2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

사용후경수로핵연료집합체의 수평방향 연소도 구배 결정

Determination of Horizontal Burnup Gradient of PWR Spent Nuclear Fuel Assembly by Gamma Spectrometry

박광준, 조일제, 김길수, 엄성호, 박성원

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

고리1호기 및 2호기에서 배출된 사용후핵연료집합체에 대하여 수평방향 연소도 구배를 감마선 측정 방법에 의해서 결정하였다. 핵연료집합체에 대한 감마선 측정은 KAERI의 PIEF 1번수조에서 수중연소도측정장치를 사용하여 4개면에 대하여 수행되었다. 측정결과 고리1호기에서 3주기 동안 연소된 F02 집합체의 연소도 구배는 11 %(1-3면) 및 7 %(2-4면)이었으며, 고리2호기에서 2주기 동안 연소된 J44 집합체는 4 %(1-3면) 및 19 %(2-4면)로 나타났다. 이러한 수평방향 연소도 구배 값은 축방향 연소도 분포와 더불어 집합체 평균 연소도를 결정하기 위해서 사용될 것이다.

Abstract

Horizontal burnup gradients were determined by gamma-ray spectrometry for the PWR spent nuclear fuel assemblies discharged from Kori Unit-1 and Unit-2 power reactors in 1985 and 1992, respectively. Gamma-ray Measurements of 4 faces of the fuel assembly were carried out using a under-water burnup measuring device in a pool of PIEF at KAERI. As a result of data analysis, horizontal burnup gradients of F02 assembly burned in Kori Unit-1 for 3 cycles were 11 % for the 1-3 faces and 7 % for the 2-4 faces, and those of J44 assembly burned in Kori Unit-2 were 4 % and 19 %. These values will be employed to determine the average burnup of fuel assembly with the axial burnup distribution determined by gross gamma scanning.

1. 서 론

핵연료는 원자로에서 연소하는 과정에서 원래의 조성이 변하게 되며, 그 조성변화중 핵분열을 일으키는 핵연료 물질의 변화는 저장, 수송, 재활용시 임계안전에 중요한 영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 조성변화를 확인하여야 하며, 그 확인방법으로서 연소도를 측정하는 방법이 보편화되어 있다. 연소도 측정 방법으로는 감마선 및 중성자 측정에 의한 방법이 주로 사용되고 있으며, 그 외에 체렌코프광 측정법, 칼로리메트리법 등이 사용되고 있다.[1] 대부분의 원자력 선진국에서는 감마선 및 중성자 측정에 의한 연소도 측정 방법을 동시에 사용하고 있지만 본 연구과제에서는 감마선 측정방법에 의한 장치를 개발하여 축방향 및 수평방향 연소도를 측정하고 있다. 사용후핵연료에 대한 모든 측정시험은 고준위 방사선 차폐가 완벽한 수조나 핫셀에서 수행된다. 사용후핵연료집합체에 대한 평균 연소도를 결정하기 위해서는 축방향 연소도 분포와 수평방향 연소도 구배의 결정이 선행되어야 한다. 사용후핵연료집합체의 축방향 연소도 분포 결정은 집합체 전체길이에 대하여 일정한 간격의 위치에서 방출되는 감마선을 측정하여 결정한다. 또한 수평방향 연소도 구배는 핵연료집합체의 4개 면에 대해서 그로스 감마선 및 감마선스펙트럼을 측정하고, 동일한 축방향의 특정 위치에서 얻은 감마선 계수를 비교하여 결정하게 된다.

2. 실험

고준위 방사선을 방출하는 사용후핵연료집합체에 대한 감마선 측정시험은 PIEF의 핵연료 하역수조(unloading pool)에서 수행하였다.

