

원자로 보호계통 캐비닛의 동해석과 구조 안전성 평가

이부윤[#], 조정래*, 김원진**, 정동관***, 손재을****

Dynamic Analysis and Structural Safety Evaluation of the Cabinet of a Reactor Safety System

Boo Youn Lee[#], Chung Rae Cho*, Won Jin Kim**, Dong Gwan Jeong*** and Jae Youl Shon****

ABSTRACT

Responses of the cabinet of the reactor safety system under seismic loadings are analyzed, its dynamic characteristics and structural reliability being evaluated. Analyzed natural frequencies are compared with those measured from a resonance test. Structural safety of the cabinet is evaluated in consideration of the required response spectrums of the operation-base and safe-shutdown earthquakes. Transient responses of the cabinet are analyzed with input ground acceleration measured during the seismic test, accelerations being extracted at the locations of the main internal parts. The transient responses are compared with those from the seismic test, favorable results being shown.

Key Words : Reactor Safety System(원자로 보호계통), Transient Response(과도응답), Mode(모드), Response Spectrum(응답 스펙트럼), Operation-Base Earthquake(운전기준지진), Safe-Shutdown Earthquake(안전정지지진)

1. 서론

안전성 확보가 반드시 요구되는 시설 중의 하나인 원자력발전소는 막대한 방사능과 에너지의 위험성으로 인하여 지진에 의한 사고 발생시 심각한 환경오염과 인명피해를 가져 올 수 있다. 따라서 원자력발전소의 1차 계통 설비들은 엄격한 내진 설계가 필요하며, 사고 조건하에서 정상적으로 작동할 수 있도록 설계되어야 한다. 이와 관련하여 원자력 발전소에 사용되는 제어설비나 모니터링 시스템 등

에 관련한 주요 부품 및 기기는 성능에 영향을 미칠 수 있는 자연현상, 가상사고 등의 환경조건에서도 고유의 보호 기능을 수행할 수 있음을 입증하는 내지진, 내환경, 내전자파 기기검증(equipment qualification)이 설계 및 제작 단계에서 요구된다. 미국의 경우 USNRC(U.S. Nuclear Regulatory Commission)와 USAEC(U.S. Atomic Energy Commission)에서 원자로 및 관련 시설에 대한 기준을 규정하고 있고^{1,6}, 기기의 지진에 대한 요건 성능 입증을 위하여 ANSI/IEEE Standard 344-1987⁷의 기

접수일: 2005년 7월 18일; 게재승인일: 2005년 10월 7일
교신저자: 계명대학교 기계자동차공학부
E-mail bylee@kmu.ac.kr Tel. (053) 580-5922
* 계명대학교 대학원 기계공학과
** 계명대학교 기계자동차공학부
*** 두산중공업(주) 기술연구원
**** 씨아이이에스대구(주)

술 규격을 사용하고 있다. 국내에서는 원자력법 시행령⁸에 8 가지 원자력발전소 시설의 내진 설계를 규정하고 있다. 본 연구는 운전변수 및 환경변수가 한계 상황에 이르렀을 때 안전조치를 개시하여 원자력발전소를 안전상태로 유지하기 위한 핵심 제어 설비인 원자로 보호계통(reactor safety system) 캐비닛(cabinet)의 개발을 위한 내지진 기기검증 연구의 일환으로 시작하였다. 원자로 보호계통 캐비닛은 내부에 정밀한 제어기기 및 관련 부품들이 장착되어 있으므로, 지진 발생시에도 정상적인 작동을 보장하는 구조 안전성에 대한 입증의 필요하다. 따라서 캐비닛의 동적 응답을 정확하고 효율적으로 해석하여 동특성을 파악하고 구조 설계에 반영하는 것이 매우 중요하다고 하겠다.

원자력발전 설비의 내진 해석에 관한 연구로서, Lee *et al.*⁹은 유한요소 해석을 이용하여 원자력발전소 공조기의 내진 안전성을 확인하였다. Yang *et al.*¹⁰은 증기터빈 발전기 축계에 대한 내진 해석을 수행하여 지진에 대한 회전체의 성능을 평가하였다. Byeon *et al.*¹¹은 유한요소해석 기법과 모드 해석 이론 그리고 가진 시험을 조합한 내진 검증기법을 제안하고 원자력발전소 주 제어반에 적용하였다. Lee *et al.*¹²은 모드해석과 가진 시험을 조합한 내진 검증 기법을 제안하고 울진 원자력발전소 5, 6호기용 공기정화기에 적용하였다. 본 연구에서 다루고자 하는 원자로 보호계통 캐비닛의 경우에는 그간 국내에서 보호계통의 평가와 신뢰도 분석에 대한 연구가 진행되어 왔으나¹³⁻¹⁵ 내진 해석에 관련된 연구 문헌은 찾아보기 어렵다. 보호계통 캐비닛의 내진 시험에 관한 연구로는 Joe *et al.*¹⁶이 원자력발전소의 지진감시계통의 중앙처리장치를 보관하는 캐비닛의 동특성 분석시험을 수행하여 각종 동특성을 도출한 바 있으나, 본 연구에서 수행하고자 하는 동적 해석 및 구조적 안전성 평가와는 근본적으로 차이가 있다.

본 연구에서는 원자로 보호계통 캐비닛에 대하여 동특성 평가와 지진에 대한 구조 안전성을 평가하기 위한 유한요소해석을 수행하고자 한다. 모드 해석(modal analysis)을 수행하여 동적 특성을 파악하고, 시제품의 시험 결과와 비교하여 유한요소 모델의 타당성을 확인하고자 한다. 또한, 설계 규격으로 주어진 요구응답 스펙트럼(required response spectrum: RRS)을 이용한 응답 스펙트럼 해석(response spectrum analysis)을 수행하여 캐비닛의

안전성을 평가하고자 한다. 또한 내진 시험시에 측정된 진동 테이블(vibration table)의 가속도를 입력으로 사용하여 과도응답 해석(transient response analysis)을 수행하고, 주요 위치의 응답을 추출하여 시제품의 측정 응답과 비교 검토하고자 한다.

