16th ASIAN PHYSICS OLYMPIAD 2015
3rd-11th MAY, HANGZHOU, CHINA

실험 경연

2015년 5월 7일

08:30–13:30

실험 문제

표지를 포함하여 모두 22쪽입니다.

먼저 다음 주의 사항을 꼼꼼히 읽으십시오.

1. 실험 문제에 주어진 시간은 5시간입니다.
2. 지급된 펜과 장비만 사용하십시오.
3. 자료와 결과를 적어 넣을 답안지 묶음이 있습니다.
4. 제출하는 모든 답안지와 추가 용지 위쪽 칸에 학생 번호를 적으십시오.
5. 추가 풀이 용지가 지급됩니다.
6. 추가 풀이 용지를 사용하면 그 용지에 **학생 번호**, **문제 번호**, **쪽 번호**를 적으십시오.
7. 채점받고 싶지 않은 추가 풀이 용지에는 용지 전체에 걸쳐 커다랗게 '**X**'를 그으십시오.
8. 답에는 주로 식, 숫자, 기호, 그래프, 그림을 쓰고 글은 되도록 적게 쓰십시오. 문제에서 정의한 기호를 사용하십시오.
9. 실험이 끝나면 모든 용지를 다음 순서로 정리하십시오.
   a. 주 답안지
   b. 사용한 풀이 용지
   c. '**X**' 표시를 한 풀이 용지
   d. 사용하지 않은 풀이 용지
   e. 문제지
10. 모든 용지를 봉투에 넣고 봉투를 책상 위에 두고 나가십시오.
11. **어떤 용지나 실험에 사용한 어떤 물품도 방 밖으로 가지고 나갈 수 없습니다.**

압전 효과와 그 응용

1. 서론

압전 효과란 고체 물질에 기계적 응력을 가하면 그에 반응하여 전하가 쌓이는 현상을 말한다(그림 1(a) 참조). 이 현상은 가역적이어서, 압전 효과를 보이는 물질은 역압전 효과, 즉 전기장을 걸면 물질 내부에 기계적 변형이 생기는 현상도 보인다(그림 1(b) 참조).

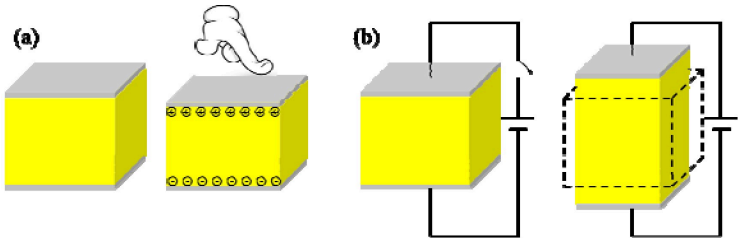


그림 1. (a) 압전 효과. 왼쪽: 기계적 응력을 받지 않은 노란색 압전 정육면체. 오른쪽: 기계적 응력을 가하면 그에 반응하여 정육면체의 마주 보는 두 면에 전하가 쌓인다. (b) 역압전 효과. 왼쪽: 전기장을 걸지 않으면 정육면체는 응력을 받지 않고 본래 모양을 유지한다. 오른쪽: 전기장을 걸면 정육면체가 응력을 받아 변형된다.

압전 물질은 산업·제조에서 일상생활에 이르기까지 폭넓게 응용된다. 소리의 발생과 검출, 고전압 발생, 미세 저울, 광학 장치의 초정밀 초점 조절, 담배 라이터의 점화원, 누름식 프로판 바비큐 점화기, 쿼츠 시계 등이 그 예이다.

위에서 말한 응용 말고도 압전 물질은 과학 연구에도 활발히 쓰인다. 매우 센 전기장을 걸어도 압전 물질의 크기는 아주 조금만 변하므로, 압전 물질은 물체를 극도로 정밀하게 위치시키는 가장 중요한 도구가 된다. 표면 과학에서 흔히 쓰는 도구인 주사 터널링 현미경(STM)과 그 변형들도 압전 물질을 바탕으로 한다. 1986년 노벨 물리학상은 STM을 설계한 게르트 비니히(Gerd Binnig)와 하인리히 로러(Heinrich Rohrer)에게 수여되었다.

압전 물질의 또 다른 장점은 기계적, 전기적, 광학적 신호처럼 서로 다른 형태의 신호를 서로 바꿀 수 있게 해 준다는 것이다. 극저온과 최첨단 전자 장치의 도움으로 연구자들은 기계적 진동 모드를 바닥 상태까지 냉각하여 운동의 양자화를 관찰할 수 있었다. 이러한 양자 기계, 곧 압전성 질화알루미늄으로 만든 기계적 공진기를 만든 실험은 『사이언스』지가 뽑은 "2010년 올해의 혁신 성과(Breakthrough of the Year 2010)"가 되었다.

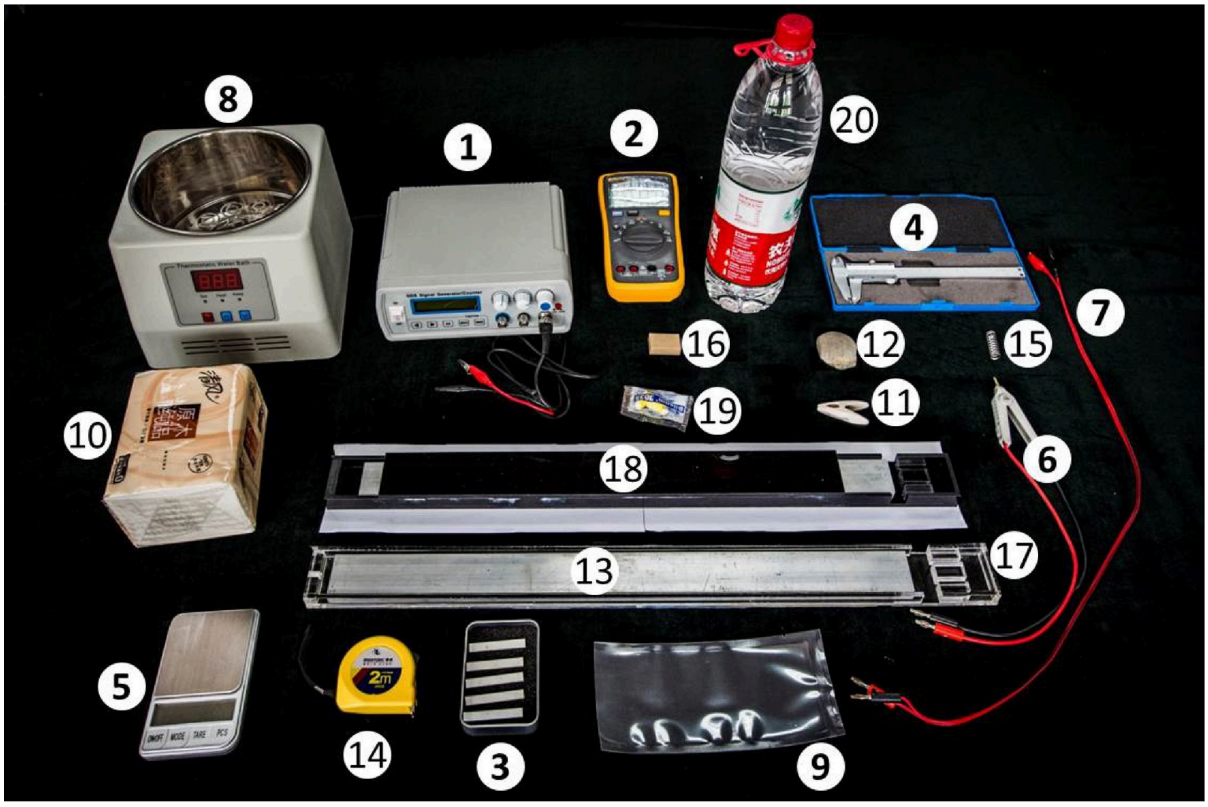
압전 물질에는 천연 물질과 합성 물질이 많이 있다. 천연 물질로는 석영, 뼈, 비단 등이 있고, 합성 물질로는 세라믹, 반도체, 고분자 등이 있다. PZT라고 불리는 지르콘산 타이타늄산 납($Pb[Zr_xTi_{1-x}]O_3$)은 오늘날 가장 흔히 쓰이는 압전 세라믹으로, 강한 압전성을 보인다.

