

충격시험에 의한 실험모드특성을 이용한 구조물의 지진응답 예측

Seismic Response Prediction of a Structure Using Experimental Modal Parameters from Impact Tests

조성국¹⁾ · 조양희²⁾ · 소기환³⁾

Cho, Sung Gook · Joe, Yang Hee · So, Gi Hwan

국문 요약 >> 원자력발전소에 설치되는 주요 전기기기들의 내부 부품을 내진검증하기 위해서는 캐비닛내부응답스펙트럼이 필요하고, 이는 캐비닛의 각 위치에서 정확한 지진응답을 구한 후에 생성이 가능하다. 반면에 대부분의 전기기기는 질량과 강성 분포가 복잡하기 때문에 해석적 방법에 의해 동적 분석을 수행하는 것이 어렵다. 이러한 여건을 감안하여 이 연구에서는 해석과 시험을 조합하여 기기의 지진응답을 예측하는 간편한 절차를 제안하였다. 제안된 절차는 먼저 충격시험을 통하여 구명된 실험모드특성을 이용하여 독립된 모드방정식을 구성하고, 이로부터 모드응답을 계산한 다음, 각 모드응답을 중첩함으로써 구조물의 지진응답을 예측한다. 제안된 절차의 신뢰성을 검증하기 위해서, 별도로 제작된 단순 강재 프레임 시편에 제안된 절차를 적용하여 지진응답을 예측하고, 이를 실제 진동대시험을 통하여 측정한 결과와 비교하였다. 이 연구를 통하여 충격시험에 의해 얻어진 실험모드특성을 이용하여 구조물의 지진응답을 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 확인하였다.

주요어 내진검증, 캐비닛내부응답스펙트럼, 충격시험, 실험모드특성, 모드중첩

ABSTRACT >> An in-cabinet response spectrum should be generated to perform the seismic qualification of devices and instruments mounted inside safety-related electrical equipment installed in nuclear power plants. The response spectrum is available by obtaining accurate seismic responses at the device mounting location of the cabinet. The dynamic behavior of most of electrical equipment may not be easily analyzed due to their complex mass and stiffness distributions. Considering these facts, this study proposes a procedure to estimate the seismic responses of a structure by a combination of a test and subsequent analysis. This technique firstly constructs the modal equations of the structure by using the experiment modal parameters obtained from the impact test. Then the seismic responses of the structure may be calculated by a mode superposition method. A simple steel frame structure was fabricated as a specimen for the validation of the proposed method. The seismic responses of the specimen were estimated by using the proposed technique and compared with the measurements obtained from the shaking table tests. The study results show that it is possible to accurately estimate the seismic response of the structure by using the experimental modal parameters obtained from the impact test.

Key words Seismic qualification, In-cabinet response spectrum, Impact test, Experimental modal parameter, Mode superposition

1. 서론

원자력발전소에는 발전소의 운전에 필요한 각종 전기 제어 설비 및 기기들이 설치된다. 이 설비 및 기기들은 지진과

같이 발생 빈도가 낮은 자연 재해에 의해서도 오작동을 하거나 작동을 정지한다면 발전소의 안전성을 크게 위협할 수 있다. 그러므로 이러한 중요 설비들은 반드시 내진검증을 완료한 후 현장에 설치하도록 요구되어 있다.⁽¹⁾ 기기의 내진 검증은 해석 혹은 시험을 통하여 수행될 수 있으나, 전기 제어 기기와 같은 복잡한 설비들은 주로 시험을 통하여 수행된다. 그리고 전기 제어 설비 및 기기들은 대부분 캐비닛 형식의 기기들이다. 캐비닛 형식의 기기들의 내부에 수용된 중요 부품은 기기 전체를 대상으로 하는 진동시험을 실시하거나, 그 부품만을 별도로 분리한 시험을 통하여 검증된다.

¹⁾ 정회원·(주)제이스코리아, 이사

²⁾ 정회원·인천대학교 토목환경공학과, 교수
(교신저자: yhjoe@incheon.ac.kr)

³⁾ 정회원·인천대학교 토목환경공학과, 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2010년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2010. 2. 22 / 수정일 : 2010. 3. 17 / 게재확정일 : 2010. 3. 17)

원자력발전소의 전기기기들 중에서 분리된 부품을 대상으로 하는 내진검증시험은 그 부품의 위치에 대한 캐비닛내 부응답스펙트럼(In-Cabinet Response Spectrum: ICRS)⁽²⁾을 생성하고 이를 진동대의 입력운동으로 사용하여야 한다. ANSI/IEEE⁽¹⁾에서 추천하는 표준응답스펙트럼을 ICRS로 사용할 수 있다. 그러나 이는 과도하게 보수적인 경향이 있는 것으로 알려져 있다.⁽³⁾ 이를 대신하여 캐비닛 전체를 대상으로 하는 진동대시험 혹은 유한요소해석을 통하여 ICRS를 작성할 수 있다. 그런데, 전기기기와 같은 구조물의 내부에 포함된 부품과 부재의 연결은 매우 복잡하고, 불분명한 경우가 많으므로 해석모델을 정확하게 작성하는 것은 매우 어렵다. 반면에 진동대시험은 반드시 시편을 진동대에 위에 설치하여야 시험이 가능하고, 큰 비용이 요구된다.

