

응집공정에서 혼합응집제 주입에 의한 자연유기물질의 제거

명복태[†] · 우달식 · 최종현 · 이윤진 * · 남상호 *

(재) 한국계면공학연구소 수질환경연구부

* 건국대학교 환경공학과

Removal of Natural Organic Matter by Mixing Coagulants in Coagulation Process

Bok Tae Myung[†], Dal Sik Woo, Jong Heon Choi
Yoon Jin Lee* and Sang Ho Nam*

Department of Water Environment Research, Korea Interfacial Science and
Engineering Institute

* Department of Environmental Engineering, Kon-Kuk University

(Received 9 April 2001; Accepted 21 May 2001)

ABSTRACT

Natural organic matters(NOMs) are found everywhere such as soil, surface and ground waters and consist of both humic and nonhumic components, and their heterogeneity makes each source unique. This study was carried to evaluate the removal characteristics of NOMs by mixing coagulants and the variation of apparent molecular weight distribution(AMWD) in coagulation process.

Ratio of optimum coagulants dosage for removal of DOC and turbidity by mixing coagulants was 1.83 mM Fe³⁺/mM Al³⁺. DOC removal increased at lower pH. The pH6 control focused on the removal of organic matters could reduce the amount of coagulant consumption by 2 to 3 times based on the pH8.5 of natural water. The dissolved organic matters in the natural water from the mid-stream of Han River were composed of the low molecular weight(LMW, <1 K) of 59.7%, and the medium and high molecular weight(M · HMW, 1~30 K) of 40.3%, respectively. At pH6, the DOC removal efficiencies of LMW(<1 K) and M · HMW(1~30 K) in coagulation process were 27~35%, 62~72%, respectively. The fraction smaller than 1 K was not eliminated to a noticeable degree, while the fraction of 1~30 K was relatively well removed. In conclusion, mixing coagulants were fairly effective in the removal of natural organic matter.

Keywords : NOM, THMs, HAAs, AMWD(Apparent Molecular Weight Distribution)

I. 서 론

상수원수내에 존재하는 자연유기물질(Natural Organic Matters, NOMs)들은 수없이 많은데 이중 대표적인 것은 탄수화물, 단백질, 지방 그리고 유지 등이다. 자연발생적인 유기물의 종류는 크게 육상 및 수중생물을 포함한 생물체 유기물과 토양 유기물로 분류되며, 이러한 물질이 수계에 유입되어 오염된다. 자연유기물질은 크기에 따라 입자상유기물질

(Particulate Organic Carbon, POC)과 용존유기물질(Dissolved Organic Carbon, DOC)로 나눌 수 있다.^{1,2)} DOC의 주성분은 휴믹물질(humic substance)이라고 하는 고분자 물질로서 NOM의 대부분을 차지하는데, 이러한 휴믹물질이 정수처리공정에서 제거되지 않으면 병원성 미생물의 소독을 목적으로 주입하는 염소와 반응하여 할로겐화된 소독부산물인 THMs(Trihalomethanes), HAAs(Haloacetic acids)와 같은 발암성물질들을 발생시키므로 정수처리에서 자연유기물질의 제거가 매우 중요한 현안으로 대두되고 있다.^{3~5)}

자연유기물질을 제거하기 위한 공정으로는 향상응집(enhanced coagulation), 활성탄 흡착, 오존+생물

[†]Corresponding author : Department of Water Environment Research, KISEI, Seoul.

Tel : 02-579-7212, Fax : 02-579-7213
E-mail : myungb@hanmail.net

처리, 막분리 등이 있다.^{5,6)} 용존유기물질은 응집제와 물리화학적으로 결합하여 제거될 수 있으나 기존의 정수처리공정에서는 제대로 제거되지 않는다.⁷⁾ 미국 연방환경청(USEPA)에서는 소독 및 소독부산물법(D/DBPs)의 하위 강화되고 있는 음용수 수질기준에 충족시킬 수 있도록 기존의 응집공정에서 소독부산물의 전구물질인 용존유기물질을 제거하도록 하는 향상응집에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{6~8)} 국내의 응집분야에 관한 연구는 혼화·응집에서의 혼화강도와 같은 물리적인 측면에서의 이론적 연구^{9,10)}, 기존공정개선¹¹⁾ 그리고 응집제의 성능평가 및 응집제 주입방법에 관한 연구¹²⁾가 있었다. 최근 응집공정에서 용존유기물질 제거에 관한 관심이 급증하면서 국내 수질에 적합한 새로운 응집제 개발연구도 진행되고 있다.¹³⁾

