

MR 감쇠기와 FPS를 이용한 하이브리드 면진장치의 수치해석적 연구

Numerical Study of Hybrid Base-isolator with Magnetorheological Damper and Friction Pendulum System

김 현 수
Kim, Hyun-Su

P. N. Roschke**

국문요약

본 연구에서는 하이브리드 면진장치가 설치된 단자유도 구조물의 동적거동을 예측할 수 있는 수치해석모델을 제안한다. 하이브리드 면진장치는 MR 감쇠기와 마찰진자시스템(FPS)으로 구성된다. MR감쇠기의 동적거동을 모형화하기 위하여 뉴로-퍼지 모델을 사용한다. 다양한 변위, 속도, 전압의 조합을 사용하여 MR 감쇠기의 성능실험을 수행한 후 얻어진 데이터를 이용하여 MR 감쇠기 뉴로-퍼지 모델을 ANFIS로 학습시킨다. FPS의 모형화는 본 연구에서 유도한 비선형 모델식에 근거하여 뉴로-퍼지 모형화방법을 사용하여 이루어진다. 본 연구에서는 MR 감쇠기로 전달되는 제어전압을 조절하기 위하여 퍼지논리제어기를 사용한다. 다양한 지진하중을 사용한 진동대 실험을 통하여 얻은 실험체의 동적응답과 뉴로-퍼지 모형화방법을 사용한 수치해석의 결과를 비교한다. 뉴로-퍼지 모델을 사용하여 MR 감쇠기와 FPS를 모형화해서 수치해석을 수행한 결과 하이브리드 면진장치의 동적거동을 매우 정확하게 예측할 수 있었다.

주요어 : 면진장치, 퍼지제어, 뉴로-퍼지 추론, MR 감쇠기, 마찰진자시스템

ABSTRACT

Numerical analysis model is proposed to predict the dynamic behavior of a single-degree-of-freedom structure that is equipped with hybrid base isolation system. Hybrid base isolation system is composed of friction pendulum systems (FPS) and a magnetorheological (MR) damper. A neuro-fuzzy model is used to represent dynamic behavior of the MR damper. Fuzzy model of the MR damper is trained by ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) using various displacement, velocity, and voltage combinations that are obtained from a series of performance tests. Modelling of the FPS is carried out with a nonlinear analytical equation that is derived in this study and neuro-fuzzy training. Fuzzy logic controller is employed to control the command voltage that is sent to MR damper. The dynamic responses of experimental structure subjected to various earthquake excitations are compared with numerically simulated results using neuro-fuzzy modeling method. Numerical simulation using neuro-fuzzy models of the MR damper and FPS predict response of the hybrid base isolation system very well.

Key words : base-isolation, fuzzy control, neuro-fuzzy inference, MR damper, friction pendulum system

1. 서 론

면진시스템은 지진하중에 대하여 건축 및 토목구조물을 보호하는데 가장 널리 사용되고 있는 방법 중의 하나이다. 마찰진자 베어링이나 고무 베어링과 같은 일반적인 면진장치를 사용하여 구조물을 지반과 격리시키는 방법은 근래에까지 많이 연구되고 사용되고 있는 일반적인 면진 기법이다.⁽¹⁾ 최근에 와서는 대형 건축구조물의 밀면변위를 보다 효과적으로 줄이기 위하여 보조감쇠장치를 추가하는 것에 대한 다양한 연구가 진행 중이다. 그러나 면진된 구조물의 밀면변위를 줄이기 위하여 면진장치에 추가적인 수동감쇠장치를 도입하는 것은 지반과 구조물을 격리시킴으로써 발생하는 여러 가지 이점들을 감소시킬 수 있으며 상부구조물의 절대가속도나 층간변위를 증가시키는 결과를 초래할 수 있다.^{(2),(3)} 이러한 문제점에 대한 해결책으로 수동 보조감쇠장치를 추가하는 것이 아니라 능동이나 준능동 제어장치를 도입하는 것을 생각해 볼 수 있다. 따라

서 상부구조물의 절대가속도나 층간변위 등의 증가 없이 면진된 구조물의 밀면변위를 줄이기 위하여 능동제어장치를 일반적인 면진장치와 함께 사용하는 방법에 관한 많은 연구가 수행되었다.⁽⁴⁾⁻⁽⁸⁾ 그러나 능동제어장치는 실제 구조물 제어에 수월하게 이용되지 못하고 있다. 그 주된 이유는 능동제어장치의 안정성(stability)과 견실성(robustness) 등에 관한 우려와 더불어 실제 지진하중이 왔을 때 공급되지 못 할 수도 있는 큰 전력의 필요성 때문이다. 그래서 몇몇 연구자들은 구조물의 지진응답을 감소시키기 위하여 준능동 스마트감쇠기를 사용한 하이브리드 면진장치에 대한 연구를 수행하였고 좋은 성능을 보여주고 있다.⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾ 비록 근래에 들어와서 지진하중을 받는 구조물에 대한 능동 및 준능동 제어기법의 개발과 적용에 대하여 많은 연구가 수행되었다고 할 지라도 퍼지제어기와 같은 지능제어 방법에 대해서는 충분한 연구가 수행되지 못하였다. 최근 몇 년 사이에 퍼지로직을 사용한 건축 및 토목구조물의 진동제어가 많은 관심을 끌고 있다.⁽¹³⁾⁻⁽¹⁷⁾ 기존에 사용되고 있는 일반적인 제어시스템(traditional control systems)에 비하여 퍼지논리제어는 복잡하고 불확실하며 애매한 조건 아래서 적용되어야 하는 시스템에 매우 적합하다. 특히 고유의 견실성과 비선형(nonlinearity) 및 불확실성

* 정희원 · 성균관대학교 건축공학과 연구원, 공학박사(대표지자: digiarchi@skku.edu)

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

본 논문에 대한 토의를 2005년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2004. 12. 21 / 심사종료일 : 2005. 2. 11)

(uncertainty)을 쉽게 다룰 수 있는 능력 때문에 본 연구에서는 하이브리드 면진장치의 핵심 구성요소인 MR 감쇠기를 제어하기 위하여 퍼지논리제어(fuzzy logic control)를 사용한다. 본 연구에서는 MR 감쇠기와 마찰진자시스템(FPS)으로 구성된 하이브리드 면진장치의 동적거동을 정확히 표현함으로써 면진장치가 설치된 구조물의 시뮬레이션이나 면진장치의 설계 단계에서 효과적으로 사용할 수 있는 수치해석모델을 제안하고자 한다. MR 감쇠기와 FPS의 동적거동을 모사하기 위하여 비선형 시스템의 표현에 뛰어난 성능을 보이는 뉴로-퍼지 모델을 사용한다. MR 감쇠기와 FPS 뉴로-퍼지 모델은 ANFIS(adaptive neuro-fuzzy inference system)⁽¹⁸⁾를 이용하여 생성한다. 보다 실제적인 MR 감쇠기 뉴로-퍼지 모델을 얻기 위하여 MR 감쇠기 성능실험으로부터 얻은 데이터를 이용하여 뉴로-퍼지 모델을 학습시킨다. 일반적으로 사용되고 있는 FPS 해석모델은 FPS에 작은 변형만이 발생한다는 가정하에 유도된 선형방정식이므로 본 연구에서는 FPS에 큰 변형이 발생하더라도 적용할 수 있는 비선형방정식을 유도한다. 이렇게 유도한 비선형방정식에 의해서 생성된 데이터를 이용하여 FPS 뉴로-퍼지 모델 생성한다. 본 연구에서 사용된 수치해석모델의 정확성을 검증하기 위하여 실험을 통해서 얻은 하이브리드 면진장치의 동적응답과 컴퓨터 수치해석을 통하여 얻은 동적응답을 비교한다.

