

응집 공정상에서 플럭의 성장 특성 고찰

허재용 · 강익중 · 이상화[†]

경원대학교 화학생명공학과
461-701 경기도 성남시 수정구 복정동 산65
(2005년 10월 31일 접수, 2006년 1월 19일 채택)

The Characteristic Floc Growth in Coagulation and Flocculation Processes

Jae-Yong Heo, Ik-Joong Kang and Sang-Wha Lee[†]

Department of Chemical and Bioengineering, Kyungwon University, San 65, Bokjung-dong, Soojung-gu, Seongnam-shi, Kyunggi-do 461-701, Korea

(Received 31 October 2005; accepted 19 January 2005)

요 약

본 연구의 목적은 응집공정에서 생성되는 플럭의 성장을 가시화하여 PACC의 응집 특성을 고찰하였다. 인공 원수내 탁질 입자의 제타전위는 pH 8~9에서 영으로 수렴하였고 이 영역에서 TDS와 전기전도도가 최소값을 나타내 주었다. 급속 및 완속 교반의 최적 혼화강도가 관측되었으며, 특히 탁도의 제거에 있어서는 급속교반의 속도경사가 가장 낮은 95.1 sec⁻¹에서 최대의 제거율을 나타내었다. 급속교반 후에는 3~5 μm의 작은 입자가 급격히 생성되었으며 교반강도가 클수록 더 많은 수의 입자가 생성되었다. 완속교반이 진행될수록 3~5 μm의 작은 입자의 수는 급격히 감소하였고 7~21 μm의 중간 크기의 입자는 증가하는 경향을 나타내주었다. 23 μm 보다 큰 입자의 경우는 급속교반의 속도경사가 95.1 sec⁻¹에서 가장 많은 수가 생성되었고, 3~5 μm의 작은 입자의 경우에는 급속교반의 속도경사가 760.7 sec⁻¹에서 가장 많이 생성되었다.

Abstract – The characteristic floc growth of Al-based coagulants was investigated in the aspect of mixing intensity and visualization of generated flocs during coagulation and flocculation processes. Zeta potential of turbid particles in the artificial water nearly approached to zero at pH 8-9, in which TDS and conductivity were minimized. The removal rate of turbidity and phosphate was maximized at the optimal mixing intensity of rapid and slow mixing stages. After the rapid mixing stage of coagulation process, small particles (3-5 μm) were abruptly generated, and higher mixing intensity made more numbers of flocs. With the progress of slow mixing stage, the number of small particles were decreased with the simultaneous increase of intermediate particles (7-21 μm). The number of large particles (>23 μm) were maximized at the lowest rapid mixing intensity of 95.1 sec⁻¹, whereas small particles (<5 μm) were maximized at the highest rapid mixing intensity of 760.7 sec⁻¹.

Key words: PACC, Floc Growth, Flocculation, Visualization, Mixing Intensity

1. 서 론

자연수에 존재하는 불순물들은 박테리아, 바이러스와 같은 미생 물질인 유기성 물질과 침적도, 점도 등의 입자성 무기 물질로 분류할 수 있다. 수처리에 있어서 응집/응결 공정들은 분산된 콜로이드성 입자를 제거하는데 공통적으로 사용되며 침전공정과 연계하여 원수내의 음전하를 띠고 있는 콜로이드 입자를 불안정화시켜 커다란 플럭으로 뭉치게 하는 것이다[1]. 최근에는 질소와 인의 함량이 많은 조류성 유기물질이 심각한 수질오염을 일으키는데, 왜냐하면 조류가 생산하는 유기성 물질이 응집제와 결합하여 용해성 알루미늄을

만들고 다량의 응집제를 투입해야하는 문제가 발생되기 때문이다[2].

수처리에 사용되는 응집제는 입자 간의 인력과 반발력을 적절히 최적화하여 서로 뭉칠 수 있게 하는 화학첨가제이다. 일반적으로 응집제가 적게 들어가면 미세입자는 그냥 잔류하게 되고, 과량으로 들어가게 되면 입자 간의 반발력이 증가하여 원수내의 입자 안정도는 증가하게 된다. 그래서 최대의 응집 효과를 얻기 위해서는 응집제가 적절한 양으로 투입되어야 하고 응집중의 수화반응에 수산화물 형성을 최소화하도록 빠르게 분산시키는 것이 필요하다[3]. 원수 중에 존재하는 불순물들을 제거하는 응집처리 공정의 효율을 증가시키기 위해서 응집제의 종류, 첨가물 효과, 염기도 변화, 그밖에 수력학적 인자들(혼화강도, 투여지점에 대한 연구들이 활발히 진행되고 있으나 원수 중에 포함된 오염 성분이 매우 다양하여 실제적인

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: lswha@kyungwon.ac.kr

적용이 어려운 실정이다[4].

응집반응에 의해 형성된 플록은 교반에 따른 1차 입자의 뭉침(aggregation)과 유체의 전단력에 의한 플록 붕괴(breakup)간의 균형에 의해 유지된다. 플록 성장에 영향을 미치는 인자들은 크게 물리화학적 인자들(응집제의 종류, 응집제 투여량, pH, 온도, 입자의 표면특성)과 수력학적 조건들(혼화강도, 체류시간)로 나눌 수 있다[5]. Francois(1988)는 플록의 4가지 성장 단계를 제안한바 있다[6]. 첫 번째 단계에서는 미세플록의 생성이 주로 흡착에 의한 불안정화된 1차 입자의 뭉침에 의해 생성되며, 두 번째 단계에서는 1차 입자와 미세 플록 간의 체거름 응집에 의해 플록의 성장이 진행된다. 세 번째 단계에서는 1차 입자를 거의 다 소비하여 플록의 성장이 느리게 진행되며, 이때 평균적으로 최대의 플록 사이즈를 갖게 된다. 마지막 단계에서는 플록의 숙성(aging) 과정이 진행되며 이때 사이즈의 수축이 일어나게 된다. 플록이 성장하는 완속교반 단계에서는 플록이 깨지지 않고 성장할 수 있는 최소한의 혼화강도가 필요하다[7,8].

