

$\lambda/4$ 모드 PVDF 초음파 트랜스듀서에 있어서 전극 사이의 접합층이 성능에 미치는 영향

Effect of a Bonding Layer between Electrodes on the Performance of a $\lambda/4$ -Mode PVDF Ultrasound Transducer

Yonggang Cao, 하강렬[†], 김무준, 김정순*

(Yonggang Cao, Kanglyeol Ha[†], Moojoon Kim, and Jungsoon Kim*)

부경대학교 물리학과, *동명대학교 멀티미디어공학과

(접수일자: 2013년 9월 27일; 수정일자: 2013년 12월 10일; 채택일자: 2014년 1월 4일)

초 록: 양 전극 사이에 압전층 외에 비압전성의 접합층이 존재하는 $\lambda/4$ 모드 PVDF 초음파 트랜스듀서에 있어서 그 접합층이 트랜스듀서의 성능에 미치는 영향을 등가회로에 의해 해석하였다. 등가회로로서는 Kikuchi 등이 제안한 전송선로 모델[Sound of IEICE, 55-A, 331-338 (1981)]을 도입하였는데, 먼저 그 모델에 의한 해석의 타당성을 80 μm 두께의 PVDF 압전막이 동(Cu) 후면체에 부착되는 세 가지 경우를 가정한 KLM 모델과의 비교를 통해 검증하였다. 다음으로, 그 압전막과 더불어 5 μm ~ 20 μm 두께의 에폭시 접합층을 갖는 다섯 개의 트랜스듀서를 제작하여 펄스 에코 응답을 측정하고 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 두 결과는 서로 잘 일치하였는바, 도입한 Kikuchi 모델에 의해 접합층이 트랜스듀서의 성능에 미치는 영향을 파악할 수 있음을 알았는데, 접합층이 20 μm 일 때는 그 접합층이 없을 때에 비해 중심주파수와 대역폭은 각각 약 19.7%, 25.0% 감소하고, 삽입손실은 57.2% 증가하는 것으로 나타났다. **핵심용어:** 초음파 트랜스듀서, 등가회로, PVDF 압전막, 접합층, 펄스 에코 응답

ABSTRACT: The effect of a bonding layer on the performance of a quarter-wave ($\lambda/4$) mode PVDF ultrasound transducer having not only a piezoelectric layer but also a non-piezoelectric layer between two electrodes was analyzed. The equivalent circuit of a transmission line model by Kikuchi et al.[Sound of IEICE, 55-A, 331-338 (1981)] was introduced for the analysis. The validity of the model was confirmed by comparison with a KLM model for three postulated adhesion cases of a 80 μm thick piezoelectric PVDF film to a copper (Cu) backer. The pulse-echo responses of five PVDF transducers, each fabricated with a different thickness (5 μm ~ 20 μm) of the bonding layer, were measured and the results were compared with those by simulation. The two results were in good agreement with each other and it was noted that the effect of the bonding layer on the performance of the transducer could be analyzed by the Kikuchi model. In detail, the 20 μm bonding layer decreased the center frequency and the bandwidth by about 19.7% and 25.0%, respectively, and increased the insertion loss by 57.2%.

Keywords: Ultrasonic transducer, Equivalent circuit, PVDF piezoelectric film, Bonding layer, Pulse-echo response

PACS numbers: 43.38.-p

1. 서 론

PVDF나 P(VDF-TiFE) 등의 고분자 압전재료는 PZT 등의 다른 압전재료에 비해 전기기계결합계수가 작고, 유전적 및 기계적 손실이 큰 단점이 있으나,

고유음향 임피던스가 작기 때문에 별도의 정합층이 없어도 쉽게 물이나 생체 쪽으로 음향에너지를 전파시킬 수 있으며, 압전전압정수가 커서 수신효율이 우수하고 광대역 특성을 가지므로 수중청음기 또는 공간분해능이 높은 단층상을 얻기 위한 고주파의 의료용 초음파 트랜스듀서 제작에 다양하게 활용되고 있다.^[1-4]

필름 형태의 고분자 압전막을 이용하여 초음파 트랜스듀서를 제작하는데 있어서는 일반적으로 그 압

[†]Corresponding author: Kanglyeol Ha (hakl@pknu.ac.kr)
Department of Physics, Pukyong National University,
45, Yongso-Ro, Busan 608-737, Republic of Korea
(Tel: 82-51-629-5570, Fax: 82-51-629-5549)

전막을 후면체(backer)에 부착시키게 되는데, 그 후면체가 도체로서 전극 역할을 하는 경우가 많다.^[5,7] 특히 그 후면체가 동과 같은 금속인 경우, 한쪽 면에만 전극이 형성된 PVDF막의 다른 쪽 면을 에폭시 등을 이용하여 접착시키는 경우가 종종 있는데, 그 때 그 금속은 음향 임피던스가 큰 후면체이면서 전극이 된다. 따라서 접합층의 두께가 얇을 경우 제작되는 트랜스듀서는 λ/4(단, λ는 파장) 모드에 가까운 동작을 하게 된다. 그러나 이와 같이 제작되는 고분자 트랜스듀서의 경우 압전세라믹 등 단단한 고체와는 달리 접합층의 두께가 최소 수 μm 이상이 되므로, Brown^[8]이 지적한 바와 같이 압전층인 고분자막의 두께에 비해 충분히 얇게 제어하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 트랜스듀서의 동작에 상당한 영향을 미치게 되나, 아직 그 해석 방법에 대한 체계적인 보고는 찾기 어렵다.

