

PVDF 압전초음파 트랜스듀서의 펄스응답 특성

이 덕 출 · 박 강 식

인하대학교 전기공학과 · 대전공업대학 전기공학과

(1992년 2월 10일 접수)

The Pulse Response Properties of Piezoelectric Ultrasonic Transducer

D. C. Lee and K. S. Park

Inha Univ. Dep. of Electrical Engineering

Tae Jon National Univ. of Technology Dep. of Electrical Engineering

(Received February 10, 1992)

요 약 : 고분자 압전재료인 PVDF 필름을 이용하여 초음파용 압전변환기를 제작하였다. 압전변환기에 펄스입력을 가하였을 때 1~2주기의 응답펄스가 나타났으며 그 응답파형은 세라믹 압전변환기에 비하여 훨씬 빠르게 감쇠가 일어남을 확인할 수 있었다. 이와 같이 감쇠가 빨리 일어나는 응답특성은 고주파용 의용 초음파 영상장치에 사용될 경우 해상도의 증진에 기여할 것으로 생각된다. 또한 변환자의 전극 크기에 따라 공진 주파수가 달라짐을 확인할 수 있었으며 이와 같은 사실로부터 Low MHz 대에서의 공진은 radial mode임을 알 수 있었다.

Abstract : Piezoelectric transducers for ultrasonic sensors were fabricated with piezoelectric PVDF film. When electric impulse waves were applied to the piezoelectric PVDF transducers, transducers produced a single or double pulses with a rapid ringdown and the ringdown time of PVDF transducer was shorter than that of ceramic transducers. These response properties are expected to contribute to the improvement of the resolution of medical ultrasonic imaging system. Resonance frequency of PVDF transducer changed with the electrode size of the transducers. From the result, the resonance of PVDF transducer in low MHz frequency is radial mode.

서 론

최근 센서 기술의 발달에 의해 계측장비나 각종 장치등에의 자동화 및 인공지능화가 활발히 이루어지고 있는 실정이다. 이러한 센서기술은 제품의 부가가치를 높이는데 없어서는 안될 필수적인 요소로서 자리잡아 가고 있다.

압전재료는 초음파 특성을 이용하여 속도, 변위,

힘, 거리, 두께등을 측정할 수 있는 각종 센서로서 사용될 수 있으며, 이와 같은 압전재료는 최근까지 주로 무기물 압전 세라믹이 주종을 이루어 왔다. 그러나 우수한 압전특성을 가지고 있는 세라믹은 제조 공정상의 어려움 또는 유연성, 박막화 및 대면적화 등의 점에서 고분자 압전재료와 비하여 큰 단점으로 지적되고 있다.

현재 이와 같은 단점을 보완하기 위한 방편으로

유기고분자 압전재료와 무기물 압전재료의 상호 장점을 이용하기 위한 고분자-세라믹 복합계 압전재료에 대한 연구가 진행되고 있지만 현재로서는 단일상 재료를 능가할 수 있는 만족할만한 결과가 얻어지지 않고 있다.^{1,2}

압전특성을 이용한 초음파 변환기는 기계적 에너지를 전기적 에너지로(정압전효과), 전기적 에너지를 기계적 에너지로(역압전효과) 변환시켜 주는 진동자로서 진동자의 재질, 크기, 형상등에 의해 그 특성이 크게 달라지게 되며 또한 에너지 변환효율에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 진동자의 전기-기계 결합계수이다. 고분자 압전재료의 전기기계 결합계수는 세라믹재료에 비해 뒤지지만 여러가지 우수한 특성이 있기 때문에 실용화에 대한 연구가 상당히 진행되고 있으며 최근에는 PVDF와 공중합시킨 재료를 이용하여 초음파용 현미경의 응용까지 연구가 진행되고 있는 실정이나 국내에서는 이에 대한 연구가 매우 미미한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 고분자 압전재료를 이용한 초음파 변환기의 제작과 성능개선을 위한 연구에 앞서 고분자 압전재료로서 널리 알려진 PVDF(poly vinylidene fluoride)를 이용하여 여러가지 실험조건에 따라 초음파 변환기를 제작한 후 이들 조건이 변환기의 성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 펄스 응답특성을 조사하여 초음파 탐측용 센서로서 성능을 평가하였다.

