

반사형 마이크로미러와 듀얼 코어 콜리메이터를 이용한 광 마이크로폰

송주한 · 김도환 · 구현모 · 박현정 · 이상신[†]

광운대학교 전자공학과

☎ 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1

조일주

LG 전자기술원 소재재료연구소

☎ 137-724 서울특별시 서초구 우면동 16

(2005년 9월 9일 받음, 2005년 12월 6일 수정본 받음)

본 논문에서는 듀얼 코어 광섬유 콜리메이터(dual-core fiber collimator)와 멤브레인형 마이크로미러를 이용한 광마이크로폰을 제안하고 구현하였다. 콜리메이터와 미러는 각각 광헤드(optical head)와 반사형 진동판으로서 사용된다. 특히, 미러 진동판은 얇은 실리콘 바(bar)에 의해 프레임에 연결되어 있어서 인가된 음압에 따라 자유롭게 움직인다. 두 개의 콜리메이터가 집적된 광헤드는 음압을 감지하고 변조하는데 사용되는 광을 공급하고 받는 역할을 한다. 이 콜리메이터 광헤드를 사용함으로써 진동판과의 초기 정렬시 기존의 광섬유를 이용한 경우에 비해 허용 오차가 클 뿐만 아니라 전체적으로 광마이크로폰의 구조도 간단해졌다. 본 논문에서는 광헤드와 진동판 사이의 거리를 변화시켜 가면서 응답 특성을 측정하여 선형성과 민감도가 최대인 지점을 동작점으로 결정하였다. 음성신호의 주파수를 변화시켜 가면서 광마이크로폰의 출력을 측정하여 얻은 주파수 대역폭은 약 ± 5 dB 이하 출력 변화에 대해 약 3 kHz였다.

주제어 : Micrmirror, Reflective diaphragm, Dual-core fiber collimator, Sensitivity.

I 서 론

광마이크로폰(optical microphone)은 기존의 콘덴서 마이크로폰에 비해 전자파 간섭에 무관, 작은 진동판 크기, 경량, 우수한 지향성, 광섬유를 이용한 장거리 전송 등의 여러 가지 장점들로 인하여 최근에 활발하게 연구되어 왔다^[1,2]. 특히, 콘덴서 마이크로폰은 작은 커패시턴스(capacitance)의 변화에 따라 소리를 변조해 주기 위하여 고가의 프리 앰프(pre-amplifier)와 파워 앰프를 필요로 하기 때문에 가격이 비싸다^[3]. 반면에, 광마이크로폰은 가격이 저렴할 뿐만 아니라 구조가 단순하기 때문에 소형화에 적합하다. 이러한 광마이크로폰은 MRI(magnetic resonance imaging)와 CT(computed tomography) 등의 의료 장비 시스템에서 장비의 동작에 영향을 주지 않고 환자와 의사 간의 원활한 의사소통에 응용될 수 있으며, 또한 공항 등과 같이 소음이 심한 곳에서의 교통이나 환경 등을 원격으로 모니터링 하는데 효과적으로 사용될 수 있다.

광마이크로폰의 구현에 활용되는 광의 특성에는 세기^[4], 위상^[5,6], 편광 등이 있다. 이 중에서 광세기 변조 방식이 구조가 단순하여 안정성 측면에서 가장 유리하다. 본 논문에서는 멤브레인(membrane) 구조의 마이크로미러 진동판^[7]과 듀얼 코어(dual-core) 광섬유 콜리메이터(collimator)를 이용하여 광마이크로폰을 구현하였다. 특히, 마이크로미러 진동판

