

< 논문 >

컴플라이언트 메커니즘을 이용한 스윙 암 액추에이터의 설계

- 강성 효과를 고려한 다중목적 최적화 설계 -

이충용* · 유정훈† · 민승재**

(2005년 6월 13일 접수, 2005년 12월 27일 심사완료)

Design of a Swing-arm Actuator using the Compliant Mechanism

- Multi-objective Optimal Design Considering the Stiffness Effect -

Choong-yong Lee, Jeonghoon Yoo and Seungjae Min

Key Words: Compliant Mechanism(컴플라이언트 메커니즘), Topology Optimization(위상 최적화), Multi-Objective Optimization(다중목적 최적화), Stiffness Effect(강성 효과)

Abstract

Topology optimization is an effective scheme to obtain the initial design concept: however, it is hard to apply in case of non-linear or multi-objective problems. In this study, a modified topology optimization method is proposed to generate a structure of a swing arm type actuator satisfying maximum compliance as well as maximum stiffness using the multi-objective optimization approach. The multi-objective function is defined to maximize the compliance in the direction of focusing of the actuator and the second eigen-frequency of the structure. The design of experiments are performed and the response surface functions are formulated to construct the multi-objective function. The weighting factors between conflicting functions are determined by the back-error propagation neural network and the solution of multi-objective function is acquired using the genetic algorithm.

1. 서 론

구조물에서의 위상최적설계는 구조물 내의 구멍(hole)의 개수와 위치, 영역간의 연결과 같은 형상 결정의 문제로 정의될 수 있다. 그러나, 위상최적설계가 갖는 연속체 구조에서의 완화(relaxation) 등의 수학적 어려움과 변수-형상 최적설계와 대비되는 개념의 상이함 등으로 인해 실제 적용에 있어서는 많은 어려움이 있게 된다. 구조물의 경량화를 추구함에 있어 외부 경계의 변형만으로는 큰 경량화 효과를 얻기 어려우며

필연적으로 설계 영역(design domain) 내의 위상의 변화가 요구되게 된다.⁽¹⁾

위상최적화 방법은 크게 밀도법(SIMP: Simple Isotropic with Penalization)과 균질화설계법(HDM: Homogenization Design Method)으로 나누어진다. 밀도법의 경우 개념상으로는 균질화법과 유사하며 상대적으로 적용하기 쉬워서 연구자들 사이에 널리 사용되나, 근본적으로 연속체 문제를 유한개의 요소로 분할하여 해결하므로 설계 영역을 몇 개의 유한 요소로 분할하였는지에 따라 위상최적화 결과가 좌우되는 한계성을 갖고 있다.⁽²⁾ 균질화법의 경우 연속체의 특성상 요구되는 복합재의 개념과 영역의 완화라는 수학적 요구 조건을 만족시키는 위상최적 설계의 개념으로써, 재료의 이방성에 의거한 탄성 계수를 계산하며 이는 요소의 밀도에 비례하지 않고 균질화 이론에 의거하여 구하게 되는 이론적 배경을 갖고 있으

* 회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학부

E-mail : yoojh@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2859 FAX : (02)362-2736

** 회원, 한양대학교 기계공학부

나 적용의 어려움과 경우에 따라 해를 구할 수 없는 문제점을 갖고 있다.^(3,4)

이러한 위상최적화 방법은 목적함수에 대한 설계 변수의 민감도 계산을 필요로 하며 이를 위해서는 목적함수의 수학적 정식화가 요구된다. 따라서, 비선형 문제나 다중목적 함수의 경우와 같이 민감도의 수학적 계산이 어려운 문제에 있어서는 적용에 한계를 가지게 된다. 본 연구에서는 이러한 위상최적설계의 단점을 극복하고 상용 패키지의 해석 기능을 효과적으로 이용할 수 있도록 반응표면법(RSM: Response Surface Method)과 유전알고리즘(GA: Genetic Algorithm)을 이용한 위상최적화 방법을 사용하였다. 반응표면법은 국부적인 설계 영역의 목적 함수를 근사화하기 위한 방법으로 임의의 실험점을 선택하여 통계적인 분석 방법으로 근사식을 구하는 방식이다. 이렇게 반응표면법으로 얻어진 목적 함수에 유전 알고리즘을 적용하여 목적 함수의 최대값을 갖는 설계 변수들의 조합과 다중목적함수에서의 가중치의 값을 찾아내게 되고, 이를 설계 영역에 적용하여 주어진 목적 함수를 최적화하는 밀도 분포를 구하게 된다.⁽⁵⁾