이 론

압전현상은 물리적인 변형에 의해 전하가 유기되는 현상^{3,4}으로 이와 같은 현상은 결정격자에 속박되어 있는 전하가 변위에 의해 분극도가 변화되어 일어나는 것으로 기계계와 전기계가 결합된 형태이다.

기계계와 전기계의 결합도 즉 에너지 변환효율은 결합계수 k^2 로 표시되며 다음식으로 표현된다.

$$\frac{\epsilon^S}{\epsilon^T} = (1 - k^2)$$

단, ϵ^S 는 전계변화에 대해 변형(strain)이 0인 상

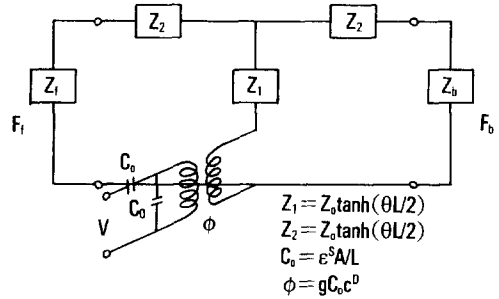


Fig. 1. Mason equivalent circuit for ultrasonic transducer.

태에서의 유전율이고, ϵ^T 은 응력(stress)이 0인 상태에서의 유전율이다. 윗식에서 k^2 은 압전효과에 의한 재료의 유전율 변화의 비를 의미한다. 압전진동자는 기계적인 부분과 전기적인 부분이 결합된 복잡한 구조로 이루어져 있으며 Fig. 1에 압전진동자에 대한 Mason의 등가회로⁴를 나타냈다. Mason의 등가회로는 길이 L(두께)의 전송선을 나타내는 것으로 2개의 기계적인 부분과 1개의 전기적인 부분으로 이루어져 있으며, 기계적인 부분과 전기적인 부분이 권수비가 ϕ 인 이상적인 변압기에 의해 결합된 T형의 등가 회로로 나타내며 $\phi = g C_0 c^D$ 이고 g 는 전기-기계 결합계수, C_0 는 진동자의 캐패시턴스, c^D 는 탄성계수이다.

등가회로에서 기계적 임피던스는 $[v = v^D = (c^D/\rho)^{1/2}]$, $\theta = (\alpha + j\omega/v^D)$ 의 경계조건에 의해 구해진다.

무한 길이의 전송선 이론에 의해 기계적 특성 임피던스는 다음식으로 표현된다.

$$Z_0 = v A \left(\frac{1}{(1+r^2)} - j \frac{r}{(1+r^2)} \right)$$

단, $r = \frac{av}{\omega}$

길이가 L인 전송선에서 반사를 고려하면 특성 음향 임피던스는 어떤 위치에서의 입자속도에 대한 응력의 비로서 다음식으로 표현된다.

$$Z = Z_0 \left[\frac{Z_L + Z_0 \tanh(\theta h)}{Z_0 + Z_L \tanh(\theta h)} \right]$$

PZT 압전세라믹의 음향임피던스는 $12.6 \times 10^6 \text{Kg/m}^2\text{sec}$ 인 반면 PVDF 고분자 압전재료의 음향임피던스는 $4.02 \times 10^6 \text{Kg/m}^2\text{sec}$ 이고 물의 음향 임피던스는 $1.5 \times 10^6 \text{kg/m}^2\text{sec}$ 로서 이들을 수중에서 사용시 압전재료와 음향매질과는 임피던스의 큰 차이가 있다. 음파가 전달될때 두 매질의 음향 임피던스차가 크면 클수록 두 매질의 경계면에서 음파의 반사가 크게 일어나게 되어^{2,3} 에너지의 전달이 효과적으로 이루어 지지 못하게 되므로 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 두매질의 사이에 임피던스 $Z_1 = (Z \times Z_L)^{1/2}$ 인 matching 층을 넣어 이를 개선^{5,6,7,8}하여야 한다

트랜스듀서의 제작 및 측정

제작

초음파 변환기의 제작을 위해 고분자 압전재료인 $\alpha + \beta$ 형 PVDF 필름을 이용하였으며 제조공정도를 Fig. 2에 나타내었다.

본 실험에 사용된 PVDF 필름은 강유전성 고분자 ($\omega_r = 12$)이고⁹ 압전계수가 고분자 압전재료중 가장 큰($d_{33} = 20 \text{PC/Nm}$) 재료이다.

