

광섬유 기반 방사선 선량계

1. 서론

일반적으로 방사능 (radioactivity)이란 불안정한 원소의 원자핵이 스스로 붕괴하면서 내부로부터 방사선을 방출하는데 이 방사선의 세기를 말하며 자발적으로 붕괴할 수 있는 원자핵을 함유한 물질을 방사성 물질이라고 한다. 이런 원자핵의 변화 중에 발생하는 물질을 방사선 (radioactive ray)이라고 하며 방사선은 원자핵 붕괴 외에 전기를 띤 원자, 전자 등이 빠르게 움직임을 바꿀 때도 생긴다. 방사선은 1895년 뢰트겐이 X-선을 발견한 이래 우리 생활에 밀접히 관련되어 많은 산업 분야에 쓰이고 있다. 원자력 발전, 질병의 진단과 치료, 그리고 건설, 반도체 등의 산업 현장 및 화학, 생물학 등의 연구 분야에서 응용이 증가되고 있으며 이러한 응용 분야의 증

를 이용한 다양한 방사선 선량계가 연구 개발되고 있다. 방사선 선량계에는 방사선이 기체를 지날 때 기체를 이온화시키는 전리작용을 이용한 전리 이온함 (ionization chamber), 비례계수관 (proportional counter), 가이거 계수관 (Geiger counter), 반도체 검출기 (semiconductor diode detector), 방사선의 분자해리작용을 이용한 화학선량계 (Fe 선량계, Ce 선량계), 방사선에 의해 발생하는 섬광을 이용한 섬광 계수관 (scintillation counter), 열형광 선량계 (Thermoluminescence Dosimeter)와 유리 선량계 등이 있다[1]. 하지만 이러한 선량계는 개인선량측정은 가능하지만 방사선 치료시설에서 대면적 선량측정이 어려우며 전자기적 간섭에 영향을 크게 받기 때문에 발전소와 같은 환경에서는 활용하기 어려운 단점이 있다.

특집 1 ■ 2017 OFS-25 국내유치 기념

광섬유 기반 방사선 선량계

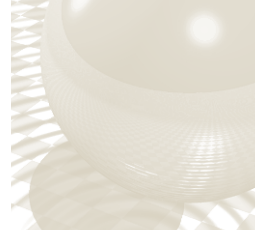
김현주, 한영근*

가에 따라 방사선작업 종사자 및 일반인의 방사선 피폭을 막기 위한 고정밀 방사선량 측정 기술 연구의 필요성이 대두되고 있다.

방사선은 사람의 감각으로는 알 수 없으며 특수한 장비를 이용해야만 방사선이 있다는 것을 파악할 수 있다. 방사선을 효과적으로 검출하기 위해 많은 물리, 화학 선량계에 대한 연구가 진행되고 있으며 방사선이 물질과 상호작용을 하여 변화하는 물리량을 측정하는 것을 기본 원리로 한다. 입사 방사선과 센서 사이의 상호작용으로는 전리, 여기, 형광, 화학 작용 등이 있으며 이러한 효과

최근, 광섬유 기반의 광 센서는 내구성이 뛰어나며 전자기적 영향에 둔감하고 설치 및 조작이 용이한 장점 때문에 초 전도체 연구, 극지 자원 탐사, 방사선량 계측과 같은 극한 환경에 적용 가능한 센서로 각광받고 있다 [2,3]. 특히 전자기적인 간섭에 영향이 없는 광섬유 기반의 방사선량 계측기술은 원자력 발전소, 입자 가속기, 방사성 동위원소 생산 및 취급기관, 원자력 관련 연구소 등 원자력 산업의 안전을 위한 감시 시스템 응용에 크게 관심을 받고 있으며 빠른 응답속도, 실시간 원격 감시 능력, 분포형 센서 시스템 등의 우수한 장점으로 활발한 연구

* 한양대학교 물리학과



가 진행되고 있다[4-6].

본 고에서는 광섬유 기반 방사선 선량계 기술에 대한 최신 연구 동향을 살펴보고자 한다. 우선 방사선 선량계의 기본 개념과 특성, 그리고 주요 고려 사항에 대해 간략히 언급하고 현재 연구되고 있는 광섬유 기반 방사선 측정 기술을 소개하고자 한다. 또한, 광섬유 선량계가 방사선 처리 산업에 있어서 어떤 장점을 가지고 사용하는지에 대한 소개를 할 것이다.

