



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

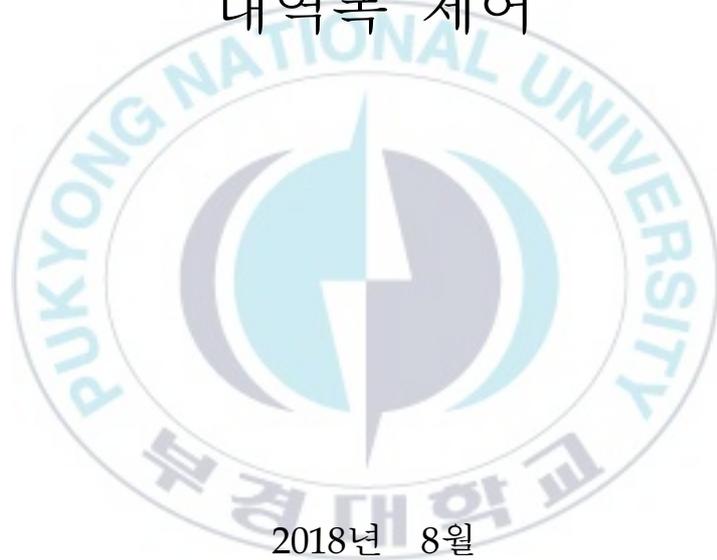
저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이 학 석 사 학 위 논 문

압전배면체를 이용한 초음파 트랜스듀서의
대역폭 제어



2018년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

물 리 학 과

염 지 영

이 학 석 사 학 위 논 문

압전배면체를 이용한 초음파 트랜스듀서의
대역폭 제어

지도교수 김 무 준

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함.

2018년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

물 리 학 과

염 지 영

염지영의 이학석사 학위논문을 인준함.

2018년 8월 24일



위원장 공학박사 하강렬 (인)

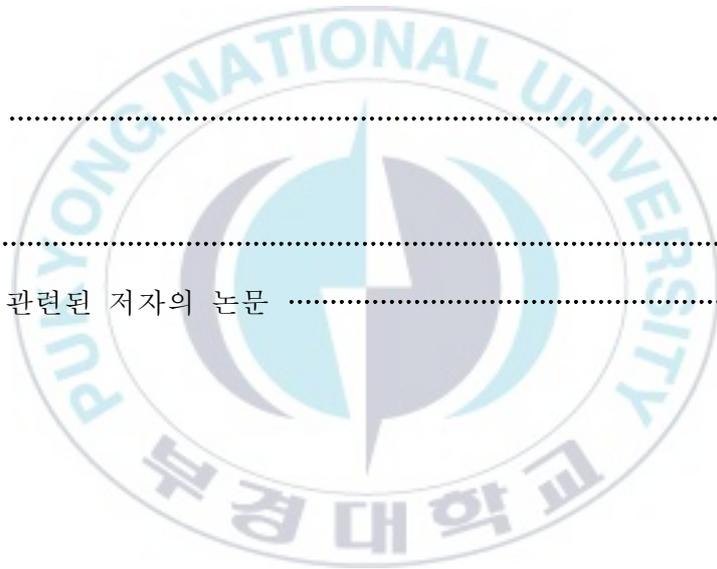
위원 공학박사 김무준 (인)

위원 이학박사 장재원 (인)

목 차

Abstract	vii
I. 서론	1
II. 적층압전체의 등가회로 해석	4
1. Sittig의 이론에 따른 등가회로 해석	4
2. 전달함수	6
III. 압전배면체의 원리	9
1. 압전 효과에 의한 음향에너지 제어	9
2. 광대역 트랜스듀서의 설계 및 특성 해석	13
가. 트랜스듀서의 구조	13
나. 어드미턴스 특성	17
다. 전달함수	22

IV. 트랜스듀서의 제작 및 특성 측정	23
1. 트랜스듀서의 제작	23
2. 트랜스듀서의 특성 측정	30
3. 트랜스듀서의 최적화	34
가. 이론적 해석	34
나. 외부 임피던스가 접속된 압전배면체	36
다. 에폭시 배면층을 가진 PMN-PT 트랜스듀서	46
V. 결론	53
참고문헌	55
본 연구와 관련된 저자의 논문	59



<표 목차>

표 1. 계산에 사용한 물리정수	17
표 2. PMN-PT [001] 결정축의 물성치	24



〈그림 목차〉

그림 1. 압전진동자의 Mason 등가회로	5
그림 2. 변형된 등가회로	6
그림 3. F행렬로 표현된 등가회로	6
그림 4. 압전배면체의 효과	10
그림 5. 압전배면체가 부착된 트랜스듀서의 등가회로	12
그림 6. 제안된 트랜스듀서의 구조	13
그림 7. 제안된 트랜스듀서의 등가회로	14
그림 8. 설계된 트랜스듀서의 변형된 등가회로	15
그림 9. F행렬로 표현된 변형된 등가회로	15
그림 10. 인덕턴스에 의한 입력 어드미턴스 변화 (a)서셉턴스, (b)컨덕턴스	19
그림 11. 저항에 의한 입력 어드미턴스 변화 (a)서셉턴스, (b)컨덕턴스 ...	20
그림 12. 캐패시턴스에 의한 입력 어드미턴스 변화 (a)서셉턴스, (b)컨덕턴스	21
그림 13. 인덕턴스 변화에 따른 전달함수 변화	22
그림 14. PMN-PT의 형상	23
그림 15. 구동압전체의 입력 어드미턴스 특성 (a)측정 결과, (b)계산결과·	26
그림 16. 압전배면체의 입력 어드미턴스 특성 (a)측정 결과, (b)계산결과·	27
그림 17. 제작된 트랜스듀서	29
그림 18. 제작된 트랜스듀서의 측정된 입력 어드미턴스 특성 (a)압전배면체 의 전기단이 개방된 경우, (b)압전배면체의 전기단이 단락된 경우	32
그림 19. 제작된 트랜스듀서의 계산된 입력 어드미턴스 특성 (a)압전배면체	

의 전기단이 개방된 경우, (b)압전배면체의 전기단이 단락된 경우	33
그림 20. 저항 50 Ω 과 인덕턴스 변화에 따른 전달함수 변화	35
그림 21. 인덕턴스 6 μH 와 저항 변화에 따른 전달함수 변화	35
그림 22. 최적 임피던스가 접속된 입력 어드미턴스 특성 (a)측정 결과, (b)계 산 결과	37
그림 23. 펄스에코 모식도	39
그림 24. 트랜스듀서에 인가한 입력펄스	40
그림 25. 압전배면체의 전기단이 개방상태인 경우의 수신파형	41
그림 26. 압전배면체의 전기단이 개방상태인 경우의 트랜스듀서의 전달함수 특성	41
그림 27. 압전배면체의 전기단이 단락 상태인 경우의 수신파형	43
그림 28. 압전배면체의 전기단이 단락 상태인 경우의 트랜스듀서의 전달함수 특성	43
그림 29. 압전배면체의 전기단에 최적 임피던스가 접속된 경우의 수신파형	45
그림 30. 압전배면체의 전기단에 저항 42 Ω , 인덕턴스 5.7 μH 를 접속한 경 우의 트랜스듀서의 전달함수 특성	45
그림 31. 에폭시 배면층을 가지는 트랜스듀서	46
그림 32. 구동압전체로 사용된 PMN-PT 압전진동자의 입력 어드미턴스 (a) 측정 결과, (b)계산 결과	47
그림 33. 에폭시 배면층을 가진 트랜스듀서의 입력 어드미턴스 특성 (a)측정 결과, (b)계산 결과	49
그림 34. 에폭시 배면층 트랜스듀서의 수신파형	51
그림 35. 에폭시 배면층을 가지는 트랜스듀서의 전달함수 특성	51

그림 36. 수신파의 진폭 비교 53
그림 37. 에폭시 배면층의 경우를 기준으로 규격화된 전달함수 특성 53



Frequency Bandwidth Control of Ultrasonic Transducer with Piezoelectric Backing Layer.

Jiyoung Yeom

Department of Physics, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

A study on the broadband characteristics of ultrasonic transducers has been reported by many researchers. Many of these studies have used the sound absorption and scattering effects by the backing layer attached to the back surface of the piezoelectric vibrator. These methods, which control the impedance and scattering effect of the backing layer with mixing the thermosetting resin and the metal particles, are required to be thick enough for the sound absorption effect. However, these methods are not suitable for the transducers needing thin thickness, such as insertion type ultrasonic diagnosis probes for human body. In this study, we propose a transducer with thin thickness and broadband characteristics using piezoelectric backing layer. The mechanical energy generated from the driving piezoelectric vibrator can be converted into the electrical energy by the direct piezoelectric effect in the piezoelectric backing

layer and consumed and controlled by the electrical impedance connected to the electrical terminals of the piezoelectric backing layer. In order to obtain the theoretical analysis method, a calculation method with the equivalent circuit was derived for the analysis of the input admittance and the transfer function of the transducer. As a result of the theoretical analysis of the effect of the electrical impedance connected to the electrical terminals of the piezoelectric backing layer, it was confirmed that the range of the mechanical characteristic change was the largest when the electrical impedance was inductance. The ultrasonic transducer fabricated on the basis of the theoretical analysis results has the thickness about three times as large as the driving piezoelectric vibrator. From the results of the input admittance characteristics, the frequency of the fundamental resonance mode was changed in range of 59%. In order to determine the optimum external impedance to be connected to the electrical terminals of piezoelectric backing layer, the optimum impedance range was obtained based on the optimization by the theoretical analysis. It was confirmed that the -6 dB bandwidth of the fabricated transducer could be widened to about 55% by applying the optimized impedance. The suggested ultrasonic transducer with piezoelectric backing layer in this study could be expected to be applicable not only in the field of medical diagnosis but also in many ultrasonic industries such as nondestructive testing and underwater wireless communication system.

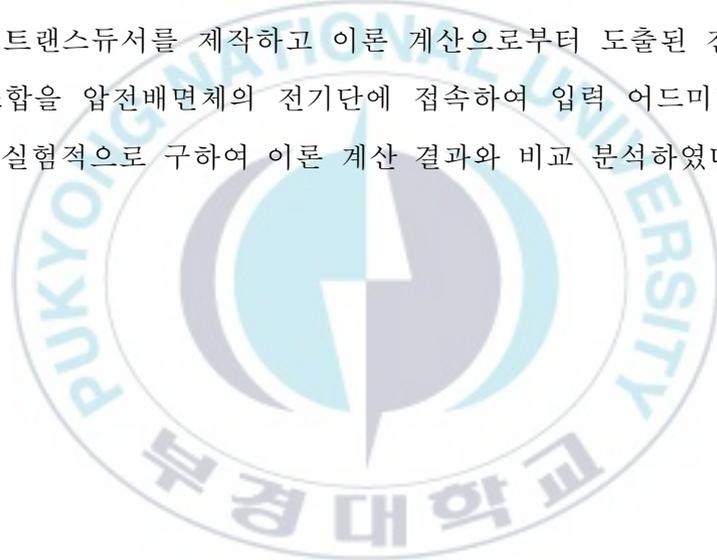
I. 서론

초음파 트랜스듀서는 수중초음파 탐사, 초음파 비파괴 검사 및 의용 초음파 진단 등 다양한 분야에서 사용되고 있다 [1~4]. 일반적으로 사용되는 초음파 트랜스듀서는 압전 효과를 사용하여 전기적인 신호를 음향신호로 혹은 음향신호를 전기적인 신호로 변환하여 초음파의 송신 및 수신을 수행하게 된다. 초음파 펄스를 이용한 음향매질 내부의 정보 취득에 있어서 높은 거리분해능을 위해서는 짧은 펄스가 요구되어 진다 [5, 6]. 짧은 펄스의 송수신을 위해서는 넓은 주파수 대역에서 전기-음향 변환능력이 있는 광대역 주파수 특성을 갖는 트랜스듀서가 요구된다 [7, 8]. 광대역 초음파 트랜스듀서의 특성 구현을 위한 연구는 많은 학자들에 의해 수행되어왔다. 그 중 많은 연구가 압전진동자의 후면에서 발생 및 반사되어 전면으로 진행되는 기계적 펄스를 후면에 부착된 배면층에 의해 흡수 및 산란시켜 전면으로 방사되는 펄스와의 간섭을 억제하는 방법이다 [9, 10]. 이 경우 이상적인 배면층은 구동진동자와 임피던스가 같아 구동진동자와 배면층의 경계에서 반사 없이 진행하고 배면층의 두께가 무한하여 배면매질로부터 반사파가 존재하지 않아야 한다. 하지만 이상적인 배면층은 현실적으로 존재할 수 없기 때문에 배면층에 감쇠효과를 더해 두께를 줄이고 열경화성 수지와 금속입자를 혼합하여 요구되는 임피던스의 배면층을 제작하는 것에 대한 연구가 진행되고 있다. 이러한 특성을 갖는 배면층은 여러 가지 방법으로 고안되고 제작되어왔는데 R. Zhang 등에 의해 제안된 배면층은 에폭시 수지에 알루미늄 분말 혼합하여 제작함으로써 입자에 의한 산란을 이용한 감쇠효과를 이용하고 알루미늄 비율을 14 ~ 32%로 변화시켜 그에 따른 밀도와 임피던스 변화를 확인하여 구동진

동자의 임피던스와 유사하게 제작하고자 하였다 [11]. 또한 M.G. Grewe 등에 의해 이루어진 연구 역시 에폭시 수지와 알루미늄 또는 텅스텐 분말을 혼합하여 입자에 의한 산란과 분말의 크기에 따른 임피던스 변화를 연구하였다 [12]. 이 외에도 많은 학자들이 수행한 배면층 제작에 관한 연구는 금속분말에 의한 산란이 이용되었고 흡음의 효과를 위해 충분히 두꺼운 두께로 만들어졌다 [13~15]. 그러나 이러한 배면층과 같이 목적하는 흡음효과를 얻기 위해 충분한 두께로 제작되는 경우 트랜스듀서의 두께가 두꺼워지는 결과를 가져온다. 이같이 두꺼운 두께를 가지는 트랜스듀서의 경우, 인체내부나 좁은 틈새에 삽입이 어려워 그 활용이 제한된다. 최근 진단효과를 높이기 위해 식도, 위, 십이지장 및 질 등에 삽입하여 사용하는 삽입용 초음파 프로브가 개발되어 있으며 여기에 사용되는 초음파 트랜스듀서는 광대역 특성과 두께가 얇아야 한다는 상충된 조건을 만족해야만 한다 [16, 17].

