한국마린엔지니어링학회지 제34권 제6호, pp. 846~851, 2010. 9 (ISSN 1226-9549)
Journal of the Korean Society of Marine Engineering

광섬유형 방향성 결합기의 광 분배비를 이용한 수위 센서 연구

손경락† · 계광현[1]

(원고접수일 : 2010년 5월 27일, 원고수정일 : 2010년 7월 30일, 심사완료일 : 2010년 8월 16일)

A Study on the Liquid-level Sensors Using Splitting Ratio of Fiber-optic Directional Couplers

Kyung-Rak Sohn† · Kwang-Hyun Key[1]

요 약 : 광섬유형 결합기의 끝단면을 이용한 액체-공기 경계면 감지 센서를 제안하고 특성을 시험하였다. 이 센서 시스템의 원리는 광섬유 끝단의 경계면에 접촉하는 물질의 굴절률 변화에 따라 발생하는 추가적인 광 손실을 이용하는 것이다. 각각 다른 광 분배비를 가지는 다섯 가지의 광섬유형 결합기를 이용하여 물과 공기에 접촉하였을 때의 스펙트럼 응답 특성을 측정하고 분석하였다. 이 실험결과는 다중 센서헤드를 가지는 센서 시스템을 개발할 경우 결합기의 광 분배비를 결정하는데 유용하게 사용되어질 것이다. 제안된 센서 구조를 이용하여 다중센서 배열을 위한 결합기 선택에 활용될 수 있기를 기대한다. 또한 다중 지역에서 동시에 발생하는 홍수나 침수을 감시하는 모니터링 시스템에 적용될 수 있다.
주제어 : 광섬유 센서, 방향성 결합기, 광 분배비, 침수센서, 스넬의 법칙

Abstract: A liquid-air interface sensing system using the flat end surfaces of a fused-silica fiber coupler has been demonstrated. The principle is based on the additional optical loss caused by changing the refractive index of the external material at the boundary of the end face made of a fiber. The immersion characteristics of this system with respect to the different splitting ratios of the couplers were investigated to determine the sensitivity when it responses to water and air. These experimental data are very useful for selecting the coupling ratio of a coupler in order to develop a multiple sensing probe system. In the proposed sensor structure, it can be emphasize that the sensing probe can be appropriately arrayed on the basis of splitting ratio of the coupler. As a result, it is expected that the proposed liquid-air interface sensors can also be applied to monitor flooding that occurs in multiple areas at the same time.
Key words: Fiber-optic sensor, Directional coupler, Splitting ratio, Immersion sensors, Snell's law

1. 서 론

액화연료와 기체층의 경계를 감지하기 위한 다양한 형태의 센서 소자에 대한 연구가 진행되어져 왔다[1]. 주로 전기저항, 정전용량, 음향 임피던스 등의 차를 이용한 것이며, 이 중 정전용량을 이용한 방법이 성공적으로 개발되었고 상용화 되어 우주항공 분야의 액화 수소 및 산소의 수위를 감시하는 응용에 적용되었다. 그러나 정전용량을 이용하는 것은 전기적 전력공급을 필요로 하는 전자소자로서 불꽃을 일으켜 액체 연료를 발화시킬 수 있는

