

유한 요소법을 이용한 대변위 압전 Bimorph설계

임종인 · 노용래* · 김선욱

포항 산업과학연구원 기능세라믹팀
*경북대학교 전자공학과 센서공학과
(1996년 12월 4일 접수)

Design of Large Displacement Piezoelectric Bimorphs with Finite Element Method

Jongin Im, Yongrae Roh* and Sunuk Kim

Functional Ceramic Div., RIST at Pohang
*Dept. of Electronic Sensor Eng., Kyungpook National Univ.
(Received December 4, 1996)

요 약

본 논문에서는 유한 요소법을 이용하여 기존의 적층형 및 무니형 압전 액츄에이터와 결합된 대변위 특성을 갖는 새로운 압전 바이몰프의 구조를 설계하고, 그 동작 특성을 분석하고자 하였다. 무니형 압전 액츄에이터를 연결한 복합 압전 바이몰프의 경우, 발생 변위는 150%정도 향상되었고, 발생력은 130%정도 증가되는 수치 해석 결과를 얻었다. 그리고 복합 압전 바이몰프의 과도이동 및 ringing현상을 억제하기 위하여 압전 바이몰프의 기본 공진 주기와 일치하는 전압 상승시간을 갖는 준계단형 전계를 인가하는 것이 효율적임을 알 수 있었다.

ABSTRACT

This paper describes the design and evaluation of new type piezoelectric bimorph actuator that shows much large mechanical response than those conventional types. The bimorph actuator has modified structure combined with the multilayer actuator (MLA) and the composite multilayer actuator called "Moonie". The design and performance analysis of bimorph actuator are carried out with Finite Element Method (FEM). Theoretical calculation results show that the generating force and displacement of Moonie-modified bimorph actuator can be improved by about 130% and 150%, respectively. The overshooting and ringing phenomena of the bimorph can be effectively restrained by the pseudo step electric field having a rising time coincided with a period of the fundamental vibration mode of the bimorph.

Key words : Piezoelectric actuator, Bimorph, Multilayer, Moonie actuator, Finite element method

1. 서 론

압전 액츄에이터(piezoelectric actuator)는 적층형 액츄에이터(multilayer actuator; 이하 MLA라 부름)와 바이몰프(bimorph) 액츄에이터로 나누어 지고, 압전 팬, 압전 릴레이, 자동 카메라의 줌 렌즈용 모터, 자동차의 충격 흡수용 업소버, 잉크젯트 프린터용 헤드등 많은 산업 분야에 실제 적용하고 있다.¹⁾ MLA의 경우 압전 종효과를 이용하므로 에너지 변환 효율이 커서 발생력 및 응답성이 우수하지만 발생 변위가 적다. 바이몰프의 경우 변위량은 큰 반면 발생력, 에너지 변환 효율, 응답

특성등에 문제가 있다. 이와 같은 압전 액츄에이터의 동작 특성때문에 용도에 따라 액츄에이터를 선택하여 사용하고 있으며 압전 액츄에이터의 응용 범위의 확대를 제한하는 요인이 되기도 한다. 그리고 압전 액츄에이터를 서보적으로 구동하여 정밀 위치 제어용으로 사용할 경우 구동 전압의 형태에 따라 목표하는 위치보다 과도하게 이동되는 현상(overshooting) 및 목표하는 위치 값 주위에서 변동하는 흔들림(ringing)현상을 유발하여 제어 성능을 저해하는 요인으로 작용한다.¹⁾

최근 Y. Sugawara 등²⁾이 MLA의 발생 변위를 향상시킨 금속-MLA 복합 액츄에이터인 무니형 액츄에이터를

개발하였으나 바이몰프의 동작 특성에는 미치지 못한 다. 또한 적절한 압전 소자를 이용한 압전 바이몰프의 경우에 발생 변위에 대해서는 약간의 개선이 되었으나 발생력에 대해서는 MLA에 비해 많이 부족하다.

