

사용후핵연료 건식저장 구조재료 장기열화평가 방법론 개발

이영호, 김형규, 최중원

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045

leevh@kaeri.re.kr

1. 서론

국내 가동 중 원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료는 수년내에 포화에 이르거나 조밀백 설치로 여유를 가지더라도 습식저장고의 한정된 용량으로 인해 이를 대체할 수 있는 건식저장시설의 도입이 시급하다. 최근 발생한 후쿠시마 원전사고와 같이 습식저장고내 냉각재 상실 사고가 발생할 경우 중대사고로 이어질 수 있음을 확인하였고 많은 위험을 가진 조밀백 설치에 대한 재검토가 필요하다. 이와는 대조적으로 후쿠시마 원전내에서 가동중인 건식저장 시설에 대한 피해보고가 올라오지 않고 있으며, 사용후핵연료가 저장되어 있는 건식저장 구조물은 지진, 홍수 및 해일 등의 외부환경의 급격한 변화에도 안전성을 유지할 수 있음을 증명하였다. 건식저장 시설을 50년 이상 안전한 저장을 위해서는 저장시설 중 중요한 구조재료 및 부품에 대한 장기열화 평가 모델이 개발되어야 한다. 그러나 현재까지 사용후핵연료 처리를 위한 건식저장 방식을 국가 차원에서 정책적으로 명확히 결정하지 못하고 있기 때문에 대표적인 구조재료인 캐니스터의 열화평가 모델 개발을 위한 방법론을 개발하고자 한다. 본 연구에서는 이를 위하여 캐니스터 열화현상에 대한 문헌조사를 수행하였으며, 적용된 재질 및 부품에 대한 환경열화를 평가할 수 있는 모델을 분석하여 장기열화평가 개발을 위한 방법을 제시하고자 한다.

2. 캐니스터 열화기구

2.1 서론

건식저장의 주요 구조물중의 하나인 캐니스터는 내부의 고온 및 고방사선 환경과 외부의 대기환경하에서 내부의 붕괴열을 외부로 전단하는 역할을 한다[1]. 건식저장 시설이 발전소내 부지에 설치될 가능성이 높고 대부분의 발전소가 해안가에 위치해 있으므로 해수의 염분에 의한 부식성 분위기가 형성되는 것으로 예측할 수 있다. 따라서 기계 구조적인 열화현상보다는 부식에 의한 열화현상을 평가하는 것이 타당할 것으로 보인다.

2.2 외부환경 및 부식거동

캐니스터의 외벽은 내부 붕괴열로 인해 고온상태를 유지하고 있으며 장기간 저장조건에서는 서서히 감소하게 되어 고온 부식에 노출되어 있다. 특히 상술한 바와 같이 특정 조건하에서 염분의 유입가능성이 있어 장기 건전성 측면에서는 부식저항성을 평가해야 한다. 특히 캐니스터는 직경이 설계에 따라 다르지만 대략 5 m, 두께가 20 mm 정도이므로 이를 제작하기 위해서는 반드시 용접부가 존재하여 일반적으로 사용되는 스테인레스강의 경우, 용접부 주변의 열영향부가 존재하게 되어 내부부식이 감소한다. 캐니스터에서 발생할 수 있는 부식거동은 일반부식, 틈부식, 응력부식균열(Stress Corrosion Cracking, SCC) 및 Galvanic 부식 등으로 요약할 수 있다.

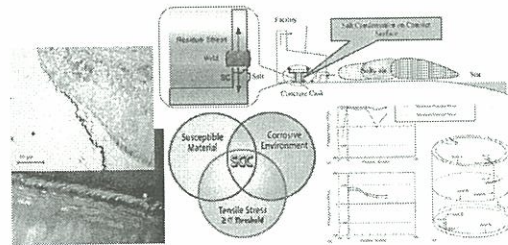


Fig. 1. Summary of canister SCC mechanism [2,3]

2.3 부식거동 요약

일반부식은 표면 전체에 걸쳐 일정한 속도로 균일하게 발생하는 부식으로 설명할 수 있으며 스테인레스강의 경우 Cr과 Mo이 내식성을 가지는 보호피막을 형성하므로 매우 낮은 부식속도를 보이는 것으로 알려져 있어 큰 영향이 없으나 탄소강이 적용되는 내외부 셸에서는 충분히 검토되어야 한다. 틈부식은 국부적으로 내식성을 가진 산화피막이 제거될 때 틈 내부의 농도차이로 인해 부식이 가속화되는 현상이며 용접부내 불균일한 곳 혹은 볼트 등의 틈새에서 발생이 가능하다. SCC는 스테인레스강에서 매우 잘 알려진 부식열화기구로 캐니스터의 환경조건과 매우 잘 일치하는 것으로 조사되었다. SCC는 예민화된 재질, 부

