

# 비파괴 검사를 위한 PZT 탐촉자의 제작 및 특성에 관한 연구

논문  
11-8-6

## A Study on Fabrication and Characteristics of PZT Probe for Nondestructive Test

김철수\*, 정규원\*, 송준태\*

(Cheol-Su Kim, Kyu-Won Jung, Joon-Tae Song)

### Abstract

Ultrasonic probes of 400kHz, 1MHz, 3MHz were fabricated using PZT-5A plates. Epoxy was used for backing layer materials on the plates. Nondestructive Test was carried using these probes. Pulse lobe width of impulse response was reduced 15.4% compare 1MHz with 400kHz and 96.6% compare 3MHz with 400kHz. The attenuation in aluminum was 2.05[dB/m] at 400kHz, 4.91[dB/m] at 1MHz, 7.35[dB/m] at 3MHz. Hole detection error of the first hole was 22.4% at 1MHz, 9.6% at 3MHz, The second hole 11.6% at 1MHz, 4.7% at 3MHz. In the result of experiment of the hole detection error and resolution, 3MHz probe was the best among them.

**Key words(중요용어) :** Ultrasonic probe(초음파 탐촉자), PZT, Nondestructive test(비파괴 검사)

### 1. 서 론

초음파 검사법은 1929년 Sokolov<sup>1)</sup>에 의해서 단 순히 음압의 차로써 내부의 결함을 찾되자 시작되었다. 그후 1942년 Firestone<sup>2)</sup>에 의해서 시험편의 결함의 위치를 알 수 있게 되었다. 그러다 1945년 이후로 비파괴 검사기술로서 널리 인정되었다.

초음파 검사는 재료의 결함의 유무, 결함의 크기 및 형태를 정확히 파악할 수 있는데, 철, 비금속의 소재로부터 선박, 교량, 자동차, 기계류의 부품 등에 이르기까지 많은 분야의 제품들의 검사에 사용된다.<sup>3),4)</sup>

초음파 검사는 휴대가 간편하고 다른 비파괴 검사에 비해 비용이 적게 드는 장점을 가지고 있다.

비파괴 검사에<sup>5)</sup> 중요한 영향을 미치는 압전탐촉자의 주요 특성인 중심 주파수, 펄스의 길이, 감도 등

은 진동자의 전기-기계 결합계수에 의해 결정되고, 매질의 음향장은 탐촉자의 모양, 주파수, 그리고 대역폭에 의해 정해지므로 탐촉자를 설계시 목적에 따라 이와 같은 여러 성능 변수 사이의 최적값을 취하게 된다.

본 연구에서는 압전 현상을 이용하는 압전형 탐촉자 중에서 유전 상수가 높고 ( $\epsilon^S/\epsilon_0=830$ ), 높은 감도( $k_t=0.49$ )를 가지는 PZT-5A를<sup>6)</sup> 사용하여, 동일한 조건으로 중심 주파수가 400kHz, 1MHz, 3MHz 탐촉자를 제작하고, 각 주파수대의 탐촉자의 초음파 특성을 조사하였다. 그리고 비파괴 특성을 보기 위해, 10cm두께의 알루미늄 시험편 내부의 crack을 검사함으로써 각 탐촉자의 비파괴 특성을 비교 평가하였다. 제작된 탐촉자는 후면층에 epoxy를 사용하여 backing<sup>7)</sup> 처리를 하였으며, inductance tuning을 하였다. 측정을 위한 시스템으로는 PC, PC-SCOPE, Data Acquisition Board를 사용하여 영상처리<sup>8)</sup> 하였다.

\* : 성균관대학교 전기공학과  
(경기도 수원시 장안구 천천동 300, Fax: 0331-290-7179  
E-mail : jtsong@yurim.skku.ac.kr)  
1998년 1월 21일 접수, 1998년 6월 19일 심사완료

2. 실험 방법

2.1 초음파 탐촉자

본 실험에서는 전기기계결합계수가 큰 PZT-5A를 압전층으로 선정하여 400kHz<sup>9)</sup>, 1MHz, 3MHz용 압전탐촉자를 설계 제작하였다<sup>10)</sup>. 사용된 PZT-5A의 압전 특성은 표 1과 같다.

