

## 소독부산물 제어를 위한 실공정 F/A 운영에 관한 고찰

김성수 · 이경혁 · 임재림<sup>†</sup> · 채선하 · 강병수 · 문필중 · 안효원

한국수자원공사

(2005년 10월 6일 접수, 2005년 10월 20일 채택)

### Evaluation of Filter-Adsorber(F/A) Process for Removal of Disinfection By-products(DBPs)

Seong-Su Kim · Kyung-Hyuk Lee · Jae-Lim Lim<sup>†</sup> · Seon-Ha Chae

Byeong-Soo Kang · Pil-Joong Moon · Hyo-Won Ahn

Korea Water Resources Corporation

**ABSTRACT** : Granular Activated Carbon(GAC) is widely used in drinking water treatment. At S and B Water Treatment Plant, GAC is used in place of granular media in conventional rapid filters(GAC Filter-Adsorber) for removal of Disinfection By-products(DBPs). The primary focus of this study is on the performance of existing filter-adsorber, and their operation. It was found that F/A process removed turbidity as effective as sand system. The ratio of Hydrophobic DOM (HPO) and hydrophilic DOM (HPI) fraction in the raw water at S and B WTP was similar. Filter Adsorber presented earlier DOC breakthrough and steady state condition which was contributed by biodegradation during operation period. The removal efficiency of DBPs were used to evaluate the filter performance. The DBPs concentration of F/A treated water was below treatment goal level (THM < 80 µg/L, HAA < 60 µg/L). The removal efficiency of THM decreased rapidly during operation period. However, HAA were removed steadily regardless of the influent concentration of HAA. These results indicate that the removal of THM depend upon the adsorption mechanism while the removal of HAA depend upon biodegradation as well as adsorption. The decrease of adsorption capacity and characteristic value of GAC may be attributed to the effect of high organic loading, residual free chlorine, coagulants, manganese oxidants and frequently backwashing. This study has confirmed that Filter adsorber process can be considered as effective alternatives for the removal of DBPs, especially HAA.

**Key Words** : GAC, Filter-Adsorber(F/A), Disinfection by-product(DBPs)

**요약** : 입상활성탄 공정은 수처리에서 널리 사용되고 있으며, S와 B정수장은 기존의 급속여과지의 여재를 활성탄으로 교체하여 F/A 공정으로 운영하고 있다. 소독부산물의 제어를 위해 F/A가 도입된 급강수계 S정수장과 낙동강 수계 B정수장의 운영결과를 토대로 용존유기물질(DOC)과 소독부산물(DBPs) 등의 효율평가와 F/A공정 운영인자 등에 대하여 검토하였다. 두 정수장 원수의 용존유기물질 특성은 친수성과 소수성이 유사한 범위를 보이고 있으며, F/A공정에서 운영 초기 흡착능에 의한 빠른 파괴특성을 나타내었다. F/A에서 소독부산물의 제거특성은 운영초기에 THM과 HAA 모두 제거효율이 우수하였으나, 운영기간이 경과되면서 THM제거율은 급격히 감소하였으며, HAA의 제거율은 동절기 저수온 시기를 제외하고는 생물학적 제거기작에 의해 높은 제거효율을 나타냈다. F/A공정은 활성탄흡착지(Post GAC) 공정과 비교하여 높은 유기물 부하, 잔류염소, 응집제 또는 응집보조제, 망간, 빈번한 역세척 등의 여러 가지 이유로 인해 여재 물성치 및 흡착능의 감소가 빠르게 나타났다. F/A공정이 실공정으로 도입되어 1년 이상 운영되었던 결과를 보면 활성탄 여재의 물성치 및 흡착능의 빠른 감소 경향이 있지만, 소독부산물 중 HAA<sub>5</sub>항목이 문제시되는 정수장의 경우 기타여과지로 인증을 받은 F/A공정은 향후 점점 더 강화되는 수질기준의 만족을 위한 대안공정의 하나로서 적용이 가능하리라 판단된다.

**주제어** : 입상활성탄, 입상활성탄여과지, 소독부산물

## 1. 서론

산업화 및 도시화에 따라 소독부산물 및 미량오염물질 등 신규 오염물질들이 출현하고 있는 현실에서 일반 표준식 정수처리공정에서는 이들 미량오염물질들의 처리가 어려워 새로운 처리공정의 도입이 불가피한 상황이다. 수돗물은 안전성이 중요한 조건으로서 많은 연구자들에 의해 좀 더 안전한

물의 공급에 대해 현재까지 많은 방법 등이 연구되어 지고 있다. 이러한 여러 가지 소독법 중 염소소독은 관련법에 의해 잔류염소가 항상 0.2 mg/L 이상 유지되도록 규정하고 있어, 국내 모든 정수장은 모두 염소계의 수처리제를 이용하여 염소처리를 실시하고 있다. 그러나 염소소독은 수중 병원성 미생물의 사멸기능과 재증식 방지기능 등의 긍정적인 효과를 주는 대신에, 수중의 다른 물질 특히 용존유기물질, Bromide, 농약류 등과 반응하여 부산물을 형성하게 된다. 이러한 소독부산물 중 대표적인 부산물로서 트리할로메탄(THMs, Trihalo-methanes)과 할로아세트익에시드(HAAs, Haloacetic acids)가 있다. 현재 국내 먹는물 수질기준 중 소독부산물은 THMs

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: jllim@kowaco.or.kr  
Tel: 042-860-0371

Fax: 042-860-0399

및 HAA<sub>5</sub>에 대해서는 100 µg/L 이하, 클로랄하이드레이트 (Chloral Hydrate, CH)에 대해서는 30 µg/L 이하로 규제하고 있으며, 수자원공사는 자체 수질목표로 THMs 80 µg/L 이하, HAA<sub>5</sub> 60 µg/L 이하, CH 30 µg/L 이하로 법적 기준보다 강화하여 관리하고 있다.

