

# 다목적 유전자알고리즘을 이용한 첨단기술산업 시설물의 스마트 미진동제어

## Smart Microvibration Control of High-Tech Industry Facilities using Multi-Objective Genetic Algorithm

김 현 수\*                      강 주 원\*\*                      김 영 식\*\*\*  
Kim, Hyun-Su                      Kang, Joo-Won                      Kim, Young-Sik

### Abstract

Reduction of microvibration is regarded as important in high-technology facilities with high precision equipments. In this paper, smart control technology is used to improve the microvibration control performance. MR damper is used to make a smart base isolation system and fuzzy logic control algorithm is employed to appropriately control the MR damper. In order to develop optimal fuzzy control algorithm, a multi-objective genetic algorithm is used in this study. As an excitation, a train-induced ground acceleration is used for time history analysis and three-story example building structure is employed. Microvibration control performance of passive and smart base isolation systems have been investigated in this study. Numerical simulation results show that the multi-objective genetic algorithm can provide optimal fuzzy logic controllers for smart base isolation system and the smart control system can effectively reduce microvibration of a high-technology facility subjected to train-induced excitation.

*Keywords : Multi-objective genetic algorithm, Smart control, Microvibration control, Fuzzy logic control, MR damper*

## 1. 서 론

우리나라의 대표적인 수출산업인 IT 분야의 첨단 제품은 글로벌 시장에서의 점유율이 꾸준히 증가하고 있는 상태이다. 국내기업의 세계 반도체(D램)시장 점유율이 60%를 넘어섰고 LCD도 55%를 돌파했을 정도로 국제시장에서 큰 영향력을 과시하고 있다. 이러한 IT 분야의 첨단 정밀제품들을 가공 및 검사하기 위해서는 가공 선풍 이상의 분해성능을 가진 고정밀도의 생산 및 검사장비가 필요하다. 이러한 고정밀도 생산 및 검사장비는 내외부로부터

입력되는 진동에 민감한 영향을 받는다.

지금까지 수행된 첨단기술산업 시설물의 미진동 제어에 대한 연구는 내부 및 외부 진동원에 의하여 유발되는 진동의 전파경로를 차단하는 기술개발에 초점이 맞추어져 있고 어느 정도 성공적인 성과를 얻을 수 있었다<sup>1,2)</sup>. 그러나 실제로 반도체나 TFT-LCD와 같은 첨단 IT 부품공장은 지진이나 태풍과 같은 외부 자연현상이 진동원이 되는 자연재해에 의하여 큰 피해를 입어왔다. 지진이 빈번하게 발생하는 주변의 일본이나 대만에서는 지진으로 인한 반도체 및 LCD공장이 많은 피해를 입어왔다. 지금까지는 지진발생이 빈번한 주변국가에서 반도체 및 TFT-LCD 공장의 피해로 반사이익을 많이 받아온 것이 사실이다. 그러나 최근 국내에서 발생하는 지진의 횟수와 규모로 볼 때 우리나라도 더 이상 지진의 안전지대가 아니며 이에 대한 대비를 철저히 하지 않으면 일본이나 대만의 사례처럼 첨단 IT 부품 산업에 큰 피해를 입을 가능성이 존재한다.

\* 정회원, 선문대학교 건축학부 조교수  
Division of Architecture, Sunmoon University  
\*\* 정회원, 영남대학교 건축학부 교수  
School of Architecture, Yeungnam University  
\*\*\* 교신저자, 정회원, 대구과학대학 건축인테리어과 부교수  
Dept. of Architecture & Interior Design, Daegu Science University  
Tel: 053-320-1182 Fax: 053-320-1777  
E-mail : yosikim@tsu.ac.kr

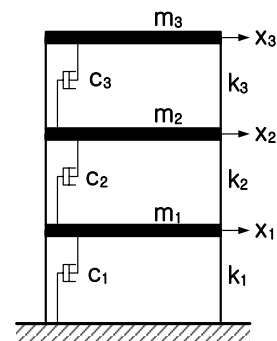
면진시스템은 구조물에 발생하는 지진하중에 의한 피해를 저감하기 위하여 널리 사용되고 있는 제어방법 중의 하나이다<sup>3)</sup>. 최근에는 과도한 면진층의 변위를 줄이면서도 구조물의 지진응답을 효과적으로 제어할 수 있는 스마트 면진시스템에 대한 연구가 수행되고 있고 실제 건물에 적용되는 사례를 통하여 그 효용성이 검증되고 있다<sup>4,6)</sup>. 그러나 지진응답 제어에 효과적인 성능을 나타내는 스마트 면진시스템이 미진동제어에 어떠한 성능을 나타내는 지에 대해서는 아직 충분히 연구되지 않은 상태이다.

