

# 광 마이크로폰 개발을 위한 광 경로해석 및 실험

## Optical Path Analysis and Experiments for Optical Microphone

권 휴 상\*, 김 경 우, 김 진 기, 제 우 성

(Hyu-sang Kwon, Kyong-Woo Kim, Jin-Ki Kim, and Woo-Seong Che)

**Abstract** : The theoretical formulations are derived for calculating optical power change for intensity modulated fiber optical microphone. The optical power change is due to optical paths, misalignment and geometry of optical coupler. Based on the theoretical equations, three different optical couplers are simulated with respect to several angles of optical couplers. In order to evaluate the formulation, a multi-mode to multi-mode coupler which is one of abovementioned optical couplers is designed and characterized by carrying out both static experiments and dynamic experiments. Considering experimental results, this paper conclude that the theoretical formulations is very useful for design optical coupler and this kind of fiber optic sensor is adequate to microphone.

**Keywords** : optical microphone, optical power coupling, optical coupler, optical path, dynamic characteristics

### I 서론

역학적인 음향신호를 광신호로 변환시켜 주는 광 변환기술에 기초한 광 마이크로폰은 주변의 전자기장이나 방사선에 의한 간섭이 전혀 발생하지 않으며 음압에 대한 감도가 뛰어나고 넓은 주파수 대역에서 그 응답특성이 우수하기 때문에 기존의 콘덴서 마이크로폰을 대체할 수 있는 차세대 기술로 인정받고 있다[1-4]. 또한 광 마이크로폰은 광섬유를 이용한 광 전송방식을 사용하여 원거리 신호 탐지와 전송이 가능하기 때문에 사람의 수시 접근이 용이하지 않은 넓은 지역에 분포시켜 지속적인 음향신호 감시에 효율적으로 사용될 수 있다.

이러한 광 마이크로폰은 전극과 금속을 사용하지 않기 때문에 가볍고 내구성이 높을 뿐만 아니라 구조가 간단하고 소형화, 집적화에 용이하여 높은 경제적 가능성을 가지고 있다. 콘덴서 마이크로폰은 진동판의 면적 이동에 비례하여 감도가 결정되므로 진동판이 크고 판 전체의 움직임이 균일해야 하지만 광 마이크로폰은 광이 반사하는 중앙부분의 움직임만을 고려하면 된다. 그리고 광 기술의 발달과 함께 저렴한 광소자의 사용이 가능해짐에 따라 가격 경쟁력을 가지는 고품질의 마이크로폰으로써 사용이 가능해짐에 따라 최근 들어 선진국에서는 국방을 비롯한 여러 분야에서 다시 활발하게 연구가 진행되고 있다.

광을 이용하여 변위를 측정하는 광 마이크로폰 등의 기본 개념은 학문적으로 오래전부터 잘 알려졌지만 실제적인 제작의 문제점으로 인해 아직까지 상용화에 어려움을 겪고 있다. 광 마이크로폰은 사용하는 광 변조방식에 따라 크게 세기변조(intensity modulation)와 위상변조(phase modulation) 방식으로 나눌 수 있다[4]. 잘 알려진 바와 같이 위상변조

방식은 미세한 거동도 측정이 가능하므로 감도가 높은 마이크로폰을 제작할 수 있지만 충격이나 진동, 온도 등과 같은 외부 요인에 쉽게 영향을 받는 단점이 있다. 그러므로 구조적으로 단순하고 외란에 강한 세기변조 방식의 광 마이크로폰이 현실적으로 많이 연구되고 있다. 또한 광 마이크로폰은 광섬유를 광 경로로 사용하는 FOM(Fiber Optical Microphone)과 광 경로를 수광 및 발광 소자와 같이 집적화하여 만든 IOM(Integrated Optical Microphone)으로 나눌 수 있다[1]. IOM 방법은 집적도와 생산성 등에서 우수하나 전자기장에 영향을 받지 않는 장점이 없어진다. 그러므로 본 연구에서는 FOM을 이용한 세기변조 방식을 개발 목표로 하였다.

이와 같은 세기변조 방식의 FOM의 개발에서 가장 중요한 핵심 기술로는 넓은 주파수 대역에서 높은 감도를 가질 수 있는 진동판과 광 경로의 설계와 제작을 들 수 있다. 큰 다이내믹 범위를 가지는 음압의 특성상 선형적이면서 큰 변위를 가지는 진동판의 동적 거동을 왜곡 없이 잘 측정하여 높은 신호 대 잡음비(SNR)를 가지는 수광 신호를 얻을 수 있는 광 경로 설계와 이를 구현하는 광 결합기의 제작은 매우 중요한 요소기술이다.

본 연구에서는 광 경로를 엄밀하게 해석하는 방법을 개발하고 이를 바탕으로 광 결합기를 제작하여 그 특성을 실험하였다. 기하학적 광 경로해석을 통해 광 경로에 따른 광 결합효율을 이론적으로 해석하고 예측하였으며 광섬유를 이용하여 광 결합기를 제작하였다. 그리고 제작한 광 결합기 전면에 광 반사거울을 부착한 소형 가진기를 설치, 구동하여 동적인 변위에 대한 광 결합효율을 측정함으로써 실제 마이크로폰으로의 적용 가능성을 확인하였다.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 7. 28., 채택확정 : 2006. 12. 7.

권휴상 : 한국표준과학연구원 기반표준부(hyusang@kriss.re.kr)

김경우 : 동명대학교 대학원 메카트로닉스공학과(woo\_da@nate.com)

김진기 : 전북대학교 정밀기계공학과(jinki@kriss.re.kr)

제우성 : 동명대학교 메카트로닉스공학과(wsche@tu.ac.kr)

### II. 기하학적 광 경로해석

하나의 광 장치 혹은 소자에서 다른 장치, 소자로 결합시킬 때 나타나는 광 출력효율, 결합효율은 광원과 광섬유 간을 결합하는 경우와 광섬유 상호간을 결합하는 경우의

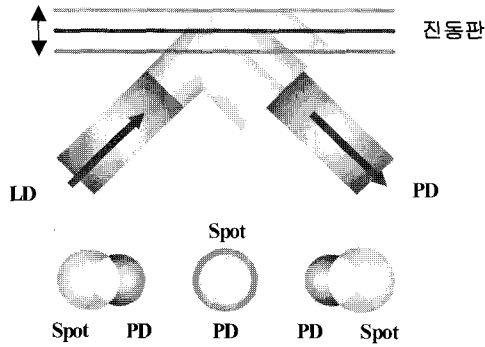


그림 1. 진동판의 위치 변화에 의한 광 축 어긋남과 광 결합손실의 발생.

