

낙동강 하류 상수원수의 생물활성탄에 의한 수질개선 및 세균분포 특성

박 홍 기·나 영 신·정 중 문·류 동 춘·이 상 준·홍 용 기*
부산광역시 상수도사업본부 수질연구소, *부산대학교 미생물학과, **부경대학교 생물공학과
(2000년 10월 21일 접수)

Improving Water Quality and Bacterial Characteristics during Water Treatment Process Using Biological Activated Carbons on Downstream of the Nakdong River

Hong-Ki Park, Young-Sin Na, Chong-Mun Chung, Dong-Choon Ryu, Sang-Joon Lee* and Yong-Ki Hong**

Water Quality Institute, Water Works HQ of Pusan Metropolitan City, Pusan 617-042, Korea

*Department of Microbiology, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

**Department of Biotechnology, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

(Manuscript received 21 October 2000)

Improvement of water quality and Investigation of bacterial characteristics have been conducted in a pilot plant using biological activated carbon (BAC) in water treatment process at the downstream of the Nakdong River. Most of water control parameters were highly improved after passing through BAC. Approximately 54% of dissolved organic carbon was removed in coal-based BAC process. Bacterial biomass and bacterial production appeared 9.8×10^8 CFU/g and $7.1 \text{mg-C/m}^3 \cdot \text{hr}$ in coal-based BAC, respectively. Predominant bacteria species grown in BAC were identified as *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Alcaligenes*, *Acinetobacter* and *Aeromonas* species. Particularly *Pseudomonas vesicularis* was dominant in both coal-based and coconut-based BACs, while *Pseudomonas cepacia* was dominant in wood-based BAC.

Key words : Biological Activated Carbon, DOC, Bacterial Biomass, Bacterial Production, *Pseudomonas vesicularis*, *Pseudomonas cepacia*

1. 서 론

최근 낙동강 하류지역은 1987년 하구언 축조이후 유속저하, 상류지역의 지속적인 오염과 부하 등으로 인해 자정 능력을 상실하여 수질오염이 날로 심화되고 있는 실정이다. 수질오염이 악화일로에 있는 낙동강의 수질개선을 위해서는 질소, 인 등의 영양염류를 제거할 수 있는 고도처리 공정의 도입이 절실히 요구된다. 이러한 고도처리방법 중 활성탄 여과법은 활성탄 다공성에 의해 수중의 각종 유해물질들이 활성탄에 잘 흡착되므로 기존의 급속여과법에서는 제거되지 않는 용해성 유기물, 미량 유기화합물, 암모니아성 질소, 철, 망간, 이취미 원인 물질, 소독 부산물 등의 제거에 매우 효과적이어서 구미 각국에서도 고도정수처리에 많이 이용하고 있다¹⁾. 또한 입상활성탄(granular activated carbon; GAC) 공정에서 GAC 파과점을 지나 지속적으로 운전한 결과, GAC 표면에 부착된 미생물의 응집체(aggregation)에 의한 생물학적 분해 작용으로 인하여 용존유기탄소(dissolved organic

carbon; DOC)가 제거된다는 보고가 알려져 있다²⁾. 이것을 생물활성탄 (biological activated carbon; BAC) 공정이라고 하며, 입상활성탄에 의한 유기물의 흡착 이외에 미생물의 생물학적 작용을 조합한 BAC 처리공정이 현재 전세계적으로 널리 이용되고 있다³⁾. BAC의 입자 표면은 세균이 부착하는데 아주 적절하고 또한 원수에는 세균의 영양분이 될 수 있는 각종 유기 및 무기물질이 포함되어 있어 세균의 번식을 가능하게 한다. 세균은 활성탄의 macro pore(500Å 이상)에 대부분 부착되며 이곳에서 효소를 생산하며 이 효소들은 micro pore(20Å 이하)에도 쉽게 확산되어 흡착된 기질과 반응하여 각종 유기물들을 분해하는 등 활성탄의 흡착 능력을 재생시키는 역할도 한다⁴⁾. 지금까지 BAC내 세균 활성을 측정하는 방법에는 대부분 간접 측정 즉 산소소비량, 특정 BDOC(biodegradable dissolved organic carbon)와 NBDOC(non biodegradable dissolved organic carbon) 제거율, DOC 제거율 등을 이용하여 왔으나, 최근에는

acridine orange를 이용한 미생물의 직접계수 및 세균 생체량 측정, radio-labeled tracer를 이용한 세균 생산력 측정 등이 사용되며 이중 직접 측정법이 더욱 정확하고 민감하다고 알려져 있다⁵⁾.

