APhO

15TH ASIAN PHYSICS OLYMPIAD
11 - 18 MAY 2014, SINGAPORE

실험 경연
2014년 5월 15일
08:30 – 13:30

실험 문제

학생 번호

표지를 포함하여 모두 14쪽입니다.

2014년 5월 15일 (목요일)

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 번호**를 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.**

용액 속 초음파의 속력

1. 서론:

초음파는 산업 분야에서 비파괴 검사, 음파 탐지(소나), 의료 영상 등에 널리 응용된다. 음향 광학 효과는 초음파 연구에 널리 쓰인다. 오늘날 음향 광학 소자는 빛살의 변조, 신호 처리, 진동수 이동에 활용된다. 레이저를 쓸 수 있게 되면서 음향 광학 효과를 쉽게 관찰할 수 있게 되었다. 또한 고주파 압전 변환기가 개발되어 음향 광학 효과를 일으키는 데 활용할 수 있다.

이번 APhO 2014 실험에서는 선택한 용액 속을 지나는 소리의 성질을 다음 두 방법으로 탐구하는 여정에 나선다.

(i) 라만-나트 회절 영역의 음향 광학 효과를 이용하는 방법, 그리고
(ii) 정상파를 직접 눈으로 보는 방법.

또한 쉽게 구할 수 있는 간단하고 값싼 물건만으로도 매우 흥미로운 실험을 할 수 있음을 배우게 될 것이다.

2. 안전 수칙과 일반 지침:

(1) 레이저 빛살을 직접 들여다보지 마십시오.
(2) 압전 변환기는 **유리 용기 안의 물속에 단단히 놓은 뒤에만** 켜십시오.
(3) 압전 변환기가 켜져 있을 때에는 물이 든 유리 용기에 손을 넣지 마십시오.
(4) 물을, 특히 전기 콘센트에 쏟지 않도록 조심하십시오.
(5) 유리 용기와 랩잭을 안전하게 다루십시오.
(6) 실험용으로 지급된 물질은 어떤 것도 마시거나 먹지 마십시오.
(7) 레이저를 켤 때에는 언제나 레이저 보안경을 쓰십시오.
(8) 배터리가 쓸데없이 닳지 않도록 레이저 포인터를 쓰지 않을 때에는 끄십시오.
(9) 물이 데워지지 않도록 압전 변환기를 쓰지 않을 때에는 끄십시오. 물속 소리의 속력은 온도에 따라 변합니다.
(10) 문제지와 답안지가 물에 젖지 않도록 보관할 플라스틱 파일이 지급됩니다.
(11) 실험대 공간이 좁으므로 쓰지 않는 장비는 상자에 넣어 바닥에 두십시오.
(12) 유리 용기는 세 개가 지급되며, 다음 실험으로 넘어갈 때 새 용기를 써도 됩니다.

3: 장치



(A) 액체용 유리 용기 × 3 – 실험용

(B) (A)용 알루미늄 받침대 – 선택 사항

(C) 압전 변환기

(D1) (C)용 받침
(D2) 조절판 – D1 위에 단다

(E) 레이저를 켠 채로 두는 플라스틱 덮개가 달린 레이저 포인터

(F) 무늬를 표시할 답안지(또는 추가 풀이 용지)를 붙이는 화면 판

(G) 랩잭 × 4 – 레이저 포인터와 광학 부품을 올려놓는 데 쓴다

(H) 거울 × 2

(I) 렌즈 × 2 (초점 거리 5.0 cm와 15.0 cm)

(J) 광천수 1.5 L × 2와 0.5 L × 2

(K) 소금 (500 g)

