

초음파 탐촉자 구성 재료의 특성 연구

김 병 극 · 박 용 기

(한국표준연구소 비파괴시험연구실)

Characterization of Component Materials of the Ultrasonic Transducer

B. G. Kim and Y. K. Park

Abstract Piezoelectric elements, backing and shoe material are the important components of the ultrasonic transducer, In this study, characteristic constants in the domestic and the foreign PZT ceramic elements are investigated. The acoustic properties of the domestic and the foreign backing and shoes are characterized. The effects of components characteristics, the kinds of the piezoelectric elements and the thickness of the wear plates are investigated for the manufactured normal beam ultrasonic transducers.

1. 서 론

초음파 탐촉자는 결함검출, 재질평가, 물성측정에 사용되는 초음파 시험장치의 핵심부품이며 압전진동자, wear plate, backing은 중요한 구성요소이다. 압전진동자는 1880년과, 1881년에 Curie와 Lippman에 의해 압전효과를 나타내는 압전 물질이 발견된 이래로 수많은 물질이 발견, 개발되어 현재에 이르러 초음파의 발생 및 수집 특성이 우수한 PZT(Lead Zirconate Titanate)가 가장 널리 사용되고 있다. Wear plate는 비파괴 검사의 주된 대상인 steel의 검사에 적절한 완전 투과 조건을 만족하는 quarter wave alumina disk가 주로

사용되며 backing은 음향입피던스와 감쇠상수가 고려되어 tungsten-epoxy compound나 urethan, rubber 등의 재질이 용도에 따라서 선택되고 있다.⁽¹⁾ 그러나 국내에서 생산되는 소재에 대한 특성은 잘 알려지지 않고 있으며 더우기 이들을 사용하여 초음파 탐촉자가 제작되었을 경우 그 특성에 미치는 영향은 보고된 바 없다.

본 연구에서는 아직까지 초음파 탐촉자의 구성 재료로서 특성이 알려지지 않은 국산재료를 중심으로 국내외 재료에 대한 제 특성을 조사하였다. IRE standard와 IEEE standard의 측정 이론에 근거하여 impedance analyzer를 이용한 측정기술을 정립하고^(2,3) PZT

계열의 극산 소재 원판과 외국산 PZT-5A 세라믹 원판에 대한 특성 조사를 수행하였다. 압전진동자의 대표상수인 압전 변형상수 또는 압전 전하상수인 d 상수, 압전 전압상수인 g 상수, 역학적 quality factor Qm, coupling factor k가 조사되었다.

Backing은 국산 epoxy resin YD115, hardener G-A0 533과 flexible epoxy DF110 각각에 대해 그리고 외국산 Araldite GY509와 Uralite 3148 각각에 대해 입도 1μ인 tungsten powder의 구성비를 달리하여 제작되었으며 제작된 각 시편에 대해 체적밀도, 음파의 속도, 음향 임피던스, 감쇠상수가 조사되었다. Wear plate로서 국산 white alumina의 특성을 조사하여 quarter wave plates와 thin plates(약 1/8 파장)를 제작하였다. 또한 제작조건이 초음파 탐촉자의 감도에 미치는 영향을 압전소자의 종류 및 wear plate 두께에 따라서 조사하였다.

II. 이론 및 실험방법

공진주파수 근처에서 진동하고 있는 압전 진동자의 등가회로는 Fig. 1a와 같이 역학적인 진동을 나타내는 RLC 직렬회로와 정전용량 Co의 병렬회로로 나타내지며 Fig. 1b와 Fig. 1c의 직렬, 병렬회로와 등가이다.⁽⁵⁾ 이 계에 대한 전기적 임피던스는 식(1)의 resistance와 식(2)의 reactance로 표현되어 Fig. 2와 같은 주파수에 대한 임피던스의 관계를 보인다.⁽²⁾

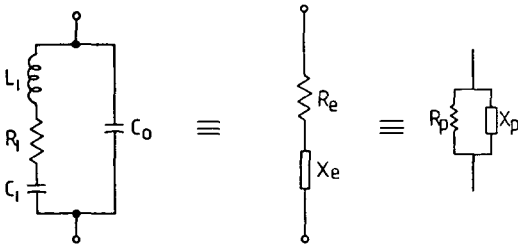


Fig. 1. Equivalent circuit of a piezoelectric vibrator near resonance.

