

멤브레인형 LNG선 화물창 단열시스템의 수면낙하 내충격 응답해석 I : 검증을 통한 수치해석 기법 개발

이상갑^{†*}, 황정오^{*}, 김화수^{**}

한국해양대학교 조선해양시스템공학부^{*} / 현대중공업 조선구조설계부^{**}

Wet Drop Impact Response Analysis of CCS in Membrane Type LNG Carriers
I : Development of Numerical Simulation Analysis Technique through Validation

Sang-Gab Lee^{†*}, Jeong-Oh Hwang^{*} and Wha-Soo Kim^{**}

Div. of Naval Architecture & Ocean Systems Engineering, Korea Maritime University^{*}
Basic Hull Design Department, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.^{**}

Abstract

While the structural safety assessment of Cargo Containment System(CCS) in membrane type LNG carriers has to be carried out in consideration of sloshing impact pressure, it is very difficult to figure out its dynamic response behaviors due to its very complex structural arrangements/materials and complicated phenomena of sloshing impact loading. For the development of its original technique, it is necessary to understand the characteristics of dynamic response behavior of CCS structure under sloshing impact pressure. In this study, for the exact understanding of dynamic response behavior of CCS structure in membrane Mark III type LNG carriers under sloshing impact pressure, its wet drop impact response analyses were carried out by using Fluid-Structure Interaction(FSI) analysis technique of LS-DYNA code, and were also validated through a series of wet drop experiments for the enhancement of more accurate shock response analysis technique. It might be thought that the structural response behaviors of impact response analysis, such as impact pressure impulses and resulted strain time histories, generally showed very good agreement with experimental ones with very appropriate use of FSI analysis technique of LS-DYNA code, finite element modeling and material properties of CCS structure, finite element modeling and equation of state(EOS) of fluid domain.

※Keywords: Cargo containment system(CCS, 화물창 단열시스템), Membrane mark III type LNG carrier(멤브레인 MARK III형 LNG선), Structural safety assessment(구조 안전성 평가), Fluid-structure interaction(FSI) analysis technique(유체-구조 연성 해석기법), LS-DYNA code

접수일: 2008년 12월 5일, 승인일: 2008년 12월 16일

†교신저자: sglee@hhu.ac.kr, 010-3344-4306

1. 서론

LNG(Liquefied Natural Gas)선의 화물창 단열시스템(Cargo Containment System; CCS)은 LNG 선에 있어 가장 중요한 부위로서 슬로싱(sloshing) 유체충격력 등의 각종 동적효과를 고려하여 구조적 안전성 평가(structural safety assessment)가 수행되어야 한다. LNG선 CCS는 그 특성상 매우 복잡한 구조배치와 재질로 구성되어 있으며, 이에 작용하는 유체충격력 또한 그 현상의 복잡성으로 인하여 CCS의 동적응답거동(dynamic response behavior)을 정확히 파악하는 것 또한 매우 어렵다. LNG선의 CCS의 원천기술 개발을 위해서는 유체충격력에 의한 CCS 구조의 동적응답거동 특성을 정확히 파악하고 실선 유탄성(full-scale ship hydroelasticity) 슬로싱 내충격 응답해석(shock response analysis)의 수행을 위한 정보를 다양하게 도출하는 것이 필요하다.

최근 전산기 환경의 급속한 발전과 함께 LS-DYNA(2007) 및 MSC/DYTRAN(2002) 등의 고도의 비선형 수치해석 시뮬레이션 도구를 통하여 다양한 분야의 내충격 실험과 대등한 유용성을 갖는 내충격 응답해석 기술 개발이 국내외적으로 활발히 진행되고 있다. 특히 이러한 시뮬레이션 도구를 이용한 유체-구조 연성(Fluid-Structure Interaction; FSI) 문제의 수치해석 기법도 최근에 크게 발전하였다. 내충격 응답해석을 통한 대상 구조물의 다양한 설계변경에 따른 동적응답거동 특성을 보다 정확히 파악하기 위해서는 내충격 실험을 통한 검증이 수행하는 것이 바람직하다 (Chung et al. 2006, Kim et al. 2008).