(L) 실험 C용, 광천수에 소금이 알 수 없는 농도로 녹아 있는 용액 병

(M) 라이트 콘 시럽 0.51 L × 3

(N) 전자저울

(O) 물 계량 용기

(P) 줄자

(Q) 자

(R) 버니어 캘리퍼

(S) 보안경 – 레이저 보안경

(T) 4 L 플라스틱 통 – 물 버리는 용도

(U) 두루마리 휴지 × 2

(V) 숟가락

(W) 가위

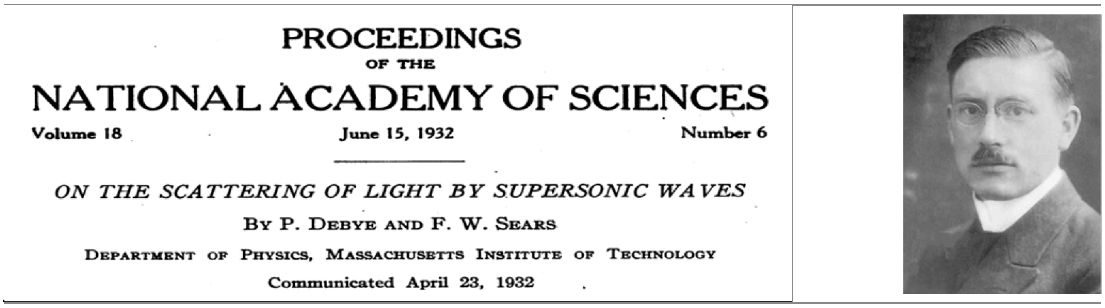
(X) 셀로판테이프와 점착 고무

(Y) 플라스틱 케이스에 든 온도계

그림 1: 이 실험 문제에 필요한 장치와 부품의 사진.

실험 A

회절법으로 초음파의 진동수 측정하기



PROCEEDINGS
OF THE
NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
Volume 18 June 15, 1932 Number 6

ON THE SCATTERING OF LIGHT BY SUPERSONIC WAVES

By P. Debye and F. W. Sears

Department of Physics, Massachusetts Institute of Technology

Communicated April 23, 1932

소리가 매질 속을 지나가면 압력이 요동하고, 그 결과 매질의 굴절률이 변한다. 알맞은 조건에서 음파는 물질 속에 움직이는 주기적 굴절률 격자를 만들며, 이 격자는 광학적으로 검출할 수 있다. 이를 음향 광학 효과라고 한다. 데바이와 시어스는 1932년에 이 움직이는 주기적 굴절률 격자에 의한 빛의 회절을 처음으로 보인 사람들 가운데 하나이다. 자세한 이론은 1935년에 라만과 나트가 세웠다.

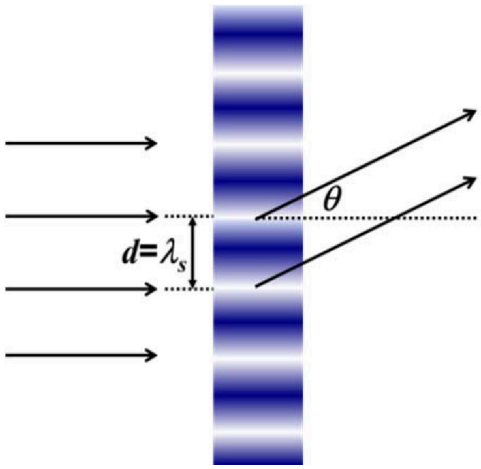


그림 2: 초음파가 액체 속에 만드는 움직이는 주기적 굴절률 격자

그림 2처럼 빛살은 움직이는 주기적 굴절률 격자에 의해 회절된다. 회절된 빛은 다음 격자 방정식을 따른다.

$$d\sin(\theta) = i\lambda_{medium} \qquad (1)$$

여기서 d는 격자 상수, θ는 회절각, i는 회절 차수, λ_{medium}은 매질 속 빛의 파장이다.

라만과 나트에 따르면, 격자 상수 d는 그림 2처럼 매질 속 초음파의 파장 λ_s와 같다.

이 실험에서는 광천수 속 소리의 알려진 속력을 이용하여, 압전 변환기 (C)가 만드는 초음파의 진동수를 회절법으로 측정한다. 그림 3은 광천수 속 소리의 속력을 온도의 함수로 보여 준다.

