

원자력 발전소 캐비닛구조물의 내진보강

Seismic Retrofitting of Cabinet Structures in Nuclear Power Plant

이 계 희* 김 재 민** 김 상 윤***
Lee, Gye Hee Kim, Jae Min Kim, Sang Yun

국문요약

본 논문에서는 오래된 원자력발전소의 내진검증과 관련한 USI A-46 문제의 해결에 사용될 수 있는 캐비닛의 내진보강방안에 대해 연구하였다. 캐비닛 구조물의 동적거동특성을 파악하기 위하여 3종류의 모델링을 수행하였고 그 결과를 비교하였다. 또한 ICERS(In Cabinet Reponse Spectrum)의 저감을 위하여 1) 보강프레임, 2) 감쇠기 설치, 3) 동조질량감쇠기 등 세 가지 내진보강방안에 대하여 구조물의 응답을 산정하였다. 해석결과, 가새보강 및 감쇠기를 설치하는 보강방법에서는 보강전의 구조물보다 큰 ICERS가 얻어지는 경우가 발생해 보강시 많은 주의가 요구된다. 동조질량감쇠기의 사용은 좋은 제진효과를 보였으나 실구조물과 정확한 진동특성을 반영한 모델의 작성이 중요한 것으로 판단되었다.

주요어 : USIA-46, 캐비닛 구조물, ICERS감소, 내진보강

ABSTRACT

This paper presents the methodologies for seismic retrofitting of cabinet equipment which can be employed to resolve the USI A-46 problem related to seismic qualification of old nuclear power plant. To obtain accurate dynamic characteristics of a cabinet structure, three types of structural modeling are introduced and their free vibration modes are compared. Three types of seismic retrofitting scenarios, such as 1) the installation of bracing, 2) installation of damper, 3) installation of tuned mass damper(TMD), are established and evaluated for the decrease of ICERS(In Cabinet Reponse Spectrum). In the cases of 1) & 2), since the retrofitted structures show larger ICERS than that of the original structure, the careful considerations are need in the application of these methods. Though the installation of TMD shows the best retrofitting result, the construction of analysis model that indicate the accurate vibration modes of real structure is estimated the essential step of this retrofitting method.

Key words : USIA-46, cabinet structure, reduction of ICERS, seismic retrofitting

1. 서 론

우리나라에 건설되어 있는 원자력발전소(이하 원전)는 주로 미국의 기술기준을 따르고 있으며 이들 기술기준을 따른 미국의 상업용 원전은 60년대 초반부터 운영되어 왔다. 따라서 현재 운영되고 있는 원전들간에는 약 40년 간의 시대차가 있으며 원전을 구성하고 있는 기기들에 대한 내진검증 및 설계기술도 많은 차이를 가지고 있다. 그러므로 기존의 기술을 바탕으로 설계 및 검증된 기 설치 기기들의 내진 안전성확보를 위하여 구형원전에 설치된 기기의 내진성능을 재평가할 필요성이 대두되었다. 미국에서는 70년대부터 이러한 기기들의 내진안전성 재평가가 원전의 안전성과 관련한 중요한 문제로 인식되어 80년에 이 문제를 USI A-46이란 문서로 공식적으로 제기하였다.^{(1),(2)}

이러한 기 설치 기기들에 대한 내진안전성평가과제의 해결을 위하여 미국의 원전사업자들에 의해 내진검증사용자그룹(SQUG, Seismic Qualification Utility Group)이 결성되었고 이들이 제시한 방법론이 GIP(Generic Implementation Procedure)

에 정리되었다.⁽³⁾ 이러한 방법으로 미국에서는 2000년 USI A-46에 대한 문제가 종결되었으나 우리나라에서는 고리 1,2 호기와 월성 1호기를 대상으로 이 문제를 해결하는 것이 시급한 실정이다.^{(4),(5)}

GIP에서는 기기정착부가 건전한 경우 대부분의 기기의 구조적 내진성능은 큰 문제가 없다는 가정을 하고 있으나 이를 만족시키지 못하는 기기의 경우 예외기기(outlier)로 분리하여 따로 해결방안을 모색하도록 하고 있다. 그러나 계전기(relay)의 경우 그 파괴양상이 다른 구조물과는 달리 계전기 자체의 구조적 파괴가 아니라 지진시 계전기에 가해지는 지진력에 의하여 발생하는 접점떨림에 의한 기능적 파괴(Functional failure)가 문제가 된다. 따라서 계전기의 내진 안전성을 확보하기 위해서는 계전기가 설치되는 캐비닛 구조물의 내진응답을 감소시켜야 하고 이는 곧 ICERS(In-Cabinet Response Spectra)의 감소를 의미한다. 이는 캐비닛 구조물의 내진안전성의 만족은 물론 캐비닛 자체의 내진응답의 감소가 필요하다는 것을 의미한다. 따라서 이러한 캐비닛 구조물의 내진응답을 감소시키기 위해서 캐비닛 기기의 내진보강방안에 관한 연구가 수행되었다.⁽⁶⁾

본 연구에서는 캐비닛 구조물의 동적 성능을 나타내기 위하여 여러 가지 해석모델을 평가하고 작성된 모델에 대하여 각종 내진보강의 효과에 대하여 연구하였다. 연구의 대상인 내진보강법은 1) 보강프레임의 설치, 2) 감쇠기의 설치, 3)

* 포항공과대학교 해양시스템공학부 전임강사, 공학박사
(대표전자 : lghlsk@mmu.ac.kr)

** 정회원 · 여수대학교 건설환경공학부 조교수, 공학박사

*** 한국원자력안전기술원 책임연구원, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2003년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2003. 4. 8 / 심사종료일 : 2003. 7. 2)

동조질량감쇠기의 설치의 세 가지이며 이의보강효과에 대하여 평가하였다.

