

## 우리나라 고준위폐기물처분장 기준벤토나이트완충재의

### 열-수리-역학적 특성치

이재완<sup>1)\*</sup>, 조원진<sup>1)</sup>, 권상기<sup>2)</sup>

## Thermal-hydro-mechanical Properties of Reference Bentonite Buffer for a Korean HLW Repository

Jaе Owan Lee, Won Jin Cho, Sangki Kwon

**Abstract** Bentonite buffer is one of the major components of an engineered barrier for an HLW (High-Level Waste) repository. The bentonite buffer is significantly exposed to the decay heat from radioactive wastes, the inflow of groundwater from the surrounding rock of the repository, and the high swelling pressure of densely-compacted bentonite that comes in contact with the groundwater. Therefore, it is essential to understand the THM (Thermal-Hydro-Mechanical) behavior of the bentonite buffer and to acquire the input data of its related constitutive models for the performance and safety assessment of an HLW repository. This paper analyzed the THM properties which have been obtained by conducting laboratory tests with a candidate buffer material for a Korean HLW repository. Moreover the formulation recipe of the reference bentonite buffer was defined on the basis of functional criteria, thus suggesting the THM properties which correspond to the formulation recipe of the reference bentonite buffer.

**Key words** Korean high-level waste repository, Buffer, Bentonite, Thermal-hydro-mechanical properties

**초 록** 고준위폐기물처분장에서 벤토나이트완충재는 공학적방벽의 중요한 구성요소 중 하나이다. 벤토나이트완충재는 방사성폐기물로부터의 붕괴열, 주위 암반으로부터의 지하수 유입, 고밀도로 압축된 벤토나이트 자체의 높은 팽윤압에 의해 큰 영향을 받는다. 그러므로 벤토나이트완충재의 열-수리-역학적 특성 이해와 평가모델의 입력데이터 확보는 고준위폐기물처분장의 성능 및 안전성 평가를 위해서 선행되어야 할 중요한 과제이다. 본 논문에서는 우리나라 고준위폐기물처분장 완충재 후보물질을 대상으로 지금까지 수행된 열-수리-역학적 특성을 분석하고, 기준벤토나이트완충재 조건을 설정하여, 이 조건에 부합되는 벤토나이트완충재의 열-수리-역학적 특성치를 제시하였다.

**핵심어** 한국의 고준위폐기물처분장, 완충재, 벤토나이트, 열-수리-역학적 특성치

### 1. 서 론

우리나라는 고준위폐기물 처분기술개발의 연구결과로서 2002년에 기준처분시스템(Fig. 1)을 제안한 바 있다. 이 기준처분시스템의 설계개념에 따르면, 처분장은

지하 수 백 미터의 결정질 암반에 위치하며, 처분폐기물은 처분용기(disposal container)에 넣은 후 처분터널 바닥에 굴착하여 만든 처분공(borehole)에 정치시키고, 처분용기와 처분공의 암반 벽 사이에는 완충재 (buffer)를 설치하도록 되어 있다(강철형 등, 1999; 최희주 등, 2008).

고준위폐기물처분장에서 완충재는 공학적방벽의 중요한 구성요소 중 하나로서, 주위 암반으로부터의 지하수 유입을 최소화하고, 지하수에 의해 용해된 핵종이 폐기물로부터 유출되는 것을 저지하며, 외부의 역학적 충격으로부터 폐기물과 처분용기를 보호하는 역할을 한

<sup>1)</sup> 한국원자력연구원 방사성폐기물 기술개발부 책임연구원

<sup>2)</sup> 인하대학교 에너지자원공학과 부교수

\* 교신저자 : jolee@kaeri.re.kr

접수일 : 2011년 7월 20일

심사 완료일 : 2011년 8월 16일

게재 확정일 : 2011년 8월 25일

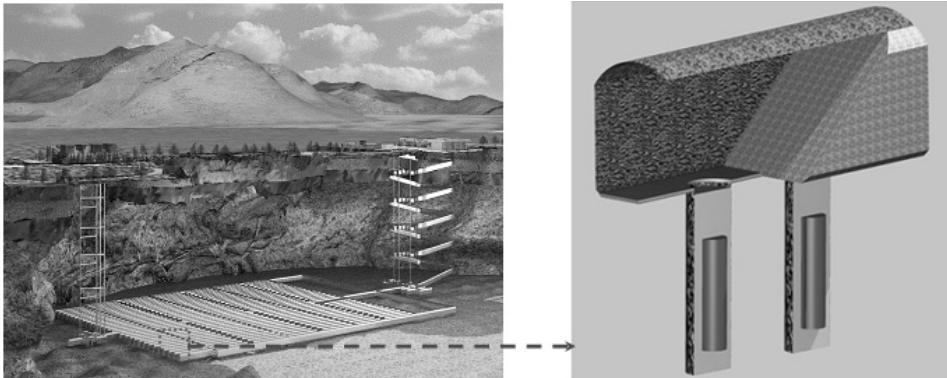


Fig. 1. Conceptual picture of KRS (Korean Reference disposal System) for high-level wastes

다. 우리나라는 기준처분시스템의 완충재 물질로 국산 벤토나이트의 사용을 고려하고 있으며, 처분장에 설치할 완충재는 방벽성능과 제작/설치 시 작업성을 감안하여 블록형태의 압축벤토나이트를 사용할 예정이다.

고준위폐기물처분장에서 벤토나이트완충재는 방사성 폐기물로부터 발생하는 붕괴열, 주위 암반으로부터의 지하수 유입 및 완충재로 사용된 압축벤토나이트 자체로부터 발생하는 높은 팽윤압에 의해 크게 영향을 받는다. 이러한 이유로 벤토나이트완충재에 대한 열-수리-역학적 특성 이해와 평가모델의 입력데이터 확보는 고준위폐기물처분장의 성능 및 안전성 평가를 위해서 선행되어야 할 중요한 과제로 인식되고 있다.

