

공명관에서 소리의 속력 측정을 위한 MBL 실험 개발

김단령¹, 이예림¹, 손경희¹, 김경대^{1,2*}

¹KAIST부설 한국과학영재학교, 부산광역시 614-822

²KAIST 과학영재교육연구원, 대전광역시 305-701

Development of MBL Experiment to measure the speed of sound in resonance tube

Danyung Kim¹, Yerim Lee¹, Kyunghee Son¹, Kyoungdae Kim^{1,2*}

¹Korea Science Academy of KAIST, Busan 614-822

²Institute for Gifted Students, KAIST, Daejeon 305-701

요약

고등학교 또는 대학의 물리학 실험 상황에서 편리하게 활용할 수 있도록 개인용 컴퓨터를 활용한 실험(MBL)을 개발하였다. 이 실험에서 공명관, 핀형 마이크로폰, 소리편집기 프로그램, 파형발생기를 사용하였으며 상온의 공기 중에서 전파하는 소리파동의 진행속력을 측정하였다. 소리의 진행속력은 29.0°C에서 346.76 ± 4.6 m/s 으로 기존의 값과 비교할 때, 1% 미만의 범위에서 잘 일치함을 확인하였다. 공명관을 사용한 개발된 MBL 실험은 공기 중을 진행하는 소리의 속력을 측정하는 교육활동에 충분히 정확한 수준에서 의미있는 실험활동으로 과학영재학생 또는 물리학을 이수하는 고등학생과 대학생의 소리 파동의 전파, 파동의 중첩, 정상파 개념을 이해하기 위한 탐구활동에 활용될 수 있을 것이다.

주제어 : 소리의 속력, 공명관, 정상파, 컴퓨터기반실험

서론

우리 주위에서 쉽게 볼 수 있는 물리 현상으로 무엇이 있을 까? 일상생활 속에서 흔하게 대면하게 되는 물리현상으로 대부분 '파동'을 꼽는데 주저하지 않을 것이다. 종이에 인쇄된 글을 읽거나, 또는 서로 이야기하고 의사소통하는 행위가 가능한 것도 파동 현상에 의한 것이다. 특히 외부의 어떤 자극을 지각하는 순간 '파동' 현상을 경험하게 된다.

이러한 파동의 여러 가지 종류들 중에서 가장 익숙한 것 중의 하나가 바로 '소리' 파동이다. 소리는 이와 같이 생활과 밀접한 연관성뿐만 아니라 초음파 등과 같은 여러 응용 가능성 때문에 그 특징과 응용 방법에 대해 다양하고 많은 연구가 수행되었다. 특히 매질 속에서 전파하는 소리의 진행속력에 관한

연구의 경우, 소리의 진행속력, 그 자체의 물리적 중요성 외에도, 그것을 측정하는데 있어 여러 측정방법에 따른 교육적 효과 때문에 다양한 음속 측정 방법이 개발되어 있다. 음파의 어떤 특징을 이용하느냐에 따라 측정 방법이 아주 다양하다. 그 성질의 예로는 공명(Muirhead, 1979), 정상파(Richard, 1996), 도플러 효과(Ng and Mak, 2001) 등을 들 수 있다. 또한 이에 따라 음속을 측정하는 각각의 다양한 방법(강미선 등, 2008; 김중복 등 2008; Fazio et al., 2006; Mak et al., 2000; Velasco et al., 2004; Worland and Wilson, 1999)에 대한 연구결과들이 보고되었다.

한편 교육과정에 따르면 초등학교와 고등학교의 과학에서 소리 파동과 관련된 내용을 다루고 있고, 대학의 교육과정에서는 대부분 일반 물리학에서 소리를 포함한 일반적인 파동 현상과 개념을 다룬다. 그럼에도 불구하고 고등학생은 물론이고, 대학생들조차 파동과 관련된 내용을 학습하는 데에는 적지 않은

