

# 경사진 고층건물의 진화최적화 알고리즘에 기반한 지진응답 제어

## Seismic Response Control of Tilted Tall Building based on Evolutionary Optimization Algorithm

김 현 수\*  
Kim, Hyun-Su

강 주 원\*\*  
Kang, Joo-Won

### Abstract

A tilted tall building is actively constructed as landmark structures around world to date. Because lateral displacement responses of a tilted tall building occurs even by its self-weight, reduction of seismic responses is very important to ensure structural safety. In this study, a smart tuned mass damper (STMD) was applied to the example tilted tall building and its seismic response control performance was investigated. The STMD was composed of magnetorheological (MR) damper and it was installed on the top floor of the example building. Control performance of the STMD mainly depends on the control algorithm. Fuzzy logic controller (FLC) was selected as a control algorithm for the STMD. Because composing fuzzy rules and tuning membership functions of FLC are difficult task, evolutionary optimization algorithm (EOA) was used to develop the FLC. After numerical simulations, it has been seen that the STMD controlled by the EOA-optimized FLC can effectively reduce seismic responses for the tilted tall building.

*Keywords : Seismic response reduction, Tilted tall building, Smart TMD, Evolutionary Optimization, Soft computing*

### 1. 서론

근래에 들어서 전 세계적으로 다양한 형태의 비정형 구조물이 건설되어 랜드마크 건물로서 도시의 홍보 및 많은 경제적 효과를 보고 있다. 특히 3T (Twisted, Tapered, Tilted)로 크게 나누어 질 수 있는 비정형 초고층 건물이 최근에 다수 건설되어 건축구조물 설계에 혁신적인 성과물들이 나타나고 있다<sup>1)-3)</sup>. 유명한 피사의 사탑과 같이 구조물이 기울어지기 시작하면 구조적으로 심각한 문제가 발생한 것으로 판단할 수 있고 이에 대한 보완책이 적용되는 것이 일반적이다. 그러나 최근에는 고층건물을 의도적으로 경사지게 설계하여 건물의 외형에 드라마틱한 효과를 나타내고 있다. 이러한 예의 대표적 사례를 <Fig. 1>에 나타내었다.



(a) capital gate (b) signature tower  
<Fig. 1> Examples of tilted tall buildings

고층건물을 설계할 때 일반적으로 매우 큰 중력하중과 횡방향 하중에 대하여 안전성을 확보하는 것이 필요하다. 따라서 고층건물을 <Fig. 1>에 나타낸 것과 같이 의도적으로 경사지게 설계한다면 곧바로 선 일반 고층건물에 비해 심각한 구조적 문제가 발생할 수 있으므로 매우 주의 깊은 구조적 검토가 필요하다.

\* 종신회원, 선문대학교 건축학부 교수, 공학박사  
Division of Architecture, Sunmoon University  
\*\* 교신저자, 종신회원, 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사  
School of Architecture, Yeungnam University  
Tel: 053-810-2429 Fax: 053-810-4625  
E-mail: kangj@ynu.ac.kr

Moon(2014)은 경사진 고층건물에 가새튜브, 다이아그리드 및 아웃리저시스템을 적용하여 각 구조시스템의 구조적 성능을 해석적으로 검토하였다. 이를 위해 기울어진 경사각도를 변경하는 매개변수 연구를 수행하였고 경사각도가 클수록 아웃리저시스템이 횡변위 제어에 우수한 성능을 나타내는 것으로 확인하였다. Scott et al.(2007)은 Twisted, Tapered 및 Tilted 고층 건물의 경제적 설계를 위한 고려사항 및 설계방법을 실제로 건설된 구조물을 분석하여 제시하였다. Schofield(2012)는 Abu Dhabi에 있는 <Fig. 1(a)>에 나타난 Capital Gate 건물에 대하여 구조적 특성 및 그에 따른 거동을 상세히 분석하였고 수직 포스트텐션 기법을 코어에 적용하여 경사진 건물의 안전성을 높이는 방법에 대해 소개하였다. Kim & Jung(2013)은 다양한 형태의 경사진 구조물에 대해서 임의의 기동을 제거한 여러 시나리오를 상정하여 연쇄붕괴저항성을 평가하였다. 이를 위해 비선형 정적 및 동적해석을 수행하였고 아웃리저 시스템, 튜브 구조 시스템, 다이아그리드 시스템의 저항성을 비교하였다. 이와 같이 기존의 경사진 고층건물에 관한 연구는 대부분 구조적 특성 및 거동을 평가하고 분석하는 분야에 집중되어 있는 것을 알 수 있다.

