

압전형 초음파 변환자의 성능해석 시뮬레이션 및 실험

Performance Analysis of Piezoelectric Ultrasonic Transducers; Simulation and Experiments

* 이 종 현 (Ih Jong Hyun)
* 성 썩 모 (Sung Koeng Mo)
* 이 병 호 (Lee Byung Ho)

요 약

압전형 초음파 변환자의 특성을 압전체, matching layer, backing 매질, tuning 및 구동 회로를 고려하여 해석하였다. 압전체는 KLM 모델을 이용하였고, 모델변수를 실험적으로 추정하여 시뮬레이션에 대입하였다.

실험적인 RTIL (Round Trip Insertion Loss)은 편반사 (plane reflection)에 대한 pulse -echo를 측정하여 계산하였으며, 이론치와 비교할 때 20 dB 주파수 대역내에서 3 dB 이하의 오차가 관찰되었다.

ABSTRACT

Performances of piezoelectric ultrasonic transducer are analyzed considering piezoelectric material, matching layers, backing, medium, tuning and driving circuits. For piezoelectric material KLM-model was used and the empirical model parameters are put into simulation processes.

By pulse-echo method RTIL (Round Trip Insertion Loss) was acquired, the difference between theory and experiment was within 3 dB in 20 dB frequency bandwidth.

1. 서 론

초음파 변환자 (ultrasonic transducer)는 비파괴 검사나 의료진단에 많이 이용되고 있으나 그 제작에 있어서의 재현성 (reproducibility)이 아직 문제점으로 남아 있다. < R·1 > 따라서 변환자에 대한 시뮬레이션을 통하여 그 성능에 영향을 주는 설계나 제작 과정의 주요 변수를 아는 것이 중요하다.

시뮬레이션은 초음파 변환자의 RTIL 및 임펄스 응답

에 대하여 이루어졌으며 압전체는 두께 방향 진동의 KLM-model < R·2 >을 이용하였다. 변환자 각 요소에 대해 전달 행렬을 사용하므로써 설계 변경이 용이하도록 하였다. KLM-model의 분포정수는 실험적인 전기저항곡선으로부터 추정하였고 변환자 제작에 쓰이는 여러 재료의 음향 임피던스에 대해서도 측정된 값을 시뮬레이션에 대입하였다.

이상의 시뮬레이션과 실험을 비교하기 위해 시편에 대한 pulse-echo 방법을 이용하여 RTIL을 측정하였다.

* 한국과학기술원 기계공학과 박사과정

** 서울대학교 전자공학과 교수

*** 한국과학기술원 기계공학과 교수

II. 일반적인 설계 개념

초음파 변환자의 설계에는 보통 아래의 두 성능변수를 고려한다.

II - 1 해상도 (Resolution)

의료진단에 쓰이는 변환자의 중요한 성능 기준으로서 축방향으로 배열된 반사체의 구별능력을 들 수 있으며 이 축방향 해상도 (axial resolution)가 높다는 것은 그 주파수 특성이 광대역 (broad band)임을 의미한다. 축방향 해상도에 영향을 주는 요소에는 구동 및 수신 회로, 신호 처리 그리고 변환자 특성 등이 포함되며, 20 dB 또는 40 dB 감쇄 (ring down)하는데 걸리는 시간이 성능변수로 많이 이용된다.

측 방향 해상도 (lateral resolution)는 변환자면에 평행한 방향으로의 구별능력을 말하며, beam 폭이 축방향 해상도를 결정짓는 중요한 변수가 된다. 이 beam 폭에 영향을 주는 요소로는 변환자의 모양, 주파수, 음향렌즈의 유무 그리고 변환자로부터의 위치를 들 수 있다.

초음파 변환자는 주파수를 높일수록 해상도가 좋아지나 일반적으로 매질의 손실이 주파수에 따라 커지므로 특히 손실계수가 큰 인체를 진단하는 의료용 변환자일 경우에는 영상을 얻을 수 있는 깊이의 제한이 있게 된다.

