한국환경과학회지 제11권(제9호), 955~960, 2002
J. of the Environmental Sciences

회수수가 응집공정의 오염물질 제거 및 입자특성에 미치는 영향

문 병 현 · 김 승 현* · 박 미 선 · 이 향 인 · 이 강 춘**
창원대학교 환경공학과 · *경남대학교 공간환경시스템공학부 · **동의대학교 환경공학과
(2002년 4월 22일 접수; 2002년 9월 16일 채택)

Effects of Recycled Washwater on Pollutant Removal and Particle Characteristics during Coagulation

Byung-Hyun Moon, Seung-Hyun Kim*, Mi-Seon Park, Hyang-In Lee and Gang-Choon Lee**
Department of Environmental Engineering, Changwon National University, Kyungnam 641-773, Korea
**Department of Architectural, Civil and Environmental Engineering, Kyungnam University, Kyungnam 631-701, Korea*
***Department of Environmental Engineering, Dongeui University, Busan 614-714, Korea*
(Manuscript received 22 April, 2002; accepted 16 September, 2002)

The recycled washwater, which has different water quality and is produced about 5 to 20% of the total water volume treated, affects the unit operation of water treatment, especially coagulation process. However, the effects of recycled washwater on unit operation of water treatment have not been fully investigated. In this study, effects of recycled washwater on coagulation process were investigated to find the optimum coagulation condition by analyzing turbidity, UV_{254}, TOC removal efficiencies. In addition, effects of recycled washwater on residual Al after coagulation were studied by analyzing soluble and particulate Al. The size distribution and fractal dimension of coagulated also analyzed.

The recycled washwater was lower pH than the raw water. And the recycled washwater had higher UV_{254}, TOC and residual Al concentration than the raw water. Residual Al concentration of recycled washwater was about 50 times higher than that of raw water. Optimum coagulant dosages on the blending recycled washwater and the raw water for turbidity, UV_{254} and Al removal were lower than that on the raw water. However, TOC removal increased by increasing coagulant dosage. The size and fractal dimension of coagulated particle produced in the blending recycled washwater were larger, which imply faster settling velocity, than those produced in the raw water only.

Key words : Recycling Water, Coagulation, Turbidity, TOC, Al, Particle Size, Fractal dimension

1. 서 론

정수공정은 응집, 침전, 여과공정으로 구성되어 있으며 상수원수의 수질에 따라 오존 및 활성탄을 조합하여 운전하며 또한 발생되는 슬러지를 감량화하기 위한 공정으로 구성되어 있다. 각 단위공정에서 발생하는 슬러지, 역세척수 및 슬러지 탈수 케이크 등은 다량의 수자원을 함유하고 있으므로 가능한 한 정수공정에서 발생하는 폐수 등을 줄이고 수자원을 재이용 하기 위해서는 정수공정에서 발생하는 재이용수에 대한 관리가 필요하다.[1] 일반적인 정수과정에서는 침전지 슬러지와 여과지 역세척수가 상당량 발생하며 이 두 배수를 집수하여 침전시킨 후 그 상등액을 다시 회수하여 이용하기 위하여 간헐적으로 착수정으로 반송시켜 원수와 혼합 후 다시 처리한다. 일반적인 정수공정에서 발생하는 일일 회수량은 전체 취수량의 5~20 %를 차지하며,[2] 또한 원수와 수질 성상이 다른 회수수가 원수와 혼합되어 유입되면 각 단위 정수공정에 영향을 미치며,

Corresponding Author : Byung-Hyun Moon, Department of Environmental Engineering, Changwon National Univ., Kyungnam 641-773, Korea
Phone : +82-55-279-7564
E-mail : bhmoon@sarim.changwon.ac.kr

특히 응집공정에 비교적 큰 영향을 준다고 보고되고[1~4] 있으나 발생하는 응집입자의 특성에 대한 연구는 많이 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 회수수가 원수에 혼합되어 응집공정으로 유입될 때 응집에 미치는 영향을 파악하기 위하여 회수수의 특성과 회수수 혼합이 탁도 및 유기물 제거에 미치는 영향과 용존성 및 입자상 잔류 알루미늄에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. 또한 회수수 혼합이 응집 floc의 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 응집 floc의 크기 분포와 형태특성을 파악하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험

