

정수처리 공정개선을 위한 응집표준화

김준현 · 오이석 · 신현구 · 김미경 · 박두현*†

인천광역시 공촌정수사업소, *서경대학교 생물공학과

Optimization of Coagulation In The Conventional Water Treatment Plant

Jun-Hyun Kim, Lee-Seuk O, Hyun-Gu Shin, Mi-Kyeong Kim, and Doo-Hyun Park*†

Gongchon Water Treatment Plant, Seogu Gongchon-dong San 100, Incheon, 404-200, Korea

*Dept. of Biological Engineering, Seokyeong University, 16-1 Jungneung-dong Sungbuk-gu, 136-704 Seoul, Korea

pH increase of raw water may cause an excess use of coagulation agent. As a result residual aluminium concentration in treated water can be increased. Accordingly, pH of raw water is required to be suitably controlled for optimal coagulation condition. In this research, pH of raw water source was controlled by addition of carbon dioxide and the effect of pH control on the coagulation efficiency and NOM removal was compared with that before controlled. In the result of pH control 1 ppm, dosage of coagulation agent was decreased, and so as 26 % of residual aluminium, 11% of KMnO_4 , 16% of UV254 and 58% of THMs. However, TOC, DOC and turbidity were not influenced by the pH control. Mean value of SUVA was 2.12 and 2.06 after the treatment of water source with carbon dioxide, which was exactly corresponded to the criterion (2-4) of USEPA. On the basis of these results, NOM is presumably composed of soluble humic compounds, non-humic organic compounds, hydrophobic organic compounds and hydrophilic organic compounds.

Key words : Optimized coagulation, trihalomethanes (THMs), non organic materials (NOM), total oxygen carbon (TOC), residual aluminium

1. 서 론

오늘날 산업화와 도시화 등으로 공장폐수, 생활하수, 농경지 배수 등에 의해 하천 및 호소가 오염되고 이로 인해 상수원내 영양염류의 과잉공급으로 조류의 급성장을 초래하고 있는 실정이다. 봄, 가을 호소수의 기온 변화에 따른 역전현상이 발생함에 따라 고 pH의 원수가 유입됨으로써 정수생산과정 중 응집효율이 감소하여 약품 사용량을 증가시키고 미처리된 유기물질과 소독제인 염소와의 반응을 증가시켜 최종적으로 각 가정으로 공급되는 정수내 THMs 농도를 상승시키는 원인이 되고 있다. 또한 기후 온난화로 인해 계절변화와 상관없이 연중 고 pH의 원수 유입이 증가하고 있는 경향을 보이고 있어 기존의 정수처리방법으로는 양질의 음용수를 생산하는데 어려움이 있다.

정수처리공정에 관한 연구는 주로 탁도 저감을 주요 목적으로 운영되어 왔으나¹⁾ 근래에는 원수 수질이 악화되어 기존 시설로는 처리가 어려운 미량오염물질을 제거하기 위해 오존/활성탄처리, 고급산화법(AOPs), 막분리(Membrane) 등의 고도처리기술을 도입하기 위한 여러 연구가 수행되고 있다²⁾. 외국의 경우, 원수내의 NOM(Natural Organic Matter)에 의한 THMs형성을 감소시키기 위해 전염소 대신에 오존을 사용하기도 하며 또한 낮은 pH 상태에서 응집·침전시키는 선도응집기술을 이용하기도 한다^{3,4)}.

본 연구는 이러한 문제점들을 해결하기 위해 응집제의 양을 최소화 하면서 응집에 가장 적합한 pH 조건을 찾아 응집시키는 최적응집방법⁵⁾을 이용함으로써 자연수 중에 존재하는 탁도유발물질 제거와 동시에 NOM의 제거율을 향상시켜 정수 소독제로 사용

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: baak@skuniv.ac.kr

되고 있는 염소와의 반응성을 최소화하여 소독부산물(DBPs : Disinfection By-Products)을 감소시키고 심미적 영향물질인 잔류 알루미늄 농도를 저감시켜 맛있는물 가이드라인에 부합되는 정수를 생산·공급하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 재료

