

납고무받침을 이용한 액체저장탱크 내진성능향상

김후승* · 오 주** · 정희영***

Kim, Hu-Seung*, Oh, Ju**, Jung, Hie-Young***

Seismic Performance Improvement of Liquid Storage Tank using Lead Rubber Bearing

ABSTRACT

Recently, interest in the seismic safety of structures is rising in South Korea due to the occurrences of earthquakes of 5.0 or greater magnitudes such as Gyeongju earthquake (September 2016) and Pohang earthquake (November 2017). In particular, the importance of living facilities that cause human injuries and property losses is more emphasized. Representative living facilities include gas and oil storage facilities and water tanks. In this study, the seismic performance of liquid storage tanks is improved by applying the lead rubber bearing, which is a seismic isolation method. The lead rubber bearing was designed considering the foundation of liquid storage tanks, and the general properties of the lead rubber bearing were verified through compression and shear tests using fabricated specimens. Furthermore, the behaviors of liquid storage tanks according to seismic and non-seismic isolations were analyzed through durability test, shaking table test and finite element analysis using ANSYS.

Key words : Lead rubber bearing, Seismic performance improvement, Liquid storage tank, Shaking table test, Finite element analysis

초 록

최근 국내에서 경주지진(2016.09)과 포항지진(2017.11) 등 규모 5.0 이상의 지진이 발생하여 구조물의 내진안전성에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히, 인명피해나 재산손실을 유발하는 생활시설물은 더욱 중요성이 강조되고 있다. 생활시설물 중 가스 및 유류 등의 저장시설물이 있으며 물을 저장하는 탱크가 대표적이다. 본 연구에서는 액체저장탱크의 내진성능향상을 위해 면진의 일종인 납고무받침(Lead Rubber Bearing)을 적용하고자 한다. 액체저장탱크의 기초를 고려하여 납고무받침을 설계하였으며, 실험체를 제작하여 압축 및 전단특성실험을 통해 납고무받침의 일반적 물성을 확인하였다. 납고무받침에 대한 내구성 실험 이후 진동대 실험 및 ANSYS를 이용한 유한요소해석을 통해 비면진 및 면진 적용에 따른 액체저장탱크의 거동을 분석하였다.

검색어 : 납고무받침, 내진성능향상, 액체저장탱크, 진동대 실험, 유한요소해석

1. 서론

최근 국내에서 경주지진(2016년 9월)과 포항지진(2017년 11월) 등 계기지진 관측 이후 최대 규모 5.0 이상의 지진이 발생하여 구조물의 내진안전성에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히, 인명피해나 재산피해를 유발하는 생활시설물은 더욱 중요성이 강조되고 있다. 생활시설물 중 가스 및 유류 등의 저장시설물이 있으며 물을 저장하는 탱크가 대표적이다. 만일 지진에 따른 액체저장탱크가 발생하면 구조물 자체의 경제적인 손실뿐만 아니라 폭발, 화재, 오염, 단수 등 주변시설물의 연속적인 파손과 인명피해 등 2차 피해를 유발할 수 있다.

* 종신회원 · 서울시립대학교 토목공학과 공학박사 (University of Seoul · ssaint1004@hanmail.net)

** 종신회원 · 특허청 심사관, 공학박사 (Korean Intellectual Property Office · aju1030@korea.kr)

*** 교신저자 · 서울시립대학교 토목공학과 교수, 공학박사 (Corresponding Author · University of Seoul · hyjung@uos.ac.kr)

Received November 20, 2018/ revised December 2, 2018/ accepted May 8, 2019

그럼에도 불구하고 국내에서는 물을 담수하는 저장탱크의 경우 동적거동에 대한 연구가 미흡하며 저장수위에 따른 정수압만을 고려하여 설계에 적용하고 있다. 또한, 기초에 고정되지 않은 액체저장탱크는 지진 발생시 과도한 슬로싱(Sloshing), 수위에 따른 수압 등으로 누수 및 파손이 나타나 안전성에 문제가 제기되었다.

지진에 대한 구조물의 안전성을 확보하는 방법으로는 일반적으로 내진, 면진, 제진구조로서 교량, 건축물 등과 같은 구조물에 대한 연구는 이미 세계적으로 진행되고 있다. 그 중 면진구조는 기존 구조를 보강을 하지 않고 효과적으로 내진성능을 향상시킬 수 있는 방안으로 적용되고 있다. 지반과 저장탱크 기초 사이의 면진장치를 설치한 탱크의 응답은 기존에도 많은 이론 및 해석적 연구가 이루어져 왔다. Kelly and Mayses(1989)는 여러 면진 지점으로 지탱된 콘크리트 바닥에 연결된 탱크의 설계방법을 제시하였다. Tajirain(1993)은 면진장치가 대형 저장탱크의 전도를 효과적으로 감소시킬 수 있음을 밝혔다. Bo and Jia-xiang(1994)은 지반에 설치한 면진장치를 가진 탱크를 유한요소법으로 해석하였다. 단순한 지진이력을 적용하면 면진장치는 유체의 슬로싱 진폭과 수압을 감소시킴을 확인하였다. Malhortra(1997)는 다양한 면진장치와 에너지 소산에 관한 액체저장탱크의 거동을 연구하였다. Harry and Francis(1999)는 수면이 높은 면진탱크의 지진응답을 연구하였다. 지반에 고정된 탱크와 면진장치가 설치된 탱크에 대해 비교 해석한 결과 면진이 설치된 탱크에서 벽체의 전도, 기초 전단, 전도모멘트와 탱크벽면압력 등 지진력 감소가 나타났다.

