

PVDF 필름의 압전정효과에 관한 연구

Study on the Piezoelectric Direct Effect of PVDF Film

이용국*, 한득영*

(Yong-Kuk Lee, Deuk-Young Han)

Abstract

This paper is concerned on the theoretical and experimental approaches of direct piezoelectric effect in the PVDF film. When a cantilever structure of PVDF film is bended by the external force, electric charges are concentrated on the electrode surface of the film due to the direct piezoelectric effect, and output voltage is induced from the terminals of the film. In this paper, a symbolic equation between the external force and the output voltage was introduced. Moreover, the theoretical output voltages were compared with the experimental results by falling balls, which were agreed well each other. This result can be useful in a warning system of abnormal pulse rate and breathing, and in detecting impact force and/or mechanical energy using bending of PVDF film.

Key Words(중요용어) : PVDF, Direct piezoelectric effect, Cantilever, External force, Strain energy

1. 서 론

PVDF는 압전성을 갖는 유기물로서 1969년 Kawai에 의해 발견된 이래로 그 특성에 관한 연구와 copolymer에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있으며, 그 유연성과 제작의 용이성에 의해 각종 음향센서, 초전센서, 접촉센서, 가속도 센서, 생의학 센서 등에 많이 응용되고 있다. 또 Takeo Furukawa와 Yutaka Uematsu는 필름의 신장(elongation)과 굽힘의 관계를 연구하였으며[1], Takayoshi Ibe는 PTFE(polytetrafluoroethylene)의 분극온도와 굽힘압전상수(bending piezoelectric

constant)의 관계를 구하였고[2], Lance Breger 등은 PVDF의 비등방 압전상수에 대하여 연구하였다[3]. 또한, E. Fukada 등은 굽힘압전상수 β 와 두께, 신장압전상수 d , 평균고유(intrinsic)굽힘압전상수 f 와의 관계를 구하였다[4]. Minoru Toda와 Susumu Osaka는 PVDF 다층 바이몰프(bimorph) 구조로부터 낮은 인가전압에 대해 상대적으로 큰 굽힘모멘트를 나타내는 새로운 디바이스를 제안하였다[5]. Minoru는 압전필름의 막운동(membrane motion)을 이용한 디바이스에 대한 설계이론을 다양한 구조에 대하여 제시하였다[6].

이 논문에서는 한 단면을 고정시킨 외팔보형 구조의 PVDF필름을 쇠구슬의 자유낙하에 의한 외부의 힘으로 굽혔을 때 압전정효과에 의해 필름표면의 전극에 유기되는 전하에 의한 출력전압과 외부에서 인가한 응력 사이의 관계식을 유도하였고, 그 이론치와 실험치를 비교함으로써 그 유도식의 타당성을 검증하였다.

* 건국대학교 공과대학 전기공학과
(서울특별시 광진구 화양동 1번지,
Fax: 02-457-9186
E-mail : madggm@pof.konkuk.ac.kr)
2000년 6월 21일 접수, 2000년 8월 30일 심사완료

2. 외력과 출력전압

2.1. 기계적 에너지

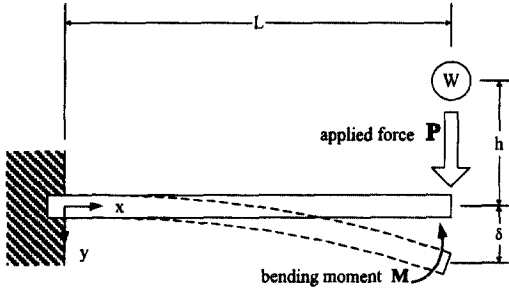


그림 1. 외팔보형 PVDF 필름
Fig. 1. PVDF film of cantilever

그림 1과 같은 길이 L , 폭 w , 두께 t 의 보(beam)에 무게 W 의 쇠구슬을 높이 h 에서 자유낙하시켰을 때, 충격력을 P , 편향을 δ 라 하면 보에 저장되는 변형에너지 U 는

$$U = \frac{P\delta}{2} \quad (1)$$

와 같이 나타낼 수 있으며, 이 변형에너지 U 는 충격력 P 에 의해 행해진 일과 같다. 또한 충격력 P 에 의해 보에 전달된 변형에너지 U 는 에너지의 손실이 없을 경우 다음과 같다.

