

고도정수공정에서 오염물질 제거효율 변화특성과 BAC조의 역세척에 따른 영향

박수이[†] · 이상봉* · 신상민** · 진창재 · 김창원***

울산광역시 상수도사업본부 수질연구소 · *(주)코델

울산광역시 상수도사업본부 천상정수사업소 · *부산대학교 사회환경시스템공학부

(2007년 10월 31일 접수, 2007년 12월 21일 채택)

Variation of Pollutant Removal Efficiency and Backwashing Effect of BAC Basin in Advanced Water Treatment Processes

Sooyee Park[†] · Sangbong Lee* · Sangmin Sin** · Changjea Jun · Changwon Kim***

Water Quality Research Institute, Waterworks Headquarter, Ulsan · *Kodell, Co., LTD.

**Cheonsang Water Treatment Plant, Waterworks Headquarter, Ulsan

***School of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

ABSTRACT : In this paper, the property of influent water and variations of removal efficiencies in each unit processes were studied based on the experiment data from the advanced water treatment plant in a city of Korea. The microbial species in the biological activated carbon(BAC) after backwashing of activated carbon filtration tank(ACFT) were also identified. The property and the removal efficiencies were evaluated by considering 8-9 items. The variations of 4 items were investigated from the influent and effluent of ACFT. SEM recording were conducted on BAC samples before and after backwashing. And the existence of attached microorganisms were identified through HPC(Heterotrophic Plate Counter) investigation. For the property of influent water, the concentrations of most items were maintained in the constant ranges, some items had seasonal properties. For the removal efficiencies, there were some items showing similar monthly-pattern and increasing with time, other items decreasing at the ozone contactor. Through these investigations, it was possible to distinguish the target items, which were removed by the advanced processes. The existence of microorganisms in ACFT could be predicted based on the variation curve of NH₃-N, and this fact were proved by SEM and HPC.

Key Words : Advanced Water Treatment, Activated Carbon, BAC, Removal Efficiency, Backwashing

요약 : 본 연구에서는 국내 한 정수장의 고도정수처리공정의 실험분석 자료를 바탕으로 정수장으로 유입되는 원수의 수질특성과 처리공정별 오염물질 제거효율의 변화특성을 연구하였고, 활성탄여과조의 역세척에 따른 BAC 내의 미생물 거동을 추적하였다. KMnO₄ 소비량 등 8~9개의 주요 항목을 중심으로 제거특성이 연구되었고, 활성탄여과조의 유입·유출수에 대하여 NH₃-N 등 4 항목의 농도변화를 추적하였다. 역세척 전·후의 활성탄 시료의 SEM 사진을 촬영하였고, 미생물 생체량(HPC) 조사를 통해 활성탄 부착미생물의 존재를 확인하고자 하였다. 유입원수의 특성은 대부분의 조사항목이 일정한 농도범위로 유입되었고 그 중 계절적 일관성을 갖는 항목이 있었다. 공정별 제거효율 변화특성은 월별 일정한 유형을 갖는 것, 공정진행에 따라 지속적으로 제거되는 것, 오존접촉조에서 제거효율이 떨어지는 것 등으로 분류되었고, 현재 운전되고 있는 고도처리공정에서 제거되는 주요 대상 오염물질을 구별할 수 있었다. NH₃-N의 농도변화 곡선으로 활성탄여과조 내에 미생물이 존재함을 예측하여 SEM 사진과 HPC 측정으로 이를 확인하였다.

주제어 : 고도정수처리, 활성탄, BAC, 제거효율, 역세척

1. 서론

경제개발로 인한 심각한 수질오염은 국내에서도 피할 수 없는 문제로 대두되었다. 특히 국내 주요 4대강 중의 하나인 낙동강은 영남지역 대부분에 걸쳐 원수를 공급하고 있는데 이 지역에 집중된 개발로 낙동강은 심각한 환경오염에 노출되어 생물학적 산소요구량(BOD)이 지속적으로 증가하고 있다.¹⁾ 이러한 산업화·도시화의 진행으로 말미암

아 인체에 악영향을 미치는 미량오염물질이 다양화되는 동시에 새로운 화학물질도 지속적인 출현하였고, 원수의 부영양화가 수시로 발생하는 등 원수 수질은 크게 호전되지 못하고 있다. 더욱이 이전의 정수처리는 급속모래여과를 중심으로 한 응집-침전-여과과정을 거치는 물리·화학적 처리 위주였는데 이는 원수 중의 입자상물질 제거에 주목적이 있기 때문에 원수 수질이 나쁠 때는 그 처리가 어렵다. 따라서 입자상물질 제거 중심의 처리방식에서 진일보하여 수돗물의 맛, 냄새, ABS(alkylbenzene sulfonate)의 제거, THMs(trihalomethanes)의 생성 억제, TOC(total organic carbon) 및 DOC(dissolved organic carbon)의 제거 등이 큰

[†] Corresponding author

E-mail: psy8515@hanmail.net

Tel: 052-227-2312

Fax: 052-227-2311

관심사가 되고 있었다.^{2,3)} 그 결과 기존의 처리방법에 새로운 정수처리공정이 하나씩 추가되었는데 이것이 「고도정수처리공정(advanced water treatment processes)」이다. 1986년 GAC(granule activated carbon) 여과공정 도입을 시작으로 1988년에 오존공정, 1994년부터는 비로소 고도처리공정의 설치가 낙동강 지역을 중심으로 광범위하게 보급되기 시작하였다.¹⁾ 한편 GAC 공정에서 한 걸음 더 나아가 BAC(biological activated carbon)공정이 부각되기 시작하였는데 이것은 통상 일반적인 정수처리공정인 모래여과지 후단에 오존접촉조와 활성탄조를 설치하여 상수를 처리하는 공법이다. 오존접촉으로 유기물을 분해하기 쉬운 상태로 변화시킨 후 미생물이 성장된 활성탄에서 흡착과 분해를 병행하는 것이다. 이 공법은 생물분해성이 향상되어 활성탄의 수명을 연장시킬 수 있는 특징이 있어 유럽뿐만 아니라 전 세계에 걸쳐 고도정수공정을 운전 중인 정수장에서 가장 널리 사용되고 있다.^{4~7)}

그러나 국내 정수장에서는 도입 당시 체계적인 연구 없이 단기간에 획일적으로 도입되어 시설 도입 목적에 대한 비판적인 의견이 많았고 원수 수질특성에 맞는 최적화된 공정을 도입했다고 할 수 없었다.^{8,9)} 또한 운영기간은 오래 되었으나 시설 운영, 공정의 수질특성 등이 대부분 개별 연구자들에 의해 부분적으로 보고되었을 뿐 체계적인 조사나 분석이 이루어지지 못하고 있고,¹⁰⁾ 공정운영 및 유지관리, 진단기술에 대한 자료는 매우 적은 것이 사실이다.²⁾ 본 연구대상의 고도처리공정 역시 5여 년 전부터 도입·운영되고 있으나 숙련된 운전자의 경험적 지식에 의해 운전되는 경우가 많았고, 공정의 운영상태, 수질특성 등의 체계적이고 통합적인 연구는 다소 미흡하여 안정적 공정 운영에 대한 문제점을 안고 있다.

