

TECHNICAL NOTES

완충재 설계시 고려사항 및 고기능 완충재 연구 현황

이기준¹, 윤 석^{2*}, 김태현³, 김진섭²

¹한국원자력연구원 박사후연수생, ²한국원자력연구원 책임연구원, ³한국원자력연구원 선임연구원

Design Considerations for Buffer Materials and Research Status of Enhanced Buffer Materials

Gi-Jun Lee¹, Seok Yoon^{2*}, Taehyun Kim³, and Jin-Seop Kim²

¹Post-Doctoral Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute

²Principal Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute

³Senior Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute

*Corresponding author: syoon@kaeri.re.kr

Received: February 11, 2022

Revised: February 17, 2022

Accepted: February 18, 2022

ABSTRACT

Currently, the design reference temperature of the buffer material for disposing of high-level radioactive waste is less than 100°C, so if the heat dissipation capacity of the buffer material is improved, the spacings of the disposal tunnel and the deposition hole in the repository can be reduced. First of all, this study tries to analyze the criteria for thermal-hydraulic-mechanical performance of the buffer materials and to investigate the researches regarding the enhanced buffer materials with improved thermal conductivity. First, the thermal conductivity should be as high as possible and is affected by dry density, water content, temperature, mineral composition, and bentonite type. the organic content of the buffer material can have a significant effect on the corrosion performance of a canister, so the organic content should be low. In addition, hydraulic conductivity of the buffer material should be less than that of near-field rock and swelling pressure should be appropriate for buffer materials to function properly. For the development of enhanced buffer materials, additives such as sand, graphite, and graphite oxide are typically used, and a thermal conductivity can be greatly improved with a very small amount of graphite addition compared to sand.

Keywords: Bentonite, Enhanced bentonite, Impact factors, High-level radioactive waste repository

초록

현재 고준위방사성폐기물 처분을 위한 완충재의 설계 기준 온도는 100 °C 미만이기에 완충재의 열 분산 능력이 개선된다면 처분장의 처분 터널과 처분 공의 간격을 줄일 수 있다. 본 연구에서는 완충재의 열-수리-역학 성능 기준을 분석하고자 하였으며, 완충재의 열전도도를 개선할 수 있는 고기능 완충재의 연구 현황에 대해 알아보하고자 하였다. 우선, 열전도도는 가능한 높아야 하며 완충재의 열전도도 값은 건조밀도, 함수비, 온도, 광물조성, 벤토나이트 유형에 영향을 받는다. 또한 완충재에 함유된 유기물은 처분용기의 부식 성능에 큰 영향을 미칠 수 있기에 완충재의 유기물 함량은 매우 낮아야 한다. 수리전도도는 근계암반보다 더 낮게 설정해야 하며, 완충재가 제 기능을 하기 위해 팽윤성이 적정해야 한다. 고기능 완충재 개발을 위해 대표적으로 모래, 흑연, 산화 흑연 등의 첨가제를 사용하며 흑연의 경우 모래보다 아주 적은 첨가량으로 열전도도를 크게 향상시킬 수 있다.

핵심어: 벤토나이트, 고기능 벤토나이트, 영향인자, 고준위방사성폐기물 처분장



1. 서론

공학적방벽의 하나로써, 고준위방사성폐기물 처분용기와 근계암반 사이를 채워주는 완충재는 고준위방사성폐기물에서 발생하는 붕괴열을 소산시키며 지하수의 접근을 차단하고 핵종의 누출을 막아주는 중요한 역할을 한다. 따라서 완충재는 열전도도가 뛰어나야 하며 수리전도도가 낮아야 될 뿐만 아니라, 팽윤성을 통해 근계암반과 처분 용기 사이의 틈(gap)을 메워주며 용기가 움직이지 않게 지지하는 역할을 수행해야 한다. 여러 연구를 통해서 완충재에 적합한 물질로는 벤토나이트가 꼽히고 있으며, 벤토나이트가 가진 장점으로서는 적절한 열전도도, 낮은 수리전도도, 양호한 역학적 특성 및 높은 팽윤성 등이 있다(Posiva, 2012, Maanoja et al., 2021). 하지만 순수 벤토나이트로만 완충재를 구성할 경우 열전도도, 수리전도도, 팽윤성 부분에서 다소 부족한 면이 있기 때문에 열전도도를 향상시키면서 적정 수리전도도와 팽윤성을 갖는 열-수리-역학적으로 안정한 고기능 벤토나이트에 대한 연구가 필요하다.

특히 완충재의 열전도도가 높으면 처분용기로부터 나오는 열이 잘 소산되어 처분 터널과 공 간격을 줄일 수 있는 것으로 연구된 바 있으며(Kim et al., 2021), 이러한 경우 처분장의 부지 면적을 줄일 수 있으므로 우리나라와 같이 국토 면적이 작은 국가에서는 고기능 벤토나이트에 대한 연구는 필수적이라고 할 수 있다. 한국원자력연구원(Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI)에서는 효율적인 처분 설계를 위해 국내에서 발생하는 사용후핵연료의 종류 및 유형에 따라 단계별로 처분시스템을 제안해 왔으며, 최근에는 처분 터널 간격 40 m, 공 간격 7.5 m로 이뤄진 향상된 한국형 기준 처분시스템인 KRS⁺(Improved Korean Reference Disposal System)를 제안한 바 있다(Lee et al., 2020). 고기능 벤토나이트 적용 시 처분 터널 간격 및 공 간격을 보다 줄일 수 있으며, 이에 따라 부지 면적 감소에 따른 부지 선택의 폭 확대와 함께 건설 비용 감소도 가능할 것으로 예상된다.

따라서, 국내에서 고준위방사성폐기물 처분장 설계 단계 이전에 고기능성 완충재 개발이 필요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 고기능 완충재 개발을 위한 선행 연구로써 완충재가 지녀야 할 열-수리-역학 성능 기준치를 알아보고, 이 중 완충재의 열전도도에 대한 여러 연구결과들을 종합하여 열전도도를 향상시킬 수 있는 고기능 벤토나이트 개발 방향에 대해 제안을 하고자 한다.

2. 완충재의 열전도도

완충재의 열전도도는 완충재의 설계 기준 온도를 설정하는 데 있어서 가장 중요한 특성 중 하나이다(Yoon et al., 2021). 처분용기로부터 발생하는 고준위방사성폐기물의 붕괴열은 100°C 이상의 고온으로서 이로 인한 처분용기 및 완충재의 장기건전성과 완충재의 물리 화학적 변화를 방지하기 위해 붕괴열을 주변 암반으로 잘 소산시켜 처분 용기와 완충재의 온도가 과도하게 상승하는 것을 막아야 한다(Cho, 2019). 완충재의 주성분인 벤토나이트가 고온에 의해 일라이트화 되는 현상과 열수 반응과 수증기에 노출됨에 따라 급작스럽게 투수계수가 증가하는 현상을 방지하기 위해 캐나다와 스웨덴 그리고 일본에서는 완충재 적정 온도를 100°C 이하로 보고 있다(Johnson et al., 1994, SKBF/KBS, 1983, PNC, 1992). Cho et al.(1997)에 따르면 완충재 온도를 100°C 이하로 유지하기 위해서는 열전도도가 1.0 W/(m·K) 이상이 되어야 하는 것으로 보고한 바 있다. 완충재의 열전도도는 아래와 같은 인자들에 의해 영향을 받게 된다.

2.1 건조밀도에 따른 열전도도

Fig. 1에서와 같이 벤토나이트 블록의 열전도도는 건조밀도가 높을수록 증가하는 경향을 보인다(Tang et al., 2008a, Xu et al.,

2019, Liu et al., 2007, Madsen, 1998). 건조밀도가 높을수록 공극률이 낮고 입자와 입자 사이에 공기층이 적기 때문에 입자 간 열 전달이 보다 잘 이루어지게 된다.

