

알루미늄·철 산화물 동시피복모래에서 *Bacillus subtilis*의 부착: 산화음이온의 영향 Attachment of *Bacillus subtilis* to Al-Fe Bimetallic Oxide-coated Sand : Effect of Oxyanions

박성직 · 이창구 · 한용운 · 박정안 · 김성배^{†,*}

Seong-Jik Park · Chang-Gu Lee · Yong-Un Han · Jeong-Ann Park · Song-Bae Kim^{†,*}

서울대학교 환경바이오콜로이드공학 연구실 · *서울대학교 지역시스템공학과, 농업생명과학연구원
Environmental Biocolloid Engineering Laboratory, Seoul National University

*Department of Rural Systems Engineering · Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

(2009년 6월 9일 접수, 2009년 7월 6일 채택)

ABSTRACT : This study investigated the influence of oxyanions (nitrate, carbonate, phosphate) on the attachment of bacteria (*Bacillus subtilis*) to Al-Fe bimetallic oxide-coated sand using column experiments. Results showed that bacterial attachment to the coated sand was independent of nitrate concentration. Bacterial mass recovery remained constant ($10.9 \pm 0.2\%$) with varying nitrate concentrations (0.1, 1, 10 mM). In case of carbonate, mass recovery increased from 25.6% to 39.0% with increasing carbonate concentration from 0.1 mM to 1 mM, and mass recovery also increased from 50.9% to 78.9% at the same concentration condition in case of phosphate. This phenomenon could be attributed to the hindrance effect of carbonate and phosphate to bacterial attachment to the coated sand. Meanwhile, with increasing carbonate/phosphate concentration from 1 mM to 10 mM, mass recovery decreased from 39.0% to 23.8% and from 78.9% to 52.6%, respectively. This phenomenon could be ascribed to the enhancement effect of free carbonate/phosphate ions present in solution phase due to increasing carbonate/phosphate concentration, which increase ionic strength and thus enhance bacterial attachment to the coated sand. In our experimental conditions, the effect of phosphate to bacterial attachment to the coated sand was the greatest among phosphate, carbonate, and nitrate.

Key words : Bacterial Attachment, Coated Sand, Oxyanions, Nitrate, Carbonate, Phosphate

요약 : 본 연구에서는 칼럼실험을 이용하여 알루미늄·철 산화물 동시피복모래에서 박테리아(*Bacillus subtilis*)의 부착에 산화음이온(질산염, 탄산염, 인산염)이 미치는 영향을 조사하였다. 실험결과, 질산염의 경우 피복모래에서의 박테리아 부착은 질산염 이온의 농도변화와 무관하였다. 질산염의 농도가 변화함에 따라(0.1, 1, 10 mM) 질량회수율은 $10.9 \pm 0.2\%$ 로 일정하였다. 탄산염의 경우 농도가 0.1 mM에서 1 mM로 증가함에 따라 질량회수율이 25.6%에서 39.0%로 증가하였고, 인산염의 경우에도 동일한 농도조건에서 50.9%에서 78.9%로 증가하였다. 이러한 현상은 박테리아 부착에 대한 탄산염과 인산염 이온의 방해효과 때문이었다. 반면, 탄산염/인산염의 농도가 1 mM에서 10 mM로 증가함에 따라 질량회수율이 각각 39.0%에서 23.8%로 78.9%에서 52.6%로 감소하였다. 이러한 현상은 탄산염/인산염의 농도증가에 따라 피복모래표면에 흡착되지 않고 수용액상에 존재하는 탄산염이나 인산염 이온이 이온강도를 증가시킴으로써 일어나는 박테리아 부착에 대한 증진효과 때문이었다. 본 실험조건에서 피복모래에서의 박테리아 부착에 미치는 영향은 인산염, 탄산염, 그리고 질산염 중, 인산염이 가장 큰 것으로 나타났다.

