

## UPS를 위한 내진검증 해석 모델 개발연구

서 옥환  
한라대학교

### 1. 서론

원자력 안전과 관련된 시스템에서 요구되는 것 중에서 필수적인 것은 내진 발생에 대비하는 검증이 있다. 이 논문은 내진 검증을 증명하고 장치 사용을 위한 증명된 유한요소 해석모델을 개발하는 방법이 제시되었다. 여기서 사용된 모델은 한국원자력연구소의 KMRR에서 사용되기 위해 이화전기산업(주)에서 제작되었다.

원자력 안전과 관련된 구조물 및 부품의 내진검증은 유한요소해석에 의한 방법, 내진시험 및 두 가지 방법을 조합한 방법이 사용되기도 한다[6,7]. 전기 구조물 혹은 기기는 경제적인 측면에서 유한요소해석 방법이 가장 유용한 방법으로 알려져 있다. 이 기술은 전체 구조물의 상세한 응력해석 뿐 만 아니라 시험방법의 어려움과 비용절감에 무척 도움이 된다. 그리고 유한요소 모델 및 해석은 쉽게 구조물의 재구성 등으로 소정의 임무를 수행하게 된다. 덧붙여서 거대한 구조물의 구성 및 다중 힘의 부하에도 쉽고 효과적으로 임무를 수행하게 된다. 그러므로 UPS 기기를 위한 유한요소모델의 개발은 매우 중요하다.

일반적으로 이러한 원자력 발전소의 기계구조물 및 부품의 응력해석용의 수학적 모델은 모달시험에서 증명된 방법의 하나로 인정되었다. 이러한 목적으로 수행된 수학적 모델의 결과는 정확하여 현장시험결과와 같이 병행해서 응용되고 있다.

### 2. 이론 전개

유한요소법을 이용한 내진검증의 이론적인 전산 모델개발, 모달주파수 해석 및 응력범위 등이 다음에 설명된다.

## 2.1 유한요소 모델

유한요소해석법에 의한 내진검증의 정밀도는 전산모델에서 좌우된다. 구조물의 동적특성치 및 질량분포가 요구되는 노드 및 요소에 의한 모델링은 실제 요소의 기계적인 성질 및 기하학적인 구조와 잘 일치하여야 한다. 즉 실제 기기에서 사용되는 모든 부분이 고려되어야 한다. 원자력발전소에서 사용되는 기기 및 부품은 전기적인 구조 즉, 전기기기, 구동모터, 콘트롤 밸브 등의 구조해석을 간단히 하기 위하여 Lump 질량 요소가 사용된다. 이렇게 설치된 구조물은 실제 이론 해석 방법, 유사해석 및 내진시험 등의 최선의 방법으로 검증 완료된다. 각각의 기기 및 부품으로 구성된 완성품의 연결은 Gap 요소와 같은 방법을 이용해서 정교하고 보수적인 해석을 수행하게 된다. Lump 요소 및 Gap 요소 등으로 간단명료하게 된 컴포넌트들은 구조적 내진검증해석으로 부터의 내진하중을 이용하여 해석된다. 또한 기기의 설치조건은 실제의 전산 경계조건을 만족하는 방법으로 이용된다. 마지막으로 유한요소해석 코드를 사용해서 요소 및 노드 구성 및 다른 영상기능으로 검증되어야 한다.

## 2.2 Mode 주파수 해석

Mode 주파수 해석은 구조물의 기본 자유 진동수들에 의해서 수행된다. 모델이 일정한 Stiffness 및 질량효과, No damping 및 자유진동 상태라고 가정하면 모델의 자유진동주파수해석을 위한 운동방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$[M] \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + [K] \{u\} = \{0\} \quad (1)$$

여기서  $[K]$  는 구조 Stiffness matrix,  $[M]$  은 질량 Matrix, 그리고  $\{u\}$  는 모델의 진동치를 나타낸다. 또 선형계에서 자유진동은 Harmonic 형태로 나타내어진다.

$$u = \phi_i \cos \omega_i t \quad (2)$$

여기서  $\phi_i$  는  $i$ th Natural frequency 의 Mode shape를 대표하는 Eigenvector,  $\omega_i$  는  $i$ th 자유진동수 주파수 및  $t$  는 시간을 각각 나타낸다.

