

초음파센서용 압전 재료



노용래
(경북대 기계공학부 조교수)

본 논문에서는 압전 재료를 초음파센서에 응용하고자 하는 관점에서 압전 재료의 일반적인 특성을 살펴보고, 주어진 용도에 부합 하는 최적 압전 재료를 선정하는 방법에 대해서 알아 본다.

1. 압전 특성

압전 재료는 유전재료의 일종으로서 외부 에서 응력이 가해지면 그 크기에 비례하는 전기적 분극이 일어나는 압전 정효과 (piezoelectric direct effect)와 반대로 전압을 가하면 그 변화에 따라 응력이 발생하는 압전 역효과 (piezoelectric converse effect) 를 가지는, 즉 기계적 에너지를 전기에너지로, 역으로 전기 에너지를 기계에너지로 변환하는 상호 가역적인 성질을 가지는 재료를 일컫는다. 이러한 현상을 재료에 가해지는 응력 (T), 전계 (E), 변형 (S), 그리고 전기적 변위 (D) 에 의해 구조방정식으로 표현하면 [1]

$$\begin{cases} D = \kappa^{\sigma} E + d\sigma \\ \epsilon = dE + s^E \sigma \\ \epsilon = s^D \sigma + gD \\ E = -g\sigma + \beta^E D \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sigma = C^E \epsilon - eE \\ D = e\epsilon + \kappa^E E \\ \sigma = C^D \epsilon - hD \\ E = -h\epsilon + \beta^E D \end{cases}$$

와 같이 되는데 여기서 s 는 탄성 유연 계수 (elastic compliance), c 는 탄성 강성 계수 (elastic stiffness), ϵ 은 유전율 (permittivity), β 는 역유전율 (impermeability)이다. 첨자로 쓰여진 E, T, S, D 는 각각 전계, 응력, 변형, 전기적 변위가 일정 할 때의 값을 의미하는데, 예를 들어 s^E 는 전계가 일정할 때의 탄성 유연 계수를 나타낸다. 또한 기계장과 전기장을 연결 하는 압전 계수 d, g, e, h 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial D}{\partial \sigma}\right)_E &= \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial E}\right)_\sigma = d, \\ -\left(\frac{\partial E}{\partial \sigma}\right)_D &= \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial D}\right)_\sigma = g, \\ \left(\frac{\partial D}{\partial \epsilon}\right)_E &= \left(\frac{\partial \sigma}{\partial E}\right)_E = e, \\ -\left(\frac{\partial E}{\partial \epsilon}\right)_D &= \left(\frac{\partial \sigma}{\partial D}\right)_E = -h, \end{aligned} \quad (2)$$

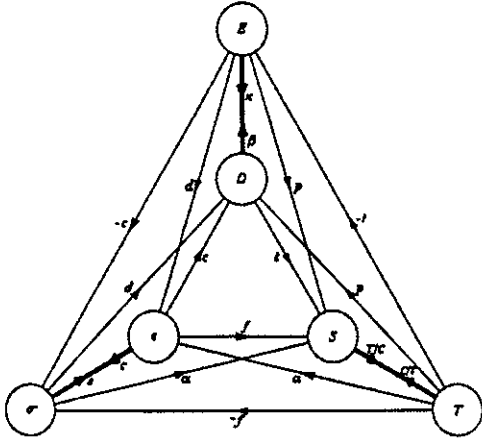


그림 2. 압전 재료의 물성 상수.

의 압전 구조 방정식이고 보다 일반적인 압전 재료의 특성을 도식화하여 나타내면 그림 1과 같고, 이에 상응하는 재료 상수들을 표시하면 그림 2와 같이 된다. 그림 2에 나타낸 특성을 수식화하여 다시 나타내면 식 3과 같은데, 이 식에 나타난 바와 같이 압전 재료는 보다 기본적으로 열에너지, 기계에너지, 전기 에너지, 나아가서 Maxwell 방정식에 의해서 전기장과 연결되는 자기에너지 까지도 서로 연결시켜서 상호간에 에너지 변환작용을 일으킬 수 있는 특성을 가진다. 즉 이러한 다양한 에너지 변환특성을 가지고 있는 재료에서, 기계-전기 에너지 변환 특성만을 이용하고자 하는 경우가 일반적이다.

