

《기술보고》

중저준위방사성 폐기물 처분장 뒷채움재

조원진 · 이재완 · 정의영 · 한필수

한국원자력연구소

(1995. 2. 8 접수)

요 약

우리 나라에서 건설될 중저준위폐기물 처분장의 기본설계개념에 따르면, 중저준위폐기물 동굴에는 점토 질 뒷채움재가 설치될 예정이다. 이 뒷채움재의 후보물질로는 원료 입수의 용이성 및 경제성 측면에서 천연점토와 분쇄암석의 혼합물이 고려되고 있다. 그러나 이 혼합물이 폐기물처분장의 뒷채움재로 사용되기 위해서는 주요특성들이 뒷채움재의 요구사항을 만족시켜야 한다. 이 보고서에서는 경상북도 연일 지역에서 산출되는 천연점토와 분쇄암석 혼합물에 대해 핵종유출저지 관점에서 가장 중요한 특성인 수리특성과 방사성핵종 확산특성 및 역학적 특성을 측정하여 뒷채움재료로서의 사용 가능성을 평가하였다. 혼합물의 수리전도도는 동일 밀도에서 점토함량이 감소함에 따라 증가되었으나, 점토함량이 적은 경우에도 상당히 낮은 값을 유지하여 뒷채움재를 통한 핵종이동의 주요 메커니즘은 확산이 될 것이라는 것을 보여주었다. 압축점도에 대한 방사성핵종 확산계수 측정결과, 동일밀도의 나트륨벤토나이트에서 측정된 값의 범위 내에 있었으며, 점토-분쇄암석 혼합물의 액소성한계, 다짐특성, 압축강도 및 압밀계수 등의 역학적 특성도 나트륨벤토나이트-모래 혼합물에서 얻어진 값과 유사하였다. 이러한 결과들로부터 연일산 천연점토-분쇄암석 혼합물을 고가의 나트륨벤토나이트 대용으로 처분장 뒷채움재로 사용할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

1. 서 론

우리 나라에서는 1990년대 말에 중저준위방사성폐기물 처분장을 운영할 것을 계획하고 있으며, 현재 이를 위한 부지선정이 진행되고 있다. 방사성폐기물 영구처분사업의 수행 과정에서 제기되는 주요문제 중의 하나는 방사성폐기물 처분안전성이며, 처분안전성은 인공방벽 및 천연방벽 등 주요 구성요소의 상호보완 작용에 의해 확보될 수 있다. 이 중 인공방벽은 천연방벽과는 달리, 그 특성을 인위적으로 개선할 수 있고, 장기거동을 상당히 정량적으로 예측할 수 있다는 점에서 이에 대한 연구가 중요시되고 있다.

처분장의 인공방벽이라 하면 광의로는 폐기물고화체(waste form), 포장용기(container), 콘크리트구조물(concrete structure), 및 뒷채움재(backfill) 등을 모

두 포함하나, 보통은 콘크리트구조물과 뒷채움재만을 말하며, 이 중 특히 뒷채움재가 처분안전성 측면에서 관심의 대상이 되고 있다. 따라서 이 보고서에서는 뒷채움재에 국한하여 그 특성을 살펴보고자 한다.

뒷채움재의 특성은 크게 방사성핵종 유출저지특성 및 역학적 특성의 두 가지 분야로 나누어 생각할 수 있다. 그러나 중저준위폐기물 동굴처분장에서는 뒷채움재가 직접 하중을 받지 않고, 고준위폐기물 처분의 경우와 달리 열 부하(thermal loading) 문제도 없으므로 역학적 특성에 관한 요구사항이 엄격하지 않으며, 처분안전성의 관점에서 중요시되고 있는 것은 방사성핵종 유출저지특성이다. 본 보고서에서는 먼저 뒷채움재의 핵종 유출저지특성을 좌우하는 수리특성과 방사성핵종의 확산특성에 대해 분석하고, 다음에 역학적 특성 중 주요인자를 살펴보고자 한다.

2. 처분장 설계개념

우리 나라에서 지하모암 내에 건설될 중저준위폐기물 동굴처분장에서는 방사성폐기물이 그 성상과 방사능준위에 따라 다음 세종류의 처분동굴 중의 하나에 처분될 예정이다. 즉 방사능준위가 낮은 폐기물은 잡고채폐기물 동굴 또는 농축폐액/폐수지/폐필터 동굴에, 방사능준위가 상대적으로 높은 폐기물은 중준위폐기물 동굴에 처분된다 [1]. 이 중 중준위폐기물 동굴에는 점토질 뒷채움재가 설치될 예정이며, 저준위폐기물 동굴의 경우 현재로는 뒷채움재의 설치여부가 결정되어 있지 않다. 중준위폐기물은 저준위폐기물에 비해 비록 양은 적을지라도 처분장 내에 처분되는 방사능의 대부분을 함유하고 있으므로, 처분안전성의 관점에서 볼 때, 중준위폐기물동굴로부터 유출되는 방사성핵종의 양을 예측하는 것이 매우 중요하다.

제안된 설계개념에 따르면, 중준위폐기물 동굴 내에는 적재된 폐기물을 지지하기 위해 콘크리트 구조물을 설치하고, 이 구조물 내에 폐기물을 적재한 후 완전히 폐기물로 채워지면 콘크리트 판으로 된 덮개를 덮는다. 콘크리트구조물 외벽과 암반동굴 내벽 사이의 공간은 점토 또는 점토와 분쇄암석의 혼합물로 뒷채움을 한다. 참고로 중준위폐기물 동굴의 단면을 그림 1에 나타내었다.