$\alpha + \beta$ 형 PVDF 시료는 2축 연신 처리된 것으로 두께 $18\mu\text{m}$ 와 $25\mu\text{m}$ 의 두가지 시료를 $3 \times 3 \text{ cm}$ 의 크기로 절단하여 필름의 한쪽면에 전극을 부착하였다. 전극은 상온용 도전성 실버페이스트(silver paste)를 이용하여 조건에 따라 직경을 16 mm 또는 22 mm 의 원형으로 도포하였다. 상온에서 30분 이상 건조시킨 시료는 전극을 부착한 면이 코로나 방전장치의 하부 전극쪽으로 향하도록 하고 전극을 도포하지 않은 쪽이 상부의 침전극쪽으로 향하도록 설치한 후 DC 10 KV의 고전압을 인가하여 코로나 분극을 시켰다. 코로나 분극방법¹⁰은 전기적으로 직접 시료와 접촉시키지 않고 전압을 인가하기 때문에 절연파괴를 일으키지 않고 보다 높은 전압을 인가할 수 있으며, 보다 짧은 시간에 시료의 분극화가 가능하기 때문에 자주 이용되고 있는 분극방법이다. 분극처리는 상온에서 10분간 하였으며 분극이 끝난 후 전극을 도포하지 않은 반대쪽의 상부면에도 전극을 도포하였다.

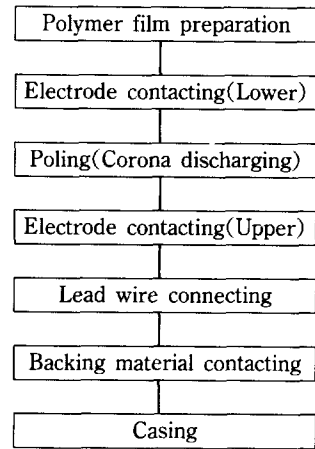


Fig. 2. Block diagram of fabrication process.

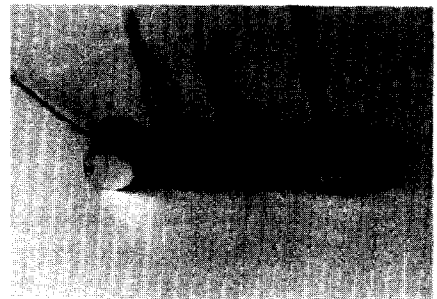


Photo. 1. Photography of fabricated transducer.

이와 같은 과정이 끝난 후 시료를 직경 22 mm 의 원통형 파이프의 한쪽에 부착하여 고정 시켰으며, 실험조건에 따라 진동자의 후면에 backing 재료로서 PMMA, epoxy 등을 접착하였다. 리드선으로는 직경 0.12 mm 의 동선을 실버페이스트를 이용하여 전극과 접속시킨후 진동에 의해 리드선과 진동자와의 전기적인 접속이 나빠지는 것을 방지하기 위해 접착제를 이용하여 견고히 고정시켰다.

측정

펄스 폭을 50 ns -수 ms 까지 변화시킬 수 있는 펄스발생기(Pulse generator)를 이용하여 본 실험에서 제작한 변환기에 임펄스를 가한 후 역압전효과에 의해 압전진동자의 양 전극에 발생하는 응답파형을 storage 오실로스코프를 이용하여 관측 조사 하였다.

또한 제작된 초음파 변환기의 특성을 평가를 위하여 주파수 분석장치를 이용, 주파수를 변화시켜가며 임피던스와 위상각을 측정하였다.

결과 및 고찰

압전체에 임펄스를 가하면 압전막은 압전현상에 의해 물리적 응력이 발생하고 그 응력에 의해 변형이 발생하게 된다(역압전효과). 이때 압전체에 발생한 변형은 정압전 효과에 의해 다시 전극 표면에 전하가 발생하여 전압의 형태로 검출되어 오실로스코프상에 압전막의 진동형태가 나타나게 된다. 이와 같은 펄스 응답특성 시험은 의료용 초음파 변환기의 설계시 또는 변환기의 성능 평가 해석에 중요한 방법이 되고 있다.^{3,4}

