

Characteristics of Mixing and Coagulation in an Inline Coagulant Mixing System

Hei-Cheon Yang, Sang-Kyoo Park and Seung-Ho Wang

Key Words : Mixing(혼화), Coagulation(응집), Coagulant(응집제), Inline Mixing System(인라인 혼화 시스템), Turbidity(탁도)

Abstract

The objective of this paper was to investigate the mixing characteristics of an three-stage inline coagulant mixing system experimentally. Wastewater samples of pH 8.5 and initial turbidity 1,000NTU were taken from a site of tunneling work. At the constant dosage, 0.36mL/L, of polymer as coagulant aids, the coagulation efficiency with the dosage of PAC as coagulant was about 4~6% at 10 minutes after sampling. In the case of 2 different velocity gradient conditions, the efficiency of turbidity removal was increased about 6.5~8% with increasing the dosage of coagulant while, the efficiency was increased about 20~21.5% with increasing the dosage of coagulant aids. The efficiency of turbidity removal with the settling time after sampling was about 90% after 1 minute, and the efficiency was about 95% after 5 minutes.

G : 속도경사(1/s)

P : 처리수에 주어지는 동력($N \cdot m/s$)

V : 혼화조 체적(m^3)

μ : 점성계수($N \cdot s/m^2$)

1.

전 세계적으로 모든 산업 분야에서 강조되고 있는 기술혁신과 신기술에 의한 경쟁력 강화, 고효율 친환경기술의 적용은 상·하수 및 폐수 처리 공정에서도 예외가 될 수 없다. 최근에 들어서 기술 선진국들에서는 공정산업 분야의 경쟁력 강화 방안으로 PI(Process Intensification) 개념을 도입하는 추세이다. 공정산업의 특성상 관련 설비에 마이크로 및 나노 기술을 적용하는 것이 용이하지는

않지만 단위공정 설비를 획기적으로 소형화, 고성능화하여 신뢰성과 가격 경쟁력을 높이고자 하는 것이 PI 개념의 기술개발이다⁽¹⁾.

본 연구의 주제인 인라인 응집약품 혼화기술은 인라인 믹서의 엘리먼트를 이용하는 수리적 혼화 방식으로 기계적 구동부가 없고 외부의 동력이 필요치 않은 장점이 있다. 또한 완전 혼화조 방식과 비교하여 단락류 및 백믹싱 현상이 발생되지 않으며, 펌프분사화산 방식과 비교하여 응집약품의 분사압력이 매우 낮고 분사노즐이 막히는 문제가 거의 없다는 기술적 특징을 갖는다⁽²⁾. 현재 국내외적으로 심각하게 대두되고 있는 수자원의 고갈 및 오염 문제를 해결하기 위한 방안들이 강구되고 있는 현실에서 상·하수 및 폐수처리 공정에서 PI 개념에 근거한 인라인 혼합기술을 응용한 응집약품 혼화시스템의 개발은 정화 효율을 높일 수 있고 투입되는 약품의 양을 줄일 수 있어서 처리 설비의 용량을 작게 할 수 있기 때문에 관련 시설의 건설 및 운영 측면에서 경제적인 효과가 매우 클 것으로 예상된다.

그러나 기존의 대다수 상·하수처리장 및 폐수처리장에서는 기계적 혼화방식의 외부동력 과다 소비 및 노즐의 막힘 현상, 수리적 혼화방식에서 원수 표면에 약품을 투입함으로 인한 혼화 효율저하

† 회원, 전남대학교(여수) 기계자동차공학부

E-mail : hcyang@chonnam.ac.kr

TEL : (061)659-3223 FAX : (061)659-3229

* 회원, 전남대학교(여수) 기계자동차공학부

** 주)오남환경산업

등의 문제점들로 인하여 약 30~40% 정도 약품을 과잉으로 사용하고 있는 실정이다. 따라서 에너지의 효율적인 이용 및 환경오염 문제에 대처하고, 수리적 혼화 방식의 단점을 최소화하고 장점을 극대화할 수 있는 인라인 응집제 혼화기술에 대한 연구가 필요하다.

