

응집과 오존처리가 NOM 분자량 분포특성과 활성탄 흡착능에 미치는 영향

Effect of Ozonation and Coagulation on NOM Molecular Distribution and Activated Carbon Adsorption Capacity

김성진 · 홍성호*

Kim, Sung Jin · Hong, Seong-Ho*

충실대학교 환경화학공학과

(2005년 5월 20일 논문접수: 2005년 7월 14일 최종 수정논문 채택)

Abstract

The main goals of this work are to investigate the effect of molecular weight distribution(MWD) and activated carbon adsorption capacity after conventional coagulation and enhanced coagulation. The ozonation was very effective to decompose the NOM to smaller size and to remove molecular smaller than 1,000. The concentration of DOC was reduced 0.25mg/L and 0.56mg/L by the conventional coagulation and the enhanced coagulation, respectively. The conventional coagulation was not effective to remove NOM. However, the enhanced coagulation was effective to remove MW bigger than 10,000. The higher MW was shifted to smaller weight by ozonation in the raw water and the after conventional coagulation. After enhanced coagulation the MW had not changed significantly by ozonation. Also, it was observed that the ozone dosage did not have significant impact on MW shifting to smaller size. The adsorption capacity simulated by IAST comparing K values showed that the adsorption capacity was not impacted by ozone doses. There was very strong correlation between MW smaller than 10,000 and the mid- and strongly adsorbable fractions.

Key words: coagulation, NOM, activated carbon, adsorption

주제어: 응집, 자연유기물질, 활성탄, 흡착

1. 서론

현재 정수처리에서 문제시 되는 자연유기물질 중 휴믹물질(Humic substance)은 서로 다른 유기화합물

로 이루어진 복잡한 혼합물의 일종으로 주로 휴믹산과 펠릭산으로 구성되어있다. 이러한 자연유기물질은 정수처리공정에서 소독제로 사용되는 염소와 반응하여 발암성 물질로 알려진 THMs(Trihalomethanes)이나 HAAs(Haloacetic acid)와 같은 DBPs(Disinfection

*Corresponding author Tel: +82-2-820-0628, Fax: 82-2-812-5378, E-mail: shong@ssu.ac.kr (Hong, S.H.)

by-products)를 생성한다는 사실이 보고된 이후, 이에 대한 규제가 강화되고 있어 국내·외적으로 많은 연구가 지속되고 있는 실정이다(Crozes, et. al., 1995; Nissinen et. al., 2001). 따라서 DBPs(Disinfection by-products)의 생성을 줄이기 위한 방법으로 소독제의 대체, 또는 DBPs가 생성되는 전구물질을 제거하기 위한 활성탄 오존 그리고 Membrane 등 신 공정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 신 공정에 대한 공정 최적화를 위해 기존 시설에 대한 Retrofitting 개념을 추가하여 최대의 전구물질을 제거한다면 Membrane, 활성탄공정에 대한 부하를 최소화할 수 있을 것으로 생각되어진다. 미국의 경우 소독 부산물의 저감을 위해 기존 탁도 제거 목적의 응집시설을 이용하여 강화된 응집(Enhanced coagulation)을 할 경우 THMs, HAAs의 전구물질 제거에 큰 역할을 하고 있다고 보고하고 있다(William, et. al., 2001). 또한 홍 등은(2003) 기존응집과 강화된 응집 후 NOM 제거와 흡착평형에서 활성탄의 흡착능은 특정물질을 선택적으로 제거하기 보다는 전체적으로 초기농도에 영향을 받는다고 보고하고 있다. 이러한 자연유기물질(NOM)은 휴믹물질(Humic substance)로 구성되어 있으며 그 중 휴믹산(Humic acid)은 pH 1에서 용존되지 않고 고형물을 형성하며 펠빅산(Fulvic acid)은 pH 1에서 용존 상태로 존재한다(Edzwald, 1993). 휴믹산(Humic acid)과 펠빅산(Fulvic acid)은 비슷한 구조를 지니고 있으나 분자크기나 Carboxyl이나 phenol과 같은 관능기의 함량이 다르다. 또한 휴믹산(Humic acid)의 경우 분자크기는 대략 5×10^5 정도이며 펠빅산(Fulvic acid)의 경우 $500 \sim 5 \times 10^3$ 의 범위를 가진다고 보고되어지고 있다(Rebhun, et. al., 1993). 따라서 최근 오존 및 응집제를 이용하여 자연유기물질(NOM)제거에 대한 연구가 활발히 진행 중이지만, 상수원수에 따라 자연유기물질(NOM)의 특성이 다르기 때문에 원수 특성과 공정별 처리에 대한 자연유기물질(NOM)의 특성을 평가하는 것이 바람직하다고 판단되어진다. 또한 오존처리의 경우 살균 목적뿐만 아니라 활성탄 흡착지의 전 공정으로 이용할 경우 자연유기물질을 분해하여 활성탄 흡착지에서 미생물 성장을 활성화하기 위하여 생물학적으로 분해 가능한 물질을 증대하는 목적으로 사용되고 있으며, 오존에 의한 자연유기물질 분해가 활성탄 흡착성능을 극대화