$$\begin{aligned}
 d\epsilon_{ij} &= \underbrace{\left(\frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial \sigma_{kl}}\right)_{E,T}}_{\text{elasticity}} d\sigma_{kl} + \underbrace{\left(\frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial E_k}\right)_{\sigma,T}}_{\text{converse piezoelectricity}} dE_k + \underbrace{\left(\frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial T}\right)_{\sigma,E}}_{\text{thermal expansion}} dT \\
 dD_i &= \underbrace{\left(\frac{\partial D_i}{\partial \sigma_{jk}}\right)_{E,T}}_{\text{direct piezoelectricity}} d\sigma_{jk} + \underbrace{\left(\frac{\partial D_i}{\partial E_j}\right)_{\sigma,T}}_{\text{permittivity}} dE_j + \underbrace{\left(\frac{\partial D_i}{\partial T}\right)_{\sigma,E}}_{\text{pyroelectricity}} dT \quad (3) \\
 dS &= \underbrace{\left(\frac{\partial S}{\partial \sigma_{ij}}\right)_{E,T}}_{\text{piezocaloric effect}} d\sigma_{ij} + \underbrace{\left(\frac{\partial S}{\partial E_i}\right)_{\sigma,T}}_{\text{electrocaloric effect}} dE_i + \underbrace{\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_{\sigma,E}}_{\text{heat capacity}} dT
 \end{aligned}$$

그러나 초음파센서의 경우를 포함해서 근원적으로 이렇게 열장 (thermal field) 과 자기장에도 반응하는 재료에서 압전 현상만을 추출해서 사용하고자 하자면, 용도와 사용 환경에 따라서 압전 소자가 외부 온도 변화나 자기장의 변화에 반응을 하지 않도록 적절한 차단 대책을 수립하여야만 한다. 하지만 압전 재료의 외부 자기장의 변화에 대한 반응도는 전기장에 대한 반응도에 비해서 매우 작으므로 통상 무시해도 무방

하다고 본다. 그러나 외부 온도 변화에 대한 반응도, 즉 초전 효과는 통상 압전 효과에 버금갈 정도로 반응도가 크므로 이에 대한 대책은 반드시 수립되어야만 한다 [2].

다음으로 식 1이나 3이 나타내는 것은 전기장과 기계장 간의 선형적인 관계인데, 이러한 선형성이 보장되는 기계-전기장의 크기에는 뚜렷한 한계가 있으며, 그 구간을 넘어서게 되면 그림 3에 보인 바와 같은 hysteresis 특성에 의해 비선형 특성 및 포화상태를 보이게 된다는 점 또한 주의하여야 할 점이다.

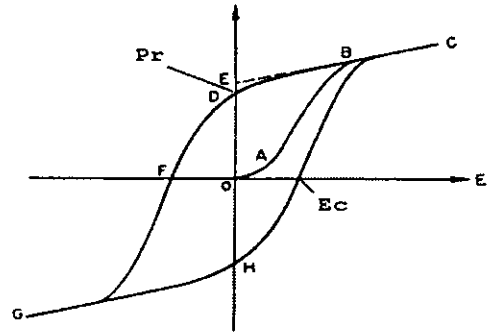


그림 3. 압전 재료의 hysteresis 특성.

그림 3에서 Pr은 잔류 분극의 크기를 나타낸다. 나아가 압전 특성은 Curie 온도 이하에서만 존재하고, 그 이상의 온도에서는 쌍극자들의 지나친 운동성에 의해 결정 대칭성이 바뀌고 동시에 압전 특성이 소멸되므로 사용 시 사용 온도 구간에 엄격한 제한을 두어야 함도 실제 응용 시 유의하여야 한다.

이러한 특성을 가지는 압전 재료에는 여러 가지 종류가 있는데 크게 나누어 압전 세라믹과 압전 폴리머를 들 수 있다 [3]. 압전 세라믹은 다시 압전 단결정과 압전 다결정으로 나뉘어 지는데, Quartz, LiNbO₃, LiTaO₃ 등으로 대표되는 압전 단결정은 높은 순도, 재료특성의 균일성, 낮은 온도계수, 높은 주파수 특성 등의 장점들을 가지고 있으나 낮은 압전 결합계수, 성장의 어려움, 그리고 높은 가격 등의 단점도 있다. 반면에 압전 다결정은 내부 입자들 간에 필수적으로 존재하는 경계면에 의해 순도나 특성의 균일성 등이 상대적으로 떨어지고 따라서 저주파대의 용도로 국한되는 단점은 있으나, 높은 압전 특성, 저렴한 가격, 그리고 무엇보다도 필요에 따라 그 특성을 어느 정도까지는 임의로 변화시킬 수 있다는 장점으로 인해 광범위하게 응용되고 있다 [4]. 대표적인 압전 다결정 재료들은 PZT, PbTiO₃, BaTiO₃ 등을 들 수 있는데, 최근의 고출력용으로 쓰이는 압전 재료는 대부분을 PZT가 차지하고 있다고 해도 과언이 아니다. 압전 폴리머는 PVDF로 대표되

표 2. 대표적인 압전 재료의 물성.