원전의 미해결안전성문제 USI A-46⁽⁴⁾를 해결하기 위하여 기기의 내진검증에 필요한 ICRS의 생성에 관한 연구가 몇 차례 수행되었다. 과거에 Gupta et al.⁽⁵⁾ 그리고 Gupta and Yang⁽⁶⁾은 캐비닛의 동적특성을 계산하고 ICRS를 생성하기 위하여 2자유도 Ritz 벡터를 이용한 방법을 제안하였다. 이 방법을 기반으로 하는 전산프로그램은 Yang and Gupta⁽⁷⁾에 의해 발표되었다. 캐비닛의 동적특성은 하단부의 고정상태 즉, 경계조건의 표현에 따라서 달라질 수 있다. 캐비닛의 지진응답을 예측하는 기존 방법들⁽⁵⁻⁷⁾은 캐비닛 하단을 고정조건(Fixed Condition)으로 고려하고 기초판의 수평축 회전에 의한 들림(Uplift)을 허용하지 않음으로써 계산 결과에 오차를 포함할 가능성이 존재하였다. 이를 개선하기 위하여 Rustogi and Gupta⁽⁸⁾는 Ritz 벡터를 이용하는 기존 방법의 수정 방안을 제시하였다. 이와 같이, 과거에 제시된 ICRS를 계산하는 방법들은 주로 해석적 기법에 기반하여 캐비닛의 동특성을 평가한다. 그러나 전기 캐비닛과 같이 내부에 복잡한 부품과 연결을 포함하는 구조물의 동특성과 경계조건은 해석적으로 정확하게 구하기 어렵다. 이를 극복하기 위해서는 시험을 통하여 분석된 캐비닛의 정확한 모드 특성을 반영하여 해석모델을 구축하고 이를 바탕으로 ICRS를 작성하는 방안이 강구되어야 한다.

설치 전에 이미 내진검증이 수행된 전기 캐비닛이라도 보강 혹은 부품의 교체 등으로 인하여 특성의 변화가 발생한 경우에는 내진검증이 다시 요구될 수 있다. 전기 캐비닛에 대한 내진검증방법 중에서 가장 효과적이고 일반적인 방법은 캐비닛 전체를 대상으로 진동대시험을 시행하는 것이지만 원자력발전소에 이미 설치된 설비들은 시험을 위하여 현장을 이탈하는 것이 허용되지 않는다. 그러므로 원자력발전소 현장에 이미 설치된 기기를 대상으로 시험을 하

는 경우에는 현장에서 수행 가능한 시험방법이 선택되어야 한다.

최근에 구기영 등⁽⁹⁾은 구조물을 절점질량 모델로 이상화하고, 상태방정식을 구성하여 지진응답을 예측하는 연구를 수행하였다. 이 방법은 구조물의 상태방정식을 구성하기 위하여 캐비닛의 여러 위치에 대한 타격시험을 필요로 한다. 본 연구에서는 보다 단순한 충격시험과정으로 구조물의 동특성을 규명하고, 이를 반영하여 캐비닛 구조와 같은 소형 구조물의 지진응답을 예측하는 실용 절차를 제시하였다. 그리고 프레임 시편에 대한 진동 실험을 통하여 제안된 기법의 실용성을 검증하였다.

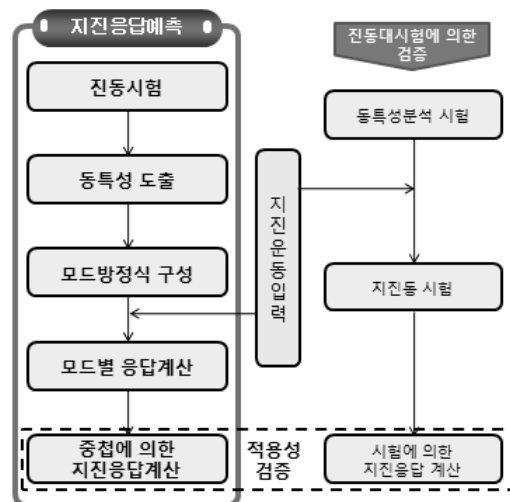
2. 지진응답 예측 기법

2.1 제안된 절차

이 연구에서 제안하는 기법은 진동시험을 이용하여 구조물의 모드특성을 분석하고, 이를 반영하여 모드방정식을 구성한 후, 구조물의 지진응답을 해석적 방법으로 예측하는 기법이다. 제안된 방법의 수행 과정과 검증 과정을 그림 1에 순서도로 나타내었다.

구조물의 지진응답을 예측하기 위해서는 동특성을 우선적으로 규명하여야 한다. 동특성은 구조물의 고유한 특성을 나타내는 지표로서 고유진동수, 모드형상, 감쇠비 등으로 표현된다. 이러한 동특성은 동적시스템의 운동방정식에 대한 고유치해석 혹은 진동시험에 의한 실험모드분석(Experimental Modal Analysis)을 통하여 구할 수 있다.

이 연구에서는 구조물의 동특성을 분석하기 위하여 진동시험을 이용한 방법을 선택하였다. 그리고 시험방법으로서



〈그림 1〉 지진응답예측 및 검증 과정

는 설비의 작동을 중지시키지 않고 현장에서 직접 시험이 가능한 충격해머시험법을 채택하였다. 충격시험법은 시험방법이 간편할 뿐 아니라 소규모 장비로 시험이 가능하고, 적은 충격량으로도 모드특성분석이 가능하여 전기 캐비닛과 같은 구조물에 특히 적합하다. 시험으로 구한 구조물의 동특성을 반영하여 대상 구조물의 지진응답을 예측하기 위해 시간이력해석법을 이용한 모드중첩법을 적용하였다.

2.2 지진응답의 계산

지진하중을 받는 다자유도 구조계의 운동방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = -[M]\{1\}\ddot{u}_g \quad (1)$$

여기서, $[M]$, $[C]$, $[K]$ 는 질량, 감쇠, 강도행렬 $\{u\}$, $\{\dot{u}\}$, $\{\ddot{u}\}$ 는 각각 변위, 속도, 가속도벡터, $\{1\}$ 은 방향벡터, \ddot{u}_g 는 지반가속도를 나타낸다.

