한국해양공학회지 제31권 제1호, pp 22-27, 2017년 2월 / ISSN(print) 1225-0767 / ISSN(online) 2287-6715

Original Research Article

Journal of Ocean Engineering and Technology 31(1), 22-27 February, 2017
https://doi.org/10.5574/KSOE.2017.31.1.022

Experimental Study on Wedge Slamming Considering Fluid-Structure Interaction

Kang-Su Ahn* and Sun-Hong Kwon*

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

유체-구조 상호 간섭을 고려한 쐐기 슬래밍에 대한 실험적 연구

안강수* · 권순홍*

*부산대학교 조선해양공학과

KEY WORDS: Slamming 슬래밍, Wedge model 쐐기 모형, Hydroelasticity 유탄성, Impact pressure 충격압력, Impact strain 충격 변형률

ABSTRACT: *This paper presents the results of an experimental study on the wedge slamming impact problem, including the fluid-structure interaction. A free drop test was performed to estimate the hydroelasticity. Three wedges were fabricated of 5 mm thick steel plate. The deadrise angles were 15°, 20°, and 25°. Plate thicknesses of 2 mm and 3 mm were used to determine the effect of the structural rigidity. The drop heights were 25 cm, 50 cm, 75 cm, and 100 cm. The pressure on a rigid part of the wedge and strain of the elastic plate were measured at four different locations. The pressure was compared using the Wagner theory and generalized Wagner theory.*

1. 서 론

해선박은 육상 구조물과 달리 해상에서 6자유도 운동을 하게 된다. 이로 인해 선저 및 선수 플레어 부분에서 발생하는 슬래밍 현상이 발생하는데, 이것은 오랫동안 연구되어 온 주제이다. 또한 액체 화물을 적재한 상태로 운항하는 선박 역시 화물의 슬로싱 현상으로 인해 화물창 내벽에 슬래밍 압력이 작용한다. 짧은 순간에 급격한 압력 변화가 발생하는 슬래밍 현상의 특성 때문에 슬래밍 충격 하중은 비선형성이 강하고 해석하기 힘들다. 따라서 슬래밍 현상 연구를 위하여 많은 연구자들이 다양한 방법을 사용하였다.

수상 착륙 비행기의 동체에 작용하는 하중을 구하기 위해 운동량 법칙을 이용한 2D 쐐기 형상의 입수 문제 연구(Von Karman, 1929)를 시작으로, 쐐기 형상을 Conformal mapping을 이용하여 같은 폭을 가지는 평판으로 근사, 포텐셜 이론을 이용하여 슬래밍 충격 압력을 해석하는 Wagner theory(Wagner, 1932)이 가장 대표적인 이론이다. Asymptotic analysis를 이용하여 슬래밍 압력을 해석하는 Logvinovich method(Logvinovich, 1969)역시 연구되었다.

많은 연구자들이 기존의 방법을 개선하기 위한 연구를 수행하였다. Schwartz-Christoffel transformation을 이용하여 기존 Wagner theory의 한계점이었던 Conformal mapping을 극복하고 더욱 실제 쐐기 입수 문제에 근접한 Generalized Wagner theory가 제안되었다(Zhao et al., 1996). Logvinovich method를 개선한 Modified Logvinovich model역시 제안되었다(Korobkin and Malenica, 2005).

유탄성을 고려하지 않은 평판(Chuang, 1966)과 마찬가지로 유탄성을 고려하지 않은 쐐기(Chuang, 1967)의 입수 문제에 대해 실험적 연구가 진행되었다. 또 자유 낙하한 수평 평판이 입수할 때 발생하는 현상의 이론 및 실험적 연구 역시 진행되었다(Verhagen, 1967).

본 연구에 선행하여 쐐기각 4°에 대하여 유탄성을 고려한 입수 문제를 실험적으로 연구하였다(Ren et al., 2015).

현대에 들어 컴퓨터 기술의 발전과 다양한 CFD 코드의 개발에 따라 수치 해석적으로도 입수 문제에 관한 연구가 많이 진행되었다. 유한요소법을 사용한 쐐기 입수 문제가 Zhao et al.(1996), Zhang et al.(2003), Chen and Xiao(2007), Luo el al.(2011) 등에 의해 연구되었다. 또한 Smoothed particle hydrodynamics (SPH)를 이용한 쐐기 입수 문제의 연구가 Oger et al.(2006), Panciroli et al.(2012) 등에 의해 진행되었다.