Clark 등⁽³⁾은 상·하수처리 공정의 파일럿 스케일의 실험에서 인라인 혼화기가 기존의 완전 혼화조 방식에서 보다 부유물의 응집에 훨씬 적은 양의 황산알루미늄이 요구된다는 것을 밝혔다. 다른 파일럿 스케일의 연구에서 Latimer 와 Amirtharajah⁽⁴⁾는 하나의 파이프라인에는 인라인 혼화기를, 다른 파이프라인에는 완전 혼화조를 이용하여 실험한 결과, 인라인 혼화기가 사용된 경우 정화수의 탁도가 낮다고 보고하였다. 또 Appiah 와 Samuel⁽⁵⁾, Burke⁽⁶⁾는 물에 포함되어 있는 탁도 및 색도, 냄새, 맛 등을 유발하는 부유 물질 및 기타성분을 제거하기 위하여 사용하는 응집제 및 활성탄, 소석회 등의 투입량을 결정하기 위한 실험에서 인라인 혼화기를 사용하였을 때 응집이 훨씬 우수하다고 보고하였다. 오존을 이용한 산화 혹은 살균에 대해서 Martin 과 Gale⁽⁷⁾는 파일럿 플랜트에서 오존의 혼화를 위해 인라인 혼화기를 사용하면 물질전달이 증가한다고 보고하였다. 국내의 수처리 산업분야에서 인라인 혼화기술을 적용한 사례는 전남의 N 정수장에서 Kenics 형 엘리먼트를 이용한 혼화기를 설치한 사례가 있으나 혼화 효율저하 및 유지관리 등의 사유로 인하여 현재는 사용되지 않고 있는 실정이며, 관련 연구도 거의 없는 실정이다⁽⁸⁾.

본 연구는 수처리 공정의 응집약품 혼화시스템의 혼화 및 응집특성에 대한 실험적 연구를 목적으로 한다.

2.

2.1 (rapid mixing)

완전 혼화조에서 응집제를 균일하게 섞고 응집제와 부유입자가 적절히 접촉하도록 하기 위해서는 격렬한 교반이 필요하다. 처리수가 완전 혼화조에 체류하는 시간 동안에 응집과정은 충분히 진행되어 미세 플록을 형성하게 되고, 플록 형성조에서 미세한 플록들은 상호작용으로 더 큰 플록 입자를 형성한다. 이러한 플록형성 과정은 완속교반 강도와 기간에 크게 영향을 받는다. 급속혼화와 플록형성에 필요한 교반장치는 기계식 완전 혼화조 방식, 압축 공기에 의한 방식 그리고 방해벽에 의한 우회식 교반방식 등이 있는데, 기계식 교반이 가장 일반적인 형태이다. 기계식 교반장치에는 터빈(turbine)형, 패들(paddle)형 그리고 프로펠러(propeller)형 임펠러가 주로 이용된다.

기계식 교반의 혼화강도는 다음과 같은 속도경사(velocity gradient) G 을 이용하여 계산한다⁽²⁾.

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

$$P = k_T N^3 D^5 \rho$$

여기서 P 는 처리수에 주어지는 혼화에너지, V 는 혼화조의 처리수 체적 그리고 μ 는 점성계수를 나타내며, k_T 는 임펠러 상수(0.32~1), N 는 임펠러 회전수 그리고 D 는 임펠러 직경을 나타낸다.

2.2

응집(coagulation)이란 콜로이드 입자를 불안정화하는 공정이며, 콜로이드 입자는 화학적 점착 층으로 둘러싸여 플록을 형성하면 적정 기간 내에 침강하게 된다. 응집 및 플록형성(flocculation)은 약품을 투입하여 수중의 용존 물질 또는 부유물질을 제거하는 공정이다. 응집 및 플록형성은 흔히 약품 투입에 의한 응집, 생선 된 미세한 플록의 응결 단계, 형성된 큰 플록의 침전 단계로 나누어 생각할 수 있다. 즉 응집을 하여 미세한 콜로이드 상태의 입자나 용존된 이온 혹은 더 큰 부유물질을 불안정화 시켜 쉽게 침전 가능한 플록을 형성하는 공정이다. 일반적으로는 예비침강분리나 초벌여과를 한 다음에, 응집제를 첨가하여 성능을 개선한다. 응집과 플록형성은 입자표면의 퍼텐셜의 변화로 정의하기도 하는데, 입자의 표면 퍼텐셜은 1 차 안정화단계(coagulation)와 2 차 안정화단계(flocculation)로 구분할 수 있다.