2. 캐비닛 구조물의 동적거동

2.1 캐비닛 구조물의 모델링

일반적으로 계전기를 포함하는 캐비닛의 크기는 제작회사나 시기에 따라 매우 다양하다. 따라서 본 연구에서는 캐비닛의 제원을 평균적인 값으로 하였다. 해석대상인 캐비닛구조물의 제원은 그림 1과 같다. 해석모델의 작성에 있어서 구조물 전면부의 문은 질량으로만 고려하고 강성을 갖지 않는 것으로 가정하였다. 그리고 후면부는 열려있는 것으로 가정하였다. 기기의 중량을 포함한 캐비닛 전체의 중량은 680.4kgf(1500lb)로 가정하였다. 모델링 방법에 따른 거동특성을 살펴보기 위하여 다음과 같은 세 종류의 모델에 대하여 동적거동을 파악하였다.

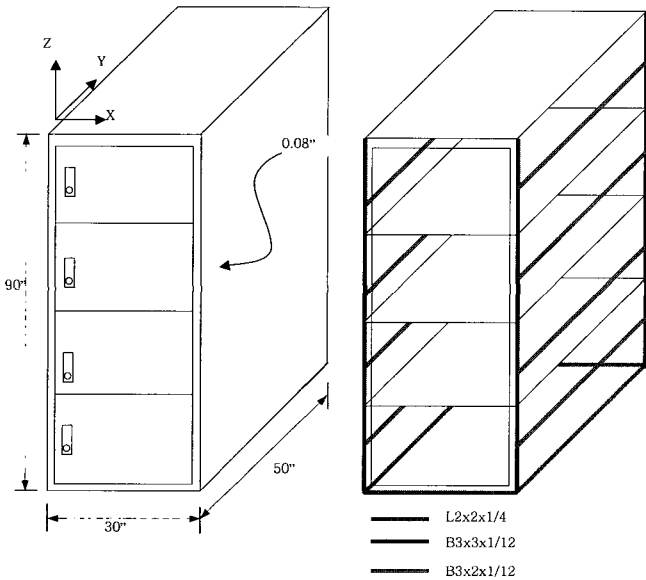


그림 1 해석에 사용된 캐비닛 구조물의 제원

2.1.1 Stick 모델

Stick 모델에서는 구조물의 강도가 적절하게 모델링된 보요소가 구조물의 거동을 나타낸다. 질량은 보요소를 따라 분포시키거나 절점에 집중질량으로 나타낸다. 이 모델에서는 휨에 의한 거동이 지배적이며 전단이나 비틀림, 평판의 평면 외 진동 등 국부적인 진동모드에 대한 거동을 나타내기 어렵다. 그러나 구조물의 거동이 명확하고 수치적인 효율성에 유리한 점이 있다. Stick 모델에 사용된 보요소의 단면계수는 측벽부와 수직보강재의 위치와 단면적을 고려하여 계산하였다. 표 1은 Stick 모델에 사용된 보요소의 단면제원을 나타내고 있다.

2.1.2 FE 모델

유한요소(Finite Element) 모델에서 구조물의 강도는 구조물의 형상을 적절히 나타내는 요소강도들의 조합으로 나타

표 1 Stick 모델에 사용된 보요소의 단면 제원

단면계수		절점	질량(kg)
단면적	57.24 cm ²		
전후방향	2차모멘트	1.732 × 10 ⁵ cm ⁴	1 22.84
	전단면적	51.86 cm ²	2 16.31
			3 184.46
좌우방향	2차모멘트	229.05 cm ⁴	4 16.31
	전단면적	24.98 cm ²	5 184.46
			6 16.31
			7 184.46
			8 16.31
			9 38.92

낸다. FE 모델에서는 많은 수의 자유도로 인하여 구조물의 전반적인 거동보다는 국부적인 거동이 많이 나타나므로 충분한 수의 고유진동모드를 사용하여야 한다. 본 연구에서 구성된 FE 모델은 각종 패널의 거동을 잘 나타낼 수 있도록 평판요소를 이용하여 모델링하였으며 보강재는 보요소로 모델링하였다. FE 모델의 작성에 있어서 질량은 구조물 전체에 분포되어 있다고 가정하였다. 그러나 문의 질량을 힌지부분에 집중시킨 경우와 측벽부에 분포시킨 경우에 대하여 각각 모델링하였다. 각 층의 선반은 설치된 기기의 질량을 분포시켜 모델링하였다.

