

일유량 변동에 따른 여과수질 악화에 대처하기 위한 최적 여재구성에 관한 연구

The Optimal Composing the Filter-Bed for Coping with Daily Flow-Rate Fluctuation for the Performance of Sand Filtration Process

박동학¹ · 박노석^{1,*} · 김성수¹ · 배철호¹ · 정남정¹ · 최승일²

Dong-Hak Park¹ · No-Suk Park^{1,*} · Seong-Su Kim¹ · Cheol-Ho Bae¹ · Nahm-Chung Jung¹ · Seung-Il Cjoi²

1 한국수자원공사

2 고려대학교 환경공학과

(2007년 6월 21일 논문 접수; 2007년 8월 13일 최종 수정논문 채택)

Abstract

The fluctuation of inlet flow to a water treatment plant makes a serious problem that it can change the filtration rate abruptly, and ultimately occur the breakthrough of the detained particles inside filter media. Also, since it takes very short time (about 10 minutes) for the surface wave occurred from the fluctuation of inlet flow to reach the filtration process, it is impossible to control the filtration rate stably. Therefore, this study was conducted to evaluate the effect of daily flow-rate fluctuation on the performance of sand filtration process, and to suggest the dual media composition for coping with that effect. Comparative column tests have been carried out for various dual media (sand and anthracite) compositions. From the results of column tests, dual media, especially in the case of sand 45cm/anthracite 30cm, is more effective to cope with the effect of flow-rate fluctuation on the performance of filtration than single media (only sand). In addition, irrespective of dual media composition, managing ability to cope with that fluctuation tends to be weak at the end of allowable filtration duration time,

Key words: fluctuation of inlet flow, performance of filtration, dual media, surface wave

주제어: 유량변동, 여과성능, 이중여재, 표면파

1. 서 론

정수장내로 유입되는 원수 유량의 변동은 단위공정의 조합으로 구성된 전체 시스템의 최적화에 영향

을 미치는 중요한 인자이다(AWWA, 1999; AWWA, 1997). 일반적으로 혼화, 응집, 침전, 여과 및 소독으로 구성된 기존 시스템의 경우 하루 중 착수정에서부터 발생하는 유량변동은 혼화공정에서 약품주입률의 변화 혼화강도의 변화가 수반되어야만 공정내 최적화

*Corresponding author Tel: +82-42-870-7525, FAX: +82-42-870-7549, E-mail: nspark@kwater.or.kr (Park, N.S.)

를 이룰 수 있다. 이와 같은 유량변동은 응집공정에서 G값의 변화, 침전공정에서 수위변화 및 침전지내 수리거동의 변화로 이어지며, 여과공정에서 여과속도의 변화로 연계되어 탁질 누출 가능성을 야기할 가능성이 있다. 일반적으로 이제까지 정수처리에 관련된 단위 공정 및 시스템의 최적화는 정적(steady state) 상태에서 도모하고자 하였다. 그러나 국내 어느 정수장이든 착수정에 도달하는 유량이 천편일률적으로 일정한 곳은 한군데도 없다.

정수장 내 첫 번째 유입원수가 도달하는 곳은 착수정이다. 착수정은 통상 수위표를 이용하여 일일간의 수위와 유량을 기록하는 곳이기도 하다. 정수장내로 유입되는 원수의 변화가 일어나는 원인은 다음과 같다. 첫째, 정수지의 용량부족으로 인해 수용가의 사용량 추이에 따라 취수량이 변할 수 있다. 둘째, 대규모 정수장에서 자주 발생하는 일인데, 배출수지로부터의 착수정으로 회수되는 수량의 변화가 착수정 수위와 관련되어 진다. 셋째, 정수장 최말단인 정수지와 배수의 시작이 되는 배수지의 연계운영이 미비하기 때문이다. 마지막으로 무리한 심야전력(심야전력의 경우 낮 시간 사용전력의 원가에 1/3에 달함)의 사용이 그 원인이 될 수 있다. 대부분의 정수장에서 착수정의 수위변화는 취수량 변동분과 배출수지로부터의 회수량 변동분의 합으로 나타낼 수 있다.

