

칼럼실험에 의한 입상활성탄에서 *Enterococcus faecalis*의 부착 연구

김현정 · 박성직 · 이창구 · 한용운 · 김성배^{†,*}

서울대학교 환경바이오콜로이드공학연구소 · *서울대학교 지역시스템공학과 · 농업생명과학연구원

(2008년 10월 13일 접수, 2009년 2월 27일 채택)

Analysis of *Enterococcus faecalis* Attachment to Granular Activated Carbon with a Column Experiment

Hyon-Chong Kim · Seong-Jik Park · Chang-Gu Lee · Yong-Un Han · 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 : The aim of this study was to investigate the influence of ionic strength and iron impregnation on the attachment of *Enterococcus faecalis* to granular activated carbon (GAC). Column experiments were performed to examine bacterial adhesion to coconut-based GAC (c-GAC), iron-impregnated c-GAC (fc-GAC), acid-washed c-GAC (a-GAC) and iron-impregnated a-GAC (fa-GAC) under two different solution (NaCl 1, 10 mM) conditions. Results showed that bacterial mass recovery in c-GAC decreased from 77.3 to 61.6% while in a-GAC it decreased from 71.6 to 32.3% with increasing ionic strength from 1 to 10 mM. This indicates that bacterial attachment to GAC can be enhanced with increasing ionic strength. Results also showed that the mass recoveries in fc-GAC were 62.6% (1 mM) and 53.3% (10 mM) while they were 50.8% (1 mM) and 16.9%(10 mM) in fa-GAC, which were lower than those in c-GAC and a-GAC. This demonstrates that bacterial adhesion to GAC can be enhanced through iron impregnation. This study provides information regarding the effects of ionic strength and iron impregnation on bacterial attachment to GAC. Furthermore, this study will advance our knowledge of bacterial removal in surface-modified granular media.

Key Words : Bacterial Attachment, Granular Activated Carbon, *Enterococcus faecalis*, Ionic Strength, Iron Impregnation

요약 : 본 연구의 목적은 입상활성탄에서 이온강도와 철침착이 *Enterococcus faecalis*의 부착에 미치는 영향을 분석하는 것이다. 야자계 입상활성탄(c-GAC), 철침착된 야자계 입상활성탄(fc-GAC), 산세척된 야자계 입상활성탄(a-GAC), 그리고 철침착된 산세척 야자계 입상활성탄(fa-GAC)에서 박테리아 부착을 관찰하기 위하여 두 가지 용액조건(NaCl 1, 10 mM)에서 칼럼실험을 수행하였다. 실험결과, c-GAC에서 이온강도가 1에서 10 mM로 증가함에 따라 박테리아의 질량회수율은 77.3에서 61.6%로 감소하였고, a-GAC에서는 질량회수율이 71.6에서 32.3%로 감소하였다. 이는 이온강도가 증가함에 따라 입상활성탄에서 박테리아의 부착이 증진될 수 있음을 나타낸다. 한편, fc-GAC에서 질량회수율은 62.6% (1 mM)과 53.3% (10 mM)이었고, fa-GAC에서는 50.8% (1 mM)과 16.9% (10 mM)이었는데, 이들 질량회수율이 c-GAC와 a-GAC에서의 질량회수율보다 낮았다. 이는 철침착에 의하여 입상활성탄에서 박테리아의 부착이 증진될 수 있음을 나타낸다. 본 연구는 입상활성탄에서 박테리아의 부착과 관련하여 이온강도와 철산화물 침착의 영향에 대한 정보를 제공하고, 나아가 표면이 변형된 입상여재를 이용한 미생물의 제거에 관한 지식을 증진시킬 것이다.

주제어 : 박테리아 부착, 입상활성탄, *Enterococcus faecalis*, 이온강도, 철침착

1. 서론

전 세계적으로 미생물학적인 수질오염에 대한 우려가 크고, 수인성 전염병에 대한 보고가 증가하고 있어, 미생물학적으로 안전한 먹는 물에 대한 관심이 매우 높다. 세계보건기구(World Health Organization)에 보고에 따르면, 세계적으로 11억 이상의 인구가 적절하고 안전한 음용수원(drinking water sources)에 접근하지 못하고 있으며, 비위생적인 물의 소비에 따른 수인성 전염병 발병으로 인하여 매년 220만 명 정도(특히 어린이)가 사망하는 것으로 알려

져 있다.^{1,2)} 특히, 수처리 기술이 보급되지 않은 저개발국가에서 이러한 수질오염이 매우 심각한 것으로 보고되고 있다.