하여 활성탄 흡착지의 사용기간을 연장 할 수 있다고 보고하고 있다(Chiang, et. al., 2002). 따라서 본 연구에서는 응집과 오존처리에 의하여 분자량 변화 특성을 평가하고, 이러한 전처리 공정이 활성탄 흡착능과는 어떠한 상관관계가 있는지 평가하고자 한다.

2. 재료 및 실험방법

2.1. 원수특성과 응집실험

본 실험에 사용된 원수는 왕숙천 하류에서 시료를 채수하여 기존응집, 강화된 응집 후 분자량 분포평가를 실시하였다. 응집실험은 Jar-Tester(Model: SW-162A)를 이용하였다. 응집실험 조건으로는 급속교반은 120rpm으로 2분간 교반하였으며, 완속교반은 20rpm으로 20분간 교반하였다. 침전은 1시간으로 상온에서 실행되었으며, 사용된 응집제로는 Aluminium sulfate($Al_2(SO_4)_3 \cdot 13-14H_2O$)를 사용하였다. pH조절을 하기 위해 0.1N HCl과 0.1N NaOH을 사용하였다.

2.2. 분자량 분획(Molecular Size Fractionation)

분자량 분포 평가를 위해 사용된 장치로는 Stirred ultrafiltration cell(Amicon Model 8400)을 사용하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 시료량은 100ml이었으며, 질소가스를 이용하여 $2.5kg/cm^2$ 의 압력으로 여과하였다. 막의 전처리 단계로 0.1N NaOH로 세정한 후 막에 의한 오염정도를 고찰하기 위하여 초순수를 통과시켜 DOC 변화량을 측정하였으며, 콜로이드에 의한 막의 손상을 최소화하기 위하여 $0.45\mu m$ membrane(Millipore)으로 1차 여과 후 실험을 수행하였다. 분자량 분포평가가시 투과된 물과 남아있는 물의 농도와 부피를 곱하여 총량을 계산 후 실험 전 시료의 농도와 비교하여 물질수지를 검토하여 실험을 수행하였다. 사용된 Membrane은 친수성인 Regenerated cellulose 재질로 제작 되었으며, 막의 공극 크기는 YM10(10,000 molecular weight cut-off; MWCO), YM5(5,000 MWCO), YM3(3,000 MWCO), YM1(1,000 MWCO) 구성된 각 Membrane을 이용하여 분자량 분포 평가를 수행하였다.

▶ Fractionation

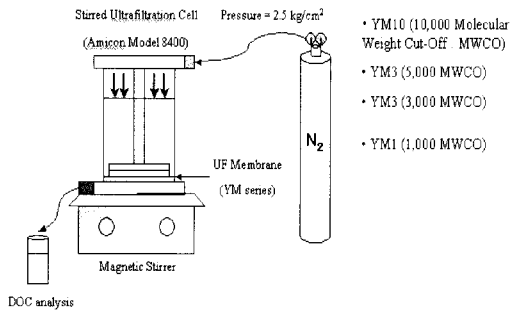


Fig. 1. Schematic diagram of fractionation.

