

Temperature Effect on the Swelling Pressure of a Domestic Compacted Bentonite Buffer

국산 압축벤토나이트 완충재의 온도에 따른 팽윤압 특성 연구

Ji-Hyeon Lee¹⁾, MinSoo Lee*, Heui-Joo Choi* and Jong-Won Choi*

University of Science & Technology, 113 Gwahak-ro Yuseong-Gu, Daejeon

*Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Daedeok-daero Yuseong-gu, Daejeon

이지현¹⁾, 이민수*, 최희주*, 최종원*

과학기술연합대학원대학교, 대전시 유성구 과학로 113

*한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045

(Received September 30, 2009 / Revised July 12, 2010 / Approved August 17, 2010)

Abstract

The effect of temperature on swelling pressure was observed with a Korean domestic Ca-bentonite which has been considered as a potential buffer material in the engineering barrier of a high level radioactive waste (HLW) disposal system. The Ca-bentonite was compacted to a dry density of 1.6 g/cm³, and then de-ionized water was supplied into it with a constant pressure of 0.69 MPa. The equilibrium swelling pressures were measured with different temperatures of 25°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C, respectively. The Ca-bentonite showed a sufficiently high swelling pressure of 5.3 MPa at room temperatures. Then it was clearly showed that the equilibrium swelling pressure was decreased with an increase of temperature. Interestingly, there were some differences in temperature effect on the equilibrium swelling pressure when the environmental temperature is increasing or decreasing. For further clarifying the swelling behaviour of a Korea domestic Ca-bentonite, the change of a compaction level, and the composition variation of a supplied water would be needed to use in conceptual design of HLW disposal system.

Key words : Bentonite, Swelling pressure, Temperature, Buffer material, High-level radioactive waste repository

요 약

국산 칼슘 벤토나이트를 대상으로 온도가 팽윤압에 미치는 영향을 관찰하였다. 벤토나이트를 건조밀도 1.6 g/cm³으로 압축하고, 0.69 MPa의 일정한 수압으로 증류수를 공급하여 팽윤압을 측정하였다. 온도 영향 실험은 25°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C에서 승온조건과 감온조건으로 수행하였다. 압축 벤토나이트가 물과 접촉하여 상온에서 5.3 MPa의 충분히 높은 팽윤압이 작용하는 것을 실험적으로 확인하였다. 팽윤압은 온도가 높을수록 감소하는 것으로 나타났다. 승온조건과 감온조건에서의 온도에 따른 팽윤압 거동에 차

1) Corresponding Author. E-mail : ezhyeon@kaeri.re.kr

이를 보이며, 승온조건에서 온도에 따른 변화가 심하게 나타났다. 향후 온도 조건 외에 벤토나이트의 압축 밀도 변화, 지하수 조성에 따라 팽윤압 특성이 어떻게 변화하는지에 대해 평가한다면, 앞으로 국내 고준위 폐기물 처분장의 개념 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 본다.

중심단어 : 벤토나이트, 팽윤압, 온도, 완충재, 고준위폐기물처분장

I. 서론

고준위폐기물 심지층 처분장에서 완충재의 중요한 기능 중 하나는 밀봉 역할이다. 완충재는 처분공 내 공극을 최소화하고 주위 암반의 균열을 메워 지하수나 유출 핵종의 이동을 최대한으로 억제하는 역할을 한다. 완충재로는 높은 팽윤성, 양호한 양이온 흡착능 및 처분 환경에서의 내구성 등이 우수한 벤토나이트가 일본 및 유럽 각국에서 사용되고 있다.

벤토나이트는 몬모릴로나이트(montmorillonite)를 주 구성 성분으로 하고 석영(quartz), 장석(feldspar), 불석(zeolite), 탄산염 광물류(carbonate minerals), 철산화물(iron oxide), 유기물(organic matter) 등을 부 구성광물로 하는 점토이다. 물과의 접촉 시 벤토나이트의 팽윤특성은 몬모릴로나이트의 함량에 의해 결정된다. 몬모릴로나이트는 스멕타이트(smectite)를 그룹명으로 하는 점토광물로서, 2개의 SiO₂ 사면체 엽상면 사이에 알루미늄(또는 철, 마그네슘)을 갖는 Al(OH)₆ 팔면체 엽상면이 끼인 단위입자들이 집적된 형태로 존재한다. 엽상면은 전기적으로 음성을 띄기 때문에 층 사이에는 Na, Ca, Mg 등의 금속 양이온이 첨가되어 전기적으로 중성을 이루게 되며, 금속 양이온의 종류에 따라서 Na-벤토나이트, Ca-벤토나이트 등으로 구분된다.

