

감진계통 지지부가 설치된 기기의 지진해석

Seismic Response Analysis of Support-Isolated
Equipment in Primary Structure

김영상* · 이동근**

Kim, Young Sang · Lee, Dong Guen

Abstract

The effectiveness of the support-isolation system for the equipment mounted on the primary structure is evaluated to reduce its responses under the earthquake load with considering the interaction between the primary structure and the internal equipment in this paper. A computer code (KBISAP) is developed to analyze the above system using the matrix condensation technique and constant average acceleration method. To evaluate the effectiveness of the support-isolation system, three systems are used in this study as follows: i) fixed-base structure with support-fixed equipment, ii) base-isolated structure with support-fixed equipment and iii) fixed-base structure with support-isolated equipment.

The results of case study show that the acceleration of equipment with the support-isolation system is less than that of the support-fixed equipment in the base-isolated structure and significantly reduced the response compared with that of the support-fixed equipment in the fixed-base structure with the reduction factor of 8. The support-isolation system used in this study can reduce the response and also increase the safety margin of the important safety-related internal equipments.

요 지

본 논문에서는 주 구조물 내에 설치된 기기의 지지점에 감진계통을 도입함으로써 지진하중에 대한 기기의 응답감소효과를 연구하였으며, 효율적인 해석을 수행하기 위해 구조물-기기 상호작용 고려 및 축소 행렬방법을 이용한 전산프로그램 (KBISAP)을 개발하였다. 지지점에 감진장치가 설치된 기기의 지진하중에 대한 응답감소 효율성을 평가하기 위해 세가지 해석모델, 즉 고정기초구조물 상의 지지점이 고정된 기기, 감진기초구조물 상의 지지점이 고정된 기기 및 고정기초구조물 상의 지지점에 감진계통이 설치된 기기를 채택한 예제해석 결과, 본 논문에서 채택한 방법이 일반적인 고정기초구조물은 물론 감진기초구조물 상에 설치된 기기의 지진하중에 대한 응답감소 보다 더 효율적임을 알 수 있었다. 따라서 본 방법은 기기의 응답감소는 물론 중요한 기기의 안전성 향상에 효과적이다.

* 정희원 · 한국원자력안전기술원, 토목구조실, 선임연구원

** 정희원 · 한국과학기술원, 토목공학과, 부교수

1. 序 論

지진은 산업시설 또는 원자력 안전성 관련 구조물, 기기 및 계통(system) 설계에서 고려되는 주요 하중의 하나이다. 일반적인 구조물 내진설계에서는 강도를 증가시켜 외부에서 작용되는 하중에 저항하게 설계하지만,^(1,2) 강성이 증가된 구조물은 지진하중이 구조물의 기초에 작용하게 되면 상부에서는 응답이 크게 증폭된다. 따라서 주 구조물의 상부에 설치된 내부기기는 구조물의 특성에 따라 그 응답이 증폭되며, 구조물의 진동수와 기기의 진동수가 유사한 경우에는 더욱 증폭된다.⁽²⁾ 많은 산업시설 또는 원자력 관련 시설 내에는 지진하중 발생 동안 또는 발생후에도 제어 및 계측 목적으로 작동되어야 하는 안전성 관련 기기 및 계통을 포함하고 있어 구조물의 건전성이 보장되도록 내진설계는 물론 내진검증이 되어야 한다.⁽³⁾ 그러나 복잡한 구조물 내의 기기에 대한 동적해석 및 내진검증은 경비가 많이 소요될 뿐 아니라 불확실성 요소가 많아 일반적으로 보수적인 방법이 설계에 이용되고 있다.⁽⁴⁾

본 논문에서 채택한 계통 (Base-Isolation System)에 대한 명칭은 일본에서는 면진계통, 일부국내에서는 지반분리시스템이라 하지만, 지진하중에 대한 응답감소 측면에서 감진계통 (BIS)으로 정의한다. 감진계통의 기본개념은 구조물의 고유진동수를 지진하중의 주진동수와 분리 시키는 것이며, 이 방법에 대한 제안은 약 1세기 전에 제기되었지만 확실한 이론적 배경이 확립되지 않아 실제 구조물에 적용되지는 않았다.^(5,6) 최근에서야 해석 및 실증시험을 통해 감진계통에 대한 기술 및 이론이 개발되었고 실제 구조물에 적용되기 시작하였다. 특히 교량, 원자력발전소 및 사용후핵연료 저장시설과 같이 중요한 시설에 적용되고 있다.⁽⁷⁾

