

MR 감쇠기와 FPS를 이용한 하이브리드 면진장치의 퍼지제어

Fuzzy Control of Hybrid Base-Isolator with Magnetorheological Damper and Friction Pendulum System

김 현 수*
Kim, Hyun-Su

P. N. Roschke**
P. N. Roschke

P. Y. Lin***
P. Y. Lin

국문요약

본 연구에서는 하이브리드 면진장치가 설치된 단자유도 구조물에 대하여 진동대 실험을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 하이브리드 면진장치는 네 개의 FPS와 한 개의 MR 감쇠기로 구성하였다. 다양한 크기 및 특성을 가진 지진하중을 하이브리드 면진장치가 설치된 구조물에 가하여 진동제어 성능을 평가하였다. 본 연구에는 준능동 MR 감쇠기의 저항력을 효과적으로 조절하기 위하여 퍼지제어기를 사용하였고 구조물에 부착된 계측기를 통하여 변위 및 가속도를 피드백으로 이용한다. 수동 및 준능동 제어기법을 사용하여 얻은 구조물의 응답을 서로 비교하였고 그 결과 FPS와 MR 감쇠기의 조합으로 다양한 특성의 하중을 받는 구조물의 진동제어를 효과적으로 수행할 수 있음을 알 수 있다.

주요어 : 면진장치, 퍼지제어, MR 감쇠기, 마찰진자시스템, 준능동제어

ABSTRACT

Shaking table tests are carried out on a single-degree-of-freedom mass that is equipped with a hybrid base isolation system. The isolator consists of a set of four specially-designed friction pendulum systems (FPS) and a magnetorheological (MR) damper. The structure and its hybrid isolation system are subjected to various intensities of near- and far-fault earthquakes on a large shake table. The proposed fuzzy controller uses feedback from displacement or acceleration transducers attached to the structure to modulate resistance of the semi-active damper to motion. Results from several types of passive and semi-active control strategies are summarized and compared. The study shows that a combination of FPS isolators and an adjustable MR damper can effectively provide robust control of vibration for a large full-scale structure undergoing a wide variety of seismic loads.

Key words : base-isolation system, fuzzy control, MR damper, friction pendulum system, semi-active control

1. 서 론

지반과 구조물 사이를 고무 베어링 등을 삽입하는 일반적인 면진장치가 근래에까지 지속적으로 사용되고 있지만 최근에는 다양한 특성을 가진 지진하중에 대하여 보다 견실한 성능을 발휘할 수 있도록 추가적인 보조감쇠장치가 도입되고 있다.⁽¹⁾ Chang⁽²⁾ 등은 그들의 연구에서 납-고무 베어링 (LRB; Lead Rubber Bearing)이나 슬라이딩 베어링을 마찰 및 점성감쇠기와 함께 사용하여 강체구조물을 효과적으로 면진시킬 수 있음을 실험 및 해석적인 방법으로 보여주었다. 최근에는 대형구조물의 진동제어를 위하여 준능동 제어장치가 유망한 방법으로 연구되고 있다. 준능동 제어장치는 직류전지와 같은 작은 전원으로도 제어장치의 특성을 적절하게 변화시킴으로써 외부하중에 대한 응답을 최소화시킬 수 있다. 즉, 준능동 제어장치는 능동제어장치에 비하여 상당히 작은 전원으로도 구조물의 제어를 효과적으로 하기 위하여 특성을 변화시킬 수 있는 능동제어장치의 장점을 얻을 수 있다. 또한 능동제어장치

의 경우에는 심각한 지진하중이 발생하여 외부전원이 끊어진 상태에서는 제어장치가 능력을 발휘하지 못하는 단점이 있는데 준 능동장치는 이러한 문제도 앞의 특성으로 해결할 수 있다. 또한 준 능동장치에 전류가 흐르지 못하게 되는 경우에도 여전히 수동 제어장치로서 역할을 할 수 있기 때문에 구조물에 감쇠력을 추가할 수 있다. 이러한 감쇠력은 감쇠기에 의해서 구조물에 직접 가해지는 것이 아니라 단순히 감쇠기의 저항력을 조절함으로써 발생하기 때문에 구조시스템을 불안정하게 할 가능성이 거의 없고 능동제어장치에 비하여 작은 에너지만을 소요한다. 이처럼 준능동제어는 수동제어 시스템이 갖고 있는 신뢰성 (reliability) 뿐만 아니라 능동제어 기법의 장점인 적응성 (adaptability)을 확보할 수 있기 때문에 최근에 활발히 연구가 진행중이다. 준능동 제어장치는 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫째로는 가변감쇠장치^{(3),(4)}, 가변강성장치⁽⁵⁾, 준능동 유압감쇠장치^{(6),(7)} 등과 같이 제어력을 조절하기 위해서 기계적 시스템을 이용하는 제어장치들이 있다. 이러한 장치들의 기본적인 접근방법은 감쇠기의 댐핑과 강성을 조절하기 위하여 조절가능한 밸브를 사용하는 것이다. 준능동 제어장치의 두 번째 타입은 ER(electrorheological) 감쇠기⁽⁸⁾나 MR(magnetorheological) 감쇠기⁽⁹⁾와 같이 제어 가능한 유체를 사용하는 제어기이다. 이 중에서

* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 연구원, 공학박사, (대표전자: digiarchi@skku.edu)

** Professor, Department of civil engineering, Texas A&M University, U.S.A

*** Associate research fellow, National Center of Research on Earthquake Engineering, Taiwan, R.O.C.

본 논문에 대한 토의를 2005년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2004. 12. 15 / 심사종료일 : 2005. 1. 4)

특히 MR 감쇠기는 건축 및 토목구조물의 제어를 연구하는 연구자들로부터 많은 주목을 받고 있다. MR 감쇠기는 비교적 최근에 개발된 감쇠장치로서 구조물에 가해지는 저항력의 크기가 실시간으로 조절될 수 있다. 즉, 빠른 반응속도를 가지면서도 외부온도가 변하거나 불순물이 첨가되어도 항복응력의 변화가 거의 없이 일정한 성능을 유지하는 장점을 갖는다. MR 감쇠기는 자기장의 세기에 따라 변하는 항복응력을 갖는 점소성 거동을 하기 때문에 이 장치를 이용한 준 능동제어는 자기장을 변화시킬 수 있는 전류 또는 전압을 조절함으로써 이루어진다. MR 감쇠기의 특성은 컴퓨터시뮬레이션^{(10),(11)}과 실험⁽¹²⁾을 통해서 여러 연구자들에 의하여 연구되어 왔고 구조물에 실제 적용을 통해서 MR 감쇠기가 구조물의 동적응답을 저감시키는데 효과적으로 사용될 수 있다는 사실을 확인하였다.^{(13),(14)}

