



## 저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

교육학 석사학위논문

Debye-Sears 효과의 특성과  
과학교수학습에의 적용



문수림

교육학 석사 학위 논문

Debye-Sears 효과의 특성과  
과학교수학습에의 적용

지도교수 하 강 렬

이 논문을 교육학 석사 학위논문으로 제출함.

2013년 2월

부경대학교 교육대학원

물리교육전공

문수림

문수림의 교육학석사 학위논문을  
인준함.

2013년 2월 25일



주 심 공학박사 김 무 준 (인)

위 원 이학박사 김 선 일 (인)

위 원 공학박사 하 강 렬 (인)

## <목 차>

Abstract .....	1
I. 서론 .....	3
II. Debye-Sears 효과의 특성 .....	6
II-1. 초음파에 의한 광선의 굴절 .....	6
II-2. Raman-Nath 회절 .....	8
III. Debye-Sears 효과의 응용 .....	15
III-1. 음속 측정 .....	15
III-2. 실험 방법 .....	17
III-3. 실험 결과 .....	23
IV. 과학교수학습에의 적용 .....	36
IV-1. 공통교육과정의 과학 .....	36
IV-2. 선택교육과정의 물리 .....	38
V. 결론 .....	42
참고문헌 .....	43

## 표 목차

표 III-1. Debye-Sears 효과 광학계 부품의 규격 및 특성 .....	22
표 III-2. 온도 변화에 따른 음속 측정 실험 조건 .....	23
표 III-3(a). 10 °C 물에서의 실험 결과 .....	24
(b). 20 °C 물에서의 실험 결과 .....	24
(c). 30 °C 물에서의 실험 결과 .....	25
(d). 40 °C 물에서의 실험 결과 .....	25
(e). 50 °C 물에서의 실험 결과 .....	26
표 III-4. 매질의 종류에 따른 음속 측정 실험 조건 .....	32
표 III-5(a). 에탄올에서의 실험 결과 .....	33
(b). 메탄올에서의 실험 결과 .....	33
(c). 증류수에서의 실험 결과 .....	34
표 IV-1. 공통교육과정에서의 학습계열 및 단위 학습 내용 .....	37
표 IV-2. ‘과학’에서의 학습계열 및 단위 학습 내용 .....	38
표 IV-3. ‘물리 I’에서의 학습계열 및 단위 학습 내용 .....	40
표 IV-4. ‘물리 II’에서의 파동 물리학 관련 내용의 영역과 기준 .....	41

## 그림 목차

그림 II- 1. 진행 초음파에 의한 광선의 회절 .....	7
그림 II- 2. 초음파에 의한 광 빔의 회절과 회절 영역 .....	10
그림 II- 3. 초음파에 의한 광 빔의 파면 변화와 고차 회절과 .....	11
그림 II- 4. 회절격자에서의 광 빔의 전파 .....	11
그림 II- 5. 회절격자에 의한 광선의 경로차 .....	12
그림 II- 6. Raman-Nath 회절의 각 차수에 따른 파의 세기 .....	14
그림 III- 1. Debye-Sears 효과를 이용한 음속 측정 방법 .....	16
그림 III- 2. 트랜스듀서의 구조 .....	18
그림 III- 3. 트랜스듀서의 파워 스펙트럼 .....	18
그림 III- 4. 트랜스듀서의 실물 사진 .....	19
그림 III- 5. Debye-Sears 효과 광학계의 구성도 .....	21
그림 III- 6. Debye-Sears 효과 광학계의 실물사진 .....	21
그림 III- 7. 온도에 따른 음속 변화 .....	27
그림 III- 8(a). 온도가 10 °C일 때, 주파수에 따른 회절 무늬 간격 ·	28
(b). 온도가 20 °C일 때, 주파수에 따른 회절 무늬 간격 ·	28
(c). 온도가 30 °C일 때, 주파수에 따른 회절 무늬 간격 ·	29
(d). 온도가 40 °C일 때, 주파수에 따른 회절 무늬 간격 ·	29
(e). 온도가 50 °C일 때, 주파수에 따른 회절 무늬 간격 ·	30
그림 III- 9. CCD 카메라로 촬영한 회절 무늬 .....	29
그림 III- 10. 매질의 종류에 따른 회절 무늬 사이의 간격 .....	35

CHARACTERISTICS OF DEBYE-SEARS EFFECT AND APPLICATION TO THE  
EDUCATION AND STUDY OF SCIENCE

Soo-Rim Moon

*Graduate School of Education  
Pukyong National University*

**Abstract**

In 1932 Debye and Sears showed for the first time that light crossing a liquid medium that is disturbed by a high frequency ultrasound undergoes a diffraction. The density maxima and minima of the medium in a standing or continuously progressing wave act like lattice elements of an optical diffraction lattice. The lattice constant corresponds to the wavelength of the ultrasound and therefore depends on their frequency and sound velocity of the medium.

The diffraction phenomenon is called as Debye and Sears effect and it includes the Raman-Nath diffraction and the Bragg diffraction. The Raman-Nath diffraction is occurred when the light beam with the wider width than the wave length of the light incidents the medium. From the diffraction images of the light beam by the Raman-Nath diffraction, the wavelength of the sound wave can be determined, and that the sound velocity in the medium can be calculated.

In this study sound speed was measured in change of the temperature of the water between 10~50 °C, and in several liquids such as ethanol, methanol, and distilled water were measured at 15 °C temperature by using the Raman-Nath diffraction patterns of the Debye-Sears effect. The obtained sound speeds were



compared with the values from literatures. It is noted that the values are in good agreement.

In addition, the contents related to acoustics or wave physics in the curriculum for middle school students were searched in this study. As the results, it is noted that the experimental method and the obtained results in this study are valuable for the Wave Physics Instruction and Learning for middle or high school students.



# I. 서론

1922년 Brillouin은 파장이 짧은 음파가 액체 내를 전파할 때, 거기에 빛을 조사하면 위상격자와 유사하게 빛이 회절하는 현상이 생긴다는 것을 예언했다[1]. 이 예언은 1932년에 미국의 Debye와 Sears, 그리고 프랑스의 Lucas와 Biquard에 의해 실험적으로 입증되었는데, 그에 따라 음파, 특히 초음파에 의한 빛의 회절현상을 일반적으로 Debye-Sears 효과라고 부른다[2, 3]. 음향광학효과(acousto-optic effect)의 한 특수한 경우인 Debye-Sears 효과는 오늘날 음향학, 광학, 고체물리학 등 물리학 관련 여러 분야에서 널리 응용되고 있으며, 슈리렌 법이나 파면 영상법 등 음장이나 파면을 가시화 하는데 매우 유용하게 사용되고 있다[4-6]. 여기서, 음향광학효과란 매질의 광탄성 성질에 의해 음파, 특히 초음파와 광 빔(주로, 레이저 빔)이 상호작용을 하는 현상을 총칭한다.

초음파는 매질을 변형시키면서 전파하는데, 파의 진행방향에 대해 매질 내의 압력 또는 밀도는 연속적이면서 주기적으로 변하게 되고, 그에 따라서 빛의 전파속도가 달라지므로 굴절률이 변한다. 빛의 전파속도, 즉 광속은 초음파의 전파속도인 음속에 비해 대단히 크므로, 초음파의 전파에 의해 굴절률이 변화한 매질은 광 빔에 대해 정상적인 회절격자처럼 작용하게 된다. 그러므로 초음파의 전파방향에 대해 거의 수직으로 광 빔이 입사하는 경우, 광 빔의 크기가 초음파의 파장보다 충분히 작으면, 그 광 빔은 하나의 광선처럼 작용하여 굴절률이 높은 쪽으로 완만하게 꺾이게 된다. 만약, 광 빔의 크기가 초음파의 파장보다 충분히 클 경우, 초음파의 주파수가 수 MHz 일 때는 Raman-Nath 회절[7] 현상이 생기며, 수십 MHz 이상일 때는 음향 광학적인 Bragg 회절[8] 현상이 생기는 것으로 알려져 있다. 이

러한 회절에서 회절광의 세기와 회절각은 각각 초음파의 파장과 세기, 초음파 빔의 폭, 입사광의 파장에 따라 변한다.

한편, 매질의 음속을 측정하는데 가장 간단하면서 보편적으로 사용되는 방법은 송파기와 수파기를 평행으로 마주보게 놓고, 이것을 초음파 펄스가 통과하는데 소요되는 시간(TOF: Time of Flight)을 측정하는 방법이다. 이 방법은 주로 액체와 고체의 음속을 측정하는데 사용되는데, 정확한 측정을 위해서는 거리를 변화시켜가면서 그 시간차를 여러 번 측정하거나 일정 거리에서 펄스를 여러 번 왕복시키는 펄스에코중첩(PEO: Pulse Echo Overlap)법[9]을 사용할 필요가 있다. 또한 다른 방법으로는 송파기와 수파기를 평행으로 놓은 다음 그 사이에 평행 평면판 시료를 넣고, 시료에 대한 초음파의 입사각을 자유로이 바꾸어 시료를 회전시키는 방법이 있다.[10] 이 방법은 수파기의 감도가 나쁘면 오차가 커진다는 단점이 있고, 너무 두꺼운 시료를 사용하면 투과파가 수파기에 충분히 들어가지 않는 일이 생기므로 주의하여야 한다. 또 다른 방법으로서 싱 어라운드(sing around)라 불리는 측정법[11]이 있는데, 송파기에서 전기적 고주파 펄스가 초음파 펄스로 변환되면 그 펄스는 초음파로서 시료(매질) 속을 돌아 순환하고, 수파기에서 다시 전기적 고주파 펄스로 변환된다. 고주파 펄스는 검파기에서 검파, 증폭되며 그 펄스에 의해서 다시 고주파 펄스가 트리거되어 송파기를 구동시킨다. 이때 생기는 지연 시간이 일정하다고 가정할 때 시료(매질)의 길이만큼 두 점에서 펄스의 반복 주파수를 측정하여 음속을 측정하는 방법이다. 이와 같은 방법은 장치가 간단하고 연속 측정이 가능하며 음속의 절대값을 간단하게 측정할 수 있지만, 실제로는 전기회로 속에서의 시간 지연이 수신 펄스의 크기에 따라 다르기 때문에 정밀도가 좋지 않아 공업적인 이용에 적합하다.

빛의 진폭변조나 편향, 광 필터 등의 광음향 디바이스 및 음장가시화에

에 응용되어지고 있는 Debye-Sears 효과를 이용하면 투명한 액체나 고체 등의 음속 측정이 가능하다. 본 연구에서는 Debye-Sears 효과의 특성에 대해 파악한 후, 현재까지 그다지 이루어지지 않고 있는 Raman-Nath 회절과 Bragg 회절의 중간 영역에 해당하는 주파수의 초음파를 이용하여 몇몇 매질에서의 음속을 측정하였다. 나아가, 이 연구방법 및 결과를 음파 및 빛과 관련한 중등과학, 특히 물리 교수-학습에 적용하기 위한 방법을 강구하였다.



