

# 음향/진동 측정을 위한 광섬유 결합기의 설계 및 특성실험

## Design and Characterization of Fiber Optical Coupler for Acoustic and Vibration Measurements

권 휴 상\* · 김 경 우\*

Hyu-sang Kwon and Kyong-woo Kim

(2006년 7월 20일 접수 ; 2006년 9월 4일 심사완료)

Key Words : Fiber Optical Microphone(광섬유 마이크로폰), Optical Power Coupling(광 결합), Optical Coupler(광 결합기), Dynamic Characteristics(동적 특성)

### ABSTRACT

This paper presents the design and characterization of a novel fiber optical coupler for intensity modulated fiber optical microphone. Theoretical equations for the optical power coupling are presented in detail including optical path analysis and misalignment. Various optical couplers are simulated and manufactured. A multi-mode to multi-mode coupler is characterized by static and dynamic movements of mirror on a well designed experimental stage.

### 1. 서 론

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<sup>(1~4)</sup>. 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 중앙 부분의 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.

또한 같은 원리로 광 가속도계 및 광 하이드로폰과 같이 진동 및 수중음향 센서로서도 우수한 성능과 잠재적 발전 가능성을 가지고 있으며 많은 연구가 진행되고 있다.

광을 이용하여 변위를 측정하는 광 마이크로폰 등의 기본 개념은 학문적으로나 기술적으로 오래전부터 잘 알려져 왔다. 광을 이용하여 변위를 측정하는 방법은 광 변조방식에 따라 크게 세기변조(intensity modulation)<sup>(4)</sup>, 위상변조(phase modulation)<sup>(5-6)</sup>, 편광변조(polarization modulation)방식으로 나눌 수 있으며 또한 외부(extrinsic) 및 내부(intrinsic)<sup>(7)</sup> 방식으로도 나눌 수 있다<sup>(8)</sup>. 그런데 잘 알려진 바와 같

† 책임저자; 정회원, 한국표준과학연구원

E-mail : hyusang@kriss.re.kr

Tel : (042)868-5057, Fax : (042)868-5643

\* 동명대학교 대학원 메카트로닉스공학과

이 위상변조나 편광변조 방식은 변위 감도가 높기 때문에 미세한 거동도 측정이 가능하여 감도가 높은 마이크로폰을 제작할 수 있지만 간섭계 등과 같이 측정을 위한 장비가 비싸며 구조가 복잡하다. 또한 충격이나 진동, 온도 등과 같은 외부 요인에 쉽게 영향을 받는 단점이 있다. 그러므로 구조적으로 단순하고 외란에 강하여 경제성이 우수한 세기변조 방식의 광 마이크로폰이 현실적으로 많이 연구되고 있다.

또한 광 마이크로폰은 광섬유를 광 경로로 사용하는 FOM(fiber optical microphone)<sup>(9)</sup>과 광 경로를 수광 및 발광 소자와 같이 집적화하여 만든 IOM(integrated optical microphone)으로 나눌 수 있다<sup>(11)</sup>. IOM 방법은 집적도와 생산성 등에서 우수하나 전자기장 영향 등의 장점이 없어진다. 그러므로 이 연구에서는 FOM을 이용한 세기변조 방식의 센서 개발을 목표로 하였다.

광섬유의 변형을 직접 이용하는 내부 변조방식에서는 구조가 단순하지만 광섬유의 변형을 일으키기 위해서는 높은 압력이 필요하기 때문에 감도가 낮게 된다. 이에 반해 외부 진동판을 이용하는 외부 방식은 정밀한 광 경로 설계와 제작이 가능하면 감도를 높일 수 있기 때문에 현실적으로 광 마이크로폰에 적합하다. 국내에서는 수중 음향센서로서 내부변조 방식을 이용한 예가 소개되었지만<sup>(10)</sup> 이는 위상변조 방식을 사용하였으므로 현실적인 한계가 있다.

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 동적 범위를 가지는 음압의 특성상 선형적이면서 큰 변위를 가지는 진동판의 구조 설계와 제작 기술, 그리고 이 진동판의 동적 거동을 왜곡 없이 잘 측정하여 높은 신호 대 잡음비(SNR)를 가지는 수광 신호를 얻을 수 있는 광 경로 설계와 광섬유 가공 기술이 종합적으로 요구된다. 여기에 더하여 마이크로폰의 패키징 기술 또한 필요하다.

이러한 여러 요소기술 중에서 이 연구에서는 광 경로의 해석과 이를 바탕으로 한 광 결합기의 제작에 관한 기술을 소개하고자 한다. 이에 광섬유에서의 기하학적인 관계를 이용하여 광 경로에 따른 광 결합효율을 이론적으로 해석하여 예측하였으며 광섬

유를 이용하여 광 결합기를 제작하였다. 그리고 제작한 광 결합기에 광 반사거울을 설치하여 광 결합 효율을 측정하여 마이크로폰이나 더 나아가 가속도계 등의 센서에서의 사용 가능성을 확인하였다. 또한 정적 변위에 대한 광 결합특성 뿐만 아니라 가진기를 이용한 동적 변위 특성도 측정함으로써 실제적인 음향이나 진동센서로서의 적용을 확인하고자 하였다.

## 2. 광 마이크로폰의 구조와 광 결합효율

앞서 설명한 바와 같이 세기변조 방식 FOM은 구조적인 단순함과 외부 영향에 강건하다는 등 마이크로폰으로써 좋은 특성을 가지고 있다. 이와 같은 구조의 마이크로폰은 Fig. 1과 같이 반사면의 위치 변화에 따라 광 결합효율이 변화하는 원리를 이용한다.

