정수처리장내 급속모래 여과지의 이단복합여과시스템으로의 개량

우달식 · 황규원 · 김준언* · 황병기** · 조관형***†

(재)한국계면공학연구소, *효성에바라엔지니어링,
상명대학교 건설시스템공학과, *청운대학교 철도행정토목학과

Improvement of Rapid Sand Filtration to Two Stage Dual Media Filtration System in Water Treatment Plant

Dal-Sik Woo, Kyuwon Hwang, Jooneon Kim*, Byung-Gi Hwang**, and Kwanhyung Jo***†

Korea Interfacial Science and Engineering Institute, Seoul, Korea

**Hyosung Ebara Engineering Co., Seoul, Korea*

***Department of Civil Engineering, Sangmyung University, Chungnam, Korea*

****Department of Civil and Environmental Engineering, Chungwoon University, Chungnam, Korea*

ABSTRACT

This study aimed for developing a two stage dual media filtration system. It has a sand and activated carbon layer above the under-drain system, and a sand layer above the middle-drain system for pretreatment. When retrofitting an old sand filter bed or designing a new one, this technology can substitute the existing sand filter bed without requiring a new plant site. The removal rate of total particle is 93, and 3~7 μm and 5~15 μm particles are all 97%. These high removal efficiencies of each pollutant due to adsorption and biological oxidation in activated carbon filter layer. The best backwashing method of two stage dual media filtration system is ascertained by air injection, air + water injection and water injection sequence. In this study, a pilot plant of two stage and dual filtration system was operated for 4 months in water treatment plant. The stability of turbidity was maintained below 1 NTU. The TOC, THMFP and HAAFP were removed about 90% by two stage and dual media filtration system, which is almost 2 times higher than existing water treatment plant.

Key words: Two stage, Dual media, Filtration, GAC, DBPs, Backwashing

I. 서 론

국내에서는 기존 정수처리방법으로는 제거가 곤란한 미량오염물질을 제어할 수 있는 고도정수처리공정으로서 대부분 모래여과를 거친 후 입상활성탄 공정 또는 오존+생물활성탄 여과공정을 채택하여 왔다. 국내 일부 정수장에서도 입상활성탄 공정 등을 적용하여 시행하고 있다. 한편 최근에는 막(membrane) 여과 공정에 대한 실험적 연구가 활발히 진행되고 있는데, 서울시는 구의정수장내에 막여과 실증플랜

트 운전을 하고 있으며, 환경부에서도 막대한 연구비를 투자하여 연구가 진행되고 있다. 막여과 공정은 원수의 수질변화에도 효율적으로 대응할 수 있고 소요부지면적을 적게 할 수 있으며 처리시설의 소형화 및 자동화 등과 같은 여러 가지 장점을 갖고 있으나, 장기적 안목에서 중대형 정수시설에 이들 공정을 적용하여 목표수질을 달성하기 위해서는 기술적, 재정적 측면과 더불어 안정성 및 유지관리의 난이도 등이 심도있게 검토되어야만 한다.^{1,2)}

상수원수의 수질이 기존의 표준정수처리로 먹는

†Corresponding author: Department of Civil and Environmental Engineering, Chungwoon University, Chungnam 350-701, Korea, Tel: +82-19-428-3287, Fax: +82-41-630-3287, E-mail: jokwan@chungwoon.ac.kr
Received: 18 January 2011, Revised: 2 March 2011, Accepted: 14 April 2011

물의 목표수질을 달성할 수 있는 수준으로 개선되지 않으면 시설 및 운전유지관리상의 비용과 어려움을 감수해야 할 고도정수처리공정이라 불리우는 특수정수처리공정의 추가도입은 불가피하다. 그러나 우선적으로 소위 외래형 고도정수처리공정들에 버금가는 기존 정수처리시설의 개선을 통하여 탁도 유발물질을 비롯한 맛과 냄새는 물론 미량 유해 용존물질까지도 제거할 수 있는 기존 정수장의 성능 개선 기술 즉, 주처리 공정인 여과지 성능 향상 기술에 초점을 맞춘 연구가 필요할 것으로 판단된다. 국내의 수질특성은 봄, 가을철에는 조류의 대량 발생, 여름철에는 집중 강우로 인한 고탁수 유입, 겨울철에는 저수온으로 인한 응집효율 저하 등의 문제로 인해 기존 급속여과지에 큰 부하를 주게 되어 여과효율의 급격한 저하를 유발시킬 수 있다.³⁾

