

입상활성탄 공정의 진단 및 효율적 운영방안: D 정수장을 중심으로

Assessment and Optimization of Granular Activated Carbon (GAC) Process in Water Treatment Process

김성수 · 이경혁*

Kim, Seong Su · Lee, Kyung Hyuk*

한국수자원공사 수자원연구원 국제상하수도연구소

(2005년 9월 20일 논문 접수; 2005년 11월 30일 최종 수정논문 채택)

Abstract

Granular Activated Carbon (GAC) is widely used in drinking water treatment. Many of the problems occurring in the GAC process are associated with the operation goal and performance. The purpose of this study were to evaluate the design, operation, and performance of granular activated carbon process in D water treatment plant. The optimal operation conditions of GAC process such as backwashing condition, granular activated carbon replacement time were discussed. The design, operation and performance of GAC process is influenced by their raw water characteristics and placement within the treatment process sequence.

A critical analysis of plants experience and the information from the literature identifies the effectiveness of GAC process and indicates where modifications in design and operation could lead to improved performance. It would be useful to evaluate and optimize the GAC process in other treatment plant.

Key words: Granular Activated Carbon, Advanced Water Treatment Process, Optimal Operation, Replacement Time

주제어: 입상활성탄, 고도정수처리, 최적운전, 교체주기

1. 서 론

낙동강 오염사고 발생 등 상수원에서의 수질사고 발생과 함께 국민들의 먹는물에 대한 욕구가 커지면

서 90년대 초반부터 시작된 오존과 입상활성탄 공정으로 대표되는 고도정수처리시설이 도입되어 운영 중이거나 현재 도입중인 정수장수는 2005년 현재 20개소를 넘고 있다. 1994년 낙동강 수계 화명정수장의 준공으로 시작된 고도정수처리공정은 전·후오존+

*Corresponding author Tel: 82-42-860-0373, FAX: +82-42-860-0399, E-mail: kh.lee@kowaco.or.kr (Lee, K.H.)

활성탄 공정과 후오존 + 활성탄 공정이 대부분을 차지하고 있으며, 한강과 금강수계의 경우 일부정수장에서 입상활성탄 공정이 도입되어 운영 중에 있다. 정수처리 공정은 안심하고 마실 수 있는 물 공급차원을 넘어 이제는 맛있는 물에 대한 공급을 목표로 향후 고도정수처리공정 도입은 지속적으로 증가할 것으로 예상된다.

국내 고도정수처리시설이 도입 운영 중에 있는 입상활성탄 공정은 국내의 다양한 수원에서 각종 유기오염물질 제거, 자연유기물질 (Natural Organic Matter, NOM) 및 소독부산물 (Disinfectant By-product, DBPs) 제어, 맛·냄새 물질 제거 등에 이미 효과 및 타당성이 입증되었다. 국내에서 입상활성탄이 도입되어 운영된 기간도 이제 10년이 지난 상황이지만, 일부 정수장을 제외하고는 대부분 입상활성탄 공정의 운영에 있어 제거대상물질에 대한 명확한 선정과 그 처리목표가 설정되어 있지 않고, 그에 따라 공정의 최적화를 위한 모니터링도 부족한 상황이다. 환경부의 2001년과 2004년 용역결과에서 제시된 입상활성탄 공정의 설계상의 문제점으로는 오존공정과 연계에 의한 잔류오존의 유입문제, 공탐체류시간 (EBCT) 선정근거, 사용 활성탄의 재생시 구조물의 설계문제, 입상활성탄 재생시설, 비효율적인 역세척 시설 등을 문제점으로 지적하고 있다. 또한 운전상의 문제점으로는 활성탄 제품선정, 역세척 주기 결정, 교체시기 결정, 재생 및 재생기술에 대한 인식부족, 잔류 오존의 유입과 공정최적화를 위한 모니터링 부재 등을 지적하고 있다. 이러한 여러 가지 이유로 10년 동안 운영되면서 처리효율 분석 및 개선방안 등의

운영 노하우에 대한 정보가 부족한 상황이며, 신규 도입된 정수장에서 기존의 실패경험을 되풀이 하는 경우가 많은 것으로 알려져 있다.

입상활성탄 공정은 탁질 제거가 주 목적으로 운영되어 왔던 기존정수처리 공정과는 달리 공정의 도입 목적이 분명해야 한다. 특정 수계 정수장에 도입되어 운영되는 입상활성탄은 주 제거대상물질의 명확한 선정에 따라 공정선정 시 최적공정의 선정뿐만 아니라, 역세척 등의 공정의 운영과 입상활성탄 여재의 교체 및 재생주기 결정 등의 입상활성탄 공정의 유지관리 방법이 달라질 수도 있다. 그러나 고도정수처리 공정이 도입된 일부 정수장에서는 제거대상 목표나 기준의 설정 없이 막연한 수질개선의 기대 속에서 운영되면서 고도정수처리 공정의 운영효과가 나타나지 않는 시설도 많으며, 또한 그러한 효과를 판단할 수 있는 자료도 부족한 실정이다.

본 논문에서는 경기도 소재 D정수장에서 운영중인 입상활성탄 공정의 진단결과를 토대로 입상활성탄 공정의 설계 및 운영상에서 발생하는 문제점을 짚어보고, 그에 따른 개선방안을 제시하여 고도정수처리를 위해 도입된 입상활성탄 공정의 효율적인 운영방안을 마련과 향후 입상활성탄 공정의 운영에 있어 효율화를 제고하고자 하였다.