몬모릴로나이트가 물과 접촉하여 부피의 증가, 즉, 팽윤을 하려면 입자와 입자 사이에 물분자가 유입되고 그 환경에서 작용하는 척력(repulsion forces)이 인력(attractive force)보다 커야 한다. 이 때 벤토나이트 입자와 입자 사이에 작용하는 척력은 수화에 의한 힘(hydration forces), 삼투현상에 의한 힘(osmotic forces), 탄성반발력(elastic rebound forces) 등 3가지 힘으로 설명된다[1]. 수화에 의한 힘은 물이 입자표면에 달라붙거나 입자 층간의 양이온이 수화되면서 생긴 척력이다. 함수량이 낮은 경우, 물은 입자표면에 강하게 달라붙고 그 결과 수화반응이 팽윤을 지배하게 된다. 삼투현상에 의한 힘은 입자 층간이나 입자와 입자 사이의 거리가 15 Å 이상일 때 중요하다. 입자표면의 전기적 이중층(electric double layer) 내 이온농도는 벌크 상(bulk phase)의 것보다 더 높는데, 이 경우 삼투현상이 일어난다. 즉, 농도구배에 의해 매질

인 물은 이온농도가 낮은 벌크 상에서 높은 이중층 쪽으로 이동하게 되고, 그 결과 두 입자사이에는 서로를 밀치는 척력이 작용하게 된다. 높은 함수량을 갖는 벤토나이트의 팽윤에서 이 힘의 기여도가 가장 크다. 탄성반발력은 벤토나이트 입자의 꺾이지 않는 탄성적인 성질 때문에 생긴 것으로, 과압밀 벤토나이트(overconsolidated bentonite)에서는 회복 가능한 변형에너지의 대부분을 차지한다. 따라서 과압밀 벤토나이트에서의 팽윤은 입자 및 양이온의 수화와 삼투현상 뿐만 아니라 탄성적 반발 현상을 동시에 고려하여 설명된다[2].

완충재가 방벽재로서 밀봉역할을 제대로 하기 위해서는 팽윤능이 커야 하지만, 다른 한편으로는 처분용기와 주위 암반에 과도한 부하를 주지 않도록 팽윤압이 적정하게 유지되어야 한다. 그러므로 벤토나이트를 기본재로 하는 물질을 완충재로 사용할 경우 대상물질의 팽윤압 측정은 처분장 설계를 위해서 매우 중요하다. 벤토나이트의 광물학적 특성, 공극수의 물리·화학적 특성, 처분장 적용 시 공학적 조건 등이 벤토나이트의 팽윤압에 영향을 미친다. 문헌에 의하면, 벤토나이트의 팽윤압은 건조밀도, 벤토나이트 함량, 초기 함수량, 이온강도, 온도 등에 의존하는 것으로 보고되고 있다[1-16].

현재 한국형 처분장에서 공학적 방벽으로 사용하고자 하는 기준 벤토나이트는 압축 밀도 1.6 g/cm³의 경주산 천연 칼슘 벤토나이트이다. 그 구성은 몬모릴로나이트 70%, 장석 29%, 석영 1%로 되어 있으며, 그 팽윤압은 상온에서 약 3 MPa 정도로 보고되고 있다[17]. 처분장은 방사성폐기물이 열원으로 작용하여 고열조건을 형성하게 된다. 한국형 처분장에서는 처분용기의 배열간격을 조정하여 공학적 방벽의 온도를 70 °C 내외로 설계하고 있다[18]. 처분장 온도는 처분기간이 늘어남에 의해 붕괴열이 감소하게 되어 낮아질 것으로 예측된다. 따라서 벤토나이트 완충재의 팽윤압도 온도 변화에 의해 변화될 것으로 보고 있으나 지금까지 국내에서는 기준 벤토나이트의 온도에 따른 팽윤압 변화는 관측된 바는 없었다.

앞선 Pusch 등의 다른 실험결과를 살펴보면, 온도가 증가하면서 팽윤압이 증가하며, 높은 건조밀도의 벤토나이트에서는 온도가 증가해도 팽윤압 변화는 별로 없는 것으로 보고되었다[19]. 이후의 Suzuki 등의 일본 연구진들의 연구에서는

이와는 반대로 온도가 증가하면서 팽윤압이 감소하는 결과를 나타내었으며, 그 원인으로 화학적 전위의 감소와 격자의 변형이 변화되면서 줄어드는 것으로 추정하였다[20]. 이러한 차이는 벤토나이트의 종류와 실험조건에 따라서 차이가 있는 것으로 보인다.

