

3차원 유한요소법과 진화전략 알고리즘을 적용한 마이크로 포지셔닝 액추에이터의 형상 최적설계

오광일, 노종석, 정현교  
서울대학교

Optimal Design of Micro-Positioning Actuator by using Three-dimensional Finite Element Analysis and Evolution Strategy

Kwang-il Oh, Jong-seok Rho, Hyun-kyo Jung  
Seoul National University

**Abstract** - 압전현상을 응용하여 설계, 제작되는 기존의 초음파 모터는 기계적인 구조가 단순하여 설계가 비교적 용이한 장점을 갖추고 있는 반면, 그 해석에 있어서는 전통적인 수치해석적인 방법을 사용하고 trial-and-error에만 의존하는 설계 방식으로 인하여 과학적으로 최적화된 설계가 이루어지지 않음으로써 초음파 모터의 효과적인 설계가 이루어지지 않는 문제점이 존재하였다.

따라서 본 연구에서는 3차원 유한요소법과 확률론적 최적화 기법인 진화전략 알고리즘을 이용하여 초음파 모터의 설계에 대한 최적화 기법을 제시하고 제시된 최적화 기법을 이용하여 소형 초음파 모터 중 Micro-Positioning Actuator(MPA)의 설계 및 해석을 수행하여 그 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

압전현상을 이용한 초음파모터(USM)는 기존의 모터와는 달리 자계에 의한 영향을 받지 않고 작은 크기로 제작이 가능하면서 토크밀도와 효율이 높은 반면 저속으로 동작하며 매우 조용하다. 또한 추가적인 breaking system을 필요로 하지 않고 정밀한 제어가 가능하다.

선형 초음파 모터는 회전형의 초음파 모터에 비해 설계의 자유도가 크고 추력이 높으며 작은 사이즈로 제작이 가능하다는 장점을 갖추고 있다.[1][2]

선형 초음파 모터 중 MPA는 LIB4와 같은 다른 선형 초음파 모터에 비해 그 기계적인 구조가 단순하여 설계가 용이하다. 또, 압전체의 전극면 중 한쪽에만 전압을 가하여도 추력을 발생한다. 즉, 다른 초음파 모터가 일정한 위상차를 가진 두 개의 전압원을 필요로 하는데 반해 MPA는 하나의 전압원만을 사용하기 때문에 전압원의 위상차를 고려치 않아도 된다는 장점을 가지고 있다.

한편 USM이 가진 수많은 장점들로 인하여 연구자들은 수십 년간 폭넓은 연구를 해왔음에도 불구하고 현재까지 초음파 모터에 대한 해석은 복잡한 contact mechanism에 대한 숙고 없이 조잡한 해석기법이나 상용프로그램에 의존하는 경우가 대부분이었으며 최적 설계 방식에 있어서도 과학적으로 검증된 최적설계방식을 따르기보다는 설계자의 개인적인 경험과 근사화된 수식 및 실험에 근거한 trial-and-error 방식에만 의존하는 비과학적이고 비효율적인 설계방식이 주를 이루었다.

따라서 이 논문에서는 MPA의 해석에 대해 3-D FEM이라는 수치해석방법을 제시하고 그 최적설계에 대해 진화 전략 알고리즘이라는 최적화 기법을 제시하였다.[2][3]

본 연구에서는 3차원 FEM을 이용하여 초음파를 이용한 선형 MPA를 설계하였다. 본 논문에서 적용된 3차원 유한 요소법의 타당성은 압전 트랜스듀서의 임피던스 파형을 실험 결과와의 비교를 통해 검증하였다. 실험적으로 검증된 3차원 유한 요소법을 선형 MPA에 적용하여 impedance와 mode, elliptical motion등의 MPA의 공진 특성을 해석하였다. 또한 진화전략 알고리즘을 도입하여 최적화를 수행함으로써 MPA에 대한 보다 정확하고 편리한 설계를 가능하게 하였다. 본 논문을 통해서 MPA의 상용화를 가속시킬 수 있을 것이라 기대한다.