본 연구에서는 슬로싱 유체충격력에 의한 LNG 선 CCS 구조의 동적응답거동 특성을 보다 정확히 파악하기 위해 LS-DYNA code의 FSI 해석기법 (Lee et al. 2006a & 2006b, Jang 2007, Aquelet et al. 2006)을 사용하여 MARK III형 CCS 구조의 수면낙하(wet drop) 내충격 응답해석 기술을 개발하고자 한다. 수면낙하 내충격 응답해석 기술의 정도를 높이기 위해 일련의 수면낙하 실험 결과를 이용하여 검증하였고, CCS의 재료 비선형 물성치와 구조적 특성을 정밀하게 고려하였다.

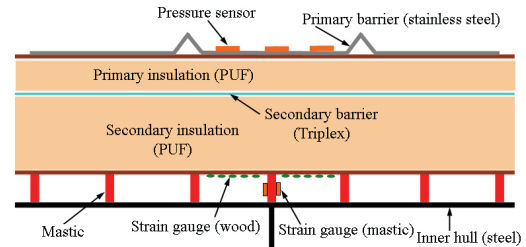


Fig. 1 Schematic diagram of measuring gauges in CCS specimen

Table 1 Scenarios of wet drop test and simulation of membrane MARK III type

Model \ Items	Incident angle (°)			Drop height (m) (Velocity : m/sec)		
	0	4	8	2 (5.80)	3 (7.17)	4 (8.31)
Corrugation (heavy)	√	-	-	√	√	-
Corrugation (light)	√	√	√	√	√	√
Flat (light)	√	√	√	√	√	√

본 연구의 내충격 응답해석의 검증에 사용된 정보들은 Fig. 1과 같은 CCS 구조 시편(specimen)의 수면낙하 실험에서 얻어진 membrane (stainless 1.2 mm) 표면의 3점에서의 충격압력 (impact pressure)과 bottom plywood 및 mastic의 각각 10점과 2점에서의 변형률(strain)에 대한 자료들이다. 그리고 CCS 구조 시편의 수면낙하 실험과 시뮬레이션은 Table 1에서와 같이 CCS 구조 시편의 중량(weight), 낙하높이(drop height), 입수각도(incident angle) 및 corrugation 유무에 따라 수행되었다.

2. CCS의 수면낙하 내충격 응답해석 모델링

Figs. 2와 3은 각각 MARK III형 CCS 구조의 낙하수면 실험을 위한 유체충격시험기(wet drop test)와 낙하장치(drop unit)의 형상을 보여주고 있다. membrane, plywood, R-PUF 및 Triplex로 구성된 Fig. 1의 CCS 구조 시편을 Fig. 3의 낙하 장치의 housing 하부에 뒤집어서 삽입하고, CCS 구조 시편의 상부 plywood를 housing안의 내판

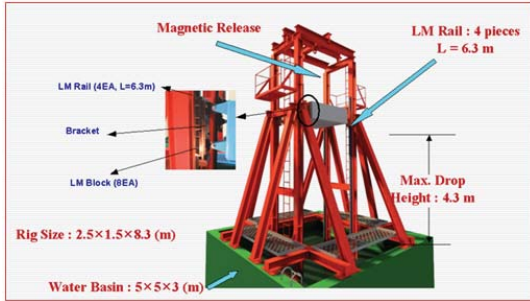


Fig. 2 Test rig for wet drop test

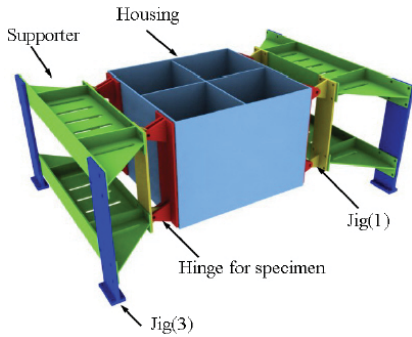
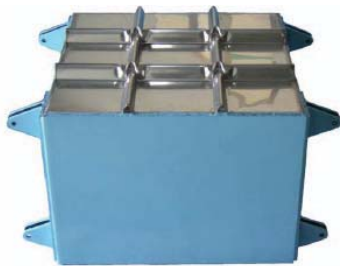


Fig. 3 Configuration of drop unit



(a) specimen with flat membrane



(b) specimen with corrugation membrane

Fig. 4 Fabrication of drop specimen

(inner hull)에 mastic으로 부착하고 바닥 plywood를 flat 및 corrugation membrane으로 막고 그 가장자리를 housing 바닥의 가장자리에 따라 용접하였다. 이들을 다시 뒤집으면 Fig. 4와 같다.