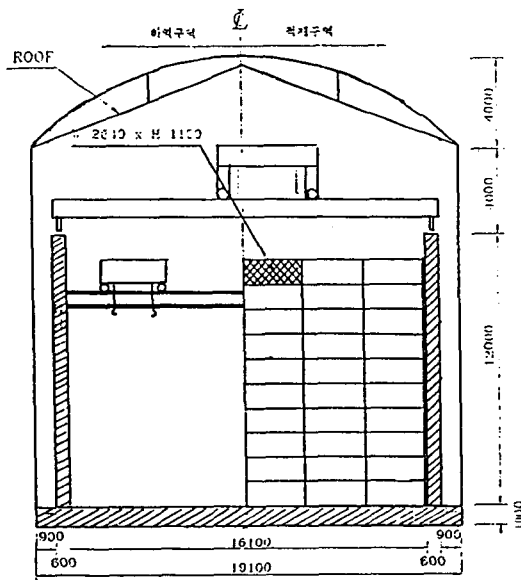


그림 1. 중준위폐기물 처분동굴 단면도

다 [1].

점토질 뒷채움재가 설치된 중준위폐기물 동굴로부터 예상할 수 있는 방사성핵종 유출시나리오 중 가장 타당성 있는 시나리오는 지하수에 의한 것으로, 대부분의 뒷채움재 성능평가에서 이 시나리오가 고려되고 있다. 즉 처분장 주위 암반에 존재하는 지하수가 처분동굴 내로 침투되면, 시간경과에 따라 폐기물용기가 부식되어 폐기물로부터 방사성핵종이 지하수로 침출된다. 그 후 침출된 방사성핵종은 콘크리트 구조물과 뒷채움재를 통과하여 주위암반으로 유출되며, 이 때 뒷채움재의 수리전도도가 충분히 낮으면, 뒷채움재를 통한 핵종유출의 주요 메커니즘은 확산이 될 것이다.

3. 뒷채움재

3.1. 요구사항

뒷채움재는 장기간동안 처분 조건 하에서 그 기능이 유지되어야 하며, 처분장을 통과하는 물의 이동을 제한하고, 핵종유출을 최소화시킬 수 있어야 한다. 또 다량을 손쉽게 확보할 수 있고 경제성면에서도 유리하여야 한다.

뒷채움재 재료가 가져야 할 주요특성은 다음과 같다 [2, 3].

- 수리전도도 : 주위 암반으로부터 처분장 내로 침투하는 지하수의 이동을 제한하고, 뒷채움재를 통한 핵종의 이동 메커니즘이 확산이 되도록 수리 전도도가 충분히 낮아야 한다.
- 핵종확산계수 : 폐기물 포장용기가 부식 등에 의해 파손된 후 폐기물에 함유되어 있던 방사성핵종이 주위 암반으로 유출되는 것을 저지할 수 있도록, 핵종의 겉보기확산계수(apparent diffusion coefficient)가 낮아야 한다.
- 팽윤성 : 처분장 폐쇄 후 지하수로 포화되었을 때 팽윤하여 암반 균열 및 뒷채움재의 빈틈을 메울 수 있도록 팽윤성이 높아야 한다.
- 팽윤압 : 외부용적의 변화없이 지하수에 의해 포화되었을 때 콘크리트 구조물 및 주위 암반에 과도한 부하를 주지 않도록 팽윤압이 낮아야 한다.
- 역학적 강도 : 뒷채움재 설치 후 빈 공간의 생성을 초래하는 상당한 손상없이 하중을 지탱할 수 있어야 한다.

-취급성 : 뒷채움재의 수송 및 설치가 용이하여야 하며 재료의 조성이 균일하여 처리, 수송 및 설치 중 심한 상분리가 일어나지 않아야 한다.

따라서 뒷채움재로 제안된 물질은 우선 매질을 통한 방사성핵종의 이동이 확산에 의해 지배되도록 수리전도도가 충분히 낮은가를 확인하여야 하며, 다음에는 매질을 통한 핵종의 확산계수가 낮아 핵종유출을 저지시킬 수 있어야 한다. 또 압축강도 등의 역학적 특성이 양호한가도 확인하여야 한다. 이러한 과정을 거쳐 뒷채움재료가 선정되면 설정된 성능목표(performance objectives)를 만족하도록 뒷채움재가 설계된다(그림 2).

3.2. 뒷채움재 후보물질

뒷채움 재료로 이용가능한 물질 중 점토는 천연물질로서 장기안전성이 잘 알려져 있어 뒷채움재로 유력시되고 있다 [3, 4].

