

국내 지하수 환경에서의 중·저준위 방사성 폐기물 처분시설 내구성 평가

Durability Evaluation of Low and Intermediate Level Radwaste Disposal Facility on the Basis of National Groundwater Environment

이재민, 신진성, 신상화
고려공업검사 (주)
서울시 용산구 서계동 224-21

요 약

국내의 중·저준위 방사성폐기물 처분장은 지중 매몰방식을 적용할 계획이며 처분장 운영이 끝난 후 폐쇄하게 된다. 처분장 운영의 안전성을 위하여 구조물로는 시멘트 콘크리트를 주로 사용하게 된다. 처분시설의 성능 목표를 달성하기 위해서는 처분장 구조재의 내구성이 요구되며 처분장 구조재가 처분안전성 유지에 능동적인 요소로 설치될 경우, 장기간의 성능 유지가 필수적이다. 따라서 이를 평가하기 위한 구체적인 기술기준 마련과 검증이 필요하나 수백년 이상의 장기 내구성에 대해서는 잘 알려져 있지도 않고 인간의 경험한계를 벗어나고 있다. 그러므로 현 단계의 지식과 경험을 바탕으로 내구성을 평가할 수 있는가에 대한 연구가 필요하다. 방사성폐기물 처분 시설의 중요 인공방벽의 하나인 처분장 구조재의 장기적인 건전성 평가를 위하여 국내의 연구 결과를 토대로 처분장 구조재로서의 내구성의 정의와 함께 국내 지하수 환경에서의 콘크리트 구조물의 내구성 평가를 하였다.

Abstract

Domestic low and intermediate level radioactive waste disposal facilities will use the burying method, and after that, it would be closed. For the safety of the disposal facility, the cement concrete structure would be used. To accomplish the performance aim of the disposal facility, the structural durability is required and if the disposal facility's structural material could work positively, long-term permanent is essential. So it is necessary to have an objective technical criteria and review, but the duration of long term over hundreds of years is still unknown and out of our experience. Therefore, it is necessary to research the way of evaluating durability on the basis of our knowledge and experience. For the long term safety assessment of radioactive waste disposal facility's structural material which is a major engineering barrier, we defined the durability and duration evaluation on the basis of national underground water environment of the cement concrete structure.

1. 서론

중·저준위 방사성폐기물의 처분이 시급한 시점에서 국내의 방사성폐기물 처분관련 규제기술개발이 필요하다. 현재 처분장을 운영하고 있는 각국은 각기 고유의 기술 기준을 설정하여 시행하고

있는 상태이다. 현재 국내의 경우 처분방식 및 처분부지가 설정되지 않은 상태이며 이에 따른 구체적인 규제기술이 미미한 실정이다. 방사성폐기물의 안정적인 처분을 위하여는 처분시설의 건전성 평가의 필요성이 요구된다. 국내의 중·저준위 방사성폐기물 처분장은 지중 매몰방식을 적용할 계획이며 처분장 운영이 끝난 후 폐쇄하게 된다. 처분장 운영의 안전성을 위하여 구조물로는 시멘트를 주로 사용하게 된다. 본 연구에서는 규제 기술 제정의 기초를 마련하고자 인공적인 조건인 중·저준위 방사성폐기물 처분시설의 주요 구성요소인 콘크리트 구조물에 대한 건전성 평가를 수행하였다. 처분장 구조재가 처분안전성 유지에 능동적인 요소로 설치될 경우, 장기간의 성능 유지가 필수적이다. 따라서 이를 평가하기 위한 구체적인 기술기준 마련과 검증이 필요하나 수백년 이상의 시멘트 콘크리트 장기 내구성에 대해서는 잘 알려져 있지도 않고 인간의 경험한계를 벗어나고 있다. 그러므로 현 단계의 지식과 경험을 바탕으로 내구성을 평가할 수 있는가에 대한 연구가 필요하다.

2. 본론

2.1 처분시설의 내구 연한

대부분의 국가들은 방사성 폐기물 처분장 폐쇄 후 감시 기간을 300-500년 전후로 보고 있다. 이 기간 동안 처분시설의 구조물들은 방사선 안전을 위하여 각각의 기능을 유지해야 한다. 처분시설에 있어서 콘크리트는 처분시설의 주요 구조물인 동시에 물리·화학적 방벽의 기능을 제공한다. 처분시설에서의 콘크리트의 역할은 장기간 및 단기간의 역할로 나눌 수 있다. 단기간의 역할은 물리적인 방벽의 기능으로서 균열방지 및 투수성 감소에 있으며 장기간의 역할은 화학적방벽으로서 방사성핵종의 이동 지연에 있다.

처분시설의 운영기간은 운영연한(Operating Life), 사용연한(Service Life), 설계연한(Design Life) 등으로도 구분할 수 있으며 각각의 의미는 다음과 같다.

- 운영연한 : 처분장 건설 후 처분장으로 방사성폐기물이 운송되고 저장용량까지 저장 완료되기까지의 기간으로 대략 20-50년 정도이다.
- 사용연한 : 운영수명이 끝나고 폐기물 처분이 완료된 이후 허가조건에 의해 폐기물이 격리되는 기간과 운영수명의 합이 되는 기간. 방사성폐기물의 저장이 끝난 후에는 오직 안전성을 위해 허가받은 행위만이 가능. 처분시설의 성능을 감시하며 시설 보수 등의 행위가 이루어지게 된다. 사용수명이 중요한 이유는 이 기간까지는 처분시설이 제 기능을 유지하며 방호적인 역할을 수행하기 때문이다. 일반적으로 사용수명은 운영수명에 약 300년-500년 정도를 더한 기간으로 설정한다.
- 설계연한 : 운영수명에 처분시설이 구조적으로 안정하고 수리학적으로 제 기능을 발휘하도록 설계된 기간을 더한 기간. 구조적으로 안정하다는 것은 균열, 성능저하, 구멍, 꺼짐 또는 형질 변화 등이 발견되지 않고 모든 잠재적인 사건에 대해 안전함을 의미. 수리학적으로 제 기능을 다한다는 것은 설계된 시설물이 물의 침투를 감소시키고 방지할 수 있으며 다른 보조 시설들이 설계·시공된 의도의 기능을 할 수 있음을 의미. 일반적으로 설계수명은 사용연한 이상이 된다.