본 연구에서 제안한 위상 최적설계 방법을 초소형 정보저장 기기의 스윙암 형식의 액추에이터 (swing arm type actuator)의 포커싱 방향의 컴플라이언스(focusing compliance) 최대화와 2차 진동 모드와 고유진동수(eigen-frequency)를 동시에 최대화하는 다목적 최적화(multi-objective optimization) 문제에 적용하였다. 일반적으로 대부분의 최적화 문제는 단일 목적함수를 상정하고 이에 대한 단일 최적값을 찾는 경우가 많으나 실제 현상에서 다루어지는 많은 문제는 두 가지 이상의 목적 함수를 동시에 최적화하는 다목적 최적화 과정을 필요로 하고 있다. 경우에 따라서 다목적 최적화 과정은 한 가지 목적 함수를 만족시키면 다른 목적 함수의 값은 악화되는 파레토 최적화 현상(Pareto optima phenomena)을 보이므로 두 가지 목적 함수가 제한 조건 내에서 모두 만족하도록 적절한 가중치(weight factor)를 부여하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 다중목적함수와 설계제한조건을 고려하여 오류 역전파 신경망(back error propagation neural network)을 이용하여 가중치를 구하였다.

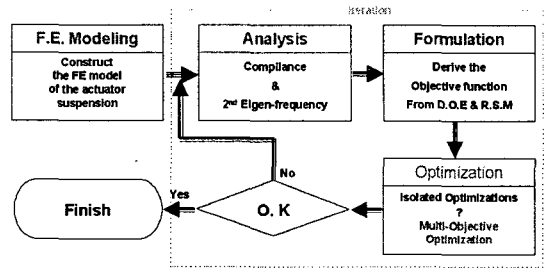


Fig. 1 Optimization process

2. 반응표면 방법 및 유전 알고리즘

2.1 최적설계 과정

본 연구에서 사용된 반응표면법과 유전알고리즘을 이용한 위상최적화 방법에서는 여러 개의 유한요소로 이산화(discretization)된 구조물에서 각 요소의 존재 여부가 위상 최적설계의 설계 변수가 된다. 설계 영역의 유한요소 해석, 실험 계획법 및 반응표면법을 이용한 목적 함수의 도출, 도출된 목적 함수에 유전 알고리즘을 이용하여 최대 목적함수 값을 나타내는 변수의 조합을 찾아내는 최적화 과정이 Fig. 1에 설명되어 있다.

설계의 제한 조건은 PD(photo diode)로부터 방출된 레이저가 대물렌즈를 통해 CD(compact disc)의 트랙 피치(track pitch) 1.6 μ m 내에서 정확한 beam spot을 맺기 위해 요구되는 포커싱 방향의 변위 7.5~8 μ m를 만족하는 동시에, 2차 굽힘 모드와 고유 주파수가 가능한 높은 값을 갖도록 하되 최소 4kHz 이상 되도록 설정하였다.

