大韓環境工學會誌・論文 - Original Paper - 287～293. 2009.

석영 및 철피복 모래에서 박테리아 부착・탈착: 이온강도의 영향

이창구・박성직・김현정・한용운・박정안・김성배†,*

서울대학교 환경바이오콜로이드공학연구실・*서울대학교 지역시스템공학과・농업생명과학연구원

(2009년 4월 14일 접수, 2009년 4월 28일 채택)

Adhesion and Release of Bacteria in Quartz and Iron-coated Sands: Effect of Ionic Strength

Chang-Gu Lee・Seong-Jik Park・Hyon-Chong Kim・
Yong-Un Han・Jeong-Ann Park・Song-Bae Kim†,*

Environmental Biocolloid Engineering Laboratory, Seoul National University
**Department of Rural Systems Engineering・Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University*

ABSTRACT : This study investigated the influence of ionic strength on the adhesion and release of bacteria (*Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*, and *Staphylococcus aureus*) in quartz and iron-coated sands using column experiments. Results show that the mass recovery remained constant (*E. coli* = 13.7±0.5%, *B. subtilis* = 9.8±1.3%, *S. aureus* = 13.0±2.1%) in iron-coated sand while it decreased from 80.7 to 45.3% (*S. aureus*) in quartz sand with increasing ionic concentrations from 1 to 100 mM. As the ionic concentrations of leaching solution was lowered from 100 to 0.1 mM, average 39.1% of bacterial detachment was quantified from quartz sand, but no bacterial release was observed in iron-coated sand. The phenomenon observed in iron-coated sand can be attributed to the inner-sphere complexes between bacteria and coated sand, which have minimal effect from ionic strength. This study improves our knowledge regarding the bacterial interaction with surface-modified porous media.

Key Words : *Bacterial Adhesion, Bacterial Release, Iron-coated Sand, Quartz Sand, Ionic Strength, Column Experiment*

요약 : 본 연구에서는 칼럼실험을 이용하여 석영모래와 철피복 모래에서 박테리아(*Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*, 그리고 *Staphylococcus aureus*)의 부착 및 탈착에 미치는 이온강도의 영향을 조사하였다. 실험결과, 철피복 모래에서는 이온강도가 1 mM에서 100 mM로 증가함에 따라 질량회수율이 일정(*E. coli* = 13.7±0.5%, *B. subtilis* = 9.8±1.3%, *S. aureus* = 13.0±2.1%)한 반면, 석영모래에서는 80.7%에서 45.3%로 감소하였다(*S. aureus*). 용출용액의 이온강도가 100 mM에서 0.1 mM로 감소함에 따라, 석영모래에서는 평균 39.1%의 박테리아 탈착이 일어났지만, 철피복 모래에서는 탈착이 관찰되지 않았다. 철피복 모래에서 관찰된 이러한 현상은 박테리아와 철피복 모래사이의 inner-sphere complexes(이온강도의 영향을 받지 않는)에 의한 결합 때문이다. 본 연구는 박테리아와 표면변형 다공성 여재의 상호작용에 대한 지식을 증진시킨다.

주제어 : 박테리아 부착, 박테리아 탈착, 철피복 모래, 석영모래, 이온강도

1. 서 론

수자원의 미생물학적인 오염은 전세계적으로 심각한 환경문제로써 인류의 건강에 커다란 위협을 주고 있고, 부적절한 위생으로 의한 수인성 전염병 때문에 많은 인구가 사망하고 있다. 세계보건기구(World Health Organization)의 보고에 의하면, 11억 이상의 인구가 적절하고 안전한 음용수원에 접근하지 못하고 있으며, 매년 220만 명 정도가 사망하는 것으로 알려져 있다.[1)] 이러한 상황에서, 다공성 여재 환경에서 박테리아와 금속(알루미늄, 철) 수산화물[metal (hydr)oxides]의 상호작용에 관한 연구가 주목을 받고 있다. 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 영향을 미친다.[2～3)] 대수층에서 금속수산화물은 중성 pH 조건에서 양전하를 띄고 있기 때문에, 대수층 매질체 표면에 전하 불균질성을 제공한다. 따라서, 음전하를 띈 박테리아는 정전기적 인력작용에 의하여 양전하를 띈 매질체의 표면에 용이하게 부착될 수 있다.[4,5)] 또한, 수 처리 여과시스템에서 금속 수산화물로 표면전하를 변형시킨 다공성 여재를 사용할 경우, 박테리아 제거를 증진시킬 수 있다.[6,7)]

