반사형 마이크로 미러를 이용한 광마이크로폰

송주한 · 이상신†

광운대학교 전자공학과

㉾ 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1

(2006년 4월 6일 받음, 2006년 8월 10일 수정본 받음)

본 논문에서는 마이크로 미러 진동판을 이용한 광마이크로폰을 제안하고 구현하였다. 이 미러 진동판은 실리콘 바(bar)에 의해 프레임에 연결되어 있어서 인가된 음압에 따라 전후로 움직이게 되어 있으며, 작고 간단한 구조의 광 헤드는 한 개의 다중모드 광섬유로 되어 있다. 본 논문에서는 광헤드와 진동판 사이의 거리를 변화시켜 가면서 응답특성을 측정하여 선형성과 민감도가 최대인 지점을 동작점으로 결정하였다. 그리고 음성신호의 주파수를 변화시켜 가면서 구현된 소자의 출력을 측정하였다. 측정된 광마이크로폰의 주파수 대역폭은 약 ~2dB 출력 변화 이내에서 약 2 kHz였다.

주제어 : Microphone, Micrmirror, Reflective diaphragm, Fiberoptic, Acoustooptic transducer.

I. 서 론

최근 들어 광마이크로폰(microphone)이 기존의 캐패시턴스 마이크로폰과 비교하여 전자파 무관, 작은 크기, 가벼움, 높은 지향성등의 장점을 가지고 있어 이에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.[1-3] 이러한 광마이크로폰의 적용 분야로서는 MRI(magnetic resonance imaging) 와 CT(computed tomography) 촬영을 할 때 환자와 의사사이에 원활한 의사소통이 필요할 때와 또 공항에서 전자파의 간섭없이 공항의 상황들 즉 트럭의 무게, 승객을 태우는 차, 모터사이클 등을 구별하며 원거리의 통제시스템에서 상황을 통제할 때 사용될 수 있다. 광마이크로폰에서 빛을 변조시키는 방법 중 세기[4] 변조, 위상 변조,[5,6] 편광 변조 등이 있는데 이 중에서 세기 변조를 이용하는 것이 간단성과 안정성면에서 가장 적합하다.

본 논문에서는 반사형 마이크로 미러 진동판과 다중모드 광섬유로 이루어진 광헤드(optical head)를 이용하여 구현하였다. 광마이크로폰의 진동판으로 쓰인 마이크로 미러는 실리콘 프레임에 얇은 바(bar)로 매달려 있어서, 외부에서 인가해준 음압의 진행 방향에 따라 움직일 수 있도록 되어 있다. 이러한 진동판은 실리콘 프레임을 이용하여 고정시킬 수 있기 때문에 패키징이 용이하다. 그리고 하나의 다중모드 광섬유(MMF: multimode fiber)는 광원에서 나오는 빛을 진동판으로 보내고, 이것에 의해 반사되어 돌아오는 빛을 받는 작고 간단한 구조의 광헤드로서 사용된다. 본 논문에서는 제안된 광마이크로폰에 대해 MMF 광헤드와 진동판 사이의 거리를 변화시켜 가면서 광결합 특성을 조사하여 선형성과 민감도가 최대인 지점을 동작점으로 결정하였다. 그리고 음성 신호 대역의 주파수를 변화시켜 가면서 광마이크로폰의 주파수 응답 특성을 조사하였다.

† E-mail: sslee@daisy.kw.ac.kr

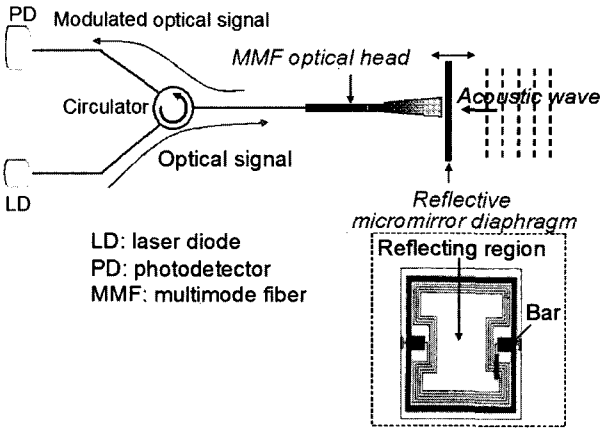


그림 1. 제안된 광마이크로폰의 구조.