본 실험에 사용한 Jar-test는 국내외 연구에서 많이 사용되고 있는 Phipps & Birds사의 표준형과 같은 제원으로 제작된 기기를 사용하였다. 장치의 조건은 너비 3㎝, 길이 8㎝의 날개로 되어 있으며, 시료의 분석을 용이하게 하기 위해 밑 부분에서 5㎝ 되는 지점에 시료 채취구가 만들어져 있으며, 가로 · 세로 11.5㎝, 높이는 21.5㎝이다.

2.2. 측정방법 및 수질분석

실험에 사용한 시료는 2001년 2월부터 5월까지 낙동강 원수를 취수하여 정수처리하는 A 정수장으로 유입되는 원수와 정수장에서 발생하는 회수수를 이용하였으며 본 실험에 사용한 회수수는 여과지 역세척수와 침전지 슬러지 배출수를 저장하는 회수조의 상등수를 사용하였다. 본 응집실험에 사용한 응집제는 A 정수장에서 사용하고 있는 동일한 응집제인 PACS (poly aluminium chloride silicate)를 사용하였으며 pH조정은 하지 않았다. 응집실험은 응집제 주입 후 150rpm에서 1분 동안 급속교반을, 30rpm에서 20분동안 완속교반을 하여 플록이 형성되게 한 다음 30분간 침전시켜 상등액의 수질(탁도, UV_{254}, TOC, 잔류 알루미늄)을 분석하였다. 응집 입자의 특성은 완속교반 후 즉시 입자를 채수하여 입자 분석기 (Malvern Mastersizer/E)를 이용하여 응집 입자의 크기분포를 측정하였다. 응집입자의 형태를 나타내는 fractal dimension은 여러 가지 방법을 이용하여 측정이 가능하나 최근 Small Angle Laser Light Scattering (SALLS)방법[5,6]이 응집입자의 on-line 측정이 가능하고 신속하게 측정할 수 있는 장점이 보고되고 있다. 본 연구에서는 SALLS 방법을 채택하여 fractal dimension을 측정하였다. SALLS 방법의 측정이론에 따르면 응집입자의 형태 특성 즉 fractal dimension, d_F, 는 빛의 투과 시 floc에 의해서 빛의 산란강도, I(Q), 사용한 빛의 파동의 함수, Q 와 밀접한 관계를 가진다. 이들의 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다[4,8].

$$I(Q) \propto M^2 P(Q) S(Q)$$

여기서 P(Q)는 floc을 구성하는 입자의 형상 인자 (form factor)를 나타내며 S(Q)는 입자간 구조인자 (interparticle structure factor)를 나타낸다. 위의 식에서 P(Q)는 대부분 상수이다. 그리고 원수의 입자의 크기가 측정시 사용한 빛의 파장보다 작은 경우에는 다음과 같이 나타낼 수 있다[8].

$$I(Q) \propto Q^{-dF}$$

Fractal dimension, dF는 1과 3의 범위에 있으며 1에 가까울수록 불규칙하고 표면적이 넓고 3에 가까울수록 표면적이 적은 구형에 가까운 형태로 침전성이 유리한 형태를 갖는다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 원수 및 회수수의 특성

원수와 회수수의 수질특성을 Table 1에 나타내었다. Table 1에 나타낸 바와 같이 회수수는 응집이 이미 진행된 후의 물이며 또한 염소소독이 된 역세척수가 함유되어 pH가 원수에 비해 낮고, 탁도, UV_{254}, TOC는 슬러지 상등수와 여과지 역세척수에 함유된 여과지 오염물질을 함유함으로 원수에 비해 높음을 알 수 있으며, 잔류 알루미늄 값도 원수에 비해 비교적 높게 나타났으며 대부분의 잔류입자는 입자상 알루미늄으로 구성되어 있은 것으로 나타났다. 회수수에 함유된 입자는 166.38㎛로 원수에 함유된 입자 크기 20.51㎛에 비해 크고 응집입자의 형태특성을 나타내는 fractal dimension는 회수수가 2.25로 원수의 1.78에 비해 크게 나타나 회수수에 함유된 입자가 크고 침강성에 유리한 비교적 구형에 가까운 형태특성을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

