

석영모래 속에서의 Ferrihydrite 콜로이드 이동

Transports of Ferrihydrite Colloids in Packed Quartz Sand Media

김 석 휘(Seok-Hwi Kim)¹ · 김 강 주(Kangjoo Kim)^{1,*} · Baohua Gu² ·
이 재 훈(Jaehoon Lee)³ · Wei Wang² · 박 기 훈(Ki-Hoon Park)¹

¹군산대학교 공과대학 토목환경공학부

(School of Civil and Environmental Engineering, Kunsan National University, Kunsan, Jeonbuk 573-701, Korea)

²Environmental Sciences Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37830, USA

³Department of Biosystems Engineering and Soil Science, University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA

요약 : 본 연구에서는 컬럼실험을 통해서 여러 종류의 콜로이드가 같이 존재할 때의 거동을 관찰하였다. 본 실험에서는 일반 pH조건에서 서로 반대의 표면전하를 띠는 ferrihydrite (100 nm; 양전하)와 비정질 SiO₂ (40 nm, 80 nm; 음전하) 나노입자들과 음전하를 띠는 177~250 μm의 석영을 고정상으로 이용하였다. 실험결과는, 양전하를 띠는 콜로이드(ferrihydrite)가 존재한다고 하더라도 그 비율이 많지 않으면 음전하를 띠는 콜로이드(SiO₂)와의 상호작용에 의해서 석영고정상 속을 쉽게 이동될 수 있음을 보여주었다. 이는 자연조건하에서는 양전하를 띠는 오염물질과 음전하를 띠는 오염물질이 동시에 콜로이드에 의해서 이동될 수 있음을 지시한다.

주요어 : 콜로이드, 콜로이드의 이동, humic acid, ferrihydrite, 비정질 실리카

ABSTRACT : Transports of heterogeneously charged particles were investigated based on column experiments. Synthesized mono-dispersed ferrihydrite (~100 nm) and amorphous SiO₂ (~40 nm and ~80 nm) particles, of which surfaces are oppositely charged under pH < 9.0 (ferrihydrite, positive; amorphous silica, negative), were used. 177~250 μm quartz sand was used as a stationary matrix. The results show that even favorable particles (i.e., ferrihydrite) can show a conservative transport through the oppositely charged media (i.e., quartz) when they coexist with humic acid or with much greater number of oppositely charged particles. These results imply that transports of both negatively and positively charged contaminants may be possible at the same time under a condition of heterogeneous colloidal system.

Key words : colloid, transport, humic acid, ferrihydrite, amorphous silica

*교신저자: kangjoo@kunsan.ac.kr

서 론

콜로이드는 그 작은 입자크기로 인하여 물속에서 브라운운동을 하며, 물에 완전히 용해된 것처럼 거동하기도 한다. 역시 작은 입자크기로 인하여 콜로이드는 아주 큰 비표면적을 갖기 때문에 많은 오염물질을 흡착시킬 수 있는 능력을 가지고 있다. 그 동안의 많은 현장연구결과와 지질매체에 쉽게 흡착되어 이동성이 거의 없는 오염물질들도 콜로이드가 존재하는 조건에서는 콜로이드에 흡착되어 멀리까지 이동될 수 있음을 잘 보여주고 있다(Keswick *et al.*, 1982; Nightingale and Bianchi, 1977; Hayward, 1984). 그러나 과거의 연구가 균질한 콜로이드를 대상으로 한 것이 대부분이어서(Elimelech *et al.*, 2000; Pulse and Powell, 1992; Litton and Olson, 1996; Elimelech and O'Melia, 1990), 자연 상황에서처럼 전하가 서로 상반되거나 입자가 다양한 콜로이드들이 서로 섞여 있을 때에 대한 콜로이드의 거동에 대하여는 아직도 충분히 규명되어 있지 않은 실정이다.