주제어 : 박테리아 부착, 피복모래, 산화음이온, 질산염, 탄산염, 인산염

1. 서론

다공성 여재 환경에서 박테리아와 금속(알루미늄, 철) 수산화물의 상호작용에 대한 이해는 대수층에서 박테리아의 부착과 수 처리 여과시스템에서 박테리아의 제거 측면에서 중요하다. 일반적으로 박테리아의 표면은 pH 2~3 이상에서 음전하를 띠고 있기 때문에 박테리아의 부착은 여재 입자 표면전하에 큰 영향을 받는다. 따라서 양전하를 띤 여재 입자 표면은 박테리아의 이동 및 여과에 큰 영향

을 미친다.^{1, 2)} 대수층에서 금속수산화물은 중성 pH 조건에서 양전하를 띠고 있기 때문에, 대수층 매질체 표면에 전하 불균질성을 제공한다. 따라서, 음전하를 띤 박테리아는 정전기적 인력작용에 의하여 양전하를 띤 매질체의 표면에 용이하게 부착될 수 있다.^{3, 4)} 또한, 수 처리 여과시스템에서 금속 수산화물로 표면전하를 변형시킨 다공성 여재를 사용할 경우, 박테리아 제거를 증진시킬 수 있다.^{5, 6)} 금속 수산화물로 피복된 여재에서 박테리아 부착은 여재의 특성(입자표면전하, 입자크기), 박테리아의 특성(박

[†] Corresponding author : E-mail : songbkim@snu.ac.kr Tel : 02-880-4587 Fax : 02-873-2087

테리아 표면전하, 소수성, 박테리아 크기), 그리고 물의 화학적 특성(pH, 이온구성, 이온강도)에 의해 영향을 받는다.^{7, 8)} 수용액에 존재하는 산화음이온(oxyanions)은 금속 수산화물로 피복된 여재와 박테리아의 상호작용에 영향을 줄 수 있다. Foppen 등⁹⁾은 인산염(phosphate)과 질산염(nitrate)의 존재 하에서 침철석(goethite)으로 피복된 모래에서의 박테리아의 부착을 연구하였고, Park 등¹⁰⁾은 철 피복모래에서 인산염의 농도변화에 따른 박테리아의 부착 현상을 관찰하였다. 금속수산화물 피복모래에서 박테리아의 부착 현상을 깊이 있게 이해하기 위해서는 여러 산화음 이온이 박테리아의 부착에 미치는 영향을 비교 연구할 필요가 있다. 하지만, 이에 관한 연구가 부족한 것으로 파악되고 있다. 최근 들어 Jin 연구그룹^{11~13)}이 금속수산화물 피복여재에서 인산염, 질산염, 탄산염(carbonate) 등이 바이러스의 부착에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

따라서, 본 연구에서는 알루미늄·철 산화물이 동시에 피복된 모래(Al-Fe bimetallic oxide-coated sand)에서 산화음이온이 박테리아의 부착에 미치는 영향을 비교 분석하였다. 박테리아 부착실험은 칼럼실험을 이용하여 증류수 조건과, 질산염, 탄산염, 그리고 인산염의 세가지 다른 농도조건에서 수행하였다. 실험을 통해 피복모래로 충전된 칼럼을 통과한 유출수를 취득하여 박테리아의 파과 곡선(breakthrough curve)을 구하고, 이 곡선을 이용하여 박테리아의 질량회수율(mass recovery) 및 부착율계수(adhesion rate coefficient)를 정량화하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 박테리아

실험에 사용된 박테리아인 *B. subtilis* ATCC 6633(그람양성, 간균)는 한국미생물보존센터(Korea Culture Center for Microorganisms)로부터 구입하였으며, 박테리아 준비과정은 다음과 같다. 멸균된 LB배지(tryptone 10 g, yeast extract 5 g, NaCl 5 g, distilled water 1 L) 200 mL가 담긴 삼각플라스크에 박테리아를 3 ml 주입하고, 배양기에서 84시간 동안 30°C 조건에서 배양하였다. 배양된 박테리아 현탁액을 4°C 조건의 원심분리기(VS-24SMTi, Vision Scientific)에서 10,000 rpm으로 20분 동안 원심분리한 후 상등액을 버렸다. 영양배지물질을 확실하게 제거하기 위하여 농축된 박테리아에 멸균된 3차 증류수를 넣고 위와 동일한 조건에서 다시 원심분리를 하였다. 칼럼실험에 사용된 박테리아의 초기농도는 0.5 OD₆₀₀으로, 농축된 박테리아에 증류수를 넣어 초기농도를 맞추었다. 실험에 사용된 모든 배지와 초자기구들은 다른

미생물에 의한 오염을 방지하기 위하여 17.6 psi, 121°C 조건의 autoclave(JISICO, J-NAS2)에서 15분간 멸균하여 사용하였다. 박테리아의 입자크기는 투과전자현미경(Transmission Electron Microscope, JEM 1010, JEOL, Japan)과 이미지 처리 프로그램(Image-Pro Plus)을 이용하여 결정하였다(1.67 μm×0.77 μm). 박테리아표면의 정전기적 특성은 전기영동광산란계(ELS-8000, Otsuka Electronics, Japan)를 이용하여 분석하였다. 박테리아 표면의 전기영동적 이동성(electrophoretic mobility)을 측정된 후(pH=6.8, 온도=25°C, 이온강도≈0 mM), Smoluchowski식을 이용하여 제타전위(zeta potential)를 결정하였다(-31.9 mV).

