

식물계활성탄과 석탄계활성탄에서의 세균재성장 비교

이 동근 · ¹박성주 · 하배진 · 하종명 · 이상현 · †이재화
신라대학교 공과대학 생명공학과, ¹대전대학교 생명과학부
(접수 : 2003. 11. 5., 게재승인 : 2004. 4. 20.)

Comparison of Bacterial Regrowth on Plant- and Coal-based Granular Activated Carbon

Dong-Geun Lee, Seong Joo Park¹, Bae-Jin Ha, Jong-Myung Ha, Sang-Hyeon Lee, and Jae-Hwa Lee†

¹Division of Life Science, College of Natural Science, Daejeon University, Daejeon 300-716, Korea

Department of Bioscience and Biotechnology, College of Engineering, Silla University, Pusan 617-736, Korea

(Received : 2003. 11. 5., Accepted : 2004. 4. 20.)

Activated carbon has been used in water treatment, because they strongly adsorb organic material including contaminant. Water purifier usually use activated carbon, and bacterial regrowth on that could induce many problems. Model columns, packed with coal- and plant-based granular activated carbon (GAC), were operated with rechlorinated tap water to compare the degree of bacterial regrowth on different GACs. GAC columns decreased the concentration of total organic carbon and chlorine, while they are not good for the decrease of ions. Breakthrough of bacteria were occurred after eight days of operation, and reached 1.1×10^3 CFU/mL on coal based GAC and 6.2×10^2 CFU/mL on coconut based one. Bacterial activities on GAC were between 15.35 ~ 29.06 μ g INT-formazan/g-GAC/h. Bacterial concentration and activities were higher in coal based GAC than coconut based one. Bacterial regrowth on GAC was clarified and regrowth effect of coal-based GAC was higher than that of coconut-based one.

Key Words : GAC (granular activated carbon), bacterial regrowth, coal, plant, INT

서 론

수계에서 세균은 생물막 (biofilm)을 형성하고 있으며, 특히 빈영양조건 (oligotrophic condition)에서는 전체 세균 생물량 (biomass)의 90% 이상이 생물막의 형태로 존재하는 것으로 알려졌다(1, 2). 생물막을 이용하여 상수원수의 정수 처리 등을 할 수 있고(3), 생물막을 위한 기질로 활성탄 (activated carbon)을 이용하는 연구가 보고되어 왔는데(4) 이는 세균 성장을 저해하는 여러 물질을 활성탄이 흡착하여 세균의 활성을 높이는 경우 등에 많이 이용되었다. 활성탄은 원료에 따라 석탄계나 식물계로 나뉘며, 형상에 따라 분말활성탄 (powdered activated carbon, PAC)과 입상활성탄 (granular activated carbon, GAC)이 있다. 활성탄은 표

면이 양전하를 띄고 있어 음전하를 나타내는 유기 물질에 대한 흡착력이 뛰어나며 표면이 음전하인 세균 또한 흡착이 잘 된다고 알려졌다(5). 활성탄과 정수처리에 관한 연구는 오염 물질 제거 분야(4), xenobiotics 제거 분야(5), 활성탄에서의 세균 성장과 활성(6) 등이 있었다.

한편 정수장에서 안전하게 생산된 수돗물일지라도 관망의 노후화와 유기물 등의 영향으로 관말 수도꼭지에서는 미생물학적으로 불안정한 음용수를 확보하게 되었으며 대장균군이 검출되는 보고도 있었다(7, 8). 국내에서는 수돗물을 정수하는 정수기의 보급이 많이 되고 있지만 지금까지 정수과정에서 활성탄 이용에 관한 연구는 주로 수돗물 생산 과정에 관한 연구가 많았다. 생산된 수돗물을 다시 정수하는 정수기에서도 거의 필수적으로 활성탄이 이용되고 있고, 관망에서 발생한 생물막 유래의 세균들이 GAC 상에서 성장할 수 있는데도 이에 대한 연구가 거의 없는 실정이었다. 이에 본 연구에서는 수돗물을 다시 정수하는 과정에서 활성탄의 물리화학적 정수 능력을 파악함과 동시에 활성탄 필터 유출수에 대한 미생물학적 분석을 하였다.

