

압전 초음파 탐촉자의 대역폭 확장을 위한 연구

김진호, 김희락, 최명선

영남대학교 물리학과

A study for bandwidth broadening of piezoelectric ultrasonic transducers

Jin Ho Kim , Hee Rak Kim and Myoung Seon Choi

Department of Physics, Youngnam University

e-mail : vision1123@hanmail.net

요약

비파괴검사, 수중탐지, 의료진단 등에 사용되는 초음파탐촉자에 요구되는 가장 중요한 특성에는 높은 감도와 좋은 분해능이 있다. 본 연구에서는 압전초음파탐촉자의 구성요소(인덕터, 정합층, 후면재 등)가 감도와 분해능에 미치는 영향을 분석한 후, 광대역탐촉자의 구성요소를 결정하였다. 또한 광대역탐촉자의 시작품을 제작하고 성능시험을 수행하여 이론예측과 실험결과가 잘 일치함을 보였다.

서론

의료진단, 비파괴검사, 수중 탐지 등의 많은 분야에서 피검체를 진단하고 예측하기 위하여 초음파 검사법을 사용하고 있다. 초음파 검사법에 대표적으로 사용되고 있는 압전초음파탐촉자는 압전판, 후면재, 정합층(혹은 보호층), 전기정합소자 등으로 구성되어진다.

압전세라믹은 일반적으로 19 ~ 35 MRayl 의 높은 임피던스를 가진다. 부하의 음향임피던스가 낮을 경우에는 부하로의 에너지투과율이 작고 압전판의 내부 울림(ringing)은 커서 좁은 주파수 대역폭을 갖게 된다. 이 점을 보완하기 위해 압전재 앞에 음향임피던스 정합층을 적용한다. 보다 넓은 대역폭을 얻기 위해 압전재의 음향임피던스와 비슷한 음향임피던스를 갖는 후면재를 적용하기도 하지만, 이는 상대적으로 전면부하 쪽으로의 에너지투과율을 낮추게 된다. Kossoff[1]는 한 층의 정합층을 제안하였다. Desilet 등[2]은 KLM 등가회로의 음향부분과 전기부분의 품질인자(Q-factor)들이 일치되도록 하는 후면재 선택의 중요성을 지적하였다.

Souquet[3] 등은 가장 높은 효율을 얻는 공기를 후면재로 사용하는 탐촉자가 가지는 구조적인 불안정성의 단점을 개선하기 위해 에폭시-텅스텐 후면재와 압전판 사이에 임피던스 부정합층의 사용을 제안하였다. Silk[4]는 탐촉자 구성요소의 변화가 그 성능에 미치는 영향을 분석하였고, Bainton과 Silk[5]는 압전판과 거의 같은 임피던스를 갖는 에폭시-텅스텐 후면재를 적용한, 효율은 낮지만 매우 넓은 주파수대역폭을 갖는 탐촉자를 제안하였다. Kervel 등[6]은 탐촉자의 전달함수에 대한 수치계산과정을 연구하였다. Ahn과 Choi[7] 등은 KLM 등가회로의 음향부분과 전기부분의 품질인자들에 대해 Desilet 등이 제안한 근사표현식들의 문제점을 지적하고 새로운 근사표현식을 유도하였다. 오늘날 보편적으로 사용되는 초음파탐촉자의 경우, 그 감도는 우수하지만 주파수대역폭은 낮은 편이다.

본 연구에서는 직렬 인덕터, 후면재, 정합층 등의 탐촉자 구성요소들이 탐촉자의 감도와 분해능에 미치는 영향에 대해 살펴보았으며, 이를 바탕으로 미세한 결합까지도 탐지할 수 있는 넓은 대역폭의 특성을 지니는 탐촉자를 설계 및 제조하고자 하였다.

이론

탐촉자의 임펄스 응답특성은 4단자 등가회로망에 의해 예측된다. 그림 1은 한 층의 음향임피던스 정합층과 직렬인덕터를 포함하고 있는 탐촉자의 4단자 등가회로망을 나타내고 있다. 그림에서 Z_e 는 탐촉자의 전기부분의 임피던스를, Z_f 는 압전판 전면의 임피던스를 나타내며, Z_{if} 와 Z_{ib} 는 압전판의 중앙에서 각각 전면부하와 후면부하를 바라본 임피던스를 의미하고 있다.