미국의 경우, NRC Performance Assessment Working Group(이하 PAWG)은 성능평가 활동은 10CFR61의 공포 후(1982년) 천층처분장의 성능 평가를 위하여 폐기물 저장용기 성능, 수리지질학 및 수리지화학 특성, 덮개 성능 영역의 평가부터 시작되었다. 10CFR61에서 10CFR61.50(a)(2)에 처분부지의 특성화 조사, 감시 및 분석을 규정하였고 10CFR61.7(a)(2)에서 부지 특성 조사는 불확

실한 미래를 고려해야 하며 적어도 500년기간에 대하여 평가하여야 하며 500년의 의미는 Class B,C 폐기물 내의 중,단반감기 핵종 대부분이 소멸되는 기간이며 이를 위해 다중층 덮개, 콘크리트 볼트, 고건전성용기, 폐기물고화체, 및 Class C 의 침입자 방벽 등의 공학적 방벽의 장기 성능 평가를 수행하여야 한다고 규정하였다. NRC는 Class B/C 폐기물 고화체의 안정된 수명은 300-500년을 보장해야 하며 설계 기초, 자연현상 및 사건을 고려한 공학적 방벽의 성능평가에 있어 500년간의 평가를 요구하고 있다.

콘크리트구조재의 장기적 안정성을 확인하는 방법으로서 장기적 안전성의 절대적 평가는 불가능하다. 그러나 구조재에 대한 장기적 성능을 나타내는 정도를 보여주는 방법이 있다. ASTM 등에 열거된 가속실험방법(accelerated testing technique)등을 사용하면 콘크리트의 성능을 예측할수가 있다. 하지만 복잡한 컴퓨터모델링을 하였더라도, 어떤 경우에는 이 방법을 사용한 실험결과가 실제 그 구조재의 장기성능을 평가한다고 증명할 수 없다. 지하수 침투와 방사성핵종의 이동에 대한 콘크리트의 역할은 단기간과 장기간에 대한 역할이 있다. 단기간에는 물리적 방벽의 역할을 한다. 이는 시설 또는 폐기물로 흐르는 물의 흐름 차단하는데, 설계개념으로 콘크리트의 균열 방지, 투수성 줄이기등이 있다. 대부분의 짧은 반감기 핵종들은 이기간 동안 붕괴됨을 예측할 수 있다. 장기간의 역할로는 물리적 방벽으로서의 기능을 상실했을 경우, 장반감기 핵종들의 이동에 대한 화학적방벽으로 작용한다. 여기서 콘크리트의 화학적특성은 물리적특성보다 훨씬 오래 지속될 것으로 예상된다.

성능평가에 있어 처분시설 재료의 물성 및 내구성 정보의 영향이 매우 크다. 성능평가 기간이 실제로 물성 평가 수행 기록, 공학적방벽의 설계연한 및 실제 제도적 관리기간 보다 훨씬 길기 때문에 성능을 상실한 공학적 방벽 구성물질의 보수적인 물성평가가 필요하다. 첫번째 단계에서 각 구성 물질의 다양성에 의한 사용연한(Service Life) 차이를 충분히 고려하여야 한다. 또한 공학적 판단 및 수리전도도 역시 주요 고려점이다. 예를 들어 덮개의 점토 경우 수리전도도가 $1E-8 \sim 1E-7$ cm/sec 이다. 만약 나무의 뿌리가 점토층을 뚫고 내려오는 기간이 500년이라면 점토의 사용연한은 500년으로 정의할 수 있다. 콘크리트 볼트의 경우 수리전도도가 $1.0E-11 \sim 1.0E-9$ cm/sec 이다. 그러나 폐쇄 후 100년간 밖에 균열발생에 대한 보장을 하지 못한다면 사용연한은 100년이 된다.

2.2 시멘트 콘크리트 성능 저하의 주요 메카니즘

중저준위 처분장 공학적 방벽의 시멘트 구조물의 장기 성능 평가에 있어 미국 NRC의 경우 약 500년간의 사용연한을 요구하고 있다. 사용연한의 종료시점을 결정하는 방법에는 두가지 관점이 있다.^[1] 이 중 하나는 하중지지능력의 상실이고 다른 하나는 콘크리트의 수리전도도가 증가하여 구조물 내로 상당량의 물이 침투할 경우이다. 동결깊이 이하의 지하 콘크리트 구조물은 온도, 수분의 영향을 매우 적게 받으며 건조 수축 및 열적 팽창 및 수축에 의한 균열의 영향이 매우 감소한다. 동결에 의한 영향은 처분장의 볼트가 흙으로 덮이기 이전에만 발생한다. 지하 콘크리트 구조물의 성능저하 발생의 주요 메카니즘은 SO_4 에 의한 열화, 알칼리-골재 반응, 강화콘크리트의 철근 부식 그리고 지하수에 의한 침출이다. 이를 표 1에 나타내었다.

1.

