

광섬유를 이용한 충격 및 압력 센서에 관한 연구

양승국* · 조희제* · 이석정*** · 전중성*** · 오상기** · 김인수** · 오영환****

A Study of the Optical Fiber Sensor for sensing impact and pressure

Sung-Kuk Yang* · Hee-Jea Cho* · Seok-Jeong Lee*** · Joong-Sung Jeon*** · Sang-Ki Oh** · Insoo S. Kim · Young-hwan Oh

요 약

광섬유 센서의 주된 이점으로는 기계적 구동부가 없으므로 고신뢰성, 긴수명, 무전기적 간섭, 고응답속도, 저가이다. 본 연구에서는 공장설비 및 자동문 등과 같은 곳에서 많이 사용되어지는 자동장치의 오작동으로 인한 사고를 미연에 감지하여 인명피해를 줄이기 위하여 광섬유를 이용한 충격 및 압력센서를 제안 및 개발하였다. 센서의 원리로는 충격에 의해 다중모드 광섬유에서 발생하는 스펙클 패턴의 변화를 포토다이오드로 검출하는 방식이다. 광섬유에 충격의 세기를 변화하여 여러 차례 측정한 결과 충격의 세기의 변화에 따른 반응정도는 선형적으로 변하지는 않았으나 주어진 충격에 대해 민감하게 반응하는 것을 실험을 통하여 확인하였으며 광섬유의 피복 두께의 변화나 신호처리부에서의 증폭도를 조절함으로써 충격에 대한 반응감도를 조절할 수 있었다. 광섬유를 이용한 충격 및 압력센서의 장점으로는 점대점 방식이 아닌 라인 방식으로 설치하거나 측정함으로써 광섬유 전체가 센서역할을 하기 때문에 설치가 용이하고 감지범위가 넓어 센서로서의 우수한 특성을 가지므로 다양한 자동시스템 분야나 충격 및 압력센서로 활용될 수 있을 것이다.

ABSTRACT

Optical fiber has many advantages, such as high reliability, long lifetime, immunity to the electromagnetic interference, high speed response and low cost.

In this study, we proposed and developed an optical fiber impact and pressure sensor for prevention of accident which occurs in the automatic system or auto door. The principle of the sensor is to detect different optical intensity caused by variation of a speckle pattern due to the external perturbation.

Speckle pattern appears at the end of a multimode fiber in which coherent beam propagates. The fabricated sensor in this study was tested. As a result of experiments, amplitude of the output signal isn't linear, but it has sufficient sensitivity for a sensor. Moreover, we can control sensitivity of the sensor by an amplifier at receiver. It has several advantages which are ability of detection at all point on the multimode fiber, large sensitive area, and many application areas for a sensing impact and pressure.

키워드

Optical fiber sensor, Speckle pattern, Optical interference, Multimode fiber

1. 서론

현대사회를 자동화 시대라 일컫는다. 공장설비 및

건물 그리고 모든 기계장비 등에 자동화 시스템이 들어 있지 않은 것이 없다. 그러나 이러한 자동화에 따른 기기의 오작동이나 사람의 실수로 인하여 인명

*한국해양대학교 전자통신공학과

***한국해양대학교 산업기술연구소

접수일자 : 2002. 11. 5

**한국전기연구원 정보·광연구그룹

****한국광통신

의 손실 및 재산 피해가 생기게 된다. 이러한 자동화의 폐해를 미연에 방지하기 위하여 많은 감지 센서들이 이용되고 있으며 또한 새로운 센서를 개발하기 위하여 많은 연구를 하고 있다.