본 연구에서는 액체저장탱크의 면진시스템 적용을 위해 저경도 고무를 적용한 납고무받침을 설계하고 압축특성 및 전단특성 실험을 통해 성능을 평가하였다. 적중고무받침을 설치유무에 따른 액체저장탱크에 대한 실험체를 제작하여 진동대 실험을 수행하였다. 해당모델에 대하여 유한요소해석을 이용하여 모델링한 후 지진해석을 수행하여 동적거동을 분석하였다.

2. 납고무받침

2.1 개요

일반적으로 지진격리는 지진에 의해 발생되어 구조물에 전달되는 에너지를 지진격리장치를 이용하여 격리함과 동시에 에너지를 소산시킴으로써 구조물 자체의 진동을 저감시킨다. 지진격리장치가 설치된 구조물은 유연성과 에너지 감소효과에 의하여 지진발생시 지반운동에 의한 수평력을 차단함으로써 지진의 피해로부터 구조물을 보호할 수 있다. 구조물의 감쇠현상을 크게 하는 가장 효과적인 수단의 하나는 이력에너지에 의한 에너지소산을 이용하는 것이다. 여기서 이력에너지 감쇠는 구조재료의 비탄성 변형을 통해 소산되는 에너지 양을 말한다.

국내뿐만 아니라 국외에서도 가장 일반적으로 사용되고 있는 지진격리장치는 납고무받침이다. 이 납고무받침은 유연한 수평강성을 갖도록 방진고무를 주된 재료로 사용하고 있으며, 수직강성을 보장하기 위한 강판을 삽입한 것을 기본형식으로 하고 있다. 그리고 초기강성 및 에너지 소산능력을 증가시키기 위해 단면 중앙에 납을 삽입한다. 납고무받침은 지진시에는 전단변형에 따라 납이 변형하고, 납의 탄소성 변형에 따라 지진시 에너지를 흡수한다. 납고무받침의 스프링 시스템과 한 사이클 당 소산되는 에너지 EDC (Energy Dissipated per Cycle)에 대해서 Fig. 1과 같이 표현할 수 있다. 여기서 K_u , K_d 는 납고무받침의 항복 전·후의 강성, K_{eff} 는 유효강성, F_y 는 초기 항복하중, F_{max} 는 최대하중, d_y 는 항복변위, d_i 는 최대변위이다.

2.2 납고무받침 설계

본 연구는 지진격리장치에서 저경도 고무와 보강철판이 적층된 형태의 납고무받침에 대하여 설계하였다. 탱크에 납고무받침에 적용하기 위해 기존 콘크리트 기초를 고려하여 외경을 설계하였으며, 받침의 높이를 최소화하기 위하여 저경도 고무를 적용하였다.

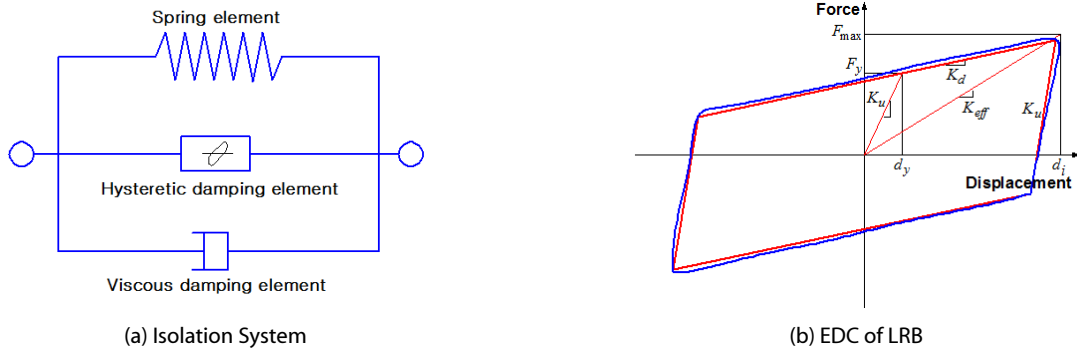


Fig. 1. LRB Isolation System and Bi-Linear Model

저경도 고무는 고무재료에 배합되는 각종 배합약품 중에서 카본블랙, 화이트카본 등과 같은 보강제의 배합양을 조절하여 경도를 낮춘 재료이다. 본 연구에서 설계된 납고무반침의 외경은 외피 10 mm를 포함한 210 mm이며, 내부보강철판의 직경은 200 mm이다. 납의 직경은 35 mm, 고무 1층 두께는 3 mm로서 고무는 총 10개가 적층되었다. 전체높이는 88 mm로서 변위는 30 mm로 설계하였으며, Table 1은 납고무반침의 설계 특성치를 나타낸 것이다.

$$K_v = \frac{E_c \cdot A}{T_r} \quad (1)$$

$$E_c = \frac{E_{ap} \cdot E_b}{E_{ap} + E_b} \quad (2)$$

$$E_{ap} = E_0(1 + 2kS^2) \quad (3)$$

$$K_d = CKd(K_r + K_p) \quad (4)$$

$$\left(K_r = G_r \frac{A_r}{T_r}, K_p = \alpha \frac{A_p}{T_r} \right)$$

압축강성(K_v)은 Eq. (1)과 같이 산정되며 고무의 압축탄성계수(E_c)와 결보기 탄성계수(E_{ap})의 산정식은 Eqs. (2) and (3)과

같다. 여기서, S 는 형상계수, k 는 고무의 경도계수, T_r 은 고무의 전체 두께이며 A 는 단면적이다. 납의 전단항복 이후에 나타나는 2차강성(K_d)은 Eq. (4)와 같으며 고무의 전단강성(K_r)과 납코어의 항복 후 강성증가분(K_p) 그리고 납코어 항복하중에 대한 전단변형을 의존성 보정계수(CQd)가 고려된다. 이러한 압축강성과 전단강성은 LRB의 설계값으로서, 압축 및 전단특성시험의 결과값과 비교하여 지진격리장치의 성능을 확인한다.