본 논문에서는 국내 C정수장의 고도정수처리공정의 설계자료와 수질측정 결과 등 몇 가지 인자를 바탕으로 유입 원수의 수질특성과 정수장의 처리공정별 오염물질 제거효율의 변화특성을 연구하였고, 역세적으로 인한 활성탄여과지 내의 오염물질 농도변화와 미생물 활동특성을 추적하여 현 정수장의 효율적인 운영과 향후 계획중인 타 지역의 고도정수처리시설 설계 및 운전에 도움을 주는 것에 그 목적을 두었다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사방법

본 연구의 대상은 국내 A시의 C정수장 고도정수처리공정으로서 낙동강(담에 일시 저류된 원수)을 주요 취수원으로

Table 1. Characteristics of water quality for source water (2004 ~ 2006)

| Item | Values |
|----------------------|----------------------|
| Temp.(°C) | 16(3 ~ 27) |
| pH | 7.6(6.8 ~ 9.4) |
| Turbidity(NTU) | 17.7(3.0 ~ 147.0) |
| Alkalinity(mg/L) | 34(10 ~ 60) |
| COD(mg/L) | 4.5(2.8 ~ 7.9) |
| SS(mg/L) | 12.8(2.4 ~ 52.0) |
| DO(mg/L) | 9.3(4.5 ~ 13.6) |
| Total Coliforms(MPN) | 269(2 ~ 3,000) |
| T-P(mg/L) | 0.050(0.009 ~ 0.182) |
| T-N(mg/L) | 1.562(0.275 ~ 3.670) |

로 사용하고 있다. Fig. 1은 본 정수장의 정수처리 공정으로서 고도정수처리기법을 적용하고 있으며, 시스템 구성은 전염소, 응집·침전, 모래여과, 후오존, 생물활성탄(BAC), 그리고 소독처리공정으로 설치되어 있다.

유입되는 원수의 수질특성과 처리공정별 제거효율의 변화특성을 연구하기 위하여 활성탄여과조의 활성탄이 교체되기 이전까지의 근래 3년간(2004~2006)의 수질측정 자료를 월별 평균치로 통계처리하였다. 정수공정구분은 원수(raw water), 침전수(sedimentation), 모래여과수(filtration), 오존처리수(ozonation), 활성탄여과수(GAC effluent) 등 5개의 단위공정으로 구분하였고, 정수장으로 유입되는 원수의 수질상태는 Table 1에 보인 바와 같이 환경부의 COD 환경기준(호소수)으로 5 mg/L 이하인 「보통(IV)등급」의 수질상태를 보였다.

유입원수의 특성 및 제거효율 변화특성의 평가대상 오염물질은 9항목(pH, 탁도, KMnO₄ 소비량, TOC, DOC, UV₂₅₄, THMFP(THM formation potential), 망간(Mn), 암모니아성질소(NH₃-N)과 8항목(pH 제외)을 중심으로 연구하였고 이 중 KMnO₄ 소비량, UV₂₅₄, TOC 및 DOC 등 4개 항목을 중점적으로 평가하였다. 보고서에 의하면 KMnO₄ 소비량, UV₂₅₄, DOC 등은 고도정수공정의 제거효율 평가에 주요 대상물질이 되고 있다.¹¹⁾

고도공정 중 오염물 저감에 결정적 영향을 미치는 활성탄여과공정의 역세척과 관련된 BAC조의 제거특성을 연구하기 위해 모래여과조, 오존접촉조, 그리고 활성탄여과조의 유출수를 채집하여 농도변화가 비교적 뚜렷한 4항목(탁도, TOC, DOC, NH₃-N)에 대해 평가하였고 BAC 상층부의 미생물의 거동을 추적하기 위해 SEM(scanning electron microscope) 사진 촬영과 HPC(heterotrophic plate counter)의 변화 상태를 분석하였다. 본 연구의 실험에 사용된 활성탄여과지의 시설제원은 Table 2와 같다.



Fig. 1. Schematic flow diagram of the target water treatment system.

Table 2. Specifications of activated carbon filtration tank

| Item | Data | |
|---------------------|---|-------------------|
| Number | 4 basin | |
| EBCT | 13.7 min(10 ~ 15 min) | |
| LV(linear velocity) | 10.9 m/hr(10 ~ 14 m/hr) | |
| BH(bed height) | 1.8 ~ 2.5 m | |
| Contact type | Downflow fixed-beds | |
| Size | W6.0 m × L10.0 m/basin | |
| Filter area | 240 m ² (60 m ² /basin) | |
| Under drains | Strainer(16Φ) | |
| Backwashing type | Air wash+Water wash | |
| Depth | 250 cm | |
| Activated carbon | Effective diameter | 1.68 ~ 0.42 mm |
| | Type/Specific gravity | Coal-based / 2.10 |
| Sand | Depth | 20 cm |
| | Effective diameter | 1.5 ~ 2.5 mm |

BAC 내의 미생물 분포 및 군집변화를 연구하는 방법으로는 배양적 방법과 비배양적 방법이 있는데 배양적 방법으로는 HPC(heterotrophic plate counter) 방법, 비배양적 방법으로는 DAPI 염색법과 in-situ hybridization 방법 등이 있으며,¹²⁾ 이 밖에 FISH법 등도 있다.¹³⁾ 본 연구에서 사용한 Camper에 의한 HPC 방법^{14,15)}은 국내에서 자주 사용되고 있는 배양적 방법으로서 활성탄에서 탈착한 박테리아가 다시 활성탄에 부착되는 것을 방지함과 동시에 미생물을 활성탄으로부터 탈착시키는데 뛰어난 방법으로 알려져 있고 고효율의 정확성을 나타낸다고 보고된 바 있다.^{16,17)}

2.2. 분석방법

유입원수의 수질특성 및 공정별 제거효율의 변화특성 연구를 위해 실제 정수장에 설치된 24시간 연속자동측정장치와 실험실의 분석기기를 병행하여 사용하였다. 탁도와 pH는 연속자동측정장치로부터 중앙제어실로 전송되는 측정자료이고, 그 측정기기는 pH가 HDM-136A, 탁도계는 TUF-100 모델이다. TOC와 DOC는 Persulfate-Ultraviolet Oxidation Method로 TOC analyzer(Seivers 820)를 사용하여 분석하였고 DOC와 UV₂₅₄ 분석에는 0.45 μm membrane 여과지로 여과한 후의 시료를 사용하였다(Standard Method). UV₂₅₄는 1 cm 길이의 석영 셀을 사용하였고, 분석 전에 시료를 pH 2로 낮추어 254 nm의 흡광도에서 측정하였고(Varian Cary 3C) 그 외의 항목은 국내의 「먹는물공정시험방법」에 준하여 실험하였다.

