

An Experimental Study on the Sorption Properties of Uranium(VI) onto Bentonite Colloids

벤토나이트 콜로이드에 대한 우라늄(VI) 수착특성에 대한 실험적 연구

Min-Hoon Baik, Won-Jin Cho and Pil-Soo Hahn

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Deokjin-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon 305-353

mhbaik@kaeri.re.kr

백민훈, 조원진, 한필수

한국원자력연구소, 대전시 유성구 덕진동 150번지

Abstract

In this study, an experimental study on the sorption properties of uranium(VI) onto bentonite colloids generated from a domestic calcium bentonite (called as Gyeongju bentonite). Gyeongju bentonite has been considered as a potential candidate buffer material in the Korean disposal concept for high-level radioactive wastes. The size and concentration of the bentonite colloids used in the sorption experiment were measured by a filtration method. The result showed that the concentration of the synthesized bentonite colloid suspension was 5100ppm and the size of the most of bentonite colloids(over 98%) was in the range of 200-450nm in diameter. The amount of uranium lost by the sorption onto bottle walls, by precipitation, and by ultrafiltration or colloid formation was analyzed by carrying out some blank tests. The loss of uranium by the ultrafiltration was significant in the lower ionic strength(i.e., in the case of 0.001M NaClO₄) due to the cationic sorption effect onto the ultrafilter by a surface charge reversion. The distribution coefficient (or pseudo-colloid formation constant) for the sorption of uranium(VI) onto bentonite colloids was 10⁴ ~10⁶ mL/g depending upon pH and the distribution coefficient was highest in the neutral pH around 6.5.

Key words : Uranium(VI), Sorption, Solubility/Precipitation, Bentonite Colloids, Distribution Coefficient

요 약

본 연구에서는 현재 국내에서 잠재적인 완충재 물질로 고려되고 있는 경주산 칼슘벤토나이트에서 발생하는 벤토나이트 콜로이드를 대상으로 대표적인 악티나이드 핵종이며 고준위 핵종인 우라늄(VI)에 대한 수착특성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 실험에 사용될 벤토나이트 콜로이드의 농도 및 크기를 여과법을 사용하여 측정된 결과 벤토나이트 콜로이드 원액의 농도는 약 5100ppm 이고 98% 이상의 콜로이드들이 200-450nm 크기 사이에 존재하는 것으로 나타났다. 우라늄 수착 실험에 대한 공시험을 수행하여 수착반응 용기 벽면에 의해, 침전에 의해, 한외여과 또는 콜로이드 형성에 의해 손실된 우라늄 양을 평가하였다. 한외여과에 의한 우라늄 손실의 경우 이온강도가 낮은 경우에(즉, 0.001M NaClO₄의 경우) 한외여과 필터의 표면전하 역전에 의한 양이온 수착 영향으로 매우 높은 핵종 손실을 유발하였다. 벤토나이트 콜로이드에 대한 우라늄(VI)의 수착 분배

계수(의사콜로이드 형성상수)는 pH에 따라 $10^4 \sim 10^6$ mL/g 정도의 값을 가지는 것으로 관측되었으며 중성 영역인 pH 6.5 근처에서 최대값을 가지는 것으로 나타났다.

중심단어 : 우라늄(VI), 수착, 용해도/침전, 벤토나이트 콜로이드, 분배계수

1. 서론

현재 고준위방사성폐기물의 안전한 처분에 대한 가장 유력한 대안으로는 지하 수 백 미터 이상의 심지층에 폐기물을 처분하는 것이며 대상 매질로는 결정질 암반, 점토질 암반 또는 압연층 등이 고려되고 있다. 국내에서는 결정질 암반에 처분하는 것을 기본 처분 개념으로 설정하고 있다 [1]. 그리고 포장된 폐기물들은 심지층의 굴착된 수평 갱도(drift) 또는 수직 시추공(borehole)에 정처되는데 이때 암반층과 포장물 사이는 완충재나 뒷채움재로 메우고 되는데 이때 사용하는 완충재로 가장 선호되는 것이 압축된 벤토나이트이며, 뒷채움재로는 암석과 점토광물과의 혼합물이다. 이러한 완충재나 뒷채움재는 다중방벽 처분개념에 있어 인공방벽시스템(EBS, Engineered Barrier System)을 구성하는 주요 구성원이 된다[2].