따라서 본 연구에서는 현재 선진국들에서 널리 활용되고 있는 이러한 BAC 처리 공정을 pilot plant 규모로 만든 후, 낙동강 하류의 원수를 사용하여 운전하면서 직접 측정법을 이용하여 입상활성탄내에 부착하여 서식하고 있는 세균량 및 생산력 측정, 부착세균들의 분포 상태 등을 조사하여 상수처리 효과를 평가하는데 기초자료로 활용하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. Pilot plant 장치

본 연구에 이용된 Pilot plant 실험장치는 기존 급속여과 시스템에서 전 염소처리 공정이 생략되었고, 오존의 전, 후처리와 BAC 공정을 부가한 시스템으로 실험하였으며(Fig. 1), BAC 운영조건은 Table 1과 같다. 원수는 낙동강 하류지점인 매리취수장의 표층수를 사용하였고 응집제로는 PSOM(Polyaluminum Sulfate Organic Magnesium)을 사용하였다. 또한 본 실험장치의 입상활성탄 재질은 야자계, 목탄계, 석탄계이며 여과층의 깊이는 2.5m이고 이들 입상활성탄의 물성치는 Table 2와 같다.

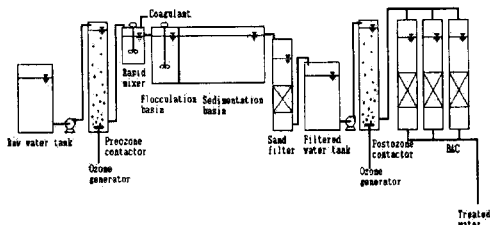


Fig. 1. Schematic diagram of the pilot plant apparatus for water treatment using biological activated carbons.

Table 1. Operating conditions of water treatment process using biological activated carbons

| Parameter | Operating conditions |
|-----------------------|----------------------|
| EBCT(min) | 12 |
| LV(m/h) | 10 |
| Bed depth(m) | 2.5 |
| Backwashing time(min) | 19 |
| Expansion rate(%) | 40 |
| Pre-Ozone dose(mg/ℓ) | 1 |
| Post-Ozone dose(mg/ℓ) | 2 |

Table 2. Specification of granular activated carbons

| Item | Properties | | |
|--|------------|------|------|
| | Coconut | Coal | Wood |
| Apparent density(g/cm ³) | 0.47 | 0.43 | 0.23 |
| Hardness number(%) | 99 | 98 | - |
| Iodine value(mg/g) | 1200 | 1050 | 950 |
| MB adsorption(mℓ/g) | 245 | 256 | 250 |
| Residual material after mesh (8 x 32 mesh) | 99 | 99.5 | 98 |
| Specific surface area(m ² /g) | 1230 | 1100 | 1611 |
| Total pore volume(cm ³ /g) | 0.54 | 0.61 | 1.21 |
| Mean pore radius(Å) | 18 | 23 | 28 |

2.2. 정수공정별 수질조사 및 기간

정수공정별에 따른 수질조사는 6단계 즉 원수, 전 오존 처리조, 침전조, 여과 수조, 후 오존 처리조, BAC 여과수(야자계, 목탄계, 석탄계 각각의 여과수)이며, 조사기간은 1년(1999. 1 ~ 1999. 12)으로 하였다. 조사주기는 수질인자 항목의 경우 주 1회, 부착세균의 생체량 및 생산력 등은 월 1회 간격으로 조사하였다.

2.3. 수질조사 항목 및 방법

생물활성탄 공정에 따른 수질조사 항목의 모든 분석은 Standard method⁶⁾와 일본 상수도 시험법⁷⁾에 따랐으며, 이에 대한 분석항목 및 방법은 Table 3과 같다.

Table 3. Analytical method and instrument

| Item | Methods and instrument |
|--------------------|--|
| pH | pH meter(Orion model 260) |
| Turbidity | Turbidimeter(HACH 2100 AN) |
| UV ₂₅₄ | UV-Vis spectrophotometer(HP 8452 A) |
| NH ₄ -N | Indophenol method |
| KMnO ₄ | Acid titration method |
| THMFP | Head space method(Gas chromatography HD 5890 SERIES 2) |
| Mn, Fe, Al | ICP(Jobin Yvon 50P) |
| DOC | TOC analyzer(Sievers 800) |

2.4. 세균 생체량 측정

중속영양세균의 생체량(biomass)은 BAC의 습중량 1g을 건조시킨 후 초음파 처리(3min, 37 kHz, 190 W)하여 세균을 탈리시킨 다음 R₂A agar(Difco) 평판배지에 시료 1ml를 단계적으로 희석 도말한 후 25℃ 배양기에서 2주간 배양하여 습중량 1g당 colony형성 세균수로 표시하였다^{8,9)}. 또한 전체 세균을 직접 계수하기 위하여는 BAC의 습중량 1g을 건조시킨 후 초음파 처리(3min, 37 kHz, 190W)하여 세균을 탈리시킨 시료 1ml를 취하여 sudan

black으로 미리 염색된 polycarbonate 막(0.2 μ m)에 여과한 다음 0.05% acridine orange로 5분간 염색하여 형광현미경(Olympus, BH-2)으로 총세균수를 측정하였다.