이와 관련하여, 본 논문에서는 우리나라 고준위폐기

물처분장 완충재 후보물질을 대상으로 지금까지 수행된 열-수리-역학적 특성을 분석하고, 처분장 성능기준을 만족하는 기준벤토나이트 완충재조건을 설정하여 이 조건에 부합되는 열-수리-역학적 특성치를 제시함으로써, 향후 수행될 우리나라 고준위폐기물처분장의 성능 및 안전성 평가에 필요한 기초자료를 제공하고자 하였다.

## 2. 벤토나이트 완충재물질

우리나라 벤토나이트는 대부분 Ca-형 벤토나이트로서, 신생대 제3기충군 지역인 한반도 동남쪽의 경주, 울산, 포항 일대에 분포하고 있다(Fig. 2 참조). 한국원자

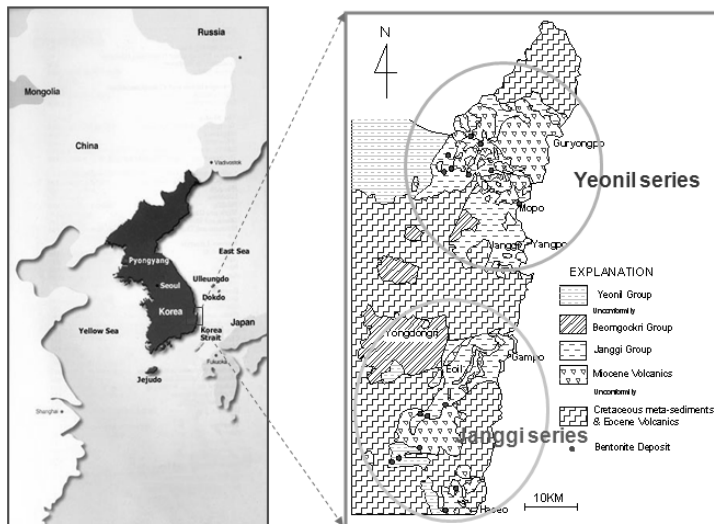


Fig. 2. Location map of domestic bentonite deposits

력연구원에서는 고준위폐기물처분장 원층재 후보물질로서 경주시 양남면 소재 진명광산에서 채취한 벤토나이트(이하 “경주벤토나이트”라 칭함)를 대상으로 원층재의 기본물성을 측정하 바 있다(강철형 등, 1999).

경주벤토나이트는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 몬모릴로나이트 70%, 장석 29%, 석영 ~1%의 구성비율을 가졌으며, 화학조성은 Table 1과 같다. 대부분 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 차지하였고, CaO는 NaO보다 높은 구성비율을 나타내고 있다. 양이온 교환능(CEC)은 57.6 meq/100 g이며, 비중과 표면적은 각각 2.74와 347.6 m<sup>2</sup>/g이었다. 그밖에 액상한계 244.5%, 소성한계 46.1%를 보였으며 소성지수는 198.4%이었다.

기준처분시스템에서 벤토나이트원층재는 원광을 건조, 분쇄 한 후 200 메쉬 ASTM 망체를 통과시킨 분말 (Fig. 4 참조)을 일정한 건조밀도의 블록으로 만들어 사

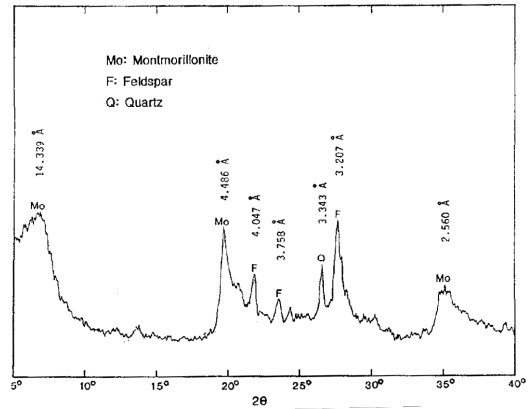


Fig. 3. X-ray diffraction pattern of Kyeongju bentonite

Table 1. Chemical composition of Kyeongju bentonite

Chemical constituents	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	FeO	SO <sub>3</sub>	MnO
Weight %	56.80	19.96	6.03	2.59	0.77	0.93	1.25	0.15	1.28	0.04

