

강제 입수에 의한 슬래밍 현상에 관한 실험적 연구

남중오* · 강효동* · 정장영** · 권순홍** · 최한석**

*부산대학교 조선해양공학과 대학원

**부산대학교 조선해양공학과

An Experimental Study on Slamming Phenomenon by Forced Impact

JONG-OU NAHM*, HYO-DONG KANG*, JANG-YOUNG CHUNG**, SUN-HONG KWON** AND HAN-SUK CHOI**

*Graduate School, Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

**Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Slamming 슬래밍, Impact pressure 충격 압력, Pressure time history 충격 압력 시계열, Pressure coefficient 충격 압력 계수, Jet spray 제트 스프레이

ABSTRACT: This paper presents the experimental results on slamming phenomenon. The air pressure cylinder was used to ensure repeatability of the impact. The results showed that the adopted experimental technique was excellent in terms of repeatability, compared to that of the free drop tests. The pressure time histories, magnitude of peak pressure and the behavior of jetspray were obtained. The flat specimen was tested for various incident angles. To estimate the incident speed of the specimen, a high-speed camera was used. The high-speed camera was also a useful tool in understanding the behavior.

1. 서 론

선박은 육상의 다른 구조물과는 달리 바다를 향해할 때 파랑과 선박의 상대운동으로 인해 슬래밍(Slamming)이 발생하여 선체에 큰 충격력이 작용하게 된다. 선박에 작용하는 슬래밍과 같은 유체력은 그 현상의 복잡성으로 인하여 이론적 접근이 매우 어려운 실정이다. 그러므로 실험적 연구 없이는 선박에 작용하는 유체력의 거동 특성을 정확히 파악하기 어렵다. 따라서 각종 동적 효과가 포함된 실험적 연구는 필수적이다. 기존의 연구로서 Hagiwara and Yuhara(1974)는 대형 선박의 선수에 작용하는 파랑 충격 압력의 특성을 결정하기 위하여 3차원이며 준-실린더형으로 축척 1/3인 선수 모델을 이용하여 유체 충격시험을 하였다. 입수각은 0°, 5° 및 15°이고 낙하 무게는 10ton이며 최대 낙하 높이가 5m까지로 하여 정수 표면에 낙하시켰다. 실험 결과로부터 최대 충격 압력, 충격 속도, 입수각에 대하여 최대 압력값은 근사적으로 충격 속도의 제곱으로 증가하고 선수의 곡률 반경에 의한 것보다는 입수각에 의한 것이 보다 영향을 많이 받는 것을 확인하였다. Chung et al.(2006)은 LNG 운반선의 보냉 시스템을 LM(Linear motion)가이드를 이용하여 실험체가 원하는 각도를 유지하면서 최소의 마찰로 자유 낙하할 수 있도록 하여 낙하 높이 및 입수각을 변화시켜 시리즈 낙하시험을 수행하여 그 거동 특성을 연구하였기에 실험 방법 등에 대하여 이 실험의 모델로 삼았다. 낙하 실험은 자유 낙하를 통한 입수 속도를 조절하는 것이 전통적인 방법이다. 이 방법의 단점은 낙하 시 실험체의

자세 유지가 대단히 어려운 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하고자 본 연구에서는 공기압 실린더를 이용한 강제입수를 통한 강제 충격에 의해 발생하는 슬래밍 현상을 실험을 통하여 정리 분석하고, 획득 결과를 바탕으로 고효율 고정도 수치 해석에 적용할 수 있는 기초 데이터를 확보하고자 한다. 또한 초고속카메라를 통하여 슬래밍 연구 관점에서 단순한 또는 복잡한 구조 및 형상에 대하여 이론적, 수치적 해석 접근이 어려운 다양한 문제를 해결하기 위해, 실험적인 방법으로 슬래밍 현상으로 인한 충격 압력 시계열(Pressure-time history)과 이 때 Jet spray의 관찰을 통해 정보를 도출하는 것을 목적으로 한다.

2. 실험

2.1 실험 장소 및 시험체

본 실험은 부산대학교 첨단 조선 공학 연구 센터에 설치된 2차원 수조에 설치된 지그(Jig)에 부착된 공기압 실린더를 이용하고 실험체를 설계·제작하여 실험을 수행하였다. Fig. 1에서 보이는 수조의 크기는 4000mm×347mm×700mm(L×B×H)이며, 실린더에 부착한 실험체는 강재로 제작한 정사각형 평판과 직사각형 평판으로서 크기는 각각 280mm×280mm×10mm, 560mm×280mm×10mm(L×B×H)이다.

