

## 사용후핵연료 검증용 광섬유 기반의 체렌코프 방사선 측정 센서 제작을 위한 기초연구

장경원, 유옥재, 문진수, 한기택, 김 신\*, 박병기\*\*, 이봉수  
 건국대학교, 충북 충주시 단월동 322

\*제주대학교, 제주특별자치도 제주시 제주대학교로 102

\*\*순천향대학교, 충청남도 아산시 신창면

[bslee@kku.ac.kr](mailto:bslee@kku.ac.kr)

### 1. 서론

일반적으로 하전입자(charged particle)는 공기 중에서 빛보다 빠른 속도로 진행할 수 없다. 그러나 어떠한 매질 안에서 일정 에너지 이상의 하전 입자는 매질 내의 빛의 속도보다 빠르게 진행할 수 있다. 체렌코프 방사선(Cerenkov radiation)은 하전입자가 물이나 폴리메틸 메타크릴레이트(polymethyl methacrylate, PMMA)와 같은 투명한 매질(transparent medium) 내에서 그 매질내의 빛의 속도보다 빠르게 투과할 때 발생된다. 이러한 체렌코프 방사선은 비등수형 원자로(boiling-water reactors, BWR) 및 가압경수형 원자로(pressurized-water reactors, PWR), 그리고 습식 사용후핵연료저장조에서 쉽게 관측될 수 있다. 습식 사용후핵연료저장조에서의 경우, 체렌코프 방사선 발생의 주요인인 전자는 콤프턴 전자(Compton electron)로서 사용후핵연료에서 발생하는 423 keV 이상의 감마선에 의하여 발생된다. 그러므로 발생하는 체렌코프 방사선의 양은 사용후핵연료의 연소도(burn-up)와 핵분열생성물(fission product)의 반감기(half-life)에 의존하는 감마선의 양과 에너지에 의해서 결정된다 [1]. 기본적으로 습식 핵연료저장조에서 발생하는 체렌코프 방사선은 물에서 발생하는 것으로서 이러한 체렌코프 방사선 측정을 통하여 사용후핵연료의 연소도를 예측할 수 있다. 그러나 건식 저장조에서는 그 측정이 불가능하고, 사용후핵연료의 축방향에 따른 연소도 및 결합여부에 대한 정보를 정확히 파악하기에는 어려움이 있다.

빛을 전달하는 매체인 광섬유는 주로 유리 및 PMMA로 구성되어 있다. 그러므로 이러한 광섬유 역시 하전입자와 상호작용하여 체렌코프 방사선을 방출하는 매개체가 될 수 있다. 광섬유는 기본적으로 그 직경이 매우 작아서 협소한 공간에서의 신호 측정이 가능하고, 신호전달과정에서 온도, 압력 및 전자기파의 간섭을 받지 않는 등 많

은 장점을 가지고 있다. 특히 광섬유에서 발생하는 체렌코프 방사선을 측정할 경우, 사용후핵연료의 축방향 연소도를 측정할 수 있고, 결합여부의 판별도 가능하다는 장점이 있다.

본 연구에서는 사용후핵연료 검증을 위한 광섬유 기반의 체렌코프 방사선 측정 센서 개발의 일환으로 광섬유의 개구수(numerical aperture, NA) 및 수산기(OH)의 함유량에 따라 광섬유에서 발생하는 체렌코프 방사선을 측정하였고, 스펙트로미터(spectrometer)를 이용하여 체렌코프 방사선의 파장을 분석하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 실험 재료 및 방법

본 연구에서 체렌코프 방사선 방출용으로 사용된 광섬유는 Thorlabs사의 BFL22-910, BFL37-1000, APCH1000, BFL48-1000, BFH48-1000로서 계단형 굴절률(step index)을 가지는 멀티모드(multi-mode) 광섬유이다. 광섬유의 코어(core)는 실리카(pure silica)로 구성되어 있으며 BFL22-910을 제외하고 클래딩(cladding)은 모두 하드 폴리머(hard polymer)로 구성되어 있다. BFL22-910의 경우, 플루오린 실리카(fluorine silica)로 클래딩이 구성되어 있다. 각 광섬유의 직경, 개구수, 수산기 함유량 등은 표 1과 같으며, 그림 1은 각 광섬유의 파장에 따른 감쇄도를 보여주고 있다.

Table 1. Properties of optical fibers.