따라서 본 연구에서는 정수처리과정 중 급속여과지를 상단과 하단으로 분리하여 상단에서는 전처리의 조립(粗粒) 모래층에서 입자성 탁질물질을 제거하고, 하단에서는 본처리의 활성탄층에서 미량의 유해유기물질 등을 제거하고, 활성탄층 하단의 마감처리용 세립(細粒) 모래층에서 미세 분말활성탄 및 병원성 미생물 등을 제거할 수 있는 소규모 이단복합여과시스템의 파일럿플랜트를 정수장에 설치하여 적용성을 평가하였다.

II. 실험재료 및 방법

1. 실험장치

본 연구에서는 팔당원수를 수원으로 하는 A정수장에 소규모 이단이층 복합여과시스템 파일럿플랜트를 설치하여 약 4개월간 운전하였다. 실험실규모의 이전 연구⁴⁾를 통해 얻은 결과를 바탕으로 상단에는 유효경 0.88 mm, 균등계수 1.5인 급속여과사

Fig. 1. Schematic diagram of the pilot plant.

를 50 cm 깊이로 포설하였고, 하단에는 활성탄(Calgon F-400)을 1.25 m 깊이로 설치하였고, 유효경 0.64 mm, 균등계수 1.47인 급속여과사를 40 cm 깊이로 포설하였으며, 각 층의 운전조건은 Table 1에 제시하였다.

파일럿플랜트의 칼럼은 Fig. 1과 같이 상단과 하단으로 분리하였고, 칼럼의 재질은 아크릴로 하였으며, 직경은 10 cm, 높이는 상단이 1.35 m, 하단이 3.5 m로 전체 높이가 4.85 m이다. 상, 하단 모두 위어(weir)와 물받이(trough)를 설치하여 원수 공급의 중단으로 인한 여과지내 물빠짐이나 수위상승으로 인한 월류수의 배출에 문제가 없도록 제작하였다. 또한 상단과 하단의 역세척 시 역세척수와 공기의 공급을 위해 공기압축기(compressor)와 역세펌프를 설치하였다. 공기와 역세수의 양을 조절하기 위해서 상, 하단에 유량계를 각각 설치하여 역세척 시 공기양과 역세수량을 조절할 수 있도록 하였다.

2. 분석방법

본 연구는 파일럿플랜트에서의 여과성능 평가를 위해 탁도, 입자수, TOC(Total Organic Carbon), UV₂₅₄, 트리할로메탄 전구물질(Trihalomethane Formation Potential; THMFP), 할로아세트산 전구물질(Haloacetic Acid Formation Potential; HAAFP)의 제거효율을 지표로 하여 실험하였다.

탁도는 Hach 2100A를, UV₂₅₄는 Agilent 8453 spectrophotometer를, TOC는 산화방식을 이용한 TOC 측정기(SEIVERS 820)를 이용하여 각각 분석하였으며, 입자수는 입자수측정기(PAMAS 3116 FM)를 사용하여 측정하였다. 입자수 측정에 사용된 시료의 양은 25 m/로 매 시료마다 5번의 측정을 통해 평균값

Table 1. Operating parameters of the pilot plant

Parameters	Conditions
EBCT (Empty Bed Contact Time)	15 min
Space velocity	4 hr ⁻¹
Linear velocity	120 m ³ /m ² · day
First stage sand depth	0.5 m
Second stage GAC depth	1.25 m
Second stage sand depth	0.4 m

을 1 m/로 환산하여 기록하였고, 입자수 측정은 16개의 범위로 나누어 측정하였지만, 결과분석 시에는 16개 범위 전체로 분석하지 않고 전체입자수, 3~7 μm 범위의 입자수, 5~15 μm 범위의 입자수로 분류하여 분석하였다. THMF 분석은 USEPA 502.2 방법에 준하여 실시하였고, HAAFP 분석은 USEPA 552.2 Micro-extraction method 중 acidic methanol을 이용한 Methylation 방법에 의해 분석하였다. 본 시스템의 하단에 충전된 입상활성탄층에서의 미생물 성장 여부를 확인하기 위해 일반세균수(Heterotrophic Plate Count, HPC)를 측정하였다. 일반세균수(HPC)는 spreading plate method를 사용하였으며, 분석에 사용한 배지는 Tryptone glucose extract agar(Difco)를 사용하였고 37°C에서 2일 배양 후 colony를 계수하였다. 미생물 실험에 사용한 모든 초자와 배지는 121°C에서 15분간 멸균한 제품을 사용하였다. 또한 분광광도계(Hach)를 이용하여 $\text{NH}_3\text{-N}$, Fe 농도를 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 파일롯플랜트 초기운전 평가