Fig. 1. Optical path misalignment and optical power loss due to the location of membrane.

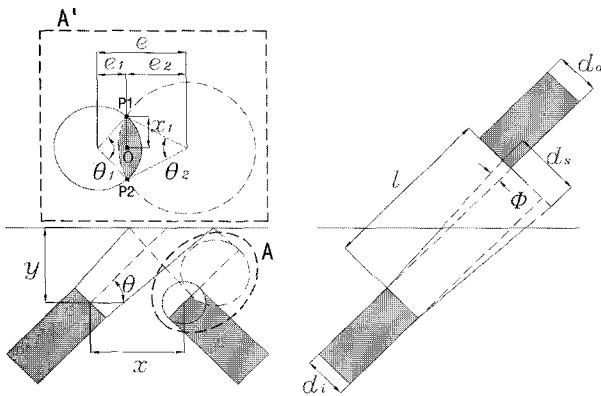


그림 2. 광 결합손실을 계산하기 위한 기하학적 설계인자들과 광 경로해석.

Fig. 2. Geometric design parameters and optical paths to evaluate the optical power loss.

손실로 구분할 수 있다. 광섬유 상호간의 결합손실은 광섬유코어의 축 어긋남, 각 어긋남, 끝단 벌어짐, 거친 끝 단면, 규격이 다른 광섬유 연결 등으로 손실이 발생된다 [1,5,6] 본 연구에서 제안하는 광 경로해석의 이론적 배경은 그림 1과 같이 진동판의 이동거리에 의한 축 어긋남 현상을 이용한 것으로 접속하는 2개의 광섬유가 동일한 중심축상에 있지 않기 때문에 발생하는 광전력 손실에 바탕을 두고 있다. 이러한 축 어긋남 손실은 발광 광섬유에서 나온 광선의 스팟(spot)과 수광 광섬유 코어가 접합면에서 서로 완전히 겹치지 못하기 때문에 발생한다[5-8].

본 연구에서는 광 방사조건을 단순하게 모델링하고 기하학적 관계를 이용하여 각 모드 결합에 의한 광 결합손실에 대한 이론적 해석을 수행하였다.

이때 방사하는 빛은 가우시안 분포(Gaussian distribution)를 가지지만, 다중모드에 대해서는 Cook and Hamm등이 균일분포로 가정하여 이론적 해석을 수행하였으며[5,6], 단일모드에 대해서는 균일분포로 가정하였을 경우 시뮬레이션 결과에 오차는 있으나, 타 요인으로 인한 광손실이 상대적으로 클 수 있는 요소가 많고, 이후 설계를 위한 편의성을

위하여 균일분포(Uniform distribution)로 가정하였다.

그림 2와 같이 진동판에 대하여 두 광섬유의 입사각  $\theta$  및 반사각은 동일하고 두 광섬유 코어의 중심은 진동판과 평행하게 놓여 있다고 가정하면 발광 및 수광 광섬유코어의 중심으로부터 진동판 사이의 거리는 동일하게 되는데 이 거리를  $y$ 라 하고 두 광섬유코어 중심 사이의 거리를  $x$ 라 두면 기하학적인 관계에 의하여 이들 사이의 관계식이 정리된다. 진동판의 위치변화에 의한 광 축 어긋남은 광선의 스팟(spot)과 수광 광섬유 코어의 접합면에 의해서 광 결합손실이 발생하게 되는데 두 광섬유 코어의 접합면의 면적은 다음의 식과 같다.

$$A = \left\{ \left[ \pi \times \left( \frac{d_o}{2} \right)^2 \times \frac{\theta_1}{360} \right] - [x_1 \times e_1] \right\} + \left\{ \left[ \pi \times \left( \frac{d_s}{2} \right)^2 \times \frac{\theta_2}{360} \right] - [x_1 \times e_2] \right\} \quad (1)$$

(1)에서 인자들 사이의 기하학적 관계를 정리하면 (2)-(4)와 같다.  $d_o$ 은 그림 2에서 보는 바와 같이 수신측 광섬유 코어의 지름이고  $d_s$ 는 송신측 광선의 스팟 지름이며 (2)와 같다. (2)에서  $l$ 는 발광 광섬유로부터 수광 광섬유까지 광선이 이동한 거리인 광로거리이고  $x$ 는 두 광섬유 중심 사이의 거리이다. 그리고  $\phi$ 는 광섬유의 퍼짐각이다.

$$d_s = d_i + 2l \tan \theta \quad (2a)$$

$$l = 2y \sin \phi + x \cos \phi \quad (2b)$$

그리고  $\theta_1, \theta_2$ 는 실선원과 점선원의 원점에서 점 P1과 점 P2사이의 각이고,  $x_1$ 는 두 원이 만나는 점과 중심 사이의 거리(P1과 O사이의 거리)이며 (3)과 같다.

$$\theta_1 = 2 \times \left[ \tan^{-1} \left( \frac{x_1}{e_1} \right) \right] \quad (3a)$$

$$\theta_2 = 2 \times \left[ \tan^{-1} \left( \frac{x_1}{e_2} \right) \right] \quad (3b)$$

$$x_1 = \sqrt{\left( \frac{d_o}{2} \right)^2 - e_1^2} \quad (3c)$$

(3)에서  $e$ 는 그림 2와 같이 진동판이 기준위치에서 앞뒤로 이동하여 광 경로가 어긋나서 두 원의 중심이 일치하지 않을 경우에, 두 원의 중점 사이의 거리이고 두 원이 만나는 점을 그림 2에서와 같이 각각 P1, P2라 하여 이를 연결하면 이 선분의 중점 O를 중심으로 점선원의 중점까지의 거리를  $e_1$ , 실선원의 중점까지의 거리를  $e_2$ 로 표현할 수 있다.

