

전력상실시 광분배기 기반의 반사광 측정을 통한 사용후핵연료 저장조의 원격 수위 감시방법

김성만* · 이훈근**

Remote Water Level Monitoring System Based on Reflected Optical Power Detection with an Optical Coupler for Spent Fuel Pool at Nuclear Power Plant

Sung-Man Kim* · Hoon-Keun Lee**

요약

본 논문에서는 원자력발전소의 전력이 상실되는 사고가 발생하더라도 사용후핵연료 저장조의 수위를 감시할 수 있는 방법을 제시하고, 이의 성능 및 한계점을 분석하였다. 제안한 방식은 광분배기를 통과한 광신호가 저장조의 냉각수 및 공기에서 반사되는 반사광의 세기를 측정하는 방식이다. 1x8 광분배기를 사용하는 경우에는 저장조의 수위를 측정하는데 문제가 없을 것으로 분석되나, 1x16 광분배기를 사용하는 경우에는 Rayleigh 역산란으로 인해 16개의 출력포트 중 15개만이 수위측정 용도로 사용이 가능하고, 1x32 광분배기를 사용하는 경우에는 32개의 출력포트 중 25개만이 수위측정 용도로 사용이 가능한 것으로 분석되었다.

ABSTRACT

We propose a new method to monitor the water level of spent fuel pool in a nuclear power plant without electric power. We also analyze the performance and limitation of the proposed method. Our method is based on the reflected optical power at the end of optical fiber through a 1xN optical coupler. We reveal that there is no problem to monitor the water level when using a 1x8 optical coupler. However, when a 1x16 optical coupler is used, only 15 out of 16 output ports can be used due to Rayleigh back-scattering. When a 1x32 optical coupler is used, only 25 out of 32 output ports can be used to monitor the water level.

키워드

Optical Fiber Sensor, Nuclear Power Plant, Spent Fuel Pool, Water Level Monitoring
광섬유 센서, 원자력 발전소, 사용후 핵 연료 저장조, 수위 감시

1. 서론

일본 후쿠시마의 원자력발전소 사고 이후, 세계의 여러 나라들은 사고대처설비의 설치를 포함하여 발전소

의 안전성평가 및 규제강화 등 원자력에 대한 안전성을 향상시키기 위해 많은 노력을 기울여 오고 있다[1]. 또한, 발전소에 대한 안전성 강화를 위해 계측제어를 포함한 전 분야에서 다양한 연구들이 진행되고 있다.

* 교신저자: 경성대학교 전자공학과

** 한국원자력안전기술원 원자력안전연구실(nklee@kns.re.kr)

• 접수일 : 2019. 03. 27

• 수정완료일 : 2019. 05. 06

• 게재확정일 : 2019. 06. 15

• Received : Mar. 27, 2019, Revised : May. 06, 2019, Accepted : Jun. 15, 2019

• Corresponding Author: Sung-Man Kim

Dept. of Electronic Engineering, Kyung Sung University

Email : sungman@ks.ac.kr

원자력발전소는 예상운전과도(Anticipated Operational Occurrence)나 설계기준사고(Design Basis Accident) 등의 사건이 발생하면, 제어봉 낙하를 통한 원자로정지 및 공학적 안전설비를 작동시켜 발전소를 안전하게 유지하도록 설계되어 있다. 하지만, 후쿠시마의 경우와 같이 쓰나미와 같은 재해로 인해 발전소의 소내·외 전원이 완전 상실되면, 발전소에 대한 실시간 감시 및 제어가 되지 않아 발전소를 안전하게 유지할 수 없게 된다[2]. 그 결과, 사고대처를 위한 최적의 우선순위 선정이 어려워지며, 사고로 인한 피해가 더욱 커지게 될 가능성이 높다. 이러한 상황을 막기 위해서는 무엇보다 전원이 상실되더라도 발전소 내부의 정보를 외부에서 실시간 감시할 수 있는 원격 측정 시스템의 개발이 필요하다.