2. 본 론

2.1 MPA의 기본 구조 및 동작원리

그림 1은 MPA의 구동부인 압전체를 나타낸다. 압전체는  $L \times 0.5L \times W(X, Y, Z)$  크기이며 Z방향으로 분극되어 있다. 압전체의 윗면과 아랫면은 전극으로 덮여있다. 윗면의 절반으로 나누는 두 개의 전극이 exciter의 역할을 하며 아랫면의 단일 전극면이 common drain이 된다. 윗면 중앙에는 aluminum oxide 재질의 teeth가 있으며 teeth가 guider 앞면을 미는 추력에 의해 MPA는 선형 운동을 한다.

압전체 윗면에 덮인 두 개의 전극 중 한쪽에 sine 파형의 전압이 공급되면 비대칭 형태의 진동이 발생한다. 이 때 다른 전극면은 floating 상태이며 이 면의 전위는 actuator의 공진주파수와 excitation 주파수를 맞추는 부가된 신호로 사용된다.[5]

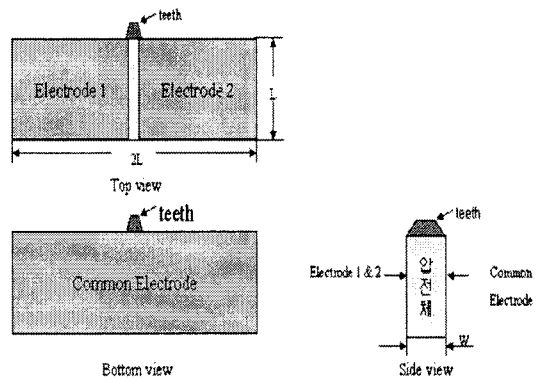


그림 1. MPA용 압전체의 기본 구조

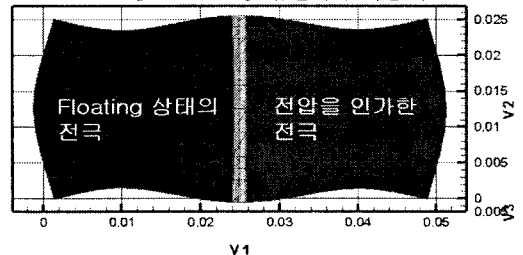


그림 2. 공진주파수에서 MPA의 mode 해석

2.2 3차원 유한요소법을 이용한 MPA의 해석

2.2.1 유한요소 정식화

MPA의 동작 특성을 3차원 유한 요소법에 의해 해석을 하였다. 그 지배방정식은 기계 및 전기적 특성을 갖는 압전 세라믹 방정식이며 다음과 같다.

행렬 방정식 (1)은 3차원 유한 요소 공식 유도 of the 기본이며, 압전 물질의 기계 및 전기적 특성과 관련된 식이다.[6]

$$T = c^E S - e^T E$$

$$D = eS + \varepsilon^S E \quad (1)$$

T: 기계적 응력 벡터  
S: 기계적 변형률 벡터  
E: 전기 벡터  
D: 유전 변위 벡터

해밀턴의 변분법으로부터, 행렬 방정식 (2)와 (3)을 얻을 수 있다.

$$-\omega^2 M u + j\omega D_{in} u + K_{in} u + K_{\omega b} \Phi = F_{total} \quad (2)$$

$$K'_{\omega b} u + K_{\omega \Phi} \Phi = Q_S + Q_P \quad (3)$$

$K_{in}$ : 기계적 강성 행렬  
 $D_{in}$ : 기계적 감쇠 행렬  
 $K_{ut}$ : 압전 커플링 행렬  
 $K_{tt}$ : 유전 강성 행렬  
 $M$ : 질량 행렬  
 $F_{total}$ : 기계적 힘  
 $Q_S$ : 유전 표전 전하  
 $Q_P$ : 유전 점전하

### 2.2.2 압전 트랜스듀서를 이용한 유한요소 해석기법의 검증

유도된 3차원 유한요소법의 검증을 위하여 압전 트랜스듀서를 이용하였다. 그림 2는 검증에 사용된 압전 트랜스듀서의 형태 및 실험을 통해 얻은 측정값과 유한요소법을 이용한 해석값의 비교 그래프이다. 그림 3에 나타난 것과 같이, 3차원 유한요소법을 이용한 압전체의 임피던스 해석 결과는 실험 결과 거의 일치함을 확인할 수 있으며, 이를 통해 제안된 3차원 유한요소법의 타당성을 검증하였다.