2. 유한요소 모델과 내진시험

2.1 유한요소 모델

원자로 보호계통 캐비닛은 구조용강으로 제작된 중량이 0.975 ton인 박스 형태의 구조물로서, 범용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS¹⁷를 사용한 해석을 위해 구성한 주요 부품들의 명칭과 유한요소 모델을 Fig. 1에 나타내었다. 강판으로 이루어진

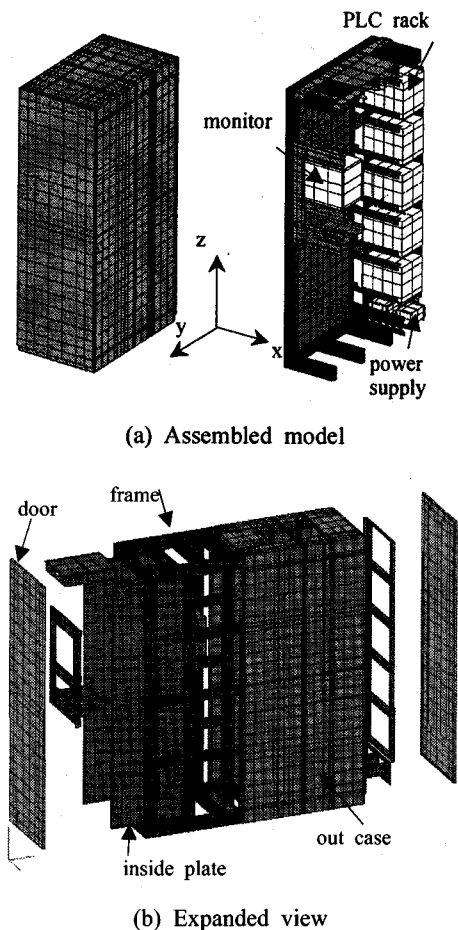


Fig. 1 The finite element model

보호계통 캐비닛의 외판(out case), 프레임(frame), 내판(inside plate), 도어(door) 등은 4절점 선형 쉘 요소를 사용하였고, 내부 장착 부품인 모니터(monitor), PLC 랙(PLC rack), 전원 공급 장치(power supply)는 8절점 선형 솔리드 요소를 사용하였다. 재료 물성치는 일반 구조용강인 SS400의 물성치를 사용하였다. 내부 장착 부품은 부품의 질량과 부피를 고려한 등가 밀도(equivalent density)를 적용하여 솔리드 요소로 모델링 하였다. 캐비닛의 결합부는 용접과 볼트 체결로 이루어진다. 외판과 프레임의 경우 선용접되어 있고, 프레임과 내판은 볼트로 체결되어 있다. 모니터, PLC 랙, 전원 공급 장치 등의 내부 부품들은 프레임에 각각의 브래킷들과 함께 볼트로 체결된다. 도어는 다섯 개의 경첩, 도어락(door lock) 등에 의해 외판과 결합되고, 캐비닛 상부의 팬 브래킷(pan bracket)은 용접과 볼트에 의해서 외판과 체결된다. 이와 같은 실제의 체결 조건을 고려하여 용접부와 볼트 위치의 절점의 모든 자유도를 선형 연계(coupling)시키는 방식으로 각각의 부품들을 결합하였다. 그리고 보호계통 캐비닛이 실제 설치될 때 캐비닛 외판의 최하단부가 바닥에 용접되기 때문에 외판의 가장 아래 부분의 절점들의 모든 자유도를 구속하였다.

2.2 내진 시험

원자로 보호계통 캐비닛의 동적 유한요소 해석 결과를 시제품의 시험 결과와 비교하기 위하여 내진 시험을 실시하였다. 내진 시험에 적용된 기술 규격은 U.S. Atomic Energy Commission Regulatory Guide 1.92³와 ANSI/IEEE Standard 344-1987⁷이다. 지진 조건은 운전기준지진(Operation Base Earthquake: OBE) 조건과 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake: SSE) 조건이다. OBE는 발전소 운전 중 5회 정도 발생 가능성이 있고 발전소가 정상 작동하는 지진의 상한으로, 원자로 보호계통은 OBE 발생시 계속적으로 정상운전이 가능하도록 설계되어야 한다. SSE는 OBE보다 강한 지진으로 발전소 수명동안 1회 정도의 발생 가능성이 있는 지진으로, SSE 발생시 원자로 보호계통이 정상적으로 작동하여 발전소를 정지시킬 수 있도록 설계되어야 한다.

Fig. 2는 캐비닛의 시제품이 내진 시험기(seismic simulator)에 설치된 모습을 나타내는데, 두께 16 mm의 철판을 M16 고장력 볼트를 이용하여

캐비닛의 프레임 하단부를 진동 테이블에 견고하게 고정하고 캐비닛의 전면과 후면의 바닥을 철판에 5 mm 필렛(fillet) 용접하였다. 가속도계의 부착 위치는 총 네 곳으로 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 #1(캐비닛 상부의 좌측 모서리), #2(모니터의 하단부), #3(상부 PLC 랙의 우측), #4(전원 공급 장치의 하단부) 위치이며, 각 위치마다 캐비닛의 좌우방향(x축 방향), 전후방향(y축 방향), 상하방향(z축 방향)으로 1축 가속도계를 세 개씩 설치하였다. 내진 시험기의 부하 능력을 고려하여 1%의 감쇠비를 적용한 요구응답 스펙트럼을 적용하였다.