최근 들어, 세계보건기구는 이러한 수질오염 따른 질병 발생을 저감하기 위한 대책으로 사용점(point-of-use, POU) 수처리 장치의 보급에 적극적인 관심을 나타내고 있다.^{3,4)} POU 장치는 한 가정내의 단일 수도꼭지에 설치하여 음용이나 취사용으로 직접 사용되는 물을 정화하기 위해 사용되는데, 이 POU 장치에 입상활성탄(granular activated carbon, GAC)이 널리 이용되고 있다.^{5~7)} GAC는 음용수 내에서 맛, 색, 그리고 냄새를 유발하는 물질이나 소독부산물을 제거하는데 효과적인 것으로 알려져 있다.⁸⁾ 하지만, POU 장치에 GAC가 적용되는 경우, 화학적 오염물질뿐 아니라

[†] Corresponding author

E-mail: songbkim@snu.ac.kr

Tel: 02-880-4587

Fax: 02-873-2087

미생물학적 오염물질(예, 박테리아)의 제거에도 효과적이어야 한다.

박테리아와 GAC에 관련된 연구들은 주로 정수처리과정에서 GAC에 부착(attachment)된 박테리아의 성장과 탈착(detachment)에 의한 음용수의 2차 오염에 초점이 맞추어져 있다.^{8~10)} 최근 들어 GAC에 의한 박테리아의 제거에 초점을 맞춘 연구 결과들이 일부 연구자들에 의해 보고되었다. Foppen과 Schijven¹¹⁾은 GAC로 충전된 칼럼(column)을 이용한 실험에서 *Escherichia coli*의 제거율을 정량화 조사하였다. 또한, Paramonova 등¹²⁾도 다양한 GAC로 충전된 칼럼을 이용한 실험에서 박테리아(*Raoutella terrigena*, *E. coli*)의 부착효율을 정량화하였다. 하지만, GAC에서 박테리아의 부착 및 제거를 깊이 있게 이해하고 박테리아 제거율을 향상시키기 위해서는 더 많은 연구가 필요하다.

본 연구의 목적은 GAC에서 이온강도와 철침착(iron impregnation)이 박테리아의 부착에 미치는 영향을 분석하는 것이다. GAC에 의한 박테리아의 부착 및 제거를 분석하기 위하여 칼럼실험을 수행하였다. 실험에는 *Enterococcus faecalis*을 사용하였는데, 이 박테리아는 분변성 연쇄상구균(fecal streptococci)에 속하며, 분변성 대장균군(fecal coliform)에 속하는 *E. coli*(그람음성, 간균)와 다른 세포특성(그람양성, 구균)을 가지고 있다. 실험을 통해 GAC로 충전된 칼럼을 통과한 유출수를 취득하여 박테리아의 파괴곡선(break-through curve)을 구하고, 이 곡선을 이용하여 박테리아의 질량회수율(mass recovery) 및 부착율계수(attachment rate coefficient)를 정량화하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 박테리아

실험에 사용된 *E. faecalis* ATCC 10100는 한국미생물보존센터(Korea Culture Center for Microorganisms)로부터 구입하였으며, 박테리아 준비과정은 다음과 같다. 멸균된 배지(polypepton 5 g, yeast extract 5 g, glucose 5 g, MgSO₄·7H₂O 1 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 (Daihan Labtech)에서 15분간 멸균하여 사용하였다. *E. faecalis*의 입자크기는 투과전자현미경(Transmission Electron Microscope, JEM 1010, JEOL, Japan)과 이미지 처리 프로그램(Image-Pro Plus)을 이