원수는 풍납취수장에서 취수한 한강물로 팔당 취수원과 비교하여 상대적으로 $\text{NH}_3\text{-N}$ 의 농도가 높은 수질 특성을 보이고 있다. 이는 공정 중 전염소 사용량을 증가시키고 이로 인해 정수 중 THMs 증가의 원인이 되고 있다('06년도 팔당 원수 $\text{NH}_3\text{-N}$ 평균 농도 : 0.03 ppm, 풍납 원수가 팔당 원수보다 57% 높게 유입됨). '06년도 풍납원수 연간 평균 pH는 7.8로 약 알칼리를 나타내고 있어 응집에 필요한 pH 적정 범위로 생각될 수 있지만, 연간 pH 8.0 초과 일수는 119일로 약 4개월 동안 고 pH의 원수가 유입되어 응집효율성이 저하되고 무기응집제(PACS)과다 투입의 원인이 되고 있다. 실험에 사용된 무기응집제(PACS)는 공정과정에서 생산된 정수에 회석하여 투입하였으며, CO_2 (순도 99.9%)는 공정수 중 여과수에 용해시켜 투입되었다. 실험을 위해 채수한 각각의 공정수 분석을 위해 "먹는물 수질공정시험방법"을 사용하였다.

2.2. 실험방법

2.2.1. Optimized Coagulation을 위한 최적 pH range 설정

원수에 대한 Jar-Test를 실시하여 최적 응집제 투입량을 우선적으로 결정하였다. 응집실험을 위해 Flocculator2000(Kemira Kemwater)을 사용하여 급속교반 1분(120 rpm), 완속교반 10분(40 rpm) 후 30분간 침전시킨 상등액 50ml을 탁도계(HACH 2100N)와 pH meter(Thermo Orion 720A⁺)를 이용하여 측정하였다. 다음으로 0.04N로 회석·제조한 황산(원액 : 98%)을 이용하여 pH를 5.5부터 점진적으로 8.0까지 조절한 후 Jar-Test 실험을 통해 1차적으로 pH range를 넓게 대략적으로 결정하고, 정해진 1차 pH range 내에서 재실험을 통해 Optimized Coagulation의 최적 pH range를 최종적으로 결정하였다. 실험에서 Sweep Coagulation을 위한 pH range는 제외하였다.

2.2.2. 응집보조제 CO_2 설치 및 투입

약품투입실내 액화 CO_2 탱크를 6기(20Kg*6)를 연결하고 기화기와 이젝터를 통해 CO_2 Gas를 착수정 전단으로 유입되는 원수에 용해되도록 설치하였다. 또한 착수정이 두 지(池)로 나누어져 있어 CO_2 를 각 지마다 같은 비율로 투입되도록 하였으며, 원수와의 완전한 반응을 유도하기 위해 CO_2 투입 지점을 착수정 전단으로 설계·시공 하였다. 또한, CO_2 Gas의 낮은 용해 특성을 고려하여 CO_2 유입부 배관은 수심 1.5 m로 하였다. CO_2 투입률 결정은 실제 착수정에 CO_2 Gas를 투입한 후 24시간 혼화수의 pH 변화를 관찰하면서 적정 투입률을 결정 하였으며, 예비 실험에서 결정된 투입률을 기초로 하여 정수공정에 적용하면서 혼화수 pH 연속측정기를 통해 투입률 증감을 수동으로 제어 하였다.

2.3. 응집효율성 비교 분석 방법

CO_2 를 착수정 전단에 투입하고 20분 후 Jar-Test 실험을 통해 투입률을 결정한 다음, 결과값을 정수 공정에 적용하여 최적의 응집효율을 유도한 후 9시간 경과 후 원수, 혼화수, 응집수, 침전수, 여과수, 정수를 각각 채수하여 실험항목별로 분석하였다. 또한, CO_2 투입 전 대조군을 위해 07시에 시료별 Sampling 후 각각 분석하여 비교자료로 활용하였다. 연구분석은 5일 동안 이루어졌으며, 일일 2회 이상 Jar-Test 및 항목별 시료분석을 하였고, 수질연속측정기(TUF7-0-B11YFY201A01, DKK)를 이용하여 CO_2 투입 전·후 탁도 변화를 모니터링 하였다. 공촌정수사업소 공정별 체류시간 [착수정 : 8~9분, 응집수 : 50~55분, 침전수 : 5시간, 여과수 : 120 m/day(약 20분), 정수 1.6시간, 총체류시간 : 약 8시간]을 고려하여 CO_2 투입 전 결과값(대조군)은 CO_2 투입 중단 후 9시간 이상 경과한 후의 평균값을, 투입 후 결과값은 CO_2 투입 시작 후 9시간이 경과한 후의 평균값을 각각 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 응집제 투입률 결정

