

공학석사 학위논문

액반과 PAC의 최적 응집형성 평가

지도교수 손 인 식

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2002년 8월

부경대학교 산업대학원

건설공학과

박진승

이 논문을 박진승의 공학석사 학위논문으로 인준함

2002년 6월 22일

주 심	공학박사	김	상	용	
위 원	공학박사	이	중	출	
위 원	공학박사	손	인	식	

목 차

List of Table	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi
I 서 론	1
II 문헌연구	4
2.1 알루미늄 가수분해	4
2.2 응집 메카니즘	9
2.2.1 급속혼화	9
2.2.2 이중층 압축(Double layer compression)	10
2.2.3 흡착과 전하중화 (Adsorption and Charge neutralization : Adsorptions / Destabilization)	11
2.2.4 Sweep floc coagulation1	12
2.2.5 입자간 가교작용	13
2.3 유기물의 안정화	15
2.3.1 NOM의 응집 메카니즘	16
III 실험 방법	17
3.1 수산화 알루미늄 형성	17
3.2 알칼리제 제조	18
3.3 자-테스트	18
3.4 입도분포	20
3.5 최적 급속혼화 조건	21

IV 결과 및 고찰	22
4.1 수산화알루미늄 형성	22
4.2 응집제 주입률에 따른 원수 수중 입자 변화	26
4.3 혼화강도 별 수중입자의 변화 특성	38
4.3.1 알루미늄 농도(0.7mg/L)	38
4.3.2 알루미늄 농도(1.4mg/L)	48
4.3.3 알루미늄 농도(2.1mg/L)	58
4.3.4 종합 평가	68
V 결론	79
참고문헌	80

List of Table

- Table 4.1 Variation of tendency with mixing intensity at PACl 13mg/L dose.
- Table 4.2 Variation of tendency with mixing intensity at Alum 20mg/L dose.
- Table 4.3 Variation of tendency with mixing intensity at PACl 25mg/L dose.
- Table 4.4 Variation of tendency with mixing intensity at Alum 40mg/L dose.
- Table 4.5 Variation of tendency with mixing intensity at PACl 38mg/L dose.
- Table 4.6 Variation of tendency with mixing intensity at Alum 60mg/L dose.

List of Figures

- Fig. 2.1 Deprotonation of the aquo aluminum ion. Initial step in aluminum hydrolysis (Letterman, 1991).
- Fig. 2.2 Solubility diagram for $\text{Al}(\text{OH})_3$. monomeric and polymeric Al species in equilibrium with $\text{Al}(\text{OH})_3$.(From Dempsey)
- Fig. 2.3 Aluminum hydrolysis products (Letterman, 1991).
- Fig. 2.4 Alum coagulation diagram(Amirtharajah and Mills, 1982).
- Fig.3.2 Schematic diagram of particle counter system.
- Fig. 4.1 Aluminum hydroxide formation with coagulant dose and coagulation time.
- Fig. 4.2 Particles count variation with coagulant dose and coagulation time for coagulant PACl.
- Fig. 4.3 Particles count variation with coagulant dose and coagulation time for coagulant Alum.
- Fig. 4.4 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at Alum 20mg/L.
- Fig. 4.5 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at PACl 13mg/L.
- Fig. 4.6 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at Alum 40mg/L.
- Fig. 4.7 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at PACl 25mg/L.
- Fig. 4.8 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at Alum 60mg/L.

Fig. 4.9 Particles count variation with mixing intensity
and coagulation time at PACl 38mg/L.

Fig 4.10 Tendency of particles by mixing intensity and coagulant
dose.

Evaluation of optimal coagulation formation by Alum and Poly Aluminum chloride(PACl)

Jin-Seung, Park

Department of Construction Engineering, Graduate school of Industry, Pukyong National University

Abstract

The purpose of this paper was finding out the variation of particles count distribution in water by adding coagulant dose with coagulation time and coagulant intensity for the optimum coagulation condition.

The results of this study are that smaller than $2.24\mu\text{m}$ particles such as aluminum hydroxide precipitated($\text{Al}(\text{OH})_3$) were produced rapidly at lower PACl dose but aluminum hydroxide precipitated ($\text{Al}(\text{OH})_3$) were produced slowly at higher PACl dose in a stock solution of 40 mg/L alkalinity.

Smaller than $2.24\mu\text{m}$ particles produced rapidly at higher coagulant dose in a natural raw water and Alum was more effective coagulant than PACl for reducing smaller particles and producing large particles at the same aluminum concentration because alum was much more decreased the raw water pH.

Particles size distribution in water were influenced by mixing intensity at lower coagulant dose however the influence of mixing intensity was lower at higher coagulant dose than lower coagulant dose, and Smaller than $10\mu\text{m}$ size particles were decreased with the mixing time but larger than $10\mu\text{m}$ size particles were increased with the mixing time.

I 서론

응집은 작은 입자를 큰입자로 형성시키는 공정으로 대부분의 정수처리장에서 물리화학적 방식을 이용하여 기본적으로 사용하고 있는 정수처리 방식이다. 이 공정은 응집제(알루미늄)을 초기공정인 급속혼화지에 주입함을 기점으로 시작된다. 그 이후 3단계로 활성응집체의 형성, 입자의 불활성화, 입자간의 상호충돌로써 이루어진다. 무기응집제인 알루미늄이나 철염이 주입되면 활성 응집체는 초기 급속혼화단계에서 입자를 불활성화시킨다. 알룸은 물에서 급속하게 가수분해반응을 일으키면서 반응을 하다가 최종적으로는 불활성화종인 수산화알루미늄으로 된다. 이때 급히 반응하는 과정에서 중간생성체가 형성되다가 최종적으로 입자의 불활성화가 된다.

응집과정에서 알룸은 2가지의 반응으로 입자를 불활성화시키는데 첫째는 전하중하(전하를 띄고있는 가수분해종에 흡착)이고, 둘째는 응집물에 입자의 걸림작용이다. 알루미늄화합물이 최적으로 불활성화하는데 소요되는 시간은 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 초 정도로 알려지고 있다.¹⁾ 이후 단분자 형성은 10^{-10} 초에서 고분자화로 변해가면서 $10^{-2} \sim 1$ 초 정도 걸린다.²⁾ 최종적으로 수산화알루미늄이 형성되는데는 pH에 따라서 1.2~7초 정도 소요되는 것으로 알려지고 있다.³⁾ 응집 침전 후의 잔류탁도는 급속혼화지에서의 효율에 큰 영향을 받는다. 즉 최적의 잔류탁도와 관련되는 최적 교반시간은 응집제 주입율과 혼화강도에 따라 달라진다. 현재까지의 연구 모두 최적 급속 교반시간은 알루미늄이 수산화알루미늄으로 변화되는 시간보다는 긴 혼화시간이 필요한 것으로 나타났다. 최적인 급속혼화 시간은 수중의 입자와 알루미늄 침전물과의 충돌과 관계가 있지 하나의 인자에만 국한되어 있지

는 않다.

입자간의 충돌 회수를 조절하는 급속혼화에 사용되는 혼화강도는 입자의 불안정화에 관련이 깊다.^{4),5)} 수중의 입자가 수산화알루미늄에 얽혀 제거되는 응집인 Sweep Coagulation은 급속혼화와는 다르다. 혼화는 매우 강한 혼화로 신속히 응집제를 분산시켜야 한다. 전하중화에 따른 입자의 불안정화는 impeller 부근의 난류형성에 의해 발생하는 것으로 보여진다.^{4),5)}

알루미늄과 폴리염화알루미늄(PACl)을 가수분해 시간에 따라서 불안정화능력을 비교한 결과 PACl 주입후 고분자화된 응집제종이 알루미늄이 가수분해되면서 생성되는 고분자 종보다 안정한 것으로 나타났고, 또한 보다 응집조건이 나빠도 훨씬 응집에 덜 민감한 반응을 보였다.

현미경상의 알루미늄 및 PACl의 가수분해 반응을 분석한 결과 일반적인 물처리에서 PACl이 알루미늄에 비해 안정적이었고, 알루미늄에서는 폴리머의 형상을 관찰 할 수 없었고.⁷⁾ AlCl₃을 사용하여 알루미늄침전물과 혼화모델에서 가수분해하는 알루미늄은 혼화조건에 매우 민감한 반응을 보인 것으로 보고하였다.⁸⁾

이러한 연구는 응집제가 가수분해와 최종침전물이 입자의 불안정화를 밝히는데 일조하였는데 입자의 불안정화에 있어 동력학적인 규명과 이어지는 입자 덩어리 형성에 있어서는 아직 완전한 이해가 불충분한 실정이다.

Matsui⁶⁾ 등은 탁도 변화지수(turbidity fluctuation methods)와 입자측정기를 이용하여 응집과정을 동력학적으로 평가하고자 하기도 하였으나,⁶⁾ 응집의 혼화강도와 혼화시간등 응집과정과 응집제 종류에 따른 최적의 응집 조건의 결정을 하기 어려운 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 입도분석기를 이용하여 응집시간과 응집에 사용된 혼화강도에 따른 수중 입자의 변화과정을 살펴봄으로써 적절한 응집조건을 도출해 내고 또한 응집제 종류에 따라서 응집효과를 비교 해봄으로써 수질에 유리한 응집제의 선정을 위한 방안도 강구하기 위함이다.

II 문헌연구

2.1 알루미늄 가수분해

Fig. 2.1과 같이 수용액에서 알루미늄은 여섯 개의 물분자로 둘러싸여 물분자의 산소와 강하게 결합된 상태로 존재한다. 그러나 이러한 물분자의 산소와 수소의 결합은 약해져서 수소분자가 용액상으로 해리 되려고 하는 경향을 갖는다. 이를 가수분해(hydrolysis)라 하고 이때 생성된 물질을 가수분해산물(hydrolysis products)라 한다. 즉, 가수분해는 산에서 물로 양자(H^+)가 전달되는 반응이라 정의할 수 있다. 이처럼 수용액에서 알루미늄은 가수분해하려는 강한 경향이 있으며, 가수분해의 산물로는 monomeric species, polymeric species, precipitate ($Al(OH)_3(s)$)가 있다. monomeric species은 하나의 중심이온을 갖는 착화합물(ex, $AlOH^{2+}$)이며, 하나 이상의 중심이온을 가질 경우 polymeric species(ex, $Al_3(OH)_4^{5+}$)라 한다. Table 2.1은 각 알루미늄 가수분해 반응과 평형상수를 나타낸 것으로 Table 2.1의 상수들을 이용하여 알루미늄 수산화물의 용해도를 Fig. 2.2과 같이 나타내었다.

Table 2.1에 나타낸 반응에서 금속 수산화 착화합물이 형성될 때 수소이온들이 유리됨을 알 수 있다. 따라서 용액의 pH에 따라 생성되는 가수분해 종들과 그에 따른 알루미늄의 용해도 관계를 알 수 있다.

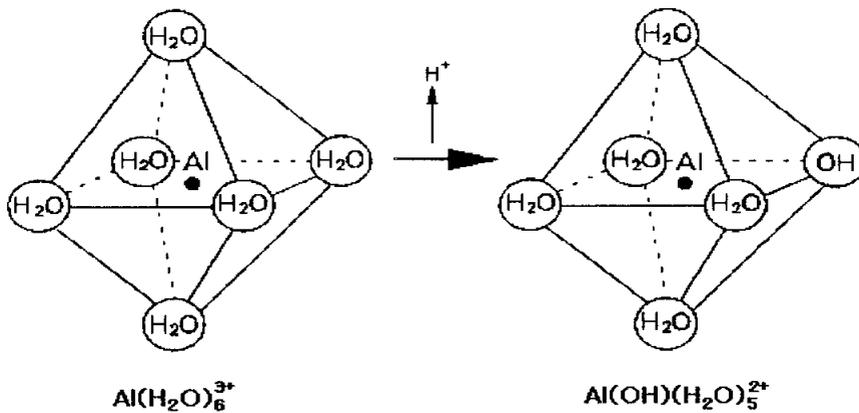


Fig. 2.1 Deprotonation of the aquo aluminum ion. Initial step in aluminum hydrolysis (Letterman, 1991).

Table 2.1 Equilibrium constants of aluminum hydrolysis

Reaction	log K (25°C)
(1) $\text{Al}^{3+} + \text{H}_2\text{O} = \text{AlOH}^{2+} + \text{H}^+$	log $K_{11} = -4.97$
(2) $\text{Al}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Al}(\text{OH})_2^+ + 2\text{H}^+$	log $K_{12} = -9.3$
(3) $\text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$	log $K_{13} = -15.0$
(4) $\text{Al}^{3+} + 4\text{H}_2\text{O} = \text{Al}(\text{OH})_4^- + 4\text{H}^+$	log $K_{14} = -23.0$
(5) $2\text{Al}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+} + 2\text{H}^+$	log $K_{22} = -7.7$
(6) $3\text{Al}^{3+} + 4\text{H}_2\text{O} = \text{Al}_3(\text{OH})_4^{5+} + 4\text{H}^+$	log $K_{34} = -13.94$
(7) $13\text{Al}^{3+} + 28\text{H}_2\text{O} = \text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+} + 32\text{H}^+$	log $K_{13, 32} = -98.73$
(8) $\text{Al}(\text{OH})_{3(\text{am})} = \text{Al}^{3+} + 3\text{OH}^-$	log $K_{\text{am}} = -31.5^*$
(9) $\text{Al}(\text{OH})_{3(\text{s})} = \text{Al}^{3+} + 3\text{OH}^-$	log $K_{\text{so}} = -33.5^*$

* From Dempsey (1984) ; others from Mesmer and Baes (1976).

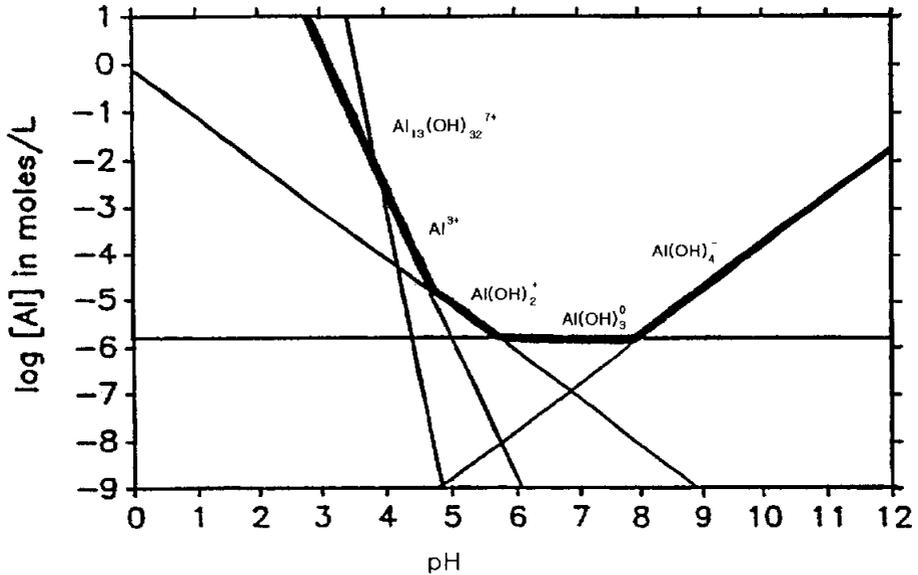


Fig. 2.2 Solubility diagram for Al(OH)₃. monomeric and polymeric Al species in equilibrium with Al(OH)₃. (From Dempsey, 1989).

Fig. 2.2에 나타난 바와 같이 수용액 상에서의 알루미늄 화학종의 분포는 pH에 따라 다르게 나타난다. 알루미늄의 일반적인 특성은 pH 4.5 이하와 pH 8 이상에서는 모노머 종이 주종을 이루고 있다. 즉 pH 4.5 이하에서 Al(H₂O)₆³⁺, Al(OH)(H₂O)₅²⁺, Al(OH₂)(H₂O)₄⁺가 주종을 이루며 이는 Al³⁺, Al(OH)²⁺, Al(OH₂)⁺로 표현되기도 하며 pH 8 이상의 경우 Al(OH₄)⁻가 주된 종으로 존재한다 (Schofield and Taylor, 1954; Frink and Peech, 1962; Baes and Mesmer, 1976). 또한 pH 6.0이하에서 용해도는 급격히 감소하여 Al₁₃(OH)₃₂⁷⁺과 같은 양이온성 폴리머종이 우세하게 나타난다. 이와 같이 각 pH에서의 알루미늄 반응은 가수분해 반응역학에 의해서 좌우된다. 즉,

폴리머 상태의 Al 종은 실제 평형상태에서 생성된 종이 아니라 평형상태로 진행되는 과정에서 생성되는 화학종으로서 침전물상태의 $Al(OH)_3$ 상태로 전이하는 과정에서 생기는 중간 생성물질이다.

Fig. 2.3은 이러한 가수분해의 경로와 가수분해 생성물을 나타낸 것으로 수용액상에 $Al(III)$ 가 충분할 때 간단한 구조의 mononuclear species는 polymer 형성과정을 거쳐 최종 가수분해산물인 $Al(OH)_3(s)$ 성분으로 전이된다. 이와같이 $Al(III)$ 의 가수분해 및 침전물 형성(precipitation)의 메커니즘에 관한 이해는 응집제의 특성과 응집효과의 분야에서 중요한 요인이다. 특히 $Al(III)$ 계 응집제의 특성에 있어서 가수분해 반응이 중요성을 갖는 이유는 가수분해가 진행되는 동안 형성되는 각종 Al의 가수분해 종이 각기 다른 응집특성을 나타내기 때문이다. 예로서 가수분해 중 중에서 폴리머 상태의 Al은 높은 양전하를 띠고 있고 흡착성이 높아 대부분 음전하를 띠고 있는 수중의 입자상 물질의 전하 변이에 가장 효율적인 가수분해 종으로 알려져 있다(Pouillot와 Suty).

Fig. 2.3에 보여진 가수분해 경로를 통하여 polymeric $Al(III)$ 나 $Al(OH)_3(s)$ precipitate가 형성되는 반응 속도 또한 응집에 있어 중요한 고려사항이다. 왜냐하면 응집제 주입직후 가수분해 속도에 따라서 응집에 작용하는 Al종의 분포가 다르기 때문이다. Table 2.2은 각 알루미늄 가수분해종의 형성시간을 나타낸 것으로 가수분해는 불과 수초내에 진행되며 $Al(OH)_3(s)$ precipitate가 형성되는 시간이 polymeric Al종이 형성되는 시간보다 상당히 느리다는 것을 알 수 있다.

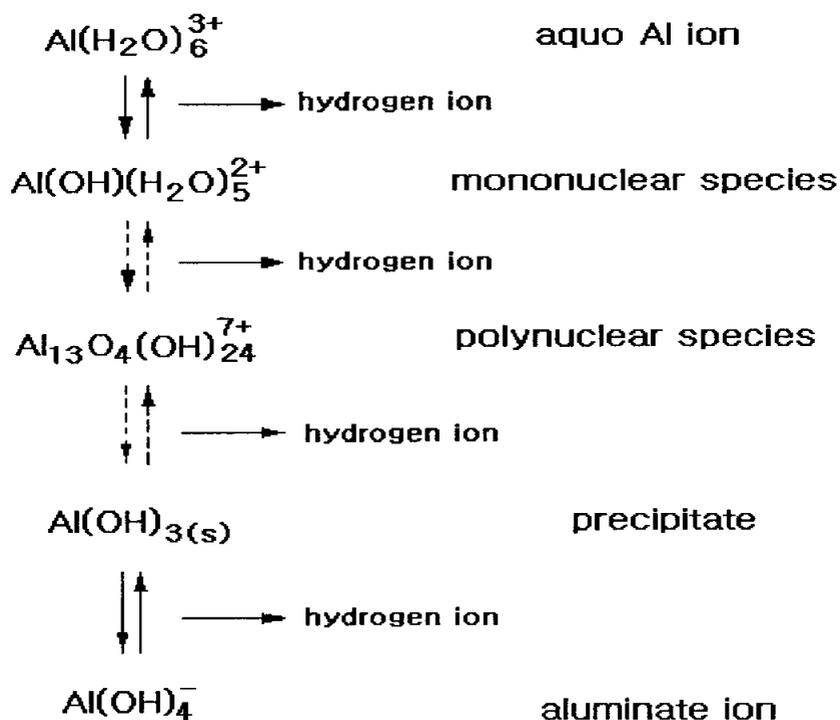


Fig. 2.3 Aluminum hydrolysis products (Letterman, 1991).

Table 2.2 Formation time of aluminum hydrolysis species (Amirtharajah, 1987)

Hydrolysis species	Time scale (sec)
Al(III) monomers	< 0.1
Al(III) polymers	0.1 to 1
Aluminum hydroxide precipitates	1 to 7

2.2 응집 메카니즘

2.2.1 급속혼화

급속혼화 조건은 플록형성 이전에 응집제를 처리하고자 하는 원수에 빠르고 균일하게 분산시켜 줌으로써 안정화된 수중입자들의 표면전하를 감소시켜 입자를 불안정화 시키는 공정이다. Amirtharjah¹¹⁾는 급속혼화 공정을 원수중의 콜로이드와 응집제의 가수분해 생성물과의 접촉을 위한 것으로 평가하였으며, O,Melia는 입자들의 불안정화를 유도하는 것으로 보고했는데 응집제와 수중의 입자의 접촉이 적절하게 이루어지지 못하면 입자의 불안정화가 일어나지 않고 불안정화된 입자끼리의 접촉이 충분하지 못하면 응집체가 형성될 수 없어 응집제의 가수분해 단계와 입자까지의 수송단계는 서로 매우 밀접한 관계를 유지하고 있다. 그러므로 급속혼화공정이 부적절하게 이루어지면 후속공정에서의 처리효율이 저감되고 유출수의 수질이 악화된다. 따라서 응집공정은 정수처리 공정에서 매우 중요한 공정중의 하나이다. 이는 특히 알루미늄이나 철염을 이용하여 응집처리시 급속혼화 공정은 특히 중요하게 여겨지는데 이들 금속염이 물속에 주입 즉시 순식간에 가수분해 반응이 일어나 이들 가수분해 생성물들이 콜로이드 입자에 순식간에 흡착되기 때문이다.

급속혼화 공정에 미치는 인자들을 열거하면 응집제, 혼화강도, 혼화시간, 수중의 콜로이드 입자, 물, 알칼리도, pH 등이 있다. 이들 인자들은 단독으로 급속혼화에 영향을 미치는 것이 아니라 상호작용에 의해 급속혼화공정의 효율이 달리 나타난다.

수중의 대부분의 입자들과 mineral, organic은 음으로 하전된 표면전하를 가지고 있다(Niehof and Loeb ; Hunter and Liss). 이들은 서로간의 반발력에 의해 일정한 거리를 유지하면서 침전하거나 충돌하지 않고

안정한 상태로 부유하게 된다. 이렇게 음의 전하로 대전되어 안정한 부유상태를 유지하고 있는 콜로이드성 물질을 양의 전하를 띤 응집제를 주입함으로써 전하를 중화시켜 입자간 결합을 가능하게 하는 과정을 불안정화(Destabilization)라 하며, 응집(coagulation)이란 불안정화과정과 불안정화된 입자들을 충돌시켜 서로 뭉치게 하는 과정(Flocculation)을 포괄하는 개념이다. 입자의 불안정화는 다음과 같은 몇가지 다른 메카니즘에 의해 일어나게 된다.

- 1) 이중층 압축(Double layer compression)
- 2) 흡착과 전하중화(Adsorption and Charge neutralization)
- 3) sweep floc coagulation
- 4) 입자간의 가교작용

2.2.2 이중층 압축(Double layer compression)

이중층 압축 이론은 비슷한 전하를 띤 입자사이들 사이에서 정전기적 반발력에 기초를 둔 것으로, 입자와 반대되는 이온들이 증가하게 되면 입자의 분산층(diffuser layer)주위에 이들이 모여들게 되고 정전기적 반발력은 감소되어 분산층은 압축되어진다. 정전기적 반발력이 감소되어 짐으로써 입자의 표면전위차는 감소하게 되고 상대적으로 van der Waals 인력이 강하게 작용하여 입자들은 서로 접근하여 뭉쳐지게 되어진다(Amirtharajah and O'Melia). 이러한 이중층 압축에 의해 이루어지는 불안정화 과정은 NaCl과 같은 간단한 전해질을 가해줌으로서 일어날 수 있는데 반대이온의 전하수가 많을수록 그 효과는 증대된다. 하지만 이러한 반응은 매우 느리게 일어나므로 실제 수처리 시스템에서 사용되는 주요 메카니즘은 아니다.

2.2.3 흡착과 전하중화 (Adsorption and Charge neutralization : Adsorption / Destabilization)

전하중화에 의한 불안정화는 입자들의 표면전하를 감소시킴으로써 이루어지는데, 이러한 과정은 두가지 process에 의해 일어난다. 첫째, 입자와 반대되는 전하를 가지고 있는 응집제 성분은 입자의 표면에 흡착되어진다. 특히 유기 고분자 전해질이나 금속염 응집제로부터 형성되어지는 가수분해 생성물은 반대전하를 띠는 입자표면에 흡착하려는 강한 경향을 가지고 있다. 이러한 응집제의 입자표면에 흡착하려는 경향은 입자표면에 대한 응집제와 용매의 상호작용, 응집제와의 화학적 친화력, 응집제 표면의 chemical groups에 기인한다. 이러한 응집제의 흡착은 입자의 표면 전하가 역전되어 재안정화가 이루어질 때까지 입자표면에 흡착되어질 수 있다. 일반적으로 가수분해 되는 다가 금속이온의 모든 형태는 가수분해 되지 않은 이온 보다 콜로이드 경계면에서의 흡착이 더 효율적이고, 흡착된 표면에서의 전하역전의 원인이 되기도 한다(Matijevic and Jananer, Weber, Stumm and Morgan). 둘째, Heterocoagulation은 반대전하를 띤 가수분해 종의 흡착에 의한 표면전하중화과정과 유사한 불안정화 메카니즘이지만 이 경우에는 하나의 입자가 다른 반대전하표면에 축적되는 것을 포함한다. 예를 들어 높은 음의 표면전하를 가지고 있는 큰 입자들은 비교적 낮은 양의 전하를 가진 더 작은 입자들과 결합할 수 있다. 이때 입자들은 반대전하를 가지게 되고 전기적 인력은 입자간의 상호작용을 증가시켜 준다. 음의 전하를 가진 더 큰 입자들의 안정화는 축적된 양전하를 띤 입자들에 의해 감소되어지고 더 큰 입자들의 부유상태는 불안정화 되어진다.