본 연구에서는 배면층이 얇으면서 광대역 특성을 가지는 트랜스듀서를 제안한다. 제안하는 트랜스듀서는 기존에 사용되던 두꺼운 배면층이 아닌 구동압전체와 유사한 압전체를 배면층으로 사용하여 트랜스듀서의 주파수 대역을 제어함으로써 비교적 얇은 두께로 광대역의 특성을 지니는 초음파 트랜스듀서의 제작 가능성을 확인한다. 압전체를 배면층으로 사용하게 되면 구동진동자로부터 발생된 기계적인 에너지가 압전배면체의 압전 효과에 의해 전기에너지로 변환되어진다. 변환된 전기에너지는 전기단에 접속된 전기적인 임피던스에 의해 소모 및 제어 될 수 있다 [18~20]. 따라서 산란이나 흡음이 아닌 압전효과로써 배면층의 역할이 가능하게 된다. 본 연구에서는 이와 같은 현상을 이용한 광대역 초음파 트랜스듀서 설계 가능성을 확인하기 위하여 다음과 같이 이론 및 실험적 고찰을 수행하였다. 우선 이론적인 해석방법을 확립하기 위하여 Mason 등가회로를

바탕으로 한 압전 초음파 트랜스듀서의 입력 어드미턴스 및 전달함수의 계산 방법을 고찰하였다 [21, 22]. 확립된 해석방법을 이용하여 압전배면체의 전기단에 접속된 전기적인 임피던스 변화에 따른 입력 어드미턴스 및 전달함수 특성 변화를 해석하였으며 이를 바탕으로 압전배면체를 가진 광대역 초음파 트랜스듀서를 설계하였다. 설계된 초음파 트랜스듀서의 최적화 특성을 도출하기 위하여 도출된 이론적인 해석방법을 통하여 압전배면체의 전기단에 접속한 전기적 임피던스의 종류 및 값의 범위에 따라 변화하는 각 공진 주파수의 변화 범위를 계산하여 도출하였다. 설계된 초음파 트랜스듀서를 제작하고 이론 계산으로부터 도출된 전기적 임피던스의 조합을 압전배면체의 전기단에 접속하여 입력 어드미턴스 및 전달함수를 실험적으로 구하여 이론 계산 결과와 비교 분석하였다.



II. 적층압전체의 등가회로 해석

1. Sittig의 이론에 따른 등가회로 해석

트랜스듀서를 해석하는 기본적인 방법은 등가회로를 이용하는 방법이다. 여러 가지 해석방법이 있지만, 본 논문에서는 Mason의 등가회로를 Sittig의 이론을 바탕으로 해석한다. 음향매질과 배면매질을 가지는 단일 압전진동자를 등가회로로 나타내면 그림 1과 같다. 여기서 압전체의 밀도, 음속, 단면적, 두께, 유전율 및 압전 상수를 ρ_p , c_p , S , l_p , ϵ_p^S 및 e_p 라 두면 회로내의 각 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_1 = jZ_{p0} \tan \frac{\gamma_p}{2}, \quad Z_2 = -jZ_{p0} \operatorname{csc} \gamma_p. \quad (1)$$

단, $Z_{p0} = \rho_p c_p S$, $\gamma_p = \frac{\omega}{c_p} l_p$ 이다. 또한, 제동용량 및 권선비는 다음과 같이 주어진다.

$$C_{0p} = \frac{\epsilon_p^S S}{l_p}, \quad \phi_p = \frac{e_p S}{l_p}. \quad (2)$$

Z_i 는 전원의 내부저항이며 배면매질 및 음향매질의 밀도와 음속을 ρ_{0b} , c_{0b} , ρ_{md} , c_{md} 라 할 때, 배면매질 및 음향매질의 기계 임피던스는 각각 다음과 같다.

$$Z_{b0} = \rho_{b0}c_{b0}S, \quad Z_{md} = \rho_{md}c_{md}S. \quad (3)$$

F 및 v 는 전기단에 전압 V 와 전류 I 가 입력될 때, 음향단에 나타나는 힘 및 입자속도이다.

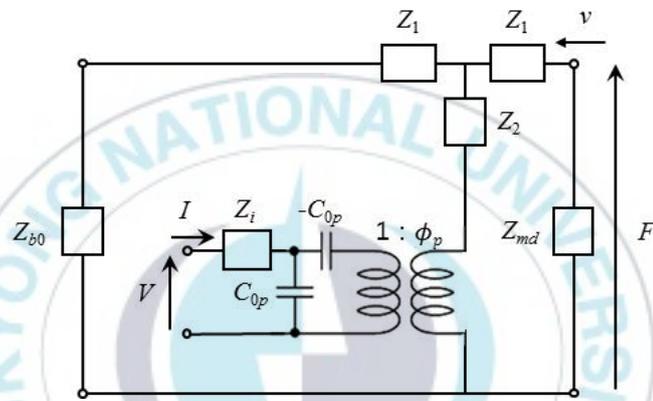


그림 1. 압전진동자의 Mason 등가회로

이 등가회로의 전기 단자에 나타나는 임피던스는 간단한 회로 해석을 통하여 손쉽게 구할 수 있으며 이 임피던스의 역수를 구함으로써 입력 어드미턴스의 특성을 구할 수 있게 된다.

2. 전달 함수

전달함수란 전기적인 입력에 대한 음향 출력의 비를 나타낸 것으로 주파수 응답을 나타낸다. 전달 함수를 구하기 위해 그림 1의 등가회로를 전기입력단과 음향출력단의 형태로 변형하면 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 그림 2의 등가회로를 4단자회로망으로 표현하고 F행렬로 나타내면 그림 3과 같다.

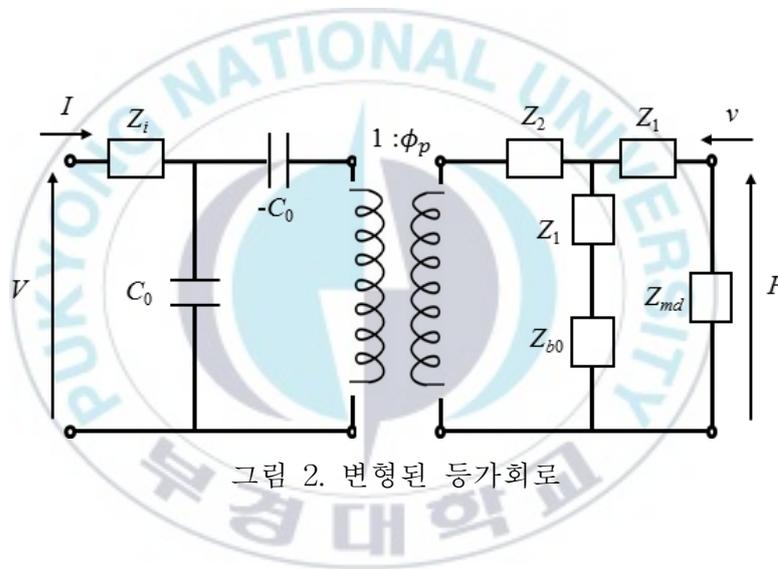


그림 2. 변형된 등가회로

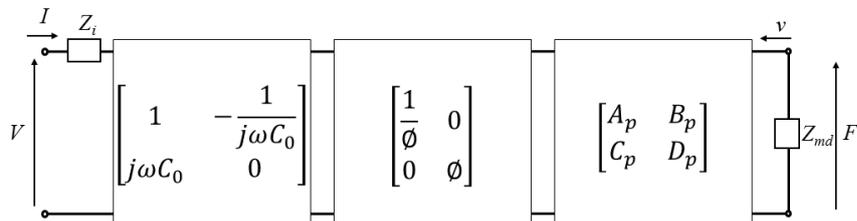


그림 3. F행렬로 표현된 등가회로

이때, 행렬의 요소는 다음과 같다.

$$A_p = 1 + \frac{Z_1}{Z_2 + Z_{bt}}, B_p = \frac{Z_1^2 + 2Z_1(Z_2 + Z_{bt})}{Z_2 + Z_{bt}},$$

$$C_p = \frac{1}{Z_2 + Z_{bt}}, D_p = 1 + \frac{Z_1}{Z_2 + Z_{bt}}. \quad (4)$$

따라서 전기입력과 음향출력의 관계는 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ v \end{bmatrix}. \quad (5)$$

여기서 A, B, C, D 는 그림 3으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{j\omega C_0} \\ j\omega C_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \phi & \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_p & B_p \\ C_p & D_p \end{bmatrix}. \quad (6)$$

음향매질의 기계 임피던스가 Z_{md} 이므로 $\frac{F}{v} = Z_{md}$ 가 되어 이 관계를 식

(5)에 적용한 후 입력 어드미턴스를 구하면 다음과 같다.

$$Y = \frac{I}{V} = \frac{AF + Bv}{CF + Dv} = \frac{CZ_{md} + D}{AZ_{md} + B}. \quad (7)$$

전달함수는 식 (5)의 행렬식으로 부터 전기입력과 음향출력의 비를 구하면 다음과 같이 구해진다.

$$H_p = \frac{F}{V} = \frac{1}{A + CZ_i + \frac{B + DZ_i}{Z_{md}}}. \quad (8)$$

식 (6)로 부터 구해진 A, B, C, D 를 대입함으로써 압전진동자의 전달함수를 구할 수 있다.



III. 압전배면체의 원리

1. 압전 효과에 의한 음향에너지 제어

압전배면체의 원리를 설명하기 위한 모식도를 그림 4에 나타내었다. 구동압전체(Piezoelectric vibrator)의 전기 단자에 인가된 전기적인 에너지는 압전 역효과에 의해 진동에너지로 변환되어 구동압전체의 전면 및 후면으로 전달되게 된다. 이때, 구동압전체의 후면에 접촉되어있는 압전배면체(Piezoelectric backing layer)는 구동압전체로부터 전달된 기계 에너지를 압전 정효과에 의해 전기적인 에너지로 변환시켜 전기 단자에 전류 및 기전력을 발생시키게 된다. 이때, 변환된 전기적인 에너지가 압전배면체의 전기단에 접속된 전기임피던스 Z_e (External electrical impedance)에 의해 소모 및 제어된다. 그 결과 반사되어 전방의 음향매질(Acoustic medium)로 돌아가는 음향 에너지를 소모 및 제어할 수 있게 된다.

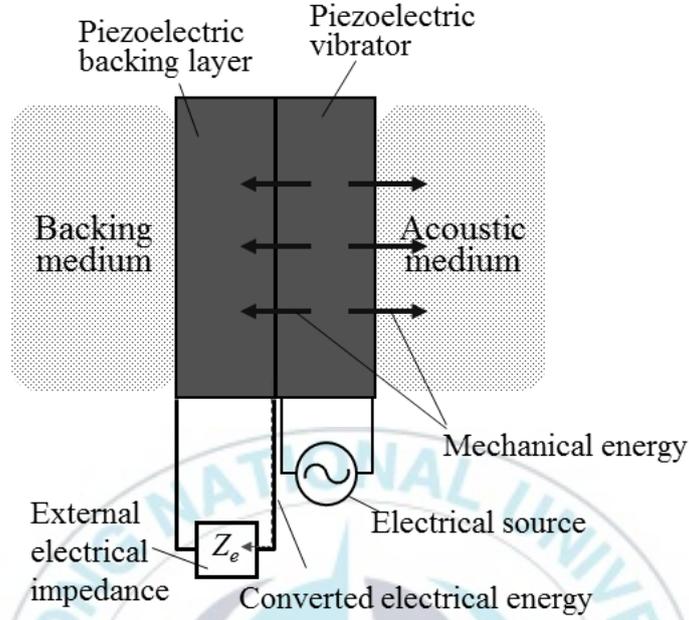


그림 4. 압전배면체의 효과

그림 4를 등가회로로 나타내면 그림 5와 같다. 여기서 압전배면체에 대한 등가회로의 요소들은 첨자 pb 로 구별하여 다음과 같이 표기하였다.

$$Z_{pb1} = jZ_{pb0} \tan \frac{\gamma_{pb}}{2}, \quad Z_{pb2} = -jZ_{pb0} \operatorname{csc} \gamma_{pb}. \quad (9)$$

단, $\gamma_{pb} = \frac{\omega}{c_{pb}} l_{pb}$, $C_{0pb} = \frac{\epsilon_{pb}^S S}{l_{pb}}$, $\phi_{pb} = \frac{e_{pb} S}{l_{pb}}$ 이다.

압전배면체의 전기단에 접속된 전기적인 임피던스 Z_e 에 따른 영향을 해석하기 위해 압전배면체의 전기단의 상태에 의한 기계적인 임피던스를 Z_{ET} 라 두었다. 먼저 Z_e 가 인덕턴스 L_e 를 갖는 인덕터인 경우, 즉

$Z_e = j\omega L_e$ 가 되어 Z_{ET} 는 다음과 같이 계산된다.

$$Z_{ET} = j \frac{1}{\omega C_0} \frac{\phi^2}{1 - \omega^2 C_0 L_e}. \quad (10)$$

여기서 만약 $L_e = \frac{1}{\omega^2 C_0}$ 의 관계를 만족하면 Z_{ET} 는 무한대가 되어 압전 배면체의 기계적인 임피던스는 매우 커지게 된다. 따라서 트랜스듀서의 주파수 특성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 다음으로 Z_e 가 저항 R_e 인 경우 Z_{ET} 다음과 같다.

$$Z_{ET} = \frac{\phi^2}{j\omega C_0 - \omega C_0^2 R_e}. \quad (11)$$

이 경우 R_e 에 따라 변하는 Z_{ET} 의 값의 범위는 다음과 같다.

$$-j \frac{\phi^2}{\omega C_0} \leq Z_{ET} \leq 0. \quad (12)$$

Z_e 가 전기용량 C_e 를 가진 캐패시터인 경우 즉, $Z_e = \frac{1}{j\omega C_e}$ 이 되어 Z_e 는 다음과 같이 계산된다.

$$Z_{ET} = \frac{j\omega C_e \phi^2}{\omega^2 C_0 (C_0 + C_e)}. \quad (13)$$

이 경우 C_e 에 따라 변하는 Z_{ET} 의 값의 범위는 다음과 같다.

$$0 \leq Z_{ET} \leq j \frac{\phi^2}{\omega C_0}. \quad (14)$$

이상으로부터 압전배면체의 전기단에 인덕터를 접속하는 경우가 주파수 특성에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

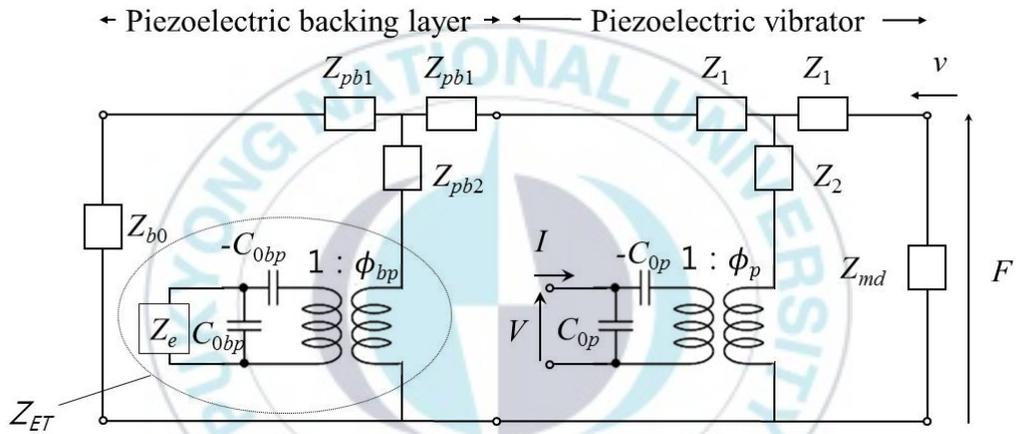


그림 5. 압전배면체가 부착된 트랜스듀서의 등가회로

2. 광대역 트랜스듀서의 설계 및 특성 해석

가. 트랜스듀서의 구조

상술한 압전배면체의 효과를 이용한 광대역 트랜스듀서를 그림 6과 같이 설계하였다. 구동압전체(Piezoelectric vibrator) 및 압전배면체(Piezoelectric backing layer)는 에폭시 접착층(Bonding layer)에 의해 접착되고 구동압전체의 전면에 에폭시 음향 윈도우(Acoustic window) 및 압전배면체 후면에 방수를 위한 에폭시 배면층(Epoxy backing layer)을 두었다. 구동압전체에 구동을 위한 전원을 연결하고, 압전배면체의 전기단에 앞서 설명된 전기적인 임피던스 Z_e 를 접속하였다.

