

## 고온 어닐링 조건에 따른 FBG 센서의 내방사선 특성

김종열\* · 이남호 · 정현규

### Radiation Hardness Characteristics of Fiber Bragg Gratings on the High Temperature Annealing Condition

Jong-Yeol Kim\* · Nam-Ho Lee · Hyun-Kyu Jung

Department of Nuclear Convergence Technology Development, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Daejeon, 34057, Korea

#### 요 약

본 논문에서는 KrF 레이저를 이용한 격자 공정 후 고온 어닐링 온도조건에 따른 감마방사선 영향을 분석하였다. 제작된 광섬유 브래그 격자는 게르마늄(Ge)이 첨가된 동일한 광섬유에 어닐링 온도를 달리하여 제작하였으며,  $Co^{60}$  감마선원을 이용하여 약 115 Gy/min의 선량률로 총선량 약 31 kGy 감마선을 조사하였다. 격자의 안정화를 위한 고온 어닐링 공정은 광섬유 브래그 격자의 방사선 민감도 변화에 영향을 주는 것으로 나타났다. 실험결과를 통하여, 각각 다른 온도(100, 150, 200 °C)로 안정화시킨 광섬유 브래그 격자들은 고온에 노출될수록 방사선 민감도가 증가했으며, 어닐링 온도조건에 따라서 방사선에 의한 브래그 파장 변화는 2배 이상의 차이를 보였다.

#### ABSTRACT

In this study, we studied the gamma-radiation effect of fiber Bragg gratings (FBGs) on the high temperature annealing condition after grating inscription using a KrF UV laser (248 nm). The FBGs were fabricated in a different annealing temperature using the same commercial Ge-doped silica core fiber (SMF-28e) and exposed to gamma-radiation up to a dose of 31 kGy at the dose rate of 115 Gy/min. The high temperature annealing procedure for grating stabilization was applied to change the radiation sensitivity of the FBGs. According to the experimental data and analysis results, the gratings that were stabilized at different temperatures at 100, 150 and 200 °C have clearly shown that exposure to higher temperatures increases their radiation sensitivity. The radiation-induced Bragg wavelength shift (BWS) was shown a difference of up to about a factor of two depending on the annealing temperature conditions of the gratings.

**키워드** : 감마선, 광섬유 브래그 격자 센서, 어닐링 조건, 방사선 영향

**Key word** : Gamma ray, Fiber Bragg grating, Annealing condition, radiation effect

Received 08 August 2016, Revised 18 August 2016, Accepted 29 August 2016

\* Corresponding Author Jong-Yeol Kim(E-mail:kimjr@kaeri.re.kr, Tel:+82-42-868-2734)

Department of Nuclear Convergence Technology Development, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 34057, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkice.2016.20.10.1980>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서 론

원전의 안전을 위협하는 다양한 요인 중에서 특히 원자로 발전 설비의 핵심인 원자로 내부나 원자력 압력용기, 냉각기 등의 원자력 설비의 온도상승 문제는 심각한 사고로 이어질 가능성이 있어 지속적인 모니터링이 필요하다. 현재 원전에 사용되는 온도센서는 포인트 방식으로 주로 열전대 온도센서인 Thermocouple 또는 Thermistors 등 방사(복사)형 온도센서가 주로 사용되고 있지만, 이들 센서는 전원상실 사고 발생의 경우 기능이 중단되는 문제점을 후쿠시마 원전의 사고에서 확인한 바 있다. 이러한 기존의 원전용 센서의 문제점 해결 방안으로 최근 광섬유를 이용한 센서 기술이 주목받고 있다.

광섬유 센서는 현재 설치된 원전 온도센서와 달리 원전 비상사고 시 전원 공급이 불가능한 상황에서도 외부로부터 내부 사고환경의 온도측정이 가능하고, 기존 센서가 갖는 장거리 전송과 원격 조정의 한계를 극복할 수 있는 센서로서 원전용 온도센서에 적합한 다양한 특성을 가진다.

