

부착형 고분자 압전센서를 이용한 탄성파 검출 연구

A Study on Detection of Elastic Wave Using Patch Type Piezo-Polymer Sensor

김기복*[†], 윤동진*, 권재화*, 이영섭*

Ki-Bok Kim*[†], Dong-Jin Yoon*, Jae-Hwa Kueon* and Young-Seop Lee*

초 록 스마트 구조물에 적합한 탄성파 검출 센서로서 고분자 압전센서를 이용한 부착형 센서에 대한 연구를 수행하였다. PVDF와 P(VDF-TrFE)에 대하여 센서로서의 특성을 평가하였으며 상용화된 PZT 센서와 비교하였다. 음향임피던스가 서로 다른 여러 가지 재료에 고분자 압전센서를 부착하여 연필심 파괴 시 발생하는 탄성파를 검출하여 분석하였다. 센서의 직경이 증가함에 따라 검출 신호의 최대 진폭값은 증가하였으나 센서의 주파수 검출한계는 감소하는 것으로 나타났다. 시편의 음향임피던스가 감소할수록 검출신호의 최대 진폭값은 증가하였으며 주로 저주파수의 주파수 성분의 신호에 민감한 것으로 분석되었다. 전반적으로 P(VDF-TrFE) 센서가 PVDF 센서보다 감도 면에서 다소 양호한 것으로 나타났다.

주요용어: 고분자 압전센서, 탄성파, 스마트구조, 부착형 센서

Abstract Patch type piezo-polymer sensors for smart structures were experimented to detect elastic wave. The pencil lead braking test was performed to analyze the characteristics of patch-type piezo-polymer sensors such as polyvinylidene fluoride (PVDF) and polyvinylidene fluoride trifluoroethylene (P(VDF-TrFE)) for several test specimens with various elastic wave velocities and acoustical impedances. The characteristics of the patch-type piezo-polymer sensor were compared with the commercial PZT acoustic emission (AE) sensor. The vacuum grease and epoxy resin were used as a couplant for the acoustic impedance matching between the sensor and specimen. The peak amplitude of elastic wave increased as the diameter of piezo-film and acoustical impedance of the specimen increased. The frequency detection range of the piezo-film sensors decreased with increasing diameter of the piezo-film sensor. The P(VDF-TrFE) sensor was more sensitive than the PVDF sensor.

Keywords: piezo-film sensor, elastic wave, smart structure, patch type sensor

1. 서 론

교량 구조물이나 항공기 재료 등과 같은 구조물들은 다양한 크기의 지속적인 반복하중을 받고 있기 때문에 이에 따른 균열발생, 균열진전, 최종 파

단으로 전개되는 피로현상을 초래하게 된다. 따라서 이러한 균열발생 및 균열진전을 조기에 검출하는 것은 매우 중요하며 균열 생성 및 진전 시 발생하는 탄성파를 감지하여 구조물의 피로균열을 검출하기 위한 연구들이 수행되고 있다[1-6]. 특히 최근

들어 각종 구조물 및 재료들은 내부의 균열이나 재료의 이상상태를 스스로 감지하고 복구하는 지능화된 스마트 구조화되고 있을 뿐만 아니라 스마트 구조 자체도 소형화되는 추세이다. 따라서 이러한 스마트 구조물에 있어서 기존의 세라믹 압전재료를 이용한 탄성과 검출 센서는 상대적으로 부피가 크기 때문에 소형화된 스마트 구조물이나 복합 재료 내에 매립하기에는 부적합할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 스마트 구조물에 적합한 탄성과 검출 센서로서 고분자 압전센서를 이용한 부착형 센서에 대한 연구를 수행하였다.