이를 위해 프랑스를 비롯한 여러 나라에서는 사고 시에도 전원의 공급없이 현장 상태를 감시할 수 있는 광섬유센서에 대한 연구를 활발히 진행해 왔다[3-6]. 광섬유센서는 광섬유가 가지는 특성으로 인해 현장에서 전원을 필요하지 않는 수동적인 특성을 가지고 있으며[7], 신호의 손실이 적기 때문에 먼 거리에서도 원하는 위치의 물리량 측정이 가능한 장점을 가진다. 또한, 전자기파 및 방사선 환경에서도 강한 내성을 가지고 있으며[3, 8], 기존의 기술과 비교할 경우 다양성의 측면에서도 유리한 장점을 가진다. 국내에서도 발전소에 위치한 사용후핵연료 저장조의 정보를 외부에서 실시간으로 감시할 수 있는 원격 측정 시스템에 대한 연구를 수행한 바 있다[9]. 기존의 방법은 OTDR(Optical Time Domain Reflectometer) 및 1x4 광분배기를 이용하여 4개 포트에 대해 수위측정의 가능성만을 시연하였다.

본 논문에서는 더 정밀한 수위측정을 위해 여러 종류의 광분배기를 사용하여 광섬유 종단에서 반사되는 광전력 측정을 통한 수위측정 방법을 제안하였다. 또한 제안된 방법의 성능 및 한계점에 대해 분석하였다.

II. 전체 시스템의 구성

사용후핵연료 저장조는 방사능의 누출을 막기 위해 콘크리트 벽으로 차단되어 있으며, 내부에는 사용후핵연료의 냉각을 위한 냉각수가 채워져 있다. 이 냉각수

는 제한된 온도범위를 유지하기 위해 순환장치에 의해 순환이 되며, 항상 일정한 수위를 유지하도록 감시되고 있다. 그림 1은 본 논문에서 제시하는 사용후핵연료 저장조의 원격 수위측정방법의 전체 구성도이다.

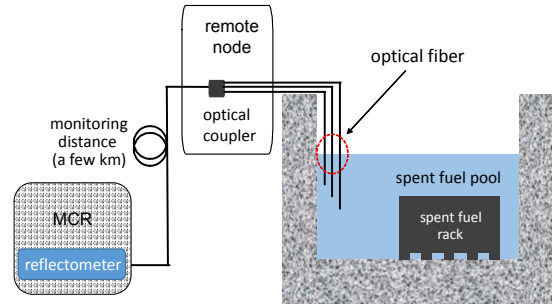


그림 1. 사용후핵연료 저장조의 원격 수위감시법 전체구성도

Fig. 1 Structure of the proposed remote water level monitoring system

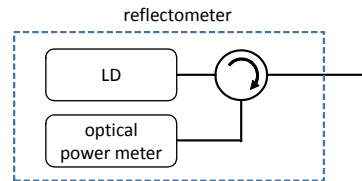


그림 2. 반사광측정기의 상세구성도
Fig. 2 Structure of the reflectometer

본 논문에서 제안하는 방식은 주제어실(MCR)과 같이 멀리 떨어진 장소에 반사광측정기(Reflectometer)가 설치되며, 사용후핵연료 저장조까지는 모두 광섬유로 연결된다. 그리고 이 광섬유는 저장조 근처의 원격노드에 설치된 광분배기(Optical Coupler)를 통해 동일한 광전력을 가지는 여러 포트의 광섬유로 나뉘어진다. 여러 개의 포트에 나뉜 광섬유는 사전에 설계된 위치에 따라 설치되며, 수위에 따라 해당 광포트의 종단이 냉각수에 침수되거나 또는 공기 중에 노출된다. 이 광섬유의 종단에서 냉각수의 유무에 따라 광의 반사율이 변하게 되며, 이러한 특성을 이용하여 사용후핵연료 저장조의 수위를 측정하게 된다. 상세한 설명을 위해 주제어실과 같이 원격지점에서 사용할 반사광측정기의 상세구성도를 그림 2에 나타내었고, 사용후핵연료 저장조에서 광분배기 및 광섬유의 상세구성도를 그림 3에 나타내었다.

