

벤토나이트 완충재의 구리치환 반응 특성

Characteristics for the Copper Exchange Reaction by Bentonite Buffer

이 승 엽(Seung Yeop Lee)* · 이 지 영(Ji Young Lee) ·
정 종 태(Jongtae Jeong) · 김 경 수(Kyungsu Kim)

한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부
(Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea)

요약 : 고준위폐기물의 심지층 처분을 위해 완충재인 벤토나이트가 반드시 필요하고, 지하 환경에서 이 물질의 장기적 특성 변화를 아는 것은 매우 중요하다. 본 실험에서 폐기물 금속용기의 구리코팅 성분이 부식되면서 구리이온 농도가 증가한다고 가정하였을 때, 완충재인 벤토나이트 점토(몬모릴로나이트)의 층간 양이온들의 이온교환 및 용출 특성 등을 실험을 통해 살펴보았다. 용존 구리와 벤토나이트와의 반응실험에서 팽창성 점토의 Na가 선택적으로 먼저 Cu에 의해 치환되었고 Ca는 상대적으로 시간을 두고 이온교환되었다. 그리고 구리로 치환된 몬모릴로나이트는 X-선회절 분석결과 원시료에 비해 층간간격이 다소 줄어든 특징적인 비대칭 회절형태로 관찰되었다. 이러한 실험결과는 지하처분 조건에서 고유 벤토나이트 성질의 점진적인 변화를 간접적으로 지시하는 것으로, 향후 다양한 추가 실험을 통해 처분장 완충재의 화학적·광물학적 특성 변화를 연구할 계획이다.

주요어 : 고준위폐기물, 벤토나이트, 구리이온, 몬모릴로나이트, 이온교환

ABSTRACT : The bentonite, a buffer material, is essential for the deep geological disposal of HLW (high-level radioactive waste), and it is important to know its characteristic long-term evolution in the underground environment. With an assumption that the concentration of aqueous copper ions will increase if copper-coated materials on a metal canister are corroded, we examined some characteristic ion-exchanges and cation release phenomena occurring in the bentonite clay (montmorillonite) interacted with aqueous Cu cations. During the interaction between dissolved copper and bentonite, Na rather than Ca cations in the expandable clay were preferentially replaced by Cu ions in the experiment. In addition, the Cu-exchanged montmorillonite was characterized by an asymmetric X-ray diffracted pattern with relatively collapsed interlayers compared to the raw sample. These results indicate that the gradual change of the original bentonite property may occur in a underground disposal condition. We are going to further study the characteristic chemical and mineralogical changes of the bentonite buffer to be used for the disposal site by conducting additional experiments.

Key words : high-level radioactive waste, bentonite, copper ion, montmorillonite, ion-exchange

*Corresponding author: +82-42-868-4735, E-mail: seungylee@kaeri.re.kr

서 론

고준위방사성폐기물을 지하 심부에 처분하기 위해서는 고준위 폐연료봉을 감싸는 금속용기(내부: 주철, 외부: 구리코팅 재질)뿐만 아니라 지하수의 침입 및 지진 등의 외부 요인들로부터 완충 역할을 해줄 수 있는 버퍼물질이 반드시 필요하다(Lee *et al.*, 2007). 지금까지 처분용기를 감싸는 완충물질로 고려되는 소재들 중에는 자연산이면서 차수 능력이 뛰어난 ‘벤토나이트’가 유력한 후보 물질로 제시되고 있다.

