

## CSFM 방법론 및 모델 분석을 통한 국내 SF 건식저장 열화모델/방법론 개발계획 수립

양용식, 국동학, 방제건, 송근우, 최종원  
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045, 305-353  
[yvs@kaeri.re.kr](mailto:yvs@kaeri.re.kr)

### 1. 서론

2016년 포화가 예상되는 사용후핵연료 저장 문제는 원자력발전의 지속성을 위협하는 중대한 문제이다. 사용후핵연료에 대한 영구 처분 혹은 재활용 기술이 상용화되기까지 많은 시간이 투입되어야 하는 점을 고려하면, 건식저장방식을 통한 사용후핵연료 중간저장은 더 이상 선택의 문제가 아닌 필수적인 문제라 할 수 있다. 국내의 경우 중수형 원자로 사용후핵연료의 건식저장은 현재까지 큰 기술적 문제 없이 성공적으로 수행되어왔으나, 국내 원전의 대부분을 차지하고 있는 경수로형 사용후핵연료에 대한 건식저장 경험은 전무한 상태이다. 인출시 건전한 사용후핵연료는 저장 기간중 어떠한 원인에서도 손상이 발생하지 않아야 하는데, 이는 건식저장이 중간저장이기 때문에 저장된 사용후핵연료는 재인출되어 처분 혹은 재활용 되어야만 하기 때문이다. 따라서, 건식저장 선진국들의 경우 건식저장 핵연료의 건전성을 보장하기 위해 방법론/모델/코드 개발하고, 엄격한 기술 기준을 보유하고 있다.

본 연구는 사용후핵연료 건식저장에 대한 미국 USNRC의 사용후핵연료 건전성 해석모델/코드를 분석하여 이를 참조로 하여 국내에서 개발할 모델 및 코드의 개발 계획을 수립하기 위해 수행되었으며, 역시 USNRC의 평가 방법론을 분석하여, 국내 사용후핵연료 장기건식저장 연구의 진행방향 설정에 목적을 두고 있다.

### 2. 사용후핵연료 건식중간저장 건전성 평가방법론 분석

사용후핵연료 건식저장은 원자로와는 달리 다양한 형태의 저장방식이 존재한다. 또한 각 저장방식에 핵연료별로도 다양한 연소도/재질/형태/설계를 가지고 있다. 1975년 이전에 건식저장된 핵연료의 경우 Johnson의 연구결과를 바탕으로 한 단일 핵연료 설계기준(피복관 최대 온도 380°C 이하)을 적용하였으나, 다양한 저장방식/핵연료 종류/습식저장기간을 가진 핵연료의 건식저장 필요성이 대두됨에 따라, USNRC에서는 저장방식과 핵연료 종류에 무관하게 건식저장시 사용후핵연료 건전성 보장을 위해 범용적으로 적용할 수 있는 기술기준 및 평가방법론의 필요성이 대두되었다. PNL의 주관하에 CSFM(Commercial Spent Fuel Management) 프로젝트라는 이름으로 수행된 연구에서는 다양한 핵연료에 적용할 수 있는 설계기준 및 해석방법론을 확립하였으며, 이를 CSFM 방법론이라 하여 USNRC에서 사용후핵연료 건식저장 건전성을 평가하는 기준으로 삼고 있다. 표 1에는 CSFM 방법론 개발을 위해 수행된 사용후핵연료 건전성 관련 시험 조건들과 모델 적용 범위가 표시되어 있다.

표 1. CSFM 방법론 수립을 위해 수행된 시험데이터베이스 범위

연소도 범위 [MWD/MTU]	12,000 ~ 40,000	핵연료 type	BWR, PWR
최대 시험 온도 [°C]	~ 570	핵연료 형태	7×7 / 8×8 14×14/15×15/16×16/17×17
최대 시험 기간 [day]	325	# of Irradiated rods	~ 190
피복관 재질	Zr-2, STD Zr-4	# of As-fab. rods	~ 1000

CSFM 방법론에서 건식저장 대상인 사용후핵연료의 최대 피복관 온도를 제한하는 것은 기존의 방법론과 동일하지만, 핵연료 설계/연소이력/재질/습식저장조 저장조건등의 차이를 고려할 수 있는 다양한 온도기준을 마련하였다(multiple temperature limit). 또한, 건전성 평가를 위해 응력/온도를 해석할 때 필수적으로 고려해야 할 항목 및 절차를 구체적으로 제시함으로써, 건식저장 사업자의 혼란을 크게 감소시킬 수 있었다. 저장 중 사용후핵연료 열화를 평가하기 위한 방법론에서는 creep-rupture를 주 원인으로 하여 이에 대한 평가 방법 및 절차를 제시하였다. 물론, 핵연료의 재질/설계/연소이력등이 CSFM 방법론 개발에 사용된 데이터범위에 포함되지 못하는 경우에는 case by case 형태로 건전성을 입증해야

함을 규제 측면 및 방법론 측면에서 선언하고 있는 점을 고려하고 있으며, 이는 건전성 측면에서 신뢰성을 확보할 수 있기 때문이다. 결론적으로, 국내 원자력 규제체계 및 기준이 미국과 유사한 국내의 경우, 앞으로 마련될 사용후핵연료 건식저장 건전성 평가 체계 및 기준 또한, USNRC의 그것과 유사할 것으로 예상되며, 이를 고려할 때, 국내 기술개발 또한 현행 USNRC의 방법론과 양립할 수 있는 바탕위에서 이루어져야 할 것으로 판단되며, 본 연구에서도 CSFM 방법론을 만족할 수 있는 건전성 평가 절차를 진행해야 할 것이다.

