

응집에 영향을 미치는 물리-화학 인자

The effect of physicochemical factors on the coagulation process

김상구* · 류재익** · 류동춘*** · 김정현****

Sang-Goo Kim* · Jae-Ick Ryu** · Dong-Choon Ryou*** · Jeong-Hyun Kim****

Abstract

Coagulation is very important process in water works. The subsequent processes are directly affected by this process.

Many factors such as turbidity, alkalinity, pH, hardness, total organic carbon(TOC), velocity gradient and flocculation time effect on coagulation process.

Among these factors, specially TOC is being concerned target substance to be removed due to trihalomethanes(THMs) precursor and alkalinity is being one of the major parameter for removing TOC. We have researched the consumption of coagulant with TOC and alkalinity concentration of water and removal efficiency of residual TOC and turbidity with alkalinity.

Furthermore we have investigated particle size distributions with velocity gradient and alkalinity.

The consumption of coagulant was proportionally increased to TOC and alkalinity concentration and the removal of TOC in Nakdong river water was very difficult more than 150 mg/l in alkalinity but large morecular weight organic such as humic acid could be removed easily.

Coagulation of low alkalinity water was more rapidly occured than of high alkalinity water by analyzing the particle size distributions. High alkalinity water needed higher mixing energy for a good coagulation within limited flocculation time.

1. 서 론

응집침전처리는 정수처리시설에서 중요한 공

정 중의 하나로 응집침전의 양부여하에 따라서 침전 후속 공정 및 정수수진에 미치는 영향은 크게 달라진다. 특히 응집침전이 불량하면 여과지의 부하가 늘어나 여과지 역세척 주기가 짧아져 역세척을 자주 해야 될 뿐만 아니라 여과지에서의 처리 효율도 떨어져 탁질이 누출되거나 누출된 탁질로 인하여 염소처리 시 소독 효과 불량 혹은 잔류알루미늄 등의 누출로 인

* 부산시수질검사소 전문직

** 부산시수질검사소 과장

*** 부산시수질검사소 연구사

**** 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원

하여 수질이 불량하게 된다. 따라서 응집공정은 급속여과시스템을 사용하는 정수처리장에서 가장 중요하게 다루어야 하는 공정이라고 하여도 과언은 아니다.

내부분의 응집과정은 탁도를 중심으로 많은 연구가 행하여 지고 있으나, 응집에 미치는 영향인자는 탁도, 알칼리도, pH, 경도, 총유기불1), 2) 등 화학적 인자외에도 응집시 요구되는 교반에너지등 물리적인 인자들이 있어 응집을 이해하기 위해서는 복합적인 응집인자의 조사 연구가 필요하다. 본 연구는 응집에 미치는 물리 화학적인 인자들을 파악하여 이들 인자들이 응집시 어떤 메카니즘을 통하여 형성되는지 그 과정을 파악하고자 원수의 여러수질 인자 중 총유기탄소(TOC)와 알칼리도를 중심으로 조사하였다.

특히 유기물은 정수처리시 사용되는 염소와 반응하여 발암성 물질로 알려지고 있는 트리할로메탄(THMs)을 생성하기 때문에 원수중의 유기물을 저감시키기 위한 노력이 많이 요구되고 있다. 따라서 응집처리시 유기물 제거에 요구되는 응집제주입량 및 알칼리도 농도에 따른 처리 효율을 비교함으로써 원수수질에 적절한 응집제 소요량과 처리수의 수질을 추정 할 수 있게 하고, 물리적인 인자로는 교반강도와 교반시간에 따라서 원수중의 입도변화 과정 및 잔류탁도를 조사함으로써 보다 직접적인 방법으로 응집과정을 규명하여 응집 조건에 필요한 기초자료로 사용함과 아울러 이의 결과를 실제 정수장에 적용할 수 있게 하여 정수장의 운영의 문제점 발견 및 이의 해결을 위하여 사용하고자 함이다.

2. 실험재료 및 방법

실험에 사용된 물은 낙동강 하류지역의 물금 원수를 이용하였다. 총유기탄소 변화에 따른 실험을 행할때 원수자체의 TOC와 원수에 TOC를 주입하여 실험을 하였다. 원수에 주입한 TOC는 Aldrich chemical company inc.에서 제조된 Humic acid를 증류수에 희석하여 희석된

원액을 GF/C필터를 통과시켜 통과된 Humic acid를 이용하여 TOC농도를 1000mg/l로 조제하였고, 이것을 TOC농도별 실험 첨가시 이용하였다. 총유기탄소(TOC)의 분석은 Shimadzu사의 TOC-5000을 이용하였다.

알칼리제는 탄산암모니아(NH₃CO₃)를 증류수에 희석시켜 6000mg/l로 조제하였다. 알칼리 첨가 실험시 pH의 증가가 일어나므로 알칼리제에 황산(H₂SO₄)을 사용하여 알칼리제 원액의 pH를 7.0~7.2 정도로 조절하여 알칼리제 첨가 후 원수의 pH상승을 억제하도록 하였다.

수송입자의 입도분석시 채수량은 30ml를 이용하였으며 사용된 분석기기는 particle sizing system사의 Model 770A를 이용하였다. 본 실험에 사용된 응집제는 부산시 대부분의 정수장에서 주로 사용하고 있는 PSO(Poly Sulfate Organic)를 이용하였으며, 주입시 농도는 부피대 부피로 하였다.