2.3 압축 및 전단특성시험

압축특성시험은 압축하중과 압축변위를 측정하여 납고무반침의 압축강성과 압축거동을 확인하기 위한 시험이다. 시험체의 수직강성을 얻고자 상온에서 시험체에 고감도 변위계를 설치하여 시험을 수행하였다. 본 시험에서는 각 적층고무반침별로 3개씩 시험체를 제작하여 각 시험체별로 각각 시험한다. 압축특성시험에 따른 결과는 Figs. 2(a)-(c)와 같이 나타난다. 압축특성시험 결과 559~610 kN/mm로 측정되었으며 설계값 529 kN/mm와 비교할 때 약 5.7~15.3 %의 오차를 나타내고 있다. 이는 AASHTO(2010)와 ISO 22762(2010)에서 규정한 허용오차범위 $\pm 30\%$ 이내로 기준치를 만족하는 것으로 나타났다(Table 2). 압축특성시험은 적층고무반침의 압축하중과 압축변위를 측정하여 시험체의 압축강성과 압축거동을 확인하기 위한 기본시험이다. 시험결과, 설계 값과 시험값과의 평균오차는 8.9 %로 설계값의 허용오차 $\pm 30\%$ 의 허용치를 만족하는 수치이다.

Table 1. Design Condition of LRB

Dvision	Value	Dvision	Value
Compressive Stiffness (K_v)	529.507 kN/mm	Characteristic Strength (Q_d)	7.67 kN
Elastic Stiffness (K_u)	37.188 kN/mm	1st Shape Factor (S_1)	16.7
Post-yield Stiffness (K_d)	0.411 kN/mm	2st Shape Factor (S_2)	6.7
Effective Stiffness (K_{eff})	0.667 kN/mm	Area of Hysteresis loop	0.242

Table 2. Compression Properties Test Result of LRB

Compressive Stiffness (kN/mm)		Error (%)	Average Error (%)
Design Value	Test Value		
529	610	15.3	8.9
	560	5.9	
	559	5.7	

Table 3. Shear Properties Test Result of LRB

Shear Stiffness (kN/mm)		Error (%)	Average Error (%)
Design Value	Test Value		
0.667	0.701	5.1	3.6
	0.675	4.2	
	0.678	1.6	