벤토나이트는 몬모릴로나이트(스멕타이트족) 함량이 매우 높은 점토로 구성되어 있으며, 석영, 장석, 고령토 및 제올라이트 등을 소량 함유하고 있다. 몬모릴로나이트는 스멕타이트 아족으로 2:1층형 구조를 가지며 층전하가 주로 팔면체판에서의 동형치환에 의해 생성되고, 층간(interalyers)에 물 분자 등을 결합시킴으로써 구조를 팽창시키고 수축시킬 수 있는 특징을 갖고 있다(Grim, 1968). 벤토나이트의 가장 큰 특징 중의 하나는 물과 접촉했을 때 물을 흡수하여 스스로 팽창(swelling)하여 물의 이동을 일정 수준 이하로 감소시키는 차수의 능력이며 결과적으로 매우 낮은 수리전도도(hydraulic conductivity)를 유지케 한다. 벤토나이트 내 몬모릴로나이트의 판상 층간(platy interlayers) 양이온의 종류에 따라 Ca-형과 Na-형 벤토나이트로 크게 나뉘지며, 자연계에서는 일반적으로 Ca-형 벤토나이트가 우세하게 존재한다(Noh, 2002). 점토 층상 구조의 음전하를 보상하기 위해 층간에 존재하는 Na 및 Ca 양이온들이 화학적으로 물을 끌어당기고 수화(hydration)되면서 층간간격이 점차 벌어지는데, Na에 비해 Ca의 수화수(hydration number)가 작아 Ca-형 벤토나이트가 상대적으로 팽창정도가 작다.

본 실험의 목적은 고준위방사성폐기물 처분용기로 개발 중인 저온분사형 구리코팅 용기(Lee *et al.*, 2012; Choi *et al.*, 2013)와 접촉하는 벤토나이트의 특성 변화를 알고자 하였다. 지하처분환경에 위치하게 될 구리코팅-용기는 시간에 따라 여러 요인들에 의해 차츰 부식되고(Rosborg *et al.*, 2005; Lee and Jeong, 2013), 그에 따라 구리가 점차 용출되어 구리 이온들이 확산되고 접촉하고 있던 벤토나이트의 성질이 바뀔 것으로 예상되고 있다. 또한 처분환경의 온도 상승(100℃ 근처)으로 인해 벤토나이트의 양이온치환(cation exchange) 특성이

상당히 영향을 받을 것으로 예측되고 있다.

본 연구에서는 지하처분장이 장기간 고온(<10 0℃)을 유지하는 환경임을 감안하여 완충제로 사용할 ‘경주벤토나이트(“실험방법”에서 “시료 준비” 참조)’에 대한 구리치환 실험 및 평가를 수행하고자 하였다. 과거 구리-벤토나이트 간의 화학적 반응 연구가 다양한 용존 중금속 오염물들을 제거하는 관점에서 수행되었고, 따라서 구리이온의 흡착등온(adsorption isotherm) 실험들이 주를 이루었으며(Oubagaranadin and Murthy, 2010; Akafia *et al.*, 2011; Anjos *et al.*, 2014), pH, 이온강도, 그리고 경쟁이온들의 영향 등을 살펴보는 실험들이 많았다(Zhu *et al.*, 2011).

하지만 본 연구에서는 순수하게 정제된 벤토나이트에 대한 구리의 단순 흡착등온실험 보다는 지하처분 환경 및 상황들을 고려하여 실험으로 준비하였다. 즉, 부식으로 인해 용출된 구리(구리이온 농도차)가 전처리하지 않은 점토광물질인 경주벤토나이트와 반응한다는 가정하에 회분식 반응실험을 수행하였고, 이를 통해 벤토나이트의 구리치환, 층간간격 및 양이온들의 용출 변화를 시간에 따라 살펴보았다. 또한, 반응온도를 실온에서 60℃까지 올리면서 벤토나이트 치환 특성에 대한 온도의 영향을 추가적으로 살펴보았다.

실험 방법

시료 준비

실험에 사용된 벤토나이트는 경주시 양남면 벤토나이트 광산에서 채취한 것으로 과거 본 연구원에서 다양한 압축벤토나이트 제조, 물성 측정 및 핵종 확산 실험 등에 사용되었던 것과 동일한 벤토나이트이다(Lee *et al.*, 2002, 2009; Yim *et al.*, 2011). 본 논문에서 우리는 이 벤토나이트를 이후 “경주벤토나이트”라고 칭한다. 경주벤토나이트는 Ca-형 벤토나이트로써, 주 화학 조성은 SiO₂ 56.8%, Al₂O₃ 20.0%, Fe₂O₃ 6.0% 및 기타 소량 성분으로 구성되어 있다(Lee *et al.*, 2009). 본 시료의 양이온교환능(cation exchange capacity, CEC)은 57.6 meq/100 g이다(Lee *et al.*, 2002, 2009). 실제 지하처분과 유사한 조건의 지화학반응을 이해하고자 경주벤토나이트 분말 시료에 대해 따로 전처리 작업을 수행하지 않았다.

