

〈논 문〉

## 유전자 알고리즘을 이용한 지능구조물의 PPF 제어기 실시간 다중변수 조정

### Real-Time Multiple-Parameter Tuning of PPF Controllers for Smart Structures by Genetic Algorithms

허 석\* · 광 문 규\*\*

Seok Heo and Moon-Kyu Kwak

(2000년 10월 14일 접수 : 2001년 1월 18일 심사완료)

**Key Words** : Active Vibration Control(능동진동제어), Genetic Algorithm(유전자 알고리즘), MIMO PPF Control(다중 입력 출력 PPF 제어), Real-Time Tuning(실시간 조정)

#### ABSTRACT

This paper is concerned with the real-time automatic tuning of the multi-input multi-output positive position feedback controllers for smart structures by the genetic algorithms. The genetic algorithms have proven its effectiveness in searching optimal design parameters without falling into local minimums thus rendering globally optimal solutions. The previous real-time algorithm that tunes a single control parameter is extended to tune more parameters of the MIMO PPF controller. We employ the MIMO PPF controller since it can enhance the damping value of a target mode without affecting other modes if tuned properly. Hence, the traditional positive position feedback controller can be used in adaptive fashion in real time. The final form of the MIMO PPF controller results in the centralized control, thus it involves many parameters. The bounds of the control parameters are estimated from the theoretical model to guarantee the stability. As in the previous research, the digital MIMO PPF control law is downloaded to the DSP chip and a main program, which runs genetic algorithms in real time, updates the parameters of the controller in real time. The experimental frequency response results show that the MIMO PPF controller tuned by GA gives better performance than the theoretically designed PPF. The time response also shows that the GA tuned MIMO PPF controller can suppress vibrations very well.

#### 1. 서 론

최근 들어 항공우주 및 여러 공학 분야에서 비강성과 비강도가 큰 복합재료 경량구조물의 사용으로 내력이나 외력에 의한 진동이 시스템 성능에 심각한 문제를 유발시켜 구조물 자체의 안정성에 큰 위협이 되기도 한다. 이와 같은 진동을 억제하기 위해서 능동진동제어 즉, 구조물자체에 감지기(sensor)와 작동기(actuator)를 표면에 부착하거나

구조물의 한 부분으로 삽입하여 진동을 능동적으로 제어하는 기법을 적용하였다. 능동진동제어를 위하여 여러 가지 재료가 개발되어 구조물의 진동 감지기와 작동기로 사용되었는데 압전재료(piezoelectric materials), 형상기억합금(shape memory alloys), electrostrictive materials, magnetostrictive materials, electrorheological fluids, fiber optics 등이 있다. 이러한 재료들 중에 압전재료는 전기적인 에너지를 기계적인 에너지로 변환할 수 있어 작동기로 사용할 수 있고 반대로 기계적인 변형을 전기적인 신호로 변환할 수 있어 감지기로도 사용할 수 있다. 압전재료 중 압전세라믹은 신호 대 잡음비가 좋아 감지기로서의 감도가 좋고 온도 변화에도 덜 민감하여 압전폴리머에 비해 상대적으로 큰 힘을 발생시킬 수 있다. 가장 보편적으로 사용

\* 정회원, 동국대학교 대학원 기계공학과

\*\* 정회원, 동국대학교 기계공학과

E-mail : kwakm@dgu.ac.kr

되는 압전재료는 PZT(Lead-Zirconate-Titanite)로 이루어진 압전세라믹 판인데 얇은 판 형태로 제공되고 있어 접착제를 이용하여 구조물에 쉽게 부착할 수 있다. 그러나 세라믹 자체가 취성이 강하여 부서질 수 있고 또한 과도한 하중이 구조물에 걸렸을 경우 작동기나 감지기 자체가 파손될 수 있다는 가능성이 있어 압전세라믹의 부착 시 특별한 주의가 요구된다.

압전재료가 구조물과 결합된 시스템에 대한 해석은 간단한 보의 해석으로부터 출발하는데 Crawley 등<sup>(1,2)</sup>은 압전작동기를 부착한 구조물의 모델화에 대한 초기 논문들이다. Hanagud 등<sup>(3)</sup>은 외팔보에 압전작동기와 감지기를 부착한 시스템을 고려하여 유한요소법을 사용하여 모델화 하였으며 이외에도 여러 가지 경우에 대한 모델화 기법과 제어 기법<sup>(4,5)</sup>이 토의되었는데 압전작동기와 감지기를 사용한 진동 제어에 관한 논문들에 대해서는 광<sup>(6)</sup>의 논문에서 자세히 다루고 있다. 제어 기법 중 실제 구조물에 성공적으로 사용된 것은 Fanson과 Caughey<sup>(7)</sup>가 개발한 일반화된 변위 신호를 Positive Feedback 하는 PPF 제어 기법으로 압전 재료를 붙인 외팔 보를 사용하여 실험적으로 PPF 제어 기법의 타당성을 증명하였다. 라 등<sup>(8)</sup>은 다중입출력 PPF 제어기의 적용 문제를 고려하고 그 타당성을 실험으로 입증하였다.

