

한강원수 자연유기물의 특성분석 및 강화응집 기준 평가

Characteristics of Natural Organic Matter (NOM) on Han River and Criterion of Enhanced Coagulation

정영미¹ · 권지향^{2,*} · 이상협¹

Youngmi Jeong¹ · Jihyang Kweon^{2,*} · Sanghyup Lee¹

1 한국과학기술연구원 환경기술연구단

2 건국대학교 공과대학 환경공학과

(2007년 4월 3일 논문 접수; 2007년 11월 14일 최종 수정논문 채택)

Abstract

The Disinfectants/Disinfection By-products (D/DBP) Rule proposed by the US Environmental Protection Agency requires the implementation of enhanced coagulation as a control strategy for natural organic matter (NOM) removal and as a means of limiting the formation of all DBPs, i.e., not just the trihalomethanes and haloacetic acids. To control DBP formation, several best available technologies (BATs) were determined for removal of DBPs and DBP precursors. The enhanced coagulation is one of the BATs for DBP precursors removal. Treatment facilities that achieve a specified percent removal of total organic carbon (TOC) prior to the application of a continuous disinfectant or that achieve a residual TOC concentration < 2mg/L prior to the application of a continuous disinfectant are considered to be in compliance with enhanced coagulation. The enhanced coagulation was applied to raw water in Korea, the Han River. Raw water were examined and effects of different raw water qualities on enhanced coagulation were investigated. Three analyses were used for raw water characteristics, water quality measurement, molecular weight distributions, hydrophobic/hydrophilic fractionation. The Han River had the relatively low alkalinity and low organic carbon concentration. The results of molecular weight distributions showed significant portions of low molecular weight organics, which is very different from most water in USA. The alum doses for the required TOC removal guided from USEPA manual were quite low (i.e. 10~30 mg/L alum) for the water, probably due to the specific water quality of the Han River.

Key words: Natural organic matter (NOM), Enhanced coagulation, Total Organic carbon (TOC), Point of diminishing return (PODR)

주제어: 자연유기물, 강화응집, 총유기탄소, 최적 강화응집 주입율

*Corresponding author Tel: +82-2-450-4053, FAX: +82-2-454-4056, E-mail: jhkweon@konkuk.ac.kr (Kweon, J.H.)

1. 서 론

정수처리공정에 존재하는 자연유기물(Natural organic matter: NOM)은 Thurman and Malcolm (1981)에 의하면 유기물의 크기에 따라 입자상 유기물질(Particulate Organic Matter: POC)과 용존 유기물질(Dissolved Organic Matter: DOC)로 나눈다. 또한 친수성(hydrophilic matter)과 소수성(hydrophobic matter)으로 나눌 수 있으며 다양한 크기의 유기물로 구성되어 있다.

NOM의 대부분은 기존 정수처리 공정에 의해 제거 가능하지만, 정수처리 공정 중 제거되지 않고 남아있는 유기물은 소독공정에서 반응하여 소독부산물을 생성하는 것으로 규명되어 있으며, 법적규제를 하고 있다. 이런 법적규제들은 세계적으로 점점 강화되고 있는 실정이며, 예를 들면 미국의 경우 트리할로메탄(Trihalomethanes: THMs) 수질기준은 100ppb에서 1998년 6월에 80ppb로 낮춰 졌으며, 2002년에는 40ppb으로 기준이 강화되었다(Mark et al., 1997). 또한 할로아세트에시드(Haloacetic acid: HAAs)도 생성물이 30ppb를 초과하지 못하도록 강화되었다(USEPA, 1998). 이에 비해 현재 우리나라의 TTHM에 대한 수질기준은 100ppb이며 할로아세트에시드 수질기준은 100ppb이다. 현재 기준만을 따르다면 대부분 정수장의 경우, 현재의 수질 기준을 만족하고 있는 것으로 나타나 있다. 하지만, 미국과 같이 소독부산물 수질기준을 배수관망의 여러 지점에서의 연평균치를 대상으로 한다면 다른 결과를 나타낼 수도 있다. 우리나라는 정수장 유출수에서의 측정치를 대상으로 수질기준을 적용하고 있어서 배수관망에서 발생하는 소독부산물 생성을 감안하지 못하고 있다. 또한, 우리나라의 할로아세트에시드의 경우는 9개의 할로아세트에시드 생성물 중 2개 물질의 합이 100ppb를 초과하지 않도록 규정하고 있지만, 미국의 경우는 5개 생성물의 합이 60ppb를 초과하지 못하도록 규정하고 있다. 그러므로 우리나라보다 강화된 미국 기준을 적용한다면 수질기준을 초과하는 경우가 많이 발생할 것으로 예측된다. 따라서 이러한 소독부산물을 제거하는 방법은 활성탄 흡착, 오존, 모노클로라민 등에 의한 여러 가지 방법들이 기존에 사용되고 있지

만(김정현, 1999), 위의 방법은 기존의 시설의 보수나 새로운 공정의 도입이 필요하므로 시설의 도입 없이 기존공정을 활용하여 적용할 수 있는 Enhanced Coagulation을 평가해 보고자 하였다.

