

사용후핵연료 건식저장 콘크리트 캐스크의 안전규제 요건 및 방사선 손상에 관한 기술현황 분석

김진섭, 최종원, 권상기, 조계춘*
한국원자력연구원, 대전 유성구 대덕대로 1045
*한국과학기술원, 대전 유성구 과학로 335
kverity@kaeri.re.kr

1. 서론

사용후핵연료의 건식저장에서 구조물을 재료적인 측면에서 분류하면 크게 금속 구조물 및 콘크리트 구조물로 구분할 수 있다. 현재 미국을 중심으로 과거 금속재질의 캐스크 타입에서 콘크리트 캐스크 방식에 관심이 증대되고 있으며, 또한 금속캐스크 저장방식을 선택한다 할지라도 최소한 건식저장 캐스크 기초 및 구조물 시설보호 등을 위해 콘크리트의 사용을 배제할 수 없다. 따라서 사용후핵연료의 건식저장 시스템의 개발을 위해서는 콘크리트의 재료적 특성과 장기 운영에 따른 열화거동에 대해 충분한 이해가 확립되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 사용후핵연료 건식저장 시스템과 관련하여 관련 기술 선진국들의 콘크리트 구조물 안전규제 기준을 분석하고, 방사선으로 인한 콘크리트의 손상 및 열화 현상에 대해 기술현황을 분석하였다.

2. 본론

2.1 건식저장 콘크리트 구조물의 안전기준

사용후핵연료 콘크리트 캐스크의 설계는 매우 다양하므로 이들의 구조적 안전성에 대한 허용기준을 개별적으로 정의하거나 또는 일괄적인 단일 기준으로 제시하는 것은 어렵다. 하지만 콘크리트 재료적인 특성에서 살펴볼 때, 일반적으로 온도의 경우 캐스크 벽체 내의 최대 온도제한은 95℃ 이하이어야 하며, 온도경사는 콘크리트 균열방지를 위해 60℃ 이하가 되도록 설정하고 있다.

- 중성자 방사선 차단벽의 경우
 - 최대 내부온도 88℃ -최대 대기온도 71℃
 - 감마 방사선 차단벽의 경우
 - 최대 내부 온도 177℃ -최대 대기온도 149℃
- 한편 방사선량의 경우 입사 에너지가 10^{10}

MeV/cm².sec 이하일 경우에는 핵반응으로 인한 가열을 무시할 수 있으며, 콘크리트가 10^{19} neutron/cm²나, 혹은 10^{10} rad를 초과하는 감마선량에 노출된다면 콘크리트의 압축강도 및 탄성계수 등이 감소하는 경향을 보인다.

2.2 온도상승으로 인한 콘크리트 열화

일반 콘크리트가 높은 온도조건에 노출되었을 때 다양한 반응 및 구조적인 변화가 콘크리트 내에 발생하게 된다. 이에 crystal transformation 과 recrystalliation 그리고 이산화탄소의 유리(liberation)로 인한 열화 및 dehydration이 포함될 수 있다. Crystal transformation은 주로 골재에서 발생하며, 소위 말하는 콘크리트 열화는 경화된 시멘트 페이스트에 주로 발생하게 된다.

온도가 상승하면서 약 180℃에서는 콘리트 내의 증발가능한 수분이 dehydration과 cement gel의 파괴로 인해 제거된다. 또한 500℃에서는 portlandite로 불리는 Ca(OH)₂가 분해되기 시작하여 약 700℃에서 경화시멘트 내의 CSH(Calcium Silicate Hydrate)이 파괴된다. 1200℃에 이르러서는 콘크리트 내의 일부 물질이 녹기를 시작하여 1300℃~1400℃에서 콘크리트가 용융상태로 존재하게 된다. 일반적으로 콘크리트의 압축·인장강도 및 탄성계수, 밀도 등은 온도증가에 따라 감소하는 경향을 나타낸다.

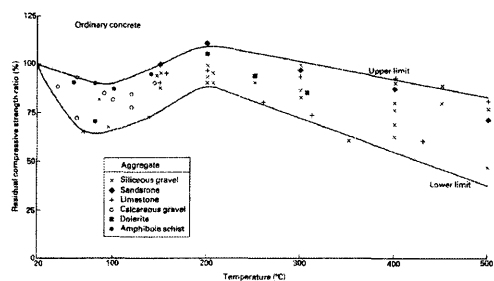


Fig. 1. Effects of temperature on the compressive strength of unsealed ordinary concrete[1]