$$e = 2y \cos \phi - x \sin \phi \quad (4a)$$

$$e_1 = \frac{e^2 + \left( \frac{d_o}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_s}{2} \right)^2}{2e} \quad (4b)$$

$$e_2 = e - e_1 \quad (4c)$$

(1)과 같이 계산된 겹쳐진 부분의 면적으로부터 광의 결

합효율 혹은 결합손실을 산출할 수 있는데, 공기 전달이나 광섬유 끝단에서의 손실, 그리고 진동판 반사면의 반사 손실 등을 무시한다면 그림 2에서 볼 수 있듯이 광선의 스팟 크기, 즉 점선원의 면적에 대한 겹쳐진 부분의 면적 (1)의 비가 발광 에너지에 대한 수광 에너지의 비로 표현된다. 그러므로 이러한 면적 비를 이용하여 (5)와 같이 광 결합효율을 표현할 수 있으며 또한 이에 대한 차로써 광 결합손실을 표현할 수 있다.

$$Power\ Coupled(\%) = \frac{A}{\pi d_s^2} \times 100 \quad (5)$$

**III. 모의실험 및 결과**

앞서 설명한 광 결합 관계식을 이용하여 설계인자를 바꿔가면서 다양한 광 결합 조건에 대하여 모의실험을 수행하였다. 모의실험에서는 일반적으로 많이 사용되는 9 $\mu$ m 코어 지름의 단일모드 광섬유와 50 $\mu$ m 코어 지름의 다중모드 광섬유를 대상으로 하였다. 광섬유의 파장은 1550 nm이고 퍼짐각은 개구수(NA)로부터 계산되어 지는데 단일모드 광섬유의 경우 8.05°, 다중모드 광섬유인 경우에는 11.54°로 산출하여 적용하였다. 모의실험은 임의의 입사각도에 대하여 광섬유와 진동판 사이의 거리 y의 변화에 따른 광 결합효율, 즉 출력신호의 크기를 구하였다.

모의실험에서 광섬유 중심 사이의 거리는 진동판의 변위 등 실제적인 상황을 고려하여 200 $\mu$ m로 하였으며 입사각은 15~75°까지 15° 간격으로 변화시켰다. 그리고 각각의 입사각에 대하여 광섬유 중심에서 진동판 사이의 거리를 1 $\mu$ m씩 이동시키면서 광 결합효율을 계산하였다. 진동판의 이동에 대한 광 결합효율에 관한 관계를 그래프로 다음의 그림들에서 나타내었다.

**1. 단일모드-단일모드 광 결합**

그림 3에서는 코어의 지름이 9 $\mu$ m인 단일모드 광섬유를 사용하는 단일모드-단일모드 광 결합의 모의실험 결과를

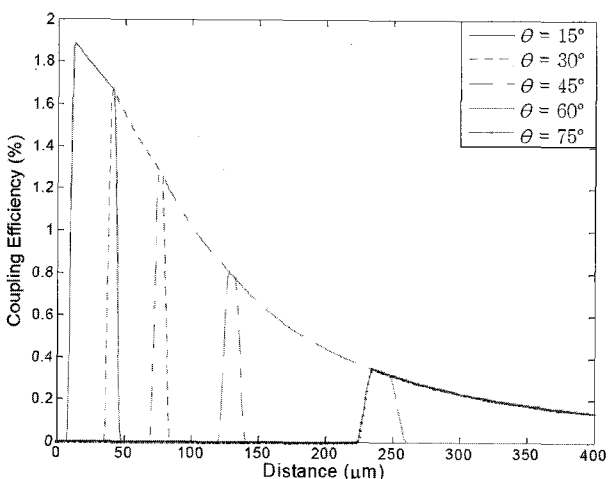


그림 3. 진동판의 이동거리에 따른 광 결합효율의 변화 (단일모드-단일모드 광 결합).

Fig. 3. Coupled optical power relative to movement of membrane (single mode - single mode optical coupling).

보여주고 있다. 이와 같은 광 결합에서는 스팟 면적이 항상 수광 광섬유 면적 보다 크게 되므로 항상 광의 손실이 크게 발생하게 되고 이에 따라 광 결합효율이 현저히 감소하게 된다.

그림 3에서 알 수 있듯이 광 결합효율은 2% 미만으로 수광된 광의 파워가 작아짐을 알 수 있으며 이에 따라 광 결합효율의 기울기 역시 작아서 센서로서의 감도 특성이 좋지 않다는 사실을 확인할 수 있다. 그러므로 이와 같은 광 결합은 변위측정을 위한 센서로서 효용성이 떨어진다고 판단할 수 있다.

**2. 다중모드-다중모드 광 결합**

그림 4는 다중모드-다중모드 광 결합으로써 코어의 지름이 50 $\mu$ m인 다중모드 광섬유를 사용하는 경우이다. 이런 조합도 역시 앞서 설명한 단일모드-단일모드 광 결합과 마찬가지로 두 광섬유의 크기가 같기 때문에 광 결합부에서 필연적으로 손실이 크게 발생하게 된다. 그러나 이와 같은 다중모드 광섬유는 코어의 지름이 크기 때문에 단일모드 광섬유를 사용하는 것보다 같은 위치에서 광 결합효율을 더 높게 할 수 있다. 즉 단일모드 광섬유에 비해 다중모드 광섬유의 코어는 훨씬 크지만 클래딩을 포함한 전체 광섬유의 크기는 동일하기 때문에 같은 거리에 놓인 광섬유 구조에서는 다중모드 광섬유의 광 결합효율이 훨씬 크게 됨을 알 수 있다. 그러므로 현실적인 경우에는 다중모드 광섬유를 사용하는 것이 타당하다 할 수 있다.

