

유체 충격압력 시계열의 모델링에 관한 기초 연구

노인식^{†*}, 이재만*, 염철웅**

충남대학교 선박해양공학과*
한국선급**

A Fundamental Study for Time History Modeling of Fluid Impact Pressure

In Sik Nho^{†*}, Jae-Man Lee* and Cheol-Woong Yeom**

Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University*
Korea Register of Shipping**

Abstract

To consider effects of essential parameters of water impact pressure on dynamic structural responses of bow bottom structures, a parametric study for a ship bottom panel is carried out. The idealized pressure time history models were assumed by triangular and rectangular shapes in time domain. The main loading parameters are duration time and peak pressure value maintaining the same impulse value. The structural models for local bottom stiffened panels of a container ship are analysed. The natural frequency analysis and transient dynamic response analysis are performed using MSC/NASTRAN. Added mass effects of contacting water are considered and the pressure distributions are assumed to be uniform in the whole water contacting surface. The effects of loading parameters on the structural responses, especially maximum displacements, are considered. Besides the peak pressure value, effects of duration time correlated with natural frequencies are thought to be the important parameters.

※Keywords: Slamming(슬래밍), Water impact pressure(수면충격압력), Transient dynamic response analysis(과도동적응답해석), Added mass effect(부가질량효과)

1. 서론

슬래밍에 의한 선수저, 플레어 손상에 대한 문 제점은 이미 오래 전부터 잘 알려져 왔고 최근에는 LNG 탱크 내부의 슬로싱에 의한 손상이 시급히 해결해야할 새로운 문제점으로 대두되고 있다.

접수일: 2009년 12월 18일, 승인일: 2010년 3월 23일

† 교신저자: isnho@cnu.ac.kr, 042-821-6622

구조물에 작용하는 유체충격력 산정을 위한 연구는 Wagner(1932)의 기초이론이 그 효시로 보인다. 그 이후 Zhao and Faltinsen(2003) 등 여러 연구자들에 의해 다양한 이론적 접근 방법이 제안되고 있고, 최근에는 전산유체역학(CFD)의 발전에 따라 다양한 수치해석법의 적용이 시도되고 있다.

그러나, 슬래밍이나 슬로싱과 같은 유체유동으로 인한 충격현상은 본질적으로 복잡하고 아직 그 물리적 거동이 이론적으로 완전하게 규명되지 못한 상태이기 때문에 유체유동을 엄밀히 해석하여 충격압력을 계산하는 방법을 실선의 구조설계에 그대로 적용하기는 어려운 단계이다.

최근에는 여러 가지 정밀한 이론적 수치적 해석법과 병행하여 실험과 실선 계측을 실시함으로써 유체충격압력의 시계열과 함께 구조물의 동적 거동을 해석하고자 하는 시도가 이루어지고 있고 부분적으로 좋은 결과를 주고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 현재 많이 활용되고 있는 모형실험의 경우, 축척효과로 인하여 결과의 정성적 경향은 인정되나 실제 선체 설계에 직접 적용하기에는 여러 가지 문제점이 남아 있고, 실선 계측법은 실험의 어려움과 더불어 비용, 인력, 소요기간 측면에서 볼 때 현실성있는 대안으로 보기는 어렵다. CFD에 바탕을 둔 정밀 수치계산법 역시 방대한 계산 및 전후처리 시간 때문에 이 방법이 일반화되어 실제 선수저 구조의 내 충격 설계에 활용되기에는 아직 현실적으로 많은 문제가 있다.

따라서 선수부 유체 충격하중에 대한 구조응답을 종래의 등가 최대압력 추정법과 정적 구조해석법을 결합한 방식에서 벗어나, 좀 더 합리적이면서도 CFD법과 같이 방대한 계산을 피할 수 있는 구조 안전성 평가 방법으로서 충격압력의 시계열에 의한 시간영역 과도 동적응답해석법 도입은 의미있는 시도로 판단된다.

