

다차원 설계윈도우 탐색법을 이용한 마이크로 액추에이터 형상설계

정민중* · 김영진† · 石原大輔*** · 吉村忍** · 矢川元基***

(2001년 3월 8일 접수, 2001년 8월 8일 심사완료)

Shape Design of Micro Electrostatic Actuator using Multidimensional Design Windows

Min Joong Jeong, Young Jin Kim, Daisuke Ishihara, Shinobu Yoshimura,
and Genki Yagawa

Key Words : Design Window(설계윈도우), Optimization(최적화), Evolutionary Algorithm(진화 알고리즘), Clustering(클러스터링), Micro Electrostatic Actuator(마이크로 정전 액추에이터), Finite Element Method(유한요소법)

Abstract

For micro-machines, very few design methodologies based on optimization have been developed so far. To overcome the difficulties of design optimization of micro-machines, the search method for multidimensional design window (DW)s is proposed. The proposed method is defined as areas of satisfactory design solutions in a design parameter space, using both continuous evolutionary algorithms (CEA) and the modified K-means clustering algorithm. To demonstrate practical performance of the proposed method, it was applied to an optimal shape design of micro electrostatic actuator of optical memory. The shape design problem has 5 design parameters and 5 objective functions, and finally shows 4 specific design shapes and design characters based on the proposed DWs.

1. 서론

최적화기법은 다양한 제한조건을 극복하고 유용한 해를 구하기 위한 방법으로, 많은 공학적 문제에 적용되고 있다. 그러나 마이크로머신과 같은 초소형 공학구조물의 설계에 대해서는 최근까지도 매우 제한적인 경우에 한해 최적화 기법이 적용되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 실제 공학구조물에 대한 최적화기법 적용에 있어서의 문제점은 다음과 같이 정리할 수

있다. (a) 많은 설계변수로 인해 설계영역이 다차원화 된다. (b) 설계변수와 설계목적함수의 특성이 일부 비선형적이며 불연속적이다. (c) 대부분의 설계목적함수가 다목적함수이다. (d) 모든 설계 요구사항이 최적화문제로 정의되기가 어렵다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 본 논문에서는 가용(feasible) 설계 파라미터 영역내의 만족해 공간으로 정의되는 설계윈도우(Design Windows; DW) 탐색법을 제시하였다. 제시된 DW는 엔지니어에게 설계문제의 이해를 위한 정보뿐만 아니라 새로운 설계개념을 전달할 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문에서 제시한 DW 탐색법은 다음의 2 가지 과정으로 구성되어있다. 첫번째 과정에서는 문제해결을 위해 정의된 다차원 설계 공간상에서 연속 진화 알고리즘(Continuous Evolutionary Algorithm; CEA)⁽⁵⁾과 자동 유한요소해석을 이용하여 만족해에 대한 직접탐사를 수행한다. 두번째 과정에서는

* 성균관대학교 대학원 기계설계학과
† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail : yjkim@yurim.skku.ac.kr
TEL : (031)290-5274 FAX : (031)290-5276
** Institute of Environmental Studies
The University of Tokyo
*** Dept. of Quantum Engineering and System Science
The University of Tokyo

전과정에서 구한 해에 대하여 수정 클러스터링 알고리즘을 적용함으로써 DW 를 정의한다. 만족해를 구하기 위한 CEA 적용시에는 전체 설계 파라미터 공간에 대해 다수의 탐색 시작점을 사용하였다. 최종적인 DW 를 결정하는 과정에서는 만족설계해에 대한 사전지식이 없이도 자동적으로 DW 를 찾는 수정 클러스터링 알고리즘을 개발하여 적용하였다.

본 연구에서 제안된 DW 탐색법은 기존의 마이크로머신 구조설계용 CAE(Computer Aided Engineering)^(6,7)시스템에 통합되었으며, 실제로 차세대 광학메모리⁽⁸⁾를 위한 마이크로 정전 액추에이터 최적 형상설계에 적용하여 그 효용성을 입증하였다.