사실 그 동안 몇몇의 현장연구에서는 다양한 종류의 입자들을 지질매체에 주입하는 실험을 수행된 바 있다(Harvey *et al.*, 1989; Ryan *et al.*, 1999). Harvey *et al.* (1989)의 경우는 Cape Cod의 사질 대수층에 다양한 입자크기와 다양한 전하를 갖는 콜로이드를 주입하는 실험을 수행하였다. 그러나, 이들이 사용한 콜로이드는 주어진 pH조건에서 모두 음전하나, 중성의 전하를 띠는 것이어서 서로 다른 전하를 띠는 콜로이드가 공존할 때의 상황에 대한 정보는 제공해 주지 못한다. Ryan *et al.* (1999)도 박테리아와 같은 유기 콜로이드와 실리카와 같은 무기 콜로이드를 현장에 주입하는 실험을 수행한 바는 있으나, 이들의 결과 역시 표면전하의 불균질성에 대한 정보를 제공해주지는 못한다.

불균질한 콜로이드를 이용한 실험연구는 지금까지 거의 수행된 바가 없는 실정이다. Zhuang *et al.* (2003)의 연구가 불균질한 콜로이드를 이용한 사례라고 할 수 있다. 이들은 자연상황에서 오염물질 유출로 발생하는 콜로이드를 인위적으로 합성, 이를 이용하여 컬럼실험을 수행하였다. 이들의 연구는 결과적으로 불균질한 콜로이드를 이용한 것이라고 볼 수는 있으나, 콜로이드 간의 상호작용보다는 불균질한 콜로이드

가 전체적으로 이동하면서 Cs의 이동이 크게 촉진될 수 있음을 보일 뿐이다.

불균질한 콜로이드가 공존하는 경우에 콜로이드의 이동을 추측할 수 있는 실험이 Elimelech *et al.* (2000)에 의하여 수행된 바 있다. 이들은 균질한 콜로이드를 실험에 이용하였으나, 고정상의 표면전하가 실제 자연환경에서처럼 불균질한 경우, 콜로이드의 이동이 어떻게 영향을 받는지에 대하여 실험을 수행하였다. 이들은 본 실험을 통하여 콜로이드와 전하적으로 우호적 조건을 갖는 고정상이 전체의 10%만 존재해도 콜로이드의 침전은 80%까지 증대될 수 있음을 관찰하였으며, 이 때문에, 고정상의 평균 표면전하 값을 가지고 콜로이드의 이동을 예측하는 모델은 무의미함을 주장하였다. 고정상의 불균질성에 의한 효과를 콜로이드에 적용하여 보면, 표면전하가 균질하지 않은 콜로이드가 공존할 경우, 콜로이드는 쉽게 서로 엉기게 되어 큰 입자를 형성하고, 그 크기가 과도하게 커지면 침전될 것으로 예상해 볼 수 있다. 이러한 상황은 균질한 콜로이드만 존재할 때와는 전혀 다른 것이며, 균질한 콜로이드를 이용한 실험 결과로는 예측할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 자연상황에서처럼 불균질한 콜로이드 조건하에서 이들 입자들이 어떻게 움직이는지를 관찰하였다.

연구 방법

본 연구에서는 일반 pH조건(5 ~ 9)에서 표면이 양전하를 띠는 ferrihydrite 입자가 음전하를 띠는 SiO₂ 입자와 다양한 비율로 혼합된 콜로이드 용액을 준비하여, 이들이 음전하를 띠는 석영입자 사이를 어떻게 이동하는지를 관찰하였다. 본 연구에는 미국 Oak Ridge 국립연구소에서 합성된 107 nm의 ferrihydrite와 37 nm 및 80 nm 비정질 SiO₂ 콜로이드 용액이 이용되었다. 이들 입자들은 2 < pH < 9에서 각각 양전하(ferrihydrite)와 음전하(비정질 SiO₂)를 띤다. 자연상황에서의 콜로이드 이동양상을 모사하는 것이 본 실험의 주된 목적인 바, 본 연구에서는 휴믹산(humic acid)이 존재하는 조건에서의 ferrihydrite 입자의 이동양상도 관찰하였다. 본 실험에 이용된 휴믹산은 South Carolina의 습지에서 채취된 자연유기물질에서 추출된 것이다