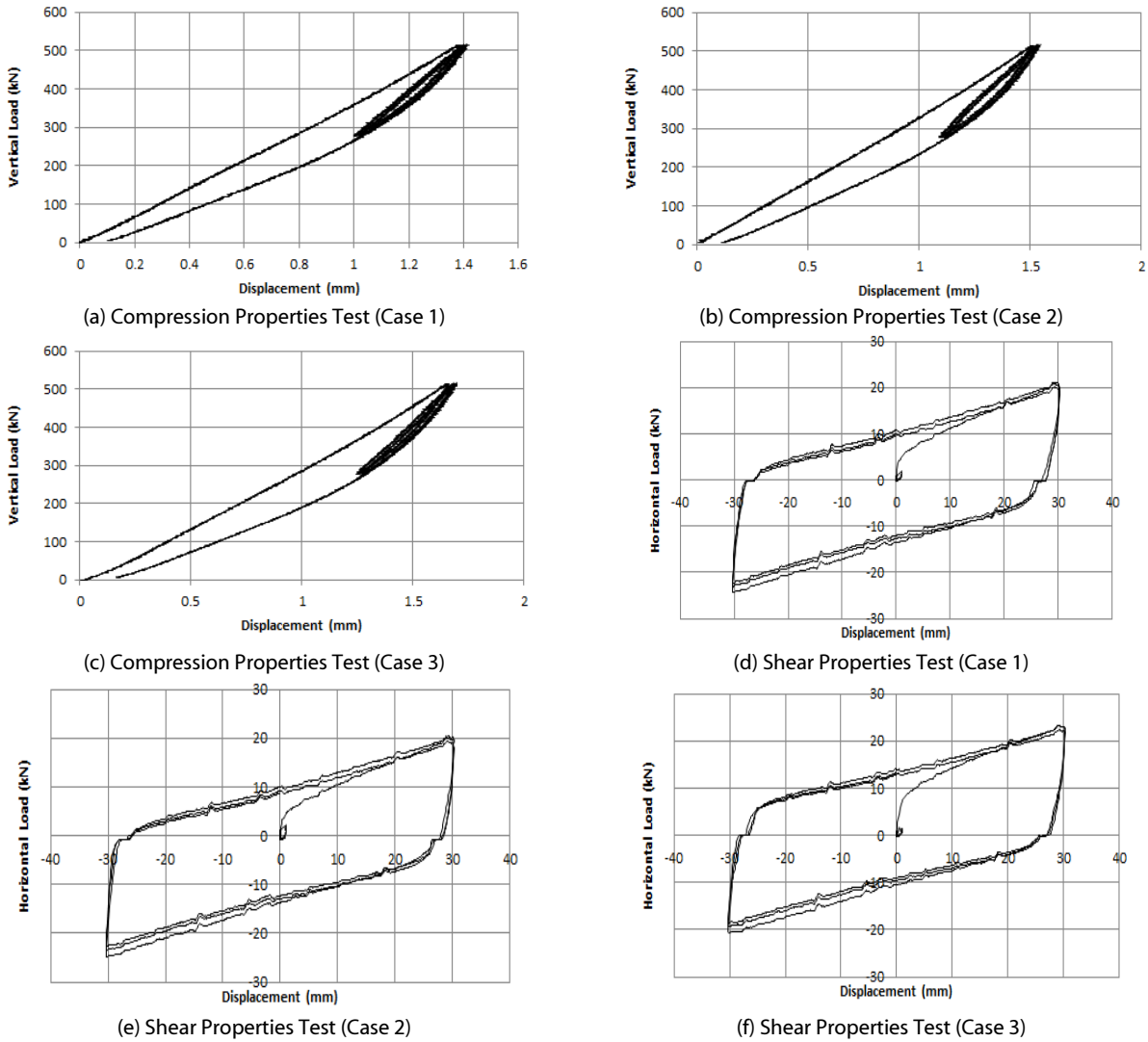


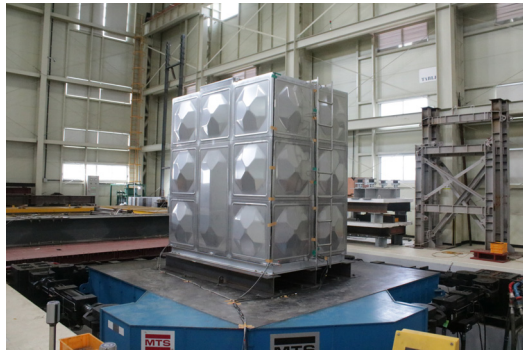
Fig. 2. Performance Test of LRB

전단특성실험은 납고무받침의 전단강성을 얻기 위한 실험으로 실험방법은 상온상태에서 각각의 실험체에 설계면압이 유지되도록 수직하중을 일정하게 재하한 상태에서 실험체에 수평방향으로 총 3회 연속적으로 반복하여 수행한다. 대상 실험체의 설계변위는 $\pm 30 \text{ mm}$ 로서 전단변형률 100%에 대해 3사이클의 전단특성실험을 수행하였다. 상기의 방법에 따른 실험 결과는 Figs. 2(d)-(f)와 같이 나타난다. 납고무받침의 설계값은 0.691 kN/mm 로서 실험한 결과 $0.675\sim 0.701 \text{ kN/mm}$ 와 비교한 결과 1.6~5.1%로 비교적 설계값과 오차가 크지 않는 것으로 나타났다(Table 3). Figs. 2(d)-(f)는 납고무받침의 이력곡선으로서 적층고무의 전단 변형시에는 내부의 납봉이 소성 변형하여 에너지를 흡수하는 댐퍼기능을 한다. 이로 인해 납봉은 순수전단에 가까운 변형이 되고 반복변형에 대해서도 비교적 안정된 에너지 흡수 능력을 발휘할 수 있다.

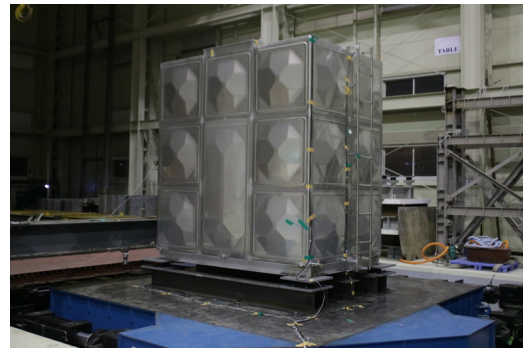
3. 진동대 실험

3.1 개요

구조물과 기초 사이에 설치되는 지진격리장치는 지진발생에 대하여 상대적으로 큰 유연성으로 구조물을 격리하는데 목적이 있다. 일반적으로 지진격리장치가 적용된 구조물은 비격리 구조물에 비해 상대변위가 크게 발생하게 되지만 지진격리장치의 이력감쇠를 통해 상대변위를 조절하게 된다. 기본적으로 지진격리장치의 이력감쇠는 비탄성 거동을 하기 때문에 이론적인 접근으로 지진격리 된 구조물에 대한 동적거동을 예측하기는 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 지진격리장치가 적용된 액체저장탱크의 거동을 평가하고 기존 유한요소해석기법을 이용한 구조해석 및 검증방법을 확인하기 위해 진동대 실험을 수행하였다. 진동대의 크기는 $5 \text{ m} \times$



(a) Non-Isolater Test Structure



(b) Isolater Test Structure

Fig. 3. Test Structure on Shaking Table

Table 4. Specification of the Shaking Table

Dvision	Dimension	Value
Table Size	m	5.0 × 5.0
Degrees of Freedom	-	3
Full Payload	kN	300
Nominal Payload	kN	200
Maximum Velocity	mm/s	X-axis 1.0 Y-axis 1.0
Maximum Stroke	mm	X-axis ± 300 Y-axis ± 200
Operating Frequency Range	Hz	0.1~60

