

PVDF 필름과 Vital Sign센서



1. 서 론

Vital sign이란 생체징후로서 인체의 맥박, 호흡, 체온, 혈압을 의미한다.[1]. 여기서는 이 Vital sign중에서 맥박과 호흡신호를 압전유기화합물인 PVDF필름을 이용하여 검출하고 그 결과를 이용하여 Vital sign검출용 센서로서의 PVDF 필름의 가능성을 보이고자 한다.

1969년 PVDF (Polyvinylidene fluoride)의 압전성과 초전성이 Kawai에 의해 발견된 후 센서에 이용하고자 하는 많은 연구가 진행되고 있다.[2]

Beam스위치, 스냅스위치 등의 스위치류, impact 프린터, 경기결과 기록, 악기, 교통센서 등의 충격센서류, 오디오장치의 픽업, machine monitoring, 베어링 센서, fan flow 센서, 실의 절단 감지 센서 등의 진동검지, 가속도센서, 의료용 초음파영상 센서, 청진기, 비파괴검사(NDT), 음향방사, 액체 수위 센서 등의 초음파 센서, 스피커와 마이크로폰 등의 audio기기, 소나, 수중청음기 등에 이용되고 있으며, 앞으로 active vibration damping, hydropiezoelectricity, smart skin 등에 이용될 전망이며 연구가 계속 진행되고 있다.[3-9].

PVDF 필름은 넓은 주파수 영역, 넓은 동적영역, 낮은 음향 임피던스, 높은 유전강도 및 기계강도, 얇고 유연성이 있으며,

낮은 밀도와 높은 감도를 갖고있다. 특히 음향임피던스는 물, 인체조직, 유기물질의 음향임피던스의 2.6배(압전세라믹은 11배) 정도로 매우 가까워서 인체의 음향신호를 효과적으로 변환 할 수 있다.

2. PVDF 필름의 특성

PVDF의 분자식은

$(CF_2 - CF_2)_n$ 으로서 그 구조식은 그림 1과 같으며, 연신한 분자고리에 직각방향으로 전기쌍극자모멘트가 나타남을 보여주고 있다. 이러한 특성을 갖는 PVDF에 외부에서 가열하거나 전계를 가하면 전하가 양면에 나타나고 그로인하여 신호를 인출할 수 있다. PVDF의 일반적인 특성을 표 1에 보였다.

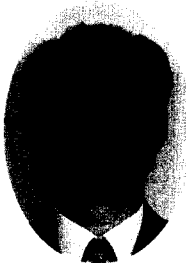
또 PVDF의 초전특성은 표 2에 나타내었으며, 그림 2는 적외선 흡수특성을 보인 것이다.

이와 같이 PVDF 필름은 외부의 압력, 진동, 충격을 받으면 압전 정효과에 의하여 전기적 출력이 얻어지고, 역으로 외부의 교류전압을 인가하면 압전 역효과에 의하여 진동하는 특성을 나타내며, 또 외부의 온도변화에 의해서 전기적 출력을 얻을 수 있어서 다양한 센서에 사용할 수 있다.

표 3은 압전세라믹스의 특성과 PVDF의 특성을 비교한 것이고, 표 4는 PVDF와 다른 압전

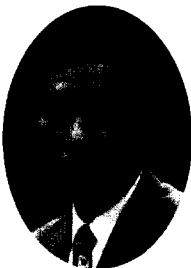
이용국

건국대 대학원 전기공학과 박사과정, 현재 현대중공업 마북리연구소 재직



안형근

건국대 대학원 전기공학과 조교수



한득영

건국대 대학원 전기공학과 교수

표 1. PVDF의 일반적 특성
Table 1. General properties of PVDF

		단위	값	
물리적 특성	융점	°C	170 - 185	
	비중		1.75 - 1.80	
	굴절율		1.42	
기계적 특성	인장강도(25°C)	kg/cm ²	500 - 600	
	항복강도(25°C)	kg/cm ²	400 - 600	
	신축율	%	200 - 300	
	경도		77 - 80	
열적 특성	열팽창율	°C ⁻¹	1.5 × 10 ⁻⁵	
	비열	cal/g · °C	0.33	
	열전도율	cal/hr · cm ² · °C/cm	1.0 (25 - 160 °C)	
	열분해온도	°C	>315	
전기적 특성	내연성		자기소화	
	체적고유저항	Ω-m	2-6 × 10 ¹⁴	
	비유전율		3 - 15	
	tan δ	60 Hz		0.05
		1 kHz		0.018
		0.1MHz		0.16
1 GHz			0.11	
내전압	kV/0.1mm 필름		9	

