

철코팅 여재에서 박테리아의 부착 및 이동

이창구 · 박성직 · 최낙철 · 김성배[†]

서울대학교 환경바이오콜로이드공학연구실

(2007년 5월 7일 접수, 2007년 7월 11일 채택)

Adhesion and Transport of Bacteria in Iron-coated Media

Chang-Gu Lee · Seong-Jik Park · Nag-Choul Choi · Song-Bae Kim[†]

Environmental Biocolloid Engineering Laboratory, Seoul National University

ABSTRACT : In this study, adhesion and transport of bacteria in positively-charged media was investigated with batch and column experiments. Bacterial species used in this study was *Escherichia coli* ATCC 11105(length: 2.2 μ m, diameter: 0.6 μ m) and media used were quartz sand(particle size distribution: 0.5-2.0 mm, mean diameter: 1.0 mm) and iron-coated sand. Batch results indicate that bacterial adhesion increased as the content of iron-coated media increased. At iron-coated media 0%(quartz sand 100%), around 46% of bacteria was adhered to media while at iron-coated media 100%(quartz sand 0%) about 97% was attached. Column results also show that bacterial adhesion was enhanced with an increase of iron-coated media content. As the iron-coated media content increased from 0 to 100%, bacterial adhesion increased from 8 to 94%. The experimental results demonstrate that positively-charged media could influence transport of bacteria in porous media.

Key Words : Iron-coated Media, *Escherichia coli*, Bacteria Transport, Sticking Efficiency

요약 : 본 연구에서는 양전하를 띤 여재 입자에서 박테리아의 부착 및 이동에 관한 연구를 위하여 회분 및 칼럼실험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 박테리아는 *E. coli* ATCC 11105(길이: 2.2 μ m, 직경: 0.6 μ m)이었고, 여재는 석영모래(입경분포: 0.5-2.0 mm, 평균 입경: 1.0 mm)와 철코팅 모래이었다. 회분실험결과에 의하면 철코팅 함량이 증가함에 따라, 박테리아의 부착량이 증가하는 것으로 나타났다. 철코팅 모래의 함량 0%(석영모래 100%)에서는 약 46% 정도의 박테리아가 부착되었고, 철코팅 모래의 함량 100%(석영모래 0%)에서는 약 97% 정도의 박테리아가 부착되었다. 칼럼실험결과 또한 철코팅 함량이 증가함에 따라, 박테리아의 부착량이 증가하는 것을 보여주고 있다. 철코팅 모래의 함량이 0에서 100%로 증가함에 따라 박테리아의 부착량이 8에서 94%로 증가하였다. 본 연구의 실험결과를 통해 양전하를 띤 여재 입자가 박테리아의 이동에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

주제어 : 철코팅 여재, *Escherichia coli*, 박테리아 이동, 부착효율

1. 서론

다공성 여재 환경에서 박테리아의 이동특성에 관한 연구는 수질환경측면에서 여러가지 중요한 가치를 가지고 있다. 수처리 및 하폐수처리 시스템의 여과 여재에서 박테리아의 이동 및 여과특성에 관한 연구는 박테리아의 제거효율 향상에 중요한 지식을 제공한다. 그리고 강변여과시 하상 층적층에서 박테리아 이동 및 제거 특성에 관한 연구는 간접 취수원으로서 강변여과수의 안전성에 관한 평가에 있어서 중요한 단서를 제공한다. 대수층에서의 박테리아의 이동 및 부착에 관한 연구는 미생물학적으로 안전한 지하수의 공급에 긴요한 정보를 공급한다. 또한, 분산하수처리시스템의 유출수 내에 존재하는 박테리아의 토양에서의 이동에 관한 연구는 지하수의 오염과 관련하여 중요한 의미를 가지고 있다.