	Tricalcium Aluminate(C3A), Calcium Hydroxide	Sulfate ions
	Chloride Content, pH Calcium Hydroxide	Chloide ions, O ₂ , CO ₂ stray currents
	K ₂ O, NaO	Water
	pH, Calcium, Hydroxide	Acid Concentrations
	Air Void Spacing Strength	Water, Temperature
	Soluble Salts	Chemistry and Flow Rate of Water

주요 인자인 SO₄에 의한 광범위한 연구는 많이 진행되었으나 아직 성능저하 진행과정에 대해 뚜렷히 밝혀지지는 않았다. SO₄에 의한 성능저하는 Gypsum과 Ettringite에 의한 공극의 형성과 채움작용으로 내부응력이 증가를 포함하는 것으로 판단된다. NIST의 연구에 의하면 일상적인 콘크리트는 이러한 Gypsum과 Ettringite를 수용할만한 충분한 모세공극이 있다고 밝혀졌다.^[2] 이러한 Ettringite의 형성은 콘크리트 성능저하를 시작할 수 있게는 하나 주요 영향을 미치지 않는다고 연구되었다. 최근의 연구에서는 SO₄가 시멘트의 주요 결합구조인 C-S-H의 Decalcification을 일으켜 콘크리트의 성능저하가 진행된다고 밝혀졌다. 여기에 기초하여 수용성 SO₄ 이온과 Monosulfate(3CaO · Al₂O₃ · 12CaSO₄)에 의해 C-S-H로부터 나온 Calcium Hydroxide가 Ettringite(3CaO · Al₂O₃ · 3CaSO₄ · 32H₂O)를 형성한다고 볼 수 있다. 이러한 C-S-H의 열화에 의해 콘크리트의 탄성이 감소하고 적은 응력만으로도 팽창 및 균열이 발생하게 된다. 다음 그림 1에 C₃A 6%의 시멘트를 Na₂SO₄에 5% 용액에 넣은 후 팽창 현상을 그래프로 나타내었다. 그림 2에는 철심보강콘크리트에서의 부식을 개념적으로 설명하였다. 2 단계로 나눌 수 있으며 제 2 단계에서는 팽창을 지속한 후 균열이 발생하며 결국 부서져 떨어져 나가게 된다. 이 팽창 현상을 다음 식으로 나타낼 수 있다.^[2]

$$X=Kt^n \text{-----}(1)$$

여기서 X : 팽창, K : 팽창 상수, t : 시간, n : 시간 계수

n = 1/2 : 확산에 의한 성능저하

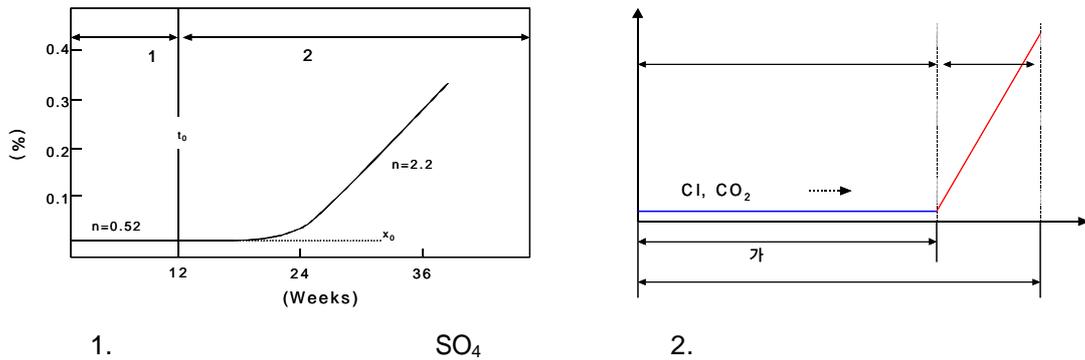
n > 1 : 미세공극에 의한 부피증가에 의한 성능저하

n = 1 : 반응 지배 모델

SO₄을 함유한 용액 내에서의 시멘트 성능저하는 SO₄의 확산계수와 시멘트 내의 C₃A 함량이 주요인자이다. 황의 확산계수가 10배 증가하면 사용연한은 10배 감소한다. SO₄ 이온의 확산계수를 구하는 방법이 어렵기에 Cl 이온의 확산계수와 관계를 통하여 평가하는 방법이 개발되었다. SO₄ 이온의 확산계수가 Cl 이온에 비해 약 1/10의 값을 갖는 것으로 밝혀졌다. SO₄ 이온의 낮은 확산계수는 Gypsum을 형성하는 칼슘수화물 및 Ettringite를 형성하는 Monosulfate와의 반응성에 기인한다.

지하 강화콘크리트 내 철의 부식은 Cl 이온, 탄화 등에 의해 발생한다. 그림 2에서 Cl 이온과 이산화탄소에 의한 부식의 개념을 설명하였다. 이 개념에 따르면 발생시간(Initiation Time)후에 부식이 시작되며 이 때를 실제 균열의 확장 시간(Propagation Time)이라 한다. 발생시간 시에는 철을 관통하기 위한 임계농도(Threshold Concentration)의 Cl 이온이 콘크리트 내 철의 깊이까지

도달했을 때까지 또는 탄화에 의해 철 인접 경계면의 공극수의 pH가 감소했을 때까지이다. 탄화는 철 위로 덮이는 시멘트의 두께가 기준치 이하이거나 공극률이 큰 콘크리트의 경우 문제가 된다. 또한 콘크리트가 포화된 경우 이산화탄소의 물에 대한 낮은 용해도로 인하여 이산화탄소의 침투는 매우 느리게 된다. 확장 시간에서 발생하는 부식율은 철 표면으로의 산소의 확산, 공극수의 저항도 그리고 온도에 의해 결정된다. 부식에 의한 생성물이 충분히 형성되면 이로 인한 응력이 콘크리트의 장력보다 커져서 균열이 발생하게 된다. 일반적으로 발생시간이 확장시간보다 훨씬 길기에 이 기간을 사용연한의 결정에 이용한다. 확산이 주요 이동 기구라고 가정하면 사용연한 결정의 주요 인자는 Cl 이온, 이산화탄소의 확산계수, 지하 토양과 지하수 내의 Cl 이온과 이산화탄소의 농도 그리고 철근을 둘러싼 콘크리트의 두께이다. SO₄의 경우와 같이 Cl 이온의 확산계수가 10배 증가하면 사용연한은 10배 감소한다. 그러므로 사용연한을 결정하기 위해서는 Cl 이온 확산계수의 정확한 평가가 있어야 한다.