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

위험성을 항상 내포하고 있다. 또한 응답속도가 느리고 무게가 무겁고 고가인 단점을 가지고 있다. 전기적인 안정성이 보장되고 소자의 신뢰성을 보장할 수 있는 대안으로 광섬유를 이용한 센서 연구가 많은 주목을 받고 있다[2-5]. 인화성이 강한 액체 탱크의 수위를 측정하기 위한 방법으로 미국의 NASA에서는 광섬유와 프리즘을 이용하여 공기-액체 경계면을 감지하는 센서를 발표하였다[6]. 프리즘의 끝단 면이 공기에 노출되면 전반사를 통해 대부분이 되돌아오지만, 액체와 접촉하면 전반사 조건을 만족하지 못하여 상당량의 광 전력이 손실되는 원리를 이용하였다. 그러나 다중센서에 대한 개별신호분리와 모니터링은 고가의 광 시간영역 굴절률 측정기(Optical time-domain refractometer: OTDR)를 사용하였으며 전기적인 신호처리를 위한 부가적인 시스템이 요구되었다. M. Bottacini 등이 제안한 플라스틱 광섬유 센서는 광섬유 끝단의 경계면에서 발생하는 공기와 액체의 굴절률 차이를 이용하여 광 감쇠량으로 침수여부를 판단하였다[7]. 제안된 센서헤드는 수 백 마이크로미터 이하의 직경을 가지는 광섬유 끝단을 전반사가 일어날 수 있게 적당한 각도로 가공해야 하는 정밀 공정이 필요하다. 또한 센서를 다중화는 방안이 제시되지 못하고 단일 센서에 대한 실험결과만 제시하였다. 광섬유의 측면을 일부분 연마하여 소산장(Evanescent field)을 외부 물질로 유도함으로서 침수센서로 활용할 수 있는 방법도 제시되었다[8]. 총 8개의 센서를 직렬 연결하여 수위 센서에 대한 실험결과를 제시하였는데 각각의 센서에 대한 감쇠비가 0.26 dB로 민감도가 좋지 못하여 신뢰성 있는 시스템을 구성하기가 어려운 단점이 있다.

본 논문에서는 광섬유형 방향성 결합기를 이용하여 액체와 공기의 경계면을 감지할 수 있는 센서헤드를 구현하였다. 방향성 결합기의 광 분배비에 따라 센서의 민감도가 달라짐을 실험결과를 통해 제시하였으며 설계를 위한 최적 광 분배비를 구하였다. 실험 결과는 다중 센서헤드를 가지는 이산형 수위 센서시스템의 다중화를 위한 설계기준으로 활용될 수 있다.

2. 동작원리

방향성 결합기는 두 개의 인접한 광 도파로로 구성되며 두 도파로의 소산장의 중첩에 의하여 광 결합이 일어난다. Figure 1은 통신용 단일모드 광섬유와 동일한 파라미터를 가지는 방향성 결합기의 기본구조와 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 두 도파로는 S_1과 S_2로 구분되어지며, S_1로 입사된 모드는 도파로를 따라 진행하면서 S_2로 점진적으로 광 결합이 일어남을 알 수 있다. 여기서 Z는 광 결합 길이를 의미한다. 만약 Z를 A-A′으로 설정한다면 S_1에선 90%의 광전력이 존재하고 10%는 S_2로 전달되어진다. 따라서 90:10 광 결합기를 구현할 수 있다. E-E′는 S_1과 S_2에 동일한 광 전력이 존재하게 되는 지점으로 50:50 광 결합기 (또는 3 dB 결합기)로 사용할 수 있다.

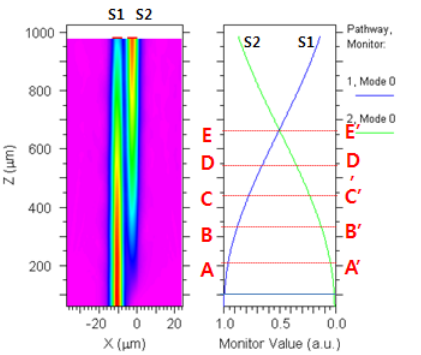

Figure 1: Schematic of directional coupler and simulation results

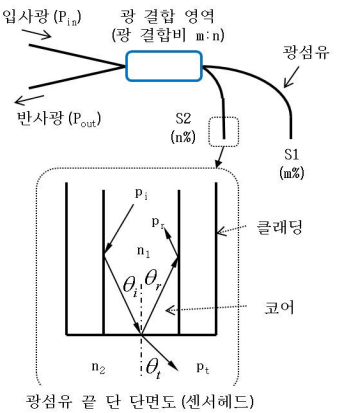

Figure 2: 2×2 fiber-optic coupler and cross section view of sensor head

Figure 2는 두 개의 입력단과 두 개의 출력단을 가지는 광섬유형 결합기(주로 2×2 결합기로 부름)를 보여준다. 광 결합영역의 동작원리는 Figure 1과 같다. 입사광은 광 결합영역에서 결합비에 의해 m:n으로 나뉘어져 두 개의 광섬유 끝단인 S_1과 S_2로 진행한다.

