

## 광섬유 브래그 격자의 방사선 민감도에 대한 수소로딩의 영향

김종열\* · 이남호 · 정현규

### The Influence of Hydrogen Loading on Radiation Sensitivity of Fiber Bragg Gratings

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

Department of Nuclear Convergence Technology Development, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Daejeon, 305-353, Korea

#### 요 약

본 논문은 광섬유 브래그 격자의 방사선 민감도에 대한 수소로딩 공정의 영향에 대해서 연구하였다. 게르마늄이 함유된 광섬유에 수소로딩 기간을 달리하여 광섬유 브래그 격자를 제작하였다. 광섬유 브래그 격자는 총 18 kGy 감마선에 조사하여 방사선에 의한 브래그 파장의 변화를 측정하였고, 방사선 조사 후에는 반치대역폭과 온도 감도 계수의 변화를 평가하였다. 수소로딩 조건에 따라서 방사선에 의한 브래그 파장의 변화는 약 2 배 이상의 차이를 보였다.

#### ABSTRACT

This paper investigates the influence of hydrogen loading process on the radiation sensitivity of fiber Bragg gratings (FBG). We made the FBG inscribed in the same commercial Ge-doped fiber with different hydrogen loading periods. We measured the Bragg wavelength shift (BWS) of the FBG exposed to gamma-radiation up to a dose of 18 kGy, and evaluated the change of full width at half maximum (FWHM) and the FBG temperature sensitivity coefficient after irradiation. Varying hydrogen loading parameter led to BWS differences up to nearly a factor of two.

**키워드** : 광섬유 브래그 격자, 감마방사선, 광섬유 센서, 방사선 영향

**Key word** : Fiber Bragg gratings, gamma radiation, optical fiber sensor, radiation effects

접수일자 : 2013. 08. 27 심사완료일자 : 2013. 09. 30 게재확정일자 : 2013. 10. 10

\* **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, 305-353, Korea

**Open Access** <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2013.17.10.2461>

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

광섬유 브래그 격자 (FBG)는 온도, 압력, 변형률 측정을 위한 센서로 많이 사용되고 있다. 특히 기존의 전기 및 기계적 센서에 대한 대안으로 가혹한 환경에서 높은 정확성, 작은 크기, 전자기 간섭 (EMI) 내성, 방폭 성능 등의 장점을 가지고 있다. 또한 FBG의 방사선 영향에 대한 연구결과에 따르면 방사선에 대한 내성을 가지고 있으며, 원자로나 우주 환경에서 온도 센서로 적합한 특성을 가지고 있다고 보고되고 있다. 최근에는 유럽의 SCK-CEN, Fraunhofer-INT 등 기업과 연구소를 중심으로 FBG 센서를 원전시설과 우주환경에 적용하기 위해서 내방사선 특성을 향상시키는 다양한 연구가 진행되고 있다.[1]-[4]

일반적으로 FBG의 방사선 민감도는 광섬유의 화학적 조성과 격자 제조기술에 따라서 큰 영향을 받는다. FBG 센서가 방사선 환경에 노출되면 브래그 파장 ( $\lambda_B$ )의 이동현상과 온도 감도 계수 ( $\alpha_0$ )의 변화가 일어나면 센서 계측의 신뢰성이 떨어지게 된다.[5]-[7]

FBG 센서 제작을 위해서 사용되는 광섬유는 게르마늄 (Ge)이 첨가된 일반적인 통신용 광섬유, 붕소 (B)가 첨가된 광민감 광섬유 등이 많이 사용되고 있으며, 광섬유의 조성에 따라서 FBG의 방사선 민감도도 다양한 특성이 나타난다. 광섬유 격자 제조 시 레이저 세기, 수소 로딩, 격자를 새긴 후의 어닐링 조건과 같은 공정 조건도 방사선 민감도에 영향을 미친다. 동일한 광섬유로 제조하더라도 공정 조건에 따라서 방사선에 의한 브래그 파장의 변화가 최대 10 배 이상 차이가 나는 것으로 보고되고 있다.[2] 또한 일반적으로 사용되는 UV KrF 레이저를 이용한 제조방법이 아닌 수소로딩 공정 없이 광섬유를 인출하면서 격자를 새기는 Draw Tower Gratings (DTGs) 제조기법도 연구되고 있다.[2]