2.1 CCS 구조 시편의 유한요소 모델링

3차원 CCS 구조 시편의 유한요소 모델링은 Fig. 5와 같이 약 50,000개의 solid와 shell 요소로 구성되어 있다. 시편에 부착된 여러 가지 zig들은 그림에서와 같이 집중질량(concentrated mass)으로 이상화하였다. 유한요소 모델링에서 membrane과 plywood, R-PUF과 side housing은 실제 시편에서와 같이 서로 접촉(contact)시켰다. 수면낙하 실험과 시뮬레이션에 사용된 CCS 구조 시편의 입수각도와 중량에 따른 전체중량, 집중질량, zig의 중량 및 LM guide에서의 마찰력 등을 Table 2에 정리하였다. heavy 모델은 Fig. 6에서와 같이 내판에 4개의 집중질량(125.0 kgf)으로 이상화하였다.

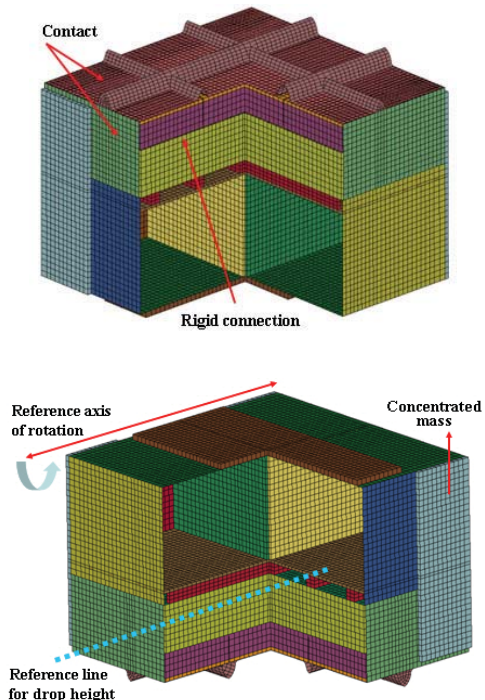


Fig. 5 Configuration of 3D finite element specimen model

Table 2 Weight of drop unit

Item	0 °		4 °	8 °
	light	heavy		
Total weight including LM guide in test(M)(kgf)	1,077.0	1,577.0	1,081.0	1,085.0
Simulation model weight (m) (kgf)	537.4	1,037.4	537.4	
Concentrated mass per one zig((M-m)/4) (kgf)	134.9	134.9	135.9	136.9
Friction force per an half zig($M(g-g)/8$) (N)	137.7	201.6	138.3	138.8