고분자 압전재료 특히 PVDF(polyvinylidene fluoride)는 1969년 Kawai[7]에 의해 압전성과 초전성이 발견된 이후 센서로 적용하기 위한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. PVDF는 (-CH₂-CF₂)를 반복단위로 하는 선상고분자로서 기계적·화학적 성질이 우수하고 분자쇄 내에 존재하는 강한 C-F 쌍극자기에 의해 고분자 재료중 가장 큰 유전율을 나타내어 콘덴서 재료로 실용화되고 있다. 또한 가공성이 좋고 충격 등으로 잘 파손되지 않으며 유전율이 작고 가벼울 뿐만 아니라 절연성, 내전압성이 커서 고전압의 입력에 잘 견딜 수 있다. 특히 PVDF와 P(VDF-TrFE) 재료는 그 재질이 매우 유연하며, 가볍고, 질긴 재료로서 기존 세라믹 계열의 압전 재료에 비해 음향 임피던스가 상대적으로 낮기 때문에 액체나 생체 조직 등과 같은 물질에서 더 유리한 장점이 있다. 특히 복합재료와 같이 음향 임피던스가 낮은 매질에 적용할 때 압전체와 매질사이의 음향 임피던스를 보다 효과적으로 정합 할 수 있기 때문에 센서와 매질사이의 임피던스 불일치에 따른 탄성과 검출의 손실을 줄일 수 있다는 장점이 있으며 Q 값이 낮기 때문에 짧은 펄스의 송수신이 가능하여 광대역 주파수 특성을 얻을 수 있다. 또한 재료의 특성상 세라믹 계열의 압전재료에 비해 flexible 하므로 사용 용도에 따라 여러 가지 변형된 형상의 센서를 제작할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서 재료 내에 매립되거나 부착되어 균열을 검출하기 위한 센서로서 고분자 압전센서의 유용성은 매우 클 것으로 기대된다. 이러한 고분자 압전재료의 특성을 고려하여 고감도 초음파 센서뿐만 아니라 탄성과 검출용 센서를 개발하기 위한 연구가 외국에서는 활발하게 수행되고 있다[8-15].

본 연구에서는 고분자 압전재료를 이용한 탄성과 검출의 기초연구로서 센서와 매질의 부착방법, 음

향임피던스가 서로 다른 매질에서의 탄성과 검출 감도 등과 같은 센서의 기본적인 특성들을 고찰하기 위하여 수행되었다.

2. 재료 및 방법

2.1. 고분자 압전박막 센서 제작

Fig. 1은 박막형 탄성과 검출센서 연구에 사용된 고분자 압전센서 두께는 PVDF의 경우 110 μm, P(VDF-TrFE)의 경우 100 μm로 하였으며 직경은 각각 3, 6, 12 mm로 하여 상용의 탄성과 검출센서인 AE 센서와 그 특성을 각각 비교하였다.

본 연구에서 사용된 고분자 압전센서의 특성은 Table 1에서 보는 바와 같다.

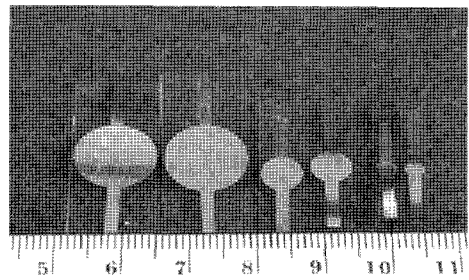


Fig. 1 Photo of PVDF (thickness: 110 μm, diameter: 3, 6, and 12 mm)

Table 1 Physical and electrical properties of polymer piezo-films

Parameter	Unit	Symbol	PVDF	P(VDF-TrFE)
Permittivity	-	ϵ_0	106-113	65-75
Loss tangent	-	$\tan\delta$	0.02	0.015
Curie Temp.	°C	-	100	145
Coupling coefficient	%	k_1 k_{31}	14 12	25-29 20
Piezo strain constant	10^{-3} C/N	d_{33} d_{31}	-33 23	-38 11
Piezo stress constant	10^{-3} V/m	g_{33} g_{31}	-330 216	-542 162
Young's Modulus	10^{10} N/m ²	E	2-4	3-5
Acoustic Impedance	Mega RayL	Z	3.9	4.4
Speed of Sound	m/s	c_1	2200	2400
Density	kg/m		1780	1820
Quality factor		Qm	<5	<5

