

광섬유형 콜리메이터를 이용한 마이크로 광학 누수감지 시스템 손 경 략†

(원고접수일 : 2011년 2월 7일, 원고수정일 : 2011년 4월 21일, 심사완료일 : 2011년 5월 15일)

Micro-optic Submersion Detection Systems using In-line Fiber Collimator

Kyung-Rak Sohn†

요 약 : 본 논문에서는 콜리메이터를 이용한 투과형과 반사형의 마이크로 광학형 누수감지 센서 시스템을 제안하고 실험하였다. 센서는 빛을 송신하고 수신하는 두 개의 콜리메이터가 10 mm 정도 떨어져서 마주보는 형태로 구현되어졌다. 센서가 공기 중에 노출된 경우 송신 콜리메이터에 나온 빛은 공기를 투과하여 수신 콜리메이터로 전송되어 일정한 출력 광 전력을 유지한다. 그러나 액체속에서는 송신된 빛이 산란되어 수신단으로 전달되지 못하므로 침수를 감지한다. 반사형의 경우 광섬유형 격자를 센서 끝단에 설치함으로써 센서에서 반응한 광 출력 정보가 입력단으로 다시 되돌아 올 수 있게 하여 시스템의 모니터링 구조를 단순화 하였다. 또한 두 시스템의 동작 특성을 비교하여 제시하였다.

주제어 : 침수센서, 마이크로광학소자, 콜리메이트, 반사, 광섬유 격자

Abstract: In this paper, two types of micro-optic submersion detection systems are proposed and demonstrated. The structures are based on the transmission and reflection of incident light, respectively. Two collimators are separated by 10 mm and installed face to face in straight line. The incident light transmits from one side of collimator to the other through the air, but the optical loss is below 1 dB. On the other hand, when the sensors are submersed into water, most of optical power scattered into water. The systems monitor the dramatical power change to alarm the submersion. Reflection type of sensor system has a Bragg grating at the end of the sensor for back-reflection of sensing signal. This is for simple configuration of systems. The performance of two sensor systems are described in detail.

Key words: Submersion sensors, Micro-optic devices, Collimator, Reflection, Fiber-Bragg grating

1. 서 론

전 세계적으로 석유수요 증가에 따라 석유자원의 부족과 고유가로 대체에너지 개발이 화두가 되고 있으며, 유전개발의 경우 심해와 극저온 지역으로 옮겨가고 있다. 이에 따라 해저 유전 및 가스전 개발에 사용되는 해양플랜트 사업이 최근 주목을 받고 있다. 그러나 한편에서는 지구 온난화로 인하여 이상기후가 빈번히 발생하여 가뭄과 홍수, 폭설로 많은 지역이 어려움을 겪고 있으므로 다양한 기

상 관측 및 해양 관측 시스템이 개발되어 피해를 최소화하고자 노력하고 있다. 해양 구조물 또는 해양 관측 시스템의 경우 침수 상태를 모니터링하기 위한 다양한 센서를 장착하고 있다[1]. 주로 전기 저항, 정전용량, 음향 임피던스 등의 차를 이용한 것이며, 이 중 정전용량을 이용한 방법이 성공적으로 개발되었고 상용화 되어 적용되고 있다. 그러나 정전용량을 이용하는 것은 센서 끝단에 항상 일정한 전력공급이 필요하므로 전기적인 영향을 고려해

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

야 될 뿐만 아니라 복잡한 배선 문제를 고려하여야 한다[2]. 이는 기존의 유선망에 링크를 추가해야 하는 것으로 시스템이 복잡해지거나 많은 경비가 소요된다. 전기적 전력공급을 필요로 하는 전자소자로써 불꽃을 일으켜 발화될 수 있는 위험성을 항상 내포하고 있으며 해수 환경에서 부식 또는 전자파에 의한 오작동의 우려가 발생할 수도 있다. 침수센서로써 전기적인 안정성이 보장되고 소자의 내부식성과 신뢰성을 보장할 수 있는 대안으로 광섬유를 이용한 센서 연구가 많은 주목을 받고 있다. 시스템의 신뢰성은 침수센서가 전자기적 간섭에 영향을 받지 않아야 하며, 센서 신호처리부와 센서헤드가 전기적으로 분리되어 원거리에 설치될 수 있다면 데이터의 신뢰성과 설치의 유연성을 동시에 확보할 수 있다. 광섬유의 경우 재료가 실리콘 다이옥사이드로 절연체이므로 전기적인 영향을 받지 않고 스파크나 화염을 일으킬 염려가 없으므로 침수센서로서의 적용에 용이하고 원거리에 설치할 시 설치가 쉽고 가벼우며 센서헤드에 소자동작을 위한 전력공급이 필요하지 않기 때문에 구조물의 복잡성에 관계없이 유연하게 시스템을 구현할 수 있는 장점이 있다.