다공성 여재에서 박테리아 부착은 박테리아의 특성(박테리아 표면전하, 소수성, 박테리아 크기)과 여재의 특성(입자표면전하, 입자크기)에 의해 영향을 받는다.[8,9)] 특히, 물의 화학적 특성(pH, 이온구성, 이온강도)은 금속 수산화물로 피복된 여재에서 박테리아 부착에 중요한 역할을 한다.

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

Ams 등[10]은 침철석(goethite) 피복모래에서 pH에 따른 박테리아의 부착을 관찰한 결과, pH가 6.0에서 9.0으로 증가할 때 *Bacillus subtilis*의 부착은 점차 감소하고, *Pseudomonas mendocina*의 경우에는 pH 4.0～7.5 조건에서 보다 pH 7.5～9.0 범위에서 부착이 감소함을 보고하였다. Jiang 등[11]은 침철석을 이용한 *Pseudomonas putida*의 부착 연구에서 pH가 3.0에서 8.0 사이에 증가할 때 박테리아의 부착은 점차 감소하지만, 침철석의 등전점(pH_{pzc} = 8.3)이 위치하는 pH 8.0～9.0범위에서는 박테리아의 부착이 급격하게 감소한다고 보고하였다. Park 등[12]은 철피복 모래(iron-coated sand, ICS)에서 인산염의 농도에 따른 *Staphyloococcus aureus*의 부착을 연구한 결과, 인산염 농도가 0에서 0.5 mM로 증가할 때 박테리아의 부착은 감소하였지만, 0.5에서 2.0mM로 증가할 때는 부착이 증가하였다고 보고하였다.

철피복 모래에서 박테리아의 부착을 깊이 있게 이해하고 제거율을 향상시키기 위해서는 이온강도의 변화에 따른 박테리아의 탈착에 관한 연구가 필요하다. 하지만, 이에 관한 연구는 수행된 바가 없는 것으로 파악되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 석영(quartz sand) 및 철피복 모래에서 이온강도의 변화에 따른 박테리아의 부착 및 탈착을 분석하기 위하여 칼럼실험을 수행하였다. 실험에는 서로 다른 세포 특성을 가진 세가지 박테리아, *Escherichia coli* (그람음성, 간균), *B. subtilis*(그람양성, 간균), *S. aureus*(그람양성, 구균)를 사용하였다. 실험을 통해 여재로 충진된 칼럼을 통과한 유출수를 취득하여 박테리아의 파과곡선(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 *E. coli* ATCC 11105, *B. subtilis* ATCC 6633, *S. aureus* ATCC 10537는 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℃조건에서 배양하였다. 배양된 박테리아 현탁액을 4℃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 OD_{600}으로(OD: optical density), 농축된 박테리아에 증류수를 넣어 초기농도를 맞추었다. 실험에 사용된 모든 배지와 초자기구들은 다른 미생물에 의한 오염을 방지하기 위하여 17.6 psi, 121℃ 조건의 고압멸균기(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 (*E. coli* = 2.2 μm × 0.6 μm, *B. subtilis* = 1.67 μm × 0.77 μm, *S. aureus* = 0.83 μm). 박테리아표면의 정전기적 특징은 전기영동광산란계(ELS-8000, Otsuka Electronics, Japan)를 이용하여 분석하였다. 박테리아 표면의 전기영동적 이동성(electrophoretic mobility)을 측정한 후(pH = 6.8, 온도 = 25℃, 이온강도 ≈ 0 mM), Smoluchowski식을 이용하여 제타전위(zeta potential)를 결정하였다(*E. coli* = -51 mV, *B. subtilis* = -31.9 mV, *S. aureus* = -46.4 mV).