2. 하이브리드 면진장치의 구성

하이브리드 면진장치에 대한 일련의 실험이 최근에 NCREE (National Center for Research on Earthquake Engineering, Taiwan)에서 수행되었다. 네 개의 FPS와 한 개의 MR 감쇠기로 구성된 하이브리드 면진장치에 대한 실험 구성도를 그림 1에 나타내었다. 본 실험에서 사

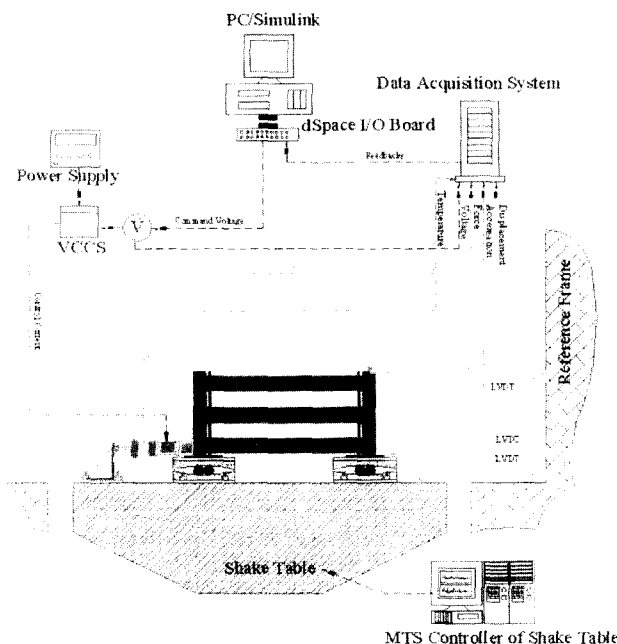


그림 1 하이브리드 면진장치 진동대 실험의 구성도

용된 FPS는 롤러를 사용하여 마찰력을 최소화함으로써 MR 감쇠기가 하이브리드 면진장치의 주 에너지 소산장치로서의 역할을 하도록 하였고 이를 통하여 준능동 제어 시스템의 제어가능범위를 최대화할 수 있도록 하였다. 진동대 실험을 통하여 하이브리드 면진장치의 효율성과 실시간 제어능력 및 실제 구조물에 적용성을 검증하였다. 실험에서는 EI Centro NS, Kobe NS, Chi-Chi (Station TCU052과 TCU069) 지진을 사용하였고 대형 진동대를 통하여 수평 지진하중을 구조물에 가하였다. 사용된 지진하중의 크기는 최대 지반가속도가 각각 50, 100, 200, 300, 400 gal이 되도록 크기를 조정하였고 실험체의 파손 방지 및 안전을 위하여 최대변위를 50 mm로 제한하였다.

3. MR 감쇠기의 모형화

본 절에서는 MR 감쇠기의 동적거동을 표현하기 위하여 사용된 뉴로-퍼지 모델의 생성과정에 대하여 설명한다. 또한 생성된 뉴로-퍼지 모델을 사용하여 계산한 MR 감쇠기의 감쇠력과 성능실험으로부터 얻은 데이터를 비교하여 뉴로-퍼지 모델의 정확성을 검증한다.

3.1 MR 감쇠기 뉴로-퍼지 모델

MR 감쇠기의 작동 범위 안에서 균등하게 분포되어 있는 충분한 양의 실험데이터를 얻기 위하여 다양한 입력데이터를 사용하여 7 kN MR 감쇠기 성능실험을 수행하였다. 이러한 성능실험을 통하여 얻은 데이터는 MR 감쇠기의 동적거동을 모사할 뉴로-퍼지 모델을 학습시키는데 사용된다. 학습시 사용할 성능실험 데이터가 MR 감쇠기의 특성을 충분히 잘 표현할 수 있고 작동범위 전체를 균등하게 포함한다면 MR 감쇠기의 동적거동을 비교적 정확히 모사할 수 있는 뉴로-퍼지 모델을 생성할 수 있다.

MR 감쇠기의 특성은 변위, 속도, 제어전압, 감쇠력의 관계에 의하여 결정된다. 이러한 관계를 그림 2에 간략하게 나타내었다. 기존의 연구⁽²⁰⁾를 통하여 그림 2에 나타낸 것과 같은 세 가지 입력과 한 가지 출력으로 표현되는 모델이 감쇠기의 동적거동을 표현하는데 적합한 것으로 알려져 있기 때문에 본 연구에서는 이 모델을 바탕으로 하여 MR 감쇠기의 뉴로-퍼지 모델을 생성한다.

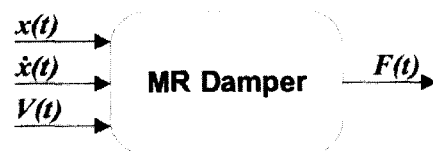


그림 2 MR 감쇠기 뉴로-퍼지 모델의 입출력 관계

3.2 ANFIS를 이용한 뉴로-퍼지 모형화

본 연구에서 사용된 7kN MR 감쇠기의 최대 허용변위는 중립축을 기준으로 ± 150 mm이고 작동 시에 경험하게

될 변위 진동수의 예상 범위는 0-3 Hz로 하였다. MR 감쇠기로 전달될 제어전압의 최대값은 포화한계(saturation limit)에 의해서 결정된다. MR 감쇠기의 성능실험 시에 제어전압을 높이는데도 불구하고 더 이상의 감쇠력의 증가가 없을 때 MR 감쇠기가 포화(saturation)되었다고 한다. 즉, 이 값은 특정한 전압 이상에서는 더 이상의 MR 감쇠기의 감쇠력의 증가가 없는 전압으로 결정된다. 성능 실험결과 7 kN MR damper의 포화한계는 1.2 volt로 결정되었다. 7 kN MR damper의 작동범위를 표 1에 나타내었다.