Fig. 1에서와 같이 pH를 5.5부터 점진적으로 8.0까지 0.5간격으로 조절한 후 Jar-Test 실험을 통해 적정 pH range를 측정된 결과 7.5에서 응집효율이 가장 높은 것으로 나타났으며 부유성 고형물질의 침강효율 또한 pH 7.5에서 가장 높게 나타났다.

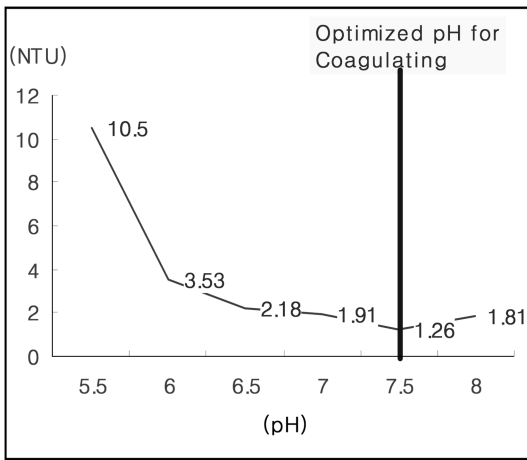


Fig. 1. Determination of pH for optimal inorganic coagulation of raw water

3.2. CO₂ 주입 전·후 응집제(PACS) 주입률 및 잔류알루미늄 농도 변화

CO₂ 주입 전 채수한 원수와 CO₂ 주입 후 채수한 혼화수를 각각 Jar-Test하여 응집제 주입률을 분석한 결과, CO₂를 투입하였을 경우 Fig. 2에서와 같이 응집제 투입률이 1 ppm 감소하는 것으로 나타났다. 또한 응집제 주입률 감소에 따라 정수내 잔류알루미늄 농도 또한 Fig. 3과 같이 5일 동안 평균 23% 감소되었다. 따라서 CO₂ 상시투입을 통해 응집에 필요한 적정 pH range로 조절해 준다면, 정수 중 잔류 알루미늄 농도가 저감되어 보다 안정적인 정수를 생산할 수 있을 것이다.

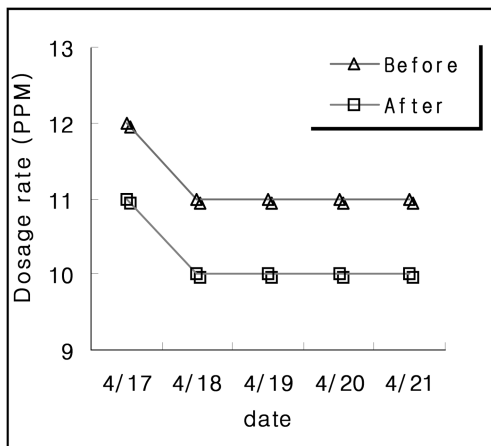


Fig. 2. The variation in dosage rates of inorganic coagulation agent (PACS).

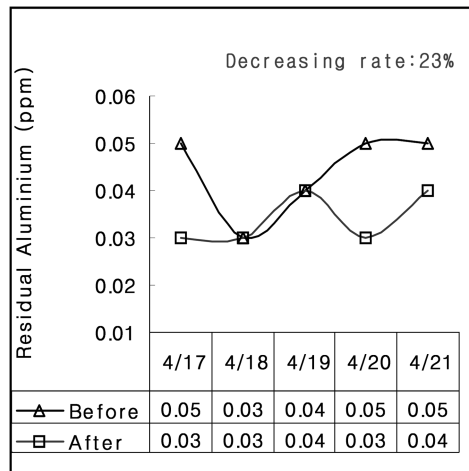


Fig. 3. The variation in residual aluminium.