참고로 광분배기나 광섬유 등은 모두 전력을 필요하지 않는 수동소자이므로, 전력 상실시에도 아무런 문제없이 동작할 수 있다.

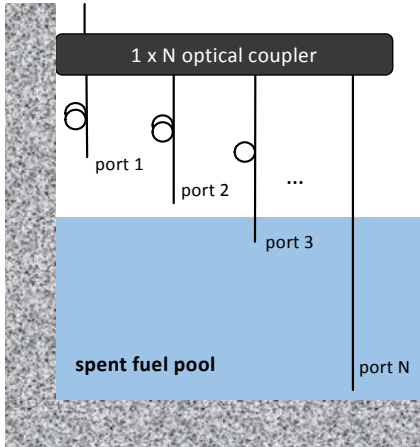


그림 3. 사용후핵연료 저장조에서 광분배기와 광섬유 간 상세구성도

Fig. 3 Structure of the optical coupler and optical fiber in the spent fuel pool

그림 2의 반사광측정기는 광원, 광회전기, 광전력 측정기로 구성되어 있다. 이 반사광측정기는 모듈화를 통해 소형화시킬 수 있으며, 광원으로는 DFB-LD:(Distributed Feedback Laser Diode) 또는 VCSEL:(Vertical Cavity Surface Emitting Laser)과 같은 LD:(Laser Diode)가 사용될 수 있다. 또한, 배터리 등을 장착하여 비상시에도 외부 전원의 도움이 없이 구동할 수 있도록 구현이 가능하다. LD의 광신호는 광회전기를 거쳐 사용후핵연료 저장조 방향으로 송신되며, 사용후핵연료 저장조에서 반사된 반사광은 광회전기를 통해 광전력 측정기로 다시 전달된다.

그림 3에서 제시한 사용후핵연료 저장조에서 광분배기와 광섬유 간 상세구성도를 살펴보면, 광섬유는 1xN 광분배를 통해 N개의 광섬유로 동일한 광신호의 출력이 분배된다. 이 분배된 광신호는 각각의 포트에 해당하는 광섬유를 통과하며, 각 포트의 종단면에서 냉각수의 유무에 따라 광신호가 반사되는 반사량이 변하게 된다. 이 반사광은 다시 광전력 측정기로 전송이 되며, 수신되는 전력값을 측정하여 저장조의 수위를 감시할 수 있다.

III. 감시시스템의 성능 유도

수식(1)은 빛이 굴절률이 다른 매질을 만났을 때에 입사파 전력에 대한 반사파의 전력비인 반사율(Reflectivity)을 나타낸다. 단, 이 수식은 입사광이 매질의 경계면에 수직에 가깝게 입사할 때에 성립하는 수식이다[10].

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (1)$$

여기에서 R은 반사율, n_1 은 진행하는 매질의 굴절률, n_2 는 경계면에서 만나게 된 매질의 굴절률을 나타낸다. 이 수식을 이용하면 광섬유의 종단이 공기에 노출되거나 또는 냉각수에 노출될 때의 반사율을 구할 수 있으며, 이를 표 1에 정리하였다. 여기에서 광섬유 코어(Core)의 굴절률은 1.45, 냉각수의 굴절률은 1.33, 공기의 굴절률은 1로 가정하였다.

