

# 초고층건물의 풍응답제어를 위한 스마트 TMD의 퍼지 하이브리드제어

## Fuzzy Hybrid Control of a Smart TMD for Reduction of Wind Responses in a Tall Building

김 한 상\*      김 현 수†

Kim, Han-Sang      Kim, Hyun-Su

(논문접수일 : 2008년 10월 8일 ; 심사종료일 : 2009년 3월 27일)

### 요 지

본 연구에서는 초고층건물의 풍응답을 저감시키기 위하여 스마트 TMD(STMD)를 활용한 퍼지 하이브리드 제어기법을 제안하였다. 효과적인 제어알고리즘을 개발하기 위하여 STMD의 응답저감에 우수한 성능을 보이는 스카이하크(skyhook) 제어기와 구조물의 응답저감에 뛰어난 그라운드훅(groundhook) 제어알고리즘을 사용하였다. 본 연구에서는 두 제어기를 적절히 조합하기 위하여 최적의 가중치를 실시간으로 결정하는 퍼지 하이브리드 제어기를 개발함으로써 일반적인 가중합방식의 하이브리드 제어기법의 성능을 개선하였다. 제안된 제어기의 성능을 검토하기 위하여 풍하중을 받는 76층 사무소 건물을 예제구조물로 사용하였다. MR감쇠기를 이용하여 STMD를 구성하였고, STMD의 제어성능을 평가하기 위하여 TMD 및 ATMD의 성능과 비교하였다. 수치해석을 통하여 STMD의 제어성능이 TMD에 비하여 월등히 뛰어남을 확인할 수 있었다. 또한 퍼지 하이브리드 제어기법을 사용하면 스카이하크 및 그라운드훅 제어기를 효과적으로 조합하여 STMD와 건물의 응답을 동시에 줄일 수 있음을 확인하였다.

**핵심용어** : 퍼지 하이브리드제어, 스마트 TMD, 스카이하크, 그라운드훅, MR 감쇠기

### Abstract

Fuzzy hybrid control technique with a smart tuned mass damper(STMD) was proposed in this study for the suppression of wind-induced motion of a tall building. To develop the effective control algorithm for a STMD, skyhook and groundhook control algorithms were employed. Usually, skyhook controller can effectively reduce STMD motion and groundhook controller shows good control performance for the reduction of building responses. In this study, fuzzy hybrid controller, which can determine an optimal weighting factor for combining two controllers in real time, was developed to improve the control performance of conventional hybrid controller using weighted sum approach. A 76-story office building was used as an example structure to investigate the performance of the proposed controller. A magnetorheological(MR) damper was used to develop a STMD and the control performance of STMD was evaluated comparing with the passive and active TMD. The numerical studies show that the control effectiveness of a STMD is significantly superior to that of the conventional TMD. It is also shown that fuzzy hybrid controller can effectively adjust skyhook and groundhook control algorithms and reduce both responses of STMD and building.

**Keywords** : fuzzy hybrid control, smart tuned mass damper, skyhook, groundhook, MR damper

### 1. 서 론

고층건물의 풍응답을 제어하기 위한 여러 가지 제어장치 중에서 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper: TMD)는

기능의 단순성, 경제성, 제어성능의 우수성 등으로 인하여 많은 건물에 다양한 형태로 적용되고 있다(Kareem 등, 1999; Nishitani 등, 2001; Dyke, 2005). 근래에는 일반적인 수동 TMD에 가력장치(actuator)를 추가하여 원하

† 책임저자. 정회원 · 선문대학교 건축학부 전임강사

Tel: 041-530-2315 ; Fax: 041-530-2839

E-mail: hskim72@sunmoon.ac.kr

\* 삼성엔지니어링 토목건축팀 과장

• 이 논문에 대한 토론을 2009년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2009년 8월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

는 제어력을 도입함으로써 TMD의 적응성과 제어성능을 향상시킨 ATMD(Active Tuned Mass Damper) 등 다양한 형태의 TMD에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다 (Ricciardelli 등, 2003; Yau 등, 2004). 가력장치와 같은 능동제어장치를 사용하면 엔지니어가 원하는 제어력을 용이하게 얻을 수 있으므로 일반적인 수동 TMD에 비하여 뛰어난 제어효과를 얻을 수 있으나 능동제어장치를 설치 및 운용하기 위해서 필요한 많은 비용 및 전력과 같은 경제적인 이유와 함께 구조시스템을 불안정하게 할 가능성 때문에 실제 구조물에 적용이 매우 제한적이다. 따라서 능동제어장치의 적응성과 수동제어장치의 안정성의 장점을 가진 준능동 제어장치를 이용한 준능동 동조질량감쇠기(Semi-active TMD)가 제안되었다. 준능동 동조질량감쇠기의 가능성에 대한 연구는 Hrovat 등(1983)에 의해서 최초로 연구된 이래 여러 연구자들에 의하여 다양한 방향으로 수행되었다(Symans 등, 1999). 이러한 기존의 연구들은 대부분 가변감쇠장치나 가변강성장치와 같은 새로운 준능동 제어장치를 개발하여 준능동 TMD를 구성하고 그 제어성능을 평가하는 내용을 주로 다루고 있다(Varadarajan 등, 2004). 이렇게 개발된 준능동 TMD를 효율적으로 제어하기 위해서는 적절한 준능동 제어알고리즘이 필요하지만 이에 대한 연구는 아직 부족한 상태이다. 본 연구에서는 스마트 준능동 제어장치인 MR 감쇠기를 사용하여 스마트 TMD(Smart TMD; STMD)를 구성하고 이를 효과적으로 제어하기 위하여 퍼지 하이브리드 제어알고리즘을 개발하였다.

준능동 제어알고리즘 중에서 스카이하크(skyhook) 및 그라운드훅(groundhook) 제어알고리즘은 간단한 계산과정을 통하여 비교적 우수한 제어성능을 발휘하기 때문에 자동차의 현가시스템이나 스마트 먼진장치 등에서 자주 이용되고 있다 (Karnopp 등, 1974; Narasimhan 등, 2006). 일반적으로 스카이하크 제어기는 자동차의 운전석이나 먼진구조물과 같이 지반과 격리되어 움직이는 구조체의 응답을 감소시키는데 효과적이기 때문에 STMD의 움직임을 제어하는데 유리하고 그라운드훅 제어기는 STMD가 설치된 건물의 응답을 저감시키는데 좋은 성능을 나타낸다. 횡하중에 대한 고층건물의 진동제어 문제에 있어서 구조물의 응답을 저감시키는 것이 첫 번째 목표이지만 진동제어장치의 과도한 응답은 실제 구조물에 적응성과 제어장치의 안정성을 떨어뜨린다. 따라서 구조물 응답의 저감과 함께 STMD와 같은 진동제어장치의 응답을 적절하게 감소시키는 것이 필요하다. 따라서 스카이하크 및 그라운드훅 제어기에 의해서 생성되는 제어명령을 적절히 조합하는 것이 필요한데 이를 위하여 일반적으로 하이브리드 제어기법이 사용될 수 있다. 일반적인 하이브리드 제어기법

