

직선집속 PVDF 초음파트랜스듀서의 제작과 응용

I. 제작 및 특성평가

윤혁준*, 하강열**, 김무준**
(* 부경대학교 대학원 음향진동공학과, ** 부경대학교 물리학과)

Fabrication of PVDF Line Focus Ultrasonic Transducer and its Application

I. Fabrication and Characteristics Evaluation

Hyuck-joon Yoon*, Kang-lyeol Ha**, Moo-joon Kim**
(* Dept. of Acous. & Vib. Eng. in P.K.N.U., **Dept. of Phys. in P.K.N.U.)

요약

누설탄성표면파(Leaky Surface Acoustic Wave : LSAW) 측정에 사용하는 것을 목적으로 PVDF 압전막을 이용하여 직선집속 초음파트랜스듀서를 제작하고 그 특성을 평가하였다. 제작은 한 쪽면이 원통형 구조를 갖는 구리, 알루미늄, 3mmPVC-에폭시 3가지 재료를 배면층으로 사용하여 각각에 PVDF를 부착시켜서 수중에 음파를 방사하도록 구성하였고, 특성평가는 임펄스응답 특성과 음장 특성으로 나누어서 평가하였다. 임펄스응답 특성은 제작한 3종류의 집속 초음파트랜스듀서에 대해 실험적으로 측정하고, Mason 등가회로¹⁾를 이용한 이론적 해석결과와 비교하였다. 음장특성 측정실험은 구리를 배면체로하여 제작한 집속 초음파트랜스듀서에 대해서 실시하였고, 그 이론적인 계산결과는 Rayleigh-Sommerfeld 회절이론²⁾을 도입하여 초점면에 형성되는 음압분포를 계산하는 것으로 얻어졌다. 실험은 펄스 초음파 송수기 및 2 $\mu\text{m}/\text{step}$ 으로 이동하는 정밀 x-y-z 스테이지를 컴퓨터에 연결하여 자동 측정하는 것으로 수행되었는데, 그 결과는 이론 해석결과와 비교적 잘 일치하였다.

1980년대에는 초음파현미경의 발달과 함께 V(z)곡선을 통해 LSAW의 속도 및 감쇄측정이 가능해지고, 그 기술에 의해 고체매질이나 생체조직의 점탄성적 특성을 정밀하게 측정할 수 있게됨으로써 초음파 현미경은 물성 연구의 중요한 수단으로 발전되고 있다. 고체, 특히 전자재료의 탄성적 성질을 평가하는데 매우 유용하게 사용되어지고 있는 직선집속빔 (Line Focus Beam : LFB)초음파현미경은 LSAW를 한쪽 방향으로만 여진시키기 때문에 이방성(Anisotropy)를 포함한 탄성적 성질을 정량적으로 측정할 수가 있다³⁾. 따라서 일본, 미국 등 선진외국에서는 LFB 초음파현미경에 대한 연구가 매우 활발히 이루어지고 있을 뿐만 아니라, 재료의 비파괴검사, 반도체웨이퍼의 불균질성 검사 등 실제 산업에서도 활용되어지고 있는데 반하여, 국내에서는 이에 대한 연구가 전무한 실정이다. 본 연구는 LFB를 이용하여 재료의 탄성적 특성을 측정하기 위한 기초 연구이다. 본 논문에서는 그 목적에 사용하기 위해 제작한 PVDF LFB 초음파 트랜스듀서의 전기적, 음향적 특성에 대해 보고하고, 연속되는 논문에서 탄성표면파 측정의 응용 결과에 대해 보고한다.

1. 서론

초음파기술은 지난 70여 년 동안 눈부시게 발전을 해왔고 실질적으로 수중물체의 탐지, 재료의 비파괴검사, 의학적인 진단 및 치료수단 등에 다양하게 응용되고 있다.

2. Mason 등가회로에 의한 임펄스 응답 특성

제작한 직선집속 초음파트랜스듀서의 구조와 그것의 Mason 등가회로는 그림 1, 그림 2와 같이 나타내어진다.