이번 APhO 2015 실험에서는 PZT의 성질과 그 응용을 탐구한다. 주어진 PZT 판에 대하여 공진법으로 압전 계수를 측정하고, 선형 외삽으로 퀴리 온도를 어림한다. PZT 판으로 변환기를 만들어 매질 속에 기계적 운동과 음파를 일으키고, 또 PZT 판으로 센서를 만들어 음파의 세기를 감지한다. 손수 만든 변환기와 센서로 알루미늄 막대 속 소리의 종파 속력과 횡파 속력을 측정한다. 마지막으로 음파를 이용하여, 다른 알루미늄 막대 속에 인공적으로 만들어 둔 결함의 위치를 공진법으로 찾아낸다.

2. 일반 안전 수칙

1) **전원 코드를 꽂거나 뽑기 전에 반드시 장비를 끄십시오. 그렇지 않으면 장비가 손상될 수 있습니다.**
2) **가열부가 물에 잠기지 않았을 때에는 항온 수조를 켜지 마십시오.**
3) **주변의 전자 기기와 전기 콘센트에 물을 쏟지 않도록 조심하십시오.**
4) **뜨거운 물을 조심하십시오.**
5) **감전을 조심하십시오.**
6) **실험용으로 지급된 물질은 어떤 것도 마시거나 먹지 마십시오.**

3. 장치



1) 넓은 진동수 범위에 걸쳐 단순한 반복 전기 파형을 내보낼 수 있는 신호 발생기.
2) 디지털 멀티미터(DMM).
3) PZT 판 5장. 각 판의 두 평평한 면은 얇은 은 막으로 덮여 있다.
4) 버니어 캘리퍼.
5) 전자저울.
6) 켈빈 클립. 켈빈 클립은 서로 절연된 두 턱을 가진 악어 클립으로, 두 턱은 각각 바나나 플러그 두 개에 연결되어 있다. PZT 판을 물리는 데 쓴다.
7) 바나나 플러그 두 개가 각각 악어 클립 두 개에 연결된 케이블. 각 악어 클립의 한쪽 턱은 검은 관으로 싸여 있으므로, 물릴 때 극성을 바르게 하는 것이 중요하다.
8) 항온 수조.
9) 비닐봉지.
10) 종이 타월.
11) 플라스틱 집게.
12) 조약돌.
13) 알루미늄 막대.
14) 강철 줄자.
15) 용수철.
16) 지우개.
17) 알루미늄 막대와 PZT 판을 함께 넣을 수 있는 투명 플라스틱 상자.

18) 알루미늄 막대가 들어 있는 검은 플라스틱 상자. 막대의 한 곳에 상자 밖에서는 보이지 않는 결함을 인공적으로 만들어 두었다.
19) 귀마개 한 쌍.
20) 1.5 L 생수.

전자저울 사용법(그림 2 참조)

- 저울을 평평하고 아주 안정된 곳에 놓으십시오.
- “ON/OFF” 버튼을 눌러 저울을 켜십시오.
- 읽은 값이 안정될 때까지 기다리십시오. 읽은 값이 0이 아니면 “TARE” 버튼을 눌러 0으로 다시 맞추십시오.
- “MODE” 버튼을 누르면 단위가 “g”, “gn”, “oz”, “ozt”, “dwt”, “ct”, “tl” 사이에서 바뀝니다. “g”(그램) 단위를 쓰기를 권합니다.

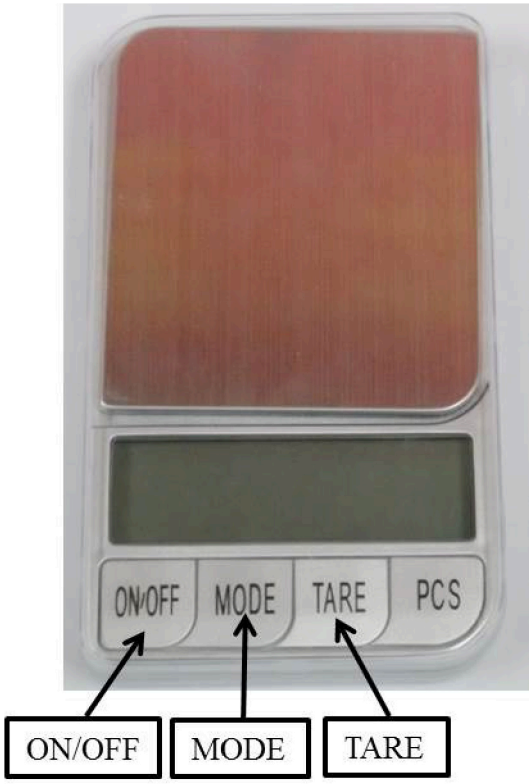


그림 2. 전자저울.