$$R_e(\omega) = \frac{R_1 \frac{C_1^2}{C_0^2}}{\left(\omega C_1 R_1\right)^2 + \left(1 + \frac{C_1}{C_0} - \omega^2 C_1 L_1\right)^2} \dots (1)$$

$$X_e(\omega) = \frac{1}{\omega C_0} \frac{(\omega C_1 R_1)^2 + (1 - \omega^2 C_1 L_1) \left(1 + \frac{C_1}{C_0} - \omega^2 C_1 L_1\right)}{(\omega C_1 R_1)^2 + \left(1 + \frac{C_1}{C_0} - \omega^2 C_1 L_1\right)^2} \dots (2)$$

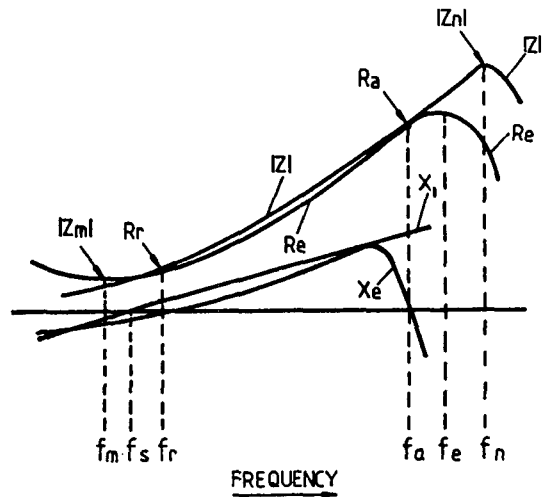


Fig. 2. Impedance Z, resistance Re, reactance Xe, and series arm reactance of piezoelectric vibrators as a function of frequency.

직렬회로의 임피던스 Z와 병렬 회로의 어드미턴스 Y는 각각 식(3)과 식(4)로 되며 Y=1/Z의 관계식에서 각각의 성분은 식(5)와 식(6)으로 표현된다. 이때 G와 B, R과 X는 각각 식(7)과 식(8)의 관계에 의해 반경이 각각 1/2 Re와 1/2Ge이고 원점이 각각 (1/2Re, 0)과 (1/2Ge, 0)인 Fig. 3의 두원이 된다.

$$Z = R_e + jX_e \dots (3)$$

$$Y = G + jB = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{jX_p} \dots (4)$$

$$R_e = \frac{G}{|Y|^2}, \quad X_e = -\frac{B}{|Y|^2} \dots (5)$$

$$G = \frac{R_e}{|Z|^2}, \quad B = -\frac{X_e}{|Z|^2} \dots (6)$$

$$\left(R_e - \frac{1}{2G}\right)^2 + X_o^2 = \left(\frac{1}{2G}\right)^2 \dots\dots\dots(7)$$

$$\left(G - \frac{1}{2R_e}\right)^2 + B^2 = \left(\frac{1}{2R_e}\right)^2 \dots\dots\dots(8)$$

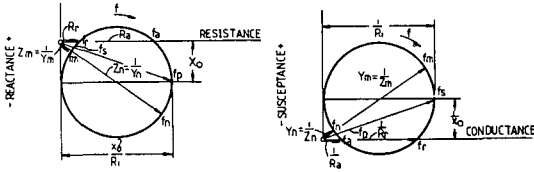


Fig. 3. a) Impedance and b) admittance diagram of a piezoelectric vibrator.

여기에서 공진주파수 $f_r, f_a, f_s, f_p, f_m, f_n$ 과 그때의 임피던스가 구해지면 이를 이용하여 압전소자의 여러 가지 특성변수 및 상수가 구해진다.⁽³⁾ 본 연구에서는 IRE와 IEEE standard 등을 참조하여, Fig. 4와 같은 측정장치를 구성하고 공진 방식의 측정절차를 정립하여, 국산 PZT 압전세라믹 원판과 Vernitron사의 PZT-5A 원판의 특성을 조사하였다.

