

## 천연고무받침이 설치된 스테인리스 물탱크의 진동대 실험

김후승<sup>1</sup>, 오주<sup>2</sup>, 정희영<sup>\*</sup>  
<sup>1</sup>서울시립대학교 토목공학과, <sup>2</sup>특허청

### Shaking Table Test of a Stainless Water Tank with Natural Rubber Bearing

Hu-Seung Kim<sup>1</sup>, Ju Oh<sup>2</sup>, Hie-Young Jung<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, University of Seoul

<sup>2</sup>Korean Intellectual Property Office

**요약** 최근 빈번한 지진발생으로 인한 구조물에 대한 안전성에 대한 관심이 증대하는 가운데 면진시스템은 신축 구조물뿐만 아니라 기존 구조물에 대해서도 구조물 자체의 기능이나 미관을 손상시키지 않고 효과적으로 내진성능을 향상시킬 수 있는 방법이며, 지진을 경험한 외국에서 이미 그 효율성이 입증된 방법이다. 본 연구에서는 스테인리스 물탱크를 대상으로 지진에 대한 안전성 확보를 위해 천연고무받침(NRB)을 이용한 면진시스템을 제안하였다. 이에 대해 비면진 물탱크와 천연고무받침이 설치된 물탱크의 내진성능을 평가하기 위해 진동대 실험을 실시하였다. 물탱크에 변위계를 설치한 후 0.0m, 1.5m, 2.5m 수위별로 인공지진파 0.154g, 0.231g, 0.341g, 0.348g를 가진하여 비면진 물탱크와 천연고무받침이 설치된 물탱크에 거동 특성을 비교 분석하였다. 진동대 실험 결과 수위 2.5m의 경우 면진 물탱크에서 전반적으로 면진시스템의 감쇠효과가 나타나지만, 수위 0.0m, 1.5m의 경우 비면진 물탱크보다 면진 물탱크에서 큰 변위가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 물탱크 수위에 따른 중량이 면진시스템의 감쇠효과에 영향을 미치는 것으로 판단되며 면진시스템을 이용하여 물탱크의 내진 보강을 할 경우 유체의 저장 수위에 따라 지진격리받침을 설계해야 할 것으로 판단된다.

**Abstract** Recently, interest in structural stability has increased due to earthquakes. Isolation systems can improve seismic ability without harming the functions and appearance of existing and new constructions, and they have established efficiency in foreign country that have experienced earthquakes. In this study, an isolation system is suggested using a natural rubber bearing (NRB) on a stainless water tank for stability assurance in an earthquake. A shaking table test was carried out to evaluate the seismic capacity of a non-isolated water tank and an isolated tank. Displacement meters in the water tank measured the behavior characteristics of the tanks, which were compared using artificial seismic waves of 0.154 g, 0.231 g, 0.341 g, and 0.348 g with water levels of 0.0 m, 1.5 m, and 2.5 m. At 2.5 m, a decrement effect was generally shown in the isolated water tank, and a bigger displacement occurred in the non-isolated water tank than in the isolated one at water levels of 0.0 m and 1.5 m. It is interpreted that the weight of different water levels affects the decrement effect. If seismic reinforcement is done, the isolated bearing should be designed while considering the fluid storage level.

**Keywords** : Displacement, Earthquake, Natural Rubber Bearing, Stainless Water Tank, Shaking Table Test

#### 1. 서론

최근 깨끗하고 안전한 물의 공급 및 위생시설 확보에

대한 인식이 세계적으로 증가하는 추세이며, 국내에서도 수질관리 및 수재해 등 각종 물 문제에 대한 관심이 증가하고 있다. 국내에서는 기존 콘크리트 물탱크의 경우

본 논문은 2015년도 서울시립대학교 연구년교수 연구비에 의하여 연구되었음.

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

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

Received March 11, 2016

Revised (1st March 31, 2016, 2nd April 6, 2016)

Accepted April 7, 2016

Published April 30, 2016

담수기능 외에 별도의 수질 개선 효과 및 청소가 어렵기 때문에 이를 개선하기 위해 스테인리스 물탱크가 증가하고 있다[1].

