



Physics Laboratory

Last modified : 2015-08-31

실험 1-6. 파동 - 어디에서 왔다가 어디로 가는가 ? - 파동의 발생과 전달 -

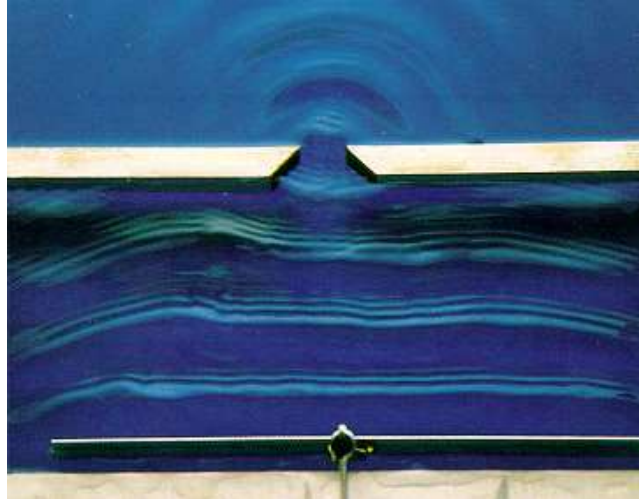
실험 목적

파동(wave)은 진동하는 물리량의 크기가 시간이 지나면서 공간상으로 진행해 나가는 것을 가리킨다. 파동에는 진동하는 물리량에 따라서 탄성파(elastic wave : 변형), 수면파(surface wave, 물분자의 변위), 소리 또는 초음파(sound or ultrasound, 매질의 밀도), 전자기파(electromagnetic wave, 전기장과 자기장) 등이 있다. 또, 진동하는 방향에 따라서는 가로 파동(횡파, transverse wave, 진동하는 방향이 파동의 진행 방향과 수직일 때)과 세로 파동(종파, longitudinal wave, 진동하는 방향이 파동의 진행 방향과 평행일 때)으로 나눈다. 파동을 기술할 때는, 진동의 형태가 반복되는 거리(파장, wavelength)와 시간(주기, period)을 사용하며 또, 동등하게는 각각의 역수에 해당하는 파수(wave number)와 진동수(frequency)를 사용하기도 한다. 파동의 속력은 파장과 진동수의 곱과 같다.

파동은 진행 경로의 도중에 장애물이 있으면 진행 방향을 바꾼다. 대표적인 예로 반사(reflection)와 굴절(refraction)이 있다. 그러나 장애물의 크기나, 장애물에 뚫린 슬릿의 크기가 파동의 파장에 가깝게 작아지면 에돌이(회절, diffraction)라고 불리는 파동 특유의 현상이 나타난다. 또한, 서로 다른 경로를 거친 파동이 합치게 되면 간섭(interference)현상이 나타나는데, 간섭 현상을 보이기 위해서는 겹치는 파동의 위상 관

계가 시간에 따라 변하지 않는 결맞는(coherent) 파동이어야 한다.

이 실험에서는 수면파 장치를 사용하여 결맞는(coherent) 파동을 발생시키고, 그 진행 특성과 간섭 효과를 조사한다.



- Halliday & Resnick 일반물리학 책에서

사진은 수면파 장치로부터 생겨난 선형파 형태의 수면파가 슬릿에서 회절하는 장면이다. 비록 파를 발생시키는 방법이나 매질 등 전달 과정, 그리고 진동수나 파장, 파의 속력은 매우 다르지만 빛, 마이크로웨이브, X-선과 같은 전자파나 소리(음파)에서도 같은 현상을 관찰할 수 있다.

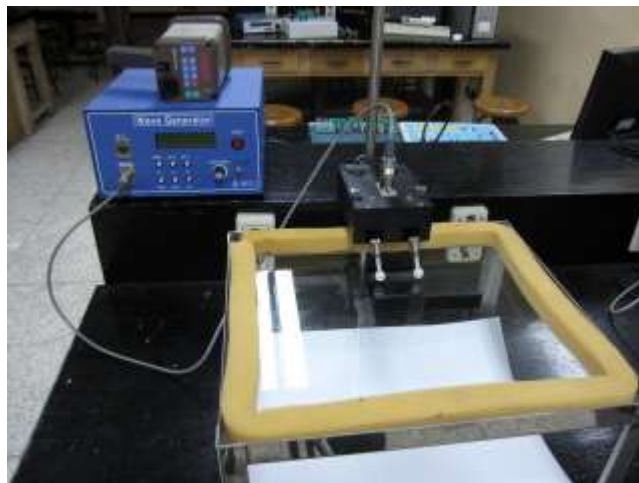
실험 개요

- 수면파의 발생 방법과 진행 과정, 전달 속력 등을 살펴본다.
- 두개의 결맞는(coherent) 점 파원으로부터의 수면파의 간섭을 조사한다.
- 선형 파원으로부터 발생한 수면파를 작은 장애물 또는 슬릿을 통과시킬 때 일어나는 간섭현상을 조사한다.