유전자 알고리즘은 생물학적 유전법칙에 근거한 최적 해를 구하는 방법이다. 유전자 알고리즘의 진화 과정은 모든 종이 주어진 환경에 적응하여 적자만이 생존한다는 다윈의 적자생존법칙(survival of the fitness)에 근거를 두고 있다<sup>(9)</sup>. 초기에는 간단한 수학적인 문제에 대하여 적용되었으나 점차 그 적용 범위가 넓혀지고 있다. 최근에는 구조물의 최적화 문제, 제어기의 이득 결정 문제, 능동진동제어기 설계<sup>(10, 11)</sup> 등에 응용되었다. Kwak과 Shin<sup>(12)</sup>은 유전자 알고리즘을 실시간으로 적용하여 능동진동제어기를 실시간 조정하는 방법을 개발하였다. 본 연구에서는 허 등<sup>(13, 14)</sup>의 연구 결과를 확장하여 여러 개의 제어 변수를 실시간으로 유전자 알고리즘을 이용하여 조정하는 문제를 다루었다. 실험 결과 여러 개의 변수를 실시간으로 조정하는 문제를 유전자 알고리즘을 도입하여 해결할 수 있음을 입증하였으며 이와 같이 조정된 능동진동제어기가 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

## 2. 지능 격자 구조물과 MIMO PPF 제어기

본 연구에서 고려한 지능 격자 구조물은 Fig.1에서 보여지는 것과 같은 것으로 탄소/에폭시 직조형 프리프레그(한국카본(주), CF-3327)와 유리/에폭시 직조형 프리프레그(한국파이버(주), G635)을 이용하여 제작되었다. 가는

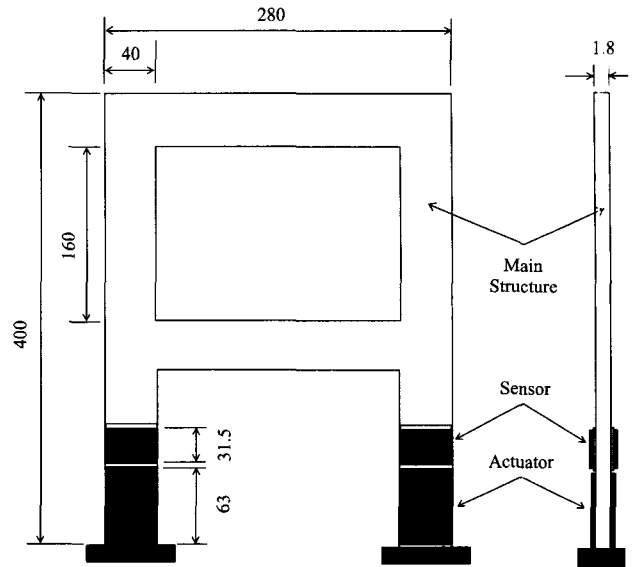


Fig. 1 Schematic of composite grid structure

동판을 압전세라믹판에 연결하고 90-분 에폭시를 이용하여 부착하였다. 통전에폭시(Silver epoxy)(대주정밀(주), DS-7276-A)가 압전세라믹의 전극과 동선을 연결하기 위하여 사용되었다.

지능격자 구조물은 본질적으로 3차원 구조물이지만 저차의 모드만이 제어대상인 경우 굽힘과 비틀을 고려한 유한요소법을 이용하여 이론적인 모델을 도출할 수 있다. 이와 같은 지능격자구조물에 대해서 최종적인 운동방정식은 다음과 같다.

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx = B_a v_a \quad (1)$$

$$v_s = B_s x \quad (2)$$

여기서  $x$ 는 절점에서의 변위로 이루어진 벡터이며  $M, C, K$ 는 각각 질량, 감쇠 및 강성행렬을 나타낸다.  $B_a, B_s$ 는 작동기와 감지기의 영향행렬이며  $v_a, v_s$ 는 작동기와 감지기의 전압을 나타낸다. 식 (1)과 (2)에 근거하여 작동기와 감지기의 식은 고유치와 고유모드의 직교성,  $U^T M U = I, U^T K U = \Lambda$ 을 이용하면, 다음과 같이 운동방정식을 모달공간에 대하여 표현할 수 있다.

$$\ddot{q} + 2Z\Omega \dot{q} + \Lambda q = U^T B_a v_a, v_s = B_s U q \quad (3)$$

여기서  $U, \Lambda (= \Omega^2)$ 는 고유벡터와 고유치 행렬을 나타내며  $Z$ 는 감쇠인자 행렬을 나타낸다.

입력과 출력이 두 개인 PPF 제어기를 고려하고 1, 2차 진동모드를 제어한다면, MIMO PPF 제어기를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \overline{v}_a(s) &= (U^T B_a)^{-1} H(s) (B_s U)^{-1} \overline{v}_s(s) \\ &= FH(s) B \overline{v}_s(s) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서

$$\begin{aligned} F &= \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix}, H(s) = \begin{bmatrix} H_1(s) & 0 \\ 0 & H_2(s) \end{bmatrix}, \\ B &= \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

그리고 각각의 PPF 제어기는 다음과 같은 형태로 이루어진다.

$$H_i(s) = \frac{\omega_i^2}{s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2}, \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

여기서  $\omega_i, \zeta_i$ 는 PPF 제어기의 고유진동수와 감쇠비이며, 능동 감쇠를 줄 수 있는 주파수 대역을 구조물의 고유진동수에 맞추면 90도의 위상차를 이루어 감쇠가 커지는 효과를 얻을 수 있다.