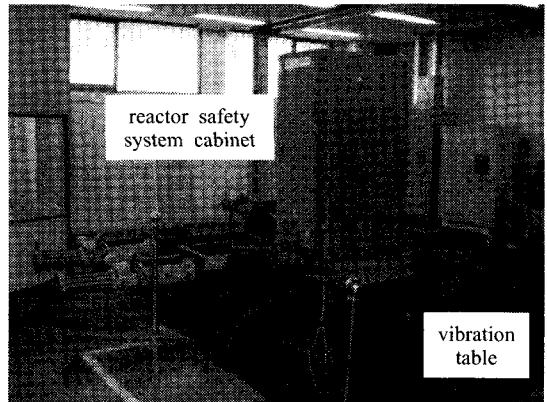


Fig. 2 The photograph of a seismic test

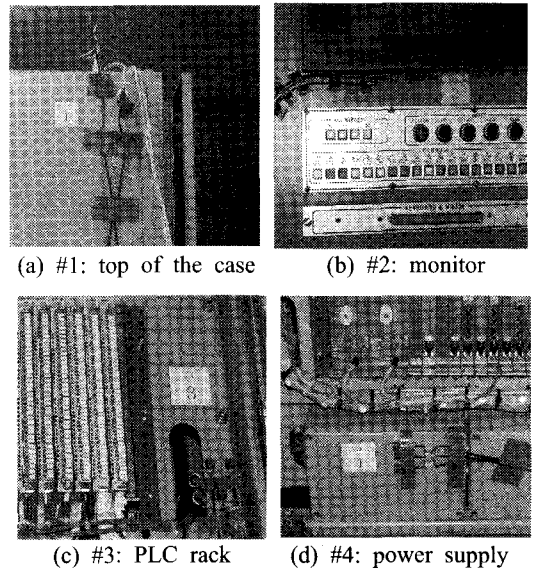


Fig. 3 Location of the accelerometers

그리고 시험 순서는 공진점 검색 시험, 5회의 OBE 시험, 2회의 공진점 검색 시험, 1회의 SSE 시험, 2회의 공진점 검색 시험의 순으로 수행되었으며, 각 단계별로 시험이 끝날 때마다 기기의 구조적 건전성을 확인하기 위한 육안 검사를 실시하였다. 시험시 OBE와 SSE 조건의 1회 시험 시간은 각각 30초 동안이다.

3. 모드 해석과 응답 스펙트럼 해석

3.1 모드 해석 결과

제3.3절에 기술된 응답 스펙트럼 해석에서 요구 응답 스펙트럼의 주파수 범위가 0~100 Hz임을 고려하여 모드 해석에서 이 주파수 범위의 50개의 진동 모드를 추출하였다.

ANSYS를 사용한 모드 해석 결과에서 기본 고유진동수 및 주요 모드 고유진동수(1~7차)를 발췌하여 Table 1에 나타내었다. Fig. 4에 대표적으로 1차, 4차, 6차의 모드형상을 나타내었다. Fig. 4(a)의 1차(21.37 Hz) 모드는 앞쪽 도어의 1차 굽힘변형 모드로서, 도어 가장자리의 경첩과 도어록만 외판과 결합되므로 도어가 다른 부분에 비하여 상대적으로 변형되기 쉬운 것으로 판단된다. 2차(21.49 Hz) 모드는 1차 모드와 유사한 뒤쪽 도어의 1차 굽힘변형 모드이다. 3차 모드(30.98 Hz)는 전원 공급 장치의 국부변형 모드이다. Fig. 4(b)는 4차(37.75 Hz) 모드로서 캐비닛의 좌우방향인 x방향의 전체변형 모드를 나타낸다. 5차(38.38 Hz) 모드 역시 국부변형 모드이다. Fig. 4(c)의 6차(42.87 Hz) 모드는 앞쪽 도어의 2차 굽힘변형 모드를 나타낸다. 7차(42.97 Hz) 모드는 6차 모드와 유사한 뒤쪽 도어의 2차 굽힘변형 모드이다.

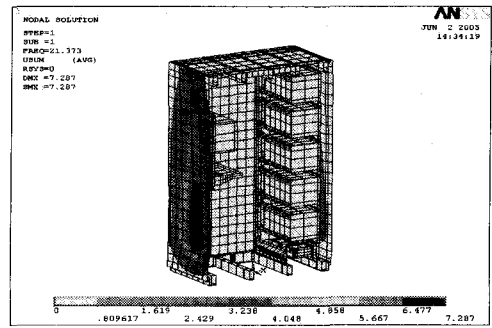
유효 질량의 평가는 내진 해석에 있어서 주어진 입력에 대한 주요한 진동 모드를 분석하는 기준으로 사용되므로, 캐비닛의 진동 모드에 대한 유효 질량을 평가하기 위하여 ANSYS에서 계산된 각 주파수별 x, y, z방향의 유효 질량의 크기를 Fig. 5에 그래프로 나타내었으며 캐비닛의 좌우방향인 x방향의 유효 질량이 4차 모드에서 가장 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 4(b)의 4차 모드에서 좌우방향으로 내부 판넬, 프레임, 외판 등이 전체적으로 변형하는 모습을 볼 수 있다. 4차 모드의 x방향 유효 질량은 전체 질량의 89 %인 0.868 ton으로 계산되어 가장 영향력

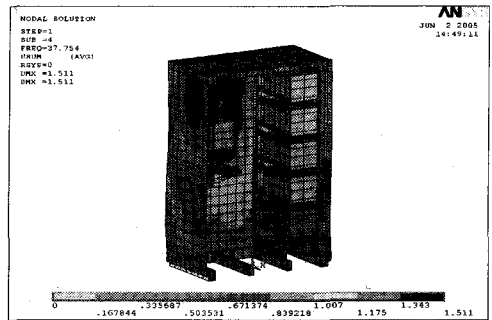
이 큰 모드로 볼 수 있다. 캐비닛의 전후방향인 y방향의 유효 질량이 크게 나타나는 모드는 1차, 2차 모드의 도어의 굽힘변형과 11차, 21차 모드(모니터의 국부변형 모드) 등을 들 수 있다. 캐비닛의 상하방향인 z방향의 경우 바닥이 고정되어 있으므로 50