알루미늄계 응집제의 경우에는 낮은 pH(pH<3) 조건하에서 Al^{3+} 와 다른 양이온들의 농도가 상대적으로 많이 존재하므로 1차 입자 간의 강한 결합력에 의한 플록의 성장이 이루어진다. 반면에 pH가 중성에 가까울수록 불용성 수산화알루미늄의 형성으로 인해 1차 입자 간 약한 수소결합에 의한 플록의 성장이 이루어진다[9]. 많은 연구자가 플록의 평균사이즈와 혼화강도 간의 상관성을 고찰한 바 있는데 대체적으로 다음과 같은 관계식을 만족하는 것으로 나타났다 [10, 11].

$$d \propto G^{-1/2}, \text{ where } G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad (1)$$

이때 d 는 플록의 직경, G 는 속도경사(sec^{-1}), P 는 물에 가해지는 동력, μ 는 유체의 점도($kg/m\cdot sec$), V 는 반응조 체적(m^3)을 나타내준다[12]. 관계식 (1)에 따르면 속도경사가 증가할수록 플록의 평균 직경은 감소하는 것으로 나타나지만 상대적으로 단단한 플록이 형성된다고 볼 수 있다. 동력 P 의 계산은 (2)식을 이용하여 계산하였다. 여기서 C_D 는 paddle의 형상계수로써 1.2~1.5 값을 가지며 A 는 운동방향에 직각인 패들의 날개 면적(m^2), ρ 는 유체의 밀도 그리고 V_p 는 교반기의 임펠러 회전수(rpm)에 따라 아래의 식으로 주어진다[13].

$$P = \frac{C_D A \rho V_p^3}{2}, \text{ where } V_p \approx 0.70 \frac{\pi \times 0.06 \times rpm}{60} \quad (2)$$

본 연구에서는 일정한 성분의 표준 조제수용액을 제조하여 pH에 따른 Al계 무기고분자 응집제의 응집성능을 고찰하였고, 또한 급속교반 및 완속교반의 혼화강도(속도경사 × 교반시간)에 따른 탁도 및 인의 제거율에 미치는 효과를 비교하였다. 특히 일반적인 정수처리공정상에서 침전 및 여과공정의 전단계인 응집교반단계에서 생성되는 플록의 성상을 가시화하고 생성된 플록의 사이즈 및 입자수를 측정하였다.

2. 실험방법

실험에 사용한 PACC(Polyaluminium calcium chloride, (주)위테크사)는 10 wt% Al_2O_3 함량의 무기고분자 응집제로써 염기도는 70%이다. pH에 따른 원수내 탁질입자의 크기 및 제타전위는 Zeta-Plus를 사용하여 측정하였다. 응집제 주입시 생성된 플록의 사이즈는

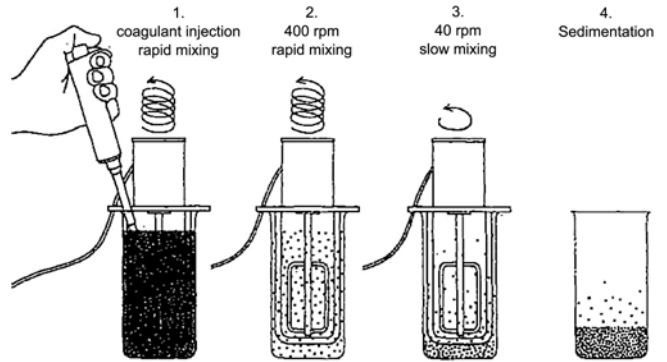


Fig. 1. Schematic diagram of mini-flocculator (Jar-Tester).

PC(particle counter)를 이용하여 입자 크기별 분포를 측정하였다. 응집반응에서 생성된 플록의 성상은 고속 비디오카메라(MotionScope 2000, Redlake Imaging Co.)를 사용하여 이미지를 얻었다. MotionScope 2000은 초당 2,000장의 촬영이 가능한 기기로서 자체스터의 교반상태에서 생성되는 플록들의 이미지를 얻을 수 있었다. 또한, Conductivity Meter를 사용하여 원수의 conductivity, TDS, resistivity를 측정하였다. 인의 분석은 산성조건하에서 PO_4^{3-} 와 Ammonium Molybdate, 아미노 시약과 반응시켜 molybdenum blue 화합물을 형성시키게 되면 530 nm 파장대에서 푸른색을 띠는 Molybdenum 화합물의 UV/Vis 흡광도를 측정함으로써 ppm 단위의 인의 농도를 확인할 수 있다.

Fig. 1에는 교반속도와 침전시간을 조절할 수 있는 소형응집교반기(Flocculator 2000, KEMIRA사)가 나타났다. 자체스터의 일반적인 표준혼화 조건은 급속교반 400 rpm($760.68 sec^{-1}$)에서 30초간, 완속교반 40 rpm($24.05 sec^{-1}$)에서 10분간 수행한 후 30분간의 정지시간을 거쳐 응집반응을 진행하였다. 급속교반의 혼화조건은 각각 100~400 rpm($95.1\sim760.7 sec^{-1}$)의 조건에서 30초간 수행하였고 완속교반의 혼화조건은 20~99 rpm($8.5\sim93.6 sec^{-1}$), 10~30 min의 조건하에서 최적의 혼화강도를 구하였다. 처리수의 상등액은 1.0 L 반응기 수면 5 cm 아래에서 샘플링 하였고 실험은 상온에서 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 조제수의 성상 및 응집효율

PACC를 이용한 응집실험에서 일정한 성상을 유지하기 위하여 HACH사의 formazin으로 처리된 탁도 용액을 희석하여 원수로 사용하였다[14]. Fig. 2(a)에는 원수의 pH 변화에 따른 전기전도도 값과 TDS 값의 변화를 나타내었다. 본 실험에서 사용한 Conductivity Meter는 자체 상관관계식을 이용하여 측정된 conductivity를 TDS로 환산하므로 그 경향이 매우 유사하게 나타났다. pH 8~9 영역에서 전기전도도와 TDS값이 최소값을 보여주는데, 이는 전하를 띤 용존성 입자들의 농도가 상대적으로 적게 존재함을 나타내준다. Fig. 2(b)에는 조제수의 탁도는 20 NTU, 인농도 10 mg/L, 알칼리도 10 mg/L, 온도는 상온으로 유지하면서 원수의 pH 4~11에 따른 PACC(염기도 70%)의 응집효율을 고찰하였다. 그림에서 보는 바와 같이 pH 8~9에서 가장 높은 탁도 및 인 제거율을 나타내 주었다. PACC의 탁도