지난, 20여 년간 다공성 여재에서 박테리아의 이동과 제거에 관한 여러 연구가 현장실험과 실험실 내에서의 칼럼(column)실험을 통해 수행되어 왔다.^{1~6)} 하지만, 이들 연구는 병원성 박테리아를 이용한 경우가 대부분이고, 수질오염과 직접적인 관련이 있는 병원성 박테리아나 분변오염 지시 박테리아의 이동 및 제거 특징에 관한 연구는 부족한 실정이다. 수환경에 존재하는 특정 병원성미생물을 검출하는데 따르는 기술적인 어려움과 비용 때문에, 분변오염 지시미생물이 병원성미생물의 존재를 예측하기 위하여 사용되는데, 그 중에서 전 세계적으로 널리 이용되는 미생물이 검출이 간단하고, 빠르며, 신뢰성이 높은 *Escherichia coli*이다.⁷⁾ 다공성 여재에서 *E. coli*의 이동 및 제거에 관한 연구가 몇몇 연구자들에 의해서 수행되었는데,⁸⁾ 예를 들면, 여과 여재를 이용하여 하폐수 내에 존재하는 *E. coli*의 제거에 관한 연구,^{9~10)} 박테리아 표면의 lipopolysaccharides, 정전기학적 작용, 박테리아의 성장단계, 거름작용(straining) 등이 석영모래칼럼에서 *E. coli*의 이동 및 부착에 미치는 영향에 대한 연구,^{11~14)} 층적자갈 대수층에서 현장실험을 통한 *E. coli*의 이동 및 저감

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

Fax: 02-873-2087

에 관한 연구,^{13~19)} 토양에 존재하는 거대공극(macropore)이 *E. coli*의 이동에 미치는 영향 연구^{18~19)} 등이 있다.

일반적으로 박테리아의 표면은 pH 2-3 이상에서 음전하를 띠고 있기 때문에 박테리아의 이동은 여재 입자 표면전하에 큰 영향을 받는다. 따라서 양전하를 띤 여재 입자 표면은 박테리아의 이동 및 여과에 큰 영향을 미칠 것이다.^{20~23)} 하지만, 양전하를 띤 여재에서 *E. coli*의 이동 및 여과에 관한 연구는 소수의 연구자들에 의해 수행되었다.^{24~26)} 따라서, 본 연구에서는 양전하를 띤 여재 입자가 *E. coli*의 이동 및 부착에 미치는 영향을 분석하였다. 석영모래와 철 코팅된 석영모래를 이용하여 회분(batch) 및 칼럼실험을 수행하였고, 이들 실험을 통해 얻어진 데이터를 분석하여 질량회수율(mass recovery)을 정량화하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 박테리아

실험에 사용된 *E. coli* ATCC 11105는 한국미생물 보존센터(Korea Culture Center for Microorganism)에서 구입하였으며, 박테리아의 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, 배양기(DAIHAN Scientific, DH. LIB. 200M)에서 84시간 동안 30°C로 배양하였다. 배양된 박테리아 현탁액을 4°C 조건의 원심분리기(Vision Scientific, VS-24SMTi)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 멸균시켜 사용하였다. *E. coli*의 입자크기는 투과전자현미경(Transmission electron microscope)을 통해 이미지를 얻은 후, 이미지 처리 프로그램(Image-Pro Plus)를 이용하여 결정하였다(Fig. 1). 이미지

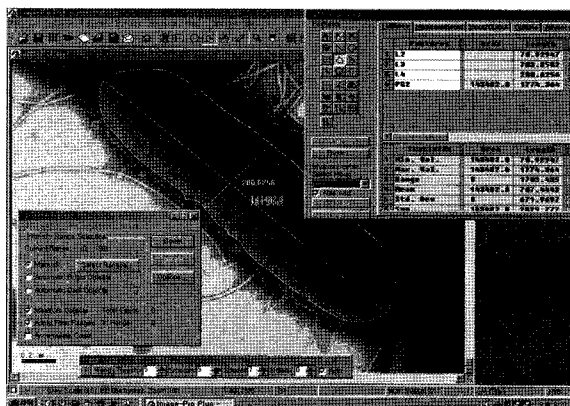


Fig. 1. Bacterial cell size determination.

분석을 통하여 얻어진 *E. coli*의 크기는 평균 길이는 2.2 μm , 평균 직경은 0.6 μm 이었는데, 이로부터 구 모양으로 환산된 *E. coli*의 직경(Equivalent diameter)은²⁾ 1.21 μm 이었다.