다음 Fig. 1은 국내 C_정수장의 일 유량변동 경향과 같은 시간대에 운영중인 1지의 여과지 여과속도와 유출수 탁도의 경향을 나타낸 것이다. C_정수장은 생활용수와 공업용수를 같이 생산해 내는 정수장이다.

상기 Fig. 1(a)와 Fig. 1(b)에서 각 그래프의 x축의 시간 스케일은 동일하다. 그림에서 나타나있듯이, (a) 착수정 유입유량의 변동이 있는 직 후 약 10~15분 후 (b) 여과속도와 여과수의 탁도가 변함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 착수정과 여과공정사이에 있는

혼화공정, 분배수로, 응집지 및 침전지의 체류시간의 합 이후 유량변동의 영향이 여과지에 나타날 것이라는 가정은 설명할 수가 없다. 이에 반해 착수정내 도달하는 유량변동이 발생시키는 수위 변화가 표면파로 전파되어 각 개수로 형태의 반응조로 전파됨을 가정할 때에는 계산상 약 8분 30초의 시간 이후 착수정의 유량 변동이 여과지에 영향을 미침을 알 수 있다 (Table 1 참조)

Table 1의 표면파 전파속도(V_s)를 계산하는 데에는 다음 식 (1)을 사용하였다.

$$V_s = \sqrt{g \cdot R} \quad \text{식(1)}$$

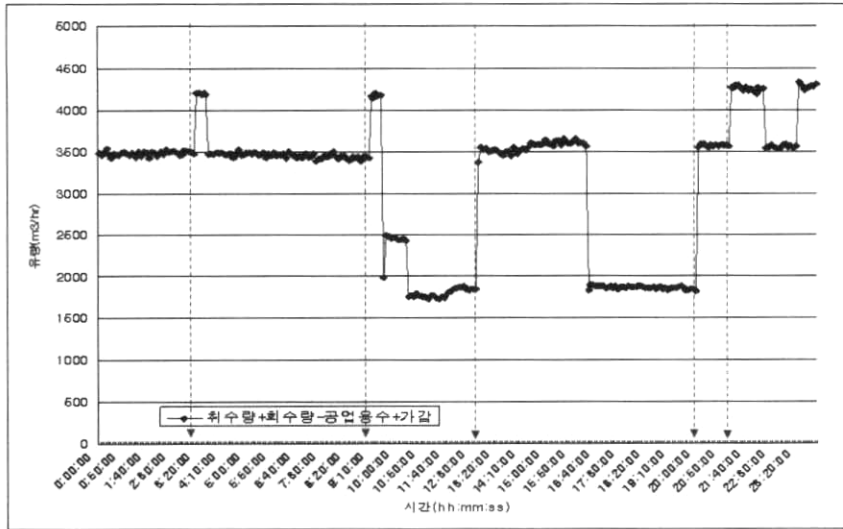
여기서, V_s 는 표면파 전파속도, g 는 중력가속도 그리고 R 은 동수반경이다.

Table 1에서 도출한 공정별 표면파 전파시간의 합(8.5분)이 실제 현장에서 나타난 lag time(10~15분)보다 작게 나타나는 것은 각 공정의 연결 수로(분배수로, 개수로 및 관수로)에서의 파의 전파속도를 제외하였기 때문이다.