광섬유를 이용한 침수센서는 다양한 형태로 개발되었다. 단일모드 광섬유와 평면도파로를 결합한 구조[3], 광섬유와 프리즘을 이용하여 공기-액체 경계면을 감지하는 센서[4], 광섬유의 측면을 일부분 연마하여 감쇄장 (evanescent field)을 외부 물질로 유도함으로써 침수센서로 활용하는 구조 등이 제안되었다[5]. 최근에는 광섬유형 방향성 결합기의 광 분배비를 이용한 수위 센서로 액체와 공기의 경계면을 감지할 수 있는 센서헤드[6] 및 광섬유 끝단의 반사도를 이용한 센서가 보고되었다[7].

본 논문에서는 광섬유형 콜리메이터를 이용하여 침수 유무를 판별할 수 있는 센서헤드를 제안하였으며, 동일 센서를 이용한 투과형과 반사형의 두 가지 센서 시스템을 구현하였다. 실험결과는 광 투과 스펙트럼과 LabVIEW® 기반의 신호처리 결과로 비교하였다.

2. 센서 설계 및 제작

Figure 1 (a)는 콜리메이터를 이용한 마이크로 광학형 누수 감지 센서의 개략도이다. 콜리메이터는 그린로드 (GRIN rod) 렌즈가 부착된 광학 소자로 광섬유를 통해 전송된 빛을 평행 광으로 만들거나 또는 외부에서 입사되는 빛을 광섬유에 집속시키는 소자로 활용된다. 본 연구에서는 누수와 침수 모니터링을 위한 목적으로 두 개의 콜리메이터를 10 mm 간격을 두고 마주보게 설치하여 구성하였다. 두 콜리메이터는 플라스틱 튜브에 삽입하여 일직선이 되게 고정함으로써 광 손실을 최소화하여 최대 광 전력이 전송될 수 있도록 하였다. 광섬유를 통해 전송된 빛은 좌측에 위치한 콜리메이터를 통과함으로써 빔 폭이 커진 평행 광이 되고 두 소자 사이에 존재하는 공기층을 통과하여 반대편에 위치한 콜리메이터로 전달된다. 플라스틱 튜브에는 외부 액체가 관통할 수 있는 홈이 파져있다. 센서부가 공기 중에 노출된 경우라면 대부분의 빛은 마주보고 있는 우측 콜리메이터를 통과하여 광섬유에 집속된다. 만약 센서가 공기보다 굴절률이 큰 물질로 둘러싸여 있다면 두 콜리메이터 사이를 통과하는 빛은 광학적 흡수와 산란에 의해 광 전력 손실은 현저하게 증가한다. 액체에 침수된 경우라면 광 전력 전달은 기대하기 어렵다.

Figure 1 (b)는 일반적인 광섬유형 콜리메이터의 실물사진과 단면도를 보여준다. 센서 제작에 사용된 콜리메이터는 동작 중심파장이 1550 nm이며 스펙트럼 대역폭은 60 nm이다. 0.2 dB의 삽입손실을 가지며 반사손실은 60 dB이다. 최대 빔 직경은 0.5 mm이다.