## II. Debye-Sears 효과의 특성

### II-1. 초음파에 의한 광선(optical ray)의 굴절

초음파는 매질 속에서 주기적인 압력변화를 일으키며 전파하는 소밀파이다. 어느 특정 시각에 그림 II-1에서 a로 나타낸 음압의 분포는 파가 진행함에 따라 b와 같이 변한다. 빛의 굴절률  $n$ 은 진공에서의 광속  $c_0$ 와 매질에서의 광속  $c$ 에 의해  $n \equiv c_0/c$  로 정의되며, 음압이 높은 곳은 밀도가 커 광속이 작아지므로 굴절률이 크다. 따라서 광학적으로 볼 때 매질 내에서 굴절률이 연속적으로 변하며 진행되는 것이 되기 때문에 빛이 매질 내에 입사하게 되면 그 굴절률 변화의 영향을 받게 된다. 만약 초음파의 파장보다 충분히 가느다란 광 빔, 즉 하나의 광선(optical ray)이 그림 II-1과 같이 음파의 전파방향에 대해 수직으로 입사하여 초음파 빔을 통과하는 경우 광선은 굴절률이 높은 쪽으로 꺾이므로 a의 상태에서는 a', b의 상태에서는 b' 방향으로 휘게 된다.

회절한 빛이 직선상으로 진행한다고 가정하고, 그림 II-1에 나타낸  $\theta$ 의 최대값을 구하면 정현파 음파에서는

$$\sin\theta = \frac{\pi L}{\lambda} \left( \frac{dn}{dp} \right) P_0 \quad (\text{II-1})$$

가 된다[12]. 여기서,  $L$  은 초음파의 폭,  $\lambda$ 는 초음파 파장,  $n$ 은 매질의 굴절률,  $p$ 는 음압,  $P_0$ 는 음압진폭이다. 매질이 20°C의 물인 경우

$$\frac{dn}{dp} = 1.47 \times 10^{-10} [Pa^{-1}] \quad (\text{II-2})$$

정도인 것으로 알려져 있다. 식 (II-1)은

$$\sqrt{\frac{\delta n}{n}} \frac{L}{\lambda} \leq \frac{1}{2\pi} \quad (\text{II-3})$$

일 때 성립한다.

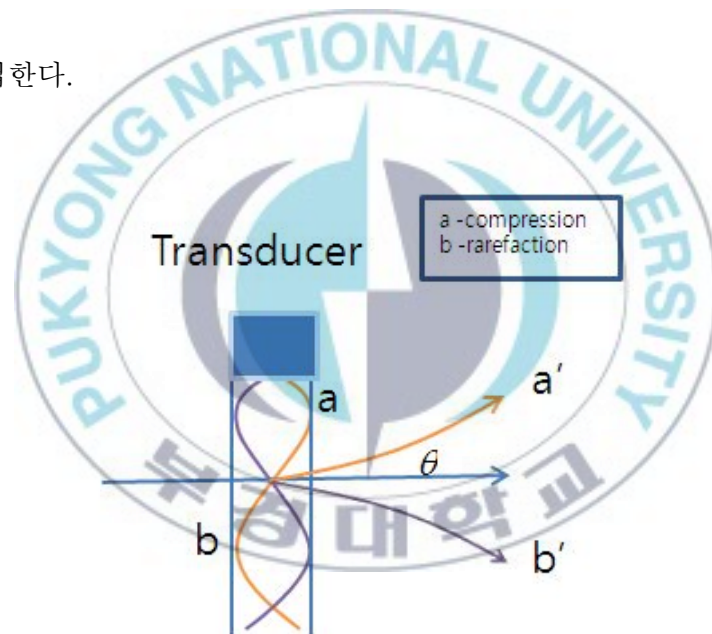


그림 II-1. 진행 초음파에 의한 광선의 굴절

## II-2. Raman-Nath 회절

할로겐 램프나 레이저 등과 같이 폭이 초음파의 파장보다 충분히 큰 광빔이 초음파의 전파방향에 대해 수직으로 입사할 때는 그림 II-2에 나타낸 바와 같이 회절영역(diffraction region)이 생기게 된다. 이 경우 초음파빔을 통과한 광빔의 파면은 초음파 영역에서 매질입자가 밀(密)한 부분의 광속이 소(疎)한 부분보다 늦어 파면이 뒤처지기 때문에 그림 II-3과 같이 정현적인 모양을 갖게 된다. 그러한 곡면의 파면을 갖는 광파는 여러 방향으로 전파하게 되는데, 그림에 나타낸 것처럼 특정방향으로 전파하는 파는 회절격자의 간격에 해당하는 음파의 파장과 입사 및 굴절각에 의해 초음파빔으로부터 떨어진 곳에 설치된 스크린 상에 보강간섭의 회절 무늬를 나타내게 된다.

음파의 속도는 광속에 비해 대단히 작으므로 근사적으로 매질의 굴절률 분포가 정상적(static)인 회절격자로 볼 수 있다. 그림 II-4에 나타낸 바와 같이 초음파 빔의 폭이  $L$ 이고 간격이  $\Lambda$ 인 회절격자에 광빔이 법선에 대해  $\phi$ 의 각도로 입사하여  $\theta$ 만큼의 각도로 투과해 나간다고 할 때, 그림에 나타낸 두 광선 a와 b의 경로차는,

$$\overline{AC} - \overline{BD} = \Lambda(\sin\theta' - \sin\phi')$$

(II-4)

가 된다[13]. 여기에 Snell의 법칙

$$\frac{\sin\theta'}{\sin\theta} = \frac{\sin\phi'}{\sin\phi} = \frac{\lambda'}{\lambda}$$

(II-5)

단,  $\lambda$ 와  $\lambda'$ 는 공기 및 매질에서의 빛의 파장을 적용하면

$$\Lambda(\sin\theta' - \sin\phi') = \Lambda(\sin\theta - \sin\phi) \quad (\text{II-6})$$

가 되고,

$$\Lambda(\sin\theta - \sin\phi) = m\lambda \quad (\text{II-7})$$

단,  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

일 때 보강간섭이 일어난다. 따라서 광 빔이 초음파 전파방향에 대해 수직으로 입사할 경우 보강간섭이 일어나는 각 고차파의 회절각  $\theta_m$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$\sin\theta_m = m\frac{\lambda}{\Lambda} \quad (\text{II-8})$$

여기서,  $m$ 은 회절파의 차수를 나타내며, 0차 파는 회절 없이 직진하는 기본파가 된다. 이 식으로부터 회절각은 빛의 파장과 음파의 파장의 비에 의해 결정됨을 알 수 있다.

그림 II-5는 파면이 평면인 광 빔의 회절격자에 의한 광선의 경로차를 나타내는 것으로,  $m=0, \pm 1, \dots$ 의 점들은 각 슬릿을 통과한 광선의 경로 차가 0이거나  $\lambda$ 의 정수배인 위치를 나타내는데, 그림에서처럼 슬릿간의 간격  $d$ 일 때



$$\Delta L = d \sin \theta_m = m\lambda \quad (\text{II-9})$$

에서  $d = \Lambda$  일 때 식 (II-9)이 된다.