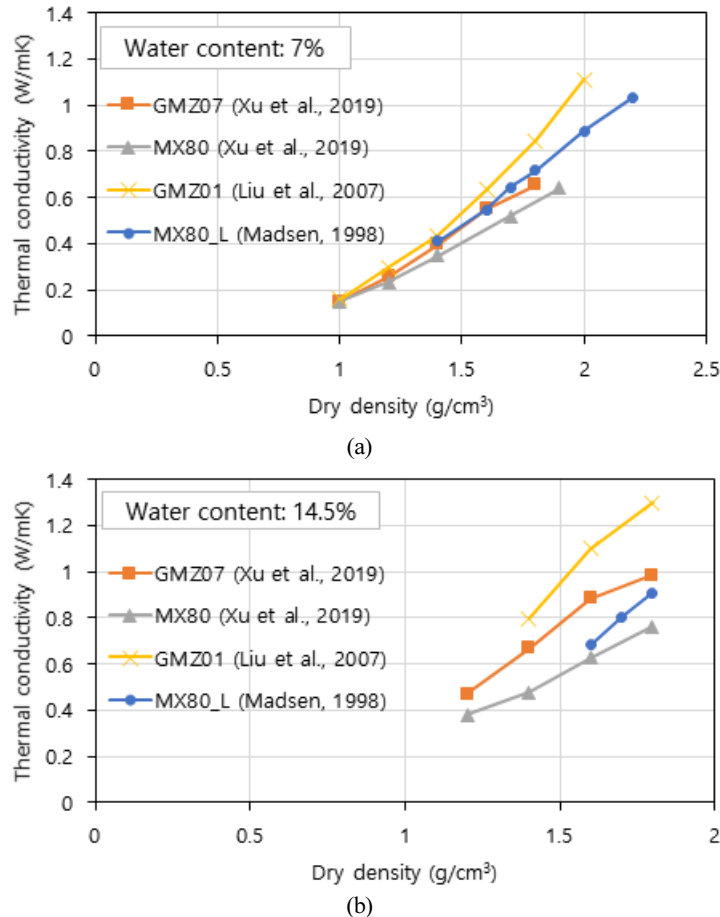


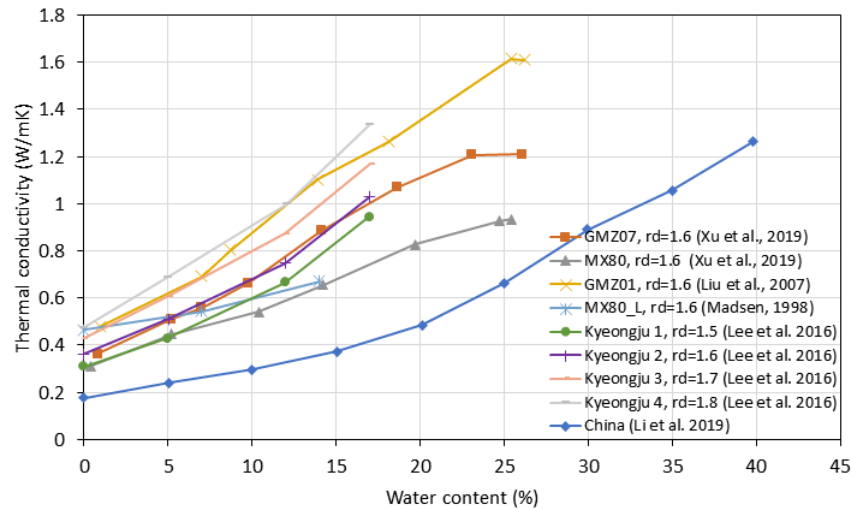
Fig. 1. Thermal conductivity of bentonites with dry density: (a) water content of 7%, (b) water content of 14.5%

2.2 함수비에 따른 열전도도

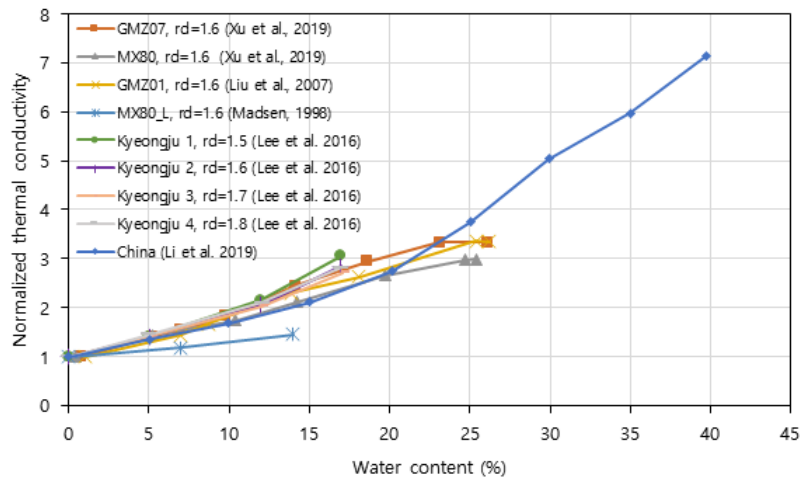
벤토나이트 완충재는 벤토나이트를 압축하여 블록 형태로 제작하여 처분공에 설치하게 된다. 분말 형태의 블록 제작 시 블록의 손상과 변형을 방지하기 위해 어느 정도의 수분은 필수적이며, 함수비에 따라 벤토나이트 블록의 열전도도가 변하게 된다. 공극 내부가 공기 대신 물로 채워지게 되면 공기보다 열전도도가 높은 물로 인해 벤토나이트의 열전도도가 증가하게 되고 수분 함량 증가 시 벤토나이트가 팽창되어 입자끼리의 결속이 강해지므로 열이 입자를 통해 더욱 잘 전달된다.

따라서 함수비에 따른 벤토나이트 완충재의 열전도도 특성과 관련된 다양한 연구가 수행된 바 있으며, 완성된 벤토나이트 블록이 제대로 된 봉괴열 소산의 기능을 하기 위해서는 벤토나이트의 함수비가 최소 15%는 되어야 한다고 보고된 바 있다(Juvankoski, 2013, Ikonen and Raiko, 2012). 또한 Tang et al.(2008a)은 벤토나이트 시편의 열전도도가 함수비 9.1~11.7% 수준에서는 큰 차이를 보이지 않았으나 18%일 때는 확연한 차이를 보임을 실험적으로 밝힌 바 있으며, Xu et al.(2019)은 포화도가 약 90%에 다다를 때까지 벤토나이트 시편의 열전도도가 선형에 가깝게 증가하는 경향을 보인다고 보고한 바 있다.

추가적으로 건조밀도 및 함수비에 따른 열전도도 변화를 파악하기 위해 Fig. 2와 같이 기존 문헌연구 결과들(Xu et al., 2019, Liu et al., 2007, Madsen, 1998, Lee et al., 2016, Li et al., 2019)을 함께 도시하였다. Fig. 2a에서 보이는 바와 같이 건조밀도가 동일한 경우에도 벤토나이트 종류에 따라 함수비에 따른 열전도도가 다르게 나타나는데, 이는 각 벤토나이트의 광물 조성이 다르기 때문이며(Table 1), 건조밀도 1.5~1.8 g/cm³범위에서는 열전도도의 측정값은 건조밀도보다 광물 조성의 영향이 더 크게 나타남을 알 수 있다. 하지만 측정된 값을 Fig. 2b와 같이 정규화하여 나타낼 경우 함수비 증가에 따른 열전도도 증가 정도가 거의 비슷하게 나타났으며, 따라서 건조밀도 1.5~1.8 g/cm³ 범위에서는 함수비 증가에 따른 열전도도 증가율 예측이 가능할 것으로 판단된다.



(a)



(b)

Fig. 2. Thermal conductivity of bentonites with water content: (a) measured value of the thermal conductivity, (b) normalized thermal conductivity (rd:dry density, g/cm³)

Table 1. Composition ratio of minerals in bentonites in Fig. 2

Composition of minerals	Bentonites		
	GMZ07 (Na ⁺), Xu et al. (2019)	MX80 (Na ⁺), Xu et al. (2019)	Kyeongju 1-4, Lee et al. (2016)
Montmorillonite	62%	77%	70%
Quartz ($\lambda = 7.69$ W/mK)	10%	7%	1%
Cristobalite ($\lambda = 6.15$ W/mK)	6%	5%	-
Feldspar ($\lambda = 1.96$ W/mK)	11%	6%	29%

2.3 온도에 따른 열전도도

온도에 따른 벤토나이트의 열전도도와 관련하여 다양한 연구가 진행된 바 있으며, 온도 증가 시 벤토나이트의 열전도도가 증가하고, 특히 함수비가 클수록 온도에 따라 열전도도 증가 경향이 크게 나타난다고 보고되었다(Xu et al., 2019, Lee et al., 2016, Yoon et al., 2021). 특히 Yoon et al.(2021)은 25°C에서 80-90°C까지 온도가 증가할 때, 벤토나이트의 열전도도는 함수비와 건조 밀도의 영향으로 최소 5%에서 최대 20%까지 증가함을 보고한 바 있다. 벤토나이트의 전해질이 물에 녹아 물 속의 이온이 증가하게 되면 더 많은 전류가 이온을 통해 전도되며 이때 열에너지도 함께 전도되는데, 온도가 올라가게 되면 전해질의 움직임이 활발해져 결국 열전도도 또한 증가하게 된다. 또한 함수비가 클수록 공극을 채우고 있는 전해질 수용액이 차지하는 비율이 크기 때문에 온도에 따른 열전도도 증가 경향성도 크게 나타난다. 다만, 벤토나이트 표면이 구속되어 있지 않을 경우 온도가 올라감에 따라 벤토나이트 내부의 수분이 외부로 유출되어 열전도도가 감소하는 경향이 나타날 수 있다(Yoon et al., 2018a).

2.4 광물조성에 따른 열전도도

벤토나이트 내에는 다양한 광물이 혼합되어 있으며, 광물별 열전도도가 다르기 때문에 포함된 광물 종류 및 함량에 따라 벤토나이트의 열전도도 또한 달라지게 된다. Table 2에 따르면, 석영의 열전도도가 7.69 W/mK로 다른 광물대비 높은 값을 나타내며, 따라서 석영이 많이 함유된 모래의 열전도도가 흙의 열전도도보다 높게 나타난다. 실제로 흙 속에 함유된 석영의 비율이 흙의 열전도도에 큰 영향을 끼치며 석영의 함량이 증가할수록 열전도도가 더 높게 나타난다는 연구 결과가 있다(Tarnawski et al., 2009).

