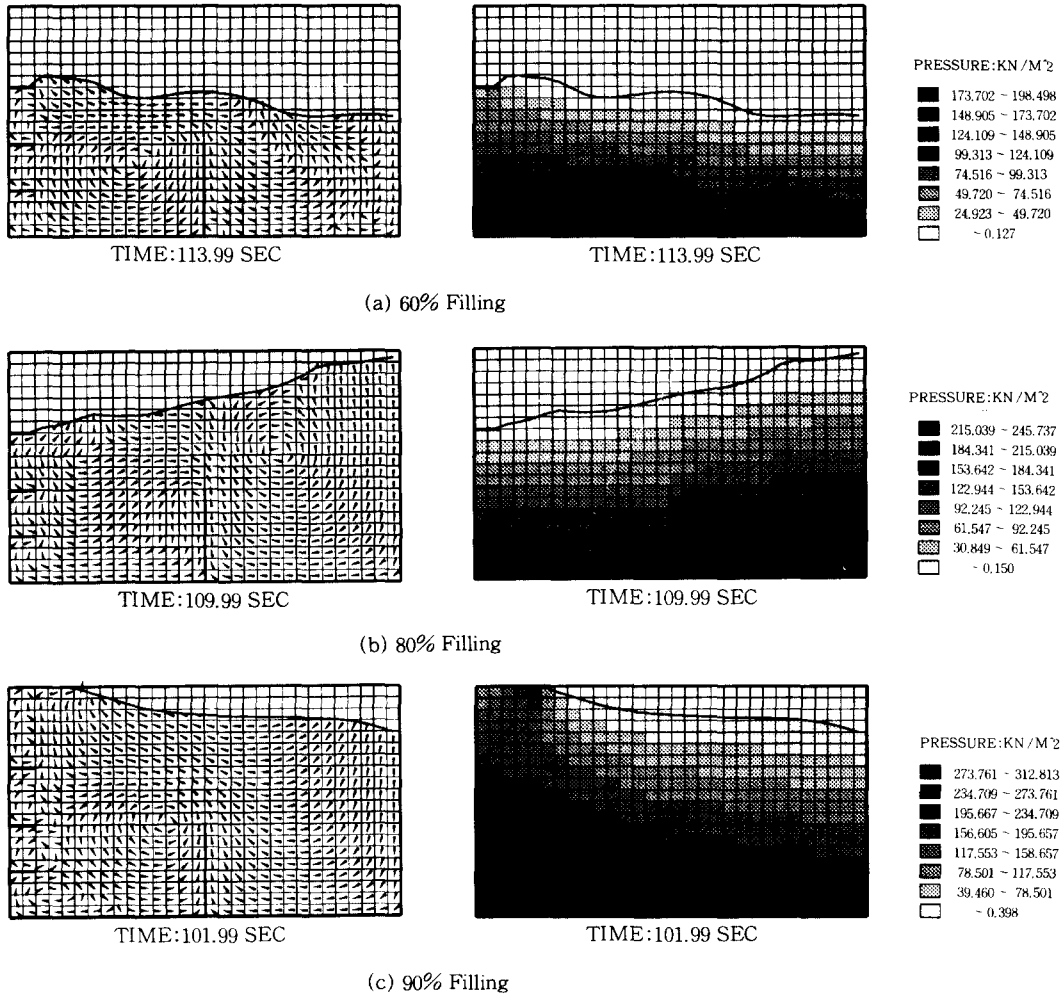


Fig.17 Velocity vectors and pressure distributions at one time instance(COT Model)

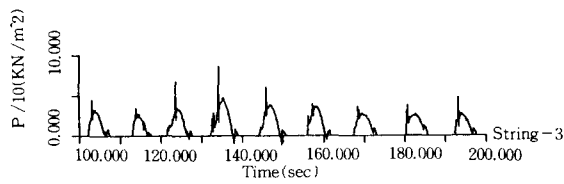


Fig.18 Time history of pressure at the lower corner of 3rd stringer (COT Model, 60% Filling)

