

입상활성탄 부착세균과 염소소독 연구

Bacterial attachment on granular activated carbon and effect of chlorine disinfection

백영애* · 조우현 · 홍병의 · 최영준 · 안승구**

Baek, Youngae* · Joe, Woohyun · Hong, Byungeui · Choi, Youngjune · Ahn, Seoungkoo**

서울시 상수도 연구원, 서울시립대학교*

(2009년 4월15일 접수 ; 2009년 6월8일 수정; 2009년 6월 12일 채택)

Abstract

The authors investigated the bacterial community attached to granular activated carbon(GAC) particles and the susceptibility of the community to chlorine disinfection. The study was carried out at the G Water Treatment Plant in Seoul, which was in full-scale operation. Bacteria attached to the surface of GAC increased gradually with treatment from $0.4 \times 10^6 \sim 8.5 \times 10^6$ CFU/g. TOC removal was under 1.0 mg/L due to increased bacterial community on the surface of GAC. It was found that TOC removal was closely related with physical and biological parameters such as pore volume and the number of attached bacteria. When the washed and the attached cells were disinfected with 1.0mg/L of chlorine for 1 hour, the washed cells with chlorination could be controlled, but the number of the attached cells increased gradually. The results suggest a possibility that the treatment and disinfection barriers can be penetrated and pathogenic bacteria may break into the drinking water supplying system.

Key words : GAC, TOC, attached bacteria, Chlorination, HPC

주제어 : 입상활성탄, 총유기물질, 부착세균, 염소소독, 중속일반세균

1. 서론

생물활성탄(Biological Activated Carbon)은 정수처리 공정 중에서 여과공정과 입상활성탄 공정사이에 오존처리를 하여 유기물질의 분해성을 증강하고, 용존산소를 풍부하게 함으로써 활성탄에서 생물학적 작용과 흡착작용의 2가지 기능이 동시에 일어나도록 운전하는 처리기술을 말한다. 생물활성탄은 용존유기물의 흡착작용과 생물학적 작용에 의하여 제거되므로 입상활성탄의 재생빈도가 줄어들어 운전 비용을 절감할 수 있게 된다.

생물활성탄 처리에서 유입된 미생물들은 대개 크기가 10000 Å 이상이므로 활성탄 표면에 있는 수많은 대세공(macro-pore)에 안착하게 된다. 대세공은 미생물들을 여러 가지 물리적인 힘으로부터 보호하는 역할을 하게 되므로 미생물들은 점차 원수중의 유기물질 및 활성탄에 흡착된 유기물질들을 먹이로 하며 번식하게 된다. 이렇듯 생물활성탄은 자연적으로 활성탄 표면에 미생물이 서식하면서 4~8주 후 미생물 활동이 평형상태에 이르면서 형성되는 것으로 활성탄 고유의 흡착기능과 생물활동의 효과를 공유하게 된다. 이처럼 고도정수처리시설 운영에 있어서 입상활성탄 특

* Corresponding author Tel:+82-2-3146-1888, Fax:+82-2-3146-1863, E-mail: bya100@seoul.go.kr(Baek, Y.A.)

성에 맞추어 운영하는 것이 매우 중요하며 특히 최종 처리수의 유기물, 소독부산물, 맛·냄새물질과 입상활성탄의 물리적인 특성인 비표면적, 요오드가, 세공용적, 세공크기 등의 상호관계를 분석하여 입상활성탄 최적유지관리의 운영지표로서 활용하는 것이 가장 바람직하다.

따라서 본 연구에서는 G정수센터에 운영되고 있는 실증플랜트 연구결과를 바탕으로 유기물 제거에 있어 입상활성탄의 부착세균과 물리적인 특성과의 상관성을 분석하여 입상활성탄의 효율적인 운영관리방법을 제시하고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구시설

고도정수처리 실증플랜트는 G 정수센터의 4공장에서 생산된 침전수와 여과수를 이용하여 운영되고 있으며 처리공정은 Table 1과 같다.