또한 일반적으로 2.1절 및 2.2절에서 상술한 바와 같이 건조밀도 혹은 함수비가 더 높은 경우 열전도도가 높게 나타나지만 광물 조성의 차이로 인해 이러한 일반적인 경향과 다른 결과가 도출될 수도 있다. Tang and Cui(2010)는 몬모릴로나이트 함유량이 각각 79.23% 및 75%인 MX80a 벤토나이트와 MX80b 벤토나이트를 대상으로 함수비에 따른 열전도도를 측정하여 비교하였는데, 함수비가 낮은 MX80a 벤토나이트(8.4% 및 17.4%)가 함수비가 보다 높은 MX80b 벤토나이트(9.0% 및 17.9%)보다 더 큰 열전도도 값을 나타냄을 확인하였다. 공기보다 물의 열전도도가 더 높기 때문에 일반적으로 동일한 건조밀도에서 함수비가 높으면 열전도도가 더 높게 나타나지만 위의 경우 반대로 함수비가 더 작음에도 불구하고 열전도도가 더 높게 나타났다. 이는 석영 함량이 MX80a에 더 많이 포함되어 있기 때문이며, 이와 같이 광물 조성 차이가 열전도도에 큰 영향을 미칠 수 있음을 확인할 수 있다. Fig. 2a에서도 마찬가지로, 몬모릴로나이트를 제외한 벤토나이트 구성 광물 중 열전도도가 상대적으로 낮은 장석(Feldspar)의 함량이 다른 벤토나이트에서보다 높은 비율을 차지하는 Kyeongju 2 (Table 1)의 열전도도가 같은 조건의 다른 벤토나이트의 열전도도보다 상대적으로 낮게 나타났음을 알 수 있다.

Table 2. Composition ratio of minerals in bentonites (Lee et al., 2021)

Composition of minerals	Bentonites			
	GMZ07 (Na ⁺), Xu et al. (2019)	MX80 (Na ⁺), Xu et al. (2019)	KJ (Ca ²⁺), Yoon et al. (2018b)	FEBEX (Ca ²⁺), Villar (2004)
Montmorillonite	62%	77%	63%	92%
Quartz ($\lambda = 7.69$ W/mK)	10%	7%	4.9%	2%
Cristobalite ($\lambda = 6.15$ W/mK)	6%	5%	3%	2%
Feldspar ($\lambda = 1.96$ W/mK)	11%	6%	25.6%	(Cristobalite/Feldspar)

2.5 벤토나이트 유형에 따른 열전도도

벤토나이트는 일반적으로 교환가능 양이온의 종류에 따라 Ca-벤토나이트와 Na-벤토나이트로 구분할 수 있으며, 벤토나이트 종류에 따라 열전도도 또한 영향을 받는 것으로 알려져 있다. Table 2 및 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 동일한 온도, 건조밀도, 포화도에서 GMZ07 벤토나이트(Xu et al., 2019)와 KJ 벤토나이트(Yoon et al., 2018b)를 살펴보면 비슷한 몬모릴로나이트(Montmorillonite) 함유량에 열전도도가 큰 광물인 석영과 크리스토팔라이트가 GMZ07에 2배 이상 많이 함유되어 있음에도 KJ의 열전도도가 조금 더 큰 것을 알 수 있다.

이는 GMZ07과 KJ의 몬모릴로나이트의 종류가 각각 Na-벤토나이트와 Ca-벤토나이트로서 다르기 때문이다. 벤토나이트가 물과 만났을 때, 물 분자가 Ca-몬모릴로나이트 보다 Na-몬모릴로나이트 입자 사이로 침투하기가 더 수월하다. 따라서 Na-몬모릴로나이트가 Ca-몬모릴로나이트보다 더 많은 물 분자를 입자 사이에 들 수 있으며 같은 부피 안에 Ca-몬모릴로나이트의 입자 수가 Na-몬모릴로나이트의 입자 수보다 더 많게 되면 열전도도가 작은 물이 더 많이 포함된 Na-몬모릴로나이트의 열전도도가 더 낮게 측정된다고 추정할 수 있다(Lee et al., 2021).

예를 들어 Ca-벤토나이트인 FEBEX 벤토나이트(Villar, 2004)는 같은 Ca-벤토나이트인 KJ보다 석영, 크리스토팔라이트, 장석(Feldspar)의 함유량이 현저히 낮지만, Ca-몬모릴로나이트의 함량이 KJ보다 약 29% 더 많기 때문에 동일한 온도, 건조밀도 그리고 포화도 조건에서 열전도도가 KJ와 거의 비슷한 값을 나타내게 된다. 따라서 열전도도 측면에서 고려할 시 처분 터널 및 공간격을 줄이기 위해서는 Ca-벤토나이트가 Na-벤토나이트보다 공학적 방벽의 완충재로서 더 적합하다고 판단된다.

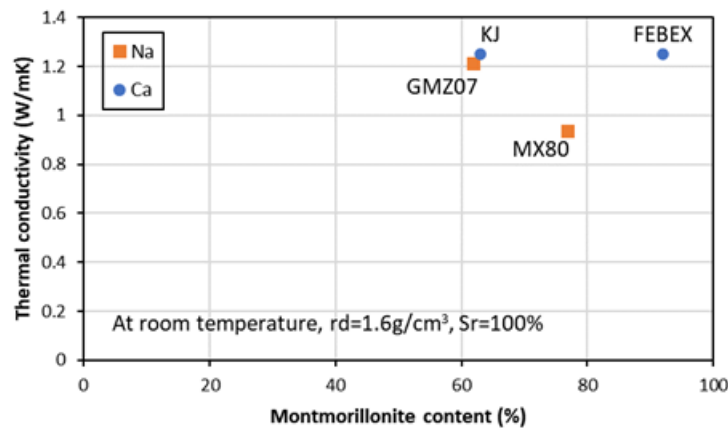


Fig. 3. Thermal conductivity with bentonite types (rd: dry density, Sr: saturation) (Lee et al., 2021)

3. 완충재의 유기물 함량

벤토나이트 완충재를 설계할 때 벤토나이트의 물성 외에 유기물 함량을 고려해야 한다. 벤토나이트에 있는 유기물은 미생물의 생장에 영양분으로서 역할을 할 수 있으며(Oscarson et al., 1986, Pedersen, 2000, Moser et al., 2003), 미생물 작용에 의해 황화물과 같은 부산물을 발생시킬 수 있다. 특히 벤토나이트에서 나온 용해된 황화물은 처분 환경에서 핵폐기물을 담고 있는 처분용기 표면의 구리를 부식시키기 때문에 처분용기에 중요한 영향을 끼친다(Stroes-Gascoyne and West, 1997, Stroes-Gascoyne and Hamon, 2008, Stroes-Gascoyne et al., 2011). 따라서 스웨덴(SKBF/KBS, 1983)과 캐나다(Johnson et al., 1994)에서는 완충재 유기물 함량기준을 0.5% 미만으로 고려하고 있다.

또한 유기물을 발생시키는 미생물 성장 조건은 완충재 건조밀도와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 완충재의 건조밀도가 1.45 g/cm^3 이상에서는 일반적으로 구속조건이 아닌 벤토나이트에서보다 유기물의 성장 가능성이 감소하게 된다(Jalique et al., 2016, Jenni et al., 2019).

하지만 모든 종류의 벤토나이트는 박테리아가 성장할 수 있는 환경에서 박테리아가 성장할 수 있는 포자를 가지고 있기 쉽고, 건조밀도 1.45 g/cm^3 는 미생물 성장을 억제하기에 충분치 못하다는 연구 결과가 제시된 바 있다(Usman and Simpson, 2021). Jalique et al.(2016)의 연구에 따르면 완충재의 건조밀도가 1.6 g/cm^3 이상의 조건에서는 미생물 성장을 충분히 억제할 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 완충재에서 미생물의 성장을 억제하기 위해서 건조밀도를 1.6 g/cm^3 이상으로 완충재 블록을 제작하는 것이 안전할 것으로 판단된다.

4. 완충재의 수리전도도

완충재는 처분용기와 지하수의 접촉을 최대한 차단하여 처분용기의 부식을 방지하고 지하수로의 핵종유출을 막아야 하기 때문에 수리전도도는 완충재 개발에 중요한 요소이다. 완충재의 수리전도도는 건조밀도가 증가하면 감소하는 것으로 알려져 있으며, 이와 관련한 다양한 실험적 연구들이 진행되어 왔다. 완충재의 건조밀도가 1.6 g/cm^3 에서 1.8 g/cm^3 로 증가하였을 때와 1.4 g/cm^3 에서 1.6 g/cm^3 로 증가하였을 때, 모두 동일한 조건에서 수리전도도가 10배 이상 감소하였다(Cho et al., 1999, Park et al., 2021). 또한 Cho et al.(1999)은 동일한 조건에서 온도만 20°C 에서 80°C 로 증가하였을 때, 완충재의 수리전도도는 약 2배 가까이 증가함을 보인바 있으며, 이를 통해 온도 증가 시 수리전도도 또한 증가함을 알 수 있다.

