

## 고막을 모방한 라텍스 샘플의 미세진동 측정을 위한 마이크로 바이브로 토모그래피 시스템 개발

### Micro Vibration Measurement in a Latex Sample Mimicking the Tympanic Membrane Using Micro Vibro Tomography

권재환 · 김필운\* · 전만식 · 김지현

Jae-hwan Kwon · Pilun Kim\* · Mansik Jeon · Jeehyun Kim

#### 요약

본 논문에서는 비 침습적, 비 파괴적으로 샘플의 단층구조와 단층의 미세진동을 실시간으로 동시에 영상화하는 마이크로 바이브로 토모그래피(micro vibro tomography: MVT) 시스템 개발 및 미세진동 측정 방법을 제안한다. 제안한 방법은 광 간섭 단층촬영기술(optical coherence tomography: OCT)을 기반으로 하여, 샘플의 위상변이를 이용해 마이크로 단위의 움직임을 측정하는 알고리즘을 적용한 방법이다. 본 실험에서는 고막을 모방한 라텍스 샘플에 2~5 kHz 주파수의 음파를 인가시키고, 음파에 의한 샘플의 미세진동을 제안한 MVT 시스템을 이용하여 측정하였다. 그 결과, 고막 모방 샘플의 단층구조와 미세진동을 동시에 영상화할 수 있었고, 표면부의 미세진동을 MVT 표면 진동 이미지로 프로젝팅하여 고막 모방 샘플의 전체적인 진동 형태를 관찰할 수 있었다.

#### Abstract

In this paper, we propose a micro vibro tomography(MVT) method, that can be used to visualize two-dimensional cross-sectional images and micro-vibration tomographic images in real time in a non-contact and non-destructive manner. The proposed method is based on the optical coherence tomography(OCT) technique, with an additionally customized image processing algorithm. The proposed method can detect the micro-motions or vibrations in sample structures by measuring the phase shift variations in the sample structures. In this study, we show the potential capabilities of the proposed MVT system for measuring the micro-vibrations generated when sound waves in a frequency range of 2~5 kHz are applied to an 80- $\mu$ m thick latex phantom, which mimics the changes in physical structure of the human tympanic membrane while hearing. Additionally, three-dimensional volumetric images of the MVT method were recorded to observe the surface morphological changes in the surface of the phantom sample which mimics the human tympanic membrane while hearing.

Key words: Micro Vibration Measurement, Optical Coherence Tomography, Optical Vibrometry, Tympanic Membrane Vibration

「이 연구는 교육부가 지원하는 BK21 Plus 프로젝트 (21A20131600011)와 2018년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단 바이오의료기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (2017M3A9E2065282).」

경북대학교 IT대학 전자공학부(School of Electronics Engineering, College of IT Engineering, Kyungpook National University)

\*경북대학교 의공학연구소(Institute of Biomedical Engineering, Kyungpook National University)

· Manuscript received September 12, 2018 ; Revised December 11, 2018 ; Accepted December 20, 2018. (ID No. 20180912-02S)

· Corresponding Author: Mansik Jeon (e-mail: msjeon@knu.ac.kr)

## I. 서론

현재 이비인후과의 청력 검사는 50년 이상 기술이 정제되어 있는 순음청력검사 방법을 통해 청력손실의 유무 및 정도, 난청 등을 진단한다. 이 기술은 자극에 의한 피검사자의 주관적 반응을 기반으로 하는 기술로 유소아의 경우에는 적절하지 않다. 또한 과도한 이어폰 사용 등으로 인해 많은 청소년들이 소음성 난청을 앓고 있지만 정확한 진단이 불가능한 검사법으로 적절한 치료시기를 놓치고 있는 경우가 대부분이다.

광간섭 단층촬영기술(optical coherence tomography: OCT)은 근적외선 대역의 광을 이용하여 비 침습적, 비 파괴적으로 다양한 깊이에서 마이크로 단위의 고해상도 단층 이미지를 실시간으로 영상화하는 기술이다<sup>[1]</sup>. OCT의 비침습, 비파괴, 고해상도, 실시간 영상의 장점을 이용하여 중이, 고막 등 귀의 다양한 부위들에 대한 OCT 연구가 활발히 진행되고 있으나<sup>[2]~[6]</sup>, 단층촬영만으로는 고막의 성능, 탄력 또는 자극에 대한 반응을 측정하기에는 한계가 있다.

