

A Study on the Methodology to Ensure Long-Term Durability of Low and Intermediate Level Radwaste Disposal Concrete Structure

중·저준위 방사성폐기물 처분 콘크리트 구조물의 장기적 내구성 확보를 위한 방안 검토

Young-Ki Kim, Byung-Sik Lee, Yong-Ho Lee

Korea Power Engineering Company, 360-9 Mabuk Ri, Kusong Eup, Yongin

김영기, 이병식, 이용호

한국전력기술, 용인시 구성읍 마북리 360-9

Abstract

The concrete structure is being considered for the main engineered barrier of low and intermediate level radwaste disposal facility. Concrete of low permeability can minimize infiltration of water and effectively prevent release of nuclide to ecosystem. But if concrete degrades, structural stability of disposal structure will decrease while permeability increase, resulting in increased possibility of nuclide release due to water infiltration. Therefore disposal concrete structure degradation shall be minimized to maintain capacity of nuclide isolation. The typical causes of concrete structure degradation are sulfide attack, reinforcement corrosion due to chloride attack, leaching of calcium hydroxide, alkali-aggregate reaction and repeated freezing-thawing. The common cause of these degradation processes is infiltration of water or adverse chemicals into concrete. Based on the study of these degradation characteristics and mechanisms of concrete structure, the methodology of design and service life evaluation of concrete structure as an engineered barrier are reviewed to ensure its long-term durability.

Key Word : Radwaste disposal facility, Concrete, Degradation, Permeability, Durability
Engineered barrier

요 약

중·저준위 방사성폐기물 처분시설의 주 인공방벽으로 콘크리트 구조물이 고려되고 있다. 콘크리트는 투수성이 낮아 물의 침투를 최소화할 수 있으며, 핵종 물질의 누출 차단에도 효과적이기 때문이다. 그러나 콘크리트에 열화가 발생하면 처분구조물의 구조적 안정성이 낮아지며, 투수성이 증가하여 외부로부터 물의 침투로 인한 핵종물질 누출 가능성이 높아진다. 따라서 처분구조물의 오염물질 격리 성능을 증진하기 위해서는 콘크리트의 열화를 최소화하여야 한다. 콘크리트 구조물의 대표적 열화 원인으로 황산염의 침투, 염화물 침투에 의한 철근 부식, 칼슘 수산화물의 침출, 알칼리-골재 반응, 그리고 구조물의 반복적인 동결-융해가 있다. 이러한 열화과정의 공통적 원인은 구조물에 물 및 유해한 화학물질이 침투하기 때문이다. 본 논문에서는 이러한 열화원인 및 메커니즘 검토에 기초하여 인공방벽으로서 콘크리트 처분구조물의 장기적 내구성을 확보하기 위한 설계 및

설계수명 평가 방안을 검토하였다.

중심단어 : 방사성폐기물 처분시설, 콘크리트, 열화, 투수도, 내구성, 인공방벽

1. 서론

중저준위 방사성폐기물 처분시설은 오염물질을 생태계로부터 300년 이상 격리할 수 있어야 하는 시설이다. 폐기물의 격리를 위해서는 폐기물과 물의 접촉을 최소화하기 위한 처분시설 건설이 필수적이다. 따라서 폐기물 처분장은 물과 폐기물의 접촉을 최소화하여 자연방벽 성능이 최대한 활용될 수 있는 부지에 건설되어야 한다. 그러나 현실적으로 우수한 부지를 선정하는데는 많은 제약이 있으며, 또한 지질 및 지하의 수리/수문 특성을 평가하는 부지특성 조사에도 많은 불확실성이 잠재되어 있다. 이러한 문제점 때문에 최근 해외에서 추진 중인 대부분의 폐기물 처분장은 인공방벽 성능을 대폭 향상하는데 초점을 두고 연구 및 설계가 추진되고 있다.

처분시설에 사용되는 인공방벽의 주 재료로 내구성이 매우 높고, 수밀성이 좋으며, 화학적으로도 비교적 안정적인 재료로 평가되고 있는 콘크리트가 고려되고 있다. 콘크리트는 로마시대의 고대 콘크리트 구조물 중 일부가 여전히 구조적 건전성을 유지하고 있는 사례가 있으며, 포틀랜드 시멘트가 사용된 근대의 콘크리트 구조물도 100년 이상 구조적 건전성을 유지하고 있는 경우가 많아 장기간 격리성능 확보가 요구되는 처분시설의 인공방벽 재료로 적합하다. 그러나 콘크리트 구조물은 설계 및 시공품질 그리고 노출환경에 따라 구조물 내구성능에 많은 편차가 발생할 수 있으며 콘크리트의 다양한 화학적 열화특성 때문에 내구 성능의 정량적 평가에 어려움이 있다. 따라서 처분구조물의 설계는 콘크리트의 열화특성에 대한 충분한 이해를 필요로 하며, 처분구조물의 장기 성능확보가 가능하도록 설계 및 시공공법 선정에 있어서 각종 열화에 대한 대책을 수립하여야 한다.

