

국내 지진동 특성에 대한 기기 용접 정착부의 비탄성에 너지 흡수계수를 고려한 지진취약도 평가

Seismic Fragility Analysis of Equipment Considering the Inelastic Energy Absorption Factor of Weld Anchorage for Seismic Characteristics in Korea

임승현¹⁾ · 김건규²⁾ · 최인길³⁾ · kwagshinyoung^{4)*}

Eem, Seunghyun¹⁾ · Kim, Gungyu²⁾ · Choi, In-Kil³⁾ · Kwag, Shinyoung^{4)*}

¹⁾경북대학교 융복합시스템공학과 플랜트시스템전공 조교수, ²⁾경북대학교 융복합시스템공학과 플랜트시스템전공 석사과정, ³⁾한국원자력연구원 첨단구조·지진안전연구부 책임연구원, ⁴⁾한밭대학교 건설환경공학과 조교수

¹⁾Assistant Professor, Major in Plant System Engineering, Department of Convergence & Fusion System Engineering, Kyungpook National University, ²⁾Graduate Student, Major in Plant System Engineering, Department of Convergence & Fusion System Engineering, Kyungpook National University, ³⁾Principal Researcher, Advanced Structures and Seismic Safety Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, ⁴⁾Assistant Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University

/ A B S T R A C T /

In Korea, most nuclear power plants were designed based on the design response spectrum of Regulatory Guide 1.60 of the NRC. However, in the case of earthquakes occurring in the country, the characteristics of seismic motions in Korea and the design response spectrum differed. The seismic motion in Korea had a higher spectral acceleration in the high-frequency range compared to the design response spectrum. The seismic capacity may be reduced when evaluating the seismic performance of the equipment with high-frequency earthquakes compared with what is evaluated by the design response spectrum for the equipment with a high natural frequency. Therefore, EPRI proposed the inelastic energy absorption factor for the equipment anchorage. In this study, the seismic performance of welding anchorage was evaluated by considering domestic seismic characteristics and EPRI's inelastic energy absorption factor. In order to reflect the characteristics of domestic earthquakes, the uniform hazard response spectrum (UHRS) of Ulsan was used. Moreover, the seismic performance of the equipment was evaluated with a design response spectrum of R.G.1.60 and a uniform hazard response spectrum (UHRS) as seismic inputs. As a result, it was confirmed that the seismic performance of the weld anchorage could be increased when the inelastic energy absorption factor is used. Also, a comparative analysis was performed on the seismic capacity of the anchorage of equipment by the welding and the extended bolt.

Key words: Weld, High frequency earthquake, Inelastic energy adsorption factor, Seismic performance, Seismic fragility, Seismic risk

1. 서론

경주지진(2016년)은 1978년 지진관측을 시작한 후 한반도에서 발생한 역대 최대 규모의 지진이다. 이후 포항지진(2017년)의 경우 이재민 1,945명, 총 재산피해 85,022백만원의 피해가 발생하였다. 또한 경주지진 발생으로 인해 월성 원자력발전소에서는 운전기준지진인 0.1 g에 미치지 않았

으나 일부 고진동수 구간의 스펙트럴 가속도값이 기준을 초과하여 수동정지하였다[1-5]. 2020년 기준 최근 10년간 국내의 지진은 총 1,040번 발생하였으며, 많은 지진이 원자력발전소에 직·간접적으로 영향을 미쳤다[6].

기존 건설된 많은 국내 원자력발전소의 내진설계는 NRC의 Regulatory Guide 1.60(R.G. 1.60)의 원자력발전소 설계응답스펙트럼을 바탕으로 설계되었다[7, 8]. R.G. 1.60의 경우에는 미국의 서부지역의 지진 특성을 많은 부분 반영하였으며, 저진동수 영역의 스펙트럴 가속도가 큰 특징을 가지고 있다[2]. 하지만 국내에서 발생한 두 지진의 경우 미국 중동부처럼 고진동수영역에서의 스펙트럴 가속도가 높으며, R.G. 1.60의 원자력발전소 설

*Corresponding author: Kwag, Shinyoung

E-mail: skwag@hanbat.ac.kr

(Received July 11, 2022; Revised September 5, 2022; Accepted November 2, 2022)

계응답스펙트럼과 차이가 보인다. 따라서 기존 원자력발전소는 국내의 지진동 특성에 맞는 원자력발전소 안전성 확보를 해야 할 필요가 있다[1].

