
Genetic Algorithm을 이용한 압전체 부착 구조물의 작동기 배치 최적화 기법

A Study of Optimization for Actuators Placement of Structures with Piezo-Materials Using Genetic Algorithm

한재흥*, 이 인 (한국과학기술원)

1. 서론

최근들어 강성과 강도가 높고 무게가 가벼운 복합재 구조물의 사용이 늘고 있다. 이러한 경량 구조물의 유연성 증가로 구조물의 진동량이 커지면서, 이를 능동적으로 제어하려는 연구가 많이 이루어지고 있다. 구조물의 진동 제어 시스템 설계에 있어서, 작동기의 위치는 전체 제어계의 성능에 크게 영향을 미치게 되며, 특히 잘못된 배치된 작동기는 특정 모드를 제어하지 못하거나(lack of controllability), 잔류 모드의 운동을 유발시키기도 한다(control spillover). 그러므로 1970년대 중반 이후로 많은 연구자들에 의해 작동기의 위치에 관한 문제들이 다루어져 왔다.

Martin[1]은 Optimal Control Cost Minimization에 의해 작동기의 위치를 구하였다. Baruh et al.[2]은 제어 에너지를 최소화하는 최적 작동기의 위치를 구하였다. Viswanathan, Longman 그리고 Likins[3]는 구조물의 가제어성 정도(Degree of controllability)의 개념을 정립하고 이를 이용하여 작동기의 최적 위치를 구하였다. DeLorenzo et al.[4]은 Control power를 최소화하는 작동기의 위치를 구하였다. Schulz와 Heimbold[5]는 Recursive quadratic programming algorithm을 이용하여 감지기와 작동기의 위치 및 제어 이득을 동시에 최적화 하였다.

이상과 같이 여러 연구자들에 의해 작동기의 최적 위치에 관한 연구가 이루어 졌지만, 압전 작동기의 경우 최적 위치나 배치 문제를 다룬 경우는 많지 않다[6, 7]. 본 연구는 구조물에 압전 작동기가 다수 분포되어 있을 때, 이들을 조합하여 소수의 작동기처럼 생각하여, 구조물의 제어 성능을 높이고자 하는 것이다. 실제로 압전 작동기 그 자체의 가격은 다른 작동기에 비해 매우 저렴한 편이며, 또 구조물에 부착 또는 삽입하여 설치하기가 매우 용이하다. 그러나 이러한 작동기 하나하나를 독립된 작동기로 사용한다면, 제어기 자체의 설계가 매우 복잡해 지거나 구현 불가능해 지며, 또한 그 가격 또한 매우 높아 실제로 응용하기가 어렵게 된다. 그러므로 본 연구에서 다루고자 하는 문제는 압전 작동기를 조합하는 문제로 귀결된다. 이러한 조합문제는 미분정보(gradient information)가 존재하지 않고, 그 차수가 매우 높기 때문에 기존의 최적화 방법인 Gradient Method나 Enumerative method로는 최적화시키기가 용이하지 않다. 따라서 본 연구에서는 근래에 알려진 최적화 기법인 GA(Genetic Algorithm) [8]를 이용하여 이 문제를 해결하고자 한다.

2. 문제 정의

평전단 변형 판 이론에 기초한 압전체 부착

구조물의 유한 요소 해석 프로그램[9]을 이용하여, Fig. 1과 같은 압전재료가 고정지지 경계조건 부근에 부착된 복합계 외팔 평판을 해석하였다. 재료의 물성치는 Table. 1에 표시하였고, 해석 모델의 적층은 $[0/\pm 30/90]_s$ 이다. 압전 재료는 Fig. 1 (b)와 같이 20개의 작은 영역으로 분할하고, 각각의 위치를 1-20으로 표시하였다. 주어진 모델의 동적 특성을 파악하기 위해, 고유치 해석을 통하여 고유진동수와 각 작동기 영역의 모달 제어력을 구하였다.