표 3. 압전재료의 특성비교
Table 3. Comparison of piezoelectric materials

	단위	PVDF	PZT	BaTiO ₃
밀도	10 ³ kg/m ³	1.78	7.5	5.7
비유전율		12	1,200	1,700
d ₃₁	pC/N	23	110	78
g ₃₁	10 ⁻³ Vm/N	216	10	5
k ₃₁	% at 1 kHz	12	30	21
음향임피던스	10 ⁶ kg/m ² sec	2.7	30	30

표 4. 초전재료의 특성비교
Table 4. Comparison of pyroelectric materials

	단위	PVDF	PZT	BaTiO ₃
초전전하계수	μC/[m ² K]	30	420	400
초전전압계수	V/[μm · K]	0.47	0.03	0.05
열확산도	10 ⁻⁶ m ² /sec	0.06	0.44	1.00
열확산깊이@1Hz	μm	138	374	564
품질계수	V · mm ² /J	0.2	0.02	0.02

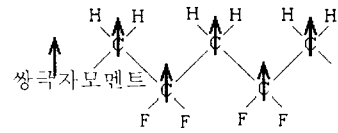


그림 1. PVDF의 분자구조
Fig. 1. Molecular structure of PVDF

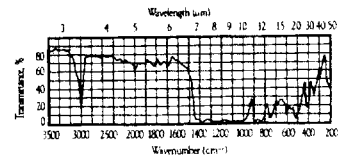


그림 2. PVDF의 적외선흡수 특성
Fig. 2. Infrared absorption spectrum of PVDF

표 2. PVDF의 초전특성
Table 2. Pyroelectric properties of PVDF

두께 (μm)	분극전압 (kV/mm)	초전계수 (nC/cm ² K)
19	60	2.4
6	100	4.1

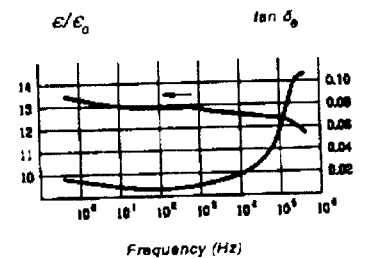


그림 3. ε_r과 tan δ의 주파수 특성
Fig. 3. ε_r and tan δ vs. frequency

매질의 초전효과를 비교한 것이다. 또 그림 3은 주파수의 변화에 따른 비유전율 ε_r과 tan δ의

변화를 보인 것이고, 그림 4는 온도에 따른 d_{31} , g_{31} 의 변화를 보인 것이다.

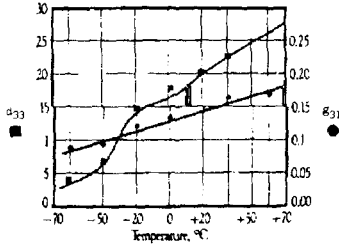


그림 4. d_{31} , g_{31} 의 온도특성
Fig. 4. d_{31} , g_{31} vs. temperature

3. PVDF 필름의 출력 및 주 변회로

이러한 PVDF를 센서로 사용하기 위해서는 사용목적에 적합한 두께와 면적으로 절단하고 그 양면에 Al, Cu, Au등을 진공증착, 스크린인쇄, 집착 등의 방법으로 전극을 준비하고 리벳과 도선을 연결하여 사용한다.

또 이들 PVDF 센서의 개방시 간단한 등가회로는 그림 5와 같다.

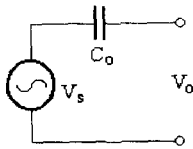


그림 5. 개방시 PVDF 센서의 간단한 등가회로
Fig. 5. Simple equivalent circuit of PVDF sensor when open

한편 이러한 PVDF 필름의 출력단자를 거의 단락시키면 전극양면의 전속밀도 D , 즉 면전하 밀도는

$$D = \frac{Q}{A} = d_{3n} T_n \quad (n=1, 2, \text{ or } 3)$$

으로 표현된다. 이 식에서 Q 는 전하량, A 는 전극면적, d_{3n} 은 압전상수, T_n 은 n 방향으로 인가한 응력을 의미한다.

또 개방시의 단자전압 V_o 는

$$V_o = t g_{3n} T_n$$

으로 표현되며, 이 식에서 t 는 필름의 두께, g_{3n} 은 압전상수이다.