2. 방사선 선량계의 기본 개념 및 특성

방사선에 피폭된 생체나 물질에 흡수된 에너지의 양을 방사선량 (radiation dose)이라 하며 흡수 선량의 SI 단위 그레이 (gray, Gy)는 어떤 물체에 방사선의 에너지가 얼마나 흡수되는지를 나타내는 단위로 다음과 같이 정의된다.

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} = 10^{-2}[\text{cCy}] = 100 \text{ rad}$$

시버트(Sievert, Sv)는 선량당량이라 불리우며 방사선의 생물학적 효과를 나타내는 양으로, 방사선이 생체에 미치는 효과에 주목하기 위해 정의한다. 그레이와 시버트의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (\text{흡수선량, Gy}) \times (\text{선질계수, Q}) \times (\text{보정인자, N}) \\ = (\text{선량당량, Sv}) \end{aligned}$$

선질 계수(Q)는 생물학적 효과비율(RBE)를 기반으로 하고 (X선, γ 선, β 선의 선질 계수 Q=1), 보정인자(N)는 체내에 침적된 동위원소의 불균등 분포에 의한 신체 부위별 상대적인 효과 차이를 보정해 주기 위한 값이다. 노출되는 신체 부위, 시간 및 부피, 혹은 종에 따라서 달라지며 비교적 영향을 덜 받고 노출 위험이 적은 뼈의 표면과 같이 상대적으로 민감도가 낮은 부위는 생식기관과 같은 가장 민감한 부위에 비하여 1/20배 정도의 효과 차이를 보인다. 이러한 흡수선량을 측정하는 장비를 총칭해서 방사선 선량계라고 부르며 방사선 피폭으로 인한 건강상의 위험을 나타내는 적절한 지표를 제공한다. 방사선에 의한 직업상 피폭은 핵연료 처리 공정, 의료상 동

위원소와 치료 방사선 발생장치의 사용, 방사성 동위원소를 이용한 연구와 교육 및 산업 등 다양한 활동에 의해 발생되며 방사선에 피폭되면 직접적으로 생체를 구성하는 단백질이나 세포막, DNA, 물, 유기물 등이 직접 이온화되어 손상이 발생하고 피폭량이 많을 경우 사망에 이르게 한다. 이러한 피해를 막기 위해 방사선 피폭에 대한 안전성이 고려되어야 하고 다양한 요구사항을 만족시키는 방사선 선량계 개발의 필요성이 증가하고 있다. 현재는 민감도 및 분해능 향상, 실시간 측정 혹은 비용 절감 등 시스템을 향상시킬 수 있는 방법을 지속적으로 연구하는 추세이며 최적의 방사선 선량계를 설계하기 위해 다음과 같은 사항을 필수적으로 고려해야 한다.

가. 고민감도

방사선과 상호작용을 하는 방사선 민감 물질의 선택은 가장 중요한 사항으로 특히 의료용 방사선 선량계의 경우 작은 선량률과 총선량에도 민감하게 반응해야 한다.

나. 빠른 응답 속도

산업 응용을 위해 방사선 민감 물질은 방사선에 대한 응답 속도가 빨라야 한다. 방사선 처리 시설에서 방사선 노출을 초기 단계에서 감지해 사고에 대한 대응을 신속 정확하게 취하는 것이 중요시 되면서 실시간 정보를 제공하는 온라인 선량계 개발의 필요성이 증가하고 있다.

다. 신뢰성 확보

방사선 선량계는 산업환경에 실질적인 사용을 위해 안정성 및 재현성 확보가 중요하다. 전자기파, 습도, 온도와 같은 외부 환경 요소에 영향이 덜 받도록 설계되어야 하며 외부 환경에 의한 요소를 반드시 보상해야 한다. 광 기반 방사선 선량계는 화학 및 전자식 방사선 선량계에 반하여 전기신호가 아닌 광신호를 사용하여 선량 정보를 전송하기 때문에 전자기적 간섭에 영향을 받지 않는 장점이 있다.

라. 페이딩 (fading) 효과 감소

방사선 선량계에 사용되는 물질은 방사선 조사 후 최

광섬유 기반 방사선 선량계

소 페이딩 효과를 보여야 한다. 페이딩 효과는 방사선에 의해 발생한 물리적 손상을 회복하기 위해 일어나며 만약 방사선 조사 후 바로 방사선 민감 물질의 회복이 시작하면 방사선 정보가 손실되기 때문에 열처리와 같은 처리 방법을 통해 페이딩 효과를 억제 시킨다. 방사선 민감 물질에 불순물을 첨가하여 페이딩 효과를 지연시키거나 실시간 정보를 획득하는 시스템을 구축하여 페이딩 효과에 대한 문제점을 해결할 수 있다.

