

## 여과 성능향상을 위한 이단이층 복합여과시스템의 공정선택 연구

# A Study on the Process Selection for Two-stage and Dual Media Filtration System for Improving Filtration Performance

송시범 · 조민 · 남상호 · 우달식\*

Si Bum Song · Min Jo · Sang Ho Nam · Dal Sik Woo\*

(재) 한국계면공학연구소

(2007년 1월 10일 논문 접수: 2007년 4월 11일 최종 수정논문 채택)

### Abstract

This study aimed at researching the process selection for two-stage and dual media filtration system, as a technology substituting the existing sand filter without expanding the site when retrofitting an old filter bed or designing a new one. In order to select the process for optimum complex filtration system, three running conditions have been tested. Test results demonstrated that Run 3 in which the 1st stage was filled with anthracite and coarse sand, and the 2nd stage was filled up with activated carbon and fine sand reduced the head loss and the load of turbidity substances. Also, Run 3 showed better performance in removing TOC, particle counts, THMFP and HAAPF, compared to other two conditions. 99 % of *Cryptosporidium* was removed. Bisphenol-A was rarely removed from the 1st stage of coarse sand and 2nd stage of fine sand, but 99 % of it was removed from the 2nd stage of activated carbon. In conclusion, when it is required to retrofit an old rapid filter bed or design a new one for the purpose of improving filtration performance, the following two-stage and dual media filtration system is suggested: the 1st stage of filter bed needs to be filled up with coarse sand to remove turbidity as the pretreatment for extending duration of filtering, the top part of 2nd stage needs to be filled up with granular activated carbon to remove dissolved organic matters and others as the main process, and finally the bottom part of 2nd stage needs to be filled up with fine sand as the finishing process.

**Key words:** Two-stages and dual media filtration system, Rapid filtration, GAC, *Cryptosporidium*, process selection

**주제어:** 이단 이층 복합여과시스템, 급속여과, 입상활성탄, 크립토스포리디움, 공정선택

## 1. 서 론

정수장의 침전지를 월류한 처리수는 침전되지 못한 이물질과 병원성 미생물을 포함한 각종 미생물을 제거하기 위하여 여과 공정을 거치게 된다. 여과 공정은 일련의 수처리 공정 중에서 미세한 고형물질을 걸러내어 먹는 물의 탁도를 낮추는 매우 중요한 정수 처리 공정이다. 일반적인 여과공정은 어떤 입경의 여재를 적당한 두께로 충전된 장치로 이루어지며, 여과 속도에 따라 급속여과지와 완속여과지로 구분된다 (한국상하수도협회, 2004; 우, 2006; Kawamura, 2000).

각종 산업발전으로 인한 상수원수의 악화로 인해 기존 여과공정으로는 제거하기 힘든 맛·냄새 유발물질, 용존 유기물질, 내분비계 장애물질 등이 많아지고 있다. 또한 여과공정이 미비한 경우 응집 침전공정에서 유출되는 미세 플러클들은 미생물의 피난처가 되므로 소독공정에서 미생물의 사멸이 어렵게 된다 (문성민 등, 2005; 우, 2006).

환경부는 정수장의 탁도 기준을 미국과 동일한 수준으로 강화하고, 병원성 원생동물의 99.9% 이상을 제거토록 하는 등 수질관리 기준을 대폭 강화한다고 2004년 발표한 바 있다(환경부, 2004). 이에 따라 수돗물 생산능력이 하루 10만 톤 이상되는 정수장의 경우 탁도관리기준을 0.5NTU에서 0.3NTU로 강화하고, 모든 정수장이 병원성 원생동물의 99.9% 이상을 제거 혹은 불활성화해야 한다.

미국은 1993년 위스콘신 주의 밀워키에서 발생하여 40만 명 이상이 고통을 겪고 100명 이상이 사망한 크립토스포리디움(*Cryptosporidium*) 오염사고(정 등, 1999) 이후 강화된 지표수처리법(The Interim Enhanced Surface Water Treatment Rule; IESWTR)에서는 정수장 여과지에서의 최대허용탁도가 0.5NTU에서 0.3NTU로 변화되었으며, 따라서 여과지에서 병원성 원생동물의 제거를 최대화하기 위하여 탁도를 0.1NTU 미만으로 운전하도록 유도하고 있다(Nix et al., 2003).

최근 국내외 여러 연구에서는 기존의 모래여과방식을 활성탄 + 모래, 안트라사이트 + 모래, 안트라사이트 + 모래 + 가넷 등과 같은 이층여과 또는 다

층여과 방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 실제 공정에도 적용되고 있을 뿐만 아니라 입자계수기(particle counter)까지 설치하여 입자수를 최소화하도록 노력하고 있다(정 등, 2005; 박 등, 2003; 문 등, 2003; 문성용 등, 2005; Lechevallier et al., 1992; Krasner et al., 1993; Niquette et al., 1998).

국내에서는 급속모래 여과공정을 개선함으로써 기존 정수방법으로 제거가 곤란한 오염물질의 제거효율을 향상시키려는 노력 대신에 오존, 활성탄, 막여과(membrane filtration) 등과 같은 고도정수처리의 추가 도입을 통해 많은 문제를 해결하려고 하고 있으나(한 등, 1993; 우 등, 1998; 김 등, 2003; 김 등, 2004; 문성민 등, 2005; 윤 등, 2005), 이는 한정되어 있는 정수장 부지에 추가적인 처리시설을 설치하기가 어렵고 경제적인 비용 증가의 문제점을 초래할 수 있기 때문에 현 정수시설을 개선하는 방법이 보다 적극적으로 강구되어야 할 필요성이 있다.

본 연구는 국내의 수질특성 즉, 봄, 가을철의 조류의 대량 발생, 여름철의 집중 강우로 인한 고탁도 유입, 겨울철의 저수온 시 생물활성탄의 기능저하 및 응집효율 저하에 따른 급속여과지의 부하증가에 대응할 수 있는 개량형 고도정수처리방법을 개발하기 위해 수행되었다.

본 연구에서는 기존 여과시설의 개량 또는 신설시 여과 성능을 향상시키기 위해 급속여과지를 상, 하단으로 구분하여 상단에는 진치리의 개념으로 안트라사이트 또는 조립사를 충전하여 유입 오염물질의 부하를 경감시키고자 하였고, 하단에는 본처리 개념의 활성탄을 충전하여 유기물질, 병원성 원생동물, 조류 등의 제거가 이루어지고, 활성탄층 하부에는 모래를 충전하여 활성탄층에서 탈리되는 미세 분말활성탄 및 병원성 미생물의 제거를 목적으로 고안된 이단이층 복합여과시스템의 개발을 위한 연구로서 이단이층 복합여과시스템의 공정선정 실험 및 상단 여재선정 실험을 수행하였으며, 이단이층 복합여과시스템에 의한 병원성 원생동물과 내분비계 장애물질의 제거특성을 평가하였다.