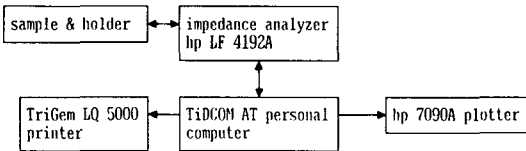


Fig. 4. Block diagram of the system for measurement of piezoelectric characteristic constants using the impedance analyzer.

Backing은 압전소자의 뒷 부분에 위치하여 압전소자의 진동을 제한하는 damper 역할을 하며 axial resolution을 높이고 frequency band width를 넓히며 불필요한 간섭신호를 제거하는 작용을 한다. 본 연구에서는 국산 및 외국산 Epoxy-hardner에 tungsten carbide (WC)를 비율을 다르게 하여 backing을 제작하고 각각에 대하여 체적밀도, center frequency 2.25MHz에서의 음파의 속도, 음향임피던스와 감쇠계수를 조사하였다. 국산재료를 사용한 backing은 Epoxy resin YD115와

hardner G-A0533을 7 : 3의 비율로 혼합한 것(YD #)과 여기에 다시 flexible epoxy DF110을 20% 혼합한 (YF #) 각각에 대하여 입도가 1 μ 인 tungsten powder의 비율을 증가시키면서 잘 혼합하여 90 $^{\circ}$ C에서 3시간 동안 가열 경화하여 제작하였다. 외국산 재료를 사용한 backing은 널리 이용되는 재료인 Araldite를 hardner와 4 : 1의 비율로 혼합한 것(Ar #)과 Uralite 3148을 hardner와 5 : 2로 배합한(Ur #) 각각에 대하여 입도가 1 μ 인 tungsten powder의 비율을 증가시키면서 잘 혼합하여 Araldite를 사용한 것은 90 $^{\circ}$ C에서 3시간 동안 가열 경화 하였으며 Uralite를 사용한 것은 상온에서 24시간 경화시켜 제작하였다. 비교 시험이 용이하도록 모든 시편을 cutting과 lapping을 통하여 두께를 3mm로 통일하였다.

초음파 탐촉자의 중요한 구성 요소의 하나인 wear plate는 압전소자에 의해서 발생된 초음파를 효과적으로 시험 재료에 전달하는 중간 매질이다. 음향임피던스가 Z1(매질 I)인 압전소자와 음향임피던스가 Z2(매질 II)이고 두께인 L인 wear plate 그리고 음향임피던스가 Z3(매질 III)인 시험재료로 구성된 계에서 매질 I에서 입사된 평면음파가 매질 II를 통과하여 매질 III까지 전파될 비율을 나타내는 초음파의 투과계수는 식(9)가 되며 이 때 투과계수가 1이 되는 초음파의 완전투과 조건은 식(10)과 식(11)이 된다.⁽⁶⁾

$$T_1 = \frac{4}{2 + \left(\frac{Z_3}{Z_1} + \frac{Z_1}{Z_3}\right) \cos^2 k_2 L + \left(\frac{Z_2^2}{Z_1 Z_3} + \frac{Z_1 Z_2}{Z_2^2}\right) \sin^2 k_2 L} \dots\dots(9)$$

$$Z_2 = (Z_1 \cdot Z_3)^{1/2} \dots\dots\dots(10)$$

$$L = \frac{\lambda}{4} \dots\dots\dots(11)$$

여기서 λ 는 초음파의 파장이다. 초음파 시험의 주요 대상인 강⁽⁷⁾의 음향임피던스는 45x10⁶kg/m²s이고 세라믹의 음향임피던스는 30x10⁶kg/m²s이다. 따라서 식(10)에 나타난 초음파의 완전 투과 조건에 의하면 중간매질의 음향임피던스 Z2는 37x10⁶kg/m²s가 된다. 본 연구에서 제작하고 조사한 white alumina에 대한 음파의 속도는 10.6km/s이었으며 음향임피던스는 41.34x10⁶kg/m²s이었는데 이는 Z2의 이론 값 37x10⁶kg/m²s와 근사한 값을 나타내고 있다.

