

## 여재구성에 따른 탁질입자 제거특성 및 효율 비교

안중호 · 윤재홍

한국수자원공사 수자원연구소

(1999년 10월 15일 접수, 2000년 3월 8일 채택)

# Pilot-Scale Evaluation of Granular Filters Using Particle Distribution Analysis

Jong-Ho Ahn · Jae-Heung Yoon

*Water Resources Research Institute, Korea Water Resources Corporation*

### ABSTRACT

The experiment in this study was conducted as a part of an effort to evaluate filter performance with pilot-filters consisting of one mono-media and two dual-media columns. Particle distribution analysis using a particle counter is more sensitive and better than turbidity analysis in observing particle detachments and a breakthrough. In sand media filters having 1.5 m of available head, caution is needed in the head loss of the late stages of filtration, and for dual-media filters, appropriate media configuration and effluent quality monitoring should be used for preventing the final breakthrough. Also the time of particle breakthrough in the dual media filter can be deferred by increasing bed depth, and it is necessary to use a filtration aid prior to filtration to prevent breakthrough of these intermediate sized particles in high filtration rate.

---

Key Words : Particle Distribution Analysis, Detachment, Breakthrough

## 요 약 문

정수장 여과지 모형실험장치를 이용하여 수중입자입도분석에 의한 모래 및 이중여재 여과지에 대한 여과특성 및 효율 평가를 탁도분석과 비교하여 실시하였다. 수중입자입도분석은 여과지의 효율 평가를 위한 훌륭한 평가방법으로 탁도분석에 비해 민감도가 뛰어나 여과유출수의 탁질누출 현상을 뚜렷이 관찰할 수 있었다. 모래여과지의 경우는 여과지속시간 내내 비교적 양호한 수질을 보여, 허용수두하에서는 초기탁질누출보다는 여과말기의 수위상승에 대한 주위가 필요하다. 반면에 이중여재 여과지의 경우는 내부여과에 의한 탁질의 침투가 이루어지므로 최적운영을 위해서는 적절한 여재구성과 각 여과지별로 연속적인 수질모니터링에 의한 탁질누출제어가 요구된다. 또한 보다 안정적이고 효율적인 수질의 확보를 위해서는 여과보조제의 사용도 고려되어야 할 것이다.

주제어 : 수중입자입도분석, 탈착, 탁질누출, 여재

## 1. 서 론

여과는 기존 정수처리공정에 있어서 최종 처리단계로 안정적인 양질의 정수생산을 위한 가장 중요한 공정중의 하나이다. 따라서 여재에 의한 탁질의 여과특성에 대한 이해는 물론 여과수질에 대한 정확한 측정 및 분석은 효율적인 여과공정의 설계 및 운전에서 있어 필수불가결한 요소이다. 그러나 현재 우리나라의 정수장 여과지의 현황을 살펴보면 여과수의 탁도가 선진국 수준에 못 미칠 뿐만 아니라, 운영상에 있어서도 많은 문제점을 가지고 있다. 이에 대한 원인 중에 중요한 요인은 각 여과지별로 수량 및 수질의 관측 및 제어가 곤란하여 각 여과지에 대한 효율평가 및 최적운영이 적절히 이루어지지 않는다는 점이다.

한편, 최근의 큰 수질사고로 알려진 미국 Milwaukee시의 Cryptosporidium 누출사건은 여과공정에서의 탁질입자의 제어에 대한 문제를 보다 심도 있게 접근하는 계기가 되었다.<sup>1,2)</sup> 따라서 탁도에 의한 수질측정은 수중의 탁질들의 최적처리와 제거를 위한 충분한 정보를 제공해 주지 못하며, 특히 여과공정에 의한 탁질제거특성을 정확히 파악하기에는 많은 한계를 갖는 것으로 나타났다.