2.2. 피복모래

실험에는 알루미늄·철 산화물 동시피복모래를 여재로 사용하였다. 석영모래는 유기물을 미리 제거한 모래(주분진사)로써, 실험에 사용된 모래의 입경분포는 0.5~2.0 mm(No. 35~10 mesh, US standard sieve) 사이에 있었으며, 평균입경은 1.0 mm이었다. 모래에 존재하는 부유물질을 제거하기 위하여 증류수로 600 nm(UV-visible spectrophotometer, Thermo, Helios) 흡광도(OD₆₀₀)에서 0.01 이하가 될 때까지 세척하였다. 세척된 모래는 autoclave에서 15분간 2회에 걸쳐 멸균하여(121°C, 17.6 psi), 미생물에 의해 오염되는 것을 최소화하였다. 피복모래의 제조과정은 다음과 같다. 멸균된 증류수 100 mL 용액에 AlCl₃·6H₂O(0.1 M, 2.4 g)과 FeCl₃·6H₂O(0.1 M, 2.7 g)을 함께 넣고 6 N NaOH로 pH를 조절하여 AlCl₃와 FeCl₃ 혼합수용액을 제조하였다. 이 혼합수용액에 멸균된 석영모래 200 g을 넣은 후 회전증발농축기(Hahnshin, HS-2005S)를 이용하여 90°C, 80 rpm 조건에서 20분 반응시켜 1차 피복모래를 제조하였다. 이 피복모래를 건조오븐(JISICO)에서 건조하고(150°C, 6시간) 증류수로 세척한 후 같은 조건에서 다시 건조하여 사용하였다.

2.3. 칼럼실험

칼럼실험을 피복모래로 충전된 칼럼에서 수행하였다. 본 연구에 사용된 칼럼은 polycarbonate 재질로써, 내경 2.5 cm, 높이 10 cm이었다. 여재를 10 cm까지 충전한 후 칼럼조건을 측정된 결과, 여재의 질량은 78.0±0.8 g, 체적밀도 1,589±0.017 g/cm³, 공극율 0.401±0.007이었다. 박테리아 부착실험은 증류수 조건(pH 6.3)과, 0.1, 1, 10 mM의 질산염(NaNO₃, pH 6.2~6.3), 탄산염(NaHCO₃, pH 6.7~8.1), 인산염(Na₂HPO₄, pH 7.3~8.8) 조건에서 수행하였다(Table 1). 여재로 채워진 칼럼에 0.35 mL/min의 유량조건에서 HPLC펌프

Table 1. Experimental conditions and results for bacterial attachment to Al-Fe bimetallic oxide-coated sand

Ex.	Oxyanions (mM)	Mr (%)	v (cm/min)	D (cm ² /min)	λ (1/min)	R ²
1a	DW	11.3	0.173	0.059	0.0389	0.99
1b	DW	11.7	0.172	0.048	0.0385	0.99
2a	N (0.1)	11.0	0.172	0.079	0.0398	0.99
2b	N (0.1)	11.1	0.160	0.139	0.0380	0.99
3a	N (1)	10.1	0.160	0.163	0.0397	0.99
3b	N (1)	10.7	0.158	0.262	0.0417	0.99
4a	N (10)	9.0	0.150	0.225	0.0355	0.95
4b	N (10)	11.0	0.150	0.164	0.0399	0.98
5a	C (0.1)	25.0	0.155	0.064	0.0218	0.99
5b	C (0.1)	26.1	0.161	0.061	0.0220	1.00
6a	C (1)	38.7	0.165	0.074	0.0160	1.00
6b	C (1)	39.2	0.165	0.085	0.0157	0.99
7a	C (10)	22.7	0.150	0.153	0.0218	0.93
7b	C (10)	24.9	0.156	0.137	0.0228	0.98
8a	P (0.1)	49.8	0.170	0.062	0.0118	1.00
8b	P (0.1)	51.9	0.164	0.065	0.0107	1.00
9a	P (1)	78.1	0.168	0.062	0.0044	1.00
9b	P (1)	79.6	0.169	0.078	0.0039	1.00
10a	P (10)	50.8	0.168	0.068	0.0115	1.00
10b	P (10)	54.4	0.167	0.074	0.0103	1.00

