

사용후연료 축방향 연소분포가 PLUS 7 핵연료 저장설비 임계안전에 미치는 영향 분석

손희동^{1*}, 한슬기¹, 이강욱¹, 조충래¹, 박화규¹, 박창제²

¹두산중공업(주), 경남 창원시 성산구 두산볼보로 22

²세종대학교, 서울 광진구 능동로 209

*heedong.sohn@doosan.com

1. 서론

사용후연료는 노심 운전조건과 운전기간, 노심내에서의 핵연료 위치 등 여러 가지 요인으로 인하여 축방향과 반경방향으로 다양한 연소분포를 가지게 된다. 특히, 핵연료의 축방향 연소분포는 핵연료의 연소기간 및 연소도 증가에 따라 몇 가지 전형적인 패턴을 보여준다. 축방향 연소 패턴에 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔으며 그러한 연구 결과를 토대로 연소도별 Axial Profile이 여러 문헌을 통해서 발표되었다. PLUS 7 사용후연료 저장 설비 임계안전 평가 시 이러한 Axial Profile을 적용하여 축방향 연소분포를 분석하고 축방향으로 균일한 연소분포 대비 임계안전 차원에서 어떤 차이가 있는지 파악하고 Axial Profile이 충분히 보수적인 결과를 도출할 수 있는지 확인하는 것이 필요하다.

2. 본론

2.1 이론적 배경

일정기간 연소된 후 노심에서 인출된 사용후연료의 반응도는 핵연료 상·하부 끝단의 저연소도 영역에 의해서 영향을 받으며, 하단부 보다는 상단부 끝단이 더 큰 영향을 미치게 된다. 이는 노심내에서 냉각수의 이동에 따른 핵연료 상단부 온도가 하단부 보다 더 높기 때문이다.

또한 일정 연소도 영역 이상에서는 축방향으로 균일할 연소분포 보다는 실제 연소된 분포(Axial Profile)를 적용하여 계산한 중성자증배계수 값이 더 크게 나타난다. 이러한 효과는 냉각기간이 길수록 그리고 핵종은 Actinide 와 Fission Product를 모두 고려한 경우가 그렇지 않은 경우보다 크게 나타난다.

PWR Type 원전에서 노심에 장전된 핵연료는 노심 연소 초기에는 핵연료 상·하부 끝단보다는 핵연료 중간 부분에서 더 빨리 연소가 진행되어 Fig. 1과 같이 핵연료 축방향으로 Near Cosine Axial Flux Shape이 나타난다. 또한 핵연료 상·하부 끝

단은 상대적으로 높은 중성자 Leakage로 인하여 핵연료 중간 부분보다 연소되는 정도가 느리다. 그러므로 연소가 진행될수록 핵연료 상·하부 끝단의 핵분열성 물질량이 상대적으로 핵연료 중간부분 보다 많이 분포하게 되어 사용후연료의 반응도 증가에 기여하게 된다.

그리고 연소도가 증가할수록 Fission Density가 Peak 값을 나타내는 부분이 핵연료 중간부분에서 양 끝단으로 옮겨가게 되어 고연소도 영역에서의 Fission Density는 상대적으로 연소가 덜 된 핵연료 양 끝단에서 큰 값을 나타내게 된다.

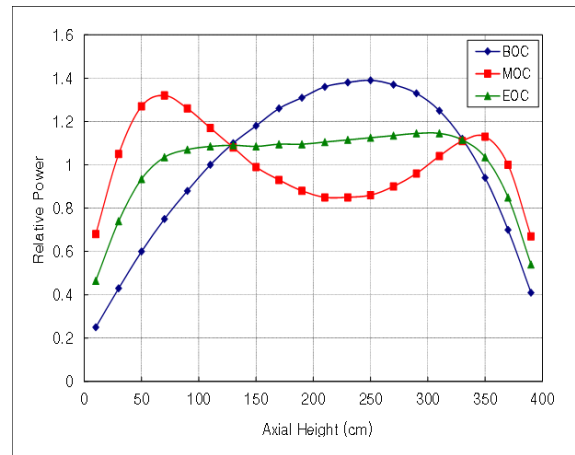


Fig. 1. Axial Power Distribution for a Typical PWR[1].