운전 중인 활성탄조의 역세척시 농도변화 상태를 추적하기 위해 운전기간동안 일정한 시간간격으로 시료를 채취하였다. Table 3은 실제공정에서 역세척을 실시할 때의 시료채취시간을 나타낸 것이다. 역세척수는 역세척 1시간 전부터 역세척 완료 후 100시간에 걸쳐 초기에는 1시간 간격, 그 이후로는 3, 5, 10시간씩 점차 시간간격을 늘리면서 채수하였고, 활성탄 시료는 역세척을 기준으로 1시

Table 3. Sampling time according to backwashing

| No. | Time(hr) | | Sampling | |
|-----|-------------|---------|---------------------------------|------------------|
| | Operation | Elapsed | Activated carbon effluent water | Activated carbon |
| 1 | -1 | -1 | ○ | ○ |
| 2 | Backwashing | 0 | ○ | ○ |
| 3 | | 1 | ○ | |
| 4 | | 3 | ○ | |
| 5 | | 5 | ○ | |
| 6 | | 5 | ○ | ○ |
| 7 | | 5 | ○ | |
| 8 | | 5 | ○ | |
| 9 | | 10 | ○ | ○ |
| 10 | | 10 | ○ | |
| 11 | | 10 | ○ | ○ |
| 12 | | 10 | ○ | |
| 13 | | 10 | ○ | |
| 14 | | 10 | ○ | |
| 15 | | 10 | ○ | ○ |

간 전, 완료 직후, 그리고 임의의 경과시간(9시간, 34시간, 54시간, 100시간) 등 총 6회에 걸쳐 활성탄조의 상부 10 ~ 15 cm 깊이에서 채취하였다. 본 정수장의 BAC조 내 역세척은 평상시 6일당 1회 정도의 일정한 주기로 운영되고 있었다.

활성탄 내의 미생물 생체량 조사를 위한 Camper의 방법은 Zwittergent 3-12, EGTA, Tris buffer와 Peptone의 4℃ buffer를 이용하여 16,000 rpm에서 탄소입자를 균질화하여 R2A agar로 미생물수를 계수하는 하는 방법이며 시료는 균질화하는 동안 4℃ 이하로 유지하여야 한다.^{14,15)}

3. 결과 및 고찰

3.1. 유입원수의 수질특성

정수장의 고도정수처리공정으로 유입되는 원수의 최근 3년간의 수질변화를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 보듯이 원수의 pH의 변화는 대체로 일정한 편이며 계절에 따라 달라지는 경향을 보였고, 대부분의 기간에 걸쳐 pH 6.8 ~ 7.8사이에서 유입되고 있지만 12~4월(겨울~초봄)에는 8.5~9.5로 증가하는데 이는 겨울철 가뭄과 조류에 의한 요인으로 보인다. 탁도는 대부분 약 3~20 NTU 사이에서 유입되고 있지만 계절에 따라 큰 폭으로 변화하고 변동 폭 또한 매년 달라지고 있다. 특히 7~8월과 10~11월에는 약 50~150 NTU로 크게 증가하는데 장마나 태풍의 영향에 의한 것임을 짐작할 수 있겠다. KMnO₄ 소비량 농도는 2~3월과 7~8월에 11~14 mg/L까지 증가하며 그 외에는 약 5~8 mg/L 사이에서 꾸준히 유입되고 있었다. TOC와 DOC 농도범위는 각각 0.8~4.1 mg/L, 0.6~3.7 mg/L이고 3~4월과 7~8월에 다소 높게 유입되는 경향을 보였다. UV₂₅₄의 변화는 전반적으로 일정한 경향을

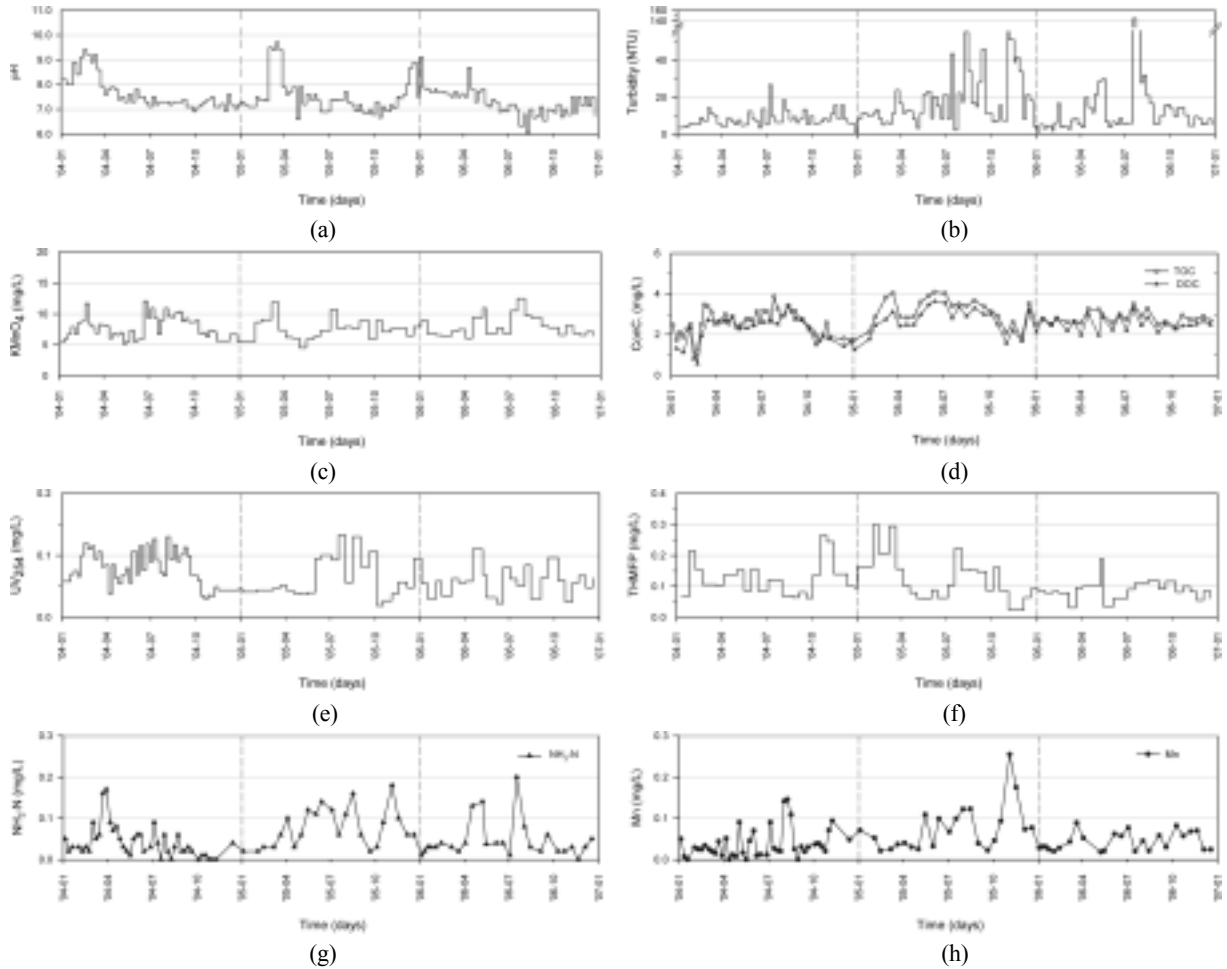


Fig. 2. Variations of water quality over the operation time(2004~2006) : (a) pH, (b) Turbidity, (c) KMnO₄ consumption, (d) TOC and DOC, (e) UV₂₅₄, (f) THMFP, (g) NH₃-N, (h) Mn.

보이지 않고 대체적으로 0.02~0.15 사이에서 유입되었으며, 특히 2004년과 2005년의 경우 장마철인 7~9월에 높게 나타나는 경향을 보였다. THMFP의 변화도 뚜렷한 계절적 일관성은 없이 간헐적으로 높은 농도를 보이나 대개 0.02~0.30 mg/L 범위로 유입되었고, Mn과 NH₃-N의 경우 역시 간헐적 높은 농도를 보이고 계절적 일관성 없이 약 0.00~0.30 mg/L 범위로 유입되었다.