최적설계 과정에서 요구되는 중요한 사항은 설계 변수의 변화에 의한 목적 함수 및 제한 조건의 변화를 추정하는 민감도 해석(sensitivity analysis)이다. 그러나 이러한 민감도의 계산 과정은 경우에 따라 수학적으로 표현하기 쉽지 않으며, 위상 최적설계의 경우 구조물이 연속체임을 감안하더라도 단순히 구조물을 유한개의 요소로 분할하여 설계를 수행할 경우 Cheng과 Olhoff가 제시하였던 영역의 완화와 관련된 문제점을 가지게 된다.⁽⁶⁾ 일단 민감도가 계산될 수 있다면 여러 가지 최적화 알고리즘을 이용해 빠르게 최적해를 구할 수 있다. 이러한 민감도 계산의 어려움을 피하는 동시에 계산 시간을 단축하기 위하여 본 연구에서는 반응표면법과 유전알고리즘을 이용한 위상최적설계 방법을 이용하였다.

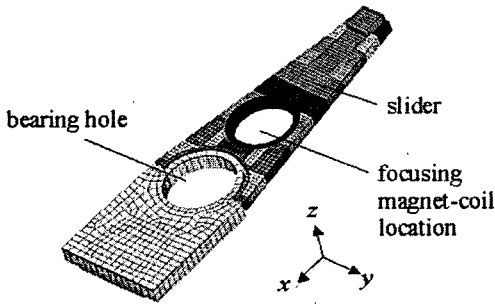


Fig. 2 Swing arm type actuator

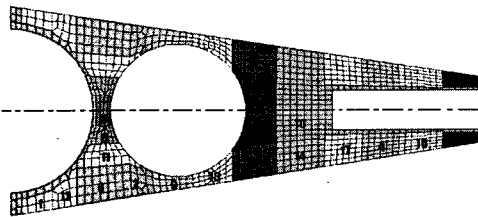


Fig. 3 Design domain and design variables

2.2 설계 영역과 설계 변수

위상최적 설계의 대상이 되는 스윙암 형식 액추에이터의 전체적인 구조는 Fig. 2와 같다.

설계 영역은 Fig. 3에 나타난 바와 같은 스윙암 형식 액추에이터의 슬라이더 부분이며 자기력을 발생하기 위한 코일, 광학 헤드 및 광학 유닛은 위상 최적화 영역에서 제외하였다. 서스펜션의 크기는 21×9.5×1mm³이며 스윙 암 전단에 부착된 광 헤드-픽업 유닛(optical head and pickup unit)의 크기는 6.6×1.8×1mm³이고 무게는 0.1g이다.

유한요소 해석을 위한 경계조건으로서 베어링 홀에 위치한 각 노드는 z축에 대한 회전만이 가능하도록 자유도를 제한하였다. 포커싱 코일에 의한 자기력은 Fig. 2에 나타난 포커싱 코일의 2개의 노드에 -z축 방향으로 자기회로의 해석을 통해 계산된 값인 0.33mN이 작용하도록 설정하였다.

서스펜션은 모두 34개의 영역으로 분할되었으며 이에 따라 영역 설계 변수의 개수는 34개가 되지만, 서스펜션의 형상이 중심축을 따라 대칭을 이루므로 34개의 1/2에 해당하는 17개의 영역을 설계 변수로 지정하게 된다. 각 영역은 해당 영역이 존재할 경우 1, 존재하지 않는 경우 0의 값을 갖게 되므로 17개의 영역 설계 변수들을 0 또는 1의 2진수 값으로 표현할 수 있게 된다.

Table 1 Orthogonal array (17-variable, 2-level)

Run	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1
4	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0
5	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
6	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
7	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
8	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
9	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
10	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
11	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0
12	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1
13	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
14	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1
15	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0
16	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1
17	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1
18	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0

Table 2 Experiment table

Run	1	2	5	9	11	12	15	16/17
1	0	1	1	1	1	1	1	1
2	1	0	1	1	1	1	1	1
3	1	1	0	1	1	1	1	1
4	1	1	1	0	1	1	1	1
5	1	1	1	1	0	1	1	1
6	1	1	1	1	1	0	1	1
7	1	1	1	1	1	1	0	1
8	1	1	1	1	1	1	1	0
9	0	1	1	1	1	1	0	1
10	1	0	1	0	1	1	1	1
11	1	1	0	1	0	1	1	1
12	1	1	0	0	1	1	1	1
13	1	0	1		0	0	1	1
14	1	1	0	1	1	0	0	1
15	1	1	0	1	0	1	0	0