유탄성 효과에 대한 필요성은 오래 전부터 대두되었으며, 규

Received 23 September 2016, revised 16 February 2017, accepted 16 February 2017
Corresponding author Sun-Hong Kwon: +82-51-510-2347, shkwon@pusan.ac.kr

ⓒ 2017, The Korean Society of Ocean Engineers
This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

칙파 중에서의 선박의 유탄성 효과 등은 이미 많은 연구가 수행되었다.

유탄성 효과를 고려한 슬래밍 현상 또한 다양한 방법으로 시도되고 있다. 본 논문은 기본적인 슬래밍 현상인 쐐기 입수 문제에 대해 다양한 조건으로 실험을 수행하여 유탄성 효과를 연구하였다.

2. 실 험

2.1. 실험 개요

부산대학교 조선해양플랜트글로벌핵심연구센터 제2연구동에 있는 자유 낙하 실험 장치(Wet drop test rig)를 사용하여 실험을 진행하였다. 실험 장치는 Fig. 1과 같으며 크기는 1,060×630×5,445mm(L×B×H)이다.

실험 모델(Test model)은 Fig. 2와 같다. 기본 재료는 5mm 강(Steel)이다. 낙하 높이(Drop height), 쐐기각(Wedge angle)에 대한 정의 및 시험체 설치 모습을 Fig. 3에 간략히 나타내었다.

낙하 높이는 쐐기의 최하단 지점부터 수면까지의 높이이며, 쐐기각은 쐐기 면이 수평면과 이루는 각도이다. 전자석을 이용하여 수송체(Transporter)를 이동하였고, 선형 가이드 레일(Linear motion guide rail)을 이용하여 수직 방향의 운동만 하도록 구속하였다. 수송체는 600×600×200mm의 강철이며 무게는 66kg이다. 수조의 크기는 790×790×420mm이며 5mm의 강철로 제작되었다.

Fig. 1 Wet drop test rig

Fig. 2 Test model

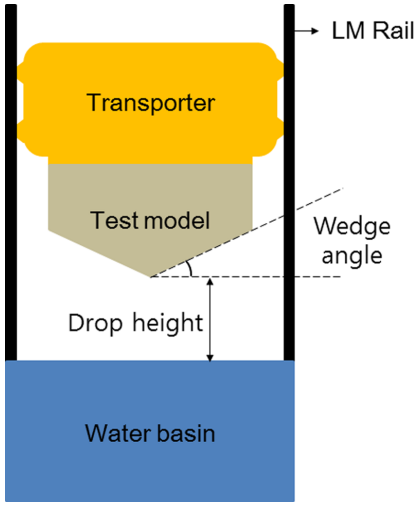


Fig. 3 Experimental setup

Table 1 Test matrix

Wedge angle [°]	Plate thickness [mm]	Drop height [cm]			
		25	50	75	100
15	2	✓	✓	✓	✓
	3	✓	✓	✓	✓
20	2	✓	✓	✓	✓
	3	✓	✓	✓	✓
25	2	✓	✓	✓	✓
	3	✓	✓	✓	✓

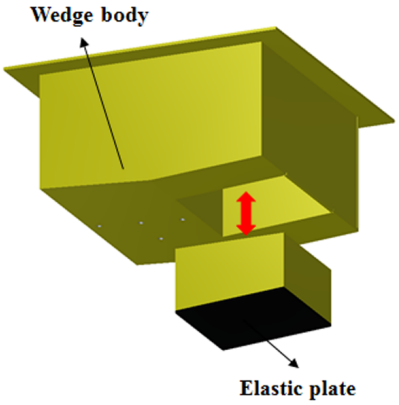


Fig. 4 Elastic plate and rigid wedge

다양한 조건에서의 유탄성 효과를 실험하기 위하여, Table 1과 같은 조건에서 실험을 수행하였다. Fig. 4와 같이 쐐기의 한 쪽 면은 두께가 다른 평판으로 교체할 수 있도록 제작하여 다른 강성을 가지는 쐐기의 유탄성 효과를 살펴볼 수 있게 하였다. Fig. 4의 흑색 부분(Elastic plate)은 2mm 또는 3mm의 스테인리스강(SUS 304)로 구성된 탄성평판이며, 나머지는 5mm 강으로 구성되었으며 강체로 가정한다. 탄성 평판은 4 모서리 모두 5mm 강판에 용접되어 고정 경계조건으로 고려할 수 있으며 크기는 쐐기각 15, 20, 25°에 따라 각각 195×206, 195×211, 195×220mm이다.