지금까지 많은 종류의 감진계통이 제안되었지만,⁽⁸⁾ 실제 구조물에 많이 사용되고 가장 현실적인 계통은 Laminated Rubber Bearing(LRB)형태이다.^(9,10) 이 계통은 유연성이 높은 고무와 강성이 큰 강판의 겹겹으로 구성되어 구조물의 사하중에 대한 수직강성은 충분한 반면, 수평방향으로는 유연하여 구조물을 지진하중의 수평성분에 대해 분리시키는 방법이다. 이 방법은 미국의 Footfill Communities Law and Justice Center 건물에서 1985년 Redlands 지진

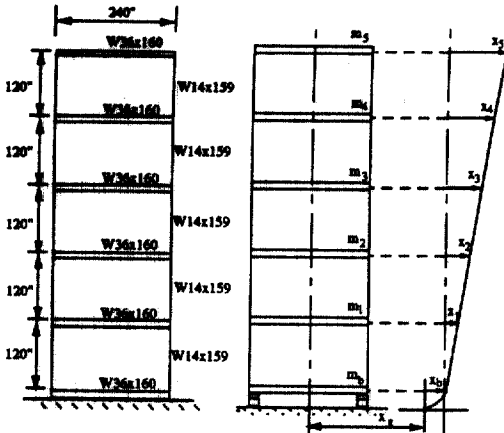
발생 시 측정된 값과 해석값을 비교한 결과 서로 잘 일치하였으므로 그 적합성이 입증되었다.⁽⁶⁾

대부분의 감진기초 구조물은 기초슬래브 하단 전체를 기초지반과 분리시키므로 해석 및 설계의 복잡성을 수반한다. 또한 현재까지는 지진하중에 대한 구조물의 응답과 구조물 내에 설치된 가벼운 기기에 대한 연구는 많이 수행되었으나^(2,11) 배관계통 또는 증량기기와 같은 안전성 관련 기기에 대한 연구는 많이 취급되지 않고 있다. 경우에 따라서는 안전성에 관련된 중요 기기의 지지부만을 감진시키는 것이 적합할 뿐만 아니라 경제적일 수도 있고, 지지부만을 감진하는 것이 기초 전체를 감진시키는 경우 보다 설치가 용이하고 기존 구조물을 재 설계하는데도 편리하다.

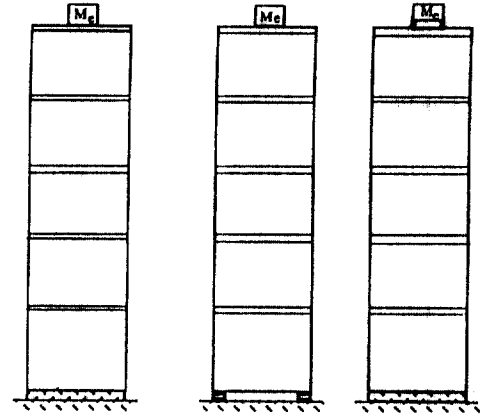
본 논문에서는 지진하중에 대한 응답감소 측면에서 기기의 지지부만을 감진 시키는 것의 효율성을 평가하였다. 기초감진구조물은 네개의 계통, 즉 기초감진계통, 상부구조물, 기기지지부 감진계통 및 2차계통 또는 기기로 구성되어 있다. 상부 구조물은 5층 강재구조물로 구성되어 있고 기초감진계통의 수평강성은 3.0 kips/in로 채택하였다. 구조물-기기 상호작용을 고려하고 해석의 효율성을 기하기 위하여 전산프로그램 (KBISAP)을 개발하였다. 해석모델은 세가지, i) 고정기초구조물+ 지지부고정기기, ii) 감진기초구조물+ 지지부고정기기, iii) 고정기초구조물+ 지지부감진기기를 채택하였다. 구조물 내의 기기는 5층에 설치된 것으로 가정하였으며 기기의 질량은 기기가 설치된 층 질량의 1/10로 가정하였다.⁽¹²⁾

2. 해석모델

전형적 해석모델은 기초감진계통, 상부구조물, 지지부감진계통 및 기기로 구성되었으며 그림 1 및 2와 같다. 상부 구조물에 대한 제원은 그림 1(a) 고정기초 구조물 (구조물 A)에 제시하였으며, 해석에 사용된 모든 상부 구조물의 제원은 동일하다. LRB 형태의 감진계통은 기초슬래브와 지반 사이에 위치하며 그림 1(b) 감진기초구조물 (구조물 B)에 보였다. 기기는 5층에 설치된 것으로 가정하였으며, 기초지반은 강체로 가정하여 토양-구조물 상호작용은 고려하지않았다.



