

지진격리장치를 적용한 복층구조파이핑 시스템의 내진성능평가

Seismic Performance Evaluation of Multi-Story Piping Systems using Triple Friction Pendulum Bearing

류용희^{a,1}, 주부석^{b,*}, 손호영^{b,2}

Yonghee Ryu^{a,1}, Buseog Ju^{b,*}, Hoyoung Son^{b,2}

^a Department of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh, NC 27695, USA

^b Department of Civil Engineering, Kyunghee University, 1732, Deogyong-daero, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

ABSTRACT

Purpose: The evaluation of seismic performance of critical structures has been emerging a key issue in Korea, since a magnitude 5.8 earthquake, the worst in Koran history, struck Gyeongju, southern area in Korea on september 12th, 2016. In particular, the catastrophic failure of nonstructural components such as sprinkler piping systems can cause significant economic loss or loss of life during and after an earthquake. The nonstructural components can be more fragile than structural components in seismic behavior.

Method: This study presents the seismic performance evaluation of fire protection piping system, using coupled building-piping system installed with Triple Friction Pendulum Bearings (TPBs). Kobe (Japan), Kocaeli (Turkey), and Gyeongju (Korea) were selected to consider the uncertainty of ground motions in this study.

Result: In the simulation results, it was observed that the reduction of maximum displacements of the piping system with the TPBs' system was significant: Kobe, Kocaeli, and Gyeongju cases were 49%, 14.4% and 21.5%, respectively.

Conclusion: Therefore, using seismically isolated system in a building-piping system can be more effective to reduce the seismic risk than a normally installed building-piping systems without TPBs in strong earthquakes.

연구목적: 2016년 9월 경주 이후 구조물 및 비구조물의 지진 안전성 및 내진성능에 관한 문제가 이슈화 되고 있으며, 특히 배관 시스템의 경우 구조요소 보다 지진 발생시 내진성능에 있어서 취약하다고 볼 수 있다. 스프링클러 배관 시스템과 같은 비구조적 구성요소의 손상으로 인해 지진 발생 및 이후에 상당한 경제적 손실이나 생명 손실을 초래 할 수 있다.

연구방법: 본 연구는 Triple Friction Pendulum Bearings (TPBs)을 설치한 건물 배관 시스템을 이용한 소방 배관 시스템의 내진성능평가를 제시한다. Kobe, Kocaeli, Gyeongju 지진을 고려하여 지반 운동의 불확실성을 고려하였다.

연구결과: 빌딩 시스템과 파이핑 시스템의 첫 번째 모드는 각각 약 5.8Hz와 약 2.742Hz로 나타났으며, 또한 TPBs 시스템이 적용된 배관 시스템의 최대 변위는 Kobe, Kocaeli 및 Gyeongju 지진의 경우 각각 49%, 14.4%, 21.5%가 감소한 것으로 나타났다.

결론: 따라서 건물 배관 시스템에서 지진 격리 시스템을 사용하면 지진이 심할 때 TPB가 없는 일반적으로 설치된 건물 배관 시스템보다 지진 위험을 줄일 수 있다.

KEYWORDS

Piping System,
Seismic Performance,
Base-Isolation,
Gyeongju Earthquake

배관시스템,
내진성능평가,
지진격리장치,
경주지진

© 2018 Society of Disaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel 82-31-201-3688. Email. bju2@khu.ac.kr