지금까지 압전 액츄에이터의 구조 개선에 관한 대부분의 연구가 단순한 형상에 대해 등가 모델을 이용한 일차원적인 해석적인 방법(analytical method)으로 이루어졌다. 이러한 해석적인 방법은 편리하기는 하지만 복잡한 형상이니 열, 응력, 그리고 전기계통의 복합적인 문제와 3차원 해석을 하고자 할 경우 사용할 수 없다. 유한 요소법은 압전 재료를 이용한 능동 진동제어등 복잡한 구조물 해석 분야에 이용되어 왔고, 압전 액츄에이터의 설계에 관한 연구로서는 무니형 금속-MLA 복합 액츄에이터 설계²⁾, MLA의 전극 구조 설계³⁾, 및 1-3형 압전 복합체 구조 설계⁴⁾ 등이 있고 바이몰프에 대한 적용은 보고되지 않았다.

본 논문에서는 유한 요소법을 이용하여 기존 바이몰프의 고정단 부분에 MLA 혹은 무니형 압전 액츄에이터를 추가하여 압전 바이몰프의 발생 변위 특성 및 발생력을 향상시키기 위한 구조 개선 연구를 수행하고, 개선된 압전 바이몰프의 동작 특성을 고찰하여 위치 제어 성능 향상에 대한 압전 소자에 인가되는 전압 형태에 관한 연구를 하고자 한다.

2. 압전 바이몰프의 동작 특성

2.1. 발생 변위 특성

기존의 압전 바이몰프와 본 논문에서 개발한 압전 바이몰프에 대한 작동 원리를 Fig. 1(a)와 Fig. 1(b)에 각각 나타내었다. 두께 방향으로 분극된 압전소자를 병렬로 연결하여 구성된 기존의 바이몰프와 기존의 바이몰프의 고정단에 MLA 혹은 무니형 적층 액츄에이터를 병렬로 연결한 구조로 형성된 본 논문의 압전 바이몰프에 전압 인가시 발생하는 변위 특성을 살펴보면 다음과 같다.

압전 소자의 기계적 변형률 (S)과 전기적 변위 (D)의 관계식인 압전 효과에 대한 구조 방정식을 텐서를 사용하여 표기하면 식(1)과 같이 나타내어진다.⁵⁾

$$S_i = S_{ij}^E T_j + d_{ij} E_n \quad (1)$$

$$D_n = d_{nm}^T T_j + \epsilon_{nm}^T E_n$$

여기서 T 및 E는 응력 및 인가 전계를 의미하여, s와 d, 그리고 ϵ 는 각각 압전소자의 컴플라이언스 (compliance)와 압전 상수, 그리고 유전율을 나타낸 것이다. 그리고 위 첨자로 표시한 E와 T는 압전 재료의 컴플라이언스와 유전율 측정시 구속 조건인 일정한 전계

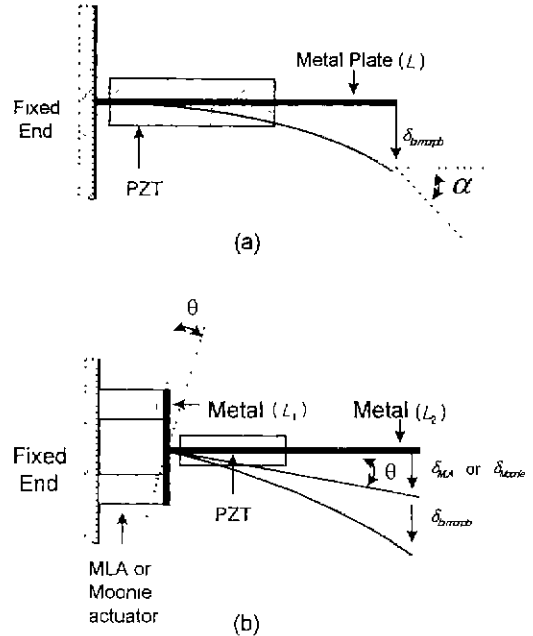


Fig. 1. Schematic structures and operating principles of piezoelectric bimorph (a) conventional bimorph (b) MLA or Mooney modified bimorph

및 일정한 응력 상태를 의미한다. 또한 아랫 첨자로 표시한 i와 j는 1에서 6까지 값을 가지고, m과 n은 1, 2, 3의 값을 갖는다.