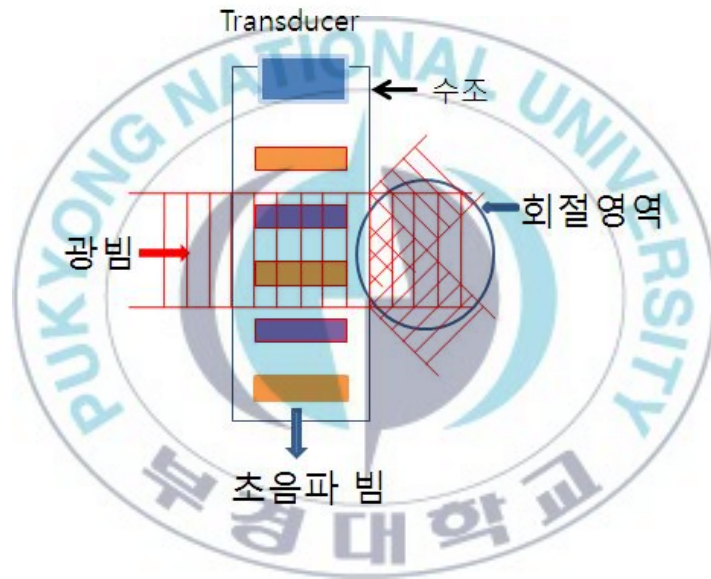


그림 II-2. 초음파에 의한 광 빔의 회절과 회절 영역

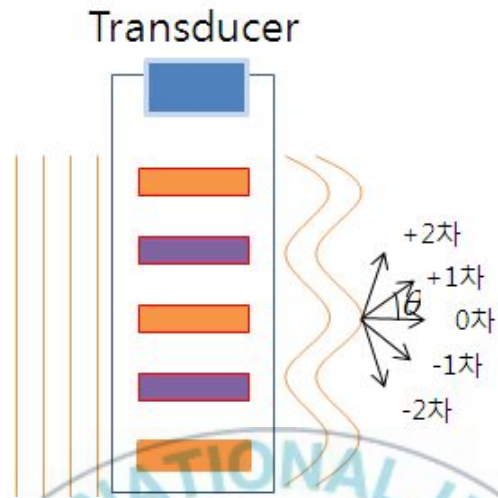


그림 II-3. 초음파에 의한 광 빔의 파면 변화와 고차 회절파

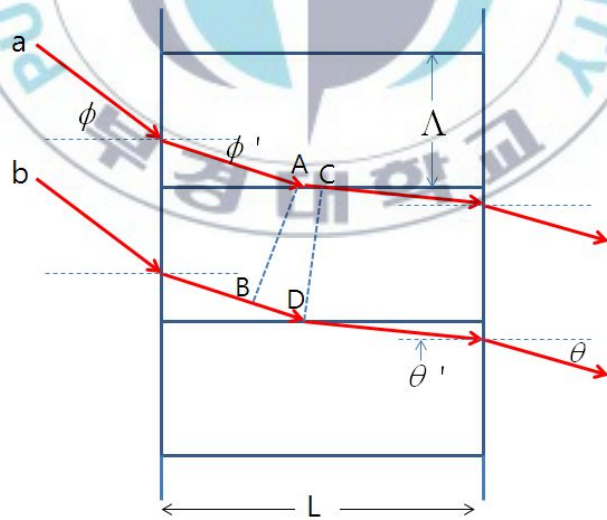


그림 II-4. 회절격자에서의 광 빔의 전파

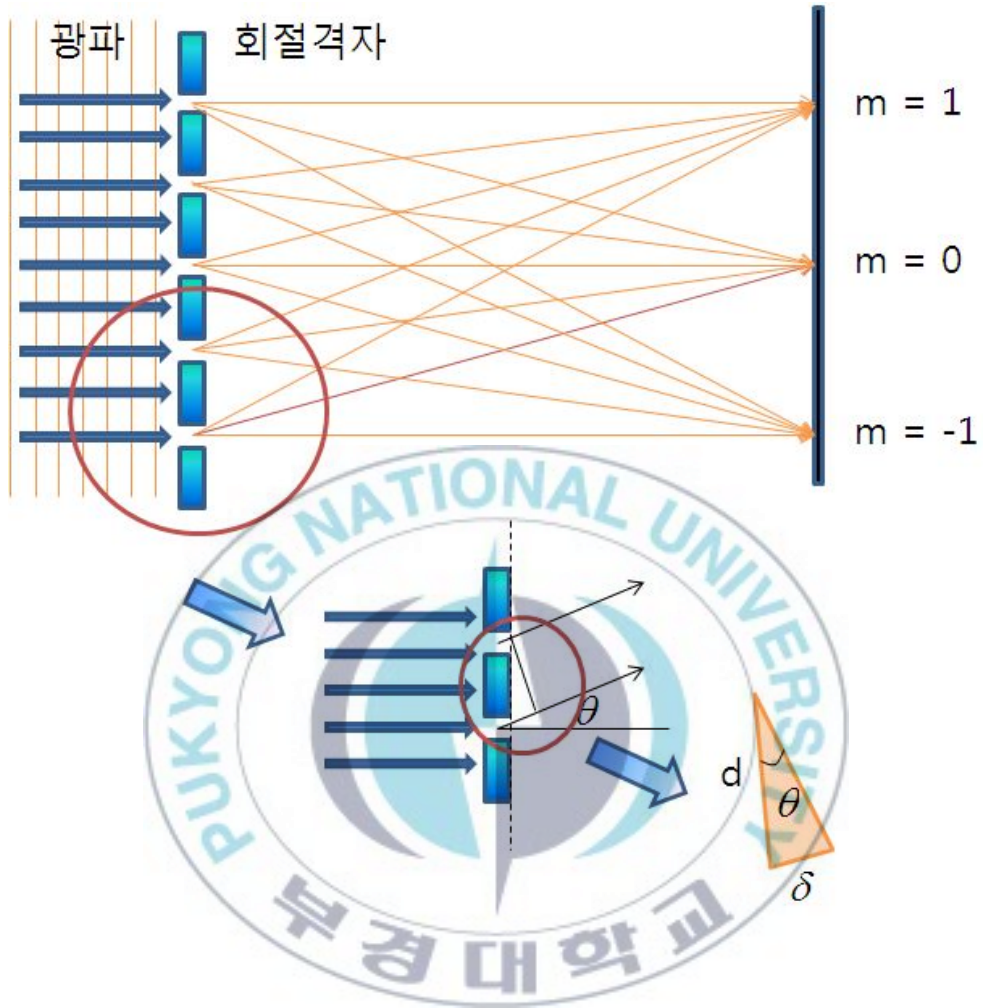


그림 II-5. 회절격자에 의한 광선의 경로차

광선의 굴절이 그다지 크지 않다면 초음파 영역을 통과한 빛의 세기는 변화가 없고 위상만 변조되는데, 이때 위상변화의 진폭  $\nu$ 는

$$\nu = \frac{2\pi\delta_n L}{\lambda} \quad (\text{II-10})$$

가 된다. 여기서,  $\delta_n$ 은 굴절률변화의 진폭이며,  $\lambda$ 는 공기 중의 빛의 파장으로서 매질에서의 파장과 동일하다고 간주하였다. 식 (II-10)의  $\nu$ 를 Raman-Nath 파라메타라고 한다.

식 (II-10)은 초음파가  $L$ 에만 존재하고 진폭이  $L$  내에서 일정한 경우에 대한 것이다. 그러나 유한한 크기를 갖는 실제의 음원은 완전한 피스톤 음원이 아니므로 음압이 수평적으로 복잡하게 변한다. 따라서 그 분포를 고려하면 Raman-Nath 파라메타는 다음의 식 (II-11)과 같이 나타내어진다.

$$\nu = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \delta_n(y) dy \quad (\text{II-11})$$

한편,  $m$ 차 회절광의 세기  $I_m$ 은 입사광의 세기를 1로 하였을 때, Raman-Nath 파라메타  $\nu$ 에 의해

$$I_m = J_m^2(\nu) \quad (\text{II-12})$$

로 나타내어진다. 여기서  $J_m$ 은  $m$ 차 Bessel 함수인데, 그림 II-6은 낮은 차수의  $m$ 에 대해  $I_m$ 과  $\nu$ 의 관계를 나타낸다.

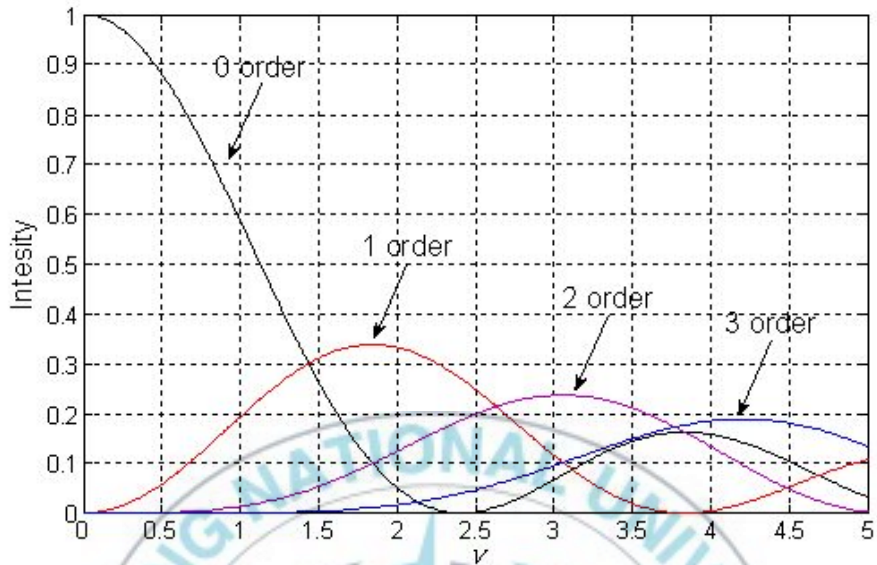


그림 II-6. Raman-Nath 회절의 각 차수에 따른 파의 세기

회절광의 세기가 식 (II-12) 및 그림 II-6와 같이 나타나는 Debye-Sears 효과를 Raman-Nath 회절이라고 부른다. Raman-Nath 회절이 생기기 위해서는 다음의 조건이 만족되어야 한다.

$$Q \equiv \frac{2\pi L\lambda}{n\lambda^2} \leq \frac{1}{2} \quad \text{and} \quad Q\nu \leq 2 \quad (\text{II-13})$$

이 식을 만족시키는 것은 일반적으로 주파수가 수 MHz 이하인 초음파에 해당하는 것으로 알려져 있다.

### Ⅲ. Debye-Sears 효과의 응용

#### Ⅲ-1. 음속 측정

그림 Ⅲ-1과 같이 트랜스듀서가 투명한 액체 매질로 채운 수조의 정중앙에 위치해 있을 때 평면파인 빛이 왼쪽에서 초음파의 진행 방향에 수직으로 입사하면 오른쪽 멀리 있는 스크린 위에 간섭과 회절이 결합된 무늬가 생긴다. 전술한 바와 같이, 초음파는 회절 격자로서 작용하므로, 광빔이  $\theta$ 만큼 기울어져 입사하면, 경로차  $\delta$ 는 음파의 파장  $\Lambda$ 에 의해 두 지점에서 각각 다르게 발생하여 진행한다. 이 값이 파장의 정수배가 되거나 같으면 모든 슬릿에서 나온 파동의 위상이 같게 되고 밝은 무늬가 관찰된다. 따라서 식 (Ⅱ-9)은 다시 식 (Ⅲ-1)로 나타낼 수 있다.

$$m\lambda = \Lambda \sin\theta_m \quad (Ⅲ-1)$$

따라서, 각도  $\theta_m$ 에서 간섭 무늬의 세기가 최대가 되려면 차수  $m$ 의 값은  $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ 의 값을 가져야 한다. 또한 밀도의 소한 층과 밀한 층 사이의 폭이 좁은 정상파의 경우는 참조가 흐릿하지만 회절 면적은 넓어지게 되고, 폭이 넓은 진행파의 경우, 회절 무늬의 면적은 줄어드는 대신 선명해진다. 또, 매질 속의 간격  $d$ 에 비해 광빔의 파장이 길수록 회절 각이 커짐을 알 수 있다.

여기서 매질 속 음파의 파장  $\Lambda$ 은 광빔이 Debye-Sears 효과에 의해 회절 되어 생기는 회절 무늬의 해석을 통해 알 수 있는 실험값이다. 트랜스듀서와 스크린까지의 거리를  $s$ 라 하고, 회절 하지 않고 직진하는 0차 파를

기준으로 + $m$ 차, - $m$ 차의 회절 무늬 사이의 거리를  $x$  라 할 때, 음파의 파장  $\Lambda$ 의 값은 식 (III-2)과 같이 계산하여 얻을 수 있고

$$\Lambda = \frac{m\lambda}{\sin\theta_m} \simeq \frac{2m\lambda s}{x} \quad (\text{III-2})$$

식 (III-3)을 통해 음파의 속도를 계산할 수 있다.

