

## 생체 청각기구를 모사한 폴리머 박막의 주파수 분리 특성 평가

### Characterization of Frequency Separation in Polymer Membranes Mimicking a Human Auditory System

송원준\*, 배성재\*, 김완두\*<sup>†</sup>

Won Joon Song\*, Sung Jae Bae\* and Wan Doo Kim\*<sup>†</sup>

**초 록** 청각기관인 달팽이관에 존재하는 기저막의 중요한 기능은 등자뼈로부터 전달되는 진동에너지를 주파수별로 분리하는 것이다. 본 연구에서는 인간 기저막의 형상을 모사하여 설계한 매크로 스케일의 폴리머 박막을 사용하여 주파수 분리 특성을 연구하였다. 각각의 폴리머 박막상의 위치에 따른 변위 분포는 LDV (laser Doppler vibrometer) 스캐닝 기법을 이용하여 측정하였고, 측정된 결과는 후처리 과정을 거쳐 주파수별로 분리하였다. 인가된 주파수에 따른 최대 변위 발생 위치를 추출하여 각 박막에 대한 주파수-최대 변위 발생 위치 관계를 도식화하였다. 아울러 박막 두께 및 물성치가 주파수-최대 변위 발생 위치 관계에 미치는 영향에 대해서도 논하였다.

**주요용어:** 달팽이관, 기저막, 폴리머 박막, LDV 스캐닝, 주파수-최대 변위 발생 위치 관계도

**Abstract** The basilar membrane, an important functional part of the cochlea, is responsible for spectral separation of vibration signals transmitted from the stapes. In current study, scaled-up polymer membranes designed by mimicking the human basilar membrane were used for investigation of the frequency-separation characteristic. Displacement field formed on each polymer membrane was acquired by Laser Doppler scanning vibrometer and post-processed frequency-wise. The locations of the maximum displacement along the centerline were identified and collected for individual frequency range to produce the frequency-position map of individual polymer membrane. The influences of the membrane thickness and material properties on the variation of the frequency separability were discussed.

**Keywords:** Cochlea, Basilar Membrane, Polymer Membrane, Laser Doppler Scanning Vibrometer, Frequency-Position Map

#### 1. 서 론

인간 청각기관에서 달팽이관의 역할은 중이를 통해 입사되는 진동신호를 전기화학 신호로 변환하여 청신경을 자극하고 뇌로 하여금 음향신호를 인지하도록 하는 것이다. Fig. 1과 같이 달팽이관 내부에 위치한 기저막(basilar membrane)은 등자

뼈(stapes)로부터 전달된 진동 신호를 주파수 대역에 따라 분리하는 기능을 담당하는 해부학적 부분이다. 기저막에 의해 분리된 상하부 도파관(scala vestibule, scala tympani)의 내부 매질을 통해 전파되는 압축파는 기저막을 따라 전파하는 진행파(traveling wave)의 형태로 변환된다. 단일 주파수의 정현파(pure tone)를 인가할 때 기저막

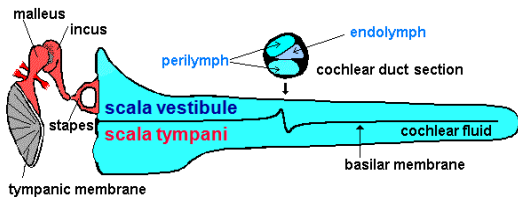


Fig. 1 Basilar membrane in a stretched cochlea (modified from <http://147.162.36.50/cochlea/cochleapages/overview/history.htm>)

에서 발생하는 진행파는 기저막 각 위치에서 파장이 변화하면서 기저부(base)로부터 첨단부(apex) 방향으로 전파되며 특성주파수(characteristic frequency) 위치에 다다르면 최대 변위를 일으킨 후 급격히 소멸하게 된다. 이러한 기저막 상에서의 진행파의 전파 특성은 달팽이관으로 하여금 특정 주파수 가진에 대해 특정위치에서 최대 변위를 야기함으로써 주파수 분리 기능을 수행하게 한다 [1-3].

