

수치해석과 실험을 통한 안전등급 축전지의 내진검증

o김 영 중*, 박 성 환*, 정 태 영*, 정 정 훈*

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

(Young-Joong Kim, Sung-Whan Park, Tae-Young Chung, Jung-Hoon Chung)

1. 서 론

최근 국내 원자력 발전의 수요급증에 맞추어 설계기술의 자립도가 높아짐과 함께 각종 기자재의 국산화도 활발히 진행되고 있다.

원자력발전소에서 사용되는 전기설비중 발전소의 안전 유지에 필수적인 장비를 안전등급(class 1E)장비로 정의하며 이들은 실제적인 상황을 가정하여 실험 또는 해석을 통해 기능이 유지됨을 확인해야 한다.

특히 내진검증은 91년도 해사기술연구소에 건설된 대형6자유도 진동대[1]를 이용함으로써 기술자립화를 이루었으며 국산화의 초석이 되고 있다. 안전등급장비에 대한 내진검증은 IEEE std 344-1987[2]을 일반기준으로 하여 수행되며 다음과 같은 방법이 제시되어 있다.

1. Analysis
2. Testing
3. Combined Analysis and Testing
4. Experience

일반적으로 해석에는 수학적인 단순화와 비선형성, 감쇠 등에 대한 불확실성이 존재하므로 가능한 한 실험을 통한 검증이 요구되고 있으나 진동대 이용이 불가능한 큰 장비, 동일한 형태의 장비가 조합되어 전체를 시험하기에는 경제적인 불합리성이 있는 경우[3]등에는 해석과 실험을 결합한 검증이 허용된다.

본 연구에서는 비상전원으로 사용되는 다수의 축전지를 탑재한 프레임형 랙(rack)의 내진검증[4]을 위해 이 방법을 적용하였다.

* 한국해사기술연구소, 정회원

원래 설계상 요구되는 전체랙(full rack)은 PS400형의 축전지를 60개 탑재토록 되어있다. 내진검증시험에서는 약 1년간의 에이징(aging)을 거친 3개의 축전지의 성능과 랙의 구조적 안전성을 확인하게 되므로 전체랙 시험을 위해서는 57개의 축전지가 추가로 소요된다. 전체적인 크기는 그림1과 같이 진동대 시험이 가능한 정도이나 경제적인 시험을 위하여 전체랙의 일부분으로서 그림2와 같이 28개의 축전지를 갖는 시험랙(test rack)을 별도로 제작하여 시험하였다. 시험랙의 모달 특성치에 대한 검증을 위해 유사시험체의 결과도 비교하였다.

진동해석은 범용유한요소프로그램인 ANSYS[5]를 이용하였으며 시험은 6자유도 진동대로 수행되었다.

2. 고유진동특성

2.1 유한요소 모델링

3차원 보요소와 축전지 질량을 이상화하는 질점 질량요소를 이용하여 모델링은 수행되었다. 각 모형의 모델링결과는 표1과 같으며, 특별히 고려된 사항들은 다음과 같다.

- 1) Rack의 각 기능을 고정시키기 위해 사용된 \square 형강의 바닥고정도 : 탄성 보요소(real 9 요소)를 기둥 끝단에 추가로 모델링 함으로써 이 요소의 굽힘강성도를 변화시켜 탄성 지지도를 제어한다.
- 2) Cell을 지지하기 위해 사용된 L형강과 기둥과의 연결부 : Hinge요소를 추가함으로써 모멘트 전달이 없도록 한다.
- 3) Rack의 길이방향 양단면에서 \square 형강기둥과 L형강간의 면의 용접연결부 : 면의 연결을 실제대로 모델링하여 그

연결부의 고정도를 고정단에 부여한 연결 보요소(real 45 요소)의 축회전 강성도를 변화하여 조절한다.

2.2 공진탐색 시험

시험체의 실험적 모드해석을 위해 랙을 진동대위에 설치한 다음 그림3과 같이 가속도계를 부착하였다.

상하방향 (Z), 수평방향 (X, Y)의 동시시험을 위해 가진파형은 0.5Hz-40Hz의 주파수 대역에서 균일한 에너지를 가지며 최대치는 약 0.05g정도로서 각방향 파형간의 coherence가 없도록 합성되었다.