은 두 제어기에 의해서 결정되는 제어명령을 적절한 가중치를 사용하여 조합하는 가중합 방법(weighted sum approach)을 많이 사용하지만 이러한 방법은 복잡한 외부하중에 의하여 실시간으로 변하는 구조물 및 STMD의 응답을 효과적으로 제어하는데 한계를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 퍼지 하이브리드 제어기법을 이용하여 최적의 가중치를 실시간으로 결정하도록 함으로써 일반적인 하이브리드 제어기법의 성능을 개선하고자 한다. STMD를 이용한 퍼지 하이브리드 제어기법의 효율성을 검증하기 위하여 풍하중을 받는 76층 사무소 건물을 예제구조물로 사용하였다(Yang 등, 2004). 수치해석을 통하여 기존의 가중합 방법의 하이브리드 제어기법과 퍼지 하이브리드 제어기법의 제어성능 비교하여 보았다. 또한 STMD를 사용했을 경우의 제어성능을 벤치마크 문제에서 제시한 TMD 및 ATMD의 결과와 비교하였다.

## 2. 스마트 TMD의 구성

본 연구에서는 그림 1에 나타낸 바와 같이 수동 TMD의 구성요소인 점성감쇠기를 대신하여 MR 감쇠기를 사용하여 STMD를 구성한다. 이렇게 구성된 STMD를 이용하여 초고층건물의 풍응답 제어성능을 검토한다. MR 감쇠기를 모형화하기 위해서는 일반적으로 사용되는 수정 Bouc-Wen모델 (Spencer 등, 1997)을 사용하였다. MR 감쇠기의 감쇠력은 감쇠기로 전달되는 명령전압에 의해서 결정되는데 사용된 MR 감쇠기는 0V의 전압이 전달될 때 최소 감쇠력을 나타내고 1V의 전압에서 최대 감쇠력을 나타낸다. 사용한 MR 감쇠기의 최대용량은 100kN이다.

일반적인 수동 TMD를 사용하여 구조물의 동적응답을 최소화하기 위한 연구는 여러 연구자들에 의하여 수행되었고 본 연구에서는 표 1에 나타낸 바와 같이 Warbuton(1982)이 제시한 풍하중을 받는 구조물에 대한 TMD의 최적 진동

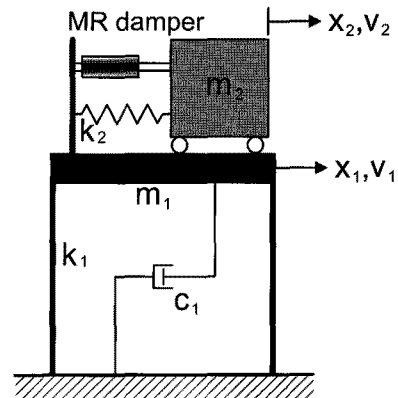


그림 1 스마트 TMD의 구성

표 1 풍하중에 대한 TMD의 최적변수(Warbuton, 1982)

진동수비	감쇠비
$\frac{\sqrt{1+\mu/2}}{1+\mu}$	$\frac{\mu(1+3\mu/4)}{\sqrt{4(1+\mu)(1+\mu/2)}}$

수비를 사용하여 STMD의 스프링강성( $k_2$ )을 결정하였다. 표 1에서  $\mu$ 는 구조물의 TMD의 질량비를 의미하는데, 그림 1의 스마트 TMD에서는  $m_2/m_1$ 으로 표현된다. 벤치마크 문제에서 제시한 샘플 TMD 및 ATMD와 본 연구에서 제시한 STMD의 제어성능을 공정하게 비교하기 위해서 STMD의 질량을 샘플 TMD 및 ATMD의 질량과 동일하게 500ton으로 놓고 수치해석을 수행하였다.

### 3. 예제구조물

본 연구에서 선택한 예제 초고층건물은 그림 2에 나타낸 평면을 가진 풍하중을 받는 벤치마크 건물이다(Yang 등, 2004). 구조형식은 횡하중에 저항하는 철근콘크리트 코어와 수직하중에 저항하는 철근콘크리트 골조로 구성되어 있다. 건물의 총 질량은 153,000ton이고, 건물의 높이와 폭의 비율은  $306.1/42=7.3$ 으로 세장하여 풍하중에 큰 영향을 받는다. 벤치마크 문제에서 예제구조물은 수직 캔틸레버 보요소로 모형화된다. 세장한 벤치마크 건물은 1차 모드 거동이 지배적이기 때문에 건물의 최상층에 STMD를 사용하여 건물의 응답을 제어하는 것이 효율적일 것이다.

벤치마크 문제에서는 호주의 시드니대학교 토목공학과 내의 풍동실험 연구소에서 실시한 실험에 의하여 얻은 풍하중을 사용하고 있다(Samali 등, 2004). 건물의 높이에 따라서 측정된 압력계수를 풍하중으로 변환하였고 제어시스템의

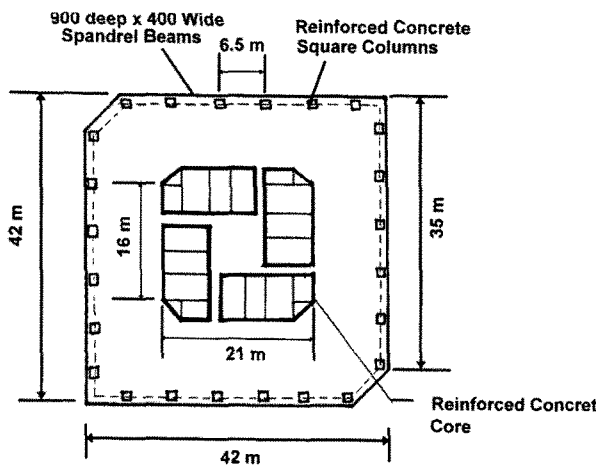


그림 2 76층 벤치마크건물의 평면도(Yang 등, 2004)

표 2 벤치마크 문제의 제어성능 평가지수(Yang 등, 2004)

Index	Description
J1	maximum floor RMS acceleration
J2	average RMS acceleration for selected floors
J3	maximum RMS displacement of top floor
J4	average RMS displacement for selected floors
J5	RMS actuator stroke
J6	RMS control power
J7	maximum floor peak acceleration
J8	average peak acceleration for selected floors
J9	maximum peak displacement of top floor
J10	average peak displacement for selected floors
J11	peak actuator stroke
J12	peak control power

성능평가를 위해서 풍 직각방향 풍하중 데이터를 사용하였다. 벤치마크 문제의 제어목표는 최대 증가속도는  $15\text{cm/sec}^2$  이하 그리고 RMS 증가속도는  $5\text{cm/sec}^2$  이하로 하는 것이고 76층은 기계실로서 사람이 거주하지 않으므로 75층까지의 응답만을 검토 대상으로 한다. 제어장치의 최대 제어력 및 RMS 제어력을 각각 300kN과 100kN이하로 제한하고 제어장치의 최대 허용변위 및 RMS 허용변위를 95cm 및 30cm이하로 제한하여 보다 실제적이고 객관적으로 제어장치의 성능을 검토할 수 있도록 하였다.