(1) 실험장치

사용후핵연료집합체 하역수조에는 새로 개발된 수중 연소도 측정장치가 설치되어 있는데, 이 장치는 검출기차폐체, HPGe 검출기/액체질소 냉각용기, 시준기(collimators), 연료깃(fuel collar), 다운튜브(down tube) 등으로 구성되어 있다.[2] 검출기차폐체내에 있는 HPGe 검출기와 수조 바깥쪽 작업구역에 설치된 전자장비와의 사이에는 전원/신호 케이블이 연결된다. 그림1은 수조와 측정시스템에 대한 개략적인 모습을 보여준다. "V"자형으로 되어 있는 기존의 연료깃은 집합체의 2개면이 동시에 접촉하게 되므로 수평방향 연소도 구배를 측정할 수 없다. 그래서 집합체의 4개 면을 각 면에 대해서 별도로 측정할 수 있게 하기 위하여 그림2와 같은 "ㄷ"자 형태의 연료깃을 새로히 설계/제작하여 사용하였다.

(2) 시험대상 핵연료 특성

고리1호기 및 2호기에서 연소된 사용후핵연료집합체 F02 및 J44의 특성은 표1과 같다. F02집합체는 14x14 배열을 갖는 경수로용 핵연료로서 고리1호기에서 3주기 동안 연소하고 1985년도에 배출되었으며, 배출시의 발전소공표 연소도는 28,300 MWd/tU이다. 그리고 J44집합체 역시 경수로용 연료로서 16x16 배열을 가지며 고리2호기에서 2주기 동안 연소되었다. 1992년도에 배출되었으며 발전소공표 연소도는 35,000MWd/tU이다.

(3) 측정시험

수중 감마선측정장치는 시험시 수조 벽에 고정되기 때문에 핵연료집합체를 이동시키면서 집합체로부터 방출되는 감마선을 측정하게 된다. 축방향 연소도 분포 결정을 위한 시

험은 측정장치의 HPGe 검출기와 시준기 슬릿이 위치한 곳을 기준으로 하여 핵연료집합체를 상단 부분에서부터 하단 부분까지 50 mm 간격으로 그로스 감마선(gross gamma-ray)을 획득하는 방법으로 수행하였다. 또한 수평방향 연소도 구배 측정시험은 핵연료집합체의 4개 면에 대하여 각각 축방향 그로스 감마선을 획득하거나 또는 특정 축방향 위치에서 1 4면까지 회전시켜 가면서 그로스 감마선을 획득하는 방법을 취하였다.