표 1. PZT-5A의 압전 특성

Table. 1 Piezoelectric properties of PZT-5A

$k_t$	$d_{33}(m/V)$	$V_i^D(m/s)$	$Z_i^D$ ( $10^6 kg/sm^2$ )	$\epsilon^S/\epsilon_0$
0.49	$374 \times 10^{-12}$	4350	33.7	830

2.1.1. 압전 세라믹

압전탐촉자를 설계하는데 있어서 결정되어야 할 요소는 사용주파수와 이에 따른 압전층의 두께와 직경, 그리고 음향임피던스 등이다. 사용된 압전층은 전기-기계 결합계수가 0.49로 비교적 큰 PZT-5A 원형 진동자를 사용하였다. 두께는 일반적으로 경계면에서의 음파의 반사와 투과 조건을 고려하여, PZT-5A내에서의 음파의  $\lambda/2$  두께로 설계하였고, 직경은 각 주파수별 탐촉자를 비교 평가하기 위해 20mm로 통일하였다.(표 2)

표 2. PZT-5A 사양.

Table 2. Specification of PZT-5A.

	PZT-5A		
	두께 d (mm)	지름 $\phi$ (mm)	Top전극직경 (mm)
400 kHz	5.44	20	20
1 MHz	2.18	20	20
3 MHz	0.75	20	15

2.1.2 전극층(Electrode)

제작된 압전체에 evaporator를 사용하여 알루미늄을 고르게 진공 증착하였으며, 하부면은 전면 증착하고, 상부면은 400kHz, 1MHz의 경우는 전면 증착하였고 3MHz의 경우는 인덕턴스(inductance)의 튜닝(tuning)을 고려하여 직경(D) 15mm로 증착하였다.(표 2)

2.1.3 정합층(Matching layer)

정합층은 측정하고자 하는 대상( $Z_1$ )과 압전층

( $Z_2$ )의 음향임피던스의 차이로 인한 음파의 반사를 줄이기 위한 층으로 두 물질의 음향임피던스의 기하학적 평균치  $\sqrt{Z_1 Z_2}$ 로 구할 수 있다. 측정하려는 매질에 따라 펄스의 중심 주파수에서 1/4파장 정도의 두께로 입힌다.

2.1.4 후면층(Backing layer)

후면층은 후면으로 진행되는 파를 흡수하여 진동자의 여진을 줄임으로써 해상도를 높일 수 있다. 본 연구에서는 에폭시( $Z_0 : 3.25 \times kg/m^2 \cdot s \times 10^6$ )를 사용하여 압전체의 후면을 충분히 채워줌으로써 뒷면으로 발생하는 파를 흡수 시켰다.

2.1.5 Impedance Matching

압전 진동자는 유전체로서 정전용량(표 3)을 가지고 있다. 이 정전용량은, 탐촉자가 초음파를 발생하는 송신기로 사용될 때는 초음파의 응답 시간(rise time)을 증가시키며, 신호원을 분포시켜 필요 전류량을 증가시킨다. 펄스 에코(Pulse-echo)에 대한 수신기로 사용될 때는 변환자의 부하로 작용하여 전기적 출력을 감소시키므로 상쇄시키는 것이 바람직하다. 그러므로 중심 주파수에서 인덕턴스에 의한 series impedance matching을 하여 원하는 주파수 대역에서 정전용량을 간단히 줄일 수 있다. 표 3은 실험에서 사용된 정전용량과 인덕턴스의 값이다.

표 3. 정전용량과 인덕턴스 값.

Table. 3. Capacitance and Inductance.