원자력발전소에 설치된 기기의 지진 안전성 평가는 기능적 진전성 및 구조적 진전성 평가가 이루어진다. 기기 정착부의 손상은 대표적으로 구조적 진전성 평가수행 시 고려된다. 일반적인 기기의 정착방법은 용접과 앵커가 있다. 대다수 기기의 고유진동수는 10 Hz 이상이며 이로 인하여 국내 지진동 특성을 고려하여 기기 정착부의 내진성능을 평가하면 설계응답스펙트럼을 적용한 것보다 내진성능이 낮아질 수 있다[9]. 기기 정착부의 비탄성 에너지 흡수계수를 기존에 고려하지 않았지만 내진성능 향상을 위해 EPRI (Electric Power Research Institute)에서는 비탄성에너지 흡수계수를 고려하는 방법을 제안하였다[10]. Eem et al.은 EPRI에서 제안한 비탄성 에너지 흡수계수를 고려하여 지진동 특성에 따른 기기 확장형 앵커 정착부의 내진성능을 비교 분석을 수행하였다[11]. 기기의 정착부는 앵커 뿐만 아니라 용접에 의한 정착도 많이 활용되고 있다. 이에 따라 필렛 용접부의 비탄성 거동, 피로 파괴 특성, 취성파괴, 연성파괴에 관한 연구도 진행되고 있다 [12-16].

본 연구에서는 국내 지진동 특성인 고진동수 지진과 EPRI에서 제안한 비탄성에너지 흡수계수를 고려하여 용접에 의한 기기 정착부에 대하여 내진성능을 지진취약도 곡선을 통해 평가하였다. 비탄성에너지 흡수계수의 영향에 대해 비교 분석을 수행하기 위하여 R.G. 1.60의 원자력발전소 설계 응답스펙트럼과 국내 지진동 특성을 반영한 울진지역의 등재해도 응답스펙트럼을 활용하였다[1],[8],[17]. 또한 확장형 앵커에 의한 기기 정착부의 내진성능과 용접에 의한 기기 정착부의 내진성능에 대해 비교 분석을 수행하였다.

2. 용접 정착부의 비탄성에너지 흡수계수

원자력발전소 구조물, 기기 및 시스템(SSCs)의 지진취약도 곡선 계산은 EPRI보고서 TR-1035959 “Methodology for Developing Seismic Fragilities”의 Separation of Variable(SOV)의 방법을 사용하는 것이 일반적이다[18]. SOV 방법에 의한 지진취약도 곡선은 식 (1)과 같이 계산된다.

$$f(a) = \Phi \left[\frac{\ln(a/A_m) + X\beta_U}{\beta_R} \right] \quad (1)$$

여기서 $X = \Phi^{-1}(P_{conf})$
 $\Phi(\cdot)$: 표준정규 확률 분포함수
 a : 입력지진의 강도
 A_m : 중앙값 성능
 X : 신뢰도(95%, 50%, 5%)
 β_U : 불확실성 대수표준 편차
 β_R : 랜덤성 대수표준편차

A_m 은 참조지진강도(PGA_{REF})으로부터 F_m (Total factor of safety)의 계수를 곱하여 식 (2)와 같이 계산된다. 기기의 내진성능 계수는 식 (2)의 F_C 이며, 강도계수와 비탄성에너지 흡수계수의 곱이다. 그러나 정착부의

내진성능 평가를 수행 시 일반적으로는 비탄성에너지 흡수계수를 고려하지 않는다. 따라서 비탄성에너지 흡수계수를 고려하면 보다 현실적으로 평가하게 되며 기존의 결과와 비교하여 내진성능이 향상될 가능성이 있다[11].

$$\begin{aligned} A_m &= F_m * PGA_{REF} \\ F_m &= F_C * F_{RE} * F_{RS} \\ F_C &= F_s * F_\mu \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, F_C : 기기의 내진성능 계수
 F_{RE} : 기기의 지진응답 계수
 F_{RS} : 구조물의 지진응답 계수
 F_s : 강도계수
 F_μ : 비탄성에너지 흡수계수

정착부의 비탄성에너지 흡수계수를 고려하여 계산하는 방법을 EPRI에서 제안하였다[10]. EPRI에서 제안한 방법은 기기 정착부의 거동을 비탄성영역까지 허용하는 것으로 기기 정착부의 비탄성에너지 흡수계수를 활용하는 것이다. 이는 기기 정착부의 변형 성능을 기준으로 활용하게 되어 내진성능을 향상할 수 있다. 하지만 정착부의 비탄성 거동을 허용하면 기기에 충격이 발생할 수 있어 민감한 기기가 설치된 기기에는 적용하면 안 된다. 따라서 비탄성 거동을 허용하여 비탄성 거동이 기기의 안전성에 문제가 없을 때 적용하여야 한다. Fig. 1은 EPRI에서 제안한 비탄성계수를 고려하는 방법이다[10]. 자세한 계산내용은 Eem et al.에 제시되어 있다[11].

기기-정착부 시스템은 다음의 특징 및 가정을 한다. 기기는 바닥에 정착되어 있다. 비지진하중은 기기 정착부에 하중으로 작용하지 않는다. 시스템의 응답은 1-자유도 시스템으로 근사한다. 시스템 응답에서 고려한 유일한 비선형성은 정착부의 재료 비선형이다. 기기 자체는 선형 탄성거동을 한다.