그 첫 번째 단계로서 슬래밍에 의한 유체충격압력의 시계열을 합리적으로 추정하는 과정은 필수적이다. 여러 연구자들이 모형 실험 또는 실선 계측을 통하여 얻어진 시간 경과에 따른 충격압력의 변화 data를 바탕으로 간단한 형태의 시계열을 제안하고 있다(Lee and Kim 1999, Watanabe 1987, Paik and Shin 2006).

실제 실선계측이나 모형실험에서 계측된 유체충격압력의 시계열은 특성상 매우 짧은 시간동안 극히 높은 크기를 보이는 고주파수의 noise가 포함되는 경향이 있고, grid 크기 및 형상, 시간증분 등 수치해석 상의 여러 가지 인자들 또는 어떤 수치해석 기법을 선택하느냐에 따라서도 상당한 차이를 보이고 있다. 실험에 있어서도 실험장비의 민감도 센서의 크기 및 종류에 따라 매우 민감하게 달라지는 현상을 보인다. 따라서 충격압력의 피크치를 구조설계에 그대로 적용하기 어렵기 때문에 구조 거동의 관점에서 핵심적인 요소만을 분리하여 이상화할 필요가 있다. 특히 극히 짧은 시간 동안 작용하는 충격압력 피크치의 크기 자체가 실제 구조물의 동적 응답에 얼마나 중요한 영향을 주는지에 대한 자세한 고찰은 아직 이루어지지 않고 있는 것으로 보인다.

본 연구에서는 이러한 유체충격압력이 구조물의 동적 거동에 미치는 영향을 상세히 고찰함으로써 복잡한 형태의 유체충격압력 시계열을 합리적으로 모델링하는 한편, 비교적 정밀하게 구조물의 동적 거동을 예측할 수 있는 방안을 제안하였다.

2. 유체충격압력의 특성

Nahm et al(2007), Watanabe et al(1987)의 모형 선체의 슬래밍 실험, Yum and Yun(2008)의 FLUENT에 의한 수치해석 기법, Lee et al(2007)의 실선 계측 등의 결과들을 종합해 보면 유체 충격압력의 시간 이력은 대체로 다음과 같은 순서를 보인다는 것을 확인할 수 있다.

1단계: panel이 수면에 닿는 순간부터 충격 압력은 급격히 최대치까지 상승한다.

2단계: 압력이 최대치에 도달한 순간부터 다시 급격히 감소되나 그 감소 속도는 상승 시보다는 상대적으로 느리다.

3단계: 충격압력이 어느 정도 수준까지 떨어지면 상당한 시간 동안 그 수압을 그대로 유지하다가 서서히 소멸된다.

결국 충격압력의 시간 축에 대한 프로파일은 최대압력까지 초기 상승시간, 최대압력의 크기, 하강

시간, 유지 시간, 소멸시간 등의 인자로 표현될 수 있다. 여러 선행 연구결과들에 의하면 충격하중에 대한 구조물의 응답은 (2.1)식과 같은 충격하중의 역적과 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Paik and Shin 2006, Lee and Kim 1999).

$$I = \int P(t)dt \quad (2.1)$$

결국 압력 시계열의 면적이 단위 면적당 역적으로 나타나므로 Paik and Shin(2006)는 슬래밍에 의한 유체충격 압력을 Fig. 1과 같이 동일한 역적을 갖는 단순한 사각형 impulse로 이상화한 바 있고 Lee et al(1999)과 Lee and Kim(1999)은 슬래밍 충격 거동 해석을 위하여 삼각형의 초기 impulse 이후 일정 크기의 압력이 상당 시간 지속되는 Fig. 2과 Fig. 3과 같은 시계열을 사용하였다.