2. 대상정수장의 일반현황

2.1. 시설현황

경기도 D정수장은 일반적인 급속모래여과로 구성되어지는 표준정수처리 공정과 고도정수처리시설인

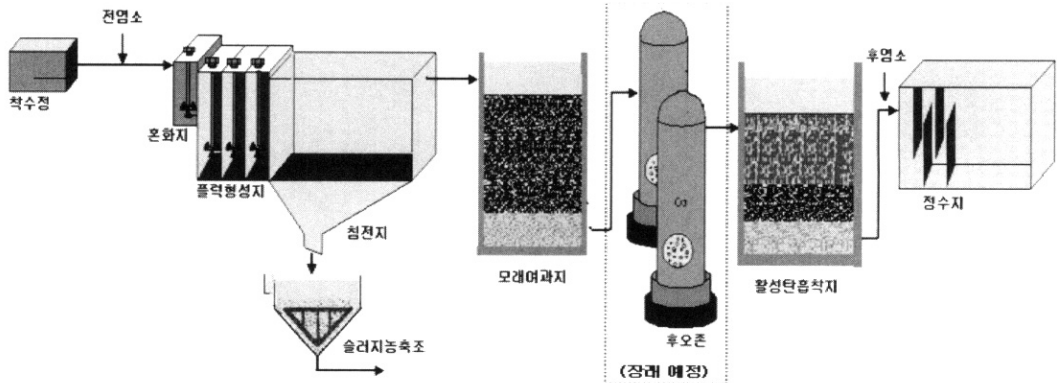


Fig. 1. D정수장의 정수처리 공정도.

Table 1. 입상활성탄 흡착지의 시설 및 운전사항

시 설	설 계 사 양
입상활성탄 흡착지	<ul style="list-style-type: none"> • 형식: 철근콘크리트 지하구조 • 여과방식: <ul style="list-style-type: none"> • 규격 및 지수: B40 L10.8m, 6지 • 총여과면적: 259㎡(43.2㎡/지) • 여과속도: 232.8m/일(운영: 154.3m/일) • 공탐체류시간(EBCT): 15.6분 • 여과사: 국산 야자계 활성탄 <ul style="list-style-type: none"> • 두께: 활성탄 2.5m • 재생: 2001년 11월 신탄으로 교체 • 입도/경도: 95% 이상 • 충전밀도/요오드흡착력: 0.48 이하/1,100 이상 • 총세공용적/비표면적: 0.45 이상/1,000 이상 • 여과사리층 구성 <ul style="list-style-type: none"> • 두께: 30cm(자갈)
역세척 공정	<ul style="list-style-type: none"> • 형식: 공기 · 물 순차 역세척 • 역세척 속도: 공기역세척(0.4㎡/㎡/분) 물 역세척(0.3-0.6㎡/㎡/분) • 역세척 빈도: 1회 / 15~30일
하부집수장치	<ul style="list-style-type: none"> • 형식: 스트레이너 방식

입상활성탄 흡착시설로 구성되어 있다. Fig. 1에 D정수장의 정수처리 공정도를 나타내었다.

입상활성탄 흡착지는 유입부의 균등분배에 의한 자연평형형 정속여과 방식으로서 역세척 공정은 공기 병용 역세척을 운영하도록 설계되어 있다. 또한, 시설용량 60,000m³/일을 기준으로 총 6지로 구성되어 있으며, 현재는 일평균 40,000m³/일 규모로 운영하고 있다. 충전된 활성탄은 초기에는 국산석탄계 활성탄이었으며, 31개월 사용 후 국산 야자계 활성탄으로 교체하여 2005년 7월 현재 43개월 운전 중에 있다. 하부집수장치로 스트레이너를 사용하고 있으며, 여층은 지지층인 자갈층 0.3m와 입상활성탄 층고 2.5m로 구성되어 있고, 입상활성탄 표면에서 트러프 하단까지 2.0m, 트러프 깊이 0.40m로 구성되어 있다. D정수장의 입상활성탄 흡착지의 시설 및 운전사항을 Table 1에 나타내었다.

2.2. 유입원수 수질현황

D정수장은 연천댐 직하류인 한탄강 표류수를 원수로 취수하여 사용하고 있다. 정수장으로 유입되는 수원은 하천 수질환경 기준의 BOD기준(평균 1.8

Table 2. D정수장 취수지점에서의 각 항목별 수질

구 분	범 위(() :평균치)
pH	5.7~9.1(7.6)
Temp(°C)	1.0~28.0 (12.9)
DO(mg/L)	6.1~14.0 (10.2)
BOD(mg/L)	0.7~3.7(1.8)
COD(mg/L)	2.3~7.7 (4.3)
SS(mg/L)	0.8~48.0 (6.0)
Chlorophyll-a(mg/㎡)	0.7~42.5 (9.4)
T-N	2.47~5.20 (4.04)
NH ₃ -N	0.04~2.01 (0.67)
NO ₃ -N	1.14 ~ 4.21 (2.75)

mg/L)으로 상수원수 II 등급 수질을 유지하고 있으나, 관련 용역보고서 상에 나타난 용존유기탄소(DOC)의 농도는 평균 2.5mg/L의 높은 농도를 보이고 있다. 취수지점에서 2003년부터 2005. 4월까지 관측된 수질자료를 나타낸 Table 2를 보면, 암모니아성 질소가 수질기준인 0.5mg/L 이상으로 상시 유입되고 겨울철에 특히 높게 검출되는 경향을 보이고 있다. 또한, 진단시 발견된 모래여과 공정에서 모래여과의 망간산화 현상으로 보아 원수 중에 망간도 유입되고 있는 것으로 판단된다. 따라서 D정수장의 유입원수는 유기물, 암모니아성 질소, 망간 등의 유입 등으로 매우 높은 염소요구량을 가지고 있으며, 고농도의 전염소 주입에 의해 현재 소독부산물의 발생농도가 매우 높게 나타나고 있다. 그러나 D정수장의 취수원인 한탄강은 상류에 산재되어 있는 오염원의 영향으로 양질의 원수수질을 얻기 어려우며 향후 수질악화가 우려되어 정수처리 공정 운영에 신중을 기해야 할 필요성을 가지고 있다.