하지만, 기저막의 주파수 분리 특성을 직접적으로 관찰하기 위해서는 불가피하게 달팽이관을 손상시켜야 하고[4-6] 이로 인해 달팽이관 내부의 물리적 성질이 변화할 수 있으며 결과적으로 기저막의 거동에도 영향을 미칠 가능성이 높아지게 된다. 따라서 기저막의 물리적 거동을 모사할 수 있는 대체 모델을 통한 간접적인 관찰이 요구된다. 본 연구에서는 기저막의 주파수 분리 특성을 실험적으로 구현하기 위한 방법으로 기저막을 모사한 매크로 스케일의 폴리머 박막을 음향장 내에 위치시키고 LDV 스캐닝 기법을 이용하여 박막의 거동을 관찰하고 그 특성을 분석하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 폴리머 박막 시편의 설계

주파수 분해 특성에 대한 분석을 목적으로 두께 및 재질 인자의 영향을 고려할 수 있도록 Table 1과 같이 polyethylene terephthalate(PET), polyurethane(PU), polypropylene(PP), polyethylene(PE), polyimide(PI) 재질로 총 7종의 폴리머 박막 시편을 마련하였다. PET 박막은 50, 75, 100  $\mu\text{m}$ 의 두께를 가지는 시편을 준비하였고 PU는 100  $\mu\text{m}$ , PE와 PP는 30  $\mu\text{m}$  두께의 박막 시편을 각각 제작

하였다. 주파수 분리 특성에 대한 박막 두께의 영향을 분석하기 위해 준비된 시편 중 각각 50, 75, 100  $\mu\text{m}$ 의 두께를 가지는 PET 박막을 사용하여 동일한 조건 하에 실험을 진행하였다. 재질의 영향을 고려하기 위해서 시편 중 동일한 두께를 가진 이중 재질의 박막 (100  $\mu\text{m}$  두께의 PE 및 PU 박막, 30  $\mu\text{m}$  두께의 PE와 PP 박막)을 사용하여 실험하였다.

Fig. 2에 보이는 바와 같이 매크로 스케일 폴리머 박막의 기하학적 형상은, 인간 기저막과 마찬가지로, 그 폭이 기저부로부터 길이 방향(x-방향)으로  $y=ae^{bx}$ 의 급수 함수 형태로 증가한다고 가정하였다. 기저부 ( $x=0$ )에서의 폭은 6.75 mm, 첨단부 ( $x=L$ )에서의 폭은 18.2 mm, 기저막의 길이는  $L=116$  mm로 각각 설정하여 박막의 형상을 설계하였다. 아크릴 재질의 패널에 상기 설계 형상의 홈을 가공한 후 폴리머 박막을 아크릴 패널에 양면테이프로 고정하여 경계 조건을 구성하였다.

Table 1 Polymer membrane samples used in current experiment (PET: polyethylene terephthalate, PU: polyurethane, PP: polypropylene, PE: polyethylene, PI: polyimide)

Sample index	Material	Thickness ( $\mu\text{m}$ )	Elastic modulus (GPa)
macro_01L	PET	100	7.0
macro_02L	PET	75	7.0
macro_03L	PET	50	7.0
macro_04L	PU	100	0.006
macro_05L	PE	30	0.15
macro_06L	PP	30	1.3
macro_07L	PI	10	2.5

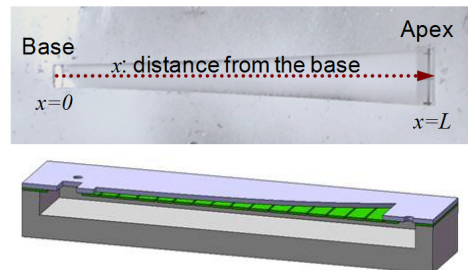


Fig. 2 Geometric configuration of a scaled-up polymer membrane mimicking the human basilar membrane (upper) and half-section drawing of a mechanical cochlea implementing the polymer membrane (lower)

## 2.2. 실험 장치의 구성 및 실험 방법

본 연구에서 사용한 실험 장치의 구성은 Fig. 3과 같다. Control unit의 junction box (Polytec GmbH, PSV-400)를 통해 최대 10 kHz 까지의 chirp signal을 증폭기(amplifier: Onkyo, A-9377)에 인가한다. 증폭기에서는 LDV 신호가 45-50 dB(A) 정도의 주변 환경 소음에 의해 영향을 받지 않도록 음압을 조절한 후 박막 시편 하단에 위치한 스피커를 통해 음향 신호를 박막에 수직 방향으로 인가하여 가진시킨다. LDV 스캐너(Polytec GmbH, PSV-400)를 사용하여 지정된 영역에서 박막의 진동 속도를 측정한다. 시간영역에서 측정된 속도 데이터를 FFT를 이용하여 주파수 영역의 변위, 속도 및 가속도로 변환한다.