본 연구에서는 유기물질로 인해 상수원이 계속 악화되고 있는 국내실정을 감안하여, 자연유기물질을 효과적으로 제거하기 위해 혼합응집제를 이용한 응집공정의 영향인자를 평가하였고, 동시에 응집처리 시 용존유기물질의 분자량분포 변화를 고찰하였다.

II. 실험재료 및 방법

1. 실험재료 및 장치

1) 시료

본 실험에서의 대상시료는 인공시료와 자연시료를 사용하였다. 인공시료는 탁도유발물질인 kaolin(Junsei Chemical, Japan)과 humic acid(東京化學工業株式會社, Japan)를 초순수에 혼합하여 조제하였으며, 알칼리도와 경도는 자연시료와 비슷한 조건에서 실험하기 위하여 각각 NaHCO₃, MgCl₂ · 7H₂O을 사용하여 모두 50 mg CaCO₃/l로 조정하였다. 원수의 pH조절은 0.1 N NaOH와 0.1 N H₂SO₄ 용액을 사용하였다. 자연시료는 한강수계인 영동대교 상류지점의 상수원수로써 임의채취(grab sampling)방법으로

채수하였으며, 수질특성은 Table 1과 같다.

2) 응집제

본 연구에서 이용된 응집제는 무기응집제로서 고체 황산알루미늄(Al₂(SO₄)₃ · 14H₂O, 이하 alum이라 칭함)과 염화제2철(FeCl₃, 이하 F.C라 칭함)을 사용하였으며, 각각의 응집제를 중류수에 녹여 1%의 표준용액(10 g/l)을 만들어서 사용하였다. 이 용액 1 ml은 각각 10 mg Al₂(SO₄)₃ · 14H₂O, 10 mg FeCl₃을 포함하고 있으며, 무게비로 환산하면 0.91 mgAl/l 와 3.44 mgFe/l이다.

3) 실험장치

본 실험에서는 응집실험을 위해 Jar tester와 용존유기물질의 분자량분포 측정을 위해 한외여과장치를 사용하였다.

Jar tester는 Hudson¹⁴⁾의 연구에 사용했던 것과 같은 재원으로 너비 2 cm, 길이 8 cm인 사각 임펠러가 설치되었으며, 11.5 cm × 11.5 cm × 21 cm의 총 용량 2l인 4각 형상의 Jar를 사용하였다. Jar의 재질은 내부 관찰을 위해 아크릴로 제작하였으며, 시료의 혼합효과를 높이기 위해 폭이 10 mm인 정류벽(baffle)을 수직으로 Jar의 4벽면에 부착하였다. 또한 시료의 채수를 용이하게 하기 위해 수면 5 cm 하단에 시료 채취구를 설치하였다.

한외여과장치(Amicon Model 8200)는 Fig. 1과 같다. 한외여과막(UF membrane)은 친수성이며, 재질은 cellulose acetate이고, 규격은 YC05(0.5K MWCO), YM1(1K MWCO), YM3(3K MWCO), YM10(10K MWCO), YM30(30K MWCO)이었다. 본 연구에서는 편의상 저분자량(1 K이하), 중분자량(1~10 K), 고분자량(10 K이상)을 LMW(Low Molecular Weight), MMW(Medium Molecular Weight), HMW(High Molecular Weight)로 표기하였다. 막의 직경은 62 mm이고, 표면적은 27 cm²이다. 여과방법은 한외여과셀(UF cell)에 시료를 넣고 불활성 순수질소를 이용하여 55 psi로 가압하였으며,

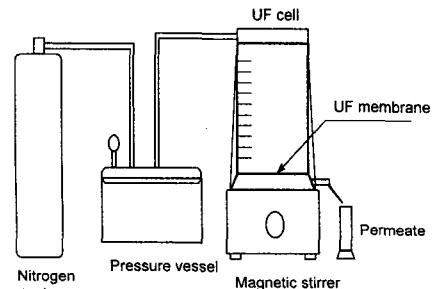


Fig. 1. Experimental apparatus for the AMWD analysis.

