

# 다이어그리드 구조물-스마트 제어장치의 다목적 통합 최적화

김 현 수<sup>1</sup> · 강 주 원<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>선문대학교 건축학부, <sup>2</sup>영남대학교 건축학부

## Multi-objective Integrated Optimization of Diagrid Structure-smart Control Device

Hyun-Su Kim<sup>1</sup> and Joo-Won Kang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Architecture, Sunmoon University, Asan, 336-708, Republic of Korea  
<sup>2</sup>School of Architecture, Yeungnam University, Gyeonsan, 712-749, Republic of Korea

### Abstract

When structural design of a tall building is conducted, reduction of wind-induced lateral displacement is one of the most important problem. For this purpose, additional dampers and vibration control devices are generally considered. In this process, control performance of additional devices are usually investigated for optimal design without variation of characteristics of a structure. In this study, multi-objective integrated optimization of structure-smart control device is conducted and possibility of reduction of structural resources of a tall building with additional smart damping device has been investigated. To this end, a 60-story diagrid building structure is used as an example structure and artificial wind loads are used for evaluation of wind-induced responses. An MR damper is added to the conventional TMD to develop a smart TMD. Because dynamic responses and the amount of structural material and additional smart damping devices are required to be reduced, a multi-objective genetic algorithm is employed in this study. After numerical simulation, various optimal designs that can satisfy control performance requirement can be obtained by appropriately reducing the amount of structural material and additional smart damping device.

**Keywords** : Diagrid structural system, Smart TMD, Vibration control, MR damper, Multi-objective optimization, Genetic algorithm

### 1. 서 론

초고층 건물의 구조설계를 수행할 때 풍하중에 의한 횡방향 변위를 적절한 값 이내로 줄이는 것이 해결해야 할 가장 중요한 문제 중에 하나이다. 때에 따라서 최적의 구조시스템을 사용하여 구조물을 설계한 이후에도 건축적, 경제적 이유 등에 의하여 구조물의 안전성을 확보할 수 있는 횡방향 강성을 나타내지 못하는 경우가 발생하게 된다. 이러한 경우에는 추가적인 감쇠기 및 진동제어장치를 사용하는 방법이 일반적으로 고려되고 있다. 구조물의 풍응답을 저감시키기 위하여 수동 및 능동 제어장치를 활용한 사례가 지속적으로 증가하고 있으며(Varadarajan & Nagarajaiah, 2004; Aldawod

et al., 2001) 근래에는 수동 제어장치의 안정성과 능동 제어장치의 적합성을 동시에 나타내는 스마트 제어장치에 대한 연구도 증가하고 있다(Kim & Kang, 2012; Ramallo et al., 2002).

근래에 비정형 초고층 건물을 위해서 다양한 구조시스템들이 제안되고 있는데, 그 중에서 다이어그리드 구조시스템이 구조적인 효율성 및 조형성 등의 장점 때문에 Fig. 1에 나타난 바와 같이 현재까지 국내외적으로 가장 널리 사용되고 있다.

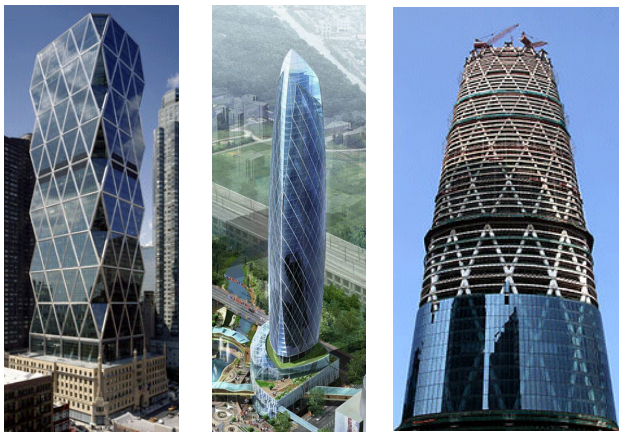
일반적인 수동 감쇠기나 다양한 형태의 진동제어장치를 구조물에 추가적으로 설치하는 과정은 구조물의 최적설계가 이루어진 후 구조시스템만으로는 더 이상의 구조성능 개선이 불가능한 상태에서 이루어지는 것이 일반적이다. 구조부재의

\* Corresponding author:

Tel: +82-53-810-2429; E-mail: kangj@ynu.ac.kr  
Received November 27 2012; Revised January 3 2013;  
Accepted January 4 2013

©2013 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



(a) Hearst Tower (b) Cyclone Tower (c) West Tower  
**Fig. 1** Building structures with diagrid system

최적설계 후 구조제어시스템 설계를 수행하는 순차적인 설계 방법은 설계과정이 명확하고 비교적 용이하므로 기존의 초고층건물 풍응답 제어 설계과정에서 보편적으로 이루어지는 방법이다(Park & Koh, 2004).

순차적인 방법으로 설계된 시스템이 예상되는 풍하중에 대하여 가장 효과적으로 대응할 수 있는 최적의 설계안이라고 보기는 어렵다. 왜냐하면 이미 최적설계된 구조물에 대하여 제어시스템이 설계되었지만 이렇게 추가된 제어시스템의 영향으로 제어시스템이 설치된 구조물의 구조부재에 대한 최적 설계안은 다르게 결정될 수 있다. 따라서 제어시스템이 추가된 구조물에 대하여 최적의 구조부재를 찾는 설계안은 최초의 구조물 설계안과 달리 다시 최적화가 가능하게 된다. 이에 따라서 구조물의 설계안이 달라지면 제어시스템 역시 첫 번째 설계안과는 다른 최적의 설계안이 존재하게 된다. 이러한 반복설계과정을 피하기 위해서 구조물과 진동제어시스템을 하나의 시스템으로 간주하고 구조물 및 제어시스템의 설계변수를 동시에 최적화할 수 있는 통합 최적설계기법이 제안되었다(Ok *et al.*, 2008; Park & Koh, 2004). 이러한 구조물-제어시스템의 다목적 통합 최적화에 대한 기존 연구에서 Park & Koh(2004)는 선호도에 기반한 최적화 방법을 제안한 바 있으며, Park 등(2004)은 생애주기비용(Life-Cycle Cost)의 측면에서 가장 경제적인 최적설계해를 제시하는 연구를 하였다. 박관순 등(2003)은 구조부재와 제어장치의 사용량 및 구조물의 응답크기에 대하여 다단계의 설계 목표를 산정하고, 이를 점진적으로 만족하도록 최적화과정을 유도하는 목표갱신 유전자알고리즘(Goal Updating Genetic Algorithm)을 제안한 바 있다.

