

〈論 文〉

수치해석과 실험을 통한 안전등급 축전지의 내진검증

Seismic Qualification of Class 1E Battery by Combined Analysis and Testing

김영중* · 박성환** · 정태영* · 정정훈*

Young-Joong Kim, Seong-Whan Park, Tae-Young Chung and Jung-Hoon Chung

〈1992년 12월 29일 접수 ; 1993년 2월 7일 심사완료〉

ABSTRACT

The seismic qualification for the class 1E battery of Korea Multipurpose Research Reactor was accomplished by the analysis as well as testing. The full rack consists of 4 similar sections of typical frame structure and contains 60 cells. However, since the seismic qualification was required on the frame structure and only on 3 aged ones among 60 cells, 2 sections of the full rack were assembled as a test rack with 28 cells including the 3 aged cells for an economic test. Seismic analysis for the full rack was carried out using the finite element program ANSYS. The modal parameters identified from the resonance search test on the test rack were used to the seismic analysis of the full rack. It was confirmed that the test rack could represent the full rack with regards to seismic responses and function of cells, and that the full rack and aged cells were qualified to the given seismic test requirements.

1. 서 론

최근 국내 원자력 발전의 수요급증에 맞추어 설계 기술의 자립도가 높아짐과 함께 각종 기자재의 국산화도 활발히 진행되고 있다. 원자력발전소에서 사용되는 전기설비중 발전소의 안전유지에 필수적인 장비를 안전등급(class 1E)장비로 정의하며 이들은 실제적인 상황을 가정하여 실험 또는 해석을 통해 기능이 유지됨을 확인해야 한다.

특히 내진검증은 1991년도 해사기술연구소에 건설된 대형 6자유도 진동대¹⁾를 이용함으로써 기술자립화를 이루었으며 국산화의 초석이 되고 있다. 안전등급장비에 대한 내진검증은 IEEE std 344-1987²⁾을

일반기준으로 하여 수행되며 (1) 해석(analysis), (2) 시험(testing), (3) 해석과 실험의 결합(combined analysis and testing), (4) 경험(experience) 등의 방법이 제시되어 있다.

일반적으로 해석에는 수학적인 단순화와 비선형성, 감쇠등에 대한 불확실성이 존재하므로 가능한 실험을 통한 검증이 요구되고 있으나 진동대 이용이 불가능한 큰 장비 및 동일한 형태의 장비가 조합되어 전체를 시험하기에는 경제적인 불합리성이 있는 경우³⁾ 등에는 해석과 실험을 결합한 검증이 허용된다.

본 연구에서는 비상전원으로 사용되는 다수의 축전지를 탑재한 프레임형 랙(rack)의 내진검증⁴⁾을 위해 이 방법을 적용하였다. 원래 설계상 요구되는 전체랙(full rack)은 4구간의 동일구조 연속형으로서 PS400형의 축전지를 60개 탑재토록 되어있다. 내진