벤치마크 문제에서는 12개의 성능평가지수( $J_1 - J_{12}$ )를 제시하여 각 제어장치 및 제어알고리즘의 성능을 객관적으로 비교할 수 있도록 하였다. 각 평가기준은 제어된 구조물의 응답을 제어하지 않은 구조물의 응답으로 나누어 정규화된 값으로 표현되며 따라서, 평가지수가 작을수록 제어장치의 제어성능이 우수한 것을 의미한다. 처음 6개( $J_1 - J_6$ )의 평가지수는 벤치마크 건물의 RMS(root mean square) 응답에 대한 제어성능을 나타내고  $J_7 - J_{12}$ 까지는 최대치 응답에 대한 평가지수를 나타낸다(Yang 등, 2004).

### 4. 퍼지 하이브리드 제어알고리즘의 개발

본 연구에서는 대표적인 준능동 제어알고리즘 중의 하나인 스카이훅 및 그라운드훅 제어알고리즘을 사용하여 하위제어기(sub-controller)를 구성하고 두 제어기의 제어명령을 적절하게 조합하는 하이브리드 제어기법을 사용한다. 이를 위하여 퍼지 하이브리드 제어기를 개발하였으며 구조물 및 STMD의 응답에 따라서 MR감쇠기의 감쇠력을 효과적으로 제어할 수 있도록 하였다.

#### 4.1 스카이훅 및 그라운드훅 제어알고리즘

퍼지 하이브리드 제어알고리즘의 하위제어기로 사용할 스카이훅 및 그라운드훅 제어알고리즘의 개념도를 그림 3에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 스카이훅 제어알고리즘은 STMD와 연결된 감쇠기를 하늘에 고정시킨 것과 같은 효과를 내도록 준능동 감쇠기의 감쇠력을 조절함으로써 구조물의 응답보다는 STMD 자체의 움직임을 최소화하는데 효과적이다. 일반적으로 이 제어알고리즘은 지반과 격리되어 움직이는 구조체의 응답을 최소화 시키는데 효과적이므로 자동차의 현가시스템이나 스마트 면진장치를 제어하는데 효과적으로 이용되고 있다. 이에 비하여 그라운드훅 제어알고리즘은 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 구조물에 연결된 감쇠기를 지반에 고정시킨 것과 같은 효과를 내도록 준능동 감쇠기의 감쇠력을 조절한다. 따라서 그라운드훅 제어알고리즘은 구조물의 응답을 저감시키는데 효과적이다. 두 제어알고리즘은 평형위치에 대한 STMD의 변위( $x_2$ ) 및 주구조물의 변위( $x_1$ )와 두 구조체의 상대속도( $v_1 - v_2$ )의 관계를 이용하여 식 (1)~(4)에 나타난 바와 같이 간단한 수식으로 정의된다. 아

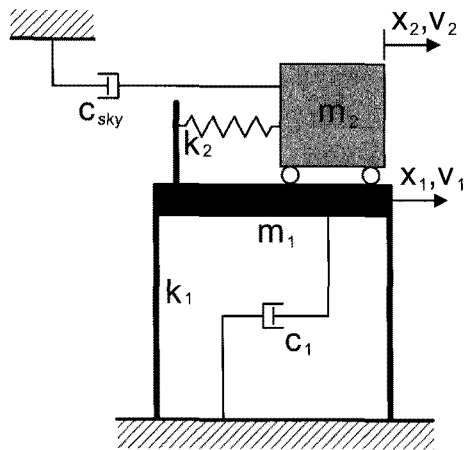
래의 식 (1)과 (2)는 스카이훅 제어알고리즘에서 감쇠력을 결정하기 위한 조건식이며 식 (3)과 (4)는 그라운드훅 제어알고리즘의 조건식이다. 본 연구에서는 MR감쇠기를 사용하여 STMD를 구성하므로 제어알고리즘에 의해서 결정된 제어 명령을 바탕으로 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압을 조절한다. 100kN MR 감쇠기의 최대 명령전압은 1V이므로 아래의 식에서  $V_{max}$ 는 1volt를  $V_{min}$ 은 0volt를 의미한다. 두 제어기 모두 구조물과 STMD의 변위 및 속도의 단순한 계산으로 제어명령을 결정하므로 계산량이 매우 작아서 실시간 제어에 상당히 유리하다. 벤치마크 문제의 제어목표는 구조물의 응답을 줄이는 것이지만 제어장치의 응답에도 제한이 있기 때문에 두 제어기에 의하여 결정된 MR 감쇠기의 감쇠력을 적절하게 조합해서 사용한다.

$$V = V_{max} \quad x_2(v_1 - v_2) \leq 0 \quad (1)$$

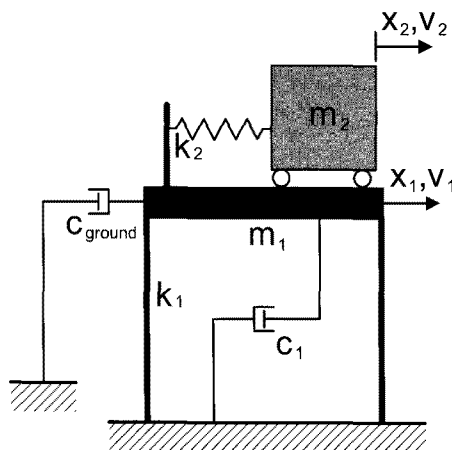
$$V = V_{min} \quad x_2(v_1 - v_2) > 0 \quad (2)$$

$$V = V_{max} \quad x_1(v_1 - v_2) \geq 0 \quad (3)$$

$$V = V_{min} \quad x_1(v_1 - v_2) < 0 \quad (4)$$



(a) 스카이훅



(b) 그라운드훅

그림 3 하위제어기의 개념도

이러한 스카이훅 및 그라운드훅 제어알고리즘을 이용하여 STMD가 설치된 76층 벤치마크건물을 제어한 결과 구조물 및 STMD의 응답을 표 3에 나타내었다. 해석결과를 보면 전층에 걸쳐서 최대응답 및 RMS응답에 대하여 그라운드훅 제어기가 스카이훅 제어기에 비하여 매우 우수한 제어성능을 발휘하는 것을 알 수 있다. 그라운드훅 제어기를 적용했을 경우의 75층 최대 층가속도 및 RMS 가속도는 각각 13.36cm/sec<sup>2</sup> 및 3.91cm/sec<sup>2</sup>로서 벤치마크 문제의 제어 목표인 15cm/sec<sup>2</sup> 및 5cm/sec<sup>2</sup>를 만족시킬 수 있었다. 그러나 STMD의 응답을 보면 제어장치의 최대 허용변위 및 RMS 허용변위인 95cm 및 30cm를 초과하여 106.32cm와

