광섬유 브래그 격자 센서의 고선량 방사선 효과

김종열* · 이남호* · 정현규* · 김영웅** · 한원택***

High Total Dose Radiation Effects on Fiber Bragg Grating Sensors

Jong-Yeol Kim* · Nam-Ho Lee* · Hyun-Kyu Jung* · Youngwoong Kim** · Won-Taek Han***

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

요 약

게르마늄이 도핑된 실리카 코어에 페이즈 마스크를 이용하여 격자를 새긴 광섬유 브래그 격자 센서를 총 선량 23 kGy의 감마선을 조사하여 방사선에 의한 브래그 파장의 변화를 측정하였고, 방사선 조사 후에는 어닐링 특성을 평가하였다. 패키징된 FBG 센서의 경우, 방사선 조사동안 최대 91 pm의 브래그 파장변화가 나타났다. 또한 동일한 조건에서 패키징된 광섬유 브래그 격자 센서가 패키징 되지 않은 센서보다 방사선 민감도가 2배 이상 높게 나타났다.

ABSTRACT

We have measured the radiation-induced Bragg wavelength shift (BWS) of fiber Bragg grating (FBG) which was inscribed in Ge-doped core silica using a phase mask during irradiation up to a dose of 23 kGy and annealing effects after the gamma-exposure. For packaged FBG sensors, we observed the maximum radiation-induced BWS of about 91 pm during irradiation. Packaged FBG sensors also show higher radiation sensitivity above nearly a factor of two than non-packaged type sensor in the same condition.

키워드

광섬유 브래그 격자, 감마선, 광섬유 센서, 방사선 영향

Key word

Fiber Bragg grating, gamma radiation, optical fiber sensor, radiation effects

* 정회원 : 한국원자력연구원(kimjr@kaeri.re.kr)
** 정회원 : 광주과학기술원 물리·광학과 박사과정
*** 정회원 : 광주과학기술원 정보통신공학부 정교수

접수일자 : 2013. 04. 09
심사완료일자 : 2013. 05. 09

I. 서 론

현재 광섬유 브래그 격자(FBG) 센서는 온도, 압력, 변형을 측정하기 위해 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 측정할 수 있는 격자의 개수를 증가시키기 위한 방법으로 파장분할방식과 시간분할방식을 응용한 브래그 격자 센서 어레이를 이용하여 대형 건축물(댐, 교량, 원전시설)의 구조 건전성 평가를 평가하는데 응용되기도 한다.

최근에는 유럽의 SCK·CEN, Fraunhofer-INT 등 기업과 연구소를 중심으로 FBG 센서를 원전시설과 우주환경에 적용하기위해서 다양한 연구가 진행되고 있다 [1][2][3]. 일반적으로 FBG 센서 제작을 위해서 사용되는 게르마늄과 붕소가 함유된 광섬유는 방사선 환경에 노출되면 광섬유 격자구조에 변화가 일어나며 그 현상은 이온화, 전자의 분리, 유리 구조 내에서의 도펀트(dopant) 분리, 수산화기 이온(OH-)의 형성으로 나타나고, 결국 컬러 센터(color center) 생성으로 인한 광신호의 감쇠가 증가한다.

FBG 센서는 광신호의 크기를 측정하는 것이 아니라 각 격자에서 반사되는 광의 브래그 파장 변화를 이용해서 물리적인 변화(온도, 압력, 변형률)를 측정하기 때문에 방사선에 의해서 감쇠가 일어나더라도 광신호를 수신할 수 있다면 파장 변화를 확인할 수 있다. 하지만 FBG 센서가 방사선 환경에 사용되면 브래그 파장의 이동 현상이 나타난다고 보고되고 있으며, 방사선에 의해서 파장 변화가 일어나면 센서 계측의 신뢰성이 떨어지게 된다[4][5].

본 논문에서 FBG를 이용한 온도 센서를 원전의 가혹한 환경에 적용 가능성을 평가하기위해서 방사선 조사에 따른 브래그 파장 변화(Bragg wavelength shift, BWS)와 어닐링 효과를 분석하였고, 센서의 패키징 형태에 따라서 BWS의 크기를 비교하여 방사선 민감도(radiation sensitivity)를 평가하였다.