DW=deionized water, N=nitrate, C=carbonate, P=phosphate, Mr=mass recovery

(QC400, FASCO, USA)를 이용하여 상향으로 용액을 15 배의 공극부피(1 공극부피 = 19.6 cm³)만큼 주입하여 포화 된 정상류 상태에 이르게 하였고, OD₆₀₀이 0임을 확인한 후 박테리아 용액(산화음이온 포함)을 0.35 mL/min 정속 으로 60분 동안 하향흐름으로 주입하였다. 이때, 칼럼의 공탑체류시간(EBCT)은 56분이었다. 박테리아의 주입이 끝난 후 동일한 유속으로 산화음이온 용액을 다시 주입 하였으며, 유출수를 일정한 시간 간격으로 자동 포집기 (Retriever 500, TELEDYNE, USA)를 이용하여 5.25 mL씩 포집하였다. 유출수 내의 박테리아 농도는 UV-visible spectrophotometer(OD₆₀₀)로 측정하였다. 실험 결과의 신뢰도를 높이기 위해 실험은 각 조건에서 2회 반복 수행하였다. 한편, 실험 후 칼럼을 해체하여 칼럼 상층 부의 피복모래를 채취한 후, 피복모래에 부착된 박테리아 를 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, JSM5410LV, JEOL, Japan)으로 관찰하였다(Fig. 1).

2.4. 파과곡선 분석

박테리아 파과곡선은 다음과 같은 일차원 운송식(성장과 사멸 제외)을 이용하여 분석하였다.¹⁴⁾

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \frac{\partial c}{\partial x} - \lambda c \quad (1)$$

여기에서 t는 시간, x는 거리, C는 수용액상의 박테리아 농도[ML⁻³], D는 수리분산계수[L²T⁻¹], v는 박테리아의



Fig. 1. A SEM image of *Bacillus subtilis* ATCC 6633 attached to Al-Fe bimetallic oxide-coated sand (Bar = 1 μm).

이동속도[L T⁻¹], 그리고 λ는 박테리아의 부착율계수[T⁻¹]이다. 박테리아 이동모델 관련 변수는 박테리아 파과곡선 으로부터 CXTFIT 코드¹⁵⁾를 이용하여 구하였다. 그리고, 유출수내의 박테리아의 질량회수율(Mr)은 다음 식을 이용 하여 정량화하였다.

$$M_r = \frac{\int_0^t C dt}{C_0 t_0} \quad (2)$$

여기에서 C₀는 박테리아의 주입농도이고, t₀는 주입시 간이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 박테리아 파과곡선

알루미늄·철 산화물 동시피복모래에서 박테리아의 파 과곡선을 Fig. 2에 나타내었다. 증류수 조건에서의 파과곡 선은 0.127의 평균상대첨두농도(average relative peak concentration)를 나타내었다(Fig. 2a). 또한, 박테리아 파과곡선으로부터 얻은 수리학적 특성변수(v, D)는 각각 0.172±0.001 cm/min과 0.054±0.007 cm²/min이었고, 부착율상수(λ)는 0.0387±0.0003 1/min이었다. 질 산염에서의 파과곡선은 질산염 농도가 0.1 mM에서 10 mM로 증가함에 따라 거의 일정한 첨두농도(0.097± 0.015)를 나타내었다(Fig. 2b). 파과곡선으로부터 얻은 v, D는 각각 0.158±0.008 cm/min과 0.172±0.064 cm²/min이었고, 부착율상수(λ)는 0.0391±0.0021 1/min이었다. 탄산염 조건에서는 탄산염 농도가 0.1 mM 에서 1 mM로 증가함에 따라 첨두농도가 0.246에서 0.357로 증가하였다가, 10 mM로 증가함에 따라 첨두농