센서에서 감지하는 신호를 검출하기 위한 전극 연결은 먼저 센서의 전극 부에 직경 1.5 mm의 구멍을 뚫은 다음 리벳과 신호 선을 결선하였다. 그 구조는 Fig. 2에서 보는바와 같다. 리벳에 연결된 황동 전극에 전기적 노이즈를 방지하기 위하여 이중으로 절연된 동축케이블을 납땜하여 BNC 커넥터와 연결하였다.

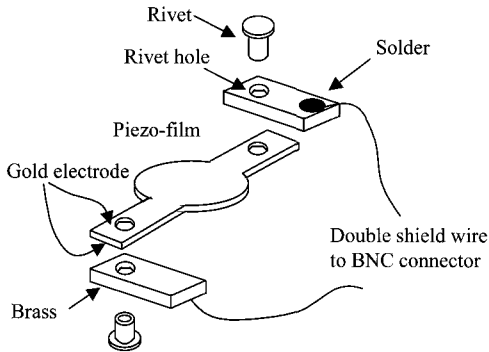


Fig. 2 Construction of a piezo-polymer sensor's wire harness

2.2. 실험장치

PVDF와 P(VDF-TrFE)의 탄성과 검출 센서로서의 특성을 고찰하기 위하여 Fig. 3에서 보는 바와 같은 탄성과 검출을 위한 실험장치를 구성하였다. CT(compact tension) 시편에 가해지는 탄성과 발생원은 널리 알려진 연필심 파괴를 이용하였다[16, 17]. 표준 탄성파원은 계단 함수 또는 벨타 함수 형태의 임펄스를 많이 이용하는데 유리관 파괴, 연필심 파괴, 축전형 탄성파원 등의 계단 함수와 전기적 스파이크, 강철구 충돌, 고출력 레이저 등의 계단 함수형 탄성파원이 널리 이용되고 있다. 연필심 파괴는 유리관 파괴와 함께 손쉽게 큰 진폭의 탄성파를 얻을 수 있으며 다양한 주파수의 탄성파가 전파되기 때문에 정량적인 탄성과 연구의 표준 탄성파원으로 많이 사용되어 왔다. 여러 가지 다양한 탄성과 속도와 음향임피던스를 가지는 재료를 선정하여 탄성과 검출 실험을 수행하였다. 센서의 중심부에서 4cm 떨어진 곳을 탄성파원으로 하였다. 선정된 테스트 시편은 테프론, 아크릴, 알루미늄, 황동, 강의 5가지 종류이며 각각의 초음파 속도와 음향임피던스는 Table 2에서 보는바와 같다. 시편의 크기는 30×30 cm²이며 두께는 3 cm로 하였다.

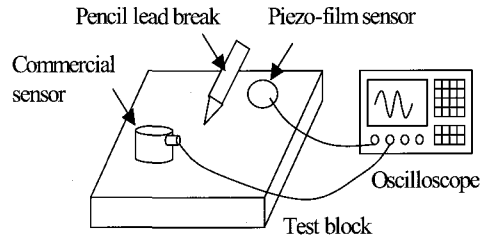


Fig. 3 Experimental setup for pencil lead breaking test

Table 2 Ultrasonic velocity and acoustic impedance of test specimens

Material	Ultrasonic Velocity (m/s)	Acoustic Impedance (MRayL)
Teflon	1350	3.00
Acrylic	2670	3.15
Aluminum	6320	17.1
Brass	4280	36.7
Steel	5900	45.4