식 (2)을 식 (1)에 대입하면

$$\{ -\omega_i^2[M] + [K] \} \{ \psi_i \} = \{ 0 \} \quad (3)$$

그러므로 위 식으로부터 자유진동 주파수는 다음과 같이 나타내어진다.

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (4)$$

여기서  $f_i$  는 자유진동 주파수이다.

### 2.3 평가 기준

이 논문에서 사용된 평가기준은 유한요소 모델 해석으로부터 얻은 자유진동 주파수를 현장 시험의 결과치와 비교하는 것이다. 여기서는 시험 결과에 대해서 5%이내의 값을 채택하였다.

### 2.4 예비 해석

UPS에 대한 유한요소 내진해석이 예비 조사 목적으로 수행되어 그 결과는 KONEL/Wyle Report # RN 001-93[2]에 수록되어 있다.

이 예비모델은 약간 수정되어 Pre-test frequency analysis로 사용되었다. 이 내진 모델의 경계조건은 Three global translational direction 및 X, Y 및 Z 축에 대한 Three rotational direction이다. Eigenvalue 해석은 Lanczos technique[1]을 이용하여 모드 50 Hz 까지 수행되었다. 그 결과는 Table 1에 표시되었다. 이 모델의 Isometric view 가 Figure 1에 유한요소 구성으로 나타내어진다.



Figure 1 Test setup details

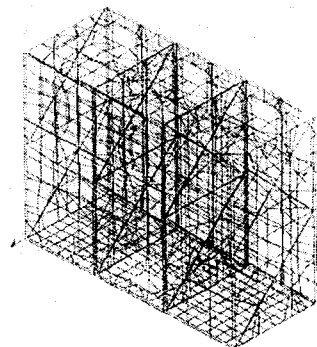


Figure 2 An isometric view of UPS

### 3. Experimental Approaches

#### 3.1 Specimen Description

이 120 VAC UPS(Uninterruptible Power Supply System)는 Figure 2와 같이 3개의 cabinet (UPS Module, Static Transfer Switch, Mechanical Bypass Switch, Synchronizing Equipment 및 Protective Devices)로 구성되어 있다.

#### 3.2 Seismic Qualification Test

내진시험은 고정된 기기에 지진이 일어나는 것을 가정하여 보수적으로 기기의 진동운동을 수행한다.

#### 3.2 Modal Survey Test

UPS의 Modal survey test는 이화전기산업(주)의 Dynamics Facility에서 수행되었다. 기기는 30-foot square, 250,000 lbs Concrete reaction mass에 단단히 고정되었다. 여기서 사용되는 판 및 볼트는 2-inch thick Carbon steel plate 및 1.5-inch bolt이었다. 이 2-inch Plate는 embedded Steel beam을 갖는 Concrete reaction mass 에 용접되었다.

UPS에 사용된 Instrument는 Figure 3에 보인 40 Accelerometer가 설치되었다. 그 위치는 예비 기초 해석의 결과와 비교하여 가장 중요한 모드를 추출하여질 수 있는 부분에 크기 및 수를 정하여 장착하였다.

이 시험은 Hewlett-Packard (Model 5423A) Structural Dynamic Analyzer[2]를 사용하여 수행되었다. Data 취득은 각각의 Accelerometer location에 Random signal을 주어 Input force 및 Output structural response 추출해 낼 수 있도록 진동시켜 수행하였다. 이 시험을 수행하는 동안 100 Hz까지의 진동 주파수를 갖는 모드가 추출될 수 있도록 설치하였다. 0 에서 50 Hz까지의 Natural frequency 및 Mode shape을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Comparison of test and pre-test analysis frequencies.

Accel. No.	Axis	Nat. Freq. results		Ref.	
		Pre-test Analysis	Modal Test	Percent Error	Status
1X	S-S		19.2		
1Y	F-B		20.3		
2Y	F-B		20.5		
3Y	F-B		29.4		
4Y	F-B		28.3		
5Y	F-B	25.0	25.1		
6Y	F-B	15.1	15		
7Z	V		-		
8Y	F-B	34.2	29.7	15.0	Unacceptable
8Z	F-B		-		
-		7	-		
-		10.0	-		
10Y	F-B	34.4	28.7	20.0	Unacceptable
10Z	V		-		
11Y	F-B	29.0	20.8	40.0	Unacceptable
11Z	V		-		
12Y	F-B	35.2	28.8	22.3	Unacceptable
12Z	V	12.0	-		
13X	S-S		20.8		
13Y	F-B	20.0	19.0		
14Z	V		-		
15Y	F-B		28.8		
16X	S-S		38.3		
17X	S-S	20	19.5		

Table 2. Comparison of test and post-test analysis frequencies.

