

Establishing the Concept of Buffer for a High-level Radioactive Waste Repository: An Approach

고준위폐기물처분장의 완충재 개념 도출: 접근방안

Jae Owan Lee*, Minsoo Lee, and Heuijoo Choi

Korea Atomic Energy Research Institute, 111 Daedeok-daero 989 beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

이재완*, 이민수, 최희주

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received July 28, 2015 / Revised September 15, 2015 / Approved October 21, 2015)

The buffer is a key component of the engineered barrier system in a high-level radioactive waste (HLW) repository. The present study reviewed the requirements and functional criteria of the buffer reported in literature, and also based on the results, proposed an approach to establish a buffer concept which is applicable to an HLW repository in Korea. The hydraulic conductivity, radionuclide-retarding capacity (equilibrium distribution coefficient and diffusion coefficient), swelling pressure, thermal conductivity, mechanical properties, organic carbon content, and illitization rate were considered as major technical parameters for the functional criteria of the buffer. Domestic bentonite (Ca-bentonite) and, as an alternative, MX-80 (Na-bentonite) were proposed for the buffer of an HLW repository in Korea. The technical specifications for those proposed bentonites were set to parameter values that conservatively satisfy Korea's functional criteria for the Ca-bentonite and Swedish criteria for the Na-bentonite. The thickness of the buffer was determined by evaluating the means of shear behavior, radionuclide release, and heat conduction, which resulted in the proper buffer thickness of 0.25 to 0.5 m. However, the final thickness of the buffer should be determined by considering coupled thermal-hydraulic-mechanical evaluation and economics and engineering aspects as well.

Keywords: Buffer, Functional criteria, Buffer concept, Engineered barrier system, High-level waste repository

*Corresponding Author.

Jae Owan Lee, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: jolee@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-4921

ORCID

Jae Owan Lee <http://orcid.org/0000-0003-0405-4041>

Minsoo Lee <http://orcid.org/0000-0001-7928-2415>

Heuijoo Choi <http://orcid.org/0000-0001-9253-7697>

고준위폐기물처분장에서 완충재는 공학적방벽의 주요 구성요소 중 하나이다. 본 연구에서는 국·내외의 완충재 요구사항과 성능기준을 분석하고, 우리나라 고준위폐기물처분장에 적합한 완충재 개념 도출을 위한 접근방안을 제시하였다. 완충재의 주요 성능기준 인자항목으로, 수리전도도, 핵종 저지능, 팽윤압, 열전도도, 역학적 특성치(mechanical properties), 유기물함량(organic carbon content), 일라이트화 속도(illitization rate) 등을 고려하였다. 우리나라 고준위폐기물처분장 완충재 물질로서 국산 벤토나이트(Ca-벤토나이트)와 대안재로 MX-80 벤토나이트(Na-벤토나이트)를 제안하였다. 완충재의 기술사양은 Ca-벤토나이트 경우엔 우리나라의 성능기준을, Na-벤토나이트의 경우는 스웨덴의 성능기준을 보수적으로 만족하는 값으로 설정하였다. 완충재의 두께는 전단거동, 핵종 유출, 열전도의 측면에서 평가하여 결정하였으며, 평가결과 완충재의 두께는 0.25 ~ 0.5 m 사이가 적절하였다. 그러나 최종적인 완충재의 두께는 향후 보다 심도 있는 열-수리-역학적 평가와 경제적, 공학적 측면을 고려하여 결정하여야 할 것이다.

중심단어: 완충재, 성능기준, 완충재 개념, 공학적방벽시스템, 고준위폐기물처분장

1. 서론

고준위폐기물처분장은 대부분 심부 결정질 암반에 건설될 예정이다[1]. 이 경우 암반 균열을 통한 지하수의 유입과 이로 인한 처분용기의 부식 및 방사성핵종 유출을 방지하기 위해 완충재의 설치 필수적이다.

고준위폐기물처분장에서 완충재는 처분용기와 함께 공학적 방벽의 주요 구성요소이다. 완충재는 처분동굴 바닥에 처분공(deposition borehole)을 파고, 이곳에 폐기물을 포장해 넣은 처분용기를 정착한 후, 처분용기와 처분공 암반벽 사이 공간을 채우며 설치한다(Fig. 1) [2, 3]. 완충재의 주요 기능은 처분장으로의 지하수 유입을 억제하고, 방사성핵종의 유출을 방지하며, 외부 응력으로부터의 처분용기를 보호하고, 또한 폐기물로부터 발생하는 붕괴열(radioactive decay heat)을 밖으로 분산시키는 역할을 한다. 그러므로 공학적 방벽(engineered barrier)의 시스템 설계와 성능평가를 위해서는 완충재 개념 설정이 필수적이다.

본 연구에서는 국·내외의 완충재 요구사항(requirements)과 성능기준(functional criteria)을 분석하고, 우리나라 고준위폐기물처분장에 적합한 완충재 개념 도출을 위한 접근방안을 제시하고자 하였다.

2. 요구사항 및 성능기준

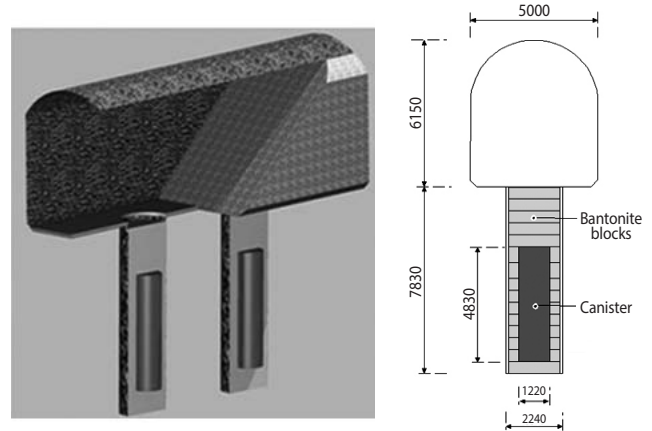


Fig. 1. Schematic picture for the Engineered Barrier System (EBS) of a Korean Reference disposal System (KRS).