점토에는 여러 종류가 있으나 그 중 벤토나이트 특히

나트륨벤토나이트가 낮은 투수성, 양호한 팽윤성 및 자체(self-sealing)특성, 낮은 핵종의 확산계수 등의 주요특성이 우수하여, 방사성폐기물 처분장의 완충재(buffer material) 및 뒷채움재(backfill material) 재료로서 가장 적합한 것으로 알려져 있다 [2-4]. 그러나 벤토나이트를 단독으로 사용할 경우 역학적 특성이 좋지 않고 팽윤압이 높은 문제점이 있어, 이를 개선하기 위해 모래나 분쇄암석 등의 불활성물질(inert material)을 혼합하여 사용하는 방안이 강구되고 있다. 혼합재의 특성규명에 관한 연구는 주로 미국, 캐나다, 스웨덴 등에서 고준위폐기물 처분장에서의 완충재(buffer material), 뒷채움재(backfill material)의 개발을 위해 나트륨벤토나이트-모래 혼합물과 천연점토-분쇄암석 혼합물에 대하여 수행되어 왔다 [2-5]. 처분장 완충재 또는 뒷채움재로 혼합재를 사용하면 경제성 면에서 유리할 뿐만 아니라 압축밀도와 열전도도가 증가하고, 기계적 강도를 증가시켜 크리프(creep) 및 침하가능성이 감소된다 [3]. 이러한 점을 고려할 때 우리나라도 처분장 뒷채움재로 순수점토만을 사용하기보다는 혼합재를 사용하는 것이 타당할 것이다.

그러나 우리나라의 경우 뒷채움재료로 가장 적합한 특성을 가진 나트륨벤토나이트의 산출량이 많지 않아 원료의 입수가 용이하지 않고, 경제성의 관점에서도 문제가 된다. 또 처분장이 중저준위폐기물 처분용이어서, 혼합재가 완충재가 아닌 뒷채움재로 사용될 것이므로 요구사항이 훨씬 완화되는 점도 고려되어야 한다. 따라서 고품위 나트륨벤토나이트 대신 국내에서 다량 입수 가능한 칼슘벤토나이트를 주성분으로 하는 국산 천연점토를 사용하는 방안이 고려되어 왔다. 점토와 혼합되는 불활성물질로는 모래를 사용하는 방안도 있으나, 처분부지 입지에 따라 하천모래의 다량 채취, 수송이 용이하지 않을 수 있으며, 처분장의 건설 중 암반 굴착과정에서 다량으로 발생하는 쇄석의 처리도 문제가 된다. 따라서 이러한 문제를 동시에 해결하기 위하여 국산 천연점토와 분쇄암석의 혼합물을 처분장의 뒷채움재로 사용하는 방안이 고려되고 있다 [5]. 그러나 뒷채움재로 혼합재를 사용할 때, 혼합재 내 불활성물질의 양이 지나치게 많을 경우 수리전도도를 증가시키고, 핵종유출저지능을 감소시킬 위험성이 있으므로, 혼합재의 조성은 경제성, 역학적 특성 뿐만 아니라, 수리전도도, 핵종의 확산계수 등과 같은 핵종유출저지특성 측면을 종합적으로 평가하여 결정하여야 한다. 따라서 본 보고서에서는 국산 천연

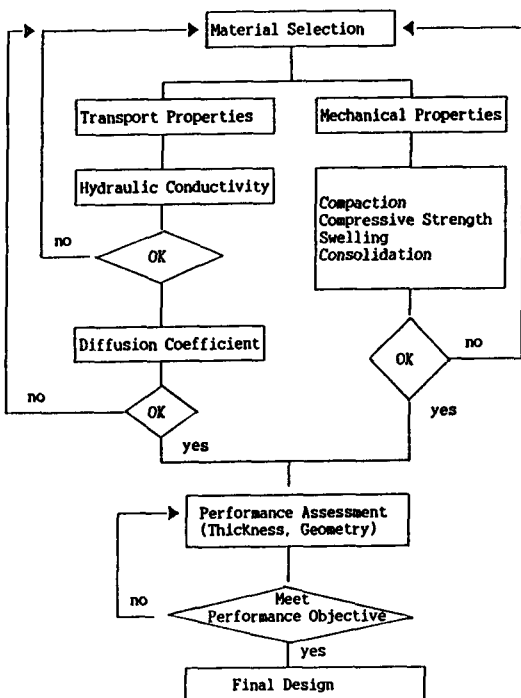


그림 2. 뒷채움재 설계

점토와 분쇄암석의 혼합물의 수리특성 및 핵종확산특성을 평가하고 아울러 역학적 특성도 살펴보아, 이 혼합물의 뒷채움재로서의 사용가능성을 평가하고자 한다.

우리나라에서 벤토나이트는 주로 경상북도 동해안 연일, 감포지역의 신생대 제 3기 층에서 산출되며, 대부분이 칼슘벤토나이트로 알려져 있다 [6]. 벤토나이트 광상은 연일지역에서는 주로 하부 함탄층에, 감포지역에서는 효동리 화산암류와 용동리 응회암층에 주로 배태된다 [6]. 최 등[7]은 연일지역과 감포지역에서 산출되는 벤토나이트에 대해 비표면적, 양이온교환능(CEC), 팽윤률 등의 기본적인 물성을 측정하였으며, 그 결과 큰 차이가 없다고 보고하였다. 따라서 여기서는 연일-감포지역 벤토나이트 생산업체로부터 이 지역의 대표시료로 추천된 연일지역(광구번호 22 및 32)에서 산출되는 칼슘벤토나이트 성분의 점토를 미처리 상태에서 분쇄하여 사용하였다. 대상 점토의 화학적 조성은 53.2% SiO₂, 22.1% Al₂O₃, 8.4% Fe₂O₃, 2.6% CaO와 기타성분 소량을 함유하고 있으며 (표 1), 양이온교환능(CEC)는 70.9 meq /100g이다 [8]. 분쇄암석은 핵종유출저지 측면에서 불활성물질(inert material)로 작용하므로 그 특성이 큰 의미가 없고, 처분부지도 결정되지 않은 상태이므로, 대덕지역에서 얻은 화강암을 분쇄하여 사용하였다.