따라서 본 논문에서는 스마트 면진시스템을 적용한 첨단기술산업 시설물에 대한 미진동 제어성능을 검토해보고자 한다. 본 논문에서는 MR 감쇠기와 같은 비선형성이 높은 제어장치에 효과적이라고 알려져 있는 퍼지제어알고리즘<sup>7)</sup>을 사용하였다. 퍼지제어알고리즘을 개발하기 위해서는 입출력 변수에 대한 소속함수를 결정해야 하고 이들 간의 관계를 퍼지제어규칙으로 연결시켜주어야 한다. 이러한 작업은 구조시스템의 동적특성과 제어시스템의 특성 및 제어알고리즘 간의 상호관계를 정확히 이해해야 할 수 있는 쉽지 않은 작업이고 반복적인 재설계로 인하여 많은 소요시간과 노력이 필요하게 된다. 따라서 본 논문에서는 여러 개의 목적을 동시에 최적화할 수 있는 다목적 유전자알고리즘을 사용하여 미진동제어를 위한 퍼지제어알고리즘을 최적화 하였다. 첨단부품 생산공장이 가동 중에 받는 외부하중으로 가장 일반적인 것은 차량이나 열차하중과 같은 교통하중이므로 본 연구에서는 인공열차하중을 사용하여 첨단시설물의 미진동제어를 수행하였다. 현재 일반적으로 널리 사용되고 있는 진동설계기준은 BBN (Bolt Beranek and Newman) 기준<sup>8,9)</sup>으로 1/3 옥타브밴드 속도 스펙트럼을 사용하여 첨단시설물 공장의 미진동 허용기준을 나타내고 있다. 본 논문에서는 수치해석결과 나타나는 진동수준을 BBN 기준을 바탕으로 검토하였다. 또한 스마트 면진시스템의 미진동제어성능을 객관적으로 분석하기 위하여 열차하중이 가해지는 고정기초구조물과 일반적인 LRB (Laminated Rubber Bearing) 면진시스템을 적용한 구조물의 동적응답을 비교하였다.

## 2. 예제구조물 및 인공열차하중

### 2.1 예제구조물의 구성

본 논문에서는 첨단기술산업 시설물의 미진동제어에 대한 성능평가를 수행하기 위하여 <Fig. 1>에 나타낸 3층 예제구조물을 선택하여 수치해석을 수행하였다. 일반적으로 IT관련 첨단부품 생산공장은 저층건물이 대부분이므로 본 논문에서 사용하는 3층 예제구조물은 적절하다고 판단된다. 예제구조물은 그림에 나타낸 바와 같이 각 층별 집중질량( $m_i$ )과 기둥강성( $k_i$ )으로 표현되는 전단빌딩모델을 사용하여 모형화 하였다. 따라서 층별 하나의 자유도로 모형화되어 고정기초 구조물은 3개의 자유도를 가지는 운동방정식으로 표현된다. 전단빌딩 예제구조물의 1, 2, 3층의 질량은 각각  $m_1=350,250\text{kg}$ ,  $m_2=262,690\text{kg}$ ,  $m_3=175,130\text{kg}$ 을 가지고 강성은  $k_1=4,728,400\text{kN/m}$ ,  $k_2=312,230\text{kN/m}$ ,  $k_3=157,610\text{kN/m}$ 이고, 감쇠값은  $c_1=4369\text{kNs/m}$ ,  $c_2=291.3\text{kNs/m}$ ,  $c_3=145.6\text{kNs/m}$ 를 갖는다. 이러한 특성치를 가지는 3층 예제구조물에 대하여 고유치해석을 수행한 결과 1, 2, 3차 모드의 고유진동수는 3.447, 7.372, 19.155 Hz로 계산되었다. 또한 예제구조물의 1, 2, 3차 모드의 감쇠비는 각각 1%, 2.14%, 5.56%로 두었다. 본 예제구조물의 1층의 강성이 상대적으로 큰 이유는 클린룸이 1층에 존재하기 때문이다.

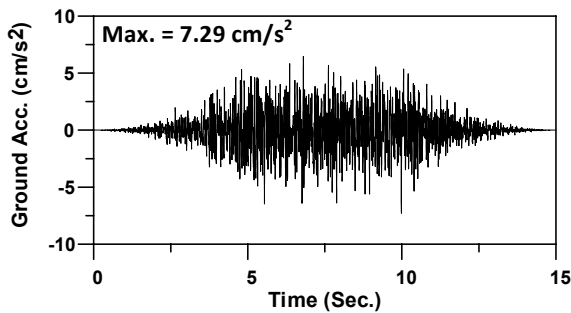


<Fig. 1> 3-story example building structure

### 2.2 인공열차하중의 생성

본 논문에서는 첨단제품 생산공장의 주변에서 상시 발생할 수 있는 교통하중 중에서 열차하중을 사용하여 스마트 면진시스템의 미진동제어성능을 검

토하였다. 열차에 의해서 유발되는 지반운동에 대한 연구가 여러 연구자들에 의해서 수행되었다<sup>10-12)</sup>. Tekemiya<sup>13)</sup>는 철로 근처에서 계측된 지반진동의 특성을 분석하였다. 철로 근처에서 계측된 지반가속도의 푸리에 스펙트럼은 주로 0-50Hz의 주파수성분을 가지고 있다. 그러나 저주파수 및 고주파수 성분은 철로에서의 길이가 멀어질수록 급격히 감쇠되어 사라진다. 철로에서 25m 떨어진 위치에서의 지반가속도 측정치는 주로 10-30Hz 사이의 주파수성분을 가지고 있다. 본 논문에서는 열차유발 지반운동을 생성하기 위하여 널리 사용되고 있는 수정된 Kanai-Tajimi 파워스펙트럼 필터를 이용하여 인공의 열차유발 지반운동 데이터를 생성한다. 본 연구에서는 선행연구<sup>17)</sup>에서 사용한 인공열차하중을 이용하였으며 하중의 지반운동 가속도를 <Fig. 2>에 나타내었다.