† Corresponding Author : Department of Bioscience and Biotechnology, Silla University, kwaebop-dong 1-1, Pusan 617-736, Korea

Tel : +82-51-999-5748, Fax : +82-51-999-5636

E-mail : jhalee@silla.ac.kr

재료 및 방법

입상활성탄 (Granular Activated Carbon, GAC)

야자 (coconut shell)와 역청탄 (bituminous coal)을 원료로 제작된 정수용 입상활성탄을 체로 걸러 2 mm 이상의 것을 제거한 후 DDW (deionized distilled water, Millipore)로 씻어 미세한 입자를 없앴다. 이후 dry oven (110°C)에서 건조된 활성탄은 desiccator에 보관을 하였고, 실험 전에 dry oven (110°C, 3시간)에서 건조시켰다. 각 활성탄의 물성 및 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Characteristics of coconut-based GAC (GAC-P) and coal-based GAC (GAC-B) used for bacterial regrowth

character \ GAC	GAC - P	GAC - B
raw material	Coconut Shell	Bituminous Coal
type	Granular	Granular
apparent density (g/cc)	0.44	0.49
particle size (mesh)	12 × 30 (0.9 ~ 1.1 mm)	12 × 40 (0.9 ~ 1.0 mm)
hardness number (%)	95.9	95.8
ash (%)	5.0	6.1
Iodine number (mg/g)	1036	1059
specific surface area (m ² /g)	1105	1129
total pore volume (cc/g)	0.55	0.62
average pore diameter (Å)	19.1	21.9
MB decolorization (mL/g)	205	210

입상활성탄 흡착능 조사 (Isotherm kinetics)

같은 농도의 오염물질(Table 2) 100 mL을 포함하는 플라스크에 GAC 양을 다르게 투입하였다. 교반기에서 평형에 이를 때까지 교반시킨 후 여과지 (Whatman, Cat. No. 1441190)로 활성탄을 제거하고 여과액 속의 흡착 대상 물질 초기 농도와 활성탄 처리 후의 농도를 구하였다. 그 후

Freundlich equation을 적용하여 두 활성탄의 각 물질에 대한 흡착능을 구하였다.

$$\ln Q = \ln K + 1/n \times \ln C \text{ (Freundlich Equation)}$$

- Q : 일정 활성탄 양에 흡착된 불순물의 양 (mg/g-GAC)
- C : 불순물 잔류 농도
- K, 1/n : 상수

위 식에서 K가 높고 1/n이 0과 1 사이인 활성탄이 제거 대상 물질에 대한 흡착능이 우수하다고 판별하였다(9).

물리화학적 분석

무기영양염류 분석은 Standard Method(10)를 따라 분광광도계 (spectrophotometer; Shimadzu, UV-160)를 이용하였다. 잔류 염소는 o-toluidine colorimetry 법으로 측정하였고 총 유기탄소 (TOC)는 NPOC (non-purgeable organic carbon)로 TOC analyzer (TOC5000, Shimadzu)를 이용하여 측정하였다. 온도, pH, 용존 산소(DO)는 시료 채취 즉시 온도계, pH meter (model DP-515M, DMS), DO meter (model 58, YSI incorporation)를 이용하여 측정하였다.

미생물학적 분석

시료를 10% sodium thiosulfate로 탈염소 (dechlorination)하였다. 세균농도는 PCA agar 배지와 R₂A agar 배지에 시료를 접종한 후, 각각 37°C에서 48시간, 20°C에서 7일간 배양한 후에 생성된 종속영양세균을 계수하였다.

입상활성탄 칼럼 (GAC Column)

Polypropylene 컬럼 (내경 5 cm, 길이 33 cm)에 DDW를 붓고 GAC 350-360 g을 채워 활성탄 입자가 유동되지 않게 고정하였다. 컬럼의 유입부와 유출부는 내경 8 mm, 외경 11 mm의 실리콘 튜브 (96400-18, Masterflex)로 연결하였다. 1시간 동안 멸균한 후 12시간 이상 실온에 두었다. 잔류염소 농도가 0.2 mg/L 이하인 수돗물을 100 L 용기에 50 L 받은 후, sodium hypochlorite 원액 4.5 ml을 가하였다. 여기에 50 L의 수돗물을 더하면서 혼합하였고 잔류염소 농도가 2.0 mg/L인지 확인한 후 5분 이상 방치한 후 이용하였다. 다시