Table 1. Water quality of raw water and recycled washwater

	raw water	recycled washwater
pH	7.5~8.6	7.0~7.7
Turbidity(NTU)	10.2~23.0	40.5~81.2
$UV_{254}(Cm^{-1})$	0.090~0.120	0.290~0.350
TOC(mg/L)	4.712~6.530	9.514~17.350
residual Al(㎍/L)	47~61	1510~2870
Average Volume diameter(㎛)	20.51	166.38
Fractal dimension	1.78	2.25

3.2. 회수수 혼합이 탁도 및 유기물 제거에 미치는 영향

Fig. 1에 원수와 회수수 혼합비율에 응집제 주입량을 달리하였을 때 상등수의 탁도값을 나타내었다. 응집제를 주입하지 않고 응집실험을 수행한 결과 회수수의 혼합비율이 높을수록 상등수의 탁도가 낮아지는 경향을 나타내었다. 이는 회수수에 함유된 입자상 알루미늄이 응집핵으로 작용하며 용존성 알루미늄은 응집제의 역할을 하는 것으로 사료되며 이로 인하여 회수수에 의하여 입자의 하전이 중화될 수 있으므로 회수수를 원수와 혼합하면 제타전위가 증가되어[4] 원수 입자간의 반발력이 감소되어 응집효과를 촉진시킨 것으로 사료된다. 회수수를 혼합하지 않은 원수만을 가지고 응집실험을 하였을 경우 응집제 주입량 30mg/L에서 1.47NTU로 가장 낮게 측정되었다. 반면 원수에 회수수를 5, 10, 20% 혼합하였을 때는 응집제 주입률 10mg/L에서 각각 0.99, 1.5, 1.07NTU로 가장 낮게 나타났다. 이러한 결과는 회수수가 원수와 혼합되었을 때 회수수에 함유된 잔류 응집제와 응집입자로 인하여 회수수를 혼합할 경우 최적 응집제 주입량이 감소됨을 알 수 있으며 위와 같은 결과는 다른 연구 결과[4]와 유사하였다. 즉 회수수가 원수와 혼합된 경우 탁도 제거를 위해서는 원수의 탁도제거에 필요한 응집제 주입량 보다 적게 소모 될 수 있음을 알 수 있다.

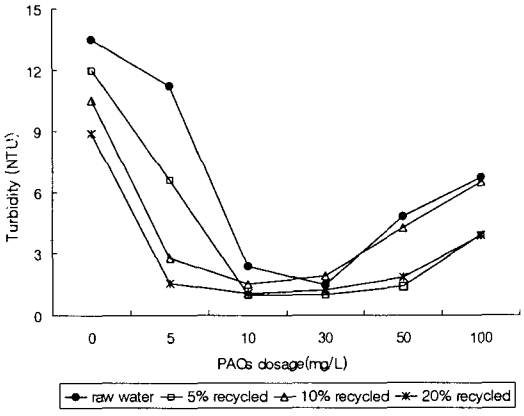

Fig. 1. Effects of coagulant dosage and recycled water ratio on turbidity.

응집제 주입량에 따른 UV_{254} 농도변화를 Fig. 2에 나타내었다. 원수만을 사용한 응집실험은 응집제 주입량 30mg/L에서 $0.042cm^{-1}$로 가장 낮게 나타났으며 회수수 혼합비가 5, 10, 20%에서도 동일한 응집제 주입량 30mg/L에서 각각 0.046, 0.052, $0.042cm^{-1}$로 가장 낮게 나타났으나 원수에 비해 회수수를 혼합한 경우가 약간 높게 나타났다.

그러나 회수수를 혼합한 경우 각 시료에 대한 TOC 측정치는 Fig. 3에서 나타난 것처럼 탁도 제거의 최적조건과 다르게 나타났다. 응집제 주입량이 증가될수록 TOC의 제거율이 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 회수수를 혼합할수록 유기물질의 양이 증가하여 TOC의 유발물질인 유기물의 음전하와 표면적이 증가하고 이는 탁도를 유발하는 물질보다 크므로, TOC 제거를 위해서는 탁도 제거에 필요한 응집제보다 많은 주입량과 알루미늄 이온이 강한 양의 전하를 나타내는 낮은 pH영역에서 유기물의 응집이 효율적이기 때문이다.