강화응집이란 통상 TOC(Total Organic Carbon) 농도가 높은 원수에 대해 DBP 형성을 줄이면서 효과적인 소독효과를 얻기 위하여 DBP 전구물질인 용존유기물질 제거하는 방법이다. USEPA는 강화응집을 NOM 제거를 위한 최적기법(Best Available Technology: BAT) 중의 하나로 채택하였다. 강화응집은 새로운 처리공정의 도입 없이 탁도 제거만을 목표로 한 기존 응집공정을 입자상물질과 자연유기물질을 동시에 제거하는 공정으로 전환하는 것을 의미하는 것으로 기존 공정에 적용이 가장 용이한 방법이라 할 수 있다. 그러나 강화응집으로 DBP 전구물질 제거 시 pH, 알칼리도, 응집제 종류와 양, 원수의 수질 등 다양한 영향인자들이 있다(Edwards et al., 1999; Mark et al., 1997). 그러므로 이러한 영향인자들을 고려하여 강화응집을 적용하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 국내 원수의 하나로 한강원수를 선택하여 NOM 특성을 분석하고, 강화응집을 적용하여 유기물 제거특성을 파악하고자 하였다. 또한 분석 결과를 바탕으로 향후 강화될 소독부산물의 수질기준에 대비하고자 소독부산물 전구물질인 NOM을 제거하기 위해 정수처리공정의 개선에 적합한 강화응집 적용 기준 및 효과를 알아보려고 하였다.

2. 연구방법

2.1. 실험원수

실험원수로는 서울시 G 정수장에서 한강원수를 취수하여 사용하였다. G 정수장은 취수 후 전염소 처리를 수행하고 있어서 취수 원수를 전 염소처리 하기 전과 전 염소처리한 후로 분류하였다. 그리고 EPA 매뉴얼에 따라 강화응집에는 염소처리가 되지 않은 원수인 전염소 처리하기 전의 원수를 이용하여 실험하였다. EPA매뉴얼에 따르면 실프랜트의 TOC 제거율을 파악할 때 어떤 oxidant나 부가적인 처리를 수행하기 전의 시료를 원수 TOC 측정에 사용하라고 명시되어 있다. 실험원수는 pH(Orion 410A+,

Table 1. Water qualities of the Han River waters

Parameters	Han-River	
	Natural raw water	Prechlorinated water
pH (-)	7.84	7.68
Turbidity (NTU)	7.5	9.02
UV ₂₅₄ (cm ⁻¹)	0.040	0.034
TOC (mg/L)	2.56	2.67
DOC (mg/L)	1.86	2.03
SUVA (L/mg m)	2.15	1.68
Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)	43.8	40.5

Thermo), UV₂₅₄(UV-1601, Shimadzu), 탁도(2100N Turbidimeter, Hach), TOC(5310C Laboratory Total Organic Carbon Analyzer, Sivers), SUVA, 알칼리도 등의 수질을 분석하였다. 한강원수의 평균 수질 특성은 **Table 1**에 제시하였다.

2.2. 강화응집실험

2.2.1. 강화응집: Step 1

DBP 전구물질들은 NOM의 일부분으로서, D/DBP 규정에서는 TOC가 DBP 전구물질의 대용물로 규정한다. USEPA 매뉴얼(1999)에 의하면 산화제를 투입하기 전 원수의 특성을 파악하여 TOC가 2 mg/L를 넘지 않으면 기존의 정수공정을 적용하고, 이를 넘으면 강화응집을 할 수 있는 시설의 개선, 응집제의 전환 등의 방법을 찾아야 한다. 만약 TOC 농도가 4mg/L를 넘어서면 파일럿 연구를 수행, 입상활성탄 흡착이나 Membrane에 의한 TOC 제거 효과를 분석해야 한다. 강화응집을 적용할 때는 두 단계로 응집제 투입량이 결정된다. 먼저, 기존 정수장의 응집공정 과정에서 제거되어야 하는 최소 TOC 제거율이 만족되는 지를 파악한다. 원수중의 알칼리도와 총 유기탄소(TOC)에 의한 TOC 최소제거율을 **Table 2**에 제시하였다.

2.2.2. 강화응집: Step 2

앞의 Step 1을 기존 정수장에서 만족하고 있지 못하면 적절한 TOC 제거율을 결정하기 위해 Step 2 실험을 실시하게 된다. Step 2의 실험 목적은 최대 가능한 TOC 제거율을 구하기 위함이며, 실질적인 운전 조건을 구하기 위해서는 아니다. 따라서 원수 특성

Table 2. Step 1 percent removal requirements for enhanced coagulation

TOC (mg/L as C)	Source water alkalinity mg/L as CaCO ₃		
	0~60	>60~120	>120
>2.0~4.0	35	25	15
>4.0~8.0	45	35	25
>8.0	50	40	30

및 운전 조건에 의한 영향을 배제하기 위해 응집제는 알럼(Al₂(SO₄)₃ · 18H₂O), 혹은 같은 동등한 양의 Ferric salt를 사용한다. 본 실험에서는 알럼을 사용하였으며 10mg/L 간격으로 응집제 투입량을 증가 투입하여 jar-test를 실시하였다. 본 연구에서는 pre jar-test를 통해서 pH가 5.5 이하로 낮아지는 jar를 결정하고 pH 저하를 방지하기 위해 결정된 NaOH를 먼저 투입한 후 응집실험을 시작하였다. 응집실험은 EPA에서 제시한 조건을 따라 급속교반 200rpm에서 1분, 완속교반 30rpm에서 30분 교반 후 1시간을 침전시켜 상등수를 채취하여 수질을 분석하였다.

