

감마스캐닝에 의한 연소도 추정방법 검증 연구

권형문, 엄성호, 장정남, 민덕기, 전용범
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045
django@kaeri.re.kr

1. 서론

사용후핵연료에서 방출되는 감마선 스펙트럼을 측정하면 연료봉 내부의 감마 방출 핵종에 대한 정보를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 핵연료의 연소상태 즉 연소도를 추정할 수도 있다. 본 연구는 한국원자력연구원 조사후시험시설에서 수행되어온 감마스캐닝에 의한 연소도 추정방법을 검증하기 위한 연구이다. 검증을 위해 사용후핵연료 미량의 시료를 용해하여 Cs-137 감마선을 측정된 결과와 여러 분리 단계를 거쳐 Nd-148를 ICP-MS로 정량분석한 결과를 연료봉의 감마스캐닝 결과와 비교하였다.

감마선을 이용하여 핵종비를 산출하는 식은 다음과 같다.

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{C_1}{C_2} \times \frac{\Gamma_2}{\Gamma_1} \times \frac{\tau_1}{\tau_2} \times \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (1)$$

여기서, A는 핵종량, atom 수

C는 감마선 검출량, counts

Γ 는 branching ratio

τ 는 반감기

ϵ 는 절대검출효율

위 식에서 평가하기 어려운 인자는 기하학적인 조건 및 검출기의 흡수율 등을 고려해야 하는 절대검출효율이다. 이를 보다 쉽게 평가하기 위해 상대검출효율을 고려해 볼 수 있다. 검출효율은 일반적으로 감마선 에너지와 식 2와 같은 관계를 갖으며, 상대검출효율을 적용하여 식 3과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon \propto E^m \quad (2)$$

여기서, E는 감마선 피크 에너지

$$\left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right) = \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^m \quad (3)$$

동일한 핵종에서 방출되는 두 개의 감마선을 이용하면 식 4를 통해 상대검출효율을 구할 수 있다. 사용후핵연료에서는 일반적으로 계수율이 높은 Cs-134의 604.7 keV와 795.86 keV 감마선을 이용한다.

$$\left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right) = \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^m = \frac{C_1 \Gamma_2}{C_2 \Gamma_1} \quad (4)$$

핵종비는 Cs-134 핵종의 604.72 keV 감마선과 Cs-137 핵종의 661.66 keV 감마선을 측정하여 식 1을 통해 산출하였으며, 핵종비와 연소도의 관계는 Origen-S 코드를 이용하여 평가하였다.

2. 평가 및 결과

국내 상용발전소에서 운반된 사용후핵연료봉에 대해 감마스캐닝 시험을 수행하고 화학분석 결과와 비교한 결과는 표 1, 그림 1과 같다. Cs-134/Cs-137 핵종비에 의한 연소도 추정방법은 Nd-148에 의한 화학분석 방법에 비해 과도 평가되는 경향을 보였으며, 시료 용해후 Cs-137 감마선을 측정하는 방법과 유사한 결과를 보여주었다. 고연소도 핵연료의 경우, 피복관과 소결체의 사이에서 화학적인 반응부가 형성되어 소결체를 완전하게 제거하기 어렵게 된다. 특히 화학분석용으로 샘플링하는 과정에서 상대적으로 연소도가 높은 RIM 영역이 피복관에 남게 되어 연소도가 다소 저평가될 가능성이 있다. 또한 소결체 중앙부에 Cs이 일부 방출되어 상대적으로 연소도가 높은 외곽부의 감마선 기여도를 높일 가능성이 있을 것으로 판단된다.