**Table 1.** Characteristics of filter media

Items	Coarse sand	Fine sand	Anthracite	Activated Carbon
Effective size(mm)	0.88	0.64	0.97	0.55~0.75
Uniformity coefficient	1.50	1.47	1.40	1.9
Specific gravity	2.60	2.66	1.49	-
Abrasion ratio(wt%)	1.28	0.51	1.71	-
Pore ratio(%)	37.0	39.7	53.0	39.0
Apparent Density(g/cc)	-	-	-	0.48
Moisture, weight(%)	-	-	-	2
Abrasion Number	-	-	-	74
Iodine Number(mg/g)	-	-	-	1,000

## 2. 실험방법

### 2.1. 실험 재료 및 장치

#### 2.1.1. 실험 재료

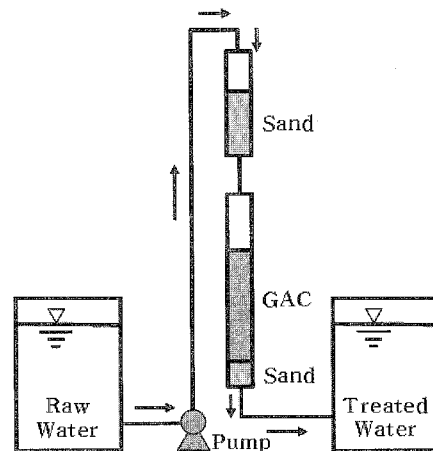
본 실험에 사용된 여재는 조립사, 세립사 그리고 안트라사이트로 수도용 여재로서 체거름 분석을 통해 유효경과 균등계수 등을 계산하였고(한국상하수도협회, 2005), 활성탄은 Calgon사의 수도용 FILTRASORB® 400을 사용하였다. 본 연구에 사용된 각각의 여재 특성을 Table 1에 제시하였다.

#### 2.1.2. 실험 장치

본 연구에서 수행된 이단이층 복합여과시스템의 실험 장치는 상단과 하단으로 구분되어 있는 구조로서 공정선정 실험에 사용된 실험 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다.

본 실험 장치는 직경 25mm인 원통형 아크릴로 상단은 400mm, 하단은 1,000mm로 제작하였고, 각 단마다 웨어(weir)를 설치하여 상단의 여과수가 상단 웨어를 통과하여 하단 칼럼으로 유입되고 하단 여과수는 하단 웨어를 통과하여 정수 탱크(tank)로 유입 되도록 설계하였다. 칼럼내의 여재 유출을 막기 위해서 각 칼럼의 끝부분에 직경 0.1mm의 오리피스(orifice)가 여러 개 뚫려있는 0.3mm 두께의 아크릴판을 설치하였고 그 판위에 직경 0.05mm의 망을 덧붙여 여재의 유실을 방지하였다. 또한 월류수의 처리를 위해서 각 칼럼의 상부 끝에 트러프(trough)를 설치하여 실험 전 여재 세척 배출수나 실험 시 월류수를 배출시킬 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 병원성 원생동물인 *Cryptosporidium*



**Fig. 1.** Schematic diagram of two-stages and dual media filtration system.

과 내분비계 장애물질인 Bisphenol-A의 제거특성을 고찰하기 위해 Fig. 1과 유사한 별도의 칼럼(column)을 제작하였다. 칼럼의 규격은 직경 8mm, 높이 100mm로 3개의 칼럼을 제작하였으며, Masterflex사의 정량 연동 펌프(Peristaltic pump)로 유입수를 공급하였다.

### 2.2. 실험방법

#### 2.2.1. 이단이층 복합여과시스템의 공정선정 실험

본 연구에서 적용된 이단이층 복합여과시스템은 급속여과지를 상, 하단으로 구분하고, 하단에는 본처리 역할의 활성탄과 모래를 충전하는 이중여재를 사용하고, 상단은 전처리 역할로서 하단의 부하를 줄일 수 있도록 안트라사이트 또는 조립사를 충전하도록 고안되었다. 본 연구에서는 이러한 개념의 근거를 확보하기 위해 Table 2와 같이 운전조건을 달리하는 3가지 방식을 채택하였는데, Run 1은 상단에는 어떠한

**Table 2.** Experimental condition to select the process for two-stages and dual media filtration system

Classification	Experimental condition	
Run 1	1st stage	-
	2nd stage	GAC + Sand
Run 2	1st stage	Anthracite + Sand
	2nd stage	GAC
Run 3	1st stage	Anthracite + Sand
	2nd stage	GAC + Sand

여제도 충전하지 않고 단지 하단에만 활성탄과 세립사를 충전하였고, Run 2는 상단에서는 안트라사이트 + 조립사를 충전하고 하단에는 단지 활성탄만을 충전하였으며, Run 3은 상단에는 안트라사이트 + 조립사를 충전하고 하단에는 활성탄과 세립사를 충전하였다. 칼럼의 면적은 0.00049m<sup>2</sup>(내경 25mm), 여과속도는 120m/day, 여과유량은 0.04L/min(58.9L/day), 활성탄의 공탑체류시간(Empty Bed Contact Time; EBCT)은 10min, 실험장치에서 상단의 높이는 안트라사이트(Anthracite, 150mm) + 조립사(Coarse Sand, 150mm), 하단의 높이는 입상활성탄(Granular Activated Carbon; GAC, 500mm) + 세립사(Fine Sand, 150mm)로 하였다. 본 실험에 사용된 원수는 팔당 3 취수장에서 취수하여 한국수자원공사 S 정수장으로 유입되는 원수를 사용하였다.

