

생체 모방 종이 작동기 힘의 측정 및 모델링에 관한 연구

Research for Measurement and Modeling on Blocked Force of Electroactive Paper

강유근† · 김재환* · 정우철** · 송준석**

Yukeun Kang, Jaehwan Kim, Woochul Jung and Chunsuk Song

Key Words : Blocked force (정지력), Electromechanical Actuators (기전 작동기), Cantilever Beam (외팔보).

ABSTRACT

Generally, characteristics of electromechanical actuators are coupled with the mechanical and the electrical properties. Important mechanical parameters of these actuators are the achievable force and displacement in the presence of electric field. These mechanical parameters are related to the stress and strain of the materials and the actuator geometry. This paper presents how to measure the blocked force by using the micro-balance. The blocked force is defined as the force produced by the transducer under an applied voltage when the tip is constrained to zero motion. Also, a theoretical force by using the cantilever beam model is calculated under elastic domain. From the sample of 4 cm x 1 cm x 20 μm , the blocked force measured from the equipment is 20.3 μN at 8 V_{DC}. By comparing it with the theoretical value, 24.9 μN , the blocked force measurement is acceptable. The force measurement is also investigated with different AC electric fields and the frequency.

1. 서론

인공 근육을 대체할 수 있는 재료로 평가 받고 있는 EAP(Electro Active Polymer)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 재료의 제조와 성능 평가에서부터 특성 파악 및 응용 장치의 개발, 그리고 재료의 작동 원리를 구현한 모델링에 이르기까지 많은 분야에 걸쳐 있다[1].

일반적으로 EAP 를 포함한 지능형 작동기는 전기적 특성과 기계적 특성이 서로 연결되어 있다. 기계적 특성 중에서 중요한 인자로 일정한 전압을 가했을 때 발생하는 변위와 힘을 들 수 있다. Fig. 1 은 특정한 입력 전압에서 발생하는 힘과 변위에 대한 그래프이다[2]. 그래프 아래의 면적은 작동기가 낼 수 있는 기계적 일의 최대값을 나타낸다[3].

EAPap(Electro-Active Paper)는 다른 EAP 에 비해 적은 소모 전력으로 큰 변위를 만들어 낼 수 있다는 장점과 더불어 환경 친화적인 재료로 평가되고 있다[4]. 또한 재료에서 발생하는 힘이 작아 그 측정 방법에 있어 매우 정밀한 센서가 요구된다.

본 논문에서는 EAPap 의 모델링과 성능 평가에 중요한 요소인 정지력(blocked force) 측정을 위해 마이크로 저울(micro-balance)를 이용한 측정 방법을 제안하고 실험을 수행하였다. 또한 셀룰로오스와 금 전극의 비균질 특성을 고려한 탄성 굽힘 이론을 이용하여 힘 측정에 관한 이론적 모델을 제시하였다.

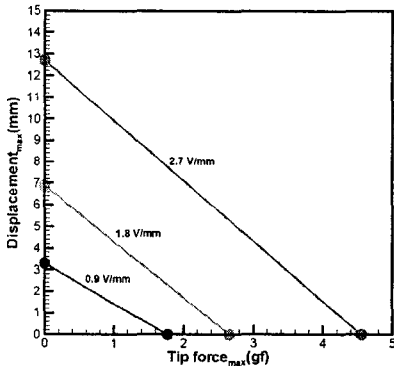


Fig. 1 입력 전압에 따른 힘-변위 관계

2. 굽힘 변위 및 정지력 측정

2.1 EAPap 의 굽힘 변위

EAPap 에 전기장을 인가하였을 때 면외 굽힘 변형이 발생한다. 이 변위는 Fig. 1 의 Displacement_{max}

† 인하대학교 기계공학과 대학원
E-mail : ukeuni@hanmail.net
Tel : (032) 874-7325, Fax : (032) 868-1716
* 인하대학교 기계공학과
** 인하대학교 기계공학과 대학원

에 해당하는 EAPap의 끝단에서 얻어지는 자유 변위이다. EAPap의 굽힘 변위 측정을 위해 AC의 경우 전압, 주파수를 변화시키면서 측정하였으며, DC는 각 전압에서의 최대 변위를 측정하였다. Fig. 2는 AC를 가했을 때, EAPap 끝단에서 발생하는 굽힘 변위의 측정 장치를 나타낸 것이다.