Table 2. Experimental conditions

Items		Experimental conditions
Mixing Coagulants dose		30 mg/l
Input methods of mixing coagulants	Time difference(15 sec) input	F.C/Alum : Alum→Ferric Chloride(F.C) Alum/F.C : Ferric Chloride(F.C)→Alum
	Simultaneous input	Alum+Ferric Chloride(F.C)
Operating methods of jar tester	Rapid mix	120 rpm for 1 min
	Slow mix	20 rpm for 20 min
	Settling time	30 min

농도분극을 감소시키기 위해 전자식교반기(magnetic stirrer)로 일정하게 교반하였다. 일정한 압력하에서 여과막을 통과한 시료는 산처리와 열처리를 한 vial로 채취하였다. 한외여과장치로 여과하기 전에 모든 시료는 부유물질에 의한 막의 손상을 최소화하기 위하여 $0.45\mu\text{m}$ membrane으로 여과하였다.

2. 실험방법

1) 실험조건

실험은 혼합응집제의 주입순서를 결정하기 위하여 황산알루미늄(alum)과 염화제2철(ferric chloride, F.C.)을 3가지 방법으로 혼합 주입하였으며, 혼합응집제(F.C/Alum)의 최적주입비를 결정하기 위하여 F.C/Alum비를 0에서 4까지 변화시키면서 응집실험을 수행하였다. 혼합응집제의 주입방법과 실험조건은 Table. 2와 같다.

2) 분석방법

탁도는 탁도계(HACH Model 2100A)를 이용하여 측정하였다. UV₂₅₄흡광도는 시료를 $0.45\mu\text{m}$ pore size의 PVDF(Polyvinylidene Fluoride) 여과로 여과한 후 10 mm cell로 UV-Visible Spectrophotometer(Shimadzu Model UV-1601)를 이용하여 파장 254 nm에서 측정하였다.

DOC는 시료를 $0.45\mu\text{m}$ pore size의 PVDF(Polyvinylidene Fluoride) 여과로 여과한 후 Table

3와 같은 운전조건에서 TOC analyzer(Shimadzu Model TOC 5000)로 측정하였다.

SUVA(Specific UV Absorbance)¹⁷⁾는 UV_{254} 흡광도와 DOC를 이용하여 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{SUVA}(\text{m}^{-1}/\text{mg C/l}) = (\text{UVA}/\text{DOC}) \times 100$$

III. 결과 및 고찰

1. 혼합응집제의 주입순서 및 최적주입비 결정

혼합응집제의 주입순서를 결정하기 위하여 pH7, 온도 20°C의 조건하에서 alum과 ferric chloride를 3 가지 방법으로 혼합주입하여 응집실험한 결과는 Fig. 3과 같다.

혼합응집제 Alum/F.C, F.C/Alum, Alum+F.C에 의한 DOC와 탁도의 제거율은 각각 39.5, 44.5, 41.5%와 91.5, 95.4, 93.5%로 응집제의 주입순서에 따른 유기물질의 제거율은 그다지 큰 차이가 없었다. 단지 시차를 두어 주입(F.C/Alum)한 경우가 동시주입(Alum+F.C)과 시차주입(Alum/F.C)보다 DOC와 탁도제거율면에서 각각 3~5%, 2~4%정도 우수하였다.

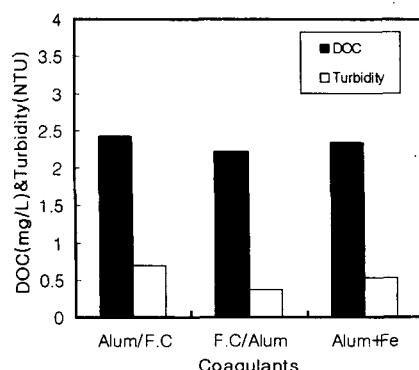


Fig. 3. Removal of DOC and turbidity by simultaneous and time difference input of alum and ferric chloride(Coagulants dose 30 mg/l, 8 NTU, DOC 4 mg/l, Alk. 50 mg/l).