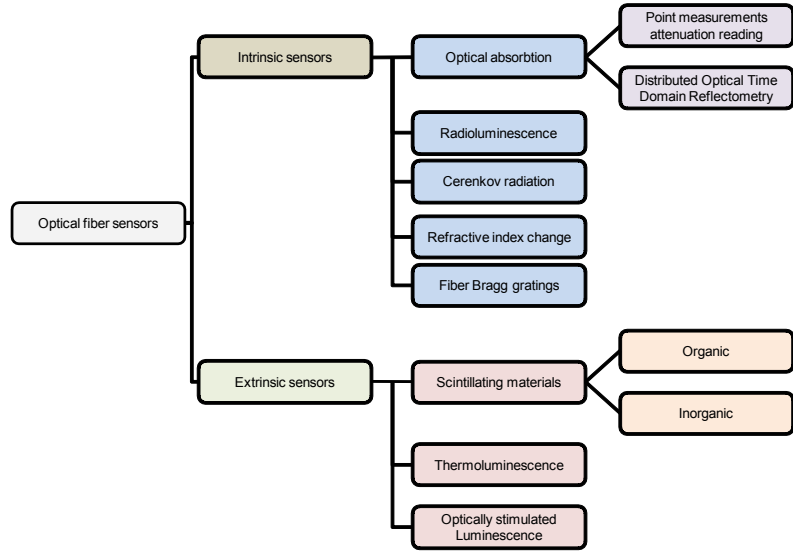


그림 1. 동작 원리에 따른 광섬유 기반 방사선 선량계 분류표[6]

마. 간편한 설치 및 사용

산업적으로 응용함에 있어 선량계는 설치 및 사용이 용이해야 한다. 시스템은 설치 장소에서 측정에 영향을 미치는 위험 요소 없이 쉽게 설치할 수 있어야 한다.

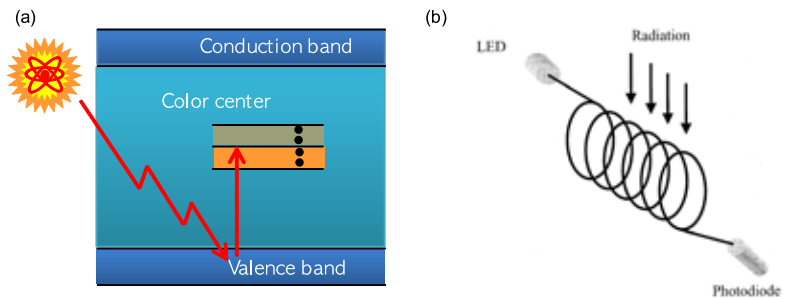


그림 2. (a) 방사선 조사에 의한 광안화 현상 원리, (b) 광흡수 선량계 개략도[7]

3. 광섬유 기반 방사선 선량계

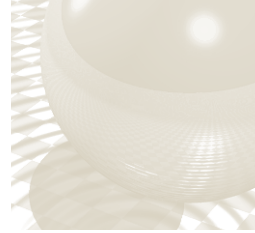
광섬유 기반 방사선 선량계는 방사선에 의한 광신호의 변조를 통하여 선량 정보를 기록하는 광섬유센서 기술 기반의 광자시스템으로 전기 화학식, 반도체식 센서와 같은 재래식 센서들 보다 우수한 장점을 가진다. 광섬유는 실리콘과 같은 유전 물질로 구성되어있어 화학적 내구성이 강하며 전자기적 간섭에 둔감하고 온도에도 강하기 때문에 전기 센서가 허용되지 않은 환경에서 사용이 가능하다. 또한 광신호를 광섬유를 통해 전송하기 때문에 장거리 원격 측정이 가능하며 정상적인 방법으로는 출입이 불가능한 고준위 환경의 원자로에서 방사선량 측정이 가능하다는 이점을 들 수 있다[4].

그림 1에서 보듯이 광섬유 기반 방사선 선량계는 광섬유가 센서프로브로 사용되어 직접적으로 방사선과 상호

작용을 하는 intrinsic 센서와 단지 광 신호를 전달하기 위한 목적으로만 사용되는 extrinsic 센서로 나뉘고 동작 원리에 따라 크게 광 흡수 선량계 (Optical absorption dosimeter), PMMA (poly-methyl-methacrylate) 광섬유 선량계, 발광 선량계 (Luminescence dosimeter), 광섬유 격자를 이용한 선량계가 있다[6-12].