Jar-test는 급속교반강도를 180sec⁻¹에서 2분 하였고 완속교반강도는 각각 10, 20, 40sec⁻¹를 기준으로 하였으며, 교반 강도는 아래(1)식을 이용하였다.³⁾

$$G = \sqrt{\frac{P}{V \times \mu}} \quad (1)$$

사용된 에너지(P)는 아래식 (2)를 이용하여 계산 하였다.

$$P = Kn^3 D^5 \omega / g \quad (2)$$

여기서 G: 교반 강도(sec⁻¹)

K: 교반의 계수(-)

P: 교반에너지(kg m/sec)

V: 체적(m³)

μ: 점성계수(kg sec/m²)

n: 회전수(sec⁻¹)

D: 교반의 길이(m)

ω: 물의 단위 중량(kg/sec)

g: 중력가속도(m/sec²)

교반의 상수 K는 교반날개의 폭과 높이에 따른 계수로써 본 실험에서는 2.7을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 TOC와 응집제 투입량의 변화에 따른 상징수의 잔류탁도를 나타낸 것으로 TOC농도가 4.5mg/l인 시료는 낙동강 원수이고, TOC농도가 6.0, 7.5 및 10.0mg/l인 시료는 낙동강 원수에 Humic acid를 각각 1.5, 3.0 5.5mg/l 씩 첨가하여 조제하였다. TOC를 1.5, 3.0mg/l 투입하여 TOC 농도가 6.0 및 7.5mg/l로 조제하였을 때의 탁도 및 입도분포의 변화는 거의 없었으나, 5.5mg/l 투입하여 10mg/l로 조제하였을 때 탁도는 0.3NTU 정도의 증가를 보였고, 입도의 변화는 거의 없이 무시할 수 있는 정도라고 판단하였다. 낙동강 원수에 응집제를 25mg/l 투입한 경우 7.6NTU에서 1.6NTU로 약 80% 정도 감소시키는 반면에 TOC 6.0mg/l인 시료수에 응집제를 25mg/l 투입한 경우의 탁도제거율은 약 25% 정도였으며, TOC농도가 7.5mg/l 및 10.0mg/l인 경우는 탁도가 전혀 제거되지 않았다. 이는 원수 중의 탁도 성분보다는 유기물의 농도에 따라서 응집제의 소비량 차이가 크다는 것을 알 수 있다. 4) 특히 TOC농도와 응집제 소비량의 관계를 비교하기 위해 TOC농도 4.5mg/l인 시료와 10.0mg/l인 시료의 두 상징수 잔류탁도를 비교하여 보면 응집제 25mg/l, 50mg/l인 경우 각각 1.6, 2.1 NTU로 약 TOC 2배에 응집제 소비량도 2배 정도 소모되는 것으로 조사되었

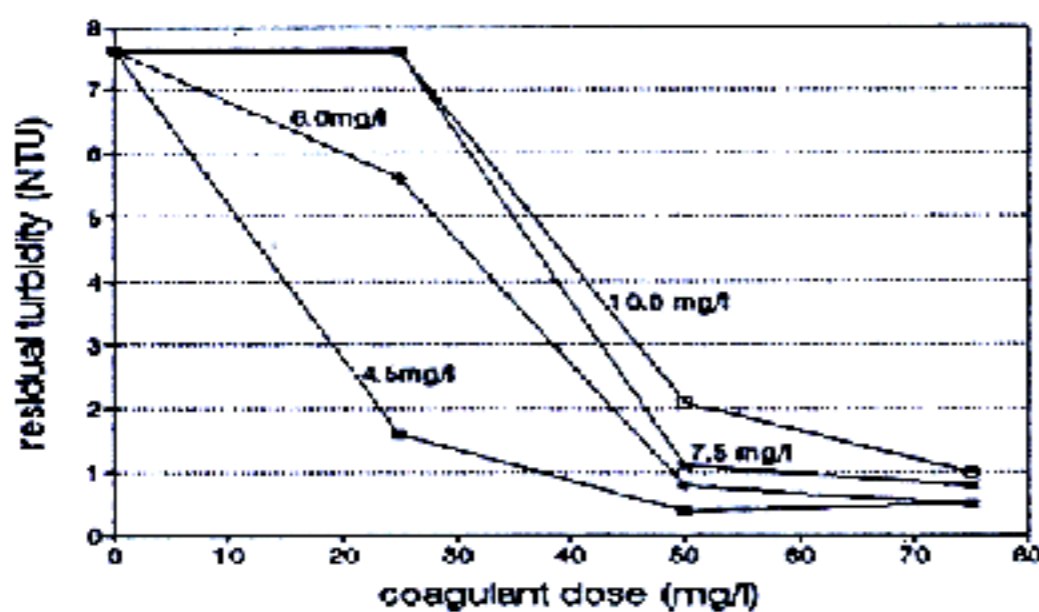


그림 1. 응집제 투입량에 따른 잔류탁도 변화(수치는 원수의 TOC 농도)