2.3 시멘트 콘크리트의 내구성 평가관련 국내외 연구

점토층에서의 폐기물 처분장의 장기 성능 평가를 위하여 영국에서 사전조사가 이루어졌다. 이 연구에서는 실험실 및 현장에서의 콘크리트에 대한 평가자료에 근거하여 연구를 수행하였다.^[3] 이 연구에서는 43년간 점토층에 묻혀있던 콘크리트 샘플을 분석하고 콘크리트의 공학적 내구연한을 약 1000년으로 추정하였으며 pH가 1백만년동안 10.5 이상을 유지한다고 평가하였다. 연구는 주로 SO₄에 의한 부식정도를 측정하는 내황 능력 평가로 이루어졌으며 SO₄의 함유 농도 증가를 통한 실험실에서의 가속 실험이 이루어졌다. 평가에 사용한 식은 다음과 같다.

$$X_S(\text{cm}) = 0.55 C_A(\%) ([\text{Mg}] + [\text{SO}_4]) t(\text{y}) \quad \text{-----}(2)$$

여기서 X_S : SO₄의 침투로 내구성이 저하된 깊이
 C_A : 3CaOAl₂O₃의 w/o
 t : 시간(년)

일반 건축물의 내구연한을 결정하는 방법을 연구한 스웨덴의 연구결과를^[4] 보면 내구연한을 구함에 있어 철근콘크리트 내 철근의 부식을 중점으로 하였다. 철근의 탄화 과정을 이용하여 내구연한을 계산하였으며 그 대표적인 계산 방법 및 변수들은 아래와 같다.

◇ 탄화 과정

$$d = K_C * t^{0.5} \quad \text{-----}(3)$$

$$t = (d/K_C)^2 \quad \text{-----}(4)$$

여기서

d = 시간 t 에서의 탄화가 진행된 깊이 (mm)

K_C = 탄화 계수

t = 시간(년) ; 사용연한(Service Life) 또는 발생시간(Initiation Time)

$$K_C = c_{env} * c_{air} * a * (f_{cm})^b \quad \text{-----}(5)$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8$$

여기서

c_{env} = 환경 계수, c_{air} = 공기 계수, f_{cm} = 평균 압축 강도(MPa)

a, b = 혼합물에 의한 변수, f_{ck} = 압축 강도(MPa)

2.

	c_{air}
	1
	0.5

3.

	c_{env}
	1
	0.5

4.

a, b

	a	b
	1800	-1.7
+ Fly Ash 28%	360	-1.2
+ Silica Fume 9%	400	-1.2
+ Blast Furnace Slag 70%	360	-1.2

◇ 부 식

사용연한 = 발생시간 (t_0) + 확장시간 (t_1)

발생시간 (t_0) = t , 확장시간 (t_1) : 균열시간

$$t_1 = 80 * C / (D * r) \quad \text{-----}(6)$$

$$r = c_T * r_0 \quad \text{-----}(7)$$

여기서

C = 철근을 덮고 있는 콘크리트의 두께 (mm)

D = 철근지름 (mm), r = 콘크리트 내 부식율 (10^{-6} m/year)

c_T = 온도계수(설정값 : 0.32)

r_0 = 20℃에서 부식율(설정값 : 비에 노출시 = 50, 비에 비노출시 = 12)

이 연구결과에 의하면 일반적인 건축물의 경우 환경인자를 가장 혹독한 상태로 가정하고, 철근을 덮고 있는 시멘트의 두께를 80mm, 철근 직경 25mm로 할 경우 내구연한 계산값이 약 1600년으로 계산된다.

국내에서도 콘크리트의 수명, 내구성에 대한 연구가 비교적 활발하게 진행되었다. 주로 콘크리트 피복(Cover)과 중성화(Carbonation)의 관계 또는 콘크리트 피복 두께와 철근 부식(Corrosion)의

관계에 대한 연구가 많이 진행되어왔다. “피복(Cover)”이란 구조물 부재에서 최외단 철근의 바깥 표면으로부터 콘크리트 표면까지의 길이로 정의한다. 철근을 소요두께의 콘크리트로 덮은 이유는 철근이 부식되지 않도록 하고, 콘크리트 구조물을 내화구조물로 만들며, 철근과 콘크리트의 부착 능력을 확보함에 있다. 이 중에서 부식 방지의 역할이 가장 중요하다고 할 수 있다. 국내에서도 피복두께에 대한 규정을 “콘크리트표준시방서”와 “콘크리트구조설계기준”에서 제시하고 있다. 최소 피복두께는 “콘크리트를 친 후 영구히 흠에 묻혀 있거나 수중에 있는 콘크리트”의 경우 현장치기 및 프리스트레스트 콘크리트 모두 8cm를 요구하고 있다. 국내에서도 위에서 설명한 $d = K_C * t^{0.5}$ 와 같은 식을 이용하여 콘크리트 수명을 예측하고 있다. 이를 보정하여 사용하고 있는 일반적인 식은 다음과 같다.^[5]

㉠ W/C의 비가 60% 이상인 경우

$$t = \frac{0.3(1.15+3W) X^2}{R^2(W-0.25)} \text{-----(8)}$$

㉡ W/C의 비가 60% 이하인 경우

$$t = \frac{7.2 X^2}{R^2(4.6W-1.76)^2} \text{-----(9)}$$

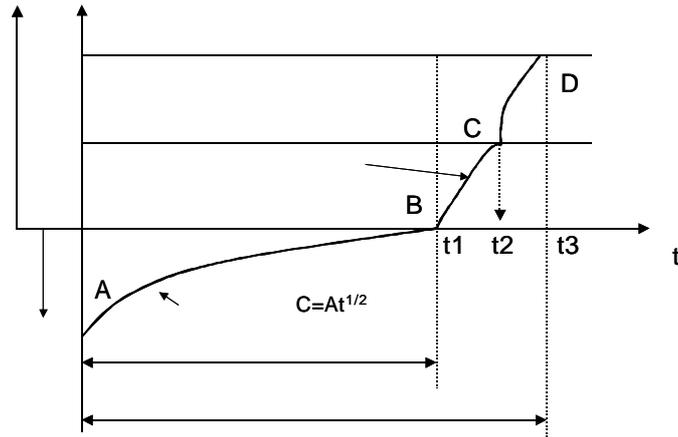
여기서 W : 물/시멘트 비, X : 중성화 깊이, t : 시간(년), R : 중성화율