2. 설계원도우 탐색법

2.1 CEA 기반의 만족설계해 탐색법

Mochizuki 등⁽⁹⁾은 설계 파라미터 영역에서 무작위로 다수의 탐색점을 생성하고 이를 하나씩 목적함수들과 제약조건들에 입력하여 평가하는 전 영역 탐색법(Whole area Search Method: WSM)을 개발하였다. 이들이 사용한 초기적인 무작위 탐색법은 그 효율성이 낮으며, 설계실험과 연계한 응답 곡면 근사법(Response Surface Method)은 샘플링 수를 감소시키나 이를 위한 사전 데이터가 필수적이다. 마이크로머신의 설계에 있어서는 실험데이터가 부족하여 사전 데이터의 확보가 어려우며 복잡한 제한조건으로 인해 WSM의 적용이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 극복하기 위해 CEA 기반의 탐색법을 적용하였다. Furukawa 등⁽⁵⁾은 CEA기반 만족설계해 탐색을 수행한 바 있다.

CEA에 관한 기본원리를 간략히 나타내면 다음과 같다. 우선, 실수조합으로 표현되는 각 개체는 무작위로 선발되어 한 세대를 구성하게 된다. 다음, 이후의 세대들은 각 개체를 목적함수에 대입한 개체 적합치를 바탕으로 선별, 교배 및 돌연변이의 진화과정을 통하여 최적해를 생성되게 된다. 사용된 CEA에서 교배와 돌연변이는 평균치 μ 을 갖는 정규분포와 표준편차 σ 로 구성되는 확률계수 μ 에 의한 가중치에 따르며, μ 는 다음과 같다.

$$\mu = N(0, \sigma^2) \quad (1)$$

2.2 수정 K-means 클러스터링 알고리즘

본 논문에서는 CEA 를 이용하여 구한 다수의 설계해를 DW 로 정의하기 위하여 클러스터링 알고리즘을 사용하였다.

현재까지 많은 연구자들에 의하여 발전된 클러스터링 알고리즘은 K-means 클러스터링 알고리즘^(10,11)이다. 이는 각 클러스터의 초기중심을 주어진 데이터와의 특성차, 즉, 일반적으로 물리적 거리를 기준으로 순차적으로 이동시켜 정해진 수(K)의 클러스터를 형성하는 방법이다. 그러나 이러한 방법은 클러스터의 수를 결정하기 위해 전체 데이터에 대한 사전지식을 필요로 한다.⁽¹²⁾

본 연구에서는 변이수준(Variation Level; VL)을 기반으로 주어진 데이터에 관한 사전 지식이 없이도 클러스터의 수가 결정되도록 수정 K-means 알고리즘을 다음과 같이 제시하였다.

Step 1. 초기치 $K=2$ 로 임의의 초기 클러스터 중심 v_{kj} 를 정한다. 여기서 v_{kj} 는 클러스터 $k = \{1, \dots, K\}$ 의 중심이고 $j = \{1, \dots, d\}$ 이며 d 는 파라미터 수를 나타낸다.

Step 2. 주어진 각각의 설계해 x_{ij} 는 클러스터의 중심과의 거리를 비교하여 VL이 최소화되도록 분류하여 클러스터로 구성된다. 하첨자 $i = \{1, \dots, n\}$ 이며 여기서 n 은 전체 설계해의 수를 나타낸다. VL은 클러스터 중심과 각 설계해 사이 거리의 총합으로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$VL(X, U, v) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n u_{ik} \left(\sum_{j=1}^d (x_{ij} - v_{kj})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

여기서 u_{ik} 는 i 번째 설계해가 k 번째 클러스터에 소속하는 정도를 나타내는 소속 함수 값이며, $u_{ik} = \{0, 1\}$ 이다.

Step 3. 구성된 각 클러스터에 소속된 설계해의 평균치를 취해 이를 새로운 클러스터의 중심으로 설정한다. 클러스터의 중심식은 다음과 같다.

$$v_{kj} = \frac{\sum_{i=1}^n u_{ik} x_{ij}}{\sum_{i=1}^n u_{ik}} \quad (3)$$

Step 4. Step 2와 3의 과정을 반복하여 수렴하는 최소 VL을 구한다.

Step 4가 끝나고 나면 클러스터의 수를 구하기 위하여 다음의 과정을 수행한다.