이에 본 연구에서는 우리나라 고준위폐기물 처분장에 사용될 완충재로서 고려되고 있는 국산 칼슘 벤토나이트를 대상으로 팽윤압을 측정하고, 온도에 따라서 팽윤압이 어떻게 변화되고 있는지 살펴보고자 하였으며, 그 결과는 완충재의 열-구조 연계 해석에 있어 중요한 입력인자로 활용될 것이다.

II. 본 론

가. 실험 재료 및 물질

① 벤토나이트

본 실험에 사용된 벤토나이트는 경북 경주시 양남면 소재 제 29 호 진명광산에서 채취한 것이다. 벤토나이트의 화학조성은 Table 1과 같다[11]. 채취한 벤토나이트 시료는 105℃에서 24시간 동안 건조시킨 후, 200 메쉬(mesh) 체를 90% 이상 통과하도록 분쇄한 분말이며, 이렇게 공장에서 조제된 벤토나이트 분말을 본 실험을 위하여 40kg 포장단위로 입수하였다.

먼저 실험에 사용된 벤토나이트의 함습율을 알아보기 위하여 110℃ 조건에서 항온 건조 오븐에서 3일간 건조시켜 무게감손량을 통하여 수분함량을 측정하였다. 그 결과 시험에 사용된 벤토나이트의 함습율은 약 12.6%였다. 얻어진 함습율을 근거로 하여 건조처리 되지 않은 벤토나이트를 압축했을 경우, 고품분만의 건조밀도를 구할 수 있었다. 팽윤압 측정용기 내적에 대한 벤토나이트 고품분만의 건조밀도를 1.6 g/cm³로 정하고, 건조처리 되지 않은 벤토나이트 분말을 프레스로 압축하였다. 제작된 압축시편은 직경 30 mm, 높이 10 mm 압축 블록 2개로서 이때 블록 부피를 기준으로 환산된 수분을 포함한 압축 블록의 겉보기 밀도는 약 1.95 g/cm³ 정도이며, 블록 자체의 건조밀도로는 약 1.7 g/cm³ 정도였다. 압축 블록 하나는 구리 시편을 가진 압축 벤토나이트이며, 이 경우 분말의 압축 과정은 동일하고 압축 몰드 내부 바닥면 중앙에 먼저 사용할 구리시편을 놓은 후 벤토나이트 분말을 쌓아 압축한다. 벤토나이트 블록 제조 과정 및 제작된 벤토나이트 블록은 각각 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. 구리시편

은 일반 압출동으로서, 완충재로 둘러싸인 처분용기를 모의하기 위하여 벤토나이트 압축 블록에 넣었다. 구리시편의 크기는 직경 15 mm, 높이 1.0 mm의 동전모양이다.

② 물

벤토나이트의 팽윤압 측정을 위해 실험에 사용된 물은 증류수(distilled and deionized water)를 사용하였다.

나. 실험 장치 구성

벤토나이트의 팽윤압은 Fig. 3과 Fig. 4에 보인 장치를 이용하여 측정하였다. 이 장치는 크게 팽윤장치, 수공급 펌프, 팽윤압 출력장치 등 3 부분으로 구성되며, 온도 조건의 변화에 따른 팽윤압 변화를 관찰하기 위해 팽윤 장치를 온도 조절이 가능한 항온 챔버 내에 설치하였다.

팽윤장치는 구리 시편을 삽입한 압축벤토나이트를 내부식성 티타늄 금속용기에 넣고 물을 공급하여 팽윤하도록 하였

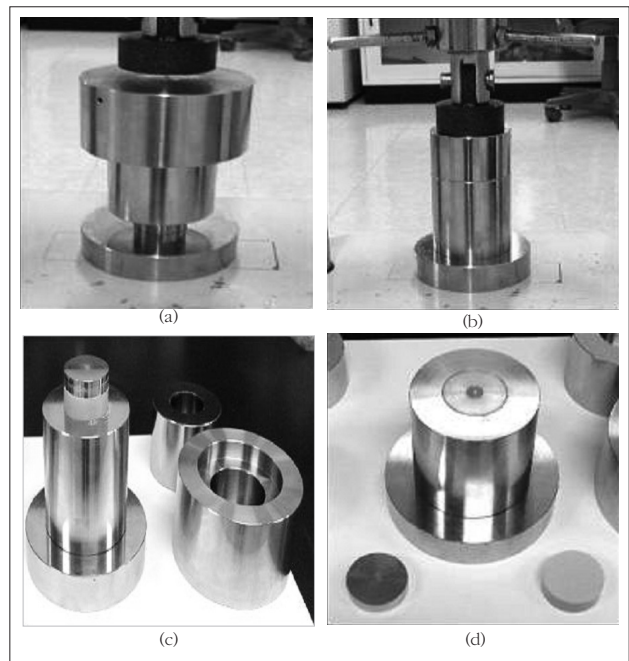


Fig. 1. Preparation procedure of a bentonite block



Fig. 2. Compacted bentonite block with copper & compacted bentonite block without copper.