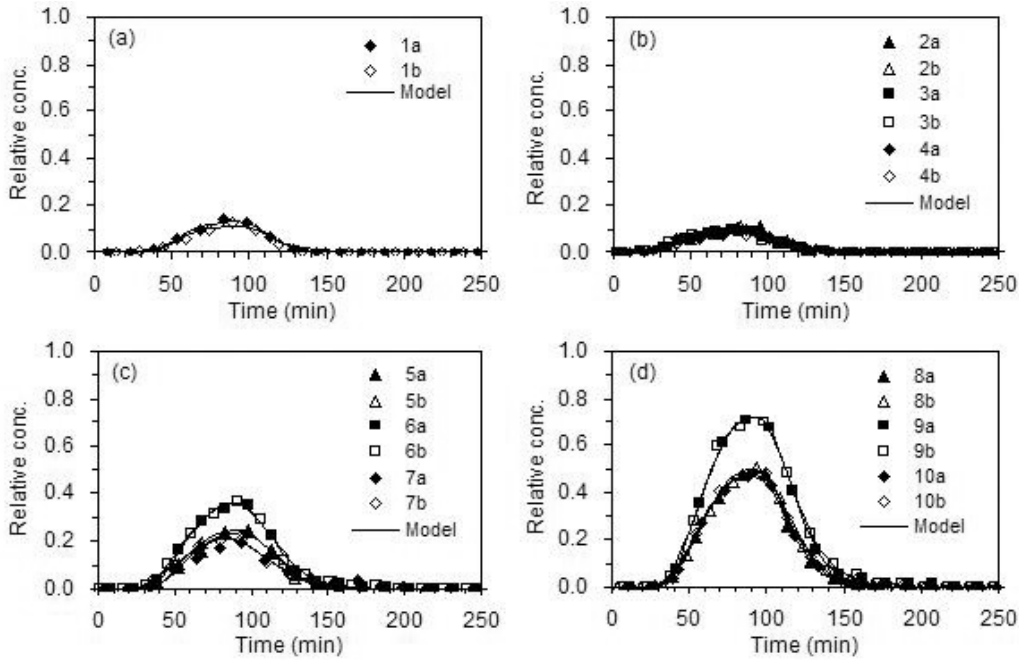


Fig. 2. Bacterial breakthrough curves from column experiments under different oxyanions: (a) deionized water, (b) nitrate, (c) carbonate, (d) phosphate.

도가 0.205로 다시 감소하였다(Fig. 2c). v 와 D 값은 각각 0.159 ± 0.006 cm/min, 0.096 ± 0.039 cm²/min이었고, λ 값은 탄산염 농도의 증가에 따라 0.0219 ± 0.0001 1/min(0.1 mM)에서 0.0159 ± 0.0002 1/min(1 mM)로 감소하였다가 다시 0.0223 ± 0.0007 1/min(10 mM)로 증가하였다. 인산염 에서는 인산염 농도가 0.1 mM에서 1 mM로 증가함에 따라 침투농도가 0.486에서 0.701로 증가하였다가, 10 mM로 증가함에 따라 침투농도가 0.475로 다시 감소하였다(Fig. 2d). v 와 D 값은 각각 0.168 ± 0.002 cm/min, 0.068 ± 0.006 cm²/min이었고, λ 값은 인산염 농도의 증가에 따라 0.0112 ± 0.0008 1/min(0.1 mM)에서 0.0041 ± 0.0003 1/min(1 mM)로 감소하였다가 다시 0.0109 ± 0.0008 1/min(10 mM)로 증가하였다.

3.2. 동시피복모래에서의 박테리아 질량회수율

박테리아 부착실험 결과에 의하면, 동시피복모래에서의 박테리아 질량회수율은 산화음이온의 종류에 따라 다른 양상을 보였다(Fig. 3). 질산염의 존재 하에서는 질산염의 농도가 증가함에도 불구하고 피복모래에서의 박테리아 부착량이 변화하지 않았다. 즉, 0.1, 1, 10 mM 용액에서 질량회수율은 각각 11.1%(2a, 11.0; 2b, 11.1), 10.4%(3a, 10.1; 3b, 10.7), 10.0%(4a, 9.0; 4b, 11.0)로 일정하였다

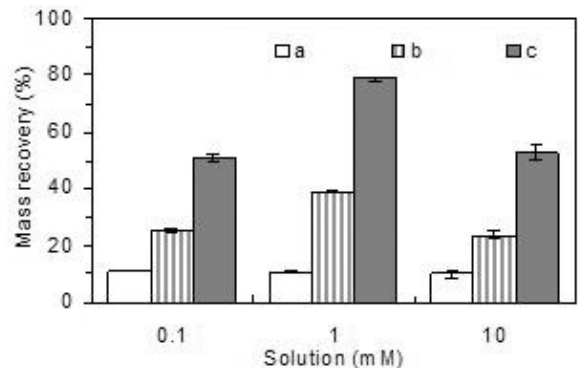


Fig. 3. Bacterial mass recoveries in Al-Fe bimetallic oxide-coated sand under different oxyanions: (a) nitrate, (b) carbonate, (c) phosphate.