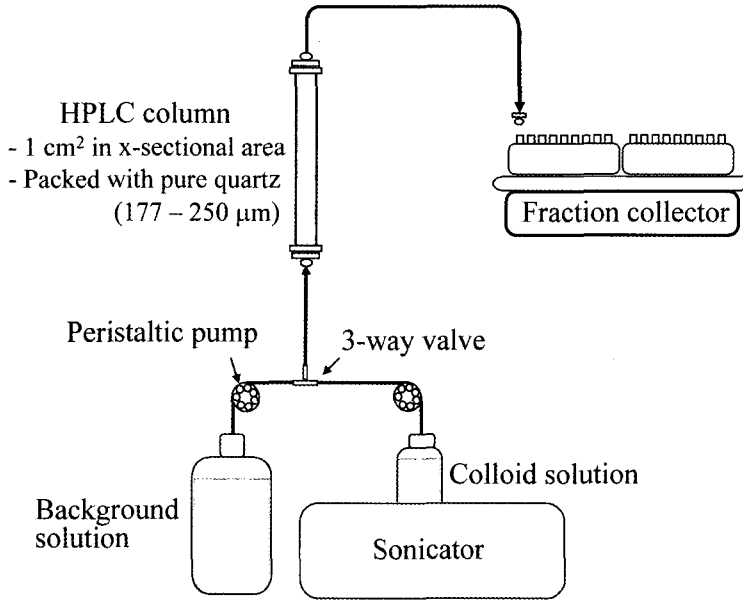


Fig. 1. Illustration of the colloid transport experiment.

(Chen *et al.*, 2002). 그림 1은 본 연구에 이용된 실험장치에 대한 모식도이다.

본 실험에서는 177~250 μm의 석영입자를 고정상으로 사용되었으며, 석영입자는 HCl 20% 용액에 3개월간 담가 표면 불순물을 제거하였다. 이처럼 준비된 석영입자는 단면적 1 cm², 길이 10 cm의 HPLC컬럼에 증류수를 채운 후 공기가 들어가지 않도록 고무 막대로 천천히 두드리면서 채웠다. 석영입자를 채운 후에는 빠른 속도로 증류수를 흘려 보내는 방법으로 컬럼을 패킹하는 과정에서 발생된 미세석영입자를 제거하였다.

콜로이드의 분산상태는 pH뿐 아니라 이온강도에 의해서도 영향을 받을 수 있으므로, 컬럼내 체류시간(pore volume) 및 공극율 측정을 위한 추적자시험과 콜로이드 용액 주입실험은 별도로 수행되었다. 먼저 콜로이드 용액과 같은 pH의 염소이온(약 100 ppm)용액을 이용하여 보존성 화학종의 breakthrough curve를 얻었다. 이후에는 곧바로 three-way valve를 이용하여 바탕용액을 최소한 10시간 이상 흘려 보냄으로써, 고정상의 표면화학이 콜로이드 용액과 미리 평형에 있도록 조정하였다(그림 1). 바탕용액은 실험대상이 되는 콜로이드 용액과 같은 pH 및

이온강도를 갖도록 NaCl, HCl 및 NaOH용액을 이용하여 조정하였다. 바탕용액을 흘린 후에는 다시 three-way valve를 이용하여 실험모드로 전환시켜 콜로이드 용액을 흘려 보냄으로써 콜로이드가 이동되는 양상을 관찰하였다.

특히, ferrihydrite와 비정질 SiO₂입자의 혼합 용액을 이용하는 실험의 경우, 콜로이드들이 컬럼에 들어가기 전에 입자들이 서로 엉기는 것을 막기 위하여 실험도중 주입용액을 지속적으로 sonication하였다. 실험시 펌프속도는 0.4 ± 0.002 mL/min으로 항상 일정하게 유지시켜주었으며, 컬럼에서 용출되는 용액은 반응시간에 따라서 0.8 mL에서 4 mL씩 변화시키면서 자동시료채취기를 통하여 채취하였다. 처음 2~3 pore volume을 채취할 동안은 채취빈도를 작게 하여 관찰하였으며, 이후부터는 점차로 채취시간간격을 길게 하였다. 추적자를 이용하여 측정된 컬럼내 유효 공극율은 약 40%로 매 실험마다 일정하였으며, pore volume도 4.0 ± 0.02 mL로 거의 일정하였다. 본 실험에서는 용출용액의 철농도를 분석하는 방법으로 ferrihydrite의 거동을 관찰하였다. 철농도 분석은 고순도 염산을 이용하여 콜로이드 입자를 모두 용해시킨 후, 일률적으로 10배 희석한 다음 ferrozine용액을 이용