5 m이며 최대가속도는 0.85 g, 진동수 범위는 0.1 Hz~60 Hz이다. 본 진동대의 주요 제원을 Table 4 그리고 진동대에 설치된 실험 모형의 형태는 Fig. 3에 나타내었다. 본 연구에서 수행한 진동대 실험은 비지진격리 액체저장탱크(Fig. 3(a))와 지진격리장치 적용된 액체저장탱크(Fig. 3(b))의 실험으로 크게 구분된다. 일반적인 액체저장탱크의 경우 기초와 분리된 구조이지만, 본 실험에서는 소방시설의 내진설계 화재안전기준 해설서(MPSS, 2016)에서 제시하는 저장탱크와 기초를 고정하는 구조를 적용하였다. 대상 액체 저장탱크는 Stainless 판넬을 이용하여 진동대의 용량과 크기에 따라 길이 3.0 m, 폭 2.0 m 이며 높이 3.0 m를 갖는 실물모형 실험체로 설치하였으며, 탱크 내부의 액체는 안전을 위해 물로 실험을 진행하였다.

3.2 실험계획

본 연구에서 지진 하중은 도로교 설계기준(KRBDC) (MLTM, 2010)에서 제시한 지진구역 I 구역계수 0.11 g와 재현주기 1,000 년에 해당하는 위험도계수 1.4를 고려한 0.154 g 그리고 일본에서 발생한 실제 지진 기록인 Hachinohe 0.231 g를 비롯한 미국에서 발생한 Northridge 0.341 g와 El Centro 0.348 g 지진파 등 총 4개의 국내외 지진파를 입력지진파로 사용하였다. 본 실험에서는 담수 높이에 따른 액체저장탱크의 지진 거동 특성을 분석하고자 수위를 1.5 m와 2.5 m로 계획하였다. 실험 데이터 측정을 위해

Table 5. Test Results of Max Dynamic Pressure (kN/m²)

Water Lever (m)	Earthquake	PGA (g)	Max Dynamic Pressure		Ratio (%)
			Non-Iso	LRB	
1.5	KRBDC	0.154	20.73	15.53	25.1
	Hachinohe	0.231	19.57	16.58	15.3
	Northridge	0.341	20.68	16.51	20.2
	El Centro	0.348	18.96	16.32	13.9
2.5	KRBDC	0.154	30.88	25.90	16.1
	Hachinohe	0.231	35.99	28.55	20.7
	Northridge	0.341	34.27	30.14	12.0
	El Centro	0.348	34.77	29.66	14.7

수압계가 사용되었으며, 부착위치는 지진파를 가진하는 장방향을 중심으로 탱크 내부 중앙부의 Base, 1.5 m, 2.5 m 높이의 설치하였다.

3.3 실험결과

비면진 액체저장탱크와 면진 액체저장탱크에 4개의 지진파를 가진하여 수압에 대해 분석한 결과 수위 1.5 m, 2.5 m 모두 액체저장 탱크의 하단부에서 응답이 크게 나타났다. Fig. 4는 최대응답이 나타난 하단부의 수위에 따른 각 지진파별로 나타냈으며 수압에 대한 최대 응답을 Table 5에 나타내었다. 수위 1.5 m의 경우 13.9~25.1 %의 감소율을 나타냈으며 비면진의 경우 KRBDC 지진파에서 최대 20.73 kN/m²이 발생하였으며 면진의 경우 최대 15.53 kN/m²이 발생하여 25.1 %의 감소율을 나타냈다. 수위 2.5 m의 경우 12.0~20.7 %의 감소율을 나타냈으며 비면진의 경우 Hachinohe 지진파에서 최대 35.99 kN/m²이 발생하였으며 면진의 경우 최대 28.55 kN/m²이 발생하여 20.7 %의 감소율을 나타냈다. 액체저장탱크에서 수압이 가장 큰 하단부에서 압고무받침을 사용했을 때 비면진과 비교했을 때 전반적으로 수압의 감소효과가 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