따라서 EBS의 장기 건전성을 확보하기 위해서는 EBS와 모암 사이의 상호작용을 이해하는 것이 필수적이라고 하겠으며 다양한 열적, 수력학적, 기계적(THM, Thermo-Hydraulic-Mechanical) 영향을 고찰하는 것이 필요하다. 실제 처분 조장 조건에서의 EBS의 THM 거동을 이해하고 모암과의 상호작용을 해석하기 위한 연구가 ENRESA(The Spanish Agency for Radioactive Waste Disposal)를 중심으로 스위스 GTS(Gimsel Test Site) 지하시험시설에서 FEBEX(Full-scale Engineered Barriers Experiment) 프로젝트를 수행하였다[3].

점토광물(특히, montmorillonite)의 hydration은 암반 균열로 침투할 수 있는 겔(gel)형의 물질을 형성하고 점토의 높은 팽윤압(swelling pressure)은 이러한 과정을 돕게 된다. 벤토나이트의 암반으로의 침투는 EDZ(excavation disturbed zone)의 물리화학적 특성을 변화시킬 수 있고 이러한 영역에서의 핵종 이동 조건들에 영향을 미칠 수 있다. 더구나 겔 물질들은 암반의 대현균열(macro-fracture) 뿐만 아니라 미세균열(micro-fracture)로 접근하여 암반으로 확산 이동할 수 있는 콜로이드를 발생시킬 수 있다[4]. 벤토나이트가 많은 핵종들에 대해 뛰어난 수착능을 가지고 있음을 고려할 때 점토입자들의 확산은 방사성 핵종의 이동과 관련될 수 있고 핵종의 이동에 영향을 미칠 수 있다. 실제로 이러한 벤토나이트 콜로이드들에 의한 핵종 이동이 가속화됨을 확인하는 실험 결과들이 다수 확인되었다[4,5].

또한 GTS의 5m 규모의 화강암 자연 균열의 지하수에서 FEBEX 벤토나이트를 이용하여 방사성 핵종에 미치는 벤토나이트 콜로이드의 영향 및 이동에 대한 연구를 CRR(Colloid and Radionuclide Retention) 프로젝트로 수행한 바 있다[6]. 이러한 현장 실험의 결과는 벤토나이트 콜로이드가 방사성 핵종의 유출량 및 이동 속도를 증가시킨다는 것이었다. 이러한 결과는 그동안 과소평가되었던 콜로이드의 역할 및 중요성에 대한 인식의 새로운 전기를 마련하는 계기가 되었다. 또한 벤토나이트 콜로이드의 물리화학적 특성 분석을 위한 다양한 연구가 수행되었다[7,8]. 아울러 벤토나이트에 대한 핵종 수착 특성에 대한 연구는 다년간 많은 연구자들에 의해 수행되었다 [9~12].

따라서 본 연구에서는 현재 국내에서 잠재적인 완충재 물질로 고려되고 있는 경주산 칼슘벤토나이트에서 발생하는 벤토나이트 콜로이드를 대상으로 대표적인 악티나이드 핵종이며 고준위 핵종인 우라늄(VI)에 대한 수착특성에 대한 실험적 연구를 수행하고자 하였다.

2. 실험

가. 재료 및 장비

실험에 사용된 벤토나이트는 경상북도 경주에서 생산된 것으로 “경주벤토나이트”로 불린다. 경주벤토나이트는 양이온 교환능이 47.7meq/100g이고 Ca^{2+} 이온이 주 이온 교환가능한 양이온으로 일반적으로 Ca-벤토나이트로 불린다. 벤토나이트의 조성은 70%의 몬모릴로나이트, 29% 장석 그리고 약 1%의 석영으로 구성되어 있다[13]. 총탄소 함량은 3160-3600ppm, 유기탄소 함량은 2400-2800ppm 정도이다[14].

벤토나이트 콜로이드 분산액은 약 50g의 경주벤토나이트를 500mL의 MQ 초순수를 담은 1L PE 병에 넣어 잘 혼합한 후에 초음파 발생기에서 약 1시간 동안 벤토나이트 입자들을 분산시킨 뒤에 초순수 500mL를 더 추가하여 희석하였고 이 벤토나이트 혼합액을 6000rpm에서 30분 동안 원심분리기한 후에 상등액을 분리하였다. 이렇게 분리된 상등액을 벤토나이트 콜로이드 원액으로 사용하였다. 분리된 상등액은 실험에 사용되기 전까지 4°C 냉장고에 보관하였다.