	PZT-5A		
	400kHz	1MHz	3MHz
정전용량( nF )	0.98	2.3	3.14
인덕턴스( $\mu H$ )	162	11	0.9

2.1.6 Casing

탐촉자 주위의 전자파를 차단할 수 있는 재료인 스텐레스 스틸을 사용하여 차폐를 하고 탐촉자를 물속에서 사용하는 경우에 대비하여 방수처리 하였다. 그리고 다른 계측기와의 접속을 위해 BNC 케이블을 연결하였다.(그림 1)

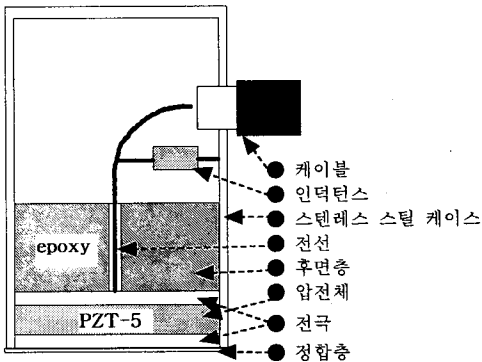


그림 1. 설계한 탐촉자의 구조.  
Fig. 1. A structure of designed probe.

### 2.2 비파괴 시험편

본 실험에서는 제작한 탐촉자로 알루미늄 내부의 결함을 비파괴검사 하기 위해, 가로, 세로 각각 50mm, 높이 100mm 크기이고, 내부에 가로 세로로 각 12mm, 5mm의 구멍이 있는 알루미늄 시편편을 제작하였다.(그림 2) 그리고 400kHz, 1MHz, 3MHz의 탐촉자로 비파괴 검사를 하여 결함의 위치를 얼마나 정확히 판단가능한가를 평가하였다.

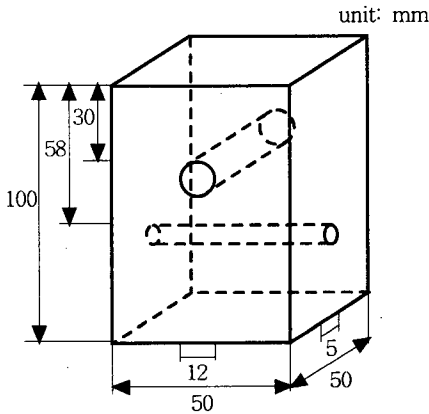


그림 2. 비파괴검사를 위한 시험편.  
Fig. 2. Testpiece for NDT.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 임펄스 응답

PR-35로 탐촉자에 임펄스를 가하고, 그 응답을 분석하여 탐촉자의 실제 진동주파수를 판단하고, 인식 가능한 최소 깊이를 유추한다. 펄스의 폭(envelope)

이 큰 경우는 인식 가능한 최소 깊이가 커지기 때문에 해상도의 관점에서 불리하다. 해상도를 높이기 위해서는 주파수가 증가되어야 한다.

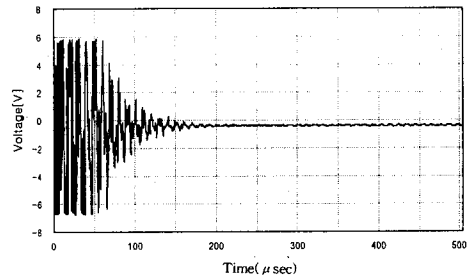


그림 3. 후면층이 없는 상태에서의 응답파형 (1MHz)

Fig. 3 Response with no matching layer (1MHz)

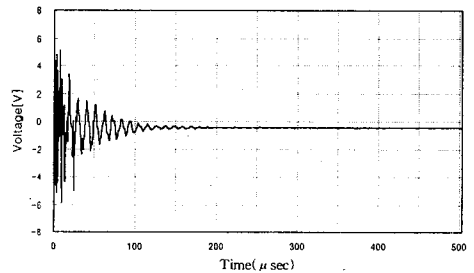


그림 4. 후면층을 붙인 상태에서 응답파형 (1MHz)

Fig. 4. Response with backing layer(1MHz)

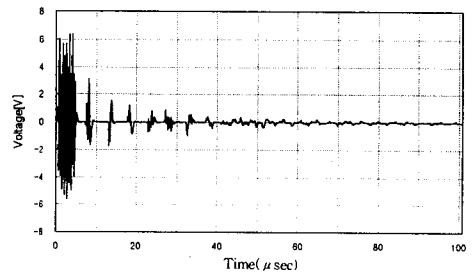


그림 5. 후면층이 없는 상태에서의 응답파형 (3MHz)