3.2. 공정별 제거효율의 변화특성

Table 4는 활성탄 교체 직전의 운전기간(2004~2006) 동안 유입수 및 공정별 처리수의 KMnO₄ 소비량의 최대, 최소, 평균값을 나타낸 것이며, Fig. 3은 KMnO₄ 소비량의 시간에 따른 월별 제거효율과 처리단계별 제거효율의 변화 특성을 나타낸 그림이다. Fig. 3(a)의 하단 영역형은 월 평균 농도를, 상부의 꺾은 선형은 각 단위공정의 월 평균 처리효율을 시계열로 나타낸 것이며, Fig. 3(b)의 막대형은 각 연도별 평균 제거효율, 꺾은 선형은 활성탄 교체 이전까지의 3년간 평균 제거효율, 그리고 오차막대(error bar)는 월 평균값의 범위를 표시한 것이다. KMnO₄ 소비량의 제거효율은 2월을 제외하면 대체로 원수농도가 높은 여름철에

높아지는 산모양의 유형(pattern)을 보였다. 처리공정이 진행됨에 따라 지속적으로 제거되어 침전수, 모래여과수, 오존처리수, 활성탄여과수에서의 3년 평균 제거효율은 원수 대비 각각 60, 68, 73, 84%로 나타났고, 따라서 후단부의 고도처리공정에 의해서만 약 16(7~28)%가 더 제거되어 활성탄여과수에서 최종적으로 0.4~2.0 mg/L을 유지하였다.

Table 5와 Fig. 4는 각각 운전기간동안 유입수 및 공정별 처리수의 UV₂₅₄의 최대, 최소, 평균값과 시간에 따른 월별·처리단계별 제거효율 변화특성을 나타낸 것이다. UV₂₅₄ 제거효율도 KMnO₄ 소비량의 경향과 유사하게 원수농도가 높은 여름을 정점으로 처리효율이 하강하는 전형적인 산모양의 유형을 보였고, 공정이 진행됨에 따라 지속적으로

Table 4. KMnO₄ consumption in unit process for water treatment(2004~2006)

| | Raw water | Sedimentation | Filtration | Ozonation | GAC effluent |
|------------|-----------|---------------|------------|-----------|--------------|
| Max.(mg/L) | 11.5 | 5.2 | 3.5 | 3.3 | 2.0 |
| Min.(mg/L) | 5.2 | 2.1 | 1.6 | 1.2 | 0.4 |
| Avg.(mg/L) | 7.8 | 3.0 | 2.4 | 2.0 | 1.2 |

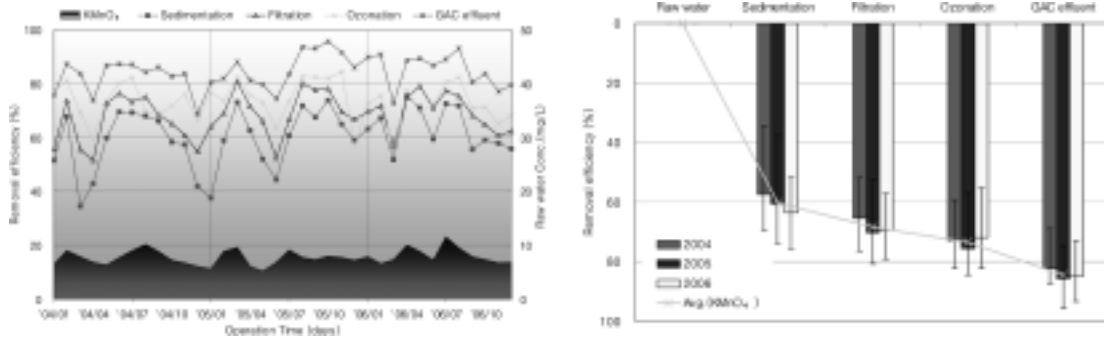


Fig. 3. Removal efficiency of $KMnO_4$ over the operation time(2004~2006) : (a) time-based, (b) unit-based.

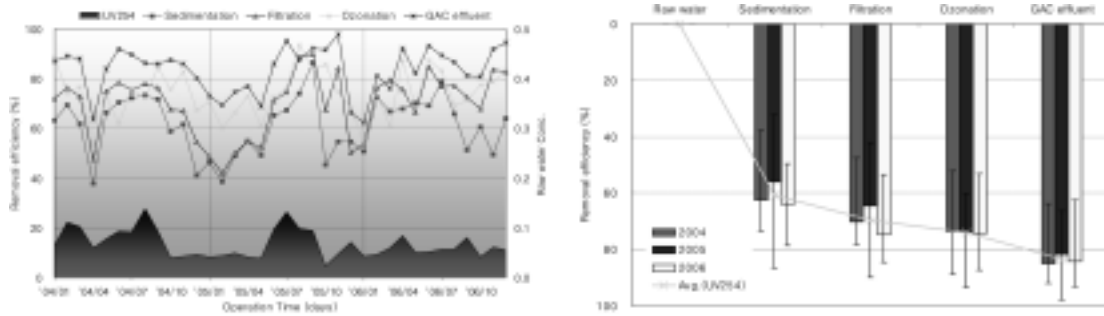


Fig. 4. Removal efficiency of UV_{254} over the operation time(2004~2006) : (a) time-based, (b) unit-based.

Table 5. UV_{254} in unit process for water treatment(2004~2006)

| | Raw water | Sedimentation | Filtration | Ozonation | GAC effluent |
|------------|-----------|---------------|------------|-----------|--------------|
| Max.(mg/L) | 0.138 | 0.043 | 0.036 | 0.038 | 0.024 |
| Min.(mg/L) | 0.023 | 0.012 | 0.008 | 0.003 | 0.001 |
| Avg.(mg/L) | 0.067 | 0.024 | 0.019 | 0.017 | 0.010 |

제거되어 3년 평균 제거효율은 처리공정 단계별로 원수 대비 각각 61, 70, 74, 84%로 나타났다. 고도처리공정에 의해서 14(2~27)%가 더 제거되어 활성탄여과수에서는 최종적으로 0.001~0.024를 유지하였다.

Table 6, Fig. 5는 TOC 및 DOC의 최대, 최소, 평균값과 제거효율의 변화를 나타낸 것이며, TOC와 DOC 제거효율은 계절별 뚜렷한 차이를 보이지 않고 다만 활성탄여과수에서 원수농도가 높은 봄·여름에 높아지는 경향을 보였다. 처리공정이 진행됨에 따라 지속적으로 제거되기는 하나 활성탄여과수에서 그 제거현상이 더욱 두드러져 3년 평균 제거효율은 공정단계별로 원수 대비 TOC는 39, 44, 47, 64%, DOC는 36, 40, 45, 62%이었다. 순수 고도처리공정에 의해서 평균적으로 TOC 20(7~47)%, DOC 22(6~50)%가 더 제거되어 활성탄여과수에서 TOC와 DOC 농도는 각각 0.43~2.05 mg/L, 0.37~1.99 mg/L을 나타내었다. 앞선 두 항목과 비교해 볼 때 전체 제거효율은 각각 64, 62%로 20% 이상 더 낮은 효율을 보이나 고도처리공정만의 순수제거율로 볼 때 오히려 5~7%의 더 높았다. 이것은 본 정수장의 고도처리공정은 $KMnO_4$ 소비량이나 UV_{254} 의 감소보다 TOC와 DOC 농도의 감소에 더 중점을 둔 공정이라 할 수 있다. 그러나 제거효율의 변동 폭은 앞선 두 항목보다 매우 큰 편인데 이는 오존 및 활성탄 공정이 일정한 최