$$U = \int \frac{M^2}{2EI} dx = \int_0^L \frac{(Px)^2}{2EI} dx = \frac{P^2 L^3}{6EI} \quad (2)$$

여기서, M 은 굽힘모멘트, E 는 Young률, I 는 관성모멘트를 나타낸다. 손실이 없는 경우 충격력 P 가 한 일과 변형에너지 U 는 같으므로 식(1)과 (2)로부터 편향 δ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\delta = \frac{PL^3}{3EI} \quad (3)$$

이때 무게 W 는 질량과 중력가속도의 곱이므로 낙하거리 $(h + \delta)$ 인 쇠구슬의 위치에너지 E_p 는 $W(h + \delta)$ 가 되고, 위치에너지 E_p 는 보에 전달된 변형에너지 U 와 같으므로 식(3)을 사용하여 정리하면

$$\frac{P^2 L^3}{6EI} - W \frac{PL^3}{3EI} - Wh = 0 \quad (4)$$

과 같이 충격력 P 에 관한 2차방정식을 구할 수 있으며, 보의 전체길이 L 에 대한 평균굽힘모멘트 \bar{M}

는 $\bar{M} = \frac{1}{L} \int_0^L Px dx = \frac{PL}{2}$ 로부터 $P = \frac{2\bar{M}}{L}$ 와 같이 평균굽힘모멘트 \bar{M} 와 충격력 P 의 관계를 나타낼 수 있으므로 이 관계를 식(4)에 대입하여 평균 굽힘모멘트 \bar{M} 에 대한 2차방정식을 유도하고 그 해를 구하면 다음과 같다.

$$(\bar{M})^2 - WL\bar{M} - \frac{3WEIh}{2L} = 0, \\ \bar{M} = \frac{WL}{2} + \sqrt{\left(\frac{WL}{2}\right)^2 + \frac{3EIh}{L^2} \left(\frac{WL}{2}\right)}.$$

한편 보의 굽힘은 길이방향으로의 신장 및 압축 응력 σ 를 발생시키며 이것을 평균굽힘모멘트 \bar{M} 로 표현하면 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{\bar{M}y}{I} = \frac{WLy}{2I} + \sqrt{\left(\frac{WLy}{2I}\right)^2 + \frac{3Ehy}{L^2} \left(\frac{WLy}{2I}\right)} \quad (5)$$

실험에 사용한 PVDF 필름의 단면(cross section) 구조는 그림 2와 같이 그 상하부에 각각 폴리에스터(Polyester)와 우레탄(Urethane)이 적층되어 있는 조합보(composite beam)로서 이러한 조합보는 그림 3과 같이 하나의 PVDF로 이루어진 단일보(simple beam)로 등가화할 수 있다[7]. 여기서, m 과 n 은 Young률의 비로서 $m = E_1/E_2$, $n = E_3/E_2$ 의 관계가 있다.

이때 그림 3에서 이 등가 단일보의 관성모멘트 I 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I = m \int_{-(t_1+t_2-h_2)}^{-(t_2+t_3-h_2)} y^2 w dx + \int_{-(t_2+t_3-h_2)}^{-(t_3-h_2)} y^2 w dx \\ + n \int_{-(t_3-h_2)}^{h_2} y^2 w dx \\ = \frac{w}{3} \{ (t_2+t_3-h_2)^3 (1-m) + (t_3-h_2)^3 (n-1) \\ + h_1^3 + nh_2^3 \} \quad (6)$$

여기서, h_1 , h_2 는 각각 PVDF 필름의 상하면으로부터 중성축(neutral axis)까지의 거리를 나타낸다. 한편 중성축에서 합성 주방향 힘(resultant axial force)은 0이 되므로 다음의 관계가 있다.