처분구조물은 일반구조물에 비하여 장기 성능이 확보되어야 하므로 처분구조물은 고도의 내구성이 확보되도록 설계되어야 한다. 그러나 처분 구조물 설계를 위한 기존의 설계기준 및 표준이 충분하지 않으며, 선진 해외국가들은 각 국가의 여건에 따라 각종 연구 및 기술개발 결과에 근거하여 처분시설을 건설하였다. 따라서 본 고에서는 콘크리트의 재료특성 및 열화특성과 각종 열화에 대한 평가 결과를 검토하여 우리나라 처분환경에 적합하고 내구성을 고도로 향상시킬 수 있는 콘크리트 처분구조물의 설계방안을 제시하고자 한다.

2. 콘크리트 구조물의 각종 열화 특성

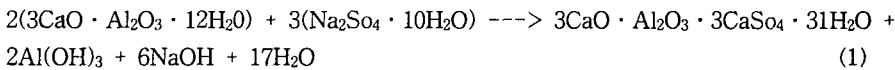
콘크리트의 열화에 영향을 주는 요인은 수없이 많다. 콘크리트 열화에 영향이 있는 화학성분으로는 황산염, 아황산 수소염, 탄산염, 시안화물, 중크롬산염, 플루오르화물, 육각인산염, 질산염, 염화물 이온, 나트륨 인산염, 포타슘 인산염, 나트륨 과붕산염, 티오 황산염, 붕사 등이 있다. 식물성 및 동물성 기름도 콘크리트의 열화에 영향이 있다. 이러한 유해한 화학물질들은 콘크리트에 균열을 일으키고 철근을 부식시킬 수 있으며, 콘크리트의 투수계수를 증가시켜 지하수 침투량을 증가시키게 된다. 또한 동결-융해의 반복적 작용에 의한 물리적 열화도 발생할 수 있다.

이러한 콘크리트의 열화요인 중 콘크리트 처분구조물 설계에 반드시 고려되어야 할 대표적인 열화원인은 황산염의 침투, 염화물의 침투, 칼슘 수산화물의 침출, 알카리-골재반응, 그리고 콘크리트의 반복적인 동결-융해가 있다.

2.1 황산염 침투에 의한 콘크리트 구조물의 열화

콘크리트가 황산칼륨, 황산나트륨 및 황산마그네슘이 있는 수분과 접촉하여 반복적인 건조과정을 겪으면서 콘크리트 내에 축적된 황산염은 시멘트의 수화에 의해 발생한 수산화칼슘과 반응하여 팽창하므로 콘크리트에 균열을 발생시킨다.

황산염에 의한 시멘트의 대표적 화학반응은 식 (1)에 나타난 바와 같이 시멘트의 C₃A와 반응으로 인하여 팽창성 물질(3CaO · Al₂O₃ · 3CaSO₄ · 31H₂O)이 생성되며, 이로 인하여 콘크리트에 균열이 발생하게 된다.



열화평가 모델로 시멘트의 C₃A 함량과 황산염의 농도를 고려하는 Atkinson의 경험적 평가 모델이 있다. 경험적 평가 모델을 활용하여 황산염 농도 및 시멘트의 C₃A 함량에 따른 콘크리트의 열화를 평가한 결과는 그림 1과 같다. 그림 1은 C₃A 함량이 5%인 시멘트가 사용된 콘크리트가 황산염 농도가 40 ppm인 환경에 300년간 노출될 경우 콘크리트 표면에서 약 3cm 정도 깊이까지 열화가 발생함을 보여주고 있다.

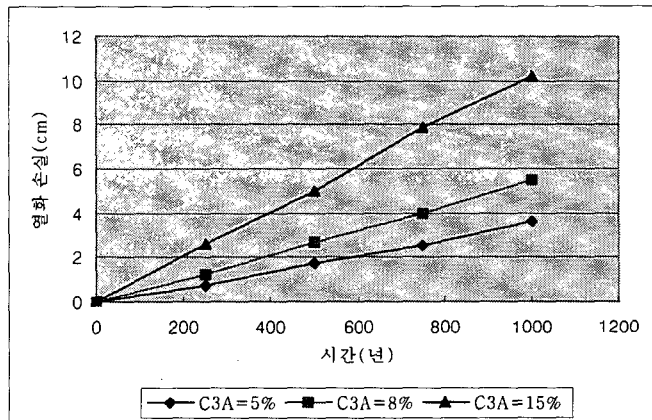
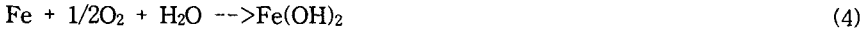