본 논문에서는 FBG 제작공정 시 수소로딩 조건에 따라서 방사선에 의한 Bragg 파장 이동(Bragg wavelength shift, BWS), 온도 감도 계수, 반치대역폭 변화를 비교하여 수소로딩에 따른 방사선 민감도를 분석하였으며, 그에 따른 FBG의 내방사선 특성을 향상시킬 수 있는 방법을 모색하였다.

## II. 광섬유 선정 및 FBG 제작

### 2.1. 광섬유 선정

FBG 센서를 제작하기 위해서 선정된 광섬유는 통신용으로 사용되는 단일모드 광섬유 (SMF-28e, Corning)를 선정하였으며, 주요 특성은 표 1과 같다. 선정된 광섬유의 코어와 클래딩 조성은 EPMA 장비를 이용한 정량 분석을 통하여 분석하였다. 코어에 첨가된 도펀트는 게르마늄 (Ge)의 함량이 가장 높은 것으로 나타났고, 극소량의 인 (P)이 함유되어 있었다. 또한 클래딩 영역은 첨가된 도펀트가 없는 것으로 분석되었다.

표 1. 광섬유 사양

Table. 1 The Specification of the optical fiber

광섬유 종류	제조사	Corning
	모델명	SMF28-e
광섬유 구조 [ $\mu$ m]	Core	9.2 $\pm$ 0.4
	Cladding	125.0 $\pm$ 0.7
도펀트 [wt %]	Core	GeO <sub>2</sub> (7.3), P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (0.2)
	Cladding	-
광손실 [dB/km]	$\leq$ 0.34 @1310nm	
	$\leq$ 0.20 @1550nm	

### 2.2. FBG 제작

FBG 센서 제작 시 전체 제조공정 중 수소로딩 조건을 제외한 나머지 공정 조건 (레이저 세기, 레이저 조사 횟수, 브래그 파장)은 거의 동일하게 설정하였다. 공정 조건에 따라서 표 2 와 같이 총 4개의 FBG 센서 실험 샘플을 선정하였다.

표 2. 광섬유 브래그 격자의 제조 조건

Table. 2 The fabrication condition of the fiber Bragg grating

구분	FBG 제조 조건			
	H2 loading		UV KrF laser	
	시간 [Hr]	압력 [atm]	출력 [mJ/pulse]	반복률 [Hz]
FBG-1	72	100	33.6	10
FBG-2	120	100	33.8	10
FBG-3	168	100	33.6	10
FBG-4	240	100	33.6	10

4개의 FBG 샘플은 각각 72, 120, 168, 240 시간의 수소로딩 공정을 거쳤으며, 압력 100 atm, 온도 30 °C 조건에서 수행되었다. 수소 주입량은 FBG의 파장 변화량을 측정하여 일정하게 조절하였다.

수소로딩 공정 후 KrF excimer 레이저를 이용하여 격자를 새겼으며, 레이저의 조사주기는 10 Hz, 레이저 파장 248 nm, 조사시간은 50초로 설정하였다. 격자 공정 후에는 100 °C에서 24시간동안 수소 제거 공정 (out-diffusion)을 수행한 후 아크릴레이트 (acrylate)로 재코팅을 하였고, 제작된 FBG 센서의 격자의 길이는 평균적으로 약 15 mm 정도였다.

표 3은 제조된 FBG의 주요특성을 나타낸다. 수소 로딩 기간이 증가할수록 반사율과 FWHM의 값이 증가하는 경향이 나타났지만, 240시간 수소로딩 후 제작된 FBG-4의 경우는 160시간 수소로딩을 한 FBG-3 보다 낮은 반사율과 FWHM 특성을 보였다.