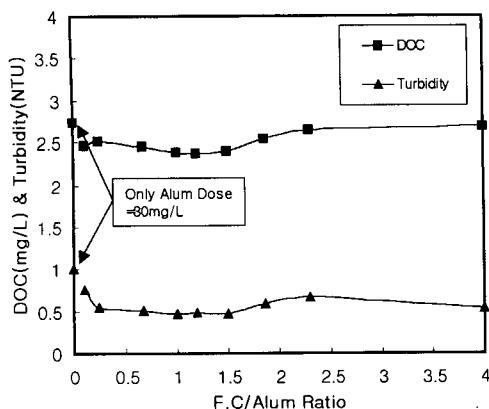


Fig. 4. Ratio of optimum coagulants dosage for the removal of DOC and turbidity by mixing coagulants (pH 7, 10 NTU, DOC 4.45 mg/l, Temp. 21°C, Alk. 50 mg/l).

다. 이는 응집제의 밀도(Alum 610~1200 kg/m³, F.C 1360~1440 kg/m³)와 응집에 의해서 생성된 floc의 침강속도와 밀접한 관계가 있는 것으로 사료된다. 즉, 응집력이 우수한 alum이 우선 수중의 혼탁물질을 응집시켜 미세floc를 형성하고, 그 이후 분자량이 크고 침강속도가 빠른 철염 응집제가 alum에 의해 생성된 미세floc를 응집·침전시키기 때문에 제거효율이 우수한 것으로 생각된다. 따라서, 혼합응집제의 주입방법 중 비교우위에 있는 alum를 주입한 다음 15초 후 ferric chloride를 주입한 F.C/Alum방법을 선정하여 이후 실험을 실시하였다.

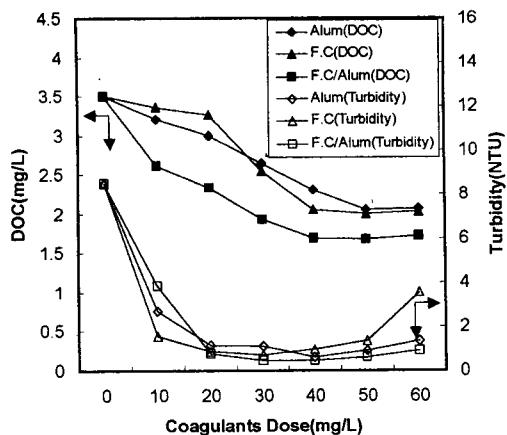
Fig. 4는 혼합응집제(F.C/Alum)의 비에 따른 유기물질의 제거효율을 나타낸 것이다.

30 mg/l의 혼합응집제(F.C/Alum)를 주입하여 유기물질의 제거효율을 고려할 때 최적주입비는 1로 나타났으며, 이때 몰비는 1.83 mM Fe³⁺/mM Al³⁺이었다. F.C/Alum비가 1에서 DOC와 탁도 제거가 가장 우수하였으며, 1이상으로 증가함에 따라 DOC와 탁도 제거효율은 감소하는 경향을 나타내었다.

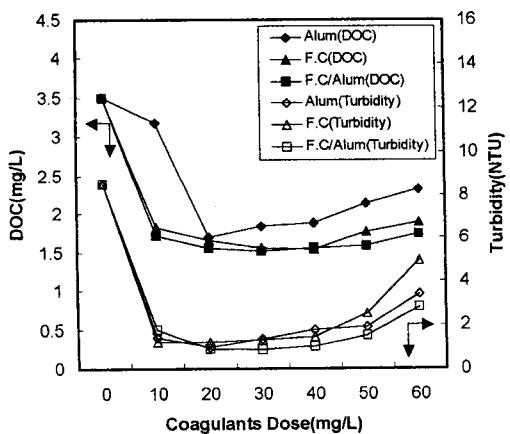
혼합응집제의 최적주입비가 1일 때 DOC와 탁도의 제거율은 각각 46, 95%로 alum를 단독으로 주입한 경우 보다 각각 8, 5.5%정도 우수하였다. 이는 Fe계 응집제의 경우에는 응집 pH의 영역이 넓고 분자량이 크므로 침전속도가 빠르고, Al계 응집제는 응집력이 우수하므로 Al-Fe계 혼합응집제를 사용할 경우에 두 응집제의 장점을 모두 살릴 수 있어 시너지효과를 나타낸 것으로 판단된다.

