

CANFLEX-NU 핵연료봉 봉단마개 부위에서의 열.기계적 거동 해석

심기섭, 박광석¹⁾, 정창준, 석호천
한국원자력연구소

요 약

중수로용 핵연료봉의 봉단마개 부위는 열.기계적 작용에 의해 핵연료봉 파손이 쉽게 발생할 수 있는 취약 부위로 알려져 있다. 따라서, 핵연료봉 설계시 봉단마개 부위의 열.기계적 거동을 해석하고, 이 결과를 설계에 반영하여 파손 가능성이 없음을 확인하여야 한다. 여기에서는 중수로용 개량 핵연료인 CANFLEX-NU 핵연료봉 봉단마개에서의 열.기계적 거동을 해석하였는데, 이 결과 CANFLEX-NU 핵연료봉은 출력이 매우 낮아서 열중성자속 집중을 고려하더라도 봉단마개 부위 건전성을 충분히 유지하는 것으로 나타났다.

1. 서론

정상상태 운전시 중수로용 핵연료봉에서의 파손은 주로 피복관 원주방향 주름 위치와 봉단마개-피복관 용접 부위에서 발생하는 것으로 알려져 있다. 봉단마개-피복관 용접 부위에서의 핵연료봉 파손은 응력부식균열 (SCC) 에 의해 주로 발생하는 것으로 또한 알려져 있다. SCC 파손이 발생되기 위해서는 핵분열 기체가 다량 존재하여야 하고, 이와 동시에 인장 하중도 어느 수준 이상으로 작용하여야 한다. 따라서, SCC 핵연료봉 파손을 방지하기 위해, 파손 발생 예상 부분에 높은 수준의 인장 하중이 작용하지 않도록 하며, 다른 방법으로 소결체 미세조직 등을 조절하여 핵분열 기체 방출을 억제하거나 운전 조건을 조절하기도 한다.

중수로용 핵연료다발 경우, 다발과 다발 사이에 UO_2 와 같은 강력한 중성자 흡수체가 존재하지 않는 영역이 있어 열중성자속 집중 현상 (end flux peaking) 이 발생하는데, 이 결과로 양단 소결체 온도가 더 높아지고 나아가 봉단마개에 더 큰 인장 하중이 작용할 수 있다. 따라서, 중수로용 핵연료봉을 개발할 때에는 봉단마개-피복관 용접 부위에서의 열.기계적 거동 해석을 엄밀히 수행하여 이 결과를 설계에 충분히 반영하여야 한다. 기존 중수로용 핵연료봉 개발시, 이러한 열.기계적 현상을 처음부터 설계에 고려하지 않았으며, 이후 부분적으로 그 영향을 분석한 바 있다. 그러나, 본 연구팀에서는 중수로용 개량 핵연료인 CANFLEX-NU 를 개발하는 과정에 이상의 연료봉 열.기계적 거동을 해석하는 방법을 개발.정립하였고, 이를 그 설계에 반영하고 있다. 여기에서는 본 연구팀에서 수행한 CANFLEX-NU 핵연료봉 봉단마개-피복관 용접 부위의 열.기계적 거동 해석 결과를 기술한다.

1) 현소속 : 충남대학교 전자공학과

2. 열중성자속 집중이 소결체 온도에 미치는 영향

중수로용 핵연료봉내에는 봉단마개와 피복관과의 용접시 발생하는 용접 flush 를 수용하고 또 소결체가 축방향 팽창하더라도 봉단마개를 치지않도록 하는 공간을 마련하기 위해 축방향 틈새를 둔다. 핵연료다발들이 핵연료 채널에 장전되어 있을 때, 다발과 다발 사이에는 Zircaloy-4 의 봉단접합판 및 봉단마개와 빈 공간의 축방향 틈새만이 존재하는 영역이 있게 된다. 이 영역에는 UO_2 와 같은 강력한 중성자 흡수물질이 없어서 열중성자속 집중 현상이 발생하게 된다. 핵연료 장전시 1번 위치 핵연료다발의 한쪽 끝이 잠시동안 중수 (D_2O) 에 의해 둘러쌓이게 되는데, 이때에도 중수에 의해 둘러쌓이는 연료봉 한쪽 끝에 열중성자속 집중 현상이 발생하게 된다. 이러한 결과로 소결체 온도가 크게 증가하여 연료봉 건전성을 위협할 수 있다.