3.3. 회수수 혼합이 잔류알루미늄 제거에 미치는 영향

Fig. 4는 응집제 주입량에 따른 잔류탁도와 잔류알루미늄 농도를 나타내었다. 회수수의 혼합비에 따

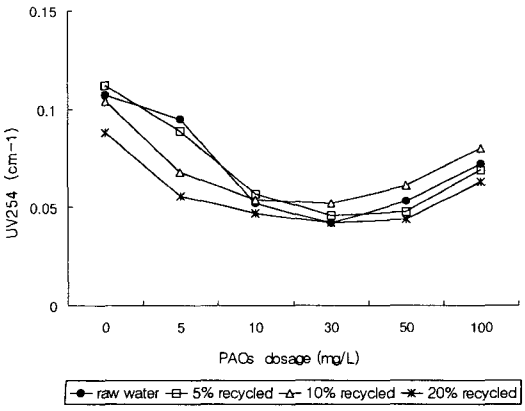

Fig. 2. Effects of coagulant dosage and recycled water ratio on UV_{254}.

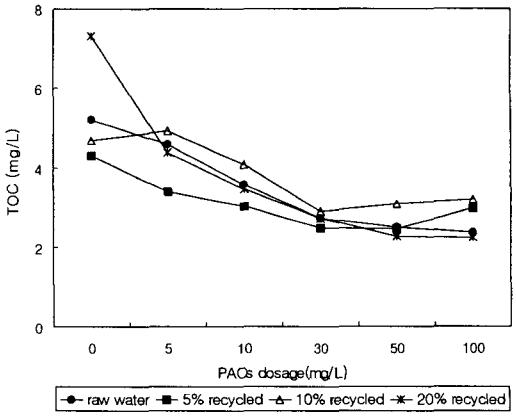

Fig. 3. Effects of coagulant dosage and recycled water ratio on TOC.

른 잔류 알루미늄의 농도를 살펴보면 회수수 혼합비 5%에서는 응집제를 10mg/L 주입하였을 때 잔류 알루미늄이 275㎍/L로 가장 적게 나타났으며, 회수수 혼합비 10%에서도 응집제 10mg/L를 주입하였을 경우에 371㎍/L로 가장 낮게 나타났다. 그리고 회수수 20% 혼합시에도 역시 10mg/L 주입시 327㎍/L로 가장 낮은 값을 나타내었다. 그러나 원수의 경우에서는 응집제를 30mg/L주입할 경우 가장 적은 값인 283㎍/L를 나타내었다. 회수수를 혼합한 경우에도 잔류 알루미늄의 농도는 잔류탁도의 농도가 최저를 나타내는 응집제 주입양에서 가장 낮게 나타났다.

원수와 회수수의 수질 특성에 의하여 그 최적 응집조건이 달라질 수 있으므로 다른 시기에 원수를 채수하여 실험을 실시한 결과를 Fig 5에 제시하였다. 원수는 강우 후 3일이 경과하고 난 후 채수하였다. 그 결과 원수에 함유된 탁도가 증가되었으며, 회수수를 혼합하였을 때도 응집제 주입량이 많이 요구되어 탁도 제거를 위한 최적 조건이 30mg/L로 나타났다. 그러나 Fig. 4와 5를 비교해보면 회수수를 혼합한 경우가 원수만을 사용한 경우에 비하여 비교적 적은 응집제량에서 최적 조건을 나타내는 경향을 보였다.