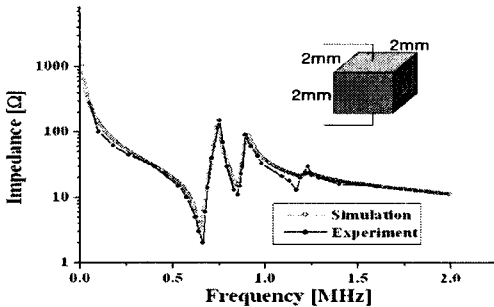


그림 3. 압전 트랜스듀서의 해석 및 실험 결과.

## 2.3 진화전략 알고리즘을 이용한 MPA의 최적설계

### 2.3.1 진화전략 알고리즘의 구현

진화전략 알고리즘은 재생산, 선택, 적응의 세가지 과정으로 이루어져 있으며 그 순서는 다음과 같다. 우선 초기 변수와 초기 목적 함수를 전체 유전적 범위 내에서 설정을 하고 자식세대의 발생을 위하여 재생산 과정을 수행한다. 재생산 과정의 결과물인 목적함수의 계산값을 부모세대의 목적함수의 값과 비교하여 보다 우수한 개체를 다음 세대의 부모개체로 선택한다. 이 과정에서 국부해를 향해 수렴하기 시작할 확률을 줄여주기 위하여 전체 유전적 범위 내에서 임의의 개체를 발생시킨 후 목적함수를 계산하여 현재의 부모개체와 비교하는 과정을 추가하기도 한다. 이러한 재생산, 선택, 적응의 반복적인 과정을 통하여 목적함수를 최대로 하는 변수 값을 찾을 수 있다.[7]

그림 4는 MPA의 최적설계를 위한 진화전략 알고리즘의 순서도를 보여주고 있다.

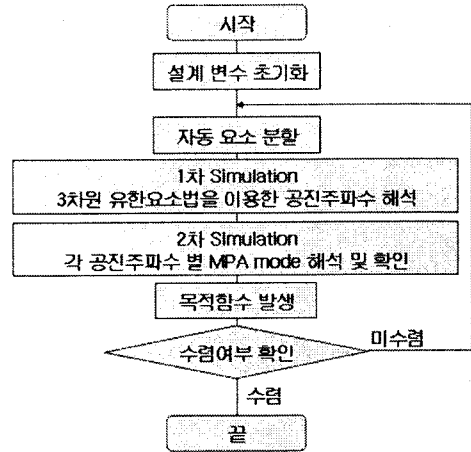


그림 4. MPA 최적설계를 위한 진화전략 알고리즘의 순서도

### 2.3.2 진화전략 알고리즘의 검증

Sinc 함수를 도입하여 제시한 진화전략 알고리즘을 검증하였다.

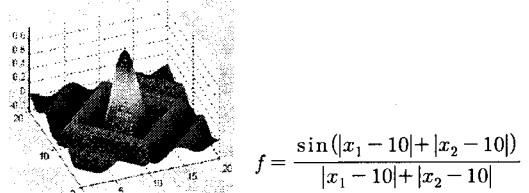


그림 5. Sinc 함수

표1.에서 볼 수 있듯이 본 논문에서 사용한 진화전략 알고리즘의 타당성이 검증되었다.

표1. Sinc함수의 수렴 결과

x1의 초기값	x2의 초기값	x1의 수렴값	x2의 수렴값	반복횟수
9	11	10.001360	10.024390	4
16	13	9.990341	9.978443	5
4	6	9.990341	9.978443	5
13	18	9.990341	9.978443	5
2	19	9.990341	9.978443	5

### 2.3.3 MPA 최적설계를 위한 자동 요소분할

진화전략 알고리즘이 진행되는 동안 매 회 새로이 자식개체로 발생한 MPA의 설계변수에 따라 설계를 하고 자동으로 요소분할을 해야 한다. 따라서 본 논문에서는 무료 공개 소프트웨어인 TETGEN과 프로그래밍 언어인 Fortran을 이용하여 자동 설계 및 요소분할을 하였다. 그림 6은 이 논문에서 사용한 자동 요소 생성 프로그램에 의해 임의의 설계변수에 맞추어 자동 요소분할된 MPA의 분할 요소 생성 결과를 보여주고 있다.