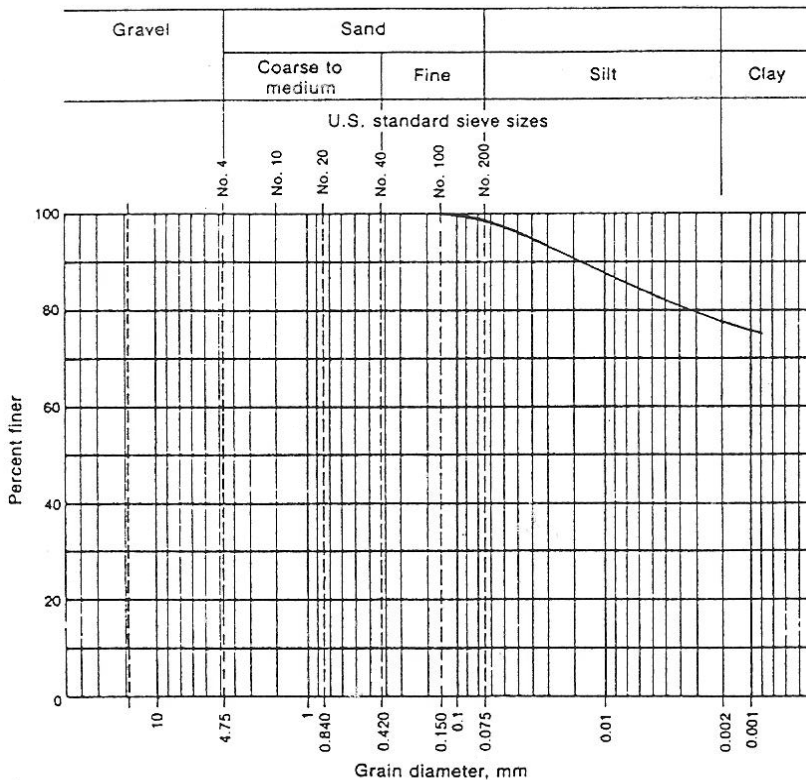


Fig. 4. Particle size distribution of powdered Kyeongju bentonite

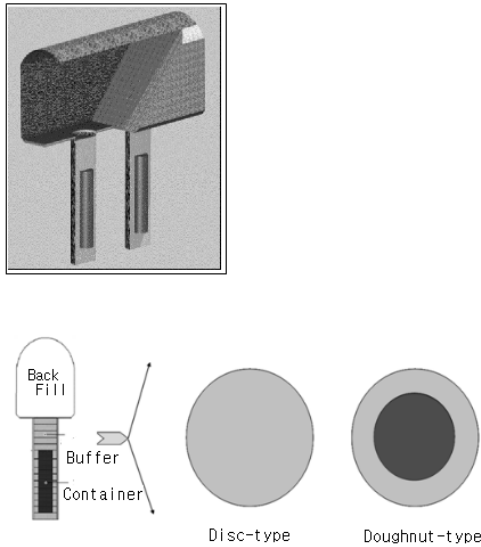


Fig. 5. Schematic pictures of the engineered barrier and bentonite buffer of Korean reference disposal system

용한다. 이 때 벤토나이트완충재블록은 처분터널 바닥의 처분공에 처분용기를 설치한 후 그 주위에 설치하게 되는데, Fig. 5와 같이 처분용기 측면에는 도넛(doughnut) 모양을, 그리고 처분용기 상하부에는 디스크(disc) 모양의 완충재블록을 사용한다.

### 3. 국산 벤토나이트의 열-수리-역학적 특성

벤토나이트완충재의 열적 특성은 처분된 폐기물로부터 발생하는 붕괴열을 주위 압반으로 신속히 발산시켜, 폐기물고화체, 처분용기 및 완충재의 온도가 설정된 최고온도를 넘지 않도록 하는데 중요한 역할을 한다. 열전도도는 물체의 단위온도 차에서 단위면적을 통하여 단위시간당 흐르는 열의 양으로 표시된다. 경주벤토나이트 블록의 열전도도는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 건조밀도와 수분함량의 변화에 민감하였다(조원진 등, 2008). 수분 함량이 일정할 때, 벤토나이트블록의 열전도도는 건조밀도가 증가할수록 증가하였으며, 건조밀도가 일정한 경우에는 수분 함량이 증가할수록 증가하였다. 각 건조밀도에서 수분함량의 증가에 따른 열전도도 변화는 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있었다.

$$k = 0.0378 \omega_w - 0.0571 (\rho_d = 1,2 \text{ Mg/m}^3) r^2 = 0.92 \quad (1)$$

$$k = 0.0681 \omega_w - 0.2519 (\rho_d = 1,4 \text{ Mg/m}^3) r^2 = 0.95 \quad (2)$$

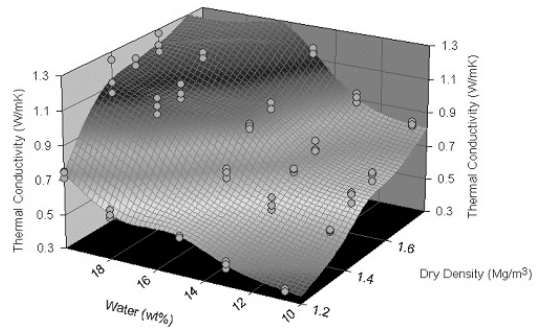


Fig. 6. Thermal conductivities as a function of the dry density and water content of Kyeongju bentonite blocks

$$k = 0.0599 \omega_w - 0.0232 (\rho_d = 1,5 \text{ Mg/m}^3) r^2 = 0.97 \quad (3)$$

$$k = 0.0640 \omega_w - 0.0236 (\rho_d = 1,6 \text{ Mg/m}^3) r^2 = 0.95 \quad (4)$$

$$k = 0.0574 \omega_w + 0.2129 (\rho_d = 1,8 \text{ Mg/m}^3) r^2 = 0.94 \quad (5)$$

여기서  $k$ 는 열전도도(W/mK),  $\omega_w$ 는 수분함량(wt%),  $\rho_d$ 는 건조밀도(Mg/m<sup>3</sup>)이다.

