

## 안전조치 측면에서 OFS를 이용한 사용후 핵연료의 모의검증

### Simulation on Spent Fuel Verification using OFS for Safeguards

고광옥, 박재범, 박일진, 김종수, 민경식

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

월성원자력발전소 수중저장고의 CANDU 사용후 핵연료 검증을 위하여 광섬유 섬광체를 이용한 검증장비가 개발되고 있으며, 현장실험을 실시하기에 앞서 몬테칼로 시뮬레이션평가를 수행하였다. 광섬유 섬광체를 이용한 CANDU 사용후 핵연료 검증장비는 약 16mm 공간의 bundle 사이로 검출기를 상하로 이동하면서 적재된 사용후 핵연료를 검증하는 장비로 기존의 검증장비로는 접근하기 어려운 부분의 사용후 핵연료 검증에 사용될 수 있다. 본 연구에서는 시뮬레이션을 통하여 상하 및 좌우에 존재하는 bundle이 측정에 미치는 영향, 측정위치에 따른 선량, 그리고 dummy가 존재하는 경우의 선량변화 등에 대하여 평가하였다.

#### Abstract

An optical fiber scintillator(OFS) system is being developed to verify the CANDU spent fuels in the pond area of Wolsong Nuclear Power Plants. Due to the tiny and flexible structure, the detector can easily access to the spent fuels, which are located in the difficult to access area with the existing verification system, through the gap between bundles. Therefore it is expected that the spent fuels in the pond can be verified without the tray movement using the OFS system. In this study, Monte Carlo simulation was performed to predict the result in real field. We also estimate the effect for the neighboring bundles and dummy as a different detection position.

#### 1. 서 론

IAEA에서는 월성 CANDU원전의 사용후 핵연료의 진위여부를 검증하기 위하여 수중

내방사선 카메라와 비파괴 검증장비를 선별적으로 사용하고 있다. 그러나 stack사이를 상하로 이동할 때 2층 선반까지 올라온 깔때기형의 봉인 설치 구조물(funnel)로 인하여 기존 검증장비로는 최하층까지 접근이 어려워 이 부분의 사용후 핵연료 검증이 불가능하다. 따라서 funnel로 가려진 사용후 핵연료의 검증을 위하여 IAEA는 선반을 이동하도록 요구하고 있으나 이는 핵연료의 안전성에 문제가 있을 뿐만 아니라 시설의 불편을 가중시킨다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 핵연료 다발 사이의 16mm의 공간에 검출기를 삽입하여 상하로 이동하면서 사용후 핵연료를 검증하는 방법이 제안되었으며, 이 경우 사용될 검출 센서는 소형이면서 내방사선이 필수 요구조건이다. 이러한 점에서 볼 때 유리섬광체는 소형으로 만들 수 있을 뿐만 아니라, 추가적인 전원장치 없이 방사선 측정이 가능한 것이 장점이다. 본 연구에서는 몬테칼로 시뮬레이션을 이용하여 OFS의 측정결과를 예측하였다. 실제 현장 실험에서는 사용후 핵연료 이동이 어렵기 때문에 다양한 조건에 대한 실험을 수행하기 힘들다. 따라서 몬테칼로 시뮬레이션을 통하여 주변 번들에 대한 영향, dummy 존재에 따른 측정값 변화, 그리고 검출위치에 따른 평가 등을 수행하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 광섬유 섬광체