<Fig. 2> Train-induced ground motion

### 3. 스마트 미진시스템 및 미진동기준

#### 3.1 스마트 미진시스템의 구성

본 논문에서는 지진하중에 대하여 구조물의 피해를 저감시키기 위하여 가장 널리 사용되고 있고 그 효과가 검증된 제어장치인 미진시스템을 사용하여 첨단시설물을 위한 미진동 제어성능을 검토하여 보았다. 일반적인 수동 미진시스템을 구성하기 위해서 가장 널리 사용되고 있는 미진베어링인 LRB (Laminated Rubber Bearing) 미진시스템을 사용하였고 스마트 미진시스템을 구성하기 위해서 MR 감쇠기를 적용하였다. 미진시스템이 적용된 구조물의 특성은 앞에서 설명한 고정기초 구조물과 같다.

여기서 추가된 미진층의 질량은  $m_4=250,000\text{kg}$ 으로 하였다. 미진층의 강성( $k_4$ )은 미진된 구조물의 1차 모드 고유진동 주기가 1.5초가 되도록 조정하였고 미진층의 감쇠비는 2%로 두어 감쇠상수  $c_4$ 를 얻었다.

본 논문에서는 대표적인 스마트 제어장치 중에 하나인 MR 감쇠기를 사용하여 스마트 미진시스템을 구성하였다. MR 감쇠기는 작은 전력으로 변화시킬 수 있는 자기장에 반응하여 구조물에 가해지는 저항력의 크기를 실시간으로 조절할 수 있고 기계적으로 단순하면서도 빠른 반응속도를 가지고 외부 온도가 변하거나 불순물이 첨가되어도 항복응력의 변화가 거의 없이 일정한 성능을 유지하는 장점 때문에 최근에 많은 연구가 진행되고 있고 건축 및 토목구조물 제어에 다양한 형태로 활용되고 있다. 이러한 MR 감쇠기의 동적 거동을 모사하기 위한 수치해석 모델로서는 많은 연구자들에 의해서 널리 사용되고 있는 Bouc-Wen 모델<sup>14)</sup>을 사용하였다. 이 모델은 전단형태의 MR 감쇠기의 거동을 잘 모사하며 실제규모의 MR 감쇠기 모델링에도 효과적으로 적용될 수 있다고 알려져 있다. 본 연구에서 사용한 MR 감쇠기는 Bani-Hani와 Sheban의 연구<sup>15)</sup>에서 사용된 최대용량이 50kN을 가지도록 설계된 모델로서 입력전압이 0V일 때 passive-off 상태를, 5V일 때 passive-on 상태를 나타낸다. MR 감쇠기의 여러 가지 특성 중 제어성능을 결정하는 가장 중요한 요소는 passive-off 상태의 최대 제어력에 대한 passive-on 상태의 최대 제어력의 비로 나타내는 제어범위(dynamic range)이다. Bani-Hani와 Sheban의 연구에서 사용된 MR 감쇠기의 제어범위는 약 24이다. 본 연구에서는 열차진동을 받는 예제구조물의 미진동제어를 위해 최적의 제어성능을 나타내는 MR 감쇠기의 용량을 찾기 위하여 MR 감쇠기의 최대 제어용량을 변화시킨 파라미터 연구를 수행하였다. 이때 MR 감쇠기의 제어용량을 변화시켜도 제어범위는 24로 계속 유지하였다.

#### 3.2 BBN 진동설계기준

첨단시설물 기계장치의 미진동제어를 위하여 사용되고 있는 일반적인 진동기준이 여러 개 존재하

고 있다<sup>9)</sup>. 그 중에서 BBN 진동기준이 현재 실무에서 가장 널리 사용되고 있다. 첨단기계장치 시설물을 위한 BBN 진동기준은 1/3 옥타브밴드 속도 스펙트럼의 형태로 표현되며 VC-A에서 VC-E까지가 정밀진동기준에 해당한다. 여기서 1데시벨(dB)은 1  $\mu\text{inch/s}$ 와 상응한다.

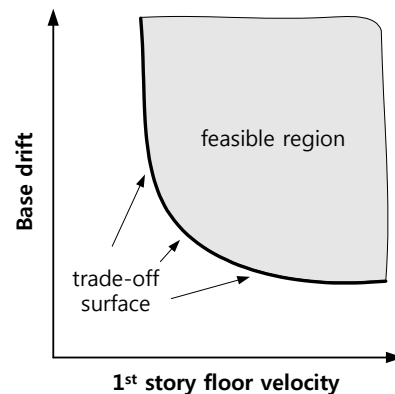
VC-A에서 VC-E의 기준곡선은 8에서 80Hz 진동수 구간에서 허용 RMS 속도가 2000  $\mu\text{inch/s}$  (50  $\mu\text{m/s}$ )부터 125  $\mu\text{inch/s}$  (3  $\mu\text{m/s}$ )까지 각각 대응하는 것을 볼 수 있다. 본 논문에서는 BBN 진동기준을 이용하여 각 시스템의 진동제어성능을 평가하므로 각각의 면진시스템이 설치된 구조물의 1층 속도시간이력을 먼저 구한 후 이 응답을 1/3 옥타브 밴드로 변환하여 표현한다. 수치해석을 통하여 얻은 속도응답 시간이력의 1/3 옥타브 밴드는 그것의 푸리에변환을 통하여 얻을 수 있다.