1) 여과지 탁도 및 유량 변화

본 연구에서 이용된 파일롯플랜트는 상단과 하단에 각각 여재를 채웠으며 여재내의 축적된 이물질을 제거하기 위해서 2일 동안 정수장의 여과수로 역세척을 실시하여 여재를 세정하였다. 세정 후 지내에 남아있는 세정수를 완전히 제거한 후 침전지 유출수를 원수로 주입하였다. 파일롯플랜트에 주입된 침전지 유출수의 탁도는 평균 0.5 NTU이었고, 유입 유량은 650 m³/min(0.94 m³/day)이었다. 파일롯플랜트 운전시작 직후의 상단과 하단의 탁도 값은

Fig. 2. Variations of turbidity and outflow in the pilot plant (before stabilization).

0.72, 0.48 NTU를 나타내었으나 시간 경과에 따라 점차 감소하였다. 상단의 경우 1시간 후부터 안정적인 값을 유지하였고 하단의 경우 40분 이후부터 안정적인 값을 나타내었으며, 유량도 운전 초기부터 일정한 유출량을 보였다. 본 파일롯플랜트의 초기 운전 시 상, 하단의 탁도와 유량의 변화를 Fig. 2에 나타내었다.

2) 유출수의 입자수 변화

Fig. 3은 운전시작 직후 6시간 동안 측정한 전체 입자수, 3~7 μm 의 입자수, 5~15 μm 의 입자수 변화를 나타낸 것이다. 파일롯플랜트가 안정화되기까지 입자수의 변화가 심할 것으로 예상했지만 운전 초기 80분 이후부터는 하단의 입자수 변화가 안정적으로 운전되는 것을 볼 수 있었다. 전체입자수는 110~24 counts/m이었으며, 3~7 μm 범위의 입자수는 초기에는 12 counts/m에서 80분 이후부터는 4 counts/m 미만으로 측정되었다. 5~15 μm 범위의 입자수는 초기에는 2~3 counts/m이었으며, 시간이 경과되면서 검출되지 않았다.

Fig. 3. Variations of particle number in the pilot plant (before stabilization).

Fig. 4. Variations of turbidity in the pilot plant.

2. 파일롯플랜트 안정화 이후 운전 평가

1) 탁도 변화

파일롯플랜트를 정수장에 설치하고 안정화 이후 약 4개월의 운전 평가 기간 중 탁도 변화는 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 보듯이 정수장의 침전지 유출수 탁도는 운전초기에 매우 심하게 변화하는 것을 볼 수 있었으며, 이러한 이유로 인해 초기 10일간은 상단의 조립(粗粒) 모래층에서도 안정적인 탁도 값을 나타내지 않고 침전지 유출수의 변화 경향과 비슷한 경향을 보였으나, 약 10일 이후부터는 침전지 유출수의 변화에 관계없이 안정적인 탁도 값을 나타내었다.

반면 하단의 최종 여과수는 침전지 유출수나 상단 여과수의 변화에 관계없이 4개월의 운전기간동안 0.1 NTU 이하의 매우 안정적인 탁도를 유지하였다. 정수장의 여과지는 안트라사이트와 모래로 구성된 이중여재로 되어 있다. 비록 여름철 고탁도 및 조류로 인한 여과지 폐색이 발생했을 때의 여과효율은 평가할 수 없었지만, 본 시스템의 장점인 전처리 개념의 상단에서의 조립(粗粒) 모래층에서 비록 역세척 주기가 다소 빨리질 수 있지만 최종적으로는 고탁도 물질 및 조류의 사전 제거를 통해 부하를 줄일 수 있으므로 안정적인 탁도 제거가 이루어질 것으로 판단된다.