(평균 질량회수율 = $10.9 \pm 0.2\%$). 또한, 증류수 조건에서의 질량회수율인 11.5%(1a, 11.3; 1b, 11.7)과 비슷하였다. 탄산염에서의 질량회수율은 탄산염 농도가 0.1 mM에서 1 mM로 증가함에 따라 25.6%(5a, 25.0; 5b, 26.1)에서 39.0%(6a, 38.7; 6b, 39.2)로 약 13% 증가하였다. 하지만, 탄산염의 농도가 10 mM로 증가함에 따라 23.8%(7a, 22.7; 7b, 24.9)로 1 mM에서 보다 약 15% 감소하였다. 인산염의 경우에도 탄산염의 경우와 같이 인산염 농도가 0.1 mM에서 1 mM로 증가함에 따라 박테리아 질량회수율이 50.9%(8a, 49.8; 8b, 51.9)에서 78.9%(9a, 78.1;

9b, 79.6)로 약 28% 증가하였다가, 농도가 10 mM로 증가함에 따라 52.6%(10a, 50.8; 10b, 54.4)로 1 mM에서 보다 약 26% 감소하였다.

세가지 산화음이온에서의 박테리아 질량회수율을 동일한 농도조건에서 비교하였을 때, 실험한 세가지 농도조건 모두에서 인산염에서의 질량회수율이 질산염이나 탄산염에서 보다 높았다(Fig. 3). 0.1mM 용액에서 질산염, 탄산염, 인산염의 질량회수율은 각각 11.1%, 25.6%, 50.9%이었다. 탄산염에서의 질량회수율이 질산염에서 보다 2.5배 높았고, 인산염에서의 질량회수율은 탄산염에서 보다 2.0배 높았다. 1mM 용액에서 질량회수율은 10.4%(질산염), 39.0%(탄산염), 78.9%(인산염)로 탄산염에서의 질량회수율이 질산염에서 보다 3.7배 높았고, 인산염에서의 질량회수율은 탄산염에서 보다 2.0배 높았다. 10mM 용액에서는 10.0%(질산염), 23.8%(탄산염), 52.6%(인산염)의 질량회수율을 보였는데, 인산염에서의 질량회수율이 질산염이나 탄산염에서 보다 각각 5.2배, 2.2배 높았다.

3.3. 산화음이온과 박테리아 부착

본 연구결과에 의하면, 탄산염의 경우 박테리아 부착은 탄산염 이온의 농도변화에 영향을 받았다. 탄산염 농도가 0.1 mM에서 1 mM로 증가함에 따라 박테리아의 부착이 감소하였는데, 이는 박테리아 부착에 대한 탄산염 이온의 방해효과(hindrance effect) 때문이었다. 탄산염 이온은 표면착화(surface complexation)에 의해 철이나 알루미늄 수산화물에 흡착된다.¹⁶⁾ 따라서, 탄산염의 존재 하에서는 금속산화물과 오염물질(예: 비소, 셀레늄)의 상호작용이 영향을 받는다.^{17, 18)} 본 칼럼실험의 경우, 칼럼 내에 주입된 탄산염이 피복모래표면에 존재하는 양전하 영역(positively-charged site)을 차지하고, 이때 탄산염이 흡착된 피복모래표면은 음전하로 변하게 된다. 따라서, 탄산염의 존재 하에서는 피복모래표면의 박테리아가 부착할 수 있는 영역이 감소되어, 박테리아의 질량회수율이 증가하게 된다. 한편, 탄산염 농도가 1 mM에서 10 mM로 증가함에 따라 박테리아의 부착이 다시 증가하였는데, 이는 피복모래표면에 흡착되지 않고 수용액상에 존재하는 탄산염 이온이 이온강도를 증가시킴으로써 일어나는 박테리아 부착에 대한 증진효과(enhancement effect) 때문이었다. 즉, 탄산염이 흡착되어 음전하를 띤 피복모래의 표면과 박테리아 사이에는 정전기적인 척력(electrostatic repulsion)이 작용하는데, 탄산염 주입농도가 증가함에 따라 수용액상에 존재하는 탄산염 이온의 농도가 증가하게 되어 이온강도가 증가하게 된다. 따라서, 피복모래의 표면과 박테리아의 입자표면 사이에 존재하는 정전기적 이중층(electrostatic double layer)이 압축됨으로써, 박테리아의 부착이 증가하

