

광민감 광섬유와 일반 단일모드 광섬유로 제작한 브래그 격자 센서의 감마방사선 영향

김종열* · 이남호* · 정현규* · 임돈순*

*한국원자력연구원

Gamma-radiation Effects on Fiber Bragg Gratings Written in Photo-sensitive and Commercial Single-mode Optical Fibers

Jong-Yeol Kim* · Nam-Ho Lee* · Hyun-Kyu Jung* · Don-Sun Im*

*Korea Atomic Energy Research Institute

E-mail : kimjr@kaeri.re.kr

요 약

본 논문에서는 광민감 광섬유와 일반 단일모드 광섬유로 제작된 광섬유 브래그 격자 센서의 감마 방사선 영향을 분석하였다. 제작된 광섬유 브래그 격자 센서는 Co^{60} 감마선원을 이용하여 300 Gy/min의 선량률로 총선량 17.8 kGy 감마선을 조사하였다. 실험결과를 통하여 수소로딩을 하지 않은 광민감 광섬유로 제작된 격자 센서가 가장 낮은 18 pm의 브래그 파장 이동을 보였다.

ABSTRACT

In this study, we studied the effect of Co^{60} gamma-radiation on the FBGs written in photo-sensitive and commercial Ge-doped single-mode optical fibers. The FBGs were exposed to gamma-radiation up to a dose of 17.8 kGy at the dose rate of 300 Gy/min. According to the experimental data and analysis results, the lowest Bragg wavelength shift (18 pm) was obtained by a grating written in photosensitive fiber without H_2 -loading.

키워드

내방사선 광섬유, 감마선, 광섬유 센서, 방사선 영향

1. 서 론

광섬유 브래그 격자(FBG)는 기존의 전기 및 기계적 센서에 대한 대안으로 가혹한 환경에서 높은 정확성, 작은 크기, 전자기 간섭(EMI) 내성, 방폭 성능 등의 장점을 가지고 있다. FBG의 방사선 영향에 대한 연구결과에 따르면 방사선에 대한 내성을 가지고 있으며, 원자로나 우주 환경에서 온도 센서로 적합한 특성을 가지고 있다고 보고되고 있다.[1]-[4]

일반적으로 FBG의 방사선 민감도는 광섬유의 화학적 조성고 격자 제조기술에 따라서 큰 영향을 받는다. FBG 센서가 방사선 환경에 노출되면

브래그 파장(λ_B)의 이동현상과 온도 감도 계수(α_0)의 변화가 일어나며 센서 계측의 신뢰성이 떨어지게 된다.[5]-[8]

FBG 센서에 사용되는 광섬유는 게르마늄(Ge)이 첨가된 일반적인 통신용 광섬유와 게르마늄(Ge)과 붕소(B)가 함께 첨가된 광민감 광섬유 등이 많이 사용되고 있으며, 광섬유의 조성에 따라서 FBG의 방사선 민감도도 다양한 특성을 보인다. 광섬유 격자 제조 시 레이저 세기, 수소로딩, 격자를 새긴 후의 어닐링 조건도 방사선 민감도에 영향을 미친다.[7] 동일한 광섬유로 제조하더라도 공정 조건에 따라서 방사선에 의한 브래그 파장의 변화가 최대 10배 이상 차이를 보인다.[2]

표 1. 광섬유 사양

구분	광섬유 종류 (제조사)	광섬유 구조 [μm]		도펀트 [wt %]		광손실 [dB/km]
		Core	Cladding	Core	Cladding	
SMF	SMF28-e (Corning)	9.2 \pm 0.4	125.0 \pm 0.7	GeO ₂ (7.3), P ₂ O ₅ (0.2)	-	\leq 0.34 @1310nm \leq 0.20 @1550nm
PSF	PS1250/1500 (Fibercore)	9.7 \pm 0.9	125.0 \pm 1.0	GeO ₂ (20.0), B(1.0)	-	\leq 10 @1310nm \leq 120 @1550nm

본 논문에서는 광민감 광섬유와 일반 단일모드 광섬유로 제작된 광섬유 브래그 격자 센서의 감마선 영향을 분석하였으며, 방사선 조사에 의한 브래그 파장 이동(Bragg wavelength shift, BWS)과 온도 감도 계수 변화를 분석하였다.

