
국내외 상용 단일모드 광섬유의 감마선 영향 분석 연구

김종열* · 이남호*

*한국원자력연구원(KAERI)

A Study of Gamma-ray Irradiation Effects on Commercially Available Single-mode Optical Fiber

Jong-yeol Kim* · Nam-ho Lee*

*Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI)

E-mail : kimjr@kaeri.re.kr

요 약

광섬유는 신호를 전달하는 통신용 섬유, 물체를 관찰하기 위한 이미지 섬유, 각종 센서용 광섬유로서 원자력분야에서 사용된다. 특히 센서용 섬유로서 라만 산란광을 이용한 온도감지 섬유와 광섬유 브래그 격자를 이용한 온도/스트레인 섬유, 광자기효과를 이용한 광회전센서 섬유 등은 이미 실용화되어 있다. 그러나 광섬유에 방사선을 조사하면 색중심(color center)이 생성되어 광의 투과성이 크게 저하되고, 방사선 환경에서 적용의 제한이 있다.

본 논문에서는 고준위 방사선환경에 대한 광섬유 센서의 적용을 위한 연구로서 Ge가 함유된 일반 단일모드 광섬유에 대한 감마선 조사에 따른 전송손실 특성 평가를 수행하였다. 시험에 사용된 방사선원은 Co^{60} 감마선원으로, 총 4시간동안 0.5kGy/hr, 2kGy/hr, 8kGy/hr의 선량률(dose rate)로 조사하였다. 그 결과 감마선조사에 의한 단일모드 광섬유의 전송손실이 뚜렷하게 나타났고, 동일 누적선량에서 선량률이 클수록 전송손실이 증가하는 선량률 효과와 조사 후 광섬유의 전송손실이 클수록 손실 회복율이 증가하는 열화(annealing) 특성을 보였다. 본 시험결과는 향후 광섬유의 내방사화 연구의 기초자료로 활용할 계획이다.

ABSTRACT

Optical fibers are going to be used for telecommunication, image fibers, sensors under irradiation in nuclear power plants and various irradiation facilities. Especially, Temperature detection sensors using Raman light scattering, temperature or strain sensors using fiber gratings, magnet-optical sensors using photo-magnetic effect, are already commercialized. However, When fibers are exposed to ionizing radiation, color centers are formed in fibers which reduces their light transmission, and it is limited in applying under radiation environments.

In this study, Co^{60} gamma-ray induced optical attenuation on Ge-doped single mode(SM) fiber has been measured. Gamma-ray is irradiated for 4hours at the dose rate of 0.5kGy/hr, 2kGy/hr, 8kGy/hr. Consequently, gamma-ray induced loss based on radiation effects in Ge-doped SM fiber occur precisely. Furthermore, dose rate effect that the higher dose rate in the same total dose, the more increase loss of optical fiber and annealing effect that the higher the loss after irradiation, the more increase the recovery rate of the loss are observed in the fiber. This results plan to make use of bases in the study of the radiation-hardened optical fiber.

키워드

단일모드 광섬유, 전송손실, 선량률 효과, 열화 효과, 내방사성 광섬유

1. 서론

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

하지만, 광섬유가 방사선에 노출되면 빛이 진행되는 광섬유 코어 내에 색중심이 형성되어 광 에너지를 흡수하는 결함부분이 생성되고, 이는 광섬유의 전송손실을 초래하게 된다. 원전의 원자로 격납용기(containment) 지역에서 연료봉 주변은 선량률은 10^3Gy/hr 이며, 사고 초기단계에는 10^4Gy/hr 이상의 값을 갖는다. [3][4] 이러한 극한 환경에서 광섬유의 전송손실은 수십부터 수천 dB/km의 전송손실이 발생한다. 따라서 방사선 환경에서 광섬유를 응용하기 위해서는 광섬유의 방사선 효과에 관한 연구와 방사선에 견딜 수 있는 내방사성 광섬유 개발이 필요하다. 미국, 일본 등지에서는 이미 내방사성 광섬유가 개발되어 있으나 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 열화 특성을 실험하고 분석하였다.