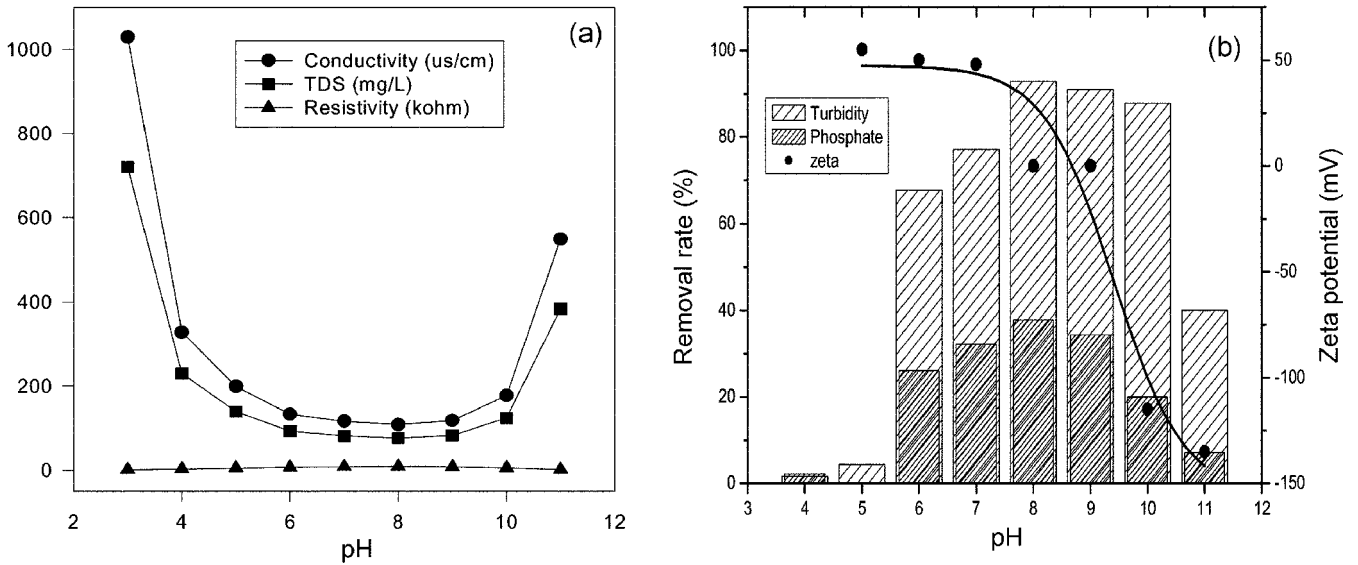


Fig. 2. The characteristic measurements of artificial water with the variation of pH (initial conditions: 12 NTU, 10 mg/L of PO_4^{3-} , 20 mg/L of $CaCO_3$, PACC dosage=30 ppm): (a) Conductivity, TDS, and resistivity, (b) Removal rate and Zeta-potential.

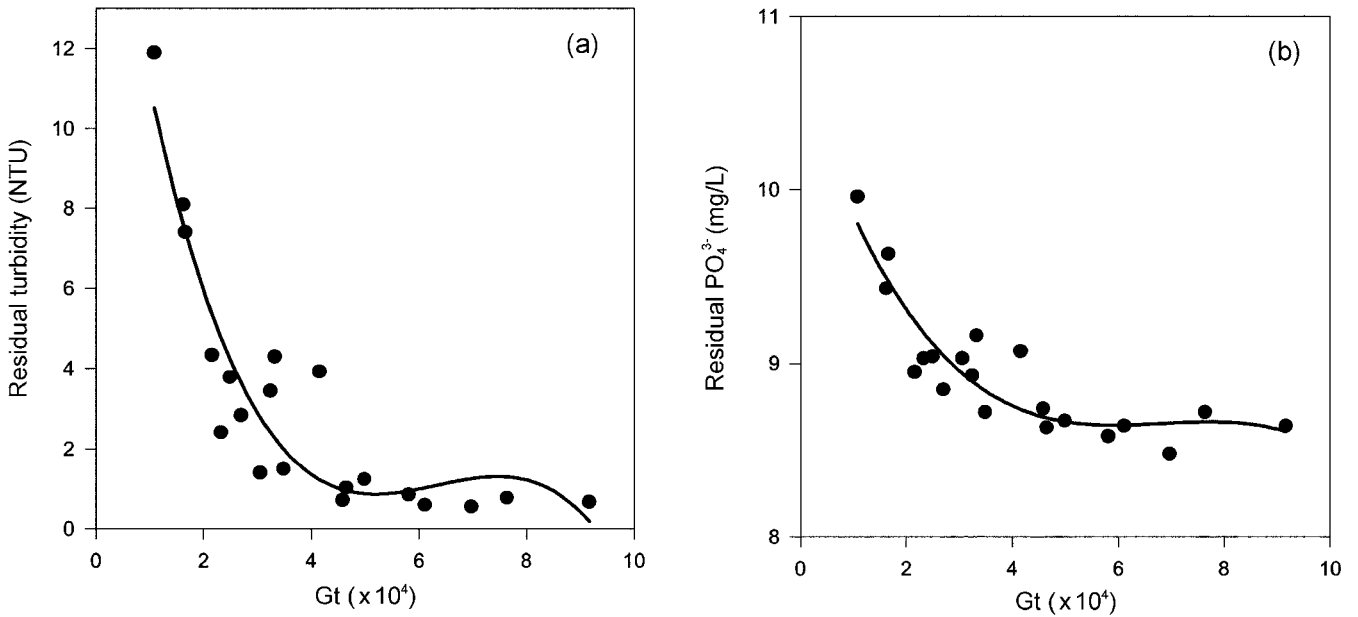


Fig. 3. The effect of slow mixing intensity, Gt , on the coagulation efficacy of PACC (initial conditions: pH8, 12 NTU, 10 mg/L PO_4^{3-} , 20 mg/L of $CaCO_3$, 15 ppm dosage, rapid mixing=100 rpm & 30 sec): (a) residual turbidity, (b) residual phosphate.

제거율은 높게 나타났으나 인의 제거율은 상대적으로 낮게 나타났다. 또한, 제타전위 값은 pH 8~9 사이에서 0으로 접근하고 있으므로 응집효율이 가장 좋은 적정 pH로 판단된다[15].

3-2. 혼화강도에 따른 응집효율

Fig 3에는 원수의 탁도를 12 NTU, 인농도 10 mg/L, 알칼리도 20 ppm/L, PACC 주입량을 15 ppm으로 하여 완속교반의 혼화강도에 따른 탁도와 인의 제거효과를 살펴보았다. 이때 완속교반의 혼화조건은 $8.5 \sim 93.6 \text{ sec}^{-1}$, 10~30 min의 조건하에서 최적의 혼화강도를 구하였다. 급속교반이 95.1 sec^{-1} , 30 sec일 때 완속교반의 Gt

값이 40,000 이상에서 탁도와 인의 응집효과가 가장 좋게 나타났다. Fig. 4에는 급속교반이 494.1 sec^{-1} , 30 sec일 경우에는 적정 Gt 값이 20,000~40,000에 탁도와 인의 최적 제거조건이 존재하는 것으로 나타났다. Fig. 5에 따르면 급속교반이 760.7 sec^{-1} , 30 sec일 경우에는 완속교반의 혼화강도가 응집효율에 미치는 효과가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 결론적으로 탁도 및 인의 제거에 있어서 일정한 급속 교반조건하에서(494.1 sec^{-1} , 30 sec) 완속교반의 적정 혼화강도가 뚜렷하게 나타났으며, 전체적으로 급속교반의 임펠러 회전수가 100 rpm(95.1 sec^{-1})인 경우에 응집효율이 가장 좋게 나타났다.