2.1 요구사항

2.1.1 기술적 요구사항

완충재는 처분장에서 방벽재로서의 기능을 효과적으로 수행하기 위해 다음과 같은 특성을 가져야 한다[2,4].

- 낮은 수리전도도(low hydraulic conductivity)
- 높은 핵종 저지능(high nuclide-retarding capacity)
- 높은 팽윤성(high swelling potential)과 적절한 팽윤압(moderate swelling pressure)
- 양호한 역학적 특성(good mechanical property)
- 높은 열전도도(high thermal conductivity)
- 장기건전성 유지(good longevity)

- 낮은 유기물 함량(low organic carbon content)

2.1.2 현실적 고려사항

완충재 물질은 처분장 방벽재로 사용하기 위해, 위에서와 같은 기술적 요구사항 외에도 실제 처분장 적용에 있어서 소재의 수급성, 제작 용이성, 경제성 등에 대해서도 검토를 하여야 한다[5].

- 수급성: 처분장 완충재로 사용할 재료의 물량이 충분한지 검토하여야 한다.
- 제작용이성: 완충재의 제작과 현장 설치가 용이한지 공학적인 기술을 검토하여야 한다.
- 경제성: 수입산을 사용할 경우 소재의 구입에 따른 재료비, 운송비 및 부대비용이 얼마나 소요되는지를 따져 보아야 한다.

2.2 성능기준

완충재 개념 설정 및 설계를 위해서는 정성적인 요구사항 뿐만 아니라 정량적인 성능기준이 필요하다. 일반적으로 완충재의 정량적 성능기준은 관련 연구결과를 토대로 완충재 요구사항에 대한 기술적 검토항목을 분석하여 결정한다. 주요 기술적 항목으로는 수리전도도, 핵종 저지능, 팽윤성 및 팽윤압, 열전도도, 장기 건전성, 유기물 함량, 역학적 특성이 검토되었다[4].

수리전도도는 주위 암반에 존재하는 지하수가 처분용기와 접촉하는 것을 제한하고, 완충재를 통한 핵종의 이동이 확산(diffusion)에 의해 지배되는지를 보여 주는 척도이다. 그러므로 완충재의 수리전도도는 충분히 낮아야 한다. 완충재의 수리전도도가 높을 경우, 핵종 이동은 확산이 아니라 이류(advection)에 의해 진행되기 때문에 완충재가 차수재 역할을 할 수 없게 된다.

핵종 저지능은 핵종 분배계수(equilibrium distribution coefficient)와 확산계수(diffusion coefficient)로 정의 된다. 완충재는 폐기물에 함유 되어 있던 방사성 핵종이 주위 암반으로 유출되는 것을 저지하기 위해 가능한 한 높은 핵종 분배계수를 가져야 하고, 확산계수는 낮은 값을 가져야 한다. 이 때 완충재의 핵종 분배계수는 확산실험을 통해 얻은 겉보기 확산계수로부터 결정되어야 한다. 이것은 회분식 방법(batch test)에 의해 결정된 핵종 분배계수가 겉보기 확산계

수(apparent diffusion coefficient)로부터 결정된 값보다 훨씬 큰 값을 보이기 때문이다. 즉, 확산실험을 통해 압축 벤토나이트로부터 결정된 핵종 분배계수는 실제 완충재 조건(압축으로 인한 낮은 공극율, 낮은 흡착 반응표면적)을 반영하나, 분말 벤토나이트 형태로 측정된 회분식 실험방법에서는 실제조건보다 과장(overestimation)된 분배계수 값을 나타내기 때문이다[6, 7].

완충재의 팽윤성(swelling potential)은 높을수록 좋다. 완충재가 처분장 폐쇄 후 지하수로 포화 되었을 때 처분공 내의 빈틈과 주변 암반의 균열을 메울 수 있기 때문이다. 그러나 완충재의 팽윤압(swelling pressure)은 완충재가 밀봉 역할을 하면서 동시에 처분용기와 주위 암반에 과도한 부하를 주지 않도록 적절한 값을 가져야 한다.

완충재의 열전도도는 가능한 한 높아야 한다. 처분된 폐기물로부터 발생하는 붕괴열을 효과적으로 주위 암반으로 전도시키기 위해서이다. 만일 붕괴열을 주위 암반으로 효과적으로 발산 시키지 못하면, 처분용기 내에 열이 축적되어 처분용기와 폐기물의 장기건전성을 저하시킬 수 있다. 또, 온도 상승으로 인해 완충재 자체의 물리화학적 특성이 변화되어 완충재가 제기능을 할 수 없게 된다.

완충재는 심부암반에서 오랜 기간 동안 지하수와 접촉하며 높은 온도의 붕괴열에 노출되면, 열수반응(hydrothermal reaction)에 의해 팽윤성의 몬모릴로나이트가 일라이트화(illitization) 되거나 규화(silicification) 되어, 팽윤능이 저하될 수 있다[8, 9]. 몬모릴로나이트의 이러한 일라이트화나 규화 과정은 온도, 압력 및 처분장으로 흐르는 지하수의 지화학적 조건과 온도에 민감하다[10]. 완충재의 장기건전성 유지를 위해서는 처분장 부지의 지화학적 조건을 고려하여 완충재의 설계온도를 가능한 한 낮게 설정하는 것이 좋다.

완충재에 포함된 유기물은 완충재와 처분용기에 직접적인 영향을 미치지 않으나, 폐기물로부터 유출된 방사성핵종의 이동을 증가 시키고 또 폐기물의 안정성을 저하시킬 수 있다. 그러므로 완충재 내 유기물함량은 이러한 영향이 무시될 정도로 가능한 한 낮은 값을 가져야 한다.

