

## 갈수기 정수장운영관리 사례 - 갈수기 pH저감제(황산)투입에 의한 정수처리효율 향상

가길현 · 김윤용 · 이준호 · 안치화 · 한인섭<sup>\*,†</sup> · 민병대<sup>\*</sup>

서울시 영등포아리수정수센터

<sup>\*</sup>서울시립대학교 환경공학부

## Improvement of Water Treatment Efficiency by pH Decreasing Agent (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) for Droughty Seasons

Gilhyun Ka · Yunung Kim · Junho Lee · Chihwa Ahn · Insup Han<sup>\*,†</sup> · Byungdae Min<sup>\*</sup>

Yeongdeungpo Water Supply Office

<sup>\*</sup>Department of Environmental Engineering, University of Seoul

(Received 15 April 2008, Accepted 16 June 2008)

### Abstract

Drinking water treatment is enhanced by coagulant dosages and chlorine injection because of pH increase in raw water in droughty seasons such as spring and fall. But water quality deterioration is occurred by increase in residual aluminium and disinfection by-products. Coagulation process can be used to control natural organic matter (NOM) during water treatment. The effect of coagulation process appeared to depend on the pH of water rather than coagulant dosages. In this study, for water treatment in high pH season H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> was applied for pH adjustment at full scale. Before and after pH adjustment by H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> injection, water quality of drinking water was evaluate. In the result of investigation of total organic carbon (TOC) removal in high pH season, TOC was removed approximately 30~40%, which showed decrease in water treatment efficiency. Also, it is increased both particle numbers and residual Al concentration in the water. After H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> injection for adjustment to pH<7.5 in settled water, treated water turbidity decreased in 0.047 NTU from 0.059 NTU, and particle numbers of filtered water decreased in 20/mL from 90/mL. On the other side, TOC removal efficiency increased in approximately 10% after adjustment of pH. In the result of decrease in pH in raw water through more coagulants and prechlorine without H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> injection, trihalomethanes (THMs) concentration increased in 16 µg/L from 8 µg/L.

**keywords** : Natural organic matter (NOM), Particle number, pH adjustment, Total organic carbon (TOC), Trihalomethanes (THMs)

### 1. 서론

잠실수중보 직상류에 위치한 P 취수장에서 한강 원수를 취수하여 정수처리를 하고 있는 Y 정수센터는 봄·가을철 갈수기에 원수 pH 상승으로 인하여 정수처리 공정의 응집 효율이 저하된다. 때문에 응집제 및 염소처리를 강화하여 정수처리를 하고 있으나, 잔류알루미늄 및 소독부산물 등이 증가하여 수질저하가 발생되고 있다. 이로 인해 처리 수질을 관리하는데 상당한 어려움을 겪고 있는 실정이다. 한강 원수의 경우, pH 8.0 이상 발생하는 기간이 연간 약 160일 정도로, 조류가 대량 번식하는 2월부터 5월 사이에는 원수 pH가 9.0 이상을 넘어서는 기간도 발생하는데, 이 시기에 정수처리효율 상승을 위하여 pH 저감제인 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(강병수 등, 2004; 심규봉, 2007; 이영기 등, 2006; 이환 등,

2003; 정영미와 권지향, 2006)를 사용하여 최적응집 범위로 pH 조절 후, 응집제를 투입하려는 최적응집(Optimized Coagulation)기법(Musikavong et al., 2005)이 검토되고 있다. 정수처리 시 응집공정은 천연유기물질(Natural Organic Matter, NOM)을 제어하는데 사용할 수 있고, 응집처리 시 응집제를 투여하여 응집할 경우 pH 조절을 통해 응집효율을 높일 수 있다. 서울시의 경우, K 아리수정수센터에 CO<sub>2</sub> 설비(이영기 등, 2006)가 시범 설치되어 2008년부터 시험 운영에 들어갔으며 수질개선 효과 및 경제성 등을 분석한 후 점차적으로 서울시 전체 정수센터에 확대설치를 추진 중에 있다. 본 연구에서는 CO<sub>2</sub>설비 도입이전에 pH가 높은 시기의 원수 처리대책(김성재 등, 2007)으로 pH 조절제로 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)을 실공정에 적용하여 pH 저감에 따른 정수처리 효율 및 수질개선 효과를 조사한 후, 공정개선을 위한 운영 자료로 이용하고자 하였다.

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

ishan@uos.ac.kr

## 2. 연구 방법

### 2.1. 실험대상 및 기기

pH 조절제로써 황산을 투입하여 정수처리 및 수질개선 효과를 알아보기 위하여 원수 pH가 8.0 이상을 유지하였던 2007년 10월부터 2008년 2월말까지 Y 정수센터의 원수 및 공정수를 대상으로 연구를 진행하였으며, 혼화지 유입부인 착수정에 간이 황산탱크(용량 3 m<sup>3</sup>)를 설치하여 94% 황산원액을 다이아프램 정량펌프로 이송하여 주입하였다(Fig. 1).

황산 투입 전·후의 수질변화 특성을 분석하기 위하여 사용된 기기는 Table 1과 같으며 pH와 입자수는 현장에 설치되어 있는 온라인 연속측정기기로 실시간 모니터링 하였다(Fig. 2).