(a) 구조물 A (b) 구조물 B
그림 1. 구조물의 전형적인 해석모델



(a) 구조물 C (b) 구조물 D (c) 구조물 E
그림 2. 예제 구조물 해석모델

2.1 상부구조물

상부 구조물의 응답은 감진계통 특성상 수직방향 강성이 수평방향 강성 보다 훨씬 크기 때문에 수평방향의 강성에 지배된다. 해석의 효율성을 위해 수평성분을 제외한 나머지 방향의 자유도를 줄이는 축소행렬기법을 사용하여 구조물에 대한 강성행렬을 작성하였다. 구조물의 작용력과 변형의 관계는 일반적으로 다음과 같은 평형방정식으로 표시할 수 있다.

$$[S][D] = \{F\} \quad (1)$$

여기서 [S] : 강성행렬

[D] : 변위벡터

{F} : 작용력 벡터

식 (1)을 상부 구조물 최상층에 적용하여 행렬식으로 표시하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} S_{AA} & S_{AB} & S_{AH} \\ S_{BA} & S_{BB} & S_{BH} \\ S_{HA} & S_{HB} & S_{HH} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} D_A \\ D_B \\ D_H \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_A \\ F_B \\ F_H \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서 첨자 A는 상부층 상단에서의 수평변위 자유도와 직접 관련되지 않는 자유도를 나타낸다. 첨자 B는 상단의 첨자 A와 유사하게 상부층 하단에서의 자유도를 나타내며, 첨자 H는 수평변위에 대한 자유도를 나타낸다. 식 (2)에서 수평방향과 무관한 자유도를 축소시키는 방법을 이용하여 마지막 층 까지 적용하면 축소강성행렬 [S]*와 하중벡터 {F}*를 계

산할 수 있다. 질량은 각 층에 작용하는 집중질량으로 가정하였으며, 감쇠행렬은 Rayleigh 감쇠⁽¹³⁾를 사용하였다.

2.2 기기

지지부 감진계통이 지진하중에 대한 기기의 응답을 감소시키는 효과를 평가하기 위해, 고정기초구조물 및 감진기초구조물 상에 지지부가 고정된 기기와 고정기초구조물 상에 지지부가 감진계통을 갖는 기기를 고려하였다. 기기의 질량은 구조물과 기기의 상호작용을 고려하기 위해 기기가 설치될 층 질량의 1/10로 가정하여 집중질량으로 고려하였다. 기기의 질량, 강성 및 감쇠는 구조물과 기기의 상호작용을 고려하여 주 구조물 행렬식의 관련된 요소에 추가시켰다.

2.3 감진계통

본 논문에서 채택한 Laminated Rubber Bearing 형태의 감진계통(Base-Isolation System : BIS)은 가장 간단하고 실제 구조물에 많이 사용되고 있으며, 수직방향으로 작용하는 하중에 대한 수직강성은 매우 큰 반면 지진하중 작용시 구조물의 응답을 지배하는 수평방향 성분에 대해서는 연성이 매우 크므로 구조물과 지반을 분리 시키는 역할을 하여 가속도 응답을 감소시킨다. 감진기초구조물에 대한 해석모델은 그림 1(b)에 제시하였으며 감진기초구조물 기초슬래브의 질량은 m_b , 감쇠값은 c_b 및 수

평강성은 k_b 로 나타내었으며, 지반에 대한 기초슬래브의 상대변위는 x_b 이다.

3. 해석방법

지반운동에 대한 구조물의 일반적인 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = -[M][I]\ddot{x}_g(t) \quad (3)$$

여기서 $[M]$, $[C]$, $[K]$ 는 각각 구조물의 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬이고 $\{\ddot{X}\}$, $\{\dot{X}\}$, $\{X\}$ 는 각각 건물 각 층에서의 지반에 대한 상대가속도, 상대속도, 상대변위 벡터이며, $\ddot{x}_g(t)$ 는 시간 t 에서의 지반가속도이다.

