서울特別市 保健環境研究院報 第43號 (2007) Report of S.I.H.E., 43:418~425 (2007)

여과수질 지표로서의 입자크기분포함수의 β값

수질화학팀

박진아 · 김영두 · 장미라 · 신도철 · 이민환 · 엄석원

β -Value of Power Law Function as Filtrate Quality

Water Chemistry Team

Jin-a Park, Young-doo Kim, Mi-ra Jang, Do-cheol Shin, Min-hwan Lee and Seok-won Eom

Abstract

The size of filter media has been considered important for a long time, but the most studies have investigated the effect of media size on effluent turbidity, turbidity detention quantity and filtering period. Conversely, the effect of media composition on the particle count and distribution have rarely been studied.

This study was conducted using pilot plant filters and settled water from a real plant under several operating conditions, with the turbidity, particle counts and size distribution analyzed.

The β -value in the power law function ranged from 3.1 to 4.3, but from 3.6 to 4.5 with turbidity above 0.1 NTU. The mean of a high β -value was high for small particle, so showed small particle leakage for periods above 0.1 NTU.

Key words : rapid filtration, power law function, β -value, particle size distribution

서 론

급속여과는 상수처리에서 일반적으로 채용되고 있으나 여과지에서 입자거동에 대한 이해는 제거 과정의 복잡성 때문에 상당히 불완전하다. 여과지 는 운전 중 정상상태에 도달하지 못한다. 입자가 포획되면 여재의 일부분이 되고 제거효율을 증가 시키거나(숙성) 혹은 감소시킨다(포획의 부족이나 혹은 전에 포획된 입자의 누출로 인한 파과). 급속 여과에서 수중의 고형입자들은 물이 여재 입자 사 이를 통과해 가면서 제거되는데, 특히 여재 입자 의 크기가 중요하다는 것은 오랫동안 인식되어 왔 지만, 수중에 존재하는 입자수와 크기분포에 대해 서는 최근에야 그 중요성이 인식되어 많은 연구가 이루어지고 있다. 이에 대한 연구 결과들을 살펴 보면 다음과 같다.

초기 연구는 라텍스 구 분산액을 이용하여 여과 지 숙성에 초점이 맞추어져서 진행되었고 그 후 여과지의 숙성 뿐만 아니라 파과를 확인하기 위한 연구가 오랫동안 수행되었다. Yao(8) 등이 제시한 결과에 의하면, 여과에서 제거효율이 가장 낮은 고형입자의 크기는 약 1 µm라고 하였다. 더 작은 고형입자는 확산에 의해 지배되고 더 큰 입자에 대해서는 침전과 차단이 중요한 제거기전이 된다 고 하였다. Mackie(7)는 분산액을 사용하여 양적 인 거동뿐 아니라 질적인 거동이 입자크기에 의존 한다고 하였다. 예를 들면, 작은 입자들의 제거가 계속되고 있는 동안에는 큰 입자의 제거가 중단되 며, 제거공정에서 서로 다른 크기의 입자들 간에 는 상호작용이 있다고 하였다. 그러므로 급속여과 에서 크기분포는 상당히 중요함에도 불구하고 경 험적인 자료가 부족한 상태라고 하였다.

여과지에서 누출되는 입자가 그 크기로 여과지 에 들어간 것인지 혹은 여재의 표면에서 형성된 플럭이 탈착된 것인가 하는 의문은 천연 혼합액 원수를 이용한 실험결과로는 확인할 수 없다. Kan와 Lawler(4)는 2 µm 크기의 단일분산 라텍 스 구를 이용한 실험에서 유입수로부터 10 mm 깊 이에서 농도비로 누출현상을 확인하였다. 1차 입 자(라텍스 구)는 유입수에 비해 유출수에서 농도 비로 1이하의 값을 갖는 것으로 나타나 제거가 잘 이루어졌지만 더 큰 입자는 처음엔 제거되지만 그 뒤부터는 1보다 큰 값을 나타내었다. 이는 1차 입 자의 포획에 의해 여재 표면에 형성된 플럭이 누 출하고 있다는 현상을 나타내는 증거가 된다.