고준위폐기물처분장에서 완충재의 가장 중요한 요구사항은 수리전도도가 가능한 한 낮아야 한다는 것이다. 수리전도도가 높을 경우, 완충재가 차수 방벽 역할을 할 수 없기 때문이다. 완충재의 수리전도도는 매질이 물을 통과시키는 척도로서, Darcy의 법칙에 따라 단위 면적당 수리구배에 대한 유량으로 정의된다. 수리전도도 값은 건조밀도에 따라 달라지며 방사성핵종의 붕괴열로 인한 완충재의 온도 상승과 해수 침투에 의한 지하수 중 염도(salinity) 변화에도 영향을 받는다. 실험결과, 경주 벤토나이트 블록의 수리전도도( $K$ )는 건조밀도에 따라 감소하였다(조원진 등, 1999). Fig. 7에서 보는 바와 같이 반대수좌표 상에서 직선관계 보였으며, 다음과 같은 관계식으로 표시되었다.

$$\text{Log } K = - 4.07\rho_d - 6.13 \text{ (at } 20^\circ\text{C)} r^2 = 0.92 \quad (6)$$

여기서  $\rho_d$ 는 벤토나이트블록의 건조밀도,  $r^2$ 는 상관계수이다. 경주 벤토나이트블록의 수리전도도는 온도가 증가할수록 증가하였다. 20°C에서의 수리전도도 값에 비해 80°C에서는 수리전도도가 약 3~4배 정도로 증가하였고, 150°C에서 수리전도도 값은 건조밀도가 1.8

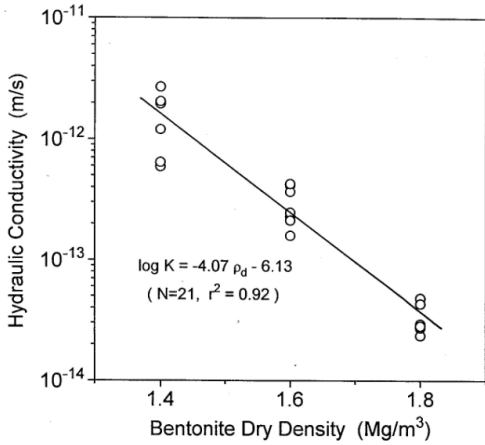


Fig. 7. Hydraulic conductivities of Kyeongju bentonite blocks bentonites as a function of dry density

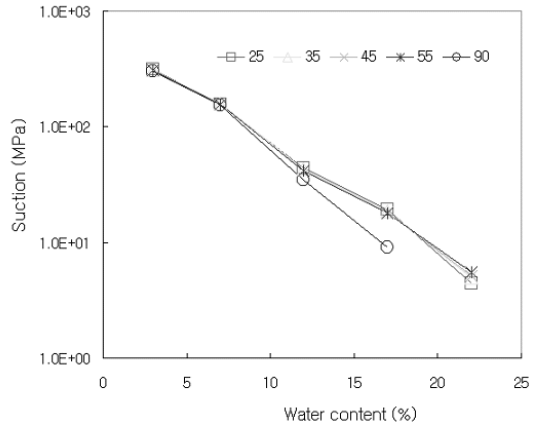


Fig. 8. Suction versus water content relationships at 25°C, 35°C, 45°C, 55°C, 90°C

Mg/m<sup>3</sup>인 경우 약 1 승수(order) 정도 증가하였으나, 그 보다 낮은 밀도에서는 증가폭이 다소 작았다. 수리전도도에 대한 염도(salinity)의 영향은 건조밀도가 상대적으로 낮은 블록에서 현저히 나타났다. 벤토나이트 블록의 건조밀도가 1.0 Mg/m<sup>3</sup> 및 1.2 Mg/m<sup>3</sup>일 때는 투과수(permeating water) 중 NaCl의 농도가 증가함에 따라 수리전도도가 증가하였다. 그러나 건조밀도가 1.4 Mg/m<sup>3</sup> 이상일 때는 NaCl의 농도 변화에 상관없이 수리전도도는 거의 일정한 값을 보였다.

처분장 완충재로 사용되는 벤토나이트 블록은 폐기물 처분 후 일정기간 동안 불포화 상태로 존재하며, 이러한 벤토나이트 블록의 재포화나 방벽성능은 흡인력(suction)이나 수확산계수(water diffusion coefficient)에 의해 좌우된다. 분말 및 블록 벤토나이트의 흡인력은 습도센서를 이용해서 상대습도를 측정하고, 다음의 Kelvin 식을 이용해서 측정된 상대습도로부터 흡인력(S)을 결정하였다(Fredlund and Rahardjo, 1993).

$$S = -10^{-6} \frac{RT}{V_w} \ln\left(\frac{RH}{100}\right) \quad (7)$$

여기서 R은 기체상수(8.3143 J/Kmol), T는 절대온도, V<sub>w</sub>는 물의 몰체적(1.8x10<sup>-5</sup> m<sup>3</sup>/mol)이다. Fig. 8과 Fig. 9에서 보는 바와 같이, 경주 벤토나이트블록의 흡인력은 온도가 일정할 경우 수분함량이 증가할수록 감소하였으나, 온도에는 크게 영향을 받지 않았다. 또, 압축 벤토나이트블록은 분말 벤토나이트의 값과 비교했을 때 수분함량 10 wt% 이하에서는 분말벤토나이트보다 큰 흡인력을 나타내었으나 그 수분함량 이상에서는 오히

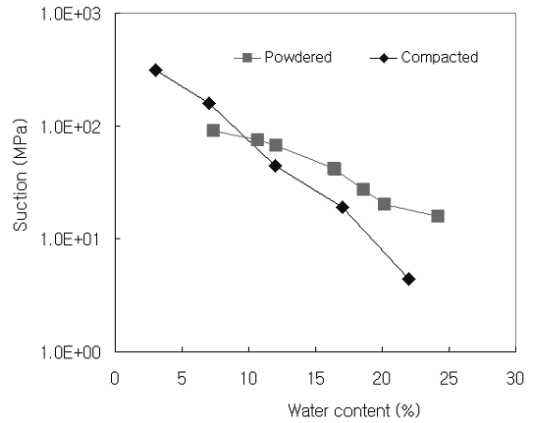


Fig. 9. Suction versus water content relationships for powdered and compacted bentonites

려 반대 경향을 보였다(Lee et al., 2011). 벤토나이트 블록의 수확산계수는 확산모델을 이용, 실험에서 얻어진 수분분포로부터 결정하였다(Lee et al., 1999). 건조밀도가 1.4~1.8 Mg/m<sup>3</sup>일 때 경주 벤토나이트블록의 수확산계수는 4.3x10<sup>-10</sup>~1.93x10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/s 범위의 값을 보였으며, 건조밀도가 증가할수록 감소하였다.