2.3. 유기물 분자량 분포 실험

유기물 분자량 분포는 분리막을 사용하여 측정하였다. 분리막은 친수성 재질의 YM30(30kD), YM10(10kD), YM3(3kD), YM1(1kD), YC05(0.5kD)이었고 적용 압력은 2.5~3.0kgf/cm²이었다. 한 조건에서의 실험이 끝나면 0.1N의 NaOH를 이용하여 화학세정을 실시하였다. 다섯 종류의 막은 모두 평막을 대상으로 실험을 진행하였다. 그리고 여과수의 DOC를 측정하였다.

2.4. 친수/소수성 분리실험

본 연구에 사용된 XAD 레진 세척방법과 실험방법은 Thurman and Malcolm(1981)을 이용하였다. 속슬렛 세척을 하였으며 methanol 슬러리 상태로 보관하다 필요시 증류수로 유출액의 DOC 농도가 0.5mg/L 이하가 될 때까지 세척하였다. 이렇게 세척한 수지를 glass column에 충전 후 수지를 사용하기 전에 다시 0.1N NaOH와 0.1N HCl로 번갈아 가며 각각 3번씩 세척하고 최종적으로 column에 HCl이 남아있도록 하였다.

친수/소수성 분리 시료원수는 입경 0.45µm 크기의

membrane filter로 여과한 후 HCl을 사용하여 pH 2로 산성화시켜 실험하였다. XAD-8 레진을 충전한 glass column을 통과하는 시료의 유출속도는 15bed volume/hr으로 유지시켰다. XAD-8 레진이 충전된 유리관의 유출액 중 처음 50mL은 버리고 이후 유출수의 적당량을 TOC vial에 받아 친수성 DOC를 측정하였다. 그 후 레진에 흡착되어있는 유기물질을 NaOH를 이용하여 유출속도 5bed volume/hr으로 탈착하여 적당량을 vial에 받아 소수성 DOC를 측정하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 한강원수의 수질 및 유기물 특성

3.1.1. 수질 특성: 탁도, UV, TOC 특성

한강 원수 수질은 본 실험을 시작하기 전부터 측정을 하였으며, 측정된 2005년 3월부터 2006년 10월까지의 자료를 정리하여 다음 Fig. 1에 나타내었다. 모두 26개의 측정값을 나타내며, DOC는 2005년 11월부터의 자료이다. 제시된 자료 중 본 실험에 사용된 것은 2006년 2월부터 2006년 10월까지의 원수이다. 누적분포로 나타낸 자료를 보면, 탁도는 10NTU 이하의 저탁도가 58% 이상을 차지하고 있음을 알 수 있다. UV₂₅₄의 경우 0.05cm⁻¹ 이하에 집중적으로 분포되어 있었으며, TOC의 경우도 2~3mg/L에 많이 분포되어 있었다. 본 실험에 사용된 원수는 전염소처리 전 원수와 전염소 처리 후 원수로 분류하여 취수하였는데 그 수질 특성을 다음 Table 3에 정리하였다. 각 월별 수질 특성은 조금씩 달랐으나 평균 pH는 6.5~8.0 부근이었으며, 탁도의 경우 장마철인 06년 8월의 고탁도 35~42NTU를 제외한다면 평균 5~10NTU를 유지하였다. 유기물 특성을 알 수 있는 UV₂₅₄의 경우 탁도가 높은 시기인 8월을 제외한다면 평균 0.02~0.04cm⁻¹를 보였다. TOC는 평균 2.6 mg/L 정도이었으며 알칼리도는 보통 40~50mg/L as CaCO₃ 정도로 나타났다. 이러한 수질 특성으로 보아 한강원수의 경우 EPA 매뉴얼에 따른 강화응집 적용 시 적어도 35%의 TOC 제거를 얻어야 한다는 것을 알 수 있었다. SUVA 값은 2.0~2.5L/mg·m 부근으로 친수성이 상대적으로 크다는 것을 유추할 수 있다.