Table 1. Chemical Composition of Bentonite

Oxides	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅
wt.%	56.8	19.96	6.03	0.15	2.59	0.77	0.93	2.95	0.04	0.83	0.11

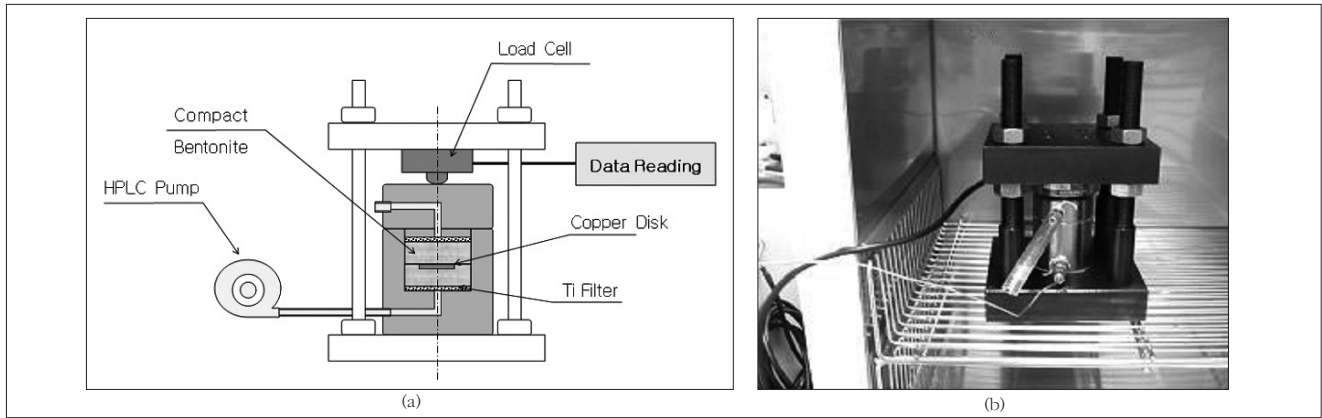


Fig. 3. Schematic diagram of a swelling pressure test apparatus and a swelling pressure test apparatus.

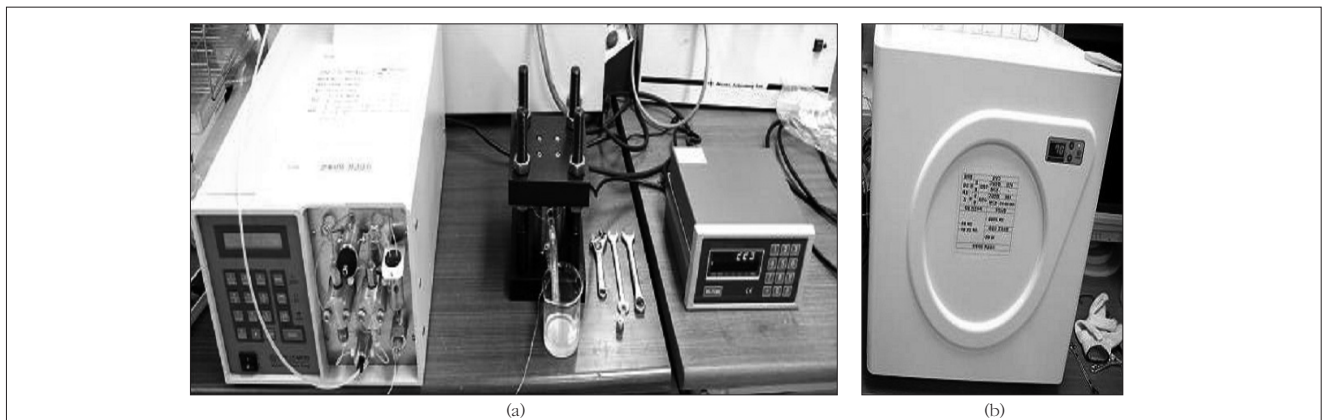


Fig. 4. Swelling pressure measuring device

으며, 팽윤된 벤토나이트가 외부로 나가지 못하도록 티타늄 필터를 상하면에 장착하였다. 상기 나열한 방법으로 조립이 완료된 팽윤장치는 Fig. 4에 나타내었다.