국산 및 외국산 압전 소자에 따라서 그리고 wear plate의 두께에 따른 초음파 탐촉자의 감도 변화를 조사하기 위하여 다음과 같이 초음파 탐촉자를 제작하였다. 압전소자에 절연을 위한 베이클라이트 cylinder를 epoxy를 사용하여 부착하고 0.001" ribbon type lead wire를 soldering하여 ground를 연결하였으며 저점도 epoxy를 사용하여 wear plate에 접착하고 이를 stainless steel로 된 housing으로 shielding하였다. 감도 (Sr)는 탐촉자의 electro-acoustic efficiency를 나타내는 값으로서 탐촉자의 center frequency에 해당하는 5개 이상의 cycle을 갖는 sinusoidal pulse의 input voltage V_{in} 에 대한 echo signal의 peak to peak voltage V_{out} 의 비인데 식(12)로 계산된다.⁽⁴⁾ 본 실험을 위하여 center frequency 2.25MHz의 국내의 PZT 압전소자와 quarter wave alumina plate와 더 얇은(약 1/8 파장) alumina plate를 준비하였으며 이를 사용하여 제작된 초음파 탐촉자들에 대하여 pulse/function generator hp 8116 A와 30mm steel plate를 이용하여 감도를 결정하였다.

$$Sr = 20 \log \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right) \dots \dots \dots (12)$$

III. 실험 결과 및 토의

1. PZT 압전 세라믹의 특성

Fig. 5가 넓은 주파수 범위에 대한 저항과 reactance의 측정을 나타내며 Fig. 6은 planar mode의 fundamental resonance frequency 근방에서의 reactance와 resistance를 보이고 있다. Fig. 7과 Fig. 8은 각각 thickness mode의 fundamental resonance frequency와 third harmonic 근처에서의 측정 그래프이다. 일반적으로 널리 사용되는 thickness mode를 이용한 초음파 탐촉자에 있어서 압전 coupling factor, k_t , k_{33} , 압전 변형상수 d_{33} , 압전 전압상수 g_{33} , mechanical quality factor Q_m 이 탐촉자의 성능에 관계된 대표상수인데 본 연구에서 국내의 압전세라믹 원판에 대해 조사된 결과는 Table 1과 같다.

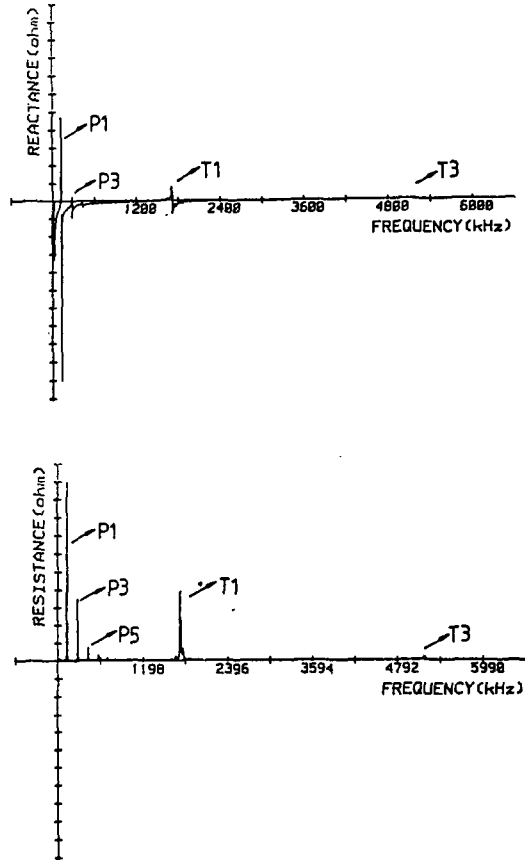
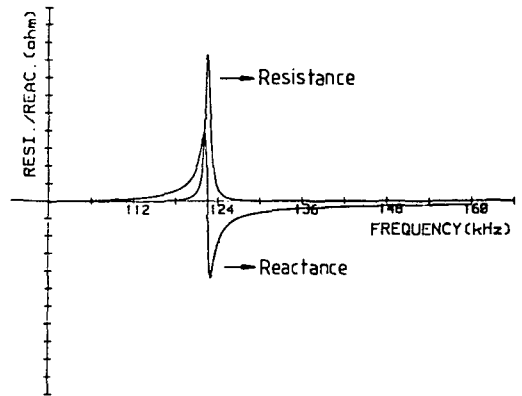


Fig. 5. R, X vs. long range frequency.