2.1.3 Frame 모델

Stick 모델은 캐비닛 구조물의 구조특성을 지나치게 단순화하는 측면이 있다. 특히 횡방향 거동으로는 전단변형이 주로 발생하므로 보요소의 휨거동만으로 이를 나타내기에는 어려움이 있다. FE 모델의 경우, 정확한 거동을 나타낸다고 하지만 모델의 크기가 크고 국부적인 모드가 많이 발생하므로 구조물의 전반적인 거동을 파악하기에 어려운 점이 있다. 이러한 두 모델의 중간적인 접근법으로 Frame 모델을 사용하였다. 이 모델은 좌우측의 측면패널과 선반 부분을 적절한 보요소로 구성한 모델로 전단거동을 충분히 나타낼 수 있을 정도의 자유도를 가지지만 FE 모델에 비해 적은 수의 자유도로 구성되어 해석에 유리하다. Frame 모델에서 사용된 보요소의 강성자료는 표 2에 제시하였다. 각 보의 강성에는 보강재의 강성이 포함되어 있다. 구조물과 기기의 중량은 각 보요소의 단위중량으로 치환하여 고려하였다.

표 2 Frame 모델에 사용된 보요소의 구조제원

단면적		측면보	선반
		39.97 cm ²	30.81 cm ²
2차모멘트	전후방향	8.65 × 10 ⁴ cm ⁴	5.20 × 10 ⁴ cm ⁴
	좌우방향	114.52 cm ⁴	3.68 cm ⁴
단위중량		0.014 kgf/cm ³	0.059 kgf/cm ³

2.2 해석모델의 동특성분석

해석모델의 동특성을 분석하기 위하여 고유치 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 각 모델별 고유치의 수는 Stick 모

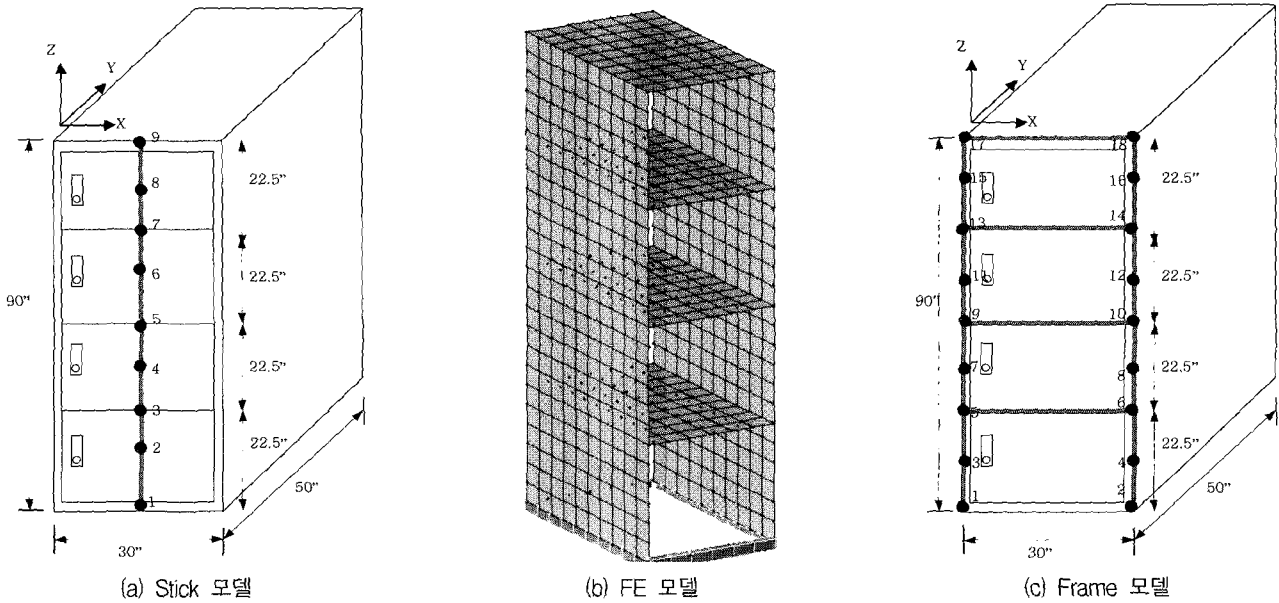


그림 2 각 해석모델

델은 5개, Frame 모델은 40개, FE 모델은 100개이다. 각 모델의 고유치는 각 방향의 질량참여도가 90% 이상이 되도록 결정하였지만 FE 모델의 경우에는 전후방향과 수직방향의 많은 국부모드 때문에 이 방향들에 대해서는 이를 만족시키지 못하였다. 그러나 고유진동수가 50Hz 이하인 진동모드는 모두 고려하였으므로 동적해석의 정확도에는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

고유치 해석결과 얻어진 각 해석모델의 1차고유진동모드는 모두 X방향 외팔보 변형이었으며 각각의 고유진동수는 표 3과 같다. Frame 모델과 FE모델의 경우에는 유사한 고유진동수를 보여주나 Stick 모델의 경우에는 다른 두 모델과는 오차가 있는 진동수를 보여주고 있다. 이는 실제구조물의 거동은 평면변형의 가정을 따르지 않는데 반해 Stick 모델은 평면변형의 가정에 따라 모델링되었기 때문인 것으로 판단된다. Frame 모델의 경우는 이러한 전단변형의 효과가 선반을 나타내는 보요소의 변형으로 나타날 수 있어 Stick 모델과 같은 오차를 보이지 않는다. Frame 모델에서 Stick 모델의 작성시 사용한 것과 동일한 구속조건을 주면 Stick 모델과 동일한 진동수를 나타낸다. 따라서 캐비닛과 같이 전단변형이 주로 발생하는 구조물의 Stick 모델은 지나치게 단순화한 모델링 방식이다. 특히 Stick 모델은 구조물의 고유진동수를 지나치게 크게 평가할 수 있으므로 응답스펙트럼의 동적 증폭효과를 제대로 나타낼 수 없어서 비안전측인 모델링이라고 판단된다.