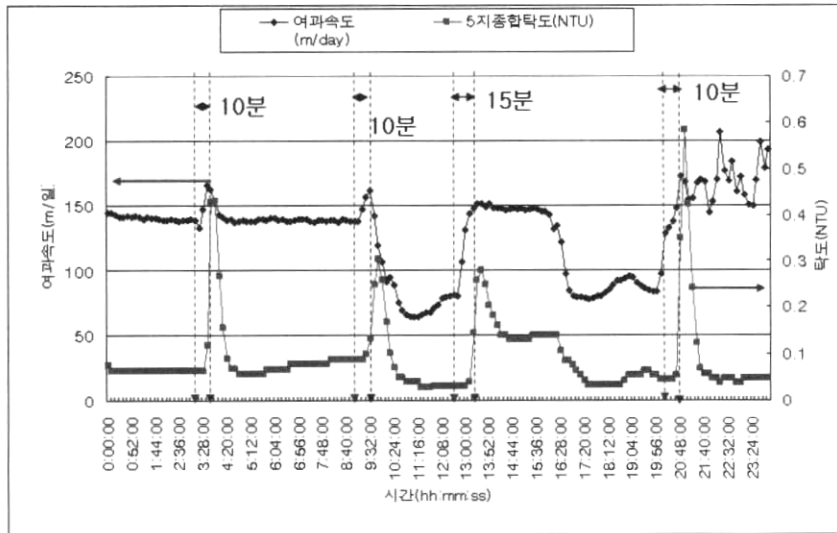
이와 같이 하루 중 정수장내 유입되는 유입 유량의 변동은 아주 짧은 시간에 여과공정의 여과유속을 변화시켜 탁질을 누출시킬 수 있다. 이러한 10~15분의 간격을 두고 나타나는 여과속도의 변화는 추가적인 여과지의 운전 등으로 여과속도의 감소를 도모하기에는 너무 현실적으로 짧아 별다른 방안이 없다. 이에 본 연구에서는 여과공정을 실험실 규모의 여과 column으로 모사하여 급격한 유량 변동이 발생하는 경우 다양한 여재층 구성별로 그 대처능을 조사하고 유량변동의 효과가 가장 적은 여재층 구성을 실험적으로 평가하였다.

Table 1. C_정수장 공정별 표면파 전파속도

공정	A(수류면적) (m ²)	P(윤변) (m)	R(동수반경) (m)	V_s (표면파 전파속도) (m/sec)	공정별 전파시간 (sec)
착수정(B10.0m × L10.2m × H4.0m)	40	18	2.22	4.66	47
혼화지(B5.0m × L5.0m × H4.0m)	20	9	2.22	4.66	24
응집지(B14.6m × L13.9m × H4.6m)	58.4	22.6	2.58	5.03	69
침전지(B15.5m × L67.0m × H4.6m)	71.3	24.7	2.89	5.32	357



(a) 착수정내 유량 변동 경향(2006년 8월 25일 00:00:00-24:00:00)



(b) 여과속도와 운전 중인 5지의 여과수 탁도 경향(2006년 8월 25일 00:00:00-24:00:00)

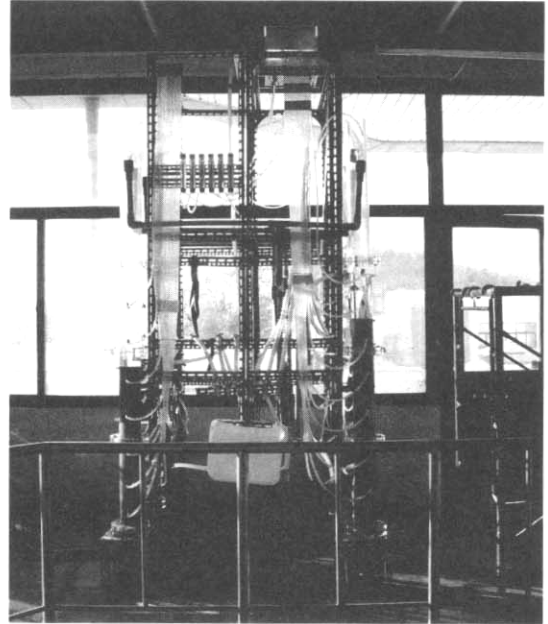
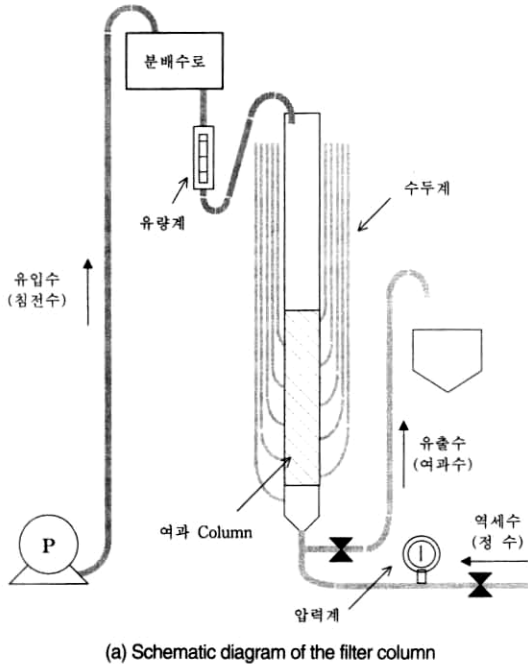
Fig. 1. 유량 변동에 따른 여과수 탁도변화 경향.