* 교신저자: kkim@kaist.ac.kr

• 2010년 6월 21일 접수, 2010년 8월 6일 수정, 2010년 8월 9일 통과

어려움을 겪고 있다(김경대 등, 2007). 소리파동에 관한 학생들의 개념 이해가 쉽지 않고(Wittmann et al., 2003) 다양한 오개념을 가지고 있으며 심지어는 학생들을 가르칠 현직과학교사와 예비교사의 경우에도 소리 파동의 전파와 파동 관련 개념에 관한 이해가 부족하다는 보고가 있었다(김경대 등, 2007; 오원근과 김재우, 2006). 특히, 관련 물리내용을 이수한 고등학생들과 일반물리학을 이수한 물리전공이 아닌 과학 예비교사들의 경우에 심화된 개념과 구체적인 상황에서 파동 개념을 잘 이해하지 못하였다. 이들 파동과 관련된 파동의 중첩과 매질에서 소리 파동의 진행속력과 관련된 개념을 잘 이해하지 못하고 어려워하는 것은 구체적인 경험과 탐구활동을 통한 심화된 개념에 대한 깊이 있는 이해의 기회를 갖지 못한 것도 한 원인일 것이다(이영직과 권재술, 1993).

학생들의 소리 파동과 관련한 학습에 대한 이러한 어려움은 이론적인 강의식 수업만으로는 쉽게 극복하기 어려워 보이며 실험을 병행하는 것이 효과적일 것이라는 믿음을 더하게 된다. 사운드카드가 장착된 컴퓨터 활용 실험(Micro-computer based laboratory; MBL)으로 소리 파동을 시각화된 파형으로 저장하고, 분석함으로써 학교 실험실 상황의 어려움을 덜 수 있고, 동시에 학생들이 탐구의 핵심적인 과정과 결과분석에 집중하게 하는 장점을 취할 수 있다(김경대 등, 2009). 이러한 측면에서 컴퓨터 활용 실험을 통해서 공명관에서 전파하는 소리 파동의 진행 속력을 측정하고 분석하는 탐구과정을 경험하는 것은 학교 현장에서 충분히 활용될 수 있는 간단하지만 의미있는 탐구 활동이 될 수 있다.

본 연구에서는 실험이 용이하도록 사운드 카드가 장착된 컴퓨터를 사용하여 MBL 실험을 개발하였다. 그리고 소리의 파동 특성에 기초하여, 공명관에서 파동이 진행할 때, 정상파가 형성되는 것을 이용하여 소리의 파장과 진동수를 측정함으로써 공기 중에서 진행되는 소리의 속력을 측정하였다. 특히 고등학교 물리 또는 대학 일반물리학 수준의 실험실 또는 과학영재반 활동 등에서 개인용 컴퓨터와 소리편집 프로그램 등 비교적 간단한 장치를 활용하여 소리의 진행 속력을 측정하였으며 그 교육적 의의에 대해서 논의한다.

이론적 배경

본 연구에서는 공명관을 이용한 음속의 측정을 위해 파의 파동적 성질을 직접 이용하였다. 우선 이론적으로 진동수와 파장

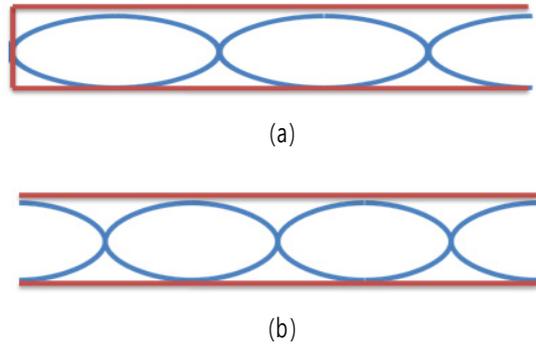


그림 1. (a) 한쪽 끝이 닫힌 관에서의 정상파, (b) 양끝이 열린 관에서의 정상파

을 통해 파동의 속도를 결정함을 보이고 이를 음파에 적용하며, 공명관에서의 배와 마디, 파장의 관계에 대하여 살펴본 뒤, 실제 관에서 정상파의 마디 위치를 측정하여 음속을 측정하였다.