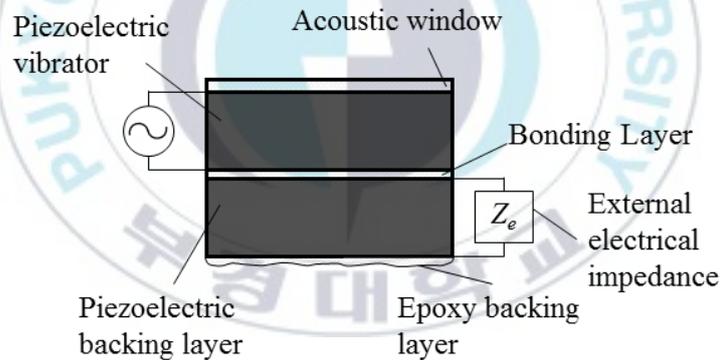


그림 6. 제안된 트랜스듀서의 구조

그림 6의 구조를 등가회로로써 나타내면 그림 7과 같다. 등가회로에 나타난 각 요소들은 음향윈도우는 첨자 aw , 접착층 및 에폭시 배면층은 첨자 a 및 첨자 eb 로 나타낸다.

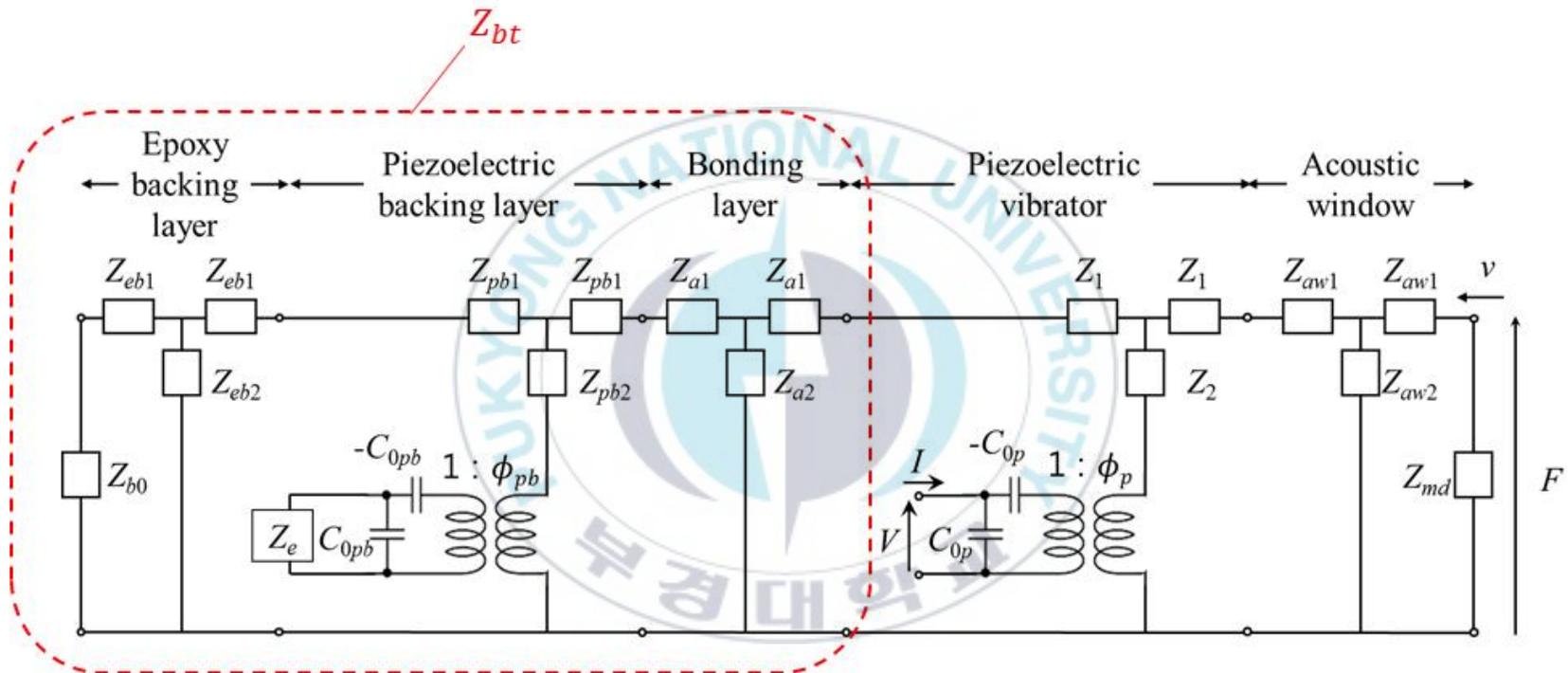


그림 7. 제안된 트랜스듀서의 등가회로

앞서 설명된 이론에 따라 그림 7의 등가회로를 그림 8과 같이 변형할 수 있다. 이때, 그림 7의 점선으로 둘러싼 것과 같이 배면매질과 에폭시 배면층, 압전배면체 그리고 접착층은 결합된 기계 임피던스 Z_{bt} 로 나타내었다.

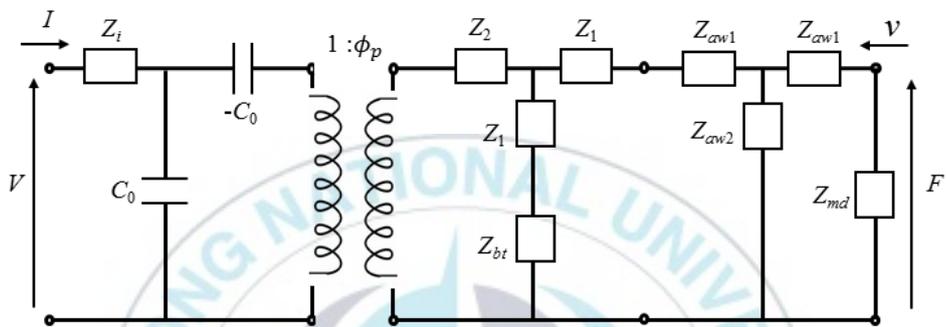


그림 8. 설계된 트랜스듀서의 변형된 등가회로

그림 8의 등가회로를 F행렬로 나타내면, 그림 9와 같다.

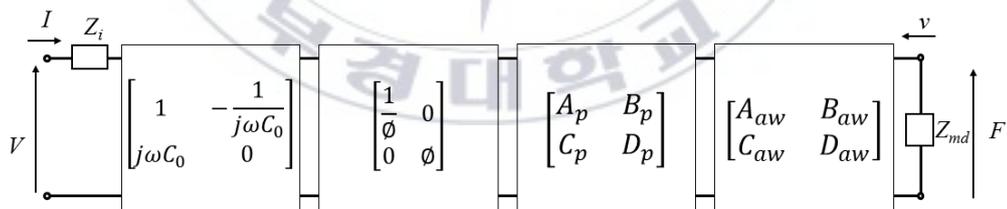


그림 9. F행렬로 표현된 변형된 등가회로

그림 9로부터 전기입력과 음향출력의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{j\omega C_0} \\ j\omega C_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\phi} & 0 \\ 0 & \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_p & B_p \\ C_p & D_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{aw} & B_{aw} \\ C_{aw} & D_{aw} \end{bmatrix}. \quad (15)$$



나. 어드미턴스 특성

압전배면체의 전기단에 접속시킨 전기적 임피던스에 의한 변화를 확인하기 위해 식 (15)에서 구한 A, B, C, D 를 식 (7)에 적용하여 입력 어드미턴스 특성을 계산하였다. 이때, 사용된 물리정수를 표 1에 나타내었다.

표 1. 계산에 사용한 물리정수

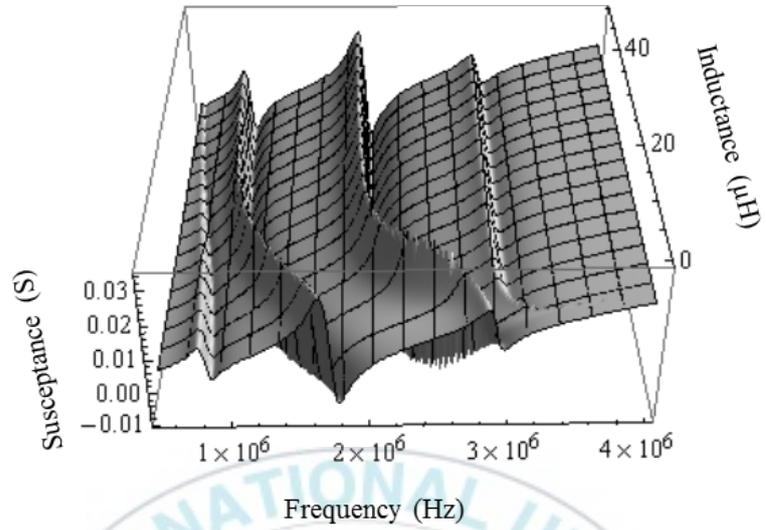
	Piezoelectric vibrator	Piezoelectric backing layer	Epoxy
Width (mm)	10.03	10.03	10.03
Length (mm)	10.04	10.04	10.04
Thickness (mm)	1.010	1.005	0.01
Resonant frequency (MHz)	1.70	1.70	-
Density (kg/m^3)	7477.39	7384.55	1466
Sound velocity (m/s)	4244.67	4177.05	2400
Permittivity (F/m)	1.09×10^{-8}	1.00×10^{-8}	-
Stress constant (C/m^2)	1.34×10^{-11}	1.28×10^{-11}	-
Elastic constant (N/m^2)	22.87	21.97	-
Coupling factor	0.59	0.61	-

그림 10은 트랜스듀서의 압전배면체의 전기단에 인덕터가 연결된 경우 입력 어드미턴스의 계산 결과이다. 이 결과를 보면 인덕턴스가 0 ~ 20 μH 범위에서 변할 때 트랜스듀서의 주파수 특성이 크게 변화함을 알 수 있다. 특히, 두 번째 공진모드의 경우 주어진 인덕턴스의 범위에서 약 1.72 MHz에서 약 0.94 MHz까지의 낮은 주파수 대역으로 변화를 보였으며 세 번째 공진모드의 경우 약 2.91 MHz에서 약 1.96 MHz까지 큰 변화를 보이고 있다.

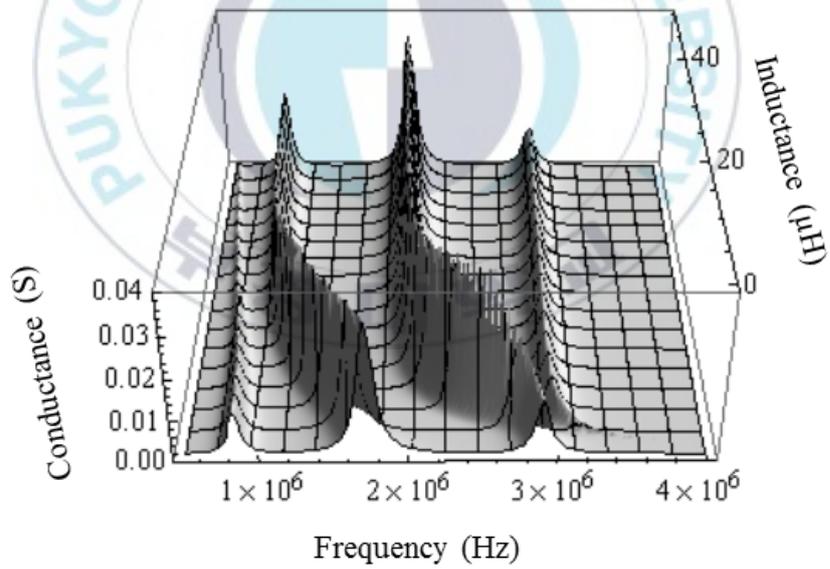
그림 11은 압전배면체의 전기단에 저항이 접속된 경우의 트랜스듀서의 입력 어드미턴스 특성을 계산한 결과이다. 이 결과를 보면 저항의 값이 0 ~ 50 Ω 의 범위에서 변화할 때를 제외하고는 의미 있는 특성변화는 나타나지 않는다.

그림 12는 압전배면체의 전기단에 캐패시터가 접속된 입력 어드미턴스 특성 변화를 나타낸 결과이다. 캐패시턴스를 0 ~ 10 nF 범위로 변화하지만, 캐패시턴스 값이 0 ~ 1 nF의 범위에 대해서만 작은 변화를 보이고, 그 외의 주어진 범위에 대해서는 의미 있는 변화를 보이지 않는다.

이상의 결과를 비교하면, 저항과 캐패시턴스는 1.8 MHz 부근의 공진 모드에서만 영향을 미치고 다른 주파수 영역에서는 큰 변화를 보이지 않는다. 반면 인덕턴스를 접속시킨 경우 식 (10)에서 예측한 것과 같이 다양한 공진모드에서 큰 변화를 확인할 수 있다.

