

## 원자력기기 내진해석응답스펙트럼 생성프로그램 개발

### Development of Response Spectrum Generation Program for Seismic Analysis of the Nuclear Equipment

변훈석\* · 김유철\*\* · 이준근\*\*\*

Hoon-Seok Byun, Yu-Chull Kim and Joonkeun Lee

**Key Words** : Nuclear(원자력), Power Plant(발전소), Analysis Response Spectrum(해석 응답 스펙트럼), 요구 응답 스펙트럼 (Required Response Spectrum), Seismic Analysis(내진해석), Program(프로그램)

#### ABSTRACT

In our country, when the replacement for individual components of equipment in nuclear power plants is required, establishment of individual criteria i.e. Required Response Spectra(RRS) of seismic test/analysis for the component is very difficult because of the absence of Test Response Spectra(TRS) for the individual component to be replaced, from the existing qualification documents. In this case, it is required to perform the structural analysis for the nuclear equipment including the components to be replaced. After the structural analysis, Analysis Response Spectra(ARS) at the point of the component shall be generated and used for seismic test of the component. However, as of today, no standard program authorized for the response spectra generation by using the structural analysis exists in Korea.

Because of above reason, the STAR-Egs computer program was developed by using the method which calculates directly the expected response spectrum(frequency vs. acceleration type) of the selected points in the nuclear equipment with input spectrum(Required Response Spectra, RRS), based on the dynamic characteristics of the Finite Element(FE) model that is equivalent to the nuclear equipment. The STAR-Egs controls ANSYS/I-DEAS commercial software and automatically extract modal parameters of the FE model. The STAR-Egs calculates response spectrum using the established algorithm based on the extracted modal parameters, too. Reliance on the calculation result of the STAR-Egs was verified through comparison output with the result of MATLAB commercial software based on the identical algorithm. Moreover, actual seismic testing was performed as per IEEE344-1987 for the purpose of program verification by comparison of the FE analysis results.

적인 내진시험(Seismic Test) 기준 즉, 요구응답스펙트럼 (Required Response Spectra, RRS)<sup>(1)</sup>을 얻을 수 없는 경우가 많다.

이로 인해 대상기기의 전체구조에 대한 구조해석 (Structural Analysis) 후 교체대상 부품위치에서의 해석응답스펙트럼(Analysis Response Spectra, ARS)<sup>(2)</sup>을 산출하여 이를 기준으로 내진시험을 수행하여야 하나 이러한 해석을 통한 응답스펙트럼의 생성에 대한 공인된 방법이나 프로그램이 국내에는 존재하지 않는 실정이다.

따라서 이러한 검증은 주로 해외검증업체를 통해 이루어지므로 기술적 해외 의존도가 높고, 해외 검증 업체들은 그 방법이나 내용을 공개하고 있지 않고 있는 상황이다. 더구나 이러한 해석을 통한 응답스펙트럼의 생성은 발전소 수명주기 중 정기적인 교체가 요구되는 부품 검증 및 최근에 논의되고 있는 발전소 수명주기 연장에 대한 논의와 맞물려 그

#### 1. 서 론

가동 중인 원자력 발전소(Nuclear Power Plants)에서 기기의 개별 부품에 대한 교체가 요구될 때 기존 검증자료에서 교체부품에 대한 시험 응답스펙트럼(Test Response Spectra, TRS)<sup>(1)</sup>을 구할 수 없으므로 각 부품에 대한 개별

\* (주)새한검증 원자력검증센터 내진연구팀  
E-mail : imstax@sneq.co.kr  
Tel : (031) 427-2520 ~ 5, Fax : (031) 427-2526

\*\* (주)새한검증 원자력검증센터 내진연구팀

\*\*\* LG전선(주) 생산기술센터 CAE팀

필요성이 더욱 증대되고 있는 실정이다.

그러므로 본 연구에서는 이러한 해석응답스펙트럼 생성프로그램의 개발을 통하여, 국내 기기/부품업체의 독자적인 기술개발 및 설계단계에서 기기/부품에 대한 사전검증이 가능하게 되므로, 기기/부품의 개발기간의 단축 및 비용절감 효과를 통한 원전기기/부품 국산화에 기여하고자 하였다.