### 2.2.2. 이단이층 복합여과시스템의 상단 여재선정 실험

본 연구에서 수행된 이단이층 복합여과시스템은 하단의 본처리 기능을 수행하는 활성탄 + 모래층에서의 오염물질의 부하를 줄이고, 여과지속시간을 늘리기 위해 상단에서의 여재 선정이 매우 중요한데, 이를 위해 실험장치의 운전 조건을 Table 3에 나타내었다. 즉, 본 실험 장치의 상단에 Run 1은 어떠한 여재도 충전하지 않았으며, Run 2는 조립사, Run 3은 세립사, Run 4는 안트라사이트를 충전하였고, 하단에는 모두 활성탄과 세립사를 충전하였다. 칼럼의 여과속도는 120m/day, 활성탄의 공탑체류시간(Empty Bed Contact Time; EBCT)은 15min, 실험장치에서 상단의 여재의 높이는 120mm, 하단의 활성탄층과 모래층의 높이는 각각 320, 120mm로 하였다.

**Table 3.** Experimental condition to select the filter media of 1st stage

Classification	Experimental condition	
Run 1	1st stage	-
	2nd stage	GAC + Sand
Run 2	1st stage	Coarse sand
	2nd stage	GAC + Sand
Run 3	1st stage	Fine sand
	2nd stage	GAC + Sand
Run 4	1st stage	Anthracite
	2nd stage	GAC + Sand

2.2.3. 이단이층 복합여과시스템에서의 병원성 원생동물과 내분비계 장애물질 제거특성 실험  
병원성 원생동물인 *Cryptosporidium*과 내분비계 장애물질인 Bisphenol-A의 제거특성 실험은 여재선정 실험에서 얻은 결과를 바탕으로 Fig. 1과 유사한 3개의 칼럼에 상단의 경우 조립사 32mm, 하단의 경우 활성탄 100mm와 세립사 40mm를 채우고 *Cryptosporidium*은  $1 \times 10^6$  cysts/L를 주입하였고, 유속 0.33mL/min로 운전을 하였다. Bisphenol-A는 인위적으로 유입수 농도를 500ppb 주입하여 유속 0.22, 0.33, 0.66mL/min로 변화시키면서 운전하였다. 각각의 실험은 1회 실시하였다.

### 2.3. 분석방법

분석항목으로는 여과지의 손실수두를 간접적으로 나타내기 위해 수위변화를 측정하였고, 탁도, UV<sub>254</sub>, TOC(Total Organic Carbon), 입자개수, 트리할로메탄 전구물질(Trihalomethane Formation Potential; THMFP), 할로아세트산 전구물질(Haloacetic Acid Formation Potential; HAAFP), 병원성 원생동물인 *Cryptosporidium*, 내분비계 장애물질인 Bisphenol-A를 분석하였다.

탁도는 Hach 2100A를, UV<sub>254</sub>는 Agilent 8453 spectrometer를, TOC는 산화방식을 이용한 SEIVERS 820 TOC meter를 이용하여 각각 분석하였다.

THMFP 분석은 USEPA 502.2법, "Purgeable Organic Compounds in Water by Capillary Column Gas Chromatography"에 준하여 실시하였고, HAAFP 분

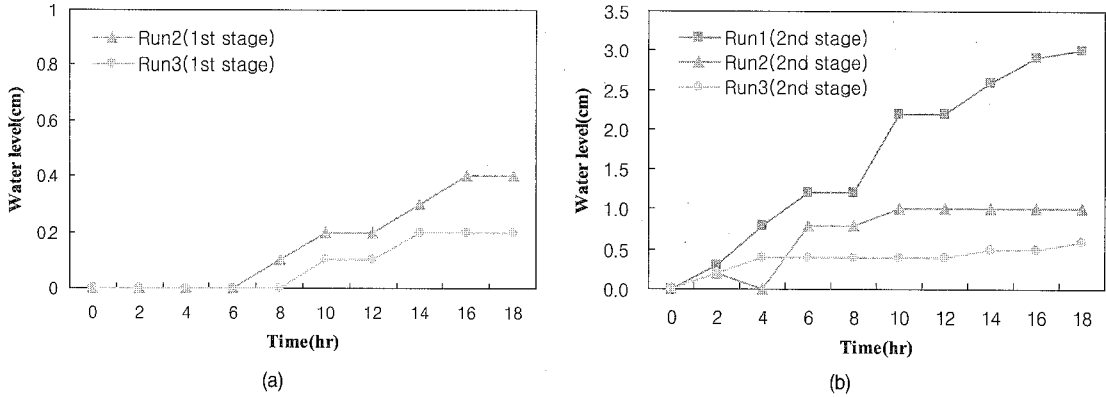


Fig. 2. Variation of water level with 1st stage and 2nd stage in this systems.

석은 USEPA 552.2 Micro-extraction method 중 acidic methanol을 이용한 Methylation 방법에 의해 분석하였다.

*Cryptosporidium* stock은 미국 Waterborne사의 제품 ( $10^8$  oocysts/8mL)을 구입하여 사용하였다. 시료 염색은 EPA 1623법을 사용하였다. EPA 1623법에서 FITC 형광 염색은 *Cryptosporidium* 고정 → 형광 염색 → 역염색 → 습기 챔버에 배양 → 세척의 과정을 거쳤다. 염색 kit는 Merifluor G-C staining Kit와 Cryp-a-Glo kit를 사용하였다. DAPI 형광 염색은 FITC 처리된 시편을 1분 동안 DAPI 시약으로 염색한 후 세척하고 니콘의 형광 현미경(Nikon Co., Japan, Model E600)과 형광필터(FITC, DAPI filter)를 사용하여 분석하였다.

Bisphenol-A는 HPLC를 사용하여 정량 분석을 수행하였다. 본 연구에서 HPLC는 waters사(1525 Binary system) 제품을 사용하였고,  $C_{18}$  reverse-phase column(XTerra Rp-18)을 사용하였다. Bisphenol-A는 UV<sub>230</sub> nm에서 높은 흡수파장을 가지므로 검출기로는 UV detector(151 UV/Vis, Gisson Co., USA)를 사용하였다. 용매는 50%의 acetonitrile과 50%의 증류수에 40mM의 인산(phosphoric acid)을 첨가하여 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 이단이층 복합여과시스템의 공정선정

##### 3.1.1. 손실수두 평가

여과공정 실험에서 수위측정은 손실수두를 간접적

으로 나타낸다. 즉, 수위가 상승한다는 것은 여과 부하가 증가하여 손실수두가 증가함을 의미한다. 실험 결과, Fig. 2에 나타낸 바와 같이 상단에 여재층이 있는 Run 2, 3은 안정적인 수위를 유지하였고, 상단에 여재가 없고 하단에 활성탄 + 조립사층이 있는 Run 1은 운전 초기부터 수위가 상승하다 8시간 부터 수위가 급상승하였다. 활성탄층 하부에 조립사가 충전되어 있는 조건인 Run 3은 활성탄층만으로 구성된 조건인 Run 2보다 수위 변화가 크지 않았다. 따라서 상단에 안트라사이트 + 조립사를 둔 조건인 Run 2, 3은 손실수두를 감소시키고, 탁도물질의 부하를 감소시켜 전처리 역할을 수행할 수 있다고 판단되었다.

