

일체형 인치웜 방식 액츄에이터의 설계 및 특성

Design and Characteristics of a Monolithic Inchworm Type Actuator(MITA)

강형원^{1,a}, 최용준¹, 이형규¹

(Hyung-Won Kang^{1,a}, Yong-Jun Choi¹, and Hyeung-Gyu Lee¹)

Abstract

The new design of inchworm-type piezoelectric actuator is presented in this paper. Compared to conventional inchworm-type actuators, which are composed of more than three piezoelectric bodies, we can reduce the number of piezoelectric bodies by employing the proposed design, resulting in only one piezoelectric body. The overall size of the proposed actuator which consists of one piezoelectric body, two clamping parts and one extending part, is only $5 \times 6 \times 9$ [mm] (DWL). The actuating characteristics of fabricated Monolithic Inchworm Type Actuator(MITA), were found to be a displacement of $0.3 \mu\text{m}$, a generating force of 0.6 N and an electric power of 0.5 W .

Key Words : Monolithic, Inchworm, Multilayer, Piezoelectric actuator

1. 서론

액츄에이터는 어떠한 구동 에너지를 기계적 변위 또는 응력으로 변환하는 트랜스듀서를 의미한다. 이러한 액츄에이터에는 여러 가지 종류가 있으나 그 중 압전 액츄에이터는 전기적 에너지를 인가하면 기계적 변위가 발생하는 압전체 소자를 이용한 액츄에이터로 응용 기구에 따라 다시 세가지로 분류할 수 있다. 첫째로는 압전체 소자만을 이용하여 고정된 액츄에이터를 수축, 팽창시키는 경우이고 둘째는 압전체 소자에 다른 탄성 재료 등(보통 변위 확대 기구)을 조합시켜 변위량을 공간적으로 확대, 고정된 액츄에이터를 수축, 팽창시키는 경우이며 마지막으로 주파수를 이용하여 액츄에이터를 수축, 팽창시키고 그 변위량을 누적시켜 액츄에이터를 이동시키는 경우이다[1]. 주파수를 이용한 경우 중 대표적인 것이 인치웜 방식 액츄에이터이며 고정밀 및 소형화에 유리하여 최근에 활발한 연구가 진행되고 있다[2,3]. 그러나 인치웜 방식 액츄에이터의 경우 사용되는 압전체 소자가 다수개인 관계로 소형

화 및 제작에 있어서 한계가 있는 것이 사실이다.

따라서 본 연구에서는 다수개의 압전체 소자를 이용해야 하는 인치웜 방식 액츄에이터를 소개하고 그것을 응용하여 1개의 압전체 소자만으로도 제작이 가능한 새로운 형태의 액츄에이터를 제안, 실제 제작하여 동특성을 파악하였다. 이를 통하여 기존 인치웜 방식 액츄에이터의 소형화 한계를 극복하고 향후 적용 가능성 여부를 검토해보고자 한다.

2. 본론

2.1 인치웜 방식 액츄에이터

인치웜 방식 액츄에이터는 자벌레(Inchworm)의 동작을 응용한 액츄에이터로 여러 가지 다른 형태가 있을 수 있으나 동작 원리는 유사하다. 그림 1에 여러 가지 인치웜 방식 액츄에이터 중 한가지 형태 [전체 소자 3개로 이루어졌으며 그 중 클램핑(clamping) 부분 2개, 익스텐딩(extended) 부분 1개]를 나타내었다[3]. 액츄에이터는 좌 또는 우로 동작시킬 수 있으나 여기에서는 우로 동작하기 위한 방법에 대해서 설명하도록 하겠다. 액츄에이터가 우로 동작하기 위해서는 첫째로 우측 압전체 소자가 팽창하여 지렛대의 원리에 따라 우측 클램핑 부분을 가이드로부터 떨어뜨려야 한다. 둘째로

1. 전자부품연구원 전자소재패키징연구센터
(경기 성남시 분당구 야탑동 68)
a. Corresponding Author : hwkang@keti.re.kr
접수일자 : 2007. 6. 26
1차 심사 : 2007. 7. 6
심사완료 : 2007. 7. 12