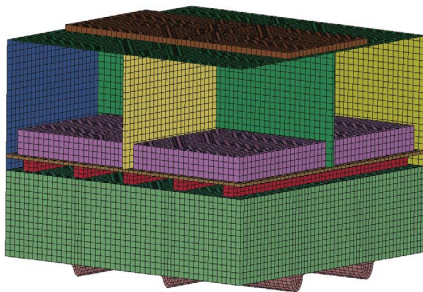


Fig. 6 Configuration of 3D finite element heavy specimen model

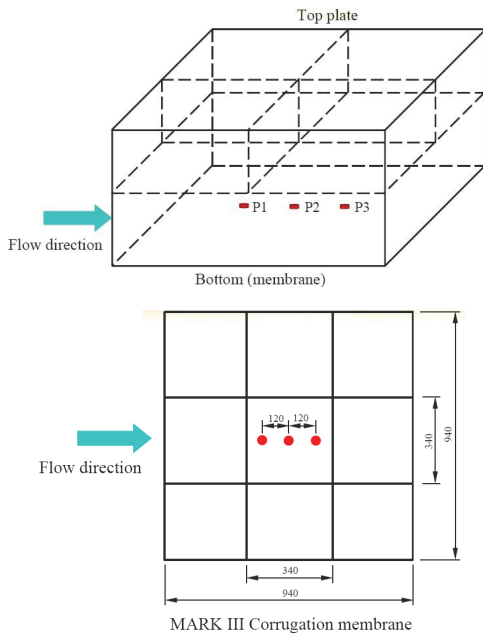


Fig. 7 Pressure sensor locations(P1~P3) on membrane

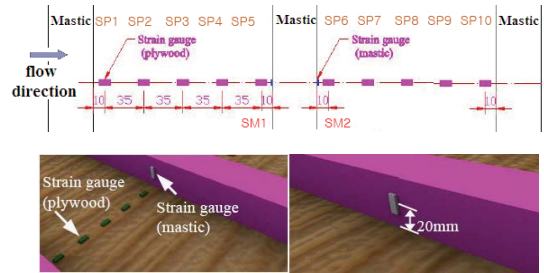


Fig. 8 Strain gauge locations on plywood (SP1~SP10) and mastic(SM1~SM2)

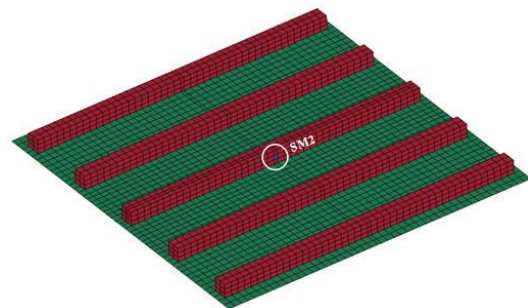
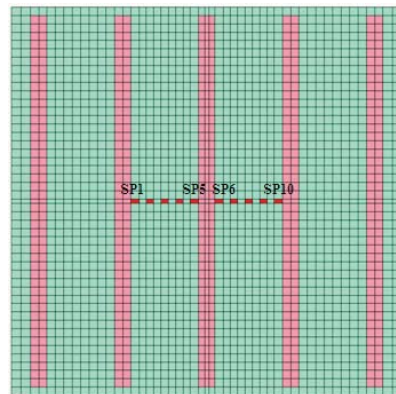


Fig. 9 Finite element configuration of strain gauge locations on plywood(SP1~SP10) & mastic(SM1~SM2)

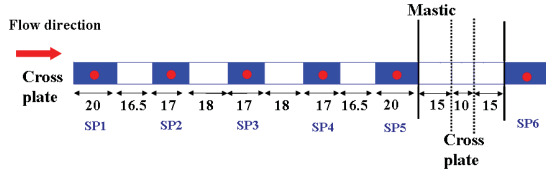
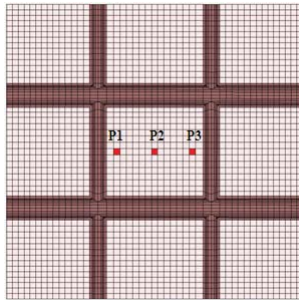
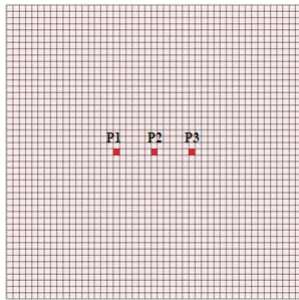


Fig. 10 Mesh configuration of strain gauge locations(SP1~SP10) on plywood(unit : mm)



(a) corrugation membrane



(b) flat membrane

Fig. 11 Finite element configuration of pressure sensor locations on membrane

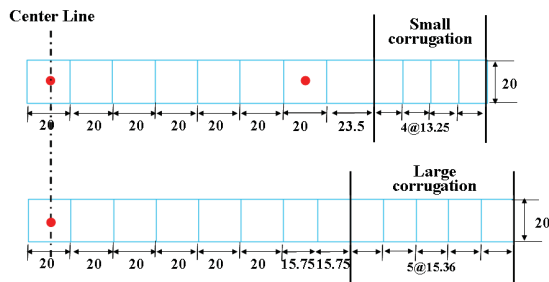


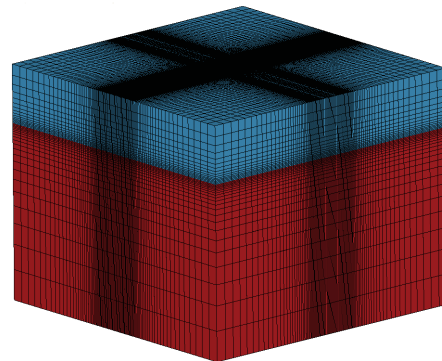
Fig. 12 Mesh configuration of pressure sensor locations(P1~P3) on corrugation membrane(unit : mm)