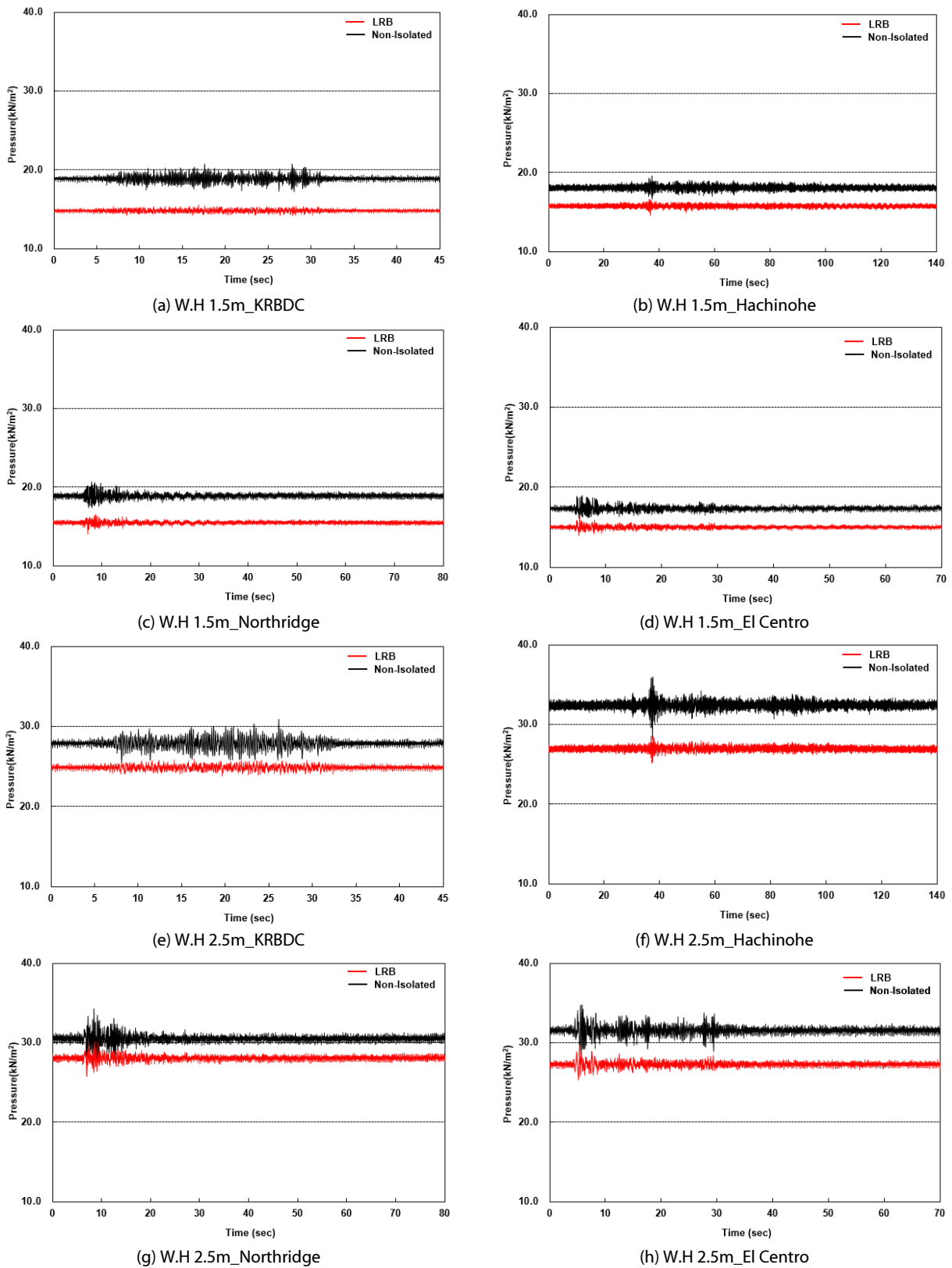


Fig. 4. Test Results of Dynamic Pressure (kN/m^2)

4. 유한요소해석

본 연구에서는 액체저장탱크의 비면진 및 면진 적용에 따른 성능을 확인한 모델에 대해 유한요소해석을 수행하여 진동대 실험 결과와 비교하여 실험의 타당성을 검증하였다. 기존의 액체저장탱크에 대한 연구는 대부분 구조물이 강체로 거동한다고 가정하여 근사해법을 통해 접근하였다. 이러한 근사해법으로 설계된 액체저장탱크들에 지진발생으로 인한 피해가 발생하여 실제거동과는 다소 차이가 나타남을 볼 수 있다. 본 연구에서는 액체저장탱크에 대하여 유체-구조물을 모형화하고 비선형해석을 통하여 진동대 실험결과와 해석결과를 비교함으로써 그 결과를 비교, 분석하였다.

4.1 해석모델

본 연구는 액체저장탱크의 내진성능을 평가하기 위해 상용 유한요소해석 프로그램 ANSYS Mechanical Ver 17.1(2016)을 사용하여 액체저장탱크와 유체를 모델링하고, 지진하중에 따른 수압에 대한 영향을 진동대 실험값과 비교 분석하였다. 유체는 수압이 가장 크게 나타난 만수위(W.H=2.5 m)로 모델링하였으며, 해석을 위한 Node는 23,723개, Elements는 21,520개를 이용하였다. 유한요소해석 모형은 진동대 실험체와 같은 길이 3 m, 폭 2 m, 높이 3 m로 Fig. 5와 같다. 유체-구조물 해석을 위해 ANSYS Mechanical의 Contained Fluid (Fluid80) 요소와 Shell 181 요소를 사용하여 Fig. 5(a)와 같이 모델링하였다. 유체의 단위중량은 1.0×10^5

N/mm^3 이며 구조물은 Stainless로서 단위중량 $7.95 \times 10^5 N/mm^3$, 탄성계수 $1.96 \times 10^4 N/mm^3$, 프아송비는 0.27이다. Contained Fluid 요소는 구조해석용 요소로 구조내부의 유체영역을 모델화하는 것으로 유체 관성력을 평가하는데 이용된다. 구조적 자유도 즉, 각 방향의 변위만을 가지고 있기 때문에 연성해석을 통하지 않고 구조해석만으로 유체의 Sloshing 효과를 구현할 수 있다. 액체저장탱크 안에 있는 액체의 경우 액체 자체의 흐름이 크지 않고 용기 내에 있기 때문에 Fluid80 요소를 적용하였으며, 액체와 구조물 사이의 경계조건은 Coupling을 사용하였다. 탱크 내부의 보강재는 Beam 188요소를 이용하여 Fig. 5(b)와 같이 모델링하였다. Fluid80 요소는 점성, 중력, 압축성의 영향을 고려할 수 있고 요소당 8개의 절점을 가지며, 한 절점당 각방향의 변위를 갖는 3자유도 요소이다. 탱크를 구성하는 Stainless 판넬을 모델링하는데 사용한 Shell 요소는 4절점 3차원요소로서, 이 요소는 절점마다 6자유도 $(x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 가지고 있으며 해석 수행시 재료 비선형과 기하 비선형을 고려한다. LRB는 실험과 동일한 위치에 모델링하였으며 압축강성은 ANSYS의 COMBIN 14요소, 전단강성은 COMBIN 40요소를 이용하여 항복 전과 항복 후의 강성을 적용하였다.