2.5. 세균 생산력

BAC에 부착된 세균의 생산력 (bacterial production)은 ³H-thymidine이 DNA에 들어가는 정도로 구하였다¹⁰⁾. 먼저 건조시킨 BAC 습중량 1g을 초음파 처리하여 세균을 탈리시킨 시료 2ml에 200nM [methyl-³H] thymidine 용액 (specific activity: 40~50 Ci/mmol) 1ml와 200nM cold thymidine 용액 1ml를 첨가한 후 교반 배양기에서 in situ 조건으로 4시간 배양하였다. ATP 용액 (25g/l) 100 μ l와 1N NaOH 2ml를 첨가하여 100 °C에서 1시간 동안 가열하여 DNA를 추출한 후 잠시 냉각시키고 3000 rpm에서 10분간 원심분리하였다. 상등액 1ml에 ice-cold 10% trichloroacetic acid 5ml를 첨가하여 반응을 종료시키고 15분 정도 냉각시킨 후 0.2 μ m membrane filter로 여과하였다. 이 여지를 vial에 넣고 건조시킨 후 ethyl acetate 1ml와 10ml의 scintillation cocktail (Aquasol-2, Packard Co.)을 넣어 liquid scintillation analyzer (HP, 2500 TR/AB)로 방사선량을 측정하였다. 얻어진 DPM(disintegrate per minute) 값으로부터 Parsons *et al*¹¹⁾에 의한 식을 이용하여 incorporation된 thymidine의 양을 계산하였다. 생성 세균수는 전환계수 2.0×10^{18} cells/mole thymidine을 이용하였고¹²⁾, 탄소량으로의 전환에는 2.0×10^{-13} g-C/ μ m³의 세균 체적당 탄소량과 평균 세포체적인 0.0865 μ m³/cell을 곱한 1.73×10^{-14} g-C/cell의 전환율을 사용하였다.

2.6. 세균 동정

세균의 동정은 형성된 colony의 형태학적 특징을 관찰하여 서로 다른 colony를 R₂A 배지에 획선 도말 하여 순수 분리하였다. 순수 분리된 세균은 API 20 NE Kit (bioMerieux, France) 및 생화학적 실험을 실시하고 Bergey's manual의 분류체계에 따라 속 혹은 종명까지 분류 동정하였다¹³⁾.

2.7. 주사전자현미경 관찰

생물활성탄 입자 표면에 부착된 세균들을 관찰하기 위한 주사전자현미경(scanning electron microscope; SEM) 분석은 건조시킨 BAC 시료에 10ml의 2.5% glutaraldehyde 용액 (in 0.1 M sodium cacodylate buffer; pH 6.8)을 첨가하여 4 °C에서 2시간동안 전 고정한 후 0.1 M sodium cacodylate buffer (pH 6.8) 10ml로 전 고정과 같은 조건에서 세정하였다. 1% OsO₄ 용액 (in 0.1M sodium cacodylate buffer; pH 6.8) 5ml를 첨가하여 후 고정시킨 후 다시 0.1 M sodium cacodylate buffer (pH 6.8) 10ml로 실온에서 세정하였다. 그리고 각 10ml의 30, 50, 70, 80, 90, 95, 100% ethanol로 각각의 농도에서 10분간씩 탈수시킨 후⁴⁾, 한국화학연구소에 SEM 촬영을 의뢰하여 BAC 입자에 부착된 세균을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 정수공정별 수질변화