은 실리콘 프레임에 얇은 바(bar)로 고정되어 있어서 외부에서 인가되는 음성 신호의 진행 방향으로 음압(acoustic pressure)에 비례하여 움직일 수 있도록 되어 있다. 이러한 진동판은 실리콘 프레임을 이용하여 고정시킬 수 있기 때문에 패키징이 용이하다. 그리고 듀얼 코어 콜리메이터는 광원에서 나오는 빛을 진동판으로 보내고, 이것에 의해 반사되어 돌아오는 빛을 받는 광헤드(optical head)로서 사용된다. 이러한 듀얼 코어 콜리메이터를 사용함으로써 광마이크로폰의 구조를 단순화시킬 수 있다. 더욱이 진동판과의 정렬시 단순한 광섬유를 이용하는 경우에 비하여 광헤드와 진동판의 초기 간격을 나타내는 동작점을 결정하는데 있어서 오차 허용범위(tolerance)가 매우 크다. 본 논문에서는 제안된 광마이크로폰에 대해 콜리메이터 광헤드와 진동판 사이의 거리를 변화시켜 가면서 광결합 특성을 조사하여 선형성과 민감도가 최대인 지점을 동작점으로 결정하였다. 그리고 음성신호 대역의 주파수를 변화시켜 가면서 광마이크로폰의 주파수 응답 특성을 조사하였다. 본 논문의 구성을 살펴보면, 제 II장에서는 제안된 광마이크로폰의 동작원리 및 구조를 설명하고 실험결과와 비교하였다. 그리고 제 III장에서 결론을 맺는다.

II. 제안된 광 마이크로폰의 구조와 동작원리 및 측정 결과

그림 1에는 제안된 광마이크로폰의 구조가 도시되어 있다.

[†] E-mail: sslee@daisy.kw.ac.kr

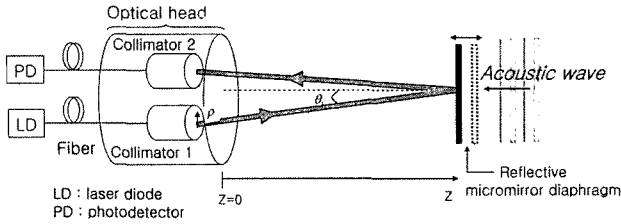


그림 1. 제안된 광마이크로폰의 구조.

이것은 듀얼 코어 콜리메이터 광헤드, 반사형 마이크로미러 진동판, 광원, 그리고 광전변환기로 구성되어 있다. 먼저 진동판으로 사용되는 정사각형 형태의 마이크로미러는 실리콘 기판에 금 박막을 코팅하여 형성된 멤브레인 구조를 갖는다⁷⁾. 이 미러의 크기와 두께는 각각 $800 \times 800 \mu\text{m}^2$ 와 $5 \mu\text{m}$ 이며, 표면이 매우 평평하고, 그리고 $800 \sim 1600 \text{ nm}$ 광파장 대역에서 높은 반사 특성을 갖는다. 이 미러는 실리콘 프레임에 얇은 막대로 연결되어 있어서 인가되는 음압에 따라 앞뒤로 움직일 수 있도록 되어 있다. 다음으로 광헤드는 두 개의 광섬유 콜리메이터(collimator 1과 collimator 2)가 함께 집적된 구조를 갖는다. 이때, 그림 1에서 보는 것과 같이 두 콜리메이터에서 나오는 빔이 이루는 각 θ_1 은 약 2.3° 이다. 다음으로 광원으로는 다이오드 레이저를 사용하였으며, 광전 변환기로는 광검출기를 사용하였다. 마지막으로 광섬유를 이용하여 광원, 수신기, 그리고 광헤드를 연결하였다.

그림 1에 도시된 광마이크로폰의 동작 원리를 살펴보면 다음과 같다. 광헤드를 구성하는 collimator 1로부터 나오는 빔 (beam)이 마이크로미러 진동판에 비스듬하게 입사되어 반사된 후, collimator 2로 입력되어 광검출기에 의해 전기 신호로 변환된다. 음성 신호에 의해 발생하는 음파가 진동판의 뒤 쪽에서 입사될 때, 이것은 음파의 진행 방향에 따라 전후로 움직이게 된다. Collimator 2에 결합되는 광파워는 광헤드와 진동판 사이의 거리에 따라 변하기 때문에, 광마이크로폰의 출력은 음성 신호의 세기에 따라 변하게 된다. 즉, 음압이 커지면 진동판의 변이가 커지고 광신호의 변조 진폭도 증가한다. 결과적으로 음성 신호를 광신호 형태로 변환하여 전달하는 광마이크로폰을 구현할 수 있게 됨을 알 수 있다. 입력 음성 신호를 충실히 재생하기 위해서는 음압에 따른 광신호의 변조 특성이 높은 선형성 및 민감도를 가져야 한다.