금속과 두개의 압전 소자를 이용하여 기존 형태의 압전 바이몰프를 구성할 경우 자유단 끝에서 변형량(δ)과 비틀림 각(α)을 압전 소자에 인가되는 전압(V) 및 자유단 끝(tip)에 인가된 힘(F) 관계를 나타내는 지배 방정식은 식(2)와 같이 표현된다.^{6,7)}

$$\begin{pmatrix} \delta_{tip} \\ \alpha \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{s_{11}^E L^3}{2wh^3} & \frac{3d_{31} L^2}{8h^2} \\ \frac{3s_{11}^E L^2}{4WL^2} & \frac{3d_{31} L}{4h^2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} F_3 \\ V_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서 L, w, 및 h는 각각 압전 바이몰프의 길이, 폭, 그리고 두께를 의미한다.

압전 소자를 m개 사용하면 적층형 압전 액츄에이터 (MLA) 및 MLA에 달 모양의 빈공간을 갖는 금속을 추가로 부착한 무니형 압전 액츄에이터 경우 압전 소자의 적층 방향으로 변형량은 각각 식(3)과 식(4)로 나타낼 수 있다.^{1,2,5,6)}

$$\delta_{MLA} = mhd_{33} E_{33} = md_{33} V_3 \quad (3)$$

$$\delta_{Moonic} = m(d_{33} - \frac{w}{h} d_{31}) V_3 + \delta_{MC} \quad (4)$$

상기한 식(4)의 δ_{MC} 는 적층한 압전 소자의 상부에 부착된 금속 층에 의하여 부가적으로 압전소자의 적층 방향으로 확대되는 변형량을 의미한다. 일반적으로 압전 상수 d_{31} 은 음의 값을 가지므로 무니형 압전 액츄에이터는 d_{31} 및 δ_{MC} 의 영향으로 MLA보다 더 큰 변위가 발생함을 알 수 있다.

본 연구에서 고안한 압전 바이몰프는 Fig. 1(b)와 같이 고정단 부근에 MLA 혹은 무니형 액츄에이터를 각각 두개씩 사용하여 길이가 L_1 인 금속판으로 서로를 병렬로 연결시키고, 그 후단에 길이가 L_2 인 기존의 압전 바이몰프를 연결하여 형성된다.

복합 압전 바이몰프에 전압을 인가할 경우, 병렬로 연결된 두쌍의 MLA 혹은 무니형 액츄에이터중 상부에 위치한 압전 액츄에이터가 수축 혹은 신장을 하게되고, 하부에 위치한 액츄에이터는 반대로 신장 혹은 수축하는 운동을 하게 된다. 이러한 두쌍의 MLA 혹은 무니형 액츄에이터의 변형에 의해 이들을 지지하는 길이 L_1 인 금속이 중심으로 부터 각 θ 만큼 비틀리게 되고, 금속판의 비틀림 각 θ 는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\delta_{MLA}}{L_1/2} \right) \text{ or } \sin^{-1} \left(\frac{\delta_{Moonic}}{L_1/2} \right) \quad (5)$$

식(5)로 표현되는 길이가 L_1 인 금속판의 비틀림은 그 후단에 연결된 기존의 압전 바이몰프의 운동에 영향을 준다. 그러나 기존 바이몰프의 발생 변위에 비하여 MLA 혹은 무니형 액츄에이터에 의한 발생 변위가 수십 μm 정도로 아주 작으므로 식(5)의 비틀림 각 θ 는 아주 작다. 또한 복합 압전 바이몰프에 사용한 두 금속판의 길이가 $L_1 < L_2$ 이며 후단 압전 바이몰프의 무게 영향을 무시한다고 가정할 경우, 두쌍의 MLA 혹은 무니형 액츄에이터의 변형에 의한 후단의 압전 바이몰프의 전체가 변형된 비틀림도 동일한 θ 라 놓을 수 있다. 그러므로 MLA 혹은 무니형 액츄에이터를 복합화 시킨 압전 바이몰프의 경우, 자유단 끝에서의 발생 변위는 식(5)에 나타낸 비틀림 각에 의한 변형과 식(2)에 의하여 표현되는 순수한 압전 바이몰프의 변형이 합하여져 표현되고, 이를 종합하면 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_{Tp} = L_2 \sin \delta + \delta_{bimorph} \quad (6)$$

여기서 L_1 과 L_2 는 각각 두쌍의 MLA 혹은 무니형 액츄에이터를 지지하는 금속길이 및 그 후단에 부착된 압전 바이몰프에 사용된 금속의 길이를 의미한다.