위에서 사용된 FE 모델의 응답에서 문의 중량을 편심되게 집중시킨 모델에서 얻어진 고유진동수는 4.80Hz로 편심을

표 3 작성된 각 모델의 1차고유진동수

	고유진동수(Hz)	비고
Stick 모델	4.22	
FE 모델	6.20(4.8)	괄호안은 편심효과 고려
Frame 모델	6.09	

을 고려하지 않은 모델에 비해 낮은 값을 보여준다. 이때 발생하는 진동모드는 좌우방향의 외팔보거동과 비틀림 거동의 조합으로 나타난다. 따라서 편심하중을 무시할 수 없는 구조물에 대해서는 FE 모델에 의해서 정확한 구조물의 고유진동수를 파악하는 것이 바람직하다고 판단된다.

2.3 캐비닛응답스펙트럼의 작성

GIP대상 계전기는 원전 내의 건물에 설치된 캐비닛상에 설치되어 있으므로 원전건물슬래브에서의 응답이 모델링된 캐비닛의 기초부에 입력되어야 한다. 본 연구에서는 원전내에 설치된 캐비닛내에서의 응답스펙트럼(ICRS)의 작성을 위하여 참고문헌 (6)에 예시된 고리 1호기의 해석모델을 이용하였다. 이 모델은 보요소와 집중질량, 스프링으로 이루어진 모델로 차폐건물, 격납용기, 내부구조물, 지반 등을 포함하고 있다.

고리 1호기의 설계에 사용되었던 지반입력운동은 현재 참조가 어렵고 또한 이 지반운동은 현재의 심사기준에 적합하지 않은 입력운동이기 때문에, 본 연구에서는 울진 3,4호기의 설계⁽⁷⁾에 사용되었던 지반입력운동을 사용하여 해석을 수행하였다. 원전건물의 해석모델의 X방향에 대해 EW방향의 지반입력운동을 작용시켰으며 해석모델의 Y, Z방향에 NS, VT 방향의 지반입력운동을 각각 작용시켰다. 캐비닛구조물의 해석을 위한 입력운동은 위의 해석결과 얻어진 내부구조물 EL 21.1m에서의 응답을 사용하였다.

Frame 모델과 FE 모델의 거동특성을 비교하기 위하여 FE 모델에 있어서 문의 질량효과에 대한 편심효과가 발생하도록 한 모델과 발생하지 않도록 측벽부에 분산시킨 모델을 사용하였다. 해석결과에 따른 응답은 4층선반에서 비교하였다(그림 3 참조). 응답스펙트럼을 분석하여 볼 때 Frame 모델이 보수적인 응답을 보이나 편심질량을 고려하지 않는 경우 두 모델 모두 동일한 진동수에서 증폭이 발생한다. 편심

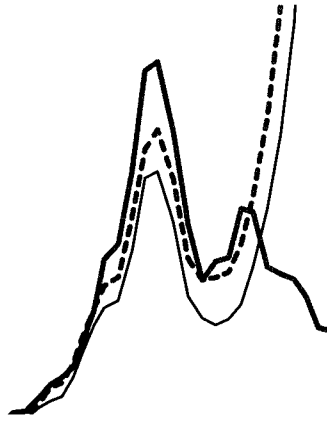


그림 3 FE모델과 Frame 모델의 응답비교(4th Floor, X방향, 5% 감쇠비)

질량을 고려할 경우에는 응답이 전반적으로 줄어들고 Frame 모델에서 나타나는 두 번째 첨두(6Hz)부근의 응답이 작게 나타나는 것을 볼 수 있다. 위에서 사용한 두 해석모델의 차이는 질량의 편심효과의 고려유무에만 있으므로 이의 고려 유무가 해석모델의 거동에 큰 영향을 미치는 것으로 말할 수 있다.

3. 캐비닛 구조물의 내진보강

계전기가 설치된 캐비닛 구조물의 응답이 계전기의 GERS (Generic Equipment Ruggedness Spectra)를 초과하게 되면 그 캐비닛은 예외기기가 되어 내진보강이나 교체가 필요하다. 본 연구에서는 이러한 예외기기에 대한 내진보강방안으로 1) 보강프레임의 설치, 2) 감쇠기의 설치 3) 동조질량감쇠기 (Tuned mass damper, TMD)의 설치와 같은 세 가지 방안을 검토하였다. 캐비닛구조물의 내진보강해석은 Frame 모델을 적용하여 수행되었다. 해석에서 얻은 응답은 4층 선반의 X방향 응답으로 하였으며 구조물의 모드감쇠비는 2%로 가정하였다.

3.1 내진보강설계

3.1.1 보강프레임의 설치

구조물의 횡방향 강성을 증가시키는 방법 중 가새형식의 보강프레임을 설치하는 보강방안을 검토하였다. 가새의 설치는 하단부에서 시작하여 총 3단까지 설치한 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 가새는 지름 1.25cm(0.5 in)의 환봉으로 가정하였으며 양 단부는 힌지인 경계조건을 부여하였다. 다음 그림 4는 보강프레임을 설치하는 경우의 보강안을 나타낸 것이다.