## 4. 다목적 유전자알고리즘을 이용한 퍼지제어기의 최적설계

### 4.1 다목적 최적화

스마트 면진시스템이 적용된 첨단기술산업 시설물의 미진동제어를 효과적으로 수행하기 위해서 가장 중요한 일 중의 하나가 MR 감쇠기를 적절하게 제어할 수 있는 제어알고리즘을 개발하는 것이다. 본 논문에서는 전술한 바와 같이 퍼지제어기를 사용하여 스마트 면진시스템을 제어한다. 스마트 면진시스템을 효과적으로 제어할 수 있는 퍼지제어기를 개발하는 것은 많은 경험을 가진 전문 엔지니어들에게도 많은 시간과 노력을 필요로 하는 일이다. 따라서 본 논문에서는 다목적 유전자알고리즘을 이용해서 퍼지제어기를 최적화한다. 일반적으로 스마트 면진시스템을 제어하는 제어알고리즘의 설계목적은 1층 바닥의 속도응답을 줄이는 것과 면진층의 변위 응답을 줄이는 것으로 크게 나눌 수 있다. 퍼지제어 알고리즘에 의해서 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압이 작을 때에는 MR 감쇠기의 감쇠력이 줄어들어서 면진층의 지반격리효과가 커져서 1층 바닥의 동적응답은 줄어드는 대신에 면진층의 변위가 증가하

게 될 것이다. 반대로 명령전압을 크게 해서 MR 감쇠기의 감쇠력을 증가시킨다면 면진층의 변위를 저감시킬 수 있지만 면진층에서의 지반격리효과가 줄어들어서 1층 바닥의 동적응답이 증가할 것이다. 따라서 이 문제는 하나의 목적을 만족시키는 것이 아니라 여러 개의 성능지표에 대하여 동시에 좋은 성능을 발휘할 수 있는 최적해를 찾는 다목적 최적화로 생각할 수 있다. 다목적 최적화의 기본적인 문제점은 목적들이 서로 상충한다는 것이다. 이러한 경우에는 각각의 목적들 사이에 상치관계(trade-off)가 존재하게 되는데 여기서 어떤 한 목적에 대한 성능향상은 다른 목적에 대한 손실 없이는 이루어질 수 없다. 이와 같이 스마트 면진시스템을 제어하는 문제에 있어서는 상치관계가 <Fig. 3>에 나타난 바와 같이 면진층의 변위와 1층 바닥의 동적응답(주로 속도) 사이에서 존재하게 된다.



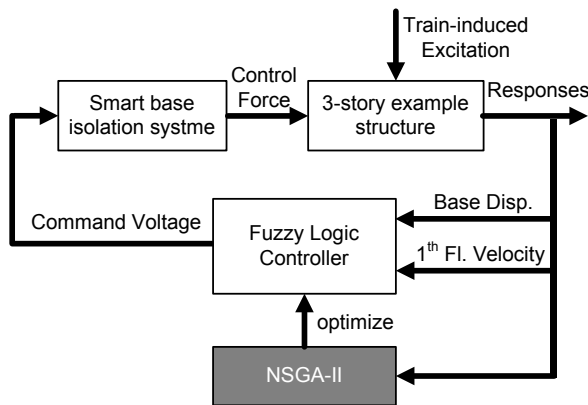
<Fig. 3> Trade-off of two objectives

본 논문에서는 다목적 최적화의 목적함수로서 예제구조물의 1층 RMS 속도와 면진층의 최대변위를 선택하였다. 다목적 최적화 문제에서 하나의 최적해를 찾는 것은 거의 불가능하고 일련의 서로 우열을 가릴 수 없는 해의 집합(파레토 최적해)이 존재하게 된다. 구조공학과 관련된 다목적 최적화문제를 해결하는데 있어서는 구조엔지니어가 한 개의 최적해보다는 구조설계의 대안으로서 파레토 최적해 집합에 더 큰 관심을 가질 것이다. 유전자알고리즘은 많은 수의 개체(해)들을 이용하여 최적화 문제를 해결하기 때문에 여러 개의 최적해를 동시에 찾는데 유전자알고리즘을 이용하는 것이 매우 자연스러운 일이

다. Schaffer가 다목적 최적화 문제에 유전자알고리즘을 적용한 이후로 많은 수의 다목적 유전자알고리즘이 제안되었다. 그 중에서 본 연구에서는 NSGA-II(a fast elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)를 이용하여 파레토 최적해 집합을 찾는다. Deb 등<sup>16)</sup>이 제안한 이 알고리즘은 기존의 알고리즘에 비하여 계산시간을 대폭 줄였고 추가적인 파라미터 없이도 개체의 다양성을 유지하기 위하여 혼잡도 비교연산자를 도입하였다.

