

납고무받침을 이용한 스테인리스 물탱크 내진성능에 관한 해석적 연구

김후승^{1*}, 오 주², 정희영^{1*}
¹서울시립대학교 토목공학과, ²특허청

A Analytical Study on Seismic Performance of Stainless Water Tank using Lead Rubber Bearing

Hu-Seung Kim¹, Ju Oh², Hie-Young Jung^{1*}

¹Department of Civil Engineering, University of Seoul

²Korean Intellectual Property Office

요약 최근 국내에서도 규모 5.0 이상의 지진이 발생하여 구조물의 내진 안전성에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히, 물을 저장하는 시설은 지진에 의해 손상 및 파손이 될 경우, 누수로 식수 및 용수가 부족하게 될 뿐만 아니라 화재 진압의 어려움이 야기되므로 지진에 대한 안전성을 만족하여야 한다. 본 연구에서는 기초와 탱크 사이에 납고무받침을 고려하여 지진에 대한 물탱크의 내진성능을 향상시키고자 한다. 이를 위해 기존 콘크리트 기초에 설치 가능하도록 납고무받침을 설계하였다. 물탱크에 대하여 유체-구조물 상호작용을 고려하기 위하여 ANSYS를 활용하여 모델링을 수행하였으며 정수압과 4개의 지진 파를 이용한 동수압을 고려하였다. 만수위 2.5m의 정수압이 작용하는 경우에 대하여 정적 해석을 수행한 결과, 면진 적용여부와 상관없이 동일한 응력이 발생하였다. 정수압과 동수압을 동시에 고려했을 때, 면진 물탱크는 전반적으로 지진력 감소가 이루어졌지만 일반적인 구조면진과 비교했을 때 감쇠율이 다소 낮은 것으로 나타났다. 이는 물탱크 중량이 면진 강성보다 매우 작아서 나타난 결과로 판단되며, 향후 물탱크 내진성능 평가에 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

Abstract Earthquakes over 5.0 on the Richter scale have recently occurred in Korea, which has led to interest in the seismic safety of structures. If a water storage facility is damaged by an earthquake, the water could leak, and the insufficient water would make fire suppression difficult. Therefore, a water storage facility should satisfy safety requirements for earthquakes. In this study, the seismic performance of a water tank was improved by installing a lead rubber bearing between the foundation and the tank. It designed the lead rubber bearing available to the existed concrete foundation. ANSYS was used for modeling to consider the interaction between the fluid and structure of the tank and the hydrostatic and hydrodynamic pressure using four seismic waves. In the case of hydrostatic pressure at 2.5 water level, full level, the same stress appeared irrespective of whether the seismic isolation was installed. When hydrostatic pressure and hydrodynamic pressures are applied at the same time, the seismic-isolated water tank showed less seismic force, and the damping ratio was lower than that of general seismic isolation. This occurred because the weight of the water tank is much smaller than the stiffness of the seismic isolation. The result is expected to be used for further research on seismic capacity evaluation for water tanks.

Keywords : Finite Element Analysis, Fluid-Structure Interaction, Isolator, Lead Rubber Bearing, Stainless Water Tank, Seismic Performance

이 논문은 2017년도 서울시립대학교 연구년 교수 연구비에 의하여 연구되었음

*Corresponding Author : Hie-Young Jung(University of Seoul.)

Tel: +82-2-6490-2430 email: hyjung@uos.ac.kr

Received August 7, 2018

Revised (1st September 3, 2018, 2nd October 10, 2018, 3rd October 29, 2018)

Accepted November 2, 2018

Published November 30, 2018

1. 서론

지진 재해시 물의 확보는 지진 발생시 필요한 일이다. 지진 발생시 상수도관은 대부분 관로의 절단 및 파손에 의해 물의 공급이 어려울 수 있기 때문에 구조물에 저장된 물은 화재 진압, 식수 그리고 용수 등 유용하게 쓸 수 있다. 이러한 물의 필요성은 이미 인식된 것으로서 물을 저장하는 구조물에는 높은 내진성능이 요구된다.