Table 1 Natural frequencies

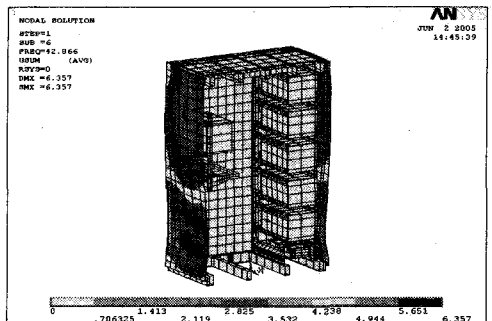
Mode	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th
Freq. (Hz)	21.37	21.49	30.98	37.75	38.38	42.87	42.97



(a) 1st(local mode)



(b) 4th(global mode)



(c) 6th(local mode)

Fig. 4 Mode shapes

Table 2 Sum of effective masses

	Sum of effective masses (ton)	Ratio to total mass (%)
x-direction	0.927	95
y-direction	0.605	62
z-direction	0.016	2

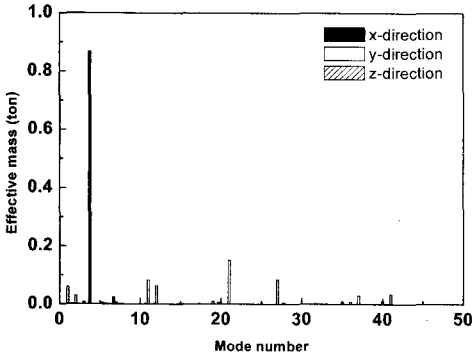


Fig. 5 Effective masses versus modes

차 모드 내에서는 유효 질량이 크게 나타나는 경우가 없는 것으로 나타났다. 이와 같이 ANSYS에서 계산된 각 방향별 유효 질량의 합과 전체 질량에 대한 비율을 Table 2에 나타내었다. 각 방향별 영향을 볼 때 좌우방향인 x방향으로의 유효 질량의 합이 전체 질량의 95%로 지배적이다. 전후방향인 y방향의 유효 질량의 합은 캐비닛 전체 질량의 62%이고, 상하방향인 z방향의 경우 유효 질량의 합은 전체 질량의 2% 정도로 영향력이 작음을 알 수 있다. 이와 같은 각 방향별 유효 질량의 차이는 캐비닛이 단면에 비해 높이가 높고, 전후방향인 y방향 길이보다 좌우방향인 x방향의 길이가 짧으므로 x방향으로 전체적인 굽힘변형이 발생하기 쉬운 것으로 판단된다.

3.2 모드 해석 결과와 공진점 검색시험 결과의 비교

해석 모델을 검증하기 위하여 모드 해석과 공진점 검색 시험 결과에서 구한 고유진동수와 응답 방향을 비교하였다. 모드 해석에서 도출된 결과를 기준으로 캐비닛의 주요 진동 모드 범위인 15~50 Hz의 결과를 비교하였다. Fig. 6은 SSE 조건에서 측정 위치 #1(Fig. 3(a)의 캐비닛 상부의 좌측 모서리)의 시험 주파수응답함수(Frequency Response Function: FRF)를 나타낸 것이다. Table 3은 시험에서 얻은

Fig. 6의 피크(peak) 1~4의 주파수응답함수를 모드 해석에서 얻은 고유진동수와 비교하여 정리한 것이다. Table 3에서 볼 수 있듯이, Fig. 6에서 첫 번째 공진점(20.10 Hz)은 Table 1의 1차 모드 고유진동수(21.37 Hz)와 일치하고 있다. 해석에서 해당 진동 모드는 Fig. 4(a)에 표시된 캐비닛 앞쪽 도어의 y방향으로의 1차 굽힘변형 모드이며, 시험 주파수응답함수에서도 y방향의 변형을 나타냄을 알 수 있다.

시험 결과의 두 번째 공진점(31.10 Hz)은 Table 1의 3차 모드 고유진동수(30.98 Hz)와 일치한다. 해석에서 해당 진동 모드는 전원 공급 장치의 국부변형 모드이며, 시험 결과의 x와 y방향 주파수응답함수에서 모두 해당 진동 모드를 확인할 수 있고, x방향이 y방향보다 상대적으로 큰 변형을 나타냄을 알 수 있다.

시험 결과의 세 번째 공진점(39.70 Hz)은 Table 1의 4차 모드 고유진동수(37.75 Hz)와 일치한다. 해석에서 해당 진동 모드는 Fig. 4(b)에 표시된 캐비

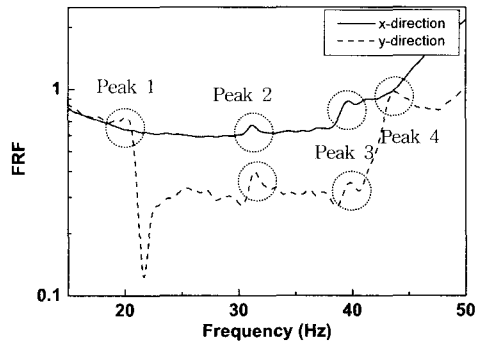


Fig. 6 Frequency response function of measuring location #1 under the resonance test of SSE

Table 3 Comparison of results of modal analysis and resonance test

Peak no.	Analysis (Hz)	Test (Hz)	Mode shape
1	21.37	20.10	1st bending deformation of the door in y-direction
2	30.98	31.10	Local deformation mode of the power supply
3	37.75	39.70	Global deformation mode of x-direction
4	42.87	43.90	2nd bending deformation of the door in y-direction

닛의 좌우방향인 x방향의 전체변형 모드이며, 시험 결과의 x와 y방향 주파수응답함수에서 동시에 해당 진동 모드를 확인할 수 있고 x방향의 변형이 y방향의 변형보다 상대적으로 매우 큼을 알 수 있다.

시험 결과의 네 번째 공진점(43.90 Hz)은 Table 1의 6차 모드 고유진동수(42.87 Hz)와 일치한다. 해석에서 해당 진동 모드는 Fig. 4(c)에 표시된 캐비닛 전후 도어의 2차 굽힘변형 모드(y방향)로서, 시험 결과의 주파수응답함수에서도 y방향의 공진 피크만 확인된다.

