

지진의 지속시간이 면진원전의 지진거동에 미치는 영향

Effects of Significant Duration of Ground Motions on Seismic Responses of Base-Isolated Nuclear Power Plants

두이두안 응웬¹⁾ · 비黠 투사²⁾ · 이태형^{3)*}

Nguyen, Duy-Duan¹⁾ · Thusa, Bidhek²⁾ · Lee, Tae-Hyung^{3)*}

¹⁾건국대학교 사회환경공학부 박사후연구원, ²⁾건국대학교 사회환경공학부 석사과정, ³⁾건국대학교 사회환경공학부 교수

¹⁾Postdoctoral Researcher, Department of Civil and Environmental Engineering, Konkuk University, ²⁾Master's Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Konkuk University, ³⁾Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Konkuk University

/ ABSTRACT /

The purpose of this study is to investigate the effects of the significant duration of ground motions on responses of base-isolated nuclear power plants (NPPs). Two sets of ground motion records with short duration (SD) and long duration (LD) motions, scaled to match the target response spectrum, are used to perform time-history analyses. The reactor containment building in the Advanced Power Reactor 1400 (APR1400) NPP is numerically modeled using lumped-mass stick elements in SAP2000. Seismic responses of the base-isolated NPP are monitored in forms of lateral displacements, shear forces, floor response spectra of the containment building, and hysteretic energy of the lead rubber bearing (LRB). Fragility curves for different limit states, which are defined based on the shear deformation of the base isolator, are developed. The numerical results reveal that the average seismic responses of base-isolated NPP under SD and LD motion sets were shown to be mostly identical. For PGA larger than 0.4g, the mean deformation of LRB for LD motions was bigger than that for SD ones due to a higher hysteretic energy of LRB produced in LD shakings. Under LD motions, median parameters of fragility functions for three limit states were reduced by 12% to 15% compared to that due to SD motions. This clearly indicates that it is important to select ground motions with both SD and LD proportionally in the seismic evaluation of NPP structures.

Key words: Nuclear power plant, Ground motion duration, Base isolation, Fragility curve

1. 서 론

사회기반시설에 막대한 피해를 입힌 비교적 최근의 강진 중 1999 치치(대만), 2008 쓰촨성(중국), 2010 멀리(칠레), 2011 토호쿠(일본) 지진은 모두 지진의 지속시간이 긴 특징이 있다. 현행 국내외 내진설계기준에서는 지진의 강도, 지반운동의 주파수특성을 반영한 응답스펙트럼을 사용하는 것이 대부분이지만, 지진의 지속시간을 명시적으로 고려하지 않는다. 하지만, 지진의 지속시간이 길면 상대적으로 구조물의 피해가 커진다는 연구 결과가 많이 보고되고 있으며, 목조건물, 강구조, 철근콘크리트, 그리고 교량 [1-5] 등 다양한 형식의 구조물이 모두 영향을 받는 것을 알 수 있다.

지진에 의한 지반진동의 다양한 특성이 원자력발전소(이하 원전)의 내진성능에 미치는 영향은 많은 연구자들이 관심을 갖는 주제이다. Ahmed et

al.[6]은 지진의 비상관성(incoherence)이 면진 원전의 지진거동에 미치는 영향을 연구하였다. Tran et al.[7]은 일방향 및 이방향지진동을 고려한 면진 원전의 지진거동을 해석하였다. Choi et al.[8]은 근거리지진의 특성을 고려하여 CANDU형 원전 격납건물에 대한 지진취약도곡선을 도출하였다. Kim et al.[9]은 2016 경주지진에 대한 면진 원전의 지진응답을 평가하였다. Park et al.[10]은 고주파지진이 원전 구조물에 미치는 영향에 대한 연구현황을 분석하였다. 최근에는 Nguyen et al.[11]이 근거리지진의 방향효과와 플링스텝효과를 고려한 면진 원전의 지진취약도 곡선을 도출하였다. 하지만, 아직 지진의 지속시간이 원전 구조물에 미치는 영향을 연구한 사례는 발견되지 않았다.

본 연구의 목적은 지진으로 인한 지반운동의 유의지속시간(significant duration)이 면진 원전구조물의 지진거동에 미치는 영향을 분석하는 것이다. 짧은 지속시간과 긴 지속시간으로 구분된 지진가속도 기록들을 선정하여 구조물의 시간이력해석을 수행하였다. 해석의 결과로 격납건물(RCB)의 횡방향변위, 전단력, 충응답스펙트럼과 납고무면진받침(LRB)의 이력에너지분포를 관찰하였다. LRB의 변위수준에 따라 정의된 여러 가지 한계

*Corresponding author: Lee, Tae-Hyung

E-mail: thlee@konkuk.ac.kr

(Received December 26, 2018; Revised February 1, 2019; Accepted March 13, 2019)

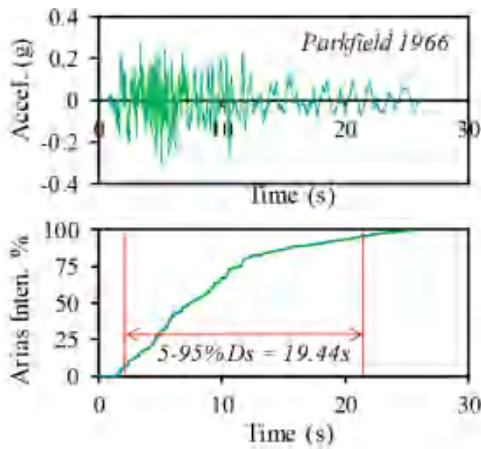


Fig. 1. A ground motion record and the estimated significant duration

상태에 대한 지진취약도 곡선을 각각 도출하였다. 마지막으로 짧은 지속시간(SD)과 긴 지속시간(LD)의 지진가속도가 면진원전 구조물의 지진거동과 지진취약도 곡선에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 지반운동

2.1 지반운동의 지속시간

지진 지반운동의 지속시간(duration)은 지반운동의 진폭, 주파수, 에너지, 진동시간 등 다양한 인자로 정의된다. 지속시간은 여러 가지로 정의되는데, 브라켓(bracketed) 지속시간, 균일(uniform) 지속시간, 유의지속시간, 유효(effective) 지속시간 등이 지진의 재해정량화에 주로 사용된다 [12]. 다양한 지속시간을 비교한 참고문헌[4, 5]에서는 구조석석에 가장 적합한 지속시간이 유의지속시간이라고 제안한다. 본 연구에서는 원전구조물의 지진거동에 대한 지진 지속시간의 영향을 평가하기 위해 유의지속시간을 선택하였다.