II. 광섬유 브래그 격자 센서의 원리와 방사선 효과

그림 1. 광섬유 브래그 격자의 기본 구조
Fig. 1 The basic structure of FBG

그림 1은 FBG의 구조를 나타낸다. 광섬유 내에서 빛의 전파 원리는 굴절률이 높은 물질에서 낮은 물질로 빛이 진행될 때, 그 경계면에서 일정한 각도 내의 빛이 모두 반사되는 전반사의 원리에 있으며, 광섬유 코어 내부로 입사된 빛은 굴절률이 높은 코어와 굴절률이 낮은 클래딩의 경계면에서 반사되어 광섬유 코어부분을 따라 전파되게 된다. 이러한 광섬유의 주성분은 실리카 유리로 이루어져 있으며, 일반적으로 광섬유 코어에는 클래딩보다 굴절률을 높이기 위하여 보통 게르마늄이 첨가되는데, 이 물질이 실리카 유리에 안착하는 과정에서 구조 결함이 생긴다. 이 경우 광섬유 코어에 강한 UV 레이저를 조사하면, 게르마늄의 결합구조가 변형되면서 광섬유의 굴절률이 변화된다. 광섬유 브래그 격자 센서는 이러한 현상을 이용하여 광섬유 코어의 굴절률을 주기적으로 변화시킨 것을 말한다. 이 격자는 식 (1)의 브래그 조건을 만족하는 파장만을 반사하고, 그 외의 파장은 그대로 투과시키는 특성을 갖는다.

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

식 (1)에서의 λ_B 는 Bragg 파장, n_{eff} 는 유효 굴절률(effective refractive index), Λ 은 격자 사이의 간격(grating period)을 나타낸다. 식 (1)에 온도 변수(T)를 적용하면 식 (2)의 방정식을 얻을 수 있다.

$$\lambda_B(T) = \lambda_B(T_0) + \alpha_0(T - T_0) \quad (2)$$

$\lambda_B(T_0)$: 기준온도(T_0)에서의 Bragg 파장

α_0 : 온도 감도(temperature sensitivity)

일반적으로 $T=T_0$ 일 때 파장 1,550 nm에서 FBG의 온도 센서 감도($\alpha_0 = d\lambda/dT$)는 10 pm/°C 정도이다[6]. FBG 온도 센서를 방사선 환경에 적용하기 위해서는 방사선에 의해서 변화되는 $\lambda_B(T_0)$ 의 범위를 고려해야 하고, 온도 감도에 대한 방사선 의존성을 평가해야 한다. FBG 온도 센서의 방사선 영향에 대한 해외 선행 연구 자료를 보면 게르마늄이 함유된 일반적인 광섬유의 경우, 브래그 파장 이동($\Delta\lambda_B$)은 총선량 412 kGy에서 0.1 nm 정도로 높게 나타났으며 고선량 방사선에 의해서 센서 감도(α_0)가 변화되는 것이 관찰되었다. 브래그 파장이 0.1 nm 변화되는 것은 온도 측정 시 10 °C의 오차가 나타나는 것으로 상당한 오차범위를 가지고 있다[7].

따라서 방사선 민감도가 낮아질 수 있도록 FBG 제작 방법을 개선하거나 측정 시 방사선에 대한 브래그 파장 변화를 보상할 수 있는 방법이 요구되고 있다.

III. 실험 구성

3.1. 광섬유 브래그 격자 센서

실험을 위하여 국내에서 생산한 동일한 단일모드 광섬유로 제작된 5종류 FBG 센서를 준비하였다. FBG 센서는 격자가 잘 생길 수 있도록 수소 로딩 과정을 거친 후 UV Eximer 레이저를 이용하여 제작되었다. 3종류(FBG N1~N3)는 패키징 되지 않은 기본형태의 FBG 온도 센서이고, 2종류(FBG P1~P2)는 변형률 센서로 이용되는 패키징 된 FBG 센서이다. 아래 표 1은 FBG 센서 시료의 세부사양을 나타낸다. 각각의 FBG 센서는 브래그 파장을 다르게 제작하였으며, 반사율은 평균적으로 70 % 이상의 값을 보였다.

