

마이크로 위치 제어용 액츄에이터 해석

노종석, 김병재, 정현교

서울대학교

Analysis of micro positioning actuator

Jong-Seok Rho, Byoung-Jai Kim, Hyun-Kyo Jung

Seoul National University

**Abstract** - 소형화, 정밀화 되어 가는 산업 추세에 의해 정밀 위치 제어용 액츄에이터가 요구 되어지고 있다. 이로 인해 생산 및 유지비용이 적은 소형화된 마이크로 위치제어용 액츄에이터를 개발하였다. 이 액츄에이터의 설계를 위해서는 해석 기법이 요구되어진다. 그래서 액츄에이터의 해석 방법을 정식화 하였고, 이를 이용한 해석을 통해 설계를 하였으며 제작을 하였다. 해석 방법은 3차원 유한 요소법을 이용하였고, 이를 이용해 소형 마이크로 위치제어용 액츄에이터의 특성을 해석하였으며, 그 결과는 제작된 액츄에이터의 실험을 통해 검증되었다. 이 액츄에이터는 적층 된 압전 세라믹과 두개의 전자석으로 구성되어 있으며, 적층된 압전 세라믹에 의한 변위와 두개의 전자석의 동기화된 동작에 의해 작동이 된다.

차임 원리'와 '임팩트 메카니즘'을 기본으로 하고 있다. 다시 말하면, 클램핑 액션과 주기적인 신축 운동의 동기화에 의해 동작이 되는 것이다. 전자석의 클램핑 동작과 적층된 압전 세라믹의 수축/이완 운동의 연속된 동기화가 인치림 원리이며, 적층된 압전 세라믹의 수축/이완에 의한 미끄러짐이 임팩트 메카니즘이다.

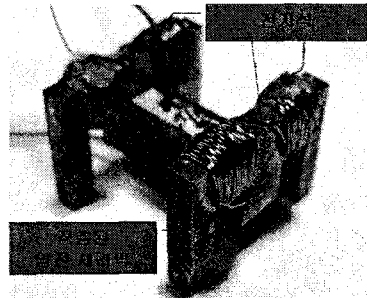


그림1. 마이크로 위치제어용 액츄에이터

1. 서 론

높은 정밀도의 기계에 대한 요구는 초정밀 메카니즘을 개발 하였다. 하지만 전통적인 접근이 특수한 머신 툴의 설계와 액츄에이터 여러 보상과 온도 조절 등의 많은 비용과 에너지 소비를 요구하고 있다. 요즘에는, IC 프로세서와 X-ray를 바탕으로 한 새로운 마이크로 제작 기술이 복잡한 특성을 갖는 마이크로 기계 분야에서 개발 되었고 성공되어지고 있다. 하지만, 아직도 많은 제작 및 유지비용이 요구되어지고 있다.[1] 이러한 문제들의 대안적인 해법으로, 소형화 된 마이크로 위치 제어용 액츄에이터를 제안 하고자 한다.

이 작은 액츄에이터의 낮은 생산 및 유지 비용은 정밀 공학의 적용에 있어 매우 큰 잠재 능력을 가지고 있다.[2] 그래서, 본 논문에서는 이 마이크로 액츄에이터의 설계를 위한 해석 기법을 제안하고자 한다.

해석 기법은 3차원 유한요소법을 이용하였다. 그 지배 방정식은 기계 및 전기적 특성을 갖는 압전체 방정식이다. 그래서 이 논문에서는 그 지배 방정식을 시간에 대해 정식화 하였으며, 이를 이용해 액츄에이터를 시간에 대해 3차원 해석을 하였다. 그리하여 마이크로 액츄에이터의 동작 특성을 해석하였고, 그 결과는 제작된 액츄에이터의 실험에 의해 검증을 하였다.