점토-분쇄암석 혼합물의 적정 입도 분포를 얻기 위해서는 우선 혼합물의 압축건조밀도가 최대가 되는 입도 분포를 알아야 한다. 동일 압축력 하에서 재료의 밀도가 최대가 될 때 수리전도도는 최소가 되어, 뒷채움재의 중요 요구사항 중의 하나인 낮은 수리전도도 조건을

만족시키기 때문이다. 분쇄기 또는 볼밀(ball mill) 등을 이용하여 분쇄암석을 제조할 때 광범위한 암석의 입도 분포가 얻어지며, 분쇄암석의 형태는 불규칙한 구형이다. 점토-분쇄암석 혼합물 제조시 점토는 No. 200 망체를 통과한 분말만을 사용하였으며, 분쇄암석은 혼합의 균일성을 유지하기 위해 입자의 최대크기를 No. 4 망체를 통과한 크기로 제한하였고, No. 200 망체 이하의 분말은 제외하였다. 분쇄암석의 입도 분포는 Talbot와 Richart [9]에 의해 제안된 혼합물의 압축밀도가 최대가 되는 이상등급곡선(ideal gradation curve)을 위한 배합비율을 이용하여 결정하였다. 점토함량에 따른 점토-분쇄암석 혼합물의 입도 분포를 표 2에 나타내었다 [8].

표 1. 점토 시료의 화학적 조성

Chemical composition	Wt. %
SiO ₂	53.20
Al ₂ O ₃	22.05
Fe ₂ O ₃	8.37
FeO	0.32
CaO	2.63
MgO	1.98
K ₂ O	0.96
Na ₂ O	1.36
MnO	0.11
IG-Loss	9.02

표 2. 점토 함량에 따른 점토-분쇄암석 혼합물의 입도분포

Sieve mesh No.	Sieve opening (mm)	cumulative size distribution (wt. %)			
		clay=20%	clay=30%	clay=40%	clay=50%
4	4.75	100.0	100.0	100.0	100.0
5	4.00	93.5	95.1	96.3	97.2
6	3.36	87.4	90.4	92.6	94.4
7	2.83	81.8	86.0	89.2	91.7
10	2.00	71.5	77.8	82.6	86.5
20	0.85	51.3	60.7	68.4	75.0
30	0.60	44.8	54.9	63.3	70.8
50	0.30	34.2	44.9	54.3	63.0
200	0.08	20.0	30.0	40.0	50.0

3.3. 수리특성

처분장 뒤편재의 요구사항 중 가장 중요한 특성 중의 하나가 수리전도도(hydraulic conductivity)가 낮아야 한다는 것이다.

수리전도도가 높을 경우에는 뒤편재를 통한 핵종의 주요 이동메카니즘이 확산이 아닌 이류(advection)가 될 가능성이 있다. Gillham과 Cherry[10]는 처분환경에서 기대되는 지질조건인 수리구배(hydraulic gradient)가 0.2, 공극률(porosity)이 0.35인 경우, 수리전도도가 10^{-8} m/s 이하이면, 확산이 물질이동의 주요 메카니즘이고, 10^{-7} m/s 이상이면, 이류에 의해 지배되며, 그 사이에서는 두 메카니즘이 모두 물질이동에 기여한다고 보고하였다. 따라서 처분장 뒤편재는 10^{-8} m/s 이하의 수리전도도를 가져야 한다.

처분장 뒤편재로 점토에 분쇄암석을 혼합하여 사용

하면 뒤편재의 수리전도도는 혼합물 중의 암석과 점토의 비율에 따라 달라진다. 연일산 점토와 분쇄암석 혼합물의 수리특성시험 결과 얻어진 혼합물 중의 점토의 함량, 혼합물의 압축밀도와 수리전도도의 관계를 살펴보면 그림 3과 같다 [8]. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 점토-분쇄암석 혼합물의 수리전도도는 점토함량이 증가할수록 감소하여 점토함량이 약 50%일 때는 혼합물의 건조밀도가 1.5 Mg/m^3 로 낮은 경우에도 약 3×10^{-10} m/s의 낮은 값을 유지하고 있었으며, 건조밀도를 1.7 Mg/m^3 으로 증가시키면 혼합물의 수리전도도는 상당히 감소하여 점토함량이 30%인 경우에도 4×10^{-10} m/s 정도이었다. Yong 등 [2]과 Westsik 등 [11]은 각각 천연점토-분쇄암석 혼합물과 나트륨벤토나이트-모래 혼합물에 대해 비슷한 결과를 보고한 바 있다. 따라서 기준 수리전도도 값을 만족시키는 혼합재의 조건은 혼합물의 조성과 압축밀도를 동시에 고려하여야 하며, 이 관계는 유효점토건조밀도(effective clay dry density) 개념을 이용하여 설명할 수 있다 [12]. 이 개념을 이용하여 기준수리전도도 조건을 만족