$$v_s = f_s \cdot \Lambda \quad (\text{III-3})$$

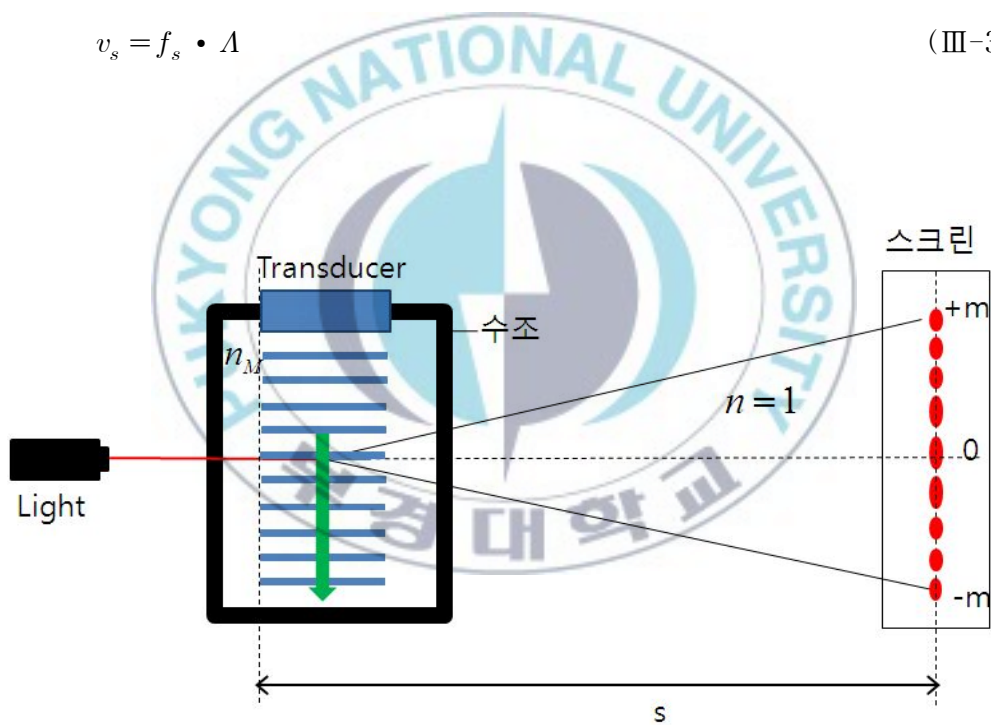


그림 III-1. Debye-Sears 효과를 이용한 음속 측정 방법

## Ⅲ-2. 실험 방법

### 가. 트랜스듀서의 제작 및 특성

본 연구에서 사용한 트랜스듀서는 직접 제작한 것으로, 중심 주파수가 9.5 MHz의 평면 P(VDF-TrFE) 압전 트랜스듀서이다. 트랜스듀서의 구조는 그림 Ⅲ-2와 같이 고분자 압전막의 일종인 P(VDF-TrFE)를 압전체 (piezoelectric material)로 사용하였고, 배면체(backing layer)는 구리이다. 접착을 위해 에폭시(epoxy)인 EPO-TEK 301을 사용하였다. 제작된 트랜스듀서의 실물 사진은 그림 Ⅲ-4와 같다. 압전체 P(VDF-TrFE) 압전요소들의 사이즈는  $100 \text{ mm}^2$ 이고 배면체는 수압 (SSP-10A; Shimadzu)을 이용해 접착하였다.

펄스 에코 측정에 의한 파워 스펙트럼은 XTR-2020 Ultrasonic Square/Spike pulser/receiver (mkcndt, MKCKorea)를 이용해 구하였고, 그림 Ⅲ-3과 같다. 본 연구에서 유효한 회절 무늬가 나타나는 6 MHz부터 12 MHz의 범위 내에서 실험 하였다.



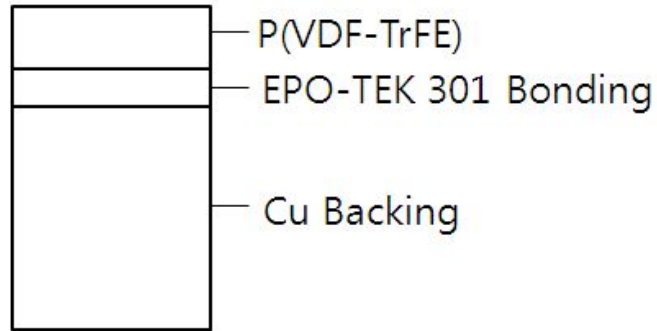


그림 III-2. 트랜스듀서의 구조

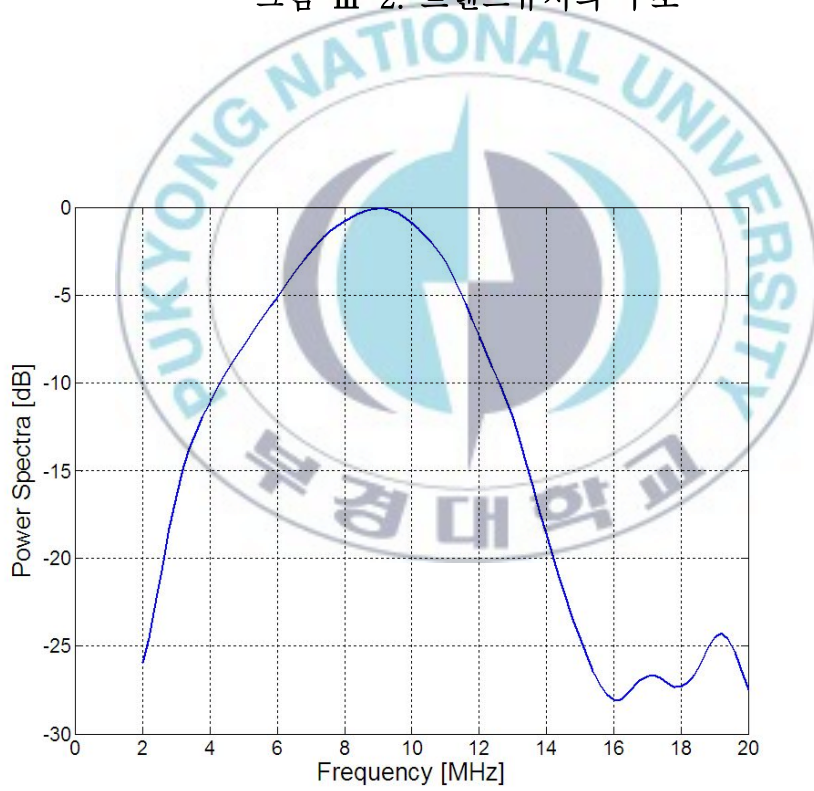


그림 III-3. 트랜스듀서의 파워 스펙트럼



그림 III-4. 트랜스듀서 실물 사진

## 나. 시스템의 구성 및 실험 방법

본 연구에서 구축한 Debye-Sears 효과 장치는 트랜스듀서와 수조, 광학계, 그리고 CCD 및 PC로 된 영상기록 장치로 구성된다. 그림 III-5와 같이 암실에 실험용 테이블을 놓고, 트랜스듀서와 수조, 스크린을 높낮이가 조절되는 받침대 위에 올린 후, 수평을 맞춘다. 트랜스듀서를 수조 중앙에 설치한 후, 방사면이 수평이 되도록 조절한다. 수조 내에 액체 매질은 트랜스듀서가 1/3 정도 잠기는 지점까지 채운다. 이때 트랜스듀서를 액체 매질과의 접촉 없이 사용하면 트랜스듀서의 열로 인해 고장의 원인이 될 수 있으니 공기 중에서 작동시킨 상태로 오래 두지 않도록 유의한다. 구성도의 실물 사진은 그림 III-6과 같다.

연구에서 사용한 트랜스듀서는 직접 제작한 것으로 자세한 내용은 후술하였다. 수조의 크기는 가로 200 mm x 세로 100 mm x 높이 200 mm로, 벽의 두께가 5 mm 인 직육면체 모양을 사용하였고, 광학계는 광원인 He-Ne 레이저와 스크린 및 CCD 카메라에 의해 구성된다. 레이저 광원에서 평행한 빛이 전방에 설치된 수조 안의 트랜스듀서가 진행하는 방향에 대해 수직으로 입사할 때, 트랜스듀서가 작동하여 매질 내에 초음파를 전파하는 경우, 회절 때문에 생기는 1차과 이상의 고차 성분이 초점을 지나 스크린에 도달하게 된다. 이러한 회절 영상을 잘 관찰하기 위해서는 무엇보다 레이저의 평행과 트랜스듀서 표면이 평행하게 설치하고 일직선으로 배치하는 것이 가장 중요하다. 광학계의 정확한 배치가 되지 않으면 광학계들 사이에서 빛이 반사하게 되고, 레이저가 초음파에 대해 수직으로 입사하지 않게 된다. 또한 보다 또렷한 회절 영상을 얻기 위해 외부의 빛을 차단하기 위해 암실에서 실험을 행하는 것이 좋다.

표 III-1은 본 연구에서 구성한 장치의 특성이다.

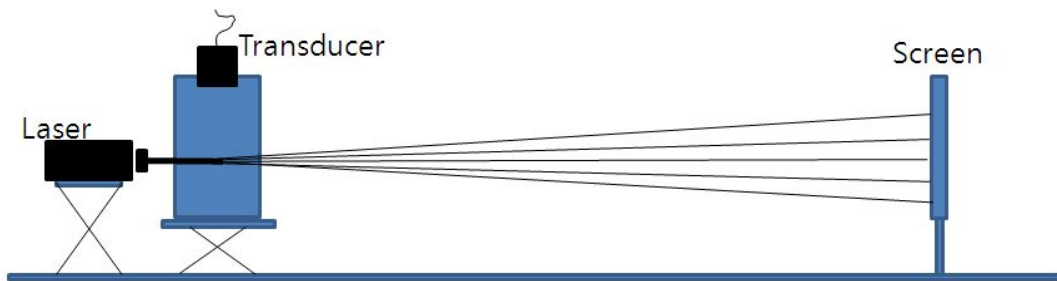


그림 III-5. Debye-Sears 효과 광학계의 구성도

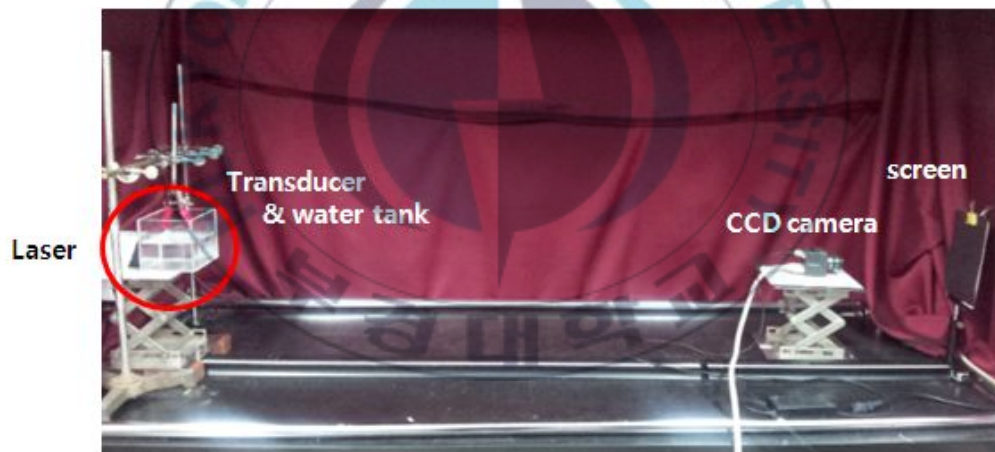


그림 III-6. Debye-Sears 효과 광학계의 실물사진

표 III-1. Debye-Sears효과 광학계 부품의 규격 및 특성

실험장치	특징
Laser	-He-Ne Laser (JDS Uniphase) -Wavelength = 632.8 nm, Power=0.5 mW
Water Tank	-width 200 mm x length 100 mm x height 200 mm -thickness: 5 mm
Transducer	-P(VDF-TrFE) -center frequency : 9.5 MHz
CCD Camera	-VM-B190(Samsung Ltd.)
Screen	-White or Black Board

### III-3. 실험결과

#### 가. 물의 음속

표 III-2는 9.5 MHz P(VDF-TrFE) 트랜스듀서에 의해 Debye-Sears의 회절 영상을 관찰하기 위한 실험 조건으로 물의 온도를 10 °C에서부터 10 °C씩 증가시키며 50 °C까지 측정하였다.

