

핵연료 집합체 구조부품 열화모사 특성 분석

이영호*, 김주성, 김현길, 국동학, 양용식, 구양현
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111
*leeyh@kaeri.re.kr

1. 서론

원전 부지내 습식저장고에 임시로 보관하고 있는 사용후핵연료의 포화가 2024년에 도래할 것으로 예상되며[1] 이를 해결하기 위한 현실적인 대안으로 건식저장을 고려하고 있다. 사용후핵연료의 건식저장은 일정한 기간 동안 습식저장고에서 붕괴열을 제거한 후 이를 일정한 수를 보관할 수 있는 캐스크 형태의 저장용기에 보관하는 개념으로 이미 원전 선진국에서는 상용화가 이루어져 있는 상태이나 국내에서는 이에 대한 기반 기술이 거의 없는 상태이다. 건식저장은 중간저장을 의미하므로 향후 이를 처리 혹은 처분을 위해서는 수송 등의 회수성을 보장해야 하므로 이를 평가하기 위한 기술과 관련된 시험자료가 반드시 확보되어야 한다. 그러나 사용후핵연료를 직접 시험 평가하기 위한 시험편의 확보가 어려운 상황에서 조사시험의 수량을 최소화하고 이를 대체할 수 있는 시험의 모사기술 확보가 매우 중요하다. 특히 국내 사용후핵연료의 80%가 45 GWd/MtU 연소도 이하이며 습식저장고에서 충분한 냉각기간을 거친 저연소도 핵연료임을 고려할 때 핵연료 구조부품 모사기술 개발은 저연소도를 목표로 진행하여 충분한 기술을 확보한 뒤 고연소도 사용후핵연료로 진행해야 할 것으로 보인다.

그러나 국내외 연구현황을 살펴보면 건식저장 조건에서 연소도에 따라 크립(Creep), 수소지체균열(Hydrogen Delayed-Cracking, DHC), 수화물재배열(Hydride Reorientation, HR) 등의 피복관 열화에 대한 연구가 매우 활발히 진행되어 왔으나 [2], 회수성과 관련된 핵연료 구조부품에 대한 열화연구는 거의 없는 실정이다. 특히 취급 및 수송 중에 발생 할 수 있는 핵연료 구조부품 손상에 대한 연구가 반드시 수행되어야 함에도 불구하고 집합체 혹은 구조부품 단위의 조사후 시험평가는 경제적 혹은 제한된 시험편으로 인해 공개된 자료가 거의 없는 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 저연소도 사용후핵연료 초기 특성 평가를 위한 핵연료 구조부품단위의 모사방법을 분석하였다. 특히, 건식저장 조건에서 장시간 저장하였을 때 발생 가능한 핵연

료 구조부품의 열화 인자를 분석하였고 이를 모사할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

2. 주요 모사 구조부품 특성

2.1 상하단 체결부

2001년 3월 미국 North Anna 원전에서 습식저장고에 보관중인 사용후핵연료를 건식저장 용기로 이송하는 과정에서 상단고정체와 안내관을 연결하는 스테인레스 강 재질의 슬리브가 응력부식균열(Stress Corrosion Cracking, SCC)로 의심되는 파단이 발생하였다[3]. 비록 수조내에서 습식저장고랙의 셀내부에 떨어져 다른 핵연료집합체 및 구조물에 충격을 가하지는 않았지만 이를 계기로 기존 저장고에 보관하고 있는 사용후핵연료의 상하단 체결부의 건전성이 매우 중요한 이슈로 고려되고 있다. 국내의 경우 초기 미국 WH에서 수입한 핵연료를 시작으로 매우 다양한 종류의 핵연료가 있으며 특히 상하단고정체의 체결방식도 원전 이력에 따라 매우 상이한 점을 가지는 것이 특징이다. 또한 이러한 체결부에 대한 열화기구를 이종재질인 스테인레스 강의 슬리브에서 발생한 SCC로 보고하고 있으나 정확한 원인규명은 미흡한 것으로 생각된다. 따라서 재질모사측면에서 평가 대상핵연료가 선정이 되면 우선적으로 체결방법(슬리브 혹은 용접 등)에 대한 기본적인 설계자료 검토가 선행되어야 하며 이를 바탕으로 예상되는 체결부 손상기구를 예측해야 할 필요가 있다.