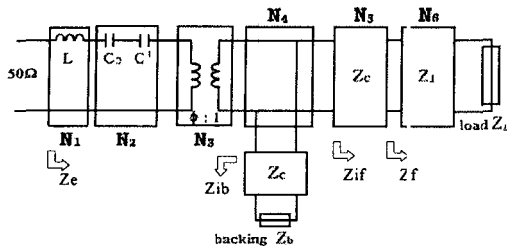


그림 1. 4단자 등가 회로망

첫 번째 회로망으로의 입력전압에 대한 마지막 회로망의 출력전압의 비와 마지막 회로망으로의 입력전압에 대한 첫 번째 회로망의 출력전압의 비의 곱으로 정의되는 왕복전달함수는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$H_r = \frac{4Z_e Z_L}{(-N_1^{21} Z_e Z_L + N_1^{11} Z_e + N_1^{22} Z_L - N_1^{12})^2} \quad (1)$$

$$N_i = N_a \times N_e \quad (2)$$

$$N_e = N_4 \times N_3 \times N_2 \times N_b \quad (3)$$

$$N_a = N_7 \times N_6 \times N_5 \quad (4)$$

$$N_1 = \begin{bmatrix} 1 & -j\omega L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$N_2 = \begin{bmatrix} 1 & j(1/\omega C_0 + 1/\omega C') \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$N_3 = \begin{bmatrix} 1/\Phi & 0 \\ 0 & \Phi \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$N_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/Z_b & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$N_5 = \begin{bmatrix} \cos\theta & -jZ_c \sin\theta \\ -j\frac{1}{Z_c} \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$N_6 = \begin{bmatrix} \cos\theta & -jZ_1 \sin\theta \\ -j\frac{1}{Z_1} \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (5)에서 C' 은 전기용량을 의미하며 다음과 같이 주어진다.

$$C' = -C_0/k_t^2 \text{sinc}(\omega/\omega_0) \quad (10)$$

식 (6)에서 Φ 는 주파수에 의존하는 변압기의 권선비를 의미하고 있다.

$$\Phi = k_t \sqrt{\frac{\pi}{\omega_0 C_0 Z_c}} \text{sinc}(\omega/2\omega_0) \quad (11)$$

이때 k_t 는 압전판의 유효전기-기계결합계수, ω 는 초음파의 각진동수, 그리고 $\text{sinc } x = \sin(\pi x)/\pi x$ 이다.

수치해석

왕복전달함수를 역푸리에트랜스폼 취한 값의 실수값에서 RF파형을 얻게되며, 이 값의 절대치를 구하면 정류된 RF파형을 얻게된다. 또한 왕복전달함수를 역푸리에트랜스폼 취한 값의 절대치를 구하면 Video 파형을 얻을 수 있다.

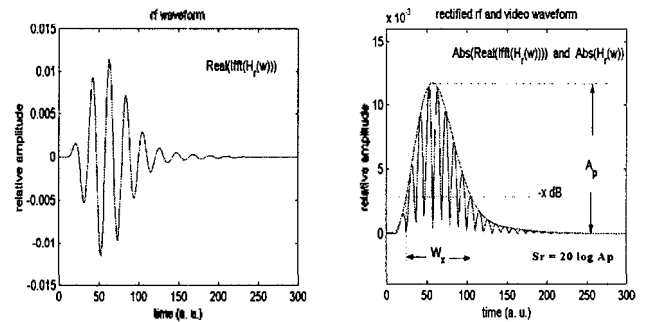


그림 2. RF파형과 Video파형

그림 2에서 왼쪽은 RF 파형의 예, 오른쪽 그림은 정류된 RF 파형과 정류된 RF 파형의 포락선으로 나타나는 비디오 파형을 보여준다. 비디오 파형에서 A_p 는 최대진폭, W_x 는 $-x$ dB 위치에서의 웨이브 폼 두께를 의미하고, 상대감도 S_r 은 $20 \log A_p$ 로 정의한다.