물을 저장하는 구조물은 기존의 철근콘크리트에서 스테인리스(Stainless)를 비롯한 SMC, FRP 등의 재질로 변화하고 있다. 철근콘크리트 재질의 경우 콘크리트가 중화되어 균열이 발생할 경우 철근노출 등의 손상이 발생되어 물이 오염될 우려가 있다. 특히, 스테인리스 재질의 경우 녹이 슬지 않고 표면에 생기는 산화 피막에 의하여 공기 중에 존재하는 산소와 산화물의 침입을 방지하여 더 이상의 산화를 진행시키지 못하게 하는 재질로서 내식성과 위생성이 비교적 우수하여 스테인리스 물탱크의 적용성이 증가하고 있다.

스테인리스 물탱크는 스테인리스 사각 패널형 구조로 패널의 크기는 가로 × 세로 1.0m × 1.0m 또는 1.0m × 2.0m로서 용접한다. 기초는 콘크리트 재질로서 폭과 높이는 300~500mm로서 배수가 원활하도록 한다. 국내에서는 기초와 물을 저장하는 탱크가 기초와 분리되어 있는 구조이며, 설계시 저장된 물의 높이에 따른 정수압만을 고려하는 것이 일반적이었으나, 소방시설의 내진설계 기준(2015)[1] 시행 이후 기초와 탱크의 일체화 및 지진 발생시 물탱크 내부 수면의 출렁거림(Sloshing)에 따른 구조물 안전성에 대한 관심과 연구가 점차 증가하고 있다[2-4].

본 연구에서는 스테인리스 물탱크의 내진성능 향상을 위해 납고무받침(Lead Rubber Bearing, LRB)을 적용하고자 한다. 이를 위해 기존 콘크리트 기초를 고려하여 납고무받침을 설계하였다. 스테인리스 물탱크에 대하여 유체-구조물의 상호작용을 고려하기 위한 모델링을 수행하였으며, 정수압과 지진과를 고려한 동수압에 대하여 유한요소 해석을 수행하였다. 해석에 적용한 지진파는 도로교설계기준(Korea Road Bridge Design Code, KRBD C)[5]에서 제시한 지진구역 I의 구역계수 0.11g와 재현주기 1,000년에 해당하는 위험도계수 1.4를 고려한 0.154g 그리고 일본에서 발생한 Hachinohe(0.231g)를 비롯한 미국에서 발생한 Northridge(0.341g)와 El

Centro(0.348g) 등 총 4개이며, 고정 물탱크와 면진 물탱크에 대해 비교 분석하였다.

2. 납고무받침

2.1 납고무받침 특성

납고무받침은 국내뿐만 아니라 국외에서도 가장 일반적으로 사용되고 있는 지진격리장치 중 하나이다. 납고무받침은 유연한 수평강성을 갖도록 방진고무를 주된 재료로 사용하고 있으며, 수직강성을 보장하기 위해 고무와 고무사이에 강판을 삽입하였다. 그리고 초기강성 및 에너지 소산능력을 증가시키기 위해 단면 중앙에 납을 삽입한다.

납고무받침은 지진시에는 전단변형에 따라 납이 변형하고, 납의 탄소성 변형에 따라 지진시 에너지를 흡수한다. 즉, 지진시 적층고무받침의 유연성을 이용하여 구조물에 유발되는 지진력의 크기를 줄이고, 에너지 소산기구로서 적층고무 내부에 원통형의 납을 삽입하여 납의 소성거동을 이용하여 지진격리 구조물의 감쇠성능을 통해 지진격리장치에서 발생하는 과도한 변위와

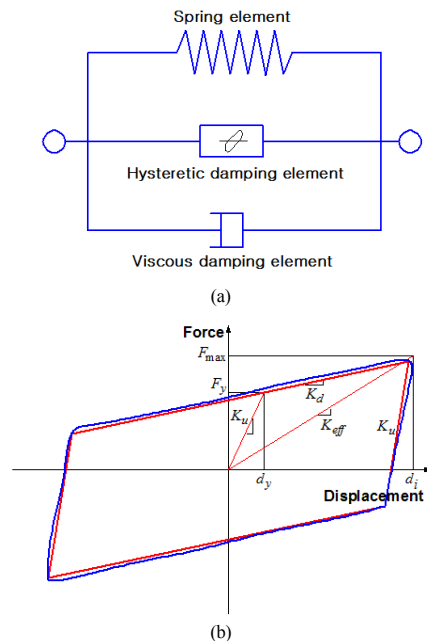


Fig. 1. LRB Isolation System and Bi-Linear Model
(a) Isolation System (b) Bi-Linear Model

구조물로 전달되는 지진력을 감소시킨다. 납고무받침의 구조형상 및 역학적 이력곡선은 Fig. 1과 같이 나타낼 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.