완충재의 역학적 특성은 일축압축강도(unconfined compression strength), 탄성계수(Young's modulus), 포아송비(Poisson's ratio), 전단강도(shear strength), 인장강도(tensile strength), 압밀특성치(consolidation properties) 등으로 정의된다. 완충재는 처분용기 및 주위 암반의 하중을 지탱하고,

Table 1. Functional criteria of the buffer considered both at home and abroad [11]

Item	Sweden	Belgium	Japan	Korea
Material	MX-80 ^(*)	FoCa clay(60%) Sand(35%) Graphite(5%)	Kunigel VI (70%) Sand (30%)	Kyungju Ca-Bentonite ^(*)
Bulk density (Mg/m ³) (Dry density)	2.0 (1.59)	- -	- (1.60)	2.0 (1.6)
Initial Water Content (%)	10-17	-	7	13
Thermal conductivity (W/mK)	1.05 (1 year) 1.15 (15 years)	1.5→4.0 (adding graphite)	0.78	> 1.0
Hydraulic conductivity (m/s)	< 1 x 10 ⁻¹²	1 x 10 ⁻¹²	4.5 x 10 ⁻¹³	< 1 x 10 ⁻¹²
Diffusion coeff. (m ² /s)	1 x 10 ⁻¹¹ , cation	-	-	<1 x 10 ⁻¹¹ , cation <1 x 10 ⁻⁹ , anion
Swelling Pressure (MPa)	8 (700 m depth)	-	< Hydrostatic pressure + 1.0	< Hydrostatic pressure + 1.0

(*1) montmorillonite content=65-75 %; (*2) montmorillonite content= 70 %

Table 2. Functional criteria of the buffer recommended by IAEA [12]

Thermal conductivity (W/mK)	Specific heat (kJ/kgK)	Bulk density (Mg/m ³)	CEC (mmole/100g)	Hydraulic conductivity (m/s)	Expansion coeff. (*)	Mont. contents (%)
> 0.8	< 1.5	~ 2.0	> 70	< 1 x 10 ⁻¹¹	> 15	> 60

(*) Expansion coeff= sample volume swelled by water / dry sample volume x 100(%)

지진이나 단층과 같은 외부적 충격에 의해 변형이 일어나지 않도록 양호한 역학적 특성을 가져야 한다.

지금까지 알려진 각국의 성능기준[4]을 보면, 모든 나라에 공통적으로 적용할 수 있는 체계적인 성능기준은 마련되어 있지 않다. 나라마다 처분개념, 처분부지환경, 처분시점이 서로 다르기 때문이다. 대부분의 나라들은 자국의 처분일정에 따라 우선 필요로 하는 기술적 항목에 대해서 성능기준을 정하고, 정량화가 곤란한 항목에 대해서는 그 동안의 연구 결과를 바탕으로 정성적인 요건을 제시하여 사용하고 있다.

Table 1에 스웨덴, 벨지움, 일본, 한국(Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI)) 등의 완충재 성능기준을 요약 하였고[11], Table 2에는 IAEA(International Atomic Energy Agency)가 추천하는 성능기준을 요약하였다[12]. Table 1의 기준은 완충재 물질 선정 후 그 소재에 대해 성능기준을 설정한 것이다. 스웨덴과 한국의 성능기준은 각각 Na-벤토나이트(MX-80)과 Ca-벤토나이트(경주 벤토나이트)

를 대상으로 하였고, 벨기에와 일본은 혼합재를 대상으로 설정한 성능기준이다. 반면에, Table 2의 IAEA의 성능기준은 임의의 완충재 후보소재에 대해 적용할 수 있도록 포괄적으로 제시한 기준이다.

우리나라의 경우는 아직 처분개념과 처분장 부지가 정해지지 않았다. 완충재 성능기준은 처분개념과 처분장 부지 조건에 민감하므로, 향후 처분개념과 처분장 부지가 결정되면 추가적인 연구를 통하여 앞서 제시된 성능기준이 방벽재의 기능을 보장할 수 있는지 확인하고 개선할 필요가 있다.

3. 완충재 물질

고준위폐기물처분장의 완충재 소재로 적합한 물질을 선정하기 위해서, 여러 나라에서 많은 물질을 대상으로 조사가 행하여졌다. 조사결과, 점토질 물질(clay-based material)과

시멘트 물질(cement-based material)이 완충재로 사용 가능한 것으로 밝혀졌다[13, 14]. 그러나 시멘트 물질은 지하수의 pH를 12.5 이상으로 증가시키고, 이러한 pH 조건에서는 처분용기 재질의 부식을 촉진시킬 가능성이 있기 때문에, 완충재로는 점토질 물질이 더 바람직하다.

점토질 물질은 구성광물에 따라 물리화학적 특성이 다르다. 주요 광물로는 카올리나이트(kaolinite), 일라이트(illite), 몬모릴로나이트(montmorillonite) 등이 있다. 이 중 몬모릴로나이트를 함유하는 점토질물질은 카올리나이트나 일라이트를 함유하는 점토질물질 보다 팽윤성이 크기 때문에 동일한 건조밀도에서 수리전도도가 훨씬 낮고[14, 15, 16], 또 비표면적이 커서 양이온 교환능(cation exchange capacity)과 핵종 분배계수가 크기 때문에 핵종 저지능 측면에서도 다른 광물에 비해 우수한 것으로 확인 되었다[13]. 그러므로 점토질 물질은 몬모릴로나이트 함량이 많을수록 완충재 물질로 더 적합한 것으로 알려져 있다. 벤토나이트는 몬모릴로나이트를 주성분으로 하는 점토질 물질로서, 현재 처분장 건설을 계획하고 있는 많은 국가에서 다른 점토 보다 완충재 후보물질로 더 선호되고 있다[17].