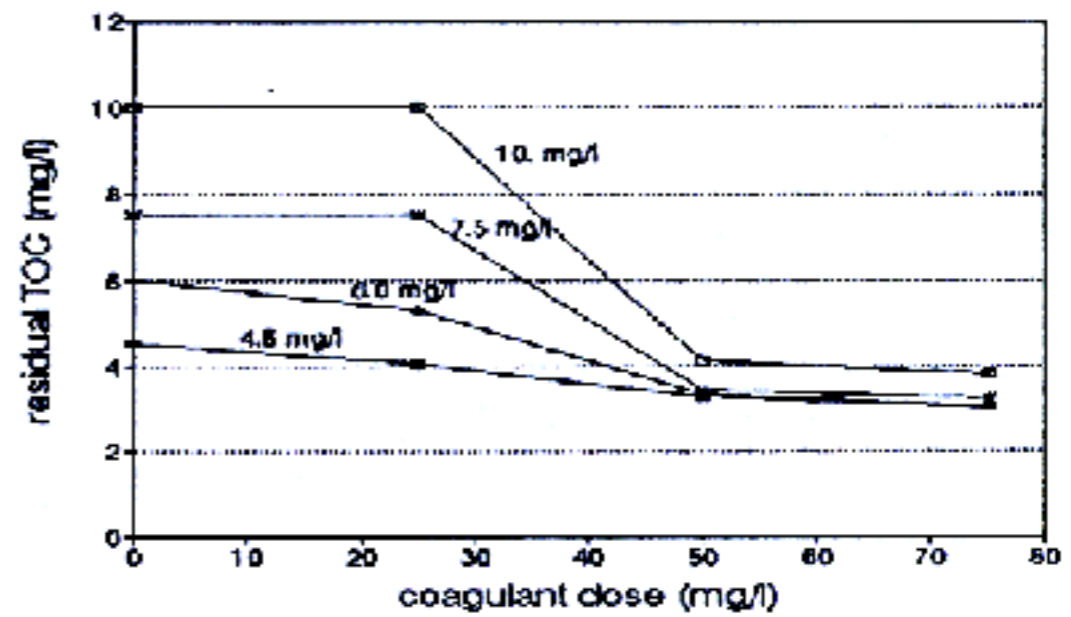


그림 2. 응집제 투입량에 따른 TOC 농도 변화(수치는 원수의 TOC 농도)

는데, 이는 응집침전시 사용되는 응집제량은 원수중의 TOC농도에 비례하는 것으로 판단할 수 있다.

그림 2는 응집제 투입량 변화에 따른 잔류 TOC의 변화를 도시한 것으로 낙동강 원수의 TOC제거율은 약 30%까지 가능하였으며, 6.0mg/l는 3.04mg/l로 약 50%까지 제거가 가능하였다. 또한 TOC농도가 10.0mg/l인 경우는 약 60%까지 제거율을 보였으며, 그 이상의 제거율 상승은 보이지 않았다. 이는 원수 중의 첨가된 고분자 유기물인 Humic acid는 대부분 응집에 의한 제거가 가능한 것으로 판단되어지며, 응집제를 75mg/l까지 넣어도 TOC의 제거효율이 개선되지 않는 것으로 미루어 보면 저분자 유기물질인 Fulvic acid 혹은 다른 유기물은 응집으로는 더 이상 제거가 어려운 것으로 보인다. 따라서 현재 원수중의 총유기물 중에서 고분자 유기물질로 판단되어지는 Humic acid는 약 30% 전후로 존재하는 것으로 추정되어지며, 나머지는 응집되기 어려운 저분자 유기물로 판단된다.

그림 3은 알칼리도 변화에 따른 응집침전 후 상징수 잔류탁도를 도시한 것으로 원수에 알칼리도를 50, 100, 150, 220mg/l로 조제하여 응집제를 25, 50 75mg/l씩 첨가하여 Jar-test 한 결과이다.

그림에서 알 수 있듯이 알칼리도가 50mg/l인 경우에는 응집제 투입량이 25mg/l에서도 1NTU 이하의 잔류탁도를 나타내 80% 이상의

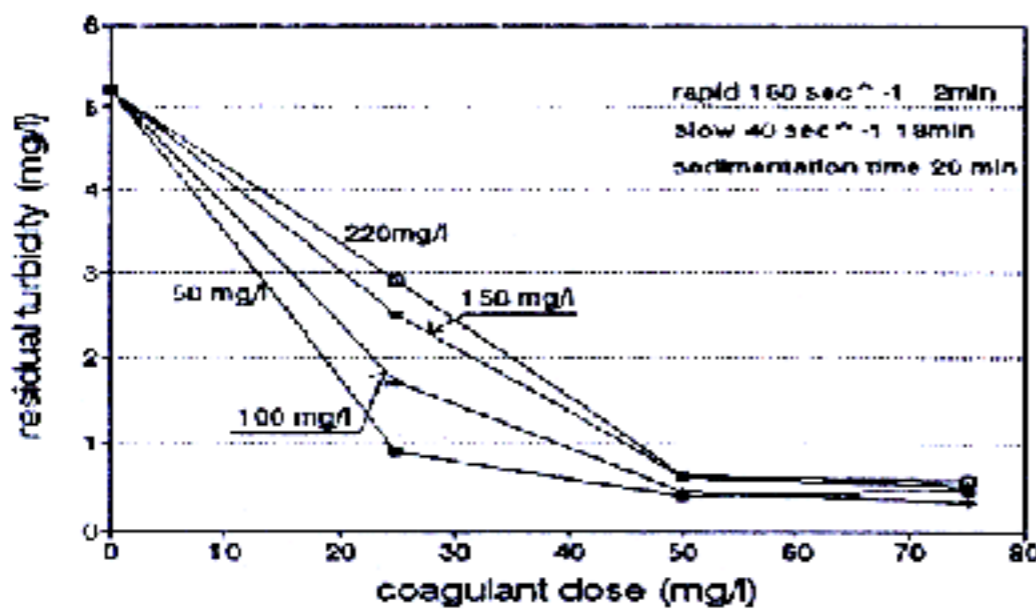


그림 3. 응집제 주입량에 따른 잔류탁도 변화(수치는 원수의 알칼리도 농도)

제거율을 보이는 반면에 알칼리도가 증가할수록 탁도제거효과가 떨어져 응집이 불량한 것을 알 수 있다. 응집제 주입량이 25mg/l로 한 경우 각 알칼리도의 변화에 따른 잔류탁도를 비교해 보면 알칼리도가 50mg/l인 시료는 충분한 응집제 주입량인 것으로 판단 할 수 있으나, 알칼리도가 100mg/l인 시료는 응집제 주입량이 조금 부족한 상태인 것으로 판단되며, 알칼리도가 150mg/l 이상인 시료는 응집제 소요량이 상대적으로 많은 것으로 판단 할 수 있다.