테스트 시편 위에 PVDF와 P(VDF-TrFE) 압전센서를 진공 그리스와 에폭시를 이용하여 접착한 다음 각각의 접착방법에 따른 센서의 탄성과 검출 특성을 분석하였다. 또한 탄성과 검출 시험의 비교를 위하여 상용화된 탄성과 검출 센서를 시편에 고분자 압전센서와 같은 위치에 부착하여 동일한 탄성파원과 거리에서 비교하였다. 상용 센서(S9220, Physical Acoustic Co., U.S.)는 외부 케이스의 직경이 10 mm, 두께 4 mm인 센서로서 주파수 범위는 100 kHz~1 MHz의 광대역 특성을 나타내며 중심주파수는 125 kHz이다. 이때 사용된 PVDF와 P(VDF-TrFE)는 상용 센서와 달리 외부 케이스 및 backing 재료가 없는 상태이며, 외부 잡음을 제거하기 위한 별도의 처리를 하지 않은 필름 그대로의 상태에서 시험을 수행하였다. 한편 상용 센서의 경우 별도의 프리앰프를 거쳐 증폭된 신호가 오실로스코프나 전용 장비에 입력되는 것이 일반적이지만 본 연구에서는 동일한 상태에서 비교하기 위하여 고분자 압전센서와 상용 센서 모두 프리앰프를 거치지 않고 바로 오실로스코프에 연결하여 연필심

파괴 신호에 대한 응답 특성을 분석하여 서로 비교하였다. 이를 위하여 각 센서에서 검출되는 시간에 따른 응답신호의 크기와 형태, 그리고 주파수를 각각 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 센서 부착매질에 따른 신호특성

고분자 압전센서를 시편에 부착하여 탄성파를 검출할 때 센서와 시편사이의 접촉매질로서의 기능뿐만 아니라 접착 기능을 수행할 수 있는 재료의 선정이 매우 중요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 시험체와 탄성파 검출 센서사이의 접촉매질로 많이 사용되는 진공 그리스 및 센서와 시험체의 접합이 용이한 에폭시를 매질로 하여 센서 부착매질에 따른 신호특성을 비교하였다. 직경 12 mm인 PVDF를 이용하여 강재 시편과 아크릴 시편에 대하여 비교한 결과 Fig. 4 및 5에서 보는바와 같다. 연필심 파괴에 대한 신호를 검출한 결과로서 강재 시편의 경우 피크 전압을 단순비교 했을 때 큰 차이가 없으나 아크릴 시편에서는 진공 그리스를 사용한 경우보다 에폭시를 이용한 접합이 감도 면에서 다소 향상되는 것으로 분석되었다.

3.2. 압전박막 센서의 직경에 따른 수신특성

고분자 압전센서의 직경에 따른 탄성파 검출 신호의 특성을 분석하였다. 본 연구에서의 탄성파원인 연필심 파괴에 따른 탄성파는 여러 가지 모드의 탄성파를 가지게 된다. 탄성파 검출을 위한 압전재료는 그 형상과 크기에 따라 여러 가지 진동모드를 가지고 있으며 주로 횡방향 공진 주파수와 종방향 공진 주파수를 가지게 된다. 따라서 각각의 공진 주파수는 압전재료의 두께나 길이(또는 지름)의 영향을 크게 받게 된다. Fig. 6은 테프론 시편에 대하여 압전센서(P(VDF-TrFE))의 직경이 3, 6, 12 mm일 때의 탄성파 검출 신호를 나타내며 Fig. 7은 검출 신호에 대한 주파수 분석을 나타낸다. 대체적으로 직경이 증가함에 따라 신호의 최대 진폭값은 증가하였으나 센서의 주파수 검출한계는 감소하는 것으로 나타났다. 또한 PVDF 센서와 다른 시편에 대해서도 거의 유사한 경향을 나타내었다. 따라서 고분자 압전센서의 선정에서는 필요로 하는 센서의 감