응집이 일어나는 매커니즘은 매우 복잡하고 복잡적이다. 응집이 일어나는 양상은 응집제 투입에 의하여 콜로이드 입자 표면의 이중 이온층 압축, 입자간의 흡착과 전기적 중화, 플록 침전 시 포획, 폴리머와 같은 고분자 응집제 투입 시 흔히 볼 수 있는 입자간의 가교 결합 등에 의해 설명할 수 있다. 응집은 이러한 다양한 응집원리가 한 가지 또는 그 이상이 복합적으로 작용하여 일어난다. 그러므로 폐수 중 탁도 및 색도의 원인이 되는 불순물을 분리 제거하기 위해서는 미립자를 서로 엉키게 해서 입자의 직경을 크게 하거나 비중을 무겁게 하여 침전 제거한다. 이때 응집제를 투입하면 입자의 직경이 증가되어 침전 속도가 빨라지고 작은 입자 덩어리가 물리 화학적인 힘과 전기적인 힘에 의해서 응집이 된다. 처리수 속에 미세 입자가 분산 되어 있을 때는 입자와 입자 사이에 작용하고 있는 인력에 의하여 결합하고 있지만 입자가 충돌하면 입자는 결합을 저해하는 인자가 작용하여 안정한 분산계로 된다. 그러므로 이때 작용하는 결합 저해 인자를 먼저 제거해야만 플록형성 작용이 원활하게 이루어지게 된다. Fig. 1 은 콜로이드 입자의 응집제 종류에 따른 응집 매커니즘을

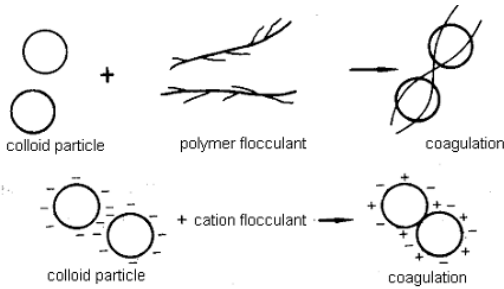


Fig. 1 Coagulation mechanism of colloid particle

개략적으로 도시한 것이다. 일반적으로 수처리 공정에서 가장 많이 사용되는 응집제인 명반(Alum)이나 철염을 처리수에 주입하면 알칼리도와 반응해서 $Al(OH)_3$ 의 플러크형성 작용으로 응집이 일어난다. 이때 대상 폐수에 알칼리도가 낮으면 석회나 소다회 등의 알칼리를 가해 알칼리도를 보강해 주어야 한다. 응집의 다른 현상은 가교 작용이다. 고분자 응집제는 분자중의 몇 개의 극성기를 가지고 있어 이 극성이 대전 입자에 접촉하여 입자와 입자 간에 가교를 놓는 작용으로 입자의 크기를 증가시키게 된다.

3.

Fig. 2는 수처리용 3단 인라인 응집제 혼합시스템의 개념도를 나타낸다. 3단의 인라인 약품 혼합시스템의 구성 요소들을 세부적으로 기술하면 다음과 같다. 처리원수 저장조는 처리원수를 저장하는 1000 리터 용량의 제 1 수조와 일정 수위를 유지할 수 있도록 설계된 200 리터 용량의 제 2 수조로 구성하였다. 제 1 수조내에는 처리원수를 제 2 수조로 펌핑할 수 있는 펌프를 설치하였으며, 처리 원수의 pH 농도를 측정할 수 있는 pH 센서를 설치하였다. 제 2 수조에는 자동 수위조절 센서를 부착하여 일정 수위가 유지되도록 하여 밸브의 개도에 따른 중력에 의해 유량을 조절할 수 있으며, 필요 시에는 제 2 수조를 거치지 않고 혼합부와 펌프를 직결할 수 있도록 설계하였다. 3 단으로 구성된 혼합 및 응집부는 내경 100mm, 길이 1200mm의 투명 아크릴 관으로 제작하여 혼합 과정을 가시화 할 수 있도록 하였으며, 각 단의 아크릴 관 상류 플랜지부로부터 210mm 하류 지점에 4 개의 단위 엘리먼트의 선단이 위치하고, 엘리먼트 선단 위쪽 30mm 지점에 응집제 및 응집보조제 주입노즐들이 위치하는 구조로 설계하였다. 한편 각단에는 상하류 간의 압력손실을 측정할 수 있는 차압계를 설치하였다. 응집보조제 및 응집제 주입부는 정량펌프를 이용한 제어 시스템에 의해 5 리터 용량의 응집보조제 및 응집제 저장조 내의 응집약품이 주입되도록 설계하였다. 200 리터 용량의 응집 침전조는 응집 침전 과정을 가시화하기 위해 가시