이외에도 파의 진행 경로상에 여러 형태의 장애물을 놓고, 수면파의 진행에 무엇이 어떻게 달라지는가를 알아보는 것도 좋을 것이다.

실험 방법

실험실에는 이 실험을 위해서 다음과 같은 장치가 준비되어 있다. (괄호 안은 준비된 개수)



I-CA system (1)

수조 (1)

수면파 흡수용 스펀지 (약간)

수면파 발생 장치 (1)

파동발생장치 (1, 연결선 포함) [[동영상](#)]

점 파원용 작은 플라스틱 구슬 (2)

광원 (1) [[동영상](#)]

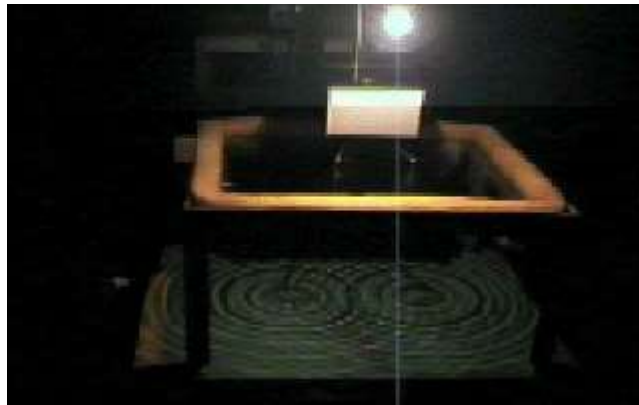
종이 (약간)

장애물 (아크릴 막대 긴 것 2, 짧은 것 1)

장애물 (니들 펜 등 세울 수 있는 펜 1, 샤프 심 1, 각자 준비)

물그릇 (1ℓ 플라스틱 비커)

이외에도 더 필요한 것이 있으면 미리 담당 조교나 실험 준비실(19동 114호)로 문의하거나 각자 준비하도록 한다. 또, 미리 [스트로보스코프\(stroboscope\)](#) 방법에 대해서 알아둔다.



★ 실험 방법.

1) 수조에 물을 2/3 가량 채운 뒤 수면파 발생 장치를 설치한다. 이때 가능한 한 수조를 수평으로 놓고 가장자리에 스펀지로 수면파 흡수대를 놓아 반사파가 생기지 않도록 한다.

그리고 I-CA system 을 설정한다. [주 : 이 과정은 이미 되어 있을 수도 있다.]

2) I-CA system 프로그램을 실행시키고 좌표계 및 스케일을 설정한다.

[이미 이전의 실험에서 많이 사용해봤을 것이므로 자세한 설명은 생략한다.]

※ 참고 : 이때 수면파 발생장치의 두 점의 거리를 실측하여 그 크기대로

스케일을 정한다.

두 파원 사이의 거리는 임의로 조정할 수 있으나 간섭무늬는 두 파원의 거리가 가까울 수록 선명해지므로 너무 멀어지면 간섭무늬 관독에 어려움이 생기므로 적당한 거리될 선택한다.

3) I-CA system 으로 캡처 준비를 한다. 수면파 발생장치의 주파수를 14~18Hz 로 위치한다.[\[동영상\]](#) (관찰이 용이한 주파수 영역대) 진폭과 Time Delay 스위치를 이용하여 간섭무늬가 가장 선명한 지점을 찾는다.[\[동영상\]](#)

4) 캡처를 시작하고 전원을 넣어 수면파를 발생시킨다. 캡처한 파일을 저장한다. 캡처시간은 4~5 초면 충분하다.

※ 참고 : 수조밑에 흰종이를 깔면 파면이 더 선명하게 보인다.

★ 시간이 경과하면 벽면에서 반사한 수면파가 영향을 미칠 수 있으므로 초기 시작시점부터 벽면에 진행하기 전까지의 수면파를 이용한다.