2.2.4 Sweep floc coagulation

Alum이나 철염과 같은 금속염이 수중에 고농도로 용해되거나, 높은 pH 범위에서는 수산화 침전물을 형성하게 되는데 이때 수중의 콜로이드성 입자들은 이들 침전물들에 의해 둘러싸이게 되며 이들간의 상호 충돌에 의해 floc이 형성하게 된다 (Amirtharajah and O'Melia). 이러한 응집의 과정을 "sweep 응집"이라 한다. sweep coagulation은 용액내의 콜로이드와 형성된 floc사이에서 이루어지는 상호작용이다. Amirtharajah와 Mills는 Alum을 이용하여 탁도 제거에 대한 응집 모식도를 Fig. 2.4와 같이 나타내었다. 수산화 알루미늄의 낮은 용해도($K_{so} = 10^{-32}$)를 고려하면 실제 정수공정에 이용되는 Al(III)의 주입량은 Al(OH)₃에 관하여 과포화 상태를 유발한다. 하지만 이러한 과포화 상태가 금속 수산화물의 침전물 형성을 반드시 유발하지는 않는다 (Stumm and O'Melia). 이들에 의하면 금속 침전물 형성이 일어나기 위해서는 초과포화(supersaturation) 상태를 초과해야 한다고 보고하고 있다.

콜로이드 입자의 농도가 낮을 경우 응집에 있어서 많은 양의 수산화 침전물이 필요하다. 즉 sweep 응집의 조건하에서는 응집제의 양과 입자의 농도 사이의 관계는 더 이상 정량적 관계에 있지 않다. 정수공정에 있어서 저콜로이드 농도의 젤라틴 상태의 수산화 금속침전물의 형성이 급속히 이루어질 정도로 고농도의 응집제 주입이 응집에 효과적이다. 저탁도 원수의 조건하에서 응집에 필수적인 입자간의 충돌 및 접촉기회가 제한된다. 이러한 조건하에서 금속염 응집제로부터 형성된 고농도의 침전물은 floc의 부피 증가를 가져오고 따라서 입자의 충돌 기회도 증가시키

며 이에 따라 보다 침전이 용이한 floc을 형성하게 된다. 유기성 polymer를 응집보조제로 사용할 경우 이러한 응집 메커니즘을 기본으로 응집작용을 촉진시켜 주는 보조적 역할을 하므로써 응집의 효율을 높여주게 된다.

2.2.5 입자간 가교작용

내부 입자의 가교작용을 이루는 흡착에 의한 불안정화는 높은 분자량을 가지고 있는 polymer에 의하여 많은 입자들이 흡착됨으로 인해 발생된다. 즉, 콜로이드 물질이 polymer에 접촉될 때, polymer의 작용기가 입자의 표면에 흡착되고 잔여하는 작용기는 수중에 남게 된다. 만약 다른 콜로이드 물질이 polymer의 비어 있는 작용기에 흡착이 일어날 경우 polymer는 내부 입자의 가교를 형성한다. 따라서 polymer는 전기적인 2중층의 불안정화 외에 충분히 긴 가교를 이룰 수 있는 polymer이어야 할 것이다. 하지만 과도한 polymer에 의한 흡착은 수중에서 재안정화를 야기할 수가 있다. 칼슘과 같은 이온은 polymer 연결에 작용하는 연결작용기로서 입자사이의 가교작용에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Black et al., Lyklema, Dental).

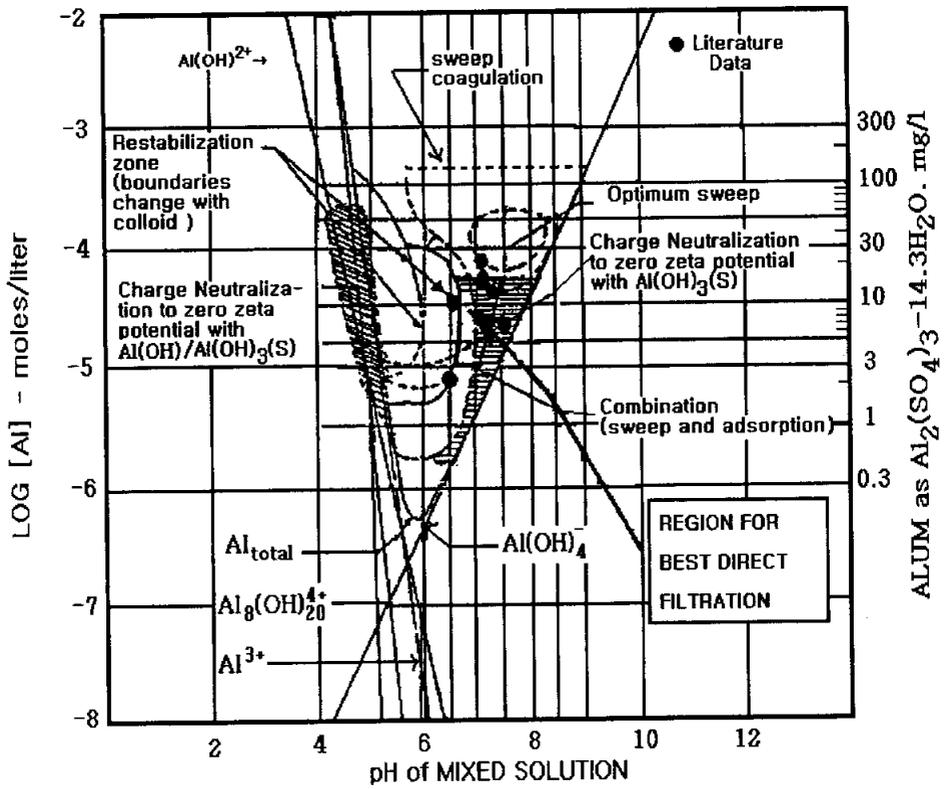
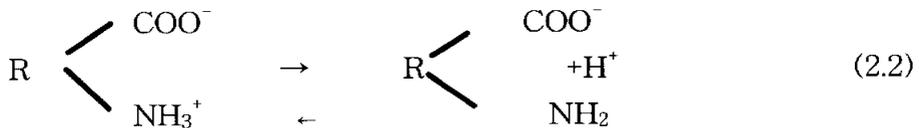
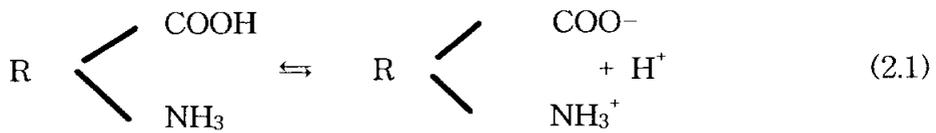


Fig. 2.4 Alum coagulation diagram (Amirtharajah and Mills, 1982).

2.3 유기물의 안정화

대부분에 수중 유기물은 표면에 전하를 띠고 있으며 그 전하는 대개 음전하이다. 예로서 카르복실기(COO⁻)와 이미노기(NH₃⁺)을 가지는 유기물 표면을 다음과 같은 이온화 반응에 의하여 전하를 띠게 된다.



이러한 반응에 따라 유기물질의 표면전하는 용액의 pH에 따라 변하게 된다. 즉 pH가 증가함에 따라 Eq(2.1)과 Eq(2.2)의 반응은 오른쪽으로 가는 경향에 따라 음전하의 세기가 점점 증가하게 된다. 유기물질이 이온화되는 경향이 클수록 극성을 띠고 있는 물분자와의 친화력이 더욱 증가하고 이에 따라 더 수중에 안정한 성질을 띠게 된다. 또한 유기물질 중 휴믹 물질은 그 표면에 띠고 있는 극성을 가진 기능기, 즉 carboxyl, phenolic, hydroxyl, keton의 특성에 따라 수용액상에서 휴믹 물질의 분자상 특성이 결정난다. 휴믹 물질에 있는 이러한 기능기들은 유기물 표면에 극성과 전하특성을 띠게 만들며 이에 따라 휴믹 물질의 용해도를 증가시킨다. 유기물질의 용해도가 증가할수록 친수성은 증가하고 이에 따라 수중에 더욱 안정한 상태로 존재하게 된다.

2.3.1 NOM의 응집 메카니즘

NOM의 농도와 특성은 응집제의 주입량과 응집제 종류의 설정을 결정하며 각 정수공정의 설정과 운전에 영향을 준다, 따라서 NOM의 응집에 의한 제거는 지난 10~15년 전 이래 점점 더 그 중요성이 더해오고 있다.

전통적으로 응집공정 및 메카니즘은 수중에 존재하는 콜로이드상 물질을 제거하는데 중점을 두어 설명되어 왔다. 그러나 NOM의 90%이상을 차지하는 부분은 용존상(DOC)으로서 입자상인 콜로이드의 응집과는 상당한 차이가 있다. 입자상 물질과 NOM의 응집의 차이점은 Table 2.3과 같이 요약할 수 있다.

Table 2.3 Comparison of alum coagulation dilute caly suspensions and humic substances

Dilute clay suspension

- 최적응집 pH 6.5-7.5
- 최소 잔류 탁도는 pH의 의존성이 적다.
- 소량의 clay 농도의 증가는 응집제 주입량의 감소를 유발
- 응집제 주입량과 최적응집 pH는 humic substances가 존재함에 따라 변한다.

Humic substances

- 최적 응집 pH 5-6
 - 최소잔류 TOC는 pH의 의존성이 크다
 - TOC의 증가는 소요응집제 주입량의 증가를 유발
 - 응집제 주입량과 최적응집 pH는 clay의 존재유·무에 상관이 없다.
-

III 실험 방법

3.1 수산화 알루미늄 형성

순수하게 응집제중의 알루미늄과 수중의 알칼리도가 반응하여 생성되는 수산화 알루미늄의 생성과정을 관찰하기 위하여 증류수에 탄산나트륨을 이용하여 일정한 알칼리도(40mg/L)를 유지하도록 제조한 후 응집제로서 알루미늄 및 폴리염화알루미늄(PACl)를 이용하여 Jar-test 응집시간에 따른 수중에서 알칼리도와 응집제 중의 알루미늄이 반응하여 생성되는 수산화 알루미늄의 입자변화를 입도분석기 (Particle Counter)를 이용하여 관찰하였다. 이때 사용한 알루미늄과 PAC의 산화 알루미늄 함량은 7.0% 및 10.2%인 것을 사용하였다. 본 실험에 사용된 입도분석기는 Accusizer Optical Particle Sizer Model 770을 이용하였으며, Jar-tester는 Phipp & Bird 사의 PB-700TH를 이용하였다.

입도분석시에 측정된 입도의 크기는 총 14개로 측정된 각 입자의 크기는 Table 3.1과 같다.

Table 3.1 Measured particles size.

Particles size (μm)	0.98	1.45	2.24	3.44	5.3	8.16	12.57
	19.36	29.81	45.91	70.69	108.86	167.63	258.14

3.2 알칼리제 제조

시험에 사용하고자 하는 일정농도의 알칼리도를 제조하기 위하여 알칼리제를 제조하여야 하는데 수중에 알칼리도를 띄는 물질은 탄산염(HCO_2^-), 중탄산염(H_2CO_3) 및 수산염(OH^-)등이다. 그러나 알칼리도를 띄는 물질에 따라서 원수중의 pH에 미치는 영향이 크므로 일반적으로 원수중의 pH범위에 맞도록 알칼리제를 제조 할 필요가 있었다. 알칼리제를 제조함에 있어 사용된 시약은 탄산나트륨, 중탄산나트륨 및 수산화나트륨을 이용하였으며 알칼리제 제조는 증류수 100mL에 탄산나트륨(Na_2CO_3), 중탄산나트륨(NaHCO_3) 및 수산화나트륨(NaOH)을 약10g 정도 주입하여 표준용액을 제조하였고 표준용액에 증류수를 100~1000배 희석하여 희석수의 알칼리도를 측정하여 표준용액의 알칼리도를 결정하였으며, 실험 조건에 따라 본 표준용액을 일정량 주입하였다.

알칼리 표준용액을 제조 후 표준원액의 pH범위가 각각의 시약종류 마다 차이가 있었는데 중탄산나트륨을 이용하여 만든 표준용액은 pH가 8.5 정도였고 탄산나트륨은 10.5 수산화나트륨은 14까지 올랐다. 일반적으로 원수중의 pH 범위는 7.0부근의 중성인 점을 고려하여 중탄산나트륨을 이용하였다.

3.3 자-테스트

자-테스트는 적정 응집제 주입률을 결정하기 위하여 일반적으로 널리 사용되고 있는데 이뿐만 아니라 응집시간별 응집이 형성되어 가는 과정과 응집의 혼화강도에 따른 응집효율을 평가 할 수 있는

매우 편리한 장치이다. 본 연구에 사용된 자-테스트는 Phipp & Bird 회사의 PB-700TH로 표준형으로 임펠러의 크기는 2.5×7.5cm였으며 Jar의 규격은 11.5×11.5×21cm 이고 유효수심은 15.1cm로 유효용량은 2L를 사용하였다. 침전후의 샘플을 채취하기 위한 시료 채수구는 수면 아래 10cm 지점에 설치하였다. Fig. 3.1은 본 실험에서 사용된 회전날개의 회전수에 따른 속도구배를 나타낸 것이다.

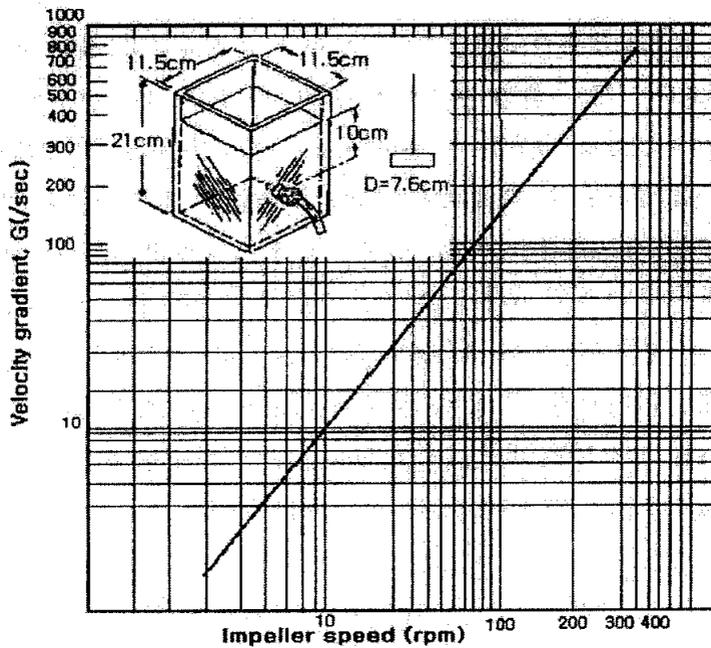


Fig.3.1 G curve for flat paddle in the gator jar.

응집제 주입 후 속도구배와 혼화시간 및 응집제 주입률에 따른 수중의 입자 분포를 조사하기 위하여 임펠러의 회전수는 80, 120, 160 rpm으로 변화시켰으며, 혼화시간별 입도의 분포를 관찰하기 위하여 원수, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 300, 360초 응집시간대의

입자분포를 조사하였다. 또한 응집제 주입률은 알룸을 기준으로 20, 40, 60 $\mu\text{l/L}$ 으로 부피대 부피비로 정하였으며 이때 응집제 중의 알루미늄농도는 0.7, 1.4, 2.1mg/L 정도이다. 이 정도의 알루미늄농도를 유지시키기 위하여 주입된 PAC는 부피비로 13, 25, 37 $\mu\text{l/L}$ 로 주입하면 순수 알루미늄 농도로써 0.7, 1.4, 2.1mg/L을 주입하는 것과 동일한 농도의 주입률이 되어 알룸과 비교할 수 있다.

3.4 입도분포

측정원리는 Fig 3.2와 같이 입자를 보유하고있는 물이 1mm의 좁은 통로인 측정지역(Photozone)를 지나가는 동안 레이저 진공관으로부터 발생된 레이저가 연속적으로 물속으로 투과되면 반대편의 스크린에 입자들의 그림자가 생기는데 이 그림자에 의해서 전위를 발생시켜 입자의 크기와 개수를 측정하게 된다.

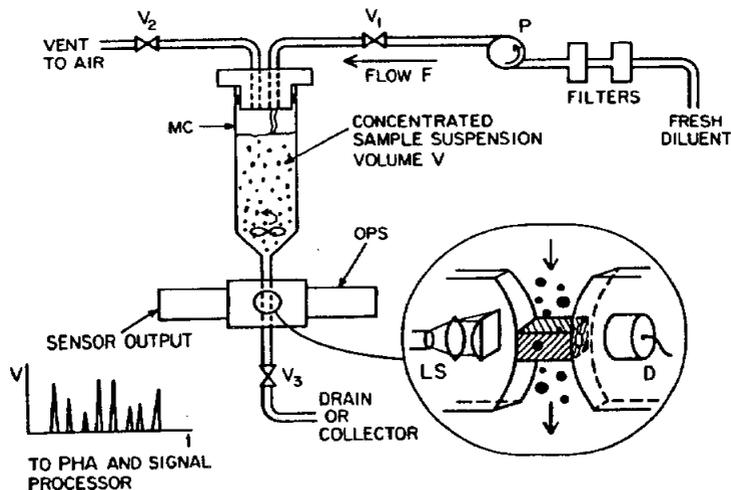


Fig.3.2 Schematic diagram of particle counter system

3.5 최적 급속혼화 조건

응집제 주입 후 수초이내에 알루미늄은 가수분해되어 수산화알루미늄을 형성하게 되고 이어 형성된 수산화알루미늄은 계속해서 수중의 입자들과 계속 반응해나간다. 이러한 일련의 과정은 응집제가 수산화알루미늄으로 형성되고 이어 수산화알루미늄과 수중의 입자와 반응해 가면서 입도의 변화를 일으키는데 반응초기에는 원수의 입도와 변화가 없다가 어느정도 반응이 진행되면서 원수중의 입자들이 응집제와 반응하면서 입도분포가 달라진다. 따라서 급속혼화조건을 수산화알루미늄이 형성되는 시점인 5~6초, 입도의 분포변화가 생기기 시작한 시점, 또한 입도의 분포가 완전히 변화한 시점을 기준으로 급속혼화를 하고 이후 완속혼화 및 침전 후 잔류탁도를 비교 함으로써 급속혼화 조건에 따른 응집효율을 비교하여 가장 효율적인 급속혼화 조건을 추적하였다.

IV 결과 및 고찰

4.1 수산화알루미늄 형성

증류수에 중탄산나트륨을 이용하여 알칼리도를 40mg/L로 유지시킨 후 응집제로 폴리염화알루미늄(PACl)을 20, 40, 60mg/L 주입하여 혼화강도를 120rpm(140 sec^{-1})으로 하여 응집시간에 따른 수중의 수산화 알루미늄 형성과정을 평가한 결과 Fig 4.1과 같이 나타났다. 이때 0.92 μm , 1.45 μm , 2.24 μm 의 입자는 응집시간과 함께 입자의 개수가 증가하는 현상이 나타났으나 3.44 μm , 5.3 μm , 8.16 μm 의 입자군수는 조금이나마 완만한 증가 추세를 나타냈다. 그러나 그 이상 크기의 입자군에서는 응집제 주입후 응집시간 증가에 따라서 입자군의 증가는 거의 보이지 않았다. 또한 응집제 주입률에 따른 수산화알루미늄의 형성은 2.24 μm 이하의 입자군에서는 응집제 주입률이 높을수록 많이 형성되는 경향을 보였다. 그러나 급속혼화 초기 단계인 혼화시간 120초 이내에서는 응집제 주입률이 적을수록 수산화알루미늄 입자군 형성이 많았고 응집제 주입률이 높은 시료에서는 혼화시간이 증가할수록 입자군의 증가가 응집제 주입률이 낮은 시료에 비해서 늦게 나타났다.

이러한 이유로는 응집제가 수중에 주입시 알루미늄과 수중의 알칼리도가 반응을 하면서 생성되는 수산화알루미늄이 응집제가 적을수록 반응이 조기에 일어나 수산화알루미늄 형성이 완료된 후 이후부터는 수산화알루미늄 간의 접촉에 의해 수산화알루미늄 입자가 서로 뭉치지면서 플록을 형성해 가는 과정을 빨리 거치는데 비해

응집체를 많이 주입하는 경우에는 알루미늄과 수중의 알칼리도와 반응하여 형성되는 수산화알루미늄이 완전히 반응하기까지 시간이 상대적으로 많이 소요되어 응집체가 많이 주입된 경우 응집 초기단계에서 수중 입자(수산화알루미늄)의 성장이 적은 것으로 판단된다.