**3. 단일모드-다중모드 광 결합**

그림 5에서는 단일모드-다중모드 광 결합의 모의실험 결과로써 수광 광섬유는 코어의 지름이 9 $\mu$ m인 단일모드 광섬유이고 발광 광섬유는 코어의 지름이 50 $\mu$ m인 다중모드 광섬유를 사용한 경우의 결과이다. 이 경우에는 수광 광섬유의 코어가 발광 광섬유의 코어보다 크기 때문에 광 스팟의 크기가 정확하게 수광 광섬유의 크기와 일치하는 조건을 찾을 수 있다. 이와 같은 상황에서는 광 결합효율이 100%

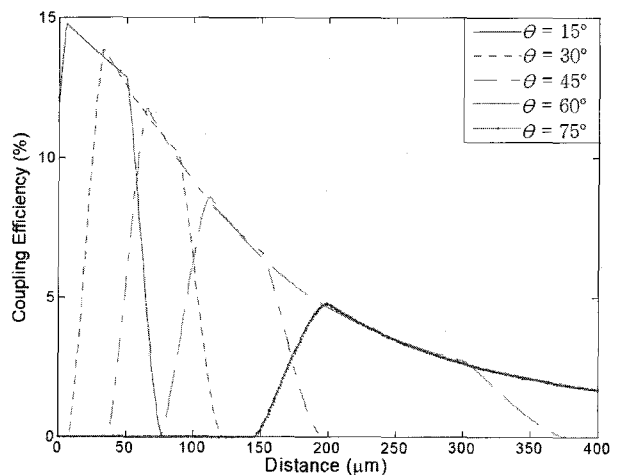


그림 4. 진동판의 이동거리에 따른 광 결합효율의 변화 (다중모드-다중모드 광 결합).

Fig. 4. Coupled optical power relative to movement of membrane (multi-mode - multi-mode optical coupling).

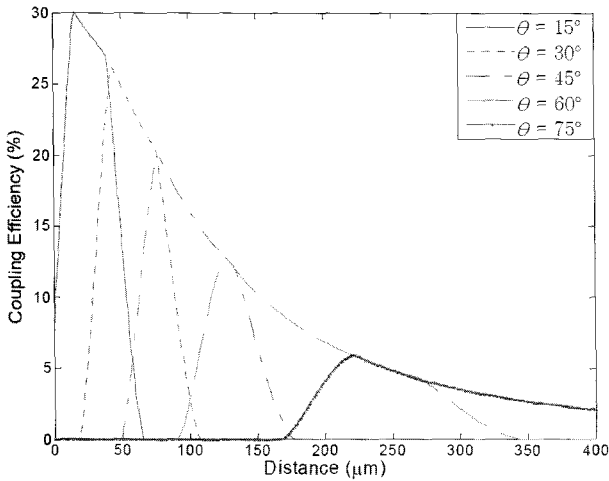


그림 5. 진동판의 이동거리에 따른 광 결합효율의 변화 (단일모드-다중모드 광 결합).

Fig. 5. Coupled optical power relative to movement of membrane (single mode - multi-mode optical coupling).

가 된다. 또한 일반적인 조건에서도 수광 광섬유가 크기 때문에 많은 빛을 받아들임으로써 광 손실을 줄이면서 좋은 효율을 기대할 수 있다.

앞서 수행한 모의실험 결과로부터 입사각이 작아져 두 광섬유 사이의 각도가 벌어질수록 그래프의 기울기가 커지면서 선형적이므로 센서로서 좋은 특성을 가진다는 사실을 알 수 있다. 또한 감도를 크게 할 수 있는 장점을 가진다는 사실도 알 수 있었다. 그러나 클래딩을 포함한 광섬유의 외경이 크기 때문에 실제로 진동판을 광섬유 중심에 가까이 두기 어렵고 진동 변위를 고려하면 실제 사용 가능한 이동거리 범위는 수십 μm 이상 떨어져야 한다. 또한 입사각이 작을수록 광섬유의 곡률이 커지게 되므로 실제 마이크로폰의 크기의 제약을 받게 된다. 그러므로 현실적인 많은 문제를 고려하여 광 결합기를 설계해야 한다.

IV. 실험 및 결과

1. 광 결합기 제작

본 연구에서는 이론적 해석의 타당성을 검증하기 위하여 실험을 수행하고 실험의 용이성을 감안하여 다중모드-다중모드 결합에 대한 실험을 수행하였다.

앞서 설명한 광 경로해석을 이용하여 실제적으로 사용가능한 광 결합기를 설계, 제작하였다. 본 연구에서 사용한 다중모드 광섬유는 코어의 지름이 50μm이고 클래딩의 지름이 125μm이며 개구수(NA)는 2.0으로 이로부터 광 퍼짐각은 11.54°로 계산하였다. 그리고 앞서 설명한 바와 같이 클래딩을 포함한 광섬유의 두께와 진동막의 변위를 고려하여 광 결합의 기하학적인 관계 해석을 바탕으로 광섬유 중심 사이의 거리를 200μm로 하고 입사각을 45°로 설계하였다. 이러한 설계를 토대로 유리판에 U 그루브를 만들고 광섬유를 고정하여 그림 6과 같이 광 결합부를 제작하였다.

정밀 이송장치위에 앞서 제작한 다중모드-다중모드 광결합기를 장착한 후 반사면과의 거리를 변화시키면서 광결합

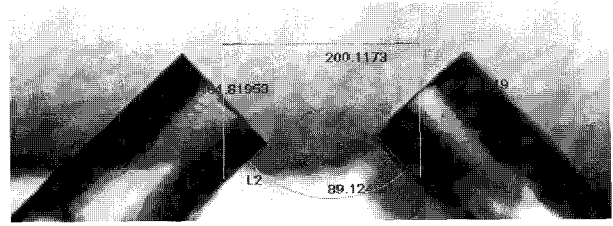


그림 6. 다중모드-다중모드 광 결합기 사진.

Fig. 6. Photograph of a multi-mode - multi-mode fiber optical coupler.

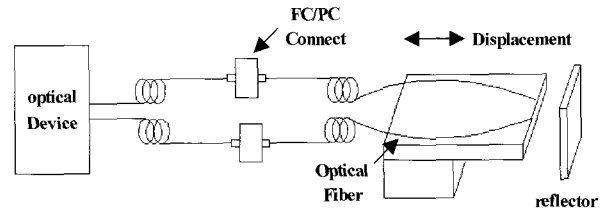


그림 7. 광 소자 구동 회로와 광 커넥터의 개념도.

Fig. 7. Electric circuit for optical devices and optical connector of block diagram.