다. 팽윤압 측정

벤토나이트 팽윤에 의해 형성된 팽윤압은 상단에 설치된 로드셀(Load cell)에서 감지되어 데이터기록장치(Data reader)에서 표시되도록 하였다. 수공급 펌프는 고압용 HPLC 펌프로서 25℃의 물을 외부에서 항온챔버 내의 티타늄 급속용기 하부로 공급한다. 초기에는 0.1 ml/min의 유속으로 티타늄 급속용기에 물을 서서히 공급하였으며, 팽윤압이 발생하기 시작하고 공급수압이 급격히 상승하게 되면, 0.69 MPa의 수압으로 정압조건을 유지하였다. 이 때 유속은 짧은 시간에 거의 제로 상태가 된다. 로드셀에서 감지된 압력은 팽윤압 출력장치를 통해 수동으로 읽었다. 일단 정압조건이 형성되면, 원하는 온도로 변화시켜서 그 온도에서 팽윤압이 평형값에 도달할 때까지 수습일을 기다린 후, 해당 온도에서의 평형값을 얻었으며, 이후에는 다음 온도로 변화시켰다. 온도 영향

실험은 25℃, 30℃, 40℃, 50℃, 60℃, 70℃로 단계적으로 증가시키거나 반대로 감소시키면서 수행하였다.

Ⅲ. 결과 및 논의

Fig. 5는 상온에서 압축시료의 시간에 따른 팽윤압의 변화를 나타낸 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 압축시료의 팽윤압은 물과 접촉한지 얼마 지나지 않아 급격히 피크를 보이다가 일정 시간이 경과한 뒤로는 거의 일정한 6.1 MPa의 팽윤압에 도달하였다. 실제 압축 벤토나이트만의 팽윤압은 공급수압 0.69 MPa을 제외한 5.3 MPa이 된다. 이 같은 결과는 일본의 공학적 방벽(Na형 압축벤토나이트 70% + 모래 30%)의 1 MPa 팽윤압에 비해서 상당히 높은 값이며[19], 스웨덴 SKB에서 측정된 Ca형 압축벤토나이트의 10 MPa에 비해서는 다소 낮은 값에 해당된다[21]. 결과적으로 경주산 국내 칼슘 벤토나이트가 물과 접촉하여 상온에서 충분히 높은 팽윤압이 작용하는 것을 알 수 있다.

온도에 따른 압축 벤토나이트의 팽윤압은 온도를 25℃, 30

℃, 40℃, 50℃, 60℃, 70℃로 단계적으로 증가시키거나 반대로 감소시키면서 측정해 보았다. 승온 시 온도에 따른 압축 벤토나이트의 팽윤압 변이는 Fig. 6에, 감온 시 온도에 따른 압축 벤토나이트의 팽윤압 변이는 Fig. 7에 각각 나타내었다. 각 온도에서 팽윤압이 정상상태에 도달할 때까지 기다렸다가 단계적으로 온도를 10℃씩 변화시켰는데, 실험 결과 팽윤압이 처음 약 30일, 그 후 각 온도에서 약 15일 정도 경과했을 때 정상상태에 충분히 도달하였다.

압축 벤토나이트의 팽윤압은 온도가 높아질수록 팽윤압이 감소하는 것을 실험상으로 뚜렷이 확인할 수 있었다(Fig. 6). 온도에 따른 벤토나이트의 팽윤압 거동은 스웨덴과 일본에서 많이 연구된 바 있다. 벤토나이트의 팽윤특성에 대해 가장 많이 연구를 한 Pusch 등은[19] 1990년대 초의 연구논문에서 Na-bentonite의 연구를 통해서 온도가 올라가면 팽윤압이 증가하는 실험적 결과를 보고 하였다. 하지만 1990년대 말 Na-bentonite의 팽윤특성을 연구한 Suzuki와 Fujita[20], 그리고 Towhata[22] 등은 오히려 온도가 올라가면 팽윤압이 감소하