박막 시편과 동일한 높이에 위치한 마이크로폰은 박막을 가진하는데 사용된 음향 신호를 포집하여 controller에 송신한다. 상기의 진동 및 음압 신호를 사용하여 PC에 내장된 전용 소프트웨어 (Polytec GmbH, PSV 8.8)로 다양한 형태의 전달 함수를 추출한다. Sound level meter를 박막에 근접한 위치에 설치하여 overall sound pressure level을 실시간으로 측정하며, 본 실험의 경우에는 가진 음압을 조절하여 83-89 dB(A) 수준을 유지하도록 하였다.

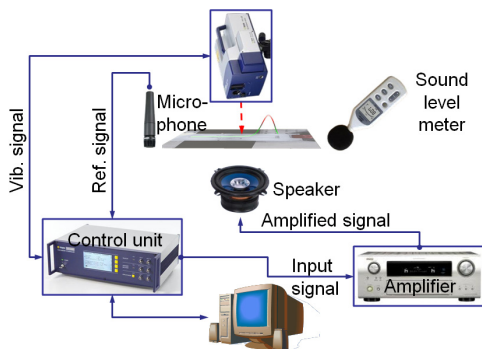


Fig. 3 Layout of the experimental setup for measuring the vibration of polymer membranes

## 3. 실험 결과 및 고찰

기저막을 모사한 매크로 스케일의 폴리머 박막에는 조화 진동(harmonic vibration)에 가까운 실험 조건 및 실제 기저막과 상이한 경계조건으로 인해 진행파와 정상파(standing wave)가 공존한다.

Fig. 4는 두께 100  $\mu\text{m}$ 인 PET 박막을 각각 0.8, 1, 2, 3 kHz의 주파수로 가진했을 때 박막의 중심선을 따라 발생하는 길이방향의 단위 음압 당 변위 패턴을 보여준다. 가진 음향신호의 주파수가 증가할수록 최대 변위가 발생하는 위치가 첨단부로부터 기저부로 이동함을 알 수 있는데, 이러한 최대 변위 발생 위치의 이동 현상은 인간 기저막에서 주파수 분리 기능을 구현하는 메커니즘과 유사하다.

실제 기저막에서 발생하는 변위 패턴과의 다른 점은 1, 2 kHz 가진에 대한 경우에서처럼 특성 주파수 위치에 다르기 전까지 변위가 지속적으로 증가하는 경향을 보이지 못하고 특정 위치에서 감소하는 현상을 보인다는 것이다. 추정되는 원인으로는 경계 조건의 불균일에 기인한 강성 및 유효 질량의 공간적인 변화로 일어나는 진폭의 감소를 들 수 있다. 또 하나의 다른 점은 특성 주파수 위치를 지난 진행파가 소멸되지 않고 apex까지 진행하거나 정상파와 유사한 형태를 보인다는 것이다. 진행파가 첨단부까지 소멸되지 않고 도달하는 것은 본 실험에서 사용된 매질(공기)의 감쇠(damping) 특성이 부족함에 부분적으로 기인한다고 볼 수 있으며 이로 인해 첨단부에서 폐경계조건에 의한 반사파가 생성되고 입사파와 간섭하여 정상파가 발생할 확률이 높아진다. 이를 방지하기 위해서는 폴리머 박막 하부에 도파관을 부착하고 점도가 높은 매질을 채워 감쇠 효과를 증대하는 방안을 들 수 있다.

정상파 발생의 또 다른 원인으로는 조화 진동과 유사한 실험 조건을 들 수 있다. 스피커에서 방사하는 음장이 동일 위상으로 폴리머 박막을 가진하게 되면 시편은 동일 위상으로 진동하게 되어 정상파를 형성하게 된다. 하지만 실제 실험에서는 박막 상의 각 위치에 따라 미소한 위상차가 발생하게 되고 박막 고유의 감쇠특성으로 인해 발생하는 위상변화가 더해져 진행파가 발생하게 된다. 결과적으로 폴리머 박막의 거동은 진행파와 정상파의 결합된 형태로 나타나게 된다.