특성을 측정하는 실험을 수행하였다. 여기서 발광 소자로는 1550nm 파장의 XL Photonic사 XFL 0250C-001 Laser Diode를 사용하였으며 수광 소자로는 XL Photonic사의 XMPD 0250-001 Photodiode를 사용하였다. 그리고 이 소자에 전류를 공급하고 이로부터 신호를 얻기 위하여 간단한 전자회로를 설계하였으며 이를 만능기판에 구현하고 광 결합부와 광 소자부의 광섬유를 연결하기 위하여 그림 7과 같이 FC/PC 광 커넥터를 사용하여 실험하였다.

먼저 광 결합효율의 기준값을 정하기 위하여 수광 광섬유에서 발광 광섬유로 광 커넥터로 직접 연결하여 신호의 크기를 측정하였는데, 이때 측정된 전압신호의 크기는 약 4.5V 이었다. 본 연구의 실험에서는 이 기준값에 대한 실제 측정된 전압신호의 비로써 (6)과 같이 광 결합효율을 계산하였다.

$$Power\ Coupled(\%) = \frac{output\ [V]}{4.5\ [V]} \times 100 \quad (6)$$

그림 8은 광섬유 중심과 진동판사이의 거리를 5μm씩 이동하면서 얻은 광 결합효율을 보여 준다. 수평축(x축)은 발광 및 수광 광섬유 코어의 중심으로부터 진동판 사이의 거리를 정확히 측정하는데 어려움이 있어 이 그래프에서 실험과 시뮬레이션의 결과를 광 결합효율이 최대가 되는 점을 영으로 설정한 후 양방향과 음방향의 거리를 표시한 것이다. 실험결과와 경우에는 광 축 어긋남 뿐만 아니라 광섬유 자체가 갖는 내적손실 요인인 광섬유의 흡수손실과 산란손실과 외적 손실인 굽힘손실[9] 등의 다른 여러 요인에 의한 광 손실의 발생과 기준손실을 직접결합하여 광 결합효율을 정성적 고찰을 하여 광 결합효율이 많이 감소하였지만, 그래프의 형태는 유사성을 지니고 있음을 알 수 있다.

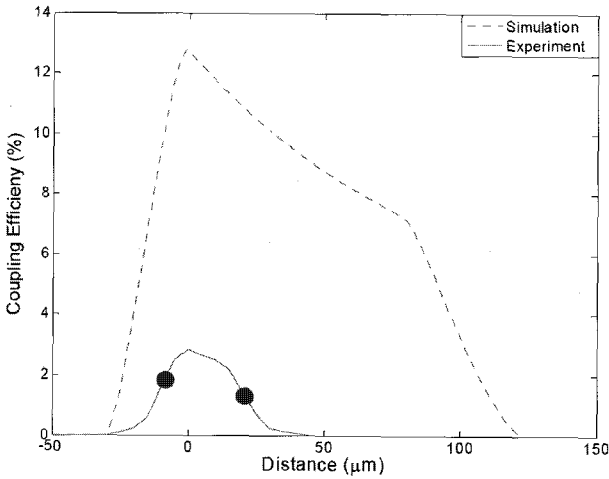
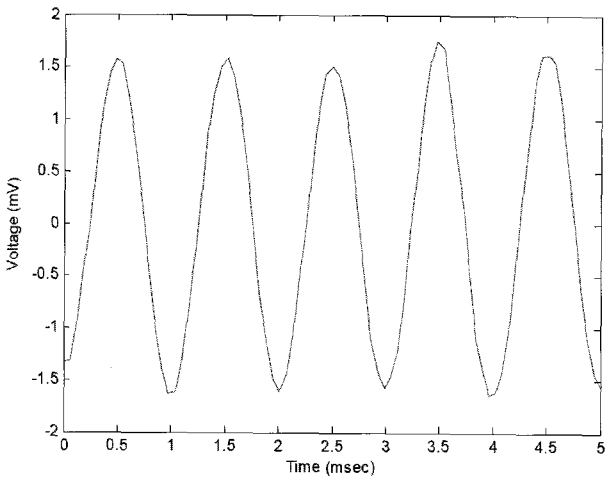
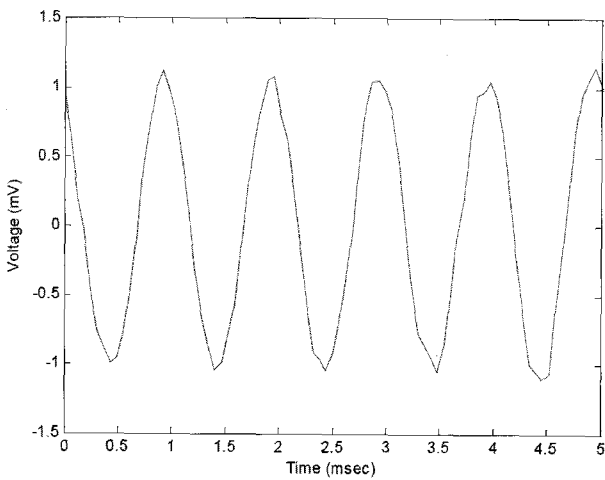


그림 8. 다중모드-다중모드 광 결합기의 광 결합효율 모의실험 및 측정 결과 비교.

Fig. 8. Simulation and experimental results of optical coupling power of multi-mode - multi-mode optical coupler.



(a) A point



(b) B point

그림 9. A점과 B점 위치에서의 광 결합기 출력 신호

Fig. 9. Output signals obtained by optical coupler.

이와 같은 광 결합기의 성능은 측정하는 변위에 대한 감도로써 표현할 수 있다. 이러한 감도는 동일한 변위 변화에 대하여 광 결합효율의 변화를 의미하는 것으로 이는 광 결합효율 그래프의 기울기로 나타내게 된다. 그러므로 그림 8 과 같이 구한 광 결합효율 그래프에서 기울기가 크고 선형인 부분을 사용범위로 정하는 것이 타당하다. 그림 9(a)는 정현파 1kHz를 가하고 변위는 20nm일 때, 음방향에서의 기울기가 가장 큰 부분의 A점의 신호이고, 그림 9(b)는 양방향에서 기울기가 가장 큰 부분의 B점의 신호이다.