게 된다.¹⁹⁾

인산염의 경우에도 박테리아 부착은 인산염 이온의 농도변화에 영향을 받았다. 인산염 농도가 0.1 mM에서 1 mM로 증가함에 따라 박테리아의 부착이 감소하였는데, 이는 탄산염 이온의 경우와 동일하게 박테리아 부착에 대한 인산염 이온의 방해효과 때문이다. 즉, 인산염의 흡착에 의해 박테리아가 부착할 수 있는 영역이 감소되기 때문이다. 인산염 농도가 1 mM에서 10 mM로 증가함에 따라 박테리아의 부착이 다시 증가하였는데, 이는 탄산염 이온의 경우와 같이 피복모래표면에 흡착되지 않고 수용액상에 존재하는 인산염 이온이 이온강도를 증가시킴으로써 일어나는 박테리아 부착에 대한 증진효과 때문이다.¹⁰⁾ 본 실험결과에 의하면, 박테리아의 부착감소에 있어서 인산염이 탄산염보다 더 큰 영향을 미쳤는데, 이는 인산염은 철이나 알루미늄 수산화물과 inner-sphere 형태의 강한 결합을 형성하는 반면에, 탄산염은 inner-sphere 형태의 결합뿐만 아니라 outer-sphere 형태의 약한 결합을 형성하기 때문이다.²⁰⁾ 이러한 결과는 또한 인산염이 탄산염보다 알루미늄 피복모래에서의 바이러스 부착에 대한 영향이 더 크다는 Zhuang과 Jin¹²⁾의 결과와도 일치한다. 질산염의 경우 피복모래에서의 박테리아 부착이 질산염 이온의 농도변화와 무관하였다. 이러한 결과는 철피복모래에서 박테리아의 질량회수율이 염화나트륨(NaCl)의 농도가 증가함에 따라 변화하지 않는다는 Lee 등²¹⁾의 실험결과와 유사하다. 또한, 층상이중수산화물(layered double hydroxides)에서 바이러스 부착에 대한 질산염의 영향이 미미하다는 You 등¹¹⁾의 결과와도 부합된다. 이러한 현상은 질산염 이온이나 염화 이온의 경우에는 피복모래에 흡착되지 않아서 피복모래의 표면특성이 변화되지 않고, 따라서 박테리아와 피복모래 표면간의 상호작용에 변화가 발생하지 않기 때문에, 박테리아의 질량회수율이 변화하지 않는다.

4. 결론

본 연구에서는 알루미늄·철 산화물 동시피복모래에서 박테리아의 부착에 산화음이온이 미치는 영향을 조사하였다. 실험결과, 탄산염이나 인산염의 농도가 0.1 mM에서 1 mM로 증가함에 따라 박테리아의 부착이 감소하였는데, 이는 박테리아 부착에 대한 탄산염과 인산염 이온의 방해효과 때문이다. 탄산염이나 인산염의 농도가 1 mM에서 10 mM로 증가함에 따라 박테리아의 부착이 다시 증가하였는데, 이는 피복모래표면에 흡착되지 않고 수용액상에 존재하는 탄산염이나 인산염 이온이 이온강도를 증가시킴으로써 일어나는 박테리아 부착에 대한 증진효과 때문이

다. 반면, 질산염의 경우 피복모래에서의 박테리아 부착이 질산염 이온의 농도변화와 무관하였다. 본 실험조건에서 탄산염, 인산염, 그리고 질산염의 영향을 비교한 결과, 피복모래에서의 박테리아의 부착에 미치는 영향은 인산염이 가장 큰 것으로 나타났다.