일반적으로 고층건물의 구설설계를 수행할 때 지진 및 풍하중과 같은 횡방향 하중에 대한 구조물의 횡변위 및 층간변위를 설계기준을 만족시키도록 계획하는 것이 매우 중요하고 어려운 문제이다. 경사진 고층건물은 경사로 인해 발생하는 편심 때문에 횡하중 뿐만 아니라 종력하중에 의해서도 횡변위가 발생한다. 따라서 기존의 고층건물에 사용되는 아웃리저 시스템, 튜브구조 시스템, 다이아그리드 시스템 등의 구조시스템만으로 구조물의 횡방향 지진응답을 설계기준 이하로 저감시키는 것은 쉽지 않은 문제이다. 따라서 경사진 고층건물의 지진응답 저감을 위한 추가적인 구조제어시스템을 사용하는 것이 필요하다.

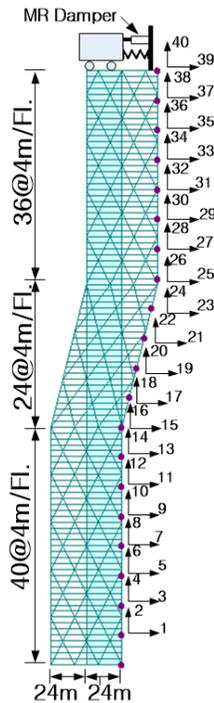
지진하중을 받는 고층건물의 횡방향 동적응답을 저감시키기 위한 구조제어장치로는 비교적 단순한 장치로 효과적인 제어성능을 나타내는 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper, TMD)가 널리 사용되고 있다 (Elias & Matsagar, 2017). 고층건물의 횡방향 지진응답을 저감시키기 위해 사용되는 TMD는 제어효과를 극대화시키기 위하여 일반적으로 고층건물의 최상층에 설치된다. 경사

진 건물의 지진응답을 저감시키기 위하여 최상층에 TMD가 설치된다면 추가적인 질량이 편심하중으로 작용하여 구조적으로 좋지 않은 영향을 미치게 되므로 TMD의 질량을 가능한 줄이는 것이 좋다. 그러나 TMD의 질량이 줄어들게 되면 제어성능이 저감되므로 적절한 질량을 선택하는 것이 필요하다.

최근에 기존의 TMD를 구성하는 수동 감쇠기를 대신하여 MR (Magneto-Rheological) 댐퍼 또는 ER (Electro-Rheological) 댐퍼와 같은 스마트 감쇠기를 사용하여 제어성능을 개선한 스마트 TMD를 사용하여 구조물의 동적응답을 제어하고자하는 연구가 다수 수행되고 있다<sup>8)-10)</sup>. 일반적으로 스마트 TMD는 질량을 사용한 전통적인 수동 TMD에 비하여 더 우수한 제어성능을 나타내는 것으로 알려져 있다. 따라서 스마트 TMD를 사용하면 더 적은 질량을 사용해도 수동 TMD와 비슷한 지진응답 제어성능을 나타낼 수 있을 것이라고 추측할 수 있다. 이렇게 지진응답 제어를 위해 동조질량감쇠기를 추가하는 과정에서 더 적은 추가질량을 사용하는 것은 상부층 편심을 가진 경사진 고층건물에 매우 유리하게 작용할 것이다. 따라서 본 연구에서는 경사진 고층건물에 스마트 TMD를 적용하여 지진응답 제어성능을 검토하였고 수동 TMD와 비슷한 제어성능을 목표로 한다면 수동 TMD 대비 질량의 크기를 얼마나 저감시킬 수 있는지 분석하였다. 스마트 TMD를 구성하기 위해서 널리 사용되고 있는 스마트 감쇠기인 MR 댐퍼를 사용하였고 100층의 경사진 고층 예제구조물의 최상층에 설치하였다. 100층 예제구조물을 해석할 때 일반적인 유한요소해석모델을 사용하면 수치해석에 매우 많은 시간이 소요되므로 행렬응축기법을 이용하여 자유도수를 저감시킨 응축모델을 사용하였다. 스마트 TMD의 제어성능은 적용되는 제어알고리즘에 의해서 크게 좌우된다. 본 연구에서는 스마트 TMD의 제어를 위해 퍼지논리제어기(Fuzzy Logic Controller, FLC)를 사용하였고 이 제어기를 최적설계하기 위하여 진화최적화기법(Evolutionary Optimization Method, EOM)<sup>11)</sup>을 적용하였다.