2.2 유체 유한요소 모델링

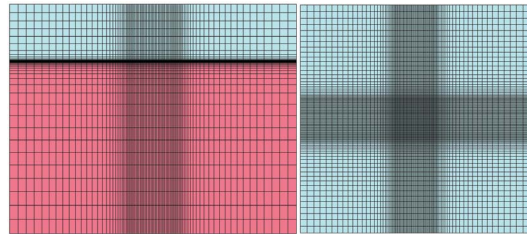
공기와 청수의 유체는 Fig. 13에서와 같이 자유수면(free surface)을 경계로 하고 있으며, 측면과 바닥은 실제 수조에서와 같이 구속하여 유체의 흐름과 압력이 반사되도록 하였다. CCS 구조 시편과 유체가 접하는 부위의 두께 및 폭 방향으로의 유체 유한요소의 크기는 5×20 mm로 모델링하고, 구조 시편에서 어느 정도 폭 방향으로 멀어지는 부위와 자유수면에서 수직방향으로 어느 정도 멀어지면 요소 크기를 점점 증가시켰고, 공기와 청수의 유한요소 개수는 각각 약 144,000 및 244,000개이다. 공기와 청수는 Linear_Polynomial의 상태방정식(Equation of State; EOS)을 사용하였고 각 계수들은 Table 3에 정리되어 있다.

2.3 구조 시편 물성치 및 낙하속도

시편을 이루고 있는 각 부재들의 물성치는 Table 4에 정리되어 있다. R-PUF와 plywood는



(a) iso view



(b) side view

(c) plane view

Fig. 13 Finite element configuration of fluid domain

Table 3 EOS_linear_polynomial of fluid model

item	flesh water	air
density(kg/m ³)	1,000.000	1.225
C ₀ (Pa)	0	0
C ₁ (Pa)	2.002e9	0
C ₂ (Pa)	8.432e9	0
C ₃ (Pa)	8.014e9	0
C ₄	0.4394	0.4000
C ₅	1.3937	0.4000
C ₆	0	0
E ₀ (Pa)	2.623e5	2.500e5
V ₀	1	1

직교이방성 재료(orthotropic material)를, 그 이외는 등방성재료를 사용하였다. 여기서 E, Nu 및 G는 각각 Young's modulus, Poisson's ratio 및 Shear modulus이고, n, s 및 t는 직교이방성 재료의 각 축(axis)을 나타낸다.

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E$$

(pressure in compression)

$$p = C_1\mu + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \text{ (pressure in tension)}$$

where, $\mu = \rho/\rho_0 - 1$

E : unit of pressure

E₀ : initial internal energy per unit reference specific volume

V₀ : initial relative volume

수면낙하 시험 시 측정된 시편의 낙하속도는 이론상의 낙하속도의 약 95%이었다. 본 연구에서의 내충격 응답해석에서도 이를 고려하여 낙하높이에 따른 낙하속도를 산출하였으며 각 낙하높이에 따른 낙하속도는 Table 1에 나타내었다. 그리고 시편의 경사각의 기준축(reference axis of rotation)과 낙하높이의 기준선(reference line for drop height)은 Fig. 5에서와 같이 CCS 구조 시편의 좌측 상단과 하단의 모서리에 각각 정하였고, 낙하높이 기준을 자유 수면에서 0.1m로 하였다.