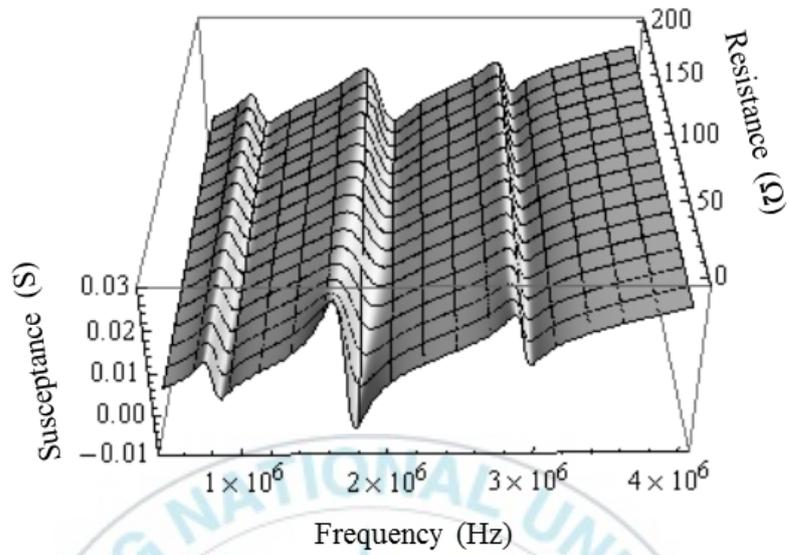


(a)

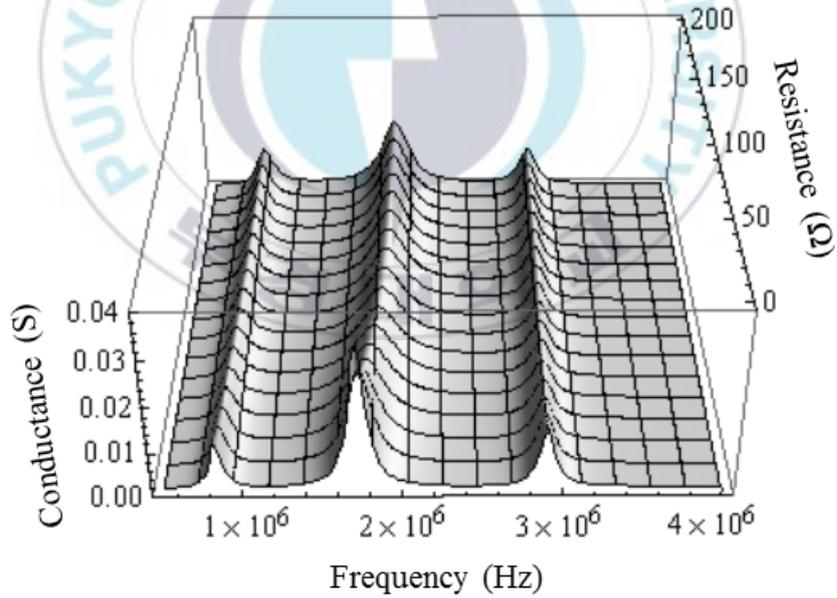


(b)

그림 10. 인덕턴스에 의한 입력 어드미턴스 변화
(a)서셉턴스, (b)컨덕턴스

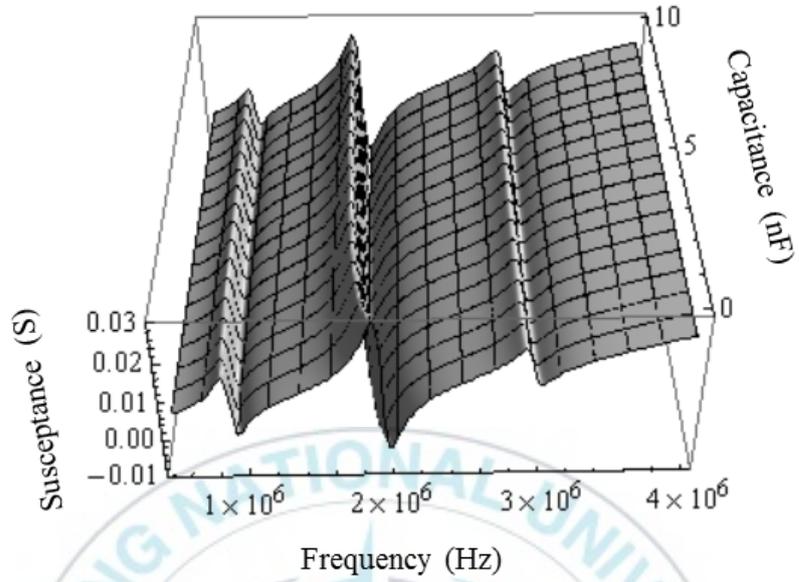


(a)

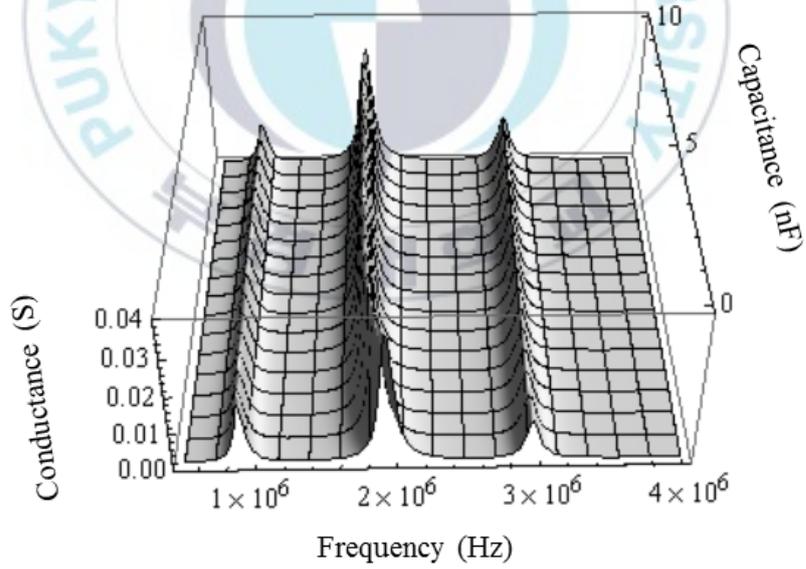


(b)

그림 11. 저항에 의한 어드미턴스 특성 변화
(a)서셉턴스, (b)컨덕턴스



(a)



(b)

그림 12. 캐패시턴스에 의한 어드미턴스 변화
(a)서셉턴스, (b)컨덕턴스

다. 전달함수

전달함수의 특성변화를 확인하기 위해 식 (15)에서 구한 행렬요소를 식 (8)에 대입하여 계산하였다. 이때, 전원의 내부 임피던스 Z_i 는 50 Ω 을 사용하였다. 압전배면체의 전기단에 접속한 임피던스가 인덕터인 경우에 대하여 전달함수 특성을 계산한 결과를 그림 13에 나타내었다. 앞서 계산한 입력 어드미턴스 변화 결과를 바탕으로 인덕턴스의 변화 범위를 0 ~ 20 μH 로 정하였다. 어드미턴스의 결과에서 예상할 수 있듯이 이 범위에서 전달함수 특성도 큰 변화를 보이고 있으며 인덕턴스의 값이 0 ~ 8 μH 인 범위에서 급격한 변화를 보인다. 압전배면체의 전기단에 인덕터와 저항 또는 인덕터와 캐패시터를 접속시키면 더 다양한 전달함수 변화를 보일 것으로 예상할 수 있다.

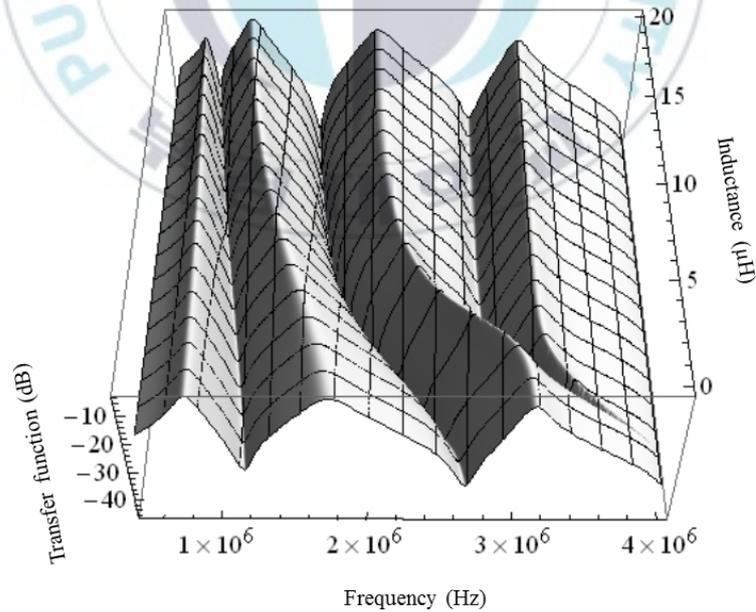


그림 13. 인덕턴스 변화에 따른 전달함수 변화

IV. 트랜스듀서의 제작 및 특성 측정

1. 트랜스듀서의 제작

실험에 사용된 압전진동자는 PMN-PT([001] LCSC145-90, Ceracomp Co., Ltd.) 단결정으로 방사면적이 $10.03 \text{ mm} \times 10.04 \text{ mm}$ 이고 두께가 1.01 mm 이다. 상술한 압전배면체에 의한 트랜스듀서의 특성제어 효과는 압전배면체의 전기-기계 변환효율이 큰 것이 효과적이다. 따라서 본 연구에서는 결합계수 k_t 가 비교적 큰 PMN-PT 단결정을 사용하였다. 그림 14는 사용된 PMN-PT 압전체의 실제 형상을 나타내고 있으며 표 2에 [001] 결정축에 대한 물성치를 나타내었다.

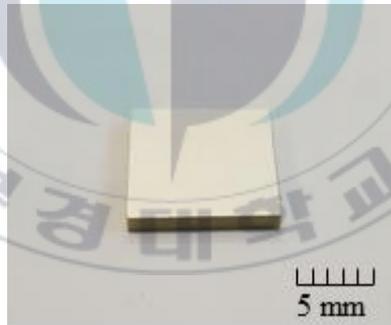


그림 14. PMN-PT의 형상

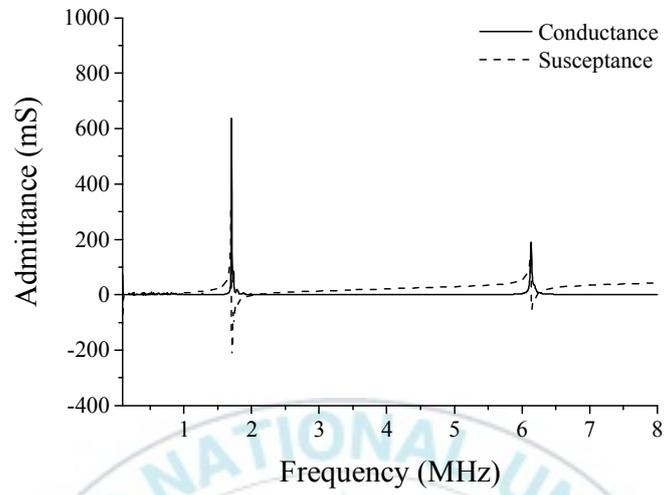
표 2. PMN-PT [001] 결정축의 물성치

Capacitance	C_0 ($\times 10^{-9}$ F)	4.8
Coupling factor	k_t	0.61
Density	ρ (kg/m ³)	7300
Elastic constant	c_{11}^E ($\times 10^9$ N/m ³)	112
	c_{12}^E ($\times 10^9$ N/m ³)	99
	c_{13}^E ($\times 10^9$ N/m ³)	93
	c_{33}^E ($\times 10^9$ N/m ³)	100
	c_{44}^E ($\times 10^9$ N/m ³)	62
	c_{66}^E ($\times 10^9$ N/m ³)	30
Piezoelectric constant	e_{15} (C/m ²)	10.4
	e_{31} (C/m ²)	-4.4
	e_{33} (C/m ²)	22.1
Relative permittivity	$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	1700
	$\epsilon_{22}^T/\epsilon_0$	1700
	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	5700
Mechanical loss	($=1/Q_M$)	0.01
Dielectrical loss	($=\tan\delta$)	0.01

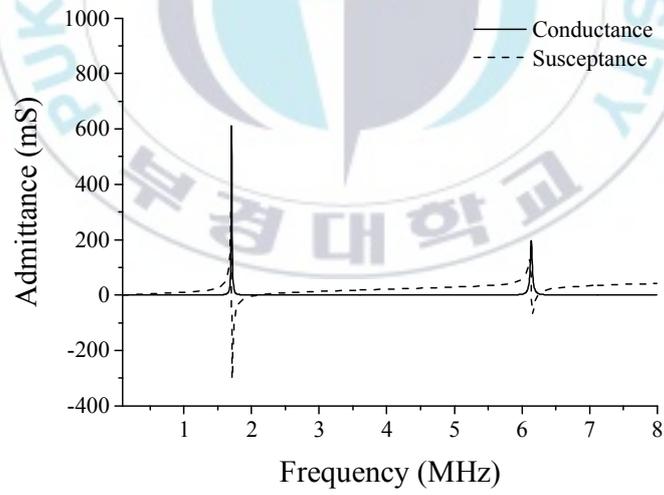
그림 15 (a)는 PMN-PT 구동압전체의 공진 특성을 알기 위해 임피던스 아날라이저(E4990A, Keysight)를 이용하여 0.1 ~ 8.0 MHz의 주파수 범위에서 입력 어드미턴스를 측정된 결과이다. 이 결과로부터 기본 공진 주파수는 1.70 MHz 부근임을 알 수 있다. 구동압전체의 입력 어드미턴스 특성을 이론적으로 계산하기 위해 식 (7)을 사용하여 그림 15 (b)에 나타내

었다. 압전배면체에 대해서도 위와 동일한 방법으로 측정하여 그림 16 (a) 및 그림 16 (b)에 측정 결과 및 계산 결과를 나타내었다.



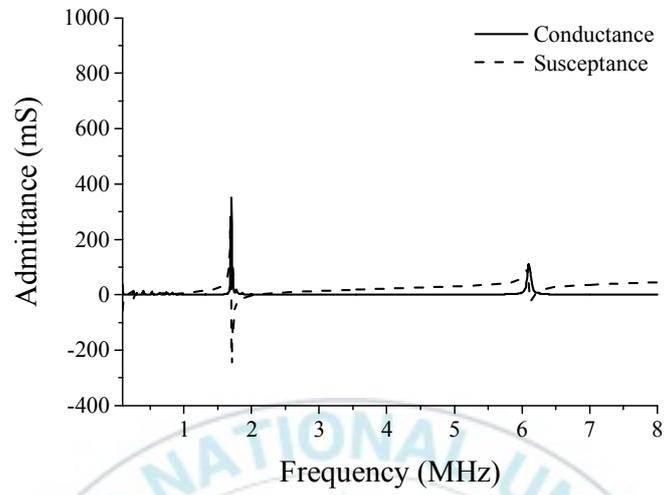


(a)

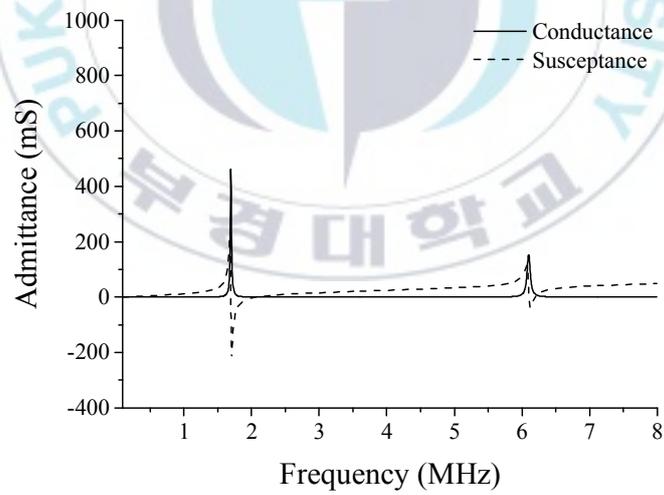


(b)

그림 15. 구동압전체의 입력 어드미턴스 특성
(a)측정 결과, (b)계산 결과



(a)



(b)

그림 16. 압전배면체의 입력 어드미턴스 특성
(a)측정 결과, (b)계산 결과

PMN-PT 구동압전체 및 압전배면체의 입력 어드미턴스를 측정된 결과와 계산된 입력 어드미턴스 결과를 비교하면 계산된 결과와 측정된 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있어 본 연구에서 사용된 등가회로 및 이론 계산모델의 유효성을 확인할 수 있다.