트랜스듀서와 스크린사이의 거리  $s$ 와 회절영상의 크기  $x$ 는 자를 이용하여 측정하였다.

표 III-2. 온도 변화에 따른 음속 측정 실험 조건

실험조건	초음파의 방사 방향	광원에 대해 수직
	매질	증류수
	온도	10, 20, 30, 40, 50 °C
	전압	300 mV
	광원의 파장 ( $\lambda$ )	632.8 nm
	트랜스듀서와 스크린사이의 거리 (s)	164 cm

표 III-3. (a) 10 °C 물에서의 실험 결과

$f$ [MHz]	$m$	$x$ [cm]	$x/2m$	$\lambda$ [nm]	$c$ [m/s]
6.0	1	0.90	0.45	235.54	1413
7.0	2	2.00	0.50	211.99	1483
8.0	2	2.30	0.58	184.34	1474
9.0	2	2.60	0.65	163.07	1467
10.0	2	2.90	0.73	146.20	1461
11.0	2	3.10	0.78	136.77	1504
12.0	2	3.40	0.85	124.70	1496
Speed of sound (Experimental)					1467
Speed of sound (literature[14] value)					1447
Difference (%)					1.41

(b) 20 °C 물에서의 실험 결과

$f$ [MHz]	$m$	$x$ [cm]	$x/2m$	$\lambda$ [nm]	$c$ [m/s]
6.0	2	1.70	0.43	249.40	1496
7.0	2	2.00	0.50	211.99	1483
8.0	2	2.30	0.58	184.34	1474
9.0	2	2.60	0.65	163.07	1467
10.0	2	2.80	0.70	151.42	1514
11.0	2	3.10	0.78	136.77	1504
12.0	2	3.35	0.84	126.56	1518
Speed of sound (Experimental)					1493
Speed of sound (literature[14] value)					1482
Difference (%)					1.08

(c) 30 °C 물에서의 실험 결과

$f$ [MHz]	$m$	$x$ [cm]	$x/2m$	$\lambda$ [nm]	$c$ [m/s]
6.0	1	0.90	0.45	235.54	1413
7.0	2	1.90	0.48	223.15	1562
8.0	2	2.30	0.58	184.34	1474
9.0	2	2.50	0.63	169.59	1526
10.0	2	2.80	0.70	151.42	1514
11.0	2	3.10	0.78	136.77	1504
12.0	1	1.70	0.85	124.70	1496
Speed of sound (Experimental)					1487
Speed of sound (literature[14] value)					1482
Difference (%)					0.30

(d) 40 °C 물에서의 실험 결과

$f$ [MHz]	$m$	$x$ [cm]	$x/2m$	$\lambda$ [nm]	$c$ [m/s]
6	2	1.65	0.41	256.96	1541
7	2	2.00	0.50	211.99	1483
8	2	2.30	0.58	184.34	1474
9	2	2.50	0.63	169.59	1526
10	2	2.75	0.69	154.17	1541
11	2	3.00	0.75	141.33	1554
12	2	3.30	0.83	128.48	1541
Speed of sound (Experimental)					1523
Speed of sound (literature[14] value)					1529
Difference (%)					0.35



(e) 50 °C 물에서의 실험 결과

$f$ [MHz]	m	x [cm]	$x/2m$	$\lambda$ [nm]	c [m/s]
6	1	0.80	0.40	264.99	1589
7	1	0.90	0.45	235.54	1648
8	1	1.10	0.55	192.72	1541
9	1	1.35	0.68	157.03	1413
10	1	1.40	0.70	151.42	1514
11	1	1.50	0.75	141.33	1554
12	1	1.65	0.83	128.48	1541
Speed of sound (Experimental)					1540
Speed of sound (literature[14] value)					1542
Difference (%)					0.13

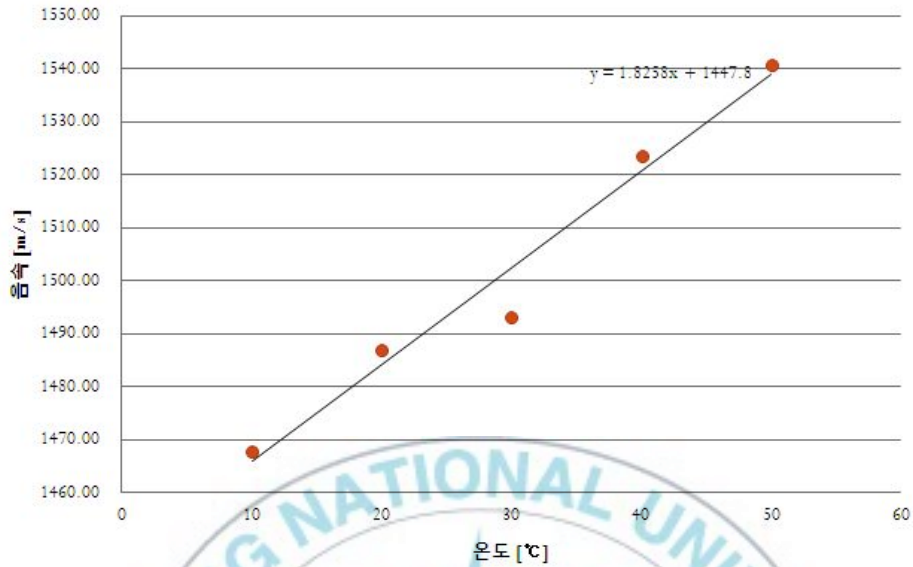


그림 III-7. 온도에 따른 음속 변화

물의 온도에 따른 음속을 측정한 결과, 일반적으로 알려진 것과 같이 매질의 온도가 올라감에 따라 밀도가 감소하기 때문에 소리의 전파속도가 빨라지는 결과와 일치했다. 또한 실험을 통해 얻은 식 (III-1)과 참고한 문헌식 (III-2)로 물의 온도 23 °C에서 음속을 구해 본 결과 각각 1491 m/s와 1489 m/s로 약 0.25 %의 오차 내에서 일치함을 확인하였다.

$$V = 1.8259T + 1447.8 \quad (\text{III-1})$$

$$V = 1402.736 + 5.03359T - 0.0579506T^2 + 3.31636 \times 10^{-4}T^3 - 1.45262 \times 10^{-6}T^4 + 3.0449 \times 10^{-9}T^5 \quad (\text{III-2})$$

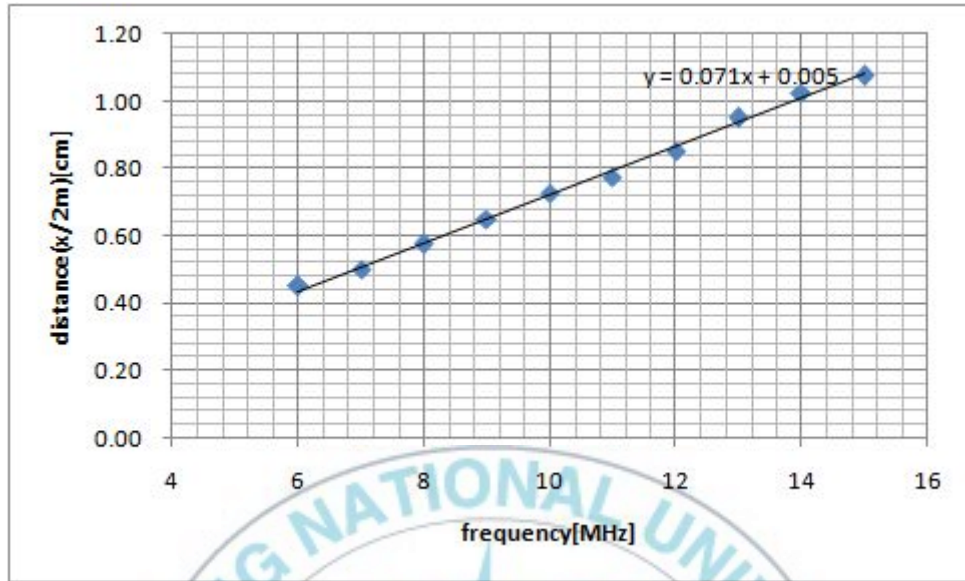
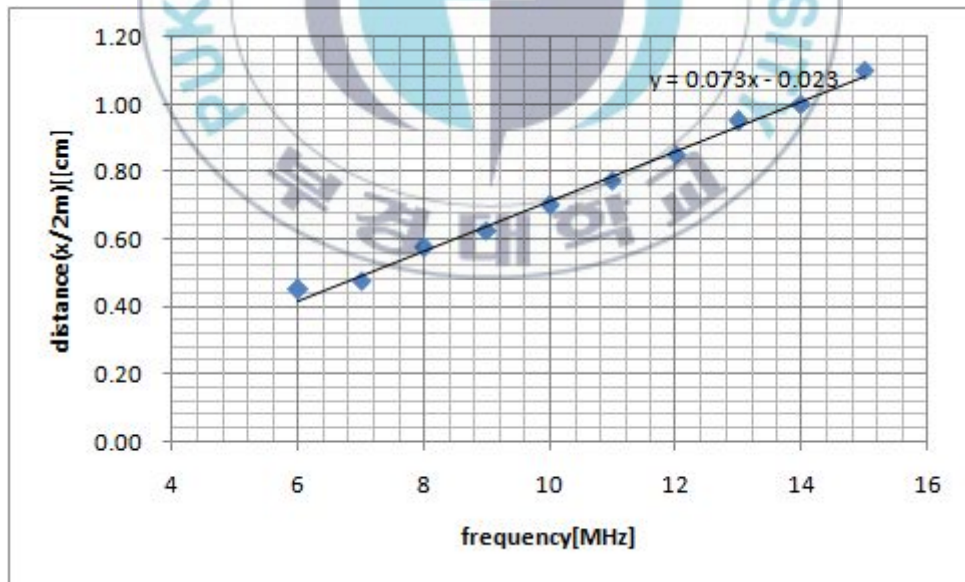
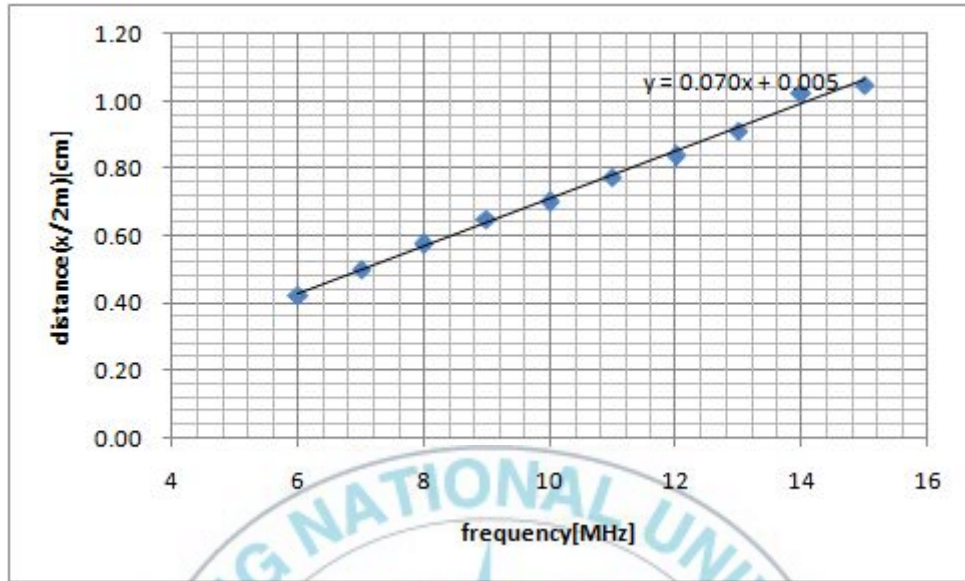