2. 응집의 영향인자 고찰

1) 응집제 주입량



(a) pH 8.5



(b) pH 6.5

Fig. 5. Effects of coagulants dosage and pH control on DOC and turbidity removal (pH 8.5, 8.5 NTU, DOC 3.5 mg/l, Temp. 25°C, Alk. 55 mg/l, UV₂₅₄ 7.8 m⁻¹).

pH를 8.5와 6.5로 조정한 후 응집제 주입량에 따른 유기물질의 변화 특성은 Fig. 5와 같다.

pH를 6.5로 조정한 후 혼합응집제(F.C/Alum)를 주입한 경우 alum과 ferric chloride를 단독으로 주입한 경우에 비해 DOC제거율은 2~6%, 탁도제거율은 1~4%정도 우수하였다. pH 8.5(자연수)에서 혼합응집제(F.C/Alum)를 주입한 경우에 alum과 ferric chloride를 단독으로 주입한 경우 보다 DOC제거율은 9~10%, 탁도제거율은 2~4%정도 우수하였다.

pH 8.5에서 응집제 주입량은 탁도물질의 제거에 비해 용존유기물질의 제거시 더 많이 소요되었다. 이는 용존유기물질이 탁도물질에 비해 높은 전하를 띠고 있으므로, 이들을 전하중화하기 위해서는 응집제가

비교적 높은 전하를 띠어야 하기 때문인 것으로 사료된다.

pH8.5에서 DOC와 탁도 제거를 위한 최적응집제 주입량은 각각 50 mg/l, 40 mg/l이었고, pH6.5에서 30 mg/l, 20 mg/l로 pH8.5와 비교해서 응집제주입량이 2~3배 감소하였다. 최적응집제 주입량보다 많이 주입하면 오히려 유기물질 제거율은 낮아졌다. 이러한 이유는 양전하를 띤 응집제에 의해 음전하를 띤 유기물질의 표면전하가 중화되어 입자간의 인력이 발생되므로 결과적으로 응집이 효과적으로 일어나지 만, 응집제를 과도하게 주입하면 양전하(Al^{3+} , Al(OH)^{2+} , Fe^{3+} , Fe(OH)^{2+})를 띤 응집종의 수가 증가하여 입자표면의 임계제타포텐셜이 양의 전하를 띠게 되어 오히려 입자간의 반발력이 유도되므로 응집효율이 감소한 것으로 판단된다.

2) 온도

응집공정에서 응집효율에 가장 큰 영향을 미치는 인자중의 하나는 처리수의 수온이다. 온도는 알루미늄과 철의 용해도 변화와 같은 화학적인 변화뿐만 아니라 물에서 입자의 밀도, 점도와 같은 물리적인 변화를 일으키기도 한다.

Fig. 6은 온도변화에 따른 유기물질의 제거특성을 고찰하기 위하여 pH7의 조건하에서 수온을 10, 20, 27.5°C로 변화시키면서 응집제 종류에 따른 유기물질의 변화를 관찰한 것이다.

3종류의 응집제를 10°C의 원수에 주입하였을 때 원수는 상당히 현탁되었으며, floc의 형성 유무도 즉시 확인되지 않았다. 완속교반시에도 초기 급속교반시 생성되었던 미세한 크기의 floc과 비슷하였다. 응

집·침전후 상등수의 투명도는 수온의 증가와 함께 점차 향상되었다. Morris와 Knocke^[15]는 낮은 온도에서 생성된 floc입자는 실온에서 생성된 입자보다 온도의 영향을 많이 받아 입자크기가 작다고 보고한 바 있는데, 본 연구에서도 이러한 경향을 보였다.

3종류의 응집제 모두 온도 증가에 따라 유기물질의 응집성능은 향상되는 경향을 보였다. 즉, pH7과 10, 20, 27.5°C의 조건에서 30 mg/l의 혼합응집제(F.C/Alum)를 주입시 DOC는 2.44, 2.01, 1.98 mg/L이었고, 탁도는 1.25, 0.61, 0.6 NTU를 나타내었다. 이러한 결과는 수온이 증가함에 따라 알루미늄과 철의 용해도가 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

3) pH

Fig. 7은 20°C의 온도 조건하에서 pH를 5.5, 6, 7로 변화시키면서 응집제 종류별 유기물질의 변화를 관찰한 것이다.