실험 방법

경주벤토나이트의 구리치환 특성을 알아보기 위해 50 mL 증류수 용액에 0.5 g의 벤토나이트 분말을 분산시켰다. 구리 시약($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)은 0.05 M 농도의 stock solution을 먼저 제조하였고 경주벤토나이트에 대해 3가지 농도(0.5, 1.0, 2.0 CEC)로 각각 주입하였다. 일정량의 경주벤토나이트에 대한 구리의 0.5, 1.0, 그리고 2.0 CEC 농도는 몰농도로 환산하면 각각 1.44, 2.88, 그리고 5.76 mM이다. 구리와 벤토나이트가 함께 들어있는 반응 용기를 온도가 다른 조건(30°C와 60°C)에서 각각 7일 이상 120 rpm으로 교반시켜주었다. 또한, 실험기간 동안 구리가 없는 대조군(control sample) 벤토나이트로부터 소량 녹아나오는 양이온들도 분석하여 참고자료로 활용하였다.

실험은 2번 반복하였으며, 필요시마다 주사기를 이용하여 용액시료를 채취 및 여과하여 분석하였고, 용존 구리를 포함한 양이온들의 농도와 pH 변화 등을 지속적으로 관찰하였다.

분석방법

일정 주기로 채취한 용액 내 용존 양이온들의 ICP-MS 분석을 위해 용액시료를 0.22- μm 필터로 여과하였다. 용액시료의 pH를 측정된 결과 벤토나이트만 있는 경우에는 pH 8.0-9.0 범위를 유지하였지만 구리를 넣어준 경우에는 pH 4.5-6.0으로 감소하였으며, 용액 pH가 구리농도에 비례하여 감소하는 경향을 보여주었다.

회분식 반응실험 이후 몬모릴로나이트의 층간변화를 알아보기 위해 채취한 부유성 점토시료를 슬라이드글래스위에 떨어뜨려 건조시키고 X-선회절 분석(XRD)을 수행하였다. XRD 분석은 Bruker D8 Advance (Germany) 모델을 사용하였으며, 40 kV/30 mA 조건으로 2θ 60°까지 CuK α 로 분석하였다.

FE-SEM (Hitach, S-4700) 주사전자현미경을 이용하여 실험이 끝난 벤토나이트 시료의 광물 특성 및 Cu 함량 등을 분석하였다. 준비 과정은 원심분리기로 고액을 분리하여 가라앉힌 침전물을 따로 동결 건조시킨 후, 건조된 시료를 SEM 홀더에 부착된 탄소 테이프(carbon tape) 위에 고루 문지르고 진공 하에서 OsO $_4$ 를 분사하여 얇게 코팅(~10 nm)하여 관찰하였다. 필요에 따라 SEM-EDS를 사

용하여 점 혹은 면 화학분석을 실시하였다.

연구결과 및 토의

구리농도 및 온도 증가에 따른 벤토나이트 양이온교환 특성

구리코팅용기가 부식되면서 구리가 용출(Lee and Jeong, 2013)되고 이후 접촉하는 경주벤토나이트의 구리-치환반응이 일어난다는 가정하에 세 가지 다른 농도(0.5, 1.0, 2.0 CEC)로 구리이온을 준비하여 실험을 수행하였다. 먼저 0.5 CEC 구리농도(1.44 mM) 조건하에서 발생할 수 있는 벤토나이트의 Ca와 Na 양이온 교환반응 특성을 살펴 보았다(Fig. 1a). 먼저 대조군 시료들(control samples)을 보면, 용존 구리가 존재하지 않더라도 Na가 상당량(1 mM 이상) 벤토나이트로부터 용출되어 나왔는데, 이는 벤토나이트 성분이라기보다는 벤토나이트 시료에 일부 포함된 탄산나트륨(Na_2CO_3)의 용해 현상으로 추정된다. 즉, 사전에 수드케미(주)(현, 클라리언트아이엠케이(주))에서 경주벤토나이트 분말시료 준비시 수 톤 규모의 벤토나이트 원석을 분말로 파쇄하는 공정에서 이전에 잔존물로 남아있었던 탄산나트륨이 본 시료와 섞이면서 초래된 결과로 해석된다. 본 시료를 60°C로 올린 조건에서는 조금 더 많은 Na 용출 특성을 보였고(Fig. 1a), 이러한 대조군의 Na 용출량을 참고하여 다른 결과들을 해석하였다.

