

급속혼화공정에서 응집제 주입률에 따른 미세입자의 성장특성 Characteristics of Micro Floc in a Rapid Mixing Step at Different Coagulant Dose

전항배* · 박상민 · 박노백 · 정경수

Jun, Hang-Bae* · Park, Sang-Min · Park, Noh-Back · Jung, Kyung-Su

충북대학교 환경공학과

(2007년 2월 12일 논문 접수; 2007년 3월 16일 최종 수정논문 채택)

Abstract

Effects of alum dosage on the particle growth were investigated by monitoring particle counts in a rapid mixing process. Kaolin was used for turbid water sample and several other chemicals were added to adjust pH and ionic strength. The range of velocity gradient and mixing time applied for rapid mixing were $200\sim 300\text{sec}^{-1}$ and $30\sim 180$ sec, respectively. Particle distribution in the synthetic water sample was close to the natural water where their turbidity was same. The number of particles in the range of $10.0\sim 12.0\mu\text{m}$ increased rapidly with rapid mixing time at alum dose of 20mg/L , however, the number of $8.0\sim 9.0\mu\text{m}$ particles increased at alum dose of 50mg/L . The number of $14.0\sim 25.0\mu\text{m}$ particles at alum dose of 20mg/L was 10 times higher than them at alum dose of 50mg/L . Dominant particle growth was monitored at the lower alum dose than the optimum dose from a jar test at an extended rapid mixing time (about 120 sec). The number of $8.0\sim 14.0\mu\text{m}$ particles was lower both at a higher alum doses and higher G values. At G value of 200sec^{-1} and at alum dose of $10\sim 20\text{mg/L}$, residual turbidity was lower as the mixing time increased. But at alum dose above 40mg/L and at same G value, lower residual turbidity occurred in a short rapid mixing time. Low residual turbidity at G value of 300sec^{-1} occurred both at lower alum doses and at shorter mixing time comparing to the results at G value of 200sec^{-1} .

Key words: Rapid mixing, particle growth, alum dosage, velocity gradient (G), mixing time

주제어: 급속교반, 입자성장, alum 주입량, 속도경사 G, 교반시간

1. 서론

정수처리에 있어서 급속혼화(교반)공정은 응집제

를 공정수내에 빠르고 균일하게 분산시킴으로써 입자의 불안정화를 유도하는 공정으로 후속공정인 응집-침전-여과공정의 효율에 직접적인 영향을 미치는 중요한 단계이다. 특히, alum이나 철염과 같은 응집제

*Corresponding author Tel: +82-43-261-2470, FAX: +82-43-271-7976, E-mail: jhbcbe@cbnu.ac.kr (Jun, H.B.)

를 사용할 경우 응집제의 가수분해가 순식간에 일어나고, 이러한 가수분해 생성물이 콜로이드 입자에 흡착되는 반응 또한 매우 빠르게 일어나기 때문에 더욱 중요하다(Amirtharajah, 1982).

이러한 급속혼화에 영향을 줄 수 있는 인자로는 원수의 특성과 온도, 응집제의 종류와 주입량, 오염 물질의 농도, 급속교반조 및 임펠러의 형상과 교반강도(속도경사 G)와 교반시간 t 등이 있다. 급속혼화공정의 주요목적은 응집제를 공정수내에 빠르고 균일하게 분산시켜 입자들의 불안정화를 유도하는 것이다. 이와 동시에 불안정화된 콜로이드는 서로 충돌하여 보다 큰 입자로 성장하게 되므로 응집제의 가수분해반응과 충돌에 의한 입자들의 접촉이 중요한 고려사항이 된다(Amirtharajah, 1981; O'Melia, 1982; Benefield et al., 1982).

일부 선행 연구자들은 흡착·전하중화의 화학이론에 근거하여 1초 이내의 완전혼화를 이룰 수 있는 급속혼화장치를 권장한 바 있고(Hudson and Wolfner, 1967; Vrale and Jordan, 1971; Kawamura, 1976), Camp(1968)와 Letterman et al.(1973)은 $1\mu\text{m}$ 이상의 입자들이 유체의 속도경사나 침전속도차에 의해 더 큰 입자로 생성되는 Orthokinetic 메카니즘에 초점을 맞추어 수분의 혼화시간을 제시한 바 있다. Amirtharajah와 Mills(1982)은 흡착·전하중화에 의한 응집 메카니즘을 위해서는 원수 내에 응집제를 빠르게 분산시키는 것이 0.01~1초 내에서 형성되는 $\text{Al}(\text{III})$ 가수분해종과 오염 물질을 반응시킴으로써 불안정화를 유도할 수 있다고 하였다. 이와는 대조적으로 1~7초에 형성되어지는 hydroxide precipitate에 의한 sweep 응집에서는 짧은 분산시간과 높은 혼화강도가 전하중화 메카니즘에서와 같이 중요하지는 않으며, 급속혼화 조건과 응집 효율은 무관하다고 하였다. 한편 Camp(1955)는 물리적 인자인 교반강도와 교반시간을 묶어 $G \cdot t$ 값을 설계 및 운전인자로 제안하였는데, Lai(1975) 등은 실제 적용에 있어서는 같은 $G \cdot t$ 값으로 운전할지라도 각기 다른 G 값과 혼화시간에 대해 급속혼화 효율이 다르게 나타나는 문제점을 지적하였다.

ASCE 및 AWWA의 설계지침은 속도경사를 $700 \sim 1,000\text{sec}^{-1}$, 체류시간을 $20 \sim 60\text{sec}$ 로 제시하고 있다. Camp 등은 후속공정인 응집 및 침전공정에 적합한

최적의 flocc 특성이 조장될 수 있는 조건으로 1~2분간의 급속교반을 제시하였으며, 일본 상수도시설기준에서는 100초 이상의 체류시간을 제시하고 있다. 반대로 Amirtharajah나 Kawamura 등은 응집제의 동력학적 수화반응 특성을 고려하여 1초 이내의 순간혼합을 제시하고 있다.