표 1. 광섬유 브래그 격자 센서의 세부사양
Table. 1 The Specification of FBG sensors

FBG sensor	λ_B [nm]	Fiber type	Reflectivity [%]	*FWHM [nm]
FBG N-1	1532.5	G-657 (Optomagic)	≥ 70	≤ 0.1
FBG N-2	1547.5			
FBG N-3	1562.1			
FBG P-1	1536.6			
FBG P-2	1543.0			

*FWHM: 반치대역폭(Full-Width Half-Maximum)

그림 2. 제작된 광섬유 브래그 격자 센서
Fig. 2 Manufactured prototype FBG sensors

그림 2는 실험에 사용된 FBG 센서의 실제 모습이다. 왼쪽은 스테인리스 스틸(SUS 304)와 에폭시로 패키징 처리된 변형률 FBG 센서이고, 오른쪽은 패키징 되지 않은 FBG 온도 센서이다.

3.2. 실험방법

방사선 조사에 의한 FBG 센서의 브래그 파장의 특성을 확인하기 위해서 사용된 방사선원은 첨단방사선연구소(정읍)의 Co-60 고준위 감마선 선원을 이용하였으며, 총 4시간 동안 총선량(total dose) 23 kGy의 방사선을 조사하였다. 처음 90분 동안은 2 kGy/h의 선량률(dose rate)로 조사하였고, 선량률을 조정하기 위해서 10분 동안의 어닐링 시간을 거친 후 나머지 150분 동안 8 kGy/hr의 선량률을 변화시켜서 재조사하였다. 측정 시 실내온도는 18 °C ~ 19.5 °C 범위였으며, 방사선 조사동안 최대 약 1.5 °C 정도 온도가 상승했다.

그림 3은 감마선 조사에 의한 FBG 센서의 BWS의 변화를 측정하기 위한 시스템 구성도이다. 방사선 시험 환경을 고려해서 온라인으로 측정할 수 있도록 시스템을 구축하였다. 5개의 FBG 센서는 조사대에 고정하여 동일한 선량(위치)에 설치하였고, 콘크리트 벽으로 차폐된 곳에서 접속손실을 최소화 하기 위해서 광섬유와 FBG 센서를 용착(splicing)하였다. 총선량과 선량률에 따라서 각각의 FBG 센서에 대한 브래그 파장의 변화와 광파워 감쇠(radiation induced attenuation, RIA)를 측정하였다. 측정장비는 FBG 센서의 고유 특성을 측정할 수 있도록 Optical Sensing Interrogator (OSI, sm-125) 장

비를 사용하였으며 이더넷으로 연결되어 측정된 데이터를 저장하는 DAQ 시스템으로 구성하였다. 매 5초 간격으로 측정하여 값을 저장하였으며 실내온도는 방사선 조사실 내부에 설치된 온도센서를 이용하여 측정하였다. 또한 방사선 조사실 외부의 제어실에 기준 센서(reference sensor)를 설치하여 측정의 정확성을 높였다.

그림 3. FBG 센서의 BWS 측정시스템 구성도
Fig. 3 Block diagram of Bragg wavelength shift measurement system in FBG sensors by gamma-ray irradiation

IV. 실험 결과

그림 4는 FBG 온도 센서(FBG N-1 ~ N-3)의 브래그 파장(λ_B)에 따른 BWS의 변화와 각각의 격자에서 반사되어 되돌아오는 광파워의 크기 변화를 나타낸다. 감마선에 노출되면서 동일한 3종류의 센서는 총선량이 증가할수록 최소 20 pm에서 최대 50 pm까지 브래그 파장의 변화가 증가하였으며 격자에서 반사되어 돌아온 신호의 광파워 크기도 감쇠가 일어났다. 제작된 FBG 온도 센서 감도는 파장 1,550 nm 부근에서 9.5 pm/℃의 값을 갖는다. 따라서 FBG 온도 센서의 브래그 파장은 방사선 조사 동안 실내 온도 상승(최대 1.5 ℃)과 감마선 조사로 인한 복합적인 영향으로 변화가 일어난 것으로 판단된다. 조사 종료 후 40분 동안 어닐링 효과를 관찰한 결과 어닐링 효과와 온도하락에 따라서 다시 원래의 브래그 파장으로 되돌아가려는 경향이 나타났고, BWS 변화가 큰 FBG 센서(FBG N-3)가 어닐링 효과가 더 크게 나타났다.