1950년대 말부터 개발되기 시작한 lithium이 함유된 유리섬광체[1, 2]는 cerium을 활성화체(activator)로 첨가하여 방사선 검출에 응용되고 있다. 특히 Li이 함유된 유리섬광체는 boron이 함유된 섬광체에 비해 방사선과의 상호작용에 의한 에너지를 빛으로 전환하는 능력이 뛰어난 것으로 알려져 있다[3]. 유리섬광체는 유리의 주성분인  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  등의 혼합물로 구성되어 있으며 유리의 밀도를 높이기 위하여 BaO를 첨가하기도 한다[4,5]. 이러한 유리섬광체는 불화수소나 강알칼리에 장시간 노출되는 경우를 제외하고는 다른 유기질 및 비유기질 섬광체에 비해 매우 견고할 뿐 아니라 동작 온도도  $-200 \sim 250^\circ\text{C}$ 로 특별한 구애를 받지 않고 습도에도 비교적 영향을 덜 받으며 사용할 수 있는 장점을 지니고 있다. 이러한 유리섬광체 재료를 이용하여 섬유형태로 제작한 것을 광섬유 섬광체(Optical Fiber Scintillator: OFS)라 한다. 표 1은 본 연구에서 사용한 OFS의 원소별 질량비를 나타낸 것이다.

표 1. OFS의 원소별 질량비

element	% by weight
Li	8.36
O	52.379
Mg	2.41
Al	6.48
Si	26.18
Ce	3.78

## 2.2 몬테칼로 시뮬레이션

시뮬레이션에 이용한 사용후 핵연료 습식저장고의 전체 모습과 OFS가 위치한 그림 1(a)와 (b)에서 묘사한 습식저장고의 크기는 가로 및 세로가 각각 420 cm, 높이가 573 cm 인 콘크리트 구조물에 물의 높이를 515 cm로 하였다. 사용후 핵연료는 반지름이 5.125 cm, 길이가 49.53 cm인 실린더의 형태로 물질은  $UO_2$ 로 하였다. 선원은 실제와 유사하게 사용후 핵연료내의 임의의 지점에서 감마선이 나오도록 하였고, 단일 에너지 662 keV로 선원의 강도는 모두 같게 하여 계산을 수행하였다. OFS의 크기는 실린더 형태인 5 mm × 1 mm dia.에 대해서 평가하였다.