2) TOC 변화

파일롯플랜트의 운전기간동안의 TOC 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 정수장 침전지 유출수의 TOC는 원수 대비 약 26%가 혼화, 응집, 침전의 과정에서 제거되었다. 정수장 여과지의 유출수의 경우 침전지 유출수의 TOC 값과 거의 비슷한 값을 나타냈고 제거율도 침전지 유출수와 같이 원수에 대해 26% 제거율을 보였다. 이는 침전지 유출수가 정수장 여과지를 거치면서 TOC 제거가 거의 일어나지 않았다는 것을 의미한다. 이러한 경우 여과지 후단의 염소 소독으로 인해 염소소독부산물이 다량 발생할 가능성이 있어 고품질의 수돗물 공급에 차질을 가져올 수 있게 된다. 본 시스템의 상단 조립(粗粒) 모래여과층에서도 정수장 여과지와 마찬가지로 유입되는 침전지 유출수의 TOC가 거의 제거되지 않고 그대로 활성탄 + 세립(細粒) 모래층으로 이동한다는 것을 알 수 있었다. 활성탄 + 세립(細粒) 모래층을 거친 최종

Fig. 5. Variations of TOC in the pilot plant.

유출수의 TOC 분석 결과, 유입 침전지의 유출수 대비 약 80% 정도의 TOC가 활성탄층에서 제거되었다는 것을 알 수 있었다. 이는 본 시스템의 하단에 충전된 활성탄층에서의 흡착 및 생물분해 효과에 기인된 것으로 판단된다. 침전지 유출수의 TOC 변화에도 불구하고 본 시스템의 최종 유출수는 변함없이 안정적인 값을 유지하였다. TOC 제거를 위해 안트라사이트/모래, GAC/모래, 심층 GAC 여과를 비교 연구한 결과, GAC(Granular Activated Carbon) 여과가 보다 많은 양의 미생물을 부착시킬 수 있으며, 결과적으로 보다 많은 양의 TOC 제거를 가능하게 하였다고 보고한 바 있는데,⁵⁾ 본 연구에서도 이와 유사한 결과를 나타내었다. 여과지에서 TOC를 줄인다는 것은 곧 염소소독부산물의 발생을 최소화시킨다는 것을 의미하고, 결국 염소소독부산물의 감소는 수돗물의 안정성을 높인다는 의미이기 때문에 본 이단이층 복합여과시스템을 기존 정수장에 설치할 경우 효율성측면에서 다른 어떤 여과시스템보다 우수하다는 것을 반증하는 것이다.

3) UV₂₅₄ 변화

난분해성 유기물과 부식질 동향 파악에서 사용되는 UV₂₅₄에 대한 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 앞선 TOC 분석 결과와 마찬가지로 침전지 유출수와 정수장 여과지 유출수, 본 시스템의 상단에서의 경우 UV₂₅₄는 유사한 경향을 보인 반면, 활성탄 + 세립(細粒) 모래층을 통과한 여과수의 UV₂₅₄ 값은 거의 0에 가까웠다. 원수 대비 UV₂₅₄ 감소율을 살펴보면 침전지가 55%, 본 시스템의 상단과 정수장 여과지 유출수가 각각 64, 68% 그리고 본 시스템의 하단의 경우 98% 이상의 감소율을 보였다. 이러한 결과로부터

Fig. 6. Variations of UV_{254} in the pilot plant.

터 하단의 활성탄+세립(細粒) 모래층이 여과지 내로 난분해성 유기물 또는 부식질이 유입된다고 하여도 충분히 제거될 수 있을 것으로 판단된다.

4) 입자수 변화

여과지에서 입자수의 측정은 병원성 미생물인 *Cryptosporidium*의 감시를 위해 기존 탁도측정법으로는 한계가 있어 크기별 입자 분포를 나타낼 수 있는 입자계수기의 적용이 필요하게 되었다.^{6,7)}