##### 3.1.2. 탁도 제거 특성

여과공정에서 탁도의 제거는 공정의 효율을 평가하는데 매우 중요한 요소이다. Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 전처리층이 있는 조건 Run 2, 3은 전처리층이 없는 조건 Run 1에 비해 탁도물질의 유출이 적었다. 전처리층이 있으면서 활성탄층 아래 모래층 유무에 따른 조건 Run 2, 3에서의 유출수의 탁도는 거의 유사한 결과를 나타내었다.

##### 3.1.3. UV<sub>254</sub> 제거 특성

UV<sub>254</sub>는 유기물을 간접적으로 나타내는 지표로서 Fig. 4에서와 같이 Run 3의 상단에서는 원수 대비 약 30% 제거율이 하단을 거치면서 유입수 대비 약 41%의 제거율로 향상되었다. 전체적으로 Run 1은 약 30%, Run 2, 3은 약 60%로 UV<sub>254</sub>의 제거율이 약 2배 증가하였다. Run 2, 3은 비슷한 결과를 보였지만

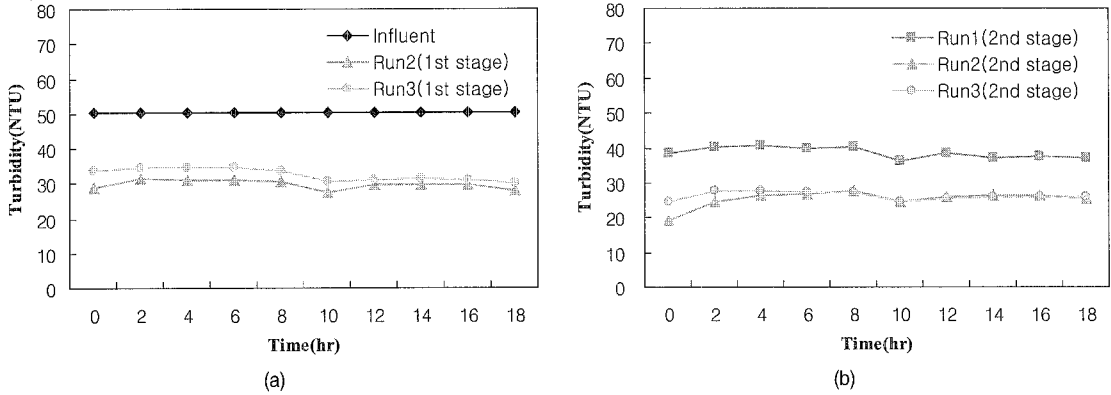


Fig. 3. Variation of turbidity with 1st stage and 2nd stage in this systems.

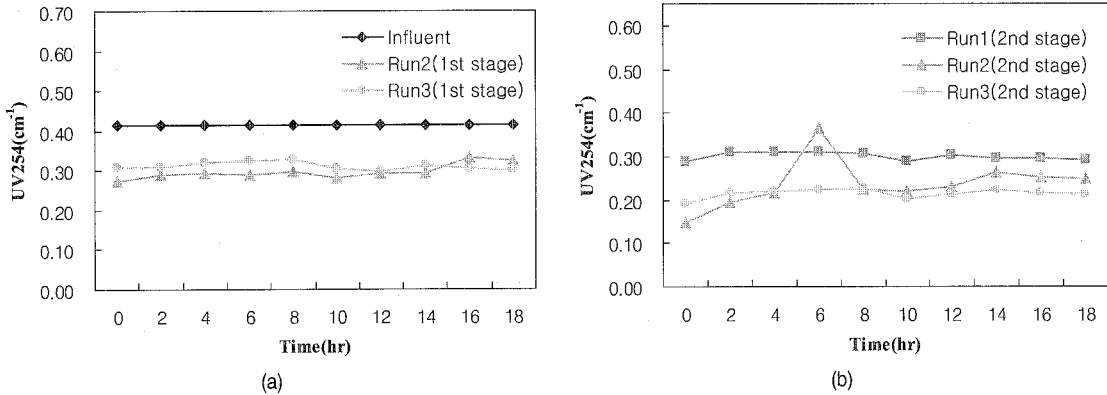


Fig. 4. Variation of UV<sub>254</sub> with 1st stage and 2nd stage in this systems.

모래층이 있는 조건인 Run 3이 Run 2에 비해 안정적인 결과를 보였다.

### 3.1.4. TOC 제거 특성

TOC(Total Organic Carbon)는 유기물을 직접적으로 알 수 있는 지표이다. Le Chevallier 등(1992)은 TOC 제거를 위해 안트라사이트/모래, GAC/모래, 심층 GAC 여과를 비교 연구한 결과, TOC의 제거는 안트라사이트/모래, GAC/모래, 심층 GAC 여과에 대해 각각 26, 51, 56%로 나타났으며, GAC (Granular Activated Carbon) 여과가 보다 많은 양의 미생물을 부착시킬 수 있으며, 결과적으로 보다 많은 양의 TOC 제거를 가능하게 하였다고 보고한 바 있다. 본 연구에서도 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 TOC는 활성탄에 의해 제거가 되기 때문에 전처리층의 유무와 상관없이 세 조건 모두 2단에서는 거의 유사한 값을 나타내었다. 그러나, 활성탄층 아래 모래층을

충전한 Run 1, Run 3이 모래층이 없는 Run 2에 비해 최종유출수의 TOC가 좀더 낮게 나타났다. 이는 유기물이 흡착된 일부 활성탄이 모래층이 없는 Run 2에서 유출되어 나온 것으로 판단되며, 결과적으로 활성탄층 하부에 모래를 추가하는 것이 유기물제거에는 효과적임을 확인하였다.

### 3.1.5. 입자개수 제거 특성

여과는 탁질물질의 제거를 유도하는 공정이며, 탁질물질의 입자개수는 여과 효율 평가에 중요한 인자이다. 병원성 원생동물인 *Cryptosporidium* oocysts의 크기는 약 4~7 $\mu$ m 정도이고, *Giardia* cysts의 크기는 약 5~15 $\mu$ m 정도(AWWA, 2000)이므로 본 연구에서는 각 조건별로 총 입자개수와 *Cryptosporidium*, *Giardia* 크기를 고려하여 2~15 $\mu$ m 범위의 입자개수 분포를 측정하였다. 유입되는 원수의 입자개수는 Total은 24,224counts/mL, 2~15 $\mu$ m는 6,121counts/mL이었다.