먼저 콜리메이터로부터 출력되는 빔의 특성을 살펴보면 다음과 같다. 이 빔이 가우시안 함수 형태의 광세기 분포를 갖는다고 가정하면 빔 진행 방향의 지점 z에서 다음의 식 (1)와 같이 주어진다⁸⁾.

$$I(\rho, z) = I_0 \left[\frac{W_0}{W(z)} \right]^2 \exp \left[-\frac{2\rho^2}{W^2(z)} \right]$$

$$\text{where } W(z) = W_0 \left[1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right]^{1/2}, W_0 = \left(\frac{\lambda z_0}{\pi} \right)^{1/2}, \theta \approx \frac{\lambda}{\pi W_0} \quad (1)$$

여기서 I_0 와 W_0 는 콜리메이터 출력단 $z=0$ 에서 광세기와 빔 반지름을 각각 나타낸다. 그리고 z_0 는 Rayleigh 범위, θ 는 빔의 발산각(divergence angle), λ 는 광파장($=1550 \text{ nm}$)을 각각 나타낸다. 그림 2에는 콜리메이터 출력단에서 측정된 빔의 광세기 분포가 나타나 있다. 또한, 식 (1)에 근거하여 이론적으로 근사한 빔 분포도 함께 도시되어 있다. 이로부터 출력 빔의 $1/e^2$ spot size는 약 $300 \mu\text{m}$ 임을 알 수 있다. 이론적으로 식(1)에 넣어 발산각을 구하면 약 0.19° 이고, 빔 진행 방향으로 몇 개의 지점에서 빔 분포를 측정하여 구한 발산각은 $\theta = \sim 0.17^\circ$ 였다. 한편, 두 콜리메이터 간의 실제 간격은 약 1.2mm 이다.

제안된 광마이크로폰의 중요한 성능 중의 하나인 민감도 (sensitivity) S_o 는 다음의 식 (2)과 같이 주어진다.

$$S_o [\text{V/Pa}] = S_{am} \times S_{mo} \times S_{oe} \times G_{TIA} \quad \text{or} \quad S_o [\text{dB}] = 20 \log(S_o)$$

$$\text{where } \begin{cases} S_{am} : \text{acousto-mechanical sensitivity} [\mu\text{m/Pa}] \\ S_{mo} : \text{mechano-optical sensitivity} [\text{W}/\mu\text{m}] \\ S_{oe} : \text{opto-electrical sensitivity or responsivity} [\text{A/W}] \\ G_{TIA} : \text{gain of transimpedance amplifier} [\text{V/A}] \end{cases} \quad (2)$$

여기서 S_{am} 과 S_{mo} 는 인가되는 음압에 따른 진동판의 이동과 진동판의 움직임에 따른 광신호의 변조도를 각각 나타내고, S_{oe} 와 G_{TIA} 는 광검출기의 응답도와 이득을 각각 나타낸다. 광마이크로폰의 민감도 S_{mo} 와 선형성을 향상 시키기 위해서 콜리메이터와 미러 간의 거리에 따른 광파워 결합 특성을 먼저 이론적으로 고찰하였다. 그림 3에는 광헤드와 진동판 간의 거리에 따른 광파워 결합 효율을 계산한 결과가 도시되어 있다. 이 결합 효율은 진동판에 의해 반사되는 입력 가우시안 빔과 콜리메이터 빔 간의 중첩 적분(overlap integral)을 이용하여 계산되었다. 음압이 인가되지 않은 초기 상태에서는 진동판에 의해 반사되는 빔이 수광부 collimator 2의 중심에 입사되기 때문에 결합 효율이 최대이고, 진동판의 변이가

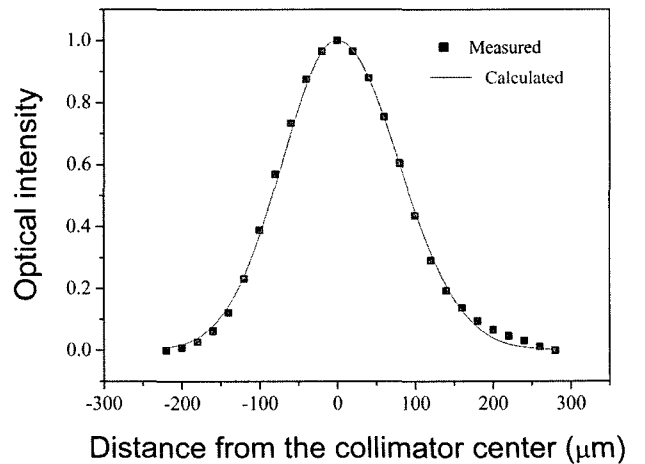


그림 2. 콜리메이터로부터 출력되는 빔의 광세기 분포.