식 (6)에 PPF 제어기의 아날로그 표현은 본 연구에서 DSP chip을 이용하여 디지털 제어를 구현하였는데 이를 위하여 다음과 같은 bilinear 변환을 사용하였다.

$$s = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} \quad (7)$$

여기서  $T$ 는 샘플링 시간을 나타내는데 불안정을 일으키지 않도록 충분히 빨라야 한다. 식 (6)에 식 (7)을 대입하면

$$H_i(z) = \frac{b_{i2}z^2 + b_{i1}z + b_{i0}}{z^2 + a_{i1}z + a_{i0}}, \quad i = 1, 2 \quad (8)$$

여기서

$$\begin{aligned} b_{i2} &= \frac{\omega_i^2}{\Delta_i}, \quad b_{i1} = \frac{2\omega_i^2}{\Delta_i}, \quad b_{i0} = \frac{\omega_i^2}{\Delta_i}, \\ a_{i1} &= \frac{2\omega_i^2 - 8/T^2}{\Delta_i}, \quad a_{i0} = \frac{4/T^2 - 4\zeta_i \omega_i/T + \omega_i^2}{\Delta_i}, \\ \Delta_i &= \frac{4}{T^2} + \frac{4\zeta_i \omega_i}{T} + \omega_i^2 \end{aligned} \quad (9)$$

따라서, 디지털 MIMO PPF 제어기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \overline{v}_{a1}(z) \\ \overline{v}_{a2}(z) \end{Bmatrix} &= \\ \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_1(z) & 0 \\ 0 & H_2(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \overline{v}_{s1}(z) \\ \overline{v}_{s2}(z) \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)으로 주어진 디지털 MIMO PPF 제어기는 DSP 보드(DS1102 of dSPACE Inc.)를 이용하여 구현되었으며 디지털 제어를 위한 샘플링 주파수는 10 kHz를 사용하였다. 시험을 통한 첫 번째와 두 번째 고유주파수가 10과 21 Hz이므로 충분히 빠른 것을 알 수 있다. 실시간 유전자 알고리즘은 행렬  $F, B$ 의 변수 값들과 식 (8)의 PPF 필터 주파수 값들을 찾는데 사용되어진다. MIMO PPF 제어기의 감쇠비  $\zeta_i (i=1, 2)$ 는 0.3으로 하는데 더 작은 감쇠비는 제어성능을 증가시키지만 세심한 조정을 필요로 한다. 실용적인 관점에서 0.2~0.3의 감쇠비를 사용하는 것이 바람직한 것으로 알려져 있다.

### 3. 유전자 알고리즘

실험을 위하여 Fig.2와 같이 지능구조물, 전하증폭기(charge amp.), 파워증폭기(power amp.), 그리고 A/D와 D/A 변환기가 연결된 DSP 보드가 내장된 PC를 연결하였다. 식 (10)으로 주어진 디지털 PPF 제어기의 전달함수는 TMS320 Floating-Point DSP Optimizing C 컴파일러와 라이브러리를 이용하여 구현하였고, 이를 DSP Chip에 저장하여 디지털 PPF 제어기가 실시간으로 진행하도록 만들었다. DSP의 D/A는 파워증폭기를 거쳐 지능 구조물의 작동기와 연결되었는데 여기서 파워증폭기의 gain을 7.5로 하였다. 또한 지능 구조물의 감지기는 전하증폭기를 거쳐 A/D로 들어가 Block 단위(3s×1 kHz)로 데이터를 유전자 알고리즘의 적합도를 평가하기 위해서 사용한다. 여기서 디지털 PPF 전달함수는 10 kHz로 작동하지만 데이터를 받을 때는 1 kHz로 감소시켰다. 유전자 알고리즘은 MIMO PPF 제어기의 변수들을 감지기 데이터에 근거하

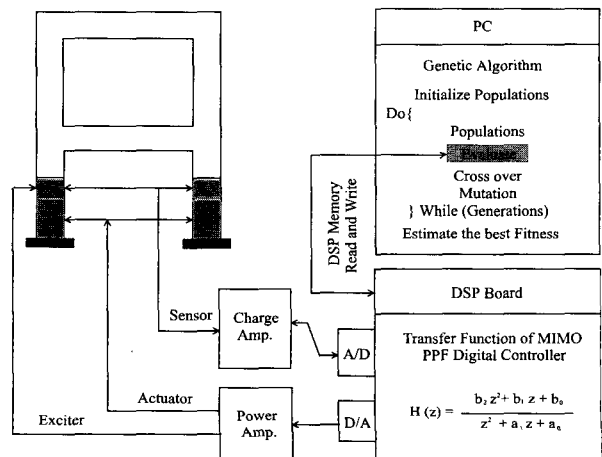


Fig. 2 Schematic of experimental set-up

여 PC에 업데이트하고 DSP 보드의 메모리 블록에 업로드 시켜 고유진동수를 조정(tuning)하도록 만들었다.

Main program은 유전자 알고리즘으로 구성된다. 파라미터를 다루는 다른 최적화 알고리즘들과 비교할 때 GA는 파라미터집합의 코딩(coding)을 다루며 한 점을 찾는 것이 아니라 점들이 밀집해 있는 곳을 찾는다라는 특성이 있다.<sup>(9)</sup> GA를 이용한 실시간 PPF 제어기의 조정에 대한 논문은 참고문헌 (10)과 (12)에서 잘 설명하고 있다. 유전자 알고리즘은 먼저 각 개체 즉, PPF 필터주파수에 난수적으로 초기 값을 부여하고 적합도 계산을 위하여 1초 동안 10 V, 10 Hz와 23 Hz의 sine wave로 구조물을 가진 한 후 유전자 알고리즘에서 부여한 PPF 필터주파수 값을 DSP의 메모리블록에 쓴 뒤 2초 동안의 감지기 값을 이용하여 적합도를 계산하는데 50 개체(gene)에 대하여 대략 150초가 소요된다. 따라서 486 PC에서 3초동안 유전자 알고리즘이 수행되어지므로 마지막 50 세대(generation)의 연산을 수행하면 대략 2시간이 소요된다.