(a)

(b)

(c)

그림 4. FBG 온도 센서의 브래그 파장 변화; 총선량: 23 kGy, 상온 (a) FBG N-1(λ_B =1532.5 nm) (b) FBG N-2(λ_B =1547.5 nm) (c) FBG N-3(λ_B =1562.1 nm)
Fig. 4 The Bragg wavelength shift of FBG temperature sensors; Total dose: 23 kGy, Room temperature (a) FBG N-1(λ_B =1532.5 nm) (b) FBG N-2(λ_B =1547.5 nm) (c) FBG N-3(λ_B =1562.1 nm)

그림 5는 FBG 변형률 센서(FBG P-1 ~ P-2)의 B브래그 파장에 따른 BWS의 변화와 격자에서 반사되는 광파워의 크기 변화를 나타낸다. 변형률 센서도 온도 센서와 마찬가지로 총선량 증가에 따라서 BWS의 변화가 나타났으며 누적선량이 증가할수록 λ_B 가 최소 85 pm에서 최대 91 pm까지 변화했다. 격자에서 반사되어 돌아온 광파워 크기도 감마선에 조사에 의해서 감쇠가 발생하여 크기가 줄어들었으며, 감마선 조사 후 광파워와 BWS 변화가 회복되는 어닐링 효과가 나타났다.

(a)

(b)

그림 5. FBG 변형률 센서의 브래그 파장 변화;
총선량: 23 kGy, 상온 (a) FBG P-1($\lambda_B=1536.6$ nm)
(b) FBG P-2($\lambda_B=1543.0$ nm)

Fig. 5 The Bragg wavelength shift of FBG strain sensors;
Total dose: 23 kGy, Room temperature (a) FBG P-1
($\lambda_B=1536.6$ nm) (b) FBG P-2($\lambda_B=1543.0$ nm)

그림 6은 총선량에 따른 FBG 센서의 BWS 변화를 나타낸다. 조사선량이 증가할수록 BWS 변화량이 증가하였으며 선량률을 2 kGy/h에서 8 kGy/h로 선량률을 4배로 증가했을 때 최대 91 pm의 변화가 나타났다. 총선량 10 kGy 이후에는 BWS 변화가 줄어들면서 포화되는 특성이 나타났다.

그림 6. 조사선량에 따른 BWS 특성; 상온
Fig. 6 The property of the Bragg wavelength shift
for total dose; Room temperature

또한 패키징 된 변형률 센서가 패키징 되지 않은 온도 센서 보다 방사선에 훨씬 민감한 특성을 보였다. 이것은 크게 2가지 원인 때문에 나타난 현상으로 판단된다. 먼저 변형률 센서는 온도 센서와 동일한 FBG 센서가 내장되어 있지만 온도 센서보다는 더 많은 변수가 존재한다. 즉, 변형률 센서는 방사선에 의한 파장 변화($\Delta\lambda_R$), 온도에 의한 파장 변화($\Delta\lambda_T$), 외부로 둘러싸고 있는 SUS 304의 열팽창계수에 따른 파장변화($\Delta\lambda_Q$)가 복합적으로 작용하여 FBG 센서의 BWS 변화에 더 큰 영향을 줄 수 있다. 또한 변형률 센서 내부에 들어있는 에폭시의 경우 고분자 물질이기 때문에 고선량의 방사선에 노출되면서 취화(brittle) 현상이나 부풀림(swelling) 현상이 발생하여 내부 FBG 센서가 물리적인 응력을 받을 수 있으며, 그로인해 브래그 파장이 변화될 수 있다[8].