콘크리트 구조물의 사용연한을 예측하는 방법으로 이외에도 콘크리트 외부 Cl이온량에 의한 부식 시점을 계산하는 방법도 제시되었다. 실험적인 결과에 의한 식으로 다음과 같다.^{[6][7]}

$$RT = \frac{129 (S_i/25.4)^{1.22}}{K^{0.42}(W/C)} \text{-----(10)}$$

여기서 RT : 부식발생까지의 시간(yr), Si : 철근을 덮고 있는 콘크리트 두께, K : Cl 이온 농도, W/C : 물/시멘트 비

그림 3에 콘크리트 중성화에 의한 콘크리트의 부식과 철근 콘크리트 구조물의 내구성 개념을 나타내었다. 여기서 t_1 은 중성화 깊이가 철근의 표면에 도달하는 시간이고 t_2 는 철근이 부식하여 콘크리트에 부식을 발생시키는 시점, t_3 은 부재내력 한계에 도달하는 시점이다. 지금까지는 t_1 을 구조물의 수명점으로 보고 있으나 때로는 t_3 까지도 수명을 산정하는 경우가 있다 그러나 이 시점은 너무 위험도가 커서 최근에는 t_2 까지를 내구연한으로 보고 있다. 그러나 t_1 까지는 비교적 쉽게 예측이 가능한 반면 t_2, t_3 구간은 예측이 아주 어렵다. 그러므로 내구연한 산정은 보수적인 예측시 t_1 이 적합하다고 할 수 있다.



3.

미국 NRC는 인공방벽 물질의 성능평가에 대한 연구를 지원하였다. 콘크리트의 성능 평가에 대하여 PAWG는 500년간의 사용연한을 갖는 콘크리트 설계 및 평가 방법 개발에 관심을 기울였다. NRC를 대신하여 NIST는 시간에 따른 콘크리트 성능 저하를 예측할 수 있는 코드를 개발하였는데 이 것이 4SIGHT 이다.^[8] 이 코드는 LLW 처분장에 특성화되어있다. 콘크리트 성능저하 평가에 있어 현재 대표적으로 사용되는 코드의 하나로 지목하고 있다.^[9] 이 코드는 단독으로 사용할 수도 있지만 처분장의 전체적인 성능 평가코드에 병합되어 사용할 수도 있다. 이 코드의 주요 입력자료는 Cl 이온의 유효확산계수, 콘크리트의 물/시멘트 비, 관심 대상 이온의 덮개 외부에서의 농도(Cl 및 SO₄ 이온을 고려), 관심 대상 이온의 콘크리트 공극수에서의 농도, 덮개의 두께이며 성능 상실 기준으로 REBAR(덮개 상부에서 강화 철근봉까지의 깊이, Cl 이온이 이 위치까지 도달하면 구조적으로 성능 상실), DEPTH(SO₄이온이 침투하는 임계깊이로 덮개 상부에서 이 깊이까지 SO₄ 이온이 침투하면 덮개 자체의 무게를 견디지 못하고 성능상실)를 적용하고 있다. 위와 같은 연구 결과를 종합하여 보면 SO₄ 이온 및 Cl 이온의 확산에 의해 내구연한이 결정됨을 알 수 있다. 첫 번째 연구결과와 경우 Cl이온의 확산계수를 계산할 수 있다면 충분히 내구연한을 산출할 수 있다. 이를 위하여 다음과 같은 연구결과를 통해 확산계수를 구하고자 한다.

미국 NIST의 연구결과^[10]에서는 이온의 확산계수를 구함에 있어 골재를 둘러싼 시멘트 (Micrometer Scale)와 콘크리트 덩어리(Millimeter Scale)에서의 두가지 모델을 결합하여 0.25 < W/C < 0.75 의 범위에 적용 가능한 식을 개발하였다. W/C 비와 수화 정도에(a) 따른 ϕ(모세공극 비율)을 구하여 확산계수를 구하는데 모세공극 비율을 결정하는 식은 다음과 같다. 여기서 수화 정도는 처분장 건설 후 충분한 기간이 지나 90% 내지 95%가 진행되었다고 가정할 수 있다.

$$\psi = 1 - \frac{1 + 1.31a}{1 + 3.2 w/c} \quad \text{-----(11)}$$

여기서, ψ : 공극율, a : 수화도, w/c : 물/시멘트 비

공극율이 결정되면 확산계수의 비 D/D_0 는 다음과 같이 결정된다.

$$\frac{D}{D_0} = 0.001 + 0.07\psi^2 + 1.8H [\psi - 0.18] [\psi - 0.18]^2 \quad \text{---(12)}$$

여기서, D : 이온 확산계수, D_0 : 물에서의 이온의 확산계수
 Ψ : 공극율 ($H : 1 = \Psi > 0.18$, $0 = \Psi \leq 0.18$)

또한 미국 PNNL의 연구보고서^[11]에서는 다음과 같은 방법으로 확산계수를 구하여 처분장 평가에 사용하였다. 확산계수는 Fick의 법칙에 의해 결정된다. 콘크리트 매질의 확산계수를 구하기 위하여 먼저 물에서의 원소 확산계수(D_f)를 구하여야 한다. 연구결과에 의하면 Grathwoh(1998)의 경우 D_f 의 범위가 $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 이며 Kemper (1986)의 경우 4.8×10^{-6} to $1.6 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ (15°C)로 나타났다. 다공성 매질에서의 확산계수는 물에서의 확산계수에 비해 작아진다. 포화상태의 다공성 매질에서의 고유확산계수(D_i)는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$D_i = D_f \phi \frac{\delta}{\tau} \quad \text{-----}(13)$$