이상에서와 같이 해석과 시험 결과의 주요 진동 모드 4개의 고유진동수와 변형 방향이 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 유한요소 해석 모델이 실제 원자로 보호계통 캐비닛의 동적 특성을 잘 표현하는 것으로 판단된다.

3.3 응답 스펙트럼 해석

원자로 보호계통 캐비닛의 응답 스펙트럼 해석을 수행하고, 최대 변위와 응력을 계산하여 구조적 안전성을 평가하였다.

응답 스펙트럼 해석을 수행하기 위해 요구응답 스펙트럼은 OBE와 SSE의 두 가지 지진조건을 고려하였으며, Fig. 7은 OBE와 SSE 조건의 요구응답 스펙트럼을 나타낸다. 해석에서 요구응답 스펙트럼은 x, y, z축의 세 방향으로 동시에 적용하였고, 5%의 감쇠비를 적용하였다. 응답 스펙트럼 해석에도 ANSYS를 사용하였다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 OBE 조건의 요구응답 스펙트럼(최대 가속도: 8.5 g)은 SSE 조건(최대 가속도: 12 g)보다 완화된 조건이다. 따라서 OBE 조건의 해석에서 계산된 변위와 응력은 SSE 조건보다 낮은 수준이므로 OBE 조건의 해석 결과는 수록하지 않았다.

응답 스펙트럼 해석을 통하여 계산된 SSE 조건에서의 캐비닛 전체 모델의 변위 크기의 분포를 Fig. 8(a)에 나타내었는데, 최대 변위는 5.9 mm로 앞쪽 도어에서 발생하였다. 설계 기준에서는 캐비닛 최상단의 최대 변위가 제한 조건인 1 inch(25.4 mm)를 초과하지 말아야 한다. Fig. 8(b)는 SSE 조건에 대한 캐비닛 상부면의 변위 크기의 분포를 나타내는데, 최대 변위가 0.4 mm로서 캐비닛 최상단의 변위 제한 조건인 1 inch(25.4 mm)를 만족한다.

Fig. 9(a)에 SSE 조건의 응답 스펙트럼 해석을 통하여 계산된 캐비닛 전체 모델의 von Mises 등가

응력 분포를 나타내었다. 최대 von Mises 등가응력은 Fig. 9(b)에 나타낸 바와 같이 193.5 MPa로 앞쪽 도어 테두리와 접하는 외판의 아래 부분에서 발생하며, 소재의 항복강도 235 MPa의 82% 수준으로 안전한 것으로 판단된다.

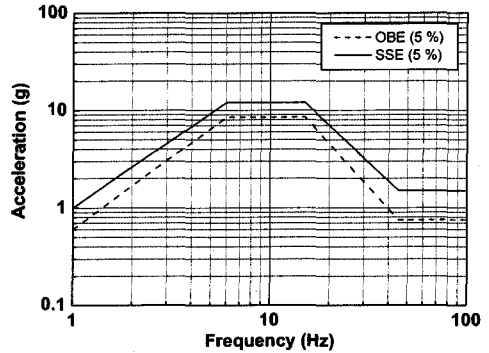
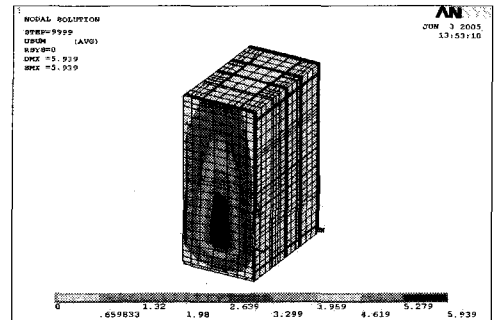
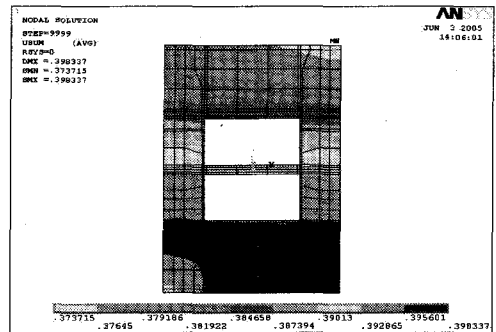


Fig. 7 Required response spectrum

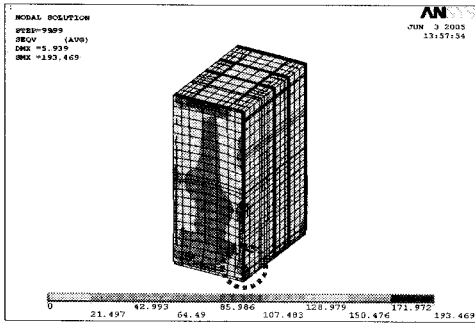


(a) Whole view

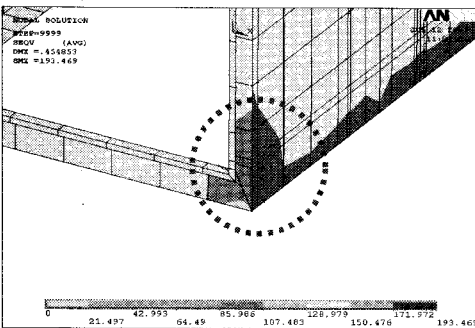


(b) Top face of the case

Fig. 8 Distribution of displacement under SSE



(a) Whole view



(b) Location of the maximum

Fig. 9 Distribution of von Mises stress under SSE

4. 과도응답 해석

4.1 과도응답 해석 결과

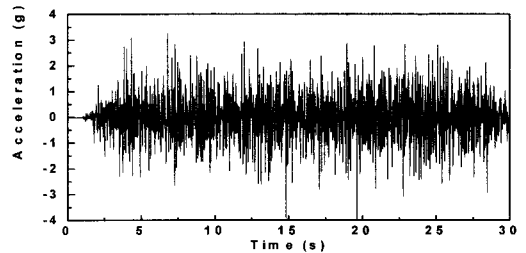
ANSYS를 사용하여 과도응답 해석을 수행하고, 원자로 보호계통 캐비닛 주요 위치에서 시간에 따른 응답 이력을 계산하였다.

