

고연소도 사용후핵연료 집합체 구조건전성 평가 요건 검토

이영호, 김재용, 이강희, 윤경호, 강홍석, 김형규
한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045
lcevh@kaeri.rc.kr

1. 서론

원자력발전의 중요한 장점중의 하나인 우수한 경제성은 안전성을 동시에 만족시켜야하는 부담을 항상 지니고 있다. 최근 발생한 후쿠시마 원전사고에서는 경제성보다는 안전성을 중요시하는 계기가 되었으며 신규원전 건설이 다소 위축될 수 있기에 원전의 경쟁력 확보를 위해서는 정비 및 핵연료 주기 비용을 감소시킬 필요가 있다. 고연소도 연료는 이러한 목적을 충분히 만족시킬 수 있기 때문에 기본적인 재질 특히 우수한 소결체, 고연소도용 피복관 개발 등에 대한 연구가 진행되고 있다. 그러나 고연소도 핵연료를 적용하기 위해서는 우수한 지르코늄 합금의 개발, 핵연료집합체의 건전성 확보, 재질내 수화물 생성 및 재분포, 연료봉 내부압력 상승, PCI 및 PCMI와 같은 열화현상에 대한 연구가 반드시 선행되어야 한다.

한편, 국내 원자력발전소의 가동률은 90%이상을 웃돌고 있어 단연 세계 최고수준이며 [1], 이것은 국내 자체기술로 제작된 핵연료집합체의 우수한 특성이 이를 뒷받침하고 있기 때문이다. 그러나 이를 바꾸어 말하면 노심내 핵연료집합체는 가혹한 환경 조건하에서 장시간동안 노출된 것을 의미하며 연소도가 증가할 경우 사용후 핵연료집합체는 잠재적인 손상 가능성 또한 현저히 증가하게 된다. 일반적으로 노심에서 연소된 핵연료집합체는 습식저장고에서 일정한 시간동안 붕괴열을 제거한 후 중간 저장 단계를 거쳐 아직 국내에서는 정책적으로 결정되지 않고 있지만 건식저장, 파이로 혹은 영구처분 될 것으로 예상된다. 특히, 습식저장고의 용량이 얼마 남지 않은 상황에서 최근 건식저장에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 국외의 경우 건식저장 시스템이 상용으로 적용되고 있어 중간저장 방식으로 건식저장 시스템이 적용될 것으로 예상된다. 그러나 건식저장 시스템의 SRP(Standard Review Plan)에서는 연료봉에 대한 제한조건만을 상술하고 있으며 핵연료집합체에 대한 건전성을 논의하고 있지는 않다 [2]. 이것은 핵연료집합체의 구조손상이 발생할 경우 핵연료봉 또한 손상위험이 있다는 것을 고려

해본다면 집합체의 건전성 또한 매우 중요한 이슈가 된다. 본 논문에서는 건식저장 시스템으로 사용후 핵연료집합체가 저장될 때 연료봉을 제외한 핵연료집합체가 가져야 할 구조 건전성에 대해 분석하고자 한다.

2. 고연소도 핵연료 집합체

2.1 부식 및 구조변형

핵연료집합체의 연소도가 증가하게 되면 열화에 대한 여유도가 감소하며 핵연료집합체의 구조부품에서 고려해야 할 사항은 다음과 같다. 우선 안내관 및 계측관은 연료봉과 동일한 재질인 지르코늄 합금이 사용되며 핵연료집합체 구조를 유지하는 기본적인 기능을 가진다. 일차 냉각수 환경하에서 부식에 의한 산화막 형성, 조사성장 등 핵연료봉에 비해 열적 영향은 다소 작을 수 있으나 유사한 부식현상이 발생할 수 있다. 이러한 부식현상의 예로 사용후핵연료 집합체를 저장조에서 인양하는 도중 상부노즐로부터 분리되어 핵연료집합체 아래부분이 저장조로 떨어지는 사고를 경험한 바가 있다 [3]. 이러한 문제점의 원인은 응력부식균열현상으로 판단하고 있으나 명확한 자료는 없지만 불균일한 안내관의 조사성장이 핵연료집합체의 뒤틀림을 발생시키고 구조변형이 발생한 응력집중부는 부식반응에서 수소의 침투가 용이하여 수조내에서 국부적인 응력부식균열의 진행이 우세하였기 때문이라 사료된다.