1 Tel. 010-4799-3231. Email. yryu@ncsu.edu

2 Tel. 82-31-201-2144. Email. shyoung0623@khu.ac.kr

ARTICLE HISTORY

Received Nov. 9, 2018

Revised Nov. 13, 2018

Accepted Dec. 20, 2018

1. 서론

일부 사람이 느낄 수 있는 지진 규모 3.0 이상의 국내 지진의 경우 2010년부터 2015년까지 평균 9.8회 이상 발생 하였으며, 유감지진의 경우 또한 평균 8.17회 발생 하였다. 그리고 전 세계적으로 2000년대 이후 지진의 규모 및 빈도가 증가하는 추세를 보이고 있으며, 환태평양 지역의 지진 구역대가 점차 활성화 되고 있다. 2011년 동일본 대지진 (규모 9.0)의 경우 지진 기록 관측 역사상 4번째로 높은 에너지 방출로 지진과 쓰나미를 동반하여 약 2만 여명의 사상자를 기록 하였으며, 2008년 발생한 중국 쓰촨성 지진 (규모 8.0)의 경우도 약 69,000명의 사망자 및 부상자 374,000명의 부상자가 발생 하였다. 자연 재해 중 지진의 경우 지진 발생에 따른 경제적/사회적 피해 및 인명피해는 국가적 재난을 선포 할 만큼 강력한 재난이라고 볼 수 있다. 2011년 동일본 대지진 이후 전 세계적으로 국가 주요시설물에 대한 보다 높은 내진 안전성 조건을 요구 하고 있는 추세이다. 국내의 경우 또한 2016년 규모 5.1 및 5.8의 경주 지진이 발생하여 공공시설 피해 93건 사유재산 피해 13건 등으로 약 58억원의 피해가 발생하였다. 특히 인명피해 및 구조물에 손상을 줄 수 있는 규모 5.0 이상의 지진이 국내에 발생하여 구조물의 지진 안전성에 대한 우려가 나타나고 있다. 이로 인해 2016년 경주 지진 이후 국내 주요시설물의 구조요소 및 비구조 요소에 대한 내진설계 및 내진 안전성 조건을 높이고 있는 추세이다. 비구조 요소 (piping system, ceiling system, mechanical & electrical equipment 등)의 경우 1994년 미국 Northridge 1995년 일본 Kobe 지역의 지진에서와 같이 구조요소보다 비구조요소의 피해 규모가 지진 발생 시 더 심각한 것으로 보고되었다. 이는 비구조 요소의 경우 전체 구조물 초기 건설 투자 비용에 있어서 약 70%이상의 비율을 차지하고 있고, 또한 구조물의 설계기준의 경우 구조 요소의 내진성능 개선에 집중되어져 있어 비구조요소의 내진 성능 확보 및 개선이 상당히 필요한 실정이다 (Reitherman et al., 2009). 따라서, 국내외에서 2000년대 이후 본격적으로 비구조요소에 대한 내진 성능 평가 및 내진 성능 개선 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 예로서, Jeon et al. (2014)의 연구에서 저층 건물에 설치된 스프링클러 시스템의 유한요소 해석을 통한 지진의 방향에 따른 내진성능평가를 수행하였다. Jeon et al. (2015)은 원자력 발전소의 배관 성능 확보를 위하여 지진 격리 시스템을 적용하여 지진 취약도 분석을 하였으며, Jung et al. (2013)의 경우 지진파의 불확실성을 고려하여 빌딩-파이핑 시스템의 내진성능을 평가 하였다. Ju et al. (2015); Ju et al. (2011); Ju et al. (2017)의 경우 파이핑 시스템의 연결부 실험에 의한 연결부의 수치 해석적 모델 검증과 정/동적 실험 통한 성능기반 한계상태 규정에 의한 파이핑 시스템의 지진취약도를 분석 하였으며, 또한 빌딩 파이핑 시스템의 상호작용을 고려한 다층 파이핑 시스템의 지진 취약도 기반 내진 안전성 평가 분석을 실시하였다.

본 연구에서는 빌딩-파이핑 시스템의 Coupled 분석을 통한 빌딩-파이핑 시스템의 상호 작용을 분석하기 위하여, Ryu et al. (2016)의 파이핑 시스템 모델을 기반으로 OpenSees내 유한요소 모델을 구축 하였다. 또한, 복층 구조 파이핑 시스템의 내진 성능 평가를 위하여 규모 5.0 이상의 지진파의 주기에 따른 불확실성을 평가 하고자 일본 Kobe, 터키 Kocaeli 및 국내 경주지진을 선택하여 빌딩-파이핑 시스템의 내진 성능을 평가 하고자 한다. 마지막으로, 파이핑 시스템의 내진 성능 확보 및 지진 피해 저감을 위해 2층 규모의 빌딩시스템에 지진 격리 장치를 적용하여 파이핑 시스템의 안전성을 분석 하고자 한다.