본 연구에서는 면진장치로서 마찰진자시스템(FPS; Friction Pendulum System)을 사용하였고 지반과 격리된 구조물을 보다 효과적으로 제어하기 위하여 MR 감쇠기를 추가적으로 사용하였다. 그리고 실험을 통하여 FPS와 MR 감쇠기를 함께 사용한 하이브리드 면진장치의 효율성과 신뢰성을 검토하였다. 본 연구에서는 15 kN 용량의 MR 감쇠기를 보조 감쇠장치로 사용하였고 4개의 새로운 형태의 FPS를 면진장치로 사용하였다. 면진장치는 구조물의 무게를 지탱하는 수직저항능력과 지진하중에 대하여 수평변위를 제어할 수 있는 능력이 있어야 한다. 본 연구에서 사용된 하이브리드 면진장치에서 FPS는 구조물의 무게를 지탱하고 또한 중력에 의해서 구조물을 원래의 위치로 되돌리는 역할을 하며 MR 감쇠기는 적절한 감쇠력을 발생시켜서 구조물의 진동을 더욱 효과적으로 줄이는 역할을 한다. 전술한 바와 같이 MR 감쇠기의 감쇠력은 MR 감쇠기에 흐르는 전류를 조절하여 자기장을 변화시킴으로써 조절할 수 있다. 현재 제시된 준능동 제어장치를 제어하는 제어기법 중 능동제어 이론에 기반 하여 매 순간 감쇠력의 소산성을 판단하고 이에 따라 전류의 세기를 on-off의 2단계만으로 조절하는 Clipped-Optimal 제어기법이 효과적인 기법이라고 알려져 있다.⁽¹⁰⁾ 그런데 이 방법은 적용이 간단하면서도 어느 정도 효과적이라는 장점을 가지지만 감쇠기의 비선형성이 고려되지 않는다. 이에 비하여 퍼지논리제어는 복잡하고 불확실하며 애매한 조건아래서 적용되어야 하는 시스템에 매우 적합하다. 특히 고유의 견실성(robustness)과 비선형(nonlinearity) 및 불확실성(uncertainty)을 쉽게 다룰 수 있는 능력 때문에 본 연구에서는 하이브리드 면진장치의 핵심 구성요소인 MR 감쇠기를 제어하기 위하여 퍼지논리제어(fuzzy logic control)를 사용한다. 이와 같은 연구를 위하여 사용된 MR 감쇠기와 새로운 형태의 FPS에 대하여 살펴본다. 그리고 하이브리드 면진장치 실험체의 구성에 대하여 소개하고 준능동 퍼지제어기의 설계과정을 소개한다. 진동대 실험결과를 분석하여 사용된 하이브리드 면진장치의 성능을 검토한다.



그림 1 15 kN MR 감쇠기

2. MR 감쇠기 성능실험

본 연구에서는 그림 1에 나타난 것과 같이 15 kN 용량의 MR 감쇠기를 제작하여 하이브리드 면진장치에 사용하였다. 제작된 MR 감쇠기의 성능실험을 수행하였고 이를 통하여 계획된 성능과 일치하는지 검토하였다. 성능실험은 다양한 전압신호에 의해서 발생하는 전류가 흐르는 MR 감쇠기에 여러 가지 진동수 성분의 정현파와 랜덤파를 이용한 축압축력과 인장력을 가함으로써 이루어진다. 성능실험을 통하여 얻은 데이터는 실험 이후에 실험체의 수치해석에 사용될 MR 감쇠기 뉴로-퍼지 모델을 학습시키는데 사용된다. MR 감쇠기를 사용하여 성능실험을 하기 이전에 우선 MR 감쇠기를 테스트할 변위와 전압의 시간이력 데이터를 생성한다. 시간이력 데이터는 MR 감쇠기가 실제로 사용될 때 경험할 것으로 예상되는 작동범위를 포함해야만 MR 감쇠기의 거동을 정확하게 나타낼 수 있는 뉴로-퍼지 모델을 만들 수 있다. 표 1에 15 kN MR 감쇠기의 실험범위를 각각 나타내었다. MR 감쇠기의 파손을 방지하고 안전을 위해서 변위의 최대값은 감쇠기 피스톤의 최대 작동길이(± 54 mm)보다 조금 작은 ± 40 mm로 하였다. 반면에 MR 감쇠기로 보내어지는 전압신호의 최대값은 감쇠기의 포화한계(saturation limit; 1.07 V)보다 조금 더 큰 1.2 V로 하여서 MR 감쇠기의 작동범위(0-1.07 V)안에 충분한 수의 데이터 포인트가 존재하도록 하였다. MR 감쇠기의 포화한계는 전압을 그 이상 보내어도 감쇠력이 더 이상 크게 증가하지 않는 점을 말한다. MR 감쇠기의 감쇠력은 자기장의 강도에만 관계가 있고 전류가 흐르는 방향에는 무관하기 때문에 0-1.2 V 사이의 랜덤 데이터를 전압의 시간이력으로 사용하였고 변위 및 전압신호의 진동수는 0-4 Hz까지 포함하도록 하였다.

