
광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 국내외 상용 단일모드 광섬유의 감마선 영향 연구

김종열* · 이남호**

A Study of Gamma-ray Irradiation Effects on Commercially Available Single-mode Optical
Fiber using Fiber Bragg Grating Sensor Systems

Jong-yeol Kim* · Nam-ho Lee**

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

요 약

본 논문에서는 Ge가 함유된 일반 단일모드 광섬유의 감마선 유입손실을 측정하였다. 방사선 선원은 Co^{60} 감마선 선원을 이용하였으며, 총 4시간동안 0.5 kGy/hr, 2 kGy/hr, 8 kGy/hr의 선량률로 조사하였다. 그 결과 감마선 조사에 의한 단일모드 광섬유의 전송손실이 뚜렷하게 나타났으며, 동일 누적선량에서 선량률이 클수록 전송손실이 증가하는 선량률 효과가 나타났다. 또한 감마선 조사 종료 후 광섬유의 전송손실이 클수록 유입손실의 회복률이 증가하는 어닐링 특성을 보였다. 본 실험결과는 향후 광섬유의 내방사화 연구의 기초자료로 활용할 것이다.

ABSTRACT

In this study, Co^{60} gamma-ray induced loss on Ge-doped single mode (SM) fiber has been measured. Gamma-ray is irradiated for 4 hours at the dose rate of 0.5 kGy/hr, 2 kGy/hr, 8 kGy/hr. Consequently, gamma-ray induced loss based on radiation effects in Ge-doped SM fiber occur significantly. Furthermore, dose rate effect was observed, that dose rate using the same total dose increased higher, then optical fiber loss increased more. Also annealing effect was observed, that the loss after irradiation, increased higher, then the recovery rate of loss was increased. This results are foreseen to be base data in the future radiation-hardened optical fiber study.

키워드

단일모드 광섬유, 방사선 유입 손실, 선량률 효과, 어닐링 효과, 내방사선 광섬유

Key word

Single-mode optical fiber, Radiation induced loss, Dose rate effect, Annealing effect, Radiation-hardened optical fiber

* 정회원 : 한국원자력연구원(kimjr@kaeri.re.kr)

접수일자 : 2012. 08. 08

** 정회원 : 한국원자력연구원(교신저자)

심사완료일자 : 2012. 08. 22

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2012.16.10.2287>

©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.

I. 서 론

광섬유를 이용한 신호 전송 기술은 저손실, 광대역특성, 소형, 경량, 내간섭성, 내환경성 등의 장점을 가지고 있기 때문에 통신 시스템, 원자력시설의 제어시스템, 군사시설, 광섬유 센서 방사선 조사시설에서 이용되고 있다[1]. 특히, 광섬유 센서용으로 이용할 경우 현장 설치 후 별도 전원공급이 필요 없는 우수한 적용성과 방사선, 온도, 압력, 유량레벨 등의 다양한 측정시스템에 사용할 수 있는 장점이 있기 때문에 원전과 같은 극한환경에서 안전성과 신뢰성을 높일 수 있다[2].

하지만, 광섬유가 방사선에 노출되면 빛이 진행되는 광섬유 코어 내에 컬러 센터(color center)가 형성되어 광 에너지를 흡수하는 결합부분이 생성되고, 이는 광섬유의 전송손실을 초래하게 된다. 원전의 원자로 격납용기(containment) 지역에서 연료봉 주변은 선량률은 10^3 Gy/hr이며, 사고 초기단계에는 10^4 Gy/hr 이상의 값을 갖는다[3][4]. 이러한 극한 환경에서 광섬유의 전송손실은 수십부터 수천 dB/km로 나타난다. 따라서 방사선 환경에서 광섬유를 응용하기 위해서는 광섬유의 방사선 효과에 관한 연구와 방사선에 견딜 수 있는 내방사선 광섬유 개발이 필요하다. 미국, 유럽, 일본 등지에서는 이미 내방사선 광섬유가 개발되어 있으며 국내에서는 아직 연구와 개발이 미비한 실정이다[5][6].