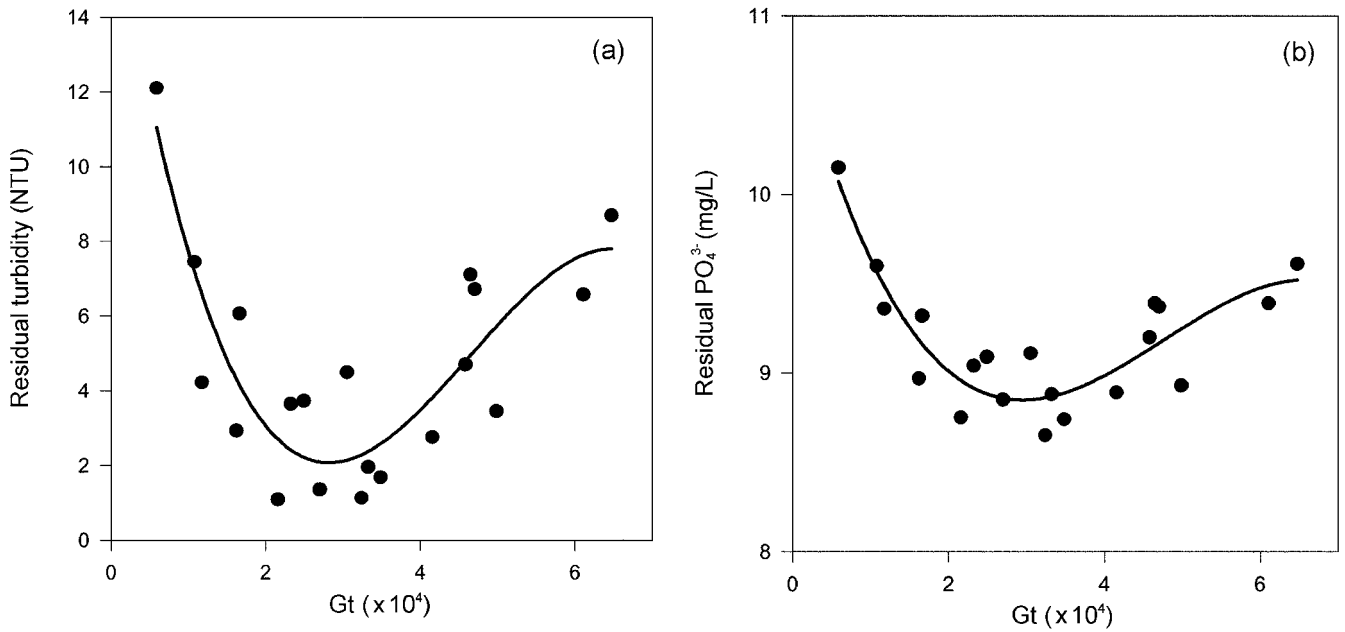


Fig. 4. The effect of slow mixing intensity, Gt, on the coagulation efficacy of PACC (initial conditions: pH8, 12 NTU, 10 mg/L of PO₄³⁻, 20 mg/L of CaCO₃, 15 ppm dosage, rapid mixing=300 rpm & 30 sec): (a) residual turbidity, (b) residual phosphate.

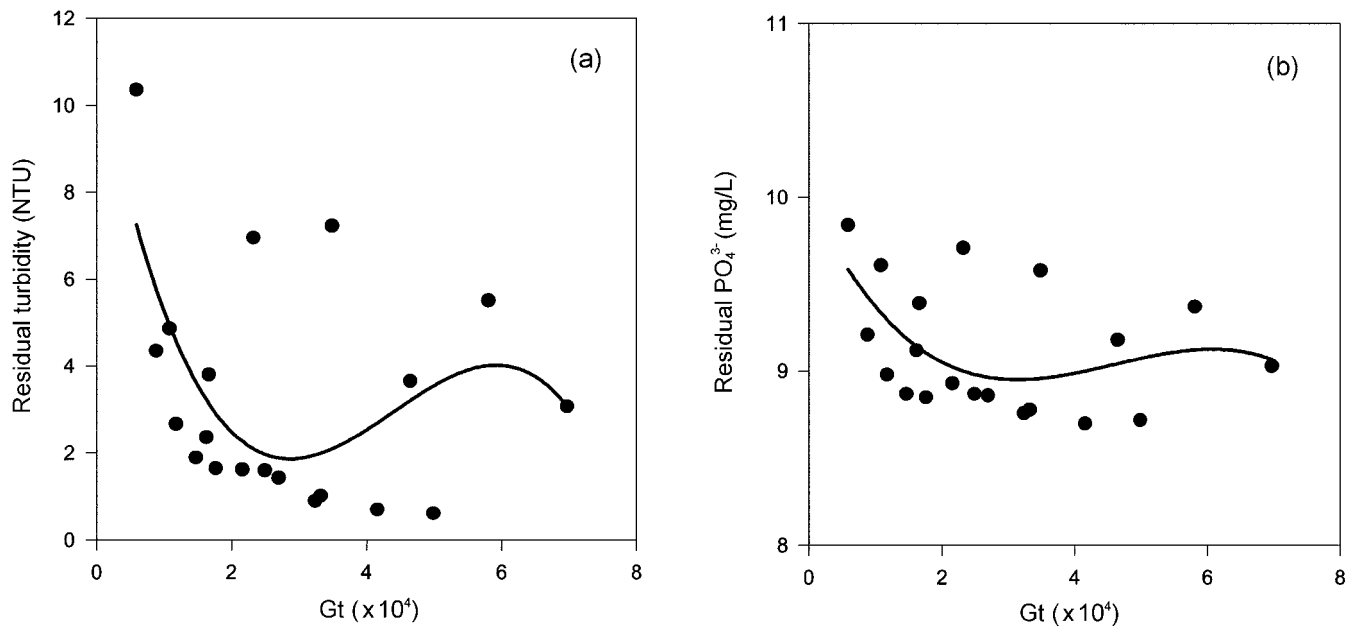


Fig. 5. The effect of slow mixing intensity, Gt, on the coagulation efficacy of PACC (initial conditions: pH8, 12 NTU, 10 mg/L of PO₄³⁻, 20 mg/L of CaCO₃, 15 ppm dosage, rapid mixing=400 rpm & 30 sec): (a) residual turbidity, (b) residual phosphate.

3-3. 응집공정상 플럭의 가시화

응집제 주입에 의해 수중의 탁질 입자들이 엉겨 붙게 되면 이러한 입자들의 엉김 형태를 플럭(floc)이라 한다. 이러한 플럭의 생성은 응집반응의 진행과정을 가시적으로 나타낼 수 있기 때문에 응집반응의 이해에 매우 중요하다. 원수의 탁도를 12 NTU, 인농도 10 mg/L, 알칼리도 10 mg/L, pH 8, PACC의 주입량 17 ppm의 조건하에서 급속교반 300 rpm & 30 sec, 완속교반 30 rpm & 20 min으로 하여 motion scope 2000을 사용하여 2분 간격으로 생성되는 플럭의 이미

지를 얻었다. Fig. 6에 따르면 완속교반이 진행됨에 따라 플럭의 크기와 개수가 증가하는 것을 알 수 있었고, 16분 이상 경과 후에는 더 이상 큰 변화가 나타나지 않았다. 이는 플럭의 성장이 입자 간의 충돌에 의한 뭉침 현상과 교반에 따른 플럭 붕괴 간의 균형에 의해 일정하게 유지되기 때문이다[4]. Fig. 7에는 정치시간에 따른 플럭의 변화를 5분 간격으로 촬영하였는데 정치시간이 경과할수록 플럭의 수가 급격히 감소함을 나타내주고 있다. 이는 형성된 플럭의 무게가 중력 침강이 가능한 충분한 사이즈로 성장했기 때문이다.