3. 입상활성탄 공정의 진단

고도처리시설 중 입상활성탄 공정은 기존 공정으로는 수질기준을 만족하기 어려운 상황이나, 유입 가능한 오염물질 처리, 맛냄새 문제의 해결, 미생물 재증식 방지 등 수질향상을 목적으로 도입되는 공정이다. 따라서 탁도의 제거나 미생물의 불활성화 같은 공통의 목적 보다는 각 도입정수장의 현황에 따라 도입목적이나 시설 및 운영에 차이를 가지고 있어, 기존공정의 진단기술 보다는 복잡하고 다양한 관점에서 공정의 평가와 진단이 이루어져야 한다. 2002년 환경

부의 정수장 진단기술 개발 보고서에서 제시된 입상활성탄 공정의 진단 절차에서는 주 제거대상물질의 검토투터 입상활성탄의 물리적 특성, 오존공정과 연계여부, 입상활성탄의 공탑체류시간(EBCCT), 역세척, 미생물 유출, 처리효율 평가 등 다양한 인자를 제시하고 있다.

통상적인 입상활성탄 공정에서의 처리대상물질은 용존유기물질, 소독부산물, 맛 냄새물질, 미량 유기오염 물질들이다. 처리효율 평가는 처리목표 물질에 대하여 활성탄 흡착지 유입수 대비 유출수의 제거율을 통해 이루어지지만, 활성탄 공정은 활성탄의 처리수량이나 처리기간 등에 따라 흡착능의 변화와 함께 처리효율에서 차이를 보임에 따라 처리대상 물질에 대한 지속적인 분석을 통해서만 정확한 평가가 가능하며, 그에 따라 향후 활성탄의 교체 및 재생주기 시점을 얻을 수 있다.

입상활성탄 공정은 탁질의 제거목적으로 운영되는 공정은 아니지만 활성탄 흡착지 공정에서도 추가적인 탁질의 제거가 발생하며, 장시간 운영시 손실수두가 증가하게 된다. 손실수두가 증가하고 여층내 유속이 빨라지게 되면 역류된 현탁 물질이나 여재 내 미생물 등이 누출되어 처리효율이 저하되고 정수를 오염시키는 사고를 유발할 수도 있다. 비효율적인 역세척 조건 중 과도한 역세척 수량 및 급격한 역세척수의 공급 등은 여재의 손실을 유발할 수 있으며, 낮은 역세척 속도 및 역세척수의 공급은 비효율적인 역세척이 되어 여상의 급격한 폐색 및 여재의 오염을 유발하게 된다. 활성탄 흡착지 공정에서 역세척 공정은 역류된 탁질 물질의 제거기능뿐 아니라 미생물 누출의 방지, 활성탄 여재 층내 미생물 양의 조절 등의 기능도 가지고 있다. 따라서 역류된 탁질 물질의 효율적인 제거뿐 아니라, 활성탄 층 내의 미생물의 양을 조절하기 위한 염소함유 역세척수 사용 등 여러 가지 최적의 역세척을 달성하기 위한 기법 등이 요구되어진다. 그러나 입상활성탄 여재는 모래보다 가벼운 입자 특성으로 인하여 과도한 역세척 수량이 공급되어지면 많은 활성탄 여재의 유실이 발생하게 된다. 따라서 기존의 모래여과지나 안트라사이트를 이용한 이중여과 여과지의 여과공정과 마찬가지로 효율적인 역세척 조건을 결정하는 인자들은 여과 속도, 여재의 크기와 형상, 수온, 여재의 밀도 또는 공급율 등 여러 가지

요인들을 고려하여야 한다. 더구나 활성탄 층고(Bed Depth)를 키워 처리효율을 높이고자 할 경우에는 활성탄 탄층이 두꺼워 운전수위가 높아지며 흡착지의 높이가 커짐에 따라 수역세만으로는 효율적인 역세척을 달성하기 어렵기 때문에, 세척이 불충분한 경우에 효과적인 방법으로 공기세척이 통상 사용되어지지만, 입상활성탄 여재의 유실, 마모 및 잔류 기포에 의한 편류의 문제가 있다.

음용수 처리용 입상활성탄 흡착지로부터 유출되는 입상활성탄 미립자를 주사전자현미경으로 관찰하면 균, 구균, 사상균, 진균(fungi)뿐만 아니라, 세균 포식성 원생동물(bacterivorous protozoan)이 다수 관찰된다. 또한 사상세균의 세포가 활성탄 입자 구멍내로 서로 얽혀 있는 것이 관찰할 수 있으며, 입상활성탄 여과지내의 입자에서 검출된 중속영양세균으로는 *Arthrobacter*, *Alcaligenes*, *Acinetobacter*, *Bacillus*, *Micrococcus*, *Corynebacterium*, *Pseudomonas*, *Moraxella*, *Flavobacterium*, *Achromobacter* 등이 있다.

입상활성탄 공정은 수많은 수종의 용존 유기물질에 의하여 일정기간 운전 후에는 흡착능이 감소하여 재생 또는 여재의 교체가 필요하게 된다. 입상활성탄 공정이 도입되어진 많은 정수처리 시설에서는 고가의 활성탄 여재 비용을 고려하여 재생 또는 교체시기 결정에 대한 많은 어려움이 있다. 명확한 교체 및 재생시기 결정기준이 없이 경험적 또는 개략적으로 수개월에서 수년 주기로 재생 또는 교체를 하는 것이 현실이며, 현재 재생 또는 교체시기 결정 방법에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 입상활성탄 공정의 활성탄 교체 및 재생주기의 결정은 수질이나 운영인자의 지속적인 모니터링을 통해 평가되어야 한다. 국내에 도입된 입상활성탄 시설들의 정수장별 활성탄 재생주기에 대한 자료에 의하면, 조사대상 17개 정수장의 활성탄 평균 재생주기는 약 34개월(± 13 개월)로 나타났으며, 11~64개월로 대부분의 정수장은 2~3년 정도의 재생주기를 나타내고 있다. 재생 및 교체주기를 결정하는 근거로는 첫째, 선정된 처리 목표물질의 제거율에 기인한 활성탄 처리성능의 평가이다. 통상적인 입상활성탄 시설에서 처리대상물질은 용존 유기물질, 소독부산물, 맛 냄새물질, 미량유기오염물질들이다. THM과 같은 소독부산물은 활성탄의 흡착능에 의존적이기 때문에 교체나 재생시기가 수개월