센서헤드의 끝단 면은 광섬유 코어(n_1)와 n_2 굴절률을 가지는 외부 물질의 경계면이 된다. 굴절률이 다른 두 매질의 경계면에서는 스넬의 법칙에 따른 입사파, 반사파, 투과파가 생긴다. 경계면에서의 반사도는 입사각 Θ_i와 굴절률 n_2의 함수로 표현되며, 입사각이 일정할 경우 외부물질의 굴절률에 전적으로 의존한다. 공기에 비하여 액체의 굴절률이 상대적으로 크므로 제안된 센서는 수위를 측정하는 소자로 충분히 활용할 수 있음을 알 수 있다. 반사파의 광 전력(P_r)은 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$P_r = 10\ \log R\ [dB] \tag{1}$$

여기서 R은 경계면에서의 반사도를 의미한다. 센서헤드의 끝단이 굴절률이 다른 물질에 접촉된다면 반사광전력의 변화가 생기며 이를 식 (2)의 소멸비(E_r)로 나타내어 센서의 민감도를 비교할 수 있다.

$$E_r = -10\ \log\left(\frac{P_{r1}}{P_{r2}}\right) \tag{2}$$

여기서 P_{r1}과 P_{r2}는 각각 서로 다른 굴절률을 가진 n_2에 광섬유 센서 헤드가 접촉되었을 때의 반사광전력을 나타낸다. 광 결합기의 광 분배비가 달라지면 각각의 센서헤드가 가지는 광 전력이 달라지므로 센서의 민감도를 조절하는 파라미터로 활용할 수 있다.

3. 실험결과 및 분석

Figure 3은 광 결합기의 광 분배비에 따른 삽입손실을 측정한 결과를 보여준다. 결합비가 각각 다른 5개의 광섬유형 결합기를 사용하여 출력광의 크기를 비교하였다. 여기서 S_1은 90 %에서 50 %로 광분배비가 10 %씩 줄어드는 경우이며, S_2는 10 %에서 50 %로 광분배비가10%씩 늘어나는 경우이다. 광대역 광원을 입사광으로 사용하였으며 결합비에 따른 광 손실은 S_1과 S_2 끝단에 광 파워미터를 부착하여 측정하였다. S_1의 경우 분배비가 줄어들수록 선형적인 광 손실을 보이며 3 dB 정도의 변동 폭을 보이고 있으나, S_2의 경우 동일 분배비 영역에서 7dB 이상의 변화폭을 보이고 있다. 두 단자의 상대적인 손실비(S_1-S_2)는 50:50 결합비에서는 거의 차이가 없지만 90:10 결합비에서는 10dB 정도의 큰 차이를 보인다. 이 결과를 통하여 광 분배비 조절에 따른 센서의 민감도 제어가 가능함을 알 수 있다.

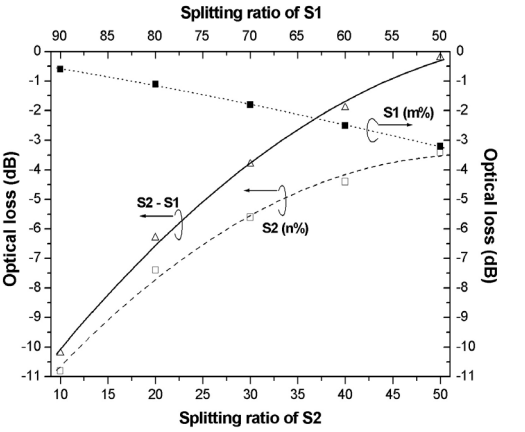

Figure 3: Optical loss vs. splitting ratio of coupler

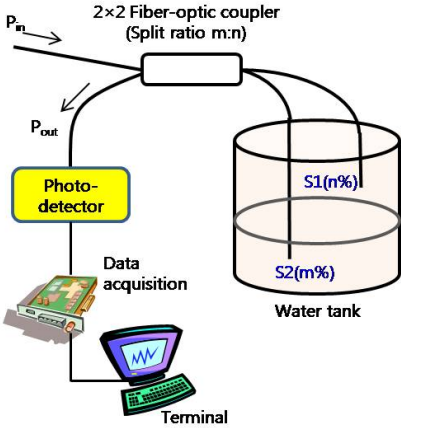

Figure 4: Experimental setup for investigating the sensing responses

Figure 4는 두 개의 센서헤드를 가지는 다중점 수위 센서의 실험도이다. 원형의 물탱크에 S_1을 바

닥 쪽에 설치하였고 S_2는 S_1보다 위쪽에 설치하였다. 수위가 상승할 경우 S_1이 먼저 침수되도록 하기 위한 센서배열이다. 센서의 침수 유무 상태에 따른 광 손실을 측정하기 위하여 출력단에 광 파워미터를 사용하였으며, 전기적인 신호처리를 위하여 광전변환소자와 신호인식보드, 신호처리 단말기를 구성하였다.