II. 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 지름 5cm의 직경으로 50m를 원형으로 감아서 방사선에 노출시켰다. 측정시 온도는 $18^\circ\text{C} \sim 19.5^\circ\text{C}$ 범위였으며 시험에 사용된 방사선원은 Co^{60} 감마선원으로, 총 4 시간동안 0.5kGy/hr , 2kGy/hr , 8kGy/hr 의 선량률로 조사하였다. 그림 2는 감마선 선원과의 거리에 따른 선량률을 나타낸다.

표1. 광섬유의 제원

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

*Vapour Phase Axial Deposition

**Outside Vapour Phase Deposition

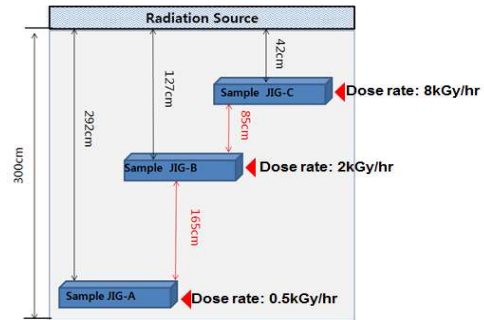


그림1. 감마선 선원과의 거리에 따른 선량률

광섬유의 전송손실을 측정하기 위해서 Micron optics사의 Optical sensing interrogator(type sm-125) 장비를 이용하여 광과위를 측정하였다. 전송손실은 파장(1510nm~1590nm)에 따라서 고유한 반사특성을 갖는 FBG(fiber bragg grating) 센서(A1~A6)를 광섬유 샘플에 접속하여 방사선에 의해서 전송손실 발생 시 그 파장의 세기변화를 측정하는 측정방식을 이용하였다. 그림 2는 감마선 조사에 따른 광섬유의 광손실을 측정하기 위한 시스템 구성도이다. 방사선 시험 환경을 고려해서 온라인으로 측정할 수 있도록 시스템을 구축하였고, 위에서 언급한 FBG 센서를 이용하여 선량률에 따른 각각의 광섬유 샘플의 전송손실을 동시에 측정하였다. 측정의 정확성을 높이기 위해서 감마선 조사실 외부에 기준센서(R1~R4)를 설치하였고, 실시간으로 기준값의 변화를 모니터링 하였다. 광과위의 변화는 sm-125장비와 Ethernet으로 연결된 DAQ 시스템을 통하여 5초 간격으로 측정하여 저장하였다.

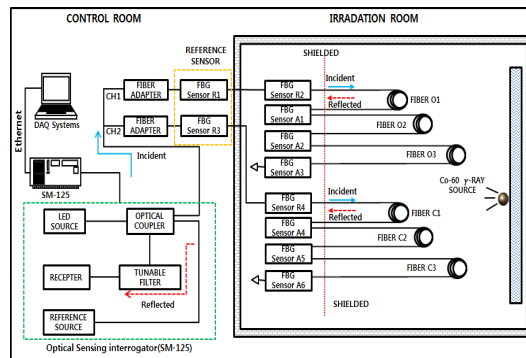
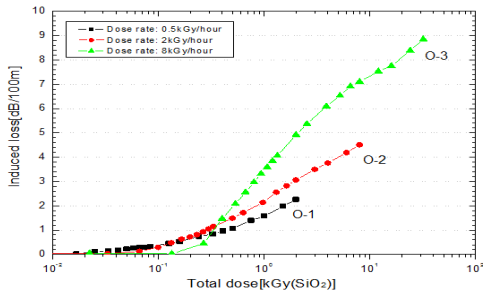
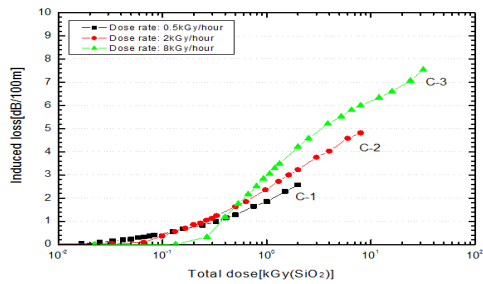