Table 2. Isotherm kinetics of coconut-based GAC (GAC-P) and coal-based GAC (GAC-B). Total organic carbon (TOC) was determined as non-purgeable organic carbon (NPOC)

Material	Initial concentration (C) mg/L	GAC	Equilibrium concentration (C _e) mg/L	K	1/n	r ²
NH ₄ ⁺ -N	0.07	GAC-P	0.00 ~ 0.04	8.37	2.69	0.94
		GAC-B	0.01 ~ 0.03	11.42	2.80	0.85
NO ₃ ⁻ -N	8.54	GAC-P	0.47 ~ 6.14	-2.24	0.40	0.93
		GAC-B	4.82 ~ 7.71	-4.57	0.68	0.92
TOC	1.96	GAC-P	0.02 ~ 1.07	0.14	0.44	0.93
		GAC-B	0.18 ~ 0.94	0.19	1.27	0.98
Residual chlorine*	240.0	GAC-P	0.0 ~ 40.0	673.79	0.20	0.87
		GAC-B	2.0 ~ 140.0	285.95	0.30	0.84

* : GAC removes residual chlorine as catalyst

염소로 처리한 재염소처리 (re-chlorinated) 유입수는 정량 펌프 (multichannel peristaltic pump, Cole Parmer Instrument Co.)를 이용하여 상향류 (upflow) 방식으로 유량이 550 ~ 600 mL/min 되도록 (EBCT = 0.92 ~1분) 1일 45 L씩 76일 동안 GAC 칼럼에 통수시키면서 유입수와 유출수를 분석하였다.

칼럼 내부 입상활성탄의 세균 분석

칼럼 가동 76일 후 칼럼 내부의 입상활성탄을 8 cm 간격으로 일정량 채취하였다. 멸균된 거즈 위에 시료를 놓고 멸균된 수돗물을 이용하여, 생물막을 형성하지 않고 가역적 흡착한 세균을 제거하였다. 멸균된 인산완충용액 50 ml이 들어 있는 시험관에 활성탄 1.0 g을 넣고 mild sonication 1분-standing 1분 처리를 3회 반복한 것을 다시 vortexing 1분-standing 1분 처리를 3회 반복한 후 R₂A agar medium을 이용하여 활성탄 상의 종속영양세균을 계수하였다. 미생물 활성을 조사하기 위하여 전자전달계 활성 (ETS activity)을 측정하였다. 시험군으로 시료 0.5 g을, 대조군으로 1시간 멸균 처리된 시료 0.5 g을 사용하였다. 시료에 0.4% INT solution (2-(p-iodophenyl)-3-(p-nitrophenyl)-5-phenyl tetrazolium chloride) 1 mL을 가한 후 2시간 동안 어두운 곳에서 배양한 후에 INT가 INT-formazan (iodonitrotetrazolium formazan)으로 환원된 것을 ethanol (Hayman limited) 5 mL로 추출하여 분광광도계 (Shimadzu, UV-160)에서 480 nm를 이용하여 분석하였다.

결 과

입상활성탄 흡착능

Table 2에 실험에 사용된 야자계와 석탄계 활성탄의 흡착능을 나타내었다. 활성탄의 암모니아성 질소에 대한 흡착 제거능이 우수하지 않음을 1/n이 1을 초과한다는 사실에서 알 수 있었고, 두 활성탄 모두 암모니아성 질소에 비해 질산성 질소 제거가 잘 되는 것을 1/n이 0~1 사이를 유지하는 데에서 알 수 있었다. 활성탄은 수계에 포함된 TOC와 잔류 염소를 제거하는 능력이 아주 뛰어난 것을 잔류농도에서 알 수 있었고 제거능은 석탄계가 야자계보다 우수한 것을 알 수 있었다. 암모니아성 질소와 질산성 질소의 제거능도 석탄계 활성탄이 야자계 활성탄보다 우수한 것으로 나타났다.