2.3 실험 계획법 및 반응표면법

17개의 변수는 각각 0 또는 1의 값을 가지므로 전체 실험 횟수는 2¹⁷=131,072회가 된다. 그러나 현실적으로 130,000번에 해당하는 실험을 실행하는 것은 많은 시간과 계산 비용을 필요로 하게 되므로 각 설계 변수간의 상호 작용이 없는 독립적이라는 가정 하에 직교배열표(orthogonal array)를 적용하고 상용 유한요소 해석패키지인 ANSYS 8.1을 이용하여 총 18회의 해석을 수행하였다. 실험계획법과 민감도 해석을 통해 17개의 설계 변수들 중 8개의 민감한 변수를 추출하고 추출된 8개의 민감한 변수들에 대하여 Table 2의 실험표를 이용하여 다시 총 15회의 해석을 수행하였다. 실험 결과들의 회귀 분석을 통해 반응표면식을 구성하게 되고 이는 각 단일 최적화의 목적 함수가 된다.

반응표면식을 구성하기 위하여 설계 공간의 실험점을 선택하는 실험계획법에는 비교적 적은 실험 횟수로 반응 표면의 곡면적 특성을 잘 나타낼 수 있는 장점을 갖는 중심합성 계획법이 많이 사용되지만, 본 연구에서는 설계 변수들이 0 또는 1의 값을 갖기 때문에 중심합성 계획법을 사용하지 않고 직접 대입법을 사용하였다.

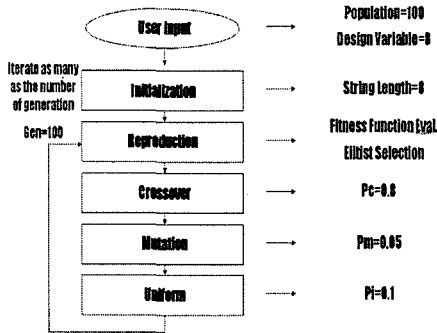


Fig. 4 Genetic algorithm procedure

2.4 목적 함수

본 연구의 최적화 목적 함수는 식 (1)과 같이 서스펜션의 포커싱 방향의 컴플라이언스 최대화 함수 $C(x)$ 와 2차 굽힘 모드의 고유진동수 함수 $F(x)$ 를 동시에 최대화하는 다목적 최대화 함수 (multi-objective optimization function)이다. 초기값에 대하여 나누어줌으로써 정규화 된 각각의 목적 함수에 가중치를 부여함으로써 다목적 최적화 함수를 구성하게 되며 가중치는 오류 역전과 신경망에 의해 결정하게 된다.

$$\begin{aligned} \text{Maximize } M(x) &= wC(x) + (1-w)F(x) \quad (1) \\ \text{Subject to } &7.5\mu\text{m} \leq C(x) \leq 8\mu\text{m} \\ &4000\text{Hz} \leq F(x) \end{aligned}$$

2.5 유전 알고리즘

실험 계획법과 반응표면법을 통해 구성된 목적 함수를 유전 알고리즘에 적용하여 최적해를 구하는 과정이 Fig. 4에 도시되어 있다. 설계 변수는 총 8개이며 각 변수가 0 또는 1의 값을 갖게 되므로 각 개체의 스트링 길이는 8이 된다.