제안된 트랜스듀서를 제작하기 위해 그림 17과 같이 구동압전체의 후면에 압전배면체를 파워에폭시(EP 202, USCHEM Co.LTD)를 사용하여 접착하였다. 이때, 퀵그립(536QCN, SWIM)으로 압력을 가해 접착층의 두께가 최대한 얇아지도록 하였다. 그 상태에서 진공 챔버에서 15분간 탈포하여 기포에 의한 감쇠를 최소화하였다. 그 후 80 °C의 전기로에서 1시간 동안 경화 시킨 후 구동압전체와 압전배면체 사이의 전극에 선을 연결하였다. 구동압전체 전면에 에폭시를 이용하여 음향 윈도우를 제작하였다. 음향 윈도우는 20분간 탈포하여 기포를 제거하였고, 80 °C의 전기로에서 1시간 동안 경화 시켰다. 압전배면체의 후면에 에폭시 배면층을 제작하였다. 음향 윈도우와 달리 기포를 제거하지 않음으로써 감쇠 효과를 기대하였다. 사용된 에폭시의 음향 임피던스는 약 4.4 Mrayl이다. 제작된 트랜스듀서의 세부크기는 그림 17과 같다. 트랜스듀서의 전체 두께는 3.225 mm로 구동압전체의 약 3배로 나타났다.

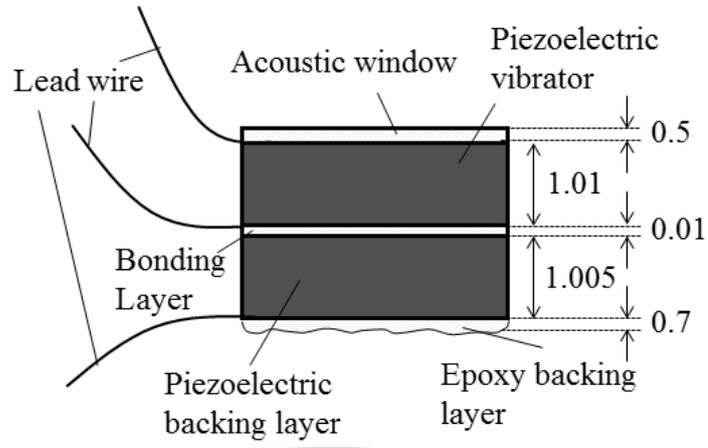


그림 17. 제작된 트랜스듀서 (단위: mm)



2. 트랜스듀서의 특성 측정

그림 18은 그림 17과 같이 제작된 트랜스듀서의 압전배면체의 전기단이 개방 및 단락된 상태에서 측정한 입력 어드미턴스 특성을 나타내고 있다. 그림 18 (a)는 압전배면체의 전기단이 개방인 경우로 0.5 ~ 4 MHz 범위에서 세 개의 공진 특성이 나타나고 있다. 첫 번째 공진은 그림 18에 나타난 바와 같이 트랜스듀서 전체 두께의 공진특성이며 0.85 MHz 부근에서 나타나고 있다. 이 공진모드의 조화모드가 약 3배 인 2.91 MHz 부근에서 나타나는 것을 볼 수 있다. 두 번째 공진은 구동압전체 한 장 두께의 공진특성으로 1.90 MHz부근에서 나타나고 있다. 이때 압전체의 음속은 다음과 같이 나타낼 수 있다 [23].

$$v_o = \sqrt{\frac{c_{11}^D}{\rho}}. \quad (16)$$

여기서 ρ 는 밀도, 탄성계수 c_{11}^D 는 전기변위 D 가 0 일 때의 스티프니스이다. 압전배면체의 전기단이 단락인 경우의 측정된 입력 어드미턴스는 그림 18 (b)에 나타나있으며 개방과 같은 범위에서 세 곳에서 공진 특성을 나타내었다. 첫 번째 공진은 0.82 MHz부근에서 나타났으며 이 공진모드의 조화모드가 약 3배인 2.87 MHz에서 나타남을 보이고 있다. 두 번째 공진은 개방과 마찬가지로 한 장의 두께 공진특성으로 1.70 MHz부근에 나타나고 있다. 하지만 압전배면체의 전기단이 개방인 경우와 단락인 경우의 입력 어드미턴스의 특성이 다른 주파수에서 나타나는 것은 압전배면체의 기계적인 결보기 물성이 달라지기 때문이다.

압전배면체의 전기단이 단락인 경우 압전배면체의 양전극간의 전위차

가 0이 되고 이는 $E_1 = V/t$ 의 관계에 따라 전계가 0이 된다. 전계가 0인 경우 스티프니스는 c_{11}^E 가 되고 음속은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

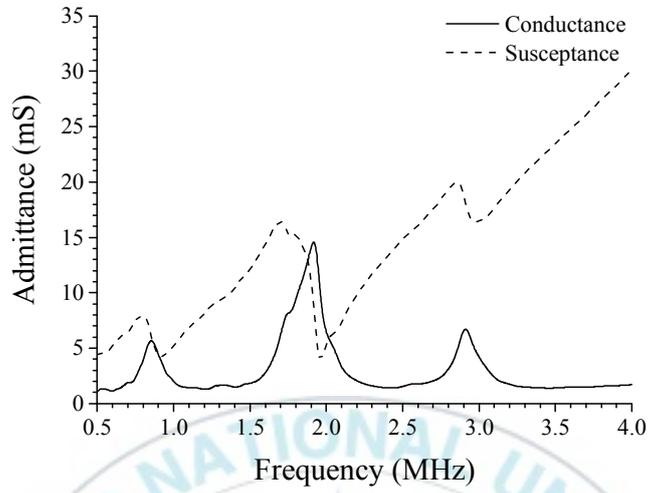
$$v_s = \sqrt{\frac{c_{11}^E}{\rho}}. \quad (17)$$

이러한 음속차이를 만드는 탄성계수 간의 관계를 압전체의 전기-기계 결합계수 k_t 로 나타내면 다음과 같다.

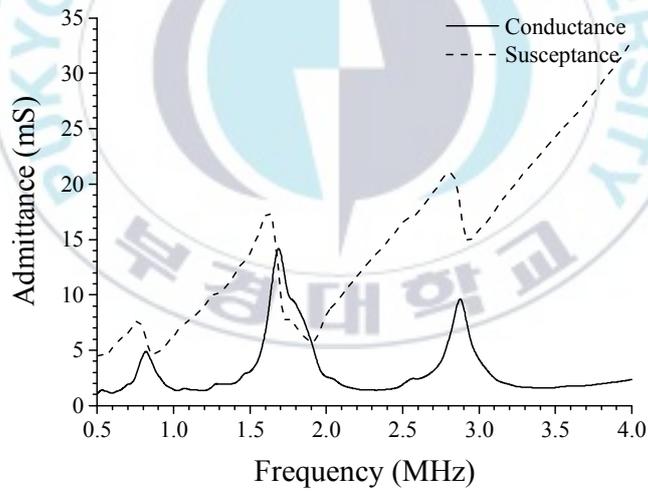
$$c_{11}^D = \frac{c_{11}^E}{1 - k_t^2}. \quad (18)$$

압전배면체의 전기단이 단락과 개방인 경우의 차이가 식 (18)과 같고 이러한 탄성계수의 차이에 의한 음속의 차이는 공진 모드의 차이를 가져 오게 된다. 압전배면체의 전기단이 개방인 경우와 단락인 경우의 차이는 결합계수 k_t 가 클수록 크게 나타남을 알 수 있다.

상술한 이론 계산법에 따라 계산된 결과는 그림 19에 나타내었다. 이 결과를 보면 압전배면체의 전기 단자의 상태에 따라 변하는 입력 어드미턴스의 결과가 이론 및 실험에서 잘 일치하고 있으며 상술한 압전배면체의 전기 단자의 상태에 따른 공진 모드의 변화 경향도 잘 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

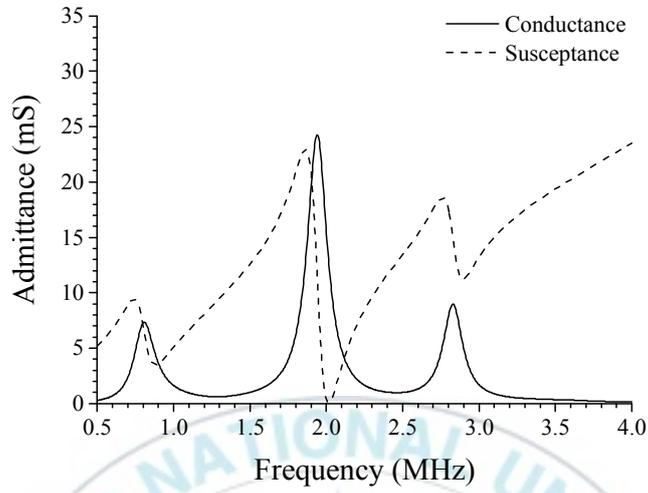


(a)

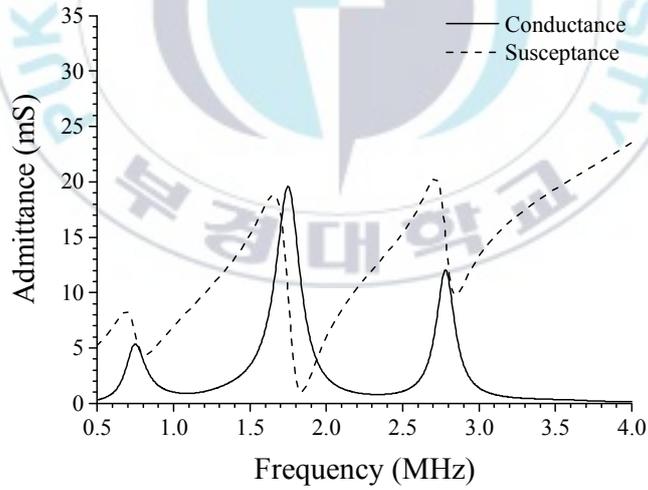


(b)

그림 18. 제작된 트랜스듀서의 측정된 입력 어드미턴스 특성
 (a) 압전배면체의 전기단이 개방된 경우
 (b) 압전배면체의 전기단이 단락된 경우



(a)



(b)

그림 19. 제작된 트랜스듀서의 계산된 입력 어드미턴스 특성

(a) 압전배면체의 전기단이 개방된 경우

(b) 압전배면체의 전기단이 단락된 경우

3. 트랜스듀서의 최적화

가. 이론적 해석

압전배면체의 전기단에 접속되는 최적 외부 임피던스를 결정하기 위해 앞서 접속시켰던 인덕터에 저항 또는 캐패시터를 직렬로 연결하며 최적화과정을 거쳤다. 그 결과 인덕터와 저항이 직렬로 연결된 경우가 가장 넓은 전달함수가 나타나는 것을 확인하였고 사용된 임피던스 Z_e 는 다음과 같다.

$$Z_e = R_e + j\omega L_e. \quad (19)$$

그림 20은 압전배면체의 전기단에 저항 50 Ω과 직렬로 접속된 인덕턴스의 변화에 따른 전달함수의 변화를 보이고 있으며 저항 50 Ω과 인덕턴스의 값이 3 ~ 6 μH 범위에서 전달함수가 완만한 특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 그림 21은 인덕턴스가 6 μH인 경우에 저항변화에 따른 전달함수 변화를 나타낸 결과이다. 이 결과에서 저항 40 ~ 60 Ω의 범위에서 전달함수의 변화가 완만한 특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 제작된 트랜스듀서의 최대 대역폭 특성을 구현할 수 있는 임피던스의 범위가 정해질 수 있다.

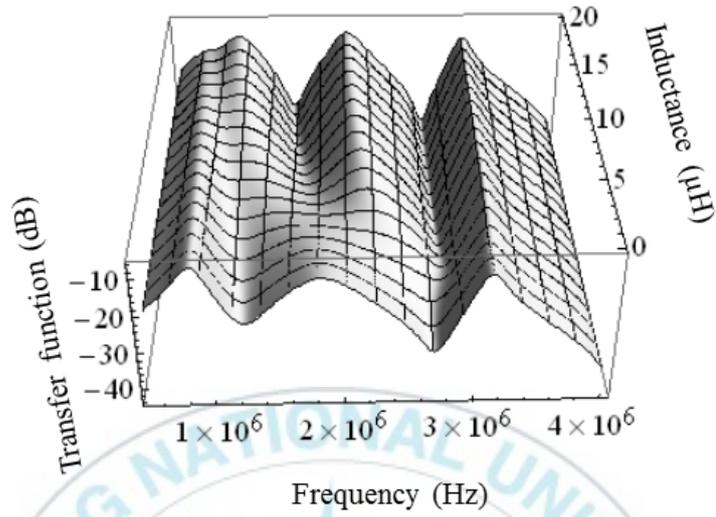


그림 20. 저항 50 Ω과 인덕턴스 변화에 따른 전달함수 변화

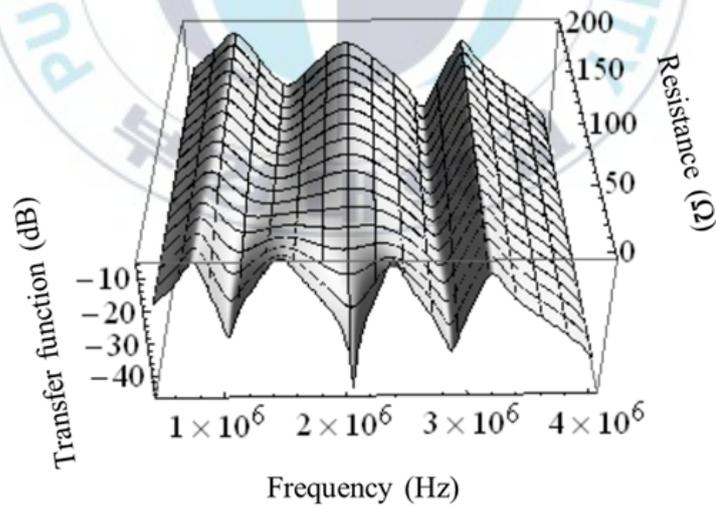


그림 21. 인덕턴스 6 μH와 저항 변화에 따른 전달함수 변화

나. 외부 임피던스가 접속된 압전배면체

제작된 트랜스듀서의 압전배면체의 전기단에 앞서 계산된 결과를 기초로 40 ~ 60 Ω 및 3 ~ 6 μH 의 범위에서 저항 및 인덕턴스를 변화시켜 가며 입력 어드미턴스 특성을 측정하였다. 그 결과 그림 22 (a)에 나타낸 것과 같이 압전배면체의 전기단에 접속되는 전기적인 임피던스가 42 Ω 과 5.7 μH 인 경우 입력 어드미턴스가 1.5 ~ 2.0 MHz의 범위에서 완만한 특성이 나타나고 있어, 넓은 대역폭을 가진 전달함수를 예상할 수 있다. 이와 비교되는 이론 계산 결과는 그림 22 (b)에 나타낸 것과 같이 전기적인 임피던스가 50 Ω 과 4 μH 인 경우로 공진 모드의 경향이 잘 일치함을 알 수 있다.