가. 광흡수 선량계

광흡수 선량계는 외부 방사선량에 의한 흡수량 증가에 의해 발생하는 광손실 (Radiation-induced attenuation, RIA)을 측정하여 방사선량을 측정한다. 광섬유의 광흡수 밴드가 있는 가시광영역 (400~700nm)의 레이저 또는 LED 광원을 측정 광섬유에 연결시키고 광 검출기를 이용하여 전송 광의 세기를 측정하는 간단한 실험 구성으로



이루어져 있다. 불순물이 첨가되어 있는 광섬유에 방사선을 조사시키면 그 에너지를 받은 분자들은 사슬절단(main-chain scission)에 의해 게르마늄, 인, 붕소와 같은 분자와의 재결합이 유도되고 그림 2.(a)에서 보듯이 비방사성 재결합 센터(non-radiative recombination center)가 밴드갭 사이에 생성되어 광흡수량 증가하는 광암화 현상(photo-darkening effect)이 발생한다. 광암화 효과는 광섬유 구성 물질의 영향을 받으며, 누적선량계 구현을 위해 인, 붕소, 게르마늄, 희토류 원소 등의 불순물이 첨가된 광섬유가 연구되었다[6-8]. 인이 첨가된 실리카 광섬유는 방사선 조사 후 회복 효과가 거의 없어 안정적인 측정이 가능하다는 결과가 보고 되었다[6]. 하지만 낮은 방사선 민감도로 인하여 수백 미터에서 수 킬로미터의 긴 광섬유를 필요로 하고 높은 방사선량만을 측정하는데 유리하다. 또한, 수십 미터 이내의 광섬유만을 광통신시스템 및 기기장치에 사용하는 우주항공 응용기술에는 활용성이 매우 낮은 단점이 있다.

나. PMMA 광섬유 선량계

PMMA 필름은 ionizing radiation의 노출 후 crosslinking 없이 사슬절단이 생기고 굴절률, 색, 흡수도 등 광학적 특성이 변하는 성질을 가지고 있어 400~700 nm의 가시광영역에서 방사선 유도에 의한 감쇄량을 측정하여 방사선량을 측정하는 대표적인 선량계이다. 이러한 PMMA로 구성된 광섬유를 제작하여 온라인 선량계 기술 연구가 활발히 수행되었다[9]. PMMA 물질이 가지고 있는 상대적으로 높은 농도의 불포화 결합 상태는 감마선에 의한 전기적 에너지의 전이로 인하여 분자의 사슬 절단(main-chain scission)이 일어나고 분자의 재결합(crosslinking)을 유도한다. PMMA 의 경우 사슬 절단이

재결합에 비해 지배적으로 발생하며 광흡수 선량계의 측정 원리와 동일하게 RIA를 측정하여 방사선량을 측정한다. PMMA 광섬유 선량계의 실험 구성은 광흡수 선량계와 동일하고 실시간으로 온라인 정보 수집이 가능하여 PMMA 필름보다 큰 장점을 가지고 있으며 전자기파에 대한 무간섭, 광섬유 사용으로 인한 유연성, 저비용, 신호 다중화, 실시간 감시가 가능하다는 장점이 있기 때문에 많은 관심을 끌고 있다. 하지만 PMMA 광섬유 선량계는 광통신 시스템과의 호환성, 신호 세기 감쇄에 의한 낮은 신호대 잡음 비, 그로 인한 낮은 측정 분해능 (> 50 Gy) 등 아직 개선되어야 할 점들이 남아있다.

다. 발광 선량계

발광 선량계에는 신틸레이션 선량계(Scintillation dosimeters), 열형광 선량계(Thermoluminescence dosimeters), 광루미네선스 선량계(Optically stimulated luminescence dosimeters) 등이 있다[10-12]. 신틸레이션 선량계는 사용된 재료가 전리방사선을 검출할 수 있는 광으로 변화시킬 수 있는 현상에 기반을 둔 것으로 광 다이오드 또는 광전자증배관(PMT)이 광을 전기신호로 변환한다. 섬광체(scintillator)는 무기 섬광체와 유기 섬광체(플라스틱 및 액체 섬광체) 두 가지 그룹으로 구분된다. 광섬유는 섬광검출시스템에 적용되어 섬광방사를 원격 PMT로 전송하여 섬광 빛의 세기를 측정한다. 이러한 시스템은 좋은 선형성, 소형 및 견고성 등의 장점이 있는 반면 광전송에서 커다란 손실이 있고 신호 대 잡음비가 커서 원격 측정 불리한 단점이 있다. 열형광선량계는 물질의 형광 현상을 이용한 것으로서 물질에 방사선을 조사하면 그 일부를 흡수하여 전자에너지가 기저상태로부터 여기 상태로 천이하게 된다.