박막의 중심선을 따라 그려지는 길이방향의 단위 음압 당 변위 패턴으로부터 추출한 최대 변위 위치가 Fig. 5에 나타나 있다. 각각의 점은 특정 가진 주파수에 대응하는 폴리머 박막 상의 최대 변위 발생 위치를 의미한다. 공통적으로 0.3 kHz 이하의 저주파 영역에서는 최대 변위 발

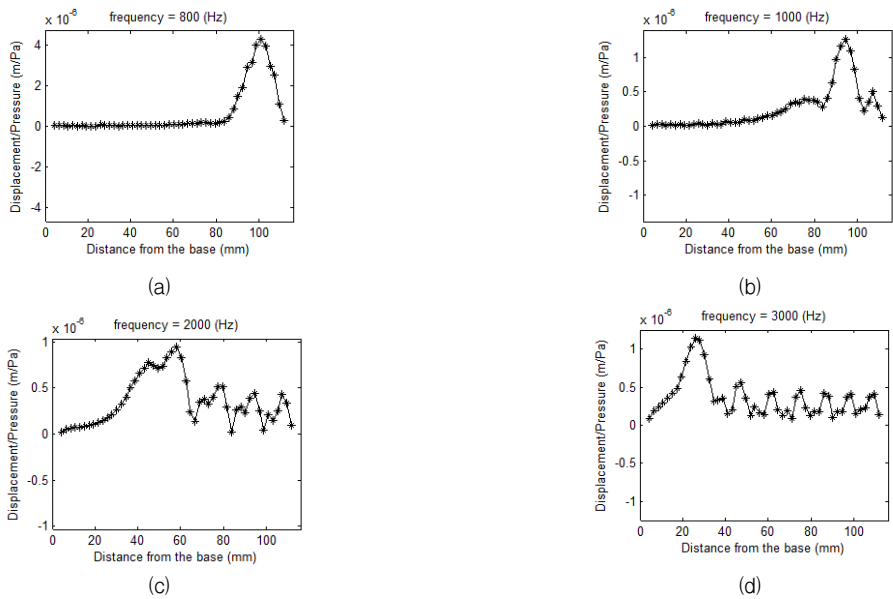


Fig. 4 Displacement envelop developed along the centerline of a polymer membrane (material: PET, thickness:  $100\mu\text{m}$ ) stimulated by unit sound pressure of: (a) 800 Hz, (b) 1000 Hz, (c) 2000 Hz and (d) 3000 Hz