## 2. 해석응답스펙트럼 생성프로그램 개발

### 2.1 해석응답스펙트럼 생성 이론

해석응답스펙트럼 생성이론은 다음의 모드 해석<sup>(3)</sup> 이론을 적용하여 정립하였다. Fig. 1과 같이  $n$ 개의 자유도를 갖는 기초부분의 움직임이 있는 시스템에 대한 운동 방정식은 다음과 같다.

$$[m]\{\ddot{v}\} + [c]\{\dot{w}\} + [k]\{w\} = \{0\} \quad (1)$$

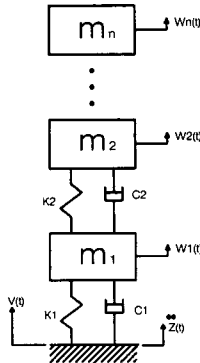


Fig. 1 Schematic diagram of  $n$ -DOF system subject to base excitation

여기서  $\{v\} = \{w\} + \{z\}$ 이다. 식 (1)에서  $[m]$ ,  $[c]$ ,  $[k]$ 는 각각  $n$ 개의 자유도를 갖는 질량, 감쇠, 강성행렬이며  $\{v\}$ ,  $\{w\}$ 는 각각 시스템의 절대변위와 상대변위를 의미하고  $\{z\}$ 는 기초변위를 의미한다. 식 (1)의 좌변항을 상대변위  $\{w\}$ 에 대해 다시 표현하면

$$[m]\{\ddot{w}\} + [c]\{\dot{w}\} + [k]\{w\} = -[m]\ddot{z} \quad (2)$$

이 된다. 식 (2)와 같이 연성된 상미분방정식을 풀기 위해서는 고유진동해석 결과로부터 얻어진 질량에 대해 정규화된 모드 형상의 직교성을 이용해야 한다. 이를 위해 상대변위  $w$ 를 식 (3)로 나타낸 후 식 (2)에 대입하면

$$w = \phi \eta = \sum_{r=1}^n \phi_r \eta_r(t) \quad (3)$$

식 (4)과 같이 모드좌표로 표현되는 비 연성된 미분방정식

으로 바뀌게 된다.

$$\ddot{\eta}_r + 2\xi_r \omega_r \dot{\eta}_r + \omega_r^2 \eta_r = \phi_r^T [m] \ddot{z} = \mu_r \ddot{z} \quad (4)$$

여기서  $\mu_r$ 은 모드 기여도이다. 모드해 및 기초변위  $\eta_r$ ,  $z$ 를 각각  $\eta_r = H_r e^{i\omega t}$ ,  $z = Z e^{i\omega t}$ 와 같이 조화해로 가정하여 식 (4)에 대입하면 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$-\omega^2 H_r + i\omega 2\xi_r \omega_r H_r + \omega_r^2 H_r = -\omega^2 \phi_r^T [m] Z = \mu_r Z_A \quad (5)$$

식 (5)로부터 계산된 결과를 조화해 가정을 통해 식 (3)에 대입하면 질량에 대해 정규화 된 모드 형상과 더불어 상대변위 및 가속도를 구할 수 있으며 구하고자 하는 절대 가속도, 즉 해석응답스펙트럼은 식 (6)로부터 얻을 수 있다.

$$\{V(\omega)\} = -\omega^2 \sum_{r=1}^N \phi_r H_r + \{Z(\omega)\} \quad (6)$$

식 (6)을 세 직교축 방향으로 확장하면 식 (7)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \{V_x(\omega)\}_p &= \left| -\omega^2 \sum_{r=1}^N \phi_{rx} H_{rx} \right| + \{Z_x(\omega)\} \\ \{V_y(\omega)\}_p &= \left| -\omega^2 \sum_{r=1}^N \phi_{ry} H_{ry} \right| + \{Z_y(\omega)\} \\ \{V_z(\omega)\}_p &= \left| -\omega^2 \sum_{r=1}^N \phi_{rz} H_{rz} \right| + \{Z_z(\omega)\} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $p$ 는 알고자 하는 해석모델의 관심노드를 의미한다.

### 2.2 해석응답스펙트럼 생성프로그램 개발

프로그램의 개발을 위해 해석 모델의 구조해석 결과로부터 동특성을 추출하여, 임의의 지점에서의 해석응답스펙트럼을 계산하는 알고리즘을 Fig. 2와 같이 개발하였다. 개발된 알고리즘은 신뢰성 확보를 위해 유한요소 모델(Finite Element Model)의 모델링 및 기본적인 해석기능은 상용 프로그램인 ANSYS 및 I-DEAS를 이용하였으며, 해석응답스펙트럼 생성을 위한 모드, 선택노드, 주파수, 방향별 데이터에 대한 복잡한 수작업을 자동으로 처리할 수 있도록 하였다. 이러한 알고리즘을 바탕으로 ANSYS/I-DEAS를 능동적으로 제어할 수 있는 해석응답스펙트럼 생성프로그램인 STAR-Egs(STructural Analysis REsponse Generation System)<sup>(4)</sup>를 개발하였다.