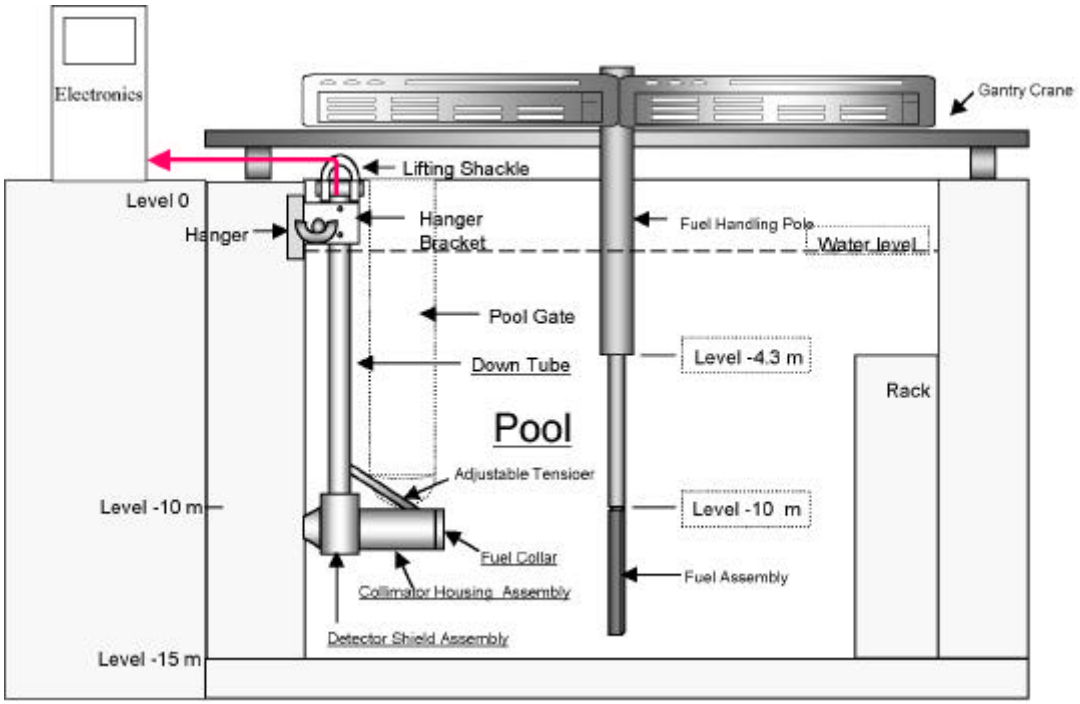

그림1. 사용후핵연료집합체 측정수조 및 측정시스템 개요도.

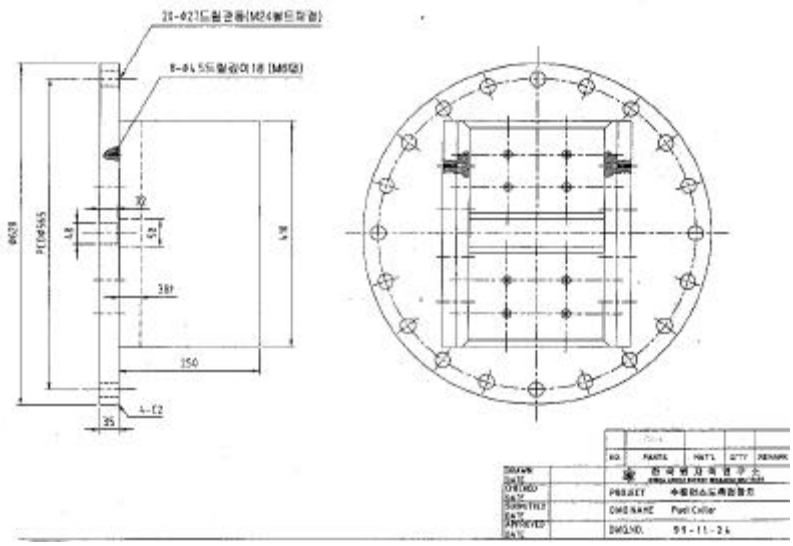

그림2. 사용후핵연료집합체 수평방향 연소도 구배 측정을 위한 연료깃.

3. 결과 및 고찰

수평방향 연소도 구배는 사용후핵연료집합체의 동일한 축방향 위치에서 서로 대응되는 면, 즉 1-3면 및 2-4면에서 얻은 계수율의 비를 구함으로서 결정하였다. 표1은 사용후핵연료집합체 F02 및 J44의 연소이력과 수평방향 연소도 구배 측정결과를 보여준다.

표1. F02 및 J44 사용후핵연료집합체의 연소이력 및 수평방향 연소도 구배 측정결과

Fuel Assembly/Type	Reactor	Cycle/Position	Measuring Method	Burnup Gradient	
				1-3 Facet	2-4 Facet
F02 (14x14)	Kori-1	4(B6), 5(K9), 6(L10)	gross gamma-ray	11 %	7 %
J44 (16x16)	Kori-2	7(C8),8(C7)	gross gamma-ray	4 %	19 %

표에서 보는 바와 같이 F02 집합체의 경우 연소도 구배는 1-3면이 11 %로서 2-4면의 7 % 보다 크게 나타났고, 이에 반해 J44 집합체의 경우에는 2-4면이 19 %로서 1-3면의 4 % 보다 연소도 구배가 크게 나타난 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 핵연료 교체시에도 집합체의 면이 바뀌지 않으며, 또한 노심 중앙쪽이 바깥쪽보다 중성자 밀도가 높기 때문에 연소주기 동안 노심 내에서 어느 위치에 놓여있었느냐에 따라 차이가 날 수가 있다. 그림3과 그림4는 고리1호기의 F02 집합체와 고리2호기의 J44 집합체의 연소주기 변화에 따른 노심내 위치이동 이력을 보여주고 있다.