지지부 가진에 의한 계속결과로부터 시험체의 고유진동수와 모달감쇠는 가진력과 진동응답간의 전달함수를 circle fitting 하는 절차와 유사하게 구해진다[5]. 질량 m , 탄성계수 k , 점성감쇠계수 c 또는 히스테리시스감쇠계수 h 를 갖는 1 자유도계의 경우에는 다음과 같은 원의 방정식관계가 성립한다.

1) 점성감쇠의 경우

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

2) 히스테리시스 감쇠의 경우

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

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 계속된 진동대의 가속도 $\ddot{y}(t)$ 와 시험체의 절대가속도 $\ddot{x}(t)$ 로부터 상대가속도 $\ddot{z}(t)$ 를 구한다음 이들을 Fourier변환하여 구해진다. 본 연구에서는 점성감쇠를 가정하여 식(1)을 이용하였다.

2.3 수치해석모형 결정

ANSYS에 의한 고유진동해석 결과 랙이 조립형 구조로 되어 있어 몇가지 요소부재의 특성치에 따라 고유진동수가 민감하게 변하는 것으로 나타났다. 1차고유진동수만을 볼 때 길이방향 (X)은 그림4와 같이 바닥과의 지지도를 결정하는 real 9부재의 굽힘강성에, 폭방향 (Y)은 그림5와 같이 수직기둥을 연결하는 L형강의 용접연결부인 real 45 부재의 비틀림강성에 영향을 받는다. 그림에서 수평실선은 실험에서 구해진 값이다.

고유진동수는 real 9부재의 강성이 $3 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6$ 의 범위, real 45부재의 경우 $2.5 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ 정도의 범위에서 실험치와 일치하고 있다. 내진검증을 위한 기준으로 주어진 층응답스펙트럼(floor response 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

$$EI_y = 3 \times 10^5 \quad : \text{real 9 element}$$

$$GJ_x = 2.5 \times 10^4 \quad : \text{real 45 element}$$

일때 FS400형 축전지를 탑재한 시험체와 전체체에 대해 해석된 고유진동수를 표2에 정리하였다. 전체체의 X, Y방향 1차 진동형은 각각 그림 6과 같다.

3. 지진응답특성

3.1 내진검증시험

내진검증시험은 시험체가 설치될 부위의 층응답스펙트럼을 요구응답스펙트럼(required response spectrum : RRS)으로 한 기준에 따라 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 한다. 파형합성을 위해 포락함수(envelope function)를 초기 5초의 증가구간, 30초의 강진구간, 최종 5초의 감소구간이 되도록 결정하였다. 합성된 파형으로부터 계산된 요구시험응답스펙트럼(desired test response spectrum)은 반드시 RRS보다 커야한다.

또한, 수직, 수평 3방향 동시 가진을 위해서는 각 방향 파형간의 상관함수(cross-correlation function)의 최대치가 0.3 이하가 되어야만 서로 통계학적인 독립성(statistical independence)이 보장된다[2]. OBE, SSE의 경우 합성된 파형 모두 각 3방향사이의 상관함수는 최대 0.28이하이다.

진동대의 거동은 합성된 파형과는 약간 다르므로 최종적으로는 시험시 계측된 진동대의 가속도로부터 계산된 시험응답스펙트럼(TRS)을 RRS와 비교해야 한다. 그림7에 SSE시험후 X방향 진동대 가속도로부터 계산된 TRS와 RRS가 비교되어 있는데 TRS가 약 1.5Hz이상의 주파수 구간에

서는 RRS를 포함하므로 진동대 구동은 만족스럽다고 할 수 있다.

3.2 지진응답해석

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

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

으로부터 계산된다. 즉 상대가속도 응답스펙트럼은

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

과 같다. 다자유도계에서 모드변환후의 운동방정식은 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 =modal participation factor

q_i =generalized coordinate

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

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

으로 구해지며, (3)식과 (5)식을 비교하면 결국

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

과 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 (9)식에 따라 구할 수 있다.

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

3.3 시험력 및 전체력의 지진응답

OBE와 SSE의 내진검증시험시 계속된 진동대가속도를 기초로 Newmark적분법을 이용하여 지진응답을 해석하였다. 실험치와 비교하기 위하여 계속점 1번 위치의 절점에서 해석된 고유벡터값을 사용하였다.