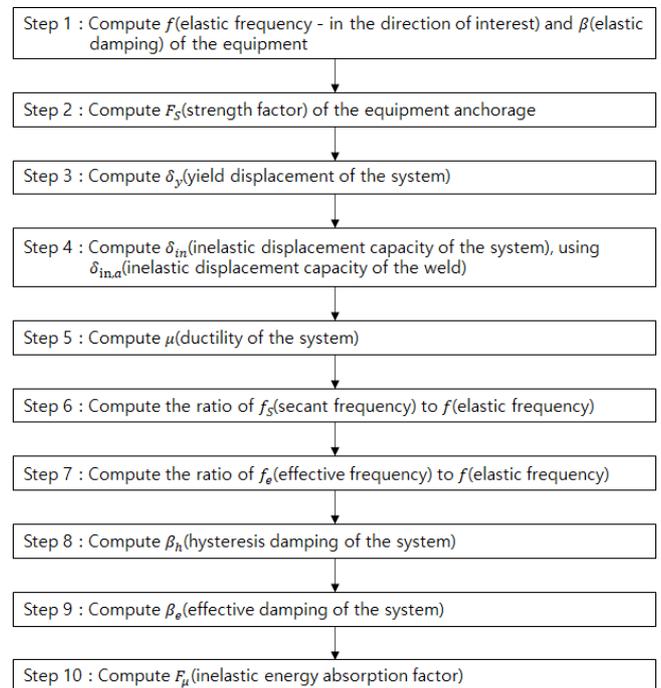


Fig. 1. Calculation of inelastic energy absorption factor

정착부의 강성은 기기의 강성보다 훨씬 높으므로 시스템 고유진동수는 기기의 강성에 의해 결정된다. 정착부의 재료 비선형성은 탄성-완전소성 한변위 곡선으로 표현된다. 지진하중에 대한 정착부의 비선형 응답과 관련된 강도 저하 현상은 무시한다[10].

3. 캐비닛의 내진성능

3.1 대상 기기 및 입력지진

대상 기기는 Eem et al.이 사용한 대상 캐비닛을 확장형 앵커에서 용접에 의한 정착부로 수정하여 분석을 수행하였다[11]. 캐비닛의 무게는 5 kip(22.2 kN)이며 캐비닛의 가로, 세로 및 높이는 각각 40 in(1,016 mm), 60 in(1,524 mm) 및 90 in(2,286 mm)의 집중질량 모델이다. 캐비닛은 0.25 in(6.35 mm)의 용접 길이와 3/8 in(9.525 mm)의 용접 다리 길이인 필렛 용접 4개를 사용하여 강판에 고정된다. 설치된 플레이트는 콘크리트 바닥에 확장형 앵커로 장착되어 있다. 고정된 캐비닛의 탄성 고유주파수는 가로방향, 세로방향 그리고 수직방향으로 각각 10 Hz, 20 Hz 그리고 30 Hz이다. 감쇠비의 중앙값은 5%이며, 확장형 앵커는 캐비닛의 손상에 관여하지 않는다고 가정한다. Fig. 2에 대상 캐비닛을 나타내었다.

캐비닛 위치의 층응답스펙트럼을 내진성능 평가를 위해 활용해야 한다. 본 연구에서는 Eem et al.의 연구와 같은 입력지진인 R.G 1.60 원자력발전소 설계응답스펙트럼과 울진지역의 등재해도 응답스펙트럼을 활용하였다[8]. 원자력발전소 설계응답스펙트럼의 최대 지반가속도는 0.2 g, 등재해도 응답스펙트럼의 최대 지반가속도는 0.273 g이다[1, 18]. 등재해도 응답스펙트럼의 1E-4/yr에 대한 응답스펙트럼이다. Fig. 3은 설계응답스펙트럼(a)과 등재해도 응답스펙트럼(b)로 나타내었다.

3.2 용접에 의해 정착된 캐비닛의 지진취약도 곡선

본 절에서는 입력지진동 특성과 비탄성에너지 흡수계수 적용 여부에 따라 캐비닛의 내진성능을 평가하였다. 다음 4가지 경우에 대하여 캐비닛의 지진취약도 곡선을 도출하였다.

- CASE 1A: 설계응답스펙트럼 R.G. 1.60 & 용접 정착부 비탄성에너지 흡수계수 미적용
- CASE 2A: 설계응답스펙트럼 R.G. 1.60 & 용접 정착부 비탄성에너지 흡수계수 적용
- CASE 3A: 등재해도 응답스펙트럼 & 용접 정착부 비탄성에너지 흡수계수 미적용
- CASE 4A: 등재해도 응답스펙트럼 & 용접 정착부 비탄성에너지 흡수계수 적용

Table 1은 CASE 2A 및 CASE 4A에서 비탄성에너지 흡수계수를 도출하기 위하여 사용한 값을 나타내었다.