2.2. 다공성 여재

실험에는 석영모래와 철피복 모래를 여재로 사용하였다. 석영모래는 유기물을 미리 제거한 모래(주문진사)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 흡광도(OD_{600})에서 0.01 이하(UV-visible spectrophotometer, Thermo, Helios)가 될 때까지 세척하였다. 세척된 모래는 autoclave에서 15분간 2회에 걸쳐 멸균하여(121℃, 17.6 psi), 미생물에 의해 오염되는 것을 최소화하였다. 철피복 모래의 제조과정은 다음과 같다. 멸균된 증류수 100 mL 용액에 $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 5.5 g을 넣고 6 N NaOH로 pH를 조절하여 $FeCl_3$ 수용액을 제조하였다. $FeCl_3$ 수용액에 멸균된 석영모래 200 g을 넣은 후 회전증발농축기(Hahnshin, HS-2005S)를 이용하여 90℃, 80 rpm 조건에서 20분 반응시켜 1차 철피복 모래를 제조하였다. 이 피복 모래를 건조오븐(JISICO)에서 건조하고(150℃, 6시간) 증류수로 세척한 후 같은 조건에서 다시 건조하여 사용하였다.

2.3. 칼럼실험

칼럼실험을 석영모래와 철피복 모래로 충진된 칼럼에서 수행하였다(Table 1). 본 연구에 사용된 칼럼은 polycarbonate (PC) 재질로써, 내경 2.5 cm, 높이 10 cm이었다. 여재를 10 cm까지 충진한 후 칼럼조건을 측정한 결과, 여재의 질량은 77.6 ± 1.2 g, 체적밀도 1.581 ± 0.024 g/cm^3, 공극율 0.403 ± 0.009이었다. 박테리아 부착실험은 세가지 이온강도 조건($NaHCO_3$ 0.1 mM이 포함된 NaCl 용액 1, 10, 100 mM)에서 수행하였고, 박테리아 탈착실험은 100 mM 용액 조건에서 부착실험을 수행한 후, 10 mM 용액과 0.1 mM 용액을 일정한 시간간격(박테리아 주입 후 300분과 720분 지난 후)으로 차례로 주입하여 수행하였다. 여재로 채워진 칼럼에 0.3 mL/min의 유량조건에서 HPLC펌프(QC400, FASCO, USA)를 이용하여 상향으로 용액을 10배의 공극부피(1 공극부피 = 19.6 cm^3)만큼 주입하여 포화된 정상류 상태에 이르게 하였고, OD_{600}이 0임을 확인한 후 박테리아

Table 1. Experimental conditions and results for bacterial adhesion in quartz and iron-coated sands

Ex.	Bacteria	Media	Solution (mM)	EC (μS/cm)	Mr (%)	v (cm/min)	D (cm^2/min)	λ (1/min)	R^2
1a	*E. coli*	ICS	1	137	14.3	0.156	0.054	0.0316	0.96
1b	*E. coli*	ICS	1	133	13.8	0.148	0.081	0.0309	0.99
2a	*E. coli*	ICS	10	1073	12.8	0.156	0.054	0.0333	0.99
2b	*E. coli*	ICS	10	1115	13.7	0.157	0.057	0.0326	1.00
3a	*E. coli*	ICS	100	10012	13.9	0.157	0.033	0.0317	0.99
3b	*E. coli*	ICS	100	9740	13.7	0.148	0.089	0.0312	0.99
4a	*B. subtilis*	ICS	1	149	8.5	0.160	0.032	0.0407	0.96
4b	*B. subtilis*	ICS	1	136	11.3	0.149	0.049	0.0331	0.99
5a	*B. subtilis*	ICS	10	1171	8.4	0.154	0.063	0.0402	0.99
5b	*B. subtilis*	ICS	10	1160	11.0	0.157	0.015	0.0354	1.00
6a	*B. subtilis*	ICS	100	10354	10.7	0.159	0.049	0.0368	0.99
6b	*B. subtilis*	ICS	100	9680	9.6	0.152	0.112	0.0386	0.95
7a	*S. aureus*	ICS	1	142	13.2	0.150	0.122	0.0334	0.98
7b	*S. aureus*	ICS	1	140	12.9	0.146	0.082	0.0294	0.98
8a	*S. aureus*	ICS	10	1154	14.1	0.153	0.136	0.0316	0.99
8b	*S. aureus*	ICS	10	1151	10.2	0.155	0.077	0.0369	0.96
9a	*S. aureus*	ICS	100	10152	14.8	0.150	0.073	0.0297	0.98
9b	*S. aureus*	ICS	100	10202	10.5	0.156	0.029	0.0356	1.00
10a	*S. aureus*	quartz	1	145	78.9	0.154	0.064	0.0040	0.99
10b	*S. aureus*	quartz	1	144	82.5	0.146	0.057	0.0031	0.99
11a	*S. aureus*	quartz	10	956	54.8	0.148	0.046	0.0088	0.99
11b	*S. aureus*	quartz	10	1008	66.9	0.145	0.060	0.0057	0.99
12a	*S. aureus*	quartz	100	10605	41.8	0.153	0.054	0.0131	1.00
12b	*S. aureus*	quartz	100	10685	48.8	0.147	0.087	0.0104	1.00