2.2 임계안전 평가 계산 조건

U^{235} 농축도 2.5 ~ 5.0wt%, 연소도 11,000 ~ 44,000MWD/MTU, 출력밀도 4.95 ~ 42.06MW/MTU, 연소후 냉각기간 100시간을 적용한 PLUS 7 핵연료가 Fig. 2와 같은 모양의 핵연료 저장시설에 저장되어 있다고 가정한다. 핵연료 저장시설은 2.5 mm 두께의 스테인레스 스틸로 구성된 사각기둥 모양의 핵연료 저장 공간이 서로 인접해서 연결되어 바둑판 모양을 하고 있고 핵연료와 핵연료 사이에는 Plate 형상의 중성자 흡수물질이 한 개 설치되어 있다. 핵연료 4다발을 저장할 수 있는 2 x 2 배열의 단위 셀을 모델링 한 후 X-Y 방향으로는 Periodic

Boundary Condition을 적용하여 무한배열을, 축방향으로는 Active Fuel과 Fuel 상.하단에 50 cm 두께의 물층을 모델링 한 다음 유한배열을 적용하였다.

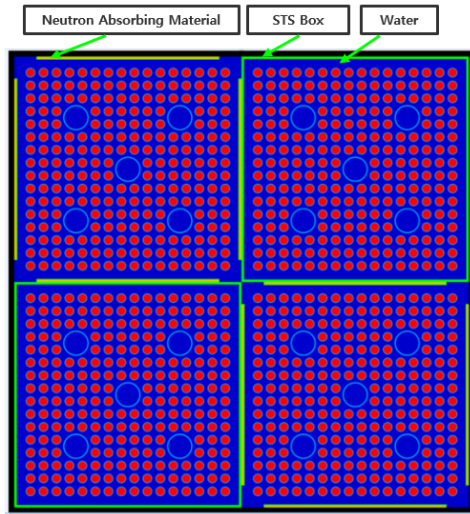


Fig. 2. Spent Fuel Storage Facility.

2.3 결과 및 고찰

Table 1은 Fig. 2와 같은 사용후연료 저장설비에 PLUS 7 핵연료가 저장되어 있다고 가정하고 핵연료의 농축도와 연소도에 따라 축방향으로 Axial Profile을 적용한 경우와 균일한 연소분포를 적용하여 중성자증배계수 값을 계산한 결과를 비교한 것이다. Axial Profile은 NUREG/CR-6801[2]에 기술된 Burnup Group별 Bounding Profile을 적용하였으며 핵연료 축방향으로 총 18개의 Node로 구분하여 각 Node별 연소분포를 계산하였으며, 균일한 연소분포는 Active Fuel을 1개의 Node로 구분하고 평균연소도를 적용하여 계산하였다.

Table 1. keff Difference between Axial and Uniform Distribution for PLUS 7

구분	keff	Distribution		차이 (A-B)
		Axial(A)	Uniform(B)	
U ²³⁵ 농축도 (wt%)	평균연소도 (MWD/MTU)			
2.5	11,000	0.92563	0.91733	0.00830
3.0	18,000	0.92338	0.91531	0.00807
4.0	31,000	0.92868	0.91292	0.01576
5.0	44,000	0.92583	0.91044	0.01539

계산 결과 2.1항에 기술된 내용과 동일한 결과는 나타나지는 않았지만 고연소도 영역에서의 두 경우

의 차가 저연소도 영역에서의 차이보다 약 2배 큰 값이 나타남을 알 수 있었다. 이는, 연소가 진행될수록 Axial Profile을 적용한 연소분포 계산은 고연소도 영역이 저연소도 영역보다 보수적인 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

3. 결론

사용후연료 저장설비 임계해석시 핵연료의 축방향 연소분포는 Axial Profile을 적용한 경우와 균일한 분포를 적용한 경우와 비교하여 그 차이는 불확실도로 반영이 되어야 한다. Axial Profile을 적용한 연소분포 계산은 핵연료 상.하부 끝단의 연소된 정도에 따라 차이를 나타내는데 이는 핵연료 상.하단 Node 에서 핵분열성 물질이 차지하는 비율이 다른 Node에 비해서 상대적으로 크기 때문이다. 또한 PLUS 7 핵연료에 대해서 NUREG/CR-6801에 기술된 Profile을 적용하여 축방향 연소분포를 계산할 경우 고연소도 영역에서는 보수적인 결과를 얻을 수 있다.

4. 참고문헌

- [1] C.J. Park, H.G. Park, H.D.Sohn, S.G. Hong, "End Effect Analysis with Various Axial Burnup Distributions in High Density Spent Fuel Storage Racks", Annals of Nuclear Energy 82, 174-178 (2015).
- [2] Wagner, J.C., DeHart, M.D. and Parks, C.V., "Recommendations for Addressing Axial Burnup in PWR Burnup Credit Analyses", NUREG/CR-6801, ORNL/TM-2001/273, Oak Ridge National Laboratory (2002).
- [3] Turner, S.E., "An Uncertainty Analysis - Axial Burnup Distribution Effects", Proc. Workshop Use of Burnup Credit in Spent Fuel Transport Cask, Washington D.C., Feb 21-22, (1988).