두께 모드로 동작하는 고주파 초음파 트랜스듀서의 일차원 등가회로 해석에 보편적으로 사용되는 KLM 모델^[9]은 전기단이 압전층의 중간에 연결되어 있고, 그 압전층의 양단은 전극인 것으로 간주되어 있어 여기서 대상으로 하는 트랜스듀서의 특성 해석에 적용하기 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 Kikuchi 등^[10]이 제안한 2단자 대망(2 ports)형 전송선로 모델을 도입하여, 양 전극 사이에 압전층과 비압전층이 공존하는 λ/4 모드 PVDF 초음파 트랜스듀서의 특성 해석 방법을 체계화하고, 그 방법에 의해 에폭시 접합층의 두께가 트랜스듀서의 성능에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 먼저 도입한 모델에 의한 해석의 타당성을 80 μm 두께의 PVDF 압전막이 Cu 후면체에 접착되는 세 가지 경우를 가정하여 KLM 모델과의 비교를 통해 검증하였다. 다음으로, 그 압전막과 더불어 5 μm ~ 20 μm 두께의 에폭시 접합층을 갖는 다섯 개의 트랜스듀서를 제작하여 펄스에코 응답 파형 및 파워스펙트럼을 측정하고, 도입한 모델에 의한 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

II. Kikuchi 모델의 도입

2.1 등가회로 도출

Kikuchi 등^[10]은 양 전극 사이에 다층구조를 갖는

초음파 트랜스듀서의 특성 해석을 위한 등가회로로서 Fig. 1과 같이 전기단이 없는 대신에 기진력원(driving force source)를 갖는 2단자 대망형 전송선로 모델을 제안하고 있다. 이 모델에서 전극 내부의 임의의 *i* 층의 전기음향적 특성은 음향 임피던스 z_i , 전파상수 $\beta_i = \omega/c_i$ (ω 는 각주파수, c_i 는 음속), 압전응력상수 h_i 및 두께 l_i 에 의해 정의되는데, 각 층에서 손실은 없는 것으로 가정하고 있다.

또한, 방사면(면적 s)은 각 층의 두께에 비해 대단히 크고, 전극의 두께는 파장에 비해 충분히 얇다고 가정하고 있다. Fig. 1에 나타낸 파라미터는 각각 다음에 해당한다. 즉, v_i 는 각 지점 x_i 에서의 입자속도, p_i 는 응력 T_i 에 의해 생기는 x_i 지점에 있는 단면에서의 힘으로서 $p_i = s T_i$ 가 되며, F_i 는 구동전류 I 에 의해 압전체의 각 단면에 생기는 기진력으로서 $F_i = (h_i/j\omega)I$ 로 주어진다. 그리고 z_B 와 z_L 은 각각 후면체 및 매질의 음향 임피던스로서 $z_i = \rho_i c_i s$ 이다.

이 Kikuchi 모델은 임의의 압전체에 대한 압전응력상수 h 를 사용한 압전기본방정식에서 도출되는데, 두께 l 인 압전체의 한쪽 단면을 $x = 0$, 다른 쪽 단면을 $x = l$ 로 하였을 때, $x = l$ 지점의 힘과 입자속도는 $x = 0$ 지점의 값 p_0, v_0 로부터 전송선로의 체인파라미터에 의해 다음과 같이 구해지는 것에 근거한다.

$$\begin{bmatrix} p_l + \frac{h}{j\omega} I \\ v_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 + \frac{h}{j\omega} I \\ v_0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

여기서,

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta l & jz_0 \sin \beta l \\ j \frac{1}{z_0} \sin \beta l & \cos \beta l \end{bmatrix}. \quad (2)$$

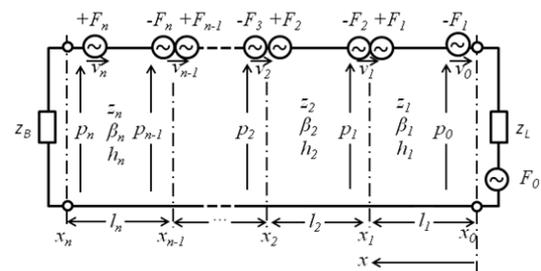


Fig. 1. Equivalent circuit model of a piezoelectric multi-layer transducer by Kikuchi et al.^[10]

이다. 선로를 구성하는 각 층의 전송특성은 식(2)에 의해 주어지며, 그 층들의 직렬접속에 의해 Fig. 1과 같은 등가회로로 표시되는데, 임의의 층이 압전성이 없을 경우 $h=0$ 이므로 해당하는 기진력원을 단락시키면 된다.

본 연구에서 대상으로 하고 있는 한쪽 면에만 전극이 형성된 PVDF 압전막을 이용한 $\lambda/4$ 모드 트랜스듀서는 Fig. 2(a)의 구조를 가지며, 그에 따른 Kikuchi 모델 등가회로는 Fig. 2(b)와 같이 된다. Fig. 2(b)에서 전원을 내부저항이 0인 기진력원으로 나타내었는데, 그것은 전극 양단에 실제적으로 걸리는 전압 V 를 기준으로 표시하였기 때문이다. 이 전압 V 는 그림에 나타난 바와 같이 압전체에 걸리는 전압 V_1 과 압전성이 없는 유전체인 접착층에 걸리는 전압 V_2 로 나누어진다. 또한, PVDF 및 에폭시 접착층의 경우는 손실을 무시할 수 없으므로 임의의 i 층에 대한 ABCD 파라미터는 다음의 식(2)와 같이 행렬 M_i 에 의해 나타내어진다.