따라서 본 연구에서는 그림 8에서 A점과 B점으로 표시된 그림 2의 y(광섬유코어의 중심으로부터 진동판 사이의 거리)값을 세팅한 후 동적변위 특성실험을 각각 수행하였다.

2. 동적변위 특성실험

본 연구에서 개발하는 광 결합기는 마이크로폰과 같이 동적인 거동의 측정을 목적으로 하므로 동적 응답특성을 확인하는 것이 매우 중요하다. 이를 위하여 다음 그림과 같이 동적 변위를 측정하고 비교하는 실험을 수행하였다.

그림 10와 같이 동적인 운동을 가하기 위해서 B&K사의 4810 소형 가진기를 사용하였으며 그 가진축에 직접 B&K사의 압전형 가속도계를 부착하여 변위를 측정하였다. 사용한 가속도계는 감도를 정밀 교정하였으므로 이 출력신호로부터 가진되는 진동의 크기를 환산할 수 있었다. 그리고 이 가속도계 면에 광학거울을 설치하였으며, 이 면에서 반사하는 광을 이용하여 광 결합기의 광 결합효율을 측정하였다.

본 실험에서는 기준 주파수로써 1kHz 정현파에 대하여 측정을 수행하였다. 앞서 언급한 것과 같이 광 결합기의 기준위치는 정적변위 실험수행시 얻은 선형적인 신호 특성이 나타나는 그림 8의 A점과 B점을 선택하였다. 진동 변위에 따른 광 결합기의 감도와 신호의 왜곡을 측정하고 고찰하기 위하여 가진 변위를 5nm부터 30nm까지 5nm씩 증가시키면서 신호의 변화를 측정하였다. 실제 마이크로폰에서 사용하는 진동판의 변위를 고려하여 수 nm~수십 nm를 설정하여 실험하였다. 가진 변위의 크기는 기준 가속도계 신호를 이용하여 가진기의 입력전압을 조정하여 맞췄다. 그림

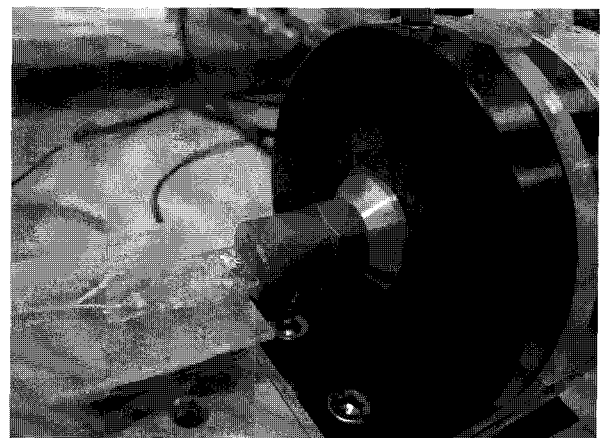
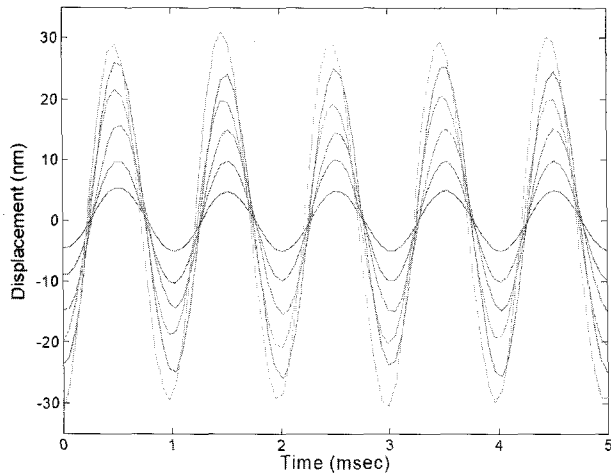
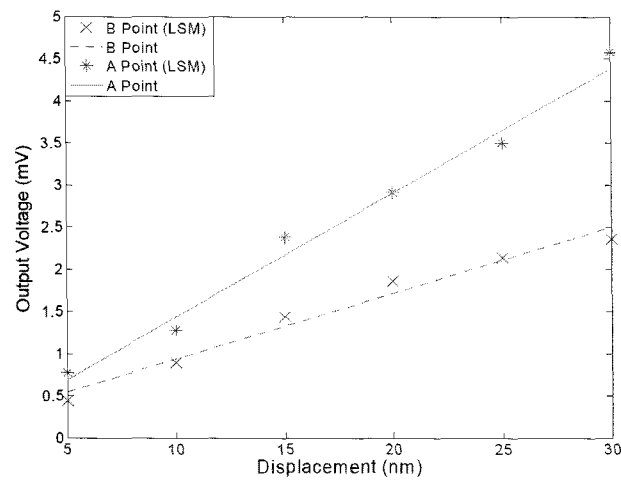


그림 10. 소형 가진기를 이용한 동적 변위 실험장치 구성.

Fig. 10. Experimental setup for dynamic displacement measurement with an exciter.



(a) 가속도계에서 측정된 진동변위.



(b) A점과 B점에서 변위대 광출력의 진폭.

그림 11. A점과 B점 위치에서의 광 결합기 출력 신호.

Fig. 11. Output signals obtained by optical coupler at (a) A point and (b) B point.

11은 가속도계로부터 측정된 변위의 크기와 각각의 변위에서의 진동에 대한 광 결합기의 출력신호의 진폭을 보여주고 있다.

그림 11의 \* 과 ×점은 A점과 B점에서 출력신호의 peak-to-peak값을 각 변위에 대해서 평균값을 나타낸다. 그리고 실선은 A점에서 LSM방법(Least Square curve fitting Method) [10]을 1차식으로 근사하였을 경우 얻어지는 직선이며, (7)을 이용하여 구하였다. A점의 감도는 0.150V/μm이었고, B점의 감도는 0.079V/μm이었다.

$$Y_{LSM} = \left[ \frac{n\sum xy - \sum x \sum y}{n\sum x^2 - (\sum x)^2} \right] x + \left[ \frac{\sum x^2 \sum y - \sum x \sum xy}{n\sum x^2 - (\sum x)^2} \right] \quad (7)$$

표 1은 각 변위에 대한 입력신호와 이에 따른 광 출력신호, 각 변위에 대해서 LSM방법에 의하여 구한 1차식으로부터 계산된 값과 LSM방법에 의해 구한 값과 실험값과의 오차를 나타내고 있다. 표 1에서 입력신호의 변위는 B&K사의 4810 소형가진기의 가진축에 정밀교정을 한 B&K사의

표 1. 입력변위에 대한 광 결합 출력전압과 LMS 값.