본 연구에서는 정수장의 침전지 유출수와 본 시스템의 상단 및 하단 여과수의 시료를 주기적으로 채취하여 입자수 변화를 전체입자수, 3~7 μm 범위의 입자수, 5~15 μm 범위의 입자수로 분류하여 그 변화 정도를 Fig. 7에 나타내었다. 본 시스템에서 병원성 원생동물인 *Cryptosporidium*과 *Giardia*가 얼마나 제거가 되는지를 살펴보기 위해서 3~7 μm 및 5~15 μm 범위의 입자수⁸⁾로 분류하였다. Fig. 7에서 보듯이 침전지 유출수의 입자수 변화폭이 심하다고 해도 본 시스템의 상단에서 완충작용을 해줌으로써 하단 여과수의 입자수는 안정적으로 낮은 값을 나타내었다. 침전지 유출수의 입자수는 평균적으로 전체 입자수가 2,288 counts/ml, 3~7 μm 범위의 입자수가 208 counts/ml, 5~15 μm 범위의 입자수가 30 counts/ml을 나타내었는데, 본 시스템의 상단을 거치면서 전체입자수가 152 counts/ml, 3~7 μm 범위의 입자수가 7 counts/ml, 5~15 μm 범위의 입자수가 1 counts/ml를 나타내어, 전체입자수는 약 93%, 3~7 μm 범위의 입자수는 약 97%, 5~15 μm 범위의 입자수는 약 97%의 제거율을 보였으며, 최종적으로 본 시스템의 하단을 통과하면서 전체입자수는 13 counts/ml, 3~7 μm 범위의 입자수는 1 counts/ml, 5~15 μm 범

(a) TOTAL

(b) 3~7 μm

(c) 5~15 μm

Fig. 7. Variations of particle number in the pilot plant.

위의 입자수는 0 counts/ml로 거의 모든 입자들이 제거됨을 확인할 수 있었다. 고탁도로 인한 다량의 입자가 유입된다고 해도 이단이층 복합여과시스템을 거치면서 병원성 원생동물인 *Cryptosporidium*이나 *Giardia*를 포함한 거의 모든 입자들을 제거할 수 있을 것으로 사료된다.

5) THMFP 및 HAAFP 제거효율 평가

염소는 뛰어난 살균력과 잔류성 그리고 경제성 때문에 정수처리과정 중 병원성 미생물의 불활성화를 위해 그동안 가장 많이 사용되어 왔다. 비록 염소에 의한 소독방법이 공공 정수시스템에서 유발될 수 있는 질병들에 대한 위험을 감소시켜 왔지만, 발암물질로 알려진 클로로포름(CHCl_3)이 1972년 네덜란드

의 로테르담에서 염소 소독된 수돗물에서 발견되고,⁹⁾ 1974년 미국 뉴올리언즈의 주민 중 수돗물 사용자와 암 사망률 사이에 높은 상관관계를 가지고 있다는 역학조사 결과¹⁰⁾가 발표되면서 트리할로메탄 (Trihalomethanes, THMs)을 포함한 각종 소독부산물에 대한 유해성 문제가 대두되었다. 염소는 자연유기물질(Natural Organic Matter, NOM)이나 브롬화합물과 반응을 하여 THMs(Trihalomethanes) 이외에 HAAs(Haloacetic acids), HANs(Haloacetonitriles), Haloketons 등과 같은 할로겐족 화합물들을 형성한다. 미국환경보호청(US EPA)은 THMs 및 HAAs를 발암물질로 정의하고, 최대오염한계(Maximum Contaminant Levels, MCLs)를 각각 80 µg/l, 60 µg/l로 규정한 바 있다. 우리나라도 현재 55개 먹는물 수질기준에서 소독부산물 관련 항목은 총 7개이며, THMs에 대한 법적수질기준이 1990년 100 µg/l로 설정된 이후, 2003년 1월 1일부터 클로랄하이드레이트 등 5개 항목이 추가되었으며, HAAs 또한 100 µg/l로 규제하고 있다.^{11,12)} THMs와 HAAs 등 소독부산물은 전적으로 자연유기물질인 휴믹물질 등과 같은 전구물질의 제거가 필수적이며, 이는 기존의 정수처리공정으로는 잘 제거가 되지 않는다. 따라서 본 연구에서는 THMs, HAAs 생성의 전구물질인 THMFP,

Fig. 8. Removal efficiency of THMFP in the pilot plant.

Fig. 9. Removal efficiency of HAAFP in the pilot plant.

HAAFP를 얼마나 제거할 수 있는지를 확인하여 염소소독으로 인한 THMs, HAAs 형성 가능성을 확인하기 위해 이단이층 복합여과시스템 파일롯플랜트의 운전 평가결과를 Fig. 8과 9에 나타내었다.