$$M_i = \begin{bmatrix} a_i & b_i \\ c_i & d_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma_i l_i & jz_i \sinh \gamma_i l_i \\ j\frac{1}{z_i} \sinh \gamma_i l_i & \cosh \gamma_i l_i \end{bmatrix}, \quad (3)$$

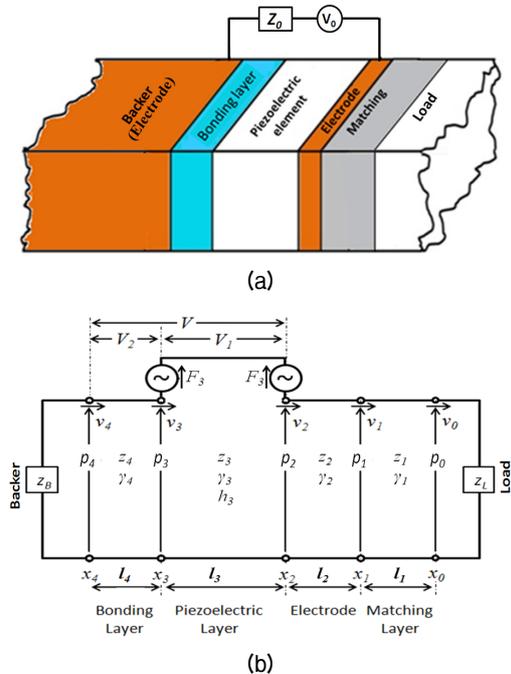


Fig. 2. The Kikuchi model: (a) construction of the $\lambda/4$ -mode PVDF transducer and (b) its equivalent circuit.

여기서, $\gamma_i = \alpha_i + j\beta_i$ (α_i [Np/m]는 감쇠계수, β_i [rad/m]는 위상정수)이다.

2.2 전기음향변환 관련 정수 유도

가역 트랜스듀서의 전기음향변환 관계를 나타내는 임피던스 형식의 기본식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[10,11]

$$\begin{bmatrix} F \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & z_m + z_L \\ Z_d & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ v \end{bmatrix}. \quad (4)$$

여기서 V 와 I 는 구동전압 및 전류, F 와 v 는 음향단의 외부구동력과 입자속도, z_m 과 z_L 은 기계 임피던스 및 매질의 음향임피던스, Z_d 와 A 는 제동 임피던스 및 변환계수(또는 힘계수)이다. 식(3)으로부터 외부구동력이 없을 때의 트랜스듀서의 전기입력 임피던스에 해당하는 자유 임피던스 Z_f 는 다음과 같이 구해진다.

$$Z_f = \left. \frac{V}{I} \right|_{F=0} = Z_d - \frac{A^2}{z_m + z_L}. \quad (5)$$

트랜스듀서의 특성해석을 위해서는 이 Z_f 를 구하는 것이 우선 필요한데, Fig. 2(b)의 등가회로에서 식(5)의 각 파라미터는 다음과 같이 유도된다. 먼저, 기계임피던스 z_m 은 음향단에서의 힘과 입자속도의 비이므로 z_B 로 종단된 선로를 고려하면,

$$z_m = \frac{p_0}{v_0} = -\frac{z_B M_T(2,2) - M_T(1,2)}{z_B M_T(2,1) - M_T(1,1)}, \quad (6)$$

여기서, $M_T = M_4 \times M_3 \times M_2 \times M_1$ 이며, 단위의 전류에 의해 제동된 음향단에 생기는 힘으로 정의되는 변환계수 A 는 다음과 같이 유도된다. 즉,

$$\begin{bmatrix} p_2 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 \\ v_0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} p_3 + \frac{h_3}{j\omega} I \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_3 & b_3 \\ c_3 & d_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2 + \frac{h_3}{j\omega} I \\ v_2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} p_4 \\ v_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_B v_4 \\ v_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_4 & b_4 \\ c_4 & d_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_3 \\ v_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

의 관계에 있으므로, (7)식에 $v_0 = 0$ 로 두면 상기 식들로 부터

$$A = \left. \frac{p_0}{I} \right|_{v_0=0} = -\frac{h_3}{j\omega} \left(\frac{z_B m_4 - m_2}{z_B m_3 - m_1} \right) \quad (10)$$

가 구해진다. 여기서

$$\begin{aligned} m_1 &= a_1 a_2 a_3 a_4 + a_3 a_4 b_2 c_1 + a_1 a_4 b_3 c_2 + a_4 b_3 c_1 d_2 + a_1 a_2 b_4 c_3 \\ &\quad + b_2 b_4 c_1 c_3 + a_1 b_4 c_2 d_3 + b_4 c_1 d_2 d_3, \\ m_2 &= (a_3 - 1) a_4 + b_4 c_3, \\ m_3 &= a_1 a_2 a_3 c_4 + a_3 b_2 c_1 c_4 + a_1 b_3 c_2 c_4 + b_3 c_1 c_4 d_2 + a_1 a_2 c_3 d_4 \\ &\quad + b_2 c_1 c_3 d_4 + a_1 c_2 d_3 d_4 + c_1 d_2 d_3 d_4, \\ m_4 &= (a_3 - 1) c_4 + c_3 d_4. \end{aligned}$$

a_i, b_i, c_i, d_i 의 각 값은 식(3)에 주어져있다. 한편 h 형식 압전기본방정식에서 전기장은

$$E = -hS + \frac{1}{\epsilon^S} D, \quad (11)$$

여기서 S 는 변형(strain), D 는 전기변위, ϵ^S 는 S 가 일정할 때의 유전율로 주어지므로 전압은 그 전기장의 적분에 의해

$$V = V_1 + V_2 = -h_3 \int_{x_2}^{x_3} \frac{\partial \xi}{\partial x} dx + \frac{D}{\epsilon^S} l_3 + \frac{D}{\epsilon^S} l_4 \quad (12)$$