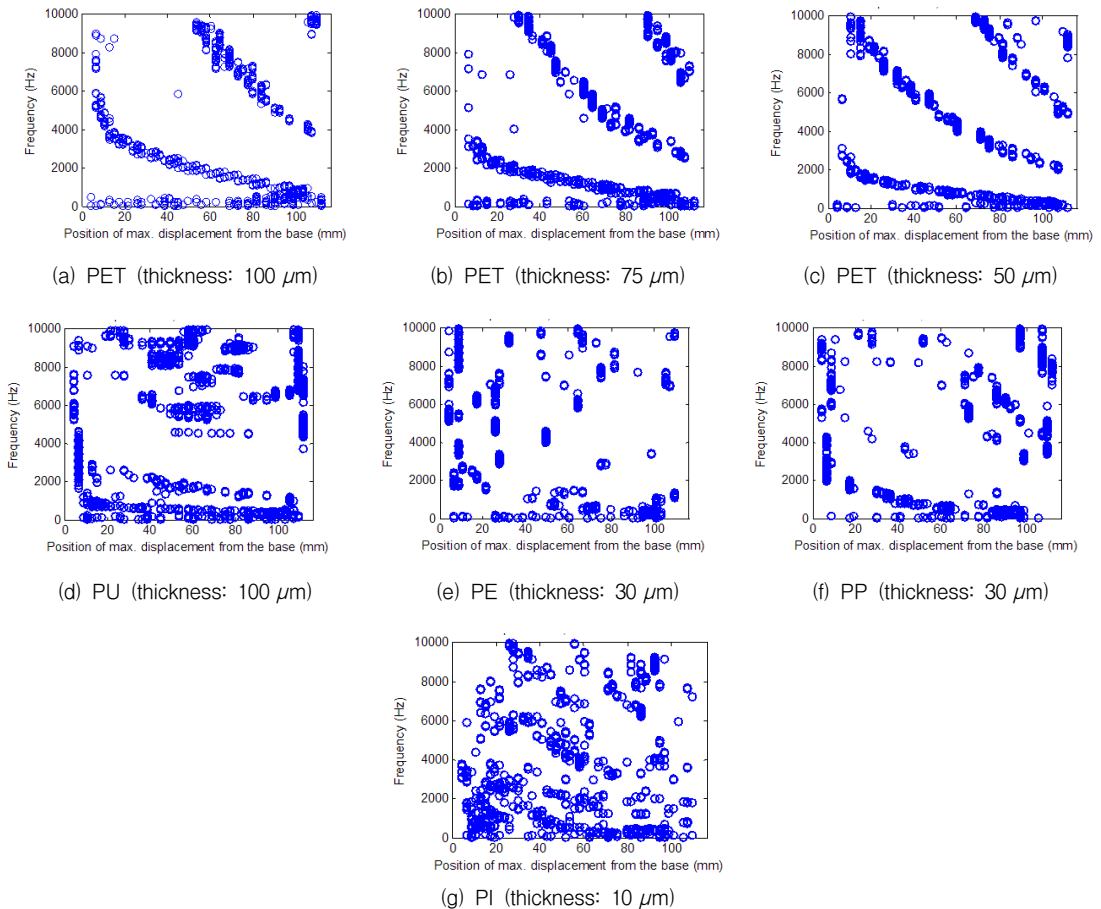


Fig. 5 Frequency-position maps of the polymer membranes extracted along the centerline

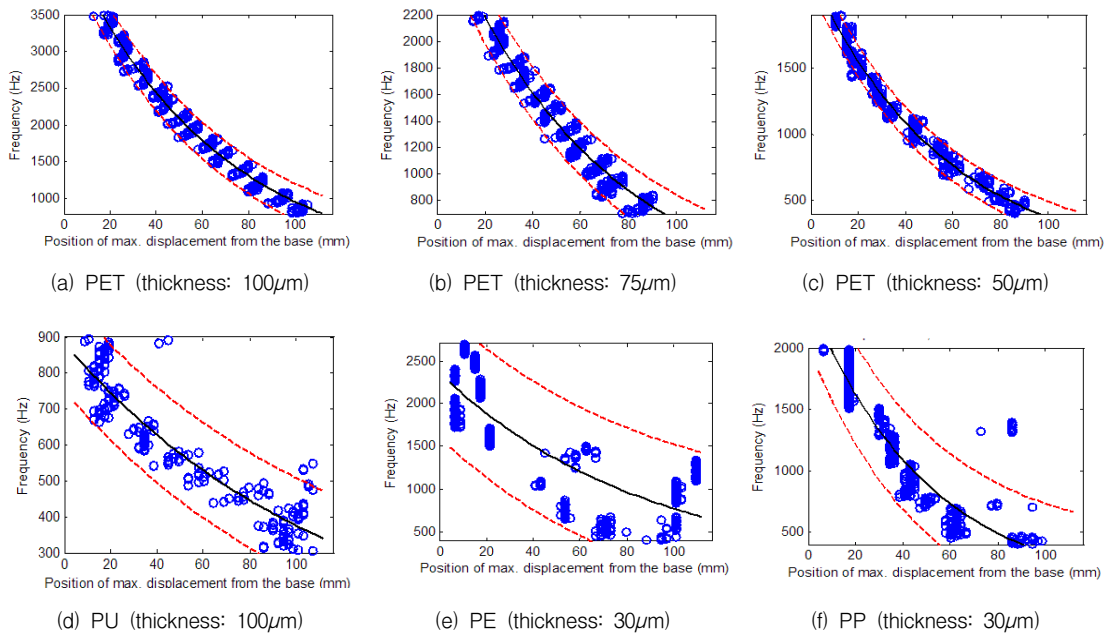


Fig. 6 Frequency separation capabilities of the polymer membranes (black solid curve: regression curve, red dotted curve: 95 % confidence interval)

