

동굴처분시설 콘크리트 구조물의 열화인자 및 모델 평가

박주완, 정해룡, 김창락

한국수력원자력(주), 대전광역시 유성구 장동 25-1번지

p5j9w@khnp.co.kr

1. 서론

방사성폐기물 동굴처분시설의 콘크리트 구조물은 구조물 내부로 지하수의 침투를 지연시키는 역할과 처분된 폐기물로부터 누출된 오염물질이 생태계(biosphere)로 유출되지 못하도록 제어하는 물리적/화학적 방벽 역할을 수행한다. 현대적인 의미의 콘크리트가 사용되기 시작한지 100여 년에 불과하기 때문에 수백년의 기간동안 서서히 발생하는 콘크리트 구조물의 열화과정을 정확히 예측 혹은 평가하기에는 무리가 따른다. 그러나 처분시설의 장기적인 안전성 관점에서 콘크리트 구조물의 열화평가는 방벽의 열화로 인해 구조물에 가해지는 예상하중에 의한 구조적 건전성의 상실측면보다는 노화된 방벽을 통한 지하수의 유동과 핵종이동에 의해 주위 환경으로 방사성물질의 누출가능성에 초점을 맞추어 실시하고 있다. 본 논문에서는 국내외적으로 발표된 대표적인 방사성폐기물 처분장 콘크리트 구조물의 열화인자 및 열화모델을 종합적으로 고찰 및 분석하였다.

2. 열화인자검토

방사성폐기물 동굴처분시설 콘크리트 구조물의 대표적인 열화인자로는 1) 황산염 및 마그네슘 침입, 2) 콘크리트의 수산화칼슘 침출, 3) 알칼리-혼합재 반응, 4) 콘크리트의 탄산화, 5) 산의 침입, 6) 보강철재 부식 등을 들 수 있다. 이들 인자중에서 동굴처분시설 콘크리트 구조물은 보강철재 부식에 의해 가장 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 보강철재에 부식이 발생할 경우 부식생성물은 초기 금속보다 약 3 배 이상 부피가 증가하게 된다. 따라서 팽창으로 인해 콘크리트에 균열이 생기거나 투수성이 증가하게 된다[1]. 그러나 공극수의 높은 pH로 인해 콘크리트내 보강철재 표면에는 보호피막이 형성되어 부식을 억제하는 경향이 있다. 따라서 보강철재에 부식이 일어나려면 먼저, 생성된 보호피막이 파괴되어야 한다. 콘크리트의 탄산화 혹은 염화물 침입에 의해 콘크리트의 pH가 낮아지고, 이로 인해 보강철재의 보호피막이 파괴되게 된다. 일반적인 지하수 환경하에서는 콘크리트의 탄산화는 거의 발생하지 않기 때문에, 염화물 침입을 대표적인 콘크리트 보강철재 부식유발인자로 설정할 수 있다.

3. 열화모델평가

콘크리트 구조물 열화를 평가하는 모델과 메커니즘에 대한 많은 문헌자료가 존재하고 있지만 [2], 이를 요약하면 크게 세가지로 구분할 수 있다. 첫 번째로는 콘크리트 구조물 주변 지하수내에 염화물 농도가 높을 경우에 적용하는 방법으로서, 콘크리트 열화가 염화물 이동(확산)에 의해 지배된다고 가정하여 설명하는 모델이다. 이 모델에서는 콘크리트 표면에서 보강철재까지 염화물의 이동을 Fick's second law로 설명하고 있다. 또한, Fick's second law가 가지는 기본적인 가정인 확산계수가 시간에 따라서 일정한 문제를 해결하기 위해, 확산계수를 식 (1)의 멱함수(power function)로 나타내었다.

$$D(t) = D_R \cdot \left(\frac{t_R}{t} \right)^a \quad (1)$$

여기서, $D(t)$ =확산계수(m^2/s), t_R =비교확산계수(reference diffusion coefficient)가 측정된 시간(s), $D_R=t_R$ 에서 측정된 비교확산계수(reference diffusion coefficient) (m^2/s). 그림 1에는 각기 다른 a 값에서, 보강철재표면(두께: 7 cm)에서 시간에 따른 염화물 농도(relative chloride concentration)를 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 보강철재에서의 염화물 농도는 a 값에 의해 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있으며, a 값은 콘크리트 종류 및 특성에 따라 달라진다. 일반적으로 방폐장 콘크리트 구조물에 사용되는 콘크리트의 a 값은 0.3 내외인 것으로 알려져 있다[3]. 따라서 a 값이

3인 콘크리트를 사용하였을 경우에, 7 cm 깊이에 있는 보강철재에서 염화물 농도가 콘크리트 표면 염화물 농도의 20% 까지 도달하는데 약 500년의 시간이 소요된다는 것을 알 수 있다. 보강철재에서 염화물의 농도가 염화물 농도한계(Threshold chloride concentration) 이상이 되었을 경우에 부식이 발생하며, 염화물 농도한계는 환경조건에 따라서 달라지게 된다.