한편, 광통신에 이용되기 위하여 개발 생산된 광섬유는 최근에 통신용뿐만 아니라 센서로도 많이 응용되고 있다. 광섬유의 주된 이점으로는 전자기 간섭에 무관한 것, 대용량의 정보전송, 빠른 응답속도, 소형·경량이며 가격이 저렴하다.[1]

본 연구에서는 공장설비 및 자동문 등과 같은 곳에서 많이 사용되어지는 자동장치의 오작동으로 인한 사고를 미연에 감지하여 인명피해를 줄이기 위하여 광섬유를 이용한 충격 및 압력센서를 제안 및 개발하였다. 센서의 원리로서는 충격에 의해 다중모드 광섬유에서 발생하는 스펙클 패턴의 변화를 포토다이오드로 검출하여 신호처리를 거친 후 신호를 출력한다. 기존에 개발된 대부분의 충격 및 압력센서들은 센서의 기계적 구성으로 인하여 부피가 크고 설치에 있어서 많은 공간적 제한을 가진다. 그리고 감지범위도 협소하다. 일례로 자동차의 파워 윈도우 및 쉐루프 등과 같은 많은 사람들에게 노출되기 쉬운 곳에는 설치가 까다로우며 자동차의 에어백 등은 감지 범위가 좁아 센서지점 이외의 충격시 에어백이 작동하지 않아 많은 문제점이 나타나고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 제작되어진 본 센서는 한 지점을 감지하는 것이 아니라 광섬유 전체가 센서로 작동할 수 있으므로 여러 지점의 충격을 감지할 수 있고, 또한 광섬유의 부피가 매우 작고 유연하여 감지하고자 하는 지점에 설치가 용이하며, 충격 및 외부 인장력에 강한 재질로 광섬유를 보호하여 아주 큰 충격에서 파손되지 않아 내구성 또한 뛰어나다는 장점을 가지고 있다.

논문은 센서의 작동원리와 시스템 구성 및 실험을 통해 결론을 서술하였다.

II. 스펙클 원리와 센서작동 원리

2.1 스펙클의 원리

LD에서 방출되는 코히어런트한 빛은 멀티모드 광섬유에 입사되어 광섬유 내부를 진행하면서 빛을 구

성하는 모드와 모드사이에 간섭이 일어나 스펙클 패턴이 발생한다.[2]

이러한 스펙클 패턴을 이용하여 현재는 광섬유 미소 밴딩의 측정[3][4]이나, 비틀림각, 축응력, 인장력 측정[5][6] 및 진동[7] 등의 감지에 사용되고 있다.

다중 모드 광섬유는 각각 특별한 전파 벡터를 가진 많은 분리된 구속 모드를 가진다. 예를 들어 m번째 모드의 전기장의 횡성분은 식(1)과 같이 표현된다.

$$\vec{E}_m(\rho, \theta, t) = \vec{E}_m(\rho, \theta) \exp[i(\beta_m z - \omega t) + \phi_m] \quad (1)$$

여기서 ρ, θ, z 는 원통좌표계를 나타낸다. z축은 광섬유의 축과 동일하다. 그리고 β_m 은 m번째 모드의 전파 상수 z성분, ω 는 레이저의 각진동수, Ψ_m 은 광섬유로 들어오는 m번째 모드의 위상이다. 각각의 모드는 특별한 경로로 전파하고 서로간의 지연을 유발한다. 그 결과 나타나는 빛은 위상이 다른 파의 합성이다.

빛의 모드가 N개이면 광섬유 끝 단면을 지나서 임의의 평면에서의 광 강도는 식 (2)과 같다.[8]

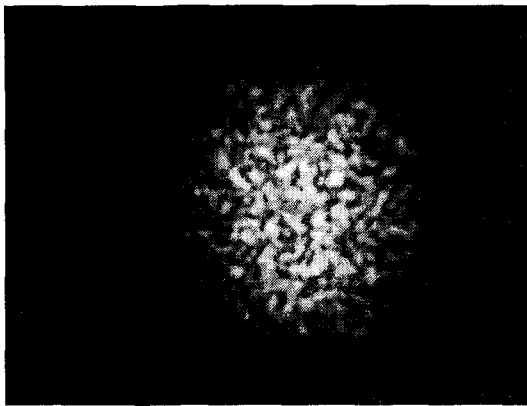
$$I(x, y) = \left| \sum_{m=1}^N \vec{E}_m(\vec{r}) \exp[i(\vec{k}_m \cdot \vec{r} - \omega t) + i\phi_m] \right|^2 \quad (2)$$