완충재의 중요한 기능 중 하나는 밀봉역할이다. 처분장내 공극을 최소화하고 주위 암반의 균열을 메워 지하수의 이동을 최대한 지연시키는 역할이다. 완충재의 팽윤압은 제한된 공간에서 지하수와 접촉한 벤토나이트가 수화반응의 결과로 외벽에 작용하는 압력으로서, 완충재의 밀봉 척도가 된다. 벤토나이트 블록의 팽윤압은 주로 건조밀도, 수분함량, 이온강도 및 온도 등에 의해

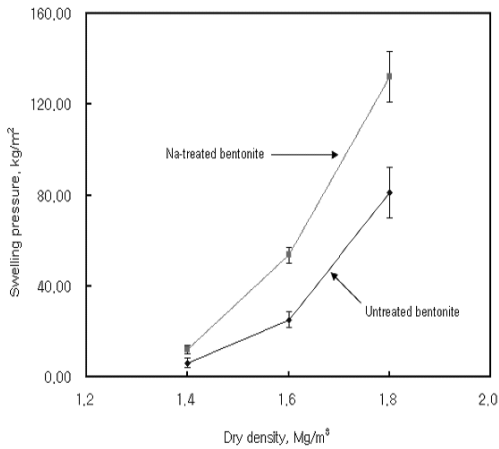


Fig. 10. Swelling pressures of Kyeongju bentonite blocks as a function dry density

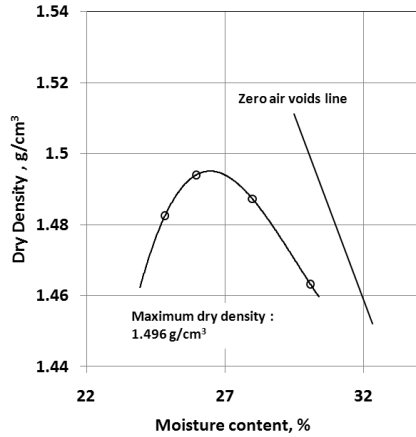


Fig. 11. Compaction curve of Kyeongju bentonite blocks

Table 2. Unconfined compressive strength, Young's modulus, and Poisson's ratio of Kyeongju bentonite blocks

Material	Dry density (g/cm³)	Water content (%)	Unconfined compressive strength (MPa)	Young's modulus (x10² MPa)	Poisson's ratio
Kyungju Bentonite	1.4	17.0	0.55	0.59	0.05
	1.6	17.0	4.90	7.84	0.20
		17.0	4.90	5.88	0.18
	1.8	17.0	7.84	10.79	0.21
		17.0	8.83	12.75	0.20

영향을 받는다. 경주 벤토나이트블록(untreated bentonite)의 경우, 팽윤압은 Fig. 10에서 보는 바와 같이, 건조밀도가 1.4~1.8 Mg/m³일 때 0.4~9.5 Mpa 사이의 값을 보였으며, 건조밀도가 커질수록 증가하였다(Lee et al, 2005). 벤토나이트 블록 제작 시 초기수분함량이 팽윤압에 미치는 영향을 조사한 결과, 팽윤압은 초기수분함량이 12 wt.%가 될 때 까지는 감소하였지만, 그 이상의 초기수분함량에서는 거의 변화가 없었다. 벤토나이트의 블록의 팽윤압은 투과수의 이온강도가 증가할수록 감소하였다. 이러한 감소 추세는 이온강도가 높을수록, 또 건조밀도가 증가할수록 둔화되었다. 경주벤토나이트 블록의 팽윤압은 80℃까지의 온도 증가에 대해서는 거의 변화가 없었다.

원충재의 역학적 특성은 외부의 충격이나 하중으로부터 폐기물을 보호하고 공학적방벽의 역학적 건전성을 보장한다. 실내실험을 통하여, 경주 벤토나이트블록의 다짐특성, 일축압축강도, 탄성계수, 포아송비, 전단강도 및 압밀특성 등을 조사하였다(강철형 등, 1999). 벤토나이트 블록의 다짐정도는 건조밀도로 표시된다. 벤토나

이트블록의 건조밀도는 수분함량과 다짐방법 등에 따라 달라지며, 동일한 다짐방법을 적용했을 때 건조밀도는 수분함량에 따라 달라진다. 수분함량에 따른 경주 벤토나이트블록의 건조밀도 변화는 Fig. 11과 같다. 이 그림에서 보는 바와 같이, 건조밀도는 그 값이 1.5 Mg/m³ 이하의 범위에 있을 때 수분함량이 증가함에 따라 증가하다가 수분함량이 26.6wt.% 이상에서는 감소하는 경향을 보였다.

일축압축시험에서는 시료를 축방향으로만 압축하고 그 때의 응력(stress), 축방향 변형률(axial strain), 측면방향 변형률(lateral strain)을 측정하여 일축압축강도, 탄성계수 및 포아송비를 결정하였다. Table 2는 경주 벤토나이트블록에 대한 일축압축시험 결과이다. Fig. 12에서 보는 바와 같이, 일축압축강도와 탄성계수는 건조밀도가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하였지만, 포아송비에서는 상관관계식을 찾을 수 없었다.

