

## 사용후핵연료 건식저장 시스템 내 콘크리트 구조재료의 장기 내구성에 주요 영향을 미치는 열화 메카니즘 분석

김진섭, 이경수, 최종원, 권상기, 조계춘\*  
한국원자력연구원, 대전 유성구 대덕대로 1045  
\*한국과학기술원, 대전 유성구 과학로 335  
[kverity@kaeri.re.kr](mailto:kverity@kaeri.re.kr)

### 1. 서론

사용후핵연료의 건식저장이라는 관점에서 콘크리트 캐스크 방식에 대한 관심이 증대되고 있으며, 하여 금속캐스크 저장방식이 국가 정책으로 채택된다 할지라도 최소한 건식저장 캐스크 기초 및 구조물 시설보호 등을 위해 콘크리트의 사용을 배제할 수 없다. 따라서 장기 운영에 따른 콘크리트 구조재료의 열화거동에 대한 충분한 이해가 필요하다. 현재 미국을 중심으로 20년 상용운전 수명이 완료된 건식저장 시스템을 대상으로 사용수명 연장에 관한 연구 및 기술적 타당성 분석이 진행 중에 있다.

따라서 본 연구에서는 건식저장 시스템의 사용수명 연장에 따른 콘크리트 구조재료의 장기 열화거동에 영향을 미치는 주요 메카니즘을 분석하였다.

### 2. 건식저장 콘크리트의 주요 장기 열화요인

건식저장 시스템의 구성요소 중 콘크리트 캐스크의 재료적 거동에 영향을 미치는 주요 인자는 1) 방사선으로 인한 손상과, 2) 핵연료 자체의 고열로 인한 열적 손상, 그리고 3) 유해한 화학적 물질의 유입으로 인한 손상을 들 수 있다.

일반적으로 ISFSI (independent spent fuel storage installation)의 콘크리트 구조물은 주로 철근콘크리트가 사용된다. 이때, 사용되는 주요 시멘트로 Type II Portland Cement가 주로 사용되는데, 이는 본 시멘트가 수화열이 낮고 내화산염 저항성이 크기 때문이다. ASTM(2010), Ghosh et al.(2010), Naus(2007) 등은 건식저장 시스템의 사용수명 연장 시, 철근콘크리트 구조물의 내구성에 열화를 초래할 수 있는 주요 메카니즘은 1) 동결융해, 2) 갈습 용출, 3) 침식용 화학물질의 유입, 4) 온도 상승, 5) 크립, 6) 방사화, 7) 수축(shrinkage), 8) 철근부식 등이라고 보고한 바 있다.

### 3. 온도상승으로 인한 영향

콘크리트가 높은 온도조건에 노출되게 되면 콘크리트의 물성은 내부에 존재하는 함수량과 공극률(porosity)에 의존하게 된다. 이러한 환경에의 장기노출은 수분손실을 유발하여 결국 콘크리트의 압축강도와 탄성계수 그리고 크립저항과 열전저도 등의 물성저하를 초래하게 된다.

일반적으로 콘크리트의 온도가 65℃ 이내이면 콘크리트의 강도저하는 그리 크지 않은 것으로 알려져 있다. 또한 콘크리트 캐스크 벽체 내의 최대 온도제한은 95℃ 이하이어야 하며, 온도경사는 콘크리트 균열방지를 위해 60℃ 이하가 되도록 설정하고 있다. 건식저장 시스템에서는 일반적으로 정상 가동시 대부분의 온도가 95℃ 이내에서 운전이 되며, 낙반과 균열이 발생하기 시작하는 온도인 149℃ 이상의 조건에 노출되는 경우는 매우 드물다. 따라서 콘크리트의 국부적인 영역에서 149℃ 이상의 고온노출로 인한 열화현상 발생은 크게 고려대상이 아니다.

### 4. 방사화에 의한 영향

콘크리트에 대한 방사화의 영향은 크게 두가지 메카니즘이 작용한다. 하나는 방사화로 인한 물질과의 상호작용으로 재료적 특성이 변하는 것이다. 이 같은 손상은 재료의 결함을 끊을 수 있고 재료의 취성화를 유발하기도 한다. 두 번째 가능한 원인으로 방사화 에너지 흡수로 인한 국부적인 온도상승이다.

방사선량의 경우 입사 에너지가  $10^{10}$  MeV/cm.sec 이하일 경우에는 핵반응으로 인한 가열을 무시할 수 있으며, 콘크리트가  $10^{19}$  neutron/cm<sup>2</sup> 혹은  $10^{10}$  rad를 초과하는 감마선량에 노출된다면 콘크리트의 압축강도 및 탄성계수가 감소하는 경향을 보이고, 콘크리트 자체의 부피가 현저히 증가하는 현상이 발견된다.