Accel. No.	Axis	Nat. Freq. results		Ref.	
		Post-test Analysis	Modal Test	Percent Error	Status
1X	S-S	24.7	19.2		
1Y	F-B	20.5	20.3		
2Y	F-B	20.9	20.5		
3Y	F-B	29.8	29.4		
4Y	F-B	28.6	28.3		
5Y	F-B	25.0	25.1		
6Y	F-B	15.1	15		
7Z	V				
8Y	F-B	30.6	29.7	3.0	acceptable
8Z	F-B		-		
-					
-			-		
10Y	F-B	29.3	28.7	2.0	acceptable
10Z	V		-		
11Y	F-B	20.2	20.8	2.5	acceptable
11Z	V		-		
12Y	F-B	29.9	28.8	4.0	acceptable
12Z	V		-		
13X	S-S	21.2	20.8		
13Y	F-B	19.6	19.0		
14Z	V		-		
15Y	F-B	29.2	28.8		
16X	S-S	38.9	38.3		
17X	S-S	20.1	19.5		

LEGEND :F-B = Front-to-Back  
 S-S = Side-to-Side  
 V = Vertical

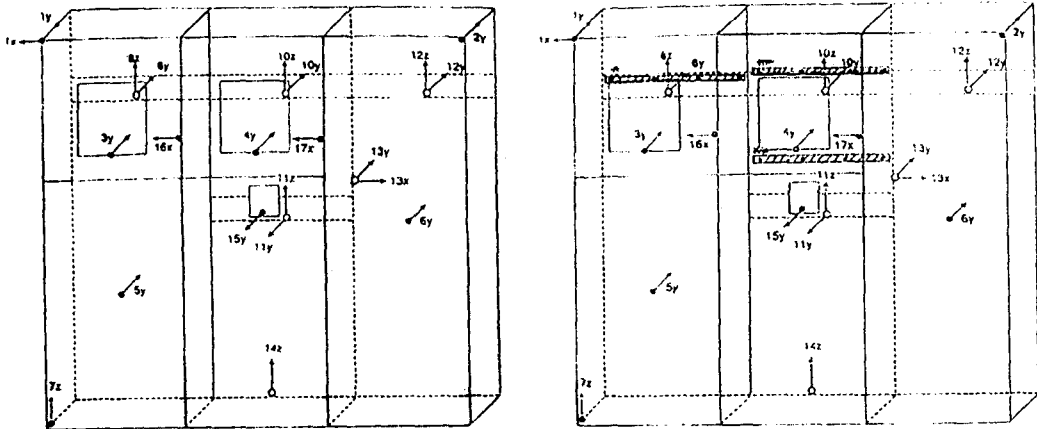


Figure 3. Accelerometer mounting locations. Figure 4. Outline of attached each supplement bar on Device Panels in the upper part of the Charger and Inverter Cabinets

Note: Supplement bar dimension

\* 30x2.6t flat bar \*\* 50x50x6 mm angle bar

## 4. Comparison of Measured and Predicted Frequencies and Results

### 4.1 Pre-test Analysis

같은 진동 Mode shape 특성치를 갖는 예상된 해석치와 시험주파수 평가기준치의 비교가 0부터 50 Hz 사이에서 이루어 졌다. 비교결과 시도모델시험결과에서 적합하지 못한 부분을 수정하였다.

Test 및 Pre-test 해석 결과의 비교는 Table 1에서와 같이 상당한 차이를 보여주고 있다. 이 Pre-test 해석 결과는 약간의 주 System mode의 사라짐을 갖는 동안 상당한 추가 mode를 생산하였다.