또한, 본 논문에서는 원격에서 측정할 수 있는 반사광의 세기를 분석하기 위하여 1xN 광분배기의 손실을 고려하였으며, 이를 표 2에 정리하였다. LD의 광신호는 사용후핵연료 저장조로 입사될 때와 광섬유의 종단에서 반사된 이후 다시 원격지로 돌아갈 때를 포함하여 총 2번의 광분배기 손실을 겪게 된다. 표 2에서 1xN 광분배기의 이론값(Ideal Value)은 광분배기가 이상적으로 동작하여 출력이 N개로 나뉘어질 때에 발생하는 손실을 나타내며, 표 2의 실제값(Real Product)은 실제 제품인 Multilink사의 광분배기 손실값을 나타낸 것이다. 본 논문에서는 실제 손실값을 기반으로 한 1x8, 1x16, 1x32 광분배기를 고려하였다. 1x64 광분배기는 상용제품이 거의 없기 때문에 고려하지 않았으며, 광분배기 출력포트 수(N)가 많을수록 공간 분해능(Spatial Resolution)이 증가하여 사용후핵연료 저장조의 수위를 좀 더 정밀하게 측정할 수 있게 된다.

표 1. 광섬유 종단에서의 반사율
Table 1. Reflectivity at the end of optical fiber

Reflection case	Reflectivity	
	in ratio	in dB
optical fiber & water	0.186 %	-27.30 dB ($R_{w(dB)}$)
optical fiber & air	3.37 %	-14.72 dB ($R_{a(dB)}$)

표 2. 1xN 광분배기의 손실
Table 2. Insertion loss of 1xN optical fiber

Type of optical coupler	ideal value	real product ($L_{N(dB)}$)
1x8	-9.03 dB	-10.5 dB
1x16	-12.04 dB	-13.5 dB
1x32	-15.05 dB	-16.9 dB

표 1에서는 광섬유가 물에 노출되었을 때 광섬유 종단에서의 반사율을 $R_{w(dB)}$ (dB 단위로 표시된 값), 공기에 노출되었을 때 광섬유 종단에서 반사율을 $R_{a(dB)}$ (dB 단위로 표시된 값)로 정의하였고, 표 2에서 나타난 바와 같이 1xN 광분배기의 손실을 $L_{N(dB)}$ (dB 단위로 표시된 값)로 정의하였다. 이때, 광분배기를 통과한 N개의 광섬유 출력포트 중에서 하나의 광섬유 포트가 물에 노출되었을 때 원격지에서 측정되는 반사광의 세기 P_w 는 식(2)와 같이 표현될 수 있다.

$$P_w = P_i + 2L_{N(dB)} + R_{w(dB)} + 2(\alpha_{dB}D + L_c) \quad (2)$$

여기서 P_i 는 반사광측정기 내부에 있는 LD의 광출력이며, P_i 와 P_w 모두 dBm 단위로 표현된 수식이다. α_{dB} 는 dB로 표현된 광섬유의 km당 손실값이며, D는 원격 측정지까지의 거리, L_c 는 광회전기의 손실값이다. 표 3은 본 논문에서 사용한 광섬유 및 광회전기의 손실값, 감시거리를 나타내었다. 광섬유 및 광회전기의 손실값들은 Thorlabs사 제품들의 값을 참고하였으며¹⁾, 감시거리는 주제어실에서 사용후핵연료 저장조까지의 거리로서, D=2 km로 가정하였다.

1) www.thorlabs.com

표 3. 본 논문에서 사용한 시스템 파라미터 값
Table 3. System parameters used in this paper

System parameters	Value
fiber loss (α_{dB})	-0.2 dB/km
loss of circulator (L_c)	-1 dB
monitoring distance (D)	2 km

식(2)와 동일한 방법을 이용하면, 광분배기를 통과한 N개의 광섬유 출력포트 중에서 하나의 광섬유 포트가 공기에 노출되었을 때 원격지에서 측정되는 반사광의 세기 P_a 는 식(3)과 같이 표현될 수 있다.

$$P_a = P_i + 2L_{N(dB)} + R_{a(dB)} + 2(\alpha_{dB}D + L_c) \quad (3)$$

마찬가지로, 여기에서도 P_i 와 P_a 모두 dBm단위로 표현된 수식이다.