한편, 안내관의 치수변화는 이와 용접된 지지격자체의 구조변형을 야기시키고 지지격자체내 연료봉의 변형을 일으킬 수 있다. 특히 지지격자 스프링 및 덤플은 노심내에서 온도, 조사취화 등으로 응력이 이완된 상태이므로 구조변형에 의한 응력이 연료봉으로 직접 전달되어 산화피막과 함께 수화물이 형성된 핵연료봉의 파손 위험도는 증가시킬 수 있으며 봉간 접촉의 가능성이 있어 사용후핵연료의 건전성 평가에서는 집합체 구조 건전성을 반드시 고려해야한다.

2.2 지지격자 수소취성

핵연료 지지격자체는 연료봉을 일정한 공간상에 위치시키는 역할을 하며 연료봉의 조사성장을 고려하여 탄성을 가지는 스프링 및 덤플구조를 가진다. 노심내에서 연소도가 증가할수록 내부 온도 및 증성자 조사취화에 의해 스프링력을 상실하게 되어 최종적으로 연료봉과 이를 지지하는 지지격자체 사이에 특정한 간극을 형성하게 된다. 핵연료봉을 지지하는 지지격자체는 연료봉과 동일한 지르코늄 합금으로 고온조건에서 부식이 발생할 경우 기지금속에 수화물을 형성하게 되어 매우 취성의 재질로 변경된다. 또한 0.5mm 내외의 두께를 가지고 있으므로 미세한 충격에도 쉽게 파손되는 특징을 가지며 이것은 연소도가 증가할수록 산화피막의 두께 및 수소함량 또한 증가할 것으로 예상되기 때문이다.

2.3 용접부 취성

핵연료집합체는 노심내에서 연소도가 증가함에 따라 지르코늄 합금재질의 안내관 또한 조사성장이 필연적으로 발생하며, 다수의 안내관에서 비균일한 성장이 발생할 경우 안내관과 지지격자체 사이의 용접부에 응력이 발생되어 손상의 위험이 있다. 특히 지르코늄 합금에서 필연적으로 생성되는 산화막과 수소에 의한 수화물 형성은 취성과 파괴의 위험도를 증가시키게 된다. 용접부는 기본적으로 잔류응력을 포함하고 있으며 금속학적으로 기지금속과는 조직상의 차이가 있고 증성자 조사에 의한 취화가 발생이 가능하므로 사용후핵연료 집합체의 용접부 건전성에 대한 충분한 연구가 필요하다.

2.4 저장고내 지진

사용후핵연료 집합체가 장전된 습식저장고는 랙방식을 이용하여 집합체를 보관하고 있으며 건식저장에서는 바스켓을 이용하고 있고, 저장고 설계 시 랙의 규격은 저장환경, 집합체 치수 및 외부 열화요인(지진, 부식, 인출작업 등)을 고려하여 설계하게 된다. 만약 국내에서도 일본 후쿠시마에서 발생한 대규모 지진사태의 가능성을 고려한다면 취약한 사용후핵연료 집합체와 랙 사이의 접촉에 의한 충격하중 발생이 가능하다. 특히 구조적으로 변형된 사용후핵연료 집합체의 경우 간격이 좁아지므로 충격 가능성은 현저히 증가하게 된다. 지진이 발생하게 되면 반드시 여진이 따라

므로 초기 지진에 의한 손상이 발생하게 되면 여진에 따라 대량파손의 위험이 증가할 수 있고, 이것은 핵연료집합체의 주요 구조부품의 손상이 연료봉의 손상으로 직결될 수 있기 때문이다.

이상의 손상가능성을 고려해 볼 때 고연소도 핵연료집합체에서는 기존에 고려하지 못한 항목에 대한 충분한 연구가 진행되어야 하며 집합체의 설계요건은 선행 및 후행을 모두 고려해야 할 것으로 사료된다.

3. 결론

고연소도 핵연료집합체는 안내관의 부식과 함께 구조변형에 대한 허용 변형량, 지지격자체 증성자 조사 및 수소취성, 용접부 건전성을 반드시 고려해야 하며, 연소도 증가에 따른 저장수조 및 건식저장 바스켓의 규격 적합성과 저장기간 동안의 구조변형에 따른 안내관 위치별 임계허용응력, 산화막 두께, 수화물 형성 및 응력부식균열 전파속도가 충분히 고려되어야 한다. 특히 고연소도 핵연료에서는 기존의 핵연료집합체 구조부품의 설계 개념을 확장하여 선행 및 후행을 모두 고려해야 하며, 고연소도용 핵연료 소재개발과정에서 이를 충분히 검토해야 할 필요가 있다.

4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학재단의 원자력기술개발사업으로 지원받았습니다.

5. 참고문헌

- [1] 송명재, 원자력산업, 한국원자력산업회의, 2008.
- [2] Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems, NUREC-1536.
- [3] Inside NRC, Vol.32, No. 18, pp. 12-13.