Park(2006) 등은 다양한 G 와 t 값을 변화시켜가며 최적의 응집제 주입량(표준 jar test 조건)에서 미세입자들의 수를 관찰한 연구결과 $8\mu\text{m}$ 이상의 입자 수는 $G 200\text{sec}^{-1}$ 일 때 150초에서 가장 컸으며, 180초 이상에서는 입자의 파괴로 오히려 감소한다고 하였다. 또한, $8\mu\text{m}$ 이상의 입자가 최대가 되는 급속교반조건일 때 Jar test 결과 잔류탁도가 최소가 되는 것으로 나타나, 미세입자 성장이 최적인 급속교반조건이 탁도제거를 위한 최적의 조건이라고 하였다.

본 논문은 제한된 속도경사 G 와 교반시간에서 응집제 주입량을 변화시켜 가며 급속혼화공정에서 불안정화 된 입자들의 성장과정을 관찰함을 연구의 목적으로 하며, 응집제 주입률이 미세입자의 성장에 미치는 영향을 규명하고, 후속공정에서 탁도제거 특성과의 관계를 파악하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 원수특성

합성원수와 자연수내 입자들의 응집특성을 파악하기 위하여 jar-test를 수행하였다. 합성원수는 수돗물에 Kaolin(Shinyo chemical, Osaka, Japan)을 첨가하여 탁도를 10NTU로 조절하였다. 충분히 건조시킨 5g의 Kaolin을 400mL의 증류수와 격렬하게 혼합시킨 후 증류수로 1L를 제조하였다. 이 용액을 24시간 방치 후 상등액 600mL을 채취하여 stock solution을 만들었고, jar-test 전에 제조하여 24시간 침전 후 상등수를 채취하여 수돗물과 혼합하여 합성원수를 제조하였다.

Table 1. Raw water quality

Item	Synthetic raw water	Natural raw water
Turbidity (NTU)	10	10
pH	7.75	8.14
Temp. (°C)	20.0	22.2
Alkalinity (mg/L as CaCO_3)	50~55	45~50

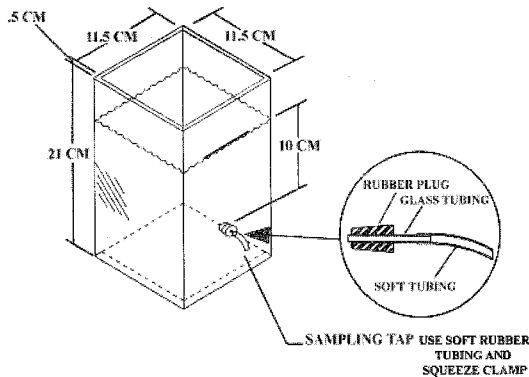


Fig. 1. 2-liter square jar for bench scale test (Phipps & Bird).

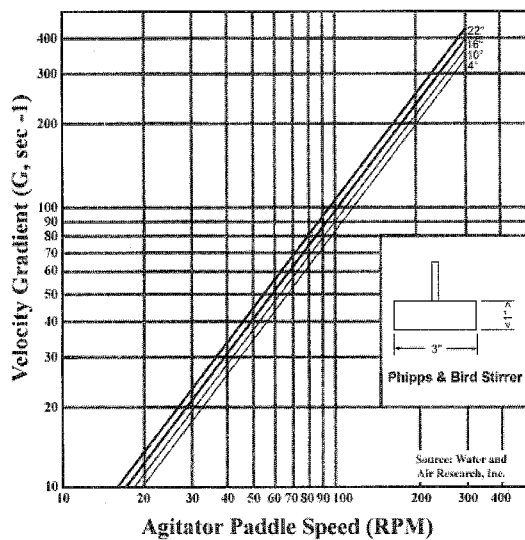


Fig. 2. Velocity gradient (G value) according to RPM for 2-liter jar (Phipps & Bird).

여 실험하였다.

2.2. 시약 및 장치

응집제는 고반($Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$)을 0.1%로 제조하여 사용하였고, 알칼리보조제는 $NaHCO_3$ 를 사용하였다. Jar-test는 Phipps & Bird 사의 2L Jar를 사용하였다(Fig. 1). Jar의 규격은 가로, 세로, 높이 11.5 × 11.5 × 21cm이고, 수면으로부터 10cm 아래에 샘플을 채취할 수 있는 밸브가 있다. 임펠러의 크기는 가로, 세로 각각 7.62cm, 2.54cm이고, 임펠러 회전속도에 따른 교반강도(G)는 Phipps & Bird 사에서 제시한 Fig. 2를 적용하였으며, 400rpm 이상의 교반

Table 2. Experiment condition

Item	
Rapid mix velocity gradient (sec^{-1})	200, 300
Slow mix velocity gradient (sec^{-1})	20
Slow mix velocity (RPM)	45
Rapid mix time (seconds)	10~180
Slow mix time (minutes)	10
Sedimentation time (minutes)	30

속도에 대한 G값은 이 그림에 있는 직선을 연장하여 추정하였다. 교반기는 고속(3,000rpm) 및 일반 교반 장치(400rpm)를 사용하였고, 급속혼화조건에서 입자들의 성장 및 응집특성을 파악하기 위하여 Particle counter(Model SBSS-C, PAMAS)를 사용하여 입도분포를 분석하였다.

2.3. 실험방법

합성원수 2L를 Jar에 채우고, $G(sec^{-1})$ 값을 변화시켜 가며 급속교반 중 샘플을 취하여 Particle counter로 입자수를 측정하여 입자들의 성장특성을 관찰하였다. 잔류탁도는 급속교반 후 연속해서 완속교반(10분, 45rpm), 침전(30분) 후 샘플을 채취하여 측정하였다. 응집제 주입 후 급속혼화시간에 따라 입자수가 감소, 증가하는 경향이 구분되는 입자크기 $8\mu m$ 를 기준으로 결과를 정리하였다. 모든 실험은 급속혼화 후 pH가 7.0이 되도록 조절하였고, 이와 함께 입자의 감소, 증가 경향과 잔류탁도와의 상관성을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 원수의 입자분포 특성

Fig. 3은 탁도가 10NTU인 Kaolin으로 제조된 합성원수와 자연수(대청원수)의 입자크기별 입자수를 나타낸 것이다. Kaolin을 이용하여 본 연구의 실험방법으로 합성원수를 제조할 경우 비슷한 탁도에서 일반적인 자연원수와 입자분포 특성이 유사한 것으로 나타났다. 입자의 크기가 $8\mu m$ 이하의 입자들이 합성원수는 99.8%, 자연수는 97.8%이었다. 자연원수내에 $10\mu m$ 이상의 큰 입자수가 더 많은 것은 조류와 같은 다양한 입자들이 포함되어 있기 때문인 것으로 생각되며, 합성원수의 경우 Kaolin 입자가 대부분이기