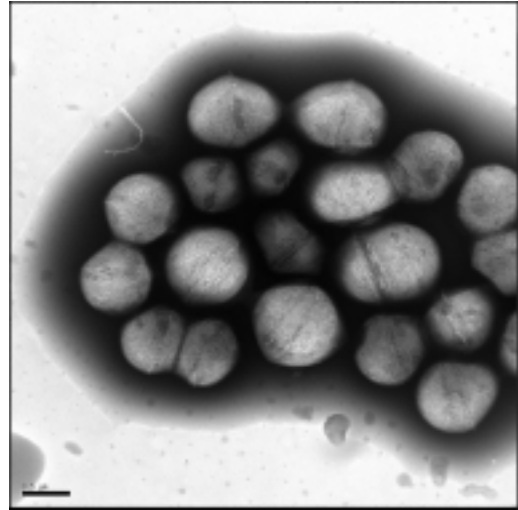


Fig. 1. A TEM image of *Enterococcus faecalis* ATCC 10100 (Bar = 0.5 μ m).

용하여 결정하였는데, *E. faecalis*의 크기는 $0.93 \pm 0.21 \mu\text{m}$ 이었다(Fig. 1). *E. faecalis* 표면의 정전기적 특성은 전기영동광산관계(ELS-8000, Otsuka Electronics, Japan)를 이용하여 분석하였다. *E. faecalis* 표면의 전기영동적 이동성(electrophoretic mobility)을 측정 후(pH=6.8, 온도=25°C, 이온강도 ≈ 0 mM), Smoluchowski식을 이용하여 제타전위(zeta potential)를 결정하였는데, 이때 *E. faecalis*의 제타전위는 -29.6 ± 5.1 mV이었다.

2.2. 입상활성탄

실험에 사용된 활성탄은 야자계(coconut-based) 입상활성탄(c-GAC), 산세척(acid-washed)된 야자계 입상활성탄(a-GAC) (Haeyoung Chemical)이었다. c-GAC와 a-GAC의 입자크기는 각각 0.6~2.3 mm와 0.5~1.2 mm이었다. 입상활성탄에 존재하는 이물질을 제거하기 위하여 증류수로 수 회 세척한 후, autoclave에서 15분간 멸균하여(121°C, 17.6 psi) 미생물에 의해 오염되는 것을 최소화하였고, 건조오븐(JISICO)에서 건조(105°C, 12시간 이상)한 후 실험에 사용하였다. c-GAC와 a-GAC를 이용하여 철수산화물로 침착(impregnated)된 입상활성탄(fc-GAC와 fa-GAC)을 제조하였는데, 제조과정은 다음과 같다. 멸균된 증류수 100 mL 용액에 FeCl₃·6H₂O 5.5 g을 넣고 6 N NaOH로 pH를 조절하여 FeCl₃ 수용액을 제조하였다. FeCl₃ 수용액에 멸균된 입상활성탄 50 g을 넣은 후 회전증발농축기(HS-2005S, Hahnshin)를 이용하여 90°C, 80 rpm 조건에서 20분 반응시켜 1차 fc-GAC(또는 fa-GAC)를 제조하였다. 이 fc-GAC(또는 fa-GAC)를 건조오븐에서 건조(150°C, 6시간)하고 증류수로 세척한 후 같은 조건에서 다시 건조하여 사용하였다.