표 1 7 kN MR 감쇠기의 작동범위

파라미터	범위	진동수
변위	±150 mm	0-3 Hz
전압	0-1.2 V	0-3 Hz

MR 감쇠기의 모형화를 위한 실험 데이터는 training 및 checking 데이터와 validation 데이터로 나눌 수 있다. Training 데이터는 뉴로-퍼지 모델의 퍼지규칙과 소속함수를 학습시키는데 사용되고 checking 데이터는 생성된 뉴로-퍼지 모델이 overfit되지 않도록 한다. Validation 데이터는 학습이 끝난 후에 생성된 뉴로-퍼지 모델의 검증 을 위해서 사용되는 데이터로 학습에 사용되지 않은 전혀 새로운 데이터이다. 성능실험에서 얻은 모든 데이터를 10 초 간격으로 잘라서 연결하여 학습에 사용될 데이터를 생성하였고 이를 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)를 보면 전체 training 데이터 중에서 MR 감쇠기에 큰 변위가 발생했을 때의 데이터가 차지하는 부분이 비교적 작은 것을 알 수 있는데 이것은 큰 변위에 대한 MR 감쇠기 성능실험이 충분히 이루어지지 않았기 때문이다. Training 데이터로 사용된 데이터는 0.001초의 시간간격을 가지고 있고

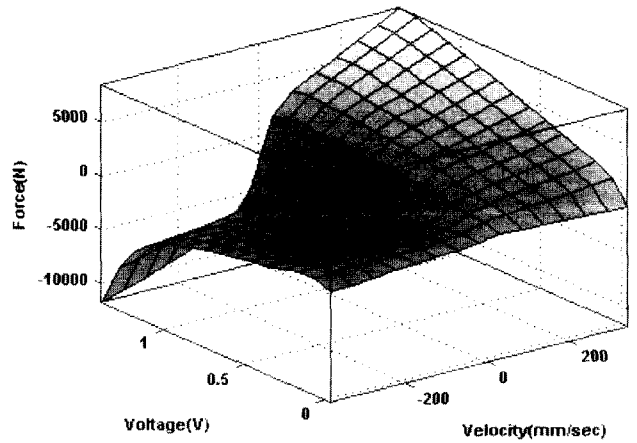


그림 4 MR 감쇠기의 뉴로-퍼지 모델의 rule surface

총 260,000개의 데이터 포인트로 이루어져 있다. Training 및 checking 데이터가 생성되면 이 데이터들을 ANFIS로 보내어 MR 감쇠기 뉴로-퍼지 모델을 생성하도록 학습시킨다. MR 감쇠기를 모형화하기 위한 수치해석은 MATLAB 7.0의 fuzzy logic toolbox를 사용하여 수행하였다. ANFIS를 사용하여 충분히 학습을 한 이후에 얻은 MR 감쇠기 뉴로-퍼지 모델의 rule surface를 그림 4에 나타내었다. 뉴로-퍼지 모델의 입력변수인 변위, 속도, 전압을 표현하기 위한 소속함수의 개수는 여러 번의 테스트를 거쳐서 각각 2, 4, 3개를 사용하였으며 최종적으로 얻은 모델은 24개의 규칙으로 이루어져 있다.

3.3 MR 감쇠기 뉴로-퍼지 모델의 검증

전술한 바와 같이 MR 감쇠기 뉴로-퍼지 모델의 검증은 training이나 checking 과정에서 사용되지 않은 전혀 새로운 데이터를 이용하여 이루어진다. 성능실험에서 얻은 세 가지 입력데이터 즉, 변위, 속도, 제어전압을 생성된 뉴로-퍼지 모델에 입력하면 MR 감쇠기 감쇠력을 계산할

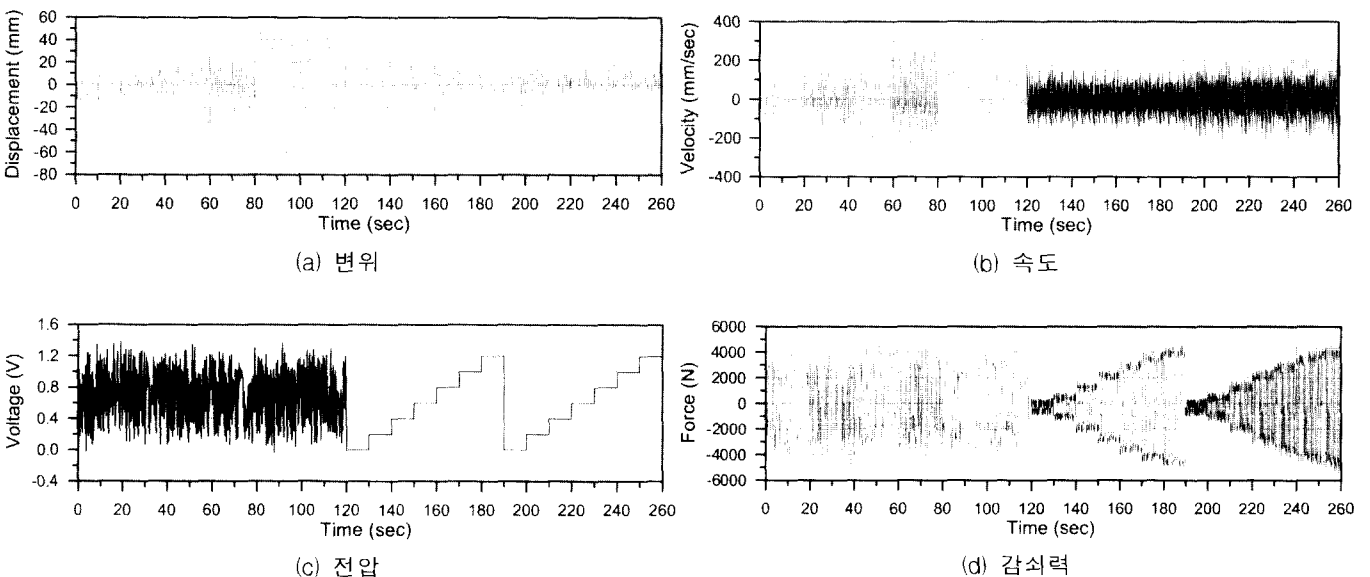


그림 3 MR 감쇠기 뉴로-퍼지 모델 training 데이터의 시간아력

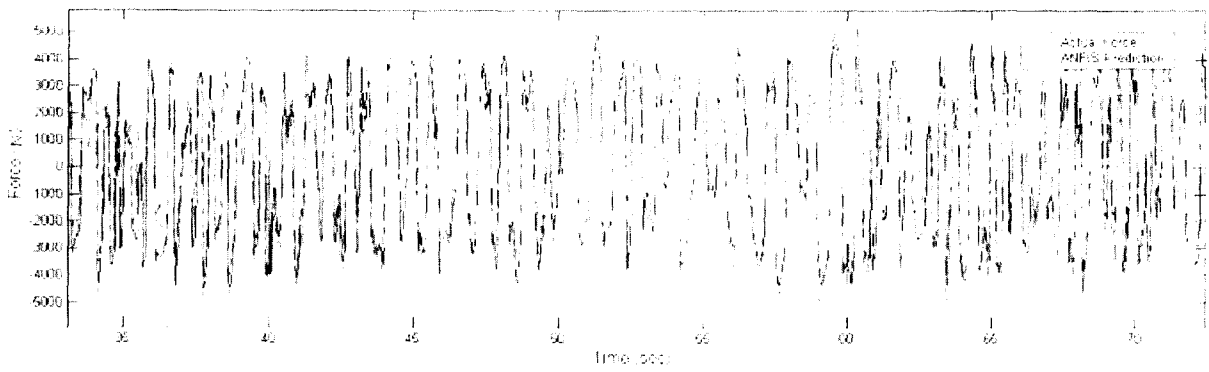


그림 5 MR 감쇠력의 성능실험 결과치와 뉴로-퍼지 모델에 의해 계산된 데이터의 비교

수 있다. 이러한 방법으로 예측된 MR 감쇠기 감쇠력과 성능실험에서 계측된 감쇠력을 그림 5에서 비교하였다. 임의의 랜덤 변위에 대하여 생성된 뉴로-퍼지 모델이 MR 감쇠기의 감쇠력을 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 그림을 통하여 알 수 있다.