위의 식에서 $n=1$ 은 길이방향, $n=2$ 는 폭방향, $n=3$ 은 두께방향을 의미하며, d_{3n} , g_{3n} 에서 아래첨자의 첫 자는 전기적 방향을 내포하고 있고, 둘째 첨자는 기계적 방향을 내포한 것으로서 3은 PVDF의 경우 그 두께가 얇으므로 전압은 두께방향인 $n=3$ 방향으로 인가함을 의미한다.

이러한 PVDF에 외부의 회로를 접속하면 그림 5의 등가회로는 그 외부회로의 영향을 고려하여 그림 6과 같이 변한다. 이때 그림 7과 같은 힘을 인가할 때 그 출력전압과형은 그 시정수 $R_1(C_0 + C_1)$ 에 의하여 감쇠하면서 왜곡이 발생하므로 주의할 필요가 있다.

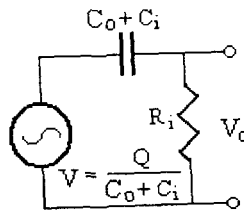


그림 6. 외부회로 접속시 PVDF의 등가회로
Fig. 6. Equivalent circuit of PVDF when connected electronic interface

역으로 외부에서 V 의 전압을 인가한 경우 이 PVDF의 길이변형 ΔL , 폭의 변형 Δw , 두께의 변형 Δt 는 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

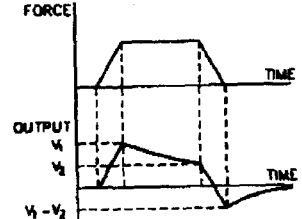


그림 7. PVDF의 출력과형
Fig. 7. Output wave-form of PVDF

$$\Delta L = L d_{31} \frac{V}{t},$$

$$\Delta w = w d_{32} \frac{V}{t},$$

$$\Delta t = t d_{33} \frac{V}{t} = d_{33} V.$$

이들 식에서 L , w , t 는 각각 이 PVDF필름의 길이, 폭, 두께를 의미한다.

한편 이러한 PVDF 필름을 초전센서로 이용할 경우 온도변화 ΔT 에 의해 면적 A 인 한 전극에 생성되는 전하량 Q 와 양전극 사이의 전압 V 는

$$Q = p \Delta T A,$$

$$V = p t \frac{\Delta T}{\epsilon}$$

로 표현되며, 이때 p 와 ϵ 는 각각 PVDF의 초전계수와 유전율을 의미한다.

또 길이 L , 전체두께 t , 폭 w 인 bimorph의 각각의 필름에 V 의 전압을 인가할 경우, 그 자유단 끝에서의 변위와 힘 Δx , F 는 각각 다음과 같이 구해진다.

$$\Delta x = \frac{3}{4} d_{31} \frac{L^2}{t^2} V,$$

$$F = \frac{3}{2} Y w d_{31} \frac{t}{L} V.$$

위의 식에서 Y는 Young율이다.

이러한 PVDF센서의 출력은 일반적으로 미소하므로 증폭을 할 필요가 있으며, 그 대표적인 증폭회로는 그림 8 및 그림 9와 같다.

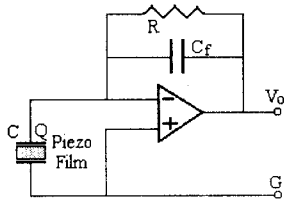


그림 8. 전하증폭기
Fig. 8. Charge amplifier

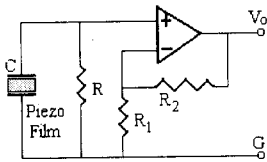


그림 9. 전압증폭기
Fig. 9. Voltage amplifier

또 높은 출력저항이 필요할 경우 그림 10과 같은 버퍼회로들이 자주 쓰인다.

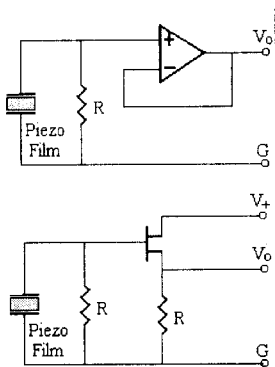


그림 10. 버퍼회로
Fig. 10. Buffer circuit

표 5. 실험에 사용된 PVDF 필름

Table 5. Characteristics of test PVDF film

t	thickness	28	μm
d ₃₁	piezoelectric strain	23	$10^{-12}(\text{m/m})/(\text{V/m})$ or $(\text{C/m}^2)/(\text{N/m}^2)$
d ₃₃	constant	-33	
g ₃₁	piezoelectric stress	216	$10^{-3}(\text{V/m})/(\text{N/m}^2)$ or $(\text{m/m})/(\text{C/m}^2)$
g ₃₃	constant	-339	
k ₃₁	electromechanical	12	%
k _t	coupling factor	14	
ϵ	permittivity	106~113	10^{-12} F/m
C	capacitance	380	pF/cm^2 , @ 1kHz
Y	Young's modulus	2~4	10^9

4. PVDF 필름의 응용례

이러한 PVDF필름을 이용하여 간단히 인체의 맥박과 호흡신호를 검출할 수 있다.