2.3 방사화에 의한 콘크리트 물성변화

콘크리트에 대한 방사화의 영향은 크게 두 가지 메카니즘이 작용한다. 하나는 방사화로 인한 물질과의 상호작용으로 인해 재료적 특성이 변하는 것으로 재료의 취성화를 유발하기도 한다. 두 번째 가능한 작용으로는 방사화 에너지 흡수로 인한 콘크리트의 국부적인 온도상승이다. 차폐체 내에서 일정거리(x) 떨어진 지점에서의 온도상승에 대한 개략적인 식은 다음과 같다.

$$\Delta T(x) = \frac{H_0 \lambda^2}{k} (1 - e^{-x/\lambda}) \quad (1)$$

ΔT 는 거리 x (cm)에서의 온도상승이고, H_0 는 heating rate(Wcm^{-3}), λ 는 감쇠거리(cm)(감마선의 경우= $1/\mu$, 중성자의 경우= $1/\Sigma R$), μ 는 감마선의 선형흡수 계수(cm^{-1}), ΣR 는 고속중성자의 제거단면(removal cross-section), k 는 차폐체의 열전도도($W cm^{-1}C^{-1}$)이다. 아래의 그림에 중성자선 및 감마선이 콘크리트의 압축 및 인장강도에 미치는 영향에 대해 나타내었다.

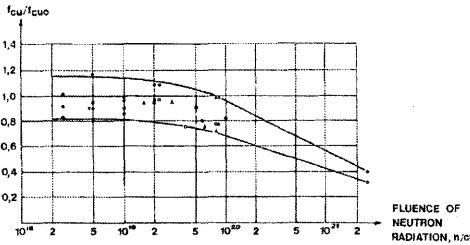


Fig. 2. Compressive strength of concrete exposed to neutron radiation[2]

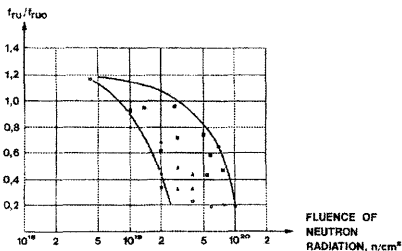


Fig. 3. Tensile strength of concrete exposed to neutron radiation[2]

많은 경우에 있어 이 두가지 메카니즘을 서로 명확히 구분하기란 불가능하다. 일반적으로 방사선 조사시 발생하는 온도상승으로 인한 콘크리트 손상이 방사선 자체에 의한 재료적인 손상 보다 더 큰 것으로 알려져 있다. 이는 콘크리트의 손상을 가져올 수 있는 임계 방사선량 값이 온도상승을 일으킬 수 있는 임계값 보다 훨씬 크기 때문

이다. 실제로 콘크리트에 대한 방사선 조사시 재료의 역학적 거동변화는 주로 온도상승으로 인한 콘크리트 내부 함수량의 변화 및 재료간의 열적 물성 차이로 인한 체적증가와 균열발생으로 인해 기인한다.

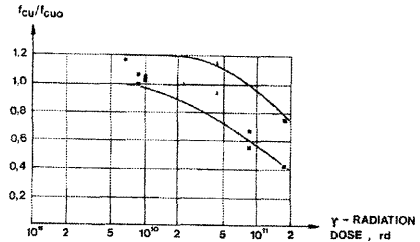


Fig. 4. Compressive and tensile strength of concrete exposed to gamma radiation[2]

3. 결론

고온 및 방사선에 노출된 콘크리트의 물리·역학적 특성에 대한 연구는 연구자들 마다 각기 다양한 결과를 보이고 있다. 이와 같은 차이는 배합 설계 및 재료적인 차이뿐만 아니라 실험이 수행된 조건이 틀리기 때문이다. 따라서 높은 온도 및 고선량 조건에서의 콘크리트 실험결과에 대한 기존 정보를 활용하기 위해서는 세심한 조심이 필요하다. 우선 온도 및 방사선에 내구성이 강한 콘크리트 재료를 선택해야 할 것이며, 현재 고려하고 있는 사용후핵연료 건식저장 시스템에 적합한 설계 체원을 도출하고 이를 관련 콘크리트 실증실험을 통해 면밀한 검증작업이 수반되어야 할 것이다.

4. 감사의 글

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학재단의 원자력기술개발사업으로 지원 받았습니다.

5. 참고문헌

[1] M.F.Kaplan, Concrete Radiation Shielding: Nuclear Physics, Concrete Properties, Design and Construction, Longman Scientific & Technical, pp.331, 1989.
 [2] D.L.Fillmore, Literature Review of the Effects of Radiation and Temperature on the Aging of Concrete, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, ineel/ext-04-02319, pp.1-10, 2004.