

## 다중모드 광섬유 융착형 침수 감지 센서 개발

손경락† · 계광현\* · 심준환\*\* · 조석제\*\*

(원고접수일 : 2009년 3월 31일, 원고수정일 : 2009년 5월 14일, 심사완료일 : 2009년 6월 1일)

### Development of submersion sensors using multi-mode fibers spliced with a fiber Bragg grating

Kyung-Rak Sohn† · Kwang-Hyun Key\* · Joon-Hwan Shim\*\* and Seok-Je Cho\*\*

**Abstract :** This paper reports a preliminary experimental investigation and characterization of an optical fiber-based submersion sensor system for applications in water flooding and leakage. The sensor system comprises a multi-mode fiber spliced with fiber Bragg grating and an intensity-based interrogator. Submersion tests were conducted in water-air and Glycerin-air environments. By the refractive index of the fiber-probe surrounding materials, the reflectance and the detecting power level is determined. When the probe is dipped into the water, the optical output power dramatically decreases from -7.5dBm to -17.5dBm. But, the center of Bragg wavelength is not affected in spite of external material changes. Temporal response characteristics of the sensor system is investigated to verify the real-time reaction. When the probe is immersed into the liquid, there is no transition time.

**Key words :** Fiber optic sensors (광섬유 센서), Submersion sensors (침수센서), Reflectance (반사도), Multi-mode fiber (다중모드 광섬유), Fiber Bragg grating (광섬유 브래그 격자)

### 1. 서 론

저지대의 상습 홍수 지역에 대한 수위 모니터링은 대형 재난이 발생하기 전에 위험을 알려 사전조치를 취하게 할 수 있는 효과적인 수단이다. 이러한 침수 경보 시스템은 산업분야에서도 다양하게 적용할 수 있으며 대형 구조물이나 선박의 경우에

도 안전을 위한 무인 감시 시스템에 적용할 수 있다. 지하에 매설된 전력선 또는 통신 케이블이나 주요 시설물의 경우에도 홍수나 상하수도 사고에 의한 침수에 매우 취약하므로 상시 감시 장비가 요구된다. 이러한 침수 모니터링을 위한 센서로 다양한 형태의 광섬유 센서가 연구되고 있다.

광섬유의 경우 재료가 실리콘 다이옥사이드로 절

† 교신저자(한국해양대학교 컴퓨터 제어 전자통신공학부, E-mail:krsohn@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4312)

\* 한국해양대학교 대학원 전자통신공학과

\*\* 한국해양대학교 컴퓨터 제어 전자통신공학부

연체이므로 전기적 영향을 받지 않고 불꽃이나 화염을 일으킬 염려가 전혀 없다. 그리고 센서를 직렬로 장거리에 걸쳐 설치해야 할 경우 기존의 구리선보다 쉽게 설치할 수 있고, 경량이며, 다루기가 쉽다. 여러 개의 센서를 동시에 설치하는 다중화에 대한 방법도 매우 쉽게 해결된다.

침수 감지를 위한 광섬유 센서는 1990년 Tomita 등이 흡습 물질을 기반으로 기계적 변형을 광섬유에 유도하여 굽힘 손실을 일으키는 방법<sup>(1)</sup>을 제시하였다. 그 후 하이드로 젤 광섬유를 이용하는 방법<sup>(2)</sup>이 제안되었으나, 위 두 가지 방법은 본질적으로 물을 흡수하게 되면 체적이 증가하는 흡습물질을 이용하므로 응답속도가 수 십분 이상 걸리며, 사용 후에는 재활용이 어려운 단점을 가지고 있다. 2002년 국내의 연구 그룹에서는 실시간으로 응답할 수 있는 광섬유형 센서를 제안하였다<sup>(3-5)</sup>. 측면 연마된 단일모드 광섬유 (Single-mode fiber)의 소산장 (Evanescent field)이 광섬유 외부 물질의 굴절률 변화에 반응할 수 있는 구조<sup>(3,4)</sup>와 굽힘에 민감한 특수 광섬유를 이용하여 침수를 감지하는 방법<sup>(5)</sup>이다. 그러나 소산장을 이용하는 경우 상부 평면도파로와 광섬유 사이에 존재하는 중간 결합층이 폴리머 계열의 재질로서 온도 의존성이 높아 이에 대한 보완책이 필요하였다. 굽힘 민감성 광섬유를 이용한 경우에는 광섬유에 압력을 가하는 부가적인 구조물이 광섬유 상에 설치되어 수위의 높낮이에 따라 광량의 변화가 생기게 하였다. 압력을 가하는 구조물이 광섬유와 물리적인 접촉을 하게 되는데 반복적인 굽힘과 기계적인 접촉은 내구성 문제를 유발할 수 있다.