모달 좌표로 표시된 구조물의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{\eta}_r(t) - 2\zeta_r \omega_r \dot{\eta}_r(t) + \omega_r^2 \eta_r(t) = \sum_{i=1}^m \bar{B}_{ri} u_i(t) \quad (1)$$

여기서, η_r 는 모달 좌표, ω_r 는 고유진동수, ζ_r 는 감쇠비, u_i 는 i 번째 작동기의 제어 입력(여기서는 입력전압), \bar{B}_{ri} 는 모달 참여 행렬(modal participation matrix)로서 i 번째 단의 제어 입력에 의한 r 번째 모드의 모달제어력을 뜻한다. 그리고, m 은 제어 입력의 갯수이다. 모달 참여 행렬을 n 개의 각 작동기에 대해 각각 표시한 것을 $B_{rk}(k=1, \dots, n)$ 로 표시하기로 하자. B_{rk} 의 값은 앞에서 언급한 각 작동기의 모달 제어력과 동일하다. 한편 각 작동기가 어떤 제어 입력을 따르느냐에 따라 \bar{B}_{ri} 가 결정된다. i 번째 입력 전압에 의해 구동되는 작동기의 집합을 U^i 라 하면,

$$\bar{B}_{ri} = \sum_{k=1}^n B_{rk} f(i, k) \quad (2)$$

여기서

$$\begin{aligned} f(i, k) &= 1 \quad \text{if } k \in U^i \\ f(i, k) &= 0 \quad \text{if } k \notin U^i \end{aligned} \quad (3)$$

감지기의 배치가 작동기의 배치와 동일한 경

우를 가정하면, 압전재료의 감지기/작동기의 대칭성(duality)에 의해 감지식은 다음과 같은 형태를 갖는다. 여기서 감지기는 속도성분을 감지한다고 가정하자.

$$y_j = \sum_{r=1}^n \bar{C}_{jr} \dot{\eta}_r(t) \quad (4)$$

여기서

$$\bar{C}_{jr} = -\bar{B}_{rj} \quad (5)$$

여러가지 제어 방식중 가장 간단한 CGC(constant gain control)을 생각해 보자. 이 경우 제어 법칙은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$u_i = G_i y_i \quad (6)$$

이 경우 폐회로 운동방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{\eta}_r(t) + 2\zeta_r \omega_r \dot{\eta}_r(t) + \omega_r^2 \eta_r(t) = -\sum_{i=1}^m \sum_{r=1}^n \bar{B}_{ri}^2 G_i \dot{\eta}_r(t) \quad (7)$$

식 (7)에서 알 수 있듯이 CGC의 제어 효과는 운동방정식의 감쇠를 증가시키는 역할을 한다. 얼마나 효율적으로 제어가 수행되는가 하는 문제를 여기서는 간단히 식 (7)의 극점(pole) 실수부의 크기로 비교하였다. 극점 실수부의 크기는 감쇠값과 직접적인 관계가 있다. 본 연구에서 선택한 파라미터들은 다음과 같다.

Number of actuators (n) = 20

Number of control input (m) = 2

Control gain $G_i = 5,000$ V/A

Inherent damping $\zeta_r = 0.5\%$

이상의 내용을 정리하면, 폐회로 극점의 실수부가 절대값이 큰 음수 값을 갖도록 U^1, U^2 집합을 구하는 문제가 되고, 이 문제는 전형적인 조합문제(Combinatorial problem)으로서, 그 조합은 총 2^{20-1} 가지이다.

3. Genetic Algorithm (GA)

GA는 생물학적 적자 생존(natural selection) 및 진화론(evolution)에서 착안된 일종의 랜덤 검색 방법이다. GA는 설계 변수를 2진수로 코딩(coding)하고, 코딩된 이진 스트링을 평가(evaluation)하여, 그 중에서 적자(the fittest)들을 선택한다. 그리고 선택된 적자들을 재조합하여, 다시 새로운 이진 스트링을 생성하는 일을 반복한다. 이러한 GA는 다음과 같이 요약될 수 있다.