## 2. 예제구조물 및 지진하중

본 연구에서는 경사진 고층건물에 대한 스마트 TMD의 제어성능 평가를 위해서 100층의 예제구조물을 구성하였고 이를 (Fig. 2)에 나타내었다. 각 층의 층고는 4m로 하여 건물의 전체 높이는 400m로 하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 건물의 폭이 48m이고 코어의 폭은 24m로 두어서 건물의 세장비는 8.33으로 계산된다. 따라서 예제구조물은 비교적 높은 세장비를 가지고 있으므로 풍하중 및 지진하중과 같은 횡력하중에 민감한 구조물이라고 판단할 수 있다. 전반적인 횡력저항시스템은 그림에 나타난 바와 같이 다이아그리드 구조시스템을 적용하였다. 코어의 위치 및 형태는 경사진 부분에서도 변화 없이 전 층에 걸쳐서 일정하게 모형화하였다. 따라서 건물의 사용공간은 저층부에서는 코어의 왼편에 존재하고 고층부에서는 코어의 오른편에 위치한다.



(Fig. 2) Example building with DOF number

그림에서 볼 수 있듯이 예제구조물은 최하층에서 40층까지 경사가 없는 일반적인 형태의 구조물이고 41층부터 64층까지 경사진 형태로 모형화되며 그 이상의 층에서는 다시 경사 없이 수직방향으로 곧게 모형화된다. 경사진 고층 예제구조물의 외형은 (Fig. 1(b))에 나타난

Signature tower의 일부분과 비슷한 것을 알 수 있다. 경사진 부분의 기울어진 각도는  $14^\circ$ 이며 매 층마다 평면이 1m씩 오른쪽으로 평행 이동하여 위치하게 된다. 100층 경사진 예제구조물의 지진응답제어를 위한 스마트 TMD는 그림에 나타난 바와 같이 건물의 최상층에 설치하였다. 예제구조물의 전체 질량은 23,200ton이고 고유치해석을 수행한 결과를 살펴보면 1차에서 3차 모드까지의 고유진동주기가 각각 11.80초, 2.38초, 1.15초로 나타났다.

그림에 나타난 100층 예제구조물을 일반적인 유한요소 해석모델로 모형화하면 수천 개의 자유도를 가진 해석모델이 생성된다. 이러한 일반적인 유한요소 해석모델을 사용해서 시간이력해석과 같은 수치해석을 수행한다면 진화최적화작업을 수행할 때 수십만 번에 달하는 시간이력해석과정이 필요하므로 엄청난 해석시간이 소요될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 (Fig. 2)에 나타난 바와 같이 5층마다 수직 및 수평자유도 2개씩 사용하여 전체 40개의 자유도를 가진 응축해석모델을 개발하여 사용하였다.

100층의 경사진 예제구조물의 일반적인 유한요소 해석모델을 사용하여 수치해석을 수행하기 위해서는 정적 평형방정식을 구성해야하는데 이를 행렬응축 후 존재하는 40개의 자유도(c)와 응축되어 사라지는 자유도(i)로 정리하여 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ii} & \mathbf{K}_{ic} \\ \mathbf{K}_{ci} & \mathbf{K}_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{D}_i \\ \mathbf{D}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_i \\ \mathbf{A}_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 첨자 i는 응축되는 자유도, c는 응축 후 해석에 사용되는 자유도를 의미한다. 식 (1)에서 정적행렬응축기법에 의하여 해석에 사용하지 않는 자유도를 소거하고 해석에 사용되는 40개의 자유도로 표시하면 다음과 같다.

$$\mathbf{K}_{cc}^* \mathbf{D}_c = \mathbf{A}_c^* \quad (2)$$

여기서,  $\mathbf{A}_c^* = \mathbf{A}_c - \mathbf{K}_{ci} \mathbf{K}_{ii}^{-1} \mathbf{A}_i$ ,  $\mathbf{K}_{cc}^* = \mathbf{K}_{cc} - \mathbf{K}_{ci} \mathbf{K}_{ii}^{-1} \mathbf{K}_{ic}$ 이다. 행렬  $\mathbf{K}_{cc}^*$ 는 살아남은 40개의 자유도에 대한 강성행

렬을 의미하고 해석시에는 이 자유도만 고려된다. 남아 있는 40개의 자유도에 대한 변위( $\mathbf{D}_c$ )가 구해지면 아래의 식 (3)의 관계를 이용하여 응축된 자유도에 대한 변위를 얻을 수 있다. 이 식은 식(1)을  $\mathbf{D}_i$ 에 대해서 풀면 얻을 수 있다. 또 응축기법을 사용할 때 응축되는 자유도에 가해지는 정적하중은 하중응축을 통하여 구조물에 미치는 영향을 정확히 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{D}_i = \mathbf{K}_{ii}^{-1}(\mathbf{A}_i - \mathbf{K}_{ic}\mathbf{D}_c) \quad (3)$$