EC= electrical conductivity, Mr = mass recovery, ICS = iron-coated sand

용액(NaCl 포함)을 0.3 mL/min 정속으로 35분 동안 하향 흐름으로 주입하였다. 이때, 칼럼의 공탑체류시간(EBCT)은 66분이었다. 박테리아의 주입이 끝난 후 동일한 유속으로 NaCl 용액을 다시 주입하였으며, 유출수를 일정한 시간 간격으로 자동 포집기(Retriever 500, TELEDYNE, USA)를 이용하여 포집하였다. 유출수 내의 박테리아 농도는 UV-visible spectrophotometer로 측정하였고, pH는 pH probe (9107BN, Orion, USA)로, 전기전도도(electrical conductivity)는 EC probe(815PDL, Istek, Korea)로 측정하였다. 실험결과의 신뢰도를 높이기 위해 실험은 각 조건에서 반복 수행하였다.

2.4. 파과곡선 분석

박테리아 파과곡선은 다음과 같은 일차원 운송식(성장과 사멸 제외)을 이용하여 분석하였다.[13)]

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

여기에서 t는 시간, x는 거리, C는 수용액상의 박테리아 농도[ML^{-3}], D는 수리분산계수[L^2T^{-1}], v는 박테리아의 이동속도[LT^{-1}], 그리고 λ는 박테리아의 부착율계수[T^{-1}]이다. 박테리아 이동모델 관련 파라미터는 박테리아 파과곡선으로부터 CXTFIT 코드[14)]를 이용하여 구하였다. 그리고, 유출수내의 박테리아의 질량회수율(Mr)은 다음 식을 이용하여 정량화하였다.

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

여기에서 C_0는 박테리아의 주입농도이고, t_0는 주입시간이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 박테리아 파과곡선

철피복 모래와 석영모래에서 박테리아의 파과곡선을 Fig. 1에 나타내었다. 철피복 모래에서의 파과곡선은 이온강도가 1 mM에서 100 mM로 증가함에 따라 거의 일정한 상대첨두농도(relative peak concentration)를 나타내었다. *E. coli*의 파과곡선(Fig. 1(a))은 이온강도가 증가함에 따라 일정한 첨두농도, 0.107±0.014(범위: 0.092～0.125)를 나타내었다. *E. coli*의 파과곡선으로부터 얻은 수리학적 특성변수