본 연구에서는 광섬유 브래그 격자와 다중모드 광섬유 끝단의 반사를 이용한 실시간 침수 감시용 센서 프로브를 제안하였다. 제안된 센서의 경우 센서 끝단에 전기적인 공급 및 신호전송을 위한 전자적인 회로가 불필요하므로, 전기적인 접촉에 의한 폭발 위험성이 있거나 휘발성 물질이 있는 지역 또는 누전 위험성이 높은 지역에 안전하게 설치할 수 있는 구조를 제공한다. 특히 프로브는 광섬유로만 구성되어 있으므로 온도 의존성을 현격하게 줄일 수 있으며 매우 간단한 구조로 설계가 되므로 현장

적용성이 매우 용이하다. 수직으로 절단된 다중모드 광섬유 끝단은 접촉되는 물질의 굴절률 증가에 따라 스넬의 법칙에 의해 경계면에서 전반사되는 입사각 범위가 작아진다. 이는 허용 수광각이 줄어들어드는 효과로 나타나서 반사 광량이 감소되는데, 이러한 원리를 공기와 액체를 구분할 수 있는 방법으로 적용하였다.

## 2. 동작원리

굴절률이 다른 두 개의 매질이 이루는 경계면으로 빛이 입사되었을 경우에는 경계면에서 반사와 굴절 현상이 일어난다. Fig. 1에서 입사 빔이  $\theta_i$ 의 각도로 굴절률이  $n_1$ 인 매질에서  $n_2$ 인 매질로 입사하였다면 두 매질의 경계면에서  $\theta_r$ 의 각도로 반사하는 빔과  $\theta_t$ 의 각도로 투과하는 빔이 생기게 된다. 이때 두 매질의 굴절률, 입사각, 투과각 사이의 관계는 스넬의 법칙으로 유도되며 식 (1)로 표현된다.

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (1)$$

여기서,  $\theta_i$ 와  $\theta_t$ 는 입사각과 투과각을 나타낸다.

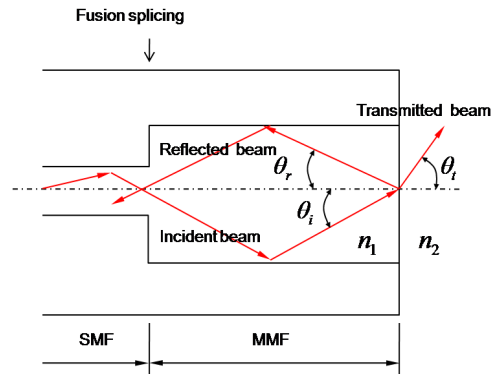


Fig. 1 Schematic diagram of proposed fiber probe

두 매질의 경계면에서 반사하여 입사 방향으로 되돌아가는 반사파와 입사파와의 관계는 반사도 (Reflectance,  $R$ )로 정의되며, 횡 전계

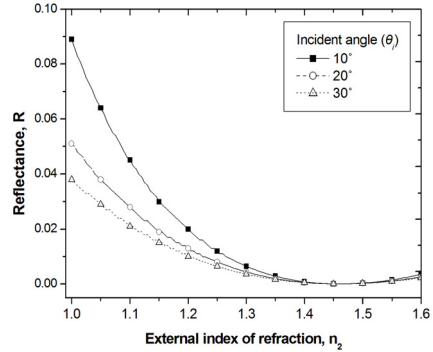
(Transverse electric, TE)파에서는 식 (2)로 주어지고, 횡 자계(Transverse magnetic)파에서는 식 (3)으로 주어진다.

$$R_{TE} = \left[ \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right]^2 \quad (2)$$

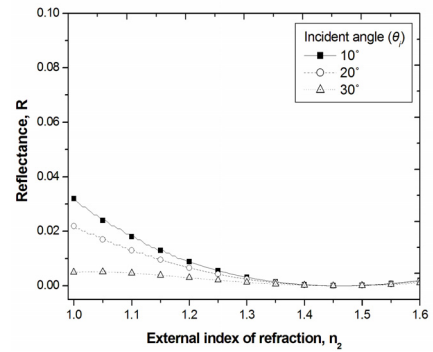
$$R_{TM} = \left[ \frac{n_1 \cos \theta_t - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} \right]^2 \quad (3)$$