표 3 스카이훅 및 그라운드훅 제어기에 따른 응답의 비교 (단위: cm, cm/s<sup>2</sup>)

층	스카이훅				그라운드훅			
	최대값		RMS값		최대값		RMS값	
	변위	가속도	변위	가속도	변위	가속도	변위	가속도
1	0.04	0.21	0.01	0.06	0.04	0.22	0.01	0.06
30	5.47	4.15	1.40	1.14	4.93	3.74	1.24	0.95
50	13.04	8.26	3.37	2.54	11.69	7.18	2.99	2.02
55	15.18	9.21	3.94	2.95	13.60	8.23	3.49	2.34
60	17.38	10.76	4.53	3.36	15.56	9.37	4.01	2.66
65	19.63	12.33	5.13	3.84	17.56	10.26	4.54	3.05
70	21.90	13.99	5.75	4.33	19.58	11.67	5.08	3.42
75	24.25	<b>16.60</b>	6.38	<b>4.85</b>	21.67	<b>13.36</b>	5.64	<b>3.91</b>
76	24.77	17.34	6.52	4.98	22.14	14.53	5.77	3.98
STMD	<b>66.89</b>	72.40	<b>16.99</b>	18.03	<b>106.32</b>	109.06	<b>30.74</b>	30.55

30.74cm를 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서 그라운드혹 제어기만으로는 벤치마크 문제의 제한조건 및 제어목표를 만족시킬 수 없다. 이에 비하여 스카이혹 제어기는 STMD의 최대변위 및 RMS변위가 각각 66.89cm 및 16.99cm로 벤치마크 문제의 제한조건을 만족시키지만 75층 층가속도가 제어목표인  $15\text{cm/sec}^2$ 를 초과한  $16.6\text{cm/sec}^2$ 를 나타낸다.

#### 4.2 하이브리드 제어기법

앞 절에서 살펴본 바와 같이 스카이혹 또는 그라운드혹 제어기를 단독으로 사용해서는 원하는 제어성능을 얻을 수 없다. 따라서 두 제어알고리즘을 통해서 생성된 제어명령을 적절하게 조합할 수 있는 하이브리드 제어기의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 두 개의 제어명령을 조합하기 위하여 가장 보편적으로 사용되는 가중합(weighted sum)방법을 사용하여 하이브리드 제어기를 개발하였다. 각 제어명령에 가중치를 두어 합하는 가중합방법은 식 (5)에 나타낸 바와 같이 1보다 작은 가중치(w)를 이용하여 손쉽게 두 제어명령을 조합할 수 있다.

$$V = w V_{sky} + (1 - w) V_{ground} \quad (5)$$

여기서,  $V_{sky}$ 는 스카이혹 제어기에 의해서 결정된 명령전압이고,  $V_{ground}$ 는 그라운드혹 제어기에 의해서 결정된 명령전압이다. 이러한 가중합 하이브리드 제어기의 장점은 매우 간단히 두 제어명령을 조합할 수 있고 가중치를 변경함으로써 손쉽게 두 제어기의 참여도를 결정할 수 있다는 것이다. 적절한 가중치를 선택하여 두 제어기의 참여도를 결정하기 위해서는 가중치의 변화에 따라서 STMD 및 구조물의 대표적인 응답이 변화하는 경향을 살펴보는 것이 필요하다. 벤치마크 문제의 제한조건 중에서 제어기의 적용성에 가장 큰 문제가 되는 것이 제어기의 최대변위이고 표 2에 나타낸 12개의 제어성능 평가지수 중에서 풍응답의 크기를 나타내는 대표적인 지수는 평균 RMS 가속도( $J_2$ )이다. 따라서 가중치를 0에서 1까지 0.1간격으로 변화시켜서 STMD의 최대변위 및  $J_2$ 값을 계산하여 그림 4 및 5에 각각 나타내었다. 식 (5)를 보면 가중치의 값이 0일 때 제어명령전압이 순수한 그라운드혹 제어기의 명령전압과 같고 1이면 스카이혹 제어기의 명령전압과 같은 것을 알 수 있다. 그림 4 및 5를 보면 가중치가 커짐에 따라 스카이혹 제어기의 참여도가 증가하고 그라운드혹 제어기의 참여도가 약해지므로 STMD의 최대변위는 감소하고  $J_2$ 값은 점차 증가하게 된다. 엔지니어는 이러한 구조물 및 STMD 응답의 변화경향을 바탕으로 벤치마크 문제의 제

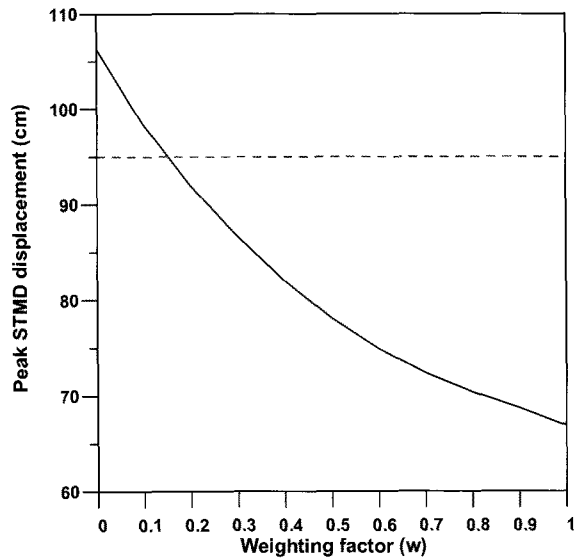


그림 4 가중치에 따른 STMD 최대변위

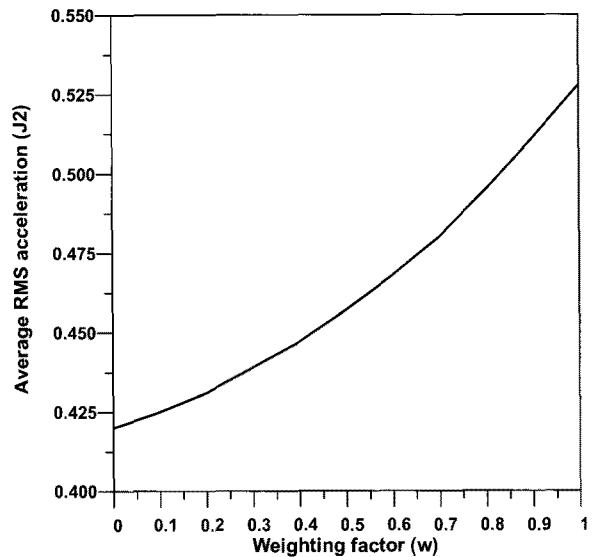


그림 5 가중치에 따른 평균 RMS 가속도( $J_2$ )