그림 2. 감마선 조사에 따른 광섬유의 광손실 측정시스템 구성도

III. 실험결과



a. Fiber O



b. Fiber C

그림 3. 감마선 조사 선량률에 의한 전송손실 증가 특성; 온도=18℃

그림 3은 감마선 조사 선량률에 의한 전송손실 증가를 나타낸다. 두 종류의 광섬유는 동일 누적 선량에서 선량률이 증가할수록 전송손실이 커지는 선량률 효과가 나타났다. 하지만, 누적선량 약 500Gy 이하에서는 선량률 효과가 반대로 나타나는 독특한 특성을 보였다. 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 500Gy 이하에서는 낮은 선량률에서 더 큰 전송손실이 나타났다. [7] 그림 4는 동일 누적선량 2kGy에서 선량률에 의한 광섬유의 손실특성을 나타낸다. 선량률 8kGy이상의 고준위 환경에서는 광섬유 C가 좀 더 좋은 내방사선 특성을 보였으며 광섬유의 종류에 따른 전송손실 차이는 크지 않았다.

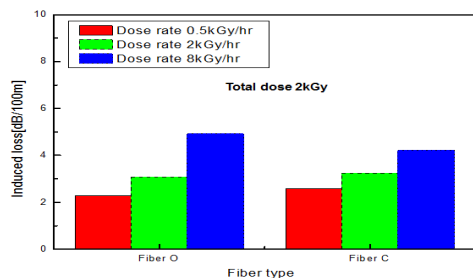
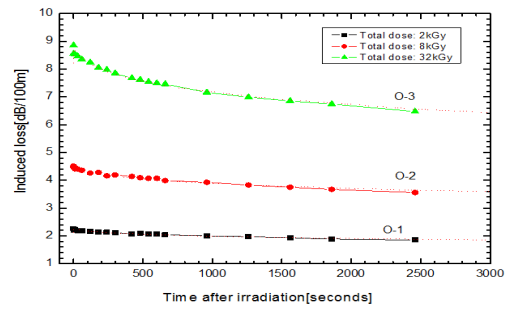
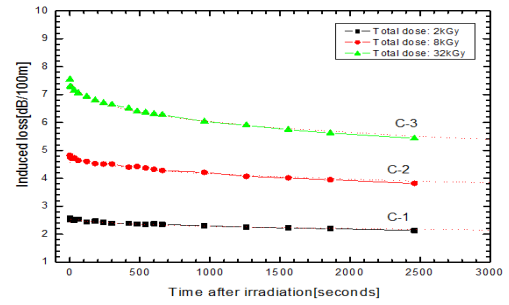


그림 4. 선량률과 광섬유 종류에 따른 손실 특성 비교



a. Fiber O



b. Fiber C

그림 5. 감마선 조사 후 선량률에 의한 전송손실 회복 특성; 온도=18℃

그림 5는 감마선 조사 후 열화현상으로 인한 광섬유의 전송손실 회복(recovery) 특성을 나타낸다. 회복은 방사선 조사로 인한 손실발생 후에 방사선에서 분리시켰을 때 시간의 경과에 따라 유리 분자나 원자 구조의 색중심이 줄어들면서 손실이 줄어드는 현상이다. 실험을 통해서 감마선 조사로 인한 손실이 큰 광섬유일수록 회복손실이 크게 나타나는 열화(annealing) 특성을 나타냈고, 조사 후 수십시간 뒤에는 손실 회복량이 포화되어 거의 증가하지 않았으며 광섬유 종류에 따른 손실회복 차이는 크지 않았다.

