

폴리염화알루미늄 과량주입에 의한 고(高) pH 원수의 수처리효율 개선 Improvement of Water Treatment Efficiency by Poly Aluminum Chloride Overdosing in High pH Raw Water

임재철·김진근*

Jaecheol Lim·Jinkeun Kim*

한국수자원공사 동두천수도서비스센터·한국수자원공사 수도관리처

(2008년 7월 1일 접수 ; 2008년 9월 5일 1차수정; 2008년 10월 15일 2차수정; 2009년 1월 30일 채택)

Abstract

A method to improve water treatment efficiency by coagulant overdosing for high pH raw water at a drinking water treatment plant (WTP) which had no pH adjusting facilities was investigated. Poly aluminum chloride (PACl) was used for coagulant, and turbidity removal efficiency was evaluated as a function of PACl dosage increases. pH and turbidity of supernatant of jar-tester were 7.10 and 0.50 NTU respectively, when the turbidity, pH, alkalinity, water temperature, conductivity of raw water were 1.75 NTU, 9.38, 46.5 mg/L, 6.4°C, 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectively. Turbidity of settled water was reduced from 2.18 NTU to 0.28 NTU (87% reduction) when PACl dosage was increased from 16 mg/L to 45 mg/L at a full scale WTP. This can be attributed to the recovery of coagulant efficiency by pH reduction with the increase of coagulant dose, however coagulation efficiency was reduced with the formation of $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ by PACl addition at higher pH. Coagulant overdosing was proven to be a rapid and effective method for high pH raw water, which can be applied at drinking WTP.

Key words : high pH, coagulant overdosing, PACl, water treatment, coagulation, algae

주제어 : 고 pH, 응집제 과량주입, PACl, 정수처리, 응집, 조류

1. 서론

약품응집-침전-급속여과-소독공정으로 구성된 일반적 인 정수처리과정에서 약품응집은 후속공정인 침전 및 여과 공정의 성패를 좌우하는 중요한 전처리공정이다. 많은 인자들이 약품응집공정에 영향을 미치며, 원수수질 측면에서는 pH, 수온, 알칼리도, NOM (Natural Organic Matter) 등이 중요한 항목으로 알려져있다 (Kim et al., 2008a; Kim and Lawler, 2008b; Pernitsky and Edzwald, 2006,

Letterman et al., 1999). 수중에 존재하는 입자물질은 대부분 음전하로 대전되어 있으며, 따라서 입자간의 전기적 반발력이 존재하여 수중에서 안정한 상태로 존재한다. 정수 처리 공정에서 이러한 음전하로 대전된 안정한 미세 입자를 고액분리시키기 위해서는 입자물질의 반발력을 최소화하여 불안정화시킨 후 입자간에 존재하는 인력을 이용하여 플록을 만드는 것이 중요하다. 플록을 만들기 위해서는 우선 입자물질의 전하를 중화시키는 것이 필요하며, 이를 위해 다가의 양이온을 갖고 있는 알루미늄염이나 철염계열의 응집제

* Corresponding author Tel:+82-33-250-6241, Fax:+82-33-244-6239, E-mail:hyukjae68@hotmail.com(Kwon, H.J.)

가 흔히 사용된다.

국내 정수장에서는 폴리염화알루미늄 (PACl, Poly Aluminum Chloride), 황산알루미늄 (Aluminum Sulfate), 폴리수산화염화규산알루미늄 (PACS, Poly Aluminum Hydroxy Chloro Silicate), 폴리수산화염화황산알루미늄 (PAHCS, Poly Aluminum Hydroxy Chloro Sulfate) 등 알루미늄계열의 응집제를 대부분 사용하고 있다. 알루미늄계열의 응집제는 원수에 주입시 Al^{3+} , $Al(OH)_2^+$, $Al(OH)^{2+}$, Al_3^{7+} , $Al(OH)_4^-$ 등과 같은 다양한 알루미늄 수화종을 형성하며, 개별 수화종의 비율 및 용해도는 pH와 온도의 함수로 나타낼 수 있다. 알루미늄계열의 응집제는 수중에서 알칼리도와 반응하여 수산화알루미늄 ($Al(OH)_3(s)$)을 형성하며 황산알루미늄을 응집제로 사용하였을 경우 수산화알루미늄의 최저 용해도는 pH가 5.5-6.5 범위에서 나타나고 수온에 따라 약간의 증감이 있으며, 25°C에서 최저 용해도는 pH 6.3에서 나타나는 것으로 보고되었다. 한편 PACl의 경우는 수산화알루미늄의 최저 용해도가 황산알루미늄의 경우보다 조금 높은 pH 범위에서 나타난다 (Pernitsky and Edzwald, 2006). 황산알루미늄을 응집제로 사용할 경우 수온 5°C, pH 7에서 알루미늄 중의 약 50%가 $Al(OH)_4^-$ 로 존재하며, PACl을 사용할 경우에는 동일한 수온에서 pH가 8 정도일 때 알루미늄 중의 약 50%가 $Al(OH)_4^-$ 로 존재하게 된다. pH가 8 이상으로 증가할수록 알루미늄 응집제 수화종에서 $Al(OH)_4^-$ 의 형태로 존재하는 비율이 높게 되며, 이 경우 알루미늄 응집제는 음전하로 대전된 입자물질에 대한 전하중화능력을 거의 상실하게 되며, 오히려 입자물질간의 반발력이 증가되어 응집효율이 저하될 수 있다. 또한 pH가 높아질수록 입자성 물질과 용존 유기물의 음전하 값이 커져 알루미늄염에 의한 응집효율이 저하되게 된다 (Letterman et al., 1999; Stumm and Morgan, 1996).