4. 마찰진자 시스템의 모형화

본 절에서는 마찰진자시스템의 수평력을 예측할 수 있는 비선형방정식을 제안하고 이 해석모델에 의하여 생성된 데이터를 사용하여 마찰진자시스템의 동적거동을 나타내는 뉴로-퍼지 모델을 생성하는 과정을 설명한다.

4.1 마찰진자 시스템의 비선형 해석모델

일반적인 마찰진자시스템 (FPS; Friction Pendulum System)의 구성도를 그림 6에 나타내었다. FPS에서는 베어링의 곡면을 따라서 상승한 구조물에 의해서 원래의 위치로 되돌아오려는 복원력이 발생하고 마찰면에서의 마찰력에 의해서 에너지가 소산된다. FPS의 횡변위가 작을 때의 힘과 변위 관계식은 기존의 연구^{(21),(22)}에서 제안되어 있지만 본 연구에서는 FPS의 변위가 클 경우까지 고려할 수 있도록 보다 일반적인 비선형관계식을 유도하고자 한다. 최종적으로 FPS에 가해지는 수평외력과 수평변위 및 수평 속도와의 관계를 표현하는 식을 얻는 것을 목표로 한다. 그림 7에 FPS에 작용하는 힘과 변위의 관계를 나타내었다.

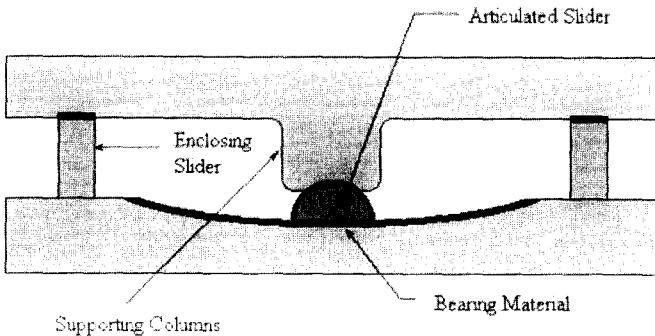


그림 6 일반 마찰진자 시스템의 구성도

FPS에 외력이 작용하여 수직중립축을 기준으로 θ 만큼 이동하고 음 혹은 양의 속도를 가졌을 때 힘의 평형조건에 의하여 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\rightarrow \sum F_u = 0: F - \text{sgn}(\dot{u})F_f \cos\theta - S \sin\theta = 0 \quad (1)$$

$$\uparrow \sum F_v = 0: -W - \text{sgn}(\dot{u})F_f \sin\theta + S \cos\theta = 0 \quad (2)$$

여기서, F 는 FPS에 가해지는 외력이고, F_f 는 마찰력, S 는 FPS의 구형곡면에 연직방향의 힘, sgn 은 양 혹은 음의 부호를 나타내는 함수, 그리고 W 는 FPS에 의해서 지지되는 구조물의 무게를 나타낸다. 만약 연직방향의 힘(S)과 마찰력(F_f)이 coulomb 마찰의 관계를 따른다고 가정하면 아래의 식을 얻을 수 있다.

$$F_f = \mu S \quad (3)$$

여기서, μ 는 마찰계수이다. FPS가 움직이는 방향은 속도의 부호로써 알 수 있고 이것은 또한 마찰 저항력의 방향도 나타낸다. 식 (3)을 식 (1)과 (2)에 대입하여 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$F = S[\text{sgn}(\dot{u})\mu \cos\theta + \sin\theta] \quad (4)$$

$$S(\cos\theta - \text{sgn}(\dot{u})\mu \sin\theta) = W \quad (5)$$

식 (5)를 S 에 관해서 정리하고 그 것을 식 (4)에 대입하면 식 (6)을 얻는다.

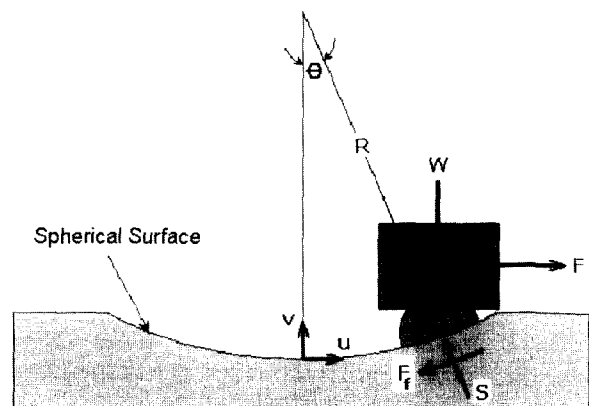


그림 7 FPS에 작용하는 힘-변위 관계

$$F = W \begin{bmatrix} \operatorname{sgn}(\dot{u})\mu \cos \theta + \sin \theta \\ \cos \theta - \operatorname{sgn}(\dot{u})\mu \sin \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

변위의 수평 및 수직성분인 u , v 는 FPS 구형곡면의 반지름인 R 과 회전변위인 θ 와 관계가 있고 이를 정리하면 다음과 같다.

$$u = R \sin \theta \quad (7)$$

$$v = R(1 - \cos \theta) \quad (8)$$

원의 방정식으로부터 변위의 수직 및 수평성분은 아래와 같은 관계를 얻을 수 있고

$$(R - v)^2 + u^2 = R^2 \quad (9)$$

이를 v 에 대해서 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$v = R - \sqrt{R^2 - u^2} \quad (10)$$

식 (10)을 식 (8)에 대입하면 변위의 수평성분만으로 이루어진 방정식을 얻을 수 있다.

$$\cos \theta = \frac{1}{R} \sqrt{R^2 - u^2} \quad (11)$$

마지막으로 식 (7)과 (11)을 식 (6)에 대입하면 다음과 같은 FPS 횡변위, 속도의 부호, 마찰계수, 곡률반경으로 이루어진 비선형함수를 얻을 수 있고 이 함수를 이용하여 FPS의 수평력을 계산할 수 있다.

$$F = W \begin{bmatrix} u + \operatorname{sgn}(\dot{u})\mu \sqrt{R^2 - u^2} \\ \sqrt{R^2 - u^2} - \operatorname{sgn}(\dot{u})\mu u \end{bmatrix} \quad (12)$$