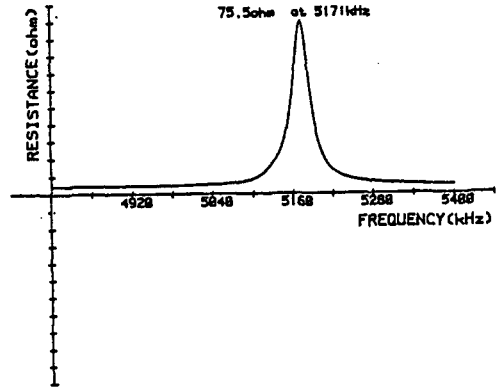
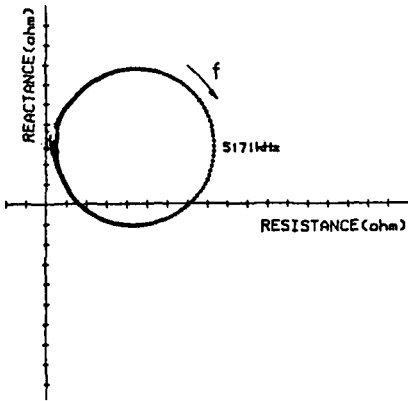


Fig. 6. R, X versus frequency and R vs. X for varying frequency near fundamental planar mode.

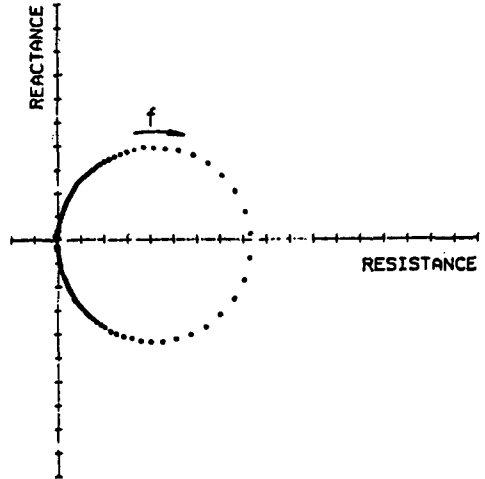
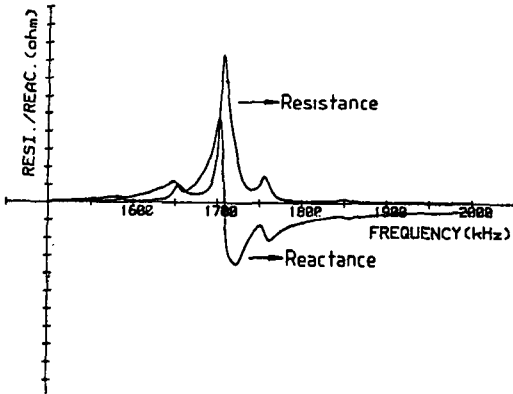


Fig. 8: R versus frequency and R vs. X for varying frequency near the third harmonic of thickness mode.

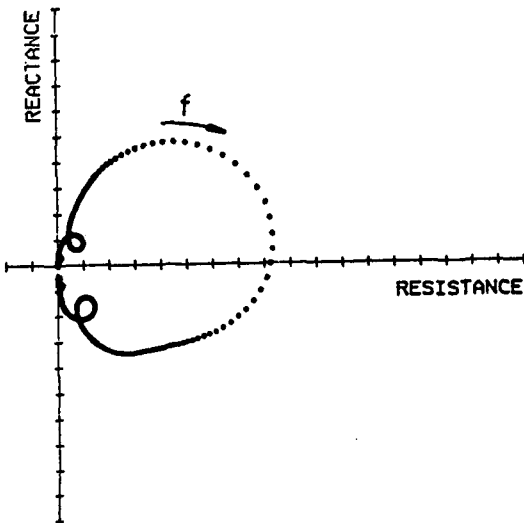


Fig. 7. R, X versus frequency and R vs. X for varying frequency near fundamental thickness mode.

