국외 유사 동굴처분시설에서의 콘크리트 열화모델링 사례 분석

이지훈. 박주완, 김창락
한국수력원자력(주) 원자력발전기술원, 대전광역시 유성구 장동 25-1
jihoon@khnp.co.kr

장기적인 처분시설 성능에 관한 시멘트/콘크리트의 열화에 대해서는 처분사일로를 구성하는 방벽물질이 갖는 성능의 물리적 측면과 시멘트계 물질의 열화 메커니즘 및 핵종과 시멘트의 상호작용에 의한 화학적 측면의 고려가 필요하다. 인공방벽의 점진적인 열화(gradual degradation)는 시멘트/콘크리트재의 물리적, 화학적 열화(크랙 생성, 공극율 변화 등)에 의해 가스와 지하수의 투과율을 높게 할 것이다. 이러한 열화는 확산과 이류를 통한 핵종이동에 부분적으로 영향을 주고, 그 밖에 지하수 성분의 이동으로 인해 구조재와 반응을 일으킬 수 있다. 또한 시멘트의 화학적 변화는 매질의 흡착성질에 점진적 변화를 야기할 수 있다. 현재 국내 처분시설과 유사한 처분사일로 방식을 채용하고 있는 핀란드와 스웨덴 처분시설에서 인공방벽으로 사용되고 있는 시멘트/콘크리트재의 시간에 따른 열화 모델링 접근법에 대해 비교・검토하였다.

핀란드 VLJ 처분시설에서의 콘크리트 열화모델링

처분장내 일반적인 조건하에서의 콘크리트 열화(concrete degradation)의 원인으로 소석회(CaOH)의 용해, 소석회로부터 생성된 석회석($CaCO_3$)이 지하수와 반응하여 콘크리트내 확산으로 인한 탄화(carbonatization), 황산염이 지하수로부터 콘크리트 내부로 확산하며 석회의 용해와 팽창성광물인 Ettringite($3CaOAl_2O_33CaSO_432H_2O$)의 형성 및 콘크리트 내의 보강재의 부식을 일으키는 황산염에 의한 열화를 고려하고 있다. 따라서 핀란드의 중준위 사일로에서 내 황산염 콘크리트 사용으로 황산염 열화를 감소시키고 있으며 콘크리트 열화에 대한 NAGRA 연구를 토대로 중준위 사일로에서 콘크리트의 총 열화시간을 약 18,000년으로 추정하고 있다.

콘크리트의 특성변화는 콘크리트의 화학반응, 다공성, 침투성의 관계에 고려하여 중준위 사일로의 지화학 모델링에 의해 조사되었다. 그 결과 반응생성물의 침전으로 인해 콘크리트의 투과성은 100,000년 동안 1/10이 감소되고, 콘크리트 특성 변화는 매우 오랜 시간이 걸리는 것으로 보고하고 있다. VLJ 처분장 조건에서 중준위 사일로 콘크리트의 특성과 내구성은 실험 데이터와 측정 그리고 문헌상의 이론적 계산에 근거하여 VVT Building Material Laboratory에서 수년간 수행하였으며, 수십년간 해수에 잠긴 콘크리트 구조물에 대한 실험에 기초하여 열화율(degradation rate)을 예측하고 있다. 실험 결과 중준위 콘크리트 사일로의 열화율은 보수적인 결과를 보이는 선형 모델에 따르면 1,000년에 약 8cm로 나타났으며, 동일한 입력 자료로 확산 모델 적용시에는 1,000년에 약 0.5cm~1.4cm인 것으로 보고하고 있다. 한편, 이 확산모델에서는 콘크리트 표면이 열화되어 점진적으로 떨어져 나가는 것은 고려하지 않았다.

이러한 실험과 모델링 결과를 바탕으로 안전성분석보고서의 기준시나리오(reference scenario)에서는 중준위 콘크리트 사일로의 외부표면은 기계적, 화학적으로 1,000년에 10cm 열화되어 분쇄석(crushed rock)과 유사한 특성을 보이는 것으로 가정하였다. 또한 콘크리트의 열화는 사일로의 관통유속을 점차 증가시킨다고 가정하였으며, 콘크리트 구조물은 5,000년 후에 붕괴하고, 콘크리트는 6,000년에 화학적으로 열화된다고 가정하였다. 운영 및 건설터널의 수직구(shaft)와 밀봉구조물(sealing structure, t=1~2m)은 9,000~12,000년 후 완전하게 열화되는 것으로 가정하였다. 콘크리트 사일로 및 밀봉을 위한 콘크리트 플러그의 열화에 수반하여 콘크리트 사일로내의 지하수 유량은 다음과 같이 증가하는 것으로 가정하였다(그림 1 참조).