낙동강 하류의 매리취수장 원수를 사용하여 BAC공정을 거치는 동안 각 정수 단계별 수질변화를 매주 측정하여 1년 동안의 평균치를 분석한 결과는 Table 4와 같다. 원수가 전오존 처리조에서 침전조, 여과조를 거쳐 후오존 처리 공정 단계에 이르면, 이미 탁도, KMnO₄ 소비량, 금속성 양이온 함량 등은 각각 원수에 비해 97.6%, 72.9%, 71.7%의 제거효율을 보였으나 pH, NH₄-N 등은 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 마지막 단계인 입상활성탄 재질에 따른 BAC 유출수는 후 오존처리 단계에서까지 제거되지 않았던 NH₄-N 등을 포함한 모든 항목들이 거의 제거됨을 알 수 있었다. 또한 BAC 유출수의 종속영양세균은 평균 $1.5 \sim 3.0 \times 10^4$ CFU/ml로 Servais 등⁵⁾이 조사한 $4.1 \times 10^4 \sim 1.5 \times 10^7$ CFU/ml 보다 낮은 세균 유출을 보여 정수처리 공정은 적절하게 운영되어지는 것으로 보여진다. 수질분석결과 NH₄-N을 제외한 모든 항목에서 석탄계 활성탄을 사용한 BAC를 거친 수질이 다른 활성탄을 사용한 BAC 보다 양호한 것으로 나타나 석탄계 BAC가 유입되는 유기물질을 적절하게 흡착과 생분해에 의하여 제거하는 것으로 나타났다. 그러나 이들의 수질조사 항목별 분석치의 절대값은 원수의 상황에 따라 차이가 날수 있으며, 낙동강 원수의 경우 식물플랑크톤에 의한 부영양화 즉 하계의 *Microcystis aeruginosa*, 동계의 *Stephanodiscus hantzschii* 등에 의한 대량 증식으로 pH, NH₄-N, BOD 등의 농도가 계절에 따라 다르게 나타나는 것으로 보고된 바 있다¹⁴⁾. 본 연구의 조사기간 중에는 빈번한 경우에 의한 조류 농도의 감소 등으로 인하여 예년에 비해 원수의 수질은 전반적으로 양호한 것으로 나타났다.

3.2. BAC의 유기물 제거 거동

수중에 존재하는 용존 유기탄소 즉 DOC는 주로 수계에 존재하는 미생물의 물질대사작용에 의하여 많이 제거되므로¹⁵⁾ 수중 미생물이 많이 부착 서식하고 있는 BAC에 의해 어느 정도 제거되는지를 조사하였다. 조사기간 동안 BAC 유입수인 후오존수의 평균 DOC는 1.57mg/l 이었으며 BAC의 DOC에 대한 제거율은 대략 20% 전후로 비슷하게 나타났으나 석탄계 BAC를 거친 유출수가 약 23.0%로 다른 BAC 유출수 보다 약간 높은 것으로 나타났다(Table 5). 대부분의 용존 유기물은 난분해성 물질이라 생각되며 입자성 유기물보다 5~10배 풍부하게 존재한다고 알려져 있으며¹⁶⁾, 용존 유기물중 생분해 가능한 유기탄소는 주로 수중의 식물플랑크톤에 의해 세포 밖으로 배출되어진 것과 오존 등에 의해 부식물질이 분해되어 생성되어진 것 등이 있다¹⁷⁾.

BAC 공정에 있어서 유기물의 초기 흡착능과 운전기간이 경과함에 따라 생분해능의 증가 등을 파악하는 것은 중요하다. 일반적으로 활성탄의 유기물 흡착 능력은 Freundlich 등온흡착 실험결과 흡착계수 1/n의 값이 2보다 큰 값을 보이면 등온흡착선의 기울기가 크게 되어 활성탄을 증가시켜도 흡착물질이 잘 제거되지 않으며, 1/n

의 값이 0.1~0.5일 때 흡착되기 쉽고 이 범위내에서는 K값이 클수록 효과적인 것으로 알려져 있다¹⁸⁾. 박(1997)¹⁹⁾의 연구에 따르면 야자계와 석탄계 BAC는 1/n의 값은 비슷하고 석탄계의 K값이 더 크므로 DOC는 석탄계에 가장 쉽게 흡착되고 반면에 목탄계는 DOC 흡착이 효과적이지 않음을 밝힌 바 있으며, Fig 2-1은 본 실험에 이용된 Pilot plant의 운전초기 14개월 간의 DOC 파과곡선을 나타낸 것으로 생분해작용이 활성화되기 전인 초기 흡착작용에 의한 DOC 평균 제거율을 조사한 결과 석탄계 52%, 야자계 36%, 목탄계 24%로 나타나는 박(1997)¹⁹⁾의 연구결과에 부합되는 것으로 판단된다. 그리고 Fig 2-2는 본 실험기간 동안의 BAC 운전 경과시간에 따른 재질별 DOC 파과곡선을 나타낸 것으로 $C_e / C_0 = a(1 - e^{-bx}) + c$ 의 식을 이용하여 각각의 DOC 파과곡선을 그려보면 회귀 곡선식의 어떤 평형상태를 발견할 수 있는데 이 부분을 정상상태라고 하며 그 의미는 생물학적 작용에 의해 대부분의 유기물이 제거되는 단계라고 말할 수 있다. 따라서 반응조가 일단 정상상태에 도달하면 흡착에 의한 유기물의 제거는 미미하고 대부분이 생분해에 의해 제거되는 것으로 볼 수 있다. 본 연구의 경우, 운전기간 말기(3년) 부분에 해당되는 BAC 공정으로서 3개의 활성탄 모두 정상상태에 수렴하는 것으로 나타나 생분해에 의한 DOC 제거율은 비슷한 것으로 판단되어진다(Fig 2-2).