국내 대부분의 정수장에서 발생하는 주요 응집메커니즘은 전하중화 (charge neutralization)와 수산화알루미늄에 의한 Sweep 응집이며, 최근 무기고분자 응집제의 사용과 더불어 가교작용도 중요한 기작으로 대두되고 있다. 전하중화 기작에서는 다가의 양이온을 갖는 알루미늄염의 존재가 중요하며 Sweep 응집의 경우 $Al(OH)_3(L,s)$ 의 존재가 중요한데 양이온 염과 수산화알루미늄의 분포정도는 주로 pH의 함수이다. 따라서 pH는 응집효율을 결정하는 가장 중요한 요소 중의 하나이다 (Amirtharajah and Mills, 1982).

최근 하천 및 호소에서는 조류의 대번식으로 인해 원수의 pH가 증가하는 사례가 많이 보고되고 있다. 한강수계 팔당호의 경우 시기적으로 pH가 9.5에 근접하는 사례도 있다 (K-water, 2007). 팔당호를 상수원으로 하는 일부 정수장

의 경우 원수 pH 저감을 위하여 황산 주입설비나 액화탄산 주입설비를 갖추고 pH가 상승하는 시기에 효과적으로 pH 제어설비를 가동하고 있다. pH가 높을 경우에는 $Al(OH)_4^-$ 의 비율이 높고 Sweep 응집에 관여하는 $Al(OH)_3(s)$ 의 비율이 줄어 응집효율은 감소하고 알루미늄의 용해도가 상승하여 용존 알루미늄의 농도가 상승할 수 있으므로 고 pH 원수에 대한 수처리효율 향상을 위한 연구가 필요하다. 원수의 pH가 높을 경우 응집제 과량주입을 통해 pH를 저감하고 응집효율을 높이는 것은 강화응집 (enhanced coagulation)의 목적중의 하나이며, 국내외에서 많은 연구가 진행되었다 (Yan et al., 2008; 정 등, 2007; Qin et al., 2006)

본 연구에서는 원수의 pH가 상승한 지역에서 응집제 과량주입을 통해 원수 pH를 저감하고, pH 저감이 응집효율향상에 미치는 영향을 고찰하였다. 본 논문의 주요 목적은 고 pH 원수에 대해 응집제 과량주입을 통한 응집효율 향상방안을 고찰하는 것이다.

2. 연구방법

2.1 대상 정수장

본 연구대상은 경기도 북부에 위치한 한탄강 표류수를 상수원으로 하는 A 정수장이다. A 정수장은 시설용량 일일 4만톤의 생활용수 처리계통과 2만톤의 공업용수 처리계통의 2계열로 구성되어 있다. 생활용수 정수장은 원수수질이 좋지 않아 1998년부터 고도정수처리시설로 급속사여과공정 후 입상활성탄 흡착공정을 운영중이며, 공업용수 정수장은 약품응집 및 침전처리 후 염색 및 피혁공단에 용수를 공급하고 있다. 공업용수 처리시설은 정수약품으로 가성소다와 응집제만 주입할 수 있고, 침전공정 이후 정수지를 거쳐 공업용수 수용가로 공급하고 있다. Fig. 1은 연구대상인 A 정수장의 위치 및 주요 상수원의 수계현황을 나타내고 있다.

2.2 연구방법

취수원인 한탄강의 상류에는 대규모 축산농가 등 많은 오염배출원이 산재되어 있으며, 이로 인해 높은 농도의 영양염류가 상수원에 유입되어 조류대발생의 원인이 되고 있다. 조류대발생의 결과로 원수의 pH가 9이상 급격히 상승하는 사례가 발생하고 있으며, 특히 2007년 전례없는 수질악화 및 조류대발생으로 원수 pH가 급격히 상승되어 생활 및 공업용수의 응집불량사태가 발생했다. 이의 신속한 해결을 위해 여러가지 방법들을 테스트한 결과, A 정수장에서 기존 공정을 이용하여 가장 쉽고 빠르게 응집효율을 향상시킬 수 있는 응집제 과량주입에 의한 pH 강하 수처리기법을 적용하게 되었다.