식(2)와 식(3)을 이용하면 1xN 광분배기와 연결된 N개의 광섬유 포트 중에서 냉각수에 잠겨있는 광섬유의 개수에 따른 반사광의 세기를 구할 수 있다. 여기서 냉각수에 잠겨있는 광섬유의 개수가 곧 저장조의 수위가 되며, 이를 n이라 하면, 반사광측정기에서 측정되는 반사광의 세기 P_t 는 식(4)를 통해 구할 수 있다.

$$P_t = 10 \cdot \log_{10}(n \cdot P_{w(lin)} + (N - n) \cdot P_{a(lin)}) \quad (4)$$

여기에서 $P_{w(lin)}$ 및 $P_{a(lin)}$ 은 P_w 및 P_a 를 와트(W)단위로 표현한 값이다. 식(4)를 이용하면 1x8, 1x16, 1x32 광분배기를 사용하였을 때에 저장조의 수위에 따라 측정되는 반사광의 세기를 구할 수 있으며, 이를 그림 4, 그림 5, 그림 6에 각각 나타내었다.

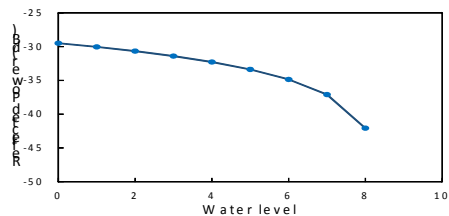


그림 4. 1x8 광분배기를 사용한 경우에 저장조 수위에 따른 반사광의 크기

Fig. 4 Reflected power as a function of water level with a 1x8 optical coupler

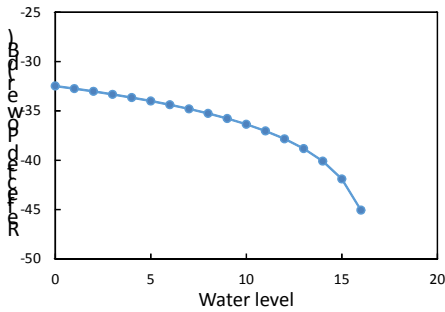


그림 5. 1x16 광분배기를 사용한 경우에 저장조 수위에 따른 반사광의 크기

Fig. 5 Reflected power as a function of water level with a 1x16 optical coupler

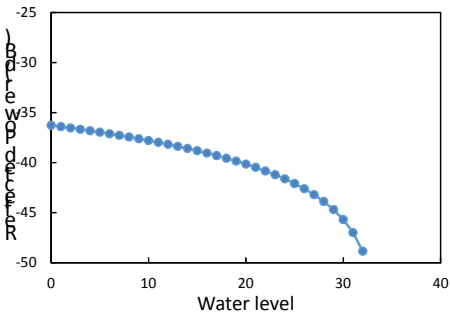


그림 6. 1x32 광분배기를 사용한 경우에 저장조 수위에 따른 반사광의 크기

Fig. 6 Reflected power as a function of water level with a 1x32 optical coupler

IV. 감시시스템의 성능 및 한계요인 분석

본 논문에서 제안한 방법을 사용하면, 1xN 광분배기를 사용한 경우에 수위는 0부터 N까지 (N+1)개의 수위상태를 측정할 수 있다. 따라서, 저장조의 깊이를 H라고 하면, 본 방식으로 측정 가능한 수위의 정확도 Q는 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$Q = H / (N + 1) \tag{5}$$

예를 들어, 저장조의 수위가 10 m이고, 1x32 광분배기를 사용했다면, 측정 가능한 수위의 정확도는 10/33 m인 0.303 m가 될 것이다.