신호 발생기 사용법(그림 3 참조)

- 기기를 켜려면 분리형 USB 전원 코드(AC 어댑터 포함)를 뒷면 단자에 연결하고 앞면의 전원 버튼을 켜십시오.
- "표시 화면(Display Panel)"에는 파동의 진동수와 파형(사인파, 사각파, 삼각파)이 나타납니다. 실험에는 사인파를 권합니다.
- "진폭(Amplitude)" 손잡이로 신호의 진폭을 조절하십시오. "조절(Adjust)" 손잡이로 신호의 진동수를 바꾸십시오. "◀" 또는 "▶" 버튼으로 커서를 옮기십시오.
- **"DC 오프셋(DC offset)" 손잡이를 돌릴 때에는 조심하십시오. 이 손잡이는 신호의 직류 오프셋을 바꿉니다. 직류 오프셋이 크면 신호가 잘릴 수 있습니다(그림 4(a) 참조). 신호 발생기를 쓰기 전에 직류 오프셋을 보정하기를 권합니다. DMM으로 출력의 직류 전압을 보면서, 직류 전압이 0이 될 때까지 "DC 오프셋" 손잡이를 돌리십시오.**
- **신호가 잘리지 않도록 "진폭" 손잡이를 최대로 돌리지 말기를 권합니다(그림 4(b) 참조). 실험에서는 출력 진폭을 3.0 V(rms)로 맞추면 됩니다. 예를 들어 1 kHz의 진동수에서 DMM으로 출력의 교류 전압을 보면서, 교류 전압이 약 3.0 V(rms)가 될 때까지 "진폭" 손잡이를 돌리십시오.**
- 버튼을 잘못 눌러 원래 설정으로 돌아가는 방법을 모르겠으면, 기기를 다시 켜서 기본 설정으로 되돌리십시오.

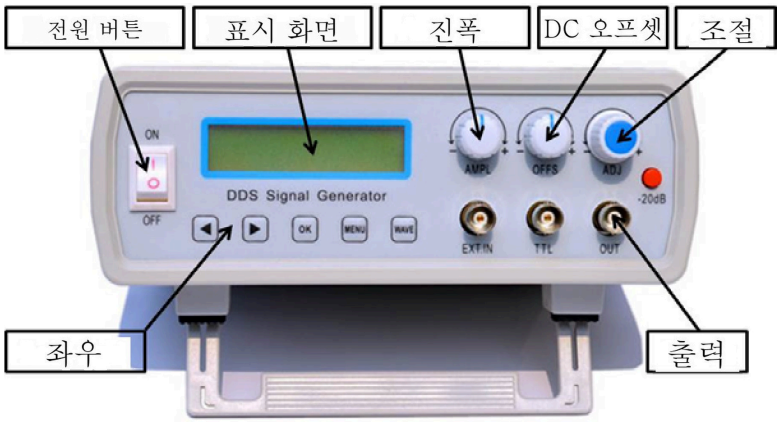


그림 3. 신호 발생기.

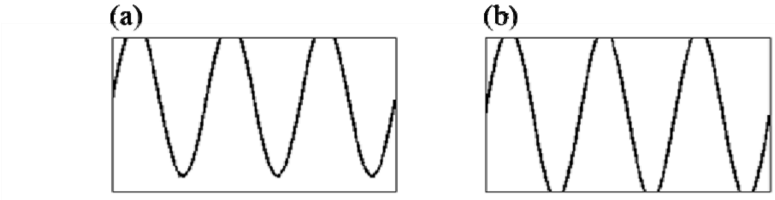


그림 4. 신호가 잘리는 두 가지 증상. (a) 직류 오프셋이 0이 아닐 때의 신호 잘림. (b) 출력 진폭이 너무 클 때의 신호 잘림.

디지털 멀티미터 사용법(DMM, 그림 5 참조)

- 전압, 저항, 전기용량을 측정할 때에는 “VΩ” 단자와 “COM” 단자를 쓰십시오.
- 전류를 측정할 때에는 “mA” 단자와 “COM” 단자를 쓰십시오.
- 회전 스위치로 알맞은 기능과 측정 범위를 고르십시오.
- 노란(YELLOW) 버튼을 누르면 교류(AC) 모드와 직류(DC) 모드가 바뀝니다.
- DMM을 20분 넘게 쓰지 않으면 “절전 모드(Sleep mode)”로 들어가 화면이 꺼집니다. 회전 스위치를 OFF로 돌렸다가 되돌리면 DMM이 깨어납니다. 절전 모드를 끄려면 노란 버튼을 누른 채로 DMM을 켜십시오.
- **주의: 이 DMM은 실험에서 40 kHz까지의 진동수에 쓸 수 있지만, 1 kHz보다 높은 교류 신호의 진폭을 정확히 재도록 설계된 것은 아닙니다. DMM으로 신호 발생기의 출력 전압을 보정하려면 신호 진동수를 1 kHz 이하로 맞추십시오.**



그림 5. 디지털 멀티미터.

항온 수조 사용법(그림 6 참조)

- **사용 중에는 표면이 뜨거워질 수 있습니다.**
- **가열부가 물에 잠기지 않았을 때 기기를 켜는 것은 엄격히 금지합니다.**
- **주변의 전자 기기와 전원 콘센트에 물을 쏟지 않도록 조심하십시오.**
- 수조가 절반쯤 차도록 생수를 부으십시오. 전원 코드를 바르게 연결하고 수조를 켜십시오.
- 목표 온도를 맞추려면 “Set” 버튼을 눌러 “Set” 모드로 들어가십시오. 그러면 “Set” 표시등이 켜집니다. “Increasing”(올림) 버튼(“Decreasing”(내림) 버튼)으로 표시된 값을 목표 온도까지 올리십시오(내리십시오). “Set” 버튼을 다시 눌러 “Set” 모드에서 나오면 수조가 자동으로 가열을 시작합니다. 실제 온도는 “온도 표시창(Temperature display)”에서 확인하십시오.
- 가열하는 동안에는 “Heat” 표시등이 켜집니다. 설정 온도에 이르면 “Keep” 표시등이 켜지고 가열이 멈춥니다.
- 실험하는 동안 온도를 낮은 값에서 높은 값으로 서서히 올리기를 권합니다.

