

鋼構造物 診斷을 위한 超音波 센서

Ultrasonic Sensors for Steel Structure Inspection

신 병 철¹⁾

Shin Byoung-Churl

Abstract

The team mixed PbO, ZrO₂, TiO₂, Nb₂O₅ and MnCO₃ to make Pb[(Zr_{0.54} Ti_{0.46}) Nb_{0.005}]O₃+4%MnCO₃. The electroded PZT ceramics were poled by 3 kV/mm at 110°C for 600 s. We assembled the 0.4mm thick PZT slices into ultrasonic transducers. Central frequency of the probe is 5 MHz, which is proper to the thickness gauge for steel pipes and for flaw detector. The probe can detect a disk shape defect of 1mm diameter at 15cm deep in steel block. The new probe's Fresnel zone that the ultrasonic beam do not broaden is 13mm. Over the Fresnel zone, the ultrasonic beam spreads. Half of the beam spread angle of the probe is 4.3°-4.6°. This probe can be used for the ultrasonic transducers for non-destructive testing of steel bridges.

Key words : Ultrasonic Sensor, Steel Structure, Inspection

1. 서 론

이 연구는 시설물의 안전진단 기법의 하나인 비파괴검사에 필요한 초음파 센서에 관한 것이다. 종래의 기술적 사항을 정리하면 다음과 같다. 시설물의 안전성을 평가하기 위하여 각종 비파괴검사법이 동원되고 있다. 여기서 시설물이란, 건축물, 교량 및 터널, 수리, 항만 등을 의미한다.⁽¹⁾ 현

재 사용 중인 시설물의 안전한 관리를 위하여 내외부의 결함을 검사하는데는 비파괴검사법이 널리 이용되고 있다.⁽²⁾ 비파괴검사법은 매우 다양하며, 그 중에서 경비도 적게 들고, 안전하며, 비교적 결함의 위치와 크기를 정확하게 잡아내는 초음파 탐상법이 많이 이용되고 있다.⁽³⁾ 초음파 탐상법이란, 초음파를 검사 대상물에 쏘고, 검사대상물 속에서 전파되었다가 되돌아 나오는 초음파

1) 정희원, 동의대학교 공과대학 전임강사, 공박

● 본 논문에 대한 토의를 7월 30일까지 학회로 보내주시면 1998년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

를 분석하는 기법을 의미한다. 최근에는 강교 등의 용접부 검사에 많이 이용되고 있다. 여기서 주목할 것은 초음파를 발생시키고, 수신하는 탐촉자이다. 이 탐촉자는 전기적인 펄스가 들어오면 탐촉자 내부의 압전소자가 펄스의 에너지를 받아 순간적으로 변형하면서, 일종의 높은 소리인 초음파를 발생하는 센서이다. 또한 초음파를 수신하는 경우엔, 음파에 의한 기계적인 진동을 전기적으로 변환시켜주어야 한다. 이러한 에너지 변환을 위해서 압전소자를 사용하고 있다. 압전소자는 전기적 신호를 받으면, 기계적 변형이 발생하고, 기계적 응력을 받으면, 전기적 신호를 발생시키는 재료이다. 실용화된 압전재료로 가장 대표적인 것은 수정(quartz) 진동자이다.⁽⁴⁾ 그러나 최근에는 이 재료보다 더욱 압전계수가 높은 피지티 (PZT; PbO-ZrO₂-TiO₂) 라는 재료가 널리 사용되고 있다. 이 피지티 재료는 가스레인지의 착화소자 및 각종 주파수 필터, 어군 탐지기, 설비관리용 진동 센서, 비파괴검사용 초음파 탐촉자 등에 널리 쓰이기 시작하였다.⁽⁵⁾ 초음파 탐촉자는 그 검사대상물의 두께나 재질에 따라 중심 주파수, 진동자의 크기 등을 달리 하여야 한다. 통상 초음파의 주파수는 2.25 MHz 또는 5 MHz 의 것들이 많이 사용된다. 이에 대한 것은 한국공업 규격 [KS-B-0817] 에 명시되어 있다. 특정한 주파수의 탐촉자를 만들기 위해선, 압전 진동자의 두께를 적당히 조절하여야 한다. 두꺼울 수록 낮은 주파수가 되고, 얇을 수록 높은 주파수가 된다.⁽⁶⁾