유의지속시간은 Trifunac and Brady[13]가 제안하였는데, 지반운동의 에너지에 대한 함수로 지속시간을 정의하였다. 지반운동의 에너지는 아리아스 지진강도(Arias intensity)[14]를 통해 계산할 수 있는데, 수학적으로 다음의 식과 같이 표현된다.

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_s} a(t)^2 dt \quad (1)$$

여기서, $a(t)$ 는 시각 t 의 지반가속도, T_s 는 지진가속도가 기록된 총 시간, g 는 중력가속도를 나타낸다. 5-95% 유의지속시간, 일컬어 5-95% D_s ,는 아리아스 지진강도의 5%와 95%에 각각 해당하는 시각들 사이의 시간간격을 뜻한다. 본 연구에서는 5-95% D_s 를 유의지속시간으로 정의하였다. Fig. 1은 특정 지진파에 대한 유의지속시간을 그래프로 보여준다.

2.2 지반운동의 선정

지진 지속시간이 원전구조물의 지진거동에 미치는 영향을 분석하기 위

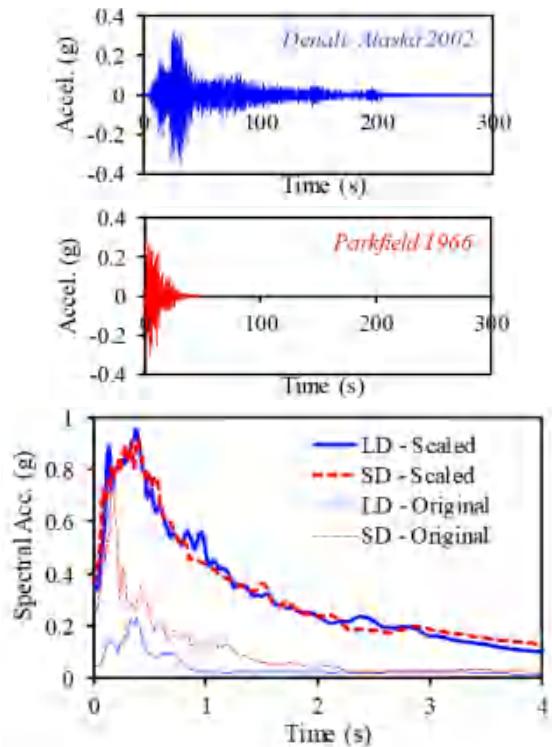
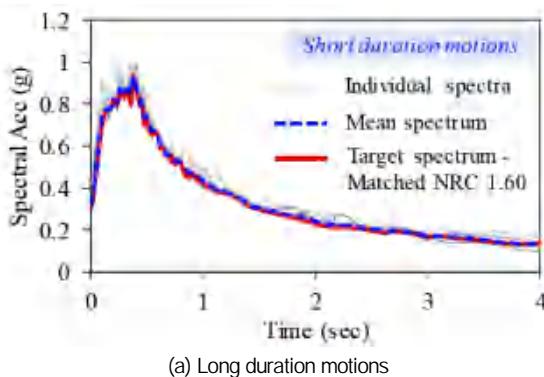


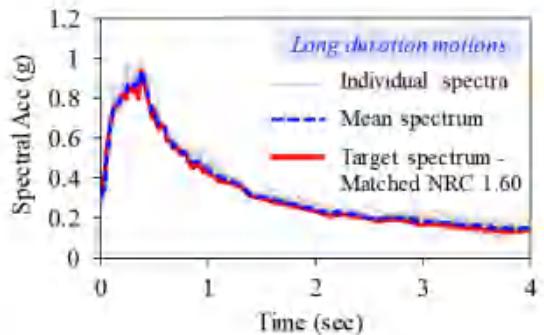
Fig. 2. Example of long and short duration ground motions and the corresponding response spectra

해서 지진의 지속시간에 따라 SD와 LD 두 종류의 지반운동을 선정하였다. 짧고 긴 지속시간을 구분하는 명확한 정의는 없지만 이와 관련된 참고문헌[4], [16, 17]을 분석하여 본 연구에서는 유의지속시간 33초를 구분의 기준으로 삼았다. 즉, 유의지속시간이 33초보다 짧은 경우 SD 지반가속도 시간 이력(이하 지진파)으로, 그렇지 않은 경우 LD 지진파로 분류하였다. SD와 LD를 구분하는 기준은 다소 임의적으로 설정되었다. 지진학 이론을 바탕으로 짧은 또는 긴 지속시간지진을 구분하는 기준을 설정하는 것도 의미있는 연구주제이지만, 본 논문의 연구범위를 벗어나므로 깊게 다루지 않았다. 다만, SD 지진을 대표할 수 있는 ATC 원거리지진의 대부분(44개의 지진 중 41개)은 유의지속시간이 33초 미만이고, 토목구조물에 대한 지진지속시간의 영향을 연구한 최근의 논문[1], [17-19]에서는 LD 지진의 유의지속시간이 모두 33초 이상이다. PEER센터 데이터베이스[15]에서 이 기준에 들어맞는 SD와 LD 지진파를 각각 15개씩 선정하였다. 실제로 선정된 지진파의 유의지속시간은 SD의 경우 11-33초, LD의 경우 62-99초로 분포되었고, 평균은 각각 20.4초와 76.3초로 계산되었다.

