

중약진지역 대공간 구조물에 대한 스마트 면진시스템의 적용성 검토

Investigation of Adaptability of Smart Base Isolation System for Spacial Structures in Regions of Low-to-Moderate Seismicity

김 현 수*
Kim, Hyun-Su

강 주 원**
Kang, Joo-Won

요 약

현재까지 스마트 면진시스템은 일본이나 미국 같은 강진지역에서 개발되고 적용되어 왔다. 이렇게 강진지역에 있는 건축물을 지진하중으로부터 보호하기 위하여 개발된 스마트 면진시스템은 우리나라와 같은 중약진 지역에 있는 건축물에 그대로 적용되기에는 많은 한계점이 있다. 따라서 본 연구에서는 강진지역에 건설되는 건축물을 위한 스마트 면진시스템을 중약진 지역에 건설되는 건축물에 적용하였을 때 발생하는 문제점을 검토해보았다. 이를 위하여 예제구조물로 대공간 아치구조물을 선택하였고 스마트 면진시스템은 MR 감쇠기와 저감쇠 탄성베어링을 사용하여 구성하였다. 강진지역과 중약진 지역에서 발생하는 지진하중으로는 기존에 발생한 역사지진을 바탕으로 인공지진을 생성하였다. 수치해석결과 강진지역에 건설되는 대공간구조물을 위하여 개발된 스마트 면진시스템을 그대로 중약진 지역에 적용하면 면진효과가 상당히 줄어들므로 스마트 제어장치의 용량이 중약진 지역에 맞추어 주의 깊게 설계되어야 함을 알 수 있었다.

Abstract

To date, a smart base isolation system has been developed in high seismicity region such as Japan, USA etc. Smart base isolation systems developed for structures in high seismicity region cannot directly applied to structures in regions of low-to-moderate seismicity such as Korea. Therefore, problems that occur by applying the smart base isolation system developed for the structures in high seismicity region to the structures in regions of low-to-moderate seismicity have been investigated in this study. To this end, a spacial arch structure was used as an example structure and MR dampers and low damping elastomeric bearings were used to compose a smart base isolation system. Artificial earthquakes were used for ground motions in regions of high and low-to-moderate seismicity. Based on numerical simulation results, it has been known that the capacity of smart base isolation system for the regions of low-to-moderate seismicity should be carefully designed because the base isolation effects of the smart base isolation system for high seismicity region is deteriorated when it is applied to the structures in regions of low-to-moderate seismicity.

키워드 : 스마트 면진시스템, 중약진지역, 대공간 구조물, 진동제어

Keywords : Smart base isolation system, Regions of Low-to-Moderate Seismicity, Spacial structure, Vibration control

1. 서 론

지진하중에 대한 구조물의 피해를 저감시키기 위한 제어기법 중에서 실제구조물에 가장 널리 사용되고 있는 방법은 면진시스템을 적용하는 것이다. 구

조물의 지진응답을 저감시키기 위한 효율적인 기법으로 알려져 있는 면진기술은 국내외에서 건물, 교량, 원자력발전소 등 대형구조물의 지진하중에 대한 피해를 최소화하기 위하여 널리 적용되고 있으며 비교적 경제성 및 효율성이 양호하기 때문에 많은 연구자들에 의하여 연구 및 응용이 활발하게 진행되고 있다^{1,2)}. 면진시스템은 구조물과 지반 사이에 베어링

* 정회원, 선문대학교 건축학부 조교수

** 교신저자, 정회원, 영남대학교 건축학부 교수

Tel:053-810-2429 Fax:053-810-4625

E-mail:kangj@ynu.ac.kr

을 삽입하여 지진하중이 구조물로 전달되는 것을 최소화하는 것을 목적으로 하고 있으며 이러한 면진시스템으로는 마찰진자베어링(FPS)이나 납-고무베어링(LRB) 등이 일반적으로 널리 사용되고 있다. 근래에 와서는 면진시스템에 보조감쇠기를 추가하여 면진된 구조물의 밀면변위를 보다 효과적으로 줄여서 지진에 대한 안전성을 높이고자 하는 시도가 이루어지고 있다. 그러나 면진된 구조물의 밀면변위를 줄이기 위하여 면진장치에 추가적인 수동 감쇠기를 도입하면 지반과 구조물을 격리시키는 면진시스템의 기본 개념에서 벗어나게 되어 면진시스템을 도입함으로써 얻을 수 있는 여러 가지 이점들을 감소시킬 수 있으며 상부구조물의 절대가속도를 증가시키는 결과를 초래할 수 있다^{3,4)}. 이러한 문제점을 해결하고 수동 면진시스템보다 우수한 면진성능을 발휘할 수 있도록 하기 위하여 기존의 면진장치에 스마트 감쇠기를 조합한 스마트 면진시스템이 제안되었다^{5,6,7)}. 이러한 스마트 면진시스템은 주로 일본이나 미국서부 같은 강진지역에서 개발되어 적용되고 있으며 일본에서는 MR 감쇠기로 구성된 스마트 면진시스템이 4층 주거용 건물에 실제로 적용된 사례도 있다. 이렇게 강진지역에 건설되는 구조물의 지진피해를 줄이기 위해서 개발된 스마트 면진시스템을 그대로 중약진 지역에 건설되는 구조물에 적용한다면 여러 가지 문제가 발생할 것이다. 따라서 본 연구에서는 강진지역에 위치한 구조물을 위해서 개발된 스마트 면진시스템이 우리나라와 같은 중약진 지역에 건설되는 구조물에 적용될 때 어떤 문제가 발생하는지 살펴보고 적용성을 검토하고자 한다.