는 결과를 얻었다. 이에 대해서 일본 학자들은 명확한 해석을 하지 못하고 초기에는 압력센서의 오차, 팽윤셀의 열팽창 등을 의심하였으며, 최종적으로는 벤토나이트의 시간에 따른 변형계수의 변화가 그 원인일 것으로 추정하였다[20]. 한편으로 팽윤을 일으키는 smectite 성분이 illite화 되는 것도 생각해 볼 수 있으나, 100℃ 이하에서는 그러한 변성이 아주 느리게 일어나기 때문에 그 가능성은 배제되었다[20]. 아직까지 일본의 연구결과들과 Pusch가 제시한 연구결과와의 상이함의 원인은 명확하지 않으며, 단지 벤토나이트 종류와 시험조건의 차이에 기인한다고 보고 있다[23]. 본 실험의 경주산 Ca-bentonite의 경우에 있어서도 일본의 연구결과와 동일하게 온도가 올라가면서 팽윤압이 감소한 것으로 볼 때, 그 원인이 외부 기기의 영향이라기보다는 벤토나이트 자체의 물성변화에 기인한 것으로 판단된다.

한편, Fig. 8의 실험 결과에서 승온조건(○)과 감온조건(■)에서 온도에 따른 팽윤압 거동에 차이를 보이는 것을 알 수 있었다. 상온에서 70℃로 올린 승온 조건은 상온에서는 감온

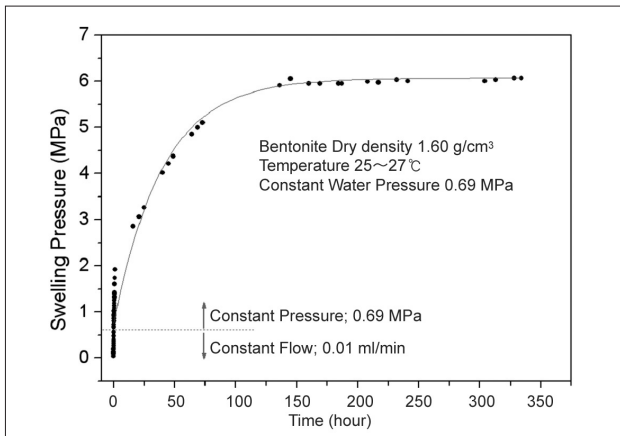


Fig. 5. Swelling pressure during saturation at room temperature.

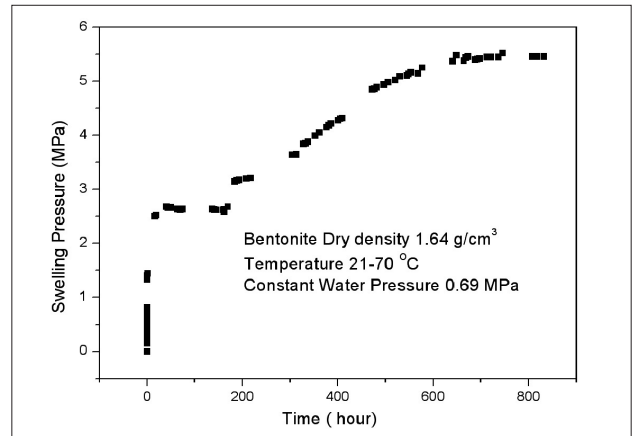


Fig. 7. Variation of swelling pressure at decreasing temperature conditions.

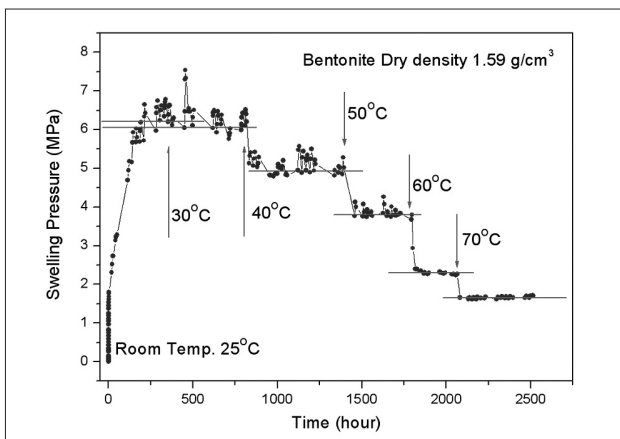


Fig. 6. Variation of swelling pressure at increasing temperature conditions.

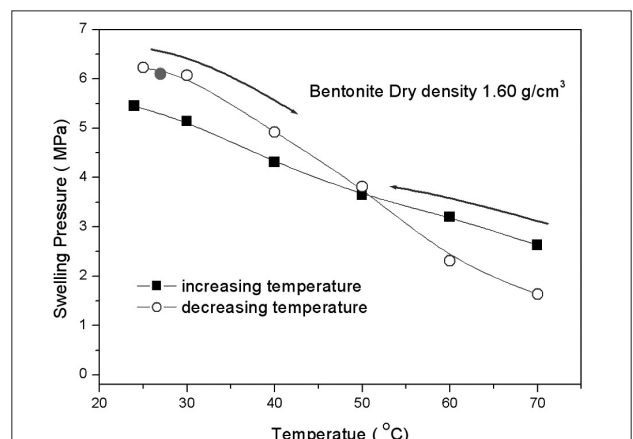


Fig. 8. Influence of temperature on swelling pressure of a domestic compacted bentonite.

