

반사형 마이크로 미러와 다중모드 광섬유를 이용한 광마이크로폰

論 文
55C-5-7

Optical Microphone Incorporating a Dual-Core Multimode Fiber Block and a Reflective Micromirror

宋 柱 漢* · 李 相 信†
(Ju-Han Song · Sang-Shin Lee)

Abstract - An optical microphone was developed using a dual-core multi-mode fiber block and a membrane type micromirror. The fiber block serves as a compact optical head, and the micromirror as a reflective diaphragm. The micromirror is designed to be suspended through a silicon bar connected to a frame, allowing for displacement induced by acoustic waves. The optical head is implemented by integrating two multi-mode fibers in a single block, and used to transfer light signals between it and the diaphragm. For the assembled microphone, its static characteristics were observed to reveal the operating point defined as the optimum distance between the optical head and the diaphragm. And its dynamic response was tested to exhibit a frequency bandwidth of 3 kHz with the variation of ~5 dB.

Key Words : Micromirror, Diaphragm, Fiber, Transducer, Microphone, Acousto-Optic Sensor

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 광 세기 변조 방식이 구조가 단순하여 안정성 측면에서 가장 유리하다. 본 논문에서는 멤브레인(membrane) 구조의 마이크로미러 진동판 [7]과 듀얼 코어(dual core) 광섬유를 이용하여 광 마이크로폰을 구현하였다. 특히, 마이크로미러 진동판은 실리콘 프레임에 얇은 바(bar)로 고정되어 외부에서 인가되는 음성 신호의 진행 방향으로 음압에 비례하여 움직이도록 되어 있

다. 그리고 집적된 두 개의 광섬유는 광원에서 나오는 광을 진동판으로 보내고, 이것에 의해 반사되어 돌아오는 광신호를 수신하는 광헤드(optical head)로서 사용된다. 본 논문에서는 광헤드와 진동판 사이의 거리를 변화시켜 가면서 광결합 특성을 조사하여 선형성과 민감도가 최대인 지점을 동작점으로 결정하였다. 그리고 입력 음성신호의 주파수를 변화시켜 가면서 광 마이크로폰의 주파수 응답 특성을 조사하였다. 본 논문의 구성을 살펴보면, 제 II장에서는 제안된 마이크로폰의 동작원리 및 구조를 설명하고, 제 III장에서는 실험 및 결과를 논의하며, 마지막으로 제 IV장에서 결론을 맺는다.

II. 제안된 광마이크로폰의 구조와 동작원리

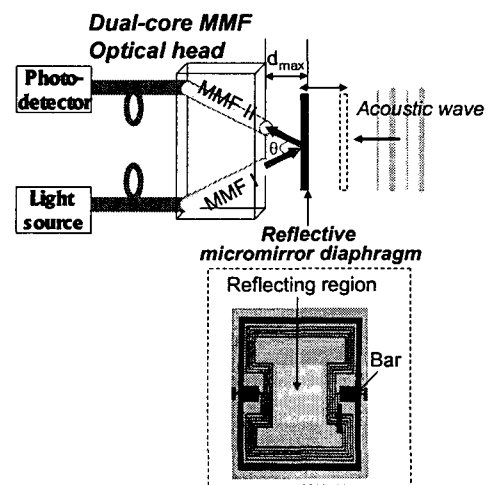


그림 1 제안된 광 마이크로폰의 구조.
Fig. 1 Schematic configuration of the proposed microphone.

† 교신저자, 正 會 員 : 광운대학교 전자공학과 조교수
E-mail : sslee@daisy.kw.ac.kr
* 非 會 員 : 광운대학교 전자공학과 석사과정
接受日字 : 2006年 1月 4日
最終完了 : 2006年 3月 22日

그림 1에는 본 논문에서 제안된 광 마이크로폰의 구조가 도시되어 있다. 이 소자는 광 헤드와 반사형 진동판으로 구성되어 있다. 먼저 광 헤드는 다중모드 광섬유(62.5 $\mu\text{m}/125 \mu\text{m}$) MMF I과 MMF II가 서로 70°의 각을 이루며 정렬되어 있는 구조를 갖는다. 그리고 마이크로미러는 그림 1에서 보는 바와 같이 실리콘 박막 위에 금을 코팅하여 형성되었으며, 얇은 막대를 통해 실리콘 프레임(frame)에 연결되어 있다. 따라서 미러의 전후로 인가되는 음압에 의해 자유롭게 움직이게 된다. 이 미러는 매우 평평하고 균일한 표면 특성으로 인하여 높은 광학적 반사성을 갖는다. 이 마이크로미러의 크기와 두께는 각각 800×800 μm^2 와 5 μm 이다. 그리고 광원으로는 1550 nm의 파장대의 레이저, 광전변환기로는 광검출기(photodetector)가 사용되었다.