2.2. 여재

실험에는 석영모래(Quartz sand)와 철코팅 모래(Iron-coated sand)를 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(OD₆₀₀)에서 0.01 이하(UV-visible spectrophotometer, Thermo, Helios)가 될 때까지 세척하였다. 세척된 모래는 Autoclave(JISICO, J-NAS2)에서 다시 121°C, 17.6 psi에서 15분간 2회에 걸쳐 멸균하여 다른 미생물에 의해 오염되는 것을 최소화하였다. 철코팅 모래의 제조과정은 다음과 같다. 멸균된 증류수 100 mL 용액에 FeCl₃ · 6H₂O 5.5 g을 넣고 1 N NaOH로 pH를 조절하여 FeCl₃ 수용액을 제조하였다. FeCl₃ 수용액에 멸균된 석영모래 100 g을 넣은 후 회전증발농축기(HAHNSHIN, HS-2005S)를 이용하여 70°C, 80 rpm 조건에서 20분 반응시켜 1차 철코팅된 모래를 제조하였다. 이 코팅모래를 105°C의 Drying oven(JISICO)에서 24시간 동안 건조하고 증류수로 세척한 후 다시 24시간 동안 건조하여 실험에 사용하였다.

2.3. 회분 실험

여재의 특성에 따른 *E. coli*의 부착 특성을 분석하기 위하여 회분실험을 수행하였다. 실험에 적용된 여재의 조건(석영모래: 철코팅 모래), 즉 질량비는 100:0, 50:50, 0:100이었다. 여재 210 g과 0.5 OD₆₀₀와 1.0 OD₆₀₀농도의 미생물 용액 70 mL를 고액비 3:1로 300 mL 플라스크에 넣어 Shaking Incubator(DAIHAN Scientific, SHAKI16)에서 30°C, 140 rpm 조건으로 24시간 반응시킨 후 박테리아 농도를 UV-visible spectrophotometer(OD₆₀₀)로 측정하여, 여재에 부착된 박테리아의 양을 결정하였다. 실험의 신뢰도를 높이기 위해 회분실험을 각 여재조건에서 반복(EXP1, EXP2) 수행하였다.

2.4. 칼럼 실험

흐름 조건에서 여재의 특성에 따른 *E. coli*의 이동 특성을 분석하기 위하여 포화조건에서 칼럼실험을 수행하였다. 실험에 적용된 여재의 조건(석영모래: 철코팅 모래)은 회분실험과 같이 100:0, 50:50, 0:100이었으며, 실험의 신뢰도를 높이기 위해 각 조건에서 반복(EXP1&2, EXP3&4, EXP5&6) 수행하였다. 본 연구에 사용된 칼럼은 polycarbonate(PC) 재질로써, 내경 5 cm, 높이 30 cm이었다. 여재를 30 cm까지 충전한 후 칼럼조건을 측정된 결과, 여재의 질량은 918.7 ± 9.1 g, 체적밀도 1.560 ± 0.015 g/cm³, 공극률 0.411 ± 0.006이었다. 여재로 채워진 칼럼에 2 mL/min의 유량조건에서 정량펌프(FASCO, QG400)를 이용하여 상향으로 멸균된 증류수를 주입하여(8~10 pore volume) 포화된 정상류 상태에 이르게

하였고 OD₆₀₀이 0임을 확인 후 보존성 추적자(KCl)와 박테리아의 칼럼실험을 하향흐름에서 수행하였다. 보존성 추적자 실험의 경우, KCl(1.0 g/L)을 60분 동안 주입한 후 증류수를 다시 주입하였고, 유출수를 Auto collector(TELEDYNE, Retriever 500)를 이용하여 일정한 시간간격으로 획득하여, Chloride-meter(THERMO, Orion 4 star)를 이용하여 농도를 측정하였다. 박테리아의 실험의 경우, *E. coli*(0.5 OD₆₀₀)를 60분 동안 주입한 후 증류수를 다시 주입하였고, 유출수 내의 박테리아 농도는 UV-visible spectrophotometer(OD₆₀₀)로 측정하였다.

