물 위의 표면장력파에 의한 회절[1]

서론

액체 표면에서 파동이 만들어지고 퍼져 나가는 현상은 중요하고 잘 연구된 현상이다. 이런 파동에서 진동하는 액체에 작용하는 복원력은 일부는 중력에서, 일부는 표면장력에서 나온다. 임계 파장 λ_c보다 훨씬 짧은 파장에서는 중력의 효과를 무시할 수 있고 표면장력의 효과만 고려하면 된다 ($\lambda_c = 2\pi\sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}}$, 여기서 σ는 표면장력, ρ는 액체의 밀도, g는 중력가속도이다).

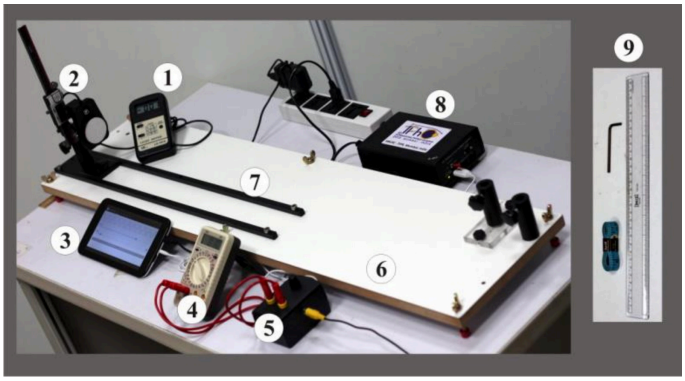
이 부분에서는 파장이 λ_c보다 짧은, 액체 표면의 표면장력파를 공부한다. 표면장력은 액체 표면이 팽팽하게 당겨진 막처럼 행동하게 하는 액체의 성질이다. 액체 표면이 흐트러지면 그 흐트러짐은 막 위에서처럼 파동으로 퍼져 나간다. 전기로 구동되는 진동자를 써서 물 표면에 파동을 만든다. 레이저 빔이 이 표면파에 비스듬한 각으로 입사하면 표면파는 반사형 회절격자처럼 작용하여 뚜렷한 회절 무늬를 만든다.

표면장력파는 퍼져 나가면서 감쇠한다(진폭이 차츰 줄어든다). 이 감쇠는 액체의 점성, 즉 이웃한 액체 층이 서로의 상대 운동을 방해하는 성질 때문이다.

목표

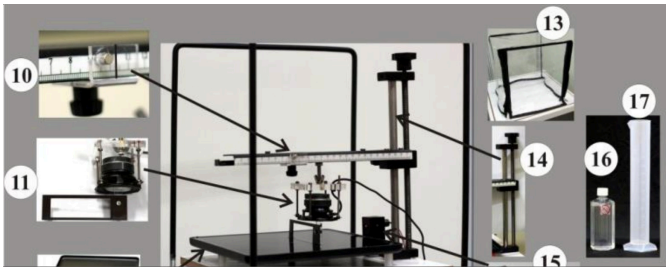
물 위의 표면장력파에 의한 회절을 이용하여 주어진 물 시료의 표면장력과 점성을 결정한다.

장치 목록



[1]	조도계(광센서 조립체에 연결됨)
[2]	스크린 받침 위 버니어 캘리퍼에 달린 광센서 조립체
[3]	태블릿 컴퓨터(사인파 발생기로 씀)
[4]	디지털 멀티미터
[5]	진동자 제어 상자
[6]	나무 받침대
[7]	광센서 조립체를 움직이는 레일
[8]	직류 정전압 전원 장치
[9]	육각 렌치, 줄자, 플라스틱 자

그림 1: 나무 받침대 장치



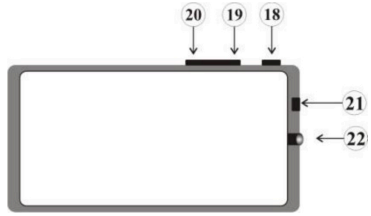
[10]	진동자 위치 표시가 달린 눈금자와 이동대
[11]	진동자 조립체
[12]	물 접시
[13]	플라스틱 덮개
[14]	진동자 높이 조절 장치
[15]	레이저 광원 2 (파장 $\lambda_L = 635$ nm, 1 nm $= 10^{-9}$ m)
[16]	실험용 물 시료
[17]	500 ml 눈금 실린더