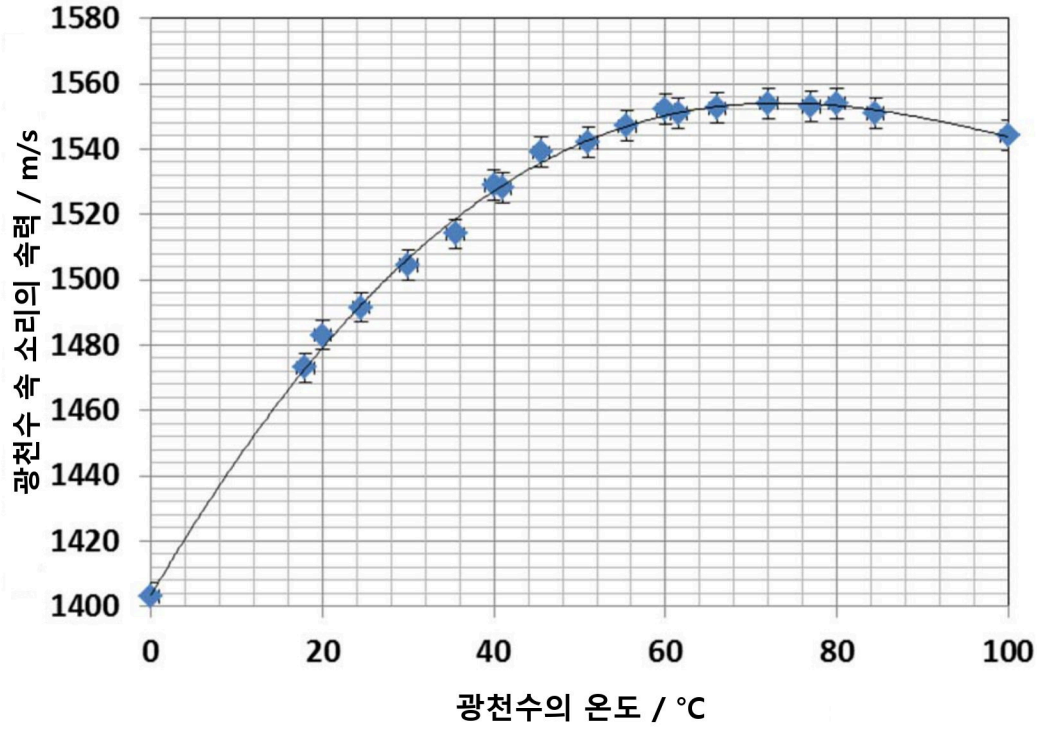


그림 3: 광천수 속 소리의 속력을 온도의 함수로 나타낸 것.

압전 변환기 (C)는 광천수 1.5 L를 채운 유리 용기 (A) 속에 놓인 받침 (D1)의 둥근 홈에 놓는다. 변환기를 켜면 그림 4(a)처럼 물속에 연직 방향으로 움직이는 주기적 굴절률 격자가 생긴다. 실험 A에서는 조절판 (D2)가 물 높이보다 위에 있도록 하십시오. 조절판은 물이 튀는 것을 막는 데에만 쓴다. 레이저 빛살을 격자에 수직으로 입사시키면 회절 무늬가 생긴다. 격자에서 충분히 먼 곳에서는 그림 4(b)에 설명한 것처럼, 측정과 분석을 위해 화면 (F)에 뚜렷이 구별되는 무늬를 만들 수 있다.