감지기 데이터를 이용한 적합도(fitness)를 평가하기 위한 식은 다음과 같다.

$$Fitness = \left[ 1000 / \sum_{i=1}^{300} (v_{s1}^2 + v_{s2}^2) \right]^5 \quad (11)$$

여기서  $v_{s1}$ ,  $v_{s2}$ 는 전하앰프로부터 얻은 감지기의 출력값이다. 식 (11)에서 알 수 있듯이 구조물의 진동 감소에 의해서 적합도값이 증가한다. 따라서, 유전자 알고리즘을 사용하면 적절한 PPF 필터주파수와 연산행렬 값을 찾을 수 있다.

#### 4. 비중앙화 MIMO PPF 제어기의 실시간 조정

모든 파라미터를 평가하기 전에, 먼저 두 개의 파라미터를 평가하는 문제를 통하여 유전자 알고리즘의 타당성을 증명하고자 한다. 이를 위하여 Fig. 3과 같은 두 개의 PPF 제어기로 구성된 MIMO PPF 제어기의 필터 주파수를 실시간으로 조정하는 실험을 수행하였다.

유전자 알고리즘의 수렴에 관련되는 개체수(population size), 교배율(crossover probability), 돌연변이율(mutation

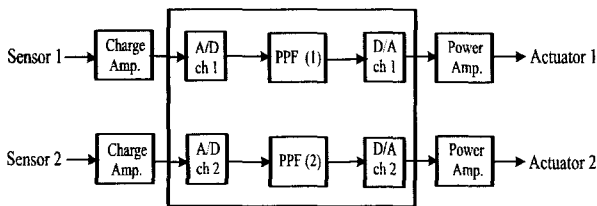


Fig. 3 Decentralized PPF controller

probability)의 영향을 조사하기 위해서 Table 1에서 보이는 것처럼 실험방법을 구성했다. 아래에 보이는 임의 조합들은 거의 같은 PPF 필터주파수를 구하지만 최상의 조합을 찾을 필요가 있다.

Fig. 4는 P1과 P5의 경우에 대한 세대동안 유전자의 두 밀집선도를 보여주는데 유전자 알고리즘의 교배율은 0.7이고 돌연변이율은 0.005이다. x축은 세대수이고 y축은 PPF 필터주파수를 나타낸다. \*, o는 개체를 나타낸다. 각각의 PPF 필터주파수에 대한 최소, 최대값의 범위는 (5, 15), (15, 30) Hz이다. 각 그룹을 계산하기 위해서 소요되는 시간은 개체수에 비례한다. 교배율은 전체 개체수 중 교배율이 적용될 수 있는 자손의 수의 비로 정의되어진다. 교배율이 크면 해 공간을 더 많이 탐색할 수 있게 된다. 따라서 국소 최적화해로 수렴할 확률을 감소시킨다. 그러나 교배율이 너무 크면 해가 존재하지 않는 영역에서의 계산도 이루어지기 때문에 수렴도가 낮아지게 된다. P1의 경우 유전자 알고리즘은 최적값을 찾는데 시간이 많이 소요된다. 개체수를 증가시키면 유전자 알고리즘의 성능이 개선된다. 수렴은 P5의 경우에 보장되어지는 것을 확인할 수 있다. 그렇지만 P5의 경우가 P1의 경우에 비해서 계산 시간이 더 소요된다.

유전자 알고리즘의 성능은 교배율에 의존한다. 우리는 교배율을 0.1에서 0.9까지 바꾸었는데 유전자 밀집선도에서 교배율의 영향을 관찰할 수 있다. 만약 교배율이 너무 높으면 Fig. 5에서처럼 불필요한 부분까지 탐색하게 되어 시간을 소비하고 교배율이 0.5보다 낮으면 유전자의 변화가

Table 1 Cases for parameter studies

Case	Population size	Maximum No. of generation	Crossover probability	Mutation probability	
P1	10	50	0.7	0.005	
P2	20				
P3	30				
P4	40				
P5	50				
C1	50		50		0.1
C2					0.3
C3					0.5
C4					0.7
C5	50		50		0.9
M1	50	50	0.7	0.001	
M2				0.004	
M3				0.007	
M4				0.010	

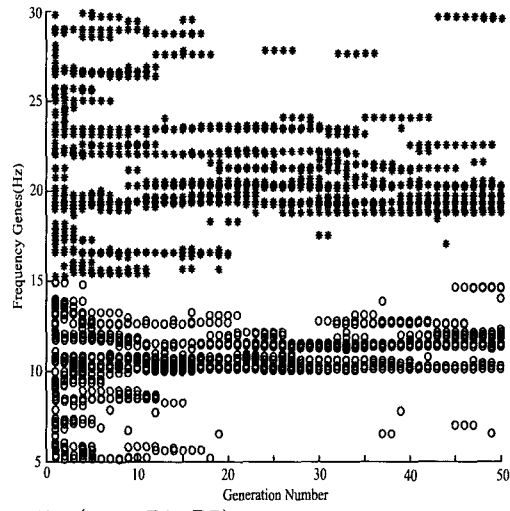
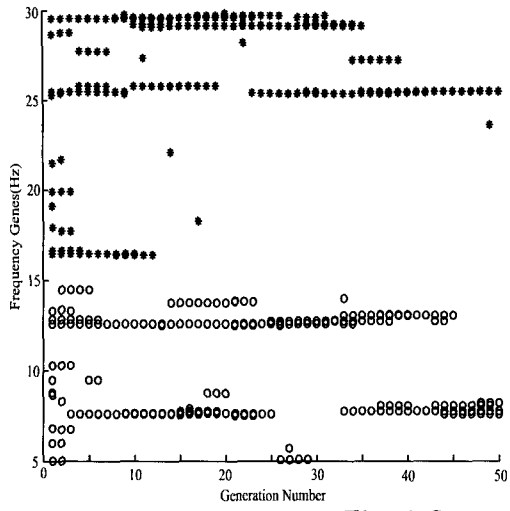


