

## 심층여과지의 여층구성에 따른 여과특성 비교

### Characteristics of Depth Filtration for Various Filter-Bed Configurations

안 종 호\* / 윤 재 흥\*\*  
Ahn, Jong-Ho / Yoon, Jae-Heung

#### Abstract

The objective of this study is to evaluate the filtration efficiency of deep-bed filters by comparing to single and dual media filters. Pilot-plant tests using four-filter columns were conducted for the comparison of head loss development and filtered water quality. The dual-media filter showed greater initial head loss, but less rate of head-loss development than those of the coarse-sand-deep-bed filters. For 180 m/day of filtration rate, the dual-media filter produces larger unit production rate by 30-40 %, and the turbidities of filtered water were below 0.1 NTU. The initial breakthrough could be effectively controlled by the dual-media filter rather than coarse-sand-deep-bed filters.

*keywords* : Depth filtration, Dual media filter, Coarse media deep bed filtration

#### 요 지

모형실험장치를 이용하여 심층여과지에 대한 여층구성별 여과효율 평가를 통해 여과지 설계시의 여층구성에 대한 기초자료를 제공하는 것이 본 연구의 목적이다. 여과지속시간에 따른 손실수두 발달특성을 보면 여과초기의 수두손실은 이중여재 여과지가 높지만 탁질 역류에 의한 수두손실의 증가는 완만하여 여과속도 180 m/day의 동일한 여과속도를 적용하였을 경우, 조립심층 모래여과지에 비해 단위정수생산량이 30 - 40 % 정도 증대되는 것으로 나타났다. 여과수질은 각각 여과속도 180 m/day, 240 m/day로 운전한 결과 여과속도에 관계없이 모두 0.1 NTU 이하를 나타내어 만족하는 여과수질을 보였다. 그러나 여과초기 탁질 누출 특성을 보면 상대적으로 조립심층 모래여과지의 누출 경향이 크게 나타났고, 여과속도가 240 m/day로 증대됨에 따라 그 경향은 보다 뚜렷하게 나타났다.

**핵심용어** : 심층여과, 이중여재, 조립심층여재, 여과효율

\* 한국수자원공사 수자원연구소 연구원  
Researcher, Water Resource Research Institute, KOWACO, Taejeon, 305-730, Korea

\*\* 한국수자원공사 수자원연구소 수도연구부장  
Head, Depart. of Water Supply and Treatment, Water Research Institute, KOWACO, Taejeon 305-730, Korea  
(E-mail: jhyoon@kowaco.or.kr)

## 1. 서 론

급속여과는 여과층 내부까지 플럭이 역류되는 것이 이상적이나 여과 층분리 현상이 심화되면 여과지 유입 수 중의 플럭은 여층의 표면에서 주로 제거되는 표면여과가 되므로 여과손실수두의 빠른 증가, 여과지속시간의 단축을 유발할 뿐만 아니라 여과수 중에 플럭이 유출되어 수질이 악화된다. 따라서 여과지의 최근 설계경향은 기존의 급속모래여과지로 대표되는 표면여과에서 탁질 역류능력이 크고 정수생산성을 증대시킬 수 있는 심층여과로 전환되고 있다. 따라서 미국 등 선진 외국의 경우 단일여재의 층분리현상을 상쇄하고, 처리용량 증대를 위해 신규 건설 여과지뿐만 아니라 기존 여과지에 있어서도 다층여과나 단일조립심층여과로 교체하고 있는 실정이다(Barnett 등, 1992).

다층여과는 주로 이종여재가 사용되고 있으며, 이종여재는 보통 부연탄의 일종인 Anthracite를 여과상부에 위치시켜 큰 부유물은 상층에서 제거되고, 하층으로 갈수록 점점 작은 부유물이 제거되어 여과층 전체에서 여과되므로 손실수두 발달이 느리고 여과지속시간이 길어져 고속여과가 가능하였다. 또한 이종여재에 Garnet (석류석)을 추가 활용한 삼층여과지도 모래여과지나 이종여재 여과지에 비해 월등한 것으로 주장되면서 미국에서 1960년대 중반부터 사용되어 왔다(Logsdon과 Symons, 1977 ; Peterson 등, 1980). 그러나 아직까지 이종여재에 비해 삼중 혹은 4층의 층으로 구성된 여과지가 이종여재에 비해 그 효율성이 입증되지 못하였다. 그 이유는 삼중여재의 경우 여재자체에 의한 손실수두가 이종여재보다, 크기 때문에 가용수두가 그만큼 작게되고, 따라서 여과지속시간이 짧아질 수 있기 때문이다(Qureshi, 1981).

이종여재에서 모래와 Anthracite의 적정 입경은 서

로 혼합되지 않기 위한 경험율로서 모래의 유효입경에 대한 Anthracite의 유효입경의 비가 2 정도(Sanks, 1979), 층전깊이는 유효입경에 대한 층전깊이의 비가 1,200 정도면(Kawamura, 1991) 이상적으로 본다. 한편, 실제 이종여과상을 구성하는 모래와 Anthracite의 입경에 대한 미국, 영국, 유럽, 일본 및 한국의 경험치를 살펴보면 다음 표 1과 같다. 호주, 뉴질랜드, 홍콩 등지에서는 이종여재로서 Anthracite를 사용하는 대신에 유연탄을 여재로 사용하기도 하는데 (Australian C & S Brand Filter Coal, 1997), 일반 Anthracite에 비해 강도가 크고, 지역적 특성에 의해 생산단가가 저렴하기 때문에 많이 이용되고 있다.

한편, 유럽대륙에서는 이종여과지 보다는 일반 모래여과지의 표면여과의 단점을 극복하기 위해 굵고 깊은 여재를 사용하여 탁질이 여재 깊숙히 침투하여 심층여과기능을 수행할 수 있도록 조립심층 모래여과지 (Coarse-Media-Deep-Bod Filter)를 선호하고 있는데 (Degremont, 1979), 여층층전 깊이를 0.9 ~ 1.2 m 정도, 모래의 유효입경을 0.95 mm ~ 1.35 mm (limit 0.7 ~ 2 mm) 정도로 보다 균일한 (Homogeneous) 여재를 요구하며, 여과속도는 고속여과가 가능하여 168 ~ 480 m/day로 운전된다.