2.3. 칼럼실험

본 연구에 사용된 칼럼은 polycarbonate (PC) 재질로써, 내경 2.5 cm, 높이 10 cm이었다. 칼럼실험을 c-GAC, fc-

GAC, a-GAC, 그리고 fa-GAC로 충전된 칼럼에서 수행하였다. c-GAC (Ex. 1-2)와 fc-GAC (Ex. 3-4)를 이용한 실험(제1실험)에서 여재를 10 cm까지 충전한 후 칼럼조건을 측정 한 결과, 여재의 질량은 24.3 ± 0.2 g, 체적밀도 0.495 ± 0.003 g/cm³, 유효공극율 0.509 ± 0.002 이었다. 제1실험은 두 가지 용액(이온강도) 조건(NaCl 1, 10 mM)에서 수행하였다. 여재로 채워진 칼럼에 1.0 mL/min의 유량조건에서 HPLC 펌프(QC400, FASCO, USA)를 이용하여 상향으로 용액을 주입(16~19 bed volumes)하여 포화된 정상류 상태에 이르게 하였고, OD₆₀₀이 0임을 확인한 후 박테리아 용액(NaCl 포함)을 1.0 mL/min 정속으로 35분 동안 하향흐름으로 주입하였다. 이때, 칼럼의 공담체류시간(EBCT)은 25.2분이었다. 박테리아의 주입이 끝난 후 같은 유속으로 NaCl 용액을 다시 주입하였으며, 유출수를 일정한 시간 간격으로 자동 포집기(Retriever 500, Teledyne, USA)를 이용하여 포집하였다. 유출수 내의 박테리아 농도는 UV-visible spectrophotometer (Helios, Thermo, UK)로 측정하였고, pH는 pH probe (9107BN, Orion, USA)로 측정하였다. a-GAC (Ex. 5-6)와 fa-GAC (Ex. 7-8)를 이용한 실험(제2실험)도 두 가지 용액(이온강도) 조건(NaCl 1, 10 mM)에서 수행하였다. 제2실험에서 여재의 질량은 28.8 ± 0.9 g, 체적밀도 0.589 ± 0.018 g/cm³, 유효공극율 0.407 ± 0.009 이었다. 유량이나 박테리아 주입농도 및 방법은 제1실험과 동일한 조건에서 수행하였고, 칼럼의 공담체류시간(EBCT)은 19.8분이었다. 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.¹⁶⁾

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

여기에서 t는 시간, x는 거리, C는 수용액상의 박테리아 농도[ML⁻³], D는 수리분산계수[L²T⁻¹], v는 박테리아의 이동속도[LT⁻¹], 그리고 λ는 박테리아의 부착율계수[T⁻¹]이다. 박테리아 이동모델 관련 파라미터는 박테리아 파과곡선으로부터 CXTFIT 코드¹³⁾를 이용하여 구하였다. 그리고, 유출수내의 박테리아의 질량회수율(M_r)은 다음 식을 이용하여 정량화하였다.

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

여기에서 C₀는 박테리아의 주입농도이고, t₀는 주입시간이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. *E. faecalis*의 파과곡선