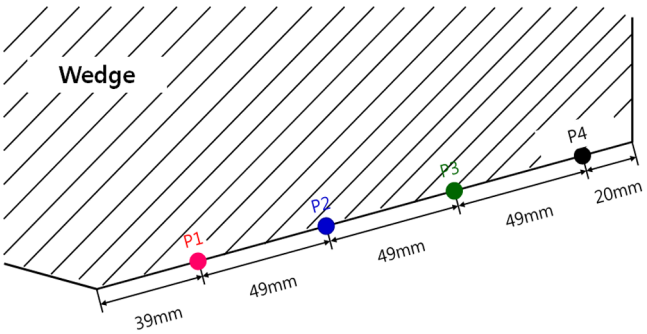
2.2. 데이터 획득 시스템

실험에서 사용된 압력 센서(Pressure sensor)는 Fig. 5와 같이 Kistler사의 701A를 사용하였고, 상세 제원을 Table 2에 표시하였다. 압력 신호는 20kHz의 샘플링 레이트(Sampling rate)로 계측하였다.

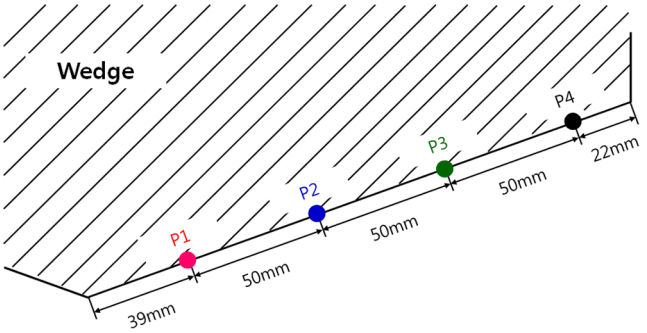
스트레인 게이지(Strain gauge)는 Fig. 6과 Kyowa사의 KFW-5-120-C1를 사용하였고, 게이지의 상세 제원을 Table 3에 나타내었다. 변형률 신호는 20kHz의 샘플링 레이트로 계측되었다.

Fig. 5 Pressure sensor

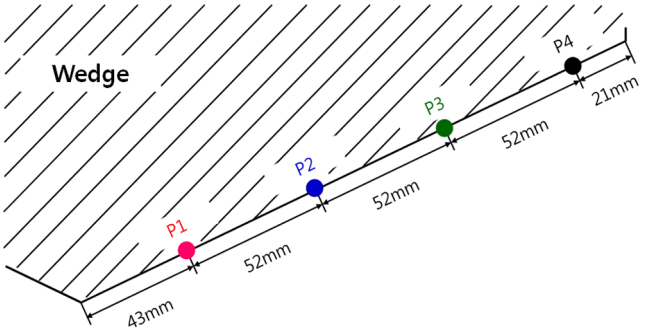
Fig. 6 Strain gauge



(a) Wedge angle 15°



(b) Wedge angle 20°



(c) Wedge angle 25°

Fig. 7 Locations of pressure sensors

Table 2 Specification of 701A

Range	0 ~ 250 10^5Pa
Sensitivity	≈−80 pC/10^5Pa
Natural frequency	≈70 kHz
Linearity	≤ ±0.5 %FSO
Acceleration sensitivity	<0.001 10^5Pa/g
Operating temperature range	-150 ~ 200°C
Temperature coefficient of sensitivity	<10^{-4} °C^{-1}

압력 센서는 강체 쐐기 면의 중앙을 따라 설치하였으며, 부착 위치는 Fig. 7과 같다. 스트레인 게이지의 위치는 압력 센서와 대칭이 되도록 탄성체 부분에 설치하였다.