4.2 해석결과

진동대 실험시 가장 수압이 크게 나타난 수위 2.5 m에 대하여 유한요소해석을 수행하였다. 대상 구조물에 정수압과 동수압에 대하여 함께 고려하였고 결과는 Fig. 6과 같다. 해석결과, Table 6과

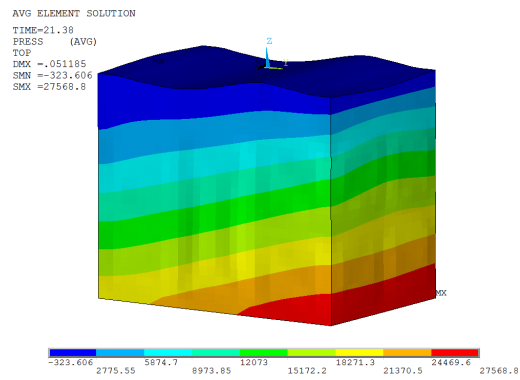


Fig. 5. Finite Element Model

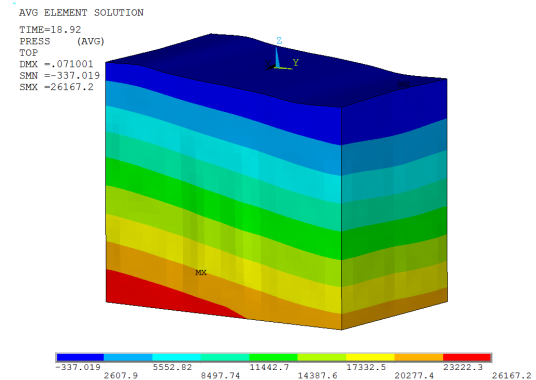
Table 6. Results of Max Dynamic Pressure (kN/m²)

Dvision	Non-Isolated			LRB		
	Test	Analysis	Ratio (%)	Test	Analysis	Ratio (%)
KRBDC	30.88	29.27	-5.2	25.90	27.18	4.9
Hachinohe	35.99	33.58	-6.7	28.55	27.14	-4.9
Northridge	34.27	31.39	-8.4	30.14	29.12	-3.4
El Centro	34.77	32.20	-7.4	29.66	29.72	0.2