Step 5. 새로운 초기 클러스터 중심을 입력하여

Table 1 Design characters and their restriction

Design characters	Subscriptions
$y_1 = y_{max} / Y_{max} > 1$	y_{max} : max disp. of lens center in y direction, Y_{max} : required max disp.,
$y_2 = y_{min} / Y_{min} < 1$	y_{min} : min disp. of lens center in y direction, Y_{min} : required min disp.,
$y_3 = S \cdot \sigma_{max} / \sigma_y < 1$	σ_{max} : max mean stress in structure, σ_y : yield stress of structure, S : safety factor,
$y_4 = a / A > 1$	a : accel. of lens center in y direction, A : required accel.,
$y_5 = t_{raise} / T_{raise} < 1$	t_{raise} : moving time of lens, T_{raise} : required moving time.

Step 1에서 4의 과정을 반복한다.

Step 6. 만일 서로 다른 초기 중심들에 의한 최소 V_L 이 같은 값일 경우 클러스터 수가 결정되며, 그렇지 않은 경우는 $K=K+1$ 로 증가시켜 Step 1에서 다시 시작한다.

2.3 CAE 시스템의 통합화

본 논문에서 제시한 CEA와 수정 K-means 클러스터링 알고리즘에 의한 DW 탐색법은 Lee와 Yoshimura 등(6,7)에 의해 개발된 마이크로머신용 CAE 시스템에 통합하였다. 통합 CAE 시스템은 병렬 분산 컴퓨터환경(13)에서 작동하며, 유한요소 해석모델, 진화 알고리즘을 이용한 최적엔진과 객체지향 서비스모듈을 채택하였다.

3. 마이크로 액추에이터 형상설계

3.1 광학 메모리 마이크로머신의 구조

Fig. 1에 광학메모리 마이크로머신의 구조도를 나타내었다. 광학 메모리 마이크로머신은 렌즈, 콤(comb)형 정전(electrostatic) 액추에이터, 지지대와 프레임으로 구성된다. 액추에이터는 메모리 픽업 렌즈를 y 방향으로 대하여 나노미터 단위의 변위로 제어한다. 렌즈와 액추에이터로 구성된 몸체는 프레임에 4개의 지지대로 지탱되며 프레임과 액추에이터의 콤 사이에서 정전기력으로 움직인다.

3.2 설계 요구사항

액추에이터의 설계 요구사항은 다음과 같다. (1) 작동변위 범위, (2) 작동변위의 정확성, (3) 강도, (4) 메모리 판독시의 가속도정확성, (5) 작동입력시간

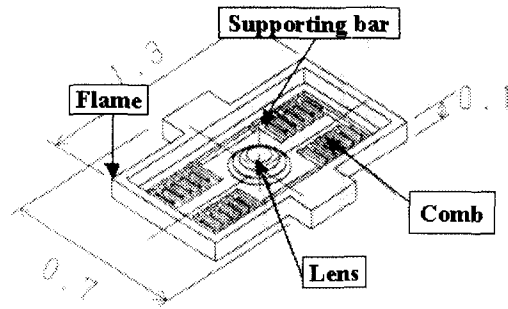


Fig. 1 Microactuator for optical memory

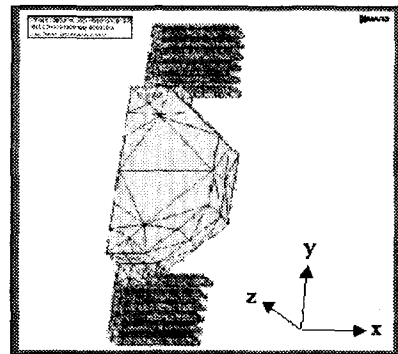
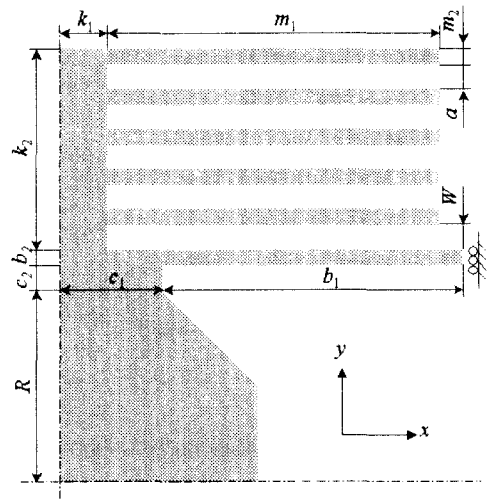


Fig. 2 Typical mesh

에 대한 피이드백 성능, 마지막으로 (6) 제작성이 있다. 본 논문에서는 이중 (1)에서 (5)까지의 설계 요구사항 $y_i (i=1, \dots, 5)$ 를 고려하였으며 Table 1에 이를 각각의 제약조건과 함께 나타내었다. 실제 적용된 설계 제약치는 $Y_{max}=1\mu m$, $Y_{min}=5nm$, $S=2$, $A=30G$, $T_{raise}=0.25ms$ 이다. (1)~(4)의 설계 요구사항은 계단하중을 콤에 작용시켜 3차원 정적 응력해석을 수행하여 평가하였다. (5)의 설계 요구사항은 공기의 영향을 고려하여 3차원 동적 응답해석을 수행하여 평가하였다.