2.2 실험 장치

실험에서 실린더를 이용하고 실험체를 낙하시켜 얻어낸 강제충격에 의한 동적인 압력 입력 신호를 처리하기 위해 Fig. 2와 같은 시스템을 구성하였다. 강제충격 시 생기는 압력을 계측하기 위한 압력계와 이러한 신호를 처리하는 Amplifier 및 입력 신호를 분석하는 컴퓨터로 구성된다.

교신저자 남중오: 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

051-510-3965 ukihako@pusan.ac.kr

Table 1 Data acquisition system (amplifier) specification

Items	Unit	Value
Sampling frequency	Hz	1~100 kHz (16 steps)
Maximum sampling frequency	kHz	100
Voltage measuring range	Volt	±20
Resolution of A/D conversion	bits	16
Date storage	MB	Compact flash memory card(128 MB to 1 GB)
Operating temperature range	°C	0~50
Dimensions	mm	100×50×110
Weight	g	500

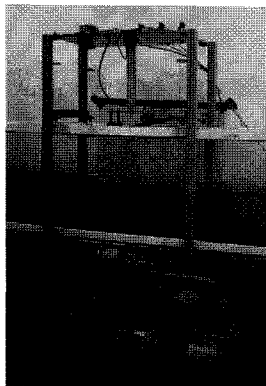


Fig. 1 Photo of wave flume

Amplifier는 KYOWA EDS-400A를 이용하였으며, EDS-400A의 Calibration은 측정기내에 전압발진회로를 삽입되어 있어 전압을 발생시켜 확인 및 교정을 하는 방식이다. 주요 제원은 Table 1과 같다.

1 Unit당 4개의 신호를 처리할 수 있기 때문에 3개의 압력계를 부착한 본 실험에서는 1 Unit을 사용하였으며, 20kHz의 Sampling rate로 최대 압력 크기와 압력 지속 시간을 측정하였다. 압력 게이지(Pressure gauge)는 임의의 입수각에서 강제 충격 시 압력을 측정하기 위하여 KYOWA의 스트레인 게이지 방식의 PS-50 KAM536을 이용하였다. 압력계의 최대 허용계측 압력은 50bar이다. Fig. 3에서 보이는 압력계는 직경은 5mm이고 두께는 2mm이다. 압력계의 주요 제원은 Table 2와 같다.

실험에서의 압력계의 부착위치는 강제충격 시 입수각(유체흐름)의 방향에 따라 Fig. 4와 같이 강제 평판 표면에 부착하였다. 압력계의 정확한 부착 위치는 Fig. 5와 같다. 지그에 부착되어 강제 충격에 의한 슬래밍 현상을 가지기 위하여 이용한 공기압 실린더는 Festo사의 DNC-32모델로 Air compressure로 구동된다. 실험에서는 8bar의 압력값을 고정하고 약 2.4m/s로 실험체를 입수시켜 강제충격을 가능하게 하였다. 이 속도는 실린더가 부착된 실험체를 입수시킬 수 있는 최대 속도이며, 이는 실험 높이에서 자유 낙하시킬 때의 속도인 약 2.2m/s보다 빠