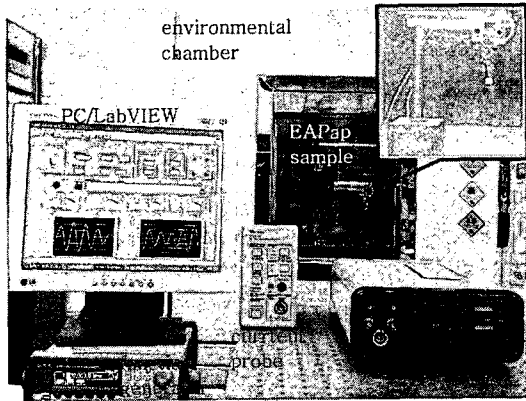


Fig. 2 굽힘 변위와 전류 측정 장치

함수 발생기(Agilent 33220A)에서 출력된 전압은 샘플의 단면에 수직인 방향의 전기장을 형성시킨다. 이때 샘플에 공급되는 전류는 current probe(Tektronix TPCA300)를 통해 측정되며, 입력되는 전압과 전류는 PC를 통해 실시간으로 모니터링된다. 또한 샘플 끝단에서의 변위는 광학 테이블에 놓인 LDV(Laser Doppler Vibrometer, OMETRON VS100)에서 측정되며 이 신호 역시 PC로 전송되며, PC에 설치된 LabVIEW를 이용하여 실시간으로 변위와 전류의 데이터를 처리한다.

2.2 정지력 측정

정지력은 작동기가 낼 수 있는 최대 힘으로 작동기 끝 부분이 고정되어 있는 상태에서 전압을 가했을 때 작동기에서 발생하는 힘으로 정의된다(Tip force_{max}, Fig. 1) [5]. 정지력을 측정하기 위해 Fig. 3과 같은 정지력 측정 장치를 구성하였다.

광학 테이블 위에 있는 환경 챔버 안에 마이크로 저울이 놓여있고, 저울 위에 설치된 지그를 통해 샘플 끝에서 작용하는 힘이 전달된다. 고정된 전극에 수직으로 샘플이 매달려 있고, 샘플의 다른 한 쪽은 지그에 의해 움직일 수 없도록 고정되어 있다.

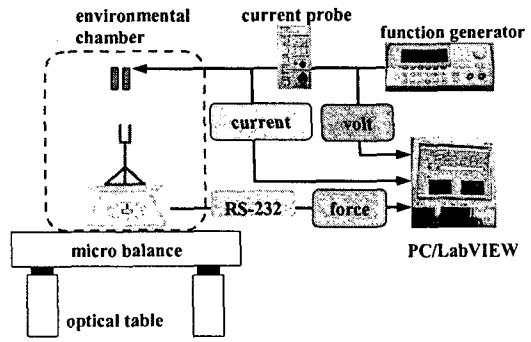


Fig. 3 정지력 측정 장치

샘플에 전압을 가하면, 샘플 끝에서 발생한 수평 방향의 힘은 지그를 통해 저울에 수직 방향으로 전달되며, RS-232 통신을 통해 PC로 전달된다. 또한 샘플에 가해지는 전압 및 전류 역시 PC로 전달되어 저장된다. 실험은 90%의 상대 습도를 유지한 상태에서 진행되었다.

2.3 인가 전압에 따른 정지력 비교

EAPap에 DC를 인가하였을 때 굽힘이 발생하기 시작하여 최대 변위에 도달하게 되는데, 최대 변위 이후에는 다시 이완 현상에 의해 샘플 끝단이 원점으로 복귀하게 된다. 한편, 정지력은 DC를 인가했을 때 일정한 값에 도달한다.

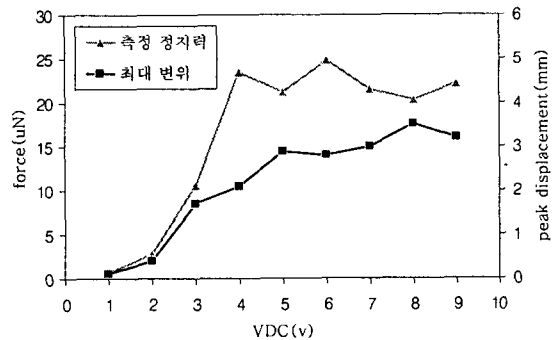


Fig. 4 DC 가전시 발생하는 정지력 결과

Fig. 4는 DC를 가하였을 때 작용하는 정지력을 최대 변위와 비교하여 나타낸 것이다. 그래프에 나타난 것처럼 1V에서 3V까지 정지력이 급격히 증가하나 3V 이후에는 거의 일정함을 알 수 있다. 이는 최대 변위가 전압에 따라 증가하는 경향과 비슷하다고 할 수 있다.