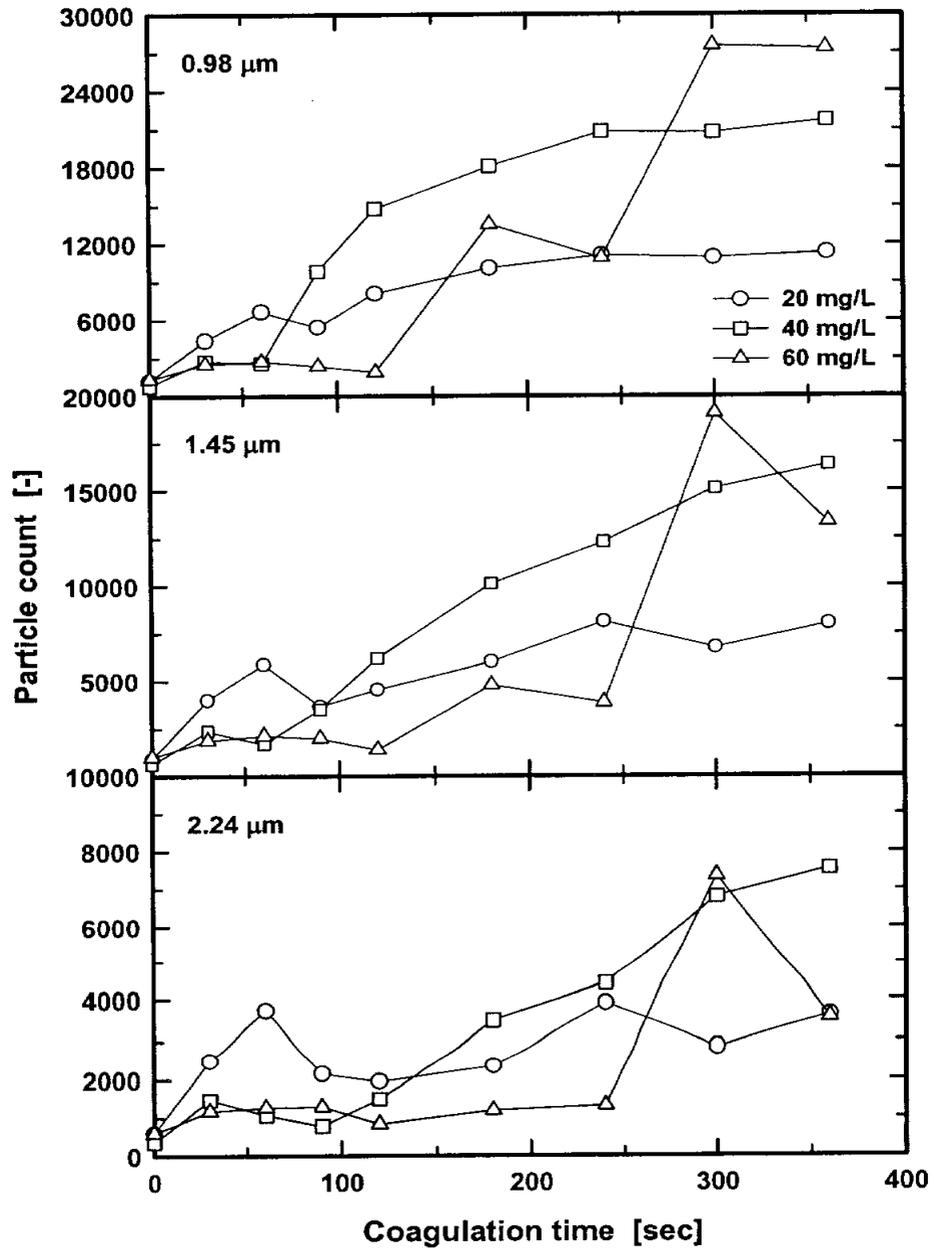


Fig. 4.1 Aluminum hydroxide formation with coagulant dose and coagulation time

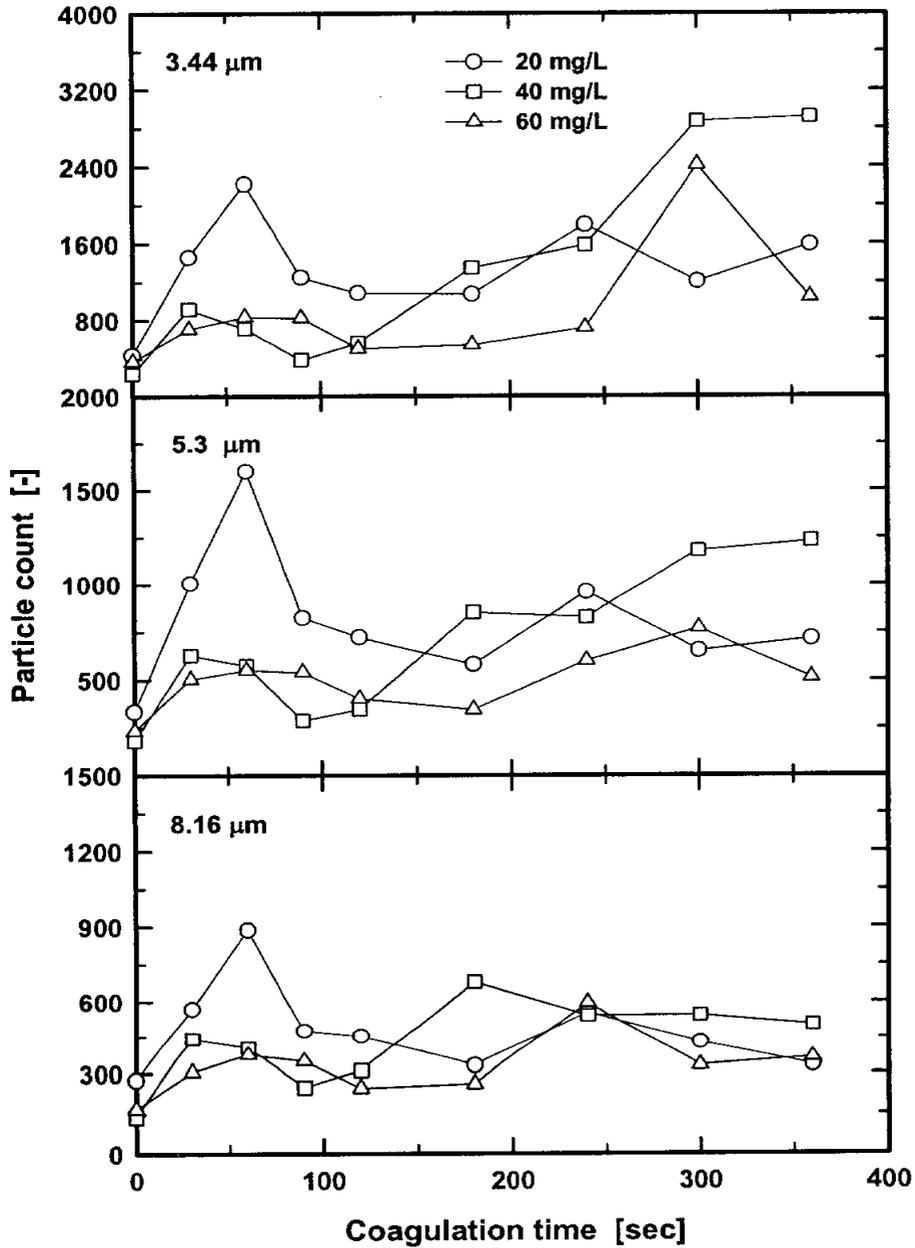


Fig. 4.1 Aluminum hydroxide formation with coagulant dose and coagulation time

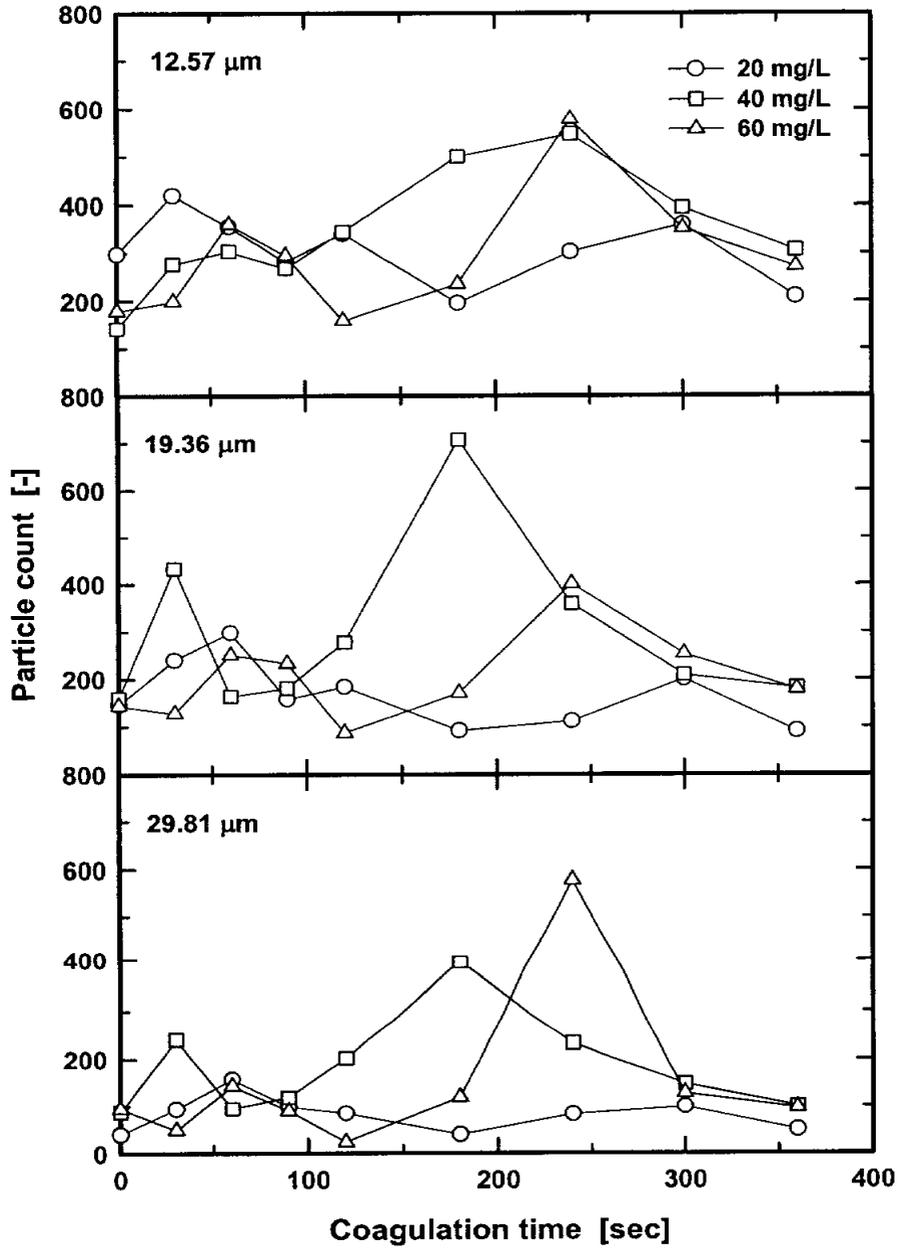


Fig. 4.1 Aluminum hydroxide formation with coagulant dose and coagulation time

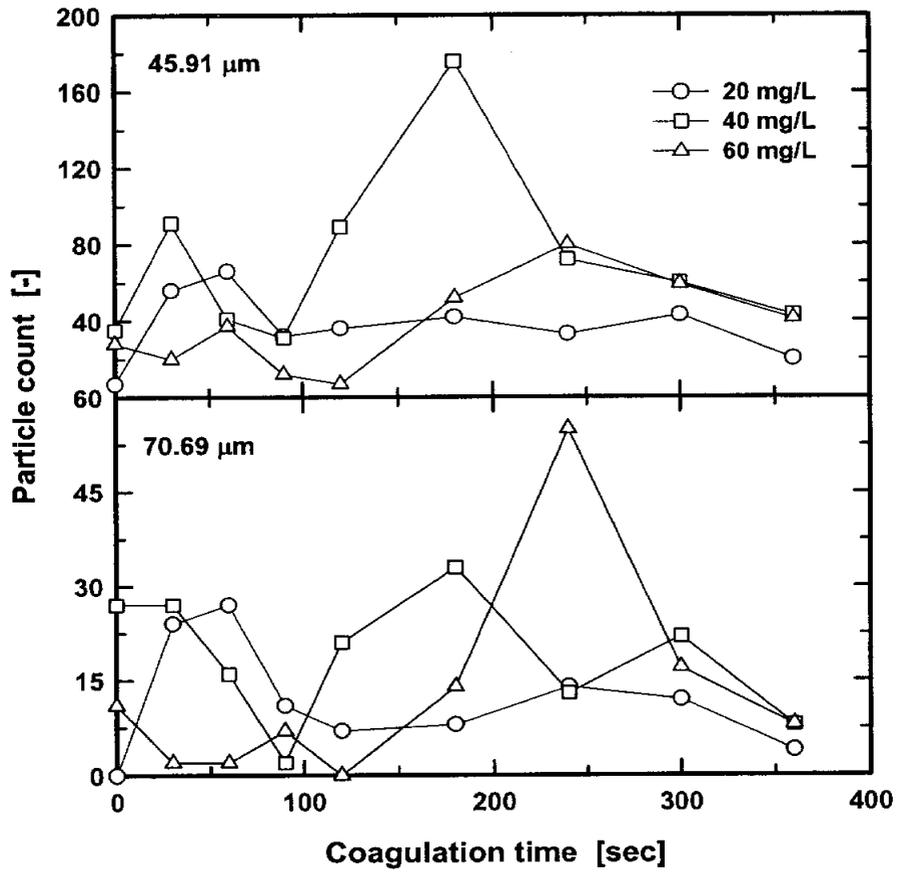


Fig. 4.1 Aluminum hydroxide formation with coagulant dose and coagulation time

4.2 응집제 주입률에 따른 원수 수중 입자 변화

탁도 1.6NTU, pH7.4, 알칼리도40mg/L인 낙동강 원수를 이용하여 응집제 알룸과 PACl을 주입하여 혼화시간 별 원수 중의 입도분포를 관찰하였다. 이때 임펠러의 회전수는 120rpm으로 조정하였으며 응집제 주입률은 알룸은 20, 40, 60 mg/L PACl은 13, 25, 38mg/L을 주입하였으며 이때 순수한 알루미늄의 농도는 0.7, 1.4, 2.1mg/L 였다.

Fig. 4.2~4.3에서 입경 0.94 μ m 입자의 혼화시간 별 알룸 및 PACl 주입률에 따른 입도 변화를 나타낸 것을 보면 응집제 주입률이 높은 PACl 38 mg/L에서 혼화초기에 입자의 증가현상이 뚜렷이 나타났고 혼화시간이 길어져도 더 이상의 입자수의 변화가 거의 없이 일정하거나 완만한 증가 추세를 보였다. 응집제 주입률 25mg/L에서는 혼화초기 약 60초 가량은 급속한 증가 현상을 나타냈으나 혼화시간이 길어질수록 지속적인 완만한 증가 현상을 보였고 13mg/L의 응집제 주입률에서는 초기혼화시간에 잠시 입자수가 감소하다가 혼화시간이 지속됨에 따라서 입자수가 증가하는 현상은 보였다. 이러한 현상은 입자의 입경이 1.45, 2.24 μ m 에서도 유사하게 나타냈다.

응집제가 알룸 경우에도 응집제 주입률이 높은 60mg/L에서 2.24 μ m 이하의 입자들이 혼화초기에 급속히 증가하는 현상을 나타냈으며 응집제 주입률이 낮을 때에는 꾸준히 혼화시간과 함께 증가하는 현상을 보였다.

이와 같이 응집제 주입률이 높을수록 2.24 μ m이하 입자의 증가가 빠른 것은 앞에서 증류수에 알칼리도를 조제하여 응집제를 주입하여 생성된 수산화알루미늄의 입자 생성과는 반대 현상을 나타냈는데 이는 수중에 주입된 응집제가 가수분해됨과 동시에 수중의 콜로

이드입자와 반응하여 $1.0\mu\text{m}$ 이하의 콜로이드간의 가교작용으로 인해 급속히 콜로이드 입자군을 형성시켜 수중의 입자가 증가된 것으로 보인다.

응집제로 PACI를 사용한 경우 3.44, 5.3, 8.16 및 $12.57\mu\text{m}$ 인 입자는 응집제 주입률이 증가 할 수록 입자 개수가 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 응집제 주입률이 높을수록 수중의 콜로이드입자와 충돌할 수 있는 기회가 많아져 콜로이드 입자군을 많이 형성시키기 때문인 것으로 판단된다. 응집시간에 따른 입자의 증가 현상은 혼화초기 180초까지는 큰 변화 없이 완만히 증감을 계속하다가 이후 240초에서 급격히 입자수가 증가하는 현상을 보였고 이후에는 완만히 증가하는 경향을 나타냈다.

응집제로 알룸을 사용한 경우 3.44, 5.3, 8.16 및 $12.57\mu\text{m}$ 인 입자군의 변화는 응집제 주입률에 따른 입자수의 변화가 혼화시간에 따라 PACI에 비해 크게 나타나지 않았고 또한 혼화시간에 따른 입자수의 변화도 거의 없는 것으로 나타났다.

응집제 종류 및 혼화시간에 따라서 $12.57\mu\text{m}$ 이상인 입자군의 변화는 이보다 미소한 입자에 비해 변화율이 미미한 것으로 나타났다.

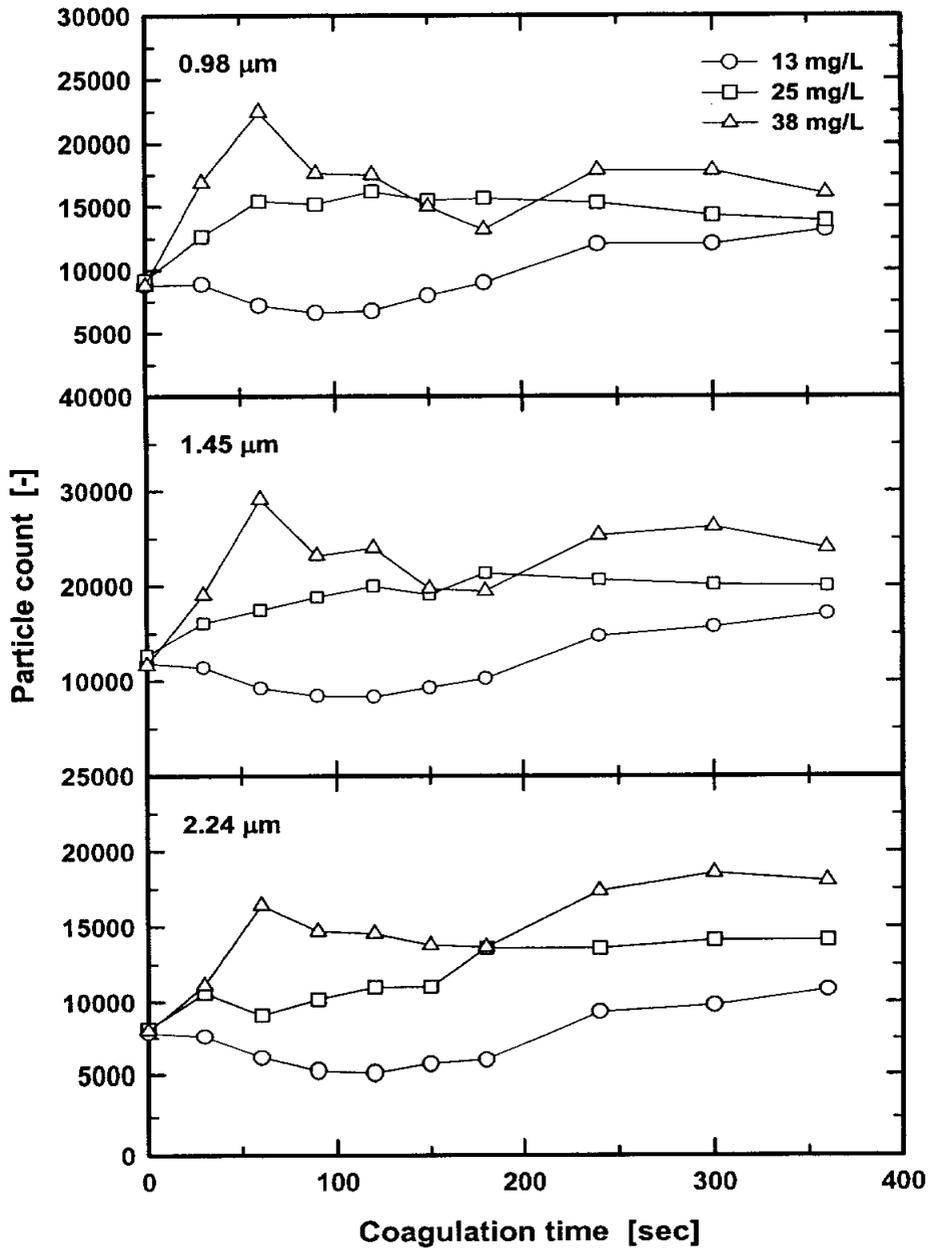


Fig. 4.2 Particles count variation with coagulant dose and coagulation time for coagulant PACl

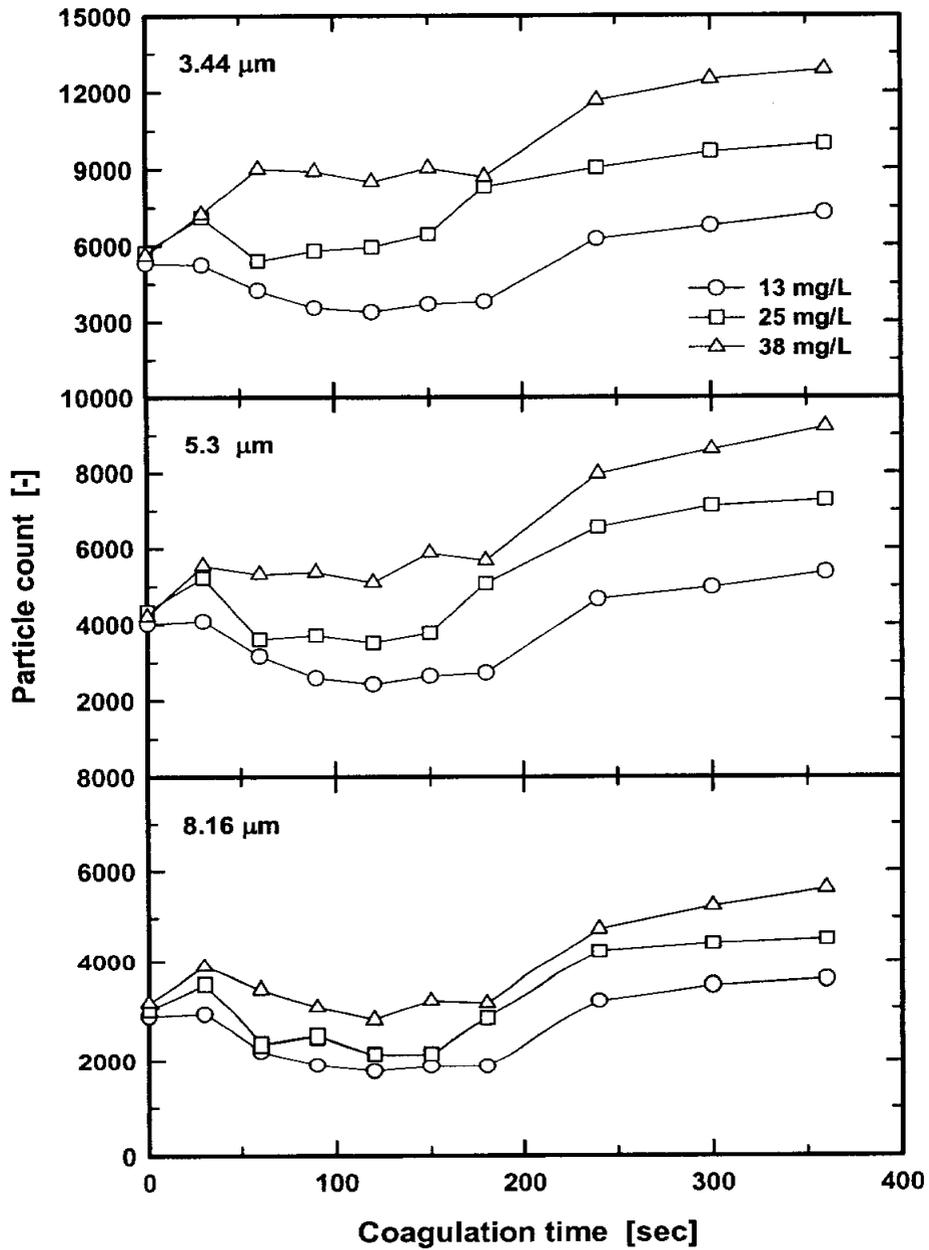


Fig. 4.2 Particles count variation with coagulant dose and coagulation time for coagulant PACl

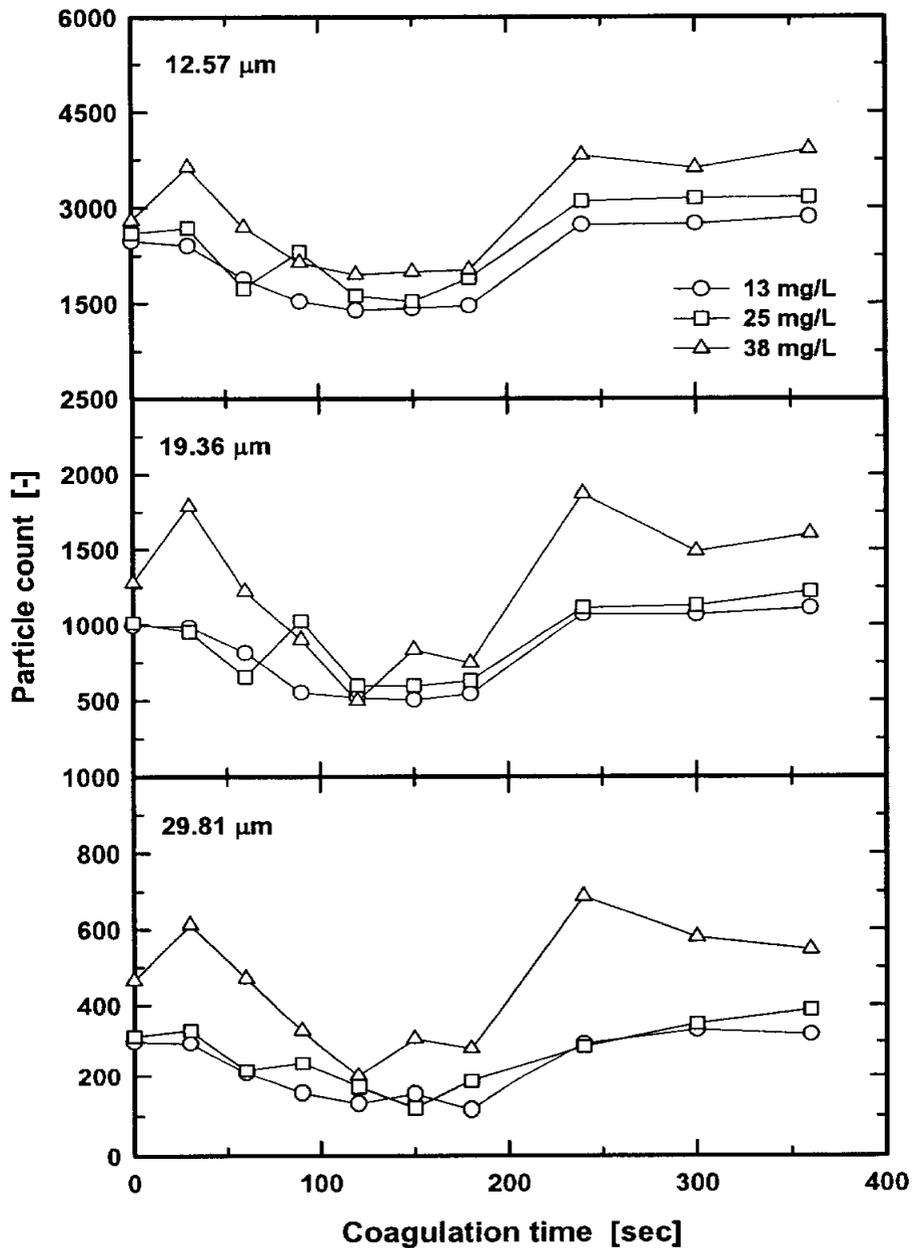


Fig. 4.2 Particles count variation with coagulant dose and coagulation time for coagulant PACl

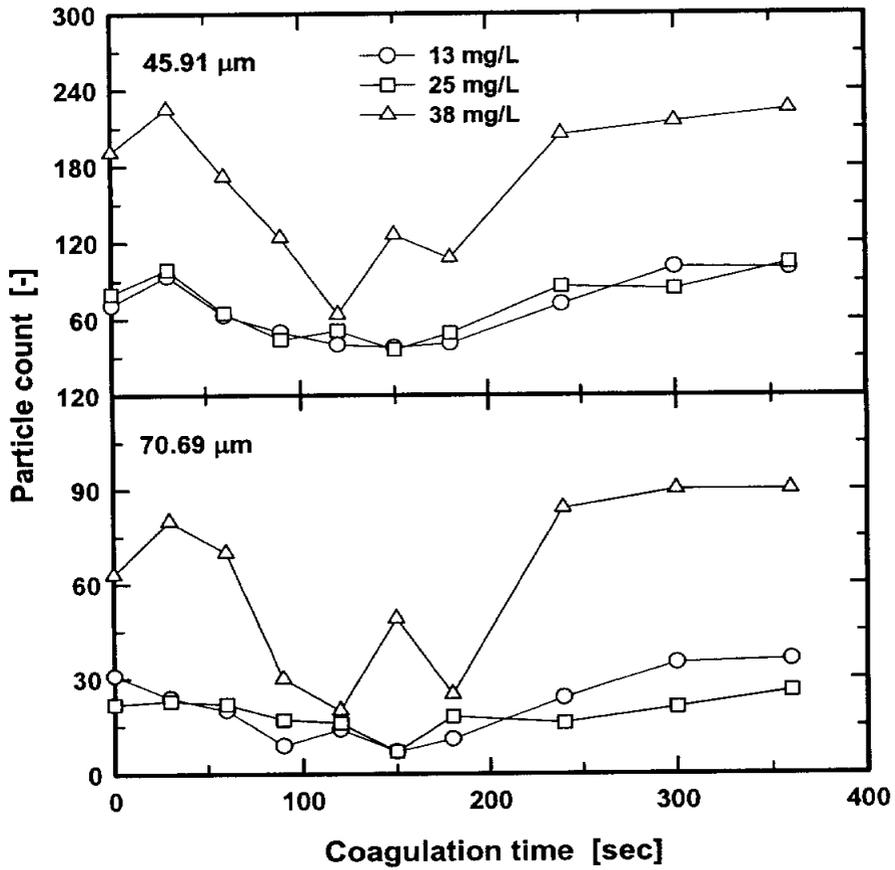


Fig. 4.2 Particles count variation with coagulant dose and coagulation time for coagulant PACl