Table 4. Water quality from each step of water treatment process using biological activated carbons

| step parameter | | | | | | 6 | | |
|---|-------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | A | B | C |
| pH | 7.6 (±0.3) | 7.7 (±0.3) | 7.1 (±0.2) | 7.2 (±0.2) | 7.5 (±0.2) | 7.2 (±0.3) | 7.1 (±0.3) | 7.3 (±0.2) |
| Turbidity (NTU) | 16.32 (±16.83) | 14.46 (±15.46) | 2.38 (±3.20) | 0.34 (±0.14) | 0.35 (±0.25) | 0.20 (±0.07) | 0.20 (±0.08) | 0.19 (±0.06) |
| UV ₂₅₄ (m ⁻¹) | 0.054 (±0.016) | 0.043 (±0.0115) | 0.032 (±0.0090) | 0.0244 (±0.0322) | 0.0107 (±0.0046) | 0.0081 (±0.0031) | 0.002 (±0.0041) | 0.0103 (±0.0043) |
| NH ₄ -N (mg/l) | 0.06 (±0.11) | 0.06 (±0.12) | 0.07 (±0.20) | 0.04 (±0.16) | 0.03 (±0.10) | 0.02 (±0.09) | 0.02 (±0.09) | N |
| KMnO ₄ (mg/l) | 9.4 (±2.8) | 7.4 (±2.7) | 3.8 (±1.2) | 2.9 (±1.1) | 2.5 (±0.9) | 1.4 (±0.5) | 1.6 (±0.7) | 1.7 (±0.8) |
| THMFP (μg/l) | 65.5 (±22.9) | 45.6 (±17.4) | 26.1 (±9.6) | 21.6 (±8.5) | 18.1 (±7.4) | 11.4 (±5.3) | 13.6 (±6.3) | 13.2 (±5.9) |
| Mn (mg/l) | 0.01 (±0.01) | 0.01 (±0.01) | N | N | N | N | N | N |
| Fe (mg/l) | 0.20 (±0.26) | 0.24 (±0.30) | 0.06 (±0.20) | 0.02 (±0.06) | 0.01 (±0.04) | 0.01 (±0.02) | N | 0.01 (±0.02) |
| Al (mg/l) | 0.32 (±0.34) | 0.39 (±0.39) | 0.21 (±0.19) | 0.05 (±0.06) | 0.05 (±0.04) | 0.01 (±0.02) | 0.01 (±0.01) | 0.02 (±0.02) |
| Bacteria (CFU/ml) | 32,000 | 2,500 | 21,000 | 28,500 | 500 | 15,000 | 30,000 | 22,000 |

* Values are expressed as average from weekly measurements during one year. Step 1 is a water sample from raw water tank. Step 2 from pre-O₃ contactor. Step 3 from sedimentation basin. Step 4 from filtered water tank. Step 5 from post-O₃ contactor. Step 6A from coal-based BAC effluent. Step 6B from coconut-based BAC effluent. Step 6C from wood-based BAC effluent.

Table 5. Removal efficiency of dissolved organic carbon in different BAC types

| | DOC(mg/l) | Efficiency of DOC removal (%) |
|---------------------------|-------------|-------------------------------------|
| Post-O ₃ water | 1.57(±0.53) | - |
| Coal-based BAC | 1.22(±0.47) | 23.0(±12.6) |
| Coconut-based BAC | 1.28(±0.42) | 18.7(±9.7) |
| Wood-based BAC | 1.30(±0.53) | 18.9(±21.0) |

* Values are expressed as average from weekly measurements during one year.

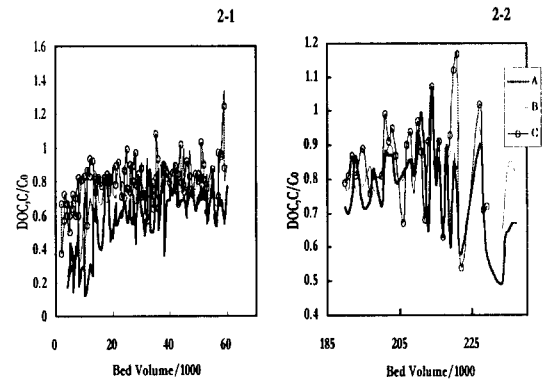


Fig. 2 DOC breakthrough curve for BAC
A, coal-based BAC; B, coconut-based BAC;
C, wood-based BAC.