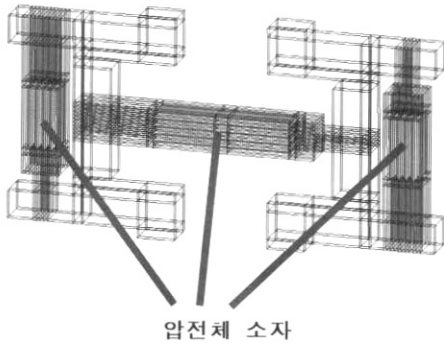
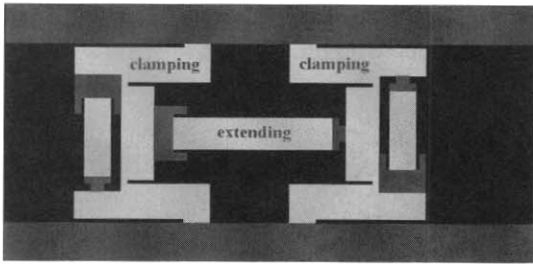


그림 1. 인치웜 방식 액츄에이터와 내부 전극.
Fig. 1. Inchworm type actuator and inner electrode.

가운데 압전체 소자(익스텐딩 부분)를 팽창시켜 우측 클램핑 부분을 우측으로 이동시켜야 한다. 셋째로 우측 압전체 소자를 수축시켜 우측 클램핑 부분을 처음 상태처럼 가이드에 고정시켜야 한다. 넷째로 좌측 압전체 소자를 팽창시켜 좌측 클램핑 부분을 가이드로부터 떨어뜨려야 한다. 다섯째로 팽창된 가운데 익스텐딩 부분의 압전체 소자를 수축시켜 좌측 클램핑 부분을 우측으로 이동시켜야 한다. 마지막으로 좌측 압전체 소자를 수축시켜 좌측 클램핑 부분을 처음 상태처럼 가이드에 고정시키면 우측으로 이동의 1주기가 종료된다.

이처럼 총 6단계(우측 클램핑 부분 가이드로부터 이탈 → 익스텐딩 부분 팽창 → 우측 클램핑 부분 가이드에 부착 → 좌측 클램핑 부분 가이드로부터 이탈 → 익스텐딩 부분 수축 → 좌측 클램핑 부분 가이드에 부착)을 거치면서 액츄에이터는 우측으로 이동을 하게 되는 것이다. 좌측으로의 동작은 위와는 반대로 동작을 시키면 된다. 그림 2에 이와 같은 액츄에이터를 구동시키기 위한 신호를 나타내었다.

좌측 clamping

extending

우측 clamping

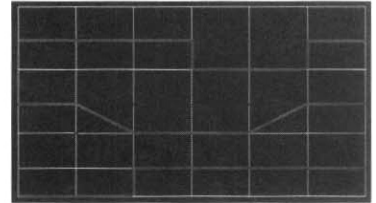


그림 2. 인치웜 방식 액츄에이터 구동 신호.
Fig. 2. Applied signal for driving inchworm type actuator.

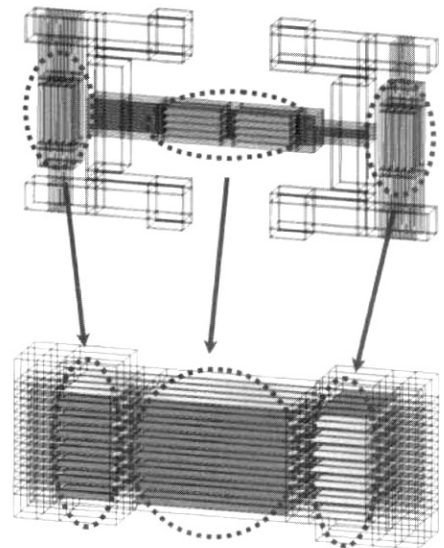


그림 3. 인치웜 방식 액츄에이터와 일체형 인치웜 방식 액츄에이터.

Fig. 3. Inchworm type actuator and MITA.