최근에는 입자입도분석 (Particle Size Distribution Analysis)이 수중의 탁질입자 특성파악에 사용되고 있으며 그 장점이 알려져 있다.<sup>3,4)</sup> 특히 최근

에 소독내성 미생물에 대한 여과지의 제거능력에 대하여 관심이 높아지고 있는 상황에서 입자입도분석은 대체추적수단 (Surrogate)으로서의 기능을 하고 있다. 아직까지는 입자입도분석이 국내 정수장 운영시 필요한 탁도측정의 대체수단으로 사용되고 있지는 않으나, 여과지의 효율평가방법으로 훌륭한 수단이고 향후 사용에 대한 필요성이 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 모형실험장치를 통하여 여과지의 탁질제거 특성 및 여재구성에 따른 제거효율을 입자입도분석을 이용하여 비교하였다.

## 2. 실험조건 및 방법

### 2.1. Pilot Plant의 구성

여과 모형실험장치는 실제 여과지의 여과특성을 반영하기 위하여 실제 침전지 유출수를 사용할 수 있도록 호소수를 원수로 하는 S정수장 여과지 건물 내에 설치하였다. 모형실험장치의 여과방식은 Column별 정량주입에 의한 정속여과방식을 채택하였고, 모두 4 조의 직경 30 cm Column으로 구성되었다. 여과속도는 모래여과지는 150 m/day, 이중여재 여과지는 240~360 m/day로 운전하였다. Fig. 1은 모형실험장치의 모식도를 나타내고 있다.

각 Column구성을 살펴보면 Column 1은 단일여

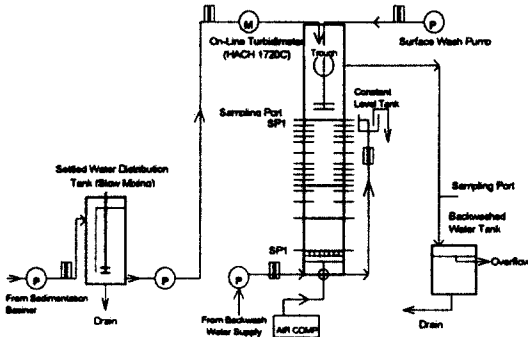


Fig. 1. Schematic diagram of pilot plant.

Table 1. Media configurations and characteristics of pilot filters

	Anthracite			Sand		
	Depths, cm	d <sub>10</sub> , mm	U.C.	Depths, cm	d <sub>10</sub> , mm	U.C.
Column 1	-	-	-	60	0.57	1.45
Column 2	45	0.9	1.46	25	0.52	1.46
Column 3	50	0.89	1.42	30	0.52	1.46
Column 4	50	0.9	1.44	30	0.52	1.46
	Specific Density 1.54 Porosity 0.495			Specific Density 2.70 Porosity 0.43		

d<sub>10</sub> : 10% finer size by weight, effective diameter  
 U.C : uniform coefficient (= d<sub>60</sub>/d<sub>10</sub>)

\* air scouring

제인 모래여과지로 구성되었고, Column 2는 대체 이중여재 여과지로서 기존 모래여과지의 여과능력을 개선하기 위하여 구조물의 변경없이 이중여재, 즉 안트라사이트와 모래로 교체한 경우로 상대적으로 여층깊이가 작고, 이중여재 여과지의 역세척을 위한 트라프 높이가 낮은 경우이다. Column 3과 4는 신설 이중여재 여과지로서 두 Column의 차이점은 Column 3이 보조 세척설비로서 표면세척설비를 사용하는 반면, Column 4는 공기역세척방식을 적용하였다. 역세척속도는 0.75~1.0 m/min이었고, 공기역세척시의 공기주입량은 0.6~0.8 m/min이었다. 각 Column의 여재구성은 Table 1에 나타나 있다. 각 Column마다 깊이에 따른 샘플링과 손실수두를 측정하기 위한 여재깊이별 Port 및 Manometer를 설치하였다.

Table 2. Configuration of HRLD sensors

HRLD Sensor Style	HRLD-150	HRLD-400
Range (μm)	1~150	2~400
Calibration Flow Rate (mL/min)	10~25	10~60
Concentration Limit (Particle per mL)	18,000	10,000

## 2.2. 입자입도분석장치

본 실험의 탁도 측정은 2100N Turbidimeter (Hach, USA)를 사용하였고, 수중입자입도분석 장치는 HIAC/ROYCO (Pacific Scientific, Hiac/Royco Division; Silver Spring, MD)사의 Model 9064 Sizing Counter와 Sampler로서 ABS 2 (Automatic Bottle Sampler)를 사용하였다. ABS 2 Sampler의 사용 유량은 분당 1~200 mL이고, 시료의 부피는 5~100 mL를 사용할 수 있다.