야자계 입상활성탄(c-GAC)과 철침착된 야자계 입상활성탄(fc-GAC)에서 *E. faecalis*의 파과곡선을 Fig. 2에 나타내

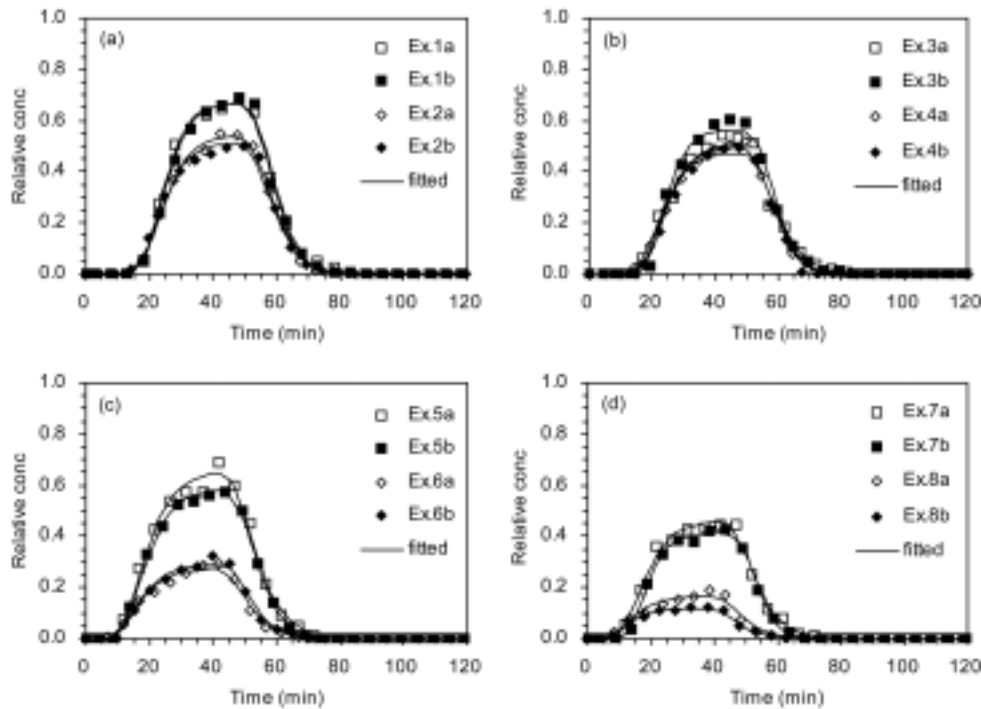


Fig. 2. Bacterial breakthrough curves from column experiments at two different ionic strengths along with model fits: (a) c-GAC (1a,1b: 1 mM; 2a,2b: 10 mM), (b) fc-GAC (3a,3b: 1 mM; 4a,4b: 10 mM), (c) a-GAC (5a,5b: 1 mM; 6a,6b: 10 mM), (d) fa-GAC (7a,7b: 1 mM; 8a,8b: 10 mM).

었다. 파과곡선은 이온강도에 따라서 다른 단일 침투농도 (peak concentration)를 나타내었다. c-GAC에서는 이온강도가 1 mM에서 10 mM로 증가함에 따라 상대 침투농도가 0.68에서 0.55로 감소하였다(Fig. 2(a)). fc-GAC에서도 침투농도는 이온강도가 1 mM에서 10 mM로 증가함에 따라 0.60에서 0.51로 감소하였다(Fig. 2(b)). 박테리아 파과곡선으로부터 얻은 수리학적 특성변수(v , D)는 각각 0.396 ± 0.002 cm/min과 0.135 ± 0.029 cm²/min이었다. 박테리아 파과곡선으로부터 추정된 v 값은 $v_w = q/n$ (여기에서, q 와 n 은 각각 다시안 유동율(Darcian flux)과 유효공극률을 나타냄)의 관계식으로부터 구한 공극유속($vw = 0.399 \pm 0.001$ cm/min)과 유사하였다.

산처리된 야자계 입상활성탄(a-GAC)과 철수산화물이 침착된 산처리 야자계 입상활성탄(fa-GAC)에서 *E. faecalis*의 파과곡선을 Fig. 3에 나타내었다. a-GAC에서는 이온강도가 1 mM에서 10 mM로 증가함에 따라 상대 침투농도가 0.62에서 0.30로 감소하였다(Fig. 3(a)). fa-GAC에서도 이온강도가 1 mM에서 10 mM로 증가함에 따라 침투농도가 0.43에서 0.15로 감소하였다(Fig. 3(b)). 파과곡선으로부터 얻은 v 와 D 는 각각 0.504 ± 0.001 cm/min과 0.456 ± 0.209 cm²/min이었다. 박테리아 파과곡선으로부터 추정된 v 값은 $vw = q/n$ 식으로부터 구한 공극유속($vw = 0.501 \pm 0.012$ cm/min)과 유사하였다.

3.2. 이온강도의 영향

c-GAC에서 박테리아 질량회수율은 이온강도가 증가할

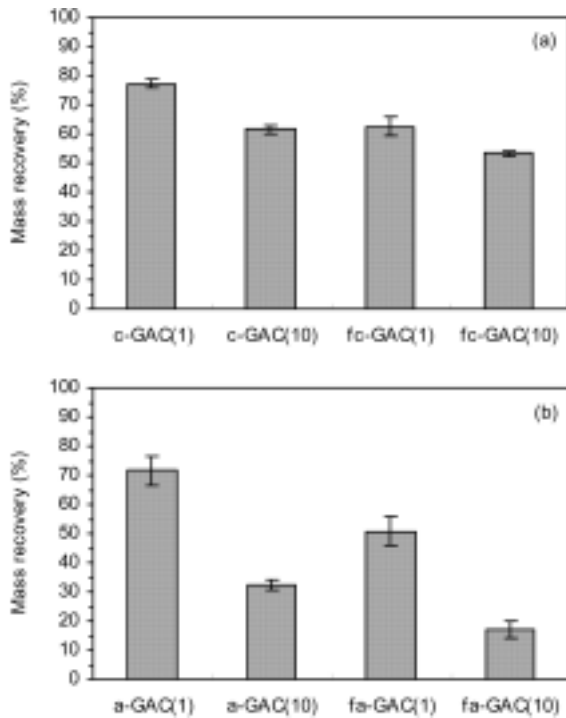


Fig. 3. Bacterial mass recoveries at two different ionic strengths: (a) c-GAC and fc-GAC, (b) a-GAC and fa-GAC. The number in the parenthesis is ionic strength (mM).