5) 간섭무늬가 가장 선명한 프레임을 선정하여 파원 발생장치에서 나오는 파에서 간섭되는 부분을 찾아 각각 거리를 측정하여 L1, L2 를 측정해놓고 두 거리의 차들이 정수배 관계인지 확인하다. 이는 경로차를 달리하면서 6 포인트 이상 확인한다.

6) 측정값을 대입하여 파장 λ 를 구한다.

7) 거리구하기 기능을 이용하여 수면파의 속력을 측정한다.

※ 수면파의 속력은 수면파가 깨끗이 관측되는 한 프레임을 선정하여 그리드보기를 통해 수면파의 임의의 한 점을 선정하여 확인해두고 5~6 프레임 정도를 진행하여 그 수면파의 한 점이 처음 선정한 점으로 부터 이동한 거리와 시간을 구하여 결정할 수 있다.

8) 진동수를 바꾸어 실험하여 본다.

★★ 준비된 광원을 수직으로 비추어서 촬영이 잘 되게 할 수 있는 방법이 있으며,

혹은 준비된 스트로보스코프(stroboscope)를 이용하면 움직이는 그림자가

고정되어 보이게 하여 파동무늬를 관측할 수있다.

[Tip : 파원 발생장치의 주파수와 스트로보스코프의 광원 주파수를 맞추어야 한다. 정확히 1:1 매칭이 아니다.]



9) 아크릴 막대나 반원형 통(통 안에 물을 채워 떠다니지 못하도록한다.)을 장애물로 사용하여 수면파에 어떤 영향을 미치는가 관찰한다.

10) 장애물로부터 반사 또는 에돌이(회절 : Diffraction)된 수면파의 간섭 현상을 측정한다.

① 1)에서와 같이 선형파 발생용 막대를 3 ~ 5 mm 정도 물에 잠기게 조정한다. 막대가 수조의 한 가운데에 가장자리와 평행하게 위치시킨다.

② 수면파 발생기의 전원을 켜고 진동자의 주기 및 진동자의 강도를 조절하여 수면파의 그림자가 잘 비치도록 한다.

③ 각자 준비한 니들펜 등을 적당한 위치에 세워 장애물로 사용하고 주위의 파형이 변화하는 모양을 관찰한다. 이때 장애물의 수, 크기, 간격 및 위치 등을 바꿔 본다.

④ 간섭 무늬의 밝은 점들을 종이 위에 표시한다. [주의 : 광원이 평행 광이 아니면 측정한 그림자의 위치와 실제 위치가 다를 수 있다.]

⑤ 이로부터 무엇을 말할 수 있는가?

이외에도 샤프 연필심 등을 사용하여 장애물의 크기가 파장보다 작을 때 수면파의 진행에 어떤 영향을 미치는가 관찰하고, 수면에 가한 작은 충격이 수면을 통해 전달되는 모양을 살핀다.

수면파란 결국 물분자들의 상호작용에 의해서 전달되는데 어떤 상호작용이 있을 수 있는가 생각해 본다.

배경 이론

+ x 방향으로 진행하는 파동의 일반적인 표현식은 시간 t , 위치 x 에서의 진동의 크기가

$$y(x,t) = y_m \sin(kx - \omega t) \quad (1)$$

로 쓸 수 있으며, 이때 y_m 은 진동의 크기 즉, 진폭이고 ω 는 각 진동수, 그리고 k 는 파수이다. 또, 각 진동수와 파수는 진동수 f 와 파장 λ 에 각각

$$\omega = 2\pi f \quad (2)$$

$$k = 2\pi/\lambda \quad (3)$$

으로 연관된다. 파동의 속도 v 는 식(1)에서 사인(sine)함수의 위상인 $(kx - \omega t)$ 가 일정한 위치 x 가 시간 t 에 따라서 변하는율이므로

$$v = x/t = \omega/k = f\lambda \quad (4)$$

이다. 엄밀하게는 이 속력을 파동의 위상 속도(phase velocity)라고 부른다. 한편 파동에 의해 정보를 전달하기 위해서는 일정한 진폭과 진동수의 단순 파동으로는 불가능하고, 여러 개의 진동수의 단순 파동들이 중첩된 펄스(pulse)와 같은 파동의 묶음(wave packet)이 필요하다. 이 파동의 묶음이 전달되는 속도를 무리 속도(군속도, group velocity)라고 하며, 군속력은

$$v_g = d\omega/dk = v + kdv/dk = v - \lambda dv/d\lambda \quad (5)$$

이다.