2.5. 데이터 분석

칼럼실험에서 얻은 보존성 추적자의 유출수 데이터로부터 다음과 같은 이류-분산모델(Convective-dispersive equation)을 이용하여 여재의 흐름특성(유속, 확산계수)을 정량화하였다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_w \frac{\partial C}{\partial x} \tag{1}$$

여기에서 t는 시간, x는 거리, C는 수용액상의 농도[ML⁻³], D는 수리분산계수[L²T⁻¹], 그리고 v_w는 공극유속[LT⁻¹]이다. 여기서 v_w와 D는 보존성 추적자의 파과곡선으로부터 CXTFIT code²⁷⁾를 이용하여 구하였다. 한편, 유출수내의 보존성 추적자와 박테리아의 질량회수율(M_r)은 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$M_r = \frac{\int_0^t C dt}{C_0 t_0} \tag{2}$$

여기에서 C₀는 주입 농도이고, t₀는 주입 시간이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 회분조건에서 박테리아의 부착

석영모래에 대한 철코팅 모래의 함량이 0%, 50%, 100%인 회분조건에서의 *E. coli*의 부착특성을 분석한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 철코팅 함량이 증가함에 따라 박테리아의 부착량이 증가하였다. 박테리아의 농도가 0.5 OD₆₀₀인 회분실험의 경우(Fig. 2(a)), 철코팅 모래의 함량 0%(석영모래 100%)에서는 질량회수율이 55.4, 53.9%로 24시간의 실험시간 동안 약 46% 정도의 박테리아가 석영모래에 부착된 것으로 나타났다. 철코팅 모래의 함량 50%(석영모래 50% + 철코팅 모래 50%)에서는 질량회수율이 2.5, 2.1%로 약 97% 정도의 박테리아가 석영모래에 부착된 것으로 나타났다. 철코팅 모래의 함량 0%인 경우와 비교하면 약 50% 이상의 부착증가가 있는 것으로 나타났는데, 이는 양전하를 띤 철코팅 모래가 박테리아의 부착증가에 큰 기여를 하였기 때문이다. 철코팅 모래의 함량 100%(석영모래 0%)에서는 질량회수율이 2.5,

2.6%로써, 철코팅 모래의 함량 50%인 경우와 비교하여 박테리아 부착량이 동일하였다. 철코팅 모래의 함량이 50% 증가했음에도 불구하고 박테리아 부착량의 증가가 나타나지 않은 것은 철코팅 모래의 함량 50%(석영모래 50% + 철코팅 모래 50%)인 조건이 주어진 박테리아(박테리아의 농도 0.5 OD₆₀₀)를 부착하는데 충분한 용량을 가지고 있기 때문에 철코팅 모래의 함량의 증가가 더 이상 박테리아의 부착에 기여하지 못하였다는 것을 나타낸다.

박테리아의 농도가 1.0 OD₆₀₀인 회분실험의 경우(Fig. 2(b)), 철코팅 모래의 함량 0%에서는 질량회수율이 67.8, 54.6%로 박테리아의 농도가 0.5 OD₆₀₀인 경우와 유사한 제거율을 나타냈다. 철코팅 모래의 함량 50%에서는 질량회수율이 19.9, 18.4%로, 철코팅 모래의 함량 0%인 경우와 비교하면 약 40%의 부착증가가 있는 것으로 나타났다. 하지만, 0.5 OD₆₀₀인 경우와 비교하여 박테리아의 부착율이 17% 정도 감소한 것으로 나타났는데, 이는 주어진 여재 조건(석영모래 50% + 철코팅 모래 50%)이 주입된 박테리아(박테리아의 농도가 1.0 OD₆₀₀)를 부착하는데 충분한 용량을 가지고 있지 못하였기 때문이다. 철코팅 모래의 함량 100%(석영모래 0%)에서는 질량회수율이 2.1, 1.9%로, 철코팅 모래의 함량 50%인 경우와 비교하여 약 17%의 부착증가가 있는 것으로 나타났다. 이는 박테리아의 농도가 0.5 OD₆₀₀인 경우와 비교할 때 철코팅 모래의 함량의 증가가 박테리아의 부착량 증가에 기여하였다는 것을 나타낸다.