그림 2와 3에 한 세트의 변위-전압의 시간이력과 Power 스펙트럼을 나타내었다. 랜덤시간이력은 가우스 백색파

표 1 15 kN MR 감쇠기의 실험 범위

	범위	진동수
변위	± 40 mm	0-4 Hz
전압	0-1.2 V	0-4 Hz

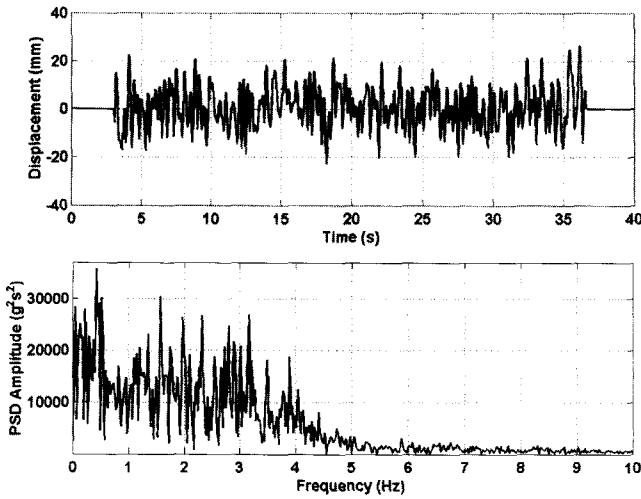


그림 2 랜덤 변위시간이력과 Power 스펙트럼

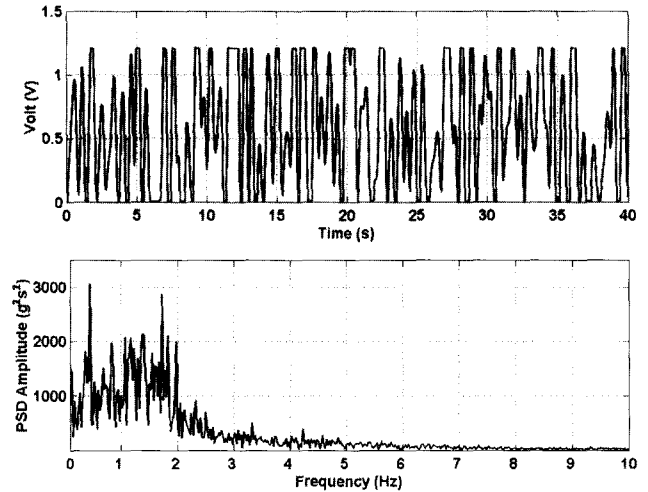


그림 3 랜덤 전압시간이력과 Power 스펙트럼

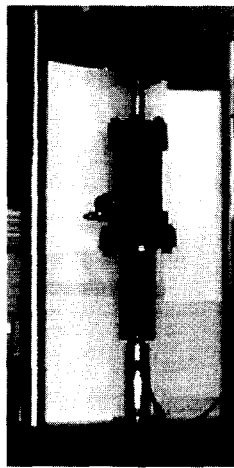


그림 4 MTS 가력기에 설치된 MR 감쇠기

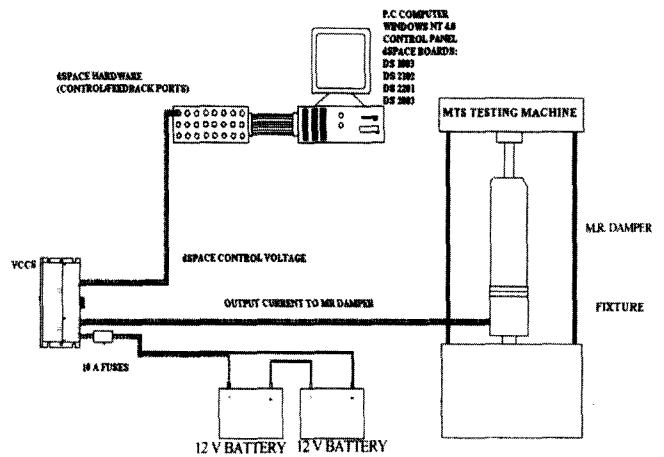


그림 5 15 kN MR 감쇠기 성능실험 구성도

(gaussian white noise)를 사용하여 만든 후 Butterworth 필터를 사용하여 4 Hz가 넘는 진동수성분은 제거하였다. MR 감쇠기를 실제 구조물에 적용하여 사용하다보면 감쇠기의 최대용량을 필요로 할 경우가 빈번하게 발생한다. 이 때 감쇠기로 전달되는 전압은 최대값(1.2 V)이 되며 이러한 경우를 passive-on이라고 한다. 반대로 MR 감쇠기에 보내어지는 전압을 0 V로 하여 감쇠기의 감쇠력을 최소화하는 상태를 passive-off라고 한다. 이러한 두 가지 극한의 상태를 나타내는 전압신호도 포함하여 성능실험을 수행하였다. 또한 랜덤시간이력 이외에도 정현파 변위시간이력을 사용하여 실험을 하였다. 변위 및 전압신호의 길이는 각각 40초이고 데이터의 시간간격은 0.001 초이다. 그리고 변위 데이터의 처음과 마지막 3초는 0으로 두어서 가력기의 갑작스런 움직임을 방지하였다.

본 성능실험에서 사용된 가력기의 최대 속도는 48 cm/sec이고 설치된 로드셀은 최고 200 kN까지 측정할 수 있다. 그림 4는 MTS 가력기에 MR 감쇠기가 설치된 모습을 나타내고 그림 5는 MR 감쇠기 성능실험의 간단한 구성도이다. 실시간 데이터 처리를 위한 dSPACE 보드가 설치된 PC와 MR 감쇠기가 설치된 가력기, 전압신

호를 전류신호로 변환하기 위한 전압제어전류원(VCCS; Voltage Controlled Current Source) 및 두 개의 12 V 직류전지로 구성되어 있다. VCCS는 계속적으로 변하는 전압신호를 실시간으로 받아서 전류신호로 변환한 후 MR 감쇠기로 보낸다. MR 감쇠기는 이 전류에 의해서 발생하는 자기장으로 감쇠력을 조절한다.

그림 6은 정현파를 이용한 MR 감쇠기 성능실험에서 얻어진 전압신호에 따른 힘-변위 이력곡선을 나타내고 그림 7은 힘-속도 관계를 보여준다. 그림 6과 7을 통해서 MR 감쇠기의 감쇠력은 전압신호에 의해서 크게 달라짐을 알 수 있다. 제어 범위가 큰 MR 감쇠기일수록 준능동 제어시스템을 보다 효과적으로 제어할 수 있다.

3. 마찰진자 시스템

마찰진자 시스템(FPS; Friction Pendulum System)은 구조물을 지반과 격리시키는 기계장치이다. 마찰진자 시스템의 간단한 구성도를 그림 8에 나타내었다. FPS에서는 베어링의 곡면을 따라서 상승한 구조물이 중력에 의해서 원래의 위치로 되돌아오려는 복원력이 발생하고 마찰

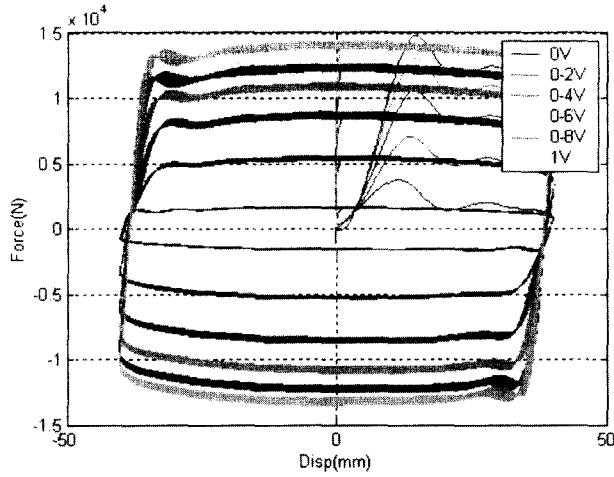


그림 6 전압에 따른 15 kN Damper의 힘-변위 관계 그래프

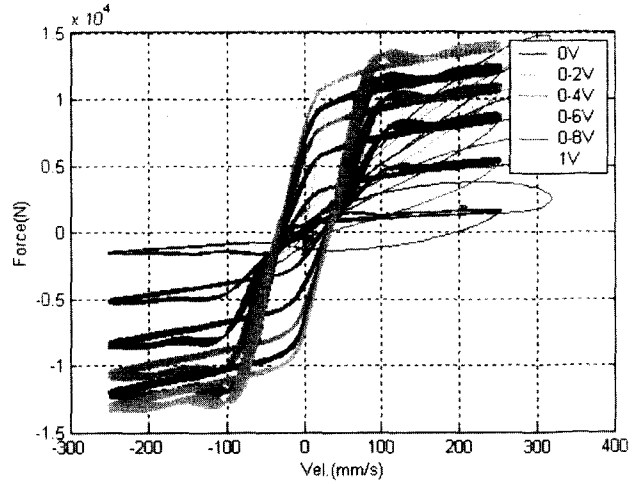


그림 7 전압에 따른 15 kN Damper의 힘-속도 관계 그래프

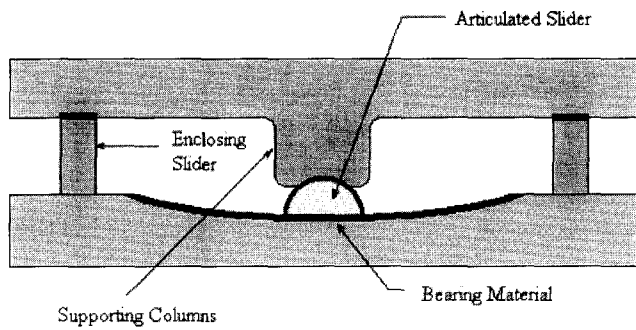


그림 8 일반 마찰진자 구성도

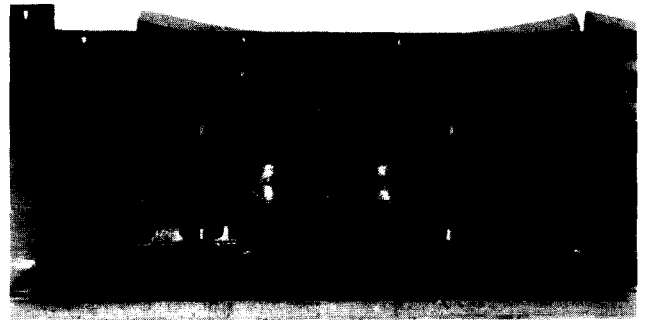


그림 9 본 연구에서 사용된 마찰진자

면에서의 마찰력에 의해서 에너지가 소산된다. 그림 9는 본 연구를 위해서 특별히 제작된 FPS로서 베어링의 하부뿐만 아니라 상부도 곡면으로 구성되어 있다. 그림 10에서 보는 바와 같이 곡면으로 된 롤러 받침은 500 mm X 200 mm X 20 mm 크기의 철판 플레이트에 용접되어 있다. 롤러 받침 곡면의 반경은 1m이고 마찰력을 최소화하기 위하여 표면을 매끄럽게 처리하였다. 이렇게 마찰력을 가능한 줄임으로써 MR 감쇠기가 제어할 수 있는 범위를 늘일 수 있고 MR 감쇠기의 진동제어 능력을 극대화할 수 있다. 본 연구에서 사용된 FPS 시스템의 마찰계수는 실험을 통하여 0.03의 값을 얻었다. 그림 11에서 볼 수 있는 이동장치의 철판 롤러의 직경은 70 mm이고

두 개의 롤러가 100 mm의 간격을 두고 배치되어 있다. 면진장치의 전체 높이는 165 mm이다.