제안된 광마이크로폰의 동작 원리를 살펴보면 다음과 같다. 광 헤드를 구성하는 다중모드 광섬유 MMF I으로부터 나오는 빛이 마이크로미러 진동판에 비스듬하게 입사되어 반사된 후, MMF II로 입력되어 광검출기에 의해 전기 신호로 변환된다. 스피커에 의해 발생하는 음파가 진동판의 뒤쪽에서 입사될 때, 진동판은 음파의 진행 방향에 따라 전후로 움직이게 된다. 인가된 음성신호의 세기에 따라 광헤드와 진동판 사이의 거리가 변하기 때문에, MMF II로 결합되는 광파워의 크기도 음압에 비례하여 변하게 된다. 즉, 음압이 커지면 진동판의 변이가 커지게 되어 광신호의 변조 진폭도 증가한다. 결과적으로 제안된 소자는 음성신호를 광신호 형태로 변환하여 전달하는 광마이크로폰의 역할을 하게 된다. 특히, 입력 음성신호를 충실히 재생하기 위해서는 음압에 따른 광신호의 변조 특성이 우수한 선형성 및 민감도를 가져야 한다.

III. 실험 결과

그림 2에는 다중 모드 광섬유 헤드와 마이크로미러 진동판으로 구성되어 있는 제안된 광마이크로폰의 성능 측정을 위한 장치가 도시되어 있다. 광헤드는 클리빙(cleaving)된 단면을 갖는 광섬유를 유리 기판 위에 적절한 각도를 갖도록 정렬하고 자외선 경화 에폭시를 이용하여 고정된 후 다른 유리판으로 덮어 제작하였다. 그리고 마이크로미러 진동판은 일반적인 마이크로머시닝 공정을 이용하여 제작되었다 [7]. 마이크로미러 진동판과 광섬유 헤드는 정밀하게 조절되는 스테이지 위에 올려져 있으며, 처음에는 수광부 (MMF II)에 최대 파워가 입사 되도록 정렬된다.

광헤드와 진동판 사이의 최적의 간격을 나타내는 동작점을 결정하기 위하여 이 둘 간의 거리를 일정하게 변화시키면서 미러에 의해 반사되어 수신되는 광파워의 결합 효율을 측정하였다. 그림 3에는 그 측정 결과가 나타나 있다. 이 결합 효율은 간격이 60 μm 가 될 때까지 증가하고, 그 이후에는 다시 감소한다. 즉, 진동판에 의해 반사되는 빛이 수광부 MMF II의 중심에 입사되는 경우에 결합 효율이 최대가 된다. 진동판의 변이가 더욱 증가하게 되면 빛이 수신 광섬유 중심에서 점점 떨어진 지점에 입사되어 결합 효율이 감소하게 된다. 그림 3에는 빔전파방법을 이용하여 이론적으로 계산된 결합 효율도 포함되어 있다.

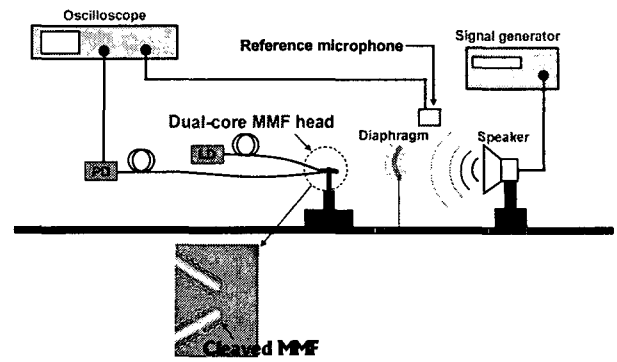


그림 2 광 마이크로폰의 특성 측정 장치.
Fig. 2 Experimental setup of the proposed microphone.