경사진 예제구조물 해석모델의 동적평형방정식도 응축 후 제거되는 자유도와 해석에 사용되는 40개의 자유도로 나누어 표현하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ii} & \mathbf{M}_{ic} \\ \mathbf{M}_{ci} & \mathbf{M}_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{D}}_i \\ \ddot{\mathbf{D}}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ii} & \mathbf{K}_{ic} \\ \mathbf{K}_{ci} & \mathbf{K}_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{D}_i \\ \mathbf{D}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_i \\ \mathbf{A}_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서  $\mathbf{D}$ 와  $\ddot{\mathbf{D}}$ 는 각각 변위벡터, 가속도 벡터이고  $\mathbf{A}$ 는 하중벡터이다. Guyan의 행렬응축기법에 따르면 새로운 운동방정식은 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$\mathbf{M}_{cc}^* \ddot{\mathbf{D}}_c + \mathbf{K}_{cc}^* \mathbf{D}_c = \mathbf{A}_c \quad (5)$$

여기서 응축된 강성행렬  $\mathbf{K}_{cc}^*$  및 질량행렬  $\mathbf{M}_{cc}^*$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{K}_{cc}^* = \mathbf{K}_{cc} - \mathbf{K}_{ci} \mathbf{K}_{ii}^{-1} \mathbf{K}_{ic} \quad (6)$$

$$\mathbf{M}_{cc}^* = \mathbf{M}_{cc} + \mathbf{T}_{ic}^T \mathbf{M}_{ic} + \mathbf{M}_{ci} \mathbf{T}_{ic} + \mathbf{T}_{ic}^T \mathbf{M}_{ii} \mathbf{T}_{ic} \quad (7)$$

여기서,  $\mathbf{T}_{ic} = -\mathbf{K}_{ii}^{-1} \mathbf{K}_{ic}$ 의 관계를 갖는다. 그리고 응축된 자유도의 변위는 남아있는 자유도에 대한 변위를 이용하여 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{D}_i = \mathbf{T}_{ic} \mathbf{D}_c \quad (8)$$

앞에서 나타낸 정적행렬응축과정에서는 어떠한 가정

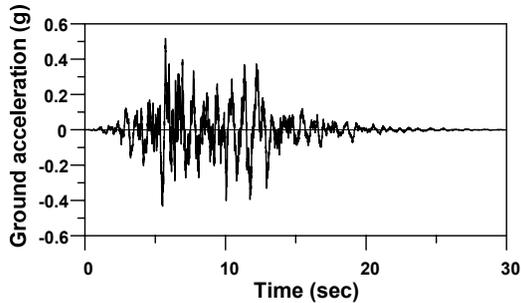
을 하지 않고 일반적인 방법으로 식을 전개하여 유도하기 때문에 응축한 해석모델을 사용한 평형방정식의 해와 응축하지 않은 일반 유한요소해석모델을 사용한 평형방정식의 해가 정확히 같게 된다. 그러나 동적행렬응축은 응축 후 사용하는 40개의 자유도 변위에 의해서 응축된 변위가 결정된다는 가정을 기반으로 유도한 식 (8)을 사용하고 있는데 이러한 가정은 응축되어 삭제되는 자유도에 하중이 가해지지 않고 있을 때만 유효하다. 따라서 동적행렬응축을 사용하게 되면 이러한 원인에 의하여 오차가 발생된다. 따라서 원래의 전체 유한요소 해석모델과 응축된 모델과의 해석오차가 허용할 수 있는 범위에 있는지 확인하는 것이 필요하다. 또한 응축 후 남아있는 해석에 사용할 자유도를 어떻게 선택하는가에 따라서 표현할 수 있는 모드형상이 달라지므로 동적행렬응축에서는 적절한 자유도를 선택하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서 사용하는 예제해석모델은 세장비가 매우 큰 모델로서 5층마다 수직 및 수평방향 자유도를 사용하면 건물의 전체적인 동적거동을 표현하는데 충분하다고 판단된다.

경사진 고층 예제구조물에 대한 스마트 TMD의 동적응답 제어성능을 평가하기 위해서는 적절한 지반가속도를 사용하여 수치해석을 수행하는 것이 필요하다. 인공 지진반가속도를 생성하는 여러 가지 방법 중에서 본 연구에서는 Nagarajaiah & Narasimhan(2006)의 연구에서 사용된 필터를 적용한 방법을 사용하였다. 이 필터는 강진지역의 지진하중 특성을 잘 표현하는 것으로 알려져 있고 이러한 지진의 주파수특성을 적절히 표현할 수 있도록 식 (9)에 나타낸 수식의 필터를 사용하였다.

$$F(s) = \frac{4\zeta_g \omega_g s}{s^2 + \zeta_g \omega_g s + \omega_g^2} \quad (9)$$