표 3. 제조된 광섬유 브래그 격자의 주요 특성  
Table. 3 Properties of manufactured fiber Bragg gratings

구분	H <sub>2</sub> loading [Hr]	반사율 [%]	FWHM [pm]	온도 감도계수 [pm/°C]
FBG-1	72	20.57	69	10.0
FBG-2	120	72.46	83	10.0
FBG-3	168	80.05	103	10.0
FBG-4	240	73.70	92	9.9

### III. 실험 구성

FBG 센서의 감마선 조사에 따른 측정시스템은 그림 1에 나타낸 것과 같이 각 테스트 샘플에 대한 반사파장 측정을 위한 단주기격자와 방사선 실험 환경을 고려해서 누적선량에 따라 테스트시료의 광파워 손실과 파장 변화를 실시간으로 모니터링 할 수 있도록 구성하였다.

측정 장비는 FBG 센서의 주요 특성을 측정할 수 있는 Optical Sensing Interrogator (OSI, sm-125) 장비를 사용하였으며 Ethernet로 연결되어 측정된 데이터를 매 5초 간격으로 저장하였다.

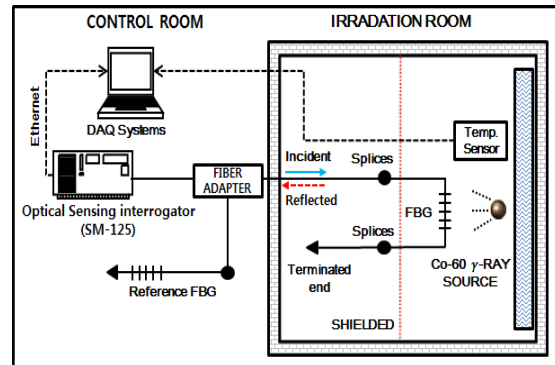


그림 1. 실험구성도  
Fig. 1 Experimental set-up

각 FBG 센서는 조사대에 고정하여 동일한 선량(위치)에 설치하였고, 콘크리트 벽으로 차폐된 곳에서 접속손실을 최소화 하기위해서 광섬유와 FBG 센서를 용착 (splicing)하였다. 또한 센서의 브래그 파장에 영향을 줄 수 있는 샘플 주변의 온도 변화를 측정하기위해서 샘플과 함께 온도 센서 (thermocouple: K type)를 설치하여 온도를 측정하였다. 방사선 조사실 외부의 제어실에는 기준 센서를 설치하여 측정의 정확성을 높였다.

방사선 선원은 첨단방사선연구소 (정읍)의 고준위 감마선 조사시설의 Co-60 감마선원을 이용하였다. 방사선 조사조건은 표 4와 같이 총 누적선량은 18 kGy이며 선량률은 300 Gy/min으로 하였으며, 실내 온도는 방사선 조사에 의해서 27.8 °C에서 31.5 °C까지 상승하였다.

방사선 조사 종료 후에는 72시간 상온에서 어닐링 과정을 거치고 방사선에 의한 온도 감도 계수 변화를 측정하였다.

표 4. 방사선 조사 시험 조건  
Table. 4 The irradiation test condition

방사선 조사조건	총 누적선량	18 kGy
	선량률	300 Gy/min
	방사선 선원	Co-60
	조사 시설	고준위 감마선조사장치
온도 조건	Irradiation	27.8 °C ~ 31.5 °C
	Annealing	상온 (72시간)

#### IV. 실험 결과

##### 4.1. 수소로딩 조건에 따른 FBG의 BWS 특성

그림 2는 수소로딩 조건에 따른 FBG 센서의 방사선에 의한 BWS 특성을 나타낸다. 방사선 조사 중에 온도 상승에 대한 브래그 파장의 변화값은 FBG 주변에 설치된 온도 센서의 값을 측정하여 보정하였다.