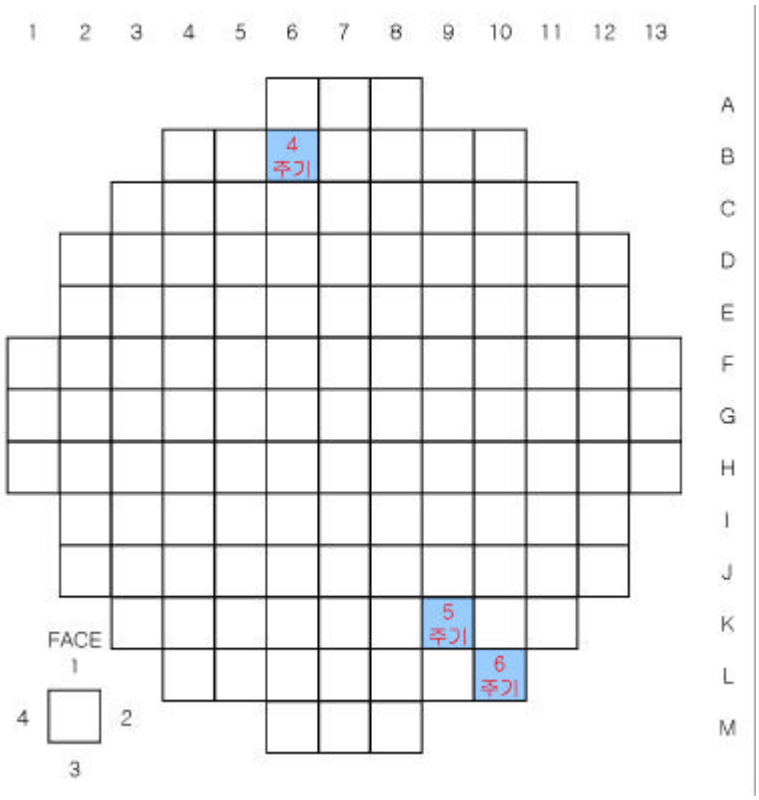

그림3. 고리1호기 F02 집합체의 연소주기별 노심내 위치이동.

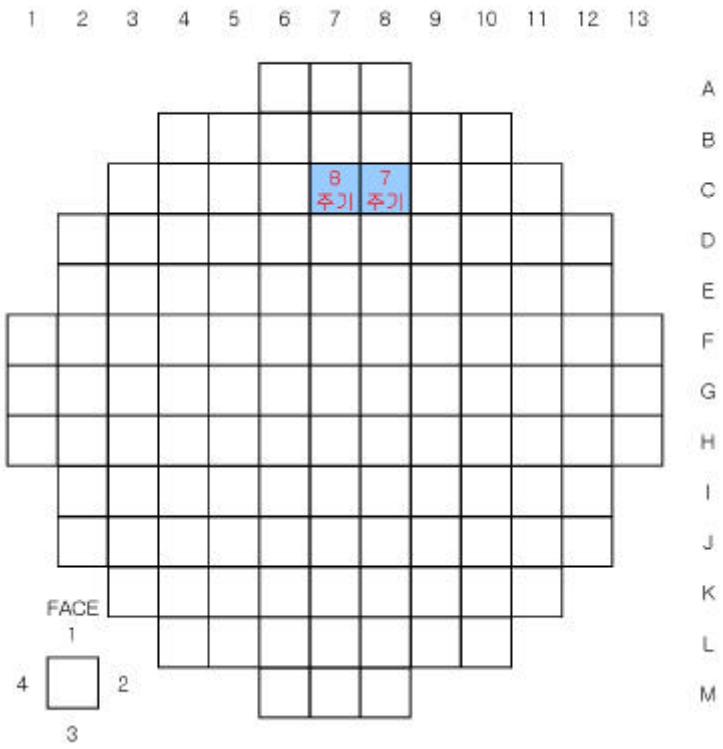

그림4. 고리2호기 J44집합체의 연소주기별 노심내 위치이동.