위에서 변위벡터 $\{u\}$ 는 변위 형상함수 $\{\phi(z)\}$ 와 시간의 함수인 $\{q(t)\}$ 의 곱으로 나타낼 수 있다고 가정하고, 모드의 직교성을 이용하면, 다음과 같은 N 개의 비연계된 일반화된 모드방정식을 얻는다.⁽¹⁰⁾

$$m_i \ddot{q}_i(t) + c_i \dot{q}_i(t) + k_i q_i(t) = -L_i \ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

$(i=1, 2, 3, \dots, N)$

식 (2)의 m_i , c_i 및 k_i 는 각각 i 번째 모드에 대한 일반화된 질량, 감쇠와 강도로서 다음과 같다.

$$m_i = \{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\} \quad (3a)$$

$$c_i = \{\phi_i\}^T [C] \{\phi_i\} = 2\xi_i m_i \omega_i \quad (3b)$$

$$k_i = \{\phi_i\}^T [K] \{\phi_i\} = m_i \omega_i^2 \quad (3c)$$

여기서 $\{\phi_i\}$ 는 i 번째 모드벡터이고, ξ_i 와 ω_i 는 각각 i 번째 모드의 감쇠비와 고유진동수이다. 그리고 식 (2)의 우변 항인 모드지진입력계수는 다음의 관계를 갖는다.

$$L_i = \{\phi_i\}^T [M] \{1\} \quad (4)$$

식 (2)를 식 (5)와 같이 변환하면, 모드진동수와 모드감쇠비 및 모드형상만으로 모드방정식을 표현할 수 있다.

$$\ddot{q}_i(t) + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = -\Gamma_i \ddot{u}_g(t) \quad (5)$$

여기서 Γ_i 는 i 번째 모드참여계수로서 i 번째 모드가 응답에 참여하는 정도를 나타내며 식 (6)과 같이 정의된다.

$$\Gamma_i = \frac{L_i}{m_i} = \frac{\{\phi_i\}^T [M] \{1\}}{\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\}} \quad (6)$$

이 연구에서는 실험을 통하여 얻은 모드특성을 이용하여 지진응답을 예측하기 위해 식 (5)를 직접 적분하였다. 직접 적분에 이용된 방법은 수렴성이 우수한 Newmark β 의 평균가속도법⁽¹⁰⁾이다. 각 모드좌표계의 응답은 선형중첩하고, 모드벡터와 실제 응답의 관계를 이용하여 물리좌표계로 변환하였다. 이 과정을 계산하기 위하여 MATLAB 프로그램⁽¹¹⁾을 사용하였다. 이 연구의 절차에서 식 (5)의 구성에 필요한 모드감쇠비와 모드진동수 및 모드벡터는 실험모드분석을 통하여 구한다.

2.3 실험모드분석

실험 혹은 시험을 이용하여 구조물의 동특성을 규명하는 실험모드분석 혹은 시스템규명(System Identification)은 고속 푸리에변환(Fast Fourier Transform: FFT)의 실행이 가능해지기 시작한 1970년대 이후에 혁신적인 발전을 거듭하여 오고 있다.⁽¹²⁾ 실험모드분석은 시간영역모델을 이용하는 경우와 진동수영역모델을 이용하는 경우로 구분할 수 있다. 진동수영역모델을 이용하는 방법은 구조물의 진동수응답함수를 이용하여 모드특성을 추출해 내는 방법으로서 선형정상거동(Linear Stationary Behavior)을 분석하는 경우에 보다 유용한 결과를 얻을 수 있고 시간영역모델을 이용하는 경우보다 더 쉽게 적용 가능하다. 이 연구에서는 선형시스템을 대상으로 하므로 실험모드분석을 위하여 진동수영역모델을 이용하였다.

진동수영역에서 구조물의 응답과 하중의 관계는 식 (7)과 같이 전달함수(Transfer Function)를 이용하여 표현한다.

$$\{X(s)\} = [H(s)]\{F(s)\} \quad (7)$$

여기서,

s : 라플라스 변수

$[H(s)]$: 전달함수 행렬 ($n \times n$)

$\{X(s)\}$: 변위의 라플라스 변환 행렬 ($n \times 1$)

$\{F(s)\}$: 하중의 라플라스 변환 행렬 ($n \times 1$)
 n : 구조물의 총 자유도 수

전달함수 행렬은 다음과 같은 부분분수(Partial Fraction)의 형태로 전개할 수 있다.⁽¹²⁾

$$[H(s)] = \sum_{k=1}^N \left(\frac{[r(k)]}{(s-p_k)} + \frac{[r(k)^*]}{(s-p_k^*)} \right) \quad (8)$$

여기서,

N : 모드의 개수

$[r(k)]$: k 번째 모드 유수행렬(Residue Matrix) ($n \times n$)

$p_k = -\sigma_k + j\omega_k$: k 번째 모드의 극(pole)의 위치

σ_k : k 번째 모드의 감쇠비

ω_k : k 번째 모드의 고유진동수

*: 공액복소수 (Complex Conjugate)

$j = \sqrt{-1}$

유수행렬과 모드형상은 다음의 관계를 갖는다.⁽¹²⁾

$$[r(k)] = A_k \{\phi_k\} \{\phi_k\}^T \quad (9)$$

여기서,

A_k : k 번째 모드의 비례상수(Scaling Constant)

$\{\phi_k\}$: k 번째 모드형상벡터(Mode Shape Vector)

$\{\phi_k\}^T$: $\{\phi_k\}$ 의 전치행렬(Transposed Matrix)

그리고 모드질량(Modal Mass)의 정의는 다음과 같다.⁽¹³⁾

$$\{\phi\}^T [M] \{\phi\} = \begin{bmatrix} \ddots & & & \\ & m_k & & \\ & & \ddots & \\ & & & \ddots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddots & & & \\ & \frac{1}{A_k \omega_k} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \ddots \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서, $[M]$ 은 ($n \times n$)의 질량행렬이고, $\{\phi\}$ 는 ($n \times N$)의 모드벡터행렬 그리고 m_k 와 ω_k 는 각각 k 번째 모드질량과 모드진동수이다. 모드질량을 단위모드질량(Unit Modal Mass)으로 비례조정하면 식 (10)에서 k 번째 모드의 비례상수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_k = 1/\omega_k \quad (11)$$