정수처리 공정에서 제거되지 않은 유기물질은 염소요구량을 증대시키고, 소독과정에서 소독제와 반응하여 발암성 물질로 알려진 소독부산물을 발생시키며, 관의 부식이나 미생물의 서식처를 만들어 주고, 냄새의 원인 물질이 된다. 입상활성탄(Granular Activated Carbon; GAC)공정은 음용수 처리에서 널리 사용되는 공정으로서 기존공정에서 제거하지 못한 미량오염물질의 제거나 용존유기물질의 제거를 목적으로 일반적으로 정수처리공정의 후단에 위치한다. GAC의 도입위치에 따라 입상활성탄 흡착지(GAC Adsorber)와 입상활성탄여과지(Filter Adsorber, F/A)로 구분하는데, 본 연구에서 다루게 될 F/A는 특정 오염물질 외에 모래여과지의 기능을 수행하여 탁도 제거까지 이를 수 있는 입상활성탄 공정이다. 수도시설은 분말활성탄(Powder Activated Carbon; PAC)의 연간 운영비용이 매우 클 때 또는 유기물이나 오염물질에 대해 더 엄중한 수질기준이 적용될 때, 기존시설에서 맛·냄새 물질을 PAC로 제어하기가 어려울 때 GAC로 기존시설 여과지들의 개량을 생각할 수 있다. 만약 기존 시설을 개선할 경우에는 모래 또는 안트라사이트 등의 기존 여재를 입상활성탄으로 교체하여 주면 F/A 공정으로 변경되게 된다.<sup>1)</sup> F/A공정의 도입과정에서 흡착기능을 강화시키기 위해서는 여러 가지 요인들에 대해 검토하여야 하고, 이때, 흡착기능 강화에는 공담체류시간(Empty bed contact time, EBCT)이 가장 중요한 영향인자이며, 이 밖에 활성탄 층 깊이 등도 영향을 미치는 것으로 보고된 바 있다.<sup>2)</sup>

F/A는 GAC공정을 위해 특정 목적으로 설계된 시스템으로, 과거 미국에서는 기존 모래여과지들의 여재가 일부 GAC로 대체되었으며, 이러한 공정들은 모래교체 시스템으로 일반적으로 불리었다. F/A를 위한 여재선택은 여과와 흡착의 요건을 모두 고려해야 한다. 게다가 입상활성탄 흡착지와 비교하여 F/A는 높은 고형물 부하때문에 일반적으로 기존 모래여과지와 같은 주기로 빈번한 역세척을 요구한다. 따라서 기존 입상활성탄 흡착지 설계에 높은 고형물 부하와 유기물의 흡착, 탁질 제거에 의한 빈번한 역세척이 고려되어야 한다. 통상 F/A는 유럽에서보다 미국에서 도입되어 왔으며, 제거하고자 하는 미량오염물질의 농도가 낮거나 간헐적으로 발생하는 경우에 많이 활용되었다. 사례<sup>3)</sup>를 통해 나타난 F/A 적용의 주요한 적용목적은 맛·냄새의 제어를 위해서였고, 그 외 소독부산물의 제어를 위해 적용여부가 검토되어 왔다. 대부분의 정수장들은 F/A의 도입에 관한 검토 의도를 다음과 같이 서두에 밝히고 있었다. 첫째, 수도시설에서 PAC의 연간 운영비용이 매우 클 때, 둘째, 유기물이나 소독부산물을 비롯한 오염물질에 대한 수질기준이 강화되어 적용될 때, 셋째, 기존시설에서 맛냄새물질을 PAC로 제어하기가 어려운 경우이다. 이러한 적용성 검토를 위해 정수장들은 기존 여과지의 개량을 통해 F/A를 도입했기 때문에 여과지 자체

에서 수용가능한 공담체류시간(Empty Bed Contact Time; EBCT)은 대부분이 10분 이내로 한정되어 있었다. 그러나 F/A의 적용성 여부를 파일럿 플랜트 규모로 검토한 일부 정수장들에서 처리대상물질의 농도가 높게 유지된 경우에는 짧은 EBCT로 인해 파과현상이 수개월 이내에 도래했기 때문에, 실정수장에서는 기존 여과지의 개량 대신에 입상활성탄 흡착지를 별도로 설치한 경우가 있다.

소독부산물에 대한 수질기준의 점차적인 강화로 인해 수도 시설들은 시설개선 및 신공정 도입에 대한 위협을 받고 있으며, 이로 인해 정수장에서는 법적 규정의 만족과 경제적인 비용 측면에서 가장 효과적인 공정의 개선을 계획하지 않으면 안될 위기에 직면해 있다. 이러한 이유에서 정수장들은 소독부산물의 제어를 위해 파일럿 규모의 F/A를 검토하게 되었다. F/A에서 용존유기물과 소독부산물 전구체, 소독부산물의 제거율은 뛰어났지만 수개월이내에 파과 현상을 보이기 시작했고, 특히 트리할로메탄생성능(Trihalomethane formation potential, THMFP)은 운영기간이 더 짧았다. 그러나, 6분 정도의 짧은 EBCT에서 할로아세트에시드생성능(Haloacetic acid formation potential, HAAFP)은 90일 이후에도 약 40%의 제거율을 유지하고 있어, 소독부산물 중 THMFP보다도 HAAFP가 문제시되는 정수장의 경우에는 F/A의 적용성 여부를 검토해 볼 만한 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 소독부산물의 제어를 위해 F/A가 도입된 금강수계를 수원으로 하는 S정수장과 낙동강수계를 수원으로 이용하는 B정수장의 운영결과를 토대로 용존유기물질(DOC), 소독부산물(DBPs), 탁도(Turbidity) 등의 효율평가와 효율적인 운영방안 등에 대하여 검토하였다. 또한 실공정으로 F/A가 정수장에 도입되어 1년 이상 운영되어진 상기 두 정수장의 운영경험과 효율평가 결과를 제시함으로써, 기타여과지로 인증을 받은 F/A공정이 향후 점점 더 강화되는 수질기준의 만족을 위한 대안공정의 하나로써 국내 수계에 적용 사례를 제시하고자 하였다.