벤토나이트 블록의 전단강도는 비압밀-비배수 조건에서의 삼축압축시험법으로 측정하였다. 삼축압축시험에서 전단강도(shear strength, τ)는 다음과 같이 점착력

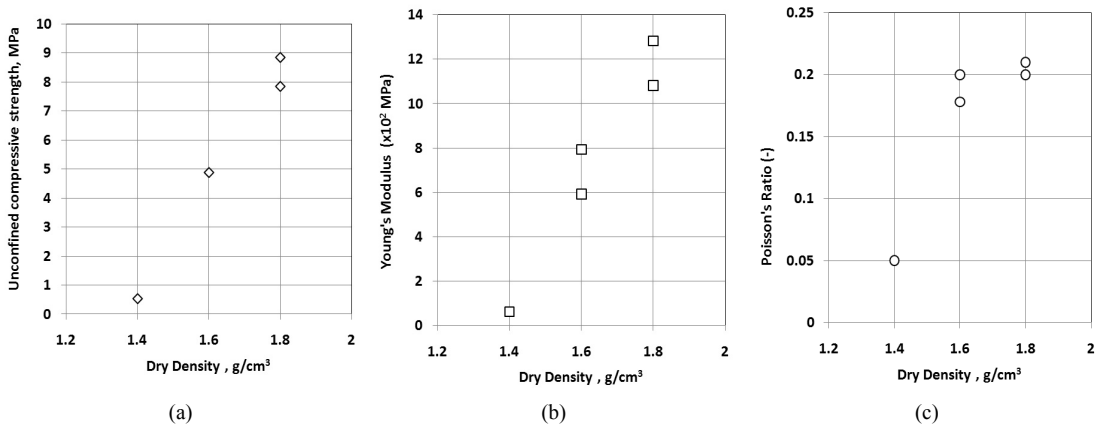


Fig. 12. Unconfined compressive strength, Young's modulus, Poisson's ratio of Kyeongju bentonite blocks

Table 3. Cohesion and internal friction angle of Kyeongju bentonite blocks

Material	Dry density (g/cm³)	Water content (wt,%)	Cohesion (kPa)	Internal friction angle (degree)
Kyungju Bentonite	1.4	17	500	27
	1.6	17	1000	37
	1.8	17	1100	50

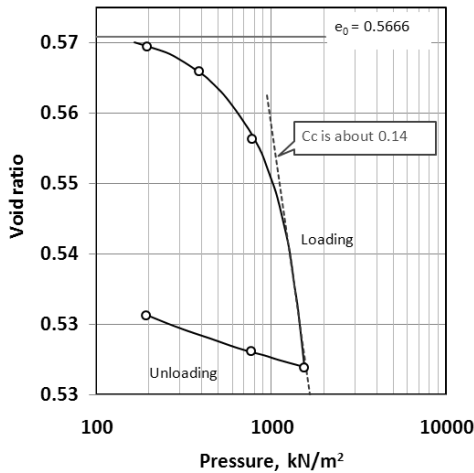


Fig. 13.  $e - \log \sigma'$  curve of Kyeongju bentonite blocks

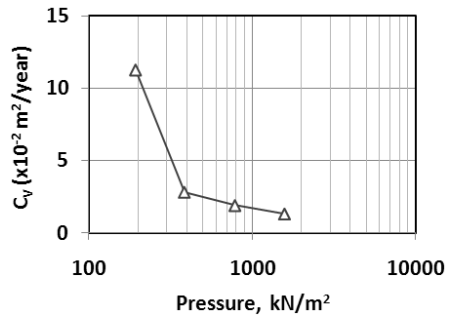


Fig. 14.  $C_v - \log \sigma'$  curve of Kyeongju bentonite blocks

(cohesion,  $c$ )과 내부마찰각(internal friction angle,  $\phi$ ) 및 파괴가 일어나는 응력작용면에서 수직응력(vertical stress,  $\sigma$ )의 관계식으로 표시된다.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (8)$$

경주 벤토나이트블록에 대한 측정결과는 Table 3과 같

다. 이 표에서 보는 바와 같이 점착력과 내부마찰각은 건조밀도가 증가할수록 증가하였고, 그 결과 전단강도가 증가함을 예상할 수 있다.

압밀(consolidation)은 지하수로 포화된 벤토나이트블록에 하중이 가해졌을 때 블록 간극 내에 존재하는 공극수가 빠져나가면서 블록이 침하되는 현상이다. Fig. 13과 Fig. 14는 각각 압밀시험에서 얻어진  $e - \log \sigma'$  곡

**Table 4.** Consolidation parameters of Kyeongju bentonite blocks

Material	Compression index, $C_c$ (-)	Coefficient of consolidation, $C_v$ ( $m^2/yr$ )	Coef. of volume compressibility, $m_v$ ( $m^2/MN$ )
Kyungju Bentonite	0.14	0.018	0.0214

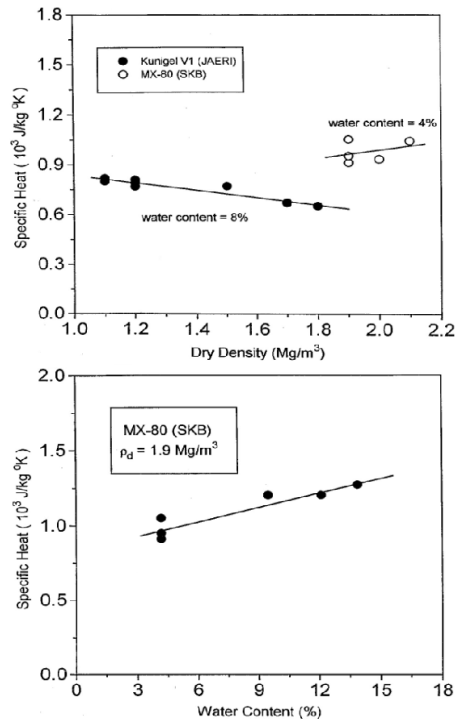
**Table 5.** Functional criteria of buffer for a Korean HLW repository