그림 2: 진동자·레이저 광원 장치

[1] *Shirish Pathare(HBCSE, 뭄바이)와 K G M Nair(CMI, 첸나이)가 이 문제의 주 저자이다. 학술위원회, 학술개발그룹, 국제위원회의 기여에 감사드린다.*

장치 설명

a) 사인파 발생기로 쓰는 태블릿 컴퓨터



[18]: 전원 스위치
[19]: 음량 높이기
[20]: 음량 낮추기
[21]: 충전 단자
[22]: 진동자 제어 상자[5]에서 오는 케이블의 오디오 연결 핀을 꽂는 소켓

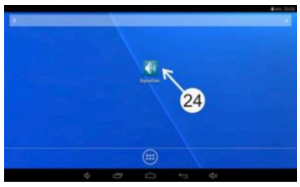
그림 3: 태블릿의 스위치와 소켓

주
- 태블릿은 늘 충전 중인 상태로 둔다.
- 전원 스위치를 *한 번* 살짝 눌러 첫 화면을 띄운다.
- "음량 높이기" 단추[19]로 출력 음량을 늘 최대로 둔다.





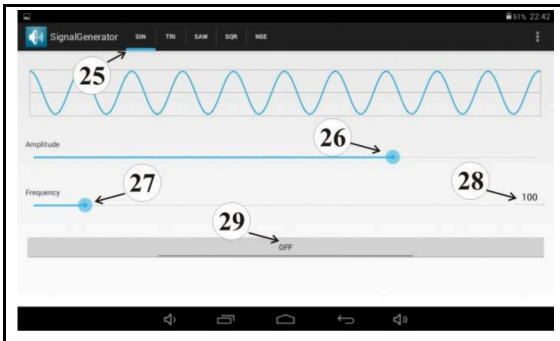
아이콘[23]을 눌러 밀어 잠금을 푼다





아이콘[24]을 눌러 사인파 발생기를 시작한다

그림 4: 태블릿의 첫 화면



[25]: 파형 선택(늘 "SIN"에 둔다)
[26]: 진폭 슬라이더
[27]: 진동수 슬라이더
[28]: 진동수 값 입력란 [Hz]
[29]: 앱 상태 표시/스위치
"OFF" – 사인파 발생기가 꺼져 있음
"ON" – 사인파 발생기가 켜져 있음

그림 5: 사인파 발생기 앱

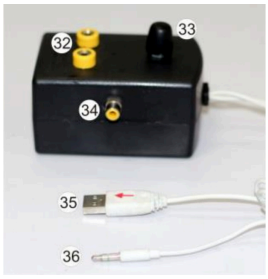
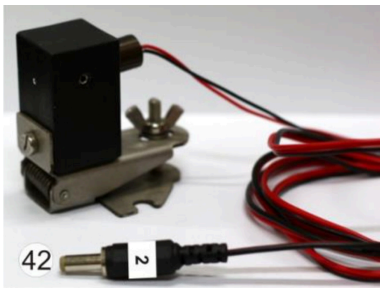


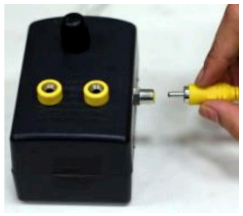
진동수를 바꾸려면
- 진동수 값 입력란[28](그림 5)을 눌러 숫자판을 띄운다
- 백스페이스 단추[30]로 진동수 값을 지운다
- 원하는 진동수를 넣고 "Finished" 단추[31]를 누른다

그림 6: 진동수 값을 넣는 숫자판이 뜬 화면

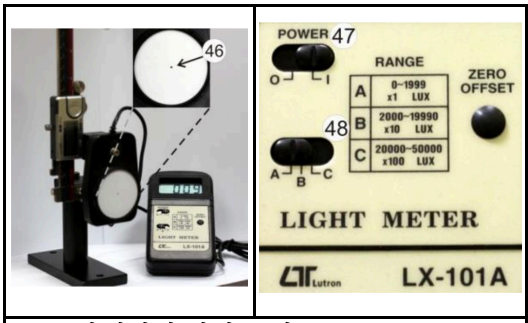
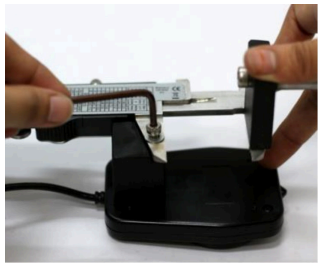
진폭을 바꾸려면
- 태블릿 화면의 진폭 슬라이더[26]나 진동자 제어 상자[5]의 가변 손잡이[33]로 출력 진폭을 바꾼다.

