

사용후핵연료 원주방향 산화층분포 차이 및 열수력 해석을 통한 평가 결과

양용식, 신창환, 방제건, 김대호, 김선기, 임익성, 권형문, 전용범, 송근우
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지
 yvs@kaeri.re.kr

원자로 운전 중, 냉각수와의 산화반응에 의해 생성된 핵연료 피복관 산화층은 핵연료의 성능을 결정하는 가장 중요한 인자이다. 핵연료 노내 성능측면에서, 과도한 산화막의 생성은 필연적으로 피복관 수소화량을 증가시키기 때문에 피복관의 기계적 건전성을 크게 위협할 수 있다.

최근에 이슈로 부각된 사용후핵연료 건식저장에서도 산화층은 핵연료의 저장 건전성을 결정하는 중요한 요인이 된다. 건식저장 환경하에서, 사용후핵연료 피복관은 높은 봉내압에 의해 인장응력으로 인해 크립이 발생하게 되며, 사용후핵연료 피복관 크립은 건식저장 핵연료 건전성을 결정하는 가장 중요한 인자로 알려져 있다.

산화층의 생성은 피복관의 두께를 감소시키기 때문에 두꺼운 산화층을 가진 핵연료의 경우, 동일한 봉내압에서도 높은 인장응력이 가해지며, 크립등에 의한 피복관 파손 확률이 증가한다.

따라서, 정확한 산화층 두께 평가를 통한 사용후핵연료 응력해석은 건식저장 핵연료의 건전성에도 필수적인 요소라 할 수 있다.

그림 1은 국내 고연소도 핵연료를 대상으로 수행된 조사후시험을 통해 측정된 피복관 산화층두께 분포를 나타내고 있다. 원주방향을 따라 30° 간격으로 측정된 이 결과에서는 원주방향 위치에 따라 산화층 두께가 큰 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. Region 1과 region 2에 대한 상세 분석을 수행한 결과, 원주방향 최대 산화층 두께는 최소 산화층 두께의 약 1.4배 정도인 것으로 나타났다. 그림 2에 보여진 원주방향 산화층 분포에서도, 약간의 차이는 나타나고 있지만 대체적으로 30°~330° 영역에서의 산화층 두께가 반대편에 비해 큼을 확인 할 수 있다.

산화층 생성에 의한 피복관 두께 감소는 Pilling-Bedworth ratio를 이용하여 평가가 수행되었다. 평가 결과, 동일한 축방향 위치에서도 원주방향에 따라 최대 10%의 피복관 두께 차이가 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 국부적으로 큰 피복관 두께 차이가 발생할 수 있음을 의미한다.

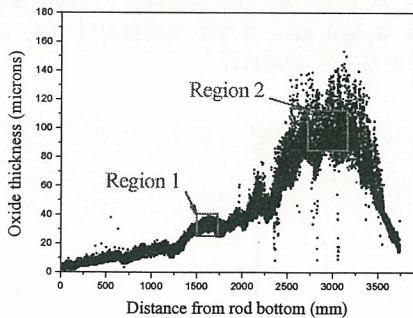


그림 1. 고연소도핵연료 축방향 산화층 분포

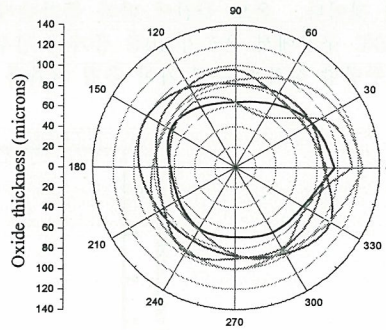


그림 2. 축방향 동일위치에서 원주방향 산화층 분포

- 원주방향 산화층 차이 평가를 위한 열수력해석

조사후시험을 통해 나타난 원주방향 산화층두께의 차이의 원인을 냉각수 및 핵연료 표면 온도의 관점에서 평가를 수행하였다.

핵연료 집합체와 유사한 형상에서 수행된 열수력적 시험을 통해서도, 각각 연료봉의 출력, 냉각수의 유동조건, 지지격자의 유동혼합도의 차이에 의해, 핵연료봉과 접촉하는 냉각수의 온도 및 핵연료봉 표면 온도가 원주방향에 따라 큰 차이가 날 수 있음이 알려져 있다.