$$\int_1 \sigma_{x1} w dx + \int_2 \sigma_{x2} w dx + \int_3 \sigma_{x3} w dx = 0 \quad (7)$$

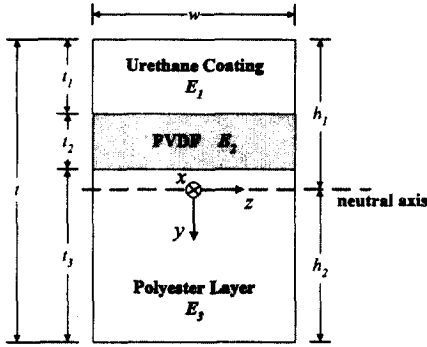


그림 2. PVDF필름의 단면과 중성축
Fig. 2. Cross section and neutral axis of PVDF film

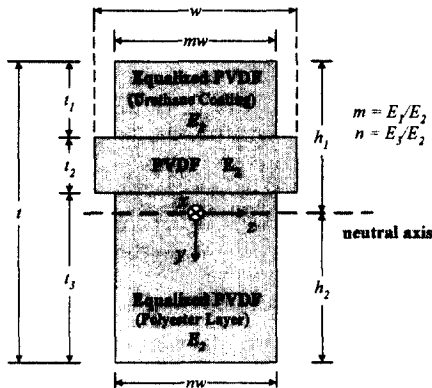


그림 3. 등가화된 단면과 중성축
Fig. 3. Equalized cross section and neutral axis

곡률(curvature)을 α 라 할 때 각 층에서 x 방향의 응력 σ 는 $\sigma_{x1} = -E_1 \alpha y$, $\sigma_{x2} = -E_2 \alpha y$, $\sigma_{x3} = -E_3 \alpha y$ 와 같이 표현될 수 있으므로 식(7)로부터

$$w \alpha E_2 \left\{ m \int_{-(t_1+t_2-h_2)}^{-(t_1+t_3-h_2)} y dy + \int_{-(t_2-h_2)}^{(t_3-h_2)} y dy + n \int_{-(t_3-h_2)}^{h_2} y dy \right\} = 0$$

의 관계가 구해지고, 이 식으로부터 h_1 , h_2 는 다음과 같이 구할 수 있다

$$h_2 = \frac{m t_1^2 + t_2^2 + n t_3^2 + 2m(t_2 + t_3)t_1 + 2t_2 t_3}{2(m t_1 + t_2 + n t_3)} \quad (8)$$

$$h_1 = t - h_2 = t_1 + t_2 + t_3 - h_2$$

2. 전기적 에너지

전속밀도 $D = \epsilon E$ 와 응력 σ 사이에는 $E_i = -g_{ij} \sigma_j + \beta_{ik} D_k$ ($i=1,2,3, j=1,2,3,4,5,6, k=1,2,3$)과 같은 관계식으로 표현된다[8]. 여기서 E_i 는 전계, g_{ij} 는 압전상수(piezoelectric voltage constant), β_{ik} 는 역유전율(impermissivity)로서 그림 1과 같은 경우는 전기적인 입력이 없으므로 $D_k = 0$ 이고, 또 1방향의 응력 σ_1 에 의해서 3방향(z 방향)의 출력전압이 나타나므로 출력전압 V 는 $V = -g_{31} t_2 \sigma_1$ 의 관계가 있다. 이 식의 응력 σ_1 은 이 PVDF필름에 가해지는 응력으로서 식(5)로부터 두께방향의 평균응력을 계산하여 구할 수 있고, 그 응력 σ_1 으로부터 출력전압 V 를 다음의 식(9)와 같이 구할 수 있다. 이때 식(5)에 포함된 Young률 E 를 PVDF의 Young률 E_2 로 대체하였다.