세계 각국에서 여러 차례의 강진 발생으로 인해 지진 대비에 대한 사회적 인식 및 안전성에 대한 인식이 높아져 가고 있다. 한반도 역시 규모 3.0 이상의 지진이 계속 증가하고 있으며, 이를 반영하여 국내 구조물의 대한 내진설계기준이 점차 강화되어 신설뿐만 아니라 기존 구조물에 대해서도 지진에 대한 안

전성을 확보하도록 되어 있다. 하지만, 물 저장 시설로서 중요성이 높게 평가되는 물탱크의 경우 지각의 변동에 따른 지진이 발생으로 인해 Fig. 1[2] 과 같이 손상되거나 파괴됨으로서 그 기능이 마비될 수 있다.



Fig. 1. Damage to Large Stainless Steel Panel Tank (Natori City, Miyagi Prefecture)

물탱크 손상 및 파괴는 누수 발생으로 인해 지진시 다른 주요 시설물의 화재 발생 진압에 큰 지장을 초래할 뿐만 아니라 식수 및 용수 부족에 따른 전염병 등 추가적인 재해가 발생할 수 있어 이에 대한 안전성 확보가 필요한 것으로 판단된다[3].

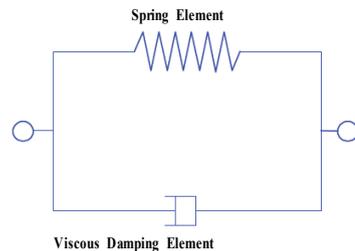
본 연구에서는 진동대 실험을 통하여 천연고무받침 (Natural Rubber Bearing, NRB)을 이용한 스테인리스 물탱크의 내진성능을 검증하고자 한다. 진동대 실험은 물탱크의 파괴양상을 분석하기보다는 면진시스템 적용에 따른 지진시 물탱크의 거동을 분석 및 면진시스템의 성능을 분석하는데 목적을 두었다[4]. 이를 위해 물탱크에 변위계를 설치한 후 0.0m, 1.5m, 2.5m 수위에 따른 지진파를 가진하였다. 실험에 적용한 지진파는 도로교 설계기준(Korea Road Bridge Design Code, KRBDC)[5]의 0.154g를 포함한 내진해석시 대표적으로 사용되는 Hachinohe(0.231g), Northridge(0.341g), El-Centro(0.348g)

이며 천연고무받침 적용전과 적용후의 내진성능향상을 분석하였다.

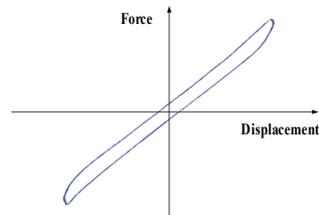
## 2. 진동대 실험 개요

### 2.1 천연고무받침의 특성

본 실험에 사용된 천연고무받침은 고무와 고무사이의 보강용 강판을 층상 형태로 설치하여 수직하중에 대해서는 고무의 좌굴현상을 방지하여 큰 강성을 유지하며, 수평방향으로는 고무의 유연성을 그대로 유지하는 지진격리 교량받침의 일종이다[6]. 천연고무받침의 구조형상 및 역학적 이력곡선은 Fig. 2와 같다. 상기와 같이 진동대 시험에 사용된 시험체는 물탱크의 동적특성 및 진동대의 크기에 적합하게 설계하여 제작하였다. 실험에 사용된 천연고무받침의 설계변위는 30mm이고, 전단탄성계수(G)는 0.4MPa이다. 고무의 한층의 두께는 동일하게 3mm로 하였다. Fig. 3, Table 1은 진동대 실험에 사용된 시험체의 단면제원 및 실물형상을 나타낸 것이다.

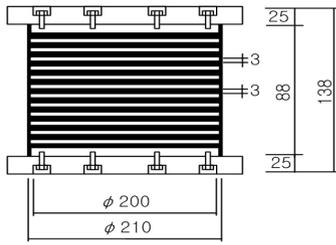


(a) Isolation System



(b) Bi-Linear Model

Fig. 2. NRB Isolation System and Bi-Linear Model



(a) Bearing Section(mm)



(b) NRB Test Piece

Fig. 3. NRB Test Condition and Test Piece

Table 1. Specimens of Design Condition

Division	Dimension
Shear Modulus of Rubber ( $G$ )	0.4MPa
Yield Strength of Steel Plate ( $f_y$ )	240MPa
Design Displacement ( $\Delta$ )	30.0mm
Compression Stiffness	529.5kN/mm
1st Shape Factor ( $S_1$ )	16.7
2nd Shape Factor ( $S_2$ )	6.7

### 2.2 실험대상 구조물 및 모형

본 연구에서는 면진시스템을 적용한 스테인리스 물탱크의 내진성능을 평가하기 위하여 하나는 보강을 하지 않은 스테인리스 물탱크와 다른 하나는 천연고무받침을 이용한 스테인리스 물탱크 제작하여 진동대 시험을 수행하였다. 대상 물탱크는 스테인리스 판넬을 이용하여 진동대의 용량과 크기에 따라 길이 3m, 폭 2m, 높이 3m를 갖는 제한적 실물모형 실험체를 제작하였다. 제작된 비면진 물탱크 및 면진 물탱크의 형상은 Fig. 4와 같으며 진동대 주요제원은 Table 2와 같다.