## 2. 대상정수장 현황

### 2.1. 시설현황

금강수계 S정수장과 낙동강수계 B정수장은 약품주입에 의한 혼화, 응집, 침전, 여과방식의 표준식 정수처리공정으로 구성되어 있다. S정수장은 금강 중·하류의 하천수를 취수하여 일 처리용량 60,000 m<sup>3</sup> 규모의 수돗물을 생산하는 정수장이며, B정수장은 낙동강 원수를 취수하여 120,000 m<sup>3</sup> 규모의 정수를 공급하고 있다. 두 정수장은 지속적인 소독부산물의 모니터링 결과 THMs, HAA<sub>5</sub> 등이 자체 수질목표인 THMs 80 µg/L, HAA<sub>5</sub> 60 µg/L 이하를 초과하는 경우가 발생하여 이러한 소독부산물의 저감대책 마련과 안전하고 보다 양질의 수돗물 공급과 신뢰도 회복을 목적으로 활성탄여과지(F/A) 공정을 도입하여 운영하고 있다. 즉, Fig. 1에서 나타난 바와 같이 여과방식은 소독부산물의 제어를 위하여 기존의 모래를 이용한 급속여과 방식에서 여과와 흡착을 동시에 수행하는 활성탄여과지 공정으로 여재를 교체 운영 중에 있다.

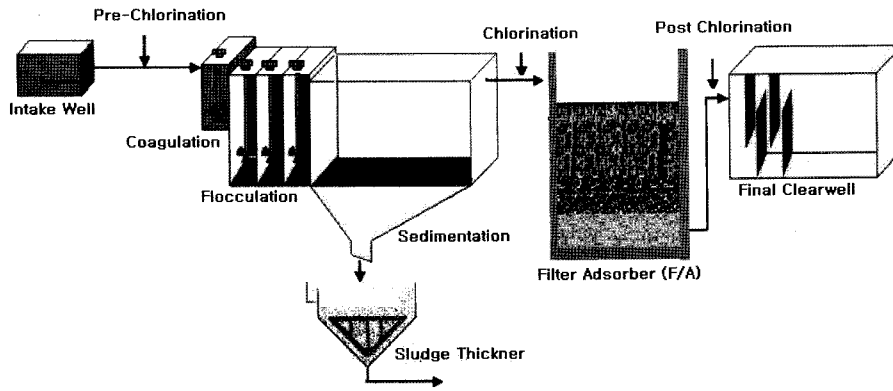


Fig. 1. Schematic diagram of S and B water treatment plant.

Table 1. Specification of Filter Adsorber in S and B water treatment plant

	S WTP		B WTP	
Type	Continuous Flow		Continuous Flow	
# of basin	8		10	
velocity	110 m/day		142 m/day	
Media	GAC	750 mm	GAC	1200 mm
	Sand	250 mm	Sand	250 mm
	Gravel	350 mm	Gravel	- mm
EBCT	· Designed Q : 9.8 min · Operated Q : 12.3 min		· Designed Q : 12.1 min · Operated Q : 18.2 min	
L/d ratio	1,305		1,455	
Backwash	Surface + Water wash (0.45 - 0.59 m/min)		Air(1.0 m/min) + Water wash (0.62 - 0.81 m/min)	
Underdrain System	strainer type		block type	

F/A 공정의 여재구성 및 운전현황은 Table 1과 같으며, 효율평가 및 운영최적화를 위한 수질분석을 원수, 침전수, F/A 여과수에 대하여 소독부산물 및 생성능, DOC를 포함한 일반수질항목에 대하여 주기적으로 분석하여 평가하였다. S정수장의 경우 기존여과지의 시설을 이용하면서 낮은 층고와 짧은 접촉시간을 갖는 F/A공정으로 개량되었으며, B정수장의 경우에도 기존시설을 이용한 개량으로 층고가 일반적인 활성탄흡착지 설계 높이보다는 다소 낮은 구조를 가지고 있다. 하부집수장치 및 역세방식에 있어서도 S정수장의 경우 스트레이너형 하부집수장치 구조에 표면세척과 물역세의 역세방식을 이용하고 있으며, B정수장은 유공블럭형의 하부집수장치 구조에 공기역세와 물역세의 역세방식으로 설계 및 운영상에 차이를 나타내고 있다.

### 2.2 평가항목 및 방법

소독부산물의 제어를 위해 도입 운영중인 F/A공정의 효율을 평가하고 효과적인 운영방안을 마련하기 위해 S정수장과 B정수장의 대상 여과지를 선정하여 평가하였다. 분석항목으로는 원수, 침전수, F/A 유출수, 정수를 대상으로 탁

도, 알카리도, UV<sub>254</sub>, KMnO<sub>4</sub>소비량, DOC 등의 일반항목과 CH, THM, HAA<sub>5</sub>, CHFP, THMFP, HAA<sub>5</sub>FP 등의 소독부산물 및 소독부산물생성능에 대하여 각 항목별로 일정 주기에 따라 분석하였다. 또한 F/A여재인 입상활성탄 내 미생물 서식 상태를 주사전자현미경(Scanning electron microscope, SEM)을 통하여 조사하였으며, 운영 중인 입상활성탄 여재의 성능 시험 등을 분석하였다. 또한 용존유기물질(Dissolved organic matter, DOM) 분리 실험, 동화가능유기탄소(Assimilable organic carbon, AOC) 등의 분석을 통하여 F/A 공정에 대한 평가를 수행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 원수의 용존유기물질 특성

S정수장 원수는 pH 6.6~8, 수온 3~24℃ 범위로 Table 2에서 보이는 바와 같이 원수에서 DOC농도는 평균 2.2 mg/L로 1.6~4.0 mg/L 범위에 있으며, UV<sub>254</sub> 흡광도는 평균 6.8 m<sup>-1</sup>로 5.0~9.3 m<sup>-1</sup>범위에 있었다. B정수장 원수는 pH 6.7~7.6, 수온 2.3~26.1℃ 범위로서 DOC 농도는 평균 2.5 mg/L로 1.7~3.1 mg/L 범위에 있었다.