완충재의 수리전도도는 지하수의 흐름이 근계암반에서 완충재로 향하는 것을 막기 위해 근계암반보다 수리전도도가 낮아야 안전하며, 수리전도도가 높을 경우 침투된 지하수의 이류현상이 발생할 수 있다. 이류현상 발생 시 침투된 지하수의 흐름이 소류력(tractive force)에 의한 이동한계유속을 벗어나게 되면 완충재의 침식이 발생할 수도 있다. 따라서 이류현상 발생 여부를 판단하는 것이 중요하며, Gillham and Cherry(1982)는 수리구배(Hydraulic gradient)가 10^{-2} 이고 공극률이 0.35인 경우, 이류현상이 지배적으로 나타날 수 있는 수리전도도 값이 10^{-7} m/s 이상임을 보고한 바 있다.

앞서 완충재 내 미생물 성장 억제하기 위한 건조밀도로 1.6 g/cm^3 를 제안하였으며, 해당 건조밀도에서의 수리전도도는 $4 \times 10^{-13} \text{ m/s}$ 으로 보고되었다(Cho et al., 1999). 이는 이류현상이 생길 수 있는 수리전도도보다 낮기 때문에 여러 영향인자를 고려하였을 때, 자연스럽게 지하수의 이류현상을 피할 수 있게 된다. 하지만 완충재에 균열이 생기거나 근계암반과 완충재 사이의 빈 공간이 있는 경우, 수리전도도 값이 증가하여 이류현상 발생으로 인한 침식이 발생할 수도 있다.

따라서 각 기관 및 문헌에서 제시하고 있는 완충재 수리전도도 기준은 Table 3과 같다. 1997년도부터 2017년까지 완충재의 수리전도도 기준은 10^{-12} m/s보다 작은 것으로 바뀌지 않고 유지되고 있는 것을 알 수 있으며, 이는 근계암반의 대상이 되는 심부 암반의 수리전도도가 보통 10^{-12} m/s 이상으로 나타나기 때문이다(Cho et al., 1997). 따라서 심부 암반의 수리전도도 측정이 우선되어야 하며, 측정된 값이 10^{-12} m/s 보다 작을 경우 완충재 수리전도도 기준 또한 근계암반의 수리전도도보다 작은 값으로 설정할 필요가 있다.

Table 3. Hydraulic conductivity criteria of buffer materials

Country (Organization)	Criterion (m/s)	References
Sweden (SKB)	$<10^{-12}$	SKB (2004)
Sweden (SKB)	$<10^{-12}$	SKB (2007)
Sweden (SKB)	$<10^{-12}$	Karland (2010)
Posiva and SKB	$<10^{-12}$	Posiva SKB (2017)
Sweden (SKI)	$<10^{-12}$	Apted et al. (2005)
Korea Republic (KAERI)	$<10^{-12}$	Cho et al. (1997)

5. 완충재의 팽윤압

벤토나이트 완충재는 지하수와 만나면서 팽윤되고 이러한 팽창을 통해서 처분공의 틈을 메우고 처분용기를 안정하게 잡아주며 핵종이 밖으로 유출되는 것을 막는 기능을 하게 된다. 따라서 팽윤량이 너무 적게 되면 틈을 채우지 못하고 처분용기를 안정하게 지지해주지 못하게 되며 반대로 팽윤이 과도하게 발생하면 완충재와 맞닿아 있는 근계암반과 처분용기를 손상시킬 수 있다.

따라서 완충재의 팽윤성은 완충재의 기능에 영향을 미치는 중요한 설계 요소이며, 완충재 세부 기능에 따라 최소 팽윤압 기준이 존재한다. 처분용기 및 근계암반과의 틈 또는 균열부위를 자가적으로 매우기 위한(self-sealing) 최소 팽윤압은 1.0 MPa, 처분용기를 안정적으로 지지해주기 위한 최소 팽윤압은 0.2 MPa, 그리고 생물학적 유출을 막기 위해서는 최소 2.0 MPa의 팽윤압이 필요하다(SKB, 2007). 완충재의 팽윤압 기준은 처분용기의 재질과 강도 및 건전성에 따라 정해지게 되며 완충재와 맞닿는 근계암반의 건전성에 따라 정해지게 된다.

Table 4는 각 기관 및 문헌을 통해 조사한 완충재 팽윤압 기준을 보여준다. 캐나다의 경우 처분용기의 티타늄 재질과 건전성을 고려하여 완충재 팽윤압 기준을 2.5 MPa 미만으로 고려하고 있다(Cho et al., 1997). SKB(2004)보고서에 따르면, 완충재의 팽윤압은 최소 1 MPa보다 커야한다고 적시되어 있으나, SKB의 2010년 보고서에 따르면 팽윤압은 최소 2 MPa보다 커야 한다고 보고하였다(Karland, 2010). Posiva SKB(2017)보고서에 따르면, 완충재 팽윤압 기준은 최소 3 MPa보다 커야 하고 최대 10 MPa보다 작아야 한다고 적시되어 있다. 이와 같이 최소 팽윤압 기준이 변화한 것은 생화학적 연구가 추가적으로 진행됨에 따라 새로운 기준이 적용되었기 때문이다. 최대 팽윤압과 관련해서는 완충재의 팽윤압은 건조밀도가 증가함에 따라 증가하는 경향이 나타나며 2.1 g/m^3 의 건조밀도의 경우 57-58 MPa의 팽윤압이 나타나기도 한다(Westsik et al., 1981). 과도한 팽윤압이 작용할 경우 처분용기 및 처분공의 안정성에 심각한 피해를 미칠 수 있다.

Table 4. Swelling criteria of buffer materials

Country (Organization)	Minimum swelling pressure (MPa)	Maximum swelling pressure (MPa)	References
Sweden (SKB)	Larger than 1		SKB (2004)
Sweden (SKB)	2	-	SKB (2007)
Sweden (SKB)	Larger than 2	-	Karland (2010)
Posiva and SKB	Larger than 3	Less than 10	Posiva SKB (2017)
Sweden (SKI)	Larger than 1	-	Apted et al. (2005)
Canada	-	2.5	Johnson et al. (1994)
Korea Republic (KAERI)	-	20	Cho et al. (1997)

벤토나이트의 팽윤과 관련된 기작(mechanism)을 파악하기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔으며, 수화반응(hydration) 시 결정질과 확산 이중층(Diffuse double layer, DDL)의 팽윤 과정을 통해 팽윤이 발생하는 것으로 알려져 있다(Chen et al., 2019b, Fig. 4).

결정질의 팽윤은 광물 층상 구조(layer lattice)에 따른 층 사이에서 교환가능 양이온의 수화반응에 의해 발생한다(Cases et al., 1992). 반면, 확산 이중층의 팽윤은 흠 입자의 확산 이중층들의 정전식 반발에 의해 발생된다(Van, 1991). 결정질 팽윤은 층간 공간에 3-4개의 수층 형성을 포함하며 DDL 팽윤 전에 발생하는 것으로 보고 있다(Laird, 1996, Yong, 1999, Liu, 2013). 낮은 건조밀도에서, 결정질 팽윤은 준결정을 더 작은 적층(stack)으로 분해하는 반면, 집합체 내부(intra-aggregate) 및 집합체 간(inter-aggregate) 공극(pore)에서는 DDL이 활발하게 작용하여 점토 집합체를 분할한다(Cases et al., 1992). 따라서, 낮은 건조 밀도에서 최종 팽윤압은 주로 DDL 팽윤 과정에 따라 달라지며 DDL 이론을 통해 계산할 수 있다(Cases et al., 1992).

반면 건조밀도가 높을 경우, Fig. 4에서와 같이 공간적 제약으로 인해 준결정 분해 및 DDL에 의한 점토 집합체의 분할은 거의 발생하지 않게 된다. 따라서 높은 건조밀도에서 최종 팽윤압은 주로 결정질 팽윤에 의해 결정되며 거시적 에너지 균형 모델을 사용하여 추정할 수 있으나(Laird, 1996, Yong, 1999, Agus and Schanz, 2008), DDL 발생이 제한되는 건조밀도의 임계값은 명확하지 않은 것으로 보고되었다(Chen et al., 2019b).

다음으로 압축 벤토나이트의 팽윤압에 대한 열적 영향은 두 가지가 있다. 첫 번째는 층간(흡착된) 물이 자유 공극수로 변성(격자 수축)하는 것이고, 두 번째는 삼투압의 열유도 증가(열 삼투)이다. 격자 수축이 발생하면 층간(흡착된) 물을 집합체 간 공극으로 몰아넣음으로써 결정질 팽윤을 약화시킬 수 있으며(Villar and Lloret, 2004, Pusch et al., 1990), Pišková et al.(2010)와 Shariatmadari and Saeidijam(2012)은 실험을 통해 가열 시 스멕타이트의 입자 층부터 다음 입자 층까지의 간격이 감소함으로 인해 격자 수축이 발생함을 밝혀낸 바 있다. 또한 열 삼투 발생 시 압축된 점토에서 수분 이동을 가속화하여 수화 팽창을 촉진할 수 있으며, 수분 이동이 가속됨에 따라 Darcy 흐름의 크기가 수백 배 증가한다(Carnahan, 1983, Hueckel and Pellegrini, 1992).