광섬유 센서 중 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg grating, FBG)는 광섬유 코어 내에 격자를 새겨서 Bragg 조건에 따른 특정 파장이 반사되는 현상을 이용한 것이다. 주변의 환경변화에 따라 Bragg 조건이 바뀌어 FBG 반사 파장의 변화를 측정하는 광응용기술에 기반하며 가혹한 환경에서 소형, 높은 정확성, EMI 내성, 극한환경 내성, 온도와 스트레인과 같은 물리적 변수의 직접 측정 등의 다양한 장점을 가지고 있다.

하지만 일반적인 상용 FBG 센서의 경우, 수십 kGy 급 이상의 고준위 방사선에 노출될 경우 광섬유 전송손실, 브래그 파장( $\lambda_B$ )의 이동현상, 반사율 변화, 온도 감도 계수( $\alpha_0$ ) 변화 등의 문제로 인해 원전과 같은 극한 환경용 센서로 사용함에 있어 센서측정의 신뢰성이 떨어지는 치명적 한계를 지닌다. 따라서 고방사선 환경 내에서도 광 손실 및 광 특성 변화가 없는 내방사선 특성을 갖는 특수 광섬유의 제조와 이를 기반으로 하는 원전 극한 환경용 센서 개발이 요구되고 있다[1-3].

고방사선 환경에서의 FBG 센서 연구는 국내에서 수행된 사례가 거의 없으며, 대부분 국외에서 많은 연구가 수행되었다. 극한 환경용 내방사선 광섬유 센서 연구는 벨기에 SCK·CEN과 독일의 Fraunhofer 연구소를

중심으로 광섬유 센서의 공정조건별 수소로딩, 펌프초 공정, 폴리이미드 특수 코팅 등을 이용한 내방사화 기법 연구가 진행되고 있으며, 수 MGy급 이상의 이온화 방사선 환경 및 500°C 이상의 극한 조건에서 적용가능성을 보여주었다[4-6].

본 논문에서는 내방사선 환경에서 견딜 수 있는 FBG 개발을 위해 격자 공정파라미터 중 어닐링 온도조건을 변경하여 FBG를 제작하였으며, 제작된 FBG를 고준위 감마선에 조사하여 FBG 센서의 내방사선 특성을 분석하였다.

## II. FBG 센서 공정조건 및 제작

### 2.1. FBG 특성 및 방사선 영향

FBG는 식 (1)의 브래그 조건을 만족하는 파장만을 반사하고, 그 외의 파장은 그대로 투과시키는 특성을 갖는다.

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

식 (1)에서의  $\lambda_B$ 는 Bragg 파장,  $n$ 은 유효 굴절률,  $\Lambda$ 은 격자 사이의 간격을 나타낸다. 식 (1)은 식 (2)와 같이 온도변화에 따른 Bragg 파장의 관계식으로 유도되며, 식 (2)의 첫 번째 항은 광 변형(strain)으로 유도되는 굴절률( $n$ ) 변화로 나타낼 수 있으며, 두 번째 항은 격자 주기( $\Lambda$ )의 변화에 대응한다.

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{d\lambda_B}{dT} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \quad (2)$$

식 (3)은 식(1)을 누적 방사선 선량( $D$ )에 의한 Bragg 파장 변화의 관계식으로 나타낸 것이다. 식 (3)의 첫 번째 항은 방사선에 의한 굴절률 변화( $\Delta n$ ), 두 번째 항은 방사선에 의한 격자 간격의 변화를 나타내며 광섬유의 선팽창 계수에 의존한다. 하지만 실리카( $\text{SiO}_2$ )의 방사선에 의한 선팽창 계수는 아주 작은 값으로 생략이 가능하다.

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{d\lambda_B}{dD} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial D} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial D} \quad (3)$$

따라서 식(3)은 식(4)와 같이 Bragg 파장과 굴절율의 관계식으로 표현이 가능하다. 즉, 방사선에 의한 Bragg 파장 변화( $\Delta\lambda_B$ )는 광섬유 내부의 굴절율 변화에 크게 영향을 받는다[7].

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta n}{n} \quad (4)$$

### 2.2. FBG 공정변수

FBG 센서 제작시 공정유형에 따라서도 센서의 특성이 달라지지만, 공정변수에 따라서도 큰 영향을 받는다. FBG 센서 제작 시 고려해야 될 공정변수는 아래와 같다.