상기 두 정수장은 동절기에 암모니아성 질소가 유입되어 전염소 주입률이 높고, 봄·가을의 조류발생 분체와 자연유기물질의 증가에 의한 소독부산물 생성의 문제를 가지고 있다. 또한, 망간이 지속적으로 원수에 유입되어 정수처리 공정에서 망간의 효율적인 제어를 위해 염소에 의한 산화공정을 운영하고 있다.

Table 2. DOM concentration of raw water

WTP	DOC (mg/L)	UV <sub>254</sub> (m <sup>-1</sup> )	SUVA (L/mg · m)	KMnO <sub>4</sub> (mg/L)	
S WTP	Max	4.0	9.3	5.4	16.8
	Min	1.6	5.0	1.9	7
	Ave	2.2	6.8	3.2	10.7
B WTP	Max	3.1	8.5	3.7	25.1
	Min	1.7	3.3	1.2	2.9
	Ave	2.5	5.6	2.3	8.8

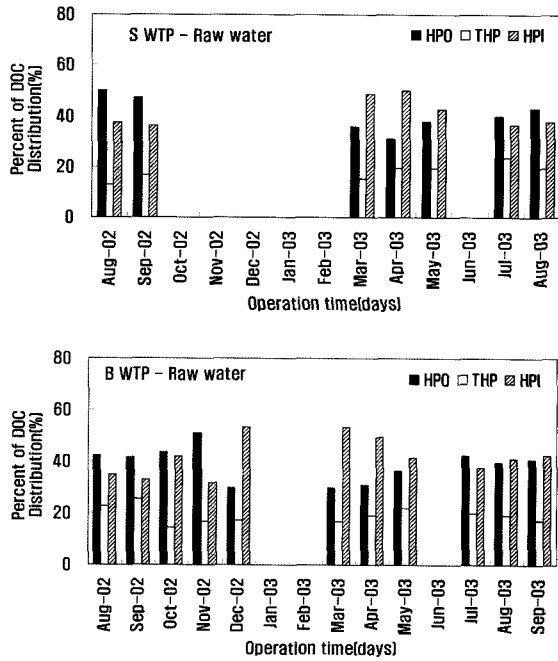


Fig. 2. DOM distribution of raw water in S, B water treatment plant (2002~2003).

소독부산물의 형성에 가장 중요한 인자인 용존유기물질(DOM)을 수치로 나타내는 방법은 DOC, UV<sub>254</sub> 흡광도, KMnO<sub>4</sub> 소비량 등이며, 일반적으로 용존유기탄소(Dissolved organic carbon, DOC)의 양으로 대표되어 진다. SUVA(specific ultraviolet absorbance)는 측정된 UV 흡광도를 용존유기탄소로 나눈 값으로서 소독부산물의 생성과 밀접한 연관이 있는 것으로 알려져 있다. SUVA값이 2~4 범위에 있을 때의 물속의 DOM의 특성은 휴믹과 비휴믹, 소수성과 친수성이 공존하고, 낮은 분자량과 높은 분자량이 같이 있는 것으로 알려져 있다.<sup>4,5)</sup>

물 속의 DOM은 적은 양의 중성과 염기성을 가진 유기산의 합성 혼합물로서, 복잡한 유기물질의 이질적인 혼합물이기 때문에 다양한 DOM 분리기술들이 제안되고 있다. 수중 DOM을 XAD수지를 이용하여 소수성(Hydrophobic DOM), 반친수성(Transphilic DOM), 친수성(Hydrophilic DOM)으로 분류하여 시기별 원수의 특성을 평가하였다. Fig. 2는 대상정수장에서 F/A공정 도입 전에 각 정수장으로 유입되는 원수의 DOM 구조 변화특성을 나타낸 그림이다. S정수장 원수의

DOM 비율은 친수성(HPI, 평균 41.2%)>소수성(HPO, 평균 40.6%)>반친수성(THP, 평균 18.2%) 순으로 나타났으며, 계절에 따라서 봄철에 HPI 비율이 HPO 비율보다 높았고, 여름철에는 HPO비율이 HPI비율보다 높은 것으로 나타나는 등 계절적으로 다른 양상을 보였다. 마찬가지로 B정수장의 원수 DOM 비율도 겨울철과 봄철에는 HPI 비율이 높게 나타나는 경향을, 여름철에는 HPO 비율이 다소 높게 나타나는 경향을 보였다. DOM 분리비율은 HPI(평균 41.8%)> HPO(평균 38.9%) > THP(평균 19.2%)순으로 나타났다. S정수장과 B정수장의 경우 평균 SUVA 값은 각각 2.3, 3.2로서 2~4 범위에 있고, DOM 분리결과에서도 HPO와 HPI의 비율이 거의 유사하게 나타남으로써 일반적인 특성이 일치하는 결과를 보여주고 있다.