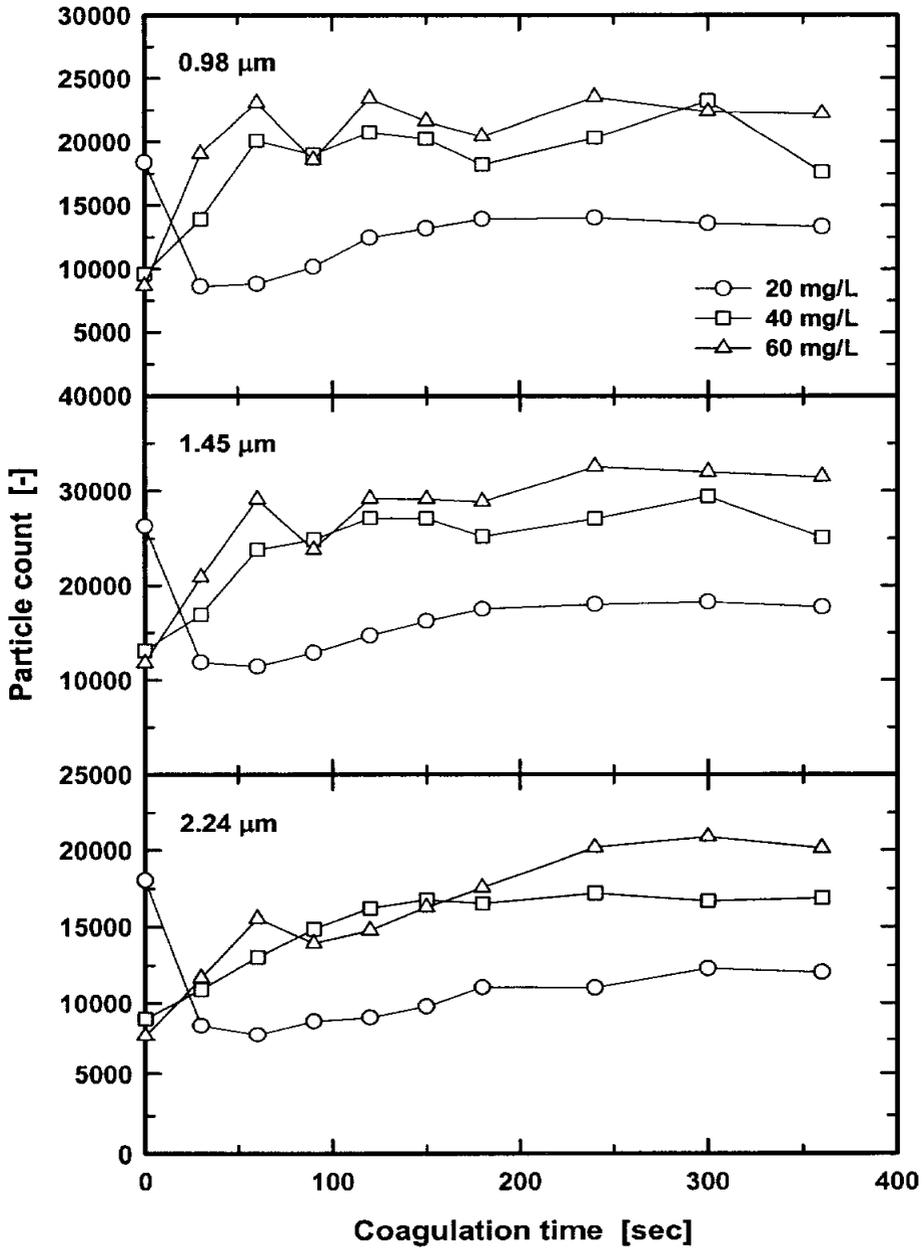


Fig. 4.3 Particles count variation with coagulant dose and coagulation time for coagulant Alum

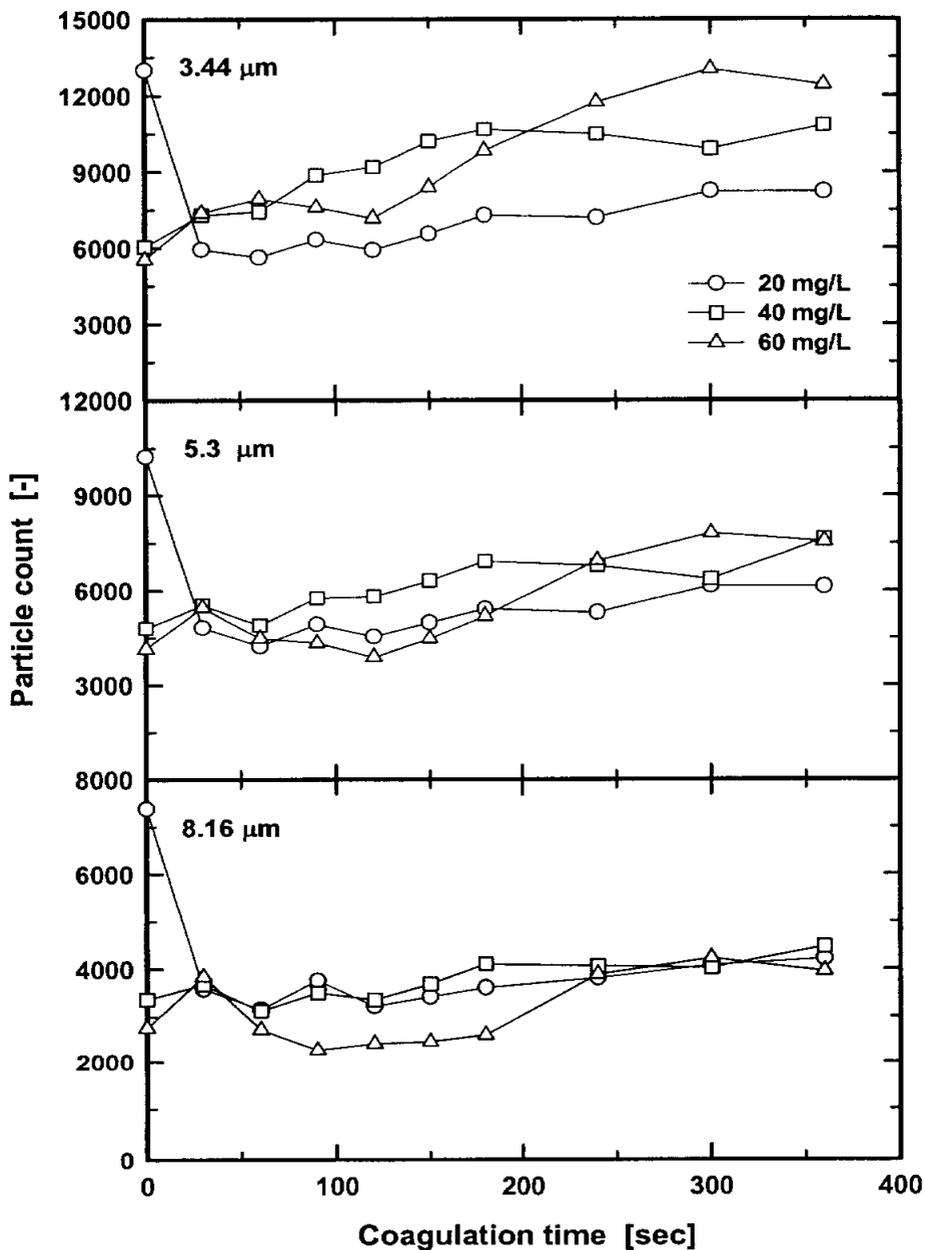


Fig. 4.3 Particles count variation with coagulant dose and coagulation time for coagulant Alum

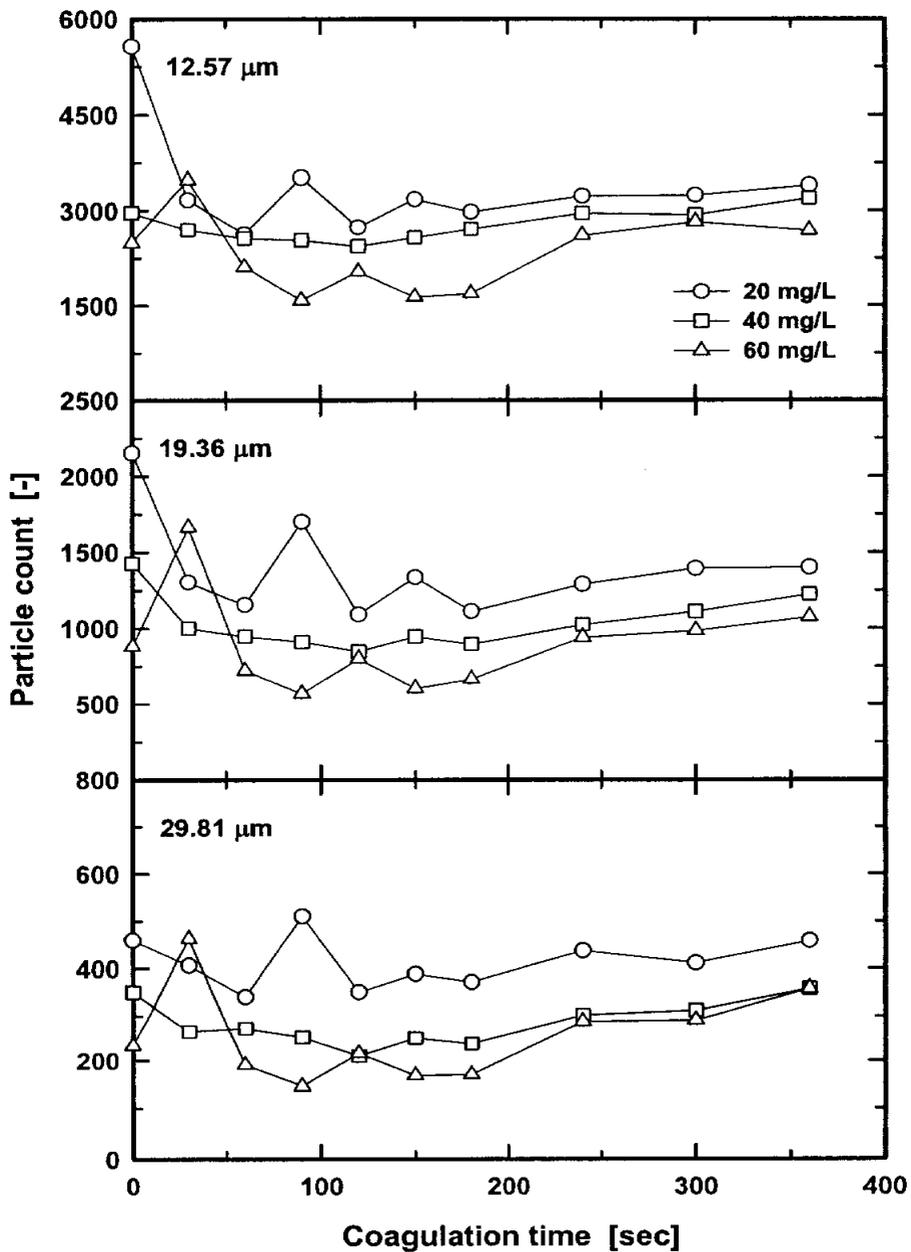


Fig. 4.3 Particles count variation with coagulant dose and coagulation time for coagulant Alum

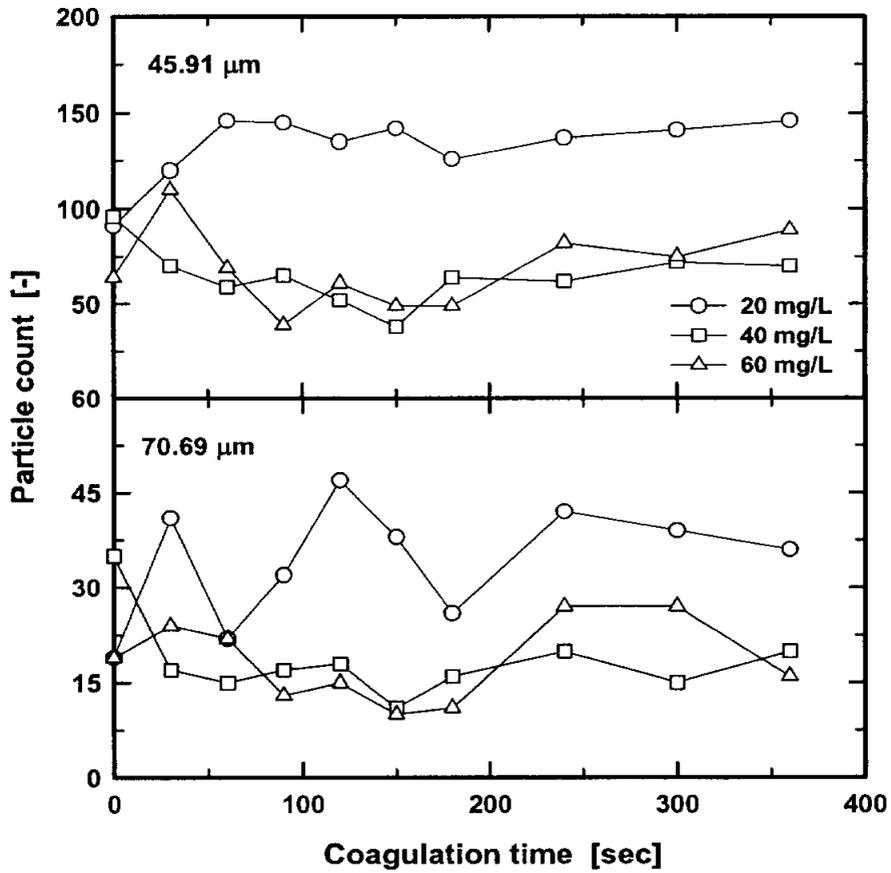


Fig. 4.3 Particles count variation with coagulant dose and coagulation time for coagulant Alum

4.3 혼화강도 별 수중입자의 변화 특성

4.3.1 알루미늄 농도(0.7mg/L)

탁도 2.6NTU, 알칼리도 52mg/L, pH7.4인 원수를 이용하여 응집제 PSOM 20mg/L, PACl 13mg/L를 주입한 후 혼화 강도별 입자의 변화 과정을 Fig. 4.4~4.5에 나타냈다. 이때 순수한 알루미늄이 0.7mg/L으로 동일한 주입 농도이다. 또한 혼화에 사용된 회전수는 80, 120, 160 rpm으로 속도구배로는 90, 140, 230 sec⁻¹ 였다.

응집제 PSOM을 20mg/L 주입 후 혼화강도 별 입도의 변화과정을 시간적으로 평가 해보면 0.94, 1.45, 2.24, 3.44, 5.3 μ m의 입자는 혼화 시간이 증가할수록 입자의 수가 감소하는 경향을 보였으나, 회전수에 따라서 입자의 변화과정은 다르게 나타났다. 혼화강도가 120, 160rpm에서 입자의 감소현상이 80rpm에 비해 뚜렷하게 나타났으며, 혼화강도 120rpm과 160rpm 에서는 입자의 변화과정이 비슷하게 나타났다.

입경 8.16 μ m입자는 응집시간에 따른 입도의 변화가 크게 나타나지 않았고 또한 회전수에 따라서도 큰 변화가 없었다.

입경이 12.57 μ m 이상인 큰 입경에서는 혼화시간에 따라서 입자의 수가 증가되는 현상이 나타났는데 이는 전화중화 및 흡착에 의해 입자의 크기가 크진 결과라고 보여진다.

그러나 혼화강도에 따른 입자 개수의 변화는 없어 큰 입자는 혼화강도에 따른 입자개수는 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