3.1 감진기초 구조물의 운동방정식

그림 1(b)에 보인 것과 같이 5층의 강재구조물은 기초슬래브 밑면에 수평강성 k_b 및 감쇠값 c_b 를 갖는 LRB 감진계통이 설치되어 있다. 상부 구조물 각 층의 지반에 대한 상대변위는 아래와 같이 나타낼 수 있으며,

$$u_i = x_i + x_b \quad (4)$$

감진기초구조물에 대한 운동방정식은 식 (5), 식 (6)과 같이 쓸 수 있다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + \ddot{x}_g(t)[I] + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{0\} \quad (5)$$

$$m_b(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g(t)) + c_b\dot{x}_b + k_b x_b = -\sum_{i=1}^n m_i(\ddot{u}_i + \ddot{x}_g(t)) \quad (6)$$

여기서 u_i : 지반에 대한 i 층의 상대변위
 x_i : 기초슬래브에 대한 i 층의 상대변위
 x_b : 지반에 대한 기초슬래브의 상대변위

식 (4)를 식 (5)에 대입하면 식 (7)과 같은 행렬식이 되며 이 행렬식 내의 각 식을 모두 더하면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + \ddot{x}_g(t)[I] + [C]\{\dot{u}\} - \dot{x}_b[I] + [K]\{u\} - x_b[I] = \{0\} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^v m_i(\ddot{u}_i + \ddot{x}_g(t)) + [I]^T[C]\{\dot{u}\} - [I]^T[C][I]\dot{x}_b + [I]^T[M]\{u\} - [I]^T[K][I]x_b = 0 \quad (8)$$

식 (6)은 식 (8)을 이용하여 아래와 같이 표현할 수

있다.

$$m_b\ddot{x}_b + \ddot{x}_g(t) + (c_b + [I]^T[C][I])\dot{x}_b - [I]^T[C]\{\dot{u}\} - [I]^T[K]\{u\} + k_b x_b + [I]^T[K][I]x_b = 0 \quad (9)$$

감진기초구조물의 지반운동에 대한 운동방정식은 식(7)과 식 (9)를 이용하여 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} [M] & 0 \\ 0 & m_b \end{bmatrix} \{\ddot{v}\} + \begin{bmatrix} [C] & -[C][I] \\ -[I]^T[C] & c_b + [I]^T[C][I] \end{bmatrix} \{\dot{v}\} + \begin{bmatrix} [K] & -[K][I] \\ -[I]^T[K] & k_b + [I]^T[K][I] \end{bmatrix} \{v\} = \ddot{x}_g(t) \begin{Bmatrix} [M] \\ m_b \end{Bmatrix} \quad (10)$$

여기서, $\{v\} = \begin{Bmatrix} \{u\} \\ x_b \end{Bmatrix}$

$[M]$: 상부구조물 질량행렬 $[M]$ 의 대각선 요소로 구성되는 벡터

3.2 기기가 부착된 감진기초 구조물의 운동방정식

구조물과 기기의 상호작용 및 기기에 대한 질량, 감쇠, 강성을 고려하고 식 (10)을 이용하여 기기가 부착된 감진기초 구조물의 운동방정식을 작성하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} [M] & 0 & 0 \\ 0 & m_b & 0 \\ 0 & 0 & m_e \end{bmatrix} \{\ddot{w}\} + \begin{bmatrix} [C] + [c_{ei}] & -[C][I] & -[c_{ei}][I] \\ -[I]^T[C] & c_b + [I]^T[C][I] & 0 \\ -[I]^T[c_{ei}] & 0 & c_e \end{bmatrix} \{\dot{w}\} + \begin{bmatrix} [K] + [k_{ei}] & -[K][I] & -[k_{ei}][I] \\ -[I]^T[K] & k_b + [I]^T[K][I] & 0 \\ -[I]^T[k_{ei}] & 0 & k_e \end{bmatrix} \{w\} = -\ddot{x}_g(t) \begin{Bmatrix} [M] \\ m_b \\ m_e \end{Bmatrix} \quad (11)$$