그림 6은 감마선 조사에 의한 전송손실과 감마선 조사 후에 손실회복의 관계를 나타낸 것이다. 광섬유의 회복율(recovery rate)은 감마선에 의해서 발생한 최대 손실값과 그 손실값에서 열화현상 후 회복된 값의 비를 백분율로 나타낸 것이며 아래 식 (1)과 같다.

$$* \text{회복률}(\%) = \frac{\text{감마선에 의한 전송손실 회복량}}{\text{감마선에 의한 최대 손실량}} \times 100 \quad (1)$$

광섬유의 회복율은 그림 6과 같이 누적선량(전송손실)이 클수록 증가한다. 즉, 감마선 조사에 의한 색중심이 많이 생성될수록 회복되는 값도 증가한다. 감마선 조사 후 40분동안 회복율은 누적선량 32kGy일 경우 최대 약 27%~28%정도 회복되었고, 누적선량 2kGy일 경우와 비교해서 약 10배의 회복률을 보였다.

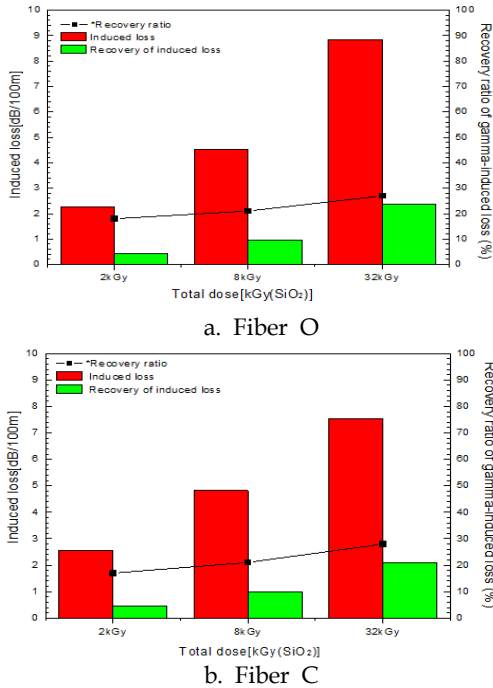


그림 6. 감마선 조사 후 누적선량에 의한 손실 회복 특성

IV. 결론

본 논문에서는 국내외에서 생산되고 있는 두 종류의 상용 단일모드 광섬유에 대한 감마선 조사 실험을 통하여 광섬유의 전송손실 특성, 선량률 효과, 그리고 열화 특성을 알아보았다.

두 종류의 단일모드 광섬유는 조사선량이 4배 증가할수록 전송손실은 1.5배~2배정도 증가했고, 최대 8.85dB/100m의 전송손실이 발생했다. 누적선량 8kGy 이상의 고준위 환경에서는 광섬유 C가 손실대비 약 15% 뛰어난 내방사선 특성을 보였다.

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

감마선 조사 후, 광섬유의 전송손실이 클수록 손실회복이 증가하는 열화 특성이 나타났으며 회복률은 최대 약 27%~28%정도였다.

본 시험결과는 향후 광섬유의 내방사화 연구의 기초자료로 활용할 계획이다.

본 연구는 교육과학기술부 지원에 의한 원자력기술개발 사업의 일환으로 한국원자력연구원(2011-0031840) 주관으로 수행된 연구과제임.

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, J.m. Lee, et. al., “Application technology for optical fiber in nuclear facilities (I)”, KAERI/RR-615/pp. 218-263, 1987.
- [3] International electrotechnical commission, “Optical fibres- Guidance for nuclear radiation tests”, IEC/TR 62283, 2010
- [4] IEEE Std 323™-1980: IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations (standard describing the reactor environments in different situations and the equipment qualification levels).
- [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 Izo, et al., “Radiation-Resistant Single-Mode Optical Fibers”, Fujikura Technical Review, 2008
- [7] A. Maio, M. David, A. Gomes David, “DOSE RATE EFFECTS IN WLS FIBERS”, Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 54B, pp. 222-228, 1997