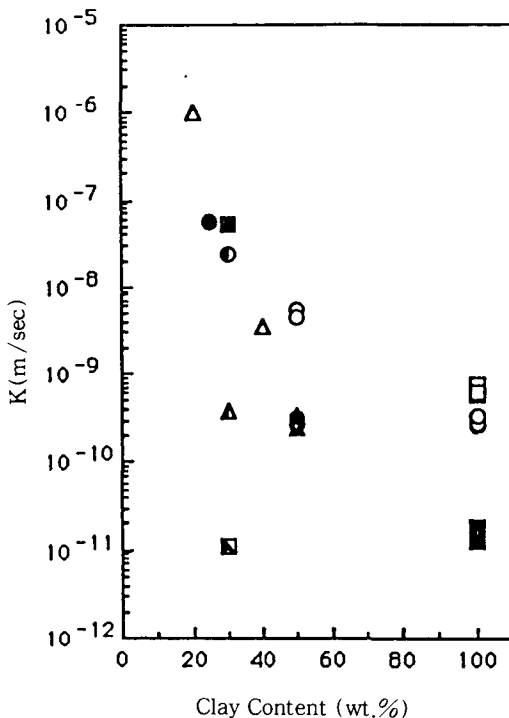


그림 3. 점토함량의 함수로 나타낸 연일산 점토/ 분쇄암석 혼합물의 수리전도도

(\square : $\rho_d = 1.0 \text{ Mg/m}^3$, \circ : $\rho_d = 1.2 \text{ Mg/m}^3$,
 \blacksquare : $\rho_d = 1.4 \text{ Mg/m}^3$, \triangle : $\rho_d = 1.5 \text{ Mg/m}^3$,
 \bullet : $\rho_d = 1.6 \text{ Mg/m}^3$, \ominus : $\rho_d = 1.7 \text{ Mg/m}^3$,
 \blacktriangle : $\rho_d = 1.8 \text{ Mg/m}^3$, \blacksquare : $\rho_d = 2.1 \text{ Mg/m}^3$)

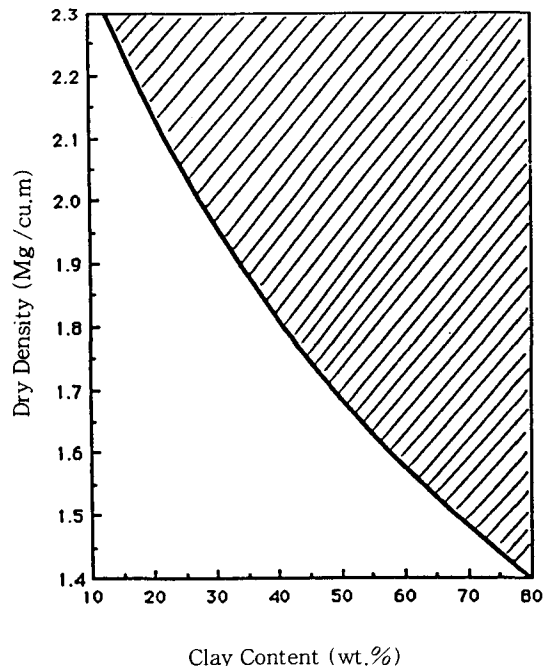


그림 4. 기준 수리전도도($1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$)를 만족하는 점토-분쇄암석 혼합물의 건조밀도와 점토함량 사이의 관계

시키는 뒷채움재의 조건을 결정할 수 있으며, 뒷채움재의 설계기준 수리전도도를 매질을 통한 물질이동의 메커니즘이 확산이 되는 경계 값인 $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 의 1% 인 $1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 로 할 경우, 이 기준을 만족시킬 수 있는 혼합재의 조건을 그림 4에 나타내었다 [8]. 이 그림에서 붉은선 위의 영역이 수리전도도가 기준 값을 만족하는 혼합물의 조성과 건조밀도를 나타낸다. 예를 들면 순수 점토의 경우 건조밀도가 1.4 Mg/m^3 정도만 되어도 수리전도도 요구조건을 만족시킬 수 있으나, 점토함량이 30%인 혼합물의 경우에는 건조밀도가 거의 2.0 Mg/m^3 정도가 되어야 요구조건을 만족시킬 수 있다. 본 보고서에서 제안된 기준뒷채움재(reference backfill material)의 조건은 점토함량 30 wt. %, 겔보기 건조밀도 2.1 Mg/m^3 로서 이 조건은 건조밀도가 1.4 Mg/m^3 의 순수점토에 해당된다. 그러나 뒷채움재의 최종조건은 현장 엔지니어링이나 경제성 등의 관련인자를 고려하여, 추후 결정되어야 할 것이다.