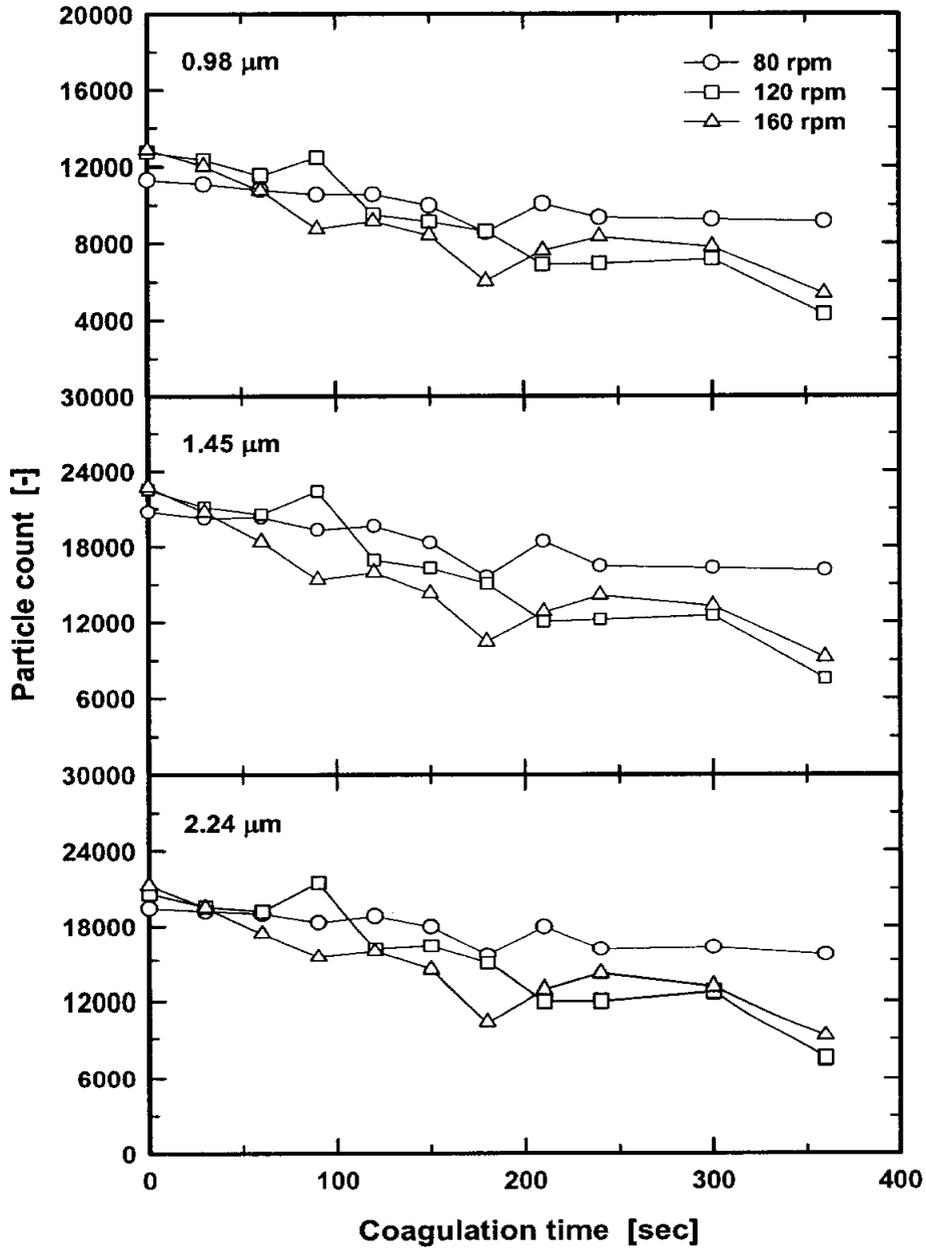


Fig. 4.4 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at Alum 20mg/L

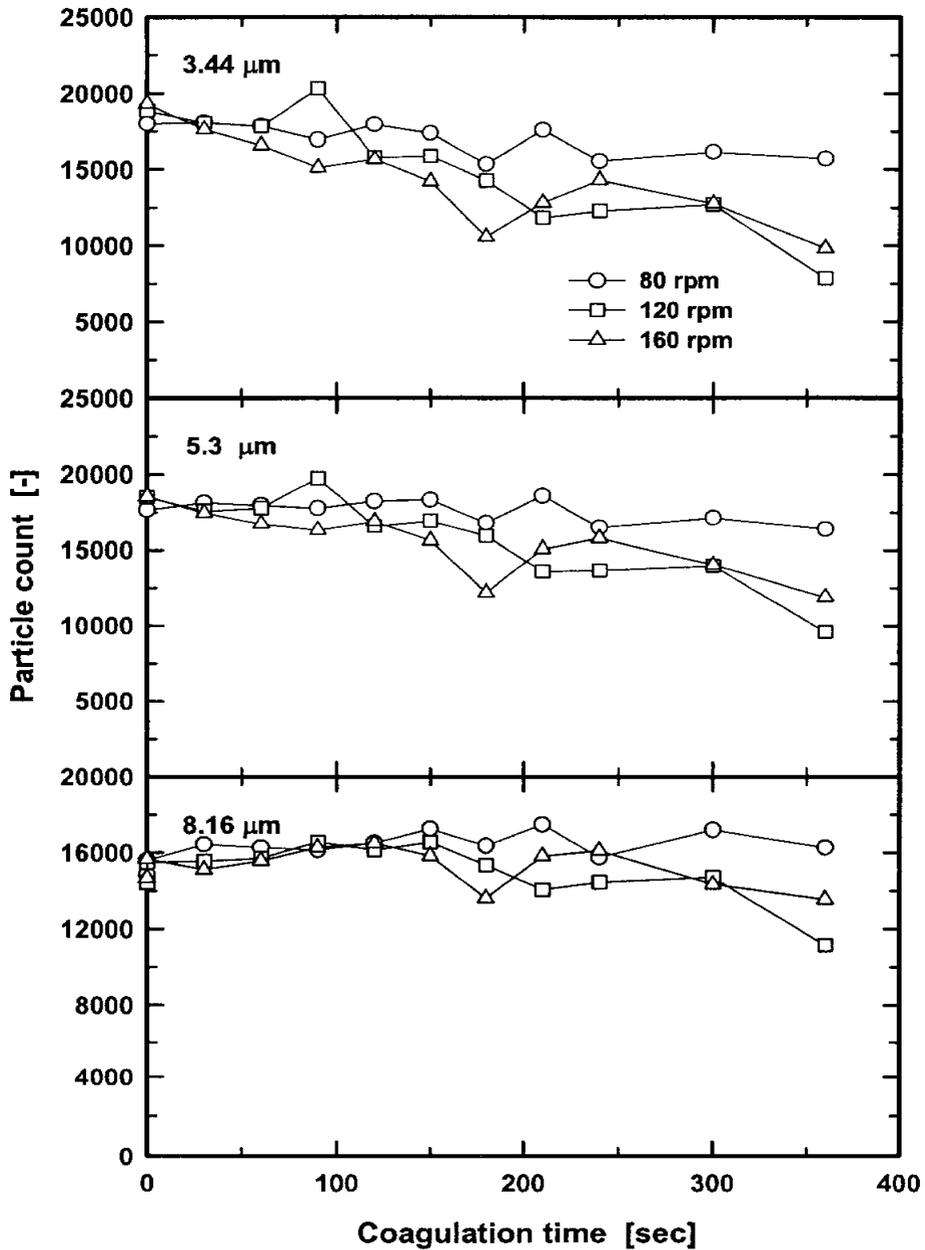


Fig. 4.4 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at Alum 20mg/L

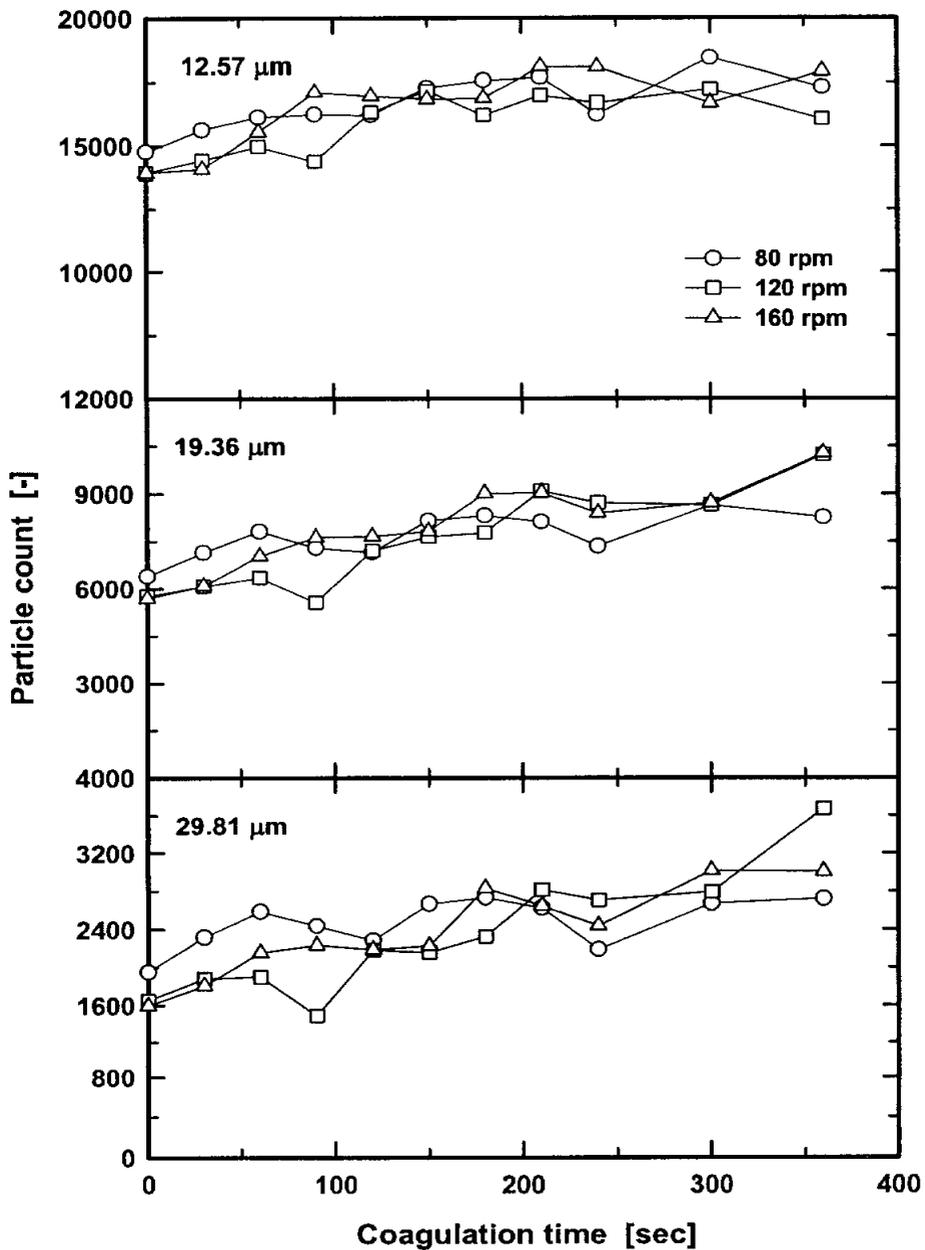


Fig. 4.4 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at Alum 20mg/L

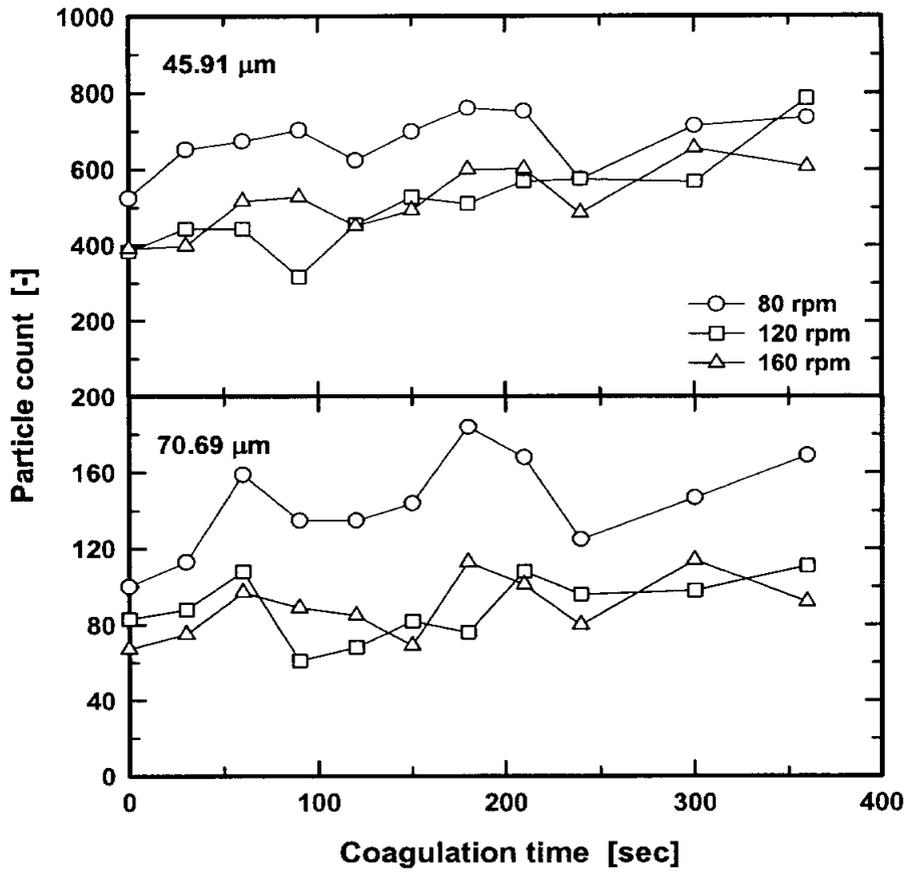


Fig. 4.4 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at Alum 20mg/L

응집제 PACl을 13mg/L 사용하여 혼화강도 및 혼화시간에 따라서 수중의 입도 변화를 Fig. 4.5에 도시하였는데 0.94, 1.45, 2.24, 3.44 μ m 크기의 입자는 혼화시간에 따라서 입자의 개수가 감소하는 경향을 보였다. 그러나 앞의 응집제 알룸에 비해서 입자의 감소율이 낮았으며, 응집제 알룸을 사용하였을 경우에는 5.3 μ m 크기의 입자도 감소하는 경향을 보였으나 응집제 PACl에서는 입경이 5.3 μ m인 입자개수의 변화는 거의 없었으며 입경 8.16에서 19.36 μ m는 혼화시간의 증가에 따라서 입자의 개수도 완만히 증가하는 현상을 보였다. 29.81 μ m 이상의 입자군은 응집시간의 증가에 따른 입자군의 변화는 거의 없이 원수와 유사한 경향을 보였다.

응집제 알룸 20mg/L을 주입한 경우가 PACl 13mg/L을 주입한 경우보다 5.3 μ m 이하의 작은 입자의 감소율이 컸는데 이는 알룸 중의 알루미늄 농도가 PACl과 동일한 농도이나 응집제 알룸에 포함된 황산이 PACl에 비해 수중의 pH를 많이 저하시켜 응집조건을 양호하게 유도하였기 때문에 응집효율이 높았기 때문인 것으로 판단되어진다.

Matsui 등의 논문 결과에 의하면 고분자 응집제인 PACl이 알룸에 비해 응집효과가 높은 것으로 보고하였는데 본 실험 결과는 상이하게 나타났다.⁶⁾

이러한 이유로는 응집제 주입률이 높은 알룸이 PACl에 비해 수중의 pH를 많이 저감시켜 응집조건이 좋았기 때문인 것으로 판단된다.

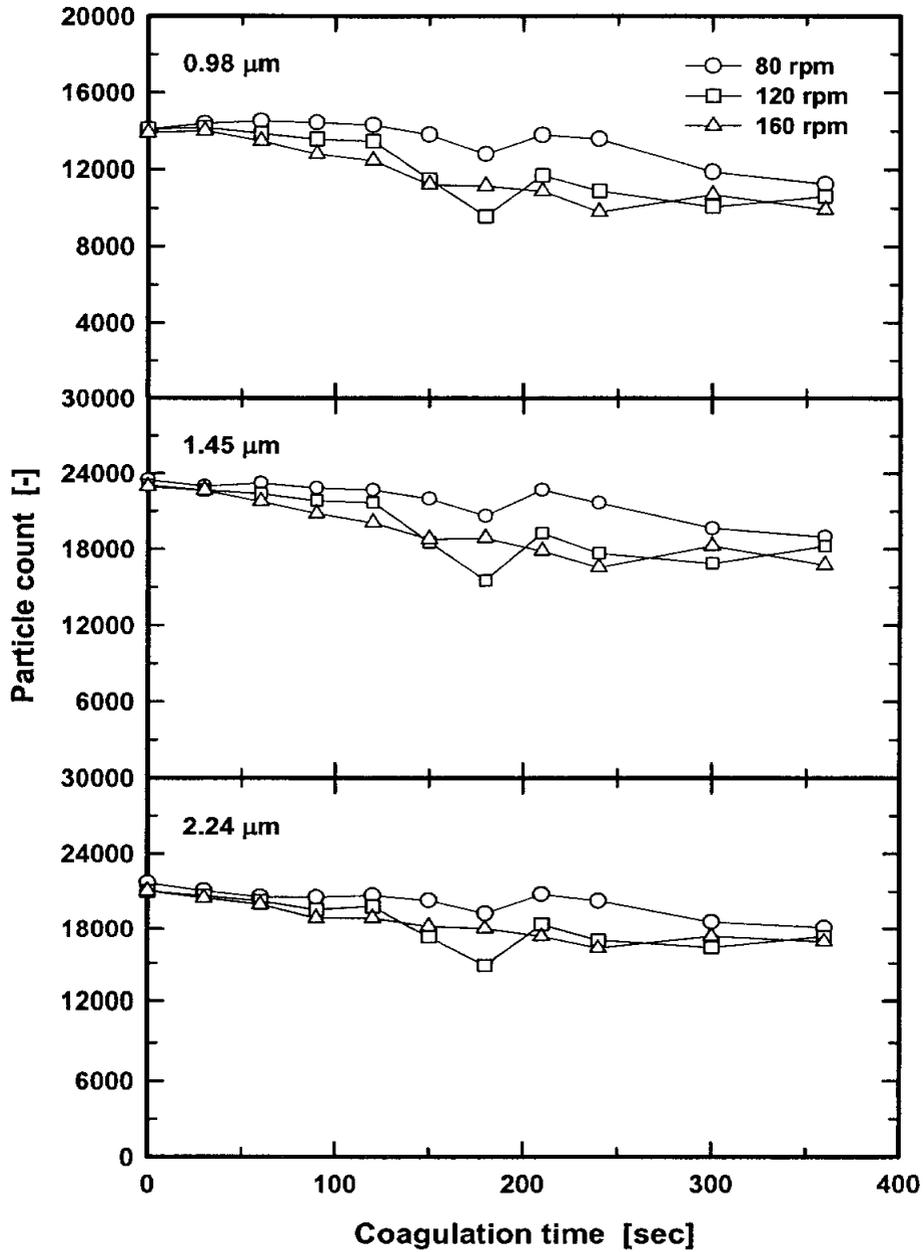


Fig. 4.5 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at PACl 13mg/L

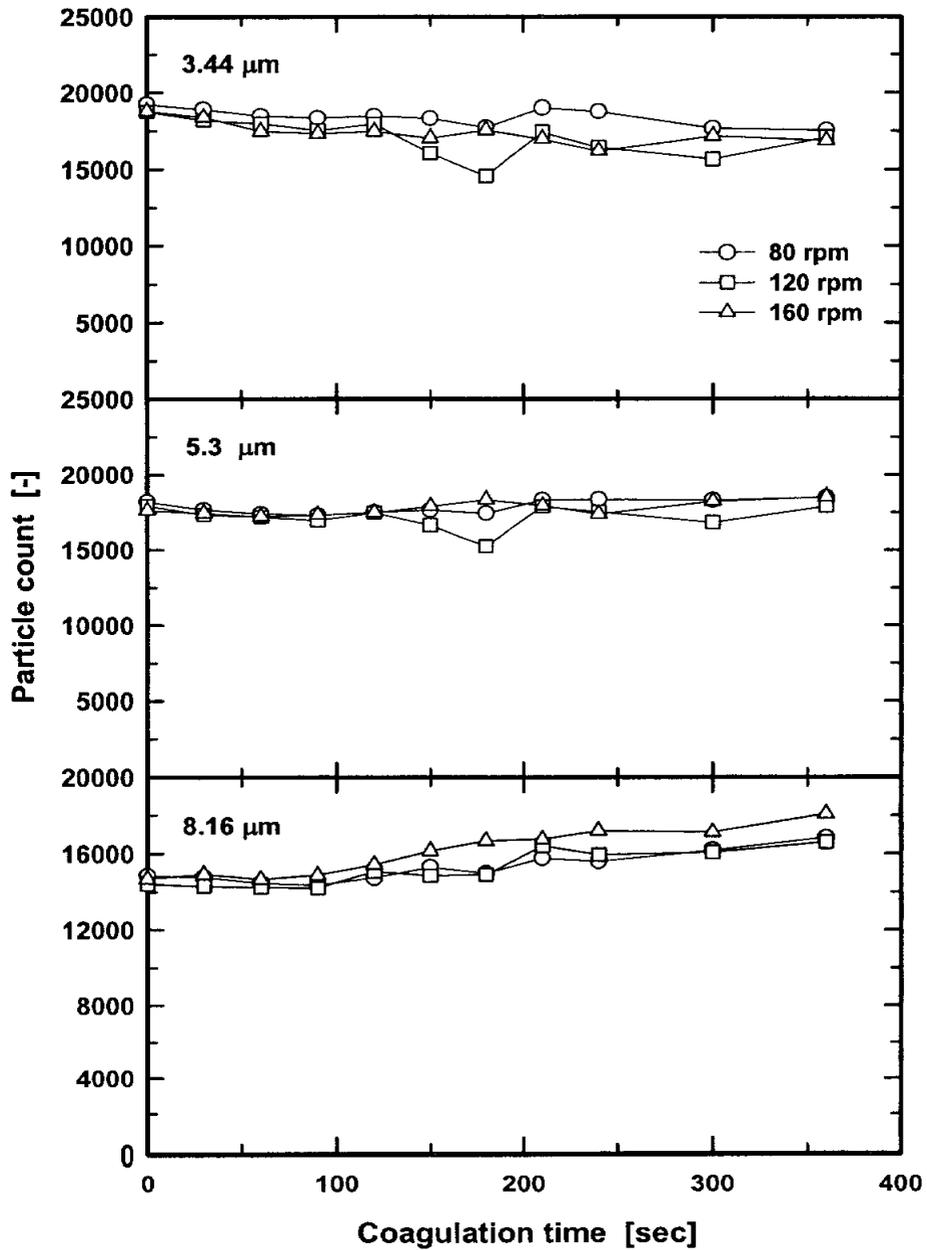


Fig. 4.5 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at PACl 13mg/L

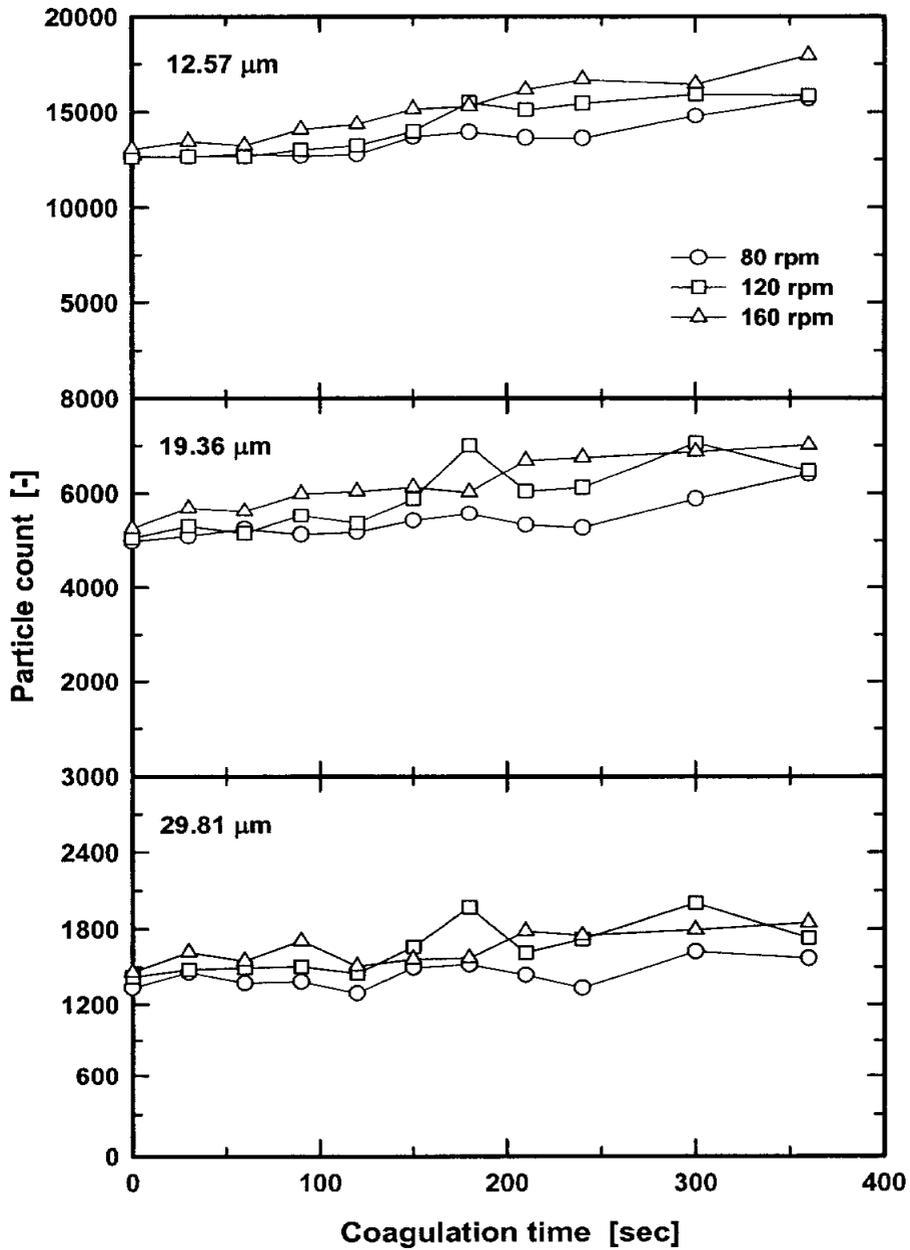


Fig. 4.5 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at PACl 13mg/L

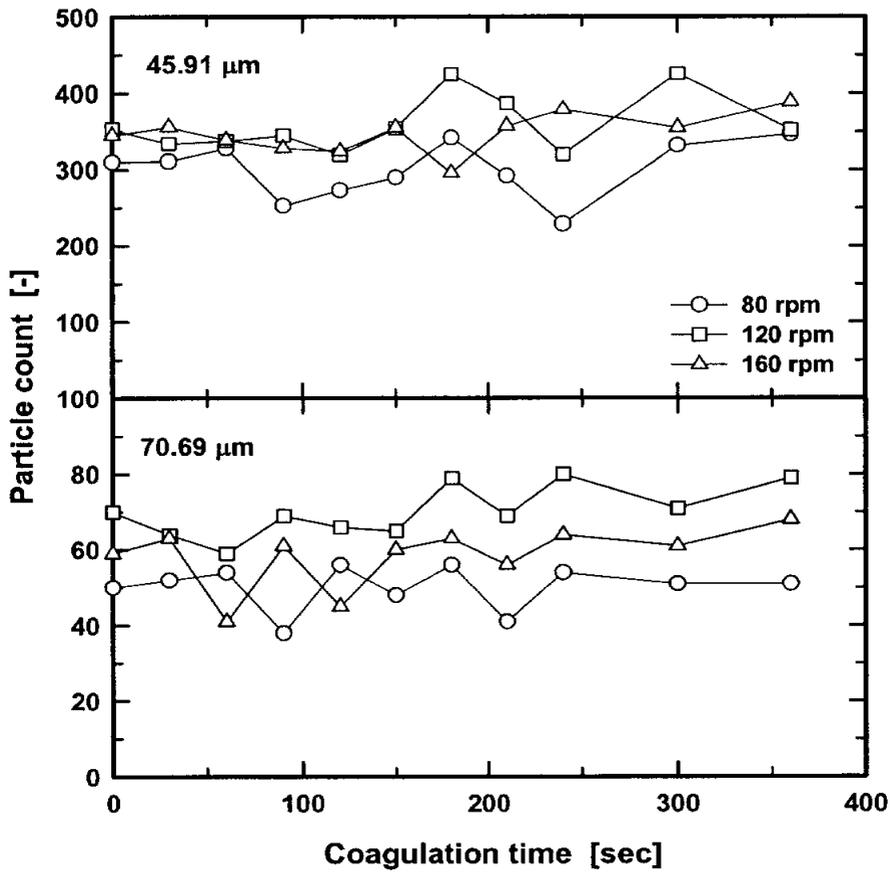


Fig. 4.5 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at PACl 13mg/L

4.3.2 알루미늄 농도(1.4mg/L)

Fig. 4.6~4.7은 탁도 14.2NTU, pH 7.5, 알칼리도 50mg/L인 원수에 응집제 주입률을 알룸 40mg/L, PACl 25mg/L 으로 한 후 혼화시간과 혼화강도에 따른 변화를 나타낸 것으로 알룸인 경우 회전수에 관계 없이 입경 0.94~8.16 μ m는 모두 혼화시간에 따라 계속 저감하는 경향을 보였으며 12.57 μ m 입자는 개수의 변화가 거의 없었다. 혼화강도에 따른 입도 변화는 0.94 μ m인 입자의 경우 혼화강도에 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며 그 보다 큰 입경의 입자는 혼화강도에 따른 변화가 적은 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 원수중에 주입된 응집제량이 충분한 Sweep 응집이 이루어진 현상으로 판단된다.

19.36 μ m 입자는 혼화시간과 함께 조금 증가하는 경향을 보였으나 29.81 μ m 및 45.91 μ m 입자의 개수 혼화시간 별 증가율은 초기에 비해 2배 정도 되었으며 그보다 큰 입자는 초기농도와 큰 변화가 없었다.