30°C 조건에서 3시간 이내에 용존 구리이온의 70% 이상이 벤토나이트에 수착되었고 그 이후에는 수착량이 많지 않았다(Fig. 1a). 온도를 60°C로 올린 조건에서는 10% 이상 더 많은 구리이온이 수착되었으며, 그 이후에는 30°C 조건과 비슷한 구리 수착 패턴을 보여 주었다. 이와 같은 구리수착 과정에서 이온교환 및 용출되는 Na와 Ca 농도 곡선을 살펴보면, 농도 차이는 있으나 거의 유사한 패턴을 보이고 있다(Fig. 1a). 즉, 이들의 거동 패턴이 구리 수착(치환)량 및 온도 상승과 밀접히 연관된 것으로 보인다.

Fig. 1b의 구리농도 변화곡선은 초기 구리농도가 1.0 CEC(2.88 mM)로 Fig. 1a 보다 2배 높은 경우이며, 이때는 초기에 약 50% 정도의 구리이온이 벤토나이트에 수착되었고 그 이후에는 수착량이 작았다. 온도가 상승함에 따라 구리 수착량과 층간 양이온들(Ca, Na)의 이온교환량이 함께 증가하는

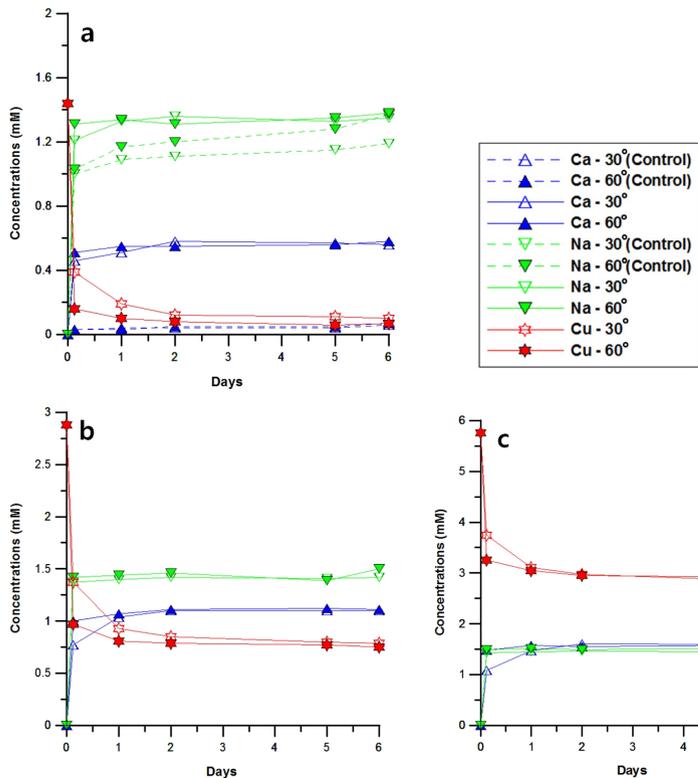


Fig. 1. Concentration curves of the major cations (Ca, Na) released from the Gyeongju-bentonite by an adsorption of Cu over time in different aqueous Cu loading and temperature (30 and 60°C) conditions. The initial Cu loadings were (a) 0.5 CEC (1.44 mM), (b) 1.0 CEC (2.88 mM), (c) 2.0 CEC (5.76 mM).