공기 중에서 스피커의 진동판이 진동하면 소리 파동이 전파된다. 음파는 스피커의 진동판 쪽으로 가까워지고 멀어지고 하는 공기분자의 운동을 통해 공기를 매질로 하여 퍼져나간다. 일반적으로 소리는 모든 방향으로 전파되지만 이 실험에서 직선형 관을 이용하여 일차원의 파동 전파로 단순화 한다. 이렇게 생성된 음파는 관의 끝에서 반사되며 개관에서는 위상이 바뀌기도 한다. 이 때 관의 내부에서는 음원에서 나온 음파와 반사된 음파의 중첩에 의해 정상파가 형성된다. 음파의 정상파는 역학적 줄파동과 유사하게 최소 변위인 마디(node)와 최대 변위인 배(antinode)를 가지게 된다. 마디와 마디 혹은 배와 배 사이의 거리는 파장의 반에 해당한다. 이 때 압력과 변위는 반비례하며, 닫힌 관의 끝에서는 마디를, 열린 관의 끝에서는 배를 가진다(그림 1).

개관의 경우 공명 진동수와 관의 길이의 관계를 다음의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$l = \frac{n\lambda}{2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \tag{1}$$

그러나 실험적으로는 관의 끝에서 정확하게 배가 형성되지 않으므로 끝 값을 보정하면 위의 식 (1)은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$l + \Delta l = \frac{n\lambda}{2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \tag{2}$$

이 때 Δl 값은 관의 내직경에 비례하여 결정되는 관 끝 보정 인자이다.

한편 파동의 속도 v 는 파장 λ 과 진동수 f 와 다음과 같은 관계를 만족한다.

$$v = f\lambda \quad (3)$$

따라서 실험을 통해 λ 값을 측정하면, 식 (3)을 이용해 소리의 속도를 측정할 수 있다.

실험 방법

소리의 진행속력을 측정하기 위하여 공명관과 소리편집기 프로그램을 사용한 실험 장치는 그림 2와 같다.

그림 2에 보이는 배와 같이, 공명관은 발생한 음파가 진행하는 관으로, 길이가 87.73 cm이고 내직경이 2.78 cm 이며 아크릴 재질로 만들어졌다. 공명관을 지지하기 위해서 3 cm 높이의 플라스틱 받침대가 사용되었다. 공명관의 한 끝을 열어두고, 열린 관의 외부 가까이 지지대와 연결된 구멍으로 약 100 cm 길이의 막대를 끼워 막대가 관 안으로 들어갈 수 있도록 했다. 반대 쪽 끝에는 관에 꼭 맞도록 ~0.1 W의 출력과 32 Ω 의 저항 값을 가진 스피커를 부착하였다. 부착된 스피커에는 함수 발생기(그림 2(a))를 연결하여 음파 발생을 위한 전기 신호를 입력하였다. 함수 발생기(FG-8002)를 사용하였으며 설정된 진동수의 신호를 1 V의 전압으로 출력하였다. 함수 발생기의 진동수 생성 범위는 0 Hz~ 20000 Hz이며 본 연구에서는 300~900 Hz 진동수 대역을 주로 사용하였다. 스피커에서 발생한 음파가 공명관에서 형성하는 배와 마디를 측정하기 위해 막대의 끝에 핀

형태의 마이크를 부착하였다. 마이크에서 측정된 소리는 컴퓨터의 사운드카드로 입력할 수 있도록 연결하였다. 또한 공명관의 외부에 스피커의 위치를 기준으로 줄자를 부착하여 길이를 측정하였다.

우선 실험 장치가 준비된 곳의 실내 온도를 안정화시킨다. 위에서 실험 장치를 설치한 뒤 함수 발생기를 가동시켜 관 내부에 사인파가 발생되도록 한다. 이 때 함수 발생기의 신호 세기를 최대로 하여 소리의 크기를 가능한 한 크게 하여 외부 잡음의 영향을 최소화한다. 마이크를 관의 가장 안쪽에 위치시킨 뒤 파형 분석 프로그램(CoolEditPro/ Adobe Audition 2.0)을 사용하여 컴퓨터로 신호가 입력되고 있는지 실시간으로 확인한다. 마이크가 달린 막대를 관의 바깥쪽으로 당겨 서서히 마이크와 스피커의 거리를 늘리면서 소리의 진폭 크기를 관찰한다. 소리가 줄어들다가 다시 커지는 지점의 부근에서 진폭 크기가 상대적으로 최소가 되는 지점을 찾아 위치를 기록한다. 정확성을 높이기 위해 같은 조건에서 실험을 5회 이상 실시하여 평균값을 취하며, 진동수를 변경한 뒤 위의 과정을 다시 반복하였다.