2.파이핑 모델

파이핑 모델의 경우 미국 뉴욕 주립대의 실험(Tian et al., 2010)을 바탕으로 실험적으로 검증된 모델이 사용되었다. Fig. 1과 같이 실험에 사용된 2층의 스프링클러 시스템의 모델의 경우 주 파이프라인의 경우 100mm의 파이프를 사용하였으며, 또한 브랜치 파이핑 경우 25mm 및 50mm 파이프를 구성되어 있다. 각각의 브레이싱은 수직방향의 행거 및 와이어를 이용하여 지지되어 있다. 스프링클러와 천장시스템의 상호작용을 고려하기 위해, 천장재의 경우 박스 형태로 중앙부에 스프링클러 헤드가 설치되어 있는 형태로 구성하였다. 연결부의 경우 Fig.2와 같이 T 모양의 연결이 주로 사용되었으며 연결은 나선형 (Treaded) 및 그르브드 커플링(Grooved couplings)으로 되어있다. 그리고 재료는 모두 Black Iron Steel로 사용되었다.

2.1 T-Joint 모델 및 특성

지진에 가장 취약한 연결부의 경우 시간이력 특성이 복잡하며 그 거동특성이 빌딩시스템과 같은 구조요소의 거동과는 매우 상이하다. 때문에 Fig. 1.과 같은 전체 파이핑 시스템 실험을 통해 그 거동특성을 파악하기 어렵다. 따라서 Fig. 2와 같이 각각 다른 파이프 지름을 갖는 T-joint의 비선형 모델을 구축하고, 이를 기반으로 전체 시스템의 수치 해석적 모델을 개발하였다.

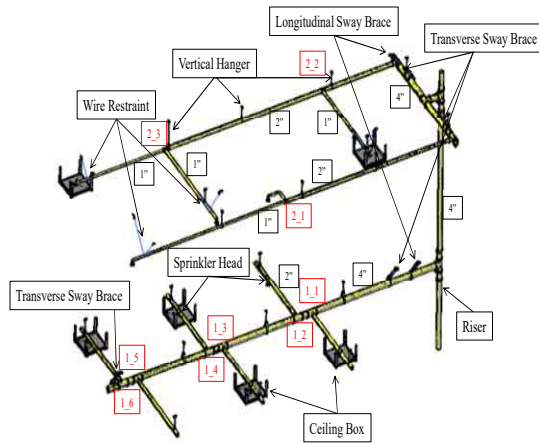


Fig 1. 2-Story Piping System (Ryu, 2016)

실험의 경우 그림 (Fig.2)과 같이 파이프 좌우 끝단에 힌지조건을 주고 하중을 점점 증가 시키며 상하 반복운동을 실시하여 가운데 있는 T 연결부의 거동을 파악하였다. Fig. 3은 각 연결부의 시간 이력 특성을 나타낸다. 그림 (Fig.3) 과 같이 T 형 연결부의 경우 반복하중이 재하 됨에 따라 그 이력 특성이 T형 연결부의 종류에 따라 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 25mm 및 50mm의 나선형 연결부의 경우 상하 반복운동에 대하여 직경에 따라 차이를 보이는 것으로 파악 되었으며, 직경이 작을수록 연성능력이 증가함을 알 수 있다. 100mm와 같은 그르브드 커플링의 경우 나선형 연결부 보다 상하 반복 운동에 대한 누수의 성능이 우수한 것으로 평가 되었다. 여기서 누수의 판단은 처음 누수가 시작한 시점을 기준으로 판단이 되었고, 누수에 강도에 대한 추가적인 평가는 고려되지 않았다 (Ju et al., 2011). 연결부 경우 Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees) 프로그램을 이용하여 모델링이 되었으며 Fig. 3과 같이 실험 측정값과 해석의 결과 값들이 매우 근접한 것을 알 수 있다.

Table 1은 Piping system의 고유주기를 보여주며, 실험 및 수치해석 모델은 Ryu. et al. (2016) 따라 적용 되었다.