3종류의 응집제 모두 pH가 증가함에 따라 DOC제거율은 점차 감소하였으나 탁도제거율은 오히려 증가하는 경향을 보였다. 이는 용존유기물질이 탁도물질에 비해서 높은 음전하를 띠고 있으므로 이들을 전하중화하기 위해 응집제는 비교적 높은 양전하를 띠어야 되고, 또한 용존유기물질의 음전하가 감소되기 위해서는 낮은 pH범위가 유리하기 때문인 것으로 생각된다.

pH5.5와 20°C의 실험조건에서 ferric chloride을 주입한 경우 alum과 혼합응집제보다 전류탁도가 월등히 높았으며 처리수에서 붉은 색을 띠는 적수현상을 초래하였다. 이는 ferric chloride의 최적 응집 pH 범위인 8에 훨씬 미치지 못했기 때문으로 생각된다.

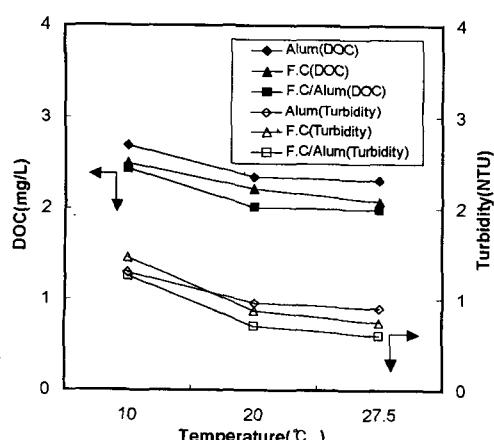


Fig. 6. Effect of temperature on DOC and turbidity removal at pH7(Coagulant dose 30 mg/l, 5.7 NTU, DOC 3.1 mg/l, Alka. 72 mg/l, UV₂₅₄ 4.2 m⁻¹).

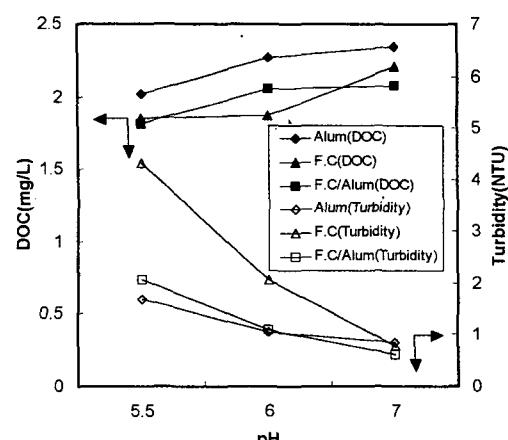


Fig. 7. Effect of pH on DOC and turbidity removal at 20°C (Coagulant dose 30 mg/l, 5.7 NTU, DOC 3.1 mg/l, Alka. 72 mg/l, UV₂₅₄ 4.2 m⁻¹).

3. 응집처리시 유기물질의 분자량 분포 변화

Fig. 8은 자연수중에 존재하는 유기물의 정량적 특성을 파악하기 위해 한외여과 장치를 이용하여 응집 전·후 용존유기물질의 분자량 분포 변화를 측정한 것이다.

한강원수의 용존유기물질 분자량 분포는 1K이하(저분자량), 1~10 K(중분자량), 10 K이상(고분자량)이 각각 59.7, 22.3, 18%로 저분자량이 높게 분포