1) 설계변수들을 적절히 2진 스트링 구조로 코딩한다. 설계 변수와 2진 스트링 사이에는 일대일 대응관계가 성립하여야 하며, 적절한 평가함수가 정의되어야 한다.

2) 개체수(population size)와 최대 세대수(generation number), crossover 및 mutation 확률을 선택하고, 초기 population을 임의로 선택한다.

3) 정의된 목적함수에 의해 각 개체를 평가한다

4) reproduction, crossover, mutation 의 3가지 연산자를 이용하여 후손 세대를 생성한다.

5) 해가 수렴될 때까지 3), 4)의 과정을 반복한다.

GA는 기존의 최적화 방법과는 달리 부분 최고점(local maximum)에 도달할 우려가 적고, 미분 정보를 사용하지 않으므로, 이산화된 문제를 다루기에도 적합하다. GA를 2절에서 정의된 문제에 적용하기 위해 다음과 같은 스트링 구조를 정의한다.

$$l = a_1 a_2 \cdots a_{20} \quad (8)$$

$$a_i = 1 \text{ when } i \in U^1$$

$$a_i = 0 \text{ when } i \in U^2 \quad (9)$$

위와 같은 이진 스트링(chromosome) 구조를 정의한 후, GA 알고리즘을 이용하여 최적화를 수행하

였다. 이 때 목적 함수는 다음과 같은 4가지를 고려하였고, 각 목적함수를 최대로 하는 스트링 l 을 구하였다.

$$\begin{aligned} J_1 &= -\text{Re}(p_1) \\ J_2 &= -\text{Re}(p_2) \\ J_3 &= -\text{Re}(p_3) \\ J_4 &= \min_{i=1,2,3} \{-\text{Re}(p_i) / \text{Im}(p_i)\} \end{aligned} \quad (10)$$

GA 적용시 사용한 선택 방식은 Tournament selection method이며, 계산시 필요한 파라미터들은 다음과 같다.

Popsize = 50

Length of chromosome = 20

Maximum number of generation = 20

Crossover probability = 0.8

Mutation probability = 0.05

Select winner of randomly selected 5 individuals

4. 결과 및 결론

해석 결과 및 수렴과정은 Table. 2 및 Fig. 2와 같다. GA로 구한 작동기 배치 패턴을 그림으로 도시하면 Fig. 3과 같다. Fig. 3의 (a), (b), (c)에서 작동기 배치 패턴은 각각의 모드의 모달 제어력의 위상에 따라 정확히 배치되어 짐을 알 수 있었다. 목적 함수가 특정 모드만을 제어하는 것이므로 이 결과는 당연한 것으로 볼 수 있다. 최적 해의 배치 패턴이 복잡해 짐에 따라 수렴하는데 보다 많은 세대를 필요로 하나, 비교적 적은 세대내에 정확한 해로 수렴하는 것을 알 수 있었다. 한편 성능 함수 J_4 에 대한 최적 배치는 Fig. 3 (d)와 같고, 이 해는 최적 또는 준최적 해로 추정된다.

이상의 연구결과를 통하여 다음과 같은 결론

을 얻을 수 있었다.

최적화 기법 중 하나인 GA가 압전 작동기의 배치 문제와 같은 조합 문제에 매우 적합하다는 것을 알 수 있었다. 단일 모드 제어를 위한 압전 작동기의 최적 배치 문제는 각 작동기의 위상에 따라 결정 되리라고 예상할 수 있는데, 실제로 이와 같은 목적 함수로 최적화를 수행한 결과 비교적 적은 세대안에 최적 해를 찾을 수 있음을 알았다. 제어계의 성능을 나타내는 적당한 가격 함수에 대해 최적화를 수행한 결과 최적 또는 준최적으로 추정되는 해에 도달함을 알 수 있었다.