3.2. 용존유기물질 제거특성

소독부산물의 제어를 위해 도입 운영되고 있는 F/A공정에서 DOC 제거특성은 소독부산물의 전구체 및 생성된 소독부산물의 제거와 밀접한 관계를 가지고 있다. 일반적으로 입상활성탄은 소독부산물의 제거를 위한 최적처리기술(BAT)로 알려져 있으나, 소독부산물의 종류에 따른 입상활성탄에서의 제거기작은 많은 연구결과에서 그 차이를 보이고 있다.<sup>6,7)</sup>

Fig 3, 4에서 보이는 바와 같이 S정수장 F/A공정에서 DOC 농도는 운영기간이 경과함에 따라 서서히 증가하다가 운영 6~8개월 이후부터 일정한 제거율을 나타내고 있다. 이는 일반적인 여과수를 대상으로 처리하는 입상활성탄 흡착지(Post GAC Adsorber)에서의 파과특성과 매우 유사한 경향을 보이고 있으며, DOC 제거가 초기에 활성탄의 흡착능에 의존하다가 운영시간이 경과함에 따라 흡착능은 점차 소진되고, 생물학적 제거능에 의존함을 지시하고 있다. 반면에 B정수장의 F/A 공정에서는 운전 초기부터 면밀하게 분석을 못한 관계로 데이터가 부족한 상황이지만, DOC 파과곡선 형태를 보면 F/A공정의 운전 초기부터 S정수장에 비해 매우 낮은 DOC 제거효율을 나타내고 있으며, 운전기간이 경과함에 따라 지속적으로 일정 제거효율을 유지하고 있는 현상을 보이고 있다. 이러한 용존유기물질에 대한 F/A 공정에서의 제거특성으로 보아 생성된 소독부산물 중 생물학적으로 제거가 어려운 THMs은 조기파과, HAA<sub>5</sub>에 대해서는 생물학적 제거에 의한 처리효율을 기대할 수 있다.

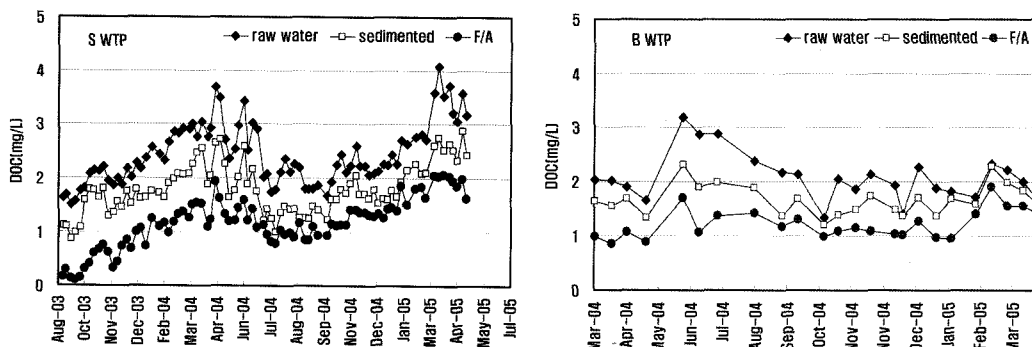


Fig. 3. Variation of DOC concentration in raw water, sedimented water and F/A filtrate.

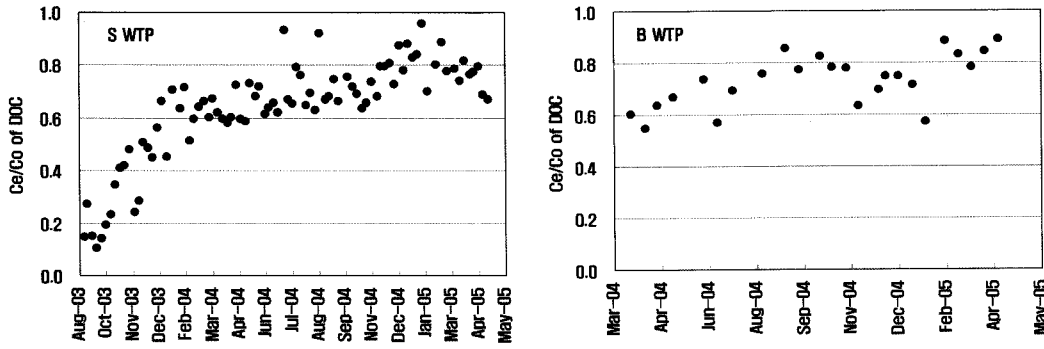


Fig. 4. DOC breakthrough curve in filter adsorber.

B정수장에서 F/A공정의 운전초기 S정수장과 달리 이러한 빠른 파과결과가 나타난 원인으로는 원수 특성 및 염소 등의 수처리제 약품사용과 같은 정수장의 공정 운영방식, F/A로의 개량공사가 병행되면서 타 여과지 유출수에 의한 오차 등 여러 가지 원인이 있을 수 있으며, 이러한 원인에 대해서 향후 다른 대상여과지의 운영을 통해 좀 더 면밀한 평가가 필요하리라 판단된다.

3.3. 소독부산물 제거특성

S정수장과 B정수장에서 운영기간 동안 F/A에 의한 소독부산물 제거특성을 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 농도와 제거율로 나타내었다. S정수장에서 F/A에 의한 소독부산물의 제거특성은 THM의 경우 급격한 제거효율 감소와 파과 특성을 보이고 있으며, HAA<sub>5</sub>의 경우에는 동절기를 제외하고는 매우

높은 처리효율을 보이고 있다. 이러한 결과는 S정수장의 DOC 파과특성에서 통상적인 입상활성탄에 의한 용존 유기물질의 파과폭선 형태를 보이고 있고, 운전 6개월 이후의 F/A 공정에서의 제거기작은 생물학적 분해임을 감안하여 볼 때, 많은 입상활성탄에 의한 소독부산물의 제거특성을 제시한 결과들과 마찬가지로 THMs 항목의 경우 급격한 파과현상을 나타낸 반면 HAA<sub>5</sub> 항목의 경우 생물학적 제거기작에 의해 높은 제거효율을 지속적으로 달성한 것으로 판단된다. 즉, 수온이 저하되는 12월에서 4월까지의 HAA<sub>5</sub>의 제거율이 낮은 반면, 수온이 증가하는 5~9월까지는 HAA<sub>5</sub> 제거율이 높게 나타나 HAA<sub>5</sub>의 주요 제거 메카니즘이 부착미생물에 의한 분해임을 알 수 있다.

