

감마스캐닝을 이용한 사용후핵연료봉 active length 측정불확도 평가

권형문, 오완호, 장정남, 전용범

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

django@kaeri.re.kr

1. 서론

사용후핵연료의 active length는 소결체의 팽윤현상 및 밀도와 관련된 인자로 소결체에서 방출되는 감마선을 연료봉 측면에서 검출하여 측정할 수 있다. 이 방법은 연료봉 하단부터 시작하여 일정한 속도로 연료봉을 하강시키면서 측면에 고정 설치된 감마선 검출기로 감마선을 계수하여 핵연료 소결체 위치를 비파괴적으로 확인하는 방법이다. 본 연구에서는 한국원자력연구원 조사후 연료시험시설 콘크리트 핫셀 내부에 설치되어 있는 감마스캐닝 장치로 PWR 고연소도 연료봉의 active length 값을 측정하고, 불확도 인자를 검토하여 측정값에 대한 불확도를 평가하였다.

2. 평가 및 결과

Active length 측정을 위해, MCS(Multi-Channel Scailing) 모드에서 사용후핵연료에서 방출되는 감마선을 각 채널당 3초간 계수하고, 연료봉 하강속도를 1/3 mm/sec로 설정하였다. 측정에는 OXFORD사의 HPGe 검출기와 슬릿 크기가 25×0.5 mm인 collimator가 사용되었다. 여기서, 연료봉 길이방향에 해당하는 슬릿 크기는 0.5mm 이다. 시험대상 연료봉의 붕평균연소도는 48,698 MWd/tU, active length 설계값은 3657.6 mm 이다.

한 채널을 측정할 때, 0.5 mm의 슬릿이 1 mm을 이동하므로 한 채널 이동구간 내의 소결체가 균질한 방사능량을 갖는다고 가정하면, 한 채널에서 측정된 측방향 위치별 계수값은 사다리꼴 형태로 예상할 수 있다. Active length의 경계지점은 비소결체 영역과 소결체 영역의 사다리꼴이 겹쳐지는 부분으로 그림 1과 같이 3가지 경우를 고려해 볼 수 있다.

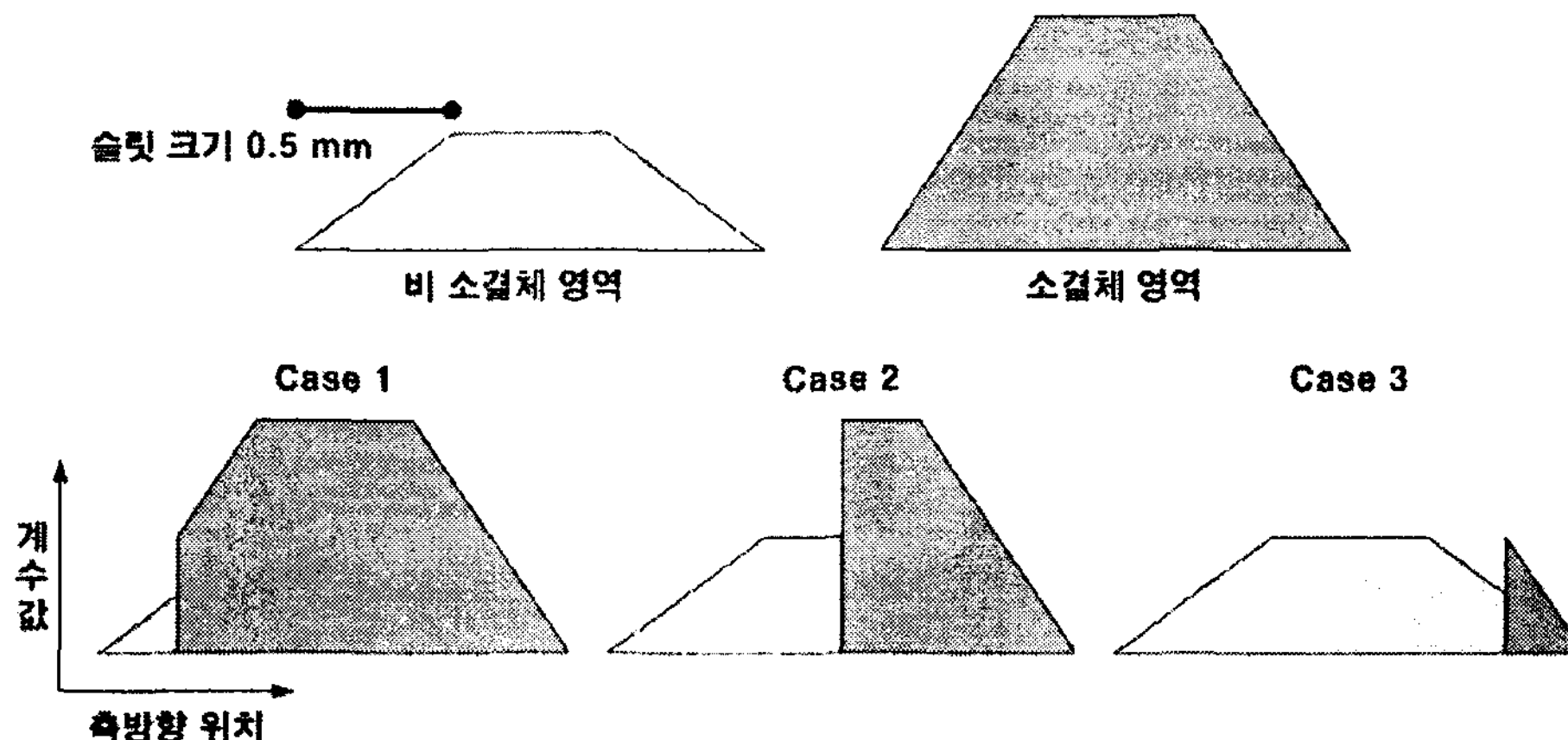


그림 1. 비소결체/소결체 경계지역의 감마선 계수 형태

각 경우에 대한 판별은 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

Case 1

$$\text{if } C_T > \left(\frac{C_N + 3C_P}{4} \right), \quad x = \sqrt{\frac{dC_T - C_P}{C_N - C_P}}$$