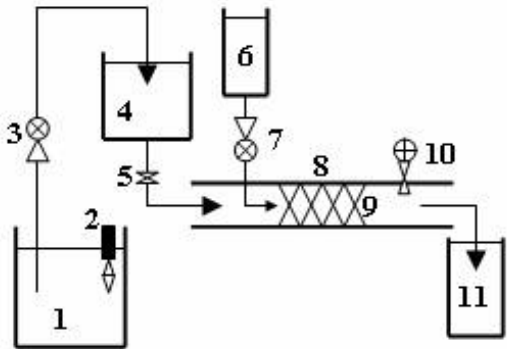


Fig. 2 Schematic diagram of inline coagulant mixing system

화창을 부착하였으며, 실험 후 배수가 용이하게 이루어질 수 있는 구조로 제작하였다. 컨트롤 패널은 제 2 수조에 설치된 수위 센서와 연동하여 원수펌프, pH 시스템, 정량펌프 등이 자동으로 작동될 수 있는 구조로 설계하였다.

4.

Fig. 3은 터널공사 현장의 폐수를 이용한 응집 효율 측정결과를 나타낸다. 처리 원수의 pH 수는 8.5이며, $Re=32,650$ 의 조건에서 응집보조제인 폴리머의 주입량을 0.36mL/L로 일정하게 유지하고 응집제인 PAC의 주입량을 0.22mL/L, 0.29mL/L, 0.36mL/L로 변화시켰을 때의 응집율을 나타낸다. 응집 보조제인 폴리머는 물과 1:200의 비율로 희석하고, 응집제인 PAC는 원액을 사용하였다. 시스템 출구의 처리수를 1000 ml의 메스실린더에 샘플링하여 10분 경과 후의 응집율을 비교한 결과 본 실험의 조건에서는 응집제를 0.36mL/L 주입한 경우에 약 6%의 응집율로 가장 높게 나타났으며, 응집제를 0.29mL/L 주입한 경우에는 약 4.5%, 응집제를 0.22mL/L 주입한 경우에는 약 4% 정도의 응집율을 나타내었다.

Fig. 4는 $Re=25,560$ 의 조건에서 폴리머와 PAC의 주입량을 0.28mL/L, 0.37mL/L, 0.46mL/L로 변화시킬 때, Fig. 5는 $Re=32,650$ 의 조건에서 폴리머와 PAC의 주입량을 0.22mL/L, 0.29mL/L, 0.36mL/L로 변화시킬 때, 샘플링 한 처리수의 5초 경과 후의 탁도를 나타낸다. 폐수 원수의 탁도가 평균적으로 1000NTU 정도인 것을 고려할 때, 샘플링 후 1분 후의 탁도가 모든 실험 조건에서 100NTU 이하 결

과를 나타낸 본 연구의 탁도 제거효율(응집율)이 우수한 것으로 판단되는데, 이는 1000NTU 정도로 고 탁도인 처리 원수에 플록형성에 필요한 충분한 탁질이 존재하여 순간혼화에 의한 전기적 중화반응이 탁도 제거효율에 결정적인 요인으로 작용했기 때문인 것으로 사료된다. 2 가지 유량조건에서 각각 응집제와 응집보조제의 주입량을 동일하게 변화시켰는데도 불구하고 응집제의 증가에 따른 탁도 제거효율은 약 6.5~8% 정도 증가한 반면에, 응집보조제의 증가에 따른 탁도 제거효율은 약 20~21.5% 정도로 3 배정도 증가하는 결과를 얻었다. 이는 처리 원수가 고 탁도이기 때문에 앞서 언급한바와 같이 플록형성에 필요한 충분한 탁질(미세 플럭)이 존재하여 응집제에 의한 미세 플럭의 형성 효과보다는 응집보조제에 의한 침강성이 우수한 큰 플럭의 생성효과가 상대적으로 크게 작용한 것에 기인한 것으로 사료된다.