발광부에서 발생한 빛은 광섬유를 통하여 전달되고 그 끝단에서 방사되어 진동판에 반사되고 수광부의 광섬유에 모여져서 검출되어 진다. 이와 같은 광섬유에서의 광 결합손실은 광섬유 코어의 축 어긋남, 각 어긋남, 끝단 벌어짐, 거친 끝 단면, 규격이 다른 광섬유 연결 등의 요인에 기인하여 발생한다<sup>(1,11-12)</sup>. 진동판의 이동거리에 의한 축 어긋남 현상과 이에 따른 광 결합손실의 이론적 배경은 접촉하는 2개의 광섬유가 동일한 중심축 상에 있지 않기 때문에 발생하는 광전력 손실에 바탕을 두고 있다. 이러한 축 어긋남 손실은 발광 광섬유에서 나온 광선의 크기와 수광 광섬유 코어가 접합면에서 서로 완전히 겹치지 못하기 때문에 발생한다<sup>(11-14)</sup>. 이 연구에서는 광 결합손실에 대한 이론적 해석을 수행하기

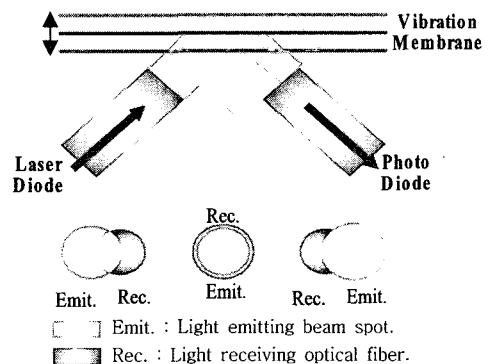


Fig. 1 Optical path misalignment and optical power loss due to the location of membrane

위하여 광 방사조건을 단순하게 모델링하여 기하학적 관계를 이용하였다. 이때 광섬유가 단일모드일 경우 방사하는 빛은 가우시안 분포(Gaussian distribution)를 가지게 되지만 광섬유 직경이 작기 때문에 공간적 분포의 영향이 작으며 다중모드 광섬유에서는 다양한 모드의 중첩으로 인한 퍼짐현상이 발생하여 광선이 가우시안 분포(Gaussian distribution)보다는 균일분포(uniform distribution)에 가깝기 때문에 이 연구에서는 광 방사를 균일분포(uniform distribution)로 전파한다고 가정하여 이론적인 해석을 수행하였다<sup>(11~12)</sup>.

Fig. 2와 같이 진동판에 대하여 두 광섬유의 입사각  $\theta$  및 반사각은 동일하고 두 광섬유 코어의 중심은 진동판과 평행하게 놓여 있다고 가정한다. 이와 같은 경우에 발광 및 수광 광섬유의 중심으로부터 진동판 사이의 거리는 동일하게 되는데 이 거리를  $y$ 라 하고 두 광섬유 중심 사이의 거리를  $x$ 라 두면 기하학적인 관계에 의하여 이들 사이의 관계식이 정리된다. 이때 Fig. 3과 같이 빛의 경로 상에서 광섬유들의 중심이 정확히 일치하는 경우에서의 진동판과 광섬유 사이 거리를  $y_0$ 로 두고 진동판이 이동할 때 거리  $y$ 를 일반적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_0 = \frac{x}{2} \tan \theta \tag{1a}$$

$$y = y_0 \pm y' \tag{1b}$$

즉  $y_0$ 는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 광섬유가 어긋나지 않고 정렬되어 있는 상태로써 기준위치로 설정하고 여기로부터 축 정렬의 어긋남 거리를  $y'$ 로서 이동거리를 나타낸다.

광 결합부인 A부분에서의 광 정렬 현상을 확대하

여 A'에서 자세히 표현하였다. 여기서 실선원은 수광 광섬유 코어으로써 광선을 수광할 수 있는 범위를 나타내며 점선원은 발광 광섬유에서 방사되어 퍼져나온 광선의 크기를 나타낸다. 그러므로 실선원의 넓이는 수신측 광섬유 코어의 지름인  $d_o$ 에 의하여 정해지고, 점선원은 발광 광섬유 코어의 지름과 퍼짐각 등에 의하여 계산되어 진다. 이 점선원의 지름을  $d_s$ 라 하고 발광 광섬유 코어의 지름을  $d_i$ , 그리고 발광 광섬유의 빛 퍼짐각을  $\phi$ 라 하면 발광 광섬유로부터 수광 광섬유까지 광선이 이동한 거리인 광로거리  $l$ 과 광선 크기의 지름  $d_s$ 는 각각 다음과 같이 계산되어 진다.

$$l = 2y \sin \theta + x \cos \theta \tag{2}$$

$$d_s = d_i + 2l \tan \phi \tag{3}$$

이 관계는 Fig. 2의 오른쪽 그림과 같이 진동판을 중심으로 거울에 대한 반사를 고려하여 광로의 기하

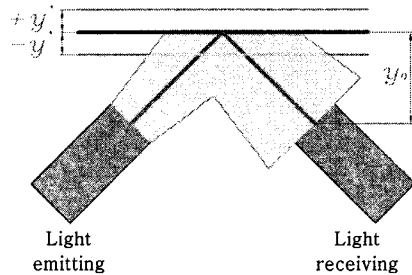


Fig. 3 Reference location of membrane with aligned optical path and its movement with path misalignment

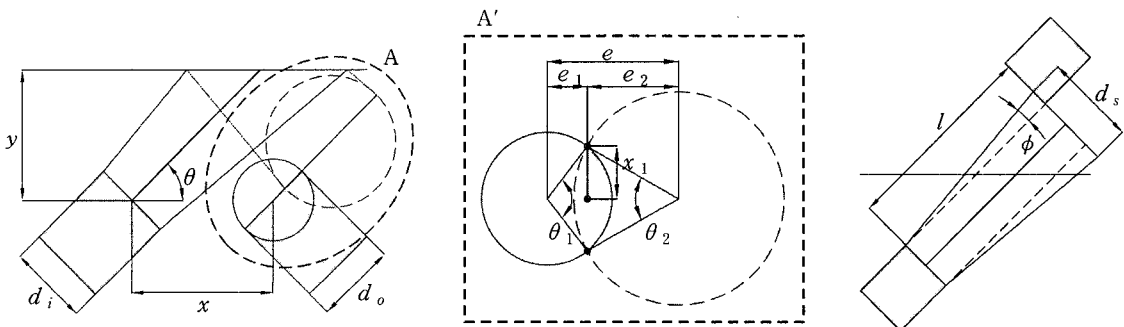


Fig. 2 Geometric design parameters and optical paths to evaluate the optical power loss

학적인 관계를 생각하면 쉽게 구할 수 있다.