- 게르마늄이 첨가된 광섬유의 광민감도는  $\text{GeO}_2$ 의 함량, 도펀트(B, N 등), 수소로딩 및 장력(strain) 등에 영향을 받는다.
- 수소로딩을 이용하여 격자 공정 시에는 필수적으로 어닐링(annealing) 공정을 수행하여 안정화 과정을 거쳐야 한다.
- 공정 시 사용되는 레이저의 종류에 따라서 영향을 받으며, 레이저 파장에 따라서 펄스형 excimer laser, CW-laser, femtosecond-laser 등을 이용한다.
- 게르마늄이 첨가되지 않은 광섬유의 격자공정은 일반적인 FBG 공정으로 제조할 수 없다.

위의 공정변수들은 극한환경(고방사선, 고온) 조건에서도 센서의 특성에 큰 영향을 미치는 요인이다.

### 2.3. 광섬유 선정

FBG 센서를 제작하기 위해서 일반 통신용 및 광섬유 센서제작에 많이 사용되는 게르마늄이 첨가된 광섬유(SMF-28e, Corning)를 선정하였으며, 주요 특성은 표 1과 같다.

선정된 광섬유의 코어와 클래딩의 주요 조성은 EPMA 장비를 이용한 정량 분석을 통하여 분석하였다[8]. 광섬유의 코어에 첨가된 도펀트로 게르마늄(Ge) 및 인(P)이 포함되어 있었으며, 광 손실 특성은 파장 1310 nm 기준 0.34 dB/km 정도로 우수한 특성을 보였다.

**Table. 1** The Specification of the optical fiber

Classification		Specification
Fiber type		SMF28-e (Corning)
Diameter [ $\mu\text{m}$ ]	Core	9.2 $\pm$ 0.4
	Cladding	125.0 $\pm$ 0.7
Dopants [wt %]	Core	$\text{GeO}_2(7.3)$ , $\text{P}_2\text{O}_5(0.2)$
	Cladding	-
Attenuation [dB/km]		$\leq 0.34$ @1310nm $\leq 0.20$ @1550nm

### 2.4. FBG 센서 공정조건 및 제작

본 연구에 사용된 FBG 센서 샘플은 KrF UV레이저를 이용하여 제작되었다. 어닐링 공정조건은 표 2와 같다. 어닐링 온도는 100, 150, 200°C로 구분하여 공정조건별로 각각 6개의 샘플을 제작하였으며, 나머지 공정조건은 동일한 조건으로 설정하였다.

**Table. 2** Process conditions of fiber Bragg gratings

FBG	$\text{H}_2$ loading [day]	Annealing condition	
		Time [hour]	Temperature [°C]
5-100-1	5	24	100
5-100-2	5	24	100
5-100-3	5	24	100
5-100-4	5	24	100
5-101-5	5	24	100
5-101-6	5	24	100
5-150-1	5	24	150
5-150-2	5	24	150
5-150-3	5	24	150
5-150-4	5	24	150
5-150-5	5	24	150
5-150-6	5	24	150
5-200-1	5	24	200
5-200-2	5	24	200
5-200-3	5	24	200
5-200-4	5	24	200
5-200-5	5	24	200
5-200-6	5	24	200

표 3은 제작된 광섬유 브래그 격자의 주요특성을 나타낸다. 제작된 FBG의 Bragg 파장( $\lambda_B$ )은 약 1526 ~

1534nm 범위 내에서 제작되었으며 평균 반사율은 약 53% 정도로 나타났다. 온도감도계수는 30°C에서 100°C 까지 온도를 10°C 씩 단계적으로 올려서 매 구간 측정하여 평균값으로 산출한 결과로 온도변화에 따른 평균 Bragg 파장 변화량을 나타낸다.