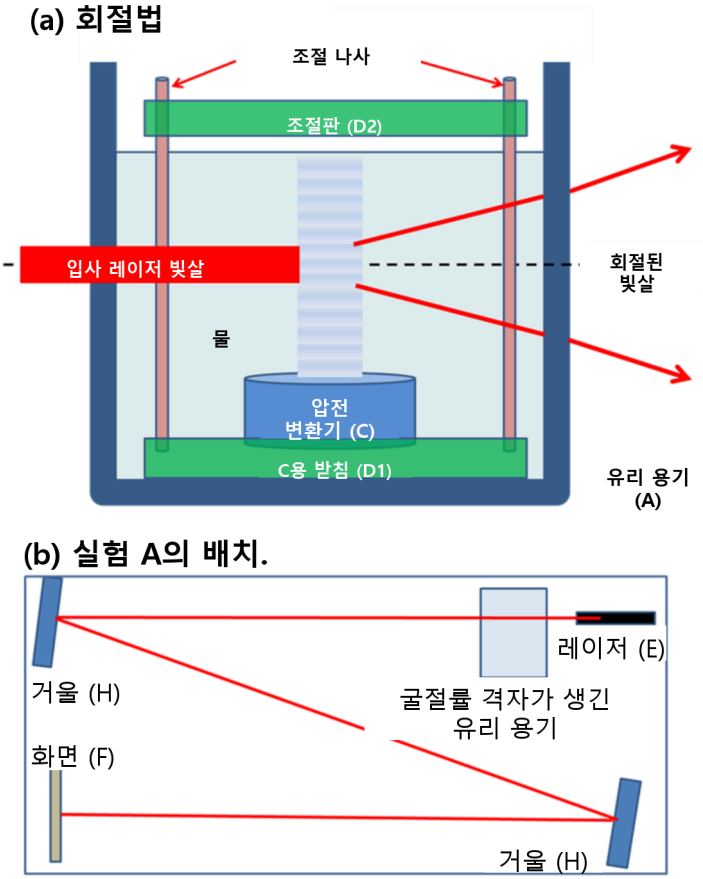


그림 4: (a) 움직이는 주기적 굴절률 격자를 만드는 장치의 모식도(축척은 맞지 않음). (b) 실험 장치의 권장 배치.

압전 변환기가 광천수 속에 만드는 초음파의 진동수를 계산하려면 먼저 물속 소리의 파장 λ_s를 구해야 한다. 식 (1)과 관련된 모든 매개변수를 보여 주는 그림 5를 이용하여 문제 A1에 답하시오.

A1.	작은 각 근사에서 λ_s를 나타내는 식은 식 (2)와 같다. $$\lambda_s = A(m-1)\frac{n_{air}\lambda_{air}}{D_m} \qquad (2)$$ **A를 $b, g, L, n_w, n_g, n_{air}$로 나타내는 식을 유도하시오.** 여기서 λ_s는 물속 초음파의 파장, b는 격자 가운데에서 유리 용기 안쪽 벽까지의 거리, g는 유리 용기 벽의 두께, m은 화면에서 센 회절 무늬의 전체 개수, n_w, n_g, n_{air}는 각각 물, 유리, 공기의 굴절률, L은 유리 용기 벽에서 화면까지의 거리, λ_{air}는 공기 중 레이저 빛의 파장, D_m은 화면 위 m개 회절 무늬가 퍼진 길이이다.	1.5

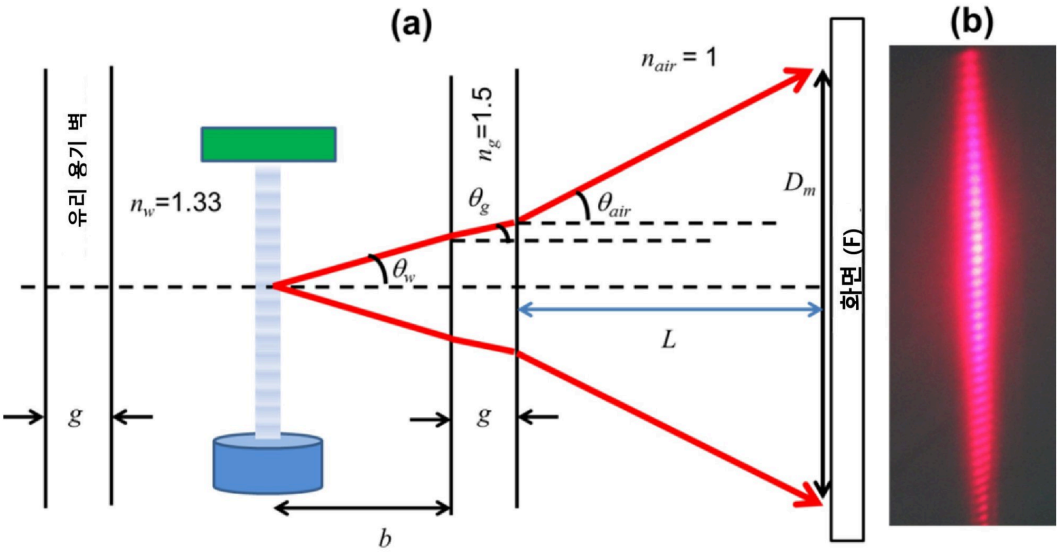


그림 5: (a) 관련 매개변수를 표시한, 회절된 빛살 경로의 모식도. (b) 화면에 보이는 무늬의 예.