Table 6. TOC and DOC in unit process for water treatment (2004~2006)

| | Raw water | Sedimentation | Filtration | Ozonation | GAC effluent |
|----------------|-----------|---------------|------------|-----------|--------------|
| TOC Max.(mg/L) | 4.16 | 2.78 | 2.51 | 2.37 | 2.05 |
| TOC Min.(mg/L) | 1.67 | 1.06 | 0.96 | 0.84 | 0.43 |
| TOC Avg.(mg/L) | 2.83 | 1.70 | 1.57 | 1.47 | 1.01 |
| DOC Max.(mg/L) | 3.70 | 2.67 | 2.49 | 2.32 | 1.99 |
| DOC Min.(mg/L) | 1.22 | 0.93 | 0.74 | 0.69 | 0.37 |
| DOC Avg.(mg/L) | 2.44 | 1.55 | 1.46 | 1.34 | 0.92 |

적의 조건으로 운영되고 있지 못함을 암시해 주기도 한다.

Fig. 6은 탁도, THMFP, Mn, 그리고 NH_3-N 의 제거효율 변화를 나타낸 것이다. 탁도의 경우 계절별 뚜렷한 차이는 보이지 않고, 일반처리공정(침전과 모래여과)이 진행됨에 따라 지속적으로 제거되다가 오존접촉조를 거치게 되면 오히려 제거효율이 낮아지는데 이것은 중간 생산수 중에 남아있는 금속 등이 오존에 의해 산화되어 금속산화물 형태의 입자상 물질을 생성하고 있다고 보여지며 이로 인해 탁도 제거율이 7% 정도 더 낮아지고 있음을 알 수 있다. 3년 평균 제거효율은 공정단계별로 원수 대비 각각 94, 99, 92, 99%이었고 활성탄여과수에서 최종적으로 0.07~0.20 NTU를 유지하였다. 고도공정에서의 추가제거효율이 0(-1.4~0.6)%로 소강상태인 것은 침전·여과공정에서 탁도가 이미 충분히 제거되었음을 의미하며 본 정수장의 고도처리공정은 탁도 제거에 주요 목적을 둔 공정이라 보기 어렵다는 결과를 얻었다. THMFP, Mn, NH_3-N 의 경우, 세 항목 모두 제거효율의 변동성이 커 계절적 특이성을 해석

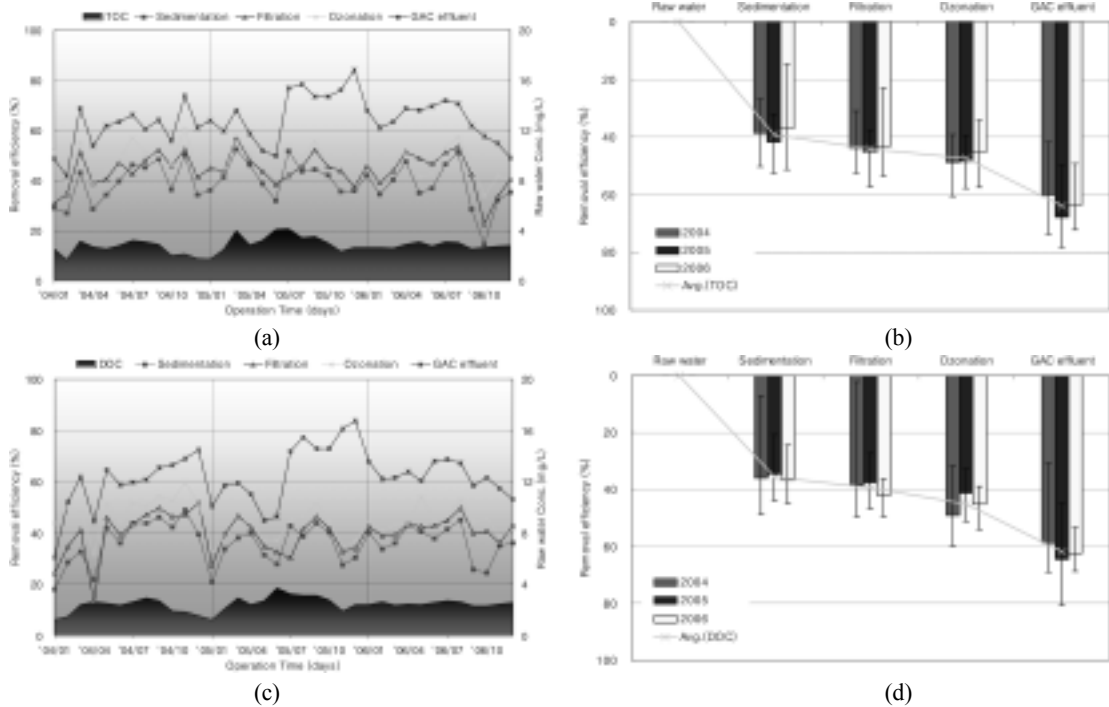
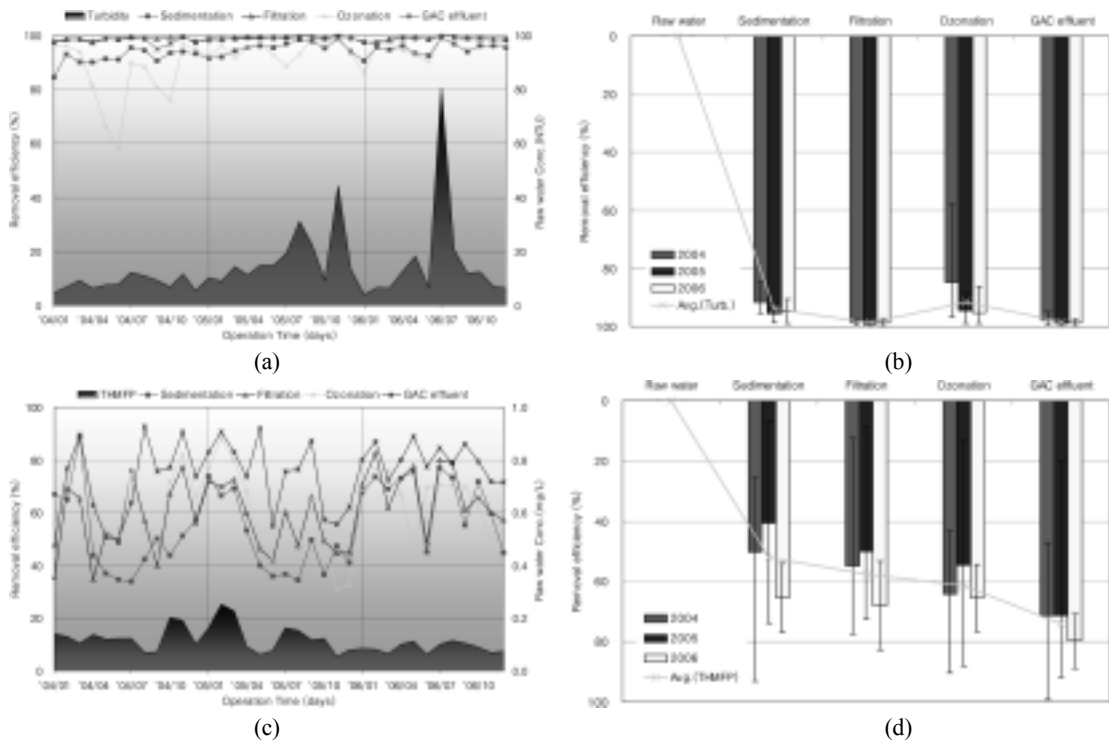


Fig. 5. Removal efficiencies of TOC, DOC over the operation time(2004~2006) : (a) time-based TOC, (b) unit-based TOC, (c) time-based DOC, (d) unit-based DOC.