센서는 Hiac/Royco Model HRLD-150과 HRLD-400를 사용하였다. 이 센서는 광원으로서 Laser를 사용하며, 감지장치로서 Photodiode를 이용하는 Light Obscuration 방식으로 되어 있다. 사용된 두 센서에 대한 사양은 Table 2와 같다.

입자입도분석시에는 측정된 자료중에서 각 Size Channel에서 측정된 입자수 중에서 10개 이하가 발생하는 Channel은 분석에서 제외시켰다. 그 이유는 감지한계 (Detection Limit)인 1.0 μm에서는 100 개/mL 이하로 존재하는 경우가 없으며, 10개 이하로 발생하는 경우는 큰 입경의 입자에 대한 측정오차로 인한 경우가 많기 때문이다. Size Channel은 128개로 나누었고, 분석의 효율성 및 편의를 위하여 몇 개의 Size Window로 나누어서 분석하였다. 물론 β값의 산정이나 입자의 크기별 분포함수 (Particle-Size Distribution Function) 및 입자 크기에 따른 제거율을 나타낼 때에는 전체 Channel에 대한 입자수를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 Size Window의 구분은 최근에 관심이 되는 소독내성 미생물인 Giardia cysts나 Cryptosporidium oocysts의 크기와<sup>3)</sup> 다른 연구자들의 연구결과,<sup>5-7)</sup> 미국 EPA의 ICR Sampling Manual<sup>8)</sup>에서 제시된 범위를 참조하였다. 본 실험에서는 Size Window를

1~2, 2~3, 3~5, 5~7, 7~10, 10~15, 15~40, 40~100, 100~150  $\mu\text{m}$ 의 9개 Size Windows로 나누었다.

### 3. 모래여과지의 탁질입자 제거특성

모래여과지의 탁질제거 상황을 보면 Fig. 2 및 Fig. 3과 같다. 전반적인 모래여과지의 탁질제거는 유입수질의 변동에도 불구하고 비교적 안정된 좋은 효율을 보여주고 있다. 모래여과지는 여재 상층부에서 대부분의 탁질이 제거되는 표면여과로서, 여과초기를 살펴보면 표면하 2 cm 이하부터 실질적인 제거효과가 나타나고 있다. 한편, 여재내부의 탁질누출은 여과시간이 5시간 경과후부터 여재깊이 30 cm 이내의 깊이에서 서서히 발생하여, 시간이 지나면서 탁질누출현상이 점차 여재 하부로 내려가고 있다. 즉, 여과이론 상의 유효여과단계 (Effective Filtration Stage)가 10시간 이후부터 시작되고 있음을 알 수 있다. 또한 여재 깊이에 따라 국부적 탁질누출 현상은 그 아래의 여재깊이에서 직접적인 영향이 나타나고 있다. 한편, 여재깊이 30 cm 이상에서는 표층여과의 이른대로 실질적인 탁도제거의 기능을 발휘되지 않고 0.1 NTU 이하의 안정된 수질을 나타내고 있다. 그러나 탁질 입자수를 살펴보면 보다 뚜렷한 탁질 제거 특성을 나타내어 여재깊이 30 cm 이상에서도 여과지속시간이 증가할수록 탁질 제거 효과가 나타나 여재 전층에 걸쳐 탁질입자수의 log제거율이 평균 2에서 2.3 정도를 나타냈다.

여과지속시간이 증가함에도 탁도상승은 보이지 않고 있다. 이러한 이유는 비교적 탁도가 낮은 침전 유입수와 모래여과지의 여과특성에 기인한다고 할 수 있다. 모래여과지의 손실수두의 발달 특성을 보면 여과초기에 급격히 발달하다가 급격히 줄어, 중반 이후부터는 시간이 지남에 따라 점차 빠르게 발달하여 여과말기에는 상당히 빨리 수위가 상승한다. 따라서 허용수위하에서의 모래여과지의 운영에 있어 탁질누출보다는 말기의 수위상승에 대한 주위가 필요하다.