국내의 경우에도 심층여과지의 설비가 최근 들어 많이 이루어지고 있으나 정수생산성 문제보다는 단지 조류에 의한 여과지 폐색효과 저감을 위한 기능으로만 만족하고 있는 실정이고 실제 여과지 설계에 있어서도 심층여과지의 장점을 최대한 이용하지 못하고 있는 실정이다. 특히, 이종여재 이과지는 한동안 설계되어오다 운전의 어려움, 여재의 유실 등의 문제가 발생되면서 조립심층모래여과지의 설비가 선호되기도 하였다. 그러나 실제 공정상의 여과지의 여층구성에 따른 상호 여과효율에 대한 평가가 미흡하여 여과지 설계시 공정 선택의

표 1. 각 국의 이종여재 선정 입경 및 여재 층전깊이

구 분	Anthracite 입경	모래 입경	총 층전깊이
미 국*	0.9 - 2.5 mm	0.5 - 1.2 mm	0.6 - 0.9 m
영 국*	1.2 - 2.5 mm	0.6 - 1.2 mm	0.7 m
유 럽*	1.5 - 2.5 mm	0.8 - 1.2 mm	1.5 - 2.0 m
호주, 뉴질랜드*	유효입경 1.1 - 1.8 mm	유효입경 0.5 - 0.85 mm	1.1 - 1.5 m
일 본**	유효입경 0.9 - 1.4 mm	유효입경 0.45 - 0.6 mm	0.6 - 0.8 m
한 국***	유효입경 0.9 - 1.4 mm	유효입경 0.45 ~ 0.6 mm	0.6 - 0.8 m

\* 기존정수장 효율향상기술(2차년도), 환경부, 1997

\*\* 수도시설 설계지침, 일본수도협회, 1982

\*\*\* 상수도시설기준, 환경부, 1998

적절한 자료를 제공해 주지 못하는 실정이다. 따라서 여충구성에 따른 여과효율 평가를 통해 정수수질을 보장하면서 경제적 운영을 위한 기초자료를 제공하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 실제 정수장의 침전지 유출수를 이용하여 여과모형실험장치를 이용한 심층여과지에 대한 여충구성별 여과효율 평가를 통해 여과지 설계시의 여충구성에 대한 기초자료를 제공하고자 하였다.

## 2. 실험조건 및 방법

여충구성에 따른 여과효율 평가를 위해 그림 1과 같이 모두 4조의 직경 30 cm의 아크릴 컬럼으로 구성하였다. 여과 모형실험장치의 유입수는 실공정 침전지 유출분배수로에서 펌프로 공급하여 여과처리하도록 하였으며, 여과수 유량제어방식은 수위상승형 정속여과방식을 사용하였다. 4조의 여과컬럼은 실험목적상 최근 설계, 건설되어 운영되고 있는 한국수자원공사 내 정수장 여과지의 여충구성을 상호비교할 목적으로는 여충을 선정하였다. 1번 여과컬럼은 단일 모래여제 여과컬럼으로 G 정수장의 급속모래여과지를 모사하여 설치되었으며, 설계기준 여과속도는 150 m/day 이다. 2번 여과컬럼은 최근들어 많이 선호하고 있는 심층여과지의 하나인 조립심층 모래여과지 (Coarse Media Deep Bed)로서 대상여과지는 D 정수장 여과지의 구성을 반영하였다. 또한, 3번 여과컬럼도 조립심층 모래여과지로서 여재의 입경은 2번 여과컬럼에 비해 좀더 큰

입경을 사용하면서 여충깊이를 보다 깊게한 경우로 Kawamura(1991)가 제시한 여충깊이에 대한 여재입경 비 ( $L/d_{10}$ )가 1250 이상 되도록 구성하였다. 4번 여과 Column은 일반적인 이중여제 여과지로 S 정수장의 여과지의 특징을 반영하였다. 이상 4개의 여과컬럼에 대해 이후에서는 각각 급속모래, 조립심층1, 조립심층2, 이중여제의 명칭을 사용하였다. 각 여과컬럼의 여충구성과 여과지 설계인자가 표 2와 표 3에 나타나 있다. 여재의 물리적 특성조사는 수도용 여과모래 시험방법 (KWWA F100)과 수도용 안트라사이트 시험방법 (KWWA F101)을 따랐다(한국수도협회, 1989). 각 여과컬럼은 깊이에 따른 손실수두 측정을 위하여 여재 깊이별 손실수두계를 설치하였고, 시료채취용 Ports를 이용하여 여충깊이별 여과수질을 측정하였다.

역세척은 심층여과에 따른 여충내부의 탁질억류가 크므로 공기병용 역세척 방법을 채택하였다. 공기병용 역세척 방법에는 몇가지 방안이 있으나, 실험에서는 공기와 저속의 역세척수를 동시에 공급하여 역세척을 시행하고, 곧바로 고속의 역세척수만에 의해 역세척을 수행하는 방법을 채택하였다. 이 역세척방식의 이론적인 원리는 Amirtharajah(1991)에 의해 제시된 Collapse-pulsing 현상에 근거를 두었다. 각 공정별 수질측정은 탁도의 경우 1720C Turbidimeter(Hach, 미국)를 사용하여 연속모니터링하였다.