본 프로그램은 총 7단계의 과정으로 이루어져있으며, 대상 기기에 대한 모델링 지식만 있다면 특별한 내진해석에 대한

지식이 없더라도 원하는 결과를 정확히 얻을 수 있도록 하였다.

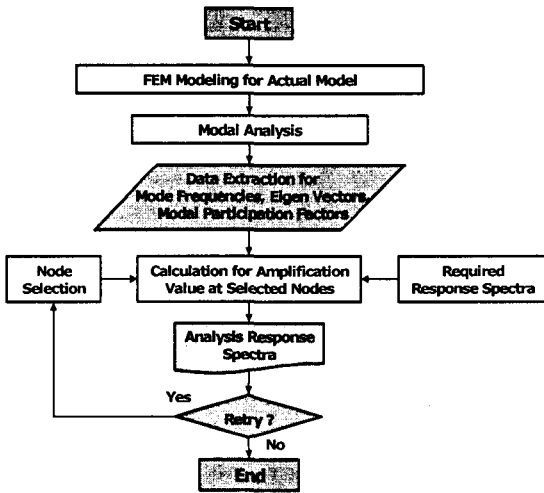


Fig. 2 Flow chart of the algorithm

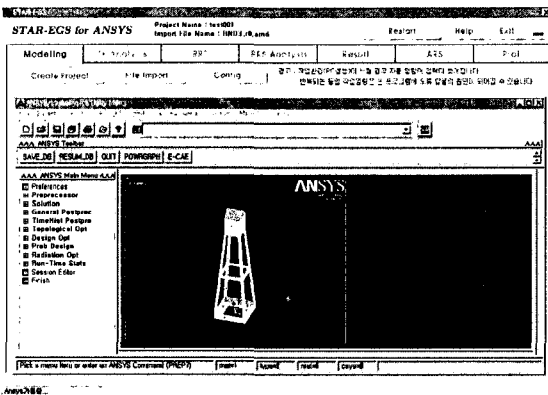


Fig. 3 Main screen of the STAR-Egs for ANSYS

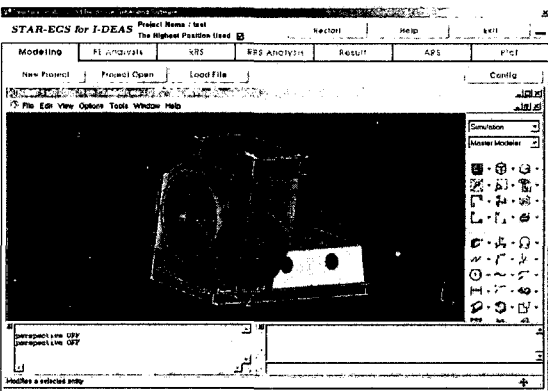


Fig. 4 Main screen of the STAR-Egs for I-DEAS

Fig. 3과 Fig. 4는 개발된 STAR-Egs 프로그램의 주 화면이다. 본 프로그램의 실행결과는 동일한 알고리즘에 대한 상용프로그램 MATLAB에서의 결과와 비교하였으며, 1% 미만의 오차( $10^{-6}$  order)를 가지는 아주 우수한 결과를 나타내는 것으로 확인되었다.

### 3. 실증 해석 및 시험

#### 3.1 실증 모델

본 연구의 시험사례구축 및 해석결과와의 비교를 위해 각기 다른 형태의 연구용 실증모델(R&D Model) 3종류를 설계 및 제작하였다.

본 연구에서는 실증 모델들에 대해서 모델의 동특성을 파악을 위한 모드시험(Modal Testing)<sup>(5)</sup>과 모델의 실제 시험 응답스펙트럼 파악을 위한 내진시험을 수행하였다.

Fig. 5~7은 실증모델의 제작도면을 나타낸 것이다. 각 모델의 부품은 단순 질량(Lumped Mass)으로 대체하였다.