Fig. 1(b)와 같이 고정단 부근에 두쌍의 MLA 혹은

무니형 액츄에이터를 병렬로 부착하여 복합화된 압전 바이몰프를 구성한 경우 인가 전압에 의한 자유단의 발생한 변위를 식(2)부터 (6)까지를 이용하여 각각 식(7) 및 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 식(7)의 경우는 MLA를 복합화 시킨 압전 바이몰프의 자유단에서 발생 변형을 나타낸 것이고, 식(8)의 경우는 무니형 액츄에이터를 복합화 시킨 압전 바이몰프에 대한 자유단에서 발생 변형을 표현한 것이다.

$$\delta_{Tp} = L_2 \sin \left[\sin^{-1} \frac{m d_{33} V_3}{L_1/2} \right] + \frac{3d_{31} L_2^2}{8ht^2} \quad (7)$$

$$\delta_{Tp} = L_2 \sin \left[\sin^{-1} \frac{m(d_{33} - d_{31} \frac{wh}{h} V_3 + \delta_{MC})}{L_1/2} \right] + \frac{3d_{31} L_2^2}{8ht^2} \quad (8)$$

식(2)와 식(7),(8)을 비교하면 알 수 있듯이 기존 바이몰프보다 MLA 혹은 무니형 액츄에이터를 이용하여 개선한 압전 바이몰프가 보다 향상된 발생 변위 특성을 갖고 있음을 알 수 있다.

2.2. 인가 전계 형상의 영향

압전 바이몰프 액츄에이터의 경우 변형량의 정확한 제어가 중요하다. 변형량은 압전 소자에 인가하는 전압의 크기 및 파형에 의해 변하고, 목표하는 위치 보다 과도하게 이동(overshoot)하거나 목표 위치에서 흔들리는 현상(ringing)이 발생한다. 이를 방지하기 위하여 압전 소자에 인가하는 전압의 적절한 상승 시간 및 유지 시간 선정이 아주 중요하다.

전압을 압전소자에 인가할 경우 금속층 상면에 부착된 압전 소자가 길이 방향으로 신장하고, 동시에 하면에 부착된 압전 소자가 수축하여 압전 바이몰프가 휨변형을 유발하게 된다. 그리고 반대 방향으로 전압을 인가할 경우 압전 바이몰프가 반대 방향으로 휨 변형을 발생시킨다. 그러므로 인가 전계의 형상에 의한 상면 혹은 하면의 단일 압전소자의 동작 특성을 고찰하여 압전 바이몰프 동작 특성을 단순화 할 수 있다. 두께 방향으로 분극된 직사각형 압전 소자에 step형 전계를 인가할 경우 압전 소자의 변형은 다음과 같이 유도할 수 있다.¹⁾

압전 소자의 휨 방향 모드만을 고려할 경우 길이 방향의 운동 방정식은 식(9)과 같고, 이를 주파수 영역으로 라플라스 변환할 경우 식(10)과 같이 표현된다. 여기서 압전소자의 길이 방향 변형을 u 라 하였고, v 및 p 는 각각 압전 소자의 길이 방향으로 전파하는 휨파 속도와 밀도를 의미한다. 그리고 압전 소자의 길이 l 인 지점에서 식(10)의 휨파 운동 방정식에 대한 해를 구할 경우 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.¹⁾

$$\rho \left(\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \right) = \frac{1}{s_{11}^E} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} \right) \quad (9)$$

$$\rho s_{11}^E \omega^2 U(\omega, X) = \partial^2 U(\omega, X) \mid \partial X^2 \quad (10)$$

$$U(\omega, x=1) = d_{31} \tilde{E} \frac{V}{\omega} * \frac{1 - e^{-1(\omega V)}}{1 + e^{-1(\omega V)}} \quad (11)$$

상기한 식(11)에서 알 수 있듯이 전체의 형상 \tilde{E} 에 의해 변위가 결정됨을 알 수 있다. 따라서 압전 소자에 인가되는 전체의 형상 및 상승 시간의 선정이 아주 중요하다. 또한 직사각형인 계단형 전계 (\tilde{E}_1) 및 준 계단형 전계 (\tilde{E}_2)는 각각 식(12)와 (13)과 같이 나타낼 수 있다. (n은 임의 상수)

$$\tilde{E}_1(\omega) = \frac{E_0}{\omega} (1 - e^{-n \frac{1}{V} \omega}) \quad (12)$$

$$\tilde{E}_2(\omega) = \frac{E_0 V}{nl} * \frac{1}{\omega^2} (1 - e^{-n \frac{1}{V} \omega}) \quad (13)$$