본 연구에서는 유체충격압력의 시계열 형상이 구조물의 동적 거동에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 여러 가지 다양한 형상의 시계열을 이용하여 실제 선수저 보강 panel의 동적 과도 응답해석을

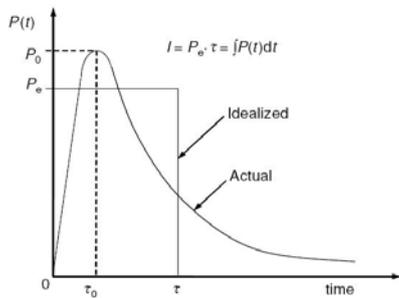


Fig. 1 Idealized time history of slamming impact pressure(Paik and Shin 2006)

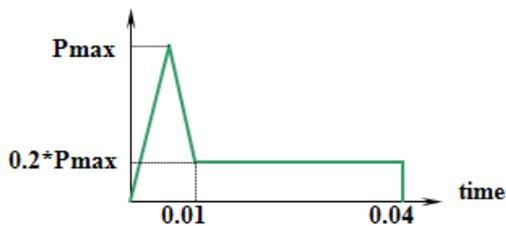


Fig. 2 Idealized time history of slamming impact pressure(Lee et al 1999)

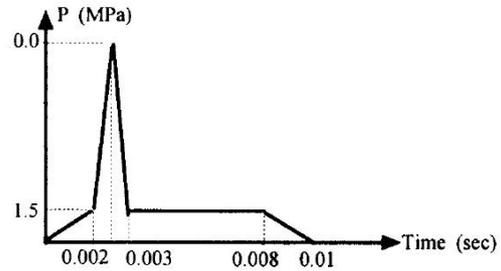


Fig. 3 Idealized time history of slamming impact pressure(Lee and Kim 1999)

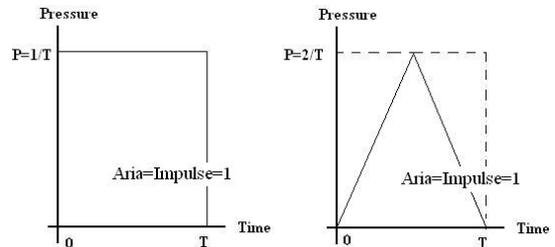


Fig. 4 Simplified rectangular and triangular time history of slamming impact pressure

수행하였다. 우선 Fig. 4에서 보는 바와 같은 가장 간단한 삼각형 및 사각형 impulse 형상의 시계열을 가정하였다. 그리고, 각각의 시계열은 충격압력의 최대치와 지속시간을 parameter로 하여 모두 같은 크기의 역적을 갖도록 조정하였다.

이때, Impulse의 작용시간은 panel의 1차 고유진동주기(T_n)와의 상대적인 크기로 나타내어 $2T_n - T_n/32$ 까지 7단계로 구분하여 해석하고 그 결과를 고찰하였다.

3. 수치 계산

3.1 개요

슬래밍 충격압력에 의해 선체 거더의 전체적인 보 굽힘 거동과 함께, 선수저 및 플레어 부분 구조에 국부적인 손상이 발생할 수 있다. 현재까지 이루어진 대부분의 연구가 거시적 측면에서 선체 거더의 whipping에 의한 굽힘 거동 해석에 초점을 두고 이루어져 왔기 때문에 유체와 직접 접촉하는 선저구조의 충격압력에 대한 국부적 구조 응

답에 관해서는 상대적으로 연구성과가 불충분한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 충격압력에 의한 선체 국부구조 거동에 초점을 두었다.

실제 8,600TEU급 컨테이너선의 선수저 panel을 대상으로 여러 가지 형상의 유체충격압력 시계열에 대한 과도 응답해석을 수행하고 그 결과를 검토하였다. 대상 panel의 형상은 Fig. 4에 보인 바와 같다.

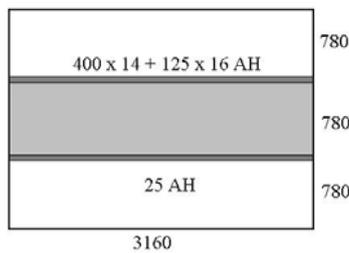


Fig. 4 Bow bottom panel and modeling range of 8,600TEU container ship.

