

# 원전 전기캐비닛의 지진취약도 재평가를 위한 진동대 실험

## A Shaking Table Test for an Re-evaluation of Seismic Fragility of Electrical Cabinet in NPP

김민규†  
Kim, Min Kyu

최인길\*  
Choi, In-Kil

### 요 지

본 연구에서는 원자력발전소의 주요 설비중의 하나인 전기설비를 대상으로 지진취약도 재평가를 위한 진동대 실험을 수행하였다. 원자력발전소 내에는 많은 전기설비들이 설치되어 있으며, 이러한 전기설비의 손상은 전기설비 자체의 손상에서 그치는 것이 아니고 발전소 전체의 안전성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 원자력발전소의 확률론적 지진안전성 평가에서는 주요 전기설비에 대한 지진취약도 결과를 활용한 평가를 수행하고 있다. 본 연구에서는 기존의 확률론적 지진안전성 평가에서 사용하고 있는 전기설비의 지진취약도 값에 대한 재평가를 위하여 원자력발전소에서 사용하고 있는 주요 기기에 대한 진동대 실험을 수행하였다. 평가대상 전기설비로는 480V MCC를 선정하였으며, 진동대 실험을 위하여 NRC 설계지진, 등재해도 스펙트럼에 의한 인공지진 그리고 PAB165'에서의 층응답스펙트럼을 이용한 인공지진의 3가지 지진파를 이용하였다. 설계지진동 수준인 최대지반가속도 0.2g부터 단계적으로 입력수준을 증가시키면서 실험을 수행하였다. NUREG/CR-5203에서 제시하고 있는 방법에 의거하여 캐비닛에서의 증폭비를 비교하였으며, EPRI TR-103959의 방법으로 취약도 평가를 수행하여 기존의 확률론적 지진안전성 평가에서 사용하고 있는 지진취약도 결과와 비교하였다. 결론적으로 기존의 보고서에서 제시하고 있는 취약도 결과가 다소 보수적으로 평가하고 있음을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 전기캐비닛 시스템, 원자력발전소, Motor Control Centers(MCCs), 진동대실험, 내진성능, 지진증폭, incabinet response amplification

### Abstract

In this study, a seismic behavior of electrical cabinet system in Nuclear Power Plants(NPPs) was evaluated by the shaking table test. A 480V Motor Control Centers(MCCs) was selected for the shaking table test, and a real MCC cabinet for the Korea Nuclear Power Plant site was rented by manufactured company. For the shaking table tests, three kinds of seismic input motions were used, which were a US NRC Reg. guide 1.60 design spectrum, a UHS spectrum and PAB 165' floor response spectrum(FRS). Especially, the UHS input motion was selected for an evaluation of structural seismic amplification effects, three directional accelerations were measured at three points outside on the cabinet system and also that of the incabinet response amplification, accelerations were measure at two points which were mounted in electrical equipment such as relay. Seismic amplification effect is determined at the outside and inside of a cabinet as input seismic motion, and compared to the results which are calculated by analytical method based on NUREG/CR-5203.

**Keywords** : *electrical cabinet system, Nuclear Power Plant, Motor Control Centers(MCCs), shaking table test, seismic capacity, seismic amplification, incabinet response amplification*

### 1. 서 론

원전설비에 대한 지진취약도 평가는 원전 전체의 확률론적

지진안전성 평가의 수행을 위하여 필수적인 내용이다. 지진취약도 평가를 수행하는 방법은 기존의 지진경험자료를 이용하는 방법, 실험에 의한 방법, 수치해석에 의한 방법 등을 들

† 책임저자, 정회원 · 한국원자력연구소 종합안전평가부 선임연구원  
Tel: 042-868-8790 ; Fax: 042-868-8256  
E-mail: minkyu@kaeri.re.kr

\* 정회원 · 한국원자력연구소 종합안전평가부 책임연구원

· 이 논문에 대한 토론을 2011년 8월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2011년 10월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

수 있다. 가장 정확한 지진취약도 평가는 해당부지에서 실제 발생한 지진에 의한 경험자료를 이용하는 것이라고 할 수 있다. 그러나 원자력발전소가 지진에 의하여 손상을 입은 것은 2007년 일본의 가시와자키 가리와 원전에서 발생한 것이 유일하므로 경험자료를 이용한 취약도 평가는 불가능하다. 그 다음으로 정확한 것은 실험에 의한 방법이지만 원전의 모든 기기를 진동대 실험을 통하여 지진취약도를 산정한 다는 것도 또한 현실적으로 불가능한 일이다. 따라서 실험과 수치해석에 의한 방법을 병행하는 방법이 가장 널리 사용되고 있다. 원전의 지진취약도 평가를 위해서는 모든 기기에 대한 평가가 불가능하므로 동일한 기기에 대한 지진취약도 평가결과를 이용하여 값을 산정할 수 있는 간편화된 방법들이 많이 제시되어 있다(EPRI 1994, EPRI 2002). 국내 고유 원전의 기기 지진취약도 평가는 국내 원전의 지진안전성 확보를 위하여 꼭 수행되어야 할 내용이지만 국내 원전을 대상으로 한 지진취약도 평가실험이 수행된 예는 없다. 이웃 일본은 우리나라에 비하여 비교할 수 없는 수준의 지진이 빈번하게 발생하므로 많은 예산과 인력을 들여서 원전 주요 기기에 대한 지진취약도 평가를 위한 실험을 수행하였고 현재도 수행하고 있다(JNES, 2006). 일본의 JNES에서는 주요기기의 지진취약도 평가를 위하여 막대한 예산을 들여 주요기기에 대한 지진취약도 평가를 수행하고 있고 이 결과의 검증을 위하여 미국의 NRC 및 BNL(Brookhaven National Laboratory)와 공동연구를 수행하고 있다(Kennedy 등, 2010).

본 연구에서는 원자력발전소의 주요 설비중의 하나인 전기설비를 대상으로 지진취약도 재평가를 위한 진동대 실험을 수행하였다. 원자력발전소 내에는 많은 전기설비들이 설치되어 있으며, 이러한 전기설비의 손상은 전기설비 자체의 손상에서 그치는 것이 아니고 발전소 전체의 안전성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 원자력발전소의 확률론적 지진안전성 평가에서는 주요 전기설비에 대한 지진취약도 결과를 활용한 평가를 수행하고 있다. 기존에 국내 원자력발전소에 대한 확률론적 안전성평가에서 사용하고 있는 기기의 지진취약도 평가 결과는 해석적인 방법이나 경험적인 방법에 의해서 구해진 결과를 사용하는 것이 대부분이다. 또는 외국의 실험결과를 바탕으로 지진취약도 결과를 산정하기도 한다. 때문에 이러한 지진취약도 결과들은 그 값이 국내의 기기에 대한 정확한 결과를 반영하고 있다고 보기에는 어려운 측면이 있다. 지진에 의한 손상 경험이 전혀 없는 국내의 여건상 원자력발전소에 사용하고 있는 기기에 대한 지진취약도 평가를 실제로 수행하기에는 어려운 측면이 있다. 그러나 원자력발전소에 대한 수출이 국가적인 관심사항이 된 지금의 현실에서는 우리가 수출하는 모든 기기에 대한 지진취약도 평가를 실험

적으로 수행하여 증명해야 할 필요성이 증대하고 있다고 할 수 있다. 이의 일환으로 본 연구에서는 원자력발전소의 주요 전기설비의 하나인 전기캐비닛을 대상으로 한 진동대 실험을 수행하여 지진취약도 평가를 수행하였다.