압전소자가 그 기능을 발휘하기 위해선 압전소자 양단에 전극이 칠해져야 하고, 그 전극에 전선이 연결되어야 한다. 그런데 초음파 탐촉자에 삽입된 압전소자의 한 쪽면은 초음파를 송수신하는 면이므로 매우 평평하여야 하며, 아크릴 등의 수지가 덮고 있다. 그런데 그런 면에 전선을 붙인 상태로 조립하면, 전선 굵기 또는 전선을 대응하는 은 리본의 두께인 0.025mm(0.001") 정도 사이가 뜨게 된다. 이를 개선하고자 압전소자의 한 면에 전선을 두 가닥 모두 납땜(soldering) 하고자 하였다. 이렇게 되면, 초음파가 발사되는 면은 그

평활도를 그대로 유지할 수 있으며 아크릴 수지와 접착성도 향상된다.

2. 실험 방법

압전소자용 세라믹스는 일반적인 피지티 세라믹스에 4 mol% Mn을 첨가한 재료를 사용하였다. PbO, ZrO₂, TiO₂, MnCO₃ 분말 50g을 증류수 50cc 및 10mm 직경의 지르코니아 불 50g과 함께 200cc 부피의 플라스틱 병에 넣어 12시간 불 밀링하였다. 이를 꺼내어 건조시킨다음 800℃에서 2시간 하소하여 유발로 분쇄하였다. 분말의 결합력을 향상시키는 유기결합제(PVA)가 하소분말의 1 wt%가 되도록 물에 녹여 만든 수용액과 하소분말을 같은 무게 만큼 넣고, 같은 무게의 지르코니아 불과 함께 2차 불 밀링하였다. 이를 건조하여 325Mesh 체를 통과시킨 후, 직경 30mm의 원형 금형에 넣고 10,000 N/mm² 의 압력으로 가압 성형하였다. 이를 같은 조성의 피지티(PZT)분말로 만든 도가니에 넣어 PbO 휘발을 억제 시키며 1200-1250℃에서 1시간 소성하였다.^(7, 8)

소성된 세라믹 소자를 저속의 다이아몬드 휠을 이용하여 가로 7.83mm, 세로 7.35mm, 두께 0.4 mm 크기로 절단하고, 연마하였다. 절단 및 연마된 압전소자의 양면 중 초음파가 나가고 들어오는 전면(前面)은 은전극을 모두 칠하였고, 초음파가 빨리 흡수되어 사라져야 하는 후면(後面)은 은전극을 분할하여 도포하였다. 분할 방법은, 사각형 압전소자의 한 쪽 모서리를 가로 1-3mm, 세로 1-3 mm의 직각삼각형 모양으로 칠해 지게하고, 1mm 정도 간격을 두고 나머지 면적을 칠해지도록 실크 스크린 망을 제작한다. 이렇게 되면 전체 면적의 89.7-94.9%는 후면을 위하여 도포한 것이고, 1.7-5.2%는 상기 전면을 위하여 도포한 것이며, 나머지 3.5-5.2%는 분할된 전극면의 간격이다. 전극을 양면에 도포한 다음에는 후면의 3.5% 만큼 도포된 전극과 전면에도 도포된 전극이 연결되도록 붓으로 전극을 칠해준다. 전극의 분할 면적을 몇 가지 경우로 하여 Table 1에 그 장단점을 비교하여 놓았다.

Table 1. 전면에 연결되고, 후면에 입혀진 귀통이 전극의 치수에 따른 장단점 비교

순번	가로 (mm)	세로 (mm)	전극간격 (mm)	귀통이 전극면적 (mm ²)	귀통이 전극면적 비율(%)	전극간격면적 (mm ²)	전극간격면적 비율(%)	후면전극면적 (mm ²)	후면전극면적 비율(%)	분극성공확률 (%)	납땀성공확률 (%)	음압비율P _F /P ₀ (%)
1	1	1	1	0.5	0.9	1.5	2.6	55.6	96.5	70	20	4.37
2	1	2	0.8	1	1.7	1.25	2.2	55.3	96.1	25	30	4.35
3	1	2	1	1	1.7	2	3.5	54.6	94.9	70	60	4.29
4	2	2	1	2	3.5	2.5	4.3	53.1	92.2	70	70	4.17
5	2	3	1	3	5.2	3	5.2	51.6	89.7	70	70	4.06
6	3	3	1	4.5	7.8	3.5	6.1	49.6	86.2	60	70	3.90
7	3	3	1.5	4.5	7.8	5.6	9.7	47.5	82.5	80	80	3.73