여기서,  $\omega_g = 2\pi \text{ rad/s}$ 이고  $\zeta_g = 0.3$ 의 값을 적용하여 필터링을 하였다. 인공 지반가속도의 최대값(Peak ground acceleration, PGA)은 약 0.5g를 나타내도록 하였고 지반가속도의 길이는 30초, 시간간격은 0.005초를 갖도록 모형화 하였다. 본 연구에서는 인공 지반가속도를 3개 생성하여 수치해석에 사용하였고 생성한 인공 지반가속도 중 하나의 시간이력을 <Fig. 3>에 나타내었

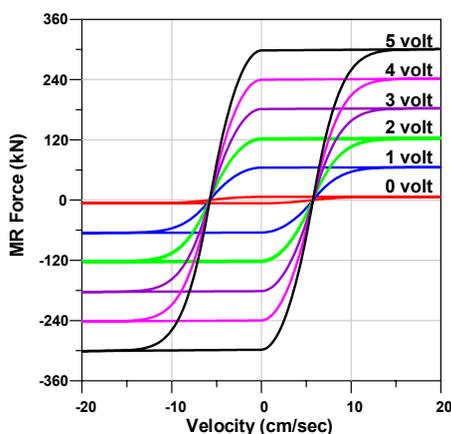
다. 인공 지진가속도를 생성할 때 백색잡음(white noise)을 식 (9)에 나타난 필터에 통과시킨 후 생성한 지반가속도가 일반적인 지진하중의 형상과 비슷해지도록 시간이력 데이터에 포락선(envelope)을 적용시켰다.



〈Fig. 3〉 Filtered artificial earthquake

### 3. 스마트 TMD 및 제어알고리즘 진화최적화

본 연구에서는 〈Fig. 2〉에서 볼 수 있듯이 MR 감쇠기를 사용하여 스마트 TMD를 구성하였고 이는 전통적인 수동 TMD에서 점성감쇠기를 MR 감쇠기로 대체한 것과 같다. MR 감쇠기의 비선형 동적거동을 모사하기 위해서 가장 널리 사용되고 있는 Bouc-Wen 모델<sup>13)</sup>을 사용하였고 조화하중에 대한 이 모델이 생성하는 MR 감쇠기의 힘-속도 관계 이력 그래프를 〈Fig. 4〉에 나타내었다.



〈Fig. 4〉 Force-velocity relationship of MR damper

본 연구에서 사용한 스마트 TMD를 구성하는 MR 감쇠기의 최대 용량은 약 300kN이고 이는 〈Fig. 4〉를 통

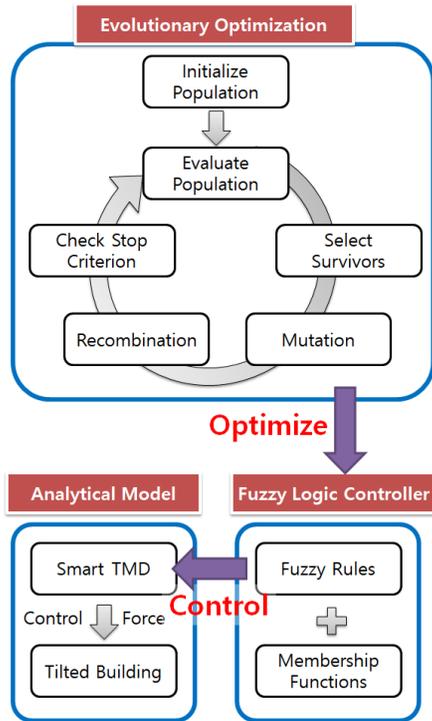
해서 확인할 수 있다. MR 감쇠기로 전달되는 명령전압의 범위는 최소 0V에서 최대 5V이고 그림에 1V 간격으로 MR 감쇠기의 제어력을 나타내었다. 0V일 때의 감쇠력은 약 10kN으로 나타났다. 본 연구에서 사용하는 예제구조물은 세장비가 상대적으로 큰 건물에 속하므로 이러한 건물의 동적거동은 주로 1차 고유진동 모드에 의해서 크게 영향을 받게 된다. 따라서 일반적인 고층건물의 1차 모드 거동에서 가장 큰 변위를 나타내는 최상층에 스마트 TMD를 설치하였고 스마트 TMD의 고유진동주기를 예제 구조물의 1차 모드 공진동주기인 11.80초가 되도록 조율하였다. 예제구조물에 설치된 스마트 TMD의 질량은 전체 건물의 질량대비 약 3%의 질량비를 갖도록 구성하였다.