평가대상 전기설비로는 480V MCC를 선정하였으며, 진동대 실험을 위하여 NRC 설계지진, 등재해도 스펙트럼에 의한 인공지진 그리고 PAB165'에서의 층응답스펙트럼을 이용한 인공지진의 3가지 지진파를 이용하였다. 설계지진동 수준인 최대지반가속도 0.2g부터 단계적으로 입력수준을 증가시키면서 실험을 수행하였다. 전기캐비닛의 지진응답평가를 위하여 캐비닛 내부와 외부에서의 가속도응답을 측정하여 입력지진동과의 비교를 통하여 증폭효과를 비교하였다. 전기캐비닛의 경우 일반 구조물과는 달리 캐비닛 외부에서의 구조적인 증폭현상보다는 주요 전기기기가 설치되는 내부 지점에서의 지진응답이 더 큰 의미를 갖기 때문이다. 캐비닛에서 관측된 내외부 지진증폭비는 NUREG/CR-5203(Bandyopadhyay 등, 1998)에서 제시하고 있는 방법에 의거하여 비교하였으며, EPRI TR-103959 (1994)의 방법으로 취약도 평가를 수행하여 기존의 확률론적 지진안전성 평가에서 사용하고 있는 지진취약도 결과와 비교하였다.

## 2. 원자력발전소의 전기설비 지진취약도

전기설비의 지진취약도 평가가 일반 타 구조물의 그것과 다른 것은 전기설비의 지진취약도에서는 파괴모드를 구조적인 파괴뿐만 아니라 기능적인 파괴까지 고려하여야 한다는 것이다. 기능적인 파괴는 전기설비에 대표적으로 가장 많이 사용되는 계전기의 접지떨림에 의해서 오작동을 유발할 수 있기 때문에 구조적인 손상과 함께 중요하게 검토되어야 할 부분이며, 또한 구조적인 파괴에 비하여 낮은 수준의 지진력에서 손상이 발생한다는 것 때문에 더욱 주의를 기울여야 한다. 국내 원전에 대한 지진취약도 평가는 현실적으로 경험자료와 실험자료가 부족하기 때문에 미국 등 외국의 자료를 이용하여 결정하는 것이 일반적이다. 국내에서 국내의 설비를 대상으로 한 평가결과가 아니므로 정확한 파괴확률을 제시하고 있다고 하기는 어려운 측면이 있다.

구체적인 원자력발전소 전기설비의 취약도 평가결과를 파악하기 위하여 원자력발전소의 확률론적 안전성평가 보고서를 분석하였다(한국수력원자력 2002). 전체 설비중에서 중요도가 높은 전기설비를 선별하여 표 1에 정리하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 원자력발전소의 확률론적 안전성 평가에서는 모든 전기설비의 취약도 평가결과를 제시하고 있으며 각 전기설비의 위치, 고유진동수, 파손모드 그리고 취약도 결

표 1 울진 5/6 호기 보조설비의 기기 지진취약도 분석결과(일부)

기 기 명	위 치	진동수	파손모드	$A_m$	$\beta_R$	$\beta_U$	HCLPF
Main Control Board	PAB100'6"	25.74	functional	> 1.5	-	-	S/O
			structural	> 1.5	-	-	S/O
Battery Charger	PAB100'6"	19.87	functional	0.90	0.29	0.28	0.35
			structural	1.35	0.29	0.31	0.50
Inverter	PAB100'-6"	13.8	functional	1.37	0.33	0.30	0.49
			structural	> 2.0	-	-	S/O
Regulating Transformer	PAB 100'-6"	9.9	functional	1.30	0.33	0.30	0.46
			structural	> 1.9	-	-	S/O
125V DC Motor Control Center	PAB 100'-6"	8	functional	1.58	0.33	0.29	0.57
			structural	> 2.3	-	-	S/O
4.16kV Switchgear	PAB 100'-6"	6	functional	1.33	0.33	0.29	0.48
			structural	1.99	0.33	0.32	0.68
480V Load Center	PAB 100'-6"	5.5	functional	1.50	0.32	0.29	0.54
			structural	> 2.2	-	-	S/O
480V Motor Control Center	PAB 165'	11	functional	1.33	0.33	0.30	0.47
			structural	1.99	0.33	0.33	0.67
	PAB 125'	11	functional	> 2.1	-	-	S/O
			structural	> 3.1	-	-	S/O
	PAB 100' 6"	11	functional	> 2.8	-	-	S/O
			structural	> 4.3	-	-	S/O
	PAB 77'	11	functional	> 4.1	-	-	S/O
			structural	> 6.2	-	-	S/O
	EDG Bldg 100' 6"	11	functional	> 4.2	-	-	S/O
			structural	> 6.2	-	-	S/O
480V MCC local starter	PAB 125'	18	functional	> 2.1	-	-	S/O
			structural	> 3.2	-	-	S/O
	PAB 100'-6"	18	functional	> 2.5	-	-	S/O
			structural	> 3.8	-	-	S/O
	PAB 77'	18	functional	> 3.7	-	-	S/O
			structural	> 5.6	-	-	S/O
Battery Rack	PAB 125'	23	functional	1.46	0.33	0.31	0.51
			structural	> 2.1	-	-	S/O

과를 정리하고 있다. 표에서의  $A_m$ 은 해당 기기성능의 중앙값을 나타내며,  $\beta_R$ 은 랜덤성에 대한 계수이며,  $\beta_U$ 는 불확실성에 대한 계수이다. 또한 HCLPF는 고신뢰도저파손 확률값을 의미하며, 95% 신뢰도 수준에서 파괴확률이 5%인 값으로 정의된다. 모든 전기설비의 파손에 대하여 구조적 손상 및 기능적 손상으로 구분하여 그 손상확률을 제시하고 있으며, 대부분의 전기설비가 충분한 지진내력을 보유하고 있는 것을 알 수 있지만 일부 전기설비의 경우는 HCLPF값이 0.5이하를 보이는 것을 알 수 있다. 또한 기능적인 손상이 전체적인 손상을 지배하고 있음을 확인할 수 있다.