FPS 베어링에서의 횡저항력은 Constantinou 등의 연구⁽¹⁵⁾에서 제안한 식 (1)이 가장 널리 사용되고 있다. Constantinou 등은 지진하중이 가해질 때 발생하는 베어링의 변위가 크지 않다는 가정 하에 베어링의 횡저항력과 횡변위와의 관계를 식 (1)과 같이 선형으로 가정하였다.

$$F = \frac{W}{R}u + \mu W \operatorname{sgn}(\dot{u}) \quad (1)$$

여기서, W 는 베어링에 의해서 지지되는 구조물의 무게

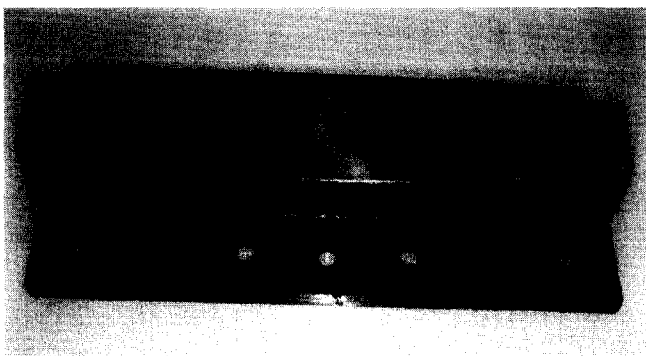


그림 10 철판 플레이트와 롤러받침의 표면



그림 11 철판 롤러로 구성된 이동장치

이고, R 은 베어링 곡면의 곡률반경이고 μ 는 마찰계수, u 는 횡방향 변위, \dot{u} 은 횡방향 속도이고 sgn 은 속도의 크기에 관계없이 부호만 얻어오는 함수이다. 식 (1)을 보면 베어링의 횡저항력은 지지하는 구조물의 무게에 비례하고 이 힘은 면진된 구조물의 질량중심에서 가해진다고 생각한다. 식 (1)에서 W/R 은 베어링의 강성을 나타낸다. 따라서 면진장치의 진동주기는 다음과 같이 나타낼 수 있으며 면진된 구조물의 질량에는 무관하다.

$$T = 2\pi \left(\frac{R}{g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

FPS로 지지된 구조물의 진동주기는 식 (2)에서 보는 바와 같이 구조물의 질량과는 관계없고 베어링의 곡률반경에 의해서 결정되기 때문에 설계자의 목적에 따라서 면진된 구조물의 진동주기를 비교적 쉽게 조정할 수 있다. 또한 베어링의 횡저항력은 베어링이 지지하는 구조물의 무게에 비례하므로 면진장치의 강성중심은 면진된 구조물의 질량중심과 일치하게 된다. 이러한 특성으로 인하여 FPS를 이용하면 면진된 구조물에 질량이 불규칙적으로 배치되었거나 또는 비대칭 구조물일 지라도 구조물의 비틀림 거동을 최소화시킬 수 있다.

4. 실험체의 구성

수치해석을 통하여 FPS와 MR 감쇠기가 설치된 하이브리드 면진장치의 퍼지제어가 변위와 가속도를 저감시키는데 효율적이라는 것을 확인한 후에 FPS 베어링과 15 kN MR 감쇠기가 설치된 면진구조물에 대한 가진 실험을 수행하였다. 본 실험에서 사용된 FPS는 롤러를 사용하여 마찰력을 최소화함으로써 MR 감쇠기가 하이브리드 면진장치의 주 에너지 소산장치로서의 역할을 하도록 하였다. 본 연구에서는 진동대 실험을 통하여 하이브리드 면진장치의 효율성과 실시간 제어능력 및 실제 구조물에 적용성을 검증하고자 한다. 이를 위하여 El Centro NS, Kobe NS, Chi-Chi(Station TCU052과 TCU069)지진을 하중으로 사용하였고 대형 진동대를 통하여 수평 지진하중을 구조물에 가한다. 그림 12에 이 들 4가지 지진하중의 지반가속도시간이력과 그것들의 FFT결과를 나타내었다. 그림에서 지반가속도시간이력은 PGA를 1로 정규화하였다.

진동대 실험의 개략적인 구성도를 그림 13에 나타내었다. 구조물의 응답은 여러 개의 가속도계, 로드셀, 열전대쌍 및 LVDT를 통하여 데이터 저장시스템으로 전달된다. 이러한 데이터의 일부분은 Matlab/SIMULINK를 이용

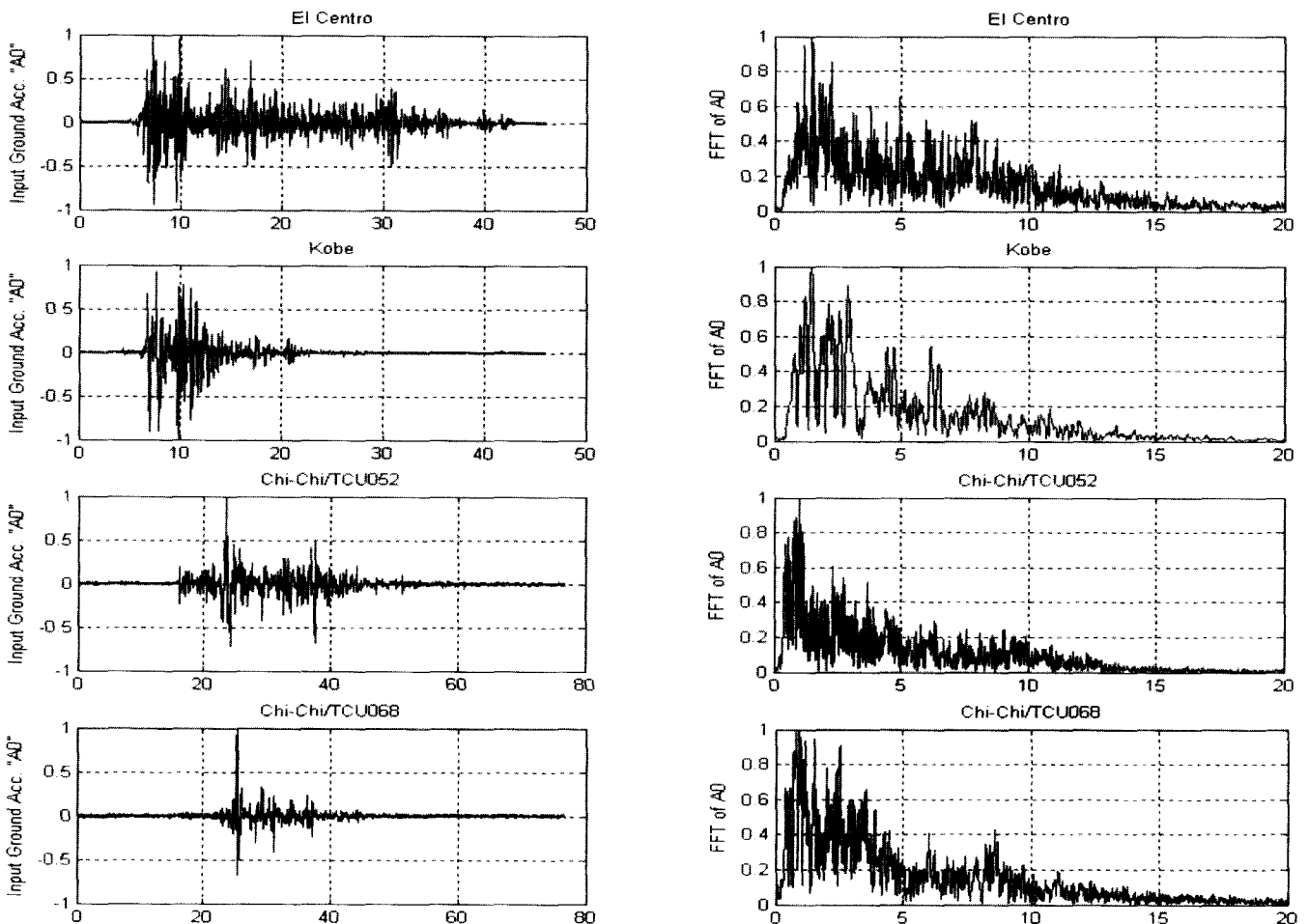


그림 12 실험에 사용된 지진하중의 지반가속도시간이력(왼쪽)과 FFT결과(오른쪽)