b) 진동자 제어 상자, 디지털 멀티미터, 직류 정전압 전원 장치와 그 연결

<table>
<tr><td>
</td><td colspan="2">
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>[32]: 멀티미터 케이블을 꽂는 소켓</td><td colspan="2">[37]: 진동판</td><td rowspan="2">그림 10: (금속 블록에 얹힌) 레이저 광원 2 [15]와 연결 단자 [42]</td></tr>
<tr><td>[33]: 사인파 진폭을 바꾸는 손잡이</td><td colspan="2">[38]: 진동자 조립체에서 오는 케이블 핀</td></tr>
<tr><td>[34]: 진동자 조립체에서 오는 케이블 핀을 꽂는 소켓</td><td colspan="2">그림 8: 진동자 조립체[11]</td><td>
</td></tr>
<tr><td>[35]: 직류 정전압 전원 장치에 꽂는 USB 핀</td><td rowspan="3">
</td><td>[39]: AC/DC 선택 스위치</td><td>[43]: 세기 스위치("High"에 둔다)</td></tr>
<tr><td>[36]: 태블릿에 꽂는 오디오 핀</td><td>[40]: 범위 선택 손잡이</td><td>[44]: 진동자 제어 상자의 USB 핀을 꽂는 USB 소켓</td></tr>
<tr><td></td><td>[41]: 입력 소켓</td><td>[45]: 레이저 광원 2의 연결 단자를 꽂는 소켓</td></tr>
<tr><td>그림 7: 진동자 제어 상자[5]</td><td colspan="2">그림 9: 디지털 멀티미터[4]</td><td>그림 11: 직류 정전압 전원 장치[8]</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td></td><td></td><td></td><td>
</td></tr>
<tr><td>[36]→[22]</td><td>[38]→[34]</td><td>[41]↔[32]</td><td>[35]→[44], [42]→[45]</td></tr>
<tr><td colspan="4">그림 12: 태블릿, 진동자 제어 상자, 직류 정전압 전원 장치 사이의 연결</td></tr>
</table>

c) 광센서 조립체와 조도계

<table>
<tr><td colspan="2">
</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">[46]: 광센서의 원형 구멍
[47]: 조도계의 전원 스위치
[48]: A, B, C – 조도계의 감도 범위</td><td>버니어 캘리퍼의 한쪽 턱이 광센서 뒤쪽의 홈에 끼워진다</td><td>육각 렌치로 나사를 조인다</td></tr>
<tr><td colspan="2">그림 13: 광센서 조립체와 조도계</td><td colspan="2">그림 14: 광센서 조립체 부착</td></tr>
</table>

처음 조정

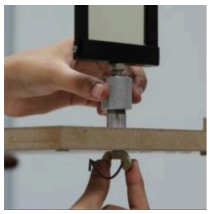


그림 15: 오른쪽 반사경 떼어 내기

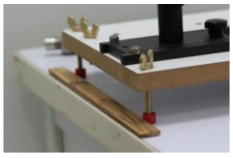
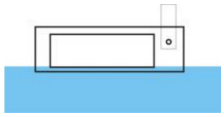


그림 16: 나무 띠에 닿은 바닥 나사



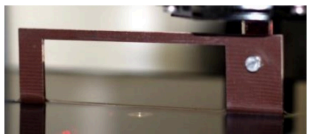




그림 17: 진동판과 높이 조절용 검은 손잡이의 올바른 위치

1. 레이저 1의 연결 단자를 뽑고 레이저 2의 연결 단자를 직류 정전압 전원 장치의 소켓에 꽂는다. 주의: 레이저 2는 이미 특정한 입사각에 맞춰져 있다. 레이저 광원을 건드리지 마시오!

2. 나무 받침대 아래의 볼트를 돌려 E-I에서 썼던 오른쪽 반사경을 떼어 낸다(그림 15).

3. E-I에서 썼던 스크린을 떼어 내고 스크린 받침에 광센서 조립체를 끼운다. 스크린 받침을 레일의 안내 레일 사이에 놓는다.

4. 나무 받침대[6]의 바닥 나사가 작업대에 붙은 나무 띠에 닿도록 놓는다(그림 16).