3.4. 방사성핵종 확산특성

점토질 뒷채움재(clay-based backfill material)를 사용하면 낮은 수리전도도로 인해 뒷채움재에서의 방사성핵종의 주요 이동메카니즘은 확산이 될 것이다. 따라서 뒷채움재에서의 방사성핵종의 확산계수는 뒷채움재를 통한 방사성핵종의 유출속도를 예측하는데 매우 중요한 인자이다. 처분장 뒷채움재로 순수점토 대신 분쇄 암석-점토 혹은 모래-점토 혼합물을 사용하는 경우, 실제 뒷채움재로 사용될 조성을 가진 혼합재에 대해 핵종의 확산계수를 직접 측정하는 것이 이상적이나, 뒷채

움재의 혼합비와 압축밀도 등이 확정되어 있지 않은 현재의 실정에서는 혼합재를 사용하는 것이 곤란하다. 즉 확산계수 측정실험은 수리전도도 측정실험이나, 수확실험 등과는 달리 실험절차가 복잡하고, 실험에 장기간이 소요되는 특성이 있어, 다양한 혼합비와 압축밀도 등의 조건에 대해 핵종의 확산계수를 측정하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 순수 점토를 대상으로 확산계수를 측정하여 이를 동일한 유효점토건조밀도(effective clay dry density)[12]를 가진 혼합재의 확산계수 값으로 사용하는 것이 일반적이며, 양자는 서로 잘 일치하고 있다 [8].

앞절에서 언급한 기준뒷채움재 조건에 해당하는 압축밀도가 1.4 Mg/m^3 인 연일점토에서의 대표적 양이온 핵종과 음이온핵종의 확산계수를 표 3에 나타내었으며 [8], 유사한 압축밀도의 나트륨벤토나이트에 대해 측정된 핵종의 확산계수 값[13-17]도 함께 나타내었다. 이 표에서 볼 수 있는 바와 같이 양이온 핵종인 Cs-137, Sr-90 및 Co-60 및 음이온핵종 I-125의 겔보기 확산계수(D_a)의 크기는 $I-125 > Sr-90 > Cs-137 > Co-60$ 순이었으며, 연일점토에 대해 측정된 양이온 및 음이온 핵종들의 겔보기 확산계수는 나트륨벤토나이트에 대해 보고된 값과 유사하였다. 비록 약간의 차이는 있으나 이러한 차이는 동일점토에서의 확산계수 측정실험에서도 흔히 볼 수 있는 오차범위에 속하므로 큰 의미가 없다 [12-18]. 따라서 핵종 확산특성 측면에서 보면 연일점토는 나트륨벤토나이트와 거의 유사한 성능을 갖고 있다고 할 수 있다.

점토에서의 핵종확산계수에 대한 압축밀도의 영향을 조사하기 위해 압축밀도 1.0, 1.2, 1.4, 및 1.7 Mg/m^3

표 3. 연일점토 및 나트륨벤토나이트에서의 방사성핵종 확산계수

Nuclides	ρ_d (Mg/m^3)	D_a (m^2/s) (Kampo clay)	D_a	Reference
			(m^2/s) (Na-bentonite)	
Co-60	1.4	3.4×10^{-13}	4.5×10^{-14}	[15]
Sr-90	1.4	8.0×10^{-12}	5.4×10^{-12}	[12]
	1.4	4.1×10^{-12}		
	1.4	1.3×10^{-12}		
Cs-137	1.4	3.9×10^{-13}	5.4×10^{-13}	[13]
	1.4	1.4×10^{-12}	2.2×10^{-12}	
	1.4	7.6×10^{-11}	6.9×10^{-11}	[11]
I-125	1.4	5.8×10^{-11}	8.5×10^{-11}	[12]

표 4. 압축점토의 건조밀도에 따른 핵종의 확산계수 변화

ρ_d (g/cm ³)	θ	D_a (m ² /s) (I-125)	D_a (m ² /s) (Sr-90)
1.0	0.63		1.43×10^{-12}
1.2	0.56	7.12×10^{-11}	1.35×10^{-12}
1.4	0.48	5.80×10^{-11}	1.30×10^{-12}
1.7	0.37	3.80×10^{-11}	1.21×10^{-12}

인 점토에 대해, 대표적 음이온 및 양이온인 I-125와 Sr-90의 겔보기확산계수를 측정하였으며 [8, 19], 그 결과를 표 4에 나타내었다. 이 표에서 볼 수 있는 바와 같이, 핵종의 겔보기확산계수는 점토의 압축밀도가 증가할수록 감소하여, 충전밀도가 1.0–1.7 Mg/m³ 일 때 I-125의 경우 3.80×10^{-11} – 7.12×10^{-11} m²/sec 의 범위에 있었으며, Sr-90의 경우 1.21×10^{-12} – 1.43×10^{-12} m²/sec 의 범위에 있었다. 압축밀도 증가에 따른 겔보기확산계수 감소는 점토의 밀도가 증가할수록, 압축점토내 공극의 크기가 감소하고 공극구조의 변화로 인해 굴곡도가 증가하여 형상인자(geometric factor)가 감소하기 때문이다. 그러나 실험에 사용된 밀도 범위에서는 확산계수는 밀도변화에 민감하지 않았으며, 기준 밀도 1.4 Mg/m³의 경우의 값을 중심으로 2–3배 범위 내에 분포되어 있었다.