3. 유한 요소 모델링 및 수치해석

본 논문에서 수치 해석 모델은 압전 수치해석이 가능한 상용 프로그램인 ANSYS를 이용하여 유한 요소 모델을 Fig. 2와 같이 구성하였다. 여기서 Fig. 2(a)는 기존의 압전 바이몰프를 묘사한 것이며 Fig. 2(b)는 두쌍의 MLA를 고정단 근처에 병렬로 추가하여 구성한 압전 바이몰프이다. 그리고 Fig. 2(c)는 무니형 액추에이터를 결합하여 구성한 개선된 압전 바이몰프를 나타낸 것이다.

압전 바이몰프의 발생 변위 특성을 알아보기 위하여 전압을 인가하여 정적인 해석을 행하였고, 발생력 특성의 경우는 바이몰프의 자유단 끝에 압력을 가하고 압전 소자에 전압을 인가하여 정적 해석을 수행하여 바이몰프 자유단 끝이 평행상태에 이르는 발생력을 구하였다.

또한 개선한 압전 바이몰프의 전압 인가 조건을 분석하기 위하여 모달 해석(modal analysis)을 하여 진동 모드를 분석하고, 압전 소자에 계단형(step) 전압 및 준 계단형(pseudo-step) 전압을 인가하여 바이몰프의 과도적인 동적 응답 특성을 해석하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 발생 변위 및 발생력 특성

기존의 압전 바이몰프(모델 1)와 고정단 부분에 MLA 혹은 무니형 액추에이터를 추가하여 동일한 크기로 구성된 바이몰프인 모델 2 및 모델 3에 대하여 1 kV의 전압을 인가하였을 경우 자유단 끝에서 변형량을 Fig. 3에 나타내었다. 그리고 전압 인가에 의하여 바이몰프의 자유단 끝에서 발생한 변위와 발생 압력의 관계를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 3에서 알 수 있듯이 기존 바이몰프인 모델 1에

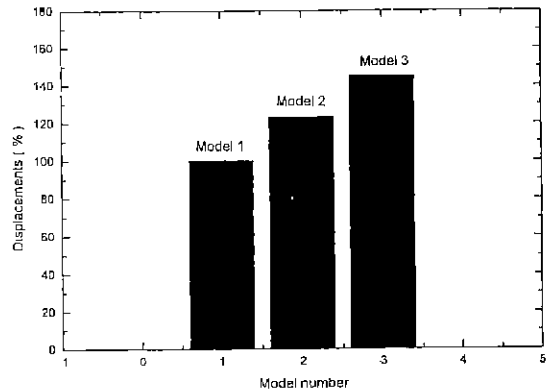


Fig. 3. A tip displacements of the modified bimorphs relative to that of the original

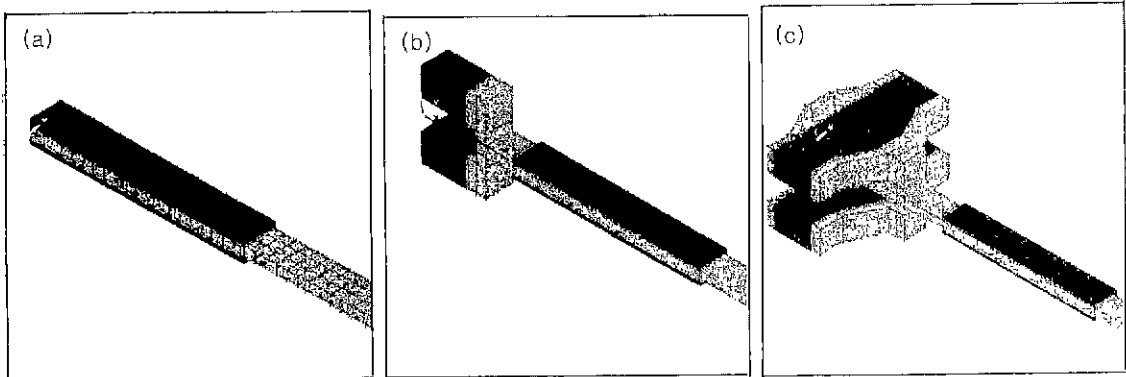


Fig. 2. FE models for the piezoelectric bimorphs, (a) original (b) modified with MLA (c) modified with Moonie type actuator