3.3 해석모델

해석모델은 10절점 사면체요소로 구성되었으며 사용된 절점수는 약 5000이다. 본 연구에 사용된 유한요소해석모델을 Fig. 2에 나타내었다. 해석시 사용된 단결정 실리콘은 결정방향에 따라 약 20%의 재료물성치 차이가 있는 이방성 재료이나 선형 탄성체이고 유한요소해석시 액추에이터의 변위가 단방향이므로 이를 등방성 재료로 가정하여 해석하였다. 단결정 실리콘과 공기의 재료물성치는 Table 2에 표시하였다. 각각의 설계 파라미터들은 Ishihara 등(14)의 연구에 따라 선정하였으며, Fig. 3에 설계 초기단계에 시제품으로 제작된 광학메모리



Param.	Dim.(mm)	Param.	Dim.(mm)	Param.	Dim.(mm)
b_1	0.20	m_1	0.30	c_1	$(2^{3/2}-1)R$
b_2	0.015	m_2	0.015	c_2	0.050
k_1	0.05	W	0.050	a	$(k_2-W-5m_2)/4$
k_2	0.30	R	0.40	h_w	0.0020
k_3	0.06	h	0.25	h_h	$a-m_2-h_w$

h_w : wide gap between fixed comb tooth and movable comb tooth,
 h_h : narrow gap between fixed comb tooth and movable comb tooth,
 h : length of lens in z direction,
 k_3 : length of actuator in z direction.

Fig. 3 Shape parameters of the basic design

마이크로머신의 형상과 본 연구의 해석시 사용된 파라미터 b_1, b_2, k_2, k_3, m_1 을 나타내었다. 여기서 b_1 은 지지대의 길이, b_2 는 지지대의 폭, k_2 는 액추에이터의 길이, k_3 는 액추에이터의 두께, m_1 은 콦의 길이를 나타낸다.

3.4 공기영향

액추에이터의 전체 크기는 1mm 이하이며 콦과 지지대 사이의 폭은 수 μm 에 지나지 않는다. 실제 액추에이터의 동적 거동을 평가하기 위해서는 액추에이터에 대한 공기의 영향이 고려되어야 한다. 콦 사이의 Reynolds 수는 10^{-3} 으로 가정하였으며, Knudsen 수가 10^{-2} 이므로 공기는 점성유체로 모델링 하였다.⁽¹²⁾

액추에이터의 형상설계시 콦과 렌즈에 미치는 공기의 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 해석 시에는 이를 추가 질량 M' , 추가 점성 C' 로 치환하여 고려하였다. 또한 렌즈부위에 대한 공기의 영향은 유체 저항력 F' 로 치환하여 고려하였다. 초기 시제품에 대하여 하중이력을 고려하여 동적 해석을 수행하였다. 해석결과, 공기영향에 의하여 전체 하중이력에 대한 진동시간은 15% 증가되었으며, 액추에이터의 y 방향 진폭은 14% 감소되었

Table 2 Material properties

Silicon	Air(under 1 N/m ² , 20 °C)
Mass density: 2328kg/m ³	Mass density: 1.205kg/m ³
Young's modulus: 170 Gpa	Kinematic viscosity: 15.01x10 ⁻³
Poisson's ratio: 0.2	Reynolds number: 1.0x10 ⁻³
Yield stress: 2.0 Gpa	

다. 이러한 해석기법을 이용해 공기의 영향을 고려한 CEA 기반 만족설계해 탐색을 수행하였다.