**Table 1.** Analytical items and the instruments

Item	Analytical instrument
Turbidity (NTU)	Turbidity meter, HACH, Model-2100N
pH	pH meter, Orion, Model 520A
TOC	TOC Analyzer, Sievers, Sievers 900
Particle	Particle counter, IBR, PAMAS-1790M (Portable)
Al ion	UV Spectro-photometer
THMs	GC-MSD Agilent Technologies, HP 6890 - MSD 5975 Pegasus III GC-TOFMS/Purge&Trap

### 2.2. 실험방법

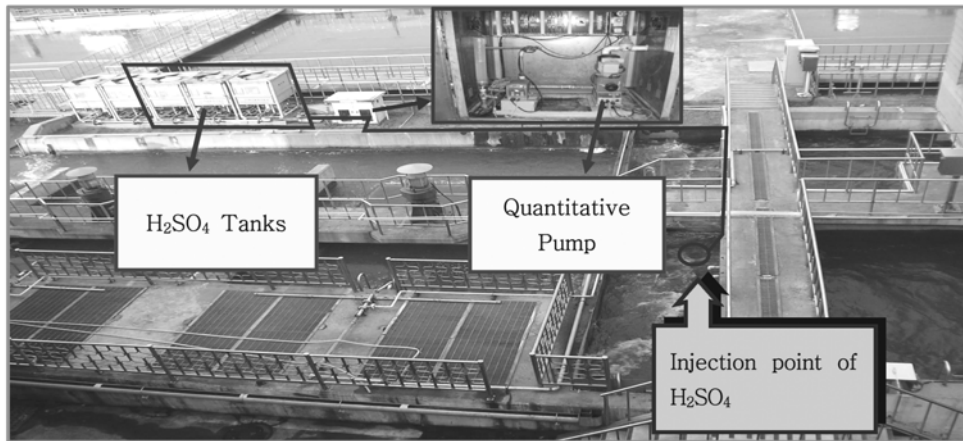
정수처리 실 공정에서 pH 조절제(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)투입에 따른 수질개선효과를 알아보기 위하여 먼저 실험실에서 Jar-test를 실시하여 탁도 및 유기물질 제거율 등을 조사한 후, 공정에 투입할 황산주입률 및 목표 pH를 결정하였다. 또한, 원수 pH 조절 전·후의 공정수의 탁도 및 입자수 제거율과 TOC, 잔류알루미늄 농도, THMs 등 표준정수처리공정에서 효율이 높지 않은 용존성 수질항목을 측정하여 정수처리 개선효과를 비교·분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 원수 pH 변동에 따른 수질변화

한강 원수를 취수하여 정수처리를 하고 있는 Y 아리수정수센터의 경우, 봄·가을철 갈수기에 원수 pH가 8.0 이상 상승하면서 적정 pH를 벗어나 정수처리공정에서 응집효율 저하가 발생하였고, pH 저감을 위하여 응집제 및 염소량 강화 투입하는 강화응집(Enhanced Coagulation)을 실시하여 정수처리를 하고 있다. 그러나 잔류알루미늄(Yan et al., 2008) 및 염소소독부산물(DBPs; Musikavong et al., 2005; Uyak et al., 2007) 등의 발생량이 증가하여 수질이 저하되는 문제점을 가지고 있었다.

최근 3년간 정수 pH를 조사한 결과, 정수 pH는 원수 pH



**Fig. 1.** Injection equipment and injection point of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.



**Fig. 2.** Turbidity meter (left) and particle counter (right) in filter bed.

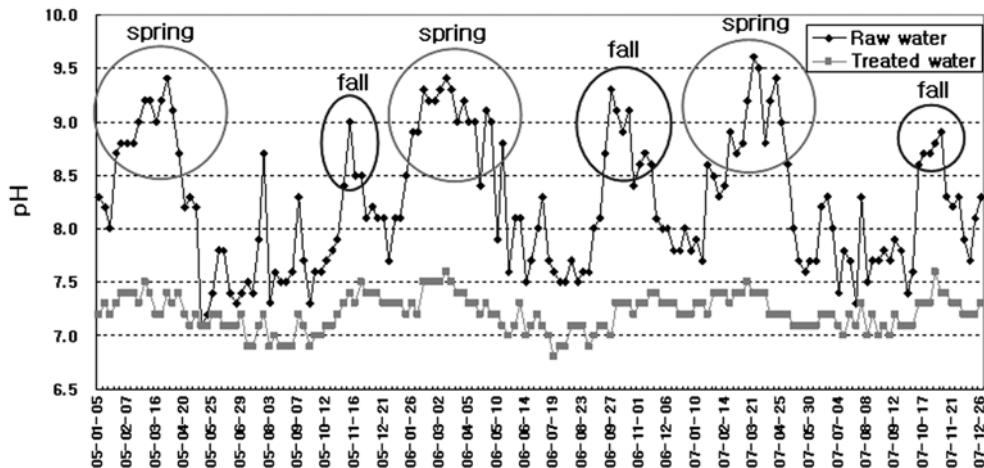


Fig. 3. pH change of raw and treated waters for 3 years.