여기서 k_m 은 m번째 모드의 전파상수이고, ϕ_m 은 m번째 모드의 위상이고, ω 는 레이저 빛의 각주파수이다. 외부에서 광섬유에 충격이 인가되면 전송중인 빛의 위상이 변하여 평면에서의 광 스펙클 패턴이 변하게 된다. 변화된 광 스펙클 패턴에 의한 강도는 식 (3)으로 표현된다.

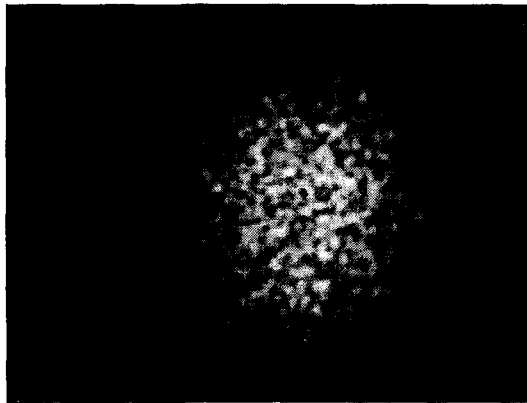
$$I(x, y) = \left| \sum_{m=1}^N \vec{E}_m(\vec{r}) \exp[i(\vec{k}_m \cdot \vec{r} - \omega t) + i\phi_m] \right|^2 \quad (3)$$

여기서 $\Delta\phi_m(t)$ 은 외부 충격에 의한 m번째 모드

의 위상변화이다. 그러므로 광섬유 출력 끝 단면을 지나서 임의의 평면에서의 스펙클 패턴이 변화한다. 광섬유에 외부 응력이 가해져서, 광섬유의 굴절률이나 단면크기에 미세 영향을 주면, 광섬유 내의 각 모드의 경로길이에 영향을 미쳐서 위상변화가 발생되어 그림 1과 같이 스펙클 패턴의 변화가 발생된다.



(a)



(a) 외력 인가 전, (b) 외력 인가 후
 그림 1. 스펙클의 변화
 (a) Before perturbation, (b) After perturbation
 Fig 1. Photographs of speckle patterns by perturbation,

2.2 센서의 작동 원리

충격 및 압력센서를 제작하기 위한 센서의 원리는 충격시 광섬유의 스펙클 변화를 감지하는 것으로서 센서의 개요도는 그림 2와 같다. LD(laser diode)로

부터 코히어런트한 빔이 광섬유로 입사된다. 광섬유에 입사된 빛은 센서 역할을 수행하는 광섬유를 통과하여 수광부에 도착한다. 광섬유 단면에서 방출하는 광의 세기는 외부 충격에 의해 스펙클 패턴이 변화하지만 전체 방사하는 광의 세기는 일정하기 때문에 수광부에서는 공간필터를 사용하여 PD(photo diode)와 광섬유 끝단과의 거리를 일정하게 두어 광의 일부를 채택하게 함으로써 외력의 인가 여부를 높은 감도로 측정할 수 있게 하였다. 검출된 광은 전기적 신호로 바뀌어 신호처리 회로로 보내진다. 즉, 외부에서 광섬유에 압력을 인가하면 전송중인 빛의 위상이 바뀌어 스펙클 무늬가 변화한다. 그래서 수광소자에서 검출되는 빛의 양이 변화하고 이로부터 신호처리 회로에서 사고 발생의 유무를 감지한다.