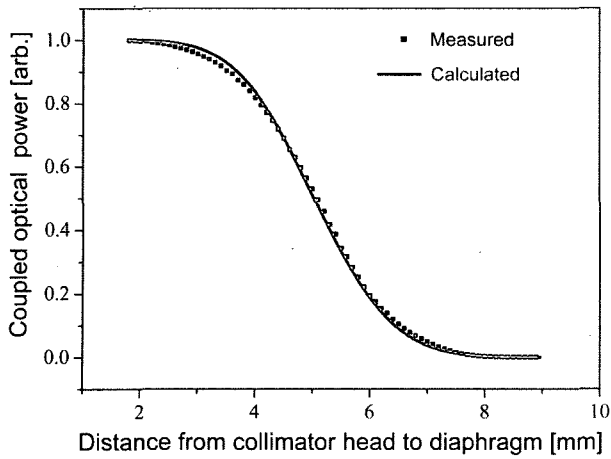


그림 3. 콜리메이터와 진동판 사이의 거리에 따른 광파워 결합 효율.

증가함에 따라 빔이 중심에서 점점 멀어지는 지점에 입사되어 결합 효율이 점진적으로 감소함을 알 수 있다. 다음으로, 이 광파워 결합 효율을 실험적으로 측정하기 위하여 그림 4와 같은 장치를 구성하였다. 광원은 1550 nm 파장대역의 다이오드 레이저가 사용되었다. 음성 신호는 전기 신호 발생기를 스피커에 연결하여 발생시켰으며, 마이크로미터 진동판과 콜리메이터 광헤드는 모터로 조절되는 정밀한 스테이지에 장착되었다. 광헤드와 진동판 간의 거리를 일정하게 변화시키면서 미러에 의해 반사되어 콜리메이터에 결합되는 광파워를 측정하였으며, 그 결과가 그림 3에 나타나 있다. 계산 결과와 실험 결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 광헤드와 진동판 사이의 최적의 간격을 나타내는 광마이크로폰의 동작점은 측정된 광결합 특성 곡선에서 기울기와 선형성이 최대가 되는 위치로 결정되는데, 그림 3로부터 알 수 있듯이 약 5 mm였다. 이 지점에서 음압에 따라 진동판이 움직일 때 광신호가 최대로 변조될 수 있다. 그러므로, 이 지점을 동작점으로 결정함으로써 광마이크로폰의 민감도를 최대화 하고 왜곡을 최소화 할 수 있을 것으로 사료된다.

광마이크로폰의 동작점을 결정한 후에 그림 4에 도시된 실험 장치를 이용하여 주파수 응답 특성을 측정하였다. 이때, BSE사의 상용화된 콘덴서 마이크를 기준으로 사용하였다. 주파수가 1 kHz이고 음압이 1 Pa인 음성 신호를 인가시켰을 경우에 광마이크로폰과 콘덴서 마이크의 출력 신