### 3. 전기캐비닛의 진동대 실험

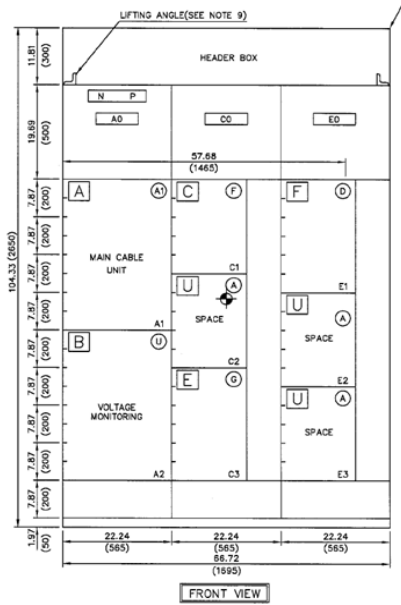
#### 3.1 실험대상

전기설비에 대한 기존의 지진취약도 분석 결과를 바탕으로

하여 실험대상 전기설비로 전기 캐비닛을 선정하였다. 전기 캐비닛이 가장 많이 사용되는 전기설비이기 때문이며, 전기 캐비닛 내부에 설치된 전기장치의 오동작으로 인하여 원자력 발전소의 안전에 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 내진성능 평가시험을 위한 전기설비를 제작하는 것은 현실적으로 불가능하므로 내진검증용으로 제작된 전기설비를 제작사로부터 임대하는 방법을 취하여 실험체를 구성하였으며, 결정된 평가대상 설비는 480V MCC로 결정되었다. 실험대상 480V MCC의 형상과 제원은 그림 1에 도시하였으며, 주요 제원은 표 2에 정리하였다. 본 실험에 사용된 480V MCC는 신고리 1호기 원전에 실제로 들어가는 제품으로 그림 1과 표 2에서 정리한 바와 같이 높이는 2.65m에 무게는 1.35ton의 제원을 가지고 있다. 실험대상 480V MCC의 지진시 파손모드는 기능적 파괴의 경우 계전기 오작동이며 구조적 파괴의 경우 정착부 손상인 것으로 평가되고 있다.



(a) 형상



(b) 도면(단위:mm)

그림 1 480V MCC

표 2 480V MCC의 제원

Dimension(mm)	Width	1,695
	Depth	550
	Height	2,650
Weight(kg)	Transportation	1,350

3.2 입력지진

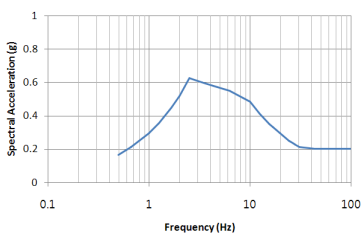
내진성능 평가실험을 위한 입력지진으로 3가지의 지진파를 선정하였다. 세 가지의 지진파는 US NRC Reg. Guide 1.60의 설계응답스펙트럼(US NRC, 1973), 해당부지의 등재해도 스펙트럼(UHS, Uniform Hazard Spectrum) (Choi 등, 2004) 그리고 480V MCC가 설치되어 있는 위치인 PAB 165'에서의 층응답스펙트럼(FRS, Floor Response Spectrum)을 사용하였다. PAB 165'에서의 층응답스펙트럼을 입력지진으로 선택한 것은 표 1에서 보는 바와 같이 480V MCC의 지진취약도 평가 결과에서 유일하게 screen out 수준 아래로 평가되고 있는 위치이기 때문이다. 또한 등재해도 스펙트럼은 원자력발전소 전기설비의 고진동수에 대

한 영향을 분석하기 위하여 선택하였다. 각 입력지진의 가속도 응답스펙트럼은 그림 2에 제시하였다.

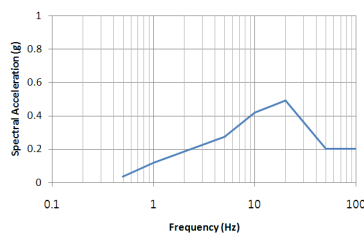
3.3 실험방법

내진성능 평가를 위한 진동대 실험은 각 지진파에 따라 수행하였으며 NRC와 UHS의 경우는 국내 원전의 설계지진 최대가속도 수준인 0.2g에서부터 점차 증가하여 가진하여 실험을 수행하였다. FRS의 경우는 PAB 165' 위치에서의 층응답이 약 0.8g 수준이므로 0.8g에서 시작하여 PGA 수준을 증가시키면서 실험을 수행하였다. 모든 경우에서 최대 가진수준은 PGA 5.0g를 목표로 하였으나 실험 수행시 5.0g가 되기 전에 손상이 발생하여 실제로는 5.0g까지 실험을 수행하지는 못하였다. 연직방향에 대한 실험과 단축 1방향에 대한 실험을 수행하였으나 본 연구에서는 단축수평방향에 대한 실험결과만을 분석하여 결과를 도출하였다.

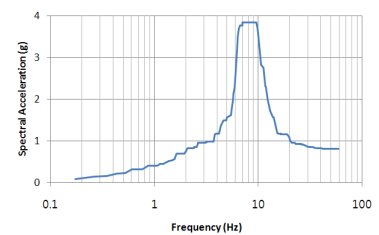
480V MCC의 구조적 응답 및 캐비닛에서의 진동증폭효과를 분석하기 위하여 캐비닛 주요부에 가속도계를 설치하여



(a) NRC 설계스펙트럼

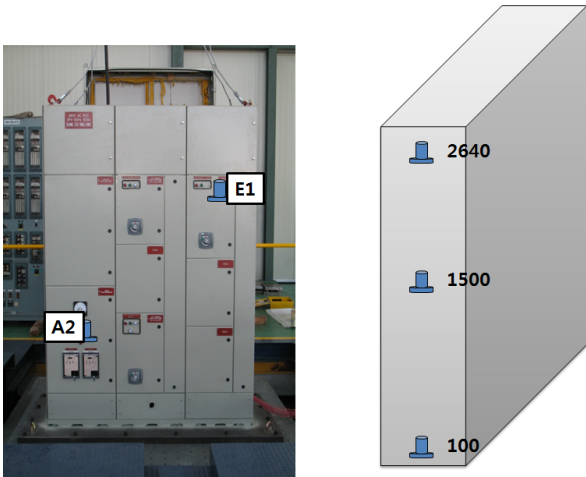


(b) UHS



(c) 울진 PAB 165' FRS

그림 2 내진성능 평가실험을 위한 입력지진 스펙트럼



(a) 측면 가속도계측 (b) 내부 가속도 계측  
 그림 3 480V MCC의 가속도 계측위치 모식도

가속도를 관측하였다. 캐비닛 전체의 거동을 살펴보기 위하여 캐비닛의 측면 판넬의 세지점에서 3방향의 가속도를 관측하였으며 캐비닛 내부의 가속도 증폭을 분석하기 위하여 계전기가 설치되어 있는 일부 위치에서의 가속도를 관측하였다. 캐비닛의 측면에 설치된 가속도계의 위치는 바닥면으로부터 100mm, 1500mm, 2640mm로서 관측결과의 정리시에도 계측 높이에 따라 분석을 수행하였다. 계측위치의 모식도는 그림 3(a)에 제시하였다. 또한 캐비닛 내부의 전기장치들이 설치되는 위치에서의 가속도 증폭효과를 분석하기 위하여 캐비닛 내부 두 개의 지점에서 가속도를 계측하였다. 계측위치는 그림 3(b)에 도시하였으며, 위치는 480V MCC의 고유위치번호를 따라서 A2와 E1으로 하여 정리하였다.