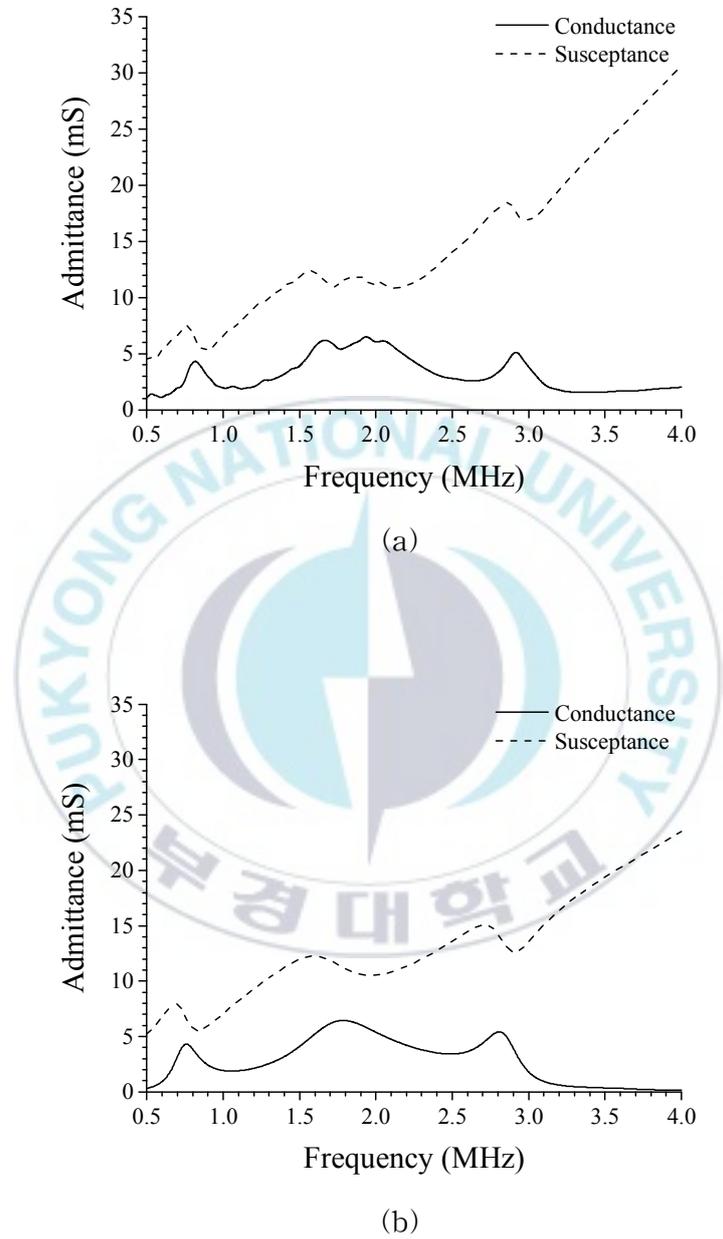


그림 22. 최적 임피던스가 접속된 입력 어드미턴스 특성
(a)측정 결과, (b)계산 결과

제작된 트랜스듀서의 전달함수를 측정하기 위해 수중에서 펄스 에코 (Pulse-echo) 방법을 수행하였다 [5, 6]. 그림 23은 실험방법을 모식도로 나타낸 것이다. 함수발생기(WD1973, NF Coporation)로부터 인가해준 전기적 입력신호의 파형을 그림 24에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 펄스 폭이 $0.25 \mu\text{s}$ 인 진폭 20 V의 단일 펄스를 발생시켰다. 입력된 전기적 펄스에 의해 구동된 트랜스듀서는 수중에 음향 펄스를 방사하게 되고 이 음향 펄스는 트랜스듀서의 방사면으로부터 파장의 10배 이상의 거리인 약 30 mm 전면에 위치한 반사체에 의해 반사되어 다시 트랜스듀서로 입력된다. 이 입력 신호는 푸리에 변환하여 주파수 특성을 분석하면 트랜스듀서의 전달함수 특성을 알 수 있게 된다. 이때 트랜스듀서의 압전배면체의 전기단에 접속한 전기적인 임피던스 Z_e 의 변화에 따른 전달함수의 특성변화를 측정하였다.

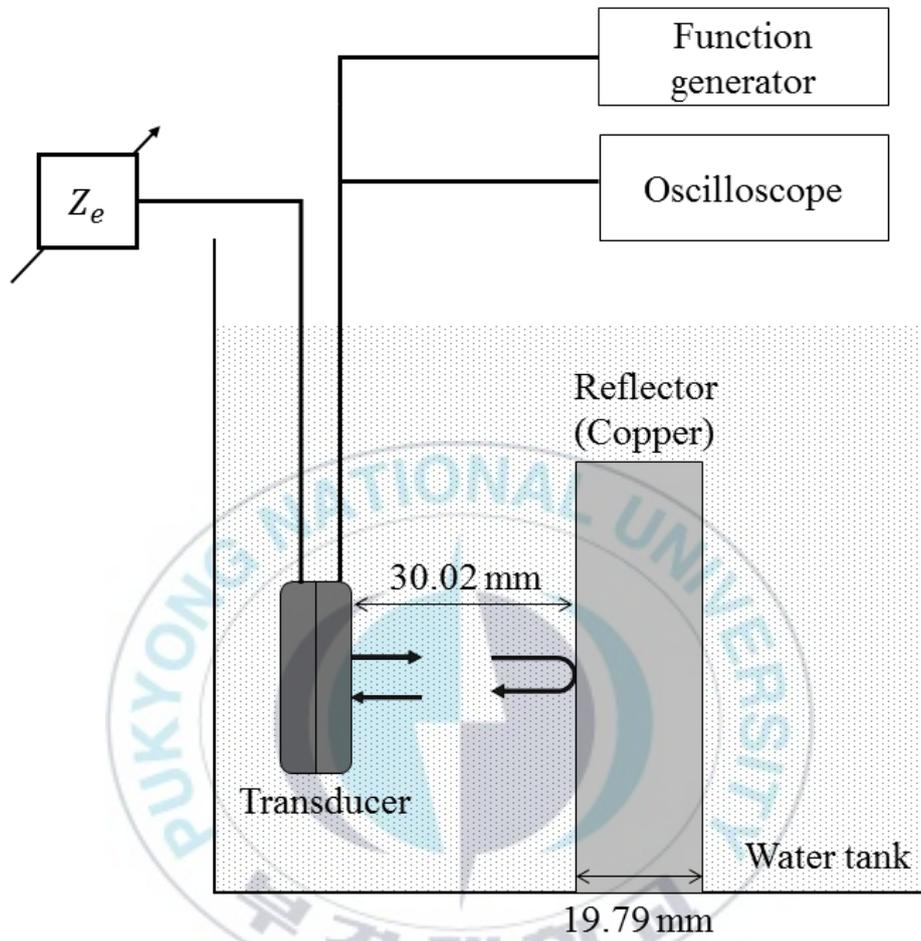


그림 23. 펄스에코 모식도

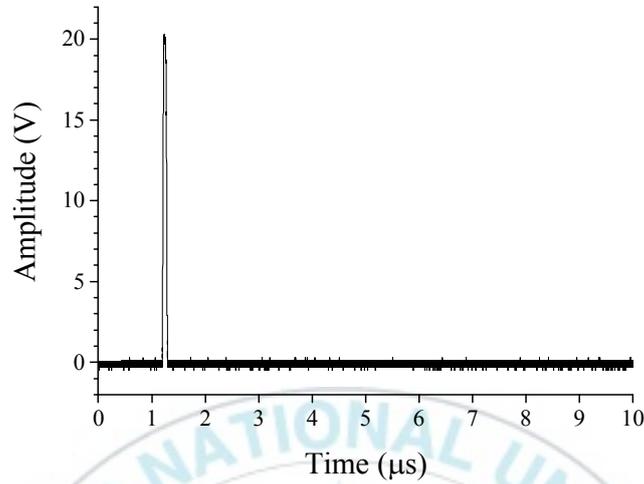


그림 24. 트랜스듀서에 인가한 입력펄스

그림 25는 수중에서 압전배면체의 전기단이 개방인 경우 반사체에 의해 반사되어 돌아온 수신파를 규격화한 형태이다. 이 수신파를 FFT(Fast Fourier Transform)하여 전달함수를 구해 규격화한 결과를 그림 26에 나타내었다. 이때, 송신 혹은 수신만의 전달함수 특성을 보기 위하여 로그를 취한 값의 1/2을 하여 나타내었다. 이 결과에서 -6 dB이 되는 낮은 주파수 f_l 은 1.64 MHz, -6 dB이 되는 높은 주파수 f_u 는 2.09 MHz의 범위였으며 전달함수가 최대가 되는 주파수는 1.93 MHz였다. 대역폭은 24.19%를 보였으며 이때, 대역폭을 계산한 식은 다음과 같다.

$$BW(\%) = \frac{f_u - f_l}{f_c} \times 100. \quad (19)$$

여기서 f_c 는 f_l 와 f_u 의 평균값으로, 대역폭의 중심주파수를 나타낸다.

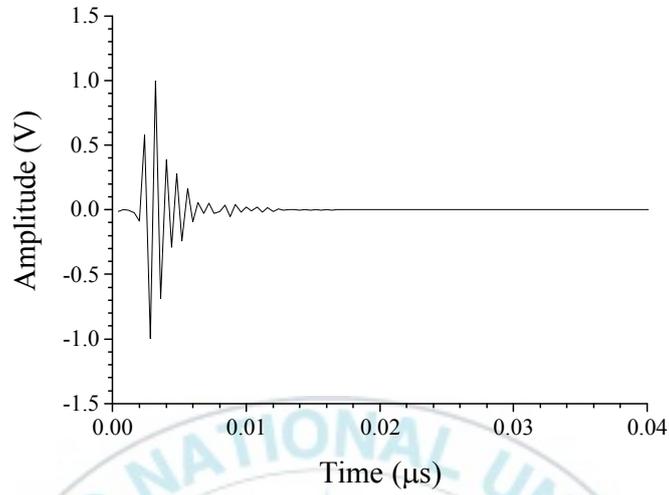


그림 25. 압전배면체의 전기단이 개방상태인 경우의 수신파형

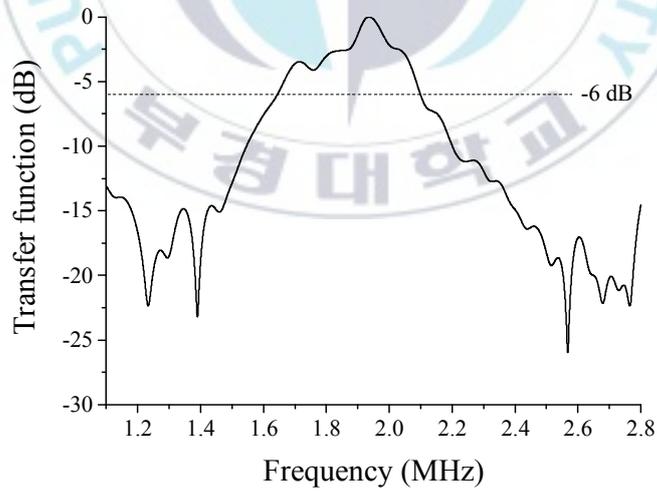
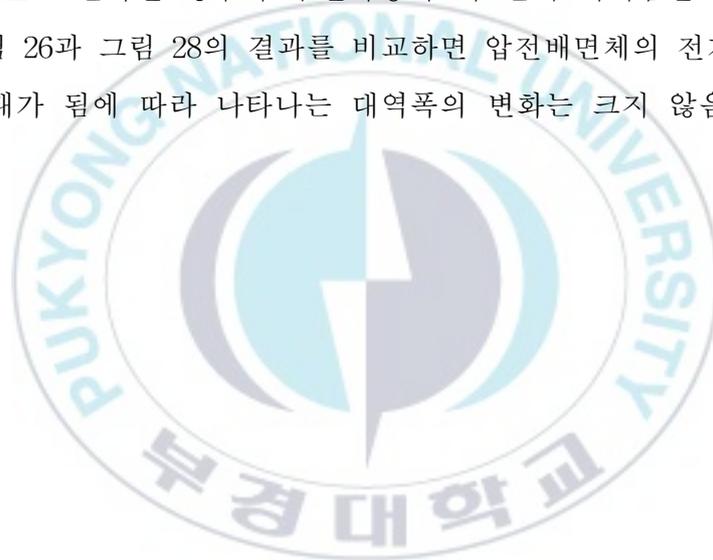


그림 26. 압전배면체의 전기단이 개방상태인 경우의 트랜스듀서의 전달함수 특성

다음으로 트랜스듀서의 압전배면체의 전기단이 단락인 경우에 규격화된 수신파를 그림 27에 나타내었으며 그 주파수 특성은 그림 28과 같다. 이때, f_l 은 1.54 MHz, f_u 는 1.98 MHz의 범위이며 최대가 되는 주파수는 1.69 MHz 이고 식 (19)를 이용하여 계산한 -6 dB 대역폭은 25.00%로 나타났다. 그림 25와 그림 27을 보면, 반사파의 잔향이 길게 남아 있으므로 공간분해능이 좋지 않을 것을 예상할 수 있다. 또한 전달함수가 최대가 되는 주파수를 비교했을 때 단락인 경우는 1.69 MHz이고 개방인 경우는 1.93 MHz로 단락인 경우의 수신과장이 더 길게 나타남을 확인할 수 있다. 그림 26과 그림 28의 결과를 비교하면 압전배면체의 전기단이 개방과 단락상태가 됨에 따라 나타나는 대역폭의 변화는 크지 않음을 알 수 있다.