Fig. 6 은 $Re=25,560$ 의 조건에서 응집보조제인 폴리머를 0.46mL/L 주입하고 응집제인 PAC 를 0.46mL/L 주입한 경우, Fig. 7 은 $Re=32,650$ 의 조건에서 응집보조제인 폴리머를 0.36mL/L 주입하고 응집제인 PAC 를 0.36mL/L 주입한 경우 처리수의 샘플링 후 경과시간에 따른 탁도변화를 나타낸다. 샘플링 후 1 분경과 후 처리수의 탁도는 처리원수 탁도의 약 10% 정도로 감소하며, 약 5 분경과 후에는 처리원수 탁도의 약 5%정도까지 감소하는 것을 알 수 있다.

5.

터널공사 현장의 폐수를 이용하여 $Re=32,650$ 의 조건에서 응집보조제인 폴리머의 주입량을 0.36mL/L 로 일정하게 유지하고 응집제인 PAC 의 주입량을 변화시키고 처리수를 샘플링하여 10 분 경과 후의 응집율을 비교한 결과, 응집제 주입량에 따라 6~4% 정도의 응집율을 나타내었다.

2 가지 유량조건에서 각각 응집제와 응집보조제의 주입량을 동일하게 변화시킨 조건에서 응집제의 증가에 따른 탁도 제거효율에 비해 응집보조제의 증가에 따른 탁도 제거효율이 약 3 배정도 높게 나타났다.

처리수의 샘플링 후 경과시간에 따른 탁도변화를 측정할 결과, 샘플링 후 1 분 경과 후 처리수의 탁도는 처리원수 탁도의 약 10% 정도로 감소하며, 약 5 분 경과 후에는 처리원수 탁도의 약 5%정도까지 감소하였다.