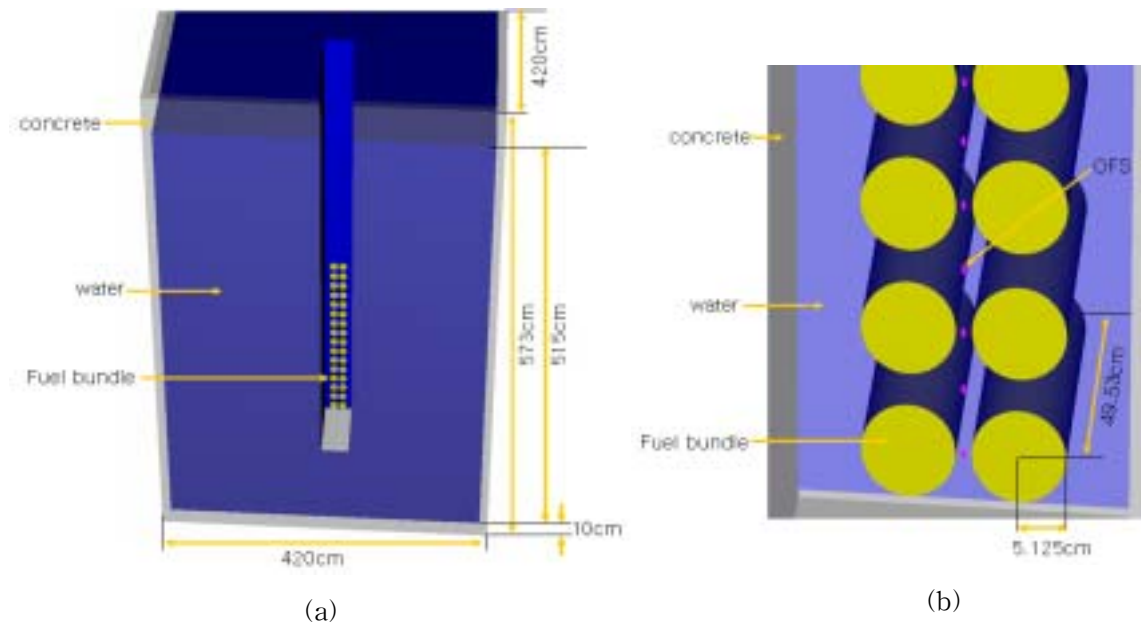


그림 1. 시뮬레이션을 위한 사용후 핵연료 저장고 (a) 전체 모습, (b) 측정을 위한 OFS의 위치

수행한 평가는 그림 2에서와 같이 우측에 있는 첫 번째 source에서부터 네 번째 source까지 각 선원이 OFS에서 측정되는 선량에 미치는 영향을 수행하였다. OFS 각각의 위치는 상·하 방향으로 사용후 핵연료 4개의 중심점이 각각 1지점과 7지점, 2개의 사용후 핵연료의 최하단 또는 최상단을 수평으로 연결한 지점이 각각 2지점과 6지점, 중심점과 최하단 또는 최상단의 중간지점이 3지점과 5지점, 그리고 사용후 핵연료의 중심높이점인 4지점까지 총 7군데의 위치에 대해서 평가를 실시하였다. 그리고 사용후 핵연료를 그림 1(a)에서와 같이 상하방향으로 모사하여 dummy가 존재하지 않는 경우와 dummy가 한 개 존재하는 경우의 선량평가를 수행하였다.

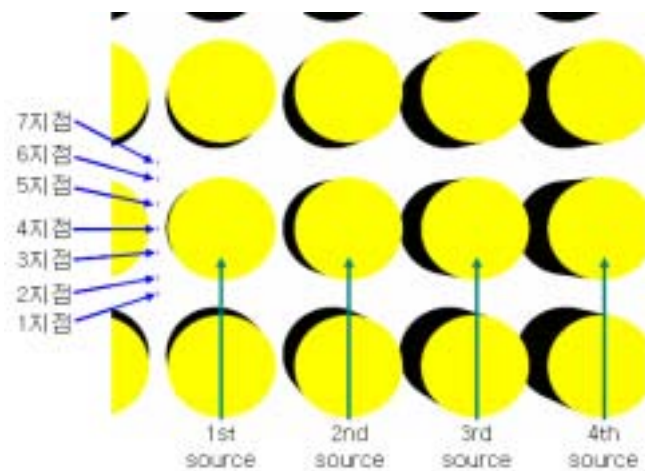


그림 2. 우측에 놓인 선원이 OFS의 선량평가에 미치는 영향

또한 사용후 핵연료 근처에서 OFS의 좌·우 위치변화에 따른 선량 변화를 알아보기 위하여 그림 3과 같이 모사하여 평가를 실시하였다. 실제 현장에서 OFS를 상하로 이동할 때 좌·우로 이동할 수 있고 이러한 경우 선량에 어떠한 변화가 있는지 알아보기 위함이다. OFS의 위치는 사용후 핵연료사이의 중심에서 사용후 핵연료방향 좌측·우측으로 5mm 지점, 그리고 중심지점까지 총 3군데로 하였다.

계산에 사용한 코드는 몬테칼로 계산 기법을 사용하는 대표적인 방사선 수송 코드인 MCNPX 2.4버전이다[6]. tally는 f6 tally를 사용하였고, 히스토리는 선원의 크기에 비해 OFS의 크기가 너무 작기 때문에 오차를 줄이기 위해  $15 \times 10^8$ 개로 하였다.

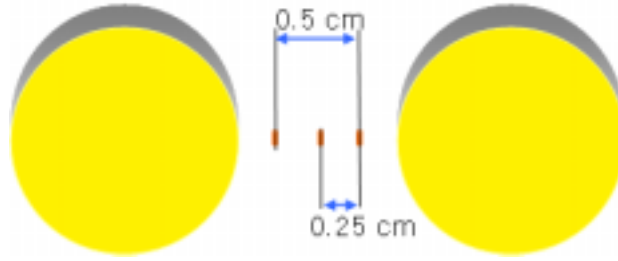


그림 3. OFS의 좌우 위치에 따른 선량 평가

### 3. 결과 및 토의

그림 4는 OFS의 우측에 있는 사용후 핵연료의 선원이 OFS에 측정되는 선량에 미치는 영향을 나타내고 있다. 평가는 한 개의 사용후 핵연료만을 source로 사용하고 나머지 3개의 사용후 핵연료들은 감마선을 발생시키지 않았다. 그리하여 첫 번째 source에서 측정된 선량을 100%로 하였을 경우 다른 나머지 source에 대한 영향은 두 번째 source에서 최대 5.53%로 나왔다.