그림3에서 보는 바와 같이 F02 집합체는 고리1호기에서 4, 5, 6주기 연소하였다. 4주기 때는 노심 중앙으로부터 위쪽 끝 부분에 위치함으로서 1면이 3면보다 연소 정도가 작았을 것이고, 5주기 및 6주기 때는 노심 중앙으로부터 우하쪽 끝 부분에 위치하여 3면이 1면 보다 연소량이 작았을 것이다. 따라서 F02 집합체는 2주기 동안 노심의 우하 바깥 부분에서 연소한 3면이 1주기 동안 위쪽 바깥 부분에서 연소한 1면 보다 상대적으로 적게 연소하였을 것이다. 마찬가지로 노심내 위치상으로 볼 때 2면이 4면 보다 연소량이 적었을 것이고, 또한 그 차이의 정도는 1-3면보다 작을 것이다. 이러한 예측은 표1의 실험결과와 같은 경향을 나타냄으로서 실험적으로 확인되었다.

그림4는 J44 집합체가 고리2호기 노심에서 7주기 및 8주기 연소한 위치를 보여준다. 이러한 위치는 노심 중앙과 위 바깥쪽의 중간 부분으로서 2주기 동안 위치 변화가 거의 없이 연소하였다는 것을 알 수 있다. 따라서 노심내 위치상으로 볼 때 1-3면에서의 연소도 차이가 2-4면 보다 크게 되어야 한다. 그러나 실험결과는 1-3면에서 4 %, 2-4면에서 19 %로 정반대로 나타났다. 그 원인을 정확히 알 수 는 없지만, 이 집합체가 결함이 생겨 배출된 연료이므로 정상적인 연소가 이루어지지 않았기 때문일 것이라고 추측할 수밖에 없다.

4. 결론

고리1호기 및 2호기에서 세 주기 및 두 주기 동안 연소한 후 배출된 F02 및 J44 집합체의 수평방향 연소도 구배를 감마선 측정방법에 의해서 결정하였다. 사용후핵연료집합체의 측정은 KAERI의 PIEF 수조에서 새로 개발한 수중 연소도측정장치를 이용하여 수행하였다. 측정결과, 고리1호기에서 연소된 F02 집합체의 연소도 구배는 1-3면에 대해서 11 %, 2-4면에 대해서 7 % 로 나타났다. 이러한 차이는 각 연소주기에서 노심내 위치를 고려하여 예측한 결과와 거의 일치하는 경향을 보여주고 있다. 그리고 고리2호기에서 연소된 J44 집합체의 경우, 1-3면에 대해서 4 %, 2-4면에 대해서 19 %로 나타났다. 이러한 결과는 연소중 노심내에서의 위치를 고려하여 예측한 경향과 실제 측정한 결과가 정반대의 양상을 보여주고 있다. 그러한 현상은 이 집합체가 결함이 생겨 정상적인 연소가 이루어지지 않아 배출된 연료이므로 일어날 수도 있다. 정확한 원인은 앞으로 많은 연구를 통하여 규명되어야 할 것이다. 실험적으로 결정한 이러한 수평방향 연소도 구배 값은 축방향 연소도 분포와 더불어 집합체 평균 연소도를 결정하는데 유용하게 사용될 것이다.

참고문헌

1. 박광준외 4인, 임계안전과 연소도 크레디트, KAERI/TS-52/98, 한국원자력연구소, pp.27-35(1998).
2. 박광준외 5인, 사용후 PWR 핵연료집합체 수중 연소도 측정시스템 사용자 지침서, KAERI/UM-5/99, 한국원자력연구소, pp.1-20(1999).

*본 연구가 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.