일반적으로 박테리아는 표면이 무전하가 되는 pH조건(pH_{ZPC}: point of zero charge)이 pH 2-3으로 알려져 있고, 석영모래인 경우에는 pH_{ZPC}가 pH 2인 것으로 보고되어 있다.¹⁸⁾ 따라서, 본 회분실험의 pH조건(7-8)에서 박테리아와 석영모래는

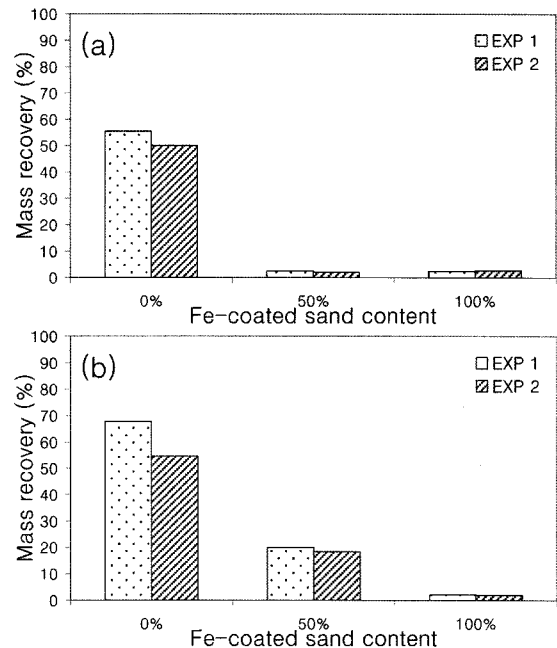


Fig. 2. Mass recoveries of *E. coli* in batch experiments at the initial bacterial concentration of (a) 0.5 OD₆₀₀ and (b) 1.0 OD₆₀₀.

음전하를 띠고 있다. 이미 제시한 것처럼 석영모래 100%인 경우에 박테리아의 부착율이 40-50%로 나타났는데, 이는 음전하를 띤 박테리아와 역시 음전하를 띤 석영모래간의 상호작용에 DLVO이론에 의한 힘(전기적인 상호작용과 van der Waals인력의 합)이외에 non-DLVO 힘(Hydrophobic interaction, Polymer bridging)이 작용하였기 때문이다.²²⁾ 한편, 철코팅 모래의 경우 pH_{zpc} 가 pH 8.5인 것으로 보고되어 있다.²⁸⁾ 따라서, 본 실험조건(pH 7-8)에서 철코팅 모래의 표면은 양전하를 띠게 되어, 음전하를 띤 박테리아와 양전하를 띤 여재간에 전기적인 작용이 큰 역할을 하게 되는데, 즉 전기적인 인력이 크게 증가하여 여재 표면으로의 박테리아 부착이 크게 증가하게 된다.

3.2. 칼럼조건에서 박테리아의 이동

칼럼실험 조건에서 여재의 수리학적 특성을 파악하기 위하여 보전성 추적자인 KCl을 이용한 실험 결과로부터 얻어진 공극유속(v_w)과 수리분산계수(D)는 각각 0.256 ± 0.004 cm/min, 0.095 ± 0.004 cm²/min이었다. 이때, Cl의 질량회수율은 $96.6 \pm 0.4\%$ 이었다. 실험을 통하여 얻어진 공극유속 값은 Darcy의 법칙에 의하여 이론적으로 얻어진(유량, 단면적, 공극률 이용) 유속(0.248 cm/min)과 일치하였다.