3.2 해석 모델 및 고유진동해석

종늑골 방식 8,600TEU 컨테이너 운반선의 선수부 구조의 부분구조로서 3 bay panel을 선택하였고, 이를 좀 더 간단하게 해석하기 위하여 그 중 중앙부 panel을 선택하였다. 해석에는 상용유한요소 구조해석 code인 MSC/NASTRAN을 사용하였으며 접수면의 부가질량 효과를 고려하였다. 주안점이 충격초기의 최대응답이기 때문에 구조감쇠는 큰 의미가 없으나 0.04로 간주하였다.

먼저 두 panel의 고유진동수를 계산하여 그 결과를 Table 1에 비교하였다. 3-bay panel에서는 주위 4 변을 모두 고정단으로 간주하였고, 1 panel의 경계조건으로는 종통 보강재에 접하는 장 변은 단순지지, 단 변은 3-bay panel 과 마찬가지로 고정단으로 처리하였다. Table 1에서 보는 바와 같이 두 panel의 1차 고유진동수는 비슷한 수준을 보이고 있다. 유체충격압력 작용 시 panel의 변형 거동이 1차진동형에 가깝다고 볼 수 있으므로 3-bay panel 대신 1 panel만 해석하여도 거의 유사한 거동을 얻을 수 있음을 의미하며 이후 슬래밍 충격에 대한 과도응답 역시 중앙부 1 panel model로써 모든 해석을 수행한다.

Table 1 Summary of natural frequencies.

Order	Natural frequencies (Hz)	
	3-bay panel	Center panel
1st	87.124	69.497
2nd	116.80	86.004
3rd	154.61	113.36

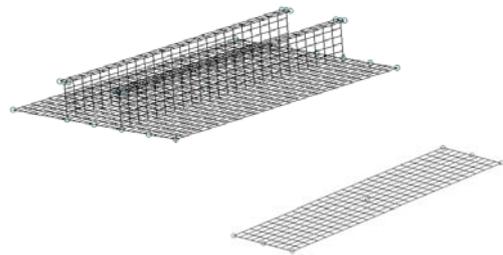


Fig. 5 Finite element models for 3-bay panel and center panel.

3.3 시간영역의 과도응답해석

선수저부 하나의 panel에 대하여 2장에서 보인 사각형 및 3각형 모양의 유체충격압력의 시계열을 적용하여 시간영역에서의 과도응답해석을 수행하였다. 여러 가지 시간영역 직접적분 알고리즘 중에서 unconditionally stable 한 결과를 주는 Newmark-β 알고리즘을 사용하였다.

초기의 정지 상태에서 부터 1차 고유진동 주기의 8배 정도에 해당되는 0.12초 동안 panel의 동적응답을 계산하였다. 본격적인 해석에 앞서 시간 증분 크기에 따른 해석결과의 의존성을 검토하기 위해 전 과정을 1200, 2000, 3000, 4000개의 시간증분으로 나누어 계산한 다음 계산된 변형응답의 시계열을 비교하였다.

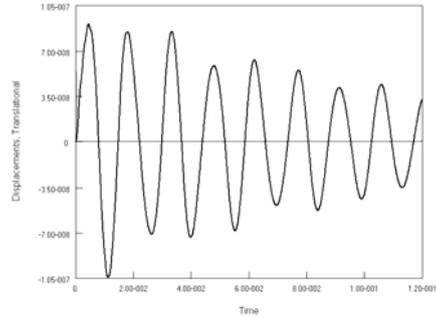
시간증분 Δt가 너무 작으면 해석에 너무 많은 시간이 소요되는 문제점이 있고 또 너무 크면 4각형 형상의 압력 시계열을 표현할 때 급격한 압력 증가 및 감소 현상을 제대로 표현하기 어렵다는 문제가 있다. 본 연구에서는 4가지 경우 모두 거의 동일한 결과를 주고 있어 정도에 큰 문제가 없음이 확인된 2000 시간 증분수(Δt=0.00006초)의 경우를 선택하여 나머지 모든 해석에 적용하였다.