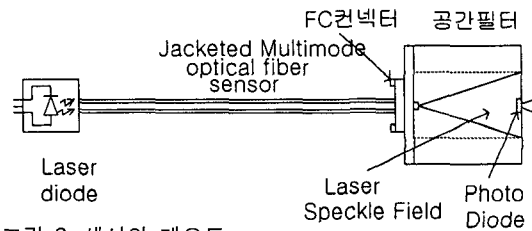


그림 2. 센서의 개요도
 Fig. 2 Schematic diagram of the sensor

III. 광센서 시스템 설계 및 제작

광섬유를 이용한 충격 및 압력센서 시스템의 전체 구성도를 그림 3에 나타내었다. LD구동드라이브와 광원 그리고 센서역할을 하는 광섬유 및 충격유무를

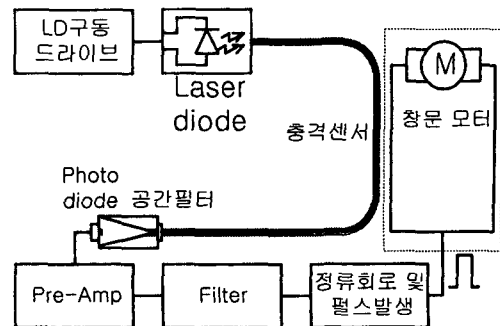


그림 3. 시스템 구성도
 Fig 3. Block diagram of the system

검출하는 공간필터와 PD로 구성하였으며 신호처리를 거친 후 시스템의 제어를 위한 제어신호를 발생하도록 하였다. 광학부는 연결을 용이하게 하기 위하여 FC-FC(Facility Connector)컨넥터를 이용하여 접속하였다.

광원으로 사용한 LD(laser diode)는 중심파장이 830nm로 출력은 12mA 전류주입시 1.7mW이다. LD는 전류 구동소자이기 때문에 소자에 안정적인 전류를 공급하는 것이 중요하다. 본 연구에서 구현한 광전 변환회로에서는 12mA의 전류 주입시 다중 모드 광섬유 끝단에서 138 μ W로 안정적인 출력이 나왔다. 빛이 진행하여 센서로 사용되어진 광섬유는 코어와 클래드가 각각 100/140 μ m로 코어의 직경이 넓어 센서로 많이 이용되는 것으로 손실은 2.7dB/km, 개구수는 0.21인 다중 모드 실리카 광섬유이다. 또한 광섬유 보호를 위하여 인장강도와 파열강도가 높은 케블라를 이용하여 1차 보호를 하고 최종적으로 유연성이 강한 재질로 외피를 코팅한 광섬유를 사용하였다. 수광모듈은 광학적 신호를 전기적 신호로 변환하여 신호처리부로 전달한다. 광섬유 끝단의 전체 광량은 외부의 충격이 있어도 일정하기 때문에 공간필터를 통하여 일부분의 광을 채택함으로써 외부의 충격을 광량으로 감지할 수 있게 하였다.

공간필터는 LD를 통해 광섬유 종단에서 방사되는 광을 3-axis translation stage에 부착된 PD와 일렬로 정렬한 후 이동시키면서 측정된 거리는 약 5mm이며 광 방사면의 중심에서 다소 벗어나는 부분이 스펙클 변화에 가장 민감하게 반응하는 부분임을 측정을 통해 확인하였다. 또한 광섬유와의 접속을 용이하게 하기 위하여 FC컨넥터를 사용하여 제작하였다. 그러나 이러한 위치는 광의 세기나 광섬유 종류에 따라 최적의 위치는 달라질 수 있음을 확인하였다. 또한 광검출기는 스펙클 패턴의 변화를 검출하기 위한 요구조건으로서 고감도, 광대역, 저 노이즈, 외부 조건에 대하여 특성이 변하지 않을 것 등을 만족하는 활성영역의 면적이 단일 스펙클 무늬보다 좁은 0.04mm², 파장 830nm에서 0.52A/W정도의 감도 그리고 2.0ns의 응답속도를 가지는 실리콘 성층형 포토다이오드를 사용하였다. PD는 입사된 광량에 비례하여 광전류를 발생한다. 수신기는 광 강도 변화에 따른 광전류 I_p가 수 nA에서 μ A이하의 작은 값이기 때문