3. 건식중간저장지 사용후핵연료 주요 열화모델 및 평가코드 분석

PNL에서 수행된 다양한 시험을 통해, 시험 데이터베이스 범위에서는 creep-rupture에 의한 핵연료 파손이 가장 중요한 손상원인으로 선정되었다. SCC, DHC등의 효과 또한 검토되었지만, 낮은 봉내압의 한계로 인해 이의 영향은 미미한 것으로 판단되었는데. Creep-rupture에 대한 다양한 실험을 통해 creep-rate (그림 1) 및 creep-rupture map (그림 2)이 작성되었으며, 시간에 따라 변화하는 온도/응력에 따른 creep-rupture를 예측하기 위해 DATING 코드가 개발되었으며, Life fraction rule을 통한 평가방법이 DATING 코드에 반영되었다.

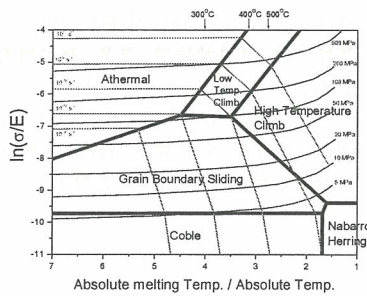


그림 1. Creep-rate map by CSFM

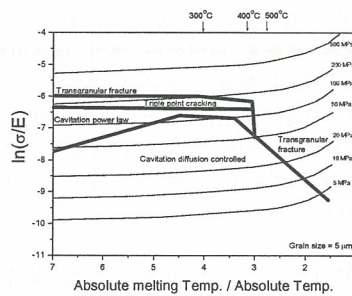


그림 2. Creep-rupture map by CSFM

DATING 코드에 사용된 주요 열화모델의 분석 결과, 비록 SCC, DHC등의 열화 현상의 영향이 크지 않은 것은 사실이지만, 핵연료 연소이력/재질등이 미국의 핵연료와 다르고, 특히 저장기간이 40년 이상으로 설계될 경우에는 이들 현상에 대한 재검토가 이루어져야 할 필요성이 있는 것으로 나타났다. 또한, 기존 모델을 사용할 경우에도 USNRC 규제체계를 따를 경우, 국내 사용후핵연료 시험을 통해 모델이 적합함을 입증할 의무가 요구될 것으로 판단된다.

4. 사용후핵연료 건식저장조건 열화모델 개발 계획 수립

USNRC의 건전성 평가방법론 및 DATING 코드의 평가모델을 분석한 결과를 바탕으로, 국내 사용후핵연료 건전성 평가 모델/코드/방법론 개발을 위한 기본방향을 확립하였다. 연소도 40,000MWD/MTU 이하의 핵연료에서는 주로 creep-rupture와 관련된 열화기간만이 핵연료 건전성에 영향을 끼치는 것으로 나타났으나, 설계/재질/연소이력에서 PNL 시험데이터베이스와 차이가 있으며, 40년 이상의 장기저장을 목표로 하는 국내에서는 SCC 및 DHC등의 영향을 확인해야 할 필요성이 있다. 크립 모델링은 PNL의 시험데이터베이스를 포함하고 Haden등 최신연구결과를 반영한 모델을 개발 중에 있다. 건전성 코드 체계는 creep map을 이용한 DATING 코드의 방법이 매우 유용한 방법으로 평가되었으며, 국내에서도 Life fraction rule을 활용한 평가방법 및 최신 연구 결과를 반영 계산 scheme을 사용할 예정이다.

5. 결 론

본 과제를 통해 개발될 고유 열화모델들은 CSFM 결과에 따라 creep 모델링에 초점을 두며, SCC, DHC등의 모델은 필요타당성을 검토한 후 진행할 계획이다. 개발 모델들은 Halden 국제공동연구등의 최신연구결과들도 반영할 수 있는 모델링을 수행할 계획이다. USNRC 체계를 검토한 결과, 모델 및 코드 검증을 위해서는 저장 대상 국내 사용후핵연료의 재질/설계/연소이력등을 검토하여 CSFM 데이터베이스를 적용할 수 없는 영역에 대한 실험이 필수적일 것으로 판단된다. 또한, 모든 모델/코드의 개발 및 실험계획 수립은 CSFM에서 제시한 방법론을 만족하여야 할 것으로 판단된다.