본 논문에서는 고준위 방사선 환경에서 적용 가능한 광섬유 센서 개발의 기초연구를 위해서 국내외에서 생산되고 있는 상용 단일모드 광섬유 2종류에 대하여 방사선에 의한 선량률 효과와 어닐링 특성을 실험하고 분석하였다.

II. 광섬유의 방사선 영향과 광손실 특성

이온화 방사선이 광섬유에 미치는 가장 큰 영향은 광 신호의 감쇠(attenuation)를 증가시키는 것이다. 이 메커니즘은 컬러 센터 형성 모델을 사용하여 단순화시킬 수 있다.

순석영 코어 광섬유에 감마선을 조사하면 여러 파장 영역에서 방사선 조사에 의한 광 신호의 전송손실이 일어난다. 이와 같은 광전송손실 증가의 원인은 ESR(Electron Spin Resonance)에 의한 측정에 의하면, 파장

600nm이하의 단파장영역에서의 E color center는 석영 중에 극히 근소하게 존재하는 산소결핍형의 결합(-Si-Si-)이 방사선 조사에 의하여 절단되어 생기는 실리콘 라디칼(Si·)에 기인하며 파장영역 600nm 부근에서의 전송손실증가는 석영 중에 미량 존재하는 산소 과잉형 결합(-Si-O-O-Si-)이 방사선 조사로 절단되어 생기는 실리콘옥사이드 라디칼(SiO·) 때문이다. 이들 석영 중에 이미 존재하는 결합, 즉 -Si-Si-나 -Si-O-Si- 결합을 전구체(precursor)라고 하며, 조사에 의하여 이들 전구체는 컬러 센터가 된다. 이밖에 일그러진 -Si-O-Si- 결합도 조사에 의하여 절단되며, 상기한 컬러 센터가 된다. 또 Ge를 첨가한 섬유나 불순물을 함유하는 섬유에서는 이들 원소와 조사결합이 결부되어 복합결합으로 안정된 컬러 센터가 된다.

광섬유의 모재(preform) 제조 시 그 분자물질은 고정되며 광섬유가 제조된 후에 그 분자구조는 굳어진다. 방사선이 광섬유에 흡수되면 광섬유 격자구조에 변화가 일어나며 그 현상은 이온화, 전자의 분리, 유리 구조 내에서의 도펀트(dopant)의 분리, 그리고 자유수소로부터 OH- 이온의 형성 등으로 나타난다. 각각의 구조 변화는 특정한 파장 영역의 빛을 흡수할 수 있는데 주로 자외선 또는 가시광선 스펙트럼 부분이다. 광섬유는 무정형 구조를 갖는 대표적인 물질이기 때문에 구조가 복잡하고 일정하지 않다. 구조가 복잡하면 다양한 형태의 결합 에너지 준위가 존재하고 손실은 여러 파장 대역에서 나타날 수 있다.

순수 실리카 코어에 게르마늄이 함유된 단일모드 광섬유의 경우 빛의 파장에 따른 광손실 특성은 파장 0.95, 1.25, 1.39 μm 에서 광손실 피크(peak)를 보이며 파장이 0.85, 1.3, 1.6 μm 에서 비교적 적게 나타난다. Rayleigh 산란은 전자기파와 구성물질의 원자 또는 분자와의 간섭에 의하여 발생하며 주로 파장 크기보다 작은 범위 내에서의 농도나 밀도변화에 기인하며 파장이 증가함에 따라 Rayleigh 산란에 의한 광손실은 감소한다. 그 외에도 광섬유 내에서의 기본적 광 손실로 구성원자내의 전자적 흥분 상태 야기에 의한 자외선 흡수(ultraviolet absorption)과 구성원자간의 진동 상태 야기에 의한 적외선 흡수(infrared absorption)가 있다. 가시광선 혹은 근적외선에서는 자외선 흡수가 우세하고 파장이 1.5 μm 가 넘으면 적외선 흡수가 우세해지며 1~1.6 μm 에서는 흡수에 의한 손실이 비교적 작다[7].