*정회원, 한국해사기술연구소 진동연구실

**한국해사기술연구소 구조연구실

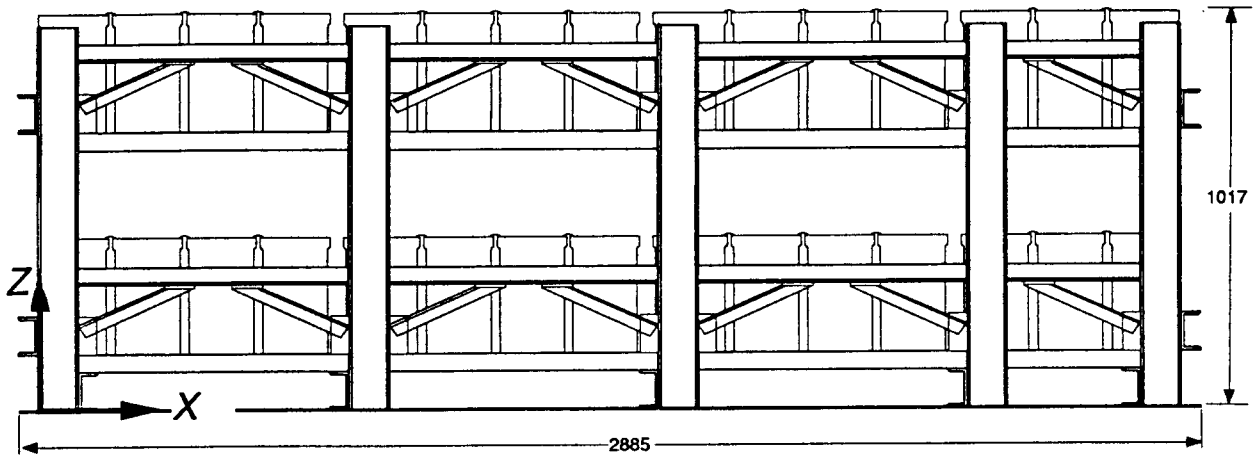


Fig. 1 Full rack with 60 PS400 cells

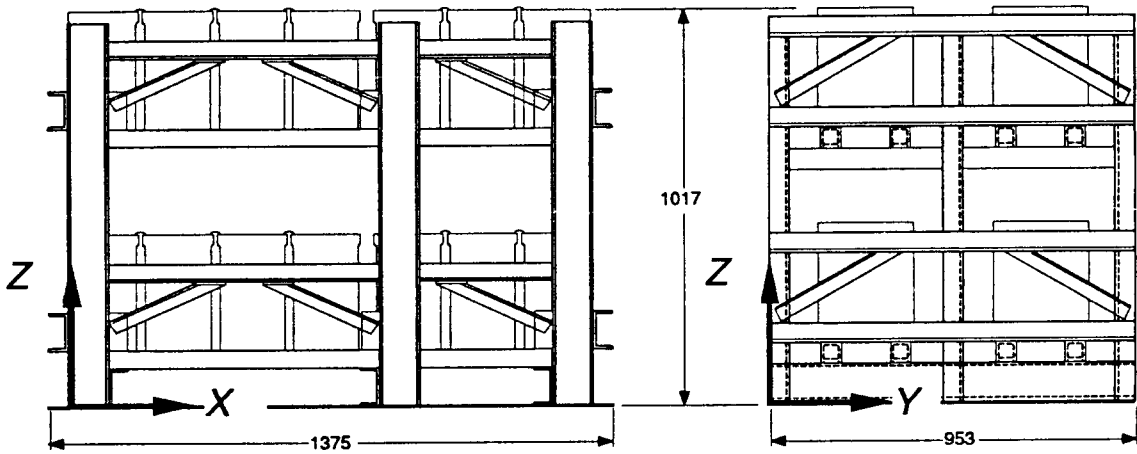


Fig. 2 Test rack with 28 PS400 cells

검증시험에서는 약 1년간의 에이징(aging)을 거친 3개의 축전지의 성능과 랙의 구조적 안전성을 확인하게 되므로 전체랙 시험을 위해서는 57개의 축전지가 추가로 소요된다. 전체랙의 크기는 Fig. 1과 같이 진동대 시험이 가능한 정도이나 경제적인 시험을 위하여 Fig. 2와 같이 전체랙의 양단 프레임을 포함하여 2구간만으로 구성되고 28개의 축전지를 탑재하는 시험랙(test rack)을 별도로 제작하여 시험하였다.

전체랙의 진동특성치는 시험랙과는 다르나 시험랙에 대한 실험 및 해석 결과를 비교 검증하여 수치해석 및 모델링 기법의 타당성을 확인한 후 전체랙의 지진응답을 해석하였다. 적합한 해석모형의 결정을 위해 유사시험체(PS210형 축전지 탑재 전체랙)의 결과도 비교하였다. 진동해석은 범용유한요소프로그램인 ANSYS⁵⁾를 이용하였으며 시험은 6자유도 진동대를 이용하여 수행되었다.

2. 고유진동특성

2.1 유한요소 모델링

랙은 π , \square , \perp 형의 구조부재들이 용접 또는 볼트에 의해 조립된 구조이다. 구조부재들은 3차원 요소로 모델링 하였으며, 축전지의 질량은 집중질량으로 치환하여 축전지를 밀착지지하는 부재의 절점에 분포시켰다. 중간에 설치된 프레임에서 축전지 지지용 \perp 형강과 기둥과의 연결부는 힌지(hinge)요소를 도입하여 모멘트 전달이 없도록 하였다. 모델링 시 특별히 고려된 사항들은 다음과 같다.

(1) 지지부 \perp 형강의 강성 : 프레임의 하부에 용접된 \perp 형강의 한면이 볼트에 의해 바닥에 고정되어 있으므로 기둥의 경계조건은 고정단보다는 유연하다. 이 효과를 고려하기 위해 Fig. 3과 같이 지지부

에 보요소(real 9 요소)를 두어 X방향의 굽힘강성을 실험결과로부터 결정하였다.

(2) 양단의 프레임에서 L형강의 용접연결부 강성 : L형강의 기둥과 L형강은 각 한면씩만 용접된 면의 연결형태이다. 연결부의 접합도를 고려하기 위해 Fig. 4와 같이 회전스프링요소(real 45 요소)를 도입하였다. 이 강성은 Y방향의 진동형에 영향을 주며 실험결과와 비교하여 강성을 결정하였다.