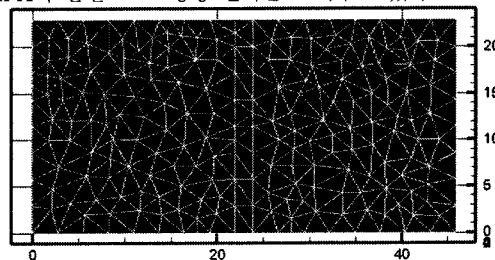


그림 6. 임의의 설계변수에 따라 자동 요소분할된 MPA

### 2.3.4 MPA 최적설계를 위한 진화전략 알고리즘의 목적함수

MPA는 각 공진주파수에서 다양한 모드를 나타낸다. 따라서 1차 시뮬레이션의 결과로 얻은 공진주파수들에 대한 2차 시뮬레이션을 수행하여 그림 2와 동일한 모드를 생성하는 공진주파수를 찾고 해당 주파수에서의 목적함수값을 계산하는 과정을 거치게 된다. 또한, 본 논문에서 MPA의 속도는 공진주파수와 Teeth의 X방향 변위의 곱셈 값을 인수로 하여 계산이 된다. 따라서 본 논문에서 제시된 진화전략 알고리즘의 목적함수는 공진주파수와 Teeth의 X방향 변위의 곱셈 값으로 설정되었으며 그러한 목적함수 값을 최대화 하는 방향으로 진화전략 알고리즘이 적용되었다.

### 2.3.5 MPA 최적 설계를 위한 설계 변수

MPA의 설계변수는 그림 1에서 볼 수 있듯이 두께 W와 세로방향 길이 L로 선정하였으며 가로방향 길이는 세로방향 길이의 두배인 2L로 자동적으로 선정 되었다. 주어진 설계 변수들의 초기값과 범위는 표 2에 제시되어 있다.

표2. 설계변수의 초기값과 범위

	초기값	최소값	최대값
W	6mm	4.5mm	10mm
L	20mm	25mm	15mm

### 2.3.6 3차원 유한요소법과 진화전략 알고리즘을 적용한 MPA 최적설계 결과

3차원 유한요소법과 진화전략 알고리즘을 적용한 MPA의 최적설계 결과는 표3과 같다.