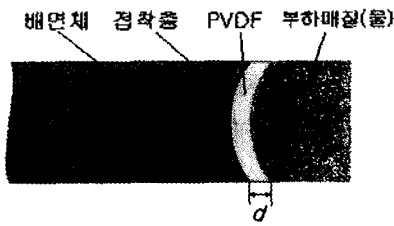


그림 1. 직선접속 초음파트랜스듀서의 구조

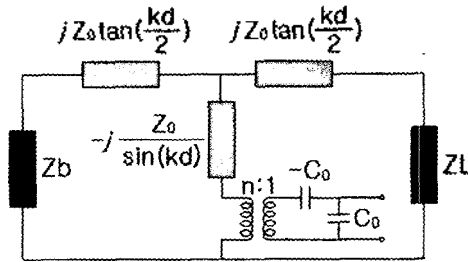


그림 2. Mason등가회로에 의한 표현

얇은 압전막이 두께모드로 진동한다고 볼 때 Mason 등가회로는 그림 2와 같이 3개의 단자로 나타내어지고 각각의 등가회로의 요소들은 아래와 같은 값을 갖게된다.

- ZL = 부하의 음향특성임피던스,
- Zb = 배면체의 음향특성임피던스
- Z_0 = PVDF의 특성임피던스

$$Z_1 = -j \frac{Z_0}{\sin(kd)}, Z_2 = -j Z_0 \tan\left(\frac{kd}{2}\right) ; \text{단, } j = \sqrt{-1}$$

$$C_0 = \text{PVDF의 계동용량, } n = k_s A \frac{\sqrt{Z_0 v \epsilon^s}}{d}$$

k_s = 결합계수, A = PVDF의 면적, ϵ^s = 유전율
 v = PVDF의 음속, k = 파수, d = PVDF의 두께

각 배면체와 PVDF의 물성치는 표. 1에 나타내었다. 각각의 배면체에 대한 회로의 해석을 통해 이론적으로 삽입손실과 임펄스응답 파형을 구할 수가 있다

[표 1] 사용된 물질의 물성표

	음속 [m/s]	밀도 [kg/m ³]	음향임피던스 [Mrayl]	유전율 [F/m]	두께 [μm]
PVDF	2200	1780	3.9	55.8×10 ⁻¹²	52
구리	4700	8900	42		
알루미늄	6350	2695	17.1		
PVC	2293	1440	3.3		
EPOXY	2450	1100	2.7		

이 계산에서는 음향부하로부터 평판 반사체까지의 에너지 전달은 주파수에 독립적이고, 부하 매질에서의 흡수와 회절에 의한 에너지 손실은 포함시키지 않았다. 다만 트랜스듀서의 내부손실과 전기기계결합계수(k_t)는 1997년

에 Kin⁴등이 Kynar Piezo Film 사의 PVDF 샘플로 계산한 탄성 탄젠트손실 $\tan \delta_m$ 과 유전 탄젠트손실 $\tan \delta_e$ 을 이용하였는데, 그 값은 표 2에 나타나 있다.

[표 2] 탄젠트손실 및 전기기계결합계수

	$\tan \delta_m$	$\tan \delta_e$	k_t
PVDF	0.133	0.256	0.146

3. 이론 계산 및 측정

그림 3은 구리로 제작한 초음파트랜스듀서로서 삽입손실과 파형특성의 이론치는 그림 4, 그림 5와 같이 계산되었고, 최소삽입손실은 47.2dB로 9.5MHz부근에서 나타났다. 이론치의 대역폭은 7.9MHz이고 비대역은 93.5%이었다. 실험치는 그림 6, 그림 7과 같이 측정되었고, 최소삽입손실은 50.3dB로 9.5MHz부근에서 나타났다. 측정된 대역폭은 6.5MHz이고 비대역은 75.0%로 계산되었다.