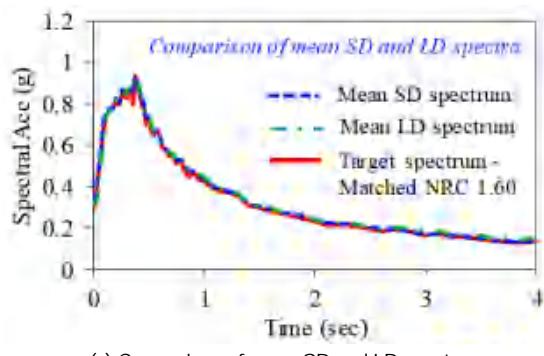
지진파의 특성을 나타내는 다양한 다른 인자들의 영향을 최소화하기 위해서 선정된 지진파를 US NRC 1.60[20]의 목표스펙트럼에 부합하도록 조정하였다. 최대지반가속도(PGA)는 한국 원전의 안전정지지진인 0.3g로 설정하였고 스펙트럼매칭기법을 이용하여 목표스펙트럼의 형상에 유사하게 지진파를 수정하였다. Fig. 2는 LD와 SD 지진파와 수정 전후의 응답스펙트럼의 전형적인 예를 보여준다. Fig. 3은 NRC 1.60 스펙트럼에 부합하는 목표스펙트럼에 대해 조정한 LD와 SD지진의 응답스펙트럼을 보여준다. Fig. 3(c)에서 볼 수 있듯이, LD와 SD의 평균스펙트럼은 목표스펙트럼과 거의 일치한다.



(a) Long duration motions



(b) Short duration motions

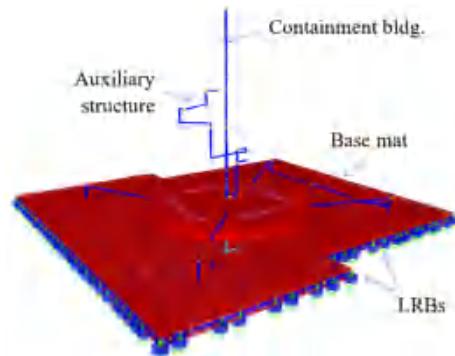


(c) Comparison of mean SD and LD spectra

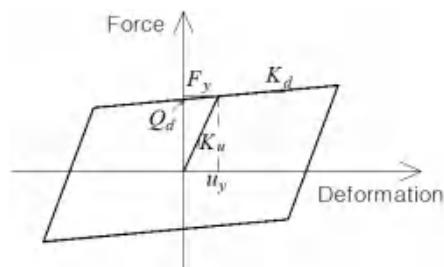
Fig. 3. Response spectra of scaled ground motions matching to the target spectrum

3. 수치해석 모델링

본 연구의 적용대상으로 APR1400 원전구조를 선정하였고, 그중 가장 중요도가 높은 격납건물을 수치해석의 대상으로 선정하였다. 이 구조물은 486개의 LRB가 매트기초 밑에 설치된 것으로 가정하였다. 면진 원전구조에 대한 집중질량 막대모델을 상용구조해석 프로그램인 SAP2000[21]을 이용하여 구축하였다. 질량과 등가단면의 물성값은 설계된 단면을 고려하여 계산하였다[22, 23]. 격납건물과 보조건물은 탄성 보-기동요소로 모델링하였고, 매트기초는 셀요소로 모델링하였다. Fig. 4(a)는 SAP2000으로 표현한 면진 원전구조물의 유한요소모델을 보여주고, Fig. 4(b)는 이선형 모델로 가정한 LRB의 전단력-전단변위 관계를 보여주는데, 상승곡선과 하강곡선의 기울기가 같은 평행사변형 모양으로 가정하였으므로 Q_d , F_y , F_u , K_d 는 양수 및 음수 모두 같은 절대값을 갖는다. 단, 이 모델은 지진하중이 작용할 때 LRB 코어의 온도상승으로 인한 이력거동의 변화를 고려하지



(a) Finite element model of the base-isolated NPP



(b) Bilinear force-deformation relation of LRB

Fig. 4. The finite element model of the case study structure

Table 1. Mechanical properties of LRBs

Property	Value	Unit
Elastic stiffness, K_u	537,703	KN/m
Hardening stiffness, K_d	4204.84	KN/m
Yield strength, F_y	1009.65	KN
Characteristic strength, Q_d	1001.03	KN
Vertical stiffness, K_v	12.896	KN/m
Effective stiffness, K_{eff}	8970	KN/m
Equivalent damping ratio, ξ	0.335	

않는다. LRB의 기계적인 성질은 Table 1에 나타내었고 집중질량 막대모델의 구성에 필요한 APR1400 원전의 구조적 물성값은 Table 2에 제시하였다. 한편, 고유치해석의 결과를 Table 3에 제시하였는데, 다른 연구에서 수행한 유사한 구조물의 고유치해석과 일치하는 것을 확인하였다[24-26].

4. 원전구조물의 지진취약도 분석

4.1 원전구조물의 지진거동 해석

횡방향 지진파를 입력하중으로 한 일련의 시간이력해석을 수행하여 면진 원전구조물의 지진응답을 계산하였다. 지진이 발생하면 면진장치에서 지진의 에너지를 대부분 흡수하기 때문에 격납건물과 보조건물 등 주요구조물은 지진이 발생하는 동안 탄성거동을 하는 것으로 가정하였다. 해석의 결과로 격납건물의 횡방향 변위, 전단력, 충응답스펙트럼과 LRB의 이력에너지률을 관찰하였다.