개체군(population)의 개수는 100개, 2개의 개체 사이에 교배가 일어날 교배 확률(crossover probability)은 80%, 마스크에 의해 개체군의 여러 지점에서 교배가 일어날 균일 교배 확률(uniform crossover probability)은 10%, 변이 확률(mutation probability)은 5%, 재생성(reproduction) 과정에서 Elitist 방식에 의해 상위 5개의 우수 인자를 선정하고 하위 5개의 인자는 도태시킨 뒤 다음 세대에 전달하도록 설정하였다. 각 세대의 교배, 변이, 우수 인자의 선택과 전달 과정이 반복됨에 따라 최종적으로는 얻어진 개체군이 목적 함수의 최대값을 나타내는 변수들의 조합을 나타낸다.⁽⁷⁾

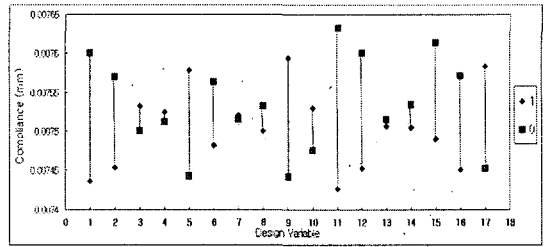


Fig. 5 Sensitivity analysis of design variables for the focusing compliance

3. 실험 결과

3.1 포커싱 방향의 컴플라이언스 최대화

3.1.1 실험 계획법 및 민감도 해석

Table 1의 18개 실험에 대한 모델링을 수행한 뒤 포커싱 코일로부터 발생하는 자기력(magnetic force) 0.33mN에 의한 포커싱 방향의 컴플라이언스를 계산하였다.

Fig. 5에 표시된 민감도 해석의 결과를 이용하여 17개의 설계 변수들 중에서 1, 2, 5, 9, 11, 12, 15, 16 등 8개의 민감한 변수를 추출하고, 이렇게 추출된 8개의 민감한 변수들에 대하여 총 15회의 실험을 실행하였다. 나머지 민감하지 않은 9개의 변수들은 모두 1의 값을 갖도록 고정한 상태에서 Table 2에 의해 민감한 8개의 설계 변수만이 0 또는 1의 값을 갖도록 하여 실험하였다.

3.1.2 목적함수의 구성 및 최적화 결과

추출된 8개의 변수에 대한 15회의 실험결과 데이터들을 상용통계분석 프로그램인 SAS 8.0을 이용한 회귀 분석을 통해 반응표면 함수를 얻게 되며, 따라서 포커싱 방향의 컴플라이언스 최대화의 목적함수 $c(x)$ 는 식 (2)와 같이 표현된다. 근사식의 R-square 값은 0.9185이다.

$$\begin{aligned} c(x) = &-0.00005326x_1 - 0.00004538x_2 \quad (2) \\ &+ 0.00000650x_5 - 0.00000473x_9 \\ &- 0.0000410x_{11} - 0.0001672x_{12} \\ &+ 0.00000649x_{15} - 0.00000235x_{16} \\ &+ 0.00762 \end{aligned}$$

목적함수 $c(x)$ 에 유전 알고리즘을 적용하여 $c(x)$ 가 최대값을 가질 때의 변수 조합을 찾으면



Fig. 6 Topology optimization result for maximizing compliance

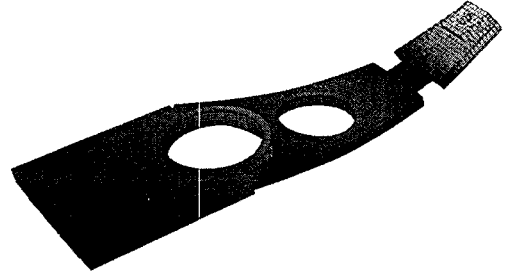


Fig. 8 Topology optimization result for maximizing 2nd eigen-frequency and its mode shape

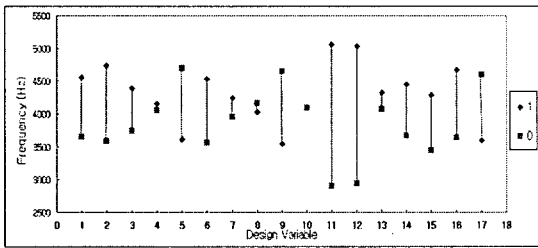


Fig. 7 Sensitivity analysis of design variables for the 2nd eigen-frequency

[1, 2, 5, 9, 11, 12, 15, 16] = [0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0]이 된다. 이러한 변수의 조합을 설계 영역에 적용한 위상최적화 결과는 Fig. 6과 같다. 초기 모델의 컴플라이언스가 7.330 μ m인데 반해 위상 최적화 된 모델의 컴플라이언스는 8.046 μ m로 약 10% 증가하지만, 2차 고유진동수는 7969.7Hz에서 1250.7Hz로 약 85% 정도 감소하였다.