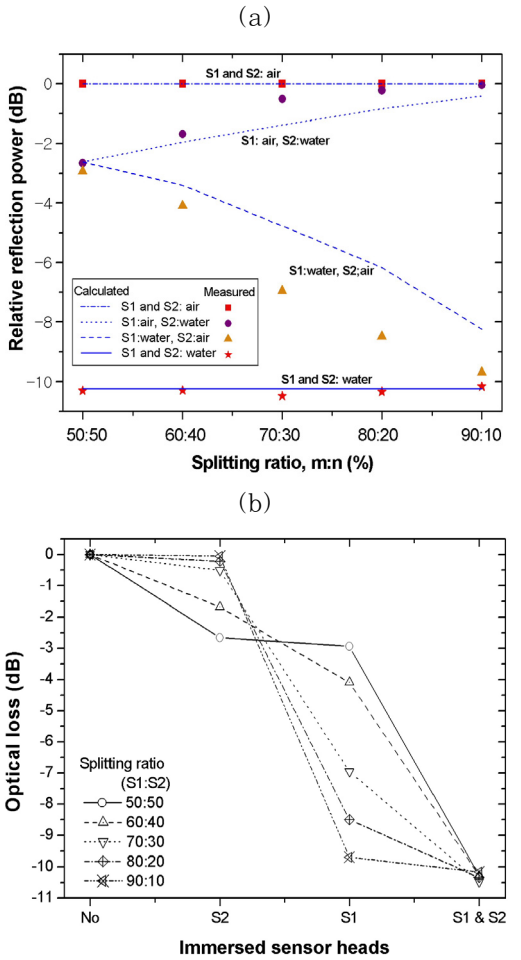

Figure 5: Optical responses corresponding to immersion situation of S1 and S2. (a) reflection power vs. splitting ratio and (b) optical loss vs. immersion situation

광 결합비가 서로 다른 다섯 가지 광섬유형 결합기에 대한 센서의 침수 응답 특성을 측정한 결과는 Figure 5와 같다. Figure 5(a)는 광전력 분배비에 대한 반사광 전력의 변화를 센서헤드의 침수 유무에 대한 파라미터로 측정한 결과이다. 모든 경우에 대하여 기준 반사광 전력은 두 센서가 공기 중에 노출되었을 때 측정한 것이며 0 dB로 정규화하였다. 먼저 50:50 광 결합기에 대하여 S_1이 침수되고 S_2가 공기 중에 있다면 3 dB 정도의 광 손실이 발생한다. 반대의 경우에도 거의 동일한 광 손실을 보인다. 이것은 두 센서헤드가 절반씩 분배된 광 전력을 가지므로 동일한 침수 응답특성을 보인 것이다. 광 분배비의 차가 커질수록 S_1의 광 손실은 급격하게 증가하고 S_2의 광 손실은 감소함을 알 수 있다. 광 분배가 상대적으로 많은 센서헤드는 외부굴절률 n_2의 변화에 훨씬 민감하게 반응함을 보이는 것으로, 물에 침수되었을 경우 입사광의 상당 부분이 물속으로 투과되어 빠져나감을 의미한다. S_2의 경우 S_1보다 상대적으로 적은 광 전력을 가짐으로 반사광 전력의 변화에 기여하는 정도가 S_1보다 작다. 점선은 각각의 경우에 대한 반사도를 이용하여 식 (2)로부터 계산한 반사광 전력이며, 점으로 나타낸 실험결과와 유사한 경향을 보이고 있다. 두 센서가 동시에 침수된 경우에는 결합비에 관계없이 10 dB이하의 소멸비를 보인다. 입사광 전력(p_{in})은 두 센서로 분리된 광 전력의 합과 동일하므로 동시침수에 대한 응답특성은 결합비와 관계없음에 기인한다. Figure 5(b)는 침수된 센서헤드에 따른 광 손실을 5가지 결합기로 구분하여 보여준다. S_1과 S_2에 대한 응답 특성을 구별하기위해서는 주어진 다이나믹 영역에서 신호차가 크게 나야한다. 가장 이상적인 경우는 S_1의 침수에 대하여 다이나믹 영역의 50 % 신호 감쇠가 발생하는 것이다. 70:30 결합기의 경우 S_1과 S_2의 개별적인 침수에 대하여 상당한 신호감쇠 차이가 있음을 보인다.