벤토나이트는 물과 접촉할 경우 몬모릴로나이트 광물의 층간이 수화(hydration) 되면서 부피가 증가하는 팽윤성(swelling potential)을 가지고 있다[18]. 처분공에 처분용기를 넣은 후, 처분용기와 처분공 사이의 빈 공간을 벤토나이트 완충재로 충전하면, 완충재는 주위 암반으로부터 지하수가 처분공 내로 침투할 때, 물과 접촉하여 팽윤하고 그 결과, 지하수의 침투를 막아주는 차수기능을 한다. 벤토나이트는 팽윤 능력이 다른 점토들에 비해 매우 크므로 완충재를 설치하는 과정에서 완충재 내에 빈 공간이나, 균열이 생긴 경우에도 팽윤과정을 통하여 빈 공간을 메워 줄 수 있다. 또 벤토나이트는 대부분의 양이온핵종에 대해 높은 흡착능을 가지고 있어, 폐기물로부터 방사성핵종이 누출된 경우 방사성핵종이 주위 암반으로 유출되는 것을 효과적으로 저지할 수 있다. 이 밖에, 벤토나이트는 장기간의 변성과정을 거쳐 형성된 안정된 천연물질이므로, 고준위폐기물처분장의 긴 수명기간 중에도 본래의 고유특성을 유지할 수 있는 장기안정성의 장점도 가지고 있다.

벤토나이트는 몬모릴로나이트 광물의 층간에 존재하는 치환성 양이온(exchangeable cation)의 종류에 따라 Na-벤토나이트와 Ca-벤토나이트의 두 종류로 구분된다. 일반적으로

Table 3. Comparison of the swelling pressure between Na-bentonite and Ca-bentonite [20]

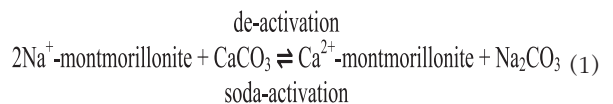
Bentonite	Dry density (Mg/m ³)						
	1.3	1.5	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1
Mx-80(Na) (MPa)	0.06	0.2	0.4	0.8-0.9	1.4	4-5	10-12
IBECO(Na) (MPa) ^(*)	-	-	-	0.6-1.0	-	4-5	-
IBECO(Ca) (MPa) ^(*)	-	-	-	0.2	-	5	-

(*1) montmorillonite content=85-95 %; (*2) montmorillonite content=75-85 %

Table 4. Buffer materials of foreign HLW repositories

Country	Buffer material	Dry density (Mg/m ³)	Compaction method
Canada	50:50 sand/Na-bentonite	~ 1.67	In situ
Sweden	Na-bentonite	1.8 ~ 2.0	Precompacted blocks
Finland	Na-bentonite	1.8 ~ 2.0	Precompacted blocks
France	Ca-bentonite	1.4 ~ 1.8	Precompacted blocks
Switzerland	Ca-bentonite	1.65 ~ 1.75	Precompacted blocks
Spain	Ca-bentonite	1.4 ~ 1.8	Precompacted blocks
Japan	Na-bentonite	1.8	Precompacted blocks/ In situ

Na-벤토나이트는 Ca-벤토나이트에 비해 높은 팽윤성을 갖기 때문에, 완충재 물질로 더 적합한 것으로 알려져 있다. 그러나 최근 연구에 의하면, Table 3에서 보는 바와 같이, 벤토나이트가 압축 블록형태로 사용될 경우 블록의 건조밀도가 2.0 Mg/m³ 이상에서는 두 벤토나이트 사이의 팽윤압은 거의 차이가 나지 않는 것으로 보고되었다[19, 20]. 또, Na-벤토나이트는 염수가 많이 존재하는 지하수 환경에서는 다음의 반응식(1)과 같은 나트륨의 비활성화반응(de-activation)에 의해 구조적 결합을 일으킬 가능성도 있는 것으로 보고되었다[5]. 스웨덴 SKB는 Ca-벤토나이트의 활용성 연구를 통해 75% 이상의 몬모릴로나이트를 함유하는 Ca-벤토나이트는 Na-벤토나이트와 같은 성능을 가진다고 보고하였다[21].



Na-벤토나이트는 미국, 캐나다 등에 많이 분포하고, Ca-벤토나이트는 주로 유럽에 많이 분포한다[4]. 세계 각국은 대부분 자국에서 산출되는 벤토나이트의 종류에 따라 Na-벤토나이트 혹은 Ca-벤토나이트를 완충재물질로 고려하고 있다. Table 4에서는 문헌에 보고된 각국의 벤토나이트 완충재 물질을 정리하였다.

우리나라에서 산출되는 대부분의 벤토나이트는 Ca-벤토나이트이다[22]. 한국원자력연구원은 2002년 제안한 고준위 폐기물처분장의 기준 완충재 물질로 경주 벤토나이트를 제안한 바 있다[23]. 그러나 국내산 벤토나이트는 부존량이 많지 않고, 채굴에 있어 경제성이 높지 않기 때문에 향후 처분 시점을 고려하여 수입 Na-벤토나이트의 대체 사용과 그에 따른 경제성도 아울러 검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 향후 공학적방벽의 시스템 설계와 성능평가에 사용할 목적으로 국산 벤토나이트와 스웨덴에서 사용하고 있는 MX-80을 각각 Ca-벤토나이트와 Na-벤토나이트의 기본 완충재로 선정하였다. 이러한 선정 배경에는 공학적방벽의 성능평가를 위한 모델링 계산에서의 입력데이터 제공 여부도 중요한 선정요소가 되었다.

4. 압축블록의 기술사양

완충재는 처분용기와 처분공 사이 빈 공간에 압축블록 형태로 설치된다. 블록의 모양은 처분용기, 처분공 및 둘 사이 공간의 모양에 좌우된다. 대부분의 국가는 현재의 처분장 설계개념에 따라 디스크형의 블록과 도넛형의 블록을 고려하고 있다[1]. 즉, Fig. 2에서 보는 바와 같이, 처분용기의 위, 아래에는 디스크형(disc-type)의 블록을, 처분용기 둘레 주위에는 도넛형(doughnut-type)의 블록을 설치하도록 되어 있다. 압축블록의 건조밀도는 완충재의 열적, 수리적, 역학적, 화학적 성능기준을 만족하며, 블록의 제작 및 설치 용이성을 종합적으로 평가하여 결정한다. 우리나라(Ca-벤토나이트)와 스웨덴(Na-벤토나이트)의 경우, Table 1의 성능기준에 의하면, 압축 완충재 블록의 건조밀도는 1.6 Mg/m³ 이상이 되도록 설정하고 있다. 고준위폐기물처분장의 완충재 블록의 사양은 완충재 성능기준을 만족하면서 제작 및 설치의 작업용이성과 경제성을 바탕으로 결정되어야 한다.