일반적인 건축구조물보다 대공간 구조물은 많은 사람들이 이용하는 운동경기장이나 관람 및 집회시설로 사용되기 때문에 지진하중에 의하여 구조물에 피해가 발생한다면 매우 심각한 인명 피해가 예상된다. 따라서 대공간 구조물의 지진응답을 최소화하기 위한 제진 및 면진기술에 대한 연구가 필요하다. 근래에는 대공간 구조물에 면진장치를 적용하여 지진

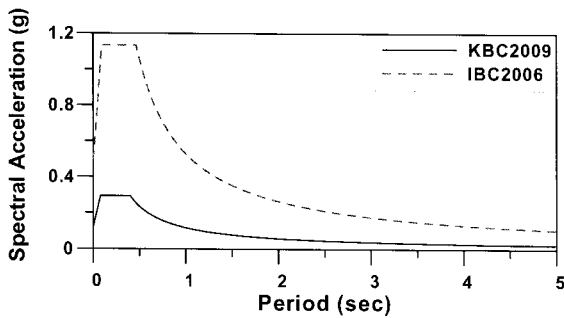
응답을 줄이고자하는 노력이 여러 연구자들에 의하여 수행되고 있다⁸⁻¹⁴⁾. 본 연구에서는 예제구조물로 대공간구조물을 사용하였다. 이를 위하여 한국기술교육대학교에 건설되고 있는 30m 경간의 대공간 파일럿 프로젝트 구조물을 선택하여 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 스마트 면진시스템은 MR 감쇠기와 저감쇠 탄성베어링으로 구성하였고 제안된 스마트 면진시스템을 제어하기 위하여 퍼지제어 알고리즘을 사용하였으며 이를 최적화하기 위하여 유전자알고리즘을 적용하였다. 중약진 지역에서 발생하는 지진하중을 생성하기 위하여 KBC2009 설계기준에 근거하여 설계응답스펙트럼을 작성하였고 이를 바탕으로 인공지진하중을 생성하였다. 이때 인공지진하중을 랜덤지진파를 사용하여 생성하지 않고 과거에 발생한 기록된 지진하중을 사용함으로써 실제 발생했던 지진동 파형과 동일한 위상특성을 가지는 인공지진하중을 생성하였다. 강진지역의 지진하중을 생성하기 위해서는 IBC2006 설계기준에 근거하여 작성한 설계응답스펙트럼을 사용하였다.

2. 인공지진하중

2.1 강진 및 중약진 지역의 설계응답스펙트럼

중약진지역의 특성을 나타내는 지반운동성분을 생성하기 위하여 KBC2009 설계기준에 근거한 설계응답스펙트럼을 사용하였고 강진지역의 특성을 나타내는 지진하중을 작성하기 위하여 IBC2006 설계기준에 근거한 설계응답스펙트럼을 사용하였다. KBC2009를 이용한 설계응답스펙트럼을 작성할 때 지역계수는 0.22, 지반종류는 S_A 를 사용하였다. 이때 S_{DS} 는 0.2933, S_{DI} 는 0.1173, T_0 는 0.08초 T_S 는 0.4초로 각각 계산되었다. IBC2006에 의한 설계응답스펙트럼 작성시 건물이 건설될 위치는 미국 Los Angeles로 선택하였고 이에 따라 S_S 는 1.70, S_I 는 0.61으로 결정되었다. Site class는 C로 선택하여 F_a 와 F_v 는 각각 1.0과 1.3으로 하였다. 이에 따라서 S_{MS} 는 1.70, S_{MI} 은 0.793, S_{DS} 는 1.1333, S_{DI} 은 0.5287로 계산되

고 T_0 는 0.0933초 T_s 는 0.4665초로 각각 계산되었으며 T_L 은 30층 이상의 건물에서만 의미가 있으므로 본 논문에서는 고려하지 않았다. 이렇게 생성한 KBC2009 및 IBC2006에 근거한 설계응답스펙트럼을 <그림 1>에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 IBC2006으로 생성된 설계응답스펙트럼의 단주기 영역 스펙트럼가속도는 1.13g이고 KBC2009에 의해 생성된 단주기 영역의 스펙트럼 가속도는 0.293g로서 약 3.86배의 차이가 난다.



<그림 1> 강진 및 중약진지역의 설계응답스펙트럼

2.2 설계응답스펙트럼을 기반으로한 인공지진 하중의 생성

본 연구에서는 <그림 1>에 나타낸 중약진지역과 강진지역을 대표하는 설계응답스펙트럼을 기반으로 인공지진을 작성한다. 랜덤 진동이론에 의하여 인공지진을 생성하는 방법 중 가장 널리 알려진 방법은 Vanmarcke과 Gasparini에 의한 방법으로 많이 사용되고 있는 SIMQKE¹⁵⁾의 기본이론이기도 하다. 이 방법은 인공지진을 다음과 같이 임의의 주기함수의 합으로 나타낼 수 있다고 가정한다.

$$\ddot{u}_g(t) = I(t) \sum_{i=1}^N A_i \sin(\omega_i t - \phi_i) \quad (1)$$

여기서 $I(t)$ 는 중첩된 조화함수의 외형을 실제 지진과 유사한 형태로 크기를 조절해 주는 포락함수(envelope function)이고, A_i , ω_i , ϕ_i 는 각각 i 번째 성분파의 진폭, 진동수(rad/sec) 및 위상각을 의미

한다. 위상각은 $0 \sim 2\pi$ 사이에서 균일한 발생확률을 갖는 랜덤변수이고 진폭은 스펙트럼밀도함수로부터 계산하거나 응답스펙트럼으로부터 계산할 수 있다. 이와 같이 작성된 인공지진을 최대 지반가속도 및 응답스펙트럼의 목표값과 부합하도록 조정하고 기저선(base line)을 보정하는 작업을 거친다. 작성된 인공지진의 응답스펙트럼이 목표로 하는 설계응답스펙트럼과 부합하도록 조정하기 위해 SIMQKE에서는 푸리에 변환 및 푸리에 역변환을 사용한다. SIMQKE 알고리즘의 단점은 생성되는 인공지진의 파형을 예측할 수가 없어서 인공지진의 파형을 제어할 수가 없다는데 있다. 즉, 가정된 초기 인공지진의 파형이 반복되며 개선되는 과정을 거치면서 임의로 변하여 초기의 파형을 상실하게 된다. SIMQKE에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 실제 지진파의 파형을 모사할 수 있는 포락함수를 이용하였다. 그러나 포락함수의 종류가 사다리꼴 함수, 지수함수, 복합함수 등 3가지로 제한되어 있으며 각 함수의 변곡점에 해당하는 시간값에 대한 규정이 모호하다.