3.5 만족 설계식

5가지의 설계 요구사항에 대응하는 실험적으로 정의된 5가지의 설계 만족식이 고려되었다. 5가지 설계 만족식은 $\phi_1 = y_1, \phi_2 = -y_2, \phi_3 = -y_3, \phi_4 = y_4, \phi_5 = y_5$ 이다. 여기서 전체 설계 만족식의 값이 10일 경우 전체 조건이 완전히 만족되었다고 고려하였다. 본 연구에서 사용된 전체 설계 만족식 f 는 다음과 같다.

$$f(b_1, b_2, k_2, k_3, m_1) = \sum_{i=1}^5 (\min \phi_i) \Rightarrow \max \quad (4)$$

$$\text{s.t. } \phi_i > 1, \exists i \in \{1, \dots, 5\} \quad (5)$$

여기서, ϕ_i 는 i 번째의 만족식을 나타낸다. 식 (5)에서 5가지의 설계 만족식이 각각 1을 초과하여야 하므로 전체 설계 만족식 f 는 5를 초과하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 전체 설계 만족식 f 가 5를 초과할 때 해석이 완료되도록 설정하였다.

4. 해석결과 및 고찰

4.1 만족 설계해 탐색

만족 설계해의 탐색을 위하여 Fig. 3의 기본 설계를 바탕으로 설계해의 첫번째 세대가 결정되었다. 매 세대의 개체, 즉 설계해 수는 200이며 총 40 번의 세대가 생성되었다. 진화에 따른 설계해 탐색은 상당한 계산 시간이 소요되므로 25 대의 PC(1CPU 펜티엄 133MHz) 클러스터를 사용한 병렬계산 시스템이 사용되었다. 총 계산시간은 약 48 시간이 소요되었으며 이중 80%의 계산시간은 각 개체의 유한요소해석에 사용되었다. 전체 설계 만족식 f 는 25 번째 세대에서 5를 초과하였고, 각각의 만족 설계해가 생성되기 시작하였다. 최종적

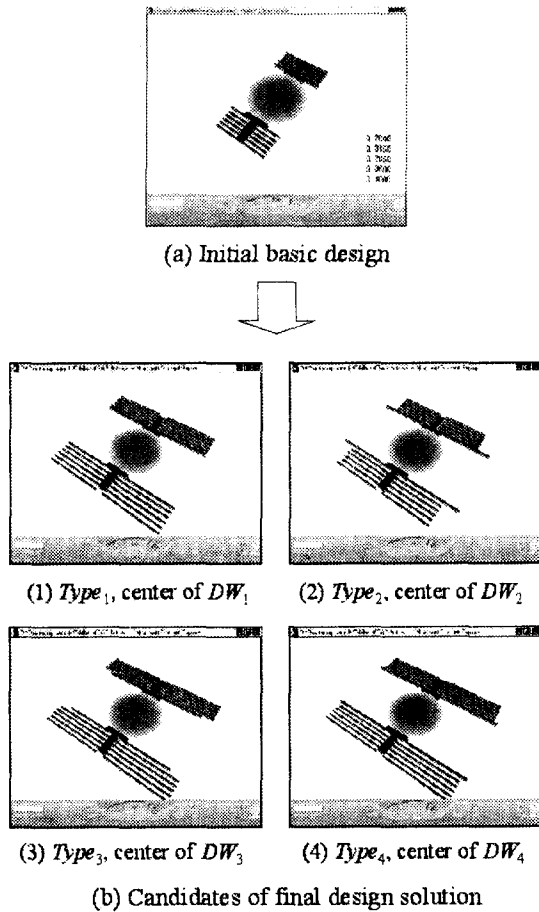


Fig.4 Comparison of shapes among the basic design and four designs

으로 총 16000개의 탐색점 중 179개의 만족 설계해가 획득되었으며, f 의 최대값은 6.35였다.

4.2 설계윈도우 정의

계산한 179개의 설계해를 제안한 클러스터링 알고리즘에 입력하여 총 4개의 설계윈도우를 생성하였다. 각 설계윈도우는 $DW_1(63)$, $DW_2(46)$, $DW_3(42)$, $DW_4(28)$ 로 명명하였으며, 여기서 괄호안은 각 설계윈도우로 분류된 설계해의 수를 나타낸다. 최대 f 값은 DW_3 에 포함되었다.

각 설계윈도우는 5-D의 설계 파라미터 공간에 위치하므로 이를 가시화하여 검토하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 본 연구에서는 각 DW_i ($i=1, \dots, 4$)의 평균벡터가 대표 만족해 $Type_i$ ($i=1, \dots, 4$)로 선택되었다. $Type_1, \dots, Type_4$ 는 최종 설계를 위한 설계해로 정의되었으며 이를 Fig. 4에 나타내었다.