2.1 열중성자속 집중 계수

PEAKAN 코드를 이용하여 열중성자속 집중 계수를 구하였다 [1]. 여기서, 열중성자속 집중 계수는 연료봉 중앙에서의 열중성자 속에 대한 연료봉 끝에서의 열중성자 속의 비로 정의한다. PEAKAN 코드에서는 충돌 확률 계산을 단순화하기 위해 block method 를 사용하고 있다. 즉, 핵연료다발을 포함하는 격자를 여러개 block 으로 나누고, 각 block 을 또한 여러 개의 region 으로 나눈다. 중성자 흡수/충돌 단면적 자료 계산을 위해, 에너지를 4 개 그룹, 즉, $10 \sim 1.353$ Mev, 1.353 MeV ~ 1.425 keV, 1.425 keV ~ 0.625 eV, $0.625 \sim 0$ eV 의 그룹으로 나누며, WIMS-AECL 코드를 사용하였다 [1].

그림 1 및 2 는 열중성자속 집중 계수 해석 결과들 예시한 것이다. 이 그림들에서 다음의 결과들을 얻을 수 있다:

- a. 열중성자속 집중 계수는 다발-다발 사이에서 보다 다발-냉각재 사이에서 더 크게 일어난다. 다발-냉각재 사이에서의 열중성자속 집중 현상은 최대 10 분 정도 지속되고 단지 1 개 다발에만 국한된다. 따라서, 핵연료봉 건전성 해석시 다발-냉각재간 열중성자속 집중 현상은 고려하지 않는다.
- b. 다발 바깥에서 중심부로 들어올수록 열중성자속 집중은 더 크게 나타난다. (다발 중성자 속은 바깥쪽에서 더 크게 나타남) 다발-다발 접촉을 하는 CANFLEX-NU 핵연료다발의 경우, 외환봉, 중환봉, 내환봉 및 중심봉에서의 열중성자속 집중 계수는 각각 1.132, 1.180, 1.245 및 1.316 이었고, 이에 해당되는 선출력 최고치는 각각 54 kW/m, 47 kW/m, 61 kW/m 및 61 kW/m 로 구해졌다.

2.2 양단 소결체 온도

상기 2.1 항에서 구한 연료봉 선출력을 이용하여, 핵연료봉 끝 부분에 대한 2 차원 온도해석을 수행하였다 [2]. 이때 유한요소 코드인 FEAT 를 사용하였는데, 유한요소 modelling 을 위하여 350 여개의 삼각형 요소와 50 여개의 표면 요소를 사용하였고 양단 소결체와 피복관 사이에 gap element 를 고려하였다. 온도 계산이 열전달 계수에 매우 민감한 점을 착안하여, 양단 소결체에서 온도가 가급적 크게 나타나도록 열전달 계수를 고려하였다.

그림 3 은 본 온도 해석에서 얻어진 주요 결과를 예시한 것이다. 각 환별 연료봉에 대해 그림 3

과 같은 형식으로 얻어진 주요 결과를 요약하면 다음과 같다:

- a. CANFLEX-NU 연료봉에서는 열중성자속 집중에 의해 양단 소결체 온도가 증가하는 현상이 나타나지 않는다. CANDU-6 용 기존 핵연료의 경우, 열중성자속 집중에 의해 외환봉에서 양단 소결체 온도가 중앙 소결체 보다 150 °C 만큼이나 높아진 것으로 알려져 있다. 따라서, CANFLEX-NU 연료봉에서 열중성자속 집중에 의해서 양단 소결체 온도가 증가하지 않는 것은 CANFLEX-NU 연료봉의 낮은 선출력에 기인하는 것으로 판단된다.
- b. 양단 소결체 중심온도는 외환봉에서 가장 크게 나타났다. 이 결과는 다발 출력을 높이 올릴 경우 외환봉 양단 소결체에서 tear drop 이 먼저 발생할 가능성이 높다는 것을 시사한다. 한 예로, NRU 연구로에서 CANFLEX 다발을 외환봉 선출력이 최고 74 kW/m 까지 도달하도록 하여 조사시험한 적이 있는데, 이때 열중성자속 집중에 의해 외환봉 양단 소결체에서 tear drop 이 발생하였다.