가 되며, 전극 내에서 전류 I 가 일정하므로 $\partial D / \partial x = 0$ 이고, 변위 ξ 와 입사속도는 v 는 $\xi = v / j\omega$ 의 관계에 있으며, $I = d(DS) / dt = j\omega(DS)$ 이므로

$$V = -\frac{h_3}{j\omega} (v_3 - v_2) + \frac{I}{j\omega C_d}, \quad (13)$$

여기서

$$\frac{1}{C_d} = \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4}. \quad (14)$$

이 된다. 여기서 C_3 와 C_4 는 각각 압전층과 접합층의 커패시턴스이다. 따라서 C_d 는 그 직렬합성 값에 해당한다. 식(13)에서의 v_2 와 v_3 를 식(10)에 나타낸 변환계수 A 와 식(7)~식(9)를 이용하여 $v_0 = 0$ 에서 전류 I 의 함수로 나타낸 후 식(13)에 대입하면, 음향단 제동시의 전기입력 임피던스에 해당하는 제동 임피던스 Z_d 는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} Z_d = \left. \frac{V}{I} \right|_{v_0=0} &= -\frac{1}{j\omega C_d} - \frac{h_3 A}{j\omega} (a_1 a_2 c_3 \\ &\quad + b_2 c_1 c_3 + a_1 c_2 d_3 + c_1 d_2 d_3 - a_1 c_2 - c_1 d_2) \\ &\quad + \left(\frac{h_3}{\omega} \right)^2 c_3. \end{aligned} \quad (15)$$

식(6), 식(10) 및 식(15)를 식(5)에 대입하면 자유 임피던스가 구해지는데, 그것을 $Z_f = R_f + jX_f$ 로 두고, 매질의 음향 임피던스 z_L 와 전원의 출력 임피던스가 순수한 실수인 것으로 간주하면 트랜스듀서의 변환손실에 해당하는 삽입손실 IL 은 다음의 식(16)이 된다.

$$IL = \frac{\{(z_L + z_m)(R_0 + Z_f)\}^2}{4R_0 z_L A^2}. \quad (16)$$

그리고 식(16)의 역수를 취하면 트랜스듀서의 효율을 나타내는 전달함수가 구해지고, 그 전달함수의 크기로부터 파워스펙트럼이 얻어지며, 푸리에역변환(IFT)에 의해 펄스에코응답의 시간파형이 구해진다.

III. 결과 및 고찰

3.1 모델의 검증

먼저 도입한 모델의 타당성을 무한히 얇은 전극을 가진 두께 $l_3 = 80 \mu\text{m}$, 면적 $s = 10 \times 10 \text{ mm}^2$ 인 PVDF 압전막이 음향정합층 없이 Cu 후면체에 부착된 간단한 경우에 대하여 펄스에코응답을 시뮬레이션한 후 KLM 모델에 의한 결과와 비교함으로써 검증하였다. 접합층 및 구동전압의 연결 상태에 대해서는 Fig. 3과 같이 세 가지 경우를 가정하였다. 즉, (a) 접합층이 없고, 전압 V 가 PVDF 양단에 인가된 경우, (b)

접합층이 전극 외부에 있고, 전압 V 가 PVDF 양단에 인가된 경우, (c) 접합층이 전극 내부에 있고, 전압 V 가 PVDF와 접합층에 분압된 경우이다. Fig. 3(a)는 이상적인 경우를 가정한 것이며, Fig. 3(b)는 양쪽 면에 전극을 갖는 PVDF 압전막을 사용하여 트랜스듀서 제작하는 경우이고, Fig. 3(c)가 본 연구에서 고려하는 구조에 해당한다.

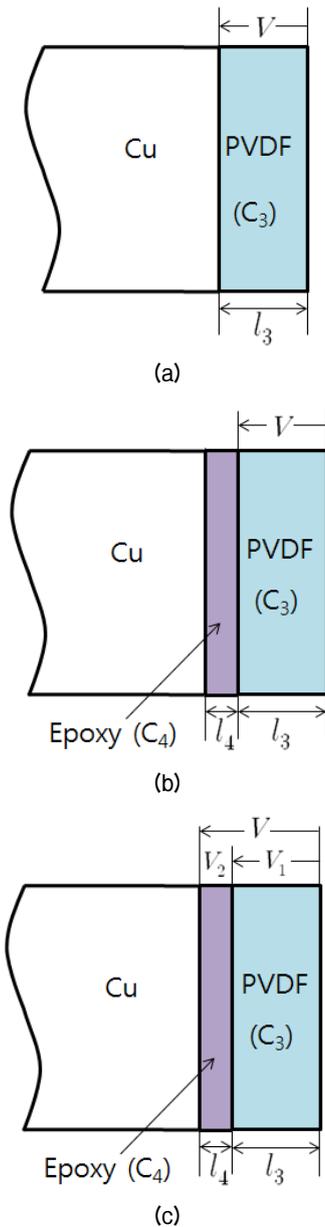


Fig. 3. Structures and driving voltages for the PVDF transducers with (a) a non-bonding layer, (b) an external bonding layer, and (c) an internal bonding layer.