Basic Properties	Reference Value
Dry density ( $Mg/m^3$ )	> 1.6
Hydraulic conductivity ( $m/s$ )	< $10^{-12}$
Swelling pressure (MPa)	< 15
Mechanical properties	
- Unconfined compression strength (MPa)	> 4.9
- Young's modulus ( $\times 10^2$ MPa)	> 5.9
- Poisson's ratio	0.05 ~ 0.21
- Cohesion (kPa)	500 ~ 1000
- Internal friction angle (degree)	27 ~ 37
- Coefficient of consolidation ( $m^2/yr$ )	0.018 ~ 0.115
Thermal conductivity ( $W/m \text{ } ^\circ K$ )	> 0.8
Organic carbon content (wt %)	< 0.3

선과  $C_v$  - log  $\sigma$ 곡선을 나타내며, Table 4는 압축지수 (compression index,  $C_c$ ), 압밀계수(coefficient of consolidation,  $C_v$ ), 체적변형계수(coefficient of volume compressibility,  $m_v$ ) 등을 정리한 것이다. 시험결과, 경주 벤토나이트블록은  $C_c = 0.14$ ,  $C_v = 0.18 \text{ m}^2/yr$ ,  $m_v = 0.0214 \text{ m}^2/MN$ 의 값을 보였다.

#### 4. 기준벤토나이트완충재의 열-수리-역학적 특성치

우리나라는 고준위폐기물 처분시스템이나 처분부지가 아직 확정되지 않았기 때문에, 향후 고준위폐기물처분장의 완충재 개발 및 관련 처분기술의 효율적이고 체계적인 연구를 위해서는 기준벤토나이트완충재의 선정이 필요하다. 한국원자력연구원에서는 기준벤토나이트 완충재 선정을 위해서 고준위폐기물처분장 완충재 요구사항들을 분석하고, 우리나라 고준위폐기물처분장에 적합한 완충재 성능기준(Table 5 참조)을 설정한 바 있으며(Cho, W.J. et al., 1999), 이를 바탕으로 Table 5의 성능기준을 보수적으로 만족하는 기준완충재조건을 설정하였다. 본 논문에서는 앞 장에서 기술한 현재까지의 실험결과를 토대로 기준벤토나이트완충재의 열-수리-역학적 특성치를 제시하였으며, 아직까지 실험이 수행되지 않은 특성치(비열, 열팽창계수)에 대해서는 문헌



**Fig. 15.** Specific heats measured by JNC (1999)와 Knutsson (1983)



**Table 6.** Thermal expansion coefficients measured by Borgesson et al. (1988)

Material	Dry density (g/cm <sup>3</sup> )	Water content (wt.%)	Thermal expansion coeff. (1/K)	Temperature (°C)
MX-80	1.2	13	3.1x10 <sup>-4</sup>	20-60
	1.5	33	3.01x10 <sup>-4</sup>	
	1.65	27	2.2x10 <sup>-4</sup>	

**Table 7.** Thermal-hydro-mechanical properties of reference bentonite buffer for a Korean HLW repository

Material property	Value
Reference bentonite buffer	
-Bentonite	Kyeongju bentonite
-Specific gravity (-)	2.74
-Initial water content (wt.%)	13
-Dry density (Mg/m <sup>3</sup> )	1.6
-Porosity (-)	0.41
Thermal-hydraulic-mechanical properties	
-Thermal conductivity (W/m K)	0.8
-Specific heat (kJ/kg K)	1.0
-Thermal expansion coefficient (1/K)	2.5 x 10 <sup>-4</sup>
-Hydraulic conductivity (m/s)	3 x 10 <sup>-13</sup>
-Suction potential (MPa)	50
-Swelling pressure (MPa)	3.0
-Unconfined compression strength (MPa)	5.0
-Young's modulus (x 10 <sup>2</sup> MPa)	5.9
-Poisson's ratio	0.18
-Cohesion (kPa)	1000
-Internal friction angle (degree)	37
-Coeff. of volume compressibility (m <sup>2</sup> /MN)	0.021
-Coeff. of consolidation (m <sup>2</sup> /yr)	0.018
-Compression index (-)	0.14

데이터 분석과 전문가 판단(expert judgment)을 통하여 추정, 제시하였다.

JNC(1999)와 Knutsson(1983)에 의하면, 압축벤토나이트의 비열(단위질량의 물질 온도를 1°C 높이는 데 필요한 열량)은 주어진 건조밀도와 수분함량 범위에서 대략 0.6~1.3 kJ/kgK의 값을 보였으며, 수분함량이 증가할수록 증가하였고, 건조밀도에 대해서는 증감추세가 명확하지 않았다(Fig. 15 참조). 열팽창계수는 온도 상승에 따른 물질의 부피변화를 나타내는 인자로서, 압축벤토나이트를 대상으로 측정된 값은 Borgesson 등(1988)에 의해 보고된 것이 유일하다. 이들은 포화된 압축벤토나이트를 대상으로 20~60°C 온도범위에서 실험을 하였는데, 측정된 열팽창계수는 Table 6에서 보는 바와 같이 건조밀도가 증가함에 따라 감소하였으나, 그 정도는 크지 않았다.