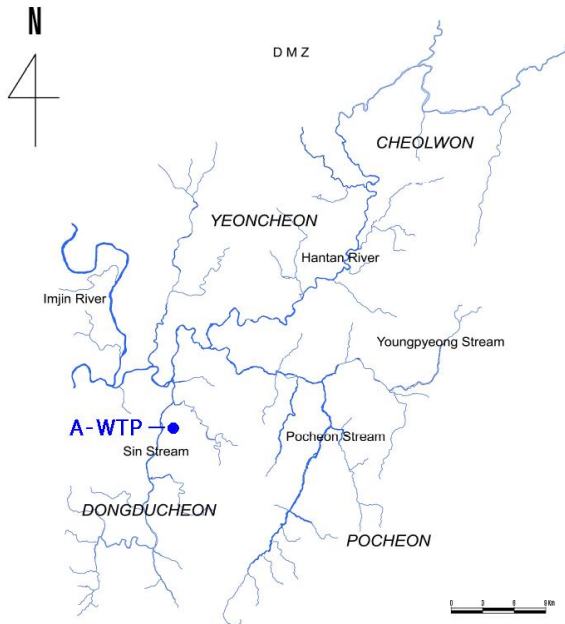


Fig. 1. Location of A water treatment plant and major streams.

본 연구는 A 정수장을 대상으로 폴리염화알루미늄 (PACl) (산화알루미늄 17%, 염기도 42.7%, 비중 1.36)을 응집제로 사용하였고, 원수 pH 상승시 PACl 주입량의 증가에 따른 수질변화를 통해 응집효율을 평가하였다. 주요평가 수질항목은 pH, 탁도이었다. pH는 DRLANGE사의 ANALON pH10 모델을 이용하여 측정하였으며, 탁도는 DRLANGE사의 Multi Unit Plus 모델을 이용하였으며, 알루미늄의 농도는 Varian사의 유도결합 플라즈마질량분석기 NEW ICP/MS 모델을 이용하여 측정하였다.

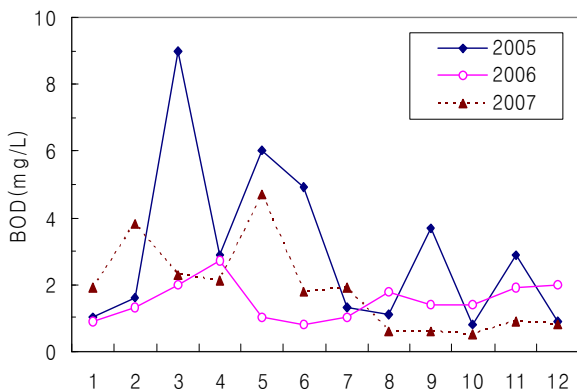


Fig. 2. BOD changes in Hantan River.

3. 결과 및 고찰

3.1 고 pH 원수의 발생원인

A 정수장의 취수구 상류 3.2 km에 위치한 환경부 수질측정망 한탄강 3지점의 3년간 (2005~2007) 수질 측정결과는 Fig 2와 3에 나타내었다. BOD의 경우 갈수기와 농번기에 주기적으로 저하되는데 이는 오염부하량은 일정한데 비해 하천유량의 감소로 유기물농도가 상승하여 나타나는 현상으로 파악된다. 특히 BOD는 2005년 3월에 9.0 mg/L로 급격하게 상승하였는데 이때 암모니아성 질소 농도도 급상승하였다. T-P의 경우에도 BOD 발생경향과 유사하게 봄철에 높게 나타나고 있으며, 이 시기에 풍부한 영양염류의 유입으로 인해 조류 대발생 가능성이 높을 것으로 판단된다.

A 정수장 취수구는 한탄강 본류에 위치하고 있으며 취수구로부터 11.5 km 상류 지점에 영평천이 유입되고, 그 지점에서 13.8 km 상류에 포천천이 다시 영평천으로 유입되고 있어 취수원의 수질은 3개 하천의 영향을 받고 있다. 포천천, 영평천 주변에는 다수의 점오염원이 위치하고 있는데 그 중에서도 포천천에 위치한 소홀, 포천하수처리장에서 배출하는 방류수의 수질이 조류발생에 지배적인 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 특히 포천천과 영평천 수계의 대형 점오염원의 배출시설 용량만 합쳐도 Table 1에 나타낸 바와 같이 약 47,000 m³/일로서 A 정수장의 일일 취수량과 비슷한 수준에 달한다. 갈수기 및 농번기에는 하천수량의 상당량을 점오염원의 방류수가 차지하게 되므로, 취수원 수질이 급격히 저하될 가능성이 매우 크다.