Fig. 4에 Fig. 3(b)에 대한 KLM 모델을 나타내었는데, $l_4 = 0$ 로 두면 Fig. 3(a)에도 그대로 적용된다. 따라서 Fig. 3(a), (b)는 KLM 과 Kikuchi 모델을 다 사용할 수 있다. 그러나 전술한 바와 같이 Fig. 3(c)의 경우는 KLM 모델에 의한 엄밀한 해석이 곤란하다. 따라서 이 경우에 대한 KLM 모델의 적용에 있어서는 제동 커패시턴스 C_0 를 압전층과 접합층의 직렬합성 커패시턴스인 식(14)의 C_d 로 두고, 전압을 $V = V_1 = C_4 V / (C_3 + C_4)$ 로 바꾸어 단순 대입하였다. 이에 따른 KLM 모델의 시뮬레이션 결과는 Fig. 3(c)의 구조에 맞게 전기음향변환식과 압전기본방정식을 유도한 후 등가회로로 변경하여 엄밀히 해석한 것이 아니므로, 이론적 근거는 없으나 실험적으로 유사한 값이 얻어진바 있다.^[12] 따라서 여기서는 Kikuchi 모델과의 비교를 위한 참고 값으로 제시하였다.

Figs. 5에서 7은 Fig. 3의 각 경우에 대하여 펄스에 코응답 파형과 그 파워스펙트럼 시뮬레이션 결과를 KLM 모델과 비교하여 나타낸 것이다. 여기서, 접착층의 두께는 $5 \mu\text{m}$ 로 가정하였고, 각 재료의 물성치는 Table 1에 나타내었는데, 음속과 두께에 의해 구해지는 $\lambda/4$ 모드의 공진주파수는 6.6 MHz이었다. Figs. 5와 6에서 알 수 있는 것처럼 접착층이 없는 경우와 접착층이 전극의 외부에 있는 경우는 KLM 모델과 Kikuchi 모델의 시뮬레이션 결과가 서로 일치하여 파형 및 파워스펙트럼에서 두 곡선은 거의 구분되지 않는다. 그러나 접착층이 내부에 있는 경우는 Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 두 모델에 의한 결과가 차이가 있는데, 여기서 사용한 KLM 모델이 접합층의

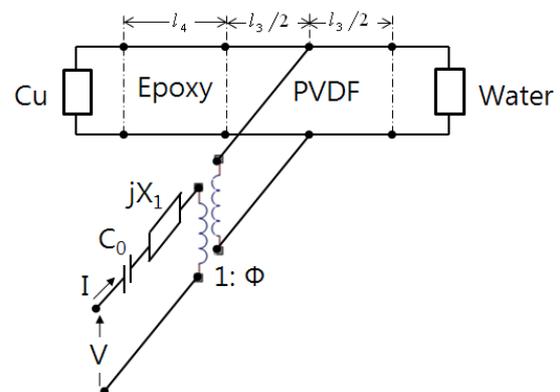


Fig. 4. KLM model for the PVDF transducer.

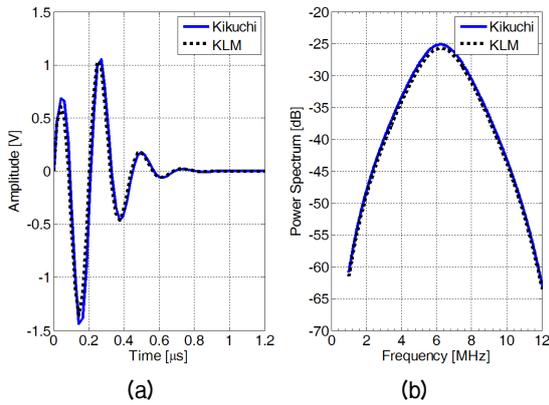


Fig. 5. Comparison of KLM and Kikuchi models for the simulation of the pulse-echo responses of the transducer with the non-bonding layer: (a) waveforms and (b) power spectra.

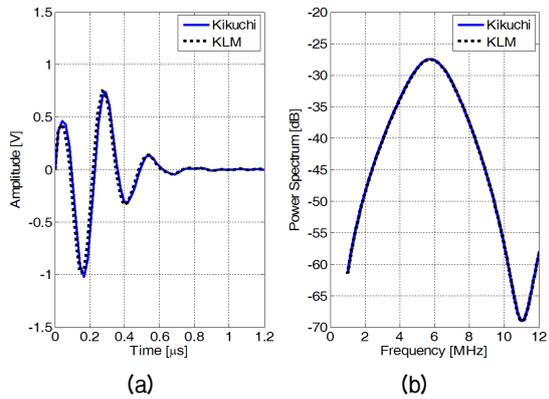


Fig. 6. Comparison of KLM and Kikuchi models for the simulation of the pulse-echo responses of the transducer with the external bonding layer: (a) waveforms and (b) power spectra.

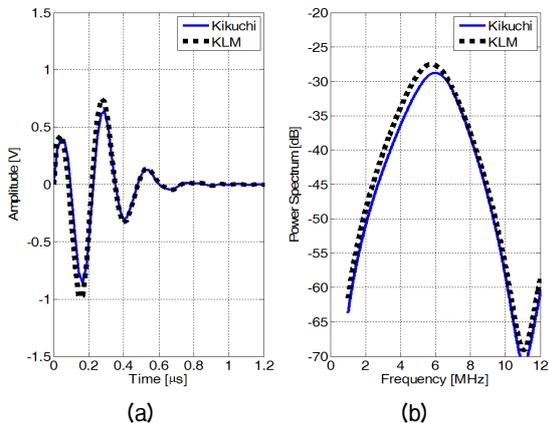


Fig. 7. Comparison of KLM and Kikuchi models for the simulation of the pulse-echo responses of the transducer with the internal bonding layer: (a) waveforms and (b) powerspectra.