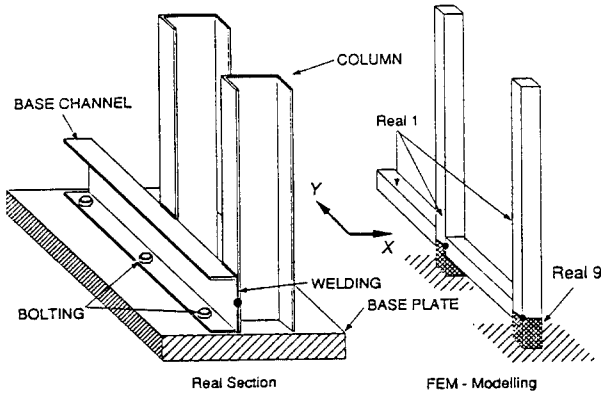


Fig. 3 Beam element used at boundary for mounting rack

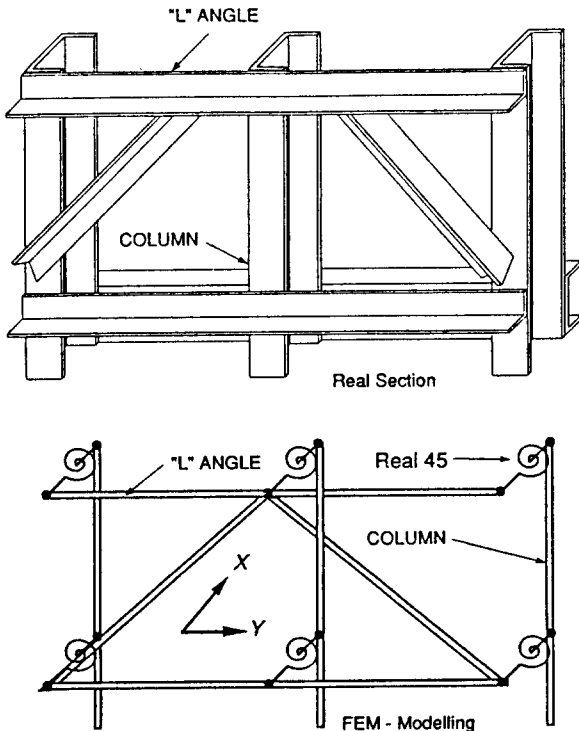


Fig. 4 Welded connections at each side frame

2.2 공진탐색 시험

시험랙의 실험적 모드해석을 위해 랙을 진동대에 설치한 다음 Fig. 5와 같이 가속도계를 부착하였다. 상하방향(Z), 수평방향(X, Y)의 동시시험을 위해 가진파형은 0.5Hz~40Hz의 주파수 대역에서 균일한 에너지를 가지며 최대치는 약 0.05g 정도로서 각방향 파형간의 간섭도(coherence)가 없도록 합성되었다.

지지부 가진에 의한 진동시험결과 구해진 진동대 거동과 진동응답간의 전달함수는 질량 m , 탄성계수 k , 점성감쇠계수 c 또는 히스테리시스감쇠계수 h 를 갖는 1자유도계의 경우에는 다음과 같은 원의 방정식관계⁽⁶⁾가 성립하며, 이로부터 시험체의 고유진동수와 모달감쇠를 산정할 수 있다.

(1) 점성감쇠의 경우

$$\left\{ \text{Re} V(\omega) + \frac{m}{2c} \right\}^2 + \{ \text{Im} V(\omega) \}^2 = \left(\frac{m}{2c} \right)^2 \quad (1)$$

(2) 히스테리시스 감쇠의 경우

$$\{ \text{Re} D(\omega) \}^2 + \left\{ \text{Im} D(\omega) - \frac{m}{2h} \right\}^2 = \left(\frac{m}{2h} \right)^2 \quad (2)$$

여기서

$$V(\omega) = \frac{Z(\omega)}{j\omega Y(\omega)}, \quad D(\omega) = \frac{Z(\omega)}{(j\omega)^2 Y(\omega)}$$

이며 $Y(\omega)$, $Z(\omega)$ 는 계측된 진동대의 가속도 $\ddot{y}(t)$ 와 시험체의 절대가속도 $\ddot{x}(t)$ 로 부터 상대가속도 $\ddot{z}(t)$ 을 구한 다음 이들을 Fourier 변환하여 구해진다. 본 연구에서는 점성감쇠를 가정하여 식 (1)을 이용하였다.

2.3 수치해석을 위한 미정계수의 실험적 산정

ANSYS에 의한 고유진동해석 결과 1,2차의 진동형은 각각 X, Y방향의 거동만을 하며, 두 진동형간

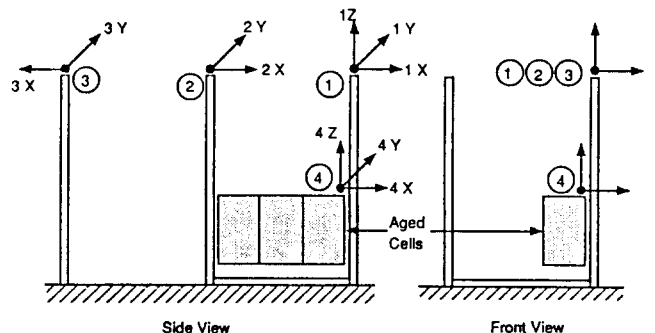


Fig. 5 Measuring points on the test rack with 28 PS400 cells

의 연성은 거의 없는 것으로 나타났다. 즉 PS400 시험랙의 길이방향(X) 진동형에 대한 고유진동수는 Fig. 6과 같이 지지부 보요소의 강성에 따라 민감한 변화를 보인다. 한편 폭방향(Y)의 진동형에 대한