또한 수질악화에 큰 영향을 미치는 요소로서 갈수기와 농번기가 겹치는 봄철에 한탄강의 유량이 농업용수 사용으로 인해 급격히 감소되는 점을 들 수 있다. 취수구 상류 14.4

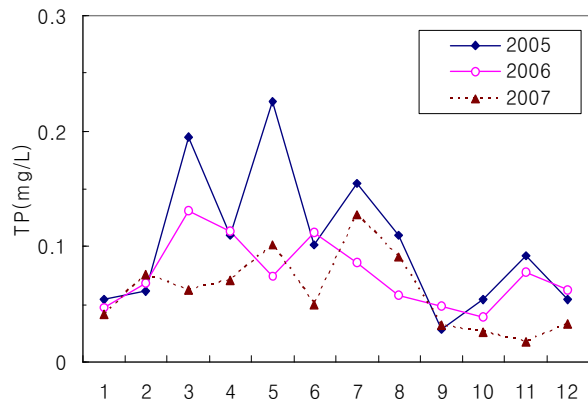


Fig. 3. T-P changes in Hantan River.

Table 1. Major point pollutant sources in watershed

Source	Capacity (m ³ /day)	Location
Sohoul wastewater treatment plant	15,000	Pocheon stream
Pochoun wastewater treatment plant	16,000	Pocheon stream
Yangmoon industrial wastewater treatment plant	14,000	The junction of Pocheon and Youngpeong stream
Small wastewater treatment plants	1,690	Youngpyeong stream
Total	46,690	-

km에 위치한 한탄강 보(泫)에 저장된 물이 농번기에 대부분 농업용수로 사용되어 오염된 영평천 수계의 물에 양호한 수질의 물이 더해지지 않는다. 한탄강 상류지역은 상수원 보호구역으로 지정되어 영평천과 합쳐지기 전까지는 수질이 양호하기 때문에 영평천 수계의 오염도를 희석, 저감시키는 역할을 하였으나 갈수기와 농번기가 겹치는 시기에는 수질이 저하된 영평천 수계의 물이 대부분 A 정수장 상수원으로 사용되고 있다.

3.2 pH > 8 원수가 정수처리에 미치는 영향

A 정수장에서는 2007년 원수 pH가 8을 초과하는 일수가 125일이었으며, 특히 3차례에 걸쳐 원수 pH가 8.5이상으로 상승하는 고 pH 원수 유입사례가 있었다. 모두 갈수기에 일조량 증가, 하천수량 부족 및 상류로부터의 풍부한 영양염 유입으로 인한 조류의 대량 증식이 그 원인으로 생각된다.

1회차에는 2007년 2월 15일부터 원수 pH가 8.5를 초과하면서 공업용수의 응집불량으로 침전수 탁도가 3.30 NTU 까지 급속도로 상승하였다. 응집침전되지 않은 연두색의 조류입자들이 월류되면서 염색공단에서는 염색불량 민원이 속출하였으나 생활용수공정에서는 정상적인 응집처리에 큰 문제가 없었다. 생활용수와 공업용수처리공정의 가장 큰 차이점은 전염소주입 여부였다. 당시 생활용수계통은 응집제(PACl 16 mg/L) 및 전염소(액화염소 13 mg/L)를 플록형성공정 전단계에서 주입하고 있었으나 공업용수계통은 응집제만(PACl 16 mg/L) 주입하고 있었다. 생활용수 처리공정에서는 전염소에 의해 조류가 사멸되고 pH가 적정응집범위로 떨어져 원활하게 응집처리가 가능했으나, 공업용수 처리공정에서는 pH 조정이나 전염소처리 설비가 되어있지 않고 운용할 수 있는 공정이 가성소다와 응집제 주입뿐이어서 원수 pH 상승에 대처하기에는 구조적인 어려움이 있었다. 이후 지속되는 원수 pH 상승시에는 응집제 과량주입을 통한 pH 저감으로 응집효율을 향상시킬 수 있었다.

2회차 (2007.5.11) 발생시에는 처음 발생시에 적용했던 방법(전염소 및 응집제 과량주입)을 이용하여 대처함으로써 민원발생 없는 원활한 수처리가 가능하였다. 한편, 3회차

(2007.6.19) 발생시에는 취수구 상류 2.4 km에 위치한 고탄보(泫)의 철거작업으로 보내에 증식해 있던 조류가 일시에 착수정에 유입되어 원수 pH가 9.76까지 급격하게 증가되었다. 이에 따라서 pH 저감을 위해 일시적으로 공업용수에서 PACl을 최대 150 mg/L, 생활용수에서는 PACl을 최대 100 mg/L, 전염소를 66 mg/L까지 투입하였고, 이후 과다한 약품사용으로 인한 수질저하를 고려하여 정수장 가동을 일시 중단하였다.