Fig. 5. Response with no matching layer (3MHz)

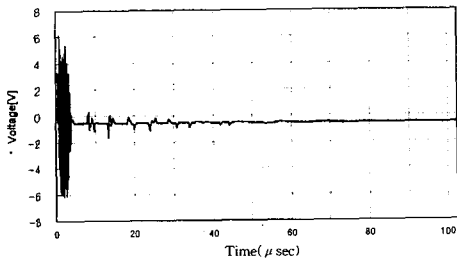


그림 6. 후면층을 붙인 상태에서의 응답파형 (3MHz)

Fig. 6. Response with backing layer(3MHz)

각 제조된 탐촉자들의 파형은 후면층을 입힌 경우가 후면층이 없는 상태보다 펄스의 폭이 400kHz의 경우(참고문헌9 참조) 34.4%, 1MHz의 경우 25.8%, 3MHz의 경우 20.8% 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 주파수가 높을수록 펄스의 폭이 현저히 감소하였는데, 1MHz의 경우 400kHz와 비교시 15.4%, 3MHz의 경우 400kHz와 비교시 96.6% 감소하였다. (그림3-6)

### 3.2 빔의 변화

제작한 탐촉자에 인덕턴스(inductance) 튜닝을 한 경우, 불규칙하게 주파수 성분을 보이던 임펄스 파형이(그림7, 9) 규칙적인 주파수 성분을 나타내었다(그림8, 10) 그리고 제작한 탐촉자로 10cm두께의 알루미늄 내부에서의 주파수에 따른 감쇠계수를 표3에 보였다. 여기에서 주파수가 높을수록 알루미늄 내부에서의 감쇠계수가 커짐을 알 수 있었다.

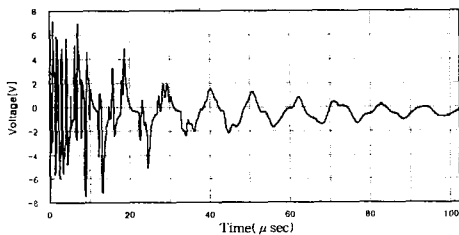


그림 7. 인덕턴스에 의해 매칭을 시키지 않았을 경우의 응답 파형(1MHz)

Fig. 7. Response without inductance matching (1MHz)

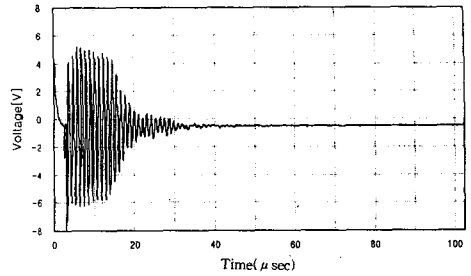


그림 8. 인덕턴스에 의해 매칭을 시킨 경우의 응답 파형(1MHz)

Fig. 8. Response with inductance matching (1MHz)

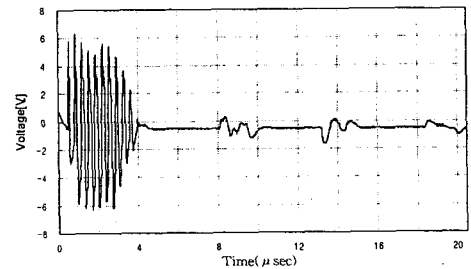


그림 9. 인덕턴스에 의해 매칭을 시키지 않았을 경우의 응답파형(3MHz)

Fig. 9. Response without inductance matching (3MHz)

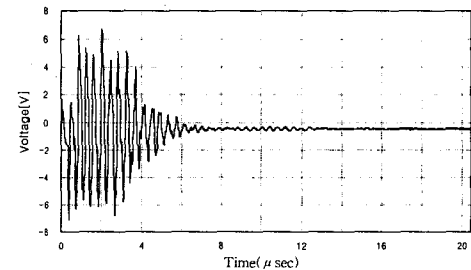


그림 10. 인덕턴스에 의해 매칭을 시킨 경우의 응답파형(3MHz)

Fig. 10. Response with inductance matching (3MHz)

표 3. 알루미늄 내에서의 주파수에 따른 감쇠 계수.