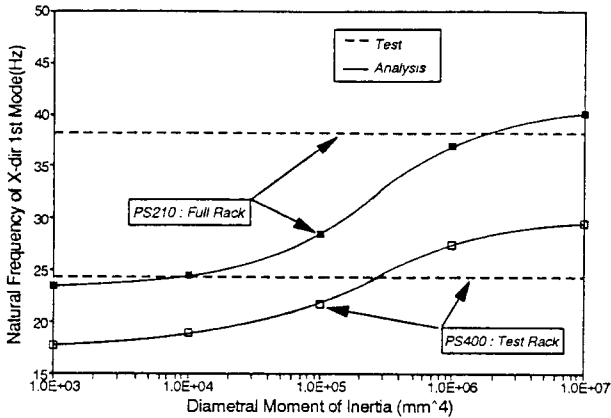


Fig. 6 Natural frequency variation in X direction with real 9

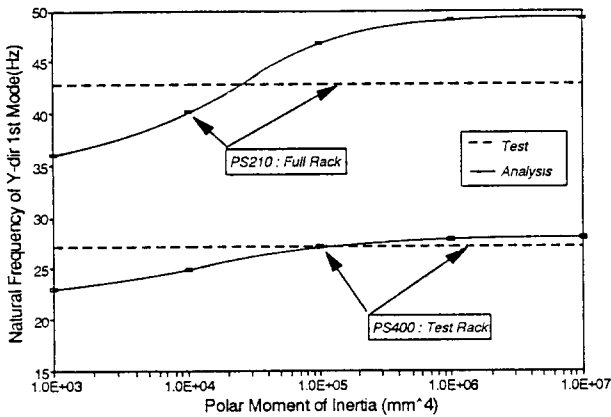
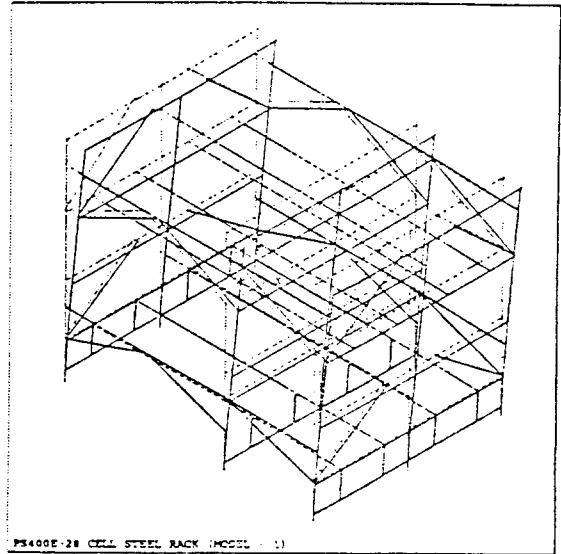


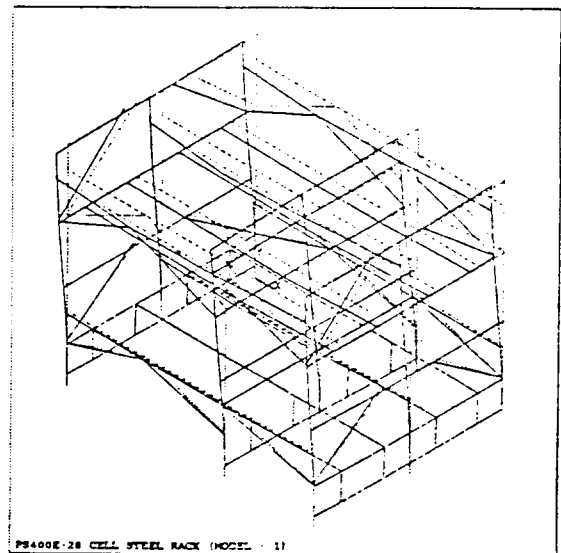
Fig. 7 Natural frequency variation in Y direction with real 45

고유진동수는 Fig. 7과 같이 회전스프링요소의 강성에 따라 변화한다. 이들 요소의 강성평가를 위해 PS210전체랙에 대한 결과도 아울러 비교하였다. 그림에서 수평점선은 실험에서 구해진 값이다.