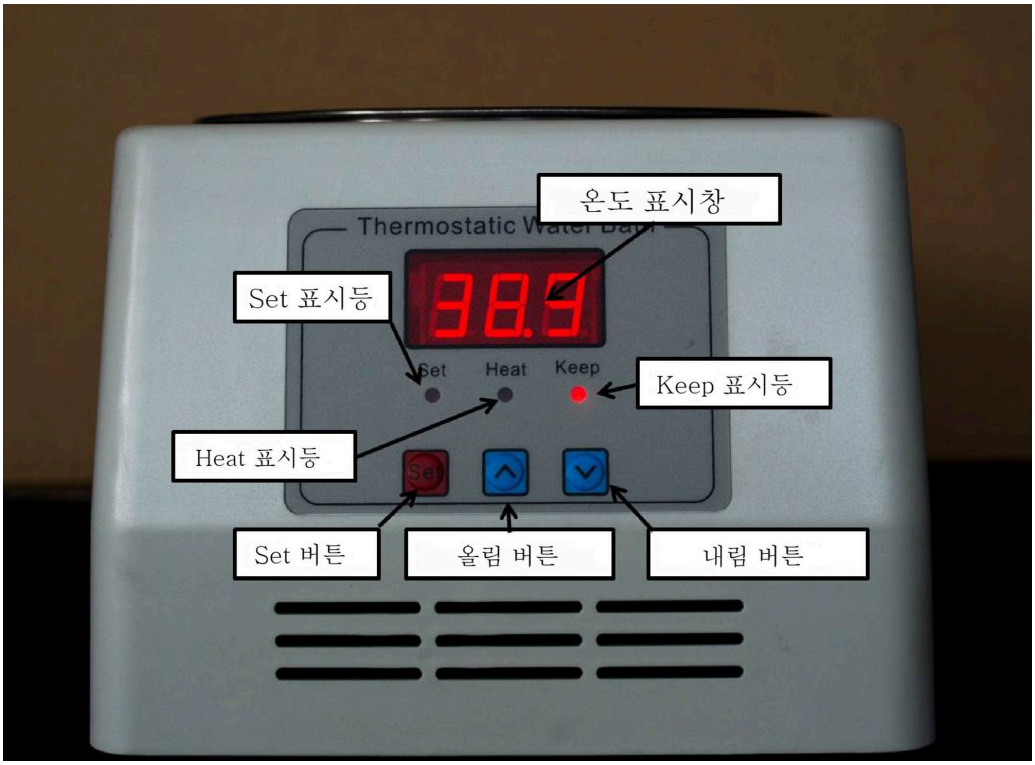


그림 6. 항온 수조.

실험 A

기본 측정 [3.0점]

이 실험에서는 PZT 판의 치수, 질량, 전기용량을 측정한 다음 밀도 ρ와 상대 유전율 ε_r를 계산한다.

PZT 판 하나를 고르십시오. 실험 A, B, C는 모두 이 같은 판으로 수행해야 합니다.

실험 A부터 E까지, 오차 분석은 명시적으로 요구한 경우에만 하고 요구하지 않은 경우에는 하지 않아도 됩니다.

A.1	PZT 판 하나를 골라 버니어 캘리퍼로 길이 l, 너비 w, 두께 t를 측정하시오. 전자저울로 질량 m을 측정하시오. DMM과 켈빈 클립으로 (실온에서) 전기용량 C를 측정하시오. PZT 판의 치수가 조금씩 고르지 않은 점과 계기 눈금 읽기의 불확도를 생각하여, 각 측정을 여러 번 되풀이한 다음 평균과 표준 오차를 계산하시오.	1.6점

주의: PZT 판의 상대 유전율은 온도에 따라 달라집니다(**실험 C** 참조). 전기용량은 실온에서 측정해야 합니다. 손으로 판을 직접 데우지 않도록 하십시오.

A.2	이제 PZT 판의 밀도 ρ와 상대 유전율 ε_r를 계산하시오. A.1에서 얻은 표준 오차를 바탕으로 오차 분석을 하여 ρ와 ε_r의 불확도를 어림하시오(진공 유전율 $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\ \mathrm{F/m}$).	1.4점

실험 B

공진법으로 압전 계수 측정하기 [4.5점]

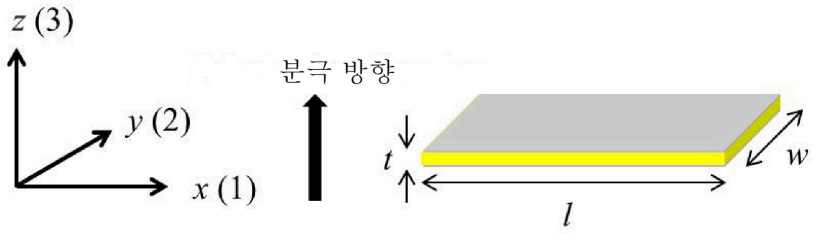


그림 7. PZT 판.

서론에서 설명했듯이 압전 판은 전기장을 받으면 뒤틀림(변형률 S라고도 한다)이 생긴다. 변형률 S와 전기장 세기 E 사이의 비례 계수 d를 압전 계수라고 정의한다.

$$d = \frac{S}{E}.$$

실제 PZT 판은 비등방적이다. 분극 방향이라고 부르는 특별한 방향이 있다. PZT 판을 만들 때, 퀴리 온도(**실험 C** 참조)보다 높은 온도에서 두께 방향(그림 7의 z축)으로 센 직류 전기장을 걸어 세라믹의 분자 쌍극자들을 정렬시킨다. 이 분극은 온도를 퀴리 온도 아래로 내린 뒤 직류 전기장을 없애도 남아 있다.

판의 위아래 평평한 면은 전극으로 쓰도록 은 막으로 덮여 있다(그림 7 참조). 전극을 전압원에 연결하면 전기장은 z축(3) 방향을 향하며, 이를 E_3로 나타낸다. 여기서 다음과 같이 정의한다.

$$d_{31} = \frac{S_1}{E_3},$$
$$d_{33} = \frac{S_3}{E_3},$$

여기서 $S_1 = \Delta l/l$과 $S_3 = \Delta t/t$는 각각 x축(1)과 z축(3) 방향의 변형률이다.

변형이 반드시 전기장 E_3에 나란한 것은 아님에 주의하라. PZT 물질에서 d_{31}은 대략 d_{33}의 절반이다. **실험 A**의 매개변수들로부터, 두 전극 사이에 전압 V를 걸 때 길이 l이 가장 크게 변함을 보일 수 있다. 즉

$$\Delta l = l d_{31} E_3 = \frac{l}{t} d_{31} V,$$
$$\Delta w = \frac{w}{t} d_{31} V,$$
$$\Delta t = t d_{33} E_3 = d_{33} V = 2 d_{31} V,$$

여기서 $l/t \gg w/t \gg 2$이다. **이론적 취급을 단순하게 하기 위해, 이렇게 길고 얇은 판에서는 너비(y축) 방향과 두께(z축) 방향의 진동을 무시할 수 있으며, 문제는 1차원 진동 문제로 줄어든다. 따라서 불필요한 아래 첨자를 빼고 d_{31}을 간단히 d로 나타낸다. 실험 D**와 **E**에서는 무시한 너비(y축) 방향의 진동 때문에 측정이 조금 불완전해질 수 있다.

PZT 판은 낮은 진동수의 신호로 구동하면 (A.1에서 구한 전기용량 C를 가진) 순수한 축전기처럼 행동한다. 그러나 진동수가 높아지면 PZT 판의 진동 때문에 회로에서의 거동이 크게 달라진다. **공진 진동수**라고 부르는 어떤 진동수에서는 판이 세게 진동하고 임피던스가 최소가 된다. 공진 진동수와 함께 임피던스가 최대가 되는 진동수들도 있는데, 이를 **반공진 진동수**라고 부른다.

판의 첫 번째 공진 진동수 f_r는 길이 방향(x축)을 따른 기본 진동 모드에 해당한다. f_r 근처에서 PZT 판은 그림 8처럼 축전기 두 개(C_0과 C_1)와 인덕터 하나(L_1)로 이루어진 간단한 회로로 근사할 수 있다.