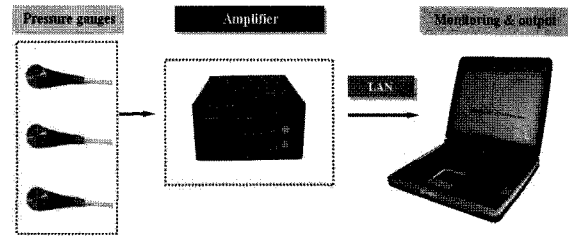


Fig. 2 Data acquisition system

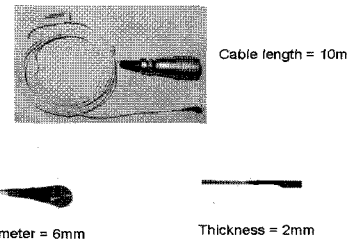


Fig. 3 Pressure gauge

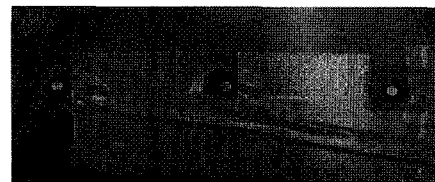


Fig. 4 Photo of pressure gauges setup

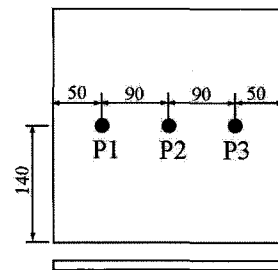


Fig. 5 Location of pressure gauges

른 속도이다. 또한, 입수 시 가이드 평판을 설치하여 입수할 때, 각도 변화가 용이하게 하였다. 실험체의 변화된 입수 각도를 전자 각도기를 사용하여 매 각도를 변화시킬 때마다 중력에 대한 보정을 하여 0°를 맞추어 수면과 실험체가 강제 충격 시 이루는 입수각을 주었다. (Fig. 6참조) 300mm 모든 실험의 결과는 Fig. 7에서 보이는 REDLAKE사의 초고속카메라 MotionPro X-3로 영상을 기록하였다. 초고속카메라의 제원은 Table 3에 나타내었다. 최대 1초당 64000 프레임수를 가지는 초고속카메라는 영상 분석 프로그램인 TEMA 소프트웨어를 통하여 강제충격 시 실험체의 입수 속도의 측정과 Trapped air로 야기된 Air pocket 현상과 또한, Jet spray현상을 관찰하였다. 본 실험은 공기압 실린더를 이용하여 반복 실험이 가능하게 하였고 각 경우에 있어 동일한 조건으로 최소 3번 이상의 반복실험을 통하여 반복성을 확인하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Air compressure는 실험체가 임의 각도를 가지고 강제 충격을 할 때 획득하는 압력값을 일정하게 유지 할 수 있도록 8bar를 유지하여 일정속도로 낙하하게 하였고 강제 입수 높이는 실험체의 밑면 모서리 중 각도 변화 후의 수면에서 가까운 실험체의 모서리를 기준으로 하여 250mm로 고정하여 실험하였다. Fig. 8에는 슬래밍 Impact 과정을 초고속 카메라로 촬영하여 나타내었다. (a)는 공기 중에서 낙하하고 있는 모델을 보여준다. (b)는 자유표면과 충돌하는 순간을 나타낸다. (c)는 물속에서 아래쪽으로 진행하고 있는 순간을 보여준다. 모델이 물속

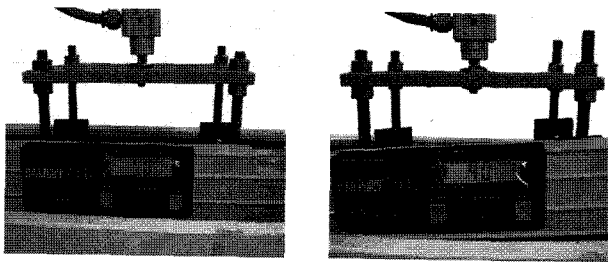


Fig. 6 Incident angles of plate setup

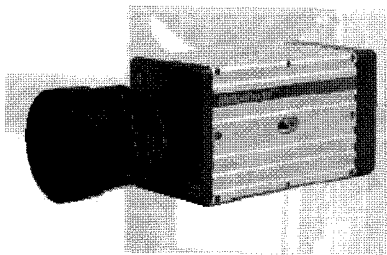


Fig. 7 Photo of high speed camera

Table 2 Pressure sensor specification

Items	Unit	Value
Range	bar	0~50
Safe temperature	°C	-20~70
Safe overload rating	%	150
Recommended excitation voltage	Volt	1~2
Safe excitation voltage	Volt	3
Weight	g	0.5±20 %
Nonlinearity	%	±1
Dedicated adhesive	-	RC-19

Table 3 High speed of camera specification

Image resolution	1280 x 1024 at 1000 fps
Internal memory	4 GB
Recording rates	Selectable, up to 64,000 fps
Control software	MotionPro X
Camera to PC interface	USB 2.0