철코팅 모래의 함량 0%(석영모래 100%) 칼럼에서 *E. coli*의 이동실험 결과($0.5 OD_{600}$) 얻어진 파과곡선을 Fig. 3에 나타내었다. 박테리아의 질량회수율은 93.9%와 90.8%로써 석영모래로만 구성된 여재에서의 박테리아의 부착은 약 8%로써 매우 미미하였다. 동일한 여재 조건의 회분실험(철코팅 모래의 함량 0%, 약46%의 부착율)과 비교하면 박테리아의 부착이 거의 일어나지 않았다는 것을 알 수 있는데, 이는 회분과 칼럼실험간의 접촉시간의 차이 때문이다. 즉, 회분실험의 경우 박테리아와 여재 표면간의 접촉시간이 충분하여 박테리아의 부착이 커지는 반면, 칼럼조건에서는 박테리아와 매질체 표면간의 접촉시간이 상대적으로 적기 때문에 박테리아의 부착이 크게 감소한다.

철코팅 모래의 함량 50%(석영모래 50%+철코팅 모래 50%) 칼럼에서 *E. coli*의 이동실험 결과($0.5 OD_{600}$) 얻어진 파과곡선을 Fig. 4에 나타내었다. 박테리아의 질량회수율은 29.9%와 31.7%로써 박테리아의 부착량은 약 70%로 나타났다. 동

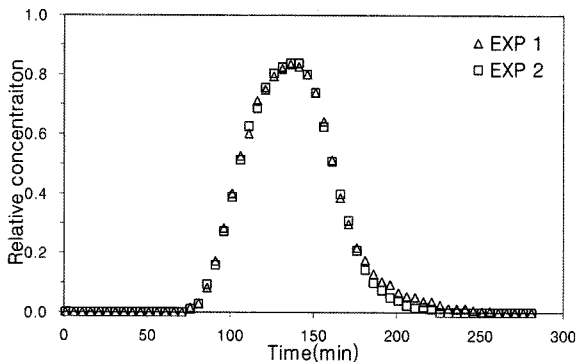


Fig. 3. Breakthrough curves of *E. coli* in porous media(quartz sand 100%).

일한 여재 조건의 회분실험(철코팅 모래의 함량 50%, 약 98%의 부착율)과 비교하면 박테리아의 부착이 약 28% 감소하였는데, 이는 역시 접촉시간의 차이에 기인한 것이다. 철코팅 모래의 함량 0% 칼럼실험 결과와 비교하면 박테리아의 부착량이 급격히 증가하였는데, 이는 양전하를 띤 철코팅 모래가 박테리아의 부착에 큰 역할을 하였기 때문이다.

철코팅 모래의 함량 100%(석영모래 0%) 칼럼에서 *E. coli*의 이동실험 결과($0.5 OD_{600}$) 얻어진 파과곡선을 Fig. 5에 나타내었다. 박테리아의 질량회수율은 5.0%와 6.7%로써 약 94%의 박테리아가 부착된 것으로 나타났다. 철코팅 모래의 함량 50% 칼럼실험과 비교하여 약 24%의 부착을 증가가 나타났다. 이는 철코팅 모래 함량의 증가로 박테리아와 여재 표면 사이의 인력작용이 증가하였기 때문이다. 한편, 동일한 여재 조건의 회분실험(철코팅 모래의 함량 100%, 약 98%의 부착율)과 비교할 때 부착율의 차이는 미미하였다. 본 칼럼실험에서 얻어진 질량회수율은 기존 연구자들의 실험결과와 비슷하였다. Lukasik 등²⁵⁾은 철 코팅 모래(100%)로 채워진 칼럼을 이용한 미생물 제거실험에서, *E. coli*가 99% 제거되었다고 보고하였다. 그리고, Foppen과 Schijven²⁶⁾은 철 코팅 모래를 이용한 실험에서 철코팅 모래의 함량이 100%일 때 *E. coli*의 제거율이 93%이었고, 칼럼에 채워진 여재 중 철코팅 모래의 함량이 증가함에 따라 *E. coli*의 제거율이 증가함을 보였다.