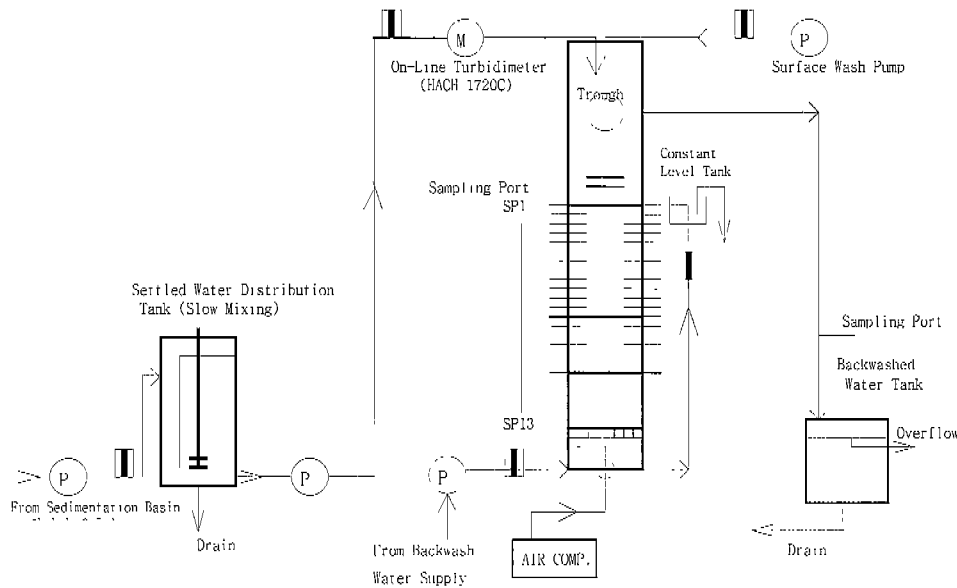


그림 1. 여과지 모형실험장치의 단면도

표 2. 여과모형실험장치의 개개 여과컬럼의 여재구성

구 분	Column 1	Column 2	Column 3	Column 4
Type	급속모래	조립심층 1	조립심층 2	이중 여재
유효경	Sand 0.7 mm	Sand 1.0 mm	Sand 1.1 mm	Anthracite 1.0 mm Sand 0.55 mm
균등계수	1.4	1.4	1.4	1.4
여재깊이	Sand 100 cm	Sand 110 cm	Sand 140 cm	Anthracite 50 cm Sand 30 cm
지지자갈층	4단 50 cm	2단 20 cm	2단 20 cm	4단 50 cm
트라프높이*	90 cm	50 cm	50 cm	120 cm

\* 여재표면 기준

표 3. 여과모형실험장치의 설계인자

설 계 인 자	단 위	규 격
최대처리용량	m <sup>3</sup> /hr	3
이과방식	정속여과	유입수관능분배 (자연평형형) - 지별세어
이과지수	개	4
여과지 면적	cm <sup>2</sup> /지	615.44
여과속도	m/day	180 ~ 240
역세척 방식		- 펌프지송방식 - 공기병용 역세척
기 타		각 지별 이과수 수질을 모니터링 할 수 있는 On-line 탁도계 설치

### 3. 손실수두 발달 특성

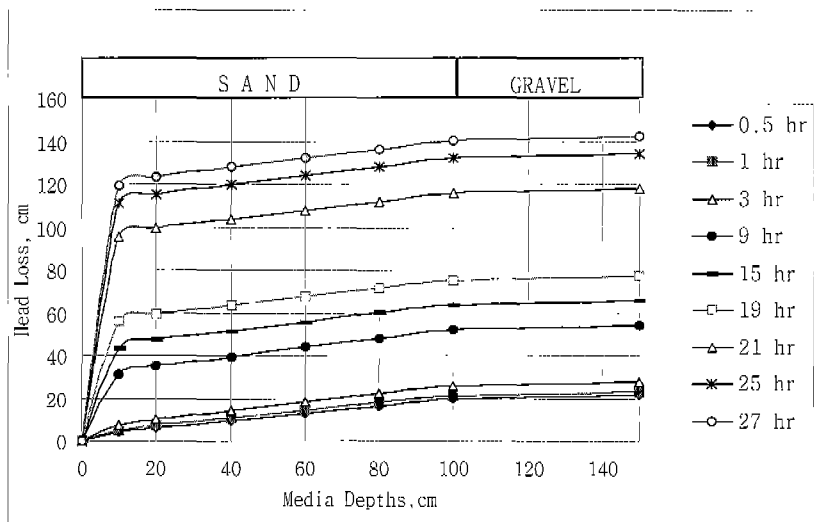
각각의 여과컬럼의 여과지속시간에 따른 손실수두 발달특성을 살펴보면 그림 2에서 그림 5의 실험결과와 같이 뚜렷한 여과특성을 반영하고 있다. 급속모래여과지의 경우 전형적인 표면여과의 특성으로 여과지속시간 9 시간 후 표층 10 cm 에서의 수두손실이 여재 전층에서 발생하는 수두손실의 58 % 이상을 차지하고 있고, 여과말기로 진행되면서는 85 %까지 증대되고 있다. 이러한 표면여과의 특성은 단위여층깊이당 수두손실비를 살펴보면 보다 명확하다. 표층 10 cm에서는 여과지속시간에 따라 단위여층깊이당 수두손실비가 증대되는 경향을 나타지만 보다 깊은 여층에서는 오히려 감소되고 있어, 여과말기에는 여층표면에서 90 %를 초과하고 있다. 이에 반해 심층여과의 특성을 나타내는 조립심층 모래여과지와 이중여재 여과지를 살펴보면 일반 급속모래여과지보다 완만한 수두손실 발달 특성을 나타내어 여과지속시간 9 시간 후 표층 10 cm 에서의 수두손실은 여재 전층 대비 각각 조립심층1은 29 %, 조립심층2

는 29.5 %, 이중여재여과지는 14 %로 급속모래여과지에 비해 표층에서 차지하는 수두손실의 비가 작음을 알 수 있다. 그러나 단위깊이별 수두손실비율 보면 조립심층 모래여과지의 경우 모두 여과말기에 표층 10 cm 에서 전체의 68 %이상을 차지하여 여과말기로 진행되면서 차차 심층여과의 기능이 떨어지 표면여과의 특성을 나타내고 있다. 한편, 이중여재여과지의 경우는 상대적으로 완만하여 여과말기에 도달해도 표층에서의 수두손실비가 전체수두손실비의 47 %에 그치고 있으며, 여재 전층에 걸쳐 수두손실이 분산되어 있음을 알 수 있다.