Typical values of the properties of some piezoelectric materials

Property	Unit	α -Quartz ^a	BaTiO ₃	PZT A ^b	PZT B ^b	PbNb ₂ O ₆	Na _{1/2} K _{1/2} NbO ₃	LiNbO ₃ ^c	LiTaO ₃ ^c	PbTiO ₃ ^c
Density	Mgm ⁻³	2.65	5.7	7.9	7.7	5.9	4.5	4.64	7.46	7.12
T _c	°C		130	315	220	560	420 ^d	1210	665	494
ϵ_{33}^x		4.6	1900	1200	2800	225	400	29	43	203
ϵ_{11}^x			1600	1130	-	-	600	85	53	-
tan δ	10 ⁻³		7	3	16	10	10	-	-	22
k _p			0.38	0.56	0.66	0.07	0.45	0.035	0.1	-
k ₃₁			0.21	0.33	0.39	0.045	0.27	0.02	0.07	0.052
k ₃₃			0.49	0.68	0.72	0.38	0.53	0.17	0.14	0.35
k ₁₅			0.44	0.66	0.65	-	-	0.61	-	0.36
k _{jk}		(11)0.1 (14)0.05								
d ₃₁	pC/N ⁻¹		-79	-119	-234	-11	-50	-0.85	-3.0	-7.4
d ₃₃			190	268	480	80	160	6	5.7	47
d ₁₅			270	335	-	-	-	69	26	-
d _{jk}		(11)2.3 (14)0.67								
Q _m		>10 ⁶	500	1000	50	11	240	-	-	326
S ₁₁ ^E		12.8	8.6	12.2	14.5	29	9.6	5.8	4.9	11
S ₁₂ ^E	$\mu\text{m}^2\text{N}^{-1}$	-1.8	-2.6	-4.1	-5.0	-	-	-1.2	-0.52	-
S ₁₃ ^E		-1.2	-2.9	-5.8	-6.7	-5 to -8	-	-1.42	-1.28	-
S ₃₃ ^E		9.6	9.1	14.6	17.8	25	10	5.0	4.3	11
S ₄₄ ^E		20.0	23	32	-	-	-	17.1	10.5	-

^aSingle crystals.

^bPZT A and PZT B are two typical PZT materials illustrating, in particular, the wide range of accessible Q_m values.

^c+5 mol.% Bi₂Zn₁Nb₂O₃.

^dDepoles above 180 °C

^eNumbers in parentheses are *jk* values.

는 고분자 재료로서 세라믹과는 달리 낮은 음향 임피던스와 높은 압전 전압상수 (g) 를 특징으로 하나 압전 변위상수 (d) 가 세라믹에 비해 상당히 작다는 단점을 가지고 있다. 그러나 구조적인 유연성에 의한 형상변화의 용이성 등 많은 장점들로 인해 응용 분야가 날로 증가되는 추세이다.

예전에는 이상의 재료들이 각각의 고유 특성들에 의해 독자적인 응용분야를 가지면서, 필요에 따라 상호 보완적인 기능을 수행하였다. 그러나 70년대 후반에 들어서 압전 세라믹의 높은 압전 특성을 활용 하면서도 높은 음향 임피던스를 낮출 수 있는 방안으로서 압전 복합재료를 개발하는 연구가 수행되어져서 최근에는 상용화까지 이루어졌고, 압전 폴리머의 낮은 압전 특성을 개선한 P(VDF-TrFE)와 같은 Co-polymer도 개발되었다 [5]. 압전 복합 재료는 제조 공정이 까다로운 단점이 있으나, 전기-기계 결합계수가 크고 음향 임피던스가 작아 앞으로 많은 응용이 기대되고 있다. 또한 최근 5년 이래로는 압전 단결정이면서도 다결정 세라믹을 능가하여 압전 결합계수가 거의 100%에 육박하는 PZN-PT와 PMN-PT 같은 재료들이 개발되기도 하였다 [6]. 즉, 현대의 재료공학 기술은

기존 재료간의 경계를 허물면서 용도에 따라 채택할 수 있는 재료의 선택의 폭을 급격히 넓혀주고 있으므로, 초음파 센서의 우수한 특성을 구현하기가 예전에 비해서 훨씬 용이해졌다. 표 2는 널리 사용되는 압전 재료의 물성들을 보이고 있다.