Fig. 2와 같이 진동판이 기준위치에서 앞뒤로 이동하여 광 경로가 어긋나서 두 원의 중심이 일치하지 않을 경우에, 두 원의 중점 사이의 거리를  $e$ 라 하고 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. 이 인자들 사이의 기하학적 관계를 정리하여 표현하면 각각 다음과 같다.

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

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

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

또한 두 원이 만나는 점과 중심 사이의 거리(P1과 O사이의 거리)를 나타내는  $x_1$ 은 다음과 같다.

$$x_1 = \sqrt{\left(\frac{d_e}{2}\right)^2 - e_1^2} \quad (5)$$

$\theta_1, \theta_2$ 는 실선원과 점선원의 원점에서 점 P1과 점 P2사이의 각이고 이는 다음과 같이 계산되어 진다.

$$\theta_1 = 2 \times \left[ \tan^{-1} \left( \frac{x_1}{e_1} \right) \right] \quad (6a)$$

$$\theta_2 = 2 \times \left[ \tan^{-1} \left( \frac{x_1}{e_2} \right) \right] \quad (6b)$$

결국 이러한 관계식을 이용하여 정리하면 두 원에 의하여 겹쳐진 부분의 면적은 다음과 같이 계산된다.

$$A = \left\{ \left[ \pi \times \left( \frac{d_e}{2} \right)^2 \times \frac{\theta_1}{360} \right] - [x_1 \times e_1] \right\} + \left\{ \left[ \pi \times \left( \frac{d_s}{2} \right)^2 \times \frac{\theta_2}{360} \right] - [x_1 \times e_2] \right\} \quad (7)$$

이와 같이 계산된 겹쳐진 부분의 면적으로부터 광의 결합효율 혹은 결합손실을 산출할 수 있다. 공기 전달이나 광섬유 끝단에서의 손실, 그리고 진동판 반사면의 반사 손실 등을 무시한다면 Fig. 2에서 볼

수 있듯이 광선의 크기, 즉 점선원의 면적에 대한 겹쳐진 부분의 면적(식 (7))의 비가 발광 에너지에 대한 수광 에너지의 비로 표현된다. 그러므로 이러한 면적 비를 이용하여 식 (8)과 같이 광 결합효율을 표현할 수 있으며 또한 이에 대한 차로써 광 결합손실을 표현할 수 있다.

$$\text{Power coupled}(\%) = \frac{A}{\pi d_s^2} \times 100 \quad (8)$$

### 3. 모의실험 및 결과

앞서 설명한 광 결합 관계식을 이용하여 설계인자를 바꿔가면서 다양한 광 결합 조건에 대하여 모의 실험을 수행하였다. 모의실험에서는 일반적으로 많이 사용되는 9  $\mu\text{m}$  코어 지름의 단일모드 광섬유와 50  $\mu\text{m}$  코어 지름의 다중모드 광섬유를 대상으로 하였다. 광섬유의 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  $y$ 의 변화에 따른 광 결합효율, 즉 출력신호의 크기를 구하였다.

그런데 입사각이나 광섬유 중심 사이의 거리  $x$  등 광 결합효율에 영향을 미치는 설계인자가 많기 때문에 이를 비교하기 위해서는 기준위치의 설정이 중요하다. 이를 위하여 이 연구에서는 Fig. 3과 같이 광 정렬 어긋남이 없는 위치  $y_0$ 를 기준으로 하여 결과를 고찰하였다. 기준위치를 정하기 위하여 먼저 단일모드-다중모드 결합인 경우에는 수광 광섬유의 크기가 발광 광섬유보다 크기 때문에 광 퍼짐에 의하여 광 결합부에서 광선의 크기와 수광 광섬유 코어가 정확히 일치하는 조건을 설정할 수 있다. 이와 같은 조건을 기준조건으로 하여  $x$ 와  $y_0$ 를 정하였다. 이러한 기준조건에서는 이론적으로 100%의 광 결합효율을 가지게 됨을 알 수 있다.

그러나 단일모드-단일모드 혹은 다중모드-다중모드 광 결합과 같이 동일한 수광 광섬유와 발광 광섬유를 사용하는 경우에는 광 퍼짐각에 의하여 광 결합부에서 광선의 크기가 수광 광섬유의 코어보다 크게 되므로 최대 100%의 광 결합효율을 기대할

수 없게 된다. 그러므로 이 경우에는 적절한 결합조건으로 기준위치를 설정하여야 한다. 이 연구에서는 같은 조건으로 비교, 분석을 하기 위하여 단일모드-단일모드 광 결합의 경우, 단일모드-다중모드 결합과 동일한 조건으로 기준위치를 설정하였다. 이러한 조건에서 광 결합부의 광선의 크기에 대한 수광 광섬유의 면적비는 약 30.86배가 된다.

다중모드-다중모드 광 결합의 경우에는 진동판의 변위 범위와 클래딩을 포함한 광섬유의 두께 등을 고려하여 현실적으로 가능한 조건으로써 광 결합부의 면적 비를 10배로 정하였다.