하기 어려웠다. THMFP의 3년 평균 제거효율은 처리단계별로 원수 대비 각각 55, 60, 62, 75%로 일반처리공정에서 조금씩 제거되다가 오존처리수에서 활성탄처리수로 넘어가면서 다소 높은 비율(13%)로 제거되고 있으며, 고도처리공정에서 추가로 제거되는 효율은 15(1~46)%로 활성탄여과수의 최종 THMFP 농도는 0.005~0.074 mg/L이다.

Mn의 3년 평균 제거효율은 원수 대비 각각 53, 59, 26, 91%로 일반처리공정에서 지속적으로 제거되나 오존처리수에는 오히려 상당히 다시 생성된 후 활성탄처리수에서 대부분 제거되었다. 고도처리공정 부분만으로 32(5~77)%의 비교적 높은 제거효율을 보여 활성탄여과지에서의 평균농도는 0.000~0.015 mg/L이었다. NH₃-N의 3년 평균 제거효율



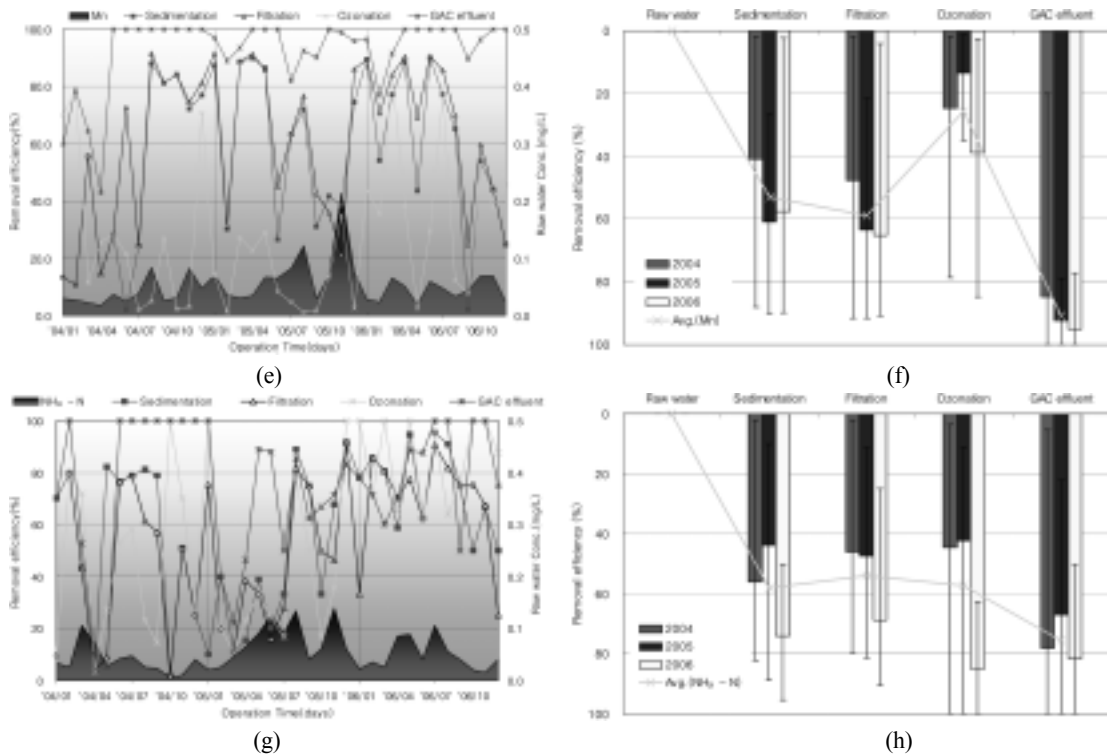


Fig. 6. Removal efficiencies of (a), (b) turbidity, (c), (d) THMF, (e), (f) Mn, and (g), (h) NH₃-N.

은 처리단계별로 각각 58, 53, 57, 76%로서 오존처리수 단계까지는 변화가 미미하나 활성탄여과지를 거치면서 순수 고도공정만의 제거효율은 약 23(-25~98)%나 제거되었다. 다만 오차값이 너무 커서 추가적인 자료 확보가 필요한 항목이었고 활성탄여과수에서의 최종농도는 0.000~0.065 mg/L 범위를 유지하였다. 특히, 이 3항목은 활성탄 교체 직전인 2006년의 제거효율이 상대적으로 높게 나타났다.

향후 활성탄 교체 이후의 제거효율 특성과 상호비교하고, 다른 지역의 고도처리공정도 비교해 본다면 더욱 심층적인 연구결과가 도출되리라 본다.

3.3. 역세척의 영향 평가

Fig. 7은 역세척을 하는 동안 탁도, TOC, DOC, 그리고 NH₃-N의 수질변화를 나타낸 것이다. 그림의 상부의 점선은 활성탄여과지로 유입되는 원수 농도, 꺾은 선형은 활성탄여과지를 통과한 유출수 농도, 그리고 하단의 점선은 역세척 직전의 초기 농도이다. 탁도는 역세척을 한 직후에 약간 증가하였으나 그 이후 큰 변화를 보이지 않았다. 그러나 TOC는 큰 변화를 보이는데 역세척 전의 TOC는 약 0.34 mg/L이었으나 역세척을 완료한 1시간 후는 역세척 전 초기농도와 거의 같은 값을 보이고 있다. 즉, 이 시간 동안에는 활성탄에 의해 TOC가 전혀 제거되지 않고 있음을 나타내며 그 이후에는 다시 감소하기 시작하여 약 60시간 이후부터 안정되고 있음을 볼 수 있다. 이러한 경향은 DOC 농도곡선에서 더욱 뚜렷하게 나타난다. NH₃-N의 농도곡선을 볼 때, 역세척 직후에 활성탄여과조에서 처리되지 않음은 물론 60시간 이상이 경과되어도 정상 처리되

지 않고 직선 형태를 유지한다. 이것은 활성탄여과조가 단순히 GAC에 의한 물리·화학적 흡착에 의한 제거만 일어나는 것이 아니라 BAC에 의한 생물학적 기능도 있음을 반영하고 있다. 왜냐하면 GAC 흡착만으로 제거된다면 역세척 이후에도 지속적으로 제거되어 하향식 곡선을 그려야 한다. 그러나 살펴본 바와 같이 역세척 후 초기에 오염물질 제거가 대단히 미약한 것은 역세척으로 인해 활성탄에 부착되어 미생물(활성탄조에서 오염물질을 먹고 사는 미생물)이 유출되었기 때문이라 예측된다.