Table 1. The output voltage and LMS value of the optical coupler corresponding to input displacement.

A Point	Input Displacement (nm)					
	5	10	15	20	25	30
B Point						

Displacement (nm)	Output Voltage (mV)					
	5	10	15	20	25	30
A Point	0.77	1.28	2.38	2.91	3.50	4.57
B Point	0.44	0.90	1.44	1.86	2.14	2.35

Displacement (nm)	Least Square Method					
	5	10	15	20	25	30
A Point	0.70	1.44	2.19	2.94	3.69	4.44
B Point	0.54	0.93	1.33	1.72	2.11	2.50

압전형 가속도계를 부착하여 이 출력신호로부터 가진되는 변위를 환산할 수 있다. 가진되는 변위는 가진기를 가진시키는 함수발생기에서 발생하는 전압으로부터 결정되는데 이 전압은 (8)을 이용하여 구하였다.

$$V_i = D \times 4\pi^2 \times f \times sensitivity \quad (8)$$

(8)에서  $f$ 는 함수발생기에서 발생하는 주파수를 의미하고  $D$ 는 실제 가진시킬 하는 변위이다. sensitivity는 본 실험에서 사용한 가속도계의 sensitivity를 나타낸다.

실험을 결과를 바탕으로 LSM 방법을 이용하여 A점과 B점의 동적변위에 대한 선형성을 알아보았다. 그림 11과 표 1에서 알 수 있듯이 변위의 크기에 대하여 광 결합기의 출력이 선형성을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 또한 앞서 설명한 바와 같이 A점의 감도가 B점보다 좋으며 이에 잡음이나 신호의 왜곡이 작다는 사실도 신호로부터 확인할 수 있었다. 이는 그림 8에서 확인한 바와 같이 A점 부근에서 그래프의 기울기가 크고 선형적이어서 센서로써 우수한 신호특성을 나타낸다는 사실을 알 수 있다.

이와 같이 측정된 광 신호의 주파수 특성을 고찰하기 위하여 스펙트럼 분석을 수행하였다. 그림 12에서는 각 변위에서의 SNR과 고조파 신호비를 보여주고 있다.

그림 12에서 알 수 있듯이 제작한 광 결합기의 출력신호는 대략 40dB 이상의 신호 대 잡음비와 30dB 이상의 고조파 신호비를 가진다는 사실을 알 수 있다. 그런데 이는 가진기의 신호 왜곡이나 주변 환경요인들을 고려하지 않은 결과이므로 실제로 잘 설계된 실험환경에서는 더 좋은 결과를 얻을 수 있으며 A점 부근을 이용하는 경우에는 최하 약 40dB 이상의 동적 범위를 확보할 수 있음을 알 수 있다.

이와 함께 sine sweep법을 이용하여 기준 가속도계의 신호에 대한 광 결합기 신호의 주파수 응답을 구하였다. 사용하는 가진기와 광 결합기의 측정범위의 제한을 고려하여

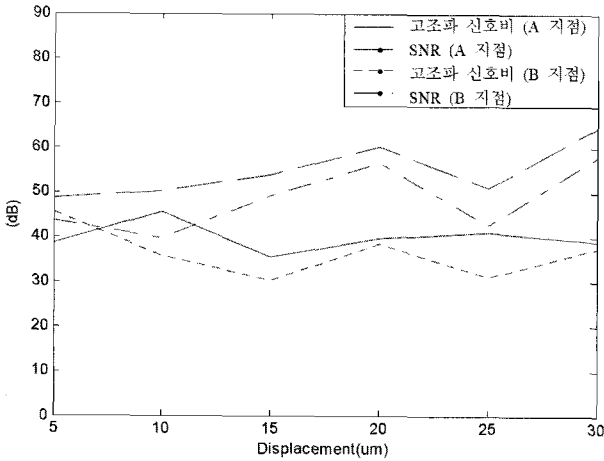


그림 12. 측정 신호의 신호 대 잡음비와 고조파 신호비.  
Fig. 12. Signal to noise ratio and harmonic ratio of measured signal.

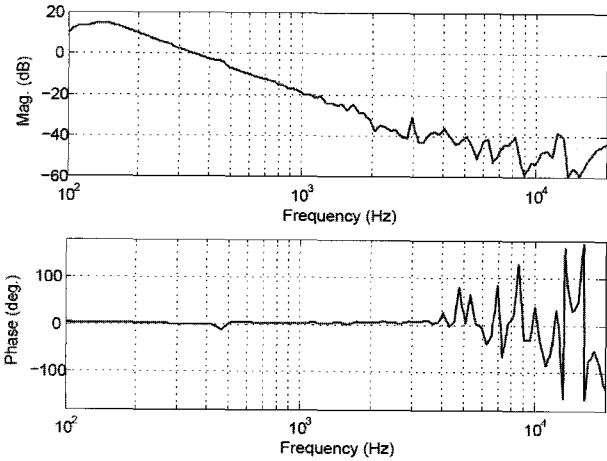


그림 13. 가속도계의 신호에 대한 광 결합기 신호의 주파수 응답.  
Fig. 13. Frequency response functions of optical coupler signal relative to accelerometer signal.

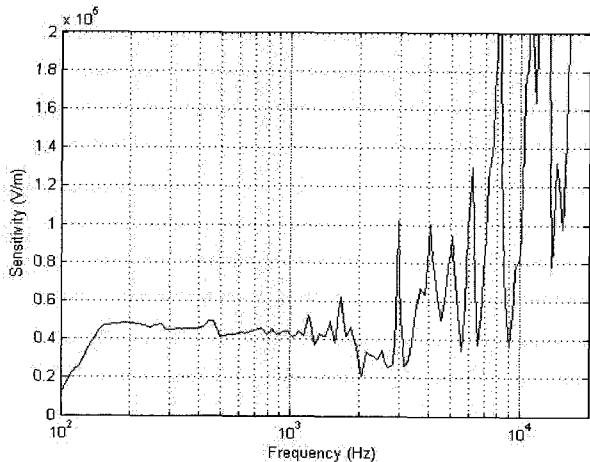


그림 14. 측정된 주파수 응답의 광 결합감도.  
Fig. 14. Estimated sensitivity of optical coupler from the measured frequency response.