이와 같은 다양한 벤토나이트 팽윤 기작은 벤토나이트 유형 및 실험 조건에 따라 다양하게 상호작용할 수 있으며, 따라서 다양한 실험 조건에서 벤토나이트의 팽윤압을 측정하는 것은 필수적인 연구이다. 먼저 온도에 따른 팽윤압 특성과 관련하여 등온조건에서 수행된 다양한 벤토나이트 팽윤압 시험 결과에 따르면, 60°C 이상의 고온 조건에서는 팽윤압이 감소하였다(Villar and Lloret, 2004, Villar et al., 2010, Ye et al., 2014, Chen et al., 2018a). 또한 화학적 특성과 관련하여 양이온 유형(Chen et al., 2018a, Zhu et al., 2013), 이온강도(Castellanos et al., 2008, Sun et al., 2015, Zhang et al., 2019) 및 화학적 구성(Herbert et al., 2008, Sun et al., 2018)이 벤토나이트에 끼치는 영향을 살펴보기 위한 실험적 연구에 따르면 모든 경우에서 용액의 농도가 증가함에 따라 벤토나이트의 팽윤압이 감소하였다. 반면 압축 FEBEX, MX80 그리고 GMZ 벤토나이트에 열을 가했을 때, 낮은 압력과 높은 흡입력 조건에서 부피 팽윤이 일어났고 높은 압력과 낮은 흡입력에서는 부피 수축현상이 발생하였다(Romero et al., 2005, Tang et al.,

2008b, Ye et al., 2013). NaCl로 압축 GMZ 벤토나이트를 미리 포화시킨 경우 열을 가했을 때, 주로 부피팽윤이 발생하였다(Chen et al., 2019a). 위의 조건에서 포화 및 구속조건으로 바뀌었을 때, 열을 가하자 열-역학-화학적 상호작용으로 인해 압축벤토나이트의 팽윤압이 감소하였다(Chen et al., 2019b). 따라서 실험 조건에 따라 팽윤 현상이 다양하게 나타나므로 향후 고기능 완충재 개발 시 정밀한 팽윤 성능 측정을 위해서는 다양한 실험 조건 설정 및 실험 수행이 필요할 것으로 판단된다.

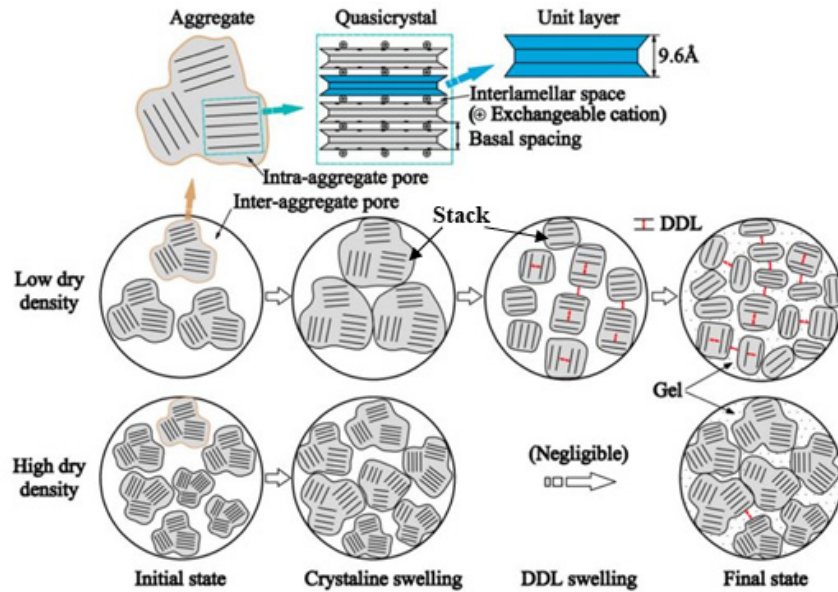


Fig. 4. Illustration of the swelling process and microstructural evolution of compacted bentonite under constant-volume conditions (reproduced from the work of Zhu et al. (2013) with some modifications) (Chen et al., 2019b)

6. 고기능 완충재 개발을 위한 첨가제

고기능 완충재를 개발하는 방법 중 하나로 벤토나이트에 첨가제를 넣는 방법이 있다. 먼저 열전도도를 높이기 위한 방법으로, 입자가 작은 벤토나이트에 상대적으로 입자크기가 크고 열전도도가 높은 모래(실리카)를 섞으면 열전도도를 높일 수 있다(JNC, 2000, Sun et al., 2009, Sun et al., 2014, Cui et al., 2012, Zhang et al., 2012). 하지만 벤토나이트에 첨가되는 모래 함유량이 일정 수준 이상으로 증가할 경우 열전도도가 증가하다가 일정해진 후 오히려 감소하는 경향이 나타났다(Xu et al., 2016, Zhuang et al., 2005). 이를 보완하기 위해 입자가 큰 모래 대신 열전도도가 높은 흑연을 벤토나이트에 첨가하는 방법이 고안되었다(Pacovsky, 2001). 벤토나이트에 흑연이 20% 함유되었을 때, 순수 벤토나이트 열전도도의 약 3배 가까이 열전도도를 증가시킬 수 있으며 흑연의 함유량이 약 80%까지 증가함에 따라 열전도도 또한 지속적으로 증가하는 경향을 보였다(Jobmann and Buntebarth, 2009). 벤토나이트에 모래 함유량이 50%일 때 열전도도가 약 1.3배 증가한 것에 비해 흑연을 첨가한 경우가 열전도도를 높이는 데 월등히 효과적인 것을 알 수 있다. 모래입자보다 입자의 크기가 작은 흑연과 같은 나노탄소 물질은 비표면적이 모래보다 훨씬 크며 물질 사이의 강한 연결성을 가지고 있기 때문에 열전도도에서 우수한 성능을 보인다(Lee et al., 2008, Balandin et al., 2008, Stoller et al., 2008). 따라서 흑연의 성능을 최대화하기 위해 산화 그래핀을 사용하여 벤토나이트의 열전도도를 높이는 방법이 시도되었다. Chen

et al.(2018b)는 실험을 통해 산화 그래핀 함유량이 20%일 때 보통의 벤토나이트보다 열전도도 값이 약 4배로 증가하는 것을 확인하였으며, 산화 그래핀을 벤토나이트에 첨가제로 사용할 경우 건조밀도를 증가시켜주면 열전도도가 건조밀도의 증가에 따라 함께 증가함을 보고하였다.

수리적인 부분에 있어서는 벤토나이트에 모래를 첨가한 경우, 모래의 첨가 비율이 증가할수록 수리전도도가 증가하며 모래의 비율이 50%가 되면 수리전도도가 10배 이상 증가하였다(Cho et al., 2000). 모래 첨가제를 대체할 수 있는 또 다른 첨가제로 모래보다 입자가 작은 돌가루를 고려할 수 있다. Chen et al.(2017)은 실리카 모래와 화강암 가루를 각각 섞은 두 가지 벤토나이트 혼합시료에 대해 수리-역학적 조건에서 압축, 팽윤 그리고 반발거동에 대한 시험을 수행하였다(Tables 5~7). 이 시험을 통해 모래와 화강암 가루 첨가제 모두 양이 적을수록 목표 건조밀도에 도달하기 위해 더 큰 수직하중이 필요하다는 것을 확인하였다. 첨가제에 따른 벤토나이트 팽윤현상을 살펴보면 실리카 모래 10%를 첨가한 경우보다 화강암 가루 10%를 첨가했을 때 팽윤율은 약 2배 가까이 크게 나타났으며(Fig. 5a) 팽윤압은 약 1.16배 더 크게(Fig. 5b) 나타났다. 따라서 팽윤성 측면에서는 실리카 모래보다 화강암 가루가 더 우위에 있다고 판단할 수 있다.

Table 5. Specification of the GMZ01 bentonite specimen (Wen, 2006, Chen et al, 2017)

Soil properties	Description
Specific gravity	2.71
Consistency limit	
Liquid limit (%)	276
Plastic limit (%)	37
Plasticity index (%)	239
PH	8.68-9.86
Total specific surface area (m ² /g)	597
Cation exchange capacity (mmol/100g)	77.3
Main exchanged cation (mmol/100g)	
- Na ⁺	43.36
- Ca ²⁺	29.14
- Mg ²⁺	12.33
- K ⁺	2.51
Main minerals	
- Montmorillonite (%)	75.4
- Quartz (%)	11.7
- Cristobalite (%)	7.3
- Feldspar (%)	4.3
- Kaolinite (%)	0.8

Table 6. Specification of the natural quartz sand (Chen et al., 2017)

Contents	Description
Source	Commercially available
Specific gravity	2.65
Particle size	0.2 to 0.8 mm (D ₇₀ =0.5 mm)
Main components	SiO ₂ (99.45% by mass)

Table 7. Specification of the granite powder (Chen et al., 2017)

Contents	Description
Source	Host rock in Beishan, Gansu, China
Specific gravity	2.75
Average unconfined compressive strength (MPa)	161.5 (Chen et al., 2014)
Main minerals	
- Plagioclase (%)	52
- Quartz (%)	17
- Alkali feldspar (%)	15
- Black mica (%)	12
- Albite (%)	3