방사선에 의한 손상은 콘크리트 배합에 크게 영향을 받으며, 압축강도의 감소 보다는 인장강도의 감소가 더 큰 경향이 있다. 일반적으로 콘크리트의 방사화에 대한 저항성은 골재 자체의 방사선 저항성에 비례하여 크게 된다. 또한 방사선 조사시 온도상승으로 인한 콘크리트의 열화는 상대적으로 미미한 것으로 알려져 있다. 방사선 조사시 온도상승으로 인한 수분손실로 인해 콘크리트에 균열을 유발한다는 점을 제외하고 고유 방사선 차폐특성에는 큰 영향을 미치지 않는다. 따라서 콘크리트 온도가 65℃ 이내로 유지된다면 이에 대한 고려는 크게 필요 없을 것으로 판단된다.

### 5. 동결융해

동결융해로 인한 콘크리트의 균열발생은 콘크리트 내부의 공극이 물로 포화되었을 때, 이의 동결시 부피가 팽창하는 현상으로 인해 발생한다. 보통 콘크리트 표면에 균열발생이 발생하며 이 자체로는 크게 강도저감에 영향이 없지만, 균열로 인한 콘크리트 투수계수의 증가로 인해 염소이온 등의 유해물질의 이동속도가 증대되어 피해가 발생할 수 있다. 미국의 경우 ACI 318-08, ACI 349-09, ACI 301-05에 따라 콘크리트의 사용을 규정하고 있으며, AE제의 첨가가 동결융해에 저항성이 큰 것으로 알려져 있다.

### 6. 칼슘 침출

칼슘 침출은 콘크리트 자체의 공극률과 투수계수의 함수로써 장기 화학적 열화거동에 영향을 미치는 주요 인자 중의 하나이다. 시멘트 내의 칼슘이온이 수분과의 반응으로 유출되면 콘크리트 내부의 투수계수가 증가하고, 염해의 침입이나 탄산화 등과 같은 유해한 화학적 열화메카니즘이 발생하게 된다.

칼슘 침출은 콘크리트의 강도와 강성과 같은 역학적 물성에 저하를 초래할 수 있으며, 콘크리트 내부의 pH를 떨어뜨려 부식의 확률을 증대시키는 요인이 된다.

### 7. 크립

콘크리트의 크립은 시간의 경과에 따라 일정 응력이 지속적으로 유지되기 때문에 발생한다. 이로 인한 균열은 주로 골재와 시멘트 페이스트 사이에 발생하게 되며 보통 육안으로는 보이지 않는 특징이 있다. 일반적으로 건식저장 시스템은

기초를 제외한 대부분의 벽체가 큰 하중을 견디는 시스템이 아니고, 또한 콘크리트의 크립현상이 시간 경과에 따라 지수함수적으로 감소하는 특징을 보이므로 장기 거동의 분석에 있어서는 크게 영향을 미치지 않을 것으로 평가된다.

### 8. 수축

콘크리트는 워키빌리티를 증대시키기 위해 보통 수화하는데 필요 이상의 수분이 공급되며, 이는 콘크리트 내부에 수축을 유발하여 균열을 발생시킨다. 일반 콘크리트의 건조수축(drying shrinkage)과 자가수축(autogenous shrinkage)은 타설후 약 30년 이내에 종료가 되며, 초기 1년 이내에 최종 수축의 약 90% 그리고 5년 이내에 95%가 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 콘크리트 타설 후 초기에 주의를 기울인다면 건식저장 시스템의 장기 열화거동에는 크게 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

### 9. 철근 부식

콘크리트 내부의 철근은 전기화학적 작용에 의하여 부식이 발생하며, 이는 부피팽창을 유발하여 콘크리트에 균열을 초래한다. 초기의 초 염기성 상태(>pH 12.5)가 탄산화와 유해물질의 침입 등으로 인해 철근 표면의 부동태 피막이 파괴되고, pH 8 이하가 되면 부식이 발생할 수 있다.

탄산화 작용이 일어나려면 수분이 존재해야 하므로 상대습도가 40% 이하이면 이산화탄소가 콘크리트 내부로 침입할 수 없다. 반대로 상대습도가 90% 이상에서는 콘크리트 내부의 공극이 이미 수분으로 채워져 있어 이산화탄소가 역시 들어갈 수가 없다.

부식은 탄산화가 철근이 배근된 위치까지 진행되었을 때 발생하며, 이는 물/시멘트 비를 감소시키고, 피복두께를 증가시킴으로써 어느 정도 방지가 가능하다. 콘크리트의 부식은 건식저장 시스템의 장기 운영에 따른 열화거동에 영향을 미치는 주요 인자 중의 하나이며, 특히 사용수명 연장과 관련하여 중요한 의미를 지닌다.

### 10. 감사의 글

이 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(77611-10).