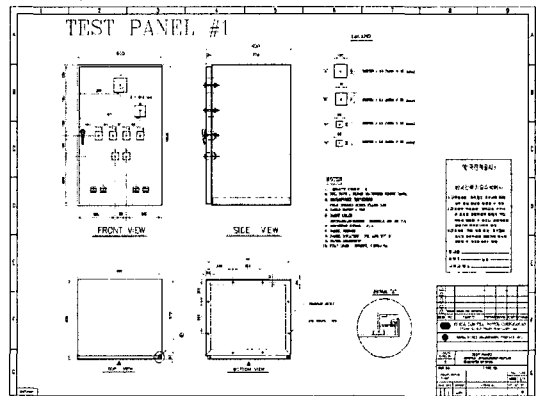


Fig. 5 R&D model no.1

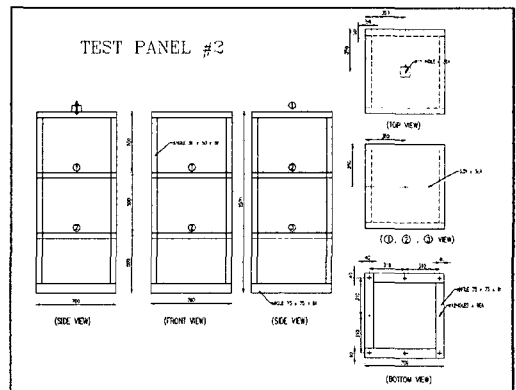


Fig. 6 R&D model no.2

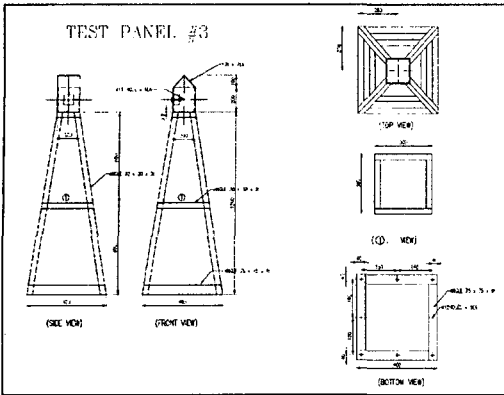


Fig. 7 R&D model no.3

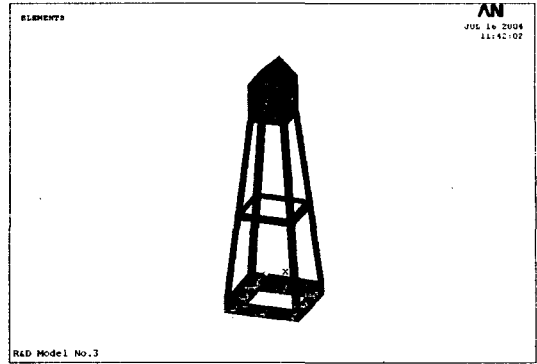


Fig. 10 Finite element model of R&D model no.3

### 3.2 모드 해석

실증시험용으로 제작된 모델들은 ANSYS 및 I-DEAS를 이용하여 유한요소(Finite Element) 모델을 구현하였다.

모델링 및 해석 결과의 오차 배제를 위하여 I-DEAS에서 모델링한 것을 ANSYS로 추출하였다. Fig. 8~10은 유한요소 모델로 구현될 실증모델을 나타낸 것이다.