3.5. 역학적 특성

연일산 점토-분쇄암석 혼합물에 대해 뒷채움재의 역학적 특성 중 가장 기본적인 특성인 액소성한계, 다짐특성, 압축강도 및 압밀특성이 측정되었다 [8]. 점토함량 증가에 따른 점토-분쇄암석 혼합물의 액소성한계, 소성한계 및 소성지수의 변화를 그림 5에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 혼합재 중 점토의 함량이 증가할수록 액소성한계 및 소성한계가 증가하였으며, 이에 따라 소성지수도 증가하였으나 점토 함량이 30% 이상 일 경우에는 증가율이 상대적으로 감소하였다. 점토-분쇄암석 혼합재는 부피변화포텐셜(volume change potential)이 비교적 큰 편이므로 [20], 폐쇄후 지하수로 포화되는 처분장조건하에서 양호한 팽윤성을 나타낼 것으로 예상된다. 점토-분쇄암석 혼합재의 다짐시험으로부터 얻은 혼합재의 최대건조밀도 및 최적함수비를 표 5

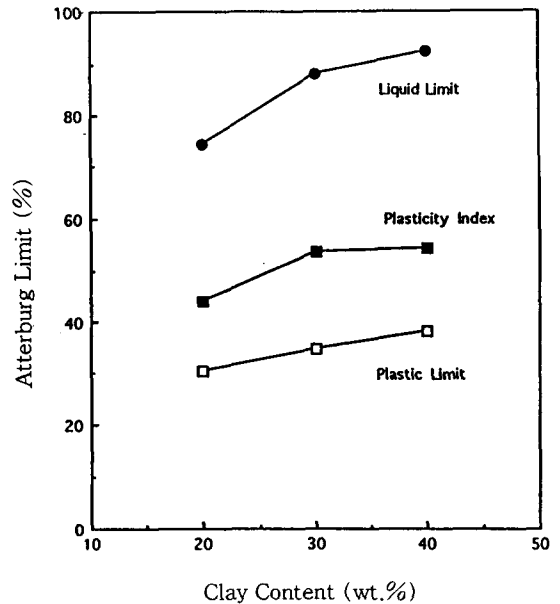


그림 5. 점토-분쇄암석 혼합물의 아터버그 한계 변화

표 5. 점토-분쇄암석 혼합물의 최대건조밀도 및 최적함수비

혼합비	최대건조밀도(Mg/m ³)	최적함수비(%)
점토(20%)+분쇄암석(80%)	1.77	15.4
점토(30%)+분쇄암석(70%)	1.68	18.1
점토(40%)+분쇄암석(60%)	1.62	20.6

에 나타내었다. 이 표에서 볼 수 있는 바와 같이 혼합재의 최적함수비는 점토의 양의 증가에 따라 증가하였으며, 이 때 얻어지는 최대건조밀도는 감소하였다.

혼합재의 일축압축강도(unconfined compressive strength)는 점토함량이 20%에서 40% 사이일 때 195 kN/m²–269 kN/m² 사이에 있었으며, 점토함량이 20%에서 30% 사이일 때는 거의 일정하다가 점토함량이 40%로 증가함에 따라 다소 증가하나 그 정도는 크지 않다. 압밀시험 결과 혼합재에 80 kN/m²–320 kN/m²의 하중을 가했을 때 얻어지는 압밀계수는 점토함량이 20% 일 때 0.77 m²/year–1.65 m²/year, 점토함량이 30% 일 때 0.88 m²/year–1.15 m²/year,

점토 함량이 40% 일때 $0.18 \text{ m}^2/\text{year} - 0.36 \text{ m}^2/\text{year}$ 의 범위에 있었다. 점토의 혼합비가 증가함에 따라 압밀계수가 감소하는 것은 점토함량 증가에 따라 혼합재의 간극비가 감소하고 이에 따른 투수계수가 감소하기 때문으로 생각된다.

김 등 [21]은 나트륨벤토나이트-주문진표준사 혼합재에 대한 다짐시험 결과, 점토의 함량이 20%, 30%, 및 40% 일때 최대전조밀도는 $1.73 \text{ Mg}/\text{m}^3$ 에서 $1.63 \text{ Mg}/\text{m}^3$ 의 범위에, 일축압축강도는 $131 \text{ kN}/\text{m}^2 - 96 \text{ kN}/\text{m}^2$ 범위에 있다고 보고하였다. 또 $100 \text{ kN}/\text{m}^2 - 400 \text{ kN}/\text{m}^2$ 의 하중을 가했을 때 얻어지는 압밀계수는 벤토나이트 함량이 20% 일때 $2.16 \text{ m}^2/\text{year} - 10.86 \text{ m}^2/\text{year}$, 벤토나이트 함량이 30% 일때 $2.24 \text{ m}^2/\text{year} - 2.63 \text{ m}^2/\text{year}$, 벤토나이트 함량이 40% 일때 $0.16 \text{ m}^2/\text{year} - 0.60 \text{ m}^2/\text{year}$ 사이에 있다고 하였으며, 이 값들은 본 연구에서 얻어진 점토-분쇄암석 혼합물의 역학적 특성과 큰 차이가 없다.

4. 결 론

우리나라 중저준위폐기물처분장에 설치될 점토질 뒷채움재의 후보물질로 고려되고 있는 연일산 천연점토와 분쇄암석 혼합물에 대해 핵종유출저지 관점에서 중요한 수리특성 및 방사성핵종 확산특성을 조사하였고 역학적 특성도 아울러 살펴보았다.