본 연구에서 스마트 TMD를 구성하는 MR 감쇠기는 비선형성이 크기 때문에 이러한 복잡하고 명확하지 않은 상황에서 좋은 제어성능을 보여주는 퍼지논리제어기(Fuzzy Logic Controller, FLC)를 사용하였다. 퍼지논리제어기의 출력은 스마트 TMD를 구성하는 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압으로 하였고 입력은 경사진 예제 고층구조물의 최상층 변위와 스마트 TMD의 최상층 대비 상대속도로 하였다. 퍼지논리제어기는 실시간으로 변하는 두 입력데이터를 기반으로 구성된 퍼지규칙에 따라서 간단한 계산으로 쉽게 출력값이 명령전압을 생성한다. 퍼지논리제어기의 출력범위는 앞서 설명한 바와 같이 MR 감쇠기의 작동 범위인 0V-5V로 하였고 이 사이에서 연속적인 출력값을 계산하므로 널리 사용되는 다양한 on-off 형태의 제어알고리즘에 비해서 더 정밀한 제어가 가능하다.

퍼지논리제어기를 설계하기 위해서는 전술한 최상층 변위 및 스마트 TMD 상대속도의 입력변수와 명령전압의 출력변수에 대한 소속함수(membership function)를 절절하게 설계해야 하고 이 소속함수들 간의 관계를 퍼지제어규칙(fuzzy rules)으로 연결시켜주어야 한다. 이러한 과정을 거치는 퍼지논리제어기의 최적설계는 전문가의 지식이 필요하고 많은 시행착오과정을 거치게 되므로 엄청난 노력과 시간이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 진화최적화 알고리즘을 사용하여 퍼지논리제어기를 최적설계하였으며 이 과정을 〈Fig. 5〉에 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 진화최적화기법은 자연계의 생물유전학에 기본을 둔 이론으로 다수의 개체를 사용

하여 병렬적이고 전역적인 탐색알고리즘으로서 적자생존 이론을 기본개념으로 하여 세대가 지날수록 우수한 개체만 살아남게 된다. 여기서 각각의 개체는 스마트 TMD를 제어하는 퍼지논리제어기를 의미하며 얼마나 우수한 개체인가를 판단하는 기준은 구조물의 응답으로 계산하는 목적함수이고 이를 <Table 1>에 나타내었다.



<Fig. 5> Evolutionary optimization process of control algorithm

진화최적화기법은 <Fig. 5>에서 보는 바와 같이 모든 개체를 초기화한 이후에 매 세대마다 개체의 우수성을 정의한 목적함수를 바탕으로 평가하고 우수한 개체를 선택한다. 각 개체는 염색체로 암호화되어 기록되고 다음 세대로 넘어갈 때 염색체에 돌연변이나 재결합을 통해서 자식 세대를 구성하게 된다. 그림에서 볼 수 있듯이 퍼지논리제어기의 출력은 스마트 TMD를 제어하는 명령전압이므로 진화최적화 알고리즘에서 각 개체의 우수성을 평가할 때는 앞서 생성한 3개의 인공지진하중을 사용해서 경계비선형 시간이력해석을 수행하게 된다. 이 과정에서 많은 시간이 소요되므로 본 연구에서는 전술한 바와 같이 자유도 응축모델을 사용하였다. <Table 1>에 나타낸 목적함수를 보면 최적 수동 TMD를 사용한 구조물의 최대치 응답을 기준으로 스마트 TMD를 적용하였을 때 최대치 응답을 정규화한 것을 볼 수 있다. 따

라서 목적함수 값이 1보다 작으면 작을수록 스마트 TMD의 제어성능이 최적 수동 TMD의 제어성능보다 더 우수한 것을 나타낸다. 목적함수에서 사용한 구조물 응답은 최상층의 최대치 변위응답 및 가속도응답으로서 일반적으로 두 응답은 서로 상충하는 관계로 알려져 있다.

<Table 1> Multi-objective functions

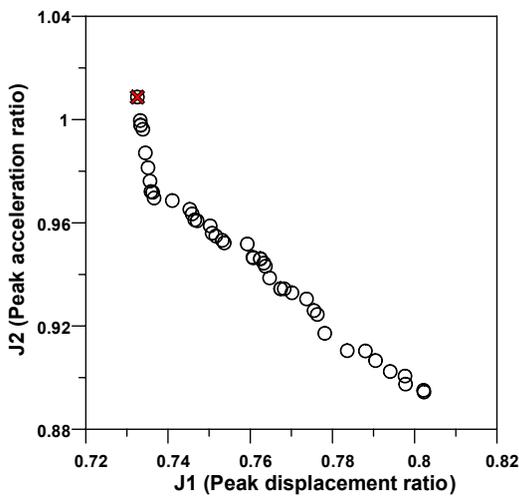
Objective function	Description
J1	$\frac{\text{Peak displacement of example building with STMD}}{\text{Peak displacement of example building with TMD}}$
J2	$\frac{\text{Peak acceleration of example building with STMD}}{\text{Peak acceleration of example building with TMD}}$