Figure 2는 제작된 센서의 실물사진이다. 센서의 길이는 30 mm 정도이며 7 mm 직경의 플라스틱 튜브를 사용하여 두 개의 콜리메이터를 고정하였다. 센서 제작에 있어서 두 콜리메이터의 끝단면이 평행을 유지하는 것은 센서의 성능을 결정하는 중요한 요소이므로 플라스틱 튜브의 선택과 콜리메이터의 장착에 주의를 요한다. 센서를 구성하는 재질이 유리와 플라스틱으로 구성되어 부식에

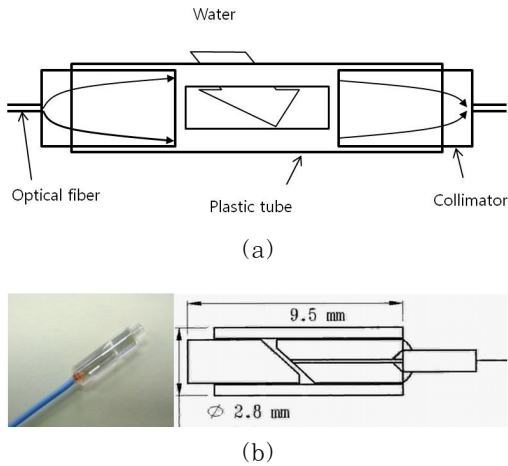


Figure 1: (a) Schematic of micro-optic submersion sensor composed of two collimators and (b) basic structure of a general fiber-optic collimator

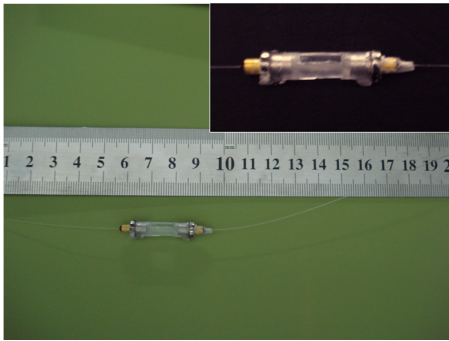


Figure 2: Photograph of micro-optic submersion sensor fabricated

강하고, 전력공급 및 신호처리를 위한 전기적인 부분이 필요 없으며, 전자파 간섭과 무관하고 소형화가 가능한 특징이 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 투과형 센서 시스템

Figure 3은 Figure 2에서 제작된 마이크로 광학 센서 소자를 이용한 투과형 침수감지 모니터링 시스템의 구성도이다. 광대역 광원을 제작된 침수 센서의 한 끝단 면에 연결하고 반대편 끝단에는 3 dB 광 결합기(coupler)를 연결하였다. 광 결합기의 두 출력단은 입사광이 각각 절반씩 분기되어

나타난다. 한쪽 출력 단자는 광 스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer: OSA)에 연결하여 파장에 대한 투과 응답 특성을 측정하였다. 다른 쪽 단자는 침수유무에 따른 출력광 신호의 변화를 관측하기 위하여 광 검출기(photodiode: PD)로 연결된다. 입력광 세기에 비례하는 전기적인 신호는 PD에서 광전 변환되고, 전기적 신호는 신호처리를 위하여 데이터 인식 보드(data acquisition board: DAQ)에 전달된다. PC의 모니터링 프로그램은 랩뷰(LabVIEW®)의 시그널 익스프레스(Signal Express)를 사용하였다.

침수에 대한 센서의 응답특성은 공기 중에 있던 센서를 물속에 반복적으로 담가 출력신호의 감쇄 정도를 측정함으로써 평가하였다. Figure 4는 센서가 공기 중에 노출되어 있을 때와 침수되었을 때의 광 출력 스펙트럼을 보여준다. 공기 중에 노출된 경우의 출력파형은 광원의 스펙트럼과 거의 유사하다. 1550 nm 파장영역에서 -20 dB 이상의 광 출력을 보이고 있다. 그 이유는 콜리메이터의 입출력 경계면에서 발생하는 약간의 광 감쇄만 고려의 대상이며 전체적인 파형의 변화는 없기 때문이다. 통상적으로 유리에서 공기로 또는 공기에서 유리로 빛이 수직 입사할 경우 4 % 정도의 반사로 인해 0.18 dB 정도의 손실이 발생한다. 그러나 두 콜리메이터 사이에 물과 같은 액체가 존재한다면 매질의 특성과 굴절률이 크게 변하여 흡수와 산란으로 인한 상당한 광 손실이 발생한다. 본 실험의 결과에서는 반대쪽 콜리메이터 도달하는 광은 -80 dB 이하로 거의 무시할 수 있는 수준으로 나타났다. 즉, 대부분의 광이 물을 통과하면서 산란되거나 흡수되어 반대편 광섬유에 집속되지 못함을 보여준다.