본 연구에서는, 기본 완충재 압축블록의 기술사양으로서,

Table 5. Technical formulation of Ca-bentonite and Na-bentonite selected as a reference buffer

Buffer material	Ca-bentonite (domestic bentonite)	Na-bentonite (MX-80 bentonite)
Dry density (Mg/m ³)	1.6	1.59
Initial water conductivity (%)	13	17
Thermal conductivity (W/mK)	0.8	1.05
Hydraulic conductivity (m/s)	1×10 ⁻¹²	1×10 ⁻¹²
Diffusion coefficient (m ² /s)	1×10 ⁻¹¹ (for cation)	1×10 ⁻¹¹ (for cation)
	1×10 ⁻⁹ (for anion)	
Swelling pressure (MPa)	hydro. pres ¹⁾ + 1.0	hydro. pres ¹⁾ + 1.0

¹⁾ hydrostatic pressure below ground surface

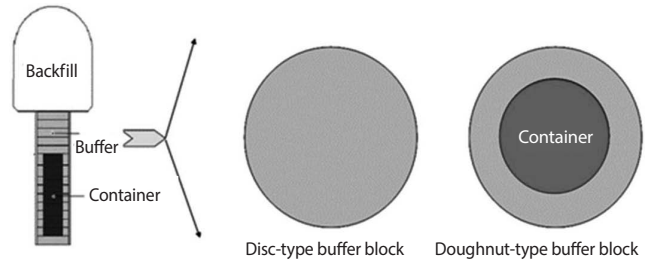


Fig. 2. Configuration(disc-type, doughnut-type) of buffer blocks to be installed in the deposition borehole.

국산 벤토나이트에 대해서는 한국원자력연구원이 제안한 성능기준을, MX-80 벤토나이트에 대해선 스웨덴의 성능기준을 보수적으로 만족하는 값으로 설정하였다. 그 결과, 국산 벤토나이트의 경우 건조밀도 1.6 Mg/m³, 수분함량 13% 일 때, 열전도도는 0.8 W/mK, 수리전도도는 3×10⁻¹³ m/s, 확산계수는 양이온의 경우 1×10⁻¹¹ m²/s, 음이온의 경우 1×10⁻⁹ m²/s, 팽윤압은 약 5 MPa 이었다 [24]. 그리고 스웨덴의 MX-80 벤토나이트의 경우는, 수분함량 17%, 건조밀도 1.59 Mg/m³일 때, 열전도도는 1.05 W/mK, 수리전도도는 3×10⁻¹³ m/s, 양이온의 확산계수는 1×10⁻¹¹ m²/s, 팽윤압은 약 7 MPa 이었다[2]. Table 5에서는 본 연구에서 기준 완충재로 선정한 국산 벤토나이트 완충재 블록과 MX-80 벤토나이트 완충재 블록의 주요 사양을 정리하였다. 그러나 이 표의 사양은

보수적으로 결정된 것으로, 앞으로 처분부지가 결정되면 부지환경조건을 반영하고, 또한 추가적인 연구를 통하여 보다 최적화 할 필요가 있다.

5. 완충재의 두께 결정

완충재의 개념 설정과 설계에 있어서 처분공(deposition borehole) 내 완충재의 두께는 중요한 고려사항이다. 완충재는 (1)외부로부터 산소와 같은 부식성 산화제의 침입을 막고, 용기에서 누출된 핵종이 외부로 확산되는 것을 억제하는 기능, (2)처분용기에서 발생된 붕괴열을 가능한 한 효과적으로 외부로 발산할 수 있는 기능, (3)외부의 지각변동과 같은 물리적 충격에도 처분용기를 보호할 수 있는 기능이 요구된다. 하지만, 완충재의 두께가 너무 크면 붕괴열의 발산이 힘들뿐만 아니라, 설치비용이 증가되고, 반대로 완충재 두께가 얇으면 핵종 이동을 억제하는 기능이 떨어지고, 물리적 완충작용도 저해된다. 본 장에서는 국산 벤토나이트를 대상으로 전단거동, 핵종 유출률, 열전도도 측면에서의 완충재 두께를 평가하고 결정하였다.

5.1 전단거동에 의한 완충재 두께

심부환경에서 완충재는 지각변동에 대해 물리적 완충작용을 할 수 있어야 한다. Table 6은 JAEA (Japan Atomic Energy Agency[25], SKB (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company[26], KAERI[27]에서 설정한, 처분용기가 견딜 수 있는 전단거동(fault movement) 기준을 나타낸다. 전단거동은 일본과 같이 지진이 많은 나라뿐만 아니라, 지진으로부터 완전히 안전하지 않은 우리나라에서도 고려되어야 할 중요한 평가요소이다. Table 6의 기준은 처분심도에서 발생할 수 있는 최대 전단 움직임의 예측치이다. 이 표의 기준을 바탕으로 본 논문에서는 최대 전단거리를 0.1 m 라고 설정하였다.