Fig. 3은 PVDF 필름의 두께가 18 μ m인 시료를 이용하여 전극의 크기를 직경 16 mm로 하여 제작한 시료에 펄스폭 70 ns의 임펄스를 가하였을 경우의 응답 파형이다. 그림에서 초음파 변환기에 인가된 입력 펄스의 크기는 3 V로 화면의 수직축 범위를 벗어나고 또한 입력펄스 폭이 70 ns로 그 상승 시간이 극히 짧아 오실로스코프의 화면상에 희미하게 나타나기 때문에 그림상으로는 잘 나타나지 않고 있다. 그림에서 응답파형은 약 2사이클 후에는 거의 관측할 수 없을 정도로 감쇠되어 가고 있음을 알 수 있으며, 진동주기로 부터 구한 진동주파수는 5.26 MHz로 나타났다. 그림에서 진동의 감쇠가 크게 일어나는 것은 고분자 재료 고유의 탄성 특성에 기인되는 기계적인 손실에 의한 것과 또한 세라믹 재료에 비해 유전체 손실이 큰 PVDF의 전기적인 손실의 상승작용에 기인되는 것으로 추정된다. 펄스방식의 의용 탐촉자의 경우 변환기의 음파가 상당히 지속되는 경우 보다 감쇠가 빨리 일어나는 것이 초음파 영상장치의 해상도 증진에 유리한 것으로 알려지고 있다.^{2,3}

Fig. 4는 시료의 두께가 25 μ m, 전극의 직경이 22 mm인 트랜스 듀서의 펄스응답을 나타낸 것이다. Fig. 4는 Fig. 3과 비교할때 펄스 응답파의 진동주기가 다소 길어짐을 관측할 수 있었으며, 이때 진동

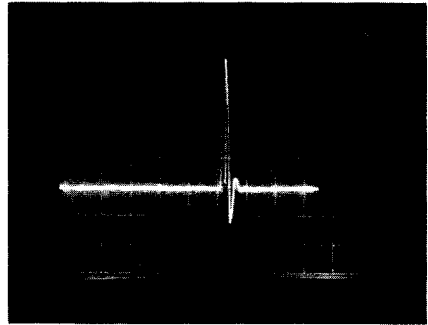


Fig. 3. Pulse response of PVDF transducer(18 μ m, 16 mm). H : 0.5 μ s/div, V : 0.2 V/div.

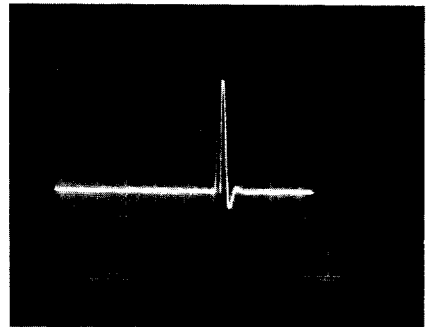


Fig. 4. Pulse response of PVDF transducer (25 μ m, 22 mm). H : 0.5 μ s/div, V : 0.2 V/div.

주기로 부터 구한 진동주파수는 4 MHz였다. 이와 같이 진동주기가 길어지는 원인이 진동자의 두께에 의한 것인가 아니면 전극의 크기에 의한 것인가 확인하기 위하여 시료의 두께가 25 μ m이고, 전극의 직경이 16 mm인 PVDF 필름을 이용하여 변환기를 제작하여 펄스 응답 특성을 조사하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5의 진동특성은 18 μ m, 16 mm의 변환기에 대한 펄스응답 특성인 Fig. 3의 결과와 거의 동일하였다. 즉 압전변환기의 전극직경변화에 따라 진동자의 진동주파수가 변화한다는 사실을 알 수 있으며, 이와같은 사실은 Fig. 6에 나타낸 필름 두께가 18 μ m이고 전극직경이 22 mm인 시료의 응답특성이 Fig. 3의 결과와 일치하는 것으로 부터 확인할 수 있다.

이와 같은 사실로 부터 저주파 대에서 PVDF 압전

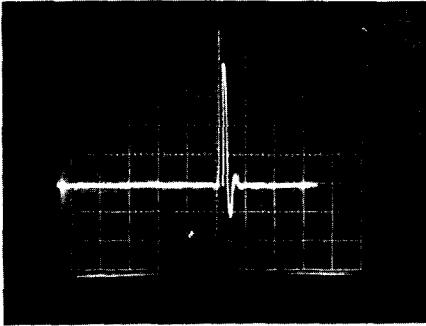


Fig. 5. Pulse response of PVDF transducer(25 μ m, 16 mm). H : 0.5 μ s/div, V : 0.2 V/div.