II. 광섬유 선정 및 FBG 제작

FBG 센서를 제작하기 위해서 통신용으로 사용되는 단일모드 광섬유(SMF-28e, Corning)와 FBG 센서 제작에 많이 광민감 광섬유(PS1250/1500, Fibercore)를 선정하였으며, 주요 특성은 표 1과 같다. 선정된 광섬유의 코어와 클래딩 조성은 EPMA 장비를 이용한 정량 분석을 통하여 분석하였다. 일반 단일모드 광섬유의 코어에 첨가된 도펀트는 게르마늄의 함량이 가장 높은 것으로 나타났고, 극소량의 인(P)이 함유되어 있었다. 또한 클래딩 영역은 첨가된 도펀트가 없는 것으로 분석되었다. 광민감 광섬유의 코어에 첨가된 도펀트는 광민감도 향상과 관련하여 게르마늄 함량을 높이기 위해 붕소(B)가 함께 함유되어 있었다.

FBG 센서 제작 시 전체 제조공정 중 수소로딩 조건을 제외한 나머지 공정 조건(레이저 세기, 레이저 조사횟수, 브래그 파장)은 거의 동일하게 설정하였다. 광섬유 종류에 따라서 FBG 센서는 각각 3개의 샘플을 제작하였다.

일반 단일모드 광섬유는 광민감도를 향상시키기 위해서 압력 100 atm, 온도 30 $^{\circ}$ C 조건에서 10 일 동안 수소로딩 공정을 거쳤고, 광민감 광섬유는 수소로딩 공정을 수행하지 않았다. 수소로딩 공정 후 KrF excimer 레이저를 이용하여 격자를 새겼으며, 레이저의 조사주기는 10 Hz, 레이저 파장 248 nm, 조사시간은 50초로 설정하였다. 일반 단일모드 광섬유는 격자 공정 후에는 100 $^{\circ}$ 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 2는 제조된 FBG의 주요특성을 나타낸다. FBG의 반사율은 광민감 광섬유로 제작된 광섬유가 일반 광섬유에 비해서 훨씬 높은 값을 보였고, 온도감도는 조금 떨어지는 경향을 보였다.

표 2. 제조된 광섬유 브래그 격자의 주요 특성

구분	수소 로딩	반사율 [%]	FWHM [pm]	온도 감도계수 [pm/ $^{\circ}$ C]
SMF-1	O	56.4	83	9.9
SMF-2	O	73.7	92	9.9
SMF-3	O	38.4	88	9.9
PSF-1	X	99.6	283	8.7
PSF-2	X	99.7	272	8.4
PSF-3	X	99.3	348	8.4

III. 실험 구성

FBG 센서의 감마선 조사에 따른 측정시스템은 그림 1에 나타난 것과 같이 각 테스트 샘플에 대한 방사선 측정 환경을 고려해서 누적선량에 따라 테스트시료의 광파워 손실과 파장변화를 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.

각 FBG 센서는 조사대에 고정하여 동일한 선량(위치)에 설치하였고, 콘크리트 벽으로 차폐된 곳에서 집속손실을 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 Co⁶⁰ 감마선원을 이용하였다. 방사선 조사조건은 총 누적선량은 17.8 kGy, 선량률은 300 Gy/min으로 하였으며, 실내 온도는 방사선 조사에 의해서 27.8 $^{\circ}$ C에서 31.5 $^{\circ}$ C까지 상승하였다.

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

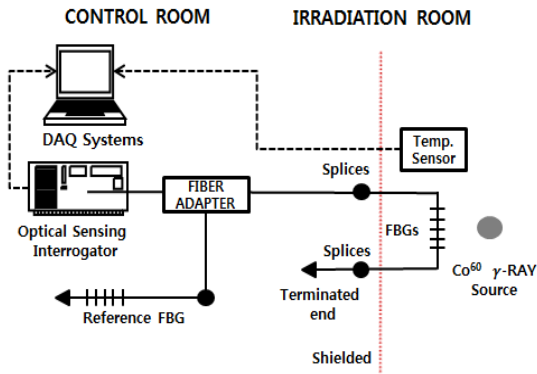


그림 1. 실험구성도

IV. 실험 결과

그림 2는 게르마늄이 첨가된 일반 광섬유와 게르마늄과 붕소가 함께 첨가된 광민감 광섬유로 제작된 FBG 센서의 BWS 특성을 나타낸다. 방사선 조사 중에 온도 상승에 대한 브래그 파장의 변화값은 FBG 주변에 설치된 온도 센서의 값을 측정하여 보정하였다.