그림 1. 경험모델에 따른 황산염 환경(40 ppm)에서의 황산염 침투에 의한 열화

2.2 철근부식

콘크리트 내에 매입된 철의 부식은 본질적으로 전기화학적 반응에 근거한다. 콘크리트 내부에 매입된 철의 부식과정은 양극과 음극, 전기 전도체(철근), 수용성 전해질 형성 등에 있어 축전지의 반응과 유사하다. 식 (2), (3), (4)는 철근의 화학반응에 의한 부식과정으로서 물과 산소가 필수적인 매개체임을 보여주고 있다. 그러나 물과 산소만 있는 경우에는 반응속도가 매우 느려서 일반적인 환경조건에서 양호한 품질의 콘크리트 내의 철근 부식은 매우 서서히 진행된다. 염화물은 철근부식을 가속화할 수 있는데, 이것은 염화물이 철근의 산화피막을 파괴하고 콘크리트의 전기저항을 낮추어 부식전류를 증가시키기 때문이다.



철근 부식의 시작 시점을 평가하기 위하여 물-시멘트비, 염화물 이온 농도, 그리고 철근에 대한 콘크리트 덮개두께를 고려한 Stratful과 Clear의 경험적 부식평가 모델이 있다. 그림 2는 경험적 부식평가 모델에 따라 토양 수분에 있는 염화물 농도에 따른 철근부식시기 평가 사례를 보여주고 있으며, 물-시멘트 비가 0.4 이하이며 덮개가 3 in 이상인 경우 250년이 경과된 시점에서 부식이 시작됨을 보여주고 있다.

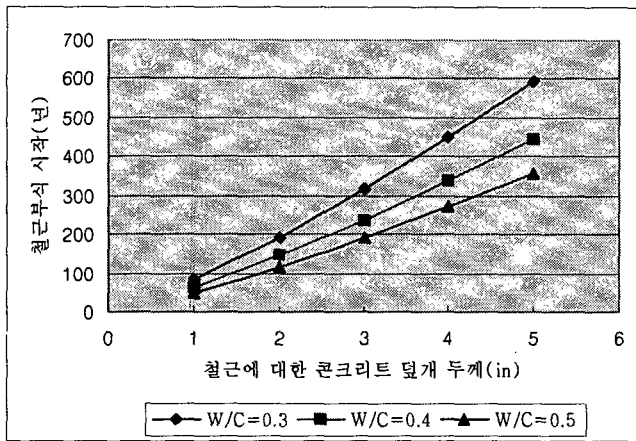


그림 2. 토양의 염화물 농도가 50 ppm인 경우의 철근부식 시작

2.3 알카리-골재 반응

알카리-골재 반응은 특정한 규산질 골재 또는 백운암 계열의 석회암 골재와 시멘트 중의 알카리 성분이 접촉할 경우 주로 발생한다. 알카리-골재반응의 일반적인 메커니즘은 다음과 같다. 수산화물 및 결정화된 용해물질에 의하여 규산 네트워크의 규산-산소 결합이 분리된다. 여기에서 규산의 비결정화는 공극 용해수의 pH와 관계가 있으며, pH 12.5에서 칼슘수산화물의 포화 용해수에서 작은 양의 실리카 비결정화가 발생하며, pH 13이상에서는 수천배로 증가되어 발생한다. 이어서 수화성 알카리 규산 젤이 형성되며, 이 젤은 물을 흡수하여 팽창하게 된다. 이 팽창은 골재 강체를 더욱 파괴하여 수산화물 이온이 골재 내부로 더욱 깊게 침입하도록 한다. 반응이 진행됨에 따라 콜로이드성 물질이 형성되고 물의 흡수량이 증가한다. 만약 팽창성 물질이 충분하게 발생하게 되면 콘크리트에 내부압력이 형성되고 콘크리트에 균열이 발생하게 된다. 균열의 발생량은 물의 흡수량에 의하여 결정된다. 알카리-골재 반응은 콘크리트 재료 선정과정에서 반응성 골재가 사용되지 않도록 하고 시멘트의 알카리 성분을 제한하여 제어될 수 있다.

