

고도처리공정이 관로 내 잔류염소 감소 및 THM 생성에 미치는 영향

이두진 · 김영일[†] · 김성수 · 이경혁 · 박현아

한국수자원공사 수자원연구원 상하수도연구소

(2007년 2월 15일 접수, 2007년 3월 29일 채택)

Effect of Advanced Treatment Process for Residual Chlorine Decay and THM Formation in Water Distribution System

Doo-Jin Lee · Young-Il Kim[†] · Sung-Su Kim · Kyung-Hyuk Lee · Hyun-A Park

Water & Wastewater Research Center, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation

ABSTRACT : According to increase of consumer's desire for clean tap water, advanced treatment processes include with membrane, ozone, and granular activated carbon(GAC) were introduced. In order to evaluate the effect of advanced treatment processes for residual chlorine decay and trihalomethane(THM) formation in water distribution system, dissolved organic matter(DOC) removal of each advanced treatment process was investigated. The residual chlorine decay and THM formation using bottle tests were also evaluated. UV₂₅₄ removal in all advanced treatment was better than DOC removal. Especially, DOC by ozone treated was removed as 4% in contrast with sand filtered water, but UV₂₅₄ was removed about 17%. This result might be due to convert from hydrophobic DOC to hydrophilic DOC by ozonation. Ozone/GAC process was most effective process for DOC removal. The residual chlorine decay constants in treated water by sand filtration, ozonation, GAC adsorption, and ozone/GAC processes were 0.0230, 0.0307, 0.0117 and 0.0098 hr⁻¹, respectively. The sand filtered water was produced 81.8 µg/L of THM after 190 hours of reaction time, as the treated water by ozone, GAC, and Ozone/GAC was less produced 6.0, 26.2, 30.3% in contrast with sand filtered water, respectively. Consequently, the durability of residual chlorine and reduction of THM formation were improved by advanced treatment processes.

Key Words : Advanced Treatment Process, Water Distribution System, Dissolved Organic Carbon(DOC), Residual Chlorine, Trihalomethane(THM)

요약 : 깨끗하고 안전한 수돗물에 대한 소비자들의 욕구가 커짐에 따라 막, 오존, 활성탄 등 다양한 고도처리공정이 정수장에 도입되고 있다. 본 연구에서는 고도처리공정의 도입으로 인한 관로 내 잔류염소 감소 및 THM 생성특성에 대하여 살펴보았다. 오존, 활성탄, 오존/GAC 공정별 DOC 제거특성과 bottle test를 이용한 잔류염소 감소 및 THM 생성특성을 평가하였다. 모든 처리공정에서 DOC 제거율보다 UV₂₅₄ 유발물질의 제거율이 우수한 것으로 나타났다. 특히, 오존공정에 의한 DOC 제거율은 기존 모래여과수 대비 약 4%에 불과하였으나, UV₂₅₄는 약 17%로 DOC 제거율보다 훨씬 더 큰 차이를 보였는데, 이는 오존에 의해 소수성 유기물이 친수성 유기물로 변환되었기 때문이다. 오존/GAC 공정이 유기물 제거에 가장 효과적이었으며, 모래여과, 오존, GAC, 그리고 오존/GAC공정을 거친 처리수의 잔류염소 감소계수는 각각 0.0230, 0.0307, 0.0117 그리고 0.0098 hr⁻¹로 나타났으며, 190시간 반응 이후 모래여과수는 THM이 81.8 µg/L 생성된 반면, 오존, GAC, 그리고 오존/GAC의 처리수는 모래여과수에 비해 각각 6.0, 26.2, 30.3% 적게 생성되었다. 결론적으로 고도처리공정에 의해 관로 내 잔류염소의 지속성이 증대되었으며, THM 생성 또한 감소하는 것으로 나타났다.

주제어 : 고도처리공정, 관망시스템, 용존유기탄소, 잔류염소, THM

1. 서 론

상수원수에는 이취미 유발물질, 자연유기물질(natural organic matter, NOM), 합성유기화합물(synthetic organic compound, SOC), 살충제 및 제초제, 색도유발물질, 그리고 소독부산물(disinfection by-product, DBP) 전구물질 등과 같이 다양한 천연 및 합성 유기물질이 존재한다. 이와 같은 유기물질 중에서 NOM은 산화, 응집, 흡착 등과 같은 정수장 단위공정의 효율뿐만 아니라 소독제의 적용과 생물학적 안정도 등을