17.8 kGy 방사선에 조사된 후 BWS 변화는 광섬유의 종류에 따라서 크게 차이를 보였다. 광민감 광섬유로 제작된 FBG는 일반 광섬유로 제작된 FBG에 비해서 최대 약 2배정도 낮은 BWS 특성을 보였다.

특히 광민감 광섬유로 제작된 광섬유는 누적선량 15 kGy 이상에서는 BWS의 크기가 거의 변화하지 않았고, 포화되는 특성이 뚜렷하게 나타났다. 이것은 광민감 광섬유의 별도의 수소로딩 공정을 수행하지 않아서 수산화기 결합(OH-bonds)이 적게 생성되었고, 그로인해 방사선에 의한 수산화기의 분해 현상(radiolysis)도 적게 나타나서 격자의 방사선 민감도를 상대적으로 낮게 해준 것으로 판단된다.

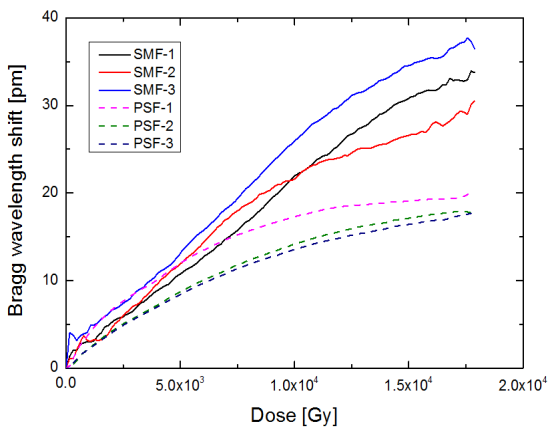


그림 2. 방사선에 의한 브래그 파장 변화

표 3. 방사선 조사에 의한 온도 감도 계수 변화

구분	온도 감도 계수(α_0) [pm/°C]		변화율 [%]
	방사선 조사 전	방사선 조사 후	
SMF-1	9.9	11.3	+14.1
SMF-2	9.9	11.3	+14.1
SMF-3	9.9	11.4	+15.2
PSF-1	8.7	9.8	+12.6
PSF-2	8.4	9.7	+15.8
PSF-3	8.4	9.8	+16.7

표 3은 방사선 조사 종료 후 72시간 상온에서 어닐링 과정을 거치고 방사선에 의한 온도 감도 계수 변화를 측정된 것이다. 방사선에 의한 FBG 센서의 온도 감도 계수(α_0) 변화율은 PSF-2가 12.6 % 정도 증가하여 가장 낮은 변화율을 보였으며, 나머지 FBG는 방사선 조사 전과 비교하여 평균적으로 약 14.6 % 정도 상승하였다.

온도 감도 계수의 변화 요인은 FBG 제작 시 격자의 아크릴레이트로 재 코팅된 부분이 고방사선에 노출되면서 취화(brittle) 현상이나 부풀림(welling) 현상이 발생하여 내부 FBG 센서가 물리적인 응력을 받은 것이 원인으로 판단된다.

V. 결 론

본 연구에서는 일반 단일모드 광섬유와 광민감 광섬유를 이용하여 FBG 센서를 제작하였으며, 방사선에 의한 브래그 파장과 온도 감도계수 변화에 대한 실험을 수행하였다. 수소로딩 공정을 수행하지 않은 광민감 광섬유로 제작한 FBG 센서가 일반 광섬유로 제작된 FBG 센서에 비해서 최대 약 2배정도 낮은 BWS 특성을 보였으며 수소로딩 공정이 FBG 방사선 민감도와 밀접한 관련성이 있음을 실험적으로 확인하였다. 또한 아크릴레이트로 재 코팅된 부분이 방사선 조사에 의해서 FBG 센서에 응력을 줄 수 있고, 그로인해 FBG의 온도감도 계수에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

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

참고문헌

[1] P. Niewczas, M. Johnston, "Effects of

- Neutron-Gamma Radiation on Fiber Bragg Grating Sensors: A Review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, no. 11, pp. 3248-3256, 2010.
- [2] H. Henschel, S. K. Hoffgen, K. Krebber, J. Kuhnhenh 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. Fernandez, 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 γ -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] S. J. Mihailov, "Fiber Bragg Grating Sensors for Harsh Environments," *Sensors 2012*, vol. 12, no. 2, pp. 1898-1918, 2012.
- [8] IEC, "Optical fibres - Guidance for nuclear radiation tests," IEC/TR 62283, pp. 27-28, 2010.