과도응답 해석을 위한 입력 가속도는 캐비닛의 시제품의 내진 시험시에 진동 테이블에서 측정된 x, y, z방향의 지진 가속도를 동시에 가하였다. Fig. 10은 대표적인 SSE 조건의 입력 가속도 이력을 나타내며, Table 4는 OBE와 SSE 조건에 대한 각 방향별 가속도의 최대값과 RMS(Root Mean Square)값을 나타낸다.

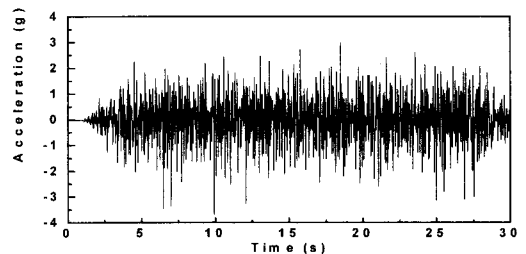
내진 시험에서 측정된 가속도는 시간길이가 32초이고 샘플링시간(sampling time)은 0.001초로 데이터의 개수는 31,000개이다. 신호해석 편리를 위하여 100 Hz 이하의 신호만 필터링하고 전체 시간 영역에서 10개 간격으로 1개씩의 가속도를 추출하여 0.01초 간격의 3,100개를 사용하였다. 그리고 해석

에서 감쇠는 시험 결과를 잘 근사하는 2.8%(20 Hz 공진 기준)의 비례감쇠를 사용하였다.

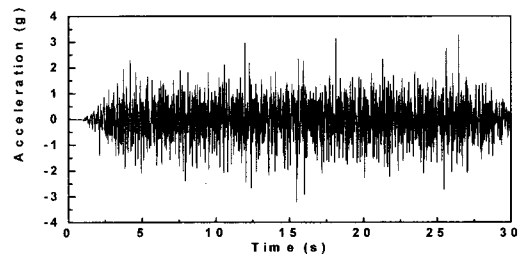
가속도 응답을 추출한 위치는 Fig. 3에 나타난 내진 시험시의 가속도 측정 위치와 동일하다. 측정 위치 #1~#4에서의 상대 변위와 상대 가속도의 최대값과 RMS값을 Table 5와 Table 6에 각각 나타내었다. 전체적으로 SSE 조건에서의 최대 응답이 OBE 조건보다 큰 것을 알 수 있다.



(a) x-direction



(b) y-direction



(c) z-direction

Fig. 10 Time history of acceleration measured at the vibration table under SSE

Table 4 Maximum and RMS values of acceleration measured at the vibration table (unit: g)

Value	OBE			SSE		
	x	y	z	x	y	z
Maximum	3.47	2.22	2.27	3.95	3.69	3.27
RMS	0.61	0.54	0.47	0.80	0.74	0.67

Table 5 Maximum and RMS values of relative displacements (unit: mm)

	Value	OBE			SSE		
		x	y	z	x	y	z
#1	Max.	0.94	0.08	0.03	1.03	0.14	0.04
	RMS	0.20	0.02	0.01	0.23	0.03	0.01
#2	Max.	1.00	0.18	0.02	1.05	0.29	0.03
	RMS	0.20	0.05	0.01	0.24	0.06	0.01
#3	Max.	0.90	0.07	0.03	0.98	0.12	0.04
	RMS	0.19	0.02	0.01	0.22	0.02	0.01
#4	Max.	0.48	0.97	0.01	0.52	1.27	0.02
	RMS	0.10	0.24	0.00	0.12	0.29	0.00

Table 6 Maximum and RMS values of relative accelerations (unit: g)

	Value	OBE			SSE		
		x	y	z	x	y	z
#1	Max.	0.72	0.05	0.02	0.81	0.08	0.02
	RMS	0.17	0.01	0.00	0.19	0.02	0.01
#2	Max.	0.74	0.12	0.01	0.83	0.18	0.02
	RMS	0.18	0.03	0.00	0.19	0.04	0.00
#3	Max.	0.68	0.05	0.03	0.76	0.07	0.03
	RMS	0.16	0.01	0.01	0.18	0.01	0.01
#4	Max.	0.35	0.80	0.01	0.40	0.90	0.01
	RMS	0.08	0.21	0.00	0.09	0.25	0.00

방향별로 살펴보면 OBE와 SSE 조건에 상관없이 x방향의 경우에 있어서는 상대 가속도와 변위 위치 #2(모니터)에서 최대값을 갖지만, RMS값을 보면 위치 #4(전원 공급 장치)를 제외한 나머지 위치에서 비슷한 것을 알 수 있다. y방향의 경우에 있어서는 위치 #4에서 최대값을 갖는데, 그 이유는 전원 공급 장치의 체결 방법에 기인한 것으로 판단된다. 직육면체 형태의 부품인 전원 공급 장치가 y 방향으로 한쪽 면만 고정되어 있어 모멘트가 크게 발생하여 다른 부품들에 비하여 상대적으로 변위가 크게 발생하는 것으로 판단된다. z방향의 경우에는 상대 가속도와 변위가 각 위치에서 비슷한 수준이며, x, y방향에 비해 상대적으로 작게 나타났다.

유한요소해석 프로그램에서 과도응답 해석을 수행하여 얻어지는 응답은 입력 가속도에 대한 상대 변위와 상대 가속도이다. 본 연구에서는 지반 가속도가 가해질 때 캐비닛의 주요 위치에서 발생하는 절대 가속도를 구하고자 한다. 따라서 절대 가속도를 구하기 위하여 ANSYS를 사용하여 구한

상대 가속도에 지반 가속도를 더하여 절대 가속도를 계산하였으며, Fig. 11은 이와 같이 구한 절대 가속도 중의 한 가지로서 SSE 조건의 위치 #2의 절대 가속도 이력을 나타낸다.