Fig. 8에서 보듯이 정수장의 유입 원수에 약 83.6 µg/l의 THMFP가 검출되었고, 이것이 정수장의 침전지와 여과지를 거치면서 약 50% 정도 제거되는 것을 알 수 있었다. 여과지를 거치면서 50%의 제거율을 보였지만 실제로 여과지에서는 침전지 유출수의 약 5%만이 제거되었을 뿐 여과지 자체에서의 제거율은 상당히 낮음을 알 수 있었다. 그러나 이단이층 복합여과지를 거친 최종 여과수에서는 상당량의 THMFP가 제거된 것을 볼 수 있었다. 다만, 상단의 조립(粗粒) 여과사층에서는 정수장의 여과지와 마찬가지로 침전지 유출수 대비 약 5%만 제거되었다. 정수장의 여과공정과 이단이층 복합여과시스템의 최종 THMFP 제거율은 각각 50%, 90%로 약 1.8배 정도 이단이층 복합여과지의 제거율이 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 염소소독으로 인한 THMs의 생성 가능성이 기존 급속여과지에 비해 상당히 낮다는 것을 의미한다.

정수장의 유입 원수의 초기 HAAFP의 농도는 Fig. 9에서 보듯이 102.7 µg/l로 침전지를 거치면서 56.4 µg/l로 45.4%가 감소되었고 정수장의 여과지를 거치면서 49.8 µg/l로 침전지 유출수 대비 11.7%의 제거율을 보였다. 전체적으로 51.5%의 제거율을 나타내었다. 반면, 이단이층 복합여과지의 상단을 거치면서 침전지 유출수 대비 8.2% 제거되었고 하단을 거치면서 상단 대비 74%의 제거율을 보였다. 전체적으로는 유입원수 대비 약 87%의 HAAFP 제거율을 나타내었다. 결론적으로 본 시스템은 정수장의 급속여과지보다 35.5% 정도 높은 HAAFP 제거율을 나타내었는데, 이는 본 시스템의 하단에 충전된 활성탄층에서의 흡착효과에 기인된 것으로 판단된다.

3. 파일롯플랜트의 역세척 방법 평가

1) 상단 역세척 방법 평가

본 연구에서는 이단이층 복합여과시스템의 상단에서의 공기 및 물의 주입 시간에 따른 최적 역세척 방법을 Table 2와 같은 조건에 따라 평가하였다.

먼저 본 시스템의 상단에서 각 조건별로 탁도, 입

Table 2. Backwashing conditions with air & water injection time (1st stage)

Method No.	Backwashing conditions
1	① air 7.5 l/min(2 min) → ② air + water(4 min) → ③ water 6 l/min(7 min)
2	① air 7.5 l/min(5 min) → ② rest time for air release(1 min) → ③ water 6 l/min(10 min)
3	① air 7.5 l/min + water 6 l/min(5 min) → ② water 6 l/min(10 min)

Fig. 10. Variation of turbidity by Method 1, 2, 3 (1st stage). **Fig. 11.** Variation of particle number by Method 1, 2, 3 (1st stage). **Fig. 12.** Variation of turbidity and particle number by Method 1, 2, 3 (1st stage).

자수, 역세척 전·후의 입자수 및 탁도를 측정하여 가장 효과적인 역세척 방법을 찾으려고 하였으며, 그 결과를 Fig. 10~12에 나타내었다.

Fig. 10에서 보듯이 Method 1, 2, 3 모두 초기 배출수 탁도는 약 430-480 NTU로 유사하였다. Method 1이 다른 방법에 비해 역세척 시 급격하게 탁도가 감소하는 것을 볼 수 있었고 10 NTU 이하로 떨어지는 시간도 다른 방법에 비해 약 1분 가량 빠른 것을 알 수 있었다.

입자수의 변화를 나타낸 Fig. 11을 보면 Fig. 10의 초기 배출수 탁도와는 다르게 Method 1이 다른 방법에 비해 월등히 많은 입자가 배출되는 것을 알 수 있었다. 이것은 Method 1이 여층내의 입자 제거에 매우 효과적인 방법이라는 것을 의미하며 역세척 효율과 여과 효율의 증대를 가져올 수 있음을 확인하였다. Method 2, 3의 경우는 지내에 입자들이 남아 있기 때문에 여과지속시간과 여과지 효율의 저하를 유발할 가능성이 매우 높다고 할 수 있겠다. 역세척 배출수의 배출 후 약 6분 후부터는 세 가지 방법 모두 비슷한 입자수 분포를 나타내었다.

역세척이 완료된 후 역세척 직전의 탁도, 입자수와 역세척 직후의 탁도, 입자수를 비교한 Fig. 12를 보면 앞선 결과에서처럼 Method 1이 다른 방법에 비해 역세척 직후의 입자수 및 탁도가 낮은 것을 알 수 있었다.