전염소 처리 전과 후의 수질을 비교해 보았을 때는

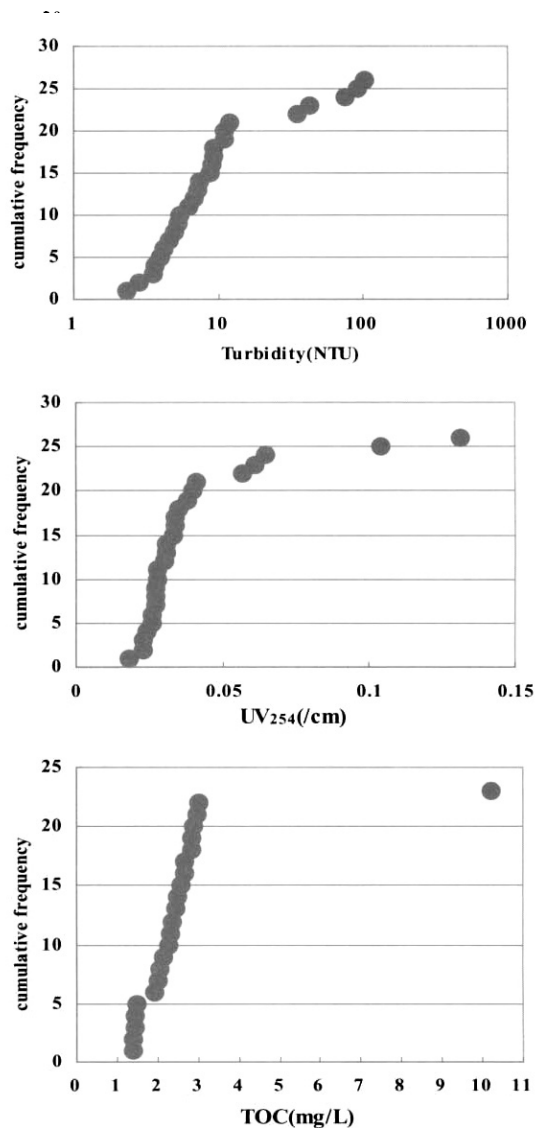


Fig. 1. Cumulative parameters of Han River Water (March, '05 October, '06).

전체적으로 큰 차이는 없었으나 탁도와 UV₂₅₄, SUVA값은 약간 염소처리로 약간 낮아지는 경향을 보였고, TOC와 DOC는 상대적으로 약간 증가하는 경향을 나타내었다. 하지만, 그 차이가 의미 있는 정도인지는 확인하기 어려운 상황이며 추후 연구가 필요하다고 사료된다.

3.1.2. 분자량의 분포 변화

한강원수 유기물 분자량 분포를 알아보았다. 전염

Table 3. Monthly water qualities of Han River Water in this study

Parameters	Temperature (°C)	pH (-)	Turbidity (NTU)	UV ₂₅₄ (cm ⁻¹)	TOC (mg/L)	DOC (mg/L)	SUVA (L/mg·m)	Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)
06년 2월 ^a	18.2	8.56	5.3	0.028	2.89	1.72	1.6	52.5
06년 2월 ^b	18.4	7.95	4.6	0.026	2.85	2.03	1.3	50.0
06년 3월 ^a	18.7	8.68	5.0	0.031	3.00	1.90	1.6	50.0
06년 3월 ^b	18.0	7.67	4.0	0.027	2.98	1.91	1.4	47.5
06년 5월 ^a	17.3	7.64	5.5	0.027	2.48	1.74	1.5	40.0
06년 5월 ^b	17.4	7.61	3.7	0.024	2.85	2.21	1.1	37.5
06년 6월 ^a	23.7	7.37	11.9	0.027	1.90	1.41	1.9	38.8
06년 6월 ^b	23.1	7.18	11.0	0.023	2.25	1.77	1.3	37.5
06년 8월 ^a	26.1	7.57	42.7	0.061	2.16	1.70	3.6	41.3
06년 8월 ^b	17.3	-	34.7	0.057	2.43	1.92	3.0	37.5
06년 10월 ^a	18.1	7.84	7.5	0.040	2.56	1.86	2.2	43.8
06년 10월 ^b	18.2	7.68	9.0	0.034	2.67	2.03	1.7	40.5
평균	19.5	7.80	12.1	0.034	2.58	1.85	1.8	43.1
표준편차	3.0	0.5	12.8	0.013	0.35	0.20	0.7	5.5

a: 자연 원수(전염소처리 전), b: 전염소처리 한 원수, -: 분석하지 못함

소 처리 전과 후의 분자량 분포 결과는 다음 Fig. 2와 같다. 시료는 각각 2005년 12월, 2006년 2월과 5월의 실험결과이다. 전염소처리 전과 후 모두 저분자 유기물이 고분자유기물에 비해 월등히 높음을 알 수 있다. 하지만 각 월별 마다 특성이 있는데, 2005년 12월의 특성을 살펴보면, 전염소 처리 전과 처리 후 원수에서 모두 70%를 넘는 1kD 이하의 저분자 유기물이 많이 나타났으며, 10kD 이상의 고분자 유기물은 10%를 조금 넘는 결과를 보였다. 2006년 2월의 경우는 2005년 12월의 원수와는 다르게 1kD 이하의 저분자 유기물이 50~60% 정도로 상대적으로 낮아졌으

며, 특히 10kD 이상의 고분자 유기물이 눈에 띄게 30%를 넘는 결과를 보였다. 그러나 2006년 5월에 측정하였을 때는 다시 2005년 12월과 비슷한 양상으로 10kD 고분자 유기물 비율이 높게 나타났다. 이는 박 등이 계절별로 한강원수의 특성이 상이함을 제시하였듯이 갈수기인 2월에는 평상시와는 다른 유기물 분자량 분포를 갖는 것으로 추정된다(박 등, 2006).