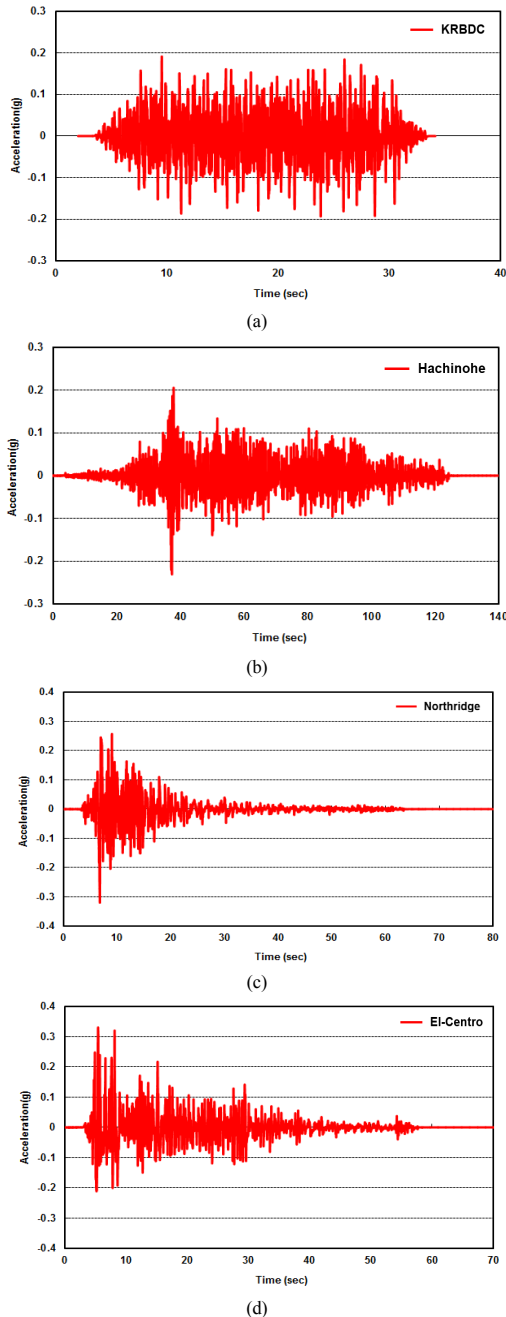


Fig. 2. Artificial earthquake
 (a) KRBDC 0.154g (b) Hachinohe 0.231g
 (c) Northridge 0.341g (d) El-Centro 0.348g

2.2 납고무받침 설계

본 연구에서 설계된 납고무받침의 전체높이는 88mm이며 외피 10mm를 제외한 외경은 200mm이다. 납의 직경은 35mm이며 변위는 30mm로 설계하였다.

고무 1층의 두께는 3mm이며 고무의 총 10개가 적용되었다. 수직하중에 의한 처짐을 방지하기 위한 보강철판의 두께는 2mm로서 9개이며 고무의 전단탄성계수(G)는 0.4MPa이다. Table. 1은 납고무받침에 대한 설계 특성치를 나타낸 것이다. 여기서, LRB의 설계압축하중은 50kN이며, 내부 납의 직경은 35mm, 강성은 18.86N/mm로 설계하였다.

Table 1. Specimens of Design Condition

Dvision	Value
Compressive Stiffness (K_v)	529.507kN/mm
Elastic Stiffness (K_u)	37.188kN/mm
Post-yield Stiffness (K_d)	0.41kN/mm
Effective Stiffness (K_{eff})	0.667kN/mm
Characteristic Strength (Q_d)	7.67kN
1st Shape Factor (S_1)	16.7
2st Shape Factor (S_2)	6.7
Area of Hysteresis loop (EDC)	0.242

3. 유한요소해석

3.1 개요

구조해석 대상 물탱크는 길이 3.0m, 폭 2.0m, 높이 3.0m의 크기이며, 만수위시 물의 수위는 2.5m로서 물탱크 용량은 150kN이다. 스테인리스 판넬의 두께는 수압의 영향이 비교적 작은 상단부는 1.5mm, 정수압이 큰 하단부는 2.5mm이며, 내부에는 수평 보강재가 설치된다.