방사선 영향으로 발생한 광섬유의 손실량 증가 (Radiation induced loss, RIL)는 다음식으로 계산된다.

$$RIL = (P_a - P_b) / (L - 1) \text{ [dB/km]} \quad (1)$$

RIL: 방사선에 의한 전송과위 변화치 [dB/km]

P_a : 방사선 조사 전에 광과위 출력 [dBm]

P_b : 방사선 조사 후에 광과위 출력 [dBm]

L: 광섬유의 총 길이 [km]

l: 방사선 조사가 되지 않은 광섬유 길이 [km]

III. 실험 구성 및 측정 방법

실험에 사용된 상용 광섬유는 두 종류(국내: O, 국외: C)로 표 1은 실험샘플의 종류, 제조공정, 구조 등을 나타낸다. 광섬유 샘플은 벤딩 손실을 최소화 하기위해서 지름 5cm의 직경으로 50m 길이를 원형으로 감아서 방사선에 노출시켰다. 측정 시 온도는 18~19.5 °C 범위였으며 시험에 사용된 방사선 선원은 Co⁶⁰ 감마선원으로, 총 4시간동안 각각 0.5 kGy/hr, 2 kGy/hr, 8 kGy/hr의 선량률로 조사하였다. 그림 1은 감마선 선원과과의 거리에 따른 선량률을 나타낸다. 그림 2는 감마선 조사에 따른 광섬유의 광손실을 측정하기 위한 시스템 구성도이다.

방사선 시험 환경을 고려해서 온라인으로 측정할 수 있도록 시스템을 구축하였고, Bragg 파장이 서로 다른 광섬유 브래그 격자 센서를 이용하여 선량률에 따른 광섬유 샘플의 전송손실을 측정하였다. 측정의 정확성을 높이기 위해서 감마선 조사실 외부에 기준센서(R1~R4)를 설치하였고, 실시간으로 기준값의 변화를 모니터링 하였다.

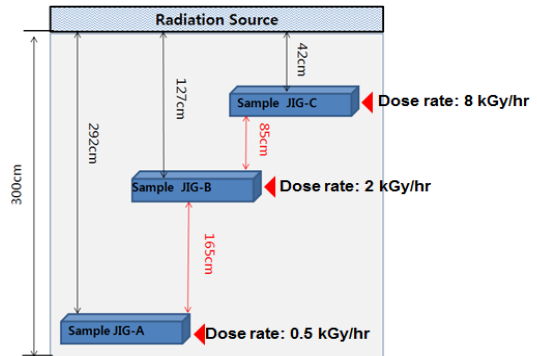


그림 1. 감마선 선원의 거리에 따른 선량률
Fig. 1 Dose rate on the distance of γ -ray source

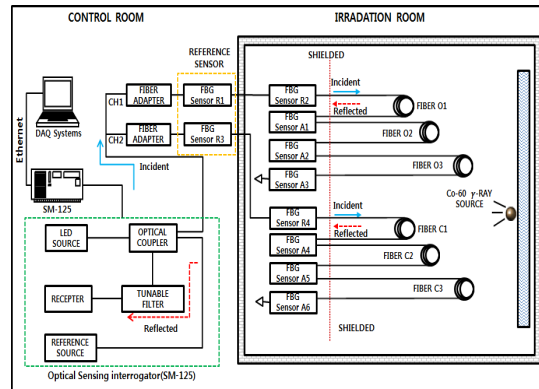


그림 2. 광섬유의 감마선 유입손실 측정시스템 구성도

Fig. 2 Experimental setup of radiation-induced loss measurement system in optical fibers by γ -ray irradiation

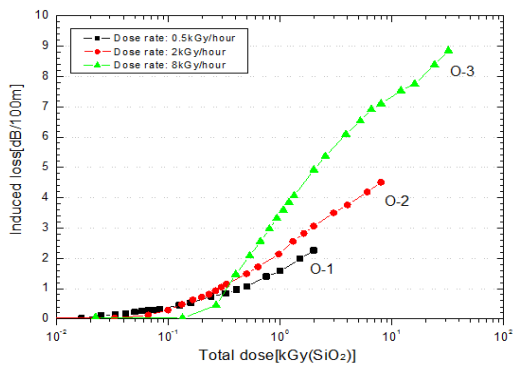
광과위의 변화는 OSI장비(SM-125)와 Ethernet으로 연결된 DAQ 시스템을 통하여 5초 간격으로 측정하여 저장하였다.