변동에 따라 최저 pH 6.9에서 최고 pH 7.6까지 변동하였으며, 갈수기 원수 고 pH 시기에는 정수 pH가 7.4~7.6까지 증가하여 연평균 정수 pH 7.2보다 높게 나타나고 있었다(Fig. 3). pH 8.0 이상의 높은 pH 원수 유입 시, 전염소 및 응집제를 증가시켜 투입하여 원수 pH를 적정 pH 범위로 조절하여 정수처리를 하고 있으나, 최고의 수질로 처리하는데 한계가 있으며 응집성능 및 용존성 유기물질 처리효율이 떨어져 입자수, 잔류알루미늄, 소독부산물 등의 발생량이 증가하여 평상시보다 수질이 저하되는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 원수 pH 상승시기인 봄·가을철 갈수기에 침전수 TOC 제거율<(원수TOC-침전수TOC)/원수TOC>의 변동 추세를 나타낸 것으로 갈수기(2~4월, 10~11월)에 침전수 TOC 제거율이 40~30%로 풍수기 및 평수기(5~9월)에 비하여 감소하여 정수처리효율(응집·침전)이 저하되는 것으로 조사되었다.

Fig. 5는 2~50 μm 크기의 여과수 중에 존재하는 입자를 측정된 것으로 입자수의 경우 저수온기 및 봄철 pH 상승시기에 여과지에서 누출이 증가하여 처리효율이 저하되는 것을 알 수 있다. 가을철 pH 상승시기에는 여과지 누출이 증가하지 않는 것은 봄철과 가을철의 조류 특성에 의한 것으로 판단된다(한선희 등, 2006).

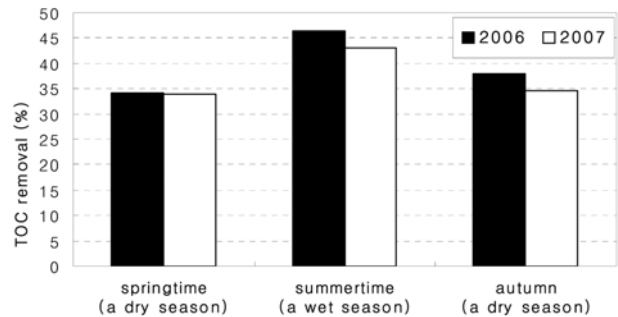


Fig. 4. Change of TOC removal efficiency in settling basin.

Fig. 6은 정수 잔류알루미늄 농도 추세를 나타낸 것으로, 수온이 낮은 봄철 높은 pH 시기보다는 가을철 높은 pH 시기에 잔류알루미늄 농도가 높게 발생되는 경향을 보이고 있으며, 장마철에는 pH가 낮게 유지되지만 고탁도 원수 유입에 따른 응집제 대량 투입으로 잔류알루미늄 농도가 증가한 것으로 나타났다.

### 3.2. 원수 pH조절을 위한 황산투입 실험 결과

#### 3.2.1. 황산주입을 결정을 위한 Jar-test

원수의 pH가 8.0 이상되는 시기에서, 현장에 황산을 투입하여 수질개선 효과를 알아보기 전에, 실험실에서 황산투

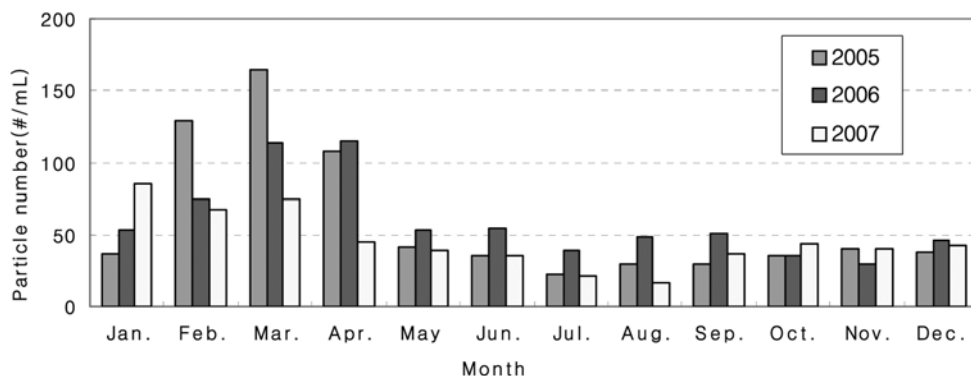


Fig. 5. Change of particle numbers in after filtration.

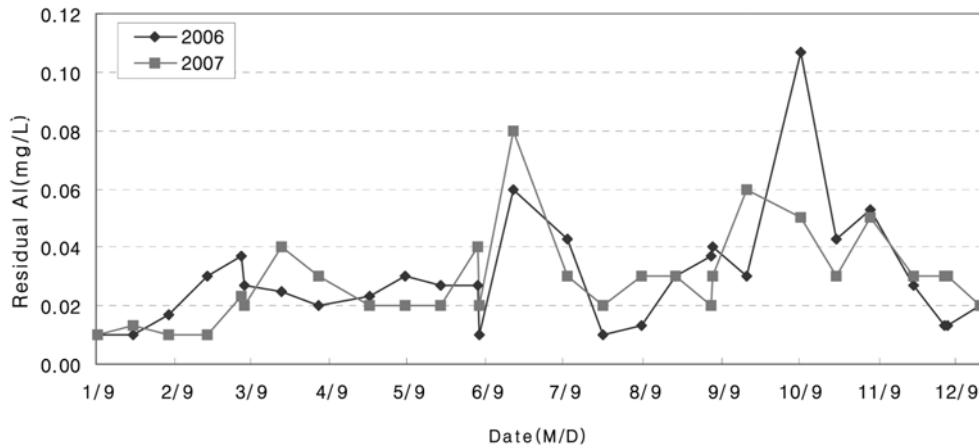


Fig. 6. Change of residual aluminium concentration in the treated water.