표3. 3차원 유한요소법과 진화전략 알고리즘을 적용한 MPA 최적 설계 결과

설계 치수		공진주파수	목적함수값
W	L		
4.60mm	22.90mm	76.1kHz	21.94105

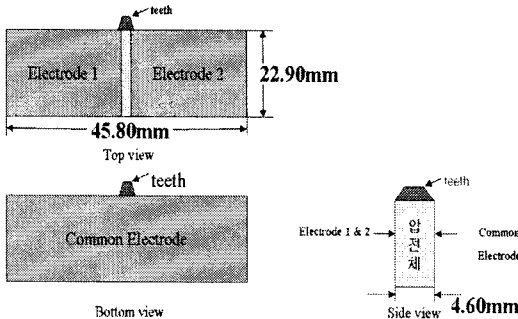


그림 7. 진화전략 알고리즘을 적용한 MPA 최적 설계 치수

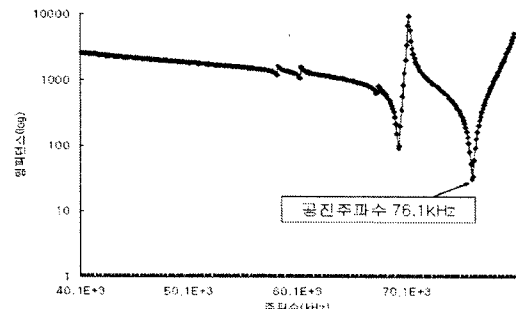


그림 8. 최적화된 MPA의 임피던스 해석

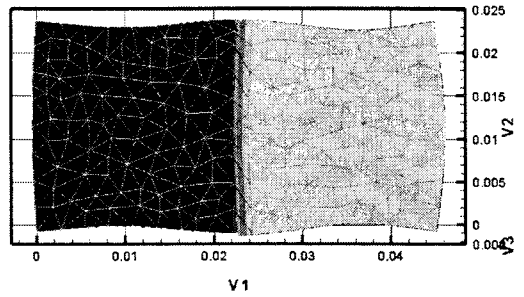


그림 9. 최적화된 MPA의 Mode 해석 결과적으로 3차원 유한요소 해석과 진화전략 알고리즘을 응용한 최적 설계 방법에 의해 속도 인수를 최대화 하는 MPA의 최적설계가 효율적이고 정확하게 이루어졌음을 알 수 있다.

## 3. 결 론

MPA를 비롯하여 공진주파수에서 동작하는 초음파 모터는 단순하고 부정확한 해석적 기법이나 설계자의 개인적이고 주관적인 경험에만 의존하여 trial-and-error의 반복과 같은 비효율적이고 비과학적인 방법에 의해 설계되는 경우가 대부분이었다. 따라서 초음파 모터의 정확하고 효율적인 해석 및 설계의 필요성이 관심의 대상이 되었다.

이러한 문제의 해결책으로서 본 논문에서는 3차원 유한요소 해석과 진화전략 알고리즘을 응용한 최적 설계 기법을 제시하였다. 제시된 설계 기법을 검증하고 MPA의 속도 인수를 목적함수로 정하여 최적 설계 과정을 거쳐 MPA 설계의 최적 설계 치수를 얻을 수 있었다.

또한 본 논문의 최적 설계 기법을 통하여 다양한 종류의 초음파 모터의 정확하고 효율적인 최적 설계가 이루어질 수 있다.

## [참 고 문 헌]

- [1] Toshiiku Sashida and Takashi Kenjo, "An Introduction to Ultrasonic Motors", pp. 17-23. 1993. Clarendon Press · Oxford.
- [2] Jong-Seok Rho, Byung-Jai Kim, Chang-Hwan Lee, Hyun-Woo Joo and Hyun-Kyo Jung, "Design and Characteristic Analysis of L1B4 Ultrasonic Motor Considering Contact Mechanism," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control., Volume 52, Issue 11, pp. 2054-2064. 2005.
- [3] Jong-Seok Rho, Byoung-Jai Kim and Hyun-Kyo Jung, "Optimal Design of L1B4 Ultrasonic Motor Using Evolution Strategy", International Conference on Electrical Machines and Systems, 2004.
- [4] Chang-Hwan Lee, Suk-Hee Lee, Hyun-Kyo Jung, Jung-Kun Lee and Kug-Sun Hong, "Analytic and numerical approaches for characteristic analysis of linear ultrasonic motor," in *Electric Machines and Drives*, International Conference IEMD '99, pp. 619-621, 1999.
- [5] W. Wischniewskiy, S. Kovalev, and O. Vyshnevskyy, "New Ultrasonic Piezoelectric Actuator for Nanopositioning", 9th International Conference on New Actuators & 3rd International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems, pp. 118-119, 14-16 June 2004
- [6] Reinhard Lerch, "Simulation of Piezoelectric Devices by Two- and ThreeDimensional Finite Elements," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 37, pp. 233-247, May 1990.Y.Jin, C.F. Foo, and W.G. Zhu, "THREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF PIEZOELECTRIC TRANSFORMER FOR THE SWITCHING POWER SUPPLY," Industrial Electronics Society, 1999. IECON '99 Proceedings. The 25th Annual Conference of the IEEE, Volume 1, 1999 Page(s): 295 - 299 vol.1.
- [7] T. Bäck, "Evolutionary Algorithms in Theory and Practice", Oxford, U.K.: Oxford Univ. Press, 1996.