[참고문헌]

1. Martin, J. E., "Optimal Allocation of Actuators for Distributed Systems," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 100, No. 3, 1978., pp. 227-228.
2. Baruh, H., and Meirovitch, L., "On the Placement of Actuators in the Control of Distributed-Parameter Systems" *Proceedings of the 1981 AIAA Dynamics Specialists Conference*, AIAA, New York, 1981, pp. 611-620.
3. Viswanathan, C. N., Longman, R. W., and Likins, P. W., "A Degree of Controllability Definition: Fundamental Concepts and Application to Modal Systems," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 7, No. 2, 1984, pp. 222-230.
4. DeLoranzo, M. L., "Sensor and Actuator Selection for Large Space Structure Control," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 13, No. 2, 1990, pp. 249-257.
5. Schulz, G., and Heimbald, G., "Dislocated Actuator/Sensor Positioning and Feedback Design for Flexible Structures," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 6, No. 5, 1983, pp. 361-367.
6. Lammering, R., Jia, J., and Rogers, C. A., "Optimal Placement of Piezoelectric Actuators in Adaptive Truss Structures," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 171, No. 1, 1994, pp. 67-85.
7. Tzou, F. S., and Fu, H. Q., "A Study of Segmentation of Distributed Piezoelectric Sensors and Actuators, Part I: Theoretical Analysis," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 172, No. 2, 1994, pp. 247-259.

8. Goldberg, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
9. 한 재홍, 이 인, "유한요소법을 이용한 지능 복합재 구조의 진동 제어 특성 고찰," *한국항공우주학회지*, 제 23 권 제 1 호, 1995, pp. 85-96.

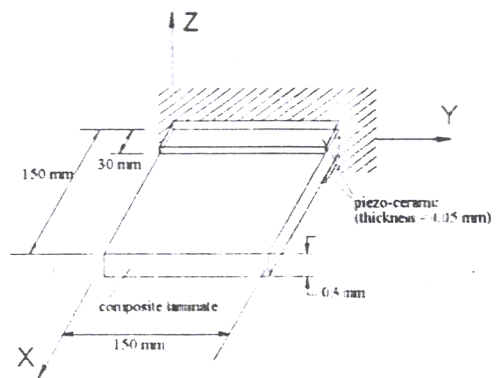
Table 1. Material properties .

	Graphite/Epoxy	Fuji C-82
E_1	1300 GPa	59.0 GPa
E_2	10.0 GPa	59.0 GPa
G_{12}	4.85 GPa	22 GPa
G_{23}	3.29 GPa	21 GPa
ν_{12}	0.31	0.34
t	0.1125 mm	0.05 mm
ρ	1480 Kg/m ³	7400 Kg/m ³
$d_{31} = d_{32}$		-250 pC/N

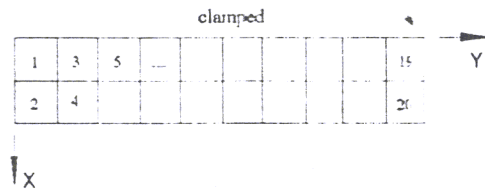
Table 2. Result of Actuator Placement Optimization

	Best final chromosome	Objective function	*
J_1	00000000000000000000	14.054	7
J_2	00000000101111111111	9.674	9
J_3	11110100000000111111	15.865	15
J_4	00000010111111111000	0.00867	15

* : Generation when best chromosome obtained.

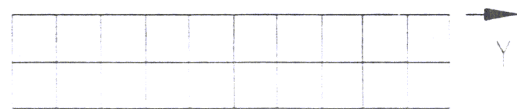


(a) Configuration of over all system

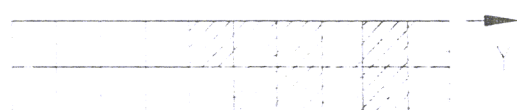


(b) Piezo-actuator Numbering

Fig. 1 Configuration and actuator distribution.