입에 따른 pH 저감추이 및 응집제 주입률 변동에 따른 탁도 개선 효과, 유기물질(TOC)제거율 등을 조사하여 실공정 원수 pH 조정을 위한 목표 pH를 결정하였다.

Jar-test용 원수 수질현황은 Table 2와 같다.

Jar-test에 사용한 황산은 순도 96% 이상의 1급 시약으로 0.2%로 희석하여 사용하였으며, 응집제는 폴리알루미늄클로라이드(PAC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량 : 17%)를 사용하였다. Jar-test 결과, 원수 pH는 8.5였으며, 알칼리도 44 mg/L, 전기전도도 169 μS/cm이었고, 원수 pH 미조정 시 최적 응집제 주입률은 13 mg/L이었다. 원수 pH 조정을 위하여 황산을 투입하여 pH 저감추세를 조사한 결과, 황산투입률 증가에 따라 원수 pH가 선형적으로 급격히 감소하였고, 황산 5 mg/L 투입 시, pH 7.5로 저감되었으며 10 mg/L 투입 시에는 원수 pH가 약 7.0까지 저감되었다.

또한 황산투입으로 원수 pH를 7.5로 조정 시 pH 미조정

Table 3. TOC removal by coagulation with pH adjustment (Jar-test)

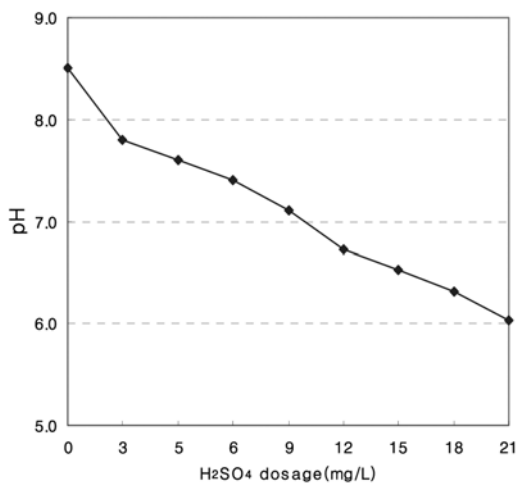
pH adjustment	TOC change (mg/L)	(TOC removal efficiency/ Raw water TOC)×100
7.6	2.0 ~ 1.8	37%
7.4	1.7 ~ 1.6	45%
7.2	1.8 ~ 1.7	47%
7.0	1.6 ~ 1.5	50%

시보다 최적 응집제 주입률이 약 3 mg/L 정도 적은 투입률에도 미투입 시보다 탁도 개선효과를 나타냈으며, 유기물질인 총유기탄소(TOC)도 Table 3과 같이 pH 저하에 따라 응집·침전효율이 상승하는 추세를 보였다(Fig. 7).

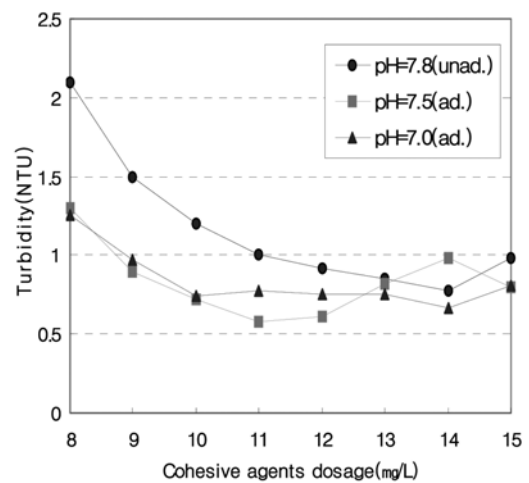
현장 실험 시, 황산으로 조정해야 할 목표 pH는 응집제 및 후염소 주입으로 공정수의 pH 저하가 발생하는 것을 고려하여 혼화수 pH를 7.6으로 유지하는 것으로 결정하였

Table 2. Raw water quality

Turbidity (NTU)	pH	Alkalinity (CaCO <sub>3</sub> as mg/L)	TOC (mg/L)	Water temperature (°C)
6.1 (10.6~3.0)	8.7 (8.0~9.3)	45 (40~50)	2.3 (1.9~2.8)	10.0 (18~3)



(a)



(b)

Fig. 7. Change of pH in raw water after H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> injection (a), and Change of turbidity in raw water after pH adjustment (b). (unad. : unadjustment, ad. : adjustment)

으며 황산주입률은 3~6 mg/L로 결정하였다.