일반적인 형광체에서는 여기상태에 있는 전자는 발광중심을 매개로 하여 복사 재결합에 의해 바로 그 에너지를 형광으로 방출하나, 열형광 물질은 열 등의 에너지를 인가하여 여기된 에너지를 방출시킨다. 열형광선량계는 감도가 민감하여 설치장소를 엄선하여 고온, 고습의 장소를 피하여야 하며 안정된 전압

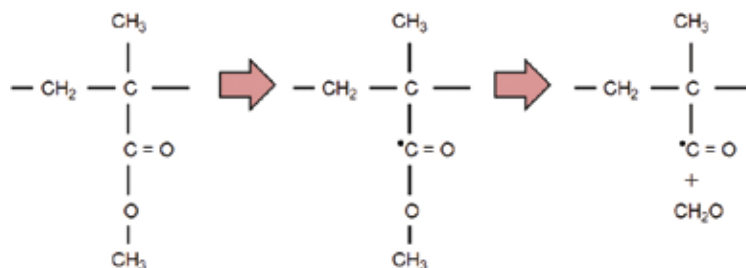


그림 3. 감마선 조사에 의한 PMMA 화학식 변화[6]

광섬유 기반 방사선 선량계

을 인가하여야 정확한 데이터를 얻을 수 있다. 이러한 시스템은 저준위 감마선을 정확하게 검출할 수 있어서 의료 및 환경측정에 적합한 반면 원자력 발전소와 같은 고준위 방사선 환경에서 계측의 제약이 있다. 광루미네선스 선량계의 경우 방사선을 조사한 물질에 열 대신 자외선을 쬐이면 형광을 발생하는 현상을 이용한 선량계로서 빛의 노출에 의한 조사로 저장된 에너지를 방출하고 극히 낮은 선량을 측정할 수 있기 때문에 개인선량측정과 방사선치료에 이상적인 반면 열형광선량계와 마찬가지로 고준위의 방사선량 측정에는 부적합하다.

라. 광섬유 격자 기반 방사선 선량계

광섬유 격자 기반 선량계는 방사선에 의한 광섬유 코어의 굴절률 변화를 이용하여 Bragg 신호의 파장이동을 검출한다[13]. 광섬유 브래그 격자의 공진파장 (λ_B)은 위상정합조건 (phase matching condition)에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$$

여기서 n_{eff} 는 광섬유 코어 모드의 유효굴절률, Λ 는 브래그 격자의 주기이다. 게르마늄 및 붕소가 첨가된

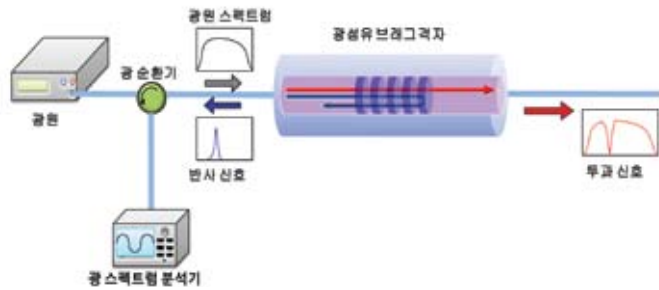


그림 4 광섬유 브래그 격자 기반 선량계 개략도[13]

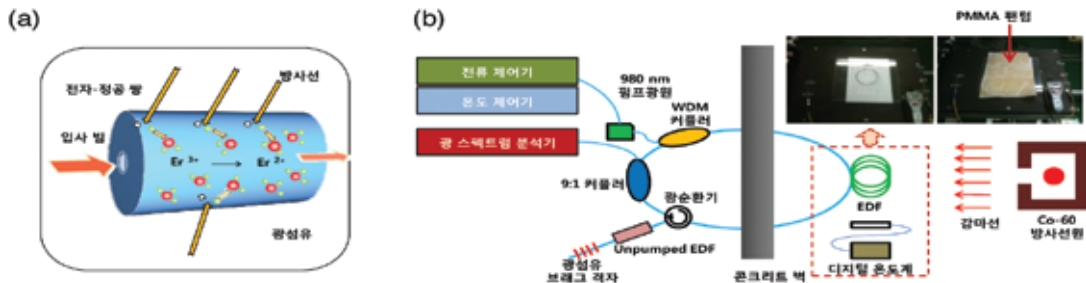
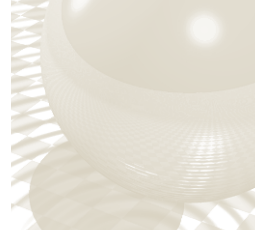