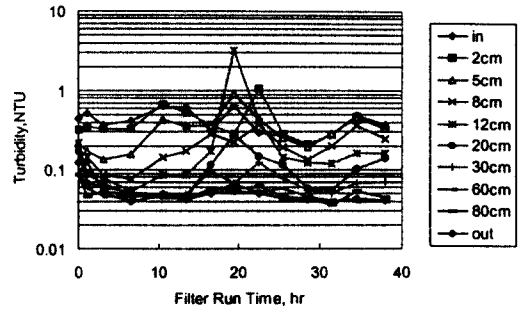


Fig. 2. Turbidity removal with depth in Column 1.

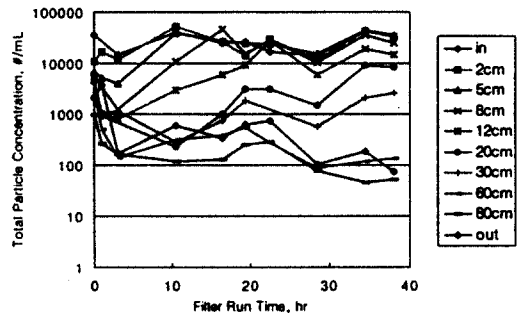


Fig. 3. Total particle counts removal with depth in Column 1.

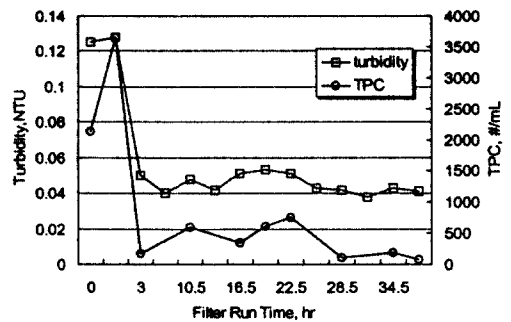


Fig. 4. Relationship between particle counts & turbidity of influent in Column 1.

Fig. 4는 유출수의 탁도와 총입자수를 비교한 결과이다. 탁도에 비해 수중입자입도분석이 보다 수질에 대한 민감도가 높은 것을 알 수 있다. 한편, 여과초기의 탁질누출이 2시간 이내에서 뚜렷히 발생하고 있다.

### 4. 이중여재 여과지의 탁질입자 제거특성

이중여재의 탁질입자제거에 대한 실험결과는 Fig. 5에서 Fig. 8에 걸쳐 나타내었다. 모래여과지와는 달리 여과말기에 탁질누출 경향이 나타나고 있으며, 여과말기의 탁질누출에 대한 주의가 필요하다.

먼저 대체이중여재 여과지인 Column 2의 경우를 살펴보면, Columns 3 및 4와는 다른 특성을 보이고 있다. Fig. 5를 보면 10시간이 경과하여 여재전층에 걸쳐 탁질의 누출현상이 두드러지게 나타나고 있고, 40시간 이후부터는 수로형성단계 (Worm Hole Stage)에 도달하고 있다. 한편, 18시간 경과 후에는 극부적인 탁질의 탈착에 의한 누출현상이 여재전체깊이에 영향을 나타나고 있다. 이러한 특성은 수중입자입도분석에 의한 총입자수의 변화를 살펴보면 보다 명확히 알 수 있다. 여과유출수의 총입자수가 모래층을 지나면서 여과지속시간 10시간까지

는 mL당 1,000개 미만이었으나, 18시간 이후 탁질 누출에 의해 mL당 10,000개 수준으로 증가하고 있다. 이때의 유출수 탁도값의 변화는 0.05 NTU에서 0.15 NTU 사이였다. 이와 같이 현상은 Columns 3 및 4와 같은 일반적인 이중여재에서 탁질누출이 30 시간 이상 경과 후 발생하는데 비해 상당히 빨리 발생하는 것이다. 이와 같은 현상은 대체이중여재 여과지의 여재의 구성에 있어 여재깊이가 충분치 못한 이유와 낮은 트라프의 구조로 인한 역세척 효율의 저하에 의한 것으로 판단된다.