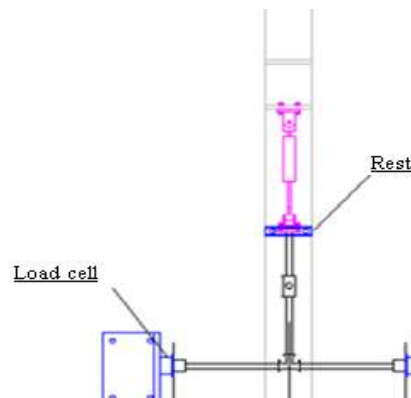


Fig 2. T-Joint Tests (Tian, 2010)

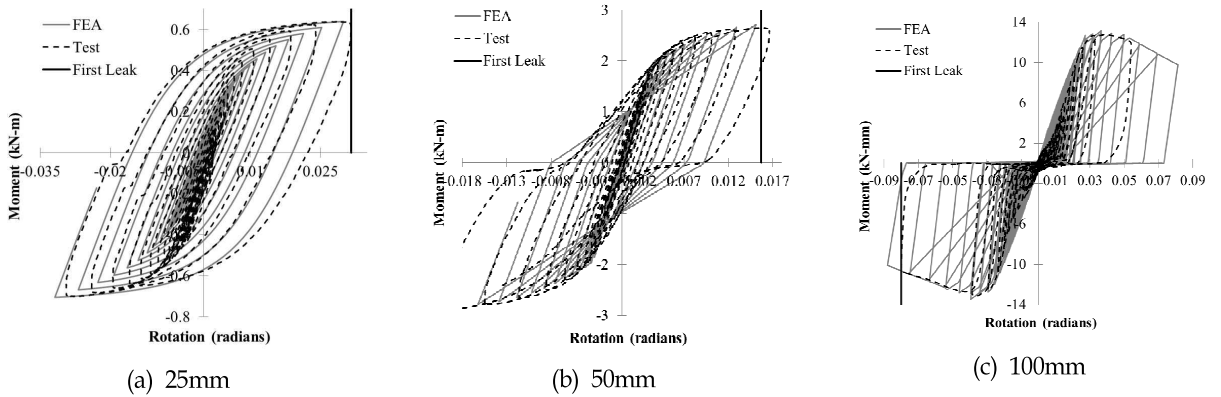


Fig 3. T-Joint Connections (Ryu, 2016)

Table 1. Piping Frequencies (Ryu, 2016)

Mode #	Frequency (Hz)
1	2.742
2	3.262
3	3.334
4	3.595
5	3.654
6	3.700
7	3.733
8	4.554
9	7.258
10	7.364

3. 빌딩 모델

빌딩 모델의 경우 2층 철근 콘크리트 구조물이 적용 되었다. 빌딩 모델은 IBC (IBC, 2006) 및 ACI 318-08 (2008) 설계 기준에 준하여 설계된 모델이 Wood et al. (2012)를 통해 제안 되었으며, 2층 파이프 모델을 적용하기(Coupling) 위해 이 모델을 Fig. 4와 같이 2층의 모멘트 골조 모델로 수정하였다. 빌딩의 경우 빌딩의 기둥과 기둥사이의 간격은 9.1m로 가정되었으며, 높이는 3.7m의 복층 구조로 설계 되었다. Table 2는 사용된 빌딩 모델의 체원을 보여준다. 빌딩의 고유 진동수는 첫 번째 5.8Hz 및 두 번째 20.7Hz로 분석되었다. 지반 강성의 특성은 해석에서 고려되지 않았으며, 지진격리 장치를 기준 모델에 추가적으로 설치하였다. 또한 지진 시 빌딩은 선형 거동을 하는 것으로 가정하였다.

