

압전 센서를 사용한 계수 장치 개발

Development of a Counting Device Using a Piezoelectric Sensor

유완동* · 김진오** · 박광훈***

Wan Dong Yoo, Jin Oh Kim, and Kwang-Hoon Park

Key Words : Piezoelectric Film(압전필름), Sensor(센서), Counting Device(계수장치), Bending Vibration(굽힘진동)

ABSTRACT

This paper deals with the development of a contact-type counting device using a piezoelectric polymer film as a sensor. The piezoelectric and vibration characteristics of the film under a bending vibration were investigated theoretically and experimentally. A counting device, which includes filters, an amplifier, an analog-digital converter, and a display, was designed and fabricated. The performance of the piezoelectric polymer sensor was evaluated in the sense of the responses to contact force, contact frequency, and contact speed. The life and the temperature effect were also investigated for the piezoelectric film sensor.

1. 서 론

압전(壓電)현상은 역학적 변형이 전기적 신호로 변환되거나, 이와 반대로 전기적 신호가 역학적 변형량으로 변환되는 것이다. 역학적 진동을 감지하여 전기신호로 출력하는 정압전현상은 센서에 활용되고, 전기적 신호를 역학적 운동으로 변환하는 역압전현상은 액추에이터에 활용된다.⁽¹⁾ 압전 소재 중에 PVDF와 같은 폴리머가 다양한 분야에 응용되고 있다. 압전 폴리머는 유연하여 간단한 스위치에서부터 로봇의 촉각센서나 의학센서 등과 같이 복잡한 센서에 이르기까지 활용방안이 많이 모색되고 있다.⁽²⁾

생산라인의 자동화 설비인 컨베이어 시스템에서, 이송되는 물품을 계수하는 장치가 사용되고 있다. 기존의 기계적 접촉식 장치는 단순하고 저렴한 반면에, 마모로 인하여 수명이 길지 않고 출력신호가 없어 자동화에 활용할 수 없는 단점이 있다. 한편 광학적 비접촉식 장치는 마모되지 않지만, 광원 등의 부속품으로 인하여 가격이 비싸고 부피가 큰 단점이 있다. 압전 폴리머 필름의 정압전현상을 이용하여, 기존 장치들의 단점을 극복하고 장점을 유지하는 방식의 접촉식 계수 장치를 개발하고자 본 연구를 수행하였다.

본 연구에서 압전필름을 활용한 계수 장치의 개념도가 Fig. 1이다. 컨베이어 시스템에서 물체의 이동경로에 압전필름을 배치하면, 물체가 이동하며 압전필름에 굽힘변형이 생기고, 그에 상응하여 전압이 발생한다. 필름 형태의 압전 폴리머가 이동 물체의 접촉에 의해 굽힘 변형 될 때 발생하는 전기적 출력 신호의 크기와 성분을 예측하기 위하여, 압전 특성과 진동 특성을 해석하고 실험을 통해 확인하였다. 압전 필름 센서의 출력 신호를 여과하고 증폭하며 계수하는 회로를 설계하고 계수 결과를 표시하는 장치를 제작하였으며, 압전 센서의 성능을 평가하였다.

2. 압전필름의 굽힘 압전 및 진동 특성

압전 폴리머 필름은 왼쪽 끝이 고정될 때 Fig. 2와 같이 외팔보로 단순화 할 수 있다. 계수 장치 회로부의 필터 설계에 활용하기 위하여 압전필름의 굽힘 압전 특성과 진동 특성을 파악하였다.

2.1 압전필름의 구조 및 물성

본 논문에서 대상으로 하는 압전필름은 MSI사의 LDT1-028K/L⁽³⁾로서, 길이 $a = 41.4$ mm이고 폭 $b = 16.3$ mm이며 전체 두께 $t = 205$ μ m이다.⁽⁴⁾ 이 압전필름은 PVDF 층(두께 $t_2 = 28$ μ m)의 위와 아래에 각각 폴리우레탄 층(두께 $t_1 = 52$ μ m)과 폴리에스터 층(두께 $t_3 = 125$ μ m)이 덮혀 있는 복합 보 형태이다.⁽⁴⁾ PVDF 양면의 6 μ m 이하의 얇은 은 전극은 무시할 만하다.