2. 초음파 센서

전형적인 압전 초음파 트랜스듀서는 음향 신호를 발진, 수신하는 압전 재료와 광대역, 고감도, 소음 감소를 위해 설치한 진동자 앞뒤의 정합층, 그리고 외부 측정 기기와의 원활한 접속을 위한 matching circuit로 구성된다. 이들 부분품들의 특성에 따라 음향 신호를 발진하는 발진기, 그리고 수신하는 수신기로 각각 개발할 수 있으며, 필요에 따라 동일한 트랜스듀서가 발진기와 수신기 역할을 동시에 수행하도록 만들 수도 있다. 이 초음파 트랜스듀서에서 가장 중요한 요소는 초음파를 발생하고 수신하는 능동 소자로서, 트랜스듀서의 감도와 해상도는 압전 소자의 전기적, 기계적 특성과 밀접한 관계가 있고, 현재 가장 널리 사용되고 있는 압전 재료는 전기-기계

결합계수가 큰 PZT 계열의 다결정 세라믹이다. 그러나 압전 세라믹은 음향 임피던스가 매우 커서 방사매질과의 임피던스 부정합으로 인한 어려움이 크다. 이러한 음향 임피던스 부정합은 압전 세라믹과 물체 사이에 정합층을 사용하여 해소하고 있으나, 특정 세라믹에 맞는 정합층을 제작한다는 것은 상당히 까다로운 작업이다. 반면에 이 능동소자로 압전 폴리머를 사용한다면 별도의 정합층도 필요없고, 내부손실이 커서 광대역을 쉽게 구현할 수 있다는 장점도 있다. 그러나 PVDF는 송신 감도가 좋지 않아서 아직까지는 pulse-echo용으로 그다지 좋은 특성을 얻지 못하고 있으며, 주로 수신용으로 사용되고 있다.

이외에 1장에서 언급한 여러 종류의 압전재료들 중 주어진

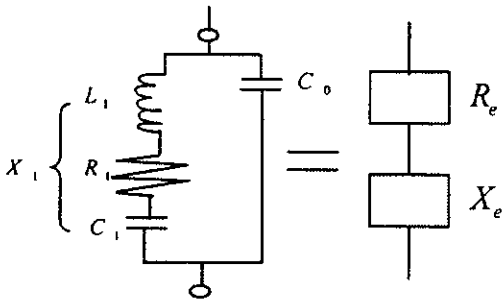
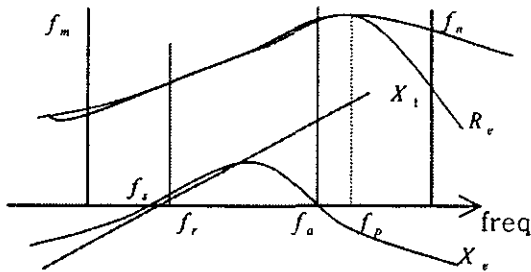


그림 4. 압전 재료의 등가회로.



- f_r : resonant frequency
- f_a : anti-resonant frequency
- f_s : the frequency when $X_1 = 0$
- f_p : the frequency when R_e is maximum
- f_m : the frequency when Z is minimum
- f_n : the frequency when Z is maximum

$$k_{eff}^2 = \frac{f_p^2 - f_s^2}{f_p^2} \equiv \frac{f_a^2 - f_r^2}{f_a^2} \equiv \frac{f_n^2 - f_m^2}{f_n^2}$$

(different for each vibration mode)

그림 5. 그림 4의 주파수 특성 측정도.