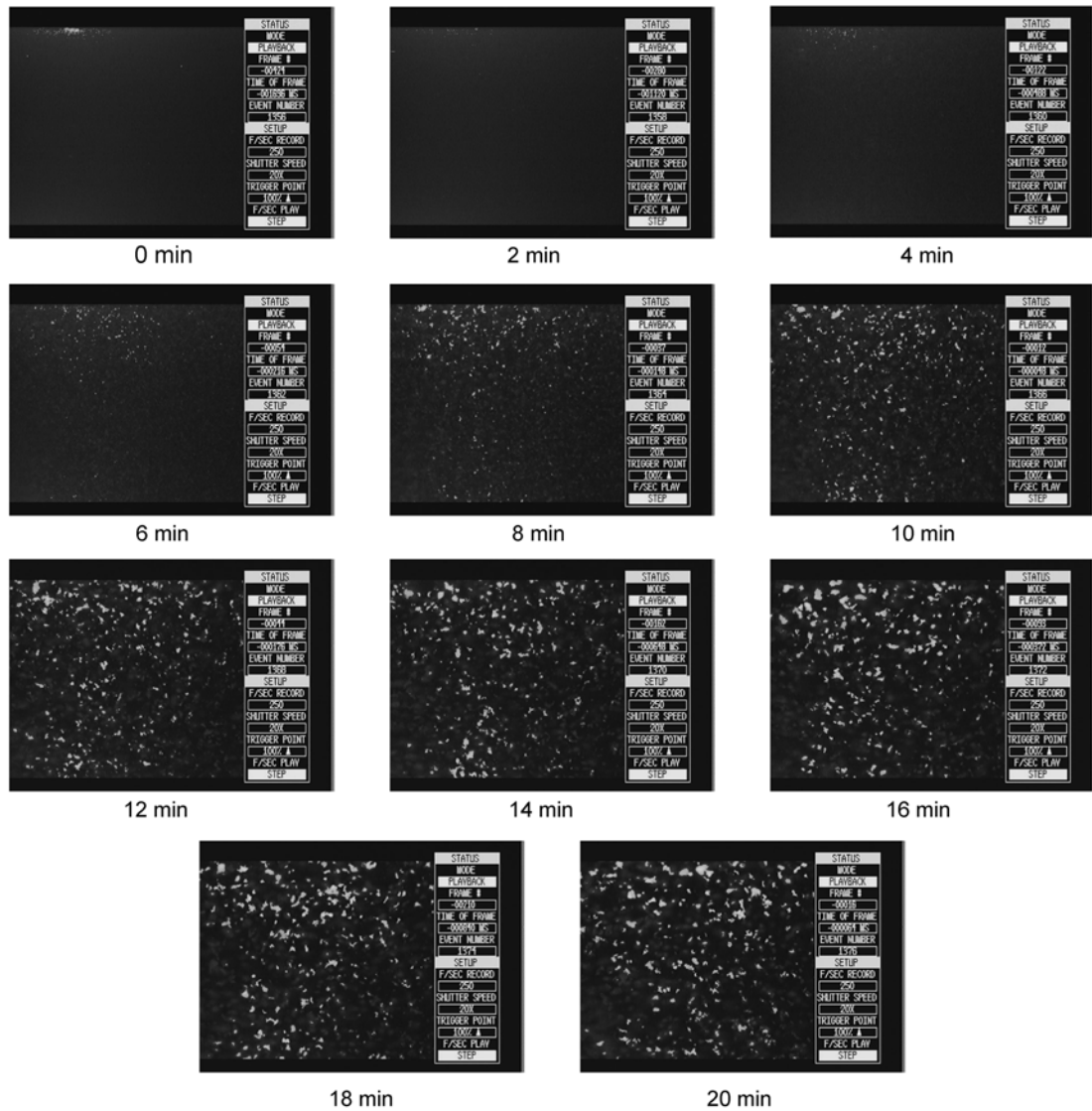


Fig. 6. Floc images captured by Motion Scope 2000 during slow mixing stage of 40 rpm & 20 min (initial conditions: pH8, 12 NTU, 10 mg/L of PO_4^{3-} , 20 mg/L of $CaCO_3$, PACC dosage=17 ppm).

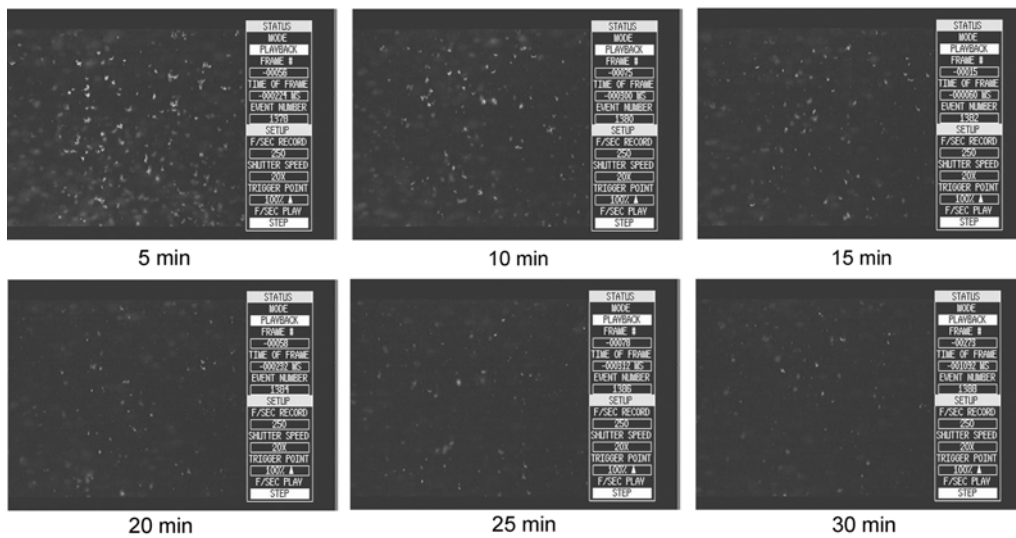


Fig. 7. Floc images captured by Motion Scope 2000 during sedimentation (initial conditions: pH8, 12 NTU, 10 mg/L of PO_4^{3-} , 20 mg/L of $CaCO_3$, 17 ppm of PACC dosage).

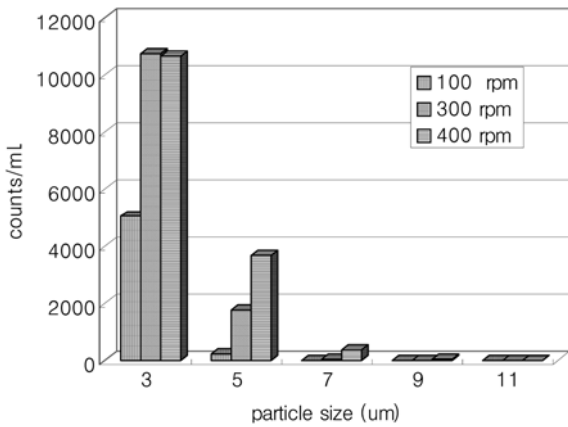


Fig. 8. Particle size distribution after rapid mixing (initial conditions: pH8, 12 NTU, 10 mg/L of PO_4^{3-} , 20 mg/L of $CaCO_3$, 17 ppm of PACC dosage).