직렬 인덕터, 후면재, 정합층이 탐촉자의 감도와 분해능과 탐촉자 전체에 미치는 영향에 대하여 알아보았다.

그림 3에서 인덕터가 있는 경우, 정합층의 임피던스가 높을수록, 그리고 후면재의 임피던스가 낮을수록 감도가 우수함을 볼 수 있다. 인덕터가 없는 경우 또한 같은 경향을 보인다. 하지만, 인덕터가 없는 경우, 그 감도가 있는 경우보다 훨씬 낮고, 후면재 임피던스의 변화에 비교적 둔감하다는 것을 알 수 있다.

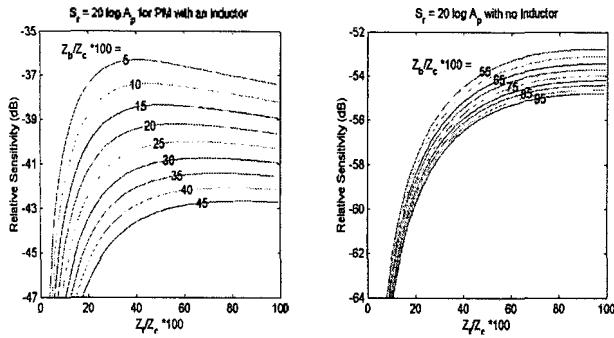


그림 3. 직렬인덕터, 후면재, 정합층이 탐촉자의 감도에 미치는 영향

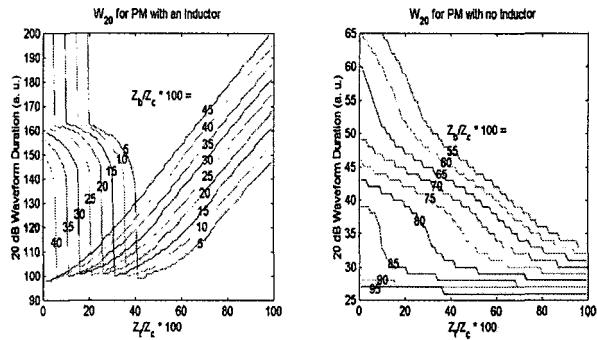


그림 4. 직렬인덕터, 후면재, 정합층이 탐촉자의 분해능에 미치는 영향

그림 4에서 인덕터가 있는 경우, 각각의 후면재 임피던스에서 W_{20} 이 최솟가 되는 전면부하 임피던스가 존재함을 볼 수 있다. 이 최소점은 후면재의 임피던스가 증가함에 따라 왼쪽으로 이동하고 있다. 인덕터가 없는 경우에는, 후면재와 전면부하의 임피던스가 높아짐에 따라 W_{20} 이 작아짐을 알 수 있다.

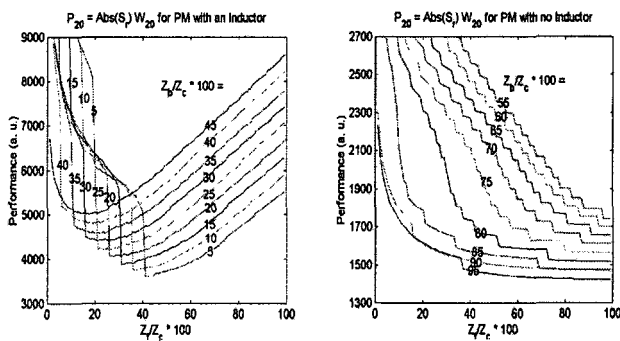


그림 5. 직렬인덕터, 후면재, 정합층이 탐촉자의 성능에 미치는 영향

그림 5에서 인덕터가 있는 경우, 각각의 후면재에 대해 성능지수가 최솟가 되는 전면부하가 존재함을 알 수 있다. 인덕터가 없는 경우에는 후면재와 전면재의 임피던스가 높을수록 좋은 성능을 나타낸다는 것을 알 수

있다. 이 때 성능지수란 상대감도의 절대값과 웨이브-폼-튜레이션을 곱한 값으로 정의한다. 그래서, 이 성능지수는 작을수록 좋다.