Table 2에는 각 회수수 혼합비와 응집제 주입량에서 발생하는 잔류 알류미늄의 존재형태를 분석한 결과를 나타내었다. 각 응집조건에서 총 알루미늄의 농도는 입자상 알루미늄의 농도가 최저가 되는 응집제 주입량에서 가장 낮게 나타났다. 입자상 알루미늄의 농도가 잔류탁도와 상관관계를 가진다고 보고되고 있으며 입자상 알루미늄의 제거율이 높은 조건에서 잔류 알루미늄의 농도가 낮다고 보고되고 있다.[7,8] 원수만 사용한 경우 회수수가 혼합된 경우에 비해 응집제 주입량 30mg/L에서 용존성 알루미늄의 농도가 높은 것으로 보아 최적 응집제 주입량에 미치지 못하는 것으로 사료되며 원수의 탁도가 비교적 높은 점을 고려하면 보다 높은 응집제 주입량이 요구되는 것으로 사료된다.

3.4. 응집제 주입량에 따른 입자특성

Table 3은 원수와 회수수의 탁도, 잔류 알루미늄, 입자크기, fractal dimension을 비교한 것이다. 원수와 비교했을 때 회수수의 경우 탁도와 평균 입자크기가 각각 66.5NTU와 166.38㎛로 높게 나타났다. 응집입자의 형태특성을 나타내는 fractal dimension의 경우에도 회수수가 2.25로 원수의 1.78에 비해 크게 나타나 입자가 구형에 가깝고 침강성이 좋은 형태특성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

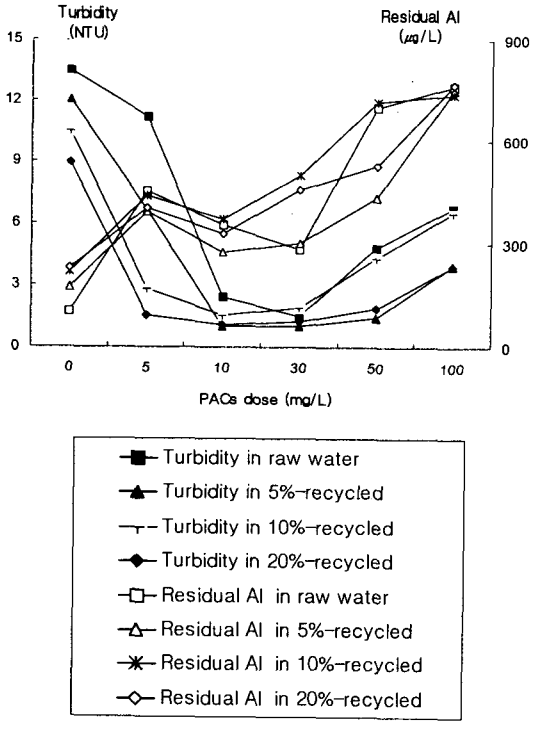

Fig. 4. Effects of coagulant dosage and recycled water ratio on turbidity and residual Al.

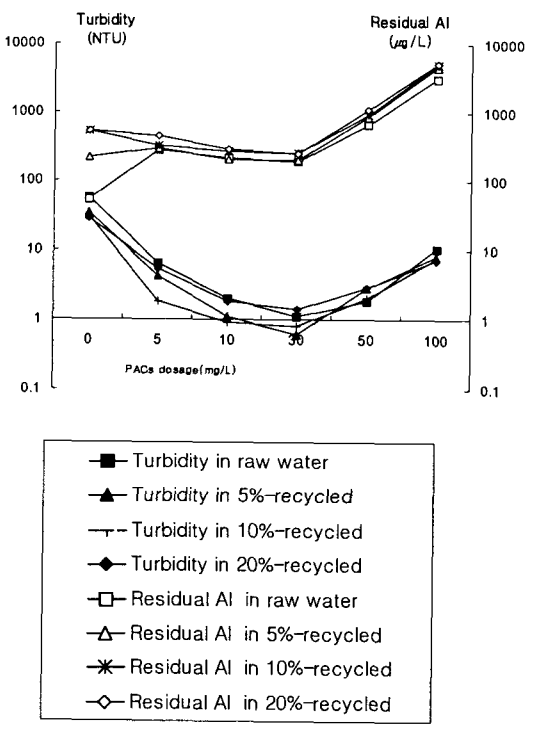

Fig. 5. Effects of coagulant dosage and recycled water ratio on turbidity and residual Al.