Table 1. Description for the input colloid solutions

Experiment*	37 nm SiO ₂ (ppm)	80 nm SiO ₂ (ppm)	Ferrihydrite (ppm)	Humic Acid (ppm)	SiO ₂ :ferrihydrite in population†
Exp. A	-	-	10	-	0:1
Exp. B	-	-	10	5	0:1
Exp. C	5	-	10	-	19:1
Exp. D	-	10	10	-	4:1

* Ionic strength and pH of the solutions were maintained to 10⁻⁴ mM using NaCl solution and 5.8~6.1 using HCl and NaOH solutions, respectively.

† Relative particle numbers were calculated based on their concentration, particle size, and density (amorphous SiO₂, 2.1 g/cm³; ferrihydrite, 3.8 g/cm³)

발색시켜 UV/Vis spectrometer를 이용하여 분석하였다.

본 연구에서는 ferrihydrite (10 ppm)만 단독으로 존재하는 경우(Exp. A), ferrihydrite (10 ppm)가 휴믹산(5 ppm)과 같이 존재하는 경우(Exp. B), 그리고 ferrihydrite입자가 음의 표면전하를 띠는 비정질 SiO₂입자와 존재하는 경우(Exp. C, D)에 대하여 수행되었다(표 1). 특히, ferrihydrite입자와 비정질 SiO₂입자가 공존하는 경우에 대한 실험에서는 그 혼합비율을 달리하여 실험하였다(Exp. C, 5 ppm, 37 nm SiO₂, 10 ppm ferrihydrite; Exp. D, 10 ppm, 80 nm SiO₂, 10 ppm ferrihydrite). 순수하게 ferrihydrite 콜로이드 용액만을 이용한 Exp. A는 고정상과 서로 우호적인 표면전하를 갖는 경우 콜로이드가 어떻게 이동되는지를 보여 줄 것이다. 또한, 양전하를 띠는 ferrihydrite 콜로이드가 휴믹산과 공존하는 경우를 모사한 Exp. B의 경우는 ferrihydrite 콜로이드 이동이 휴믹산에 의해서 어떻게 변화되는지를 보여 줄 것이다. 본 실험에서는 모든 콜로이드 용액들의 이온강도와 pH를 각각 10⁻⁴ mM 및 5.8~6.1로 유지시켰다.

결과 및 토의

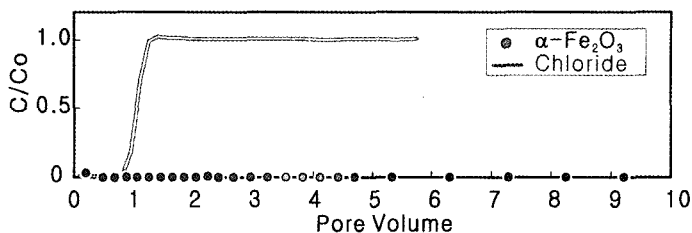
순수한 Ferrihydrite입자의 이동

순수한 ferrihydrite입자를 이용한 실험(Exp A)에서는 10 pore volume의 콜로이드 용액을 흘러 보내는 동안 철농도가 거의 검출되지 않았다(그림 2). 이와 같은 결과는 양전하를 띠는