식(4)에서 각진동수 ω 와 파수 k 의 비 즉, 위상 속력이 진동수나 파장에 관계없이 일정한 매질을 비분산매질(nondispersive medium)이라고 부르며 비분산매질에서는 $v_g = v$ 이다. 그러나 매질 중에는 위상 속력이 파장에 의존하는 경우가 있는데 (예: 프리즘을 통과하는 빛), 이를 분산매질(dispersive medium)이라고 부르며 이 때는 $v_g \neq v$ 이 된다. 분산 매질에서는 여러 가지 파장 성분이 섞여 있는 무리진 파의 모양이 파의 진행에

따라서 변화된다.

이제 두 결맞는(coherent) 파(진동수는 같으나 위상이 다름)

$$y_1(x,t) = y_m \sin(kx - \omega t) \quad (6)$$

와

$$y_2(x,t) = y_m \sin(kx - \omega t + \varphi) \quad (7)$$

의 합성(superposition)

$$\begin{aligned} y(x,t) &= y_1(x,t) + y_2(x,t) \\ &= y_m \sin(kx - \omega t) + y_m \sin(kx - \omega t + \varphi) \\ &= 2y_m \cos(\varphi/2) \sin(kx - \omega t + \varphi/2) \\ &= Y_m \sin(kx - \omega t + \varphi/2) \end{aligned} \quad (8)$$

을 생각한다. 여기서는 편의상 두 파의 진동수, 파장과 진폭이 같고 진행 방향도 같은 경우에 국한하여 생각하며, 두 파의 위상 차(phase difference)는 φ 이다. 식(8)의 합성 파는 원래의 파와 같은 진동수와 파장을 가지며, 그 진폭(amplitude)는 위상 차 φ 에

$$Y_m = 2y_m \cos(\varphi/2) \quad (9)$$

로 의존한다. 즉, 간섭 현상이 나타난다.

만약 반사된 파와의 간섭을 생각하면 식(8)은

$$\begin{aligned} y(x,t) &= y_1(x,t) + y_2(x,t) \\ &= y_m \sin(kx - \omega t) + y_m \sin(kx + \omega t + \varphi) \\ &= 2y_m \cos(\omega t + \varphi/2) \sin(kx + \varphi/2) \end{aligned} \quad (8')$$

가 되어 진행하지 않는 서 있는 파동(정상파, standing wave)이 된다. 이 경우 $kx + \varphi/2 = n\pi$ ($n=0,1,2,\dots$) 인 곳은 항상 어두운($y=0$) 곳이 되며, $kx + \varphi/2 = (n+1/2)\pi$ ($n=0,1,2,\dots$) 인 곳은 진폭이 최대인 곳이다. 흔히 먼저의 경우를 마디 (node), 나중의 경우를 배(antinode)라고 부른다. 따라서 마디와 마디 사이의 거리 또는 배와 배 사이의 거리는 $\Delta x = \pi/k$ 가 되어 원래 파동의 파장 λ 의 1/2 이다. 이 정상파 섬광의

진동수가 파동의 진동수와 차이가 나더라도 진폭의 최대와 최소가 일어나는 위치가 변하지 않는다.

이제 거리 d 만큼 떨어져 있는 두 결맞는(coherent) 파원으로부터의 파의 간섭을 생각하자. 두 파원을 점 파원으로 간주하면 발생한 두 수면파는 원형파가 된다. 그림에서와 같이 두 파원의 중심으로부터 거리 r , 각도가 θ 인 곳에서의 파의 간섭은 두 파원으로부터의 경로 차이(path difference)에 의해서 결정된다. 즉, 경로 차이에 따른 위상 차 φ 가 $2n\pi$ (n 은 정수) 일 때 식(9)로부터 합성 파의 크기가 최대가 된다. 두 파의 경로 차이는 각도 θ 가 크지 않은 경우

$$r_1 - r_2 = d \sin \theta \quad (10)$$

이므로 합성 파에 밝은 무늬(배)가 생기는 조건은

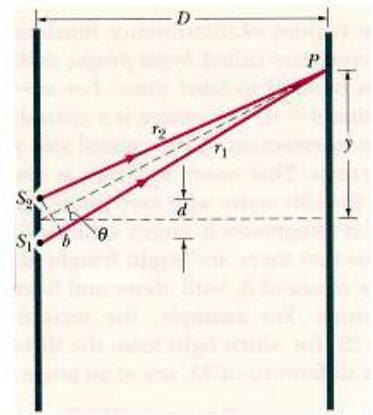
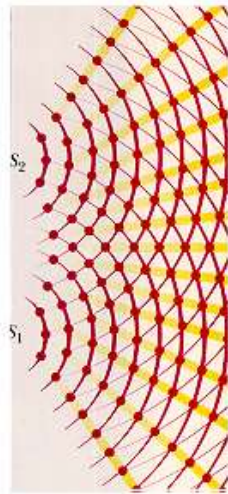
$$d \sin \theta = n \lambda \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (11)$$