3.1.2 감쇠기의 설치

감쇠기의 설치에 변형에너지를 열에너지로 소산시켜 구조물의 응답을 줄일 수 있는 방안이다. 일반적인 프레임 보강은 변형에너지가 모두 구조물에 작용하기 때문에 보강부에 큰 응력이나 변형이 발생할 가능성이 있는 반면 감쇠기를 설치한 경우에는 상대적으로 작은 힘이 작용하기 때문에 감쇠기가 연결되는 부분에 대한 추가 보강량이 감소하고 변위가 줄어드는 장점이 있다. 본 연구에서는 캐비닛에 가새형태로 설치하는 안과 상부에 설치하는 두 가지 안에 대하여 검토하였다.

비선형 점성감쇠기의 비선형 힘-변형관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_D(t) = \begin{cases} c\dot{u}^\alpha & \text{when } \dot{u} \geq 0 \\ -c(-\dot{u})^\alpha & \text{when } \dot{u} < 0 \end{cases} \quad (1)$$

여기서 f_D 는 감쇠력이고 \dot{u} 는 변형률, c 는 감쇠계수, α 는 감쇠지수로 일반적으로 실용적인 범위는 0.2에서 2.0사이이다. 감쇠기의 설계는 식 (1)에 의하여 감쇠기의 감쇠계수와 최대