GAC 칼럼의 유입수와 유출수

재염소처리 유입수를 통수시킬 때 유입수와 유출수의 분석 결과를 전체실험기간의 평균과 범위로 나타낼 때 Table 3과 같았다.

pH는 10일 동안 입상활성탄 칼럼 유출수가 유입수보다 높은 값을 유지하였고 이후는 비슷하였다. 암모니아성 질소 농도는 10일 이전까지는 칼럼 유입수와 유출수가 비슷한 값을 유지하였고, 10일 이후부터는 칼럼 유입수보다 유출수가 높은 값을 유지하였다. 질산성 질소 농도는 47일까지 대체로 칼럼 유입수가 유출수보다 높은 값을 유지하였고, 이후부터는 비슷한 값을 유지하였다. 질산성질소는 10일까지 1 mg/L 정도가 제거되었고 이후부터는 제거능이 감소하는 양상이었다. 용존 산소 농도는 실험 기간 동안 칼럼 유출수가 유입수보다 대체로 0.5 mg/L 정도의 낮은 값을 유지하였다. 잔류

염소는 유입수가 2.0 mg/L을 계속 유지하였고 두 칼럼 유출수는 모두 잔류 염소가 검출되지 않았다.

Table 3. Water quality of influent (rechlorinated tap water) and effluent of GAC-P and GAC-B columns during experimental period. It represents the range of water quality and parenthesis mean the average value. Total organic carbon (TOC) was determined as non-purgeable organic carbon (NPOC). N.D. means not detected

Water Quality	Water type of the water purifier		
	Influent	Effluent (GAC-P)	Effluent (GAC-B)
pH	6.61~7.51 (7.19)	6.77~8.18 (7.30)	6.78~8.43 (7.31)
NH ₄ ⁺ -N (μg/L)	N.D.~7.71 (1.78)	N.D.~12.45 (4.20)	0.08~22.97 (5.38)
NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	0.97~2.15 (1.49)	0.73~1.86 (1.30)	0.63~1.90 (1.29)
Residual chloride (mg/L)	2.0	below 0.2	below 0.2
DO (mg/L)	7.86~9.61 (8.68)	7.49~9.20 (8.12)	7.53~9.08 (8.10)
TOC (mg/L)	0.88~2.71 (1.49)	0.01~2.27 (0.70)	N.D.~1.72 (0.61)

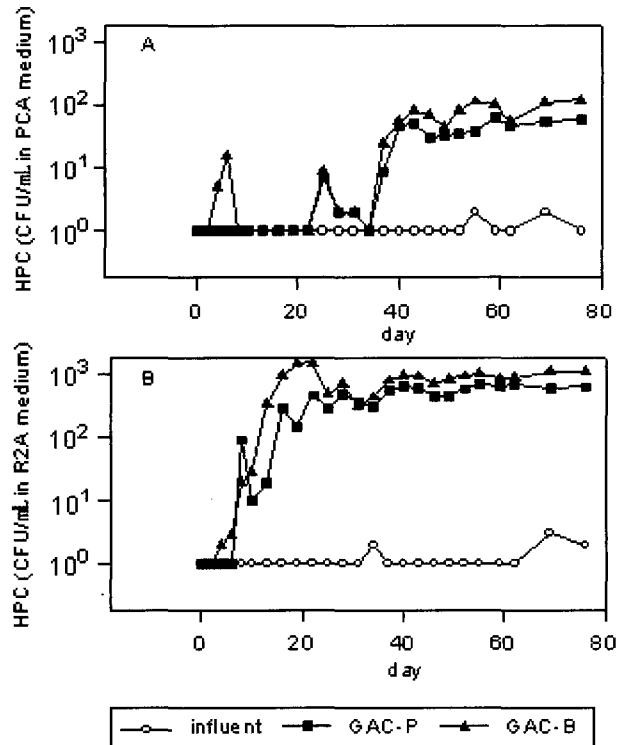


Figure 1. Comparison of heterotrophic-plate-count (HPC) in influent and effluent of 2 kinds of GAC columns with passing rechlorinated tap water [A: PCA medium (CFU/mL), B: R₂A medium (CFU/mL), GAC-P: coconut based GAC, GAC-B: coal based GAC].