2.3. 오존처리(Ozone treatment)

오존처리를 위한 오존발생장치는 Ozonia사의 model CFS-1A를 이용하여 순산소 무성방전에 의해 발생된 gas상의 O₃을 diffuser를 통해 증류수가 담긴 semi-batch reactor로 투입하여 30mg/L 정도의 O₃ 포화수를 만든 후 적당량을 취하여 실험하였다. 실험장치는 O₃ loss가 최소인 stainless steel, pyrex, teflon, viton으로 구성하였다. 시료 분석은 indigo method를 이용하였다. Indigo method는 O₃에 의한 indigo sulfonate decolorization이 산화되어 나타나는 UV(HP 8000) 흡광도 감소로 O₃을 측정하는 방법으로 다른 O₃ 분석 방법에 비해 매우 감도가 좋고 정확하며, Chlorine이나 H₂O₂ 등의 영향을 거의 받지 않는다고 보고 되어있다. O₃과 indigo sulfonate는 1:1 반응을 하며 O₃의 농도는 아래와 같다.

$$O_3 = \frac{(\Delta Abs \times 100)}{f \times b \times v} \quad (1)$$

*f: 600nm에서의 calibration curve slope (f) 값은 0.42 ± 0.1cm⁻¹ per mg/l

*b: cuvette의 path length

*v: 첨가된 sample의 volume

2.4. 흡착등온 실험과 IAST(Ideal adsorbed solution theory)

활성탄 흡착에 사용된 자연유기물질(NOM)의 흡착은 석탄계를 원료로한 입상 활성탄을 이용하여 초기능도에서 활성탄의 양을 변화시키는 Bottle point 등

온식을 이용하여 실험을 수행하였다. 활성탄 흡착시 평형에 도달하는 시간은 입자크기의 제곱에 반비례하므로 활성탄 흡착능 평가시 평형에 도달하는 시간을 단축하기 위하여 실험에 사용된 활성탄은 100 * 200 (Average dp = 0.11mm)mesh로 분쇄하여 사용하였다. 초기농도의 함수로 흡착능을 예측하는 것은 공정의 이해적 측면에서 상당히 중요하다. 왜냐하면 활성탄 흡착능은 자연유기물질의 농도와 미량유기물질의 농도에 따라서 전체적인 흡착능이 달라지기 때문이다. 따라서 본 연구에서 다성분계 흡착에 의한 자연유기물질(NOM)의 활성탄 흡착능 평가는 Radke와 Prausnitz(1972)가 제안한 IAST을 이용하였다.

$$C_i = \frac{q_i}{\sum_{j=1}^N q_j} \left(n_i \frac{\sum_{j=1}^N q_j}{K_j} \right) \text{ for } i=1 \text{ to } N \quad (2)$$

q_i와 C_i는 각각 흡착제와 용액에서의 흡착질의 농도를 말하며 n_i와 K_i는 Freundlich isotherm의 상수이다. 다음 식 (2)는 평형상태에서 흡착 가능한 성분 i의 액상의 농도와 흡착제에서의 농도의 관계를 나타내고 있다. 또한 IAST에서는 흡착질의 농도는 몰농도로 표시되어 왔으나 식 (2)에서는 질량단위가 이용되었다. 이는 각 흡착 가능한 성분들에 대한 분자량이 동일하다고 가정한다면 몰 농도비는 질량비와 같기 때문이다(Hong, 1995).

3. 분석방법

본 연구에서는 DOC와 UV₂₅₄를 측정하여 분자량 분포평가 및 활성탄 흡착능 평가를 수행하였으며 사용된 기기는 UV₂₅₄는 0.45μm membrane으로 여과 후 Specord 200(Analytikjena, Germany)을 사용하였으며 용존유기물질(DOC)은 Multi N/C 3000(Analytikjena, Germany)을 통해 NPOC(Non-purgeable organic carbon)법을 이용하여 분석을 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 응집실험

본 연구에서는 왕숙천 하류에서 원수를 채취하여

Table 1. Raw water qualities and conditions of each coagulation with DOC value after coagulation

Raw water Quality		
DOC(mg/L)	2.00	
UV ₂₅₄ (/cm)	0.0523	
Turbidity(NTU)	2.5	
Alkalinity(mg/L as CaCO ₃)	45	
	Conventional Coagulation	Enhanced Coagulation
Alum dose(mg/L)	20 ~ 30	100 ~ 120
pH	6.8 ~ 6.5	6.1
After coagulation DOC(mg/L)	1.87	1.56