Table 3. Frequency dependence of attenuation coefficient in Al specimen.

\* 시험편으로 10cm 알루미늄을 통과시켰음.

	PZT-5A		
	400kHz	1MHz	3MHz
초기 음압[V]	0.81	3.75	1.31
거리 10cm 통과후 음압[V]	0.64	2.13	0.56
감쇠 계수[dB/m]	2.05	4.91	7.35

3.3 비파괴 검사

알루미늄 내부의 결함을 비파괴검사 하기 위해, 시험편을 사용하였다. 그리고 400kHz, 1MHz, 3MHz로 비파괴 검사를 하여 결함의 위치를 얼마나 정확히 판단가능한가를 평가하였다.

펄스의 왕복시간을 계산하여 이론값과 실험값을 비교 평가하였다.(표 4) 비파괴검사를 함에 있어서 시험편을 공기 중에서 직접 주사하면 내부 결함에서 음파가 전반사하므로 물 속에 시험편을 담그고 알루미늄(AI)을 주사하였다.

표 4. 각 조건에서의 응답 시간.

Table 4. Response time on each cases.

알루미늄 속에서의 음속 : 6.32km/s

	이론값 ( $\mu$ sec)			실험값 ( $\mu$ sec)		
	첫째홀	둘째홀	바닥	첫째홀	둘째홀	바닥
400kHz	10.13	19	31.65	×	×	35.4
1MHz	10.13	19	31.65	12.4	21.2	33.8
3MHz	10.13	19	31.65	11.1	19.9	33.4

수조 속에 알루미늄 시험편을 넣고 비파괴 검사를 하였다. 그림 10-15에 그 응답 파형을 보인다. 제작된 400kHz의 탐촉자는 그림 10, 11과 같이 실제 홀의 위치에서 신호의 증폭이 일어나지 않고 다른 위치에서 간섭이 일어난 것을알수 있다. 그러므로 알루미늄 내부의 결함을 인식하기에는 불가능한 것으로 나타났다. 단지 바닥 검사만을 할 수 있었다. 1MHz의 경우는 그림 12, 13과 같이 알루미늄 내부

의 구멍을 잘 관찰할 수 있었으나 펄스가 큰 관계로 세밀한 부분의 결함은 관찰하기 힘들었다. 3MHz의 경우는 그림 14, 15와 같이 이론값과 실험값 사이의 오차면에서 400kHz, 1MHz와 비교할때 가장 우수하였고, 응답 파형의 증폭이 알루미늄내부의 감쇠와 그밖의 영향으로 다소 약하지만 잡음 성분이 적어 증폭하면 깨끗한 파형을 얻을 수 있었다.

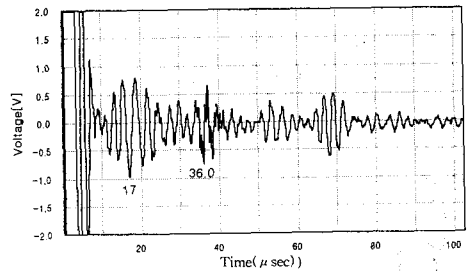


그림 11. 400kHz에서 첫 번째 홀의 응답파형.  
Fig. 11. The first hole response at 400kHz.

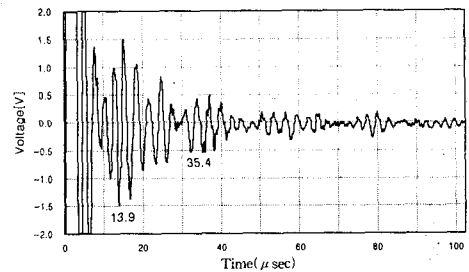


그림 12. 400kHz에서 두 번째 홀의 응답파형.  
Fig. 12. The second hole response at 400kHz.