그림 1에는 제안된 광마이크로폰의 구조가 도시되어 있다. 이것은 광헤드와 반사형 마이크로 미러형 진동판 등으로 구성되어 있다. 광헤드는 하나의 MMF로 구성되어 있는데, 이 MMF의 코어 직경은 62.5㎛이고 클래딩 직경은 125㎛이다. 먼저 진동판으로 사용되는 정사각형 형태의 마이크로 미러는 그림1에서 보는 것과 같이, 실리콘 기판에 금 박막을 코팅하여 형성된 진동막 구조를 갖는다.[7] 이 미러는 실리콘 프레임에 얇은 막대로 연결되어 있어서 인가되는 음압에 따라 앞뒤로 움직일 수 있도록 되어 있다. 이 미러의 크기와 두께는 각각 800 x 800㎛^{2}와 5㎛이며, 표면이 매우 평평하고, 800 ~ 1600 nm 광파장 대역에서 높은 반사 특성을 갖는다. 또 광원으로는 다이오드 레이저를 사용하였으며, 광전 변환기로는 광검출기를 사용하였다. 마지막으로 광섬유를 이용하

여 광원, 수신기, 그리고 광헤드를 연결하였다. 써큘레이터(circulator)를 통하여 광원으로부터 광헤드까지 연결하고 광헤드에서 광검출기까지 서로 신호가 섞이지 않도록 연결하여 구조를 단순화 시켰다. 제안된 광마이크로폰의 동작원리는 아래와 같다.

먼저 광원에서 나온 빛이 광헤드의 MMF를 통해 마이크로 미러 진동판의 표면으로 입사된다. 입사된 빛은 마이크로 미러 진동판에 의해 다시 반사되어 부분적으로 MMF로 돌아간다. 이 돌아온 빛은 써큘레이터를 통해, 광전변환기 쪽으로 가서 스피커로 연결되어 입력된 음압을 재생할 수 있도록 한다. 이 때 광헤드로 들어가는 빛의 결합 효율은 광헤드와 진동판 사이의 거리에 의해 결정된다. 왜냐하면 광헤드로부터 나온 빔은 거리와 진행 방향에 따라 퍼지기 때문이다. 음압이 마이크로 미러 진동판 뒤쪽에서부터 인가되었을 때 마이크로 미러 진동판이 전후 방향으로 움직이게 된다. 광헤드쪽으로 입사되는 빛의 양은, 미러 진동판이 음압에 의해 움직임에 따라, 빛이 광 헤드로 돌아오는 거리가 바뀌게되므로, 광 파워의 크기가 변하게 되고 결론적으로, 마이크로폰의 출력은 변조된 빛의 진폭에 비례하게 되어 입력한 음압의 세기가 커질수록 출력이 커지게 된다. 입력된 신호를 충실히 재생하기 위해서 광마이크로폰은 높은 선형성과 함께 효율적으로 외부에서 인가한 음압이 광신호로서 변조될 수 있어야 한다.

먼저, 그림1과 같이 MMF가 진동막에 수직으로 정렬되고 마이크로 미러와 MMF가 동작할 수 있는 최적의 위치를 찾는다. 1550nm 대역의 다이오드 레이져를 광원으로 이용하였고 광전변환기를 통해 변조된 광신호를 전기적 신호로 변환하였다. 음압은 전기적 파형 재생기에 의해 스피커를 통하여 발생시켰다. 또 BSE사의 상용화된 콘덴서 마이크로폰을 기준으로 사용하였다. 실험에서 미러 진동판과 광헤드는 모터로 정밀하게 조절되는 스테이지 위에 놓고 처음에는 최대의 빛이 돌아올 수 있도록 정렬하였다. 그리고, 광헤드와 진동판 사이에 선형성이 큰 동작점을 얻기 위해, 광헤드와 미러 사이의 거리를 변화시켜 가면서 진동판에서 MMF로 돌아오는 광의 양을 측정하였다.

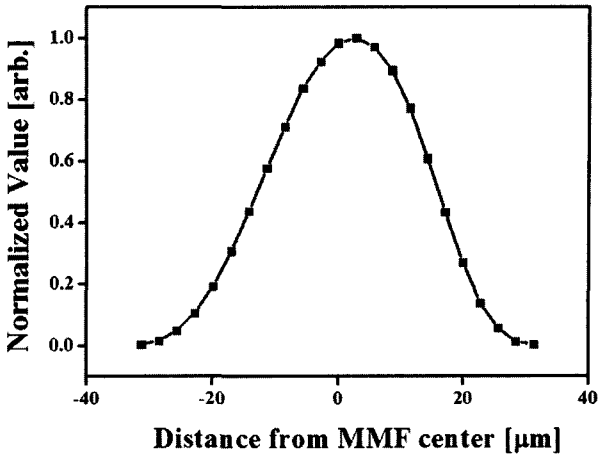


그림 2. 다중 모드 광섬유로부터 출력되는 빔의 광세기 분포.