고유진동수는 지지부 보요소의 단면관성모멘트가 $3 \times 10^5 - 2 \times 10^6 \text{ mm}^4$ 의 범위, 회전스프링요소의 단면극관성모멘트가 $2.5 \times 10^4 - 1 \times 10^5 \text{ mm}^4$ 정도의 범위에서 실험치와 일치하고 있다. 내진검증을 위한 기준으로 주어진 층응답 스펙트럼(floor response



(a) 1st mode : X direction (24.54 Hz)



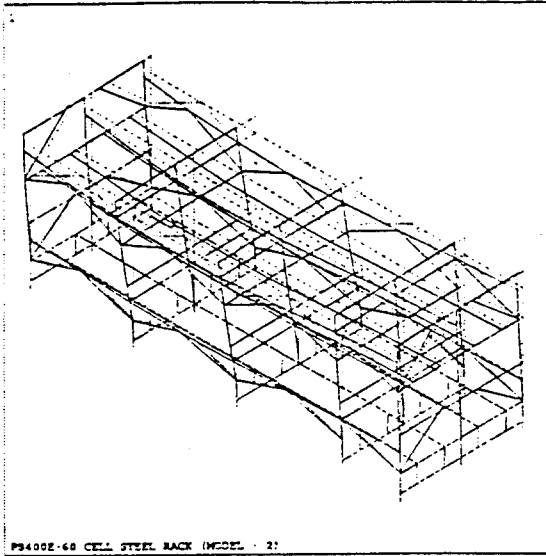
(b) 2nd mode : Y direction (25.92 Hz)

Fig. 8 Mode shape of test rack with PS400 cells

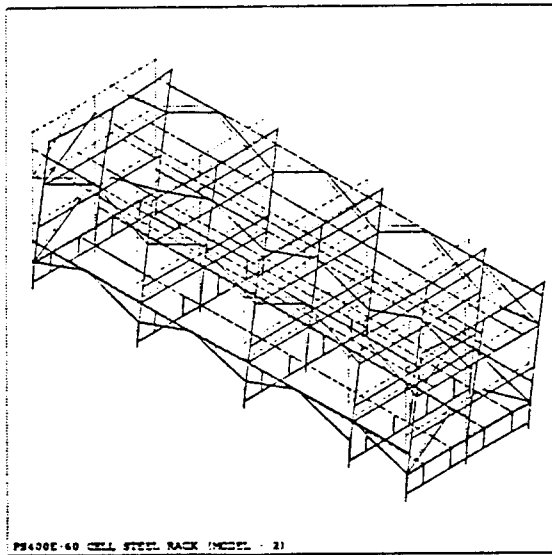
Table 1 Natural frequencies of rack with PS400 cells (unit : Hz)

Mode	Order	Test rack		Full rack
		Test	Analysis	Analysis
X	1	24.3(3.9) ⁽¹⁾	24.54[0.292] ⁽²⁾	25.75[0.332]
	2	27.2(8.3)	25.92[0.279]	16.05[0.464]
Y	3	31.5(5.4)	34.79[0.030]	24.01[0.051]
	4	—	—	35.02[0.009]
				42.40[0.038]

1) Numbers in () are modal damping factors in percent.
2) Numbers in [] are modal participation factors.



(a) 1st mode : Y direction (16.05 Hz)



(b) 3rd mode : X direction (25.75 Hz)

Fig. 9 Mode shape of full rack with PS400 cells

spectrum : FRS)이 최대 진폭을 갖는 주파수범위가 수평방향의 경우 6Hz~9Hz로서 시험체의 고유진동수보다 매우 낮다. 따라서 해석모형의 고유진동수가 낮을수록 지진응답이 증가하게 되므로 요소부재의 강성을 고유진동수가 낮은 쪽으로 결정하였다. 즉,

$$I_y = 3 \times 10^5 \text{ mm}^4 : \text{real } 9 \text{ 요소}$$

$$J = 2.5 \times 10^4 \text{ mm}^4 : \text{real } 45 \text{ 요소}$$

일때 PS400형 축전지를 탑재한 시험랙과 전체랙에

대해 해석된 고유진동수를 Table 1에 정리하였으며, 시험랙과 전체랙의 X, Y방향 1차 진동형은 각각 Figs. 8,9와 같다.

3. 지진응답특성

3.1 내진검증시험

내진검증시험은 시험체가 설치될 부위의 요구응답 스펙트럼 (required response spectrum : RRS)을 기준으로 수행된다. RRS는 진동내구시험 성격의 OBE: (operating basis earthquake)와 이보다 진폭이 큰 SSE(safe shutdown earthquake)의 2중으로 주어진다.

시험을 위해서는 RRS를 기준으로 시간파형을 합성해야 하며, 합성된 파형으로부터 계산된 요구시험 응답스펙트럼 (desired test response spectrum)은 반드시 RRS보다 커야한다. 포락함수(envelope function)는 초기 5초의 증가구간, 30초의 강진구간, 최종 5초의 감소구간이 되도록 결정하였다.

수직, 수평 3방향 동시 가진을 위해서는 각 방향 파형간의 상관함수(cross-correlation function)의 최대치가 0.3이하가 되어야만 서로 통계학적인 독립성 (statistical independence)이 보장된다²⁾. OBE, SSE의 경우 합성된 파형 모두 각 3방향사의 상관함수는 최대 0.28이하이다.