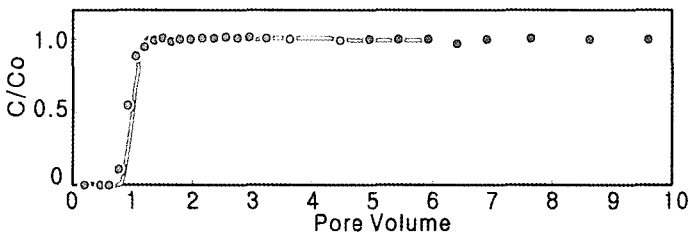
ferrihydrite입자가 음전하를 띠는 고정상에 쉽게 달라붙음으로써 거의 이동되지 못함을 보이는 것이다(그림 3A). 반면 ferrihydrite입자가 휴믹산과 공존하는 경우(Exp. B), ferrihydrite입자의 breakthrough 곡선이 보존성 이온인 염소이온의 그것과 거의 일치되어 나타났으며, 이는 ferrihydrite입자가 보존성 이온과 비슷하게 거동하였음을 지시한다(그림 2). 이와 같은 현상은 휴믹산이 계면활성제와 같은 역할을 함으로써, ferrihydrite입자의 표면이 음전하를 띠도록 바꾸었음을 잘 보여주는 결과이다. 즉, 계면활성제처럼 양전하와 음전하를 모두 가지고 있는 휴믹산은 음전하를 띠는 부분이 ferrihydrite입자에 달라 붙고 음전하를 띠는 부분은 입자의 바깥쪽을 향하도록 배열되어 전체적으로는 ferrihydrite입자의 표면이 음전하를 띠도록 만들어 준다. 이와 같은 상황에서는 표면 음전하를 띠는 석영고정상과는 서로 전하적으로 비우호적인 관계, 즉, 반발하게 됨으로써 석영고정상에 침착하지 않고 흘러갈 수 있게 된다. 이는 마치 석영고정상과 같은 표면전하를 갖는 SiO₂입자가 흘러가는 것과 같다고 할 수 있다(그림 3B).

Exp. B의 결과에서는 ferrihydrite입자가 염소이온보다 빠르게 용출되는 소위 ‘크기배제효과(size exclusion effect)’가 미약하게 관찰되었다. 크기배제효과는 콜로이드의 이동에서 흔하게 관찰되는 현상으로, 콜로이드가 물보다 오히려 빠르게 이동하는 현상을 말한다. 콜로이드의 경우는 용존된 이온과는 달리 크기가 있는 입자이기 때문에 지질매체 내에서는 자기보다 큰 공극만을 이동한다. 또한 큰 공극에서는 물과의

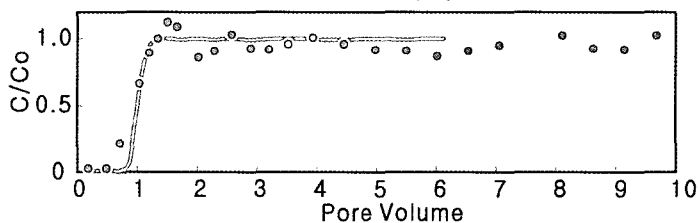
Exp. A) Pure α -Fe₂O₃ (10 ppm)



Exp. B) α -Fe₂O₃ (10 ppm) + humic acid (5 ppm)



Exp. C) α -Fe₂O₃ (10 ppm) : SiO₂ (37 nm, 5 ppm)
= 1 : 19 in colloid population ratio



Exp. D) α -Fe₂O₃ (10 ppm) : SiO₂ (80 nm, 10 ppm)
= 1 : 3.9 in colloid population ratio

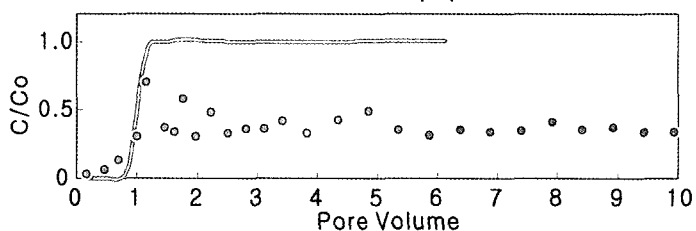


Fig. 2. Breakthrough curves obtained from each experiment.