그림 4는 원수의 알칼리도에 따라서 응집 침전 후 잔류 TOC의 변화를 도시한 것으로 알칼리도가 50mg/l인 원수의 TOC 최대 제거효율은 약 36%로 나타났으며, 100mg/l인 경우는 25%, 150mg/l는 15%, 220mg/l는 2% 정도의 제거효율을 보이고 있었다. 특히 알칼리도

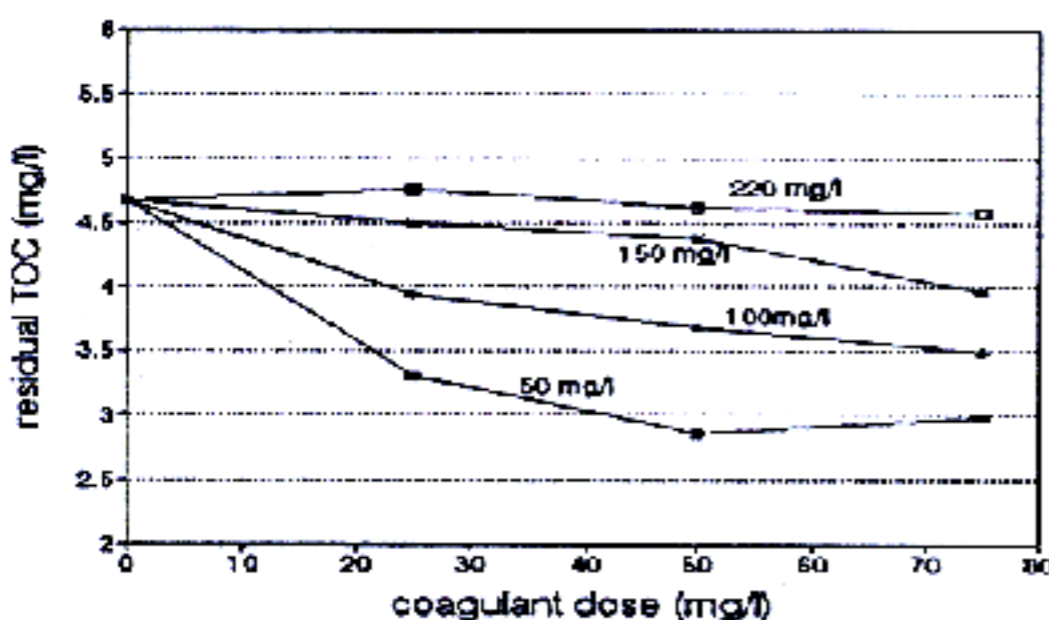


그림 4. 응집제 주입량에 따른 TOC 농도 변화(수치는 원수의 알칼리도 농도)

가 높으면 응집제 주입을 많이 하여도 탁도는 세기되나 TOC의 제거는 기대 할 수 없는 것을 알 수 있는데, 이는 원수중의 입자성 유기물질(POC)은 제거될 수 있으나 용존성유기물질(DOC)의 제거는 알칼리도가 높은 물에서 제거되기 어려움을 나타내는 것으로, 일반적으로 알칼리도가 낮은 원수중에서 제거될수 있는 용존성 유기물질의 일부분은 응집제가 만든 수산화 알루미늄에 흡착제거 될 수 있었으나, 알칼리도가 높을수록 알칼리도에 많은 응집제가 소비되어 큰 floc을 형성 할 수 없었던 것으로 생각된다.

이를 바탕으로 원수의 알칼리도 변화에 따른 TOC제거 효율 관계를 회기분석 해보면 알칼리도농도에 따라서 TOC의 제거효율이 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다. 그림 4의 결과를 수식화 한 결과 TOC의 제거효율은 알칼리도 1mg/l 증가에 따라 0.2% 정도 감소하는 것으로 조사되었으며, 이의 상관계수는 0.986으로 매우 높게 나타났다. 앞으로 원수중의 TOC성분을 좀더 세분화하여 응집제거가 가능한 TOC를 구분하여 조사하면, 원수의 TOC 성분에 따라서 이들 제거효율을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 5는 알칼리도가 20, 40, 80, 150, 220mg/l인 원수를 응집시킬 때 응집시간의 변화에 따라서 입자의 분포 변화를 나타낸 것으로, 이때 사용한 교반강도는 약 40sec⁻¹로 교반시켰으며 교반시간이 5, 10, 15, 20분에서의 입자분포를 조사하였다. 알칼리도가 20, 50mg/l인 원수의 응집시간 별 입도 분포변화를 보면 5분 정도의 교반시간 만으로도 응집이 많이 진행된 것을 알 수 있으며, 교반시간 10분 이상은 입도분포의 변화가 거의 없는 것으로 나타나 약 10분의 응집시간 정도면 충분한 것으로 추정할 수 있었다. 알칼리도가 80mg/l인 경우는 응집시간이 10분 이상 필요한 것으로 나타났고, 15분 이후의 입도의 분포 변화가 거의 없이 비슷하게 나타나 상대적으로 알칼리도가 높을수록 많은 응집시간이 요구되는 것을 알 수 있다. 또한 알칼리도가 150 또는