영향을 엄밀히 해석하지 못하고 있음에 기인한 것으로 사료된다. 따라서 Kikuchi 모델은 전극 사이에 압전층만 있는 일반적인 트랜스듀서에서는 KLM 모델과 동일한 결과를 도출하며, 비압전성의 접합층이 존재하는 경우에도 엄밀한 특성 해석이 가능한 것으로 판단된다.

3.2 접합층 두께에 따른 특성 변화 측정

전극 사이에 에폭시 접합층을 갖는 트랜스듀서에 있어서 그 접합층의 두께에 따른 특성 변화를 실험적으로 파악하기 위하여 모델 검증에서와 같은 크기이며, 한쪽 면에만 전극을 갖는 PVDF 압전막을 이용하여 트랜스듀서를 제작하였다. 사용한 PVDF는 Fils 사(Fils Co., Ltd.) 제품으로 분극은 되어 있으나 전극이 형성되어 있지 않는 것을 입수하여, 실험실에서 스퍼터링(sputtering)에 의해 한쪽 면에만 약 0.1 μm 의 Au 전극을 형성시켰다. 트랜스듀서 제작에 있어서

Table 1. Physical parameters of the piezoelectric polymer and backer.

Element	Material	Parameters	
Piezoelectric layer	PVDF	Longitudinal velocity c [m/s]	2110
		Density ρ [kg/m^3]	1800
		Piezoelectric constant h	2.86×10^9
		Dielectric constant ϵ^S/ϵ_0	8.0
		Loss α [Np/mm/MHz]	0.3
Backer	Cu	Acoustic impedance Z [Mrayl]	41.6

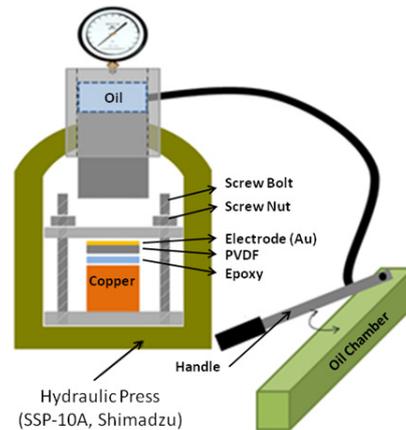


Fig. 8. Apparatus for fabrication of the transducers with different thicknesses of the bonding layer.

는 Fig. 8에 나타낸 바와 같은 지그 및 유압 프레스 (SSP-10A, Shimadzu)를 사용하였는데, 그 공정은 다음과 같다. 먼저 지그의 아래 판에 길이 30 mm, 직경 30 mm인 표면이 평탄하게 연마된 후면체용의 Cu 봉을 놓고, 그 윗면에 EPO-TEK 301(Epoxy Technology, Inc.) 에폭시를 얇게 도포한 다음 PVDF 압전막을 올려 놓는다. 다음으로 지그의 위판을 덮은 후, 프레스로 압력을 가하여 게이지가 적정 값을 가리키면 너트를 체결하고, 지그를 프레스로부터 분리한다. 그 분리된 지그를 에폭시가 안정되게 균도록 60 °C의 항온 챔버에서 4시간 이상 열처리한 후, 리드선을 연

결하여 제작을 완료한다. 사용한 에폭시의 음파물성은 Table 2와 같다.

에폭시 접합층의 두께는 프레스의 압력 지시값과 상관되므로 트랜스듀서를 제작하기 전에 여러 번의 예비실험을 통하여 프레스의 지시값과 광학현미경 (ICAMSCOPE, EG Tech., Ltd.)으로 측정된 접합층의 두께와의 상관 관계를 미리 파악하였는데, 게이지 압력이 높아지면 접합층의 두께가 얇아지는바, 접합층이 5 ~ 20 μm 두께를 가지도록 압력을 조정하여 트랜스듀서를 제작하였다. 제작된 트랜스듀서에 대한 특성 측정이 완료되면 그 단면을 절단하여 접합층의 두께를 상기한 광학현미경으로 관찰하였는데, 5, 10, 13, 16, 20 μm인 것으로 나타났다.

제작된 트랜스듀서들의 펄스에코 응답 파형과 그 파워스펙트럼을 측정된 결과를 Kikuchi 모델에 의한 시뮬레이션 결과와 비교하여 Figs. 9와 10에 각각 나타내었다. 측정된 펄스에코 응답은 25 °C의 수중에서 트랜스듀서로부터 1.0 cm 지점에 놓인 용융석영

Table 2. Physical properties of the bonding layer.

Element	Material	Parameters	
Bonding layer	EPO-TEK 301	Longitudinal velocity c [m/s]	2650
		Density ρ [kg/m ³]	1150
		Dielectric constant ϵ^S/ϵ_0	4.0
		Loss α [Np/mm/MHz]	0.3

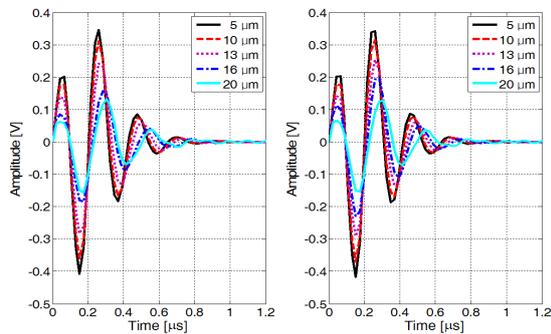


Fig. 9. Variation of waveform with the bonding layer thickness. (a) measurement, (b) simulation.