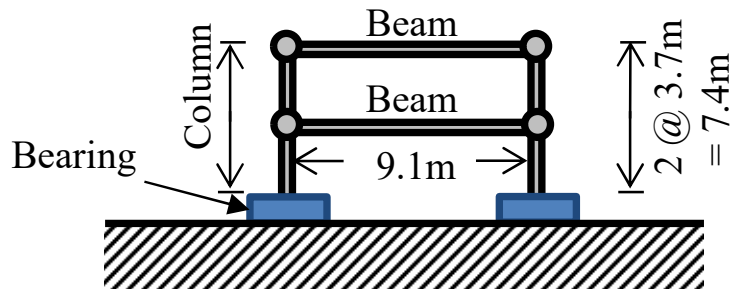


Fig 4. 2-Story Building Model

Table 2. Material Properties of Building System (Wood, 2012)

Member	b (mm)	h (mm)	f'_c (MPa)	Longitudinal Reinforcing	Confinement
Beam	660	762	34.5	10 - #9s	#5 @ 152mm
Column	762	762	34.5	20 - #9s	#5 @ 140mm

3.1 지진격리 장치 (Bearing)

본 연구의 경우 지진 격리장치의 특성에 따른 파이프 구조물의 내진 성능 평가를 수행하였다. 지진 격리 장치의 경우 Dao et al. (2013)이 실험을 통해 검증한 Fig. 5와 같은 Triple Friction Pendulum Bearings (TPBs) 모델을 이용하였다. 그림과 같이 이 모델은 내부 미끄럼틀 (Inner slider) 및 중간 미끄럼틀 (Articulated slider)로 구성되어 있으며 세 개의 마찰계수 (μ_1, μ_2, μ_3)로 저항 특성이 고려되며, 길이 (d_1, d_2, d_3), 높이 (h_1, h_2, h_3) 및 곡률 (R_1, R_2, R_3)로 정의된다.

Fig. 6은 이러한 지진 격리장치의 수치적인 모델의 하중-변위 특성을 보여준다. 이 모델은 무차원화된 하중 (f)은 지진 격리장치의 수평하중에 대한 반력 (F)의 비와, 유효길이 (Effective pendulum lengths, L)와 마찰 계수(μ)의 상관관계를 통해 표현 될 수 있으며, 지진 격리 장치의 거동 특성은 총 4개의 변곡점을 가지는 모델로 정의 되었다.

4. 내진성능평가

파이프 시스템의 내진 성능 평가를 위해 대표적으로 일본 Kobe (6.9ML), 터키 Kocaeli (7.5ML), 한국 Gyeongju (5.8ML) 지진을 데이터를 Fig. 7과 같이 가속도 응답 스펙트럼 (Acceleration Response Spectrum)을 이용하여 분석하였다.

일본, 터키, 및 경주 지진의 경우 최대지반 가속도 (PGA) 값은 각각 0.36g, 0.24g, 및 0.36g이며, 탁월 진동수는 각각 1 ~ 2Hz, 2.5 ~ 3.5Hz, 및 3Hz 이상 최대 6~10Hz 사이에서 나타나는 것을 보였다.

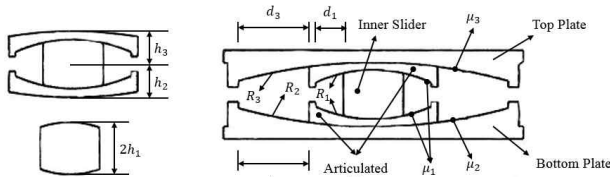


Fig 5. Triple Friction Pendulum Bearing (Dao, 2013)

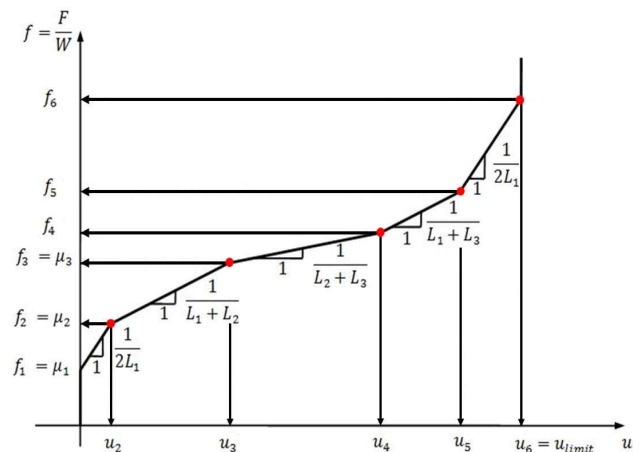


Fig 6. Normalized Backbone Curve of Standard TPBs (Dao, 2013)