활성탄 내 미생물의 탈리현상을 확인하기 위하여 SEM 사진 촬영 및 HPC를 측정하였다. Fig. 8의 (a), (b), (c)는 정수공정의 활성탄여과지에서 역세척 전·후에 촬영된 사진으로서 각각 4종류(1 mm, 50 μm, 10 μm, 5 μm)의 크기로 촬영되었다. 역세척 직전의 활성탄 표면에서는 대세공(macro pore)이 미생물에 의해 많이 덮여져 있으나 역세척 직후에는 상당히 뚜렷해 졌고 100시간이 경과된 뒤에는 대세공이 다시 많이 덮여지고 있음을 볼 수 있다. 즉 역세척으로 인해 활성탄 표면에 서식하고 있는 미생물들이 많이 탈리되어 100시간 경과 후에 다시 성장하여 활성탄 표면은 물론이고 세공(pore) 내부까지 미생물로 채워져 가고 있음을 보여주고 있다. 활성탄 내에 서식하는 미생물의 양, 즉 HPC를 측정한 그래프를 Fig. 8(d)에 보였다. 역세척 전에는 활성탄 1 g당 HPC가 6.36 × 10⁷ CFU를 유지했으나 역세척 후에는 세척수로 인해 미생물이 활성탄 표면으로부터 떨어져 나가고 남아있는 HPC는 3.61 × 10⁷ CFU로 43% 정도의 미생물이 탈리되어 유출되고 있음을 알 수 있다. 그러나 시간이 지남에 따라 미생물들이 다시

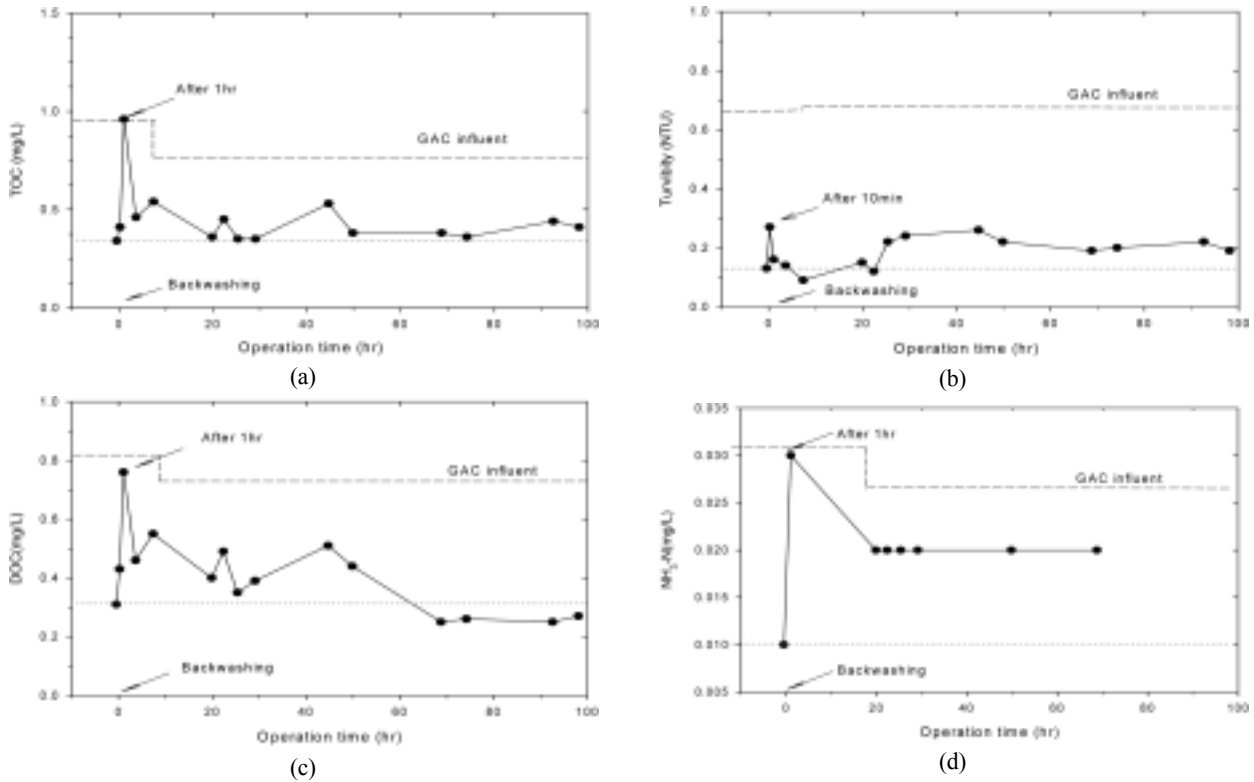


Fig. 7. Variations of water quality over operation time : (a) TOC, (b) turbidity, (c) DOC, (d) NH₃-N.

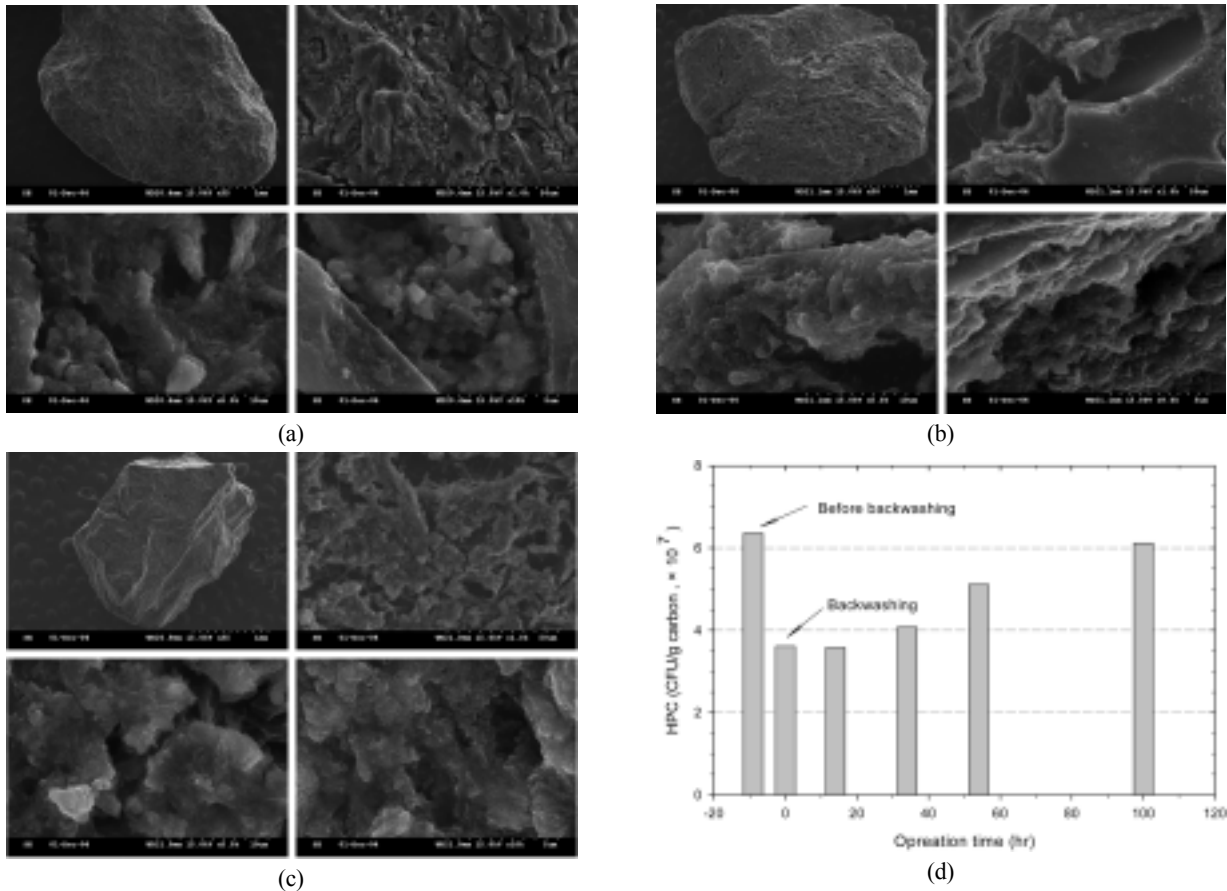


Fig. 8. SEM photograph of microorganisms on BAC in different time and variation of HPC at upper BAC based on backwashing : (a) before backwashing, (b) after backwashing, (c) after 100 hr, (d) HPC.