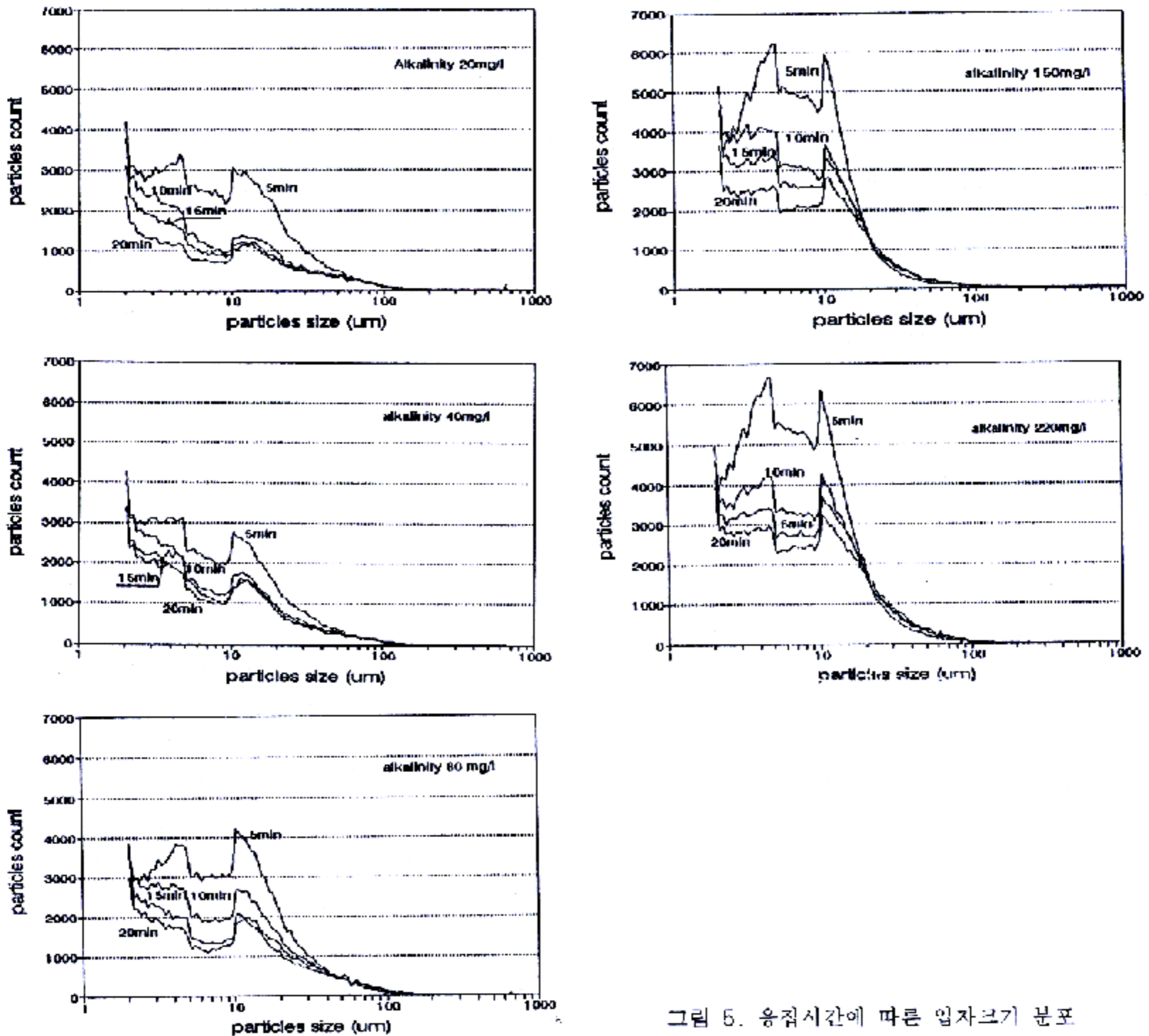


그림 5. 응집시간에 따른 입자크기 분포

220mg/l로 고농도인 경우, 응집시간에 따른 입도분포변화를 알칼리도가 저농도인 40mg/l인 경우와 비교해 보면, 알칼리도가 40mg/l인 경우는 응집시간 5분 후의 입자분포 상황과 알칼리도가 150mg/l 이상인 원수를 20분간 응집교반 한 후의 입자분포 상황과 유사한 결과를 보이고 있다. 이들의 잔류탁도도 각각 0.33, 0.26, 0.57, 0.85, 1.0NTU로 나타나 알칼리도가 높은 원수는 응집이 불량함을 알 수 있다.

따라서 이들의 결과에서 알칼리도가 높을수록 응집시간이 길어질 뿐만 아니라 응집도 불량하여 잔류탁도가 높게 나타났다. 따라서 빠른 응집이 요구될 때에는 응집제의 양이 많이

소요는 것으로 추정 할 수 있다.

그림 6의 (A)~(C)는 응집제를 25mg/l 주입 후 교반강도에 따른 응집시간 별 입자분포과정을 나타낸 것으로, 이때 사용된 교반강도는 10, 20 40sec⁻¹였다. 교반강도를 10sec⁻¹로 했을때 응집시간 25분까지 계속 응집이 진행되고 있었으며, 교반강도가 20sec⁻¹ 이 때는 교반시간 20분 까지는 응집이 진행되는 것으로 나타났으나, 그 이후에는 입도분포의 큰 변화가 없는 것으로 미루어 보아 응집이 20분 정도에서 거의 완료된 것으로 생각 할 수 있었다. 또한 교반강도를 40sec⁻¹로 한 경우는 응집시간 10분 이후부터 입자분포의 변화가 크게 나타나지 않는 것으로 미루어 보면 응집시간이 약 10분 정