Fig. 4 Genes vs. generation(case P1, P5)

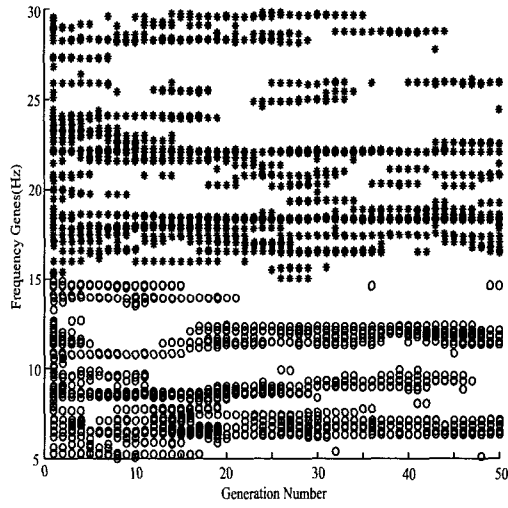
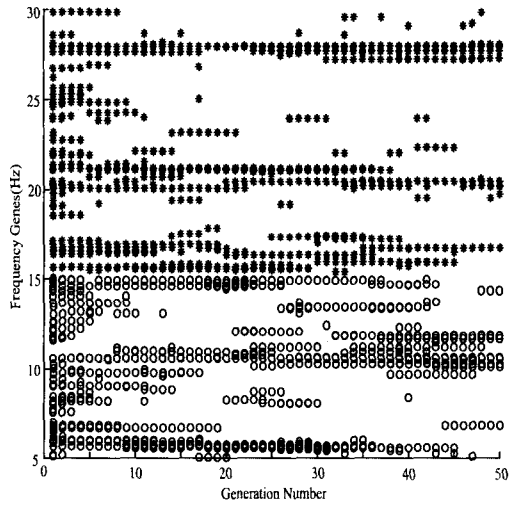


Fig. 5 Genes vs. generation(case C1, C5)

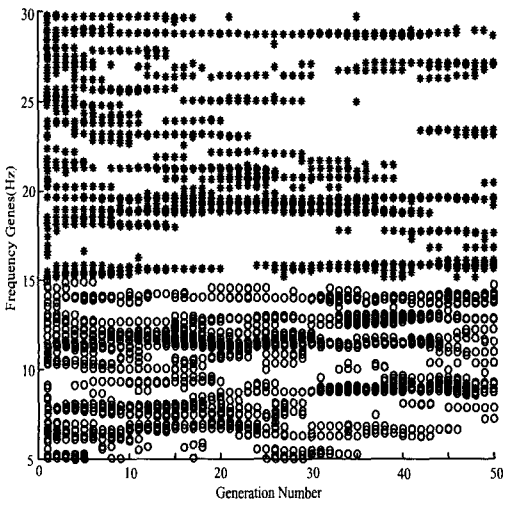
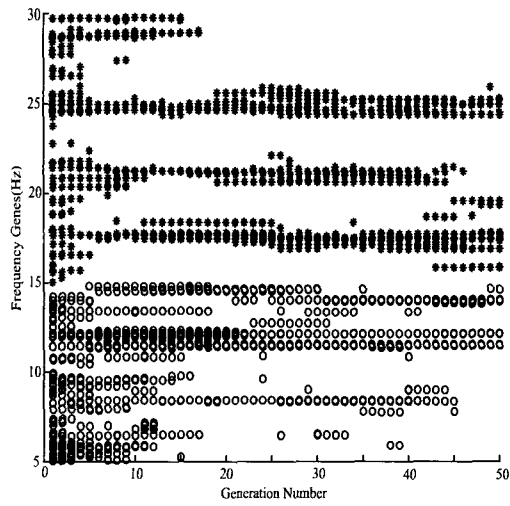


Fig. 6 Genes vs. generation(case M1, M4)

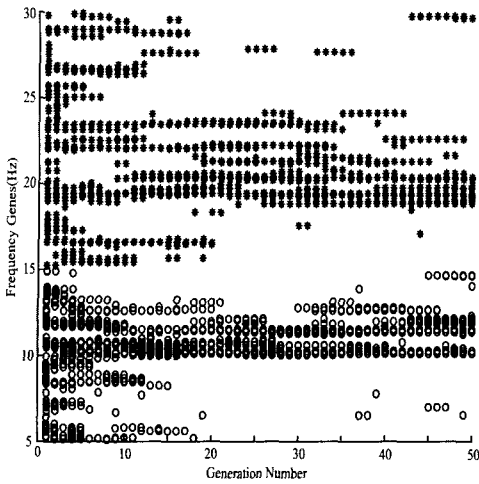


Fig. 7 Genes vs. generation(case C4)

너무 심한 것을 알 수 있다. 따라서 0.7에 대한 교배율은 이러한 문제들에 대해 적절한 선택이라 할 수 있겠다.

돌연변이는 전혀 다른 부모들로부터 새로운 세대를 만드는 역할을 하는데 적합도에 의해서 새로운 유전자를 시험하는 기회를 준다. 만약 돌연변이율이 너무 낮으면 많은 유용한 유전자들이 시도조차 되어지지 않을 수가 있으며, 반대로 돌연변이율이 너무 높으면 너무 많은 난수적인 불안을 초래하게 된다. 이 경우 자손이 부모와 닮게 되는 성질을 상실하게 된다. Fig. 6은 M1과 M4의 경우를 보여준다. 실험을 통하여 0.005의 돌연변이율이 유효한 값을 알 수 있었다.