진동대의 거동은 합성된 파형과는 약간 다르므로 최종적으로는 시험시 계측된 진동대의 가속도로부터 계산된 시험응답스펙트럼 (TRS)을 RRS와 비교해야 한다. Fig. 10과 Fig. 11에 각각 OBE와 SSE시험시 X, Y방향의 진동대 가속도로부터 계산된 TRS가 RRS와 비교되어 있는데 약 1.5Hz이상의 주파수 구간에서는 TRS가 RRS를 포함하므로 진동대 구동은 만족스럽다고 할 수 있다. 한편 내진시험중 에이징 시험을 완료한 축전지들의 성능은 기준⁷⁾에 적합하였으며, 시험후 검사를 통하여 랙의 구조적 안전성을 확인하였다.

3.2 지진응답해석이론

지진응답은 시험체의 고유진동특성과 TRS로부터 구할 수 있다. 응답스펙트럼은 고유진동수 ω_n , 감쇠비 ζ 인 1자유도계의 최대진동응답으로 정의되며, 진동대 변위가 y , 1자유도 질량의 절대변위가 x 일때 상대변위 $z = x - y$ 에 관한 운동방정식

$$\ddot{z} + 2\zeta\omega_n\dot{z} + \omega_n^2z = -\ddot{y} \quad (3)$$

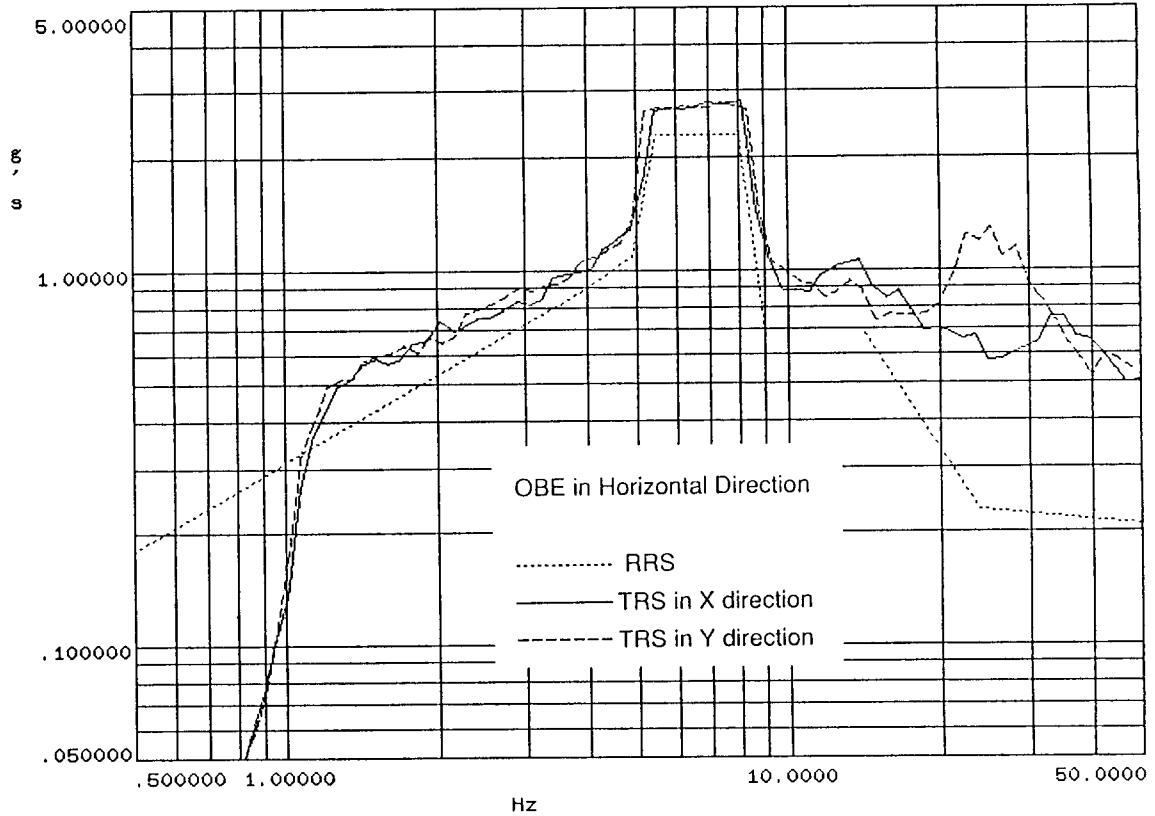


Fig. 10 TRS vs. RRS at OBE test in horizontal directions

으로부터 계산된다. 즉 상대가속도 응답스펙트럼은

$$S_a(\omega_n, \zeta) = \max |\ddot{z}(t)| \quad (4)$$

와 같다. 한편, 다자유도계에서 모드변환후의 운동 방정식은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\ddot{q}_i + 2\zeta_i\omega_i\dot{q}_i + \omega_i^2q_i = -\gamma_i\ddot{y} \quad (5)$$