본 연구에 사용된 지진파는 국내 도로교설계기준(KRBDC)에서 제시한 0.154g를 비롯한 Hachinohe(0.231g), Northridge(0.341g) 그리고 El-Centro(0.348g) 등 총 4개이며 Fig. 2와 같다. 대상 인공지진파는 장방향인 3.0m 길이방향으로 가진하였으며, 수위는 2.5m로 가정하였다.

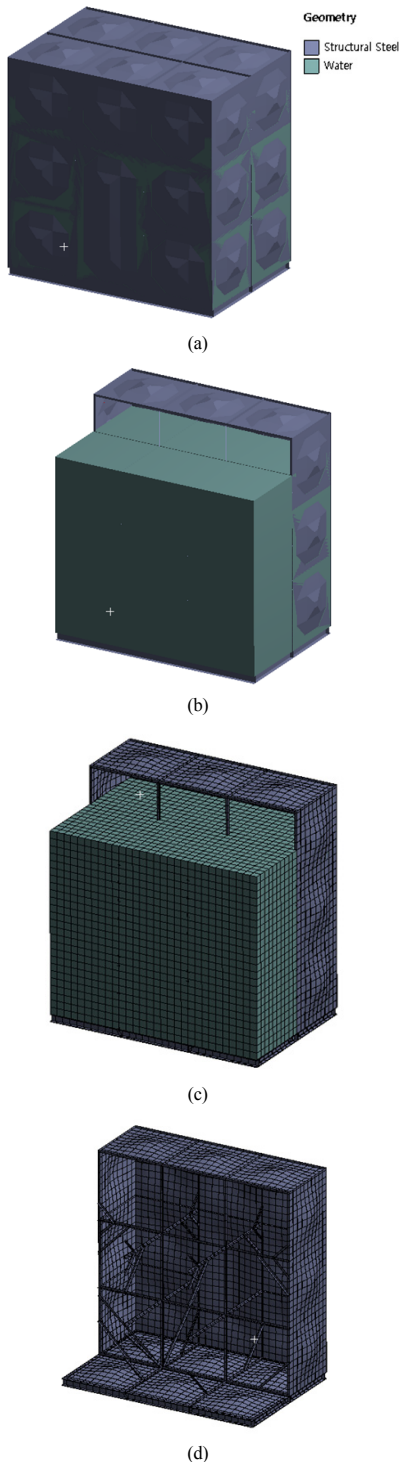


Fig. 3. Finite Element Model
 (a) Full Model (b) Fluid-Structure Model(1)
 (c) Fluid-Structure Model(2) (d) Shell-Beam Model

3.2 유체-구조물 해석

물탱크는 지진과 같은 진동에 의하여 내부 액체가 출렁거리며 즉, 슬로싱 현상이 발생하며 탱크 벽면과 충돌함으로써 파괴가 발생할 수 있다. 일반적으로 유체와 구조물 상호작용을 고려하기 위해 Housner의 이론을 이용한 단순화된 모델이 널리 사용되고 있다[6]. 이러한 Housner 이론은 구조물이 강체로 거동한다고 가정하여 유체동압력 및 유체 자유수면의 변화인 슬로싱을 산출하는데 근사해법을 이용하였다. Housner 이론을 통해 설계된 탱크는 지진 발생시 슬로싱이 구조물 모델보다 수배 이상 증폭되어 손상 및 파괴를 유발하기 때문에 액체저장탱크를 강체로 가정하는 것이 안전하지 않다는 것으로 판단되었다. 또한, 지반과 분리된 탱크는 지진 발생시 들림 또는 전도로 손상이 더욱 크게 발생할 수 있는 것으로 확인되었다[7].