이고, 맛 냄새물질과 용존유기물질은 흡착능과 생분해능에 의해 제거 가능하기 때문에 그 주기가 길어진다. 둘째, 활성탄의 품질 및 성능 평가이다. 대표적인 예가 요오드 흡착능으로서 업체별로 자사 제품에 대한 재생 시기를 지정하는 권고치가 있으며, 대략 요오드 흡착능이 600~650mg/g 범위에서 재생시점을 권장하고 있다. 셋째, 통수기간 및 Bed Volume이다. 일정 통수량에 도달되면 교체하거나 재생하는 것이다.

입상활성탄 공정이 국내 도입되어 운영되기 시작한 후 10여년이 지나고 있지만, 현재 입상활성탄 공정의 운영 및 유지관리, 진단기술에 대한 자료는 매우 적은 것이 사실이다. 따라서 본 논문에서는 D정수장 입상활성탄 흡착지에 대한 진단결과를 토대로 효율적 운영방안 마련을 위한 여러 가지 평가인자를 검토하였고, 시설의 기초 자료조사, 운영관리자와의 면담, 설계자료, 시설 및 설비의 조사를 바탕으로 한 기초능력 평가를 실시하였다. 또한 성능제한 인자, 운영 및 유지 관리상의 문제점 등을 파악하고자 시설 및 설비의 현장진단을 실시하였다. 이러한 여러 가지 설계기준 평가, 역세척 등의 운영현황 평가, 공정의 처리효율 평가 등의 현장진단 결과와 사용 중인 활성탄 여재의 품질특성 결과를 바탕으로 향후 D정수장 입상활성탄 공정의 고도정수처리 운영에 대한 포괄적인 운영방안을 제시하고자 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 설계기준에 대한 평가

D정수장 입상활성탄 공정은 15.6분의 공탐체류시간(EBCT)과 활성탄 층고 2.5m로 구성되어 통상적인 입상활성탄 흡착지의 설계인자를 적용하고 있다. 고도정수처리시설 도입시 장래분으로 오존공정의 도입이 고려되어 현재 오존접촉조 부지가 확보되어 있는 상황이고, 이러한 오존시설의 도입을 고려하여 입상활성탄 흡착지에서 발생될 수 있는 오존취기를 대비하여 흡착지 상부가 밀폐되어 있는 상황이다. 관측을 위한 출입부와 여재의 보충 및 교체를 위한 공간을 제외하고 콘크리트 구조로 건설되어 활성탄여재의 교체 작업시 작업자들에게 매우 큰 어려움이 있었다.

입상활성탄 흡착지의 선속도(Linear Velocity, LV)

는 설계 값이나 현재 운영 값 모두 일반적인 범위인 5~10m/일을 만족하고 있다.

- 설계 처리유량 Q = 60,000m³/d
- 통상 처리수량 Q = 40,000m³/d
- 흡착지수 N = 6지
- 흡착지 면적 A = W 4.0m × L 10.8m
- 흡착지 층고 H = 2.5m
- 선속도(Linear Velocity, LV)

$$\begin{aligned} \text{- 운영 선속도(m/h)} &= \frac{\text{유량(m}^3\text{/분)}}{\text{흡착지면적(m}^2\text{)}} \\ &= \frac{40,000(\text{m}^3\text{/d)}}{4 \times 10.8 \times 6\text{지(m}^2\text{)}} \\ &= 154.3\text{m/d} = 6.4\text{m/h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{- 1지 역세척 시 선속도(m/h)} &= \frac{40,000(\text{m}^3\text{/d})}{4 \times 10.8 \times 5\text{지(m}^2\text{)}} \\ &= 185.2\text{m/d} = 7.7\text{m/h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{- 설계 선속도(m/h)} &= \frac{60,000(\text{m}^3\text{/d})}{4 \times 10.8 \times 6\text{지(m}^2\text{)}} \\ &= 231.8\text{m/d} = 9.6\text{m/h} \end{aligned}$$

- 공탐체류시간(EBCT)

$$\begin{aligned} \text{- 운전 EBCT(분)} &= \frac{\text{활성탄의부피(m}^3\text{)}}{\text{유량(m}^3\text{/분)}} \\ &= \frac{4 \times 10.8 \times 2.5 \times 6\text{지}}{40,000\text{m}^3\text{/d}} = 23.3\text{분} \\ &\approx 23\text{분} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{- 설계 EBCT(분)} &= \frac{4 \times 10.8 \times 2.5 \times 6\text{지}}{60,000\text{m}^3\text{/d}} = 15.6\text{분} \\ &\approx 15.6\text{분} \end{aligned}$$

4.2. 운영에 대한 평가

4.2.1. 역세척에 대한 평가

D정수장 입상활성탄 흡착공정의 역세척 방법은 공기, 물의 순차적인 역세 방법을 사용하고 있으며, 역세척수 유입밸브의 개폐 방식이 on/off 방식으로서 밸브의 순차적인 개도 시설이 구성되어 있지 않다. 따라서 운전자가 수동으로 밸브 조작에 의해 육안확인 방법을 이용 역세시간 및 역세척수 유입 등을 조절하여 운전하고 있다. 또한 드레인 밸브의 수동조작에 의한 여과지 배수시 여재층 높이가 위치별로 차이가 발생함에 따라 하부집수장치의 파손이나 하부 자갈층의 교란이 의심된다. 역세척 시 여재 표층부 일정 높

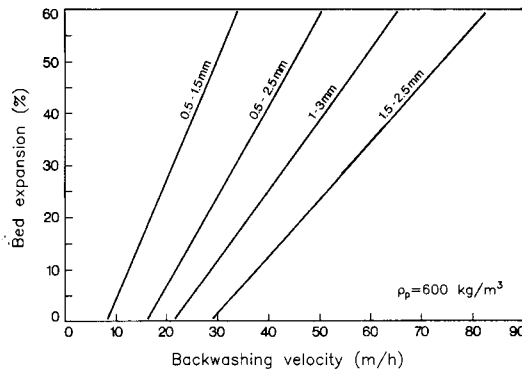


Fig. 2. 활성탄 입자 크기별 흡착지에서 역세척 동안 여층 팽창율.