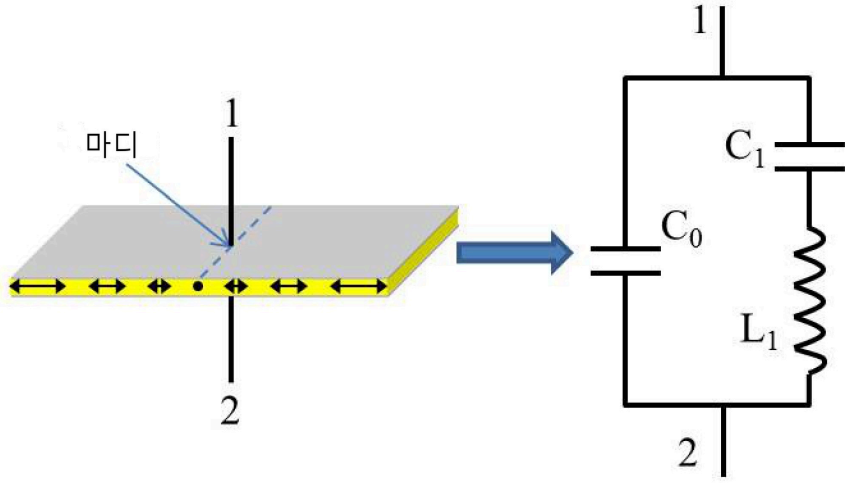


그림 8. 첫 번째 공진 진동수 근처에서 (외부 신호 구동에 대한) PZT 판의 등가 회로 모형. PZT 판은 기본 모드로 진동한다. 자유 경계 조건에서는 길이 방향의 가운데 점이 마디이다.

B.1	등가 회로의 공진 진동수 f_r와 반공진 진동수 f_a를 나타내는 식을 유도하시오.	1.0점

압전 계수 d는 다음 공식으로 계산할 수 있다.

$$d = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{128 f_r^4 l^2 \rho \left[\frac{1}{(2\pi f_a)^2 - (2\pi f_r)^2} + \frac{1}{32 f_r^2}\right]}}.$$

이제 실험으로 f_r와 f_a를 찾는다. 그림 9의 회로도를 보라. 신호 발생기의 출력 진폭(전압 V)을 일정하게 유지하므로, PZT 판의 임피던스는 회로의 교류 전류와 관련된다.

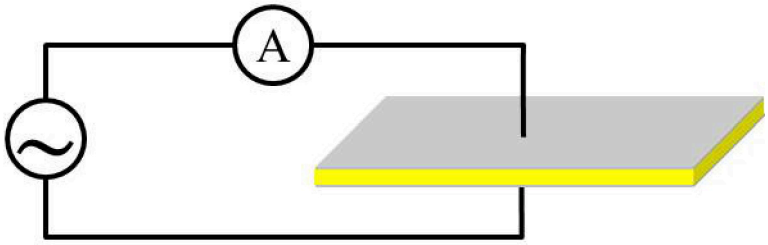


그림 9. 공진 진동수와 반공진 진동수를 측정하는 회로도.

B.2	PZT 판을 지나는 교류 전류 I를 신호 진동수 f의 함수로 측정하시오. I-f 곡선을 그리고 공진 진동수 f_r와 반공진 진동수 f_a를 구하시오. 그에 따라 압전 계수 d를 계산하시오.	3.5점

지침:

(1) 그림 9에 따라 신호 발생기, DMM, PZT 판을 연결하시오. **PZT 판은 켈빈 클립으로 길이 방향의 가운데 점을 물려야 함에 주의하십시오.** 자유 경계 조건에서는 가운데 점이 마디이기 때문입니다.

(2) 신호 발생기의 "진폭" 손잡이를 건드리지 않으면 출력 신호의 진폭은 진동수에 따라 거의 변하지 않습니다. 그러나 DMM은 진동수가 40 kHz보다 높은 신호에는 반응하지 않을 수 있습니다. 40 kHz 위의 자료는 필요하지 않습니다.

(3) **주의: 실험하는 동안 물려 놓은 PZT 판을 건드리지 마십시오. 조금만 움직여도 전류 읽은 값이 흘러갈 수 있습니다.**

(4) 주의: A.1에서 말했듯이 측정은 실온에서 해야 합니다. 손으로 판을 직접 데우지 않도록 하십시오.

(5) 주의: 진동수를 훑어도 시험하는 판에서 높은 소리가 전혀 들리지 않는데 측정 장치에 자신이 있다면, 장비가 고장 났을 수 있으니 진행 요원에게 연락하십시오.

실험 C

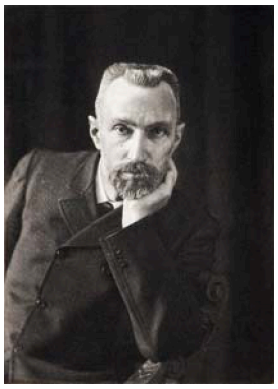
PZT 판의 퀴리 온도 [4.0점]

대부분의 절연체는 유전 감수율이 온도 변화에 둔감하다. 그러나 PZT 세라믹의 정적 상대 유전율은 다음 관계에 따라 온도와 함께 변한다.

$$\varepsilon_r = A + \frac{B}{T - T_c}, \text{ 단 } T > T_c.$$

여기서 A와 B는 온도와 무관한 상수이다. 이 관계를 **퀴리-바이스 법칙**이라고 한다. 매개변수 B와 T_c는 각각 퀴리 상수와 퀴리 온도라고 부르며, **피에르 퀴리**의 이름을 땄다.

피에르 퀴리



전이 온도 T_c에서 상전이가 일어난다. T_c 위에서는 물질이 상유전 상에 있으며, 결정 속 여러 단위 세포의 기본 쌍극자들이 무작위로 향한다. T_c 아래에서는 기본 쌍극자들이 서로 상호 작용하여 내부 전기장이 생기고, 이 전기장이 쌍극자들을 정렬시킨다. 그래서 외부 전기장이 없어도 자발 분극이 나타난다. T_c 아래에서 상대 유전율은 다음과 같다.

$$\varepsilon_r = 1 + \frac{B}{2(T_c - T)}, \text{ 단 } T < T_c.$$

실험 A에서 $\varepsilon_r \gg 1$임을 알고 있다. 상수항을 무시하면 정적 상대 유전율의 근삿값으로 다음을 얻는다.

$$\varepsilon_r = \frac{B}{2(T_c - T)}, \text{ 단 } T < T_c.$$

따라서 A.1에서 구한 PZT 판의 전기용량도 온도에 따라 변할 수 있다. PZT 판의 퀴리 온도는 물의 끓는점보다 훨씬 높으므로, 선형 외삽으로 퀴리 온도를 어림한다.