이제 실험 장치를 꾸미시오. 그림 4와 5의 모식도를 참고하시오. 되도록 많은 무늬가 생기도록 노력하시오. 이 파트에서는 화면 (F)에 답안지 A2를 붙여 회절 무늬를 기록해야 한다. 레이저 빛살의 단면이 완전히 대칭이 아닐 수 있으므로, 레이저를 돌려 가며 가장 좋은 무늬를 얻어야 한다. 작업을 깔끔하게 하시오. 물속 소리의 속력은 물의 온도에 따라 달라지므로 실험하는 동안 온도를 살펴야 한다. 문제지와 답안지가 물에 젖지 않도록 보관할 플라스틱 파일이 지급된다.

A2.	측정한 모든 무늬를 답안지 A2에 표시하시오. 센 무늬의 개수 m과 무늬가 퍼진 길이 D_m을 분명히 적으시오. 광천수의 온도를 적으시오. 계산에 필요한 관련 실험 매개변수를 답안지 A3에도 잊지 말고 적으시오.	2.5

주: 무늬 표시를 마쳤으면 자료를 분석하고 계산하는 동안 압전 변환기 (C)와 레이저 포인터 (E)를 꺼 두십시오.

다음 문제에서는 아래 값을 써도 된다.
n_w = 물의 굴절률 = 1.333±0.007
n_{air} = 공기의 굴절률 = 1.000±0.0003
n_g = 유리의 굴절률 = 1.50±0.05
λ_{air} = 공기 중 레이저 빛의 파장 = 660 ± 3 nm
광천수 속 소리의 속력은 그림 3으로 구한다.

주: 오차 분석에서는 계산을 간단히 하기 위해 n_w, n_g, n_{air}, λ_{air}의 불확도를 무시해도 된다.

A3.	관련된 모든 매개변수를 측정하여 답안지 A3에 기록하고, 광천수 속 소리의 파장 λ_s를 계산하시오.	1.0

A4.	광천수 속 초음파의 진동수 f_s를 계산하여 기록하시오.	0.5

A5.	오차 분석을 하여 f_s의 불확도를 어림하시오.	1.0

실험 B

투영법으로 초음파의 진동수 측정하기

실험 B에서는 투영법이라는 다른 방법으로, 광천수 속 초음파의 진동수를 직접 눈으로 보면서 측정한다. 이를 위해 조절판 (D2)를 초음파 반사판으로 써서 광천수 속에 정상파 무늬를 만든다. 압전 변환기에서 나온 진행파와 조절 반사판에서 나온 진행파가 서로 반대 방향으로 움직이며 겹쳐 정상파 무늬를 만든다. 그림 6은 투영법 장치의 모식도이다. 모식도처럼 레이저 (E)와 유리 용기 (A)의 벽 사이에 렌즈 (I)를 넣는다. 그러면 유리 용기 속 정상파 무늬가 배율 $M = D_B/p$로 화면에 투영된다.