다음으로, 1x8, 1x16, 1x32 광분배기를 사용하였을 때, 광전력 측정기의 측면에서 살펴보자. 계산을 통한

수위 변화에 따른 한 포트에 대한 반사광의 최소 변화량은 각각 0.55 dB, 0.26 dB, 0.13 dB 로 나타났다. 그리고, 반사광의 절대값 측면에서 살펴보면, LD의 출력을 0 dBm으로 가정하고, 1x8, 1x16, 1x32 광분배기를 사용하였을 때에 반사광의 최저값은 각각 -42.1 dBm, -45.1 dBm, -48.8 dBm으로 나타났다. 이들 값들은 현존하는 광학장비로 충분히 측정할 수 있는 광전력이다.

감시시스템의 성능에 영향을 줄 수 있는 또 다른 요인으로는 광섬유에서 발생하는 Rayleigh 역산란(Backscattering)과 광회전기를 사용함으로써 광원으로 인해 발생하는 누화(Crosstalk)가 있다.

LD의 광출력 중 Rayleigh 역산란으로 인해 광전력 측정기로 들어올 수 있는 광신호의 크기 R_R 은 식(6)으로 근사화 될 수 있다[11]. 여기에서 D는 km로 표현된 광섬유의 거리이다.

$$R_R = \begin{cases} -32 - 10 \times \log_{10} \left(\frac{20}{D} \right) (dB), & D < 20 km \\ -32 (dB), & D \geq 20 km \end{cases} \tag{6}$$

따라서, D=2 km의 광섬유의 거리에서는 Rayleigh 역산란으로 인해 약 -42 dB의 반사광이 들어올 수 있다. 여기에 광회전기의 손실을 고려하면 최대 약 -44 dB의 반사광이 잡음으로서 반사광 측정기에 들어올 수 있다.

1x8 광분배기를 사용했을 경우에 반사광의 최저값은 -42.1 dB 이므로 Rayleigh 역산란으로 인한 반사광보다 높아 큰 문제가 되지 않지만, 1x16 광분배기를 사용하였을 경우에는 반사광의 최저값이 최고 수위(레벨 16)일 때인 -45.1 dB이므로 문제가 발생한다. 하지만, 레벨 15인 수위에서는 반사광의 크기가 -41.9 dB이므로 문제가 발생하지 않는다. 따라서, 1x16 광분배기를 사용하였을 경우에는 16개의 출력포트 중에서 1 개는 공기 중에 중단시키고, 나머지 15개의 출력포트만을 사용하여 수위측정 용도로 사용하여야 할 것이다.

1x32 광분배기를 사용하였을 경우에는 0~32 레벨 중에서 29 레벨부터 -44 dB 이하의 반사광이 측정되므로 문제가 발생할 수 있다. 측정오차 등을 감안하

면 1x32 광분배기를 사용하는 경우에는 레벨 25 정도까지만 사용이 가능할 것으로 판단된다. 참고로 레벨 25의 반사광의 값은 -42.1 dB이다. 따라서, 1x32 광분배기를 사용하는 경우에는 32개의 출력포트 중 7개는 공기 중에 중단시키고, 나머지 25개의 출력포트만을 사용하여 수위측정 용도로 사용하여야 할 것이다.

광회전기의 누화로 인한 영향을 살펴보면, 광 회전기의 누화로 인해 LD의 광출력이 그대로 광전력 측정기로 들어올 수 있다. 이 누화값은 Thorlabs사의 실제 제품의 경우에 -50 dB 이하의 값으로 나타난다. 하지만, 모든 경우를 통틀어서 반사광의 최저값은 1x32 광분배기를 사용했을 경우에 -48.8 dB 이므로 광회전기의 누화로 인한 영향은 본 수위측정에 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