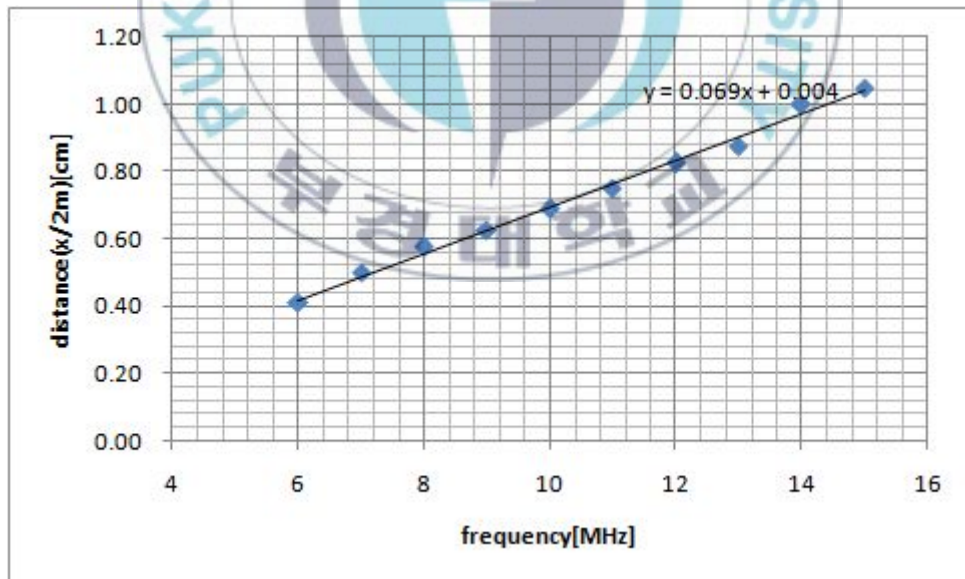
그림 III-8. (a) 온도가 10 °C일 때, 주파수에 따른 회절 무늬 간격



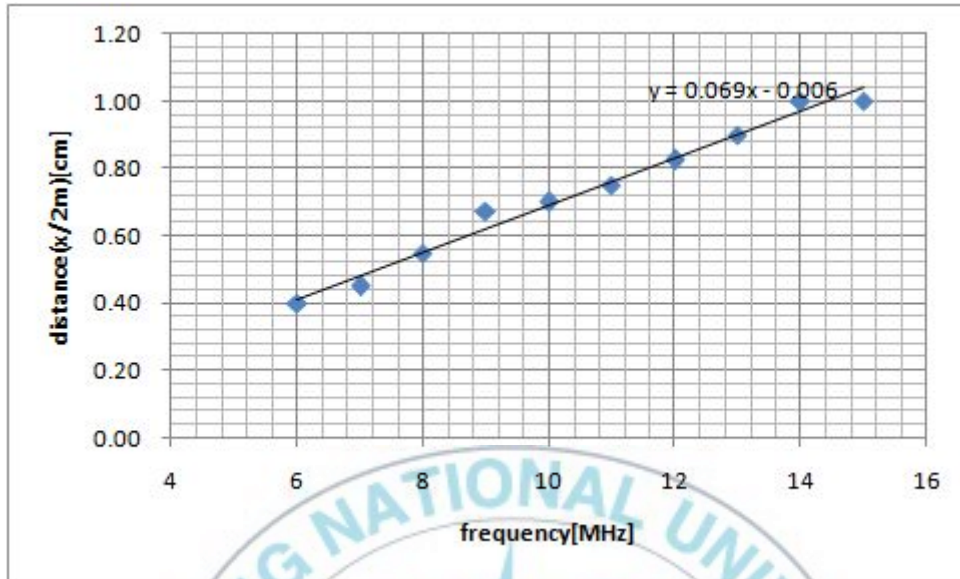
(b) 온도가 20 °C일 때, 주파수에 따른 회절 무늬 간격



(c) 온도가 30 °C 일 때, 주파수에 따른 회절 무늬 간격



(d) 온도가 40 °C 일 때, 주파수에 따른 회절 무늬 간격



(e) 온도가 50 ℃일 때, 주파수에 따른 회절 무늬 간격

주파수와 회절 무늬의 간격 ( $x/2m$ )의 그래프를 통해 주파수가 일정하게 증가하면, 회절 무늬의 차수 사이의 간격도 일정하게 증가하여 점점 무늬간의 간격이 멀어짐을 확인하였다. 또한 기울기 역시 거의 동일하게 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

그림 III-9은 레이저 광이 회절격자에 의해 생기는 회절 무늬를 CCD 카메라로 촬영한 사진으로 10 ℃부터 50 ℃까지의 회절 무늬이다.

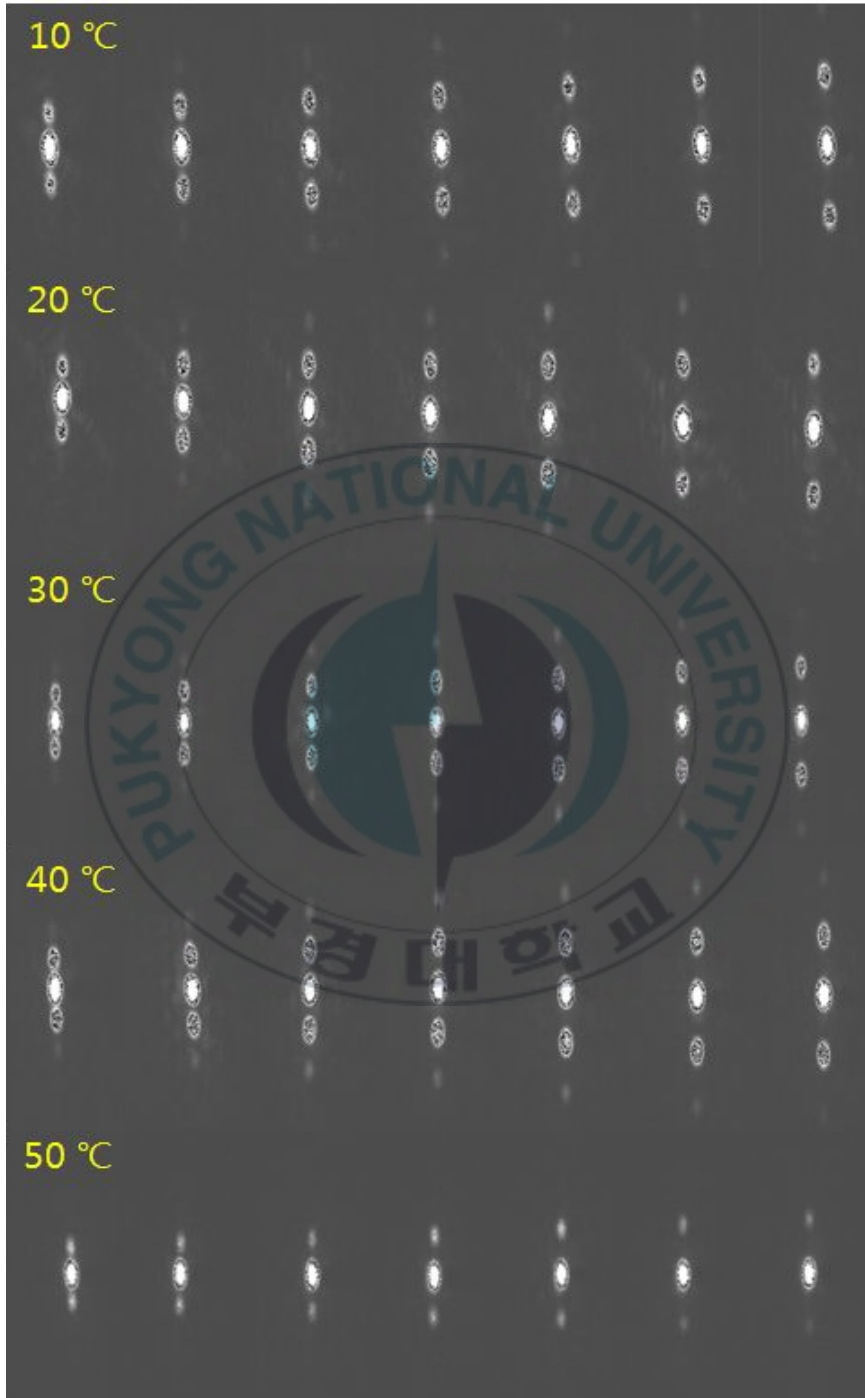


그림 III-9. CCD 카메라로 촬영한 회절 무늬

## 나. 액체 매질의 종류에 따른 음속

표 III-4는 9.5 MHz P(VDF-TrFE) 트랜스듀서에 의해 Debye-Sears의 회절 영상을 관찰하기 위한 실험 조건으로 에탄올과 메탄올, 물에 대한 음속과 회절 무늬 간격을 측정하였다.