#### 4. 실험결과 분석

##### 4.1 Modal Test 결과 분석

실험대상 480V MCC에 대한 Random 신호를 이용한 고

유진동수 분석을 수행하였다. 분석결과는 그림 4에 도시하였으며 그림에서 보는 바와 같이 캐비닛의 종방향 고유진동수는 72Hz이며 횡방향 고유진동수는 13Hz인 것으로 나타나는 것을 알 수 있다. 표 1에서 제시한 울진 56호기 전기설비의 지진취약도 평가결과에서는 480V MCC의 고유진동수를 11Hz로 평가하고 있으며, 본 실험의 결과와 큰 차이가 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

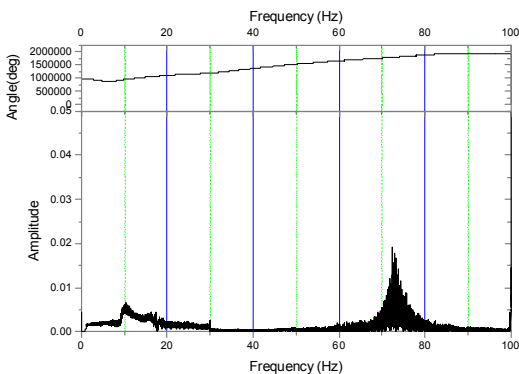
##### 4.2 최대가속도 응답 분석

###### 4.2.1 구조응답 분석

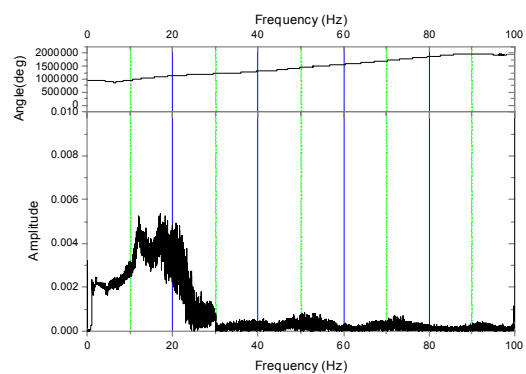
NRC 설계지진과 UHS 지진을 이용한 내진성능 시험시 캐비닛 측면의 가속도를 분석하여 캐비닛 자체의 구조적 증폭특성을 비교하였다. 그림 5와 그림 6에 입력지진과 측면 각 지점에서 계측한 최대가속도를 각 위치에 따라 입력지진 별로 도시하였다. 또한 입력지진대비 각 위치에서의 증폭비를 그림 5와 6에 동시에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 실험대상 캐비닛의 고유진동수 범위와 유사한 진동수 범위의 UHS 지진에서는 캐비닛 상단의 가속도 증폭이 3배 이상 발생하는 것을 알 수 있으며, NRC 지진의 경우 동일 지점에서의 가속도 증폭이 2배 이내인 것으로 나타나는 것을 알 수 있다.

###### 4.2.2 In Cabinet 응답 분석

캐비닛 내부에 실제로 계전기를 비롯한 전기장치들이 설치되어 있는 위치에서의 in Cabinet Response 변화를 살펴보기 위하여 동일한 방법으로 최대가속도 응답과 가속도 증폭비를 비교하여 그림 7과 그림 8에 도시하였다. 캐비닛 본체에서 고주파 지진특성의 UHS에서 더 큰 가속도 증폭이 발생하였던 것과는 반대로 캐비닛 내부에서의 가속도 증폭은 NRC 지진에서 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 UHS 지진의 경우도 캐비닛 본체에서의 가속도 증폭은 약 3

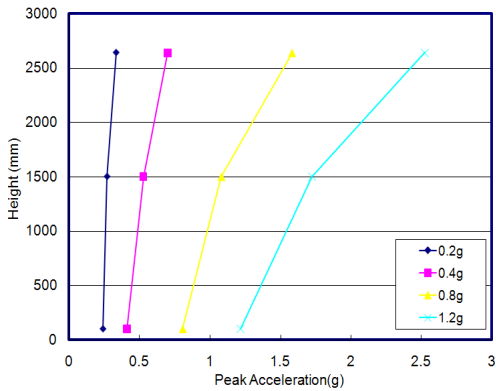


(a) 종방향(장축)

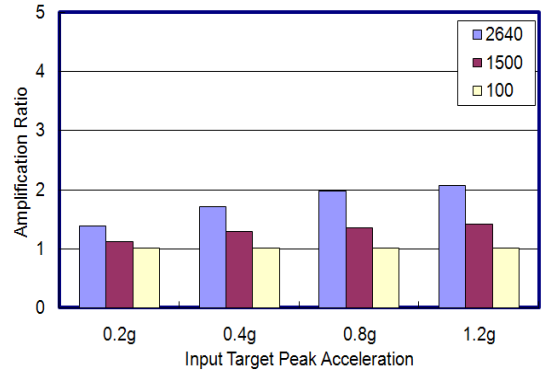


(b) 횡방향(단축)