3.3. CO₂ 주입 전·후 침전수 탁도 및 알칼리도 분석

Fig. 4와 5에서와 같이 CO₂ 주입 전·후 탁도 제거 및 알칼리도 소모는 큰 변화를 보이지 않았으며, 또한 Fig. 6에서와 같이 TOC에서도 큰 차이를 보이지 않았다. 응집에 필요한 pH 7.5±1로 조절 하였을 경우 응집제에 의해 침전 가능한 물질의 제거율에는 상관성이 없는 것으로 나타났다. 탁질 제거와 동시에 NOM 제거 효율을 모두 향상시키는 응집개선효율¹⁾을 위해서는 pH를 더욱 산성화 시켜야 한다. 탁도 제거율이 높으면 NOM제거율이 감소하고, NOM제거율이 높으면 탁도 제거율이 감소하는 것으로 나타났는데, 이것은 최적조건이 서로 다르다는 것을 보여주는 것이다⁸⁾. 따라서 본

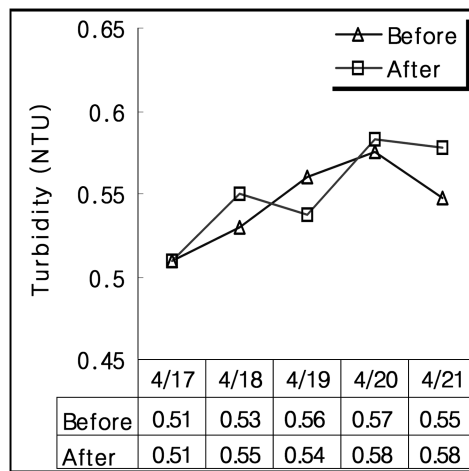


Fig. 4. Effect of carbon dioxide treatment on turbidity of treated water.

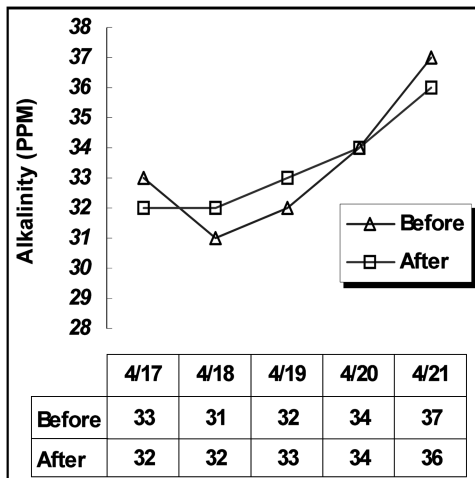


Fig. 5. Effect of carbon dioxide treatment on alkalinity variation of treated water.

연구는 탁도와 NOM을 모두 최고의 제거율에 목적을 두고 pH를 조절함으로써 약품사용량을 최소화하고 탁도 유발물질과 NOM 제거효율을 개선하였다.

3.4. TOC 및 UV254 분석

전체적인 공정에서 평균 TOC 제거효율을 비교하면, 산처리 전에는 평균 26%가 제거 되었고, 후에는 29%가 제거되어 10% 향상됨을 알 수 있었다. 연구기간 중 평균 농도는 감소되었지만, 원수대비 침전수 TOC 제거율이 Fig. 6과 같이 전체적인 상관성은 나타나지 않았다. 3.3의 탁도결과와 비교해보면 TOC 구성물질이 탁도유발물질과 연관성이 있다고 생각할 수 있을 것이

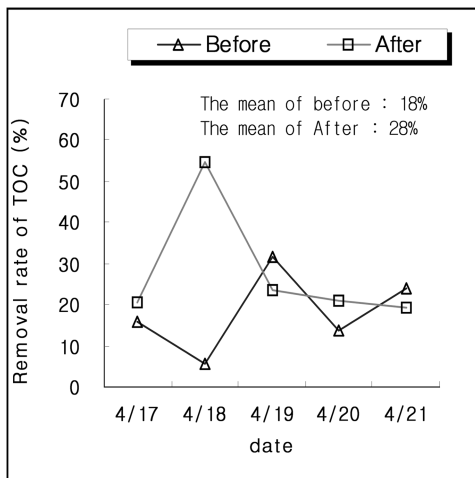


Fig. 6. Effect of carbon dioxide treatment on TOC removal in settling water.