4개의 FBG 샘플은 수소로딩 공정에 따라서 방사선에 의한 BWS 특성도 큰 차이를 보였다. 수소로딩 기간이 증가할수록 방사선에 의한 BWS 변화 ( $\lambda_B$ )가 증가하는 경향이 나타났다. 수소로딩 시간이 72시간으로 가장 짧았던 FBG-1은 17 pm의 브래그 파장 변화를 보였으며 수소로딩 시간이 가장 길었던 FBG-4의 경우 34 pm 변화를 보여서 최대 2배 이상의 차이를 보였다. 일반적으로 방사선에 의한 광섬유의 광손실 (Radiation-Induced Attenuation, RIA)은 수소로딩 과정을 거치면 내방사선 특성이 좀 더 향상되어 광손실이 줄어드는 것으로 보고되고 있지만, FBG의 BWS 변화는 수소로딩 기간이 길수록 방사선에 더 민감한 특성이 나타났다. 이것은 수소로딩에 의해서 생성된 광섬유 내부의 수산기 결합 (OH-bonds)이 방사선 분해 (radiolysis)로 인해서 격자의 방사선 민감도를 증가시킨 것으로 분석된다.

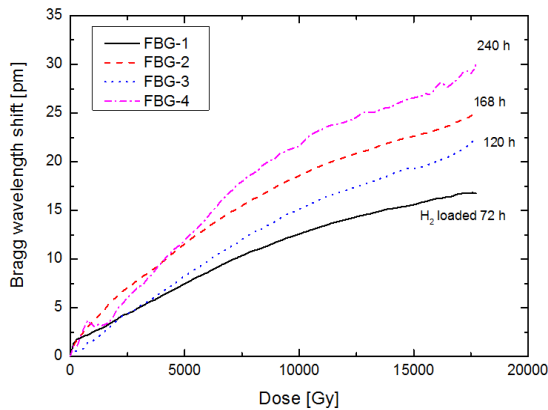


그림 2. 방사선에 의한 브래그 파장 변화  
Fig. 2 Radiation-induced Bragg wavelength shift

##### 4.2. 방사선에 의한 FBG의 FWHM 변화 특성

표 5는 방사선 조사전과 방사선 조사 종료 후 72시간 뒤의 FBG 센서의 FWHM 변화를 나타낸다.

표 5. 방사선 조사 전과 조사 후의 FWHM 비교

Table. 5 Comparison of FWHM before and after the irradiation

구분	FWHM [pm]		변화율 [%]
	방사선 조사 전	방사선 조사 후	
FBG-1	69	60	-13.0
FBG-2	83	82	-1.2
FBG-3	103	100	-2.9
FBG-4	92	92	0

방사선에 조사 후 FWHM는 줄어드는 경향을 보였고, 수소로딩 기간이 길수록 변화폭이 줄어드는 특성이 나타났다. 하지만 FBG - 1을 제외하고 대부분 3 % 이내의 변동률을 보였으며, 방사선에 의한 영향이 크지 않았다.

##### 4.3. 방사선에 의한 FBG의 온도 감도계수 변화 특성

표 6은 방사선 조사 종료 후 72시간 상온에서 어닐링 과정을 거치고 방사선에 의한 온도 감도 계수 변화를 측정한 것이다.

방사선에 의한 FBG 센서의 온도 감도계수 ( $\alpha_0$ ) 변화를 보면, 수소로딩이 기간이 가장 짧았던 FBG-1이 6 % 정도 감소하여 가장 낮은 변화율을 보였으며, 나머지 FBG는 방사선 조사 전과 비교하여 평균적으로 약 14 % 정도 상승하였다. 온도 감도 계수의 변화 요인은 FBG 제작 시 격자의 아크릴레이트로 재 코팅된 부분이 고방사선에 노출되면서 취화 (brittle) 현상이나 부풀림 (swelling) 현상이 발생하여 내부 FBG 센서가 물리적인 응력이 영향을 준 것으로 판단된다. 또한 방사선에 의한 온도 감도계수 변화와 BWS 변화는 밀접한 관련성이 있는 것으로 분석된다.