조건에서보다 높은 팽윤압을 보였지만, 70℃에서는 감온조건에서보다 낮은 역전된 팽윤압을 보이고 있었다. 이러한 현상은 다른 논문에서는 나타나지 않는 현상으로서 그 원인이 뚜렷하지 않았다. 예상되는 이유 중의 하나는 평형압에 충분히 도달하지 않을 만큼 팽윤압 측정시간이 충분치 않은 경우이다. 물의 흡수에 의해 뒤틀린 격자가 물이 빠져 달아날 경우(승온조건)와 물이 다시 들어오는 경우(감온 조건)에는 평형에 도달하는 시간적 차이가 발생할 수도 있을 것이다. 우리의 실험방법과 다르게 단독으로 벤토나이트를 승온시킨 후 다시 감온시킨 일본 연구자들의 결과를 살펴보면[20], 다시 감온을 하게 되면 팽윤압이 상승하기는 하지만 승온시켰을 때보다 낮게 나타나는 경우가 많이 발생됨을 알 수 있다. 따라서 본 논문의 결과와 앞선 일본의 연구 결과를 살펴보면, 확실한 사실은 승온조건이나 감온조건에서 시간이 오래 지난 후 측정된 팽윤압은 같은 온도조건이더라도 낮은 값을 보인다는 것이다. 즉 상온에서는 초기값을 가지는 승온조건이 높은 값을, 70℃에서는 초기값을 가지는 감온 조건이 상대적으로 높은 팽윤압을 보이게 된다. 따라서 이러한 승온조건과 감온조건의 온도에 따른 팽윤압 차이는 시간에 따른 벤토나이트의 팽창력이 서서히 감소하는 것이 아닌가 판단된다. 하지만 앞선 일본의 연구에서도 나타나듯이[20] 한 온도 지점에서 1,000시간 이상 관찰하여도 팽윤압이 감소되는 경우는 잘 발생되지 않고 있으며, 본 연구에서도 한 온도 지점에서 300 시간 이상 팽윤압을 관측하여도(Fig. 5) 팽윤압 감소가 보이지 않고 일정한 값을 유지함을 알 수 있다. 따라서 온도 변화가 벤토나이트의 팽창력에 영향을 주는 것으로 보인다. 따라서 보다 확실한 해석을 위해서는 수개월 이상의 장기 팽윤거동을 통해서 시간이 지남에 따라서 형성된 팽윤압이 감소되는지 확인해 볼 필요가 있다고 본다.

IV. 결 론

본 연구에서는 국산 압축벤토나이트의 팽윤압에 온도가 미치는 영향을 연구하였다. 경주산 국내 칼슘 벤토나이트가 물과 접촉하여 상온에서 5.3 MPa의 충분히 높은 팽윤압이 작용하는 것을 실험으로 확인할 수 있었다. 또한 온도가 높아짐에 따라 압축 벤토나이트의 팽윤압이 감소하는 것을 승온조건과 감온조건으로 확인하였다. 하지만 승온조건과 감온조건에서 온도별로 팽윤압이 일치하지 않는 현상이 나타났으며, 시간적으로 오래된 경우에는 낮은 팽윤압을 나타내었다. 좀 더 오랜 시간 팽윤압을 관측하는 것이 필요한 것으로 판단되며, 증류수 이외에도 이온수에 대한 팽윤압도 조사하면 실험적 해

석이 뚜렷해 질 것으로 판단된다.

앞으로 본 실험을 계속하면서 벤토나이트의 압축밀도 변화, 지하수 조성의 변화에 따라 팽윤압 특성이 어떻게 변화하는지에 대해 평가한다면, 앞으로 국내 고준위폐기물 처분장의 개념 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력 연구개발 중장기 계획 사업의 일환으로 수행된 연구 결과입니다.