3. CCS의 수면낙하 내충격 응답해석

충격압력의 응답거동은 최대압력값(peak) 뿐만 아니라 지속시간(duration)을 포함한 전반적인 충격압력 곡선의 형상과 특히 역적(impulse)이 중요한 인자이다. 본 연구에서는 내충격 응답으로서 구조물에 발생하는 변형(변형률)이 더 중요한 관심사이다. 충격압력 및 변형률 등에 대한 수면낙하 응답해석 결과를 실험 결과와 비교하였으며, Fig. 14와 Fig. 15는 각각 corrugation membrane heavy 모델 OD3M(0 degree, 3 m drop height)의 경우의 충격압력 및 변형률 응답거동을 실험 결과와 비교하여 보여주고 있다. 또한 Table 5에 OD2M 및 OD3M의 경우에 대한 충격압력 역적의 응답을 실험 결과를 기준으로 하는 백분율로 비교하여 정리하였다. 내충격 응답해석에 의한 구조적

Table 4 Material properties of specimen

	plywood	R. PUF	rigid Triplex	mastic	membrane	steel
E(n)(MPa)	8,900	142	13,133	2,934	200,000	206,000
E(s)(MPa)	7,500	142	-	-	-	-
E(t)(MPa)	520	84	-	-	-	-
Nu(ns)	0.17	0.24	0.3	0.3	0.27	0.3
Nu(nt)	0.15	0.18	-	-	-	-
Nu(st)	0.15	0.18	-	-	-	-
G(ns)(MPa)	196	12.2	-	-	-	-
G(nt)(MPa)	196	12.2	-	-	-	-
G(st)(MPa)	196	12.2	-	-	-	-
Density	7.10E-10	1.25E-10	2.50E-09	1.50E-09	7.85E-09	7.85E-09
Model	Solid, Shell/Ortho	Solid/Ortho	Shell/Iso	Solid/Iso	Shell/Iso	Shell/Iso

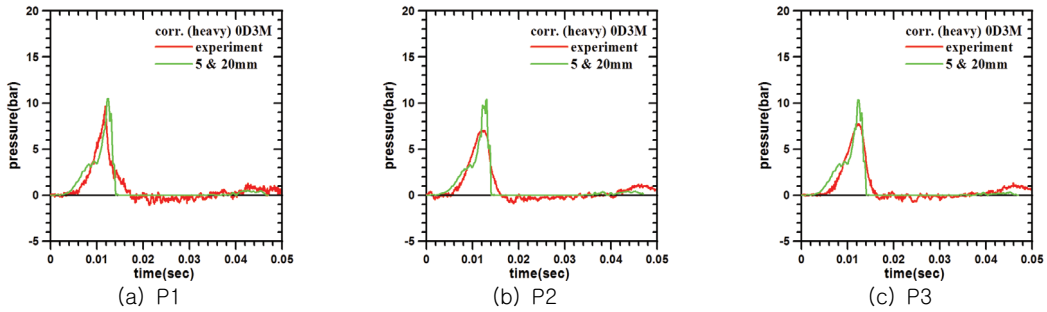


Fig. 14 Comparison of test/simulation pressure responses : Heavy corrugation membrane 0D3M