이렇게 하여 압전소자 후면은 51.6-54.6m² 면적의 전극과, 1-3m² 면적의 전극으로 분할되고, 그 중 면적이 1-3m² 인 전극은 압전소자 옆면을 따라 압전소자 전면(前面), 즉 초음파 송수신면과 연결된 것이 탐촉자 제작에 적당함을 확인할 수 있다. 전면에 연결되었으며, 후면의 한 귀통이를 차지하는 전극이 1-3m² 보다 작아지면 납땀의 어려움이 있고, 너무 커지면, 진동자 유효 단면적이 줄어 감도가 떨어지는 단점이 있기 때문이다. 최초 검사 대상물의 내부에 들어간 초음파의 음압(P₀)과 결합에서 반사되어 탐촉자에 들어오는 음압(P_F)의 비율은 아래의 식과 같이 진동자의 유효 단면적이 넓을수록 높아진다.⁽⁹⁾

$$P_F / P_0 = (SA) / (\lambda^2 x^2)$$

- S: 진동자의 유효 면적 [m²]
- A: 초음파 빔의 진행 방향에 맞서는 결합의 면적 [m²]
- λ: 초음파의 파장 [m]
- x: 탐촉자와 결합까지의 거리 [m]

여기서 전극이 도포된 압전소자는 전극의 부착력을 증진 시키기 위하여 섭씨 570-600도에서 10-30분간 소성 시킨다. 이렇게 하면, 은전극에

미리 함유되어 있던 저융점 유리가루가 은전극 내부의 은가루가 압전소자에 들어붙게 해준다. 열처리가 끝난 압전소자에 극성을 부여하기 위하여 실리콘 오일이 들어있는 3-3.3 kV/mm 정도의 고전압 발생기에 넣고 섭씨 100-110도 정도에서 10-30분간 분극 처리한다.⁽¹⁰⁾ 고전압에 의하여 극성을 갖게된 압전소자에 전선을 용접한다. 상기와 같은 공정을 거친 압전소자에는 두 가닥의 전선 모두를 후면에 접합시킬 수 있다. 이 점이 본 제작방법의 중요한 특징이다.

탐촉자 케이스는 물과의 접촉이 필수적이므로, 녹이 슬지 않아야 한다. 따라서 알루미늄이나, 스테인레스 또는 아크릴 수지로 하였다. 압전소자의 앞부분은 압전소자에서 나오는 초음파가 피검체에 들어가기 전에 거치는 곳으로써 통상 아크릴 수지, 알루미늄이나 혼합물 (mixture), 폴리스티롤 등이 쓰이는데, 이들 재료의 고유 음향 임피던스 (밀도×재질 내의 음속)는 보통 40×10⁶kg /m² sec [Maryl] 정도이다. 본 연구에서는 3.17 Maryl의 음향 임피던스를 갖는 아크릴 수지를 사용하였다. 두께 1mm의 아크릴 수지 재질 음향 정합층을 압전소자 전면에 정착제로 붙인다. 그 다음 원통 용기에 넣고, 그 위에 수신 및 발신되는 초음파가 외피에서 반사되는 것을 방지하고, 압전소자 후면에서 뒤로 나오는 초음파를 흡수하기 위하여 에폭시 수지를 부어서 고착 시킨다. 이

때 노이즈 방지를 위하여 두 가닥의 전선 사이에 리액턴스가 $3 \mu\text{H}$ 인 인덕터를 병렬 연결한다. 두 가닥의 전선은 초음파 탐상기에 쉽게 착탈되도록 비앤씨 (BNC) 코넥터로 마무리 한다.