단위모드질량을 만족하는 모드벡터에 대하여 k 번째 모드

변위는 식 (9)의 유수행렬의 j 번째 행의 성분과 식 (12)와 같은 관계를 가지므로 이로부터 모드벡터가 구해진다.⁽¹³⁾

$$\begin{Bmatrix} \phi_{1k} \\ \phi_{2k} \\ \vdots \\ \phi_{nk} \end{Bmatrix} = \sqrt{\frac{\omega_k}{r_{jj}(k)}} \begin{Bmatrix} r_{1j}(k) \\ r_{2j}(k) \\ \vdots \\ r_{nj}(k) \end{Bmatrix} \quad (12)$$

전달함수는 복소수 라플라스 평면($s = \sigma + j\omega$)에서 정의되는 반면에 실험에서는 전달함수의 값이 단지 s -평면의 허수축($s = j\omega$)을 따라 측정된다. 식 (8)의 전달함수에서 s 의 허수축만을 선택하여 정리하면, 진동수응답함수(Frequency Response Function)가 된다. 진동수응답함수는 원점을 기준으로 대칭이므로 양의 구간 혹은 음의 구간의 함수를 선택적으로 이용하여도 동일한 결과를 얻을 수 있다. 이 연구에서는 측정된 진동수응답함수의 양의 구간만을 선택하여 분석하였다. 다항식회귀분석법(Polynomial Curve Fitting Method)은 대표적인 진동수영역 실험모드분석방법이다. 이 연구에서는 식 (8)의 모드별 진동수와 감쇠비 및 유수(Residue)를 구하기 위하여 시험에서 얻어진 진동수응답함수에 유리화 분수 최소자승법(Rational Fraction Least Squares Method)을 이용한 다항식회귀분석법⁽¹⁴⁾을 적용하였다. 이상적인 경우에, 실험모드분석에서 구한 모드형상은 고유치 해석과 비교하여 정확하게 일치한다.⁽¹⁵⁾

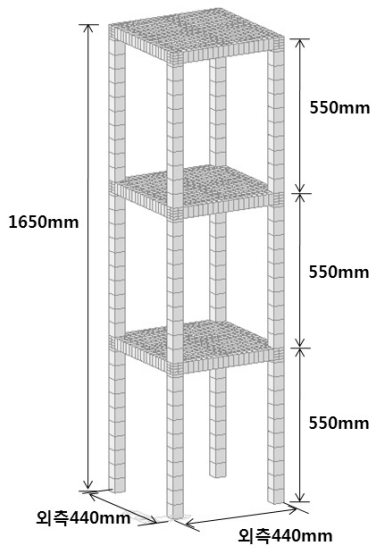
3. 진동시험

앞서 설명된 지진응답 예측 절차의 실용성을 검증하기 위하여 이 연구에서는 프레임 구조물 시편을 제작하고, 이를 대상으로 두 가지 진동시험을 실시하였다. 첫 번째 진동시험은 충격시험으로서 모드특성을 규명하기 위한 시험이다. 그리고 다른 하나는 진동대시험으로서 임의의 지진운동에 대한 시편의 실제 지진응답을 측정하기 위한 시험이다. 진동대시험에서 얻은 측정자료는 충격시험모드 특성을 이용하여 예측한 지진응답과 비교하였다.

3.1 시편

이 연구에서 제작한 시편은 그림 2와 같은 3층의 프레임 구조로 주요 부재는 4개의 기둥과 각 층의 슬래브 판 및 보 강용 보이다.

시편의 총 높이는 1650mm이며 각 층의 간격은 550mm이다. 바닥면적은 440×440(mm)의 정사각형 형태이다. 시편을 구성하는 모든 부재의 재질은 구조용 강재로서 강종은



〈그림 2〉 프레임 시편의 형상 및 제원

SS400이다. 기둥과 보 부재는 공장제품 사각 파이프이다. 각 층 슬래브 판의 하부에는 기둥과 동일한 규격의 사각 파이프를 십자형으로 보강하였다. 보와 기둥 부재의 규격은 □-40×40×2.3(mm)이고, 슬래브 판의 두께는 12mm이다.

시편 기둥의 하단에는 시편을 바닥에 고정시키기 위하여 바닥철판을 용접으로 부착하고, 기둥의 양 옆은 리브(Rib)로 보강하였다. 바닥판을 제외한 시편의 중량은 64.8kg이고, 바닥판을 포함하면, 103.5kg이다.

3.2 시험 설비 및 계측장비

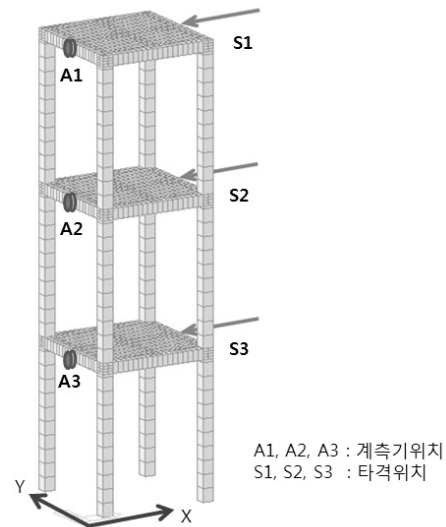
시편의 진동응답을 계측하는 계측기는 PCB 393B04 전 단형 가속도계로서 민감도는 1000mV/g이고, 계측 가능한 진동수 범위는 0.06 ~ 450Hz 이다. 시편에 부착한 가속도계는 총 3개로서 시편 각 층 보의 중심 부분에 부착하였다. 그리고 진동대시험에서는 프레임 하단에 가해진 지진의 실제 입력운동 값을 계측하기 위하여 진동대의 중앙부에 한 개의 가속도계를 추가로 부착하였다.