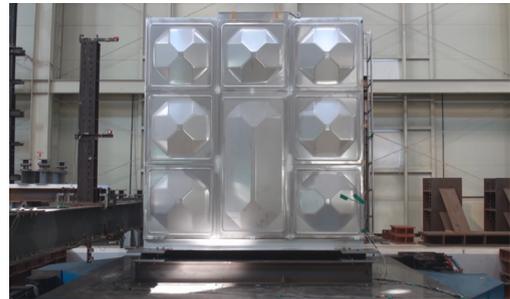
### 2.3 실험방법

본 연구에서 사용된 지진파는 도로교 설계기준(KRBDC)에서 제시하는 최대값인 0.154g를 비롯하여 미국에서 발생한 실제 지진기록인 Northridge, El-Centro 그리고 일본에서 발생한 Hachinohe 지진 등 총 4개의

계기 지진파를 입력지진파로 사용하였다(Fig. 5). 지진파는 장방향인 수평 길이방향(Horizontal, Longitudinal)의 1방향으로 가진하였으며 각 실험체의 수위는 0.0m와 1.5m 그리고 2.5m로 수위별로 지진파를 가진하였다. 천연고무받침 설치 전후에 따른 내진성능을 평가하기 위하여 스테인리스 물탱크의 하단부(0.0m), 중앙부(1.5m), 상단부(3.0m)에 변위계(Displacement Gauge)를 설치하여 시험체의 지진시 변위를 측정하였다. Fig. 6은 물탱크의 계측장비 설치위치를 나타낸 것이다.



(a) Non-Isolater Test Structure



(b) Isolater Test Structure

Fig. 4. Test Structure on Shaking Table

Table 2. Specification of the Shaking Table

Division	Dimension
Table Size(m)	5.0 × 5.0
Degrees of Freedom	3
Full Payload(kN)	300
Nominal Payload(kN)	200
Maximum Velocity(mm/s)	X축 1.0 Y축 1.0
Maximum Stroke(mm)	X축 ±300 Y축 ±200
Operating Frequency Range(Hz)	0.1~60

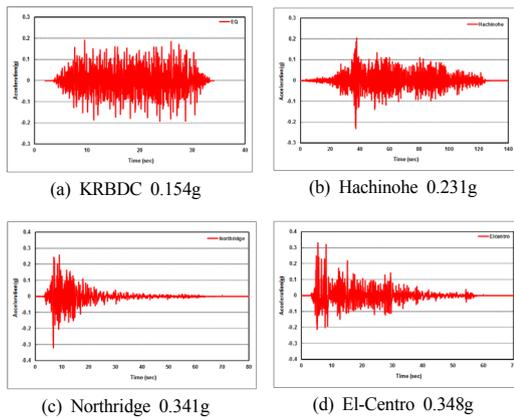


Fig. 5. Artificial earthquake

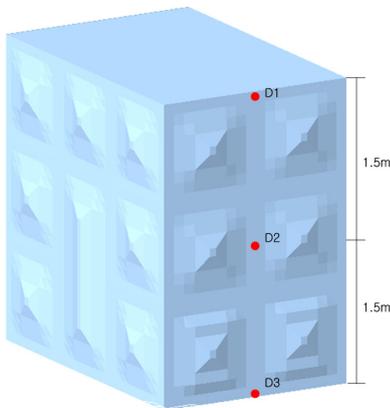


Fig. 6. Displacement Gauge

### 3. 실험결과 및 분석

Table 3, Table 4는 중앙부와 상단부에서의 천연고무받침을 이용한 지진격리(Seismic Isolation)와 일반적인 비 지진격리(Non-Isolation)를 비교하여 정리한 것이며, Fig. 7와 Fig. 8 그리고 Fig. 9는 이를 도식화하여 나타낸 것이다.