본 실험에 사용된 우라늄 핵종은 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (MERCK) 형태의 시료로 U(VI)를 사용하였고, 모든 핵종의 농도는 ICP-MS(varian, Ultramass 700)을 이용하여 측정하였다. 우라늄 핵종의 침전을 방지하기 위해 0.01M HClO_4 산용액에 시약을 첨가하여 용해시킨 후에 10^{-3}M 농도의 원액을 제조하여 사용하였다. 모든 실험 용액은 $18.3\text{M}\Omega\text{-cm}$ 의 저항도를 가진 초순수(Milli-Q, Millipore)를 이용하여 제조되었고, AR 등급의 시약들을 사용하였다. 실험 시스템의 이온강도를 적절하게 유지하기 위하여 적당한 농도의 NaClO_4 용액을 기본 전해액으로 사용하여 이온강도를 조절하였다.

나. 실험 방법

벤토나이트 콜로이드에 대한 U(VI)의 수착실험은 이온 강도 및 pH 등의 함수로 회분식으로 수행되었다. 모든 수착 실험은 대기 조건에서 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 에서 수행되었다. 먼저 일정 농도의 NaClO_4 용액 30mL를 담은 50mL PC(poly carbonate) 원심분리기 튜브(Nalgene)에 5100ppm 농도의 벤토나이트 콜로이드 원액을 약 300 μL 첨가하였다. 그리고 이 용액의 pH는 1.0M 및 0.1M HClO_4 또는 NaOH를 용액을 이용하여 원하는 pH로 조절하였다. pH가 안정화되었을 때 10^{-3}M 의 핵종 원액을 30 μL 를 가하여 초기 우라늄의 농도를 10^{-6}M 로 만들었다. 또한 대기중의 CO_2 와 평형을 유지하기 위하여 물로 포화된 공기 방울을 이 용액에 계속하여 제공하였다. 용기 속 용액에 공기를 제공하게 되면 pH가 변하게 되는데 pH 조절액을 이용하여 이를 보정하였다. 공기 제공 및 이로 인한 pH 변화가 어느 정도 안정화되면, 용기를 느슨하게 밀봉하여(실제로는 용기 뚜껑에 직경이 2mm 정도 되는 구멍을 3개 뚫었다) 자동 온도제어 가능한 교반기(shaker)에서 25°C 를 유지하며 100rpm 정도의 속도로 교반시키며 3일 동안 수착 반응시켰다.

수착반응 시킨 3일 후에 용액의 pH를 측정된 후(Ion Analyzer EA-940 및 Ross combination electrode, ORION), 한외여과기(Ultrafiltration Stirred Cell 8000, Millipore)를 이용하여 3nm 기공 크기를 가진 XM50(50,000NMWL, Millipore)로 벤토나이트 콜로이드를 분리하였고, 여과액 중 약 4mL를 채취하였다. 채취된 여과액은 ICP-MS로 핵종 농도를 분석하기 위하여 시료용기에 담아 65% 질산 10 μL 를 가한 후에 냉장고에 보관하였다.

용기벽에 부착되거나, 침전 또는 흡착되어서 제거되어지는 핵종의 손실과 여과에 의해 제거되어지는(즉, 자체로 참 콜로이드를 형성하는) 핵종의 손실을 규명하기 위한 공시험(blank test)을 pH 및 NaClO_4 를 이용하여 이온강도를 변화시키면서 수행하였다. 이러한 공시험의 결과들을 수착실험 결과의 계산에 반영하였다.