Fig. 7은 C4의 경우에 대한 세대동안의 유전자의 밀집 정도를 보여주는데 실험을 통하여 최적의 선택이라 생각한다. 실험으로부터 최대 적합도 값은  $f_1 = 10.12$  Hz,  $f_2 = 20.34$  Hz이다. 지능격자구조물의 첫 번째와 두 번째 고유주파수는 실험을 통해서 9.5와 20 Hz 임을 알았는데 PPF 필터주파수를 유전자 알고리즘에 의해 얻어서 능동진동제어를 성취할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 지능격자구조물에 제어를 한 것과 안 한 것에 대한 주파수응답곡선을 보여준다. 제어된 주파수응답은 유전자 알고리즘에 의해 PPF 필터주파수가 조정되어 얻어진 것이다. 그림에서 보듯이 두 개의 모드에 대해서 30 dB와 20 dB의 감쇠가 이루어지는데 능동진동감쇠가 성공적으로 이루어짐을 알 수 있다.

유전자 알고리즘을 실시간으로 적용할 때의 주된 문제는 각각의 유전자에 있어서 같은 초기상태를 부여하기 어렵다는 것이다. 이러한 현상은 참고문헌 (12)에서 설명하고 있다. 따라서 실험을 통해서 얻은 적합도 값이 같은 유전자 그룹에 대해 가능성 있는 분포를 보여주며 이것이 실시간으로 실제 지능 구조물에 대해 유전자 알고리즘을 적용하

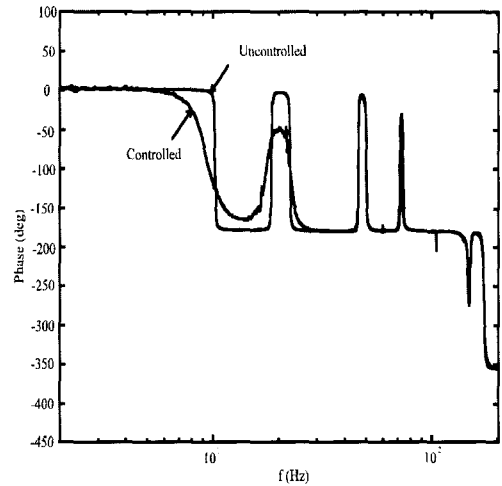
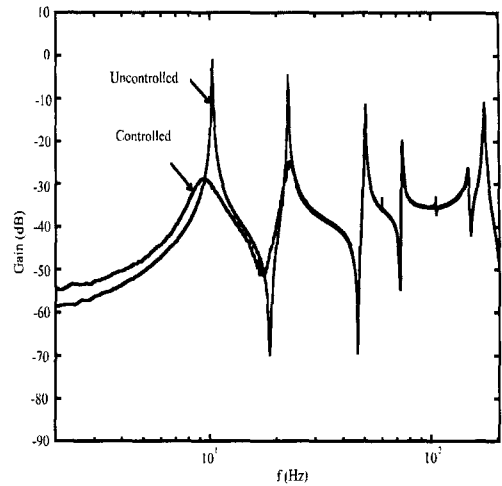


Fig. 8 Frequency response functions

는 주된 문제이다. 그렇지만 각각의 실험방법, 즉 적합도 값이 구조물의 고유주파수 부근에서 최고값을 나타냄을 통해서 최적의 PPF 필터주파수를 찾을 수 있었다.

유전자 알고리즘을 적용하는 다른 문제는 유전자 값의 상하범위를 결정하는 것이다. 만약 유전자 값의 범위가 너무 넓으면 수렴이 너무 느리다. 따라서 유전자 값의 범위는 조심스럽게 결정해야 한다. 실제구조물에 기초한 이론적인 모델에 대해 유전자 알고리즘을 시험하여 범위를 구하면 시간을 줄이는데 도움이 된다.

### 5. 중앙화 MIMO PPF 제어기의 실시간 조정

두 개의 파라미터 평가에 대한 유전자 알고리즘의 성공적인 실험이후 모든 파라미터에 대한 추정을 위해서 실험을 하였다. MIMO PPF 제어기의 실시간 조정을 시험하기 위해 Fig. 9에서 보이는 바와 같은 연성된 두 개의 PPF

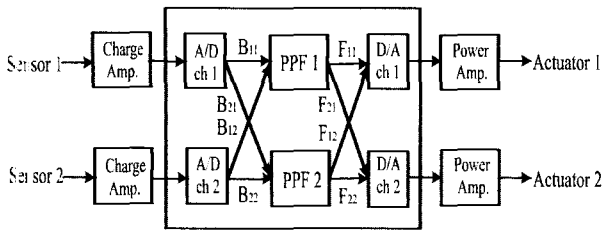


Fig. 9 Centralized MIMO PPF controller

제어기를 구성하였다.

10개의 파라미터를 평가하기 위해서 실시간 유전자 알고리즘을 수정하였다. 상위 10%의 유전자, 즉 5개의 유전자를 선택하고 이들 유전자의 평균을 계산하였다. Table 2는 Table 1의 파라미터 연구를 통하여 얻은 결과 C4(50-50) 0.7-0.005)의 경우를 이용하여 5번의 실험과 그 평균에 대한 파라미터 값들을 보여준다. 5번의 실험에서 얻은 값들이 근소한 차이가 남을 알 수 있었다. 따라서 5번의 실험 결과의 평균값과 유한요소모델의 결과를 비교하였다. 평

균값이 유한요소모델에 의해 얻은 결과와 거의 같다는 것을 알 수 있다. 위에서 언급한 것처럼 파라미터에서 볼 수 있는 차이는 초기결합과 실험오차에 의한 것이다.