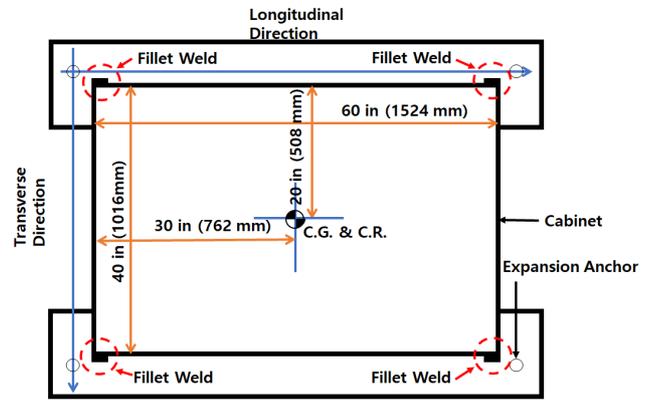
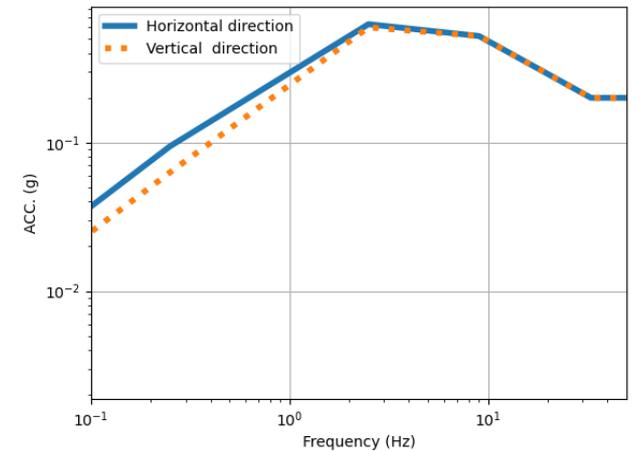
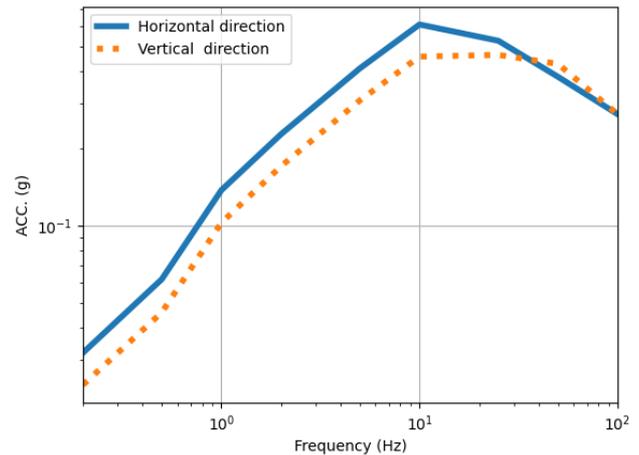


Fig. 2. Target cabinet weld details



(a) Design response spectrum (R.G. 1.60, PGA: 0.2 g)



(b) Uniform hazard response spectrum (1E-4/yr)

Fig. 3. Response spectrum [1, 8]

3.2.1 CASE 1A: 설계응답스펙트럼 R.G. 1.60 & 용접 정착부 비탄성에너지 흡수계수 미적용

대상 기기 정착부의 비탄성계수를 적용하지 않았으며 입력지진으로 설계응답스펙트럼을 활용하였다. Table 2은 지진취약도 곡선을 도출하기 위한 계수를 나타내었다. Fig. 4는 정착부의 지진취약도 곡선을 도출하기 위하여 SOV 방법을 활용하여 나타내었다.

Table 1. Result for Each Direction

Variables	CASE 2A			CASE 4A		
	Transverse	Longitudinal	Vertical	Transverse	Longitudinal	Vertical
Yield Displacement (mm)	4.45	0.26	0.09	4.03	0.37	0.14
Inelastic Displacement (mm)	0.53	0.29	0.34	0.52	0.31	0.34
Ductility Ratio	1.12	2.07	4.89	1.13	1.83	3.54
Secant Frequency (Hz)	9.50	13.9	23.3	9.40	14.8	24.0
Effective Frequency (Hz)	9.80	18.2	30.0	9.80	18.4	30.0
Hysteretic Damping	0.01	0.05	0.11	0.01	0.04	0.10
Effective Damping	0.05	0.05	0.1	0.05	0.06	0.10
Inelastic Energy Absorption Factor	1.06	1.60	1.62	1.10	1.54	1.44
Total Inelastic Energy Absorption Factor	1.127			1.196		

Table 2. Parameter for seismic fragility (CASE 1A)