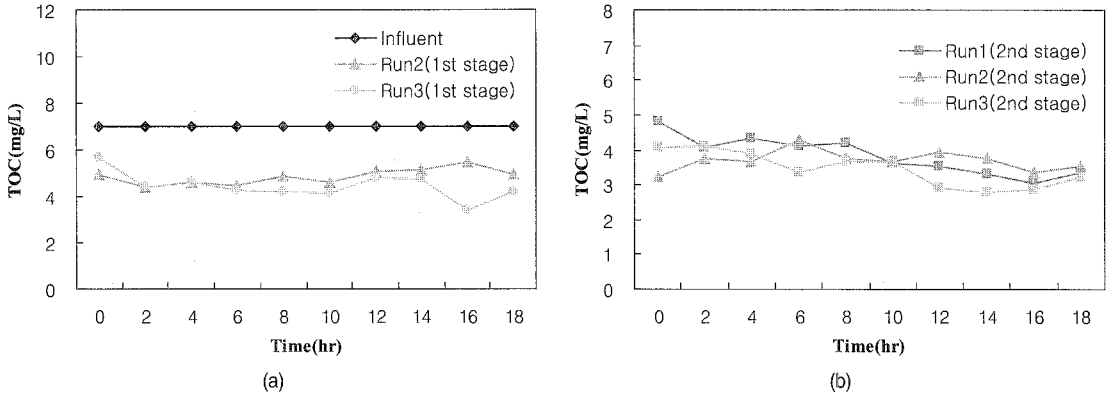


Fig. 5. Variation of TOC with 1st stage and 2nd stage in this systems.

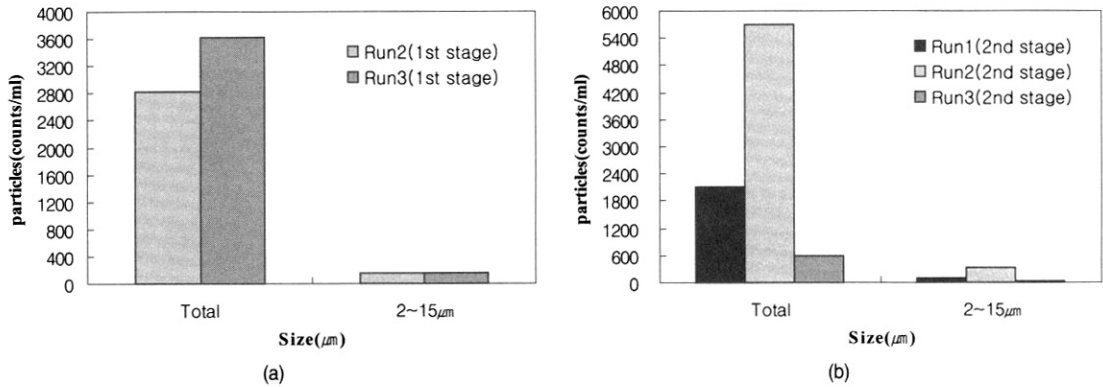


Fig. 6. Variation of particles with 1st stage and 2nd stage in this systems (Initial particles; Total 24,224 counts/mL, 2 15 μm 6,121 counts/mL).

Fig. 6에 나타난 바와 같이 Run 2와 Run 3의 상단에 서의 총 입자개수를 비교한 결과, Run 3이 Run 2에 비해 다소 많았으나, 병원성 원생동물의 크기인 2~15 μm의 범위에서는 비슷한 값을 보였다. 상단을 통과하고 하단 통과 후의 총 입자개수와 2~15 μm 범위에서의 입자개수는 Run 3이 Run 1, 2에 비해 매우 적은 수를 보여 효과가 있었음을 확인하였다. Run 3의 Total 입자개수에 대한 제거율은 97.5%였고, 2~15 μm 범위의 입자개수에 대한 제거율은 99.2%를 보였다.

Run 2가 Run 1보다 입자수가 많은 것은 활성탄 하부에 포설된 모래가 탁질 억제 능력이 있음을 보여주는 것이다. 따라서 본 연구에서 활성탄 하부에 모래층을 두는 것은 탁질 억제능력을 극대화시켜 혹시 있게 될 병원성 원생동물인 *Cryptosporidium*의 유출사고를 미연에 방지하는데 큰 역할을 할 수 있을 것으로 사료된다.

### 3.1.6. THMFPP 및 HAAFP 제거 특성

트리할로메탄 전구물질 (Trihalomethane Formation Potential; THMFPP) 및 할로아세트산 전구물질 (Haloacetic Acids Formation Potential; HAAFP)는 발암물질로 알려진 염소소독의 부산물인 트리할로메탄과 할로아세트익시드를 생산해 낼 수 있는 원인물질 즉, 유기물질을 나타내는 지표이다. 본 연구에서는 Fig. 7에 나타난 바와 같이 Run 1, 2, 3의 조건에서 THMFPP의 총 제거율은 각각 91.6, 88.0, 92.6%로 Run 3에서 제거율이 가장 높았으며, HAAFP의 총 제거율 역시 각각 74.0, 72.1, 77.8 %로 Run 3에서의 제거율이 가장 우수하였다.

## 3.2. 이탄이층 복합여과시스템의 상단 여재선정

### 3.2.1. 손실수두 평가

운전 조건별 상, 하단의 깔림 수위변화를 Fig. 8, 9

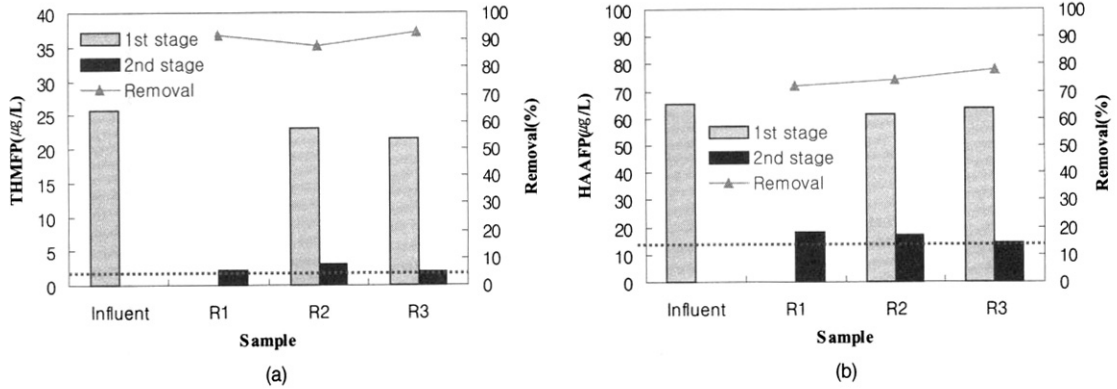


Fig. 7. Removal rate of THMFP and HAAFP with experimental conditions.