그러나 이러한 연구들은 대부분 20층 이하의 예제 구조물을 선택하여 지진하중에 대한 구조물의 응답과 구조물 및 제어시스템을 통합 최적화하는 것을 목표로 하고 있고, 풍하중

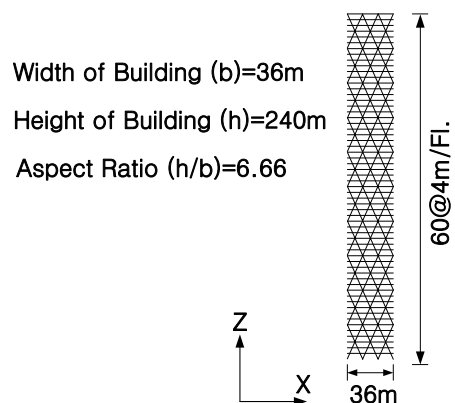
을 받는 초고층 건물과 제어시스템의 통합 최적화에 대한 연구는 거의 찾아보기 어렵다. 또한 추가되는 제어시스템은 대부분 능동이나 수동 제어시스템을 사용하고 있으며, 근래에 주목받고 있는 스마트 구조 제어시스템을 사용한 연구는 국내외적으로 수행된 사례가 거의 없다. 특히 다이어그리드 구조물과 제어시스템의 통합 최적화에 대한 연구는 지금까지 이루어진 바가 없다.

따라서 본 연구에서는 스마트 제어시스템이 설치된 다이어그리드 초고층 건물에 대한 구조물-제어시스템의 다목적 통합최적화를 수행하였다. 이를 위해서 풍하중을 받는 60층 다이어그리드 구조물에 대한 수치해석을 수행하였다. 예제 구조물의 풍응답을 평가하기 위하여 인공풍하중을 생성하여 풍방향 응답을 분석하였다. 예제 구조물의 풍응답을 제어하기 위하여 MR 감쇠기로 구성된 스마트 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper; TMD)를 사용하였다. 전술한 바와 같이 구조물과 제어시스템의 설계변수를 동시에 최적화할 수 있는 통합 최적설계기법을 적용하기 위하여 스마트 TMD의 질량과 이에 사용되는 MR 감쇠기의 제어용량을 스마트 제어시스템의 설계변수로 선택하였다.

## 2. 예제 구조물 및 인공풍하중

### 2.1 60층 다이어그리드 예제 구조물

본 연구에서는 예제 구조물을 구성하기 위하여 구조물의 세장비에 따른 다이어그리드의 최적의 경사각에 대해서 연구를 수행한 Moon 등(2007)의 연구에서 다루었던 구조물을 사용하였다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 건물의 폭은 36m이고 층고는 4m로서 전체 건물의 높이는 240m이다. Moon 등의 연구에 근거하여 세장비가 6.66인 본 예제 구조물이 횡방향 하중에 대하여 효과적으로 저항할 수 있도록 6개의 층



**Fig. 2** 60-story diagrid example structure

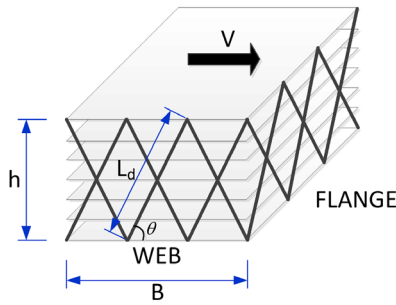


Fig. 3 6-stoy diagrid module(Moon *et al.*, 2007)

이 하나의 다이어그리드 모듈로 구성되도록 하였고, 이때의 다이어그리드 경사각은 63°이다.

이렇게 6개 층으로 구성된 하나의 다이어그리드 모듈을 Fig. 3에 나타내었다. 본 논문에서 사용한 예제 구조물의 경우에 Fig. 3에 나타낸 모듈의 폭(B)은 36m이고 모듈의 높이(h)인 6개 층의 높이는 24m이므로 그림에 나타낸 다이어그리드의 경사각  $\theta$ 는 약 63°가 된다.

Fig. 3에 나타낸 바와 같이 전단력  $V$ 가 작용할 때 웹에 있는 다이어그리드 요소에 의해서 저항을 하고 플랜지에 있는 요소는 무시할 수 있다. 따라서 3차원의 다이어그리드 모듈을 Fig. 2에 나타낸 2차원 구조물로 간략화 하여 생각해 볼 수 있다. 풍하중과 같은 횡력에 의해서 전단력  $V$ 가 작용을 할 때 발생하는 Fig. 3에 나타낸 단위 다이어그리드 모듈의 상대변위를 아래의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다

$$V = K_T \Delta u \tag{1}$$

여기서,  $K_T$ 는 전단강성(shear stiffness)을 나타내고,  $\Delta u$ 는 단위모듈의 상대변위를 나타낸다. Fig. 3에 나타낸 다이어그리드 단위 모듈에 대하여 Moon 등(2007)의 연구에서는 다음과 같이 전단강성을 나타내고 있다.