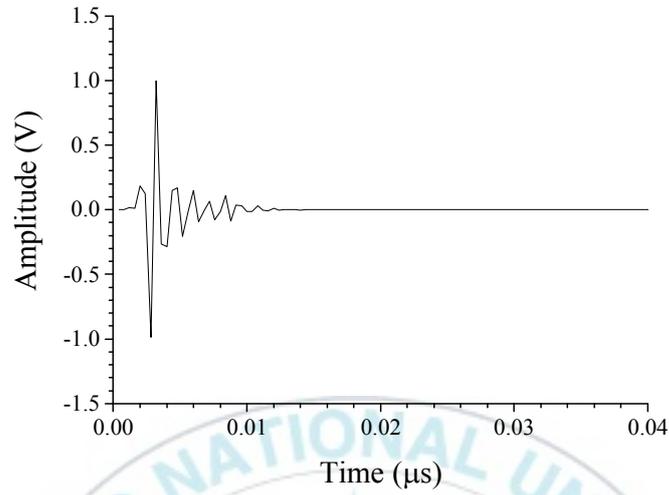


그림 27. 압전배면체의 전기단이 단락 상태인 경우의 수신파형

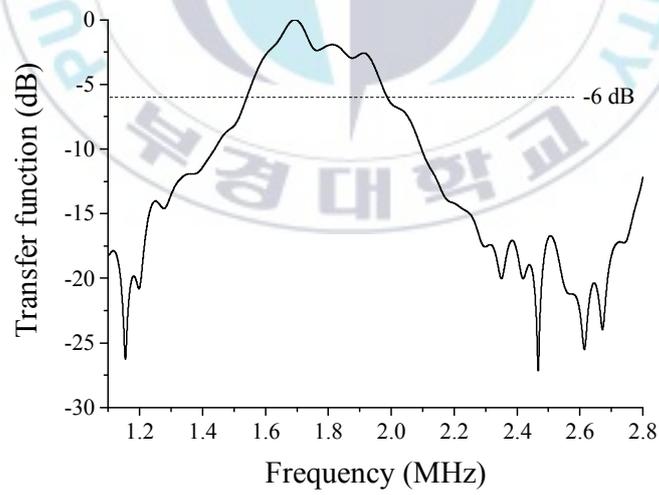


그림 28. 압전배면체의 전기단이 단락 상태인 경우의 트랜스듀서의 전달함수 특성

그림 29는 압전배면체의 전기단에 저항 42 Ω , 인덕턴스 5.7 μH 가 직렬로 접속된 경우 반사체로부터 반사되어 돌아온 파를 규격화하여 나타낸 것이다. 이 경우 개방과 단락의 경우와는 달리 잔향이 많이 줄어든 비교적 짧은 펄스를 보인다. 그림 30은 -6 dB 대역폭을 나타낸 것이다. 이때, f_l 은 1.31 MHz, f_u 는 2.30 MHz, 전달함수가 최대가 되는 주파수는 1.69 MHz에서 나타났으며 -6 dB 대역폭은 55.00%로 나타났다. 이상의 세 결과를 비교하였을 때 압전배면체에 최적의 외부 임피던스를 접속함으로써, 대역폭을 확장시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있다.



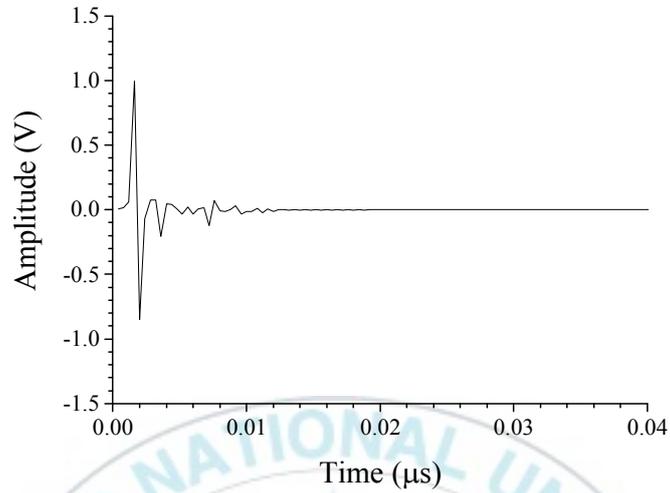


그림 29. 압전배면체의 전기단에 최적 임피던스가 접속된 경우의 수신파형

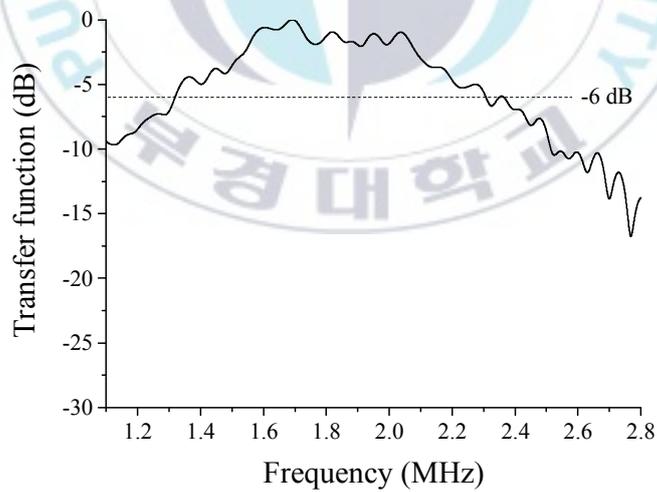


그림 30. 압전배면체의 전기단에 저항 42 Ω, 인덕턴스 5.7 μH를 접속한 경우의 트랜스듀서의 전달함수 특성

다. 에폭시 배면층을 가진 PMN-PT 트랜스듀서

비교를 위하여 그림 31에 나타난 바와 같이 PMN-PT 압전진동자의 후면에 배면층을 기존에 사용되어지던 방법 중 하나인 에폭시를 이용하여 제작하였다. 그림 32는 구동압전체로 사용된 PMN-PT 압전진동자의 특성 확인을 위해 측정된 어드미턴스와 이론 계산 결과이다. 이 결과로부터 공진주파수가 1.68 MHz 부근에서 나타남을 확인하였고 앞서 제작한 압전배면체를 가진 트랜스듀서에 사용된 구동압전진동자와 그 특성에 있어서 큰 차이가 없음을 확인하였다.

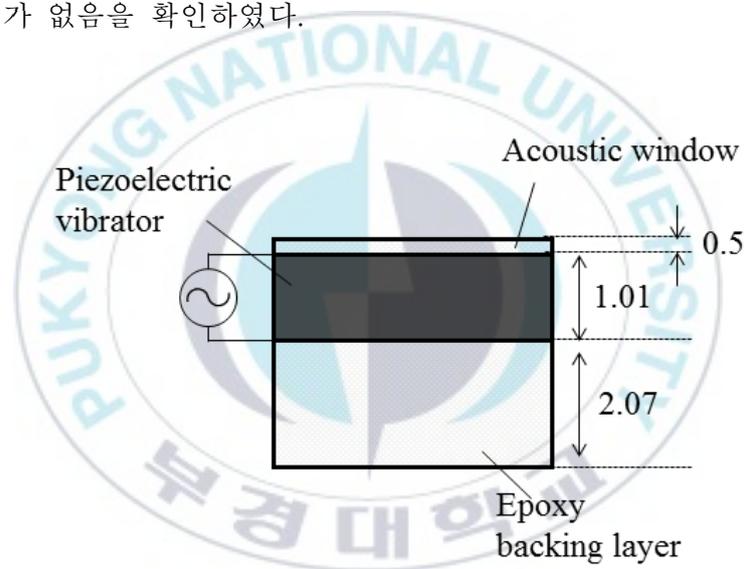
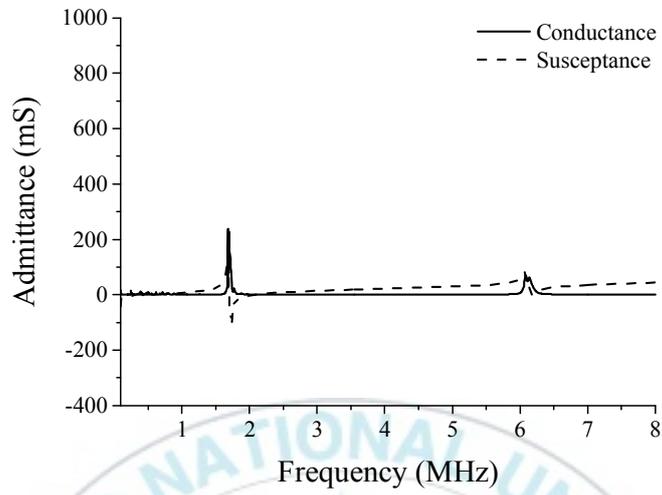
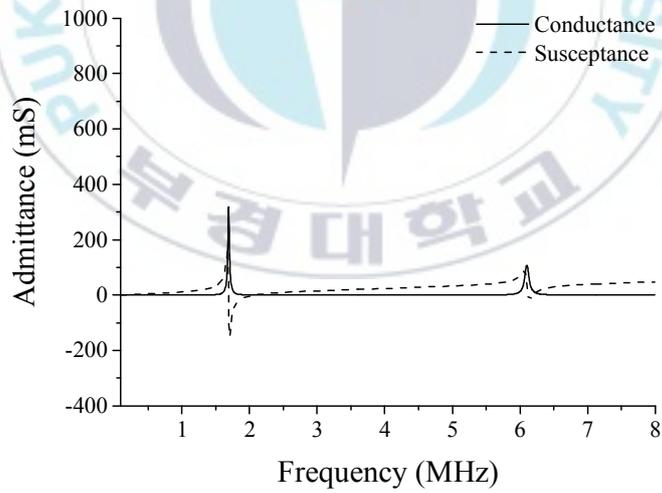


그림 31 에폭시 배면층을 가지는 트랜스듀서 (단위: mm)



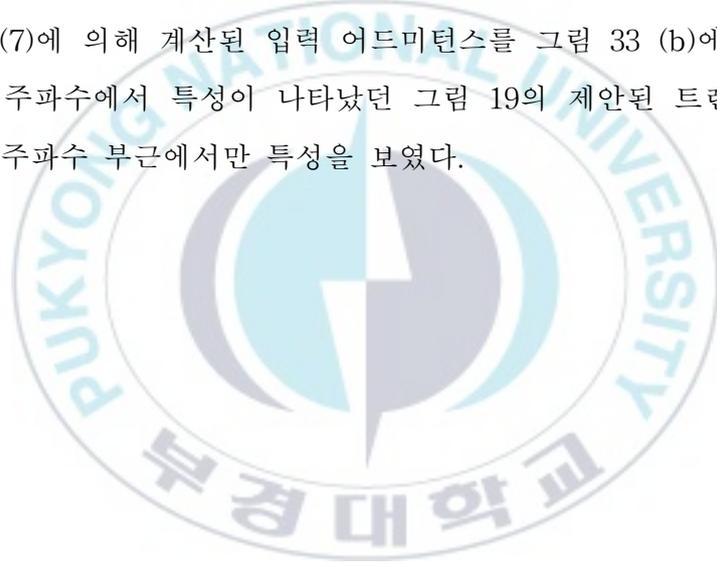
(a)

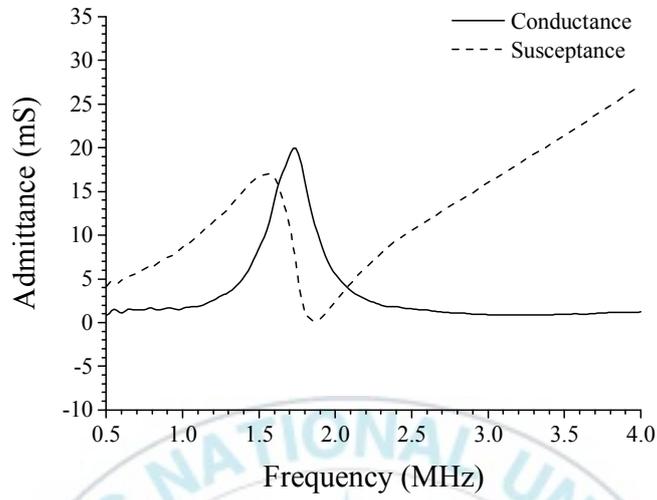


(b)

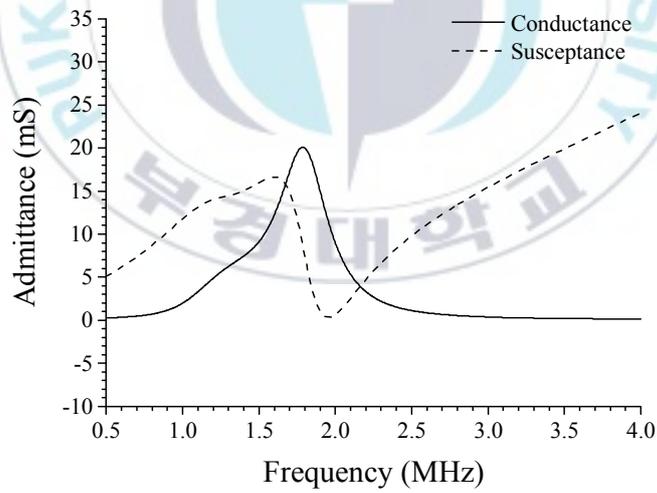
그림 32. 구동압전체로 사용된 PMN-PT 압전진동자의
입력 어드미턴스
(a)측정 결과, (b)계산 결과

그림 33은 압전배면체 없이 에폭시 배면층만 가진 트랜스듀서의 구조를 나타내고 있다. 구동압전체(Piezoelectric vibrator) 전면에 앞서 제작된 트랜스듀서와 같은 두께 0.5 mm의 음향 윈도우(Acoustic window)를 제작하였고 압전배면체 대신 같은 두께의 에폭시 배면층(Epoxy backing layer)을 제작하였다. 제작된 트랜스듀서의 총 두께는 3.57 mm로 구동압전체의 약 3배이다. 그림 31과 같이 제작된 트랜스듀서의 입력 어드미턴스 특성을 임피던스 아날라이저를 이용하여 측정하였고, 그림 33 (a)에 나타내었다. 식 (7)에 의해 계산된 입력 어드미턴스를 그림 33 (b)에 나타내었다. 다양한 주파수에서 특성이 나타났던 그림 19의 제안된 트랜스듀서와 달리 공진주파수 부근에서만 특성을 보였다.





(a)



(b)

그림 33. 에폭시 배면층을 가진 트랜스듀서의 입력 어드미턴스 특성
(a)측정 결과, (b)계산 결과

앞서 트랜스듀서의 전달함수를 측정하는 것과 같이 그림 25의 펄스 에코 방법으로 에폭시 배면층만을 가지는 트랜스듀서의 전달함수를 측정하였다. 그림 34는 반사체로부터 반사되어 돌아온 파를 규격화한 결과이다. 결과에서 잔향이 길게 이어져 있는 것이 보였다. 그림 35는 전달함수를 나타낸 것으로, f_l 은 1.35 MHz, f_u 는 2.16 MHz의 범위였으며 전달함수가 최대가 되는 주파수는 1.79 MHz에서 나타났으며 대역폭은 46.28%임을 보인다. 이 결과는 제안된 트랜스듀서의 압전배면체의 전기단이 개방이나 단락 상태인 경우 보다는 넓은 대역폭을 보이지만 압전배면체의 전기단에 최적의 외부 임피던스가 접속된 경우보다는 좁은 대역폭을 나타내고 있다.