본 연구에서는 기초와 탱크사이에 LRB를 고려하여 지진에 따른 물탱크의 내진성능을 향상시키고자 한다. 이러한 내진성능을 평가하기 위해 유한요소해석 프로그램 ANSYS Mechanical(Ver 17.1)을 사용하여 탱크와 유체를 모델링하고 기초와 탱크가 고정(Non-Isolated)인 경우와 면진인 경우를 비교 분석하였다. 유체는 수압이 가장 높은 만수위 2.5m로 모델링하였으며, 해석을 위한 Node는 23,723개이며 Elements는 21,520개이다(Fig. 3(a)).

유체-구조물 해석을 위해 ANSYS Mechanical[8]의 Contained Fluid(Fluid 80) 요소와 Shell 181요소를 이용해 Fig. 3(b) 및 Fig. 3(c)와 같이 모델링하였다. 탱크 내부의 수평 및 수직보강재는 Beam 188 요소를 이용하여 Fig. 3(d)와 같이 모델링하였다. Contained Fluid 요소는 구조해석용 요소로서 구조내부의 유체영역을 모델화하여 유체 관성력을 평가하는데 이용된다. 구조적 자유도 즉, 각 방향의 변위만을 가지고 있기 때문에 연성해석을 통하지 않고 구조해석을 통해 유체의 Sloshing 효과를 구현할 수 있다. 물탱크 안에 있는 물의 경우 유체 자체의 흐름이 크지 않고 용기 내에 있기 때문에 Fluid 80 요소를 적용하였으며, 액체와 구조물 사이의 경계조건은 Coupling을 사용하였다.

Fluid 80 요소는 Solid 요소로부터 변형된 요소로서 압축성, 점성, 중력의 영향을 고려할 수 있고 한 요소당 8개의 절점을 가지며 한 절점당 각방향의 변위만을 갖는 3자유도 요소이다. 유체요소 Fluid 80 요소를 사용하여

자유표면을 모델링하는 경우 반드시 중력가속도 효과를 포함하여야 한다.

탱크를 모델링하는데 사용한 Shell 181 요소는 4절점 3차원요소로서, 이 요소는 절점마다 6자유도($x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$)를 가지고 있다. 해당 요소를 사용하므로 해석 수행시 재료 비선형과 기하 비선형을 고려할 수 있다.

LRB는 탱크 모서리 4개를 설치하여 모델링하였으며, 수직강성은 ANSYS의 COMBIN14 요소를 사용하였으며, 수평강성의 경우 COMBIN40 요소를 이용하여 항복 전과 후의 강성을 적용하였다.

Fig. 4는 만수위 2.5m에서의 탱크가 기초와 고정된 경우(a)와 LRB를 고려한 경우(b) 정수압(Hydrostatic pressure)이 작용하는 경우에 대하여 정적 해석을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 정적해석 결과 정수압의 경우 면진 적용여부와 상관없이 동일하게 응력이 나타났다.