표 6. 방사선 조사 전과 조사 후의 온도 감도계수 비교

Table. 6 Comparison of temperature sensitivity coefficient before and after the irradiation

구분	온도 감도 계수 ( $\alpha_0$ ) [pm/°C]		변화율 [%]
	방사선 조사 전	방사선 조사 후	
FBG-1	10.0	9.4	-6.0
FBG-2	10.0	11.4	14.0
FBG-3	10.0	11.4	14.0
FBG-4	9.9	11.3	14.1

## V. 결 론

본 연구에서는 OSI 장비를 이용하여 게르마늄이 첨가된 동일한 광섬유로 수소로딩 공정조건을 달리하여 FBG 센서를 제작하였다. 방사선에 의한 브래그 파장 변화, 반치대역폭, 온도 감도계수 변화에 대한 실험을 수행하였으며, 그에 따른 FBG의 수소로딩 공정에 따라서 방사선 효과가 다양하게 나타났다. 수소로딩 기간이 길수록 FBG의 브래그 파장의 변화가 증가하였으며 브래그 파장 변화량은 최대 약 2 배의 차이가 나타났다.

제작된 FBG의 반치대역폭은 방사선 조사 후에 조금 줄어드는 경향을 보였지만, 대부분의 FBG가 3 % 이내에서의 미약한 변화를 보였으며, 방사선의 영향은 크지 않았다. FBG 센서의 온도 감도 ( $\alpha_0$ )는 대부분 상승하는 경향이 나타났으며, 수소로딩 기간이 가장 짧은 FBG-1을 제외하고 방사선 조사 전과 비교하여 평균적으로 약 14 % 정도 상승하였다. 이것은 FBG 제작 시 격자의 재 코팅된 부분이 고방사선에 노출되면서 내부 FBG 센서가 물리적인 응력을 받아 온도 감도계수를 상승시킨 것으로 분석된다.

위 연구결과를 통하여 FBG 센서 공정조건을 최적화한다면 방사선 민감도가 낮으며 신뢰도가 높은 FBG 센서를 원전시설이나 우주환경에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (원자력연구개발사업, No. 2011- 0031840)

김종열(Jong-Yeol Kim)

한국정보통신학회 논문지 제17권 제6호 참조

이남호(Nam-Ho Lee)

한국정보통신학회 논문지 제17권 제6호 참조

정현규(Hyun-Kyu Jung)

한국정보통신학회 논문지 제17권 제6호 참조

## REFERENCES

- [1] A. Gusarov, I. A. F. Fernandez, F. Berghmans, O. Deparis, Y. Defosse, P. Megret, M. Decreton, and M. Blondel, "Effect of MGy dose level-radiation on the parameters of FBGs written in Ge-doped silica fiber," *presented at the European Workshop on Optical Fiber Sensors*, Peebles, Scotland, U.K., Jul. 1998.
- [2] 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 Trans. Nucl. Sci.*, vol. 55, no. 4, pp. 2235-2242, 2008.
- [3] A. F. Fernamdez, F. Berghmans, A. I. Gusarov, et. al., "Multiplexed fibre Bragg grating sensors for in-core thermometry in nuclear reactors," *Conference on Fiber Optic Sensor Technology II, SPIE Proceedings*, vol. 4204A, pp. 40-49, 2000.
- [4] 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, 2000.
- [5] A. Gusarov, D. Starodubov, F. Berghmans, O. Deparis, Y. Defosse, A. F. Fernandez, d, M. Decreton, P. Megret, M. Blondel, "Comparative study of the MGy dose level  $\gamma$ -radiation effect on FBGs written in different fibres," in *Proc. Int. Conf. Optical Fibre Sensors 1999 (OFS 13)*, Kyongju, Korea, pp. 608 - 611.
- [6] A. Gusarov, S. Vasiliev, O. Medvedkov, I. Mckenzie and F. Berghmans et. al., "Stabilization of Fiber Bragg Gratings Against Gamma Radiation," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 55, no. 4, pp 2205-2212, 2008.
- [7] IEC, "Optical fibres - Guidance for nuclear radiation tests," IEC/TR 62283, pp. 27-28, 2010.