한조건을 만족시키면서 구조물의 응답을 최소화시킬 수 있는 적절한 가중치값을 선택하게 된다. 이렇게 최적의 가중치를 찾기 위해서는 가중치의 변화에 따른 구조물 및 STMD 응답의 변화경향을 파악해야 하는데, 이를 위하여 파라메트릭 스터디를 하는데 많은 노력을 기울여야 한다. 또한 한번 결정된 가중치는 어떤 하중에 대해서도 고정되어 있어 STMD의 적용성이 매우 떨어진다는 단점이 있다.

#### 4.3 퍼지 하이브리드 제어기

가중합방법의 하이브리드 제어기법을 사용하면 앞 절에서 살펴본 바와 같이 스카이혹 및 그라운드혹 제어기의 참여율을 손쉽게 조절할 수 있다. 그러나 이러한 참여율이 구조물

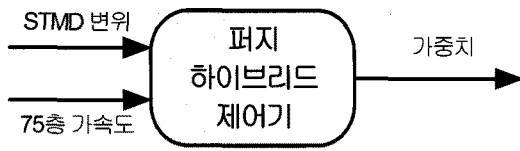


그림 6 퍼지 하이브리드 제어기의 입출력관계

이나 STMD의 응답에 의하여 실시간으로 변화할 수 있다면 보다 우수한 제어성능을 얻을 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 퍼지 로직제어기를 이용하여 구조물의 응답을 바탕으로 가중치를 실시간으로 변경할 수 있는 퍼지 하이브리드 제어기를 제안하였다. 즉, 구조물의 응답이 커질 때에는 가중치의 값을 작게 하여 그라운드혹 제어기의 효과를 크게 하고 STMD의 응답이 커질 때에는 스카이훅 제어기의 영향이 커지도록 가중치의 값을 크게 하는 퍼지 하이브리드 제어기를 개발하였다. 퍼지 로직제어기를 설계하는 과정은 크게 3가지로 나눌 수 있다. 첫째, 사용할 퍼지 추론타입을 선택하고 입력과 출력의 개수를 결정한다. 둘째, 각각의 입력과 출력에 대하여 소속함수(membership function)를 결정한다. 마지막으로 if-then규칙을 설정한다. 본 연구에서는 STMD의 변위응답과 예제구조물 75층의 가속도 응답을 퍼지 하이브리드 제어기의 입력으로 선택하였고 가중치를 출력으로 사용하였다. 이러한 퍼지 하이브리드 제어기의 입출력관계를 그림 6에 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 퍼지 하이브리드 제어기는 두 가지 입력값을 바탕으로 출력값인 가중치를 실시간으로 결정하게 된다.

퍼지 하이브리드제어기의 입력과 출력을 표현하기 위한 소속함수는 삼각형함수를 사용하였다. 그림 7, 8, 9는 각각 입력 및 출력변수의 소속함수를 나타낸다. 그림 7과 8에서 볼 수 있듯이 두 가지 입력변수 모두 zero, small, big, huge의 4개의 소속함수를 사용하여 그 크기를 결정하고 있다. 벤치마크 문제에서 STMD 변위의 제한값은 95cm이고, 제어 목표는 최대 층가속도  $15\text{cm/sec}^2$ 이하이므로 이 값을 기준으로 4개 소속함수의 범위를 결정하였다. 그림을 보면 STMD 변위에 대해서는 40cm부터 huge 소속함수가 시작되고 두 번째 입력변수인 75층 가속도값은  $4\text{cm/sec}^2$ 에서부터 huge 소속함수가 시작된다. 두 입력변수의 기준치인 95cm 및  $15\text{cm/sec}^2$ 와 비교해볼 때 각각 기준치의 42%와 27%를 넘으면 퍼지 제어기에서 매우 큰 값(huge)으로 판단하는 것을 알 수 있다. 즉, 이렇게 개발된 퍼지 제어기는 STMD의 변위보다 75층 가속도값을 더 작은 값에서 huge로 판단한다. 따라서 STMD의 변위보다는 구조물의 가속도를 줄이는데 더 중요도를 가진 퍼지 제어기를 얻을 수 있게 된다. 이것은 개발된 퍼지 제어기에 의해서 실시간으로 생성되는 가중치값을

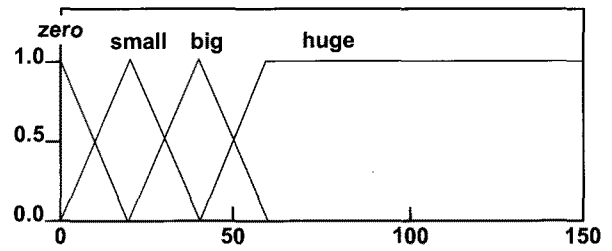


그림 7 퍼지 입력변수1: STMD 변위(cm)

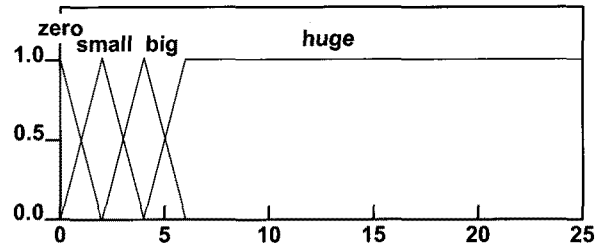


그림 8 퍼지 입력변수2: 75층 가속도( $\text{cm/sec}^2$ )

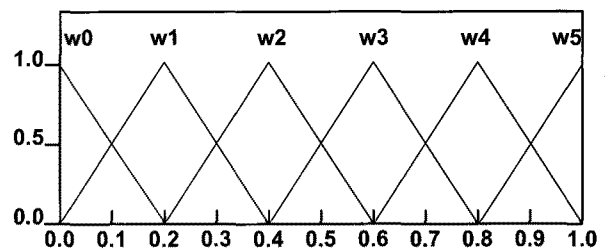


그림 9 퍼지 출력변수: 가중치

검토해보면 확인할 수 있는데 다음 절에서 소개하였다. 두 입력변수인 STMD 변위와 75층 가속도 응답은 양의 값뿐만 아니라 음의 값도 가질 수 있는데 각각의 값에 절대값을 취하여 퍼지 제어기의 입력데이터로 사용하였다. 출력변수인 가중치를 표현하기 위해서는 그림 9에 나타낸 바와 같이  $w_0$ - $w_5$ 의 6개의 삼각형 소속함수를 사용하여 나타내었으며 각 함수의 간격을 균등하게 하였다.