실제 지진동 파형의 특성은 진원에서 지각내부를 통과하는 전파경로 특성과 지표면 부근 지반에서의 증폭특성으로 분리하여 생각하는 것이 일반적이다. 즉, 진원에서 발생한 지진동이 지각내부를 통하는 과정과 지각 위를 덮고 있는 지반의 영향으로 증폭되는 과정에 의하여 지진동 파형의 특성이 결정된다. 이와 같이 지진동 파형은 매우 복잡한 과정을 거쳐서 구조물에 도달하기 때문에 지진동이 구조물에 미치는 영향을 규명하는데 어려움이 많으며 그 성질을 정확히 규명하기는 쉽지 않다. 랜덤지진파를 사용하여 인공지진동을 만들 때 지각 내부 및 지반 종류에 따른 영향을 반영하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 지각내부의 특성 및 지반 종류의 특성이 반영되어 기록된 역사지진을 가정된 초기의 지진파형으로 사용하여 인공지진을 생성한다. 이를 위해서 가정된 초기 지진파형으로 사용되는 기록된 역사지진의 지진동 파형과 동일한 위상특성을 가지면서 설계용 가속도 응답스펙트럼에 매우 근접한 응답스펙트럼을 갖는 인공지진을 작성

하는 방법을 사용한다¹⁶⁾. 이 방법은 기존의 SIMQKE에서 사용된 이론과는 달리 가정된 초기지진의 개략적인 파형을 그대로 유지하면서 위상특성의 변화가 전혀 없고 설계용 가속도 스펙트럼에 대응하는 여러 종류의 기록된 역사지진을 바탕으로 하는 인공지진을 손쉽게 대량으로 작성할 수 있다.

과거에 기록된 역사지진을 이산 푸리에(Fourier) 변환을 통하여 분해하면 식 (1)에서 포락함수를 나타내는 $I(t)$ 를 제외한 형태의 근사식으로 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 식 (1)을 구성하는 인자들 중에서 위상각 성분(ϕ_i)은 그대로 유지하면서 각각의 성분파의 진폭(A_i)을 조정하여 선택된 설계용 가속도 응답스펙트럼과 일치하도록 한다. 이때 가속도 응답스펙트럼과 일치시킬 주기영역은 일반적인 건축물의 설계에 사용되는 0초-10초 사이로 선택하였다. 이렇게 조정된 푸리에 진폭을 사용하여 푸리에 역변환을 수행하면 수정된 인공지진의 가속도시간이력을 얻을 수 있다. 여기서 각 주파수 성분의 진폭은 다음의 식과 같이 계산하여 조정한다.

$$A'_i = \frac{S_A^T}{S_A} \times A_i \quad (2)$$

여기서, A'_i 는 수정된 진폭, A_i 는 원래 기록된 지진동의 진폭, S_A^T 는 설계용 가속도 응답스펙트럼, S_A 는 기록된 지진동 그리고 수정된 지진동의 가속도 응답스펙트럼을 나타낸다. 이 식과 같은 방법으로 수정된 인공지진의 지반운동 데이터를 이용하여 지진응답해석을 수행한 후 가속도 응답스펙트럼을 다시 작성하고 선택한 설계용 가속도 응답스펙트럼과의 적합도를 확인하는 과정을 거친다. 이와 같은 계산과정은 최종적으로 설계용 가속도 응답스펙트럼에 적합한 파형이 얻어질 때까지 반복적으로 수행된다. 이때 인공지진의 지반운동 데이터의 가속도 응답스펙트럼이 설계용 가속도 응답스펙트럼에 적합한지를 판단하는 기준은 다음의 두 가지 조건으로 하였다. 우선 다음의 식 (3)과 같이 인공지진동의 가속도 응답스펙트럼과 설계용 가속도 응답스펙트럼 비(ϵ_i)의

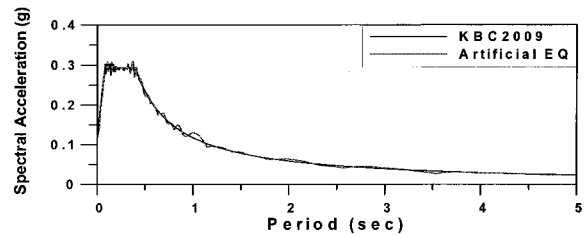
변동계수 값이 5%이내가 되도록 한다. 그리고 주기 성분별 응답스펙트럼 비의 평균값에 대한 오차가 식 (4)를 만족하게 한다.

$$\nu = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\epsilon_i - 1.0)^2}{N}} \leq 0.05 \quad (3)$$

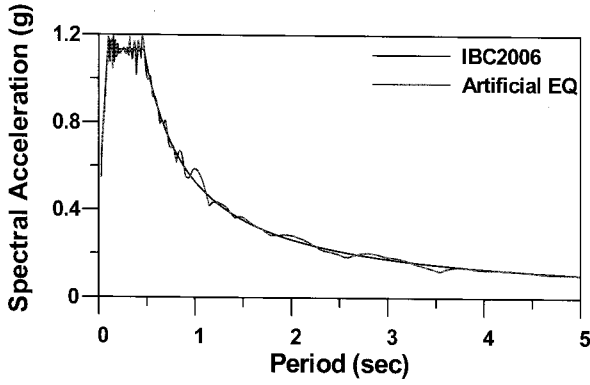
$$|1 - \epsilon_{ave}| \leq 0.02 \quad (4)$$

여기서, $\epsilon_i = S_A/S_A^T$, N 은 응답스펙트럼을 작성시 사용하는 주기 성분의 개수이고, $\epsilon_{ave} = \sum_{i=1}^N \epsilon_i / N$ 이다. 적합도를 판정하기 위해서는 가속도 응답스펙트럼의 주기범위를 0초-10초로 하였고 주기간격은 0.025초로 하여 $N=400$ 으로 하였다.

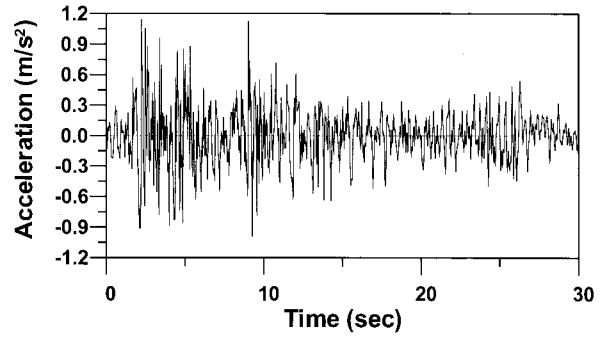
본 연구에서는 전술한 바와 같이 지각내부의 특성 및 지반 종류의 특성이 반영되어 기록된 역사지진을 가정된 초기의 지진파형으로 사용하여 인공지진을 생성한다. 이를 위해서 일반적으로 구조물의 지진응답 거동을 분석할 때 널리 사용되고 있는 El Centro (1940, NS) 지진하중을 사용하였다. 본 연구에서는 이 El Centro 지진하중의 개략적인 파형을 그대로 유지하면서 위상특성의 변화가 없고 설계용 가속도 스펙트럼에 대응하는 인공지진하중을 생성한다. 이러한 방법으로 작성한 인공지진동의 가속도 응답스펙트럼을 생성하여 인공지진하중을 작성할 때 사용한 KBC2009 및 IBC2006에 근거한 설계응답스펙트럼과 함께 <그림 2>와 <그림 3>에 각각 나타내었다.