동일한 역적(= $1 Pa \cdot sec$)을 가지면서 지속시간이 서로 다른 사각형 및 삼각형 impulse가 작용할 때 panel 중앙부에서 처짐량의 시간 이력을 Fig. 6에 보였으며, 각 경우의 최대값을 Table 2에 정리하였다. 여기서 T 는 panel의 1차고유진동 주기이다. 사각형, 삼각형 impulse 모두 충격압력의 작용시간이 $2T$ 에서 $T_n/8$ 로 짧아질수록 응답의 크기는 점차 증가됨을 알 수 있다. 그러나 작용시간이 $T_n/8$ 보다 더 짧아지면 응답의 변화가 현저하게 줄어들어 삼각형 사각형 impulse 모두 거의 비슷한 값으로 수렴되고 있다. 특히 삼각형 impulse에서는 최대 처짐 및 시간이력이 거의 동일하게 유지되고 있어 충격에 대한 구조응답이 작용하중의 역적에 의존한다는 일반적 가설이 거의 그대로 적용되고 있음을 보여준다. 그러나 사각형 impulse인 경우에는 작용시간이 $T_n/8$ 보다 더 줄어드는 경우에도 약간씩 응답의 크기가 증가하고 있음을 나타내고 있다. 이것은 impulse의 작용 초기에 워낙 급격히 압력이 증가하여 수치적 오차에 의해 비현실적인 충격으로 작용하기 때문인 것으로 보인다. Fig. 6 (a) 및 (b)에서 하중방향의 양의 응답치 보다는 오히려 음의 응답치가 더 크게 나타나는 것은 고차 진동모드의 영향일 수 있다.

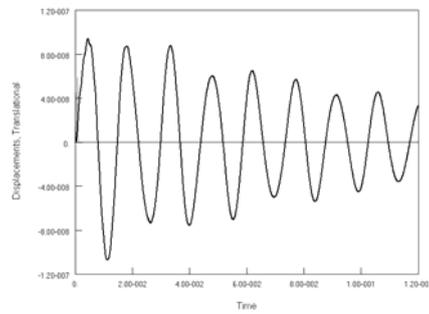
기존에 발표된 실선 계측 또는 수치해석으로 구해진 슬래밍 충격압력의 초기 상승시간(rising time)은 선수부의 입수 속도와 deadrise 각도에 따라 달라질 수 있으나 대체로 0.01초 정도 이상의 order로 나타나고 있다(Lee et al. 1999, Yum

Table 2 Summary of max. displacements.

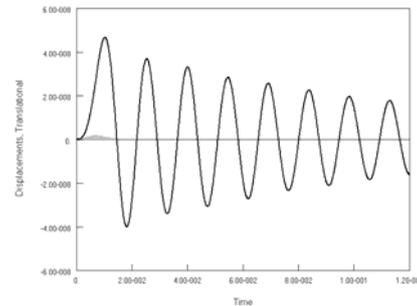
Rising and decaying time (sec)	Displacement	
	rectangular ($\times 10^{-9}$ m)	triangular ($\times 10^{-9}$ m)
$T_n/32$ (0.000449)	106.9	106.7
$T_n/16$ (0.000898)	104.9	106.7
$T_n/8$ (0.001796)	104.9	106.7
$T_n/4$ (0.003593)	94.19	102.2
$T_n/2$ (0.007185)	66.4	86.0
T_n (0.014370)	31.8	46.5
$2T_n$ (0.028740)	16.0	15.2



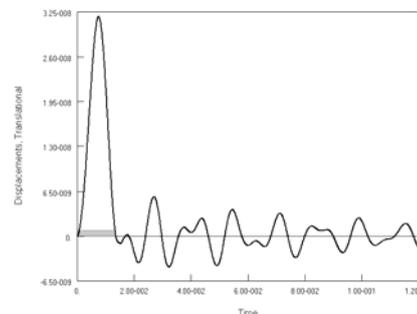
(a) duration time= $T_n/16$, rectangular impulse