#### 4. 지진응답 제어성능 평가

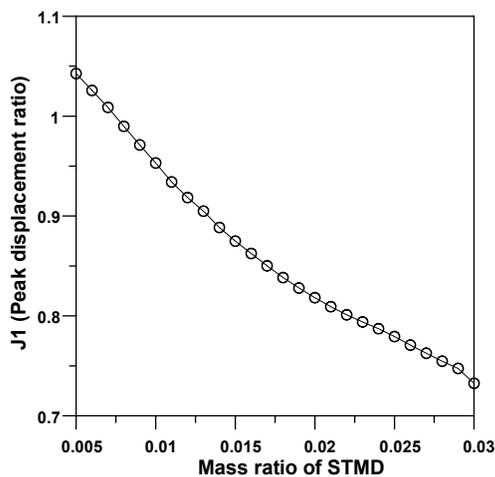
스마트 TMD를 이용한 경사진 100층 예제구조물의 지진응답 제어성능평가는 MATLAB을 이용하여 수행하였으며 전술한 진화최적화 연산을 1000세대에 걸쳐서 수행한 후 얻는 파레토 최적해 결과를 <Fig. 6>에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 최대 변위응답과 가속도응답은 반비례관계로서 서로 상충하는 것을 알 수 있다. 스마트 TMD는 경사진 고층건물의 지진응답제어시 변위응답을 저감시키는데 매우 우수한 제어성능을 나타내지만 가속도응답은 변위응답에 비해 상대적으로 부족한 제어성능을 나타내었다. 그러나 수동 TMD에 비해서는 최대 10%이상의 제어성능을 나타내었다. <Fig. 6>에 나타낸 파레토 최적해 집합 중에서 구조물의 안전성에 중요한 영향을 미치는 변위응답을 가장 효과적으로 제어할 수 있는 퍼지논리제어기를 선택하였고 이를 'X'로 나타내었다.

선택한 퍼지논리제어기의 J1과 J2 값은 각각 0.73과 1.01로서 제한한 스마트 TMD가 최적 수동 TMD대비 가속도응답은 비슷하게 제어하면서 변위응답은 약 27% 더 저감시키는 제어성능을 발휘한다. 본 연구의 목적은 경사진 고층건물의 지진응답제어를 위해 사용하는 스마

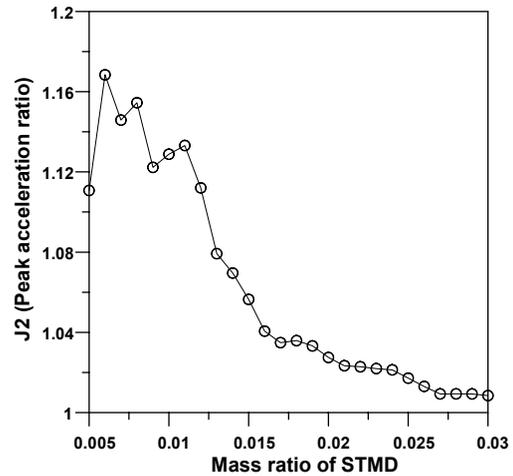
트 TMD의 질량을 줄일 수 있는 가능성을 검토하는 것이므로 스마트 TMD의 질량비 변화에 따른 목적함수값의 변화를 <Fig. 7>과 <Fig. 8>에 나타내었다. 최대 변위 응답인 J1은 질량비를 줄임에 따라서 지속적으로 늘어나는 반비례의 경향을 나타내었다. 가속도응답을 나타내는 J2도 질량비가 줄어들에 따라서 응답이 증가하다가 1%이하에서는 불규칙적으로 변하는 것을 알 수 있다. 경사진 구조물의 구조적 안전성에는 최대변위가 가장 큰 영향을 미치므로 J1이 1이 되는 스마트 TMD의 질량비를 검토한 결과 0.7%와 0.8%의 질량비를 얻을 수 있었다. 선택된 스마트 TMD질량비의 지진하중별 제어성능을 확인하기 위하여 3%의 질량비를 가지는 최적 수동 TMD와 0.7% 및 0.8%의 질량비를 가지는 스마트 TMD의 응답을 <Table 2>에 비교하여 나타내었다.