소리의 진동수를 변경하기 위해서는 함수 발생기의 패널을 조작하여 가해주는 전압의 설정 진동수를 바꾸기 때문에, 실제 음원에서 발생하는 소리의 진동수와 설정 진동수에 차이가 있는 지 확인해야한다. 따라서 실제 사용된 음원을 녹음하고 고속 푸리에 변환(FFT; Fast Fourier Translation) 방법으로 임의의 다섯 구간을 추출하여 진동수별 세기 분포를 분석하여 발생한 소리 가운데에서 세기가 가장 큰 중심 진동수를 알아낸다.

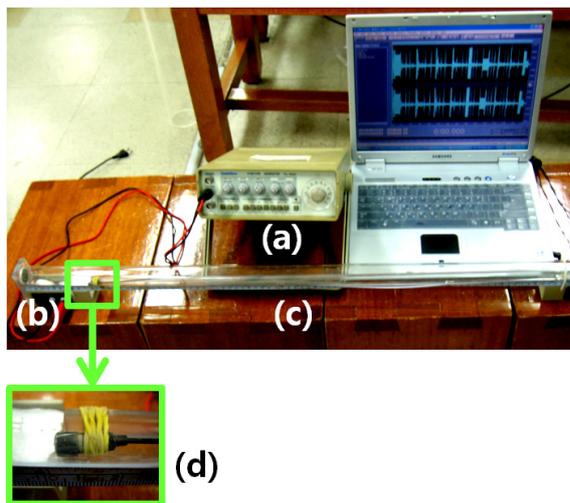


그림 2. 실험장치. (a) 파형발생장치, (b) 스피커, (c) 공명관, (d) 편형 마이크로폰

실험결과 및 논의

실험을 위해 안정화된 실험실의 온도는 29.0 $^{\circ}\text{C}$ 이었고, 대기 압은 0.996기압이었다. 본 실험에서는 식 (2)에서와 같은 정상파 조건을 만족시키는 특정 진동수를 사용하지 않았지만 음원으로 부터의 거리를 증가시키며 소리의 세기 변화를 관찰한 결과 정상파에서의 배와 마디처럼 주기적으로 감소하고 증가하는 세기의 분포를 관찰할 수 있었다(그림 3).

앞서 이론에서 언급했듯이, 소리의 진행속력은 진동수와 파장을 곱한 값이다. 각각의 진동수에서 얻어진 마디의 간격은 다음의 표 1과 같다. 또한 실제 음원의 진동수를 얻기 위해 고속 푸리에 변환방법을 이용하여 실제 음원에서 발생한 소리의 동수 분포를 얻었다. 변환의 정밀도를 나타내는 수치인 고속

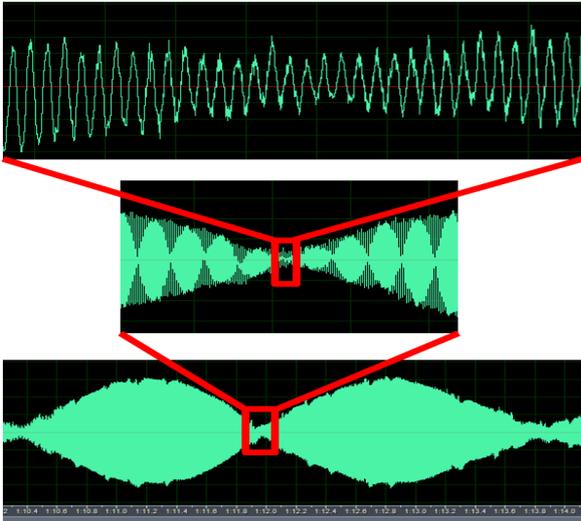


그림 3. 공명관 속 위치에 따른 정상파의 진폭. 확대한 부분은 관 속의 정상파의 파형.