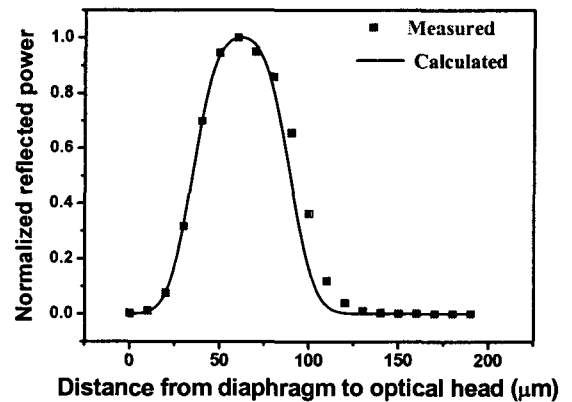


그림 3 광섬유 헤드와 진동판 사이의 거리에 따른 광파워 결합 효율.

Fig. 3 Static optical coupling efficiency as a function of the distance from the optical head to the reflective diaphragm.

그림 4에서 보는 것과 같이, MMF I과 MMF II 사이의 각을 θ 라고 하면, 마이크로미러가 뒤로 Δd 만큼 이동하였을 때, MMF I에서 거울에 반사되어 MMF II로 들어가는 빛이 처음보다 $2\Delta d \cdot \tan\theta/2 \cdot \cos\theta/2$ 만큼 옮겨지는 것을 알 수 있다. 이 때 MMF I로부터 출력되는 빛이 가우시안 함수 형태의 광세기 분포를 갖는다고 가정하면 빔 진행 방향의 지점 z 에서 빔의 세기 분포가 식 (1)과 같이 주어진다 [8].

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

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

여기서 I_0 와 W_0 는 MMF I의 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 nm)을 각각 나타낸다. 이 때, IR camera를 통하여 측정된 빔 분포

특성은, $W_0 = 24 \mu\text{m}$ 이다. 이 때 측정을 통해 가장 큰 파워가 수신되는 d_{max} 를 구하고, 그림 4에서 보는 것과 같이, 이 거리에서 MMF I의 빛의 세기가 가장 큰 부분이 MMF II의 중심으로 입사된다고 가정하여 이론적으로 동작점을 나타내었다. 측정 결과와 이론적인 계산 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는, 그림 3에 나타나 있는 측정 및 이론적 계산 결과를 토대로 결합 효율의 선형성과 기울기가 큰 약 $100 \mu\text{m}$ 를 광마이크로폰의 동작점으로 결정하였다. 앞에 $30\sim 40 \mu\text{m}$ 영역에서도 선형적인 동작이 나타나지만 제작할 때 미러와 파이버 헤드 간의 거리가 너무 가까워지는 문제점이 있다. 정해진 동작점에서의 기계광학적 민감도 S_{mo} (mechano optic sensitivity)가 $\sim 2.7\%/ \mu\text{m}$ 임을 알 수 있다.

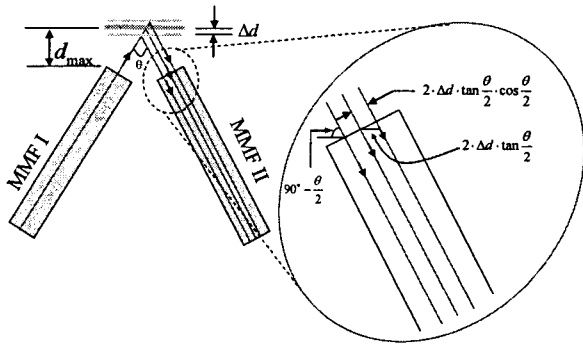
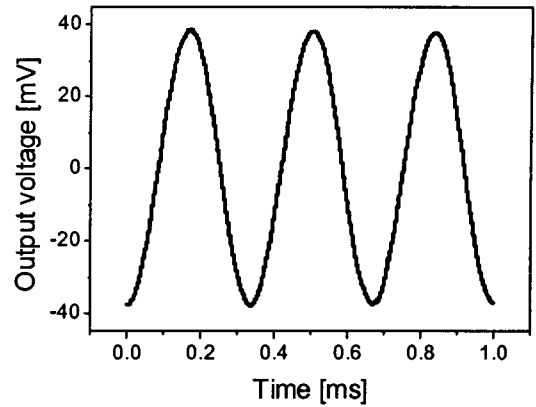


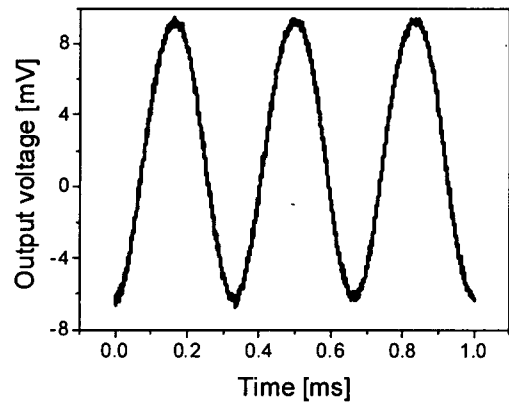
그림 4 동작점 해석을 위한 광 마이크로폰 구조 분석.
 Fig. 4 Analysis of optical microphone structure for operating point.