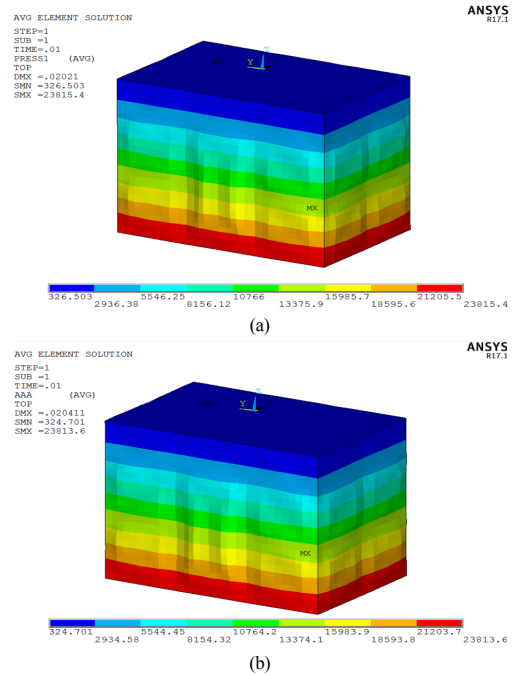


Fig. 4. Analysis Results of Hydrostatic Pressure(Pa)
(a) Non-Isolated (b) LRB

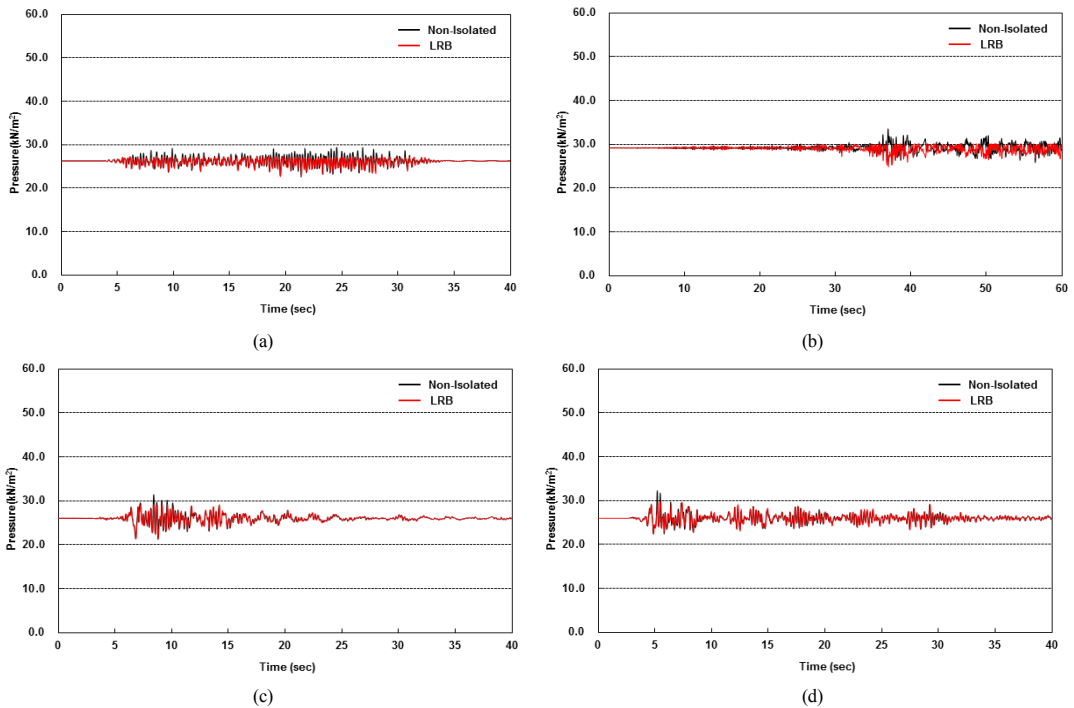


Fig. 5. Analysis Results of Dynamic Pressure(kN/m²)
(a) KRBDC (b) Hachinohe (c) Northridge (d) El-Centro

Fig. 5는 대상 구조물에 정수압과 지진파 4개를 이용한 동수압에 대하여 고려하여 비면진과 면진적용에 따른 결과를 비교하였다. 비면진 물탱크의 경우 Hachinohe 지진파에서 최대수압 33.58kN/m^2 이 나타났으며, LRB를 적용한 면진 물탱크는 동일한 지진파에서 최대수압 30.14kN/m^2 이 발생하였으며 Table. 2에 각 지진파별 비면진과 면진 물탱크의 최대수압을 비교하였다.

Table 2. Analysis Results of Max. Dynamic Pressure (kN/m^2)

Earthquake	Non-Iso	LRB	Reduction Ratio(%)
KRBDC	29.27	27.18	-7.1
Hachinohe	33.58	30.14	-10.2
Northridge	31.39	29.12	-7.2
El-Centro	32.20	29.72	-7.7

일본의 수조 구조설계계산법[9]에서는 물탱크의 동적 거동을 반영한 지진하중을 제시하고 있으며, 적용 범위는 용적 50.0m^3 , 수심 4.0m 이내의 원통형, 각형, 구형의 액체저장탱크로 한다. 계산법에서 제시한 설계식의 경우 가속도 0.154g 일 때 최대수압은 33.5kN/m^2 로 산정된다. 본 연구에서 동일한 가속도(KRBDC)에서 해석한 비면진의 최대수압은 29.3kN/m^2 으로 일본 수조 구조설계 계산법과 비교했을 때 상대적으로 작게 나타났다. 이는 일본 구조설계계산법에서 제시한 설계값이 비교적 보수적인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 납고무반침을 이용한 스테인리스 물탱크의 내진성능을 평가하기 위해 면진 적용여부에 따른 정수압 및 지진파 4개를 이용한 동수압을 고려하여 유한 요소해석을 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