경향을 보이며, 초기에 온도의 영향이 약 15% 정도되는 것으로 나타났다. 본 실험에서 벤토나이트 점토로부터 치환되는 대부분의 양이온은 Ca이며, 온도가 상승함에 따라 Cu^{2+} 와 Ca^{2+} 간의 이온교환량이 같이 상승함을 알 수 있다. 그리고 Fig. 1a와 비교했을 때, Na의 최대 용출량(약 1.5 mM)은 거의 변화가 없는 반면, Ca는 ~0.6 mM에서~1.2 mM로 약 2배 이상 증가하는 경향을 보여 주었다. 이러한 결과는 용존 구리가 벤토나이트에 수착되면서 Na^+ 가 Cu^{2+} 에 의해 먼저 치환되고 Ca^{2+} 는 점진적으로 치환되는 것으로 사료된다. 즉, 용존 Cu^{2+} 가 벤토나이트의 Ca^{2+} 보다는 Na^+ 와 선택적으로 먼저 반응하고 이온교환되려는 경향이 강한 것으로 판단된다.

초기 용존 구리농도를 2.0 CEC(5.76 mM)로 높게 올린 경우에는 약 절반 정도인 1.0 CEC만큼의 용존 구리가 벤토나이트에 수착되었다(Fig. 1c). 벤토나이트의 Na^+ 는 Cu^{2+} 에 의해 빠르게 치환 및

용출된 반면, Ca^{2+} 는 오랫동안(48시간 이상) Cu^{2+} 와 치환되며 점진적으로 용출되었다. 또한 벤토나이트에 대한 구리의 수착량이 온도의 영향을 상당히 받았으나, 초기 48시간 이내에 국한되어 나타났다.

팽창성 몬모릴로나이트의 특성 변화

벤토나이트와 구리이온 간 반응에 의해 나타나는 광물형태적 특성 변화를 살펴보기 위해 주사전자현미경(SEM)을 이용하였다. 2.0 CEC 구리 농도와 7일 동안 반응한 벤토나이트를 관찰하면 점토 입자들의 응집력이 약하고 서로 분리되려는 현상이 부분적으로 관찰되었다(Fig. 2). 그리고 점토 입자들을 SEM-EDS로 분석한 결과 벤토나이트(몬모릴로나이트) 내에 Cu 성분이 존재하는 것으로 확인되었으나, 온도에 따른 구리 함량비 차이는 거의 없었다. 즉, 7일간 반응한 Cu-2.0 CEC 벤토나이트

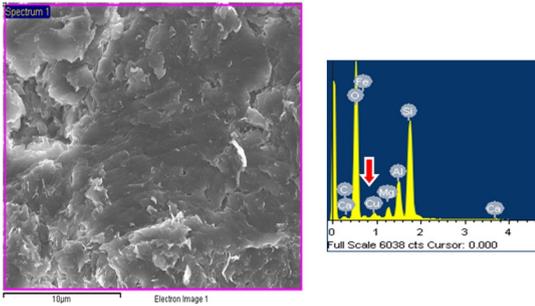


Fig. 2. A SEM image for the Cu-exchanged bentonite treated under a Cu-2.0 CEC condition. Arrows on the SEM-EDS spectra indicate the copper existence in the sample.

시료의 Cu 함량비는 30℃와 60℃에서 대략 0.75 atomic% 값들로 비슷하였고 서로간의 차이가 없었다. 이는 벤토나이트의 구리치환 반응에서 온도의 영향은 시간에 따라 점차 감소함을 의미한다 (Fig. 1c).