3.2.2. 원수 pH조절 및 정수처리효율 향상을 위한 황산투입 현장 실험

황산투입 현장 실험은 2007년 10월부터 2008년 1월까지 진행하였으며, 이 시기의 원수 수질은 가을철 조류 증가 등의 영향으로 원수 pH가 8.5~9.2까지 상승하여 정수처리공정의 처리효율이 크게 떨어지고, 응집제 과량 주입 및 pH 조절목적으로 전염소를 다량 투입함으로써 잔류알루미늄 및 염소소독부산물 발생량 등이 증가하여 수질이 저하되는 시기였다.

따라서, 초기 투자비가 저렴하고 간단한 설비를 통하여 pH 조절이 가능한 황산투입 설비를 착수정에 설치한 후, 원수 pH 조절에 따른 수질(탁도, 입자수 등) 비교를 실시하여 정수처리 효율을 평가하고자 하였다. 1차 현장실험은 2007년 10월 10일부터~2007년 11월 9일까지 진행하였으며, 황산투입 시기와 황산 미투입 시기의 침전수 및 정수의 탁도 변화 추세 및 황산투입을 중지하고 응집제 및 전염소로서 원수 pH를 조절하였을 때, 공정상에서의 수질변화를 조사·분석하였다. 2차 현장실험은 2008년 1월에 현장에 설치되어 있는 온라인 계측기로 황산투입 시, pH 변동에 따라 여과수 입자수와 정수 탁도의 변화 추세를 시간으로 측정하여 원수 pH 조절에 따른 정수처리 효율이 개선되는지 재차 검증하였다.

1차 현장 실험기간의 약품투입현황과 pH 조절 현황을 Table 4와 Fig. 8에 나타내었다.

1차 현장 실험 시, Fig. 8과 같이 황산을 약 4~5 mg/L 을 착수정 원수에 정량 투입하여 침전수 말단 pH를 7.7에서 pH 7.5이하로 조절하였다. 또한, 황산 미투입 시, 원수 pH를 조절하지 않았을 때에 원수 pH 제어는 Table 4와 같

이 응집제 및 전염소를 증가시켜 투입하여 조정하였다.

원수 pH 조정 후, 공정상에서 정수처리 효율이 개선되었는지 알아보기 위하여 침전수와 정수 탁도 변화를 조사한 결과는 Fig. 9와 같다. Fig. 9는 원수 pH 조정 후, 침전수 및 정수 탁도의 일간 변동을 나타내고 있는 것으로, 침전수 탁도는 0.60 NTU에서 0.47 NTU로 정수 탁도는 0.059 NTU에서 0.047 NTU로 감소되어 정수처리효율이 상승하고 탁도가 개선되는 것으로 나타났다.

Fig. 10은 원수 pH조절을 위하여 전염소 투입량을 증가하여 정수처리를 하였을 때, 염소소독부산물인 THMs 발생량 변동 추세를 나타내는 것으로 정수 THMs는 염소투입량에 비례하여 생성되는 것으로 조사되었다. 황산투입 시기 정수 THMs 농도는 평균 0.008 mg/L로 매우 낮았으나, 전염소 증가투입에 의한 원수 pH조절시기의 정수 THMs는 평균 0.019 mg/L로 황산 투입으로 원수 pH를 조절하여 처리한 시기보다 THMs 발생량이 약 2.4배 증가하였다.

황산투입 전·후의 일간 TOC현황 및 공정에서 제거율을 Table 5에 정리하였다.

황산투입에 따른 pH조절 효과로 정수처리공정에서 TOC 제거율이 약 10% 상승하여 정수처리공정에서 제거가 어려운 유기물질 제거에도 효과가 있는 것으로 조사되었다. 원수 높은 pH 시기에 pH 조절을 통한 응집·침전효율을 높여 전구물질제거율을 상승시키고, 염소투입량을 감소시켜 전염소 과잉주입에 따른 염소소독부산물(THMs) 발생량 증가에 따른 수질저하 문제를 최소로 제어할 수 있었다.

Fig. 11~13은 1월 중 황산투입에 따른 원수(착수정) pH와 침전수 pH 변화를 나타내고 있는 것으로, 황산투입량을 5~9.0 mg/L까지 변화시켜 침전수 pH를 7.5~7.3으로 유지시킨 다음 정수처리공정에서 탁도 및 입자수의 변화를 현장에 설치되어 있는 온라인 연속측정기로 모니터링한 결

Table 4. Chemicals injection and pH adjustment (experimentation period) (unit : mg/L)

Injection	Period	10/10~10/19 (A)	10/20~10/29 (B)	10/30~11/4 (C)	11/4~11/9 (D)
Cohesive agents (PAC)		12	10	11	10
Prechlorine		0.6	0.4	1.6	0.4
Note		pH unadjustment	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> injection	pH unadjustment	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> injection

(A) Period : Addition of cohesive agents 2 ppm and prechlorine 0.2 ppm more than (A) period

(C) Period : Addition of cohesive agents 1 ppm and prechlorine 1 ppm more than (A) period