2. 분석항목 및 방법

운영되고 있는 실증플랜트의 각 공정별 처리수의 TOC를 분석하여 유기물질의 처리효율을 평가하였으며, 활성탄을 채취하여 부착세균, SEM 등의 생물학적 특성을 분석하였으며 분석방법은 Table 2와 같다.

2.1 총유기물질농도(TOC; Total Organic Carbon)

총유기물질농도(TOC; Total Organic Carbon) 분석은 유기물을 자외선과 산화제를 사용하여 CO₂로 전환시키며, CO₂는 정밀하고 감도가 높은 막을 이용하여 CO₂를 선택적으로 투과시키는데 유기물 산화 후 TC(Total Carbon)를

측정하여 IC(Inorganic Carbon)를 빼주는 방식으로 TOC가 계산되며 시료중의 IC를 제거하기 위한 IC Remover를 부착하여 TOC측정의 감도를 높였다.

2.2 부착세균

부착세균은 입상 활성탄에 부착되어 있는 세균을 분석하는 방법으로 멸균처리된 피펫으로 채취한 활성탄을 50mL 멸균 증류수병에 넣고, 초음파 처리(1min, 28kHz) 및 강한 교반(2000rpm, 30sec)으로 부착세균을 탈리시키고, 상정수 1mL를 취해 10mL 시험관에 단계적으로 희석하여 고체 R2A평판배지에 접종하여 배양(21±1°C, 7일간)하였다. GAC층의 균체수는 1g 습중량당이 colony수로 표시하였다(長澤 忠正, 1990).

부착세균의 동정은 1차 배양후 각 색깔과 모양에 따라 close zigzag pattern으로 R2A배지 평판 전체에 도달하여 2차 순수배양(25±1°C, 7일)후 동정(identification)하였다.

운영기간별 입상활성탄의 표면상태 및 부착세균 양의 정도를 관찰하기 위해 파악하기 위한 SEM 전처리 방법은 1차 고정(at 4°C for 2-4hr)→세척(at 4°C for 10min)→2차 고정(at 4°C for 2hr)→세척→탈수→건조→mounting on metal stubs→gold coating→observation순으로 진행하였으며, SEM분석은 서울대학교 농업생명과학부의 NICEM에 소재한 일본 JEOL사의 JSM-54120LV 분석장비를 사용하였다.

2.3 잔류염소

먹는물 수질공정시험법에 의해 Diethyl-P-Phenyl-enediamine 법(DPD법)을 이용하여 잔류염소 측정기로 측정하였다.

Table 1. 실증플랜트의 처리공정(2007년)

처리대상수	처리방법	경과년수	활성탄종류
모래여과수	GAC	5년	F-400
	GAC	1년	N1020
	Ozone+GAC	1년	N1020

Table 2. 분석항목에 따른 시험규격 및 장비

항 목	시험규격(방법)	분석장비
TOC	(선택적 막전도도 검출법)	Sievers 820(GE, USA)
부착세균(HPC)	Standard method 9215 for water and wastewater	-
SEM	-	JSM-5410LV(JEOL, Japan)
잔류염소	먹는물 수질공정시험법(DPD법)	Colorimeter(Hach)

III. 결과 및 고찰

3.1 운영기간별 GAC 부착세균 계수변화 및 우점종 분석결과

GAC에서의 부착세균은 유기물 제거의 지표로 활용될 있으며, 특히 세공크기와도 밀접한 관련이 있는데, 주로 대세공(500Å)에 대부분 부착되어 효소를 생산해 이 효소들이 미세공(20Å)에 쉽게 확산되어 각종 유기물질을 분해하는 등 활성탄의 흡착능력을 재생시키는 역할을 한다(Rigway, 1981). 대세공은 미생물들을 여러 가지 물리적인 힘으로부터 보호하는 역할을 하게 되므로 미생물들은 점차 원수중의 유기물질 및 활성탄에 흡착된 유기물질들을 먹이로 하며 번식하게 된다. 이렇듯 생물활성탄은 자연적으로 활성탄 표면에 미생물이 서식하면서 4~8주 후 미생물 활동이 평형상태에 이르면서 형성되는 것으로 활성탄 고유의 흡착능력과 미생물에 의한 분해 효과를 공유하게 된다. 따라서, GAC의 흡착능력이 파과에 이르더라도 GAC 표면의 부착된 세균의 응집체에 의한 분해작용을 통해 지속적으로 유기물질 제거가 가능하게 되므로 부착세균은 GAC 처리에 있어서 매우 중요한 부분을 차지하고 있다.