3-4. 응집단계별 입도 분포

응집 반응시 생성되는 플록의 크기와 개수의 변화를 관찰하기 위해 시간별로 처리수를 샘플링하여 PC(particle counter)를 이용하여

측정하였다. 이때 원수의 탁도는 12 NTU, 인농도 10 mg/L, pH 8의 조건하에서 PACC 주입량은 17 ppm으로 고정하였다. 급속교반 직후 측정된 입자별 크기 변화는 Fig. 8에 나타나 있는데 급속교반의 속도경사가 100 rpm보다는 300, 400 rpm인 경우에 3 μm~5 μm의 작은 입자가 많이 생성됨을 알 수 있었다.

Fig. 9는 각 응집단계별 생성된 입자 수의 변화를 나타낸 그림이다. 급속교반 직후 생성되는 입자의 크기는 대략 3~7 μm에 분포하는 것으로 나타났으며 9 μm 이상의 입자는 거의 생성되지 않았다. 급속교반 직후 생성된 3 μm 입자의 경우에는 95.1 sec⁻¹에 비해 494.1~760.7 sec⁻¹이 거의 2배 이상 생성되었고 5~7 μm의 입자의 경우에는 400 rpm의 경우 가장 높게 나타났다. 7 μm 이상의 입자는 급속교반보다는 완속교반 직후에 더 많이 생성됨을 알 수 있었다. 또한, 초기 교반 속도가 400 rpm의 경우에 7~13 μm의 입자들은 100 rpm, 300 rpm에 비해 상대적으로 높게 나타났으며, 15~21 μm의 입자들의 개수는 급속교반의 rpm에 따라 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다. 결론적으로 급속교반 직후 생성되는 입자는 주로 3~5 μm에 분포하며 완속교반 직후 생성되는 10 μm 이상의 입자는 오히려 급속교반의 rpm이 감소할수록 증가하는 경향을 나타내 주었다.

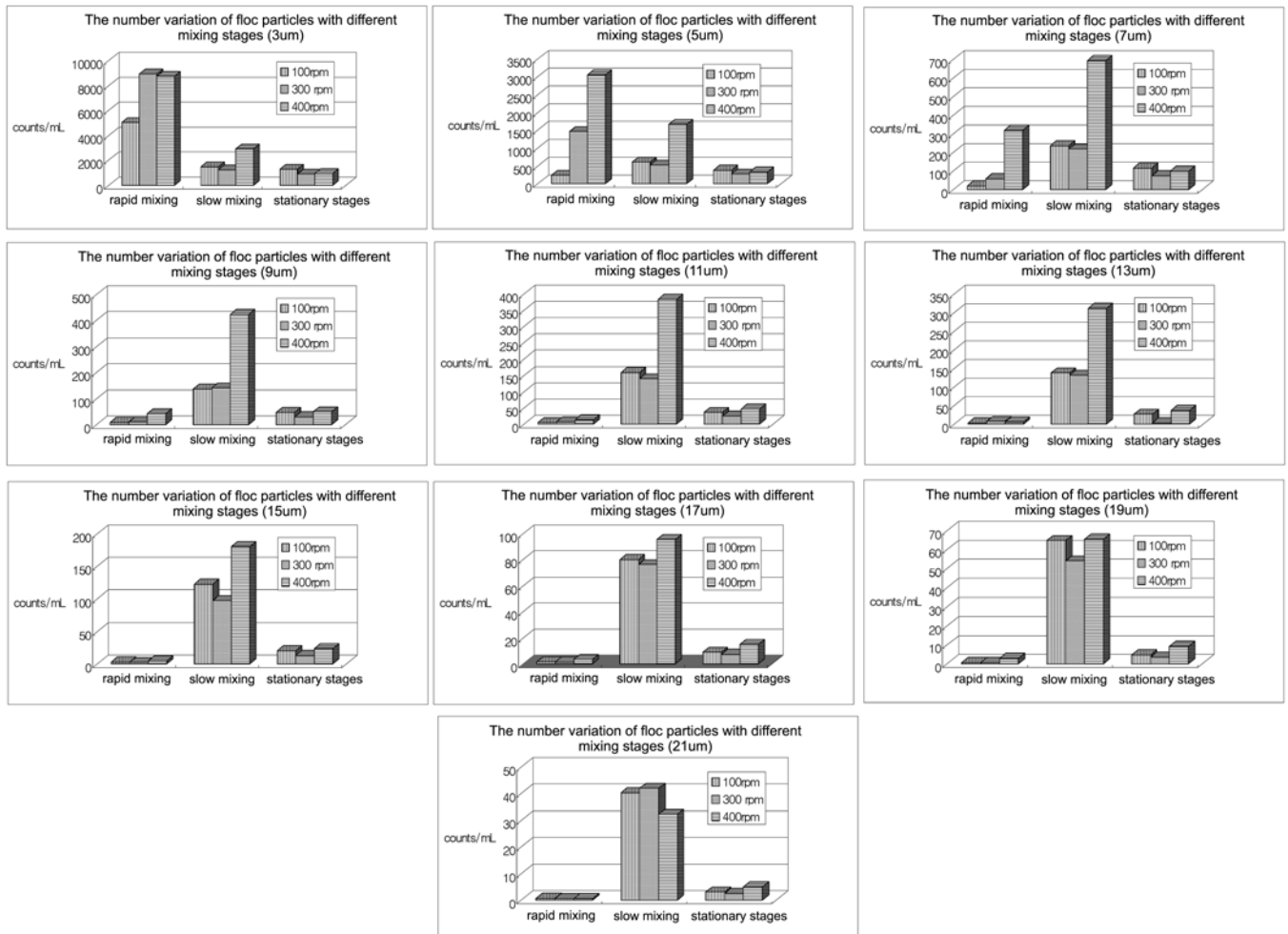


Fig. 9. Particle size distribution after rapid mixing, slow mixing, and stationary stages (initial conditions: pH8, 12 NTU, 10 mg/L of PO_4^{3-} , 20 mg/L of $CaCO_3$, 17 ppm dosage of PACC).