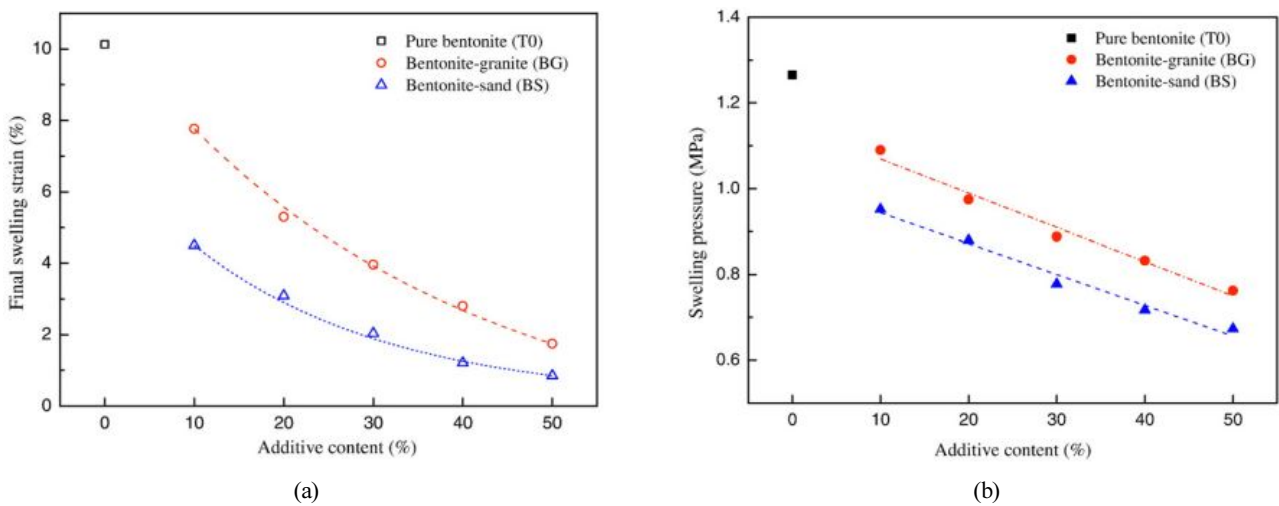


Fig. 5. Swelling strain (a) and swelling pressure (b) of bentonite-additive mixtures with additive contents (Chen et al., 2017)

처분용기로부터 나오는 열로 인해 완충재의 온도는 처음에 증가하였다가 열이 소산되면서 다시 감소하는 경향을 보이기 때문에 온도 변화에 따른 완충재 거동이 어떻게 발생하는지 파악하는 것이 중요하다. Shariatmadari and Saaidijam(2012) 의 논문에 보고된 Na-벤토나이트와 모래를 1:1 비율로 혼합한 완충재(Tables 8~10)의 온도 변화에 따른 특성을 살펴보면 다음과 같다. 벤토나이트-모래 혼합시료는 온도가 올라갈수록 팽윤과 변형현상이 감소하며 고온에서 벤토나이트-모래 혼합시료의 팽윤이 안정화되기까지 저온에서 보다 시간이 더 적게 소요된다(Fig. 6). 고온에서는 벤토나이트-모래 혼합시료의 압축률과 압축량이 증가하기 때문에 고온에서 벤토나이트-모래 완충재의 건조밀도를 상온에서보다 더 증가시킬 수 있다(Fig. 7).

또한 일반적으로 온도 상승 시 벤토나이트의 소성지수는 감소하지만 열을 가하고 식히는 과정을 반복하게 되면 소성지수가 다소간 증가하게 되며 역학적 거동에 영향을 미치게 된다. 따라서 벤토나이트 완충재의 변형을 평가할 때에는 벤토나이트의 열 이력도 함께 고려해야 할 것으로 판단된다.

Table 8. Specification of the Na-bentonite specimen (Shariatmadari and Saeidijam, 2012)

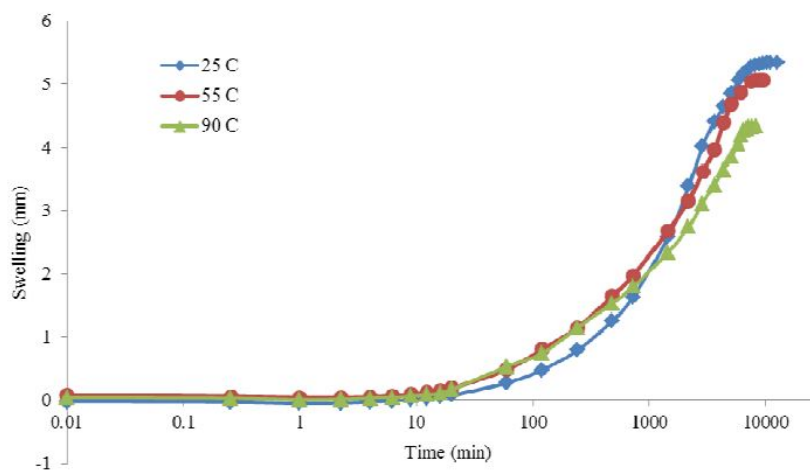
Soil characteristics	Definition
Source	Iran Barite
XRD analysis	Montmorillonite, quartz, calcite
Soil classification	CH
Liquid limit (%)	321
Plasticity index (%)	285
γ_d max (g/cm ³)	1.51
Optimum water content (%)	24
CEC (cmol/ kg soil)	68.5
Gs	2.78
pH (1:10 soil:water)	9.5
SSA (m ² /g)	420

Table 9. Specification of the silica sand (Shariatmadari and Saeidijam, 2012)

Soil characteristics	Definition
Angularity	Sub-angular
Uniformity	Poor graded
Gs	2.66
D ₅₀ (mm)	0.3

Table 10. Specification of the bentonite-sand mixture (Shariatmadari and Saeidijam, 2012)

Soil characteristics	Definition
Liquid limit (%)	290
Plasticity index (%)	255
γ_d max (g/cm ³)	1.78
Optimum water content (%)	21.5

**Fig. 6.** The swelling of sample in oedometer at 15 kPa and different temperatures (Shariatmadari and Saeidijam, 2012)

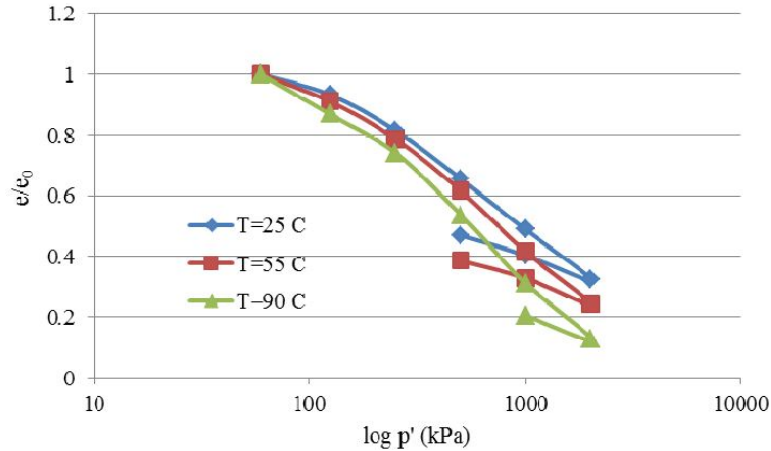


Fig. 7. The variation of normalized void ratio versus compressive stress at different temperatures (e : void ratio, e_0 : initial void ratio, p : loading pressure) (Shariatmadari and Saeidijam, 2012)

7. 결론

고기능 완충재 개발을 위해서는 완충재의 기본 성능을 최소한 유지하면서 열전도도를 향상시켜야 한다. 이에 따라 고기능 완충재의 성능기준은 아래 조건을 모두 충족하여야 할 것이다.

먼저, 열전도도를 향상시키기 위해 미생물 성장 억제에 효과적인 1.6 g/cm^3 이상의 높은 건조밀도여야 하고, 초기 함수비가 높으며 열전도도가 높은 광물의 함량이 많아야 한다. 또한, Na-벤토나이트보다 Ca-벤토나이트를 활용하는 것이 열전도도를 향상시키는 데 유리할 것으로 판단된다. 열전도도는 최소 $1.0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 이상이어야 하며 최대한 높을수록 좋다.

두 번째로, 용기의 부식을 방지하기 위해 유기물 함유량을 0.5% 미만으로 유지하는 것이 안전하다.

세 번째로, 완충재의 수리전도도는 근계암반의 수리전도도보다 더 낮게 설정하여 지하수의 흐름이 근계암반에서 완충재로 향하는 것을 억제함으로써 완충재의 침식을 방지할 수 있다.

네 번째로, 완충재의 원활한 기능을 위해서 핵종의 유출을 방지하기 위한 팽윤압(2.0 MPa)이 처분용기를 지지하고 틈을 매우기 위한 팽윤압(1.0 MPa)보다 크기 때문에 최소 2.0 MPa의 팽윤압을 충족하는 것이 안전하다고 판단된다. 또한 처분용기의 재질과 설계에 따른 건전성을 고려하여 처분용기가 파손되지 않도록 최대 팽윤압 기준을 설정하는 것이 안전할 것으로 판단되며, 완충재의 격자 수축으로 인한 팽윤성 저하와 열 삼투로 인한 팽윤성 강화 현상을 고려하여 침투하는 지하수 성분 및 온도 등 현장 조건에 따른 완충재의 팽윤압 특성을 파악할 필요가 있다.