3. 봉단마개 응력 해석

양단 소결체 설계는 그림 4 에 나타난 응력해석 모델을 사용하여 수행되었다. 즉, 양단 소결체가 열중성자속 집중을 고려하여 구해진 출력에 의해 열팽창하여 피복관에 q 만큼의 하중을 부과한다고 가정하여 봉단마개와 피복관 사이 notch 에 작용하는 응력 및 변형도를 구하고, 이 응력 및 변형도 값이 설계 기준이하가 되도록 양단 소결체의 제원을 결정하였다. 이와 같이 결정된 양단 소결체 설계를 평가하기 위하여, 유한요소 응력해석용 코드인 FEAST 를 사용하였다. 즉, 핵연료가 연소도 ~ 40 MWh/kgU 에서 ~ 30 kW/m 의 출력급증을 경험한다고 가정 (즉, 출력급증후 양단 소결체 출력은 상기 2. 항에서 고려하고 있는 출력이 됨) 하고, 이때 봉단마개에서의 응력해석을 수행하였다 [3]. 계산의 정확성을 높이기 위해, 380 여개의 삼각형 요소를 사용하여 유한요소 modelling 을 하였고, 특히, 봉단마개, 용접 부위 및 피복관 각각에 대해 재료 특성을 다르게 고려하였다.

해석 결과 모든 핵연료봉 봉단마개에서의 주응력 최대치가 90 MPa 이하로 구해졌는데, 이 값은 설계 기준치보다 매우 작은 것으로 판명되었다.

4. 실험 결과를 통한 열.기계적 거동 평가

다발 AJJ 는 NRU 연구로에서 조사시험된 CANFLEX 핵연료다발들중 조사후시험이 최초로 완료된 핵연료다발이다. 이 다발은 다발 출력 1100 kW 로 운전되었는데, 이때 외환봉 출력이 최대 69~74 kW/m, 평균 57 kW/m 로 나타났다. 연소도 308 MWh/kgU 까지 연소된후 외환봉에서 결합이 발생하였다. 이 핵연료다발의 조사후 시험 결과 [4] 들중 본 논문의 주제와 관련하여 다음 두 가지 결과를 인용할 수 있다:

- a. 양단 소결체에 tear drop 이 발생하였다. 이 tear drop 이 양단 소결체에 나타난 것은 바로 중성자속 집중 효과에 기인한 것을 의미한다. 다른 실험결과에 의하면, 핵연료봉이 ~ 70 kW/m 이상으로 조사될 때 양단 소결체에서 tear drop 이 발생한다.
- b. 핵연료봉은 308 MWh/kgU 의 연소도까지 파손되지 않았다. 이 결과와 다른 CANFLEX 연

료봉 노내시험 결과로 부터, CANFLEX-NU 핵연료봉은 ~60 kW/m 까지의 선출력으로 ~300 MWh/kgU 연소도까지 조사되더라도 파손되지 않는다. 특히, 다발 AJJ 에서 핵연료봉 1 차 파손이 non-reference end 양단 지지체와 180° 되는 위치에서 발생되었다. 이 결과는, 비록 다른 data 가 없어 단정적으로 결론내리기는 어렵지만, CANFLEX-NU 연료봉 출력이 양단 소결체에 tear drop 이 발생할 정도로 매우 높더라도 봉단마개-피복관 용접부위에서 보다는 다른 부위, 예를 들어 피복관 원주방향 주름 부위 등에서 발생할 가능성이 더 크다는 점을 시사한다.

5. 결론

핵연료다발과 다발 사이에 강력한 중성자 흡수체가 없어서 나타나는 열중성자속 집중 때문에 연료봉 끝에서 과도하게 나타날 수 있는 열기계적 거동을 CANFLEX-NU 핵연료봉에 대해 해석하였다. 해석 결과, CANFLEX-NU 핵연료봉의 선출력이 워낙 낮아서 열중성자속 집중이 연료봉의 열기계적 거동과 건전성에 전혀 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

참고문헌

- [1] C.J. Jeong and B. Townes, KAERI/TR-470/94 (or CANFLEX-052), 1994 November.
- [2] G-S. Park, K-S. Sim, H.C. Suk and M. Tayal, KAERI/TR-580/95, 1995 November.
- [3] K-S. Sim and H.C. Suk, "Stress Analysis at Endcap of CANFLEX-NU Elements", To be issued.
- [4] D.F. Sears, Restricted Data for CANFLEX Program.