기존응집, 강화응집 후 원수특성을 평가한 뒤 이에 따른 분자량 분포평가를 실시하였다. 원수와 기존 응집 그리고 강화된 응집 후 원수 특성은 다음 Table 1에 나타내었다. 기존의 응집공정에서는 먹는 물 기준인 0.5 NTU 이하로 낮추기 위한 최적의 pH와 Alum 투입량을 산정하였으며, 강화된 응집공정에서는 자연유기물질(NOM) 제거를 위한 최적의 pH와 Alum을 산정하였다. 응집공정에 따른 자연유기물질(NOM) 제거율은 기존응집의 경우 6.6%를 보인 반면 강화된 응집에서는 22%로 높은 제거율을 보였다.

4.2. 분자량분포 평가

분자량 분포를 평가하기 위하여 MW 5,000 이하 그리고 3,000 이하를 측정하였으나 농도가 미미하여 본 연구에서는 분자량 분포를 10,000 이상 1,000 이상 10,000 이하 그리고 1,000 이하로 구분하여 결과를 도출하였다. Fig. 2에서부터 Fig. 5는 기존응집, 강화된 응집 후 분자량 분포변화를 원수와 함께 비교하여 나타내었다. Fig. 2에서 나타난 바와 같이 원수와 기존응집의 경우 분자량 분포는 큰 차이점은 나타나지 않았으나 강화된 응집과 비교 평가한 결과 원수에서는 MW 10,000 이상 물질들이 0.66mg/L를 나타낸 반면 강화된 응집에서는 0.32mg/L로 MW 10,000 이상의 물질이 상대적으로 약 51% 감소하였다. 또한 MW 1,000 이하의 물질들이 0.13mg/L 감소하였다. Fig. 3에서는 원수를 오존 처리한 후 분자량 분포평가를 실시한 결과이다. 오존처리 결과 상대적으로 용존유기물질(DOC) 농도는 약 25%의 감소하였으며, 오존처리전과 오존처리후 MW 10,000 이상의 물질들을

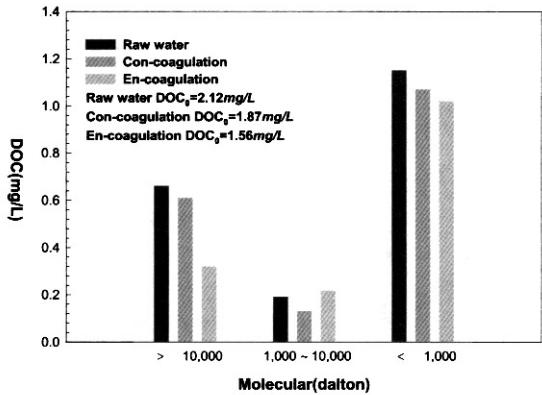
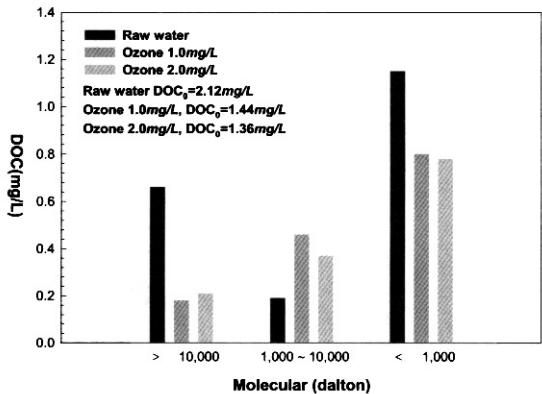


Fig.2. Distribution of MW after Conventional coagulation and Enhanced Coagulation.