여기서  $n_1$ 은 광섬유의 굴절률,  $n_2$ 는 광섬유를 둘러싸고 있는 물질의 굴절률이다. 만약  $n_2$ 가 높아지면 반사도  $R_{TE}$ 와  $R_{TM}$ 은 감소한다. 본 연구에서 주목한 침수센서 동작원리는 광섬유 끝단에서의 반사도가 광섬유 외부 물질의 굴절률에 따라 달라지는 현상을 이용한 것이다.

Fig. 2는 굴절률  $n_2$ 의 변화에 대한 횡 전계파와 횡 자계파의 반사도를 계산한 결과를 보여준다. 동일한 입사각에서 광섬유를 둘러싸고 있는 외부 물질의 굴절률이 증가하면 반사도가 현격히 줄어들고 있음을 알 수 있다. 입사각이 커지면 횡전계파의 경우 반사도가 증가하는 경향이 있지만, 굴절률  $n_2$ 가 광섬유의 굴절률 ( $n_1 = 1.458$ )에 가까워질수록 반사도는 입사각의 크기에 관계없이 거의 0에 가까워진다. 이것은 대부분의 입사범이 광섬유 바깥으로 투과되고 광섬유 내부로 반사되는 빛이 거의 없다는 것을 의미한다. 즉, 외부 굴절률이 광섬유의 굴절률과 일치하면 손실 없이 외부 물질로 광전력 전송이 일어나지만 도파모드를 형성하지 못하므로 완전한 광 손실이 발생한다. 횡 자계파의 경우에는 입사각의 커질수록 반사도가 줄어드는 경향을 보이며 굴절률  $n_2$ 에 대한 반사도의 경향은 횡 전계파와 동일하다. 입사각의 각도가 10°인 경우 횡 전계파는  $n_2$ 가 공기( $n_2 = 1$ )일 때 보다 물( $n_2 = 1.33$ ) 일 때 반사도는 4배 이상 줄어듦을 알 수 있다. 이러한 현상을 이용하면 공기와 물을 구별할 수 있는 광섬유형 침수 센서로 개발이 가능하다.



(a) TE wave



(b) TM wave

Fig. 2 Calculated Reflectance as a function of external index of refraction ( $n_2$ )

### 3. 침수센서 시스템 구현

Fig. 3은 제작된 침수 센서 시스템의 개략도를 보여주고 있다. 입사광원으로 C-밴드와 L-밴드를 제공하는 광대역 광원을 사용하였으며, 2 입력 1 출력 단자를 갖는 광 결합기 (2×1 coupler)의 입력 단자 a로 광원을 입사시킨다. 결합기의 출력단자 c에는 광섬유 브래그 격자 (Fiber Bragg grating, FBG)가 연결되어져 있다. 광섬유 브래그 격자는 격자 주기에 해당하는 브래그 파장의 빛을 반사하여 입력광원 쪽으로 되돌아가게 하므로 밴드패스필터의 스펙트럼 특성을 보인다. 이때 브래그 파장( $\lambda_{Bragg}$ )은 식 (4)로 주어진다.

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff}\Lambda \quad (4)$$

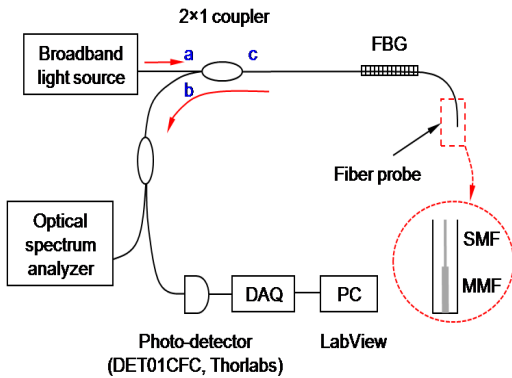


Fig. 3 Basic configuration of fiber-optic submersion sensor systems

여기서,  $n_{eff}$ 는 광섬유 코어의 유효 굴절률이며  $\Lambda$ 는 FBG의 공간격자 주기를 의미한다. 본 연구에 사용한 FBG는 1554.3nm의 브래그 파장을 가지며 3dB 대역폭은 0.5nm 이하이고 반사도는 20dB 이상이다.