여기서, Ψ = 공극율, δ = 수렴인자, $1/\tau$ = 굴곡계수

실제로 굴곡계수를 구하기는 매우 어렵다. 그래서 고유확산계수식을 공극율만의 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$D_i = D_f \cdot \phi^\beta \quad \text{-----}(14)$$

β 값은 Millington (1959)의 경우 4/3 이라는 값을 제시하였고 Grathwohl (1998)은 자연의 다공성 매질의 경우 1.5 - 2.5 의 값을 갖는다고 평가하였다. 확산에 있어 화학적인 반응의 영향은 매우 종류가 다양하다. 처분장의 핵종 유출 관련 평가를 위하여 간단한 가정을 할 필요가 있다. 핵종의 흡착이 K_d 값에 의해 수용액상의 핵종농도에 비례적이라면 반응성 핵종의 확산은 겉보기 확산계수로 특정 지워질 수 있다.

$$D_a = \frac{D_i}{a'} = D_f \delta \frac{\phi}{\tau a'} \quad \text{-----}(15)$$

$$a' = \phi + \rho_b \cdot K_d \quad \text{-----}(16)$$

여기서, ρ_b : 다공성매질의 건조밀도, K_d : 분배계수

이상과 같이 확산계수는 공극율을 먼저 계산하고 그에 따른 확산계수를 구하도록 되어있다. 공극율을 구하기 위하여 위의 식을 사용하였다. 공극율을 계산시 수화도는 0.9 이상으로 가정하였다. 일반적으로 시멘트 콘크리트의 경우 양생 후 한달이상이 경과하면 수화도가 0.9 이상 나타난다. 처분장의 경우 건설후 상당기간 운영기간을 갖기에 수화도를 0.9 이상으로 놓는 것이 타당하다고 판단된다. w/c 의 비는 일반적인 고화체 배합비인 0.4 ~ 0.6을 사용하였다.

이 공극율을 바탕으로 위의 확산계수를 구하는 식을 사용하여 확산계수를 구한 후 국내외 시멘트 침출 실험 연구에서의 확산계수와 비교를 하였다. 두가지의 확산계수 계산 방법은 일반적인 시멘트의 유효확산계수의 범위 내의 확산계수 값을 계산하였다. 그러나 식 (12)의 경우 D_0 값이 정해지지 않았으며 식(14)에서의 D_i 에 해당하는 값만을 얻을 수가 있다. 또한 PNNL의 연구보고서^[11] 방사성 폐기물 처분장의 평가를 위한 연구이기에 확산계수를 구하는데 더 적합하다고 판단되었다.

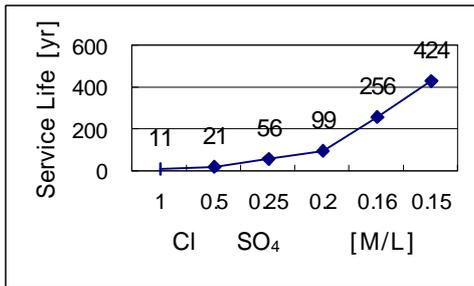
2.4 국내 지하수 환경에서의 처분시설 내구연한 평가

국내 지하수 환경에서의 처분시설의 내구성을 평가하였다. 중저준위 처분시설은 지하수대 상부에 위치하게 된다. 보수적인 내구성 예측을 위하여 처분시설 구조물과 접촉하는 토양 공극수 내 이온농도를 지하수와 같다고 가정하여 계산을 수행하였다. 계산 방법은 앞에서의 연구자료를 토대로 계산하였다. 확산계수 계산 방법은 미국 NIST의 방법을 사용하였고 사용연한의 계산은 4SIGHT 코드와 Clear의 방법을^[7] 사용하였다. 국내 지하수 내 Cl과 SO₄의 이온농도는^[12-17] 다음 표 5와 같다.

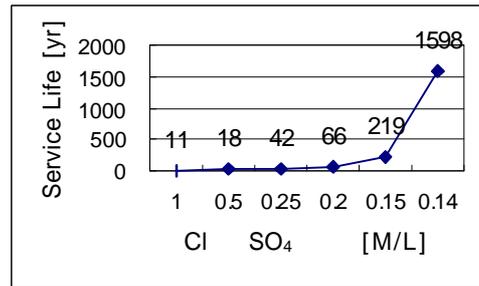
먼저 4SIGHT 코드로 300년간의 내구연한을 확보하기 위한 조건을 계산하였다. 보수적인 계산을 위하여 철근을 덮고 있는 콘크리트의 두께는 10cm로 가정하였고 SO₄가 10cm 이상 침투하면 응력에 의해 콘크리트가 균열이 발생한다고 가정하였다. 확산의 영향을 받는 Cl 이온의 경우 콘크리트 Valut의 두께를 1m, 0.5m로 변화시켜 계산하였다. 확산계수와 W/C를 보수적으로 가정하여 5.0E-12 cm²/sec와 0.45로 두고 계산을 수행한 후, W/C=0.4와 수화도 0.9의 값으로 Cl 이온은 유효확산계수를 계산하여 내구연한을 계산하였다. Cl 이온과 SO₄ 이온비가 1:1인 경우, 확산계수와 W/C를 보수적으로 가정하여 계산한 결과 콘크리트 Valut의 두께가 1m일 때 내구연한 300년을 확보하기 위하여는 콘크리트 Valut 외부에서의 Cl 이온의 농도가 0.15 M/L 이하여야 하며 콘크리트 Valut의 두께가 0.5m인 경우 0.14 M/L 이하여야 함을 알 수 있다. 이를 그림 4와 그림 5에 나타내었다. W/C=0.4와 수화도 0.9의 값으로 Cl이온은 유효확산계수를 구한 후 계산한 결과는 콘크리트 Valut의 두께가 1m일 때 내구연한 300년을 확보하기 위하여는 Cl 이온의 농도가 0.39 M/L 이하여야 하며 콘크리트 Valut의 두께가 0.5m인 경우 0.37 M/L 이하여야 함을 알 수 있다. 이를 그림 6과 그림 7에 나타내었다. SO₄ 이온의 영향만을 고려하였을 경우 확산계수와 W/C를 보수적으로 가정시 내구연한 300년을 확보하기 위하여는 Cl 이온의 농도가 0.7 M/L 이하이어야 하며 유효확산계수를 구한 후 계산한 결과로는 2.0 M/L이하이어야 한다. 이를 그림 8과 그림 9에 나타내었다.