3. 결과 및 논의

가. 벤토나이트 콜로이드의 특성

실험에 사용될 벤토나이트 콜로이드의 농도 및 크기를 결정하기 위하여 여과법을 사용하였다. 필터 홀더는 Millipore Swinnex (직경 25mm)를 이용하였고, 주사기는 고압용 20mL Millipore 플라스틱을 이용하였다. 측정 결과 벤토나이트 콜로이드 원액의 농도는 약 5100ppm이고 98% 이상의 콜로이드들이 200-450nm 크기 사이에 존재하는 것으로 나타났다(그림 1 참조). 또 XRD를 이용하여 구성광물을 분석한 결과 벤토나이트 콜로이드를 구성하는 주광물은 몬모틸로나이트 이며 다른 부광물은 거의 없는 것으로 나타났다(그림 2 참조). 양이온교환능(CEC, Cation Exchange Capacity)은 암모니아 전극(Thermo Orion)을 이용하여 NH₄Cl을 벤토나이트의 이온교환양이온과 치환하여 측정하였고 약 93.3 meq./100g인 것으로 측정되었다.

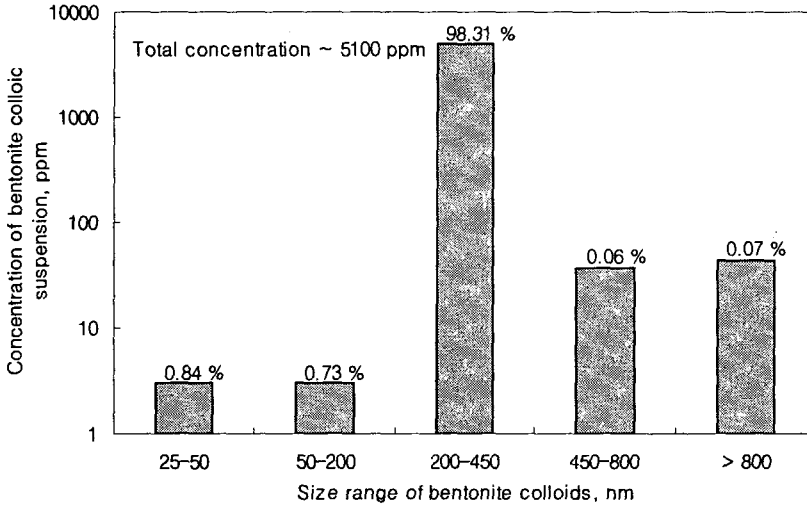


그림 1. 여과법을 이용한 벤토나이트 콜로이드의 크기 및 질량 농도 측정 결과

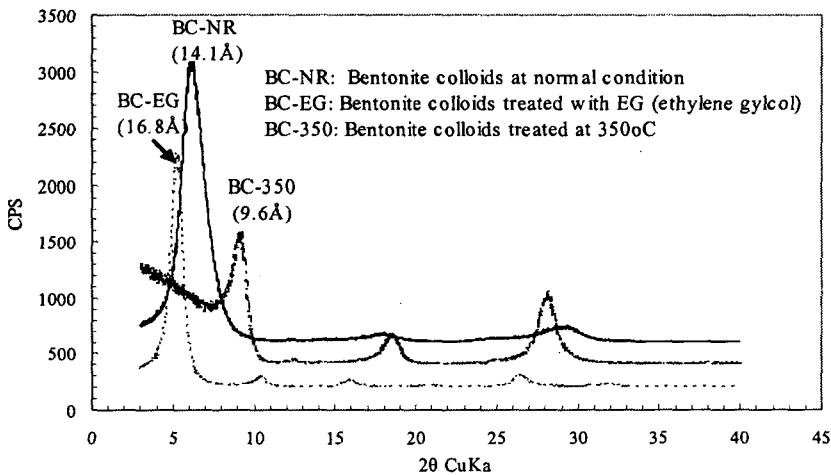


그림 2. 벤토나이트의 XRD 측정결과.

나. 수착 계수

일반적으로 핵종의 콜로이드로의 수착 반응에 대한 수착 분배계수(또는 의사콜로이드 형성상수) $K_d(\text{mL/g})$ 는 다음과 같이 정의된다[15,16]:

$$K_d = \frac{[S]}{[U]} = \frac{([U_T] - [U])}{[U][C_T]} \cdot M$$

여기서 $[U]$ 는 용액에서의 우라늄의 농도(mol/mL)이고, $[S]$ 는 콜로이드에 수착된 우라늄의 농도(mol/g)이고, $[C_T]$ 는 용액의 단위부피당 존재하는 콜로이드의 농도(mg/L)이며 $[U_T]$ 는 우라늄의 초기농도(mol/L)이고 M 은 L/mg 의 mL/g 으로의 단위 환산 인자($=10^6$)이다.