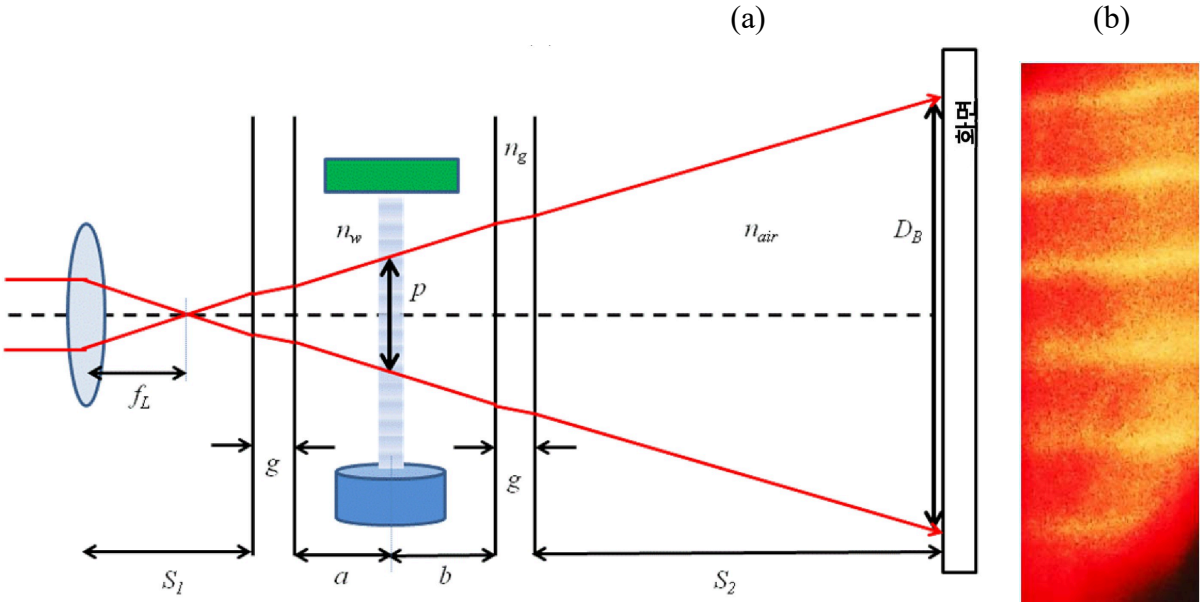


그림 6: (a) 관련 매개변수를 표시한 투영법 모식도. (b) 화면에 투영된 정상파 무늬의 예.

그림 6에 나타낸 매개변수로 화면 (F) 위 구간 p의 배율 M을 나타내면 식 (3)과 같다.

$$M = \frac{\left[\frac{(S_1 - f_L)}{n_{air}} + \frac{2g}{n_g} + \frac{(a+b)}{n_w} + \frac{S_2}{n_{air}}\right]}{\left[\frac{(S_1 - f_L)}{n_{air}} + \frac{g}{n_g} + \frac{a}{n_w}\right]} \qquad (3)$$

여기서
S_1은 렌즈 가운데에서 유리 용기 바깥 벽까지의 거리,
S_2는 유리 용기 바깥 벽에서 화면 (F)까지의 거리,
f_L은 렌즈의 초점 거리,
a는 격자 가운데에서 유리 용기 왼쪽 안쪽 벽까지의 거리,
b는 격자 가운데에서 유리 용기 오른쪽 안쪽 벽까지의 거리,
g는 유리 용기 벽의 두께,
n_w는 물의 굴절률,
n_g는 유리의 굴절률,
n_{air}는 공기의 굴절률이다.

투영된 무늬의 밝은 곳과 어두운 곳은 정상파 무늬의 마디와 배에 관련된다.

B1.	화면 위 길이 D_B 안에서 센 밝은 곳의 개수를 m_B라 하자. 식 (3)을 써서 λ_s를 측정할 수 있는 매개변수와 주어진 매개변수로 나타내는 식을 쓰시오.	1.0

이제 그림 6의 모식도를 참고하여 실험 장치를 꾸미시오. 이 파트에서는 화면 (F)에 답안지 B2를 붙여 투영된 정상파 무늬를 기록해야 한다.

실험 과정에 대한 몇 가지 권장 사항은 다음과 같다.

- 투영법을 위한 초음파 정상파를 얻으려면 조절판 (D2)를 물속에 잠기게 하십시오.
- 그림 6(b)처럼 안정되고 뚜렷한 무늬를 얻도록 수평 조절 나사를 조심스럽게 조정하십시오.
- 초점 거리 5.0 cm와 15.0 cm인 렌즈 두 개가 지급된다. 실험 B에는 이 가운데 **하나만** 쓰십시오.

B2.	투영된 정상파 무늬를 답안지 B2에 표시하시오. 센 밝은 곳의 개수 m_B와 그에 해당하는 길이 D_B를 분명히 적으시오. 광천수의 온도를 적으시오. 계산에 필요한 관련 실험 매개변수를 답안지 B3에도 잊지 말고 적으시오.	2.0

B3.	관련된 모든 매개변수를 측정하여 답안지 B3에 기록하고, 광천수 속 소리의 파장 λ_s를 계산하시오.	1.5

B4.	광천수 속 초음파의 진동수 f_s를 계산하여 기록하시오.	0.5

다음 파트의 오차 분석에서는 계산을 간단히 하기 위해 n_w, n_g, n_{air}, f_L의 불확도를 무시해도 된다.