가진장치로서 충격시험에 사용한 해머는 PCB 086D20 모델로서 망치의 머리 무게는 1.36kg(3파운드)이다. 지진응답시험에 사용된 진동대는 유압식 소형 진동대로서 500kg의 물체를 최대 3g의 가속도로 가진할 수 있다. 신호의 계측과 FFT 변환을 위하여 사용된 장비는 프랑스 OROS 사의 휴대용 8채널 FFT 분석기인 OR38 모델이다.⁽¹⁶⁾

충격시험과 진동대시험이 진행되는 동안 시편의 바닥판은 16개의 고정력 볼트로 진동대에 고정하였다. 그림 3은 시험을 위하여 진동대 상단에 고정된 시편의 형상을 보인 것이다.



〈그림 3〉 진동대에 설치된 시편 및 계측기 부착



〈그림 4〉 응답신호의 계측기 위치와 타격 위치

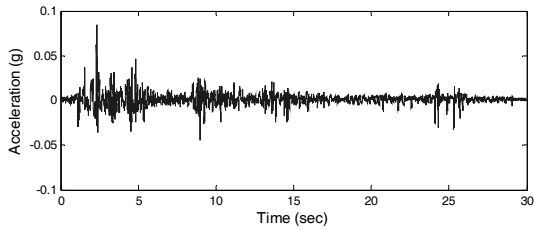
3.3 시험 방법

충격해머를 이용한 진동시험에서 타격 위치는 가속도계가 설치된 반대편 보의 중심점으로 정하였다. 이 위치는 슬래브 하단에 십자형 보가 보강되어 강성이 큰 위치이다. 타격은 각 층별로 3회씩 가하였고, 각 회차에서 계측한 전달함수를 평균하여 최종 전달함수를 얻었다. 그림 4는 충격시험에서 타격한 위치와 응답의 계측 위치를 보인 것이다.

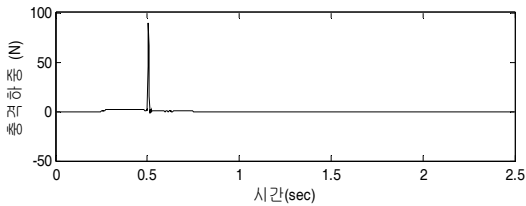
진동대시험에서는 실제 기록지진과 유사한 형태의 시간

이력가속도 신호를 진동대에 입력하였다. 이 입력운동은 E1 Centro 지진의 남북방향 성분을 진동대의 성능에 맞도록 수정하여 생성하였다.

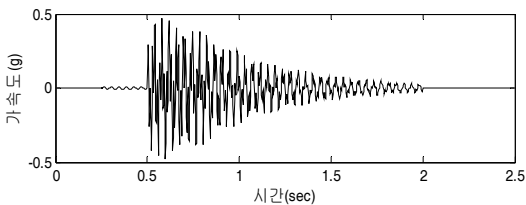
그림 5는 지진시험으로부터 진동대에서 계측한 입력운동의 시간이력가속도 신호를 보인 것이다. 진동대운동의 최대 가속도는 0.0849g 이고, 지속시간은 30초이다. 모든 시험에서 계측한 신호의 샘플링 개수는 초당 256개이므로 각 신호의 시간간격은 1/256초이다.



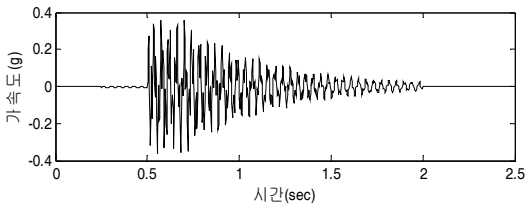
〈그림 5〉 진동대운동의 시간이력가속도



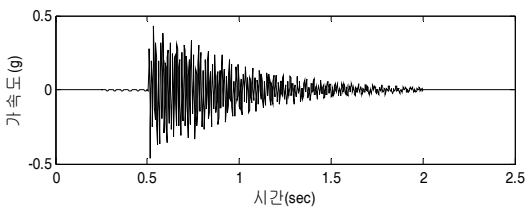
(a) 충격하중



(b) A1 응답



(c) A2 응답

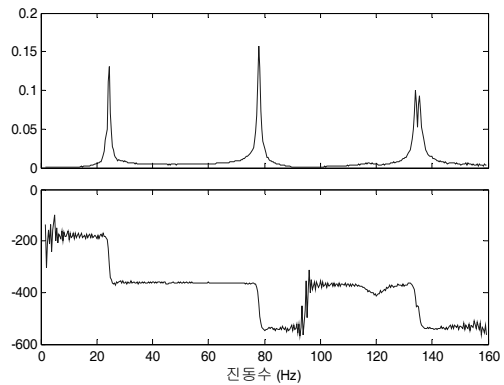


(d) A3 응답

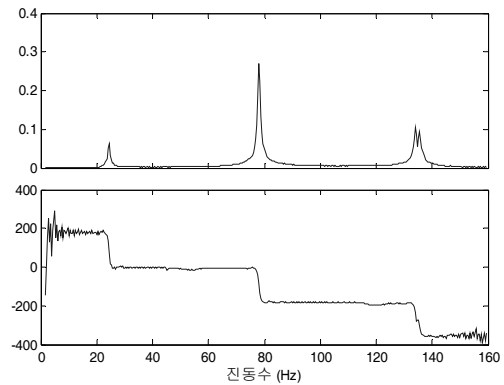
〈그림 6〉 상단타격(S1)에 대한 계측기 응답의 시간이력곡선

4. 동특성 분석 결과

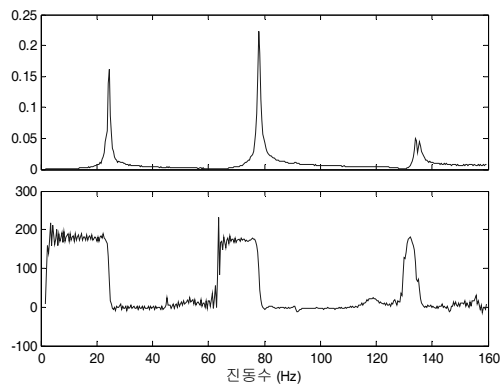
그림 6은 충격해머시험의 상단에 타격된 충격하중(S1)과 그에 대한 응답가속도를 계측하여 그래프로 나타낸 것이다. 이때 가해진 충격하중은 약 100N이다. 시험에서 계측한 충격신호와 응답가속도신호로부터 계산된 전달함수는 그림 7에 보인 바와 같다. 그림 7에서, 전달함수의 진폭곡선에는 분명하게 구분되는 3 개의 피크(Peak)가 존재하고, 이 부근에서 위상각도 뚜렷하게 변화한다. 이 논문에 그림으로 제



(a) A1 응답



(b) A2 응답



(c) A3 응답

〈그림 7〉 상단타격(S1)에 대한 계측기 응답의 전달함수

시되지는 않았으나, 중단 타격시험과 하단 타격시험의 경우에도 전달함수의 진폭의 크기만 달라질 뿐 함수의 형태는 동일하다.