Variables	Median factor	β_R	β_V
Strength Factor	3.733	0.000	0.190
Inelastic Energy Absorption Factor	1.000	0.000	0.000
Qualification Method Factor	1.000	0.000	0.000
Spectral Shape Factor	1.000	0.000	0.000
Damping Factor	1.000	0.000	0.120
Modeling Factor	1.000	0.000	0.000
Mode Combination Factor	1.000	0.000	0.000
Earthquake Component Combination	1.000	0.071	0.000
Structure Response Factor	1.000	0.180	0.240
Total	3.733	0.193	0.329

Table 3. Parameter for seismic fragility (CASE 2A)

Variables	Median factor	β_R	β_V
Strength Factor	3.733	0.000	0.190
Inelastic Energy Absorption Factor	1.127	0.026	0.181
Qualification Method Factor	1.000	0.000	0.000
Spectral Shape Factor	1.000	0.000	0.000
Damping Factor	1.000	0.000	0.120
Modeling Factor	1.000	0.000	0.000
Mode Combination Factor	1.000	0.000	0.000
Earthquake Component Combination	1.000	0.071	0.000
Structure Response Factor	1.000	0.180	0.240
Total	4.207	0.195	0.375

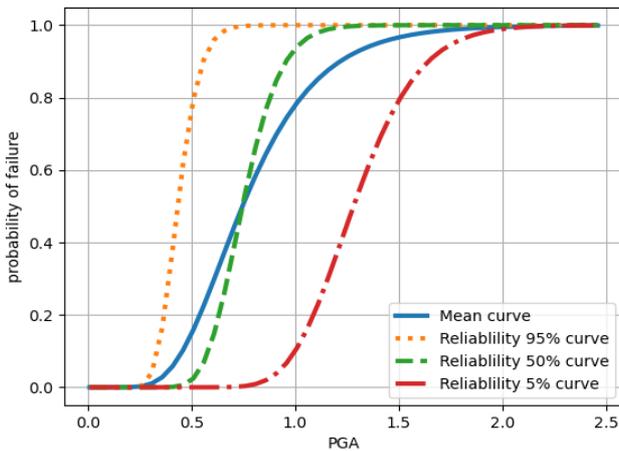


Fig. 4. Seismic fragility of cabinet (CASE 1A)

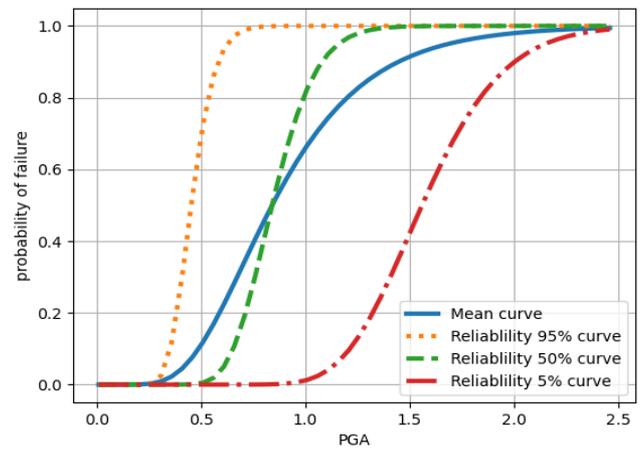


Fig. 5. Seismic fragility of cabinet (CASE 2A)

3.2.2 CASE 2A: 설계응답스펙트럼 R,G, 1.60 & 용접 정착부 비탄성에너지 흡수계수 적용

대상 기기 정착부의 비탄성계수를 적용하였으며 입력지진으로 설계응답스펙트럼을 활용하였다. Table 3은 지진취약도 곡선을 도출하기 위한 계수를 나타내었다. Fig. 5는 정착부의 지진취약도 곡선을 도출하기 위하여 SOV 방법을 활용하여 나타내었다.

3.2.3 CASE 3A: 등재해도 응답스펙트럼 & 용접 정착부 비탄성에너지 흡수계수 미적용

대상 기기 정착부의 비탄성계수를 적용하지 않았으며 입력지진으로 울진지역 등재해도 응답스펙트럼을 활용하였다. Table 4은 지진취약도 곡선을 도출하기 위한 계수를 나타내었다. Fig. 6는 정착부의 지진취약도 곡선을 도출하기 위하여 SOV 방법을 활용하여 나타내었다.