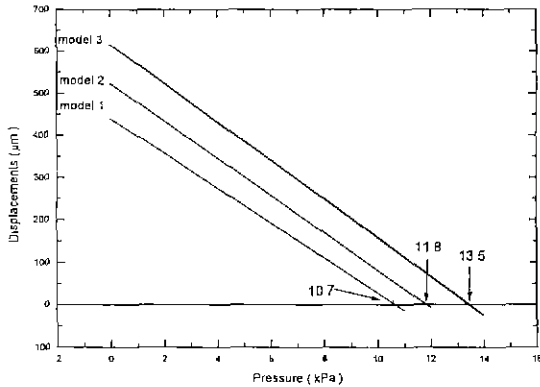


Fig. 4. Tip pressure vs. displacements of the bimorphs

비하여 모델 2 및 모델 3의 바이몰프의 경우 발생 변위 특성이 각각 125%와 150%정도 향상되었음을 알 수 있다. 이 결과는 전술한 바와 같이 고정단 주위에 설치된 MLA 혹은 무니형 액츄에이터의 동작에 의하여 바이몰프에 θ 만큼의 비틀림이 발생하였기 때문이다.

또한 압전 액츄에이터의 동작 특성은 변형량-힘 관계로 나타낼 수 있으며 최대 발생력은 자유단의 변형이 발생하지 않는 평형 상태에서 발생력을 의미한다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 모델 2와 모델 3의 경우 기존 바이몰프인 모델 1에 비하여 각각 110% 및 130%정도 발생력 특성이 향상되었음을 알 수 있다.

상기한 결과는 동일한 크기의 기존 바이몰프와 MLA 혹은 무니형 액츄에이터를 부가하여 구조 개선한 바이몰프에 대한 발생 변위와 발생력 개선 정도를 비교한 것으로 기존 바이몰프에 비하여 주목할 만큼 동작 특성이 개선되었음을 확인할 수 있었다. 그리고 압전 소자의 특성 및 압전 소자의 크기, 갯수, 그리고 기타 구성품의 재질, 치수에 의해 바이몰프의 동작 특성을 상기 결과 이상으로 향상시킬 수 있으므로 필요한 용도에 따라 변형이 가능하다.

4.2. 전압 인가 형태의 영향

정밀한 위치 제어의 용도로 사용되는 압전 바이몰프의 경우 구동시 과도한 이동 및 ringing현상의 방지가 중요하다. 이런 현상들은 압전 소자에 인가되는 전압파형에 의해 영향을 받으므로 인가 전압의 형태 결정이 중요하다.

본 논문에서 고안한 모델 3의 바이몰프 경우 인가 전압 파형 변화에 따른 자유단 끝에서 변위 응답 특성을 과도 해석하여 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 Fig. 5(a)는 전압 유지 시간이 바이몰프 기본 공진 주기의 절반인 직사각형 계단형 전압을 인가한 경우이고, n

