

사용후핵연료 축방향 연소도 분포를 이용한 사용후핵연료 검사 방법론

문주현, 박병기*, 김신**, 이봉수***

동국대학교, 경상북도 경주시 석장동 707

* 순천향대학교, 충남 아산시 신창면 읍내리 646

** 제주대학교, 제주도 제주시 제주대학로 66

*** 건국대학교, 충청북도 충주시 단월동 322

ihmoon86@dongguk.ac.kr

1. 서론

원전에서 연소된 핵연료집합체는 건전성 확인 등의 목적을 위해 검사된다. 현재, 국내 원전에서는 계획예방정비기간 중 사용후핵연료 집합체 형상에 대해 육안검사 및 초음파검사를 수행하고 있다. 또한 이 검사방법 이외에도 사용후핵연료에 포함되어 있는 Xe^{133} 의 누설 여부를 측정하여 사용후핵연료 집합체의 결함 여부를 판별하는 방법도 있다.¹⁾

육안검사는 원자로에서 사용후핵연료 집합체를 인출하는 과정 중 실시간으로 검사결과를 얻을 수 있다는 장점이 있지만, 확보된 영상정보의 질과 육안 검사자의 판독능력 등에 따라 검사결과 정확도가 달라지는 단점이 있다. 초음파검사는 육안검사보다 정확한 검사결과를 얻을 수 있다는 장점이 있으나, 사용후핵연료 집합체를 원자로에서 인출하면서 실시간으로 검사할 수는 없으며, 검사를 위해 별도의 장소로 운반해야하기 때문에 운반 중 사용후핵연료 집합체가 추가로 손상될 가능성과 이를 취급하는 작업종사자의 추가적인 방사선피폭 가능성이 높다는 단점이 있다. 한편 Xe^{133} 을 이용한 검사는 사용후핵연료봉 끝단에서 Xe^{133} 의 평균 농도를 측정하고 있기 때문에, 사용후핵연료 끝단의 구조물 내부 물질에 포함되어 있는 방사화생성물 Co^{60} , Co^{58} , Mn^{54} 와 같은 방사화생성물의 강력한 감마 에너지에 의해 Xe^{133} 만을 선별적으로 계측해야 한다는 기술적 어려움과 함께, 결함이 발생한 것으로 판명된 경우 결함위치를 쉽게 판별할 수 없다는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 사용후핵연료 집합체를 원자로에서 인출하는 과정에서 실시간으로 검사하여, 사용후핵연료 집합체의 결함여부를 보다 용이하게 판별할 수 있는 방법론을 제안하고자 한다.

2. 본론

가. 이론적 배경

사용후핵연료에서 방출되는 방사능은 주로 중성자와 감마선에 의한 것이다. 사용후핵연료에서 방출되는 대부분의 감마방사능은 ^{95}Zr (반감기: 64.0일), ^{95}Nb (35.0일), ^{103}Ru (39.4일), $^{106}Ru-Rh$ (366.4일), ^{134}Cs (2.06년), ^{137}Cs (30.17년), $^{144}Ce-Pr$ (284.5일), ^{154}Eu (8.5년), ^{54}Mn (312.2일), ^{58}Co (70.3일), ^{60}Co (5.27년) 등과 같은 몇 개의 핵분열생성물과 방사화생성물에 의한 것이다. 사용후핵연료의 냉각기간이 1년 이상인 경우, 총 감마방사능은 대략 연소도(burnup)에 비례한다. 이러한 사실을 이용하여, 안전조치 목적으로 ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{154}Eu 등의 핵종에서 방출되는 감마 방사능을 계측하여, 사용후핵연료의 연소도와 냉각기간을 예측하는 방법론이 개발되어 사용되고 있다. 하지만, ^{95}Nb 와 ^{95}Zr 과 같은 단반감기 핵종에 의한 감마방사능이 지배적인 상황, 예를 들어, 원자로에서 핵연료집합체를 인출한 직후와 같은 상황에서는 적용하는데 한계가 때문에, 이들 방법은 1년 이상 냉각되어 단반감기 감마 방출 핵종이 붕괴된 사용후핵연료에 대해서만 적용하고 있다. 따라서 이 방법을 사용후핵연료를 인출하는 과정에 실시간으로 적용하기 위해서는 별도의 수정이 필요하다.

반면 사용후핵연료의 총 중성자 선량은 사용후핵연료의 연소도 지표로서 사용이 가능하다. 중성자속에 노출된 우라늄은 중성자를 포획하여 ^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am , ^{242}Am , ^{244}Cm 과 같은 초우란 핵종으로 변환되며, 이들 핵종의 대부분은 자발 핵분열과 (α, n) 반응을 통해 중성자를 방출한다. 10GWd/tU 이상의 연소도에 대해, 총 중성자선량과 핵연료집합체 연소도 사이의 관계를 다음과 같은 실험식으로 근사할 수 있는 것으로 알려져 있다.²⁾

$$neutron\ rate = \alpha(burnup)^\beta \quad (1)$$

여기서 α는 척도인자(scaling factor)이며, β는 3.0~4.5 범위의 값을 갖는다. 식 (1)은 다양한 종류의 경우로 핵연료집합체에 대해 입증되어 왔으며, 계측된 총 중성자선량으로부터 연소도를 추정할

수 있는 근거를 제공하고 있다.