#### 3.1 수위별 상대변위

##### 3.1.1 Case 1 W,H = 0.0m

스테인리스 물탱크 수위가 0.0m의 경우 상단부에서는 비면진의 경우 El-Centro에서 최대 2.270mm 변위응답을 보이고 있으며, 면진의 경우 동일한 El-Centro 지진

파에서 2.245mm로 나타났다. 중앙부에서는 비면진의 경우 El-Centro에서 최대 1.877mm 변위응답을 보이고 있으며, 면진의 경우 동일한 El-Centro 지진파에서 3.586mm으로 다소 면진에서 큰 변위가 나타났다. 이는 물탱크의 중량이 상대적으로 가벼워 천연고무받침을 이용한 면진의 효과가 다소 크지 않는 것으로 판단된다.

##### 3.1.2 Case 2 W,H = 1.5m

스테인리스 물탱크 수위가 1.5m의 경우 상단부에서는 비면진의 경우 Hachinohe에서 최대 3.313mm 변위응답을 보이고 있으며, 면진의 경우 동일한 Hachinohe 지진파에서 2.522mm로 나타났다. 중앙부에서는 비면진의 경우 El-Centro에서 최대 2.009mm 변위응답을 보이고 있으며, 면진의 경우 동일한 El-Centro 지진파에서 3.713mm으로 Case 1과 같이 면진에서 큰 변위가 발생하였다. 면진 적용에 따른 효과가 상대적으로 상단부의 경우 비면진보다 변위의 감소가 나타나지만 중앙부에서는 변위가 증가하는 양상을 나타내는 것을 볼 수 있다.

##### 3.1.3 Case 3 W,H = 2.5m

스테인리스 물탱크 수위가 2.5m의 경우 천연고무받침을 사용했을 때 비면진에 비하여 전반적으로 지진시 감소율이 나타났다. 상단부에서는 비면진의 경우 Hachinohe에서 최대 7.416mm의 변위를 보이고 있으며, 면진의 경우 동일한 지진파에서 2.676mm으로 최대 63.92%의 감소율이 나타났다. 물탱크 중앙부에서는 비면진의 경우 동일하게 Hachinohe에서 최대 5.705mm의 변위를 보이고 있으며, 면진의 경우 동일한 지진파에서 3.335으로 최대 41.54%의 감소율이 나타났다.

#### 3.2 시험 결과

진동대 실험 종료 후 비면진과 면진 적용에 따른 스테인리스 물탱크의 구조적 변형 및 파손은 육안으로 조사되지 않았다.

실험결과, 비 면진의 경우 수위가 높아질수록 중앙부보다 상단부에서 높은 변위응답을 보이는 반면, 면진의 경우 수위가 높아질수록 상단부보다 중앙부에서 증가하는 변위응답을 나타내었다. 최대변위를 분석한 결과 수위 2.5m의 경우 면진 적용에 따른 효과가 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