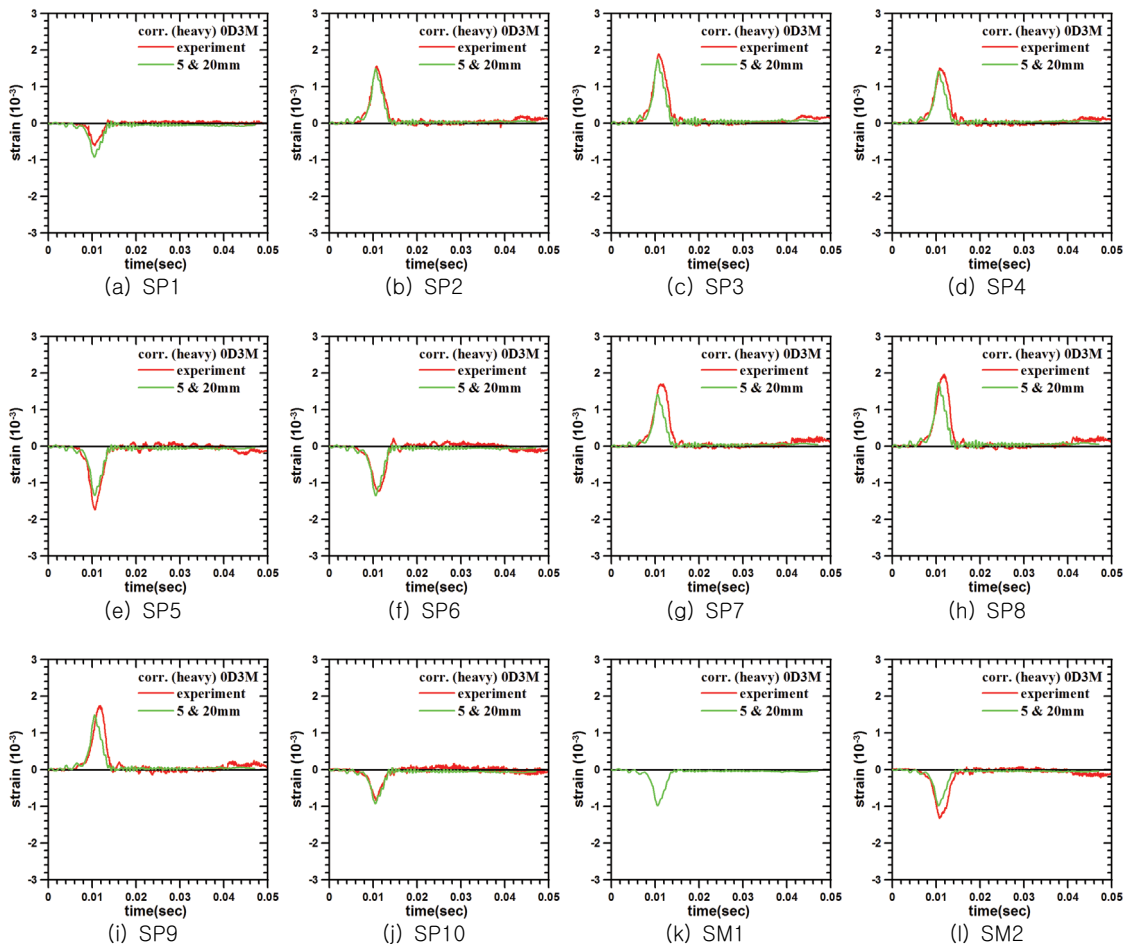


Fig. 15 Comparison of test/simulation strain responses : Heavy corrugation membrane 0D3M

Table 5 Comparison of test/simulation pressure impulse results: Heavy corr. membrane (unit : bar-sec)

Results	Case	P1	P2	P3	Case	P1	P2	P3
Experiment	0D2M	0.028	0.029	0.030	0D3M	0.036	0.034	0.037
LS-DYNA		0.030	0.026	0.030		0.039	0.037	0.039
%		107	89	100		108	108	105

Table 6 Comparison of test/simulation pressure impulse results (unit : bar-sec)

Case	Results	Light corrugation membrane			Light flat membrane		
		P1	P2	P3	P1	P2	P3
0D2M	Experiment	0.025	0.024	0.026	0.024	0.025	0.024
	LS-DYNA	0.027	0.024	0.028	0.031	0.032	0.031
	%	108	100	108	128	127	127
0D3M	Experiment	0.032	0.034	0.033	0.030	0.031	0.029
	LS-DYNA	0.038	0.034	0.038	0.039	0.040	0.039
	%	118	100	115	130	132	134
0D4M	Experiment	0.036	0.040	0.039	0.035	0.036	0.035
	LS-DYNA	0.043	0.041	0.043	0.046	0.048	0.045
	%	120	102	110	131	134	129
4D2M	Experiment	0.018	0.019	0.020	0.020	0.023	0.021
	LS-DYNA	0.024	0.021	0.024	0.017	0.027	0.014
	%	133	110	120	85	117	70
4D3M	Experiment	0.022	0.024	0.027	0.022	0.025	0.026
	LS-DYNA	0.029	0.027	0.033	0.023	0.023	0.030
	%	132	113	122	104	92	115
4D4M	Experiment	0.026	0.028	0.034	0.025	0.029	0.022
	LS-DYNA	0.033	0.032	0.041	0.025	0.028	0.039
	%	127	114	121	100	96	177
8D2M	Experiment	0.017	0.017	0.015	0.017	0.024	0.020
	LS-DYNA	0.016	0.019	0.020	0.018	0.017	0.015
	%	94	112	133	106	71	75
8D3M	Experiment	0.022	0.022	0.020	0.022	0.029	0.025
	LS-DYNA	0.024	0.027	0.021	0.022	0.017	0.019
	%	109	123	105	100	58	76
8D4M	Experiment	0.027	0.026	0.024	0.025	0.035	0.028
	LS-DYNA	0.029	0.031	0.027	0.028	0.024	0.026
	%	107	119	113	112	69	93