고 pH 원수가 정수처리에 미치는 영향은 크게 두 가지 측면에서 고찰할 수 있다. 첫번째는 응집효과 감소이다. 그 이유는 전술한 바와 같이 $Al(OH)_4^-$ 와 같은 음이온 알루미늄 수화종의 생성으로 인하여 입자물질간의 반발력이 증가하기 때문이다 (Letterman et al., 1999). 두 번째로는, 원수의 pH가 증가할수록 응집제의 국부분산 (local dispersion) 속도가 상대적으로 저 pH보다 증가하기 때문이다. 세 번째로는, pH 상승의 원인물질인 조류 자체의 침전불량이다. 이 부분은 보다 상세한 조사가 필요하지만 원수에 전염소처리를 하지 않는 경우 조류의 생존에 의한 운동성이 그 원인으로 생각된다. A 정수장에서 다음 두 가지 점에서 그 원인을 추정할 수 있었다. 먼저, 2007년 2월 21일 채수한 원수와 침전수에서의 조류종과 개체수를 분석한 결과, Table 2에 표시된 바와 같이 원수의 총조류개체수는 3,694 cells/mL이었으며, 우점종은 *Chlamydomonas.sp*와 *Euglena.sp*이었다. 한편, 전염소처리를 하지 않은 공업용수 침전수의 총조류개체수는 약 1,870 cells/mL로 응집침전공정에서의 제거율이 50%에 미치지 못했으나, 전염소처리(액화염소 13 mg/L)를 실시한 생활용수 침전수의 총조류개체수는 약 60 cells/mL로 응집침전처리를 통해 98.4%가 제거되었다. 한편, *Chlamydomonas.sp*와 *Euglena.sp* 비교시 *Euglena.sp*가 *Chlamydomonas.sp*보다 침전성도 더 좋았으며 전염소 처리를 통해 상대적으로 잘 제거되었다. Henderson 등 (2008)의 연구에 의하면 염소주입률이 2.0 mg/L로 동일할 경우 *Chlamydomonas.sp*와 *Euglena.sp*의 제거율이 각각 85%와 95%로 나타나 본 연구와 비슷한 경향을 나타내었다. Fig. 4는 공업용수 계통의 침전지 유출수

Table 2. Influence of prechlorination on algae removal

		Total cell counts (cells/mL)	Algae Species	Cell counts (cells/mL)	Removal (%)
Raw water		3,694	Chlamydomonas.sp. (38%)	1,422	-
			Euglena.sp. (38%)	1,391	
Settled water	Without prechlorination (Industrial Purpose)	1,870	Chlamydomonas.sp. (63%)	1,173	49.4
			Euglena.sp. (34%)	629	
	With prechlorination (Drinking Purpose)	60	Chlamydomonas.sp. (71%)	43	98.4
			Others (29%)	17	

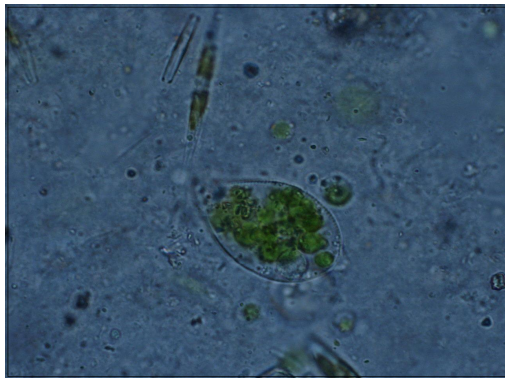


Fig. 4. Algae in the settled water (*Chlamydomonas.sp.*).

에서 검출된 조류의 일종인 *Chlamydomonas.sp.*를 나타내고 있다.

우점종으로 조사된 *Chlamydomonas.sp.*와 *Euglena.sp.*는 편모를 갖고 물 속에서 유영하는 특성을 갖고 있는 종으로 전염소처리를 하지 않는 공업용수의 경우 자테스트 후 바닥에 침강된 연두색의 슬러지가 일정시간이 지난 후 재부상되는 현상을 관찰할 수 있었다. 반면, 전염소처리를 한 생활용수의 경우에는 바닥에 가라앉은 슬러지의 색깔이 갈색으로 조류가 사멸되어 연두색 색소가 탈색된 것을 볼 수 있고 조류의 운동성으로 인한 슬러지의 재부상은 관찰되지 않았다. 이러한 특징은 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 공업용수 침전수의 탁도변화에서도 관찰되고 있다. 이 두 종의 조류가 침전지 내에 살아있으면서 특정한 시간에 주기적인 생체운동을 반복함으로써 하루 중 일정한 시간에 공업용수 탁도 상승의 원인으로 작용하고 있는 것으로 추정된다. 특히 오전 8시에 최고 탁도가 관찰되고 있는데 이는 정수장 내에 위치한 공업용수 정수지 유출지점의 측정치이므로 침전지 말단에서의 시간으로 계산하면 약 15:00경을 최저 탁도로 볼 수 있고