이러한 2개의 입력변수와 1개의 출력변수의 관계를 논리적으로 구성하기 위해서 사용한 퍼지 하이브리드 제어기의 퍼지규칙표를 표 4에 나타내었다. 퍼지 하이브리드 제어기의 두 입력변수인 STMD 변위와 75층 가속도의 각각 4단계의 입력변수 크기에 대하여 출력변수인 6단계의 가중치가 결정되는 것을 알 수 있다. STMD의 변위가 아주 작은 경우(zero)에는 75층 가속도를 제어하는 것이 중요한 목표가 되므로 그라운드혹 제어기에 의한 영향을 크게 하기 위하여 작은 가중치 소속함수( $w_0, w_1$ )를 사용하였다. 이에 반하여 STMD의 변위가 아주 큰 경우(huge)에는 스카이훅 제어기의 참여도가 증가해야 하므로 큰 가중치 소속함수( $w_4, w_5$ )를 사용하였다. STMD의 변위가 극한의 상황이 아닐 때 (small & big)에는 스카이훅 제어기와 그라운드혹 제어기

표 4 퍼지 하이브리드 제어기의 퍼지규칙표

		STMD 변위			
		zero	small	big	huge
75층 가속도	zero	w1	w3	w4	w5
	small	w1	w2	w3	w5
	big	w0	w1	w2	w4
	huge	w0	w0	w1	w4

가 적절하게 조합되어야 한다. 따라서 75층 가속도의 크기가 huge에서 zero로 변할 때 STMD의 변위가 small인 경우에는 w0에서 w3으로, 그리고 STMD의 변위가 big인 경우에는 w1에서 w4로 가중치의 값이 단계적으로 증가하도록 퍼지규칙표를 구성하였다.

### 5. 제어성능 평가

본 절에는 STMD 및 퍼지 하이브리드 제어기의 제어성능 평가를 위하여 76층 벤치마크 건물의 풍응답 저감효과를 검토하여 보았다. 벤치마크 문제에서 제시된 풍하중을 사용하여 수치해석을 수행하였으며 수치해석 시간간격은 0.001초 해석시간은 900초로 하였고, 해석을 수행한 후 구조물 및 STMD의 응답을 분석하였다. 앞 절에서 개발한 퍼지 하이브리드 제어기를 사용하여 STMD를 제어한 경우에 얻어진 가중치의 시간이력을 그림 10에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 가중치의 값이 0과 1사이에서 실시간으로 변화되는 것을 알 수 있다. 가중치 시간이력의 전체 구간에서 평균값을 계산해보면 0.33이 되는데, 이것은 퍼지 하이브리드 제어기가 스카이훅 제어기 보다는 그라운드훅 제어기에 중요도를 더 두는 것을 의미한다. 이것은 앞 절에서 퍼지 하이브리드 제어기를 설계할 때 두 번째 입력변수인 75층 가속도가 낮은 값에도 huge라고 판단하도록 소속함수를 결정하였기 때문이다. 이러한 가중치 시간이력의 결과는 퍼지 하이브리드 제어기의 소속함수의 크기나 형태, 혹은 퍼지제어규칙을 변경하면 조절할 수 있다. 따라서 엔지니어가 원하는 구조물과

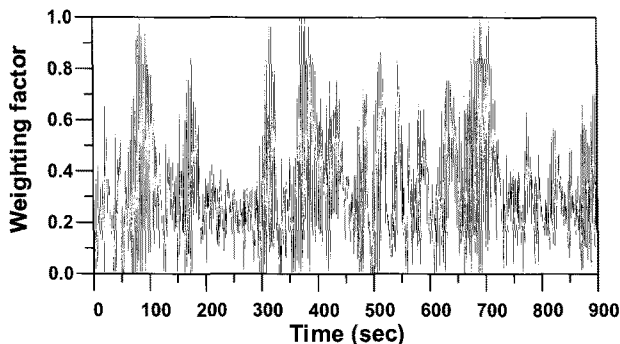


그림 10 가중치 시간이력

STMD의 응답을 얻기 위하여 여러 가지 퍼지 하이브리드 제어기를 설계한 후 그 성능을 평가해서 적절한 제어기를 선택하는 것이 필요하다.

퍼지 하이브리드 제어기의 성능을 평가하기 위하여 그림 4 및 5에 나타난 가중치의 변화에 따른 STMD 최대변위 및  $J_2$ 와 함께 퍼지 하이브리드 제어기를 사용했을 때 얻은 값을 그림 11에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 가중치의 증감에 따라서 STMD의 변위와 구조물의 가속도는 서로 상치관계(trade-off)에 있으므로 일반적인 가중합방법의 하이브리드 제어기를 구성한다면 둘 중 하나의 응답저감에 중요도를 두어 적절한 가중치를 선택하게 된다. 본 연구에서 제시한 퍼지 하이브리드 제어기를 사용한다면 그림에 나타난 바와 같이 STMD의 최대변위는 78.7cm가 되는데 이것은 가중합 하이브리드 제어기에서 0.48의 가중치를 사용한 경우와 같다. 퍼지 하이브리드 제어기를 사용하여 얻은  $J_2$  값은 0.436으로 이 값은 가중치가 0.27인 가중합 하이브리드 제어기를 사용했을 때의 결과와 같다. 즉 일반적인 가중합방식의 하이브리드제어기를 사용하여 0.436의  $J_2$  값을 얻기 위해서는 그림에 나타난 바와 같이 STMD의 최대변위가 약 89cm까지 증가해야 하지만 퍼지 하이브리드 제어기를 사용하면 78.7cm의 STMD 최대변위가 발생하므로 매우 효과적으로 STMD 및 구조물의 응답을 동시에 저감시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

퍼지 하이브리드 제어기 및 그라운드훅 제어기와 스카이훅 제어기를 사용하여 STMD가 설치된 76층 벤치마크 건물의 풍응답을 제어하여 얻은 성능평가지수를 표 5에서 비교하였다. 표에서 보듯이 그라운드훅 제어기의 구조물 응답에 대한 성능평가지수는 스카이훅 제어기에 비하여 모두 우수한 결과를 나타내었다. 다만 STMD의 응답에 대한 성능평가지수 ( $J_0, J_{11}$ )는 스카이훅 제어기에 비하여 좋지 못한 것을 알 수