응답거동은 실험 결과와 대체로 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

corrugation membrane heavy 모델 이외의 실험에서는 몇 개의 변형을 측정지점에서의 변형을 응답에 오류가 있었다. Table 6은 corrugation membrane light 모델과 flat membrane light 모델의 충격압력 역적의 응답을 실험 결과와 비교하여 보여주고 있다. 두 모델에 대한 내충격 응답해

석에 의한 충격압력 역적의 응답도 실험 결과와 대체로 잘 일치하고 있으나 corrugation 모델에 비하여 flat 모델이 부분적으로 실험 결과와 응답에 다소 차이가 발생하는 것을 볼 수 있다.

본 연구에서 사용한 LS-DYNA3D의 유체-구조 연성 해석기법과 CCS 구조의 유한요소 모델링 및 비선형 재료 물성치, 유체영역의 모델링 및 상태 방정식 등을 매우 적절히 사용하여 내충격 응답해

석에 의한 충격압력 역적 및 변형률의 구조 응답 거동이 실험 결과와 전반적으로 매우 잘 일치하였다고 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 슬로싱 유체충격력에 의한 LNG 선 CCS 구조의 동적응답거동 특성을 보다 정확히 파악하기 위해 LS-DYNA의 유체-구조 연성 해석 기법을 사용하여 MARK III형 CCS 구조의 수면낙하 내충격 응답해석 기술을 개발하고자 하였다. 내충격 응답해석 기술의 정도를 높이기 위해 일련의 수면낙하 실험 결과를 이용하여 검증하였다.

내충격 응답해석에 의한 충격압력 역적 및 변형률의 응답거동은 실험 결과와 전반적으로 잘 일치하였다는 것을 확인할 수 있었다. 이상의 내충격 응답해석 및 실험 결과들의 비교·검토에서 LS-DYNA의 유체-구조 연성 해석기법과 CCS 구조의 유한요소 모델링 및 비선형 재료 물성치, 유체영역의 모델링 및 상대방정식 등을 매우 적절히 사용하여 내충격 응답해석을 수행하였다는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- Aquelet, N., Souli, M. and Olovsson, L., 2006, "Euler-Lagrange coupling with damping effects: Application to slamming problems," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 195, pp. 110-132.
- 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 ISOPE, Vol. 3, pp. 199-204.

- Jang, I.H., 2007, Sloshing Response Analysis of LNG Carrier Tank using Fluid-Structure Interaction Analysis Technique of LS-DYNA3D, Master Thesis, Korea Maritime University, Korea.
- Kim, W.S., Noh, B.J., Lee, H., Mravak, Z., Lauzon, J. de, Maguire, J.R., Radosavljevic, D., Kwon, S.H. and Chung, J.Y., 2008, "Fluid-structure interaction modeling, relating to membrane LNG ship cargo containment system," Proceedings of ISOPE, Vol. 3, pp. 75-84.
- Lee, S.G., Jang, I.H. and Hwang, J.O., 2006a, "Fluid-Structure Interaction Response Analysis using LS-DYNA3D," Proceedings of the Spring Meeting KAOST, pp. 997-1001.
- Lee, S.G., Jang, I.H. and Lee, J.D., 2006b, "Fluid-Structure Interaction Respones Analysis using LS-DYNA3D II," Proceedings of the Annual Autumn Meeting SNAK, pp. 503-538.
- LSTC, 2007, LS-DYNA User's Manual, Version 971, Livermore Soft Technology Corp., USA.
- MSC, 2002, MSC/DYTRAN User's Guide, Version 2002 r2, MacNeal-Schwendler Corp.



< 이 상 갑 > < 황 정 오 > < 김 화 수 >