후면재에 요구되는 중요한 특성은 후면재로 빠져나간 초음파가 되돌아오지 못할 정도로 감쇠가 커야 한다는 것이다. 임피던스가 크면서 동시에 감쇠도 큰 물질을 개발하는 것이 매우 중요하다.

정합재 및 후면재의 개발

초음파탐촉자의 용도에 따라 정합재와 후면재에는 각기 최적의 임피던스가 요구된다. 정합재의 제작에는 에폭시수지로 araldite 509의 9종이 사용되었고, 0.55~20.0 μ m의 다양한 크기를 가지는 텅스텐카바이드 분말이 사용되었다. 또한 후면재를 위하여 감쇄와 흡수율이 높은 8종류의 에폭시 및 우레탄 수지와 입자크기가 서로 다른 텅스텐(25 μ m)과 텅스텐 카바이드(0.55~20.0 μ m) 파우더를 혼합하여 시편들을 제조하였다. 입자가 클수록 혼합가능한 텅스텐 분말의 최대 중량비가 증가한다. 텅스텐 중량비의 증가에 따라, 혼합물의 밀도와 음향임피던스는 증가한다. 초음파 감쇄(속도)가 최대(최소)가 되는 혼합비가 존재한다. 음향임피던스가 2~17 Mrayl인 정합재 혼합물을 개발하였다. 음향임피던스가 3~14 Mrayl인 후면재 혼합물을 개발하였다. 표 1은 개발된 정합층 재료의 한 예를 보여준다. 한편 후면재로 사용될 높은 임피던스와 감쇄를 가지는 재질을 확보하는데에는 한계가 있었다. 실제 탐촉자의 제작에서는 이러한 어려움 때문에, 임피던스와 감쇄를 고려하여 수차례의 결과에 따른 최적의 조건에 가장 근접하는 재질을 사용하였다.

표 1. 정합층 재료의 예

타입	에폭시		텅스텐 카바이드		중량비	밀도 (g/cm ³)	속도 (m/s)	임피던스 (MRayl)	감쇄 (dB/mm)	
	주제(g)	경화제(g)	입도	양(g)						
1	pacific-a	5	2.2	0.55	24	77	4.01	1865	7.48	1.35
2	pacific-a	5	2.2	0.8	26	78	4.31	1806	7.78	1.8
3	pacific-a	5	2.2	1.15	35	83	4.8	1840	8.83	1.37
4	pacific-a	5	2.2	2.35	41	85	5.58	1826	10.19	1.3
5	pacific-a	5	2.2	4.23	50	87.4	6.08	1857	11.29	1.4
6	pacific-a	5	2.2	6.3	40	84.7	5.41	1853	10.02	2.0
7	pacific-a	5	2.2	10.3	54	88.2	6.32	1832	11.58	1.87
8	pacific-a	5	2.2	18.7	64	90	6.71	1824	12.24	1.4
9	pacific-a	5	2.2	20.0	65	90	6.86	1784	12.24	1.7

시작품의 성능평가

탐촉자 시작품의 제작에는 중심주파수 2.0MHz, 음향 임피던스 19Mrayl, 직경이 0.5인치인 미국 Keramos사

의 K-81(PM)을 압전소자로 사용하였다. 전면부하로 임피던스 3.2Mrayl 인 루사이트를 채택하였다.