B5.	오차 분석을 하여 f_s의 불확도를 어림하시오.	1.0

실험 C

용액의 소금 농도 구하기

이 실험에서는 “농도 모름(Unknown Concentration)”이라고 표시된 병 (L)이 지급되는데, 이 병에는 광천수에 알 수 없는 양의 소금을 녹인 소금 용액이 들어 있다. 실험 C의 목표는 이 소금 용액의 농도를 구하는 것이다.

이 방법에서는 유리 용기 (A) 속 광천수 1.5 L에 알려진 양의 소금을 점점 늘려 가며 녹이고, 실험 A 또는 B에서 구한 초음파의 진동수를 써서 소금 농도를 아는 물속 소리의 속력을 측정한다. 알려진 양의 소금을 물에 녹인 다음, 실험 A와 실험 B에서 설명한 두 방법 가운데 **하나만** 써서 소금 용액 속 소리의 속력을 측정하시오.

소리의 속력을 소금 용액의 농도 C_s(C_s는 물에 녹인 소금의 질량을 물과 소금을 합한 질량으로 나눈 값)에 대해 그래프로 그려야 한다. 이것이 보정 곡선이 된다.

그다음 “농도 모름”이라고 표시된, 광천수에 알 수 없는 양의 소금을 녹인 용액 (L) 속 소리의 속력을 측정하고, 보정 곡선으로 이 미지 용액의 소금 농도를 구하시오.

소금을 넣어도 소금 용액의 굴절률은 거의 변하지 않으며 그 값을 여전히 1.333±0.007로 둘 수 있다고 **가정**하시오.

실험 C에서는 서로 다른 소금 농도마다 측정을 **한 번만** 하시오.

압전 변환기와 레이저 포인터를 쓰지 않을 때에는 끄는 것을 잊지 마십시오.

화면 (F)에 답안지 C1을 붙여 관찰한 무늬를 기록해야 한다.

C1.	사용한 알려진 소금 농도마다 관찰한 무늬를 답안지 C1에 표시하시오. 기록한 무늬마다 해당 소금 농도를 적으시오. 계산에 필요한 관련 실험 매개변수를 답안지 C2에 잊지 말고 적으시오. 표시할 용지가 더 필요하면 풀이 용지를 쓰시오.	1.0

C2.	관련된 모든 매개변수를 측정하여 답안지에 기록하고, 알려진 각 소금 농도에서 소리의 속력 v_s를 계산하시오.	2.0

C3.	용액 속 소리의 속력 v_s를 용액의 소금 농도 C_s에 대해 그리시오. 각 자료점의 백분율 오차가 실험 A 또는 실험 B에서 얻은 것과 같다고 가정하여 오차 막대를 넣으시오.	1.0

이제 "농도 모름"이라고 표시된 용액 (L)의 모르는 소금 농도 C_s를 구하는 실험을 하시오.

C4.	미지 농도 용액에 대해 관찰한 무늬를 답안지 C4에 표시하시오. 용액의 온도를 적으시오. 관련 실험 매개변수를 답안지 C4에 적고, 이 용액 속 소리의 속력 v_s를 계산하시오.	0.8

C5.	미지 용액의 소금 농도를 구하시오. 답을 불확도와 함께 답안지 C5에 적으시오.	0.2

실험 D

콘 시럽 용액 속 소리의 속력 측정하기

이 실험에서는 콘 시럽 용액 (M)이 지급되며, 이를 새 유리 용기 (A) 하나에 부어야 한다.

콘 시럽 용액 속 소리의 속력은 **실험 A에서 설명한 회절법으로** 측정한다. 그러나 소리의 속력을 계산하려면 먼저 콘 시럽의 굴절률을 구해야 한다.

주어진 물품을 써서 콘 시럽의 굴절률을 구하는 실험을 설계하고 수행하시오.

D1.	설계한 실험의 스케치를 이름표를 붙여 그리시오. 이 실험을 수행하여 필요한 관련 매개변수를 기록하고 콘 시럽의 굴절률을 계산하시오.	1.5

이제 실험 A의 회절법 장치를 꾸며 콘 시럽 속 소리의 속력을 구하시오.

D2.	답안지 D2에 무늬를 표시하시오. 콘 시럽 용액 속 소리의 속력 v_s를 계산하는 데 필요한 관련 매개변수를 모두 측정하여 적으시오.	1.0

실험 D에서는 오차 분석이 필요하지 않다.

---- 문제지 끝 ----