신설이중여재 여과지의 경우를 살펴보면 탁도의 변화가 Fig. 7에서와 같이 여재깊이에 따라 부착과 탈착이 연속적이고 반복적으로 일어나고 있음을 알 수 있다. 이와같은 탁질입자 제거특성은 Fig. 8에서 보다 자세히 보여주고 있다. 탁질누출이 발생하는 시점은 30시간 경과 후부터 나타났다.

한편, 이중여재 여과지에 있어 특이한 점은 자갈층에서의 탁질 제거능력이다. 모래여과지의 경우 표면에서 대부분의 탁질을 제거하기 때문에 상대적으로

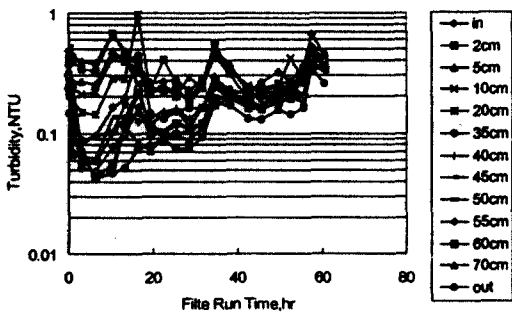


Fig. 5. Turbidity removal with depth in Column 2.

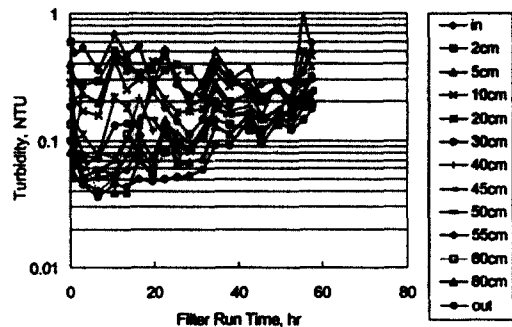


Fig. 7. Turbidity removal with depth in Column 3.

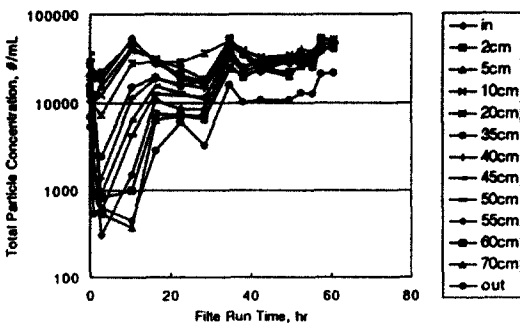


Fig. 6. Total particle counts removal with depth in Column 2.

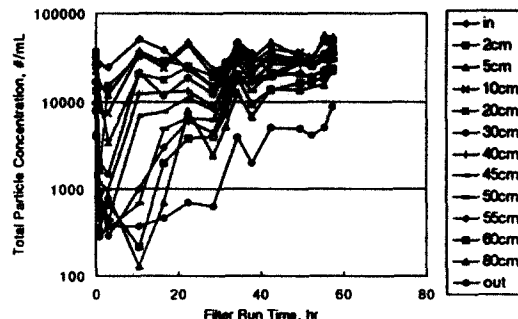


Fig. 8. Total particle counts removal with depth in Column 3.

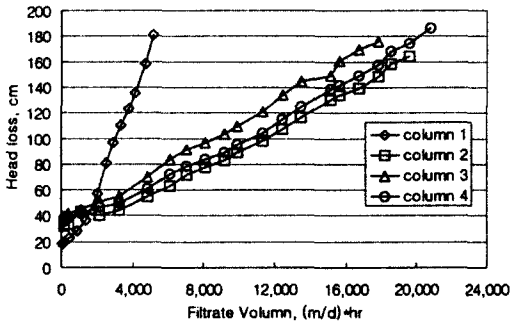


Fig. 9. Head loss in pilot filters with time.