용도에 가장 적합한 것을 선정하기 위해서는 우선 재료의 물성을 정확히 아는 것이 가장 중요하다. 압전 특성의 측정은 IEEE규격 등에 의거하여 임피던스 분석기를 이용해 주파수에 따른 전기적 임피던스의 궤적을 측정함으로써 여러 가지 유용한 상수를 계산할 수 있다 [7]. 그림 4는 압전재료를 다음에서 설명할 간단한 등가회로로 묘사한 것이며, 이 등가회로를 그림 5에 나타난 주파수에 따른 임피던스 분석 결과와 연결하여 다양한 물성값을 찾아낼 수 있다.

이러한 구조를 가지는 초음파센서는 제작에 앞서 사용 용도와 기능에 따라 성능의 최적화를 이룰 수 있도록 적절한 설계 과정을 거친다. 설계 시 널리 사용되는 방법으로는 이론적 파동방정식 해석법, 등가회로 해석법, 그리고 FEM 같은 수치해석법이 있다. 설계과정에서 초음파 센서가 송신자나 수신자나에 따라 최적 압전재료를 선정하는 것은 설계시 결정해야 할 가장 중요한 문제 중의 하나인데, 이에 관한 간략한 선정 기준은 기존에 제시된 것이 있다 [8]. 그러나 이는 매우 개략적인 것으로서 현재와 같이 수많은 종류의 가용 압전재료가 있는 상황에서는 충분히 상세한 기준이 될 수 없다. 따라서 본 고에서는 등가회로 해석법에 의해서 원하는 용도에 가장 적합한 압전재료를 선정하는 방법에 대해 알아본다. 초음파센서는 그림 6에서 보듯이 여러 개의 기계적 매질과 전기회로 그리고 초음파가 전파하는 음향매질로 구성되어 있다. 이들 상이한 특성을 가지는 부분을 각각 해석해서 나중에 합친다는 것은 무척 번거롭고 힘든 일이다.

등가회로 설계법은 센서의 기계, 음향 매질을 유사한 특성을 가지는 전기부품으로 대체하여 센서 전체의 특성을 전기회로로 표시하여 비교적 간단한 방법으로 상당한 수준까지 정확한 결과를 구할 수 있도록 하는 기법이다. 전기, 기계장의 값을 환산할 때, 기계적인 힘과 속도를 전기적인 전위와 전류로 각각 환산할 때 이를 임피던스 변환법이라 칭하고, 역으로 전류와 전위로 환산할 때 이를 모빌리티 변환법이라 부른다. 개발된 방법으로는 Mason 등가회로, KLM 등가회로가 있다. 그

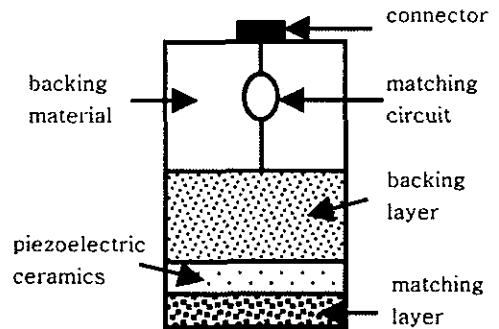


그림 6. 전형적인 초음파센서 구조의 개략도.

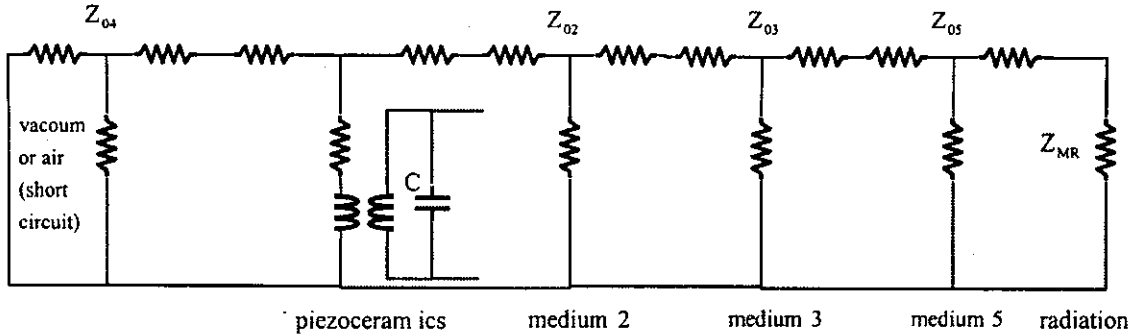


그림 7. 그림 6의 초음파센서의 Mason 등가회로도.