표 III-4. 매질의 종류에 따른 음속 측정 실험 조건

실험조건	초음파의 방사 방향	광원에 대해 수직
	매질	에탄올, 메탄올, 증류수
	전압	300 mV
	광원의 파장 ( $\lambda$ )	632.8 nm
	트랜스듀서와 스크린사이의 거리 (s)	164 cm

표 III-5. (a) 에탄올에서의 실험 결과

$f$ [MHz]	$m$	$x$ [cm]	$x/2m$	$\lambda$ [nm]	$c$ [m/s]
6.0	2	2.20	0.55	192.72	1156
7.0	2	2.60	0.65	163.07	1141
8.0	2	2.90	0.73	146.20	1169
9.0	2	3.30	0.83	128.48	1156
10.0	2	3.60	0.90	117.77	1177
11.0	2	4.00	1.00	105.99	1165
12.0	2	4.30	1.08	98.60	1183
Speed of sound (Experimental)					1171
Speed of sound (literature[14] value)					1179
Difference (%)					0.65

(b) 메탄올에서의 실험 결과

$f$ [MHz]	$m$	$x$ [cm]	$x/2m$	$\lambda$ [nm]	$c$ [m/s]
6.0	1	1.10	0.55	192.72	1156
7.0	1	1.30	0.65	163.07	1141
8.0	1	1.50	0.75	141.33	1130
9.0	1	1.70	0.85	124.70	1122
10.0	1	1.90	0.95	111.57	1115
11.0	1	2.00	1.00	105.99	1165
12.0	1	2.40	1.20	88.33	1059
Speed of sound (Experimental)					1127
Speed of sound (literature[14] value)					1130
Difference (%)					0.25



(c) 증류수에서의 실험 결과

$f$ [MHz]	$m$	$x$ [cm]	$x/2m$	$\lambda$ [nm]	$c$ [m/s]
6.0	1	0.90	0.6	235.54	1413
7.0	2	2.00	0.7	211.99	1483
8.0	2	2.30	0.8	184.34	1474
9.0	2	2.60	0.9	163.07	1467
10.0	2	2.90	1.0	146.20	1461
11.0	2	3.10	1.0	136.77	1504
12.0	2	3.40	1.2	124.70	1496
Speed of sound (Experimental)					1467
Speed of sound (literature[14] value)					1466
Difference (%)					0.12

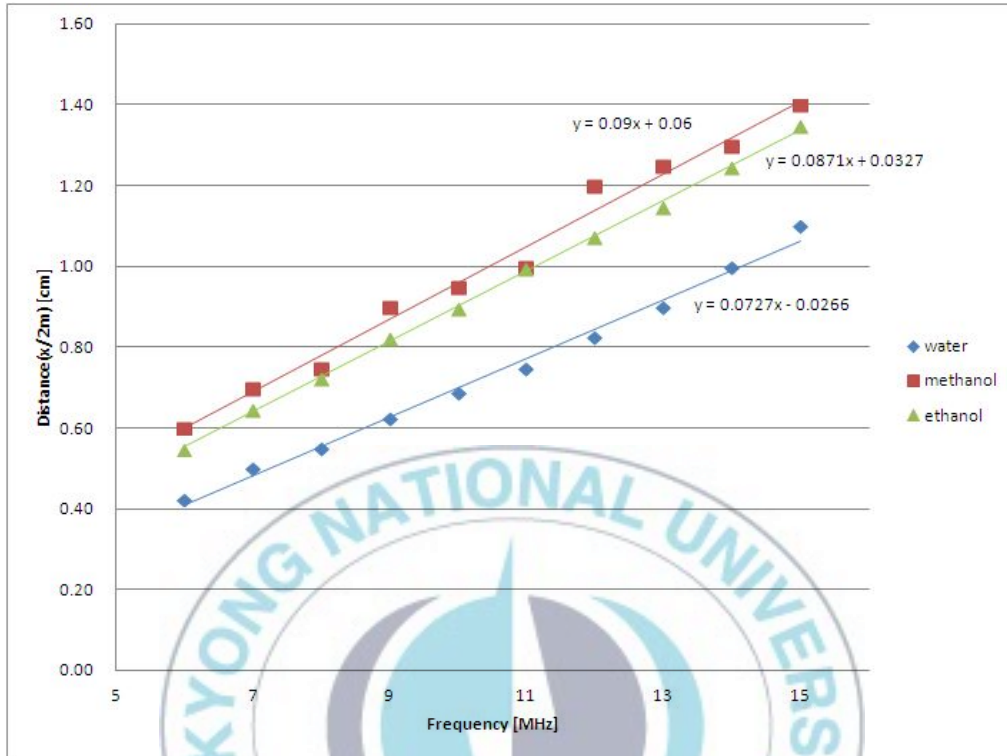


그림 III-10. 매질의 종류에 따른 회절 무늬 사이의 간격

측정 결과 에탄올, 메탄올, 물에서의 음속은 각각 1171 m/s, 1127 m/s, 물에서는 1467 m/s으로 계산할 수 있다. 에탄올과 메탄올의 경우 알려진 문헌 값으로 음속도를 비교해 본 결과 대략 3.66 %와 0.2 %의 오차 내에서 일치함을 보였다. 또한 음속의 크기는 물이 가장 빠르고 에탄올, 메탄올 순임을 확인 하였다.

회절 무늬의 간격 또한 물, 에탄올, 메탄올 순으로 점점 넓어짐으로 음속이 느릴수록 간격이 넓어짐을 확인 할 수 있다.

## IV. 과학교수학습에의 적용

### IV-1. 공통교육과정의 과학

공통교육과정에서의 ‘과학’은 초등학교 3학년부터 중학교 3학년까지 학습하는 교과로서 관찰, 실험, 조사 등의 탐구 활동을 통하여 과학의 기본 개념을 이해하고 과학 탐구 능력과 과학적 태도를 함양하여 창의적이고 합리적으로 문제를 해결하는 데 필요한 과학적 소양을 기르기 위한 교과이다.[15]

표 IV-1 공통 과학 교육과정에서 본 실험과 관련된 음향학과 파동 물리학 분야 내용으로 초등 교육에서는 소리의 성질과 렌즈의 개념에 대해 이해하고, 중등교육에서는 초등교육을 바탕으로 소리와 진동수 매질, 파동, 소리의 전달 과정을 배운다. 특히 여러 물질 속에서의 소리의 속력과 기온에 따른 음파 전달 시간에 대해 학습하게 되는데, 학생들은 소리가 전달되려면 반드시 공기가 있어야 한다고 생각하며 물속에서 소리가 전달되는 이유는 물속의 공기 분자가 있기 때문이라고 알고 있는 경우가 많기 때문에 본 연구에서 한 실험을 구성하고 해봄으로서 여러 가지 매질 내에서의 속력을 직접 측정하고, 매질의 온도를 변화시켜 온도에 따른 음속 관찰을 통해 학생들의 오개념을 바로 잡을 수 있도록 지도할 수 있다.[16]

표 IV-1. 공통교육과정에서의 학습 계열 및 단원 학습 내용

2,3학년	6학년	8학년
<p style="text-align: center;">&lt;소리&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 주위의 소리를 찾고 소리를 내는 것과 소리 나는 것</li> <li>○ 여러 가지 소리</li> </ul> <p style="text-align: center;">&lt;빛의 직진&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 빛을 내는 물체와 빛을 내지 않는 물체</li> <li>○ 그림자의 크기</li> </ul>	<p style="text-align: center;">&lt;빛&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 빛의 직진</li> <li>○ 빛의 반사</li> <li>○ 빛의 굴절</li> <li>○ 물체가 보이는 과정</li> </ul>	<p style="text-align: center;">&lt;빛과 파동&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 평면거울에 의한 상</li> <li>○ 구면경과 구면 렌즈</li> <li>○ 빛의 분산과 합성</li> <li>○ 파동의 발생과 전파</li> <li>○ 종파와 횡파의 차이</li> <li>○ 소리의 높이와 진동수</li> <li>○ 소리의 전달과정 (매질에 따른 소리의 속력 관찰)</li> </ul>
탐구활동	탐구활동	탐구활동
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 주위 소리에 귀 기울이기</li> <li>○ 소리 흉내내기</li> <li>○ 빛이란 무엇인지 알아보기</li> <li>○ 그림자 살펴보기</li> <li>○ 그림자 만들기</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 바늘 구멍 사진기 만들기</li> <li>○ 잠망경을 만들어 빛 관찰하기</li> <li>○ 레이저 포인터를 통해 굴절 현상 관찰하기</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 물결과 관찰, 파도 풀 만들기</li> <li>○ 용수철로 신호보내기</li> <li>○ 파동의 기록 남기기</li> <li>○ 눈으로 보는 소리</li> <li>○ 사람이 들을 수 있는 소리</li> <li>○ 소리 지도 만들기</li> <li>○ 휴대 전화 벨 소리 지우기</li> </ul>

## IV-2. 선택교육과정의 물리

선택교육과정은 중등 교육의 성과를 바탕으로 하며 크게 일반 과목과 심화 과목으로 구분되어 있다. 일반과목은 ‘과학’, ‘물리 I’, ‘물리 II’로 구분되고, 심화과목은 ‘고급 물리’와 ‘물리 실험’으로 구성되어 있다.

‘과학’은 다시 제 1부 ‘우주와 생명’과 제 2부 ‘과학과 문명’으로 나누어지는데 본 연구와 관련된 파동물리학 분야는 ‘과학과 문명’에 속해 있다. 선행학습 된 빛과 소리, 파동의 개념을 토대로 현대사회의 과학과 정보통신, 신소재 등에 관련된 물리적 정보 발생 과정을 이해하고 기초 과학개념을 학습한다. 표 IV-2은 일반과목의 ‘과학’에서의 파동 물리학과 관련한 내용의 영역과 기준이다.

표 IV-2. ‘과학’에서의 학습 계열 및 단원 학습 내용

영역		소단원	학습내용	탐구 활동 예시
과 학 과 문 명	정보 통신과 신소재	정보의 발생과 처리	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 정보의 발생</li> <li>○ 센서</li> <li>○ 디지털 정보처리</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ CD 표면을 현미경으로 관찰하고, 레이저의 파장과 기록 밀도의 관계를 조사하고 토론하기.</li> </ul>

‘물리 I’에서는 실생활 관련 주제와 현대 물리학의 내용을 단순히 정보를 제공하는 형식으로 제시하지 않고, 논의하고 체험하며 탐구할 수 있는 방법으로 도입한다. 또한, 물리학 이론의 개념적 구조뿐 아니라 내용의 이해를 돕기 위한 다양한 활동들을 포함하여 능동적 학습이 이루어 질 수 있도록 구성되어 있다.