로 탁질의 침투가 여재아래까지 미치는 영향이 적으나, 이중여재 여과지의 경우 탁질이 여층 깊숙히 침투하기 때문에 자갈층에서의 부착과 탈착의 연속적인 기작에 의해 탁질이 제거되고 있다. Fig. 6과 Fig. 8을 비교해 보면 대체이중여재 여과지에 비해 신설이중여재 여과지의 경우 그 경향이 뚜렷하며, 여과중기 이후로는 자갈층에 의해 탁질누출 저감효과가 크게 작용하고 있다. 그 이유로는 자갈층에서 부담되는 탁질의 부하량의 정도에 의한 것으로 판단된다. 여과중기이후의 모래층을 통과한 탁질입자수를 살펴보면 Column 3의 경우 10,000 개/mL 이하인 반면, Column 2의 경우는 10,000 개/mL 이상의 값을 보이고 있다.

### 5. 여재구성에 따른 여과특성 비교

Fig. 9는 4개의 여과 Column의 여과량에 따른 손실수두 발달특성을 나타낸 것이다. 모래여과지인 1번 Column의 여과지속시간은 이중여재 여과지인 나머지 Column에 비하여 25~30%에 지나지 않는다는 것을 알 수 있다. Columns 2, 3 및 4는 거의 비슷한 여과량과 손실수두 발달을 보여주어 양적으로는 비슷한 결과를 나타내었다. 그러나 여과수질을 살펴보면 여재의 구성에 따라 상이한 여과효율을 보여준다.

Fig. 10와 Fig. 11은 각 여재구성별 여과지속시간에 따른 탁도와 총수중입자수의 변화를 나타내고 있다. 여과유입수 수질의 변동이 비교적 커서 유입수의 탁도가 0.2 NTU에서 0.6 NTU에 걸쳐 시간에 따라 변하고 있다. 이러한 수질변동의 원인은 정

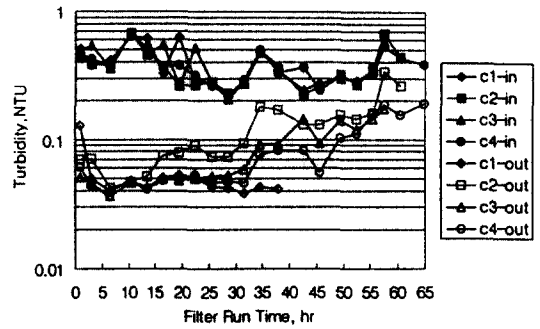


Fig. 10. Turbidity removal in pilot filters with time.

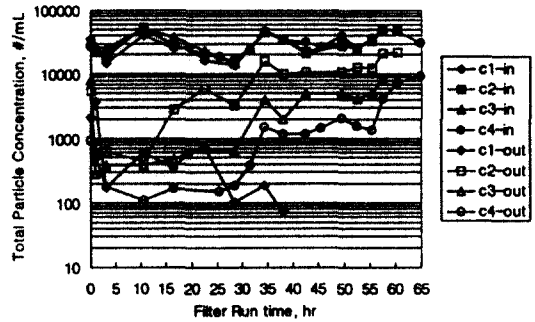


Fig. 11. Total particle counts removal in pilot filters with time.

수장 유입원수 자체의 수질특성의 변화에 기인하기 보다는 현장의 시간별 원수유입량의 변동에 기인한 것으로, 여과전처리 공정인 침전공정의 월류부하량 변화로 침전지 처리효율이 변동하기 때문이었다. 이러한 여과유입수의 수질 변동이 여과지의 수질변화에 미치는 영향을 살펴보면 탁질누출이 발생하기 이전의 경우는 그 영향이 미약하나, 탁질누출이 진행되는 경우에는 뚜렷한 영향을 주고 있다.

여과지의 여재구성에 따른 효율을 비교해보면 모래여과지인 Column 1의 경우는 상대적으로 짧은 여과지속시간을 가지고 있지만 낮은 탁도의 여과수질을 생산하고 있다. 또한, 이중여재 여과지와는 달리 여과말기의 탁질누출 현상이 나타나지 않고 있어, 현재 설계된 Column 1의 가용수심 1.5 m내에서 운전된다면 여과말기의 탁질누출에 대한 우려는 적다고 판단된다.