그러나 위에 소개한 인치웜 방식 액츄에이터의 경우는 3개의 압전체 소자와 기구(금속)를 사용해야 하므로 소형화나 액츄에이터 제작에 있어서 많은 한계가 존재한다. 따라서 이러한 제작상의 한계를 극복하기 위해서 3개의 압전체 소자를, 내부 전극 패턴을 달리하여 클램핑 부분과 익스텐딩 부분을 1개의 압전체 소자에 구현하고자 하였다. 즉 기존의 인치웜 방식 액츄에이터를 일체형 인치웜 방식 액츄에이터(Monolithic Inchworm Type Actuator : MITA)로 제작하고자 하였다. 이에 대한 설명을 그림 3에 나타내었다.

MITA 제작에 앞서서 동작 가능성 유무를 파악하고자 시뮬레이션(simulation)을 통하여 확인하였다.

표 1. 적층형 압전체 소자의 재료 정수.

Table 1. Material constants of the multilayer piezoelectric body.

Density	0.775E+04	kg/m ³
s_{11}^E	0.164E-10	m ² /N
s_{12}^E	-0.574E-11	m ² /N
s_{13}^E	-0.722E-11	m ² /N
s_{33}^E	0.188E-10	m ² /N
s_{44}^E	0.475E-10	m ² /N
d_{15}	0.584E-09	C/N
d_{31}	-0.171E-09	C/N
d_{33}	0.374E-09	C/N
ϵ_{11}^T	1.730E-08	F/m
ϵ_{33}^T	1.700E-08	F/m

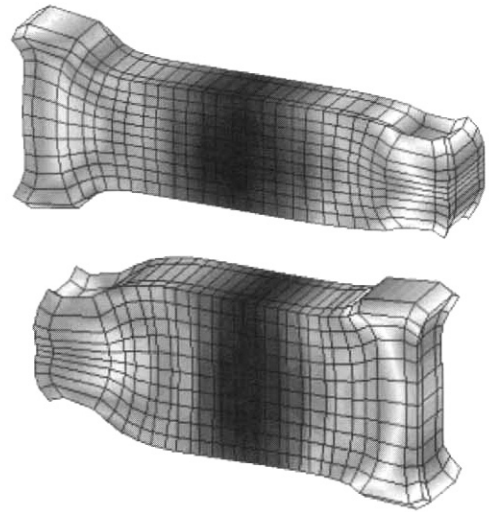


그림 4. MITA의 시뮬레이션 결과.

Fig. 4. Simulation of MITA.

2.2 일체형 인치웜 방식 액츄에이터 (MITA)

MITA의 시뮬레이션은, 유한요소법(FEM)을 이용하여 적층형 압전체 소자의 물리적인 특성을 예측할 수 있는 프로그램인 Atila를 통하여 진행하였다.

MITA의 해석을 위해 Atila 5.2.4와 GID 7.2를 이용하였고 해석 모델은 그림 3의 아래 그림에 나타내었다. 그림 3에 보이는 것처럼 압전체 시트 한면에 클램핑 부분과 익스텐딩 부분을 동시에 형성, 적층하는 것으로 모델링 하였다.

모델링이 끝난 후에는 프로그램에서 제공된 라이브러리(library)를 이용하여 적층형 압전체 소자의 재료를 설정하였으며 그것을 표 1에 나타내었다.

설정된 재료의 면과 부피에 경계 조건을 주고 유한요소 해석을 위해 메쉬(mesh)를 형성하였으며 해석 후 프리프로세스(pre-process)를 완료하였다.

이렇게 하여 얻어진 MITA의 동작 모습을 그림 4에 나타내었다.

그림 4로부터 MITA의 경우도 신호를 클램핑 부분과 익스텐딩 부분에 인가한다면 좌 또는 우측으로의 이동이 가능할 것으로 사료된다.

이를 바탕으로 실제 MITA를 제작하였다.