참고문헌

- [1] 이재완, 조원진, 전관식, 강철형, "완충재 대상물질의 팽윤특성 연구 : 팽윤압에 대한 이온강도 및 온도의 영향", KAERI/TR-1318/99, 한국원자력연구소 (1999).
- [2] 이재완, 전관식, 조원진, 박현수, "완충재 대상물질의 팽윤특성 연구 : 팽윤압에 대한 건조밀도, 벤토나이트 함량 및 초기함수량의 영향," KAERI/TR-954/98, 한국원자력연구소 (1998).
- [3] Hideo Komine, "Simplified evaluation for swelling characteristics of bentonites", Engineering Geology 70 (2004) 265-279 (2003).
- [4] Roland Pusch, "Swelling pressure of highly compacted bentonite", SKBF TEKNISK KBS RAPPORT 80-13, Division Soil Mechanics, University of Lulea
- [5] M. Victoria Villar, Antonio Lloret, "Influence of dry density and water content on the swelling of a compacted bentonite", Applied Clay Science 39(2008) 38-49 (2007).
- [6] Hideo Komine, "Simplified evaluation for swelling characteristics of bentonites", Engineering Geology 71(2004) 265-279 (2003).
- [7] Hideo Komine and Nobuhide Ogata, "Experimental study on swelling characteristics of sand-bentonite mixture for nuclear waste disposal", Soils and foundations Vol. 39, No. 2, 83-97 (1999).
- [8] De'an Sun, Hongbin Cui, Wenjing Sun, "Swelling of compacted sand-bentonite mixtures", Applied Clay Science 43 (2009) 485-492 (2008).
- [9] Horst-Juergen Herbert, Joern Kasbohm, Heinz

- Sprenger, Ana Maria Fernandez, Christian Reichelt, "Swelling pressures of MX-80 bentonite in solutions of different ionic strength, *Physics and Chemistry of the Earth* 33 (2008) S327-S342 (2008).
- [10] "Bentonite swelling pressure in strong NaCl solutions", SKB Technical report 97-31, Ola Karnland, Clay Technology, Lund, Sweden.
- [11] Ola Karnland, Siv Olsson, Ulf Nisson, Patrik Sellin, "Experimentally determined swelling pressure and geochemical interactions of compacted Wyoming bentonite with highly alkaline solutions, *Physics and Chemistry of the Earth* 32 (2007) 275-286 (2006).
- [12] P. Wersin, L. H. Johnson, I. G. McKinley, "Performance of the bentonite barrier at temperatures beyond 100°C: A critical review", *Physics and Chemistry of Earth* 32 (2007) 780-788 (2006).
- [13] W.J. Cho, J.O. Lee, K.S. Chun, "The temperature effects on hydraulic conductivity of compacted bentonite, *Applied Clay Science* 14 (1999) 47-58 (1998)
- [14] Won-Jin Cho, Jae-Owan Lee, Chul-Hyung Kang, "Influence of temperature elevation on the sealing performance of a potential buffer material for a high-level radioactive waste repository, *Annals of Nuclear Energy* 27 (2000) 1271-1284 (1999).
- [15] 이재완, 조원진, "습도계를 이용한 압축벤토나이트 내 함수율 결정 및 적용", *방사성폐기물학회지*, Vol.7 pp. 101-107 (2009).
- [16] 조원진, 이재완, 권상기, "압축 벤토나이트 및 벤토나이트-모래 혼합물의 열전도도", *방사성폐기물학회지*, Vol.6 pp. 101-109 (2008).
- [17] 이재완, 조원진, "우리나라 고준위폐기물처분장 기준 벤토나이트완충재의 열적-수리적-역학적 특성치", KAERI/TR-3729/2009, 한국원자력연구원 (2009).
- [18] J. W. Choi, H. J. Choi, J. Y. Lee and et. al. 2006. "HLW Disposal System Development", KAERI/RR-2765/2006. Korea Atomic Energy Research Institute.
- [19] Pusch. R, Karnland. O, Lajudie. A, Lechelle. J and Bouchet. A, "Hydrothermal Field Test with French Candidate Clay Embedding Steel Heater in the Stripa Mine", SKB Technical Report 93-02
- [20] Suzuki. H, and Fujita. T, "Swelling Characteristics of Buffer Material", JNC TN8400, 99-038.
- [21] Pusch. R, Karnland. O and Hökmark. H, "GMM - A General Microstructural Model for Qualitative and Quantitative Studies of Smectite Clay", SKB Technical Report 90-43.
- [22] Towhata, I., Kuntiwattanakul, P., Ohishi, K. and Takeuchi, , "Effect of Elevated Temperature on Mechanical Behavior of Clays", *Journal of the Japanese Geotechnical Society*, Vol.46, No.10, pp.27-30 (1998).
- [23] H12 report : Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Chap. II, JNC (2000).