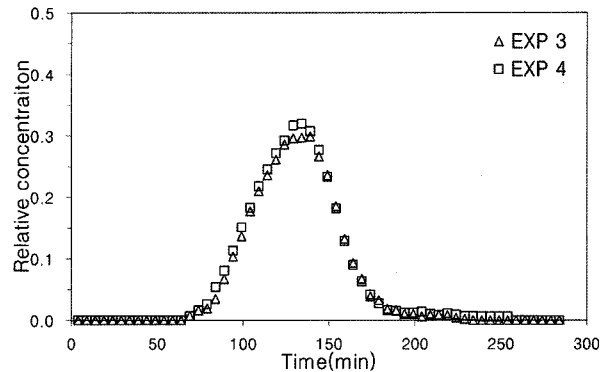


Fig. 4. Breakthrough curves of *E. coli* in porous media(quartz sand 50% + iron-coated sand 50%).

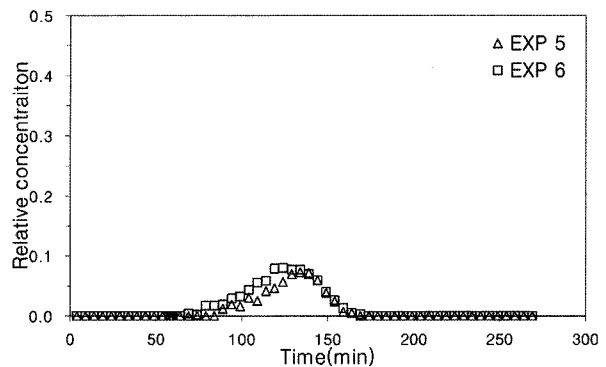


Fig. 5. Breakthrough curves of *E. coli* in porous media(iron-coated sand 100%).

4. 결론

본 연구에서는 양전하를 띤 여재 입자에서 박테리아의 부착 및 이동에 관한 연구를 하기 위하여 회분 및 칼럼실험을 수행하였다. 회분실험결과 양전하를 띤 철코팅 여재의 함량이 증가함에 따라 부착되는 박테리아의 양이 크게 증가하였다. 흐름조건에서 행한 칼럼실험 역시 철코팅 함량이 증가함에 따라, 박테리아의 부착량이 증가하는 것을 보여주었다. 석영모래 조건의 경우 회분실험에 비하여 칼럼실험에서의 박테리아의 부착량이 크게 감소하였는데, 이는 칼럼조건에서는 회분조건에 비하여 박테리아와 여재 표면간의 접촉시간이 충분치 않았기 때문이다. 철코팅 모래조건에서는 박테리아와 여재 표면간에 인력작용이 박테리아의 부착에 크게 기여하였다. 본 연구의 실험결과를 통해 양전하를 띤 여재 입자가 박테리아의 이동에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

참고문헌

1. Harvey, R. W., George, L. H., Smith, R. L., and LeBlanc, D. R., "Transport of microspheres and indigenous bacteria through a sandy aquifer: Results of natural- and forced-gradient tracer experiments," *Environ. Sci. Technol.*, **23**, 51~56(1989).
2. Rijnaarts, H. H. M., Norde, W., Bouwer, E. J., Lyklema, J., Zehnder, A. J. B., "Bacterial adhesion under static and dynamic conditions," *Appl. Environ. Microbiol.*, **59**, 3255~3265(1993).
3. Sinton, L. W., Finlay, R. K., Pang, L., and Scott, D. M., "Transport of bacteria and bacteriophages in irrigated effluent into and through an alluvial gravel aquifer," *Water, Air, Soil, Pollut.*, **98**, 17~42(1997).
4. Lahlou, M., Harms, H., Springael, D., and Ortega-Calvo, J. J., "Influence of soil components on the transport of polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading bacteria through saturated porous media," *Environ. Sci. Technol.*, **34**, 3649~3656(2000).
5. Chen, G. and Zhu, H., "Bacterial deposition in porous medium as impacted by solution chemistry," *Res. Microbiol.*, **155**, 467~474(2004).
6. 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.*, **76**, 295~314(2005).
7. Tallon, P., Magajna, B., Lofranco, C., and Leung, K. T., "Microbial indicators of faecal contamination in water: a current perspective," *Water, Air, Soil, Pollut.*, **166**, 139~166(2005).