<그림 2> KBC2009의 설계응답스펙트럼과 인공지진동의 가속도 응답스펙트럼

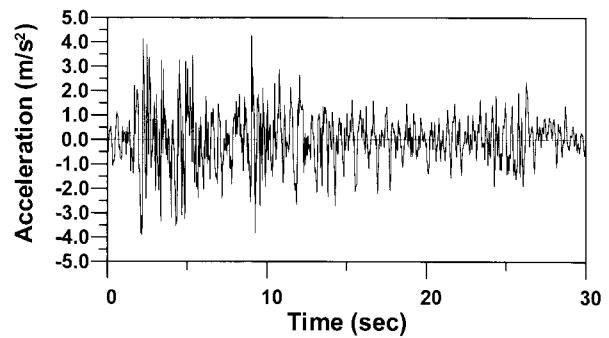


〈그림 3〉 IBC2006의 설계응답스펙트럼과 인공지진동의 가속도 응답스펙트럼

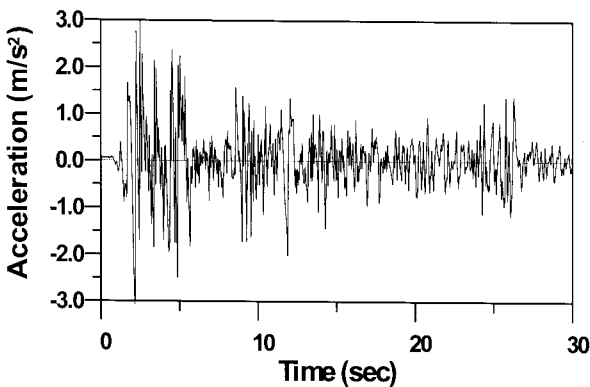


〈그림 5〉 KBC2009의 설계응답스펙트럼에 적합하도록 수정된 El Centro 기반 인공지진하중

이렇게 작성된 인공지진동의 시간이력곡선을 〈그림 4-6〉에 El Centro 지진하중 원본과 함께 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 생성된 지진하중의 파형이 El Centro 지진하중의 파형과 개략적으로 일치하는 것을 알 수 있다. 기록된 El Centro 지진하중의 최대 지반가속도는 3.07m/s^2 인데 반하여 KBC2009의 설계응답스펙트럼에 적합하도록 조정된 중약진지역 인공지진하중의 최대 지반가속도는 1.14m/s^2 이고 IBC2006 설계응답스펙트럼에 적합하도록 조정된 강진지역 인공지진하중의 최대지반가속도는 4.26m/s^2 이므로 각각의 지역특성에 맞도록 El Centro 지진하중이 조정된 것으로 판단된다.



〈그림 6〉 IBC2006의 설계응답스펙트럼에 적합하도록 수정된 El Centro 기반 인공지진하중

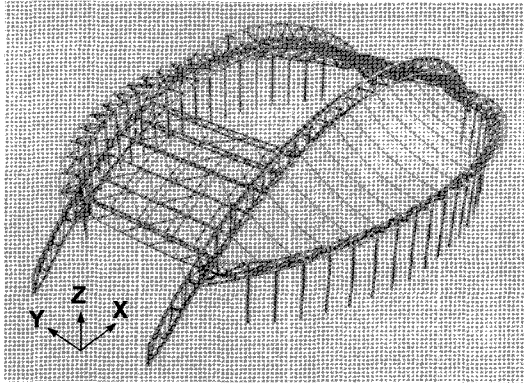


〈그림 4〉 El Centro (1940, NS) 지진하중 원본

3. 예제 대공간 구조물

본 연구에서 사용한 예제 대공간 구조물은 한국기술교육대학교의 홍보관으로 대공간 건축물 건설기술 개발 연구단의 파일럿 프로젝트로 사용되고 있는 30m 경간의 대공간 구조물로서 〈그림 7〉에 나타내었다. 예제 구조물의 지붕구조는 철골 킬아치(keel arch)와 막구조 및 격자형 케이블구조(cable net)으로 구성되어 있으며 하부구조는 철골조로 이루어져 있다. 예제 대공간 구조물의 지붕구조 중 킬아치가 가장 핵심적인 역할을 하고 킬아치에 의해서 구조물의 동적특성이 크게 좌우된다. 예제구조물을 고유치 해석한 후 모드별 고유진동수를 보면 구조물의 지진 응답에 많은 영향을 미치는 저차모드의 진동수가 일반적인 지진하중의 지반가속도 스펙트럼이 매우 커지는 1Hz이상(주기 1초 이내)에 존재하는 것을 알 수 있었다. 따라서 지진하중에 대하여 예제 구조물

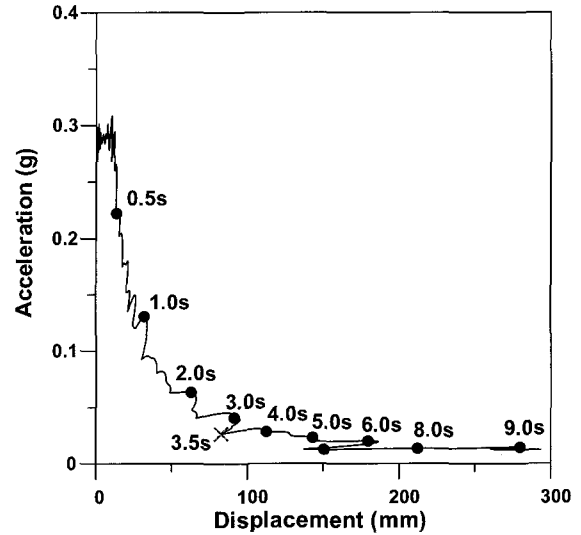
의 동적응답이 작지 않게 발생하리라는 것을 예측할 수 있다. 예제 구조물의 주요 저차모드 형상을 보면 구조물의 수평방향 움직임 못지않게 수직방향 움직임이 크게 발생하는데 이러한 특성 때문에 대공간 구조물은 라멘구조와 달리 수평지진하중에 의하여 수평방향 응답뿐만 아니라 수직방향응답도 크게 발생하는 것으로 알려져 있다.