모의실험에서 입사각은 15~75° 까지 15° 간격으로 변화시켰으며 각각의 경우에서 광섬유 중심에서 진동판 사이의 거리를 1 μm씩 이동시켰다. 그리고 그 결과를 Fig. 4~6과 같이 진동판의 이동에 대한 광 결합효율의 관계로써 그래프로 나타냈는데 가로축은 진동판과 광섬유 중심 사이의 기준위치를 중심으로 이동거리의 증가 혹은 감소를 표현하였다.

Fig. 4는 지름이 9 μm인 단일모드 광섬유를 발광부로 지름이 50 μm인 다중모드 광섬유를 수광부로 사용하는 단일모드-다중모드 광 결합에서의 모의실험 결과이다. 기준위치에서 수광부의 광선의 크기와 수광 광섬유는 정확히 일치하므로 100%의 광 결합효율을 기대할 수 있다. 또한 입사각이 작아져 두 광섬유 사이의 각도가 벌어질수록 그래프의 기울기가 커지면서 선형적이므로 센서로서 좋은 특성을 가진다는 사실을 알 수 있다.

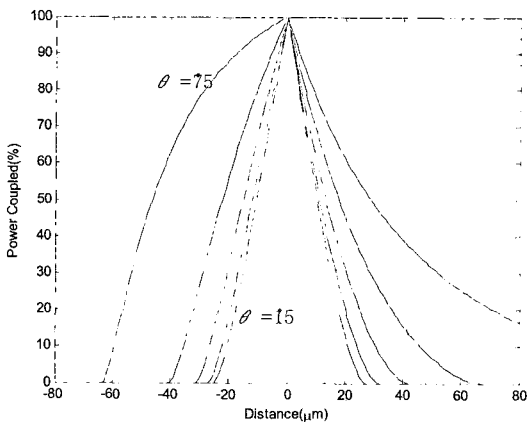


Fig. 4 Coupled optical power relative to movement of membrane (single mode - multi-mode optical coupling)

Fig. 5에서는 코어의 지름이 9 μm인 단일모드 광섬유를 사용하는 단일모드-단일모드 광 결합의 모의실험 결과를 보여주고 있다. 이와 같은 광 결합에서의 기준위치는 앞서 설명한 단일모드-다중모드 광 결합과 동일하게 설정하여 수광부 광섬유의 차이에 따른 광 결합효율의 변화를 고찰하고자 하였다. 이와 같은 광 결합에서는 광선의 크기가 항상 수광 광섬유 면적 보다 크게 되므로 광의 손실이 발생하게 되고 이에 따라 광 결합효율이 현저히 감소하게 된다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 광 결합효율은 10% 미만으로 수광된 광의 파워가 작아짐을 알 수 있으며 이에 따라 광 결합효율의 기울기 역시 작아서 센서로

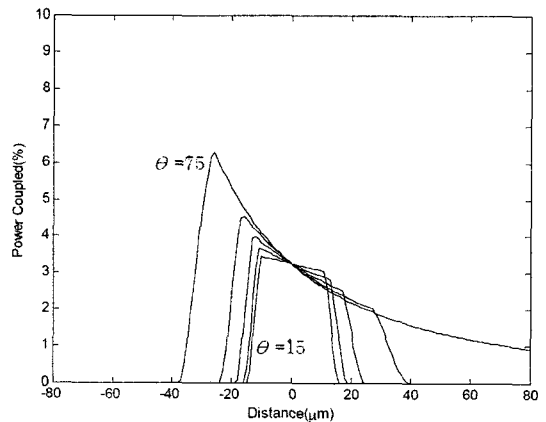


Fig. 5 Coupled optical power relative to movement of membrane (single mode - single mode optical coupling)

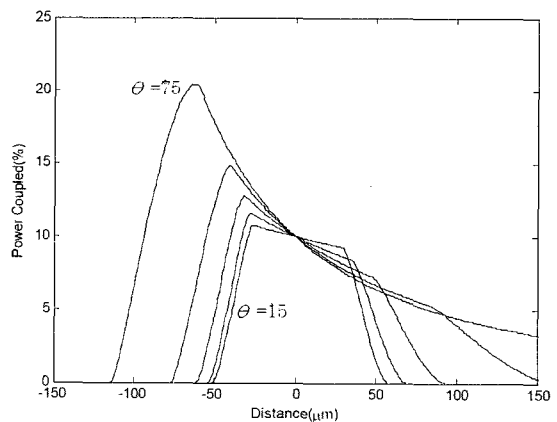


Fig. 6 Coupled optical power relative to movement of membrane (multi-mode - multi-mode optical coupling)

서의 감도 특성이 좋지 않다는 사실을 유추할 수 있다. 그러므로 이와 같은 광 결합은 변위측정을 위한 센서로서 효용성이 떨어진다고 판단할 수 있다.

Fig. 6은 다중모드-다중모드 광 결합으로써 코어의 지름이 50  $\mu\text{m}$ 인 다중모드 광섬유를 사용하는 경우이다. 이런 조합도 역시 앞서 설명한 단일모드-단일모드 광 결합과 마찬가지로 두 광섬유의 크기가 같기 때문에 광 결합부에서 필연적으로 손실을 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. 이 모의실험에서는 기준위치의 광선의 크기와 수광 광섬유 면적비를 10배로 설정하였다.