서로 다른 구리농도와 반응한 Cu치환-벤토나이트들에 대해서 X-선회절분석(XRD)을 실시하였고 팽창성 점토의 층간간격 변화를 살펴보았다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이, 각기 다른 용존 구리농도와 반응한 몬모릴로나이트의 (001) peak의 위치가 조금씩 달랐다. 순수한 원재료(raw bentonite)인 경우 대기상태에서 약 14.7 Å의 저면간격(basal spacing)을 보였지만, 구리로 치환된 시료의 경우 몬모릴로나이트의 저면간격이 다소 감소하는 특징을 보여주었다. 특히 Cu-2.0 CEC 시료인 경우 높은 비대칭 XRD 회절곡선을 보여주었고, 14.2 Å의 main peak과 13.0 Å의 shoulder peak 등이 특징적으로 관찰되었다. 이러한 현상은 용존 Cu^{2+} 이온들이 팽창성 점토의 층간 양이온들(주로 Ca^{2+})을 치환하면서, 점토 층간에 본래 있던 양이온종들이 바뀌면서 이전의 함수량 및 저면간격이 달라지고 층간이 다소 수축된 것으로 보인다. 앞서 “분석방법”에서 언급하였듯이 용존 구리 이온 농도가 높은 경우에는 벤토나이트 용액의 pH가 4.5까지 떨어졌는데, 이렇게 낮은 pH에서는 일반적으로 구리 이온들이 점토 표면 혹은 가장자리(edges)의 격자구조 성분인 Si, Al과 surface-complex를 이루기보다는 층간 양이온과 ion-exchange하려는 경향이 강하다. 따라서 층간 양이온의 이온교환량이 상대적으로 증가하고 층간 간격도 상당히 변화하는 것은

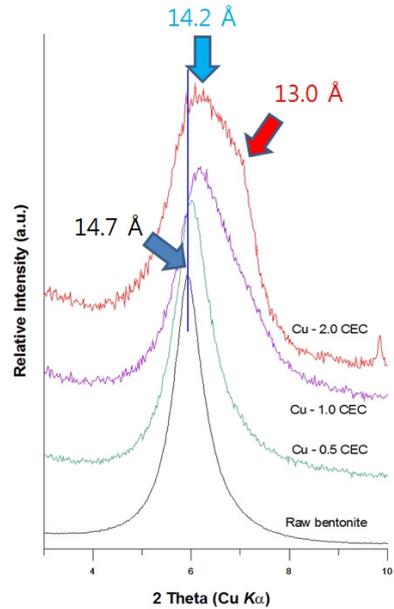


Fig. 3. X-ray diffraction patterns for the montmorillonite in the bentonite sample treated with different amounts of Cu loading.

로 사료된다.

처분장 완충재의 장기적 변이 고찰

본 실험을 통해 처분장에 위치할 벤토나이트 완충재가 용기 부식에 따른 구리 확산에 의해 화학적·광물학적으로 다양하게 바뀔 수 있음을 알게 되었다. 실험결과를 살펴보면 경주벤토나이트 점토의 주 층상양이온인 Ca가 Cu 양이온에 의해 치환되면서 특징적으로 점토의 층간간격(interlayer spacing)이 변화되었다(Fig. 4). 초기 Ca 양이온들에 배위하는 물분자들로 인해 점토의 층간두께가 일정 수준(~14.7 Å)을 유지하지만, Cu 양이온으로 치환되면서 함수량이 점차 줄어들고 층간두께가 감소(14.2~13.0 Å)하는 특징을 보인다. 이처럼 구리치환에 따른 팽창성 점토의 층간 화학 및 두께 변화는 광물화학적 특성 변화를 가져오지만, 궁극적으로 지하처분장 완충재의 물성에 적지 않은 영향을 미칠 것이다.

서론에서 언급했듯이 지하처분장 벤토나이트의 중요한 역할 중의 하나는 점토의 수화팽창을 통해 금속용기(내부 폐연료봉 포함)와 지하수와의 상호

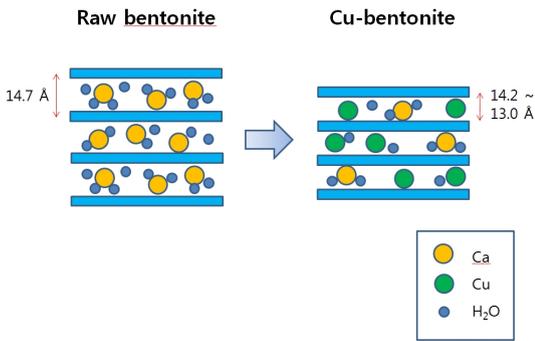


Fig. 4. Schematic models for the raw and Cu-exchanged bentonites (montmorillonites) characterized by their different interlayer spacings.