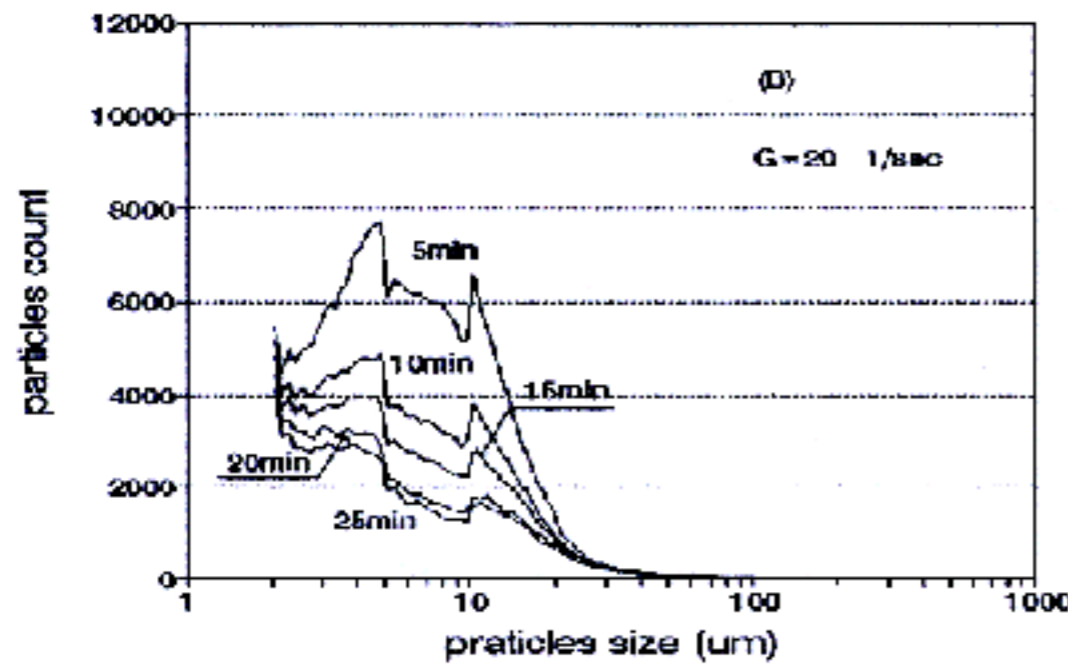
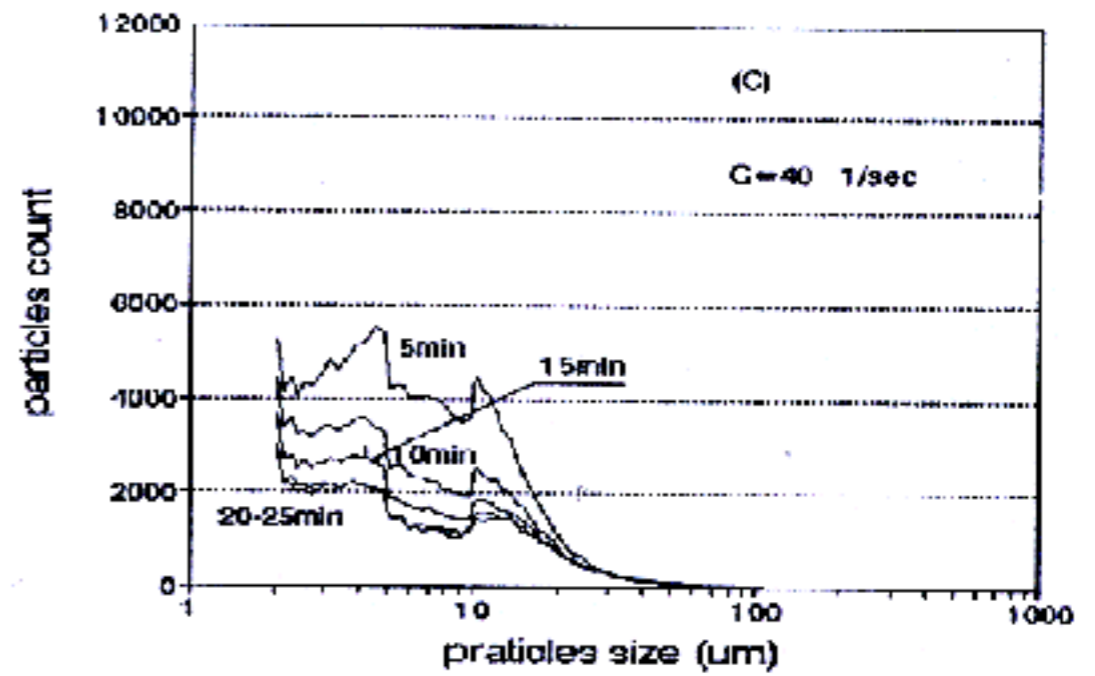
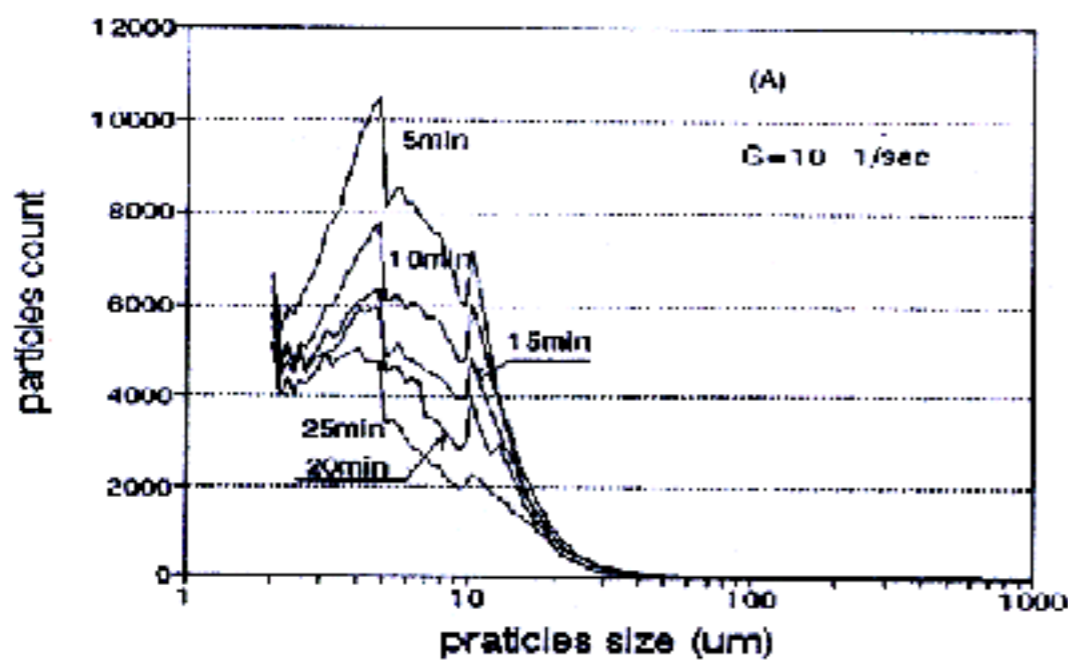