그림 4 실험대상 캐비닛의 진동특성

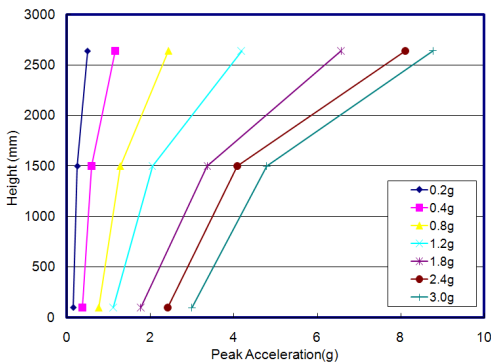


(a) 가속도 응답

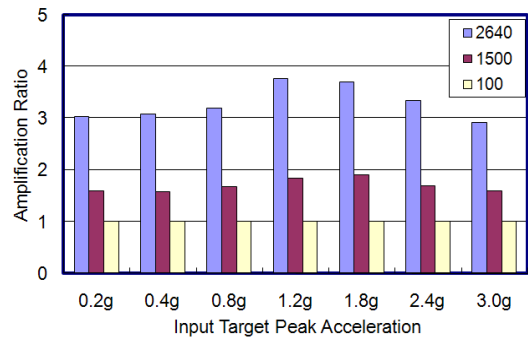


(b) 가속도 증폭비

그림 5 NRC 가속도 응답

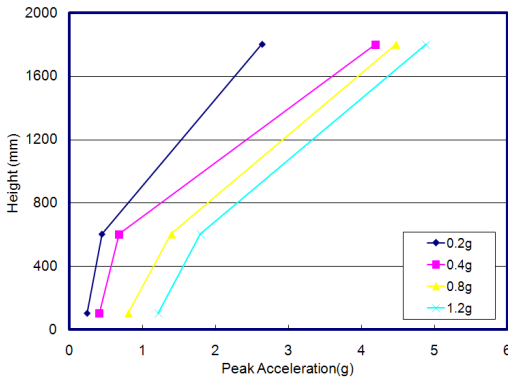


(a) 가속도 응답

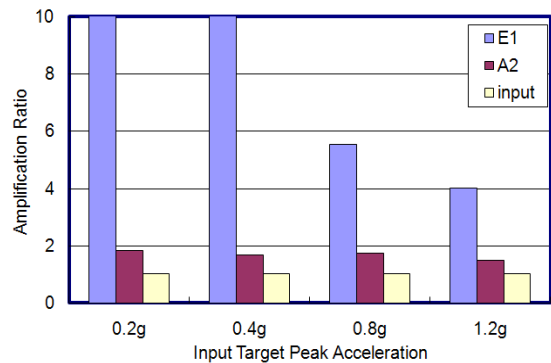


(b) 가속도 증폭비

그림 6 UHS 가속도 응답



(a) 가속도 응답

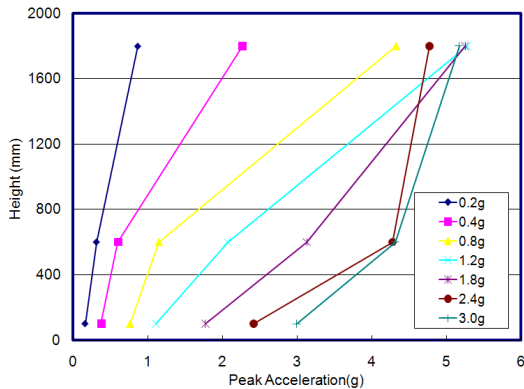


(b) 가속도 증폭비

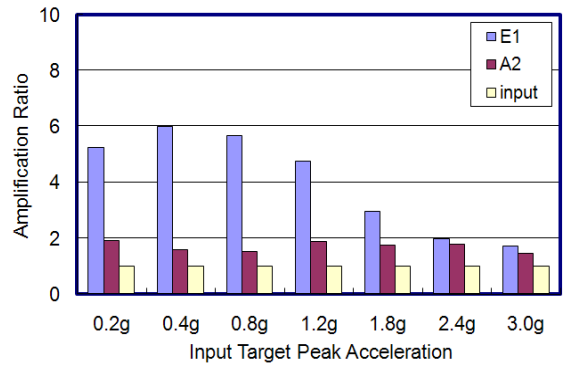
그림 7 NRC ICRS

배 정도 발생하는데 반해서 내부에서의 가속도 증폭은 최대 6배까지 발생하는 것을 알 수 있다. 구조물의 고유진동수 범위와 유사한 진동수 영역에서 탁월진동수대를 나타내는 UHS 지진의 경우 구조물 본체에서는 NRC 지진에 비하여 더 큰 증폭을 유발하지만 캐비닛 내부에서는 오히려 NRC 지진에서의 증폭이 더 크게 발생한다는 것은 이례적인 현상인 것으로 판단된다. 전반적으로는 캐비닛 내부에서의 증폭이 캐비닛 구조물에서의 증폭에 비하여 더 크게 발생하고 있으므로 구조물 자체에서의 가속도 증폭만을 이용한 전기설비

의 설계는 적절하지 않은 것으로 판단된다. 또한 전기장치들이 설치되어 있는 캐비닛 내부 판넬의 고유진동수에 의하여 캐비닛 구조물에서의 증폭과는 다른 양상의 가속도 증폭특성을 보이는 것은 대부분의 전기캐비닛이 매우 복잡한 구조형태로 구성되어 있으므로 실험에 의하지 않고는 그 진동특성을 파악하기 매우 힘들다는 것을 또한 의미한다. 캐비닛 외부에서의 가속도 응답과는 달리 NRC의 경우 가속도 수준이 증가하면서 증폭비가 감소하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 실험에 사용한 MCC 캐비닛이 일체형으로 되어



(a) 가속도 응답



(b) 가속도 증폭비

그림 8 UHS ICRS

있는 것이 아니고 그림 1에서 보는 바와 같이 각 부분이 내부에 조립된 형태로 되어 있으므로 실험이 거듭되면서 조립되어 있는 부분이 헐거워짐으로 인해 오히려 가속도 증폭이 감소하는 현상을 보이는 것으로 판단된다. 이러한 현상은 UHS 지진시에도 유사한 현상을 보이고 있다. 따라서 캐비닛 내부에서의 증폭효과는 가속도 수준이 낮은 경우의 증폭 비율로 생각하는 것이 적절한 것으로 판단된다. 반면 실제 지진시에도 이와 유사한 현상이 발생한다면 오히려 강진시에는 지진에 의한 증폭이 예상보다 작게 발생할 수도 있을 것으로 예측할 수도 있을 것이다. 이러한 현상을 역으로 이용하면 캐비닛 내부 판넬의 강성을 조절해서 캐비닛 내부의 가속도 증폭을 감소시키는 방법을 생각해 볼 수도 있을 것이다.