* 숭실대학교 대학원 기계공학과

** 숭실대학교 공과대학 기계공학과

E-mail : jokim@ssu.ac.kr

Tel: (02)820-0632, Fax: (02)820-0638

*** (주)피엔에스미캐닉스

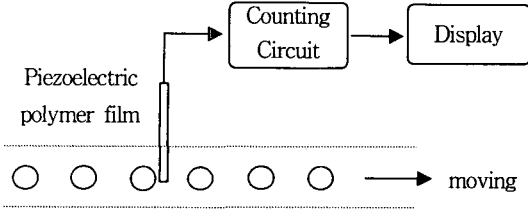


Fig. 1 Concept of the counting device using a piezoelectric film.

이러한 형태의 압전필름을 탄성학 관점에서 다룰 때에는 하나의 PVDF로 이루어진 단순 보로 등가화 할 수 있고, 이러한 보의 단면 모멘트 I_{eq} 는 다음과 같이 구한다.⁽⁵⁾

$$I_{eq} = \frac{b}{3} [mh^3 + (t_2 + t_3 - h_2)^3(1-m) - (t_3 - h_2)^3(1-n) + nh_2^3] \quad (1)$$

여기서 $m(= E_1/E_2)$ 과 $n(= E_3/E_2)$ 은 Young률의 비로서 E_1, E_2, E_3 는 각각 폴리우레탄, PVDF, 폴리에스터의 Young률이다. 또한 h_1 과 h_2 는 각각 윗면 및 아랫면으로부터 중성축까지의 거리이다.⁽⁴⁾ 각 재료의 Young률은 $E_2 = 3 \text{ GPa}$, $E_1 = 0.4 \text{ GPa}$, $E_3 = 2.4 \text{ GPa}$ 이므로,^(3,6,7) $m = 0.133$, $n = 0.80$ 이다. 따라서 $h_1 = 120.6 \mu\text{m}$, $h_2 = 84.4 \mu\text{m}$ 이다. 이러한 수치들을 대입하여 계산된 I_{eq} 값은 $5.33 \times 10^{-15} \text{ m}^4$ 이다.

전체 길이가 41 mm인 압전필름의 전선 쪽 끝이 고정 장치에 물리고 남은 길이는 $L = 33.18 \text{ mm}$ 이다. 압전필름의 외팔보 부분의 치수(L, b, t)로부터 계산된 부피 $1.097 \times 10^{-7} \text{ m}^3$ 와 이부분의 측정된 질량 $0.089 \times 10^{-3} \text{ kg}$ 으로부터 구해진 밀도는 $\rho = 802.7 \text{ kg/m}^3$ 이다.

2.2 특성 해석

(1) 변형에 따른 전기적 출력

탄성학에서 다루는 보의 처짐 관계식^(5,7)을 적용하면, Fig. 2의 압전필름 외팔보의 자유단에 가해지는 하중 P 와 변형량 δ 의 관계가 다음과 같이 표현된다.

$$P = \frac{3E_2 I_{eq}}{L^3} \delta \quad (2)$$

이 식에 의해 변형 크기 δ 로부터 충격력 크기 P 를 파악할 수 있다. 고정부로부터 거리 x 만큼 떨어진 지점의 굽힘 모



Fig. 2 Cantilever model of the piezoelectric film.

멘트의 작용에 따른 x 방향 응력 σ_x 는 다음과 같다.

$$\sigma_x(x, z) = -\frac{P(L-x)}{I_{eq}} z \quad (3)$$

압전현상을 묘사하는 일반적인 관계식⁽¹⁾으로부터 단순화하면, x 방향 응력 σ_x 에 의해 발생하는 z 방향 전기장 E_z 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_z = -g_{31} \sigma_x \quad (4)$$

여기서 g_{31} 은 압전상수로서, 압전필름 LDT1-028K/L에서는 $g_{31} = 0.216 \text{ Vm/N}$ 이다.⁽³⁾ 전기장 E_z 와 전압 V 의 관계는 $E_z = -dV/dz$ 이므로, 적분을 하여 전압을 나타낸다.

$$\begin{aligned} V(x) &= -\int_{-(t_2+t_3-h_2)}^{-(t_1-h_2)} E_z dz \\ &= g_{31} \frac{P(L-x)}{I_{eq}} \frac{(t_2+t_3-h_2)^2 - (t_3-h_2)^2}{2} \quad (5) \end{aligned}$$

따라서 압전 폴리머 표면 전체에서의 평균적인 출력전압 V 는 다음과 같다.

$$V = \frac{g_{31} PL [(t_2+t_3-h_2)^2 - (t_3-h_2)^2]}{4I_{eq}} \quad (6)$$

가령 필름 끝의 굽힘 변형 $\delta = 10 \text{ mm}$ 가 발생하는 충격 접촉 때에 압전필름의 출력 전압 크기는 식 (6)으로부터 16.33 V로 계산된다.