그리고 상하위치에 따른 평가는 두 줄로 된 16층의 사용후 핵연료에 대해서 수행하였다. 사용후 핵연료를 그림 5에서와 같이 32곳의 측정지점에 대해서 dummy가 하나도 없는 경우와 dummy가 한 개 있는 경우를 평가한 결과이다. 먼저 dummy가 하나도 없는 경우는 각각의 최대값이 조금씩 틀리기는 하지만 16개 모두가 보이고 있다. 그리고 12번째 층에 한 개의 dummy가 있는 임의의 상황을 만들어 평가한 결과는 그래프에서와 같이 12번째 층의 peak가 나타나지 않으며 다른 값과 비교하여 현저히 낮은 값을 보이고 있다.

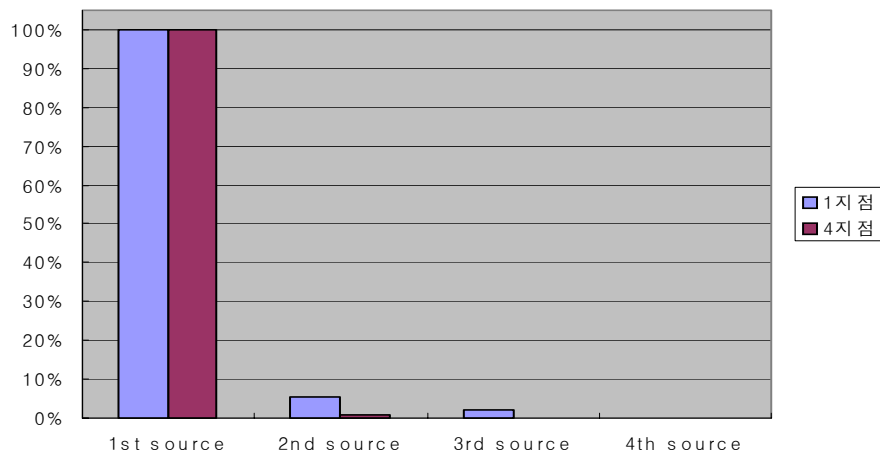


그림 4. 우측에 놓인 선원이 OFS의 선량평가에 미치는 비율

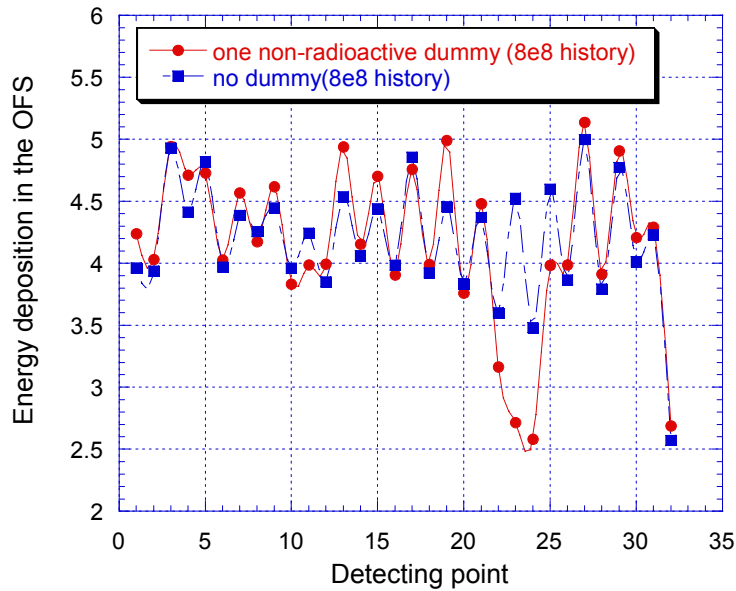


그림 5. 사용후 핵연료를 OFS로 선량 평가한 결과

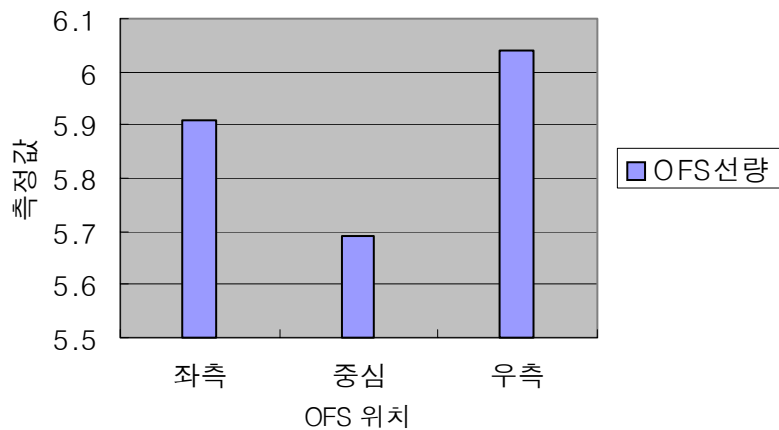


그림 6. OFS의 좌·우 위치에 따른 선량 변화

OFS가 사용후 핵연료에 근접할 경우의 선량변화를 그림 6에서 보이고 있으며, 각각의 평가된 선량의 차이는 중심값에 대하여 좌측인 경우 약 4%, 우측인 경우 약 6%의 차이를 보이고 있다. 따라서 OFS가 각 지점에서 사용후 핵연료방향으로 접근한다고 하여도

peak식별에 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 핵물질 안전조치 측면에서 월성 CANDU원전의 사용후 핵연료 검증목적으로 OFS의 위치변화에 따른 선량평가를 몬테칼로 방법으로 수행하였다. 측정위치로부터 우측으로 두 번째에 위치한 source가 OFS에 미치는 영향은 첫 번째 위치한 source와 비교할 때 5%로 평가되었다. 16층의 사용후 핵연료를 평가한 결과 peak값의 절대치는 약간의 차이는 보였으나 16개의 peak를 뚜렷이 구분할 수 있었다. 또한 OFS가 좌·우 위치변화에 따른 선량은 조금씩 다른 값을 보이기는 하지만 그 차이가 약 6%로 평가되었다. 