5.

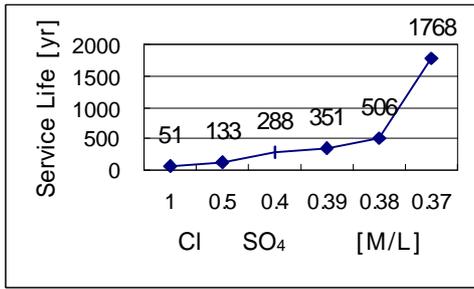
	Cl [mg/L]	[mg/L]	SO ₄ [mg/L]	[mg/L]	pH		
	6.0-65.8		1.8-18.1		7.2-9.4		
	3.2-34.6		2.1-66.1		8.4-9.8		
	5.4-49.8		0.4-12.2		8.5-9.4		
	225.4-16351.0		16.5-2072.3		6.9-8.0		50m
	19307.0		2461.3		7.87		50m
	0.0-27.6	5.16	0.6-31.3	6.67	5.9-8.5	7.46	
(0-100m)	2.4-17.2	9.59	1.4-475.5	59.31	6.1-8.1	6.91	
(100-300m)	1.8-9.7	3.72	1.9-134.2	18.75	6.8-8.5	7.86	
	2.4-333.7	61.07	6.0-147.0	40.63	7.6-9.6	8.32	
	0.0-14.6	4.08	0.0-28.4	6.64	6.0-9.1	7.13	
(0-100m)	1.1-44.0	8.71	0.4-236.6	15.48	5.9-8.8	7.00	
(100-300m)	1.3-46.3	7.15	0.0-367.2	29.79	6.3-9.2	7.82	
(>300m)	2.2-307.2	28.79	0.4-377.4	33.26	6.5-9.8	8.48	
	9.8-3060.0	190.7	3.3-73.5	59	6.4-7.5	7.04	100-200m
	3.9-72.1	20.49	1.3-40.4	12.82	5.3-7.7	6.80	100-160m
	1.7-13.1		1.2-68.4	32.94	6.4-7.3		(100m)
	2.7-39.4		2.4-182	71.16	7.1-7.8		(100m)
	3.6-20.1		1.6-24.4	22.25	6.9-8.1		(100m)
	3.6-33.1		3.8-285.6	108.01	6.9-8.6		(100m)



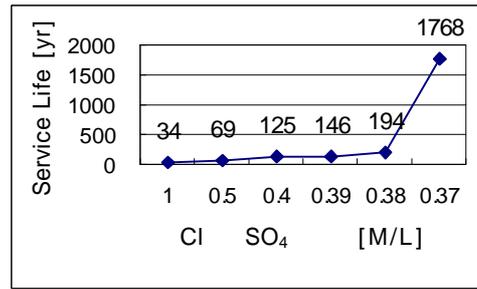
4. (Valut) 가
1m (Service Life)



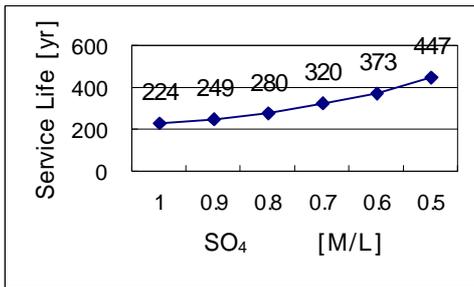
5. (Valut) 가
0.5m (Service Life)



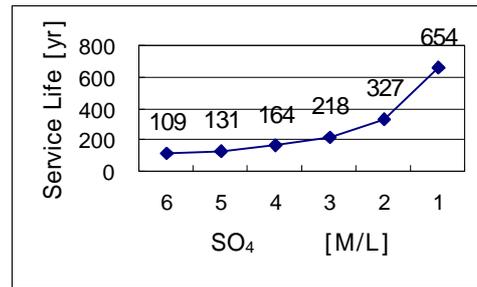
6. 가 1m ;



7. 가 0.5m ;



8. SO4 ;



9. SO4 ;

Clear의 방법으로 국내 지하수 내 Cl 이온 농도에 따른 내구연한을 계산하였다. 위의 계산과 같이 철근을 덮고 있는 피복의 두께는 10cm로 하였고 W/C 비는 0.4, 0.45로 각각 계산하였다. 다음 표 6과 표 7에 각각의 결과를 나타내었다.