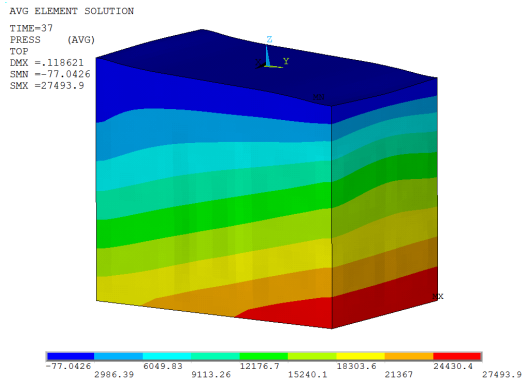
납고무받침을 이용한 액체저장탱크 내진성능향상



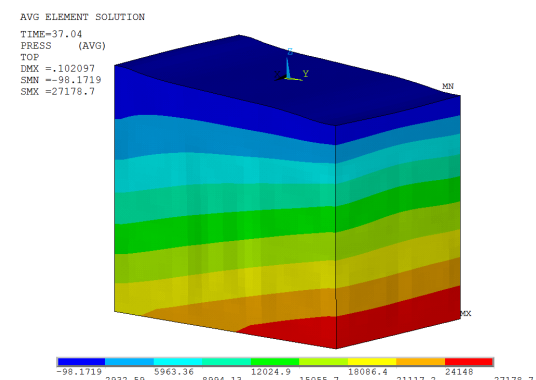
(a) Non-Isolated_KRBDC



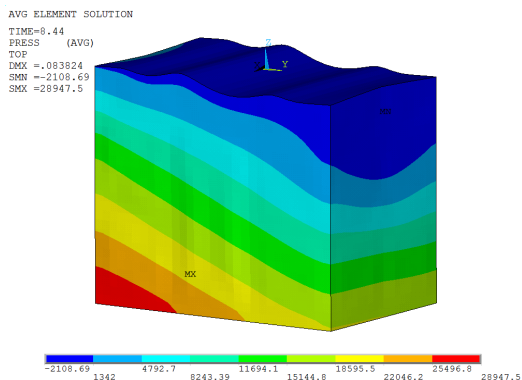
(b) LRB_KRBDC



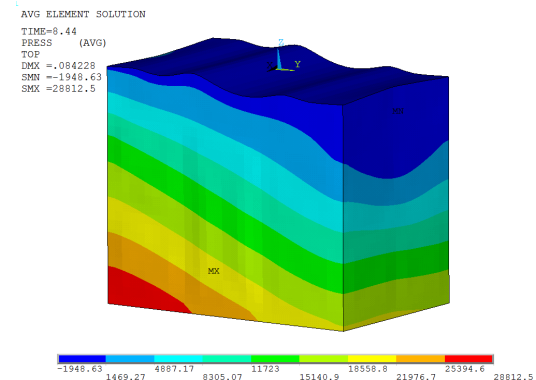
(c) Non-Isolated_Hachinohe



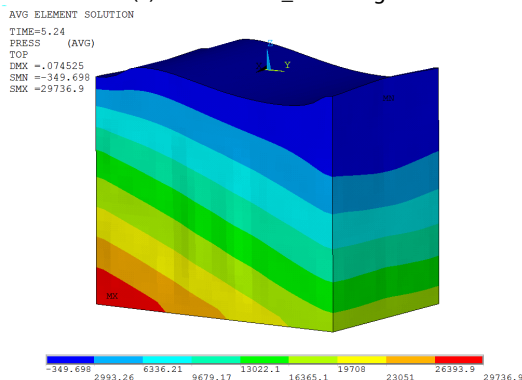
(d) LRB_Hachinohe



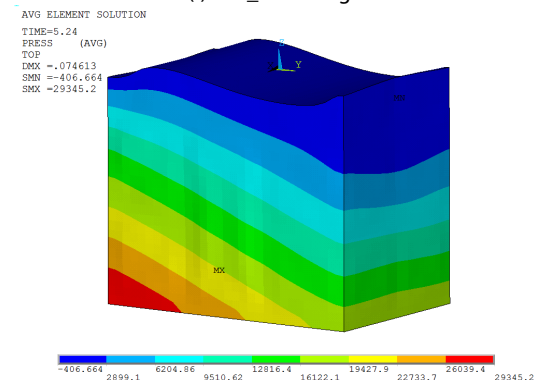
(e) Non-Isolated_Northridge



(f) LRB_Northridge



(g) Non-Isolated_El Centro



(h) LRB_El Centro

Fig. 6. Analysis Results of Dynamic Pressure (Pa)

같이 해석결과 최대수압은 진동대 실험결과와 최대수압과 비교할 때 비면진은 -5.2~8.4 %, LRB는 -4.9~4.9 % 의 차이가 나타났다. 상기와 같이 실험값과 해석값을 비교 분석할 결과 거의 유사하며 최대값에 있어서도 큰 차이는 나타나지 않고 있다. 따라서 본 해석방법은 지진하중 작용시 액체저장탱크의 거동을 효율적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

최근 국내에서도 규모 5.0 이상의 지진이 두 차례 발생하였고 생활구조물 중 물을 담수하는 액체저장탱크의 파손이 발생되었다. 본 연구는 액체저장탱크의 내진성능 향상을 위해 면진의 일종인 납고무받침을 제안하였다. 저경도 고무를 적용한 납고무받침을 설계하고 실험체를 제작하여 압축과 전단특성실험을 통하여 일반적인 물성을 확인하였다. 납고무받침에 대한 내구성 실험 이후 적용에 따른 액체저장탱크의 거동을 분석하기 위해 진동대 실험 및 ANSYS를 이용한 유한요소해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

납고무받침의 기본 물성을 검증하기 위해 압축특성 및 전단특성을 실험한 결과 설계값과 실험값을 비교했을 때 압축강성은 8.9 %, 전단강성은 3.6 %의 차이를 나타내며 설계값과 비교적 큰 차이가 나타나지 않았으며 이는 납고무받침 내부의 납의 영향에 의한 것으로 판단된다.

납고무받침 성능실험 이후 액체저장탱크에 적용하여 진동대 실험한 결과 수위 2.5 m에서 최대 수압이 발생하였으며 기초와 고정된 구조보다 면진구조가 구조물의 지진응답을 저감시키는데 비교적 효과적임을 알 수 있었다. 또한, 대상구조물에 대한 해석에서 응답값은 실험치와 유사하게 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

본 연구는 액체저장탱크의 내진성능을 향상시키기 위해 면진시스템 일종인 납고무받침을 제안하였고 이를 대상으로 실험 및 해석적으로 성능을 확인하였다. 또한, 연구결과들은 향후 액체저장

탱크에 대한 내진성능 향상 방안으로 면진시스템 적용에 따른 기초적인 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 2018 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

References

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2010). *Guide specifications for seismic isolation design*, Washington D.C.
- ANSYS Mechanical Ver. 17.1 (2016). *ANSYS manual*.
- Bo, L. and Jia-xiang, T. (1994). "Vibration studies of base-isolated liquid storage tanks." *Computers and Structures*, Vol. 52, No. 5, pp. 1051-1059.
- Harry, W. S. and Francis, P. H. (1999). "SEismic Response Of Isolated Elevated Water Tanks." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 9, pp. 965-976.
- ISO 22762 (2010). *Elastomeric seismic protection isolators part-1 : test methods*.
- Kelly, T. E. and Mayes, R. L. (1989). "Seismic isolation of storage tanks." *Proceeding of Sessions Related to Seismic Engineering at Structures Conference*, ASCE, New York, pp. 408-417.
- Malhortra, P. K. (1997). "Method for seismic response base isolation of liquid-storage tanks." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 1, pp. 113-116.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2010). *Korean Road Bridge Design Code* (In Korea).
- Ministry of Public Safety and Security (MPSS) (2016). *Seismic design fire safety standard of fire protection system* (in Korean).
- Tajirain, F. E. (1993). "Seismic isolation of critical components and tanks." *Proceeding ATC-17-1, Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control*, San Francisco, California, Vol. 1, pp. 223-244.