Fig. 1은 종속영양세균의 변화를 관찰하기 위한 목적으로 유기물 함량이 다른 두 배지를 이용한 결과이다. 유기물농도가 높은 배지인 PCA medium을 이용한 경우 유입수는 실험 기간 동안 5 CFU/mL 이하의 HPC를 유지하였다. 반면 유출수는 컬럼 통수 시작일로부터 34일까지 세균이 유입수와 비슷하게 낮은 값을 유지하였고 37일째부터 유입수보다 아주 높은 세균의 검출이 시작되었다. GAC-B 유출수가 GAC-P 유출수보다 세균농도가 높은 것으로 나타났고 시간에 따라 요동 (fluctuation)하였다(Fig. 1A). 유기물농도가 낮은 배지인 R₂A medium의 경우도 유입수는 PCA medium 경우와 같이 실험 기간 동안 5 CFU/mL 이하의 HPC를 유지하였다. 반면 유출수는 컬럼 통수 시작일로부터 8일까지 세균이 유입수와 비슷하게 낮은 값을 유지하였지만 10일째부터 세균의 검출이 시작되었다. 전체적인 양상은 시간에 따라 요동 (fluctuation)하면서 HPC가 증가하였다. 특이한 것은 석탄계 활성탄의 유출수에서 20일을 전후하여 높은 HPC를 유지하다가 감소 후에 다시 증가하는 양상을 보였다는 점이다 (Fig. 1B).

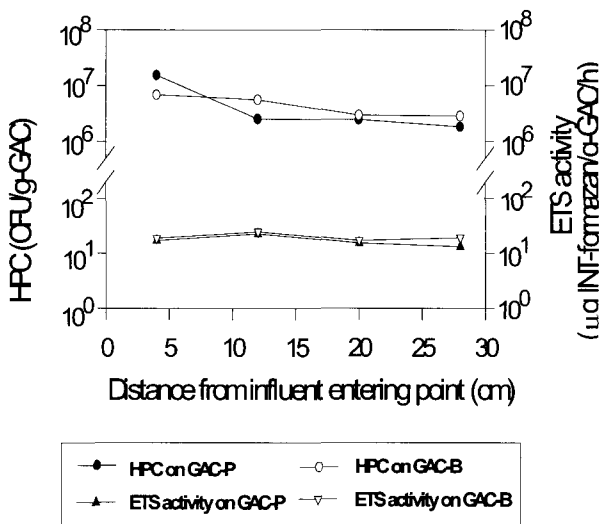


Figure 2. Heterotrophic-plate-count (HPC) and electron-transport-system (ETS) activity of bacteria on GAC [GAC-P: coconut based GAC, GAC-B; coal based GAC].

컬럼 내부 입상활성탄의 미생물학적 분석

재염소처리 유입수를 이용한 경우에 입상활성탄 부착 종속영양세균 계수 (attached bacteria enumeration) 결과는 컬럼의 유출부로 갈수록 감소하는 양상을 보였으며 두 활성탄은 비슷한 수의 부착 세균을 갖고 있는 것으로 판명되었다(Fig. 2). GAC-B가 $6.9 \times 10^6 \sim 2.9 \times 10^6$ CFU/g-GAC, GAC-P가 $1.5 \times 10^7 \sim 1.8 \times 10^6$ CFU/g-GAC의 부착 세균수를 유지하였다. 미생물 활성은 야자계와 석탄계가 각각 15.35~21.97, 19.87~29.06 μg INT-formazan/g-GAC/h의 값을 유지하고 있었다. 컬럼 깊이에 따른 미생물의 전자전달계 활성 변화 양상은 두 컬럼이 비슷하였다.

고 찰

입상활성탄의 흡착능

본 연구에서는 석탄계 활성탄이 야자계 활성탄에 비해 유기물 흡착 제거 능력은 우수하고 암모니아성 질소나 질산성 질소의 흡착 제거 능력은 비슷한 것을 알 수 있었다. 두 활성탄 모두 잔류 염소 제거율은 다른 제거 대상에 비해 월등히 좋았다. 이는 활성탄의 잔류 염소 제거가 흡착 과정이 아닌 촉매 작용에 기인하기 때문에 높은 제거율을 보인 것이라고 유추된다(11).