2.3. 실험 결과

2.3.1. 압력

대표적인 경우로서 가장 압력이 크게 계측되는 쐐기각 15°, 낙하 높이 100cm에 대한 압력 신호를 Fig. 8에 나타내었다. 기존에 알려진 충격 압력 패턴과 동일하게, 빠른 상승과 완만한 감소를 보이는 압력 신호가 계측되었다. 약 0.04초부터 0.06초 사이에 발생하는 진동은 실험 장치의 특성에 의한 것이다. 실험 모델은 입수 후 자유 낙하 실험 장치에 설치된 댐퍼에 의해 정지하는데, 그 때 댐퍼와의 접촉 후 발생하는 진동 현상이다.

각 낙하 높이별로 총 5회의 반복실험을 수행하였으며, 최대 압력값의 평균으로부터 압력 계수를 계산하여 Fig. 9에 나타내었다. 실선은 Wagner theory로 얻은 Cp 곡선이며 점선은 Generalized Wagner theory(GWT)로부터 얻은 Cp 곡선이다. Chuang(1967)의 실험 결과는 다이아몬드 형상으로 표시하였다. 실험결과는 GWT와 더 일치함을 알 수 있으며, 기존의 연구와 동일하게 입수각이 클수록 압력계수는 작아지는 것을 확인할 수 있으며 이론과 실험과의 오차 역시 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

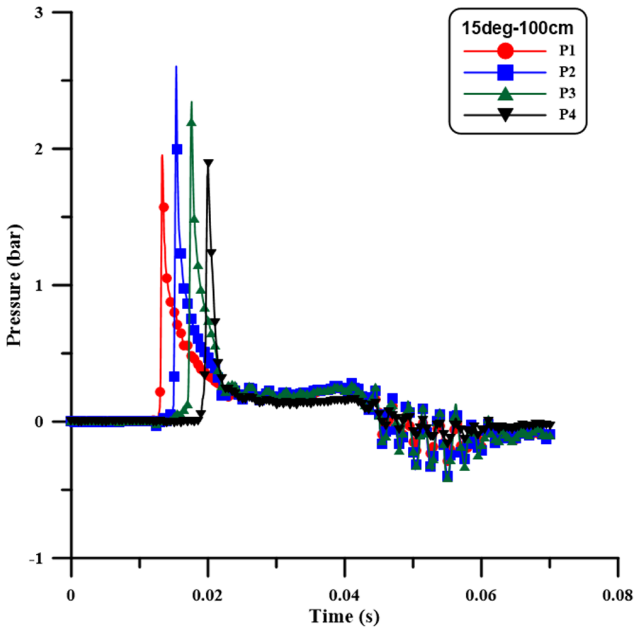


Fig. 8 Pressure time history

Table 3 Specification of KFW-5-120-C1

Materials resistive element	CuNi alloy foil
Operating temperature ranges in combination with major leadwire cables [°C]	Vinyl-coated flat cable (L-6, L-7) : -10 ~ 80°C
Self – temperature compensation range [°C]	10 ~ 80
Strain limit at room temp. [approx. %]	2.8
Fatigue life at room temp., approx. [times]	3×104(±1500 μm/m)

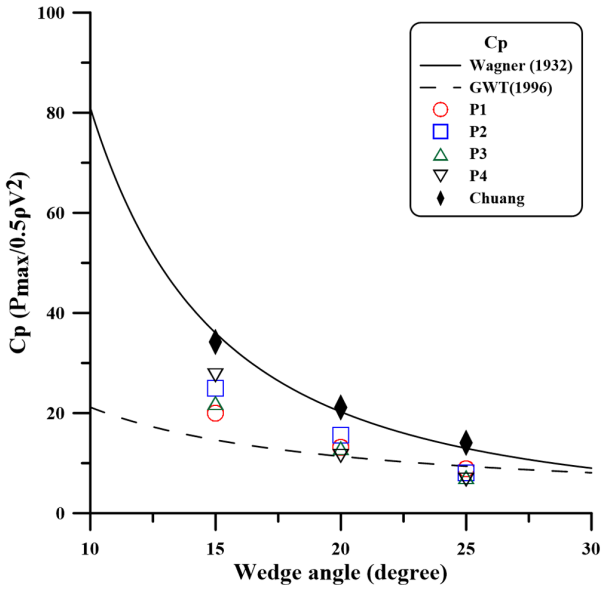


Fig. 9 Pressure coefficient

2.3.2. 변형률

압력과 대응되는 대표적인 경우로서 쐐기각이 15°일 때의 판 두께 2mm와 3mm일 때의 변형률 신호를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 판의 두께가 3mm일 때 보다 2mm일 때 더 큰 변형률