표 2의 특성을 갖는 압전 원료에 표 3의 특성을 갖는 바인더솔루션(binder solution, PVB계)을 혼합하여 슬러리를 만들었고 이를 40 μm의 압전체 시트(sheet)로 캐스팅(casting)한 후 각각의 시트 한면에 클램핑 2 부분과 익스텐딩 1 부분을 동시에 인쇄하여 내부 전극을 형성하였다. 내부 전극이 형성된 시트 64장을 적층한 후 WIP를 통하여 적층체에 등가압을 실시하였다. 이후 컷팅(cutting) 공정, 바인더 휘발(B/O), 소성 공정을 거쳐 MITA를 위한 하나의 압전체를 제작하였다.

표 2. MITA용 압전체 소자의 전기적 특성.

Table 2. Electrical characteristics of the piezoelectric body for MITA.

Density	7.9	g/cm ³
$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	1300	
$\tan \delta$	0.5	
전기기계 결합계수 (k_r)	0.62	
전기기계 결합계수 (k_{31})	0.37	
전기기계 결합계수 (k_{33})	0.70	
d_{31}	-140	pC/N
d_{33}	290	pC/N
기계적 품질계수 (Q_m)	2000	

표 3. 바인더 솔루션의 특성.

Table 3. Characteristics of binder solution.

성분		함량 (%)
Solvent	Toluene	56.2
	Ethanol	18.8
Powder		18.6
가소제		6.4

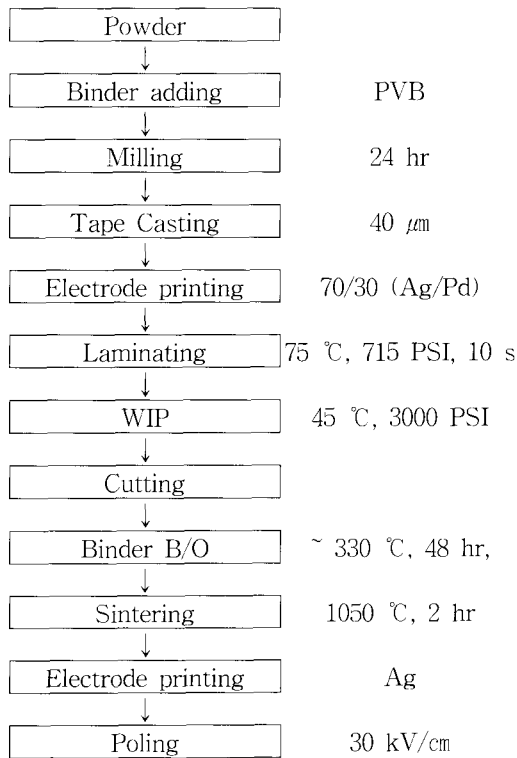


그림 5. MITA용 압전체 제조 공정.

Fig. 5. Fabrication process of piezoelectric body for MITA.

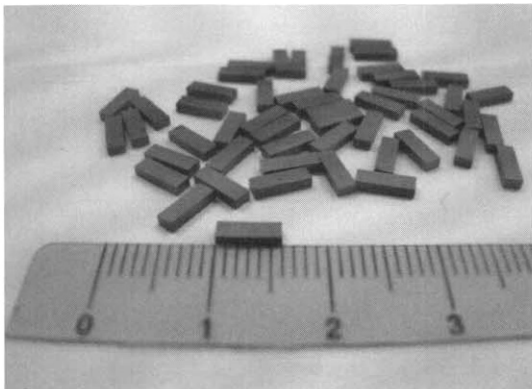


그림 6. 일체형 인치웜 방식 액추에이터용 압전체 소자.

Fig. 6. Piezoelectric body for MITA.

제작된 압전체의 클램핑 부분과 익스텐딩 부분에 전극을 은도, 은소하여 외부 전극을 형성하였고 분극을 시행하였다. 이 과정을 그림 5에 나타내었다.

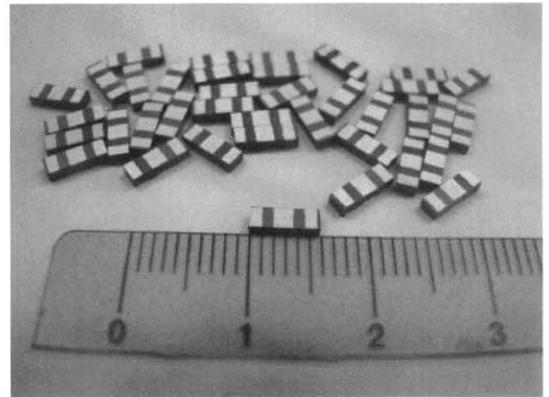


그림 7. 전극이 인쇄된 일체형 인치웜 방식 액추에이터용 압전체 소자.