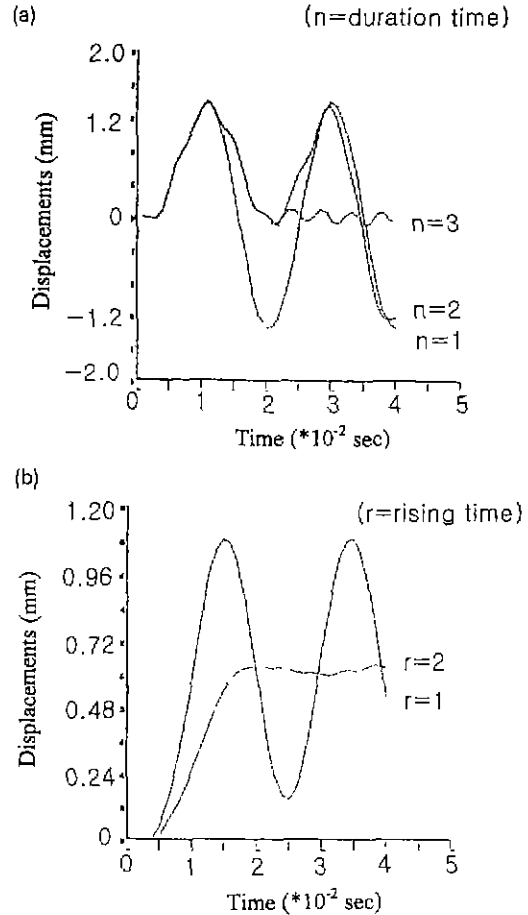


Fig. 5. Displacement response of the bimorph (model 3) with the applied electric field (a) step electric field and (b) pseudo-step electric field

은 인가된 전압 유지 시간의 정수배에 해당한다. Fig. 5(b)의 경우는 전압 상승 시간이 바이몰프 기본 공진 주기의 절반인 준계단형(pseudo-step) 전압을 인가한 경우로 n은 전압의 상승 시간의 정수배를 의미한다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 직사각형 모양의 계단형 전압을 인가한 경우보다 준 계단형 전압을 인가하는 것이 바이몰프의 ringing현상 및 과도 이동 방지를 위하여 효율적이고, 최적의 전압 상승 시간은 기본 공진 모드의 주기와 일치되는 시간이다.

5. 결 론

본 논문에서는 압전 소자를 이용한 미소 변위 소자인 압전 액츄에이터중에 휨 변위형인 바이몰프의 동작 특성에 대한 개선 연구를 행하였다. 유한 요소법을 이용하

여 새로운 바이몰프를 설계하였고, 정적인 해석을 하여 인가 전계에 따른 바이몰프의 발생 변위 및 발생력 특성을 수치 해석하였다. 또한 과도적인 동적 해석을 하여 계단형 전계의 인가에 대한 바이몰프의 동작 특성을 수치 해석하여 전계 인가 조건을 결정하였다. 수치 해석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. MLA 혹은 무니형 액츄에이터를 기존 바이몰프와 결합하여 새로운 압전 바이몰프를 설계하였고, 기존 압전 바이몰프에 비하여 발생 변위 및 발생력이 각각 150% 및 130%정도 향상되는 수치 해석 결과를 얻었다.

2. 계단형 전압을 인가하여 압전 바이몰프를 구동할 경우 직사각형의 계단형 전계 보다는 준 계단형 전계를 인가하는 것이 바이몰프의 과도 이동 및 ringing현상의 방지에 효율적이고, 전압 상승 시간 및 유지시간을 바이몰프의 기본 공진 주기와 일치시키는 것이 가장 좋다.

REFERENCES

- 1 K. Uchino, "Piezoelectric/Electrostrictive Actuator," Morikita Publishers, Tokyo, Japan (1986)
2. Y. Sugawara, et al., "Metal Ceramic Composite Actuator," *J. Am. Ceram. Soc.*, **75**(4), pp. 996-997 (1992)
3. K. Kanayama, et al., "Gap Structure Multilayer Piezoelectric Actuator," *Jpn. J. of Applied Physics*, **30**(9B), pp. 2281-2284 (1991)
4. J. A. Hossack and G. Hayward, "Finite Element Analysis of 1-3 Composite Transducers," *IEEE Trans. On Ultra., Ferro. And Freq. Control*, **38**(6), pp. 618-629 (1991)
5. J.F.Nye, "Physical Properties of Crystals," Oxford University Press, Inc., (1985)
6. J. G Smits, S. I Dalke and T. K. Cooney, "The Constituent Equations of Piezoelectric Bimorphs," *Sensors and actuators*(A), **28**, pp. 41-61 (1991)
- 7 M. Toda, "Theory of Air Flow Generation by a Resonant Type PVF₂ Bimorph Cantilever Vibrator," *Ferroelectrics*, **22**, pp. 911-918 (1979)
8. F. Lalande, Z. Chaudhry and C. A. Rogers, "A Simplified Geometrically Nonlinear Approach to The Analysis of The Moonie Actuator," *IEEE Trans. On Ultra., Ferro and Freq. Control*, **42**(1), pp. 21-27 (1995)

1 K. Uchino, "Piezoelectric/Electrostrictive Actuator,"