연일산 천연점토-분쇄암석 혼합물은 압축밀도가 낮은 경우에도 상당히 낮은 수리전도도를 가져, 뒷채움재를 통한 핵종이동의 주요 메커니즘이 확산이 될 것이라는 것을 알 수 있었다. 또 측정된 대표핵종의 확산계수 값들이 동일 압축밀도를 가진 나트륨벤토나이트로 부터 얻은 확산계수 값들의 범위에 있었으며, 혼합물의 역학적 특성도 나트륨벤토나이트-모래 혼합물에 대해 측정된 값과 유사한 값을 보여 주었다. 이러한 결과들로부터 연일점토-분쇄암석 혼합물을 고가의 나트륨벤토나이트 대용으로 처분장 뒷채움재로 사용할 수 있다는 것이 확인되었다.

참고문헌

1. 박현수 외, "저준위폐기물영구처분장 건설을 위한 기본설계요건 분석," 원자력환경관리센터, KAERI-I-NEMAC/PR-32/93 (1994)
2. R.N. Yong, P. Boonsinsuk and G. Wong, "Formation of Backfill Material for a Nuclear Waste Disposal Vault," Canadian Geotech. J., Vol. 23, p. 216 (1986)
3. M.J. Smith et al., "Engineered Barrier Development for a Nuclear Waste Repository in Basalt: An Integration of Current Knowledge," RHO-BWI-ST-7, Rockwell Hanford Operations (1980)
4. R. Pusch, "Use of Clays as Buffers in Radioactive Repositories," SKBF/KBS, Swedish Nuclear Supply Company Technical Report 83-46 (1983)
5. 한필수 외, "처분안전성연구," 원자력환경관리센터, KAERI-NEMAC/RR-63/92 (1993).
6. 김진웅 외, "부지특성 및 구조물의 안전성 평가연구," KAERI-NEMAC/RR-61/92, 원자력환경관리센터 (1992)
7. J.W. Choi, J.H. Whang, K.S. Chun, and B.H. Lee, "Applicability of Domestic Bentonite as a Buffer Material of Spent Fuel Repository," J. of Korean Nuclear Society, Vol. 23, pp. 410-419 (1991)
8. 조원진, 이재완, 금동권, 정의영 "처분안전성연구, 제 3권 인공방벽의 핵종유출 저지능 연구," 원자력환경관리센터, KAERI-NEMAC/RR-119/94 (1995)
9. A.N. Talbot and F.E. Richart, "The Strength of Concrete, Its Relation to the Cement Aggregates and Water," University of Illinois Bulletin, No. 137, Urban, IL (1923)
10. R.W. Gillham and J.A. Cherry, "Contaminant Migration in Saturated Unconsolidated Geologic Deposits," Geologic Society of America, Special Paper 189, pp. 31-62 (1982)
11. J.H. Westsik Jr. et al., "Water Migration through Compacted Bentonite Backfills for Containment of High-level Nuclear Waste," Nuclear and Chemical Waste Management, Vol. 4, p. 291 (1983)
12. W.J. Cho, J.O. Lee, P.S. Hahn, and H.H.

1. 박현수 외, "저준위폐기물영구처분장 건설을 위한 기본설계요건 분석," 원자력환경관리센터, KAERI-

- Park, "Hydraulic and Diffusive Properties of Clay-Based Backfill Material for a Low- and Intermediate-Level Waste Repository," in Scientific Basis for Nuclear Waste Management XVIII, Kyoto, Japan (1993)
13. D.W. Oscarson, H.B. Hume, N.G. Sawatsky, and S.C.H. Cheung, "Diffusion of Iodide in Compacted Bentonite," *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 56, pp. 1400-1406 (1992)
 14. H. Sato, T. Ashida, Y. Kohara, M. Yui and N. Sasaki, "Effect of Dry Density on Diffusion of Some Radionuclides in Compacted Sodium Bentonite," *J. of Nucl. and Sci. and Technol.*, Vol. 29, pp. 873-882 (1992)
 15. Cho, D.W. Oscarson, M.N. Gray and S.C.H. Cheung, "Influence of Diffusant Concentration on Diffusion Coefficients in Clay," *Radiochimica Acta*, Vol. 60, pp. 159-163 (1993)
 16. K. Miyahara, T. Ashida, Y. Kohara, Y. Yusa and N. Sasaki, "Effect of Bulk Density on Diffusion for Cesium in Compacted Sodium Bentonite," *Radiochimica Acta*, Vol. 52/53, pp. 293-297 (1991)
 17. A. Muurinen, J. Rantanen, P. Penttila-Hiltunen, "Diffusion Mechanisms of Strontium, Cesium, and Cobalt in Compacted Sodium Bentonite, in Scientific Basis for Nuclear Waste Management IX, Stockholm, Sweden. pp. 617-624 (1985)
 18. W.J. Cho, D.W. Oscarson and P.S. Hahn, "The Measurement of Apparent Diffusion Coefficients in Compacted Clays : An Assessment of Methods," *Applied Clay Science*, Vol. 8, p. 283 (1993)
 19. J.O. Lee, W.J. Cho, P.S. Hahn, and H.H. Park, "Diffusion Characteristics of Iodide in a Domestic Bentonite of Korea," *J. of Korean Nuclear Society*, Vol. 26, pp. 285-293 (1994).
 20. J.G. Bowles, Physical and Geotechnical Properties of Soil, 2nd ed., McGraw-Hill Book Co., New York (1984)
 21. 김진웅외, "부지특성 및 구조물의 안전성 평가연구 - 제2권 처분구조물의 구조적안전성 연구," KAE-RI-NEMAC/RR-83/93, 원자력환경관리센터 (1993)