2.4 동결-융해에 의한 열화

경화된 콘크리트의 공극 내에 있는 물이 동결되면 내부에 팽창압이 발생하며 콘크리트의 인장강도를 초과하게 되면 균열이 발생하게 된다. 물이 얼음으로 변하면 약 9%의 부피팽창이 발생하여

내부 수리압력이 발생한다. 이러한 팽창으로 인하여 동결 발생지점에서 잉여수는 인접한 공극으로 이동하게 되며, 이 때 수리압력은 동결지점에서 물의 이동이 제한될 때 발생하게 된다. 만약 공극이 동결지점 가까이 있지 않고, 잉여수를 수용할 수 없다면 수리압력은 경화된 콘크리트의 인장강도를 초과하게 된다. 이러한 가설은 발달된 압력의 크기가 동결율, 포화도, 시멘트의 투수도, 그리고 동결지점에서 가장 가까운 공기로 채워져 있는 공극과의 거리에 의하여 좌우됨을 나타낸다.

동결-융해에 의한 열화는 흙에서의 프로스트 히브(Frost-heave) 현상과 같이 삼투압 발생이론으로 설명될 수 있다. 모세 공극에 형성된 얼음 결정체는 얼음과 물간의 자유에너지의 차이로 인하여 젤 공극으로부터 얼지 않은 물이 유인되어 얼음 결정이 성장한다. 얼음 결정은 자유에너지가 같아질 때까지 성장하게 되며, 삼투압이 충분하게 발생할 경우 경화된 콘크리트에 균열을 발생시키게 된다.

동결-융해에 의한 콘크리트의 열화는 공기 연행량, 물-시멘트 비, 그리고 동결-융해 반복 횟수를 고려하여 동탄성계수의 부분적 감소량을 산정하여 평가할 수 있다. 그림 3은 Shuman의 경험적 열화 평가모델에 따른 동결-융해 반복회수에 의한 년도별 열화 깊이를 평가한 사례를 보여주고 있으며, 물-시멘트 비가 커질수록 동결-융해 열화가 급격히 진행됨을 보여주고 있다. 또한 그림 3은 동결-융해 반복횟수가 증가될 경우 열화 깊이가 크게 증가하여 구조물 건전성에 큰 영향이 있음을 보여주고 있다.

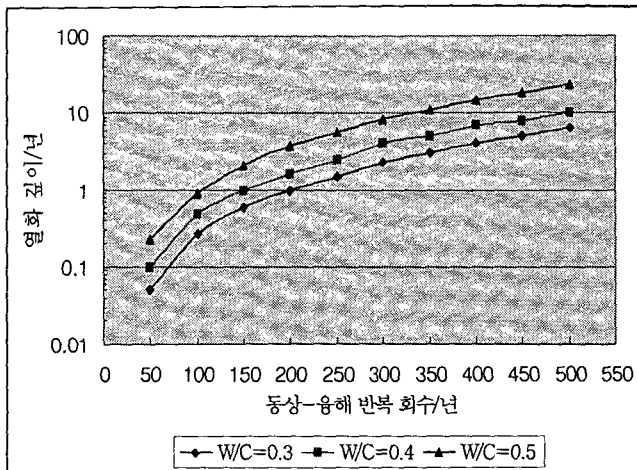
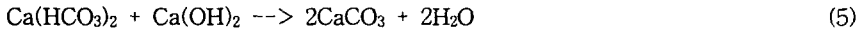


그림 3. 공기 함유량이 7%인 경우 동결-융해 열화 손실

2.5 침출에 의한 열화

물에 의한 침출은 물이 콘크리트에 침투하여 수화된 시멘트 내부의 수용성 물질을 용해하여 지하수계로 이동시키는 것이다. 일정한 온도를 가질할 때 용해의 정도는 물의 화학적 특성, 경화된 시멘트의 용해 가능 성분, 그리고 지하수의 유동성에 의하여 좌우된다. 만약 물의 저수량이 작고 정체되어 있다면 용해된 물질의 농도가 콘크리트와 평형상태를 이루어 용해과정이 제한된다. 그러나 만약 지하수가 유동하는 경우에는 용해 평형은 발생하지 않으며 침출이 지속적으로 발생하게 된다.

식 (5)는 중탄산염이 칼슘수산화물과 반응하여 칼슘 탄산염을 발생시켜 침출되는 과정이며, 식 (6)은 식 (5)에서 발생한 탄산염이 없는 물이 다시 칼슘 수산화물과 반응하여 중탄산염을 생성되는 과정이다. 이러한 반복적인 과정으로 인하여 중탄산염 이온은 칼슘 규산염 수산화물의 칼슘과 반응하게 된다. 물에 이산화탄소가 20 ppm 이상으로 용해되어 있으면 수화된 시멘트가 열화될 수 있다.