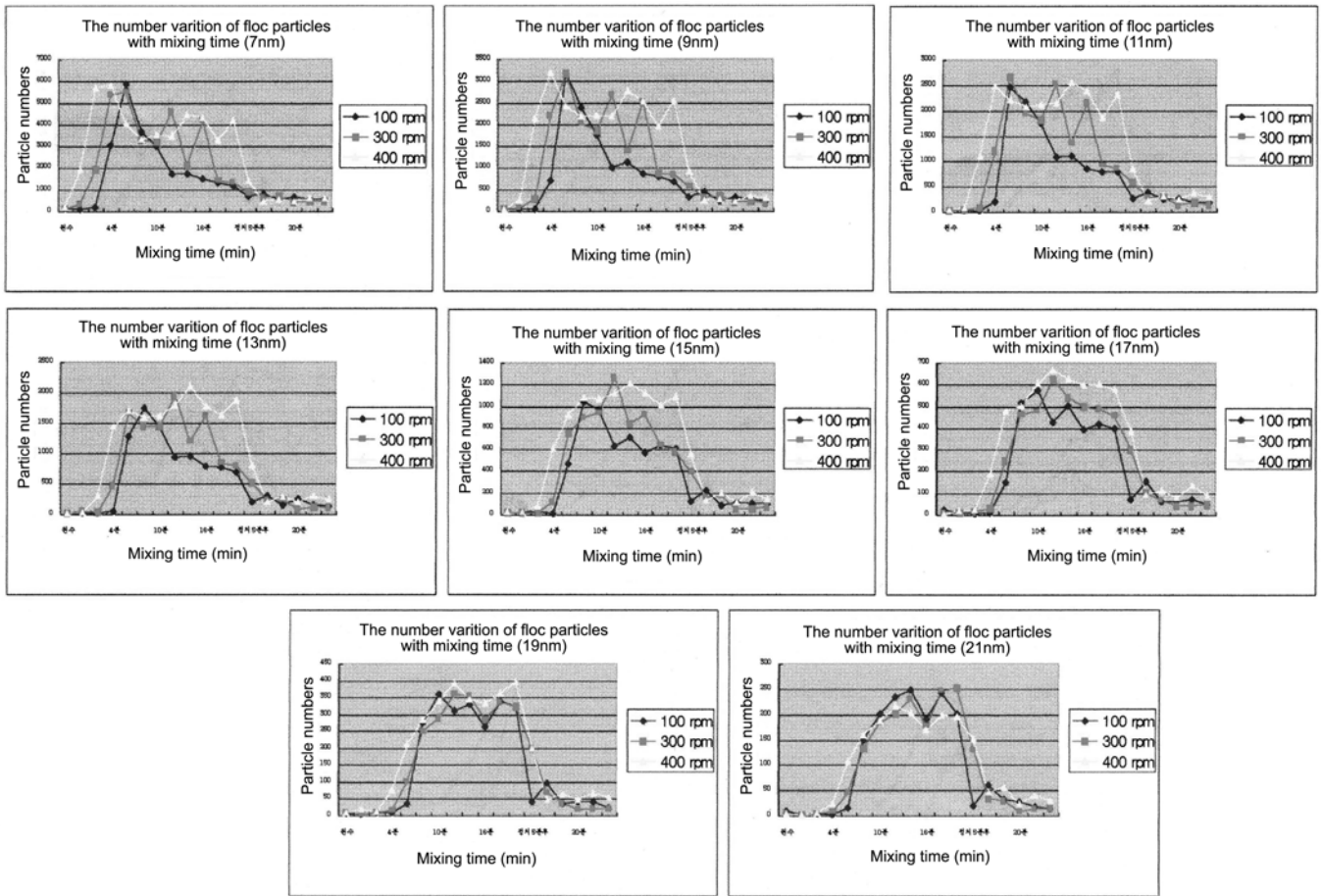


Fig. 10. Particle size variation (9-21 μm) during jar test time (initial conditions: pH8, 12 NTU, 10 mg/L of PO₄³⁻, 20 mg/L of CaCO₃, 17 ppm dosage of PACC).

3-5. 교반에 따른 입도 분포

Fig 10은 완속교반의 진행에 따른 생성된 입자(7~21 μm)의 사이즈 및 수의 변화를 나타낸 그림이다. 급속교반이 300 rpm, 400 rpm으로 증가할수록 생성된 입자의 수가 증가하였으며 완속교반이 완결되는 시점까지 거의 일정하게 유지되었다. 반면에 100 rpm의 급속 교반 후에 생성되는 7~13 μm의 입자들의 경우에는 일정시간이 지난 후 갑자기 증가하다가 감소하는 경향을 나타내었다. 완속교반이 진행됨에 따라 생성되는 15~21 μm의 입자들의 lag time은 점차적으로 증가하는 경향을 나타내 주었으나 급속교반의 rpm에 따른 입자 수의 차이는 뚜렷하게 나타나지 않았다. 예를 들면 약 21 μm의 입자의 경우에는 급속교반의 rpm에 상관없이 생성된 입자의 수가 거의 동일하였다. 급속교반 직후 생성되는 미세 입자는 주로 1차 입자 간 충돌에 기인하며, 완속교반이 진행됨에 따라 생성되는 커다란 입자들은 1차 입자와 미세플럭 간의 충돌이나 체거름 응집에 의해 성장한다. 커다란 입자(> 21 μm)의 경우에는 플럭의 사이즈가 증가할수록 입자 수가 감소하는 경향을 나타내 주었다.

Fig 11은 생성된 입자의 크기가 23 μm~47.5 μm에 분포하는 경우에는 급속교반 속도에 따른 플럭의 개수 차이가 뚜렷하게 나타났다. 초기 급속교반속도가 가장 낮은 100 rpm의 경우에 플럭의 사이즈가 증가할수록 커다란 플럭이 더 많이 생성됨을 알 수 있었다. 이는 초기 급속교반 속도가 클수록 생성되는 플럭의 사이즈가 감소한

다는 이론적 예측과 일치하며, 따라서 생성된 플럭의 강도는 떨어질 것으로 판단된다[16].

4. 결 론

알루미늄계 응집제인 PACC(polyaluminium calcium chloride, 염기도=70%)를 주입시 생성되는 플럭의 성상을 가시화하였고 탁도와 인의 응집특성을 고찰하였다. 최적 응집의 적정 pH 8~9 범위에서 체타전위는 영으로 수렴하였고 전기전도도와 TDS는 최소값을 나타내주었다. 혼화강도(속도경사 × 교반시간)가 PACC 응집체의 효율에 미치는 효과를 고찰하였는데, 탁도 제거율은 가장 낮은 100 rpm의 급속교반에서 가장 높게 나타났다. 특히 급속교반이 300 rpm인 경우에는 완속교반의 적정 혼화강도가 뚜렷하게 나타났는데, 이는 혼화강도가 플럭의 성장 및 응집 효율에 중요한 영향을 미치는 것을 나타내 준다.

급속 및 완속교반이 진행됨에 따라 플럭의 생성이 증가하였고, 완속교반의 최종단계에서는 플럭의 사이즈가 일정하게 유지되었다. 이는 입자 간의 충돌에 의한 응결과 교반에 따른 플럭 붕괴 간의 균형에 의해 플럭의 성장이 균형을 이루기 때문이다. 급속교반 직후 생성된 입자는 3~5 μm의 사이즈가 우세하게 나타났고 급속교반의 속도경사가 클수록 생성되는 입자의 수도 증가하였다. 완속교반이