FBG 끝단에는 다중모드 광섬유 (Multi-mode fiber, MMF)가 결합되어 프로브 역할을 하게 된다. FBG와 다중모드 광섬유는 광 융착기를 사용하여 물리적으로 접속하였으며 융착 후 삽입손실은 0.1dB 이하가 되도록 하였다. 다중모드 광섬유 끝단의 단면은 센서의 민감도와 데이터의 신뢰성을 좌우하는 부분이므로 절단시 주의를 요하게 된다. 다중모드 광섬유의 끝단 면을 20배 확대하여 찍은 사진을 Fig. 4에서 보여주고 있다. 광섬유의 길이방향에 대하여 단면이 수직이며, 끝단 면에 갈쭉한 부분 없이 매끈하게 유지되고 있다. 센서의 끝단과 FBG에서 반사된 빛은 광 결합기의 다른 단자 b를 통하여 광스펙트럼 분석기 또는 신호처리를 위한

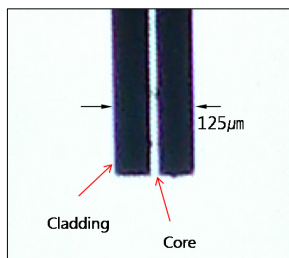


Fig. 4 Photograph of fiber-optic probe

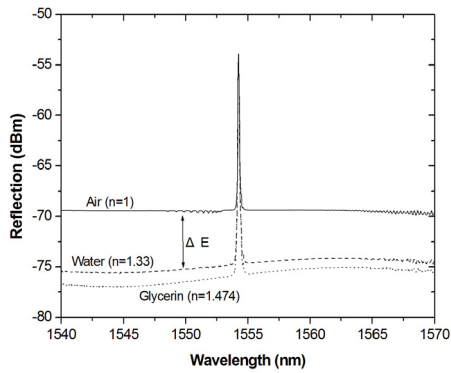
시스템으로 보내진다. 침수유무에 대한 전기적인 신호 변화 측정은 InGaAs 기반 PIN 형의 광 검출기 (DET01CFC, Thorlabs)를 사용하였으며 신호처리는 NI USB-6112 (National Instrument)의 데이터 인식보드와 LabVIEW 소프트웨어를 사용하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

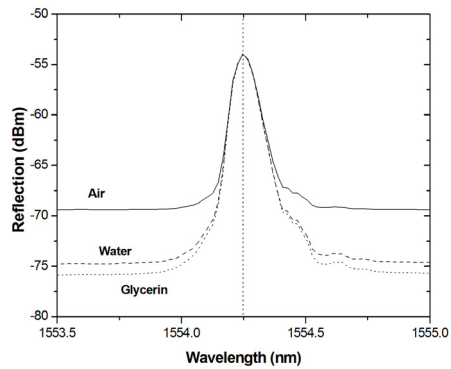
광섬유 브래그 격자에 의한 반사 스펙트럼은 광섬유 끝단에서 반사되어 되돌아오는 광 전력으로 인하여 신호 대 잡음비에 영향을 받게 된다. 이것은 투과된 대역의 빛이 되돌아와서 동일 대역에 광전력이 더해지므로 잡음레벨을 높이는 효과로 나타난다. 광통신 관점에서 보면 높은 잡음레벨은 채널간의 격리도를 떨어뜨려 시스템 성능 저하를 가져오지만 본 연구에서는 이러한 효과를 이용하여 침수를 판별하고 있다.

Fig. 5(a)는 광섬유 탐침을 둘러싸는 물질이 공기, 물, 글리세린일 때의 반사 스펙트럼을 광 스펙트럼 분석기로 측정된 것이다.  $n_2$ 가 증가함에 따라 브래그 파장 주위의 광 스펙트럼 출력이 낮아진다. Fig. 2의 계산된 결과에서처럼  $n_2$ 가 커짐에 따라 광섬유 끝단에서의 반사도  $R$ 이 작아져서 일어나는 것이다.  $n_2$ 가 공기일 때와 물일 때의 스펙트럼을 비교하면 브래그 파장 주위의 광 전력이  $\Delta E$  만큼 낮아짐을 알 수 있다.