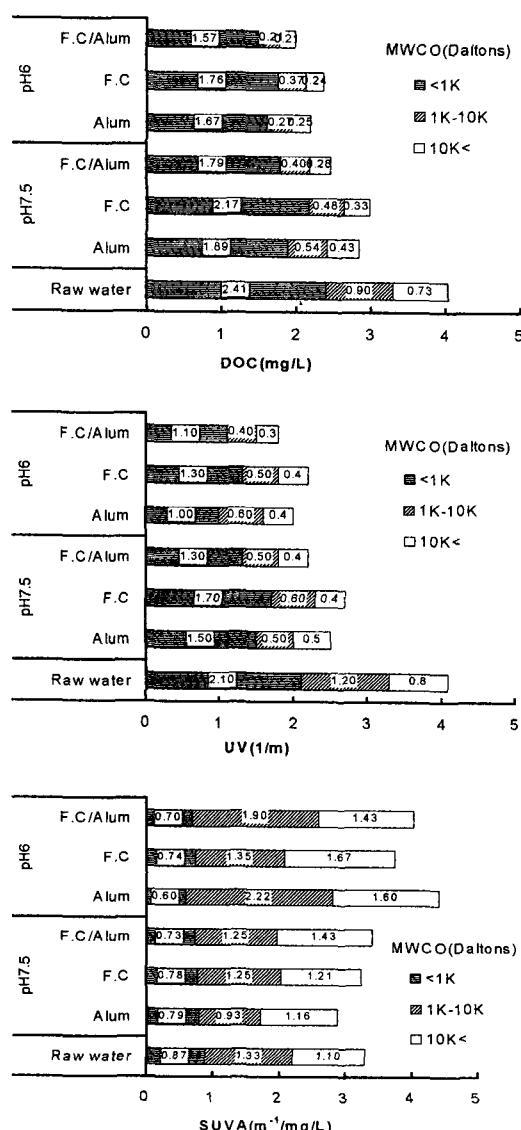


Fig. 8. Molecular weight distribution before and after coagulation at pH7.5 and pH6(Coagulant dose 30 mg/l, 6.5 NTU, DOC 4.04 mg/l, Temp. 23°C, Alk. 66 mg/l, UV₂₅₄ 4.1 m⁻¹).

하고 있는 반면에 중·고분자량은 상대적으로 낮게 분포하였다.

응집·침전후 1 K이하인 저분자량의 경우 DOC제거율은 pH7.5에서 10~25%이었으며, pH6에서는 27~35%이었다. 1~30 K사이의 중·고분자량의 경우 pH7.5와 pH6에서 각각 40~58%, 62~74%의 DOC제거율을 보였다. 이와 같이 중·고분자량에 비해서 저분자량의 DOC제거율이 낮게 나타났는데, 이는 Gary와 Amy¹⁶⁾의 연구에서 분자량이 5~10 K사이에는 화학적 응집 및 침전으로 잘 제거되지만 1 K이하의 저분자량의 물질은 잘 제거되지 않은 경우와 일치하는 것이다. 따라서 1 K이하의 저분자량 물질은 물리·화학적으로 안정하여 잘 분해가 되지 않으며 친수성이 강하기 때문에 응집침전이나 흡착에 의해서 제거하기가 어려울 것으로 생각된다.

원수의 SUVA(m⁻¹/mgC/l) 값은 저분자량(1 K이하), 중분자량(1~10 K), 고분자량(10~30 K)에서 각각 0.87, 1.33, 1.10로 나타났으며, 저분자량(1 K이하)에서의 SUVA값이 중·고분자량에 비해 상대적으로 낮았다. Edzwald¹⁷⁾에 따르면 SUVA값이 3이하인 경우에는 높은 4~5의 SUVA값과 비교하여 상대적으로 친수성, 비방향족, 저분자량을 갖으며 응집에 의해 잘 제거되지 않는다고 보고한 바 있다. 본 실험에서도 1 K이하의 저분자량은 응집·침전에 의하여 잘 제거되지 않았다.

IV. 결 론

본 연구는 유기물질로 인해 상수원이 계속 악화되고 있는 국내실정을 감안하여, 혼합응집제를 사용하여 자연수내에 존재하는 탁도물질과 THMs, HAAs 등의 전구물질인 용존유기물질 제거에 영향을 미치는 인자들을 평가함과 동시에 유기물질의 분자량·분포 특성을 고찰한 결과 연구로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 혼합응집제(F.C/Alum)의 최적주입비는 1(1.83 mM Fe³⁺/mM Al³⁺)이었으며, 이 때 DOC와 탁도의 제거율은 각각 46, 95%로 alum과 ferric chloride를 단독으로 주입한 경우 보다 DOC는 8%, 탁도는 5.5% 정도 높은 제거율을 보였다.

2. 응집공정에서 alum과 ferric chloride의 혼합주입방법에 따라 응집실험을 한 결과 alum을 주입한 다음 ferric chloride를 주입한 F.C/Alum방법이 다른 방법에 비해 우수하였다.