Figs. 5-7은 SD 및 LD 지진파에 의한 구조물의 지진응답 비교결과를 보

Table 2. Properties of the structural model of the superstructure

Node	Height from base-mat (m)	Nodal mass (ton)	Area (m^2)	Moment of inertia (m^4)	Shear area (m^2)	Torsional constant (m^4)
Reactor containment building						
1	16.76	87.07	202.90	56299.85, 56299.85	101.45, 101.45	112634.22
2	20.27	166.52	202.90	56299.85, 56299.85	101.45, 101.45	112634.22
3	23.46	185.42	202.90	56299.85, 56299.85	101.45, 101.45	112634.22
4	27.73	189.29	202.90	56299.85, 56299.85	101.45, 101.45	112634.22
5	31.09	170.39	202.90	56299.85, 56299.85	101.45, 101.45	112634.22
6	34.59	234.68	202.90	56299.85, 56299.85	101.45, 101.45	112634.22
7	40.53	314.15	202.90	56299.85, 56299.85	101.45, 101.45	112634.22
8	47.24	333.05	202.90	56299.85, 56299.85	101.45, 101.45	112634.22
9	53.94	318.02	202.90	56299.85, 56299.85	101.45, 101.45	112634.22
10	60.65	310.43	202.90	56299.85, 56299.85	101.45, 101.45	112634.22
11	66.44	376.80	202.90	56299.85, 56299.85	101.45, 101.45	112634.22
12	70.56	279.92	179.76	47591.20, 47591.20	89.89, 89.89	95199.65
13	78.63	355.52	179.76	35861.70, 35861.70	89.89, 89.89	71732.03
14	86.72	352.09	166.11	12825.63, 12825.63	83.03, 83.03	25651.25
15	94.64	147.80				
Internal structure						
1201	16.76	184.17	833.15	51055.67, 79896.93	662.77, 662.77	164989.72
1202	18.28	341.40	883.97	51262.81, 81942.48	704.29, 704.29	168389.13
1203	20.26	796.48	857.92	51149.25, 80710.1	684.03, 684.03	165957.82
1204	23.46	523.67	313.78	9908.34, 21253.36	221.77, 221.77	37753.43
1204	25.75	273.10	254.60	9816.63, 19442.95	171.14, 171.14	35811.75
1205	27.73	296.29	221.94	9515.25, 19384.02	144.33, 144.33	35233.94
1206	31.09	296.86	261.38	9848.14, 20166.32	175.93, 175.93	36571.27
1207	32.61	355.47	202.76	9630.81, 18524.13	130.81, 130.81	34566.87
1208	34.59	80.51	202.76	9630.81, 18524.13	130.81, 130.81	34566.87
1209	36.57	264.64	202.76	9630.81, 18524.13	130.75, 130.75	34566.87
1210	40.53	255.68	103.23	1932.60, 4666.70	94.90, 94.90	7888.57
1211	46.32	271.76	97.93	1918.14, 4642.60	92.25, 92.25	7840.37
1212	51.20	81.38				
Auxiliary structure						
1001	16.76	4608.78	1660.45	530766.3, 405355.4	770.35, 611.30	239729.53
1002	23.46	5265.66	1503.17	466685.8, 332679.3	658.91, 582.41	198363.83
1003	36.57	4680.11	1529.65	464101.2, 340852.6	659.42, 589.37	205791.05
1004	41.91	4150.72	1363.35	368330.8, 292325.7	565.41, 558.81	187226.65
1005	40.53	3218.83	842.16	241060.5, 158771.4	358.88, 329.06	173747.81
1006	52.42	2000.28	579.06	142392.3, 121479.2	212.0, 261.6	76553.8
1007	57.92	1659.49	371.98	75850.4, 86362.9	160.3, 192.0	52753.99
1008	63.39	957.38				

Table 3. Eigenvalue analysis results

Mode	Natural frequency (Hz)	Natural period (sec)
1 st (X-translation)	0.476	2.096
2 nd (Y-translation)	0.477	2.095
3 rd (Torsion)	0.709	1.408