C.1	이제 여러 온도에서 PZT 판의 전기용량을 측정하고 자료를 기록하시오.	1.5점

지침:

(1) 바나나 플러그 두 개와 악어 클립 두 개가 달린 케이블로 PZT 판을 DMM에 연결하십시오. PZT 판을 물릴 때 두 악어 클립의 극성에 주의하십시오. **켈빈 클립은 ABS 플라스틱이 뜨거워지면 물러지므로 쓰지 마십시오.**

(2) PZT 판을 비닐봉지 안에 넣으십시오. 플라스틱 집게로 케이블과 봉지를 함께 집으십시오. **경고: 봉지의 한쪽은 열려 있습니다. 다른 쪽을 찢지 마십시오!**

(3) 1.5 L 생수를 항온 수조에 부으십시오. 비닐봉지를 물에 담그십시오. 조약돌로 비닐봉지가 물속에 있도록 누르십시오.

(4) 항온 수조를 켜고 목표 온도를 맞추십시오. **경고: 가열부가 물에 잠기지 않았을 때 기기를 켜는 것은 엄격히 금지합니다.**

(5) 경고: 항온 수조의 뜨거운 물을 아주 조심하십시오. 50 °C보다 뜨거운 물은 화상을 입힐 수 있습니다. 안전을 위해 온도를 90 °C보다 높게 맞추지 마십시오.

(6) 온도는 천천히 올라갑니다. 여러 온도에서 PZT 판의 전기용량 C를 기록하십시오.

(7) 측정이 끝나면 항온 수조를 끄고 전원 코드를 콘센트에서 뽑으십시오.

(8) 도움말: 실험을 빨리 하려면 목표 온도를 90 °C로 맞추고 온도가 오르는 동안 전기용량을 기록해도 됩니다.

C.2	자료를 분석하여 알맞은 그래프를 그리고, 그에 따라 퀴리 온도를 계산하시오.	2.5점

실험 D

응용: 알루미늄 속 소리의 속력 측정 [6.5점]

고체 속에서 소리는 종파와 횡파로 모두 전달될 수 있다. 두 종류의 파동을 일으키는 매질의 운동을 아래에 나타내었다.

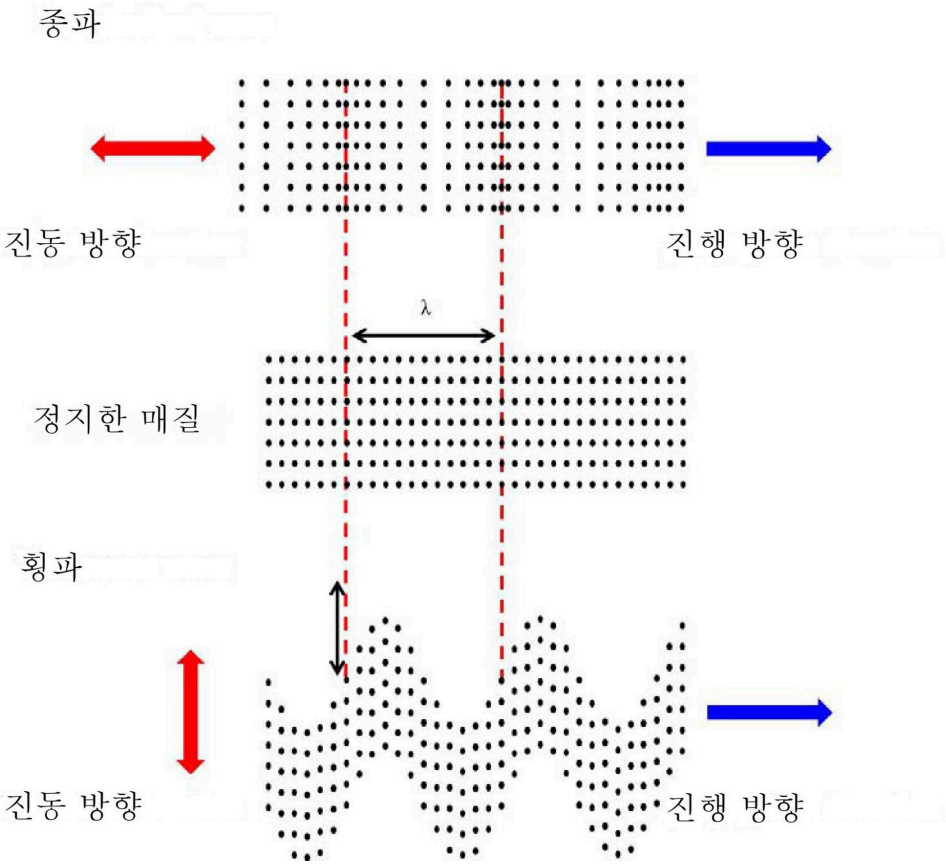


그림 10. 고체 속의 종파와 횡파.

종파에서는 진동이 세로 방향, 곧 파동이 진행하는 방향으로 일어난다. 에너지가 압축과 팽창의 연속된 운동으로 원자 구조를 거쳐 전달되므로, 종파는 고체뿐 아니라 액체에서도 생길 수 있다.

횡파에서는 매질의 변위가 파동이 진행하는 방향에 수직이다. 횡파는 전파되려면 고체 매질이 필요하며, 액체나 기체에서는 제대로 전파되지 못한다.

이 실험에서는 알루미늄 막대 속 소리의 종파 속력과 횡파 속력을 측정한다. 먼저 횡파 속력을 측정하고, 그다음 종파 속력을 측정한다.

D.1	알루미늄 막대의 길이를 L, 파동의 속력을 u라 하자. 자유 경계 조건에서 긴 막대를 따라 생기는 정상파(공진파)의 진동수 f_n을 나타내는 식을 유도하시오. 그런 다음 f_n으로부터 파동의 속력 u를 구하는 식을 유도하시오.	0.6점

이제 PZT 판 하나를 변환기로 써서 알루미늄 막대 속에 음파를 일으키고, 다른 PZT 판을 진동 센서로 써서 반사된 음파를 감지한다.

먼저 횡파 속력을 측정한다. **실험 B**에서 논의했듯이 길이 방향의 진동이 지배적이다. 그림 11처럼 변환기와 센서를 막대의 한쪽 끝에 놓는다. 변환기의 진동이 마찰을 통해 막대 속으로 전파되어 횡파를 이룬다.