그림 6. 응집제 주입량이 25mg/l일때 교반강도에 따른 입자크기 분포

도면 충분한 것으로 판단 할 수 있었다. 이때 각각의 교반강도에 다른 상등수의 탁도를 비교해보면 0.5, 0.35, 0.3NTU로 같은 응집제

주입량에서도 교반강도의 차이에 의한 상등수 잔류탁도 차이가 있었다. 또한 응집의 패턴도 교반강도가 클수록 초기 교반시간에서 수중 입

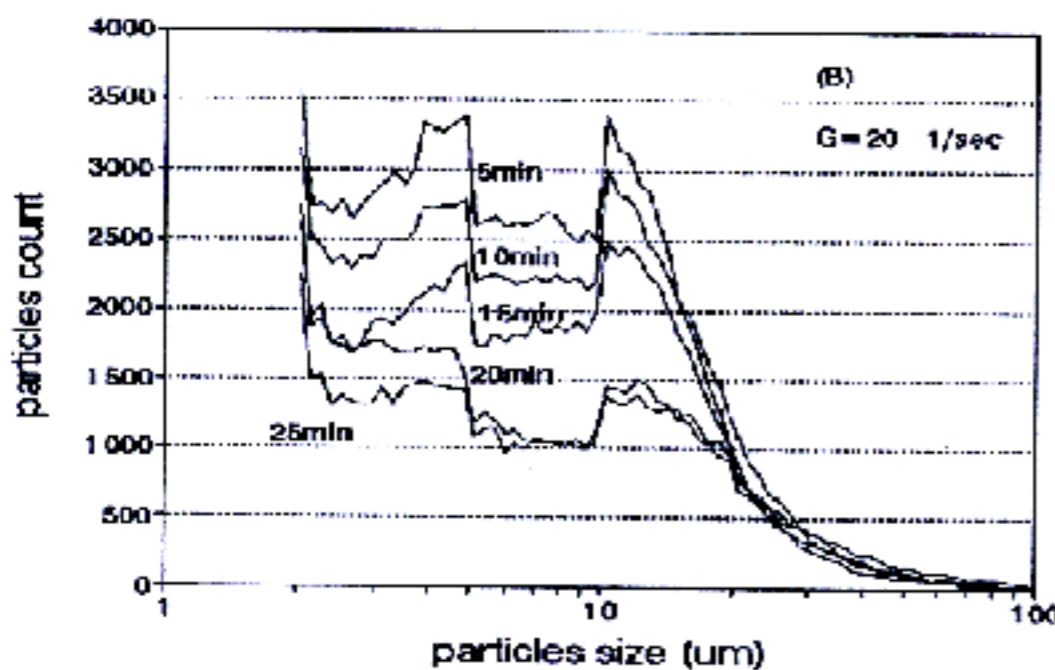
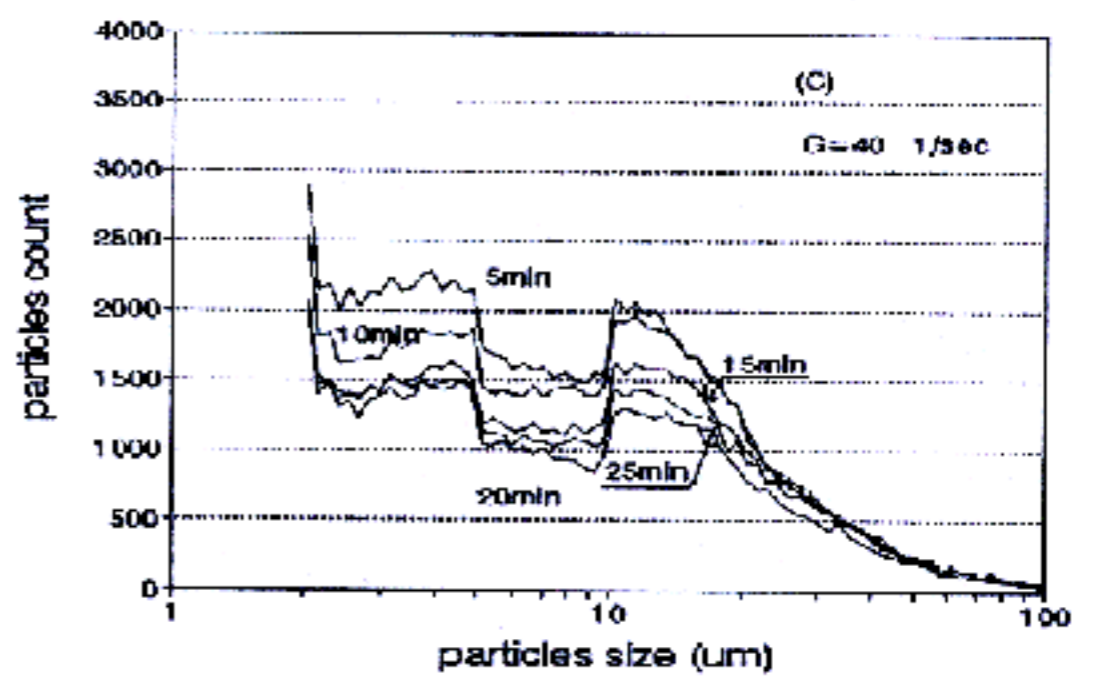
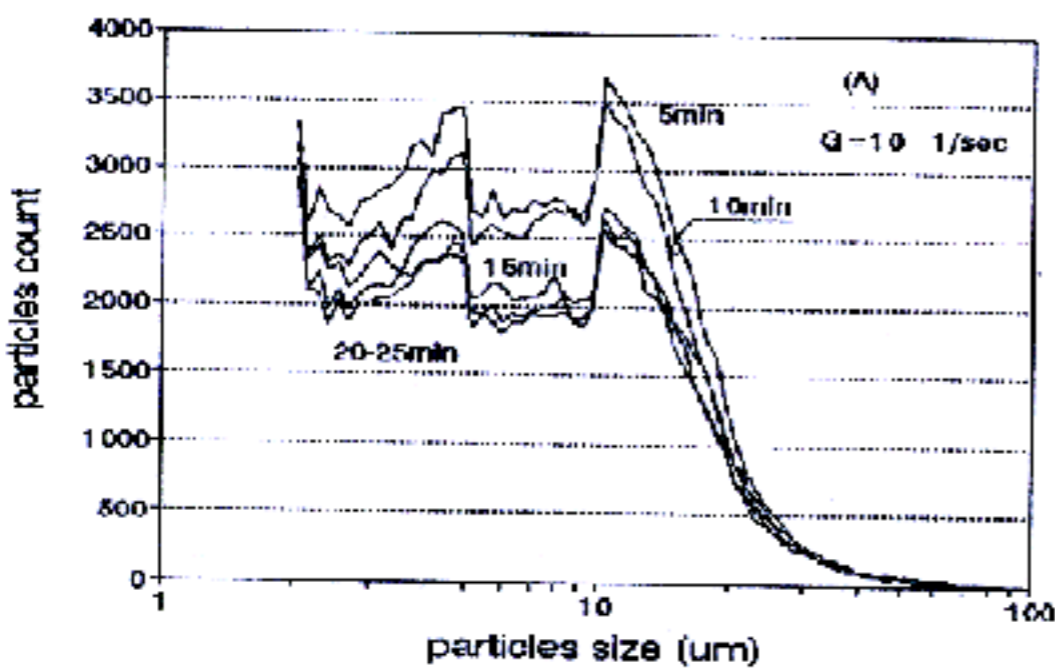