8. Jamieson, R. C., Gordon, R. J., Sharples, K. E., Stratton, G. W., and Madani, A., "Movement and persistence of fecal bacteria in agricultural soils and sub-surface drainage water: a review," *Can. Biosys. Eng.*, **44**, 1.1~1.9(2002).
9. Stevik, T. K., Ausland, G., Jenssen, P. D., and Siegrist, R., "Removal of *E. coli* during intermittent filtration of wastewater effluent as affected by dosing rate and media type," *Water Res.*, **33**, 2088~2098(1999a).
10. Stevik, T. K., Ausland, G., hansen, J. F., and Jenssen, P. D., "The influence of physical and chemical factors on the transport of *E. coli* through biological filters for wastewater purification," *Water Res.*, **33**, 3701~3706(1999b).
11. Walker, S. L., Redman, J. A., and Elimelech, M., "Role of cell surface lipopolysaccharides in *Escherichia coli* K12 adhesion and transport," *Langmuir*, **20**, 7736~7746(2004).
12. Redman, J. A., Walker, S. L., and Elimelech, M., "Bacterial adhesion and transport in porous media: role of the secondary energy minimum," *Environ. Sci. Technol.*, **38**, 1777~1785(2004).
13. Walker, S. L., Redman, J. A., and Elimelech, M., "Influence of growth phase on bacterial deposition: interaction mechanisms in packed-bed column and radial stagnation point flow systems," *Environ. Sci. Technol.*, **39**, 6405~6411(2005).
14. Foppen, J. W. A., Mporokoso, A., and Schijven, J. F., "Determining straining of *Escherichia coli* from breakthrough curves," *J. Contam. Hydrol.*, **76**, 191~210(2005).
15. Sinton, L. W., "Microbial contamination of alluvial gravel aquifers by septic tank effluent," *Water, Air, Soil, Pollut.*, **28**, 407~425(1986).
16. Sinton, L. W., Noonan, M. J., Finlay, R. K., Pang, L., and Close, M. E., "Transport and attenuation of bacteria and bacteriophages in an alluvial aquifer," *New Zealand Marine Freshwater Res.*, **34**, 175~186(2000).
17. Pang, L., Close, M., Goltz, M., Sinton, L., Davies, H., Hall, C., Stanton, G., "Estimation of septic tank setback distance based on transport of *E. coli* and F-RNA phages," *Environ. Inter.*, **29**, 907~921(2003).
18. Smith, M. S., Thomas, G. W., White, R. E., and Ritonga, D., "Transport of *Escherichia coli* through intact and disturbed soil columns," *J. Environ. Qual.*, **14**, 87~91(1985).
19. Guber, A. K., Shelton, D. R., and Pachepsky, Y. A., "Transport and retention of manure-borne coliforms in soil," *Vadose Zone J.*, **4**, 828~837(2005).
20. Scholl, M. A., Mills, A. L., Herman, J. S., and Horn-

- berger, G. M., "The influence of mineralogy and solution chemistry on the attachment of bacteria to representative aquifer materials," *J. Contam. Hydrol.*, **6**, 321~336(1990).
21. Mills, A. L., Herman, J. S., Hornberger, G. M., and DeJesus, T. H., "Effect of solution ionic strength and iron coatings on mineral grains on the sorption of bacterial cells to quartz sand," *Appl. Environ. Microbiol.*, **60**, 3300~3306(1994).
22. 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).
23. 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).
24. Truesdail, S. E., Lukasik, J., Farrah, S. R., Shah, D. O., and Dickinson, R. B., "Analysis of bacterial deposition on metal (hydr)oxide-coated sand filter media," *J. Colloid Interface Sci.*, **203**, 369~378(1998).
25. 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).
26. Foppen, J. W. A. and Schijven, J. F., "Transport of *E. coli* in columns of geochemically heterogeneous sediment," *Water Res.*, **39**, 3082~3088(2005).
27. 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. U.S. Department of Agriculture, USA(1995).
28. Stumm, W., and Morgan, J. J., "Aquatic Chemistry, An Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters," 2nd Ed., Wiley, New York, USA(1981).