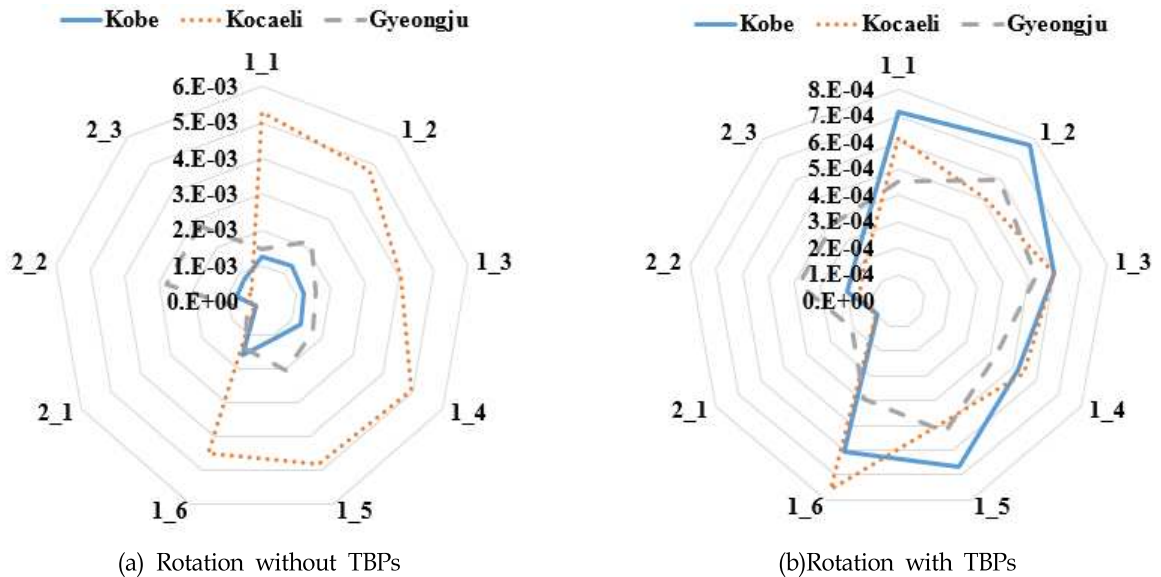


Fig 8. Maximum Rotation at T-Joints

5. 결론

본 연구를 통해 자연재해 즉 지진에 따른 비구조 요소의 손상 및 피해 저감을 위해 빌딩-파이핑 시스템의 상호작용을 고려하여 지진파의 특성에 따른 복층 구조 파이핑 시스템의 응답 특성을 평가 하는 방법을 논하였다. 또한, 파이핑 시스템 모델을 포함한 건물에 지진 저감 장치의 설치 여부에 따른 파이핑 시스템의 내진 성능을 분석하고, 다음과 같은 절차와 결론을 도출 하였다.

(1) 신뢰성 높은 내진 평가를 위해 실험적으로 검증된 파이핑 및 TPBs 시스템을 적용하여 빌딩-파이핑 시스템 비선형 시간이력 수치해석모델을 구축하였다.

(2) TPBs 시스템을 적용 유무를 고려한 일본 고베 (Kobe), 터키 코카엘리 (Kocaeli), 한국 경주 (Gyeongju) 지진파 지진파의 특성에 따른 복층 구조 파이핑 시스템의 변위 응답 특성을 평가 하였다.

(3) 각 지진파의 특성에 따른 비선형 시간이력해석 결과 면진장치가 없는 파이핑 시스템의 경우 Kocaeli 지진에서 가장 큰 변위 응답을 보였으며, 경주 지진의 경우 1층보다 2층의 변위 응답이 큰 것으로 나타났다. 이는 경주지진의 경우 탁월 진동수가 고주파 대역에서 형성되어 2층의 고주파 대역의 파이핑 시스템의 변위가 증폭이 된 것으로 판단된다.