V. 결론

본 논문에서는 1x8, 1x16, 1x32 광분배기 기반의 반사광을 이용하여 사용후핵연료 저장조의 수위를 원격에서 감시하는 방법을 제시하고, 이론적인 분석을 통해 이의 성능 및 한계점을 분석하였다. 광분배기의 분기수가 많을수록 공간분해능의 증가로 저장조의 수위를 더 세밀하게 감시할 수 있지만, Rayleigh 역산란으로 인해 1x16 광분배기를 사용하는 경우에는 16개의 광섬유 출력포트 중 15개만 수위측정을 위한 용도로 사용해야 할 것으로 분석되고, 1x32 광분배기를 사용하는 경우에는 32개의 광섬유 출력포트 중에서 25개만 수위측정을 위한 용도로 사용해야 할 것으로 분석되었다. 1x8 광분배기를 사용하는 경우에는 8개의 출력포트를 모두 사용가능하다.

본 논문에서 제안한 방식을 사용하면 원자력발전소에 전원상실사고가 발생하더라도 추가적인 외부전원의 도움이 없이 주체어실과 같은 원격지에서 사용후핵연료 저장조의 수위를 쉽게 감시할 수 있을 것이다.

References

- [1] A. Lee, C. Goo, H. Park, and I. Kim, "An analysis of the current status of nuclear advanced countries' countermeasure against the loss of electrical power after Fukushima accident," In *Proc. Annual Summer Conf. Korean Inst. Elec. Eng.*, Jeongsun, Korea, July 2012, pp. 1607-1608.
- [2] Korean Nuclear Society, "Analysis of the reason of Fukushima nuclear accident," *Technical report*, Mar. 2013.
- [3] A. Stanciu and M. Stanciu, "Optical fiber sensors in nuclear plants," *EEA (Electrotehnica, Electronica, Automatica)*, vol. 53, 2005, pp. 15-20.
- [4] H. M. Hashemian and W. C. Bean, "Sensors for next-generation nuclear plants: fiber-optic and wireless," *Nuclear science and Engineering*, vol. 169, no. 3, 2011, pp. 262-278.
- [5] P. Ferdinand, S. Magne, and G. Laffont, "Optical fiber sensors to improve the safety of nuclear power plants," In *Proc. Asia Pacific Optical Sensors (APOS)*, Wuhan, China, Oct. 2013.
- [6] U. S. Dept. of Energy, "Technical readiness and gaps analysis of commercial optical materials and measurement systems for advanced small modular reactors," *Technical report*, Aug. 2013.
- [7] E. Kim, "Implementation of weight sensor with polarization maintaining photonic crystal fiber," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 10, no. 1, Jan. 2015, pp. 133-138.
- [8] P. Tsvetkov, *Nuclear Power - Control, Reliability and Human Factors*. London: Intech, Sept. 2011.
- [9] H. Sim, W. Yoo, S. Shin, J. Jang, J. Kim, K. Jang, S. Cho, J. Moon, and B. Lee, "Real-time measurements of water level and temperature using fiber-optic sensors based on an OTDR," *Trans. Korean Inst. Elec. Eng.*, vol. 63, no. 9, 2014, pp. 1239-1244.
- [10] J. Lee, *optical fiber communications*. Seoul: Hanbit Academy, 2015.
- [11] S. Moon, H. Lee, and C. Lee, "Automatic

wavelength allocation method using Rayleigh backscattering for a WDM-PON with tunable lasers," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 5, no. 3, Mar. 2013, pp. 190-197.

저자 소개



김성만(Sung-Man Kim)

1999년 KAIST 전기및전자공학과
공학사

2001년 KAIST 전기및전자공학과
공학석사

2006년 KAIST 전기및전자공학과
공학박사

2006년~2009년 삼성전자 정보통신총괄 책임연구원
2009년~현재 경성대학교 전자공학과 교수

※ 관심분야 : 광통신, 무선 광통신, 광전력 전송



이훈근(Hoon-Keun Lee)

2008년 KAIST 전기및전자공학과
공학석사

2014년 KAIST 전기및전자공학과
공학박사

2016년~현재 한국원자력안전기술원 선임연구원

※ 관심분야 : 디지털계측제어, 광섬유센서