B정수장에서 THMs의 경우 S정수장 보다 느린 파과특성과 좀 더 높은 처리효율을 보이고 있고, HAA<sub>5</sub> 항목의 경우

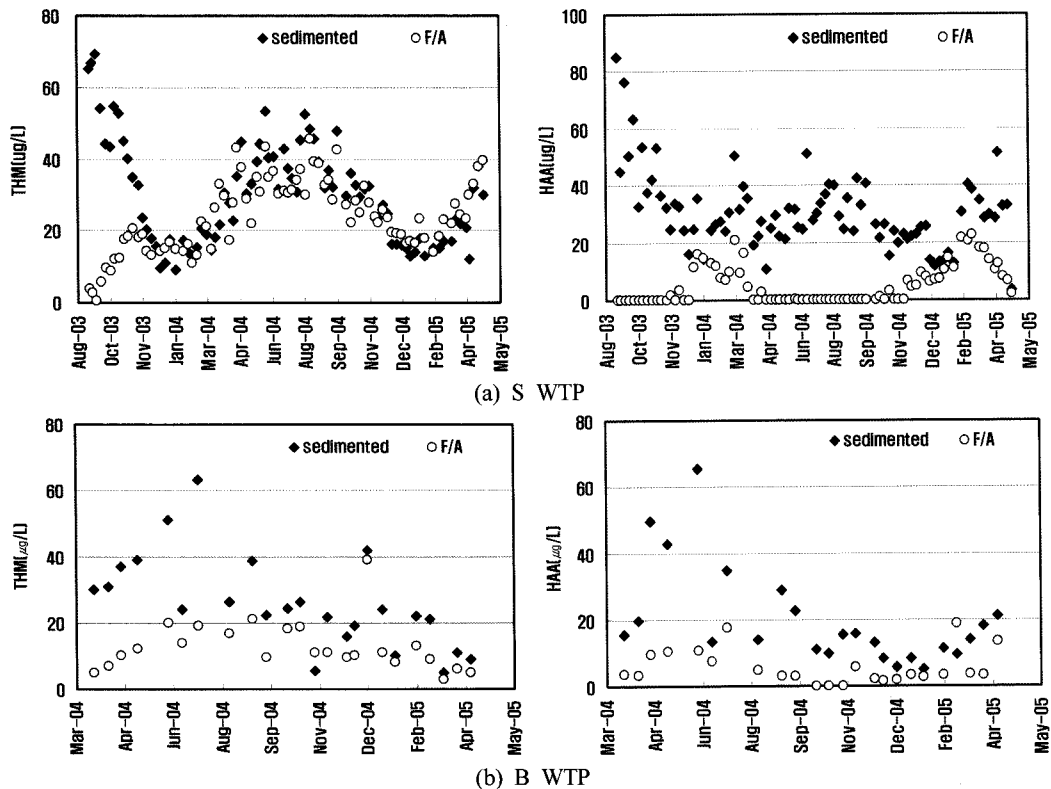


Fig. 5. Variation of DBPs concentration in sedimented water and F/A filtrate.

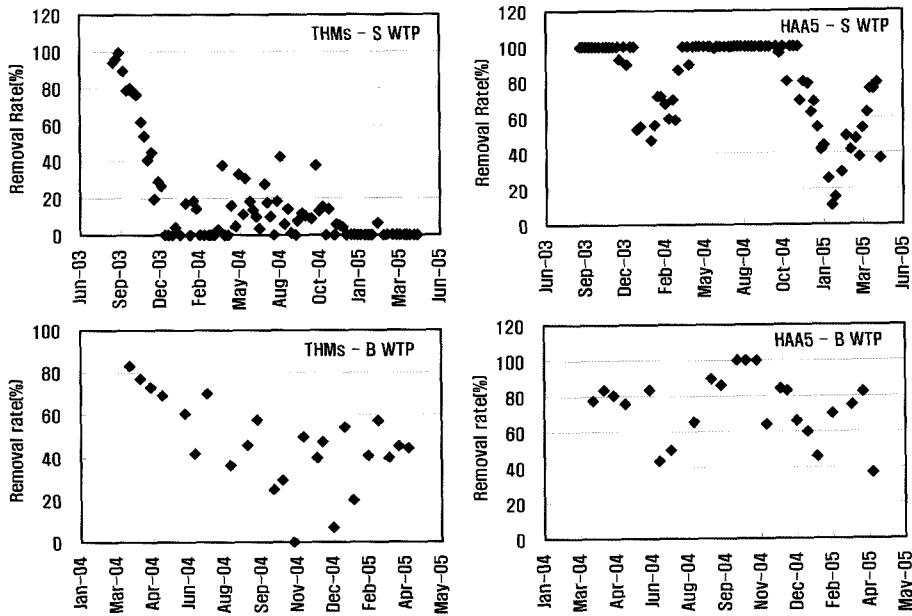


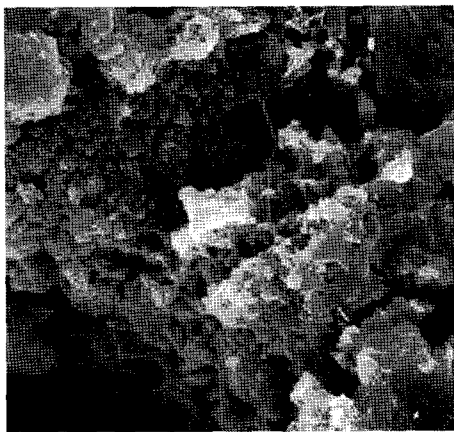
Fig. 6. DBPs breakthrough curve in Filter adsorber of S and B WTP.