100Hz 부터 20kHz 까지의 범위에서 측정을 수행하였다. 다음 그림 13은 측정된 주파수 응답을 보여 준다.

광 결합기의 출력신호는 변위를 표현하므로 그림 13에서 확인할 수 있듯이 가속도계 신호에 비하여 주파수가 증가하면서 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 이 그래프의 기울기는 잘 알려진 바와 같이 decade 당 -40dB가 된다. 또한 주파수 응답의 위상은 일정하게 약 180도 위상차를 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

이 측정결과에서 교정을 통하여 얻은 기준 가속도계의 감도, 10mV/(m/s<sup>2</sup>)을 사용하여 광 결합기의 감도를 계산할 수 있다(그림 14).

산출한 광 결합기의 감도는 약 50kV/m로 일정함을 알 수 있는데 고주파 영역에서는 가속도 측정에 의하여 큰 측정 오차가 발생함을 확인할 수 있다.

이 결과는 실제로 진동판의 결합을 통하여 마이크로폰으로써 사용이 가능하다는 사실을 잘 말해준다. 그리고 A점에서 광 변환의 선형성이 좋기 때문에 고조파 왜곡이 작고 잡음이 적음을 알 수 있다. 그러므로 광 결합기의 적용에 있어서 A 위치를 정하여 진동판을 설계하는 것이 타당하다.

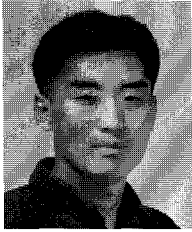
V. 결론

광섬유의 광 축 어긋남에 의한 광 결합효율의 변화에 기초한 광 경로를 해석하고 광 결합기에 대한 연구를 수행하였다. 광 마이크로폰을 목적으로 하는 광 결합기를 설계하고 이를 제작하여 정적, 동적 특성을 측정하였다. 기하학적인 광섬유의 광 경로해석을 바탕으로 다양한 광 결합조건을 모의실험 하였고 최적의 광 결합기를 설계할 수 있었다. 제작한 다중모드-다중모드 광 결합기의 동적변위 특성을 실험하고 고찰함으로써 광 마이크로폰 제작을 위한 기반기술을 확립하였고 그 가능성을 확인하였다.

참고문헌

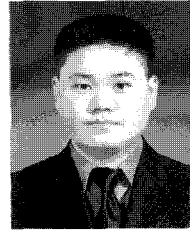
- [1] Y. Kahana, A. Paritsky, A. Kots, and S. Mican, "Recent advances in optical microphone technology," *Inter-noise 2003*, pp. 1158-1169, 2003.
- [2] A Phone-Or White Paper, "Microphone for speech recognition applications," *Phone-Or Ltd.*, 2001.
- [3] K. Kadirvel, R. Taylor, S. Horowitz, L. Hunt, M. Sheplak, and T. Nishida, "Design and characterization of MEMS optical microphone for aeroacoustic measurement," *42nd Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, AIAA 2004-1030*, 2004.
- [4] N. Bilaniuk, "Optical microphone transduction techniques," *Applied Acoustics*, vol. 50, Issue 1, pp. 35-63, 1997.
- [5] G. He and F. W. Cuomo, "Displacement response, detection limit, and dynamic range of fiber-optic lever sensors," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 9, no. 11, pp. 1618-1625, 1991.
- [6] G. He and F. W. Cuomo, "A light intensity function suitable for multimode fiber-optic sensors," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 545-551, 1991.

- [7] Y. Li and T. Erdogan, "Cladding-mode assisted fiber-to-fiber and fiber-to-free-space coupling," *Optic communication* 183, pp. 377-388, 2000.
- [8] C. J. Koester and E. Snitzer, "Amplification in a fiber laser," *Applied Optics*, vol. 3, no. 10, pp. 1182-1186, 1964.
- [9] J.-A. Yoo, J.-H. Jo, and I.-b. Kwon, "Multiplexed bend loss type single-mode fiber-optic displacement sensor using reflection signals generated at optical connectors," *Optical Society of Korea*, vol. 15, no. 15, pp. 415-422, 2004.
- [10] E. O. Doebelin, "Measurement system application and design," *McGraw-Hill*, pp. 39-58, 1990.



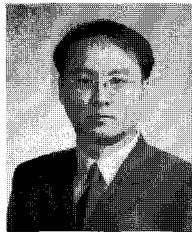
**권 휴 상**

1990년 한국과학기술원 기계공학과 졸업. 1992년 동 대학원 석사. 1997년 동 대학 박사. 1998년~현재 한국표준과학연구원 선임연구원. 관심분야는 소음 및 진동, 신호처리 응용, 센서.



**김 경 우**

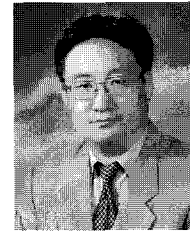
2006년 동명대학교 메카트로닉스공학과 졸업. 2006년~현재 동명대학교 대학원 석사과정. 관심분야는 신호처리, 센서, 제어.



**김 진 기**

1997년 전북대학교 정밀기계공학과 졸업. 1999년 동 대학원 석사. 2002년 동 대학원 박사 수료. 2002년~2006년 4월 에스브이(주) 기술연구소 연구원. 2006년 4월~현재 한국표준과학연구원 박사 연구 과정. 관심분야는 소음 및 진동,

신호처리 응용.



**제 우 성**

1984년 한양대학교 기계공학과 졸업. 1987년 한국과학기술원 생산공학과 석사. 1997년 동 대학 박사. 1995년~1998년 만도기계중앙연구소 선임연구원. 1998년~현재 동명대학교 메카트로닉스공학과 부교수. 관심분야는 센서 및

센서 응용, MEMS.