본 논문에서는 도플러 현상에 의한 광 간섭신호의 위상변이를 이용하여 진동을 측정하는 알고리즘을 OCT 기술에 적용하여 다양한 깊이 방향에서의 단층구조와 단층의 미세진동을 동시에 영상화하는 마이크로 바이브로 토모그래피(micro vibro tomography: MVT) 시스템 개발 및 미세진동 측정 방법을 제안한다. 개발한 MVT 시스템을 이용하여 피검사체의 미세진동을 영상화함으로써 피검사자의 주관적 반응에 의존하는 현재의 청력검사가 지닌 한계를 극복하는 새로운 청력검사의 방법을 제안한다.

## II. 재료와 방법

### 2-1 검사 시료 및 실험 계획

그림 1은 실험을 위해 준비된 샘플의 모식도이다. 사용된 고막 모방 샘플은 80  $\mu\text{m}$  두께의 라텍스를 사용하였고, 양 옆의 stage에 고정하였다. 고막 모방 샘플에 스피커를 이용하여 2~5 kHz 대역의 주파수 음파를 인가하였고, 각 주파수의 인가는 소프트웨어를 통해 제어하였다. 외부 소리 및 진동을 차단하기 위해 샘플, 스캐너, 스피커는 방음 챔버 내에 설치하였다.

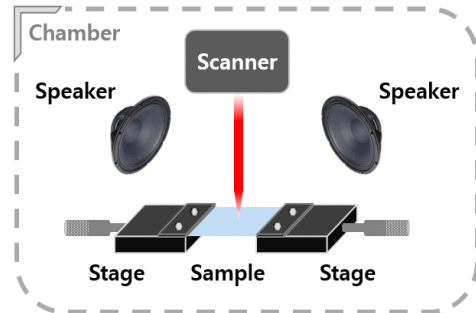
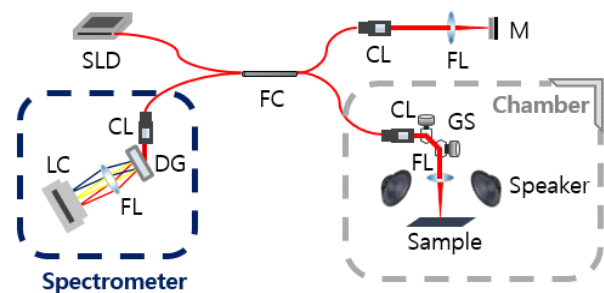


그림 1. 고막 모방 샘플 셋업 모식도  
Fig. 1. Tympanic membrane mimic sample setup schematic.

### 2-2 OCT 기반의 MVT 시스템

그림 2는 개발된 시스템의 하드웨어 모식도이다. 사용된 광대역 광원(EXS210022-02, Exalos, Swiss)의 중심파장은 840 nm이고, 반치폭(full width at half maximum)은 50 nm이다. 광원에서 출력된 광은 fiber coupler(TW850R5A2, Thorlabs, USA)로 연결되고, 각각 기준 단과 샘플 단으로 50:50의 비율로 광이 분리된다. 샘플 단에서 Galvanometer scanner (GVS002, Thorlabs, USA)를 이용해 x, y 축으로 샘플 단의 광을 이동시켜 3차원 스캐닝을 구현한다. 분리된 광은 샘플 단과 기준 단에서 각각 반사되어 fiber coupler에서 간섭을 일으킨다. 광 간섭 신호는 diffraction grating(spatial frequency 1800 lpmm, Wasatch Photonics, USA)에 의해 파장별로 회



SLD: 광대역 광원, FC: 광섬유 커플러, CL: 시준기, DG: 회절 격자, FL: 초점 렌즈, M: 거울, LC: 라인 스캔 카메라, GS: 2축 갈바노미터 스캐너

SLD: super luminescent diode, FC: fiber coupler, CL: collimator, DG: diffraction grating, FL: focal lens, M: mirror, LC: line scan camera, GS: 2 axis galvanometer scanners

그림 2. MVT 하드웨어 모식도  
Fig. 2. MVT hardware schematic.