수중에 존재하는 입자의 분포는 number distribution, area distribution, volume distribution 등의 방법으로 표현하는 것이 일반적이다. 특히 입자크 기와 갯수로서 입자크기분포를 간단히 표현할 수 있는 power law function이 주로 이용된다. 이 방법은 자연수 중의 입자분포를 표현하거나 공정 에서 입자분포의 변화를 알아보기 위하여 A와 β 의 값을 지표로서 사용한다. 즉 물속의 입자들은 전형적인 크기분포를 가지며 연속적으로 존재하는 데, 누적갯수 농도분포는 입자크기가 증가함에 따 라 어느 정도 최대크기에 도달할 때까지 증가한 다. 그같은 분포의 어떤 점에서 기울기나 도함수 dN/d(dp)는 입자크기분포함수로 알려져 있다.

$$\frac{dN}{d(d_p)} = Ad_p^{-\beta} \tag{1}$$

여기서 d(dp) : 입자 크기의 변화량 dN : 단위부피 중 입자수의 변화량 A : 시스템 내의 전체 입자 농도와 관련 이 있는 상수 β : 실험적으로 결정되는 상수

여기서, 계수 β는 큰 입자와 작은 입자의 상대적 인 비율을 나타내며, 자연수계에서 크기가 1 µm 이 상인 입자의 β값은 2~5 정도로 측정된다. 즉. β가 클수록 상대적으로 작은 크기의 입자수가 많아지고, 감소될수록 큰 입자들의 비율이 증가함을 의미한다. A는 시스템에서 전체입자에 대한 농도와 관계가 있 으며, 주어진 β값에 대해서 A가 클수록 시스템 내 입자의 총량이 많음을 뜻한다. Lawler(6) 등은 β 값이 3인 경우가 동일한 탁질량의 β값이 4인 경우 보다 응집공정에서 큰 입자의 형성이 잘 되고 침전 효율도 뛰어나 긴 여과지속시간을 가진다고 하였으 며, 안 등(2)의 실험결과 여과지 유입수의 B값은 3.5, 이층여과지 처리수의 β값은 2~3을 보인다고 하였다. 심(1)은 lab-scale 실험에서 침전수의 β값 은 3.66, 모래단층여과지 처리수는 2.67로 나타났 다고 보고하였다. Ginn(3) 등은 원수에서 3.71~ 3.77. 침전수에서 3.33~3.55. 여과수에서 2.81~ 3.23의 β값을 얻었다. Kaminski(5)는 응집제 첨가 유무에 따라 여과수에서 3~5의 8값을 얻었다.

재료 및 방법

그림 1은 본 연구에 사용된 급속여과장치의 모 식도이며 표 1은 실험에 사용된 장비와 장치의 제 원이다. 모래/안트라사이트의 L/d_e비(950)와 유속 (10m/hr=240m/d)을 고정하고, 균등계수는 1.40 (H 모드의 안트라사이트는 제외)로 하였으며 K 정 수장의 침전수를 원수로 유효경을 8단계(모래 (mm)-안트라사이트(mm) A 모드 0.40-0.79, B 모드 0.45-0.88, C 모드 0.50-0.98, D 모드 0.55 -1.08, E 모드 0.60-1.18, F 모드 0.65-1.28, G 모드 0.70-1.37, H 모드 0.75-1.47)로 변경하여 운전하고 유효경의 변화가 처리수에서의 입자수와 탁도에 미치는 영향을 분석하였다. 표 2와 표 3은 각 운전조건을 요약한 것이다.



Fig. 1. Schematic diagram of the rapid filtration pilot plant.

입자수는 Laser Trac[™], Model PC 2400D를 이용하여 on-line 측정하였으며, size window는 2-4 µm, 4-7 µm, 7-14 µm, 14-20 µm, 20-25 µm, 25-100 µm 및 100µm이상의 7단계로 나누었다.

탁도는 HF Scientific MicroTOL를 사용하여 on-line 측정하였다.

결과 및 고찰

 여과시간에 따른 입자크기분포함수 β값 변화 입자크기분포함수를 구하기 위한 표현식인 power law function 식(1)에서 양변에 log를 취하면 log <u>dN</u> <u>d(d_p)</u>=-βlogd_p+logA로 표현할 수 있고 좌변을 y축에 우변의 logd_p를 x축으로 하여 플롯 하면 기울기는 β, y 절편은 상수 C(=log A)라 할 수 있다.