에서 정지한 순간을 (d)에 나타내었다. Inertia 때문에 모델 아래쪽과 접촉했던 물은 계속 아래 방향으로 진행하게 되어 모델과 격리되게 되고 이 순간을 (e)에 나타내었다. (f)는 복원력에 의해서 격리되었던 물이 다시 모델과 부딪히는 장면을 나타내었다. (g)는 물속에 갇혔던 공기가 압축이 되는 장면을 나타내었다. 마지막으로 (h)에서 나타난 바와 같이 갇힌 공기는 부력에 의해 수면으로 상승하게 된다. 실험체 중 Flat plate(square)의 충격압력 시계열을 Figs. 9~11에 나타내었다. Fig. 9는 입수각도가 0°의 경우로 세 압력 시계열의 최대 피크가 발생한 시점이 일치하므로 0°가 잘 유지된 상태로 입수된 것을 알 수 있다. 그러나 3번 센서에서 측정된 값은 상대적으로 작은 값을 보인다. 이것은 Trap된 Air가 세 개의 센서위치에서 동일한 조건이 아닌 상태에서 측정된 것으로 추정된다.

Fig. 10은 4°로 입수하는 경우의 결과를 나타내는데 입수직후

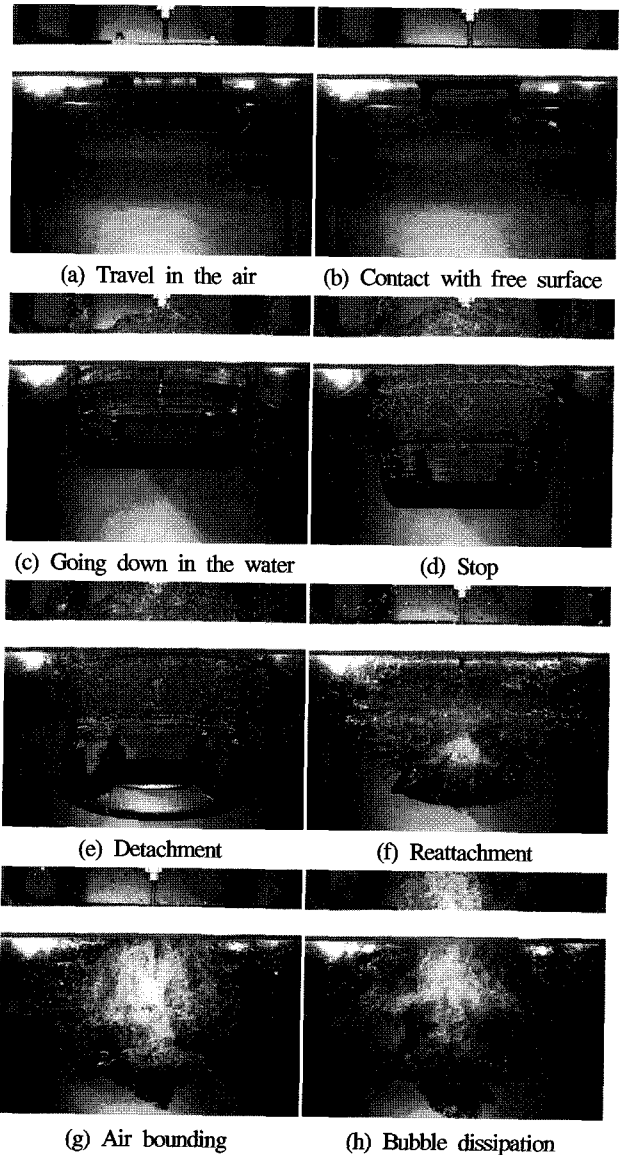


Fig. 8 Slamming impact time history captured by high speed camera

에도 실린더가 계속 입수 되므로 나중에 입수되는 센서에서의 압력은 계속 증가한다. Fig. 11에서 나타난 바와 같이 8°로 입수하는 경우에 3번 센서의 압력값이 4°의 경우와는 달리 2번 센서에 비해서 감소하는데 이것은 Jet spray의 영향으로 생각된다. Fig. 12은 입수각에 따른 최대 충격 압력 계수를 나타내었다. 입수각의 변화에 따른 최대 압력의 크기를 분석하기 위하여 최대 압력 P_{max} 을 동압력 $\frac{1}{2} \rho V_o^2$ 으로 무차원한 계수즉, 최대 충격 압력 계수(C_p)를 도입한다. 충격 압력은 근사적으로

충격 속도의 제곱에 비례하므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{max} = C_p \frac{1}{2} \rho V_o^2$$

여기서, P_{max} = maximum(or peak) pressure[bar]