신설 이중여재 여과지의 경우 공기비용역세척이 여과능력 향상에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. Fig. 10에서 보면 탁도변화에 있어 Column 3

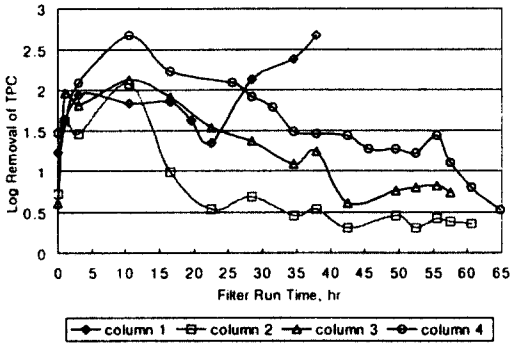


Fig. 12. Total particle counts log removal of pilot filters with time.

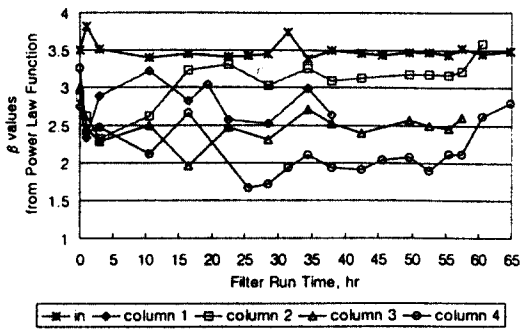


Fig. 13.  $\beta$  values of pilot filters with time.

과 Column 4의 차이가 크게 나타나고 있지 않지만, Fig. 11의 총수중입자수의 변화를 비교하여 보면 뚜렷한 차이를 나타내고 있고, Fig. 12와 같이 총입자수의 Log계거율을 살펴봐도 Column 4의 제거효과가 뛰어난 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 반드시 탁도와 총수중입자수와의 단순한 상관관계가 성립되지 않음을 보여줄 뿐 아니라 탁도측정에 의한 여과지의 효율 평가가 정확한 여과층의 탁질제거 양상을 보여줄 수 없음을 시사한다.

한편, 수중입자의 입도분포특성을 살펴보기위해 일반적으로 사용되는 Power Law 분포함수를 이용하면 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{dN}{dd} = A d^{-\beta} \quad (1)$$

여기서, N = 탁질입자의 농도 (#/mL), d = 탁질입자의 평균입경 ( $\mu\text{m}$ ), A,  $\beta$  = 상수 (power law 함수)로 상수 A는 측정된 시료의 총입자수와 직접적인 관계가 있는 값이고, 상수  $\beta$ 는 측정된 입자의 분포관계를 나타내는 값이다. 즉, A의 증가는 그만큼 시료의 입자농도가 높음을 의미하고,  $\beta$ 가 증가하게 되면 상대적으로 작은 크기의 입자들의 양이 증가했음을, 감소되면 상대적으로 큰 입자들의 양이 증가했음을 의미한다. 따라서 수중입자입도분석을 통한 공정별 처리효율에 대한 평가를 위한 파라미터로 A와  $\beta$  값을 유용하게 사용될 수 있다.

문헌<sup>1)</sup>에 의하면 호소나 하천수의  $\beta$  값은 일반적으로 1.8에서 4.5의 범위에 분포하고 있는 것으로 알려져 있고, 또한 Lawler 등<sup>4)</sup>은  $\beta$  값이 3인 경우가 동등한 탁질 량의  $\beta$  값이 4인 경우보다 응집공정

중에 큰 입자의 형성이 잘 되고, 침전효율도 뛰어나서, 긴 여과지속시간을 가진다고 하였다. 본 실험의 여과유입수의  $\beta$  값은 3.5, 여과수의  $\beta$  값은 2에서 3 사이를 보이고 있다.

Fig. 13에서 Column 3과 Column 4의  $\beta$  값을 비교해 보면, Column 3이 2.5 부근의 값을 나타내는데 반해, Column 4는 여과초기에는 2.5이었으나 여과중기에는 2 부근으로 떨어졌다가 여과말기에는 2.5이상까지 상승하는 것을 알 수 있다. 이는 Column 4가 Column 3에 비해 전체 수중입자의 입도분포영역 내에서 작은입자가 차지하는 분포영역이 적음을 의미한다. 즉, 입자 측정범위가  $1 \mu\text{m}$ 에서  $150 \mu\text{m}$ 으로 그 중  $1 \sim 2 \mu\text{m}$  크기의 영역이 총입자수의 80% 이상이고 제거가 가장 힘든 부분이기 때문에 여과유출수의 작은  $\beta$  값의 의미는 여과공정의 제거효율이 뛰어난 것을 의미한다.