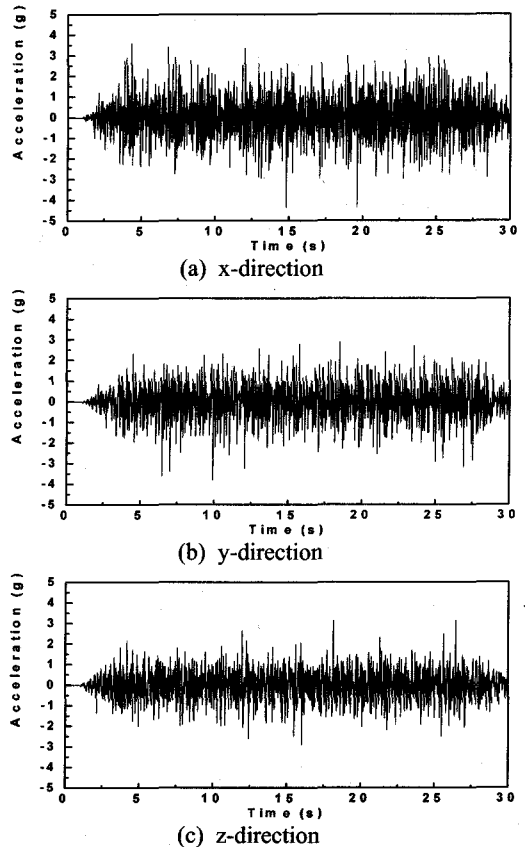


Fig. 11 Time history of absolute acceleration at location #2 under SSE

Table 7 Maximum and RMS values of absolute accelerations (unit: g)

	Value	OBE			SSE		
		x	y	z	x	y	z
#1	Max.	3.80	2.13	1.88	4.35	3.74	3.15
	RMS	0.70	0.55	0.47	0.90	0.75	0.67
#2	Max.	3.81	2.17	1.88	4.36	3.82	3.16
	RMS	0.70	0.56	0.47	0.91	0.77	0.67
#3	Max.	3.78	2.13	1.89	4.33	3.73	3.15
	RMS	0.69	0.55	0.47	0.90	0.75	0.67
#4	Max.	3.65	2.58	1.89	4.14	4.11	3.16
	RMS	0.65	0.64	0.47	0.85	0.86	0.67

만일 캐비닛 전체가 아닌 특정한 한 부품(#2: 모니터, #3: PLC 랙, #4: 전원 공급 장치)만의 내진 시험을 하려면 이러한 방법으로 구한 각 위치의 절대 가속도를 입력 가속도로 이용할 수 있다. 측정 위치 #1~#4에서의 절대 가속도의 최대값과 RMS값을 Table 7에 나타내었으며, 이를 Table 4의 입력 가속도와 비교해 보면 x방향은 지반 가속도에 비해 절대 가속도 레벨(RMS 기준)이 10~15 % 증폭되는 것을 알 수 있다. 그리고 y, z방향은 #1~#3 위치에서 캐비닛의 강성이 매우 강하므로 입력 가속도에 대한 절대 가속도의 증폭이 거의 없으며, #4 위치에서 y방향의 경우에 12 %가 증폭된 것은 전원 공급 장치의 국부진동 모드에 의한 것으로 판단된다.

4.2 과도응답 해석 결과와 내진 시험 결과의 비교

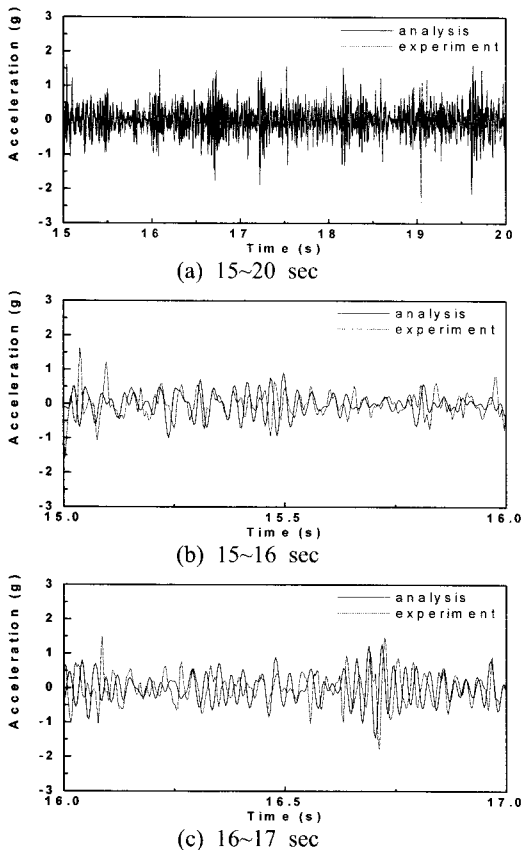


Fig. 12 Comparison of relative accelerations in the x-direction at location #1 under SSE

진동 응답의 수준이 정상 상태에 도달되었다고 판단되는 15~20초 사이의 데이터를 대상으로 과도 응답 해석과 내진 시험 결과를 비교하였다. 시험 결과와 비교하기 위하여 해석에서는 15~20초 사이를 0.003초의 시간 간격으로 1,667개의 입력 가속도 값을 선정하여 다시 해석을 수행하였다. ANSYS 해석과 시험 결과의 비교는 캐비닛의 동특성을 포함하고 있는 상대 가속도를 대상으로 하였다. 시험에서 측정된 가속도는 모두 절대 가속도이므로 응답 가속도에서 입력 가속도를 제거하여 상대 응답 가속도를 계산하였다. 이와 같이 측정된 절대 가속도에서 상대 가속도를 도출할 경우에는 측정시에 모든 가속도 센서가 정확한 하나의 트리거(trigger)에 의해 센서 간의 시간 지연이 없어야 한다. 해석과 시험 결과의 신호처리에 있어서는 해석에서 구해진 주요 모드를 포함하는 시간 응답을 시험과 비교하기 위해 주요 모드가 포함된 15~100 Hz 범위의 신호만을 대역통과 필터(band-pass filter)를 사용하여 추출하였다.