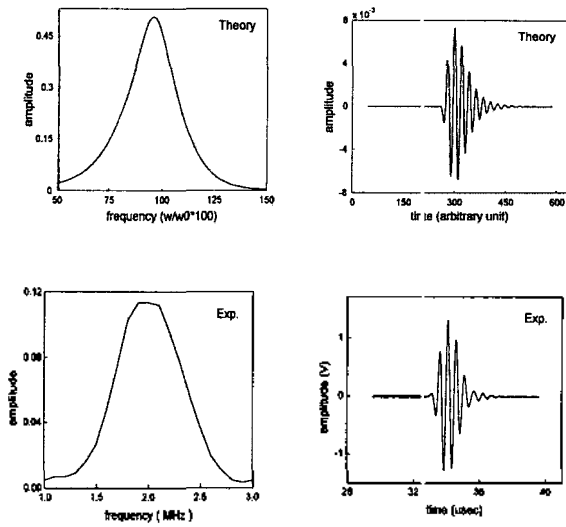


그림 7. 일반형 탐촉자에서의 스펙트럼과 RF신호에 대한 이론예측과 제작품 결과

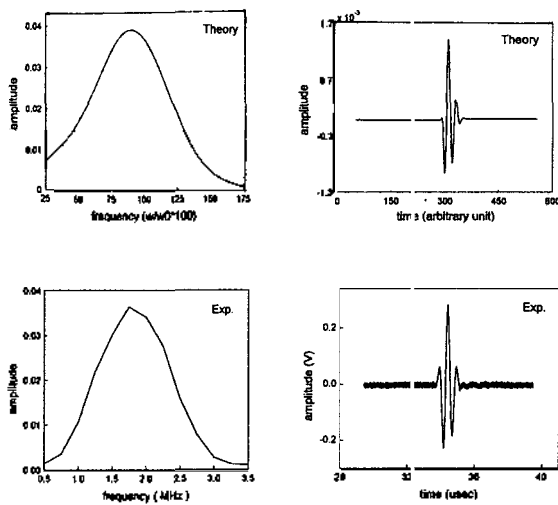


그림 8. 고분해능형 탐촉자에서의 스펙트럼과 RF신호에 대한 이론예측과 제작품 결과

일반용 탐촉자는 0.17 Zc의 후면재, 0.51 Zc의 전면부하 실효임피던스, 0.27 Zc의 정합층으로 구성되었고, 16uH 용량의 인덕터가 부가되었다. 고분해능용 탐촉자에는 인덕터가 부가되지 않았으며, 0.75 Zc의 후면재, 0.51 Zc의 전면부하 실효임피던스, 0.27 Zc의 정합층으

로 구성되었다.

그림 7에서는 일반형 탐촉자의 스펙트럼과 파형에 대한 이론예측과 실제결과를 비교하고 있다. 이론과 실험의 좋은 일치를 볼 수 있다. 그림 8에서는 고분해능용 탐촉자에 대한 결과를 보여주고 있는데, 여기서도 예측과 결과간의 좋은 일치를 볼 수 있다. 특히 고분해능용 탐촉자는 일반형 탐촉자에 비해 분해능이 2.3배 개선되었고, 감도는 15 dB 감소하였음을 알 수 있다.

결론

1) 광대역 초음파 탐촉자에는 인덕터를 부가하지 않는다. 2) 광대역 초음파탐촉자의 경우, 감도는 후면층의 임피던스가 낮을수록, 전면 부하의 실효 임피던스가 높을수록 커진다. 또한 분해능은 전후면 부하의 실효임피던스가 높을수록 좋아진다. 전체적으로 후면재와 전면재의 임피던스가 높을수록 좋은 성능을 나타낸다. 3) PM 탐촉자의 제조공정을 완성하고 시작품을 제작하여 성능시험을 수행한 결과, KLM 모델에 의한 전기음향 특성의 예측이 정확함을 보였다.

참고 문헌

- [1] G. Kossoff, IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics 13, 20-30 (1966).
- [2] C. S. Desilets, J. D. Fraser, and G. S. Kino, IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics 25, 115-125 (1978).
- [3] J. Souquet, P. Defranould, and J. Desvois, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics 26, (March 1979).
- [4] M. G. Silk, Ultrasonics 21, 27-33 (1983).
- [5] K. F. Bainton and M. G. Silk, British J. of NDT, 15-20 (1980).
- [6] S. J. H. van Kervel and J. M. Thijssen, Ultrasonics 21, 134-140 (1983).
- [7] Y. K. Ahn, M. S. Choi et al., Sae Mulli (Kor. Phys. Soc.) 41, 123-129 (2000).