

## 사용후핵연료 건식저장 캐니스터 장기열화 평가인자 분석

이영호, 김형규, 김재용, 윤경호, 강홍석, 이강희

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045

lccvh@kaeri.re.kr

### 1. 서론

원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료에 대한 처리문제가 시급한 상황에 와 있으며 이에 따라 국내 습식저장고에 보관된 사용후핵연료를 건식저장 시설에 적용하기 위한 연구가 진행 중에 있다. 건식저장의 장점은 습식저장과는 달리 별도의 냉각장치를 필요로 하지 않고 자연대류에 의한 냉각방식을 적용하고 있어 안전성과 경제성이 우수한 특징을 가진다. 최근 발생한 후쿠시마 원전에서 쓰나미 재난에 따른 습식저장고의 냉각수 유출은 사용후핵연료의 손상과 격납건물 파손을 일으켜 방사성물질의 대량유출이라는 심각한 사고를 경험하였으나, 원전 내 건식저장 시설에 대한 피해는 보고되지 않아 건식저장 시설의 안전성을 검증하였다. 이미 해외 원전기술 선진국에서는 상용 건식저장 시설을 적용하여 가동 중에 있으며 국내에서도 자체개발 혹은 기술도입 방식 등으로 건식저장을 시작할 예정이다. 본 연구에서는 건식저장 구조물의 가장 중요한 구조부품 중의 하나인 캐니스터 재질의 국내 적용성을 검토하기 위하여 재질에 따른 열화거동을 조사하였고, 국내 환경에서 충분히 검토해야 할 환경적 영향을 고려하였으며, 이를 바탕으로 상용 열-유체 연성해석 프로그램인 ADINA를 이용하여 국내환경조건하에서의 장기열화평가 방법론을 제시하고자 한다.

### 2. 장기열화평가

#### 2.1 캐니스터 열화

사용후핵연료가 저장되는 캐니스터는 내부에서 발생하는 고온 및 고방사선 환경을 차폐하고 외부의 대기환경으로 붕괴열을 전달하는 역할을 수행한다. 따라서 캐니스터 벽면은 고온환경에 노출되어 있으며 캐니스터의 구조상 축방향 및 횡방향으로 용접에 의한 접합이 필수적으로 적용되므로 일정한 크기의 잔류응력이 존재하는 동시에 예민화된 미세조직을 가지게 된다. 또한 건식저장 시설이 발전소내 부지에 설치될 수 밖에 없는 국내의 상황을 고려해본다면 그림 1과 같이 해안가

의 높은 염분 환경 조건이 자연적으로 생성되므로 장기건전성측면에서는 부식에 의한 열화가 가장 중요할 것으로 생각된다. 캐니스터에 발생할 수 있는 부식의 종류로는 일반부식, 틈부식, 응력부식균열 등으로 요약할 수 있으며 이중에서도 국내 환경을 고려해볼 때 캐니스터 재질인 스테인레스 강의 응력부식균열현상이 매우 중요한 열화기구로 판단된다.

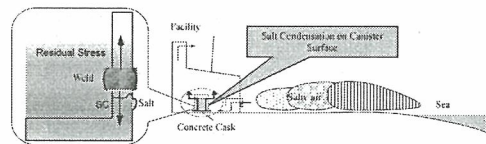


Fig. 1. Stress corrosion cracking on canister surface near the sea coast [1].

#### 2.2 국내 환경

상술한 바와 같이 사용후핵연료를 국내에 적용할 경우, 설치되는 위치는 가동 중 원자력발전소 부지가 가장 유력하며 거의 대부분이 해안가에 위치하고 있다. 따라서 필연적으로 해수면의 염분에 의한 영향이 클 것으로 예상되며 재질에 따른 온도변화, 높은 상대습도로 인해 캐니스터로 유입되는 공기는 내부 캐니스터의 벽면에 응축되어 부식을 가속시킬 수 있다. 특히 캐니스터 벽면의 미세하게 존재하는 불균일한 용접부는 예민화된 재질, 높은 잔류응력과 함께 염분에 의한 부식이 가속화되어 응력부식균열을 반드시 검증되어야 한다. 상용으로 운전하고 있는 건식저장 시설의 캐니스터 재질별 부식특성은 명확히 알려져 있지 않은 상태에서 국외 시설을 도입 혹은 국내 개발 시 이러한 국내환경조건을 반드시 만족해야 한다.