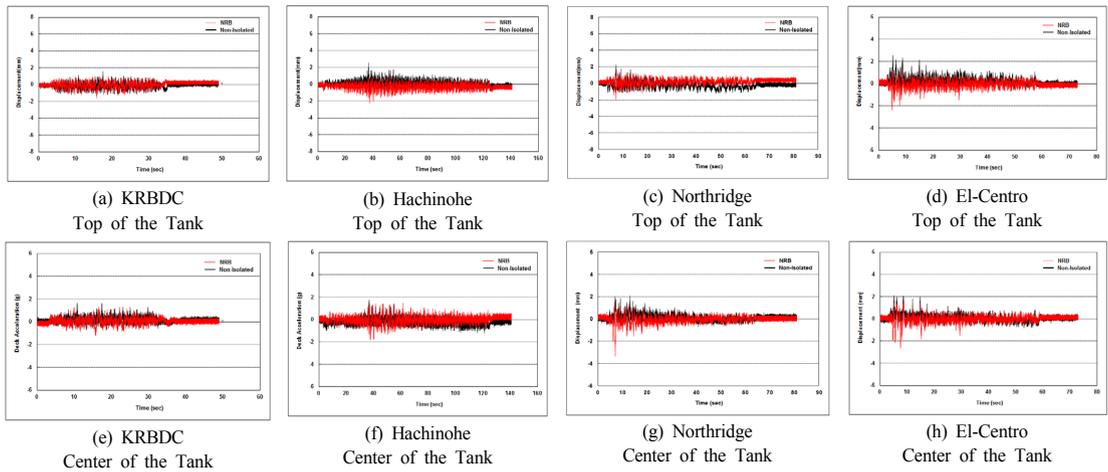


Fig. 7. Case 1(0.0m) Max. Displacement

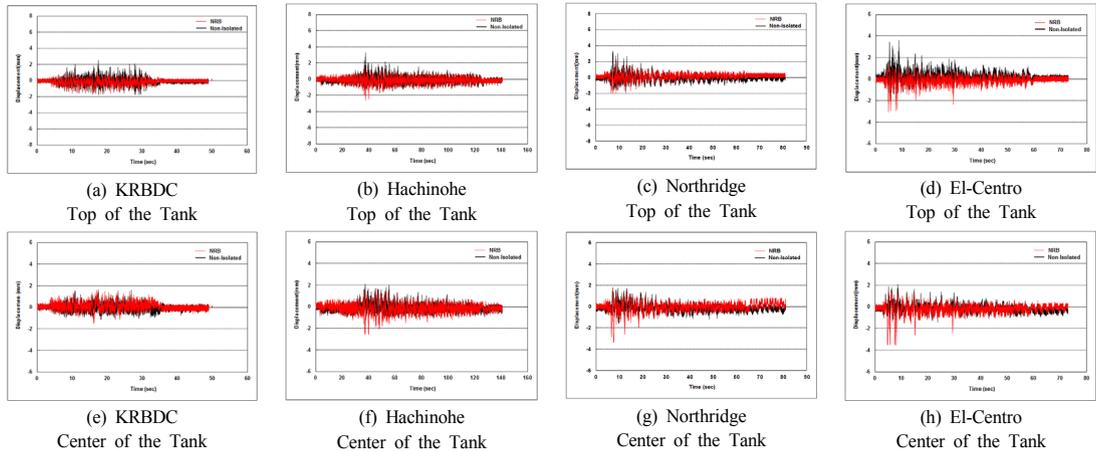


Fig. 8. Case 2(1.5m) Max. Displacement

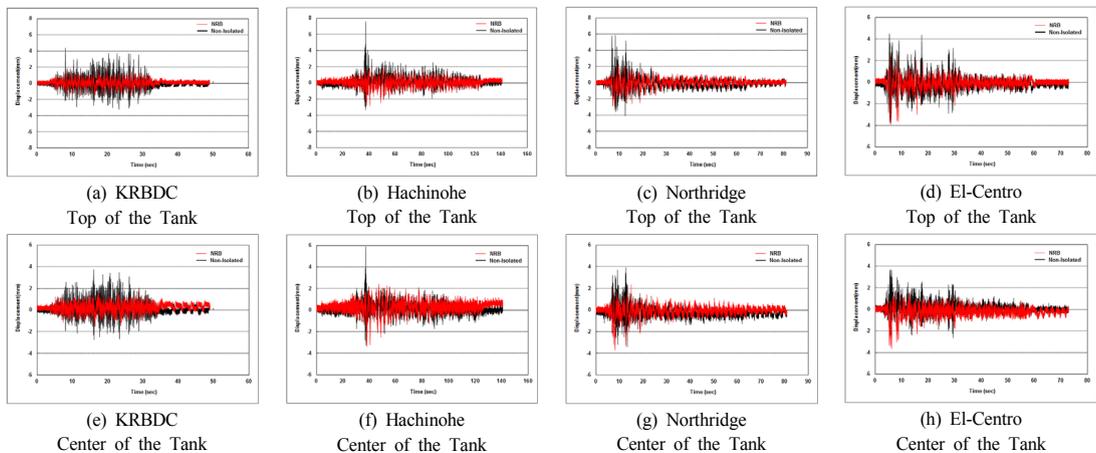


Fig. 9. Case 3(2.5m) Max. Displacement

**Table 3.** Center of the Tank(H=1.5m) Max. Displacement

Earthquake	Case 1 W.H=0.0m			Case 2 W.H=1.5m			Case 3 W.H=2.5m		
	Non-Iso (mm)	NRB (mm)	Reduction Ratio(%)	Non-Iso (mm)	NRB (mm)	Reduction Ratio(%)	Non-Iso (mm)	NRB (mm)	Reduction Ratio(%)
KRBDC	1.505	1.290	14.29	1.522	1.454	4.47	3.596	1.529	57.48
Hachinohe	1.455	2.553	-75.46	1.880	3.883	-106.54	5.705	3.335	41.54
Northridge	1.861	3.471	-86.51	1.740	3.631	-108.68	3.801	3.414	10.18
El-Centro	1.877	3.586	-91.05	2.009	3.713	-84.82	3.784	3.708	2.01