Figure 5는 센서의 반복적인 침수유무에 대한 전기적 신호 처리 결과를 시간 응답 특성으로 보여주는 그래프이다. 센서가 공기 중에 노출된 경우 1.4 V 정도의 출력 전압이 나타나지만 침수되면 광 전력의 감쇄에 의해 0.2 V 이하의 출력전압이 관측된다. 실험결과를 통해 마이크로 광학 소자를 이용한 투과형 누수감지 시스템이 충분히 응용될 수 있음을 보였다.

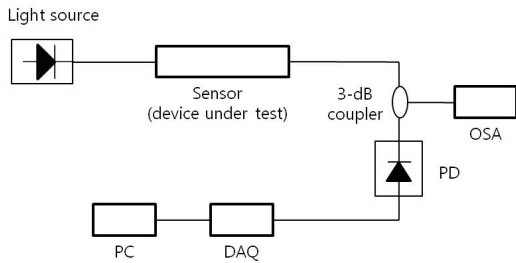


Figure 3: Transmission-type submersion monitoring system using collimator

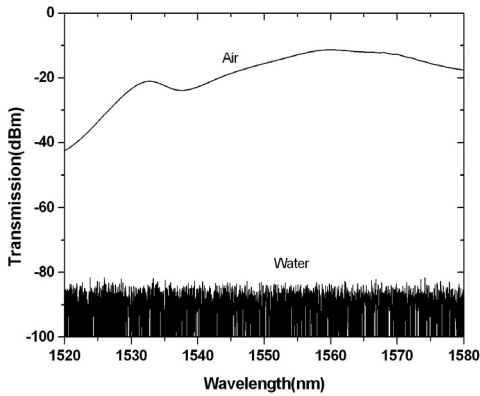


Figure 4: Optical spectra measured by optical spectrum analyzer (OSA)

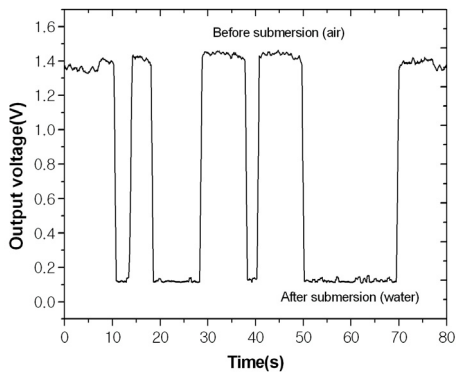


Figure 5: Time response measured by data acquisition board (DAQ)

3.2 반사형 센서 시스템

투과형 센서시스템의 경우 선박 등에 적용할 경우 배선이 복잡해 질 수 있다. 투과형은 입력과 출력 신호 단이 서로 반대편에 위치하므로 설치된 센

서까지 광섬유가 연결된 것과 동일하게 출력단에 연결된 광섬유가 측정 시스템이 있는 곳까지 다시 연결되어야 한다. 그러므로 이중 케이블 작업이 필요하므로 구조적으로 복잡하여 배선에 어려움이 발생하고 설치비용이 많이 발생할 수 있다. 반사형 센서 시스템은 배선의 문제점을 해결하기 위한 대안으로 제시하였으며, 광섬유 격자 (fiber-Bragg grating: FBG)를 사용함으로써 한 개의 광섬유만 채널로 사용되었다.

광섬유 격자는 코어에 게르마늄과 같은 불순물을 첨가한 후 자외선 레이저를 조사하여 주기적으로 굴절률을 변화시킴으로써 격자를 새긴 것을 말한다. 주기적으로 변조된 굴절률의 경계면에서는 미량의 빛이 반사되게 되는데, 광섬유 격자는 광섬유 코어에 새겨진 수 만개의 격자에서 일어나는 다중반사와 간섭현상에 의해서 일정한 파장범위를 반사시키는 소자이다. 격자의 주기와 유효굴절률에 의해 브래그(Bragg) 파장이라 불리는 특정 파장이 반사되게 되는데 이 파장은 식 (1)과 같은 브래그 조건에 의해서 결정된다.

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

여기서 λ_B 는 반사 측정되는 브래그 파장, n 은 광섬유의 굴절률, Λ 는 제작된 격자 간격이다.