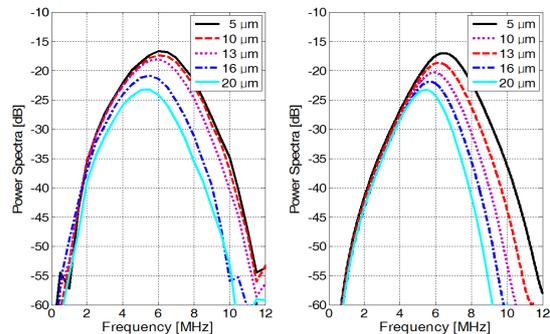


Fig. 10. Variation of power spectrum with the bonding layer thickness. (a) measurement, (b) simulation.

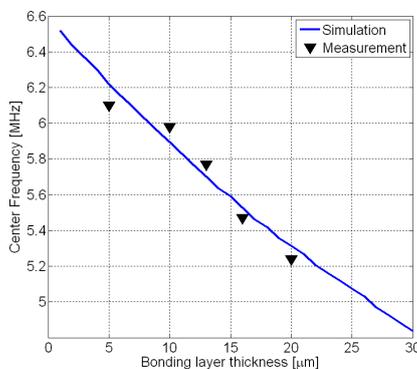


Fig. 11. Center frequency variation with the bonding layer thickness.

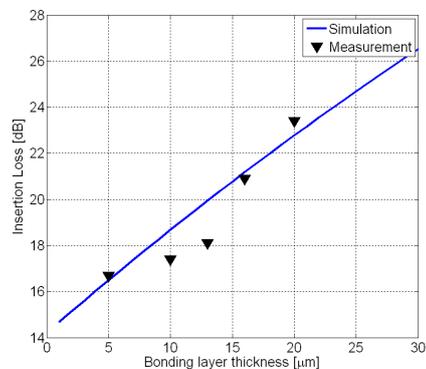


Fig. 12. Insertion loss variation with the bonding layer thickness.

표적으로부터 반사된 파형이다. 측정에 있어서는 MKCNDT XTR-2020(MKC Korea, Ltd.) 펄스/리시버와 LT-322(LeCroy Ltd.) 오실로스코프가 사용되었다. 이 결과로부터 접합층의 두께가 두꺼워짐에 따라 파형의 진폭은 감소하고, 펄스 지속시간은 증가함을 알 수 있다.

이에 따라, 중심주파수가 감소하고 삽입손실이 증가하는데 그 변화의 양상을 Figs. 11과 12에 각각 나타내었다. 각 그림에서 실선은 시뮬레이션에 의해 예측되는 변화이고, ▲는 측정치를 나타낸다. Fig. 11의 시뮬레이션 결과에 따르면 중심주파수는 접합층이 없을 때의 6.6 MHz에서부터 접합층의 두께가 5 μm 가 되면 6.2 MHz, 20 μm 가 되면 5.3 MHz로 감소하는 것을 볼 수 있는데, 측정결과와 상당히 잘 일치한다. 삽입손실은 접합층의 두께가 10 μm 와 13 μm 일 때 측정치가 시뮬레이션 결과에서 다소 벗어나 있으나 전반적으로 볼 때 ± 2.0 dB 이내에서 일치하고 있다. 또한 중심주파수에 대한 -6 dB 대역폭을 Fig. 13에 나타내었는데, 접합층의 두께가 증가하면 대역폭이 감소하는 것으로 나타난다. 측정결과는 시뮬레이션 결과에 비해 전반적으로 대역폭이 크게 나타나나 감소의 경향은 유사함을 알 수 있다. 접합층 두께에 따른 이러한 트랜스듀서의 성능 변화, 특히 파형의 진폭과 중심주파수의 변화는 Brown^[8]이 언급한 바와도 잘 일치한다. 이상의 결과들로부터 도입한 Kikuchi 모델에 의한 시뮬레이션에 의해 접합층의 두께가 트랜스듀서의 주요 성능, 즉 중심주파수, 삽입

손실 및 대역폭에 미치는 영향을 비교적 잘 예측할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 양 전극 사이에 압전층 외에 비압전성의 에폭시 접합층이 존재하는 $\lambda/4$ 모드 PVDF 초음파 트랜스듀서에 있어서 그 접합층의 두께가 트랜스듀서의 성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Kikuchi 모델에 의한 등가회로를 도출하고, 그 모델의 타당성을 검토한 후, 두께가 다른 접합층을 갖는 PVDF 트랜스듀서를 제작, 펄스에코 응답 파형 및 파워스펙트럼을 측정하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 그 결과 Kikuchi 모델은 접합층이 없거나 전극 외부에 있을 때 KLM 모델과 동일한 결과를 도출하며, 일반적인 KLM 모델로서는 해석이 곤란한 전극 사이에 접합층이 있는 경우에도 유효한데, 두께 5 μm ~ 20 μm 의 에폭시 접합층을 갖는 5개의 트랜스듀서에 대한 시뮬레이션 결과와 측정 결과는 비교적 잘 일치하였다. 따라서 도입한 Kikuchi 모델에 의해 접합층의 두께 변화가 트랜스듀서의 성능에 미치는 영향을 잘 파악할 수 있음을 알았는데, 에폭시 접합층이 20 μm 일 때는 그 접합층이 없을 때에 비해 중심주파수와 대역폭은 각각 약 19.7%, 25.0% 감소하고, 삽입손실은 57.2% 증가하는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2013년)에 의하여 연구되었음.