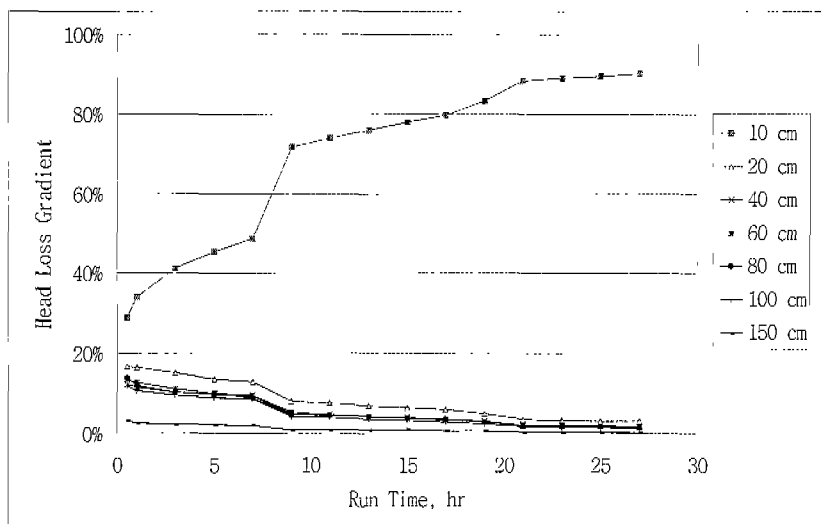
그림 6은 여층구성별 손실수두 발달특성을 비교한 결과이다. 여과초기 수두손실을 보면 급속모래여과지가 15.7 cm로 가장 작고, 다음으로 조립심층1, 조립심층2, 이중여재 순으로 이중여재가 39 cm로 가장 높았다. 그러나 여과가 진행되면서 여층 내의 탁질 여류로 급속모래여과지는 표층폐색으로 급격한 수두발달을 보였고, 다음으로 조립심층2, 조립심층1, 이중여재 순으로 빠른 손실수두 발달이 나타났다. 여과허용수두를 120 cm로

가정했을 때 각각의 여과지속시간은 급속모래는 15.7 시간, 조립심층2는 21.5 시간, 조립심층1은 27시간, 이중여재는 39시간을 나타내었다. 비록 초기손실수두는 상대적으로 높았으나 가장 원만한 수두손실을 나타내는 것은 이중여재여과지로 심층여과의 기능이 우수함을 알 수 있다. 또한 조립심층모래여과지의 경우 다소 유효경이 크고, 균등계수가 낮은 조립심층2가 손실수두 발달

은 조립심층1에 비해 급격하여 여과지속시간이 다소 짧게 나타났다. 한편, 그림 7은 여과속도를 240 m/day 증가시켰을 때의 수두발달 특성을 비교한 것으로 속도 증가에 따라 수두손실 발달이 급격하게 나타나고 있으나 허용수두손실 120 cm 기준으로 보면 심층여과지 모두 여과지속시간은 45시간 이상을 나타내었다.