에 고이득의 증폭기를 사용하여야 한다. 고이득의 증폭기를 사용할 경우 잡음에 대한 고려를 해야하는데 제작된 시스템에서는 저주파에서 잡음 특성이 좋은 FET 증폭기를 사용하였고, 수광부에서 검출된 불필요한 잡음 신호인 고주파 신호를 제거하기 위하여 차단주파수가 30Hz인 저역통과 필터를 사용하였다. 그리고 최종단에는 시스템의 제어기에 일정한 레벨의 펄스 신호를 인가하기 위하여 DC 바이어스 성분을 제거하기 위한 콘덴서를 사용하여 DC성분을 제거하였으며 0.8~1.2V에서 트리거 신호가 발생하는 슈미트소자를 이용하여 3.6V의 트리거 신호값이 출력되도록 하였다. 센서의 파손의 유무를 감지하기 위하여 정상작동시의 DC바이어스 전압과 파손시 DC바이어스 전압차를 비교기로 측정하여 광섬유의 절단 및 파손시 5V의 전압이 발생하게 하여 정상작동의 유무를 확인할 수 있게 하였다.

IV. 실험결과

다중 모드 광섬유를 통과하여 모드와 모드 사이의 간섭에 의해 발생한 밝고 어두운 무늬인 스펙클 패턴을 CCD카메라로 관찰한 결과 그림1과 같이 측정되었다. 또한 가장 민감하게 응답할 수 있도록 명암의 밝기를 뚜렷하게 측정할 수 있는 거리를 실험을 통하여 측정하였으며 측정된 길이에 의하여 공간필터를 제작하였다. 전체 시스템은 광원부, 센싱부, 수광부, 신호처리부로 구성되었다. 이렇게 구성된 시스템의 감도를 측정하기 위하여 광섬유센서를 광학테이블에 고정시키고 일정한 무게를 가지는 막대로 각도를 주어 충격을 가하고 오실로스코프를 이용하여 출력특성을 그림 4-1과 같이 측정하였다. 그림에서 임계 전압값을 1.25V로 표시한 이유는 트리거전압이 최고 1.2V값이 출력되어야 하기 때문이다. 막대의 각도를 바꾸어 가며 자유낙하시켜 광섬유에 입력되는 충격크기를 변화하면서 측정된 결과 최소 출력값이 0.1kg의 무게를 0.128m 높이에서 자유낙하 시켰을 때 2V를 검출하였으나 충격크기에 따른 선형적인 관계를 얻지는 못하였다. 그러나 주어진 충격에 민감하게 반응함을 알 수 있었다. 또한 임계 충격값은 신호처리의 증폭도를 조절함으로써 자동시스템이 원하

는 값으로 감도를 조절할 수 있었다.

광섬유에 일정한 시간 간격으로 충격을 광섬유에 인가한 후 출력된 신호 파형은 4-2와 같이 측정되었다. 파형 2는 정류회로를 거친 후 검출된 아나로그 신호 파형이며 파형1은 일정한 신호를 출력하기 위하여 슈미트 소자를 거친 후 출력된 파형을 나타낸다. 신호잡음비를 알아보기 위하여 광섬유 센서에 충격을 인가하지 않을 경우의 신호처리부의 출력 파형은 그림4-3와 같다. 이 파형은 광섬유 충격 및 압력 센서 시스템의 특성에 영향을 주는 노이즈신호이며 크기는 약 20mV_{p-p}이다. 그림 4-2는 센서 시스템의 최종 출력 파형이다. 최종단에서 입력이 있을 경우와 없을 경우를 비교하여 SNR(signal-to-noise ratio)을 계산하면 식4-1과 같이 출력되었으며 우수한 특성을 나타낸다.