6. Cl ; W/C=0.4

	W/C	[ppm]	[mm]	[yr]	
	0.4	27.6	100	426	
1	0.4	17.2	100	520	0-100m
2	0.4	9.7	100	661	100-300m
	0.4	14.6	100	557	
1	0.4	44.0	100	350	0-100m
2	0.4	46.3	100	343	100-300m
	0.4	72.1	100	285	
	0.4	16351.0	100	29	
	0.4	333.7	100	150	
	0.4	19307.0	100	27	

7. Cl ; W/C=0.45

	W/C	[ppm]	[mm]	[yr]	
	0.45	27.6	100	379	
1	0.45	17.2	100	462	0-100m
2	0.45	9.7	100	588	100-300m
	0.45	14.6	100	495	
1	0.45	44.0	100	311	0-100m
2	0.45	46.3	100	305	100-300m
	0.45	72.1	100	253	
	0.45	16351.0	100	26	
	0.45	333.7	100	133	
	0.45	19307.0	100	24	

이상의 계산 결과로 볼 때 국내 지하수 내 Cl 및 SO₄ 이온의 함량은 콘크리트 내구성에 영향을 미칠 만큼 크지 않다. 해수의 침입이 예상되는 지역의 경우는 Cl 이온농도가 높아서 내구성의 감소가 두드러진다. 국내 지하수 내 Cl과 SO₄의 이온농도는 해수 침투의 영향을 받은 지역과 일부 온천지역을 제외하고는 300년간의 내구연한을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

3. 결론 및 토의

방사성폐기물 처분 시설의 중요 인공방벽의 하나인 처분장 구조재의 장기적인 건전성 평가를 위하여 국내외 연구 결과를 토대로 처분장 구조재로서의 내구성의 정의와 함께 내구성 평가를 하였다. 공학적방벽은 시간이 지남에 따라 물리적으로 성능이 저하되며 기존의 공학적 경험치를 넘어선 긴 평가기간에 의해 내구성 예측 및 사용연한(service life)의 정의에 불확실성을 갖게 된다. 그리하여 성능평가지 얼마나 맞은 신뢰성이 그 유효성에 역할을 하는가 하는 의문을 갖게 된다. 중·저준위 방사성폐기물 처분장에서 공학적방벽은 다음 두가지의 기능을 한다. 첫째로 법규가 규정한 기간동안 폐기물을 격리, 보관, 두번째로 침입자와 폐기물간의 물리적 방벽역할을 통한 의도하지 않은 인간 침입자로부터의 영향을 감소시키는 역할을 한다. 일반적으로 약 300년간의 제도적 관리기간을 두며 이 기간에는 공학적방벽이 제 기능을 다 하여야한다. 이 300년의 의미는 중저준위폐기물 내의 단반감기 핵종이 붕괴하여 거의 소멸하는 시간이다. 국내외의 처분시설 성능 평가 관련 연구자료와 계산방법을 바탕으로 국내 지하수 환경에서의 처분시설 내구연한을 평가하였다. 국내 지하수내 Cl 이온과 SO₄ 이온을 대상으로 내구연한을 평가한 결과 해수 침투 지역 및 일부 온천 지역을 제외하고는 300년간의 내구연한을 확보함이 가능함을 알 수 있었다.

4. 참고문헌

1. D. E. Gjorv and O. Vennesland " Diffusion of Chloride ions from Sea-water into Concrete" Cem. Con. Res., 19, pp 229, 1979
2. J. R. Clifton and J. M. Pommersheim, Kenneth Snyder, Long-term performance of engineered concrete barrier, NISTIR 5690, U.S. National Institute of Standards and Technology, 1995. 7
3. A. Van Dalen and J. E. Rijpkema, Modified Sulfur Cement : Low Porosity Encapsulation Material for Low, Medium and Alpha Waste, Nuclear Science and Technology, Final Report, ENR/12303/EN, Commission of the European Communities, 1989

4. Göran Hed, Service Life Estimations of Building Components, TR28:1999, Kungl Teknikac HÖgskolan, 1999
5. 정재동, "콘크리트 피복과 중성화," 콘크리트학회지, 11(4), pp 5-11, 1999.9
6. M. S. Cheung and B. R. Kyle, "Service Life Prediction of Concrete Structures by Reliability Analysis," Construction and Building Materials, 10(1), pp. 45-55, 1996
7. K. C. Clear, Time to Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Slab, Vol. 3, FHWA-RD-76-70, Federal highway Administration Office of Research and Development, 1976
8. Nuclear Regulatory Commission, A Performance Assessment Methodology for Low-Level Radioactive Waste Disposal Facilities : recommendations of NRC s performance assessment working group, NUREG-1573, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2000. 6
9. Man-Sung Yim and S. A. Simonson, "Performance Assessment Models for Low Level Radioactive Waste Disposal Facilities : A Review," Progress in Nuclear Energy, 36(1), pp. 1-38, 2000
10. E. J. Garboczi and D. P. Bentz, "Multi-scale analytical/numerical theory of the diffusivity of concrete," Advanced cement based materials, pp 77-88, 1998. 8
11. P. D. Meyer and R. J. Serne, Near-Field Hydrology Data Package for the Immobilized Low-Activity Waste 2001 Performance Assessment, PNNL-13035, Pacific Northwest National Laboratory, 1999. 12
12. 오창환, "화강암지역에 고준위 원자력 폐기물 처리에 대한 안정성 평가," 자원환경지질학회지, 29(2), pp.215-225, 1996
13. 소승영, 김선준, "남양만 부근 지하수의 수문지구화학적 체계 연구," 대한자원환경지질학회, 한국자원공학회, 한국지구물리탐사학회 춘계공동학술발표회 -동북아광상성인 심포지움, 1999
14. 이종운, 전효택, 전용원, "대수층 지질 및 온도에 따른 국내 지하수의 지구화학적 특징- 화강암 질암내 지하수와 비교연구," 지하수환경학회지, 4(4), pp. 212-222, 1997. 12
15. 이종운, 전효택, 전용원, "국내 화강암질암내 심부지하수의 지구화학적 특성," 지하수환경학회지, 4(4), pp. 199-211, 1997. 12
16. 함세영, 조명희 외 4, "부산 남부지역 지하수와 서북부지역 지하수의 수리화학적 특성 비교," 지하수환경학회지, 6(3), pp. 140-151, 1999. 9
17. 이재영, 김철호 외 2, "고령지역 지하수에 대한 지화학적 연구," 지하수환경학회지, 5(3), pp. 162-170, 1998. 9