에는 S정수장보다는 다소 낮은 제거효율을 보이고 있다. 이러한 원인은 B정수장의 경우 S정수장의 F/A공정보다 높은 총고 및 EBCT를 보유하여 입상활성탄 흡착이 주 제거 메커니즘으로 알려진 THM에 대하여 좀 더 높은 제거효율을 나타낸 것으로 판단된다. 그러나 입상활성탄에 의한 용존유기물질의 제거에 있어 초기 제거효율이 낮고, S정수장 F/A 공정에서 나타난 생물학적 기작에 의한 HAA의 제거효율보다 다소 낮은 HAA의 제거경향을 보이고 있다. 이러한 현상은 정수장의 유입원수 특성, 염소처리 공정, F/A 운영방식 등 여러 가지 원인에 의한 결과로서 향후 지속적인 평가가 필요하며, 정수장의 공정운영에 있어 제거대상물질에 대한 명확한 선정에 의한 운영이 추후 필요할 것으로 판단된다.

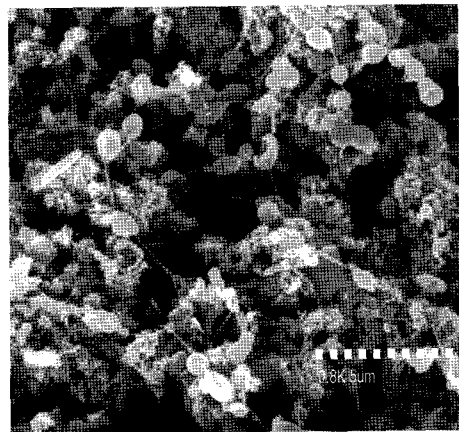
### 3.4. 생물학적 제거기작

대상정수장 F/A공정에서 미생물이 성장할 수 있는 유기물의 농도를 의미하는 동화가능유기탄소(Assimilable Organic

Carbon, AOC)분석을 통하여 수돗물의 안전성 및 F/A 공정의 효율 평가를 실시하였다. 일반적으로 AOC는 미생물이 성장할 수 있는 유기물의 농도를 의미하며, 염소요구량을 감소시키기 위해서 AOC 농도 저감이 필요하고, 관로에서의 미생물 재증식력에 대한 간접적 지표로 사용할 수 있으며, F/A 공정의 효율평가 및 생물분해성 평가의 지표로 사용이 가능하다. 대상 F/A여과지의 유출수를 분석한 결과, S정수장 원수의 경우 AOC농도가 약 173(ug/L-Acetate)정도로 분석되었으며, 침전공정을 거치면서 평균 132(ug/L-Acetate)까지 제거되었다. F/A공정의 유출수에서는 평균 81(ug/L-Acetate)로서 후속 소독공정이 있는 경우 관로내 재증식에서 안전하다고 평가되고 있는 농도인 100(ug/L-Acetate)이하의 값을 나타내었다. 또한 B정수장의 경우에서도 원수에서 약 165 (ug/L-Acetate)로서 S정수장 원수와 유사한 범위를 나타냈으며, 침전공정을 거치면서 133(ug/L-Acetate), F/A 처리수의 경우 89(ug/L-Acetate)로 S정수장과 유사한 처리효율을 보이고 있다.



(a) F/A process of S WTP



(b) F/A process of pilot scale

Fig. 7. Scanning electron microscope(SEM) of GAC media in F/A process.

입상활성탄은 활성탄 층내에 미생물이 서식하기에 매우 유리한 조건을 가지고 있기 때문에<sup>8,9)</sup> 많은 미생물의 활동에 의한 생물학적 제거기작을 기대할 수 있다. S정수장에서 입상활성탄 시료를 채취하여 층내 미생물의 서식을 주사전자현미경(SEM)을 이용 측정된 결과를 나타낸 Fig. 7(a)를 보면, 13개월 운영된 F/A 층내 활성탄 여재에서 미생물의 흔적을 관찰할 수 있었으나, 입상활성탄 흡착지에서 관찰할 수 있는 생물막 형성은 발견되지 않았다. 그러나 27개월 운영된 파일럿규모 F/A 공정에서 측정된 자료(b)를 보면 입상활성탄 층내에서 다량의 미생물 번식을 확인할 수 있었다. 향후 AOC, BDOC 등의 지속적인 분석을 통하여 F/A공정에서의 생물학적인 제거효율에 대한 규명을 실시하여 효율적인 공정운영을 위한 기초자료로 활용할 계획이다.

3.5. 여재 품질평가

대상정수장 F/A공정에서 사용중인 여재를 샘플링하여 물성치를 분석한 결과를 Table 3과 4에 각각 나타내었다. 잔류평형농도 0.02 mole/L에서 1g의 활성탄에 흡착되는 요오드의 g수를 나타내는 요오드가는 일반적으로 활성탄의 내부세공표면적에 비례하며 비표면적의 간접지표로 활용되어진다. 또한, F/A가 도입되어 운영되어지고 있는 미국내 정수장의 경우 요오드가는 여재의 교체시기를 결정하는 근거로서도 사용되어 지고 있으며, 일반적으로 200 또는 400 mg/g이하가 되면 여재의 교체시기로 판단하고 있다.<sup>3,10)</sup> Table 3에서 나타낸 바와 같이 S정수장에서 초기 신활성탄과 12, 21개월 경과된 활성탄에서의 요오드가는 21개월 운영 후 초기 1,010 mg/g에서 635 mg/g으로 감소하였다. B 정수장에서 15개월 운영된 입상활성탄 여재의 경우 사용개월수가 적음에도 불구하고 635 mg/g으로 S 정수장에서 21개월 사용한 활성탄과 동일한 값을 보여주고 있다. 마찬가지로 비표면적과 총세공용적을 측정된 결과를 나타낸 Table 4에서 보이는 바와 같이 S정수장과 B정수장은 비표면적은 유사한 값을 보여주고 있다. 이러한 원인은 유입수의 특성 차이, 정수장의 전염소 투입 등의 약품사용과 관계된 것으로 판단되며, 지속적인 평가가 필요하다. 활성탄흡착지 공정과 비교하여 F/A공정은 높은 유기물 부하, 잔류염소, 응집제 또는 응집보조제, 망간, 빈번한 역세척 등 여러 가지 이유로 여재의 파과시기는 매우 빨리 도래한다는 사실을 인지하고, 지속적인 효율평가 및 여재품질 평가를 지속적으로 실시하여 여재의 교체시기 결정 등에 이용할 계획이다.