$$\begin{aligned} V &= -g_{31} t_2 \frac{1}{t_2} \int_{-(t_2+t_3-h_2)}^{-(t_3-h_2)} \alpha dy \\ &= -g_{31} \frac{M}{I} \frac{(t_3-h_2)^2 - (t_2+t_3-h_2)^2}{2} \\ &= A \left\{ \frac{WL}{2} + \sqrt{\left(\frac{WL}{2}\right)^2 + \frac{3E_2 I}{L^2} \left(\frac{WL}{2}\right) h} \right\}, \end{aligned} \quad (9)$$

여기서

$$\begin{aligned} A &= -\frac{3g_{31}}{2w} \cdot \frac{(t_3-h_2)^2 - (t_2+t_3-h_2)^2}{B} \\ B &= (t_2+t_3-h_2)^3(1-m) \\ &\quad + (t_3-h_2)^3(n-1) + h_1^3 + nh_2^3 \end{aligned} \quad (10)$$

3. 실험결과 및 고찰

실험에 사용된 PVDF필름은 AMP사의 그림 4와 같은 LDT1-028K/L로서 길이는 $L=30\text{mm}$ 이며, 두께 $t_1 = 52\mu\text{m}$ 의 우레탄, $t_2 = 28\mu\text{m}$ 의 PVDF, $t_3 = 125\mu\text{m}$ 의 폴리에스터가 적층되고, 필름의 양면에는 약 $6\mu\text{m}$ 이하의 매우 얇은 silver ink screen 전극이 있다. 또한, 압전상수 $g_{31} = 0.216(\text{V/m})/(\text{N/m}^2)$, Young률 $E_1 = 0.4\text{GPa}$, $E_2 = 3\text{GPa}$, $E_3 = 3.25\text{GPa}$ 이다[9][10]. 그림 5는 그 실험장치를 보인 것이다.

PVDF 필름에 충격력을 인가하기 위하여, 무게 W가 각각 0.033, 0.065, 0.111g인 쇠구슬을 낙하높이 5~40mm범위에서 5mm 간격으로 필름 자유단에 자유낙하시켰다. 이때, 압전효과에 의해 필름의 출력단에 나타나는 전압파형은 그림 6과 같다. 그림 6에서 알 수 있듯이 외팔보 PVDF 필름의 자유단에 충격력이 인가되는 순간의 출력전압은 최대치를 나타내고, 그 이후의 전압파형은 필름의 탄성에 의한 상하운동과정에서 공기저항에 의한 손실 등이 포함되어 감쇄한다. 이 실험에서는 충격력에 의해 생성되는 출력전압파형의 최대치를 실험치로 취하였다.

그림 4. 사용된 PVDF 필름의 구조
Fig. 4. Structure of PVDF film (LDT1-028K/L)

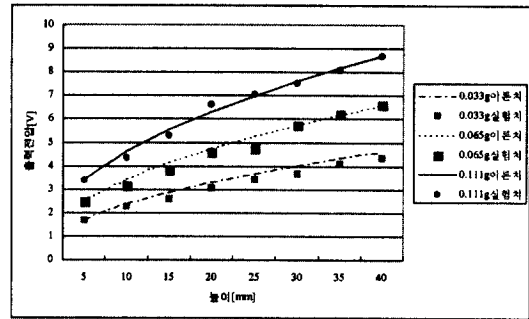


그림 7. 이론치와 실험치의 비교
Fig. 7. Comparison between theoretical and experimental data

그림 5. 실험장치
Fig. 5. Experimental System

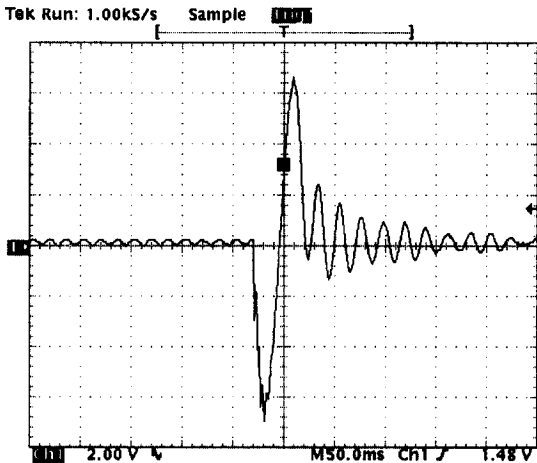


그림 6. 출력전압파형(0.111g, 20mm 높이)
Fig. 6. Output voltage waveform (0.111g, 20mm height)