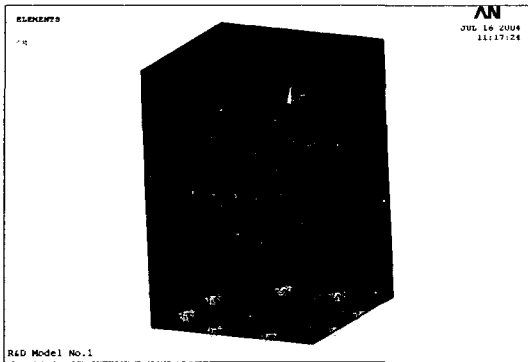


Fig. 8 Finite element model of R&D model no.1

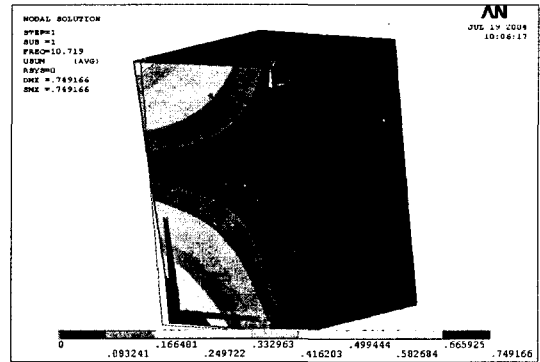


Fig. 11 1st mode of R&D model no.1

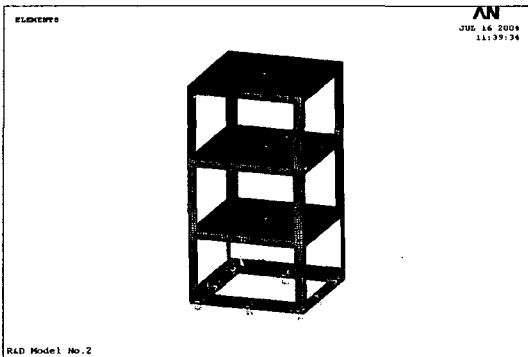


Fig. 9 Finite element model of R&D model no.2

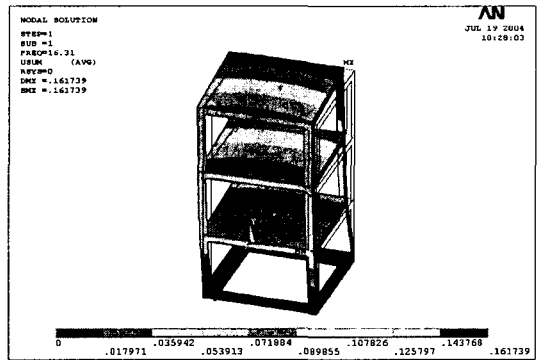


Fig. 12 1st mode of R&D model no.2

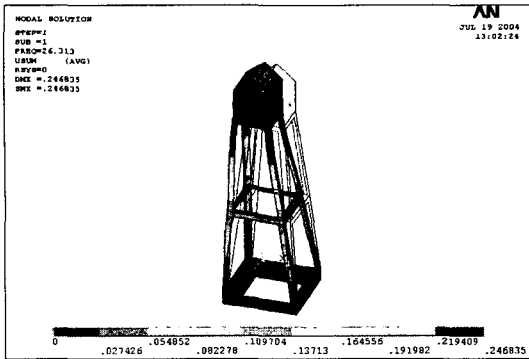


Fig. 13 1st mode of R&D model no.3

해석 모델의 구현에는 ANSYS의 BEAM4<sup>(6)</sup> 요소와 SHELL63<sup>(6)</sup> 요소 그리고, MASS21<sup>(6)</sup> 요소가 사용되었다.

해석 모델들은 바닥 면에 볼트결합으로 이루어져 있으며, 이에 대한 구속조건은 UX,UY,UZ를 구속하는 것으로 구현하였다. 또한 Door부분은 Hinge와 잠금장치 부분을 강체구속방정식(Constraint Equation)을 이용해 구속하였다. 구현된 유한요소 모델에 대한 모드해석(Modal Analysis)<sup>(7)</sup>을 통해 모드형상(Mode Shape), 모드주파수(Mode Frequency), 모드벡터(Mode Vector), 모드참여계수(Modal Participation Factor) 등의 모델의 동특성(Dynamic Characteristics)을 파악하였다. Fig.11~13은 모드해석결과로 구해진 각 모델의 첫 번째 모드를 표현한 것이다.

Table 1은 각 모델의 모드해석 결과 중 본 연구의 관심영역인 50Hz까지의 응답을 요약한 것이다.

Table 1 Mode frequencies of the R&D models based on the results of modal analysis using ANSYS

Mode	Model	No.1	No.2	No.3
1		10.7	16.3	26.3
2		27.5	23.1	26.8
3		28.1	35.2	48.9
4		35.0	-	-
5		41.2	-	-
6		47.9	-	-

### 3.3 모드 시험

실증 모델의 정확한 동특성과 실증모델에 대한 유한요소모델의 모드해석결과를 비교하기 위하여 모드시험을 실시하여 실증모델의 동특성을 명확히 판단하고자 하였다. Fig. 14~16은 각 모델에 대한 모드시험을 나타낸 것이다.

모드시험 방법은 SISO(Single-Input Single-Output)<sup>(5)</sup> 방법을 적용하였으며, 가진은 임팩트해머(Impact Hammer, B&K 4294)를 이용 충격가진을 실시하였으며 측정된 신호

는 FFT Analyzer를 통해 분석하였다.