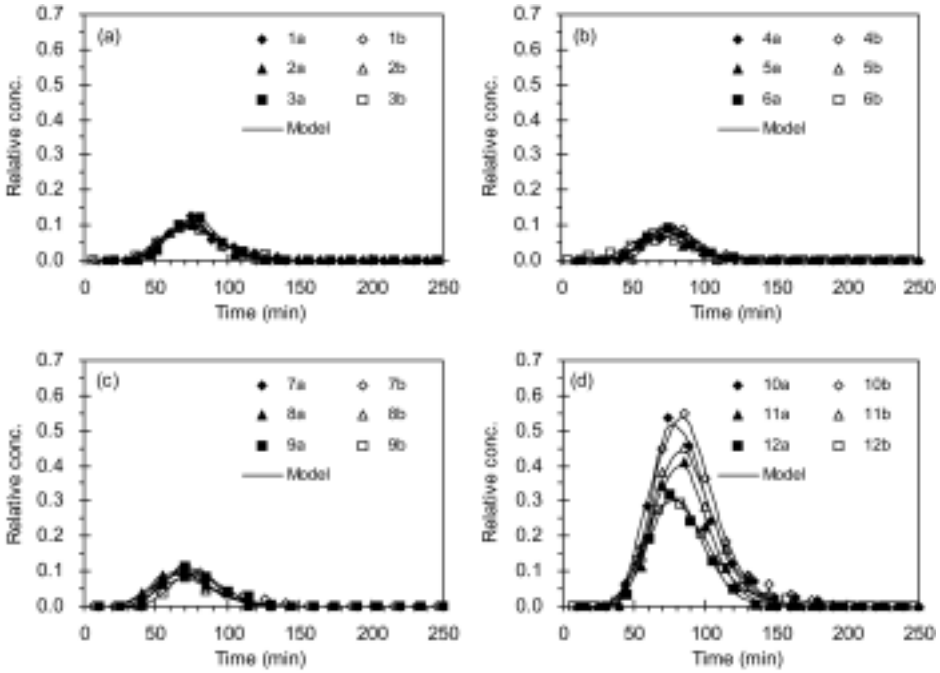

Fig. 1. Bacterial breakthrough curves from column experiments under different ionic strength conditions: (a) *E. coli* in iron-coated sand (ICS), (b) *B. subtilis* in ICS, (c) *S. aureus* in ICS, (d) *S. aureus* in quartz sand.

(v, D)는 각각 0.154±0.004 cm/min과 0.061±0.020 cm^2/min 이었고, 부착율상수(λ)는 0.032±0.001 1/min이었다. *B. subtilis*의 경우도 이온강도가 변화함에 따라 일정한 첨두농도, 0.081±0.009(범위: 0.071～0.092)를 나타내었다(Fig. 1(b)). *B. subtilis*의 v, D, 그리고 λ값은 각각 0.155±0.004 cm/min, 0.053±0.033 cm^2/min, 그리고 0.038±0.003 1/min이었다. 철피복 모래에서 *S. aureus*도 일정한 첨두농도, 0.096±0.011 (범위: 0.085～0.114)를 나타내었고(Fig. 1(c)), v, D, λ는 각각 0.152±0.004 cm/min, 0.087±0.020 cm^2/min, 0.033± 0.003 1/min을 나타내었다. 하지만, 석영모래에서 *S. aureus* 경우에는 이온강도가 1 mM에서 100 mM로 증가함에 따라 파과곡선의 첨두농도가 0.551에서 0.295로 감소하였다 (Fig. 1(d)). 파과곡선으로부터 얻은 v와 D는 각각 0.149± 0.004 cm/min과 0.061±0.014 cm^2/min이었다. λ값은 이온강도가 1 mM에서 100 mM로 증가함에 따라 0.0031 L/min 에서 0.0131 1/min로 약 4배 가량 증가하였다.

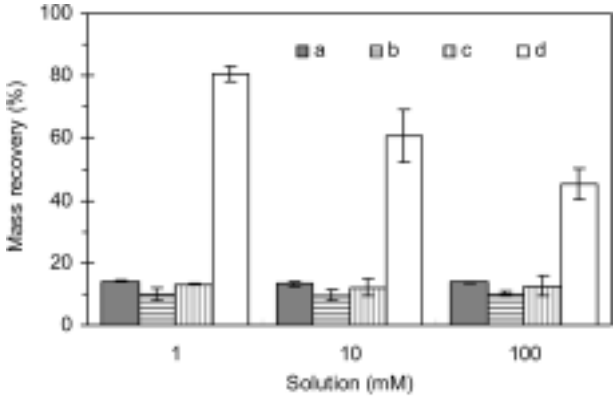

Fig. 2. Bacterial mass recoveries in quartz and iron-coated sand (ICS) under different ionic strength conditions: (a) *E. coli* in iron-coated sand (ICS), (b) *B. subtilis* in ICS, (c) *S. aureus* in ICS, (d) *S. aureus* in quartz sand.