(2) 충격에 의한 진동 응답

압전필름의 출력 신호 중 잡음 신호를 여과하기 위하여 필터를 사용하는데, 필터의 차단 주파수를 선정하기 위하여 압전필름의 진동 응답의 주파수 대역을 파악할 필요가 있다. 충격 가진에 따른 진동 응답에 고유진동 성분이 가장 크게 기여하므로, 외팔보형 압전필름의 고유진동수를 파악하였다.

Fig. 2에 보인 외팔보에 대해서 변위를 $y(x, t) = X(x) \exp(i\omega t)$ 형태로 변수분리 할 때, 지배방정식과 경계조건으로부터 구해지는 특성방정식은 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$\cos \beta L \cosh \beta L = -1 \quad (7)$$

여기서 $\beta^4 = \rho A \omega^2 / E_2 I_{eq}$ 이고, 단면적 $A = bt$ 이다. 이 특성방정식의 근은 $\beta L = 1.875, 4.694, 7.855, 10.995, 14.137, \dots$ 이다.

압전필름 외팔보에 대해서 굽힘진동의 고유진동수 f_n 는 다음 식으로부터 구해진다.

$$f = \frac{(\beta L)^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{E_2 I_{eq}}{\rho A}} \quad (8)$$

수치들을 대입하여 구한 1차 고유진동수는 39 Hz이다.

2.3 실험

컨베이어와 같은 실제 상황에서 센서에 반복적으로

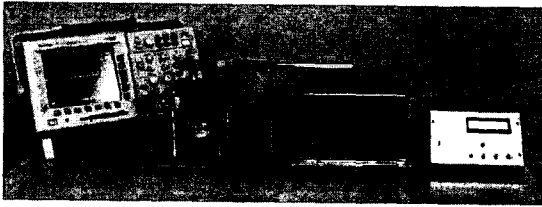


Fig. 3 Experimental apparatus and a counting device.

접촉이 가해지는 것처럼 충격적 접촉을 압전 필름에 가하기 위하여, 돌출부가 부착된 회전체를 제작하였다. Fig. 3은 제작된 장치가 사용되는 모습을 보여주는 사진이다. 왼쪽 부분이 모터를 핵심 부품으로 하여 구성된 회전장치이고, 가운데 기둥에 압전필름이 설치되며, 오른쪽 상자에 모터 회전수 조절기와 회전수 표시기가 들어간다.

앞 절의 해석 결과들과 비교하기 위하여, 출력 신호의 크기와 성분을 측정하는 실험을 하였다. 필름 끝의 굽힘 변형 $\delta = 10$ mm를 발생시키는 충격력이 가해질 때, 압전 필름의 출력 전압 신호를 관찰한 예가 Fig. 4에 보여 있다. Fig. 4의 파형에서 출력신호 크기가 약 13.8 V라고 측정된다. 이 크기는 2.2절에서 해석을 통해 계산한 출력 크기 16.33 V와 비교된다.

또한, Fig. 4의 출력 신호를 주파수 분석한 결과에서 피크 위치의 주파수가 46.0 Hz였다. 이 1차 감쇠고유진동수 f_d 에 해당한다. Fig. 4의 감쇠운동 파형으로부터 구한 감쇠비⁽⁶⁾ $\zeta = 0.099$ 이다. 따라서 $f = f_d / (1 - \zeta^2)^{1/2}$ 의 관계로부터 구한 1차 비감쇠 고유진동수 f 는 45.7 Hz이다. 이는 2.2절에서 계산하여 구한 고유진동수 39 Hz와 비교된다.