그림 7은 앞에서 유도된 식(9)의 이론치와 그림 6과 같은 출력전압파형의 최대치를 실험치로 취한 값을 비교하여 나타낸 것으로서, 낙하높이가 상승할수록 쇠구슬의 무게가 무거울수록 출력전압이 상승함을 알 수 있었다. 실험장치의 오차, 충격력이 변형에너지로 전달될 때의 손실, 유도식에서 전극을 고려하지 않은 것 등에 의하여 실측치가 이론치보다 약간 작은 값을 나타내고 있으나 전체적으로는 같은 곡선 추이를 보이고 있다. 이러한 실험과정을 통하여 식(9)와 같이 유도된 출력전압식은 타당성이 있다고 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 외팔보 형의 PVDF 필름에서 외력과 출력전압 사이의 관계식을 유도하였으며, 무게가 각각 0.033, 0.065, 0.111g중인 쇠구슬을 높이 5~40mm범위에서 5mm간격으로 필름 위에 자유낙하

시킬 때의 출력전압의 최대치를 측정한 후 이론치와 실험치를 비교하여 그 유도식의 타당성을 검증하였다. 그 결과 각각의 출력전압의 측정치는 유도식에 의한 계산치와 잘 일치함으로써 이 논문에서 유도된 출력전압에 관한 식(9)가 타당성이 있음을 알 수 있었다. 이 출력전압 식은 인체의 맥박을 측정하거나 호흡의 이상유무를 검출하고 감시 또는 경보할 수 있는 장치에서 출력전압으로부터 맥박과 호흡의 세기를 측정하거나 인가되는 충격량 또는 기계적 에너지를 검출하는 데 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 건국대학교의 '99학년도 교내지원 학술진흥연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1]. Takeo Furukawa, Yutaka Uematsu, Kiyoshi Asakawa, Yasaku Wada, "Piezoelectricity, Pyroelectricity, and Thermoelectricity of Polymer Films," J. Appl. Polymer Science, Vol.12, pp.2675-2689, 1968.
- [2]. Takayoshi Ibe, "Bending Piezoelectricity in Polytetrafluoroethylene," Japan. J. Appl. Phys., Vol.13, No.1, pp.197-180, 1973.
- [3]. Lance Breger, Takeo Furukawa, Eiichi Fukada, "Bending Piezoelectricity in Polyvinylidene Fluoride," Japan. J. Appl. Phys., Vol.15, No.11, pp.2239-2240, 1976.
- [4]. E. Fukada, G.M. Sessler, J.E. West, A. Berraissoul, P. Günther, "Bending Piezoelectricity in monomorph polymer films," J. Appl. Phys. Vol.62(9), No.1, pp.3643-3646, 1987.
- [5]. Minoru Toda, Susumu Osaka, "Electromotional Device Using PVF₂ Multilayer Bimorph," The Transactions of the IECE of Japan, Vol.E61, No.7, pp.507-512, 1978.
- [6]. Minoru Toda, "Design of Piezoelectric Polymer Motional Devices with Various Structures," The Transactions of the IECE of Japan, Vol.E61, No.7, pp.513-518, 1978.
- [7]. James M. Gere, Stephen P. Timoshenko, "Mechanics of Materials - Third Edition," PWS-KENT, pp.96-106,491-492, 1990.
- [8]. Takuro Ikeda, "Fundamental of Piezoelectricity," Oxford Univ., p.16, 1996.
- [9]. Ferdinand P. Beer, E. Russel Johnston, "Mechanics of Materials - second edition," McGraw-Hill, pp.700-703, 1992.
- [10]. Walter D. Pilkey, "Formulas for Stress, Strain, and Structural Matrices," John Wiley & Sons, pp.174-176, 1994.