다. 우라늄(VI) 손실

수착실험 수행 시 수착 용기 벽면에 우라늄 핵종이 수착 됨으로 해서 또는 우라늄과 벤토나이트를 한외여과 하는 과정에 필터에 흡착되거나 물리적으로 부착 또는 막힘에 의해 우라늄이 핵종의 손실을 가져올 수 있으며 이러한 손실은 결국 수착실험 결과에 오차를 유발하게 되므로 이러한 손실량에 대한 해석이 중요하다. 우선 우라늄-벤토나이트 수착 반응 용기의 벽면에 대한 우라늄 손실량을 분석하기 위한 공시험을 벤토나이트 콜로이드가 존재하지 않는 조건에서 이온강도와 pH를 변화시키며 수행하였다. 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 반응용기 벽면에 의한 우라늄 손실량은 이온강도에 상관없이 중성 pH 영역에서 가장 크게 나타났지만 최대 10% 정도로 그 영향이 크지 않은 것으로 나타났다. 그리고 이온강도가 낮을수록 손실량이 크지는 경향을 보이기는 했지만 그 차이 또한 크지 않은 것으로 나타났다. 그리고 pH 변화에 따른 반응용기 벽면에 의한 우라늄 손실 거동은 pH 변화에 의한 일반적인 우라늄 수착거동과 거의 일치하는 경향을 나타내는 것으로 미루어 수착 메커니즘에 의해 우라늄이 반응용기 벽면에 부착되는 것으로 추정된다.

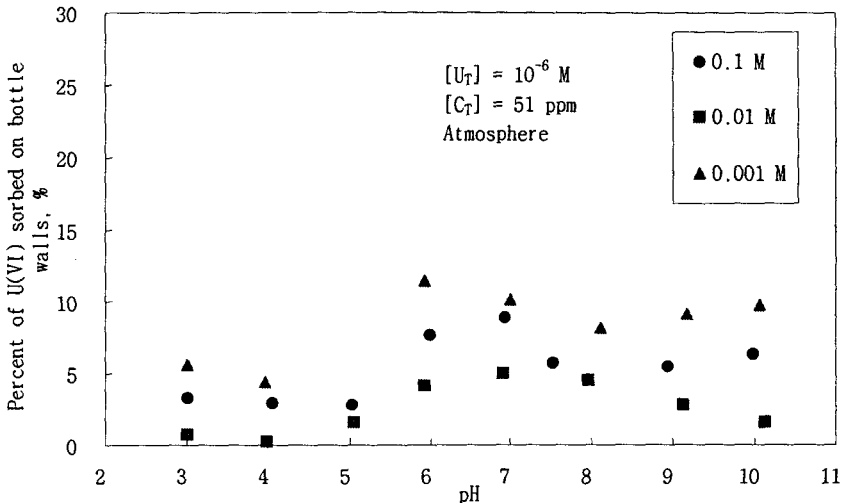


그림 3. 수착실험 용기에 의한 U(VI)의 손실 영향 공시험 결과

그림 4에는 한외여과에 의한 우라늄 손실량 분석을 위한 공시험 결과를 나타내었다. 한외여과에 의한 우라늄 손실의 경우엔 이온강도의 영향이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 특히 이온강도가 0.001M 정도로 매우 낮은 경우엔 중성 pH 영역에서 거의 모든 우라늄이 한외여과에 의한 손실되는 것으로 나타났다. 따라서 벤토나이트-우라늄 수착반응 실험 시에 한외여과에 의해 벤토나이트를 분리하는 것은 용액의 이온강도가 0.01M 이하일 경우엔 오차가 매우 커서 신뢰할만한 결

과를 얻을 수 없음을 주지할 필요가 있다. 이러한 현상은 한외여과 필터 자체의 제타-전위의 변화에 기인하는데 이온강도가 증가할수록 제타전위가 감소하게 되고 결국은 우라늄과 같은 양이온들이 필터 표면에 수착 됨으로서 핵종양의 손실을 유발하는 것으로 알려져 있다[17,18].