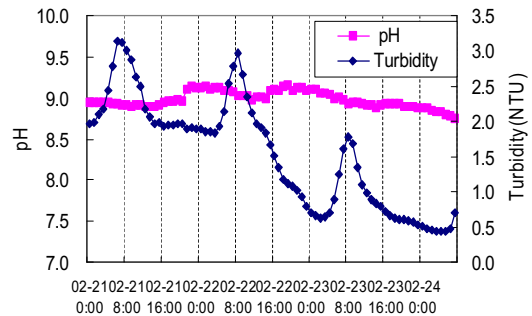


Fig. 5. Turbidity of the settled water and pH of raw water in industrial WTP without prechlorination (PACl dosage was increased from 20 mg/L to 45 mg/L on Feb. 23, 2007).

이때부터 상승되기 시작하여 23:00경 최고 탁도까지 증가하였다가 다시 하강하고 있다. 이 현상은 정확하게 24시간을 주기로 반복되었으며, 이 때 공업용수 생산유량, 송수유량 증감 등 탁도 변화에 영향을 줄만한 공정운영의 변화는 없었다. 한편 Fig. 5에서 PACl의 주입량은 20 mg/L에서 2월 23일 09시부터 45 mg/L로 증가되었다.

3.3 PACl 과량주입에 의한 응집효율개선 결과

고 pH 원수의 수처리 효율향상 방안 도출을 위하여 먼저 Jar-test를 실시하여 응집제 주입률에 따른 응집효율을 분석하였다. 당시 원수의 수질은 탁도 1.75 NTU, pH 9.38, 알칼리도 46.5 mg/L, 수온 6.4 °C, 전기전도도 400 μ s/cm였다. 보통 원수 탁도 2 NTU정도를 기준으로 할 경우 PACl을 12~16 mg/L 주입하면 적정 응집이 되지만 자테스트에서는 최저 20 mg/L에서 45 mg/L까지 5 mg/L 간격으로 PACl을 주입하였다. 자테스트는 급속혼화 (120 rpm)를 80초간 실시한 후 3단계 완속교반 (33 rpm-10분, 22 rpm-10분, 11 rpm-10분)을 실시하였다. 이후 20분 정치 후 상징수를

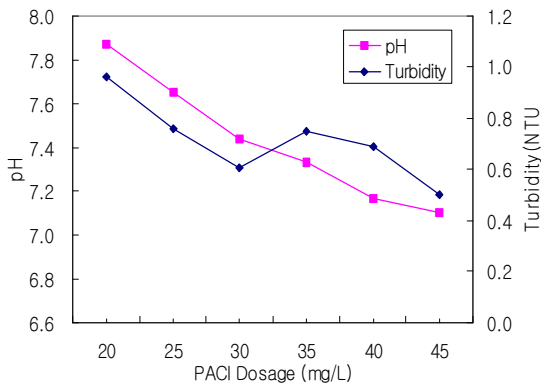


Fig. 6. Results of jar-test of raw water (pH 9.38 and alkalinity 46.5 mg/L).

대상으로 수질분석을 실시하였으며, 자테스트 결과는 Fig 6에 나타내었다.

자테스트 결과 응집제 과량주입의 효과가 양호했다. 원수 pH가 응집제 주입을 증가에 따라 감소되었고 상징수 탁도도 하강하여 응집성능이 개선됨을 확인할 수 있었다. 따라서 고 pH 원수의 수처리효율 향상방안으로 응집제 과량주입방법을 실공정에 적용하여 PACI의 주입율을 16 mg/L (2007.2.22)에서 45 mg/L (2007.2.23)까지 증가시켜 공업용수 탁도를 효과적으로 낮추게 되었다. Table 3은 고 pH 원수 유입시 PACI 주입에 따른 침전수의 pH 및 탁도변화를 나타내고 있다. 원수의 pH는 크게 변화가 없었으나 PACI 주입을 증가에 따라 침전수의 pH가 7.37에서 6.68로 낮아지며 응집효율이 향상된 것으로 생각된다.

2007년 2월에 발생했던 것과 같은 유사한 상황이 2회차로 2007년 5월 초순경 발생하다가 강우로 해소되었고, 3회차가 2007년 6월 중순경에 다시 발생되었다. 당시에는 응집제로 PAHCS를 사용하고 있었으며, 응집제를 수질에 따라 선택적으로 사용하기 위해 약품주입배관을 이중화하고 있던 중이었다. 즉, pH 상승시에는 pH 저감효과가 좋은 PACI를 사용하고 그 외의 시기에는 응집효율이 우수한 PAHCS를

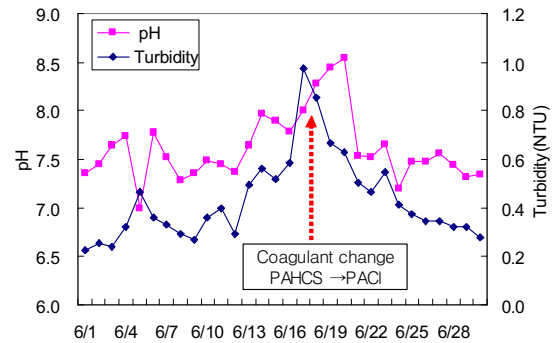


Fig. 7. Turbidity changes at different pH values and coagulants based on daily measurements at industrial WTP (coagulant dose was changed from 40 mg/L (PAHCS) to 45 mg/L (PACI) on June 18, 2007).