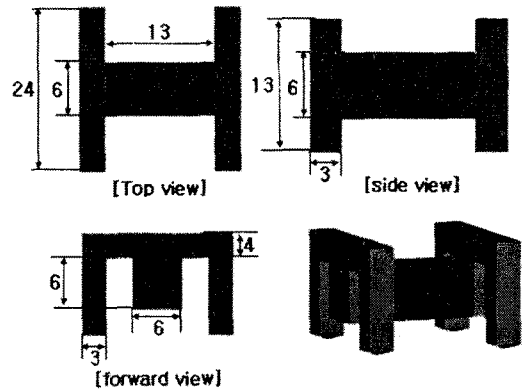


그림2. 마이크로 위치제어용 액츄에이터의 치수[mm]

2. 본 론

2.1 액츄에이터의 동작 원리

그림1은 제작된 마이크로 위치 제어용 액츄에이터를 보여주고 있으며, 그림2는 그 치수를 나타낸다.

이 마이크로 위치 제어용 액츄에이터의 동작원리는 '인

마이크로 위치 제어용 액츄에이터의 입력 전압파형은 그림3과 같다. 왼쪽 전자석이 켜지면서 철판바닥에 고정 이 되고, 오른쪽 전자석은 꺼지면서 자유롭게 움직일 수 있게 된다. 이때 적층된 압전 세라믹에 전압을 가하여 팽창을 시킨다. 이로 인해 액츄에이터의 오른쪽 전자석 부분이 오른쪽으로 미끄러지게 되는 것이다. 그 다음 단계에서는 왼쪽 전자석이 꺼지면서 자유롭게 움직일 수

있게 되고, 오른쪽 전자석이 켜지면서 바닥에 고정이 된다. 이때 적층된 압전 세라믹에 전압을 제거하여 수축을 시킨다. 이로 인해 액츄에이터의 왼쪽 전자석이 오른쪽으로 미끄러지게 된다. 이러한 동기화된 동작의 반복으로 액츄에이터는 오른쪽으로 미끄러지면서 나아가게 되는 것이다.

그림에서 보듯이 전압 파형을 조금씩 겹치게 인가하는 이유는 동작시 발생하는 철판바닥과의 진동을 줄이기 위해서이다.

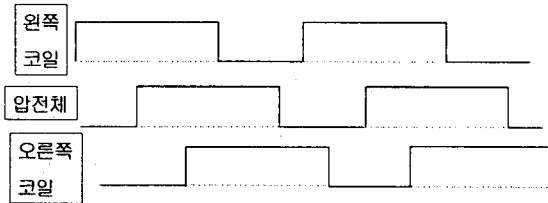


그림3. 마이크로 액츄에이터의 입력 전압

## 2.2 액츄에이터의 해석 및 설계와 실험 결과

### 2.2.1 유한요소 지배 방정식의 정식화

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

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

$$\begin{aligned} T &= c^E S - e^T E \\ D &= e S + \epsilon^S E \end{aligned} \quad (1)$$

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

헤밀턴의 변분법으로부터, 매트릭스 방정식 (2)와 (3)을 얻을 수 있다.[4]

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

$$K'_{\omega\Phi} u + K_{\Phi\Phi} \Phi = Q_s + Q_p \quad (3)$$

$K_{uw}$ : 기계적 강성 매트릭스  
 $D_{uw}$ : 기계적 감쇠 매트릭스  
 $K_{\omega\Phi}$ : 압전 커플링 매트릭스  
 $K_{\Phi\Phi}$ : 유전 강성 매트릭스  
M: 질량 매트릭스  
 $F_{total}$ : 기계적 힘  
 $Q_s$ : 유전 표전 전하  
 $Q_p$ : 유전 점전하

식(2),(3)을 이용한 시간에 대한 해석을 위해 중간 차분법을 이용하여 식(4),(5)와 같이 유도할 수 있다.

$$M \frac{u_3 - 2u_2 + u_1}{dt} + \omega D_{uw} \frac{u_3 - u_2}{dt} + K_{uw} u_3 + K_{\omega\Phi} \Phi = F_{total} \quad (4)$$

$$K'_{\omega\Phi} u_3 + K_{\Phi\Phi} \Phi = Q_s + Q_p \quad (5)$$

최종 식(4),(5)를 이용하여 마이크로 위치 제어용 액츄에이터를 시간에 대해 3차원 해석 하였다.