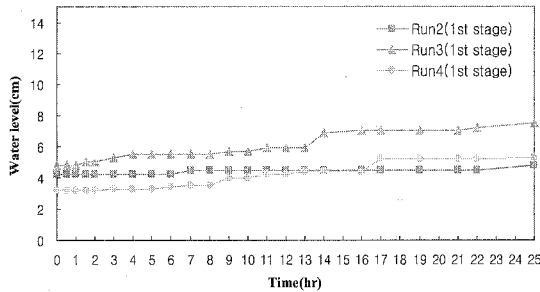


Fig. 8. Variation of water level with 1st stage in this systems.

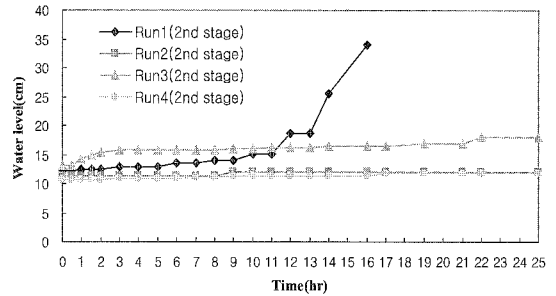


Fig. 9. Variation of water level with 2nd stage in this systems.

에 나타내었다. 수위변화의 측정은 손실수두를 간접적으로 평가하기 위함이며, Fig. 8을 보면 상단에서의 세립사, 안트라사이트가 각각 충전된 Run 3, 4는 시간이 경과하면서 여과수위가 증가하는 반면 조립사가 충전된 Run 2는 시간 경과에 따라 지속적으로 안정적인 수위를 유지하였다. 이는 장기간 운전시 Run 2가 Run 3, 4에 비해 여과지속시간이 길어지므로 하단에 충분한 처리수를 공급할 수 있을 것이다. 또한 다른 조건에 비해 역세척 횟수가 줄어들기 때문에 여과수량 측면에서도 다른 조건에 비해 효과적인 것으로 판단된다.

상단에서 조립사가 충전된 Run 2는 다른 조건에 비해 수위변화나 여과지속시간이 길어졌음으로 인해 하단에서도 그만큼 탁도 물질이 많을 것으로 예상되었으나, Fig. 9에서 보듯이 안트라사이트가 충전된 Run 4와 함께 안정적인 수위를 나타내었다. 하단에서의 세립사가 충전된 Run 3은 초기 수위가 높은 상태에서 운전이 시작되었지만 운전 종료시까지 안정적인 수위를 유지하였다. 반면 상단에 전처리용 여재를 설

치하지 않은 Run 1은 하단에서 운전시작 후 천천히 증가하던 수위가 10시간 이후 급격하게 증가하여 16시간 이후에는 유입수가 칼럼의 트라프를 넘게 되었다. 이는 하단의 부하와 여과지속시간을 증가시키기 위한 목적으로 설치한 상단이 없음으로 인해서 유입수의 탁도 부하에 하단이 견디지 못하고 수위가 급격하게 상승하는 결과를 초래한 것이다.

따라서 상단에 여재를 충전하는 것은 그만큼 하단에서의 여과지속시간과 여과효율을 높이는데 큰 역할을 하고 있었으며, 또한 상단의 전처리용 여재로서 조립사가 안정적인 수위확보를 위해 적합하다는 것을 확인하였다.

### 3.2.2. 탁도 제거 특성

각 조건별 탁도변화를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 10을 보면 상단에서는 안트라사이트가 충전된 Run 4가 다른 두 조건에 비해 탁도제거가 다소 우수하였으나, Fig. 11에서 보듯이 하단에서는 오히려 조립사가 충전된 Run 2가 가장 우수하고 안정적인



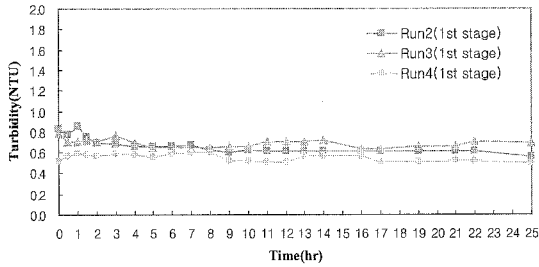


Fig. 10. Variation of turbidity with 1st stage in this systems.

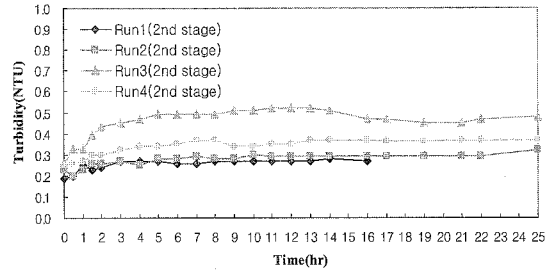
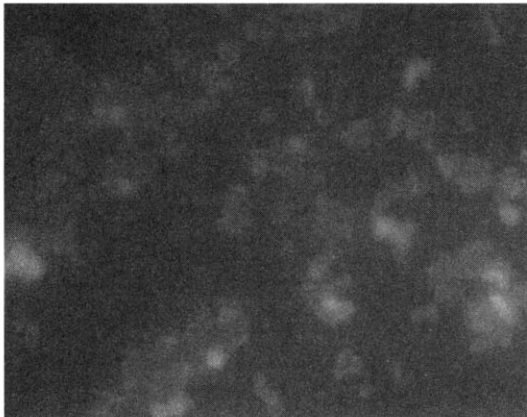


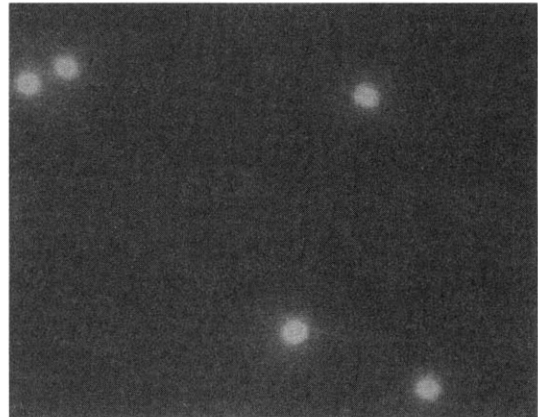
Fig. 11. Variation of turbidity with 2nd stage in this systems.