2. 실험방법

본 연구를 위해서 여과지 모형 column을 제작하였다(Fig. 2 참조). Column은 아크릴 재질의 내경 10cm, 길이 2.5cm의 원형 구조물로, 여과구성을 달리 하여 동시에 실험할 수 있도록 6sets를 동일하게 제작

하였다(Cleasby et al., 1992; Tuepker과 Buescher, 1968; Robeck et al., 1964; Naeem, 1981; Conley, 1961).

Column 하부는 역세척시 역세척의 균등분배가 이루어지도록 나팔관 위에 다공판이 놓여있는 형태로 하였으며, 5~10mm 입径의 여과사리 층을 15cm 두께로 포설한 후 그 위에 Table 2와 같은 조건으로 여



(a) Schematic diagram of the filter column

(b) A photograph of the filter column

Fig. 2. 본 연구에 이용된 여과 column.

Table 2. 각 여과 column 여재층 포설 조건

구성(cm)	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
Anthracite	50	40	30	20	10	-
Sand	25	35	45	55	65	75
Total depth	75	75	75	75	75	75

*Anthracite의 유효경은 0.97mm, 균등계수는 1.36

Sand의 유효경은 0.55mm, 균등계수는 1.58

재층을 포설하였다.

Column 양 측면에는 여과의 진행에 따라 발달하는 손실수두 측정을 위해 10cm 간격으로 압력계를 설치하였다. 여과 column의 유입수는 실제 정수장(W_정수장)의 침전수(Table 3 참조)를 사용하였으며, 본 실험 기간 동안의 원수 수질 조건, 약품 투입조건 및 침전수 수질조건은 Table 3에 정리하였다.

여과수 수질 평가는 기본적으로 여과수의 입자 개수와 탁도를 동시에 측정하였으며 각각 Particle counter(US Filter WQA 2000)와 온라인 탁도계(Hach 1720 Series)를 사용하였다.

여과 column에 유입되는 유량의 급격한 변동에 대한 대처능을 여재층 구성별로 평가하기 위해 여과속

Table 3. 수질조건 및 약품 투입조건

구 분	항목	내 용
원수 수질 조건	- 탁도(평상시)	3~10NTU
	- 탁도(고탁도시)	20~800NTU
	- 수온(°C)	6~25°C
	- pH	6.8~8.5
	- Alkalinity(as CaCO ₃)	평균 45(mg/L)
침전수 수질 조건	- 탁도(평상시)	0.5~1.0NTU
	- 탁도(고탁도)	1.0~3.0NTU
응집제 투입조건	- PACs	8~14mg/L
	- PAC(평상시)	17~20mg/L
	- PAC(고탁도시)	25~50mg/L

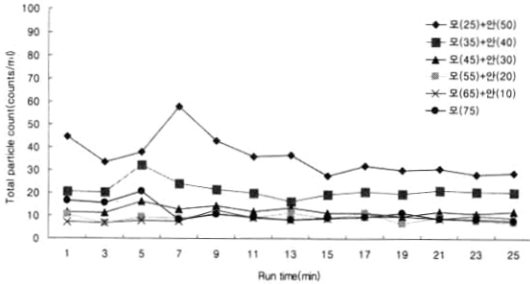


Fig. 3. 24시간 후 여과속도변경(120m/일에서 180m/일)에 따른 여과수 내 총 입자개수.