V. 결 론

본 논문에서는 FBG 온도센서와 FBG 변형률 센서를 대상으로 방사선 영향을 평가하였다. 조사선량 23 kGy에서 패키징 되지 않은 FBG 온도 센서는 최대 약 50 pm 정도의 BWS가 변화되었으며 패키징된 FBG 변형률 센서는 최대 약 91 pm의 변화를 보였다. 패키징된 FBG 센서는 패키징 재질에 따른 복합적인 영향 때문에 패키징 되지 않은 FBG 센서에 비해서 방사선 민감도가 2배 이상 높게 나타났다. 감마선 조사 종료 후에는 BWS 변화가 큰 FBG 센서가 원래의 브래그 파장으로 돌아가려는 어닐링 효과가 더 크게 나타나는 경향을 보였다.

또한 방사선에 의한 광섬유의 광파워 감쇠 특성과 브래그 파장의 변화는 서로 독립적으로 작용하였고, 동일한 선량에서 FBG의 브래그 파장의 변화는 광파워 감쇠와 비교하여 방사선 조사에 의한 영향이 크지 않았다. 위 실험결과를 통하여 원전에 FBG 센서를 적용하기 위해서는 방사선에 의한 BWS 변화를 최소화 할 수 있는 내방사화 기술이 요구되며, 추가적으로 센서 패키징 재질과 광섬유 코팅 재료에 대한 방사선 영향을 충분히 고려해야 될 것으로 판단된다.

issues”, Conference on Photonics for Space Environments VII, SPIE Proceedings, vol. 4134, pp. 253-260, 2000.

- [4] 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.
- [5] International electrotechnical commission, “Optical fibres - Guidance for nuclear radiation tests,” IEC/TR 62283, pp. 27-28, 2010.
- [6] A.I.Gusarov, F.Berghmans, O.Deparis, Y.Defosse, P.Megret, M.Decreton, M.Blondel, “High Total Dose Radiation Effects on Temperature Sensing Fiber Bragg Gratings,” IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, vol. 11, pp. 1159-1161, 1999.
- [7] P.Ferdinand, S.Magne, V.Marty, S.Rougeault, et al., “Optical fiber Bragg gratings sensors for structure monitoring within nuclear power plants,” in Proc. SPIE, Optical Fiber Sensing and Systems in Nuclear Environment, vol. 2425, pp. 11 - 20, 1994.
- [8] K.Krebber, H.Henschel, U.Weinand, “Fiber Bragg Gratings as high dose radiation sensors?”, Meas. Sci. Technol., vol. 17, pp. 1095-1102, 2006.

참고문헌

- [1] H.Henschel, S.K.Hoffgen, K.Krebber, J.Kuhnhehn 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.
- [2] 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.
- [3] A.I.Gusarov, D.B.Doyle, N.K.Karafolas, F.Berghmans, “Fibers-Bragg gratings as a candidate technology for satellite communication payloads: radiation effects

저자소개

김종열(Jong-Yeol Kim)

한국정보통신학회 논문지
제16권 제10호 참조

이남호(Nam-Ho Lee)

한국정보통신학회 논문지
제16권 제10호 참조

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

김영웅(Youngwoong Kim)

2008년 홍익대학교
전자전기공학부(공학사)
2008년-현재 광주과학기술원
물리·광학과
(석박사통합과정)

※관심분야: 내방사선 광섬유 센서, 비선형 광섬유,
광섬유 레이저

한원택(Won-Taek Han)

1979년 서울대학교
금속공학과(공학사)
1981년 서울대학교
금속공학과(공학석사)

1988년 Case Western University (U.S.A)
재료과학(공학박사)
1981년-1983년 동아대학교 전임강사
1988년-1991년 Center for Glass Science and
Technology, RPI (U.S.A) 전임연구원
1991년-1998년 한국생산기술연구원 수석연구원
1998년-2002년 광주과학기술원 부교수
2004년-2005년 Stanford University (U.S.A) 초빙교수
2006년-2008년 광주과학기술원
광과학기술학제학부 학부장
2008년-2012년 광주과학기술원 기획처장
2002년-현재 광주과학기술원 교수
※관심분야: 광통신용 특수 광섬유, 광섬유 센서,
비선형 광섬유, 광 증폭기, 광섬유 레이저, 광학 유리