$$K_T = 2N_w \left( \frac{A_{d,w} E}{L_d} \cos^2 \theta \right) \tag{2}$$

여기서,  $N_w$ 는 하나의 웹 평면에서 전체 모듈 높이만큼 뻗어 있는 다이어그리드 요소의 개수이고,  $A_{d,w}$ 는 다이어그리드 요소의 단면적,  $E$ 는 구조재료의 탄성계수, 그리고  $L_d$ 와  $\theta$ 는 Fig. 3에 나타내었다. 본 연구에서 이루어지는 구조물과 제어시스템의 최적화 과정을 통해서 예제 구조물의 전단강성이 결정되면 다음의 식 (3)을 통하여 6개 층으로 이루어진 하나의 다이어그리드 모듈을 구성하는 대가가새 요소의 단면적을 결정할 수 있다.

$$A_{d,w} = \frac{K_T L_d}{2N_w E \cos^2 \theta} \tag{3}$$

## 2.2 인공 풍하중의 생성

인공풍하중의 작성 시 기본 풍속은 30m/s, 노풍도는 C로 하였고 0.02초 간격으로 600초 동안의 풍하중을 작성하였다. 풍하중을 받는 예제 구조물의 폭은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 36m이고, 층고는 4m이므로 각 층의 인공풍하중 데이터를 생성하였다. 풍하중은 식 (4)의 Kaimal spectrum을 이용하여 작성한 인공풍하중을 사용하였으며, 풍방향 성분만을 고려하여 해석을 수행하였다.

$$\frac{f S_U(z, f)}{\sigma_u^2} = \frac{6.8 f_L}{(1 + 10.2 f_L)^{5/3}} \quad \text{where} \quad f_L = \frac{f L_H(z)}{U_H(z)} \tag{4}$$

인공풍하중 생성시 상호상관관계를 고려한 비대각 스펙트럼을 작성하기 위해서 본 연구에서는 decay constant를 10으로 결정하였으며 식 (5)를 이용하여 작성하였다.

$$S_{rs} = \sqrt{S_{rr}(f)S_{ss}(f)} \cdot \exp\left[-f \frac{k_z |z_r - z_s|}{(1/2)[U_H(z_r) + U_H(z_s)]}\right] \tag{5}$$

시간이력 변환과정(Wittig & Sinha, 1975)은 Cholesky 분해기법을 통하여 하삼각행렬을 작성 후에 각 층에 대하여 정규분포를 따르는 위상각을 가지는 FFT함수( $X_p$ )를 작성하고 역 FFT(Fast Fourier Transform) 작성을 통하여 각 층의 풍속시간이력( $x_p$ )을 작성하였다(Dyrbye & Hansen, 1997; Zhou *et al.*, 2003).

$$x_p(n\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N X_p(k\Delta f) \exp\left(j \frac{2\pi kn}{N}\right) \tag{6}$$

$$X_p(k\Delta f) = \sqrt{2f_c N} \sum_{i=0}^p H_{pi}(k\Delta f) \zeta_{ik} \tag{7}$$

여기서,  $H_{pi}$ 는 Cholesky 분해기법을 통하여 작성된 하삼각행렬이며  $\zeta_{ik}$ 는 평균이 "0"이고 분산이 "0.5"인 가우시안 복소난수(complex Gaussian random numbers)이며,  $\Delta t = 1/2f_c$ 로서  $f_c$ 는 나이퀴스트 진동수(Nyquist frequency)이다. 이러한 방법으로 작성한 인공풍하중의 층수에 따른 평균 풍속과 난류강도를 Fig. 4에 나타내었고 40, 50 및 60층 풍하중 시간이력 그래프를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4에서 실선은 평균풍속을, 점선은 난류강도를 의미한다.

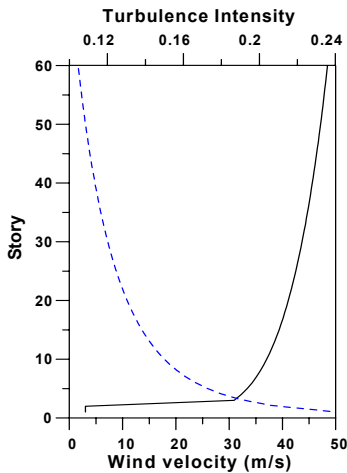


Fig. 4 Average wind velocity and turbulence intensity

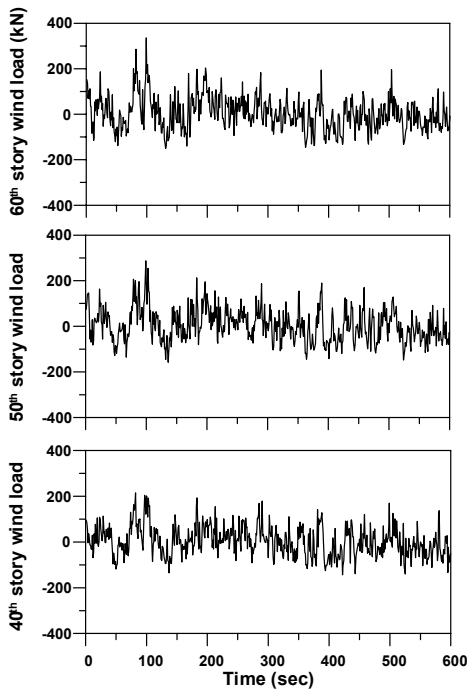


Fig. 5 40-60 story wind load time history

### 3. 스마트 진동제어장치의 구성

#### 3.1 스마트 동조질량감쇠기

본 연구에서는 초고층 다이어그리드 구조물의 풍응답 제어를 위하여 스마트 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper; TMD)를 사용하였고 이 스마트 제어장치와 다이어그리드 구조물의 다목적 통합 최적화를 수행한다. 이때 스마트 TMD를 구성하기 위해서 Fig. 6에 나타난 바와 같이 수동 TMD의 구성요소인 점성감쇠기를 대신하여 MR 감쇠기를 사용한다.