우리나라 고준위폐기물처분장 기준벤토나이트완충재

의 열-수리-역학적 특성치를 요약하면 Table 7과 같다.

## 5. 맺음말

본 논문에서는 우리나라 고준위폐기물처분장 완충재 후보물질을 대상으로 수행된 열-수리-역학적 특성을 분석하고, 보수적인 완충재 성능기준을 만족하는 기준벤토나이트완충재의 열-수리-역학적 특성치를 제시하였다. 지금까지의 실험데이터와 문헌의 데이터를 분석한 결과, 기준벤토나이트 완충재 조건에서의 열전도도는 0.8 W/m K, 비열 1.0 kJ/kg K, 열팽창계수 2.5 x 10<sup>-4</sup> 1/K, 수리전도도 3 x 10<sup>-13</sup> m/s, 흡인력 50 MPa, 팽윤압 3.0 MPa, 일축압축강도 5.0 MPa, 탄성계수 5.9 x 10<sup>2</sup> MPa, 포아송비 0.19, 점착력 1000 kPa, 내부마찰각 37°, 압축지수 0.14, 압밀계수 0.018 m<sup>2</sup>/yr, 체적변형계수 0.021 m<sup>2</sup>/MN이었다.

본 논문에서 제시된 특성치 중 비열과 열팽창계수의 값은 문헌데이터 분석과 전문가판단에 근거하여 결정된 것이기 때문에 추후 실험을 통해 확인할 필요가 있으며, 또한 완충재의 열-수리-역학적 특성치는 처분시스템과 밀접한 관계가 있고, 일부 특성치는 처분시스템에 따라 상당히 달라질 수 있기 때문에 향후 처분시스템이 확정되면 시스템의 성능 및 안전성에 대한 상세 평가를 하기 위해 보다 광범위한 실측을 통해 보정을 한 후 사용하여야 할 것이다.

**감사의 글**

본 연구는 교육과학기술부의 원자력연구개발 중장기 계획사업의 일환으로 수행되었습니다.

**참고문헌**

1. 강철형, 구정의, 김성기, 김승수, 김진웅, 박정화, 이연명, 이재완, 전관식, 조원진, 최종원, 황용수, 권상기, 1999, 고준위폐기물처분기술개발: 심지층처분시스템개발. 한국원자력연구원, KAERI/RR-2013/99, p. 519.
2. 조원진, 이재완, 권상기, 2008, 압축벤토나이트 및 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도. 방사성폐기물학회지, Vol. 6(2), p. 101-109.
3. 조원진, 전관식, 이재완, 1999, 고준위폐기물처분장 완충재용 국산 압축벤토나이트의 수리전도도에 미치는 건조

- 밀도와 온도의 영향. 한국원자력연구원, KAERI/TR- 1223/99.
4. 최희주, 이종열, 조동진, 김성기, 김승수, 김진영, 정종태, 이민수, 최종원, 이재완, 전관식, 김풍오, 2008, 한국형 고준위폐기물 처분시스템. 한국원자력연구원, KAERI/TR-3563/2008.
5. Borgesson, L., Hokmark, H., and Karnland, O., 1988, Rheological properties of sodium smectite clay. SKB Technical Report 88-30.
6. Cho, W.J., Lee, J.O., Chun, K.S., and Park, H.S., 1999, Analysis of Functional Criteria for Buffer Material in a High-level Radioactive Waste Repository. J. of the Korean Nucl. Soc., Vol. 31, No. 1, pp. 116-132.
7. Fredlund, D.G., Rahardjo, H., 1993, Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons Inc., NY, pp. 517.
8. JNC, 1999. H12 Project to establish technical basis for HLW disposal in Japan. Supporting Report 2, Japan Nuclear Cycle Development Institute, Japan.
9. Knutsson, S., 1983, On the thermal conductivity and thermal diffusivity of highly compacted bentonite. SKR Technical Report 83-72.
10. Lee, J.O., Goh, E.O., Cho, W.J., Hyun, J.H., Chun, K.S., 1999, Water diffusion and resaturation of compacted bentonite. J. of Korean Solid Wastes Engineering Soc., Vol. 4(1), pp. 51-56.
11. Lee, J.O. and Cho, W.J., 2005, Swelling pressures of an untreated and a Na-treated bentonite. 방사성폐기물학회, 춘계학술발표회.
12. Lee, J.O., Cho, W.J., Kwon, S., 2011, Suction and water uptake in unsaturated compacted bentonite. Annals of Nuc. Energy, 38, pp. 520-526.

**이재완**



1981년 영남대학교 공과대학 화학공학과 학사  
 1983년 고려대학교 대학원 화학공학과 공학석사  
 1998년 한국과학기술원 원자력공학과 공학박사

Tel: 042-868-2852  
 E-mail: jolee@kaeri.re.kr  
 현재 한국원자력연구원 방사성폐기물 기술개발부 책임연구원

**조원진**



1979년 고려대학교 화학공학과 공학사  
 1984년 한국과학기술원 핵공학과 공학석사  
 1990년 한국과학기술원 핵공학과 공학박사

Tel: 042-868-8122  
 E-mail: wjcho@kaeri.re.kr  
 현재 한국원자력연구원 방사성폐기물 기술개발부 책임연구원

**권상기**



1987년 서울대학교 자원공학과 공학사  
 1989년 서울대학교 자원공학과 공학석사  
 1996년 University of Missouri-Rolla, Mining Eng. 공학박사

Tel: 010-9661-4774  
 E-mail: kwonsk@inha.ac.kr  
 현재 인하대학교 에너지자원공학과 부교수