3.2. 석영 · 철피복 모래에서의 질량회수율

부착실험 결과에 의하면, 철피복 모래에서는 이온강도가 증가함에 따라 박테리아 질량회수율은 일정하였다(Fig. 2). 즉, 이온강도가 증가함에도 불구하고 철피복 모래에서의 박테리아 부착량이 변화하지 않았다. *E. coli*의 경우 1, 10, 100 mM 용액에서 질량회수율은 각각 14.1% (1a, 14.3; 1b, 13.8), 13.3% (2a, 12.8; 2b, 13.7), 13.8% (3a, 13.9; 3b, 13.7)로 일정하였다(평균 질량회수율 = 13.7±0.5%). *B. subtilis*의 질량회수율은 1, 10, 100 mM 용액에서 각각 9.9% (4a, 8.5; 4b, 11.3), 9.7% (5a, 8.4; 5b, 11.0), 10.2%(6a, 10.7; 6b, 9.6)로 일정하였다(평균 질량회수율 = 9.9±1.3%). *S. aureus*의 질량회수율은 1, 10, 100 mM 용액에서 각각 13.1% (7a, 13.2; 7b, 12.9), 12.2% (8a, 14.1; 8b, 10.2), 12.7% (9a, 14.8; 9b, 10.5)로 일정하였다(평균 질량회수율 = 13.0±2.1%). 그러나, 석영모래에서는 이온강도가 증가함에 따라 박테리아 질량회수율이 감소하였다(Fig. 2). 즉, 이온강도가 증가함에 따라 석영모래에서의 박테리아 부착이 증가하였다. 석영모래에서 *S. aureus*의 질량회수율은 1 mM에서 80.7% (10a, 78.9; 10b, 82.5)이었다. 10 mM에서 질량회수율은 60.8% (11a, 54.8; 11b, 66.9)로써, 1 mM 조건에 비하여 약 20% 정도 감소하였다. 그리고, 100 mM에서 질량회수율은 45.3% (12a, 41.8; 12b, 48.8)로써, 10 mM 조건에 비하여 약 15% 정도 감소하였다. 한편, 철피복 모래에서의

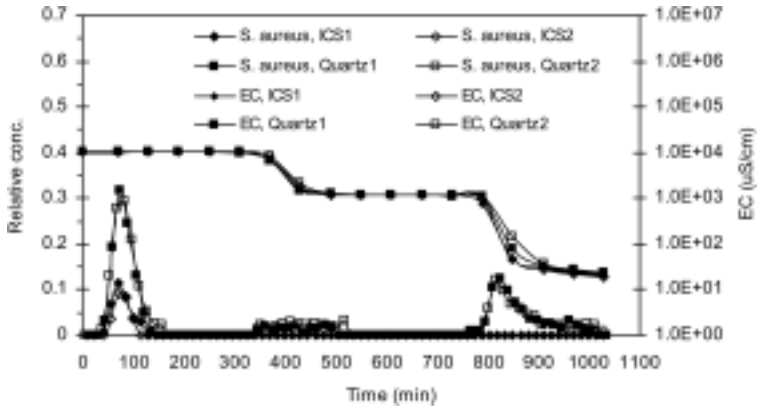

Fig. 3. Bacterial release of *S. aureus* from quartz and iron-coated sands in response to ionic strength change.

질량회수율은 세가지 이온강도 조건 모두에서 석영모래에서의 질량회수율보다 낮았다.

탈착실험 결과에 의하면, 철피복 모래에서는 용출용액의 이온강도가 100 mM (≈ 10,100 μS/cm)에서 10 mM (≈ 1,100 μS/cm), 그리고 0.1 mM (≈ 30 μS/cm)로 감소함에 따라 박테리아의 탈착이 발생하지 않았다(Fig. 3). 즉, 이온강도의 변화에도 불구하고 철피복 모래에 부착되어 있던 박테리아(*E. coli*, *B. subtilis*, *S. aureus* 모두)의 탈착이 일어나지 않았다(Table 2). 이러한 결과는, 철피복 모래에서 수행한 부착실험에서 이온강도가 증가함에도 불구하고 박테리아 부착량이 변화하지 않았다는 결과와도 부합된다. 하지만, 석영모래에서는 용출용액의 이온강도가 100 mM에서 10 mM, 그리고 0.1 mM로 감소함에 따라 박테리아(*S. aureus*)의 탈착이 발생하였다(Fig. 3). 즉, 이온강도의 변화함에 따라 석영모래에 부착되어 있던 박테리아의 탈착이 일어났다(Table 2). 이는, 석영모래에서 수행한 부착실험에서 이온강도가 증가함에 따라 박테리아 부착량이 증가하였다는 결과와도 부합된다. 용액의 이온강도가 100 mM에서 10 mM로 감소함에 따라, 초기 주입했던 박테리아의 9.0% (12a, 7.5; 12b, 10.4)에 해당되는 양이 탈착되었고, 다시 0.1 mM용액을 주입함으로써 30.1% (12a, 30.6; 12b, 29.5)가 더 탈착되었다. 석영모래에서 이온강도의 변화에 따른 박테리아 부착 및 탈착실험결과, 전체적으로 84.3% (12a, 79.7; 12b, 88.7)의 질량회수율을 나타내었다(Table 2).