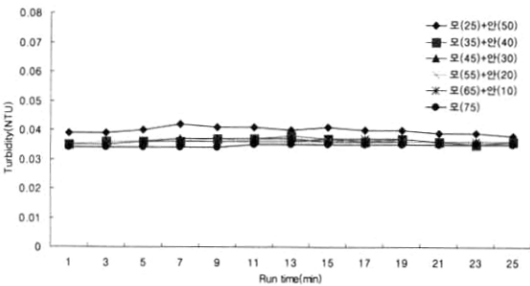


Fig. 4. 24시간 후 여과속도변경(120m/일에서 180m/일)에 따른 여과수 탁도.

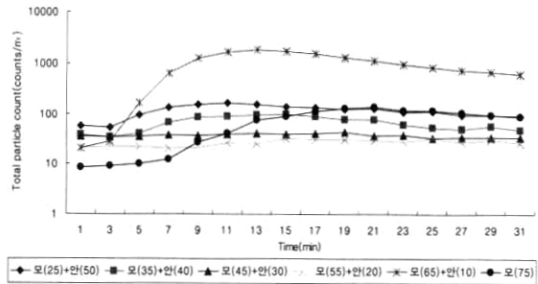


Fig. 5. 48시간 후 여과속도변경(120m/일에서 180m/일)에 따른 여과수 내 총 입자개수.

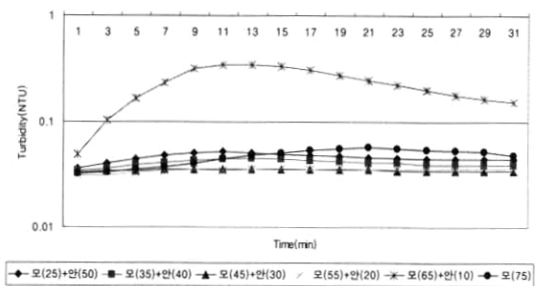


Fig. 6. 48시간 후 여과속도변경(120m/일에서 180m/일)에 따른 여과수 탁도.

도를 120m/일로부터 180m/일로 증가시켰다. 여과속도를 증가시키는 시기는 120m/일로 24시간 동안 여과 후, 48시간 동안 여과 후 및 65시간 동안 여과 후 180m/일 증가시키는 세 가지 경우로 구분하여 실험하였다.

3. 결과 및 고찰

이중 여재 구성별 유량변동에 대한 대처능을 알아보기 위하여 여과지속 시간 24시간, 48시간 그리고 65시간이 경과한 후 여과속도 120m/일에서 180m/일로 증가시켜 크기별 입자수와 탁도가 어떻게 변화되는지를 측정하였다.

3.1. 24시간 후

여과 개시 후 24시간이 경과되었을 때 여과속도를 120m/일에서 180m/일로 증가시켜 크기별 입자수와 탁도를 측정된 결과가 다음 Fig. 3과 Fig. 4에 나타났다. 전체적으로 수질의 큰 변화는 관찰되지 않았다. No. 1 column(Sand 25cm + Anthracite 50cm)의 총 입자수가 60개/mL까지 증가했다가 2분 후 50개/mL

이하로 감소하였으며 나머지 칼럼은 거의 변동 없이 안정된 수질을 보였다.

3.2. 48시간 후

48시간 후 유입 유량을 변동한 경우 No. 5(Sand 65cm + Anthracite 10cm)의 총 입자수가 1,800개/mL를 초과하였다. 또한 유량변동 실험 후 1시간이 경과하였을 때 측정된 총 입자의 개수가 약 400개/mL로 측정되어졌는데, 이는 수질이 안정된 상태에서 30개/mL 이하인 것을 감안하면 사실상 가장 먼저 파괘현상이 나타난 것으로 판단할 수 있다.

또한, 나머지 column도 48시간 후 유량변동 실험에서 입자수가 크게 변화되는 것이 관측되어졌다. No. 1 column(sand 25cm + anthracite 50cm)은 총 입자수가 170개/mL, No. 6 column(sand 70cm)은 140개/mL, No. 2(sand 35cm + anthracite 40cm)은 100개/mL까지 증가하였다가 감소하였다. 이에 반해 No. 3(sand 45cm + anthracite 30cm)과 No. 4(sand 55cm + anthracite 20cm)은 매우 안정된 수질을 보였다.