그림 5.(a) 어븀 첨가 광섬유 방사선 효과, (b) 레이저 공진기 기반 방사선 선량계 개략도[14]

광섬유 격자에 방사선을 조사시키면 이온화에 의한 광섬유 코어의 유효굴절률 변화가 야기되고 이는 Bragg 파장이동으로 계산된다. 광섬유 격자는 또한 온도와 스트레스에 매우 민감하기 때문에 주로 방사선 환경에서 온도와 스트레인 측정을 위해 내방사선 FBG가 주로 개발되었다. 방사선 측정을 위해서는 온도와 스트레스에 매우 안정적인 장치 설비를 필요로 하고 이는 센서 활용 범위에 큰 제약을 가져온다.

4. 광섬유 레이저 기반 방사선 선량계

일반적으로 희토류 원소인 어븀 첨가 광섬유를 방사선 조사시킬 경우 희토류 이온의 이온화 및 실리카 결정 구조가 변화되어 비방사성 색중심 (non-radiative color center) 형성에 의한 광암화 효과가 발생한다. 광암화 효과는 희토류 첨가 광섬유에서 신호광의 전송 손실을 높인다. 그 결과, 희토류 첨가 광섬유에 누적되는 방사선량에 따른 신호광의 선형적인 출력 감소가 발생하고 2.7 dB/km · Gy 정도의 민감도를 보인다. 반면 기존의 광흡수 선량계와 같이 단순히 광흡수에 의한 손실량을 측정하는 것이 아니라 희토류 첨가 광섬유를 이득 매질로 사용하여 레이저 공진기를 구성한다면 짧은 광섬유 길이만으로도 광흡수 선량계보다 훨씬 높은 방사선 민감도를 얻을 수 있다[14]. 그림 5는 어븀 첨가 광섬유의 방사선 효과와 제작된 고리형 광자 레이저 공진기 실험 개략도를 나타낸다. 레이저 이득 매질 (gain medium)로 사용되는 어븀 첨가 광섬유 (EDF)와 이 이득 매질에 광 펌핑 (pumping)을 하기 위한 980



nm 펌프 광원 (Current controller와 temperature controller의 feedback system을 통한 안정적인 980 nm 펌프광의 출력), 링 구조 제작을 위한 파장 다중화 (WDM) 커플러와, 출력을 얻기 위한 9:1 커플러, 그리고 안정적인 단일모드 레이저 발진을 위한 광섬유 브래그 격자 (FBG @ 1549.85 nm), 포화흡수체 (saturable absorber)로 사용되는 unpumped 어븀 첨가 광섬유 (길이: 4 m), 광순환기 (Optical circulator) 로 구성되어 있다. 30 m 길이의 단일 모드 광섬유 라인을 연결하여 희토류 이득 매질인 어븀 첨가 광섬유 (6 m)만을 방사선 조사실에 배치하였고 1 cm 두께의 PMMA 팬텀 (phantom)을 그림 5.(b)의 삽입 사진과 같이 어븀 첨가 광섬유 위에 위치하였다. 방사선 조사에 의한 희토류 이득 매질 분자 구조의 변화는 광섬유 레이저 공진기로 입사되는 펌프광과 신호광 모두 흡수를 증가시키게 되고 레이저 공진 임계치를 높게 되어 레이저에서 출력되는 광 파워를 감소시킨다. 즉, 그림 5.(a)에서 보듯이 Er^{3+} 이온에서 전자가 하나 떨어져 나가게 되고 Er^{2+} 이온이 되면서 색중심 (color center)이 생성되고 펌프광인 980 nm 대역에서 추가적인 광흡수를 유도하여 1550 nm 영역에서의 자발 방출의 감소를 발생킨다.

