

탁도와 총유기탄소 제거를 위한 최적응집제 및 투여량 선정 연구

박한배¹, 우달식^{1*}

¹한국계면공학연구소 물환경부서

Optimal coagulant and its dosage for turbidity and total organic dissolved carbon removal

Hanbai Park¹, Dal-Sik Woo^{1*}

¹Korea Interfacial Science & Engineering Institute

요 약 본 연구는 급격한 수질변화에 따른 현장 적용에 적합한 응집제를 선정하고, 응집제 별 최적 주입량을 찾기 위해 aluminium sulfate, poly aluminum chloride, poly aluminum silicate chloride를 이용하여 Jar-Test와 Pilot-Test의 검증으로 실험 하였다. 분석 항목은 탁도, TOC, pH로 제거율을 측정하였다. 실험 결과를 바탕으로 PASC의 경우 기존 응집제 인 Alum 이나 PAC 보다 최적 주입량 (15 mg/L)이 상대적으로 적었으며, 제거율도 높게 나타남을 확인할 수 있었다. Jar-Test에서는 원수 탁도 3-20 NTU 범위에서 응집제(PASC)의 최적 주입량을 주입하였을 때, 탁도 제거율(80%)과 TOC 제거율(89%)이 가장 높았으며, Pilot-Test에서는 원수 탁도 3.6-27 NTU 범위에서 응집제 최적 주입량을 주입하였을 때 탁도 제거율(82%)과 TOC 제거율(88%)을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구 결과를 바탕으로 응집제의 제거 효과는 원수 탁도와 TOC가 높아질 수록 상승하는 경향을 확인할 수 있었다.

Abstract Three coagulants, alum sulfate(alum), poly aluminum chloride(PAC) and poly aluminum silicate chloride (PASC), were used to remove low to high turbidity and TOC in surface and ground blended water. Laboratory experiments and pilot plant experiments were carried out to evaluate the optimal coagulant and its dosage. To determine the optimized coagulant and its dosage, the turbidity, TOC and pH were measured. The experimental results showed the best removal performance using PASC. The optimal dosage of PASC between 3-20 NTU was found to be 15 mg/L in the jar test. In the pilot test, a 15 mg/L PASC dosage was applied and resulted in the efficient removal of turbidity and TOC between 3.6-27 NTU. The removal efficiency of PASC increased with increasing turbidity and TOC.

Key Words : Coagulation, TOC, Turbidity, PASC, pH

1. 서론

최근 지구의 온난화에 따른 급격한 기후변화에 따라 정수장에서 쓰이는 취수원의 탁도 및 오염물의 변화율이 증가하고 있다. 정수장에서 원수의 수질을 안정화하기 위해서는 수처리 공정에서의 최적 응집제 선정 및 주입량 산정은 경제적이고, 안정적인 정수처리를 위하여 매우

중요한 요소이다. 현재까지 정수처리공정에서의 최적 응집제 주입량에 관한 연구는 많이 진행되어왔으나, 최근 사용되는 PASC (Poly aluminum silicate chloride)와 기존 응집제(aluminum sulfate, poly aluminum chloride)와의 비교에 따른 응집 효과에 관한 연구는 미비한 실정이다. 응집 공정은 원수 내 탁도 및 유기물, 무기물을 제거하기 위한 중요한 공정이다[1]. 현재 널리 사용되는 응

본 논문은 2014년도 국토교통부 “스마트워터그리드(KW-14-SWG)”와 농식품부 “첨단생산기술개발사업(312070-03)”의 지원으로 수행된 연구임.

*Corresponding Author : Dal-Sik Woo(Korea interfacial Science and Engineering institute)