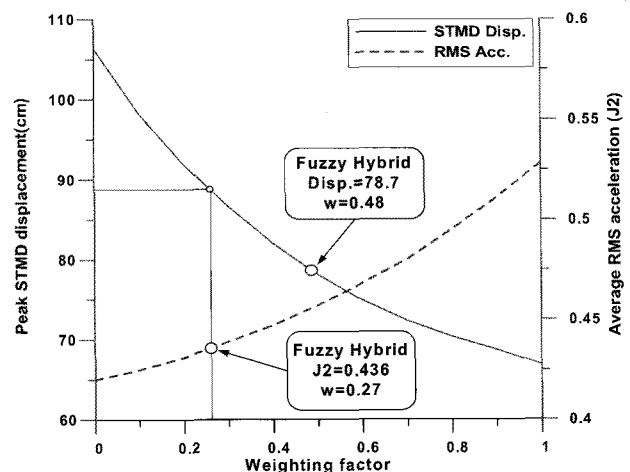


그림 11 가중치에 따른 구조물의 응답

있다. 그리고 이것은 4.1절에서 살펴본 바와 같이 제어장치 응답의 제한조건을 초과하므로 본 연구에서는 사용할 수 없다. 퍼지 하이브리드 제어기는 그라운드혹 제어기보다는 성능이 떨어지지만 스카이혹 제어기에 비해서는 매우 우수한 성능을 나타내었다. 그리고 STMD의 응답에 대한 성능평가지수에서는 퍼지 하이브리드 제어기가 그라운드혹 제어기보다 우수한 성능을 나타내었다. 퍼지 하이브리드 제어기를 사용하여 STMD를 제어한 경우가 샘플 TMD를 사용했을 때 보다는 매우 뛰어난 제어성능 효과를 나타내는 것을 알 수

표 5 제어장치별 성능평가지수의 비교

Index	STMD			TMD	ATMD
	그라운드혹 (w=0.0)	스카이혹 (w=1.0)	퍼지 하이브리드		
J1	0.428	0.531	0.444	0.589	0.369
J2	0.420	0.528	0.436	0.583	0.417
J3	0.569	0.643	0.581	0.681	0.578
J4	0.571	0.645	0.583	0.682	0.580
J5	3.032	1.676	2.564	1.258	2.271
J6	3.237	1.808	2.760	1.358	11.988
J7	0.441	0.547	0.441	0.652	0.381
J8	0.461	0.541	0.465	0.637	0.432
J9	0.685	0.767	0.677	0.786	0.717
J10	0.694	0.775	0.685	0.794	0.725
J11	3.292	2.071	2.435	1.319	2.299
J12	3.494	2.167	2.540	1.384	71.869

있다. STMD를 샘플 ATMD에 비교해 볼 때 구조물의 가속도 응답에 대해서는 대체적으로 조금 저하된 성능을 나타내지만 구조물의 변위응답의 제어에는 더 우수한 제어성능을 나타내었다. 특히 구조물의 최대 변위응답( $J_9, J_{10}$ )에 대해서는 ATMD보다 STMD의 제어성능이 더 우수한 것을 알 수 있다.

STMD, TMD 및 ATMD를 사용한 경우의 층별 최대치 및 RMS 응답을 비교하여 표 6에 나타내었다. 표에서 나타낸 바와 같이 퍼지 하이브리드 제어기를 사용한 경우 STMD의 최대 변위 및 RMS변위는 각각 78.65cm 및 25.99cm로 제한조건을 만족한다. 그리고 75층의 최대 가속도 및 RMS 가속도는 각각 83.12cm/sec<sup>2</sup> 및 4.06cm/sec<sup>2</sup>로 제어목표인 15cm/sec<sup>2</sup> 및 5cm/sec<sup>2</sup>보다 작다. 따라서 벤치마크 문제를 만족시키는 것을 알 수 있다. 이에 비하여 샘플 TMD의 경우에는 75층의 최대 가속도 및 RMS가속도가 각각 19.79cm/sec<sup>2</sup> 및 5.38cm/sec<sup>2</sup>로 제어목표를 만족시키지 못한다. ATMD의 경우에는 76층 최대가속도가 제어목표를 만족시키지 못하지만 나머지 층의 가속도는 모두 만족시키며 STMD보다 우수한 제어성능을 나타내었다. 그러나 최대 층 변위의 제어에 있어서는 전 층에 걸쳐서 STMD가 ATMD보다 더 우수한 제어성능을 발휘하는 것을 알 수 있다.

벤치마크 문제에서는 예제구조물의 강성이 ±15% 변화할 때의 제어장치의 강인성(robustness)을 검토할 것을 요구하

표 6 제어장치별 응답의 비교(단위: cm, cm/sec<sup>2</sup>)

층	STMD(퍼지하이브리드)				TMD				ATMD			
	최대값		RMS값		최대값		RMS값		최대값		RMS값	
	변위	가속도	변위	가속도	변위	가속도	변위	가속도	변위	가속도	변위	가속도
1	0.04	0.21	0.01	0.06	0.04	0.21	0.01	0.06	0.04	0.23	0.01	0.06
30	4.87	3.81	1.27	0.97	5.60	4.68	1.48	1.23	5.14	3.37	1.26	0.89
50	11.55	7.25	3.05	2.10	13.34	9.28	3.57	2.79	12.22	6.73	3.04	2.03
55	13.44	8.36	3.57	2.44	15.54	10.74	4.17	3.26	14.22	8.05	3.55	2.41
60	15.37	9.53	4.10	2.77	17.80	12.70	4.79	3.72	16.27	8.93	4.08	2.81
65	17.35	10.39	4.64	3.18	20.10	14.72	5.43	4.25	18.36	10.05	4.62	3.16
70	19.34	11.63	5.19	3.57	22.43	16.77	6.08	4.76	20.48	10.67	5.17	3.38
75	21.40	13.37	5.77	4.06	24.84	19.79	6.75	5.38	22.67	11.56	5.74	3.34
76	21.87	14.56	5.89	4.14	25.38	20.52	6.90	5.48	23.15	15.89	5.86	4.70
STMD	78.65	83.12	25.99	26.43	42.60	46.18	12.76	13.86	74.27	72.64	23.03	22.40

표 7 예제구조물의 강성변화에 따른 제어성능평가지수의 비교

	RMS 응답				최대 응답				
	$\Delta K = -15\%$		$\Delta K = +15\%$		$\Delta K = -15\%$		$\Delta K = +15\%$		
	TMD	STMD	TMD	STMD	TMD	STMD	TMD	STMD	
J1	0.594	0.538	0.494	0.455	J7	0.695	0.619	0.556	0.523
J2	0.586	0.530	0.488	0.449	J8	0.697	0.613	0.557	0.497
J3	0.809	0.768	0.526	0.501	J9	0.999	0.897	0.633	0.637
J4	0.810	0.769	0.527	0.503	J10	1.008	0.904	0.637	0.643



고 있다. 따라서 표 7에 예제구조물의 강성변화에 따른 샘플 TMD와 STMD의 제어성능변화를 검토하여 보았다. 표에서 볼 수 있듯이 예제구조물의 강성이 변화하면 STMD의 제어 성능이 저하되지만 여전히 대부분의 평가지수에서 TMD의 제어성능보다는 더욱 우수한 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 특히 TMD의 경우는 1보다 큰 평가지수도 존재하여 구조물의 응답을 TMD가 설치되지 않았을 때보다 더 증폭시킬 수도 있는 것을 알 수 있다.