절되어 Line scan camera(spL4096-140 km, Basler, Germany)로 수신된다. Line scan camera에서 수신된 광 간섭 신호는 디지털 신호로 변환되어 PC로 입력된다.

### 2.3 미세 진동 측정을 위한 위상변이 처리

디지털 신호로 변환된 광 간섭 신호는 푸리에 변환을 통해 간섭 신호의 진폭과 위상 정보를 얻는다. 측정된 진폭은 로그 스케일링을 통해 단층 이미지를 형성하고, 진폭과 위상은 Kasai autocorrelation 수식을 이용해 도플러 위상 변이를 측정한다<sup>7)</sup>.

$$f_D = \frac{f_a}{2\pi} \arctan \left[ \frac{\frac{1}{M(N-1)} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N-1} (I_{m,n+1} Q_{m,n} - Q_{m,n+1} I_{m,n})}{\frac{1}{M(N-1)} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N-1} (Q_{m,n+1} Q_{m,n} + I_{m,n+1} I_{m,n})} \right] \quad (1)$$

식 (1)의 Arctangent 함수로 얻어진  $f_D$ , 도플러 위상 변이는 인접한 z축 간의 위상 변이를  $-\pi$ 에서  $\pi$ 의 값으로 계산하여 4개 사분면으로 표현된다<sup>8)</sup>. 측정된  $f_D$ 의 부호는 진동의 방향성을 나타내고,  $|f_D|$  값은 진동의 크기를 나타낸다. 측정된 미세진동 수치의 가시화를 위해 (+) 방향의 진동은 진동의 크기가 클수록 검은색에서부터 푸른색, 자주색으로, (-) 방향의 진동은 검은색에서부터 붉은색, 자주색으로 맵핑하였다.

그림 3은 미세 진동 측정 처리의 소프트웨어 구성도를 나타낸다. 신호 획득부, 신호 처리부, 영상화부로 3가지 프로세스로 구성된다. 각 프로세스는 멀티 쓰레딩 버퍼를 이용해 신호 획득과 처리, 영상화가 동시에 진행된다. 가장 많은 알고리즘을 수행하는 신호 처리부는 NVIDIA사의 CUDA GPU 프로그래밍 툴을 이용하여 고속 병렬처리 알고리즘으로 개발되었다.

### III. 실험 결과

그림 4(a)와 그림 4(b)는 음파를 인가하지 않은 상태의 고막 모방 샘플의 횡단면 MVT 단층 이미지와 MVT 진동 이미지이다. 그림 4(b)의 MVT 진동 이미지는 음파가 인

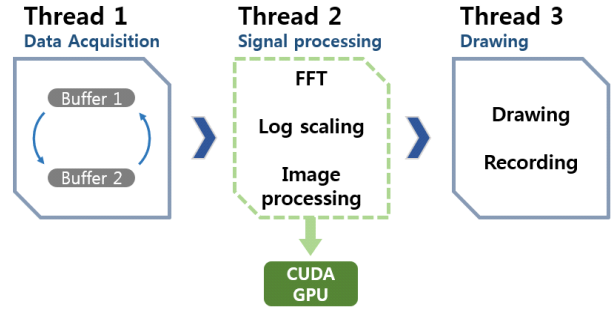


그림 3. MVT 소프트웨어 알고리즘 구성도  
Fig. 3. MVT software algorithm diagram.

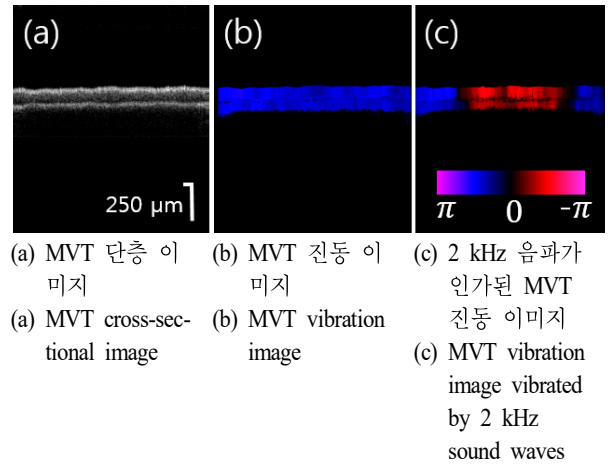


그림 4. 고막 모방 샘플의 MVT 이미지  
Fig. 4. MVT images of tympanic membrane mimic sample.