Table. 3 Properties of manufactured FBGs

FBG	$\lambda_B$ [nm]	Reflectivity [%]	Temperature sensitivity [pm/°C]
5-100-1	1526.77	44.0	10.3
5-100-2	1527.83	66.3	10.4
5-100-3	1529.00	60.3	10.4
5-100-4	1531.70	69.3	10.4
5-101-5	1532.78	63.0	10.4
5-101-6	1534.00	41.3	10.4
5-150-1	1526.80	55.3	10.3
5-150-2	1527.85	63.0	10.3
5-150-3	1529.02	63.7	10.4
5-150-4	1531.71	29.3	10.4
5-150-5	1532.87	60.3	10.4
5-150-6	1533.95	47.5	10.4
5-200-1	1526.71	63.0	10.4
5-200-2	1527.79	60.3	10.4
5-200-3	1528.94	58.3	10.4
5-200-4	1531.69	39.3	10.5
5-200-5	1532.79	55.3	10.5
5-200-6	1533.95	20.7	10.5

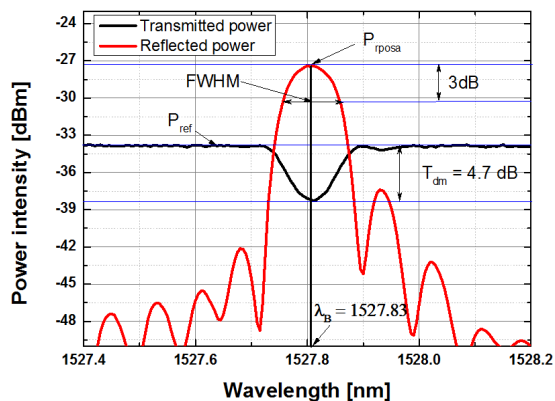


Fig. 1 Transmission spectra of a fiber Bragg grating

그림 1은 제작된 FBG 센서 시료 중에 5-100-2의 광 스펙트럼 특성을 나타낸다. 반치대역폭(FWHM)은 200nm 이내이며, 반사율은 약 66% 정도로 설계조건에 만족하는 광 특성을 보였다.

### III. 실험 구성

FBG 센서의 감마선 조사에 따른 측정시스템은 그림 2와 같이 감마선 조사시설을 고려해서 누적선량에 따라 각 테스트 샘플에 대한 반사파장 측정, FBG의 광손실, 브래그 파장변화를 모니터링 할 수 있도록 구성하였다.

측정 장비는 FBG 센서들의 주요 특성을 측정할 수 있는 sm-125 장비를 사용하였으며 각 FBG 센서별로 측정된 데이터를 매 1분 간격으로 저장하였다. FBG 센서들은 감마선 선원과의 거리가 동일한 위치에 수직으로 설치하였으며, 센서의 파장변화에 영향을 줄 수 있는 온도변화를 측정하기 위해서 시료와 함께 온도센서(thermocouple)를 설치하여 매 1분 간격으로 모니터링을 하였다.

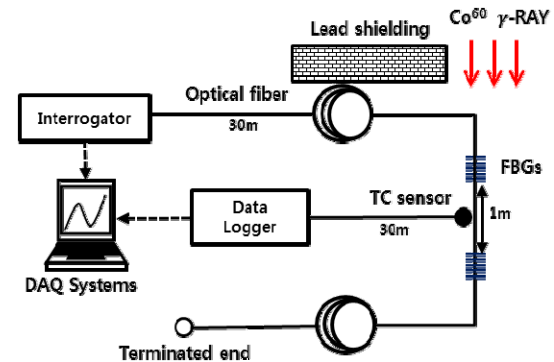


Fig. 2 Experimental set-up

방사선 선원은 그림 3과 같이 첨단방사선연구소(정읍)의 고준위 감마선 조사시설의 Co<sup>60</sup> 감마선원을 이용하였다. 방사선 조사조건은 총누적선량 31 kGy, 선량률 115 Gy/min으로 하였으며 추가로 방사선량 측정의 정확도를 높이기위해서 시료와 함께 펠릿(pellet) 형태의 선량계(Alanine dosimeter)를 장착하였다. 총누적선량 및 선량률 조건은 광섬유의 방사선 시험절차에 따라서 조정하였다[9].