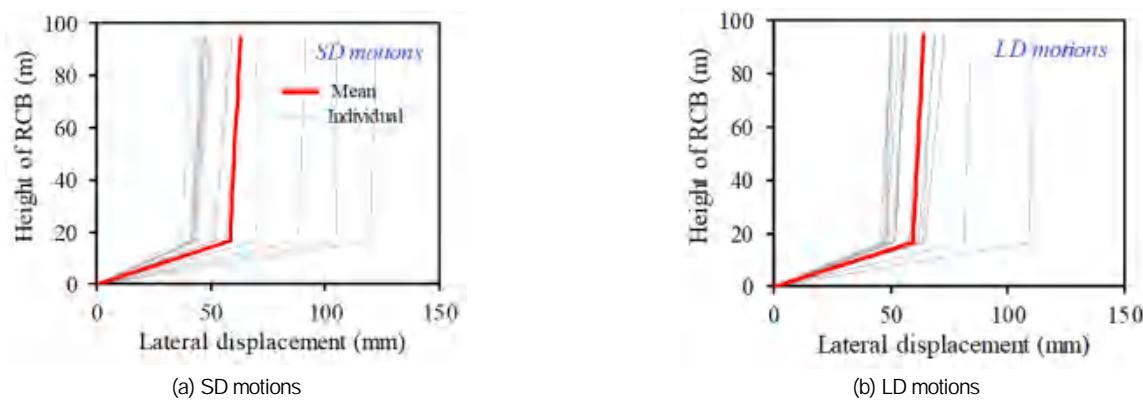


Fig. 5. Displacement distributions of RCB

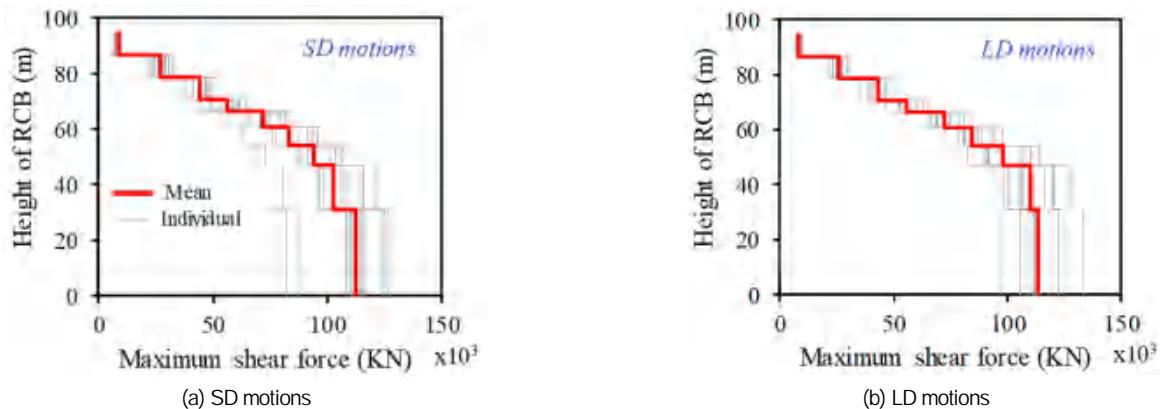


Fig. 6. Shear force distributions of RCB

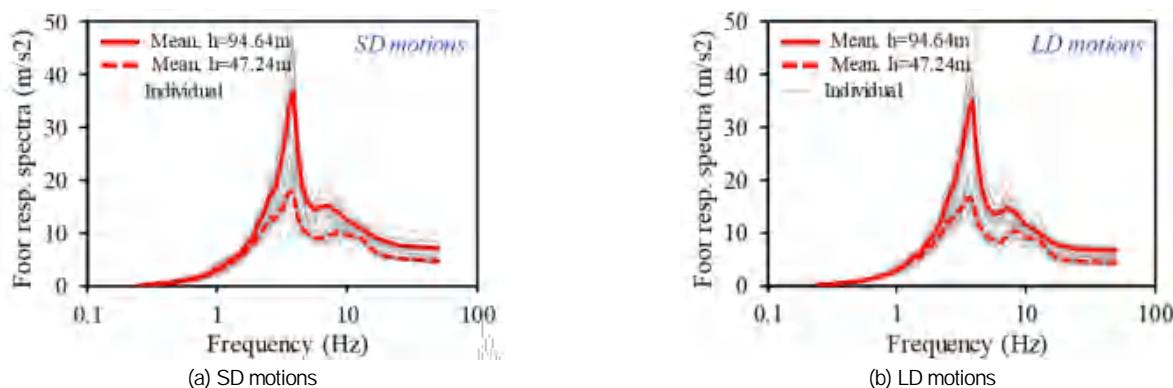


Fig. 7. Floor response spectra of RCB

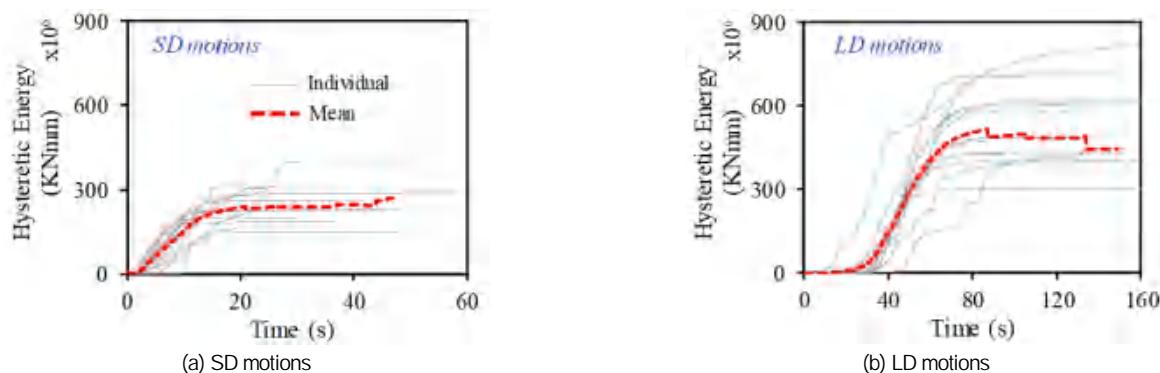


Fig. 8. Hysteretic energy of LRB

여준다. Figs. 5와 6은 각각 격납구조의 높이에 따른 횡방향 최대변위와 전단력을 나타내며, Fig. 7은 두 개의 층(높이 47.24 m와 94.64 m)에서 계산된 충응답스펙트럼을 나타낸다. 각 그래프에서 굵은 선은 15개 곡선의 평균 곡선을 의미한다. Figs. 5-7을 관찰하면 SD와 LD 지진파에 의한 구조물의 거동은 평균개념으로 큰 차이가 없다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 SD와 LD 지진파가 모두 동일한 스펙트럼에 부합하도록 수정되었기 때문이고, 또한 관찰한 거동지표가 모두 최대값(변위, 전단력, 가속도)이기 때문이다.

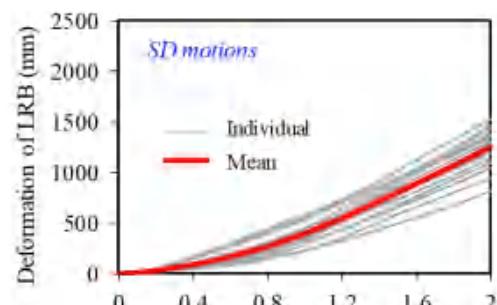
Fig. 8은 LRB에 누적된 이력에너지가 시간에 따라 변화하는 그래프를 보여준다(굵은 선은 평균 그래프). 앞서 관찰한 바와 달리, SD와 LD 지진파에 의한 누적에너지는 큰 차이를 보였다. 비록 동일한 스펙트럼을 보이는 지진일자라도 유의지속시간에 따라 구조물에 전달되는 에너지는 크게 달라질 수 있다는 점을 보여준다. 유의지속시간이 긴 지진파는 면진장치와 같이 비탄성거동을 하는 구조부재에 많은 이력에너지를 전달하게 되어 영구변형 등에 영향을 미치게 된다.

4.2 지진취약도 곡선

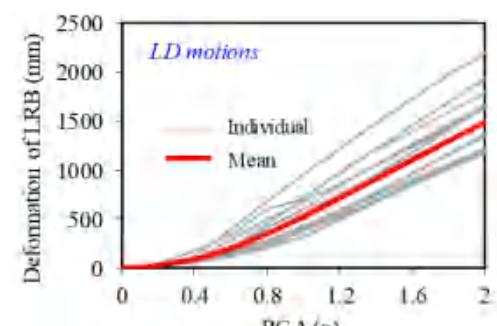
LRB는 지진이 발생했을 때 면진 원전구조의 거동에 가장 큰 영향을 주는 요소이며 상부구조보다 먼저 손상되도록 설계한다. 이는 지진 발생 시 LRB가 지진에너지의 대부분을 흡수하며 비선형적으로 거동하기 때문에 중요한 상부구조는 탄성범위 내에서 보호받을 수 있도록 하는 설계개념 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 LRB의 손상을 한계상태로 설정하여 면진 원전구조물의 지진취약도 함수를 도출하였다. SD와 LD를 대표하는 각각 15개의 지진파를 이용하여 동적중분해석(IDA)[27]을 수행하였다. 본 연구에서는 해석에 사용하는 입력지진파의 PGA를 0.05 g ~ 2.00 g 까지 20 단계로 증가시켜서 시간이력해석을 수행하였다. 각 시간이력해석에서는 LRB의 최대전단변형을 관찰하였다.

Fig. 9는 SD 와 LD 지진파에 대한 IDA곡선을 보여주며 Fig. 9(c)는 SD 지진파와 LD 지진파에 의한 IDA의 평균곡선을 비교한 것이다. PGA가 0.4 g보다 작을 때 SD와 LD 지진파에 의한 LRB의 평균 전단변형은 거의 같지만, 0.4 g보다 큰 경우 LD 지진파에 의한 변형이 SD 지진파에 의한 변형보다 점차 커지는 것을 관찰할 수 있다. 이는 같은 PGA수준이라도 LD 지진파가 SD 지진파보다 높은 에너지를 구조물에 전달하게 되고 PGA가 클수록 비선형거동을 하는 LRB에 누적되는 에너지가 더 많아지기 때문이다. 이런 점은 SD와 LD에 의한 누적에너지를 비교한 Fig. 10에 잘 나타나 있다.