여기서, $\{w\} = \begin{Bmatrix} \{u\} \\ x_b \\ x_e \end{Bmatrix}$

m_e , c_e , k_e : 각각 기기의 질량, 기기지지부의 감쇠 및 강성

$[c_{ei}]$, $[k_{ei}]$: 각각 기기가 설치된 층에 해당하는 대각요소는 c_e 와 k_e 이며 나머지는 모두 0으로 구성된 행렬

4. 수치해석

4.1 해석구조물

예제해석에 채택된 구조물은 일반적으로 낮은 층수의 고차진동모드와 높은 층수의 저진동모드 특성을 배제할 목적으로 5층 강재구조물을 선정하였으며, 경간은 240 inch이고 각 층 높이는 120 inch로 일정하다. 상부구조물 기둥단면은 W14×159이며, 보의 단면은 W36×160으로 그림 1(a)와 같다. 그림 1에 보인 것과 같이 기기가 설치되지 않은 구조물은 고정기초구조물(구조물 A)과 감진기초구조물(구조물 B)이다. 구조물 A는 일반적인 구조물이며, 구조물 B는 상부구조물과 감진계통으로 구성되었으며 상부구조물은 구조물 A와 동일하다. 구조물 A 및 B의 각 층 질량은 동일하게 0.05 kips-sec²/in, 상부구조물의 감쇠비는 5%로 가정하였다. 기초감진계통의 수평방향 강성은 3.0 kips/in이며 감쇠비는 10%로 가정하였다. 기기의 지진하중에 대한 응답감소 효과를 평가하기 위해 세가지 해석모델을 그림 2(a),(b),(c)와 같이 채택하였으며 구조물의 제원은 그림 1(a)와 동일하다. 그림 2(a)는 구조물 A 상에 지지부가 고정된 기기가 설치된 구조물(구조물 C)이며, 그림 2(b)는 구조물 B 상에 지지부가 고정된 기기(구조물 D) 및 그림 2(c)는 구조물 A 상에 지지부가 감진된 기기(구조물 E)를 나타내고 있다. 주 구조물의 층에 설치된 기기의 질량은 0.005 kips-sec²/in, 감쇠비는 5%로 가정하였으며, 기기 지지부에 설치된 감진계통의 수평강성은 0.05kips/in, 감쇠비는 10%로 가정하였다. 예제구조물해석에 사용된 입력하중으로는 1940년 El Centro 지진의 S00E 성분을 사용하였으며 구조물의 응답은 constant

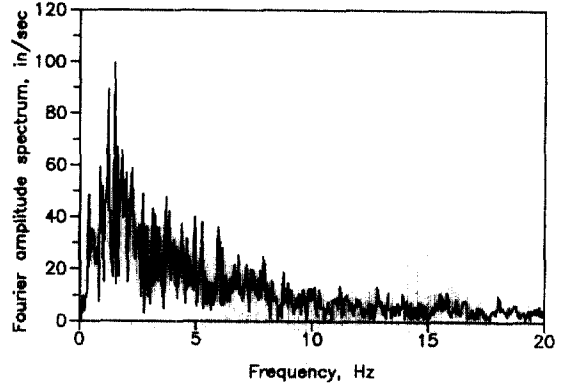


그림 3. 입력하중(El Centro지진)의 Fourier 스펙트럼

average acceleration 방법을 이용한 직접적분법에 의해 계산하였으며 이때 수치적분을 위한 시간증분 Δt 는 0.02초로 하였다. 이 입력하중에 대한 Fourier 스펙트럼을 그림 3에 제시하였다.

4.2 고정기초 및 감진기초 구조물의 응답

고정기초구조물(구조물 A : FBS)과 감진기초구조물(구조물 B : BIS)의 고유진동수는 표 1에 제시하였다.

해석대상 구조물(구조물 A 및 B) 5층의 가속도에 대한 진동수 특성은 Fourier 변환을 이용하여 시간영역에서 진동수영역으로 변환시켜 그림 4 및 5에 제시하였다. 그림 4에 제시된 것과 같이 고정기초 구조물의 진동성분은 넓은 진동수에 걸쳐 분포되어 있으며, 구조물의 고유진동수인 3.9 Hz에서 최대값이 발생한다. 감진기초 구조물에 대한 진동성분은 그림 5와 같이 0.5 Hz에 집중되어 있으며, 이것은 상부구조물이 강체와 같이 거동함을 의미한다.