표2와 같은 시험력의 특성치를 이용해 해석한 상대가속도의 최대치를 실험치와 비교하여 표3에 수록하였다. 해석

에 의한 상대가속도 응답이 실험치와 비교적 일치하고 있다. 이들의 차이는 적용된 감쇠계수가 작은 진폭으로 기진된 공진탐색시험시에 비해 큰 진폭의 지진시험시 변화할 수 있기 때문인 것으로 사료된다.

한편 시험력과 전체력의 지진응답을 비교하기 위하여 X, Y방향 모드의 감쇠계수를 각각 3%, 5%로 균일하게 적용하여 해석한 결과를 표4에 정리하였다. 이를 보면 X방향의 응답은 비슷하며, Y방향 응답은 시험력의 경우가 월등히 크음을 알 수 있다. 즉 시험력의 지진응답이 실제 설치될 전체력의 경우보다 크므로, 시험력에 의한 내진검증이 오히려 비경제적인 전체력을 대상으로 한 것보다 열악한 조건에서 수행된 것이라고 볼 수 있다. 시험력에 대한 내진검증시 구조부재의 구조적 안전성과 축전지의 성능유지를 확인한 바 있으므로[4] 전체력의 경우에도 내진검증이 이루어졌다고 판단된다.

4. 결 론

축전지를 탑재한 프레임형 랙에 대한 공진탐색시험결과를 이용하여 유한요소에 의한 수치해석모형을 결정하였다. 내진검증시험은 에이징시험을 거친 3개의 축전지를 포함하여 28개의 축전지를 탑재한 시험력을 대상으로 수행되었다. 공진탐색시험으로부터 구한 모달특성치를 이용하여 지진응답을 해석하였으며 실험치와 부합함을 확인하였다. 시험력의 지진응답이 실제 설치될 60개의 축전지를 갖는 전체력의 응답보다 크므로, 시험력에 의한 내진검증이 보다 열악한 조건에서 수행되었다고 볼 수 있다. 시험력에 대한 내진검증시 구조부재의 구조적 안전성과 축전지의 성능유지를 확인한 바 있으므로 전체력의 경우에도 내진검증이 이루어졌다고 판단된다.

후 기

본 연구의 축전지 및 랙은 한국원자력연구소 한국형연구원자료(KMRR)사업단의 발주에 의해 세방전지주식회사에서 제작되었으며, 본 연구는 세방전지(주)의 의뢰에 따라 한국해사기술연구소에서 수행한 내진검증시험의 일부이다.

참고문헌

- [1] 이호섭 1991, "6자유도 진동대 - 특성 및 활용방안", 한국소음진동공학회지, 제1권 제1호, 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, 3061-3067.
- [4] KRISO 1992, "Seismic Qualification Test on the Class 1E Barrery for KMRR," to be published.
- [5] ANSYS Revision 4.4 1990, Swanson Analysis Systems.
- [6] Ewins, D.J. 1984, Modal Testing : Theory and Practice, Research Studies Press.

표 1 Node and element numbers of 3 types of models

Model number	PS400-28cell (Model 1)	PS400-60cell (Model 2)	PS210-12cell (Model 3)
Nodes	793	1583	510
Elmts	372	660	27
M.D.O.F.	192	328	130

표 2 Natural frequencies of rack with PS400 cells

Mode	Order	Test Rack			Full Rack	
		Test	Anal.	γ^1	Anal.	γ
X	1	24.3(3.9) ²⁾	24.54	0.292	25.75	0.332
	1	27.2(8)	25.92	0.279	16.05	0.464
Y	2	31.5(5.4)	34.79	0.030	24.01	0.051
	3	-	52.01	0.063	35.02	0.009

1) γ : modal participation factor

2) Numbers in () are modal damping factor in percent.