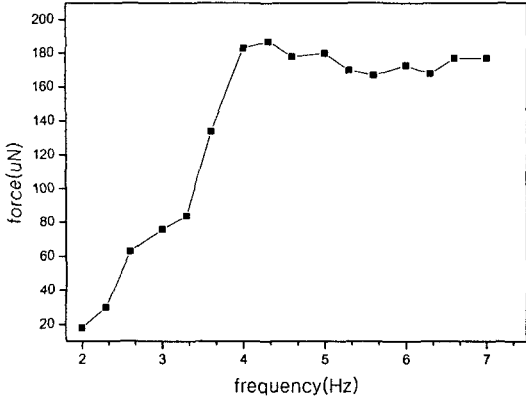


Fig. 5 AC 가진시 주파수에 따른 정지력

Fig. 5 는 AC 를 가했을 때 주파수에 따른 정지력을 보여주고 있다. AC 의 경우 전압이 주파수에 따라 일정한 주기를 가지고 바뀌므로 DC 와는 달리 최대 변위가 주기적으로 나타나게 되며, 최대 정지력은 최대 변위에서 발생한다. AC 로 가진한 경우 주파수에 따른 힘의 변화를 8 Vpp 에서 측정하였다. AC 의 경우 정지력이 4 Hz 까지 급격히 증가하지만 이후에는 조금 감소하는 경향을 보인다. 특히, 4 Hz 는 EAPap 의 공진 영역으로 변위가 공진 주파수를 기준으로 감소하게 된다[6].

정지력의 경우 공진 주파수 이하에서는 변위와 비슷한 양상을 나타내지만, 공진 주파수 이후에는 정지력이 조금 감소한 후 거의 일정함을 알 수 있다.

3. 정지력의 이론 고찰

3.1 단순 외팔보를 이용한 해석

EAPap 에서 발생하는 힘을 계산하기 위해 한쪽 끝이 고정되어 있는 단순 외팔보 이론을 적용하였다. 여기서 샘플을 고정하는 전극은 외팔보의 고정 단 역할을 하게 된다. Fig. 6 의 (a)에 나타난 샘플 형상의 치수는 다음과 같다.

- b_1 : 양쪽 금 전극의 폭 (=1 cm)
- b_2 : 샘플의 폭 (=1.5 cm)
- l_g : 증착된 금 전극의 길이 (=4 cm)
- l_t : 반사체의 길이 (=0.5 cm)
- l_c : 반사체를 포함한 전체 길이 (=4.5 cm)
- l_b : 샘플이 고정 전극에 묻힌 길이 (=1 cm).

샘플의 전체 길이 4 cm 와 레이저 반사를 위한 반

사체의 길이 0.5 cm 에서 전극의 길이 1 cm 를 고려하면 실제 굽힘이 발생하는 샘플의 길이는 3.5 cm 가 된다.

금 전극과 셀룰로오스 사이의 미끄러짐을 무시한 동일한 곡률을 가진 탄성 굽힘으로 가정하였으며, 금 전극과 셀룰로오스의 두께는 일정하다고 가정하였다. 금 전극과 셀룰로오스의 탄성 계수는 각각 80 GPa 와 8.5 GPa 로 다르기 때문에 비균질 보의 굽힘 응력 이론을 적용하였다.

Fig. 6 의 (b)는 금이 증착된 EAPap 의 단면을 나타낸 것이다. 샘플의 단면은 도심을 지나는 가로축과 세로축에 대해 대칭 형상으로 가정하였으며, 단면에 대한 정보는 다음과 같다.

- h : 금 전극의 두께 (=0.1 μm)
- T : 셀룰로오스의 두께 (=20 μm)
- \bar{y}_1 : 단면 도심의 중심에서 금 전극의 중심까지 측정된 높이 (=10.05 μm)
- I_1 : 금 전극의 단면 관성 모멘트 (=1.0 $\times 10^{-19} \text{ m}^4$)
- I_2 : 셀룰로오스의 단면 관성 모멘트 (=10.0 $\times 10^{-18} \text{ m}^4$)
- \bar{EI} : 가중 굽힘 강성 (the weight flexural rigidity) (=2E₁I₁+E₂I₂=1.015 $\times 10^{-17} \text{ Nm}^2$)