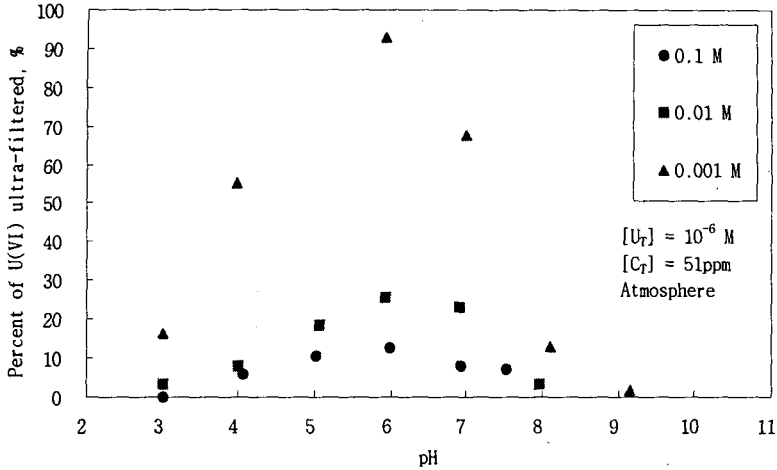


그림 4. 한외여과의 의한 U(VI) 손실 영향 공시험 결과

라. 우라늄 수착

벤토나이트 콜로이드에 대한 우라늄 수착계수를 용액의 이온강도와 pH를 변화시키며 측정한 결과를 그림 5에 나타내었다. 이온강도가 0.001M 일 경우엔 앞에서 논의된 바와 같이 한외여과에 의한 우라늄 손실량이 매우 커서 신뢰할만한 결과를 얻을 수 없었다. 이온강도가 0.1M일 때와 0.01M 경우를 비교해보면 중성영역에서는 거의 영향이 나타나지 않지만 산 및 알칼리 영역에서는 이온강도의 영향이 나타나고 있으며 이온강도가 작을수록 수착량이 증가함을 보이고 있다.

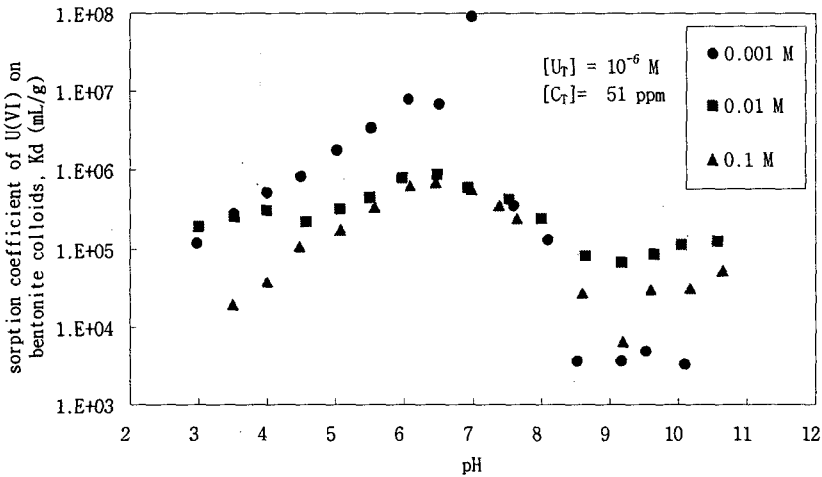


그림 5. 벤토나이트 콜로이드에 대한 U(VI)의 수착 실험 결과

수착계수는 pH에 따라 $10^4 \sim 10^6$ mL/g 정도의 값을 가지는 것으로 관측되었으며 중성 영역인 pH6.5 근처에서 최대값을 가지는 것으로 나타났다. 일반적으로 벤토나이트의 경우에 낮은 pH 영역에서는 이온교환 반응이 지배적이며 높은 pH 영역(pH>5)에서는 표면복합화 반응이 지배적인 것으로 알려져 있다[9,19,20]. 최근의 SCM(Surface Complexation Model)을 이용한 연구 결과들은 우라늄이 순수 벤토나이트에 수착될 경우에, pH5-9 사이에서는 $UO_2(OH)^+$ 가 주요 수착하는 핵종이며 pH9 이상에서는 $UO_2(OH)_3^{2-}$ 가 수착을 지배하는 것으로 해석되었다[19]. 그러나 이러한 표면 복합물의 형성은 높은 pH에서 음의 표면전하의 발달에 의해 제약받을 것이다. 그리고 이러한 핵종들의 복합화 반응은 주로 벤토나이트에 함유된 몬모릴로나이트의 edge-surface의 수산화기(hydroxy group)에서 발생되는 것으로 확인되고 있다[20-22].