MR 감쇠기를 모형화하기 위해서는 일반적으로 사용되는

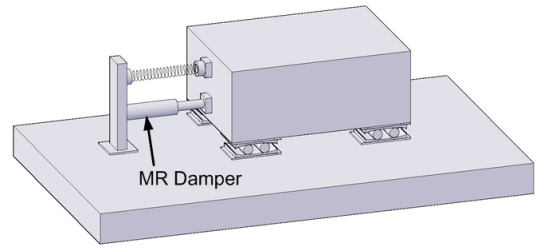


Fig. 6 Smart TMD having MR damper

Bouc-Wen 모델(Sues *et al.*, 1988)을 사용하였다. 이 모델에서 MR 감쇠기의 감쇠력은 아래의 식 (8)과 같이 표현된다.

$$f = c_0 \dot{x}_d + \alpha z \tag{8}$$

여기서,  $x_d$ 는 감쇠기 양단의 상대변위(stroke)를 나타내고 변수  $c_0$ 와,  $\alpha$ ,  $z$ 는 아래의 식 (9)~(11)을 통해서 각각 얻을 수 있다.

$$c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b}u \tag{9}$$

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \tag{10}$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}_d| |z|^{n-1} - \beta \dot{x}_d |z|^n + A_m \dot{x}_d \tag{11}$$

식 (9)는 감쇠상수를 식 (10)은 MR 감쇠기의 변화하는 거동 특성을 모사하기 위한 변수로서 수동 감쇠기의 경우에는 이 변수들이 고정된 상수값을 가지며 고정된 이력거동을 보이게 되지만 MR 감쇠기에서는 식에 나타난 바와 같이 입력전압( $u$ )의 함수로서 표현되며 입력전압의 값에 따라서 감쇠력이 매 순간 변화할 수 있다. 식 (8)와 (11)의 변수  $z$ 는 MR 감쇠기의 이력거동을 모사하기 위한 가상의 변수로서 매 개변수  $\gamma$ ,  $n$ ,  $\beta$ ,  $A_m$ 은 항복 전후의 기울기와 같이 감쇠기의 이력거동의 형상을 결정하는데 사용되는 계수들이다. 본 연구에서 사용한 MR 감쇠기는 Bani-Hani와 Sheban의 연구(2006)에서 사용된 최대용량이 50kN을 가지도록 설계된 모델로서 입력전압이 0V일 때 passive-off 상태를, 5V일 때 passive-on 상태를 나타낸다. 이러한 MR 감쇠기를 모사하는데 사용한 계수들의 값을 Table 1에 나타내었다.

스마트 TMD의 동적 특성을 다이어그리드 구조물의 동적 특성에 맞추어 적절하게 조율하는 것이 풍응답 제어성능을

Table 1 Properties of MR damper model

$c_{0a}$	0.44N·s/cm	$\gamma$	3cm <sup>-1</sup>
$c_{0b}$	4.4N·s/cm	$n$	1
$\alpha_a$	10872N/cm	$\beta$	3cm <sup>-1</sup>
$\alpha_b$	49616N/(cm·V)	$A_m$	1.2

결정하는 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 본 연구에서는 스마트 TMD의 고유진동주기를 제어대상 고층구조물의 1차 모드 고유진동주기와 일치하도록 조율하는 방법을 사용하였다. 유전자 알고리즘을 사용할 때에는 다수의 설계 안에 따라서 구조물의 고유진동주기가 변하게 되고 스마트 TMD의 질량도 변하게 된다. 이때 각각의 설계안에서 제시하는 구조물의 1차모드 고유진동주기와 일치하도록 스마트 TMD의 강성을 조절해서 스마트 TMD의 고유진동주기를 조율한다. 이 과정에서 스마트 TMD의 질량 및 구조물의 1차모드 고유진동주기는 유전자알고리즘이 제시하는 설계 안에 의해서 이미 결정이 되어 있으므로 스마트 TMD의 강성은 간단한 계산으로 구할 수 있다.

### 3.2 그라운드훅 제어알고리즘

본 연구에서는 스마트 TMD를 구성하는 MR 감쇠기의 감쇠력을 제어하기 위해서 전통적인 준능동 제어알고리즘인 그라운드훅(groundhook) 제어알고리즘(Koo *et al.*, 2004)을 사용하였다. 이 알고리즘을 설명하기 위하여 빌딩 구조물에 설치된 TMD의 이상적인 그라운드훅 시스템을 Fig. 7에 나타내었다. 그림을 보면 빌딩 구조물의 응답을 감소시키기 위하여 감쇠기를 구조물과 땅(그라운드) 사이에 연결한 것을 볼 수 있다. 이러한 가상의 시스템이 존재한다면 그라운드훅 댐퍼는 다양한 외부의 동적하중에 대하여 빌딩 구조물의 동적응답을 저감시키는 역할을 하게 된다. 그러나 이러한 시스템은 실제 구현이 불가능하기 때문에 본 연구에서는 Fig. 6에 나타낸 스마트 TMD를 이용하여 가상의 그라운드훅 시스템을 모사한다.