회복되어 약 50시간 이후부터는 크게 증가하여 5.12×10^7 CFU를 보이고 있어 초기 상태로 대부분 회복되었음을 보여 주어 활성탄조 내에 미생물의 존재를 재확인시켜 주었다.

4. 결론

국내 A시의 C정수장 고도정수처리공정에서 몇 가지 인자를 이용하여 활성탄 교체 이전의 근래 3년간(2004~2006)의 유입원수의 수질특성, 처리공정별 제거효율의 변화특성, 그리고 활성탄여과조의 역세척에 따른 활성탄 미생물의 거동을 연구하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 유입원수의 수질특성은 9개의 조사항목 대부분 일정한 농도범위로 유입되었고 그 중 계절적 일관성을 갖는 5개 항목을 발견하였다. 유입원수의 농도는 통상 pH 6.8~7.8, 탁도 3~20 NTU, KMnO_4 소비량 5~8 mg/L, TOC 0.8~4.1 mg/L, DOC 0.6~3.7 mg/L, UV_{254} 0.02~0.15, Mn 0.02~0.30 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 0.00~0.30 mg/L 범위를 유지하였고, 농도변화가 계절적 일관성을 보인 항목은 pH, 탁도, KMnO_4 소비량, TOC, DOC였다.

2) 공정별 제거효율의 변화특성은 월별 일정한 유형을 갖는 것, 공정진행에 따라 지속 제거되는 것, 오존접촉조에서 제거효율이 떨어지는 것으로 분류할 수 있었고, 현재의 고도처리공정에서 제거되는 주요 대상(target) 오염물질을 찾을 수 있었다. 제거효율이 여름철을 정점으로 산모양을 보이는 KMnO_4 소비량과 UV_{254} , 공정진행에 따라 지속 감소하는 KMnO_4 소비량, UV_{254} , TOC, DOC, THMF, 오존공정에서 크게 떨어지는 탁도, Mn 등의 항목이 있었다. 고도공정만의 평균 제거효율은 Mn, $\text{NH}_3\text{-N}$, DOC, TOC, KMnO_4 소비량, THMF, UV_{254} , 탁도의 순서대로 각각 32, 23, 22, 20, 16, 15, 14, 0%이었고, 고도공정의 주요 처리대상물질은 Mn, $\text{NH}_3\text{-N}$, DOC, TOC 위주이며 KMnO_4 소비량, THMF, UV_{254} 도 대상물질이라 볼 수 있다.

3) 활성탄여과조의 역세척에 따른 거동을 추적한 결과, $\text{NH}_3\text{-N}$ 의 수질농도 변화곡선으로 활성탄조 내의 미생물 존재를 예측하였고 SEM 사진 촬영과 HPC 측정으로 이를 확인하였다. $\text{NH}_3\text{-N}$ 의 농도변화곡선을 통해 활성탄여과조의 오염물질 제거가 BAC에 의한 생물학적 제거 기능도 있음을 예측하였고, HPC는 활성탄 1 g 당 역세척 전 6.36×10^7 CFU, 역세척 후 3.61×10^7 CFU로 43% 정도의 미생물이 탈리되었고, 50시간 경과 후에는 5.12×10^7 CFU로 초기상태로 거의 회복되었다.

참고문헌

1. Kim, S. H. and Yoon, J. Y., "Water quality improvement by advanced treatment of GAC filtration and ozonation over an eight-year period," *J. Water Suppl. : Res. & Technol.-AQUA*, **54**(2), 95~104(2005).

2. 김성수, 이경혁, "입상활성탄 공정의 진단 및 효율적 운영방안 : D 정수장을 중심으로," 대한상하수도학회지, **19**(6), 781~790(2005).

3. Servais, P., Billen, G., Bouillot, P., and Benezet, M., "A pilot study of biological GAC filtration in drinking water treatment," *J. Water Suppl. : Res. & Technol.-AQUA*, **41**(3), 163~168(1992).

4. Miller, G. W. and Rice, R. G., "An assessment of ozone and chlorine dioxide technologies for treatment of municipal water supplies," U. S. EPA report No. EPA-600/2-78-147(1987).

5. 이상봉, 김동윤, 임정아, 이원권, "덕산정수장에서의 BAC Pilot plant에 관한 연구," 대한상하수도학회지, **9**(2), 97~107(1995).

6. Miller, G. W., Rice, R. G., "European water treatment practices the promise if biological activated carbon," *Civil Engineering ASCE*, **48**(2), 80~92(1990).

7. Zhang Xiaojian, Wang Zhansheng & Gu Xiasheng, "Simple combination of biodegradation and carbon adsorption - The mechanism of biological activated carbon process," *Water Res.*, **25**(2), 165~172(1991).

8. 한무영, 박중현, "고도정수처리 도입의 타당성 검토," 대한상하수도학회지, **7**(2), 47~54(1993).

9. 박훈수, 염철민, 윤제용, "국내 정수처리 공정에서 오존공정시설의 현황과 특성," 대한상하수도학회지, **15**(4), 279~292(2001).

10. 최승일, "우리나라 고도정수시설 도입의 현황과 허실," 한국물환경학회지, **11**(3), 153~161(1995).

11. 문성민, 최승일, 손진식, 윤제용, "국내 정수장 고도정수처리 공정에서 공정별 처리효율 조사," 대한상하수도학회지, **19**(3), 323~329(2005).

12. Amann, R., Ludwig, W., and Schleifer, K. H., "Phylogenetic and in situ detection of individual microbial cells without cultivation," *Microbiol. Rev.*, **59**, 143~169(1995).

13. Bouvier, T. and Giorgio, P. A. D., "Factors influencing the detection of bacterial cells using fluorescence in situ hybridization(FISH) ; a quantitative review of published reports," *FEMS Microbiol. Ecol.*, **44**, 3~15(2003).

14. Camper, A. K., LeChevallier M. W., Broadaway, S. C., and McFeters, G. A., "Evaluation of procedures to desorb bacteria from granular activated carbon," *J. Microbiol. Method*, **3**, 187~198(1985).

15. Camper, A. K., LeChevallier M. W., Broadaway, S. C., and McFeters, G. A., "Growth and persistence of pathogens on granular activated carbon filters," *Appl. Microbiol.*, **50**(6), 1378~1382(1985).

16. Frías, J., Ribas, F. and Lucena, F., "A method for the measurement of biodegradable organic carbon in waters," *Water Res.*, **26**(2), 255~258(1992).

17. 김동윤, 이상봉, "BAC탑에의 BDOC 분해특성," 대한상하수도학회지, **12**(3), 21~28(1998).