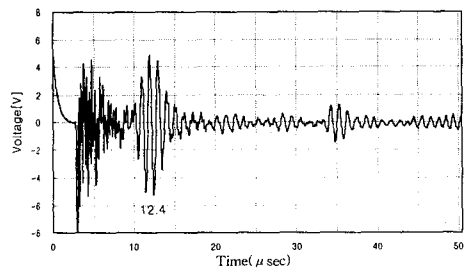


그림 13. 1MHz에서 첫 번째 홀의 응답파형.  
Fig. 13. The first hole response at 1MHz.

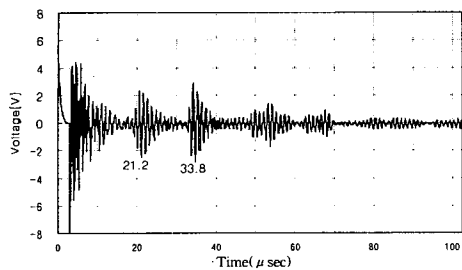


그림 14. 1MHz에서 두 번째 홀의 응답파형.  
Fig. 14. The second hole response at 1MHz.

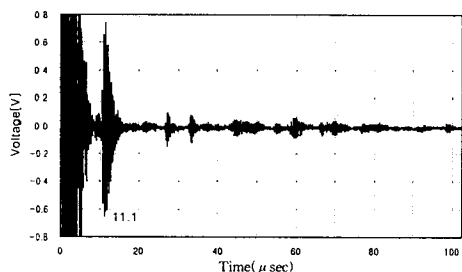


그림 15. 3MHz에서 첫 번째 홀의 응답파형.  
Fig. 15. The first hole response at 3MHz.

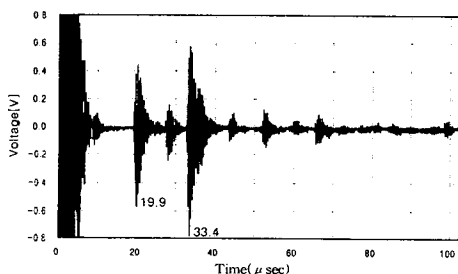


그림 16. 3MHz에서 두 번째 홀의 응답파형.  
Fig. 16. The second hole response at 3MHz.

400kHz의 경우는 알루미늄 내부의 구멍을 검출하기에는 부적합한 것으로 나타났다. 그림 17, 18은 제작한 1MHz, 3MHz 탐촉자로 알루미늄 내부를 주사한 것으로 이상적으로 구멍의 위치를 나타낸 그림 16과 비교할 때, 1MHz의 경우, 가로 구멍의 오른쪽 부분이 검출이 되지 않았으나 넓은 부위에서 알루미늄

내부의 구멍을 검출할 수 있었다. 3MHz의 경우는 반사파형의 신호음이 1MHz보다는 작았지만, 파형이 깨끗해 확대해서 보면 내부결함의 검출이 용이하였다. 그리고 비교적 홀의 위치와 크기가 제대로 검출되었다. 거리의 오차면에서 1MHz의 경우는 첫 번째 홀에서는 22.4%, 두 번째 홀 11.6%였다. 3MHz의 경우는 첫 번째 홀에서는 9.6%, 두 번째 홀 4.7%로 1MHz와 비교시 거리의 오차면에서도 3MHz가 우수한 것으로 나타났으며 제작된 3가지 탐촉자중 가장 비파괴 검사에 적합한 것으로 나타났다.

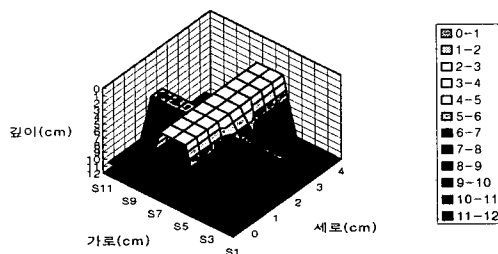


그림 17. 이상적인 경우의 비파괴 검사 파형.  
Fig. 17. Ideal NDT response

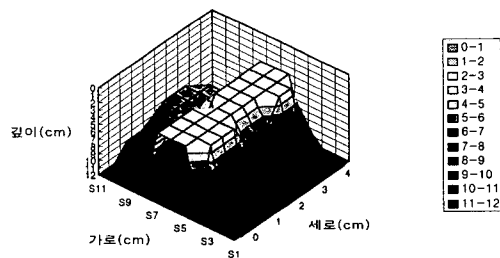


그림 18. 1MHz에서의 비파괴 검사 파형.  
Fig. 18. NDT response at 1MHz.