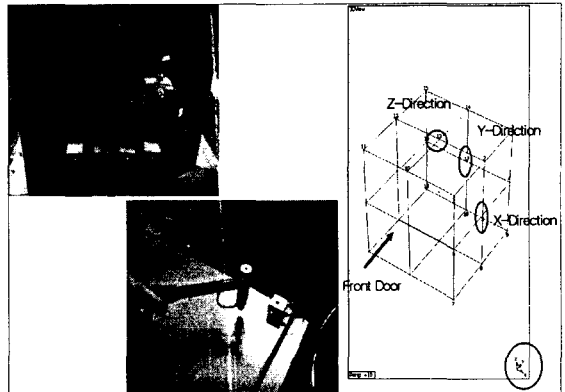


Fig. 14 Modal testing of the R&D model no.1

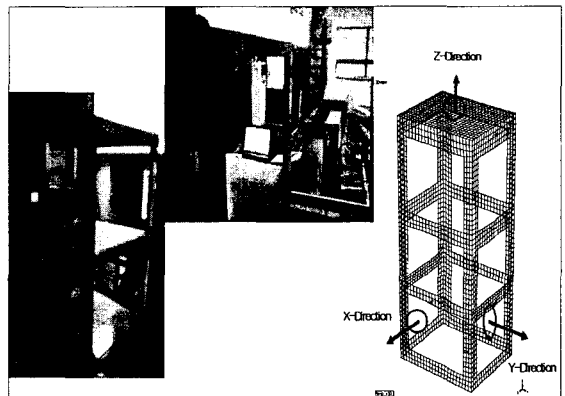


Fig. 15 Modal testing of the R&D model no.2

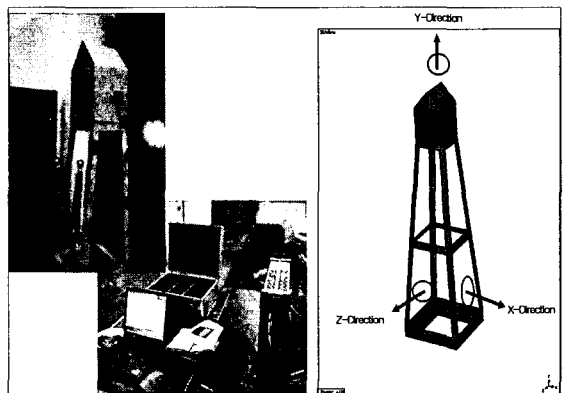


Fig. 16 Modal testing of the R&D model no.3

Table 2는 강체모드를 배제한 실제 실증모델들의 모드시험 결과를 요약한 것이다. 각 모델에 대한 해석과 실험결과에서 보듯이 모드형상을 포함한 동특성이 매우 유사함을 확인할 수 있었다.

Table 2 Mode frequencies of the R&D models based on the results of modal analysis

Model Mode	No.1		No.2		No.3	
	Freq.	Damping ratio	Freq.	Damping ratio	Freq.	Damping ratio
1	9.4	33.4	15.5	5.4	25.7	14.4
2	24.4	12.6	16.8	3.74	42.6	1.55
3	30.6	5.68	24.7	9.24	-	-
4	34.1	5.56	31.2	9.38	-	-
5	40.1	3.69	36.2	1.98	-	-
6	46.1	5.82	-	-	-	-

### 3.4 내진 시험

실증 모델에 대한 내진시험은 2축 내진시험 설비(Biaxial seismic table)를 이용하였으며, 시험은 일반적인 원자력 발전소용 기기에 대한 내진시험에 적용되는 IEEE 344-1987<sup>(8)</sup>에 따라 수행되었다. Fig. 17은 2축 내진시험 설비를 나타낸 것이다.