대체이중여재 여과지인 Column 2의 경우는 상대적으로 작은 여재깊이에 의해 탁질 침투에 대한 적절한 내부여과 기능이 수행되지 못하여 여과초기부터 탁질누출이 발생하기 시작하고 있다. 유출수의  $\beta$  값도 3 이상의 값을 나타내어 다른 Column에 비해 제거효율이 떨어진 것을 알 수 있다.

이상과 같이 여재구성에 따른 탁질제거특성은 다소 다른 양상을 보이고 있다. 모래여과지의 경우는 탁질누출의 대한 우려보다는 여과말기 급격한 손실수두발달에 주의를 가져야 하지만, 반면에 이중여재의 경우는 내부여과가 이루어지므로 부적절한 여재구성이나 운영은 초기의 탁질누출을 초래할 수 있다. 또한, 향후에 엄격해지는 수질기준에 맞춰 수질 목표를 0.1 NTU이하로 유지하기 위해서는 본 실험의 경우를 보면 총입자수를 2000 개/mL 이하로 유

지해야 하며, 여과보조제의 사용을 통해 탁질의 여재부착력을 증대시켜, 높은 수류전단력에도 저항할 수 있도록 하여야 안정적인 수질 확보와 여과능력 증대가 이루어질 수 있다.

## 6. 결 론

정수장 여과지 모형실험장치를 이용하여 수중입자입도분석에 의한 모래 및 이중여재 여과지에 대한 여과특성 및 효율 평가를 탁도분석과 비교하여 실시하였다.

수중입자입도분석은 여과지의 효율 평가를 위한 훌륭한 평가방법으로 탁도분석에 비해 민감도가 뛰어나 여과유출수의 탁질누출 현상을 뚜렷히 관찰할 수 있었다. 한편, 모래여과지의 경우는 여과지속시간 내내 비교적 양호한 수질을 보였다. 따라서 1.5 m 정도의 허용수두하에서는 초기탁질누출보다는 여과말기의 수위상승에 대한 주의가 필요하다. 반면에 이중여재 여과지의 경우는 내부여과에 의한 탁질의 침투가 이루어지므로 최적운동을 위해서는 적절한 여재구성과 각 여과지별로 연속적인 수질모니터링에 의한 탁질누출제어가 요구된다. 또한 보다 안정적이고 효율적인 수질의 확보를 위해서는 여과보조제의 사용도 고려되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. Guidance Manual for Compliance with the Filtration and Disinfection Requirements

- for Public Water Systems Using Surface Water Sources, USEPA, Washington, D. C., October(1989).
2. Letterman, Raymond D, "Filtration Strategies to Meet the Surface Water Treatment Rule," AWWARF, Denver, AWWA(1991).
3. Hargesheimer, E. E., Lewis C. M., and Yentsch C. M., "Evaluation of Particle Counting as a Measure of Treatment Plant Performance," AWWARF, Denver, AWWA (1992).
4. Lawler, D. F., Izurieta, E., and Kao, C.-P., "Changes in Particle Size Distributions in Batch Flocculation," *Jour. AWWA*, **75**, 604~612(1983).
5. Clark, S. C., Lawler, D. F., and Cushing, R. S., "Contact Filtration : Particle Size and Ripening," *Jour. AWWA*, **84**, 61~71 (1992).
6. Morgan, Daniel C., Morgan M. C., Cushing R. S., and Lawler, D. F., "Particle Behavior in Deep-Bed Filtration: Part 1-Ripening and Breakthrough," *Jour. AWWA*, **85**, 69~81(1993).
7. Morgan, Melissa C., Morgan D. C., Cushing R. S., and Lawler, D. F., "Particle Behavior in Deep-Bed Filtration: Part 2-Particle Detachment," *Jour. AWWA*, **85**, 82~93 (1993).
8. USEPA, ICR Sampling Manual, EPA 814-B-96-001, April(1996).