Table 1. Experimental conditions and results for column experiments of *Enterococcus faecalis* in various granular activated carbons

Ex.	Granular media	Ionic strength (mM)	Mr (%)	v (cm/min)	D (cm ² /min)	λ (1/min)	R ²
1a	c-GAC	1	78.3	0.400	0.122	0.0160	0.99
1b	c-GAC	1	76.3	0.393	0.121	0.0156	0.99
2a	c-GAC	10	62.6	0.394	0.151	0.0240	0.99
2b	c-GAC	10	60.6	0.397	0.148	0.0262	0.99
3a	fc-GAC	1	60.2	0.394	0.191	0.0255	0.99
3b	fc-GAC	1	65.0	0.398	0.107	0.0226	0.98
4a	fc-GAC	10	52.7	0.397	0.138	0.0274	0.99
4b	fc-GAC	10	53.8	0.398	0.100	0.0299	0.99
5a	a-GAC	1	75.1	0.504	0.377	0.0206	0.99
5b	a-GAC	1	68.0	0.502	0.309	0.0264	0.99
6a	a-GAC	10	31.2	0.505	0.502	0.0673	0.98
6b	a-GAC	10	33.4	0.505	0.362	0.0632	0.99
7a	fa-GAC	1	54.2	0.504	0.384	0.0383	0.99
7b	fa-GAC	1	47.3	0.504	0.200	0.0450	0.99
8a	fa-GAC	10	18.9	0.503	0.696	0.0986	0.97
8b	fa-GAC	10	14.8	0.506	0.830	0.1231	0.99

수록 감소하였다(Fig. 4). 즉, 이온강도가 증가할수록 입상활성탄에서의 박테리아 부착이 증가하였다. 1 mM 용액에서 평균 질량회수율은 77.3%(1a, 78.3; 1b, 76.3)이었다. 10 mM에서 질량회수율은 61.6%(2a, 62.6; 2b, 60.6)로써, 1 mM 조건에 비하여 약 16.0% 정도 감소하였다. 한편, c-GAC에서 박테리아 부착계수(λ)는 이온강도가 증가함에 따라 증가하였다. 1 mM 용액에서 λ의 평균값은 0.0158 1/min (1a, 0.0160; 1b, 0.0156)이었다. 10 mM에서 λ값은 0.0251 1/min(2a, 0.0240; 2b, 0.0262)이었다(Table 1). a-GAC에서 질량회수율도 이온강도가 증가할수록 감소하였다(Fig. 5). 1 mM과 10 mM 용액에서 질량회수율은 각각 71.6%(5a, 75.1; 5b, 68.0)와 32.3%(6a, 31.2; 6b, 33.4)이었다. a-GAC에서 λ값은 이온강도가 증가함에 따라 증가하였다. 1 mM과 10 mM에서 λ의 평균값은 각각 0.0235 1/min(5a, 0.0206; 5b, 0.0264)과 0.0653 1/min(6a, 0.0673; 6b, 0.0632)이었다(Table 1).

야자계 입상활성탄의 등전점(isoelectric point)은 pH 4 이하로써,¹²⁾ 본 실험조건(pH 7.3~7.6)에서 입상활성탄은 음전하를 띄고 있다. 측정된 제타전위값에서 알 수 있듯이 *E. faecalis*도 본 실험조건에서 음전하를 띄고 있다. 따라서, 입상활성탄과 박테리아의 상호작용에는 전기적인 척력(electrostatic repulsion)이 크게 작용하여 박테리아의 부착이 용이하지 않다. 하지만, 이온강도가 증가하게 되면, 입상활성탄에 대한 박테리아의 부착이 증가하게 되는데, 이는 DLVO 이론에 의해 설명할 수 있다. 즉, 염(salt)의 농도가 증가하면 이온강도가 증가하게 되는데, 이때 입상활성탄과 박테리아의 입자표면 사이에 존재하는 정전기적 이중층(elec-