푸리에 변환 크기(FFT size)는 65535였으며, 블랙만 헤리스(Blackmann-Harris)의 방법이 사용되었다. 진동수 분석 결과 중 본 실험과 관련된 0~1000 Hz의 범위만 나타내었다. 그리고 각 진동수 별로 소리의 진행 속력을 계산하기 위하여 공명관 내에서 정상파의 마디를 진동수 별로 각각 10회에 걸쳐 반복 측정하였다. 소리의 진동수가 438.07 Hz인 경우를 보면, 각 측정값에 대한 소리의 진행속력 평균값은 그림 4와 같이 얻을 수 있다. 이 경우에 공기 중을 진행하는 소리의 속력은 346.31 ± 6.38 m/s이다. 이 값은 기존의 문헌 값(표 2)에 의하면 음원이 400 Hz에서 343.82 m/s (온도 25℃, 습도 30%)와 비교할 때, ± 2.49 의 오차 범위로 0.72% 이내에서 잘 일치함을 알 수 있다.

위의 그림 5에서 보이는 바와 같이 각 진동수별 세기 분포에서 최고점을 찾아 표시하였으며, 주요 진동수의 정수배에 해당

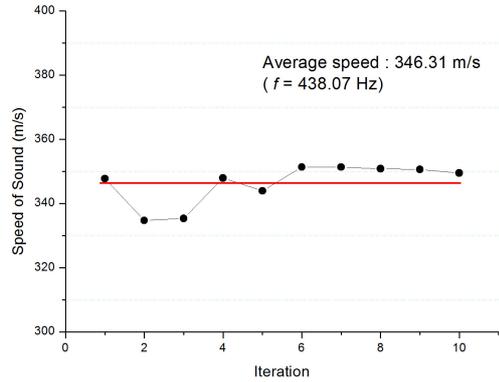


그림 4. 29.0 ℃에서 438.07 Hz의 음원을 대상으로 측정된 속력 분포. 붉은 색 실선은 10회 반복 측정에 의한 평균값

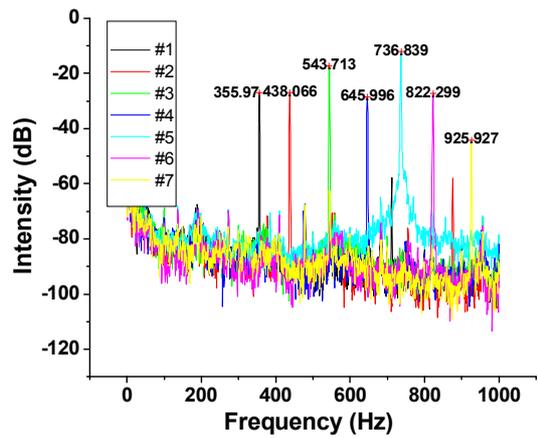


그림 5. 사용된 음원들의 진동수 분석 결과

하는 지점에 작은 세기의 피크가 하나 더 있는 것을 볼 수 있다. 측정된 마디간 거리 값을 속도를 구하는 데에 사용하기 위해 그림 5에서 보이는 것과 같이 통계적 방법을 사용하였다. 측정된 값들 중 최소값과 최대값을 제외하였으며, 이들의 평균은 오차범위 내에서 결정되었다.

표 1. 길이가 $L = 87.73 \pm 0.5$ cm인 공명관에 소리 파동의 진동수를 변화시킬 때 형성된 정상파의 각 마디의 위치를 측정된 실험 값

| Frequency (Hz) | Δs (cm) | | | | | | | | | | Avg. (cm) |
|----------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| 355,97 | 40,88 | 40,62 | 41,18 | 41,14 | 41,17 | 40,60 | 40,81 | 41,32 | 40,86 | 40,90 | $40,95 \pm 0,25$ |
| 438,07 | 39,69 | 38,20 | 38,27 | 39,71 | 39,25 | 40,10 | 40,10 | 40,04 | 40,02 | 39,89 | $39,53 \pm 1,04$ |
| 543,71 | 31,79 | 31,77 | 31,98 | 31,80 | 32,12 | 31,81 | 31,72 | 32,18 | 31,90 | 31,89 | $31,90 \pm 0,15$ |
| 646,00 | 26,94 | 31,32 | 26,94 | 26,75 | 26,45 | 26,85 | 27,88 | 26,98 | 27,55 | 26,94 | $27,46 \pm 1,42$ |
| 736,84 | 23,97 | 23,72 | 23,41 | 23,37 | 23,54 | 23,62 | 23,53 | 23,61 | 23,58 | 23,52 | $23,59 \pm 0,17$ |
| 822,97 | 19,32 | 21,02 | 21,13 | 20,98 | 21,12 | 20,72 | 20,05 | 21,02 | 20,03 | 21,75 | $20,71 \pm 0,71$ |
| 925,93 | 18,66 | 18,59 | 18,50 | 18,46 | 18,46 | 18,56 | 18,90 | 18,47 | 18,63 | 18,57 | $18,58 \pm 0,13$ |