이까지 물을 배수하지 않고 트러프를 이용한 배수 후 공기역세, 물역세의 순차적인 시행을 통하여 역세척 공정을 운영하고 있다. 그러므로 초기 공기역세 시작 높이가 트러프 수위와 같기 때문에 낮은 공기역세 유속(0.4m/min)에서도 활성탄 여재의 손실이 발생하고 있으며, 후속 물에 의한 세척과정에서도 낮은 역세속도로 역세척 공정에서 탁질의 효율적인 제거가 이루어지지 않고 있다.

역세척시 여재 팽창율은 그림 2의 활성탄 입자크기에 따른 여층팽창율을 나타낸 그림처럼 입자크기에 매우 민감하다. 활성탄 흡착지에 충전되는 활성탄의 일반적인 유효경인 0.5~1.0, 균등계수는 1.5~2.5의 경우 그래프에서 0.5~2.5mm를 적용하면 D정수장의 0.3~0.6m/min의 역세속도는 20~30% 여층팽창을 이루기에 충분하다.

트러프까지의 높이는 통상 여재 팽창율 25%에 여유분 15cm와 트러프 깊이를 합하여 산정되며 동계 평균기온(5°C)을 기준으로 결정한다. 활성탄 흡착지에서 역세척 효율을 극대화시키기 위해서 트러프 높이는 여재 팽창율 25%에 여유분 15cm와 트러프 깊이를 합하여 1.2m 이상이 요구되어 진다. 이는 공기병용 역세척 방식을 사용할 경우 공기주입시에는 최소유동화 속도의 50% 부근의 저속의 역세척 속도를 사용하기 때문에 역세척수에 의한 여재의 팽창이 없지만, 공기병용 역세척 후 탁질의 월류를 위한 고속 역세척시는 여재팽창과 air binding 효과를 감안하여 트러프 높이를 여재표면 위 1.2m 이상으로 확보해야 하기 때문이다.

- 흡착지 깊이: 2.5m
- 활성탄: 2.5m×25%(팽창율, 5°C 기준)=0.63m
- 트러프 깊이: 40cm
- 여유분: 15cm
- 요구되는 트러프까지 높이: 1.18m(=63cm+40cm+15cm)

D정수장 입상활성탄 흡착지의 여재표층에서 트러프까지의 높이는 2.0m로 요구되는 트러프 높이에 비해 매우 높은 편이다. 따라서 트러프 높이의 증가 없이 현 상태에서 역세척 속도를 강화하여 여재 팽창율을 증가시켜 역세척 효율을 극대화해야 할 필요성이 있다. 따라서 원활한 역세척 공정의 운영을 위하여 역세 밸브의 단계적 개폐가 가능한 구조로 개선을 실시하고, 역세속도를 트러프의 여유고와 여재팽창을 고려하여 강화된 속도에 의한 세정이 요구되어 진다. 공기와 물 병용 역세척시 물과 공기의 역세속도는 여재의 제조사의 권장치와 아래의 Amitharajah(1991)가 제시한 식과 같은 경험식 등을 참고자료로 실험적으로 구하여 적용하는 것이 가장 타당한 것으로 판단된다(Stevenson, 1995)

$$35.2Q_a^2 + \% (V/V_{mf}) = 26.6$$

V = 역세척속도(m/분)

V_{mf} = 최소유동화속도(m/분)

Q_a = 공기주입속도(m/분)

a, b = 상수

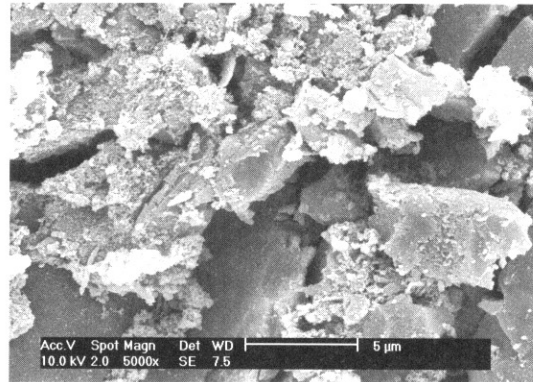
4.2.2. 처리효율 평가

D정수장은 입상활성탄 공정의 효율평가 및 최적화를 위한 필수적인 운영데이터(DOC 파과곡선 등) 부족으로 효율평가에 어려움이 많으며, 소독부산물 등의 수질분석 결과 부족 및 실시간 모니터링을 위한 계측장비의 미비 또한 효율적인 공정운영 마련에 어려움을 주고 있다. 기존의 각 항목별 분석 자료가 없거나 충분하지 못한 관계로 입상활성탄 공정의 처리효율 평가는 시료의 샘플링에 의한 분석결과로 실시하였다. D정수장은 암모니아성 질소의 제거를 위한 고농도 전염소 투입에 의한 공정운영으로 높은 소독부산물의 발생이 예상되어진다. 총 3회에 걸친 모래여과수 대비 입상활성탄 공정의 샘플링에 의한 THM과 HAA 등의 소독부산물과 용존유기물질(DOC)의