Table 2. Experimental conditions and results for bacterial release from quartz and iron-coated sands

Ex	Bacteria	Media	Solution (mM)	Mr (%)		Total Mr (%)	
				a	b	a	b
3	*E. coli*	ICS	100	13.9	13.7	13.9	13.7
			10	0	0		
			0.1	0	0		
6	*B. subtilis*	ICS	100	10.7	9.6	10.7	9.6
			10	0	0		
			0.1	0	0		
9	*S. aureus*	ICS	100	14.8	10.5	14.8	10.5
			10	0	0		
			0.1	0	0		
12	*S. aureus*	Quartz	100	41.8	48.8	79.9	88.7
			10	7.5	10.4		
			0.1	30.6	29.5		

Mr = mass recovery, ICS = iron-coated sand

3.3. 이온강도와 박테리아 부착・탈착

본 연구에서는 철피복 모래에서의 박테리아의 부착이 이온강도의 변화에 무관하였다. 이러한 결과는 차단효과(shielding effect)에 의하여 이온강도가 증가할수록 서로 반대 전하를 띈 여재와 박테리아 표면 사이에 정전기적인 인력이 감소하여 양전하를 띈 여재의 표면에 음전하를 띈 박테리아의 부착이 감소한다는 Yee 등[15]의 주장과 일치하지 않았다. 박테리아는 철피복 모래에 inner-sphere complexes(공유결합, 이온결합, 또는 이들의 복합작용에 의함)에 의하여 부착되는데, inner-sphere complexes는 이온강도의 영향을 받지 않는다.[16] 박테리아는 그 표면에 많은 카르복실기(COOH)를 가지고 있으며,[17] 박테리아가 철피복 모래에 부착할 때 이 기능기(functional group)가 리간드 교환기작(ligand exchange mechanism)에 의하여 피복모래 표면의 수산화기(OH)와 교환된다.[16]

반면, 석영모래에서는 이온강도가 증가함에 따라 박테리아의 부착이 증가하고 이온강도가 감소하면 부착되어 있던 박테리아의 탈착이 일어났다. 이러한 결과는 Gannon 등[18]의 보고와도 일치하는데, 그들은 칼럼실험을 통해 이온강도가 증가하면 대수층 모래에서 *Pseudomonas* 박테리아의 부착이 증가함을 보였다. 이러한 현상은 DLVO 이론[19]에 의해 설명될 수 있다. 중성 pH조건에서 박테리아와 석영모래 모두 음전하를 띄고 있다. 이온강도가 증가하면 모래와 박테리아의 입자표면 사이에 존재하는 정전기적 이중층(electrostatic double layer)이 압축됨으로써, 박테리아의 부착이 증가한다. 반면, 이온강도가 감소하면 이중층의 두께가 다시 증가하여 박테리아의 부착을 감소시킨다. 이는 석영모래에서 전기적 작용에 의한 박테리아의 부착은 가역적(reversible) 현상으로써 모래표면에 상대적으로 멀리

위치한 2차 에너지 최소점(secondary energy minimum)에서 일어남을 의미한다.[20] 따라서, 석영모래표면에 부착되어 있던 박테리아는 용액의 화학조건(예, 이온강도)이 변할 경우, 모래표면으로부터 쉽게 탈착된다.[21]