II - 2. 감도 (Sensitivity)

감도는 S/N비와 밀접한 관계가 있는 변수로서 변환자, 구동 및 수신 회로, 신호 처리 그리고 display 회로 등 여러 요소가 포함되어 있어 정의하기가 어렵다. 여기에서는 energy 변환 효율을 의미하는 무차원의 RTIL (Round Trip Insertion Loss) (R · 3) 을 감도로 이용한다.

보통 감도는 축방향 해상도와 서로 상충 (trade off) 되므로 사용 목적에 따른 최적설계가 필요하다.

III. 시뮬레이션

초음파 변환자에 대한 시뮬레이션은 그림 1 과 같이 원형 PZT, 전방의 matching layer, 후방의 backing, 매질, tuning 및 구동 회로 등을 고려하였다.

압전체와 backing 을 붙일 때 많이 사용되는 epoxy는 음향 임피던스가 약 3×10^8 Mrayl로서 압전체와 차이가 많이 있으므로 그 접촉면 두께가 1400 파장 이상일 때, 특히, 높은 음향 임피던스의 backing이 사용된 변환자

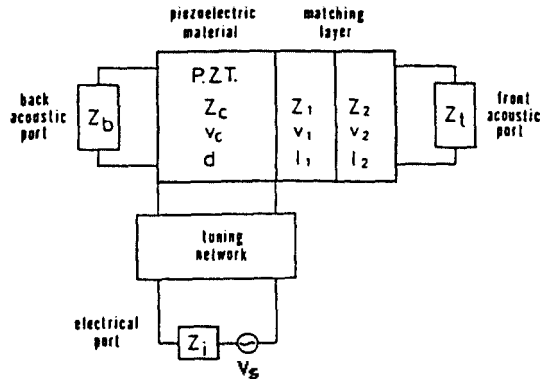


그림 1 초음파 변환자의 구성도
 Z_c, Z_b, Z_2, Z_0, Z_i : 음향 임피던스
 V_c, V_1, V_2 : 음속
 d, L_1, L_2 : 두께

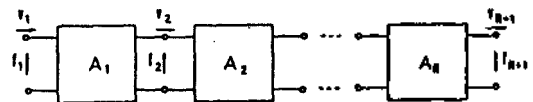
의 펄스 모양에 많은 영향을 주게 되어 시뮬레이션에 포함시켜야 한다.

또 일반적으로 전극의 두께는 10 μm 이하로서 Ag인 경우에 그 음향 임피던스가 압전체와 비슷하며 2.25 MHz에서 1/100 파장 이하이어서 광대역 주파수 특성과 초음파 변환자의 성능에 거의 영향을 주지 않는다.

시뮬레이션 방법은 변환자를 구성하고 있는 각 요소에 대해 4 단자 정수의 행렬 (R · 3) 을 이용하였다.

이 방법은 전체 변환자의 특성이 그림 2와 같이 각 행렬의 곱으로 표시되므로 변환자 요소의 변화에 따른 program 변경이 쉽게 된다.

변환자의 송·수신 전달 함수와 RTIL 그리고 각각에 대한 임펄스 응답은 전달 행렬 양쪽의 두 변수 ($f_1, V_1, f_{n+1}, V_{n+1}$)에 대한 경계조건을 대입하여 구해진다.



$$\begin{bmatrix} f_2 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ V_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} f_{n+1} \\ V_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_n \\ A_{n-1} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} A_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ V_1 \end{bmatrix}$$

Fig.2 transfer matrix of ultrasonic transducer

그림 2. 초음파 변환자의 전달 행렬

그림 3은 matching layer의 두께에 따라 계산된 RTIL로서 1/4파장 보다 약간 작은 두께에서 RTIL이 가장 적으며 또 주파수 대역도 넓어짐을 보여주고있다.