그라운드훅 제어알고리즘은 평형위치에 대한 빌딩 구조물

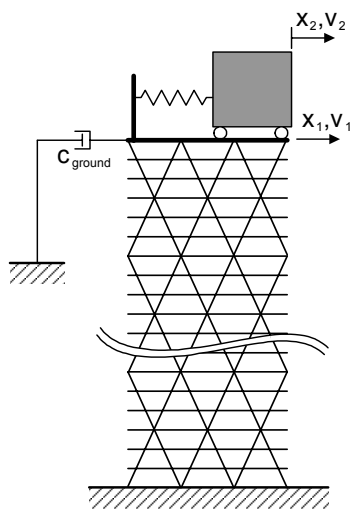


Fig. 7 Idealized groundhook system

의 최상층 변위( $x_1$ )와 최상층과 스마트 TMD의 상대속도( $v_1 - v_2$ )의 관계를 이용하여 정의된다. 이 그라운드훅 알고리즘은 식 (12)와 (13)으로 간단하게 정리될 수 있다. 여기서  $V$ 는 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압을 의미하며  $V_{max}$ 는 최대 전압인 5V,  $V_{min}$ 은 최소 전압인 0V를 의미한다.

$$x_1(v_1 - v_2) \geq 0 \Leftrightarrow V = V_{max} \tag{12}$$

$$x_1(v_1 - v_2) < 0 \Leftrightarrow V = V_{min} \tag{13}$$

## 4. 다목적 유전자알고리즘을 이용한 구조물-제어시스템 통합 최적화

### 4.1 다목적 유전자알고리즘

다목적 최적화의 경우에 각각의 목적들 사이에 상치관계(trade-off)가 존재하게 되는데, 여기서 어떤 한 목적에 대한 성능 향상은 다른 목적에 대한 손실없이는 이루어질 수 없다. 즉, 경제적인 효과를 보기 위하여 구조부재의 단면을 작게 하여 사용량을 줄이면 구조물의 풍응답이 증가하게 되고 반대로 구조부재의 사용량을 늘리면 구조물의 안전성은 증가하지만 경제적 효율성은 떨어지게 된다. 구조부재의 사용량 이외에도 수동 감쇠기의 사용량, MR 감쇠기의 제어용량, 스마트 TMD의 질량 등은 구조물의 풍응답과 모두 상치관계가 있음을 알 수 있다. 또한, 구조부재의 사용량이 증가하게 되면 구조물의 강성이 증가하게 되어 풍응답이 저감되므로 수동 감쇠기의 사용량도 줄어들게 되는데, 이렇게 구조부재와 감쇠기, 제어장치의 용량 등도 서로 상치관계가 있음을 나타내게 된다.

유전자알고리즘은 많은 수의 개체(해)들을 이용하여 최적화 문제를 해결하기 때문에 여러 개의 최적해를 동시에 찾는데 유전자알고리즘을 이용하는 것이 매우 자연스러운 일이다.

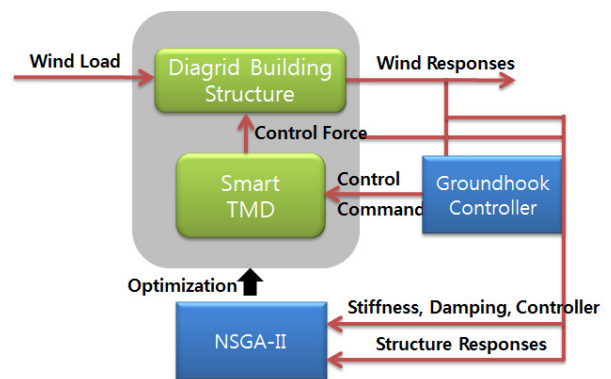


Fig. 8 Multi-objective optimization process



다. Schaffer(1985)가 다목적 최적화 문제에 유전자알고리즘을 적용한 이후로 많은 수의 다목적 유전자알고리즘이 제안되었다. 그 중에서 본 연구에서는 NSGA-II(Deb *et al.*, 2000)를 이용하여 파레토 최적해 집합을 찾는다. 다목적 유전자알고리즘인 NSGA-II를 이용하여 다이어그리드 예제 구조물과 스마트 TMD의 다목적 통합 최적화를 수행하는 과정을 Fig. 8에 나타내었다.

#### 4.2 구조물과 제어시스템의 인코딩(encoding) 방법

다목적 유전자알고리즘을 이용하여 다이어그리드 구조물과 스마트 TMD의 통합 최적화를 수행하기 위해서는 인코딩(encoding) 과정을 거쳐서 구조물과 제어시스템을 유전적으로 표현해야 한다. 즉, 다이어그리드 구조물과 스마트 TMD 제어시스템을 구성하는데, 필요한 모든 정보를 염색체(chromosome)라고 불리는 하나의 구조에 인코딩해야 한다. 다이어그리드 예제 구조물의 구조부재를 최적설계하기 위해서 기본 강성을 가지는 해석모델을 생성한 후 유전자 알고리즘에 의하여 추가되는 강성의 최적량을 결정하도록 하였다. 예제 다이어그리드 구조물의 층 질량은  $1 \times 10^6 \text{kg}$ 으로 하였고, 층별 기본 강성은  $1 \times 10^9 \text{N/m}$ 로 두었다. 이렇게 구성된 기본 강성을 가지는 해석모델의 1-3차 모드 고유진동 주기는 각각 7.65, 2.55, 1.53초이다. 이렇게 정해진 기본 해석모델에 유전자 알고리즘에 의해서 결정된 추가 강성과 수동감쇠기의 용량을 더하여 다이어그리드 구조물의 최종 해석모델을 구성한다. 본 연구에서는 최적화 작업의 효율성과 시공의 편의성을 고려하여 Fig. 3에 나타난 6층으로 이루어진 다이어그리드 단위모듈에 대하여 동일한 추가 강성과 수동감쇠기를 적용하기로 한다. 이렇게 설정된 10개의 다이어그리드 각 모듈별 추가 강성 및 감쇠기의 용량을 해당 모듈에 속한 6개의 층에 대해 동일하게 적용하여 전체 다이어그리드 구조물의 최종 해석모델을 구성한다. 스마트 TMD의 제어성능을 결정하는 가장 중요한 요소는 TMD의 질량과 MR 감쇠기의 제어용량이다. 따라서 이 두가지 특성치의 최적값 또한 NSGA-II를 사용하여 찾는다. 이렇게 다이어그리드 구조물과 스마트 TMD를 구성하기 위한 설계변수를 염색체에 인코딩하는 방법을 Fig. 9에 나타내었다.