표 IV-3는 ‘물리 I’에서의 음향학과 파동 물리학 관련 내용의 영역과 기준으로 파동의 특성과 관련하여 소리의 공명, 간섭을 이해하고 소리가 마이크에서 전기 신호로 변환되는 원리를 이해하며, 특히 소리의 굴절과 반사, 회절 등을 이해하고 소리의 전달 속도를 공통과학교육 보다 깊이 있게 공부하며, 초음파의 의미와 발생장치 및 실생활에서의 이용을 알아보도록 구성되어 있다. 따라서 본 연구를 탐구활동의 예시로 제시하여 초음파의 특성을 통해 실생활에서 응용하여 보고, 소리의 전반적인 특성과 더불어 파동의 성질을 보다 쉽게 파악할 수 있다.

표 IV-3. '물리 I'에서의 학습계열 및 단원 학습 내용

단원	소단원	학습 내용	탐구 활동 예시
소리와 빛	1. 소리와 초음파	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 소리의 굴절, 반사, 회절</li> <li>○ 소리 정보의 활용</li> <li>○ 초음파의 의미, 발생장치</li> <li>○ 초음파의 활용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 풍선에 귀를 대고 목소리 들어보기</li> <li>○ 음원에 따른 소리의 파형</li> </ul>
	2. 공명과 화음	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 소리의 공명, 간섭</li> <li>○ 화음과 소음의 차이</li> <li>○ 공명의 이용</li> <li>○ 악기의 원리</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 관으로 소리를 크게 들리게 하기</li> <li>○ 빨대 피리 만들기</li> <li>○ 진동수가 다른 소리 동시에 듣기</li> </ul>
	3. 마이크와 스피커	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 전자기 유도</li> <li>○ 여러 마이크의 원리</li> <li>○ 스피커의 원리</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 헤드셋의 스피커로 소리 녹음하기</li> <li>○ 마이크와 스피커 만들기</li> </ul>

'물리Ⅱ'는 심화된 물리 개념과 다양한 탐구 방법을 적용하여 물리 현상과 관련된 기본적인 문제를 해결하는 능력을 기르기 위한 과목으로 물리 전반적인 기본영역을 고루 학습 할 수 있도록 구성되어 있다. 표 IV-4는 '물리Ⅱ'에서의 음향학과 파동 물리학 관련 내용의 영역과 학습내용으로, 특히 음파의 파장을 기주 공명을 통해 측정하는 방법과 더불어 Debye-Sears 효과를 이용해 파장을 구하는 방법을 함께 소개하여 공기 중에서 뿐만 아니라 여러 매질에서의 파장을 구해볼 수 있도록 지도할 수 있다. 또한 빛의 회절과 간섭을 가시화 하여 확인 해 봄으로써, 학습 내용을 이해하는

데 많은 도움이 될 것이다.

표 IV-4. '물리 II'에서의 학습계열 및 단원 학습 내용

영역	소단원	학습내용	탐구 활동 예시
파동과 빛	1. 파동의 표시	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 파동의 발생</li> <li>○ 파동의 표시</li> <li>○ 파동의 속도</li> </ul>	○ 파동의 발생
	2. 파동의 진행과 중첩	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 하위헌스 원리</li> <li>○ 파동의 독립성</li> <li>○ 파동의 중첩</li> <li>○ 파동의 간섭</li> <li>○ 소음 제거 기술</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 하위헌스 원리 알아보기</li> <li>○ 파동의 중첩 관찰</li> </ul>
	3. 파동의 성질	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 정상파</li> <li>○ 파동의 공명</li> <li>○ 파동의 반사</li> <li>○ 파동의 굴절</li> <li>○ 빛의 회절</li> <li>○ 빛의 간섭</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 정상파 만들기</li> <li>○ 공기 기둥의 공명을 이용한 음파의 파장 측정</li> </ul>



## V. 결론

본 연구에서는 Debye-Sears 효과를 이용하여 물을 비롯한 몇몇 액체 매질의 음속을 측정하였다. 즉, 중앙 주파수가 9.5 MHz인 P(VDF-TrFE) 트랜스듀서에 의해 발생한 초음파가 매질 속을 진행하면서 만드는 밀도변화에 의해 회절된 레이저 광 빔의 간섭무늬를 관찰함으로써 물의 온도에 따른 음속 변화를 측정하였다. 그리고 15 °C의 메탄올 및 에탄올의 음속을 측정하여 물의 음속과 비교하였다.

그 결과 온도가 증가함에 따라 매질의 밀도가 감소하여 음속이 빨라지는 것을 확인하였고, 메탄올과 에탄올의 음속이 물보다 빨라지는 것을 확인하였는데, 그러한 결과는 기존의 문헌값과 잘 일치하였다. 회절 무늬의 간격을 측정한 결과 0차 파에서 m차 파 간격까지의 거리가 멀어질수록 음속은 빨라지고, 거리가 좁아질수록 음속이 느려짐을 확인할 수 있었다. 그리고 사용한 주파수 범위인 6.0~12.0 MHz의 범위에서 음속은 거의 일정하여, 그 거리는 파장의 감소에 의해 선형적으로 증가하였다.

향후 본 실험에서 확립한 방법 및 장치를 매질의 종류, 광원의 파장, 온도 등을 다양하게 변화시켜 가면서 측정하는데 적용함으로써 여러 가지 매질의 물리적 성질과 음파의 성질 등을 보다 명확히 규명할 수 있을 것으로 생각된다.

나아가, 교육학적 측면에서 본 연구와 관련한 음향 및 파동물리에 관한 중·고등교과의 교육 과정 내용을 파악하였다. 본 연구는 공통교육과정의 ‘빛과 파동’, 공통과학의 ‘정보통신과 신소재’, 물리 I의 ‘소리와 빛’, 물리 II의 ‘파동과 빛-파동의 발생과 전달’ 단원 또는 영역과 직접 관련되며, 본

연구에서의 실험방법 및 측정결과는 중·고등 교육과정에서의 교수-학습에 유효하게 이용할 수 있음을 알 수 있었다. 즉, 학생들이 직접 간단한 실험을 통해 매질 속 음파의 전파특성을 가시적으로 파악하고 매질에 따른 음속을 측정해 봄으로써 음향 및 파동 물리학에 대한 학생들의 흥미 유발은 물론, 그 이해의 정도를 높이는 데 사용될 수 있다. 나아가 지식 전달의 교수-학습에서 끝나지 않고 첨단 과학 기술에 대한 흥미를 재고시키고, 학습한 과학적 내용이 실제 기술·산업에 적용되는 사례를 보여 주는 교수-학습에 응용한다면 보다 나은 학습효과를 기대할 수 있을 것으로 생각된다.



## 참고문헌

- [1] L. Brillouin, "Diffusion of Light and X-rays by a Transparent Homogeneous Body". Ann. Phys. (Paris), Vol. 17, pp. 88 - 122, 1922.
- [2] P. Debye and F. W. Sears, "On the scattering of light by supersonic waves". Proc. Nat. Acad. Sci. USA, Vol. 18, no. 6, pp. 409 - 414. 1932.
- [3] R. Lucas and P. Biquard, "Optical properties of solid and liquid medias subjected to high-frequency elastic vibrations". Journal Phys., Vol. 71, pp. 464 - 477, 1932.
- [4] B. Schneider and K. K. Shung, "Quantitative analysis of pulsed ultrasonic beam patterns usings a Schlieren system", IEEE Trans. on UFFC, Vol. 43, pp. 1181-1186, 1996.
- [5] N. Kudo, H. Miyashita, K. Yamamoto and H. Sekimizu, "A simple Schlieren system for visualization of a sound field of pulsed ultrasound", Journal of physics: Conference Series 1, pp. 146-149, 2004.
- [6] T. Neumann and H. Ermert, "A new designed Schlieren system for the visualization of ultrasonic pulsed wave fields with high spatial resoulution and temporal resolution", 2006, IEEE Ultrason. Symposium Proceedings, Vol. 1, pp. 244-247, 2006.
- [7] C. V. Raman and N. S. Nath, "The diffraction of light by sound waves of high frequency, Pt II, "Proc. Ind. Acad.. Sci., Vol. 2A, p. 413, 1935.
- [8] W. L. Bragg, "The diffraction of short electromagnetic waves by a

crystal". Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, Vol. 17, pp. 43 - 57, 1913.

[9] 김창현 외 2명, "저주파 영역에서 고분자 재료의 음속 측정에 관한 연구". 한국음향학회지, 제 17호 8호, pp58-63. 1998.

[10] 전자 기술 연구회, "알기 쉬운 초음파 응용", 한국, 기문사, pp. 225-231, 2000.

[11] G. D'Arrigo, P. Marietti, and P. Tartaglia, "A new form of the sing-around technique for ultra-sonic velocity measurements", Il Nuovo Cimento B Series 10, Vol. 69(1), pp. 105-114, 1970.

[12] 根岸勝雄, 高木堅志郎, "超音波技術", 東京大學出版會, pp. 76-100, 1984.

[13] 최광윤, "음장해석과 가시화를 통한 의료용 초음파프로브의 결함요소 검출", 부경대학교 공학석사학위논문, pp. 8-22, 2010.

[14] 實吉絶一, 菊池喜充, 能本乙産, "超音波技術便覽", 日刊工業新聞社, pp 1202-1203, 1989

[15] 박종원 외 2명, "물리 교육학 총론", 한국, 북스힐, (2001)

[16] 송진웅, "학생의 물리 오개념 지도", 한국, 북스힐 (2004)

## 감사의 글

대학원 생활 2년 반 동안 바쁘다는 이유로 실험에 전념하지 못하고, 여러 가지 부족한 저에게 늘 자상하게 신경써주시고 세세한 부분까지 꼼꼼하게 지도해주신 하강렬 교수님께 진심으로 감사드립니다.

아울러 세세한 부분까지 잘 챙겨주었던 실험실 식구들, 특히 실험에 미숙해 여러 가지 질문과 부탁에도 싫은 내색 하지 않고 언제나 친절하게 가르쳐준 차오와 해랑에게 고마운 마음을 전합니다.

또한, 학부와 대학원생활을 함께하며 힘든 일도, 즐거운 일도 같이 나누는 김미주, 이예나. 우리 모두 이제 시작이니 더 열심히 잘해서 목표한 꿈 꼭 이루도록 하자!

마지막으로 오랜 학교생활에도 항상 용기를 주고 잘하고 있다고 격려해 준 우리 가족과 승희씨에게도 늘 고맙고 사랑한다는 말 전하고 싶습니다.