러나 이 두 방법은 모두 선형 모델을 이용한 것이라 센서의 3차원적 특성이나 비선형 특성을 해석하는 데는 구조적인 한계들을 가지고 있고, 보다 엄밀한 해석을 위해서는 FEM, BEM과 같은 복잡한 설계기술이 이용되기도 한다.

초음파 센서는 초음파를 주사하는 방식, 그리고 센서내의 압전 소자 배열 방식에 따라 sector 주사용 센서, 선형배열 센서, 컨벡스형 센서, 그리고 동심환 배열 센서 등 많은 종류가 있다. 그러나 이렇게 센서의 종류에 따라 압전소자의 횡방향 배열 형태나 주사 방식은 다르더라도 초음파가 전파해가는 센서의 전면 구조는 거의 대동 소이한데, 이를 도식화하면 그림 6과 같다. 그림 6의 센서는 앞에서 설명한 등가 회로법에 의해 묘사할 수 있으며, 일례로서 Mason 등가회로로 묘사하면 그림 7과 같다. 즉 그림 7을 이용하면 그림 6에 나타난 트랜스듀서가 초음파의 송신자로 작동할 때 입력 전압에 의해 방사 매질에 인가되는 초음파 음압의 크기 즉, 입력전압 대비 음압의 비 (TVR)에 의한 송신자로서의 효율을 구할 수 있고, 수신자로서 작동할 때는 입력 음압에 의해 전기적 측정단에 나타나는 전압의 크기를 구함으로써 수신자 감도 (RVS) 를 구할 수 있다. 이때 이 등가회로는 트랜스듀서를 이루는 재료들의 물성의 함수로서 나타낼 수 있으므로, 결국 위의 트랜스듀서가 송신자, 수신자로서의 성능에 미치는 압전 재료 물성의 영향을 분석할 수 있을 것이다. 간단한 일례로서 그림 8에 나타난 바와 같이 음향 정합층 없이 압전 소자만이 물속으로 초음파를 송신, 수신할 때의 TVR, RVS, 그리고 pulse-echo 트랜스듀서로 작동할 때의 등가회로는 그림 9와 같이 나타나며, 이때 각각의 경우에 대한 전달함수들은 식 (4), (5), (6)과 같이 물성의 함수로서 나타내므로 각 경우에 대해 최대의 성능을 나타내는 물성치를 결정할 수 있고, 결국 그에 따라 최적의 압전 재료를 선정할 수 있다 (9). 식에서 a 는 Z_0/Z_L 이고, α 는 $\frac{\pi f_s}{f_0} = \sqrt{\pi^2 - 8k_{33}'^2}$ 이다. 이러한 방법은 더 복잡한

구조를 가지는 여타 다른 초음파 센서용 최적 압전재료의 선정에도 그대로 적용될 수 있는 기법이다. 그러나 본고에서 언급한 내용은 센서에 사용되는 압전 재료가 단지 선형 구간 내

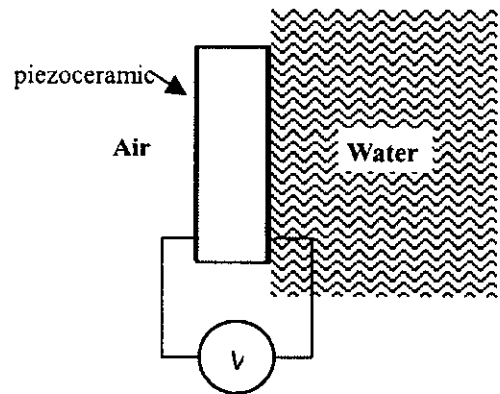


그림 8. 압전 소자만에 의한 초음파 방사 형상.

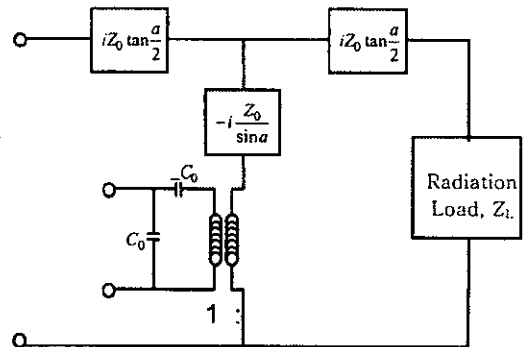


그림 9. 그림 8의 등가회로.

에서만 작동한다고 가정하고, 방사 매질 및 재료 자체 내에서의 감쇄특성들을 다 무시할 수 있을 때의 방법이고, 이상의 가정들이 성립될 수 없다면 위 등가회로의 전체적인 방법은 여전히 타당하지만 세부적인 내용은 적절히 수정되어야 할 것이다.