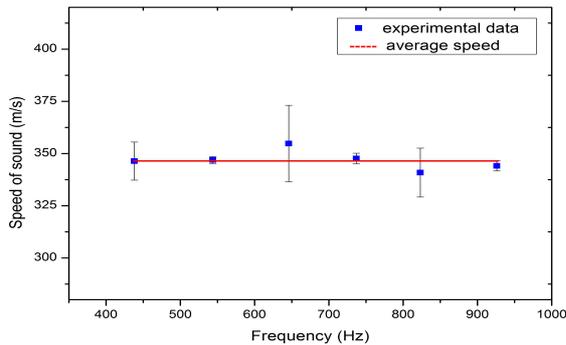


그림 6. 29.0 °C에서 400~1000 Hz 사이의 진동수 변화에 따른 소리파동의 진행속력

표 3. 진동수별 음속에 대한 문헌값(Lide, 2003). 온도 25.0°C, 습도 30%

| f (Hz) | v (m/s) |
|----------|-----------|
| 100 | 343.814 |
| 200 | 343.821 |
| 400 | 343.826 |
| 630 | 343.827 |
| 800 | 343.828 |

표 1에 나와 있는 실제 진동수 값과 마디 간 거리의 2배인 파장에 대한 측정을 기초로 하여, 진동수와 파장을 곱한 뒤, 100을 나누어 주면, [m/s]단위를 가지는 소리의 속력을 구할 수 있다. 이와 같은 방법으로 각각의 진동수에 따른 소리의 속도를 구한 결과는 그림 6에 나타나 있다.

400 ~ 1000 Hz 진동수의 소리들로부터 346.76 ± 4.6 m/s의 음파의 진행 속력을 구할 수 있었으며 기존의 연구결과인 343.82 m/s 과 비교할 때, +2.94의 값으로 0.85%의 범위에서 잘 일치함을 확인하였다. 표 2에 참고문헌(Lide, 2003)의 값이 제시되어 있으며 100~800 Hz 범위의 진동수에서 소리의 진행 속력은 거의 일정함을 확인하였다.

측정 오차의 주요 원인으로, 온도유지에 대한 부분과 음원 발생 부분에서 스피커 자체가 관에 붙어있었기 때문에 끝 부분이 배를 형성하여 정상파의 분포가 고르다고 단정할 수 없는 것 등을 들 수 있다. 또한 진동수 분석 결과에서도 볼 수 있었던 듯이, 음원에서 발생된 소리가 완전히 단파장이 아니기 때문에 정확하게 마디를 형성한 것이 아니라 비슷한 진동수 대역에서 중첩된 음파의 최소점을 찾는 것이기 때문에 비교적 짧은 파장으로 인해 전반적인 마디의 개수가 많아진 상황에서 형성된 최소점들은 마디 위치의 근사 값으로 사용하기에 오차가 발생하였다. 그 외에 실험에서 오차를 줄이기 위하여 실험실 온도를

일정하게 유지하는 것과 소리의 음원으로 공명관에 장착할 스피커의 진동수별 특성을 분명하게 확인하는 것 등이 본 실험의 오차를 줄이기 위하여 필요하다. 또한 그 외 측정 상의 여러 가지 오차를 줄이기 위한 노력이 필요하며 측정할 때 신호의 입력을 마이크로폰을 사용하므로 다른 소음으로부터 차단될 수 있는 상황에서 실험하는 것이 실험 오차를 줄이기 위해서 필요하다.