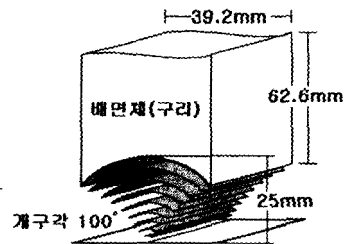


그림 3. 배면체가 구리인 직선접속 초음파트랜스듀서

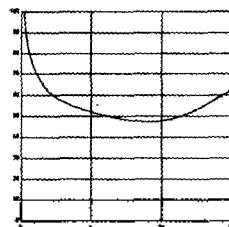


그림 4. 삽입손실 곡선 (이론치)

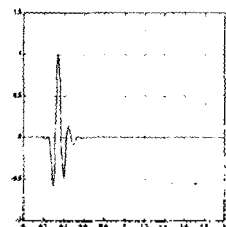


그림 5. 파형 특성 (이론치)

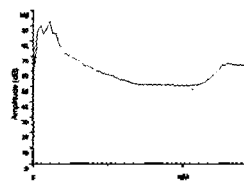


그림 6. 삽입손실 곡선 (실험치)

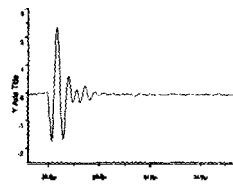


그림 7. 파형 특성 (실험치)

그림 8은 알루미늄으로 제작한 초음파트랜스듀서로서 삽입손실과 파형 특성의 이론치는 그림 9, 그림 10과 같이 계산되었고, 최소삽입손실은 47.6dB로 9.5MHz부근에서 나타났다. 이론치의 대역폭은 8.0MHz이고 비대역은

92.3%이었다. 실험치는 그림 11, 그림 12와 같이 측정되었고, 최소삽입손실은 50.0dB로 10MHz부근에서 나타났다. 측정된 대역폭은 6.0MHz이고 비대역은 61.0%로 계산되었다.

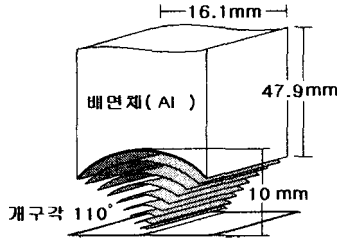


그림 8. 배면체가 알루미늄인 직선 집속 초음파트랜스듀서

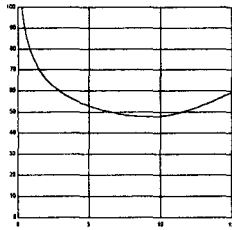


그림 9. 삽입손실 곡선 (이론치)

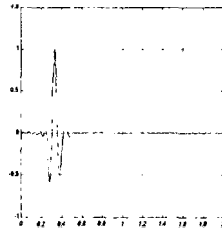


그림 10. 파형 특성 (이론치)

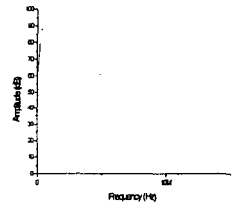


그림 11. 삽입손실 곡선 (실험치)

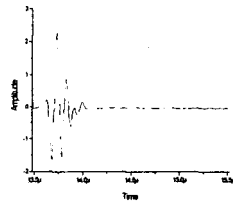


그림 12. 파형 특성 (실험치)

그림 13은 3mmPVC-에폭시로 제작한 초음파트랜스듀서로서 삽입손실과 파형특성의 이론치는 그림 14, 그림 15와 같이 계산되었고, 최소삽입손실은 47.6dB로 9.5MHz부근에서 나타났다. 이론치의 대역폭은 12.7 MHz이고 비대역은 123.8%이었다. 실험치는 그림 16, 그림 17과 같이 측정되었고, 최소삽입손실은 53.8dB로 8.0MHz부근에서 나타났다. 측정된 대역폭은 9.3MHz이고 비대역은 105.0%로 계산되었다.

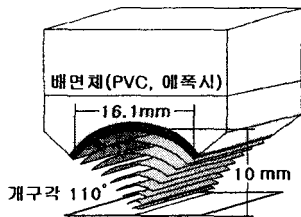


그림 13. 배면체가 PVC-에폭시인 직선집속 초음파트랜스듀서

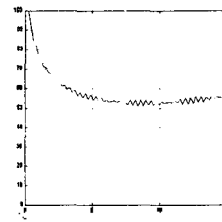


그림 14. 삽입손실 곡선 (이론치)

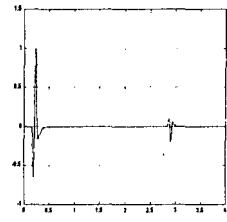


그림 15. 파형 특성 (이론치)