ρ = fluid density[1,000kg/m³]

C_p = maximum pressure coefficient

V_o = impact velocity[m/s]

실험의 결과로 충격압력 시계열 데이터를 분석한 결과는 기존의 Wagner(1932, wedge type), Chuang(1966, flat plate), Chuang(1970, wedge type)의 이론식과 유사하였으며 충격 압력은 동일 입수 속도와 동일 강제 입수 높이에 있어서 0°에서 4°까지는 증가하다가 그 보다 더 큰 입수각에 대해서는 오히려 감소한다는 것을 알 수 있었다. 각 입수 각도에 대해서 3번씩 실시한 실험 결과를 모두 표시하였다.

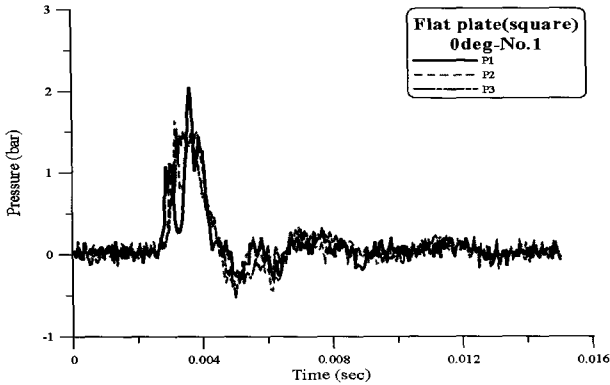


Fig. 9 Time history of pressure (0° incident angle, drop height 250 mm, air pressure in the compressor 8 bar)

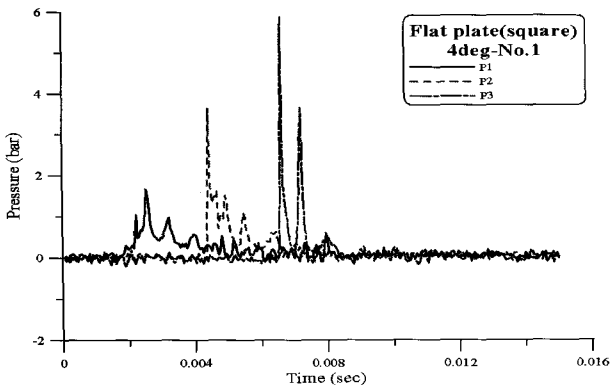


Fig. 10 Time history of pressure (4° incident angle, drop height 250 mm, air pressure in the compressor 8 bar)

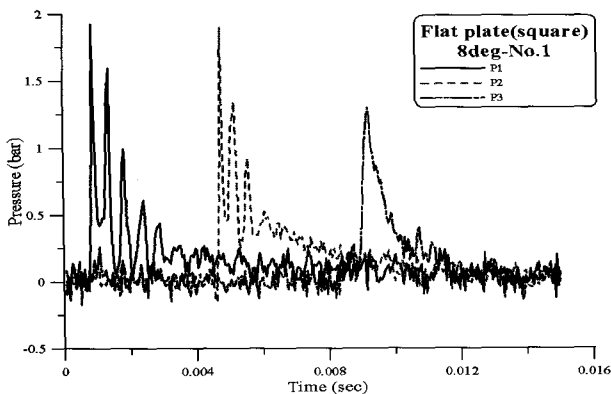


Fig. 11 Time history of pressure (8° incident angle, drop height 250 mm, air pressure in the compressor 8 bar)