구조물 A와 B의 5층 가속도응답을 그림 6에 제시하였으며 표 2에는 최대응답을 나타내었다. 여기서 구조물A의 상대변위는 지반에 대한 값이며 구조물

표 1. 구조물 A 및 B의 진동수

(단위 : Hz)

진동모드 구조물	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
구조물 A	3.904	11.855	20.810	29.410	36.500	
구조물 B	0.501	7.282	15.725	24.359	32.128	37.528

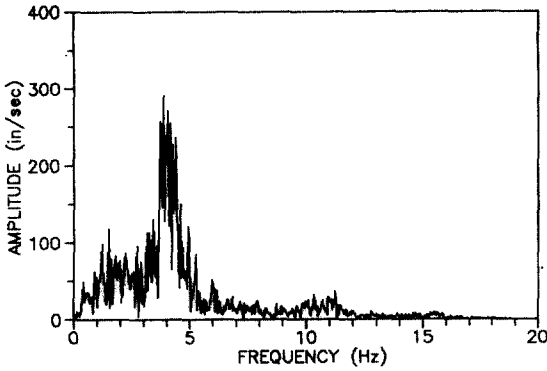


그림 4. 구조물 A의 5층 가속도 Fourier 스펙트럼

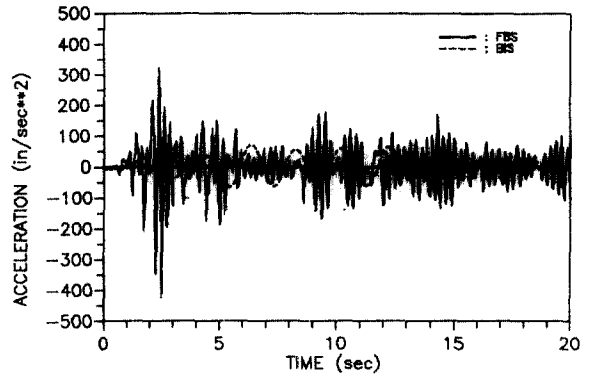


그림 6. 구조물 A 및 B의 5층 가속도응답

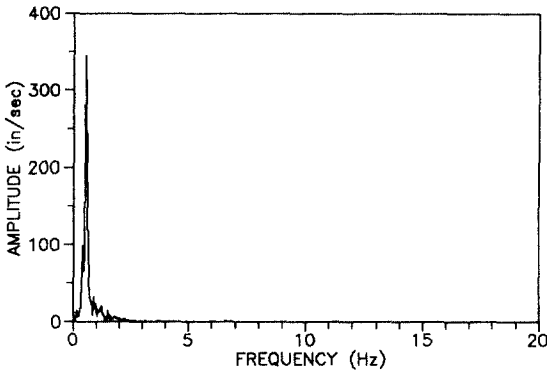


그림 5. 구조물 B의 5층 가속도 Fourier 스펙트럼

B는 기초슬래브에 대한 값이다. 이 표로부터 구조물 A의 최대가속도는 1.14g에 해당하는 값으로서 입력하중의 3.35배 까지 증폭되었음을 알 수있다. 제시된 것과 같이 구조물 B의 응답은 구조물 A의 응답에 비해 상당히 작은 값이며, 입력하중의 최대값 보다도 약 55% 감소하였다.

그림 7에서는 이 두 구조물의 변위응답을 비교 하였으며, 구조물 B에 대한 변위는 기초슬래브에 대한 상대변위를 나타내고 있어 구조물 A의 응답에 비해서도 상당히 작은 값을 나타내고 있다. 그림 6과 7에서 알 수 있듯이 감진기초 구조물의 응답은 일반적인 고정기초 구조물의 응답 보다 상당히 작은 값을 나타내고 있다.

4.3 구조물에 설치된 기기의 응답

기기가 설치된 구조물 (구조물 C, D, E)에 대한 진동수 특성은 표 3에 제시하였다.

표 2. 구조물 A 및 B의 5층 최대응답

	상대변위 (in)	절대가속도 (in/sec**2)
고정기초구조물 (구조물 A)	0.679	440.0
감진기초구조물 (구조물 B)	0.230	72.2

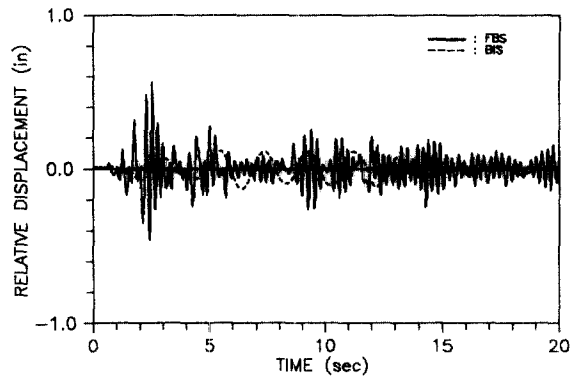


그림 7. 구조물 A 및 B의 5층 변위응답

구조물 A의 5층에 설치된 지지부가 고정된 기기의 가속도 응답은 그림 8에 제시하였으며, 최대응답은 입력지반 가속도 최대값의 3.5배 까지 증폭되었다. 그림 9에서는 구조물 B 상의 지지부가 고정된 기기의 가속도 응답을 보이고 있다. 최대응답은 0.19 g이며 입력가속도 최대값 보다도 약 57% 감소되었다.