4.3 고찰

(1) 형상: $Type_1$ 은 긴 지지대와 콤을 갖는 형태로

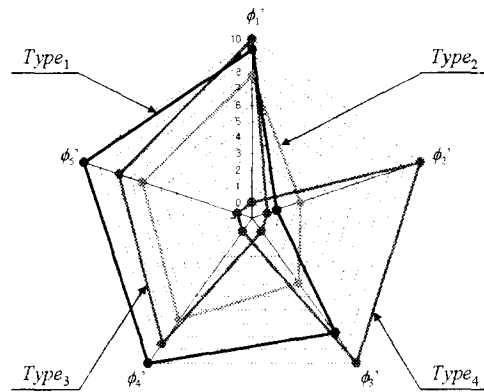


Fig. 5 Comparison of relative satisfaction values

y 방향의 길이는 짧은 형상을 하고 있다. $Type_2$ 는 짧은 콤과 긴 지지대, 그리고 긴 y 방향 값을 갖는다. 한편, $Type_3$ 는 지지대 보다 긴 콤으로 인하여 프레임의 형상이 복잡해지므로 제작상에 어려움이 있다. $Type_4$ 는 지지대와 콤이 가장 긴 형상으로 상대적으로 작은 y 방향 값을 갖는다.

(2) 설계특성: 3.5 절에 기술한 설계만족식은 설계윈도우를 탐색하기 위한 시험적 목표이므로 이를 최종 설계를 위한 대표 만족해 검토에 사용하는 경우 적합치 않을 수 있다. 따라서 최종 설계를 위한 후보들을 평가하기 위하여 상대 설계 만족식 ϕ_1', \dots, ϕ_5' 가 정의되었다. ϕ_i' 는 i 번째 설계특성 y_i 에 대하여 각 설계 후보가 최적일 경우 10, 최악일 경우 0을 나타내며, 액추에이터의 작동변위 범위, 변위의 정확성, 액추에이터의 강도, 가속도, 피이드백 성능의 각각의 최적 설계특성을 표시한다. ϕ_i' 의 레이더차트를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5를 통해 평가하면, $Type_1$ 은 작동변위와 강도에서 우수한 설계특성, 가속도와 피이드백 성능에서 최적 설계특성을 나타내며, $Type_2$ 의 경우는 상대적으로 취약한 설계특성은 없다. $Type_3$ 는 작동범위에서, $Type_4$ 는 변위 정확성과 강도에서 최적 설계특성을 나타내나, 종합적 설계특성은 $Type_1$ 과 $Type_2$ 가 우수함을 알 수 있다.

(3) 최적설계: 제작상에 취약점이 없다면 $Type_1$ 이 상대 설계 만족식에 따라 최적의 설계이다. 특정한 설계 특성에 주목할 경우에는 $Type_3$ 와 $Type_4$ 가 선발될 수도 있겠으나 $Type_3$ 의 경우는 콤보다 짧은 지지대의 형상으로 인하여 프레임에서 액추에이터의 지지대를 지탱할 4 개의 프레임 지지대를 돌출 시켜야 하고 돌출된 프레임 지지대가 액추에이터의 동작에 지장이 없도록 제작되어야 하

는 어려움으로 인하여 선택될 수 없다.

5. 결 론

본 논문에서는 연속 진화 알고리즘과 수정 K-means 클러스터링 알고리즘을 사용한 다차원 설계윈도우 탐색법을 제안하였다. 제안한 설계윈도우 탐색법을 검증하기 위하여 기존의 마이크로머신을 위한 CEA시스템에 본 탐색법을 통합한 실제 마이크로 정전 액추에이터의 형상설계에 적용하였다. 주어진 형상설계 문제는 5개의 설계 파라미터와 5개의 설계 요구사항을 가진 만족설계 문제로, 해석결과 총 4개의 설계윈도우를 획득하였다. 각 설계윈도우의 대표 설계해는 각기 다른 형상과 설계특성을 나타내었다. 4개의 설계윈도우에 대응하는 각 만족설계해는 실제 공학설계의 관점에서 최적설계해 선정에 대해 검토되었다.