입상활성탄 층별(상,중,하) 표면에 부착된 저온일반세균은 상, 중, 하층의 세균수를 평균하였을 때 Ozone+GAC가 $1.2\sim 10.4 \times 10^6$ CFU/g, 단독 GAC는 $0.4\sim 8.5 \times 10^6$ CFU/g으로 부착세균은 온도에 가장 큰 영향을 받지만 운영 초기보다 경과시간이 지남에 따라 증가함을 보였으며, 두 공정 모두 큰 차이를 보이지 않았다. 실제로 운영초기에 비해 시간이 경과할수록 GAC표면에 부착된 세균의 양이 증가

하는 것을 SEM 분석을 통해 확인할 수 있었다(Fig. 1).

Stewart 등(1990)은 생물활성탄의 부착세균으로 *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Aeromonas* 속 등이 있다는 연구결과를 보고하였으며, 박 등(2001)도 낙동강 하류를 대상으로 생물활성탄의 세균분포 특성을 연구한 결과, *Pseudomonas*속이 50.5%로 가장 많은 분포를 보였고, *Flavobacterium*속, *Alcaligenes*속 등이 검출되었다고 보고한 바 있다.

Table 3은 약 6년이 경과된 GAC를 대상으로 유기물 제거에 있어서 주된 생물분해 역할을 해 주는 GAC 부착세균의 동정(Identification)결과를 나타낸 것이다. 대부분의 GAC의 부착세균은 주로 하천수에 많이 서식하는 *proteobacterium* group, 즉, *Afipia*(Alpha), *Polaromonas*(Beta) *Mesorhizobium*, *Staphylococcus*, *Sphingomonas* 속 등으로 전체의 약 83%를 차지하였고, 나머지는 *Arthrobacter*, *Flavobacterium* *Flectobacillus*속 등이었다.

Table 3. GAC에서 분리한 부착세균 동정결과(GAC-6년 경과, 2007년 10월)

일반세균명	분포(%)
<i>Afipia</i> sp.	72.5
<i>Polaromonas</i> sp.	10.3
<i>Mesorhizobium</i> sp.	8.2
<i>Staphylococcus</i> sp.	6.9
<i>Sphingomonas</i> sp.	2.0
기타(<i>Arthrobacter</i> sp, <i>Flavobacterium</i> sp.등)	0.1

(× 3500)