Table 4. Removal characteristics of *Cryptosporidium* in two-stages and dual media filtration system

Steps	Influent(Cysts/L)	Effluent(Cysts/L)	Removal rate(%)
1st stage(coarse sand)	$1 \times 10^5$	$2 \times 10^5$	80
2nd stage(activated carbon)	$2 \times 10^5$	$1.4 \times 10^5$	30
2nd stage(fine sand)	$1.4 \times 10^5$	$8.4 \times 10^3$	94
total(in contine)	$1 \times 10^6$	$8.4 \times 10^3$	99(2log)



(a) Before treatment



(b) After treatment

Fig. 12. Variation of *Cryptosporidium* before and after treatment.

탁도 제거 특성을 보였다. 어떤 여재도 충전되지 않은 Run 1이 하단에서 안정적으로 탁도가 제거되는 것이 보였지만 3.2.1절의 손실수두 평가에서 살펴본 바와 같이 시간 경과에 따라 급격하게 수위가 증가하여 16시간 이후에는 운전이 중단되는 문제점을 안고 있다.

따라서 세립사와 안트라사이트에 비해 상대적으로 수위가 안정적이고, 탁도 제거에 무리가 없는 조립사가 이단이층 복합여과시스템의 상단 여재로 적합한 것으로 판단된다.

### 3.3. 이단이층 복합여과시스템에 의한 원생동물과 내분비계 장애물질 제거특성

본 연구에서는 실험실 규모의 이단이층 복합여과 칼럼을 이용해서 일회 실험을 실시하였고, 병원성 원생동물인 크립토스포리디움(*Cryptosporidium*)의 제거 특성을 Table 4, Fig. 12에, 내분비계 장애물질인 Bisphenol-A의 제거특성을 Table 5에 나타내었다.

상수에 존재하는 감염성 미생물 중에서 특히 병원성 원생동물인 크립토스포리디움(*Cryptosporidium*)의 경우 기존의 염소 처리로는 소독이 거의 이루어지지 않기 때문에(조 등, 2004) 국내 정수처리 실정 상 급

**Table 5.** Removal characteristics of Bisphenol-A in two-stages and dual media filtration system

Steps	Removal rate(%)		
	0.22(mL/min)	0.33(mL/min)	0.66(mL/min)
1st stage(coarse sand)	3	1	0
2nd stage(activated carbon)	99	99	99
2nd stage(fine sand)	6	3	1
total(in contine)	99 >	99 >	99 >

속여과 과정에서 최대한 제거가 이루어지지 않으면 안된다.

**Table 4**는 이단이층 복합여과시스템의 각 단계별 *Cryptosporidium*의 제거율을 나타낸 것으로 각단의 유입수를 기준으로 상단의 조립사층에서는 80%, 하단의 활성탄층에서는 30%, 하단의 세립사층에서는 94%가 제거되었고, 전체적으로는 99%가 제거되었다. **Fig. 12**는 본 시스템에 의한 처리 전후의 *Cryptosporidium*를 형광 현미경(Nikon Co., Japan, Model E600)을 통해 나타낸 모습이다. **Table 4, Fig. 12**에 나타난 바와 같이 병원성 원생동물인 *Cryptosporidium*의 제거율은 상단의 조립사층에서부터 하단의 세립사층을 통과한 후 전체적으로 99%의 제거율을 보여, 일반적으로 급속모래여과에서 제거가 잘되지 않는 단점을 본 이단이층 복합여과시스템에서는 보완할 수 있음을 확인하였다.

각종 산업의 발달로 인한 유해화학물질의 상수원 수 유입은 내분비장애라는 새로운 유해성 논란을 야기시킬 우려가 있다. 우리나라에서는 현재 내분비계 장애물질로 38군 87종으로 분류되고 있으며, 이러한 물질들은 환경 중에 미량이라도 존재하게 되면 인체에 커다란 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 에폭시 수지 출발물질로서 캔 코팅제, 음식용기, 아기젖병 등에 사용되는 Bisphenol-A는 적은 양이라도 내분비계에 이상을 일으키는 유해물질로 그린피스 등과 같은 국제환경단체는 그 유해성을 강력히 주장하고 있다(이 등, 2002; 환경부, 2000; 박, 2006).

**Table 5**는 내분비계 장애물질인 Bisphenol-A가 이단이층 복합여과칼럼에서의 통과 유속에 따른 제거효율을 나타낸 것으로 상단의 조립사층에서는 거의 제거되지 않으나 하단의 활성탄층에서 대부분 제거되어 99% 이상 제거됨을 확인할 수 있었다. 따라서 본 이단이층 복합여과시스템은 다양한 오염물질에 대응할

수 있음을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 기존 여과지의 개량 또는 신설 여과지 설계시 또 다른 부지의 확장없이 기존 급속모래여과지를 대체하는 기술로서 하부집수장치 상부에 활성탄 + 모래를 충전하고 활성탄층 상부에 일정한 간격의 역세 팽창층을 두고 중간집수장치 위에 전처리 개념으로 모래층을 두는 이단이층 복합여과시스템의 공정선정 연구를 수행하였다. 연구결과 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 이단이층 복합여과시스템의 공정 선정을 위해 3가지의 운전조건 즉, Run 1(상단은 여재를 충전하지 않고, 하단에만 활성탄과 세립사를 충전), Run 2(상단은 안트라사이트 + 조립사를 충전하고, 하단에는 활성탄만을 충전), Run 3(상단에는 안트라사이트 + 조립사를 충전하고, 하단에는 활성탄과 세립사를 충전)로 운전한 결과, Run 3이 다른 두 조건에 비해 손실수두가 감소되었고, 탁도, TOC, 입자개수, THMFP 및 HAAFP의 제거율이 우수하여 이단이층 복합여과시스템으로 적합하였다.