GAC 컬럼의 유입수와 유출수

재염소처리 유입수를 이용하여 유입수 속의 HPC가 낮으면서 일정하게 하여 비염소처리 유입수에서 야기되는 HPC가 높고 변동이 심한 것을 방지하였다. 활성탄 유출수를 잔류 염소 농도 0.5 mg/L로 5분 처리하여 완전한 HPC 감소와 1.25 mg/L의 농도로 3분 처리하면 HPC가 없음을 관찰한 보고(11)도 있었지만, 본 실험의 유입수는 2 mg/L의 농도에서 5분 처리한 후에 HPC (heterotrophic plate count)가 감소함을 확인하였다. 이 결과를 바탕으로 하여 이 후의 실험에서는 5분 이상 염소 처리한 수돗물을 컬럼에 통수시켰다.

pH는 10일 까지 유출수가 유입수보다 높은 값을 유지하였다. 이는 활성탄이 알칼리를 띄기 때문인 것으로 유추된다. 이 기간 동안 컬럼은 유입수 속의 오염 물질을 제거함과 동시에 washing도 일어났던 것으로 사료된다. 암모니아성 질소 농도는 유출수 속의 세균수가 빈영양배지인 R₂A medium에서 높아진 후에 유출수의 농도가 유입수보다 전반적으로 높게 나타났다. 실험에 이용한 Phenate method는 10 μg/mL 이상의 농도를 인지하는 민감도를 가지고 있어(10) 검출 한계를 벗어나는 것도 있지만 전반적으로 유출수 농도가 높으므로 다른 요인에 의한 결과일 가능성이 높다.

질산성 질소 농도는 16일과 25일을 제외하고는 43일 까지 제거되는 양상이 나타났다. 용존 산소 농도는 연구 기간 동안 유출수가 유입수보다 낮은 값을 유지하였고, 세균 파과 (breakthrough)가 일어난 후 계속 유출 세균수가 높아져도 유입수와 유출수의 농도 차이는 컬럼에서 뚜렷한 변화가 없었다. 이러한 결과는 용존 산소의 증가로 biomass의 증가를 확인하였던 보고(12)와 세균 성장에 따라 용존 산소의 농도가 GAC column 전후에서 차이가 났던 결과(13)에 상치되는 것이었다. 본 연구에서는 GAC에 흡착하는 용존 산소의 양이 연구 기간 동안 GAC 상에서 성장하였던 세균들이 호흡원 등으로 이용하기에 충분한 양이었다고 사료된다.

연구 기간 동안 유입수와 유출수의 TOC 차이가 GAC에 흡착되었다면 GAC의 TOC에 대한 adsorption capacity (Table 2), 사용한 유입수 총량 등으로 계산하면 필요한 활성탄 양은 약 15,000 g인데 실제 사용된 양은 350 g 내외이므로 차이가 아주 큰 것을 알 수 있었다. R₂A medium에서 유출수의 종속영양세균이 확인되기 전인 7일까지의 NPOC 제거에 필요한 활성탄 양은 1,528 g과 2,030 g인데 실제 사용량은 350 g 내외였다. 용존 산소는 GAC의 유기물 흡착 능력을 향상시키는 것으로 알려져 있어(14) 본 연구 조건에서 용존 산소는 활성탄의 유기물 흡착력을 4.3배 내지 5.8배의 증가시켰을 가능성

이 있다. 그리고 PCA medium에서 세균 성장이 확인된 37일 이후부터 칼럼의 NPOC 제거율이 증가한 것을 볼 수 있었는데 여기에는 세균 성장에 의한 biological activity가 중요한 역할을 하고 있다고 추정된다. 활성탄을 이용하여 TOC 제거를 보고한 사례(15)와 GAC 상에서 미생물 활성을 보였다는 보고(6)들이 이를 뒷받침하고 있다고 사료된다. 이 보고들과 비교하면 산소가 활성탄의 유기물 흡착 능력을 향상시켰고, 세균 성장 후에는 세균의 유기물 분해 활성도 함께 작용하였을 것으로 추측된다.