순환수(Vadose) 지역에 위치한 처분고의 칼슘 수산화물의 침출을 평가하기 위하여 콘크리트 내부에서 확산에 의한 이동모델에 따른 Atkinson의 수축 코어 평가모델(Shrinking Core Model)이 있다. 그림 3은 수축 코어 평가모델에 따라 지하수의 칼슘 농도에 따른 콘크리트의 침출에 의한 열화 깊이 평가결과를 보여주고 있다. 평가에 적용된 콘크리트의 물-시멘트 비는 0.5이며, 콘크리트가 Ca^{2+} 의 농도는 0.02 mol/cc, 콘크리트 공극수의 Ca^{2+} 농도는 $2.7\text{E}-6$ mol/cc이다. 침출 현상이 가장 빠른 경우는 지하수의 칼슘 농도가 낮은 곳이며, 폐기물 처분 예상지역에서 침출에 의한 콘크리트 열화에 수천년이 소요됨을 보여주어 처분구조물 설계에 큰 영향이 없음을 보여주고 있다.

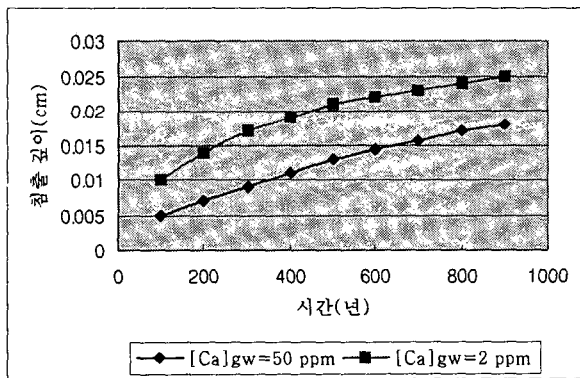


그림 4. 콘크리트 칼슘 수산화물의 침출

3. 콘크리트 처분구조물 장기 내구성 확보 방안 검토

콘크리트의 열화특성에 대한 기술검토는 콘크리트 처분구조물의 내구성을 확보하기 위한 방안으로 콘크리트 열화 요인을 최소화할 수 있는 양호한 처분부지 조성, 투수성이 낮고 화학적으로 안정적인 콘크리트 재료의 선정, 그리고 적절한 구조설계가 필요함을 보여주고 있다.

본 문에서는 콘크리트의 열화특성, 처분구조물 내구성에 대한 평가결과, 그리고 내구성능 입증에 있어 불확실성 등을 고려하여 장기간 폐기물 격리가 가능한 콘크리트 처분구조물의 설계방안을 검토하였다. 또한 폐기물 처분구조물의 장기적인 내구성을 입증하기 위한 방법을 검토하였다.

3.1 처분구조물 부지 조성 방안

황산염, 염화물 침투 등에 의한 화학적 열화과정과 동결-융해에 의한 물리적 열화과정은 일반적으

로 콘크리트가 물과 접촉하여야 발생한다. 그리고 열화의 진행속도는 황산염 또는 염화물과 같은 내구성에 유해한 화학성분의 농도가 높을 경우 빠르게 진행된다. 따라서 콘크리트 처분구조물의 열화 속도를 늦추기 위해서는 우선적으로 열화의 촉진 요인인 콘크리트와 물과의 접촉을 최소화하여야 하며, 화학적 반응을 일으키는 황산염, 염화물 등 유해한 화학물질이 콘크리트와 접촉하지 않도록 하여야 한다. 또한 우리나라의 경우 사계절이 뚜렷하여 콘크리트의 동결-융해에 의한 열화 개연성이 높으므로 동절기에 처분구조물의 동결-융해 반복횟수가 최소화되도록 하여야 한다. 처분구조물의 장기내구성 확보를 위한 적절한 처분부지 조성 방안은 아래와 같다.

처분구조물 부지로는 황산염 농도 및 염화물 농도가 낮은 지역이 처분고 장기 내구성 확보에 유리하다. 일반적으로 해안에 인접한 지역은 해수의 영향에 따라 황산염과 염화물 농도가 높으므로 처분고 위치 선정시 가능하면 내륙쪽에 배치하여 해수의 영향을 최소화하여야 한다. 황산염과 염화물의 농도가 높을 경우에는 처분고 기초 하부의 지반과 구조물의 배면 지반을 세척한 모래나 쇄석으로 치환하거나 성토작업을 하여 양호한 조건으로 개선하여야 한다.