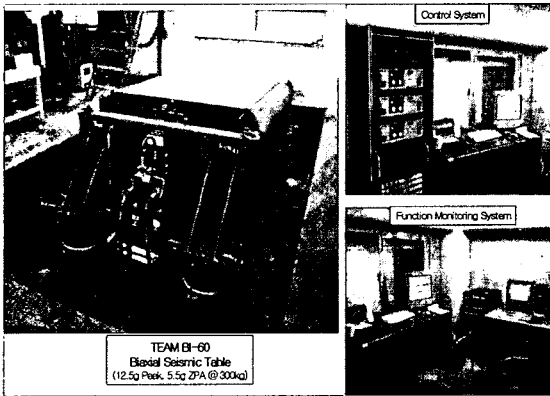


Fig. 17 Biaxial seismic test facility

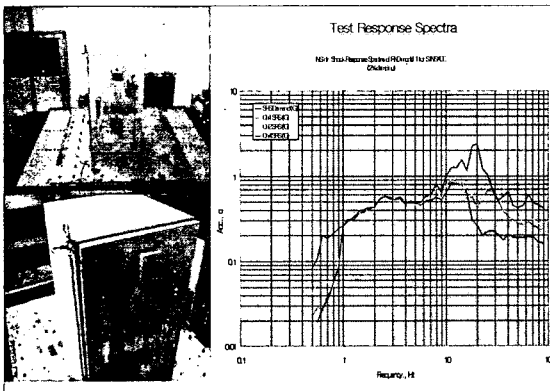


Fig. 18 Seismic testing for the R&D model no.1

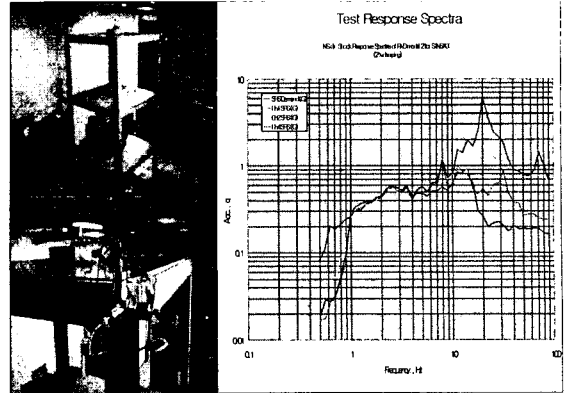


Fig. 19 Seismic testing for the R&D model no.2

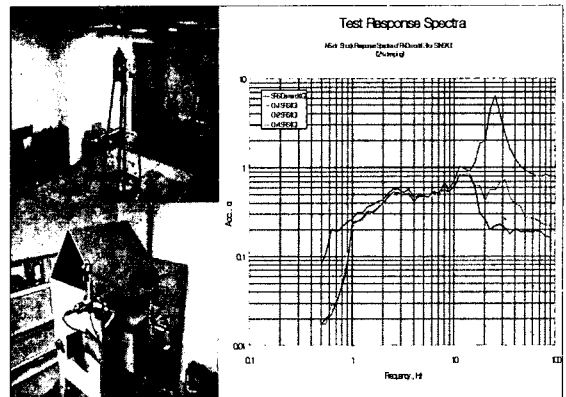


Fig. 20 Seismic testing for the R&D model no.3

시험에 사용된 요구응답스펙트럼은 한국전력기술주식회사 (KOPEC) 연구소의 자문을 통하여 제공받은 한국형 표준원전의 보조건물(Primary Auxiliary Building)에 적용되는 N-S(North-South), E-W(East-West), V-S(Vertical-Slab) 방향 데이터를 사용하였다. 시험 적용 감쇠(damping)는 2%이며, 운전기준지진(Operating Basis Earthquake, OBE)<sup>(1)</sup> 및 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake, SSE)<sup>(1)</sup>에 대한 내진시험이 수행되었다. 시험 모델의 실제 시험 응답스펙트럼을 측정하기 위한 가속도계(Accelerometer)의 부착위치는 해석모델에서의 해석응답스펙트럼 생성지점과 동일한 위치로 선정하였다. Fig. 18~20은 실증모델에 대한 내진시험을 나타낸 것이다.

### 3.5 결과 비교

Fig. 21~23은 실증시험을 통해 획득된 시험응답스펙트럼과 유한요소모델에 대한 모드 해석을 통해 획득된 동특성을 이용해 STAR-Egs 프로그램으로부터 생성된 해석응답스펙트럼을 나타낸 것이다.