본 초음파 센서는 압전진동자의 두께 진동 모드를 이용하여 종파를 만들어 금속 내부로 초음파를 발사하므로, 두께를 변화시켜 중심 주파수를 바꾸어 테스트하였다. 통상, 공진하는 주파수와 진동자의 두께는 반비례(反比例)하므로, 고주파 용은 두께를 얇게 하였고 저주파 용은 두껍게 하였다.

압전소자의 특성평가는 임피던스 분석기 [Impedance/Gain Phase Analyzer, HP 4194A]와 압전상수 측정기 [d_{33} -meter, Channel] 를 사용하였다. 제작 완료된 초음파 탐촉자의 특성 평가는 초음파 분석기 [Ultrasonic Analyzer, Panametrics 5052UA], 스펙트럼 분석기 [Spectrum Analyzer (HP 3585B)] 와 디지털 오실로스코프 [HP 54510B] 를 사용하여 펄스 에코 (pulse echo) 방법으로 측정하였다. 표준시험편에 의한 테스트는 한국공업규격 [KS-B-0831]에 의거한 STB-G 시리즈 블록으로 하였다. 초음파 탐상기 [Panametrics Epoch-II-B]에 제작된 센서를 접속시켜 초음파 탐촉자원 특성을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

상기의 과정을 통하여 측정된 압전소자의 특성은 아래의 Table 2와 같다. 아래의 Table 2로부터 구한 압전 전압계수는 압전전하계수(d_{33})와 상대유전상수(ϵ_r)로부터 구해졌는데 그 관계식은 아래와 같으며, 구해진 값은 $40.6 \text{ (V/mm)/(N/mm}^2\text{)}$ 정도 되었다.⁽¹¹⁾ 이는 초음파 탐촉자용 압전소자로 충분한 성능을 갖고 있음을 의미한다.⁽¹²⁾

$$g_{33} = d_{33}/(\epsilon_0 \epsilon_r)$$

ϵ_0 : 진공의 유전상수, $8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

Table 2. 압전소자의 압전특성

공진주파수 f_r (MHz)	5.07
반공진주파수 f_a (MHz)	5.70
변환계수 k_{33}	0.495
기계적 품질계수 Q_m	90
상대 유전 상수 ϵ_r	320
압전전하계수 d_{33} (pC/N)	115

주파수 스펙트럼 분석기로 분석한 본 탐촉자의 중심 주파수는 5 MHz 였다. 이는 압전 소자의 두께가 0.4mm 이었기 때문이다. 이 경우 아래와 같은 관계식에 의하여 압전소자의 주파수 정수는 2000m/s 이다.⁽¹³⁾

$$[\text{두께}] \times [\text{중심 주파수}] = [\text{주파수 정수}]$$

아크릴 수지의 종파속도는 2730 m/s 이므로 아크릴 내부에서의 초음파 파장은 아래의 식에 의거하여 0.546mm 가 된다.⁽¹⁴⁾

$$\lambda = C/f$$

λ : 종파의 파장 [m]

C : 종파의 음속 [m/s]

f : 초음파의 중심주파수 [Hz, 1/s]

주 검사 대상물인 철강의 경우 그 내부에서의 음속이 5900m/s이므로 파장은 상기 식에 의거하여 1.18mm 정도가 된다. 이는 5MHz 탐촉자의 결함 검출능($\lambda/2$)이 철강내의 결함에 대해선 0.6mm 정도 임을 알 수 있게 한다. 만일 중심 주파수가 2.25 MHz인 경우엔 약 1.3mm가 되는 것이다.⁽¹⁵⁾

Table 3에는 표준시험편 STB-G 시리즈를 이용하여 측정된 특성을 표시하였다. STB-G V15-5.6 표준시험편은 한국공업규격 KS-B-0831에 규정된 것으로서, 전체 길이 18cm 인 사각 기둥이고, 표