두 번째 모델은 지하수내에 포함되어 있는 화학종들이 콘크리트 표면에서 보강철재까지 이류 및 확산에 의해 이동하는 것으로 표현하는 것이다. 지하수내에 포함되어 있는 화학종들이 일정거리 이동한 후에는 콘크리트 내의 성분들과 화학적 평형상태에 도달하는 것으로 가정하고 있기 때문에 다른 모델들에 비해 상대적으로 복잡하게 이루어져 있다.

세 번째는 미국 아이다호 국립연구소(INEEL)내의 고준위 폐기물 탱크의 잔류 폐기물 안전성평가를 위해 미국 에너지성(US DOE)에서 제시한 모델을 들 수 있다[4]. 이 접근 방법에서는 개별 열화인자에 의한 콘크리트 구조물의 열화속도를 경험식을 이용하여 도출하였기 때문에 보다 단순하고 간단한 방법으로 인식되고 있지만, 이전에 설명된 모델들에 비해 보수적인 접근방법을 적용하는 모델로 알려져 있다.

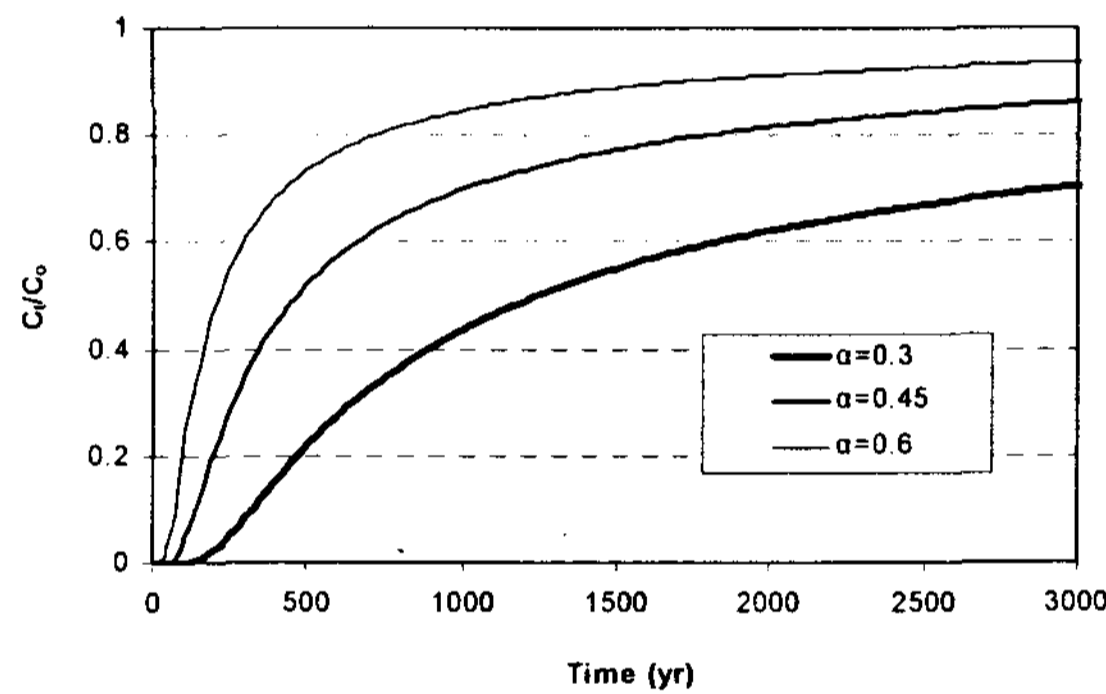


그림 1. 시간에 따른 보강철재 표면에서 염화물 농도.

참고 문헌

[1] NCRP Report 152. Report of the National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP), "Performance Assessment of Low-Level Waste Disposal Facilities," Bethesda, 2005.

[2] J.C. Walton, L. E. Plansky, and R. W. Smith, Models for Estimation of Service Life of Concrete Barriers in Low-level Radioactive Waste Disposal, NUREG/CR-5542, September 1990.

[3] DuraCrete, Design Framework, Document BE95-1347/R1, The European Union-Brite EuRam III, Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, CUR, Gouda, 1997.

[4] US DOE, The U.S. Department Of Energy Idaho National Laboratory Site Draft Section 3116 Waste Determination For Idaho Nuclear Technology And Engineering Center Tank Farm Facility. U.S. Department of Energy, Idaho Operations Office. No report number. Appendix E. Degradation Analysis of the Grouted Tank/Vault and Piping System at the Idaho Nuclear Technology and Engineering Center Tank Farm Facility And Preliminary Results for the Detailed Analysis of Releases from the Grouted Pipe and Encasement System, 2006.