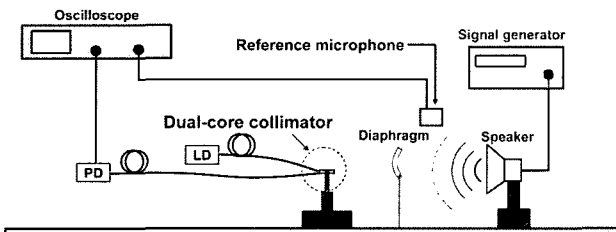
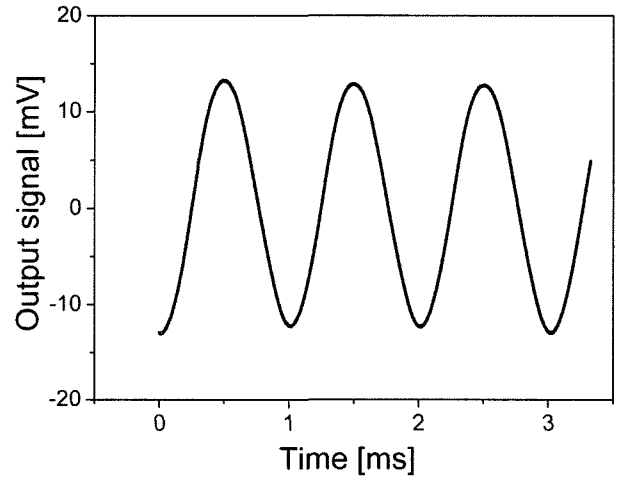
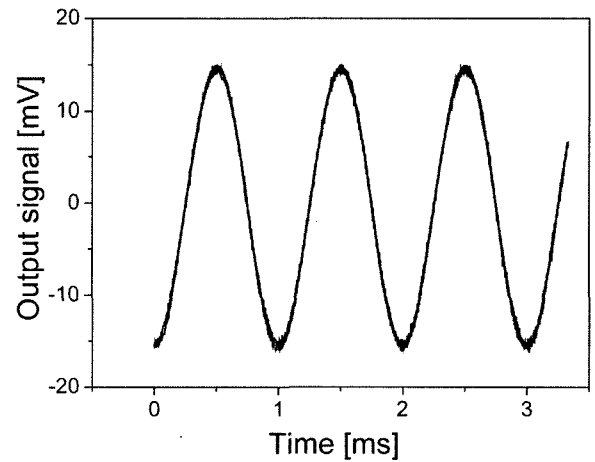


그림 4. 광마이크로폰의 특성 측정 장치.

호를 오실로스코프로 측정한 결과가 그림 5(a)와 5(b)에 각각 나타나 있다. 이 때, 기준 마이크로폰과 광마이크로폰의 출력 신호는 각각 13 mV_p과 15 mV_p이다. 광마이크로폰으로부터 기준 마이크로폰과 거의 동일한 왜곡이 없는 출력 신호를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그리고 음성 신호의 크기를 일정하게 하고 주파수를 변화시키면서 광마이크로폰의 출력을 측정한 결과가 그림 6에 나타나 있다. 여기서 1 Pa의 음압이 인가되었을 때 광마이크로폰의 출력 전압이 1 V인 경우를 0 dB로 가정하였다. 그림 6으로부터 알 수 있듯이, 3 kHz까지 약 ± 5 dB 변화 이내에서 출력이 일정하였다. 한편, 4 kHz 근처에서 출력이 급격하게 증가하는 현상을 볼 수 있는데, 이 결과로부터 이 주파수 대역 근처에 마이크로미터 진동판의 고유공진(natural resonance)이 존재함을 알 수 있다^[7]. 광마이크로폰의 동작 주파수 대역을 향상시키기 위해서는 진동판의 크기를 작게 하여 고유진동 주파수를 높게 하여 음성 주파수 대역에서 벗어나도록 해야 할 것이다.



(a)



(b)

그림 5. 1 kHz 입력 음성 신호에 대한 (a) 제안된 광마이크로폰 출력 (b) 기준 콘덴서 마이크 출력.

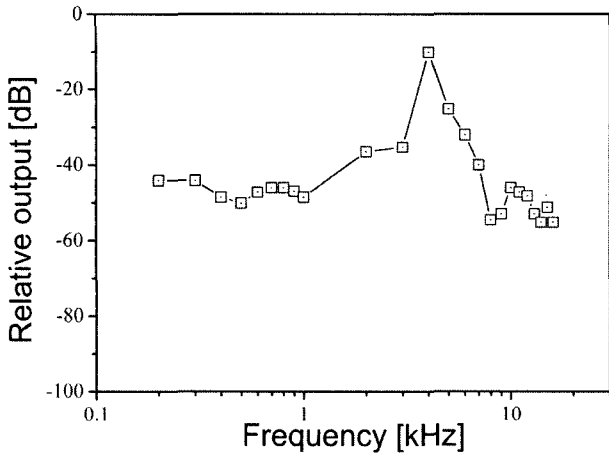


그림 6. 광마이크로폰의 측정된 주파수 응답 특성.