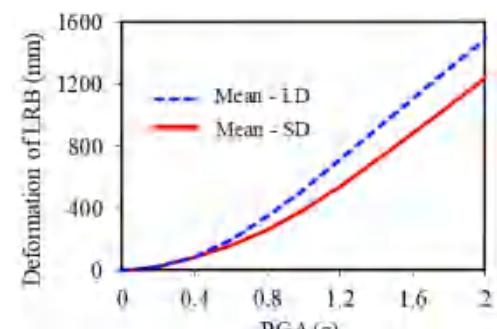
지진취약도 곡선을 도출하기 위해서는 구조물이나 구조부재의 손상수준에 따른 한계상태를 설정해야 한다. 본 연구에서는 LRB의 전단변형률을 기반으로 경미한 손상, 중간단계 손상, 심각한 손상 등 3단계의 한계상태를 설정하였다[11]. 여기서, 전단변형률은 LRB의 높이($H = 40$ cm)에 대한 횡방향상대변위(Δ)의 비율로 계산하였다. 면진장치의 성능에 대한 최근의 연구결과[28-33]에 따르면, LRB의 극한성능은 전단변형률 400%를 넘는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 취약도 분석을 위한 한계상태를 설정하는데 이와 같은 연구결과를 반영하였다. 전단변형률이 100%를 초과할 때($\Delta \geq 40$ cm)를 경미한 손상을 나타내는 한계상태(LS-1)로, 300%를 초과할 때($\Delta \geq 120$ cm)를 중간단계 손상을 나타내는 한계상태(LS-2)로,



(a) SD motions



(b) LD motions



(c) Comparison of the mean SD and LD curves

Fig. 9. IDA curves of shear deformations of LRB

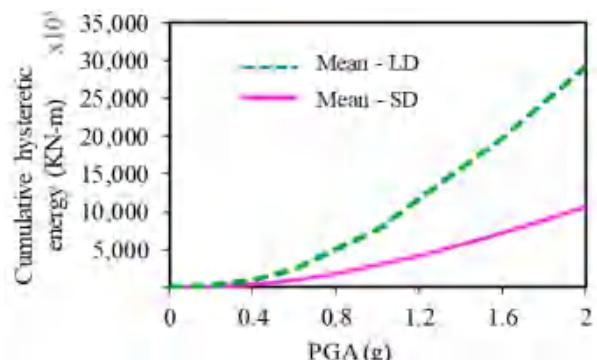


Fig. 10. Comparison of LRB hysteretic energy curves of SD and LD earthquakes

400%를 초과할 때($\Delta \geq 160$ cm)를 심각한 손상을 나타내는 한계상태(LS-3)로 설정하였다. 이와 같은 한계상태는 최근에 발표된 연구결과와 비

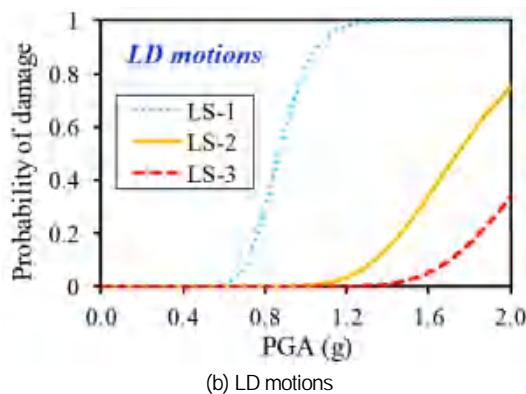
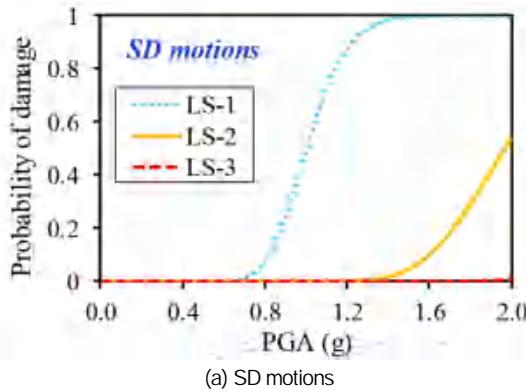


Fig. 11. Fragility curves of SD and LD motions

교할 만한다[34-37].

지진취약도 함수는 특정 규모의 지진이 작용할 때 구조물 또는 구조부재가 한계상태를 초과할 조건부화률을 나타낸다. 본 연구에서는 지진취약도 함수를 대수정규분포의 누적분포함수로 가정하였고 다음의 식과 같이 표현할 수 있다.

$$P[LS|IM] = \Phi\left[\frac{\ln(IM) - \mu}{\beta}\right] \quad (2)$$

여기서 $P[LS|IM]$ 은 규모 IM의 지진이 작용할 때 한계상태 LS를 초과할 조건부화률을 나타내며 여기서 규모는 PGA로 표현된다. $\Phi[\cdot]$ 는 표준정규분포의 누적분포함수를, μ 와 β 는 각각 $\ln(IM)$ 의 중간값과 표준편차를 나타낸다. μ 와 β 는 Shinozuka et al.[38]이 제안한 최우도추정법에 의해 계산할 수 있다.