Table 4. Parameter for seismic fragility (CASE 3A)

Variables	Median factor	β_R	β_U
Strength Factor	2.661	0.000	0.190
Inelastic Energy Absorption Factor	1.000	0.000	0.000
Qualification Method Factor	1.000	0.000	0.000
Spectral Shape Factor	1.000	0.000	0.000
Damping Factor	1.000	0.000	0.120
Modeling Factor	1.000	0.000	0.000
Mode Combination Factor	1.000	0.000	0.000
Earthquake Component Combination	1.000	0.104	0.000
Structure Response Factor	1.000	0.180	0.240
Total	2.661	0.208	0.329

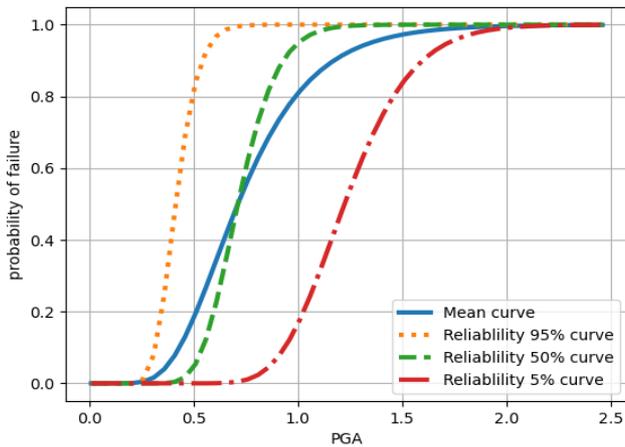


Fig. 6. Seismic fragility of cabinet (CASE 3A)

Table 5. Parameter for seismic fragility (CASE 4A)

Variables	Median factor	β_R	β_U
Strength Factor	2.661	0.000	0.190
Inelastic Energy Absorption Factor	1.196	0.026	0.238
Qualification Method Factor	1.000	0.000	0.000
Spectral Shape Factor	1.000	0.000	0.000
Damping Factor	1.000	0.000	0.120
Modeling Factor	1.000	0.000	0.000
Mode Combination Factor	1.000	0.000	0.000
Earthquake Component Combination	1.000	0.104	0.000
Structure Response Factor	1.000	0.180	0.240
Total	3.171	0.210	0.406

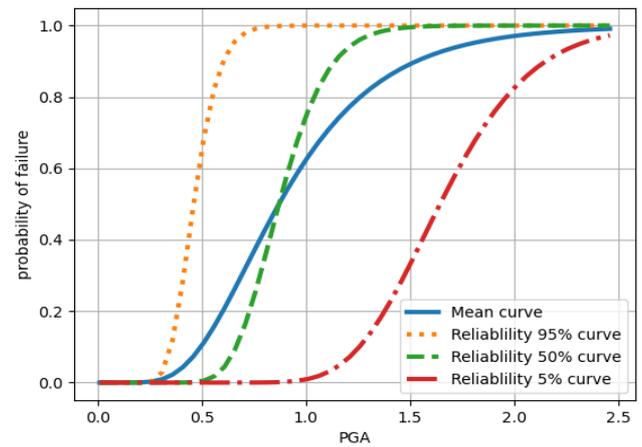


Fig. 7. Seismic fragility of cabinet (CASE 4A)

3.2.4 CASE 4A: 등재해도 응답스펙트럼 & 용접 정착부 비탄성에너지 흡수계수 적용

대상 기기 정착부의 비탄성계수를 적용하였으며 입력지진으로 울진지역 등재해도 응답스펙트럼을 활용하였다. Table 5은 지진취약도 곡선도를 출하기 위한 계수를 나타내었다. Fig. 7는 정착부의 지진취약도 곡선을 도출하기 위하여 SOV 방법을 활용하여 나타내었다.

3.3 용접 정착부의 CASE별 비교 · 분석

입력 지진과 비탄성에너지 흡수계수에 따라 캐비닛의 내진성능이 변화하는 것을 확인할 수 있다. Table 6는 각 CASE들의 캐비닛이 내진성능과 비탄성에너지 흡수계수에 대해 나타내었다. 비탄성에너지 흡수계수의 적용하지 않은 CASE 1A과 CASE 3A에서 캐비닛의 내진성능은 등재해도 응답스펙트럼(CASE 3A)을 입력지진으로 적용하였을 때 보다 캐비닛의 내진성능이 더 낮은 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 등재해도 응답스펙트럼은 설계응답스펙트럼에 비해 고진동수 영역에서 스펙트럴 가속도가 높으며, 대상기기는 가로, 세로, 수직 방향으로 각각 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz의 고유진동수를 가지기 때문이다.

Table 6. Seismic capacity of cabinet (Weld)

Case	A_m	HCLPF	F_μ
1A	0.747 g	0.315 g	1.000
2A	0.861 g	0.328 g	1.127
3A	0.713 g	0.294 g	1.000
4A	0.871 g	0.326 g	1.196