Tel: +82-41-522-5025 email: dswoo7337@hanmail.net

Received October 1, 2014

Revised December 4, 2014

Accepted March 12, 2015

Published March 31, 2015

집제는 aluminum sulfate(alum), poly aluminum chloride (PAC), poly aluminum silicate chloride (PASC), ferric chloride (FeCl₃) 이다[2]. 이러한 응집제들의 응집 효과는 원수의 물리·화학적 특성에 따라 달라진다[3]. 최근, 응집제의 비용절감과 효율적인 사용을 위해 유럽, 일본, 북미에서는 PAC, PASC등의 사용이 증가하고 있는 추세이다 [4],[5]. 황산알루미늄은 정수 및 하수 처리의 대표적인 응집제로 그동안 널리 사용되어왔고, 이것은 물속의 무기성 입자를 제거하는데 있어 높은 효율을 보이는 것으로 알려져 있다[6]. PAC는 FeCl₃ 이나 alum 보다 미립자 및 유기물을 효율적으로 제거하고 상대적으로 적은 양의 슬러지를 발생한다고 알려져 있다.[7]. Poly aluminum silicate chloride (PASC)는 최근 개발된 무기응집제로써 기존의 응집제인 PAC, Alum, FeCl₃ 보다 탁도, 색도 및 유기물 제거에 탁월한 효과를 보이는 것으로 보고되었다 [8]. 또한, PASC를 하수에 적용하여, 조류, 오일, COD, TP 를 분석한 결과 PAC 보다 높은 효율을 보이는 것으로 나타났다[9].

본 연구의 목적은 원수의 급격한 수질 변동에 대응하기 위해 최적 응집제를 선정하고 이에 따른 최적의 투입량을 결정하기 위해 Jar-Test를 수행하여 PASC, PAC, alum을 이용한 최적의 응집제 결정 및 원수 수질에 따른 최적 응집제 투입량을 설정하였고, 파일럿플랜트에서 이를 검증하였다.

2. 분석방법

본 연구는 Pilot-Plant 내 고도정수처리공정에서의 응집제의 효과를 알아보기 위하여 실험을 수행하였다. Jar-Test는 5번의 반복실험을 통해 결과가 도출하였으며, 도출된 결과를 바탕으로 P파일럿플랜트에 적용하여 25일간 평가를 수행하였다.

2.1 원수 및 응집제

본 연구를 위해 사용된 지표수는 팔당댐을 원수로 하는 인천 B. 정수장의 유입수를 사용 하였으며, 지하수는 B. 정수장 내 지하수 관정을 이용하여 채수하였다. 지표수와 지하수의 물리·화학적 특성은 Table 1에 나타내었다. 응집제는 PASC(KG Chemical, Korea), PAC (Eyoung Chemical, Korea), Alum(Eyoung Chemical, Korea)을 사용하였으며, 각각의 특성은 Table 2에 나타내었다.

[Table 1] Characteristics in Raw-water

Analysis Type Water Type	Tem p. (°C)	pH	Turb. (NTU)	TOC (mg/L)	DOC (mg/L)	Water intake Area
Surface water	18	7.6	3.87	1.62	1.25	P. intake, Korea
Ground water	18	7.5	1	0.32	0.26	B. WTP, Korea

[Table 2] Used coagulants characteristics

Coagulant type	Characteristics	
Alum	1. Aluminum oxide (≤7%) 2. pH(≤3) 3. Fe(≥0.3%), NH ₃ -N (≥0.01%), As(≥10ppm), Mn(≥25 ppm), Cd(≥2 ppm),Pb(≥10ppm), Hg (≥0.2 ppm),Cr(≥10 ppm)	Eyoung Chemical, South Korea
PAC	1. Specific gravity(1.19) 2. Aluminum oxide(10.0~12.0%) 3. Basicity(≤35%) 4. pH(3.5 ~ 5.5) 5. SO ₄ (≥3.5%), Fe(≥0.01%), NH ₃ -N(≥0.01%), As(≥5 ppm), Mn(≥25 ppm), Cd (≥2 ppm), Pb(≥10ppm), Hg(≥0.2 ppm), Cr(≥10 ppm)	Eyoung Chemical, South Korea
PASC	1. Specific gravity(1.36) 2. Aluminum oxide(17.2%) 3. Basicity (≤35%) 4. pH(3.9) 5. SO ₄ (≥3.5%), Fe(0.0005%), NH ₃ -N (≥0.01%), As (≥5 ppm), Mn(≥25 ppm), Cd(≥2 ppm), Pb(≥10 ppm), Hg(≥0.2ppm), Cr(≥10 ppm)	KG Chemical, South Korea