반응을 최대한 억제하는 것이다(Lee *et al.*, 2007). 만약, 초기 벤토나이트가 변질되면서 본래의 팽창압(swelling pressure)이 바뀐다면, 벤토나이트의 수리전도도와 확산도(diffusivity) 등과 같은 다른 특성들도 같이 변할 것이다. 이는 수리지질학적 측면에서 매우 중요한 사안이기도 하다. 긍정적인 측면으로는 폐연료봉의 방사능붕괴에 따라 생성열이 방출되는데(Kim *et al.*, 2006), 구리의 높은 열전도성 때문에 Cu치환-벤토나이트가 순수 벤토나이트에 비해 열전도율이 좋아 처분장 안전성에 어느 정도 기여할 가능성도 있다.

본 연구는 지하처분환경 조건에서 구리 농도와 주변 온도의 증가만을 고려한 실험 결과이며, 다른 여러 인자들(예: 토착미생물 활동, 고염수 침입 등)을 별도로 고려하지 않았다(Masurat *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2013). 향후 벤토나이트의 장기적 변질(long-term evolution) 관점에서 다양한 영향 인자들을 추가하여 벤토나이트의 화학적·광물학적 변화와 함께 물리적·열적·생물학적 변화까지 고려하는 복합반응 실험을 수행할 계획이다.

결 론

지하 심부에 고준위폐기물을 안전하게 처분하기 위한 중요한 요소로써, 폐기물 처분용기와 벤토나이트 완충재는 필수적이다. 그러므로 처분용기 개발뿐만 아니라 완충 역할을 담당 할 벤토나이트의 물성, 화학 및 광물학적 특성들의 장기적 변화를 면밀히 조사·분석해야 한다. 하지만 폐기물 처분이 이뤄진 후 후속적으로 일어나는 여러 가지 상황

및 변화들을 예측하기는 쉽지 않다. 특히, 지하에 매립된 금속용기의 부식과 이에 따른 구리성분의 용출, 그리고 벤토나이트의 장기변질 등을 복합적으로 예측하기는 매우 어렵다. 그럼에도 불구하고 다양한 사전 모의실험을 통해 이들의 지하환경에서의 지화학적 거동, 특히 시간에 따른 광물학적 변질 등을 예측하는 것이 매우 중요하다.

본 실험에서는 구리로 코팅된 금속용기의 장기 부식 상황을 가정하고 구리이온이 확산될 때 경주 벤토나이트의 다양한 변화, 즉 구리에 의한 양이온 치환 및 층간두께의 변화 등을 온도 변화와 함께 관찰하였다. 실험결과 구리이온의 초기 농도에 따라 벤토나이트의 주요 양이온들인 Ca와 Na의 치환량 및 속도가 달라졌고, 초기 온도의 영향도 상당히 있었다. 그리고 최대 Cu^{2+} 수축량은 점토의 층간양이온(주로 Ca)의 치환량과 밀접한 관련성이 있었다. 몬모릴로나이트 점토광물의 화학적·광물학적 변화가 궁극적으로 벌크 벤토나이트의 물성(예: swelling) 변화를 야기시키고, 장기적으로는 처분장 완충재의 장기안정성(long-term stability)에도 영향을 줄 것이다. 본 실험은 지하처분환경에서 용기부식에 따른 구리 확산과 온도 상승 등 일부 요소만을 고려하였고, 향후 다양한 지화학적 인자와 요소들을 포함한 복합실험을 통해 벤토나이트 완충재의 다양한 특성 변화와 그에 따른 장기안정성 등을 예측코자 한다.