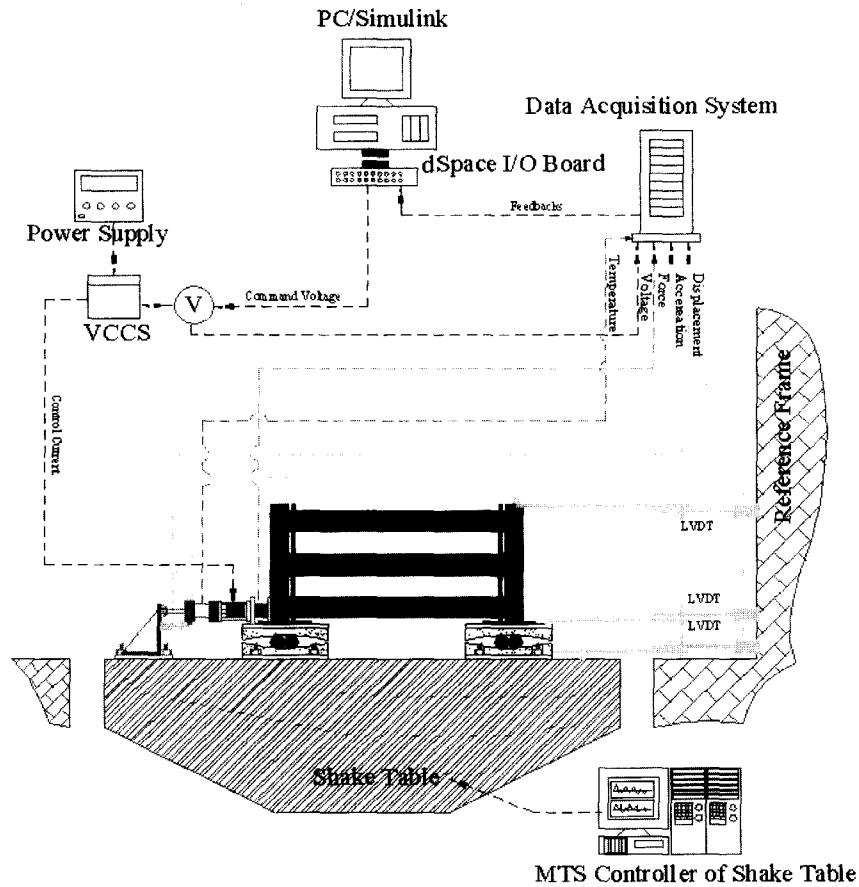


그림 13 진동대 실험의 구성도

하여 구성되어 있는 준능동 퍼지제어기로 보내져서 MR 감쇠기를 제어할 적절한 전압신호를 실시간으로 계산한다. 전압신호는 앞에서 설명한 VCCS를 통하여 대응하는 전류로 변환되고 이 전류는 MR 감쇠기로 보내져서 구조물의 거동을 변화시킨다.

전술한 여러 가지의 계측기를 통하여 그림 14에 나타낸 위치에서 면진구조물 및 감쇠기의 변위, 절대가속도, 감쇠력, 온도 등을 계측한다. 하이브리드 면진장치의 변위(D)와 가속도(A)는 FPS의 밀면(D0, A0), 지반과 격리된 구조물의 밀면(D1, A1), 구조물의 최상부(D2, A2)와 같이 크게 3개의 레벨로 나뉜다. 진동대 실험 중 구조물의 횡방향 변위와 비틀림을 계측할 수 있도록 각 레벨마다 2

개의 LVDT를 설치하였다. 또한 LVDT를 MR 감쇠기에 설치하여 실린더와 피스톤의 상대변위(Dmr)를 계측하였다. 그리고 MR 감쇠기 피스톤의 가속도(Amr)를 계측하기 위하여 가속도계를 추가적으로 피스톤에 설치하였다. 또한 로드셀을 MR 감쇠기에 설치하여 MR 감쇠기의 축력(Lmr)을 계측하였다. 그리고 MR 감쇠기 작동시에 MR 유체의 온도가 MR 감쇠기 성능의 신뢰성에 중요한 역할을 하기 때문에 MR 감쇠기 실린더의 표면에 열전대 쌍을 부착하여 온도를 계측하였다(Tmr). 지반과 격리된 구조물은 철제 프레임과 납 블록으로 구성되었으며 질량은 13620 kg이고 구조물의 고유진동주기는 2.77 초이다. MR 감쇠기의 양단은 그림 15에서 보는 바와 같이 진동대의 상부 표면과 격리된 구조물의 옆면에 견고하게 부착되었다. 전술한 4가지 지진하중의 시간이력을 이용하여 진동대를 제어하였다.

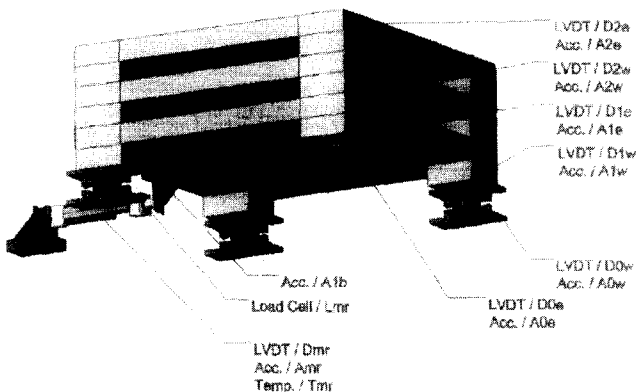


그림 14 실험체에 설치한 계측기의 위치

5. 준능동 퍼지제어기의 설계

본 연구에서 사용된 준능동 제어장치인 MR 감쇠기를 제어하기 위해서는 적절한 제어기가 필요하다. 비록 MR 감쇠기가 능동제어장치와 같이 제어신호에 의하여 감쇠력을 조절할 수 있지만 전통적인 능동제어 알고리즘을 준능동 제어장치인 MR 감쇠기에 직접 적용할 수는 없다. 현재 제시된 준능동 제어장치를 제어하는 제어기법으로는