III. 결 론

본 논문에서는 듀얼 코어 콜리메이터 광헤드와 마이크로미러 반사형 진동판을 이용하여 간단한 구조의 광마이크로폰을 구현하였다. 사용된 진동판은 음압에 비례하여 움직이도록 설계되었으며, 두 개의 광섬유 콜리메이터가 집적된 광헤드를 활용함으로써 소자의 구조를 효과적으로 단순화시킬 수 있었으며 진동판과의 초기 정렬에 있어서 오차 허용도가 커서 소자의 패키징을 용이하게 하였다. 이 제안된 마이크로폰으로부터 기준 콘텐츠 마이크로폰과 거의 동일한 출력 신호를 얻을 수 있었으며, 측정된 주파수 대역폭은 약 3 kHz였다.

감사의 글

본 연구는 Korea Research Foundation Grant(R08-2004-000-10312-0)에 의해 지원받았습니다. 연구에 도움을 주신 LG전

자기기술원의 안세원 박사님과 광주과학기술원의 김형준씨에게 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] N. Bilaniuk, "Optical microphone transduction techniques," *Applied Acoustics*, vol. 50, no. 1, pp. 35-63, 1997.
- [2] Y. Kahana, A. Paritsky, A. Kots, and S. Mican, "Recent advances in optical microphone technology," *Inter-Noise 2003*, Jeju, Korea, Aug. 2003.
- [3] *Microphone Engineering Handbook*, Focal, Oxford, U.K., 1994.
- [4] K. Nakamura, S. Toda, and M. Yamanouchi, "A two-dimensional optical fibre microphone array with matrix-style data readout," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 12, pp. 859-864, 2001.
- [5] H. Sagberg, A. Sudbo, O. Solgaard, K. Anne, H. Bakke, and I. Johansen, "Optical microphone based on a modulated diffractive lens," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 10, pp. 1431-1433, 2003.
- [6] N. Furstenau, H. Horack, and W. Schmidt, "Extrinsic Fabry-Perot interferometer fiber-optic microphone," *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, vol. 47, no. 1, pp. 138-142, 1998.
- [7] I. Cho, K. Yun, H. Lee, J. Yoon, and E. Yoon, "A low-voltage three-axis electromagnetically actuated micro-mirror with bulk silicon mirror plates and torsion bars," *IEEE Int'l Conf. MEMS 2002*, Las Vegas, USA, Jan. 2002.
- [8] B. E. A. Saleh and M.C. Teich, *Fundamentals of Photonics*. New York: Wiley, 1991, pp. 80-107.

Optical Microphone Incorporating a Reflective Micromirror and a Dual-core Collimator

Ju-Han Song, Do-Hwan Kim, Hyun-Mo Gu, Hyun-Jung Park and Sang-Shin Lee[†]

Department of Electronic Engineering, Kwangwoon University, 447-1 Wolgye-Dong, Nowon-Gu, Seoul 139-701, Korea

Il-Joo Cho

Devices and Materials Lab., LG Electronics Institute of Technology, 16 Woomyeon-Dong, Seocho-Gu, Seoul 137-724, Korea

[†]*E-mail: sslee@daisy.kw.ac.kr*

(Received September 9, 2005, Revised manuscript December 6, 2005)

An optical microphone based on a dual-core fiber collimator and a membrane type micromirror serving as an optical head and a reflective diaphragm respectively was implemented. The micromirror diaphragm is suspended by a thin silicon bar linked with a frame, thus it is subject to a displacement induced by acoustic waves. The optical head incorporating two collimators integrated in a single housing gives light to and receives it from the diaphragm, rendering the optical microphone structure simple and compact. This dual-core collimator having a slowing varying beam profile facilitates the initial alignment of the optical head with the diaphragm, especially the distance between them. For the assembled microphone, the static characteristics were investigated to find the operation point defined as the optimum distance between the head and the diaphragm, and a frequency response with a variation of about ± 5 dB for the range of up to 3kHz was achieved.

OCIS Codes : 230.1040. 310.6860. 230.4040.