레이저를 발진 후 광 스펙트럼 분석기를 이용하여 방사선량에 따른 센서프로브의 변화 정보를 실시간 모니터링하고 방사선량을 계측하였다. 그림 6.(a)는 6 m의 어븀 첨가 광섬유를 이득 매질로 사용하고 펌프 출력을 5 mW부터 100 mW까지 변화시키면서 측정된 고리형 광섬유 레이저 출력 스펙트럼을 보여준다. 전류 및 온도 제어기의 피드백을 통한 안정적인 980 nm 펌프광의 출력과 60 pm의 좁은 선폭을 갖는 FBG와 포화흡수체로 사용되는 어븀 첨가 광섬유를 사용하여 안정적인 단일 모

드 발진을 구현하였다. 그림 6.(b)에서 보듯이 펌프파워가 감소할수록 출력파워의 안정성이 증가되는 것을 확인하였고 펌프에너지가 낮을수록 증가하는 중모드들의 모드 호핑 현상에 기인한다. 그림 6.(c)는 방사선 조사량에 따라 펌프 파워의 변화에 대한 고리형 광섬유 레이저 출력 감쇄를 보여준다. 방사선량이 증가함에 따라 광섬유 레이저의 이득 매질인 어븀 첨가 광섬유의 흡수도가 증가하고 레이저 출력이 감소하게 되며 5, 10, 27, 45, 70, 100 mW 의 펌프파워에서 방사선 민감도는 각각 3.14, 3.19, 3.63, 4.16, 5.12, 8.40 dB/km · Gy 로 측정되었다. 광자 레이저 공진기 기반 방사선 선량계는 어븀 첨가 광섬유가 공진기에 삽입되어 있지 않을 때의 민감도 (2.7 dB/km · Gy)보다 3 배 이상의 민감도 (8.4 dB/km · Gy) 향상을 보였다. 광흡수 선량계의 측정 원리와 다르게 광흡수에 의한 RIA를 측정하는 것이 아니라 희토류 첨가 광섬유를 광섬유 레이저 공진기의 이득매질로 사용하여 증폭 · 발진되는 빔의 세기변화를 관측한다면 짧은 광섬유 길이만으로도 광흡수 선량계보다 훨씬 높은 방사선 민감도를 얻을 수 있음을 보였다. 또한, 고준위 방사선에 의해 감쇄량이 크게 증가하여도 레이저 시스템에 의해 광신호가 증폭됨으로 신호 대 잡음비를 줄일 수 있는 장점을 가진다.

5. 결론

본 고에서는 광섬유 기반 방사선 측정 기술에 대한 최신 연구동향을 간략히 살펴보았다. 광섬유 기반 방사선 선량계의 측정 원리에 따라 방사선량 센서 종류를 분류하였으며 각각의 경우의 장단점을 비교해보았다. 광섬유

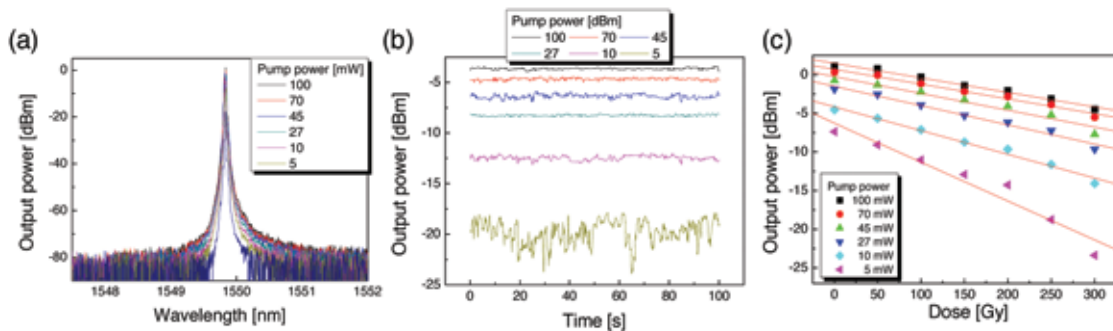


그림 6.(a) 광섬유 레이저 출력 스펙트럼, (b) 펌프 파워에 따른 출력 안정도, (c) 방사선량에 따른 출력 감쇄 [14]