3.3. BAC의 세균 생체량 및 생산력

BAC에 부착된 세균의 생체량은 전반적으로 BAC 여과 표층에서 0.6~98 × 10⁷ CFU/g, 저층에서 0.5~3.6 × 10⁷ CFU/g 범위를 보였는데 (Table 6), 이는 김(1995)²⁰⁾이 조사한 10⁶~10⁷ CFU/g 보다는 약간 높은 것으로 나타났다. 활성탄 종류별로는 표층을 기준으로 하여 석탄계 BAC가 9.8 × 10⁸ CFU/g으로 가장 세균 생체량이 많았으며, 다음으로 목탄계, 야자계 순으로 나타났다. 한편 acridine orange를 이용한 세균의 직접 계수에 의하면 총 세균 생체량은 표층에서 5.3~16 × 10⁸ cells/g의 범위를 보였다. 그리고 세균 생산력은 표층에서 0.7~7.1mg-C/m²h, 저층에서 0.3~5.7mg-C/m²h로 나타나, Servais 등⁵⁾ (1991)이 조사한 20~60mg-C/m²h 보다는 낮은 경향을 보였다⁵⁾. 활성탄 종류별로는 석탄계 BAC가 최고 7.1mg-C/m²h의 활성을 보였다. 세균의 생체량과 생산력에 대한 실험 결과로 볼때 세균은 주로 BAC 여과표층에 더 많이 분포하고 있음을 알 수 있었고, 계절별로는 모두 하계에 높게 나타나 수온이 높으면 세균의 활성도 역시 높은 것으로 나타났다. BAC 여과 표층의 세균 생체량과 생산력의 상관관계를 조사한 결과

는 Fig. 3과 같았다. 야자계 및 석탄계 BAC의 경우는 각각 0.80 및 0.55의 비교적 높은 상관계수를 보였으나, 목탄계 BAC는 낮은 상관계수(0.23)를 보였다. 활성탄 종류별로 이러한 차이가 나는 주된 이유는 세균의 부착과 증식을 하는데 필요한 영양물인 수중의 유기물질이 활성탄에 흡착하는 비율이 다르기 때문인 것으로 추정된다.

Table 6. Bacterial biomass and bacterial production in different BAC types

| | | Bacteria biomass (CFU/g) | Direct count (cells/g) | Bacterial production (mg-C/m ³ h) |
|-------------------|------------|--------------------------|------------------------|--|
| Coal-based BAC | Upper part | 3.7 × 10 ^x | 9.8 × 10 ^x | 3.5 |
| | Lower part | 3.0 × 10 ^y | 1.0 × 10 ^y | 1.5 |
| Coconut-based BAC | Upper part | 3.6 × 10 ^x | 8.9 × 10 ^x | 3.2 |
| | Lower part | 2.3 × 10 ^y | 8.7 × 10 ^y | 0.9 |
| Wood-based BAC | Upper part | 2.5 × 10 ^x | 9.1 × 10 ^x | 3.2 |
| | Lower part | 1.2 × 10 ^y | 0.5 × 10 ^y | 1.0 |

* Values are expressed as average from monthly measurements during one year.

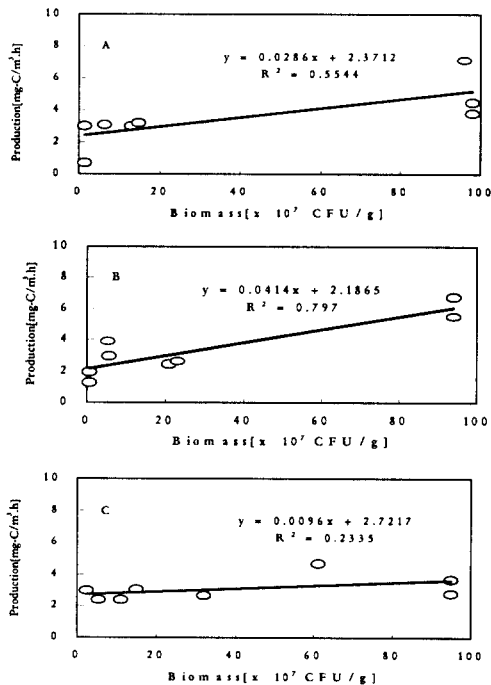


Fig. 3. Correlation between bacterial biomass and bacterial production. A, coal-based BAC; B, coconut-based BAC; C, wood-based BAC.