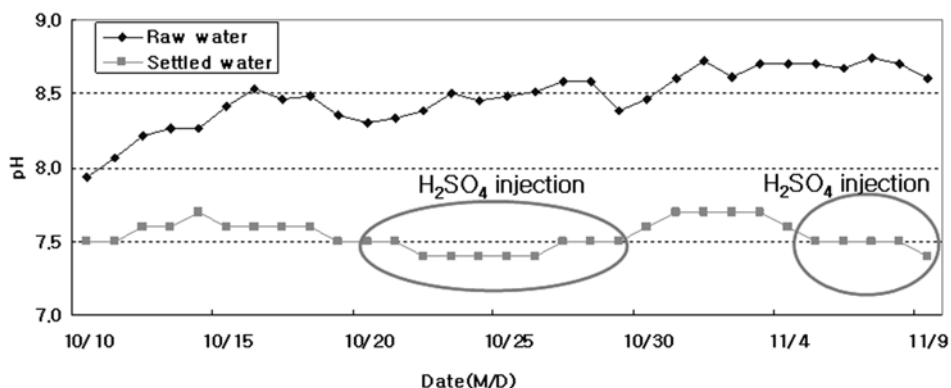


Fig. 8. Change of pH by H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> injection.

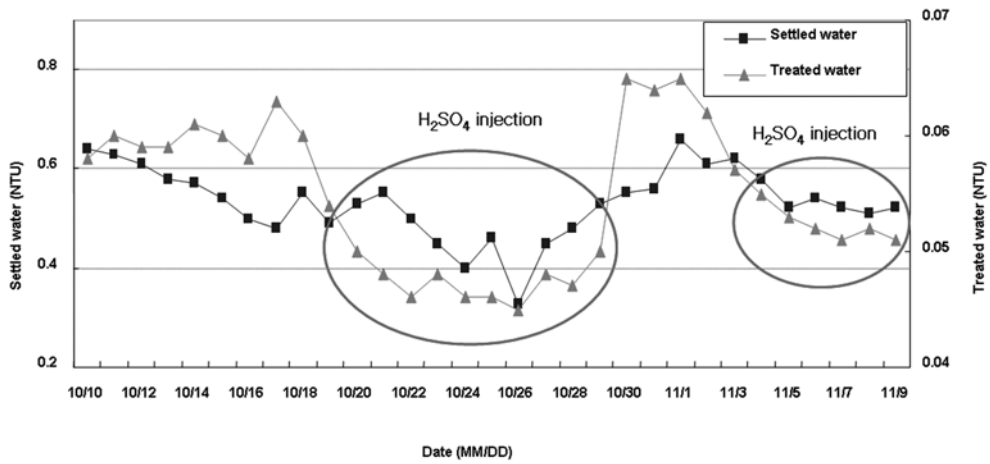


Fig. 9. Change of turbidity in settled water and terated water after pH adjustment.

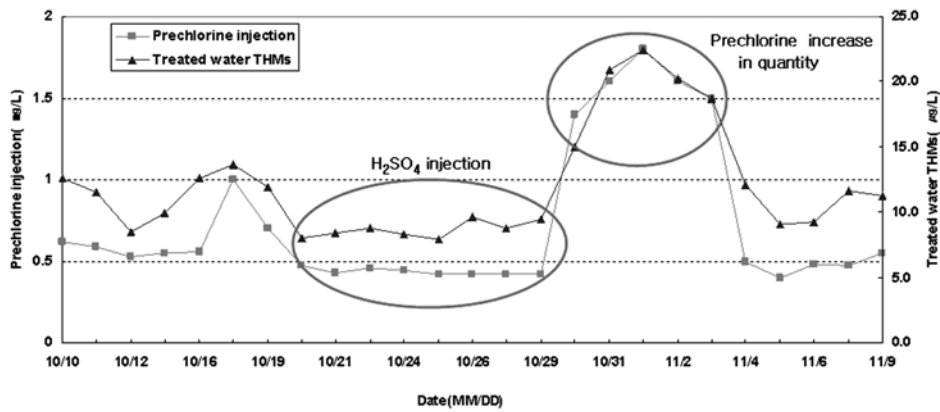


Fig. 10. Change of THMs in treated water by H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and prechlorine injection.

Table 5. TOC removal efficiency of before and after H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> injection

Item	Date	TOC (mg/L)			TOC removal rate (%)	
		Raw water	Settled water	Filtered water	Settled water	Filtered water
Before H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> injection	10/10	1.67	1.15	1.05	30	38
	10/11	1.72	1.20	1.06	32	40
	10/12	1.66	1.13	0.99	29	45
	10/15	1.92	1.36	1.05	22	41
	10/16	2.01	1.56	1.18	31	49
	10/18	1.92	1.32	1.18	36	53
	Average	1.82	1.29	1.05	30	45
After H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> injection	10/19	1.98	1.26	0.93	41	56
	10/20	1.90	1.12	0.83	31	47
	10/21	1.94	1.34	1.02	34	55
	10/22	2.00	1.32	0.91	50	64
	10/23	2.28	1.14	0.82	37	55
	10/24	1.99	1.25	0.90	40	53
	10/25	2.16	1.30	1.01	42	56
	10/26	2.36	1.38	1.05	39	55
Average	2.08	1.26	0.93	39	55	

과로 1차 현장실험과 동일한 수질개선효과(탁도, 입자수)를 나타내었다.