3.2 2차 굽힘 모드의 고유 주파수 최대화

3.2.1 실험 계획법 및 민감도 해석

컴플라이언스 최대화 과정과 동일하게 Table 1의 18개 실험에 대한 모델링을 수행한 뒤 모드 해석(Modal Analysis)에 의한 2차 굽힘 모드의 고유진동수를 계산하였다.

Fig. 7의 민감도 해석을 통해 17개의 설계 변수들 중에서 1, 2, 5, 9, 11, 12, 16, 17 등 8개의 민감한 변수를 추출하고, 이렇게 추출된 8개의 민감한 변수들에 대하여 총 15회의 실험을 실행하였다. 컴플라이언스의 경우와 마찬가지로 나머지 민감하지 않은 9개의 변수들은 모두 1의 값을 갖도록 고정하여 실행하였다.

3.2.2 목적함수의 구성 및 최적화 결과

추출된 8개의 변수에 대하여 실행한 15회의 실험결과 데이터들을 SAS 8.0을 이용한 회귀 분석을 통해 반응표면 함수를 얻게 되며, 따라서 2차 굽힘 모드의 고유 주파수 최대화 목적함수 $f(x)$ 는 식 (3)이 된다. 이 근사식의 R-square 값은 0.9941이다.

$$f(x) = 164.03x_1 + 932.99x_2 + 22.95x_5 + 577.39x_9 + 446.09x_{11} + 4621.66x_{12} + 179.23x_{16} - 167.63x_{17} + 1172.89 \quad (3)$$

목적함수 $f(x)$ 에 유전 알고리즘을 적용하여 $f(x)$ 가 최대값을 가질 때의 변수 조합을 찾으면 [1, 2, 5, 9, 11, 12, 16, 17] = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0]이 된다.

목적 함수 $F(x)$ 가 최대값을 갖는 변수의 조합을 설계 영역에 적용하여 얻은 위상 최적화 결과는 Fig. 8과 같다. 초기 모델의 2차 고유 주파수가 7969.7Hz인데 반해 위상 최적화 된 모델의 2차 고유 주파수는 7997.8Hz로 약 1% 정도 증가하였지만, 컴플라이언스는 7.330 μ m에서 7.330 μ m로 거의 변화가 없음을 확인할 수 있다.

3.3 다목적 위상 최적화

3.3.1 가중치의 선정 및 다중목적 함수의 구성

포커싱 방향의 컴플라이언스와 2차 고유 진동수를 동시에 최대화하는 다목적 최적화 함수는 두 목적함수가 제한 조건 내에서 모두 만족하는 적절한 가중치를 부여함으로써 이루어진다. 컴플라이언스-고유 주파수의 관계는 변위-강성의 관계로써 변위가 커지면 강성이 작아지고 강성이