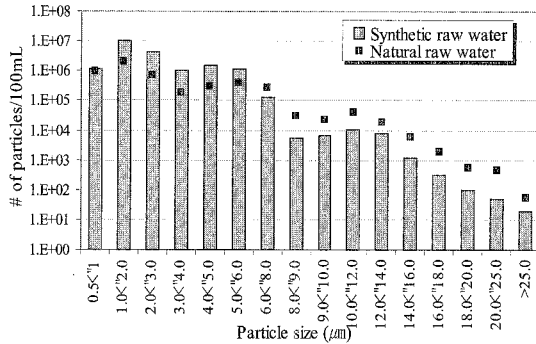


Fig. 3. Particle size distribution of the synthetic raw water and natural lake raw water around 10 NTU.

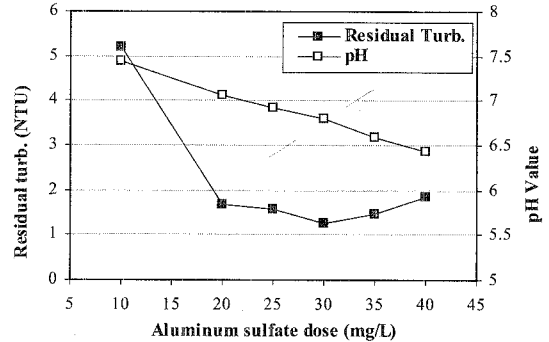


Fig. 4. Effect of alum dosage on residual turbidity and pH of synthetic raw water after coagulation.

때문에 24시간 이상 정체시킬 경우 침전되는 것으로 생각된다. 그러나 Kaolin으로 원수를 조성한다 하더라도 동일한 크기의 입자만으로 구성하기 어려우며, 오히려 이러한 Kaolin의 특성이 자연수를 모의하기 위해서는 적절한 것으로 평가할 수 있다.

3.2. 최적 응집제 주입률

최적 응집제 주입률을 결정하기 위하여 Jar test를 시행하였다. Alum 주입률을 10~40mg/L 범위로 하였고, 급속교반은 속도경사, G값을 200sec^{-1} (180rpm)으로 30초, 완속교반은 G값 20sec^{-1} (45rpm)으로 10분, 침전 30분 후 잔류탁도를 측정하였다. 잔류탁도는 20mg/L 이상에서 급격하게 감소하였으며, 그 이상에서는 약간의 차이로 30mg/L까지는 감소하다가 그 이상에서는 약간 증가하고 있다. Alum 주입량이 증가하면서 응집후의 pH는 선형적으로 감소하여 alum 주입량 40mg/L에서는 pH가 6.5 이하로 나타났다. Alum 주입량에 따른 입자성장이나 응집 특성을 비교 관찰하기 위하여는 응집후의 pH가 일정해야 하기 때문에 alum 주입량에 따른 pH 감소를 상쇄할 수 있는 알카리제를 주입한 후 응집실험을 수행하여 모든 실험의 응집후 pH가 일정하도록 하였다.

3.3. 응집 초기의 입자거동

응집과정에서 측정되는 입자 수는 원수 내에 있던 입자와 응집제로 인해 생성된 입자 수에 기인한다. 그러나 응집제에 의해 입자가 생성되고, 원수 내의 입자들을 응집시키면서 입자가 성장해 가는 과정에서 작은 입자(8μm 이하) 수는 감소하는 반면 큰 입자

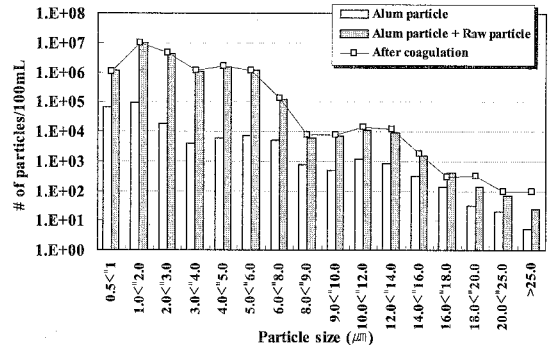


Fig. 5. Particle size and counts distribution after rapid mixing of 30 seconds.

(8μm 이상) 수는 증가하는 결과로 나타나게 된다 (Park et al., 2006). 이와 같은 현상은 원수내의 입자수와 함께 적정량의 alum을 입자가 없는 증류수에 주입 후 동일한 pH에서 입자 수를 관찰함으로써 비교할 수 있다. Fig. 5는 합성원수와 증류수에 alum을 30mg/L씩 주입한 후 G값 200sec^{-1} 에서 30초 동안 급속교반 후 바로 입자크기별 분포를 측정한 것이다. 증류수에 alum만 주입한 경우의 입자수는 원수내에 존재하는 입자수보다 입자크기별 크기는 10%에서 적게는 0.1% 정도로 작은 것을 알 수 있다. 이 두 종류의 입자수의 합과 alum 응집 후 입자수를 비교해 보면, 8μm 이하의 입자수는 거의 유사한 반면, 8μm 이상의 입자수는 응집 후의 입자수가 alum에 의해 생성된 입자 수와 원수내 입자 수의 합보다 약간씩 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 alum 주입으로 생성된 입자가 원수내 입자들과 충돌하며 보다 큰 입자로 성장하고 있는 응집이론을 잘 설명해 주고 있다.

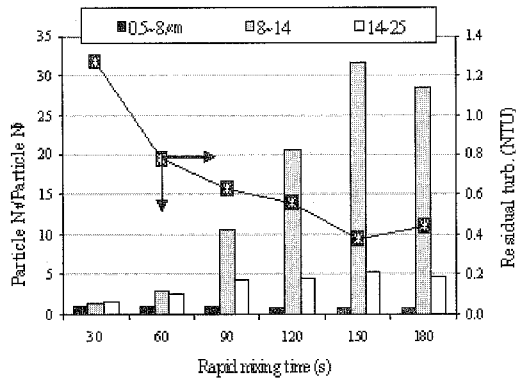


Fig. 6. Effect of rapid mixing time on the particle growth in rapid mixing and residual turbidity; G of 200sec^{-1} , 10 NTU, pH 7, 20°C , Park et al., 2006).