그림 2에는 IR 카메라를 이용하여 MMF의 1550nm 파장대역에서의 빔의 모드분포가 나타나 있다. 이 측정된 모드분포를 다음과 같이 가우시안 빔으로 근사하면, 빔의 진행 방향 임의의 지점 z에서 빔의 세기 분포가 다음 식과 같이 주어진다.[8]

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

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

여기서 I_0와 W_0는 MMF의 출력단 z=0에서 광세기와 빔의 반지름을 각각 나타낸다. 그리고 z_0는 Rayleigh 범위, θ는 빔의 발산각(divergence angle), λ는 광파장(=1550 nm)을 각각 나타낸다. 이 때, IR 카메라를 통하여 측정된 빔 분포 특성은, W_0=24㎛ 이다. 이제 빔전파 방법을 통하여, 광섬유와 광헤드 간의 거리가 변할 때 결합 효율이 어떻게 변하는가 알아보자. 그림 3은 MMF 광헤드와 미러 사이의 관계 및 구조를 나타내고 있다. MMF 한 개를 이용하여 신호를 주고 받는 구조에서, 수직이 되게 정열을 하는 것은 어렵고 까다롭

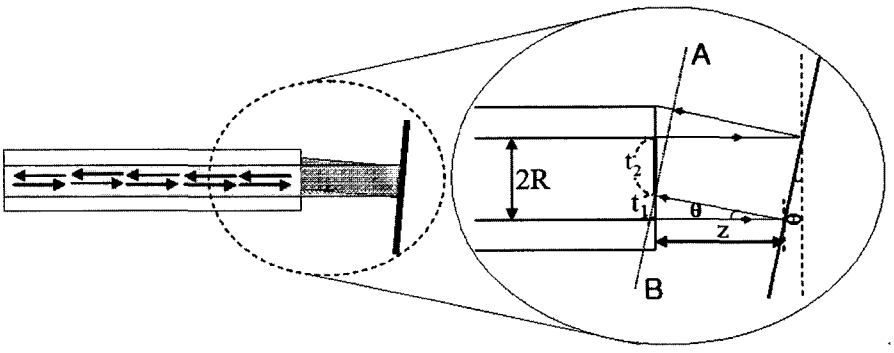


그림 3. 동작점 해석을 위한 광마이크로폰 구조 분석.

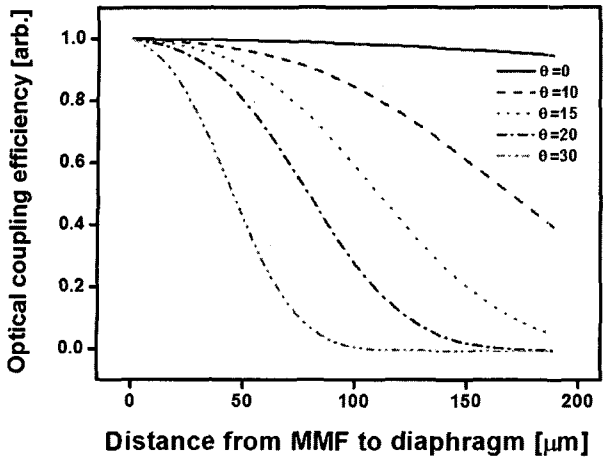


그림 4. 광섬유와 미러 간의 tilt angle에 따른 동작 곡선의 변화.