3. 계수 장치 설계 및 제작

앞 절에서 특성 파악이 된 압전 폴리머 필름을 센서

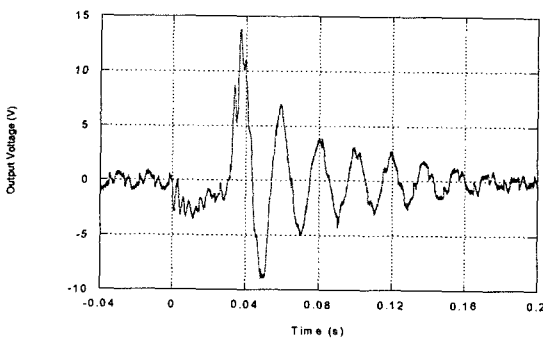


Fig. 4 Output signal

로 사용하여, 물체의 접촉 횟수를 계수하는 장치를 설계하고 제작하였다. 압전 필름의 전기적 출력 신호로부터 계수 결과를 표시하기까지의 신호처리 과정이 Fig. 5에 보여 있다.

압전필름의 출력신호에 포함되어 있는 잡음신호들을 걸러내기 위하여, 저역통과필터와 대역차단필터 및 고역통과필터를 사용하였다. 그리고 신호는 증폭기를 통과한 후 계수에 활용되었다. 여과와 증폭을 거친 아날로그 신호를 계수회로에 입력하기 전에 디지털 신호로 변환하였다. Analogue Device사의 AD580과 AD7895를 사용하여 12 bit 축차비교형 A/D변환기를 제작하였다.

개발하는 장치의 단가를 낮추기 위하여 단순한 계수 회로인 CD4528를 사용하였다. 압전필름에서 발생된 신호는 필터와 증폭기 및 A/D변환기를 거쳐 계수회로에 입력된다. 입력신호 크기가 설정 전압(가령, 5 V)를 초과할 때 필스가 발생하여 PIC의 프로그램에 의해 계수된다.⁽⁹⁾

계수된 숫자를 나타내는 표시기가 Fig. 6 사진의 우측 상단에 보여 있다. Fig. 6에는 또한 필터, 증폭기, A/D변환기, 계수회로 등이 배치되어 보여 있다. 센서가 동작되면, 사진에서 보듯이 누적된 숫자가 표시된다. 이 회로부는 Fig. 3의 장치의 우측 상자 안에 들어 있다.

4. 고찰

4.1 충격력 크기에 따른 응답

충격력의 크기를 다양하게 하면서 압전 필름의 출력 신호 크기를 측정하는 실험을 행하였다. 압전필름 끝에 5 mm 높이에서 추를 낙하시키는 방법으로 행하면서, 추의 질량을 여러 가지로 선정하여 충격력을 변화시켰다. 이때 압전필름의 굽힘 변형량을 측정하여 출력 전압 크기와 관계를 관찰하였다. 그 결과로서 굽힘 변형 δ 의 함수로 출력 전압 크기 V 를 그래프로 정리하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7의 그래프에서 실선은 2.2절의 해석을 통해 계산한 결과이다. 측정 결과와 계산 결과가 정확히 일치하지는 않지만, 제시한 오차 범위 내에서 일관된 경향을 보여주고 있다.

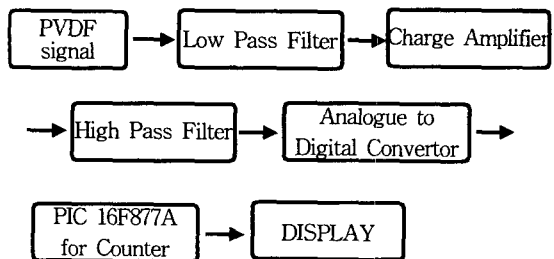


Fig. 5 Flow chart of signal processing.

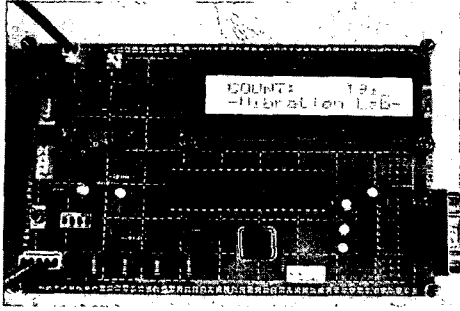


Fig. 6 Circuit of the counting device.