유입수의 세균수가 연구 기간 동안 계속 낮은 값을 유지하였지만, 유출수 속의 세균수는 PCA medium을 이용하였을 때 37일 때부터 파과 (breakthrough)가 시작되었다. 그리고 R₂A medium을 이용하였을 때는 10일 때부터 파과가 본격적으로 시작되었다. 활성탄을 이용한 수돗물 처리에서 종속영양세균수 파과에는 부영양배지인 PCA medium보다 빈영양배지인 R₂A medium의 유용성을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 파과가 일어난 후 연구 기간 동안 약 10배 정도의 HPC 차이가 난다는 사실에서도 알 수 있었다. 그리고 실험에 이용한 각 배지가 미생물이 성장하는 GAC 상의 영양상태를 반영한다고 볼 때 GAC는 37일까지 부영양화가 지속되고 있었다고 유추할 수 있다.

Biofilm 자체의 소독제 내성(16)과 함께 유입수가 2 mg/L의 잔류 염소를 함유하고 있지만 활성탄의 촉매 작용으로 잔류 염소가 제거되어 세균에 작용을 하지 못하고 입자에서 성장하는 세균은 소독에 저항성이 증가한다는 보고(11)에서와 같이, 일단 biofilm을 형성하고 성장한 세균은 dead cell material과 수계의 유기물을 이용하여 생장을 하였을 것이다. 유출수의 세균은 칼럼에서 세균 파과 이전의 시기에서부터 염소 소독 과정에서 살아남은 세균들이 활성탄에 부착 (attach) 혹은 흡착 (adsorption)하여 성장을 하다가 활성탄 상의 세균수가 어느 정도 높아진 후 탈착 (detach) 혹은 분열의 결과로 해석이 가능하다. 야자계 활성탄과는 달리 석탄계 활성탄에서 통수 20일을 전후하여 HPC의 증가가 있는 후 감소하고 다시 증가하였는데, Servais 등(6)은 강물을 이용한 실험에서 칼럼 유출수의 HPC가 3일에서 7일 사이 급격한 증가가 있는 후에 감소하여 안정된 값을 유지하고 이러한 kinetics 현상은 활성탄을 컬럼에 재장착하면 반복성이 있다고 보고하였다.

칼럼 내부 입상활성탄의 미생물학적 분석

활성탄 상의 biofilm을 형성하는 종속영양세균은 수돗물 유입부에서 유출부 방향으로 감소하는 양상을 보여 bacterial biomass가 15°C 이상의 수온에서는 칼럼 깊이에 따라 vertical stratification을 보인 것과 일치하였다(2). 그리고 석탄계 활성탄이 야자계 활성탄에 비해 근소하나마 높은 세균수를 유지하는 것을 볼 수 있었다. 평균 활성을 갖는 은을 활성탄에 사용하여 세균 농도를 감소시키는 보고(17)도 있었지만 더 많은 연구가 필요한 것을 알 수 있었다.

INT reduction method를 활성탄에 이용한 보고(13)도 있었지만, 본 실험에서 미생물 활성은 세균수 변화 양상과는 일치하지 않는 양상을 보였다. 이러한 결과가 세균수와 ETS activity가 비례하지 않는 것에 기인한 것인지, ETS activity가

다른 세균 들이 성장하는 등 ecological niche가 다른 것인지는 알 수가 없었다.

본 실험에서 얻을 수 있는 결론은 다음과 같았다. 입상활성탄은 세균 성장의 좋은 substratum을 제공하여 입상활성탄 입자 상에서 세균 재생장 현상이 활발하게 일어났고 세균 재생장은 석탄계 활성탄에서 야자계 활성탄보다 잘 일어나며 이는 활성탄의 흡착력에 의한 것으로 생각된다. 입상활성탄 칼럼의 수계 유기물 제거는 초기에는 활성탄의 흡착력이, 후기에는 미생물 활성이 중요한 역할을 수행한 것으로 추측되었다.