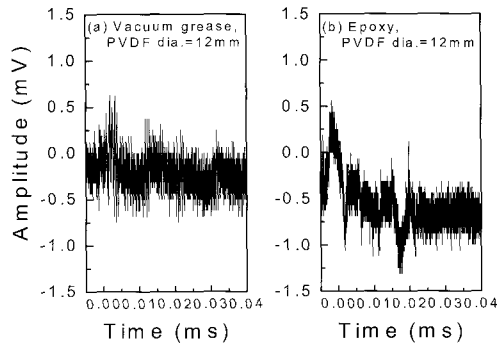


Fig. 4 Elastic waves detected by PVDF film sensors in steel specimen with (a) vacuum grease bonding and (b) epoxy bonding

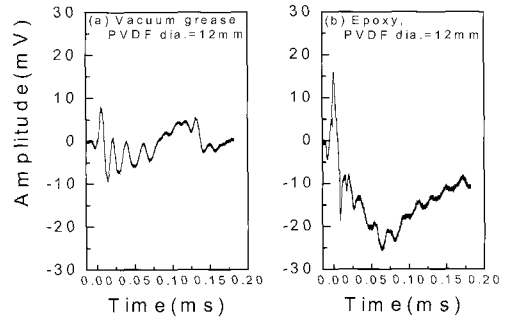


Fig. 5 Elastic waves detected by PVDF film sensors in acrylic specimen with (a) vacuum grease bonding and (b) epoxy bonding

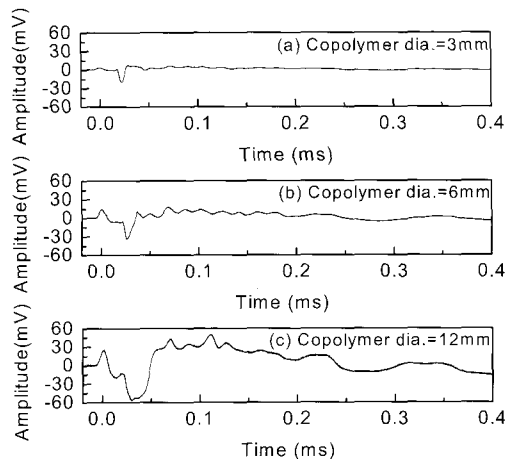


Fig. 6 Elastic waves detected by the P(VDF-TrFE) film sensors in teflon specimen. (a) 3 mm diameter of the sensor, (b) 6 mm diameter of the sensor, and (c) 12 mm diameter of the sensor

도와 주파수 대역을 고려하여 적절한 두께와 직경을 선정해야 할 것으로 생각된다.

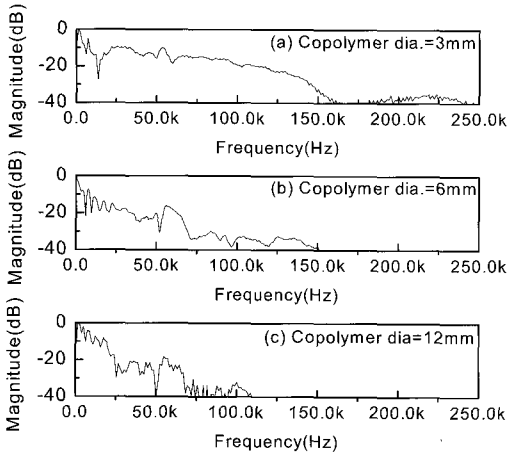


Fig. 7 Frequency spectrums of the elastic waves detected by the P(VDF-TrFE) film sensors in teflon specimen. (a) 3 mm diameter of the sensor, (b) 6 mm diameter of the sensor, and (c) 12 mm diameter of the sensor

3.3. PVDF 및 P(VDF-TrFE) 센서 감도비교

PVDF 센서와 P(VDF-TrFE) 센서의 감도를 비교한 결과 Table 3 에서 보는 바와 같으며 이때 센서의 직경이 12 mm일 때의 결과를 나타내었다. 대체적으로 음향임피던스가 감소할수록 연필심 파괴에 따른 각 센서에서 검출되는 파형의 최대 진폭값은 증가하는 경향을 나타내었다. 전반적으로 PZT를 이용한 상용 센서보다 상대적으로 감도는 낮지만 음향임피던스가 감소할수록 그 차이는 현저하게 감소하였다. 이러한 이유는 Table 2에서 나타난 바와 같이 테프론과 아크릴의 음향임피던스가 고분자 압전 재료와 거의 차이가 나지 않기 때문인 것으로 생각되며 추후 이러한 특성을 구명하기 위한 보완 연구가 필요할 것으로 생각된다. 한편, PVDF와 P(VDF-TrFE)를 비교한 결과 P(VDF-TrFE)가 다소 양호한 결과를 나타내었다.