Fig. 7. Piezoelectric body where electrode printed for MITA.

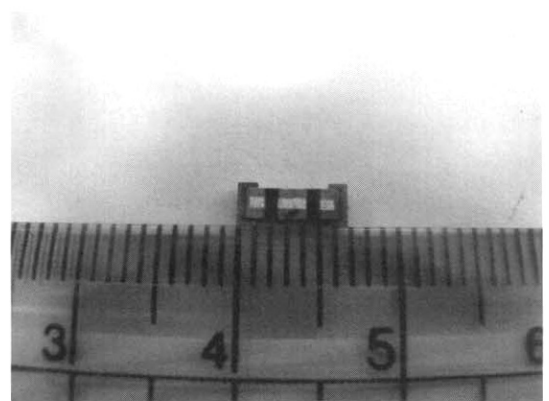


그림 8. 금속이 접착된 일체형 인치웜 방식 액추에이터용 압전체 소자.

Fig. 8. Piezoelectric body with metal cover for MITA.

다. 소성된 압전체와 분극된 압전체를 그림 6과 7에 나타내었다.

MITA의 경우는 기존 인치웜 방식 액추에이터의 클램핑 부분과는 달리 압전체의 수축이 곧 가이드에서의 이탈을 의미한다. 만약 클램핑 부분이 직접적으로 가이드(금속)에 접촉하게 되면 압전체 소자에 손상이 생기게 되므로 압전체 소자의 클램핑 부분을 금속으로 접착하여 가이드와 접촉하게 해야 한다. 이것을 그림 8에 나타내었다.

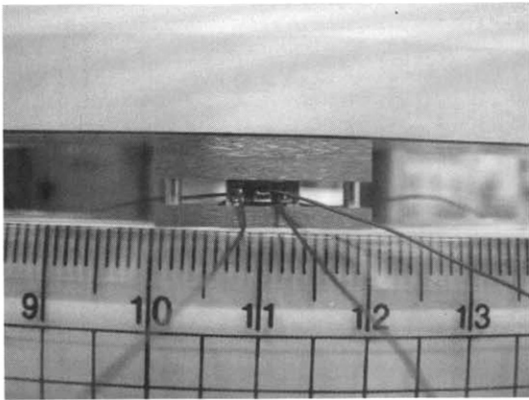


그림 9. 일체형 인치웜 방식 액츄에이터.
Fig. 9. MITA.

그림 9에는 완성된 압전체 소자를 실제 장착한 MITA를 나타내었다. 실제 이동 거리에 따라서 MITA의 크기는 조절이 가능하며 여기에서는 가이드의 크기를 20 mm로 하였다.

3. 결 과

본 연구에서 제작한 MITA의 동작 특성을 파악하기 위해서 변위, 발생력, 전력을 측정하였다. 클램핑

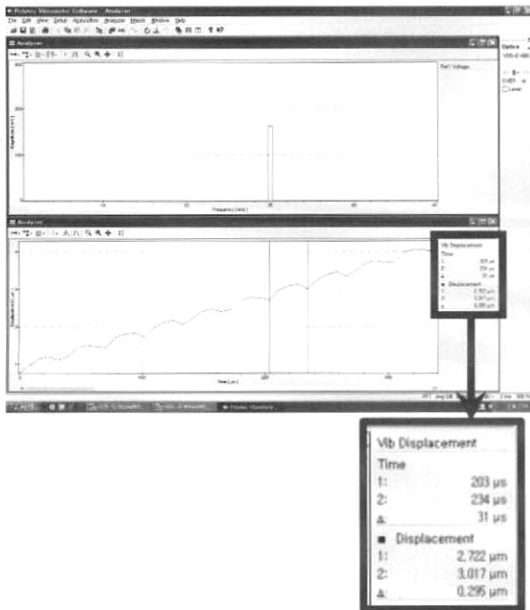


그림 10. 일체형 인치웜 방식 액츄에이터의 변위.
Fig. 10. Displacement of MITA.