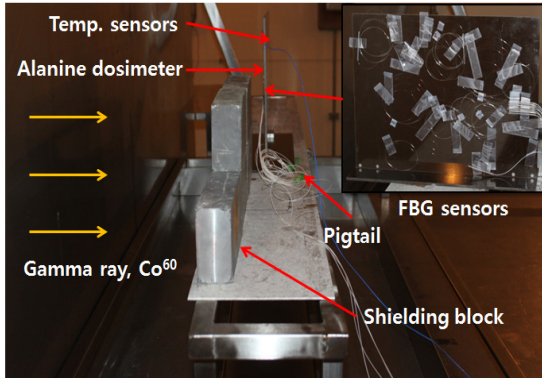


Fig. 3 Set-up of FBG sensors in the irradiation facility

#### IV. 실험 결과

##### 4.1. 어닐링 온도에 따른 FBG의 BWS 특성

그림 4는 어닐링 조건에 따른 FBG 센서의 감마선 유입 BWS(Bragg wavelength shift) 특성을 보여준다. 그래프의 BWS 변화는 각각의 어닐링 온도조건에 따른 시료들의 평균값으로 나타낸 것이다. 방사선 조사 중에 온도 변화에 대한 BWS 변화는 FBG 센서와 함께 동일한 공간에 설치된 온도센서의 값을 이용하여 보정하였다. 감마선에 노출되면서 200°C에서 어닐링을 수행한 FBG가 누적선량 31kGy에서 35pm로 가장 높은 방사선 민감도를 나타냈으며, 가장 낮은 방사선 민감도를 보인 것은 100°C에서 어닐링을 수행한 것으로 동일한 누적선량에서 17pm로 나타났다.

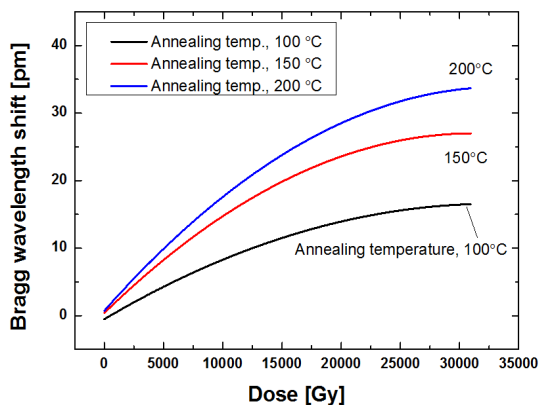


Fig. 4 Radiation effects of FBGs on annealing condition

어닐링 온도 100°C와 비교하여 200°C에서 어닐링을 수행한 것은 BWS 변화가 최대 2배 이상 높은 것으로 나타났다.

##### 4.2. FBG의 온도 감도계수 변화

표 4는 방사선 조사 전과 조사 종료 후 약 2일간 상온에서 안정화 과정을 수행한 후 어닐링 온도 및 방사선 조사에 의한 온도 감도 계수( $\alpha_0$ ) 변화를 비교한 것이다. 온도감도계수는 표 2의 온도조건에 따른 각 FBG 시료의 평균값을 나타낸다.

방사선에 의한 FBG 센서의 온도감도계수 변화율은 어닐링 온도가 증가함에 따라서 감소하는 경향을 보였으며, 200°C에서 어닐링을 수행한 FBG는 최대 3% 정도의 변화율을 보여서 가장 큰 변화를 나타냈다. 특히 100, 150°C에서 어닐링을 수행한 시료는 비슷한 온도 감도계수 변화를 보였지만 200°C에서는 온도감도계수가 급격하게 감소하는 특성을 보였다.

Table. 4 Change of temperature sensitivity coefficient after the irradiation

Annealing temperature [°C]	Temperature sensitivity coefficient [pm/°C]		Rate of variation [%]
	Before irradiation	After irradiation	
100	10.40	10.23	- 1.6
150	10.39	10.21	- 1.7
200	10.45	10.14	- 3.0

#### V. 결 론

방사선 조사에 의한 FBG 센서의 방사선 민감도는 다양한 격자공정 방법 및 파라미터에 영향을 받는다. 격자 제작 시 광섬유 내에 수소를 제거(Hydrogen diffusion)하는 어닐링 공정은 광섬유 내에 잔존하는 수소와 밀접한 관련이 있다. 특히 어닐링 공정은 최종 브래그 파장에 변화를 줄 수 있기 때문에 어닐링 온도 및 시간은 FBG의 특성을 결정하는 중요한 단계이다.