만약 FPS의 변위가 작다면 식 (13)의 선형관계식을 사용

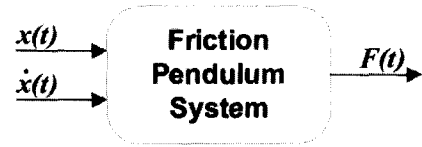


그림 8 FPS 뉴로-퍼지 모델의 입출력 관계

해도 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

$$F = \frac{W}{R} u + \operatorname{sgn}(\dot{u})W\mu \quad (13)$$

4.2 ANFIS를 이용한 뉴로-퍼지 모형화

FPS의 동적거동을 모사할 뉴로-퍼지 모델을 생성하기 위해서는 FPS의 힘-변위관계를 잘 표현하는 충분한 데이터가 필요하다. 본 연구에서는 실제 실험데이터 대신에 앞 절에서 유도한 비선형 FPS 해석모델을 사용하여 의사(pseudo)실험데이터를 생성하고 이를 이용하여 FPS 뉴로-퍼지 모델을 학습시킨다. MR 감쇠기 뉴로-퍼지 모델을 생성하는 경우와 마찬가지로 FPS의 모델을 만들기 위해서도 ANFIS를 사용한다. FPS 뉴로-퍼지 모델은 식 (12)와 (13)에 근거하여 두 개의 입력(변위, 속도)과 한 개의 출력(수평력)으로 구성되며 이 관계를 간단히 그림 8에 나타내었다. 뉴로-퍼지 모델은 기본적으로 규칙에 근거하여 입력 데이터로부터 출력 데이터를 예상하는 블랙박스이고 그 규칙들은 실험 및 해석데이터를 이용한 학습에 의해서 생성된다. 이와 같은 학습에 사용될 training 및 checking 데이터는 변위, 속도 및 그에 대응하는 FPS의 수평력으로 구성되며 이 중 변위 데이터는 백색파를 이용해서 생성하였다. 또한 수치미분을 통하여 변위 데이터로부터 속도 데이터를 얻었고 FPS 수평력은 식 (12)와 (13)을 이용하여 계산하였다. 이러한 방법으로 생성된 training 데이터를 그림 9와 10에 나타내었다. 일반적으로

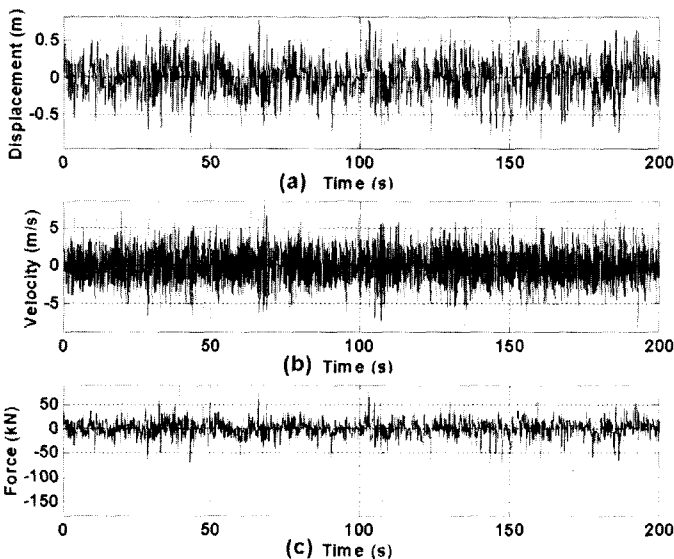


그림 9 FPS 뉴로-퍼지 모델 training 데이터의 시간이력
(a) 변위, (b) 속도, (c) 힘

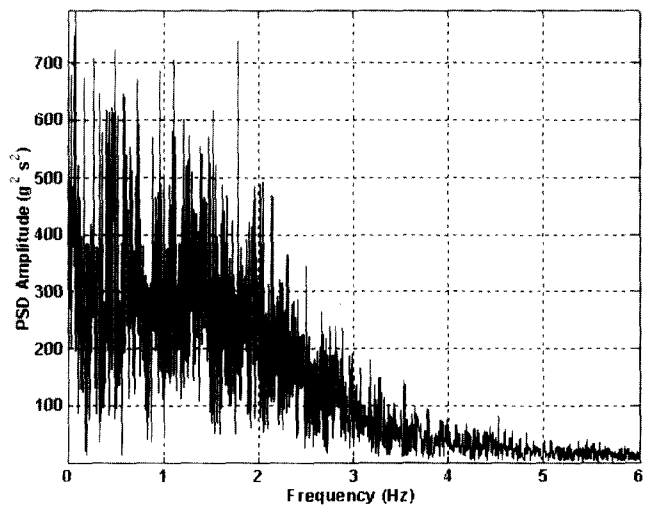


그림 10 변위 training 데이터의 파워 스펙트럼

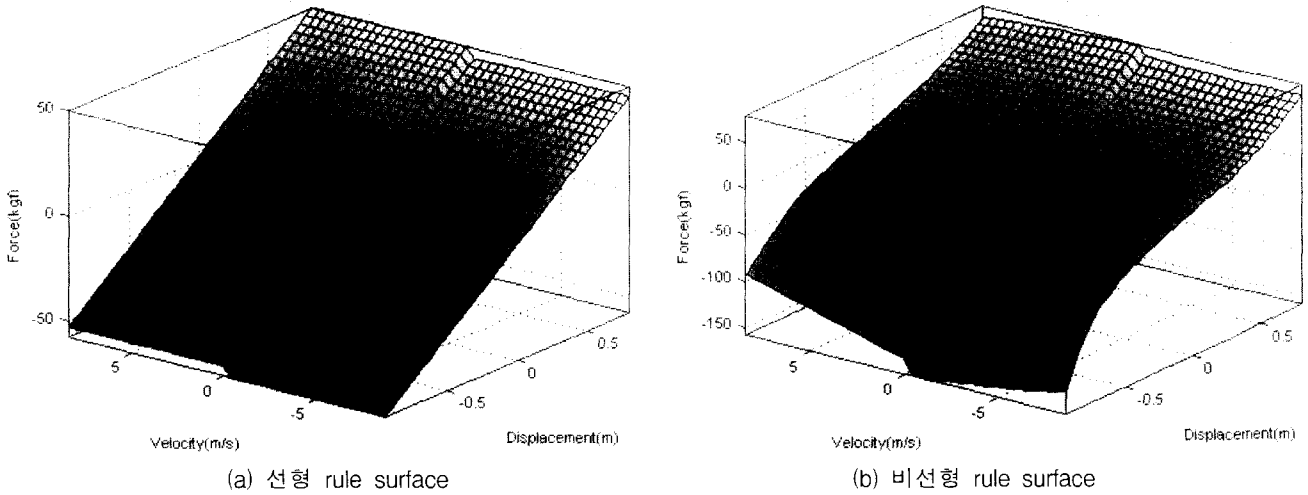


그림 11 FPS 뉴로-퍼지 모델의 rule surface

변위를 나타내는 백색파의 시간이력을 충분히 길게 하면 FPS 퍼지모델을 사용할 때 요구되는 보간(interpolation)의 양을 줄일 수 있으므로 뉴로-퍼지 모델에 의해서 계산되는 FPS 수평력의 정확성을 높일 수 있다.

ANFIS에 의하여 생성된 FPS 뉴로-퍼지 모델의 rule surface를 그림 11에 나타내었다. 그림 11(a)에 나타낸 rule surface는 힘-변위의 관계를 선형이라고 가정하여 유도한 식 (13)으로부터 얻은 퍼지 모델이고 그림 11(b)는 보다 일반적인 관계식인 식 (12)에 의해서 얻은 퍼지 모델이다. 그림 11(b)를 보면 힘과 변위의 관계가 비선형인 것을 볼 수 있고 이러한 비선형성은 변위가 커질수록 커지는 것을 알 수 있다. 두 가지 모델 모두 0.03의 마찰계수를 사용하였다. 식 (12)와 (13)을 통해서 예상할 수 있듯이 속도가 0인 부근에서 수평 저항력의 급격한 변화가 있는 것을 볼 수 있다. 마찰계수가 커질수록 이 변화는 커질 것이다.