48시간 후 유량 변동실험에서 No. 5 column의 경우 10cm의 anthracite층에 과다한 탁질의 부착으로 유량

변동 충격시 가장 먼저 탁질이 누출되었으며, 모래 단일여과지인 No. 6 column의 경우는 표면여과로 모래표면에 형성된 cake층이 유량변동의 일부를 흡수하여 상대적으로 탁질이 작게 누출된 것으로 판단된다. 또한, No. 1과 No. 2 column의 경우는 유량변동에 의해 anthracite층에 부착되어 있던 탁질이 누출될 때, 하부 모래층이 얇아 누출되는 탁질을 억제하는데 한계가 있었음을 알 수 있었다. 이는 No. 1 column보다 모래층이 10cm 깊은 No. 2 column의 탁질 누출이 적었고, No. 3과 No. 4의 경우는 안정된 수질을 보여주었기 때문이다. Fig. 5와 Fig. 6은 각각 48시간 후 유입 유량변동에 따른 여과수내 총입자수와 탁도의 경향을 그래프로 나타낸 것이다.

3.3. 65시간 후

65시간 후 유입 유량변동 실험에서는 No. 6(sand 75cm) column이 허용손실수두(1m)를 초과하여 측정에서 제외하였다. 본 유량변동 실험에서는 모든 column의 입자수와 탁도가 급격히 증가하였다. Fig. 7은 총 입자수, Fig. 8은 탁도의 변화를 나타내고 있는데 두 그래프 모두 비슷한 경향을 보였다.

총 입자수와 탁도의 증가는 No. 5(sand 65 cm + anthracite 10cm), No. 4(sand 55cm + anthracite 20cm), No. 2(sand 35cm + anthracite 40cm)순으로 증가하는 추세를 보였으며, No. 1(sand 25cm + anthracite 50cm)과 No. 3(sand 45cm + anthracite 30cm) column이 비슷한 경향을 보였다. 그러나 증가된 입자수나 탁도가 40여 분 후 안정되는 순서는 No. 2, No. 3, No. 4, No. 1 그리고 No. 5 column순으로 관측되어 졌다. 총 입자수와 탁도 모두 안정된 수질상태에서 측정되었던 값(입자수 50개/mL, 탁도 0.05NTU)과 비교할 때 매우 높았다. 1시간 경과 후 측정된 총 입자수가 500개/m로 나타남에 사실상 모든 column에서 파과가 일어났으며, 여과지 허용 운영시간을 초과한 것으로 판단된다.

유량 변동에 대한 대처능을 평가한 결과, 단일여재(sand)에 비해 이중여재(sand + anthracite)가 유량 변동에 대한 대처능이 훨씬 좋은 것으로 나타났다. 특히 층구성이 No. 3(sand 45cm + anthracite 30cm) 및 No. 4(sand 55cm + anthracite 20cm)과 같이 유량 변동의 충격을 대처할 충분한 모래의 깊이가 확보되어야

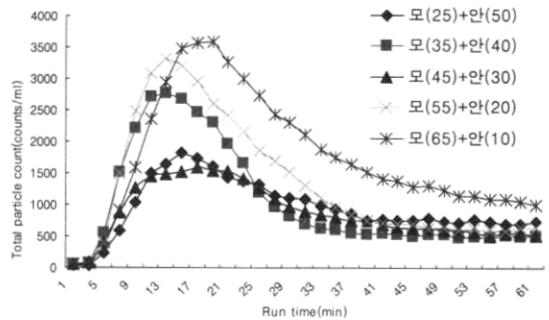


Fig. 7. 65시간 후 여과속도변경(120m/일에서 180m/일)에 따른 여과수 내 총 입자개수.

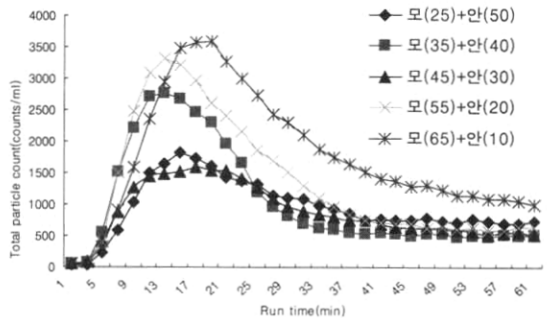


Fig. 8. 65시간 후 여과속도변경(120m/일에서 180m/일)에 따른 여과수 탁도.