Table 1. Results of characteristic constants measured in PZT-5A and domestic piezoelectric ceramic disks

con.	sp.	Vernitron PZT-5A(USA)	Domestic PZT	Vernitron data
kp		0.617	0.595	0.600
k33		0.744	0.710	0.705
kt		0.525	0.490	0.486
d33		391	340	374
g33		22.9	20.2	24.8
Qm		76.7	87.1	75.0

Table 1의 결과는 본연구의 측정결과와 Vernitron사가 발표한 data가 잘 일치됨을 보이고 있으며 국산 PZT압전 세라믹이 PZT-5A에 비해 에너지 변환효율(kp, kt)과 초음파의 발생 및 수신 능력(d33, g33)에 있어서 약간 낮고 기계적인 공진도를 나타내는 Qm이 약간 큼을 나타내고 있다. 이러한 결과는 국산소재가 외국산 소재에 비해 성능면에서 약간 뒤지긴하나 큰 차이가 없고 국산소재가 탐측자용으로 이용 가능함을 시사하고 있다고 하겠다.

2. Tungsten-epoxy compound의 특성

Table 2, Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11과 Fig. 12가 국내의외 재료를 사용하여 제작된 backing에 대해 조사된 결과의 도표와 그림이다. 이들 결과는 tungsten powder의 분율을(구성비)이 증가함에 따라서 밀도는 거의 선형적으로 증가하지만 종파의 속도는 tungsten powder에 의한 음파의 회절에 의한 결과로써 분율이 낮은 쪽에서 급격히 감소되다가 분율이 높아짐에 따라서 서서히 증가하며 대체로 저비율에서의 속도에 비해 비율이 높은 것이 속도가 낮게 나타나는 비선형성을 보이고 있다. 또한 음향 임피던스는 tungsten 분율이 증가함에 따라서 대체로 증가하는 경향을 보이고 음향감쇠 상수는 증가하다가 감소하는 경향을 보이고 있다. 구성 재료에 따른 경향을 살펴보면 음향임피던스는 Araldite, YD115, Yd-DF110, Uralite compound의 순으로 그리고 감쇠 상수는 Uralite, YD115, YD-DF110, Araldite compound 순으로 나타났다. Backing용으로 적합한 재료는 높은 음향 임피던스와 동시에 높은 감쇠 상수를 지닌다고 할 때 국산 재료중 YD115 compound는 backing 재료로서 적절히 이용될 수 있음을 알 수 있다.

Table 2. Characteristics of backing specimens manufactured with several different condition

sample	density g/cm ³	velocity m/s	acoustic impedance 10 ³ kg/m ² s	attenuation coefficient m ⁻¹	weight ratio epoxy : tungsten
Ar #1	1.15	2836.1	3.3	8.0	1 : 0
Ar #2	1.71	2394.9	4.1	179.1	1 : 1
Ar #3	2.59	1562.2	4.1	1344.7	1 : 2

Ar #4	3.57	1704.6	6.1	705.0	1 : 3
Ar #5	4.18	1720.8	7.2	147.3	1 : 4
Ar #6	5.05	1690.1	8.5	414.4	1 : 5
Ar #7	5.70	1727.4	9.8	348.0	1 : 6
Ur #1	1.01	1582.9	1.6	1311.8	1 : 0
Ur #2	1.98	866.5	1.7	3932.9	1 : 1
Ur #3	2.53	719.2	1.8	4015.6	1 : 2
Ur #4	3.20	815.9	2.6	4061.5	1 : 3
Ur #5	3.99	886.7	3.5	3566.9	1 : 4
Ur #6	4.56	929.2	4.2	2505.6	1 : 5
Ur #7	5.22	949.7	5.0	2639.5	1 : 6
YD #1	1.13	2047.2	2.3	222.5	1 : 0
YD #2	2.58	1417.4	3.7	883.5	1 : 2
YD #3	3.04	1323.7	4.0	1252.6	1 : 4
YD #4	3.88	1209.3	4.7	1533.3	1 : 6
YF #1	2.20	1188.8	2.6	1320.5	1 : 1
YF #2	2.66	1096.6	2.9	2440.0	1 : 2
YF #3	3.32	1059.0	3.5	2886.7	1 : 4
YF #4	4.04	836.8	3.4	3746.4	1 : 6
YF #5	4.62	1408.7	6.5	2998.9	1 : 8