사용하여 수처리 안정성과 입자물질 제거율을 동시에 높이 고자 하였다. 그런데, 2007년 6월 18일 취수원 상류 2.4 km에 위치한 고탄교 아래의 보가 철거되면서 보 상류에 성장하고 있던 조류가 일시에 취수구로 유입되어 pH가 급상승하는 상황이 발생되었다. 즉시 임시 응집제 배관을 가설하여 응집제를 PAHCS 40 mg/L에서 PACI 45 mg/L로 교체 주입하여 공업용수의 탁도상승을 막을 수 있었다.

Fig. 7은 2007년 6월에 발생한 고 pH 원수 유입시 응집제를 PAHCS에서 PACI로 전환한 후 과량주입에 따른 공업용수계통에서의 침전수 탁도변화를 매일 오전 8시 측정값에 근거하여 나타내고 있다. 2007년 6월 18일의 경우 원수의 pH가 8.0에서 8.3으로 증가했음에도 불구하고 침전수 탁도의 경우 1.0에서 0.85 NTU로 15% 개선되었으며, 이후에도 pH는 6월 20일까지 증가했으나 탁도는 지속적으로 낮아져서 PACI 과량주입에 의한 탁도저감 효과가 명확하게 나타나는 것을 알 수 있었다. 한편, pH가 7.5이하로 낮아졌을 경우에는 PACI에 의한 과량주입과 PAHCS의 적정 주입에 의한 탁도의 차이는 크지 않는 것으로 나타났다. 따라서 효율적인 정수장 운영을 위해서는 고 pH에서는 PACI를 과량주입하는 것이 효과적이지만 그 외의 경우에는 PAHCS의

Table 3. Turbidity and pH of settled water: effect of coagulant overdosing

Date	pH		PACI dosage (mg/L)	Turbidity of settled water (NTU)
	Raw water	Settled water		
Feb. 14, 2007, 08:00	8.47	7.37	16	2.18
Feb. 24, 2007, 08:00	8.54	6.68	45	0.39
Feb. 25, 2007, 08:00	8.51	6.68	45	0.28

주입이 응집효율면에서 유리한 것을 알 수 있었다.

그런데, 이번에는 공업용수만이 아니라 생활용수에서도 응집불량현상이 발생했다. 지난 2007년 2월의 생활용수 약 폼주입율은 PACl 17 mg/L, 전염소 13 mg/L 주입시 혼화수의 pH가 응집성을 유지하기에 적절하였던 것으로 보인다. 그러나, 2007년 6월의 PAHCS (12.8%) 25 mg/L, 전염소 2.9 mg/L 주입조건에서는 응집제로 PAHCS를 사용하였고, 전염소 주입율이 지난 2월보다 약 10 mg/L 낮아 pH 저감효과가 미미하였던 것으로 생각된다. 따라서 PACl을 과량주입(40 mg/L)하여 pH를 낮추었고, 먹는물을 차질없이 생산할 수 있었다.

한편, 과량의 응집제 주입에 따라 잔류알루미늄 농도의 증가가 우려될 수 있으나 생활용수와 공업용수의 알루미늄 농도 분석결과 '07.6.25 생활용수 PACl 30 mg/L 주입시 정수 (pH 6.8, 탁도 0.08 NTU)에서 불검출, 공업용수 PACl 50 mg/L 주입시 침전수 (pH 6.6, 탁도 0.37 NTU)에서 0.05 mg/L로 검출되어 먹는물 수질기준 0.2 mg/L에는 미치지 못하였다.

이는 PACl의 염기도가 42.7%로 수화작용이 용이하고 잔류알루미늄을 분석한 침전수, 여과수, 정수의 pH가 6.6~6.8의 범위로 알루미늄염의 분포가 불용성인 Al(OH)₃(L,s)형태로 존재하게 되며, 정수와 침전수의 탁도 성분에도 잔류알루미늄 플록이 거의 존재하지 않았기 때문인 것으로 생각된다. 일반적으로 PACl을 응집제로 사용할 경우 수산화알루미늄의 최저용해도는 pH 6.5부근에서 형성되는 것으로 보고되었으며 (Pernitsky and Edzwald, 2006), 시료의 pH가 최저용해도 pH에 근접하고 응집효율이 개선되어 잔류알루미늄의 농도가 매우 낮은 농도로 검출된 것으로 생각된다.