### 4.3 가속도 증폭비 분석

전기 캐비닛의 지진시 가속도 증폭현상은 캐비닛이 보호하고 있는 많은 전기장치의 안전성에 매우 큰 영향을 미치는 문제이므로 NUREG/CR-5203에서는 이미 기존의 실험결과들을 분석하여 MCC와 Switchgear에 대한 증폭비(Amplification Ratio)를 제시하고 있다. NUREG/CR-5203에서 제시하고 있는 증폭비는 최대가속도를 기준으로 정의한 것이 아니고, 가

속도 응답스펙트럼에서의 진동수 범위를 구분하여 최대값과 중앙값 그리고 고신뢰도 값을 제시하고 있다. 또한 각 진동수 구간별로 최대값과 평균값 그리고 전체구간에서의 최대가속도인 영주기 가속도를 제시하고 있다. NUREG/CR-5203에서 제시하고 있는 증폭비를 표 3에 정리하였다. 표에서 보는 바와 같이 전체적으로 Switchgear의 경우가 MCC의 경우에 비하여 증폭비가 더 크게 나타나고 가속도 증폭비의 변동폭도 MCC의 경우에 비하여 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

본 연구에서의 실험결과를 이용하여 MCC의 증폭비를 NUREG/CR-5203에서 제시한 것과 동일한 방법으로 정리하여 비교해 보았다. 가속도 증폭비는 NRC 지진과 UHS 지진의 실험결과만을 비교하였으며 캐비닛 외부에서 측정한 결과와 내부에서의 측정결과를 모두 비교하였다. 또한 진동대 실험시 수행한 최대가속도 수준별로 모두 비교하여 입력가속도 수준의 변화에 따른 변화를 파악할 수 있도록 하였다. NUREG/CR-5203에서는 진동수 범위를 4~16Hz, 16~40Hz 그리고 40~100Hz로 구분하였으나 본 연구에서는 한계 진동수(cutoff frequency)를 50Hz로 하였으므로 4~16Hz와 16~50Hz 구간만을 대상으로 비교하였다. 표 4~7과 그림 9~12에 지진과 캐비닛의 내외부에 따른 가속도 증폭비를 정리하였다. 표에서는 표 3에서 제시한 NUREG의 증폭비에서

표 3 NUREG/CR-5203의 전기캐비닛 가속도 증폭비

Amplification	Motor Control Center			Switchgear		
	Max.	Median	High Confidence	Max.	Median	High Confidence
Peak						
4-16Hz	7.7	4.8	8.2	20.0	7.4	16.7
16-40Hz	8.3	5.3	9.9	27.3	11.2	31.6
40-100Hz	13.0	5.7	15.8	51.7	16.2	72.1
Average						
4-16Hz	4.0	3.0	4.7	9.0	4.2	8.7
16-40Hz	6.6	3.7	7.7	15.6	7.5	19.3
40-100Hz	9.3	5.0	11.2	28.3	12.3	45.0
Zero Period	4.8	3.3	5.4	16.7	5.8	15.2

표 4 480V MCC의 지진증폭비(캐비닛 외부, NRC 지진)

		0.2g		0.4g		0.8g		1.2g	
		middle	top	middle	top	middle	top	middle	top
Peak	4-16Hz	2.6	4.3	2.3	4.3	2.7	5.0	2.6	5.0
	16-50Hz	2.2	4.0	2.1	4.0	2.4	5.0	2.6	5.3
Average	4-16Hz	1.5	2.1	1.5	2.1	1.6	2.3	1.6	2.4
	16-50Hz	1.4	2.2	1.3	2.1	1.6	2.8	1.6	3.0
ZPA		1.4	2.3	1.3	1.9	1.5	2.5	1.4	2.7

표 5 480V MCC의 지진증폭비(캐비닛 내부, NRC 지진)

		0.2g		0.4g		0.8g		1.2g	
		A2	E1	A2	E1	A2	E1	A2	E1
Peak	4-16Hz	2.1	10.6	2.0	9.5	2.1	9.0	2.2	6.7
	16-50Hz	1.9	14.1	1.8	15.4	2.2	8.7	2.4	6.2
Average	4-16Hz	1.4	4.7	1.4	4.5	1.4	3.8	1.5	3.2
	16-50Hz	1.5	10.6	1.3	10.0	1.6	6.8	1.7	5.2
ZPA		1.9	13.8	1.5	13.4	2.2	7.0	2.2	5.9

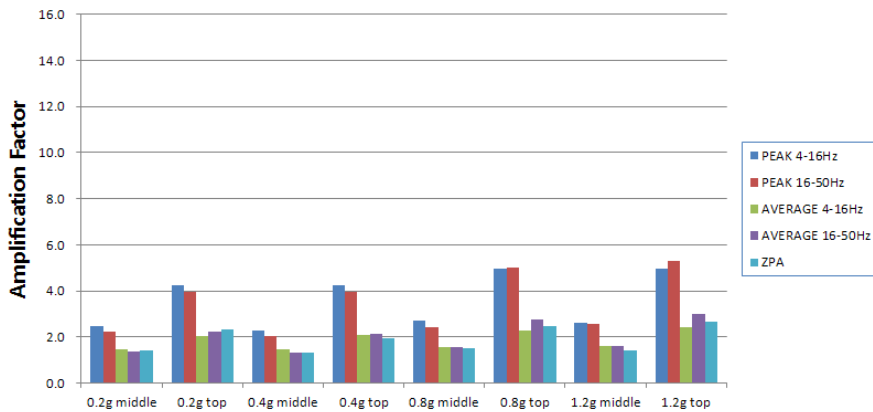


그림 9 480V MCC의 지진증폭비(캐비닛 외부, NRC 지진)

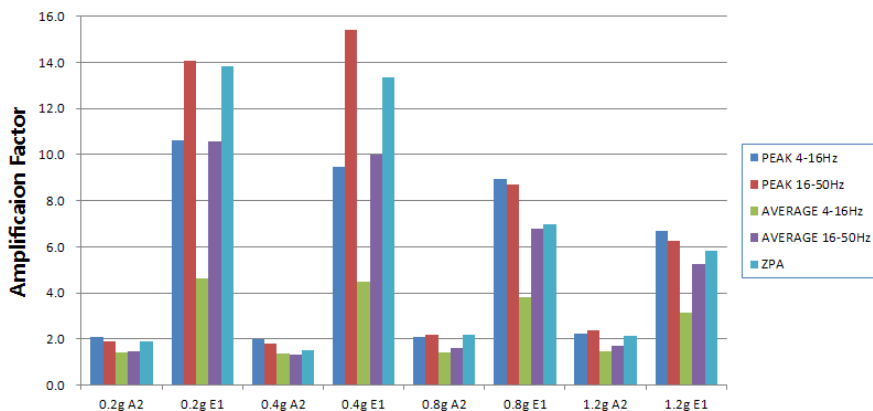


그림 10 480V MCC의 지진증폭비(캐비닛 내부, NRC 지진)

고신뢰도 값으로 정의된 증폭비보다 큰 값을 보이는 증폭비의 경우에 음영으로 구분하여 확인할 수 있도록 하였다.