#### 4. 실험 및 결과

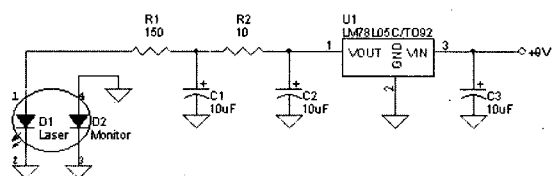
##### 4.1 광 결합기 설계 및 제작

앞서 설명한 세기 변조 방식의 광 결합기를 설계, 제작하여 광 결합특성을 측정함으로써 그 성능을 확인하였다. 일반적으로 많이 사용되는 단일모드 광섬유와 다중모드 광섬유를 사용하여 다양한 종류의 광 결합기를 설계, 제작하였는데 그 중에서 이 논문에서는 다중모드 광섬유를 이용한 대표적인 한 예에 대하여 소개하고자 한다.

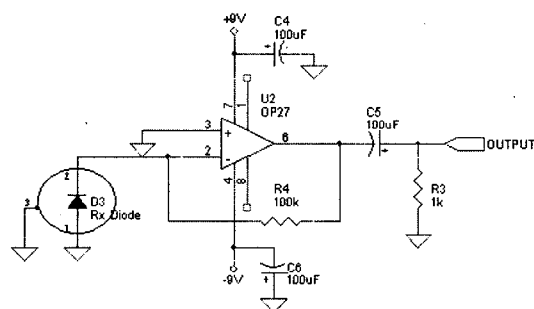
이 연구에서 사용한 다중모드 광섬유는 코어의 지름이 50  $\mu\text{m}$ 이고 클래딩의 지름이 125  $\mu\text{m}$ 이며 개구수

(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 200  $\mu\text{m}$ 로 하고 입사각을 45°로 설계하였다. 그리고 이와 같은 설계대로 유리판에 U 그루브를 만들고 광섬유를 고정하여 Fig. 7과 같이 광 결합부를 제작하였다.

발광 소자로는 1550 nm 파장의 XL Photonic사 XFL 0250C -001 Laser Diode를 사용하였으며 수광 소자로는 XL Photonic사의 XMPD 0250-001 Power-monitor Photo Diode를 사용하였다. 그리고



(a) Laser diode



(b) Photo diode

Fig. 8 Circuit for laser diode(a) and photo diode(b)

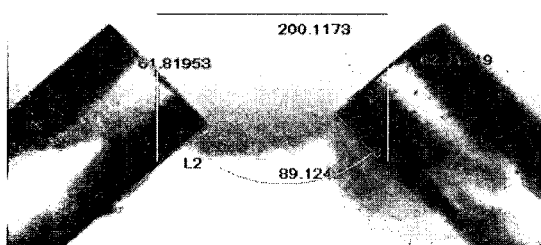


Fig. 7 Photograph of a multi-mode - multi-mode fiber optical coupler

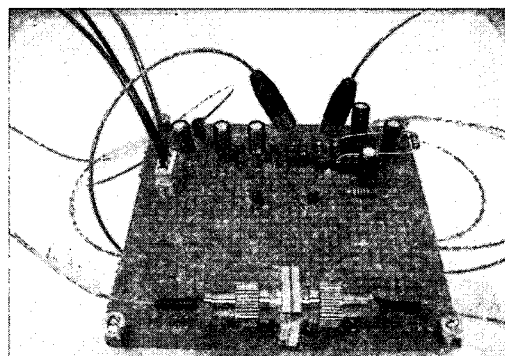


Fig. 9 Assembled electric circuit for optical devices and optical connector

이 소자에 전류를 공급하고 이로부터 신호를 얻기 위하여 Fig. 8과 같이 간단한 전자회로를 설계하였으며 이를 만능기판에 구현하여 실험하였다.(Fig. 9)

그리고 광 결합부와 광 소자부의 광섬유를 연결하기 위하여 Fig. 9와 같이 FC/PC 광 커넥터를 사용하였다.

#### 4.2 정적 변위 특성실험

앞서 제작한 다중모드-다중모드 광 결합기를 이용하여 반사면의 위치에 따른 광 결합특성을 측정하는 실험을 수행하였다. 정밀 변위계측과 이동을 위하여 Fig. 10과 같이 정밀 이송장치를 설계, 제작하였다. 소형 정반위에 제작한 수평방향 정밀 이송장치에는 10 $\mu$ m의 분해능을 가지는 변위 측정기기가 부착되어 있어서 정확한 이동거리를 확인할 수 있다. 그리고 그 맞은편에는 광학거울을 설치하였는데 나사를 이용하여 각도를 조절할 수 있다. 여기에서 사용한 거울은 광학기기에서 사용하는 정밀계측용 반사거울로 반사율이 매우 높은 제품이다.

먼저 광 결합효율의 기준값을 정하기 위하여 수광 광섬유에서 발광 광섬유로 광 커넥터로 직접 연결하여 신호의 크기를 측정하였다. 이와 같이 광 커넥터로 연결하는 경우에 손실이 없다고 가정하였다. 이때 측정된 전압신호의 크기는 약 4.5 V이었다. 그러므로 실험에서는 이 기준값에 대한 실제 측정된 전압신호의 비로써 광 결합효율을 계산하여 사용하였다.

$$\text{Power coupled(\%)} = \frac{\text{output [V]}}{4.5[\text{V}]} \times 100 \quad (9)$$

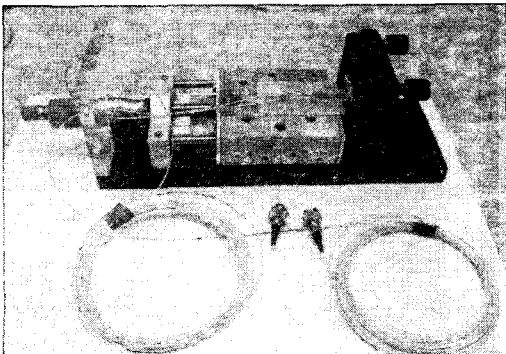


Fig. 10 Experimental setup for static displacement measurement

Fig. 11은 이와 같은 방법으로 측정한 결과로써 광섬유 중심과 진동판사이의 거리를 기준위치를 중심으로 5 $\mu$ m씩 이동하면서 얻은 광 결합효율을 보여 준다. 이 결과에서 알 수 있듯이 앞서 설명한 모의 실험으로 계산한 광 결합기의 기하학적 해석 결과와 실험결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 실험결과와 경우에는 광 축 어긋남 뿐 만 아니라 광섬유 자체가 갖는 내적손실 요인인 광섬유의 흡수손실과 산란손실과 외적 손실인 굽힘손실<sup>(15)</sup>등의 다른 여러 요인에 의한 광 손실의 발생과 기준손실을 직접결합하여 광 결합효율을 정성적 고찰을 하여 광 결합효율이 많이 감소함을 확인할 수 있다.