3.4. BAC의 부착세균 동정 및 SEM 분석

BAC 종류별로 부착된 세균들을 동정한 결과 모든 활성탄에서 *Pseudomonas*속이 평균 50.5%로 가장 많은 분포를 보였고 그 다음으로 *Flavobacterium*속 20.9%, *Alcaligenes*속 4.8%, *Acinetobacter*속 2.5%, *Aeromonas*속 2.2% 순으로 검출되었으며, 10%의 세균은 동정되지 않았다(Table 7). 이는 Stewart 등²¹⁾ (1990)이 조사한 연구결과 즉 생물활성탄에 부착된 세균으로는 주로 *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Acinetobacter*, *Aeromonas*, *Chromobacterium*속 등이 있는 것으로 알려진 결과와 비슷한 경향을 보였다. *Pseudomonas*속의 경우 야자계와 석탄계 BAC는 *Pseudomonas vesicularis*, 목탄계 BAC는 *Pseudomonas cepacia*가 우점종으로 나타났다. 이렇게 BAC 종류별로 부착세균의 우점종이 다른 이유는 활성탄의 조직 크기, 표면 조직, 유속율 등의 차이에 의해 세균이 활성탄에 부착할 수 있는 환경 조건이 다르기 때문인 것으로 판단된다. 또한 계절적으로는 주로 춘계와 하계에 *Pseudomonas cepacia*, 동계에는 *Pseudomonas vesicularis*가 많이 분포하였다(Table 8). 그리고 BAC 입자표면에 부착된 세균들의 분포를 주사현미경으로 관찰한 결과는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 세균이 활성탄 입자표면에 많이 부착되어 있었으며, 여과 저층보다 표층의 활성탄에 세균이 보다 많이 존재함을 확인할 수 있었다.

Table 7. Distribution of bacteria in different BAC types

| | Coal-base BAC | Coconut-based BAC | Wood-based BAC |
|---------------------------------------|---------------|-------------------|----------------|
| <i>Acinetobacter haemolyticus</i> | - | + | + |
| <i>Acinetobacter alcaligenes</i> | + | - | + |
| <i>Aeromonas hydrophila</i> | - | + | - |
| <i>Alcaligenes faecalis</i> | + | + | - |
| <i>Alcaligenes odorans</i> | - | + | - |
| <i>Flavobacterium breve</i> | + | + | + |
| <i>Flavobacterium indologenes</i> | + | + | + |
| <i>Flavobacterium meningosepticum</i> | - | + | - |
| <i>Pasteurella haemolytica</i> | + | + | + |
| <i>Pseudomonas vesicularis</i> | ++ | ++ | + |
| <i>Pseudomonas aureofaciens</i> | + | + | + |
| <i>Pseudomonas fluorescens</i> | + | + | - |
| <i>Pseudomonas cepacia</i> | + | + | ++ |

Presence of the bacteria is detected in 1999. Symbol "++" is expressed as a dominant species. Symbol "+" is expressed as a detectable species. Symbol "-" is expressed as a non-detectable species.

Table 8. Seasonal distribution of bacteria in coal-based BAC

| | Mar. 5 | Jun. 4 | Oct. 4 | Dec. 10 |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|---------|
| <i>Acinetobacter haemolyticus</i> | + | + | - | - |
| <i>Acinetobacter alcaligenes</i> | + | + | - | - |
| <i>Aeromonas hydrophila</i> | + | - | + | + |
| <i>Alcaligenes faecalis</i> | + | + | + | - |
| <i>Alcaligenes odorans</i> | + | - | - | - |
| <i>Flavobacterium breve</i> | + | + | + | + |
| <i>Flavobacterium indolgenes</i> | - | + | + | + |
| <i>Flavobacterium meningosepticum</i> | + | - | + | - |
| <i>Pasteurella haemolytica</i> | + | + | + | - |
| <i>Pseudomonas vesicularis</i> | + | + | + | ++ |
| <i>Pseudomonas aureofaciens</i> | + | + | - | - |
| <i>Pseudomonas fluorescens</i> | + | + | + | - |
| <i>Pseudomonas cepacia</i> | ++ | ++ | + | + |

* Presence of the bacteria is detected in 1999. Symbol "++" is expressed as a dominant species. Symbol "+" is expressed as a detectable species. Symbol "-" is expressed as a non-detectable species.