5. 진동자·레이저 광원 장치의 플라스틱 덮개 옆면 날개를 들어 올린다. 눈금 실린더[17]로 물 시료를 정확히 500 ml 재어 접시[12]에 붓는다.

6. 레이저를 켠다. 광센서 위에서 반사된 레이저 점을 찾는다. 광센서 조립체를 레일을 따라 앞뒤로 움직일 때 레이저 점은 비스듬하지 않고 연직으로 움직여야 한다. 나무 받침대를 옆으로 살짝 조정하고 광센서 조립체를 위아래로 움직이면 레이저 점을 구멍에 정확히 맞출 수 있다. 레이저 점의 중심이 구멍의 중심과 일치하면 조도계가 보여 주는 세기가 최대가 된다.

7. 진동판은 이미 올바른 연직 위치에 맞춰져 있다. 높이 조절 장치[14]의 검은 손잡이를 바꾸지 **마시오** (그림 17).

8. 진동자 조립체는 수평으로 앞뒤로 움직일 수 있다. 진동자 위치 표시가 눈금자[10] 위에서 조립체의 위치를 가리킨다.

9. 자료를 기록하는 동안에는 공기 흐름으로부터 물 표면을 보호하도록 플라스틱 덮개의 날개를 내려 둔다.

실험

파트 C: 레이저 빔과 물 표면 사이의 각 θ 측정

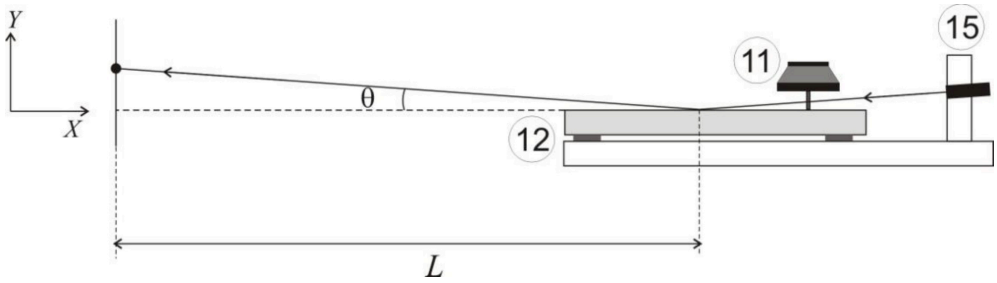


그림 18: 각 θ의 측정

과제	설명	배점
C1	광센서 조립체를 레일을 따라 알맞은 간격으로 움직인다. 조립체의 X 변위와 그에 대응하는 레이저 점의 Y 변위를 적는다. 읽은 값을 표 C1에 기록하라. (조도계에서 알맞은 범위를 고른다.)	**1.0**
C2	알맞은 그래프를 그리고(그래프 C1이라 이름 붙인다) 그 기울기로부터 각 θ를 도 단위로 결정하라.	**0.6**

파트 D: 주어진 물 시료의 표면장력 σ 결정

회절 이론으로부터 다음을 보일 수 있다.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_L}\sin\theta\,\sin\gamma \qquad (1)$$

여기서 $k = 2\pi/\lambda_w$는 표면장력파의 파수이고,
λ_w와 λ_L은 각각 표면장력파와 레이저의 파장이다.
각 γ는 중앙 극대와 1차 극대 사이의 각거리이다(그림 19).

파동의 진동수 f는 파수 k와 다음 관계에 있다.

$$\omega = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}k^q} \qquad (2)$$

여기서 $\omega = 2\pi f$, ρ는 물의 밀도이고 q는 정수이다.