$$SNR = \frac{\text{신호의 크기}}{\text{noise의 크기}} = \frac{5Vp-p}{20mVp-p} = 250 \dots (4-1)$$

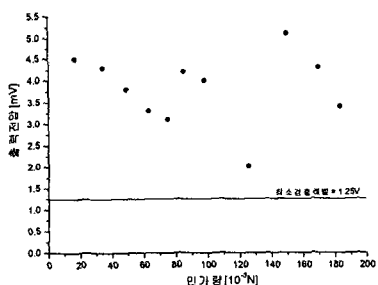


그림 4-1. 정류회로단에서 측정된 무작위 출력
Fig 4-1. Random output at the rectifier

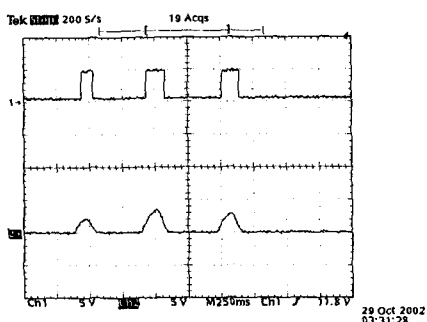


그림 4-2. 정류회로 출력파형
Fig 4-2. output signal at the rectifier

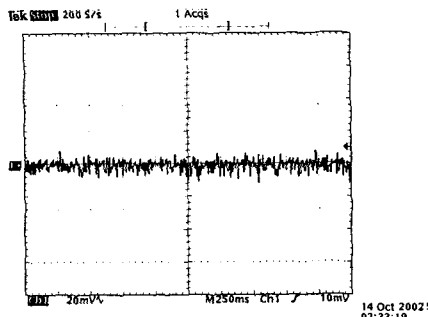


그림 4-3. 충격이 없을 때 노이즈 출력파형
Fig 4-3. Noise signal before perturbation

IV. 결론

본 연구에서는 공장설비 및 자동문 등과 같은 곳에서 많이 사용되어지는 자동장치의 오작동으로 인한 사고를 미연에 감지하여 인명피해를 줄이기 위하여 광섬유를 이용한 충격 및 압력센서를 제작하였으며 감도를 측정하였다. 센서의 원리로는 충격에 의해 다중모드 광섬유에서 발생하는 스펙클 패턴의 변화를 포토다이오드로 입력받아 충격신호를 검출하는 방식이다. 광섬유에 충격의 세기를 변화하여 여러번 측정된 결과 충격의 세기의 변화에 따른 반응정도가 선형적으로 변화지는 않았으나 주어진 충격에 대해 민감하게 반응하는 것을 실험을 통하여 확인하였으며 광섬유의 피복 두께의 변화나 신호처리부에서의 증폭도를 조절함으로써 충격에 대한 반응감도를 조절할 수 있었다.

광섬유를 이용한 충격 및 압력센서의 장점으로는 점대점 방식으로 설치하거나 측정하는 것이 아니라 라인방식으로써 광섬유 전체가 센서역할을 함으로 설치가 용이하고 감지범위가 넓어 충격 및 압력센서로서의 우수한 특성을 가지므로 다양한 자동시스템 분야의 센서로서 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] V.I. Busurin, A.S. Semenov, and N.P.Udalov "Optical and fiber-optic sensors(review)" Sov.J. Quantum Electron 15(5) May 1985