나. 사용후핵연료 검사 방법론

식(1)과 같이 중성자율과 연소도 사이에 비례 관계가 있다는 사실을 이용하여, 사용후핵연료 집합체로부터 방출되는 중성자율을 계측함으로써, 사용후핵연료 집합체의 이상 유무의 판별이 가능한 것으로 판단된다. 먼저, 사용후핵연료 집합체의 축방향 연소도 분포를 구한다. 검사대상 핵연료 집합체와 동일한 설계변수에 대해, 전산코드(MASTER 코드 등)를 이용하여 사용후핵연료 집합체의 축방향 방출 연소도 분포를 구한다. 핵연료집합체 설계변수에 따라 축방향 연소도 분포가 조금씩 달라질 수 있으나, 대략적으로 그림 1과 같은 모양을 가지게 될 것이다. Fig. 1은 국내 웨스팅하우스형 핵연료집합체 16개를 대상으로 축방향 연소도 분포를 구한 것이다.

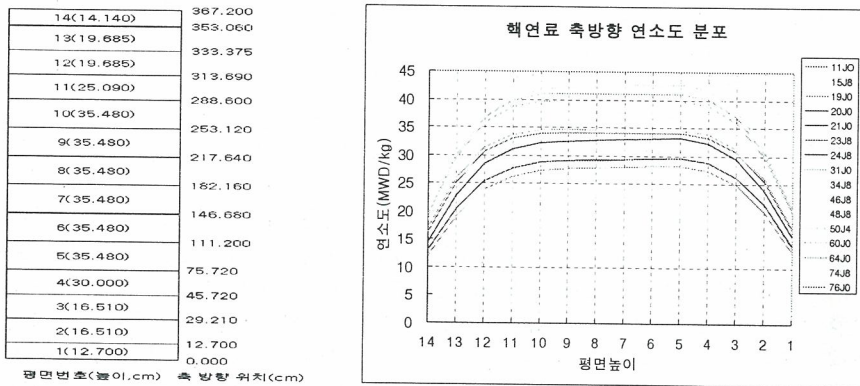


Fig. 1 국내 웨스팅하우스형 핵연료집합체의 축방향 방출 연소도 분포

그 다음 원자로에서 핵연료집합체를 stepwise로 인출하면서 핵연료집합체 측면에서 방출되는 중성자율을 중성자계측기(예: Fission Chamber)를 통해 계측한다. 이 중성자율 계측값을 Fig. 1의 오른쪽 그림과 같이 핵연료집합체 축방향을 x축으로 놓고 그래프를 그린다. 마지막으로 중성자율 계측값 그래프의 모양과 계산을 통해 구한 핵연료집합체 축방향 연소도 그래프의 모양을 비교하여 일치여부를 판단한다. 이때 두 그래프의 모양이 일치하지 않으면 해당 핵연료집합체가 정상적으로 연소되지 않았을 가능성이 높다. 또한 그래프 상 왜곡된 부분이 발견될 경우, 그곳에 해당하는 핵연료집합체 위치에 이상이 있을 가능성이 높다. 계측오류가 있을 경우, 위와 같은 그래프의 불일치나 왜곡이 발생할 수 있지만, 여기에서는 계측오류의 발생은 무시하는 것으로 가정한다.

3. 논의

본 연구에서는 상기의 방법론을 구현하기 위해, 현재 사용후핵연료 집합체로부터 방출되는 중성자를 계측하기 위한 계측센서를 개발하고 있다. 이 중성자 계측센서는 중성자를 흡수하여 (n, α), (n, β) 반응을 일으켜 α 또는 β입자를 발생시키는 중성자 반응물질 (⁶LiF 등)과 발생된 α 또는 β입자와 반응하여 섬광을 발생시키는 섬광물질(ZnS:Ag 등)이 함유 또는 부착된 광섬유로 구성되어 있다. 센서에서 발생한 섬광은 연결된 광섬유를 통해 광전변환기로 전달되며, 이때 섬광량은 조사된 중성자 선량과 일정한 상관관계를 갖는다. 현재 개발된 중성자 계측센서에 대한 예비 성능시험을 수행 중에 있다.

4. 참고문헌

[1] R. E. Womack, "Fuel Rod Leak Detector," U. S. Patent No.4,110,620 (1978).
 [2] J. R. Phillips, et al, "Neutron Measurement Techniques for the Nondestructive Analysis of Irradiated Fuel Assemblies," Los Alamos National Laboratory, LA-9002-MS (1981).

사사

본 연구는 교육과학기술부의 원자력연구개발사업(과제번호:M20806000028-08B0600-02810)으로 수행되었다.