KSEE

사 사

본 연구는 서울시 산학연 협력사업 중 신기술 연구개발 지원사업 (과제번호 NT080607C0209721)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Knapp, E. P., Herman, J. S., Hornberger, G. M. and Mills, A. L., "The effect of distribution of iron-oxyhydroxide grain coatings on the transport of bacterial cells in porous media," *Environ. Geol.*, **33**, 243~248(1998).
2. Bolster, C. H., Mills, A. L., Hornberger, G. M. and Herman, J. S., "Effect of surface coatings, grain size, and ionic strength on the maximum attainable coverage of bacteria on sand surfaces," *J. Contam. Hydrol.*, **50**, 287~305(2001).
3. Silliman, S. E., Dunlap, R., Fletcher, M. and Schneegurt M. A., "Bacterial transport in heterogeneous porous media: observations from laboratory experiments," *Water Res.*, **37**, 2699~2707 (2001).
4. Hall, J. A., Mailloux, B. J., Onstott, T. C., Scheibe, T. D., Fuller, M. E., Dong, H. and Deflaun M. F., "Physical versus chemical effects on bacterial and bromide transport as determined from on site sediment column pulse experiments," *J. Contam. Hydrol.*, **57**, 161~187(2005).
5. Lukasik, J., Cheng, Y.-F., Lu, F., Tamplin, M. and Farrah, S. R., "Removal of microorganisms from water by columns containing sand coated with ferric and aluminum hydroxides," *Water Res.*, **33**, 769~777(1999).
6. Kim, S. B., Park, S. J., Lee, C. G., Choi, N. C. and Kim, D. J., "Bacteria transport through goethite-coated sand: effects of solution pH and coated sand content," *Colloids Surf. B.*, **63**, 236~242(2008).
7. Gannon, J. T., Manilal, V. B. and Alexander, M., "Relationship between cell surface properties and transport of bacteria through soil," *Appl. Environ. Microbiol.*, **57**, 190~193(1991).
8. Fontes, D. E., Mills, A. L., Hornberger, G. M. and Herman, J. S., "Physical and chemical factors influencing transport of microorganisms through porous media," *Appl. Environ. Microbiol.*, **57**, 2473~2481(1991).
9. Foppen, J. W. A., Lien, Y. and Schijven, J. F., "Effect of humic acid on the attachment of Escherichia coli in columns of goethite-coated sand," *Water Res.*, **42**, 211~219(2008).
10. Park, S. J., Lee, C. G. and Kim, S. B., "The role of phosphate in bacterial interaction with iron-coated surfaces," *Colloids Surf. B.*, **68**, 79-82(2009).
11. You, Y., Vance, G. F., Sparks, D. L., Zhuang J. and Jin, Y., "Sorption of MS2 bacteriophage to layered double hydroxides: effects of reaction time, pH, and competing anions," *J. Environ. Qual.*, **32**, 2046~2053(2003).
12. Zhuang, J. and Jin, Y., "Virus retention and transport through Al-oxide coated sand columns: effects of ionic strength and composition," *J. Contam. Hydrol.*, **60**, 193~209(2003).
13. Zhuang, J. and Jin, Y., "Interactions between viruses and goethite during saturated flow: effects of solution pH, carbonate, and phosphate," *J. Contam. Hydrol.*, **98**, 15~21(2008).
14. Hornberger, G. M., Mills, A. L. and Herman, J. S., "Bacterial transport in porous media: evaluation of a model using laboratory observations," *Water Resour. Res.*, **28**, 915~938(1992).
15. Toride, N., Leij, F. J. and van Genuchten, M. Th., "The CXTFIT code for estimating transport parameters from laboratory or field tracer experiments," Research Report No. 137, US Salinity Laboratory.
16. Hiemstra, T., Rahnemaie, R. and van Riemsdijk, W. H., "Surface complexation of carbonate on goethite: IR spectroscopy, structure and charge distribution," *J. Colloid Interface Sci.*, **278**, 282~290(2004).
17. Kuan, W. H., Lo, S. L., Wang, M. K. and Lin, C. F., "Removal of Se(IV) and Se(VI) from water by aluminum-oxide-coated sand," *Water Res.*, **32**, 915~923(1998).
18. Radu, T., Subacz, J. L., Phillippi, J. M. and Barnett, M. O., "Effects of Dissolved Carbonate on Arsenic Adsorption and Mobility," *Environ. Sci. Technol.*, **39**, 7875-7882(2005).
19. Poortinga, A. T., Bos, R., Norde, W. and Busscher, H. J., "Electric double layer interactions in bacterial adhesion to surfaces," *Surf. Sci. Report.*, **47**, 1~32(2002).
20. Rahnemaie, R., Hiemstra, T. and van Riemsdijk, W. H., "Carbonate adsorption on goethite in competition with phosphate," *J. Colloid Interface Sci.*, **315**, 415~425(2007).
21. Lee, C. G., Park, S. J., Kim, H. C., Han, Y. U. and Kim, S. B., "Determination of bacterial mass recovery in iron-coated sand: influence of ionic strength," *J. Environ. Sci. Health*, **43**, 1108-1114(2008).