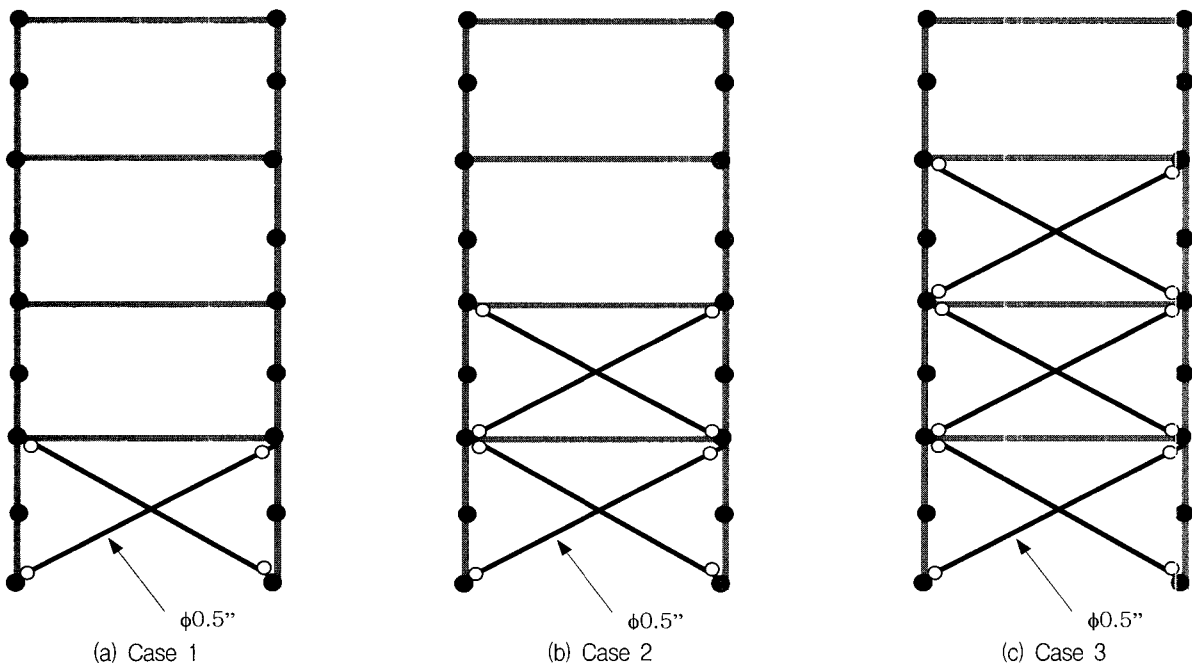


그림 4 캐비닛 구조물의 가새 보강

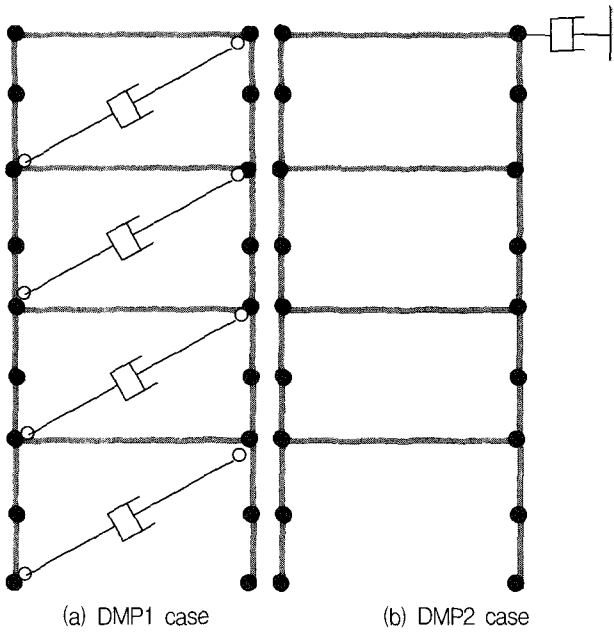


그림 5 캐비닛 구조물의 감쇠기 설치

감쇠력을 정하는 것이다. 일반적으로 감쇠계수의 값이 1보다 작은 경우에는 그렇지 않은 경우에 비하여 작은 속도에서 감쇠력이 크고 큰 속도에 대해서는 상대적으로 작은 감쇠값을 보이게 된다. 따라서 작은 속도에서도 충분한 감쇠력을 얻을 수 있고 큰 속도에 대해서는 큰 감쇠력에 의해서 발생하는 보강부의 응력집중등의 문제를 피할 수 있기 때문에 감쇠계수를 1보다 작은 값을 쓰는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 감쇠지수를 $\alpha=0.5$ 를 사용하여 해석을 수행하였다. 감쇠기의 감쇠계수 및 강성은 오일감쇠기를 설치하는 것으로 가정하여 산정하였다.

최대속도 발생시 작용하는 최대 감쇠력을 슬래브 중량의 a 배로 가정하면 가새형태의 감쇠기(damper1)의 감쇠계수는 다음과 같다.

$$C_{dmp1} = \frac{aW_{slab}}{\Delta v_{max}^\alpha} \quad (2)$$

여기서 Δv_{max} 는 감쇠기의 지지점 사이의 최대 속도차이고 W_{slab} 는 슬래브의 무게이다.

마찬가지로 상부 감쇠기(damper2)의 감쇠계수도 최대 감쇠력은 캐비닛 중량의 a 배로 가정하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_{dmp2} = \frac{aW_c}{v_{max}^\alpha} \quad (3)$$

여기서 v_{max} 는 꼭대기에서의 최대 속도이고 W_c 는 캐비닛의 무게이다. 본 연구에서는 a 값이 15인 경우(Large)와 반복해석을 통하여 얻어진 최적의 감쇠값(Small)을 선정하여 해석을 수행하였다. 감쇠기의 강성은 시판되는 감쇠기의 강성을 고려하여 결정하였다.⁽⁹⁾ 이와 같이 설계된 감쇠기의 특성값은 표 4에 나타내었다.

표 4 설계된 감쇠기들의 특성

	Small Damper (DMP1S, DMP2S)	Large Damper (DMP1L, DMP2L)	TMD
강성	1500 kgf/cm	3.47×10^4 kgf/cm	7.07 kgf/cm
감쇠값	5.36 kgf · sec/cm	116.43 kgf · sec/cm	6%

감쇠기의 강성과 감쇠값을 연결하는 방법은 직렬연결인 Maxwell방법과 병렬연결인 Kelvin방법이 있다. 본 해석에 사용된 감쇠기는 오일감쇠기로 가정하여 Maxwell방법을 이용하여 구성하였다. 감쇠기를 고려한 시간이력 해석은 경계비선형해석이므로 이러한 기능을 제공하는 프로그램인 SAP2000/Nonlinear⁽¹⁰⁾을 이용하여 해석을 수행하였다.

3.1.3 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper)의 설치

동조질량감쇠기는 주구조물과 유사한 진동수를 가진 작은 질량을 주구조물의 자유도 방향으로 설치하여 주구조물의 진동에너지 대신 발산하게 하는 장치이다. 이에 대한 응용은 1940년대부터 기계구조물에 적용되어 왔으며 현재는 교량이나 건축구조물들에 제진에 널리 쓰이고 있다. 동조질량감쇠기에 대한 이론은 2자유도를 가진 시스템에 의해서 유도되는데 다자유도 구조물의 경우에는 목표하는 모드에 대하여 동조질량감쇠기의 진동수를 설계하여야 한다. 따라서 다자유도 구조물에서 동조질량감쇠기설계는 특정한 모드에 대하여 TMD의 질량, 감쇠, 강성 값을 설정하는 것이다. 1차 모드에 대한 캐비닛의 질량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_1 = \frac{W}{g} \times \Gamma_1 \quad (4)$$

여기서 m_1 은 1차모드의 참여질량, W 는 구조물의 총중량, g 는 중력가속도, Γ_1 은 질량참여계수이다. 1차모드에 기여하는 강도는 고유진동수와 질량과의 관계에서 얻을 수 있다.

$$k_1 = m_1 \omega_1^2 = m_1 (2f_1 \pi)^2 \quad (5)$$

여기서 k_1 은 1차모드의 강도, f_1 은 고유진동수, ω_1 은 각진동수이다. 동조질량감쇠기의 질량비를 μ 라하면 동조질량감쇠기에 설치되는 질량은 다음과 같다.