시편의 모드특성 값은 전달함수에 다항식회귀분석법을 적용하여 검증하였다. 이 과정을 위하여 STAR System 전산프로그램⁽¹⁴⁾이 사용되었다. 이 프로그램에서는 실험으로 얻은 FRF 자료를 다항식에 대한 최소자승회귀분석 방법을 사용하여 각각의 진동모드에 대한 중간 추정 값을 얻어내 다항식 곡선을 산출한다. 그림 8은 그림 7의 전달함수에 다항식회귀분석법을 적용하여 곡선식으로 근사하는 과정을 보인 것이다.

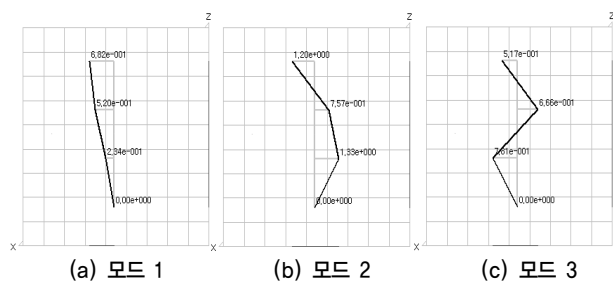
모드특성분석에서 얻어진 시편의 모드진동수와 모드감쇠비를 표 1에 정리하였다. 그리고 추출된 시편의 모드형상은 그림 9와 표 2에 나타내었다. 이 연구에서는 3개 지점의 응답을 계측하였으므로 3절점 모델로 이상화하였다.



〈그림 8〉 다항식회귀분석법의 적용 결과

〈표 1〉 시편의 모드진동수와 모드감쇠비

모드번호	모드진동수(Hz)	감쇠비(%)
1	24.3	1.19
2	78.1	0.50
3	134.5	0.65



〈그림 9〉 충격시험에 의해 추출한 시편의 모드형상

〈표 2〉 상대변위로 나타낸 시편의 모드형상

구 분	모드 1	모드 2	모드 3
상 (A1)	0.682	1.200	0.517
중 (A2)	0.520	-0.757	-0.666
하 (A3)	0.234	-1.330	0.781

〈표 3〉 충격해머시험과 진동대시험의 고유진동수 비교 단위 : Hz

모드번호	진동대시험	충격해머시험
1	24.8	24.3
2	78.0	78.1
3	133.2	134.5

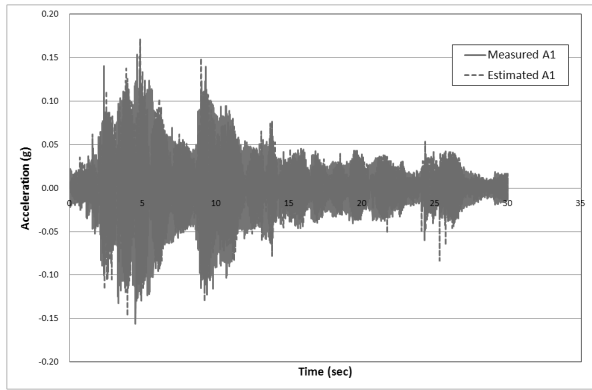
5. 지진응답 예측 및 검증

시편에 대한 충격해머시험으로 구한 동특성을 이용하여 예측한 지진응답 결과를 검증하기 위하여 진동대시험으로부터 계측된 각 층의 가속도 응답을 비교 하였다.

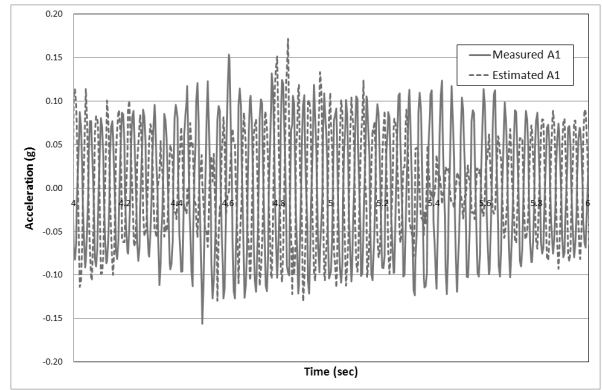
지진응답의 비교에 앞서, 진동대시험으로부터 계측된 신호의 전달함수를 분석하여 구한 고유진동수와 앞서 충격시험에서 구한 고유진동수를 비교하였다. 표 3에서 보는 바와 같이 두 가지 시험에서 구한 진동수는 잘 일치하고 있으므로 충격시험에 의해 구한 모드특성의 신뢰성을 입증해 주고 있다.

모드중첩법을 이용한 지진응답의 예측에서는 앞서 구해진 표 1과 표 2의 모드특성을 입력하였다. 즉, 각 모드의 지진응답을 구하기 위해서 실험에서 구해진 표 2의 모드형상을 식 (6)에 대입하여 모드참여계수를 계산하고, 이와 함께 또 다른 동특성 결과인 표 1의 모드진동수와 모드감쇠비를 식 (5)에 직접 대입하여 모드별 지진응답을 계산하였다. 이후에 모드중첩법을 이용한 지진응답해석 절차에 따라 전체 좌표계에서의 절대가속도 응답이 구해진다. 이 연구에서는 시편의 3개 위치에서 가속도 신호를 계측하고, 3개의 모드를 추출하였으므로 3개 모드의 응답을 중첩하였다. 이때 시편의 전체 질량은 각 층에 등분하여 집중되는 것으로 가정하였다.