비탄성에너지 흡수계수(F_μ)를 사용하여 캐비닛의 내진성능 평가 시 내진성능이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 비탄성에너지 흡수계수의 적용으로 설계응답스펙트럼의 경우 중앙값 성능(A_m)은 약 15% 증가하였으며, 등재해도 응답스펙트럼의 경우 A_m 은 약 20% 증가하였다. 또한 HCLPF 값은 설계응답스펙트럼의 경우 약간 증가하였으며, 등재해도 응답스펙트럼의 경우 10% 증가하였다. 또한 모든 CASE에서 랜덤성(β_R) 및 불확실성(β_U)의 대수 표준편차가 증가하는 것을 확인하였다. 고진동수 영역 스펙트럴 가속도 값이 큰 지진의 경우 비탄성에너지 흡수계수를 적용하여 내진성능 평가 시 내진성능의 증가를 확인할 수 있다. 또한 비탄성에너지 흡수계수의 효과는 상대적으로 고진동수 지진에서 효과적인 것을 확인할 수 있다. 이는 비탄성에너지 흡수계수를 고려하면 앵커의 강도보다 변위를 기준으로 손상을 평가하기 때문이다. 따라서 국내지진동 특성(고진동수 지진)을 고려할 경우 낮은 기기의 내진성능을 비탄성에너지 흡수계수를 활용하

Table 7. Seismic capacity of cabinet (Extended Bolt) [11]

CASE	A_m	HCLPF	F_μ	β_R	β_U
1B	0.542 g	0.202 g	1.000	0.193	0.404
2B	0.581 g	0.198 g	1.071	0.195	0.457
3B	0.539 g	0.196 g	1.000	0.208	0.405
4B	0.657 g	0.213 g	1.220	0.210	0.472

Table 8. Rate of Change (ROC) of A_m

Anchorage type	Comparison CASE	A_m	ROC
Weld	1A & 2A	0.747 & 0.861	15.26 %
Weld	3A & 4A	0.713 & 0.871	22.16 %
Extended bolt	1B & 2B	0.542 & 0.581	7.20 %
Extended bolt	3B & 4B	0.539 & 0.657	21.90 %

여 증가가 가능할 것으로 생각한다. 비탄성에너지 흡수계수를 고려하면 보다 현실적인 평가를 하게 된다. 확장형 앵커에서 비탄성에너지 흡수계수를 고려 하였을 때 와 마찬가지로 일반적으로는 내진성능이 증가할 수 있지만, 고려하는 시스템의 연성도, 입력지진의 스펙트럼형상과 기기의 고유주파수에 의해 감소 될 수도 있다. 또한 비탄성에너지 흡수계수는 기기 내부에 진동 혹은 충격에 민감한 부품이 있으면 적용이 불가하다.

3.4 용접 정착부와 확장형 앵커 정착부에 대한 내진성능 비교 및 논의

본 절에서는 대상 기기의 용접과 확장형 앵커 정착부에 대한 내진성능을 비교하였다. Table 7은 Eem et al.의 확장형 앵커 정착부 내진성능 평가 결과이다[11]. Table 7에서 CASE 1-4까지의 조건(입력지진 및 비탄성에너지 흡수계수 고려여부)은 동일하며, A는 용접 정착부를 의미하며, B는 확장형 앵커를 의미한다. Table 8은 비탄성에너지 흡수계수 고려여부 기준으로 각 CASE별 A_m 의 변화율을 나타내었다.

모든 경우에서 비탄성에너지 흡수계수의 활용은 정착부의 내진성능을 강도 기준이 아니라 허용 변위를 기준으로 평가가 진행되어 고진동수 지진에 대해 유리하기 때문이다. 즉, 입력지진이 고진동수 특성이 있고 기기의 고유진동수가 높을수록 비탄성에너지 흡수계수의 영향은 클 것으로 생각된다. 용접 정착부와 확장형 앵커 정착부의 내진성능의 변화율은 상대적으로 고진동수 지진을 고려하였을 경우 그 값이 더 크다. 기본적으로 용접 정착부에 대한 내진성능이 확장형 앵커의 내진성능보다 큰 것을 알 수 있다. 고진동수 지진의 경우 용접 및 확장형 앵커 정착부의 경우 비탄성 거동을 허용하면 비탄성에너지 흡수계수는 각각 1.196 및 1.22으로 정착부의 내진성능은 대략 20% 정도 증가하는 것을 확인하였다. 또한 상대적으로 용접에 의한 정착이 확장형 앵커보다 신뢰성이 높으므로 불확실성 및 랜덤성에 의한 대수표준편차는 용접 정착부가 확장형 앵커 정착부 보다 작은 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