표 1. 감마스캐닝에 의한 연소도 추정 결과와 화학분석 결과 비교

연료봉	봉평균연소도(GWd/tU)		위치(mm)*	화학분석연소도(GWd/tU)		Cs-137 분포(GWd/tU)	
	Code	핵종비		Cs-137**	Nd-148***	Code	핵종비
Rod-A	56.72	57.71	831	56.59	59.54	66.45	67.61
			2289	64.57	65.69	63.78	65.18
			3328	52.85	48.10	52.33	53.24
Rod-B	44.10	54.31	878	59.40		48.10	59.24
			2356	63.43		50.02	61.61
Rod-C	53.75	54.76	378		50.39	53.43	54.43
			2047		58.98	59.83	60.95
Rod-D	40.53	44.69	327		38.03	37.47	41.31
			2124		44.70	46.37	51.12

* 연료봉 하단으로부터의 높이
 ** 시료 용해후 Cs-137 감마선 측정
 *** 시료 용해/분리후 Nd-148 정량측정

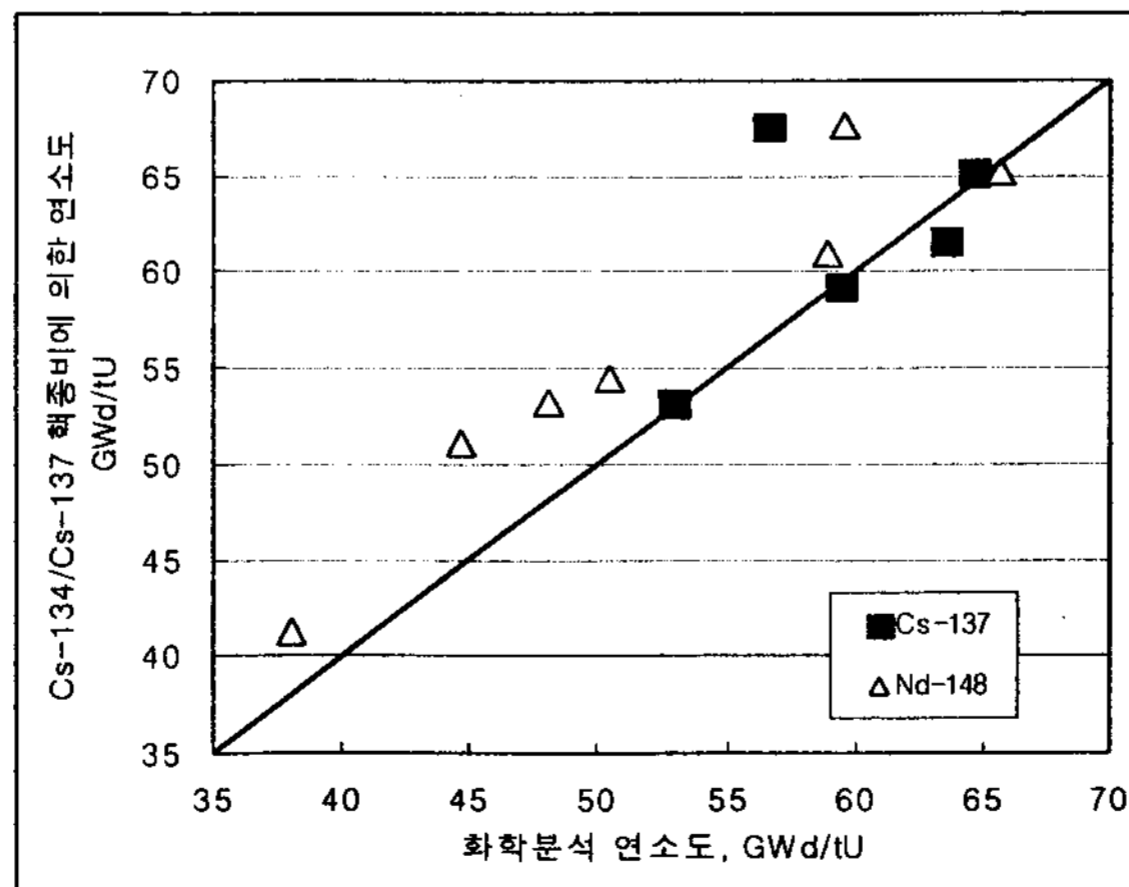


그림 1. 연소도 비교 결과

3. 결론

Cs-134/Cs-137 핵종비에 의한 연소도 추정방법은 Nd-148에 의한 화학분석 방법에 비해 과도 평가되는 경향을 보였다. 향후, 소결체 중앙부의 Cs 방출 영향과 cascade summing, self absorption 등에 대한 보정을 통해 감마스캐닝에 의한 연소도 추정방법을 개선할 계획이다.