그림 6. 응집제 주입량이 50mg/l일때 교반강도에 따른 입자크기 분포

자분포의 변화폭이 크을 알 수 있었다. 따라서 응집제 주입량이 적을 경우에는 교반 강도를 크게 함으로써 응집반응을 상대적으로 촉진 시킬 수 있을 것으로 판단된다.

그림 7의 (A)~(C)는 응집제를 50mg/l 주입 후 교반강도에 따른 응집시간 별 입자분포과정을 나타낸 것으로, 사용된 교반 강도는 상기와 같이 10, 20 40sec⁻¹로 하였다. 응집제가 충분히 주입되었으므로 초기 응집반응이 응집제 주입량을 25mg/l로 한 경우 보다 훨씬 빨리 진행됨을 알 수 있었으며, 교반강도가 상대적으로 작은 10, 20sec⁻¹은 응집시간에 따라 응집반응이 계속진행됨을 알 수 있었으나, 교반강도가 40인 경우는 응집시간 5분이면 거의 거의 충분한 반응이 완료되는 것으로 나타났다. 세 조건의 교반강도에서 교반시간을 25분으로 한 후 상징수의 잔류탁도를 비교하여 보면 0.26, 0.18, 0.20NTU로 거의 비슷하게 나타났는데 이는 응집제가 충분히 주입된 경우에는 상징수의 잔류탁도는 교반강도보다 응집제 주입량에 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

응집에 미치는 영향을 파악하기 위하여 원수 수질 변화에 따른 잔류탁도 및 잔류 TOC의 농도와 교반강도 따른 수중의 입자성물질의 응집과정을 조사한 결과 아래와 같은 몇가지 결론을 내릴 수 있었다.

1. 탁도처리를 위해 소모되는 응집제는 수중의 총유기탄소(TOC) 농도에 비례하였다.
2. 고분자 유기물질인 Humic acid는 응집에 의해서 90% 이상 제거가 가능 하였으나, 낙동강 원수중의 TOC제거율은 30% 정도에 불과

하였다.

3. 원수의 알칼리도가 150mg/l 이상 높으면 탁도 제거는 가능하나 TOC의 제거는 매우 어려웠다. 또한 알칼리도의 증가에 따라 탁도제거를 위한 응집제의 소비량도 증가하였다.

4. 응집시간에 따른 수중 입도변화에서 알칼리도가 낮은 원수가 높은 원수에 비해 응집이 빨랐다.

5. 응집제의 첨가가 적은 경우에는 잔류탁도는 교반강도에 큰 영향을 받지만, 응집제가 충분한 경우에는 교반강도의 영향은 적었다.

참고문헌

1. Chang S.D., Singer P.C.: "The impact of ozonation on particle Stability and the removal of TOC and THM Precursors" JAWWA, Vol.81, No.6, pp.71-79, 1991
2. 김상구.: "pH에 따른 응집특성 및 유기물 제거에 관한 연구", 한국수처리기술연구회, 제3권, 제 1호, pp.35-43, 1995.
3. Reynolds T. J.: "Unit operations and processes in environmental engineering" Brooks/Cole engineering division, 1982.
4. Edzward J. K.: "Coagulation in drinking water treatment: particles, organics and coagulants", Wat. Sci. Tech., No. 11, pp.21-35, 1993.
5. Cheng R.C., Krasner S.W., Green J.F., Wattier K.L.: "Enhanced coagulation: preliminary evaluation" JAWWA, Vol.87, No.2, pp.91-103, 1995.
6. Becker W.C., O'Melia C.R.: "The effect of ozone on the coagulation of turbidity and TOC" 12th ozone world congress, Proceedings, Vol.1, pp. 505-516, 1995.
7. Krasner S.W., Amy G.: "Jar-test evaluations of enhanced coagulation", JAWWA, Vol.87, No.10, pp.93-107, 1995