Fig. 10은 제어가 안된 주파수 응답선도와 이론적인 값에 의해 제어된 주파수 응답곡선, 유전자 알고리즘에 의해 조정되어 제어된 주파수 응답곡선을 보여준다. Fig. 10으로부터 첫 번째 모드에 대해 유전자 알고리즘에 의해 조정된 파라미터에 기초한 제어성능이 이론적인 모델에 의한 것 보다 약간 더 좋다는 것을 알 수 있다. 그렇지만 첫 번째 모드에서 처럼 두 번째 모드에서 진동감쇠와 같은 감소효과를 얻을 수 없었다. 시간응답은 초기 가진 이후 첫 번째 모드에 지배되어지는데, 따라서 제어가 첫 번째 모드에 적응되어지는 경향을 갖는다. 이것이 첫 번째 진동모드가 좀더 많은 진동감쇠가 이루어지는 이유로 예상되었다. Fig. 10에서 두 모드에 대해 30 dB 정도의 감쇠를 볼 수 있다. 이 값은 비중앙화 MIMO PPF 제어기의 결과보다 좋다는 것을 알 수 있다. Fig. 11은 감지기 출력값의 시간 응답을 보여준다. Fig. 11로부터 능동진동감쇠가 성공적임을 알 수 있다.

Table 2 Parameters obtained by GA and FEM

Runs	Fitness	$f_1$ (Hz)	$f_2$ (Hz)	$B_{11}(10^{-3})$	$B_{21}(10^{-3})$	$B_{12}(10^{-3})$	$B_{22}(10^{-3})$	$F_{11}$	$F_{21}$	$F_{12}$	$F_{22}$
1	185.655	11.745	25.963	1.000	0.931	-1.084	0.790	2.924	-3.008	3.157	3.436
2	192.794	10.829	17.383	1.062	0.694	-0.828	0.842	5.297	-5.736	3.581	4.310
3	281.864	8.754	22.714	1.057	1.290	-0.922	0.811	5.695	-6.421	7.096	3.733
4	246.207	10.582	23.373	1.051	1.184	-1.164	1.345	4.673	-5.097	5.089	5.129
5	244.108	8.003	20.540	1.311	0.813	-1.371	0.994	6.207	-6.378	6.264	4.675
GA (avg)	230.126	9.983	21.994	1.096	0.983	-1.074	0.956	4.959	-5.328	5.037	4.256
FEM	N/A	9.6	21.7	0.971	0.971	-1.373	1.373	5.231	-4.708	5.231	4.708

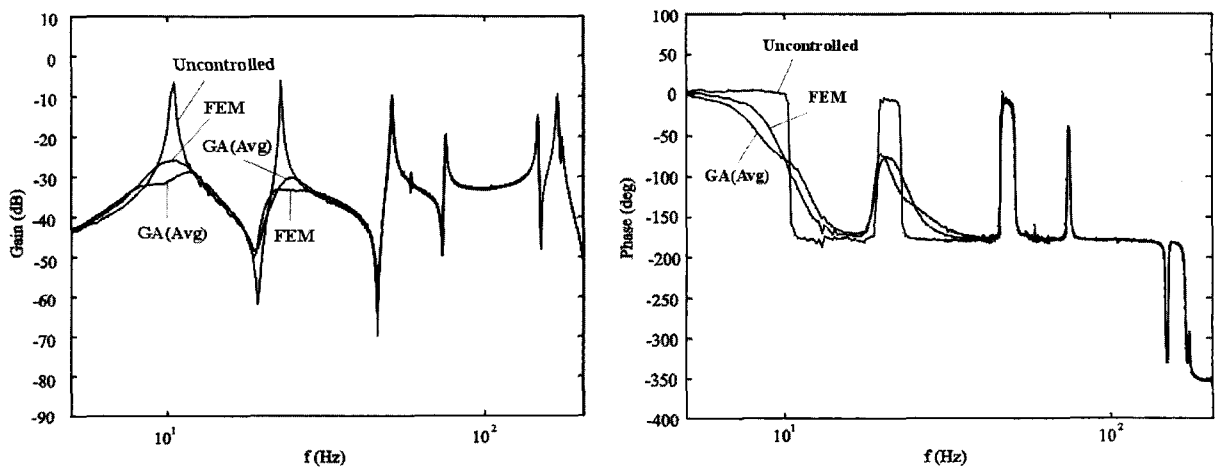


Fig. 10 Frequency response plots

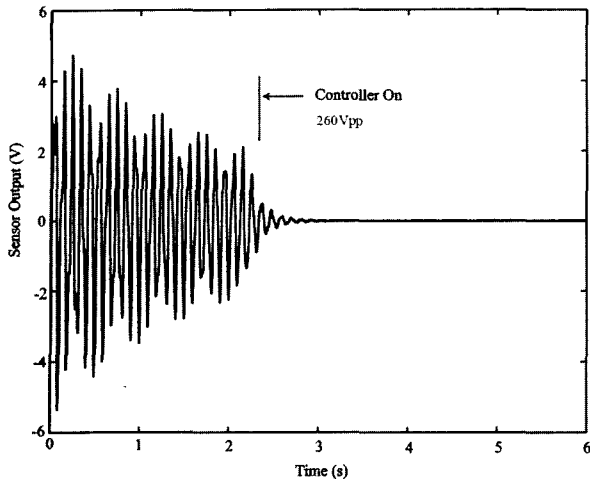


Fig. 11 Time response of MIMO PPF control

### 6. 토의와 결론

본 논문은 유전자 알고리즘을 이용하여 MIMO PPF 제어기의 제어 파라미터를 실시간으로 조정하는 방법을 다루고 있다. 두 개의 압전감지기와 작동기가 부착된 지능 격자 구조물을 이용하여 논문에서 개발된 유전자 알고리즘의 효과를 실험으로 증명하였다.