2.2 Jar-Test

응집제의 Jar-Test는 높은 탁도부터 낮은 탁도순으로 정확성을 위해 5회에 걸쳐 반복시행 하였고, Jar-Test의 결과를 검증하기 위해 Pilot-Plant에서 실험을 진행하였다. Jar-Test에서는 Jar-tester(SF6, Misung scientific. co. Ltd.)를 사용하였으며, Alum, PAC, PASC를 사용하여 원수 탁도에 따른 응집효율을 측정하였다. Jar-Test 실험 시 테스트 샘플들을 1,000 mL 비이커 6개에 500 mL 를 채우고 농도 별로 응집제를 동시에 투입한 뒤 교반기를 이용하여 급속(120 rpm)으로 1분, 완속(60 rpm)으로 20분 동안 교반 하였으며, 30분간 침전 시켰다. 침전이 끝난 후 침전수의 상층을 피펫을 사용해 샘플링 한 뒤 탁도,

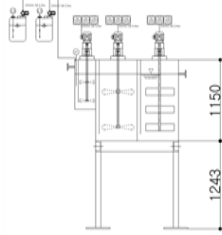
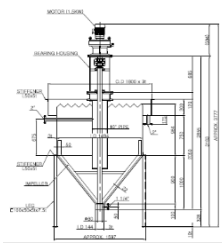
TOC, DOC, pH를 측정하였고, 응집제의 농도는 10ppm, 15ppm, 20ppm, 25ppm, 30ppm, 35ppm, 40 ppm으로 투여하였다.

2.3 Pilot-Test

인천 B. 정수장 내 Pilot-Plant의 운전 조건은 지표수 8L/min, 지하수 2L/min 로 총 10L/min으로 하루 8시간씩 운전 하였으며, 원수와 혼화/응집/침전 처리된 물의 탁도, pH, 그리고 TOC를 비교 측정하였다.

Table 3에서는 Pilot-plant의 혼화/응집/침전 공정의 구성도와 세부 설계 사항을 나타내었다. 실험 기간 동안 원수의 수질은 탁도 3.6-25 NTU, pH 7.44-7.68, TOC 0.76-8.56 mg/L 범위로 측정되었다. Jar-Test에서 실험한 결과를 바탕으로 최적 응집제인 PASC를 이용하여 최적 주입량 조건으로 주입 후 25일간 실험을 통하여 검증하였다.

[Table 3] Coagulation and sedimentation process in pilot plant

Unit	Process	Design	Schematic diagram
Coagulation/ Flocculation		Size: total 729L (rapid mixing tank:45L, two slow mixing tanks: 342L each). Velocity: Rapid mixing(120rpm), slow mixing (60rpm) Coagulant dose: PASC 15 mg/L	
Clarifier		Size: 2.0m3 Contact time: 2 hours	

후 처리수의 탁도, TOC, pH를 측정하였다. 탁도 측정 시 Jar-Test 에서는 Hach사의 탁도 측정기(DR-2100, Germany)를 사용하였으며, Pilot-Test에서는 Yokogawa사의 온라인 탁도측정기(TB450, Japan)를 사용하여 측정하였다. pH 측정 시 Jar-Test 에서는 HANNA Instrument사의 pH meter (HI 98129, USA)를 사용하였으며, Pilot-Test 에서는 Thermo Scientific사의 온라인 pH 측정기(Alpha pH 200, USA)를 사용하였다. TOC는 습식산화법을 이용한 Shimadzu사의 TOC 측정기(V-series, Japan)로 측정하였으며, TOC 제거율은 아래 식을 이용하여 계산하였다.

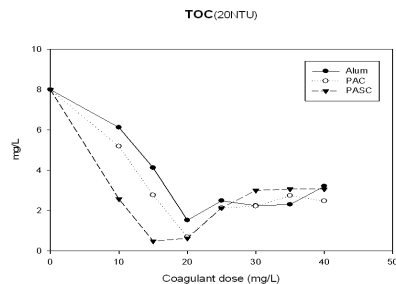
$$Removal(\%) = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100$$