그림 2는 A 모드의 운전시간에 따른 기울기(β 값), y절편(C), 그리고 y절편과 기울기의 비(C/

Table 1	1.	Specifications	of	the	experimental	apparatus	and	instruments
---------	----	----------------	----	-----	--------------	-----------	-----	-------------

Item	Specification		
Column	Acrylic column, $\Phi40 \times H$ 3,600 mm(jointed with 3 pieces)		
Peristaltic pump	Masterflex L/S Model 7518-00, Coleparmer Instrument, USA		
Raw water tank	PVC, W 1,000 × L 1,000 × H 1,000 mm		
Constant head tank	Acrylic, W 290 \times L 240 \times H 215 mm		
Temperature controller	Recirculating Chiller, NICECOOL 515, NiceTec Co.		
Particle counter	Laser TracTM, Model PC 2400D, ChemTrac Systems Inc.		
Turbidimeter	MicroTOL, HF Scientific ; 1720D/2100P Turbidimeter, Hach		

Table	2.	Uniformit	ty co	efficier	nts and	effective
		sizes of s	sand	and an	thracite	by mode

				-)		
	Sa	nd	Anthracite			
Mode	Uniformity	Effective	Uniformity	Effective		
	coefficient	size (mm)	coefficient	size (mm)		
А	1.4	0.40	1.4	0.79		
В	1.4	0.45	1.4	0.88		
С	1.4	0.50	1.4	0.98		
D	1.4	0.55	1.4	1.08		
Е	1.4	0.60	1.4	1.18		
F	1.4	0.65	1.4	1.28		
G	1.4	0.70	1.4	1.37		
Н	1.4	0.75	1.33*	1.47		

Table 3. Depth of sand and anthracite L/de ofsand : 500 L/de of anthracite : 450

Mode	Sand (cm)	Anthracite (cm)	Total (cm)
А	20.0	35.3	55.3
В	22.5	39.8	62.3
С	25.0	44.2	69.2
D	27.5	48.6	76.1
Е	30.0	53.0	83.0
F	32.5	57.4	89.9
G	35.0	61.9	96.9
Н	37.5	66.3	103.8

Adjusted because of too large effective size of anthracite.

β)의 분포를 나타낸 것이다. β와 C의 구별을 용 이하게 하기 위하여 C를 보조축에 나타내었다.

β값의 변화를 살펴보면 여과지숙성기간인 처음
1시간 동안 β는 약 5.18에서 4.54까지 감소하였고 이후 2시간에 이르러 3Q(쿼타일, 분위수)인
4.40에 21시간에 평균인 4.2 수준이 되었고 이후
3Q과 1Q 사이의 구간에서 변동하다가 48시간 무 렵부터 1Q 값보다 작게 나타났다.



Fig. 2. Variation of Slope(β), y-intercept(C) and C/ β of Mode A.

그림 3은 B 모드의 운전시간에 따른 기울기(β 값), y절편(C), 그리고 y절편과 기울기의 비(C/ β)의 분포를 나타낸 것이다.

여과지숙성기간인 처음 1시간 동안 β는 약 3.75~4.64범위에서 변동하였고 이후에도 특별한 경향을 보이지 않고 3Q 4.38, 1Q 3.86의 사이에 서 변화하였다. β와 C의 비는 3Q인 1.00부터 1Q 인 0.97사이에서 변동하였다.



Fig. 3. Variation of Slope(β), y-intercept(C) and C/ β of Mode B.

그림 4는 C 모드의 운전시간에 따른 기울기(β 값), y절편(C), 그리고 y절편과 기울기의 비(C/ β), 탁도(보조축)의 분포를 나타낸 것이다.

여과지숙성기간인 처음 1시간 동안 β는 약 5.5 7~3.99범위에서 변동하였고 이후 탁도의 움직임 과 비슷하게 출렁임을 보이지만 탁도와 β값과의 상관계수는 0.20으로 높지 않았다. C 모드에서 0.1NTU보다 높은 탁도를 보인 시기는 57시 30분 인데 이보다 1시간 30분정도 빠른 56시부터는 β 값은 평균 4.12 보다 작은 값들이 연속적으로 나타 났고 C/β는 평균인 1.01보다 큰 값들을 보여 수중 에 탁질이 증가하고 있음을 지표로서 보여주었다.



Fig. 4. Variation of Slope(β), y-intercept(C), C/ β and turbidity of Mode B.

그림 5는 D 모드의 운전시간에 따른 기울기(β 값), y절편(C), 그리고 y절편과 기울기의 비(C/ β), 탁도(보조축)의 분포를 나타낸 것이다.

여과지숙성기간인 처음 1시간 동안 β는 약 2.49~3.13범위이었고 이후에 탁도의 움직임과 비슷하게 출렁임을 보이지만 탁도와 β값과의 상 관계수는 0.15로 낮게 나타났다. 유효여과기간동 안 β는 3Q와 1Q 사이로 차이가 다른 운전들의 0.24~0.52에 비해 0.84로 다소 넓은 범위로 변동 하였다. D 모드에서 0.1NTU보다 높은 탁도를 보 인 시기인 60시 10분경부터 90퍼센타일 값인 3.79 를 넘고 있고, C/β는 이보다 약간 빠른 58시간부 터 90 퍼센타일 평균인 1.01보다 큰 값들을 보여 수중에 탁질이 증가하고 있음을 지표로서 보여주 었다.