Fig. 5(b)는 브래그 격자의 중심파장 변화를 확인하기 위한 반사 스펙트럼이며 Fig. 5(a)의 브래그 파장 부분을 자세히 보여준 것이다. 제안된 센서 구조에서 브래그 파장의 중심은 외부물질의 굴절률 변화에 영향을 받지 않고 일정하다. 이것은 센서의 정상동작 유무를 확인하기 위한 수단으로 이용된다. 만약 광섬유 손상에 의한 광 손실 요인이 발생하여 반사 광량이 줄어들었음에도 불구하고 광섬유 손상 여부를 알지 못한다면 침수가 발생한 것으로 오판할 수 있다. 이 경우 브래그 파장의 유무와 이동정도를 통하여 정확한 진단을 할 수 있다. 브래그 파장이 관측되는 경우에는 정상동작하



(a) Reflection spectra

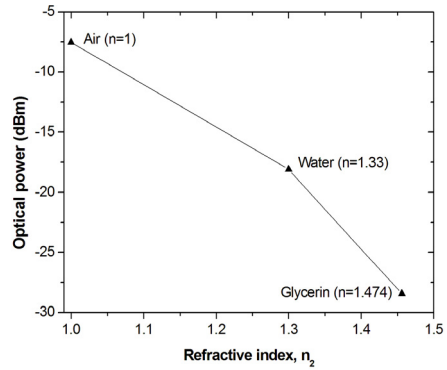


(b) Center of Bragg wavelengths

**Fig. 5 Spectral responses of submersion sensor for three different surrounding materials**

는 것이지만, 브래그 파장이 나타나지 않거나 매우 미약하다면 광섬유 손상이나 파손 등을 의심하여야 한다. 광섬유 브래그 격자를 사용한 또 다른 목적은 저가형 광 검출기를 사용할 경우 발생할 수 있는 최저 광 전력 검출에 대한 신뢰성 보장이다. 브래그 반사파에 의한 피크 광 전력은  $-55\text{dBm}$  이상을 보장하며 외부물질의 굴절률 변화에 대해서도 피크 광 전력은 전혀 영향을 받지 않는다. 그러므로 최소 반사광전력을 보장할 수 있다.

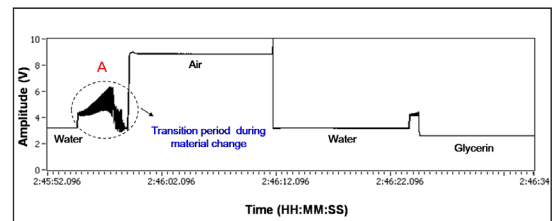
Fig. 6은 광 파워미터를 이용하여 측정한 광 전력의 변화이다. 광섬유 프로브가 공기 중에 노출된 상태에서 물과 접촉하게 되면  $10\text{dB}$  정도의 광 전력 감쇠를 유발한다. 글리세린 ( $n_2 = 1.474$ )의 경우 굴절률이 물 보다 더 높으므로  $20\text{dB}$  이상의 광 전력 감쇠가 발생한다. 대부분의 액체는 물보다 굴



**Fig. 6 Optical power versus external index of refraction ( $n_2$ )**

절률이 높아서 물과 다른 종류의 액체가 프로브에 검출되면  $10\text{dB}$  이상의 광 전력 손실이 발생한다는 것을 유추할 수 있다. 이 결과를 이용하면 공기와 액체를 구별할 수 있는 분야의 응용으로 적용할 수 있다.

모니터링을 위한 센서 시스템 구현을 위해서는 광 신호를 전기적인 신호로 변환하여 데이터 처리하는 부분이 필요하다. 본 연구에서는 NI USB-6008 데이터 인식보드와 LabVIEW 소프트웨어를 이용하여 구현하였으며, 모니터링 시스템의 시간응답 특성을 Fig. 7에서 보여준다. 광섬유 프로브의 초기상태는 물속에 담겨져 있다. 이를 공기 중에 노출시키면 물의 표면장력으로 인하여 광섬유 단면에 물이 남아 있게 되어 A 구간과 같이 4초 정도 과도응답을 보인다. 이후 센서 표면의 물이 중력에 의해 떨어진 후에는 정상상태의 응답으로 돌아간다. 그러나 광섬유 센서 프로브가 다시 물과 접촉하게 되면 즉각적인 반응을 보이게 된다. 광전 변환이 일어난 후 모니터링 시스템에 나타난 전기