표 3. 구조물 C, D 및 E의 진동수

(단위 : Hz)

구조물 \ 진동모드	진동모드						
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th
구조물 C	3.63	4.45	11.92	20.93	29.64	36.63	
구조물 D	0.50	4.14	7.34	15.74	24.37	32.13	37.53
구조물 E	0.50	3.91	11.90	20.97	29.64	36.63	

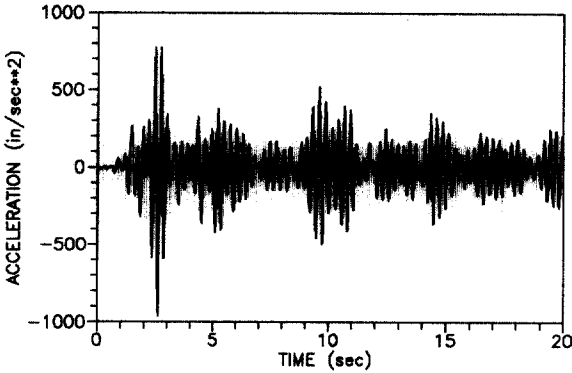


그림 8. 구조물 C의 5층 기기 가속도응답

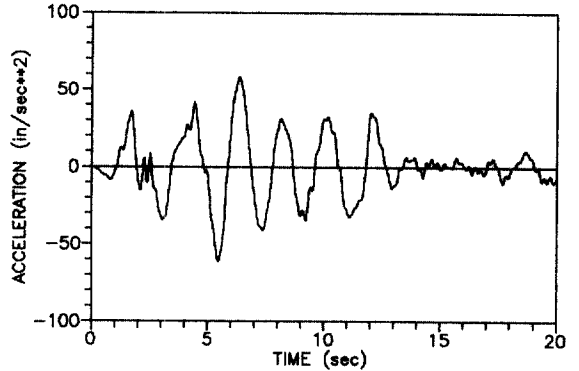


그림 10. 구조물 E의 5층 기기의 가속도응답

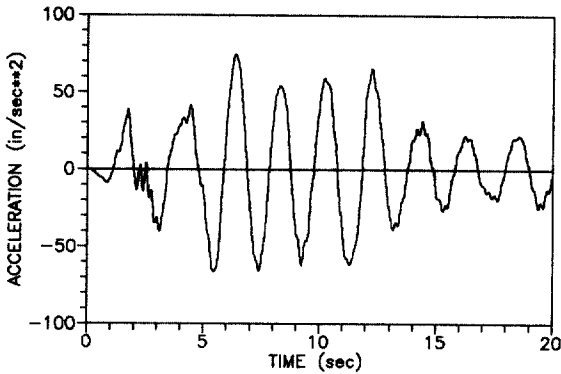


그림 9. 구조물 D의 5층 기기 가속도응답

표 4. 구조물 5층에 설치된 기기의 최대응답

	상대변위 (in)	절대가속도 (in/sec**2)
구조물 C의 기기	0.134	483.0
구조물 D의 기기	0.110	74.6
구조물 E의 기기	5.320	61.3

슬래브에 대한 값이다. 이 표로부터 기기의 절대가속도는 지지부가 감진된 경우에 가장 많이 감소되고 있음을 알 수 있다.

4.4 지지부가 감진된 기기의 변위응답 제한

일반적으로 감진계통을 이용하여 지진하중에 대한 구조물의 응답을 감소 시키는 경우 가속도는 감소되는 반면 변위응답이 크게 발생된다. 따라서 기기의 변위응답을 제한 시키는 효율성을 평가하기 위해 5층에 설치된 기기의 지지부에 설치된 감진계통의 수평강성을 0.05 kips/in에서 0.79 kips/in로 변화시키면서 가속도와 변위응답의 상관관계를 계산하였다. 그림 11에는 감진계통의 수평강성에 따른 가속도응답과 변위응답의 상관관계를 보였으며, 진동