광섬유의 측면에 248nm 근방 파장의 자외선 레이저를 이용하여 간섭무늬를 형성하면 광섬유 코어의 굴절률은 간섭무늬의 에너지 분포에 따라 주기적으로 변화하는 Figure 6의 특성을 가진다. 광섬유 코어 내에 주기적인 굴절률 변화는 특정 파장의 빛을 반사시키는 거울과 같은 역할을 하므로

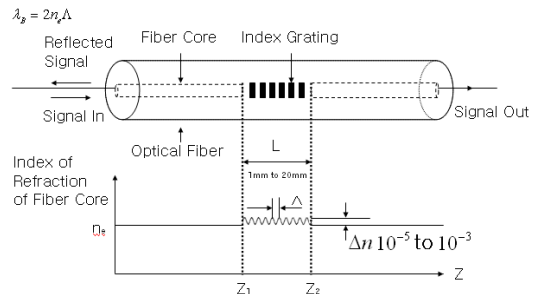


Figure 6: Basic structure of fiber Bragg gratings

본 연구에서는 이를 한 가닥의 광섬유 채널로 이용하기 위하여 시스템에 적용하였다. 브래그 격자에 해당하는 특정 파장의 빛은 입력단으로 되돌아가게 되며 나머지 광 전력은 투과된다.

Figure 7은 광섬유 격자를 이용하여 단선으로 침수유무를 모니터링할 수 있는 센서 시스템이다. 먼저 광원의 빛이 3 dB 결합기를 통하여 센서로 입사되면 센서 뒷단에 설치된 광섬유 격자로 인하여 브래그 파장에 해당하는 특정한 파장의 빛은 센서를 거쳐 다시 입력 단으로 되돌아가게 된다. 브래그 파장의 빛이 공기 중일 때와 센서가 침수되었을 때 보이는 다른 특성을 이용함으로써 하나의 광섬유를 이용하여 센서시스템을 구성할 수 있다. 광섬유 격자에서 반사되어 되돌아오는 빛은 3 dB 결합기를 이용하여 분리해 내고 신호 분석기로 연결하면 브래그 파장이 측정된다.

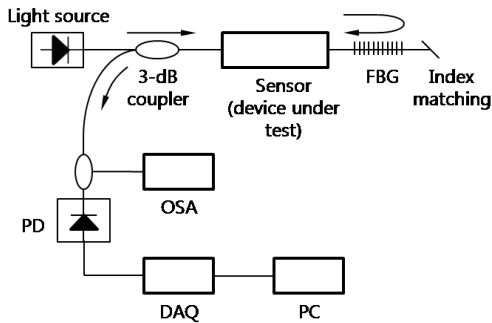


Figure 7: Reflection-type submersion monitoring system using fiber-bragg grating

Figure 8은 광 스펙트럼 분석기로 측정한 센서의 응답특성이다. 센서가 공기 중에 있을 때에는 두 개의 콜리메이터를 횡단하는 광의 손실이 작아 브래그 파장을 관측할 수 있으며 1534 nm 부근에서 피크 파장이 나타남을 볼 수 있다. 브래그 파장의 신호 대 잡음비는 10 dB 정도이다. 그러나 센서가 물에 잠기면 대부분의 반사광은 산란되므로 브래그 파장을 관측할 수 없게 되어 침수 상황을 판별할 수 있다. Figure 7에서와 같이 광원과 측정 시스템이 동일한 장소에 설치할 수 있으므로 단선으로 모니터링 시스템을 구현할 수 있는 장점을 제공한다.

Figure 9는 공기 중에 노출된 센서를 침수시켰을 때의 시간에 대한 응답특성을 보여준다. 공기 중일 경우 1.05 V 부근의 출력전압이 나타나지만 물이 검출됨에 따라 0.96 V 정도로 떨어짐을 알 수 있다. 이는 침수에 의해 브래그 파장에 해당하는 빛이 출력 단으로 전달되지 못함으로 전압 강하가 발생한 것이다. 그러나 센서가 다시 공기 중으로 노출되었을 때는 1 V 부근의 전압을 보이면서 물에 침수되기 전의 전압으로 회복되지 못하고 있다. 그 이유는 콜리메이터 끝단에 남아있는 소량의 액체에 브래그 파장이 민감하게 영향을 받고 있음을 보여준다.