고분자 압전센서의 탄성파의 주파수 검출한계를 검토하기 위한 결과를 Table 4에 나타내었다. 이때 Fig. 7에서 보는바와 같이 잡음 수준이상인 -30 dB를 기준으로 하여 그 이상의 주파수 한계를 나타내는 대역을 비교하였다. 상대적으로 음향임피던스가

높은 강재 시편으로 갈수록 주파수 검출한계는 증가하였다. 이것은 시편 재료의 특성 상 알루미늄, 황동, 강에서는 고주파수의 탄성과 감쇠가 테프론, 아크릴에 비해서 낮기 때문인 것으로 사료된다. 특히 테프론, 아크릴과 같은 비금속 재료에서는 주로 저주파 성분의 탄성파가 검출되는 것으로 나타났다.

Table 3 Comparison of peak amplitude of the elastic wave detected by polymer piezo-film sensors and commercial sensor in various test specimens

Material Sensor	Peak amplitude (mV)				
	Teflon	Acryl	Aluminum	Brass	Steel
PVDF	40	16	1.7	1.5	0.6
P(VDF-TrFE)	59	25	2.6	1.4	0.7
Commercial sensor	48	41	16	12	10

Table 4 Comparison of frequency detection range of the elastic wave detected by polymer piezo-film sensors and commercial sensor at various test specimens.

Material Sensor	Frequency detection range (kHz)				
	Teflon	Acryl	Aluminum	Brass	Steel
PVDF	70	100	850	1200	2200
P(VDF-TrFE)	85	100	1200	1000	1300
Commercial sensor	265	500	1000	950	1000

4. 요약 및 결론

스마트 구조물에 적합한 탄성파 검출 센서로서 고분자 압전센서를 이용한 부착형 센서에 대한 연구를 수행하였다. PVDF와 P(VDF-TrFE)에 대하여 센서로서의 특성을 평가하였으며 상용화된 PZT 센서와 비교하였다. 두께 110 μm, 직경이 각각 3, 6, 12 mm인 PVDF 센서와 두께 100 μm, 직경이 각각 3, 6, 12 mm인 P(VDF-TrFE) 센서를 음향임피던스가 서로 다른 테프론, 아크릴, 알루미늄, 황동, 강재