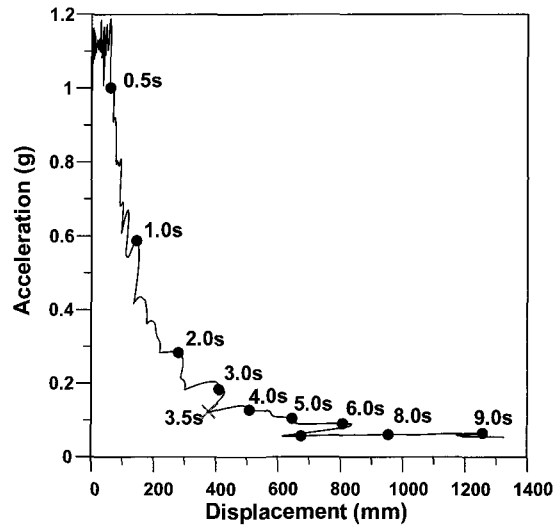
〈그림 7〉 예제 대공간 구조물

4. LRB 면진시스템

스마트 면진시스템의 대공간구조물에 대한 지진 응답 제어성능을 객관적으로 검증하기 위하여 LRB 면진시스템을 사용한 경우와 비교하여 보았다. 이를 위하여 앞서 소개한 예제구조물 및 인공지진하중을 대상으로 최적의 거동을 할 수 있는 LRB를 설계하였다. LRB 면진시스템을 설계하기 위해서는 면진시스템의 진동주기를 우선 결정해야 한다. 면진시스템의 진동주기는 예상되는 지진하중에 대하여 상부구조물의 가속도응답 뿐만 아니라 변위응답을 적절하게 줄일 수 있는 값으로 선택되어야 한다. 이를 위해서는 대상 지진하중을 사용하여 가속도-변위 스펙트럼을 그려보는 것이 필요하다. 따라서 <그림 5와 6>에 나타낸 중약진 및 강진지역의 인공지진하중을 사용하여 가속도-변위 스펙트럼을 작성하였고 이를 <그림 8과 9>에 나타내었다.



〈그림 8〉 중약진지역 인공지진하중의 변위-가속도 스펙트럼



〈그림 9〉 강진지역 인공지진하중의 변위-가속도 스펙트럼

그림에서 보는 바와 같이 변위응답스펙트럼과 가속도응답스펙트럼은 일반적으로 반비례 관계를 나타낸다. 즉, 구조물의 주기가 길어지면 가속도응답은 감소하는 반면에 변위응답은 증가하는 경향이 있고 구조물의 주기가 짧아지면 그 반대의 경향을 나타낸다. 면진시스템의 감성이나 감쇠를 작게 하면 지반과 구조물의 격리효과가 커져서 지반운동이 상부구조물로 전달되는 것을 막아주게 된다. 따라서 면진

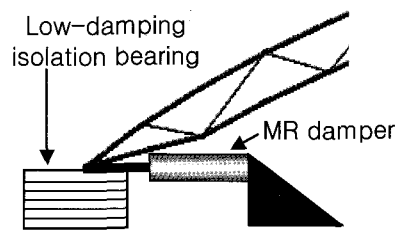
된 상부구조물의 절대가속도는 작아지지만 면진층의 변위가 증가하게 되어 지반과 상부구조물 사이의 상대변위가 커지게 된다. 반대로 면진시스템의 강성이나 감쇠가 커지면 면진층의 변위가 감소하게 되지만 상부구조물로 지반운동이 전달되어 면진된 구조물의 절대가속도가 증가하게 된다. 따라서, 두 응답사이 에 서로 상충관계가 발생하므로 면진시스템을 설계 할 때에는 두 가지 응답을 적절하게 저감시킬 수 있는 주기를 면진된 구조물의 1차모드 진동주기로 선택하는 것이 필요하다. 중약진지역의 인공지진을 나타내는 <그림 8>을 보면 구조물의 주기가 증가함에 따라서 가속도응답이 급격히 감소하다가 약3.5초 이후에는 가속도응답의 저감은 거의 없고 변위응답이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 <그림 9>에 나타난 강진지역 인공지진의 경우도 거의 비슷한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

LRB 면진시스템을 설계할 때 결정해야할 중요한 변수는 납과 탄성고무를 합한 LRB의 항복하중(Q_y)과 LRB의 납이 항복하기 전의 강성과 항복한 후의 강성비($K_{initial}/K_{yield}$)이다. 본 연구에서는 면진구조물의 1차모드 고유진동주기를 3.5초로 선택하였기 때문에 LRB의 항복후 강성(K_{yield})는 자동적으로 결정이 되고 이것은 LRB 중 고무부분만의 강성과 같다. 본 연구에서는 파라미터 스타디를 통하여 면진층 변위와 구조물 가속도를 동시에 적절하게 제어할 수 있는 값으로 LRB의 항복하중(Q_y)을 전체구조물 무게의 5%로 선택하였고 $K_{initial}/K_{yield}$ 를 5로 선택하였다.

5. 스마트 면진시스템의 구성 및 제어 알고리즘의 개발

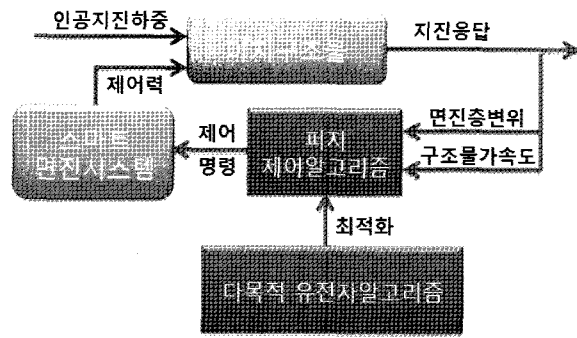
스마트 면진시스템을 구성하기 위하여 <그림 10>에 나타난 바와 같이 MR 감쇠기와 저감쇠 탄성베어링을 사용하였다. 본 연구에서 사용하는 예제 대공간 구조물은 30m 경간의 비교적 작은 파일럿 프로젝트로서 8.26ton의 질량을 가지고 있다. 면진시스템을 적용한 대공간구조물의 1차모드 고유진동주기를

3.5초로하기 위하여 LRB의 납이 항복한 후 탄성베어링만의 강성(K_{yield})을 260kN/m로 두었다. 스마트 면진시스템이 MR 감쇠기로 인한 제어효과를 크게 하기 위하여 탄성베어링의 감쇠를 비교적 작은 값인 2%로 하였다. MR 감쇠기의 동적 거동을 모사하기 위한 해석모델로서는 많은 연구자들에 의해서 널리 사용되고 있는 Bouc-Wen 모델을 사용하였다. MR 감쇠기로 전달되는 최소 및 최대 전압은 0V와 5V이고 MR 감쇠기의 용량은 20kN이다.