요 약

정수용 입상활성탄 (granular activated carbon, GAC)으로 사용되는 식물계와 석탄계 활성탄의 미생물 재생장 현상을 파악하고 비교하기 위해 활성탄 칼럼을 대상으로, 유입수와 유출수 비교와 함께 활성탄 상의 종속영양세균의 분포와 활성을 분석하였다. 활성탄 칼럼은 총유기탄소와 잔류염소를 잘 제거하였으며 이온은 잘 제거하지 못하는 것을 알 수 있었으며, 칼럼 유출수의 세균수는 10일째 파과 (breakthrough)가 발생한 후 증가하여 최종적으로 석탄계와 식물계 활성탄에서 각각 1.1×10^3 , 6.2×10^2 CFU/mL로 나타났다. 칼럼 내부 활성탄 상의 미생물 활성은 GAC-C가 15.35 ~ 29.06 μ g INT-formazan/g-GAC/h이었고, 세균수와 세균활성 모두 석탄계가 조금 높았다. 입상활성탄 상의 미생물 재생장 현상이 확인되었고, 석탄계 활성탄이 야자계 활성탄보다 미생물 재생장 유발 효과가 큰 것으로 판명되었으며, 활성탄 상의 세균에 의한 유기물 제거능력이 확인되었다.

REFERENCES

- Keinänen, M. M., L. K. Korhonen, M. J. Lehtola, I. T. Miettinen, P. J. Martikainen, T. Vartiainen, and M. H. Suutari (2002), The microbial community structure of drinking water biofilms can be affected by phosphorus availability, *Appl. Environ. Microbiol.* **68**, 434-439.
- Servais, P., P. Laurent, and G. Randon (1992), Measurement of bacterial biomass and activity in tap-water, *Rev. Sci. Eau* **5**, 473-488.
- Logan, B. E. and D. LaPoint (2002), Treatment of perchlorate- and nitrate-contaminated groundwater in an autotrophic, gas phase, packed-bed bioreactor, *Water Res.* **36**, 3647-3653.
- Gagnon, G. A. and P. M. Huck (2001), Removal of easily biodegradable organic compounds by drinking water biofilms: analysis of kinetics and mass transfer, *Water Res.* **35**, 2554-2564.
- Frimmel, F. F. (1998), Characterization of natural organic matter as major constituents in aquatic systems, *J. Contam. Hydrol.* **35**, 201-216.
- Servais, P., G. Billen, and P. Bouillot (1994), Biological colonization on granular activated carbon filters in drinking-water treatment, *J. Environ. Eng.* **120**, 888-899.
- Lee, D. -G. and S. -J. Kim (2003), Bacterial species in biofilm cultivated from the end of the Seoul water distribution system, *J. Appl. Microbiol.* **95**, 317-324.
- Reid, D. C., A. Edwards, D. Cooper, E. Wilson, and B. A. McGaw (2003), The quality of drinking water from private water supplies in Aberdeenshire, UK, *Water Res.* **37**, 245-254.

9. Weber Jr., W. J. (1991), Sorption phenomena in subsurface system, concepts, models and effects on contaminant fate and transport, *Water Res.* **25**, 499-528.
10. APHA-AWWA-APCF (1996), Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th ed., APHA, Washington, D.C.
11. Stringfellow, W. T., K. Mallon, and F. A. DiGiano (1993), Enumerating and disinfection bacteria associated with particles released from GAC filter-adsorbers, *J. AWWA.* **85**, 70-80.
12. Huang, J. C. and Y.-C. Liu (1993), Relationship between oxygen flux and biofilm performance, *Water Sci. Technol.* **28**(7), 6153-158.
13. Malley Jr, J. P., T. T. Eighmy, M. R. Collins, J. A. Royce, and D. F. Morgan (1993), The performance and microbiology of ozone-enhanced biological filtration, *J. AWWA.* **85**, 47-57.
14. Vidic, R. D., M. T. Suidan, and R. C. Brenner (1994), Impact of oxygen mediated oxidative coupling on adsorption kinetics, *Water Res.* **28**, 263-268.
15. Matilainen, A., N. Lindqvist, S. Korhonen, and T. Tuhkanen (2002), Removal of NOM in the different stages of the water treatment process, *Environ. Int.* **28**, 457- 460.
16. Wende, E. V. D., W. G. Charaklis, and D. B. Smith (1989), Biofilms and bacterial drinking water quality, *Water Res.* **23**, 1313-1322.
17. Park, S. J. and Y. S. Jang (2003), Preparation and characterization of activated carbon fibers supported with silver metal for antibacterial behavior, *J. Colloid Interface Sci.* **261**, 238-243.