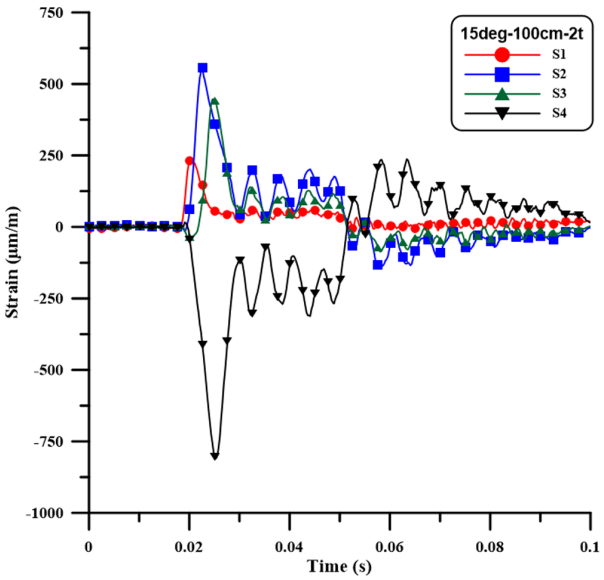


Fig. 10 Strain time history for thickness 2mm

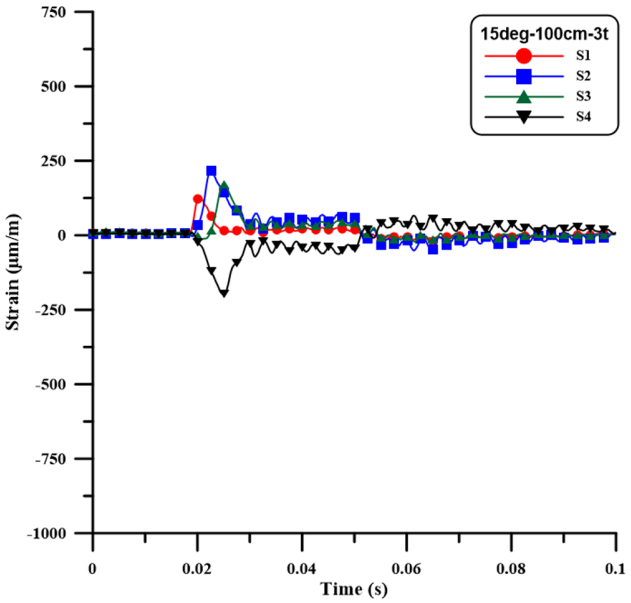


Fig. 11 Strain time history for thickness 3mm

이 계측되었다. 이는 판의 강성에 따른 자연스러운 결과이다. S4의 경우 음의 변형률을 보이는데, 이는 판의 용접부에 의한 고정 경계조건 때문에 음의 모멘트가 발생하기 때문이다.

이에 대해 좀 더 자세히 알아보기 위해서 입수하는 동안 충격을 받는 판을 균일 하중을 받는 보로 가정한다.

이 때 경계조건은 양쪽 모두 고정 경계조건이며 그로인해 보에 작용하는 굽힘 모멘트는 다음과 같다.

$$M(x) = \frac{w}{12}(6lx - l^2 - 6lx^2) \tag{1}$$

이 때 $M(x)$는 각각 보의 임의의 위치 x에 작용하굽힘모멘트, l은 보의 길이이며 w는 작용하는 균일 하중의 크기이다.