며, 짧은 급속교반시간 내에 수십 μm 정도의 입자들이 성장하고 있음을 설명해 주고 있다.

급속교반과정에서 보다 큰 입자의 생성여부가 응집효율에 큰 영향을 미친다는 연구결과(Fig. 6, Park et al., 2006)는 급속교반조건에 대한 새로운 중요한 사실들을 언급해 주고 있으며, Fig. 5와 같이 $8\mu\text{m}$ 이상의 입자수가 응집 후 증가하는 비율이 클수록 잔류탁도가 낮아지고 있다.

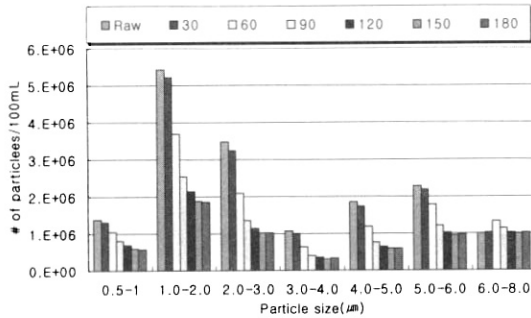
3.4. 최적 $G \cdot t$ 값에 따른 잔류탁도

Fig. 6은 급속교반 조건이 G 값 200sec^{-1} 일 때 교반시간에 따라 $0.5\sim 8\mu\text{m}$, $8\sim 14\mu\text{m}$, $14\sim 25\mu\text{m}$ 범위의 입자수의 변화를 나타낸 것이다. 그림의 종축 값은 초기의 입자수와 alum 주입 후 일정한 급속교반시간 후 입자수를 측정하여 그 입자수의 비를 나타낸 것이다. $8\sim 25\mu\text{m}$ 의 입자는 30초 이후부터 계속 증가하여 150초 일 때 최대가 되며, 그 후부터 감소하는 경향을 보이고 있다. 특히, $8\sim 14\mu\text{m}$ 의 입자는 150초 교반 후 30배 이상 증가하였고, 그 때의 잔류탁도는 0.38NTU로 가장 낮았다. 급속교반이 단순한 응집제의 확산 및 화학반응을 위한 조건만을 제공해 주는 기존의 설계 개념으로는 이러한 입자와의 충돌로 인한 입자성장을 유도해 줄 수 없을 뿐 아니라, 곧 바로 완속교반으로 전환할 경우 입자성장 속도가 느려질 수 있고, 많은 작은 입자들이 충분히 응집되지 않을 가능성이 있을 것으로 판단된다. 급속교반시간 중에 작은 입자들이 충돌하여 큰 입자로 성장하기 위해서

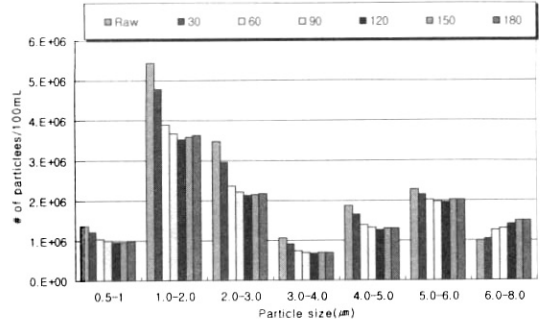
는 속도경사 G 값이 $200\sim 300\text{sec}^{-1}$ 정도에서 $100\sim 150\text{sec}$ 정도가 적당하며, G 값이 너무 크거나 교반시간이 길 경우 오히려 성장된 큰 입자가 파괴될 수 있는 것으로 보고된 바 있다(Park et al., 2006).

3.5. 응집제 주입률에 따른 입자 성장 특성

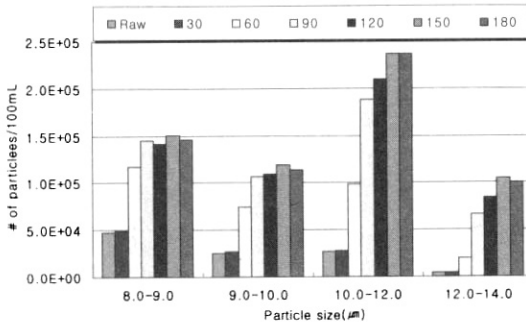
Fig. 7과 Fig. 8은 동일한 급속교반조건(G 200sec^{-1} , pH 7.0, 20°C)에서 alum을 20과 50mg/L 주입하였을 경우 교반시간에 따른 입자들의 성장특성을 나타낸 것이다. 합성원수 중에 가장 많은 부분을 차지하는 $1.0\sim 2.0\mu\text{m}$ 입자들은 alum을 20mg/L 주입한 경우 교반시간이 30초 이상부터 급격하게 줄어들어 150초 후에는 약 75% 정도 감소하였다. Alum을 50mg/L 주입한 경우에는 같은 크기의 입자수가 교반시간 90초까지 약 35% 정도만 감소하였으며, 교반시간 120초 이상부터는 약간 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 7, 8b)에 있는 $8.0\sim 14.0\mu\text{m}$ 입자 수의 변화에서 큰 차이를 발견할 수 있다. Alum을 20mg/L 주입한 경우 교반시간이 증가하면서 대체로 입자수가 증가하고 있으며, $10.0\sim 12.0\mu\text{m}$ 입자수가 현저하게 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. 반면, Alum을 50mg/L 주입한 경우에는 $8.0\sim 9.0\mu\text{m}$ 입자수의 증가가 크게 나타났고, 절대적인 입자수가 20mg/L를 주입했을 경우 증가한 수의 약 50%정도였다. $14.0\sim 25.0\mu\text{m}$ 입자의 범위에서 교반시간에 따른 입자수의 변화는 20mg/L를 주입한 경우 50mg/L를 주입한 경우보다 10배 정도 큰 것으로 나타났다. 즉, 동일한 교반조건(속도경사, 교반시간, pH, 수온)에서 alum 주입률이 클 경우 급속교반과정에서 입자들의 성장이 오히려 감소하였다. 적정 주입량 이상으로 Alum을 주입할 경우 급속교반과정에서 입자들의 성장이 줄어들고 이는 잔류탁도의 증가로 이어지는 결과로 도출될 수 있다. alum 주입률이 높을수록 생성된 입자수는 증가할 수 있으나, 원수내에 존재하는 하전된 입자들을 응집시키고 이들 입자들이 성장하는 데는 오히려 방해가 될 수 있음을 암시해 주고 있다. 하전된 원수내 입자들을 중화시키고 남은 alum에 의한 입자들은 전기적으로 약한 양(+)의 전하를 갖기 때문에 입자들이 서로 충돌해도 반발력 때문에 큰 입자로 성장하지 못하는 것이거나, alum에 의해서 생성된 입자들의 강도가 낮기 때문에 교반에 의한 전단력에 의해 큰 입자로 성장하