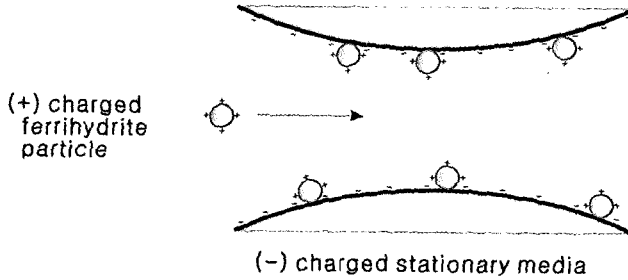
마찰력이 작기 때문에 작은 공극에서 보다 유속이 빠르다. 따라서, 큰 공극만을 선택적으로 흐르게 되는 콜로이드 입자는 물의 평균이동속도보다 빨리 움직이게 된다.

표면전하가 다른 입자와 공존하는 경우

표면전하가 서로 다른 ferrihydrite 입자와 비정

질 SiO₂ 입자를 혼합한 용액은 입자수 비가 서로 대등한 경우 혼합 용액을 준비 후 3시간이 지나지 않아 서로 엉겨서 바로 침전되는 현상이 발생되었다. 이와 같은 현상은 한쪽의 입자가 월등히 많아지게 되면 매우 약해지는 것으로 나타났다. Ferrihydrite:SiO₂의 입자수 비가 1:4 이상인 경우는 적어도 24시간 이상 영기는 현상이 육안으로 관찰되지 않았다. 따라서, 표

(A) Attractive condition:



(B) Repulsive condition:

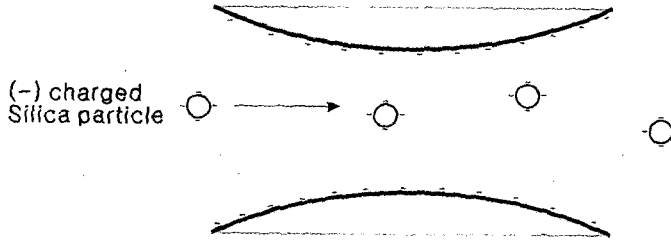


Fig. 3. Transports of homogeneously charged colloids under attractive and repulsive conditions.

면이 음전하를 띠는 입자와 양전하를 띠는 입자가 대등하게 존재하는 상황에서는 이들이 서로 과도하게 엉김으로써 적절하게 지질매체를 통과하지는 못할 것으로 판단되며, 이에 따라, 그에 대한 실험은 수행하지 않았다.

본 실험에서는 SiO_2 의 입자가 ferrihydrite입자에 비하여 월등히 많은 경우(Exp. C, 20배; Exp. D, 4배)에 대하여만 수행되었으며, 그 결과는 그림 2에 제시되었다. 흥미롭게도 두 가지 경우에서 모두 ferrihydrite입자에 대한 breakthrough가 추적자의 그것과 비슷한 시기에 관찰되었지만, 세부내용에서는 서로 다른 양상을 보여 주었다. Ferrihydrite: SiO_2 의 입자 비가 1:20인 경우, Exp B의 경우보다는 작은 크기배제효과를 보였지만 1 pore volume이 지난 후에는 유입농도와 거의 같은 ferrihydrite입자농도를 보였다(C/C₀ 1.0). 이와 같은 결과는 ferrihydrite입자가 석영고정상을 통과하는데 거의 방해받지 않음을 지시한다. 반면, ferrihydrite: SiO_2 의 입자수 비가 1:4인 Exp. D의 경우는 가장 큰 크

기배제효과를 보였지만, breakthrough 이후의 C/C₀값은 약 0.4 정도에서 안정되는 양상을 보였다. 이는 Exp. D의 경우 엉겨 붙은 후의 입자 크기가 Exp. C에 비해서는 현저히 큼을 지시한다. 물론, Exp. D에서는 Exp. C에 비하여 큰 SiO_2 입자(80 nm)를 사용하기도 하였지만, 여기에서는 ferrihydrite의 입자수 비율이 높음으로써 더 큰 입자가 형성된 결과로 예측된다. 즉, ferrihydrite가 반대의 표면전하를 띠는 SiO_2 입자와 엉기게 될 경우, 양전하입자와 음전하입자가 서로 연속적으로 연결되는 현상이 더 크게 나타나 더욱 큰 입자를 형성할 수 있게 된다. 반면, Exp. C의 경우는 ferrihydrite 각각의 입자를 완전히 둘러쌀 수 있을 만큼 SiO_2 입자가 월등히 많기 때문에 체인처럼 연결되어 커다란 입자를 형성하는 현상은 상대적으로 많이 방해받을 수 밖에 없다. 따라서, Exp. C의 경우는 입자들이 엉긴 후에도 비교적 작은 입자를 유지할 수가 있다. 또한, 이러한 경우에는 엉겨 붙은 후의 입자가 전체적으로는 음전하를 띠기