### 6. 결론 및 추후 연구과제

본 연구에서는 스카이훅 및 그라운드훅 제어알고리즘을 이용한 퍼지 하이브리드 제어기를 개발하였으며 STMD가 설치된 76층 벤치마크 건물의 풍응답제어에 적용하여 그 제어성능을 검토하여 보았다. 퍼지 하이브리드 제어기의 입력변수는 서로 상치관계에 있는 STMD의 변위 및 구조물의 75층 가속도 응답으로 하였고, 출력변수는 두 제어기의 참여도를 결정할 가중치로 하였다. 제안된 STMD 퍼지 하이브리드 제어의 성능을 평가하기 위하여 가중합 방법의 하이브리드 제어기와 함께 벤치마크문제에서 제시한 샘플 TMD 및 ATMD를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. STMD가 설치된 76층 벤치마크 건물의 풍응답 제어에 스카이훅 및 그라운드훅 제어기를 적용시켜 본 결과 두 제어기의 본래 설계의도대로 각각 STMD 및 구조물의 응답을 매우 효과적으로 제어할 수 있음을 확인하였다. 그러나 각각의 독립된 제어기만을 사용하면 벤치마크 문제의 제한 조건이나 제어목표를 만족시키지 못하므로 두 제어기를 절절히 조합한 하이브리드 제어기의 필요성이 제기되었다.
2. 본 연구에서 개발한 퍼지 하이브리드 제어기를 이용하면 스카이훅 및 그라운드훅 제어기의 참여율을 실시간으로 조절할 수 있으므로 일반적인 가중합 방식의 하이브리드 제어기에 비하여 우수한 제어성능을 발휘하는 것을 확인하였다.
3. 퍼지 하이브리드 제어기에 의하여 제어된 STMD를 사용하여 벤치마크 문제의 제한조건을 만족시키면서 제어 목표를 달성할 수 있었다. 또한 모든 평가기준에 있어서 샘플 TMD에 비해서 더 우수한 제어성능을 나타내는 것을 확인하였다.
4. 퍼지 하이브리드 제어기에 의한 STMD의 제어성능은 가속도 제어에 있어서는 ATMD보다 저하된 결과를 보

여주었지만 벤치마크 건물의 변위응답의 제어에 있어서는 ATMD보다 더 우수한 성능을 나타내었다.

5. 본 연구에서는 100kN 용량의 MR 감쇠기를 사용하여 실제로 설계된 76층 벤치마크 건물을 성공적으로 제어하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 STMD가 고층건물의 풍응답 제어에 현실성이 있는 대안으로 고려될 수 있을 것으로 판단된다.
6. STMD는 ATMD보다 설치 및 운용에 드는 비용이 저렴하기 때문에 경제적인 측면에서 큰 장점을 가지고 있다. 또한 MR 감쇠기에 전원공급이 차단되는 사고가 발생하여도 여전히 수동 TMD의 기능을 수행할 수 있고 능동제어장치와는 달리 구조시스템을 불안정하게 할 가능성이 없으므로 ATMD에 비하여 뛰어난 안정성을 나타낸다. 이러한 준능동 제어장치로서의 장점 때문에 MR 감쇠기를 사용한 스마트 TMD가 고층건물의 풍응답 제어에 매우 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.
7. 본 연구에서 사용한 퍼지 하이브리드 제어기는 엔지니어의 경험을 바탕으로 시행착오(trial and error)방법을 사용하여 개발하였다. 그러나 유전자 알고리즘 등의 최적화기법을 적용하여 퍼지제어기를 개발한 한다면 우수한 성능을 나타내는 퍼지 하이브리드 제어기를 얻을 수 있을 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-331-D00642)을 밝히며 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- Dyke, S. J.** (2005) Current directions in structural control in the US, 9th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Kobe, Japan, pp. 1~22.
- Hrovat, D, Barak, P, Rabins, M.** (1983) Semi-active versus passive or active tuned mass damper for structural control, *ASCE, Journal of Engineering Mechanics*, 190(3), pp.691~705.
- Kareem, A., Kijewski, T.** (1999) Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications, *Wind and Structures*, 2(3), pp.201~251.

- Karnopp, D., Crosby M. J., Harwood R. A.** (1974) Vibration control using semi-active force generators, *J. of Engineering for Industry, ASME*, 96(2), pp.619~626.
- Narasimhan S., Nagarajaiah S., Johnson E. A., Gavin H. P.** (2006) Smart base isolated benchmark building Part I: Problem definition, *J Struct Control Health Monitor*, 13, pp.573~588.
- Nishitani, A., Inoue, Y.** (2001) Overview of the application of active/semiactive control to building structures in Japan, *Earthquake Engrg. and Struct. Dyn.*, 30, pp.1565~1574.
- Ricciardelli, F, Pizzimenti, A. D., Mattei, M.** (2003) Passive and active mass damper control of the response of tall buildings to wind gustiness, *Engineering Structures*, 25(9), pp.1199~1209.
- Samali, B., Kwok, K.C. S., Wood, G. S., Yang, J. N.** (2004) Wind tunnel tests for wind-excited benchmark building, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 130(4), pp.447~450.
- Spencer Jr., B. F., Dyke, S. J., Sain, M. K., Carlson, J. D.** (1997) Phenomenological model for magnetorheological dampers, *J. of Engineering Mechanics, ASCE*, 123(3), pp.230~238.
- Symans, M. D., Constantinou, M. C.** (1999) Semi-active control systems for seismic protection of structures: A State-of-the-art Review, *Engineering Structures*, 21, pp.469~487.
- Varadarajan, N., Nagarajaiah, S.** (2004) Wind response control of building with variable stiffness tuned mass damper using empirical mode decomposition/hilbert transform, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 130(4), pp.451~458.
- Warburton, G. B.** (1982) Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters, *Earthquake Engrg. and Struct. Dyn.*, 10, pp.381~401.
- Yang, J. N., Agrawal, A. K., Samali, B., Wu, J. C.** (2004) Benchmark Problem for Response Control of Wind-Excited Tall Buildings, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 130(4), pp.437~446.
- Yau, J. D., Yang, Y. B.** (2004) A wideband MTMD system for reducing the dynamic response of continuous truss bridges to moving train loads, *Engineering Structures*, 26(12), pp.1795~1807.