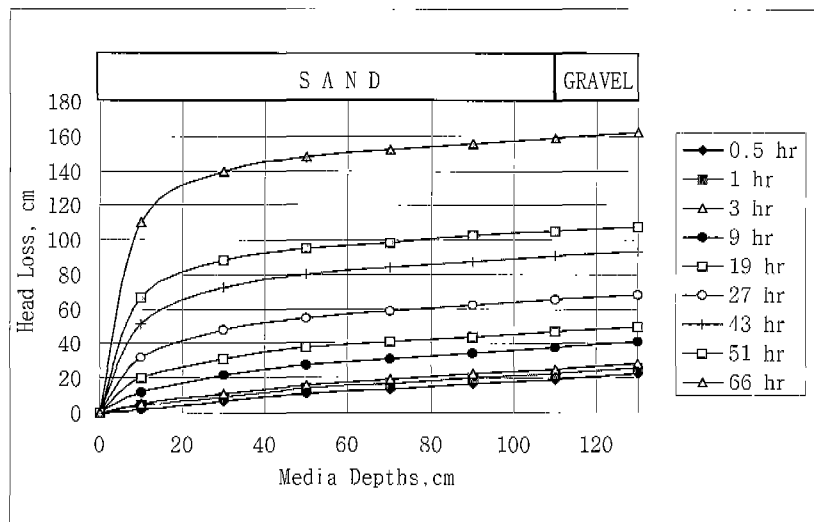


(a) 여층깊이별 손실수두

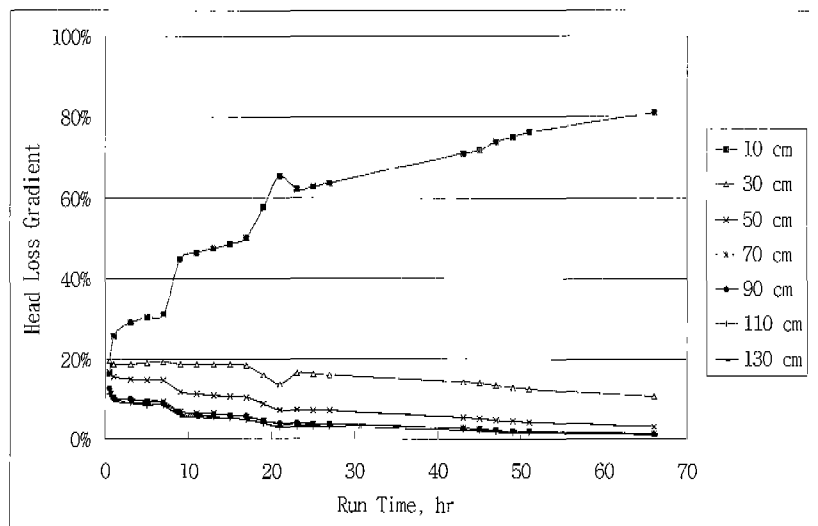


(b) 단위여층깊이당 손실수두비

그림 2. 급속모래여과지(column 1)의 여과시간에 따른 수두발달

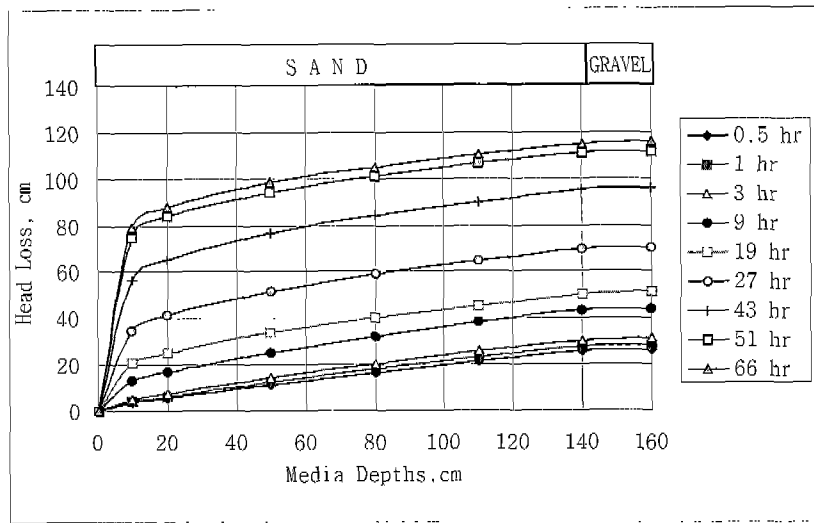


(a) 여층깊이별 손실수두

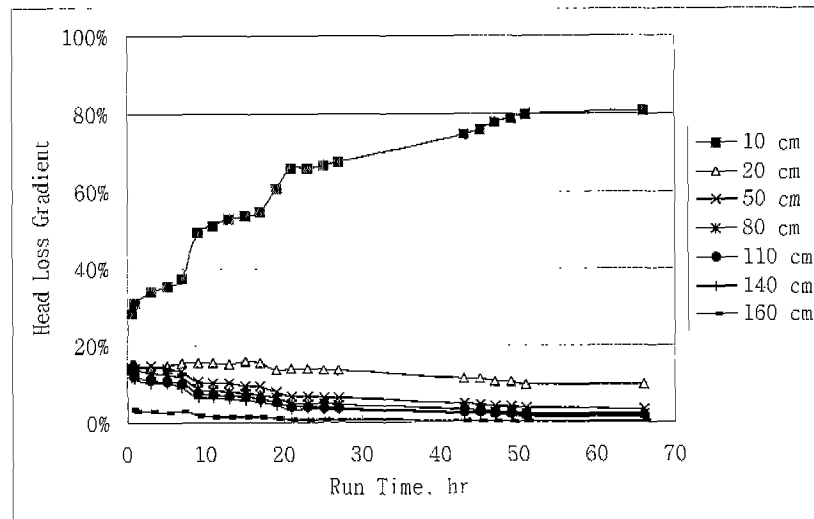


(b) 단위여층깊이당 손실수두비

그림 3. 조립심층 모래여과지 1 (column 2)의 여과시간에 따른 수두발달

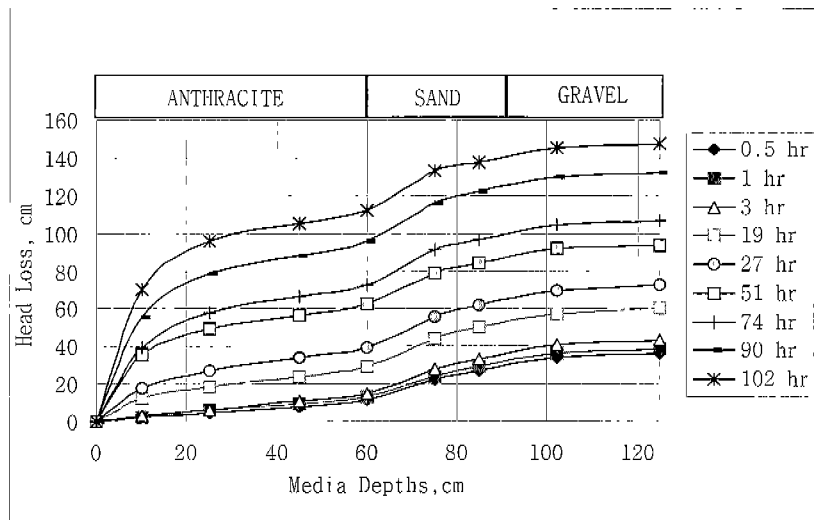


(a) 여층깊이별 손실수두

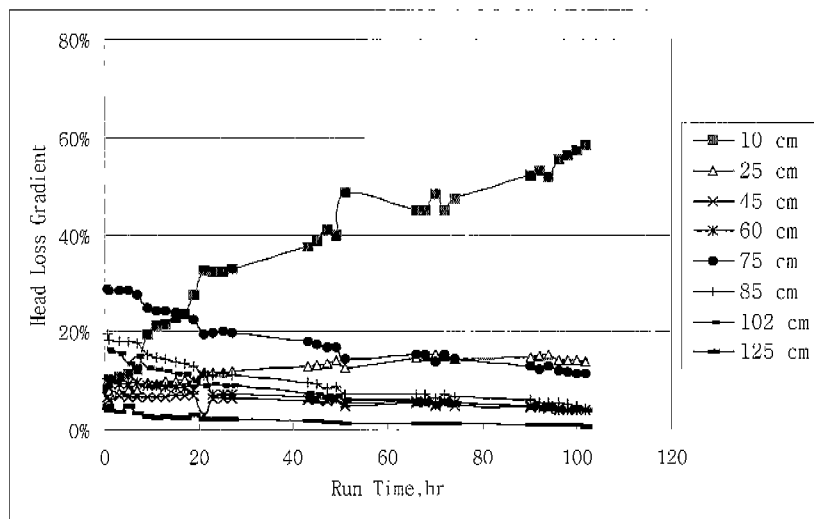


(b) 단위여층깊이당 손실수두비

그림 4. 조립심층 모래여과지 2 (column 3)의 여과시간에 따른 수두발달



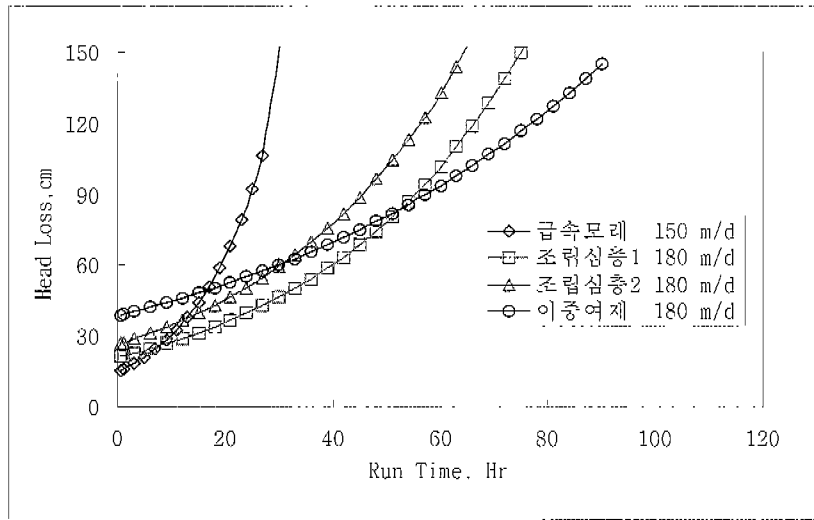
(a) 여층깊이별 손실수두



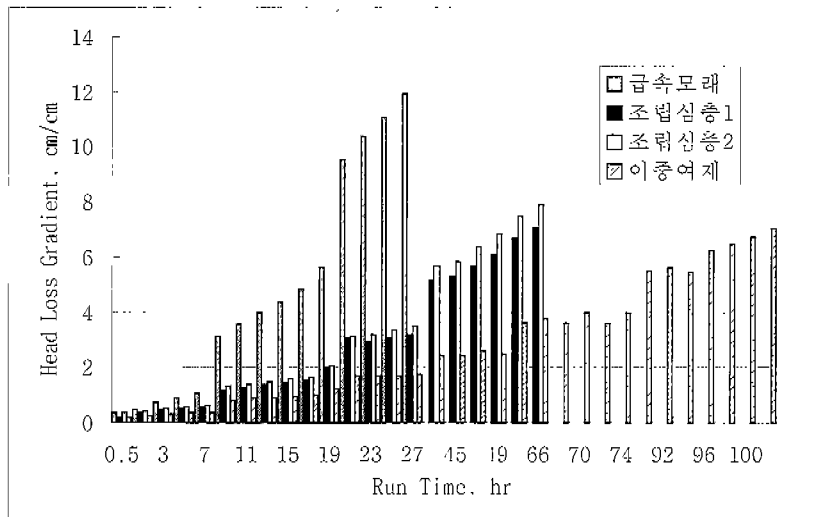