### 2.2.2 액츄에이터의 특성 해석과 실험 결과

그림4는 마이크로 액츄에이터의 메쉬 형상을 보여 준다. 테트라헤드 요소를 사용하였으며, 이 모델을 이용하여 80[vol]/50[hz]로 구동시 시간에 대한 액츄에이터의 변위량 u를 해석한 결과는 그림5와 같다.

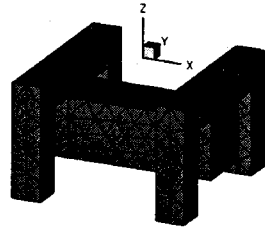


그림4. 마이크로 액츄에이터 메쉬 형상

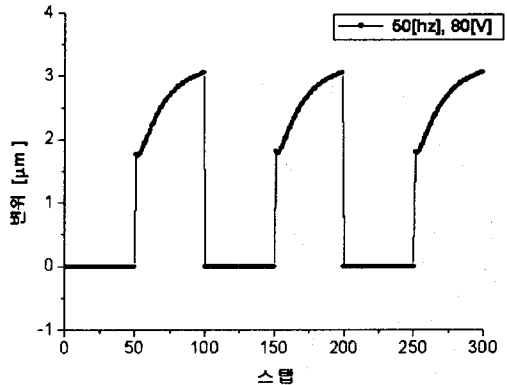


그림5. 3차원 유한요소법에 의한 액츄에이터 변위 해석

위의 변위 해석 결과에서 보듯이 1주기에서의 변위는 3.05[μm]임을 알 수가 있다. 또한 1주기 당 변위를 이용하여 주파수 변화에 따른 속도를 계산해 낼 수가 있다. 이렇게 해석된 변위와 속도는 제작된 액츄에이터의 실험값에 의해 검증이 되었고, 해석결과와 실험결과의 비교 및 마이크로 액츄에이터의 제원을 Table1에 정리 하였다.

Table1. 마이크로 액츄에이터의 특성 해석 결과와 실험 결과 비교 및 제원

	해석 결과	실험 결과
1주기에서의 변위	3.05[μm]	2.83[μm]
속도 (주파수)	152.5[μm/sec] (50hz)	141.65[μm/sec] (50hz)
무게	13[g]	
치수	24[mm]×19[mm]×13[mm]	
압전체 치수	6[mm]×13[mm]×6[mm]	
전자석입력 전류	0.3 [A]	

### 2.2.3 전자석 설계

전자석의 입력 전류 결정 및 전자석의 설계에서 고려할 사항은 액츄에이터의 동작 시 바닥에 달라붙는 쪽의 전자석이 받게 되는 반력을 전자석이 발생시키는 힘에 의해 밀리지 않고 충분히 견딜 수 있어야 한다. 따라서 액츄에이터의 동작 시 바닥에 달라붙는 쪽의 전자석이 받게 되는 반력의 해석과 전자석이 발생하는 힘의 해석이 요구된다.

우선 바닥에 붙게 되는 전자석 쪽에 발생하는 반력의 해석 방법은  $F=ma$ 식을 이용하는데, 미끄러지는 전자석 쪽의 질량과 해석된 변위를 통해 구한 가속도를 이용하여 구할 수 있다. 전자석의 질량을 고려한 발생 반력은 그림6이다. 또한 전자석이 발생시키는 힘은 FEMM을 통해 해석하였고 그 결과는 그림7이다.