표 1. 광섬유 샘플 제원
Table. 1 Characteristics of optical fibers

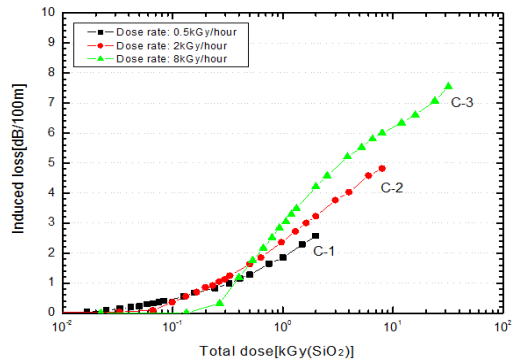
종류	제조공정	코어 / 클래딩 지름(um)	코어 도펀트	클래딩 도펀트	코팅 재질
O	VAD	8.6±0.4 / 125.0±0.7	Ge	none	Dual layers of UV-cured acrylate
C	OVD	9.2±0.4 / 125.0±0.7	Ge	none	Dual layers of UV-cured acrylate(CPC)

IV. 실험 결과

그림 3은 감마선 조사 선량률에 의한 전송손실증가를 나타낸다. 두 종류의 광섬유는 동일 누적선량에서 선량률이 증가할수록 전송손실이 커지는 선량률 효과가 나타났다. 하지만, 누적선량 약 500 Gy 이하에서는 선량률 효과가 반대로 나타나는 독특한 특성을 보였다.



(a)



(b)

그림 3. 방사선 유입손실의 선량률 의존성; 온도=18°C
(a) Fiber O (b) Fiber C
Fig. 3 Dose rate dependence of the radiation-induced loss; T=18°C (a) Fiber O (b) Fiber C

이것은 동일 누적선량에서 고선량률(high dose rate)으로 짧은 시간 동안에 조사된 것보다 저선량률(low dose rate)로 긴 시간동안 조사된 것이 광섬유 손상에 더 큰 영향을 미쳤기 때문이며, 이로 인해 누적선량 500 Gy

이하에서는 낮은 선량률에서 더 큰 전송손실이 나타났다[8].

그림 4는 동일 누적선량 2 kGy에서 선량률에 의한 광섬유의 손실특성을 나타낸다. 선량률 8 kGy 이상의 고준위 환경에서는 광섬유 C가 좀 더 좋은 내방사선 특성을 보였으며 광섬유의 종류에 따른 전송손실 차이는 크지 않았다.

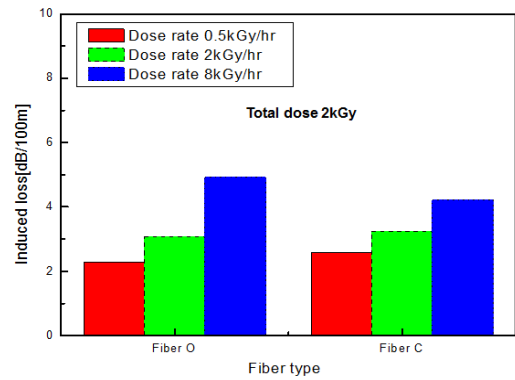
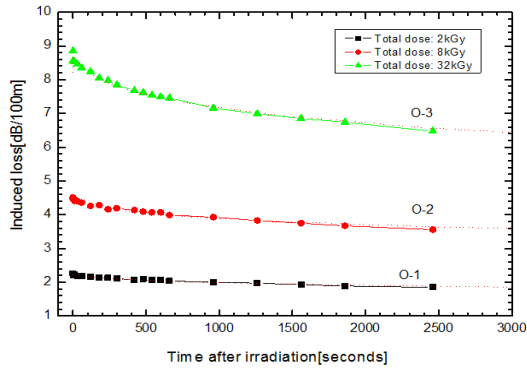