상대 가속도의 비교는 보호계통 캐비닛의 동적 특성을 상대적으로 잘 표현할 수 있고 응답 가속도 레벨이 큰 측정 위치 #1(캐비닛 상부 모서리)의 x방향을 대상으로 하였다. Fig. 12에는 측정 위치 #1에서의 x방향 상대 가속도의 해석과 시험 결과를 비교하여 나타내었다. Fig. 12(a)에서 보면 해석과 시험 결과의 전반적인 가속도 레벨이 비슷하다. 여기서 RMS값을 구해보면 해석에서는 0.398 g이고 시험에서는 0.412 g로서, 해석은 시험 결과의 96 % 수준으로 비슷한 레벨을 갖는 것으로 판단할 수 있다. 그리고 Fig. 12(b)와 (c)에 보인 바와 같이 15~16초 구간과 16~17초 구간을 확대해 보면 해석에서 구해진 상대 가속도가 시험값을 어느 정도 잘 예측함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구를 통하여 원자로 보호계통 캐비닛의 동특성을 해석하고 구조 안전성을 평가하였으며, 주요 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

모드 해석을 통하여 캐비닛의 동적 특성인 고유진동수와 모드 형상을 계산하고, 유효 질량을 검토하여 캐비닛의 동적 거동에 크게 영향을 미치는 고유진동수를 분석하였다. 그리고 모드 해석 결과를 시제품의 공진점 검색 시험 결과와 비교하여 서로

일치하는 4개의 모드를 확인함으로써 해석 모델의 타당성을 입증하였다.

OBE와 SSE의 지진 조건에 대한 응답 스펙트럼 해석을 통하여 캐비닛의 구조적 안전성을 평가하였다. 캐비닛에서 발생한 최대 응력은 항복강도의 82% 수준으로 안전하게 나타났으며, 캐비닛 최상단의 최대 변위도 변위 제한 조건을 만족하는 것으로 나타났다.

내진 시험 조건에 대한 과도응답 해석을 통하여 캐비닛의 주요 부위의 가속도 등의 응답 이력을 산출하였다. 해석 결과에서 상대 가속도는 좌우방향인 x방향의 증폭이 다른 방향보다 크게 나타났고, y, z방향의 경우는 캐비닛의 강성이 강하여 상대 가속도의 증폭이 거의 없는 것으로 나타났다. 과도응답 해석에서 구한 상대 가속도가 내진 시험에서 얻은 측정값을 어느 정도 잘 예측하는 것으로 나타났다. 또한 도출된 주요 부품 장착 위치의 절대 가속도 이력은 해당 부품만을 대상으로 하여 내진 시험을 수행할 경우에 입력 가속도로 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- Regulatory Guide 1.60, "Design Response Spectra for Seismic design of Nuclear Power plants," U.S. Atomic Energy Commission, 1973.
- Regulatory Guide 1.61, "Damping Values for Seismic Design of Nuclear Power Plants," U.S. Atomic Energy Commission, 1973.
- Regulatory Guide 1.92, "Combination of Modes and Spatial Components in Seismic Response Analysis," U.S. Atomic Energy Commission, 1974.
- Regulatory Guide 1.29, "Seismic Design Classification," U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1978.
- Regulatory Guide 1.222, "Development of Floor Design Response Spectra for Seismic Design of Floor-Supported Equipment or Components," U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1978.
- Regulatory Guide 1.100, "Seismic Qualification of Electric and mechanical Equipment for Nuclear Power Plants," U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1988.
- ANSI/IEEE STD 344-1987, "IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations," The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 1987.
- The Enforcement Ordinance of Law of Atomic Energy, 1997.
- Lee, J. K., Kim, J. Y., Chung, P. J. and Chung, J. H., "Seismic Qualification of the Air Conditioning Equipment for Nuclear Power Plant," Journal of KSNVE, Vol. 9, No. 3, pp. 535-543, 1999.
- Yang, B. S. and Kim, Y. H., "Seismic Response Analysis of Steam Turbine-Generator Rotor System(1st Report, In Case of Rotor-Bearing System only)," Journal of KSNVE, Vol. 9, No. 3, pp. 554-564, 1999.
- Byeon, H. S. and Lee, J. K., "Seismic Qualification of the Main Control Board for Nuclear Power Plant," Journal of KSNVE, Vol. 12, No. 11, pp. 856-863, 2002.
- Lee, J. K., Kim, J. Y. and Rhee, H. N., "Seismic Qualification of the Air Cleaning Units for Nuclear Power Plants Ulchin 5&6," Transactions of the KSME A, Vol. 26, No. 7, pp. 1376-1383, 2002.
- Lee, J. H. and Chang, S. H., "Improvement of Pressurizer PROV System through Micro-Computer and PRA," Journal of the Korean Nuclear Society, Vol. 17, No. 4, pp. 302-317, 1985.
- Auh, G. S., Hwang, D. H. and Kim, S. H., "A Steady-State Margin Comparison between Analog and Digital Protection Systems," Journal of the Korean Nuclear Society, Vol. 22, No. 1, pp. 45-58, 1990.
- Mok, J. I. and Seong, P. H., "Optimal Inspection Periods of Safety System of Wolsung Nuclear Power Plant Unit 1 with Human Error Consideration," Journal of the Korean Nuclear Society, Vol. 26, No. 1, pp. 9-19, 1994.
- Joe, Y. H. and Park, H. G., "Modal Testing of Seismic Monitoring System Cabinet of Nuclear Power Plant," Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 19, No. 2, pp. 449-457, 1999.
- ANSYS, "User's Manual," Revision 6.2, ANSYS Inc., 2002.