(4) 면진장치가 적용된 파이핑 시스템의 변위는 각각 49% (Kobe), 21.6% (Gyeongju), 14.4% (Kocaeli)로 감소함을 볼 수 있어, 면진 장치를 이용할 경우 지진 발생 시 비구조요소 즉 파이핑 시스템의 손상 및 피해 저감에 효과적이라고 볼 수 있다.

(5) 본 연구를 통해 빌딩(선형)-파이핑 시스템의 상호작용을 분석 하여 파이핑 시스템의 내진 안전성을 평가 하였으나, 향후 면진장치와 빌딩 시스템의 비선형성을 복합적으로 고려한 복층 구조 파이핑 시스템의 취약성 평가도 이루어 져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 플랜트연구사업(18IFIP-B128598-02)에 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] Reitherman, R., (2009). "Nonstructural Earthquake Damage." Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering. (CUREE), https://www.curee.org/outreach/calendars/essays/2010-CUREE_excerpt.pdf
- [2] Jeon, J.T., Jung, W.Y., Ju, B.S. (2014). "Evaluation of Seismic Performance of 2-Story Fire Protection Sprinkler Piping System." *Journal of Korea Society of Disaster Information*, 10(3), pp.458-464.
- [3] Jeon, B.G., Choi, H.S., Hahm, D.G., Kim, N.S. (2015). "Seismic Fragility Analysis of Base Isolated NPP Piping Systems." *EESK J Earthquake Eng*, Vol. 19 No. 1, pp. 29-36, <http://dx.doi.org/10.5000/EESK.2015.19.1.029>
- [4] Jung, W.Y., Ju, B.S. (2013). "Analytical Studies on Seismic Performance of Multi-Story Coupled Piping System in a Low-Rise Building." *EESK J Earthquake Eng*, Vol. 17 No. 4, pp. 181-186, <http://dx.doi.org/10.5000/EESK.2013.17.4.181>
- [5] Ju, B.S., Gupta, A. (2015). "Seismic Fragility of Threaded Tee-Joint Connections in Piping Systems." *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 132-133, pp. 106-118, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpvp.2015.06.001>
- [6] Ju, B.S., Tadinada, Sashi, K., Gupta, A. (2011). "Fragility Analysis of Threaded Tee-joint Connections in Hospital Piping Systems." *ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Conference*, Baltimore, Maryland, PVP 2011-57958
- [7] Ju, B.S., Gupta, A., Ryu, Y.H. (2017). "Piping Fragility Evaluation: Interaction With High-Rise Building Performance." *Journal of Pressure Vessel Technology*, 139(3), 031801.
- [8] Ryu, Y.H., Gupta, A., Jung, W.Y., Ju, B.S. (2016). "A reconciliation of experimental and analytical results for piping systems." *International Journal of Steel Structures*, 16(4), 1043-1055.
- [9] Tian, Y., Fuchs, J., Mosqueda, G., Filiatrault, A. (2010). "NEESR Nonstructural: Progress Report on Tests of Tee Joint Component of Sprinkler Piping System." *Progress Report*, NEESR-GC: Simulation of the Seismic Performance of Nonstructural Systems.
- [10] Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., Fenves, G.L., et al. (2006). "OpenSees Command Language Manual." *Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees)*, <http://opensees.berkeley.edu/>
- [11] IBC, I. (2006). "International building code. International Code Council" Inc.(formerly BOCA, ICBO and SBCCI), 4051, 60478-5795.
- [12] American Concrete Institute. (2008). "Building code requirements for structural concrete" *ACI 318-08*, Farmington Hills, Michigan,
- [13] Wood, R.L., Hutchinson, T.C., Lee, C.H., Grigoriu, M.D. (2012). "Fragility Function Development for Nonstructural Component Systems." *Technical Report*, NEESR-GC: Simulation of the Seismic Performance of Nonstructural Systems
- [14] Dao, N.D., Ryan, K.L., Sato, E., Sasaki, T. (2013). "Predicting the displacement of triple pendulumTM bearings in a full-scale shaking experiment using a three-dimensional element." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42: 1677-1695.