(b) 단위여층깊이당 손실수두비

그림 5. 이중여제 여과지 (column 4)의 여과시간에 따른 수두발달





(a) 여과지속시간에 따른 손실수두



(b) 표층 10cm에서의 손실수두비 발달

그림 6. 여중구성별 손실수두 발달 특성

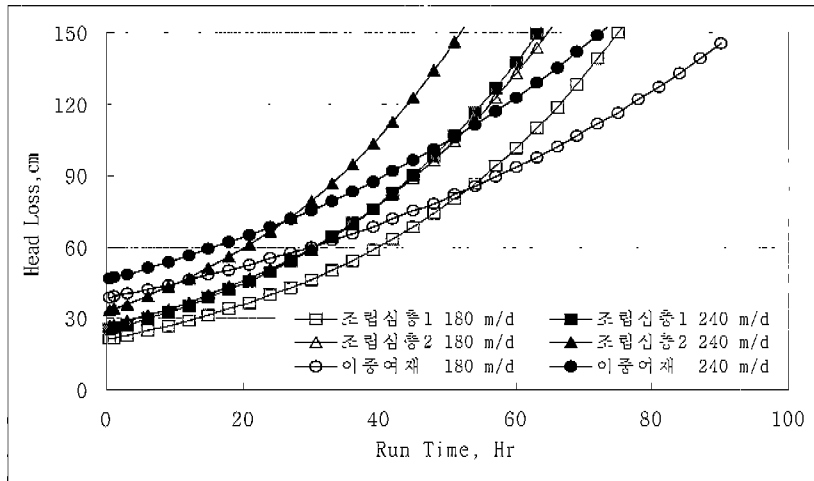


그림 7. 여층구성별 여과속도 변화에 따른 수두손실 발달

#### 4. 여층구성별 탁질 역류량 분포 및 제거효율 비교

여층구성에 따른 탁질역류 분포특성을 살펴보면 그림 8과 같다. 여층깊이별 탁도변화를 여과시간별로 측정한 결과 급속모래여과지는 표면여과 특성대로 표면 10 cm

부근에서 시간이 지남에 따라 탁질입자의 탈착특성이 뚜렷하게 나타나고 표층 20 cm 이하에서 다시 부착하는 특성을 보여준다. 즉, 탁질입자의 여층 내 역류능력은 여층의 표층 20 cm 이하에서만 발생한다고 할 수 있다. 그러나 조립심층1은 굵은 입径의 여재를 사용했기 때문에 탁질입자가 60 cm 이상 깊은 여층까지 침투가 가능

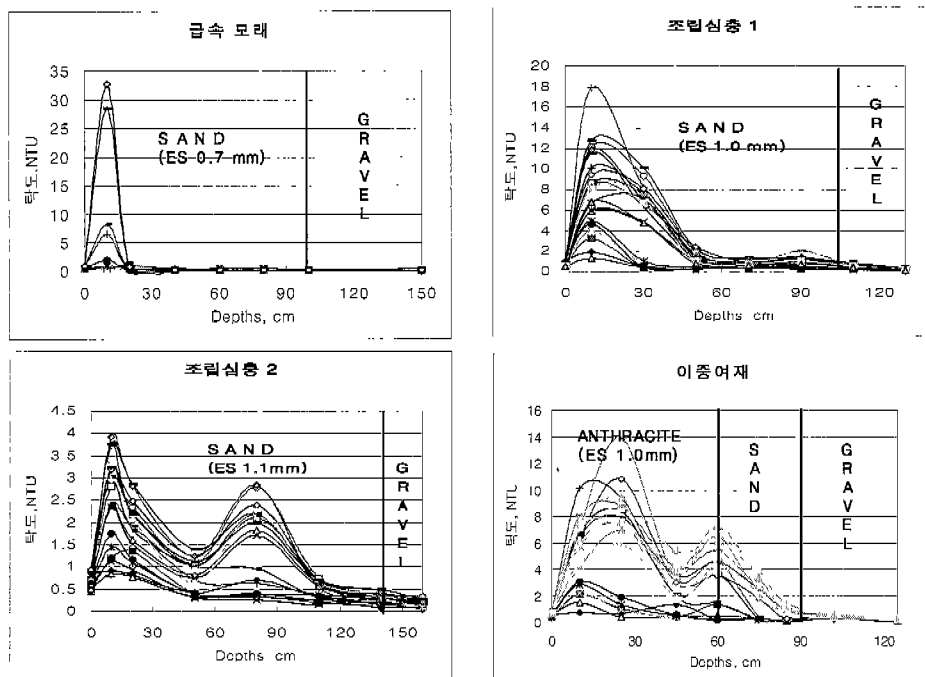
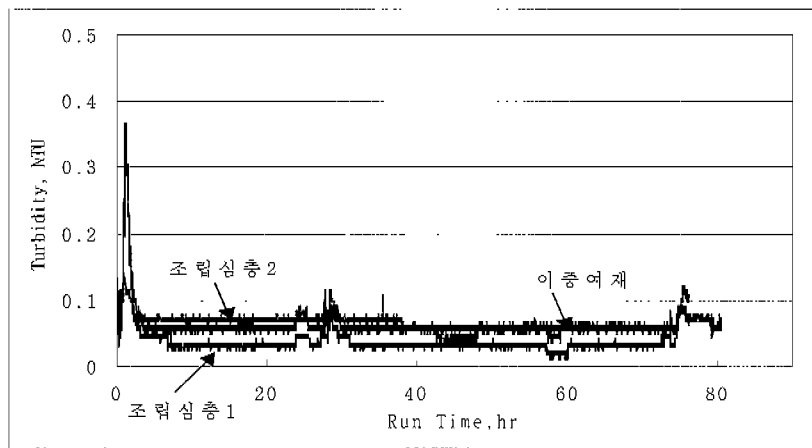