C0 : 초기 DOC, TOC 및 Turbidity 농도
C : 침전 후 농도

3. 실험 및 결과분석

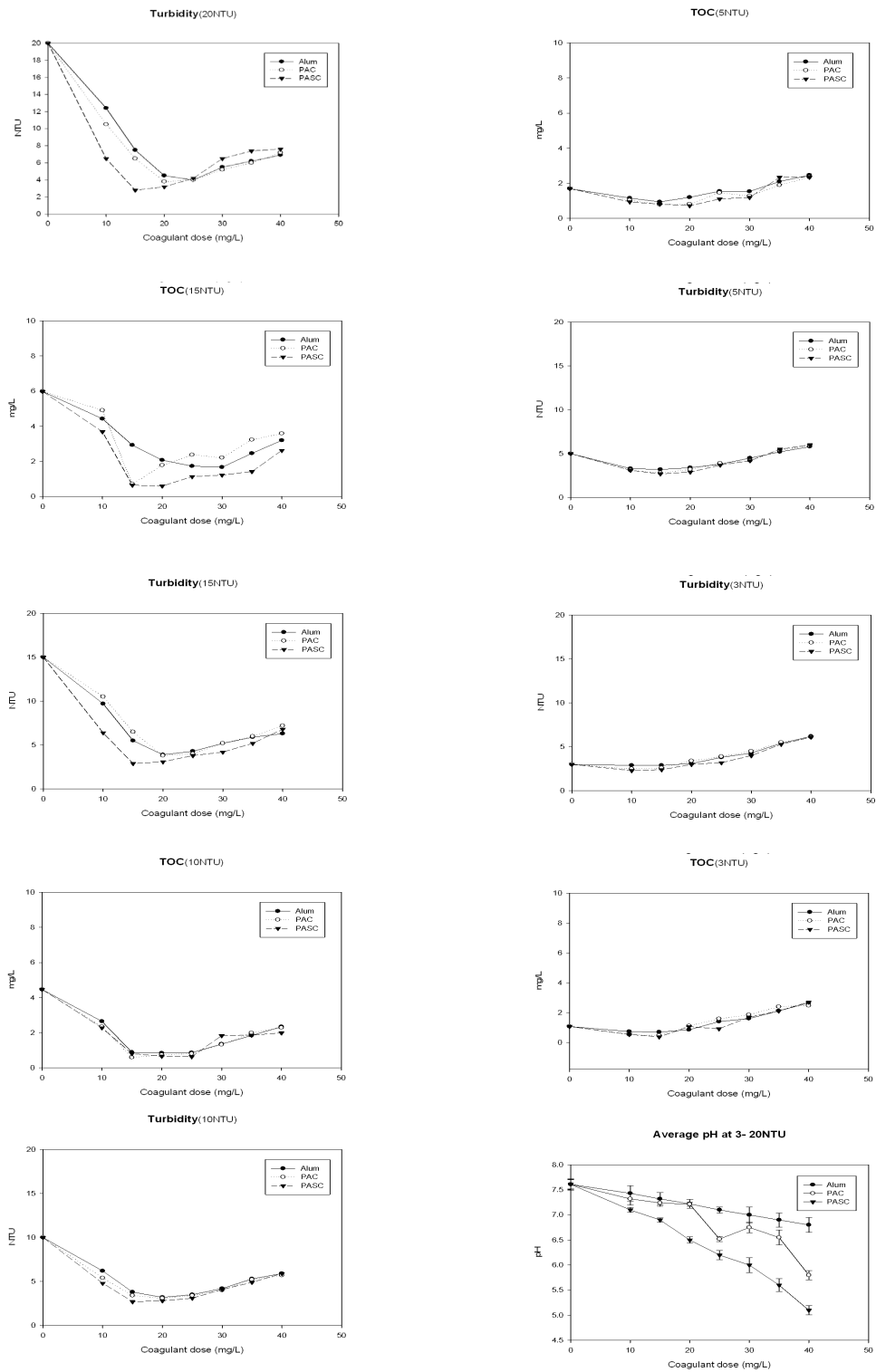
3.1 최적 응집제 및 투여량 설정 Jar test

종류 별 응집제(Alum, PAC, PASC)를 10 ppm, 15 ppm, 20 ppm, 25 ppm, 30 ppm, 35 ppm, 40 ppm 조건으로 주입하여 급속/완속교반, 침전 과정 후 TOC, 탁도, 그리고 pH를 측정하였다. 이를 바탕으로 응집효과를 비교 및 분석하여 최적의 응집제 선정 및 주입량을 결정하고자 하였다. 원수의 탁도는 3-20 NTU 범위로 저니토를 이용하여 인위적으로 조절하였다. 5회에 걸친 Jar-Test의 평균 값에 대한 원수 탁도 별 응집제 투입량에 따른 실험은 Fig. 1와 같이 나타났다.