본 연구에서는 Table 2에 나타난 5개의 목적함수를 다목적 최적화에 사용하였다. Table 2에서  $k_i$ 는 6개의 층으로 이루어진 다이어그리드 모듈에 포함된 각층의 강성을 의미한다. 본 연구에서 사용한 예제 구조물을 구성하기 위해서는 10개의 모듈을 쌓아 올려서 60층 건물을 구성하게 되므로 각 모듈별 추가되는 강성을 모두 합한 값을 첫 번째 목적함

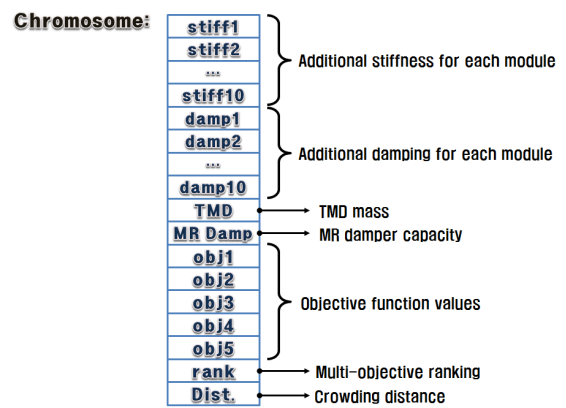


Fig. 9 Configuration of chromosome

Table 2 Multi-objective functions

	Description	Objective function
obj1	additional stiffness	$\sum_{i=1}^{10} k_i$
obj2	additional damping	$\sum_{i=1}^{10} c_i$
obj3	smart TMD mass	TMD_mass
obj4	MR damper capacity	MR_sf
obj5	peak roof displacement	$\max_t  d(t) $

수(obj1)로 두었다. 두 번째 목적함수(obj2)에 사용된  $c_i$ 는 각 모듈에 포함된 6개의 층에 동일하게 추가되는 수동 감쇠기의 용량(감쇠상수)을 의미한다. 10개의 다이어그리드 모듈에 추가되는 수동 감쇠기의 용량을 모두 더한 값을 목적함수로 사용하였다. 세 번째 목적함수(obj3)는 간단하게 스마트 TMD의 질량으로 선택하였고, 네 번째 목적함수(obj4)는 MR 감쇠기의 용량으로 하였다. 3.1절에서 설명한 바와 같이 본 연구에서는 50kN 용량의 MR 감쇠기 나타내는 해석모델을 사용하였으며 이 감쇠기의 제어범위를 유지한 채 가중계수(scale factor)를 사용하여 MR 감쇠기의 용량을 결정하도록 하였다. 마지막으로 다섯 번째 목적함수(obj5)로는 풍하중을 받는 예제 구조물의 최상층 절대치 최대응답을 선택하였다.

#### 5. 수치해석을 통한 다목적 통합 최적화 결과의 분석

본 연구에서는 NSGA-II를 이용한 다목적 통합최적화를 위하여 한 세대를 이루는 염색체 개체군은 100개의 개체로 이루어지도록 하였고 최적화는 1000세대까지 수행하였다. 본 연구에서는 Table 2에서 나타난 5가지의 목적함수를 이용하여 구조물과 구조시스템의 다목적 통합 최적화를 수행하였고 그 결과 구조물 물량을 대표하는 첫 번째 목적함수인 추가 구조부재 사용량과 풍응답의 최대치를 나타내는 다섯

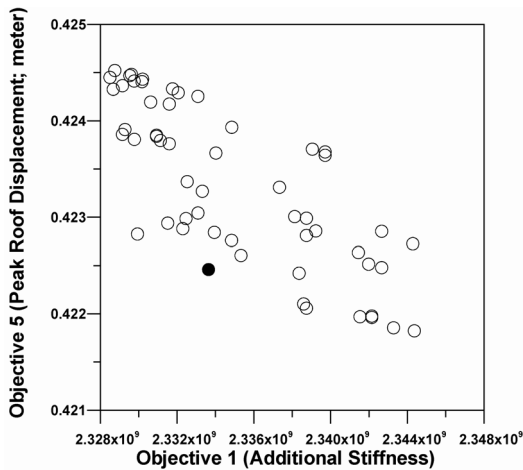


Fig. 10 Optimization results

번째 목적함수에 대한 최적화 결과 파레토 해집합을 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 추가 구조부재의 사용량과 최상층의 최대치 풍응답 간에는 서로 반비례 관계가 존재하는 것을 알 수 있다. 즉, 추가되는 강성이 많을수록 풍응답을 저감시킬 수 있는 반면에 경제적 부담은 증가하게 된다. 그림을 보면 일반적인 2차원 파레토 최적해 집합과는 달리 파레토 최적 경계면 안쪽에도 다수의 해가 존재하는데 이것은 본 연구에서 최적화시 사용한 목적함수의 개수가 2개가 아니라 5개이고, 이러한 5차원의 파레토 최적해 집합을 2차원 그래프에 나타내었기 때문이다. 추가되는 구조부재의 강성(목적함수 1)과 최대 지붕층 변위(목적함수 5)를 동시에 적절하게 고려하여 선택한 개체를 Fig. 10에서 검정색 원으로 나타내었다.