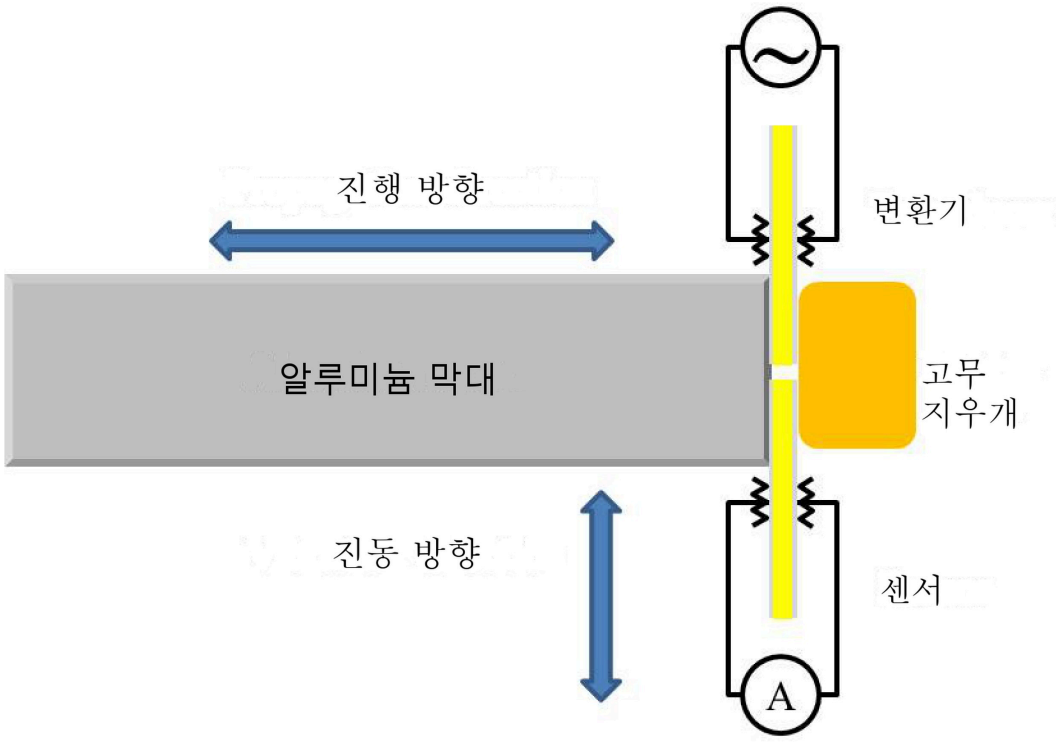


그림 11. 횡파 속력을 측정하는 장치의 모식도(위에서 본 모습).

D.2	강철 줄자로 알루미늄 막대의 길이 L을 읽으시오. 측정을 여러 번 되풀이하여 평균과 표준 오차를 계산하시오. 변환기가 내는 음파의 진동수를 바꾸면서, 센서로 관찰되는 봉우리 값을 기록하시오. 그림 12와 비슷하게, 측정한 모든 공진 봉우리를 담은 스펙트럼을 그리시오.	1.6점

지침:

(1) 단계 (2)–(4)에 따라 그림 11처럼 실험 장치를 배치하십시오. 플라스틱 상자는 이 장치를 담도록 특별히 설계된 것입니다.

(2) 알루미늄 막대를 플라스틱 상자의 긴 홈에 놓고, 그림 11처럼 지우개로 PZT 판들을 알루미늄 막대의 한쪽 끝에 눌러 대십시오. 두 판이 서로 닿으면 안 됩니다.
(3) 홈의 다른 쪽 끝에 용수철을 넣어 막대를 PZT 판 쪽으로 살며시 밀어 주십시오.
(4) PZT 판 하나를 신호 발생기에 연결하여 변환기로 쓰십시오. 다른 PZT 판은 DMM에 연결하여 센서로 쓰십시오. 악어 클립을 쓸 때 극성에 주의하십시오.
(5) PZT 판은 깨지기 쉬우며 여분이 없습니다.
(6) 높은 소리가 거슬리면 귀마개를 쓰십시오.
(7) 진동수는 0에서 40 kHz 사이에서 훑기를 권합니다.

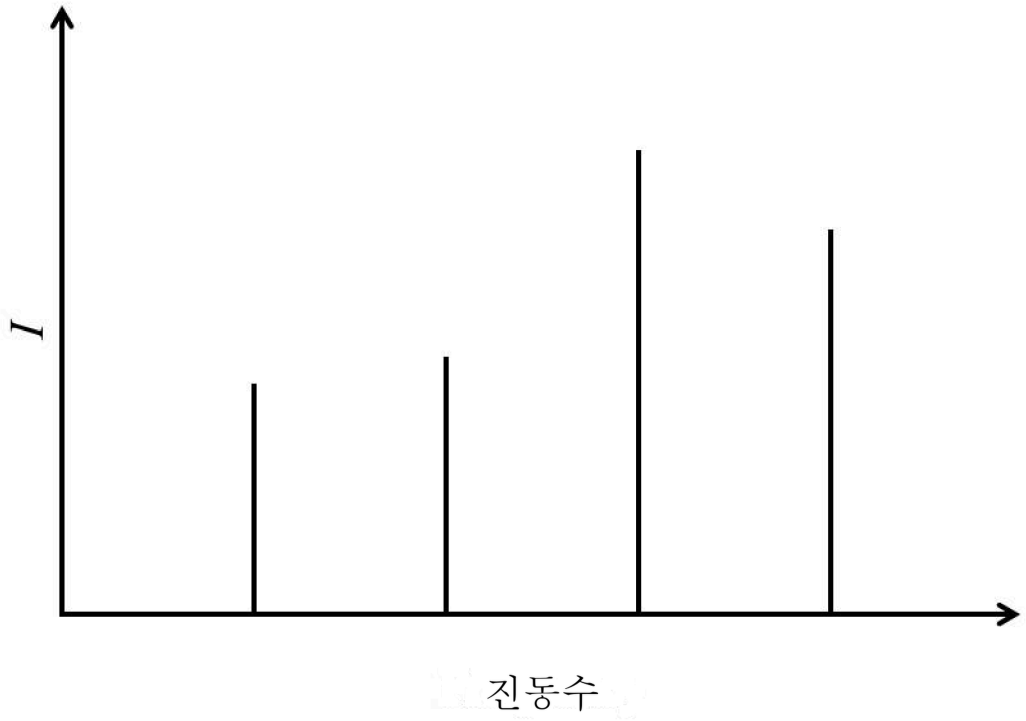


그림 12. 모든 공진 봉우리를 보여 주는 스펙트럼의 예.

D.3	횡파 때문에 생겼을 것으로 보이는 공진 봉우리를 가려내시오. 그에 따라 횡파 속력을 계산하고 오차 분석을 하시오. 주의: 불완전한 자유 경계 조건처럼 실험 장치가 완벽하지 않아서 생기는 관계없는 봉우리들이 있을 수 있습니다. 분석할 때 스스로 판단하여 관계없는 봉우리들은 무시해야 합니다.	1.4점

PZT 판과 막대가 닿는 방식을 바꾸면 막대 속 종파 속력도 측정할 수 있다. 그림 13처럼 변환기와 센서를 막대에 붙인다. 변환기의 길이 방향 진동이 압축을 통해 막대 속으로 전파되어 종파를 이룬다.