마지막으로, 고기능 완충재 개발을 위해 벤토나이트에 혼합될 첨가제는 흑연, 모래, 또는 화강암 분말 등을 고려할 수 있다.

사사

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 사용후 핵연료관리핵심기술개발사업단 및 한국연구재단(2021 M2E1A1085193)과, 한국연구재단 원자력연구개발사업(2021M2E3A2041351)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Agus, S.S., and Schanz, T., 2008, A method for predicting swelling pressure of compacted bentonites, *Acta Geotechnica*, 3(2), 125-137.
- Apted, M., Arthur, R., and Savage, D., 2005, Engineered Barrier System-Long-term Stability of Buffer and Backfill, Synthesis and extended abstracts (No. SKI-R—05-48), Swedish Nuclear Power Inspectorate.
- Balandin, A.A., Ghosh, S., Bao, W., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Miao, F., and Lau, C.N., 2008, Superior thermal conductivity of single-layer graphene, *Nano letters*, 8(3), 902-907.
- Carnahan, C.L., 1983, Thermodynamic coupling of heat and matter flows in near-field regions of nuclear waste repositories, MRS Online Proceedings Library Archive, 26.
- Cases, J.M., Bérend, I., Besson, G., Francois, M., Uriot, J.P., Thomas, F., and Poirier, J.E., 1992, Mechanism of adsorption and desorption of water vapor by homoionic montmorillonite, 1, The sodium-exchanged form. *Langmuir*, 8(11), 2730-2739.
- Castellanos, E., Villar, M.V., Romero, E., Lloret, A., and Gens, A., 2008, Chemical impact on the hydro-mechanical behaviour of high-density FEBEX bentonite, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33, S516-S526.
- Chen, L., Liu, Y.M., Wang, J., Cao, S.F., Xie, J.L., Ma, L.K., et al., and Liu, J., 2014, Investigation of the thermal-hydro-mechanical (THM) behavior of GMZ bentonite in the China-Mock-up test. *Engineering geology*, 172, 57-68.
- Chen, Y.G., Dong, X.X., Zhang, X.D., Ye, W.M., and Cui, Y.J., 2018a, Combined thermal and saline effects on the swelling pressure of densely compacted GMZ bentonite, *Applied Clay Science*, 166, 318-326.
- Chen, Y.G., Liu, X.M., Mu, X., Ye, W.M., Cui, Y.J., Chen, B., and Wu, D.B., 2018b, Thermal conductivity of compacted GO-GMZ bentonite used as buffer material for a high-level radioactive waste repository, *Advances in Civil Engineering*, 2018.
- Chen, Y.G., Dong, X.X., Zhang, X.D., Ye, W.M., Cui, Y.J., 2019a, Thermal volumetric behaviour of compacted GMZ bentonite saturated with salt solution. In: *Proceedings of the 8th international Congress on Environmental Geotechnics Volume 3*. Springer, Singapore, pp. 57-64.
- Chen, Y.G., Dong, X.X., Zhang, X.D., Ye, W.M., and Cui, Y.J., 2019b, Cyclic thermal and saline effects on the swelling pressure of densely compacted Gaomiaozi bentonite, *Engineering Geology*, 255, 37-47.
- Chen, Z.G., Tang, C.S., Zhu, C., Shi, B., and Liu, Y.M., 2017, Compression, swelling and rebound behavior of GMZ bentonite/additive mixture under coupled hydro-mechanical condition. *Engineering Geology*, 221, 50-60.
- Cho, W.J., Lee, J.O., and Chun, K.S., 1999, The temperature effects on hydraulic conductivity of compacted bentonite, *Applied clay science*, 14(1-3), 47-58.
- Cho, W.J., 2019, Bentonite-Barrier Material for Radioactive Waste Disposal, pp.181, KAERI/GP-535/2019.
- Cho, W.J., Chun, K., Lee, J.O., and Kang, M.J., 1997, Analysis of Functional Criteria for Buffer Material in the High-level Waste Repository, Korea Atomic Energy Research Institute Technical Report, 16-18, KAERI/TR-933/97.
- Cho, W.J., Lee, J.O., and Kang, C.H., 2000, Hydraulic conductivity of bentonite-sand mixture for a potential backfill material for a high-level radioactive waste repository, *Nuclear Engineering and Technology*, 32(5), 495-503.
- Cui, S.L., Zhang, H.Y., and Zhang, M., 2012, Swelling characteristics of compacted GMZ bentonite – sand mixtures as a buffer/backfill material in China. *Engineering Geology*, 141, 65-73.
- Gillham, R.W., and Cherry, J.A., 1982, Contaminant migration in saturated unconsolidated geologic deposits. In *Recent trends in hydrogeology*, 189, 31-62.
- Herbert, H.J., Kasbohm, J., Sprenger, H., Fernández, A.M., and Reichelt, C., 2008, Swelling pressures of MX-80 bentonite in solutions of different ionic strength, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33, S327-S342.

- Hueckel, T., and Pellegrini, R., 1992, Effective stress and water pressure in saturated clays during heating – cooling cycles, *Canadian Geotechnical Journal*, 29(6), 1095-1102.
- Ikonen, K., and Raiko, H., 2012, Thermal dimensioning of Olkiluoto repository for spent fuel. Working Report 2012-56. Posiva Oy, Eurajoki.
- Jalique, D.R., Stroes-Gascoyne, S., Hamon, C.J., Priyanto, D.G., Kohle, C., Evenden, W.G., et al., and Korber, D.R., 2016, Culturability and diversity of microorganisms recovered from an eight-year old highly-compacted, saturated MX-80 Wyoming bentonite plug. *Applied Clay Science*, 126, 245-250.
- Jenni, A., Wersin, P., Thoenen, T., Baeyens, B., Ferrari, A., Gimmi, T., Mäder, U., Marschall, P., Hummel, W., and Leupin, O., 2019, Bentonite Backfill Performance in a High-Level Waste Repository: A Geochemical Perspective. Technical Report NTB 19-03 270.
- JNC, 2000, H12: Project to establish the technical basis for HLW disposal in Japan. Supporting Report 3, Safety Assessment of the Geological Disposal System. JNC Tech. Rep., JNC TN1401 2000-04.
- Jobmann, M., and Buntebarth, G., 2009, Influence of graphite and quartz addition on the thermo – physical properties of bentonite for sealing heat-generating radioactive waste. *Applied Clay Science*, 44(3-4), 206-210.
- Johnson, L.H., Tait, J.C., Shoesmith, D.W., Crosthwaite, J.L., and Gray, M.N., 1994, The disposal of Canada's nuclear fuel waste: engineered barriers alternatives (No. AECL—10718). Atomic Energy of Canada Limited.
- Juvankoski, M., 2013, Buffer design 2012 (No. POSIVA—12-14). Posiva Oy.
- Karland, O., 2010, Chemical and mineralogical characterization of the bentonite buffer for the acceptance control procedure in a KBS-3 repository.
- Kim, M.J., Lee, G.J., and Yoon, S., 2021, Numerical Study on the Effect of Enhanced Buffer Materials in a High-Level Radioactive Waste Repository. *Applied Sciences*, 11(18), 8733.
- Laird, D. A., 1996, Model for crystalline swelling of 2: 1 phyllosilicates. *Clays and Clay Minerals*, 44(4), 553-559.
- Lee, C., Wei, X., Kysar, J.W., and Hone, J., 2008, Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *science*, 321(5887), 385-388.
- Lee, G.J., Yoon, S., and Cho, W.J., 2021, Effect of Bentonite Type on Thermal Conductivity in a HLW Repository. *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology (JNFCWT)*, 19(3), 331-338.
- Lee, J., Kim, I., Ju, H., Choi, H., and Cho, D., 2020, Proposal of an Improved Concept Design for the Deep Geological Disposal System of Spent Nuclear Fuel in Korea. *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology (JNFCWT)*, 18(spc), 1-19.
- Lee, J.O., Choi, H., and Lee, J.Y., 2016, Thermal conductivity of compacted bentonite as a buffer material for a high-level radioactive waste repository. *Annals of Nuclear Energy*, 94, 848-855.
- Li, H.F., Chen, M.Q., Fu, B.A., and Liang, B., 2019, Evaluation on the thermal and moisture diffusion behavior of sand/bentonite. *Applied Thermal Engineering*, 151, 55-65.
- Liu, L., 2013, Prediction of swelling pressures of different types of bentonite in dilute solutions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 434, 303-318.
- Liu, Y.M., Cai, M.F., and Wang, J., 2007, Thermal conductivity of buffer material for high-level waste disposal. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(S1), 3891-3896.
- Maanoja, S., Palmroth, M., Salminen, L., Lehtinen, L., Kokko, M., Lakaniemi, A.M. et al., and Rintala, J., 2021, The effect of compaction and microbial activity on the quantity and release rate of water-soluble organic matter from bentonites. *Applied Clay Science*, 211, 106192.
- Madsen, F.T., 1998, Clay mineralogical investigations related to nuclear waste disposal. *Clay minerals*, 33(1), 109-129.