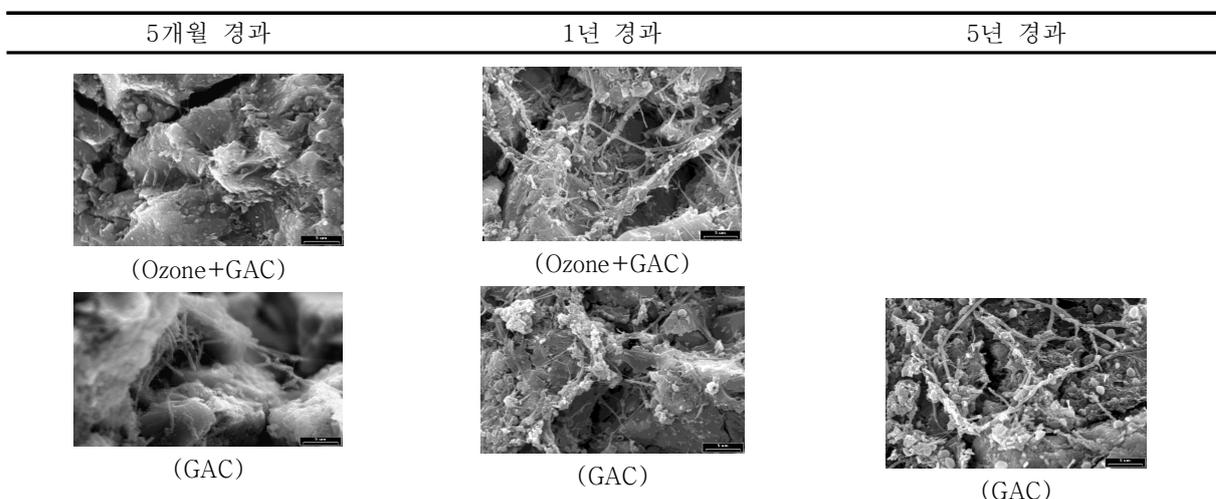


Fig. 1. 운영기간에 따른 각 공정별 SEM 분석결과

한강원수를 대상으로 시험한 GAC 부착세균의 동정결과는 위의 문헌들의 결과에 나타난 부착세균종들과는 다른 결과를 나타내었는데, 이는 원수수질과 GAC 운영환경 조건 즉, 수온, 탁질, 유기물, GAC의 표면물성, 여과속도 등에 따른 부착세균종의 차이인 것으로 판단된다. 결국 유기물질 제거에 있어서는 우점종이나 부착세균종이 다르다 할지라도 GAC에 부착되어 있는 세균종들에 의한 생물활성탄의 역할은 일치한다고 볼 수 있다.

Table 4는 GAC의 월별 시험결과의 평균을 나타낸 것으로서 고수온시와 저수온시의 총일반세균수는 큰 차이를 보였으나 우점종은 일정한 결과를 나타내었다. 결국 초기의 단순물리흡착과 경과시간에 따른 물리흡착 외에 생물흡착과의 병행으로 유기물을 제어하기 위한 GAC 효과는 매우 중요하다고 할 수 있겠다.

3.2 부착세균과 TOC 제거관계

부착세균은 유기물 제거 지표로서 GAC 표면에 부착되어 TOC 제거에 매우 중요한 역할을 하고 있는 것으로 보고되었다(Bancroft,1983 ; Stewart, 1990)

Fig. 2는 장기간 운영해 온 GAC(5년)를 대상으로 경과시간에 따른 부착세균수 변화를 나타내고 있는 것으로, 부착세균수의 증감곡선과 TOC제거율이 서로 유사한 증감 패턴을 보여, 부착세균과 TOC 제거효율과는 밀접한 관계가 있다는 것을 확인할 수 있다.

GAC의 운영기간에 따른 표면 부착세균수는 운영초기에 비해 5개월 경과후 증가하나, 1년 이상 경과된 GAC의 경우 안정적인 부착세균 상태를 보여 이론적인 평형상태에 도달하는 것으로 판단되지만 Fig. 2에서의 월별 부착세균상태를

알 수 있듯이 계절별 증감폭이 큰 것으로 나타나 부착세균이 이론적인 평형상태에 도달하였더라도 수온의 영향을 크게 받으며, 7~8월 장마철 고탁도시에는 탁질의 영향으로 다소 감소하는 경향을 보인다.

수온이 낮은 시기에는 부착세균의 활동력이 약화되어 TOC 제거율이 감소됨을 알 수 있으나, 일부 구간에서는 부착세균수가 많아도 TOC 제거율이 낮은 경우를 보이는데 이는 모래여과수 자체 TOC 농도가 1.0mg/L로 낮게 유입된 경우로 5년이 경과된 GAC에서의 평균 TOC 농도는 0.7~0.9mg/L로서 제거율 또한 2040%로 유지하고 있음을 알 수 있다.