Fig. 11은 SD와 LD 지진파를 고려한 3가지 한계상태에 대한 지진취약도 곡선을 보여준다. 면진 원전구조물은 SD와 LD 지진파 모두 PGA가 0.6g 이하일 때 아무런 손상이 발생하지 않는다(초과화률0). 다시 말해, 이 원전구조물은 한국 원전의 안전정지지진(PGA 0.3 g)에 대해 안전한 것으로 평가된다. SD와 LD 지진파의 영향을 분석하기 위해서 각 지진파그룹에 의한 지진취약도 곡선을 한계상태별로 비교하여 Fig. 12에 나타내었다. 전체적으로 SD지진파에 의한 취약도곡선이 LD지진파에 의한 취약도곡선보다 낮은 손상확률을 나타낸다. LS-1의 경우 LD지진파에 의한 지진취약도 함수의 중간값이 SD지진파에 의한 중간값보다 13% 작게 계산되었다. 이는 SD지진파보다 13% 작은 PGA를 갖는 LD지진파가 원전구조물에 동일

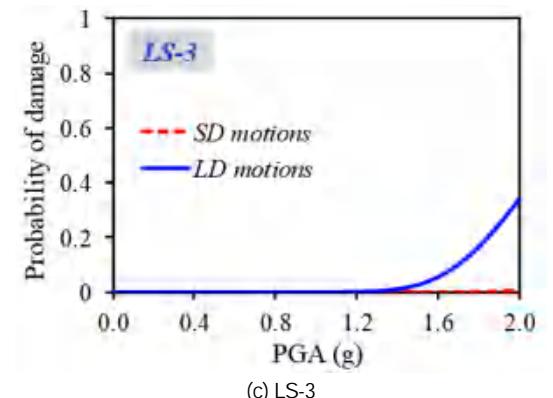
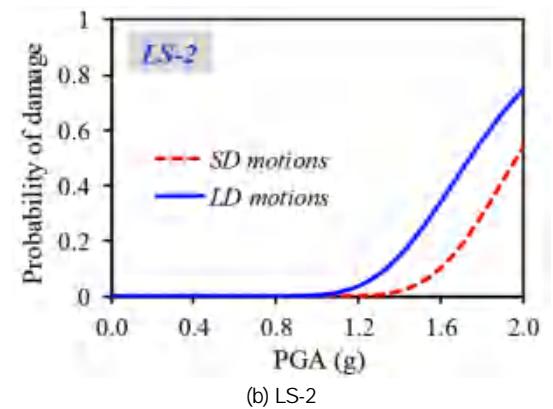
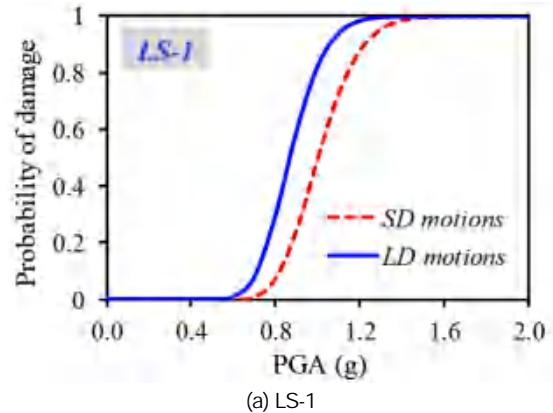


Fig. 12. Comparison of fragility curves for SD and LD motions

Table 4. Parameters for defining fragility functions

Limit state	SD earthquake		LD earthquake	
	Median, μ (g)	Standard dev., β	Median, μ (g)	Standard dev., β
Slight (LS-1)	1.003	0.155	0.870	0.152
Moderate (LS-2)	1.969	0.163	1.743	0.207
Extensive (LS-3)	2.501	0.095	2.163	0.187

한 파괴화률(50%)을 유발한다는 뜻이다. 이와 유사하게, LS-2와 LS-3의 경우, LD지진파에 의한 지진취약도함수의 중간값이 SD지진파에 의한 중간값보다 각각 12% 및 15% 작게 계산되었다. 세 가지 한계상태에 대한 지진취약도 함수의 결정인자들을 Table 4에 정리하였다.

5. 결 론

지진의 지속시간이 면진 원전구조물의 지진거동에 미치는 영향을 분석하기 위해 SD와 LD 지진파를 이용하여 시간이력해석을 수행하였다. 아리아스 지진강도의 5%부터 95%까지에 해당하는 지속시간을 유의지속시간으로 정의하고 33초를 기준으로 SD와 LD 지진을 구분하였다. 수치해석을 위해 격납건물과 보조건물을 탄성 집중질량 막대모델로 모델링하고 이선형 힘-변위모델로 LRB를 모델링하였다. LRB의 전단변형을 기반으로 세 가지 한계상태를 설정하고 SD와 LD 지진파에 의한 지진취약도함수를 각각 도출하였다. 본 연구의 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 지진에 의한 면진 원전구조물의 평균적인 거동은 SD나 LD 지진파에 상관없이 유사하다. 여기서 거동은 격납건물의 횡방향최대변위, 최대 전단력, 충응답스펙트럼을 포함한다.
- 2) 같은 PGA의 SD와 LD 지진파에 의한 LRB의 누적이력에너지는 LD 지진파에 의한 에너지가 더 크게 나타났다. 이로 인해 PGA가 0.4 g 이상인 경우, LD 지진파에 의한 LRB의 평균 최대변위가 SD 지진파에 의한 것보다 크게 나타났다.
- 3) LD 지진파에 의한 면진 원전구조물의 지진취약도 곡선의 중간값(PGA)은 SD 지진파에 의한 지진취약도 곡선의 중간값보다 12%에서 15%까지 작게 나타났다.

동일한 응답스펙트럼에 부합하는 지진파라도 유의지속시간에 따라 면진 원전구조물의 거동특성이 달라지게 되므로 설계나 평가 시에 긴 유의지속시간을 갖는 지진파를 충분히 고려하는 것이 중요하다.

/ 감사의 글 /

이 논문은 2017년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구이며(No. 20171510101860), 2018 학년도 건국대학교의 연구년교원 지원에 의하여 연구되었음.