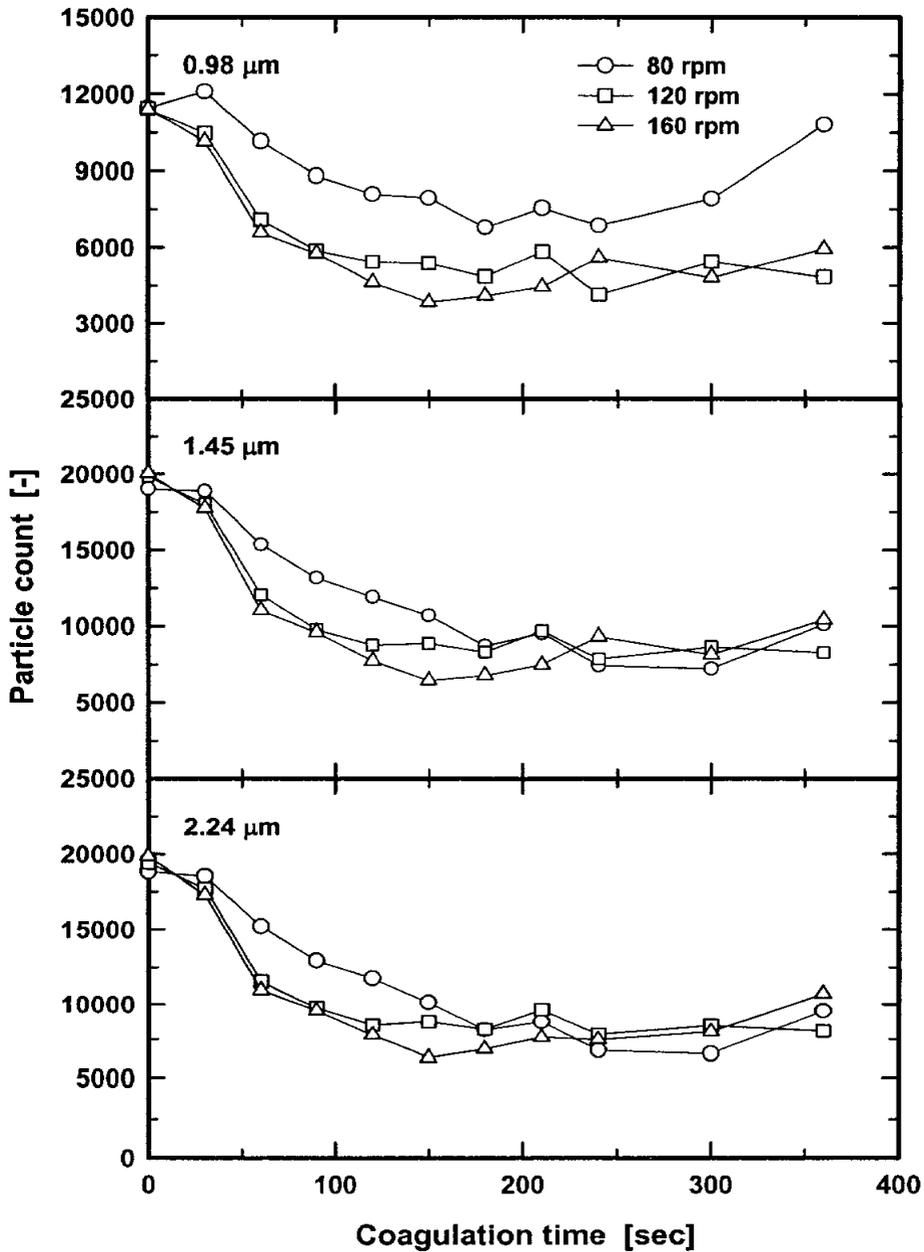


Fig. 4.6 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at Alum 40mg/L

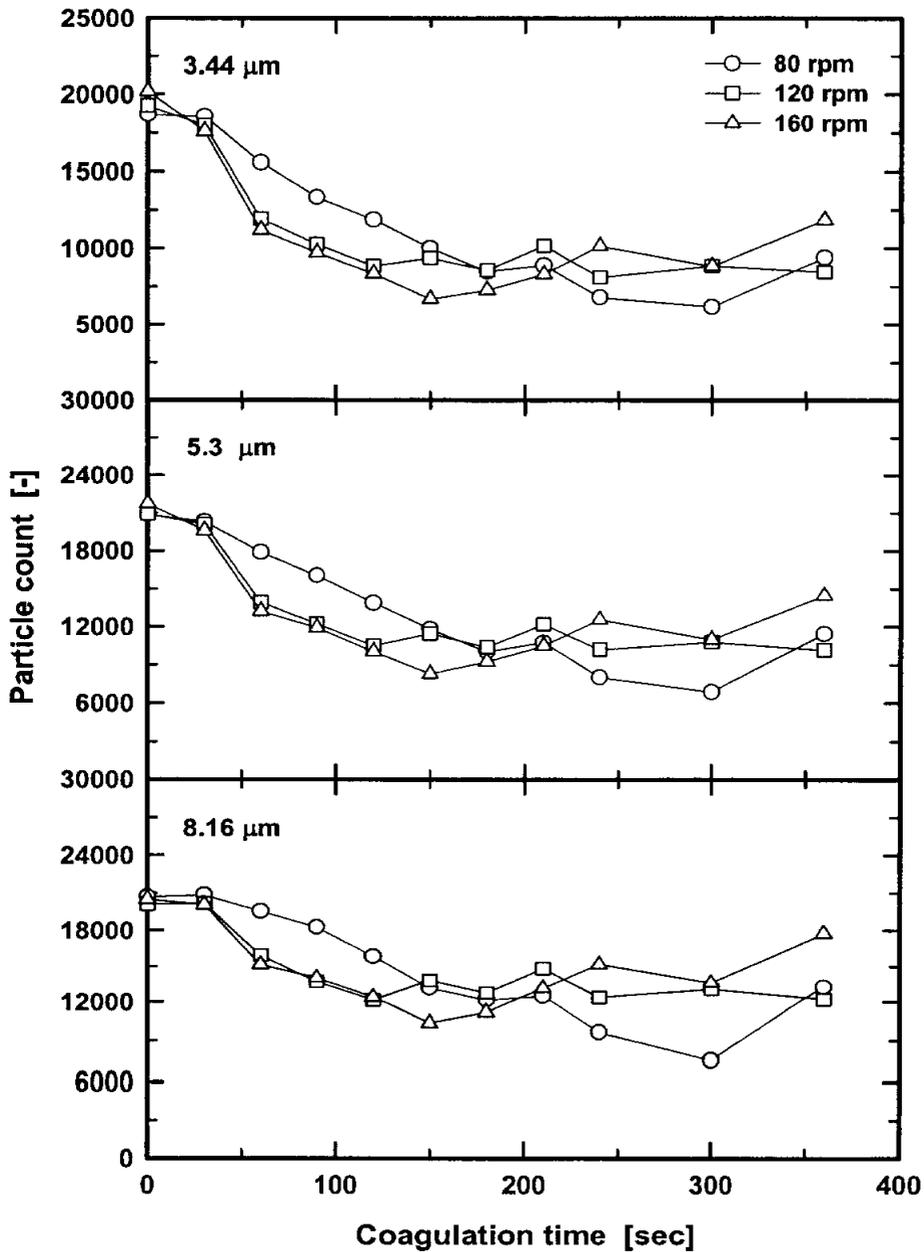


Fig. 4.6 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at Alum 40mg/L

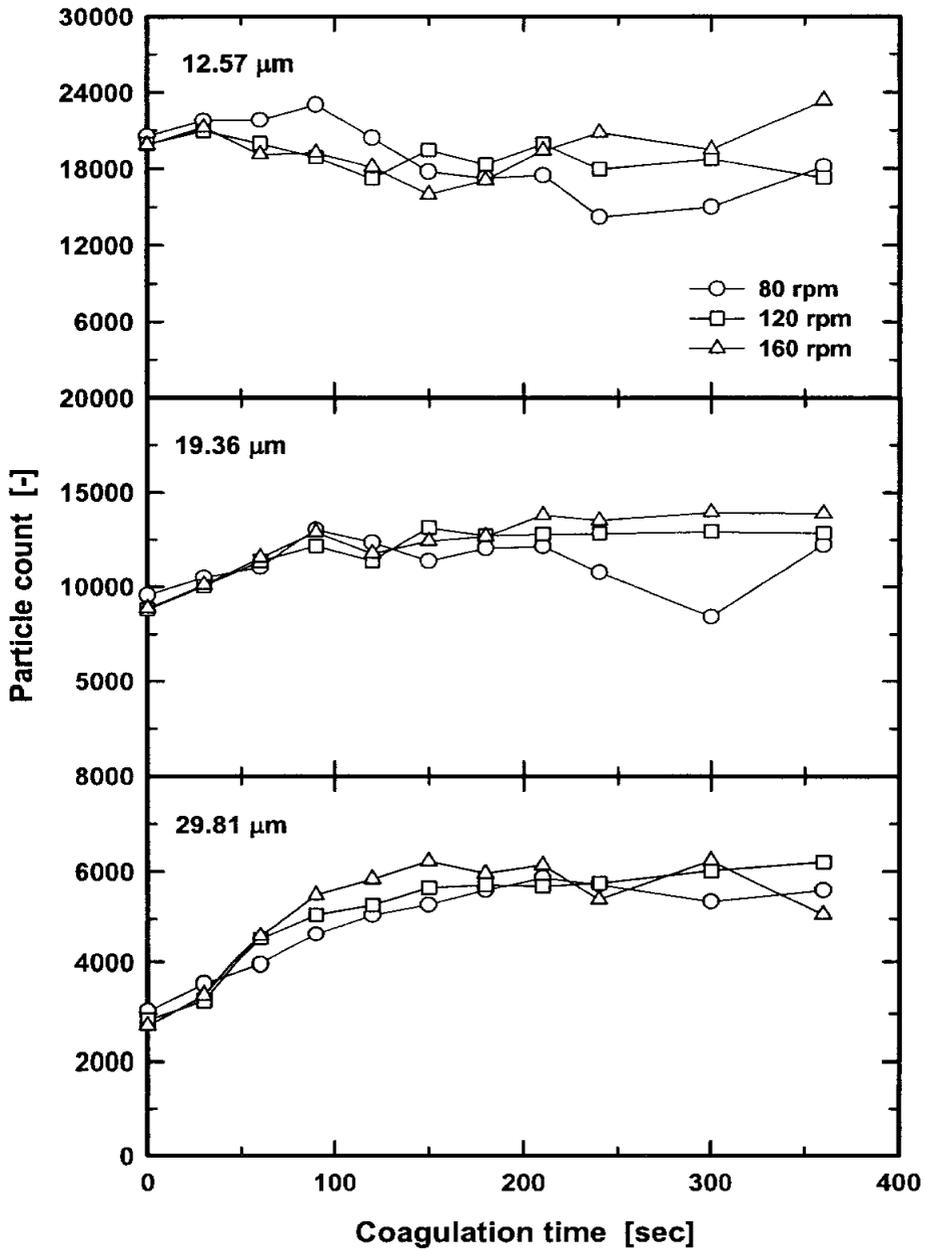


Fig. 4.6 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at Alum 40mg/L

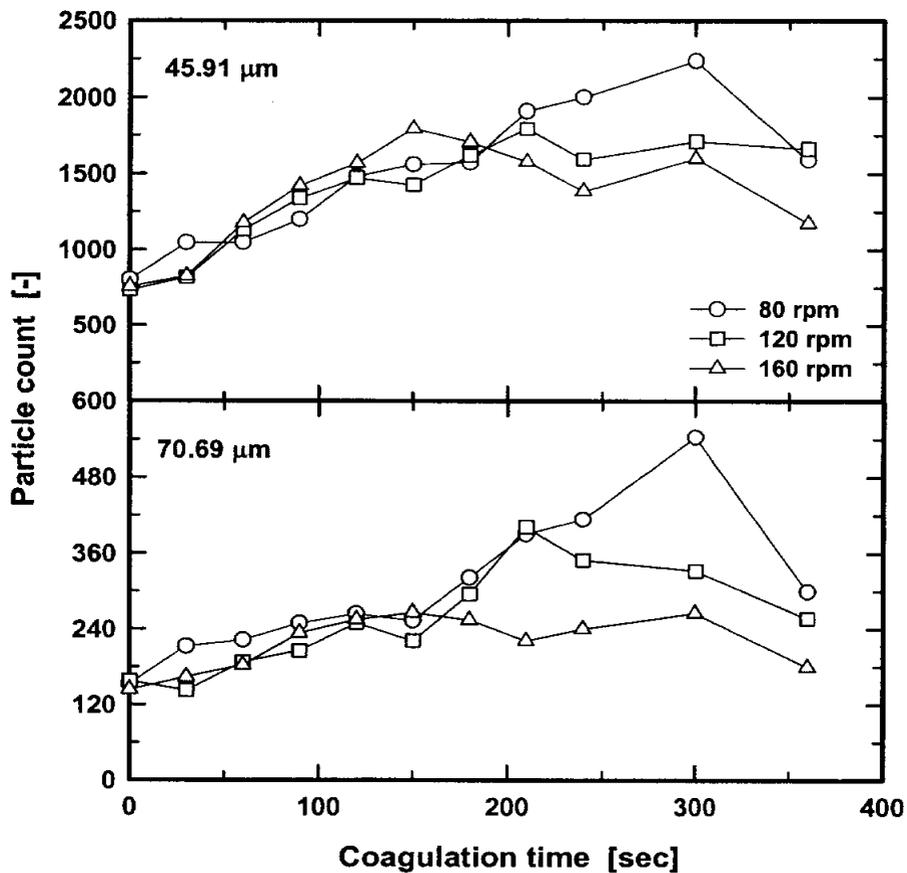


Fig. 4.6 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at Alum 40mg/L

그에 반하여 응집제로 PACl을 사용한 경우 0.94, 1.45, 2.24, 3.44, 5.3 μ m 입자는 혼화시간의 증가에 따라 입자 개수가 감소하는 현상을 보였으며 혼화강도가 클수록 감소비율이 더욱 증가하는 현상을 보였다. 8.16 μ m 입자는 혼화강도 80rpm에서는 거의 변화가 없었으나 120, 160rpm에서는 어느 감소하는 경향을 보였다. 12.57 μ m 입자는 혼화시간과 혼화강도에 큰 관계없이 원수와 유사한 입자수를 보였으며, 19.36, 29.81, 45.91 μ m 입자는 혼화시간이 증가함에 따라 입자수가 함께 증가하였으며 또한 혼화강도가 클수록 증가율이 높았다.

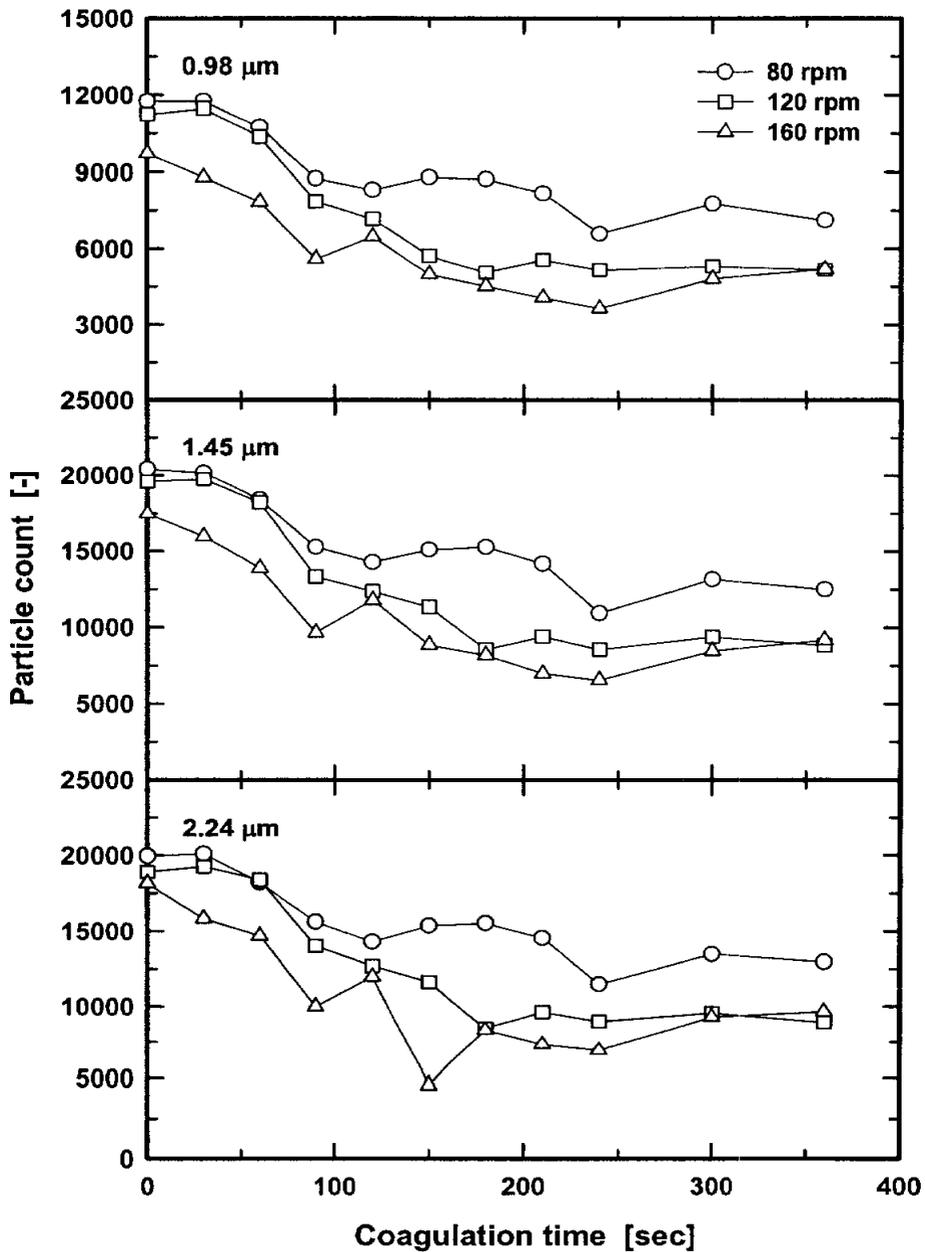


Fig. 4.7 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at PACl 25mg/L

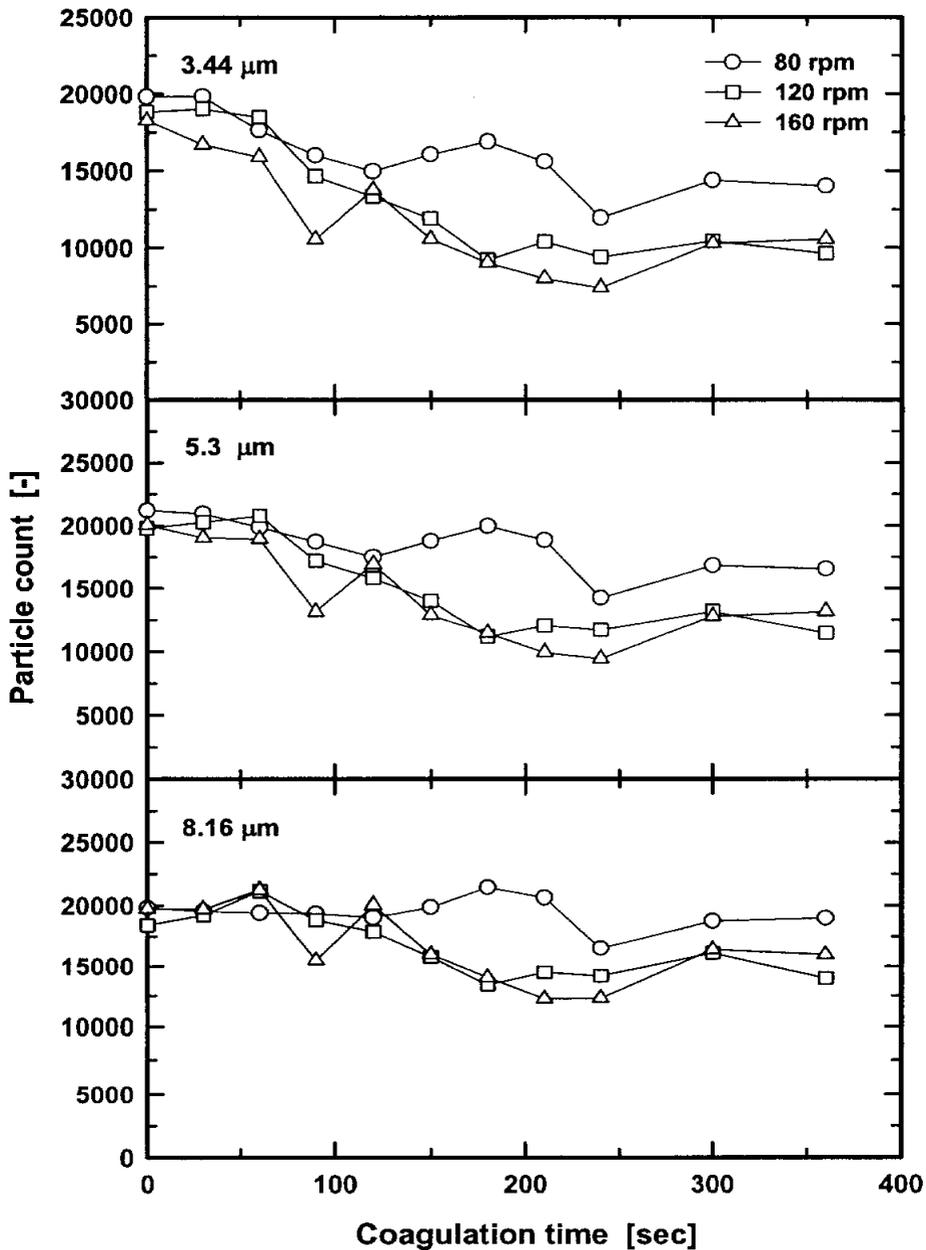


Fig. 4.7 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at PACl 25mg/L

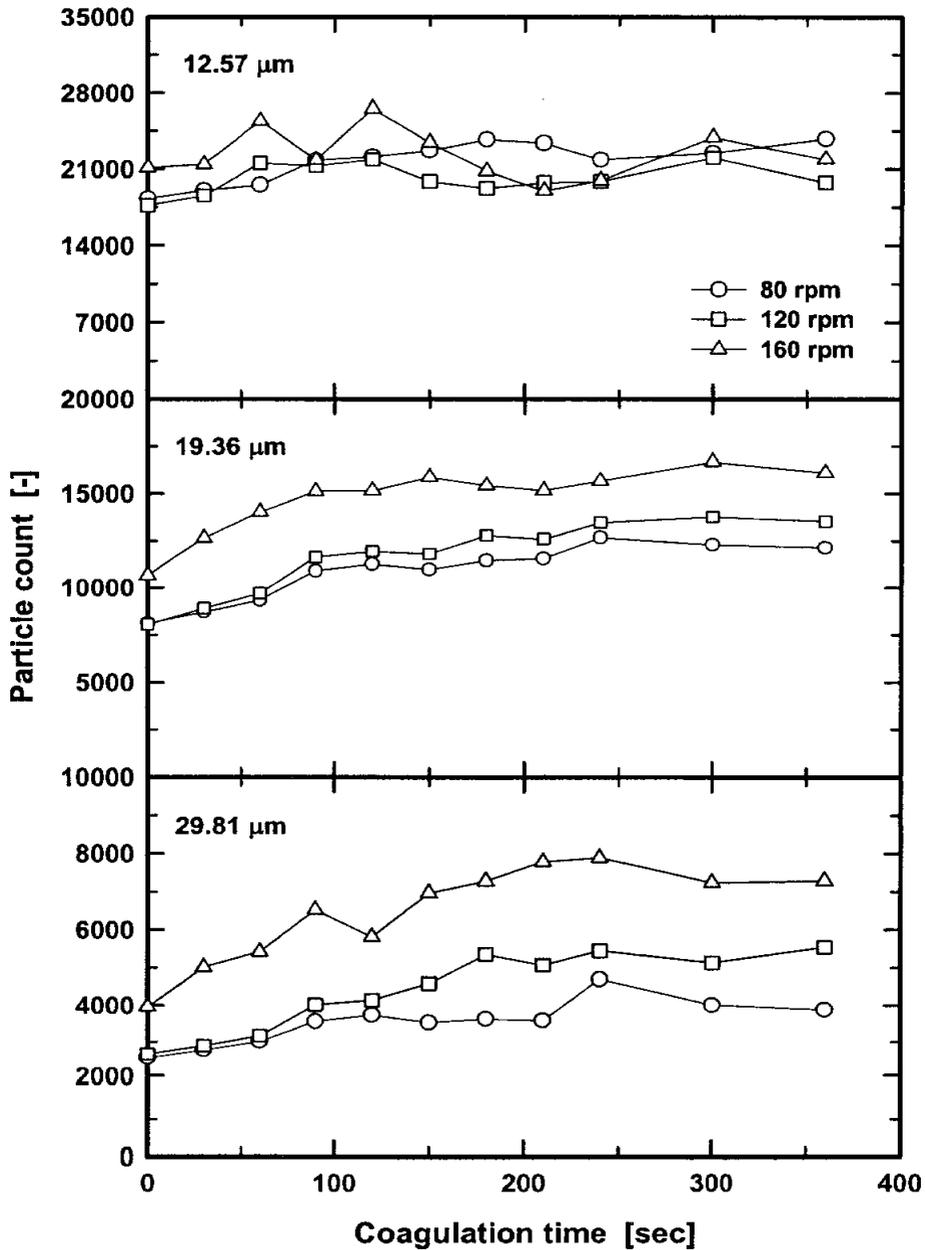


Fig. 4.7 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at PACl 25mg/L

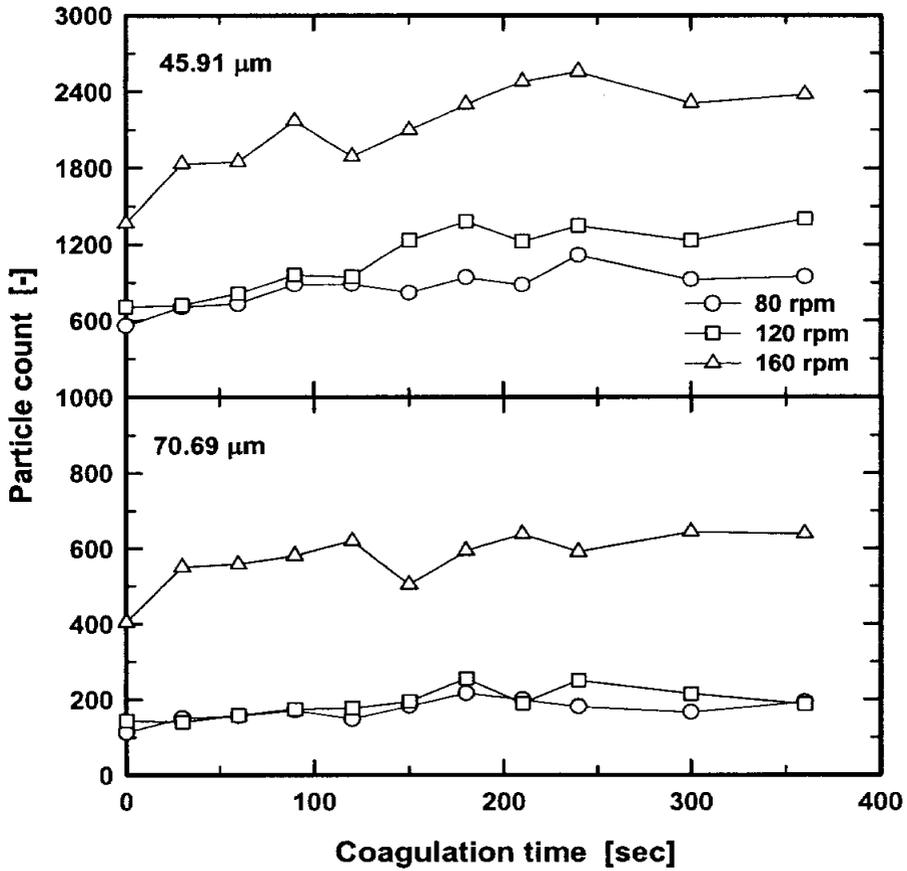


Fig. 4.7 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at PACl 25mg/L

4.3.3 알루미늄 농도(2.1mg/L)

Fig 4.8~4.9는 응집제 주입율이 알룸은 60 mg/L, PAC는 38mg/L 주입으로 충분한 응집제를 주입하여 Sweep 응집을 할 때의 조건을 나타낸 것으로 알룸을 60mg/L 주입 한 후 0.94, 1.45, 2.24, 3.44, 5.3, 8.16 μ m의 입자군의 입자개수는 응집시간 90초까지 급격히 감소하는 현상은 나타냈으며 그 이후로는 입자수의 변화가 크게 없이 일정한 입자수를 보였다. 그러나 혼화강도에 따른 입자군의 변화는 그다지 크게 나타나지 않았다. 즉 응집제 주입률이 적은 경우에는 혼화강도에 따른 입자군의 개수 변화 현상이 다르게 나타났으나 응집제 주입률이 충분하게 주입된 경우에는 혼화강도에 의한 영향이 적었다. 이는 전하중화에 의한 콜로이드입자간의 충돌에 의한 입자군의 형성보다는 Sweep 응집 의하여 충분한 수산화알루미늄의 형성으로 말미암아 적은 혼화강도에 의해서도 수중의 콜로이드 입자와 수산화알루미늄의 접촉기회가 증가된 결과라고 판단된다.

12.57 μ m입자의 경우는 원수중의 입자와 비슷한 입자수를 보이고 있었으며, 19.36, 29.81, 45.91 μ m 입자는 응집시간이 증가 할 수록 입자군의 수가 증가되는 현상을 보였다. 특히 19.36 μ m입자군의 증가폭이 다른 입자군에 비해 크게 나타났고, 혼화강도에 따른 입자군 폭의 변화도 적은 입경의 경우와 마찬가지로 크게 나타나지 않았다. 45.91 μ m 보다 큰 입자는 원수중의 입자수와 큰 변화가 없는 것으로 관찰되었다.