검토결과 설계윈도우 1은 긴 지지대와 콦을 갖는 형태로 작동변위와 강도에서 우수한 설계특성, 가속도와 피이드백 성능에서 최적 설계특성이 보여진다. 설계윈도우 2는 짧은 콦과 긴 지지대, 그리고 콦간의 간격이 큰 형상으로 상대적으로 취약한 설계특성은 없다. 설계윈도우 3은 작동변위에서 최적 설계특성을 나타내나 지지대 보다도 긴 콦의 형태로 프레임 지지대를 돌출시켜야 문제점을 나타내었다. 마지막으로 설계윈도우 4의 경우는 지지대와 콦이 가장 길고 콦간의 간격은 작은 형상으로 변위 정확성과 가속도에서 최적 설계특성을 나타내었다. 종합적인 설계특성을 고려하면 설계윈도우 1이 광학메모리 마이크로머신의 정전 액추에이터 형상설계의 최적설계이다.

본 논문을 통해 제시한 설계윈도우 탐색법은 엔지니어에게 설계문제의 이해를 위한 각 설계 파라미터와 각 설계 요구사항에 대한 정보를 설계윈도우를 통하여 제공하고 이를 통하여 새로운 설계 개념을 전달할 수 있을 것으로 판단된다

후 기

본 연구는 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터와 일본 동경대학 ADVENTURE 프로젝트와의 공동연구의 일환으로 이루어진 것으로서 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Folkmer, B., Siber, A., Grobse Bley, W., Sandmaier, H., and Lang, W., 1999, "Improved Simulation for Strongly Coupled Micro-electro-mechanical Systems: Resonant Vacuum Sensor Optimization," *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 74, Issues 1-3, pp. 190-192.
- (2) Nagler, O., Trost, M., Hillerich, B. and Kozlowski, F., 1998, "Efficient Design and Optimization of MEMS by Integrating Commercial Simulation Tools," *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 66, Issues 1-3, pp. 15-20.
- (3) Haronian, D., 1995, "Maximizing Microelectromechanical Sensor and Actuator Sensitivity by Optimizing Geometry," *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 50, Issue 3, pp. 223-236
- (4) 권대갑, 이문구, 1997, "광픽업 미세구동부의 최적설계," 대한기계학회, 대한기계학회논문집(A), 제 21 권, 제 5 호, pp. 819-827.
- (5) Furukawa, T., and Yagawa, G., 1995, "Genetic Algorithms for Real Search Space and Their Use for Nonlinear Inverse Problems," *Transactions of Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 61A, pp. 1409-1415.
- (6) Lee, J. S., Yoshimura, S., Yagawa, G. and Shibaike, N., 1995, "A CAE System for Micromachines : Its Application to Electrostatic Mirco Wobble Actuator," *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 50, pp. 209-221.
- (7) Yoshimura, S., Furukawa, T., Kowalczyk, T. and Yagawa, G., 1997, "An Automated CAE System for Multidisciplinary Structural Design and Its Application to Microaccelerometer Design," *Transactions of Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 62C, pp. 2173-2180.
- (8) <http://www.nedo.go.jp>
- (9) Mochizuki, Y., Yoshimura, S. and Yagawa, G., 1997, "Automated System for Structural Design using Design Window Search Method: Its Application to Fusion First Wall Design," *Advances in Engineering Software*, Vol. 28, pp. 103-113.
- (10) Jane, A. J. and Dubes, R. C., 1988, *Algorithm for Clustering Data*, Prentice-Hall, Inc.
- (11) 남원우, 이상조, 1993, "퍼지 클러스터링과 스트링 매칭을 통합한 형상 인식법," 대한기계학회, 대한기계학회논문집, 제 17 권, 제 11 호, pp. 2711-2922.
- (12) Esogbue, A. O. and Liu, B. 1999, "Cluster Validity for Fuzzy Criterion Clustering," *Computer and Mathematics with Application*, Vol. 37, pp. 95-100.
- (13) Kowalczyk, T., Yoshimura, S. and Yagawa, G., 1997, "Integrated CAE System for Micro-machine Design," *Conference on Computational Engineering and Science*, Vol. 2, pp. 547-550.
- (14) Ishihara, D., Yoshimura, S. and Yagawa, G., 1999, "Automated Design for Micro-machine of Optical Memory," *JSME Design and Systems Conference '99*, No. 99-27, pp. 70-73.