#### 4.2 NSGA-II를 이용한 퍼지제어기의 최적화

본 논문에서는 전술한 바와 같이 퍼지제어기를 사용하여 스마트 면진시스템을 제어하고 이 제어기는 NSGA-II를 이용하여 최적화된다. NSGA-II를 이용하여 퍼지제어기를 최적화하는 과정의 개념도를 <Fig. 4>에 나타내었다.



<Fig. 4> Optimization flow of fuzzy controller

본 논문에서는 전술한 바와 같이 상충하는 두 개의 동적 응답 즉, 1층 가속도와 면진층 변위를 다목적 최적화의 목적함수로 선택하였다. 사용된 두 목적함수는 <Table 1>에 나타난 바와 같이 스마트 면진시스템이 설치된 구조물의 응답을 LRB가 설치된 구조물의 응답으로 나누어 정규화된 값으로 표현하였다.

유전자알고리즘에서 각각의 개체들은 퍼지제어기를 나타내고 암호화(encoding)는 이러한 퍼지제어기의 유전적 표현방법이라고 말할 수 있다. 퍼지제어기를 구성하는데 필요한 모든 정보는 염색체라고 불리는 하나의 구조에 암호화된다.

<Table 1> Multi-objective functions

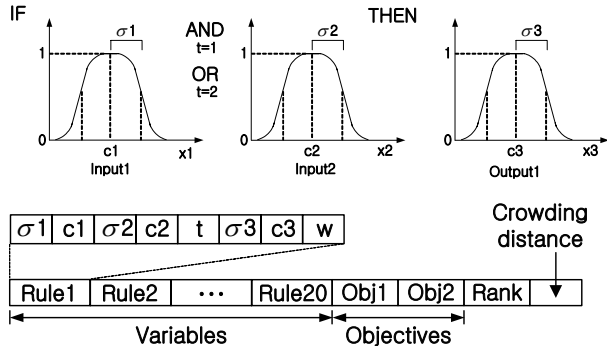
Objective function	Description
J1	$\frac{\text{Peak drift of isolator with smart isolation system}}{\text{Peak drift of isolator with passive isolation system}}$
J2	$\frac{1^{\text{th}} \text{ story RMS velocity with smart isolation system}}{1^{\text{th}} \text{ story RMS velocity with passive isolation system}}$

본 연구에서는 모든 입력과 출력을 표현하기 위하여 가우스 소속함수를 사용하였다. 가우스 소속함수의 형태는 식 (7)에 나타난 바와 같이 2개의 파라미터( $c$ 와  $\sigma$ )를 정의함으로써 결정된다. 여기서  $c$ 는 중앙부의 위치,  $\sigma$ 는 표준편차를 각각 나타낸다. 이 두 가지 파라미터를 적절히 조절함으로써 다양한 형태의 가우스 소속함수를 표현할 수 있고 이를 통하여 여러 가지 종류의 지식이 표현될 수 있다. 이 두 가지의 파라미터는 <Fig. 5>에서 보는 바와 같이 실수 표현방법으로 유전자에 암호화된다.

$$\mu = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right) \tag{1}$$

<Fig. 5>에 나타난 암호화 방법은 모든 염색체에 적용된다. 여기서 하나의 퍼지 규칙은 두 개의 입력( $x_1, x_2$ )과 하나의 출력( $x_3$ )으로 구성되어 있는 것을 알 수 있다. 두 개의 입력은 중앙부를 나타내는  $c_1, c_2$ 와 표준편차를 나타내는  $\sigma_1, \sigma_2$ 로 각각 구성되고 출력을 표현하기 위해서는  $c_3$ 와  $\sigma_3$ 가 이용된다. 파라미터  $t$ 는 두 입력 사이의 관계조건을 나타내는데 연결조건이 논리곱(AND)이라면  $t=1$ 로 그리고 연결조건이 논리합(OR)이라면  $t=2$ 로 표현한다. 그리고 각각의 제어규칙에 가중치( $w$ )를 두어서 유전자알고리즘이 각각의 제어규칙이 전체 의사결정 과정에 미치는 영향을 조절할 수 있도록 하였다. 염색체에는 전체 20개의 제어규칙이 사용되고 두 개

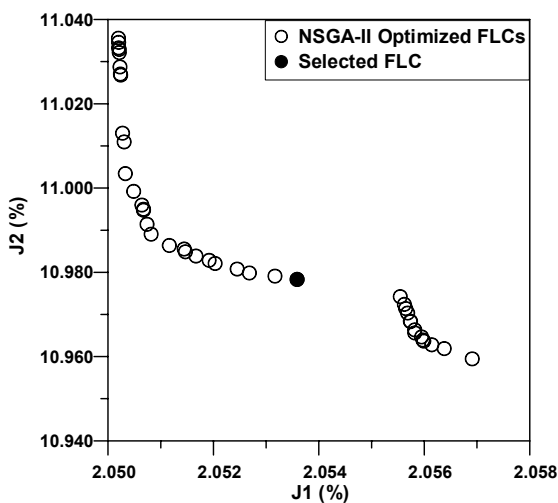
의 목적함수에 대한 적합도 값 및 우선순위 등이 염색체의 뒷부분에 저장된다.