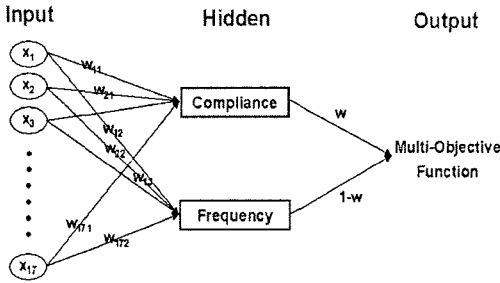


Fig. 9 Error back-propagation neural network

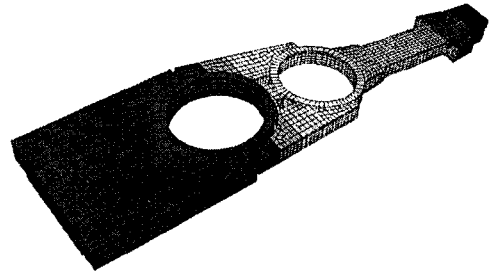


Fig. 10 Multi-objective topology optimization result

커지면 변위가 작아지는 상충적 관계를 보인다. 두 단일목적 함수간의 가중치를 매개로 한 다목적 최적화 함수를 구성하기 위하여 각 최적화 과정의 초기값을 목적함수로 나누어줌으로써 정규화(normalization)한 뒤, 실험 계획법을 이용하여 선정된 설계점들의 컴플라이언스와 2차 고유 진동수 값을 혼련 데이터로 사용하여 출력과 실제값과의 차이를 최소화하도록 신경망 내의 가중치를 최적화하는 오류 역전파 신경망을 이용하였다.⁽⁸⁾ Fig. 9의 구조를 갖는 역전파 신경망을 이용하여 식 (1)의 설계 제한조건을 만족하며 $M(x)$ 가 최대값을 갖도록 하는 가중치 w 는 0.6로 얻어지며 이를 고려한 다목적 최적화 함수 $M(x)$ 는 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{Max. } M(x) &= w \frac{c(x)}{c_0} + (1-w) \frac{f(x)}{f_0} & (4) \\
 &= 0.6C(x) + 0.4F(x) \\
 &= 0.003873x_1 + 0.04311x_2 + 0.001684x_5 \\
 &\quad + 0.02859x_6 + 0.019033x_{11} + 0.21828x_{12} \\
 &\quad + 0.00053124x_{15} + 0.0088032x_{16} \\
 &\quad - 0.008413x_{17} + 0.68261
 \end{aligned}$$

3.3.2 최적화 결과

다목적 최적화 함수 $M(x)$ 에 유전 알고리즘을 적용하여 $M(x)$ 가 최대값을 가질 때의 변수 조합을 찾으면 [1, 2, 5, 9, 11, 12, 15, 16, 17] = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0]이 된다.

다목적 최적화 함수 $M(x)$ 가 최대값을 갖는 변수의 조합을 설계 영역에 적용하여 얻은 위상 최적화 결과는 Fig. 10과 같다. 위상 최적화에 의해 컴플라이언스는 7.330 μ m에서 7.530 μ m로 약 3% 정도 증가하고 2차 고유 진동수는 7969.7Hz에서 5561.8Hz로 약 30% 정도 감소하지만, 컴플라이언스와 2차 고유진동수 모두 식 (1)에서 설정된 설계제한 조건을 만족함을 확인할 수 있다.

포커싱 방향의 컴플라이언스는 포커싱 코일에서 발생하는 자기력에 의해 결정되는데 이 자기력의 크기가 0.33mN으로 매우 작으므로 위상 최적화된 구조물이라 하더라도 컴플라이언스 증가량은 작은 반면 초기 모델의 2차 고유 진동수가 약 8,000Hz로 매우 높았기 때문에 고유 진동수의 감소량은 큰 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 목적함수의 민감도의 수학적 계산이 어려운 경우에 대해 구조물의 다목적 위상 최적 설계를 위해 반응표면법과 유전알고리즘을 이용한 위상최적화 방법을 사용하였다. 각각의 단일 최적화는 실험 계획법과 반응표면법을 이용하여 근사화된 목적 함수를 도출하고 이를 유전 알고리즘에 적용하여 목적 함수의 최대값을 나타내는 설계 변수들의 조합을 찾아낸다. 이렇게 얻어진 변수의 조합을 설계 영역에 적용하여 주어진 목적 함수를 최적화하는 밀도 분포를 구하였다.