<Fig. 6> Pareto optimal solutions



<Fig. 7> Variation of J1 due to mass ratio



<Fig. 8> Variation of J2 due to mass ratio

<Table 2> Variation of mass ratio

EQ.	Displacement (m)			Ratio	
	TMD-3	STMD-0.7	STMD-0.8	STMD-0.7 / TMD-3	STMD-0.8 / TMD-3
EQ1	0.958	0.963	0.951	1.005	0.993
EQ2	0.977	0.960	0.935	0.983	0.957
EQ3	0.867	0.900	0.884	1.038	1.019
Avg.	0.934	0.941	0.923	1.009	0.990

표를 보면 질량비 0.7%-0.8%를 갖는 스마트 TMD가 질량비 3%를 갖는 최적 수동 TMD와 비슷한 변위응답 제어성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 스마트 TMD를 사용하면 수동 TMD 대비 약 25%의 질량만 사용하여 비슷한 제어성능을 발휘할 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 특성은 자중에 의해서도 횡변위가 발생하는 특성을 가진 경사진 고층건물의 지진응답제어에 스마트 TMD가 매우 유용하게 사용될 수 있을 것임을 의미한다.

## 5. 결론

본 연구에서는 경사진 고층건물의 효율적인 지진응답 제어를 위한 스마트 TMD를 제안하였고 제어알고리즘을 최적설계하기 위하여 진화최적화 알고리즘을 적용하였다. 선택한 100층 예제구조물의 동적거동을 효과적으로 표현하기 위하여 응축해석 모델을 사용하였고 제어알고리즘으로는 퍼지논리제어기를 사용하였다. 수치해석결과 스마트 TMD는 최적 수동 TMD에 비하여 가속도응답은

비슷하게 유지하면서 변위응답은 약 27% 더 저감시키는 우수한 제어성능을 나타내었다. 스마트 TMD의 질량을 줄이는 매개변수 연구 결과 최적 수동 TMD에 비하여 약 25%의 질량만 사용하고자도 경사진 예제 고층구조물의 지진응답 제어성능을 비슷하게 나타낼 수 있었다. 이러한 특성으로 자중에 의해서도 횡변위가 발생하는 경사진 고층건물의 지진응답 제어에 스마트 TMD가 매우 유용하게 활용 될 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (NRF-2020R1A2B5B01002117)

### References

1. Moon, K.S., "Diagrid structures for complex-shaped tall buildings", *Procedia Engineering*, Vol. 14, pp. 1343-1350, 2011.
2. Golasz-Szolomicka, H., & Szolomicki, J., "Architectural and structural analysis of selected twisted tall buildings", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Czech Republic, Vol. 471, 2019.
3. Moon, K. S., "Comparative evaluation of structural systems for tilted tall buildings", *International Journal of High-Rise Buildings*, Vol. 3, No. 2, pp. 89-98, 2014.
4. Scott, D., Farnsworth, D., Jackson, M. & Clark, M., "The effects of complex geometry on tall towers", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 16, pp. 441-455, 2007.
5. Schofield, J., "Case Study: Capital Gate, Abu Dhabi", *CTBUH (Council on Tall Buildings and Urban Habit) Journal*, Vol. 2, pp. 12-17, 2012.
6. Kim, J.K. & Jung, M.K., "Progressive collapse resisting capacity of tilted building structures", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 22, No. 18, pp. 1359-1375, 2013.
7. Elias, S. & Matsagar, V., "Research developments in vibration control of structures using passive tuned mass dampers", *Annual Reviews in Control*, Vol. 44, pp. 129-156, 2017.
8. Kim, H.S. & Kang, J.W., "Seismic response control of retractable-roof spatial structure using smart TMD", *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, Vol. 16, No. 4, pp. 91-100, 2016.
9. Koo, J.H., "Using magneto-rheological dampers in semiactive tuned vibration absorbers to control structural vibrations", Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 2003.
10. Bathaei, A., Zahrai, S.M. & Ramezani, M., "Semi-active seismic control of an 11-DOF building model with TMD+MR damper using type-1 and -2 fuzzy algorithms", *Journal of Vibration and Control*, Vol. 24, No. 13, pp. 2938-2953, 2018.
11. Przyby, A., Szczypka, J. & Wang, L., "Optimization of Controller Structure Using Evolutionary Algorithm", *International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing*, pp. 261-271, 2015.
12. Nagarajaiah, S. & Narasimhan, S., "Smart base-isolated benchmark building. Part II: phase I sample controllers for linear isolation systems", *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 12, pp. 589-604, 2006.
13. Sueoka, T., Torii, S. & Tsuneki, Y., "The Application of Response Control Design using Middle-Story Isolation System to High-Rise Building", *The 13th World Conference on Earthquake Engineering*, 2004.

- Received : July 14, 2021
- Revised : August 3, 2021
- Accepted : August 3, 2021