처분고가 지하수면 하부에 위치할 경우 지하수압이 작용하고, 미세 균열을 통하여 물의 침투가 쉽게 발생할 수 있다. 따라서 처분고는 지하수 상부에 위치하여 지하수와 직접 접촉하지 않도록 하여야 한다. 또한 지하수위의 변동 가능성과 모세관 현상에 의한 지하수와 구조물의 접촉가능성을 고려하여 처분고 기초하부가 지하수위 상부에 위치하도록 하는 것이 바람직하다. 그리고 강우에 의하여 처분고 상부로 물이 침투할 가능성을 차단하기 위하여 토사 덮개에 불투수층(점토 또는 벤토나이트 층)을 설치하여 유입되는 물의 흐름을 차단하고 우회 배수되도록 하여야 한다. 구조물 기초 하부에는 배수층을 두어 강우 침투수가 신속히 배수되도록 하여야 한다. 덮개를 시공하여 처분고를 폐쇄한 후에도 일부 강수가 덮개의 불투수층을 통과하여 콘크리트 구조물과 접촉할 수 있으므로, 처분고 측벽 뒷채움재는 자유배수 재료로 시공되어야 한다. 처분고가 불포화대에 위치하여도 습윤상태인 주변의 토사에 의하여 물과 유해한 화학성분이 침투할 수 있다. 콘크리트 표면에 부착되는 방수막과 도막재료는 물과 화학물질이 콘크리트와 직접 접촉하는 것을 원천적으로 장기간 차단하도록 설계 및 시공되어야 한다.

우리나라의 경우 사계절이 뚜렷하므로 처분시설 운영 중 처분구조물이 직접 외기에 노출될 경우에는 동결-융해가 발생할 수 있다. 처분시설 폐쇄를 위하여 덮개가 건설된 후에는 처분고가 동결심도 이하에 위치하므로 동결-융해 피해가 발생하지 않는다. 따라서 동결-융해에 의한 콘크리트 열화를 방지하기 위하여 운영 중에는 강설의 유입을 차단하고 급격한 기온 강하를 예방할 수 있도록 보호구조물 내부에 처분고가 있도록 하거나, 처분고에 폐기물을 정지한 후 조기에 토사 덮개를 건설하여 처분고가 동결심도 하부에 위치하도록 하여야 한다.

3.2 처분구조물 재료의 선정 방안

처분구조물은 폐쇄 후 덮개가 시공된 후에는 지하에 위치하게 된다. 이 경우 가장 위험한 열화과정은 황산염의 침투에 의한 열화로 예상된다. 따라서 시멘트는 내황산염 성능이 좋은 V종 또는 II종 시멘트를 사용하여야 한다. 혼화재료로는 황산염, 철근부식, 탄산화, 알칼리 골재 반응, 그리고 침출에 대한 내구성 확보에 매우 유리한 재료인 포졸란 재료를 사용할 수 있다. 사용 가능한 포졸란 재료는 화학적으로 안정적인 플라이 애쉬, 실리카 등이 있다.

처분시설을 폐쇄한 후 콘크리트 열화는 유해한 물질이 용해되어 있는 지하수가 콘크리트에 침투하여 발생한다. 따라서 물의 침투를 방지하기 위해서는 콘크리트의 투수도 및 확산도가 낮아야 한다. 낮은 물-시멘트 비는 투수성 및 확산성을 낮추고 콘크리트의 강도를 증가시킨다. 낮은 투수성

을 확보하기 위해서는 콘크리트의 물-시멘트비가 0.4 이하이어야 하며, 감수제 및 고유동화제를 사용하여 낮은 물-시멘트 비에서도 워커빌리티에 문제가 없도록 하여야 한다.

콘크리트는 인장강도가 작으므로 온도구배 및 수축이 발생할 경우 콘크리트 표면의 미세균열을 완전하게 제거하기 어렵다. 균열이 발생하면 콘크리트의 투수계수가 2-3배 증가한다. 따라서 지하에 위치하는 처분구조물은 물의 침투를 방지할 수 있는 방수막이나 도막에 의하여 보호되어야 한다. 방수막 및 도막은 유해한 화학물질이 콘크리트 내부로 침입하는 것을 매우 효과적으로 방지할 수 있다. 방수재료로 고대시대부터 오랫동안 사용되어 내구성이 입증된 아스팔트의 사용이 바람직하다. 그러나 아스팔트는 산에 취약하므로 숏크리트나 벽돌로 아스팔트 외부표면에 열화 보호층을 설치하는 것이 바람직하다.

3.3 구조물 설계 방안

폐기물 처분 구조물은 최소 300년 이상 폐기물 오염물질 누출을 방지할 수 있는 격리 성능이 요구되므로 최대 60-100년 정도인 설계수명을 목표로 하여 규정된 일반적 설계기준은 처분구조물 설계에 충분하지 못하다. 따라서 본 문에서는 일반적인 설계기준에 추가하여 구조물의 장기적 오염물질 격리 성능을 최대화하기 위한 구조물 설계 고려사항을 아래와 같이 검토하였다.