4.2 접촉 빈도에 따른 응답

접촉 빈도는 회전장치의 회전수에 해당하므로, 회전수를 변화시켜 가며 출력 전압을 측정하였다. 회전장치에서 압전필름에 접촉하는 돌출부의 위치를 세가지 (반경 41.8, 43.8, 44.9 mm)로 달리하여 각각 측정을 하였고, 그 결과를 Fig. 8에 그래프로 나타내었다. 회전속도가 900 rpm, 즉 초당 15번 접촉까지는 출력전압이 5~10 V 범위에 있었다. 따라서 이러한 접촉 빈도 범위에서 접촉 센서는 설정 전압 (5 V)를 유지하면서 계수 센서로 사용될 수 있음을 확인하였다. 접촉 빈도가 더 많은 경우에는 설정 전압을 조정할 필요가 있다.

5. 결론

압전 폴리머 필름을 센서로 사용하는 접촉식 계수 장치를 개발하였다. 외팔보형 압전 필름이 이동 물체의 충격적 접촉에 의해 굽힘 변형 될 때 발생하는 전기적 출력 신호의 크기와 성분을 파악하여 필터 설계에 반영하였다. 압전필름 센서의 출력 신호에서 잡음 성분을 걸러내고 신호를 증폭한 후 아날로그-디지털 신호 변환을 거쳐 계수하는

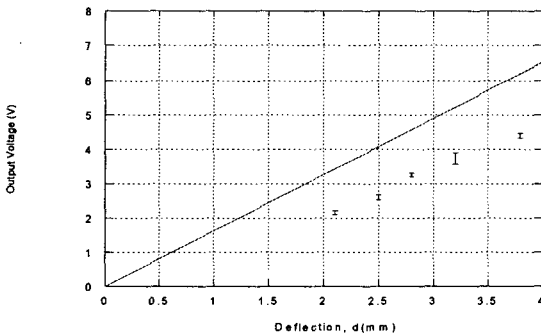


Fig. 7 Output voltage magnitude measured as a function of the deformation δ .

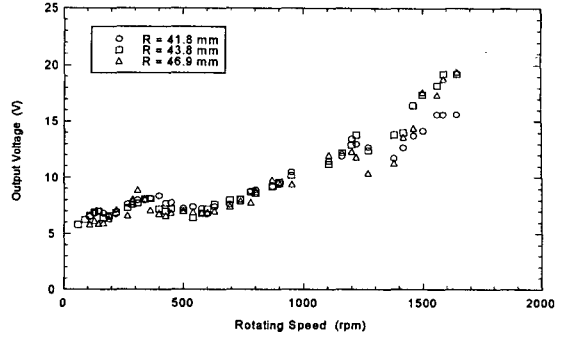


Fig. 8 Output voltage magnitude measured as a function of the impact frequency.

회로를 설계하고 제작하였다.

압전 폴리머 필름의 센서로서의 성능을 점검하여, 충격력의 크기에 따른 선형 비례적 응답 특성을 관찰하고, 접촉 빈도가 변하더라도 정상적으로 응답하는 범위를 파악하였다.

참고 문헌

- (1) I. J. Busch-Vishniac, *Electromechanical Sensors and Actuators*, Springer, New York, 1999, Chapter 5.
- (2) J. V. Chatigny, L. E. Robb, "Piezo Film Sensor," *Sensors*, Vol. 3, No. 5, 1986.
- (3) Measurement Specialties, Inc., *Piezo Film Sensors Technical Manual*, Internet Version, www.msusa.com, 1998, Part 1, p. 4.
- (4) 이용국, 한득영, "PVDF 필름의 압전정효과에 관한 연구," *전기전자재료학회논문지*, 제13권, 제9호, pp. 786-790, 2000.
- (5) J. M. Gere, S. P. Timoshenko, *Mechanics of Materials*, 3rd ed., PWS-Kent Publishing Co., Boston, 1990, pp. 301-308.
- (6) W. D. Pilkey, *Formulas for Stress, Strain, and Structural Matrices*, John Wiley & Sons, New York, 1994, p.175.
- (7) F. P. Beer, E. R. Johnston, Jr., and J. T. Dewolf, *Mechanics of Materials*, 3rd ed., McGraw-Hill, Boston, 2002, p. 749.
- (8) D. J. Inman, *Engineering Vibration*, 2nd ed., Prentice-Hall, New Jersey, 2001, Chapter 6.
- (9) M. M. Mano, *Logic and Computer Design Fundamentals*, 2nd ed., Prentice Hall, New Jersey, 2000, Chapter 5.