이다. 한편, 합성파의 크기가 최소가 되는 곳(마디, 빛을 쪼이면 수면파의 볼록렌즈 효과를 기대할 수 없으므로 상대적으로 어둡게 보이는 곳)은 경로 차이에 따른 위상차 φ 가 $(2n+1)\pi$ (n 은 정수) 일 때이고,

$$d \sin \theta = (n + \frac{1}{2}) \lambda \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (12)$$

이다.

평면파를 거리 d 만큼 떨어진 두 슬릿(슬릿 크기 \sim 파장)을 통해서 통과시키는 경우도 위와 같이 해석할 수 있다.



– Halliday & Resnick 일반물리학책에서

생각해 볼 만한 것들

➤ 수면파의 속력(위상속도)

수면파 실험 장치에서 발생하는 수면파의 속력 v 는 물의 깊이를 h 라고 할 때, 진폭이 h 에 비해서 무시할 수 있을 정도로 작으면

$$v = (gh)^{1/2} \quad (A1)$$

라고 근사적으로 쓸 수 있다. 여기서 g 는 중력 가속도이다. 이것은 물론 물리법칙으로부터 유도해 낼 수가 있지만, 차원 분석 (dimensional analysis)에 의해서도 쉽게 알아볼 수 있다. 즉, 이 경우에 관련된 물리량은 물의 깊이 h , 밀도 ρ , 중력 가속도 g 가 있다. 수면파의 속력도 이들 물리량과 관련되어 있을 것이며, 이들을 조합하여 속력의 차원을 갖도록 하는 방법은 \sqrt{gh} 뿐이다. 이러한 차원 분석 방법은 물리량들 사이의 관계를 찾는 데 간간이 애용된다. 물론 이 방법으로는 비례 관계만을 알 수 있을 뿐, 비례상수는 알아내지 못하는 단점이 있다. 위의 식(A1)에서 파의 속력이 파장에 무관하므로 이 파동은 비 분산 파동이다. 수면파의 속력은 물의 깊이가 깊거나 또는 수면의 높이가

높으면 더 빠르다. 해변에서 높은 물결이 더 빨리 쫓아와서(?) 파도가 부서지는 것을 보는데 그 이유가 바로 여기에서 연유된다. 또, 진동수가 f 인 수면파의 파장은

$$\lambda = v/f = (gh)^{1/2}/f \quad (A2)$$

이 된다.

이 파의 속력에 비해서 실제 물의 진행 속력은 매우 느리다. 이 사실은 레오나르도 다 빈치(Leonardo da Vinci)도 언급한 바가 있다. 그는 수면파를 밀밭에 바람이 만드는 파동과 비유하였다. 이때도 밀밭의 파동은 진행하지만 밀은 제자리에 그대로 남아 있다. 수면파의 경우에는 파의 속력의 약 1% 정도의 느린 진행(drift)이 파동의 진행 방향으로 생긴다. 수면파가 있을 때 물분자들은 수직면 상에서 원운동을 한다. 파의 마루(crest)에서는 파동의 방향으로 전진하고, 골(trough)에서는 반대 방향으로, 그리고 마루의 앞에서는 올라가고 뒤에서는 내려가는 운동을 한다. 이러한 물분자의 운동은 수면으로부터 깊이 들어감에 따라 급격히 줄어들어 깊이가 $\lambda/4$ 의 곳에서는 원의 크기가 1/10 정도로 작아진다. 따라서 바다에 폭풍이 일 때도 바다 속에 있는 잠수함은 안전하다.

참고사항

- [스트로보스코프\(stroboscope\)](#)
- [측정 데이터 처리 방법](#)
- [그래프에 의한 분석 방법](#)
- [크리스찬 호이겐스 - 흔들리 시계를 발명한 파동학의 선구자](#)
- [토마스 영 - 빛\(파동\)의 간섭](#)
- [조셉 푸리에 - 거부당한 푸리에 급수](#)