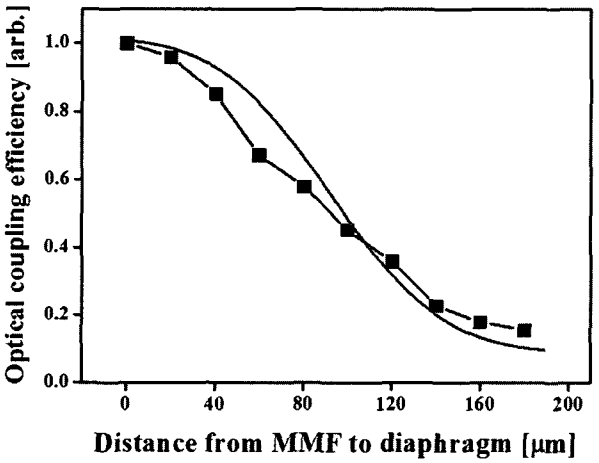
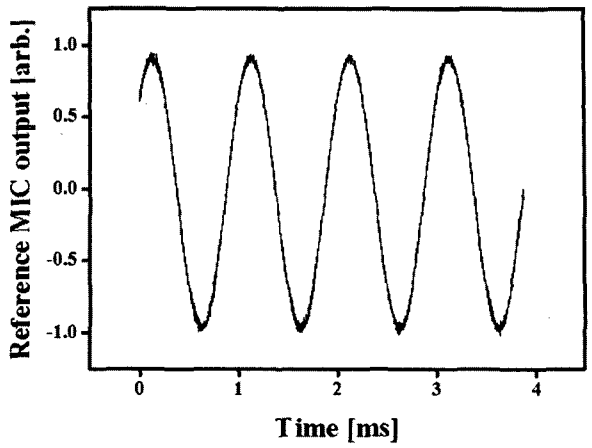
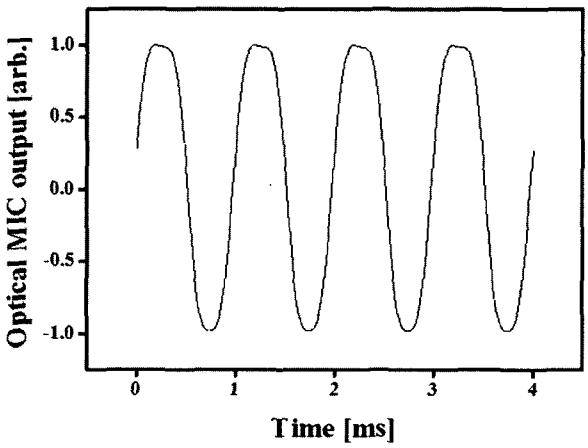


그림 5. 광섬유 헤드와 진동판 사이의 거리에 따른 광파워 결합 효율.



(a)



(b)

그림 6. 1 kHz 입력 음성 신호에 대한 (a) 기준 콘덴서 마이크로폰 출력 (b) 제안된 광마이크로폰 출력.

다. 만일 광섬유와 미러가 정확이 정렬된다면, 동작점은 수 백 μm 이상이 될 것이다. 그러나, 실제로는 그림 3과 같이 미러와 광섬유가 약간의 각도를 갖게 되고, 이것에 의해 동적 곡선이 나타나는 구간이 짧아지고 동작점도 훨씬 작아지게 된다. 이것의 동작원리를 살펴보면 다음과 같다. MMF 광섬유를 통해 외부로 가우시안 분포 특성을 갖고 진행하는 빛은 θ 만큼의 각이 있는 미러에 부딪쳐 다시 되돌아 오게 된다. 이 때, 미러과 광마이크로폰 헤드와의 거리를 z라고 하면, $t_1=z\tan\theta$의 관계식이 생긴다. 여기서, 코어의 반경 R=31.25μm 이므로, $t_2=62.5-t_1$이고, 광섬유의 코어 안으로 입사되는 빛은 $t_2\cos\theta$가 되고, 이것은 광섬유로 나가서 다시 돌아온 가우시안 빔의 적분 구간으로서 계산할 수 있다. 그림 4에는 위의 방법을 이용하여 θ에 따른 동작특성 곡선이 나타나 있다. θ =0°에 가까워지면 동작점은 수 백 μm 이상으로 매우 길어짐을 알 수 있다. 또한, θ값이 0°에 가까울수록 동작점에서의 기울기 역시 가파르지 않고 평탄해진다. 반면에 θ가 점점 커질수록 동작거리가 감소하고 동작점에서의 기울기가 증가함을 알 수 있다. 이것은 외부의 음압이 인가됨에 따라 더욱 민감하게 광마이크로폰이 반응하여 신호를 재생할 수 있음을 의미한다. 한편, θ가 과도하게 커지면 광손실이 급격히 증가하여 소자의 효율이 저하된다. 결과적으로 이러한 사항들을 고려하여 적당한 θ값을 결정하는 것이 요구된다. 그림 5는 거리의 변화에 따라 광 헤드로 다시 돌아오는 파워의 변화를 거리의 함수로 나타낸 것으로 실제 측정한 결과와 그림 3에서 모델링 하여 이론적으로 fitting 한 결과를 함께 도시하였다. 보는 것과 같이, 비교적 잘 맞음을 알 수 있다. 이 때 미러의 기울어진 각도인 θ가 약 17.5° 정도가 되었다. 이것은 실제로 측정했을 때 틀어진 각보다 큰 이론 값인데, MMF의 NA(numerical apeature)를 고려하지 않고 코어 안으로 들어온 빛이 모두 진행하였다고 가정해서차이가 생긴 것으로 사료된다. 동작점의 결과를 통하여 광헤드와 미러 진동판의 거리가 멀어질수록 MMF로 되돌아 오는 광 파워가 점점 줄어드는 것을 알 수 있다. 이러한 결과들을 토대로, 최적의 선형성과 기울기를 갖는 지점을 동작점으로 정하고자 할