이와 같은 광 결합기의 성능은 측정하는 변위에 대한 감도로서 표현할 수 있다. 이러한 감도는 동일한 변위 변화에 대하여 광 결합효율의 변화를 의미하는 것으로 이는 광 결합효율 그래프의 기울기로 나타내게 된다. 그러므로 Fig. 11과 같이 구한 광 결합효율 그래프에서 기울기가 크고 선형인 부분을 사용범위로 정하는 것이 타당하다.

#### 4.3 동적 변위 특성실험

이 연구에서 개발하는 광 결합기는 음향이나 진동 등과 같은 동적인 거동의 측정을 목적으로 하므로 정적인 변위 특성뿐만 아니라 동적 응답특성을 확인하는 것이 매우 중요하다. 이를 위하여 다음 그림과 같이 동적 변위를 측정하고 비교하는 실험을 수행하였다.

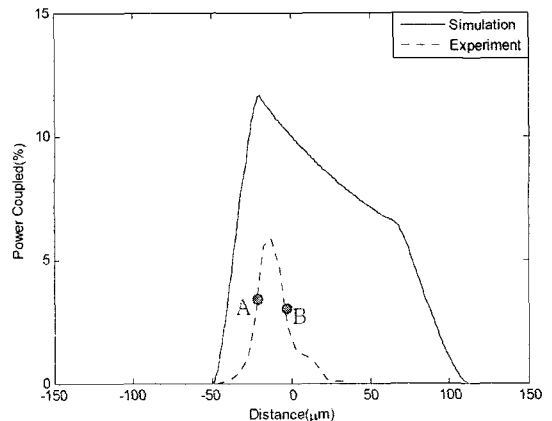


Fig. 11 Simulation and experimental results of optical coupling power of multi-mode - multi-mode optical coupler

Fig. 12와 같이 동적인 운동을 가하기 위해서 B&K사의 소형 가진기(Model-4810)를 사용하였으며 그 가진축에 직접 B&K사의 압전형 가속도계(Model-4371)를 부착하여 그 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.

먼저 기준 주파수로써 1 kHz 정현파에 대한 실험을 수행하였다. 광 결합기의 기준위치로는 정적변위 실험결과를 바탕으로 선형적인 신호 특성이 나타나는, Fig. 11의 A점과 B점을 선택하였다. 이때 기준 가속도계 신호를 이용하여 가진기의 입력전압을 조정하여 가진 변위를 최대값 25 nm로 설정하였다. 이때 측정된 가속도계의 신호는 Fig. 13과 같다.

가속도계에서 얻어진 가속도 신호로부터 주파수 관계를 이용하여 변위를 산출하였다.

이때 얻어진 A 및 B 점에서의 광 출력신호는 Fig. 14와 같으며 이로부터 계산된 주파수 스펙트럼은 Fig. 15와 같다.

Fig. 14에서 확인할 수 있듯이 A 위치의 신호의 크기가 B 위치의 신호 보다 크게 나타나는데 이는 A 위치의 광 측정감도가 더 크다는 사실을 말해준다. 광 정적변위 실험에서 설명한 바와 같이 광 결합기의 변위 감도는 광 결합효율 그래프의 기울기로 나타나므로 A 위치에서의 감도가 높게 된다. 또한 광 변환의 선형성이 좋기 때문에 주파수 스펙트럼에서 나타나듯이 고조파 왜곡이 작음을 알 수 있다.