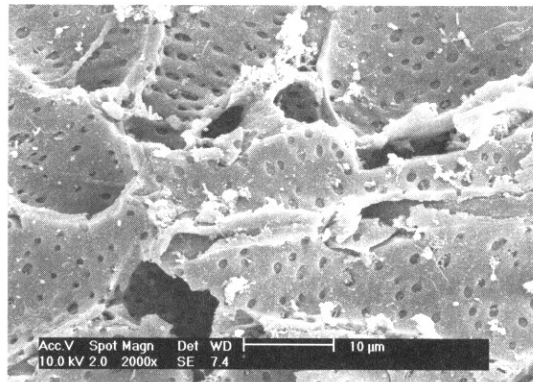
분석결과, 용존유기물질의 경우 모래여과수 즉 입상활성탄 공정으로 유입되는 유입수의 평균농도는 1.56 mg/L, 유출수의 평균농도는 1.41mg/L로서 입상활성탄 공정은 유입수 대비 평균 10% 미만의 매우 낮은 용존유기물질 제거율을 나타내고 있다. 소독부산물의 경우도 마찬가지로 THM, HAA, CH 등의 각 항목별로 낮은 제거효율을 나타내거나 또는 처리수의 농도가 유입되는 모래여과수의 농도보다 더 높게 검출되는 경우도 발생하였다. 물론 총 3회에 걸친 각 공정별 유출수에 대한 분석 자료로서 활성탄 흡착지의 처리효율에 대해 단언하기는 어려운 상황이다.

4.2.3. 생물학적 영향 평가

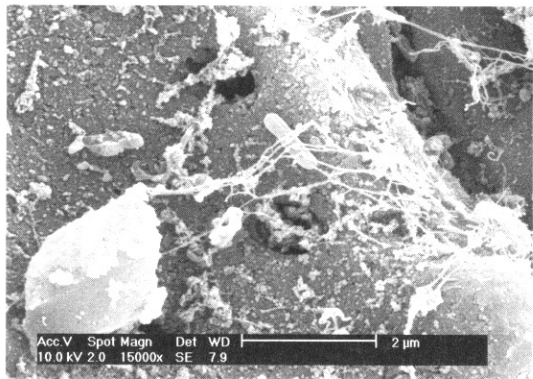
D정수장에서 42개월 동안 운전된 입상활성탄 흡착지 공정에서 층고 2.5m 중 여재 표층으로부터 50cm 간격으로 150cm까지 3개의 샘플을 채취하여 주사전자현미경(SEM) 분석을 실시하여 그림 3에 나타났다. 그림에서 보이는 바와 같이 여재표층부터 50cm, 50~100cm의 표층부에서는 미생물의 모습을 관찰할 수 없었으며, 표층부 활성탄은 하부의 활성탄 표면보다 많은 균열과 부스러기 등이 관찰되었다. 100~150cm 부근에서는 미생물의 모습을 관찰할 수 있었으나, 미생물의 양은 다른 정수장 또는 파일롯 플랜트 공정에서 관찰 보고된 활성탄 층내 미생물 모습보다 매우 적었다. 이러한 원인은 유입수인 모래여과 처리수내의 고농도 잔류염소와 운전시간 경과에 따른 활성탄의 세공분포 변화특성에 의한 영향으로 판단된다. 즉, 미세공(micropore)이 잘 발달된 야자계 활성탄이 장기간 운전에 따라 미생물이 주로 서식하는 것으로 알려진 대세공(macropore)의 세공용적이 감소하고 있는 상황에서, 고농도 염소투입에 의한 잔류염소의 영향으로 42개월의 장기간 운전기간에도 불구하고 미생물이 성장할 수 없었던 것으로 판단된다. 향후 입상 활성탄 내 생물학적 제거기작의 효율을 높이기 위해 원수의 염소요구량에 대한 평가를 수질별로 실시하고, 결과를 바탕으로 전염소 투입농도를 조절하여 입상활성탄 공정으로 유입되는 모래여과 처리수에 잔류염소를 낮게 유지하기 위한 공정운영이 필요하며, 모래여과 처리수의 잔류염소를 계측하기 위한 모니터링 장비를 설치하고, 주기적으로 활성탄 층내 미생물 층을 분석하여 오염물질의 제거에 있어



(a) 표층~50cm



(b) 50~100cm



(c) 100~150cm

Fig. 3. 입상활성탄 흡착지 표층으로부터 층고별 주사전자현미경(SEM) 사진.

생물학적 제거기작이 미치는 영향을 지속적으로 판단할 필요가 있다.

4.3. 여재품질에 대한 평가

본 절에서는 D정수장 입상활성탄 흡착지에서 42개월 사용 중인 활성탄 여재를 채취하여 비표면적(BET Surface Area), 총 세공용적(Total Pore Volume)과 주사전자현미경(SEM) 측정에 의해 흡착 및 처리 특성을 살펴보았다. 또한 입상활성탄 공정의 처리수에 대한 분석 결과와 함께 여재의 요오드가(Iodine Number), 메틸렌블루 탈색력(Methylene Blue Adsorption Capacity), 페놀가(Phenol Adsorption Capacity), ABS가 등의 품질평가를 통한 잔류 흡착능을 결정하여 재생 또는 교체시기 결정을 위한 기초자료로 이용하고자 하였다.

D정수장 활성탄흡착지에서 42개월 운영된 활성탄 여재의 샘플을 채취하여 측정한 결과 비표면적은 936.6m²/g, 총 세공용적은 0.3950cm³/g, 평균입径은 16.87Å으로 나타났다. 또한, D정수장에서 사용 중인 여재의 미사용 신 활성탄이 없었던 관계로 입상활성탄 흡착지용으로 널리 알려진 Calgon F400 신탄 제품과 동두천 정수장에서 사용 중인 여재의 Pore Size별 흡착용량 관계를 Fig. 4에 비교하여 나타내었다.