3.3 부착세균의 소독저항성 평가

GAC에 부착된 일반세균들의 염소소독에 대한 저항성 평가를 위해, 실증플랜트에서 멸균 증류수병 50mL에 채취(1년 경과 GAC)한 활성탄을 대상으로 초음파를 이용한 탈리 잔후의 염소소독 저항성을 평가하였다. 활성탄이 들어 있는 멸균 증류수병에 주입한 염소농도는 1.0mg/L로 실제 정수센터에서 최종처리수에 주입하는 농도와 유사한 농도로 주입하였다. 먼저 채취한 활성탄이 들어 있는 멸균 증류수병

Table 4. 고수온시와 저수온시의 부착세균수 비교결과(GAC-5년 경과, 평균)

온도조건	고수온시(20~25°C)	저수온시(2~10°C)
부착세균수 (CFU/gGAC)	2.3×10 ⁷	1.0×10 ⁶

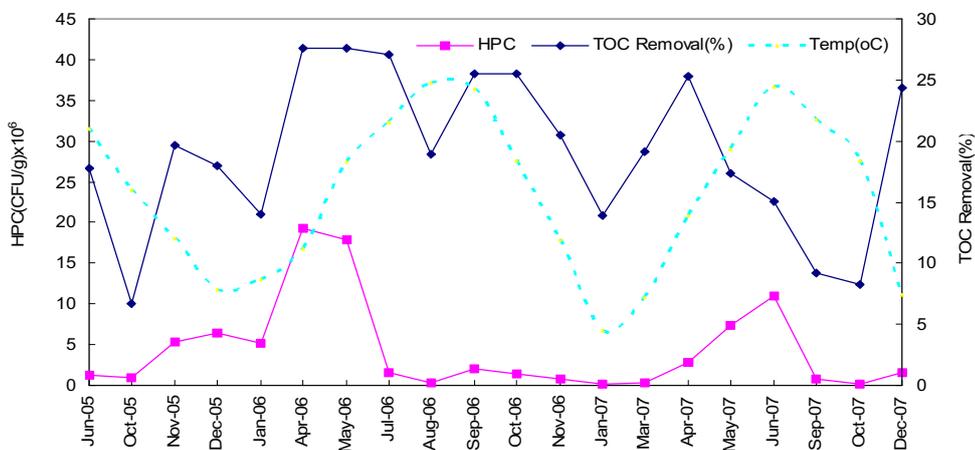


Fig. 2. 온도변화에 따른 부착세균과 TOC 제거율 관계(GAC)

Table 5. GAC 부착세균 부착 및 탈리시 염소소독 결과비교

염소접촉시간(농도)	GAC부착	GAC탈리	정상시(평균)
1hr접촉(1.0mg/L)	$2.5 \times 10^3 \sim 1.4 \times 10^4$	$3 \times 10^2 \sim 1 \times 10^3$	$0.4 \times 10^6 \sim 8.5 \times 10^6$

(활성탄에 부착되어 있는 상태로 탈리전)과 또 다른 활성탄이 들어 있는 50mL 멸균 증류수병을 초음파 처리(1min, 28kHz, 長澤 忠正, 1990) 및 강한 교반(2000rpm, 30s) 후 다른 멸균병에 탈리수를 부은 50mL병에 각각 염소수(약 0.5mg/L)를 주입하고, 배수지까지 도달하는 시간을 감안하여 암소에서 약1시간을 방치한 후 R2A배지에 배양(25±1°C, 7일간)하였다.

GAC의 초음파 탈리전후 염소소독 저항에 대한 평가결과 Table 5에서 알 수 있듯이 염소주입농도 1.0mg/L, 1hr 접촉후 GAC 자체를 염소 소독한 경우가 GAC를 초음파 처리 후 소독한 경우보다 일반세균수가 다소 높게 나타나 GAC의 갈라진 틈(crack이나 crevices)에 부착되어 군집(conclony)을 이루고 있는 세균의 경우, 활성탄 자체가 염소소모와 은신처 역할을 함으로써 염소소독으로부터 보호되는 것으로 판단된다(Mark 외 3인, 1984).

위의 결과로부터 알 수 있듯이 활성탄에 부착되어 있던 세균들 중, 소독내성이 강한 특히 병원성 세균의 경우 외부 충격에 의해 떨어져 나가 배급수관으로 유입될 가능성이 있으므로 입상활성탄의 운영지표로서 부착세균의 주기적 관리로 예방할 필요가 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 G 정수센터내 입상활성탄 실증플랜트 운영을 통하여 운영기간별 입상활성탄의 표면에 부착된 저온 일반세균을 조사하여 유기물(TOC) 제거와의 상관성을 분석하였다.