생 위치에 대한 경향성이 뚜렷하게 나타나지 않고 있으며, 이는 본 실험에 사용된 박막의 특성 상 저주파 대역에 대한 분해 능력을 기대할 수 없음을 의미한다. 4 kHz 이상의 주파수 대역에서 PET 박막의 경우 2-3개의 상이한 위치에서 최대 변위가 추출되며 일정한 경향성을 보이나 이는 주파수 분해능과는 무관한 것으로 판단된다. 다른 재료의 박막에서는 경향성이 전혀 나타나지 않는 것으로 미루어 볼 때 주파수 분해능이 거의 없는 것으로 판단된다. 0.3-4 kHz 대역에서 PI 재료의 박막을 제외한 나머지 매크로 스케일 폴리머 박막은 부분적으로 주파수 분리 가능 대역을 형성한다.

각 폴리머 박막에 대한 주파수 분해 가능 대역이 회귀 곡선 및 95 % 신뢰구간과 함께 Fig. 6에 나타나 있다. 전체적으로 비교해 볼 때, PET 재료의 박막들이 두께에 무관하게 다른 재료의 박막에 비해 주파수 분해능이 좋으며 두께가 증가할수록 주파수 분리 대역이 확장되나 분리 가능한 최저 주파수는 증가함을 알 수 있다. 100  $\mu\text{m}$  두께의 PET와 PU 박막을 비교해 보면 PET 박막의 주파수 분리 특성이 월등함을 알 수 있는데, 이는 효과적인 주파수 분리를 위해서는 모델의 크기에 맞는 적정 수준의 박막 강성이 필요함을

반증한다. PE 재료의 박막이 PP 재료의 박막보다 넓은 주파수 분리 대역을 가지나 산포의 형태와 추정 신뢰 구간으로 보아 질적인 측면의 주파수 분해능은 PP재료의 박막이 우수하다고 할 수 있다. 본 실험에 사용한 7개의 시편을 비교해 볼 때 두께 100  $\mu\text{m}$ 인 PET재료의 박막의 주파수 분리 특성이 가장 우수할 것으로 추정된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 다양한 재료와 두께의 폴리머 박막을 기저막을 모사하여 매크로 스케일로 설계하고 음향 가진에 따른 거동을 LDV scanning 기법을 이용하여 측정하였다. 이를 바탕으로 가진 주파수별 최대 변위가 발생하는 박막 상의 위치를 찾아내어 주파수-최대 변위 발생 위치 관계를 도식화하였다. 각 폴리머 박막의 주파수 분리 가능 영역을 추출하여 두께 및 재료에 따른 영향을 비교 분석하였다. 본 연구에서 도출된 결과와 더불어 주파수 분해능에 대한 박막의 형상 및 잔류 응력의 영향 등을 종합적으로 비교 분석한다면 향후 진행될 마이크로 스케일의 MEMS 인공기저막 설계를 위한 예비 자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 후 기

본 논문은 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 미래유망 융합기술 파이오니어사업 (No. 2011-0001661, 2011-0001664)의 지원을 받아 수행된 연구임.

## 참고문헌

- [1] E. d. Boer, "Auditory physics. physical principles in hearing theory. I," *Physics Reports*, Vol. 62, pp. 87-174 (1980)
- [2] G. Zweig, R. Lipes and J. R. Pierce, "The cochlear compromise," *J. Acoust. Soc. Am.*,

Vol. 59, pp. 975-982 (1976)

- [3] J. J. Zwislocki, "The Cochlea Simplified by Death," *Auditory Sound Transmission: An Autobiographical Perspective*, Lawrence Erlbaum Associates, pp. 89-174 (2002)
- [4] G. V. Bekesy, "Experiments in Hearing," McGraw-Hill, New York (1960)
- [5] T. Ren, "Longitudinal pattern of basilar membrane vibration in the sensitive cochlea," *PNAS*, Vol. 99, pp. 17101-17106 (2002)
- [6] N. Robles and M. A. Ruggero, "Mechanics of the mammalian cochlea," *Physiological Reviews*, Vol. 81, pp. 1305-1352 (2001)