Fig. 10에서 선택한 개체는 각 다이어그리드 모듈별 추가 강성 및 수동 감쇠기 용량과 스마트 제어시스템을 구성하는 TMD 질량 및 MR 감쇠기의 용량에 대한 설계안에 대한 정보를 염색체에 포함하고 있다. 염색체에 저장된 이러한 정보를 디코딩(decoding)해서 Fig. 11과 12에 다이어그리드 각 모듈별 추가강성 및 수동감쇠기 용량을 나타내었다. Fig. 11에서 보듯이 추가되는 강성은 하위 1~4번째 모듈에 주로 포함되는 것이 구조물의 풍응답을 저감시키는데 효과적인 것을 할 수 있다. 각 모듈별 6개층을 포함하고 있으므로 선택된 설계안은 하부 24개 층에 강성이 주로 추가되는 것을 의미한다. 4.2절에서 밝힌 바와 같이 예제 구조물의 기본 강성을  $1 \times 10^9 \text{N/m}$ 로 두었으므로 하부 24개 층에서 기본강성의 약 35%~45% 정도가 추가되는 것을 알 수 있다. 수동 감쇠기의 경우에도 Fig. 12에서 볼 수 있듯이 주로 하부 모듈에 설치되는 것이 효과적임을 알 수 있다. 하부 6개 층에 가장 큰 용량의 수동감쇠기가 설치되고 그 위 7~18층에서 수동 감쇠기의 사용량이 두 번째로 크게 결정되었다. 선택된 설계안

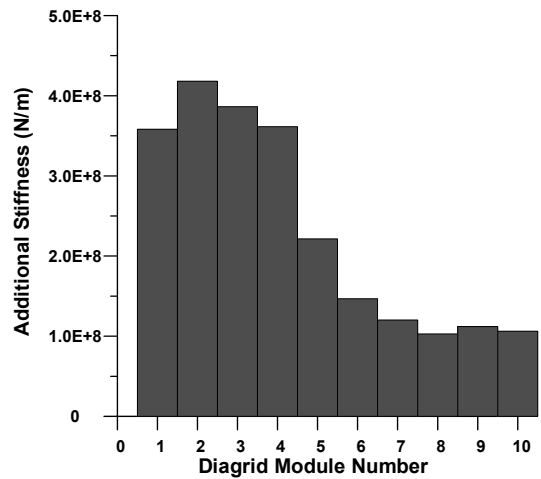


Fig. 11 Additional stiffness for each module

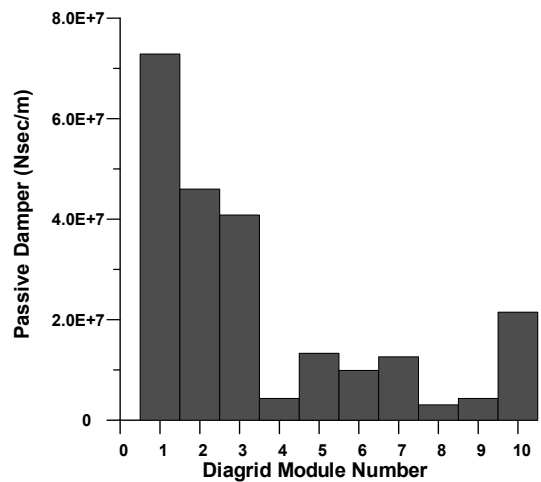


Fig. 12 Additional damping for each module

을 디코딩한 결과 최적화된 스마트 TMD의 질량은 285.6ton으로 나타났다. 이 값을 구조물 전체 질량의 합계에 대한 질량비로 나타내면 0.48%로서 비교적 크지 않은 스마트 TMD의 질량으로 60층 다이어그리드 예제 구조물의 풍응답을 효과적으로 제어할 수 있음을 볼 수 있다. MR 감쇠기의 최적 용량을 결정하기 위하여 선택된 Table 2의 MR\_sf값은 4.3으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 MR 감쇠기 해석모델로 사용한 50kN 용량의 4.3배의 용량, 즉 215kN 용량의 MR 감쇠기로 스마트 TMD를 구성하는 것이 선택된 최적의 설계안의 내용이다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 풍하중을 받는 초고층 다이어그리드 예제 구조물과 스마트 제어시스템의 다목적 통합 최적화를 수행하였고 이 방법의 초기 설계단계에서의 적용가능성을 검토하였

다. 이를 위해서 예제 구조물로는 구조적 효율성 및 심미성 때문에 최근 널리 사용되고 있는 다이어그리드 60층 구조물을 선택하였고, MR 감쇠기와 TMD로 구성된 스마트 TMD를 사용하여 풍응답을 제어하도록 하였다. 경제적 효율성을 위하여 구조물을 구성하는 구조부재와 수동감쇠기의 사용량 및 스마트 TMD의 질량과 MR 감쇠기의 용량을 줄이는 것을 다목적 최적화의 목적함수로 하였고, 이와 더불어 최상층의 최대치 풍응답을 줄이는 것을 최적화의 목적으로 하였다. 이를 위하여 다목적 유전자알고리즘인 NSGA-II를 이용하였고 최적화 과정을 통하여 구조물 및 제어시스템의 물량과 예제 구조물의 풍응답을 동시에 적절하게 줄일 수 있는 파레토 최적해 집합을 얻을 수 있었다. 본 연구에서 선택한 개체가 나타내는 최종 설계안으로 구조물 및 스마트 TMD의 최적 설계변수를 얻을 수 있었고, 인공 풍하중이 가해질 때 발생하는 최상층 변위의 최대치를 건물 높이의 1/500에 해당하는 제어목표 이하로 줄일 수 있었다. 파레토 최적 해집합에 속하는 다양한 설계안들은 서로 우열을 가질 수 없는 최적해로서 엔지니어가 각각의 개체가 제공하는 설계안의 구조물량 및 제어성능을 평가하여 적절한 안을 쉽게 선택할 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 다목적 최적화의 목적함수로서 Table 2에 나타낸 5개의 함수를 사용하였으므로 5차원 영역에서 균등 분포될 수 있도록 충분한 개수의 해를 검색하는 것이 필요하다. 이는 최적화 과정에서의 검색시간이 기하급수적으로 늘어나는 것을 의미한다. 또한, 설계변수로서 추가 강성, 수동 감쇠기의 위치별 최적 용량 및 스마트 제어시스템의 최적화도 동시에 다루므로 매우 넓은 설계영역을 갖게 된다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 추후, 제한 조건을 갖는 다목적 최적화 기법이나 다른 추가적인 방법을 통해서 보다 효과적으로 최적해를 찾는 연구가 필요하다고 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-0001934).