trostatic double layer)이 압축됨으로써, 박테리아의 부착이 증가한다. 본 실험의 결과는 다른 연구자의 실험결과와 일치하였다. Paramonova 등¹²⁾은 야자계 입상활성탄으로 충전된 칼럼을 이용한 실험에서 그람음성(gram-negative) 박테리아인 *R. terrigena* 33257의 부착이 이온강도의 증가(증류수조건에서 1 mM 용액조건으로 증가)에 따라 증가하였다고 보고하였다.

3.3. 철수산화물 침착의 영향

fc-GAC에서 박테리아 질량회수율은 c-GAC에 비하여 감소하였다(Fig. 4). 즉, 입상활성탄에 철수산화물을 침착시킴으로써 박테리아 부착이 증가하였다. fc-GAC에서의 경우 1 mM 용액에서 평균 질량회수율은 62.6%(3a, 60.2; 3b, 65.0)이었고, 10 mM는 53.3%(4a, 52.7; 4b, 53.8)이었다. 이는 같은 용액조건의 c-GAC 실험결과에 비하여 각각 10.0%(1 mM 조건)와 8.0%(10 mM 조건) 정도 감소한 것이다. 한편, fc-GAC에서의 경우 1 mM 용액에서 박테리아 부착계수(λ)의 평균값은 0.0241 1/min(3a, 0.0255; 3b, 0.0226)이었다. 10 mM에서 λ 값은 0.0287 1/min(4a, 0.0274; 4b, 0.0299)이었다(Table 1). 즉, c-GAC에서의 경우와 비교하여 fc-GAC에서 λ 값이 증가하였다. fa-GAC에서 질량회수율도 a-GAC에 비하여 감소하였다(Fig. 5). fa-GAC에서의 경우 1 mM과 10 mM에서 질량회수율은 각각 50.8%(7a, 54.2; 7b, 47.3)와 16.9%(8a, 18.9; 8b, 14.8)이었다. 이는 같은 용액조건의 a-GAC 실험결과에 비하여 각각 39.0%(1 mM 조건)와 15.0%(10 mM 조건) 정도 감소한 것이다. fa-GAC에서 λ 값은 a-GAC에서의 값과 비교하여 증가하였다. fa-GAC에서의 경우 λ 값은 1 mM 용액에서 0.0417 1/min(7a, 0.0383; 7b, 0.0450)이었고, 10 mM에서는 0.1109 1/min(8a, 0.0986; 8b, 0.1231)이었다(Table 1).

입상활성탄에 침착된 철수산화물인 침철석(goethite)은 일반적으로 pH 8~9사이의 등전점을 갖는다.^{14,15)} 따라서, 본 실험조건(pH 7.3~7.6)에서 철수산화물이 침착된 입상활성탄 표면은 부분적으로 양전하를 띠게 되고, 음전하를 띤 박테리아와 양전하를 띤 여재 표면간에 전기적인 인력(electrostatic attraction)이 작용하게 되어, 여재 표면으로의 박테리아 부착이 증가하게 된다. 즉, 철수산화물 침착에 따라 입상활성탄 표면에 부분적으로 호의적 부착지역(favorable attachment site)이 증가되어 박테리아의 부착이 증가한다. 본 실험의 결과는 석영모래에 철수산화물을 피복시킴으로써 모래의 표면전하를 변형시켜 박테리아의 제거율을 향상시킬 수 있다는 연구결과들^{11,15,16)}과 유사하다. Foppen과 Schijven¹¹⁾은 칼럼실험을 통해 충전여재 중의 침철석으로 피복된 모래의 비율이 0에서 100%로 증가함에 따라서 *E. coli*의 제거율이 59에서 93%로 증가한다는 것을 보였다. 또한, Kim 등¹⁶⁾도 칼럼충진여재 중의 철피복모래 함량의 비율이 0에서 100%로 증가함에 따라서 *E. coli*의 제거율이 27에서 97%로 증가한다는 것을 보였다. 따라서, 입상활성탄에 철수산화물을 침착시킴으로써 박테리아의 제거율을 향