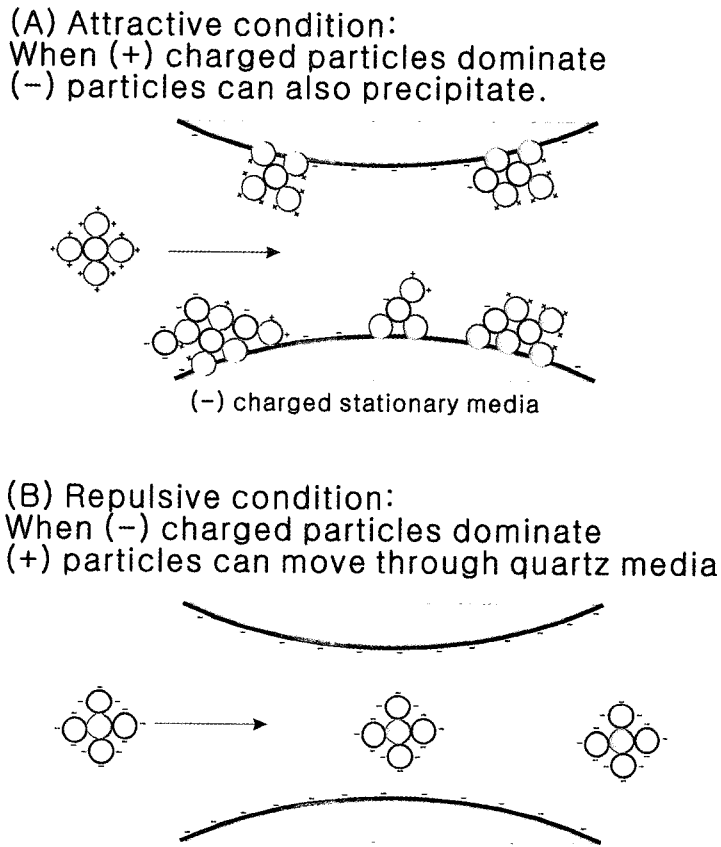


Fig. 4. Colloidal transports when oppositely charged particles coexist. Overall charge conditions of the aggregated particles are dependant on their relative population.

때문에 석영고정상을 안정적으로 통과하게 된다(그림 4). 물론, ferrihydrite의 입자가 SiO₂입자보다 월등히 많을 경우에도 그 반대의 경우에 대하여 관찰한 것처럼, 영겨 붙은 입자가 곧바로 침전될 만큼 과도하게 커지지는 못할 것이다. 그러나, 이 경우는 영겨 붙은 입자의 표면이 전체적으로는 양전하를 띠기 때문에 흘러가는 도중 고정상에 쉽게 침착 될 것이다(그림 4).

이와 같은 이유로 영겨 붙은 덩어리의 크기가 큰 Exp. D의 경우 더욱 큰 크기배제효과를 보이며, 또한 이처럼 큰 입자들은 작은 크기의 공극에 의하여 쉽게 포획되기 때문에 용출되는 농도가 주입농도보다 매우 작아지게 된다. 반면, Exp. C의 경우는 이들 입자들이 영긴 후에도 여전히 크기가 충분히 작아서 이들의 이동이 작은 공극에 거의 방해 받지 않음을 보이고

있다. 그렇지만 Exp. B의 경우보다는 큰 입자를 형성하게 됨으로써 이 보다는 다소 큰 크기배제효과를 보인다.