장기간 사용되는 처분구조물에는 불가피하게 각종 열화가 발생하게 된다. 따라서 처분구조물 설계는 열화에 의한 유효단면의 감소를 고려하여 충분한 설계안전율을 확보하여야 한다. 철근을 보호하는 콘크리트 덮개두께는 3 in 이상으로 하여 산소, 수분, 염화물 및 기타 유해한 물질의 콘크리트 내부로 침입을 방지하여야 한다. 철근 부식을 방지하기 위한 추가적인 방안으로 에폭시 코팅된 철근을 사용할 수 있다.

처분시설의 장기적 성능확보를 위해서는 다중방벽 설계개념의 적용이 필요하다. 다중 방벽은 콘크리트나 레진으로 고화된 폐기물, 내부가 그라우팅 되는 MDU(Modular Disposal Unit), 자유배수 덮개층, 처분구조물, 아수팔트 방수막, 숏크리트나 벽돌로 보호된 방수막 또는 도막, 물의 침입을 방지하는 저투수성 토사 덮개로 구성할 수 있다. 여기서 저투수 덮개는 외부 강수의 처분고 침투를 직접 차단하며, 방수막 및 도막은 폐쇄 후 주변 흙 또는 유해한 물질이 용해되어 있을 수 있는 수분의 콘크리트 표면과 직접적인 접촉을 차단한다. 저투수성으로 설계되는 콘크리트 처분고는 물의 처분고 내부 침투를 제어하며 외부 침입자에 대한 방벽 기능을 한다. 처분고 내부 자유배수층은 처분고 내부에 물이 유입될 경우 정체되지 않고 외부로 신속히 배수되도록 하여 물이 폐기물과 접촉하는 것을 방지한다. MDU는 처분시설의 추가적인 방벽기능을 하는 시설로서 물과 외부의 유해한 화학물질과 직접 접촉할 가능성이 작기 때문에 장기간 동안 구조물의 건전성 유지가 가능하다. 이러한 다중 방벽은 물과 유해한 화학물질의 침투속도를 매우 낮게 하여 장기적인 처분시설 성능유지가 가능하도록 하며, 만약 일부 처분시설이 손상되거나 열화되어도 여전히 폐기물의 오염물질이 외부로 누출되는 것을 방지할 수 있다.

3.4 처분구조물의 내구성능 입증 방안

설계수명이 300년 이상으로 예상되는 폐기물 처분구조물의 목표 설계수명을 입증하여야 할 필요가 있다. 처분구조물의 내구성을 입증하기 위한 대표적 방안으로 건설재료에 대한 속성열화시험, 콘크리트 구조물의 열화 메커니즘에 기초한 수치해석, 그리고 처분시설 운영 및 제도적 관리기간 동안 축적된 각종 열화도 조사 결과에 기초하여 평가하는 방안이 있다.

속성열화시험은 시간에 따른 유해물질의 농축을 평가하기 위한 시험이므로 콘크리트 침투율 산정을 위한 자료인 확산과 투수성 변화와 관련한 자료수집에 초점을 두어야 한다. 속성시험은 화학물질 수용액의 침투율을 가속화하기 위해서 온도를 높이고, 사용상태의 농도보다 열악한 조건을 위하여 더욱 높은 농도까지 단계별 유해 화학물질을 적용하며, 수용액에 압력을 가하여 수압이 작용되도록 한다. 또한 건습이 반복되도록 하는 방안이 있다. 처분구조물의 장기 설계수명에 비하여 매우 단기간에 수행되는 속성열화시험의 결과에 기초한 처분구조물의 사용수명 평가는 신뢰성 확보에 문제가 있을 수 있다. 이것은 속성열화시험 결과의 외삽(Extrapolation)에 의한 사용수명 예측이 시험기간과 사용수명기간의 비율이 1:10 이내에서 평가(예를 들어 5년간의 속성열화시험에 의한 50년간의 설계수명 예측)될 경우 신뢰도가 높지만, 외삽에 적용된 기간 비율이 지나치게 클 경우 불확실성이 크게 증가하여 신뢰도 확보가 어렵기 때문이다. 또한 속성열화시험에서는 개별적 열화인자에 대하여 시험이 이루어지며, 복합적 열화작용을 모사하는데 제한적이다.