완충재 내에 처분용기가 고정되어 있는 경우, 처분용기 중앙을 지나는 전단거리에 의한 회전각은 식(2)와 같이 결정된다.

$$\theta = \sin^{-1}(\delta/L) \tag{2}$$

Table 6. Design criteria of a disposal container which should be considered for fault movement

Item	JAEA [25]	SKB [26]	KAERI [27]
Shear displacement	0.1 m	0.05 m	0.1 m
Shear rate	1.0 m/sec	1.0 m/sec	1.0 m/sec

Table 7. Allowable fault movement and rotational angle of the buffer with respect to its thickness when a disposal container(OD 1.030 m, L 4.778 m) is installed in the buffer

Drawing No.	Canister length (m)	Buffer thickness (m)	Fault movement (m)	Rotational angle (°)
(A)	4.778	0.5	0.95	11.47
(B)	4.778	0.4	0.70	8.42
(C)	4.778	0.3	0.55	6.61
(D)	4.778	0.2	0.35	4.20
(E)	4.778	0.1	0.16	1.92
(F)	4.778	0.5	0.10	1.20

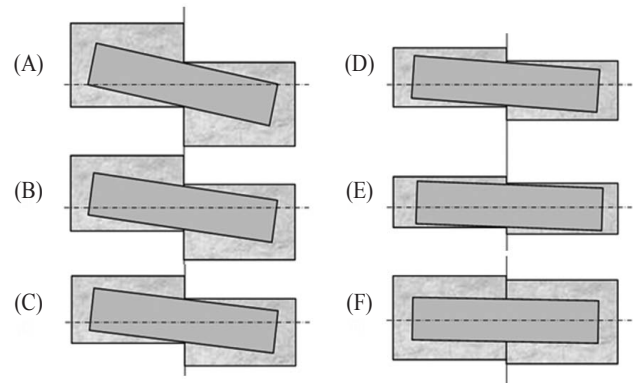


Fig. 3. Rotational movement of a disposal container with respect to the fault movement.

여기서 θ 는 처분용기 회전각, δ 는 전단거리, L은 처분용기 길이이다. 완충재 두께에 따른 가능한 전단거리와 회전각은 Table 7의 (A)~(E)에 표시하였고, 비교를 위해서 완충재 두께 0.5 m, 전단거리 0.1 m일 때의 회전각은 (F)에 표시하였다. 그리고 처분용기의 회전 움직임은 Fig. 3에 도식화하였다. 이 그림에서 보는 바와 같이, 실제 전단거리가 0.1 m 인 경우에는, 완충재 두께가 0.5 m부터 0.1 m사이 일 때에는 처분용기와 지반간의 충돌을 막는 것으로 파악된다. 하지만 완충재 두께 0.1 m 수준이 되면 처분용기와 지반간의

여유 간격이 거의 사라지기 때문에, 충분한 안전율을 갖기 위해서는 적어도 0.2 m 이상의 완충재 두께를 가져야 할 것으로 보인다.

5.2 핵종 유출률에 의한 완충재 두께

처분용기가 손상된 후, 폐기물로부터 침출된 방사성 핵종이 완충재를 통해 주위의 암반으로 유출되는 메카니즘은 확산이다. 처분장의 기하학적 구조를 고려하면, 완충재를 통한 방사성 핵종의 유출은 방사성 붕괴를 고려한 2차원 확산 이동으로 묘사될 수 있다. 완충재-암반 계면에서 완충재의 단면을 통한 방사성 핵종의 총 누적속(cumulative flux)으로 정의되는 방사성 핵종의 유출률, R_i 은 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다[27].

$$R_i = \int \theta D_p \nabla C_i dA \quad (3)$$

여기서 θ 는 완충재의 공극율, D_p 는 핵종의 공극확산계수 (pore diffusion coefficient), C_i 는 핵종 i 의 용액 중 농도, A 는 완충재-암반 계면에서의 핵종 확산 유출이 일어나는 단면적이다.

KAERI에서는 고준위폐기물 처분안전성 평가에 있어 중요한 핵종으로 알려져 있는 12개 방사성 핵종의 완충재를 통한 유출률을 평가하였다[27]. 처분장 폐쇄 후 시간 경과에 따른 방사성핵종들의 총 유출률을 완충재 반경방향두께의 함수로서 계산하였으며, 경과시간 $t=1000$ yr 일 때의 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 방사성 핵종들의 총 유출률은 완충재의 반경방향 두께가 0.25 m로 증가할 때까지는 급격히 감소하고, 그 이후에는 0.5 m까지는 완만하게 감소한다. 그러나 0.5 m 이상에서는 완충재의 두께가 증가하더라도 방사성핵종 유출의 감소효과는 거의 없다. 두께는 0.25 m에서 0.5 m 사이가 적절하다고 할 수 있다. 그러나 최종적인 완충재의 두께는 이 범위 내에서 방사선적 안전성 측면과 진단시험을 포함한 열적-수리-역학적 성능 측면 그리고 경제적, 공학적 측면 등을 종합적으로 고려하여 결정하여야 할 것이다.

5.3 열전도도에 의한 완충재 두께

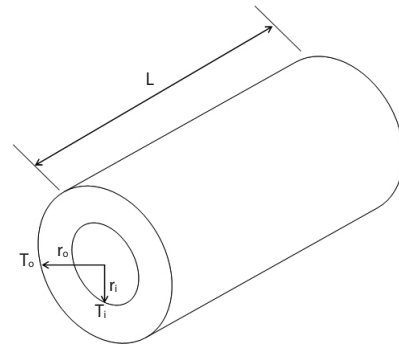


Fig. 4. Schematic diagram of a cylindrical container for its heat transfer explanation.

일반적으로 암반의 열전도도에 비해 완충재의 열전도도가 낮다. 따라서 완충재가 처분용기를 감싸게 되면 그만큼 용기의 표면온도가 상승한다. 용기의 온도는 대부분의 나라에서는 100℃ 이하로 규정하고 있다[1]. 만일 열전도도가 낮은 완충재의 두께가 커지면, 처분용기의 온도가 상승하고 그 결과 완충재의 방벽성능이 저하될 수 있다. 그러므로 완충재의 설계를 위해서는 사전에 완충재의 두께에 따른 처분용기의 표면온도를 분석하여 기준온도를 넘지 않는지를 사전에 가늠할 수 있어야 한다.