2) 하단 최적 역세척 방법 평가

본 연구에서는 이단이층 복합여과시스템의 하단 최적 역세척 방법을 평가하기 위해서 임의로 Table 3과 같은 조건별로 탁도와 TS를 분석하여 Fig.

Table 3. Backwashing conditions with air & water injection time (2nd stage)

Method No.	Backwashing conditions
1	① air 7.5 l/min(2 min) → ② air 7.5 l/min + water 2 l/min(4 min) → ③ water 4 l/min(8 min)
2	① air 7.5 l/min(5 min) → ② rest time for air release(1 min) → ③ water 4 l/min(10 min)
3	① air 7.5 l/min + water 4 l/min(5 min) → ② water 4 l/min(10 min)

Fig. 13. Variation of turbidity by Method 1, 2, 3 (2nd stage).

Fig. 14. Variation of TS by Method 1, 2, 3 (2nd stage).

13~15에 나타내었다. 역세척 시 세정효과를 높이기 위해 장시간의 역세척은 활성탄층에 부착된 미생물의 탈리 우려¹³⁾가 발생할 수 있으므로 본 연구에서는 역세척 시간을 약 15분 정도로 한정하여 실험하였다.

역세척 방법별 역세척 배출수 탁도를 나타낸 Fig. 13을 보면 초기 탁도는 대략 120~130 NTU로 비슷한 값을 나타냈지만 Method 1이 다른 방법에 비해 배출수 탁도 감소율이 더 높은 것을 볼 수 있었다. 세 가지 방법 모두 380 sec 후부터는 국내 상수도시설 기준¹⁴⁾의 역세척 탁도 배출 기준인 10 NTU 이하로 비슷한 경향을 탁도 변화를 보였다. 또한 역세척 후 활성탄층과 모래사이의 경계면에서의 혼합은 다른 연구¹⁵⁾와 마찬가지로 발생하지 않았다.

시간에 따른 TS(Total Solid)의 농도를 나타낸 Fig. 14를 보면 상단에서와 마찬가지로 하단에서도 Method 1이 Method 2, Method 3에 비해 탁질 농도가 급격하게 감소하는 것을 알 수 있었다.

본 시스템의 하단에서 역세척 직전·후 탁도와 역세척 직후의 TS를 분석한 결과를 Fig. 15에 나타내

Fig. 15. Variation of turbidity and TS before & after backwashing by Method 1, 2, 3 (2nd stage).

었는데, Method 1이 다른 방법에 비해 역세척 직후의 여과수 안정화와 탁질 제거효과가 좋다는 것을 알 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 기존 여과시설의 개선 및 신설시 채택이 가능한 이단이층 복합여과시스템 파일롯플랜트를 정수장에 설치하여 탁도, TOC, THMFP, HAAFP 등의 제거를 분석하여 그 적용성을 평가함과 동시에 상, 하단의 최적 역세척 방법을 평가하여 도출한 결론은 다음과 같다.

1. 파일롯플랜트 운전시작 직후의 상단과 하단의 탁도 값은 0.72, 0.48 NTU를 나타내었으나 시간 경과에 따라 점차 감소하였다. 상단과 하단의 경우 각각 1시간, 40분 이후부터 안정적인 값을 나타내었다. 전 입자개수 역시 80분 이후부터 안정화되었다.

2. 파일롯플랜트의 안정화 이후 하단의 최종 여과수의 탁도는 침전지 유출수나 상단 여과수의 변화에 상관없이 약 4개월의 운전기간동안 거의 차이가 없이 0.1 NTU 이하의 매우 안정적인 탁도를 유지하였다. 하단의 활성탄+세립(細粒) 모래층을 거친 최종 유출수의 TOC 분석 결과, 유입 침전지의 유출수 대비 약 80% 정도의 TOC가 활성탄층에서 제거됨을 확인하였다. 원수 대비 UV₂₅₄ 감소율을 살펴보면 침전지가 55%, 본 시스템의 상단과 정수장 여과지 유출수가 각각 64, 68% 그리고 본 시스템의 하단의 경우 98% 이상의 감소율을 보였다. 이러한 결과로부터 하단의 활성탄+세립(細粒) 모래층이 여과지 내로 난분해성 유기물 또는 부식질이 유입된다고 해도 충분히 제거될 수 있을 것으로 판단된다.