스피커를 통하여 발생되는 음압을 제작된 광마이크로폰에 인가시켜 주파수 응답 특성을 측정하였다. 이때 성능 비교를 위한 기준으로는 BSE사의 상용화된 콘덴서 마이크로폰이 사용되었다. 주파수가 3 kHz인 음성신호를 인가시켰을 경우에 광마이크로폰과 기준 콘덴서 마이크로폰의 출력 신호를 오실로스코프로 측정한 결과가 그림 5(a)와 5(b)에 각각 나타나 있다. 이 그림으로부터 광마이크로폰으로부터 기준 마이크로폰과 거의 동일한 왜곡이 없는 출력 신호를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

다음으로 음성신호의 크기를 일정하게 유지하고 주파수만을 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 5로부터 알 수 있듯이, 3 kHz까지 약 ± 5 dB 변화 이내에서 출력이 일정하였다. 한편, 4 kHz 주파수 근처에서 출력이 급격하게 증가하는 현상을 볼 수 있는데, 이것은 마이크로미터 진동판의 고유공진(natural resonance)에 의한 것으로 사료된다 [7]. 따라서 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 3 kHz 입력 음성신호에 대한 (a) 광마이크로폰 출력 (b) 기준 콘덴서 마이크로폰 출력.

Fig. 5 Measured signals from (a) the proposed optical microphone (b) the reference condenser microphone.

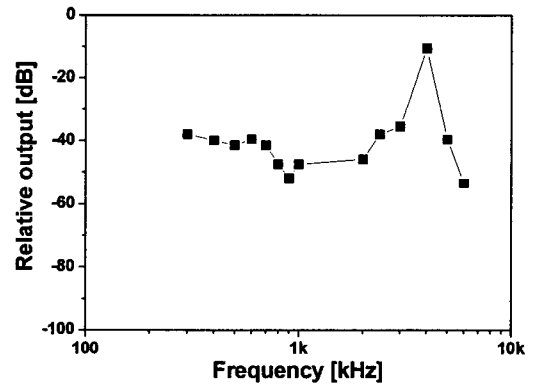


그림 6 광 마이크로폰의 측정된 주파수 응답 특성.
 Fig. 6 Measured frequency response of the optical microphone.

IV. 결 론

본 논문에서는 듀얼 코어 다중모드 광섬유 광헤드와 마이크로미터 반사형 진동판을 이용하여 광 마이크로폰을 구현하였다. 사용된 진동판은 음압에 비례하여 움직이도록 설계되었고, 광섬유 헤드는 외부 음압에 민감하게 변조되도록 제안하였다. 이 제안된 마이크로폰으로부터 기준 콘덴서 마이크로폰과 거의 동일한 출력 신호를 얻을 수 있었으며, 측정된 주파수 대역폭은 약 3 kHz였다.

감사의 글

본 연구는 Korea Research Foundation Grant (D00146)에 의해 지원받았습니다. 연구에 도움을 주신 LG전자기술원의 조일주 박사님과 안세원 박사님, 광운대의 구현모, 최종범, 박현정 학생에게 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [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, 2004.
- [6] N. Furstenuau, 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 micromirror 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.

저 자 소 개



송 주 한 (宋 柱 漢)

1982년 7월 8일생. 2005년 광운대학교 전자공학부 졸업. 2005년~현재, 광운대학교 대학원 전자공학과 석사과정
Tel : 02-914-5301
E-mail : canona@kw.ac.kr



이 상 신 (李 相 信)

1968년 9월 5일생. 한국과학기술원(KAIST) 전기및전자공학과에서 학사(1991년), 석사(1993년), 박사(1997년)학위 취득. 2001년 9월~현재, 광운대학교 전자공학과 조교수
Tel : 02-940-5581
E-mail : sslee@daisy.kw.ac.kr