TVR (transmitting voltage ratio of a transmitter) =

$$FV_i = \frac{4i\pi Z_0 Z_t \sin^2\left[\frac{\alpha}{2}\right] C_0 h_{33}}{2\pi f(Z_0 \sin[\alpha] - iZ_t \cos[\alpha]) - C_0 h_{33}(4Z_0 \sin^2\left[\frac{\alpha}{2}\right] - iZ_t \sin[\alpha])} \quad (4)$$

RFR (receiving force ratio of a receiver) =

$$F_o/F_i = \frac{\tan^2\left[\frac{\alpha}{2}\right] h_{33}}{2\pi f(2Z_0 \tan\left[\frac{\alpha}{2}\right] + iZ_t(\tan^2\left[\frac{\alpha}{2}\right] - 1))} \quad (5)$$

TF (overall transfer function of a transducer) = TVR (RFR =

$$= \frac{2k_{33}^2 \alpha \sin^2\left[\frac{\alpha}{2}\right] \tan\left[\frac{\alpha}{2}\right] \tan[\alpha]}{(\alpha(a \sin[\alpha] - 4k_{33}^2 \sin^2\left[\frac{\alpha}{2}\right]) + i(k_{33}^2 \sin[\alpha] - a \cos[\alpha]))(1 + i\alpha \tan[\alpha])} \quad (6)$$

3. 결론

이상에서 압전 재료의 일반적인 특성과 초음파 센서로의 응용을 위해 압전 재료가 갖추어야 할 요건 및 최적 재료를 선정하는 방안에 대해 개략적으로 알아보았다. 현재에도 압전 재료에는 단결정에서부터 폴리머에 이르기까지 수많은 종류가 있고, 초음파센서 또한 응용 분야가 확대 됨에 따라 나날이 새로운 구조가 개발되고 있다. 이상에서 알아본 바와 같이 우수한 초음파 센서를 구현하기 위해서는 우수한 압전 소자가 필수적이며, 또 주어진 용도에 가장 적합한 압전 소자를 선택해서 사용함의 중요성은 더 이상 강조할 필요가 없을 정도이다. 본 논문에서 설명한 내용이 그 개략적인 지침이 될 수 있을 것이며, 보다 정확한 해석 및 재료 분석은 FEM이나 BEM 같은 보다 정밀한 방법을 통해 이를 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] J. F. Nye, Physical Properties of Crystals, Oxford Press, Oxford, 1985
- [2] A. J. Moulson and J. M. Herbert, Electroceramics, Chapman and Hall, New York, 1990
- [3] M. G. Silk, Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing, Adam Hilger Ltd., Briston,

Nothern Ireland, 1984

- [4] B. Jaffe, W. R. Cooke, Jr., and H. Jaffe, Piezoelectric ceramics, Academic Press, New York, 1971.
- [5] R. E. Newham, "Composite electroceramics", Ann. Rev. Mater. Sci, Vol.16, No. 47 (1986) 68.
- [6] S. E. Park and T. R. Shroud "Characteristics of relaxor-based piezoelectric single crystals for ultrasonic transducers," IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 44, No. 5, p. 1140, Sept. 1997
- [7] IEEE Standard 176-1987
- [8] J. Callerame, H. Tancrell and D. T. Wilson, Transmitters and receivers for medical ultrasonics, Proceedings of Ultrasonics Symposium, Los Angeles, CA, U.S.A., Sep. (1979) 407 - 411.
- [9] 노용래, 임종인, "Effects of piezoelectric material constants on the performance of ultrasonic transducers." 한국음향학회지, vol. 12, No. 1, p.48, 1993. 2

저 자 약 령

성명 : 노용래

약력

- 1980-1984: 서울대 자원공학과 학사
 1984-1986: 서울대 대학원 자원공학과 석사
 1987-1990: The Pennsylvania State University, Ph.D., 음향공학/전자재료 전공
 1990-1994: 포항산업과학연구원, 무기재료연구분야 선임연구원
 1992-1999: 한국음향학회 편집위원/편집이사
 1994-현재: 경북대 기계공학부 조교수, 부교수
 2000-현재: Technical Committee Member in the Acoustical Society of America
 -현재: 한국군사과학기술학회 센서/신호처리부문 위원