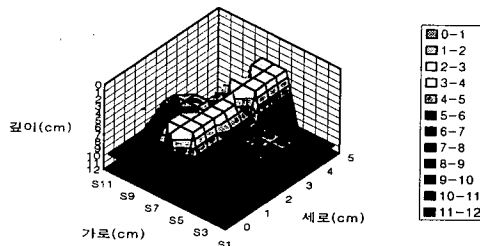


그림 19. 3MHz에서의 비파괴 검사 파형.  
Fig. 19. NDT response at 3MHz

## 5. 결 론

## 참 고 문 헌

본 연구에서는 전기기계 결합계수가 큰 PZT-5A를 사용하여 400kHz, 1MHz, 3MHz의 탐촉자를 제작하였고, 각 탐촉자의 파형을 비교 분석하였다. 그리고, 알루미늄 시험편을 사용하여 비파괴 검사를 한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1). 제작한 탐촉자들의 파형 특성을 보면 후면층을 입히면 무부하인 상태보다 펄스의 폭이 400kHz의 경우 34.4%, 1MHz의 경우 25.8%, 3MHz의 경우 20.8% 감소하였다.
- 2). 각 주파수별 파형 특성을 보면 펄스의 폭이 1MHz의 경우 400kHz와 비교시 15.4%, 3MHz의 경우 400kHz와 비교시 96.6% 감소하였다. 펄스의 폭은 해상도와 밀접한 관계가 있으며, 펄스의 폭을 줄이는 방법에는 적절한 후면층을 선정하는 방법과 주파수를 높이므로 가능함을 확인할 수 있었다.
- 3). Inductance에 의한 tuning은 정전용량으로 인한 rise time 증가 및 전기적 출력 감소를 줄이므로 파형의 안정성을 증가시켰다.
- 4). 비파괴 검사시 400kHz의 경우는 알루미늄 내부의 hole을 인식하기에는 파장의 크기가 커 부적합함을 알 수 있었다. 1MHz에서는 실제 거리와 측정된 거리와의 오차는 첫 번째 홀의 경우 22.4%, 두 번째 홀의 경우 11.6% 였다. 3MHz에서는 마찬가지로 첫 번째 홀의 경우 9.6%, 두 번째 홀의 경우 4.7%, 로 거리 측정 오차에서 3MHz 경우 가장 우수하였으며, 해상도도 가장 우수하였다.

1. Sokolov, W. S, "Testing of Materials" Moscow, Gozenergizda 1957
2. Josef krautkramer, Herbert krautkramer "Ultrasonic Testing of Materials"
3. Gordon S. Kino, "Acoustic Waves, Devices, Imaging, and Analog Signal Processing" prentice-hall, INC. 1987.
4. T.R. Gururajz, Walter A. Schulze, "Piezoelectric Composite Materials for Ultrasonic Transducer Applications, Part1, Part2", IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics, vol. su-32, no.4 July 1985
5. Don E. Bray, "Nondestructive Testing Techniques" A Wiley-Interscience Publication.
6. D. Berlincourt, B. Jaffe, H. Jaffe, and H. H. A. Krueger, "Transducer properties of lead titanate zirconate ceramics," IRE Trans. Ultrason Engg., pp. 1-6, February 1960.
7. G. Kossoff, "The effects of backing and matching on the performance of piezoelectric ceramic transducers, "IEEE Trans. Sonics Ultrason. vol. su-13, no. 1, pp. 20-30, March 1966.
8. D. A. L. Collie, M. A. Player, "Extended computer method for predicting the transient response of ultrasonic NDT probes: Ultrasonic, vol. 27, pp. 141-149, 1989