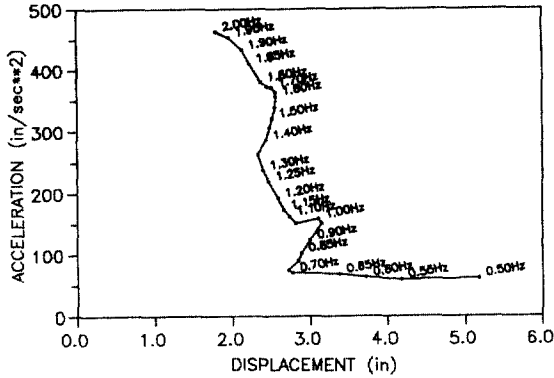


그림 11. 기기 지지부 수평강성 변화에 따른 변위-가속도 응답 상관관계

수 0.7Hz 이하에서는 변위는 증가하는 반면 가속도응답은 거의 일정하다. 또한 진동수 0.7Hz 이상에서는 가속도응답은 크게 증가하는 반면 변위응답은 약간 감소한다. 따라서 안전성 관련 중요 기기의 응답은 지지부에 설치된 감진계통의 특성을 적절히 선택함으로써 조절될 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 지지부가 감진된 기기의 응답감소 효과를 평가하기 위해 서로 상이한 형태의 구조물에 설치된 기기의 지진하중에 대한 응답을 비교하였다. 본 논문에서 채택한 입력하중에 대한 구조물의 해석결과 고정기초 구조물 상의 지지부에 감진계통이 설치된 기기가 감진기초 구조물 상의 지지부 고정기기 및 고정기초 구조물 상의 지지부 고정기기 보다 지진하중에 대한 응답감소에 매우 효과적임을 알 수 있었다. 일반적으로 감진계통이 설치된 구조물은 변위응답이 크게 발생하나, 감진계통의 수평강성 및 감쇠값을 구조물의 특성에 따라 적절히 조정함으로써 지진하중에 대한 구조물 및 기기의 응답을 효율적으로 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한 중요 기기의 지지부만을 감진하는 방법은 응답감소 효과뿐만 아니라 설계와 설치가 용이하고, 기기의 특성 및 설치위치에 따라서는 경제성 및 안전성에 필수적일 수도 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Farzad Naeim, 'The seismic design handbook', St-

tructural engineering series, Van Nostrand Reinhold, New York, 1989.

2. J.M.Kelly and H.C. Tsai, 'Seismic response of light internal equipment in base-isolated structures', *Earthquake engineering and structural dynamics*, vol.13, 711-732 (1985).

3. United States Code of Federal Regulations, Title 10, Section 100 (10CFR100), Appendix A, 'Seismic and geologic siting criteria for nuclear power plants', 1986.

4. Giuseppe Muscolino, 'Dynamic response of multiply connected primary- secondary systems', *Earthquake engineering and structural dynamics*, vol.19, 205-216 (1990).

5. Apostolos S.Papageorgiou and B.C.Lin, 'Study of the earthquake response of the base-isolated law and justice center in Rancho Cucamonga', *Earthquake engineering and structural dynamics*, vol.18, 1189-1200 (1989).

6. N.Mostaghel and M.Khodaverdian, 'Dynamics of resilient-friction base isolator(R-FBI)', *Earthquake engineering and structural dynamics*, vol.15, 379-390 (1987).

7. I.G.Buckle and R.L.Mayes, 'Seismic Isolation : History, Application, and Performance - A world view', *Earthquake spectra*, vol.6, Number 2, 161-201 (1990).

8. J.M.Kelly, 'Aseismic base isolation : Review and bibliography', *Soil dynamic earthquake engineering* 5, 202-216 (1986).

9. Lin Su,etc., 'A comparative study of performances of various base isolation systems, part I : shear beam structures', *Earthquake engineering and structural dynamics*, vol.18, 11-32 (1989)

10. Lin Su,etc., 'A comparative study of performances of various base isolation systems,part II : sensitivity analysis', *Earthquake engineering and structural dynamics*, vol.19, 21-33 (1990).

11. H.C.Tsai and J.M.Kelly, 'Seismic response of the superstructure and attached equipment in a base-isolated buildings', *Earthquake engineering and structural dynamics*, vol.18, 551-564 (1989).

12. 'USNRC Standard Review Plan', NUREG-800, revision 2, 1984.

13. J.W.S.Rayleigh, 'Theory of sound', vol.1, Dover, New York, 1945.

(接受 : 1992. 2. 25)