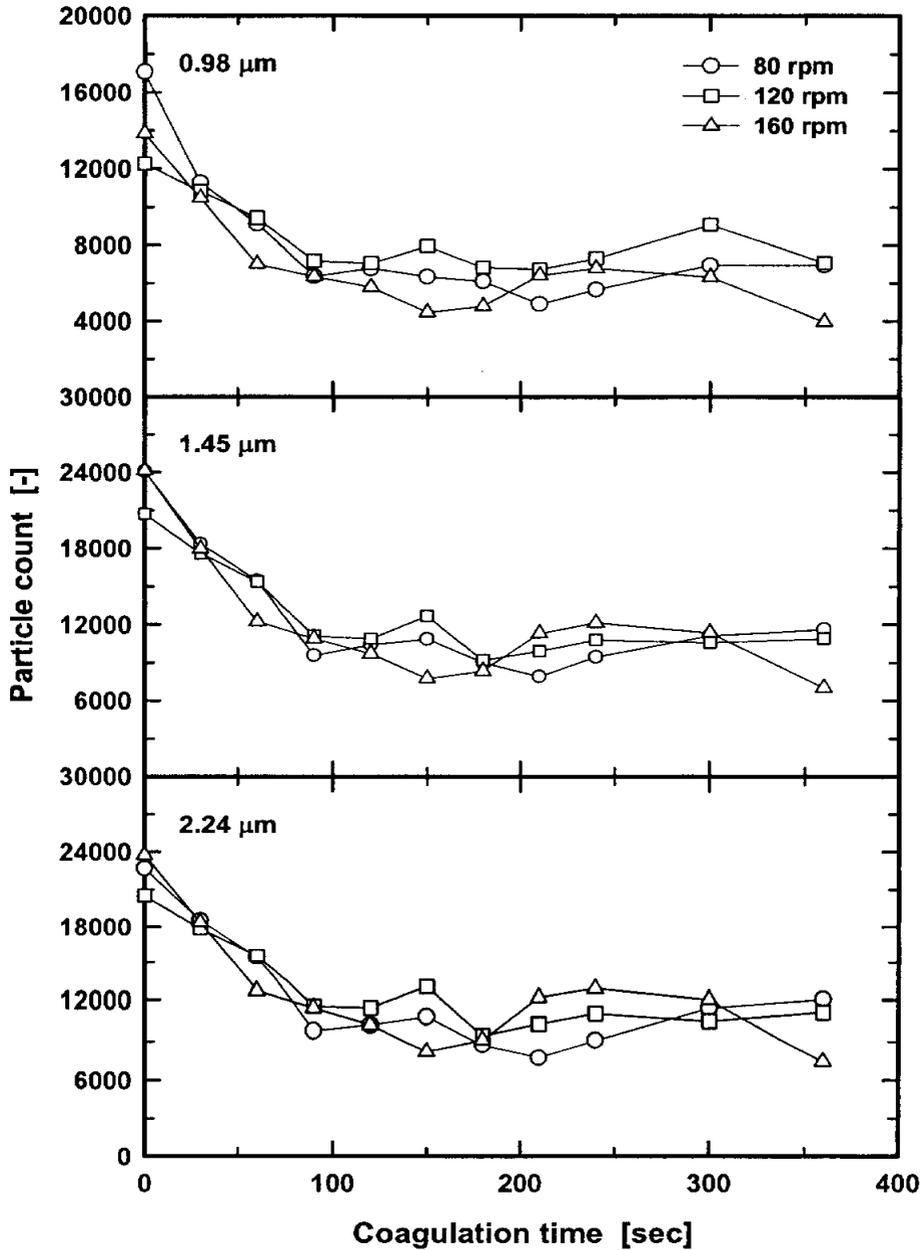


Fig. 4.8 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at Alum 60mg/L

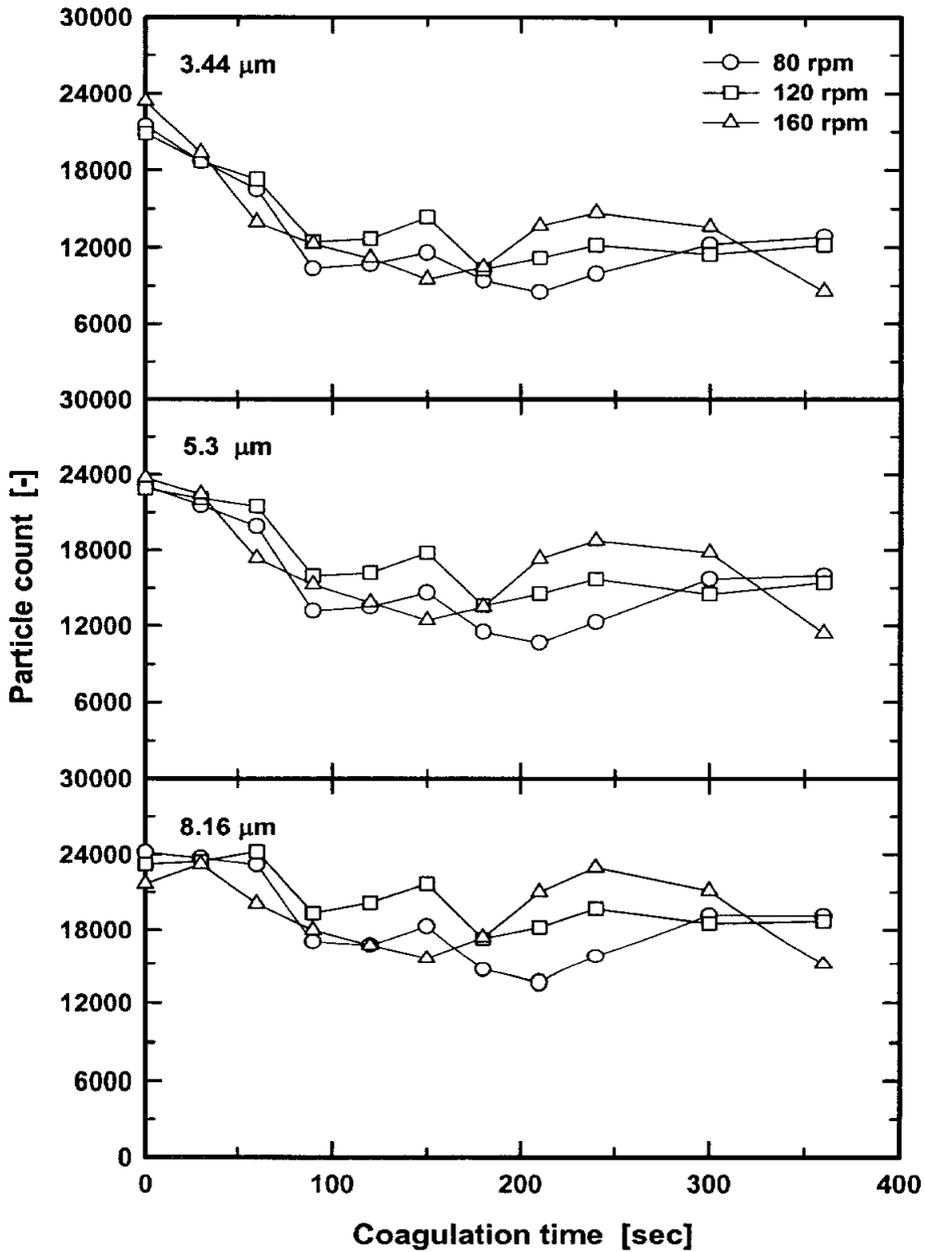


Fig. 4.8 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at Alum 60mg/L

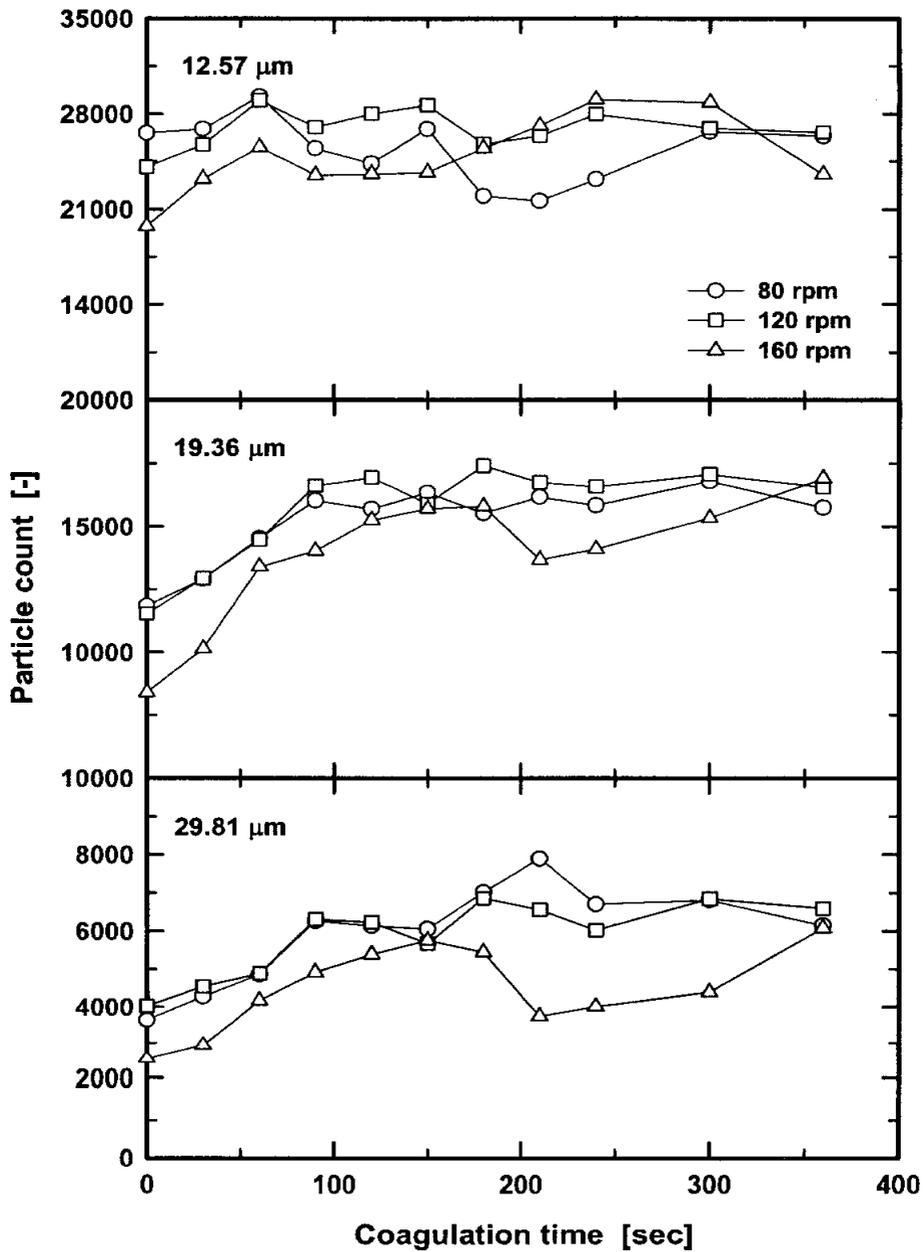


Fig. 4.8 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at Alum 60mg/L

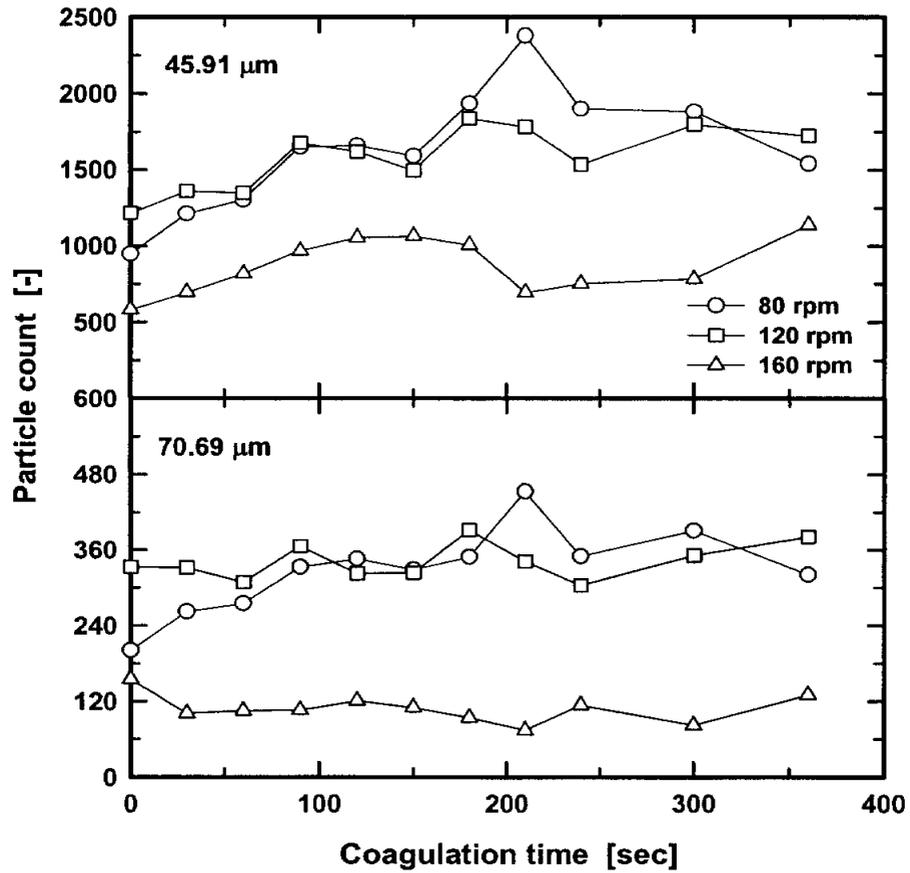


Fig. 4.8 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at Alum 60mg/L

응집제로 PACl을 38mg/L 사용한 경우 0.94, 1.45, 2.24, 3.44, 5.3, 8.16 μ m 입자군의 변화도 응집제 알룸을 사용한 경우와 마찬가지로 혼화시간 90초까지는 계속 입자군 수가 감소하다가 그 이후 부터는 입자군 수의 변화가 거의 없는 것으로 나타났으며 혼화강도에 따른 효율도 크게 나타나지 않은 것으로 판단되었다. 이는 PACl도 알룸과 마찬가지로 충분한 응집제의 주입으로 혼화강도가 강하지 않아도 수중에 충분한 수산화알루미늄의 생성으로 수중의 콜로이드 입자간의 접촉기회가 증가 된 때문인 것으로 판단된다.

12.57 μ m 입자군의 변화도 앞의 알룸 실험과 마찬가지로 혼화시간과 혼화강도에 큰 영향을 받지 않아 원수중의 입자와 비슷한 입자수를 보였으며, 그보다 큰 입자인 19.36, 29.81, 45.91 μ m 입자는 응집시간의 증가와 함께 입자군의 수가 증가 되어가는 현상을 보였으나 혼화강도에 따른 입자군의 변화과정은 뚜렷하게 나타나지 않았다.

70.69 μ m 이상인 입자군에 있어서는 혼화강도와 혼화시간에 따른 변화가 있는지 정확한 판단을 하기 어려웠다.

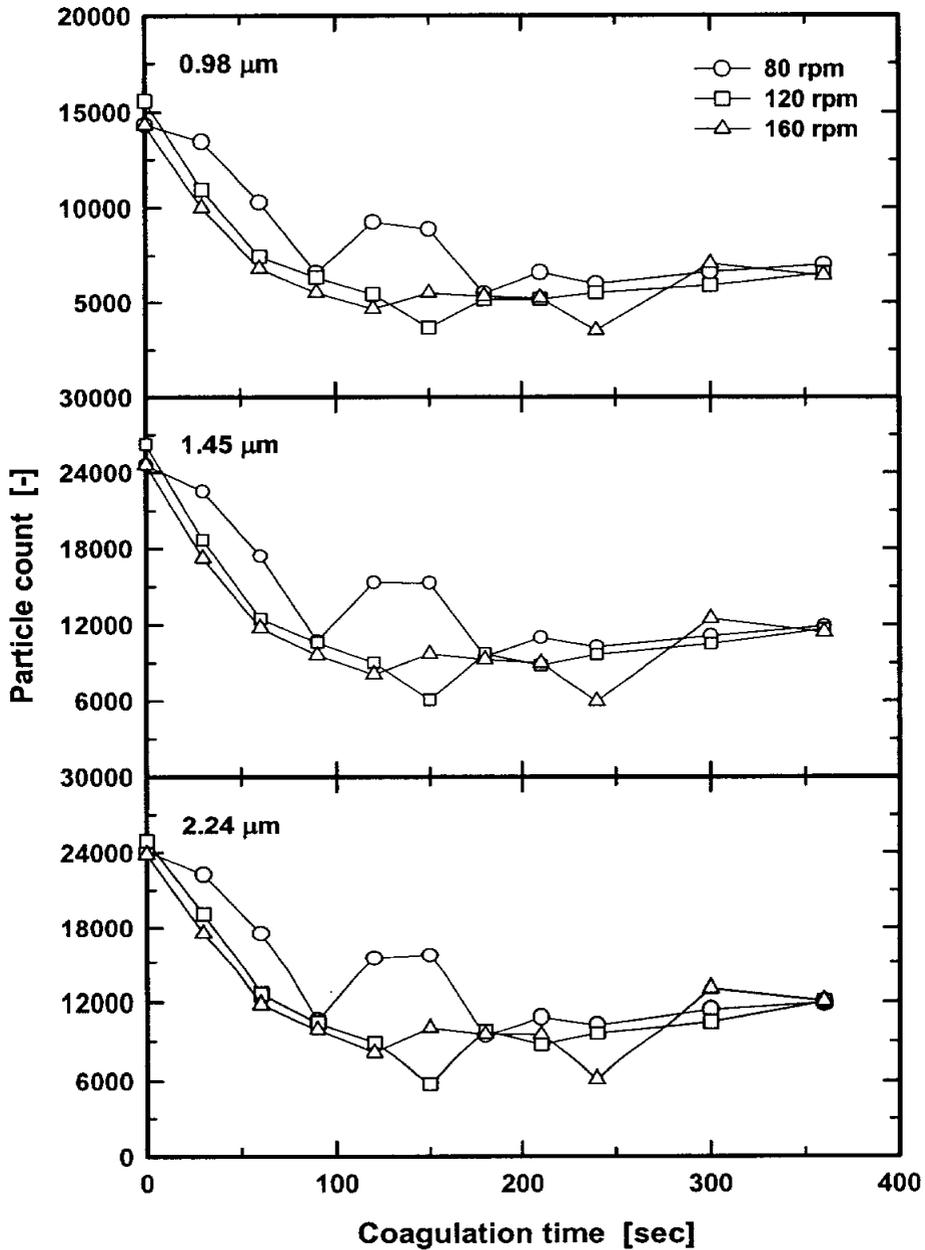


Fig. 4.9 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at PACl 38mg/L

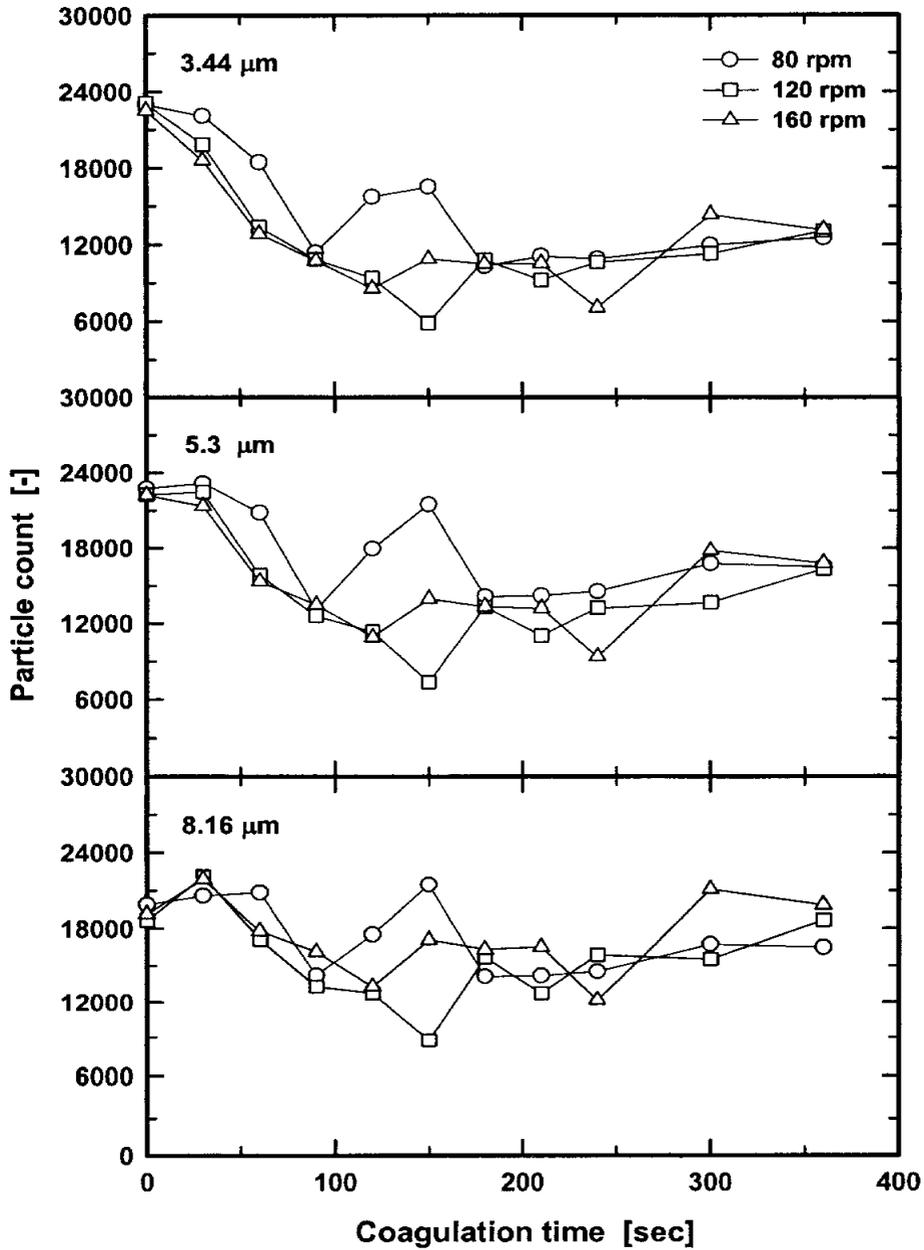


Fig. 4.9 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at PACl 38mg/L

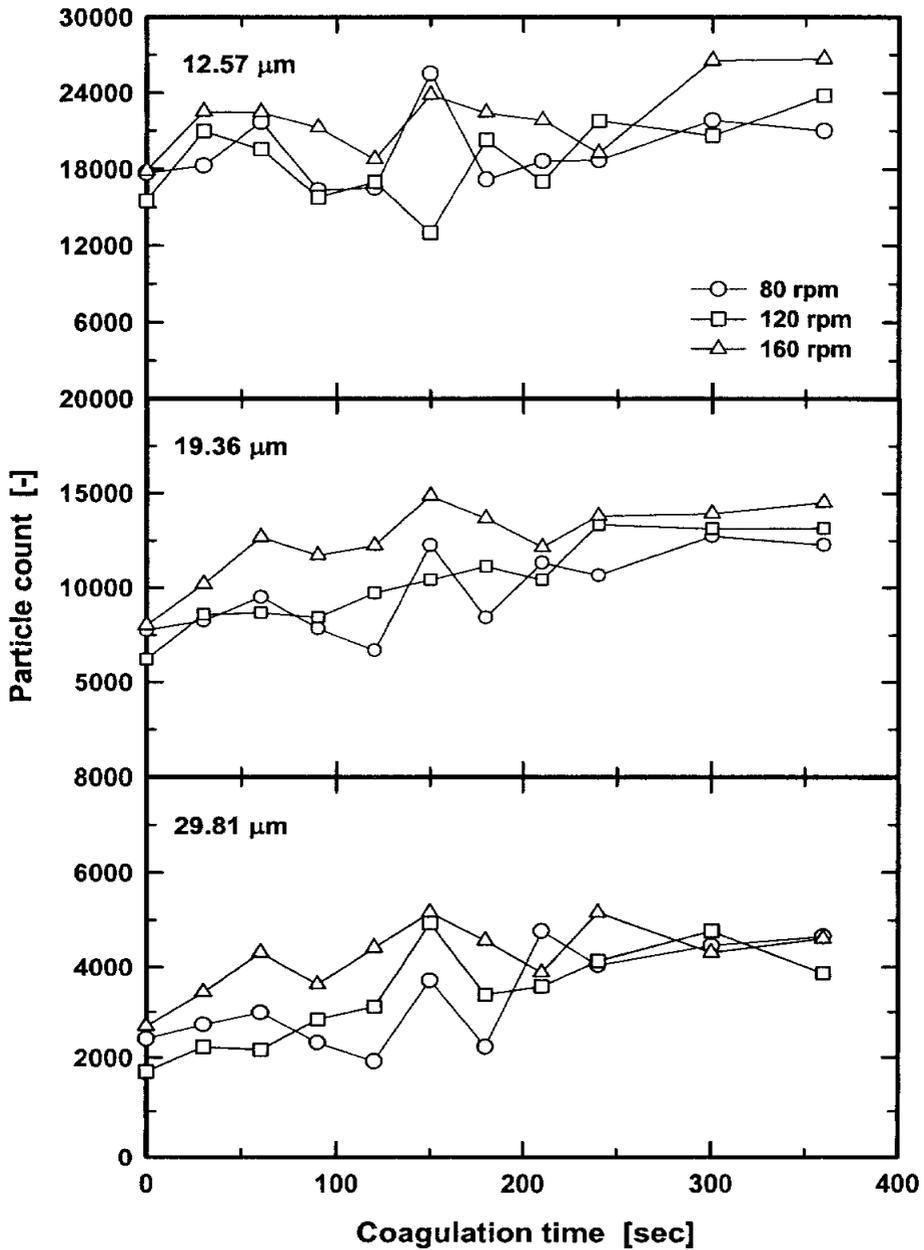


Fig. 4.9 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at PACl 38mg/L

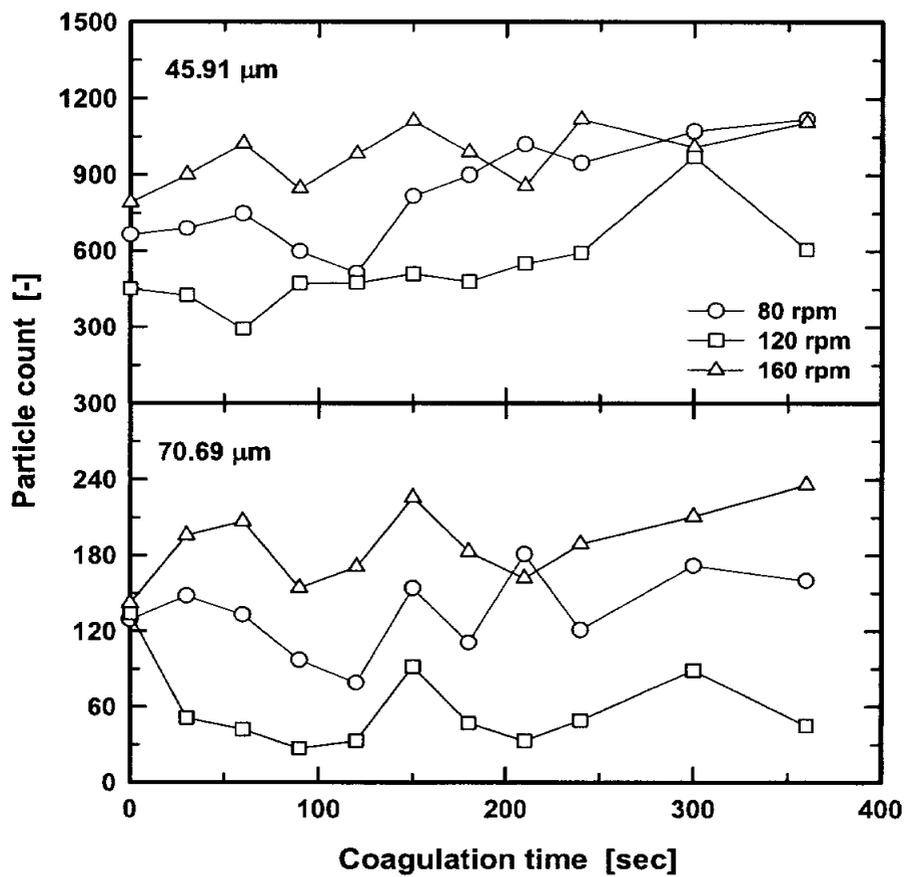


Fig. 4.9 Particles count variation with mixing intensity and coagulation time at PACl 38mg/L

4.3.4 종합 평가

이상의 결과를 정리하면 응집제 주입률, 혼화강도에 따른 결과를 정리하면 Table 4.1~4.6과 같다.