가되지 않았으나 푸른색 방향으로 미세한 진동이 측정되었다. 이는 3차원 영상화를 위한 모터 컨트롤 미러가 600×600개의 X, Y 축 스캐닝 포인트에서 멈춤과 이동을 반복하여 발생한 미세진동이다. 그림 4(c)는 음파에 의해 진동되는 고막 모방 샘플의 MVT 진동 이미지로, 샘플의 가운데 영역에서 진동되는 것을 볼 수 있다.

음파에 의한 전체적인 고막 모방 샘플의 진동을 관찰하기 위해 MVT 진동 이미지를 프로젝팅하였다. 그림 5는 각각 2 kHz, 2.5 kHz, 4.5 kHz의 음파에 의해 진동된 고막 모방 샘플의 MVT 표면 진동 이미지이다. 주파수를 2 kHz에서 0.5 kHz씩 증가시키면서 보이는 대표적인 MVT 표면 진동 이미지를 나타낸다. 그림 5(a)는 2 kHz에서의 MVT 표면 진동 이미지로 샘플의 중심에서부터 둥근 모양으로 퍼진

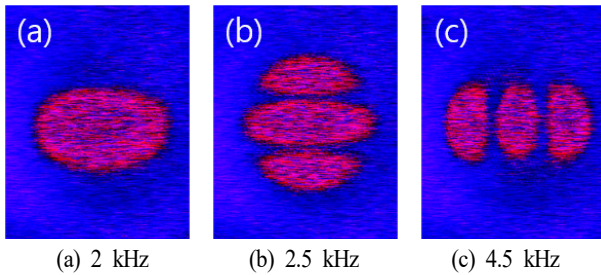


그림 5. 각각의 음파에 의해 진동되는 고막 모방 샘플의 MVT 표면 진동 이미지

Fig. 5. MVT surface vibration images of tympanic membrane mimic sample vibrated by each sound waves, respectively.

진동을 관찰할 수 있다. 그림 5(b)에서는 2.5 kHz에서의 MVT 표면 진동 이미지로 횡 방향으로 세 갈래의 진동이 관찰되었다. 2.5 kHz에서 4 kHz 사이에서의 MVT 표면 진동 이미지는 그림 5(b)에서의 이미지와 비슷한 경향성을 가지는 것을 확인하였다. 그림 5(c)에서는 그림 5(b)와 반대 방향인 종 방향으로 세 갈래의 진동이 관찰되었다.

#### IV. 결론 및 토의

개발된 MVT 시스템과 2~5 kHz의 주파수 제어를 통한 음파를 이용하여 샘플의 단층구조와 음파에 의한 미세진동을 동시에 영상화하여 시스템의 유효성을 입증하였다. 또한 샘플 표면에서의 전체적인 진동 형태를 프로젝팅하여 MVT 표면 진동 이미지를 관찰하였다. 2 kHz의 음파에 의한 진동은 샘플의 중심에서 둥글게 퍼진 형태의 진동을 관찰하였고, 주파수가 증가하면서 발생된 음파에서는 각각 횡 방향과 종 방향으로 세 갈래로 진동하는 형태를 관찰할 수 있었다.

실제 사람의 고막에 적용하였을 때, 가청주파수 대역의 음파에 의한 진동형태에 대한 분석을 기반으로 역치를 측정하거나, 고막의 성능을 테스트하는 등의 새로운 청력 진단방법이 될 수 있을 것으로 기대된다.