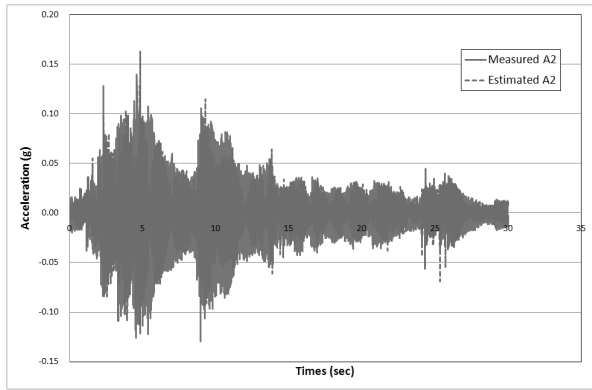
이 연구에서 제시된 절차에 따라 예측된 지진응답과 진동대를 이용하여 계측한 응답의 시간이력신호를 그림 10에 비교하였다. 그림 10에서 시험과 해석으로 예측한 신호는 전체적으로 유사한 형태를 보이고 있으나, 정확하게 일치하지는 않는다. 보다 상세한 비교를 위하여 그림 11에 최대응답이 나타나는 시간 구간을 확대한 그림을 비교하였다. 그림 11에서 두 곡선의 차이를 보다 확실하게 확인할 수 있다. 이



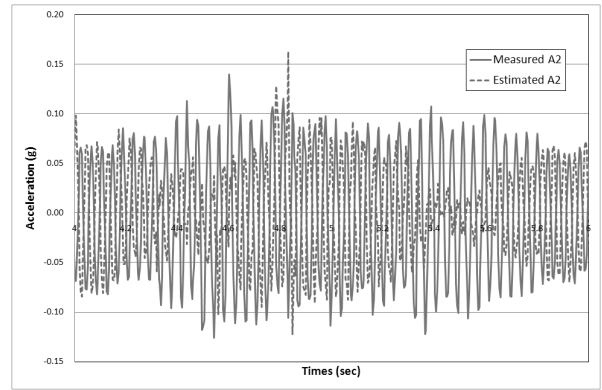
(a) A1 (전구간)



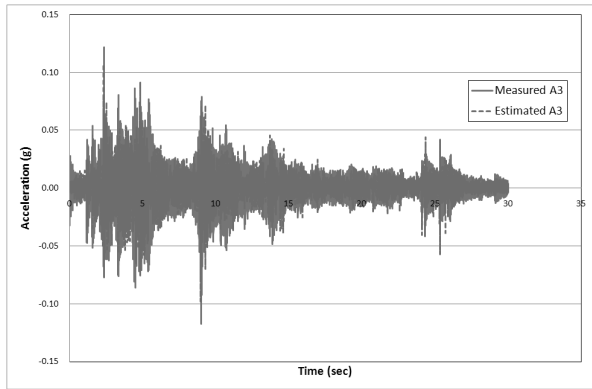
(b) A1 (4 ~ 6 sec)



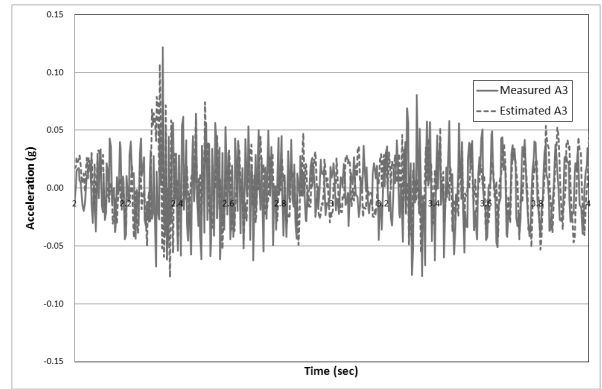
(c) A2 (전구간)



(d) A2 (4 ~ 6 sec)



(e) A3 (전구간)



(f) A3 (2 ~ 4 sec)

〈그림 10〉 시편의 지진응답(전구간) 비교

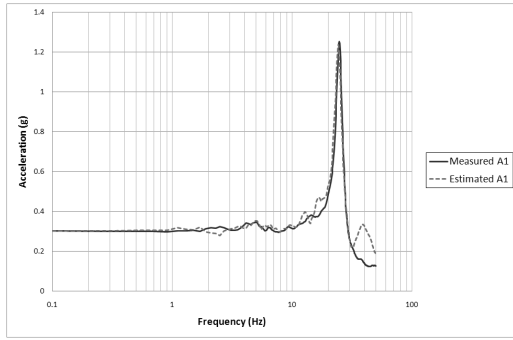
〈그림 11〉 시편의 지진응답(최대 응답 부분) 비교

차이는 시험을 수행하는 동안 각종 원인에 의해 계측신호에 잡신호(Noise)가 포함되기 때문인 것으로 판단한다.

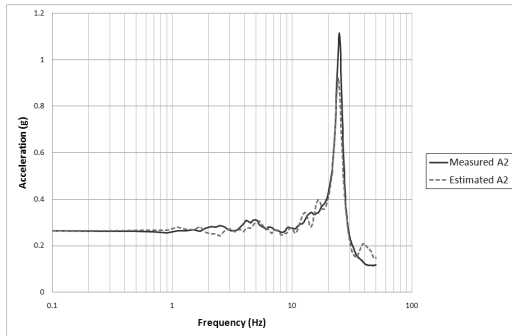
한편, 이 연구에서는 계측된 신호에 기준선 보정(Baseline Correction) 혹은 필터처리(Filtering) 등과 같은 특별한 신호처리 과정을 생략하였다. 이는 신호처리의 기법에 따라 계측된 신호가 왜곡될 수 있는 우려를 고려한 것으로 이에 대해서는 추후에 보다 상세한 연구가 수행될 예정이다.