다. 또한 침전수 대비 정수의 TOC 제거율을 보면 pH 조정 전에는 미처리된 플러클들이 여과공정에 의해 일부 제거가 되었으나 산처리 후에는 응집·침전공정에 의해 대부분 제거되어 여과공정을 통한 추가 제거 효율은 발견되지 않았다.

3.5. SUVA 현황

pH 조절 후 UV254의 제거율은 투입 전 평균 53%, 투입 후 평균 63%로 연구 기간 중 투입전 보다 투입후가 평균 16% 향상되었다. 시험 기간 중 원수의 SUVA값은 산처리 전 평균 2.12, 산처리 후 2.06을 나타내 원수내 NOM 구성이 대부분 수용성 휴믹물질과 비휴믹유기물질의 혼합체이며 소수 및 친수성인 유기물질이 다양하게 공존하고 있음을 알 수 있다. USEPA 값에 따른 NOM 특성 및 DOC 제거율에 따르면 2미만에서는 대부분 응집으로 제거하기 어려운 비휴믹성이며 친수성인 저분자 유기물질로 구성되어 있다고 규정하고 있다. 따라서 CO₂ 주입 전·후 SUVA값이 각각 2.12, 2.06으로 2미만에 근접하므로 소수성 물질보다는 최적의 응집 조건에서도 제거하기 어려운 친수성 물질의 비율이 더 크다고 생각할 수 있다.

3.6. KMnO₄ 분석 결과

CO₂ 투입 후 원수 대비 침전수 KMnO₄ 제거율은 투입 전보다 평균 11%가 향상되었지만 원수 대비 정수 제거율은 별다른 차이가 나지 않았다. 따라서 대부분 KMnO₄에 의해 산화되는 유기물질은 응집, 침전공정으로 제거됨을 알 수 있으며, 전체적인 공정을 통해 제거율이 11% 향상되었다.

3.7. 소독부산물(THMs) 분석결과

CO₂를 투입함으로써 원수대비 침전수 THMs가 4월 20일을 제외하고 모두 감소했으며, 투입전과 비교하면 Table 1과 같이 평균 17% 감소함을 알 수 있다. 또한 침전수 대비 정수 평균 생성률 현황을 보면, 평균 41% 감소되어 정수생산 전 공정을 거치면서 THMs는 평균 58% 감소하였다.

3.8. 부식지수 분석 결과

CO₂를 투입함으로써 부식성이 증가될 것으로 예상되었으나 Table 2와 같이 정수 부식성 지수는 큰 변화를 나타내지 않았다. 부식지수에 영향을 미치는 인자로는 pH, TDS, 수온, 알칼리도, 칼슘경도, 잔류염소값이 있

Table 1. CO₂ 투입 전·후 THM 생성률 현황

Section	원수대비 침전수 평균 생성률 (%)	침전수 대비 정수 평균 생성률 (%)
Before (①)	58	34
After (②)	48	20
Decreasing rate (①-②)/①	17	41

다. 이 항목들 모두 부식지수에 영향을 줄 정도의 차이는 없어 비슷한 값을 나타내었으며, 특히, 부식지수에 크게 영향을 미칠 수 있는 pH 변화 또한 산처리 전과 비슷한 값을 보였다. 특징적인 pH 변화는 산처리 후 침전수 pH가 7.1±1로 더욱 안정화 되었다는 것이다.

pH를 더욱 산성 쪽으로 조절할 경우 정수 pH 값이 낮아져 부식지수가 -2.0을 넘는 강부식성이 될 수 있으므로 향후 추가적인 분석을 통해 부식성지수를 고려하면서 탁도 및 NOM을 동시에 가장 낮은 농도로 낮출 수 있는 적정 pH 범위를 재결정하고자 한다.