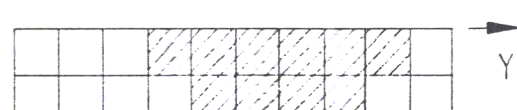
(a) J1



(b) J2



(c) J3



(d) J4

Fig. 3 Actuator patterns for maximizing performance indices.

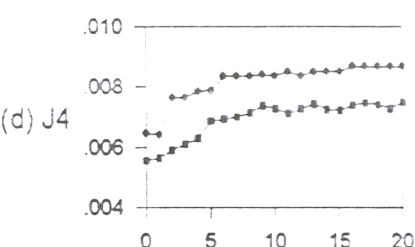
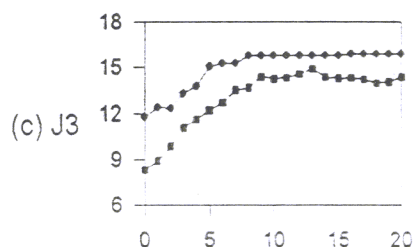
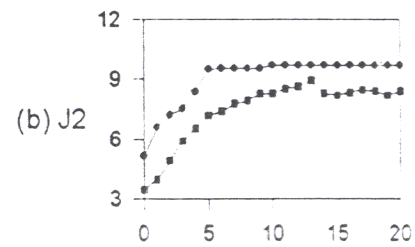
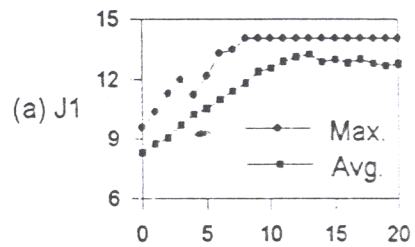


Fig. 2 Convergence process of Genetic algorithm.

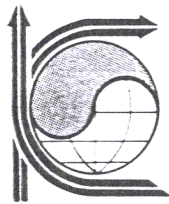
1995年度

秋季 學術發表會 論文集

Proceedings of the KSAS Fall Annual Meeting '95

日時：1995年 11月 11日(土)

場所：仁 荷 大 學 校



主 催

社團 韓 國 航 空 宇 宙 學 會

The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences

後 援

韓 國 科 學 技 術 團 體 總 聯 合 會

- 전진비행시 헬리콥터 블레이드의 공력탄성학적 안정성 연구
한창현*, 김승조(서울대학교), 송창식(대우중공업)
 김용진(국방과학연구소), 정성남(전북대학교)···540

좌장 : 이우식(인하대학교)

- 제침각이 있는 평판의 비선형 자유진동 해석····· 이창욱*, 김지환(서울대학교)···545
- 특이 접촉응력이 있는 쇠기의 형상 최적화
박정선*, 김두만(한국항공대학교)···550
- 고차보이론에 의한 Mixed-mode형태의 복합재 파괴 현상에 대한 해석
김성태*, 조평효, 김기욱(인하대학교)···556
- 고체 로켓트 노즐의 구조 및 형상 설계
정 훈*, 홍순성, 구자예, 이수용(한국항공대학교)···560

좌장 : 김지환(서울대학교)

- 항공기 구조용 알루미늄 압출재 성형공정 설계
최한호*, 강범수(부산대학교)···565
- Slippage영향을 고려한 비대칭 적층판의 상온에서의 곡률형상에 관한 연구
김민호*, 조평효(인하대학교)
 안구중, 덕용성, 최홍섭(대한항공)···569
- 광섬유 센서에 의한 복합재 보의 변형률 및 모자균열 파손의 동시감지
권일범*, 김천곤, 홍창선(한국과학기술원)···573
- Genetic Algorithm을 이용한 압전체 부착 구조물의 작동기 배치 최적화 기법
한재홍*, 이 인(한국과학기술원)···579