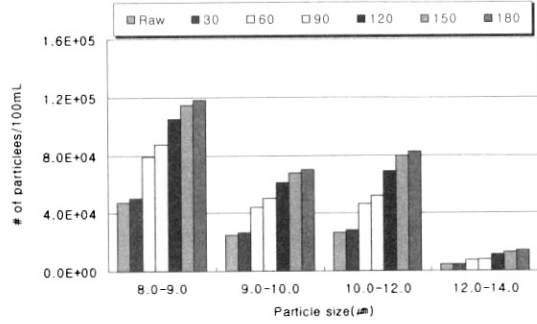
(a)



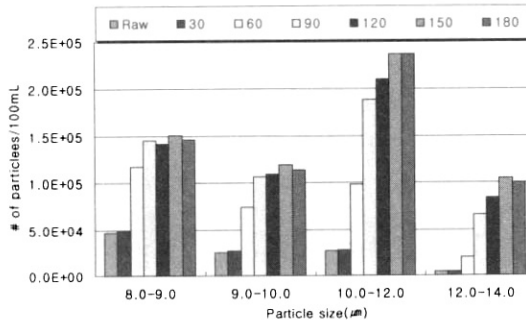
(a)



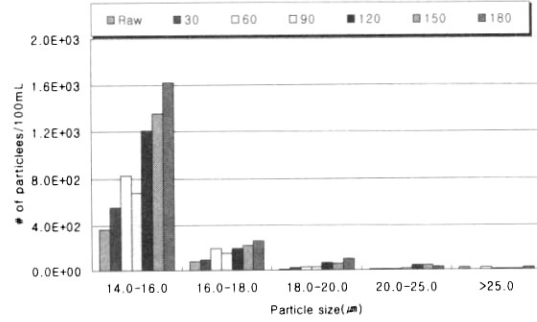
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 7. Particle size distribution at alum dose of 20 mg/L (a: 0.5-8 μm , b: 8-14 μm , c: 14-25 μm at G value of 200 sec^{-1}).

Fig. 8. Particle size distribution at alum dose of 50 mg/L (a: 0.5-8 μm , b: 8-14 μm , c: 14-25 μm at G value of 200 sec^{-1}).

지 못하는 것으로 해석할 수 있다. 속도경사 G값을 300 sec^{-1} 로 증가시켜 위의 동일한 실험을 수행한 결과 20mg/L를 주입한 경우 90초 이상부터, 50mg/L를 주입한 경우 60초 이상부터 14.0~16.0 μm 크기의 입자 수가 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 과량의 alum 주입으로 생성된 alum 입자들은 강도가 낮아 큰 입자로 성장하지 못하고 오히려 파괴되는 것으로 판단할 수 있다. 또한, G값에 관계

없이 큰 입자(8.0 μm 이상)들의 수가 alum 주입률 50mg/L 이상에서 감소하고 있는 것은 전자의 해석을 뒷받침해 주고 있다. 이에 대한 정확한 원인분석을 위해서 좀 더 구체적인 연구가 필요하다고 생각한다.

Fig. 9는 alum 주입량을 10~50mg/L까지 변화시켜 가며, G값을 200 sec^{-1} 로 하고, 온도와 pH는 각각 20 $^{\circ}\text{C}$, 7.0인 동일한 조건에서 급속교반시간에 따라 생성된 입자수를 측정하는 것이다. 8.0 μm 이하의 입자

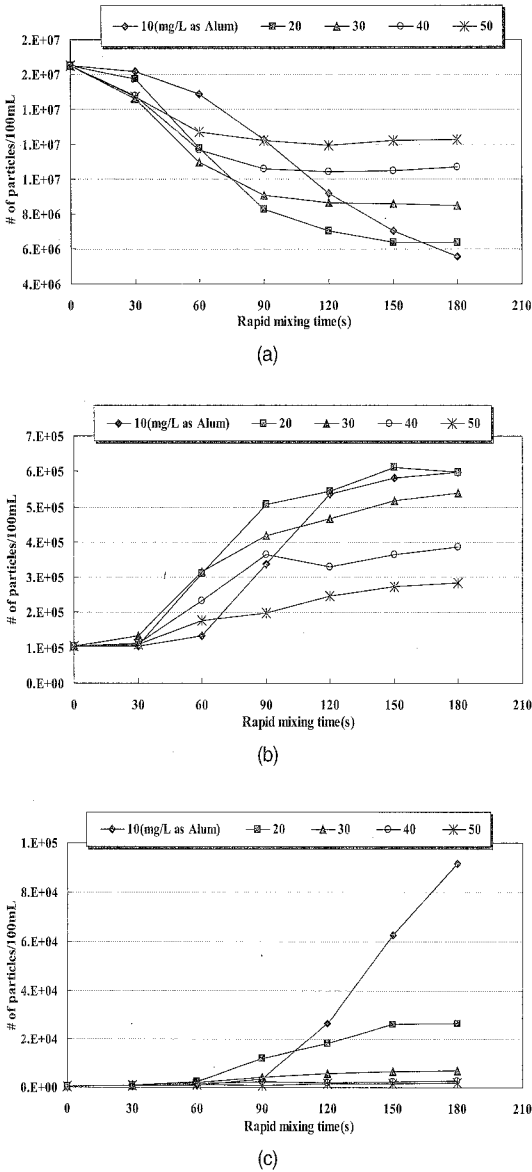


Fig. 9. Particle distribution at different alum dose and mixing time(G 200sec⁻¹, pH 7.0, 20°C, a; 0.5-8µm, b; 8-14µm, c; 14-25µm).