3.9. 원수 pH 변화에 따른 CO₂ 사용량 결과

분석기간 중 원수 pH 최고값 8.9, 최소값 8.1, 평균 8.6으로 모두 고 pH를 유지하였다. CO₂주입은 혼화수 pH를 모니터링 하면서 수동으로 조절하였다. 원수 pH 변화에 따라 CO₂ 사용량은 Fig. 7과 같이 비례하여 증가하였으며, pH가 높아질수록 지수함수곡선을 따라

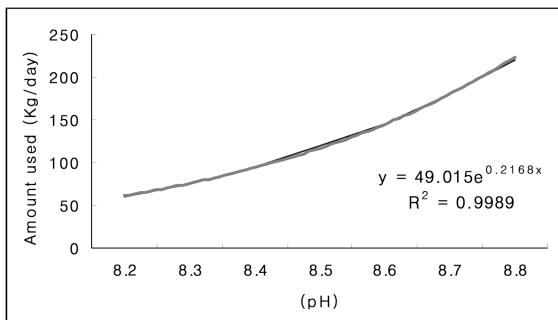


Fig. 7. Corelation with pH and CO₂ dosage rate.

Table 2. CO₂ 투입 전·후 부식성지수(LSI) 증감표

date		4/17	4/18	4/19	4/20	4/21
Before	raw water	-0.4	-0.6	0	-0.1	-0.1
	clean water	-1.9	-1.9	-1.9	-1.8	-1.7
After	raw water	-1	-0.9	-0.5	-0.3	-0.5
	clean water	-1.9	-1.9	-1.8	-1.9	-1.8

CO₂ 사용량이 증가함을 보였다.

따라서 이 기초 자료를 활용한다면 CO₂ 주입 자동화 설비 구축 전까지 간단한 조건표를 활용하여 응집에 필요한 적정 pH 범위를 유지할 수 있어 고 pH 원수 유입시 상시 투입이 가능할 것이다.

4. 결 론

원수 중 조류가 대량 발생하면 탄소동화작용으로 인해 pH가 9이상 상승하여 응집 최적 영역인 pH 7.5~7.8를 벗어나게 되고, 조류의 밀도는 1.01-1.18 g/Cm³으로 자연수 중의 점토 밀도 2.6 g/Cm³에 비해 훨씬 작기 때문에 응집 침전에 매우 불리한 조건을 갖는다.

본 연구는 무기응집제(PACS)의 최적 응집을 유도하기 위해 응집보조제(CO₂)를 이용하여 무기응집제의 최적 pH range를 조절해 줌으로써 약품사용량 증감에 따른 예산 감소와 잔류알루미늄 및 THMs의 변화를 조사하여 기존 정수처리 공정의 효율을 향상시키고자 하였으며, 한강을 취수원으로 사용하는 공촌정수사업소를 대상으로 응집보조제(CO₂) 투입 전·후의 효율성 평가를 실시하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 응집보조제(CO₂) 투입 후 pH를 7.5±1로 조절한 후 응집제를 주입하였을 경우 무기응집제(PACS) 사용량이 평균 1 ppm 감소하였다. 응집제 투입량이 감소하였지만 탁도제거율은 비슷한 경향을 보였다. 따라서 응집제의 과다투입 대신 pH 조절제를 이용함으로써 수처리의 최적화를 이룰 수 있었다.

2. TOC 및 DOC는 pH 조절 전·후 큰 차이를 보이지 않았지만, 잔류 알루미늄의 경우에는 pH조절 후 평균 26% 감소되어 pH의 영향이 컸다. 따라서 TOC, DOC제거는 pH에 의한 영향은 적고, 잔류 알루미늄은 pH에 따라 적정 응집제가 투입되어 pH 의존도가 높다고 할 수 있다. 탁질 제거와 동시에 TOC 및 DOC 감소를 위해서는 정수 LSI지수를 우선적으로 고려한 후 적정 pH 범위를 재설정할 필요가 있다.

3. 정수공정 중 UV254 제거율은 평균 16% 향상되었고, $KMnO_4$ 에 의해 산화 가능한 유기물은 응집·침전을 통해 11% 제거되었으며 여과공정을 통한 추가제거는 이루어지지 않았다.

4. 원수 pH를 조절하여 응집효율을 최적으로 맞추어 $KMnO_4$ 및 UV254 제거율이 증가함과 동시에 THMs 생성이 저감되었다. 따라서 THMs 생성은 1차적으로 pH를 적절하게 조절하면 생성물을 낮출 수 있을 것이다⁶⁾.