Table 3. Characteristics of GAC media for F/A process

Contens	S WTP			B WTP
	New	after 12 months	after 21 months	after 15 months
Iodine No.(mg/g)	1,010	700	635	635
MB Adsorption capacity (mL/g)	-	-	70	70
Phenol value	-	-	81	80
ABS value	-	-	218	189

Table 4. BET Surface area of GAC media for F/A process

	operation (month)	specific surface area (m <sup>2</sup> /g)	total pore volume (cm <sup>3</sup> /g)	average pore diameter (Å)
S WTP	21	635.3	0.319	21.31
B WTP	15	624.8	0.378	25.45

4. 결 론

소독부산물의 제어를 위해 F/A가 도입된 금강수계 S정수장과 낙동강 수계 B정수장의 운영결과를 토대로 용존유기물질(DOC)과 소독부산물(DBPs) 등의 효율평가와 F/A공정 운영인자 등에 대하여 검토하였다.

두 정수장 원수의 용존유기물질 특성은 계절적으로 약간의 차이는 보이지만 전반적으로 친수성과 소수성이 유사한 범위를 보이고 있으며, SUVA값은 S정수장과 B정수장에서 2~4 범위를 나타내었다. F/A공정에서 용존유기물질 제거특성은 운영 초기 흡착능에 의한 빠른 파과특성과 운영시간 경과에 따른 생물학적 제거기작을 나타내고 있으며, 일반적인 입상활성탄 흡착지에서의 용존유기물질 파과특성과 매우 유사한 특성을 보여주고 있다. F/A공정에 의한 소독부산물의 제거특성은 THMs의 경우 급격한 제거효율 감소와 빠른 파과특성을 보이고 있으며, HAA<sub>5</sub>의 경우에는 동절기를 제외하고는 생물학적 제거기작에 의해 매우 높은 처리효율을 보이고 있다. THMs 항목의 경우 S 정수장보다는 높은 층고와 긴 접촉시간을 가지고 있는 B정수장에서 높은 제거효율을 보인 반면, HAA<sub>5</sub> 항목에 대해서는 B정수장의 F/A공정이 다소 낮은 제거효율을 나타내었다. F/A공정 유출수의 평균 AOC 농도는 S정수장 81 µg/L-Acetate, B정수장 89 µg/L-Acetate를 나타냈으며, SEM측정결과 활성탄 여재에서 미생물의 흔적을 관찰할 수 있었다. F/A공정은 활성탄흡착지(Post GAC)공정과 비교하여 높은 유기물 부하, 잔류염소, 응집제 또는 응집보조제, 망간, 빈번한 역세척 등의 여러 가지 이유로 인해 여재 물성치의 감소가 빠르게 나타났다.

F/A공정이 실공정으로 도입되어 1년 이상 운영되어진 결과를 보면 활성탄 여재의 물성치 및 흡착능의 빠른 감소 경향이 있지만, 소독부산물 중 HAA<sub>5</sub>항목이 문제시되는 정수장의 경우 기타여과지로 인증을 받은 F/A공정은 향후 점점 더 강화되는 수질기준의 만족을 위한 대안공정의 하나로서 적용이 가능하리라 판단된다.

참고문헌

- Hyde, R. A., Hill, D. G., Zabel, T. F., and Burke, T., "Replacing sand with GAC in rapid gravity filters," *Journal of AWWA*, 33~38(1987).
- Graese, S. L., Snoeyink, V. L., and Lee, R. G., "Granular activated carbon Filter-Adsorber systems," *Journal of AWWA*, 79(12) 64~72(1987).
- Graese, S. L. and Snoeyink, V. L., "GAC Filter-Adsorber"

- bers," *AWWARF* research report(1987).
4. Kitis, M., "Probing chlorine reactivity of dissolved organic matter for disinfection by-products(DBP) formation ; relations with specific ultraviolet absorbance(SUVA) and development of the DBP reactivity profile, Ph. D. Dissertation, Clemson Univ.(2001).
  5. 채선하, 이경혁, 임재림, 김성수, 왕창근, 안효원, "수원에 따른 용존유기물질의 생성 특성과 계절적 변화," 대한환경공학회지, **26**(11), 1244~1250(2004).
  6. Xie, Y. F., Wu, H., and Tung, H. H., "Haloacetic acid removal using granular activated carbon," *AWWA Research Foundation*(2004).
  7. Owen, D. M., "Removal of DBP precursors by GAC adsorption," *AWWA Research Foundation*(1998).
  8. DiGiano, F. A., "Microbial activity on Filter-Adsorbers," *AWWARF*(1992).
  9. Stringfellow, W. T., Kathryn, and DiGiano, F. A., "Enumerating and disinfecting bacteria associated with particles released From GAC Filter-Adsorbers," *Journal of AWWA*, 70~80(1993).
  10. Wiesner, M. R., Rook, J. J., and Fiessinger, F., "Optimizing the placement of GAC filtration units," *Journal of AWWA*, 39~49(1987).