2. 이단이층 복합여과시스템 상단의 여재선정은 4가지의 운전조건 즉, 실험장치의 하단에는 모두 활성탄과 세립사를 충전하고, 상단에는 어떠한 여재도 충전하지 않은 Run 1, 조립사를 충전한 Run 2, 세립사를 충전한 Run 3, 안트라사이트를 충전한 Run 4의 조건으로 운전한 결과, Run 2가 다른 여재를 충전한 조건에 비해 수위변화가 적어 여과지속시간을 늘릴 수 있고, 탁도 제거가 우수한 것으로 나타나 조립사를 상단의 여재로 선정하였다.

3. 이단이층 복합여과시스템에 의한 각 단계별 *Cryptosporidium*의 제거율은 각 단의 유입수를 기준으

로 상단의 조립사층에서는 80%, 하단의 활성탄층에서는 30%, 하단의 세립사층에서는 94%가 제거되었고, 전체적으로는 99%가 제거되었다. Bisphenol-A의 제거율은 상단의 조립사층 및 하단의 세립사층에서는 거의 제거되지 않으나 하단의 활성탄층에서 대부분 제거되어 99% 이상 제거되었다.

이상의 내용을 종합정리하면, 향후 여과성능 향상을 위해 기존 급속여과지를 개량하거나 또는 신설할 때에는 급속여과지의 상단은 여과지속시간을 연장하기 위해 조대입자의 탁도물질을 제거하는 전처리 목적의 입자경이 큰 조립사층, 하단의 상층부는 용존유기물질, 내분비계 장애물질 등의 본처리 목적의 입상활성탄층, 그리고 하단의 하층은 마감처리용 세립사층을 두는 이단이층 복합여과시스템을 제안하고자 한다.

사 사

본 연구는 "환경부 차세대 핵심환경기술개발사업"의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김경숙, 오병수, 조우현, 강준원 (2004) 정수처리 시스템에서 유기물 제거 효율 향상을 위한 오존과 활성탄 공정의 영향, *대한환경공학회지*, **26**(10), pp. 1101-1108.
2. 김충환, 김한승 (2003) 정수 막여과 국제 세미나 리뷰, *상하수도학회지*, **17**(5), pp. 594-605.
3. 문성민, 최승일, 손진식, 윤제용 (2005) 국내 정수장 고도정수처리 공정에서 공정별처리효율 조사, *상하수도학회지*, **19**(3), pp. 323-329.
4. 문성용, 김승현 (2005) 정수처리 공정에서 연속식 입자계수기의 적용성 검토에 관한 연구, *상하수도학회지*, **19**(2), pp. 214-220.
5. 문철훈, 이윤진, 고영송, 남상호 (2003) 생물활성탄 및 사여재를 이용한 여과공정에서의 역세척에 관한 연구, *대한환경공학회지*, **25**(2), pp. 227-233.
6. 박동학, 신창수, 한덕희, 최승일 (2003) 급속여과공정에서 여재구성에 따른 여과효율 분석 비교연구, *한국물환경학회 · 대한상하수도학회 공동추계학술발표회 논문집*, **A-1**, pp. 1-4.
7. 박원식 (2006) 환경호르몬 비스페놀 A란?. *주간한국*, **2146**호. 서울.

8. 우달식, 김평청, 남상호 (1998) 생물활성탄 유동상을 이용한 상수원수의 암모니아성 질소 제거, *대한환경공학회지*, **20**(6), pp. 779-789.
9. 우달식, 조관형, 권문선, 류병로, 박광하, 박혜숙, 조영태, 황병기 (2006) *최신 수질오염개론*, pp. 166-176, 동화기술, 서울.
10. 윤제용, 손진식, 최승일, 문성민 (2005) 국내 정수장 고도정수시설의 설계 및 운영상의 문제점과 제언, *상하수도학회지*, **19**(3), pp. 268-276.
11. 이명희, 김종향 (2002) 자외선에너지를 이용한 내분비계 장애물질인 비스페놀-A의 분해, *대한환경공학회지*, **24**(3), pp. 551-556.
12. 정현미, 윤제용, 류제근 (1999) 먹는 물과 크립토스포리디움, *한국물환경학회지*, **15**(1), pp. 1-11.
13. 정현미, 정신호, 김대균, 정원화, 박상희, 김종민, 박상정, 유명진 (2005) 이종여재를 사용한 급속여과 처리조건에 따른 *Cryptosporidium* 제거효율 연구, *한국물환경학회 · 대한상하수도학회 공동추계학술발표회 논문집*, **A-3**, pp. 27-38.
14. 조민, 정현미, 김이호, 손진식, 박상정, 윤제용 (2004) 오존 및 UV에 의한 크립토스포리디움(*Cryptosporidium parvum*)의 불활성화 및 국내 정수장에서 소독 효과 예측, *한국물환경학회 · 대한상하수도학회 공동추계학술발표회 논문집*, **B-12**, pp. 125-128.
15. 한무영, 박중현 (1993) 고도정수처리 도입의 타당성 검토, *상하수도학회지*, **7**(2), pp. 47-54.
16. 환경부 (2000) '99 내분비계 장애물질 조사 연구결과 발표회, pp. 151-210.
17. 환경부 (2004) *정수처리에 관한 기준*, 환경부고시 제 2004-89호.
18. 한국상하수도협회 (2004) *상수도시설기준*, pp. 352-353, 환경부, 서울.
19. 한국상하수도협회 (2005) *여과지 최적 운영 관리 매뉴얼*, 11장, pp. 1-59, 아이올리브, 서울.
20. AWWA (2000) *Operational Control of Coagulation and Filtration Processes - Manual of Water Supply Practices*, 2nd Ed. pp.51-66, AWWA Research Foundation, Denver.
21. Lechevallier M.V. (1992) Evaluating the Performance of Biologically Active Rapid Filters, *J. AWWA*, **84**(4), pp. 136-145.
22. Kawamura, S. (2000) *Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities*, 2nd Ed. pp. 194-292, John Wiley & Sons, Inc., New York.
23. Krasner, S.W., Sclementi, M.J., Coffey, B.M. (1993) Testing Biologically Active Filters for Removing Aldehydes Formed during Ozonation, *J. AWWA*, **85**(5), pp. 62-71.
24. Niquette, P., Pr vost, M., Maclean, R.G., Thibault, D. (1998) Backwashing First-stage Sand-BAC Filters, *J. AWWA*, **90**(1),

pp. 86-96.  
25. Nix, D.K., Taylor, J.S. (2003) *Filter Evaluation Procedures for*

*Granular Media*. pp.91-97, AWWA Research Foundation,  
Denver.