<그림 10> 스마트 면진시스템의 구성

스마트 면진시스템을 효과적으로 제어하기 위해서 본 연구에서는 퍼지제어알고리즘^{17,18)}을 이용한다. 퍼지제어기의 입력변수는 스마트 면진시스템이 설치되는 면진층에서의 상대변위와 구조물의 X방향 절대가속도로 하였고 스마트 면진시스템을 구성하는 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압을 출력변수로 하였다. 퍼지제어기는 면진층 변위 및 구조물 가속도를 입력받아서 입력소속함수를 사용하여 입력퍼지변수로 변환하는 퍼지화작업을 우선적으로 한다. 입력퍼지변수는 퍼지규칙에 따라서 퍼지추론과정을 통하여 출력퍼지변수로 사상(mapping)되고 비퍼지화(defuzzification)과정을 통하여 물리적 의미를 가지는 0V-5V 사이의 명령전압으로 출력된다. 입력 및 출력소속함수는 가우스함수를 사용하였고 소속함수의 형태와 퍼지규칙은 다목적 유전자알고리즘(NSGA-II)을 사용해서 최적화하였다^{19,20)}. 이러한 최적화 과정의 개념도를 <그림 11>에 나타내었다.



〈그림 11〉 다목적 유전자알고리즘을 이용한 퍼지제어기의 최적화

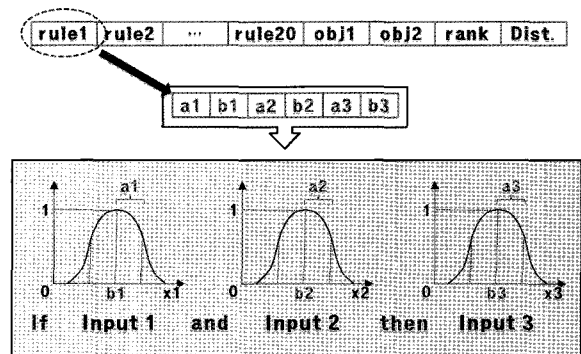
다목적 최적화문제에서는 본질적으로 서로 우열을 판별할 수 없는 다수의 최적해가 존재하게 되는데 이를 파레토 최적해집합이라고 한다. 이는 다수의 목적함수가 서로 상충하는 특성 때문에 trade-off가 발생한다. 즉, 스마트 면진장치가 설치된 구조물에서 명령전압을 크게 하면 면진층의 변위가 감소하지만 구조물의 가속도는 증가하게 된다. 반대로 명령전압을 작게 하면 지반과의 격리효과가 커져서 구조물의 가속도는 감소하지만 면진층 변위가 증가하게 된다. 이처럼 두 응답이 서로 상충되기 때문에 다목적 유전자알고리즘의 목적함수로 사용하였다. 사용된 두 목적함수는 〈표 1〉에 나타낸 바와 같이 스마트 면진시스템이 설치된 구조물의 응답을 LRB가 설치된 구조물의 응답으로 나누어 정규화된 값으로 표현하였다.

〈표 1〉 다목적 최적화의 목적함수

목적함수	내용
f_1	스마트 면진시스템이 적용된 경우의 최대 면진층 변위 LRB 면진시스템이 적용된 경우의 최대 면진층 변위
f_2	스마트 면진시스템이 적용된 경우의 최대 구조물 가속도 LRB 면진시스템이 적용된 경우의 최대 구조물 가속도

유전자알고리즘을 통해서 최적화하기 위해서는 암호화(encoding)과정을 거쳐서 퍼지제어기를 구성

하는데 필요한 모든 정보를 염색체라 불리는 하나의 구조로 표현되어야 한다. 본 연구에서 사용한 퍼지 제어기의 입출력 변수는 가우스함수를 통해서 표현이 되고 사용된 염색체의 구조를 〈그림 12〉에 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 하나의 염색체에는 20개의 퍼지제어규칙과 다목적 최적화에 필요한 목적함수별 적합도 값 (obj1, obj2) 및 우선순위(rank)와 혼잡도거리(dist)가 저장된다. 각각의 퍼지 제어규칙은 6개의 파라미터를 통해서 표현이 되는데 a 는 가우스 소속함수의 중앙부 위치, σ 는 표준편차를 각각 나타낸다. 여기서 a_1, b_1 및 a_2, b_2 는 입력 변수를 위한 가우스 소속함수를 나타내고 a_3, b_3 는 출력변수를 위한 가우스 소속함수를 나타낸다.

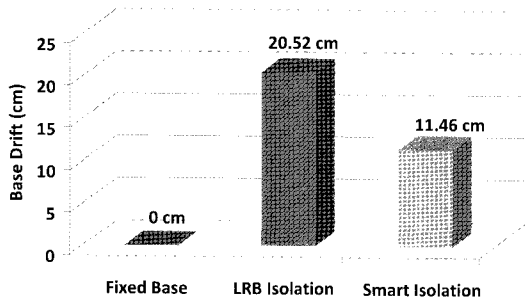


〈그림 12〉 퍼지제어기의 염색체 구조

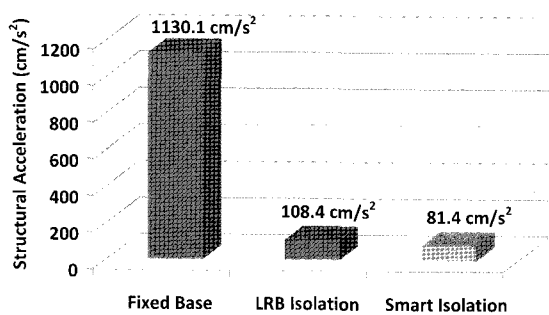
6. 스마트면진시스템의 제어성능 평가

스마트 면진시스템이 설치된 대공간구조물의 지진응답을 효과적으로 제어할 수 있는 퍼지제어기를 개발하기 위하여 다목적 유전자알고리즘(NSGA-II)을 사용한 최적화작업을 수행하였다. 이때 〈그림 6〉에 나타낸 강진지역을 대표하는 인공지능동을 사용하였다. 한 세대를 이루는 개체군은 100개로 하였고 최적화는 1000세대까지 수행하였다. 최적화작업 및 수치해석은 MATLAB 버전 2009b를 사용하였고 SIMULINK를 사용하여 모델링하였다. 최적화 결과 얻은 파레토 최적해 집합 중에서 면진층변위와 구조물의 가속도를 동시에 적절하게 저감할 수 있는 퍼지제어기를 선택하여 수치해석을 수행하였다.