본 연구에서는 공정파라미터 중 어닐링 조건을 변경하여 FBG 센서를 자체 제작하였으며, 어닐링 온도에 따른 감마선 영향을 분석하였다. 격자 제조 시 어닐링 온도 조건은 FBG의 방사선 민감도에 큰 영향을 줄 수

있고, 어닐링 온도가 상승할수록 감마선 민감도가 높게 나타나는 경향을 보였다. 특히, 어닐링 온도 조건에 따라서 고준위 감마선 노출되면서 최대 2배 이상의 Bragg 파장변화를 보임을 확인하였다. 또한 어닐링 온도가 상승할수록 FBG 온도감도계수 변화율이 증가하는 것으로 나타났으며, 이로 인해서 센서의 온도 민감도가 저하되는 것을 확인하였다. 따라서 FBG의 어닐링 온도조건을 100°C 이하로 유지하고, 어닐링 시간을 최소화한다면 방사선 내성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한 추가적으로 펄소초 레이저 공정, 특수코팅 등의 추가적인 공정기술 개발로 원전 혹은 우주와 같은 방사선 환경에 이용할 수 있는 내방사선 FBG 센서 개발이 가능할 것으로 전망된다.

### ACKNOWLEDGMENTS

This paper was supported by the Ministry of Science, ICT & Future Planning and Civil Military Technology Cooperation Center.

### REFERENCES

- [1] A. Gusarov, S. Vasiliev, O. Medvedkov, I. Mckenzie and F. Berghmans et. al., "Stabilization of Fiber Bragg Gratings Against Gamma Radiation," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 55, no. 4, pp. 2205-2212, Aug. 2008.
- [2] A. I. Gusarov, D. B. Doyle, N. K. Karafolas, F. Berghmans, "Fibers-Bragg gratings as a candidate technology for satellite communication payloads: radiation effects issues," *Conference on Photonics for Space Environments VII, SPIE Proceedings*, vol. 4134, pp. 253-260, Oct. 2000.
- [3] S. J. Mihailov, "Fiber Bragg Grating Sensors for Harsh Environments," *Sensors 2012*, vol. 12, no. 2, pp. 1898-1918, Feb. 2012.
- [4] A. Gusarov, B. Brichard, and D. N. Nikogosyan, "Gamma-radiation effects on Bragg gratings written by femtosecond UV laser in Ge-doped fibers," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 57, no. 4, pp. 2024-2028, Aug. 2010.
- [5] H. Henschel, S. K. Hoffgen, K. Krebber, J. Kuhnenn and U. Weinand, "Influence of fiber composition and grating fabrication on the radiation sensitivity of fiber Bragg gratings," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 55, no. 4, pp. 2235-2242, Aug. 2008.
- [6] IEC, "Optical fibres - Guidance for nuclear radiation tests," Technical Report IEC/TR 62283, pp. 27-28, 2010.
- [7] K. Krebber, H. Henschel and U. Weinand, "Fibre Bragg gratings as high dose radiation sensors?," *Measurement Science and Technology*, pp. 1095-1102, vol. 17, Apr. 2006.
- [8] J. Y. Kim, N. H. Lee, H. K. Jung, "The study of radiation sensitivity on fiber Bragg grating written in photo-sensitive optical fibers," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, pp. 2023-2025, vol. 18, no. 8, Aug. 2014.
- [9] TIA/EIA Standard 455-64, *Procedure for Measuring Radiation-Induced Attenuation in Optical Fibers and Optical Cables*, TIA, 1998.



김종열(Jong-Yeol Kim)

2009년 한양대학교 전자전기공학부 공학사  
 2011년 한양대학교 전자전기제어계측공학과 공학석사  
 2011년 ~ 현재 한국원자력연구원 선임연구원  
 ※관심분야: 내방사선 광섬유, 광섬유 분포 센서



이남호(Nam-Ho Lee)

1993년 경북대학교 전자공학과 공학석사  
 2004년 충남대학교 전기공학과 공학박사  
 1992년 ~ 현재 한국원자력연구원 책임연구원  
 2009년 ~ 현재 충남대학교 전자전기공학부 겸임교수  
 ※관심분야: 원격제어, 원격센서, 영상신호처리



**정현규(Hyun-Kyu Jung)**

1981년 서울대학교 금속공학과 공학사  
1987년 서울대학교 금속공학과 공학석사  
2000년 한국과학기술원 재료공학과 공학박사  
1983년 ~ 현재 한국원자력연구원 책임연구원  
※관심분야 : 비파괴기술, 센서, 센서의 방사선 영향, 원자력전지