3. pH8.5에서 DOC와 탁도의 최적응집제 주입량은

각각 50 mg/l, 40 mg/l이고, pH 6.5에서 30 mg/l, 20 mg/l로 pH 8.5와 비교해서 응집제주입량이 2~3배 감소하였다.

4. 20°C의 온도에서 pH가 증가함에 따라 DOC제거율은 점차적으로 감소한 반면에 탁도제거율은 오히려 증가하였다.

5. 한강원수의 분자량 분포별 DOC는 저분자량(<1 K이하)이 59.7%, 중·고분자량(1~30 K)이 40.3%로 저분자량이 높게 분포하였다. 응집 전·후 유기물질의 분자량분포를 고찰한 결과, pH를 6으로 조절한 경우 저분자량과 중·고분자량의 DOC제거율은 각각 27~35%, 62~74%으로 저분자량은 응집·침전에 의해 잘 제거되지 않음을 확인하였다.

참고 문헌

- 1) Thurman, E. N. : *Organic geochemistry of natural waters*, Dordrecht, Nijhoff/Junk Publishers, Netherlands, 1985.
- 2) Schenitzer, M and Kahn, S. U. : *Humic substance in the environment*, Marcel Dekker, Inc., New York, 1996.
- 3) Hooper, S. M. : Improving GAC performance by optimized coagulation, *J. AWWA*, **88**(9), 107-120, 1996.
- 4) Crozes, G., White, P. and Marshall, M. : Enhanced coagulation-its effect on NOM removal and chemical costs, *J. AWWA*, **87**(1), 78-89, 1995.
- 5) 황정은, 강임석, 김승현, 윤조희 : 정수공정별 천연유기물질의 특성 변화, *대한환경공학회지*, **22**(7), 1254-1261, 2000.
- 6) Mark, M., John, M. and Gail, C. : Optimization of particulate removal under enhanced coagulation conditions, *J. AWWA*, **87**(5), 1011-1020, 1995.
- 7) Sandrucci, P., Merlo, G., Genon, G. and Meucci, L. : PAC activity vs by-product precursors in water disinfection, *Wat. Res.*, **29**(10), 2299-2308, 1995.
- 8) Najm, I. N., Snoeyink, V. L., Lykins, B. W. and Adams, J. Q. : Using powdered activated carbon-a critical review, *J. AWWA*, **83**(3), 65-72, 1991.
- 9) 한무영 : 응집이론(I)-수리동력학과 입자간의 작용력을 고려한 응집모델, *대한상하수도학회지*, **9**(3), 65-77, 1995.
- 10) 한무영 : 응집이론(II)-플록형성에서의 G값의 의의, *대한상하수도학회지*, **9**(4), 63-72, 1995.
- 11) 최계운, 곽창호, 김량 : 응집교반강도 및 침전지 물류부하율 개선을 통한 기존 정수장의 정수처리 능력 향상, *대한상하수도학회*, **8**(2), 43-52, 1994.
- 12) 김동수, 조경숙, 이종복 : 알루미늄에 수처리 응집 제 적용시의 부유물질 응집거동에 관한 연구, *한국수처리기술연구회지*, **5**(1), 31-43, 1997.
- 13) 황보봉형, 한승우, 류동춘, 류재익, 강임석 : 상수 처리시 PACI 응집제의 특성 및 기타 Al(III)계와의 응집특성 비교, 1997년 대한환경공학회 추계 학술발표회 논문초록집, 253-256, 1997.
- 14) Hudson, H. E. : *Water clarification processes practical design and evaluation*, Litton Education Publishers, Inc., 1-122, 1981.
- 15) Morris, J. K. and Knocke, W. R. : Temperature effects on the use of metal-ion coagulants for water treatment, *J. AWWA*, **76**(3), 74-79, 1984.
- 16) Gary, L., Amy, M. R., Collins, C. J. : Comparing gel permeation chromatography and ultrafiltration for the molecular weight characterization of aquatic organic matter, *J. AWWA*, **79**(1), 43-49, 1987.
- 17) Edzwald, J. K. : Coagulation in drinking water treatment-particles, organic and coagulants, *Wat. Sci. Tech.*, **27**(11), 21-35, 1993.