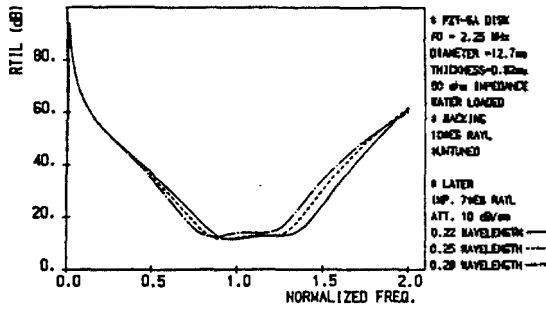


FIG. 3 ROUND TRIP INSERTION LOSS

그림 4는 backing 임피던스에 따른 RTIL로서 감도와 주파수 대역 사이의 상충 관계를 알 수 있다.

즉 backing의 임피던스가 15×10^6 rayl일 때에는 임피던스 matching이 비교적 좋아 RTIL이 크고 광대역의 주파수 특성을 나타내나, 임피던스가 5×10^6 rayl일 때에는 RTIL은 작고 협대역의 주파수 특성을 나타낸다.

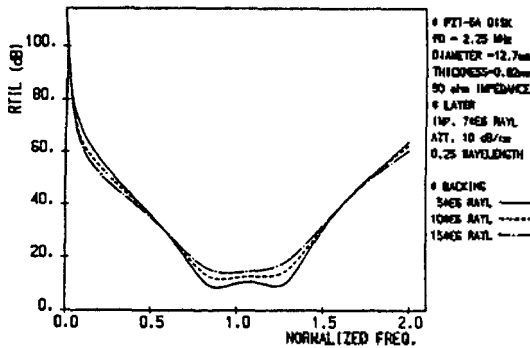


FIG. 4 ROUND TRIP INSERTION LOSS

그림 5는 backing을 압전체에 붙일 때 생기는 접착면의 두께에 따라 계산된 RTIL이다.

그림에서 두께가 두꺼울 때 감도가 커지나 주파수 대역은 오히려 좁아져 임펄스 응답의 ring down이 길어진다.

일반적으로 감도 증가의 장점에 비해 속방향 해상도 저하가 더욱 문제가 되므로 접착면은 되도록 얇은 것이 좋다.

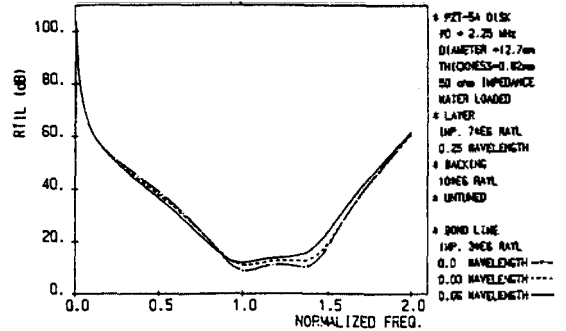


FIG. 5 ROUND TRIP INSERTION LOSS

그림 6은 직렬 tuning이 RTIL에 미치는 영향을 보여주고 있으며, tuning에 의해 감도가 높아지며 주파수 대역도 넓어짐을 알 수 있다.

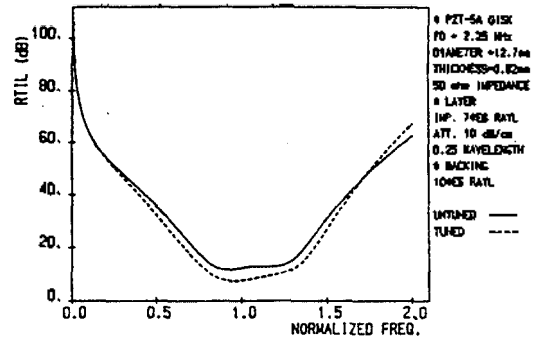


FIG. 6 ROUND TRIP INSERTION LOSS

그림 7은 matching layer갯수에 따른 RTIL로서 1/4 파장 - matching법을 이용했을 경우, 2개의 layer일 때가 1개일 때에 비해 중심주파수 근처의 감도가 더욱 커지며, 그 임펄스 응답 [그림 8]에서 알 수 있듯이 축방향 해상도도 좋아진다.