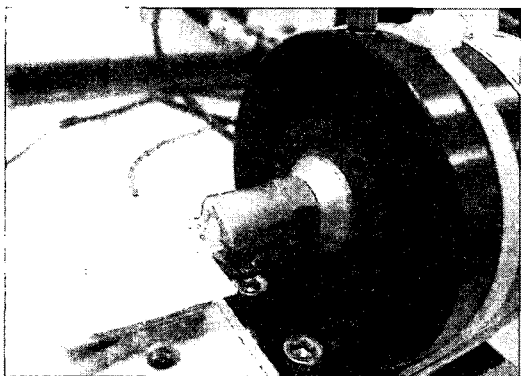


Fig. 12 Experimental setup for dynamic displacement measurement with a exciter

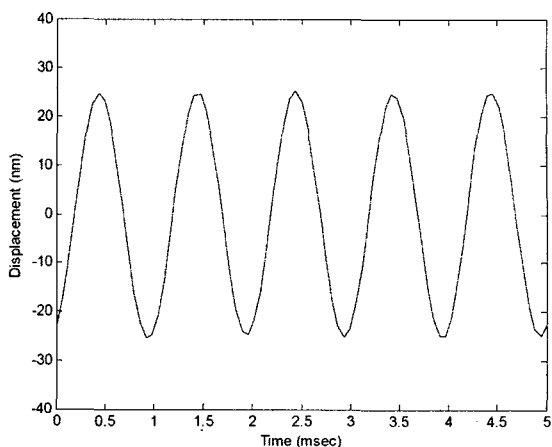
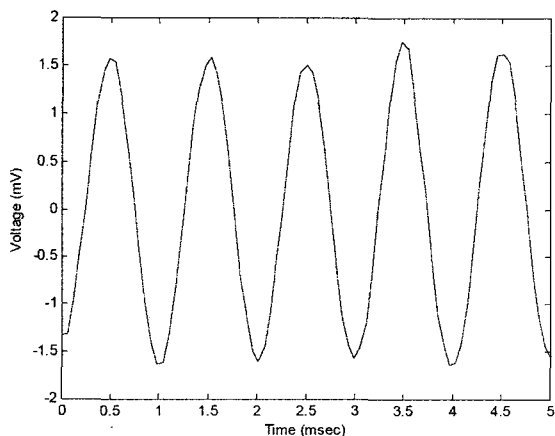
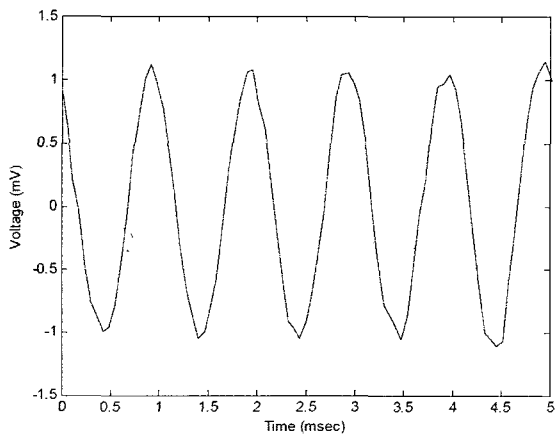


Fig. 13 Displacement signal obtained by reference accelerometer



(a) A point



(b) B point

Fig. 14 Output signals obtained by optical coupler at (a) A point and (b) B point



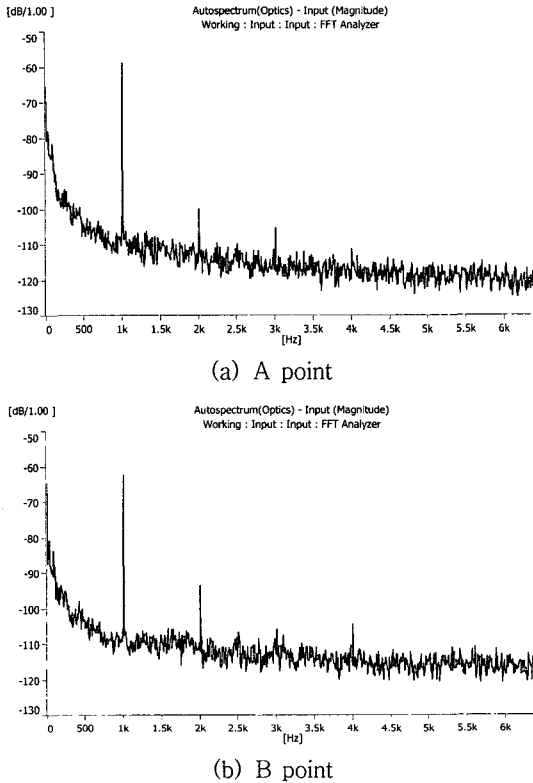


Fig. 15 Power spectra of output signal at (a) A point and (b) B point

Table 1 Output signal characteristics in various displacements and frequencies

Displacement	Frequency	A Point		B Point	
		Harmonic Distortion	SNR	Harmonic Distortion	SNR
5 nm	500 Hz	-	49.2 dB	-	44.4 dB
	1 kHz	38.6 dB	48.6 dB	45.5 dB	43.5 dB
	2 kHz	39.6 dB	49.6 dB	29.4 dB	40.4 dB
10 nm	500 Hz	44.4 dB	51.4 dB	22.6 dB	43.2 dB
	1 kHz	45.3 dB	50.1 dB	35.7 dB	39.7 dB
	2 kHz	39.6 dB	54.6 dB	23.1 dB	45.8 dB
15 nm	500 Hz	36.5 dB	55.5 dB	24.0 dB	48.6 dB
	1 kHz	35.4 dB	53.8 dB	30.2 dB	49.0 dB
	2 kHz	40.9 dB	58.9 dB	32.9 dB	51.1 dB
20 nm	500 Hz	37.6 dB	60.1 dB	25.8 dB	52.0 dB
	1 kHz	39.6 dB	60.1 dB	38.4 dB	56.4 dB
25 nm	500 Hz	33.4 dB	57.8 dB	36.2 dB	57.7 dB
	1 kHz	40.9 dB	50.9 dB	30.9 dB	42.4 dB
30 nm	500 Hz	38.0 dB	65.1 dB	36.2 dB	58.9 dB
	1 kHz	38.7 dB	64.3 dB	37.3 dB	57.7 dB

그러므로 광 결합기의 적용에 있어서 A 위치를 정하여 진동판을 설계하는 것이 타당하다.

이와 함께 주파수를 500 Hz, 1 kHz, 그리고 2 kHz로 변화시키면서 각각의 주파수 특성을 고찰하였다. 이때 A 및 B 위치를 기준으로 변위를 5~30 nm로 변화시키면서 신호의 잡음과 왜곡 특성을 측정하였다. 앞서 살펴본 주파수 스펙트럼과 같이 가진 주파수의 출력신호에 대한 최대 크기를 가지는 고조파(harmonic)신호의 크기 비를 주파수 왜곡으로 표현하였으며 또한 출력신호에 대한 배경잡음신호의 비를 SNR로 나타냈다. Table 1은 이를 정리한 결과이다.