시뮬레이션을 수행한 결과, 선원의 강도가 동일한 조건하에서 OFS의 측정은 약간의 차이가 있을 수 있지만 사용후 핵연료의 검증이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서 사용후 핵연료의 물질구성을  $UO_2$ 로 에너지는 662keV로 평가하였으나 실제 사용후 핵연료는  $UO_2$ 외에 다른 물질이 소량 함유되어 있고, 또한 다양한 에너지를 가지고 있기 때문에 향후 이에 대한 연구가 필요하다. 또한 cooling time에 따른 영향, low burn up에 의한 영향 등에 대한 연구도 같이 수행해 나간다면 OFS를 이용한 사용후 핵연료 검증에 좀 더 큰 신뢰를 얻을 수 있는 검증시스템을 개발할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 5. 감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력중장기연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

#### Reference

1. R. J. Ginther and J. H. Schulman, IRE Trans. Nucle. Sci. N.S-5(3), 1958.
2. V. K. Voitovetskii et al., Atomn. Energ. 6, 1959.
3. L. M. Bollinger, G. E. Thomas, and R. J. Ginther, "Neutron Detection with Glass Scintillators", Nucl. Inst. and Meth. 17, 1962.
4. 이화학 대사전, 창원사, 1976.
5. G. F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement, 2nd Edition" John Wiley & Sons, Inc., 1989.
6. LANL, MCNPX<sup>TM</sup> User's Manual, Los Alamos National Laboratory, MCNP<sup>TM</sup> 2.4.0, LA-CP-02-408, 2002