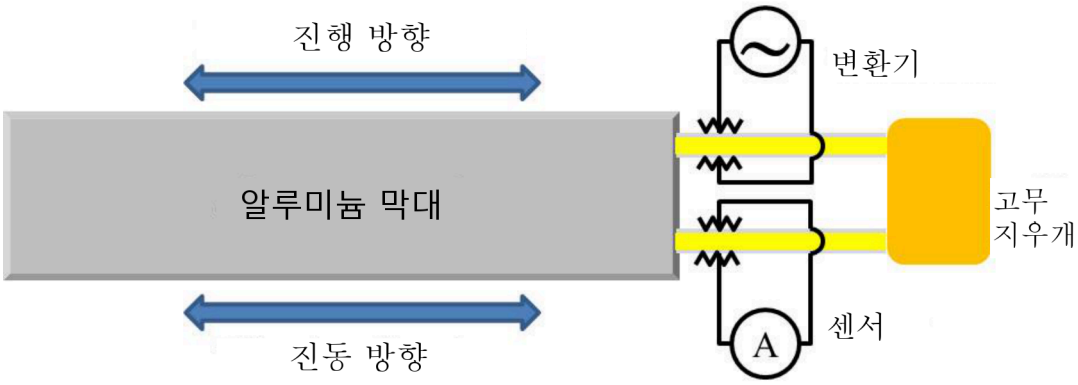


그림 13. 종파 속력을 측정하는 장치의 모식도.

실험 B에서 논의했듯이, 길이 방향 진동이 지배적이기는 하지만 다른 방향의 진동도 있어서, 이것이 막대 속에 음파를 만들어 스펙트럼에 공진 봉우리를 더 생기게 할 수 있다. 다른 방향의 진동은 횡파만 만든다는 점에 주의하라. 따라서 이렇게 더 생긴 공진 봉우리는 종파 정상파 때문에 생기는 봉우리와 겹치지 않는다.

D.4	변환기가 내는 음파의 진동수를 바꾸면서, 센서로 관찰되는 봉우리 값을 기록하시오. 그림 12와 비슷하게, 측정한 모든 공진 봉우리를 담은 스펙트럼을 그리시오.	1.5점

지침:

(1) 단계 (2)–(5)에 따라 그림 13처럼 실험 장치를 배치하십시오. 플라스틱 상자는 이 장치를 담도록 특별히 설계된 것입니다.

(2) 플라스틱 상자 한쪽 끝에 있는 가느다란 두 홈에 PZT 판 두 장을 각각 맞춰 끼우십시오.

(3) 긴 알루미늄 막대를 홈에 놓은 채로, 지우개를 완충재로 삼아 PZT 판들을 막대의 한쪽 끝에 눌러 대십시오.

(4) 다른 쪽 끝에 용수철을 끼워 막대를 PZT 판 쪽으로 살며시 밀어 주십시오.

(5) PZT 판 하나를 신호 발생기에 연결하여 변환기로 쓰십시오. 다른 PZT 판은 DMM에 연결하여 센서로 쓰십시오. 악어 클립을 쓸 때 극성에 주의하십시오.

(6) **주의: PZT 판과 막대가 닿는 방식이 매우 중요합니다. PZT 판의 모서리가 막대의 옆면에 빈틈없이 닿게 하여, 점 접촉이나 부분 접촉이 되지 않도록 하십시오.**

(7) **주의: 스펙트럼에 공진 봉우리가 너무 많으면, 신호 발생기의 신호 진폭을 줄이거나 PZT 판과 막대 사이의 누르는 힘을 조금 풀어서 횡파가 덜 생기게 해 보십시오. 용수철이 없어도 PZT 판과 막대가 잘 닿아 있으면 다른 쪽 끝의 용수철을 빼 보아도 됩니다.**

(8) 진동수는 0에서 40 kHz 사이에서 훑기를 권합니다.

D.5	D.2의 결과와 비교하여 횡파 때문에 생긴 공진 봉우리를 가려내시오. 종파 때문에 생긴 공진 봉우리를 골라 그에 따라 종파 속력을 계산하시오. 오차 분석을 하시오.	1.4점

실험 E

응용: 알루미늄 막대 속 결함의 위치 찾기 [2.0점]

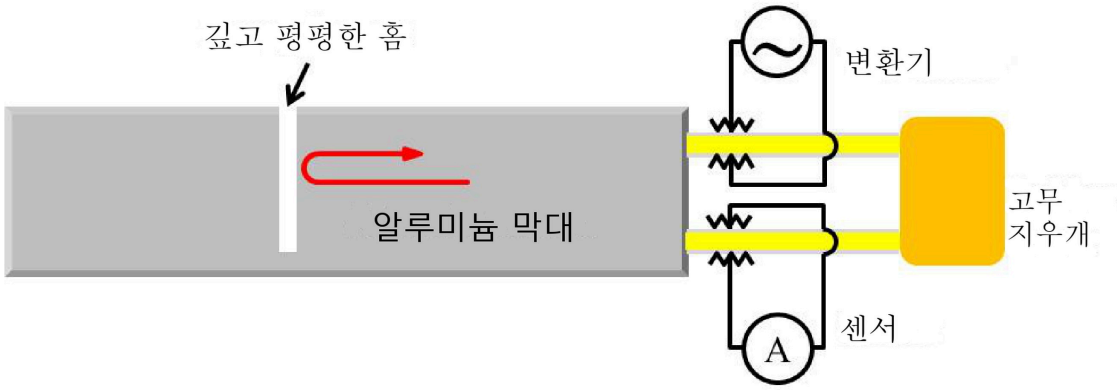


그림 14. 알루미늄 막대 속 결함의 위치를 찾는 장치의 모식도.

실험 D에서 종파 속력을 알았으니, 이제 긴 알루미늄 막대에 인공적으로 만들어 둔 결함, 곧 깊은 홈의 위치를 찾아보자.

고체 속을 지나는 음파는 금속, 복합 재료, 플라스틱, 세라믹 속에 숨은 균열, 빈틈 같은 내부 불연속을 찾는 데 쓰여 왔다. 산업용 초음파 검사는 진폭이 수백 볼트에 이르는 수 메가헤르츠의 짧은 펄스를 되풀이해 만들어 변환기를 구동하고, 받은 신호를 증폭하여 결함에서 반사된 것이 있는지 살피는 방식으로 이루어진다. 이것은 지금 우리 장치로 하기에는 기술적으로 너무 복잡하다. 그 대신 간단한 시연으로서, 공진법을 다시 써서 막대 속의 깊고 평평한 홈을 찾아낸다. **실험 D**의 경우와 달리 음파는 막대의 먼 끝이 아니라 깊은 홈이 있는 곳에서 되튄다. 따라서 스펙트럼 속 공진 봉우리의 배열이 **실험 D**와 달라지며, 이것이 깊은 홈의 위치를 찾는 기준이 될 수 있다.

검출에는 종파를 쓸 수 있다.

E.1	변환기가 내는 음파의 진동수를 바꾸면서, 센서로 관찰되는 봉우리 값을 기록하시오. 그림 12와 비슷하게, 측정한 모든 공진 봉우리를 담은 스펙트럼을 그리시오.	1.2점

E.2	측정한 스펙트럼에서 깊은 홈이 있어서 생긴 공진 봉우리를 가려내시오. 홈이 있는 곳에서 PZT 판과 닿아 있는 막대 끝까지의 거리를 어림하시오.	0.8점