2.2 지지격자체 용접부

핵연료집합체의 주요 구조부품 중의 하나인 지지격자체는 핵연료봉을 일정한 공간상에 위치하도록 건전하게 지지하는 역할을 한다. 특히 외부에서 핵연료집합체에 가해지는 충격력으로부터 핵연료봉을 보호하는 핵심 구조부품이므로 충분한 횡방향 충격강도를 가지도록 설계 및 제작되고 있다. 가동 중 원전 내부에서 요구되는 지지격자 횡방향 충격강도 요구조건은 임의의 하중조건에서도 설계하중 이내로 변형되어야 하며, 이를 만족할 경우 안내관으로

제어봉 삽입이 방해받지 않아 노심의 안전성을 보장할 수 있다. 이러한 지지격자체의 고유한 역할과 함께 사용후핵연료에서도 높은 연소도로 인해 열화된 핵연료봉을 안전하게 지지하는 역할을 계속 수행해야하며 취급 및 수송 중에서도 손상이 발생하지 않아야 한다. 특히 지지격자판 용접부는 지지격자체의 기하학적 형상과 더불어 충격강도를 결정하는 주요 인자로 건식저장동안 발생 가능한 열화거동을 예측해야 한다. 이것은 용접방법, 용접부 비드의 크기와 깊이 등에 따라 열영향부의 특성이 결정되며 장기간 저장조건에서 재료적으로 열화의 가능성이 매우 높기 때문이다. 그러나 연소도 증가에 따른 지지격자체 표면 산화특성과 관련된 자료는 핵연료봉에 비해 거의 없는 실정이며 수소량 및 수화물 분포와 관련된 자료 또한 부족한 실정이므로 이에 대한 모사 특성을 체계적으로 분석할 필요가 있다.

2.3 지지격자 스프링 및 덤플 특성

사용후핵연료의 안전성 및 회수성과 관련된 연구의 핵심은 핵연료봉의 건전성으로 귀결된다. 건식저장을 위한 사용후핵연료 취급 혹은 예상치 못한 사고조건에서 외부하중이 가해질 때 최종적으로 핵연료봉에 직접 전달되는 충격력은 연료봉과 접촉하고 있는 지지격자 스프링 및 덤플에 의해 전달되며 충격력의 크기는 각각의 강성(Stiffness)과 매우 밀접한 관련이 있다. 지지격자 스프링 및 덤플의 강성은 연소도가 증가함에 따라 조사취화로 인해 고유한 탄성특성이 상실되어 서서히 증가하는 것으로 알려져 있다. 또한 연료봉과 지지격자 사이에 형성되는 간극(gap)은 외부 충격하중과 함께 핵연료봉에 전달되는 충격력의 크기를 결정하는 중요한 인자이다. 따라서 이러한 치수와 관련된 변수가 건식저장에서 핵연료봉 열화에 중요한 역할을 하게 된다면 핵연료집합체 구조부품의 재질 모사와 더불어 형상 또한 체계적으로 모사될 필요성이 있다. 한편, 스프링 및 덤플의 강성을 결정하는 요인은 부식에 따른 산화막 형성과 재질 내부 수화물 형성 등으로 요약할 수 있으나 이와 관련된 자료는 부족한 상황이다. 일반적으로 지지격자체에 횡방향 충격력이 가해질 때 지지격자체의 좌굴은 격자판의 강성에 따라 결정되는 반면 핵연료봉에 가해지는 충격력은 스프링 및 덤플의 강성에 따라 결정되므로 건식저장조건에서 스프링 및 덤플의 열화에 따른 강성 변화를 충분히 모사할 필요가 있다. 이에

따라 산화막 두께 증가에 따른 지지격자 스프링 및 덤플의 기계적 특성변화를 파악해야 하며 우선적으로 산화막 두께 영향에 대한 실험적 분석이 필요한 것으로 보인다.

3. 요약

사용후핵연료의 습식저장고 포화문제를 해결하기 위한 도입할 예정인 건식저장은 저장될 사용후핵연료의 안전성 및 회수성을 보장하기 위하여 특성 평가 연구가 반드시 선행되어야 한다. 사용후핵연료의 초기특성을 평가하기 위한 핵연료집합체 부품단위 모사방법에 있어 건식저장 혹은 취급과정에서 예상되는 열화를 크게 상하단고정체 체결부, 지지격자체 충격강도 및 지지격자 스프링/덤플 특성으로 요약하였다.

4. 감사의 글

본 연구는 2014년도 산업통상부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20141710201660)

5. 참고문헌

- [1] 김주성, 국동학, 심지형, 김용수, "사용후핵연료의 장기 건식 건전성 성능과 주요 열화 기구에 관한 고찰", 한국방사성폐기물학회지 Vol.11 No.4 333-349 (2013).
- [2] H.G. Kim, Y.H. Jeong and K.T. Kim, "The effects of creep and hydride on spent fuel integrity during interim dry storage". Nuclear Engineering and Technology, Vol.42, 249-258 (2010).
- [3] Information Notice 2002-09: Potential for Top Nozzle Separation and Dropping of a Certain Type of Westinghouse Fuel Assembly, <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/gen-comm/infor-notices/2002/in0209.html> (2002).