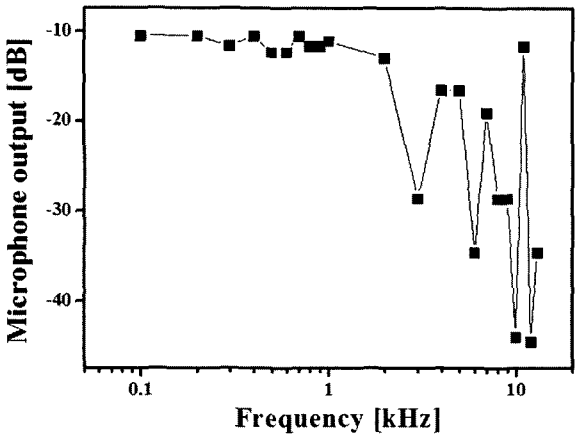


그림 7. 광마이크로폰의 측정된 주파수 응답 특성.

때, 약 60㎛에서 동작점을 결정하였다. 본 동작점 근처의 높은 선형성은 또한 소리를 소리를 왜곡없이 재생하는데 유리하다.

그림 6(a)와 6(b)는 기준 마이크로폰과 광마이크로폰에 1 kHz 주파수의 음압을 인가해 주었을 때 얻어진 출력 신호를 오실로스코프로 측정한 결과를 나타낸다. 이 결과로부터 제안된 마이크로폰로폰은 기준 마이크로폰과 거의 동일한 출력 특성을 보여줌을 알 수 있다. 광마이크로폰의 출력 신호의 위와 아래 피크 부분에서 약간 클리핑(clipping) 되는 부분이 나타나는데, 이것은 외부에서 걸어준 음압의 크기가 커서 미러 진동판의 움직임이 포화되었기 때문이다.

제작된 광마이크로폰의 측정된 출력 응답 특성은 그림 7에 나타나 있다. 여기서 1 Pa의 음압이 인가되었을 때 광마이크로폰의 출력 전압이 1 V인 경우를 0 dB로 가정하였다. 그림 7에서 보듯이 출력의 변화의 크기가 약 2 dB의 범위 내에서 2 kHz까지 일정한 주파수 응답특성을 갖고 있으며, 이 대역을 넘어서서는 응답이 불규칙적임을 알 수 있다. 따라서 제안된 광마이크로폰의 대역폭은 ~2 kHz 정도이다. 이 2 kHz 이상의 대역에서 관찰되는 불규칙적인 응답 특성은 미러 자체가 갖 있는 공진현상(natural resonance) 때문인 것으로 사료된다.[7] 한편, 대역폭을 증가시키기 위해서는 저주파 대역의 공진현상을 제거해야 하는데, 미러 진동판의 크기를 줄임으로써 가능할 것이다.

본 논문에서는 MMF 광헤드와 마이크로 미러형 반사 진동판을 이용하여 광마이크로폰을 구현하고, 이 소자의 동작점과 주파수 응답 특성에 대하여 연구하였다.

감사의 글

본 논문은 2006년도 「서울시 산학연 협력사업」의 「나노 IP/SoC 설계기술혁신사업단」의 지원과 학술진흥재단의 지원(D00146)으로 이루어졌습니다. 연구에 도움을 주신 LG전자 기술원의 조일주 박사님과 안세원 박사님께 감사 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, 2004.

[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 micromirror with bulk silicon mirror plates and torsion bars," IEEE Int'l Conf. on 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 Based on a Reflective Micromirror Diaphragm

Ju-Han Song, and Sang-Shin Lee†

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

† *E-mail : sslee@daisy.kw.ac.kr*

(Received April 6, 2006, Revised manuscript August 10, 2006)

An optical microphone incorporating a reflective diaphragm and a fiber-optic head was demonstrated. The diaphragm was made of a micromirror membrane which is suspended by a silicon bar connected to a frame, allowing for a displacement induced by acoustic waves. A compact, simple optical head was implemented by exploiting a single multimode fiber. 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 flat frequency response with a variation of ~2dB for the range of up to 2 kHz was accomplished.

OCIS code : 230.1040, 310.6860, 230.4040.