비교 평가한 결과 약 72~73% 정도 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 MW 1,000 이상~10,000 이하의 물질은 상대적으로 증가하였으며, 1,000 이하의 물질에서는 절대농도기준으로 32~33% 정도 감소하였다. 그러나 오존농도 (1.0, 2.0mg/L)에 따른 분자량 분포변화에 대한 오존농도와의 상관성은 크게 나타나지 않았다. Fig. 4와 Fig. 5에서는 기존응집과 강화된 응집 후 처리수를 대상으로 오존 처리시 분자량 분포평가를 나타낸 것이다. 기존응집의 경우 오존농도 1.0mg/L에서 MW 10,000 이상의 물질이 절대농도를 기준으로 했을 때 약 72% 정도 감소하여 원수의 분자량 분포특성과 큰 차이는 나타나지 않았으나, MW 1,000 이상~10,000 이하의 물질들이 오존처리를 하기 전보다 약 50%가 증가하였으며, MW 1,000 이하의 물질들은 약 25%가 감소하였다. 또한 오존농

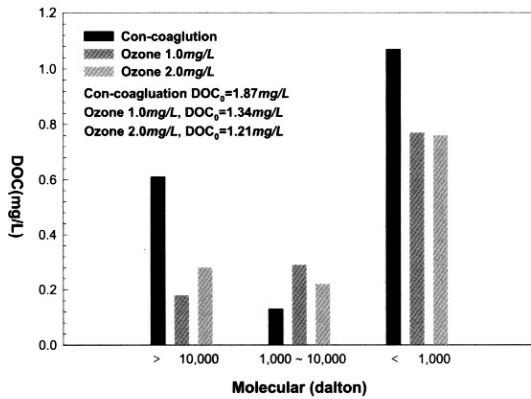
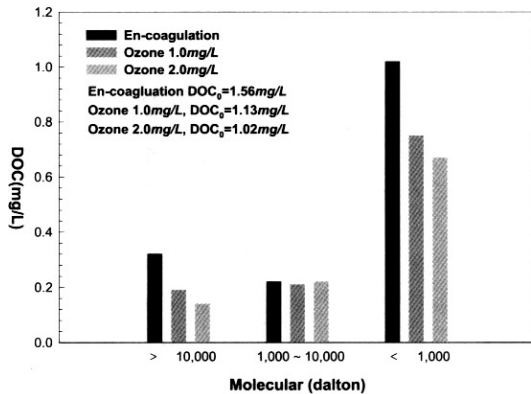


Fig. 4. Distribution of MW after ozonation for conventional coagulation.



도를 2.0mg/L로 하여 분자량 분포특성을 평가한 결과 오존농도 증가에 따른 분자량 분포특성에 큰 차이는 나타나지 않았다. 그러나 강화된 응집의 경우 기존 MW 10,000 이상의 물질들이 강화된 응집에 의해 제거되어 오존처리 결과 MW 10,000 이상의 물질의 감소는 원수와 기존응집에 비해 감소 경향이 크게 나타나지 않았으며, 강화된 응집 후에도 제거되지 않은 MW 10,000 이상의 물질과 MW 1,000 이하의 물질에서 약 30~35% 정도 감소되는 경향을 나타내었다. 이러한 관점에서 오존 처리시 원수와 기존응집 그리고 강화된 응집에서 오존에 의한 자연유기물질(NOM)의 산화 또는 분해에 영향을 주는 분자량(MW)은 MW 10,000 이상의 물질이 대부분 반응하여 분자량이 저분자화 되는 것으로 나타났으며, MW 1,000 이하의 물질 또한 오존과의 반응이 상당부분

이루어지고 있음을 고찰 할 수 있었다. 또한 오존 투입량 증가에 따른 자연유기물질의 산화 분해와의 상관성은 크게 나타나고 있지 않음을 보여주고 있다.