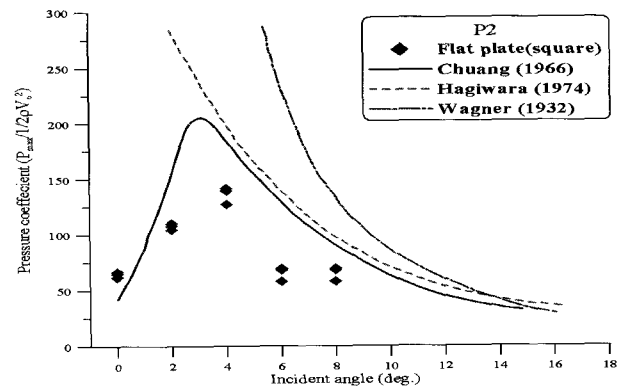


Fig. 12 Relation between incident angle and maximum pressure coefficient

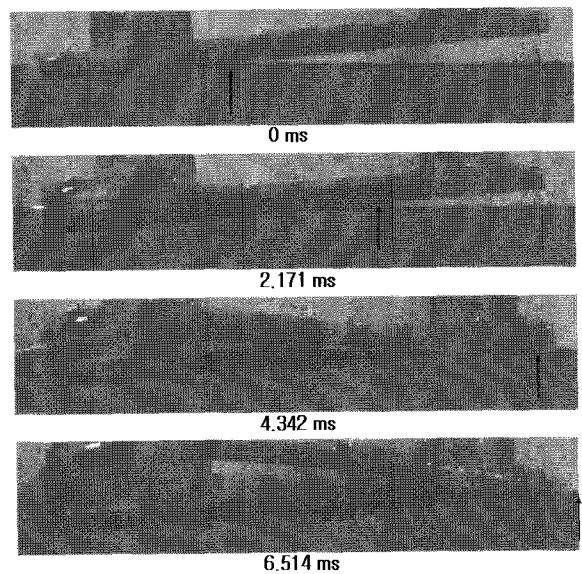


Fig. 13 Jet spray at 4°

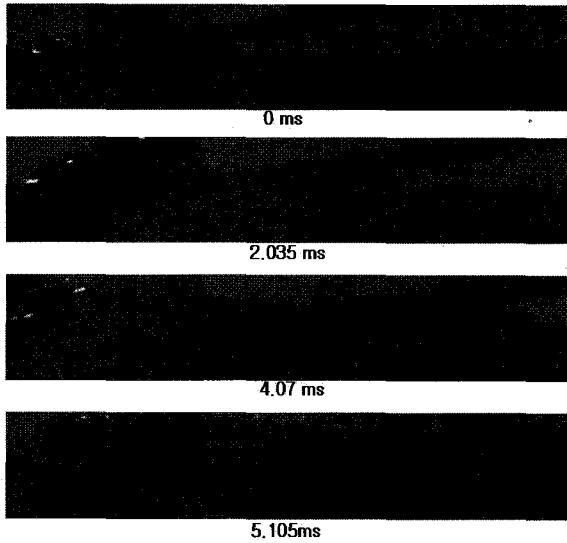


Fig. 14 Jet spray at 8°

그림에서 알 수 있듯이 종래의 자유낙하에 비해서 우수한 반복성을 보여준다. 또한 Figs. 13, 14에서는 4°와 8°에서의 초고속카메라로 획득한 Jet spray의 거동을 보여준다. 4°보다는 8°의 경우가 Jet spray의 양이 많음을 알 수 있었다. 그림에서 화살표는 Jet spray의 Front를 나타낸다. Jet spray가 압력에 미치는 정량적인 영향에 대해서는 보다 많은 연구가 필요하다고 생각된다.

4. 결 론

공기압 실린더를 이용한 본 실험은 종래의 자유 낙하에 비해서 보다 안정적으로 수행할 수가 있었다. 실험 결과 평판을 다양한 입수각에서 낙하할 경우, 입수각이 증가하면 충격 압력은 급속하게 증가하지만, 어떤 값 이상이 되면 오히려 충격 압력은

저하한다고(Chuang, 1970)알려져 있는 것과 일치하고 있다. 그리고 초고속 카메라를 이용하여 충격 입수 실험 시의 실험체의 속도를 측정할 수 있었고 촬영을 통하여 Jet spray의 거동을 관찰할 수 있었다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유 과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

Chung, J.Y., Lee, J.H., Kwon, S.H., Ha, M.K., Bang, C.S., Lee, J.N. and Kim, J.J. (2006). "Wet drop test for LNG insulation system", Proceedings of the sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conf., San Francisco, California, USA, pp 199-204.

Hagiwara, K. and Yuhara, T. (1974). "Fundamental study of wave impact load on ship bow (1st Report)", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol 135, pp 181-189.

Chuang, S.L. (1966). "Experiments on flat-bottom slamming", Journal of Ship Research, Vol 10, pp 10-17.

Chuang, S.L. (1970). "Investigation of impact of rigid and elastic bodies with water", NSR & DC, Report 3248.

Wagner, V.H. (1932). "Über Stoss und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten", Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik, Vol 12, pp 193-215.

2006년 12월 18일 원고 접수

2007년 2월 5일 최종 수정본 채택