식환경 및 응력조건이 모두 만족될 때 발생하며 그림 1과 같이 캐니스터의 용접부, 잔류응력과 열팽창에 의한 인장응력, 그리고 해수에 의한 염분 유입 등을 고려해볼 때 캐니스터의 건전성을 위협하는 가장 중요한 열화기구로 생각된다. Galvanic 부식은 이중금속간 부식전위의 차이로 인해 한쪽 재질에서 발생하는 부식현상으로 구조재료인 스테인레스 강과 탄소강이 접촉할 때 탄소강에서 우선적으로 부식이 발생할 수 있다.

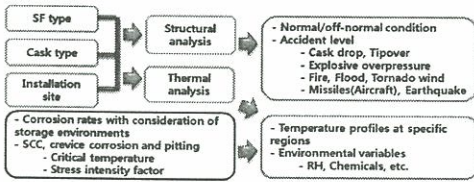


Fig. 2. Procedure of degradation mechanism evaluation method

2. 장기열화평가 방법론

현재까지 국내 저장환경조건에서 캐니스터의 열화거동은 SCC가 중요한 지배인자로 판단되며 이를 고려한 장기저장 열화평가 방법을 그림 2에 요약하였다. 우선 캐니스터 냉각을 위해 유입되는 공기에 포함되어 있는 평균 염분의 농도를 건식저장 시설이 위치할 장소를 고려하여 분석해야 하며 시간에 따른 내부 붕괴열의 변화와 이에 따른 캐니스터 외벽의 온도변화를 산출해야 한다. 이것은 특정 온도조건에서 염분의 농도에 따라 외벽의 불균일한 지점, 특히 용접부에서 응축이 가능하기 때문이다. 또한 유사환경조건하에서 SCC의 균열전파속도에 대한 문헌조사를 수행하여 가장 유사한 값을 적용시킬 수 있다. 선행연구에 따르면 캐니스터의 부식수명(T_{SCC})은 캐니스터 외벽의 온도가 100도 이하까지 냉각되는 시간(T_c)과 SCC 균열이 생성되는 시간(T_i) 및 균열전파시간(T_p)로 규정하고 있으나 이것은 환경조건을 명확히 고려하지 않고 있다[3]. 특히, 상대적으로 습도 및 염분이 높은 국내 저장조건에서는 다소 고온에서 캐니스터 외벽의 응축이 가능하므로 T_c 가 다소 낮은 값을 보일 수 있다. 또한 T_p 의 적용을 위해서는 저장환경 조건하에서 캐니스터의 영향을 잘 모사한 실험결과가 반드시 수행되어야 한다[4].

국내에서 적용될 건식저장 시설의 형태는 현재까지 국가적 차원에서 결정된 것은 명확히 없다. 향후, 국내 자체로 건식저장 시설을 개발하거나

혹은 국외 상용시설을 도입하더라도 국내 적합성 여부는 반드시 수행되어야 한다. 결국 어떠한 방식으로 결정되더라도 적용되는 재질 및 부품의 국내 적용성 분석 및 평가 모델의 개발이 선행되어야 할 것으로 생각된다.

3. 결론

건식저장 시스템에 적용되는 캐니스터의 장기열화거동에 대한 조사와 국내 저장조건을 고려해볼 때 캐니스터 자체의 응력부식균열이 매우 중요하며 이를 평가하기 위한 방법론을 제시하였다. 이를 위해서는 실제 저장조건하에서의 적용 재질에 대한 실험결과가 반드시 필요하며 향후 건식저장시설 상용화에 대한 충분한 대비가 필요하다.

4. 감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

5. 참고문헌

- [1] J. Tani et al., "Stress corrosion cracking of stainless-steel canister for concrete cask storage of spent fuel", Journal of nuclear materials, Vol.379, pp. 42-47, 2008.
- [2] J. Saejusa et al., "Topics of research and development on concrete cask storage of spent nuclear fuel", Nuclear engineering and design, Vol.238, pp. 1168-1174, 2008.
- [3] A. Kosaki, "Evaluation method of corrosion lifetime of conventional stainless steel canister under oceanic air environment", Nuclear engineering and design, Vol.238, pp. 1233-1240, 2008.
- [4] Y. Toshima et al., "Long-term exposure test for external stress corrosion cracking on austenitic stainless steels in coastal areas", Corrosion 2000, Paper No. 00456, 2000.