그림 8. 여층구성별 탁질역류량 분포특성

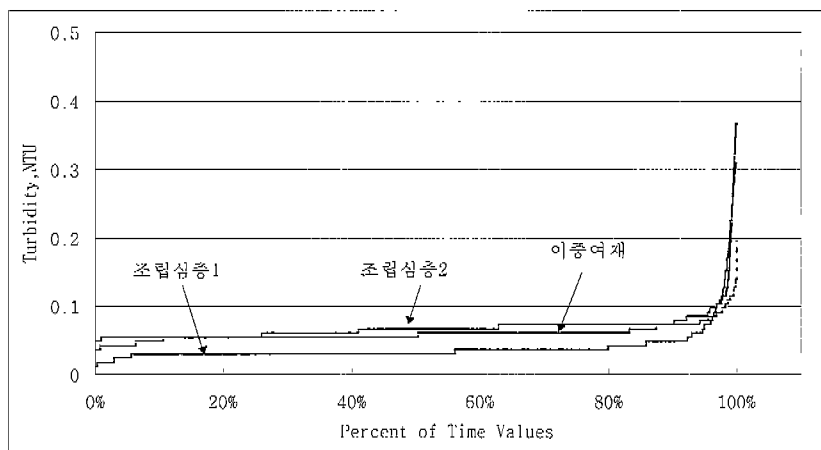
하여 급속모래여과지에 비해 탁질여류량이 큰 것을 알 수 있다. 하지만 여과말기에 도달하면서 역류된 탁질의 누출조짐이 발생되어 여과말기에 세심한 탁질누출 모니터링이 요구되었다. 조립심층2는 조립심층1에 비해 다소 얇은 입경을 사용하고 여층깊이를 보다 깊게하여 수질의 안정성을 도모코저 하였다. 그 결과 탁질입자의 여층 내 침투깊이도 조립심층1에 비해 깊어져 탁질여류량 분포 특성도 증가되었고, 여층 내 탁질제거 메카니즘도 탈착과 부착이 반복적으로 일어나는 특성을 보이고 있다. 이러한 특성은 이중여과여과지에서 나타나고 있으며, 여층 상부에 집적된 탁질입자의 역류가 수류전단력에 의해 탈착되어 더 깊은 여층으로 탁질 입자를 침투하게되며,

다시 부착 메카니즘이 발생되고 있다. 이러한 탈착과 부착의 반복적 메카니즘은 수두손실의 급격한 발달을 저감시켜 탁질입자 역류능력을 증대시켜 주고 있다.

그림 9와 그림 10은 심층여과지인 조립심층 모래여과지와 이중여과 여과지에 대해 각각 여과속도 180 m/day, 240 m/day로 운전한 결과를 나타내고 있다. 실험결과는 여과속도가 증대됨에 따라 수두손실의 급격한 증가로 여과지속시간이 다소 짧아졌으나, 여과속도에 관계없이 여과초기를 제외하고 모두 여과수질이 양호하여 95 % 이상의 여과수질이 0.1 NTU 이하를 나타내었고, 여층구성별 수질의 차이는 미미하나 조립심층1이 다소 좋은 수질을 나타내었다. 그러나 그림 11.



(a) 여과지속시간에 따른 여과수질

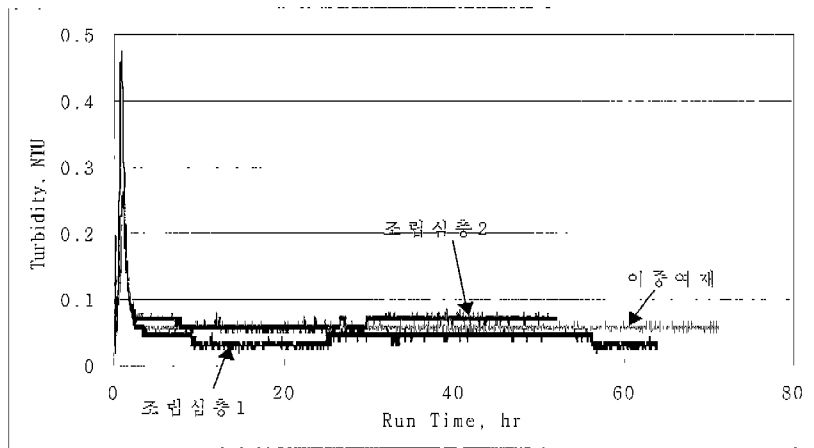


(b) 여과수질 분포특성

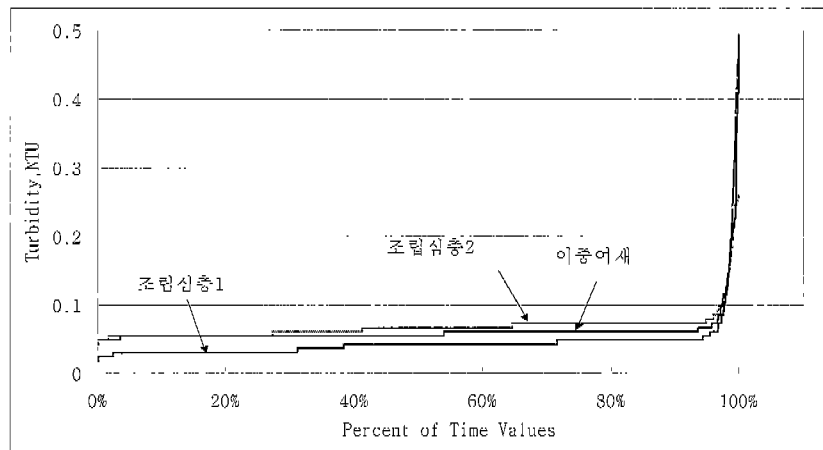
그림 9. 여층구성별 탁질제거효율 비교 (여과속도 180 m/day)

의 여과초기 탁질누출 특성을 보면, 오히려 조립심층1의 경우가 높은 수질을 나타내었다. 초기탁질 누출현상은 여과속도가 높은 240 m/day로 운전하였을 경우 보다 뚜렷하게 나타났다. 이중여제여과지의 경우에는 비록 초기누출경향은 있으나, 조립심층여과지에 비해 상대적으로 완만하게 나타났고, 조립심층모래여과

지의 경우에도 조립심층2의 경우가 조립심층1에 비해 초기 탁질누출에 대한 완충능력이 있는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 조립심층2가 상대적으로 여층이 깊고 균등계수가 작아 탁질 여류 능력이 우수하기 때문으로 판단된다.