그림 6에는 벤토나이트 콜로이드의 농도가 우라늄(VI)의 벤토나이트 콜로이드에 대한 수착에 미치는 영향을 분석하기 위한 실험 결과를 나타내었다. 벤토나이트 콜로이드의 농도를 0.5ppm에서 1000ppm까지 변화시키며 우라늄 수착량을 측정한 결과 벤토나이트 콜로이드의 농도가 증가할수록 우라늄 수착량도 증가하고 그 증가의 경향은 S-곡선의 형태를 가지고 있음을 알 수 있다. 벤토나이트 콜로이드의 농도가 약 5ppm에서 부터 우라늄 수착량이 급격히 증가하다가 500ppm 이상이 되면 수착량이 거의 포화됨을 알 수 있다. 이러한 경향은 우라늄 핵종의 농도가 벤토나이트 콜로이드의 농도에 비해 매우 낮기 때문에 충분히 수착점(sorption site)를 제공하기 때문인 것으로 추측된다.

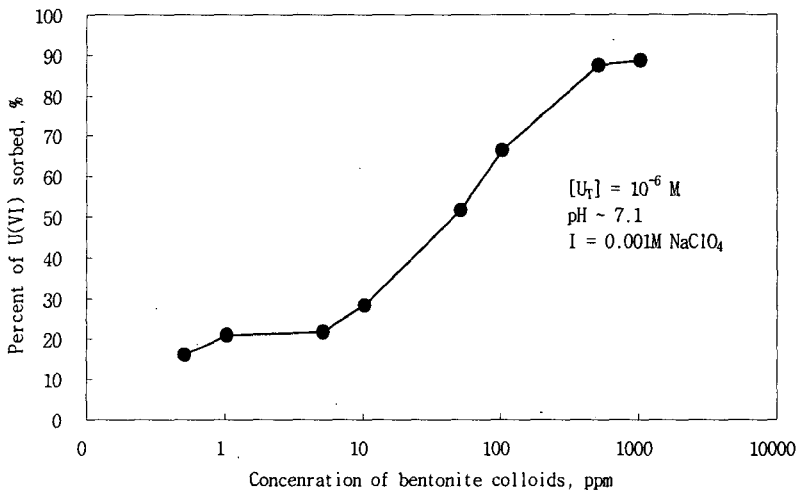


그림 6. 벤토나이트 콜로이드에 대한 U(VI)의 수착의 콜로이드 농도 영향 실험 결과

4. 결론

본 연구에서는 국산 벤토나이트 콜로이드에 대한 우라늄(VI)의 수착실험을 수행하였고, 수착계수 또는 의사콜로이드 형성상수를 구하였다. 이들 콜로이드에 수착계수는 일반 점토 입자들에 대한 수착계수보다 매우 크게 나타났는데 이는 콜로이드 입자의 크기가 매우 작기 때문에 수착에 필요한 보다 큰 표면적을 제공하기 때문인 것으로 사료된다. 아울러 이들 핵종에 대한 공시험을 수행하여 수착반응 용기 벽면에 의해, 침전에 의해, 한외여과 또는 콜로이드 형성에 의해 손실된 우라늄 양을 평가하였다. 한외여과의 경우 이온강도가 낮은 경우에 한외여과 필터의 표면전하 역

전에 의한 양이온 수착 영향으로 매우 높은 핵종 손실을 유발하였다.