5. DOC와 UV254의 결과로부터 얻어진 SUVA값은 산처리 전·후 각각 평균 2.12, 2.06으로 USEPA에서 정해진 2~4사이에 해당하여 원수 NOM구성이 대부분 수용성 휴믹물질과 비휴믹유기물질의 혼합체이며, 소수 및 친수성인 유기물질이 다양하게 공존하고 있다고 추정할 수 있다. 특히 2미만에 더욱 근접함으로 최적의 응집 조건에서도 제거하기 어려운 친수성 물질의 비율이 더 많다고 생각할 수 있을 것이다.

6. 향후 혼화수 pH meter와 연동하여 자동으로 CO_2 주입률을 결정할 수 있는 CO_2 자동투입기를 설치하여 정수공정을 개선할 필요가 있다.

참고문헌

1. Seugn-Hyun Kim, Enhanced Coagulation : Determination Of Controlling Criteria And An Effect On Turbidity Removal, Environ. Eng. Res. Vol. 10, No. 3. pp. 105~111 (2005).
2. Kimberlyk, A. B. and Mortza A., Enhanced and Optimazied Coagulation for removal of Particulate and Microbial Contaminants, in Proceedings of the 1996 AWWA Annual Conference, New York (1996).
3. Douglas, M. O., Gary, L. A., and Zaid, K. C., Characterization of Natural Organic Matter and Its Relationship to Treatability. AWWA Research Foundation (1993).
4. 유희중 · 전용성 · 노재일 · 김주원, Water Treatment Techniques Coping with High pH-Containing Raw Water, '06 상수도수질연구논문집, 인천광역시상수도사업본부수질연구소, 1-36.
5. 정성구·이길후, 기술사 문제·해설, 환경관리연구소, 2005, 343-352.
6. 이지형 · 김동윤 · 최유정, 모형 관과 상수도 현장 관망에서 THMs 생성 및 예측 모델링에 관한 연구, 대한환경공학회지, Vol. 19. No. 6. pp. 709~720. 1997.
7. 박홍석 · 이사윤, 정수장 응집공정 향상을 위한 수처리제의 최적사용, 대한환경공학회지 Vol. 20. No. 10 pp. 1435~1447, 1998.
8. 최돈혁, 조류 발생에 따른 응집저해 원인 및 대책연구, '97 상수도 운영관리 기술상습회 발표문집, 1997.11, 179-236.
9. 윤희중, 정수장에서의 THMs 저감 연구, 97 상수도 운영관리 기술상습회 발표문집, 1997.05, 161-180.
10. Tai il Yoon, Chang Gyun Kim, and Jung Soo Park, Advanced Treatment For Drinking Water Resource By The Ultra Rapid Coagulation, Environ. Eng. Res. Vol. 8, No. 1, pp. 15~21(2003) Process(Korea).
11. 배철호 · 홍성호 · 허원수 · 강위경, Removal of heavy metals and natural organic matters by chemical treatment in drinking water, 숭실대학교 화학공학과
12. 박세진 · 이형술 · 윤태일, 황산반토를 이용한 응집공정에서 용존성 휴믹산 제거의 주요 메카니즘 평가, 대한환경공학회지. Vol. 24. No. 9. pp. 1623~1631, 2002.
13. 류동춘 · 배은영 · 김상구 · 손희중 · 송미정 · 김영진, 낙동강 하류 원수의 응집효율 개선을 위한 황산의 적용, 대한환경공학회지. Vol. 22. No. 11. pp. 2059~2065, 2000.
14. 박세진 · 박정수 · 윤태일, 초고속응집침전(URC)공정과 모래여과를 이용한 부영양화 호소의 NOM과 잔류 알루미늄의 처리, 대한환경공학회지, Vol. 24. No. 3, pp. 421~433, 2002.
15. 박덕준 · 왕창근, Residual Aluminum Variation in Conventional Water Treatment Plant using Aluminum containing Coagulants, 대한환경공학회, 추계학술연구 발표회논문초록집, 1994.
16. 윤재용 · 송명석, 기존 정수처리 공정에서의 THMs생성 및 제거 특성에 관한 연구, 대한환경공학회, 추계학술연구발표회논문초록집, 1994.