질변화를 비교한 결과 DOC를 포함한 9개 조사항목에서는 석탄계 BAC에서, 그리고 NH₄-N 제거에서는 목탄계 BAC에서 양호한 것으로 나타났다. 또한 석탄계 BAC에서의 세균 생체량과 생산력은 각각 9.8 × 10⁸ CFU/g 및 7.1mg-C/m²h로서의 높은 세균 활성도를 보였다. 활성탄 부착 세균으로는 전반적으로 *Pseudomonas*속, *Flavobacterium*속, *Alcaligenes*속, *Acinetobacter*속, *Aeromonas*속 순으로 검출되었다. *Pseudomonas*속 중에서는 야자계와 석탄계 BAC에서 *Pseudomonas vesicularis*, 목탄계 BAC에서는 *Pseudomonas cepacia*가 우점종으로 분포하였다.

참 고 문 헌

- 1) 박중연. 1994. 수돗물의 미생물학. 대한상수도학회. 서울. 109~110
- 2) H. Bach, S. Tarre and M. Green. 1998. Post treatment of groundwater denitrification fluidized bed reactor effluents to achieve drinking water quality. *J. Industrial Microbiol. & Biotechn.* 20, 35 4~359
- 3) 류동춘. 1997. 오존 및 입상활성탄을 이용한 정수공정의 최적화. 부경대학교 환경공학 박사학위 논문
- 4) Rigway, H. F. and B. H. Olsan. 1981. Scanning electron microscope evidence for bacterial colonization of a drinking water distribution system. *Appl. Environ. Microbiol.*, 41, 274~287
- 5) Servais, P., G. Billen, C. Ventresque and G. P. Bablon. 1991. Microbial activity in GAC filters at



Fig. 4. Scanning electron micrograph of bacteria attached on particles of BAC. The carbon particles were taken from upper part (A) and lower part (B) of coal-based BAC reactor. Bars; 5µm.

4. 결 론

낙동강 하류의 매리취수장 원수를 사용하여 생물활성탄에 의한 pilot plant 공정을 운전하면서 수질인자들의 변화와 세균분포 특성을 조사하였다. BAC 유출수의 수

the Choisy-Roi treatment plant. *J. AWWA*, 75, 62~68

- 6) APHA. 1992. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA-AWWA-WPCF, New York.

- 7) 日本水道協會. 1985. 日本上水道試験方法. 630~637
- 8) Rice, R. G. and C. M. Robson. 1982. Biological Activated Carbon. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida
- 9) 長澤. 1990. 粒狀活性炭表層における微生物の動向. 第41回 全國水道研究發表會 proceedings. 1~3
- 10) Fuhrman, J. A. and F. Azam. 1982. Thymidine incorporation as a measure of heterotrophic bacterio-plankton production in marine surface waters: Evaluation and field results. *Mar. Biol.*, 66, 109~120
- 11) Parsons, T. R., Y. Maita and C. M. Lalli. 1984. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Pergamon, New York
- 12) Bell, R. T., G. M. Ahlgren and I. Ahlgren. 1983. Estimating bacterioplankton production by the [³H]thymidine incorporation in a eutrophic Swedish Lake. *Appl. Environ. Microbiol.*, 45, 1709~1721
- 13) Krieg, N. R and J. G Holt. 1984. *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*. Williams & Wilins. Baltimore
- 14) 박흥기, 정종문, 박재립, 홍용기. 1999. 낙동강 하류에서 식물플랑크톤과 수질변화와의 관계. *한국환경과학회지*. 8. 101~106
- 15) Aiken, G. R., D. M. McKnight, R. L. Wershaw and P. MacCarthy. 1987. *Humic Substances in Soil, Sediment and Water*. Wiley-Interscience, New York
- 16) Chrzanowski, T. H. and J.G. Hubbard. 1988. Primary and bacterial secondary production in a south-western reservoir. *Appl. Environ. Microbiol.*, 54, 661-669
- 17) 허준무, 박종안, 손부순, 장봉기, 이종화. 1999. 상수원수에 따른 용존 유기물의 특성 평가. *한국환경과학회지*. 8. 337~347
- 18) 北川陸夫. 1990. 活性炭水處理技術と管理. 日本工業新聞社. 74
- 19) 박은주. 1997. 생물활성탄 Pilot-plant 정수처리 공정별 분자량 분포변화. 부산대학교 환경공학과 석사학위 논문
- 20) 金周永. 1995. 生物活性炭による水道原水の高度處理に関する研究. 日本 東北大學校 博士學位論文
- 21) Stewart, M. H., R. L. Wolfe and E. G. Means. 1990. Assessment of bacteriological activity in carbon treatment of drinking water. *Appl. Environ. Microbiol.*, 56, 3822 ~3829