Optical fiber	Diameter	NA	OH
BFL22-910	910 $\mu\text{m}$	0.22	Low
BFL37-1000	1000 $\mu\text{m}$	0.37	Low
APCH1000	1000 $\mu\text{m}$	0.39	Low
BFL48-1000	1000 $\mu\text{m}$	0.48	Low
BFH48-1000	1000 $\mu\text{m}$	0.48	High

체렌코프 방사선의 파장 및 광량을 계측하기 위해서 사용된 광 계측장비는 Ocean optics사의

스펙트럼미터(QE65000)로서 본 스펙트럼미터의 검출 파장 영역은 200 nm~925 nm이다.

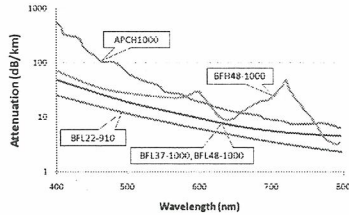


Fig. 1. Attenuations of optical fibers according to the wavelength.

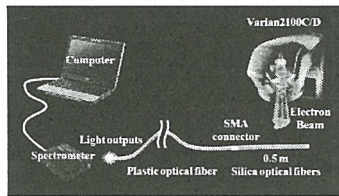


Fig. 2. Experimental setup.

그림 2는 실험구성을 보여주고 있다. 선형가속기에서 발생된 전자선이 유리광섬유에 조사되면 여기서 발생된 체렌코프 방사선은 10 m의 플라스틱 광섬유를 통하여 스펙트럼미터로 전송된다.

## 2.2 실험결과

그림 3은 광섬유의 종류에 따라서 측정된 체렌코프 방사선의 파장을 보여주고 있다. 결과에서 체렌코프 방사선의 최대 방출 파장은 약 460 nm로 측정되었고, 약 610 nm에서는 체렌코프 방사선 전송용 플라스틱 광섬유에 의해서 광 신호가 감쇄되는 것을 확인할 수 있다. BFL48과 BFH48의 결과를 살펴보면 BFL48의 값이 더 크게 측정된 것을 확인할 수 있는데, 이는 광섬유 자체의 수산기 함유량에 의한 결과로 수산기 함유량이 많을 경우 감쇄가 커지는 것에서 기인한다. BFL22의 결과를 살펴보면 개구수에 비해 상대적으로 값이 크게 측정되는 것을 확인할 수 있다. 이는 BFL22 광섬유 자체의 감쇄도가 매우 작은 것에서 원인을 찾을 수 있다.

그림 4는 광섬유의 개구수에 따라 측정된 체렌코프 방사선의 광량을 보여주고 있다. 광섬유에서 발생된 체렌코프 방사선의 광량은 개구수에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 광섬유의 개구수가 증가하게 되면 임계각이 커지게 되고, 그에 따라 전달되는 광량이 많아지게 된다.

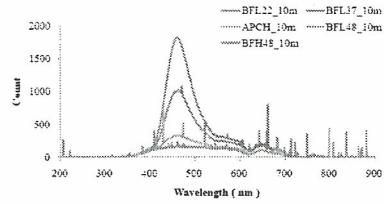


Fig. 3. Measurements of the wavelengths of Cerenkov radiations generated from optical fibers.

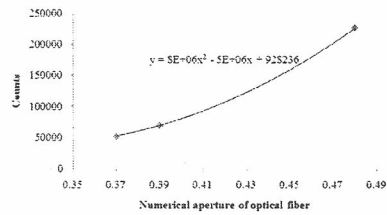


Fig. 4. Measurements of the intensities of Cerenkov radiations according to the numerical apertures of optical fibers.

## 3. 결론

본 연구에서는 사용후핵연료 검증을 위한 광섬유 기반의 체렌코프 방사선 측정 센서 개발의 일환으로 광섬유의 개구수 및 수산기의 함유량에 따라 광섬유에서 발생하는 체렌코프 방사선을 측정하였고, 스펙트럼미터를 이용하여 체렌코프 방사선의 파장을 분석하였다. 향후 연구 계획은 광섬유의 길이에 따라 발생하는 체렌코프 방사선의 광량을 측정하는 것이다. 지속적인 연구를 통하여 개발될 광섬유 기반의 체렌코프 방사선 측정 센서는 경제적, 효율적으로 사용후핵연료 검증에 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 4. 감사의 글

"이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국연구재단의 연구지원프로그램으로 지원받았습니다. (관리코드: M2009-0078227)"

"본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (2011T100100249)"

## 5. 참고문헌

- [1] M. Kuribara, 1994. IEEE Transactions on Nuclear Science. Vol. 41, pp. 1736-1739.