시편에 부착하여 연필심 파괴 시 발생하는 탄성과를 검출하여 센서의 수신 특성을 분석하였다. 시험체와 센서사이의 접촉매질로서 진공 그리스와 에폭시를 비교한 결과 대체적으로 에폭시를 이용한 결합에서 감도가 다소 향상되었다. 고분자 압전센서의 직경에 따른 탄성과 검출 신호의 특성을 분석한 결과 직경이 증가함에 따라 신호의 피크 전압은 증가하였으나 센서의 주파수 검출 한계는 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 고분자 압전센서의 선정에서는 필요로 하는 센서의 감도와 주파수 대역을 고려하여 적절한 두께와 직경을 선정해야 할 것으로 분석되었다. PVDF 센서와 P(VDF-TrFE) 센서의 감도와 탄성과 검출 주파수 한계 대역을 분석한 결과 음향임피던스가 감소할수록 검출신호 파형의 피크 값은 증가하였으며 주로 저주파수의 주파수 성분을 가지는 신호에 민감한 것으로 나타났다. 전반적으로 P(VDF-TrFE)가 PVDF 보다 감도 면에서 다소 양호한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2002년도 과학기술부 국가지정연구실 사업에 의한 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 윤동진, 정중채, 박휘립, 김기복, 이승석, "응력 확대계수와 음향방출 변수를 이용한 피로균열 거동 연구", 비파괴검사학회지, Vol. 20, No. 5, pp. 412-423, (2000)
- [2] 김기복, 윤동진, 정중채, 박휘립, 이승석, "주성분 회귀분석 및 인공신경망을 이용한 AE 변수와 응력확대계수와와의 상관관계 해석", 비파괴검사학회지, Vol. 21, No. 1, pp. 80-90, (2001)
- [3] Z. F. Wang, J. Li, W. Ke, Y. S. Zheng, Z. Zhu, and Z. G. Wang, "Acoustic Emission Monitoring of Fatigue Crack Closure," *Scripta Metallurgica*, Vol. 27, No. 12, pp. 1691-1694, (1992)
- [4] Z. F. Wang, J. Li, W. Ke, and Z. Zhu, "Characteristics of Acoustic Emission for A537 Structural Steel During Fatigue Crack Propagation," *Scripta Metallurgica*, Vol. 27, No. 5, pp. 641-646, (1992)
- [5] I. M. Daniel, J. J. Luo, C. G. Sifniotopoulos, and H. J. Chun, "Acoustic Emission Monitoring of Fatigue Damage in Metals," *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 14, pp. 71-87, (1998)
- [6] 정중채, 윤동진, 박휘립, 김기복, 이승석, "구조용 알루미늄 합금에서의 피로균열 열림 및 닫힘 시 AE 발생특성 연구", 비파괴검사학회지, Vol. 22, No. 2, pp. 155-169, (2002)
- [7] H. Kawai, "The piezoelectricity of poly (vinylidene fluoride)," *Journal of Applied Physics*, Vol. 8, pp. 975-976, (1969)
- [8] 김기복, 김병극, 이승석, "PVDF 및 P(VDF-TrFE)를 이용한 고주파수 수침용 초음파 탐촉자 개발 및 평가", 비파괴검사학회지, Vol. 22, No. 1, pp. 1-8, (2002)
- [9] R. Stiffler and E. G. Henneke, II, "The Application of Polynylidene Fluoride as an Acoustic Emission Transducer for Fibrous Composite Materials," *Materials Evaluation*, Vol. 41, pp. 956-960, (1983)
- [10] L. F. Brown and J. L. Mason, "Disposable PVDF Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing Applications," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 43, No. 4, pp. 560-568, (1996)
- [11] M. J. Zipparo, K. K. Shung, and T. R. Shrout, "Piezoceramics for high frequency (20-100 MHz) single element imaging transducers," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 44, No. 5, pp. 1038-1048, (1997)
- [12] F. S. Foster, K. A. Harasiewicz, and M. D. Sherar, "A History of Medical and Biological Imaging with Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Transducers," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 47, No. 6, pp. 1363-1371, (2000)
- [13] L. F. Brown, "Design Consideration for Piezoelectric Polymer Ultrasound Transducers," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 47, No. 6, pp. 1377-1396, (2000)

- [14] F. S. Foster, L. K. Ryan, and D. Turnbull, "Characterization of lead zirconate titanate ceramics for use in miniature high frequency (20-80 MHz) Transducers," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control., Vol. 38, No. 5, pp. 446-453, (2000)
- [15] M. D. Sherar and F. S. T. Foster, "The design and fabrication of high frequency poly (vinylidene fluoride) transducers," Ultrason. Imag., Vol. 11, pp. 75-94, (1989)
- [16] N. N. Hsu, J. A. Simmons, and S. C. Hardy, "An approach to acoustic emission signal analysis," Materials Evaluation, Vol. 35, No. 11, pp. 10-106, (1977)
- [17] N. N. Hsu and F. R. Breckenridge, "Characterization and Calibration of Acoustic Emission Sensors," Materials Evaluation, Vol. 39, No. 1, pp. 60-68, (1983)