입상활성탄 흡착지의 사용여재 중 하나인 Calgon 사 F400 신탄 제품의 분석데이터와 D정수장 활성탄 흡착지에서 42개월 사용한 활성탄에 대한 Pore Size별 흡착용량 분포 곡선에서 나타난 바와 같이 중세공 영역이 차지하는 비율이 매우 감소하였음을 알 수 있다. Matthew et al.(2003)의 연구결과를 보면 맛·냄새 유발 물질은 geosmin, 2-MIB의 제거에 있어 중세공의 활성화가 중요하다는 연구결과를 제시하였으며, 많은 bench규모 실험에서 미세공부터 중세공의 범위에서 제거효율이 결정된다는 연구결과가 제시되어 있다. 이와 같이 입상활성탄에 의한 오염물질의 제거에 있어 중요한 영역인 중세공부터 대세공에서의 확산율이 중요한 역할을 담당한다는 것은 많은 연구결과에서 제시되었다. D정수장 사용 활성탄의 경우 아자계 활성탄의 특성인 많은 미세공의 발달에 의해 비표면적이나 총 세공용적 측정결과는 그리 큰 감소가 없었지만, 중세공의 용적이 많이 감소함에 따라 분자량의 크기가 대부분 큰 자연유기물질에 대한 제거효율이 매우 저조한 것으로 판단된다.

사용중인 활성탄의 품질특성 평가를 위해 총 42개월 운전중인 입상활성탄 공정의 여재를 채취하여 여

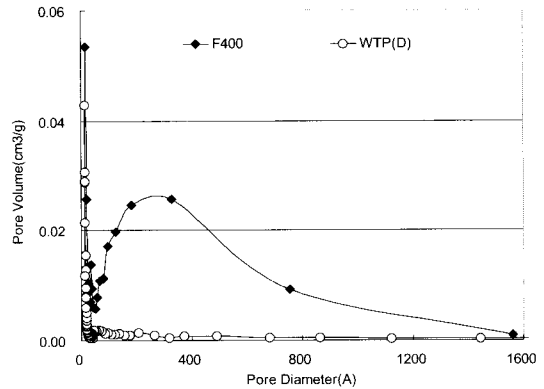


Fig. 4. Pore Size별 흡착용량 분포 곡선.

재의 요오드가, 메틸렌블루 탈색력, 페놀가, ABS가 를 분석하여 Table 3에 나타냈으며, 1차 여재 교체시 31개월 사용한 활성탄의 품질특성 평가 결과도 함께 제시하였다. 잔류평균농도 0.02mole/L에서 1g의 활성탄에 흡착되는 요오드의 g수를 나타내는 요오드가는 일반적으로 활성탄의 내부세공표면적에 비례하며, 비표면적의 간접지표로 활용되어진다. 업체별로 자사 제품에 대한 재생시기를 지정하는 권고치가 있으며, 대략 요오드 흡착능이 600~650mg/g 범위에서 재생시점을 권장하고 있으며, 이는 이 값 이하에서 재생을 하면 재생탄에서 흡착능의 회복효율이 저조해지기 때문이다. 1차 여재 교체시 여재의 요오드가는 710mg/g이었으며, 42개월 사용한 활성탄 여재는 현재 요오드가는 609mg/g로 분석되었으며, 오염물질 중 크기가 큰 분자의 제거능력을 나타내는 것으로 알려진 메틸렌블루 탈색력은 50mL/g을 나타내고 있다. 한국공업규격에서 제시하고 있는 액상용 입상활성탄의 요오드흡착력은 1급이 1,100mg/g 이상이며, 환경부 수처리제 기준과 품질규격에서 제시하고 있는 요오드가는 950mg/g 이상, 메틸렌블루 탈색력은 150mL/g 이상으로서 요오드가는 환경부 수처리제 기준에 비해 36%, 메틸렌블루 탈색력은 기준치에 비해 66%가 감소하였다. 페놀 100µg/L를 10µg/L로 줄이는데 필요한 활성탄의 양을 나타내는 페놀가는 수처리제 기준인 25 이하 보다 월등히 높은 수치를 나타내고 있으며, ABS가도 마찬가지로 기준 50 이하 보다 월등히 높은 값을 나타내고 있다. 이러한 결과로 볼 때 D정수장의 활성탄 흡착지에서 사용중인 여재

Table 3. 입상활성탄 여재의 품질특성 평가 결과

항 목	요오드가 (Iodine Number, mg/g)	메틸렌블루 탈색력 (Methylene Blue Adsorption Capacity, ml/g)	페놀가 (Phenol Adsorption Capacity)	ABS가
1차 여재교체시점 31개월 사용탄	710	120	28	54
D정수장 42개월 사용탄	609	50	67	495

는 흡착능이 거의 소진된 것으로 판단되며, 고농도 염소투입 등의 공정운영에 의해 생물학적 제거효율도 나타나지 않음에 따라 조속한 여재의 교체가 요구되어 진다.

4.4. 개선방안

D정수장은 고도정수처리 공정인 입상활성탄 공정의 여재를 1차 교체하였음에도 흡착지에서의 주 제거 대상물질과 운영목적이 불분명하기 때문에 활성탄 제품과 공정운영 등 여러 가지 사항에 대해 기준이 모호한 상황이다. D정수장으로 유입되는 원수는 유기물 농도가 높고, 암모니아성 질소와 망간의 간헐적인 고농도 유입 등의 수질특성을 가지고 있다. 따라서 입상활성탄 흡착지 공정은 용존유기물질과 THM, HAA와 같은 소독부산물물의 제거, 맛냄새 물질의 제거 목적으로 흡착과 생분해능을 이용하여 운영하는 것이 타당하리라 판단된다. 따라서 원수중 암모니아성 질소 및 망간의 제어를 위한 고농도 전염소 처리에 의해 여과 처리수에 입상활성탄 공정에 영향을 줄 수 있는 잔류염소가 포함될 수 있으므로 잔류염소 농도 제어를 위한 전염소 투입농도 조절 등의 공정운영이나, 향후 필요하다면 탈염소를 위한 시설 설치 등의 적극적인 처리대안 마련 필요하다.