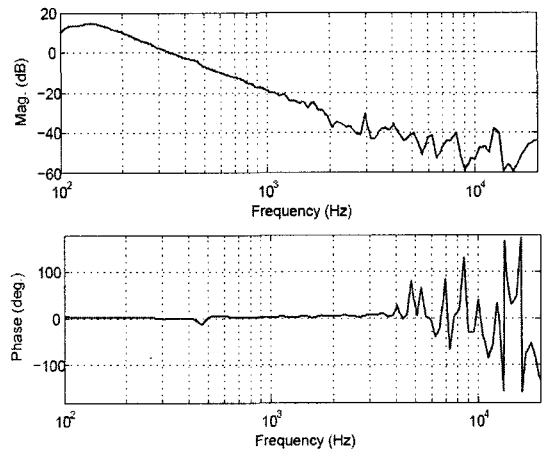


Fig. 16 Frequency response functions of optical coupler signal relative to accelerometer signal

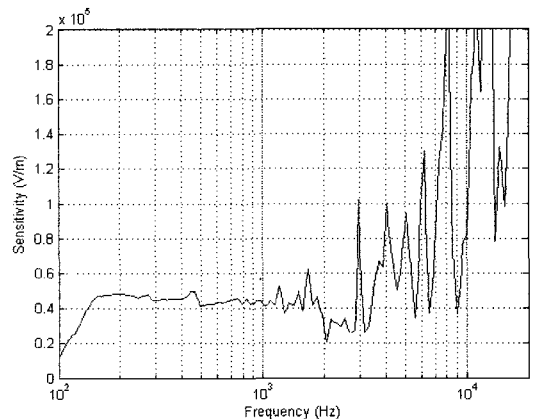


Fig. 17 Estimated sensitivity of optical coupler from the measured frequency response

결과에서 알 수 있듯이 광 결합기를 사용하여 수 nm의 크기의 동적 변위를 측정할 수 있으며 적어도 30 db 이상의 동적범위를 가지고 사용이 가능함을 확인하였다.

이와 함께 sine sweep법을 이용하여 기준 가속도계의 신호에 대한 광 결합기 신호의 주파수 응답을 구하였다. 사용하는 가진기와 광 결합기의 측정범위의 제한을 고려하여 100 Hz 부터 20 kHz 까지의 범위에서 측정을 수행하였다. Fig. 16은 측정된 주파수 응답을 보여 준다.

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

이 측정결과에서 교정을 통하여 얻은 기준 가속도계의 감도,  $10 \text{ mV}/(\text{m/s}^2)$ 을 사용하여 광 결합기의 감도를 계산할 수 있다.(Fig. 17)

산출한 광 결합기의 감도는 약  $5 \cdot 10^4 \text{ V/m}$ 로 일정함을 알 수 있는데 고주파 영역에서는 가속도 측정에 의하여 큰 측정 오차가 발생함을 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

광섬유의 광 축 어긋남에 의한 광 결합효율의 변화에 기초한 광 결합기에 대한 연구를 수행하였다. 음향이나 진동 측정을 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 정적/동적 변위 특성을 실험하고 고찰함으로써 향후 마이크로폰과 가속도계를 제작하기 위한 기반기술을 확립하였다.

## 참 고 문 헌

(1) Yuvi, K., Alexander, P., Alexander, K. and Sever M., 2003, "Recent Advances in Optical Microphone Technology", Inter-noise 2003, pp.

1158~1169.

(2) A Phone-Or White Paper, 2001, "Microphone for Speech Recognition Applications", Phone-Or Ltd.

(3) Karthik, K., Robert, T., Steve, H., Lee, H., Mark, S. and Toshikazu, N., 2004, "Design and Characterization of MEMS Optical Microphone for Aeroacoustic Measurement", 42nd Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, AIAA 2004-1030.

(4) Nakamura, K., Toda, S. and Yamanouchi, M., 2001, "A Two-dimensional Optical Fiber Microphone Array with Matrixstyle Data Readout", Meas. Sci. Technol., Vol. 12, pp. 859~864.

(5) Sagberg, H., Sudbo, A., Solgaard, O., Anne, K., Bakke, H. and Johansen, I., 2003, "Optical Microphone Based on a Modulated Diffractive Lens," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 15, No.10, pp. 1431~1433.

(6) Furstenu, N., Horack, H. and Schmidt, W., 1998, "Extrinsic Fabry-perot Interferometer Fiber-optic Microphone," IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, Vol. 47, No. 1, pp. 138~142.

(7) Peter, H., 1993, Sensors : Pringciples and Applications, Carl Hanser Verlag.

(8) Nykolai, B., 1997, "Optical Microphone Transduction Techniques", Applied Acoustics, Vol. 50, Issue 1, pp. 35~63.

(9) Feldmann M., Buttgenbach S., 2005, "Microoptical Distance Sensor with Integrated Microoptics applied to an Optical Microphone", Sensors 2005 IEEE, pp. 769~771.

(10) Lee, J. K., Yoon, H. G., Seol, J. S. and Nam, S. H., 1997, "Experimental Investigation of the Acoustic Signal Detection Performance for an Interferometric Fiber Optic Hydrophone," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 7, No.6, pp. 931~936.

(11) Gang He and Frank W. Cuomo, 1991, "Displacement Response, Detection Limit, and Dynamic Range of Fiber-optic Lever Sensors", Journal of Lightwave Technology, Vol. 9, No.11, pp. 1618~1625.

(12) Gang He and Frank W. Cuomo, 1991, "A

Light Intensity Function Suitable for Multimode Fiber-optic Sensors”, Journal of Lightwave Technology, Vol. 9, No. 4, pp. 545~551.

(13) Li, Y. and Erdogan, T., 2000, “Cladding-mode Assisted Fiber-to-fiber and Fiber-to-free-space Coupling”, Optic Communication 183, pp. 377~388.

(14) Koester, C. J. and Snitzer, E., 1964,

“Amplification in a Fiber Laser”, Applied Optics Vol. 3, No. 10, pp. 1182~1186.

(15) Yoo, J.-A., Joo, J.-H. and Kwon, I.-B., 2004, “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.