<Fig. 5> Configuration of chromosome

### 5. 미진동 제어성능평가

스마트 면진시스템을 효과적으로 제어할 수 있는 퍼지제어기를 개발하기 위하여 사용한 NSGA-II에서 한 세대를 이루는 개체군은 100개의 개체로 이루어지며 최적화는 3000세대까지 수행하였다. 최적화작업 및 수치해석은 MATLAB 버전 2011a를 사용하였고 SIMULINK를 사용하여 모델링하였다. 앞에서 밝힌 2개의 목적함수를 이용하여 최적화를 수행하였고 스마트 면진시스템의 최적화 수행결과를 <Fig. 6>에 나타내었다.

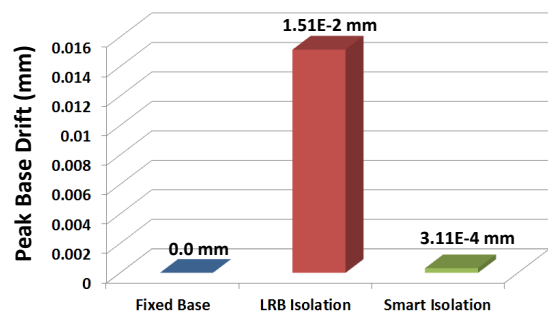


<Fig. 6> NSGA-II optimization results

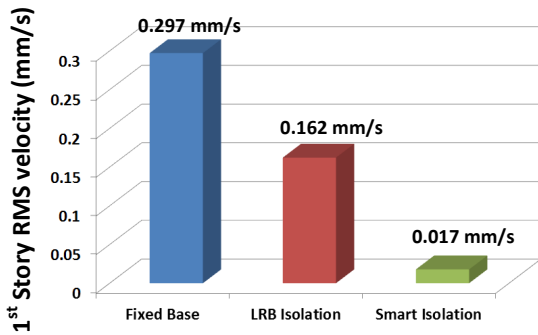
<Fig. 6>를 보면 모든 개체의 J1과 J2의 값이 100%보다 작으므로 LRB 면진시스템보다 스마트 면

진시스템이 더 우수한 제어성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 파레토 최적해집합을 보면 J1에 대해서는 모든 개체가 2.05%에서 2.058% 사이에 있고 J2에 대해서는 10.94%에서 11.04% 사이에 있으므로 두 목적함수 중에서 면진층 변위를 1층 바닥의 속도응답보다 더 효과적으로 제어하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 면진층에 추가적인 수동감쇠기를 설치하거나 감쇠기 용량을 늘리게 되면 면진층 변위는 줄어들지만 면진된 구조물의 동적응답은 증가하게 된다. 그러나 MR 감쇠기로 구성된 스마트 면진시스템을 사용할 경우에는 일반적인 수동 면진시스템에 비하여 면진층 변위와 구조물의 동적응답을 동시에 저감시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

다목적 최적화작업이 끝난 후에는 <Fig. 6>와 같이 다수의 개체를 포함하고 있는 파레토 최적해 집합을 얻게 되는데 엔지니어는 이 중에서 가장 적절하다고 판단되는 개체를 선택하게 된다. 본 논문에서는 <Fig. 6>에서 검정색 원으로 나타난 개체를 선택하였고 이것은 하나의 퍼지제어알고리즘에 대한 설계안이 된다. 선택된 개체의 J1과 J2에 대한 목적함수 값은 각각 2.05% 및 10.97%로서 이것은 스마트 면진시스템을 적용한 예제 구조물의 면진층 변위와 1층 속도응답을 LRB를 적용한 경우에 비하여 대폭 저감시킬 수 있음을 의미한다. 선택된 개체를 사용하여 퍼지제어알고리즘을 작성한 후 수치해석을 수행하였고 개발된 제어알고리즘의 스마트 면진시스템에 대한 미진동제어성능을 정량적으로 파악하기 위하여 일반적으로 사용하는 LRB 면진시스템과 스마트 면진시스템 그리고 고정기초를 가진 예제구조물의 최대치 지진응답을 비교하여 <Fig. 7>과 <Fig. 8>에 나타내었다.



<Fig. 7> Comparison of peak base drifts



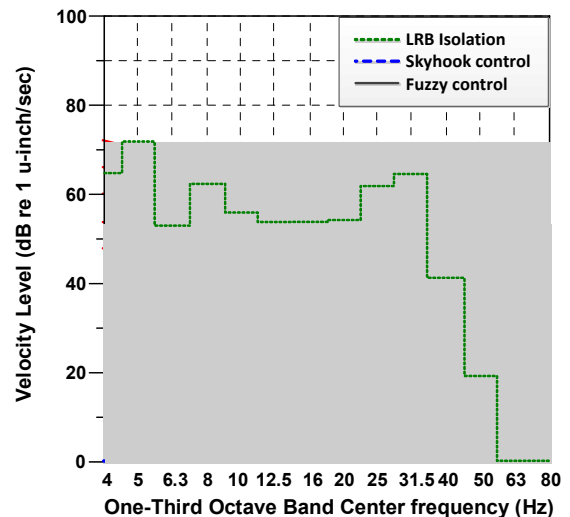
〈Fig. 8〉 Comparison of 1<sup>st</sup> story RMS velocity

그림에서 보는 바와 같이 스마트 면진시스템을 첨단산업 시설물 미진동제어에 적용하면 LRB 면진시스템에 비하여 면진층변위를 대폭 줄이면서도 동시에 1층의 RMS 가속도를 매우 효과적으로 저감시킬 수 있음을 볼 수 있다. 특히 고정기초구조물에 비하면 첨단기계장치 시설물을 위한 BBN 진동기준에서 평가대상인 1층 RMS 가속도가 스마트 면진시스템의 경우에 5.7%로 매우 크게 줄일 수 있었다.