**Fig. 7 Real-time responses for surrounding material changes**

적 신호는 9V에서 3.2V로 급격하게 떨어짐을 알 수 있다. 글리세린의 경우 출력 전압은 2.7V로 더욱 낮게 나타난다. 이는 Fig. 6의 결과와 일치하는 것으로서 제안된 광섬유센서 시스템은 홍수나 범람으로 인한 침수 지역 또는 선박의 사고로 인한 선체의 누수 구역 정보를 실시간으로 진단할 수 있는 원격지 모니터링 시스템에 적용할 수 있음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 다중모드 광섬유와 광섬유 브래그 격자가 융착된 광섬유 센서를 이용하여 침수 모니터링 시스템을 구현하고 실험하였다. 단순하지만 효과적으로 침수 여부를 실시간으로 파악할 수 있는 구조로서 다중모드 광섬유가 사용되었고 광섬유 끝단의 반사도가 외부 물질의 굴절률에 따라 달라짐을 이용하였다. 광섬유 프로브가 공기에 대하여 물을 감지하였을 때의 상대적인 광 전력은 10dB 정도로 낮게 나타났다. 이를 응용하여 홍수 및 누수, 누유에 대한 정보를 실시간으로 제공하는 침수 감시 센서 소자로 적용할 수 있음을 보였다. 광섬유 브래그 격자는 센서의 연속적이고 안정적인 동작을 모니터링할 수 있는 파장 정보를 제공할 뿐만 아니라 광 검출기의 최저 광 전력 검출 허용한계를 보장하는 역할을 하도록 구성하였다. LabVIEW 기반으로 구성된 모니터링 시스템은 광 전력의 변화를 전기적인 신호의 변화로 전환하여 신호 처리할 수 있도록 하였다. 물을 검출하였을 때의 전기적 신호는 공기에 대하여 6.8V의 전압 감소를 보였다. 이는 침수 경보 시스템으로 구현하기에 충분한 전압의 변화를 제공하므로 본 연구에서 제안한 광섬유 형 프로브는 기존의 전기적인 센서의 단점을 보완하고 대체할 수 있을 것이다.

## 후 기

이 논문은 2008학년도 한국해양대학교 공과대학의 지원을 받아 수행된 연구임.

## 참고문헌

- [1] S. Tomita, H. Tachino, and N. Kasahara, "Water sensor with optical fiber", *J. Lightwave Technol.*, Vol. 8, No. 12, pp. 1892-1832, 1990.
- [2] W. C. Michie, B. Culshaw, M. Konstantaki, I. McKenzie, S. Kelly, N. B. Graham, and C. Moran, "Distributed pH and water detection using fiber-optic sensor and hydrogels", *J. Lightwave Technol.*, Vol. 13, No. 7, pp. 1415-1420, 1995.
- [3] K.-R. Sohn, K.-T. Kim, and J.-W. Song, "Optical fiber sensor for water detection using a side-polished fiber coupler with a planar glass-overlay-waveguide", *Sens. Actuators A*, Vol. 101, pp. 137-142, 2002.
- [4] C.-H. Lee, J.-H. Kim, J.-H. Park, and J.-W. Song, "Reflective side-polished optical fiber submersion sensor using an optical fiber mirror for remote sensing", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 19, No. 8, pp. 583-585, 2007.
- [5] S.-H. Jung, D.-H. Lee, K.-H. Kwon, and J.-W. Song, "Water sensor using macrobending-sensitive fiber for real-time submersion monitoring", *Opt. Commun.*, Vol. 260, pp. 105-108, 2006.

## 저 자 소 개



손경락(孫慶洛)

1992년 경북대학교 전자공학과 졸업, 1995년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학 석사), 2002년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학박사), 2007년 1월~2008년 1월 University of New South Wales 연구교수, 2003년~현재 한국해양대학교 컴퓨터제어전자통신공학부 조교수



**계광현(桂光賢)**

2009년 2월 한국해양대학교 전자통신공학과 졸업(공학사), 2009년 6월 현재 한국해양대학교 대학원 전자통신공학과 석사과정 재학



**조석제(趙爽濟)**

1982년 경북대학교 전자공학과 졸업, 1988년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학 석사), 1991년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학박사), 1991년~현재 한국해양대학교 컴퓨터제어전자통신공학부 교수



**심준환(沈俊煥)**

1991년 경북대학교 전자공학과 졸업, 1993년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학석사), 1998년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학박사), 2003년 8월~2005년 2월 텍사스주립대(알링턴소재) 연구교수, 1998년~현재 한국해양대학교 컴퓨터제어전자통신공학부 부교수