#### 4. 결론

본 연구는 원수의 pH가 높은 시기인 갈수기에 pH 조절제로써 황산을 공정에 투입하여 원수 pH 조정 전·후의 정수처리효율을 평가하기 위하여 탁도 및 입자수, TOC 등 수질인자를 조사한 후, 황산투입에 따른 수질개선효과를 평가하였다.

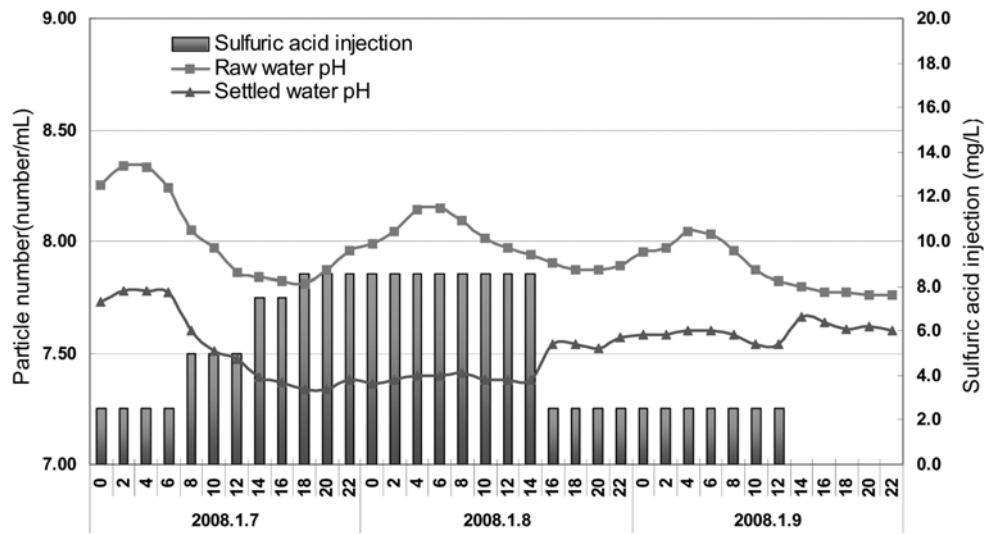


Fig. 11. Change of pH in settled water and raw water by injection of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

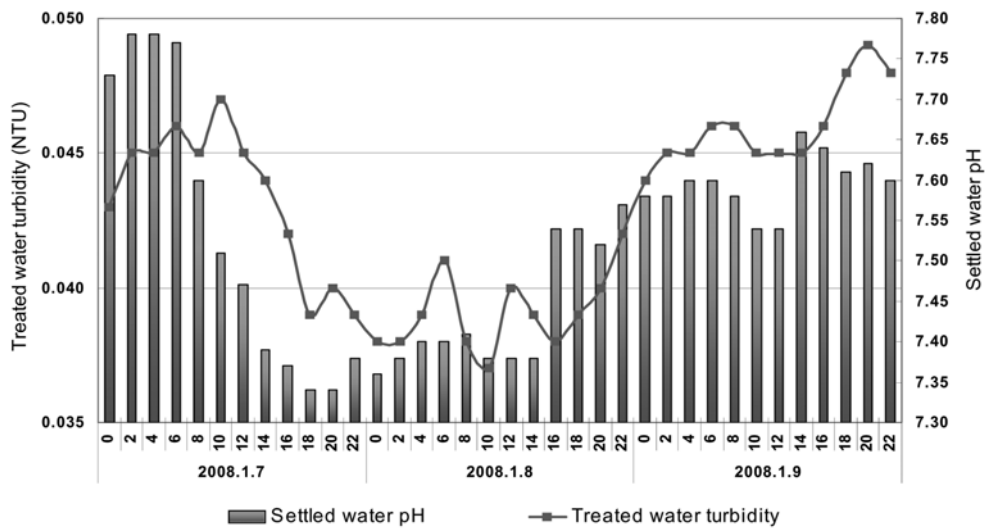


Fig. 12. Change of turbidity in treated water by pH adjustment.

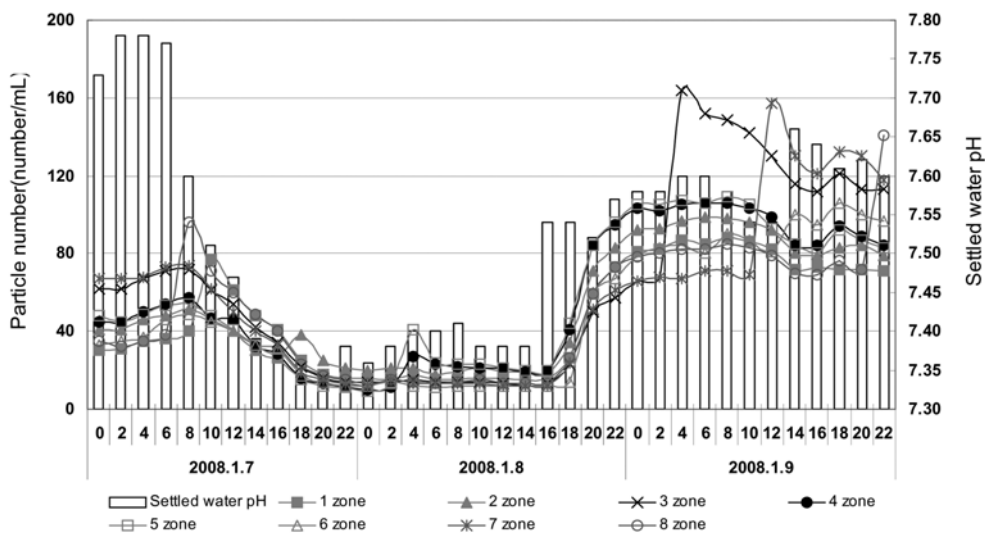


Fig. 13. Change of particle numbers by pH adjustment.