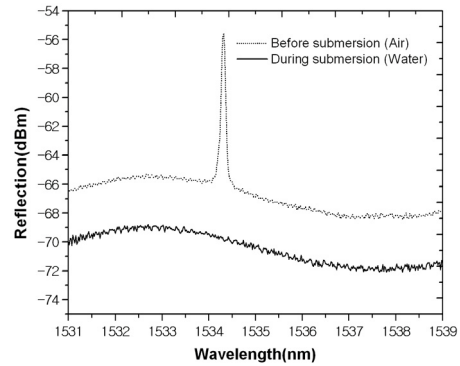


Figure 8: Optical spectrum measured at the end of 3-dB coupler

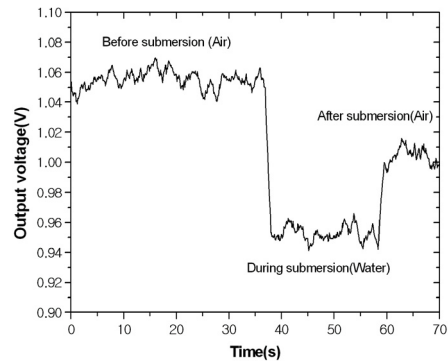


Figure 9: Time response measured by data acquisition board (DAQ)

4. 결 론

본 연구에서는 두 개의 콜리메이터를 이용한 마이크로 광학형 침수감지 센서시스템을 제안하고 실

험결과를 제시하였다. 투과형 센서 시스템의 경우 모니터링을 위해서는 복선의 광섬유 채널을 필요로 하지만 침수에 대한 반복 응답 특성이 우수하게 나타났다. 반사형 센서 시스템은 광섬유 브래그 격자를 이용함으로써 침수시에 브래그 파장이 관측되지 않는 특징을 보였으며 이를 모니터링 원리에 적용하였다. 투과형과는 달리 단선의 광섬유로 센서 시스템을 구현할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 브래그 파장이 콜리메이터 단면에 묻어 있는 이물질에 영향을 받기 때문에 반복응답 특성을 요구하는 응용에는 제한이 있다.

본 연구에서 제안한 마이크로 광학형 센서헤더의 경우 유리 또는 플라스틱만으로 구현할 수 있으므로 폐수 또는 해수와 같은 특수한 환경에서의 침수나 누수를 모니터링 하는 시스템에 적용할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 한국해양대학교 2009학년도 학술연구지원사업의 일부지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] K. S. C. Kuang, S. T. Quek, and M. Maalej "Remote Flood monitoring system based on plastic optical Fibres and wireless mote," Sens. Actuators A, vol. 147, pp. 449-455, 2008.
- [2] K. R. Sohn and J. H. Shim, "Liquid-level monitoring sensor systems using fiber Bragg grating embedded in cantilever," Sens. Actuators A, vol. 152, pp. 248-251, 2009.
- [3] 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.
- [4] A. A. Kazemi, C. Yang, and S. Chen, "Fiber optic cryogenic liquid level detection system for space application", Proc. of SPIE, vol. 7314, 73140A-1, 2009.
- [5] M. Lomer, J. Arrue, C. Jaurequi, P. Aiestaran, J. Zubia, J. M. López-Higuera, "Lateral polishing of bends in plastic optical fibers applied to a multipoint liquid-level measurement sensor", Sens. Actuators A, vol. 137, pp. 68-73, 2007.
- [6] 손경락, 계광현, "광섬유형 방향성 결합기의 광분배비를 이용한 수위센서 연구", 한국마린엔지니어링학회지, 제34권, 제6호, pp. 90-95, 2010.
- [7] K. H. Key, H. P. Kim, K. R. Sohn, "Development of optical dual-sensors for submersion monitoring using zigbee-based wireless sensor networks", J. of Kor. Sensors, vol. 19, no. 3, pp. 184-190, 2010.

저 자 소 개



손경락(孫慶洛)

1992년 경북대학교 전자공학과 (공학사), 1995년 경북대학교 전자공학과 (공학석사), 2002년 경북대학교 전자공학과 (공학박사), 1992년-1993년 하이닉스 반도체, 1995년 - 1999년 현대자동차 (연구원), 2006년 - 2007년 UNSW 방문교수, 2003년 - 2010년 현재 한국해양대학교 전자통신공학과 (부교수). 관심분야: 광센서, 가시광 통신, UV-LED 통신, 수중 광통신