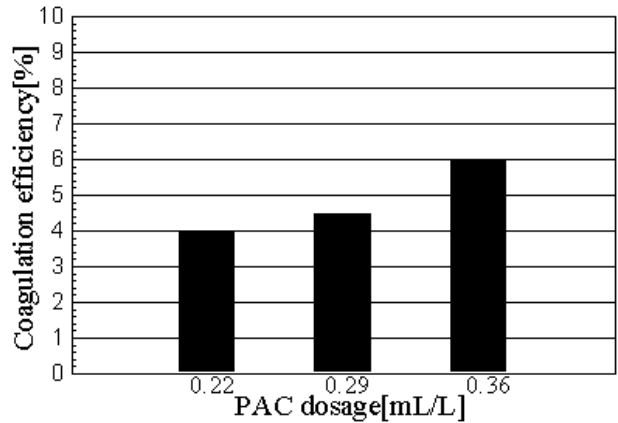


Fig. 3 Coagulation characteristics with PAC dose

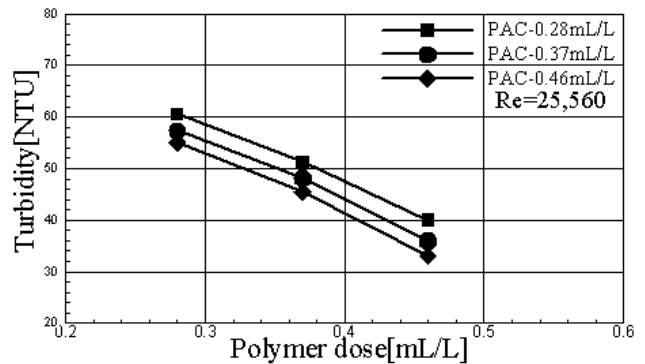


Fig. 4 Turbidity at $Re=25,560$ with polymer dose

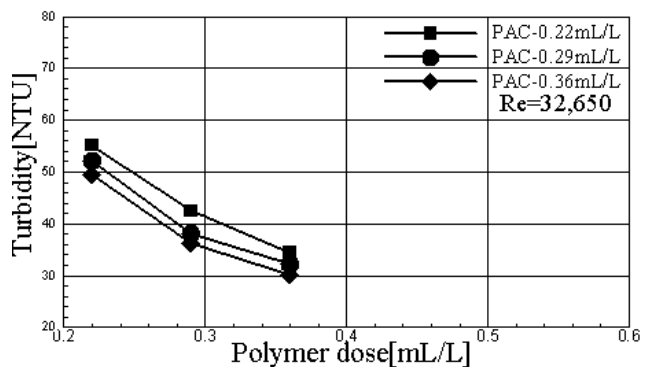


Fig. 5 Turbidity at $Re=32,650$ with polymer dose

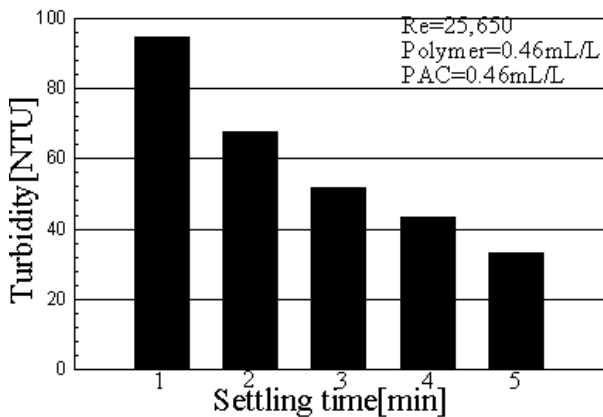


Fig. 6 Turbidity at $Re=25,650$ with settling time

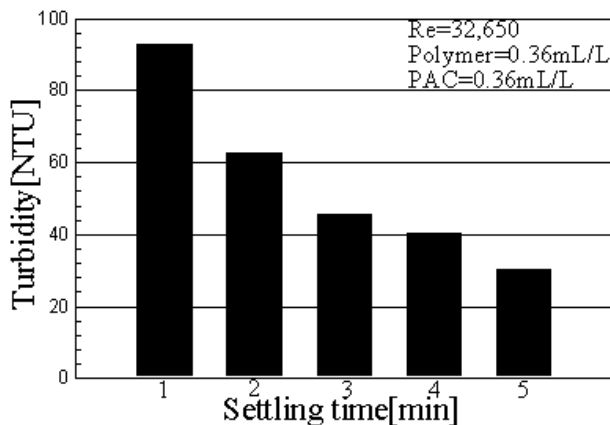


Fig. 7 Turbidity at $Re=32,650$ with settling time

for Enhanced Coagulation," Master's thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta.

- (7) Martin, N. and Galey, C., 1994, "Use of Static Mixer for Oxidation and Disinfection by Ozone," *Ozone Science and Engineering*, Vol. 16, pp. 455~473.
- (8) Yang, H. C. and Park, S. K., 2005, "Study of Coagulant Mixing Technology for Wastewater Treatment," *Proc. of KSME 2005 Spring Annual Meeting*, pp. 3062~3066.

- (1) Stankiewicz, A. I. and Moulijn, J. A., 2000, "Process Intensification: Transforming Chemical Engineering," *Chem. Eng. Progress*, Vol. 96, No. 1, pp. 22~34.
- (2) Kawamura, S., 2004, *Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities*, John Wiley and Sons, Inc..
- (3) Clark, M. M., Srivastava, R. M., Lang, J. S., Trussell, R. R., McCollum, L. J., Bailey, D., Christie, J. D. and Stolarik, G., 1994., "Selection and Design of Mixing Processes for Coagulation," *AWWA Research Foundation and AWWA*, Denver.
- (4) Latimer, R. J. and Amirtharajah, A., 1998, "Pilot Scale Comparison of Static Mixers and Backmix Reactors for Water Treatment," *Proc. of 1998 Annual Conference*, American Water Works Association, pp. 705~740.
- (5) Appiah, A. and Samuel, C. J., 1996, "Mixing for Coagulation: Organic Polymers, Static Mixers and Modeling," In Hermann H Hahn, Erhard Horrmann, and Hallvard Odegaard, Editors, *Chemical Water and Wastewater Treatment IV*, Springer-Verlag, pp. 3~15.
- (6) Burke, J. C., 1996, "Effectiveness of Static Mixers