표 4에서 보는 바와 같이 NRC 지진을 이용한 진동대 실험결과 캐비닛 외부에서 계측된 지진응답은 NUREG에서 제시하고 있는 지진증폭비의 범위를 벗어나지 않는 것을 알 수

있다. 반면 표 5에서 제시하고 있는 캐비닛 내부에서의 가속도 증폭현상을 보면 캐비닛 상단에 위치하고 있는 E1 지점에서는 많은 경우 NUREG에서 제시하고 있는 증폭비를 넘어서고 있는 것을 알 수 있다. 일부 지점에서 NUREG에서 제시한 값의 1.5배를 상회하는 가속도 증폭이 발생하고 있는



표 6 480V MCC의 지진증폭비(캐비닛 외부, UHS 지진)

		0.2g		0.4g		0.8g		1.2g	
		middle	top	middle	top	middle	top	middle	top
PEAK	4-16Hz	4.7	9.3	4.4	8.8	4.1	7.8	4.0	7.5
	16-50Hz	3.1	6.7	2.7	5.9	2.7	5.3	4.7	9.2
AVERAGE	4-16Hz	1.9	3.1	2.0	3.2	2.0	3.3	2.0	3.3
	16-50Hz	1.4	2.7	1.5	2.9	1.7	3.5	2.3	4.6
ZPA		1.5	2.7	1.9	3.9	2.6	5.2	3.8	7.9

표 7 480V MCC의 지진증폭비(캐비닛 내부, UHS 지진)

		0.2g		0.4g		0.8g		1.2g	
		A2	E1	A2	E1	A2	E1	A2	E1
PEAK	4-16Hz	3.9	15.6	3.6	14.0	3.4	12.7	3.2	7.9
	16-50Hz	2.5	11.7	2.2	9.9	3.2	8.4	2.9	9.5
AVERAGE	4-16Hz	1.8	4.7	1.8	4.7	1.8	5.0	1.7	4.2
	16-50Hz	1.2	4.5	1.4	5.0	1.4	6.0	1.8	6.5
ZPA		1.5	4.4	1.8	5.5	3.2	7.5	2.7	8.6

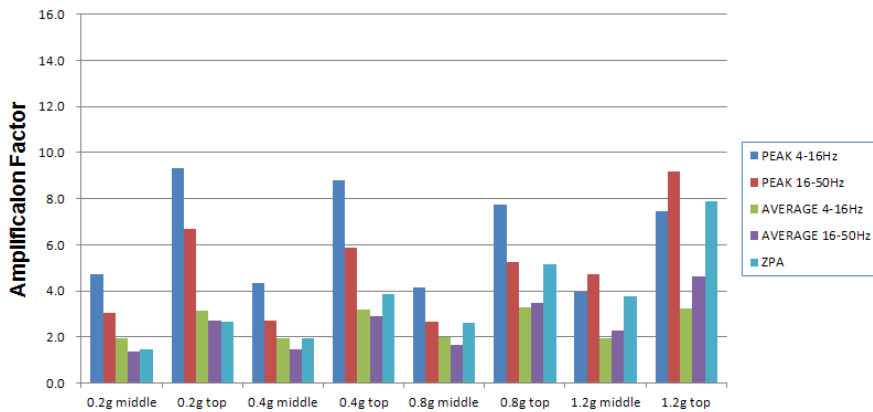


그림 11 480V MCC의 지진증폭비(캐비닛 외부, UHS 지진)

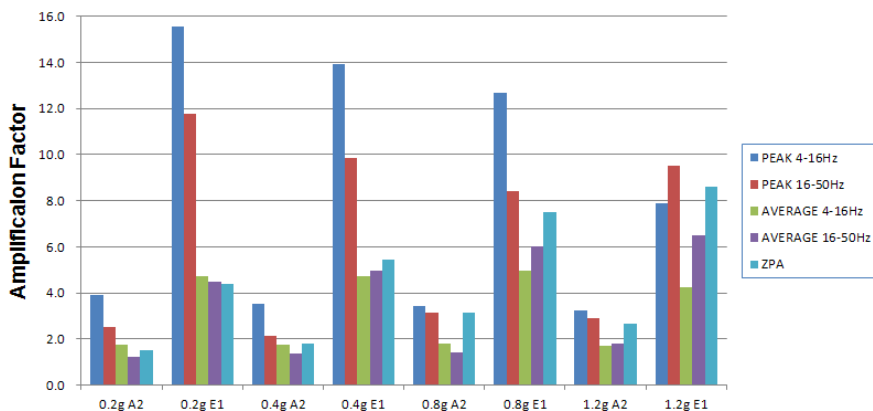


그림 12 480V MCC의 지진증폭비(캐비닛 내부, UHS 지진)

것을 알 수 있다. 이러한 현상은 그림 9와 그림 10을 통해서 더욱 명확하게 확인할 수 있다.

UHS 지진을 이용한 진동대 실험결과를 보면 표 6에서 보는 바와 같이 구조물 외부에서의 응답도 저진동수 구간에서 최대값이 NUREG의 제안값을 넘어서는 것을 알 수 있다.

구조물 자체의 고유진동수가 UHS 입력지진의 탁원진동수 영역에 더 가까이 위치하고 있기 때문에 발생하는 현상인 것으로 판단된다. 반면 표 7에서 제시한 캐비닛 내부에서의 증폭비는 NRC 지진을 이용한 실험에서의 결과와 유사한 수준의 증폭비를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 4.2절에

서 단지 최대가속도 응답만을 분석한 것과 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 특이한 것은 16Hz미만의 진동수 영역에서의 증폭비가 16Hz이상의 영역에서의 증폭비에 비하여 훨씬 크게 나타나고 있는 점이다. 전기설비의 안전성 평가에서는 전기설비를 포함하고 있는 전기캐비닛의 고유진동수에 의한 평가도 중요하지만 전기설비가 설치되어 있는 위치에서의 고유진동수에 의해서 실제 증폭이 민감하게 반응하므로 그에 대한 검토가 필요할 것이다. 또한 계전기 등이 설치되어 있는 위치에 따라서 증폭이 크게 변화하므로 계전기 설치 위치에 대한 검토가 반드시 수행되어야 할 것이다.

### 5. 전기캐비닛의 지진취약도 평가

실험결과를 바탕으로 하여 480V MCC에 대한 지진취약도 평가를 수행하였다. 지진취약도 평가를 위해서 EPRI TR-103959에서 제시하고 있는 방법을 사용하였다. 지진취약도에서 정의하는 고신뢰도 저파손 파괴확률(HCLPF, High Confidence and Low Probability of failure)은 다음의 식 (1)로 구할 수 있다.

$$HCLPF_{50} = A \cdot e^{-1.65(\beta_R + \beta_U)} \quad (1)$$

여기서,  $A$ 는 응답의 중앙값이며,  $\beta_r$ 은 응답의 대수정규 표준편차이고,  $\beta_u$ 는 무작위성을 나타내는 대수정규 표준편차이다. 응답의 중앙값인  $A$ 는 다음의 식 (2), (3), (4)를 이용하여 구할 수 있다.

$$A = \frac{TRS_C}{RRS_C} \cdot F_D \cdot F_{RS} \cdot PGA \quad (2)$$

$$TRS_C = TRS \cdot C_T \cdot C_I \quad (3)$$

$$RRS_C = RRS \cdot C_C \cdot D_R \quad (4)$$

여기서, 각각의 변수는 다음과 같다.