본 연구에서는 PACl 과량주입에 따른 탁도제거율을 중심으로 고찰하였으나 향후 유기물제거율, 소독부산물 저감과의 관련성 등에 대한 추가연구도 필요할 것으로 생각된다. 또한 Alum과 PACl과의 비교분석을 통해 보다 경제적이고 효율적인 응집제 과량주입에 따른 pH 저감 방법에 대한 추가 연구도 필요하다.

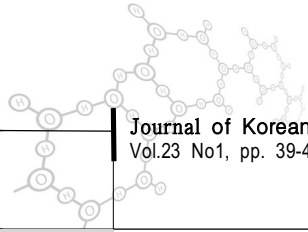
4. 결론

본 연구에서는 갈수기 하천유량감소 및 오염부하량 증가, 수온상승, 조류개체수 증가 등으로 원수의 pH가 급격하게 상승한 A 정수장을 대상으로 PACl 과량주입을 통해 pH를 낮춤으로써 정수처리효율 개선점을 도출하였다. PACl의 과량주입은 원수의 pH를 저감시켜 별도의 pH 조정제를 사용하지 않고도 양호한 응집을 유도함으로써 침전수의 탁도를 개선할 수 있는 유용한 방법으로 평가되었다. 특히, 이러

한 정수처리 방법은 수처리공정에 전염소나 pH 저감설비가 없는 경우에 유용하게 적용이 가능하였다. 즉, pH를 낮출 수 있는 응집제의 선택과 그 응집제의 과량주입에 의한 pH의 조정만으로 수처리 기능을 일정부분 회복할 수 있었다. 이는 pH 상승으로 PACl 주입시 Al(OH)₃와 같은 화학종이 생성되어 응집효과가 저해되었으나 응집제 주입량 증가에 따라 pH 저감효과로 인해 더 활성화된 (activated) 알루미늄염 수화종의 형성으로 응집성능이 회복되었기 때문인 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 이영기, 이태용, 김대수, 김윤하, 유영인, 유병조, 한창환 (2006) CO₂를 이용한 원수 pH 조정으로 수돗물 품질 개선, 대한상하수도학회, 한국물환경학회 2006공동 추계학술발표회논문집, pp. D-177-D-185.
2. 정영미, 권지향, 이상협 (2007) 한강원수 자연유기물의 특성분석 및 강화응집 기준 평가, *상하수도학회지*, 21(6), 653-661.
3. Amirtharajah, A., and Mills, K.M. (1982) Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation, *J. of AWWA* 74(4), pp.210-216.
4. Henderson, R., Parsons, S.A. and Jefferson, B. (2008) The impact of algal properties and pre-oxidation on solid-liquid separation of algae. *Wat. Res.* 42(8-9), 1827-1845.
5. Kim, J., Nason, J.A., Lawler, D.F. (2008a) Influence of Surface Charge Distributions and Particle Size Distributions on Particle Attachment in Granular Media Filtration. *Environ. Sci. Tech.*, 42(7), 2557-2562.
6. Kim, J., Lawler, D.F. (2008b) Influence of Particle Characteristics on Filter Ripening. *Separation. Sci. and Tech.* 43(7), 1583-1594.
7. K-water (2007) *수도관리연보*.
8. Letterman, R.D, Amirtharajah, A. and O'Melia, C.R. (1999) Coagulation and Flocculation in *Water Quality and Treatment*. 5th Ed. pp. 6.9-6.61, AWWA, Denver.
9. Pernitsky, D.J. and Edzwald, J.K. (2006) Selection of alum and polyaluminum coagulants: principles and applications, *J. of water supply: research and technology-AQUA*, 55(2), pp.121-141.
10. Stumm, W. and Morgan J.J. (1996) *Aquatic*



- Chemistry*. 3rd edition. pp.834–857, Wiley Interscience.
11. Yan, M., Wang, D., Ni, J., Qu, J. Chow, C., and Liu, H. (2008) Mechanism of natural organic matter removal by polyaluminum chlorides: Effect of coagulant particle size and hydrolysis kinetics, *Wat. Res.* 42(13), 3361–3370.
 12. Yan, M., Wang, D., Yu, J., Ni, J., Edwards, M. and Qu, J. (2008) Enhanced coagulation with polyaluminum chlorides: Role of pH/Alkalinity and speciation, *Chemosphere*, 71(9), pp. 1665–1673.
 13. Qin, J. Oo, M.H., Kekre, K.A., Knops, F. and Miller, P. (2006) Impact of coagulation pH on enhanced removal of natural organic matter in treatment of reservoir water, *Separation and Purification Technology* 49(3), pp. 295–298.