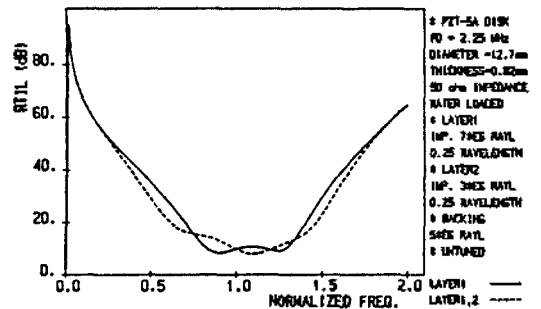


FIG. 7 ROUND TRIP INSERTION LOSS

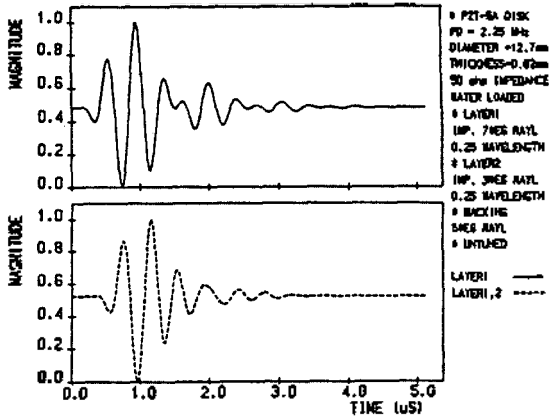


FIG. 8 IMPULSE RESPONSE

IV. 측정 및 실험결과

IV-1. Matching layer 및 backing의 음향 임피던스 측정

음향 임피던스에 대한 실험은 그림 9와 같이 펄스 발생기의 전기 펄스가 변환자에서 초음파로 바뀐 후 시편의 정측면에서 반사된 echo를 수신함으로써 이루어진다.

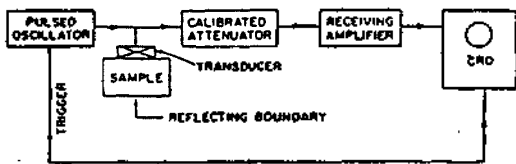


그림 9 음향 임피던스 및 pulse-echo에 대한 실험방법

이웃하는 반사파 사이의 시간 간격을 t , 시편의 두께와 밀도를 각각 d, ρ 라 할 때 임피던스는 $2\rho d/t$ 이다.

Matching 및 backing에 사용할 목적으로 epoxy-resin에 여러 가지 분말을 섞어 만든 재료에 대해 측정된 음향 임피던스는 그림 10과 같다.

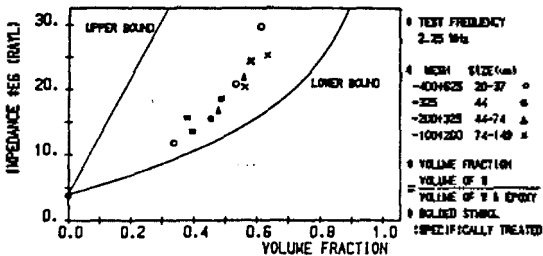


그림 10 음향 임피던스

그림의 임피던스에 대한 상한선과 하한선은 입자의 크기가 파장에 비하여 충분히 작을 때 얻을 수 있는 이론적인 곡선이며 <R.4> 제작된 시편의 임피던스 값은 모두 두 곡선사이에 들어 있다.

IV-2. 변환자의 특성 측정

변환자의 특성을 측정하기 위해 그림 9와 같이 반사체에 대한 pulse-echo 실험을 하였다. Pulse 모양의 오차를 줄이기 위하여 시편내의 다중반사에 의해 pulse가 중복되지 않는 최소 두께의 시편을 사용하였으며 더욱 정확한 이론적 예측을 위해서는 원형 변환자의 면반사에 대한 diffraction filter <R.5>를 사용해야 한다.