여기서 γ_i = 모드기여비(modal participation factor), q_i = 일반화 좌표계(generalized coordinate)이다. i 차모드의 정규화된 고유벡터를 ϕ_i 라 하면 상대모달진폭은

$$z_i(t) = \phi_i q_i(t) \quad (6)$$

이므로 상대가속도의 최대치 R_i 는

$$R_i = \phi_i \max |\ddot{q}_i(t)| \quad (7)$$

로 구해지며, 식(3)과 식(5)를 비교하면 결국

$$R_i = \phi_i \gamma_i S_a(\omega_n, \zeta) \quad (8)$$

와 같이 정의된다. 주어진 RRS의 주파수 범위내에 모드가 여러개 있을 경우 전체 진동응답은 SRSS법(square root of sum of squares)에 따라 계산하도록

IEEE std 344⁽²⁾에서 권고하고 있다. 즉 모드가 N 개 있다면 전체 상대가속도의 최대치 R_a 는 식(9)에 따라 구할 수 있다.

$$R_a = \sqrt{\sum_{i=1}^N R_i^2} \quad (9)$$

3.3 시험랙 및 전체랙의 지진응답 해석

OBE와 SSE의 내진검증시험시 예측된 진동대가속도를 입력으로 Newmark적분법을 이용하여 시험랙과 전체랙의 지진응답을 해석하였다. Table 1과 같은 시험랙의 모달특성치를 이용해 해석한 상대가속도의 최대치를 실험치와 비교하여 Table 2에 수록하였다. 이를 보면 해석결과와 실험결과가 전체적인 경향은 일치하고 있으나, X방향의 지진응답은 해석결과가 실험결과보다 작고, Y방향은 크다. 일반적으로 볼트에 의한 조립체는 진동이 클수록 감쇠계수가 증가함⁽⁸⁾을 감안하면, 공진탐색시험으로부터 산정된 감쇠계수를 토대로 해석된 Y방향의 지진응답은 합리적인 것으로 보이나, X방향의 해석결과는 그렇지 않다. 그러나 랙의 특정부위에서의 지진응답해석

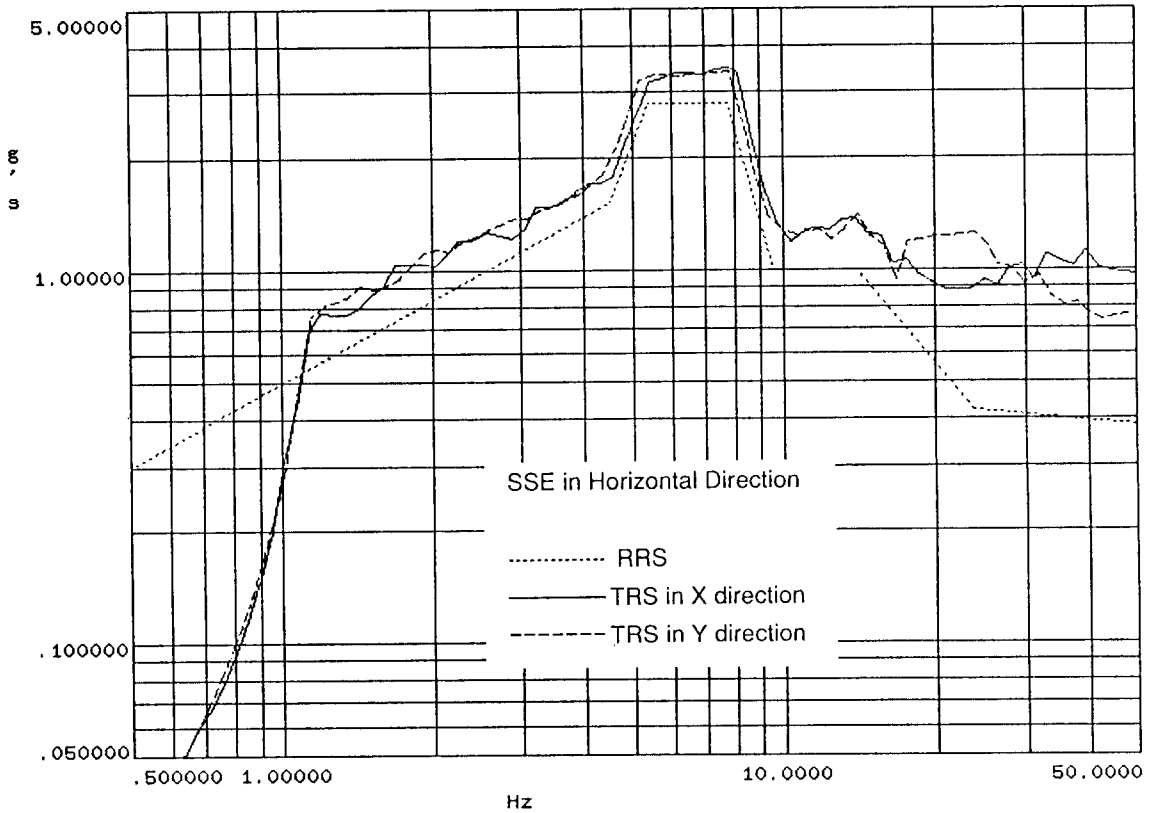


Fig. 11 TRS vs. RRS at SSE test in horizontal directions

결과는 감쇠계수뿐만 아니라 모델링의 부정확에서 오는 진동형 및 고유진동수의 차이에 의해서도 실제와 달라질 수 있다. X방향의 해석결과가 실험치보다 작은 이유로는 유한요소 모델링시 길이 방향 부