$$m_2 = \mu m_1 \quad (6)$$

동조질량감쇠기의 이론에서 최적의 감쇠효과를 보이는 진동수는 주구조물의 진동수의 $1/(1+\mu)$ 이므로 동조질량감쇠기에 설치되는 스프링의 강도는 다음과 같다.⁽¹¹⁾

$$k_2 = \omega_2^2 m_2 = \left(\frac{\omega_1}{1+\mu} \right)^2 m_2 \quad (7)$$

이 때 동조질량감쇠기의 최적감쇠비는 다음과 같다.⁽¹¹⁾

$$\xi = \sqrt{\frac{2\mu}{8(1+\mu)^3}} \quad (8)$$

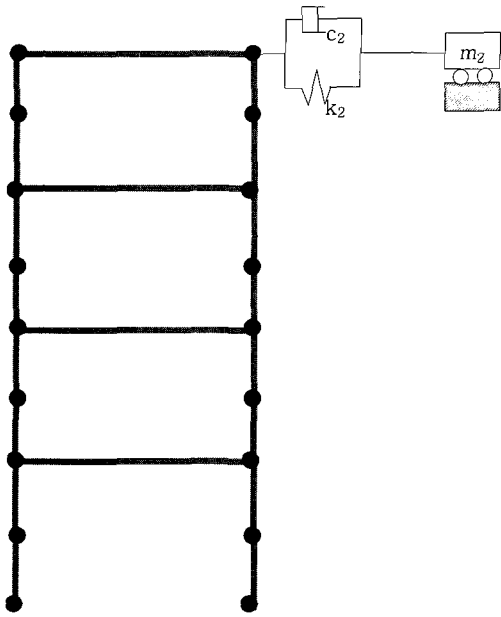


그림 6 동조질량감쇠기해석 모델

위의 식들을 이용해 얻은 감쇠기의 특성치는 표 4에 나타내었다.

3.2 해석결과 및 분석

해석결과는 그림 7에서 보는 바와 같다. 각 보강방안은 Agastat E7022의 계전기에 대한 GERS⁽¹²⁾와 비교하여 개선효과를 분석하였다.

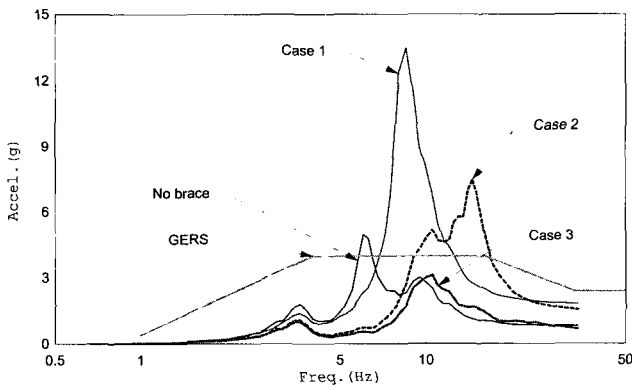


그림 7 가새형식 강성보강에 의한 캐비닛의 내진보강 효과

3.2.1 보강프레임의 설치

캐비닛구조의 내진보강을 위하여 가새를 설치한 구조물들의 ICRS는 그림 7에서 보는 바와 같다. 위의 그림에서 각 응답스펙트럼의 첨두값은 모두 구조물의 1차 고유진동수의 위치에서 발행하였다. 그러나 Case 1이나 Case 2의 경우 보강을 했음에도 불구하고 오히려 최대 응답값이 보강을 하지 않은 경우에 비해서도 매우 큰 값을 보이고 있다. 반면에 Case 3의 경우에는 증폭이 거의 발생하지 않아 내진보강이 효과를 발휘하고 있음을 알 수 있다. 따라서 구조물의 강도를 증가시킴으로서 내진보강을 수행하고자 할 때는 구조물의 고유진동수를 증폭범위 밖으로 이동시켜야 내진 보강이

효과를 발휘할 수 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 충분하지 못한 강성보강은 오히려 구조물의 동적응답을 증폭시키는 쪽으로 작용할 수 있다.

3.2.2 감쇠기의 설치

그림 8은 감쇠기를 설치한 캐비닛 구조물의 응답스펙트럼을 나타낸 것이다. 두 가지 설치방법에 있어서 DMP1의 경우가 DMP2의 경우보다 좋은 결과를 보여주고 있다. DMP2의 경우에는 비보강 구조물의 고유진동수에 해당하는 응답은 뚜렷하게 감소했지만 10Hz 이상의 고주파수 범위에서는 비보강 구조물보다 큰 응답을 나타냈다. 따라서 모든 진동수 영역에서 안전측인 결과를 보여주지는 않는다. 감쇠기의 감쇠력에 대한 비교는 작은 감쇠값을 가진 감쇠기를 설치한 경우가 큰 감쇠값을 가진 감쇠기를 설치한 경우에 비하여 좋은 내진 보강결과를 보여주고 있다. 큰 감쇠값을 가진 감쇠기에 의한 보강은 구조물의 강성을 증가시키는 것과 유사한 효과를 보인다. 따라서 적절한 감쇠값의 설정이 감쇠기를 이용한 보강에서 중요한 요소임을 알 수 있다.

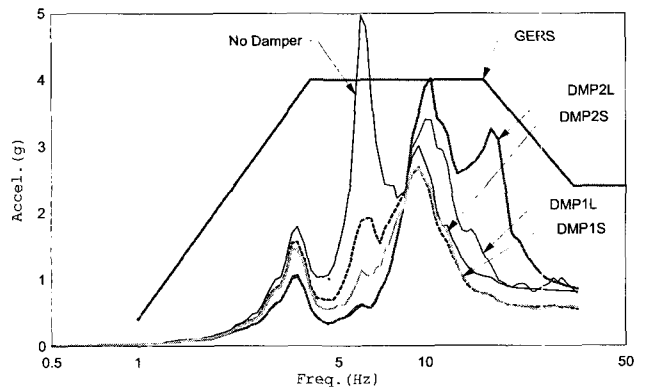


그림 8 점성감쇠비에 의한 캐비닛의 내진보강 효과

3.2.3 동조질량감쇠기의 설치

동조질량감쇠기를 설치한 경우 목표했던 주구조물의 1차 고유진동수에 대한 응답이 그림 9와 같이 크게 줄어들어 동조질량감쇠기의 설치가 적절하게 수행된 것을 확인할 수 있다. 다른 진동수영역에 있어서도 비보강 구조물에 비해 큰