3.1.3. 유기물 친수/소수 특성 분포

응집공정에서 원수 중 소수성유기물이 많을수록 유기물 제거효율이 증가하는 것으로 알려져 있다. 즉

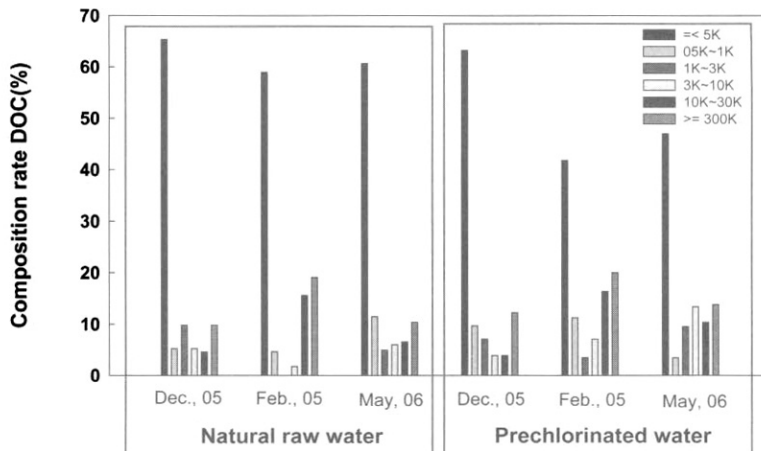


Fig. 2. Molecular weight distributions of NOM from the Han River water.

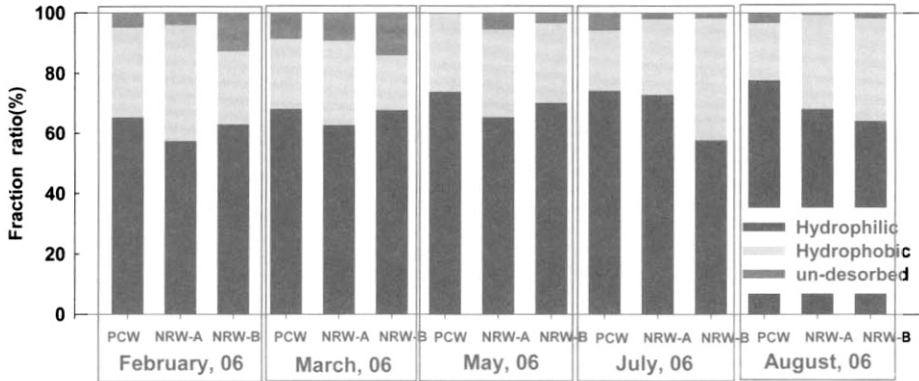


Fig. 3. Hydrophilic/hydrophobic fraction of raw waters by DOC measurement (NRW: Natural raw water, PCW: Prechlorinated water).

원수 중에 친수성유기물질이 많은 경우 응집 후 잔류 유기물질이 많이 남게 된다. Kimberlyk et al.(1996)은 수중에 친수성유기물과 소수성유기물이 공존하고 있는 경우 응집제 주입량이 적은 경우에는 대부분 소수성유기물질 제거에 사용되고 응집제를 더욱 첨가시키면 친수성 유기물제거에 사용된다고 설명하였다.

Fig. 3에 나타난 유기물의 분리실험결과는 2006년 2월부터 2006년 8월까지의 실험결과이다. 전염소처리된 원수를 NRW-A(Natural raw water), 전염소처리한 원수를 PCW(Prechlorinated water)로 표기하였다. 우선 원수의 특성을 살펴보면, 염소 처리 전(NRW-A)이나 처리 후(PCW) 모두 친수성 성분이 소수성 성분에 비해 두 배 정도 많은 경향을 보이고 있다. 또한, 계절 별 특성을 살펴보면 겨울인 2006년 2월에 측정된 한강 원수의 특성은 유기물 중 친수성 성분이 약 50~60%의 경향이 보였으며, 5월의 경우에도 소수성 물질에 비해 친수성 물질이 2배 이상 측정되었다. 이는 전염소처리 한 원수와 전염소처리 안 한 원수가 비슷한 경향을 보이고 있는데, SUVA값이 꽤 낮은 한강원수의 특성상 친수성 특성이 SUVA값 일치된 경향을 보이는 것으로 나타났다. 또한 염소처리된 원수(NRW-A)를 이용하여 강화응집을 적용한 후 상징수를 이용해 유기물의 분리실험을 실시한 결과(NRW-B)를 Fig. 3에 함께 제시하였다. 강화응집 전후를 살펴보면 06년 7월과 8월인 여름철을 제외하고는 소수성유기물의 비율이 강화응집 후에 감소되는 것으로 나타났다. 이는 강화응집으로 소수성 유기물이 선택적으로 제거되었다는 것을 나타낸다. 이에 따

라서 강화응집 후에 친수성 유기물 분율이 조금씩 증가되었으므로 유기물 제거율을 더 높일 필요가 있는 경우에는 제거되지 않은 친수성유기물에 대한 처리 고민할 필요가 있다.

3.2. 강화응집의 특성

한강원수를 이용하여 강화응집 특성을 파악하였다. 이제까지 국내에서 강화응집 조건을 결정하는 기준이 정해진 바는 없으나 대체적으로 두 가지가 쓰이고 있는 것으로 파악된다. 먼저, 탁도 물질 제거 면에서 최적인 조건보다 많은 응집제를 투입하는 방법이다. 또 다른 하나는 UV나 DOC에 대한 일정한 제거율을 지정하고 그 제거율을 얻을 수 있을 만큼 응집제를 투입하는 방법이다. 이 때 사용되는 제거율은 30~50% 수준인 것으로 파악된다. 하지만, 미국 EPA의 경우, 각 원수의 특성에 따라 the point of diminishing returns(PODR)를 0.3mg TOC/10mg 알럼으로 정하고 있다.