그림 11. 일체형 인치웜 방식 액츄에이터의 발생력.
Fig. 11. Force generated in MITA.

부분과 익스텐딩 부분에 전압을 30 Vp-p, 30 kHz로 인가하였다. 그림 10의 위 그림에는 주파수에 따른 인가전압을 나타내었고 아래 그림에는 시간에 따른 변위량을 나타내었다. 1주기(30 kHz \rightarrow 33.3 μ s)당 변위는 약 0.3 μ m 였고 이를 인가한 신호와 연관시켜 속도를 계산하면 약 10 mm/s 로 이동하였다. 이것은 MITA의 속도를 증가시키기 위해서는 주파수를 증가시켜야 함을 의미한다.

MITA의 발생력은 push-pull gauge를 이용하여 측정하였고 약 0.6 N으로 측정되었다.

MITA 동작시 전력을 측정할 결과를 표 4에 나타내었다(좌, 우측 클램핑 부분은 그림 8 기준).

MITA용 압전체 소자의 용량값은 표 4와 같이 익스텐딩 부분이 가장 크다. 만일 MITA를 구동시키기 위해 인가하는 전압의 형태가 동일하다면 전력은 익스텐딩 부분이 가장 크게 나타나야 한다. (전류는 용량값에 비례) 그러나 MITA를 구동시키기 위해 각 부분에 인가하는 전압의 형태가 그림 2처럼 다르기 때문에 실제 전력은 클램핑 부분이 오히려 크게 나타났으며 같은 클램핑 부분이라고

표 4. 일체형 인치웜 방식 액츄에이터의 전력.
Table 4. Electric power of MITA.

	좌측 클램핑 부분	익스텐딩 부분	우측 클램핑 부분
용량값 (nF)	42.5	123.5	42.3
전력 (W)	0.430	0.278	0.764

하더라도 우측이 더 크게 나타났다. 이것은 클램핑 부분에 인가된 전압의 신호 형태가 스텝 함수(수직 상승, 수직 하강)의 형태를 취하고 있으므로 전류는 스텝 함수의 미분 형태 즉, 임펄스 함수와 용량 값에 비례해서 나타나고, 익스텐딩 부분에 인가된 전압의 형태는 램프(완만한 기울기로 상승 및 하강)의 형태이므로 전류는 램프 함수의 미분 형태인 스텝 함수와 용량 값에 비례해서 나타나게 되므로 위와 같은 전력 값이 측정된 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 일체형 인치웜 방식 액츄에이터를 설계, 제작하여 그 특성을 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 기존의 인치웜 방식 액츄에이터를 소형으로 제작하기 위하여 다수개의 압전체 소자를 하나의 압전체 소자로 일체화하여 액츄에이터(MITA)를 설계, 제작하였다.

- MITA의 한주기당 이동 변위는 약 $0.3 \mu\text{m}$ 였고 속도는 10 mm/s 였다. 또한 액츄에이터의 발생력은 0.6 N 정도 였고 전력은 약 0.5 W 정도로 측정되었다.

- MITA의 속도는 주파수에 비례한다. 따라서 현재 인가 주파수를 수백kHz 정도로 증가시킬 경우 고속으로의 상용화가 가능하다.

참고 문헌

- [1] C. Niezrecki, D. Brei, S. Balakrishnan, and A. Moskalik, "Piezoelectric actuation : State of the art", The Shock and Vibration Digest, Vol. 33, No. 4, p. 269, 2001.
- [2] P. E. Tenzer and R. Ben Mrad, "On amplification in inchworm precision positioners", Mechatronics, Vol. 14, p. 515, 2004.
- [3] C. W. Moon, S. H. Lee, and J. K. Chung, "A new fast inchworm type actuator with the robust I/Q heterodyne interferometer feedback", Mechatronics, Vol. 16, p. 105, 2006.