표 3 Maximum relative acceleration response of test rack using identified modal parameters

Dir	Test		Analysis	
	OBE	SSE	OBE	SSE
X	0.250	0.291	0.269	0.315
Y	0.290	0.279	0.401	0.392

unit: g

표 4 Maximum relative acceleration response of test rack and full rack

Dir	Test Rack		Full Rack	
	OBE	SSE	OBE	SSE
X	0.300	0.332	0.288	0.316
Y	0.528	0.585	0.156	0.169

unit: g

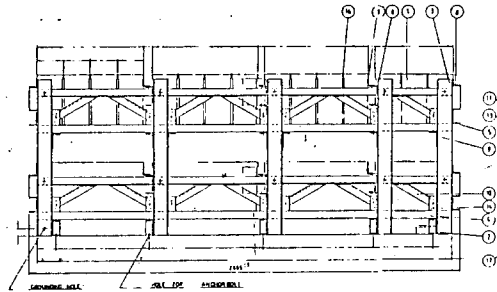


그림 1 Full rack with 60 PS400 cells

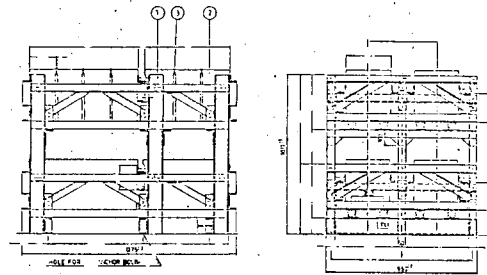
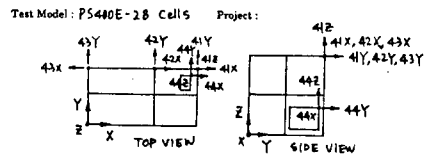
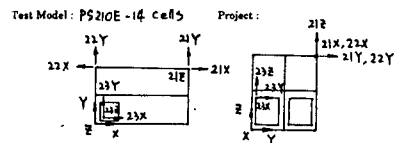


그림 2 Test rack with 28 PS400 cells



(a) Test rack with PS400 cells



(b) Full rack with PS210 cells

그림 3 Measuring points on test rack

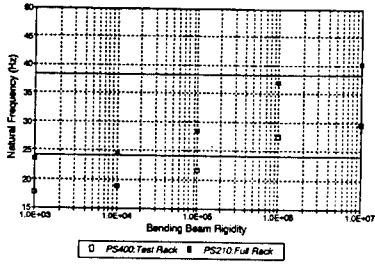


그림 4 Natural frequency variation in X direction with real 9

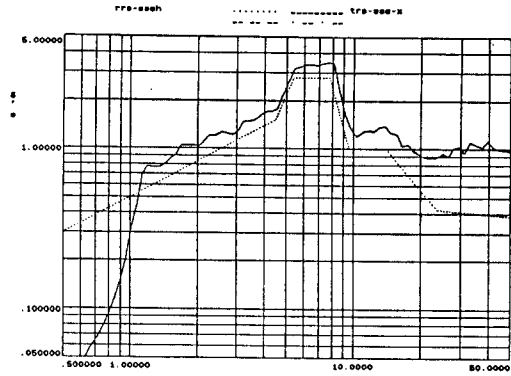


그림 7 TRS vs. RRS at SSE in X direction

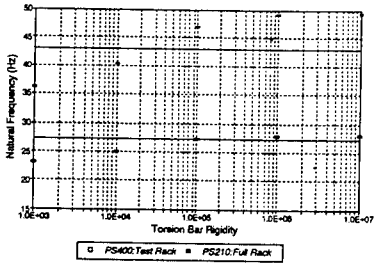
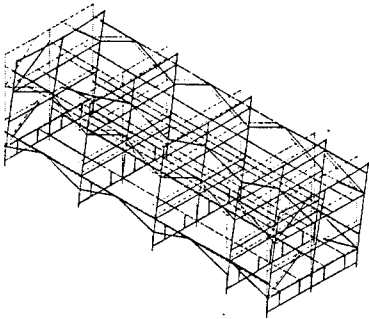
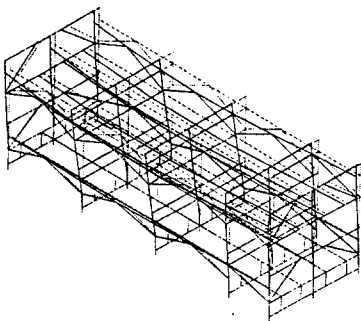


그림 5 Natural frequency variation in Y direction with real 45



(a) X direction : 1st order



(b) Y direction : 1st order

그림 6 Mode shape of full rack with PS400 cells