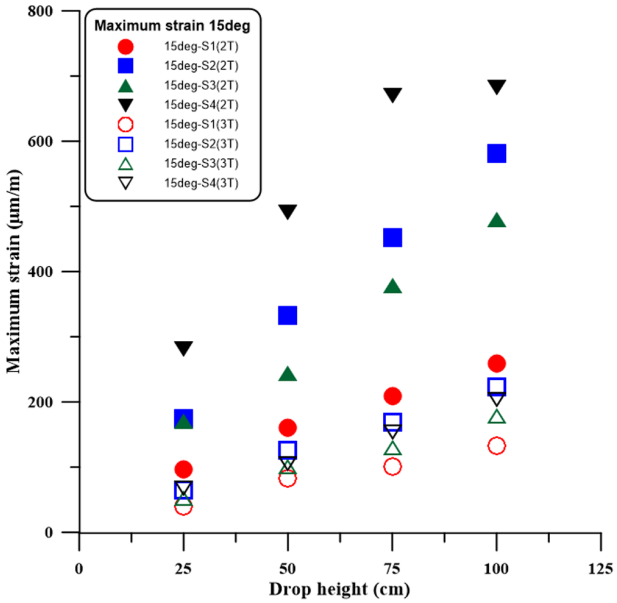


Fig. 12 Maximum strain for wedge angle 15°

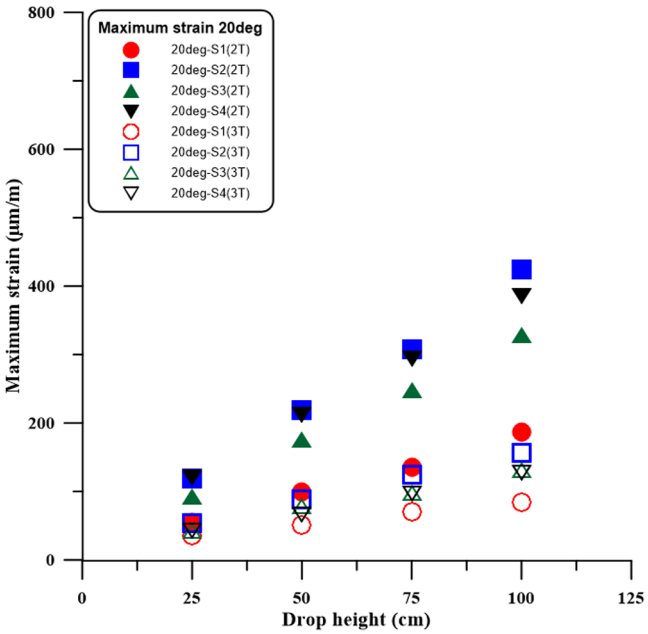


Fig. 13 Maximum strain for wedge angle 20°

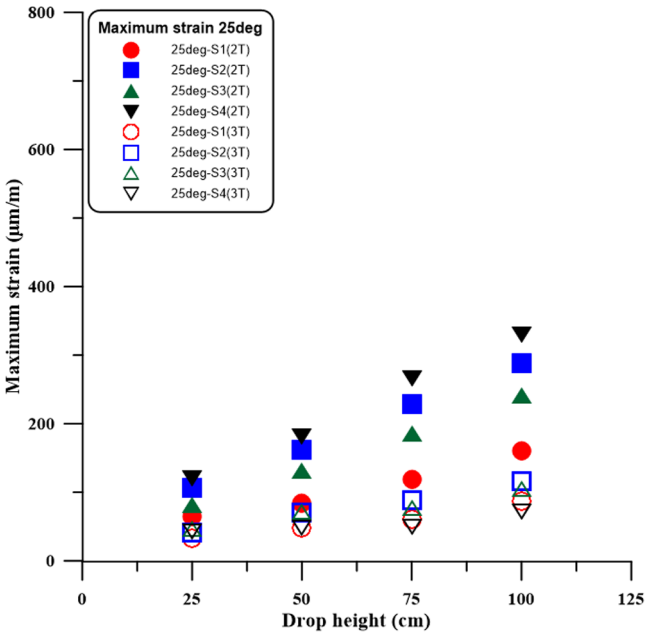


Fig. 14 Maximum strain for wedge angle 25°

여기서 굽힘모멘트는 식 (1)로부터 보의 양쪽 경계조건에서 0.2113l 영역에서 음의 값을 보이고, 간단히 본 실험에 사용된 판의 길이 200mm를 대입해 보면 약 157mm 지점부터 음의 변형률을 보일 것임을 예상할 수 있다. S4는 약 180mm 범위 안에 위치해 있으므로 이 영역 안에 해당하며, 따라서 음의 변형률을 보인다.