Figure 6은 광전변환 모듈과 신호처리기를 통해 획득한 전기적인 신호 응답 특성이다. Figure 6(a)는 50:50 결합기를 이용한 실험결과이다. S_1 센서의 침수에 대하여 0.1V 이하의 신호변화를 보인 반면 S_1과 S_2의 동시 침수에 대해서는 2.3V 정도의 신호 감쇠를 보인다. 다중 위치에 대한 센서 응용을 위해서는 S_1의 민감도를 향상시켜야 할 필

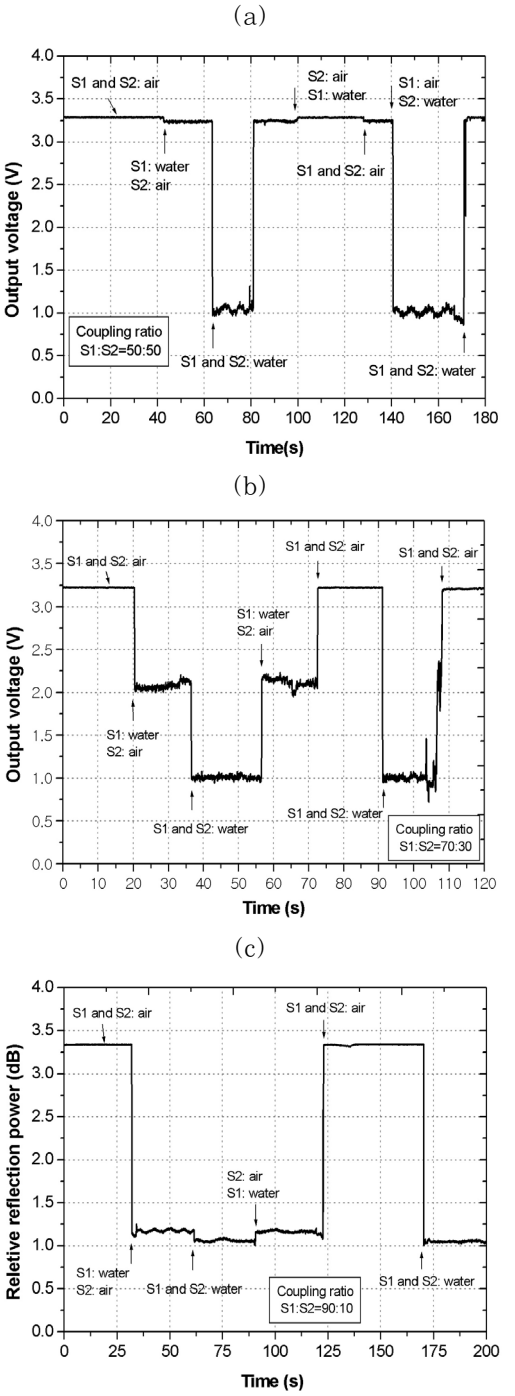

Figure 6: Temporal responses for showing electrical signal variation corresponding to immersion situation of S1 and S2. (a) 50:50 coupler, (b) 70:30 coupler and (c) 90:10 coupler