입상활성탄 층별(상,중,하) 표면에 부착된 저온일반세균은 상,중,하층의 세균수를 평균하였을 때 Ozone+GAC가 $1.2 \sim 10.4 \times 10^6$ CFU/g, 단독 GAC는 $0.4 \sim 8.5 \times 10^6$ CFU/g으로 부착세균은 운영초기보다는 경과시간에 따라 증가하였으나, 고수온시와 저수온시에는 증감을 보여, 부착세균수가 이론적인 평형상태에 도달하였더라도 수온의 영향을 가장 많이 받는 것을 알 수 있다.

약 5년이 경과된 GAC를 대상으로 GAC 부착세균을 동정(Identification)한 결과, 대부분의 부착세균은 주로 하

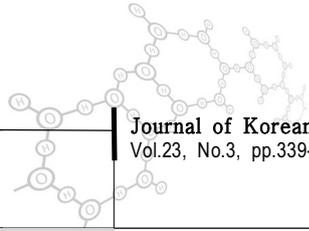
천수에서 많이 서식하는 *proteobacterium* group, 즉, *Afipia(Alpha)*, *Polaromonas(Beta)* *Mesorhizobium*, *Staphylococcus*, *Sphingomonas*속 등으로 약 83%를 차지하여 우점하는 것으로 나타났고, 나머지는 *Arthrobacter*, *Flavobacterium* *Flectobacillus*속 등으로 나타났다.

염소주입농도 1.0mg/L, 1hr 접촉후 GAC 자체를 염소 소독한 경우가 GAC를 초음파 처리후 소독한 경우보다 일반세균수가 다소 높게 나타나 GAC의 갈라진 틈(crack이나 crevices)에 부착되어 군집(conclony)을 이루고 있는 세균의 경우, 활성탄 자체가 염소소모와 은신처 역할을 함으로써 염소소독으로부터 보호되는 것으로 판단된다. 이로부터 알 수 있듯이 활성탄에 부착되어 있던 세균들 중, 소독내성이 강한 특히 병원성 세균의 경우, 외부 충격에 의해 떨어져 나가 배급수관으로 유입될 가능성이 있으므로 입상활성탄의 운영지표중 하나로서 부착세균의 주기적인 관리로 예방할 필요가 있다.

본 연구는 full scale Ozone+GAC와 GAC 처리공정의 운영을 통하여, 입상활성탄의 부착세균을 운영지표로 한 유기물질 제거특성을 분석한 결과로서 향후 입상활성탄 재생 연구에 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 박흥기 외 5인(2001), 낙동강 하류 상수원수의 생물활성탄에 의한 수질개선 및 세균분포 특성, *한국환경과학회지*, 10(2), pp.105-111
2. 長澤 忠正, 汐崎 淳(1990), 입상활성탄층에서의 미생물 동향, *제41회 전국수도연구발표회*
3. 이성우 외 4인(2004), 고도상수처리 -원리 및 응용-,
4. 서울시고도정수처리연구 1단계 보고서(1999), 서울시 상수도 연구원
5. K. Bancroft, S.W. Maloney, J. Mcelhane, I. H. Suffet, and W. O. Pipes(1983), Assessment of Bacterial Growth and Total Organic Carbon Removal on Granular Activated Carbon Contactors, *Applied and Environmental Microbiology*, p.683-688
6. Mic h. Stewart, Roy L. Wolfe, and Edward G. Means(1990),



- Assessment of the Bacteriological Activity Associated with Granular Activated Carbon treatment of Drinking Water, *Applied and Environmental Microbiology*, p.3822-3829
7. Takashi kameya, Tatsuya hada and Kohei Urano(1998), Changes of adsorption capacity and pore distribution of biological activated carbon on advanced water treatment, *Wat. Sci. Tech*, **Vol.35**(7), p.155-162
8. Wataru Nishijima, Takao Akama, Eiji Shoto and Mitsumasa Okada(1997), Effects of Adsorbed Substances on Bioactivity Attached Bacteria on Granular Activated Carbon, *Wat. Sci. Tech*, **Vol.35**, No.8, pp.203-208