Case 2

$$\text{if } \left(\frac{C_N + 3C_P}{4} \right) \geq C_T > \left(\frac{3C_N + C_P}{4} \right), \quad x = \frac{dC_T - \left(\frac{C_N + C_P}{4} \right)}{\frac{C_N - C_P}{2}}$$

Case 3

$$\text{if } \left(\frac{3C_N + C_P}{4} \right) \geq C_T \quad x = 1.5 - \sqrt{\frac{dC_T - C_N}{C_P - C_N}}$$

- 여기서, C_T : 경계부분의 계수값
- C_N : 비소결체 영역의 계수값
- C_P : 소결체 영역의 계수값
- d: dish correction factor
- x: 경계지점

Active length 측정불확도는 그림 2와 같은 인자를 고려하여 평가하였다. 표 1은 연료봉 상단 소결체 경계값의 측정불확도 평가 결과를 보여준다.

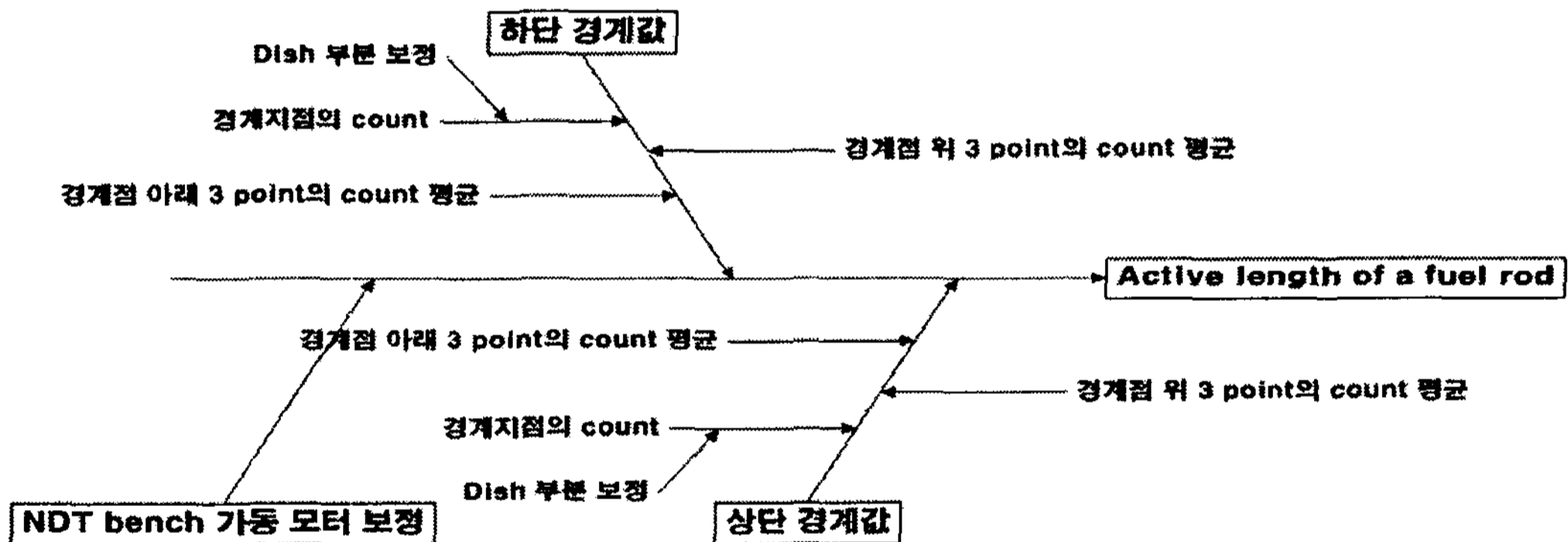


그림 2. Active length 측정불확도 분석인자 다이어그램

표 1. 연료봉 상단 소결체 경계값의 측정불확도 평가 결과

인자	값	표준불확도	Sensitivity coefficient
C_N	10633	80	-2.036E-3
C_P	12923	77	2.472E-3
C_T	12098	135	-8.518E-4
d	0.975	0.0027	-1.057E+1
x	0.5	0.28	

위 경우는 case 2에 해당하며, 연료봉 하단 경계값의 표준불확도 0.04를 합성하면 active length의 측정 표준불확도는 0.29, 95% 신뢰수준에서 확장불확도는 0.58 mm로 평가된다. 상단부분이 하단부분에 비해 불확도가 큰 이유는, 하단이 봉단마개 이후부터 소결체가 시작하는 것과 달리, 상단 부분은 플레넘 영역과 인접하고 있어 핵연료 물질의 확산 가능성이 높아 비소결체영역에서도 계수율이 높기 때문인 것으로 생각된다. 이 결과는 NDT bench의 가동모터 보정이 포함되지 않은 결과로 추후에 가동모터 보정값의 불확도를 포함하여 재평가할 예정이다.