3.2.1. 탁도와 유기물의 제거효율

기존의 응집공정은 탁도 제거를 목표로 하고 있다. 그러나 강화응집의 경우 탁도 제거율을 유지하면서 유기물 제거를 높이고자 하는 공정이다.

강화응집의 효율을 알아보고자 응집제 주입량이 증가함에 따라 탁도를 측정하였으며, 유기물을 분석하였다. Fig. 4에는 2006년 2~10월까지의 강화응집 결과를 제시하였다. Fig. 4의 (a)에는 탁도를 제시하였다. 원수의 경우 평균 탁도는 13.0NTU였다. 2006년

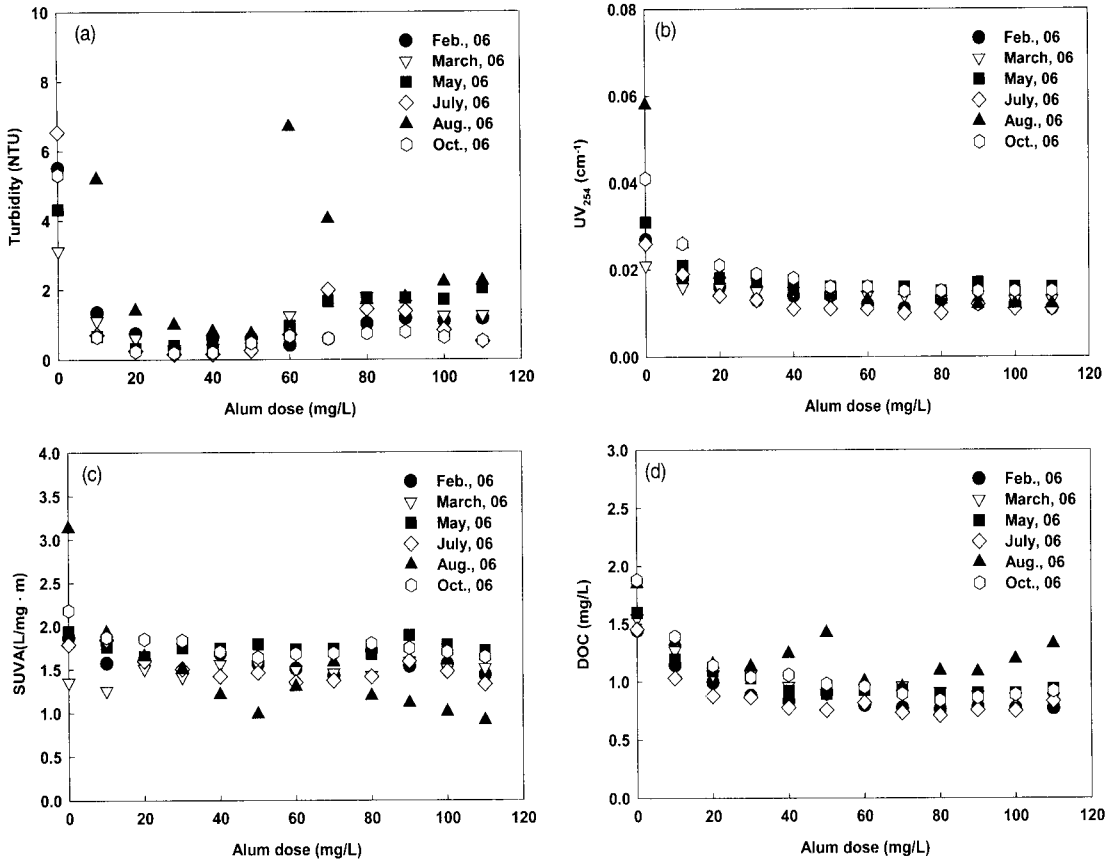


Fig. 4. Enhanced Coagulation of Natural Raw Water (February, '06~October, '06) [A: Turbidity, B: UV254, C: SUVA, D: DOC].

8월의 경우 원수의 탁도가 기존 한강원수의 탁도 보다 상대적으로 높은 경향인 42.7NTU를 보였다. 따라서 2006년 8월의 경우는 오른쪽 y축을 사용하였다. 모든 원수에서 응집제 주입량이 증가함에 따라 탁도가 크게 감소함을 알 수 있었다. 응집제의 주입량이 약 20~30mg/L에서 0.2NTU까지 감소 돼 약 95%가 넘는 제거율을 보였다.

Fig. 4(b)에는 UV₂₅₄의 결과를 나타내었는데 응집제 주입량에 증가됨에 따라 UV₂₅₄가 감소되는 것을 볼 수 있는데 초기 응집제 주입시에 감소폭이 크고, 응집제 주입량이 40mg/L 이상인 경우에는 그 감소율이 둔화되는 것을 알 수 있다. 경우에 따라서 최고 약 60%가 넘는 UV₂₅₄ 유기물 제거율이 응집제 주입량 70mg/L에서 나타나는 경우도 존재하였다.