5. 사 사

본 연구는 과학기술부에 의해 지원되는 원자력중장기연구개발의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Progress Report on the R&D Program for the Disposal of HLW in Korea, Korea Atomic Energy Research Institute, August 20, 2002, Daejeon(2002).
2. N.A. Chapman and I.G. McKinley, The Geological Disposal of Nuclear Waste, Wiley, Chichester(1987).
3. M. García-Gutiérrez, T. Missana, M. Mingarro, J. Samper, Z. Dai and J. Molinero, "Solute transport properties of compacted Ca-bentonite used in FEBEX project," J. Contam. Hydrol., 47, pp. 127-137(2001).
4. U. Alonso, T. Missana, A. Patelli, V. Rigato and P. Rivas, "Study of the contaminant transport into granite microfractures using nuclear ion beam techniques," J. Contam. Hydrol., 61, pp. 95-105(2003).
5. P. Grindrod, M. Peletier and H. Takase, H. "Mechanical interaction between swelling compacted clay and fractured rock, and the leaching of clay colloids," Eng. Geol., 54, pp. 159-165(1999).
6. W. Hauser, H. Geckeis, J.I. Kim and Th. Fierz, "A mobile laser-induced breakdown detection system and its application for the in situ-monitoring of colloid migration," Colloids and Surfaces A, 203, pp. 37-45(2002).
7. T. Missana and A. Adell, "On the applicability of DLVO theory to the prediction of clay colloids stability," J. Coll. Interf. Sci., 230, pp. 15-156(2000).
8. H. Geckeis, Th. Ngo Mahn, M. Bouby and J.I. Kim, "Aquatic colloids relevant to radionuclide migration: characterization by size fractionation and ICP-mass spectrometric detection," Colloids and Surfaces A, 217, pp. 101-108(2003).
9. M.H. Bradbury and B. Baeyens, "Modelling the sorption of Zn and Ni on Ca-montmorillonite," Geochim. Cosmochim. Acta, 63, pp. 325-336(1999).
10. O. Abollino, M. Aceto, M. Malandrino, C. Sarzanini, E. Mentasti, "Adsorption of heavy metals on Na-montmorillonite. Effect of pH and organic substances," Water Research, 37, pp. 1619-1627(2003).
11. S. Nagasaki, S. Tanaka and A. Suzuki, "Sorption of neptunium on bentonite and its migration in geosphere," Colloids and Surfaces A, 155, pp. 137-143(1999).
12. W. Xiangke, D. Wenming, G. Yingchun and T. Zuyi, "Sorption characteristics of radioeuropium on bentonite and kaolinite," J. Radioanal. Nucl. Chem., 250, pp. 267-270(2001).
13. W.J. Cho, J.O. Lee, C.H. Kang and K.S. Chun, Physicochemical, mineralogical and mechanical properties of domestic bentonite and bentonite-sand mixture as a buffer material in the high-level waste repository, KAERI/TR-1388/99, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon(1999).
14. W.J. Cho, J.O. Lee, C.H. Kang and K.S. Chun, Effect of organic carbon content of the

- domestic bentonite on the performance of buffer material in a high-level waste repository, KAERI/TR-14393/99, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon(1999).
15. C. Degueldre, H.J. Ulrich and H. Silby, H. "Sorption behaviour of $^{241}\text{Am}(\text{III})$ on montmorillonite, illite and haematite colloid," *Radiochimica Acta*, 65, pp. 173(1994).
 16. M.H. Baik and P.S. Hahn, "Experimental study on uranium sorption onto silica colloids: Effects of geochemical parameters," *J. of the Korean Nuclear Society*, 33, pp. 261-269(2001).
 17. J.M.M. Peeters, J.P. Boom, M.H.V. Mulder and H. Strathmann, "Retention measurements of nanofiltration membranes with electrolyte solutions," *J. Membrane Sci.*, 145, pp. 199-209(1998).
 18. D.B. Burns and A.L. Zydney, "Buffer effects on the zeta potential of ultrafiltration membranes," *J. Membrane Sci.*, 172, pp. 39-48(2000).
 19. K.A. Boulton, M.M. Cowper, T.G. Heath, H. Sato, T. Shibutani and M. Yui, "Towards an understanding of the sorption of U(VI) and Se(IV) on sodium bentonite," *J. Contam. Hydrol.*, 35, pp. 141-150(1998).
 20. M. Tsukamoto, T. Fujita, T. Ohe, "Surface complexation modeling for description of actinide sorption at the buffer materials/water interface," *J. Nucl. Mat.*, 248, pp. 333-337(1997).
 21. S.P. Hyun, Y.H. Cho, P.S. Hahn and S.J. Kim, "Sorption mechanism of U(VI) on a reference montmorillonite: Binding to the internal and external surfaces," *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 250, pp. 55-62(2001).
 22. J.D. Morton, J.D. Semrau and K.F. Hayes, "An X-ray absorption spectroscopy study of the structure and reversibility of copper adsorbed to montmorillonite clay," *Geochim. Cosmochim Acta*, 65, pp. 2709-2722(2001).