우선 표 5와 같은 특성을 갖고 그림 11과 같은 형상의 PVDF소자를 이용하여 잡음특성을 살펴보면 그림 12와 13과 같다. 또 가벼운 0.44g의 추를 자유낙하하였을 때의 출력특성은 그림 14와 같다.

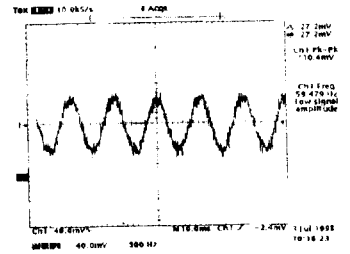
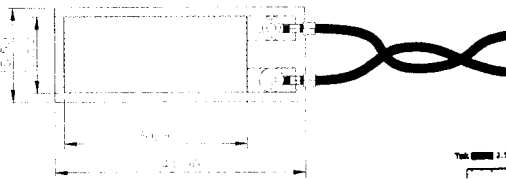


그림 12. 60Hz잡음(110 mV_{p-p})
Fig. 12. 60 Hz noise (110 mV_{p-p})



Metalization

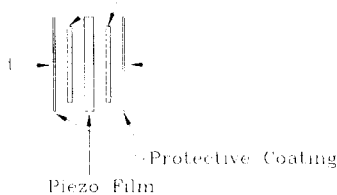


그림 11. PVDF 필름의 구조
Fig. 11. Structure of PVDF film

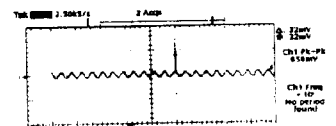
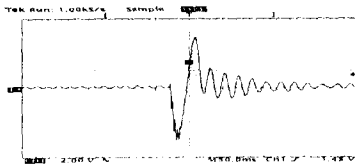
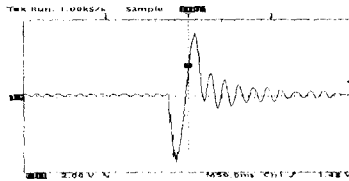


그림 13. 선풍기 스위치 개폐잡음(spike : 656mV)
Fig. 13. On-Off noise of fan motor switch(spike : 656mV)



낙하높이: 10mm
Falling height: 10mm
최대전압진폭 : $6V_{p-p}$



낙하높이: 15mm
Falling height: 15mm
최대전압진폭 : $6.8V_{p-p}$

그림 14. 자유낙하 실험
Fig. 14. Free drop experiment

또 이 PVDF 필름을 이용하여 검지손가락, 손목, 목에서의 맥박을 검출한 결과를 그림 15에서 17까지 보이고 있으며, 그림 18은 어른의 복부에서 검출한 호흡신호를 보인 것이다.

각각의 파형의 아래에 있는 펄스파는 생체신호를 변환한 결과로서 계수에 충분히 이용할 수 있는 신호임을 알 수 있다.

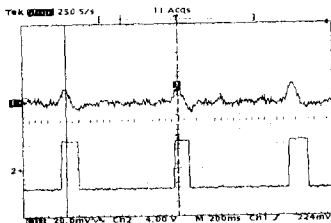


그림 15. 검지에서 맥박신호
($20mV_{p-p}$, 740 msec)
Fig. 15. Pulse rate of palm digital artery

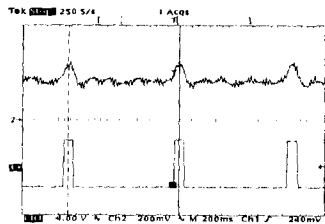


그림 16. 손목에서의 맥박신호
($200mV_{p-p}$, 740 msec)
Fig. 16. Pulse rate of radial artery

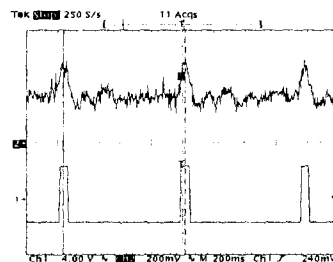


그림 17. 목에서의 맥박신호
($400mV_{p-p}$, 780 msec)
Fig. 17. Pulse rate of cervical artery