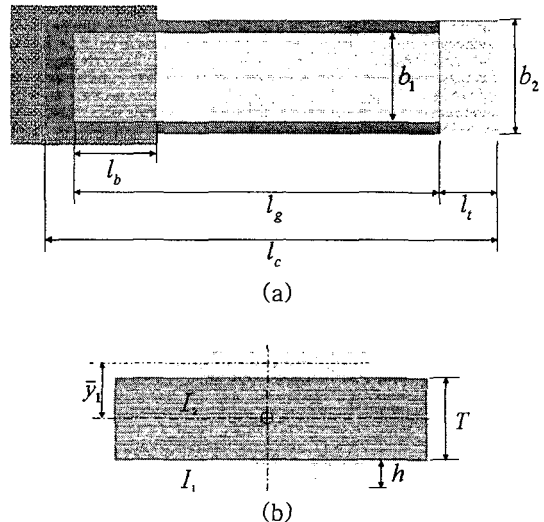


Fig. 6 EAPap 의 형상(a) 및 단면(b)

한쪽이 고정된 외팔보의 다른 한쪽에 힘을 가했을 때 발생하는 변위와 작용하는 힘의 관계로부터 EAPap 에서 발생하는 힘의 최대값 구하면 다음과 같다.

$$P = \frac{3EI\delta}{L^3} = \frac{3 \times (1.015 \times 10^{-7}) \times 35 \times 10^{-3}}{(3.5 \times 10^{-2})^3}$$

$$= 24.9 \mu N$$

여기서 최대 정지력은 최대 변위를 나타낸 8 V에서 발생하였으며, 그 크기는 24.9 μN 이었다. 이 값은 실제 측정값인 20.3 μN 과 22.7%의 차이를 보였으며, 각 전압에 따른 실제 측정값과 이론값, 그리고 두 값 사이의 차이를 Fig. 7에 나타내었다. 이론값은 수식에서 최대 변위에 비례하므로 최대 변위의 경향과 같은 모양을 나타내었다. 이론값과 측정값 사이에 다소 오차는 있으나 경향은 같은 것을 알 수 있다.

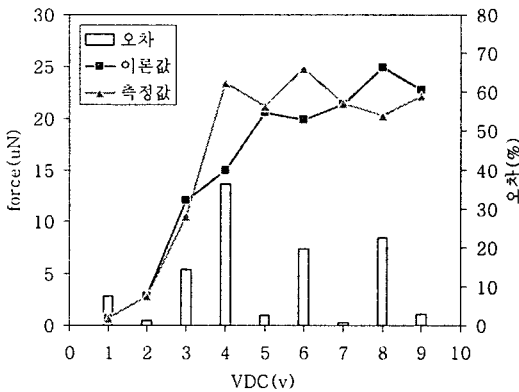


Fig. 7 DC에서의 정지력의 이론값과 측정값 비교

4. 결론

본 논문에서는 EAPap의 직류 및 교류 전압에 따른 샘플 끝 단에서 발생하는 최대 힘을 측정하였다. 또한 샘플의 최대 굽힘 변위값과 비균질 보의 탄성

굽힘 이론을 적용하여 이론적인 힘을 계산하였다. 외팔보의 경우 작용하는 힘과 변위가 비례 관계에 있으므로 각 전압에서의 최대 정지력은 최대 변위에서 발생하게 되고, 최대값은 8 V에서 20.3 μN 로 나타났다. 이 값은 같은 전압이 주어졌을 때 발생하는 최대 변위를 이용한 이론값과 다소 차이는 보였으나 같은 경향을 나타내었다. 본 실험 장치는 간단한 구성으로 미소한 힘을 측정할 수 있는 방법으로 다른 생체 모방 작동기의 힘 측정에도 응용할 수 있다.

참고문헌

- (1) Y. Bar-Cohen Ed., 2001, Electroactive Polymer(EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential, and Challenges, SPIE Press.
- (2) B. Kim, et al., Analysis of mechanical characteristics of the ionic polymer metal composite (IPMC) actuator using cast ion-exchange film, SPIE's 9th Annual Symposium on Smart Structure and Materials, vol.5051, 486-495, 2003
- (3) Kenneth M. Newbury and Donald J. Leo, 2002, Electromechanical Modeling and Characterization of Ionic Polymer Benders, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 13, pp.51-60
- (4) J. Kim, Y. B. Soe, 2002, Electro-active paper actuators, Smart Materials & Structures, 11, 355-360.
- (5) Barbar Akle and Donald J Leo, 2004, Electromechanical transduction in multilayer ionic transducers, Smart Materials and Structures, 13, 1081-1089
- (6) J. Kim, C. Song and S. Bae, Actuation performance of cellulose based electro-active papers, SPIE's 11th Annual Symposium on Smart Structure and Materials, vol.5759, 75-81, San Diego CA, USA, March 2005.