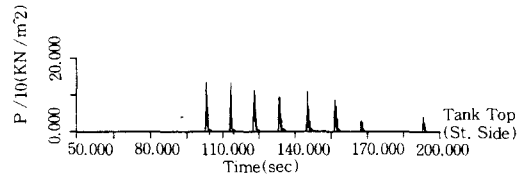


Fig.19 Time history of pressure at the corner of tank top (Left Side) (COT Model, 80% Filling)

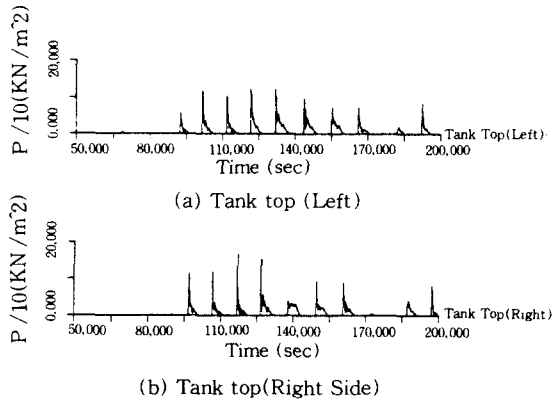


Fig.20 Time history of pressure at the corner of tank top and side wall (COT Model, 90% Filling)

(1) Sloshing 으로 인한 충격압력을 수치계산기법을 이용해 예측하기 위해서는 일반적인 자유표면과 문제에서 작용되는 경계조건만으로는 힘들며, 본 연구에서는 충격완화영역의 개념을 도입하여 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

(2) 수치계산을 통해 예측된 충격압력은 실험결과와 유사한 경향을 보이고 있는 것으로 판단되며, 이러한 사실로부터 본 연구에서 적용한 기법이 실선계산에서도 유용히 사용될 수 있다고 생각된다.

(3) 예측된 충격압력에 대한 올바른 적용을 위해서는 유체-구조 상호작용에 대한 올바른 이해가 반드시 필요하며, 이를 바탕으로 보다 올바른 유동압력을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] T.J. Bridges, A Numerical Simulation of Large Amplitude Sloshing, *3rd Int. Congress on Num. Hydrodynamics*, 1981
- [2] N.E. Mikelis, & et al, Sloshing in Partially Filled Liquid Tanks and Its Effect on Ship Motions, *The Naval Architect, RINA*, 1984
- [3] 김용환, 박용진, 수치기법을 이용한 Sloshing 문제의 해석, *대한조선학회지*, 제 29권 3호, 1992
- [4] O. Eguchi & O. Niho, A Numerical Simulation of 2-Dimensional Sloshing Problem, Mitui Zosen, *Technical Report*, 1988
- [5] LR.FLUIDS - Theoretical Manual, *LLOYD System. Development Report TPDD, 90/1*, 1990
- [6] K.C. Chan & R.L. Street, SUMMAC - A Numerical Model for Water Waves, Stanford University, *Report No.135*, 1970
- [7] J.A. Vieceili, A Computing Method for Incompressible Flows Bounded by Moving Walls, *Jour. of Computational Physics*, Vol. 8, 1971
- [8] M. Arai, Experimental and Numerical Study of Sloshing Pressure in Liquid Cargo Tanks, *Journees Vibrations Chocs*, 1984
- [9] J. Navickas, & et al, Sloshing of Fluids at High-Fill Levels in Closed Tanks, Symposium on Computers in Flow Predictions and Fluid Dynamics Experiments, *Annual Winter Meeting of American Society of Mechanical Eng.*, 1981
- [10] 김용환, 박용진, 김용수, 체계적 Sloshing 해석 System 구축 II, 대우조선 기술연구소, 보고서 SH9121, 1993
- [11] C.A. Blixell, Results of Model Sloshing Experiences For Two Baul-Carrier Shaped Tanks Due to Rolling, *LLOYD Development Unit Report No.50*, 1974
- [12] 봉현수, 김만수, 이종구, 초대형 이중선체 유조선의 구조설계, *대한조선학회 추계연구발표회*, 1992
- [13] Sloshing Loads and Scantling Assessment for Tanks Partially Filled with Liquids, *LLOYD Procedures Manual TPDD 90/11*, 1990