열화 메커니즘에 따른 수치 해석은 이온에 대한 단일 이동공식(Single Transport Equation)을 적용하여 다중열화 시스템(Multifactorial degradation mechanism)을 평가, 즉 여러 종류의 열화현상 동시 발생에 의한 시너지효과를 고려하여 각종 열화과정의 상호작용을 고려할 수 있다. 또한 휨 균열과 건조수축 균열의 간격 및 깊이, 균열폭을 해석하여 콘크리트 투수계수 및 확산계수의 변화를 평가할 수 있다. 열화과정의 불확실성을 반영하기 위하여 Monte-Carlo 계산에 의하여 사용수명 동안 각종 변수의 불확실성을 고려하며, 콘크리트 구조물 성능에 대한 확률론적 평가의 수행이 가능하다.

속성열화시험 및 수치해석은 콘크리트 구조물의 열화에 대한 유용한 정보를 제공하여 처분구조물의 설계수명 평가에 유용하게 활용될 수 있다. 그리고 처분시설 폐쇄 후 최소 30년 이상 처분구조물의 노출환경 및 열화의 변화에 대한 감시 및 조사를 계속하여 처분구조물 내구성능 평가를 하여 처분구조물의 내구성을 실증할 필요성이 있다. 시간적, 공간적 감시 및 조사 계획은 속성열화 시험 및 수치해석 결과를 참조하여 수립될 수 있다. 이러한 사용 중인 처분구조물의 조사 및 평가 결과에 기초하여 속성열화시험과 수치해석을 보완한다면 처분구조물 격리 성능의 신뢰도 확보에 어려움이 없을 것이다.

4. 결론

콘크리트의 열화특성 및 각종 내구성 평가 사례 등을 검토한 결과 방사성폐기물을 환경으로부터 장기간 격리할 수 있는 내구성이 확보된 콘크리트 처분구조물의 건설이 충분히 가능함을 알 수 있었다. 그러나 콘크리트 구조물은 노출 환경 및 콘크리트 구조물의 품질에 따라 내구성능에 많은 편차가 발생할 수 있으므로 설계 및 건설과정에서 고도의 품질확보가 요망된다.

처분구조물의 장기 내구성능 확보를 위해서는 우선 구조물에 유해한 요소를 최소화할 수 있는 부지를 선정하여야 한다. 부지조건이 비교적 열악한 경우에는 지반을 개량하여 열화 요인을 최소화하여야 한다. 그리고 각종 열화의 기본적 매개체인 물과 접촉을 최소화할 수 있도록 처분구조물을 배치하여야 한다. 이것은 구조물 내구성 확보 뿐만 아니라 폐기물 오염물질 격리에 있어서도 필수적인 요소이다.

또한 처분구조물 재료선정 및 설계에 있어서도 부지의 화학적 특성 등 각종 열화 요인을 조사하여 노출환경에 적합한 재료를 선정하여야 한다. 구조물 설계에는 처분구조물에 부분적인 열화가 발생하여도 오염물질 격리성능 유지가 가능하도록 충분한 설계여유도를 확보하여야 한다. 또한 다중방벽 구조물 설계개념의 채택은 구조물의 열화 진행을 극도로 낮출 수 있으며, 처분 구조물에

서 일부 손상이 발생하여도 여전히 오염물질 격리성능을 유지할 수 있다.

처분구조물의 설계수명은 콘크리트 사용에 대한 역사적 경험, 각종 속성열화시험, 그리고 열화 메커니즘에 기초한 수치해석을 통하여 평가가 가능하다. 수명평가에 있어 기술적 어려움은 열화 시나리오의 구축 및 각종 열화과정 간의 상호작용 등에 대한 지속적인 연구 및 처분시설 실증실험을 통한 충분한 열화 데이터 구축을 통하여 보완되어야 한다. 처분구조물의 열화에 대한 지속적인 연구와 함께 처분구조물 운영 및 폐쇄 후 제도적 관리기간 동안 최소 30년 이상 처분장 환경 및 처분구조물의 열화과정에 대한 체계적 조사 및 평가가 보완된다면 300년 이상의 처분구조물 설계수명 확보에 어려움이 없을 것이다.

구조물 설계수명이 50-100년인 경우에는 문제가 되지 않지만 설계수명이 수백년인 경우에 문제가 될 수 있는 대표적 열화 과정으로 미생물에 의한 공격, 염분 결정화, 그리고 방사성폐기물에 의한 공격 등이 있다. 그러나 이러한 열화에 대하여는 기존의 연구 실적이 충분하지 못하며, 향후 지속적으로 관심을 가지고 체계적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

참조문서

1. American Concrete Institute, "Guide to Durable Concrete", ACI 201.2R-77, 1977.
2. American Concrete Institute, "Code Requirement for Nuclear Safety Related Concrete Structures", ACI 349-97, 1997.
3. U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG 1199, "Standard Format and Content of a License Application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility Rev. 2, January 1991.
4. U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG 1200, "Standard Review Plan for the Review of a License Application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility" Rev. 3, April 1994.