수치해석결과 각 시스템의 지진응답 제어성능을 정량적으로 파악하기 위하여 최적 설계된 LRB 면진시스템과 스마트 면진시스템 그리고 고정기초를 가진 예제구조물의 최대치 지진응답을 비교하여 <그림 13>과 <그림 14>에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 LRB 면진시스템을 사용하면 면진층에서 20.52cm의 변위가 발생하지만 스마트 면진시스템을 사용하면 11.46cm의 변위가 발생한다. 예제 대공간 구조물에 면진시스템을 적용하지 않았을 경우에는 지붕구조물 중앙부의 X방향 가속도응답이 1130.1cm/s^2 이 발생하였고 LRB 면진시스템을 적용하였을 경우에는 이를 108.4cm/s^2 로 줄일 수 있었다. 스마트 면진시스템을 적용할 경우에는 이를 81.4cm/s^2 로 더욱 줄일 수 있다.



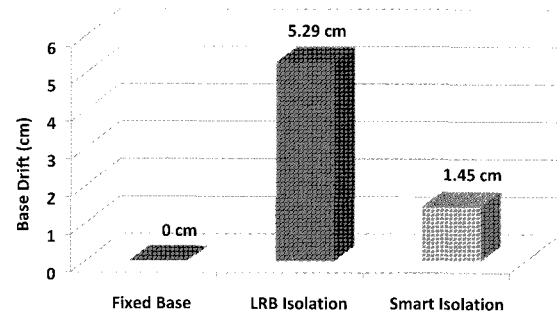
<그림 13> 최대치 면진층 변위의 비교



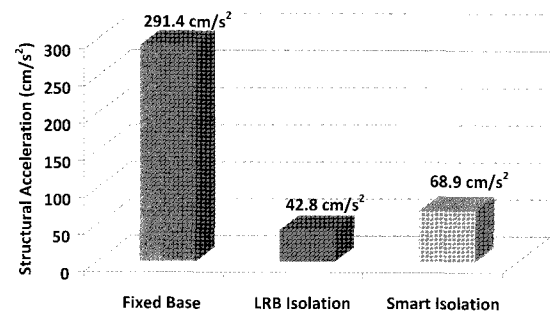
<그림 14> 최대치 구조물 가속도 비교

위와 같이 강진지역에 위치한 대공간 구조물에 설치된 스마트 면진시스템은 LRB 면진시스템에 비하여 면진층 변위와 구조물의 가속도를 동시에 효과적으로 저감시킬 수 있음을 확인하였다. 이렇게 강진지역에 있는 대공간 구조물을 위하여 개발된 스마트

면진시스템을 중약진지역에 있는 구조물에 적용할 때 나타나는 제어성능을 검토하기 위하여 <그림 5>에 나타난 중약진지역을 대표하는 인공지진을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석결과 각 시스템의 지진응답 제어성능을 비교하기 위하여 LRB 면진시스템과 스마트 면진시스템 그리고 고정기초를 가진 예제구조물의 최대치 지진응답을 <그림 15>와 <그림 16>에 나타내었다.



<그림 15> 최대치 면진층 변위의 비교



<그림 16> 최대치 구조물 가속도 비교

그림을 보면 강진지역에 위치한 대공간구조물을 위해서 개발된 스마트 면진시스템을 중약진 지역에 위치한 대공간구조물에 그대로 적용한 경우에 면진층의 변위는 LRB 면진시스템에 비하여 효과적으로 제어할 수 있지만 구조물의 동적응답은 오히려 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 강진지역에 있는 구조물의 지진응답제어를 위하여 개발된 스마트 면진시스템의 MR 감쇠기 용량은 중약진 지역의 구조물의 제어를 위해서는 비교적 크기 때문으로 판단된다.

즉, 스마트 면진시스템을 구성하는 MR 감쇠기의 용량이 지진하중에 비하여 상대적으로 크면 면진층에 과도한 감쇠력이 발생하게 되고 이로 인하여 구조물과 지반의 격리효과가 떨어지게 되므로 면진층의 변위는 대폭 줄어들지만 대공간 구조물의 가속도응답은 LRB 시스템을 적용한 경우에 비하여 매우 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 강진지역에 있는 구조물을 위하여 개발된 스마트 면진시스템을 그대로 중약진 지역에 있는 구조물에 적용하면 구조물의 동적응답을 증폭시킬 수 있으므로 MR 감쇠기의 용량 등 스마트 면진시스템을 새롭게 설계해야함을 알 수 있다. 이때 MR 감쇠기의 passive-on 용량은 스마트 면진시스템의 최대 제어력을 결정하게 되므로 매우 신중하게 선택해야한다. 뿐만 아니라 MR 감쇠기의 passive-off 용량을 적절하게 선택하는 것도 필요하다. Passive-off 용량이 커지게 되면 면진층에 도입되는 제어할 수 없는 감쇠력이 커지게 되어 면진시스템에 의한 지반격리효과가 줄어들게 되므로 효율적인 지진응답 제어가 불가능하게 된다. 따라서 수치해석을 수행할 때에는 MR 감쇠기의 passive-off 용량을 '0'에 가깝게 두어 제어성능을 증가시킬 수 있지만 이것은 이론적으로만 가능하므로 실제로 제작이 가능한 용량을 고려하여 passive-off 용량을 설계하는 것이 반드시 필요하다. 또한 스마트 면진시스템을 구성하는 각각의 기계적 장치뿐만 아니라 제어알고리즘 또한 중약진지역의 특성에 맞게 재구성된다면 더욱 효율적인 제어가 이루어질 것으로 판단된다. 중약진 지역에 있는 대공간구조물의 지진응답제어를 위한 스마트 면진시스템의 최적설계는 추후 파라미터 연구를 통하여 수행될 계획이다.