Fig. 5. Variation of slope(β), y-intercept(C) and C/ β of Mode D.

그림 6은 E 모드의 운전시간에 따른 기울기(β 값), y절편(C), 그리고 y절편과 기울기의 비(C/ β)의 분포를 나타낸 것이다.

여과지숙성기간인 처음 2시간 동안 β값은 약 6.49~3.60 범위에서 변동하였고 이후 평균 3.71 을 중심으로 변동하였으며 시간이 지남에 따라 증 가하거나 감소하는 등의 경향을 보이지는 않았다.



Fig. 6. Variation of slope(β), y-intercept(C), and C/ β of Mode E.

그림 7은 F 모드의 운전시간에 따른 기울기(β 값), y절편(C), 그리고 y절편과 기울기의 비(C/ β)의 분포를 나타낸 것이다.

여과지숙성기간인 처음 2시간 동안 β는 약 3.9 0~4.66범위이었고 유효여과기간의 초기에 작은 입 자출현에 따라 더 높은 값들도 자주 나타났다. 다른 운전들과 달리 F 모드에서는 여과가 진행됨에 따라 β값과 C값이 모두 감소하였는데 2~4μm 입자의 거동이 이들 값에 영향을 주는 것으로 보인다.



Fig. 7. Variation of slope(β), y-intercept(C), and C/ β of Mode F.

그림 8은 G 모드의 운전시간에 따른 기울기(β 값), y절편(C), 그리고 y절편과 기울기의 비(C/ β)의 분포를 나타낸 것이다.

여과지숙성기간인 처음 2시간 동안 β는 약 6.42~4.16 범위이었고 유효여과기간의 말기를 제외하고 유효여과기간 동안 3Q(4.49)~1Q(4. 19) 사이에서 변동하였다. 운전말기에는 작은 입 자수의 감소에 따라 더 낮은 값들을 보였다. G 모 드에서는 여과가 진행됨에 따라 β값과 C값이 모 두 감소하였는데 F 모드 운전시보다 그 경향은 분 명하지 않았다. β값보다 C값의 감소 경향이 더 강하여 C/β에서도 감소하는 경향을 보였다.



Fig. 8. Variation of slope(β), y-intercept(C) and C/ β of Mode G.

그림 9는 H 모드의 운전시간에 따른 기울기(β 값), y절편(C), 그리고 y절편과 기울기의 비(C/ β)의 분포를 나타낸 것이다.

여과지숙성기간인 처음 2시간 동안 β는 약 5.1 6~3.82 범위이었고 유효여과기간 동안 3Q(4.47) ~1Q(4.23) 사이에서 변동하였다. 유효경이 큰 그룹인 F와 G 모드에서는 여과가 진행됨에 따라 β값과 C값이 모두 감소한 반면 H 모드에서는 그 러한 경향이 보이지 않았다.



Fig. 9. Variation of slope(β), y-intercept(C) and C/ β of Mode H.

2. 입자크기분포함수 β값의 분포

표 4는 power law function으로 계산된 여과지 유입수의 β, y절편으로서의 C, C/β값을 나타낸 것이다. β가 클수록 상대적으로 작은 크기의 입자 수가 많아지고, C/β가 클수록 시스템 내 입자의 총량이 많아짐을 뜻한다.

유입수(침전수)의 β 분포는 2.94~3.52로 Ginn(3) 등의 침전지 β값과 큰 차이를 보이지 않 았고 C/β는 1.49~1.62로서 여과수의 값의 범위 보다 훨씬 높았다.

Table 4. β , C and C/ β of influent for each mode

Mode	β	С	C/β
A	3.43	5.20	1.52
В	3.43	5.20	1.52
С	3.52	5.46	1.55
D	3.89	5.84	1.50
Ε	2.94	4.74	1.61
F	3.13	5.06	1.62
G	3.80	5.67	1.49
Η	3.37	5.32	1.58

그림 10은 power law function으로 계산된 각 운 전의 (a) β값, (b) C값, (c) β와 C의 비값들의 변 동을 파악하기 위하여 최대값, 최소값, 1Q, 3Q, 평 균값을 제시한 것으로서 표기된 수치는 평균값이다.



Fig. 10. Average, max, min, 3Q and 1Q of β , C and C/ β value of filtrate at each mode.