4.3. 응집 후 오존처리에 따른 흡착능 평가

Table 2에서는 원수, 기존 응집 후 그리고 강화된 응집 후 처리수를 대상으로 오존 처리하여 등온흡착 실험 결과와 IAST를 사용하여 모사한 결과를 나타내고 있다. 본 실험에서는 NOM을 총 4가지로 구분하여 흡착이 안되는 물질, 약하게 흡착되는 물질, 중간 정도의 흡착물질, 그리고 강하게 흡착되는 물질로 구분하여 데이터를 분석 평가 하였다. 이러한 방법은 trial-error법을 이용하여 error값이 최소화되는 Optimized K값의 조합을 찾는 방법이다. 따라서 이러한 방법은 비슷한 error percent를 나타내어 서로 다른 조합을 가질 수 있지만 이는 전체적인 K값의 조합에는 커다란 영향을 미치지 않는다. 따라서 본 실험에서는 원수와 기존 그리고 강화된 응집한 처리수를 대상으로 오존 처리시 각각의 Optimized K값을 도출하여 이에 따른 흡착능 평가를 실시하였다. K값이 0을 나타내는 것은 흡착이 안되는 물질로 원수와 기존응집 그리고 강화된 응집 후 오존농도 1.0 그리고 2.0mg/L에 대하여 23.83~29.47%를 차지하고 있었으나 실질적으로 흡착이 되지 않는 초기농도는 오존농도에 따라서 큰 차이를 나타내지 않았다. 약하게 흡착되는 물질을 나타내는 K값은 2에서 5를 나타내었으며, 비율적 측면에서는 2.61에서 6.90을 나타내어 전체적으로 비율이 낮게 나타나고 있다. 중간세기로 흡착되는 물질을 나타내는 K값의 조합은 8.0에서 11.0을 나타내고 있으며 오존농도 1.0과 2.0mg/L에서도 큰 차이를 나타내지 않고 있다. 또한 강하게 흡착되는 물질을 나타내는 K값의 조합을 살펴본 결과 원수에 오존농도 1.0 그리고 2.0mg/L에서 31.0과 22.0을 나타내었으며, 강화된 응집 후 오존처리 결과에서는 51.5와 45.0을 나타내어 상대적으로 강화된 응집후 오존 처리시 강하게 흡착되는 부분이 증가한 것으로 나타났다. 또한 강하게 흡착되는 물질의 비율은 강화된 응집 후 오존 처리시 가장 높게 나타났으나, K값 측면에서는 기존응집과 강화된 응집에서 큰 차이를 나타내지 않았다. 이는 기존응집과 강화된 응집을 통하여 어떠한 특정한 물질을 흡착가능하게 전

Table 2. Result of IAST simulation on optimized K of ozonated water

Water	Raw water-ozone 1.0mg/L (C ₀ = 1.43mg/L)				Raw water-ozone 2.0mg/L (C ₀ = 1.36mg/L)			
K _i values	Optimized K(Error = 1.08%)				Optimized K(Error = 1.23%)			
	0	2.0	9.2	31.0	0	2.0	8.0	22.0
C _{0j} (mg/L)	0.34	0.08	0.35	0.66	0.32	0.04	0.13	0.87
C _{0j} (%)	24.98	5.73	24.32	45.97	23.83	2.61	9.52	64.03

Water	Raw water-ozone 1.0mg/L (C ₀ = 1.34mg/L)				Raw water-ozone 2.0mg/L (C ₀ = 1.20mg/L)			
K _i values	Optimized K(Error = 1.56%)				Optimized K(Error = 1.90%)			
	0	2.0	10.0	45.0	0	2.0	11.0	41.0
C _{0j} (mg/L)	0.33	0.02	0.48	0.50	0.34	0.01	0.30	0.56
C _{0j} (%)	24.79	1.59	35.99	37.63	28.02	0.92	24.68	46.37

Water	Raw water-ozone 1.0mg/L (C ₀ = 1.13mg/L)				Raw water-ozone 2.0mg/L (C ₀ = 1.02mg/L)			
K _i values	Optimized K(Error = 0.96%)				Optimized K(Error = 1.48%)			
	0	5.0	11.0	51.5	0	2.7	11.0	45.0
C _{0j} (mg/L)	0.33	0.05	0.19	0.56	0.30	0.07	0.15	0.51
C _{0j} (%)	29.47	4.05	16.91	49.57	29.21	6.90	14.18	49.70