4.3 마찰진자 시스템 뉴로-퍼지 모델의 검증

두 가지의 검증데이터를 이용하여 이론식에 의한 결과

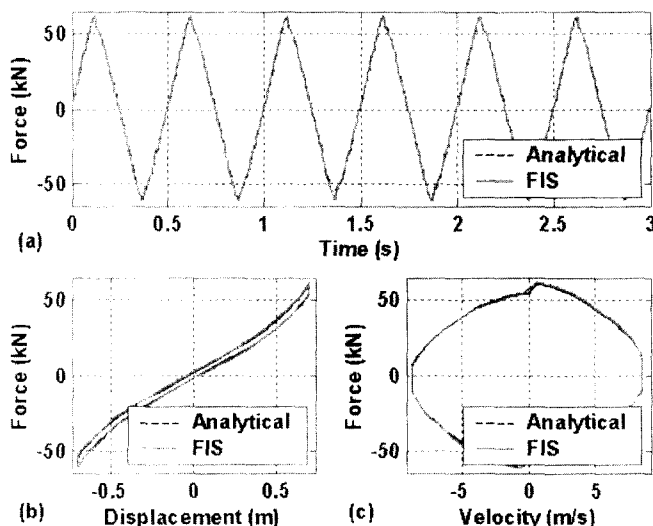


그림 12 2 Hz 사인파 변위를 사용한 FPS 뉴로 퍼지 모델의 검증

와 뉴로-퍼지 모델에 의한 결과를 비교하였고 이를 그림 12와 13에 나타내었다. 그림에서 'FIS'는 퍼지추론시스템(Fuzzy Inference System), 즉 퍼지모델에 의한 결과를 'Analytical'은 이론식에 의한 결과를 의미한다. 그림 12는 2 Hz의 진동수와 0.7m의 진폭을 가지는 sine파 변위를 검증데이터로 사용한 경우이고 그림 13은 0-2 Hz 범위의 진동수를 가지는 백색파 변위를 검증데이터로 사용한 경우이다. 두 번째 데이터의 경우는 뉴로-퍼지 모델의 학습에 사용된 training 데이터와 비슷하기는 하지만 다른 데이터이다. 두 가지 경우 모두 FPS 수평력의 시간이력 뿐만 아니라 힘-변위 관계 및 힘-속도 관계도 뉴로-퍼지 모델에 의하여 매우 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

5. 준능동 퍼지제어기

본 연구에서는 하이브리드 면진장치에 사용된 준능동 MR 감쇠기를 효과적으로 제어하기 위하여 퍼지논리제어기를 사용한다. 퍼지제어기법은 구조물의 동적응답정보로부터 퍼지연산을 수행함으로써 매 순간 보다 효율적인 제어성능을 발휘하도록 MR 감쇠기에 입력되는 전류를 조

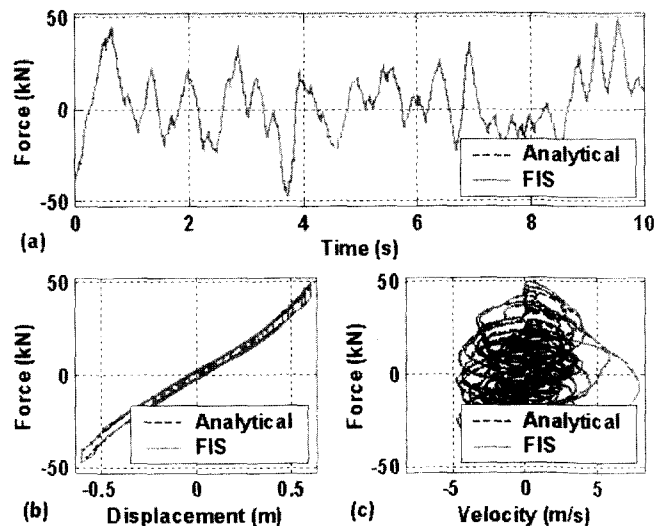


그림 13 백색파 변위를 사용한 FPS 뉴로 퍼지 모델의 검증

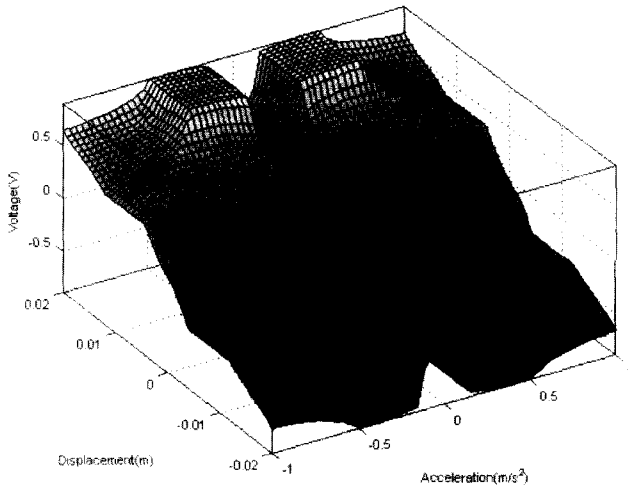


그림 14 퍼지논리제어기의 rule surface

절한다. 퍼지논리제어기는 엔지니어나 제어전문가의 지식을 바탕으로 구조물 제어에 필요한 제어규칙을 기술하게 되며 제어대상 시스템에 대한 불확실성과 비선형성을 보다 용이하게 취급할 수 있는 장점이 있다. 종래에는 입출력량과 시스템파라미터를 분명히 알 수 있다는 가정 하에서 정확한 수치를 이용하는 하나의 수식에 의해서 제어가 이루어졌다. 그러나 실제 시스템에서는 어떤 모델도 실제 모델에 대한 근사치에 지나지 않고 확률론적 모델로부터 얻어진 기대치에 불과한 모델이므로 시스템을 모델링할 때 근사치를 고려해야 하며 불확실하게 모델링된 시스템을 제어할 때에는 불확실한 모델에 대한 불확실한 제어기법이 필요하게 되었다. 이러한 관점에서 다루어지는 지능 제어기법 중에 하나가 퍼지논리제어이다. 본 연구에서 사용된 준능동 퍼지제어기의 기본적인 접근개념은 지반과 격리된 구조물의 상대변위와 절대가속도를 동시에 줄여보고자 하는 것으로 그림 14에 rule surface를 나타내었다.