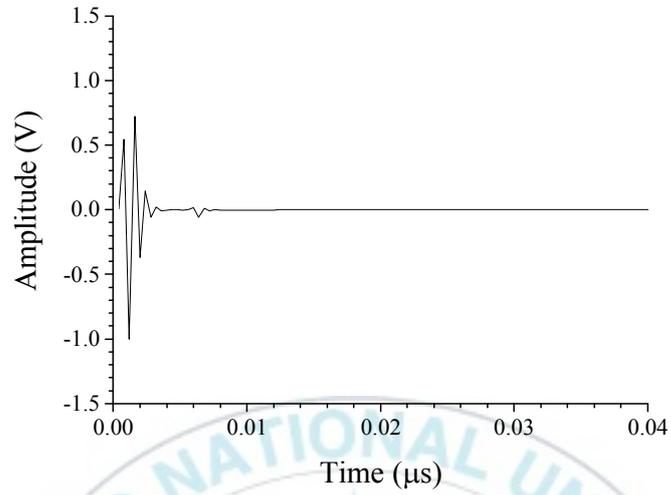


그림 34. 에폭시 배면층 트랜스듀서의 수신파형

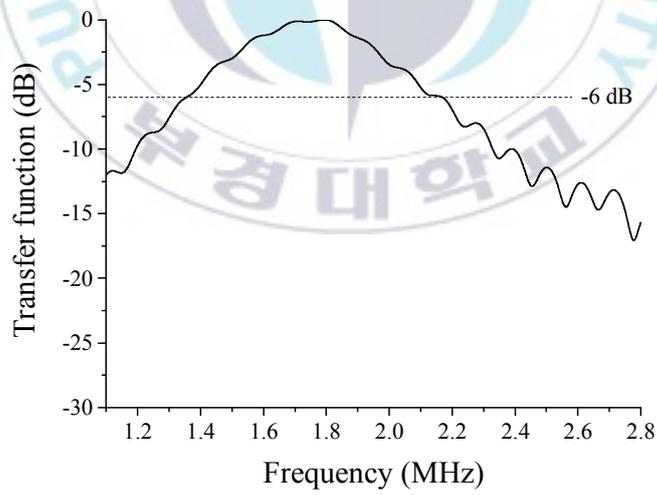


그림 35. 에폭시 배면층을 가지는 트랜스듀서의 전달함수 특성

그림 36은 수신파의 진폭을 비교하기 위해 나타낸 것으로 최적의 임피던스를 접속시킨 압전배면체를 가지는 트랜스듀서의 경우가 에폭시 배면층인 경우보다 진폭은 작게 나타나지만 최댓값으로 부터 $1/e$ 로 떨어지는데 걸린 시간인 시정수를 구하면 에폭시 배면층인 경우가 1.27 ns, 압전배면체인 경우가 0.85 ns로 나타나 펄스폭이 짧음을 알 수 있다. 그림 37은 변환효율을 비교하기 위해 에폭시 배면층만을 가진 트랜스듀서의 전달함수를 기준으로 압전배면체를 가진 최적화된 트랜스듀서의 전달함수를 규격화하여 비교한 결과이다. 이 결과를 보면 압전배면체의 전기단에 최적의 임피던스가 접속된 경우의 전달함수를 실선으로, 에폭시 배면층만을 가진 트랜스듀서의 전달함수를 점선으로 나타내었다. 에폭시 배면층의 경우에 비해 제안된 트랜스듀서의 경우가 최고치 기준으로 약 7 dB 정도 낮은 전달함수 특성을 나타내고 있으나 상술한 바와 같이 대역폭은 약 1.2배 정도 더 넓은 특성을 보이고 있어 송수신시 증폭기의 증폭이득의 설계 등으로 높은 S/N비를 갖는 신호의 취득이 가능할 것으로 기대된다.

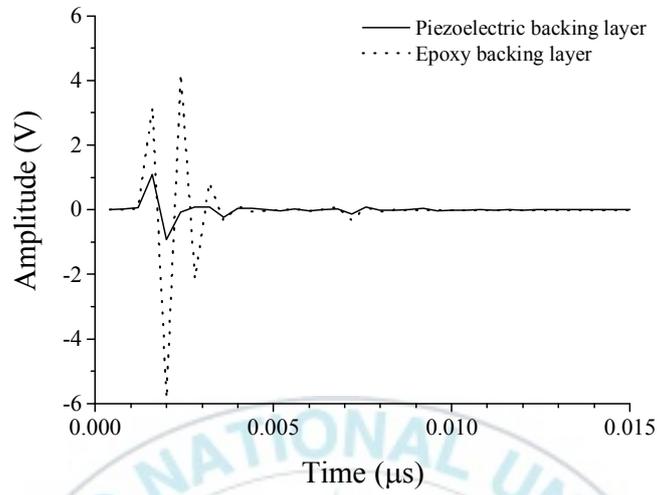


그림 36. 수신파의 진폭 비교

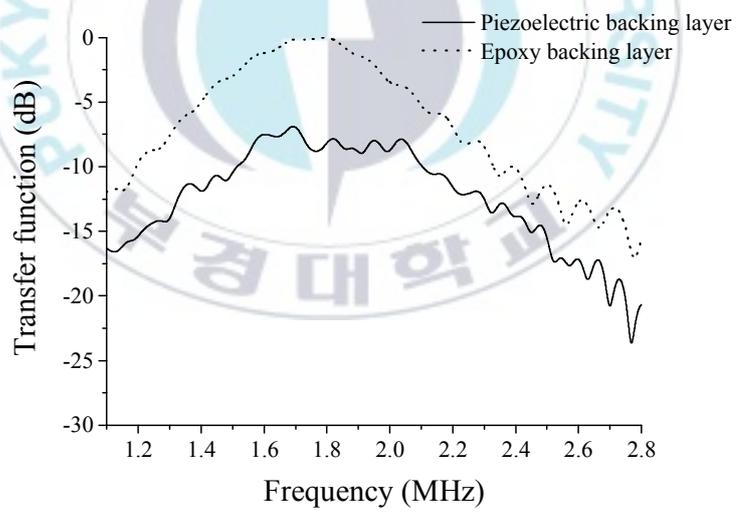


그림 37. 에폭시 배면층의 경우를 기준으로 규격화된 전달함수 특성

V. 결론

본 연구는 초음파 트랜스듀서의 대역폭을 제어 및 확장하기 위해 구동 압전체와 유사한 압전체를 배면층으로 사용하고 압전배면체의 전기단에 외부 임피던스를 접속하는 구조를 제안하였다. 설계된 초음파 트랜스듀서의 입력 어드미턴스 특성과 전달함수를 이론적으로 분석하기 위해 Mason 등가회로를 Sittig의 해석방법을 이용하여 입력 어드미턴스와 전달함수 계산방법을 정리하였다. 압전배면체는 압전 정효과로써 방으로 발생하는 음파를 전기적인 에너지로 변환하여 전기단의 외부 임피던스에 의해 소모하는 방식으로 얇으면서도 효과적인 배면층의 역할을 하게 된다. 압전배면체의 전기단에 접속되는 전기적인 임피던스의 영향을 등가회로를 분석하여 해석적으로 표현하였고 이에 따른 입력 어드미턴스와 전달함수 특성 변화를 해석하였다. 그 결과 전기적 임피던스가 인덕턴스인 경우 기계적인 특성 변화의 범위가 가장 넓은 것으로 확인되었다. 이론적해석 결과를 바탕으로 제작된 초음파 트랜스듀서는 구동압전체의 약 3배로 제작되었으며 입력 어드미턴스 특성을 측정된 결과로부터 기본 공진 모드의 주파수가 59%까지 변화됨을 보였다. 압전배면체에 접속되는 최적의 외부 임피던스를 결정하기 위해 이론적해석을 바탕으로 최적화과정을 거쳐 최적의 임피던스 범위를 도출하였으며 이를 제작한 트랜스듀서에 적용하여 -6 dB 대역폭이 약 55%까지 넓어지는 것을 확인하였다. 또한 압전배면체의 유효성을 검증하기 위해 에폭시 배면층만을 가지는 비슷한 두께의 트랜스듀서를 제작하여 그 특성을 실험적으로 해석하여 본 연구에서 제안한 트랜스듀서의 유효성을 확인하였다. 이상으로 압전배면체의 전기단에 연결된 적절한 외부 임피던스를 접속함으로써 대역폭을 확장할 수 있

음을 확인하였다. 또한 외부 임피던스의 값을 조절함에 따라 요구되는 주파수 범위로 공진모드를 이동할 수 있어 가변 대역폭을 갖는 트랜스듀서의 제작도 기대할 수 있다. 이와 같이 트랜스듀서의 외부에서 간단한 조작으로 주파수 대역폭의 제어가 가능한 초음파 트랜스듀서는 의용 진단 분야뿐만 아니라 비파괴 검사 분야 및 수중 통신 분야 등 많은 초음파 산업 분야에 활용 가능 할 것으로 기대 된다.



참고문헌

- [1] P. W. Hodges, L. H. M. Pengel, R. D. Herbert, and S. C. Gandevia, "Measurement of muscle contraction with ultrasound imaging," *Muscle & nerve*, 27(6), 682-692 (2003).
- [2] A. Fenster, D. B. Downey, and H. N. Cardinal, "Three-dimensional ultrasound imaging," *Physics in medicine & biology*, 46(5), R67 (2001).
- [3] K. Y. Jhang, "Nonlinear ultrasonic techniques for nondestructive assessment of micro damage in material: a review," *International journal of precision engineering and manufacturing*, 10(1), 123-135 (2009).
- [4] M. Li, and G. Hayward, "Ultrasound nondestructive evaluation (NDE) imaging with transducer arrays and adaptive processing," *Sensors*, 12(1), 42-54 (2011).
- [5] 최홍호, *의료초음파공학*, 인터비전 (2002).
- [6] J. Krautkrämer, and H. Krautkrämer, *Ultrasonic testing of materials*, Springer Science & Business Media (2013).
- [7] C. S. Desilets, J. D. Fraser, and G. S. Kino, "The design of efficient broad-band piezoelectric transducers," *IEEE Transactions on sonics and ultrasonics*, 25(3), 115-125 (1978).
- [8] H. W. Persson, and C. H. Hertz, "Acoustic impedance matching of medical ultrasound transducers," *Ultrasonics*, 23(2), 83-89 (1985).
- [9] Cao, Yonggang, 하강렬, 김무준, 김정순, " $\lambda/4$ 모드 PVDF 초음파 트랜

스듀서에 있어서 전극 사이에의 접합층이 성능에 미치는 영향” 한국 음향학회지, 33(2), 102-110 (2014).

- [10] F. El-Tantawy, and Y. K. Sung, “A novel ultrasonic transducer backing from porous epoxy resin - titanium - silane coupling agent and plasticizer composites,” *Materials letters*, 58(1-2), 154-158 (2004).
- [11] R. Zhang, W. Cao, Q. Zhou, J. H. Cha, K. K. Shung, and Y. Huang, “Acoustic properties of alumina colloidal/polymer nano-composite film on silicon,” *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 54(3), 467-469 (2007).
- [12] M. G. Grewe, T. R. Gururaja, T. R. Shrout, and R. E. Newnham, “Acoustic properties of particle/polymer composites for ultrasonic transducer backing applications,” *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 37(6), 506-514 (1990).
- [13] E. Cho, G. Park, J. W. Lee, S. M. Cho, T. Kim, J. Kim, ... and S. Kang, “Effect of alumina composition and surface integrity in alumina/epoxy composites on the ultrasonic attenuation properties,” *Ultrasonics*, 66, 133-139 (2016).
- [14] H. J. Fang, Y. Chen, C. M. Wong, W. B. Qiu, H. L. W. Chan, J. Y. Dai, ... and Q. F. Yan, “Anodic aluminum oxide - epoxy composite acoustic matching layers for ultrasonic transducer application,” *Ultrasonics*, 70, 29-33 (2016).
- [15] J. W. Hunt, M. Arditi, and F. S. Foster, “Ultrasound transducers for pulse-echo medical imaging,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, BME-30(8), 453-481 (1983).

- [16] F. HELMCKE, F. EDWARD III, N. C. NANDA, J. W. COOPER, and R. SANYAL, "Use of the smaller pediatric transesophageal echocardiographic probe in adults," *Echocardiography*, 7(6), 727-737 (1990).
- [17] J. B. Seward, B. K. KHANDHERIA, J. K. OH, M. D. ABEL, R. W. HUGHES, W. D. EDWARDS, and A. J. TAJIK, "Transesophageal echocardiography: technique, anatomic correlations, implementation, and clinical applications," In *Mayo Clinic Proceedings*, 63(7), 649-680 (1988, July).
- [18] N. Chubachi, and M. J. Kim, "Transmission line model equivalent circuit for piezoelectric transducers including the effect of electrical terminal impedance," *Japanese journal of applied physics*, 35(5S), 3231 (1996).
- [19] 김무준, 하강렬, 김성부, 이종규, "다층 PZT 초음파 트랜스듀서에 대한 새로운 전송선로형 등가회로의 제안" *한국음향학회지*, 14(4), 29-37 (1995).
- [20] M. J. Kim, and N. Chubachi, "Frequency Controllable Multilayer Piezoelectric Transducers by the Control of Electrical Terminal Impedance," *IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems*, 115(7), 893-900 (1995). (In Japanese)
- [21] E. K. Sittig, *Design and technology of piezoelectric transducers for frequencies above 100 MHz*, In *Physical Acoustics 9*, Academic Press, 221-275 (1972).

- [22] E. K. Sittig, "Effects of bonding and electrode layers on the transmission parameters of piezoelectric transducers used in ultrasonic digital delay lines," IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 16(1), 2-9 (1969).
- [23] T. Ikeda, *Fundamentals of piezoelectricity*, Oxford university press (1990).



본 연구와 관련된 저자의 논문

- 게재논문 -

- J. Y. Yeom, J. S. Kim, K. L. Ha, and M. J. Kim “Minimization of thickness of ultrasonic transducer by using piezoelectric backing layer,” Japanese Journal of Applied Physics, 57(7S1), 07LD05 (2018).

- 발표논문 -

- 염지영, 임수현, 심민섭, 하강렬, 김무준, 김정순, PMN-PT 적층형 압전진동자를 이용한 광대역 트랜스듀서 2018 한국음향학회 춘계학술발표대회 및 제33회 수중음향학 학술발표회 37(1s), 151 (2018).
- J. Y. Yeom, J. S. Kim, K. L. Ha, and M. J. Kim, “Minimization of thickness of ultrasonic transducer by using piezoelectric backing layer,” Symposium on Ultrasonic Electronics (USE 2017), 3P3-5 (2017).
- 염지영, 하강렬, 김무준, 김정순, 압전배면체를 이용한 삽입용 초음파 트랜스듀서의 제작 2017 한국음향학회 정기총회 및 추계학술발표대회 36(2s), 169 (2017).
- 염지영, 김지향, 임수현, 심민섭, 김정순, 하강렬, 김무준, 압전배면체를 이용한 초음파 트랜스듀서의 대역폭 제어 2017 공동학술대회 한국소음진동공학회, 한국음향학회, 대한기계학회 동역학 및 제어부문, 공동학술대회 초록집, 421 (2017).