모든 경우에 대한 변형률의 최대값을 Fig. 12, Fig. 13과 Fig. 14에 나타내었다. 변형률은 압력과 비례하여 나타났으며, 따라서 입수각이 작고 낙하 높이가 높을수록 변형률이 크게 계측되었다. 음의 값을 보이는 S4는 크기가 같은 양의 값으로 나타내었다.

3. 결 론

본 논문은 쐐기가 입수할 때 발생하는 슬래밍 현상을 유탄성을 고려하여 실험적 방법으로 연구하였다.

실험에 사용된 쐐기의 각은 15°, 20°, 25°의 3종류를 사용하였다. 탄성을 고려하기 위한 탄성판의 두께는 2mm와 3mm 2가지를 사용하였다. 하나의 쐐기에 대해 0.25m, 0.50m, 0.75m와 1.0m의 4개의 다른 높이에서 낙하하여 슬래밍 실험을 수행하였다.

실험 결과 쐐기 각도가 작을수록, 또한 낙하 높이가 높을수록 압력이 크게 계측되는 것을 확인할 수 있었다. 변형률 신호 역시 압력신호와 동일하게 쐐기 각도가 작을수록, 또한 낙하 높이가 높을수록 압력이 크게 계측되는 것을 확인할 수 있었다. 판의 경계조건으로부터 음의 굽힘모멘트가 작용하는 영역이 존재함을 변형률 신호로 확인하였다. 제시된 자료는 유탄성 해석 프로그램이 개발된다면 프로그램의 검증자료로서 활용될 수 있을 것이다.

후 기

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

References

Chen, Z., Xiao, X., 2007. The Simulation Study on Water Entry of 2D Wedge Bodies. Journal of Shanghai Jiaotong University, 41(9), 1425.

Chuang, S.L., 1966. Experiments on Flat-Bottom Slamming. Journal of Ship Research, 11(3), 10-17.

Chuang, S.L., 1967. Experiments on Slamming of Wedge Shaped Bodies. Journal of Ship Research, 11(3), 190-198.

Korobkin, A., Malenica, S., 2005. Modified Logvinovich Model for Hydrodynamic Loads on Asymmetric Contours Entering Water. Proceedings of International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Longyearbyen Norway, 124-128.

Logvinovich, G.V., 1969. Hydrodynamics of Flows with Free Boundaries. Naukova Dumka.

Luo, H., Wang, S.C., Guedes, S., 2011. Numerical Prediction of Slamming Loads on a Rigid Wedge Subjected to Water Entry using an Explicit Finite Element Method. Advances in Marine Structures. CRC Press. 41-48.

Oger, G., Doring, M., Alessandrini, B., Ferrant, P., 2006. Two-dimensional SPH Simulations of Wedge Water Entries. Journal of computational physics, 213(2), 803-822.

Panciroli, R., Abrate, S., Minak, G., Zucchelli, A., 2012. Hydroelasticity in Water-entry Problems: Comparison between Experimental and SPH Results. Composite Structures, 94(2), 532-539.

Ren, D., Ahn, G.S., Kwon, S.H., 2015. Experimental Investigation of Wedge Slamming Impact. Journal fo Ocean Engineering

and Technology, 29(2), 163-168.

Verhagen, J., 1967. The Impact of a Flat Plate on a Water Surface. Journal of Ship Research, December, 211-223.

Von Karman, T., 1929. The Impact of Seaplane Floats During Landing. National Advisory Committee for Aeronautics Technical Notes, 321, Washington.

Wagner, H., 1932. Uber Stoss-und Gleitvorgange an der Oberflache von Flussigkeiten. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 12(4), 193–215.

Zhang J., Zhang Z., Hong F., Zhao F., 2003. Numerical Simulation of Initial Flow of Wedge Entry. Journal of Ship Mechanics, 7(4), 28-35.

Zhao, R., Faltinsen, O., Aarsnes, J., 1996. Water Entry of Arbitrary Two-Dimensional Sections with and Without Flow Separation. Proceedings of 21st Symposium on Naval Hydrodynamics, Trondheim, Norway, 118-133.