각 모델별 미진동응답을 BBN 진동기준을 바탕으로 평가해보기 위하여 1층 속도시간이력을 계산한 후 이 값을 속도스펙트럼으로 변환하여 <Fig. 9>에 1/3 옥타브밴드 형태로 나타내었다. 미진동응답의 비교를 편하게 하기 위하여 BBN 진동기준의 정밀진동 등급을 함께 표현하였다. 그림에서는 LRB 면진시스템을 적용한 경우 및 스마트 면진시스템을 사용한 경우에 대해서 비교하였다. 스마트 면진시스템을 사용한 모델은 본 논문에서 개발한 퍼지제어 알고리즘을 사용한 경우와 선행연구<sup>17)</sup>에서 소개된 스카이훅 제어알고리즘을 사용한 경우를 함께 비교하였다.

LRB 면진시스템을 적용하면 전반적인 주파수대역에서 정밀진동 VC-A등급의 기준을 만족시키는 것을 그림에서 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용된 예제구조물의 경우에는 LRB 면진시스템이 열차하중에 의해서 유발되는 미진동을 어느정도 제어하는 효과가 있음을 알 수 있다. 선행연구에서 수행된 결과인 스카이훅 제어알고리즘을 사용하여 스마트 면진시스템을 제어한 경우를 보면 LRB 면진시스템에 비하여 미진동제어성능이 매우 우수함을 확

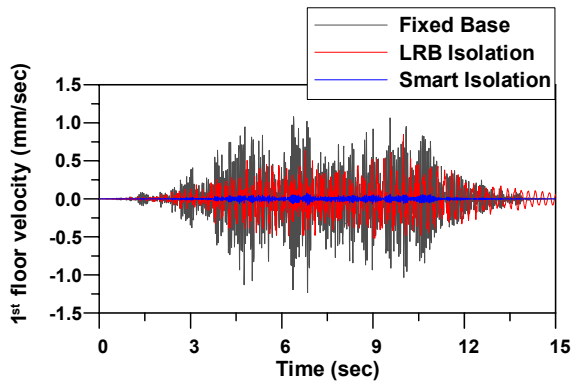
인할 수 있다. 중심주파수 16-20Hz 구간에서 가장 큰 미진동 속도레벨이 나타나지만 전체적으로 볼 때 BBN 기준의 정밀진동 VC-C등급의 기준을 만족시키는 것을 알 수 있다. 따라서 예제구조물에 스마트 면진시스템을 적용하면 30000X 전자현미경이나 1M DRAM 수준의 반도체 생산설비를 사용할 수 있다. 마지막으로 본 연구에서 개발한 퍼지제어 알고리즘이 적용된 스마트 면진시스템의 경우에는 선행연구에 비하여 제어알고리즘만을 바꾸었을 뿐인데 미진동제어성능이 대폭 개선된 것을 알 수 있다. 대부분의 중심주파수 구간에서 스카이훅 제어알고리즘보다 최적화된 퍼지 제어알고리즘이 우수한 제어효과를 나타내는 것을 볼 수 있다. 특히 중심주파수 16Hz 구간에서는 정밀진동 VC-C등급 근처에서 VC-E등급 이하로 미진동응답이 대폭 줄어들었다. 퍼지 제어알고리즘을 적용한 경우에 중심주파수 20Hz 구간에서 가장 큰 속도 레벨을 보였지만 VC-D등급 아래의 수준으로 30000X 이상의 전자현미경이나 4M DRAM 수준의 반도체 생산설비를 사용할 수 있다.



〈Fig.9〉 1<sup>st</sup> story velocity spectrum

본 논문에서 사용한 고정기초 구조물, LRB 면진시스템이 적용된 구조물, 스마트 면진시스템이 적용된 구조물의 1층 속도응답을 주파수영역 뿐만 아니라 시간영역에서 비교해보기 위하여 <Fig. 10>에 속도 시간이력을 비교하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 고정기초 구조물의 1층 속도응답을 LRB 면진시

시스템을 적용하면 많이 줄일 수 있고 스마트 면진시스템을 사용하면 LRB 면진시스템보다 더욱 크게 저감시킬 수 있는 것을 확인할 수 있다.