면에서 15cm 지점부터 끝이 평평한 직경 5.6mm의 구멍이 뚫려 있는 표준시험편이다. 마찬가지로 STB-G V15-1 표준시험편은 전체 길이 18cm 인 사각 기둥이고, 표면에서 15cm 지점부터 끝이 평평한 직경 1.0mm의 구멍이 뚫려 있는 것이다. 제작된 초음파 탐촉자는 STB-G V15-1 표준시험편의 결함도 검출하는 특성을 갖고 있었다. 초음파 탐상기의 화면에 나타나는 결함으로부터의 에코는 아래와 같이 결함의 면적에 비례한다.⁽⁹⁾

$$I_1/I_2 = (A_1 D_2^2)/(A_2 D_1^2)$$

$$\Delta H = 20 \log(I_1/I_2)$$

- I : 결함에코 높이 [%]
- A : 초음파 진행에 맞서는 결함의 면적 [m²]
- D : 초음파 탐촉자와 결함과과의 거리 [m]
- ΔH : 상대 감도 [dB]

$$X_0 = D^2/(4\lambda) = a^2/(4\lambda)$$

- X₀: 근거리 음장 (Fresnel zone) [m]
- D : 원형 압전진동자의 직경 [m]
- a : 사각 압전진동자의 경우 긴변의 길이[m]

근거리 음장을 지나면서 초음파는 퍼지기 시작한다. 이 퍼지는 각을 분산각이라고 하며, 중심에서부터 따지면 분산반각(分散半角)이라고 한다. 본 탐촉자의 분산반각(φ)은 직사각형의 압전소자이므로 아래의 식에 의거, 가로 세로가 서로 다른 분산반각을 갖게되었는데, 7.83mm인 가로변의 경우, 4.3°이고, 7.35mm인 세로변의 경우 4.6°였다.⁽¹⁶⁾

Table 3. 초음파 탐촉자에서 나온 초음파가 표준시험편 STB-G V15 시리즈의 결함에서 반사된 후 수신된 에코 크기 비교표

표준시험편 STB-G의 시리즈 번호	평저공 결함의 직경 (mm)	평저공 결함의 면적 (mm ²)	59.2 dB로 계인을 맞춘 경우, 계산된 에코 크기 (%)	59.2 dB로 계인을 맞춘 경우, 측정된 에코 크기 (%)	계산된 상대 감도 ΔH (dB)	화면의 에코 높이를 80%로 했을 때의 계인 값(dB)
V15-1	1	0.79	3.2	3	-30	87.2
V15-1.4	1.4	1.54	6.3	7	-24	80.7
V15-2.8	2.8	6.16	25	27	-12	70.6
V15-5.6	5.6	24.6	100	100	0	57.5

표준시험편 STB-A1을 이용하여 얻은 분해능은 다음과 같았다. 거리 85mm, 91mm, 100mm에서 반사되는 3개의 결함을 확연히 구분(분해)하기 위해선 42.4 dB 이하의 계인 값이 필요하였다. 이보다 계인 값을, 즉 증폭 값을 올리면, 세 개의 독립적인 에코가 합쳐졌다. 이때 사용한 기기는 상기한 초음파 탐상기 (Panametrics Epoch-II-B)이다.

초음파는 물질 내부를 전파되면서 조금씩 퍼지기 시작하는데 일정한 거리 (Fresnel zone)까지는 퍼지지 않는다. 이를 근거리 음장이라고 한다. 본 탐촉자의 경우 상기 아래의 관계식에 의거하여 구하면 13mm 정도였다.⁽¹⁶⁾

$$\phi = \sin^{-1}(1.22 \lambda/D) = \sin^{-1}(0.5 \lambda/a)$$

- φ : 분산반각 [°]
- λ : 종파의 음속 [m]
- D : 원형 압전진동자의 직경 [m]
- a : 직사각형 압전소자 한 변의 길이 [m]

상기와 같은 각종 탐촉자 특성을 Table 4에 정리하였다. 이 탐촉자는 강판의 품질 검사나 강교 등의 접착기 용접부를 검사하는데 유용하게 이용될 수 있다.