광섬유 기반 방사선 선량계

기반 방사선 선량계는 우수한 내구성, 소형제작, 설치 및 조작이 용이한 장점 때문에 원자로와 같은 극한 환경에 활용이 가능하고 특히, 기존의 전기식 방사선센서의 한계점을 극복할 수 있는 전자식 간섭 둔감성, 빠른 응답 속도, 실시간 원격 감시 능력, 분포형 측정 등의 우수한 장점으로 인해 이 기술에 대한 연구 개발이 세계적으로 관심을 끌고 있다. 이러한 방사선 측정 기술은 방사선 피폭의 안전 감시, 의료분야에서 질병 진단 및 치료, 산업 분야에서 물성 특성 및 비파괴검사와 학술 분야에서 연구용으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Knoll, F Glenn, "Radiation detection and measurement," New York: Wiley (1999).
- [2] H. Henschel, D. Grobncic, S. K. Hoeffgen, J. Kuhnenn, S. J. Mihailov, U. Weinand, "Development of highly radiation resistant fiber BRAGG gratings," Nuclear Science, IEEE Transactions on, vol.58, no. 4, pp.2103-2110 (2011).
- [3] L. Song, S. Ningfang, J. Jing, W. Xueqin, Y. Gongliu, "Effect of grating fabrication on radiation sensitivity of fiber BRAGG gratings in gamma radiation field," Nuclear Science, IEEE Transactions on, vol.58, no.4, pp.2111-2117 (2011).
- [4] O'Keeffe, S. Fitzpatrick, C. Lewis, E. and Al-Shamma'a, A.I, "A review of optical fibre radiation dosimeters", Sensor, Rev., vol.28, no.2, pp.136-142 (2008).
- [5] H. Henschel, M. K. Orfer, J. Kuhnenn, U. Weinand, F. Wulf, "Fibre optic radiation sensor systems for particle accelerators," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol.526, pp.537-550 (2004).
- [6] D. Sporea, A. Sporea, S. O'Keeffe, D. McCarthy, and E. Lewis, "Optical fibers and optical fiber sensors used in radiation monitoring," in Selected Topics on Optical Fiber Technology, pp.697-653 (2012).
- [7] A. L. Huston, B. L. Justus, P. L. Falkenstein, R. W. Miller, H. Ning and R. Altemus, "Remote optical fiber dosimetry," Nucl. Instrum. Methods B, vol.184, pp.55-67 (2002).
- [8] T. S. Rose, D. Gunn, and G. C. Valley, "Gamma and proton radiation effects in erbium-doped fiber amplifiers: active and passive measurements," J. Lightwave Technol, vol.19, no.12, pp.1918-1923 (2001).
- [9] S. O'Keeffe A. Fernandez Fernandez, C. Fitzpatrick, B. Brichard and E. Lewis, "Real-time gamma dosimetry using PMMA optical fibres for applications in the sterilisation industry," Meas. Sci. & Tech., vol.18, no.10, pp.3171-3176 (2007).
- [10] J. M. Fontbonne, G. Iltis, G. Ban, A. Batalla, J. C. Vernhes, J. Tillier, N. Bellaize, C. Lebrun, B. Tamain, K. Mercier, and J. C. Motin, "Scintillating fiber dosimeter for radiation therapy accelerator," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol.49, no.5, pp.2223-2227 (2002).
- [11] A. L. Huston, B. L. Justus, and T. L. Johnson, "Fiber optic-coupled, laser heated thermoluminescence dosimeter for remote radiation sensing," Appl. Phys. Lett., vol.68, no.24, pp.3377 (1996).
- [12] R. Gaza and S.W.S. McKeever, "A real-time, high-resolution optical fibre dosemeter based on optically stimulated luminescence (OSL) of kbr:eu, for potential use during the radiotherapy of cancer," Radiat. Prot. Dosim., vol. 120, no.1-4, pp. 14-19 (2006).
- [13] K. Krebber, H. Henschel, and U. Weinand, "Fibre BRAGG gratings as high dose radiation sensors?," MST, vol.17, no.4, pp. 1095-1102 (2006).
- [14] Y. Shim, H. Kim, Y. Ji, Y. Han, "Multi-monitoring system based on erbium doped fiber ring laser for measurement of radiation dose and strain," Proceedings of the 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors, vol.8421, pp.842131-4 (2012).

약 력

김현주



• 2008년 3월 - 현재
한양대학교 물리학과, 석박통합과정

한영근



• 2010년 3월 - 현재
한양대학교 물리학과, 부교수
• 2007년 3월 - 2009년 2월
한양대학교 물리학과, 조교수
• 2006년 6월 - 2006년 8월
Integrated Research Center for Photonics Networks and Technologies, Visiting researcher
• 2003년 3월 - 2007년 2월
한국과학기술연구원 연구원 및 선임연구원
• 2002년 1월 - 2002년 7월
John Hopkins University, visiting researcher
• 1999년 3월 - 2003년 2월
광주과학기술원 정보통신공학과, 공학박사