사 사

본 연구는 미래창조과학부(한국연구재단)의 원자력연구개발사업(No. 2012M2A8A5025589)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Akafia, M.M., Reich, T.J., and Koretsky, C.M. (2011) Assessing Cd, Co, Cu, Ni, and Pb sorption on montmorillonite using surface complexation models. *Applied Geochemistry*, 26, S154-157.
- Anjos, V.E., Rohwedder, J.R., Cadore, S., Abate, G., and Grassi, M.T. (2014) Montmorillonite and vermiculite as solid phases for the preconcentration of trace elements in natural waters: Adsorption and desorption studies of As, Ba, Cu, Cd, Co, Cr, Mn, Ni, Pb, Sr, V, and Zn. *Applied Clay Science*, 99, 289-296.

- Choi, H.J., Lee, J.Y., and Choi, J.W. (2013) Development of geological disposal systems for spent fuels and high-level radioactive wastes in Korea. *Nuclear Engineering and Technology*, 45, 29-40.
- Grim, R.E. (1968) *Clay mineralogy* (2nd ed.), McGraw-Hill, London, 596p.
- Kim, G.Y., Kim, S.S., Choi, J.W., Park, S.W., and Bae, D.S. (2006) Measurements of the thermal conductivity of domestic bentonite for improving the physical performance of buffer. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 19, 89-98. (in Korean with English abstract).
- Lee, J.O., Cho, W.J., and Kang, C.H. (2002) Effect of dry density on technetium diffusion in compacted bentonite. *Environmental Engineering Research*, 7, 219-225.
- Lee, J.O. and Cho, W.J. (2009) Determination of water content in compacted bentonite using a hygrometer and its application. *Journal of the Korean Radioactive Waste Society*, 7, 101-107 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., Cho, D.K., Choi, H.J., and Choi, J.W. (2007) Concept of a Korean reference disposal system for spent fuels. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 44, 1565-1573.
- Lee, J.Y., Lee, S.Y., Baik, M.H., and Jeong, J.T. (2013) Existence and characteristics of microbial cells in the bentonite to be used for a buffer material of high-level wastes. *Journal of the Korean Radioactive Waste Society*, 11, 95-102 (in Korean with English abstract).
- Lee, M.S., Choi, H.J., Lee, J.Y., and Choi, J.W. (2012) Design, manufacturing, and performance estimation of a disposal canister for the ceramic waste from pyroprocessing. *Journal of the Korean Radioactive Waste Society*, 10, 209-218 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.Y. and Jeong, J. (2013) Corrosive characteristics of metal materials by a sulfate-reducing bacterium. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 26, 219-228 (in Korean with English abstract).
- Masurat, P., Eriksson, S., and Pedersen, K. (2010) Microbial sulphide production in compacted Wyoming bentonite MX-80 under in situ conditions relevant to a repository for high-level radioactive waste. *Applied Clay Science*, 47, 58-64.
- Noh, J.H. (2002) Mineralogical and petrochemical characteristics of domestic bentonites and their genetic significance. *Journal of the Geological Society of Korea*, 38, 441-455 (in Korean with English abstract).
- Oubagaranadin, J.U.K. and Murthy, Z.V.P. (2010) Isotherm modeling and batch adsorber design for the adsorption of Cu (II) on a clay containing montmorillonite. *Applied Clay Science*, 50, 409-413.
- Rosborg, B., Pan, J., and Leygraf, C. (2005) Tafel slopes used in monitoring of copper corrosion in a bentonite/groundwater environment. *Corrosion Science*, 47, 3267-3279.
- Yim, S.P., Lee, J.H., Choi, H.J., Choi, J.W., and Lee, C.K. (2011) An investigation of diffusion of iodide ion in compacted bentonite containing Ag_2O . *Journal of the Korean Radioactive Waste Society*, 9, 33-40 (in Korean with English abstract).
- Zhu, J., Cozzolino, V., Fernandez, M., Torres Sanchez, R.M., Pigna, M., Huang, Q., and Violante, A. (2011) Sorption of Cu on a Fe-deformed montmorillonite complex: Effect of pH, ionic strength, competitor heavy metal, and inorganic and organic ligands. *Applied Clay Science*, 52, 339-344.

Received December 4, 2014, Revised December 19, 2014, Accepted December 22, 2014, Responsibility Editor: Seokhun Lee