각각의 Table에서 제시한 시간은 입도의 변화가 급격하게 변한 시점까지의 시간이고 Tendency는 이시점의 입자수와 초기입자수의 차이를 시간으로 나눈 값으로 식 (1)과 같다.

$$\frac{P_t - P_0}{T} = \text{Tendency} \quad (4.1)$$

P_t = 응집시간 t초후의 입자수

P_0 = 응집전 원수중의 입자수

T = 응집시간(sec)

응집제 주입률을 알룸 20mg/L, PAC 13mg/L로 적게 한 경우에는 입자의 크기가 3.44~5.3 μm 까지는 입도분포가 줄어드는 경향을 나타냈고 8.16 μm 이상의 입자군은 증가하는 경향을 보였다. 응집제 PACl을 13mg/L 주입시 3.44 μm 이하의 작은 입자 감소율은 혼화강도가 증가함에 따라서 감소율이 조금 증가함을 알 수 있다. 또한 8.16 μm 이상의 큰 입자는 증가율도 혼화강도가 클수록 증가하였다. 응집제로 알룸을 20mg/L 사용시 PACl보다 큰 입자인 8.16 μm 의 입자 크기까지 제거율 있는 것으로 나타났다. 이는 동일한 알루미늄 주입농도에서 PACl에 비해 알룸의 응집효율이 높은 것임을 알 수 있었으며, 또한 혼화강도 80rpm에서는 PACl과 유사한 감소율을 보였으나 혼화강도를 120rpm 이상으로 크게하는 경우에는 PACl에 비해서 감소율이 3배정도 높게 나와 알룸이 PACl에 비해 응집효율이 높음을 알 수 있다.

Table 4.1 Variation of tendency with mixing intensity at PACl 13 mg/L dose

Dose	PACl (13mg/L)					
Intensity	80rpm		120rpm		160rpm	
Dia. (μm)	Time (sec)	Tendency	Time (sec)	Tendency	Time (sec)	Tendency
0.94	360	-7.91	360	-9.7	360	-11.1
1.45	360	-12.5	360	-13.4	360	-17.3
2.24	360	-9.96	360	-10.2	360	-11.6
3.44	360	-4.73	360	-4.59	360	-5.33
5.3	360	0.78	360	-0.12	360	2.45
8.16	360	5.51	360	6.06	360	9.43
12.57	360	8.36	360	9.05	360	13.58
19.36	360	3.93	360	3.96	360	4.89
29.81	360	0.65	360	0.86	360	1.08
45.91	-	-	-	-	-	-
70.69	-	-	-	-	-	-
108.86	-	-	-	-	-	-
167.63	-	-	-	-	-	-
258.14	-	-	-	-	-	-

Table 4.2 Variation of tendency with mixing intensity at Alum 20 mg/L dose.

Dose	Alum(20mg/L)					
Intensity	80rpm		120rpm		160rpm	
Dia. (μm)	Time (sec)	Tendency	Time (sec)	Tendency	Time (sec)	Tendency
0.94	360	-6.1	360	-23.5	360	-20.9
1.45	360	-12.8	360	-41.8	360	-37.6
2.24	360	-10.9	360	-36.6	360	-33.4
3.44	360	-6.4	360	-30.7	360	-26.5
5.3	360	-3.5	360	-24.7	360	-18.5
8.16	360	1.85	360	-12	360	-5.85
12.57	360	7.06	360	5.91	360	11.0
19.36	360	5.2	360	12.38	360	12.7
29.81	360	2.14	360	5.6	360	3.9
45.91	360	0.58	360	1.12	360	0.6
70.69	-	-	-	-	-	-
108.86	-	-	-	-	-	-
167.63	-	-	-	-	-	-
258.14	-	-	-	-	-	-

응집제로 PACl 25mg/L, 알룸 40mg/L 주입시 8.16 μ m 입자군까지는 제거되는 경향을 보였으나 12.57 μ m 이상의 입자군은 증가하는 경향을 나타냈다. 응집제 종류별 작은 입자의 감소율과 큰 입자의 증가율 차이를 보면 알룸이 PACl에 비해 1.5~2.0배 정도 양호한 응집효율이 있는 것으로 나타났고, PACl은 혼화강도가 높을수록 작은 입자의 감소율이 증가하는 현상을 나타냈고, 알룸은 120rpm 이상에서는 유사한 감소율을 보였다.

Table 4.3 Variation of tendency with mixing intensity at PACl 25 mg/L dose.

Dose	PACl(25mg/L)					
Intensity	80rpm		120rpm		160rpm	
Dia. (μm)	Time (sec)	Tendency	Time (sec)	Tendency	Time (sec)	Tendency
0.94	90	-33.4	90	-37.8	90	-46.1
1.45	120	-51.3	90	-69.7	90	-87
2.24	120	-47	180	-57.7	90	-90.5
3.44	120	-40.4	180	-53.5	360	-30.3
5.3	120	-30.9	180	-47.8	360	-29.5
8.16	360	-2.3	180	-27.6	360	-20.7
12.57	360	15.27	360	5.9	360	2.2
19.36	360	11.15	360	15.19	360	15.1
29.81	360	3.8	360	8.07	360	9.2
45.91	360	1.08	360	1.92	360	2.82
70.69	360	0.22	360	0.12	360	0.65
108.86	360	0.47	360	0.03	360	0.22
167.63	-	-	-	-	-	-
258.14	-	-	-	-	-	-

Table 4.4 Variation of tendency with mixing intensity at Alum 40 mg/L dose.

Dose	Alum(40mg/L)					
Intensity	80rpm		120rpm		160rpm	
Dia. (μm)	Time (sec)	Tendency	Time (sec)	Tendency	Time (sec)	Tendency
0.94	180	-26	90	-61.8	120	-56.6
1.45	180	-57.4	120	-92.3	120	-103
2.24	180	-59	120	-90.7	150	-90.5
3.44	180	-56.8	120	-86.8	150	-90
5.3	240	-45	120	-86.7	150	-89.7
8.16	150	-50.3	120	-66.3	150	-67.7
12.57	-	-	-	-	-	-
19.36	360	7.4	360	11.8	360	13.96
29.81	120	17.0	120	20.2	120	25.73
45.91	120	5.7	120	6.2	150	6.9
70.69	360	0.4	360	0.27	360	0.1
108.86	-	-	-	-	-	-
167.63	-	-	-	-	-	-
258.14	-	-	-	-	-	-

응집제를 PACl 38mg/L, 알룸60mg/L로 비교적 충분히 주입한 경우 PACl 및 알룸은 혼화강도에 따른 입자군의 변화가 거의 없이 일정하게 나타났으며, 감소경향도 응집제주입률이 증가할수록 크게 나타났다. 응집제 주입률이 높을 때 혼화강도에 따른 입자의 증감을 변화가 크게 나타나지 않는 이유는 수중에 주입된 응집제의 반응이 흡착 전하중화의 반응보다는 Sweep 반응에 의한 이유로 생각된다. 즉 충분한 응집제가 주입되어 주중 분산이 빠르게 형성되어 콜로이드와의 접촉기회가 많아서 생긴 현상으로 보인다.

따라서 응집제를 많이 주입하여 응집혼화를 시키는 경우에는 급속혼화강도의 영향이 적어 혼화강도를 약하게 해도 충분한 혼화가 이루어지므로 급속혼화기에 소용되는 전력비를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4.5 Variation of tendency with mixing intensity at PACl 38 mg/L dose.

Dose	PACl (38mg/L)					
Intensity	80rpm		120rpm		160rpm	
Dia. (μm)	Time (sec)	Tendency	Time (sec)	Tendency	Time (sec)	Tendency
0.94	90	-86.3	120	-84.6	120	-80.4
1.45	90	-154	120	-144	120	-138
2.24	90	-149	120	-134	120	-132
3.44	90	-129	120	-114	120	-116
5.3	90	-107	120	-90.8	120	-94.1
8.16	90	-62.7	120	-48.9	120	-48.5
12.57	360	9.1	360	23	360	24.4
19.36	360	12.5	360	19.3	360	18.1
29.81	360	6.3	360	6.0	360	5.3
45.91	-	-	-	-	-	-
70.69	-	-	-	-	-	-
108.86	-	-	-	-	-	-
167.63	-	-	-	-	-	-
258.14	-	-	-	-	-	-

Table 4.6 Variation of tendency with mixing intensity at Alum 60 mg/L dose

Dose	Alum(60mg/L)					
Intensity	80rpm		120rpm		160rpm	
Dia. (μm)	Time (sec)	Tendency	Time (sec)	Tendency	Time (sec)	Tendency
0.94	90	-119	90	-56.5	120	-67.3
1.45	90	-162	90	-106	90	-147
2.24	90	-143	90	-99.8	90	-137
3.44	90	-124	90	-93.7	120	102
5.3	90	-110	90	-77.2	120	-82.5
8.16	90	-79.6	90	-43.1	90	-40.7
12.57	60	-18.7	60	81.6	60	96.5
19.36	90	46.5	90	56.7	90	62.5
29.81	90	29.1	90	25.7	180	16.2
45.91	150	4.3	150	1.85	120	3.9
70.69	120	1.1	-	-	-	-
108.86	-	-	-	-	-	-
167.63	-	-	-	-	-	-
258.14	-	-	-	-	-	-

Fig.4.10은 각각의 입도군 변화를 도시한 그림으로 적은 입자의 감소율은 PACI에 비해 알룸이 크고 큰 입자의 증가율도 PACI에 비해 알룸이 크게 나타나 알룸이 PACI에 비해 반응성이 좋은 것으로 나타났다.

또한 응집제 주입율이 높아질수록 응집시간에 따른 입자수의 변화인 Tendency의 변화폭도 변화하는데 응집제 주입율이 적은 경우에는 Tendency의 변화가 -40~13정도이나 응집제 주입률을 증가시키면 Tendency가 -150~100까지 매우 크게 변화하는데 이는 작은 입경의 입자수가 줄어들고 큰 입경의 입자수가 증가하는 것을 의미하는 것으로 응집에 있어서 변화폭이 클수록 양호한 응집이 되는 것으로 추정 할 수 있다.

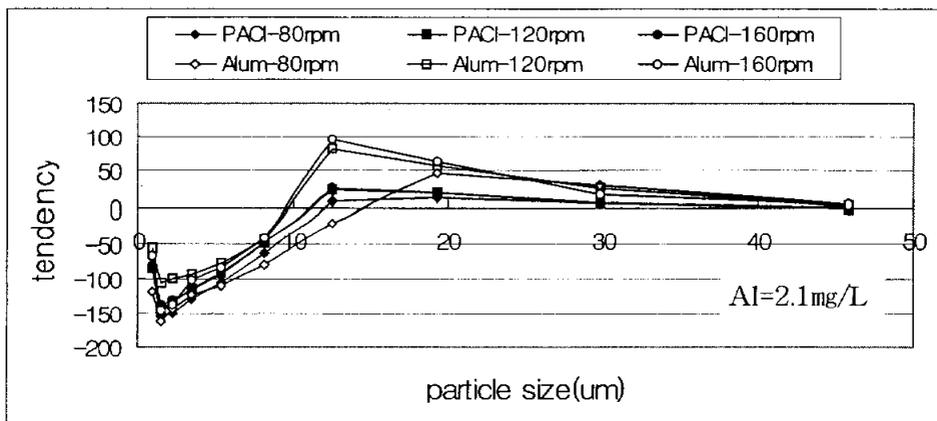
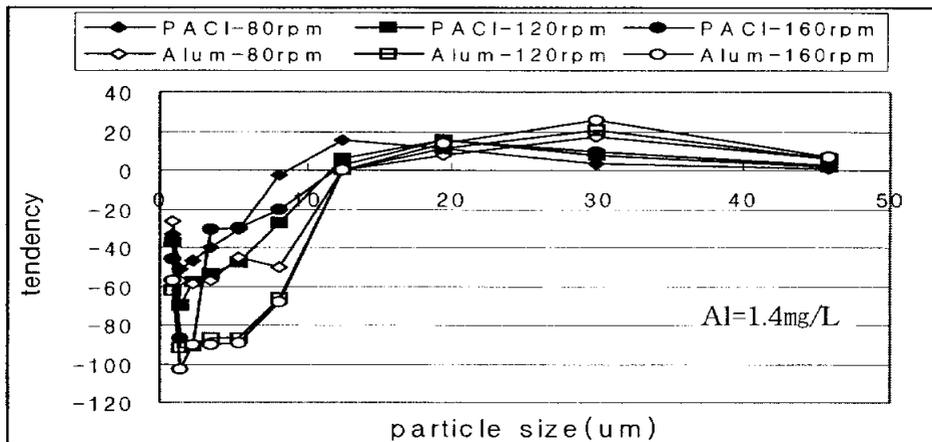
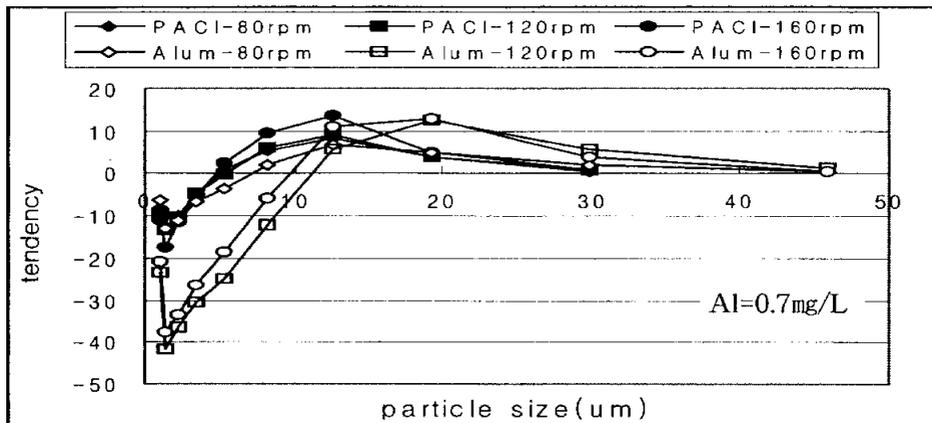


Fig 4.10 Tendency of particles by mixing intensity and coagulant dose

V 결론

알루미늄과 PACl을 응집제로 사용하여 응집제 주입율과 혼화강도를 변화시켜 혼화시간에 따른 입자의 변화를 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 증류수에 알칼리도를 40mg/L로 조제한 시료수에 응집제 주입율에 따른 수산화알루미늄의 형성과정을 조사한 결과 2.24 μm 이하의 입자군은 응집제 주입율이 낮으면 혼화초기 입자군 수의 증가율이 컸고 응집제 주입율이 높으면 혼화시간이 길수록 입자군의 증가율이 커졌다.
2. 응집제 주입율에 따른 입도의 변화는 응집제주입율이 높을수록 2.44 μm 이하의 입자는 응집초기 증가율이 높았다.
3. 동일한 알루미늄농도로 응집제를 주입하면 응집제 알루미늄이 PACl에 비해 응집효과가 높은 것으로 나타났는데 이러한 이유로는 pH의 저감 효과에 의한 것으로 보인다.
4. 응집제 주입량이 적으면 혼화강도에 따른 수중입자의 변화율이 크나 응집제 주입량이 많으면 혼화강도에 따른 수중입자의 변화율이 적었다.
5. 응집제 주입 후 혼화시간에 따라서 수중의 입도분포 변화는 크기가 작은 콜로이드는 감소하는 반면 크기가 큰 입자는 증가하는 경향을 보였다.

참고문헌

- 1) Hahn, H.H. & Stumm, W.: Kinetics of Coagulation with Hydrolyzed Al(III), the rate-determining step. *jour. Colloid interface sci.*, 28:134(1968)
- 2) O'melia, C.R. Coagulation and Flocculation. Physicochemical processes for water quality control (W.J. Weber Jr., editor) Wiley-Interscience, New York(1972)
- 3) Letterman, R.D.; Quon, J.E.; & Gemmill, R. S. Influence of rapid Mix Parameters on Flocculation. *jour. AWWA*, 65:11:716 (Nov.1973)
- 4) Amirtharjah A., Miller, K.M.: Rapid mixer design for mechanisms of Alum coagulation, *jour. AWWA*, 74:4:210 (Apr.1982)
- 5) Amirtharjah A., Trusler, S.L.: Destabilization of particles by turbulent Rapid Mixing, *jour. EnrhIr. Eng. ASCE* 112:1085(1986)
- 6) Matsui, Y., Yuasa, A., Furuya, Y., Kamei, T., : Dynamic analysis of coagulation with alum and PACl, *jour. AWWA*, 90:11:96(Oct. 1998)
- 7) Van Benschoten, J.E. Edzwald, J.K.: Chemical aspects of coagulation using Aluminum Salts- I: Hydrolytic reactions of Alum and Poly-aluminium Chloride, *Water Res.*, 24:1519(1990)
- 8) Clark, M.M., Sriavstaava, R.M., David, R., : Mixing and Aluminum precipitation, *Envir. Sci. Tech.* 27:2181 (1990)
- 9) Camp, T.R., Stein, P.C., : Velocity gradients and internal work in fluid motion, *J. Boston Soc., Civil Eng.*, 30:10:217 (1943)
- 10) Edzwald, J. K.: Coagulation in drinking water treatment : particles, organics and coagulants, *Wat. Sci. Tech.*, 27:11:21 (1993)
- 11) Amirtharjah A., *Mixing in Coagulation and Flocculation*(1991)

- 12) Randtke, S. J., : Organic contaminant removal by coagulation and related process combination, jour, AWWA, 80:5:40(1988)
- 13) Kawamura. S. Considerations for Improving Flocculation, J. AWWA Vol. 68, No.6, pp328-336. (1976).
- 14) AWWA manual : Operational control of coagulation and Filtration processes ,First edition
- 15) American Water Works Association, "Coagulation and Flocculation: rapid mixing", In Water Quality and Treatment, ch.6, R.D. Letterman, ed. New York : McGraw-Hill, (1999),
- 16) Amirtharajah, A. and O'Melia, C. R.. Coagulation process : destabilization, mixing, and flocculation,. In Water Quality and Treatment, 4th Ed., McGraw-Hill, NY.(1990),
- 17)Amirtharajah, A. and Mills, K. M. Rapid-Mix Design for Mechanisms of Alum Coagulation, J. AWWA, Vol. 74, no. 4, 210.(1982),
- 18) Amirtharajah, A. and Truser, S. L.,:Destabilization of Particles by Turbulent Rapid Mixing,ASCE Journal Environ. Engineering , vol. 112. p.1085. (1986),
- 19) Amirtharajah, A., and C. R. O'Melia.:Coagulation processes : Destabilization,mixing, and flocculation. In Water treatment, ch. 6, F. W. Pontius, eds.New York:McGraw-Hill. (1990),
- 20) Amirtharajah, M. M. Clark, and R. R. Trussell, eds. Denver,CO:American Water Works Association Research Foundation. (1991),
- 21) Amirtharajah, A., Mixing in Coagulation and flocculation. (1991),
- 22) Aveston, J., Hydrolysis of the Aluminum Ion: Ultracentrifuge and Acidity Measurements. J. Chem. Soc. (London) 4483-4443. (1965),
- 23) Baes, C. F. and Mesmer, R. E. :The hydrolysis of cations, John Wiley and Sons, NY.(1976),

- 24) AWWA Research Foundation, "Mixing in coagulation and Flocculation", pp. 256-281,(1991),
- 25) Amirtharajah, A. M.M. Clark, and R.R. Trussell, eds. Denver, CO :American Water Works Association Research Foundation.
- 26) Bersillon, J. L., Brown, D. W. and Fiessinger, F. and Hem, J. D., Studies of Hydroxy-aluminum Complexes in Aqueous Solution. J. Res. U. S. Geol. Survey. 6(3) :325-337.(1978),
- 27) Bertsch, P. M. Conditions for Al_13 polymer formation in partially neutralized aluminum solutions, Soil Sci. Soc. Am. J., 51, 825-828.(1987),
- 28) Black, A.P., Destabilization of dilute clay suspensions with labeled polymers, J.AWWA, 57:12:1547. (1965),
- 29) Camp, T. R. & Stein, P.C., Velocity Gradients and Internal Work in Fluid Motion. Jour. Boston Soc. Civil Engrg., 30:10: 217.(1943),
- 30) Clark, M.M., Scale-Up of Laboratory Flocculation Results, Presented to AWWA Annual Conference, Denver, Co.(1986),
- 31) Clark, M.M., R. David, and M.R. Wiesner. Effect of Micromixing on Product Selectivity in Rapid Mix. June 14-18. Kansas City Proceeding of the Annual Conference of the AWWA. (1987),
- 32) Corrsin, S., : Simple Theory of an Idealized Turbulent Mixer. AICHE Jour., 3:329.(1957)
- 33) C. R. O'Melia, :Coagulation & Flocculation," in W. J. Weber, Jr.(ed.),Physicochemical Processes for Water Quality Control, Wiley-Interscience, New York.(1972),
- 34) Cutter, L.A., :Flow and turbulence in a Stirred Tank" A.I.Ch.E.Journal, 12, 1: 34-45.(1976).
- 35) David, R. and Clark, M. M. : Micromixing Models and Application to Aluminum Neutralization Precipitation Reactions In

- Mixing in Coagulation and Flocculation, AWWA Research Foundation, Denver, Co: 170-216.(1991),
- 36) Dempsey, B. A., Reaction between fulvic acids and aluminum, In Aquatic humic substances; Influence on Fate and Treatment of pollutant, ACS.(1989),
- 37) Dempsey, B. A., Xioxin Men, : Bench-scale Production, Characterization, and Application of Polyaluminum Sulfate (PAS), AWWA. (1989)
- 38) Dempsey, B. A., sheuh., Mentink J. : polyaluminum chloride and alum coagulation of clay-fulvic acid suspensions, JAWWA, 77, 74-80. (1985),
- 39) Dentel, S.K., : Coagulant control in water treatment, Critical Reviews in Environmental Control, 21:1:41-135, CRC Press, Boca Rotan.(1991),
- 40) Edzwald, J. K. : Conventional water treatment and filtration : treatment and removal of total organic carbon and THM precursors, In Organic carcinogens in drinking water, John Wiley & Sons, NY.(1986),
- 41) Edzwald, J.K., :Coagulation in drinking water treatment: Particles, organics and coagulants, Wat. Sci. Tech., 27:11:21-35.(1993),
- 42) Frink, C. R. and Peech, M. : The Solubility of Gibbsite in Aqueous Solution. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 26 : 346-347.(1962),
- 43) Health Education Service., Recommended Standards for Water Works. Great Lakes Upper Mississippi River Board of State Sanitary Engineers. Health Education Service, Albany, NY.(1982),
- 44) Hem, J. D. and Roberson, C. E., From and Stability of Aluminum Hydroxide Complexes in Dilute Solution. U. S. Geol. Survey Water Supply Paper 1827-A. U. S. office, Washington, DC.(1967),
- 45) H. E. Hudson, Jr., and J. P. Wolfner, "Design of mixing and

- Flocculation," Journal AWWA, vol. 59, no. 10, p.1257.(1967),
- 46) Hunter, R. J., Zeta Potential in Colloid Science. London:Academic Press. (1981),
- 47) Hunter, R. J., and P. S. Liss. "The surface charge of suspended particles in estuarine and coastal water." Nature, 282, 1979:823.
- 48) James M. Montgomery Consulting Engineers Inc., "Chapter 6: Precipitation, Coagulation, Flocculation." In Water Treatment Principles and Design. John Wiley & sons, New York, N.Y.: 116-134. (1985),
- 49) Jardine, P. M. and Zelazny L. W., : Mononuclear and polynuclear aluminum speciation through differential reactions with ferron". Soil Sci. Am. J. 50:895-900. (1986)

感謝의 글

먼저 부족함이 많은 저를 이 자리까지 올 수 있도록 많은 지도를 해주신 손 인식 교수님께, 김 상용 교수님, 이 종출 교수님께 감사드리며, 물사랑회 선후배 여러분, 특히 이 현문 선배님께 감사를 드립니다. 그리고 이 논문이 있기까지 끝까지 도움을 주신 김 상구 박사님, 정 인주 선생님께도 깊은 감사를 드립니다. 또 바쁜 직장생활 중에서도 학문에 충실할 수 있도록 도움을 주신 (주)동아지질의 정 유채 부장님과 중앙하수처리장 현장의 이 경수 소장님, 권 오덕 과장님, 이 종섭 기사, 양 호철 기사, 구 연자 씨, 항상 친형제 이상으로 관심을 가져주시는 남 상수 소장님, 이 홍우 대리에게도 감사를 드립니다.

2년 반 동안의 학교 생활동안 옆에서 묵묵히 도와준 채현이, 채호의 엄마인 아내 이 원경에게 고마움을 전하며, 부모님, 장인장모님, 우일 형님, 진우 형님, 매형, 처남 내외분께도 진심으로 감사의 마음을 전합니다.

끝으로 이 논문이 있기까지 도움을 주신 모든 분들께 감사를 드립니다.