적층고무반침 일종인 LRB를 물탱크의 콘크리트 기초에 적용 가능하도록 축소 설계한 후 유한요소해석을 수행하였다. 해석결과, 정수압만을 고려한 정적해석에서는 면진적용 여부와 상관없이 응력이 일정하게 나타났다. 정수압과 4개의 지진파를 이용한 동수압을 고려한 결과, 면진 적용시 비면진과 비교했을 때 전반적으로 동적 응답 저감 효과가 나타났다. 면진을 적용한 물탱크의 감쇠율은 면진을 설치한 일반구조(교량 및 건축물)의 감쇠율과 비교했을 때 작은 값을 나타냈다. 이는 물탱크 중

량이 면진 강성보다 매우 작은 것 때문으로 판단되며, 향후 물탱크 내진성능 평가에 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

References

- [1] Ministry of Public Safety and Security, "Seismic Design of Fire Protection System", Korea, 2015.
- [2] B. -J. Son, S. -Y. Lee, "Finite Element Stress Analysis of Large Sized Rectangular Water Tank Structures Made of Stainless Steel Materials", *J. Korean Soc. Adv. Comp. Struc.*, Vol.6, No.2, pp. 85-90, 2015
DOI: <http://dx.doi.org/10.11004/kosacs.2015.6.2.085>
- [3] J. H. Yun, T. W. Kang, H. I. Yang, J. -S. Jeon, "Earthquake-Induced Wall Pressure Response Analysis of a Square Steel Liquid Storage Tank", *EESK J Earthquake Eng.*, Vol.22, No.5, pp. 261-269, 2018
DOI: <http://doi.org/10.5000/EESK.2018.22.5.261>
- [4] S. M. Lee, Y. -J. Lee, "Seismic Fragility Assessment of Liquid Storage Tanks by Finite Element Reliability Analysis", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.18, No.4, pp. 718-725, 2017
DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.4.718>
- [5] Korea Road & Transportation Association(In Korea), "Korean Road Bridge Design Code", 2010.
- [6] G.W. Housner, "The dynamic behavior of water tanks", *Bulletin of the seismological society of America*, Vol. 53, No.2, pp.381-387, 1963.
- [7] D. B. Bae, J. H. Park, and C. K. Oh, "Comparison of Design Standards for Seismic Design of Steel Liquid Storage Tanks", *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol.28, No.3, pp.195-202, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7781/kjoss.2016.28.3.195>
- [8] ANSYS Mechanical Ver. 17.1, ANSYS Inc., 2016.
<https://www.ansys.com>
- [9] Japan Reinforced Plastics Society, "Structural design calculations of FRP water tank", 1996.

김 후 승(Hu-Seung Kim)

[정회원]



- 2006년 2월 : 전남대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2017년 8월 : 서울시립대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2008년 1월 ~ 2011년 2월 : 동명기술공단 구조부
- 2011년 2월 ~ 2013년 1월 : 유니스이테크 설계부
- 2017년 9월 ~ 현재 : 서울시립대학교 토목공학과 강사

<관심분야>

내진 및 면진, 토목구조

오 주(Ju Oh)

[정회원]



- 2001년 2월 : 전남대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2011년 8월 : 서울시립대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 11월 ~ 2005년 10월 : 한국건설품질연구원 전임연구원
- 2005년 10월 ~ 2011년 8월 : 유니승기술연구소 선임연구원

• 2011년 9월 ~ 현재 : 특허청 심사관

<관심분야>

내진 및 면진, 토목구조

정 희 영(Hie-Young Jung)

[정회원]



- 1982년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학사)
- 1987년 8월 : 미국 Auburn University 토목공학과 (공학석사)
- 1994년 3월 : 미국 Georgia Tech 토목공학부 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 서울시립대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

내진 및 면진, 토목구조