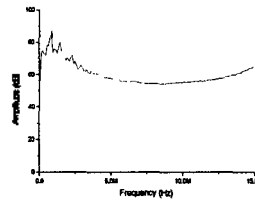


그림 16. 삽입손실 곡선 (실험치)

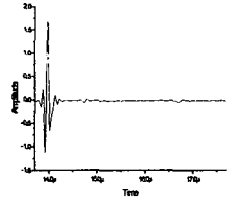


그림 17. 파형 특성 (실험치)

4. Rayleigh-Sommerfeld 회절이론에 의한 음장계산

그림 18의 좌표계에서 나타낸 바와같이 반경이 R 인 직선집속 초음파트랜스듀서의 오목면 z_0 로부터 개구면 z_1 을 지나 축상에서 $z=z_2$ 거리에 있는 xy 단면 S_2 의 음장 $U_2(x_2, y_2, z_2)$ 는 Rayleigh-Sommerfeld 회절공식에 의해 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.²⁾

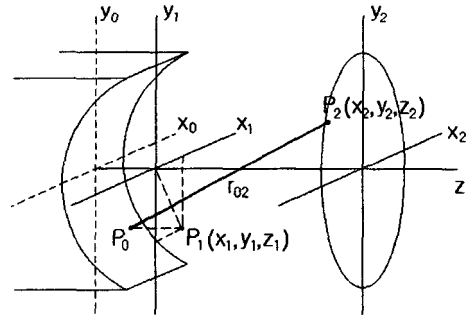


그림 18. 음장계산을 위한 음원면과 관측면의 기하학적 표현

$$U_2(x_2, y_2, z_2) = \frac{1}{j\lambda_w} \iint_s U_0(x_0, y_0, z_0) \times \frac{e^{jk_w r_{02}}}{r_{02}} ds \quad (1)$$

여기서 $U_0(x_0, y_0, z_0)$ 는 트랜스듀서면상의 음장이며, ds 는 그 면상의 미소 면적으로 $ds = dx dy$ 로 두고, 트랜스듀서를 피스톤음원이라고 가정하여 $U_0(x_0, y_0, z_0) = 1$ 로 두면 식 (2)가 성립한다.

$$U_2(x_2, y_2, z_2) = \frac{1}{j\lambda_w} \iint_s \frac{e^{jk_w r_{02}}}{r_{02}} dx dy \quad (2)$$

그림 18에서 음원면상의 한 점의 좌표를 $P_0(x_0, y_0, z_0)$, 개구면의 좌표를 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 관측점의 좌표를

$P_2(x_2, y_2, z_2)$, P_0, P_2 두 점간의 거리를 r_{02} 라고 하면, 음원의 좌표 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 는 집속형 트랜스듀서의 특성에 따라 개구면의 좌표를 기준으로 해서 식 (3)과 같이 x_1, y_1 으로 표현된다.

$$P_0(x_0, y_0, z_0) = P_0(x_1, y_1, R - \sqrt{R^2 - y_1^2}) \quad (3)$$

따라서 거리 r_{02} 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있고,

$$r_{02} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - [R - \sqrt{R^2 - y_1^2}])^2} \quad (4)$$

식 (4)를 식(2)에 대입하여 이론적으로 구할 수 있다.

5. 음장측정

음장측정 실험장치는 그림 19와 같이 구성하였고, 가장 파형이 정확하고 효율과 대역폭이 양호한 구리로 제작한 LFB 트랜스듀서에 대해 측정하였다. 먼저 초점면에서 x축에 대한 이론과 실험치는 그림 20, 그림 21에서 보인 바와 같이 빔의 폭이 이론과 실험치 모두 약 20mm로 거의 일치하는 값을 나타내었다