$TRS$  : Equipment Test Response Spectrum Capacity

$RRS$  : Required Response Spectrum

$C_T$  : Clipping Factor for Narrow-banded TRS

$C_I$  : Capacity Increase Factor

$C_C$  : Clipping Factor for Narrow-banded Demand

$D_R$  : Demand Reduction Factor

$F_D$  : Broad Frequency Input Spectrum Device Capacity Factor

$F_{RS}$  : Response factor for Building(Structure)

$PGA$  : Reference Earthquake Peak Ground Acceleration

취약도 계산을 위하여  $TRS$ 와  $RRS$ 는 본 실험에서 도출된 결과를 사용하여 산정하였으며, 기타 변수들은 TR-103959에서 제시되어 있는 값을 사용하였다. 진동대 실험시 NRC 지진을 이용한 실험에서는 최대가속도 기준 1.2g에서 실험이 중단되었으나 그것이 실험체의 파괴라고 판단하기에는 적합하지 않은 것으로 판단되어 취약도 산정을 하지 않았다. UHS 지진을 이용한 실험에서는 최대가속도 3.0g까지 실험을 수행하였으나 구조적인 손상은 발생하지 않았으며, 따라서 3.0g에서의 결과를 기능적 손상이 발생한 것으로 가정하고 취약도 평가를 수행하였다. FRS를 이용한 실험에서는 최대가속도 2.5g에서 캐비닛의 측면 판넬이 손상되는 구조적 손상이 발생하였으므로 이것을 구조적 손상인 것으로 판단하여 취약도 평가를 수행하였다. 최종적인 취약도 평가결과를 정리하면 표 8과 같다. 표 1에서 제시한 울진 원전의 지진취약도 평가결과는 PAB 165'에 설치된 MCC의 경우의 HCLPF값이 기능적손상일 때 0.47g 구조적 손상일 때 0.67g인 것으로 평가되고 있으나 본 연구의 평가결과는 지진파에 따라서 다르지만 기능적 손상인 경우 0.765g, 구조적 손상인 경우 0.746g로 평가되고 있으므로 기존의 확률론적 지진안전성 평가에서 제시하고 있는 HCLPF 값이 다소 보수적으로 평가되어 안전성을 확보하고 있는 것으로 판단된다.

### 6. 결 론

원자력발전소의 확률론적 안전성 평가의 수행을 위하여 필수적인 요소인 기기 지진취약도 평가를 위한 진동대 실험을 수행하였다. 파괴수준까지의 진동대 실험을 수행하였으며, 구조적 파괴와 기능적 파괴를 고려한 분석을 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

실험대상으로 선정된 480V MCC의 내외부 증폭특성을 분석하기 위하여 캐비닛 외부와 전기장치들이 주로 설치되는 내부 판넬에서의 가속도증폭을 계측하였다. 계측결과 캐비닛

표 8 진동대 실험결과를 이용한 480V MCC의 지진취약도 평가 결과

기기명	입력지진	진동수(Hz)	파손모드	Am	$\beta_R$	$\beta_U$	HCLPF
480V MCC	UHS 3.0g	13	functional	1.81	0.26	0.27	0.765
	PAB 165'(FRS 2.5g)	13	Structural	2.16	0.28	0.36	0.746

내부와 외부에서의 가속도 증폭특성이 상이한 것을 발견할 수 있었다. 캐비넷 외부의 경우 전체모드에 의한 가속도 증폭이 발생하는 반면 캐비넷 내부에서는 국소모드에 의한 증폭이 발생하는 것으로 판단되며, 실제 전기설비가 설치되는 부분이 캐비넷 내부이므로 실제 캐비넷에 전기장치를 설치할 때에는 이에 대한 검토가 있어야 할 것으로 판단된다.

NUREG 보고서에서 제안하고 있는 가속도 증폭비와 본 연구에서의 실험결과를 비교한 결과 캐비넷 상단부에서의 가속도 증폭이 NUREG의 제안 범위를 벗어나고 있는 것을 알 수 있었다. 즉 전기장치가 캐비넷 내부 어느 위치에 설치되는지의 여부가 고려대상이 되어야 할 것이다.

기능적, 구조적 파괴를 고려한 캐비넷의 지진취약도 평가 결과는 현재 국내 원자력발전소에서 사용하고 있는 동일 전기캐비넷의 지진취약도값이 비교적 보수적인 범위에 있음을 알게 해 주었다. 그러나 본 결과는 단지 하나의 전기 캐비넷을 대상으로 한 한번의 실험에 의한 결과이므로 국내 원전을 대상으로한 추가적인 실험적 연구가 있어야 할 것으로 판단된다.

**감사의 글**

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국연구재단의 원자력기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

**참 고 문 헌**

한국수력원자력 (2002) 울진 5,6호기 확률론적 안전성 평가 (II단계 연구): 외부사건 분석(최종보고서).  
 Bandyopadhyay, K.K., Hofmayer, C.H., Kassir,

M.K., Pepper, S.E. (1998) *Dynamic Amplification of Electrical Cabinets*, NUREG/CR-5203, Brookhaven National laboratory(BNL), Upton, NewYork.  
 Choi, I.K., Kim, M.K., Choun, Y.S., Seo, J.M. (2004) Development of a Uniform Hazard Spectrum for a Soil Site by Considering the Site Soil Condition, 2004 KNS-spring Conference.  
 Electric Power research Institute(EPRI) (1994) Methodology for Developing Seismic Fragilities, TR-103959, Palo Alto, CA.  
 Electric Power research Institute(EPRI) (2002) Seismic Fragility Application Guide, Palo Alto, CA.  
 Kennedy, R., Nie, J., Hofmayer, C., Ali, S. (2010) Evaluation of JNES Equipment Fragility Tests for Use in Probabilistic Risk Assessments for U.S. Nuclear Power Plants, Division of Engineering Technology, Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC 20555-0001, NRC Job Code N-6076.  
 US NRC (1973) Regulatory Guide 1.60. Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants.  
 日本原子力安全基盤機構(JNES) (2006) 地震に係る確率論的安全評価手法の整備=機器フラジリティ評価 (PWR プラント) =, JNES/SAE06-024.

- 논문접수일 2011년 2월 9일
- 논문심사일  
 1차 2011년 2월 16일  
 2차 2011년 5월 17일
- 게재확정일 2011년 6월 9일