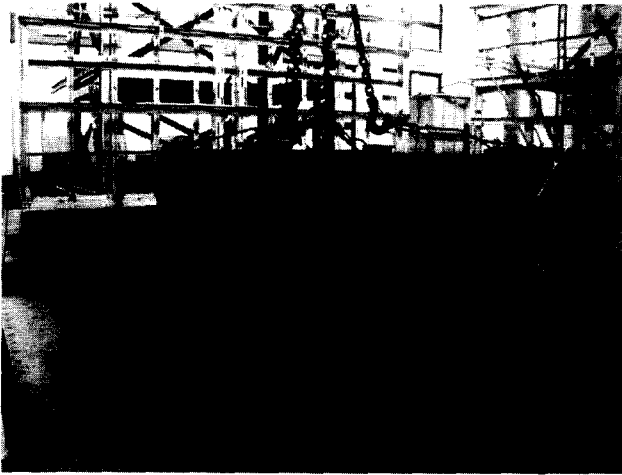


그림 15 하이브리드 면진장치가 장착된 시험체

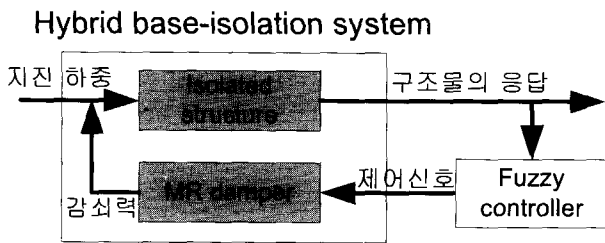


그림 16 퍼지제어시스템의 개념도

능동제어이론에 기반 하여 매 순간 감쇠력의 소산성을 판단하고 이에 따라 전류의 세기를 on-off의 2단계만으로 조절하는 Clipped-Optimal 제어기법⁽¹⁰⁾이나 절대속도와 상대속도의 부호를 이용하여 조절하는 Skyhook 제어기⁽¹⁶⁾ 등이 있다. 그런데 이러한 방법들은 적용하기가 간단하면서도 어느 정도 효과적이라는 장점을 가지지만 감쇠기의 비선형성을 고려하지 못하여 감쇠기에 입력되는 전압을 최대값 또는 최소값으로만 결정한다. 이에 반하여 퍼지제어기법은, 구조물에 발생하는 변위 및 가속도 등의 정보를 이용하여 퍼지추론과정을 거쳐서 구조물의 상태를 파악함으로써 매 순간 보다 효율적인 제어성능을 발휘하

도록 MR 감쇠기에 입력되어 감쇠력을 결정하는 전류량을 실시간으로 조절할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 그림 16에 나타난 바와 같이 퍼지제어기를 사용하여 MR 감쇠기에 전달되는 전류의 양의 조절하였다.

퍼지제어기를 설계하는 과정은 크게 3가지로 나눌 수 있다. 첫째, 사용할 퍼지추론타입을 선택하고 입력과 출력의 개수를 결정한다. 둘째, 각각의 입력과 출력에 대하여 소속함수(membership function)를 결정한다. 마지막으로 if-then 규칙을 설정한다. 본 연구에서는 지반과 격리된 구조물의 지반에 대한 상대변위와 절대가속도를 입력으로 사용하고 MR 감쇠기를 제어할 전압신호를 출력으로 사용하였다. 입력과 출력의 소속함수는 삼각형함수를 사용하였다. 그림 17, 18, 19는 각각 입력 및 출력의 소속함수를 matlab의 소속함수 편집기를 사용하여 입력하는 모습이다. 그림 17과 18에서 볼 수 있듯이 첫 번째 입력인 절대가속도는 PH, PS, Z, NS, NH의 5개의 소속함수를 사용하였고, 두 번째 입력인 상대변위는 PH, PB, PS, NS, NB, NH의 6개의 소속함수를 사용하였다. 여기서 P는 Positive, N은 Negative, H는 Huge, B는 Big, S는 Small, Z는 Zero를 각각 나타낸다. 그리고 출력변수인 전압신호는 PH, PB, PS, Z, NS, NB, NH의 7개의 소속함수를 사용하였다.

준능동 퍼지제어기의 기본적인 설계개념은 지반과 격리된 구조물의 상대변위와 절대가속도를 동시에 줄여보고자 하는 것이다. 본 연구에서 제안한 퍼지제어기는 면진 구조물의 응답을 크게 3가지 레벨로 나눈다. 첫째 구조물의 절대가속도가 매우 클(Huge) 경우에, MR 감쇠기의 감쇠력이 크다면 절대가속도가 더 커질 수 있다. 따라서 상대변위가 Small이나 Big인 경우에는 MR 감쇠기로 보내어지는 전압신호를 작게(Small) 한다. 그러나 상대변위가 Huge인 경우에도 전압신호를 너무 작게 한다면 상대변위를 효과적으로 제어할 수 없으므로 이때는 전압신호를 조금 크게(Big)한다. 둘째, 절대가속도가 작을(Small)

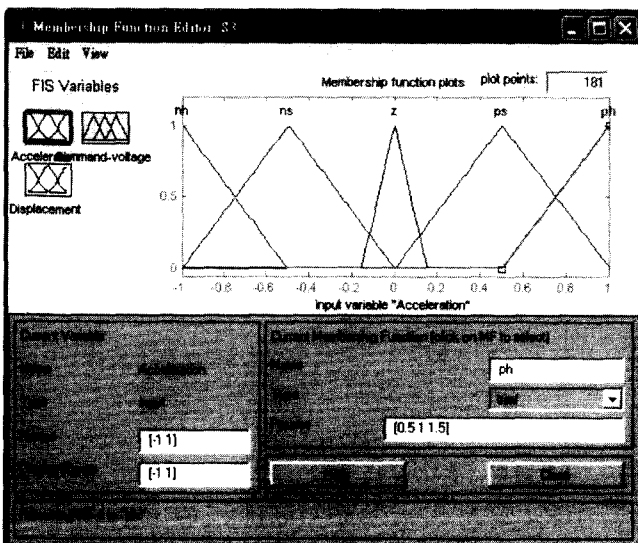


그림 17 입력 1: 절대가속도 (m/sec²)

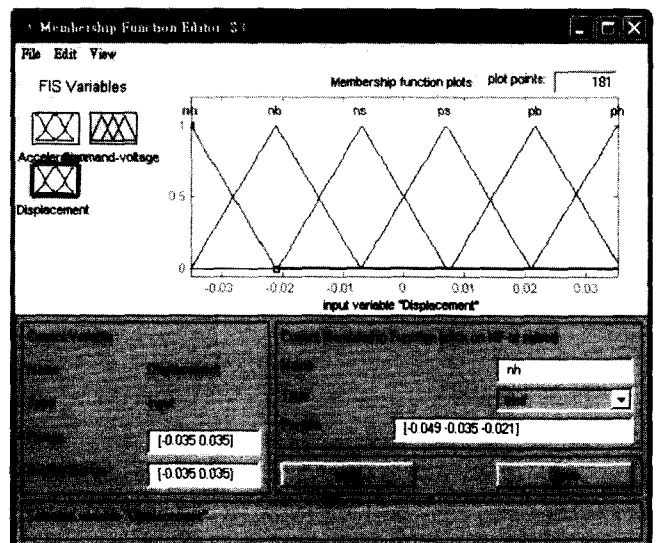


그림 18 입력 2: 상대변위 (m)

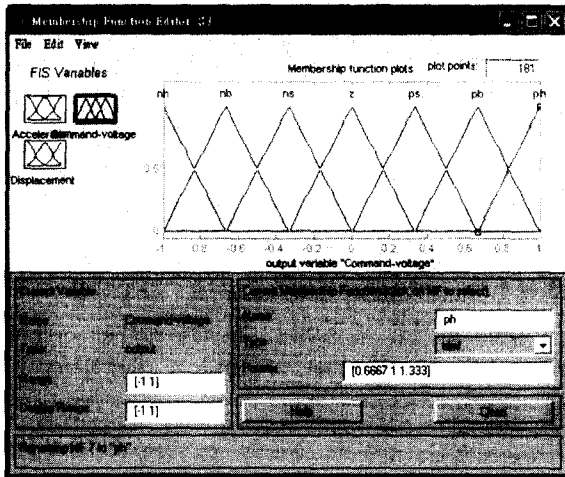


그림 19 출력: 전압신호 (Volt)