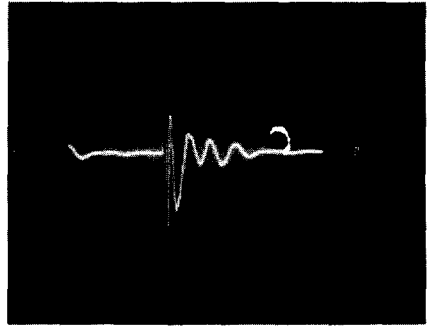


Fig. 7. Pulse response of 2.25 MHz ceramic transducer (electrode diameter : 24 mm). H : 0.5 μ s/div, V : 0.2 V/div.

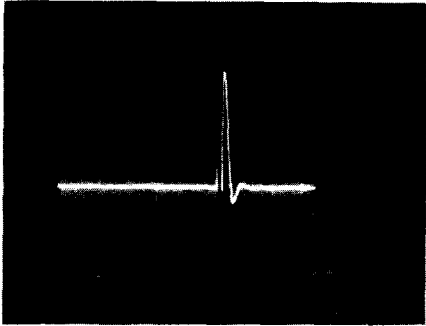


Fig. 6. Pulse response of PVDF transducer(18 μ m, 22 mm). H : 0.5 μ s/div, V : 0.2 V/div.

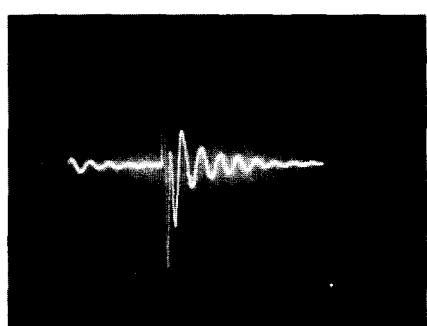


Fig. 8. Pulse response of ceramic transducer with inductor inserted(electrode diameter : 24mm). H : 0.5 μ s/div, V : 0.2 V/div.

진동자의 진동모드¹¹는 radial mode 인 것을 알 수 있었다.

PVDF 변환기의 펄스 응답파형과 세라믹 변환기와의 펄스 응답파형과 비교하기 위하여 비파괴 검사용 장비에 사용되고 있는 상업용의 2.25 MHz 세라믹 변환기의 펄스 응답파형을 관측하여 Fig. 7 에 나타내었다. 세라믹 압전 변환기의 경우 응답파의 진동(ringing)이 고분자 압전재료인 PVDF의 경우보다 상당히 길어지고 또한 파형에 많은 왜곡이 나타남을 관측할 수 있었다.

세라믹 변환기의 진동이 수사이클 동안 계속되는 현상은 초음파 영상장치에서 해상도를 높이기 위해 높은 주파수의 펄스 신호원을 사용할 경우 각 펄스에 의한 응답파의 중복이 발생하게 될 것이므로 수 MHz 이상의 높은 주파수대에서 사용할 경우 깊이방향의 해상도에 문제가 됨을 예상할 수 있다. 이와같

이 해상도의 측면에서 보면 고분자 압전 변환기가 세라믹 압전변환기에 비해 유리함을 알 수 있다. 또한 펄스응답파형에서 나타나는 파형의 왜곡은 신호원과 변환기와의 전기적인 임피던스의 매칭이 이루어 지지 않았기 때문으로 변환기에 병렬로 인덕터를 삽입하여 임피던스 매칭을 개선시키면 왜곡 특성이 사라지고 또한 응답파의 진동주기도 길어짐을 Fig. 8 을 통하여 관측할 수 있다. 이때 압전진동자의 진동주기가 길어지는 특성은 본 실험에서 제작한 PVDF 압전진동자의 경우에서도 인덕터를 삽입하면 진동주기가 길어짐을 관측할 수 있었다. 이것은 인덕터가 기계적으로 damper와 같은 성질을 갖기 때문으로 추정할 수 있다. 이와 같은 사실로부터 초음파 변환기의 동작 특성은 음향 임피던스의 매칭뿐만 아니라 전기적인 임피던스의 매칭도 고려해야

함을 알 수 있다.

임피던스 분석장치를 이용하여 주파수를 변화시켜 가며 압전진동자의 두께가 18 μm 이고 전극의 크기가 16 mm, 22 mm인 초음파 변환기의 전기 임피던스를 측정하여 Fig. 9 에 도시하였다.