PPF제어기의 설계는 고유진동수를 제어하고자하는 구조물의 특정 고유진동수에 맞추는 개념 하에 진행되며 먼저 구조물의 고유진동수를 정확히 알아야한다. 고유진동수는 이론적인 모델로부터 추정할 수 있으며 이것이 용이하지 않을 경우 진동실험으로부터 예측할 수 있다. 만일 구조물의 고유진동수가 변화한다면 PPF제어기의 성능저하가 발생할 수 있다. 따라서 PPF제어기의 단점인 고유진동특성의 예측을 제거하여 PPF제어기를 조정하는 방법을 다루었다.

먼저 단일 PPF 제어기의 실시간 조정은 변수가 하나인 PPF제어기를 고려하여 유전자 알고리즘이 실시간으로 최적 PPF 필터주파수를 추적할 수 있는지에 대한 논문이다. 이를 바탕으로 MIMO PPF 제어기의 다중 파라미터를 실시간으로 조정이 가능한지 알아보았다. 두 개의 PPF제어기에 대한 평가를 시작으로 10 개의 제어 파라미터 조정 즉, 2개의 PPF제어기 필터주파수, 8개의 게인값을 실시간 유전자 알고리즘을 이용하여 해결할 수 있음을 확인하였다. 파라미터 연구를 통해서 개체수, 교배율, 돌연변이율의 영향을 조사하였는데 개체수는 파라미터크기보다 한 차원 더 커야하고 교배율은 고유진동특성이 분명하다면 높은 것이 좋다. 돌연변이율은 빠른 수렴을 위해 작은 것이 좋다.

10개 파라미터 평가문제에 유전자 알고리즘을 적용한 경

우에 최상의 적합도 값을 기초로 하면 파라미터 집합에서 몇몇 변화들을 볼 수 있었다. 따라서, 마지막 세대의 상위 10%의 평균값을 계산하는 알고리즘으로 수정하였다. 평균값들은 이론적인 결과 값들과 거의 같은 값을 나타내었다. 유전자 알고리즘에 의해 조정된 MIMO PPF 제어기에 의한 진동제어성능은 유한요소모델에 근거한 MIMO PPF 제어기의 이론적인 결과에 의한 것보다 조금 더 우수하다. 결론적으로 유전자 알고리즘을 진동제어를 위한 다중 파라미터 조정문제로 적용할 경우 평균값을 사용하면 원하는 최적 값을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 국방과학연구소 위탁과제(UD000038ED)의 지원으로 이루어졌다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- (1) Crawley, E. F. and de Luis, J., 1987, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," AIAA Journal, Vol. 25, No. 10, pp. 1373~1385.
- (2) Crawley, E. F. and Anderson, E. H., 1990, "Detailed Models of Piezoceramic Actuation of Beams," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 1, No. 1, pp. 4~25.
- (3) Hanagud, S., Obal, M. W., and Calise, A. J., 1992, "Optimal Vibration Control by the Use of Piezoceramic Sensors and Actuators," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 15, No. 5, pp. 1199~1206.
- (4) Kwak, M. K., Denoyer, K. K. and Sciuilli, D., 1995, "Dynamics and Control of a Slewing Active Beam," Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 18, No. 1, pp. 185~186
- (5) Kwak, M. K. and Sciuilli, D., 1996, "Fuzzy-Logic Based Vibration Suppression of a Slewing Active Structure Utilizing Piezoceramic sensors and Actuators," Journal of Sound and Vibration, Vol. 191, No. 1, pp. 15~28.
- (6) 곽문규, 1995, "압전재료를 이용한 지능구조물의 능동진동제어," 한국소음진동공학회지, 제 5 권, 제 3 호, pp. 292~302.
- (7) Fanson, J. L. and Caughey, T. K., 1990, "Positive



Position Feedback Control for Large Space Structures," AIAA Journal, Vol. 28, No. 4, pp. 717~724

(3) 라완규, 광문규, 윤광준, 1997, "압전감지기와 작동기를 이용한 복합재료 격자 구조물의 능동 진동 제어," 한국항공우주학회지, 제 25 권 제 5 호, pp. 76~85.

(9) Goldberg, D. E., 1989, "Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning," Addison Wesley, Reading, MA.

(10) Kwak, M. K. and Han, S. B., 1998, "Application of Genetic Algorithm to the Determination of Multiple Positive Position feedback Gains for Smart Structure," SPIE's 5th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, CA USA, 637~648.

(11) Kundu, S., Kawata, S., and Iwata, Y., 1996,

"Genetic Algorithms for Active Vibration Control System Design," Third International Conference on Motion and Vibration Control, Chiba Japan, pp.122~127.

(12) Kwak, M. K and Shin, Tae-Sik, 1999, "Real-Time Automatic Tuning of Vibration Controllers for Smart Structures by Genetic Algorithm," [3667-67] SPIE's 6th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, Newport, CA USA, pp. 679~690.

(13) 허 석, 광문규, 1999, "유전자 알고리즘에 의한 다중입출력 PPF 제어기의 실시간 조정", 한국소음진동공학회, 춘계학술대회논문집, pp. 213~218.

(14) 허 석, 광문규, 1999, "다중입출력 능동진동제어를 위한 실시간 유전자 알고리즘 개발", 한국소음진동공학회, 추계학술대회논문집, pp. 205~210.