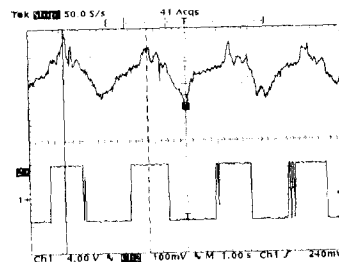


그림 18. 복부에서의 호흡신호
($250mV_{p-p}$, 2.7sec)
Fig. 18. Abdominal breathing

5. 맺는 말

위에서 살펴본 바와 같이 PVDF는 압전효과와 초전효과를 나타내므로 그러한 현상을 이용하면 인체의 Vital sign 4종류 중

에서 압력 또는 진동과 관련되는 맥박, 호흡, 혈압신호를 압전효과에 의하여 검출할 수 있고, 특히 혈압측정시 발생하는 Korotkoff 음도 이 PVDF로 들을 수 있으며, 나머지 Vital sign인 체온은 PVDF의 초전현상에 의하여 검출할 수 있음을 알 수 있다.

6. 참고 문헌

- [1] 이용국, 유영환, 서현배, 박근상, 조준, 안형근, 한득영, "PVDF 필름을 이용한 맥박 및 호흡측정에 관한 연구", 논문게재준비.
- [2] R. W. Cahn, P. Haasen, E. H. Kramer, "Materials Science and Technology - structure and properties of ceramics," *VCH*, vol. 11, pp.652-653, 1994.
- [3] P.C.A. Hammers, P.P.L. Regtien, P.M. Sarro, "A pyroelectric matrix sensor using PVDF on silicon containing FET readout circuitry," *Sensors and Actuators A*, pp.290~295, 1993.
- [4] Sally L. Hope, "Validation of the Accuracy of the Medilog ABP non-invasive blood-pressure monitor," *J. of Ambulatory Monitoring*, Vol. 1, No. 1, pp.39~51, 1988.
- [5] Lewis F. Brown, "New Ferroelectric Polymer Ultrasound Contact Transducers for Non-destructive Testing Applications," *7th Intl Symposium on Applic. of Ferroelectrics*, June 6~8, 1990.
- [6] Munch W.V, Thiemann U.,

- "Pyroelectric detector array with PVDF on silicon integrated circuit," *Sensors and Actuators*, A25-27, pp.167~172, 1991.
- [7] Zucherwar A.J., Pretlow R.A., "Development of a piezopolymer pressure sensor for a portable fetal heart monitor," *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, Vol. 40, No. 9, pp.963~969, 1993.
- [8] Philppe Benech, Eric Chamérod, Christan Monllor, "Acceleration mesurement using PVDF," *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 43, No. 5, pp. 838~843, 1996. Polyvinylidene Fluoride," *Japan. J. Appl. Phys.*, Vol. 15, No. 11, pp.2239~2240., 1976.
- [9] Qian Zhang, Peter A. Lewin, Philip E. Bloomfield, "PVDF transducers - a performance comparison of single-layer and multilayer structures," *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 44, No. 5, pp. 1148~1156, 1997.
- [10] Yuhuan Xu, "Ferroelectric Materials and Their Application," *Elsevier Science Publishers B.V.*, pp.330~337, 1991.
- [11] 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.
- [12] Takayoshi IBE, "Bending Piezoelectricity in Poly-tetrafluorethylene," *Japan. J. Appl. Phys.*, Vol. 13, No. 1, pp.197~198., 1974.
- [13] Lance Breger, Takeo Furukawa, Eiichi Fukada, "Bending Piezoelectricity in
- [14] E. Fukada, G.M. Sessler, J.E. West, A. Berraisoul, P. Günter, "Bending piezoelectricity in monomorph polymer films," *J. Appl. Phys.*, Vol. 62, No. 9, pp.3643~3646, 1987.
- [15] 英一太, "エレクトロニクス用有機材料", シ-エムシー, 1982.
- [16] 조 준, "초전/압전센서를 이용한 Vital sign감시 및 스트레스 평가시스템의 개발에 관한 연구", 한국과학재단 제출 연구계획서, 1998.
- [17] 미 Amp사 발행, "Piezo Film Sensors Technical Manual", 1998.

<안형근 위원 >