원통형 처분용기에서의 열전달은 푸리에(Fourier) 식(4)를 통해 계산할 수 있다. 보수적으로 원통 양단으로의 열전달은 무시하고 실린더 측면으로만 열이 외부로 확산된다고 가정하면, 실린더 층의 $r_i \rightarrow r_o$ 로 이동하는 열전달 식은 최종적으로 식 (5)와 같이 정리된다.

$$Q = kA_r \frac{\Delta T}{\Delta r} = k2\pi rL \frac{\Delta T}{\Delta r} \quad (4)$$

$$\therefore Q = 2\pi kL \frac{T_i - T_o}{\ln \frac{r_o}{r_i}} = \frac{T_i - T_o}{\frac{\ln \frac{r_o}{r_i}}{2\pi kL}} = \frac{T_i - T_o}{R_{th}} \quad (5)$$

여기서 R_{th} 는 층의 열저항이다. 여러 층이 직렬로 둘러싸여 있을 경우 $R_{th, total}$ 은 각층의 열저항의 산술적 합으로 나타내어진다.

완충재 두께 결정을 위해 기본 열계산에 사용된 조건은 다음과 같다. 암반온도 30℃ (=지표온도 15℃ + 지열구배 30℃/km × 심도 500 m), 내부 발열량 2,000 W, 암반 열전도도 3.2 W/mK, 완충재 열전도도 1.0 W/mK, 처분용기 반경

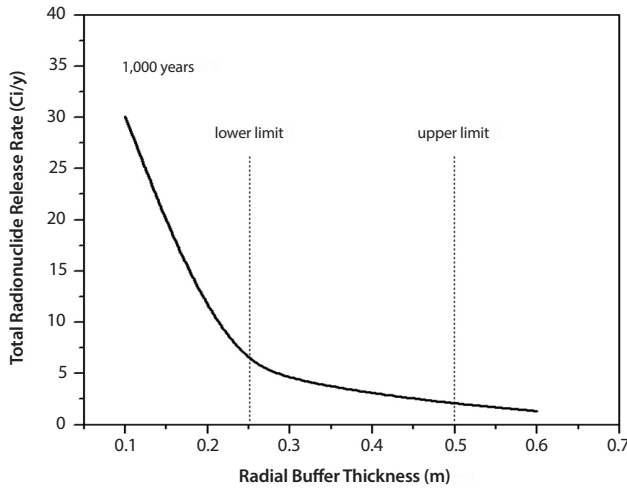


Fig. 5. Total release rate of radionuclides as a function of the radial thickness of buffer over 1,000 years after repository closure.

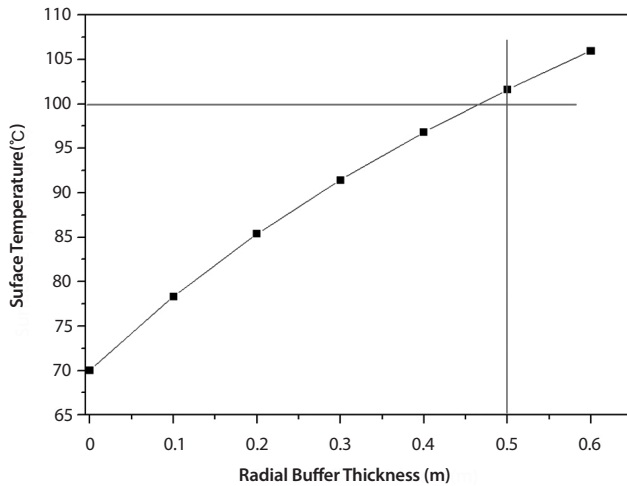


Fig. 6. Container surface temperature with respect to the radial thickness of buffer calculated using the eqn. (5).

$r_i=0.5$ m, 처분용기 길이 $L= 4.8$ m으로 하였다[3].

완충재가 없이 처분용기가 암반으로만 둘러싸여 있는 경우를 가정하고 용기표면 온도 70℃ ((100℃)의 평형을 유지한다고 할 때, 30℃가 되는 암반 지점은 식 (5)에 따라 약 $r_0=3.44$ m 지점이 된다. 처분용기 둘레에 완충재를 설치하고 이와 동일한 암반조건을 적용할 경우, 용기의 표면온도는 완충재 두께가 증가할수록 증가한다. Fig. 6는 계산결과를 그래프로 나타낸 것이다. 이 그림에서, 처분용기의 표면온도는 완충재 두께가 약 0.5 m 를 넘었을 때 100℃를 초과하게

되는데, 이것은 처분용기 표면온도 기준에 대한 완충재의 두께 설정 근거로 삼을 수 있다. 그러나 본 계산은 여러 가지가정을 전제로 한 단순계산이기 때문에, 향후 설계 시 정확한 계산을 위해서는 열-수리-역학적 전산코드를 이용한 열해석을 통해 보다 정확한 값을 제시할 필요가 있다.

5.4 두께 결정 결과 및 향후 과제

완충재의 전단거동 완충효과, 핵종 유출을 억제효과, 열전도 효과 등을 고려한 결과, 완충재 두께는 0.25 ~ 0.5 m 범위에서 적절한 성능을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 최종적인 완충재의 두께는 이러한 효과 외에도 경제적, 공학적 측면 등을 함께 고려하여 결정하여야 하며, 향후 추가적인 연구 결과를 바탕으로 보다 신뢰성 있는 값으로 최적화 하여야 한다.

6. 결론

본 연구에서는 완충재의 기능, 요구사항 및 성능기준을 분석하고, 완충재 개념 도출을 위한 주요 성능기준 인자항목으로 수리전도도, 핵종 저지능, 팽윤압, 열전도도, 역학적 특성치(mechanical properties), 유기물함량(organic carbon content), 일라이트화 속도(illitization rate) 등을 제시하였다. 우리나라 고준위폐기물처분장 기준 완충재 물질로서, 국산 벤토나이트 (Ca-벤토나이트)와 대안재료 MX-80 벤토나이트 (Na-벤토나이트)를 제안하였다. 기준 완충재의 기술사항은 Ca-벤토나이트 경우엔 우리나라의 성능기준을, Na-벤토나이트의 경우는 스웨덴의 성능기준을 보수적으로 만족하는 값으로 설정하였다. 완충재의 수리전도도는 1×10^{-11} m/s 이하, 팽윤압은 hydrostatic pressure + 1.0 MPa 이하, 핵종 확산계수는 양이온의 경우 1×10^{-11} m²/s, 음이온의 경우 1×10^{-9} m²/s 이하가 적합하였다. 또, 완충재의 두께는 전단거동, 핵종 유출, 열전도의 측면에서 평가하여 결정하였으며, 평가결과 완충재의 두께는 0.25 ~ 0.5 m 사이가 적절하였다.