Table 2. Effect of coagulant dosage and recycled washwater on residual dissolved and particulate Al

PACs dose (mg/L)	Raw water			Raw water 95%+ Recycling water 5%			Raw water 90%+ Recycling water 10%			Raw water 80%+ Recycling water 20%		
	Total	SoubleAl	Al particle	Total	SolubleAl	Al particle	Total	SolubleAl	Al particle	Total	SolubleAl	Al particle
0	54	37	17	219	64	155	536	153	383	538	124	413
5	278	114	164	296	116	180	326	67	259	457	94	363
10	215	108	108	206	99	107	266	62	204	290	85	205
30	190	107	82	199	50	149	256	55	201	250	66	184
50	659	236	423	876	112	764	931	103	828	1109	202	907
100	3129	3056	73	4686	2890	1796	5059	2390	2669	5208	458	4750

Table 3. Properties of raw water and recycled washwater

	pH	Turbity (NTU)	Residual Al (μg/L)	Average Volume diameter (μm)	d_F
raw water	8.4	18.8	57	20.51	1.78
recycled washwater	7.5	66.5	2,634	166.38	2.25

Fig. 6에는 원수만을 사용하여 응집실험을 수행한 결과를 제시하였다. 응집제 주입량이 30mg/L까지 증가할 때까지 입자크기가 증가하다가 그 이후로 조금씩 감소함을 보였다. 응집제 주입량 30mg/L에서 평균 입자크기가 133.08μm로 가장 높게 나타났다.

Fig. 7에는 원수 및 회수수를 혼합하였을 때 각 응집제 주입량에서 발생하는 평균 입자의 크기를 나타내었다. 원수와 회수수를 혼합하여 발생한 응집입자가 원수만을 대상으로 발생한 응집입자에 비하여 비교적 크게 형성됨을 알 수 있으며 회수수의 혼합비가 많을수록 응집제 주입량 5mg/L 까지는 응집입자의 평균크기가 증가됨을 알 수 있다. 원수와 회수수를 혼합할 경우 응집제 주입량 10mg/L에서 가장 큰 입자가 발생하였으며 원수의 경우는 30mg/L에서 가장 큰 입자가 발생하였음을 알 수 있다. 최대 크기의 입자가 발생되는 응집제 주입량에서 탁도 제거가 가장 양호한 것으로 나타나 응집 입자의 크기가 증가할수록 탁도 제거도 증가함을 알 수 있으며 원수와 회수수를 혼합한 경우 원수에 비해 적은 응집제 주입량에서 최대크기의 입자가 발생함으로 회수수 반송시에는 응집제 주입량을 절감할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 8에서는 각 조건에서 응집입자의 형태를 나타내는 fractal dimension(d_F)를 나타내었다. 전체적으로 응집제 주입량이 증가될수록 d_F값이 증가하는 것으로 나타났으며 원수와 회수수를 혼합한 경우에서 발생한 응집입자의 d_F가 크게 나타났다. 즉 회수수를 혼합한 경우 응집입자의 크기가 증가하고 응

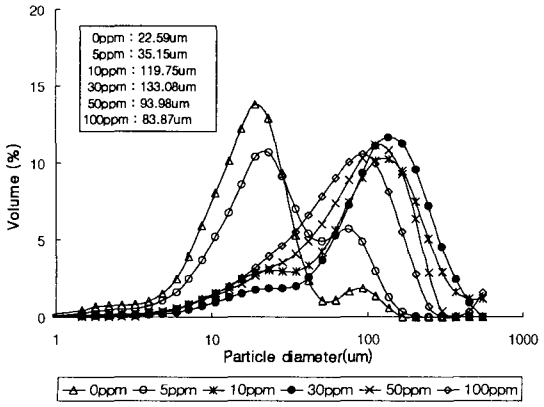

Fig. 6. Effect of coagulant dosage on particle size distribution.