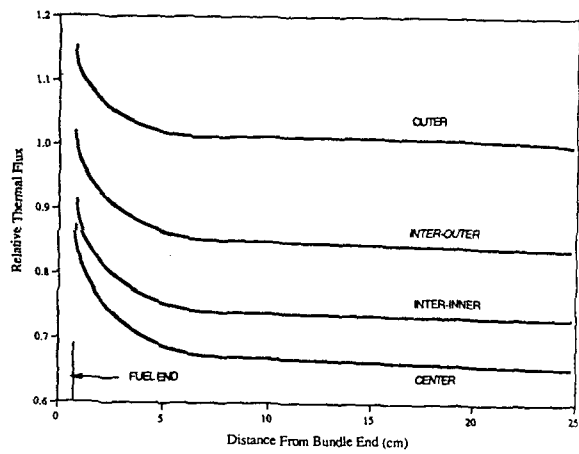


Fig. 1 Axial Thermal Flux Distribution of CANFLEX-NU Fuel (Bundle-Bundle Contact)

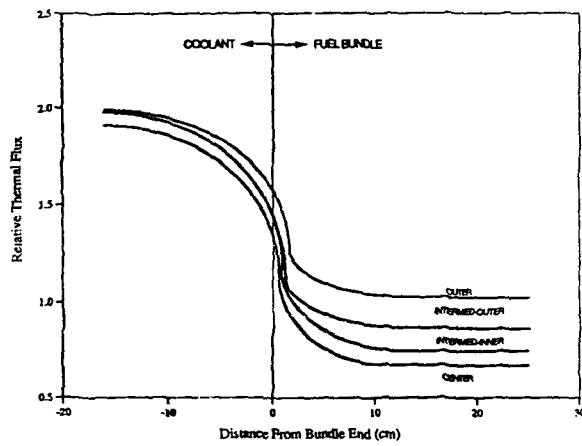


Fig. 2 Axial Thermal Flux Distribution of CANFLEX-NU Fuel (Bundle-Coolant Contact)

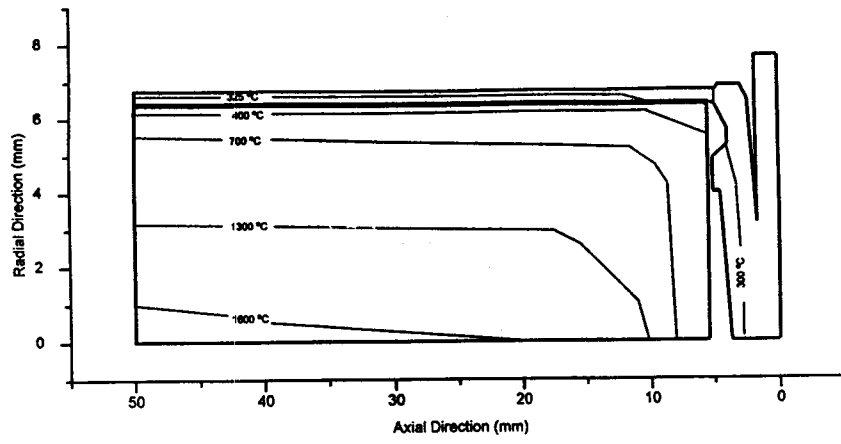


Fig. 3 Calculated Isotherm Lines in CANFLEX-NU Inner Element

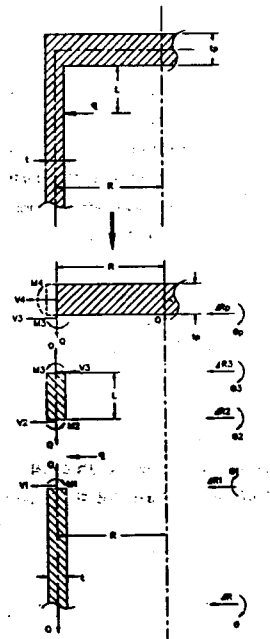


Fig. 4 Free Body Diagram for Endcap Stress Analysis