1.1.4 분석 방법

Jar-Test 및 Pilot-Plant 실험을 통하여 원수 및 응집



[Fig. 1] Coagulation analysis based on TOC, Turbidity and pH in jar test

원수 탁도 20 NTU 조건에서 Alum의 최적 주입농도는 25 mg/L이며, 탁도 제거율은 80%, TOC 제거율은 69%로 확인하였다. PAC의 최적 주입농도는 20 mg/L이며, 탁도 제거율은 81%, TOC 제거율은 91%로 확인하였다. PASC의 경우 최적 주입농도는 15 mg/L이며, 탁도 제거율은 86%, TOC 제거율은 93%로 원수 탁도 20 NTU 조건에서 PACS 15 mg/L 농도로 주입하였을 때 응집 효율이 가장 높은 것을 확인할 수 있었다.

원수 탁도 15 NTU 조건에서 Alum의 최적 주입농도는 25 mg/L이며, 탁도 제거율은 75%, TOC 제거율은 71%로 확인하였다. PAC의 최적 주입농도는 20 mg/L이며, 탁도 제거율은 75%, TOC 제거율은 70%로 확인하였다. PASC의 경우 최적 주입농도는 15 mg/L이며, 탁도 제거율은 80%, TOC 제거율은 89%로 확인하였다. 원수 탁도 20 NTU 조건에서와 같이 PACS 15 mg/L 농도로 주입하였을 때 Alum이나 PAC보다 응집 효율이 가장 높은 것을 확인할 수 있었다.

원수 탁도 10 NTU 조건에서 Alum의 최적 주입농도는 20 mg/L이며, 탁도 제거율은 68%, TOC 제거율은 81%로 확인하였다. PAC의 최적 주입농도는 20 mg/L이며, 탁도 제거율은 69%, TOC 제거율은 83%로 확인하였다. PASC의 경우 최적 주입농도는 15 mg/L이며, 탁도 제거율은 73%, TOC 제거율은 82%로 확인하였다. 응집제 별 탁도 및 TOC 제거율과 최적 주입량을 고려하였을 때 최적 조건은 PASC 15mg/L 주입 조건이 응집효율이 가장 높은 것을 확인할 수 있었다.

원수 탁도 5 NTU 조건에서 Alum의 최적 주입농도는 15 mg/L이며, 탁도 제거율은 36%, TOC 제거율은 44%로 확인하였다. PAC의 최적 주입농도는 15 mg/L이며, 탁도 제거율은 44%, TOC 제거율은 53%로 확인하였다. PASC의 경우 최적 주입농도는 15 mg/L이며, 탁도 제거율은 46%, TOC 제거율은 52%로 확인하였다. 응집 효과를 분석하였을 때 최소 투입량 15mg/L에서의 PACS가 탁도 및 TOC의 최대 제거율을 보여주었다.

원수 탁도 3 NTU 조건에서 Alum의 최적 주입농도는 15 mg/L이며, 탁도 제거율은 3%, TOC 제거율은 34%로 확인하였다. PAC의 최적 주입농도는 10 mg/L이며, 탁도 제거율은 16%, TOC 제거율은 51%로 확인하였다. PASC의 경우 최적 주입농도는 10 mg/L이며, 탁도 제거율은 23%, TOC 제거율은 49%로 확인하였다. 최적 응집제 및 투여량은 PACS 10mg/L로 확인할 수 있었다.