수는 급속교반시간이 증가함에 따라 감소하다가 alum 주입량에 따라 다소 차이가 있으나 120~150초 사이에서 안정된 값을 보이고 있다. 절대적인 입자수는 alum 주입량이 높을수록 크고, alum 주입량 20mg/L까지는 일정한 경향을 갖고 증가하는 것을 알 수 있다. Alum 주입량 10mg/L일 경우 급속교반시간에 따라 입자의 수가 일정한 수치에 접근하는 것이

아니고 계속적으로 감소하여 급속교반시간이 180초 이상에서는 다른 alum 주입량의 경우보다 더 적은 것으로 나타나고 있다. 8.0~14.0µm 크기의 입자 수는 교반시간이 증가함에 따라 증가하는 경향이 뚜렷하며, 대체로 150초 이상이 되면 최대치에 도달하고 있다. 8.0~14.0µm 크기 입자의 총수는 alum 주입량이 클수록 적게 나타났으며, alum 주입량 20mg/L일 때 가장 컸다. 10mg/L일 경우 교반시간이 60초 이상부터 급격하게 증가하여 120초부터는 20mg/L의 경우와 비슷한 것으로 나타났다. 14.0µm 이상의 입자수는 10mg/L일 경우 급속교반시간이 90초 이상부터 급격하게 증가하여 다른 alum 주입량의 경우보다 4배 이상 큰 것으로 측정되었다.

급속교반과정에서 입자들의 성장은 일반 Jar test 결과에서 도출된 최적의 alum 주입량(20~30mg/L)보다 작은 범위에서 급속교반시간을 일정시간(약 120초) 이상으로 제공해 줄 경우 더 양호하게 진행되었다. 최적 alum 주입량 보다 클 경우 급속교반시간에 따른 입자들의 성장은 불량하였으며, 침전 후 잔류탁도가 증가하는 현상을 잘 설명해 주고 있다. 동일한 속도경사, G 값에서 급속교반시간이 증가하게 되면, 초기에는 입자들의 성장이 파괴현상보다 우세하여 작은 입자 수는 줄고 큰 입자 수는 증가하다가 어느 정도 이상의 시간이 경과하게 되면 큰 입자들의 파괴현상이 우세하게 되어 큰 입자 수가 줄고, 동시에 작은 입자수가 증가하게 된다(Park et al., 2006). 이러한 입자들의 파괴현상은 여러 문헌에서 언급되고 있으나, 급속교반조건에 따라 각 입자들의 역할에 대한 연구 결과는 거의 없었다. 각 문헌에서 제시하고 있는 최적의 급속교반(혼화)조건은 속도경사 G 값과 급속교반시간 t 를 각 국가 상수도시설기준의 값으로 제한한 상태에서 응집제 주입량 및 pH 등과 같은 수질조건을 최적화 한 것이다. 그러나 본 실험과는 수질조건을 일정하게 유지한 채 응집제 주입량과 G 및 t 값을 변화시켜가며 입체적으로 조사한 것이다. 실험결과로부터 최적의 응집제 주입량이나 그 이하에서 급속교반시간을 증가시켜 줄 경우 오히려 큰 입자들의 생성이 향상되는 것으로 나타나고 있다.

Fig. 10은 alum 주입량을 10mg/L에서 50mg/L까지 변화시켜가며 속도경사, G 값을 200, 300sec⁻¹로 하고, 교반시간이 120초일 경우 입자크기별 입자수의 분포

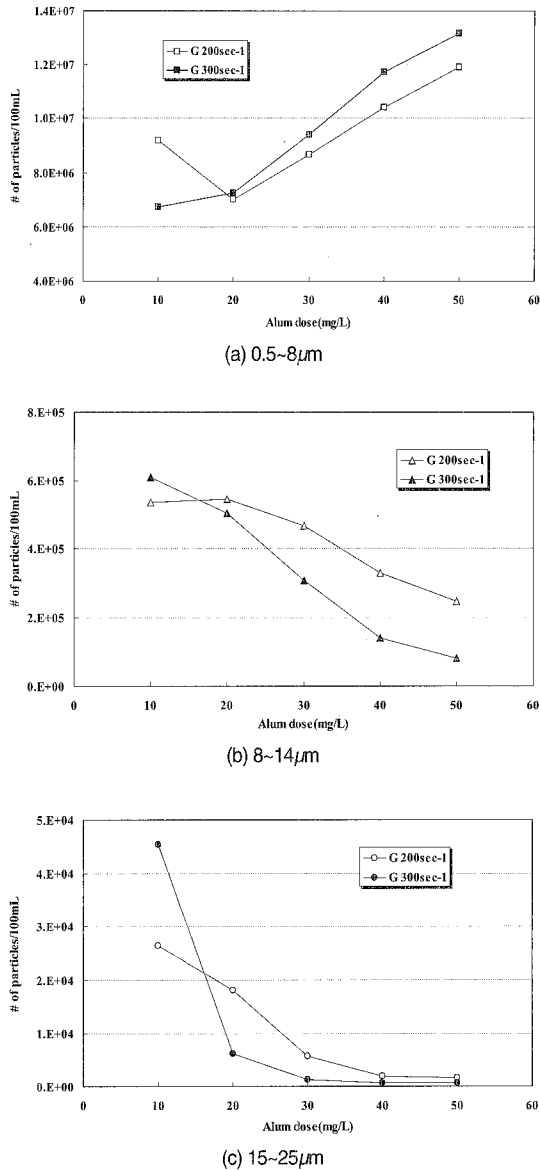


Fig. 10. Number of particles at mixing time of 120sec vs. Alum dose.

를 나타낸 것이다. 이 그림에서 alum 주입량이 20mg/L, G값이 200sec⁻¹일 경우에만 8.0 μ m 이하의 입자수가 감소하였고, 그 이상의 alum 주입량에서는 모두 증가하고 있다. 또한, 8.0~14.0 μ m 크기의 입자수도 alum 주입량 20mg/L에서만 증가하고 그 이상에서는 감소하고 있다. 이와 동일한 조건에서 G값이 300sec⁻¹일 경우에는 alum 주입량이 증가함에 따라 8.0 μ m 이하의 입자수가 증가하는 것으로 나타났다.