Fig. 4의 (c)와 (d)는 응집제 주입량에 따라 SUVA와 DOC의 결과를 나타내었다. 한강원수의 SUVA는 평균 2.0을 넘지 않고 있다. 친수/소수성 분리실험에서

나타난 바와 같이 친수성분이 소수성 성분에 비해 많이 나타났다. SUVA 값은 응집제 주입량에 따라 UV₂₅₄값에 비해 감소하는 경향이 상대적으로 적을 뿐만 아니라 눈에 보이는 경향을 찾기 어려움이 있다. 이러한 결과는 친수성분이 많은 한강원수의 경우는 응집제 주입에 의해 선택적인 소수성 성분의 제거량이 상대적으로 작아지기 때문에 그 경향을 알아보기 힘든 것이라고 판단된다. 또한 DOC의 결과를 살펴보면 응집제 주입량이 증가될수록 DOC 감소가 지속적으로 일어나고 있는데, 그 감소폭은 응집제 주입량이 40mg/L까지는 꽤 큰 편이었다가 40mg/L 이상에서는 일정해지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 UV₂₅₄값의 경향과 일치하였음을 확인하였다.

3.2.2. 적절한 TOC 제거율 기준 평가

적절한 TOC 제거가 가능한 응집제 주입량에 대해서 세 가지 기준을 적용하여 구해보고자 하였다. 첫

번째는 USEPA 매뉴얼 step 1에서 제시하는 TOC 제거율을 얻기 위해 필요한 응집제 주입량이다. 즉, USEPA 매뉴얼에 의하면 원수의 알칼리도와 TOC에 따라 정수장에서 제거되어야만 하는 TOC 제거율이 제시되어 있다. 한강 원수의 알칼리도와 원수 TOC 농도에 따른 step 1에 제시된 제거율은 35% 제거율이다. 따라서 강화응집 jar-test 결과에서 원수 TOC를 35% 제거할 수 있는 응집제 주입량을 결정하였다. 두 번째는 적절한 응집제 주입량을 결정하는 방법으로 제시된 point of diminishing return(PODR)에 해당하는 응집제 주입량이다. 정수장의 소독부산물 생성능 제거를 평가해서 step 1에서 제시하는 35% 제거율을 만족하지 않은 상태로 응집이 진행되고 있는 경우, 적절한 응집제 주입량을 결정하기 위해서 PODR을 얻는 응집제 주입량을 결정하게 된다. USEPA는 이러한 PODR로서 0.3mg TOC/10mg 알럼을 들고 있다. 세 번째는 침전 후 상정수의 TOC가 2mg/L 이하가 되게 하는 응집제 주입량이다. 엄격하게 적용될 수는 없지만 침전 후 상정수 TOC가 2mg/L 이하가 되면, 소수성 유기물이 상당부분 제거되었고, 또 소독부산물 생성량이 먹는물 기준을 초과하지 않을 것이라 알려져 있다.

본 강화응집 실험에서의 유기물 제거 효과를 파악하기 위해 측정된 TOC 결과를 제거율 면에서 정리하여 Fig. 5와 Table 4에 나타내었다. Fig. 5를 바탕으로 여러 가지 강화응집 기준에 해당되는 TOC 제거율을 얻기 위한 알럼 주입량을 Table 4에 제시하였다. Table 4에 제시된 바와 같이 Step 1에 의한 최저 TOC 제거율 면에서는 응집제 주입량은 10~20 mg/L로 나타났으나, PODR에 적합한 응집제 주입량은 20~30mg/L로 나타났다. TOC 제거율면에서 적합한 응집제 주입량보다 약간 많은 주입량을 필요로

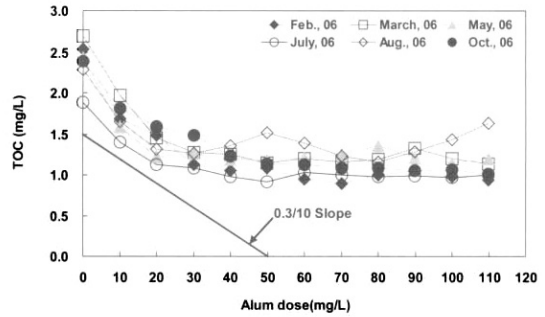


Fig. 5. Alum jar-test profile for Natural Raw Water, showing dosages required to meet Step 1 removal and PODR - TOC.

하는 것을 알 수 있었다. 그리고 응집 후 침전된 상정액의 TOC가 2mg/L보다 낮을 때의 응집제는 06년 3월 ~06년 10월까지의 모두 10mg/L의 낮은 응집제 주입량이면 충분할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 기존정수처리공정의 개선을 위해 강화응집공정을 이용하여 NOM 제거를 향상시키고자 하였다. 먼저 한강의 자연유기물 특성을 분석하였으며, 한강원수를 이용하여 강화응집을 실시하고 유기물 특성이 강화응집에 미치는 영향을 알아보려고 실험을 수행하였다.