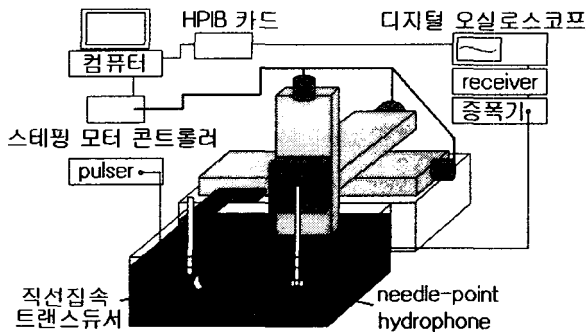


그림 19. 음장 측정 실험장치도

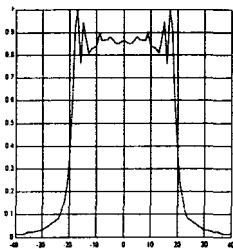


그림 20. x축에 대한 음장계산

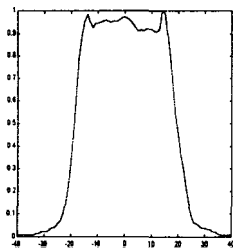


그림 21. x축에 대한 음장측정

초점면에서 y축에 대한 음장의 이론과 실험치는 그림 22, 그림 23과 같이 나타났는데 계산치 측정치 모두 거리분해능이 약 0.5mm로써 첨예한 특성을 볼 수 있다. 초점심도를 측정하기위해 음원의 중심으로부터 z축을 따라 계산하고 측정한 음장분포는 그림 24, 그림 25와 같이 나타났다. 계산에 의한 초점심도는 2.5mm이고 측정에 의한 초점심도는 5mm로 약 2배 가량 길게 나타났다.

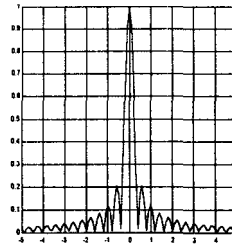


그림 22. y축에 대한 음장계산

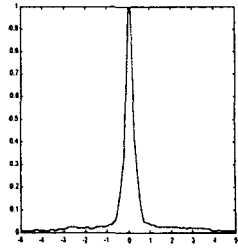


그림 23. y축에 대한 음장측정

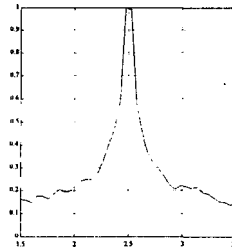


그림 24. z축에 대한 음장계산

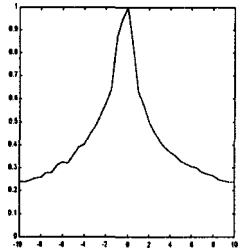


그림 25. z축에 대한 음장측정

6. 결론

본 연구에서는 LFB PVDF 초음파트랜스듀서를 배면체가 다르게 제작하여 그 특성을 분석하고 측정하였다. 측정된 실험치는 Mason등가회로에 의한 이론치와 잘 일치하였다. 구리배면체와 알루미늄배면체의 경우 PVC-에폭시배면체에 비해서 대역폭은 좁지만 삽입손실이 낮았고, 알루미늄보다 구리일 때가 대역폭이 좀더 넓고 양호한 파형특성이 나타났다. 구리배면체 초음파트랜스듀서에 대한 음장특성측정에서도 이론과 실험 모두 잘 일치하였는데 x, y축의 공간분해능이 20mm, 0.5mm로써 빔폭의 비가 40:1인 직선집속특성이 잘 나타났고 초점심도는 5mm로 측정되었다. 이상과 같이 제작된 LFB 초음파트랜스듀서는 전기적, 음향적 특성이 이론과 잘 일치하였고 의도한 특성대로 제작되었다는 것을 확인하였다.

7. 참고문헌

- 1) V. M. Ristic, "Principles of Acoustic Devices", John Wiley & Sons, pp. 117 - 165, 1983.
- 2) J. W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics", McGraw-Hill Co., pp. 42-54, 1968.
- 3) J. Kushibiki, N. Chubachi, "Material Characterization by Line-Focus-Beam Acoustic Microscope" IEEE Trans. Sonics Ultrason., Vol. SU-32, No. 2, pp. 189-212, 1985.
- 4) K. Kwok, H. Chan, C. Choy, "Evaluation of the Material Parameters of Piezoelectric Materials by Various Methods" IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., Vol. 44, No. 4, pp. 733-742, 1997.