〈Fig.10〉 1<sup>st</sup> story velocity time histories

## 6. 결론

본 논문에서는 스마트 면진시스템이 적용된 첨단 기술산업 시설물의 미진동제어성능을 검토하여보았다. 이를 위하여 3층 전단빌딩 예제구조물을 선택하였고 인공열차하중을 가하여 수치해석을 수행하였다. 스마트 면진시스템은 일반 LRB 시스템과 MR 감쇠기를 사용하여 구성하였다. 스마트 면진시스템의 제어성능은 제어알고리즘에 의해서 크게 좌우되므로 본 논문에서는 MR 감쇠기와 같은 비선형성이 큰 제어장치에 대해서 효과적이라고 알려진 퍼지제어알고리즘을 적용하였고 이를 최적화하기 위해서 다목적 유전자알고리즘을 사용하였다. 수치해석결과 클린룸이 1층에 설치되어 있는 예제구조물에서 1층의 미진동 속도응답은 LRB 면진시스템을 사용하여 어느 정도 효과적으로 제어할 수 있었고 BBN 정밀진동 기준의 VC-A 등급을 만족시킬 수 있을 정도로 개선되었다. 본 논문에서 개발한 유전자알고리즘으로 최적화된 퍼지제어기의 스마트 면진시스템에 대한 미진동 제어성능을 선행연구에서 수행한 스카이훅 제어알고리즘과 비교하여 보았다. 스카이훅으로 제어된 스마트 면진시스템을 사용한 경우에는 전체 주파수 영역에 걸쳐서 BBN 기준의 VC-C 등급을 만족시킬 수 있었다. 퍼지제어알고리즘을 사용한 경우에는 전체 구간의 주파수대역에 있어서

스카이훅 제어알고리즘보다 우수한 미진동제어성능을 나타내었고 BBN 기준의 VC-D 등급을 만족시킬 수 있었다. 본 논문에서 사용한 다목적 최적화기법을 사용하면 1층의 속도응답에 대한 제어뿐만 아니라 면진층 변위의 제어에도 우수한 성능을 보이는 퍼지제어알고리즘을 개발하는 것이 가능하였다.

## 감사의 글

이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2011-0011165).

## 참고문헌

1. Lee, H.K., Pak, J.H., Won, Y.J., Park, H.D. and Kim, D.H., "A study on the structural dynamic design for sub-micro vibration control in high class semiconductor factory by semi-empirical method", Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 9, No. 6, 1999, pp.1227-1233.
2. Liu, J., Liu, H.J. and Dyke, S.J., "Control-structure interaction for micro-vibration structural control", Smart Materials and Structures, Vol. 21, No. 10, 2012.
3. Naeim, F. and Kelly, J.M., Design of Seismic Isolated Structures: from Theory to Practice. Wuley: New York, 1999.
4. B.F. Spencer Jr., E.A. Johnson and J.C. Ramallo, "Smart isolation for seismic control", JSME Int. J. Ser. C., Vol. 43, No. 4, 2000, pp. 704-711.
5. Kang, J.W., Kim, H.S. and Lim, J.H., "Multi-objective fuzzy control of a spacial structure using smart base isolation system", Journal of the Korean Association for Spacial Structures, Vol. 11, No. 2, 2011, pp.89-99.



6. Kim, H.S. and Kang, J.W., "Investigation of adaptability of smart base isolation system for spacial structures in regions of low-to-moderate seismicity", Journal of the Korean Association for Spacial Structures, Vol. 11, No. 4, 2011, pp.109-119.
7. Mamdani, E.H. and Assilian, S., "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller", International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 7, No. 1., 1975, pp.1-13.
8. Gordon, C.G., "Generic criteria for vibration sensitive equipment", Proceedings of SPIE, 1991, pp.71-85.
9. Amick, H., "On the generic vibration criteria for advanced technology facilities", Journal of the Institute of Environmental Sciences, Vol. 5, 1997, pp.35-44.
10. Kuppelwieser, H. and Ziegler, A., "A tool for predicting vibration and structure-borne noise emissions caused by railways", J. of Sound and Vibration, Vol. 193, No. 1, 1996, pp.261-267.
11. Jones, C.J.C. and Block, R., "Prediction of ground vibration from freight trains", Journal of Sound and Vibration, Vol. 193, No. 1, 1996, pp.205-213.
12. Hunt, H.E.M., "Modelling of rail vehicles and track for calculation of ground-vibration transmission into buildings", Journal of Sound and Vibration, Vol. 193, No. 1, 1996, pp.185-194.
13. Takemiya, H. and Kellezi, L., "Paraseismic behaviour of wave impeding block measured for ground vibration reduction", Workshop on Effect of High-Speed Vibration on Structures and Equipment, Taiwan, 1998, pp.51-56.
14. Wen, Y.K., "Method of Random Vibration of Hysteretic Systems", J. Engng. Mech. Division, Proceedings, ASCE, Vol. 102, 1976, pp.249-263.
15. Bani-Hani, K.A. and Sheban, M.A., "Semi-active neuro-control for base-isolation system using magnetorheological (MR) dampers", Earthquake Engng Struct. Dyn., Vol. 35, 2006, pp.1119-1144
16. Deb, K., Pratap, A., Agrawal, S. and Meyarivan, T., "A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II", Technical Report No. 200001, Kanpur: Indian Institute of Technology Kanpur, India, 2000.
17. Kim, H.S., Kang, J.W. and Kim, Y.S., "Microvibration control of high technology facilities subjected to train-induced excitation using smart base isolation", Journal of the Korean Association for Spacial Structures, Vol. 12, No. 2, 2012, pp.99-108.

(접 수 일 자 : 2013년 01월 21일)

(심사완료일자 : 2013년 04월 22일)

(게재확정일자 : 2013년 05월 22일)