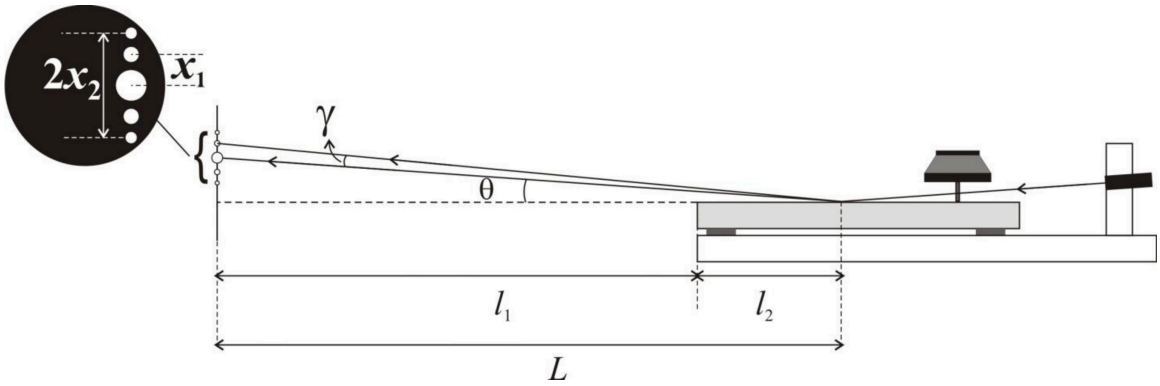


그림 19: 장치의 개략도

1. 광센서 조립체를 (스크린 받침의 조임 볼트로) 그림 1에 보인 위치에 고정한다. 조도계에서 알맞은 범위를 고른다.

과제	설명	배점
D1	광센서 구멍과 물 접시 바깥 가장자리 사이의 길이 l_1을 재라. 레이저가 물 표면에 닿는 곳에 선이 보일 것이다. 이 선의 중심이 레이저의 입사점이다. 가장자리에서 이 점까지의 거리 l_2를 재라. L을 구하라. 답안지에 기록하라.	**0.3**

2. 진동자 위치 표시를 수평 눈금자[10]의 7.0 cm 눈금에 맞춘다.
3. 사인파 진동수를 60 Hz로 맞추고, 회절 무늬의 1차·2차 극대가 뚜렷이 보이도록 진폭을 조정한다(그림 19의 작은 그림).

과제	설명	배점
D2	중앙 극대 위아래의 2차 극대 사이 거리를 재라. 이로부터 x_1을 계산하라. 관측값을 표 D1에 기록하라. 진동수를 알맞은 간격으로 높여 가며 이를 되풀이하라.	**2.8**
D3	기울기가 q의 값을 주는 알맞은 그래프를 위해 적절한 변수를 찾아라. 변수 값을 표 D2에 넣어라. 그래프를 그려 q를 구하라(그래프 D1이라 이름 붙인다). 알맞은 정수 q 값을 넣어 식 (2)를 써라.	**0.9**
D4	식 (2)로부터, 기울기가 σ의 값을 주는 알맞은 그래프를 위해 적절한 변수를 찾아라. 변수 값을 표 D3에 넣어라. 그래프를 그려 σ를 결정하라(그래프 D2라 이름 붙인다). ($\rho = 1000\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$).	**1.2**

파트 E: 감쇠 상수 δ와 액체의 점성도 η 결정

표면장력파는 물의 점성 때문에 감쇠한다. 파동의 진폭 h는 진동자로부터 잰 거리 s에 따라 지수적으로 줄어든다.

$$h = h_0 e^{-\delta s} \qquad (3)$$

여기서 h_0는 진동자 위치에서의 진폭이고 δ는 감쇠 상수이다.

실험적으로 진폭 h_0는 진동자 조립체에 가한 전압(V_{rms})과 다음 관계에 있다.

$$h_0 \propto (V_{\mathrm{rms}})^{0.4} \qquad (4)$$

감쇠 상수는 액체의 점성도와 다음 관계에 있다.

$$\delta = \frac{8\pi\eta f}{3\sigma} \qquad (5)$$

여기서 η는 액체의 점성도이다.

1. 진동자 위치 표시를 8.0 cm에 맞춘다.
2. 진동수를 100 Hz로 맞춘다.
3. 회절 무늬의 1차 극대가 구멍에 떨어지도록 버니어 캘리퍼로 광센서를 조정한다.
4. 조도계의 읽음값이 범위 A에서 100이 되도록 사인파의 진폭(V_{rms})을 조정한다. 이 조도계 읽음값에 대응하는 V_{rms}를 적는다.
5. 진동자를 레이저 입사점에서 0.5 cm씩 멀리 옮기면서 조도계 읽음값이 100이 되도록 V_{rms}를 조정한다. 대응하는 V_{rms}를 적는다.

과제	설명	배점
E1	모든 단계의 자료를 표 E1에 기록하라.	**1.9**
E2	알맞은 그래프를 그리고(그래프 E1이라 이름 붙인다) 그 기울기로부터 감쇠 상수 δ를 결정하라.	**1.0**
E3	주어진 물 시료의 점성도 η를 계산하라.	**0.3**