그림 3은 원자로 부수로 해석코드인 MATRA를 이용해서 한 개의 집합체를 1/8 대칭으로 모델링한

후, 집합체 내부의 핵연료 및 냉각수 유로별 온도를 계산한 결과이다. 축방향 위치 3810mm 부근에서 15번 핵연료를 기준으로 분석한 결과, 15번 핵연료와 인접한 4개의 유로 냉각수온도가 최대 12℃까지 차이가 나는 것으로 나타났으며 이는 동일한 핵연료봉 표면에서도 원주방향에 따라 12℃ 이상의 온도 차이가 발생할 수 있음을 의미한다.

MATRA 해석결과를 바탕으로, 원주방향 냉각수 및 핵연료 표면온도 차이가 실제 산화층 생성에 어느 정도의 영향을 끼칠 수 있는지에 대한 평가를 수행하였다. 이 평가를 위해서는 MATPRO에 제시된 Zircaloy-4 산화모델을 사용하였으며, 다른 영향을 고정시킨 채, 피복관 온도의 변화 영향만을 고려하여, 피복관 표면온도 변화에 따른 피복관의 weight gain을 평가하였다.

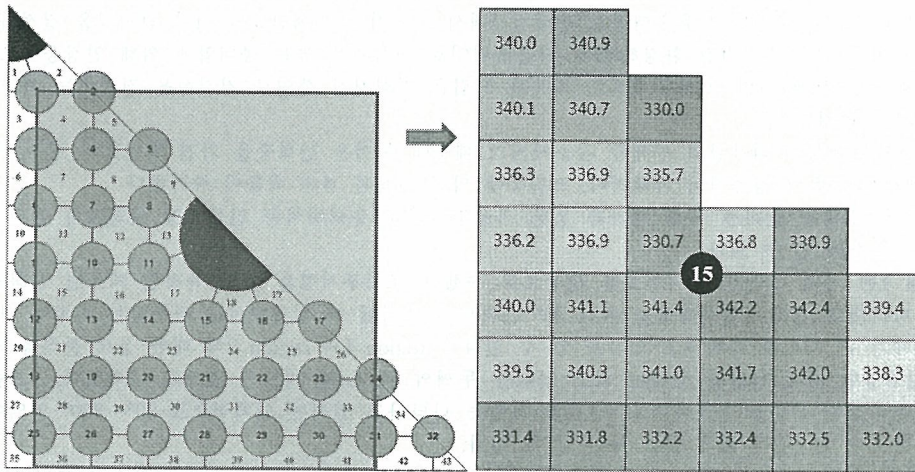


그림 3. MATRA를 이용한 핵연료 부수로별 냉각수 온도 해석 결과

그림 5는 피복관 산화모델을 이용하여, 310℃를 1로 할 때, 피복관 온도 증가에 따른 산화량 증가율을 나타낸 것이다. 온도 구간에 따라 증가량이 차이를 보이는 하지만, 일반적인 피복관 표면온도인 350℃~360℃ 구간에서 온도가 10℃ 증가할 경우 42%의 weight gain 증가가 나타났으며 이는 그림 1에 나타난 원주방향 산화층 두께 차이 측정 결과와 상당히 근접하는 결과이다.

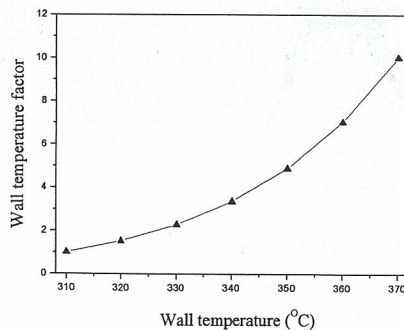


그림 4. 핵연료 표면온도 증가에 의한 산화량 차이 평가 결과

실제, 원주방향 산화층의 차이는 피복관 온도, 중성자속 분포, 집합체 지지격자등에 의해서도 영향을 수 있으며, 이는 더욱 상세한 영향 평가를 통해 효과를 확인해야 할 것으로 판단된다.

그러나, 본 연구결과만을 바탕으로 할 때에도, 핵연료 집합체에 대한 상세한 열수력적 해석이 핵연료 성능 및 사용후핵연료 건전성 평가에 큰 영향을 끼칠 수 있음을 확인하였으며, 이에 대한 연구가 지속되어야 할 것이다.