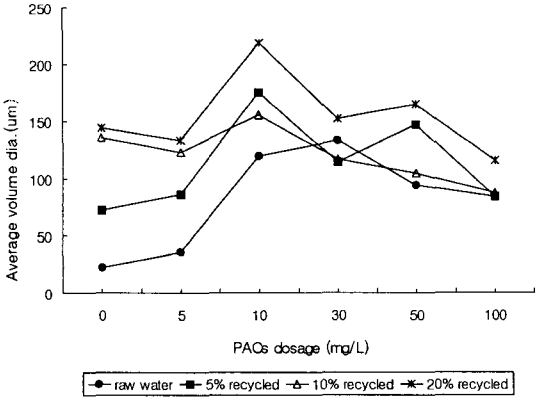

Fig. 7. Effects of coagulant dosage and recycled water ratio on average volume diameter of particle.

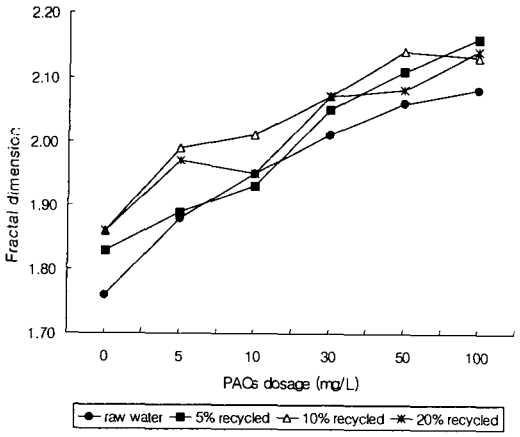

Fig. 8. Effects of coagulant dosage and recycled water ratio on fractal dimention of particle.

집입자의 형태 또한 침전에 유리한 구형에 가까운 형태의 입자들이 발생됨을 알 수 있다.

4. 결 론

회수수가 응집공정에 미치는 영향을 살펴보기 위한 실험 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1) 회수수의 pH는 원수에 비해 낮고 탁도, UV_{254}, TOC, 잔류알루미늄의 값은 원수에 비해 매우 높음을 알 수 있었다.
2) 회수수를 혼합하였을 때 탁도 및 UV_{254}의 제거율은 원수만을 사용한 경우의 최적 응집제 주입량보다 적은 주입량에서 높았다. 그러나 TOC의 경우는 모든 대상 시료에서 응집제 주입량이 증가될수록 제거율이 증가되었다.
3) 회수수를 혼합한 경우 응집처리 후 잔류 알류미늄의 농도가 전반적으로 증가됨을 알 수 있다. 잔류탁도의 농도가 낮을 때 입자상 알루미늄의 농도가 낮았으며 또한 총 알루미늄의 농도가 낮았다. 즉 탁도 제거율이 최대가 되는 최적조건에서 총 잔류 알류미늄의 농도가 가장 낮았다.
4) 원수 및 회수수에 함유된 입자의 평균 입자크기는 각각 20.51과 166.38㎛였으며 응집입자의 형태 특성을 나타내는 fractal dimension인 d_F는 원수가 1.78, 회수수가 2.25로 회수수에 함유된 입자의 크기가 크고 또한 fractal dimension도 크게 나타나 입자가 구형에 가깝고 침강성이 좋은 형태를 하고 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 창원대학교 교내학술 연구지원비에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1) ASCE, AWWA, 1998, Water Treatment Plant Design, 3rd. Ed., McGraw-Hill.
2) Kawamura, S., 1991, Integrated design of water treatment facilities, John Wiley & Sons, Inc.
3) 한무영, 이재원, 1997, 회수수가 정수장 응집공정에 미치는 영향, 대한토목학회 학술발표회, 519-522.
4) 환경부, 1997, 기존 정수장 효율향상기술, 제2단계 2차년도 연차보고서, 한국수자원공사.
5) Waite, T. D., 1999, Measurement and implications of floc structure in water and wastewater treatment, Colloids and Surfaces A : Physicochem. Eng. Aspects, 151, 27-41.
6) Guan, J., T. D. Waite, and R. Amal, 1998, Rapid structure characterization of bacterial aggregates, Environ. Sci. Technol., 32(23), 3735-3742.
7) 고영송, 남상호, 1994, 응집처리시 잔류알루미늄의 농도와 플록의 특성, 한국수질보전학회지, 10(4), 435-442.
8) Kim, S. H. and C. H. Yoon, 2000, Reducing residual aluminum concentration at water treatment plant by improving filtration performance, Environmental Engineering Research, 5(4), 207-212.