국내 지진동 특성은 고진동수 영역에서 스펙트럴 가속도가 높으며, 원전

의 설계응답스펙트럼과 차이가 있다. 따라서 원자력발전소에는 다수의 기기가 설치되어 있으며 국내 지진동 특성을 반영하여 원자력발전소의 기기에 대한 안전성 평가를 시행해야 한다. 기기에 대한 손상에는 일반적으로 구조적 손상과 기능적 손상으로 구분하며, 구조적 손상의 대부분은 정착부의 손상이다. 기기 정착부의 대표적인 정착 방법으로는 용접 정착부와 확장형 앵커 정착부가 있다. 또한 국내의 지진동 특성을 고려하여 기기 용접 정착부의 내진성능 평가 시 내진성능이 낮아질 수 있다. 대부분의 기기는 10 Hz 이상인 고유진동수를 가지는 경우가 많으며, 국내 지진동 특성이 설계응답스펙트럼보다 고진동수 영역에서의 스펙트럴 가속도가 높기 때문이다. 이로 인하여 용접 정착부의 안정성 평가를 상세히 하여 평가를 실시해야 할 필요성이 있다. 기기 용접 정착부의 평가 시 일반적으로 비탄성에너지 흡수계수를 적용하여 평가하고 있지 않지만, 비탄성에너지 흡수계수의 적용을 할 경우 내진성능이 증가될 수 있다. 본 연구에서는 기기 용접 정착부의 입력 지진과 비탄성에너지 흡수계수 고려 여부에 따른 총 4가지 CASE에 대해 내진성능을 평가하였으며, 비탄성에너지 흡수계수 고려 시 기기 용접 정착부와 확장형 앵커 정착부의 내진성능을 비교하였다. 비탄성에너지 흡수계수를 고려하면 내진성능이 증가한 것을 확인하였다. 또한 정착 방법에 따른 내진성능은 용접부에서 내진성능이 높은 것을 확인하였다. 따라서 국내 지진동 특성을 반영하여 정착부의 내진성능이 안전기준을 만족하지 못할 때 비탄성에너지 흡수계를 활용할 수 있을 것으로 생각된다. 하지만 비탄성에너지 흡수계수 고려는 캐비닛의 종류, 정착부 정착 방법 등에 따라 내진성능이 달라질 것으로 보인다. 따라서, 입력지진의 응답스펙트럼 형상과 기기 고유진동수에 의해 변화하므로 내진성능이 기존의 결과와 비교하여 내진성능이 항상 증가하는 것은 아니다. 또한, 비탄성에너지 흡수계수는 정착부의 비탄성영역의 거동을 허용함으로써 기기에 충격이 발생할 수 있으며, 민감한 기기일 경우 적용할 수 없다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 2020R1G1A1007570 & RS-2022-00154571).

/ REFERENCES /

1. Eem S, Choi I. A shape of the response spectrum for evaluation of the ultimate seismic capacity of structures and equipment including high-frequency earthquake characteristics. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2020;24(1):1-8.
2. Eem S, Yang B, Jeon H. Earthquake damage assessment of buildings using opendata in the pohang and the gyeongju earthquakes. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2018; 22(3):121-128.
3. Korea Meteorological Administration Earthquake Notification - 2016. 9.12 20:37. Official notice. c2016.
4. Central Disaster Safety Measures Headquarters Press Releases: Recovery cost of Pohang earthquake. c2017.
5. Ministry of the Interior and Safety 2017 Statistical Yearbook of Natural Disaster. c2018.

6. Ministry of the Interior and Safety 2020 Statistical Yearbook of Natural Disaster. c2021.
7. Jeong Y, Baek E, Jeon B, Chang S, Park D. Seismic performance of emergency diesel generator for high frequency motions. *Nuclear Engineering and Technology*. 2019;51(5):1470–1476.
8. US Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 1.60: Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants. c2014.
9. Park HS, Nguyen D, Lee T. Effect of high-frequency ground motions on the response of NPP components: A state-of-the-art review. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 2017; 17(6):285–294.
10. Kassawara B, Richards J. High Frequency Seismic Inelastic Effects on Equipment Anchorage. EPRI 3002010665. c2017.
11. Eem S, Kwag S, Choi I, Jung J, Kim S. Seismic fragility analysis considering the inelastic behavior of equipment anchorages for high-frequency earthquakes. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*. 2021;25(6):261–266.
12. Lee CH, Jung JH, Kim SY. Cyclic seismic performance of RBS weak-axis welded moment connections. *Journal of Korean Society of Steel Construction*. 2015;27(6):513–523.
13. Jeong-Ung Park, Gyu-Baek An. Fracture toughness of thick steel plate for ship building. *Journal of Welding and Joining*. 2007;25(4): 15–19.
14. Yunchan J, Jaekun H, Jihong P, Dongwook K, Youngseog L. Failure behaviors depending on the notch location of the impact test specimens on the HAZ. *The Korean Society of Mechanical Engineers*. 2007:808–813.
15. Myers AT, Kanvinde AM, Deierlein GG, Fell BV. Effect of weld details on the ductility of steel column baseplate connections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2009;65(6):1366–1373.
16. Lesik DF, Kennedy DJ. Ultimate strength of eccentrically loaded fillet welded connections. c1988.
17. Kim M, Choi I. Effect of evaluation response spectrum on the seismic risk of structure. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*. 2009;13(6):39–46.
18. Reed JW, Kennedy RP. Methodology for Developing Seismic Fragilities. EPRI TR-103959. c1994.