**Table 4.** Top of the Tank(H=2.5m) Max. Displacement

Earthquake	Case 1 W.H=0.0m			Case 2 W.H=1.5m			Case 3 W.H=2.5m		
	Non-Iso (mm)	NRB (mm)	Reduction Ratio(%)	Non-Iso (mm)	NRB (mm)	Reduction Ratio(%)	Non-Iso (mm)	NRB (mm)	Reduction Ratio(%)
KRBDC	1.533	1.319	13.96	2.382	1.331	44.12	3.999	1.624	59.39
Hachinohe	2.109	1.893	10.24	3.313	2.522	23.88	7.416	2.676	63.92
Northridge	1.986	1.955	1.56	3.127	2.129	31.92	5.511	2.933	46.78
El-Centro	2.270	2.245	1.10	3.227	2.809	12.95	4.407	3.991	9.44

물탱크에 천연고무받침을 적용할 경우 수위가 높아질 수록 그리고 중앙부보다 상단부에서 변위의 감소율이 높게 나타났다. 비면진 물탱크의 경우 슬러싱 현상으로 인해 상단부에 큰 변위가 나타나는 반면 면진 물탱크의 경우 비면진 물탱크와는 반대 방향인 중앙부에 비교적 큰 변위가 발생되었다. 이는 물탱크의 적용된 천연고무받침의 감쇠효과에 따른 방향성 및 수압의 영향으로 판단된다.

변위가 면진 물탱크보다 더 크게 발생하는 것으로 나타났다.

이는 물탱크의 수위에 따라 지진격리받침의 감쇠효과에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서, 면진시스템을 이용하여 물탱크의 내진 보강을 할 경우 이러한 유체의 저장 수위에 따라 지진격리받침을 설계해야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 천연고무받침을 이용한 스테인리스 물탱크의 내진성능향상을 평가하기 위해 도로교설계기준에서 제시하는 최대값인 0.154g를 포함한 대표적인 지진파인 Hachinohe(0.231g), Northridge(0.341g), El-Centro(0.348g)를 진동대 시험을 수행하였다. 또한, 수위에 따른 영향을 분석하기 위해 3단계 수위 단계(0.0m, 1.5m, 2.5m) 별로 가진하여 스테인리스 물탱크의 상단부, 중앙부의 상대변위를 분석하였다.

수위별 입력지진과 가진에 따른 물탱크의 거동을 분석한 결과 수위 0.0m, 1.5m일 경우 중앙부에서 비면진보다 면진에 따른 물탱크의 변위가 전반적으로 더 크게 나타나는 반면, 수위 2.5m일 경우 전반적으로 비면진의

#### References

- [1] Susan, T, "Tracer Studies in Water Treatment Facilities: A Protocol and Case Studies", AWWA Research Foundation and American Water Works Association, 1996.
- [2] Hirokazu Hirano, "Unknown Damage from the Earthquake", The Japan News by The Yomiuri Shimbun, 2013.
- [3] Park DS, Ha IS, Lim JY, Jung WS, "Earthquake case report of water facilities", Korea Water Resources Corporation, 2006.
- [4] Park SJ, Won SH, Choi MS, Kim SH, Cheung JH, "Seismic Performance Evaluation of Externally Reinforced Panel Water Tank Using Shaking Table Tests", J. of EESK, EESK, Vol. 17, No. 4, pp.151-157, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.5000/eesk.2013.17.4.151>
- [5] KRBDC Korean Road Bridge Design Code, Korea Road & Transportation Association, Korea, 2010.
- [6] Oh, J, "An Evaluation of Physical Characteristics and Seismic Performance of Laminated Rubber Bearings Being Used in Bridges", University of Seoul, Doctorate Thesis, 2011.

**김 후 승(Hu-Seung Kim)**

[정회원]



- 2006년 2월 : 전남대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2008년 1월 ~ 2011년 2월 : 동명기술공단 구조부 근무
- 2011년 2월 ~ 2013년 1월 : 유니슨이앤씨 설계부 근무
- 2012년 3월 ~ 현재 : 서울시립대학교 토목공학과 박사과정

<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 : 유니슨기술연구소 선임연구원

- 2011년 8월 ~ 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