요가 있다. Figure 6(b)는 S_1의 광 분배비가 70%인 경우이다. S_1의 침수에 대하여 1.25 V 정도의 신호 변동이 발생하며 S_1과 S_2의 동시 침수에 대해서는 1 V까지 신호가 떨어진다. 2.3 V 정도의 동적 응답 범위에서 S_1은 절반정도의 신호 감쇠를 보임으로서 매우 안정적으로 동작하는 이중 센서헤드 시스템을 구현할 수 있다. 만약 S_1의 광 분배비가 90 %까지 올라가면 Figure 6(c)와 같이 S_1의 침수에 대한 신호감쇠가 동적 응답범위에 육박하는 신호 감쇠를 보이며 S_1과 S_2 동시침수와 구별하기 힘든 경우가 발생할 수 있다. 본 실험결과로부터 확인할 수 있는 광 전력변화 기반 광섬유형 센서 시스템 설계 규칙은 최하위에 설치되는 광섬유 센서의 광 분배비가 전체 전력의 절반 이상 되어야 한다는 것이다. 센서 헤드가 2개 이상으로 증가할 경우 목적에 적합한 광 분배비를 산출하기 위한 과정이 필요하다.

4. 결 론

액화 수소 및 산소 등과 같은 물질이 수송시스템의 연료로 사용됨으로서 액체의 유무를 실시간으로 확인할 수 있는 센서 시스템이 요구되고 있으며, 안전을 위해 비 전기적으로 동작하는 센서에 대한 관심이 고조되고 있다. 본 연구에서는 광섬유와 광결합기를 이용하여 수위를 모니터링 할 수 있는 센서 구조를 제안하였으며 다중센서헤드를 위한 결합기의 적절한 광 분배비에 대한 실험결과를 제시하였다. 또한 광 결합기를 이용하여 반사광 전력의 감쇠 정도를 관측함으로서 두 개의 센서를 활용한 동시 침수 상태를 감시할 수 있음을 보였다. 이는 센서의 다중화를 위한 추가적인 공정이나 복잡한 신호분석 과정이 필요하지 않음을 의미한다. 다중 센서 시스템을 설계할 경우 제안된 센서 구조와 실험결과가 결합기 배열과 광 분배비 선택에 활용될 수 있기를 기대한다. 본 연구의 결과는 다중 지역에서 동시에 발생하는 홍수나 범람을 감시하는 모니터링 시스템에 응용될 수 있다.

참고문헌

[1] 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.

[2] 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.

[3] F. J. Arrequi, I. R. Matias, K. L. Cooper, and R. O. Clause, "Simultaneous measurement of humidity and temperature by combining a reflective intensity-based optical fiber sensor and a fiber Bragg grating," IEEE Sensors J., vol. 2, no. 5, pp. 482-487, 2002.

[4] S. K. Khijwania, V. S. Tiwari, F-Y. Yueh, and J. P. Sigh, "A fiber optic Raman sensor for hydrocarbon detection," Sens. Actuators A, vol. 125, pp. 563-568, 2007.

[5] K. R. Sohn, "Liquid sensors using refractive intensity at the end-face of a glass fiber connected to fiber Bragg grating," Sens. Actuators A, vol. 158, pp. 193-197, 2010.

[6] C. Y, S. Chen, and G. Yang, "Fiber optical liquid level sensor under cryogenic environment," Sens. Actuators A, vol. 94, pp. 69-75, 2001.

[7] P. Nath, H. K. Singh, P. Datta, and K. C. Sarma, "All-fiber optic sensor for measurement of liquid refractive index," Sens. Actuators A, 148, pp. 16-18, 2008.

[8] M. Lomer, J. Arrue, P. Aiestaran, and J. M. López-Higuera, "Lateral polishing of bends in plastic optical fibers applied to a multipoint liquid-level measurement sensor," Sens. Actuators A, 137, pp. 68-73, 2007.

저 자 소 개

손경락(孫慶洛)

1992년 경북대학교 전자공학과 (공학사), 1995년 경북대학교 전자공학과(공학석사), 2002년 경북대학교 전자공학과(공학박사), 1995년 - 1999년 현대자동차(연구원), 2006년 - 2007년 UNSW 방문교수 2003년 -현재 한국해양대학교 전자통신공학과(교수). 관심분야: 광센서, Optical wireless communications, 가시광 LED 통신, CAN 통신

계광현(桂光賢)

2009년 한국해양대학교 전자통신공학과 (공학사), 2009년 -현재 한국해양대학교 전자통신공학과(석사과정). 관심분야: 임베디드프로그래밍, 가시광 LED 통신, CAN 통신