8.0 μ m 이하 작은 입자수의 증가는 8.0 μ m 이상의 입자수의 감소와 동시에 발생하기 때문에 alum 주입량이 증가하면 일정한 급속교반과정에서 입자들의 성장은 감소한다고 할 수 있다. G값이 300sec⁻¹일 경우 alum 주입량이 증가할수록 200sec⁻¹일 때보다 8.0 μ m 이상의 입자수는 더 감소하고 있다. 이러한 결과는 급속교반과정에서 입자들이 충돌에 의해 큰 입자로 성장하지 못하거나, 입자들이 파괴되는 것으로 해석할 수 있다. 큰 입자로의 성장을 유도하기 위해서는 급속교반조건인 속도경사 G, 교반시간 t, 응집제 주입량 등의 인자들을 동시에 최적의 조건으로 만들어 주어야 한다. 즉, G값이 클 경우에는 교반시간을 짧게, 응집제 주입량을 낮게 유지해 주는 것이 입자의 성장에 유리한 것으로 생각된다. 최적의 조건은 응집제 주입량을 일정량 이상 유지해 주는 일반적으로 정수장에서 도입하고 있는 sweep 응집방법보다는 응집제 주입량을 낮게 하고 G값, 특히 t값을 길게 해 주는 것이 유리한 것으로 해석할 수 있다.

3.6. Alum 주입률에 따른 잔류탁도

Fig. 11, 12는 G값이 200sec⁻¹과 300sec⁻¹에서 alum 주입량과 급속교반시간에 따라 완속교반, 침전 후의 잔류탁도를 나타낸 것이다. 먼저 G 200sec⁻¹일 때 급속교반시간별 최소의 잔류탁도는 alum 주입량에 따라 다르게 나타난다. 급속교반시간이 30초일 때에는 alum 주입량이 증가할수록 잔류탁도도 계속 감소하지만, 60초일 때에는 alum 주입량이 40mg/L에서 잔류탁도는 최소가 된다. 급속교반시간이 90, 120초와 150, 180초로 증가함에 따라 최소의 잔류탁도는 alum 주입량이 각각 30 및 20mg/L에서 발생한다. 특히, 급속교반시간을 90초 이상으로 할 경우 alum 주입량이 증가할수록 잔류탁도가 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 또한, alum 주입량이 10~20mg/L일 때에는 급속교반시간이 증가함에 따라 잔류탁도도 감소하였으나, 40mg/L 이상일 때에는 급속교반시간이 짧을수록 잔류탁도가 낮게 나타났다.

한편, G값이 300sec⁻¹일 때에는 급속교반시간별 최소의 잔류탁도는 alum 주입량이 30mg/L 이하에서 발생하였다. 급속교반시간이 30초일 때를 비교해 보면, G값이 200sec⁻¹일 때보다 alum 주입량이 증가할수록 잔류탁도가 더 급격하게 감소하고 있으며, 120초 미만

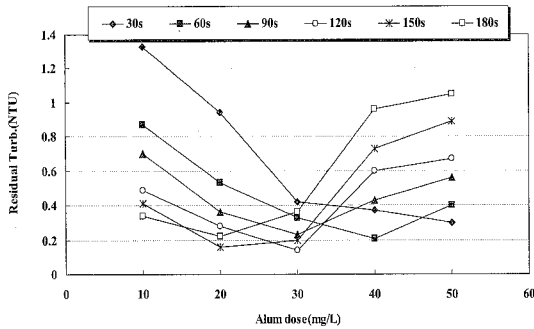


Fig. 11. Effect of alum dose on residual turbidity at different rapid mixing time (G 200 sec⁻¹).

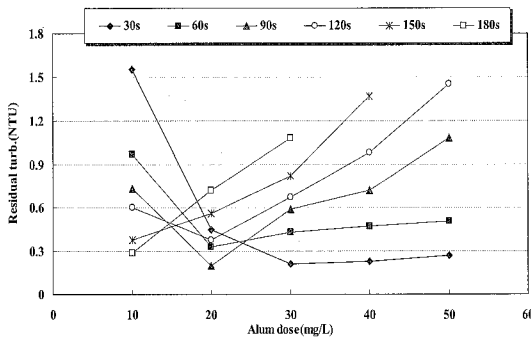


Fig. 12. Effect of alum dose on residual turbidity at different rapid mixing time (G 300 sec⁻¹).

일 때에는 alum 주입량이 20mg/L에서 잔류탁도는 최소가 된 후 급격하게 증가하고 있다. 급속교반시간이 150과 180초일 때에는 alum 주입량이 증가함에 따라 잔류탁도도 계속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 결과적으로 최소의 잔류탁도는 급속교반시간이 120 초 미만일 때, alum 주입량이 20mg/L이었고, 그 이상에서는 10mg/L로 나타났다.

3.7. 결과의 고찰

이상의 결과로부터 급속교반공정은 단순한 응집제와 같은 약품을 원수 중에 균등하게 확산시켜 주는 역할 외에 입자들의 성장에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 급속교반공정 동안 입자의 성장에는 속도경사 G, 교반시간 t, 응집제 주입량 등이 상호 밀접한 관계를 갖으며 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히, 응집제의 주입량이 증가할수록 입자의 성장을 위해서는 G와 t값이 중요한 역할을 하며, 일정한 값

이상에서는 입자들의 성장이 급격하게 저해를 받는 것으로 나타났다. 최적의 입자성장을 위해서는 오히려 응집제 주입량을 낮게 하고 G 및 t값을 좀 더 높게 유지하는 것이 효과적일 수 있다.

일반정수공정에서 적용하는 sweep 응집은 입자들의 정전기적 반발력을 없애기 위한 응집제 주입량보다 10~100배 정도 더 많이 주입하여 응집속도를 빠르게 함으로써 입자의 성장 및 침전분리가 용이하도록 하고 있다. 이 경우 불필요한 교반강도나 교반시간은 오히려 입자성장을 방해할 수 있다는 것이며, alum의 미세입자로 인하여 잔류탁도가 증가할 가능성이 있을 수 있다. 특히, 강화응집(enhanced coagulation)을 적용하여 소독부산물물을 제어하고자 할 경우 급속교반조건을 정밀하게 제어할 필요가 있을 것으로 생각한다. 기존 급속교반 장치의 개선없이 강화응집을 도입할 경우 탁도제거 효율이 크게 감소할 수 있을 가능성이 크다.