반응표면 함수에서의 변수값들은 실수의 값을 가지게 되나, 설계 영역의 존재 여부의 판정을 위해서 본 연구에서는 0과 1의 이진 변수에 대한 반응표면 함수로 사용하였다. 실수 변수에 대한 반응표면 함수가 최대값을 갖는 경우에는 변수가 음의 실수값을 가질 수 있으나, 설계 영역의 존재 여부의 판단을 위해서는 음의 값이 필요하지 않으므로 음의 실수값을 갖는 변수는 0으로 대체된다. 또한 본 연구에서 사용한 1차 반응표면 함수의 최대값은 각 변수의 계수가 동일한 부호를 가질 때 최대값을 갖게 되므로 양의 부호를 갖는 변수들은 모두 1의 값을 갖게 되고 음의 부호를

갖는 변수들은 모두 0의 값을 갖게 되며 0과 1 사이의 중간값을 갖는 경우는 계산되지 않는다. 따라서 본 연구에서 사용한 1차 반응표면 함수에서는 이진 변수를 이용한 유전 알고리즘에 의해 해를 구하는 방법이 적절하다고 할 수 있다.

컴플라이언스에 대한 식 (2)에서 각 변수의 계수가 동일한 부호를 갖지 않고 양 또는 음의 부호를 갖는 것은 설계 영역의 형상이 복잡한 구조 (complex structure)를 갖기 때문으로 판단된다. 1차 근사 함수식으로 구조물의 정확한 거동을 근사화 하기에는 어려움이 있지만, 이를 보정하기 위하여 2차 이상의 근사 함수식을 사용하는 경우 0 또는 1의 값을 갖지 않고 중간값(intermediate values)을 갖는 변수들을 벌칙화(penalization) 하여 0 또는 1의 값을 갖도록 하는 과정이 추가적으로 필요하게 된다.

본 연구에서 제안한 위상최적화 방법을 적용하는 경우, 비선형 또는 다중물리(multi-physics) 해석과 같은 복잡한 해석과정의 수행을 상용 해석 패키지로 대체할 수 있으므로 실제적인 여러 문제에 대한 적용이 가능하다. 본 연구에서는 제안한 위상 최적설계 방법을 스윙 암 타입 액추에이터의 포커싱 방향의 컴플라이언스와 2차 고유 진동수를 동시에 최대화하는 다목적 최적화에 적용하고 그 유용성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2004년도 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2004-042-D00004)

참고문헌

- (1) Yoo, J., 2003, "A Study on the Topology Optimization of a Solid Structure," *Transactions of Computational Structural Engineering Institute*, Vol. 16, No. 1, pp. 77~85.
- (2) Bendsøe, M. P., 1989, "Optimal Shape Design as a Material Distribution Problem," *Structural Optimization*, Vol. 17, pp. 193~202.
- (3) Bendsøe, M. P. and Kikuchi, N., 1988, "Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenized Method," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 71, pp. 197~224.
- (4) Suzuki, K. and Kikuchi, N., 1991, "A Homogenization Method for Shape and Topology Optimization," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 93, pp. 291~318.
- (5) Han, S., Yoon, D., Lee, J. and Yoo, J., 2002, "Topology Optimization of a Brake Pad to Avoid the Brake Moan Noise Using Genetic Algorithm," *Transactions of Korea Society of Automotive Engineers*, Vol. 10, No. 4, pp. 216~222.
- (6) Cheng, K. T. and Olhoff, N., 1981, "An Investigation Concerning Optimal Design of a Solid Elastic Plates," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 16, No. 3, pp.305~323.
- (7) Lee, J., 2000, "Advanced Genetic Algorithm Strategies in Optimal Design of Stiffened Composite Panels," *Transactions of Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 24, No. 5, pp. 1193~1202.
- (8) Kim Y., Kim J. and Lee, J., 2000, "Optimization of Transonic Airfoil Using GA Based on Neural Network and Multiple Regression Model," *Transactions of Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 26, No. 12, pp. 2556~2564.

(1) Yoo, J., 2003, "A Study on the Topology