β값은 평균 3.1~4.3의 범위에 분포하며 C/β는 평균 0.97~1.12 수준이었다. D 모드 운전에서 가 장 낮은 β값을 보였으나 14µm 보다 큰 입자의 출 현에 따라 1Q와 3Q의 차이는 가장 넓게 나타났다. 1Q와 3Q의 차이는 β값의 분포범위를 나타내는 것 으로 한 운전 안에서 여과가 어느 정도 일정하게 진행되는지 보여주는 지표라 할 수 있다. 1Q와 3Q 사이의 차이는 유효경이 가장 작거나 큰 A 모드와 H 모드에서 좁지만 C/β값도 커서 총입자수가 많 으므로 이들 운전에서 비록 가장 일정한 수질을 얻 을 수는 있지만 일정한 수질이 곧 양질의 처리수를 의미하지는 않는다는 것을 확인할 수 있다.

여과지 유입수에 큰 입자들이 많고 적음에 상관 없이 유출수에서는 작은 입자가 많은 비율을 차지 하고 있어 큰 입자들의 제거기전을 지배하는 침전 이나 차단, 혹은 체거름작용이 여과지 내에서 상 대적으로 우세하게 작용됨을 나타낸다. 여과지에 서 작은 입자가 잘 제거되지 않고 오히려 여과지 유입수에서보다 더 많은 입자수가 누출되는 경우 도 있다. 이것은 여과초기 탁질입자의 누출을 의 미하는 것으로 이러한 미세입자가 유출수 수질이 나 탁질누출에 미치는 영향이 크기 때문에 여과지 모니터링에 미세입자의 거동이 매우 중요하다.

그림 11은 1시간 평균 탁도가 0.1 NTU를 초과 할 때 power law function으로 계산된 각 운전의 (a) β값, (b) C값, (c) β와 C의 비값들의 변동을 파악하기 위하여 최대값, 최소값, 1Q, 3Q, 평균값 을 제시한 것으로서 표기된 수치는 평균값이다.



Fig. 11. Average, max, min, 3Q and 1Q of β , C and C/ β value of filtrate at each mode when 1-hr average turbidity is above 0.1NTU.

탁도가 0.1 NTU를 초과할 때 β값은 평균 3. 6~4.5의 범위에 분포하여 전체여과기간을 기준으 로 한 경우보다 약간 높다. 특히 전체여과기간에 서 가장 낮은 β값을 보였던 D 모드 운전(3.1)에 서 가장 높은 β값을 보이는 것은 매우 특이하다. 시스템 내의 입자수 총량을 의미하는 C/β는 0.9 7~1.12로 전체여과기간의 C/β와 큰 차이를 나타 내지는 않았다.

결 론

모형여과칼럼을 사용하여 여층의 깊이와 여재의 유효경의 비(L/de)를 고정하고 여재의 크기를 변 화시켜 여과수 중 입자의 분포를 조사함으로써 여 과시간에 따른 입자크기분포함수를 분석한 결과 본 실험에서 β값은 3.1~4.3의 범위에 분포하였 으며 탁도가 0.1 NTU를 넘는 기간 동안의 β값은 3.6~4.5를 보여 전체 평균보다 약간 높았다. β값 이 높다는 것은 작은 입자의 비율이 큼을 의미하 므로 0.1 NTU보다 탁도가 높은 기간에 작은 입자 의 누출이 있었음을 보여준다.

참고문헌

- 심유섭 : 입자크기분포 평가를 통한 여과공정
 의 최적화 연구, 서울시립대학교 박사학위논 문, 2001.
- 2. 안종호, 윤재홍 : 여재구성에 따른 탁질입자 제거특성 및 효율비교, 대한환경공학회지, 22(5):919~926, 2000.
- Ginn Jr TM, Amirtharajah A and Karr PR : Effect of particle detachment in granular-media filtration, J. of AWWA, 12:66~76, 1992.
- Kau SM and Lawfer DF : Dynamic of deep bed filtratim : Velocity depth and media, J. Envir. Engr., ASCE, 121(12): 850~859, 1995.
- 5. Kaminski I, Vescan N, and Adin A

Particle size distribution and wastewater filter performance, Wat. Sci Tech., $36(4):217 \sim 224$, 1997.

- Lawler, D. F., Particle size distribution in treatment process : theory and practice, Wat. Sci. & Tech., 36:15~23, 1997.
- Mackie RI, Horner RMW and Jarvis RJ : Dynamic Modeling of deep bed filtration, J. of AIChE, 33(11):1761, 1987.
- 8. Yao KM : water and wastewater filtration ; concepts and applications, Envir. Sui & Tech., (5):1105, 1971.