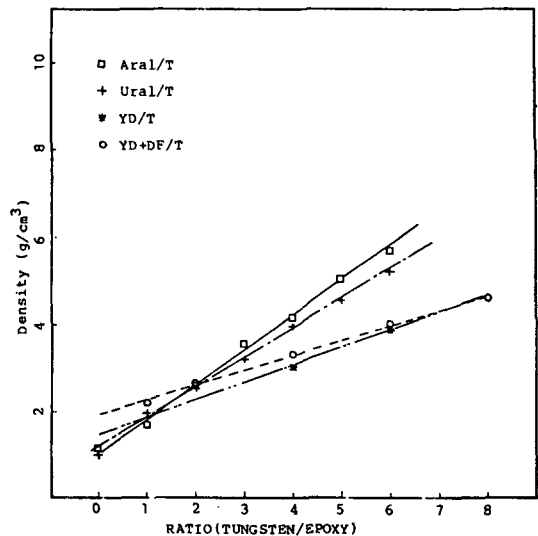


Fig. 9. Density vs. weight ratio of 1μ tungsten powder/epoxy compound of several kinds.

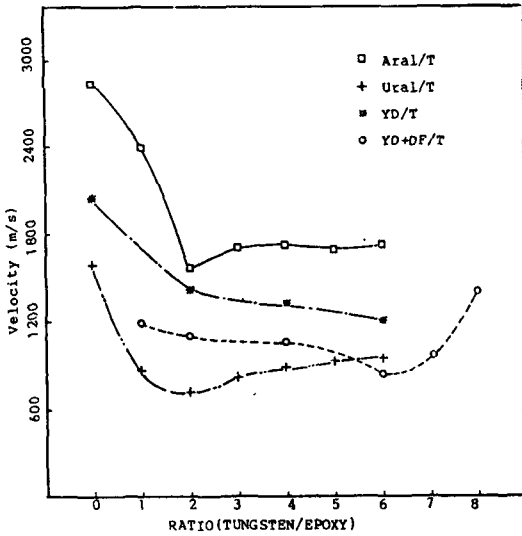


Fig. 10. Longitudinal velocity vs. weight ratio of 1μ tungsten powder/epoxy compound of several kinds.

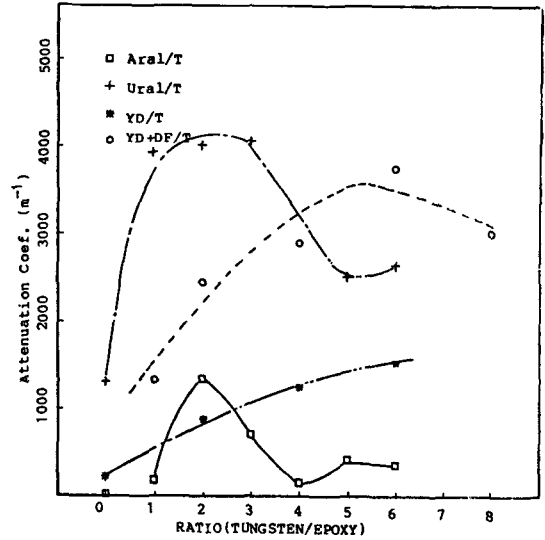


Fig. 12. Relative attenuation constants vs. weight ratio of 1μ tungsten epoxy compound of several kinds.