한다는 결론을 내릴 수 있다. 그러나 anthracite의 깊이가 상대적으로 부족할 경우(No. 5(sand 65cm + anthracite 10cm) 역류된 탁질이 모래층을 과도하게 오염시켜 유량 변동의 충격에 취약한 면을 보였다. 여과지속시간(24시간, 48시간 및 65시간 이후)에 따른 유량변동 대처능 평가 실험 결과로부터는 여재층의 구성에 상관없이 여과 허용시간 말기에 대처능이 매우 취약하므로 운영시 역세척 시기의 결정이 매우 중요하다고 할 수 있겠다.

4. 결 론

본 연구에서는 하루 중 정수장내 유입되는 유입 유량의 변동은 아주 짧은 시간에 여과공정의 여과유속을 변화시켜 탁질을 누출시킬 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 유량 변동에 의한 여과속도의 변화가 약 10분정도의 단시간에 나타나므로 추가적인 여과지의 운전 등으로 여과속도의 감소를 도모하기에는 무리가 있다. 이에 본 연구에서는 여과공정을 실험실 규모의

여과 column으로 모사하여 급격한 유량 변동이 발생하는 경우 다양한 여재층 구성별로 그 대처능을 조사하고 유량변동의 효과가 가장 적은 여재층 구성을 실험적으로 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 정수장내 유입되는 유량의 변동은 착수정, 혼화지, 응집지 및 침전지를 거쳐 여과지에 도달하는 데에는 표면파의 전파 양상으로 전달된다. 이에 급격한 유입 유량의 변동은 아주 짧은 시간에 여과공정의 여과유속을 변화시켜 탁질을 누출시킬 수 있는 것으로 나타났다. 운영 여과지의 증가로 유량변동에 의한 여과속도의 증가를 감소시키기에는 무리가 있다.

2) 유량 변동에 대한 대처능을 평가한 결과, 단일 여재(sand)에 비해 이중여재(sand + anthracite)가 유량 변동에 대한 대처능이 훨씬 좋은 것으로 나타났다. 특히 층구성이 No. 3(sand 45cm + anthracite 30cm) 및 No. 4(sand 55cm + anthracite 20cm)과 같이 유량 변동의 충격을 대처할 충분한 모래의 깊이가 확보되어야 한다는 결론을 내릴 수 있다.

3) 여과지속시간(24시간, 48시간 및 65시간 이후)에 따른 유량변동 대처능 평가 실험 결과로부터는 여재층의 구성에 상관없이 여과 허용시간 말기에 대처

능이 매우 취약하므로 운영시 역세척 시기의 결정이 매우 중요한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. American Water Works Association (1999) *Water Quality and Treatment*, 5th ed., New York, McGraw-Hill.
2. American Water Works Association (1997) *Water Treatment Plant Design*, 3th ed., New York, McGraw-Hill.
3. Cleasby, J.L., Sindt, G.L., Watson, D.A. and Bauman, E.R. (1992) *Design and Operation Guidelines for Optimization of High-Rate Filtration Process: Plant Demonstration Studies*. Denver, Colorado: AWWA Research Foundation.
4. Robeck, G.G., Dostal, K.A. and Woodward, R.L. (1964) Studies of modification in water filtration, *Journal of AWWA*, **56**(2), pp. 198-207.
5. Tuepker, J.L and Buescher, Jr. C.A. (1968) Operation and Maintenance of Rapid sand mixed-media filter in a lime softening, *Journal of AWWA*, **60**(12), pp. 1377-1385.
6. Naeem Qureshi (1981) Comparative performance of dual and mixed-media filter, *Journal of AWWA*, **73**(9), pp. 490-496.
7. Conley, W.R. (1961) Experience with anthracite sand filters, *Journal of AWWA*, **53**(12), pp. 1473-1481.