### 참 고 문 헌

Aldawod, M., Samali, B., Naghdy, F., Kwok, K.C.S. (2001) Active Control of Along wind Response of Tall Building using a Fuzzy Controller, *Engineering Structures*, 23, pp.1512~1522.  
 Bani-Hani, K.A., Sheban M.A. (2006) Semi-active

neuro-control for Base-isolation System using Magnetorheological (MR) Dampers, *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, 35, pp.1119~1144.  
 Deb, K., Pratap, A., Agrawal, S., Meyarivan, T. (2002) A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II, *Evolutionary Computation, IEEE Transactions*, 6(2), pp.182~197.  
 Dyrbye, C., Hansen, S.O. (1997) Wind Loads on Structures, John Wiley & Sons Ltd, New York.  
 Koo, J.H., Setareh, M., Murray, T.M. (2004) In Search of Suitable Control Methods for Semi-active Tuned Vibration Absorbers, *Journal of Vibration and Control*, 10, pp.163~174.  
 Kim, H.S., Kang, J.W. (2012) Semi-active Fuzzy Control of a Wind-excited Tall Building using Multi-objective Genetic Algorithm, *Engineering Structures*, 41, pp.242~257.  
 Moon, K.S., Connor, J.J., Fernandez, J.E. (2007) Diagrid Structural Systems for Tall Buildings: Characteristics and Methodology for Preliminary Design, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 16, pp.205~230.  
 Ok, S.Y., Park, K.S., Song, J.H, Koh, H.M. (2008) Multi-objective Integrated Optimal Design of Hybrid Structure-damper System Satisfying Target Reliability, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 12(2), pp.9~22.  
 Park, K.S., Koh, H.M. (2004) Preference Based Optimum Design of an Integrated Structural Control System using Genetic Algorithms, *Advances in Engineering Software*, 35(2), pp.85~94.  
 Park, K.S., Koh, H.M., Hahm, D.G. (2004) Integrated Optimum Design of Viscoelastically Damped Structural Systems, *Engineering Structures*, 26, pp.581~591.  
 Park, K.S., Koh, H.M., Ok, S.Y (2003) Integrated Optimal Design of Hybrid Structural Control System using Multi-stage Goal Programming Technique, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 7(5), pp.93~102.  
 Ramallo, J.C., Johnson, E.A., Spencer Jr., B.F. (2002) "Smart" Base Isolation Systems, *Journal of Engineering Mechanics*, 128(10), pp.1088~1100.  
 Schaffer, J.D. (1985) Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms, Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms, Hillsdale, New Jersey,



pp.93~100.

**Sues, R.H., Mau, S.T., Wen, Y.K.** (1988) System Identification of Degrading Hysteretic Restoring Forces, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 114(5), pp.833~846.

**Varadarajan, N., Nagarajaiah, S.** (2004) Wind Response Control of Building with Variable Stiffness Tuned Mass Damper using Empirical Mode Decomposition/hilbert Transform, *J. Eng. Mech.*, 130(4),

pp.451~458.

**Wittig, L.E., Sinha A.K.** (1975) Simulation of Multicorrelated Random Processes using the FFT Algorithm, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 58(3), pp.630~633.

**Zhou, Y., Kijewski, T., Kareem, A.** (2003) Aerodynamic Loads on Tall Buildings: An Interactive Database, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 129(3), pp.394~404.

## 요 지

초고층 건물의 구조설계시 풍하중에 의한 횡방향 변위를 적절한 값 이내로 줄이는 것이 가장 중요한 문제 중에 하나이다. 이를 위해서 추가적인 감쇠기 및 진동제어장치를 사용하는 방법이 일반적으로 고려되고 있다. 이 때 일반적으로 구조물의 특성은 변화없이 추가되는 제어장치에 대해서만 최적설계를 수행하게 된다. 본 연구에서는 구조물과 스마트 제어장치의 다목적 통합 최적화를 통하여 추가되는 스마트 제어장치로 인하여 구조물의 물량을 줄일 수 있는 가능성을 검토하였다. 이를 위하여 다이어그리드 구조시스템이 적용된 60층 초고층 건물을 예제 구조물로 선택하였고, 인공 풍하중에 대한 풍응답을 검토하였다. 스마트 제어장치로는 TMD에 MR 감쇠기를 설치한 스마트 TMD를 사용하였다. 구조물의 응답과 구조물량 및 제어장치의 용량을 동시에 줄이는 것이 필요하므로 본 연구에서는 다목적 유전자알고리즘을 적용하였다. 수치해석결과 제어성능목표를 만족시키면서 구조물의 물량과 제어장치의 용량을 적절하게 줄일 수 있는 다양한 설계 최적안을 얻을 수 있었다.

**핵심용어** : 다이어그리드 구조시스템, 스마트 TMD, 진동제어, MR 감쇠기, 다목적 최적화, 유전자알고리즘