6. 수치해석

지진하중이 가하여 졌을 때 하이브리드 면진장치의 동적응답을 수치해석을 통하여 예측하기 위해서 SIMULINK⁽²³⁾를 사용하였으며 이때 사용된 SIMULINK 모델의 블록 다이어그램을 그림 15에 나타내었다. SIMULINK를 사용함으로써 이전 장에서 소개한 MR 감쇠기와 FPS의 뉴로-퍼지 모델을 구조해석모델에 쉽게 통합할 수 있다. 보다 사실적인 시뮬레이션을 위해서 quantization 에러와 A/D convertor 및 D/A convertor의 saturation, 그리고 계측잡음을 SIMULINK 모델에 추가하였다. 시뮬레이션 시간 간격은 0.005초로 하였고 A/D convertor와 D/A convertor의 saturation은 ± 10 V, resolution은 12 bit로 하였다. 그림 15에서 'Excitation'이라고 이름 붙은 블록은 4가지 지진의 지반가속도 데이터를 시스템(면진구조물)으로 보낸다. 면진된 구조물의 지반에 대한 상대변위와 절대가속도가 퍼지제어기를 포함하고 있는 'FLC' 블록으로 전달된다. 이때 0.03 V rms를 즉, A/D convertor span

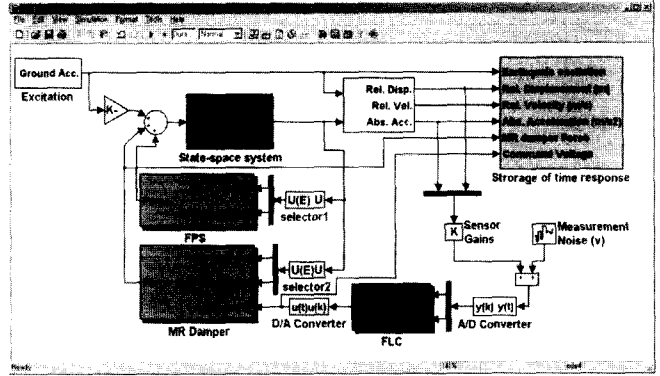


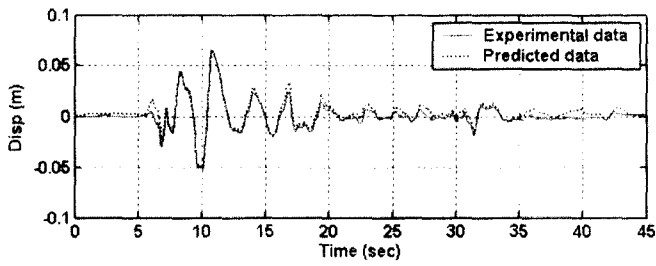
그림 15 하이브리드 면진장치의 수치해석을 위한 SIMULINK 블록 다이어그램

의 0.3%를 계측잡음으로 추가하였다. 계측잡음은 Gaussian rectangular 펄스를 이용하여 생성된다. 퍼지제어기로부터 명령전압이 변위 및 속도 데이터와 함께 MR 감쇠기 뉴로-퍼지 모델로 입력된다. 면진된 구조물의 횡변위와 속도에 의해서 계산되는 FPS 수평력은 'FPS' 블록에서 결정되며 이렇게 계산된 FPS 수평력은 MR 감쇠기의 감쇠력과 함께 면진구조물로 입력된다. 'FPS' 블록에서는 비선형방정식(식 (12))에 근거하여 생성한 뉴로-퍼지 모델(그림 11(b))을 사용한다.

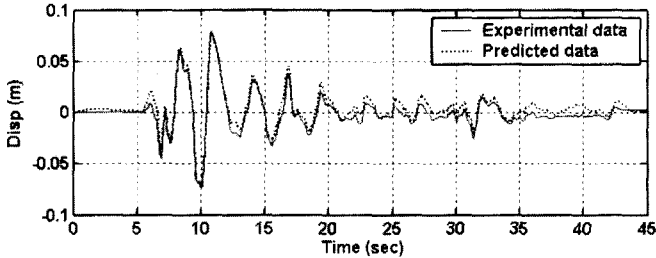
하이브리드 면진장치가 사용된 단자유도 구조물에 지진하중을 가하였을 때 발생하는 지진응답의 실험 데이터와 수치해석 데이터를 그림 16과 17에 나타내었다. 지반최대가속도가 200, 300 및 400 gal로 조정된 El centro와 Kobe 지진을 가했을 때 발생하는 변위시간이력을 비교하였다. 그림을 통하여 알 수 있듯이 거의 모든 경우에서 수치해석에 의한 결과와 실제 실험결과가 매우 정확하게 일치하는 것을 알 수 있다. 이것은 뉴로-퍼지모델이 하이브리드 면진장치의 구성요소로 사용된 MR 감쇠기와 FPS의 동적거동을 정확하게 묘사할 수 있음을 나타낸다. 그러나 그래프를 자세히 살펴보면 사용된 지진하중의 최대지반가속도가 커질수록 실험 데이터와 해석 데이터 사이의 오차가 조금씩 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 MR 감쇠기의 성능실험 데이터가 충분하지 않아서 감쇠기에 큰 변위가 발생하는 경우에 대하여 뉴로-퍼지 모델이 충분히 학습되지 못했기 때문으로 판단된다. 그림 17을 보면 Kobe 지진하중을 사용했을 때의 수치해석 결과가 El Centro 지진하중을 사용했을 때보다 조금 더 실험결과와 비슷한 것을 알 수 있다. 이러한 차이도 역시 조정된 Kobe 지진하중을 받았을 때의 구조물의 변위가 El Centro 지진하중을 받았을 때보다 작기 때문에, 즉 충분히 학습된 범위 내에서 하이브리드 면진장치의 동적거동이 이루어 졌기 때문으로 판단된다.

7. 결 론

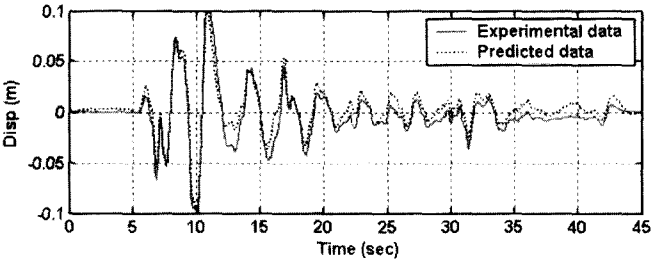
본 논문에서는 MR 감쇠기와 FPS로 이루어진 하이브리드



(a) 지반최대가속도가 200gal인 경우

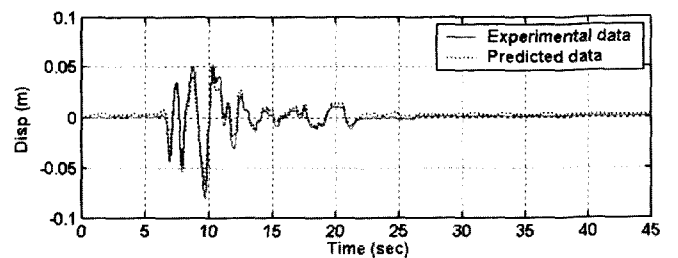
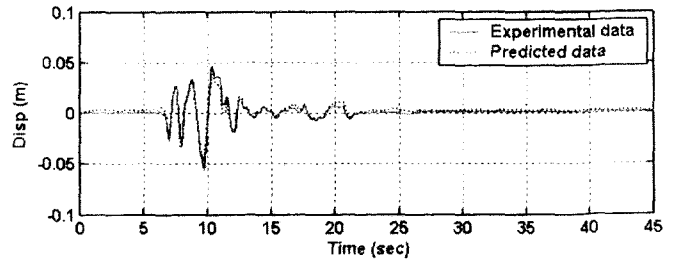