Charger cabinet panel의 뒷 부분의 Y mode는 15.0 %의 에러를 갖는 34.2 Hz를 예측하였다. 또한 Inverter cabinet 의 뒷 부분도 받아들일 수 없는 에러를 갖는 34.4 Hz를 기록하였다. Mode 11 및 12는 완전히 사라졌으며 다른 상부의 시스템 Mode도 사라지거나 받아들일 수 없는 에러 값을 예측하였다.

#### 4.2 Tuning of the Analysis(Post-test Analysis) Model and Results

Post-test analysis 와 현장Test 의 비교평가가 다단계에 걸쳐 수행되었다. Global coordinate system에서 부 적절히 계산된 모든 Rotary inertia는 그들의 Local coordinate system에 의해서 수정되었다. UPS의 Base에서의 경계조건은 오직 Three translational 방향에 고정된 것으로 변경되었다. 또 Base에서의 Rotational 고정이 release 되었다. 모든 이 연합수정은 Table 2에 보였듯이 채택 할 수 있는 값 5 %이내의 낮은 값을 Y mode에서 가져왔다. Charger 및 Inverter cabinet의 윗 Device panel 부분에 Figure 4 와 같이 수정을 가하였다. Charger 및 Inverter의 윗 부분의 Device panel 위에 지지 질량의 충분한 견고함을 위하여 각각의 보강 재를 설치하였는데 이는 지지 계를 견고하게 만들기 위한 시도였다. 결국 이 수정은 Rotary inertia와 연합하여 첫 번째 mode를 15.1 Hz 까지 향상되게 하였다.

시험결과의 정확성을 가정하면 0부터 50 Hz 사이의 주파수 범위에서 새로운 해석 모델은 거의 같은 Mode를 나타내었다. Table 2에서 보여주듯이 이 모드들을 약 5 % 이내의 예측치를 나타내었다.

수정한 부분에서도 33 Hz 이상을 갖는 Mode 들은 내진검증해석의 결과에 아무런 영향을 주지 않았다.

#### 5. 결론

이 UPS 모달시험 결과는 0부터 50 Hz 사이의 특출하고 주요한 Mode를 나타내었다. 이 진동수 사이에서는 세 개의 직각 방향의 첫 번째 기본 진동주파수가 있으며 두 번째는 Y mode에, 40 Hz 이상에서는 3 개의 Higher system mode가 존재하였다.

시험결과의 정확성을 가정하면 0부터 50 Hz 사이의 주파수 범위에서 새로운 해석 모델은 거의 같은 Mode를 나타내었다. Table 2에서 보여주듯이 이 Mode들은 약 5 % 이내의 예측치를 나타내었다.

수정한 부분에서도 33 Hz 이상을 갖는 Mode 들은 내진검증해석의 결과에 아무런 영향을 주지 않았다.

원자력발전소에서 안전과 관계가 있는 계나 부품은 부여된 내진 Event에 의하여 유한요소해석에 의해 검증될 수 있다.

시험이나 여기서 개발된 모델에 의해서 수행된 내진검증해석은 내진업무 수행에 아무런 중요한 차이점을 발견할 수 없었다. 결국 평가 기준에서 제시한 약 5% 이내의 차이점을 가져왔다. 그러므로 여기에서 수행 개발된 UPS 모델은 참고 문헌 [6,7]의 목적을 충분히 만족하였으며 최종 내진검증응력모델로서 적절하였다.

### 참고문헌

- (1) COSMOS/M User's Manual, Structural Research and Analysis Corporation, Santa Monica, California, 1990.
- (2) KONEL/Wyle Laboratories' Report No. RN 001-93, Seismic Qualification Test Report, 1993.
- (3) Clough, R. W. And Penzien, J., Dynamics of Structures, McGraw-Hill Book Company, New York, 1975.
- (4) Meirovitch, L., Elements of Vibration Analysis, McGraw-Hill book company, New York, 1986.
- (5) Humar, J. L., Dynamics of Structures, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1990.
- (6) ANSI/IEEE Std. 344-1987, IEEE Recommend Practice for Seismic Qualification of class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, IEEE, 345 E. 47th St., N.Y, N.Y10017, U.S.A.
- (7) U.S. Nuclear Regulatory Commision, Regulatory Guide 1.100, Seismic Qualification of Electric and Mechanical Equipment for Nuclear Power Plants, Rev.2, June 1988.