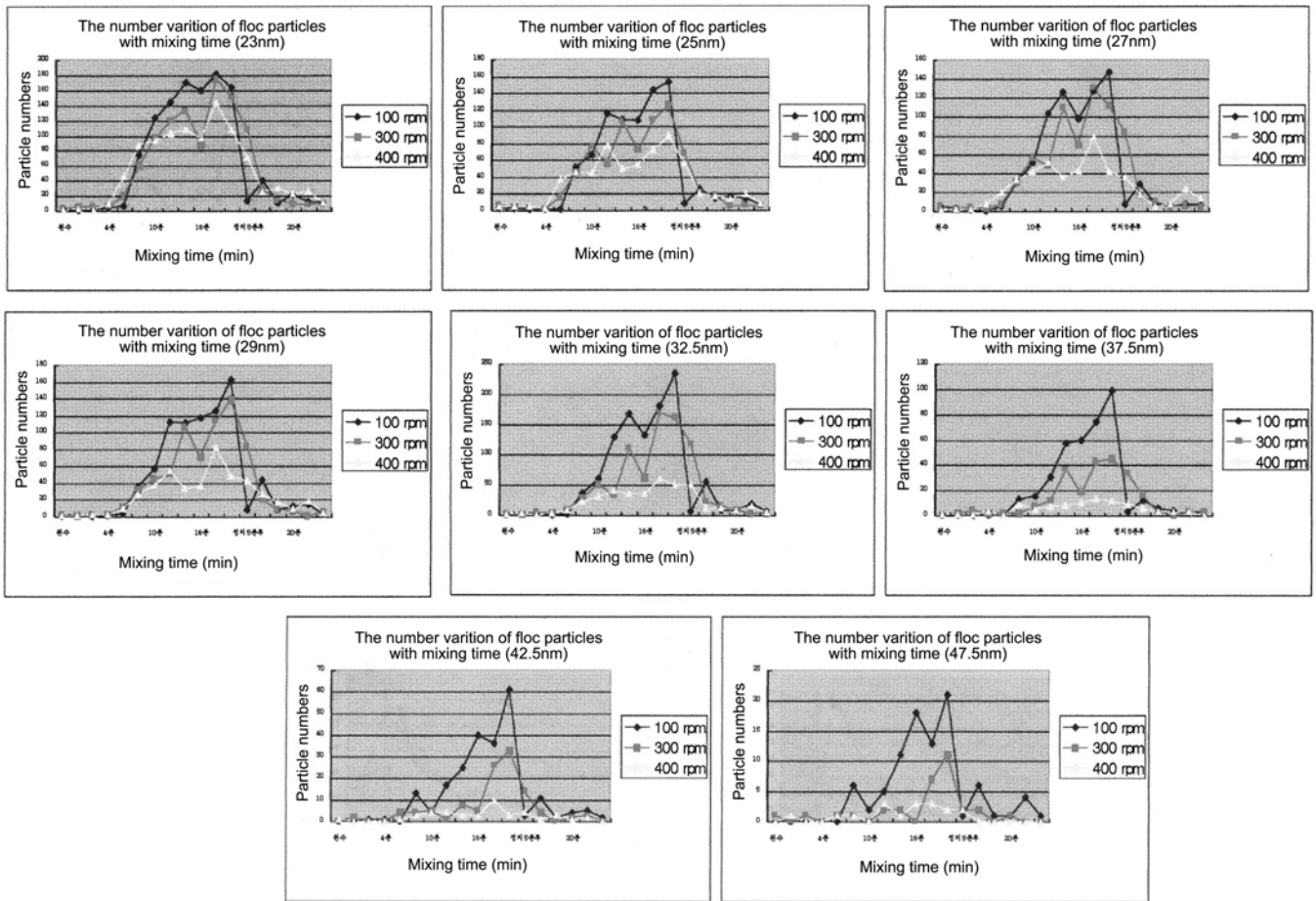


Fig. 11. Particle size variation (23-47.5 μm) during jar test time (initial conditions: pH8, 12 NTU, 10 mg/L of PO₄³⁻, 20 mg/L of CaCO₃, 17 ppm dosage of PACC).

진행될수록 3~5 μm의 작은 입자는 감소하였고 7~21 μm 이상의 입자는 증가하는 경향을 나타내주었다. 가장 낮은 100 rpm의 급속교반에서 23~47.5 μm의 입자가 가장 높게 나타났다. 즉, 초기 급속교반의 혼화강도가 감소함에 따라 커다란 사이즈의 플러이 상대적으로 많이 생성되는 경향을 나타내 주었다. 전반적으로 완속교반이 진행됨에 따라 플러의 사이즈와 lag time이 증가하는 경향을 나타내 주었다.

참고문헌

1. Kemira, K., Handbook on Water Treatment, Helsingburg, Sweden(1993).
2. Lee, C. H., Lee, S. H. and Okada, M., "Removal Algae and Cryptosporidium on Drinking Water Treatment by Polysilicate-Iron Coagulant," *J. of KSEE*, **26**, 876-882(2004).
3. Rossini, M., Garrido, J. G. and Galluzzo, M., "Optimization of the Coagulation-Flocculation Treatment: Influence of Rapid Mix Parameters," *Wat. Res.*, **33**, 1817-1826(1999).
4. Kang, L. S., Han, S. W. and Jun, C. W., "Synthesis and Characterization of Polymeric Inorganic Coagulants for Water Treatment," *Korean J. Chem. Eng.*, **18**(6), 965-970(2001).
5. Bouyer, D., Coufort, C., Line, A. and Do-Quang, Z., "Experi-

- mental Analysis of Floc Size Distribution in a 1-L jar under Different Hydrodynamics and Physicochemical Conditions," *Journal of Colloid and Interface Science*, **292**(2), 413-428(2005).
6. Francois, R. J., "Growth Kinetics of Hydroxide Floccs," *Journal AWWA*, **80**(6), 92-96(1988).
7. (a) Dharmappa, H. B., Verink, J., Fujiwara, O. and Vigneswaran, S., "Optimal Design of a Flocculator," *Water Research*, **27**, 513-519(1993), (b) Han, M. and Lawler, D. F., "The (Relative) Insignificance of G in Flocculation," *Journal of AWWA*, **84**, 79-91 (1992).
8. Jeong, J. K., Yoon, T. I., Seo, H. J. and Kim, J. Y., "Influence of Mixing Intensity on the Biological Wastewater Treatment," *J. of KSEE*, **5**, 67-83(1983).
9. Kwak, J. W., Physico-chemical Principle and Practice of Water Treatment, Yeigigak(1998).
10. Tambo, N. and Hozumi, H., "Physical Characteristics of Floccs-II. Strength of Floccs," *Water Res.*, **13**, 421-427(1979).
11. Wiesner, M. R., "Kinetics of Aggregate Formation in Rapid Mix," *Water Res.*, **26**(3), 379-387(1992).
12. Reynolds, T. D. and Richards, P., Unit Operations and Processes in Environmental Engineering, Boston, PWS Publishing Company(1995).
13. Han, S. W., Lee, C. W. and Kang L. S., "Physical Effect on Syn-

- thesis of Al(III) Polymeric Inorganic Coagulants for Water Treatment," *Korean Chem. Eng. Res.*, **40**(5), 612-618(2004).
14. Lee, K. S. and Lee, S. W., "Removal of Phosphorus and Turbidity in Settling-Aggregation Basin using Solid-type Polymeric Coagulants," *J. of KSEE*, **26**(6), 642-648(2004).
15. Lee, S. W., Lee, K. S., Haam, S. J. and Kwak, J. W., "Phosphorous Removal by Al(III) and Fe(III) Coagulants and Visualization of Floes," *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **16**(1), 74-80(2005).
16. Kim, J. P., Han, I. S. and Chung, C. B., "Monte Carlo Simulations of Colloidal Particle Coagulation and Breakup under Turbulent Shear," *Korean J. Chem. Eng.*, **20**(3), 580-586(2003).