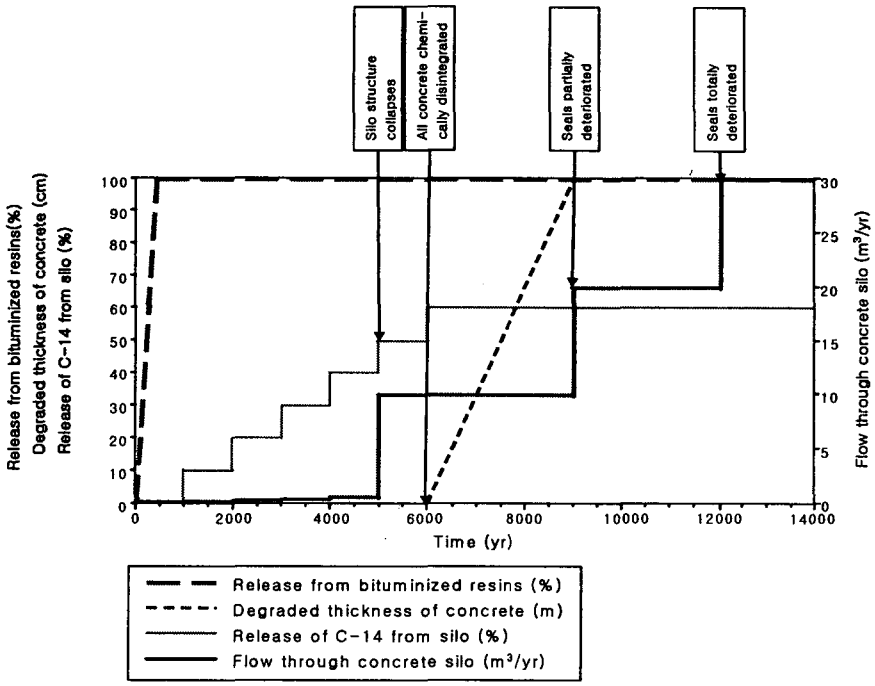

그림 1. MLW 사일로의 기준시나리오에서 사용된 핵종누출과 콘크리트 붕괴에 대한 가정

스웨덴 SFR 처분시설에서의 콘크리트 열화모델링

스웨덴 SKB의 최근 안전성 재평가에서는 주로 시멘트 방벽의 광물학적 변환에 초점을 맞춘 화학적 이동계산을 수행하고 있다. 세부적으로 1) 경계조건으로서 일정한 지하수 화학조건을 가진 시멘트 방벽을 통해 반응물이 확산하는 경우, 2) 균열이 생긴 시멘트 방벽을 통해 이류하는 경우 3) 일정한 지하수 화학조건을 가진 시멘트 방벽과 모래/벤토나이트 혼합물을 통해 확산하는 경우의 세 가지 경우에 대한 모델링을 수행하였다. 그 결과 포틀랜드 성분의 침출, Friedelsalt ($Ca_2Al(OH)_6Cl{:}2H_2O$)의 생성, 탄화, 칼슘실리케이트수화물(CSH)로의 전환 및 Ettringite 생성과 같은 변화가 예측됨을 보여주었으며, 계산 결과 10,000년의 기간동안 콘크리트내에 알칼리 조건이 유지되어 콘크리트 방벽내의 흡착능이 유지되는데 기여할 것으로 보고 있다. 공극률 변화는 그다지 크지 않으며, 초기 값과 비교하여 약 2배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 또한 이온교환수지로부터의 황산염 누출로 인해 주변 콘크리트 구조물의 손상가능성을 배제하였으며 유기물질의 분해에 의한 탄화와 농축폐액으로부터의 염의 영향은 크랙발생을 일으킬 수 있다고 기술하고 있으나 이에 대한 구체적인 조사는 수행하지 않았다. 처분시설의 근계 핵종이동 모델링에서는 SFR에서의 수리지질학적 상황을 3가지 즉, 폐쇄후 1,000년, 2,000년 및 3,000년에 유량과 유향의 변화를 겪는 것으로 나타내고 있다. 안전성분석보고서의 핵종이동평가에서는 공학적 방벽의 열화와 관련하여 시멘트/콘크리트 방벽의 시간에 따른 수리특성의 변화를 기준 시나리오(base scenario)범주내에서 여러 가지 경우에 대해 예시하고 있으며, 시간 경과에 따른 방벽의 열화에 대해서는 잠정적으로 처분시설 폐쇄후 1,000년 경과 후 열화가 시작되는 것으로 가정하고 있다.

국내에서도 시멘트/콘크리트 열화와 관련된 모든 메커니즘을 고려하여 시간적 변화에 대한 결론을 도출하기 위한 적절한 기반을 마련해야 할 것이며, 안전성 평가에서는 방벽 열화에 관한 합리적으로 가능한 모든 메커니즘에 대한 해석과 평가가 포함되어야 할 것이다. 또한 콘크리트의 수리특성의 중요성을 조사하기 위한 민감도 분석도 수행하여야 할 것이다.