3. 본 파일럿플랜트로 유입되는 침진지 유출수의 입자개수는 평균적으로 전체입자수가 2,288 counts/ml, 3~7 μm 범위의 입자수가 208 counts/ml, 5~15 μm 범위의 입자수가 30 counts/ml을 나타내었는데, 본 시스템의 상단을 거치면서 전체입자수가 152 counts/ml, 3~7 μm 범위의 입자수가 7 counts/ml, 5~15 μm 범위의 입자수가 1 counts/ml를 나타내어, 전체입자수는 약 93%, 3~7 μm 범위의 입자수는 약 97%, 5~15 μm 범위의 입자수는 약 97%의 제거율을 보였다.

4. 본 파일럿플랜트에 의한 THMFP와 HAAFP의 제거율은 90%와 87%로 기존 정수장의 급속여과지보다 약 2배 정도 높은 제거효율을 보였으며, 이는 본 시스템의 하단에 충전된 활성탄층에서의 흡착 및 생물분해 효과에 기인된 것으로 판단된다.

5. 본 시스템의 상, 하단에서의 공기 및 물의 주입 시간에 따른 최적 역세척 방법을 평가한 결과, 상단의 경우 ① air 7.5 l/min(2 min) → ② air 7.5 l/min + water 6 l/min(4 min) → ③ water 6 l/min(7 min)의 순이었고, 하단의 경우 ① air 7.5 l/min(2 min) → ② air 7.5 l/min + water 2 l/min(4min) → ③ water 4 l/min(8 min)의 순이었다. 결론적으로 본 이단이층 복합여과시스템에서의 역세척은 공기세척, 공기세척 + 물세척, 물세척의 순으로 하는 것이 가장 효과적일 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 차세대 핵심환경기술사업 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Kim JK, Jeong SG, Shin CS, Cho HJ. Characteristics of disinfection by-products formation in Korea. *J Kor Soc Water and Wastewater*. 2005; 19(3): 301-311.
- Kim CH, Kim HS. International seminar on membrane filtration technology for water supply. *J Kor Soc Water and Wastewater*. 2003; 17(5): 594-605.
- Lee YJ, Jo KH, Choi JH, Myung BT, Nam SH. Evaluation of chlorine demand and chlorine decay kinetics for drinking water. *Kor J Env Heal Sci*. 2001; 27(1): 27-35.
- Song SB, Jo M, Nam SH, Woo DS. A Study on the process selection for two-stage and dual media filtration system for improving filtration performance. *J Kor Soc Water and Wastewater*. 2007; 21(2): 203-214.
- Lechevallier MV. Evaluating the performance of biologically active rapid filters. *J Amer Water Works Assoc*. 1992; 84(4): 136-145.
- Moon SY, Kim SH. Discussion of problems during the application of the on-line particle counter in water treatment process. *J Kor Soc Water and Wastewater*. 2005; 19(2): 214-220.
- AWWA. Water quality and treatment. 5th Ed. McGraw Hill, USA. 1999.
- AWWA. Operational control of coagulation and filtration processes - Manual of water supply practices. 2nd ed. AWWA Research Foundation, Denver; 2000. p.51-66.
- Rook JJ. Formation of haloforms during chlorination of natural water. *J Water Treat Exam*. 1974; 23(2): 234-243.
- Page T, Harris RH, Epstein SS. Drinking water and cancer mortality in Louisiana. *Science*. 1976; 193: 55-57.
- Kim SS, Lee KH. Assessment and optimization of granular activated carbon (GAC) process in water treatment process. *J Kor Soc Water and Wastewater*. 2005; 19(6): 781-790.
- Boorman GA, Dellarco VT, Dunnick JK, Chapin RE, Hunter S, Hauchman F, Gardner H, Cox M, Sills RC. Drinking water disinfection byproducts: Review and approach to toxicity evaluation. *Env Heal Perspt*. 1999; 107(Suppl 1): 207-217.
- Amirtharajah, A. Optimum backwash of dual media filter and GAC filter adsorbers with air scour. AWWA Research Foundation, Denver; 1991.
- Korea Water and Wastewater Works Association : Standard for water treatment works, Ministry of Environment; 2004.
- Moon CH, Lee YJ, Ko YS, Nam SH. An experimental review of backwashing factors on BAC-sand filter. *J Kor Soc Env Eng*. 2003; 25(2): 227-233.