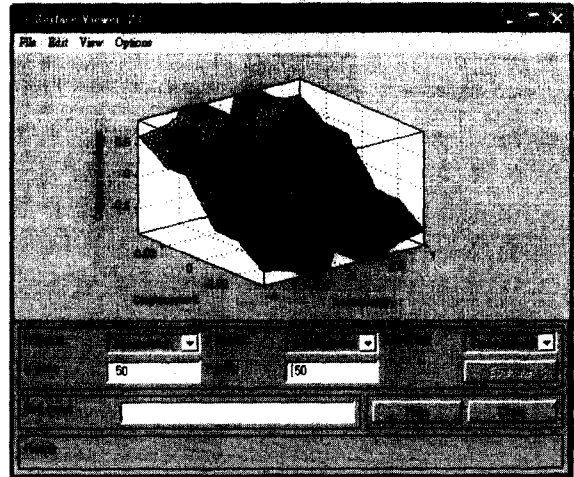


그림 20 Rule surface

표 2 퍼지규칙표

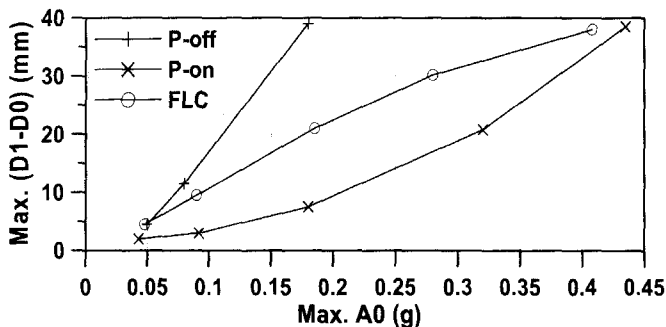
		상대변위					
		PH	PB	PS	NS	NB	NH
절대 가속도	PH	PB	PS	PS	NS	NS	NB
	PS	PH	PH	PS	NS	NH	NH
	Z	PS	PS	Z	Z	HS	NS
	NS	PH	PH	PS	NS	NH	NH
	NH	PB	PS	PS	NS	NS	NB

경우에는 상대변위가 주 제어대상이 되므로 상대변위가 증가함에 따라서 전압신호도 증가한다. 세 번째로 구조물의 절대가속도가 거의 Zero인 경우에는 상대변위가 Big 이나 Huge이면 이를 제어하기 위해서 전압신호는 Small 로 하고 상대변위가 Small인 경우에는 전압신호를 Zero 로 두어서 절대가속도의 증가를 막는다. 이러한 방법으로 만든 퍼지규칙을 표 2에 정리하였고 이 퍼지규칙을 적용하여 만든 rule surface를 그림 20에 나타내었다.

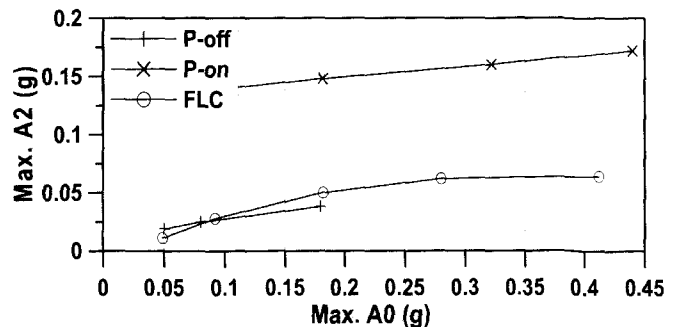
6. 실험결과 및 고찰

앞 절에서 설명한 실험체에 여러 가지 지진하중을 가하는 진동대 실험을 통하여 퍼지제어기를 사용한 하이브

리드 면진장치 제어의 효율성을 검토하였다. 다양한 실험 결과를 효과적으로 비교하기 위하여 최대 입력지반가속도 (Max. A0)에 따른 면진된 구조물의 최대 절대가속도 (A2)와 최대 상대변위(D1-D0)를 그림 21에서 24에 나타내었다. 그림에서 FLC (Fuzzy Logic Controller)는 준 능동 퍼지제어기를 사용하여 면진구조물을 제어한 결과를 나타낸다. 일반적으로 사용되는 두 가지의 수동제어기법 즉, Passive-off (P-off)와 Passive-on (P-on)의 방법으로 MR 감쇠기를 수동제어한 결과도 함께 나타내었다. 이 두 가지 수동제어의 결과를 보면 더 큰 제어전압(command voltage)을 보내어 MR 감쇠기에 더 큰 전류가 흐르게 할수록 면진된 구조물의 지반에 대한 상대변위 (D1-D0)가 크게 줄어드는 것을 그림 21(a)에서 24(a)를 보면 알 수 있다. 그러나 최대전압을 보내는 Passive-on의 경우에 구조물의 상대변위를 효과적으로 조절할 수 있지만 절대가속도에 대한 제어효과는 매우 좋지 않게 된다 (그림 21(b)-24(b)). 즉, 면진된 구조물의 절대가속도를 효과적으로 제어하기 위해서는 낮은 제어전압(Passive-off)을 사용하는 것이 유리하다. 그러나 이 경우에는 대부분의 지진하중에 대해서 입력 최대지반가속도가 200gal이 넘을 때 MR 감쇠기의 피스톤의 길이보다 더 큰 변위가 발생하게 되므로 제어가 불가능해지고 제어장치의 파손이 일어날 수도 있다. 즉 수동제어방법으로는 면진구조물의