그림 4. 동일 누적선량에서의 선량률과 광섬유 종류에 따른 전송손실 비교

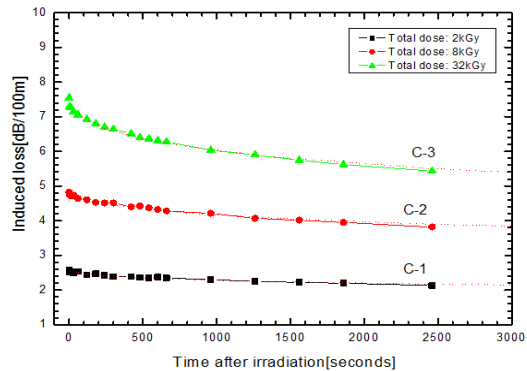
Fig. 4 Comparison of radiation-induced loss due to dose rate and fiber type at the same dose

그림 5는 감마선 조사 후 어닐링 현상으로 인한 광섬유의 전송손실 회복(recovery) 특성을 나타낸다. 회복은 방사선 조사로 인한 손실 발생 후에 방사선에서 분리시켰을 때 시간의 경과에 따라 유리 분자나 원자 구조의 쿨러 센터가 줄어들면서 전송손실이 줄어드는 현상이다. 실험을 통해서 감마선 조사로 인한 유입 손실이 큰 광섬유일수록 손실 회복이 크게 나타나는 어닐링 특성이 나타났다.

감마선 조사 후 수십 시간 뒤에는 손실 회복량이 포화되어 거의 증가하지 않았으며 광섬유 종류에 따른 손실회복 차이는 크지 않았다. 이것은 실험에 사용된 2종류의 광섬유가 제조공정은 틀리지만 코어/클래딩의 구조와 재질, 코팅 재질 등이 거의 동일하기 때문에 방사선의 영향도 비슷한 양상이 나타난 것으로 판단된다.



(a)



(b)

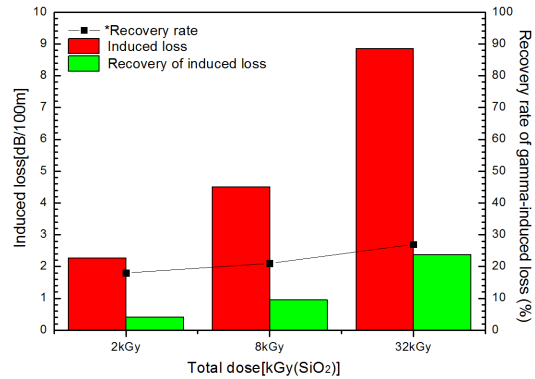
그림 5. 감마선 조사 후 누적선량에 따른 전송손실 회복 특성; 온도=18 °C (a) Fiber O (b) Fiber C
Fig. 5 Loss annealing for three different dose after the end of irradiation; T=18 °C (a) Fiber O (b) Fiber C

그림 6은 감마선 조사에 의한 전송손실과 감마선 조사 후에 손실회복의 관계를 나타낸 것이다. 광섬유의 회복률(recovery rate)은 감마선에 의해서 발생한 최대 손실 값과 그 손실값에서 어닐링 현상 후 회복된 값의 비를 백분율로 나타낸 것이며 아래 식 (2)와 같다.

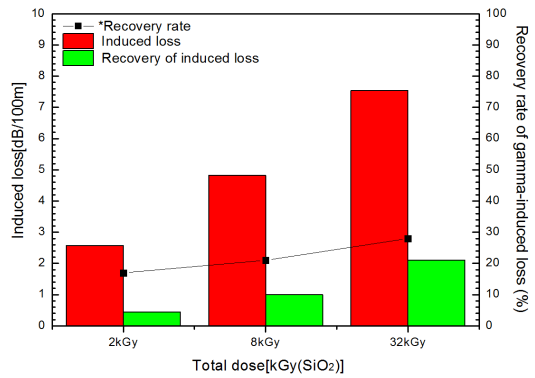
$$*회복률(\%) = \frac{\text{감마선에 의한 유입손실 회복량}}{\text{조사 종료 직후 최대 손실량}} \times 100 \quad (2)$$