(b) 지반최대가속도가 300gal인 경우

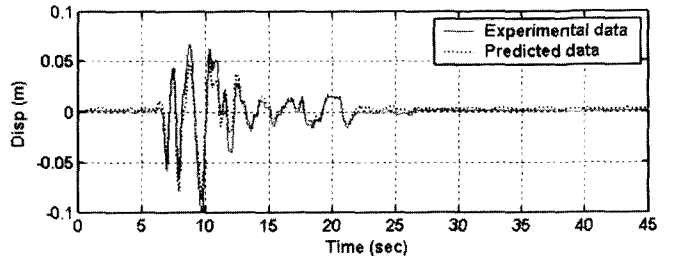


(c) 지반최대가속도가 400gal인 경우

그림 16 El Centro 지진하중을 받는 하이브리드 면진장치의 동적변위의 비교



(b) 지반최대가속도가 300gal인 경우



(c) 지반최대가속도가 400gal인 경우

그림 17 Kobe 지진하중을 받는 하이브리드 면진장치의 동적변위의 비교

드 면진장치의 동적거동을 수치해석을 통하여 예측할 수 있는 해석모델을 제안하였다. MR 감쇠기와 FPS의 동적거동을 모사하기 위하여 뉴로-퍼지 모델을 사용하였다. MR 감쇠기 성능실험 데이터와 FPS 비선형 해석모델 데이터를 사용하여 각각의 뉴로-퍼지 모델을 학습시켰다. 본 논문에서 제안한 FPS 비선형 해석모델은 기존에 널리 사용되고 있는 작은 변위를 가정한 선형모델과 달리 큰 변위가 발생하는 FPS의 거동도 나타낼 수 있는 보다 일반적인 모델이다. 뉴로-퍼지 모델은 ANFIS를 이용하여 생성하였고 생성된 모델은 학습에 사용되지 않은 전혀 새로운 데이터를 이용하여 검증하였다. 검증한 결과 비선형성이 강한 MR 감쇠기와 FPS의 동적거동을 뉴로-퍼지 모델을 이용하여 매우 정확하게 표현할 수 있음을 알 수 있었다. 특히 학습에 사용되는 데이터가 면진 및 제어장치가 실제 구조물에 적용되었을 때 경험할 것으로 예상되는 상황을 전반적으로 고르게 포함하고 있다면 학습에 의하여 생성되는 뉴로-퍼지 모델의 정확도는 더욱 높아질 것이다. MR 감쇠기로 전달되는 명령전압을 조절하기 위해서 건실성이 높고 비선형성을 잘 다룰 수 있는 퍼지제어기를 사용하였다. MR 감쇠기 및 FPS 뉴로-퍼지 모델과 퍼지제어기를 사용하여 수치해석을 수행한 후 그 결과를 진동대 실험을 통하여 얻은 결과와 비교하였고 그로부터 본 연구에서 사용한 수치해석모델이 하이브리드 면진장치의 동적

응답을 매우 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안한 수치해석모델이 하이브리드 면진장치의 시뮬레이션이나 면진장치의 설계 단계에서 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. Naeim, F. and Kelly, J.M., *Design of Seismic Isolated Structures: from Theory to Practice*, Wiley: New York, 1999.
2. Kelly, J.M., "The role of damping in seismic isolation," *Earthquake Eng. Struct. Dyn.* Vol. 28, 1999, pp. 30-20.
3. Kelly, J.M., "The current state of base isolation in the United States," *Proc. Second World Conference on Structural Control*, Kyoto, Japan, Vol. 1, 1999, pp. 1043-1052.
4. 정형조, 최강민, 장지은, 이인원, "면진구조물의 스마

- 트 내진제어”, 한국지진공학회 추계워크샵 발표논문집, 한국지진공학회, 2004.
5. 조상원, 이현재, 김춘호, 이인원, “MR댐퍼 기반의 스마트 수동제어 시스템”, 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집, 한국지진공학회, 2004, pp. 453-461.
 6. Nagarajaiah, S., Riley, M.A. and Reinhorn A., "Control of sliding-isolated bridge with absolute acceleration feedback," *J. Eng. Mech.*, Vol. 119, No. 11, 1993, pp. 2317-2332.
 7. Schmitendorf, W.E., Jabbari, F. and Yang, J.N., "Robust control techniques for buildings under earthquake excitation," *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 23, 1994, pp. 539-552.
 8. Yang, J.N., Wu, J.C., Reinhorn, A.M. and Riley M., "Control of sliding-isolated buildings using sliding-mode control," *J. Struct. Eng.*, Vol. 122, No. 2, 1996, pp. 179-186.
 9. Spencer, B.F. Jr, Johnson, E.A. and Ramallo, J.C., "Smart isolation for seismic control," *JSME Int. J. Ser. C.*, Vol. 43, No. 4, 2000, pp. 704-711.
 10. Johnson, E.A., Ramallo, J.C., Spencer, B.F. Jr and Sain M.K., "Intelligent base isolation systems," *Proc. 2nd World Conf. on Structural Control*, Kyoto, Japan, 1999, pp. 367-376.
 11. 이호근, 민경원, 성금길, 김대곤, “구조물 진동의 반능동 제어를 위한 MR 댐퍼 설계”, 한국지진공학회 춘계 학술발표회 논문집, 한국지진공학회, 2004, pp. 469-476.
 12. 이상현, 민경원, 이루지, 김대곤, “건축구조물의 지진 응답제어를 위해 설치된 MR감쇠기의 모델링 방법에 따른 성능 평가”, 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집, 한국지진공학회, 2004, pp. 461-468.
 13. Symans, M.D. and Kelly, S.W., "Fuzzy logic control of bridge structures using intelligent semi-active seismic isolation," *Earthquake Eng. Struct. Dyn.* Vol. 28, 1999, pp. 37-60.
 14. Joghataie, A. and Ghaboussi, J., "Neural network and fuzzy logic in structural control," *Proceedings of the First World Conference on Structural Control*, Los Angeles, 1994, pp. 21-30.
 15. 박관순, 고현무, 옥승용, "퍼지관리제어기법을 이용한 지진응답의 능동제어", 한국지진공학회논문집, 한국지진공학회, 제5권, 제4호, 2001, pp. 75-81.
 16. 박관순, 고현무, 서충원, "독립모달퍼지제어를 이용한 다자유도 구조물의 능동제어", 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제23권, 제5호, 2003, pp. 823-831.
 17. 박관순, 고현무, 옥승용, 서충원, "MR Damper의 준능동 퍼지제어이론을 이용한 교량구조물의 지진응답 제어", 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집, 한국지진공학회, 2002, pp. 459-467.
 18. Jang J.S.R., "ANFIS : Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System," *IEEE Trans. Systems, Cybernetics*, Vol. 23, 1993, pp. 665-685.
 19. 김현수, Roschke, P.N., Lin, P.Y., "MR 감쇠기와 FPS를 이용한 하이브리드 면진장치의 퍼지제어," 한국지진공학회 논문집, 한국지진공학회, 2005, 심사중.
 20. Spencer, B.F. Jr., Dyke, S.J., Sain, M.K. and Carlson, J.D., "Phenomenological model for magnetorheological dampers," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 123, No. 3, 1997, pp. 230-238.
 21. Soong, T.T. and Constantinou M.C., *Passive and active structural vibration control in civil engineering*, New York, Springer-Verlag.
 22. Tsopelas, P., Constantinou, M.C., Kim, Y.S. and Okamoto, S., "Experimental study of FPS system in bridge seismic isolation," *Earthquake Eng. and Struct. Dyn.*, Vol. 25, No. 4, 1996, pp. 65-78.
 23. SIMILINK, The Mathworks Inc., Natick, Massachusetts, 2004.