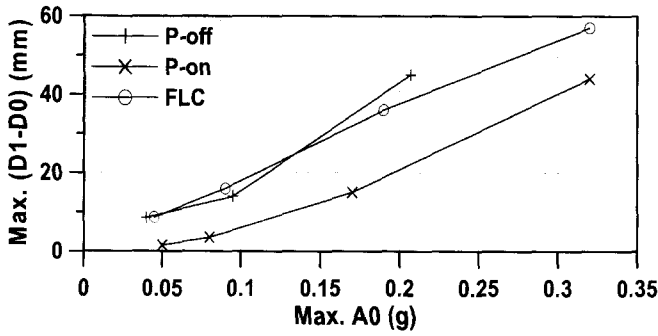


(a) 최대 상대변위의 비교

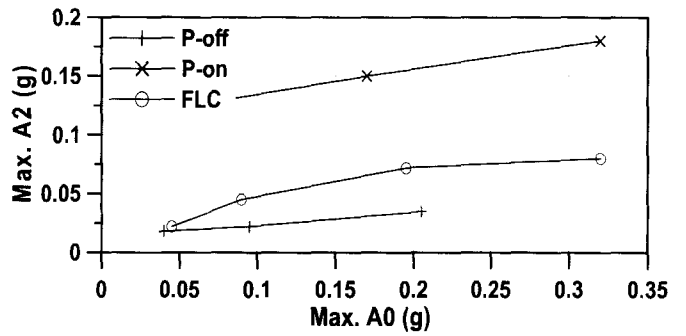


(b) 최대 절대가속도의 비교

그림 21 El Centro 지진하중에 대한 최대 응답치의 비교

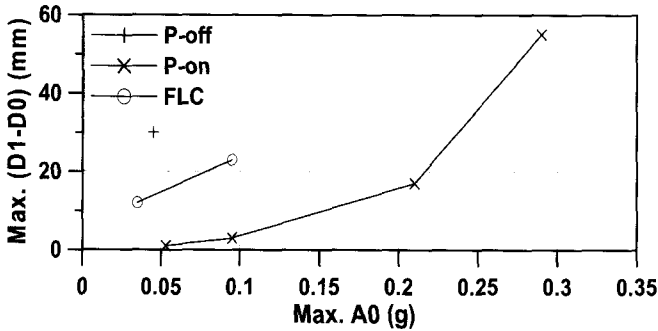


(a) 최대 상대변위의 비교

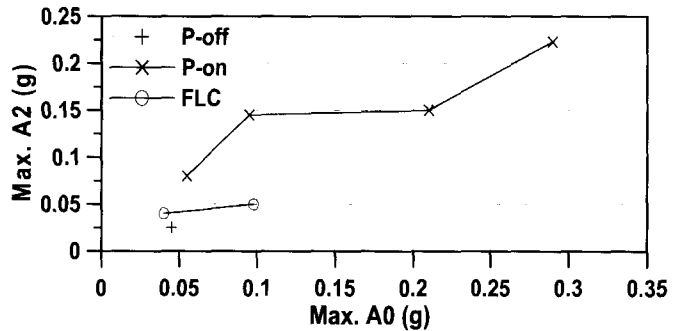


(b) 최대 절대가속도의 비교

그림 22. Kobe 지진하중에 대한 최대 응답치의 비교

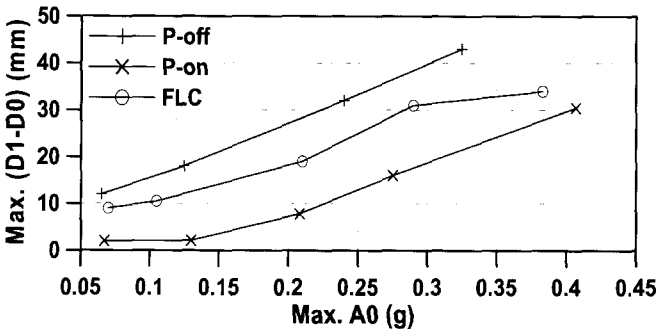


(a) 최대 상대변위의 비교

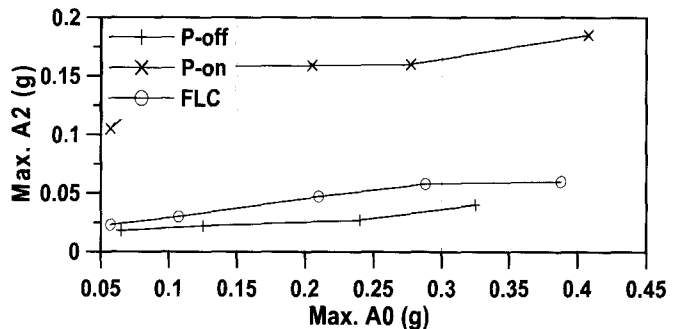


(b) 최대 절대가속도의 비교

그림 23. Chichi/TCU052 지진하중에 대한 최대 응답치의 비교



(a) 최대 상대변위의 비교



(b) 최대 절대가속도의 비교

그림 24 Chichi/TCU068 지진하중에 대한 최대 응답치의 비교

절대가속도와 상대변위를 동시에 엔지니어가 요구하는 수준으로 적절히 줄이는 것은 쉽지 않다. 그러나 준능동 퍼지제어기를 이용하여 MR 감쇠기를 제어한 경우에는 최대제어전압을 사용하는 Passive-on의 경우와 비슷한 수준으로 최대 상대변위를 저감할 수 있고 면진구조물의 절대가속도 또한 Passive-off의 경우와 비슷한 정도로 제어할 수 있음을 그림을 통하여 알 수 있다. 결국, 준능동 퍼지제어 알고리즘을 사용하여 하이브리드 면진장치를 적절히 제어한다면 면진구조물의 지반에 대한 상대변위와 절대가속도를 동시에 효과적으로 줄일 수 있음을 실험을 통하여 확인할 수 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 MR 감쇠기와 FPS로 구성된 하이브리드

면진장치의 성능을 실험을 통하여 검토하여 보았다. 다양한 특성을 가지는 지진하중의 크기를 여러 단계로 조절하여 실험체에 가진하였고 이 때 발생하는 구조물의 여러 가지 응답을 계측기로 측정하였다. 계측된 데이터들은 MR 감쇠기를 제어하는 퍼지제어기의 퍼드백 데이터와 면진장치의 성능을 평가하는데 이용하였다. 2가지의 수동 제어와 퍼지제어기를 사용하여 하이브리드 면진장치를 제어하였으며 각각의 경우의 효율성을 비교하여 보았다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 본 실험에서 사용된 FPS는 톨러를 포함함으로써 마찰력을 최소화할 수 있도록 하였다. 따라서 감쇠력은 MR 감쇠기에 의해서 주로 제공되도록 하였고 이렇게 함으로써 하이브리드 면진장치의 제어가능한 범위를 극대화할 수 있다.

- 2) 수동 면진장치와는 달리 준능동 MR 감쇠기를 사용한 하이브리드 면진장치를 이용하면 다양한 규모와 특성을 가지는 지진하중에 대하여 구조물의 응답을 효과적으로 제어할 수 있다.
- 3) 본 연구에서 제안된 준능동 퍼지제어기는 중간정도 규모의 지진에 대하여서는 절대가속도를 효과적으로 제어할 수 있고 큰 규모의 지진이나 근접-단층 지진 (near-fault earthquakes)에 대해서는 면진구조물의 지반에 대한 상대변위를 효율적으로 제어할 수 있다.
- 4) 본 실험으로 FPS와 MR 감쇠기를 이용한 하이브리드 면진장치가 설치된 구조물을 퍼지제어기를 사용하여 실시간으로 효과적인 제어를 할 수 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수지원에 의하여 연구되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Naeim, F. and Kelly, J. M., *Design of Seismic Isolated Structures: from Theory to Practice*. Wuley: New York, 1999.
2. Chang, S. P., Makris, N., Whittaker, A. S., and Thompson, A. C. T., "Experimental and analytical studies on the performance of hybrid isolation systems," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, 2002, pp. 421-443.
3. Sadek, F. and Mohraz, B., "Semiactive control algorithm for structures with variable dampers," *Journal of Engineering Mechanics*, 1998. 9, pp. 981-990.
4. Symans, M. D. and Constantinou, M. C., "Seismic testing of a building structure with a semi-active fluid damper control system," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, 1997, pp. 759-777.
5. Kobori, T., Takahashi, M., Nasu, T., and Niwa, N., "Seismic response controlled structure with active variable stiffness system," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 22, 1993, pp. 925-941.
6. Kurata, N., Kobori, T., Takahashi, M., Niwa, N., and Midorikawa, H., "Actual seismic response of controlled building with semi-active damper system," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, 1999, pp. 1427-1447.
7. Niwa, N., Kobori, T., Takahashi, M., Midorikawa, H., Kurata, N., and Mizuno, T., "Dynamic loading test and simulation analysis of full-scale semi-active hydraulic damper for structural control," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 29, 2000, pp. 789-812.
8. Burton, S. A., Makris, N., Konstantopoulos, I., and Antsaklis, P. J., "Modeling the response of ER damper: phenomenology and emulation," *Journal of Engineering Mechanics*, 1996. 9, pp. 897-906
9. Spencer, Jr. B. F., Dyke, S. J., Sain, M. K., and Carlson, J. D., "Phenomenological model of magnetorheological dampers," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 123, No. 3, 1997, pp. 230-238.
10. Dyke, S. J., Spencer, B. F., Sain, M. K., and Carlson, J. D., "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction," *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, 1996, pp. 565-575.
11. Schurter, K. C. and Roschke, P. N., "Fuzzy modeling of a magnetorheological damper using ANFIS," *Proceedings of the 9th IEEE International Conference of Fuzzy System*, San Antonio, Texas, 2000.
12. Dyke, S. J., Spencer, B. F., Sain, M. K., and Carlson, J. D., "An experimental study of magnetorheological dampers for seismic hazard mitigation," *Proceedings of the 17th Structures Congress*, New Orleans, LA, 1999, pp. 1358-1362.
13. 조상원, 이헌재, 김춘호, 이인원, "MR댐퍼 기반의 스마트 수동제어 시스템", 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집, 한국지진공학회, 2004, pp. 453-461
14. 이호근, 민경원, 성금길, 김대곤, "구조물 진동의 반동 제어를 위한 MR 댐퍼 설계", 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집, 한국지진공학회, 2004, pp. 469-476
15. Constantinou, M. C. and Soong, T. T., *Passive and active structural vibration control in civil engineering*, Springer-Verlag, New York, 1994, pp. 114-117.
16. Karnopp, D., Crosby, M. J., and Harwood, R. A., "Vibration control using semi-active force generators," *J. Engrg. for Industry*, Vol. 96, No. 2, 1974, pp. 619-626.