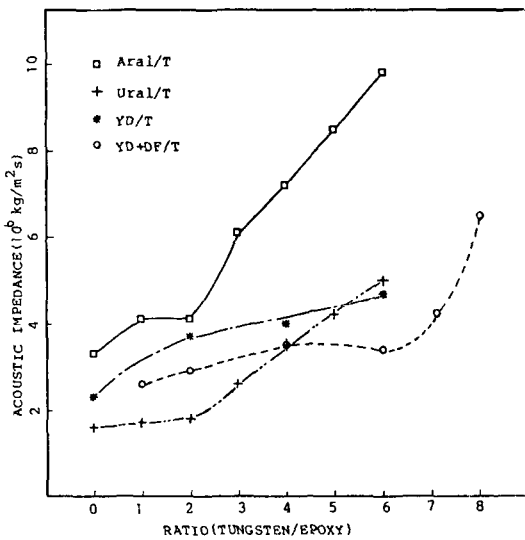


Fig. 11. Acoustic impedance vs. weight ratio of 1μ tungsten powder/epoxy compound of several kinds.

3. 감도의 제작조건에 따른 영향

Fig. 13a가 center frequency 2.25MHz에 해당하는 7개의 cycle을 갖는 sinusoidal input pulse이며 Fig. 13 b가 제작된 탐촉자에 의한 echo signal이다. 국산 PZT 압전 원판을 사용한 탐촉자에 비해 외국산 압전소자를 사용한 경우의 감도가 2dB 높고 quarter wear plate를 사용한 경우가 thin(약 1/8 파장) plate를 사용한 초음파 탐촉자에 비해 6dB 크게 나타났다.

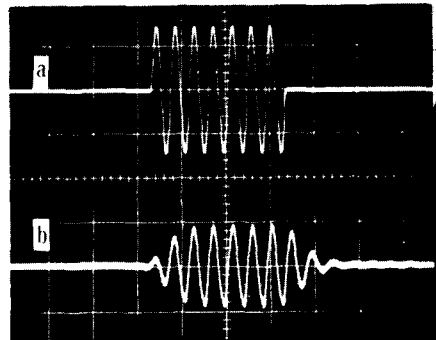


Fig. 13. Measurement of relative sensitivity of a search unit. a) excitation signal : 2V/div b) Ultrasonic echo : 0.1V/div.

IV. 결 론

초음파 탐촉자의 중요 구성 요소인 압전소자, backing, wear plate용 국내의 재료에 대한 제 특성과 제작조건에 따른 영향이 조사되었다. 국내 PZT압전 세라믹이 PZT-5A에 비해 에너지 변환 효율(kp, kt)과 초음파의 발생 및 수신 능력(d33, g33)에 있어서 약간 낮은 값을 나타내고 기계적인 공진도를 나타내는 Q_m 이 약간 크게 나타났다. Backing 재료로서 국산 YD115-tungsten compound는 비교적 높은 음향 임피던스와 높은 감쇠율을 가진것으로 나타났고 국산 white alumina의 음향임피던스는 $41.34 \cdot 10^6 \text{kg/m}^2\text{s}$ 로 나타나 이론적인 요구값 $37 \cdot 10^6 \text{kgm}^2\text{s}$ 와 근사한 값으로 나타났다.

국산 및 외국산 압전소자의 종류와 wear plate의 두께를 달리하여 제작된 초음파 탐촉자에 대한 감도 조사에서 국산 PZT 압전 원판을 사용한 탐촉자에 비해 외국산 압전 소자를 사용한 경우의 감도가 2dB 높게 그리고 quarter wear plate를 사용한 경우가 thin(약 1/8

파장) plate를 사용한 초음파 탐촉자에 비해 6dB 크게 나타났다.

References

1. Ultrasonic transducers, NTIAC-84-1.
2. "IRE standars on piezoelectric crystals-the piezoelectric vibrator : definitions and methods of measurement, 1957", Proc. IRE 45, pp. 353-8, 1957.
3. "IEEE standard on piezoelectricity", IEEE Std 176-1978.
4. "Characterization of search unit and sound field", Draft, ISO/TC, 135/SC3, N33, 1987.
5. L. E. Kinsler, A. R. Frey, "Fundamentals of acoustics", New York, 1982.
6. L. M. Brekhovskikh, "Waves in layered media", Applied meth. and Mech., v. 16, 1980.