그림 11은 수신된 pulse-echo와 시뮬레이션에 의한 결과를 비교한 것이다. 비교적 이론과 실험이 잘 일치하나 펄스 뒷 부분의 차이는 변환자의 edge wave <R.6>에 의한 영향으로 생각된다.

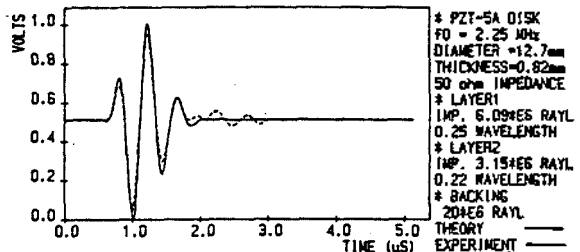


FIG. 11 PULSE-ECHO RESPONSE

그림 12는 RTIL에 대한 이론과 실험의 비교로써, 이론적인 RTIL곡선의 최대값을 기준으로 한 20 dB 주파수 대역내에서 3dB 이하의 오차를 보이고 있다.

가장 큰 3 dB 오차는 2.25 MHz로 무차원화 했을 때 0.65 근처에 있으며 III장의 시뮬레이션을 검토하였을 때 압전체와 backing사이의 epoxy 접착면의 영향으로 볼 수 있다.

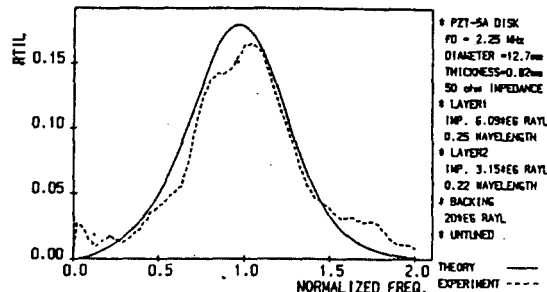


FIG. 12 ROUND TRIP INSERTION LOSS

V. 결 론

압전형 초음파 변환자의 RTIL 및 임펄스 응답에 대하여 시뮬레이션과 실험을 하였다.

RTIL에 대한 이론과 실험의 오차는 20 dB 주파수 대역안에서 3 dB 보다 적었다.

또 변환자에 쓰이는 여러 음향재료를 만들고 그 임피던스를 측정함으로써 실제 변환자 제작에 쓸 수 있는 유용한 자료를 얻었다.

이상의 결과는 비파괴 재료시험이나 Doppler용 변환자의 설계 제작에 응용될 수 있으며 또 medical imaging용의 배열소자[transducer array]연구의 기초 자료가 될 수 있다.

본 논문은 과학기술처에서 시행하는 특정연구 개발 사업의 연구결과임을 밝히며, 그동안 박 송배 교수님의 격려와 도움말씀에 무한히 감사드리며 또한 KAI-ST 음향실험과, 회로실 선후배 제씨의 도움에도 감사드립니다.

REFERENCES

1. M.G. Silk, "Predictions of the effect of some constructional variables on the performance of ultrasonic transducers", *Ultrasonics*, 27-33 (March 1983).
2. R. Krimholtz, D. Leedom, and G. Matthaei, "New equivalent circuits for elementary piezoelectric transducer", *Electronics Lett.* 6, 398-399 (June 1970).
3. S.J.H. van Kervel and J.M. Thijssen, "A calculation scheme for the optimum design of ultrasonic transducers", *Ultrasonics*, 134-140 (May 1983).
4. B. Paul, "Prediction of elastic constant of multiphase materials", *Trans. Met. Soc. AIME* 218, 36-41 (1960).
5. T.L. Rhyne, "Radiation coupling of a disk to a plane and back or a disk to a disk; An exact solution", *JASA*, 61(2), 318-324 (Feb. 1977).
6. A.J. Hayman, "Transmission and reception of short ultrasonic pulses by circular and square transducers", *JASA*, 66(4), 945-951 (Oct. 1979).