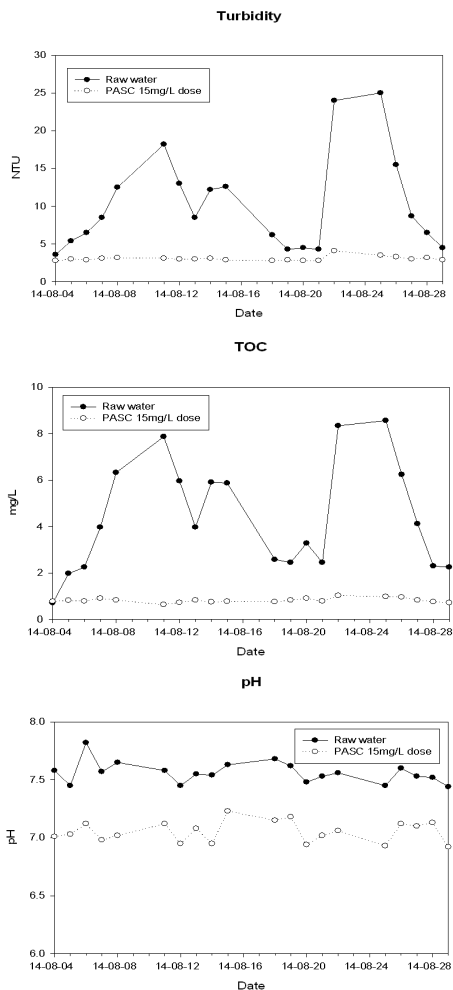
원수 pH는 7.61 이었으며 Alum 주입 시 10mg/L(pH 7.43), 15 mg/L(pH 7.32), 20 mg/L(pH 7.22), 25 mg/L(pH 7.1), 30 mg/L(pH 7.00), 35 mg/L(pH 6.9), 40 mg/L(pH 6.80) 이었으며, 먹는 물 수질기준인 pH 5.8-8.5 사이를 만족하였다. PAC를 사용 하였을 때 10 mg/L(pH 7.32), 15 mg/L(pH 7.24), 20 mg/L(pH 7.21), 25 mg/L(pH 6.52), 30 mg/L(pH 6.5), 35 mg/L(pH 6.5), 40 mg/L(pH 5.8)로 응집제를 주입에 따라 pH가 일정하게 감소하였으며 40 mg/L 이상 조건에서는 먹는 물 수질 기준을 만족시키지 못하였다. PASC는 10 mg/L(pH 7.1), 15 mg/L(pH 6.9), 20 mg/L(pH 6.5), 25 mg/L(pH 6.2), 30 mg/L(pH 6.0), 35 mg/L(pH 5.6), 40mg/L(pH 5.1)였으며, 30 mg/L 이상은 pH 6.0 이하로 먹는 물 수질 기준을 만족시키지 못하였다.

Jar-Test의 실험 결과를 분석 하였을 때, 원수 탁도가 3-20 NTU 범위에서 응집제 주입 후 탁도 및 TOC 제거율을 측정하였을 때 PASC의 응집효율이 가장 높음을 확인할 수 있었으며, 응집제 주입량에 따른 탁도와 TOC 제거율, pH 변화를 고려하였을 때, PACS 15 mg/L을 주입하는 것이 최적 조건임을 확인하였으며, 이를 Pilot-Plant에서 적용 및 검증 하였다.

3.2 Jar test 검증을 위한 Pilot test

본 연구에서의 Pilot-Test는 Jar-Test에서의 실험 결과를 바탕으로 하여 25일간 실험을 수행하였다. Pilot-Plant의 운전 조건은 지표수 8 L/min, 지하수 2 L/min 로 총 10 L/min으로 하루 8시간씩 운전 하였으며, 원수와 응집 처리수의 탁도, pH, TOC를 비교 측정하였다. Figure 2 에서는 시간에 따른 탁도, pH, TOC 변화곡선을 나타내었다.

Pilot-Plant에서 4주간 실험을 수행 하였을 때 원수 탁도는 3.6-25 NTU범위로 변화하였으며, PASC 15mg/L을 주입하였을 때 침전조에서 22-82% 범위의 제거율을 보였으며, TOC의 경우 0-88% 범위의 제거율을 보여주었다. 본 결과를 바탕으로 응집제의 효율은 탁도 및 TOC가 높아짐에 따라 높은 효율을 보이는 경향을 나타내었으며, 탁도의 경우 25NTU에서 최대 응집효율(82%)을 확인하였고, TOC의 경우 8.56mg/L에서 최대 제거효율(88%)을 확인하였다.



[Fig. 2] Coagulation analysis based on TOC, Turbidity and pH in pilot plant

4. 결론

본 연구는 보편적으로 많이 사용하는 응집제인 aluminium sulfate, poly aluminum chloride, poly aluminum silicate chloride를 사용하여 Jar-Test와 Pilot-Test를 이용하여 응집 효율을 평가하고자 실험을 수행하였다.