결 론

고등학교 또는 대학의 물리학 실험 상황에서 편리하게 활용할 수 있도록 개인용 컴퓨터를 활용한 소리의 속력 측정 실험(MBL)방법을 제안하였다. 특히 학교현장에서 쉽게 준비할 수 있는 공명관, 편형 마이크로폰, 소리편집기 프로그램, 파형발생기를 사용하였으며 상온의 공기 중에서 전파하는 소리파동의 진행속력을 측정하였다. 소리의 속력은 29.0°C에서 346.76 ± 4.6 m/s 으로 측정되었다. 컴퓨터를 활용하여 측정된 소리의 진행속력은 기존의 값과 비교할 때, 1% 미만의 범위에서 잘 일치함을 확인하였으며 공명관을 사용한 MBL 실험이 공기 중을 진행하는 소리의 속력을 측정하는 교육활동에 충분히 정확한 수준에서 의미있는 실험활동으로 활용될 수 있음을 확인하였다. 따라서 이 실험은 과학영재학생 또는 물리학을 이수하는 고등학생과 대학생의 소리 파동의 전파, 파동의 중첩, 정상파 개념을 이해하기 위한 탐구활동에 활용될 수 있을 것이다.

Abstract

We have designed a simple MBL (micro-computer laboratory) experiment to measure the speed of sound in air by using the resonance tube for undergraduate laboratory. The speed of sound was measured in air, 346.76 ± 4.6 m/s was good agreement with theory (0.85%) under the condition of temperature, 29.0°C. There was no frequency dependence between the frequencies, 400~1000 kHz in air. This experimental activity would be a helpful learning materials for in-depth understanding concepts of superposition and propagation of sound waves for scientifically gifted students and undergraduate students.

Key Words : MBL, speed of sound, sound wave, resonance tube

참고문헌

- 강미선, 안효정, 염혜지, 김경대 (2008) 리사주 도형을 이용하여 공기 중에서 진행되는 소리의 속력 측정하기. *현장과학교육* 2: 46-51.
- 김경대, 김지나, 김광수, 한병래 (2007) 예비과학교사의 파동관련 오개념 분석. *새물리* 55: 397-408.
- 김경대, 김지나, 김중복 (2009) 소리파동 학습을 위한 컴퓨터를 이용한 실험과 전통적인 실험의 비교. *현장과학교육* 3: 5-12.
- 김중복, 김은택, 남기현, 권순신 (2008) 마이크 2개 또는 스피커 2개를 이용한 소리 속도 측정. *현장과학교육* 2: 105-110.
- 이영직, 권재술 (1993) 오개념 견고성 지수. *한국과학교육학회지* 30: 310-316.
- 오원근, 김재우 (2006) 물리 전공이 아닌 중등학교 과학교사들의 빛과 파동 개념. *새물리* 52: 512-520.
- Cool Edit Pro Syntrillium software, Adobe Audition 2.0; <http://210.217.241.15/sori/manual/audition20/audition20.htm>
- Lide DR (2003) CRC Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press, pp 6-14.
- Fazio C, Guastella I, Sperandeo-Mineo RM and Tarantino G (2006) Measuring longitudinal wave speed in solids: two methods and a half. *Eur. J. Phys.* 27: 687-701.
- Mak S-y, Ng Y-k and Wu K-w (2000) Measurement of the speed of sound in a metal rod. *Phys. Educ.* 35: 439-445.
- Muirhead FR (1979) Resonance tube for measurement of the speed of sound. *Phys. Teach.* 17: 131.
- Ng Y-k and Mak S-y (2001) Measurement of the speed of sound in water. *Phys. Educ.* 36: 65-70.
- Richard G (1996) Determining the speed of sound using the Doppler effect. *Phys. Teach.* 34: 126-127.
- Velasco S, Roman FL, Gonzalez A and White JA (2004) A computer-assisted experiment for the measurement of the temperature dependence of the speed of sound in air. *Am. J. Phys.* 72: 276-279.
- Wittmann MC, Steinberg RN, and Redish EF (2003) Understanding and affecting student reasoning about sound waves. *Int. J. Sci. Educ.* 25: 991-1013.
- Worland RS and Wilson DD (1999) The speed of sound in air as a function of temperature. *Phys. Teach.* 37: 53-57.