- Moser, D.P., Onstott, T.C., Fredrickson, J.K., Brockman, F.J., Balkwill, D.L., Drake, G.R., Pfiffner, S.M., White, D.C., Takai, K., and Pratt, L.M., 2003, Temporal shifts in the geochemistry and microbial community structure of an ultradeep mine borehole following isolation. *Geomicrobiology Journal* 20, 517-548.
- Oscarson, D.W., Stroes-Gascoyne, S., and Cheung, S.C.H., 1986, The effect of organic matter in clay sealing materials on the performance of a nuclear fuel waste disposal vault. Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-9078.
- Pacovsky, J., 2001, Selected results from geotechnical research on bentonite. In *Proceedings of the 8th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation*.
- Park, S., Yoon, S., Kwon, S., Lee, M.S., and Kim, G.Y., 2021, Temperature effect on the thermal and hydraulic conductivity of Korean bentonite buffer material. *Progress in Nuclear Energy*, 137, 103759.
- Pedersen, K., 2000, Exploration of deep intraterrestrial microbial life: current perspectives. *FEMS Microbiology Letters* 185, 9-16.
- Píšková, A., Bezdička, P., Hradil, D., Káfuňková, E., Lang, K., Večerníková, E., Kovanda, F., and Grygar, T., 2010, High-temperature X-ray powder diffraction as a tool for characterization of smectites, layered double hydroxides, and their intercalates with porphyrins. *Applied clay science*, 49(4), 363-371.
- PNC, 1992, Research and development on geological disposal of high-level radioactive waste, PNC TN1410 93-059.
- Posiva S.K.B., 2017, Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository. Conclusions and recommendations from a joint SKB and Posiva working group. Posiva SKB Report 01, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Posiva, 2012, Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto. Description of the disposal system 2012 (No. POSIVA—12-5). Posiva Oy.
- Pusch, R., Karnland, O., and Hökmark, H., 1990, GMM-a general microstructural model for qualitative and quantitative studies of smectite clays (No. SKB-TR—90-43). Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- Romero, E., Villar, M.V., and Lloret, A., 2005, Thermo-hydro-mechanical behaviour of two heavily overconsolidated clays. *Engineering Geology*, 81(3), 255-268.
- Shariatmadari, N., and Saeidijam, S., 2012, The effect of thermal history on thermo-mechanical behavior of bentonite-sand mixture. *International Journal of Civil Engineering*, 10(2), 162-167.
- SKB, 2004, Interim main report of the safety assessment SR-Can. SKB Technical Report TR-04-11, Swedish Nuclear Fuel Management Company Limited, Stockholm, Sweden.
- SKB, 2007. RD&D-programme 2007, SKB TR-07-12. SKB Swedish Nuclear Fuel and Waste Management CO., Stockholm, pp. 260.
- SKBF/KBS, 1983, Final Storage of Spent Fuel-KBS-3.
- Stoller, M.D., Park, S., Zhu, Y., An, J., and Ruoff, R.S., 2008, Graphene-based ultracapacitors. *Nano letters*, 8(10), 3498-3502.
- Stroes-Gascoyne, S., and Hamon, C.J., 2008, The Effect of Intermediate Dry Densities and Intermediate Porewater Salinities on the Culturability of Heterotrophic Aerobic Bacteria in Compacted 100% Bentonite. NWMO-TR-2008-11; Nuclear Waste Management Organization.
- Stroes-Gascoyne, S., and West, J.M., 1997, Microbial studies in the Canadian nuclear fuel waste management program. *FEMS Microbiology Reviews* 20, 573-590.
- Stroes-Gascoyne, S., Hamon, C.J., and Maak, P., 2011, Limits to the use of highly compacted bentonite as a deterrent for microbiologically influenced corrosion in a nuclear fuel waste repository. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 36, 1630-1638.
- Sun, D.A., Cui, H., and Sun, W., 2009, Swelling of compacted sand – bentonite mixtures. *Applied Clay Science*, 43(3-4), 485-492.

- Sun, D.A., Sun, W.J., and Fang, L., 2014, Swelling characteristics of Gaomiaozi bentonite and its prediction. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(2), 113-118.
- Sun, D.A., Zhang, L., Li, J., and Zhang, B., 2015, Evaluation and prediction of the swelling pressures of GMZ bentonites saturated with saline solution. *Applied Clay Science*, 105, 207-216.
- Sun, Z., Chen, Y.G., Cui, Y.J., Xu, H.D., Ye, W.M., and Wu, D.B., 2018, Effect of synthetic water and cement solutions on the swelling pressure of compacted Gaomiaozi (GMZ) bentonite: the Beishan site case, Gansu, China. *Engineering Geology*, 244, 66-74.
- Tang, A.M., and Cui, Y.J., 2010, Effects of mineralogy on thermo-hydro-mechanical parameters of MX80 bentonite. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2(1), 91-96.
- Tang, A.M., Cui, Y.J., and Le, T.T., 2008a, A study on the thermal conductivity of compacted bentonites. *Applied Clay Science*, 41(3-4), 181-189.
- Tang, A.M., Cui, Y.J., and Barnel, N., 2008b, Thermo-mechanical behaviour of a compacted swelling clay. *Géotechnique*, 58(1), 45-54.
- Tarnawski, V.R., Momose, T., and Leong, W.H., 2009, Assessing the impact of quartz content on the prediction of soil thermal conductivity. *Géotechnique*, 59(4), 331-338.
- Usman, M.O., and Simpson, M.J., 2021, Assessment of the molecular-level compositional heterogeneity of natural organic matter in bentonites intended for long-term used nuclear fuel storage. *Organic Geochemistry*, 152, 104166.
- Van, O.H., 1991, Clay colloid chemistry for clay technologists. *Geologists and soil scientists*.
- Villar, M.V., 2004, Thermo-Hydro Mechanical Characteristics and Processes in the Clay Barrier of a High Level Radioactive Waste Repository. *State of the Art Report*.
- Villar, M.V., and Lloret, A., 2004, Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite. *Applied clay science*, 26(1-4), 337-350.
- Villar, M.V., Gómez-Espina, R., and Lloret, A., 2010, Experimental investigation into temperature effect on hydro-mechanical behaviours of bentonite. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2(1), 71-78.
- Wen, Z.J., 2006, Physical property of China's buffer material for high-level radioactive waste repositories. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(4), 794-800.
- Westsik, J.H., Bray, L.A., Hodges, F.N., and Wheelwright, E.J., 1981, Permeability, swelling and radionuclide retardation properties of candidate backfill materials. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 6.
- Xu, L., Ye, W.M., Chen, B., Chen, Y.G., and Cui, Y.J., 2016, Experimental investigations on thermo-hydro-mechanical properties of compacted GMZ01 bentonite-sand mixture using as buffer materials. *Engineering Geology*, 213, 46-54.
- Xu, Y., Zeng, Z., and Lv, H., 2019, Temperature dependence of apparent thermal conductivity of compacted bentonites as buffer material for high-level radioactive waste repository. *Applied Clay Science*, 174, 10-14.
- Ye, W.M., Zhang, Y.W., Chen, Y.G., Chen, B., and Cui, Y. J., 2013, Experimental investigation on the thermal volumetric behavior of highly compacted GMZ01 Bent. *Applied clay science*, 83, 210-216.
- Ye, W.M., Zheng, Z.J., Chen, B., Chen, Y.G., Cui, Y.J., and Wang, J., 2014, Effects of pH and temperature on the swelling pressure and hydraulic conductivity of compacted GMZ01 bentonite. *Applied Clay Science*, 101, 192-198.
- Yong, R.N., 1999, Soil suction and soil-water potentials in swelling clays in engineered clay barriers. *Engineering geology*, 54(1-2), 3-13.
- Yoon, S., Kim, M.J., Lee, S.R., and Kim, G.Y., 2018a, Thermal conductivity estimation of compacted bentonite buffer materials for a high-level radioactive waste repository. *Nuclear Technology*, 204(2), 213-226.

- Yoon, S., Cho, W., Lee, C., and Kim, G.Y., 2018b, Thermal conductivity of Korean compacted bentonite buffer materials for a nuclear waste repository. *Energies*, 11(9), 2269.
- Yoon, S., Kim, M.J., Park, S., and Kim, G.Y., 2021, Thermal conductivity prediction model for compacted bentonites considering temperature variations. *Nuclear Engineering and Technology*, 53, 3359-3366.
- Zhang, F., Ye, W.M., Wang, Q., Chen, Y.G., and Chen, B., 2019, An insight into the swelling pressure of GMZ01 bentonite with consideration of salt solution effects. *Engineering Geology*, 251, 190-196.
- Zhang, M., Zhang, H., Cui, S., Jia, L., Zhou, L., and Chen, H., 2012, Engineering properties of GMZ bentonite-sand as buffer/backfilling material for high-level waste disposal. *European journal of environmental and civil engineering*, 16(10), 1216-1237.
- Zhu, C.M., Ye, W.M., Chen, Y.G., Chen, B., and Cui, Y.J., 2013, Influence of salt solutions on the swelling pressure and hydraulic conductivity of compacted GMZ01 bentonite. *Engineering Geology*, 166, 74-80.
- Zhuang, Y.C., Xie, K. H., and Sun, Y.H., 2005, Experimental study on thermal conductivity of mixed materials of sand and bentonite. *Yantu Lixue(Rock Soil Mech.)*, 26(2), 261-264.