상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 입상활성탄에 의한 *E. faecalis*의 부착에 미치는 이온강도와 철수산화물 침착의 영향을 분석하였다. 칼럼실험결과에 의하면, 입상활성탄에서 이온강도가 증가할수록 박테리아 부착이 증가하였다. 이는 이온강도의 증가에 따른 입상활성탄과 박테리아의 입자표면 사이의 정전기적 이중층의 압축현상 때문이다. 입상활성탄에 철수산화물 침착시킴으로써 박테리아 부착이 증가하였는데, 이는 철수산화물 침착에 따라 입상활성탄 표면에 부분적으로 호의적 부착지역이 증가하였기 때문이다. 본 연구는 입상활성탄에서 박테리아의 부착과 관련하여 이온강도와 철수산화물 침착의 영향에 대한 정보를 제공하고, 나아가 표면이 변형된 입상여재를 이용한 미생물의 제거에 관한 지식을 증진시킬 것이다.

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. Lantagne, D. S., Blount, B. C., Cardinali, F., and Quick, R., "Disinfection by-product formation and mitigation strategies in point-of-use chlorination of turbid and non-turbid waters in western Kenya," *J. Water Health*, **6**, 67~82(2008).
3. Brownell, S. A., Chakrabarti, A. R., Kaser, F. M., Connelly, L. G., Peletz, R. L., Reygadas, F., Lang, M. J., Kammen, D. M., and Nelson, K. L., "Assessment of a low-cost, point-of-use, ultraviolet water disinfection technology," *J. Water Health*, **6**, 53~65(2008).
4. Doocy, S. and Burnham, G., "Point-of-use water treatment and diarrhoea reduction in the emergency context: an effectiveness trial in Liberia," *Trop. Med. Int. Health*, **11**, 1542~1552(2006).
5. Reasoner, D., Blannon J., and Geldreich, E., "Microbiological characteristics of third-faucet point-of-use devices," *J. Am. Water Works Ass.*, **79**(10), 60~66(1987).
6. Malley, J. P., Eliason, P. A., and Wagler, J. L., "Point-of-entry treatment of petroleum contaminated water supplies," *Water Environ. Res.*, **65**, 119~128(1993).
7. Snyder, J. W., Mains, C. N., Anderson, R. E., and Bissonnette, G. K., "Effect of point-of-use, activated carbon filters on the bacteriological quality of rural ground-

- water supplies,” *Appl. Environ. Microbiol.*, **61**, 4291~4295(1995).
8. Stewart, M. H., Wolfe, R. L., and Means, E. G., “Assessment of the bacteriological activity associated with granular activated carbon treatment of drinking water,” *Appl. Environ. Microbiol.*, **56**, 3822~3829(1990).
 9. Tobin, R. S., Smith, D. K., and Lindsay, J. A., “Effects of activated carbon and bacteriostatic filters on microbiological quality of drinking water,” *Appl. Environ. Microbiol.*, **41**, 646~651(1981).
 10. Chaidez, C. and Gerba, C., “Comparison of the microbiologic quality of point-of-use (POU)-treated water and tap water,” *Int. J. Environ. Health Res.*, **14**, 253~260 (2004).
 11. Foppen, J. W. and Schijven, J., “Transport of *E. coli* in columns of geochemically heterogeneous sediment,” *Water Res.*, **39**, 3082~3088(2005).
 12. Paramonova, E., Zerfoss, E. L., and Logan, B. E., “Measurement of biocolloid collision efficiencies for granular activated carbon by use of a two-layer filtration model,” *Appl. Environ. Microbiol.*, **72**, 5190~5196(2006).
 13. 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.
 14. Gaboriaud, F. and Ehrhardt, J. J., “Effects of different crystal faces on the surface charge of colloidal goethite (α-FeOOH) particles: an experimental and modeling study,” *Geochim. Cosmochim. Acta*, **67**, 967~983(2003).
 15. 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).
 16. 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).