재와 프레임간의 볼트접합 부위를 고정접합으로 처리함으로써 보다 경직된 구조로 인해 X방향 진동형의 높이방향 변화가 실제보다 작기 때문인 것으로 사료되며, Y방향으로는 Table 1에서 보는 바와 같이 해석된 최저차 고유진동수가 실제보다 작으므로 유연한 구조로 해석되어 실제보다 큰 응답을 보이게 되는 것으로 사료된다.

한편 시험랙과 전체랙의 지진응답을 비교하기 위하여 X, Y방향 모드의 감쇠계수를 각각 3%, 5%로 균일하게 적용하여 해석한 결과를 Table 3에 정리하

Table 2 Maximum relative acceleration response of test rack using identified modal parameters (unit : g)

Direction	Earthq.	Method	Location		
			1	2	3
X	OBE	Test	0.250	0.243	0.305
		Analysis	0.243	0.255	0.251
	SSE	Test	0.291	0.290	0.327
		Analysis	0.282	0.295	0.293
Y	OBE	Test	0.290	0.414	0.346
		Analysis	0.374	0.541	0.398
	SSE	Test	0.280	0.310	0.277
		Analysis	0.366	0.529	0.389

Table 3 Maximum relative acceleration response of test rack and full rack (unit : g)

Direction	Test rack		Full rack	
	OBE	SSE	OBE	SSE
X	0.274	0.303	0.261	0.286
Y	0.714	0.792	0.554	0.616
Overall	0.765	0.848	0.612	0.679

였다. 지진응답의 최대치로서 랙의 기동상부(전체랙 5곳, 시험랙 3곳)에서 해석된 최대응답중 최대값을 비교하였으며, 합성치(overall)는 X, Y방향 최대응답의 벡터합으로 산정하였다. 이를 보면 X방향의 응답은 비슷하며, Y방향 응답은 시험랙의 경우가 약 30%정도 크음을 알 수 있다. 즉 시험랙의 지진응답이 실제 설치될 전체랙의 경우보다 크므로, 시험랙에 의한 내진검증이 전체랙을 대상으로 한 것보다 열악한 조건에서 수행된 것이라고 볼 수 있다.

4. 결 론

축전지를 탑재한 프레임형 랙에 대한 내진검증시험은 에이징시험을 거친 3개의 축전지를 포함하여 28개의 축전지를 탑재한 시험랙을 대상으로 수행되었다. 공진탐색시험으로부터 산정된 시험랙의 모달 특성치를 이용하여 유한요소에 의거한 지진응답을 해석하였으며 실험치와 부합함을 확인하였다. 해석 결과로부터 시험랙의 지진응답이 실제 설치될 60개의 축전지를 갖는 전체랙의 응답보다 크며, 시험랙에 대한 내진검증시 구조부재의 구조적 안전성과 축전지의 성능유지를 확인한 바 있으므로" 전체랙의 경우에도 내진검증이 이루어졌다고 판단된다.

후 기

본 연구의 축전지 및 랙은 한국원자력연구소 한국형 연구용 원자로(KMRR)사업단의 발주에 의해 세방전지주식회사에서 제작되었으며, 본 연구는 세방

전지(주)의 의뢰에 따라 한국해사기술연구소에서 수행한 내진검증시험의 일부이다.

참 고 문 헌

- (1) 이호섭, 1991, "6자유도 진동대-특성 및 활용 방안", 한국소음진동공학회지, 제 1 권, 제 1 호, pp. 7~19.
- (2) IEEE std. 344 1987, "IEEE Recommended Practices for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations".
- (3) Fischer, E. G., Sucevic, J. M., Fischer, T. P. 1982, "Class 1E Seismic Qualification by Test and Analysis of Generic Multi-Cabinet Electrical Equipment," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 9, pp. 3061~3067.
- (4) Kim, Y. J., et. al. 1992, "Seismic Qualification Test on the Class 1E Barrery for KMRR," KRISO Report No. BSI935-1628E.D, November.
- (5) ANSYS Revision 4.4 1990, Swanson Analysis Systems.
- (6) Ewins, D. J. 1984, Modal Testing : Theory and Practice, Research Studies Press.
- (7) GYB-551-KMT-001 1992, "Equipment Qualification Program for Class 1E Battery of KMRR," Global & Yuasa Battery Co., Ltd.
- (8) Regulatory Guide 1.61 1973, "Damping Values for Seismic Design of Nuclear Power Plants," US Atomic Energy Commission.