7. 결론

본 연구에서는 강진지역에 위치한 대공간구조물의 지진응답 제어를 위하여 개발된 스마트 면진시스템의 중약진 지역에 위치한 대공간구조물에 대한 적용성을 검토해보았다. 이를 위하여 강진지역 및 중약진 지역의 특성에 적합한 인공지진을 생성하였다. 이 때 강진지역 및 중약진지역의 지진하중을 생성하기 위하여 각각 IBC2006, KBC2009에서 제시한 설계 가

속도 응답스펙트럼을 사용하였다. 대공간 구조물의 지진응답 제어를 위하여 20kN MR 감쇠기와 저감쇠 탄성베어링으로 구성된 스마트 면진시스템을 개발하였고 이를 효율적으로 제어할 수 있는 퍼지제어알고리즘을 개발하였다. 퍼지제어기를 최적화하기 위해서 다목적 유전자알고리즘인 NSGA-II를 사용하였고 면진층 변위와 대공간 구조물의 가속도를 목적함수로 사용하였다. 제안된 스마트 면진시스템의 지진응답 제어성능을 일반적으로 사용되는 LRB 면진시스템과 비교하여 검토하였다. 강진지역에 위치한 예제 대공간구조물의 지진응답은 LRB 면진시스템을 적용하여 매우 효과적으로 제어할 수 있음을 확인하였고 스마트 면진시스템을 적용하면 LRB 면진시스템을 적용한 경우에 비하여 면진층 변위와 구조물 가속도 모두 큰 폭으로 더 줄일 수 있었다. 강진지역에 설치된 구조물을 위하여 개발한 스마트 면진시스템을 그대로 중약진 지역의 구조물에 적용한다면 면진층 변위는 줄어들지만 구조물의 지진응답이 크게 증가하는 것을 확인하였다. 따라서 강진지역의 스마트 면진시스템을 그대로 중약진 지역에서 사용하는 것은 위험하며 MR 감쇠기 용량 등을 재설계하는 것이 필요함을 알 수 있다. 또한 MR 감쇠기 용량의 최적화작업과 함께 제어알고리즘의 최적화작업을 포함한 통합 최적화에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 추후 파라미터 연구를 통하여 중약진 지역에 있는 대공간구조물의 지진응답제어를 위한 스마트 면진시스템의 최적설계방법에 대한 연구가 수행될 계획이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호# '06 건설핵심 B03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. F. Naeim and J.M. Kelly (1999), Design of Seismic Isolated Structures: from Theory to Practice, Wuley: New York.

2. J.M. Kelly (1999), The current state of base isolation in the United States, Proc. Second World Conference on Structural Control, Kyoto, Japan, pp. 1043-1052.
3. T.H. Heaton, J.F. Hall, D.J. Wald and M.W. Halling (1995), Response of high-rise and base-isolated buildings in a hypothetical Mw 7.0 blind thrust earthquake, Science, 267, pp. 206-211.
4. J.M. Kelly (1999), The role of damping in seismic isolation, Earthquake Eng. Struct. Dyn. 28, pp. 30-20.
5. E.A. Johnson, J.C. Ramallo, B.F. Spencer Jr. and M.K. Sain (1999), Intelligent base isolation systems, Proc. 2nd World Conf. on Structural Control, Kyoto, Japan, pp. 367-376.
6. B.F. Spencer Jr., E.A. Johnson and J.C. Ramallo (2000), Smart isolation for seismic control, JSME Int. J. Ser. C., 43(4), pp. 704-711.
7. H.S. Kim, and P.N. Roschke (2006), Design of fuzzy logic controller for smart base isolation system using genetic algorithm, Engineering Structures, 28(1), pp. 84-96.
8. T. Kinoshita, M. Ohsaki, and T. Nakajima (2009), Topology optimization of compliant mechanisms for seismic isolation of spatial structures, APCS 2009, Nagoya, Japan.
9. I. Tatemichi, and M. Kawaguchi (2000), A new approach to seismic isolation: possible application in space structures, International Journal of Space Structures, 15(2), pp. 145-154.
10. Y.C. Kim, S. Xue, P. Zhuang, W. Zhao, and C. Li (2010), Seismic isolation analysis of FPS bearings in spatial lattice shell structures, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 9(1), pp. 93-102.
11. S. Xue, X. Li, K. Pan (2010), Seismic isolation technology application in spatial structures, Journal of Building Structures,
12. S. Kato, S. Nakazawa, M. Uchikoshi, and Y. Mukaiyama (2000), Response reducing effect of seismic isolation system installed between large dome and lower structure, Proceedings of APCS 2000, pp. 323-330.
13. S. Xue, X. Li (2008), Advances on seismic isolation in spatial structures, Proceedings of the 6th International Conference on Computation of Shell and Spatial Structures IASS-IACM 2008.
14. 강주원, 김현수, 임준호 (2011), "스마트 면진시스템을 이용한 대공간 구조물의 다목적 퍼지제어", 한국공간구조학회 논문집, 제11권, 2호, pp. 89-99.
15. E.H. Vanmarcke and D.A. Gasparini (1976), SIMQKE: A program for artificial motion generation, Dept. of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
16. 전대한, 강병두, 김재웅 (2006), "설계용 스펙트럼에 적합한 인공지진파에 의한 비선형 응답 특성의 분석", 한국지진공학회 논문집, 제10권, 5호, pp. 63-71
17. C.C. Lee (1990), Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller-part I, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 20(2), pp. 404-418.
18. L.X. Wang (1994), Adaptive fuzzy systems and control: design and stability analysis, Prentice Hall.
19. K. Deb, A. Pratap, S. Agrawal, and T. Meyarivan (2000), "A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II," Technical Report No. 200001, Kanpur: Indian Institute of Technology Kanpur, India.
20. 강주원, 채승훈, 김현수 (2010), "스마트 스카이브릿지를 이용한 인접건물의 진동제어", 한국공간구조학회 논문집, 제10권, 4호, pp. 93-102.

(접수일자 : 2011년09월21일)

(심사완료일자 : 2011년11월21일)

(게재확정일자 : 2011년11월30일)