전기 임피던스는 두 시료 모두 주파수가 증가함에 따라 점차 감소하다가 최저 피크를 나타낸 후 다시 증가하였다. 전극직경이 22 mm인 변환기의 최저 임피던스를 나타내는 주파수범위는 4.7 MHz이고 임피던스 최저값은 12.8[Ω]인 반면 전극직경이 16 mm

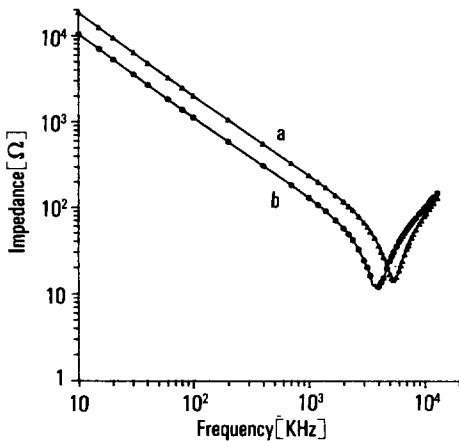


Fig. 9. Electrical impedance of PVDF transducer vs. frequency. Electrode size ; a : 16 mm, b : 22 mm.

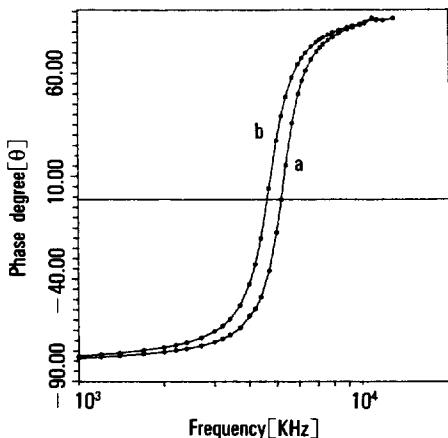


Fig. 10. Phase angle of PVDF transducer vs. frequency. Electrode size ; a : 16 mm, b : 22 mm.

인 필름으로 제작된 트랜스 듀서의 최저 임피던스를 나타내는 주파수범위는 6.7 MHz이고, 그때의 임피던스는 16.9[Ω]이 되었다. 이들 주파수대가 변환기의 직렬 공진점으로 생각되며 임피던스의 최저값을 나타내는 주파수와 임피던스값은 변환기에 사용된 압전필름의 두께, 전극면적 분극조건등에 따라 각각 다른 값을 나타내었다.

Fig. 10은 주파수를 변화시켜 가며 PVDF 변환기의 위상각 변화를 측정한 결과이다. 변환기의 위상각은 저주파수에서 트랜스 듀서 자체의 capacitance에 의한 용량성 리액턴스 성분에 의해 -80° 정도의 값을 나타내지만 주파수가 증가함에 따라 점차 감소하여 0으로 되며 위상각이 0으로 되는 점에서 Fig. 9의 임피던스값이 최저치를 나타내는 주파수와 거의 일치하였다. 즉 이 주파수 범위에서 압전진동자가 공진을 일으키기 때문으로 볼 수 있다. 각 변환기의 위상각은 전극크기에 따라 위상각이 0으로 되는 주파수도 각각 다르게 나타났다.

주파수를 증가시켜 감에 따라 유도성 리액턴스가 용량성 리액턴스보다 커져, 위상각은 + 값으로 변화하여 점차 증가하였으며 이에 따라 변환기의 임피던스도 다시 증가하는 것을 관측할 수 있었으며 이 주파수 범위가 본실험에서 제작한 초음파 변화기의 중심 동작 주파수임을 예측할 수 있다.

초음파변환기의 손실은 크게 매칭손과 변환손으로 구별되며 매칭손은 소스와 초음파 변환기와의 임피던스의 미스매칭에 의해 일어나는 손실로서 매칭손은 소스로부터 이용가능한 최대 에너지와 소스로부터 초음파변환기에 유입되는 에너지의 비로서 다음 식으로 표현된다.⁵

$$ML = -10\text{LOG}(p_r/p_o)$$

$$= -10\text{LOG} \frac{4\text{Re}(Z_s)\text{Re}(Z_t)}{|Z_s + Z_t|^2}$$

단, Z_s 는 소스의 임피던스이고 Z_t 는 초음파 변화기의 임피던스이며 위의 식의 분자에서 Re 는 실수부를 의미한다.