광섬유의 회복률은 그림 6과 같이 누적선량(전송손실)이 클수록 증가한다. 즉, 감마선 조사에 의한 커플러 센터가 많이 생성될수록 회복되는 값도 증가한다. 감마선 조사 후 40분 동안 회복률은 누적선량 32 kGy일 경

우 최대 약 27~28 % 정도 회복되었고, 누적선량 2 kGy 경우와 비교해서 감마선 유입손실이 약 10배 이상 회복되었다.



(a)



(b)

그림 6. 감마선 조사 후 누적선량에 따른 방사선 유입손실 회복률 (a) Fiber O (b) Fiber C
Fig. 6 Recovery rate of radiation-induced loss for three different dose after the end of irradiation (a) Fiber O (b) Fiber C

V. 결 론

본 논문에서는 광섬유 브래그 격자 센서를 이용하여 국내외에서 생산되고 있는 Ge가 첨가된 2종류의 상용 단일모드 광섬유에 대한 감마선 조사 실험을 수행하였다. 실험을 통하여 광섬유의 감마선 유입손실 특성, 선량률 효과, 그리고 어닐링 특성을 알아보았다.

두 종류의 단일모드 광섬유는 조사선량이 4배 증가할 수록 전송손실은 1.5~2배 정도 증가했고, 최대 8.85 dB/100m의 전송손실이 발생했다. 누적선량 8 kGy 이상의 고준위 환경에서는 광섬유 C가 광섬유 O 보다 손실 대비 약 15 % 뛰어난 내방사선 특성을 보였다.

또한 동일 누적선량에서 선량률이 클수록 전송손실이 증가하는 선량률 효과가 뚜렷하게 나타났으며, 500 Gy 이하의 초기 누적선량에서는 짧은 조사시간(고 선량률)보다 긴 시간(저 선량률)으로 조사된 것이 전송손실이 더 크게 나타났다.

감마선 조사 후, 광섬유의 전송손실이 클수록 손실 회복이 증가하는 어닐링 특성이 나타났으며 40분 동안 광섬유의 손실 회복률은 방사선 유입 손실 대비 약 27~28 % 정도였다. 본 시험결과는 향후 내방사선 광섬유 연구의 기초자료로 활용할 계획이다.

감사의 글

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

참고문헌

[1] 김웅기 외, “감마선 조사에 의한 광섬유의 전송 손실 특성 연구”, 대한전자공학회논문지, 제27권 4호, pp. 484-644, 1990. 4.

[2] W. K. Kim, Y. B. Lee, et. al., “Application technology for optical fiber in nuclear facilities(I)”, KAERI/RR-615/pp. 218-263, 1987.

[3] IEC, “Optical fibres - Guidance for nuclear radiation tests”, IEC/TR 62283, pp. 9-18, 2010.

[4] IEEE Std 323TM-1980: IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations.

[5] H. Henschel, O. Köhn, U. Weinand, “A New Radiation Hard Optical Fiber for High-Dose Values”, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL.

49, NO. 3, JUNE 2002.

[6] Kazuhiko Aikawa, Katsuaki Izoe, et al., “Radiation-Resistant Single-Mode Optical Fibers”, Fujikura Technical Review, 2008.

[7] 김교선, “광섬유 제조기술”, 한국화학공학회, CHEMICAL INDUSTRY and TECHNOLOGY, Vol. 11, No. 5, pp. 357-365, 1993.

[8] A. Maio, M. David, A. Gomes David, “Dose Rate Effects in WLS Fibers”, Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 54B, pp. 222-228, 1997.

저자소개



김종열(Jong-yeol Kim)

2009년 한양대학교
전자전기공학부(공학사)
2011년 한양대학교
전기공학과(공학석사)

2011년-현재 한국원자력연구원 연구원

※관심분야: 내방사선 광섬유, 광섬유 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