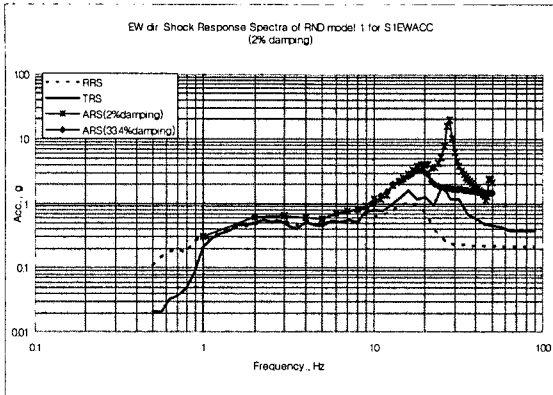


Fig. 21 Result comparison of response spectra for R&D model no.1

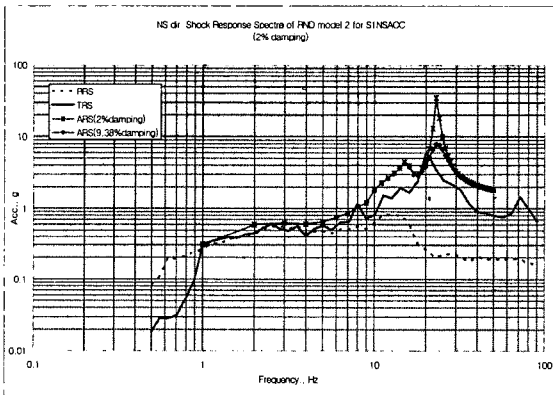


Fig. 22 Result comparison of response spectra for R&D model no.2

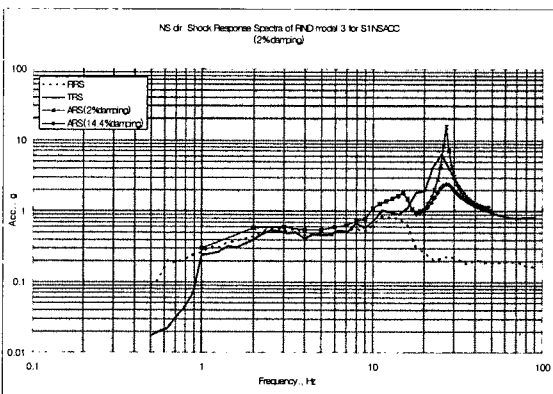


Fig. 23 Result comparison of response spectra for R&D model no.3

본 연구의 방법을 통해 유도된 응답스펙트럼이 첨두(Peak) 부분에서 실제 시험응답스펙트럼보다는 보수적인 값을 나타

낸다.

그러나 본 연구의 방법은 해석응답스펙트럼 생성시 요구응답스펙트럼의 감쇠값인 2% 감쇠를 적용했을 때 실제 시험응답스펙트럼보다 보수적으로 나타나지만 전반적으로 실제 시험응답스펙트럼과 유사한 양상으로 나타났다. 이렇게 보수적인 값을 나타내는 것은 해석응답스펙트럼 생성시 필요한 대상기 자체의 구조감쇠값을 실제 모드시험을 통하지 않고서는 구할 수 없기 때문이다.

이를 입증하듯이 실제로 해당모델에 대한 모드시험을 통해 알아낸 해석모델의 실제 감쇠값을 적용하였을 때는 실제 값과 아주 근사한 결과값을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

그러므로 본 연구에서 대상기기를 실제로 제작하지 않고 설계검토단계에서 대상기기의 해당부위에서의 원하는 응답을 보수적으로나마 실제 값과 같은 양상으로 나타낼 수 있다는 것을 입증하였다. 이것은 실제값과 다른 양상을 나타내거나, 실제보다 더 작은 값을 나타냄으로써 인해 발생할 수 있는 검증에서의 오류를 예방할 수 있다는 측면에서 의미있는 성과라 할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서 제시하는 해석을 통한 응답스펙트럼을 계산하는 기법은 기기검증대상물의 동특성 즉, 고유진동수, 모드형상, 감쇠비를 이용하여 주어진 지진파나 스펙트럼에 대한 응답을 엄밀한 모드해석 이론에 근거하여 계산하는 기법이며 따라서 해석결과에 높은 신뢰성을 줄 수 있다는 것을 실제 내진 시험을 통해 입증하였다.

본 연구를 통해 최종 개발된 STAR-Egs 프로그램은 프로그램심의조정위원회에 등록하였다. 또한 원자력발전소에 사용될 소프트웨어에 대한 요건인 인증 및 검증(Validation & Verification)을 위해, 정보통신부 산하 한국정보통신기술협회를 통한 소프트웨어 인증(Validation)을 수행하여 국제적인 Good Software 인증마크를 부여받았으며, 한국전력기술 주식회사의 검토를 통한 검증(Verification)을 수행하였다.

#### 후 기

본 논문은 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구결과입니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 한국전력주식회사, 1997, 원자력발전소 기자재 기기검증.
- (2) 변훈석, 이준근, 2002, 원자력 발전소용 주제어반의 내진검증, 제 12 권, 제 11 호, pp. 856~863.

- (3) Roy R. Craig, 1992, Structural Dynamics, John Wiley & Sons Publication, pp. 497~512.
- (4) 주식회사 새한검증(변훈석, 김유철 외 4인), 2004, 원자력기기 내진해석응답스펙트럼 생성프로그램 개발, 과학기술부 연구보고서.
- (5) D. J. Ewins, 2000, Modal Testing : Theory, Practice and Application 2nd Edition, Research Studies Press Ltd.
- (6) ANSYS Element Reference 11th Edition, 1999, SAS IP INC.
- (7) ANSYS Structural Analysis Guide 15th Edition, 1999, SAS IP INC.
- (9) ANSI/IEEE 344-1987, 1987, Recommended Practice For Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Station.
- (10) 이준근, 김진영, 정필중, 정정훈, 1999, 원자력 발전소 (영광 5 & 6호기)용 공조기에 대한 내진 검증, 한국소음진동공학회지(현 논문집), 제 9 권, 제 3 호, pp. 535~543.