References

1. P. Lum, M. Greenstein, C. Grossman, and T. L. Szabo, "High-frequency membrane hydrophone," IEEE Transactions on UFFC, **43**, 536-544 (1996).
2. F. S. Foster, C. J. Pavlin, K. A. Harasiewicz, D. A. Christopher, and D. H. Turnbull, "Advanced in ultrasound biomicroscopy," Ultrasound in Med. & Biol. **26**, 1-27 (2000).
3. M. Robert, G. Molingou, K. Snook, J. Cannata, and K. K.

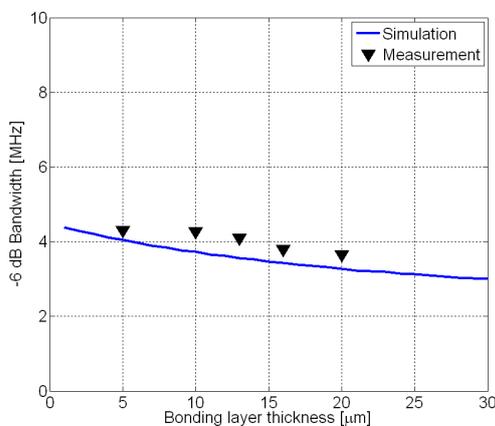


Fig. 13. The -6 dB bandwidth variation with the bonding layer thickness.

- Shung, "Fabrication of focused poly (vinylidene fluoride-trifluoroethylene) P(VDF-TrFE) copolymer 40-50 MHz ultrasound transducers on curved surfaces," *J. Appl. Phys.* **96**, 252-256 (2004).
4. J. A. Ketterling, F. L. Lizzi, O. Aristizabal, and D. H. Turbull. "Design and fabrication of a 40-MHz annular array transducer," *IEEE Trans. on UFFC*, **52**, 672-681 (2005).
 5. H. Ohigashi and K. Koga, "Ferroelectric copolymers of vinylidene fluoride and trifluoroethylene with a large electromechanical coupling factor," *Jpn. J. Appl. Phys.* **21**, L455-L457 (1982).
 6. J. S. Jeong and K. K. Shung, "Improved fabrication of focused single element P (VDF-TrFE) transducer," *Ultrasonics*, **53**, 455-458 (2013).
 7. C. H. Chung and Y. C. Lee, "Broadband poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) ultrasound focusing transducers for determining elastic constants of coating materials," *J. Nondestruct. Eval.* **28**, 101-110 (2009).
 8. L. F. Brown, "Design considerations for piezoelectric polymer ultrasound transducers," *IEEE Trans. on UFFC*, **47**, 1377-1396 (2000).
 9. R. Krimholtz, D. A. Leedom, and G. L. Matthaei, "New equivalent circuit for elementary piezoelectric transducers," *Electron. Lett.* **6**, 398-399 (1970).
 10. Y. Kikuchi, N. Chiubachi, and S. Yamamizu, "Analysis of Ultrasonic Multi-layer Transducer for UHF and VHF Ranges"(in Japanese), *Sound of IEICE*, **55-A**, 331-338 (1981)
 11. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppers, and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics* (John Wiley & Sons, 2000), 390-406.
 12. J. H. Yoon, J. H. Oh, J. S. Kim, M. J. Kim, and K. L. Ha, "Fabrication and evaluation of a VHF focusing ultrasonic transducer made of PVDF piezoelectric film" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **30**, 215-222 (2011).

저자 약력

▶ Yonggang Cao



2007년 6월: 중국 소주대학 재료공학과 졸업
 2010년 6월: 동 대학원 재료공학과 석사과정 졸업
 2011년 8월: 부경대학교 대학원 물리학과 석사과정 졸업
 2013년 8월: 동 대학원 물리학과 박사과정 수료
 2014년 ~ 현재: 부경대학교 박사수료후 연구생

▶ 하 강 렬(Kanglyeol Ha)



1978년 2월: 부산수산대학 어업학과 어업 물리전공 졸업
 1982년 8월: 부산수산대학 대학원 수산물 리전공 석사과정 졸업
 1990년 3월: 일본 도호쿠(東北)대학 대학원 공학연구과 졸업(Ph. D.)
 1991년 3월 ~ 현재: 부경대학교 물리학과 교수

▶ 김 무 준(Moojoon Kim)



1985년 2월: 부산수산대학 응용물리학과 졸업
 1990년 2월: 부산수산대학 대학원 응용물 리학과 석사과정 졸업
 1994년 3월: 일본 도호쿠(東北)대학 대학원 공학연구과 졸업(Ph. D.)
 1994년 3월 ~ 현재: 부경대학교 물리학과 교수

▶ 김 정 순(Jungsoon Kim)



1996년 2월: 부경대학교 물리학과 졸업
 1999년 2월: 부경대학교 대학원 음향진동 공학협동과정 석사과정 졸업
 2002년 3월: Tokyo University of Agriculture & Technology, Bio-Applications and Systems of Engineering(Ph. D.)
 2006년 3월 ~ 현재: 동명대학교 멀티미디어공학과 교수