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 한강원수의 경우 전염소처리 전 원수와 전염소처리 후의 원수로 분류하였으며 전염소처리 전 원수의 경우 친수성 유기물은 60%이상, 소수성 유기물은 30%이상이 측정되었다. 또한 1kD이하의 저분자 유기물이 65%이상의 많은 부분을 차지하고 있었다. 전염소처리 후의 원수 또한 저분자 유기물이 많은 부분

Table 4. Alum dosage required in jar testing to achieve various enhanced coagulation criteria: Natural Raw Waters

Utility	Enhanced Coagulation Step 1 Required TOC Removal percent	Alum Dosage Required in Jar Test to Achieve Criterion mg/L $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$		
		Step 1 TOC Removal	PODR	Settled TOC < 2.0 mg/L
Feb., 06	35	10	30	10
March, 06	35	20	20	10
May, 06	35	10	20	10
July, 06	35	20	20	0
Aug., 06	35	10	20	10
Oct., 06	35	20	20	10

을 차지하고 있었다.

2) 한강원수의 강화응집의 결과를 살펴보면 탁도의 경우 초기 주입량인 20~30mg/L에서 95% 이상의 제거율을 보였다. 또한 TOC와 UV₂₅₄는 응집제 주입 초기에 대부분의 유기물이 제거되고, 40mg/L 이상에서의 제거율은 아주 미미한 것으로 나타났다. 즉, 강화응집 적용 시 유기물 제거를 위한 응집제 주입량에서 탁도 제거의 효과 또한 만족한다고 사료된다. 따라서 한강수계 정수장의 경우는 강화응집을 일반적인 응집과 구분할 필요가 없다고 사료된다. 그러나 SUVA값의 경우는 응집제 주입에 따른 제거가 두드러지지 않아, 소수성 유기물 분율이 높지 않은 한강원수의 특성을 잘 나타내주었다.

3) 강화응집 적용 최적 응집제 주입량을 세 가지 기준을 적용하여 구해 본 결과, 대체적으로 20~30 mg/L 알람 주입량으로 미국 등에서 제안하는 TOC 제거율을 맞출 수 있음을 알 수 있었다. 이는 한강원수의 경우, 소수성 유기물이 적은 관계로 THMs 생성능이 낮은 점을 감안하면 어느 정도 연관성이 있음을 알 수 있다. 하지만, 한강 원수의 친수성분이 높아서 발생하는 높은 HAAs 생성능과 강화응집 기준과의 연관성 연구는 더 필요하다고 본다. 소수성이 강한 원수를 대상으로 정한 PODR값도 친수성분이 강한 원수를 대상으로 한 경우 수정되어야 한다고 사료된다.

사 사

본 연구는 서울지역환경기술개발센터 연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 김정현 (1999) Enhanced Coagulation의 적용성 평가 연구. *한국수처리학회지*, 7(4), pp. 31-41.
- 박현, 김창모, 장현성, 김현숙, 박창민, 한선희, 유명진, (2006) 한강분류와 유입지천의 천연유기물과 염소소독 부산물 생성능 고찰, 2006년 대한환경공학회 학술발표회.
- Edzwald, J.K. (1993) Coagulation in Drinking Water Treatment: Particles, Organic and Coagulation, *Water Science Tech.*, 27(11), pp. 21-35.
- Edzwald, J.K. and Benschoten, J.E. Van. (1990) Aluminium Coagulation of Natural Organic Matter, Proc. of 4th Gothenburg Sym.
- Edzwald J. K., John E. Tobiasson (1999) Enhanced Coagulation: US requirements and a Broader View, *Wat. Sci. Tech.*, 40(9), pp. 63-70.
- Kimberlyk, A.B. and Mortza, A., Gary, A. (1996) Enhanced and Optimized Coagulation for removal of Particulate and Microbial Contaminants, In Proceedings of the 1996 AWWA Annual Conference, New York, pp. 303-310.
- Marc Edwards (1997) Predicting DOC Removal During Enhanced Coagulation, *J. AWWA*, 89(5), pp. 78-89.
- Mark C. White, Jeffrey D. Thompson, Gregory W. Harrington, Philip C. Singer (1997) Evaluating criteria for enhanced coagulation compliance, *J. AWWA*, 89(5), pp. 64-77.
- Mark Morgan, John Mogavero, Gail Charles (1995) Optimization of Particulate Removal under Enhanced Coagulation Conditions, In Proceedings of the 1995 AWWA Annual Conference, New Orleans.
- Seung-Hyun Kim (2005) Enhanced Coagulation: Determination of Controlling Criteria and An effect on Turbidity Removal, *Environ. Eng. Res.*, 10(3), pp. 105-111
- Singer, P.C. (1995) Enhanced Coagulation and Enhanced Softening for the Removal of Disinfection By-product Precursors: An Evaluation Report to the Disinfectants/Disinfection By-products Technical Advisory Workgroup of the Water Utility Council of the AWWA.
- Thurman, E.M., Tonal L. Malcolm (1981) Preparative Isolation of Aquatic Humic Substances, *Environ. Sci. & Tech.*, 15(4), pp. 463-466.
- US Environmental Protection Agency (1999) Definitions of Enhanced Coagulation and Enhanced Precipitative Softening, Prepared for Health and Ecological Criteria Div., Washington, D.C.
- US Environmental Protection Agency (1998) National primary drinking water regulations: disinfectants and disinfection by-products. *Fed Regist* 63(241): 69389.