4. 결 론

본 연구에서는 석영모래와 철피복 모래에서 박테리아의 부착 및 탈착에 미치는 이온강도의 영향을 조사하였다. 실험결과, 철피복 모래에서는 이온강도가 증가함에 따라 질량회수율이 일정한 반면, 석영모래에서는 감소하였다. 용출용액의 이온강도가 감소함에 따라, 석영모래에서는 박테리아 탈착이 일어났지만, 철피복 모래에서는 탈착이 관찰되지 않았다. 철피복 모래에서 관찰된 이러한 현상은 박테리아와 철피복 모래사이의 inner-sphere complexes에 의한 결합 때문인데, inner-sphere complexes는 이온강도의 영향을 받지 않는다. 석영모래에서는 박테리아 부착이 가역적 현상으로써, 용액의 이온강도가 변할 경우 부착되어 있던 박테리아는 모래표면으로부터 쉽게 탈착된다. 본 연구는 박테리아와 표면변형 다공성 여재의 상호작용에 대한 지식을 증진시킨다.

사 사

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

참고문헌

1. Souter, P. F., Cruickshank, G. D., Tankerville, M. Z. Keswick, B. H., Ellis, B. D., Langworthy, D. E., Metz, K. A., Appleby M. R., Hamilton, N., Jones, A. L., and Perry, J. D., "Evaluation of a new water treatment for point-of-use household applications to remove microorganisms and arsenic from drinking water," *J. Water Health*, **1**, 73～84(2003).
2. Knapp, E. P., Herman, J. S., Hornberger, G. M., Mills, A. L., "The effect of distribution of iron-oxyhydroxide grain coatings on the transport of bacterial cells in porous media," *Environ. Geol. Water Sci*., **33**, 243～248(1998).
3. 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).
4. Silliman, S. E., Dunlap, R., Fletcher, M., and Schneegurt, M. A., "Bacterial transport in heterogeneous porous media: observations from laboratory experiments," *Water Resour. Res*, **37**, 2699～2707(2001).
5. 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).
6. 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).
7. Kim, S. -B., Park, S. -J., Lee, C. -G., Choi, N. -C., Kim, D. -J., "Bacteria transport through goethite-coated sand: effects of solution pH and coated sand content," *Colloids Surf. B*, **63**, 236～242(2008).
8. 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).
9. 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).
10. Ams, D. A., Fein, J. B., Dong, H., and Maurice, P. A., "Experimental measurements of the adsorption of *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas mendocina* onto Fe-oxyhydroixde-coated and uncoated quartz grains," *Geomicrobiol. J.*, **21**, 511～519(2004).
11. Jiang, D., Huang, Q., Cai, P., Rong, X., and Chen, W., "Adsorption of *Pseudomonas putida* on clay minerals and iron oxide," *Colloids Surf. B*, **54**, 217～221(2007).
12. Park, S. -J., Lee, C. -G., Kim, S. -B., "The role of phosphate in bacterial interaction with iron-coated surfaces," *Colloids Surf. B*, **68**, 79～82(2009).
13. 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).
14. 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.
15. Yee, N., Fein, J. B., and Daughney, C. J., "Experimental study of the pH, ionic strength, and reversibility behavior of bacteria-mineral adsorption," *Geochim. Cosmochim. Acta*, **64**, 609～617(2000).
16. 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).
17. Kastowsky, M., Sabisch, A., Gutberlet, T., and Bradaczek, H., "Molecular modeling of bacterial deep rough

mutant lipopolysaccharide of *Escherichia coli*.," *Eur. J. Biochem.*, **197**, 707～716(1991).
18. Gannon, J. T., Manilal, V. B., Alexander, M., "Relationship between cell surface properties and transport of bacteria through soil," *Appl. Environ. Microbiol.*, **57**, 190～193(1991).
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. Hahn, M. W., and O'Melia, C. R., "Deposition and reentrainment of Brownian particles in porous media under unfavorable chemical conditions: some concepts and applications," *Environ. Sci. Technol.*, **38**, 210～220(2004).
21. Johnson, W. P., Li, X., and Assemi, S., "Deposition and re-entrainment dynamics of microbes and non-biological colloids during non-perturbed transport in porous media in the presence of an energy barrier to deposition," *Adv. Water Resour.*, **30**, 1432～1454(2007).