- 1) 한강 원수의 경우, 원수 pH가 봄·가을철 갈수기에 pH 8.0 이상 상승하는 특징을 가지고 있으며, 연중 pH가 높게 유지하는 기간은 약 160~180일 정도로 조사되었다.
- 2) pH가 높은 원수 유입 시기인 2월~4월의 침전수의 유기물질(TOC) 제거율을 조사한 결과, TOC 제거율이 약 30~40%로 타 시기보다 낮아 정수처리효율(응집·침전)이 저하되는 것으로 나타났으며, 입자수 및 잔류알루미늄 농도 역시 상승하는 것으로 조사되었다.
- 3) 황산을 투입하여 침전수 pH를 7.5 이하로 조절 후, 탁도 및 입자수를 조사한 결과, 정수탁도는 0.059 NTU에서 0.047 NTU로 입자수(여과수) 경우, 90개/mL에서 약 20개/mL로 감소되었으며, TOC의 경우 침전지에서 제거율이 pH 미조정 대비 약 10% 상승하여 수질개선 효과를 나타내었다.
- 4) 갈수기에 기존 정수처리 방식인 응집제와 전염소 증량 투입을 통하여 원수 pH를 저감시키고 정수처리를 한 결과, 최적응집을 위하여 응집제(PAC)가 약 3 mg/L 이상 (Jar-test) 추가 투입되었으며, 전염소 강화투입(0.8 → 1.6 mg/L)으로 정수에서 염소소독부산물(THMs) 발생량이 염소최적주입(0.008 → 0.019 mg/L)시보다 약 2.4배 증가하였다.
- 5) 갈수기 조류증가 등 수질악화로 원수 pH 상승 시기에 pH 저감제로 황산을 투입하여 원수를 적정 pH로 조정하여 운영한 결과, 응집효율이 상승되어 응집제 투입량이 감소되었고, pH 조절 목적으로 강화 주입하였던 염소를 최적으로 투입하게 됨으로써 염소소독부산물(THMs)이 저감되는 등의 수질이 향상되고 공정을 안정적으로 운영할 수 있었다.

## 사 사

이 연구는 2005년도 서울시립대학교 학술연구용 첨단장비 지원에 의하여 이루어진 것임을 밝히며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 강병수, 김중숙, 김정희, 유정희(2004). pH 조절을 통한 최적응집에 관한 연구. *추계학술발표회 논문집*, 대한상하수도학회·한국물환경학회, pp. 6-13.
- 김성재, 권학신, 임은형, 김정우, 정득모(2007). 원수 pH 조정에 의한 여과수 수질 향상에 관한연구. *공동추계학술발표회 논문집*, 한국물환경학회·대한상하수도학회, pp. 1449-1456.
- 심규봉(2007). 응집 pH와 응집제 종류에 따른 유기물 제거 특성에 관한 연구. *공학석사 학위논문*, 부경대학교 산업대학원.
- 이영기, 이태용, 김대수, 임윤하, 유영인, 유병조, 한창환(2006). CO<sub>2</sub>를 이용한 원수 pH 조정으로 수돗물 품질 개선. *공동 추계 학술발표회 논문집*, 대한상하수도학회·한국물환경학회, pp. 177-185.
- 이환, 이석호, 정창규, 이송희(2003). 원수의 pH 조정에 의한 정수 수질개선방안에 관한 연구. *추계학술연구발표회 논문집*, 대한환경공학회, pp. 320-327.
- 정영미, 권지향(2006). 자연유기물 친수성 및 분자량 분포가 강화응집에 미치는 영향. *공동추계학술발표회 논문집*, 한국물환경학회·대한상하수도학회, pp. 583-589.
- 한선희, 김재식, 최인철, 이호원, 이인숙, 최예덕(2006). 조류 및 조류독소 조사. *수질조사분석보고서*, 서울특별시상수도연구원.
- Musikavong, C., Wattanachira, S., Marhaba, T. F. and Pavasant, P. (2005). Reduction of organic matter and trihalomethane formation potential in reclaimed water from treated industrial estate wastewater by coagulation. *Journal of hazardous materials*, **B127**, pp. 48-57.
- Uyak, V., Yavuz, S., Toroz, I., Ozaydin, S. and Genceli, E. A. (2007). Disinfection by-products precursors removal by enhanced coagulation and PAC adsorption. *Desalination*, **216**, pp. 334-344.
- Yan, M., Wang, D., Qu, J., Ni, J. and Chow, C. W. K. (2008). Enhanced coagulation for high alkalinity and micro-polluted water: The third way through coagulant optimization. *Water Research*, **42**, pp. 2278-2286.