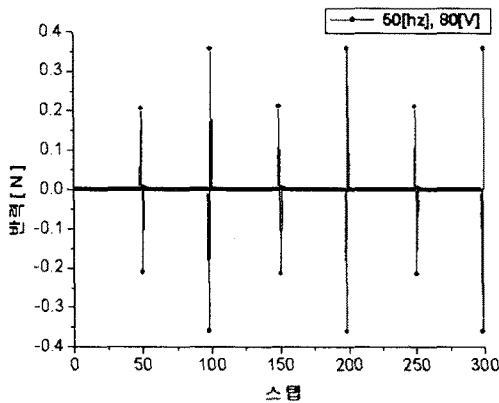


그림6. 액츄에이터 동작 시 철판 바닥에 달라붙는 전자석 쪽이 받게 되는 반력

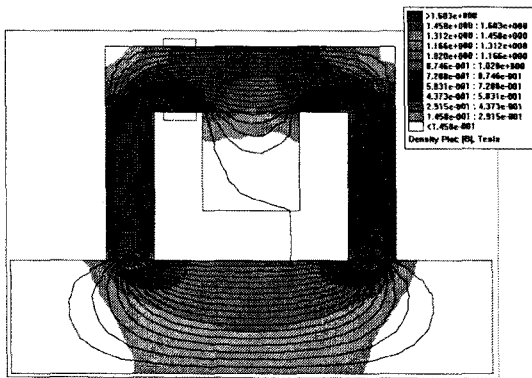


그림7. FEMM을 이용한 전자석 해석

그림6에서 알 수 있듯이 철판 바닥에 달라 붙는 전자석 쪽에 발생하는 최대 반력은 0.36[N]이다. 액츄에이터 동작시 달라붙게 되는 전자석 쪽이 밀리지 않고 이 최대 반력을 견디기 위해서 전류 0.3[A]를 결정하였고, 그때 발생시킬 수 있는 전자력 힘과 액츄에이터 자체의 무게로 인한 수직력에 의해 견딜 수 있는 최대 반력은 2.67[N]이었다. 이 힘은 철판 바닥에 붙게 되는 전자석 쪽에 발생하는 최대 반력 0.36[N]에 밀리지 않고 견딜 수 있음을 알 수 있다.

### 3. 결 론

정밀 위치 제어용 액츄에이터의 요구에 따라 기존의 높은 생산 및 유지 비용을 가지는 정밀위치 제어용 액츄에이터의 단점을 보완한 마이크로 위치제어용 액츄에이터를 개발하였다. 그 설계를 위해서는 해석 기법이 요구된다. 본 논문에서는 3차원 유한 요소법을 이용한 해석 방법을 사용하였다. 그 지배방정식을 정식화 하였는데, 그 방정식은 기계 및 전기적 특성을 갖는 압전 방정식으로 시간에 대한 방정식으로 정식화 하였다. 이 방정식을 이용한 3차원 유한 요소법을 사용하여 마이크로 위치제어용 액츄에이터를 해석하였다. 80[volt]/50[hz] 구동시 해석 결과는 1주기 당 변위는 3.05[ $\mu\text{m}$ ] 이며 속도는 152.5[ $\mu\text{m}/\text{sec}$ ]이다. 이 결과는 제작된 액츄에이터의 실험 결과에 의해 검증되었다. 실험 결과는 2.83[ $\mu\text{m}$ ], 141.65[ $\mu\text{m}/\text{sec}$ ]이다. 또한 액츄에이터 동작시 철판에 달라 붙는 쪽이 밀리지 않고 원활한 동작을 하기 위해 전자석을 설계 하였다. 즉, 철판 바닥에 달라붙는 쪽의 전자석이 받게 되는 반력의 해석과 FEMM을 이용한 전자력의 해석을 통해 전자석을 설계 할 수 있었다.

이 액츄에이터는 수마이크로로 제어가 가능함을 확인하였다. 그 성능에 비해 생산 및 유지비용이 매우 적으므로 그 실제 응용에 있어서 많은 장점을 가지고 있다. 앞으로 전압의 조절과 개선된 설계를 통해 나노급의 제어로도 활용이 가능하다고 여겨진다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] H.Aoyama and A.Hayashi, *Multiple Micro Robots for Desktop Precise Production*, Proc. Of 1<sup>st</sup> Conf. of EUSPEN, (BREMENN) pp. 60-63, 1999.
- [2] H. Aoyama, et al, Proc. Of 14th ASPE Annual Meeting(Monterey,CA), pp. 283-286, 1999.
- [3] 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.J in, 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.
- [4] Hong-In Chea, Fabrication and Characteristics Analysis of an Ultrasonic Motor using the Flexural Vibration Mode of a Ring-type Piezoelectric Ceramic, Ph.D. Thesis, Chung-buk National University, Korea, 1995.