*A.C.: Activated carbon *K = (mg/g)(L/mg)n, n = 0.2

환 시킨다기보다는 전체적으로 오존처리와 응집을 통하여 초기농도를 낮춰 흡착능을 증가시켰다고 사료되어진다. 또한 분자량 분포와 강하게 흡착되는 부분에서의 상관관계를 고찰해 볼 때 원수에 오존처리를 한 경우 강하게 흡착되는 물질과 중간세기로 흡착되는 물질의 비율이 약 70~74%를 나타내었고, 분자량 분포특성에서 MW 10,000보다 작은 물질이 80%로 유사하게 나타났고, 기존응집과 강화된 응집에서도 비슷한 경향을 나타내고 있어 중간세기와 강하게 흡착되는 물질과 MW 10,000 이하의 물질과 상관관계가 있음을 보여주고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 원수, 기존응집 그리고 강화된 응집 후 분자량 분포특성을 평가하고 각 처리수를 대상으로 오존처리 후 NOM의 분자량 분포특성과 오존농도에 따른 흡착능 평가를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 원수와 기존응집의 경우 DOC농도와 분자량분포 측면에서는 큰 차이를 나타내지 않았으나 원수와

강화된 응집을 비교 평가한 결과 MW 10,000 이상의 물질이 강화된 응집에서 약 50% 그리고 MW 1,000 이하의 물질이 약 5% 감소하는 경향을 나타내었다.

2. 원수, 기존응집 그리고 강화된 응집 후 오존처리 하여 분자량 분포 특성을 고찰한 결과 원수와 기존응집 처리수를 대상으로 오존처리 한 경우 MW 10,000 이상의 물질이 약 72~73%감소한 반면, MW 1,000 이상~10,000 이하의 물질이 약 50% 정도 증가하였다. 또한 강화된 응집 후 처리수를 대상으로 오존처리 한 경우 MW 10,000 이상과 1,000 이하의 물질이 약 20~30%의 감소를 나타내었으며, MW 1,000 이상~10,000 이하의 물질에서 약 10% 정도 증가되는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 자연유기물질(NOM)이 원수와 기존응집과 달리 강화된 응집을 통하여 MW 10,000 이상의 물질에 대해 상대적으로 우수한 제거특성을 보여 오존처리를 통한 분자량 분획분포에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 사료되어지며, 오존 처리시 자연유기물질(NOM)의 분해에 영향을 주는 MW는 10,000 이상의 물질이고 오존 투입량 증가에 따른 자연유기물질(NOM)과의 산화 또는 분해의 상관성은 크게 나타나지 않았다.

3. 오존농도 1.0 그리고 2.0mg/L에 대한 원수, 기

존응집 그리고 강화된 응집에서의 흡착능을 평가한 결과 기존응집과 강화된 응집에서의 오존 처리시 흡착능 증가는 크게 나타나지 않았다. 다만 오존처리를 통하여 분자량 분포와 강하게 흡착되는 물질의 상관관계 측면에서는 MW 1,000 이하 그리고 1,000 이상 ~10,000 이하의 물질과 강하게 흡착되는 물질과 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 숭실대학교 교내 연구비 지원으로 이루어 졌음.

참고문헌

홍성호, 김성진, 오현제 (2003) 강화된 응집이 활성탄에 미치는 영향, *상하수도학회지*, 17(3), pp.517-527.
Crozes, G., White P. and Marshall, M. (1995) Enhanced Coagulation: its Effect on NOM Removal and Chemical cost, *J. AWWA.*, 87(1), pp.78-89

William, J, Reavis. Jim Greenlee (2002) Enhanced Coagulation Doesn't have to break the bank, *J. AWWA.*, - Water Quality Technology Conference.
J.K. Edzwald (1993) Coagulation drinking water treatment: particle organics and coagulation, *Wat. Sci. Tech.*, 27(11), pp.21-35.
M. Rebhun and M. Lurie (1993) Control of organic matter by coagulation and floc separation, *Wat. Sci. Tech.*, 27(11), pp.1-20.
P.C. Chiang, E.E Chang (2002) NOM characteristics and treatabilities of ozonation processes, *Chemosphere* 46(2002) pp.929-936.
Hong, S.H. (1995) Activated carbon adsorption of organic matter backwashing, desorption and attenuation, Ph. D. Dissertation, Univ. of Cincinnati, Ohio.
Semmens, M.J., Staples, A.B., Hohenstein, G., and Norgaard, G.E. (1986) Influence of coagulation on removal of organics by granular activated carbon, *J. of AWWA.*, 78(8), pp.80-84.
EPA, ICR Manual for Bench-and Pilot-Scale Treatment Studies, U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati, OH 45268.