Table 4. 제작된 탐촉자의 제원

압전진동자의 치수 [mm]	7.83×7.35× 0.4
압전진동자의 압전전압계수 g_{33} [mmV/N]	40.6
압전진동자의 주파수 정수 [m/s]	2000
탐촉자의 중심주파수 [MHz]	5
탐촉자의 검출능 [mm]	STB-G V15-1시험편의 결함(깊이 15mm, 직경 1mm) 검출 가능
분해능 [dB]	STB-A1 시험편의 깊이 85, 91, 100mm 결함을 분해하는 게인 값; 42.4 dB
철강내 파장 [mm]	1.18
근거리 음장 [mm]	13
분산반각 [°]	4.3 - 4.6

또한 아크릴과의 접촉 부위에 전선이 개입되지 않아 접촉이 완벽하고 평활도가 증진되었으며, 병렬연결된 인덕터의 기능으로 초음파의 전달효과가 우수하고 노이즈가 발생하지 않아 검출능과 분해능이 향상되었다 [Table 5].

상기에 기술된 압전소자의 치수나 각종 제조과정에서의 온도, 시간, 리액턴스 등 데이터는 실험실에서의 시행착오를 거치는 동안 약 5% 범위에서는 거의 유사한 특성이 얻어질 수 있음을 알 수 있었다.

Table 5. 전극 분할 및 인덕터 삽입 효과

진동자 송수신면에 전선이	인덕터가 전선에 병렬연결	게인 42.4 dB에서의 노이즈
납땀 되어있다.	되어있지 않다.	7%
없다	되어있지 않다.	5%
납땀 되어있다.	되어있다.	5%
없다	되어있다.	3% 이하

4. 결 론

강구조물의 안전진단을 위해 각종 비파괴검사 기법이 동원되고 있다. 그 중에서 비교적 안전하

고, 정확한 결함 검출 능력이 있는 초음파 탐상 기술이 각광을 받고 있다. 이 초음파 탐상에 필요한 탐촉자를 제작 하였다. 가로 세로가 7.35-7.83mm 이며 두께가 0.4mm, 상대 유전상수가 320 정도인 압전소자를 이용하여 초음파 탐촉자를 제작하였다. 압전소자 한 면에 전극을 분할하여 도포하되, 그 중 귀퉁이의 작은 면적 전극을 1-3mm² 넓이로 하고, 반대면과 연결되도록 하여 전선의 용접을 한 면에서만 할 수 있도록 한 상태에서 3MH의 인덕터를 두 가닥의 전선에 병렬연결하여 조립하여 노이즈의 필터링(filtering) 효과를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 시설물의 안전관리에 관한 특별법 1996. 12. 30. 개정, 법제 5230호.
2. 신병철, "안전관리 업무 요령", 97시설안전반, 부산광역시지방공무원교육원, 1997, pp. 3-46.
3. 김일수, 신병철, 건설재료 및 시험, 진영문화사, 1997, pp.112-120.
4. 이용, 비파괴검사의 기초, Vol. 4. 초음파 탐상 검사, 세진사, 1994, pp. 15-17.
5. 신병철, "압전소자를 이용한 다축형 진동 감지기", 한국 실용신안등록 제 68410호, 1992.
6. 신병철, 권정락, "연주빌렛의 비파괴검사를 위한 초음파 센서의 응용", 한국센서학회지, 5권 3호, 1996, pp. 25-31.
7. 김일수, 신병철, 재료공학입문, 반도출판사, 1997, pp. 167-168.
8. 신병철, 전자재료 비즈니스, 대영사, 1997, pp. 135-148.
9. 신병철, 비파괴검사-초음파탐상분야, 성안당, 1997, pp. 51-63.
10. 신병철외, "압전소자용 분극처리장치", 한국 실용신안등록 제 68403호, 1992.
11. 김호기, 신병철, 압전전왜 세라믹스, 반도출판사, 1991, pp. 76-99.
12. Byoung-Chul Shin, "Computation of hydrostatic piezoelectric coefficients for 1-3

-
- composites by the finite-element method", *Sensors and Actuators A*, Vol. 40, 1994, pp. 191-194.
13. Bernard Jaffe et al, *Piezoelectric Ceramics*, Academic Press, 1971, pp. 31-32.
14. "Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing", Panametrics Inc., Catalog No. P395, pp. 33-34.
15. Byoung-Chul Shin and Jeong-Rock Kwon, "Ultrasonic Transducers for Continuous Cast Billets", *Sensors and Actuators A*, Vol. 51, (1996), pp. 173-177.
16. 이충헌, 김경애, *초음파탐상검사*, 세진사, 1996, pp. 38-42.

(접수일자 1998. 2. 23)