#### References

- [1] D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Schuman, W. G. Stinson, and W. Chang, et al., "Optical coherence tomography," *Science*, vol. 254, no. 5035, pp. 1178-1181, Nov. 1991.
- [2] N. H. Cho, U. S. Jung, H. I. Kwon, H. S. Jeong, and J. H. Kim, "Development of SD-OCT for imaging the *in vivo* human tympanic membrane," *Journal of the Optical Society of Korea*, vol. 15, no. 1, pp. 74-77, 2011.
- [3] C. T. Nguyen, W. Jung, J. Kim, E. J. Chaney, M. Novak, and S. A. Boppart, "Noninvasive *in vivo* optical detection of biofilm in the human middle ear," in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, vol. 109, no. 24, pp. 9529-9534.
- [4] N. H. Cho, J. H. Jang, W. Jung, and J. Kim, "*In vivo* imaging of middle-ear and inner-ear microstructures of a mouse guided by SD-OCT combined with a surgical microscope," *Optics Express*, vol. 22, no. 8, pp. 8985-8995, 2014.
- [5] 백인찬, 이상일, 유경주, 장종훈, "간섭계 레이더 고도 계용 시뮬레이터 구현," *한국전자과학회논문지*, 26(1), pp. 81-87, 2015년 1월.
- [6] 이재환, "광 지연선을 이용한 FMCW 전파고도계 시뮬레이터 개발," *한국전자과학회논문지*, 28(3), pp. 208-216, 2017년 3월.
- [7] V. X. D. Yang, M. L. Gordon, A. Mok, Y. Zhao, Z. Chen, and R. S. Cobbold, et al., "Improved phase-resolved optical Doppler tomography using the Kasai velocity estimator and histogram segmentation," *Optics Communications*, vol. 208, no. 4-6, pp. 209-214, Jul. 2002.
- [8] V. X. D. Yang, M. L. Gordon, B. Qi, J. Pekar, S. Lo, and S. Y. Emily, et al, "High speed, wide velocity dynamic range Doppler optical coherence tomography(Part I): System design, signal processing, and performance," *Optics Express*, vol. 11, no. 7, pp. 794-809, 2003.

권 재 환 [경북대학교/석사과정]



2016년: 계명대학교 전자공학과 (공학사)  
2017년~현재: 경북대학교 전자공학과 석사과정  
[주 관심분야] 의료생체영상, 영상신호처리

전 만 식 [경북대학교/조교수]



2002년: 경북대학교 전자공학과 (공학사)  
2004년: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)  
2011년: 경북대학교 전자공학과 (공학박사)  
2011년~2013년: Univ. of New York at Buffalo (Postdoctoral Researcher)  
2013년~2014년: 포항공과대학교 미래 IT 융합공학과 책임연구원  
2014년~2015년: 포항공과대학교 창의 IT융합공학과 연구조교수  
2015년~현재: 경북대학교 IT대학 전자공학부 조교수  
[주 관심분야] 광 음향 영상, 의료광학, 신소재 영상, 신약전달 영상

김 필 운 [경북대학교/연구초빙교수]



2001년: 경운대학교 컴퓨터공학과 (공학사)  
2003년: 경북대학교 의용생체공학과 (공학석사)  
2011년: 경북대학교 의용생체공학과 (공학박사)  
2011년~2014년 : 주식회사 이큐메드 광학 영상진단기술연구소 연구소장

2014년~2017년: 주식회사 오즈텍 연구개발팀장  
2018년~현재: 경북대학교 의공학연구소 연구초빙교수  
[주 관심분야] 생체영상처리, 광 간섭 단층촬영기기, 컴퓨터 자동 검사 및 진단, 의료기기 개발

김 지 현 [경북대학교/교수]



1995년: 경북대학교 전자공학과 (공학사)  
1995년~1998년: 대우정밀공업(주) 연구원  
2000년: 미국 Univ. of Texas at Austin Biomedical Engineering (공학석사)  
2004년: 미국 Univ. of Texas at Austin Biomedical Engineering (공학박사)  
2007년: 미국 Univ. of California Irvine, Beckman Lase Institute (Postdoctoral Researcher)  
2007년~현재: 경북대학교 IT대학 전자공학부 교수  
[주 관심분야] 생체 광 간섭 단층촬영, 다광자 현미경, 광 음향 영상, OTDR