#### 2.3 열해석

사용후핵연료 건식저장 시스템의 열해석은 범용 CFD 코드가 이용되고 있으며 국외 인허가 및 사업시행에 있어 중요한 평가기준으로 적용되고 있다. 캐니스터 내부 사용후핵연료 붕괴열을 시간

에 따라 계산이 가능하며 내부 바스켓, 중성자흡수체 등의 온도변화와 함께 캐니스터 벽면의 온도를 열-구조 연성해석 결과로 표현이 가능하다. 그러나 장기열화평가를 위해서는 열-구조 연성해석과 함께 캐니스터 벽면에서의 유입공기 특성에 따른 유동분포를 고려해야하며 특히 응축이 가능한 온도에서 시스템의 형상별 유동분포가 매우 중요하다. 본 연구에서는 캐니스터 벽면의 온도에 따른 유동분포를 단순화된 시스템 구조에 적용하여 유동분포의 특징을 관찰하였으며 이를 바탕으로 현재 문헌으로 알려진 캐니스터 재질의 응력부식균열속도의 고려하여 장기열화평가를 수행하였다. 대표적인 결과를 그림 2에 나타내었으며 평가를 위해 사용된 캐니스터 재질의 부식속도는 기존의 문헌을 참고하였다[2].

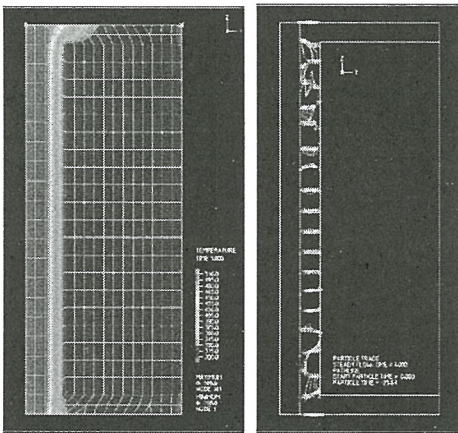


Fig. 2. Typical results of simple DCSS temperature distribution and air flow velocity.

캐니스터의 응력부식균열에 대한 수명은 벽면의 온도가 부식 발생 가능 온도에 도달하는 시간, 균열생성시간 및 균열전파속도로 나눌 수 있다. 일반적으로 캐니스터 벽면온도는 내부에 저장된 사용후핵연료의 연소도, 습식저장 기간 및 건식저장 환경 등에 따라 결정된다. 그러나 국내 저장환경하에서 해안가에서 유입되는 염분의 농도를 고려해 볼 때 응축이 시작되는 온도가 변할 수 있으므로 보수성을 고려한다면 벽면에서 부식이 시작되는 온도는 상대적으로 높을 것으로 생각된다. 또한 응력부식균열 생성시간은 실험적으로 산출된 결과가 대부분이며 특히 가혹한 환경조건(60°C, 90% RHS, NaCl)하에서 가속화 시험[3]을 수행한 것으로 이를 적용하면 304 스테인레스 강에

서는 약 3년 정도의 시간이 필요한 것으로 보고하고 있다. 한편, 응력부식균열 전파속도의 경우 환경적 요인이 매우 중요한데, Stress Intensity Factor K값이 0.5-30 MPam<sup>1/2</sup> 범위에서 1.0 x 10<sup>-10</sup> m/s의 범위를 가지며 대기중에서는 이보다 10배 정도 낮은 값을 보인다. 그러나 이러한 결과는 실험실 단위시험에서 나타난 결과로 실제 장기저장평가에 적용하기엔 적합하지 않다. 특히 장시간동안 해안가에서 캐니스터와 동일한 재질을 자연상태로 그대로 두고 15년 동안 부식거동을 관찰한 결과[4] 다량의 부식현상이 관찰되었기 때문이다. 따라서 국내에서 개발될 혹은 해외로부터 도입될 건식저장 시설의 건전성은 국내환경조건하에서 충분한 검토가 필요하며 재질별 열화거동을 충분히 파악할 필요가 있다.

### 3. 결론

최근 국내 습식저장고의 포화로 진행되고 있는 건식저장 시스템에서 중요한 구조부품중의 하나인 캐니스터에 대한 장기열화평가 방법을 분석하였고 이를 국내에 적용하기 위해 고려되어야 할 사항을 분석하였다. 향후 국내에서 개발되거나 도입될 건식저장 시스템의 장기건전성은 반드시 국내 저장 환경을 고려하여 평가되어야 한다.

### 4. 감사의 글

본 연구는 한국원자력연구원 자체연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

### 5. 참고문헌

- [1] J. Saejusa et al., Nuclear engineering and design, Vol.238, pp. 1168-1174, 2008.
- [2] S. Todd et al., NACE Corrosion 2009, Paper No. 09295.
- [3] K. Akio, Nuclear Engineering and Design, Vol. 238, pp. 1233-1240, 2008.
- [4] Y. Toshima et al., NACE Corrosion 2000, Paper No. 00456.