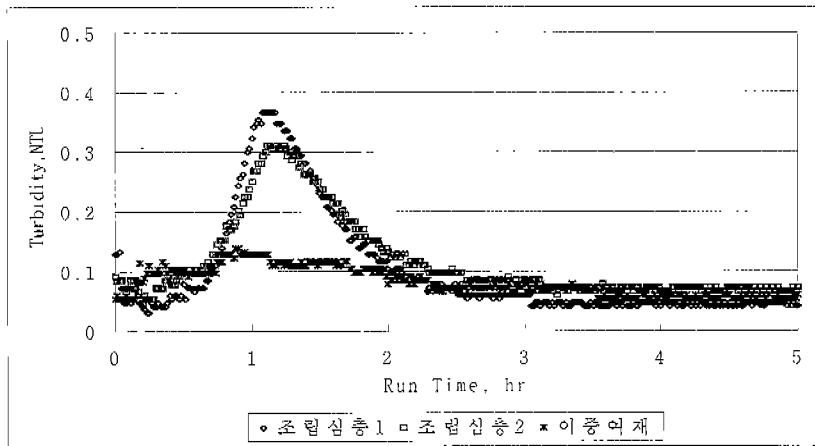


(a) 여과지속시간에 따른 여과수질

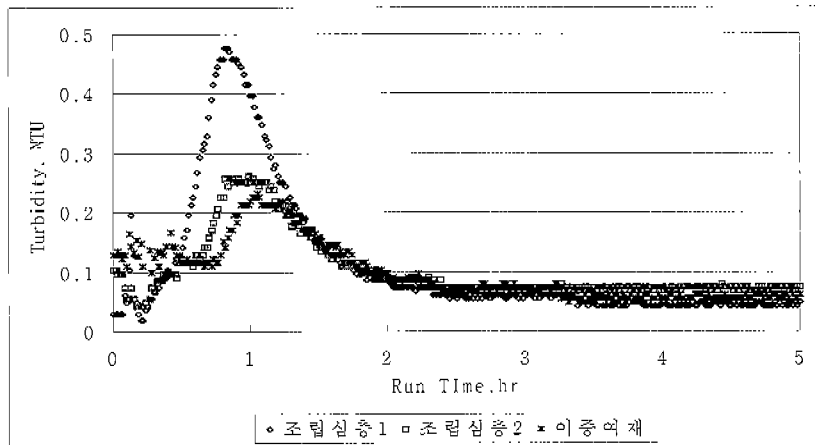


(b) 여과수질 분포특성

그림 10. 여층구성별 탁질제거효율 비교 (여과속도 240 m/day)



(a) 여과속도 180 m/day



(b) 여과속도 240 m/day

그림 11. 여층구성별 초기탁질 누출특성 비교

### 5. 결론

심층여과지에 대한 여층구성별 여과효율 평가를 위해 실제 정수장 침전지 유출수를 이용한 여과모형실험을 실시하였다. 여과시간에 따른 손실수두 발달특성을 보면 여과초기의 수두손실은 이중여재 여과지가 조립심층 모래여과지에 비해 높지만 탁질 억류에 의한 수두손실의 증가는 완만하여 여과속도 180 m/day의 동일한 여과속도를 적용하였을 경우, 조립심층 모래여과지에 비해 단위정수생산량이 30 ~ 40 % 정도 증대되는 것으로 나타났다. 여과수질은 각각 여과속도 180 m/day,

240 m/day로 운전한 결과 여과속도에 관계없이 95 % 누적발생율이 모두 0.1 NTU 이하를 나타내어 만족하는 여과수질을 보였으나, 여과초기 탁질 누출 특성을 보면 상대적으로 조립심층 모래여과지의 누출 경향이 크게 나타났고, 여과속도가 240 m/day로 증대됨에 따라 그 경향은 보다 뚜렷하게 나타났다.

### 참고 문헌

- 일본수도협회 (1982). 수도시설 설계지침
- 한국수도협회 (1989). 한국수도협회규격
- 환경부 (1997). 기존정수장 효율향상기술(2차년도)

- 환경부 (1998). 상수도시설기준
- Amirtharajah, A. (1991). "Optimum Backwash of Dual Media Filters and GAC Filter-Adsorbers with Air Scour." *AWWARF*, Denver, AWWA.
- Barnett, E., et al. (1992). "Comparing Plant-Scale Dual and Mixed-Media Filters." *Jour. AWWA*, 84(6), p.76.
- Brocher of Australian C & S Brand Filter Coal. (1997).
- Degremont. (1979). *Water Treatment Handbook*. 5th edition, Degremont.
- Kawamura, Susumu. (1991). *Integrated Design of Water Treatment Facilities*. John Wiley & Sons, Inc.
- Logsdon, G. A. and Symons, J. M. (1977). "Removal of Asbestiform Fibers by Water Filtration." *Jour. AWWA*, 69(6), p.499.
- Peterson, D. L., Schleppenbach, R. X. and Zandtke, T. M. (1980). "Studies of Asbestos Removal by Direct Filtration of Lake Superior Water." *Jour. AWWA*, 72(3), p.155.
- Qureshi, N. (1981). "Comparative Performance of Dual and Mixed Media Filters." *Jour. AWWA*, 73(9), p.490.
- Sanks, Robert L. (1979). *Water Treatment Plant Design*. Ann Arbor Science
- (논문번호:00-029/접수:2000.05.04/심사완료:2001.07.10)