앞서 기술된 바와 같이, 이 연구의 주 목적은 충격시험에 의해 ICRS를 구하는 것이므로, 이번에는 시험과 예측으로 구한 두 가속도응답에 대한 응답스펙트럼의 5% 감쇠 곡선

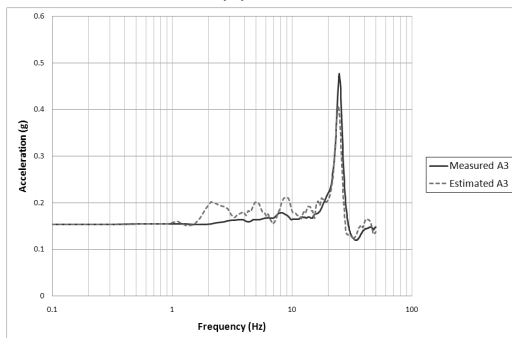
을 비교하였다. 그림 12에서 확인하는 바와 같이, 이 연구에서 제시한 절차에 따라 예측된 지진응답의 응답스펙트럼 곡선은 그 형태가 시험으로 구한 응답스펙트럼 곡선과 매우 유사하다. 그러나 표 4에 비교한 바와 같이, 예측된 최대 응답의 크기는 시험에서 계측된 응답에 비하여 중간층과 하단에서 약 17.2%와 14.5% 정도의 오차가 발생하였다. 이는 앞서 밝힌 계측신호의 잡신호에 의한 영향과 이 연구에서 시편의 질량을 각 층에 등분하여 배분한 것으로 가정하였기 때문인 것으로 판단된다.



(a) A1



(b) A2



(c) A3

〈그림 12〉 시편 각 층의 응답스펙트럼(5% 감쇠) 비교

〈표 4〉 시편의 최대스펙트럼 가속도 비교

응답위치	최대 스펙트럼가속도 (g)		오차(%)
	시험	예측	
A1	1.252	1.237	1.2
A2	1.114	0.922	17.2
A3	0.477	0.408	14.5

오차(%)=(시험-예측)/시험 (%)

6. 결 론

이 연구에서는 현장에서 쉽게 적용 가능한 충격시험을 통하여 분석된 구조물의 동특성 자료를 이용하여 지진응답을 예측하는 절차를 제시하였다. 제시된 절차에 따라 예측한 지진응답을 진동대시험 결과와 비교함으로써 제안된 절차의 실용성을 검증하였고, 이 과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 충격시험에 의한 실험모드특성을 사용하면, 해석모델의 작성이 없이도 신뢰성 있는 구조물의 지진응답을 예측할 수 있다. 이 방법을 이용하면 시험에 의한 동특성 자료만을 사용하여 지진응답을 효과적으로 예측할 수 있으므로 복잡한 구조물의 모델링 오차를 확실하게 제거할 수 있다.
2. 이 연구에서 분석된 시편과 같이 비교적 단순한 구조물인 경우에는 충격해머시험을 이용하여도 진동대시험을 통하여 얻은 동특성과 동일한 특성을 추출 할 수 있다.
3. 제안된 절차의 정확성을 향상시키기 위해서는 시험을 통하여 구조물의 질량행렬을 정확하게 예측하는 과정이 선행되어야 하므로 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 인천대학교 2008년도 자체 연구비 지원에 의하여 수행된 연구이며, 저자 일행은 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. ANSI/IEEE, IEEE Recommended Practices for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, Std.-344, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2004.
2. Djordjevic, W., O'Sullivan, J.J., Guidelines for Development of In-Cabinet Amplified Response Spectra for Electrical Benchboards and Panels, EPRI NP-7146s-M, Prepared by Stevenson & Associates, Inc., 1990.
3. Bandyopadhyay, K.K. and Hofmayer, C.H., Seismic Fragility of Nuclear Power Plant Components (Phase I), NUREG/CR-4659, US Nuclear Regulatory commission, 1986.
4. T.Y. Chang, Seismic qualification of equipment in operating nuclear power plants, USNRC, NUREG-1030, 1985.
5. Gupta, A., Yang, S.K. and Gupta, A.K., "Ritz Vector Approach for Evaluating Incabinet Response Spectra," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 190, 255-272, 1999.
6. Gupta, A., and Yang, J., "Modified Ritz Vector Approach for Dynamic Properties of Electrical Cabinets and Control Panels," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 217, 49-62, 2002.
7. Yang, J., and Gupta, A., "INCABS: A Computer Program for Evaluating Incabinet Spectra," Paper #2072, Transactions, SMiRT 16, Washinton DC, August 2001.
8. Rustogi, S., and Gupta, A., "Modeling the Dynamic Behavior of Electrical Cabinets and Control Panels: Experimental and Analytical Results," *J. Structural Engineering*, Vol. 130, No. 3, 511-519, 2004.
9. 구기영, 최진타오, 조성국, 김두기, "진동시험을 이용한 원자

- 력발전소 캐비닛구조의 지진응답예측 기법,” 한국지진공학회, 제12권, 제5호, 57-63, 2008.
10. 김두기, 구조동역학, 제 2판, 구미서관, 2009.
 11. MATLAB, The Language of Technical Computing, Version 7.0, Mathworks, 2004.
 12. Richardson, M. and Schwarz, B., “Modal Parameter Estimation form Operating Data,” Sound and Vibration, January 2003.
 13. Richardson, M., “Modal Mass, Stiffness and Damping,” Vibrant Technology, Inc., Jamestown, CA, January, 2000.
 14. STAR User's Guide, Spectral Dynamics, Inc., 1996.
 15. 조성국, 조양희, 소기환, “실험모드분석에 의한 3층 프레임 시편의 지진응답 예측,” 한국지진공학회 2010 춘계학술발표회 논문집, 강원대학교, 2010. 3. 19.
 16. 3-series/NVGate Reference Manual, OROS, 2006.