일반적으로 급속교반공정은 정수약품의 확산에 초점을 맞추어 설계하고, 완속교반공정은 입자의 성장을 위하여 운영하고 있다. 그러나 자연원수 중에 주로 포함되어 있는 1~2 μ m 정도의 작은 입자들이 침전이 가능한 수 mm까지 성장하기 위해서는 무수히 많은 서로간의 충돌이 있어야 한다. 입자들의 성장을 유도하고 성장속도를 향상시키기 위하여 응집제를 첨가해 주고, 빠르게 큰 입자로 성장할 수 있도록 교반을 해 준다. 미세입자들을 빠르게 성장시키기 위해서는 급속교반으로 활용하는 속도경사 G값과 교반시간이 필요한 것이며, 급속교반과정에서 입자들의 성장이 빠르게 진행됨을 실험결과를 통하여 관찰하였다. 또한, 정수약품의 확산만을 위한 G값의 범위에서는 성장한 큰 입자들이 파괴되는 현상이 관찰된(Park et al., 2006) 바 있다. 특히, 응집제의 급속한 확산을 위하여 적용하는 G값을 점차 더 크게 확보하는 방안이 검토되고 있는데, 이 경우 입자성장에 급속교반시간이 중요한 변수가 될 수 있다. G값이 300sec⁻¹ 이상일 때에는 입자들의 성장속도는 증가하는 대신, 급속교반시간을 60초 이상으로 할 경우 성장한 입자들의 파괴현상이 현저하게 나타날 수 있다. 입자성장만을 위한 급속교반조건은 G값이 200sec⁻¹ 정도에 급속교반시간이 120~150초 정도이다. 이 범위는 기존에 사용해 오던 정수장 급속교반조건과 매우 유사하다는 것

이 흥미 있다.

4. 결론

Alum 주입량에 따른 급속교반공정에서 입자들의 성장특성을 관찰하는 실험연구를 통하여 다음과 같은 실험결과를 도출하였다.

1. 본 실험에 사용한 합성원수는 Kaolin을 사용하여 조제하였으며, 입자의 분포특성은 자연원수와 유사하였다.

2. 표준 Jar test(G 200sec⁻¹, 교반시간 30초, 완속교반(G 20sec⁻¹, 교반시간 10분), 침전시간 30분)를 통한 합성원수의 최적 alum 주입량은 30mg/L이었다.

3. Alum을 20mg/L 주입한 경우 교반시간이 증가하면서 10.0~12.0 μ m 입자수가 현저하게 증가하나, Alum을 50mg/L 주입한 경우에는 8.0~9.0 μ m 입자수가 크게 증가했다.

4. 14.0~25.0 μ m 입자의 수는 20mg/L를 주입한 경우 50mg/L를 주입한 경우보다 10배 정도 큰 것으로 나타났다.

5. 급속교반공정에서 입자들의 성장은 표준 Jar test 결과에서 도출된 최적 alum 주입량(30mg/L)보다 작은 범위에서 급속교반시간을 일정시간(약 120초) 이상으로 제공해 줄 경우 양호하게 진행되었다.

6. G값이 300sec⁻¹일 경우 alum 주입량이 증가할수록 200sec⁻¹일 때보다 8.0 μ m 이상의 입자 수가 더 적었다.

7. G값이 200sec⁻¹일 때에는 alum 주입량이 10~20mg/L일 때 급속교반시간이 증가함에 따라 잔류탁도는 감소하고, 40mg/L 이상일 때에는 급속교반시간이 짧을수록 잔류탁도가 낮았다.

8. G값이 300sec⁻¹일 때에는 G값이 200sec⁻¹일 때보다 alum 주입량이 낮고, 급속교반시간이 짧을 때 잔류탁도가 낮았다.

이상의 실험결과로부터 급속교반공정에서 8 μ m 이상의 입자가 잘 성장할 수 있는 조건일 때 Jar test 결과 낮은 잔류탁도를 얻을 수 있었으며, 8 μ m 이상의 입자가 잘 성장할 수 있는 조건은 1) alum 주입량이

표준 Jar test 결과보다 크지 않을 것, 2) G값을 200sec⁻¹ 정도로 작게 유지할 것, 3) 교반시간을 충분히 제공(120초 이상)해 줄 것 등으로 정리할 수 있었다.

사사

이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Park, S.M., Jun, H.B., Jung, M.S., Koo, H.M. (2006) Effects of velocity gradient and mixing time on particle growth in a rapid mixing tank, *Water Science & Technology*, **53**(7), pp 95-102.
2. Amirtharajah, A., Clark, M.M. and Trussell, R.R. (1991) Mixing in coagulation and flocculation, *American Water Works Association Research Foundation*, pp. 256-281.
3. Amirtharajah, A. and O'Melia, C.R. (1990) *Coagulation process: Destabilization, mixing and flocculation*, Water Quality and treatment, McGraw-Hill.
4. Benefield DL, Judkins JF, Weand BL, *Process chemistry for water and wastewater treatment*, Prentice-Hall, Inc., NJ, USA, 1982.
5. Amirtharajah, A. and Mills, K.M. (1982), Rapid Mix Design for mechanisms of Alum Coagulation, *J. AWWA*, **74**, pp. 210-216.
6. Bratby J.R. (1981), Interpreting laboratory results for the design of rapid mixing and flocculation systems. *J. AWWA*, **73**, pp. 318-325.
7. Kawamura S. (1976) Consideration in improving flocculation, *J. AWWA*, **68**, pp. 328-336.
8. Letterman, R.D., Quon, J.E. and Gemmell, R.S. (1973) Influence of rapid-mix parameters on flocculation, *J. AWWA*.
9. Vrale L. and Jordan R.N. (1971) Rapid mixing in water treatment, *J. AWWA*, **63**, pp. 52-58.
10. Camp T. R. (1968), Floc volume concentration, *J. AWWA*, **60**, pp. 656-673
11. Hudson, H.E., Jr., and Wolfner, J.P. (1967) Design of Mixing and Flocculation Basins, *J. AWWA*, **59**, 1257.