결론

본 실험 결과는 자연상태에서는 고정상과 표면전하가 서로 반대인 상황에서도 콜로이드가 흘러갈 수 있음을 보여준다. 이 같은 결과는 매우 중요한 환경적 의미를 갖는다. 일반적으로, 콜로이드를 통한 오염물질의 이동을 생각할 때는 균질한 상태의 콜로이드만을 가정하여 왔다. 따라서, 석영질 모래와 같이 음의 표면전하를 띠는 지질매체 내에서의 철산화물과 같은 양전하콜로이드의 이동가능성은 거의 무시되어 왔다. 이에 따라, 지금까지는 음전하콜로이드에

잘 흡착될 수 있는 양전하를 띠는 오염물질의 이동만이 콜로이드를 매개로한 오염물질이동에서 주된 관심의 대상이 되어 왔다. 그러나, 양전하를 띠는 콜로이드도 휴믹산이나 음전하를 띠는 다른 콜로이드에 의해 음전하를 띠는 고정상속을 자유롭게 이동할 수 있음이 본 연구를 통하여 확인되었다. 이는 자연상태에서는 음전하를 띠는 오염물질과 양전하를 띠는 오염물질이 모두 동시에 콜로이드에 의해서 이동될 수 있음을 지시한다. 물론 반대의 전하를 띠는 입자들이 대등하게 존재한다면 서로 엉겨 붙어 대부분 침전되겠지만, 한쪽이 매우 우세하게 나타나고, 또 이들 우세한 입자들이 고정상과 비우호적인 전하를 갖는 경우는 이들 비우호적인 입자에 둘러 쌓여 전하적으로 우호적인 고정상속을 자유롭게 이동할 수 있다.

사 사

본 연구는 군산대학교 교수장기해외연수경비 지원과 미국 Oak Ridge 국립연구소 HERE Program의 연구비 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

Chen, J., Gu, B., LeBoeuf, E.J., Pan, H. and Dai, S. (2002) Spectroscopic characterization of the structural and functional properties of natural organic matter fractions. *Chemosphere*, 48, 59-68.

Elimelech, M., Nagai, M., Ko, C.H. and Ryan, J.N. (2000) Relative insignificance of mineral grain zeta potential to colloid transport in geochemically heterogeneous porous media. *Environmental Science and Technology*, 34, 2143-2148.

Elimelech, M. and O'Melia, C.R. (1990) Kinetics of deposition of colloid particles in porous media. *Environmental Science and Technology*, 24, 1528-1536.

Harvey, R.W. and George, L.H. (1989) Transport of microspheres and indigenous bacteria through a sandy aquifer: results of natural- and forced-gradient tracer experiments. *Environmental Science and Technology*, 23, 51-56.

Hayward, S.B. (1984) Field monitoring of chrysotile asbestos in California waters. *Journal of American Water Works Association*, 76, 66-73.

Keswick, B.H., Wang, D.S. and Gerba, C.P. (1982) The use of microorganisms as ground-water tracers: A review. *Ground Water*, 20, 142-149.

Litton, G.M. and Olson, T.M. (1996) Particle effects on colloid deposition kinetics: evidence of secondary minimum deposition. *Colloid and Surfaces*, 107, 273-283.

Nightingale, H.I. and Bianchi, W.C. (1977) Ground-water turbidity resulting from artificial recharge. *Ground Water*, 15, 146-152.

Pulse, R.W. and Powell, R.M. (1992) Transport of inorganic colloids through natural aquifer material: Implication for contaminant transport. *Environmental Science and Technology*, 26, 614-621.

Ryan, J.N., Elimelech, M., Harvey, R.W. and Johnson, P.R. (1999) Bacteriophage PRD1 and silica colloid transport and recovery in an iron oxide-coated sand aquifer. *Environmental Science and Technology*, 33, 63-73.

Zhuang, J., Flury, M. and Jin, Y. (2003) Colloid-facilitated Cs transport through water-saturated Hanford sediment and Ottawa sand. *Environmental Science and Technology*, 37, 4905-4911.

2006년 12월 4일 원고접수, 2006년 12월 18일 게재승인.