우리나라는 아직 처분장 부지가 결정되지 않았다. 향후 상세 완충재 개념 설정을 위해서는 처분부지의 암반과 지하수의 지화학적 환경을 고려하여 설정되어야 한다. 그리고

완충재의 최종적인 두께는 향후 보다 심도 있는 열-수리-역학적 연구와 경제적, 공학적 측면을 고려하여 결정하여야 할 것으로 사료되었다.

감사의 글

본 논문은 미래창조과학부의 원자력연구개발 중장기계획사업의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] H.J. Choi and J.Y. Lee, 2011 State-of-the-Art: Geological Disposal Systems for High Level Wastes, KAERI/AR-894/2011 (2011).
- [2] Svensk Kärnbränslehantering AB(SKB), Final storage of spent fuel: KBS-3, Sweden (1983).
- [3] H.J. Choi, J.Y. Lee, S.S. Kim, S.K. Kim, D.G. Cho et al., Korean Reference HLW Disposal System, KAERI/TR-3563/2008 (2008).
- [4] W.J. Cho, J.O. Lee, K.S. Chun, and H.S. Park, "Analysis of functional criteria for buffer material in a high-level radioactive waste repository", J. of the Korean Nuclear Society, 31, 116-132 (1999).
- [5] J.W. Park, S.H. Park, K.H. Lee, S.M. Joo, K.S. Park et al., Establishment of a disposal system concept for underground research laboratory: Final report, KU-RIST-TR-002, Research Institute of Industrial Science and Technology(RIST) (2013).
- [6] D.W. Oscarson, H.B. Hume, and F. King, "Sorption of cesium on compacted bentonite", Clays Clay Miner 42(6), 731-736, (1994).
- [7] J.O. Lee, W.J. Cho, and H. Choi, "Sorption of cesium and iodide ions onto KENTEX-bentonite", Environmental Earth Sci., 70(5), 2387-2395 (2013).
- [8] M.N. Gray, "OECD/NEA International Stripa Project overview, Volume III: Engineered barriers", Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm, Sweden (1993).
- [9] R. Pusch, O. Karnland, H. Hokmark, T. Sanden, and L. Borgessonnet, Final report of the rock sealing project - sealing properties and longevity of smectite clay grouts, Stripa Project Report, TR-91-26, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm, Sweden (1991).
- [10] J.O. Lee and W.J. Cho, "Hydrothermal behaviors and long-term stability of bentonite buffer material", J. of the Korean Radioactive Waste Society, 5(2), 145-154 (2007).
- [11] K.Y. Kim, S.S. Kim, and J.W. Choi, "Review on the performance and requirement of buffer for radioactive waste disposal", J. Miner. Soc. Korea, 20(1), 10-18 (2007).
- [12] International Atomic Energy Agency, "Sealing of underground repositories for radioactive waste", Technical report series, No. 319, IAEA, Vienna (1990).
- [13] D.J. Cameron, Fuel waste isolation research for the Canada nuclear waste management program, Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-6834 (1982).
- [14] W.E. Coon, State-of-the-art report on potentially useful materials for sealing nuclear waste repositories, STRIPA Project Report, TR87-12, Sweden Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm (1987).
- [15] D.A. Dixon, M.N. Gray, S.C.H. Cheung, and B.C. Davidson, "The hydraulic conductivity of dense clay soils", Geotechnique in resource development, Proc. of 40th Canadian Geotechnical Conference, Regina, Saskatchewan, 389-396 (1987).
- [16] H.S. Moon, Clay mineralogy, 503, Mineumsa, Seoul (1995).
- [17] L.H. Johnson, J.C. Tait, D.W. Shoesmith, J.L. Crosthwaite, and M.N. Gray, The disposal of Canada's nuclear fuel waste: engineering barrier alternatives, Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-10718, COG-93-8 (1994).
- [18] R.N. Yong and B.P. Wakentin, Soil properties and be-

- havior, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam (1975).
- [19] R. Pusch, *The Buffer and Backfill Handbook. Part 1: Definitions, basic relationships, and laboratory methods*, SKB Technical Report, TR-02-20 (2002).
- [20] Dietrich Koch, "European bentonites as alternatives to MX-80", *Science and Technology Series*, 334, 23-30, Andra (2008).
- [21] P. Sellin, O. Karland, U. Nilsson, and S. Olsson, "Experimental study of sealing properties of commercial bentonites related to bentonite mineralogy and water solution composition, Conference abstracts of ANDRA 2nd International Meeting, March, 14-18 2005 in Tours", *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, 229 (2005).
- [22] J.H. Noh, "Mineralogical and Petrochemical Characteristics of Domestic Bentonites and Their Genetic Significance", *J. Geological Society of Korea*, 38, 441-455 (2002).
- [23] C.H. Kang, *High Level Radwaste Disposal technology/ Geological disposal system development*, KAERI/RR- 2336/2002 (2002).
- [24] J.O. Lee and W.J. Cho, *Thermal-hydro-mechanical properties of reference bentonite buffer for a Korean HLW repository*, KAERI/TR-3729/2009 (2009).
- [25] M. Naito, Y. Saito, K. Tanni, and M. Yui, "Earthquake induced rock shear through a deposition hole", *J. Power and Energy Systems*, 3(1)(2009).
- [26] Svensk Kärnbränslehantering AB(SKB), *Earthquake induced rock shear through a deposition hole*, Technical Report TR-10-33 (2010).
- [27] H.J. Choi, J.Y. Lee, J.W. Choi, M.S. Lee, D.G. Cho et al., *High-level waste long-term management technology development: Development of a geological disposal system*, KAERI/RR- 3417/2011(2011).