- [2] Harry J. R. Dutton "Understanding Optical Communications" *IBM*, 1998
- [3] Denis Donlagic and Miha Zavrsnik, "Fiber-optic microbend sensor structure" *OPTICS LETTERS*, Vol. 22, No. 11, June 1, 1997
- [4] D. Z. Anderson and M. A. Boshtyansky and B. Ya. Zel'dovich, "Stabilization of the speckle pattern of a multimode fiber undergoing bending" *OPTICS LETTERS*, Vol. 21, No. 11, June, 1996
- [5] Shizhuo Yin, Purwadi Purwosumarto, Francis T. S. Yu, "Application of fiber specklegram sensor to fine angular alignment" *Optics Communications* 170, pp.15-21, October 1999
- [6] Chung-ye Leung, I-fan Chang, "Optical Fiber Line Sensor Based on Speckle Detection" 1986 International Carnahan Conference on Security Technology Gothenburg, Sweden, pp.125-129, August 1986
- [7] Francis T. S. Yu, Jianzhong Zhang, Kun Pan, Dazun Zhao, and Paul B. Ruffin, "Fiber vibration sensor that uses the speckle contrast ratio" *OPTICAL ENGINEERING*, Vol. 34 No. 1, January 1995
- [8] W. B. Spillman, Jr., B. R. Kline, L. B. Maurice, and P. L. Fuhr, "Statistical-mode sensor for fiber optic vibration sensing uses" *APPLIED OPTICS*, Vol. 28, No. 15, 1 August 1989[1]
Harry J. R. Dutton "Understanding Optical Communications" *IBM*, 1998

저자소개

양승국(Sung-Kuk Yang)

1997년 진주산업대학교 전자공학과 학사.
1999년 한국해양대학교 전자통신공학과 석사.
1999년 7월~2001년 12월 한국전기연구원 위축연구원
2000년 2월~2002년, 한국해양대학교 전자통신공학과 박사과정수료
※ 관심분야: 광섬유 센서, 광기술, 센서기술, 신호처리

조희제(Hee-Jea Cho)

2002년 한국해양대학교 전자통신공학과 학사.
2002년 2월~현재, 한국해양대학교 전자통신공학과 석사과정
※ 관심분야: 광섬유 센서, 광 증계기, 레이저 다이오드

이석정(Seok-Jeong Lee)

1983년 2월 울산대학교 응용물리학과(이학사)
1987년 2월 연세대학교 대학원 물리학과(이학석사)
1998년 2월 한국해양대학교 대학원 전자통신공학과(공학박사)
1999년 10월~2002년 4월 동경공업대학 객원연구원
2002년 4월~현재 한국해양대학교 산업기술 연구소 전임연구교수
※ 관심분야: 광섬유센서, 반도체 레이저, 광변조기

전중성(Joong-Sung Jeon)

1989년 2월 대구대학교 물리학과(이학사)
1997년 2월 한국해양대학교 대학원 전자통신공학과(공학석사)
2000년 8월 한국해양대학교 대학원 전자통신공학과(공학석사)
2000년 7월~현재 한국해양대학교 산업기술 연구소 전임연구교수
※ 관심분야: 마이크로 수동 및 능동 회로설계, 전자 파수치해석, 위성통신시스템

오상기(Sang-Ki Oh)

1977년 조선대학교 전자공학과 학사.
1979년 조선대학교 전자공학과 석사.
1994년 원광대학교 전자계산기 박사.
1983년 8월~현재, 한국전기연구원
책임연구원, 정보·광응용연구그룹에서 광섬유센서분
야 연구.
※ 관심분야: 광섬유 센서, 센서기술, 광기술

김인수(Insoo S. Kim)

1984년 동아대학교 전자공학과 학사
1986년 동아대학교 전자공학과 석사
1986년 2월~현재, 한국전기연구원 선임연구원. 정보·
광응용연구그룹에서 광섬유센서분야 연구
1997년~1998년 Shanghai 803 Research Institute
파견연구원
1998년~2000년 SIOM 파견연구원
※ 관심분야: 광섬유 센서, 광기술, 광통신 시스템, 센
서기술

오영환(Young hwan Oh)

1979년 광대학교 (공학사-전자공학)
1987년~현재 한국광통신 대표이사
1999년~현재 광기술연구소 소장