1) Jar-Test에서 사용한 Alum의 경우 최적 응집제의 투입량은 25mg/L로 확인하였으며, 탁도 제거효율은 최대 71%였으며, TOC 제거효율은 최대 75%였다. PAC의 최적 투입량은 20mg/L로 확인하였으며, 탁도 제거효율은 최대 75%, TOC제거효율은 최대 70%로 확인하였다. PASC의 탁도 제거효율은

최대 80%, TOC의 제거효율은 최대 89%로 확인하였다.

2) Pilot-Test는 Jar-Test의 결과에서 선정된 응집제인 PASC를 이용 최적 투입량인 15mg/L 조건으로 투입하여 이를 검증하기 위해 Pilot-Plant에서 실험하였다. 응집제 투입에 따른 탁도 제거율은 22-82%, TOC 제거율은 0-88% 범위로 확인하였다. 응집제 투입 시 pH는 평균 7.0으로 먹는 물 수질 기준인 pH 5.8-8.5를 만족하였다. 응집제의 응집효율에 대한 경향성을 분석하였을 때, 탁도 및 TOC가 높아짐에 따라 높은 효율을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

응집제 최적 투입조건 도출 실험에 대한 Pilot-Test에서의 검증에 대한 연구는 많이 현재까지 많이 진행되지 않았으며, 본 실험의 결과를 바탕으로 실제 플랜트에서의 응집제투입량 산정에 기여할 수 있을 것이라 사료된다.

References

- [1] Wang, Z.P., Zhang, Z., Lin, Y.J., Deng, N.S., Tao, T. & Zhuo, K "Landfill leachate treatment by a coagulation-photooxidation process", *J. Hazardous Material*, 95 (1/2), 153-159, 2002. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00116-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00116-4)
- [2] Bratby J. "Coagulation and Flocculation in Water and wastewater Treatment", *IWA Publishing*, London, Seattle, 2006
- [3] Gregor JE, Nokes CJ, Fenton E, "Optimising natural organic matter removal from low turbidity waters by controlled pH adjustment of aluminium coagulation", *Water Research*, 31, 2949-2958, 1997. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00154-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00154-1)
- [4] A. Amirtharajah and C. R. O'Melia.(1990). "Coagulation processes: destabilization, mixing and flocculation, *Water Quality and Treatment*", *American Water Works Association*, 4th ed, New York: McGraw Hill, 1990.
- [5] S Sinha, Y Yoon, G Amy, J Yoon "Determining the effectiveness of conventional and alternative coagulants through effective characterization schemes", *Chemosphere* 57 (9), 1115-1122, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.08.012>
- [6] MRWA (Editor) "Coagulation and Flocculation Process Fundamentals" 2003. *MRWA: Minnesota Rural Water Association*. Available From (Accessed <http://www.mrwacom> Sept.,21, 2014).
- [7] Wenshan G., Huu-Hao N., Saravanamuthu V., Fonny D,

- Tien T. N., Rupak A., "Effect of different flocculants on short-term performance of submerged membrane bioreactor", *Separation and Purification Technology* Volume 70, Issue 3, Pages 274 - 279, 2010.
- [8] B.Y. Gao, Q.Y. Yue, B.J. Wang, "The chemical species distribution and transformation of polyaluminum silicate chloride coagulant" *Chemosphere*, 46 (6), pp. 809 - 813, 2002. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0045-6535\(01\)00180-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0045-6535(01)00180-1)
- [9] B. Y. Gao, Q. Y. Yue, Y. Wang "Coagulation performance of polyaluminum silicate chloride (PASiC) for water and wastewater treatment", *Separation and Purification Technology*, Volume 56, Issue 2, Pages 225-230, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2007.02.003>

박 한 배(Hanbai Park)

[정회원]



- 2007년 12월: Oklahoma State University (화학공학석사)
- 2013년 7월 : Oklahoma State University (환경공학박사)
- 2013년 12월 ~ 2014년 5월 : 한양대학교 Postdoc
- 2014년 6월 ~ 현재 : 한국계면공학연구소 선임연구원

<관심분야>
정수하수처리, 환경, 에너지

우 달 식(Dal-Sik Woo)

[정회원]



- 1998년 4월 : 건국대학교 대학원 환경공학과 (환경공학박사)
- 1999년 8월 ~ 현재 : 상명대학교 겸임교수
- 2010년 3월 ~ 현재 : 환경인 포럼 운영간사
- 2011년 1월 ~ 현재 : 한국계면공학연구소 수석연구원

<관심분야>
관부식, 수처리