/ REFERENCES /

- Pan Y, Ventura CE, Liam Finn WD. Effects of ground motion duration on the seismic performance and collapse rate of light-frame wood houses. *J. Struc. Eng.* 2018;144(8).
- Barbosa AR, Ribeiro FL, Neves LA. Influence of earthquake ground-motion duration on damage estimation: application to steel moment resisting frames. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2017;46(1):27–49.
- Raghunandan M, Liel AB. Effect of ground motion duration on earthquake-induced structural collapse. *Structural Safety*. 2013;41: 119–133.
- Chandramohan R, Baker JW, Deierlein GG. Quantifying the influence of ground motion duration on structural collapse capacity using spectrally equivalent records. *Earthquake Spectra*. 2016; 32(2):927–950.
- Foschaar JC, Baker JW, Deierlein GG. Preliminary assessment of ground motion duration effects on structural collapse. In *Proceedings of the 15th world conference on earthquake engineering*, Lisbon, Portugal, c2012.
- Ahmed K, Kim D, Lee SH. Effect of the incoherent earthquake motion on responses of seismically isolated nuclear power plant structure. *Earthquakes and Structures*. 2018;14(1):33–44.
- Tran TT, Nguyen TH, Kim D. Seismic incidence on base-isolated nuclear power plants considering uni-and bi-directional ground motions. *J. Structural Integrity and Maintenance*. 2018;3(2):86–94.
- Choi IK, Choun YS, Ahn SM, Seo JM. Seismic fragility analysis of a CANDU type NPP containment building for near-fault ground motions. *KSCE J. Civil Eng.*, 2006;10(2):105–112.
- Kim GJ, Yang KK, Kim BS, Kim HJ, Yun SJ, Song JK. Seismic response evaluation of seismically isolated nuclear power plant structure subjected to Gyeong-Ju earthquake. *J. the Earthquake Eng. Society of Korea*. 2016;20(7):453–460.
- Park HS, Nguyen DD, Lee TH. Effect of high-frequency ground motions on the response of NPP components: A state-of-the-art review. *J. Korean Society of Hazard Mitigation*. 2017;17(6):285–294.
- Nguyen DD, Thusa B, Lee TH. Seismic fragility of base-isolated nuclear power plant considering near-fault ground motions. *J. Korean Society of Hazard Mitigation*. 2018;18(7):315–321.
- Bommer JJ, Martinez-Pereira A. The effective duration of earthquake strong motion. *J. earthquake eng.*, 1993;2:127–172.
- Trifunac MD, Brady AG. A study on the duration of strong earthquake ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1975;65(3):581–626.
- Arias A. A measure of Earthquake Intensity. *Massachusetts Inst. of Tech.*, Cambridge. Univ. of Chile, Santiago de Chile, c1970.
- PEER ground motion database. 2018. Available from: http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database.
- Hou H, Qu B. Duration effect of spectrally matched ground motions on seismic demands of elastic perfectly plastic SDOFs. *Engineering Structures*. 2015;90:48–60.
- Wang C, Hao H, Zhang S, Wang G. Influence of ground motion duration on responses of concrete gravity dams. *J. Earthquake Eng.*, 2018;1–25.
- Chandramohan R, Baker JW, Deierlein GG. Influence of ground motion duration on the collapse response of bridge structures. 7th National Seismic Conference on Bridges and Highways, Oakland, CA, USA, c2013.
- Ou YC, Song J, Wang PH, Adidharma L, Chang KC, Lee GC. Ground motion duration effects on hysteretic behavior of reinforced concrete bridge columns. *Journal of Structural Engineering*. 2013; 140(3):04013065.
- NRC. Design response spectra for seismic design of nuclear power plants regulatory guide 1.60. US Nuclear Regulatory Commission, c1973.
- SAP2000, CSI. Computers and structures Inc. Berkeley, CA, USA.

- c2013.
22. Kim JM, Lee EH. Development and verification of simplified beam-stick model of seismically isolated ARPI400 nuclear power plant structure. Research report, Central Research Institute of KHN, KETEP Project No. 2014151010170B, c2015.
 23. Lee EH, Kim JM, Joo KH, and Kim H. Evaluation of the soil-structure interaction effect on seismically isolated nuclear power plant structures. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*. 2016;20(6):379–389.
 24. Jung JW, Jang HW, Kim JH, Hong JW. Effect of second hardening on floor response spectrum of a base-isolated nuclear power plant. *Nuclear Engineering and Design*. 2017;322:138–147.
 25. Cho SG, Yun SM, Kim D, Hoo KJ. Analyses of vertical seismic responses of seismically isolated nuclear power plant structures Supported by Lead Rubber Bearings. *J. Earthquake Eng. Society of Korea*. 2015;19(3):133–143.
 26. Han SR, Nam MJ, Seo CG, Lee SH. Soil-structure interaction analysis for base-isolated nuclear power plants using an iterative approach. *J. Earthquake Eng. Society of Korea*. 2015;19(1):21–28.
 27. Vamvatsikos D, Cornell CA. Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2002;31(3):491–514.
 28. Kim JH, Kim MK, Choi IK. Experimental study on the ultimate limit state of a lead-rubber bearing. In ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, Vancouver, BC, Canada, 2016.
 29. Lee HP, Cho MS, Park JY, Jang KS. Assessment of LRB seismic isolation device for nuclear power plant. In Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Gyongju, Korea, c2013.
 30. Choi IK, Kim JH, Kim MK. Performance based design of LRB systems for nuclear power plants. In Transaction of the 24th Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-24) Conference, Busan, Korea, c2017.
 31. Eem S, Hahn D. Large strain nonlinear model of lead rubber bearings for beyond design basis earthquakes. *Nuclear Engineering and Technology*. 2018 (accepted, in press).
 32. Yabana S, Kanazawa K, Nagata S, Kitamura S, Sano T. Shaking table tests with large test specimens of seismically isolated FBR plants: Part 3 – Ultimate behavior of upper structure and rubber bearings. In ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference, c2009.
 33. Hiraki T, Nagata S, Kanazawa K, Imaoka T, Nakayama T, Umeki Y, Shimizu H. Development of an evaluation method for seismic isolation systems of nuclear power facilities: Part 9 – Ultimate properties of full-scale lead rubber bearings based on breaking test. In ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Conference, c2014.
 34. Eem SH, Jung HJ, Kim MK, Choi IK. Seismic fragility evaluation of isolated NPP containment structure considering soil-structure interaction effect. *J. Earthquake Engineering Society of Korea*. 2013;17(2):53–59.
 35. Lee JH, Song JK. Seismic fragility analysis of seismically isolated nuclear power plant structures using equivalent linear- and bilinear-lead rubber bearing model. *J. Earthquake Eng. Society of Korea*. 2015;19(5):207–217.
 36. Zhang J, Huo Y. Optimum isolation design for highway bridges using fragility function method. In proceedings of The 14th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), Beijing, China, c2008.
 37. Ali A, Hayah NA, Kim D, Cho SG. Probabilistic seismic assessment of base-isolated NPPs subjected to strong ground motions of Tohoku Earthquake. *Nuclear Eng. and Tech.*, 2014;46(5):699–706.
 38. Shinozuka M, Feng MQ, Lee J, Naganuma T. Statistical analysis of fragility curves. *J. engineering mechanics*. 2000;126(12):1224–1231.