(b) duration time= $T_n/16$, triangular impulse



(c) duration time= T_n , triangular impulse



(d) duration time= $2T_n$, rectangular impulse

Fig. 6 Time history of displacements at mid point.

and Yun 2008, lee et al. 2007). 본 연구의 충격 압력 지속시간은 선저 panel의 1차 고유진동수 order 이기 때문에 Table 1에서 보듯이 실제 슬래밍 충격압력의 초기 상승시간 보다는 매우 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 실제 슬래밍 충격압력을 받는 선저 보강 panel의 동적거동 문제를 해석함에 있어서 역적만 동일하게 유지하는 방법으로 유체 충격압력을 모델링한다면 합리적인 해석 결과를 기대하기는 어렵다는 사실을 보여준다.

4. 결론

여러 가지 형상의 슬래밍 충격압력 시계열을 적용하여 실제 8,600TEU급 컨테이너선 선수저 panel의 동적 구조응답을 고찰하였다.

본 연구를 통하여 일반적인 선수저 panel의 슬래밍 뿐만 아니라 슬로싱 등 일반적인 유체 충격 응답 문제에 있어서 충격압력 초기 피크치의 작용 시간이 보강 panel의 고유진동 주기보다는 상당히 긴 경우에는 충격압력의 역적만이 중요한 인자로 작용하는 것이 아니라 같은 역적의 경우에도 peak 압력크기와 지속시간의 조합 및 구조물의 고유진동 주기에 따라 차이가 있을 수 있기 때문에 이에 대한 고려가 필요한 것으로 결론 내릴 수 있다.

후 기

이 논문은 지식경제부 산업원천기술개발사업인 "LNG 관련 선박 또는 해양구조물의 탱크 설계를 위한 슬로싱 해석 기술 개발 및 관련 인프라 구축 (10033656)" 과제와 2008학년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국대학교육협의회 대학교수 국내교류 연구비 지원에 의한 결과입니다.

참 고 문 헌

- Lee, S.G. and Kim, M.S., 1999. "Development of Structural Analysis System of Bow Flare Structures - Prediction of Wave Impact Load Calculation," Journal of the Society of Naval Architecture of Korea, Vol. 36, No.4, pp. 77-86.

- Lee, C.K., Kim, S.C. and Yoon, J.H. 1999. "Bottom Slamming Analysis of VLCC Using Nonlinear Transient Analysis in MSC/NASTRAN," Proceeding of Annual Meeting of Structural Research Group, The Society of Naval Architecture of Korea.
- Lee, T.K., Rim, C.W., Kim, Y.N., Heo, J.H. and Kim, B.H., 2008. "A Study on Measurement of Flare Slamming of Large Container Vessel(II)," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 3, pp. 279-284.
- Nahm, J.O., Kang, H.D., Chung, J.Y., Kwon, S.H. and Choi, H.S., 2007. "An Experimental Study on Slamming Phenomenon by Forced Impact," Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 21, No. 1, pp. 40-44.
- Paik, J.K. and Shin, Y.S., 2006, "Structural Damage and Strength Criteria for Ship Stiffened Panels under Impact Pressure Actions Arising from Sloshing, Slamming and Green Water Loading," Ships and Offshore Structures, Vol. 1 No. 3 pp. 249-56.
- Wagner, V.H. 1932, "Über Stoss und Gleitvergänge an der Ober fläche von Flüssigkeiten," Aeitschrift für Angewandle Mathematik und Mechanik, Vol. 12, pp. 193-215.
- Yum, D.J. and Yoon, B.S., 2008, "Numerical Simulation of Slamming Phenomena during Water Entry of 2-D Wedges," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 45, No. 5, pp. 477-486.



< 노인식 >



< 이재만 >



< 염철웅 >