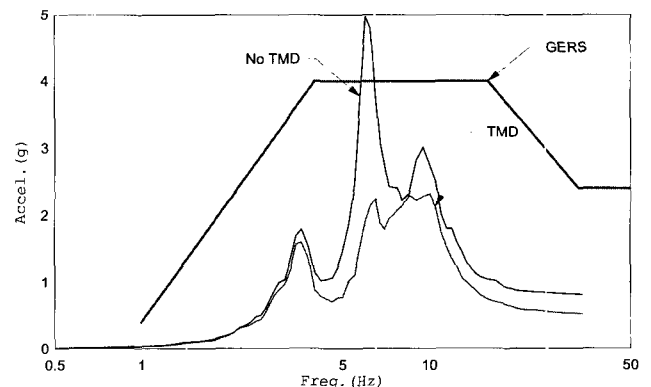


그림 9 동조질량감쇠기에 의한 캐비닛의 내진보강 효과

응답을 보이는 곳이 없어 세 가지의 보강방법중 가장 좋은 내진 보강효과를 보이고 있다. 그러나 실제 구조물과 해석모델과의 진동수차이등을 고려하여 볼 때 이 방법의 사용에 있어서 실제구조물의 고유진동수계측과 해석모델의 작성에 큰 주의를 기울이는 것이 바람직하다.

4. 결 론

본 연구에서는 GIP적용대상 필수계전기를 포함하는 캐비닛 구조물에 대하여 해석모델과 ICRS를 작성하여 동적 거동특성을 평가하고 각종 내진 보강방안에 대한 평가를 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 해석모델의 작성에 있어서 Stick 모델은 캐비닛 구조물의 전단거동을 바르게 나타낼 수 없으므로 캐비닛 구조물의 모델링에는 적합하지 않은 반면, Frame 모델은 캐비닛 구조물의 거동을 적절하게 나타내고 보수적인 값을 준다. 그러나 편심질량을 무시할 수 없는 경우 유한요소를 이용한 정밀한 모델의 사용이 요구된다.
- 캐비닛 구조물의 강성증가에 의한 내진 보강시 고유진동수를 확실히 고주파수로 이동시키지 않는 한 오히려 비보강의 경우보다 큰 응답이 발생될 수 있으므로 이에 대한 주의가 필요하다.
- 감쇠기를 설치하여 동적응답을 감소시키는 경우 전반적으로 만족할 만한 응답감소가 발생하나 진동수 영역별로 응답이 증가하는 경우가 있으므로 이에 대한 주의가 요망되며 적절한 감쇠값을 갖는 감쇠기의 설계가 중요한 요소이다.
- 해석상 동조질량감쇠기가 가장 좋은 내진보강 효과를 보여주나 실제 구조물의 적용시에는 고유진동수의 계측과 구조모델링을 통한 충분한 검토가 필요하다.

참 고 문 헌

1. GL 87-02, "Verification of Seismic Adequacy of Mechanical and Electrical Equipment in Operating Reactors, Unresolved Safety Issue(USI) A-46," USNRC, 1987.
2. 김상운, "USI A-46 관련 규제방향", 제5회 원자력안전기술정보회의, 1999. 12, 16~17일.
3. Seismic Qualification Utility Group, "Generic Implementation Procedure(GIP) for Seismic Verification of Nuclear Power Plants Equipment," Revision 2A, Corrected 2/14/92, February 1993.
4. 유원진, 서용표, "원자력 발전소 기기의 내진검증을 위한 일반수행절차", 보고서번호 '01전력연-단575, 한국전력공사 전력연구원, 2001. 11.
5. 김재민, "원전내진안전성 재평가 방법론 개발 : Part 3. GIP 내용 및 기술배경 분석과 GIP의 국내 적용 방안", 보고서 번호 KINS/HR-441, 한국원자력안전기술원, 2002. 3.
6. 고리1호기 지진감시설비 설계 및 운용방안 연구, 한국전력공사 기술연구원 연구보고서, KRC-92H-J01, 1993. 4.
7. 서용표, 장정범, 유원진, "고리 3&4호기 지진감시계통 설계변경 관련 안전성기술검토결과보고서", 01전력연-정002, 한국전력공사 전력연구원, 2001. 3.
8. 조양희, 박형기, "원산지진계측캐비닛의 동특성분석시험", 대한토목학회논문집, Vol. 19, pp. 449-456, 1999.
9. Kayaba damper 제품설명서, VETECH Korea, 2002.
10. Computers & Structures, Inc., SAP2000/Nonlinear User's Manual - Version 7.0, 1997.
11. Smith, J. W., *Vibration of Structures*, Chapman and Hall, 1988.
12. EPRI Report NP-7147, "Seismic Ruggedness of Relays, Electric Power Research Institute," Palo Alto, CA, Prepared by ANCO Engineers, Inc., 1991. 2.