D정수장의 입상활성탄 시설은 처리수의 수질이나 활성탄 성능평가에 대한 정확한 자료 확보가 어려워 명확한 재생이나 교체주기를 판정하기는 어렵지만, 활성탄의 비표면적, 총 세공용적, 요오드가 등의 품질특성 평가 및 소독부산물 등의 처리효율 평가를 실시한 결과 현재 사용 중인 여재는 흡착능이 소진되었으며, 잔류염소의 영향으로 생물학적인 처리효율도 나타나지 않아 즉각적인 여재 교체가 요구되어 진다. 여재의 교체는 여러 문헌자료와 제시된 파일럿 실험 결과를 참고하여 처리효율이 입증된 활성탄 재질의

제품으로 교체하는 것이 바람직하다. 향후 재생 및 교체주기는 지속적으로 공정을 운영하면서 처리대상 물질의 제거율을 파악하여 재검토되어야 한다.

D정수장 입상활성탄 흡착지의 여재구성은 하부지층인 자갈층 위에 활성탄을 포설하여 운영하고 있기 때문에 활성탄 여재의 재생 또는 교체작업에 용이한 구조이지만, 미생물의 방호층 개념으로 설치되는 모래층이 설치되어 있지 않아 미생물의 유출영향을 최소화하기 위한 모니터링과 역세척 공정 운영도 필요하다. 효율적인 역세척 공정운영을 위하여 역세 밸브의 단계적 개폐가 가능한 구조로 개선함이 필요하며, 하부 드레인 밸브의 교체도 검토할 필요성이 있다. 효과적인 역세척을 위해 현재 역세속도 보다 강화된 속도 조건을 실험적으로 구하여 운영하여야 하며, 하부집수장치와 파손여부 및 하부지층인 자갈층의 교란여부를 조사하여 파손시 수리 또는 교체가 요구되어 진다. 또한, 입상활성탄 공정의 효율적인 운영과 재생 또는 교체시기 결정 등의 공정관리를 위한 수질자료의 확보를 위해 주기적인 용존유기물질, 소독부산물 등의 처리대상물질에 대한 파괴곡선 작성을 위한 모니터링이 요구되어지고, 향후 활성탄의 재생 및 교체 시기는 지속적으로 공정을 운영하면서 처리대상물질의 제거율을 파악하여 판단해야 할 것이다

5. 결 론

지금까지 D정수장 입상활성탄 흡착지에 대한 설계, 운영 및 분석결과를 토대로 입상활성탄 공정운영에 대한 검토를 실시하였다. D정수장의 입상활성탄 공정은 유입원수 수질특성을 고려하여 주 제거대상물질을 소독부산물과 맛냄새 물질로 선정하여 운영하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 현재 사용 중인 활성탄은 여재 품질평가와 처리효율 평가 흡착능이 소

진된 것으로 판단되며, 생물학적인 제거효율도 나타나지 않아 여재의 교체가 필요하며, 교체시 운영목적에 최적인 여재를 선정하여 교체함이 필요하다. 활성탄 공정의 운영은 제거대상 물질에 따라 최적의 효율을 달성하기 위한 공정운영이 필요하며, 공정관리를 위해 처리대상물질 및 용존유기 물질 등에 대한 수질 자료의 지속적인 확보가 요구되어진다.

1990년대 초반부터 미량오염물질 등으로 부터 안전한 수돗물의 공급을 위해 도입된 고도정수처리시설은 유입되는 원수 수질특성을 고려하여 그 운영목적이 분명해야 한다. 그러나 고도정수처리시설이 도입된 일부 정수장에서는 도입효과가 나타나지 않았으며, 설계 및 공정의 운영에 있어서 많은 시행착오를 경험하고 있다. 고품질의 맛있는 수돗물에 대한 국민적 욕구 증가의 시대적인 요구를 고려하여 고도정수처리 공정이 운영 중이거나 도입이 예정된 정수장은 이러한 앞선 정수장의 운영결과와 시행착오 등의 많은 자료를 검토하여 최적의 공정운영을 달성해야 할 것이다.

참고문헌

한국수자원공사(2004), 한강수계를 중심으로 한 맛냄새의 효율적 제거 보고서.

- 환경부(2001), 오존, 활성탄 정수시스템의 자동화 및 관련 설비의 개발.
- 환경부(2004), 고도정수처리 정책방향에 관한 연구.
- Amirtharajah, A. (1991), Optimum Backwashing of Dual Media Filters and GAC Filter-Adsorbers with Air Scour, *AWWARF*, Denver, AWWA.
- D.G. Stevenson (1995), Process Conditions for Backwashing of Filters with Simultaneous Air and Water, *Wat. Res.* **29**(11), pp 2594-2597.
- Douglas M. Owen (1998), Removal of DBP Precursors by GAC Adsorption, AWWA Research Foundation.
- Engineering Considerations for GAC Treatment Facilities, AWWA Proceedings (1990).
- Francis A. DiGiano (1992), Microbial Activity on Filter-Adsorbers, AWWA Research Foundation.
- G. Chen, B. W. Dussert and I. H. Suffet (1997), Evaluation of Granular Activated Carbons for Removal of Methylisoborneol to Below Odor Threshold Concentration in Drinking Water, *Water Research*, **31**(5), pp. 1155-1163.
- Matthew F. Tennant, David W. Mazyck (2003), Steam-pyrolysis activation of wood char for superior odorant removal, *CARBON*, 41 pp. 2195-2202.
- R. Scott Summer (1992), Standardized Protocol for the Evaluation of GAC, AWWA Research Foundation.
- William T. Stringfellow, Kathryn, and Francis A. DiGiano (1993) Enumerating and Disinfecting Bacteria Associated with Particles Released From GAC Filter -Adsorbers, *J. of AWWA*, Research and Technology, pp. 70-80.