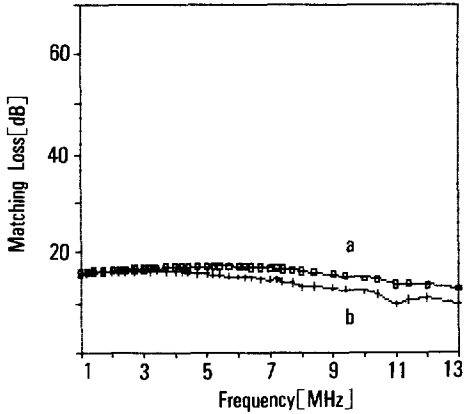


Fig. 11. Transducer matching loss calculated from electrical impedance and reactance vs. frequency. Electrode size ; a : 16 mm, b : 22 mm.

Fig. 11은 소스의 임피던스가 $50[\Omega]$ 일 경우로 가정하여 Fig. 9와 Fig. 10의 임피던스와 위상각으로부터 초음파 변환기의 매칭 손실을 이론적으로 계산하여 나타낸 것이다.

a), b) 변환기 모두 매칭손실의 주파수 특성은 주파수가 증가함에 따라 약간 증가하다가 점차 감소하는 경향을 나타내고 있으나 주파수에 따라 그다지 큰 변화는 나타내지 않고 있음을 알 수 있다. 공진 주파수 범위에서 일어나는 매칭손실은 a) 변환기의 경우 공진주파수 6.7 MHz 범위에서 17.03[dB]이며 b) 변환기의 경우 4.7 MHz 에서 16.1[dB]의 크기이다. 따라서 이와 같은 매칭 손실을 줄이기 위해서는 임피던스 매칭 회로를 부가할 경우 성능 개선의 여지가 있음을 보여주고 있다.

이상은 고분자 재료인 PVDF 필름을 이용하여 초음파 변환기를 제작하여 펄스 응답특성과 주파수 변화에 대한 임피던스 특성을 조사한 결과로서 전극재료 또는 backing 재료에 따른 초음파 변환기의 특성 변화에 대하여 보다 깊은 연구를 하여 추후 보고할 예정이다.

결 론

1. PVDF의 펄스응답 특성은 세라믹 변환기에 비해 감쇠가 매우 빨리 일어나며 이와 같은 특성은

의용 초음파 영상장치용 진동자에 적합함을 알았다.

2. 펄스 응답특성에서 PVDF의 진동주파수는 전극의 크기에 따라 달라짐을 알 수 있었으며 이와 같은 사실로부터 low MHz 대에서의 PVDF 압전재료의 진동모드는 radial mode임을 알 수 있었다.

3. PVDF의 펄스응답파형은 인덕터를 삽입하면 응답파의 진동주기가 길어짐을 알 수 있으며 또한 파형의 왜곡현상을 개선할 수 있다.

본 연구는 인하대학교 1992년도 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

1. R. Y. Ting, *Ferroelectrics*, **67**, 143 (1986).
2. R. E. Newnham, A. Safari, G. Sa-gong, and J. Giniewicz, *Ultrasonics Symposium*, 501 (1984).
3. P. N. T. Wells, "Biomedical Ultrasonics", pp. 145-282, Academic Press Inc, London, 82, 1977.
4. G. S. Kino, "Acoustic Waves : Devices, Imaging, and Analogy Signal Processing", pp. 27-83, Prentice-hall, Inc. New Jersey, 1987.
5. K. Kimura, N. Hashimoto, and H. Ohigashi, *IEEE Trans. on Sonic and Ultrasonics*, SU-32, No. 4, 566 (1985).
6. LE N. BUI, H. J. Shaw, and L. T. Zitelli, *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics*, SU-24, No. 5, 331 (1977).
7. H. W. Persson and C. H. Herzt, *Ultrasonics*, pp. 83-89 (1985).
8. J.H.GOLL, *IEEE Trans.on Sonics and Ultrasonics*, SU-24, No. 6, 385 (1978).
9. G. M. Sessler, *J.Acoustic Soc. Am.*, 70, No. 6, 1596 (1981).
10. J. Mort and Pfister, "Electronic Properties of Polymers", pp. 111-150, John Wiley and Sons Inc. New York, 1982.
11. 池田拓郎, "壓電材料科學の基礎", pp. 59-82, オーム社, 東京, 1984.