포함하여 많은 부분에 영향을 미치고 있다. 또한, NOM은 소독제와 반응하여 THM(trihalomethane)과 같은 소독부산물을 생성하는 것으로 알려져 있으며, 이 외에도 관로 내에서의 미생물 재성장, 색도 및 이취미 유발 등에 기여하기도 한다.^{1~4)} 특히, 이러한 소독부산물이 공중보건에 미치는 잠재적인 위험성 때문에 2006년 1월에 미국 환경청(environmental protection agency, EPA)에서는 보다 강화된 2단계 D/DBP 법(stage 2 disinfectant/ disinfection byproduct rule)을 통하여 THM과 HAA를 각각 80 및 60 µg/L 이하로 유지하도록 규제하였다.⁵⁾

기존 재래식공정에서 NOM 제거를 통하여 소독부산물의 생성을 최소화할 수 있는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수

[†] Corresponding author
E-mail: yikimenv@empal.com
Tel: 042-870-7510

Fax: 042-870-7549

있다. 첫째는 2차 소독제인 염소를 사용하기 이전에 비염소 소독제(예를 들면, 오존)를 1차 소독제로 사용하는 것이다. 이러한 방법을 시행하면 정수장의 총 소독능을 일정하게 유지시킬 수 있어 염소 사용량과 DBP 생성을 최소화 할 수 있다. 둘째는 염소소독 이전에 물리화학적 처리방법(응집/침전/여과)을 강화하여 원수에 존재하는 NOM을 제거하는 것이다.⁶⁾ 이러한 방법들은 정수장의 여건에 따라 적용할 수 있는 방법이기 때문에 90년대 중반부터 미국에서는 상수원수에 존재하는 NOM을 효율적으로 제거하기 위해 고울응집(enhanced coagulation)을 이용하여 THM 전구물질을 제거하고자 하는 연구가 진행되었다.^{7,8)} 또한, GAC(granular activated carbon)를 이용한 흡착공정과 오존을 이용한 산화공정, 고도산화공정(advanced oxidation process, AOP), 이들을 조합한 다양한 공정들에 대한 연구도 활발히 진행되었다.⁹⁻¹²⁾ 최근 국내에서도 원수수질에 대한 우려와 수도물 품질에 대한 소비자들의 욕구가 높아짐에 따라 기존 처리공정을 고도화하기 위하여 활성탄이나 오존, UV 등을 도입하고 있으며, 향후 더욱 확대될 전망이다.¹³⁾ 따라서 본 연구에서는 국내에 고도처리공정이 도입될 경우 원수 내 유기물의 특성변화에 따라 송수 및 배급수 관망에서 염소의 지속시간이 늘어남을 증명하기 위하여 실험규모 모형플랜트를 대상으로 각 고도처리공정별 유기물 제거특성을 조사하였으며, 각 고도처리공정에 따른 관로 내 잔류염소의 지속성 증대 및 THM 생성감소 등을 평가하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 현장 모형 플랜트 및 실험대상 원수

고도처리에 따른 유기물의 제거특성과 잔류염소의 감소 및 소독부산물의 생성특성을 조사하기 위하여 팔당댐 원수를 취수원으로 사용하고 있는 S정수장의 모형 플랜트를 이용하였다. 실험에 사용된 모형 플랜트는 Fig. 1에서와 같이 50 m³/d 규모의 응집/침전/모래여과의 표준정수처리공정과 8.3 m³/d 규모의 입상활성탄 흡착공정(GAC) 및 13 m³/d 규모의 후오존-입상활성탄(O₃/GAC)으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 모래여과, 후오존, GAC, 그리고 오존/GAC 공정 등을 대상으로 실험을 수행하였다. 후오존공정은 모래여과수에 오존 1 mg O₃/L를 연속적으로 주입하여 오존 접촉조에서 15분간 체류하도록 운전하였으며, 배오존은 각 접촉조 및 반응조의 상부로 배출하여 오존과파기로 이송한 후 제거하였다. Calgon사의 역청탄계 F-400 GAC를 충전한 GAC공정은 공탐체류시간(empty bed contact time, EBCT) 14분, 여과속도 135 m/d로 운전하였으며, 오존/GAC공정은 오존과 GAC공정을 조합하여 운전하였다. 한편, 실험에 사용한 원수의 수온, pH, 알칼리도, DOC, 그리고 UV₂₅₄는 각각 15.0 ± 8.4 °C, 8.0 ± 0.6, 40.3 ± 6.9 mg/L, 1.809 ± 0.274 mg/L, 0.033 ± 0.007 cm⁻¹이었다.

2.2 고도처리공정별 유기물의 제거특성

고도처리공정별 유기물의 제거특성을 알아보기 위하여 모래여과, 오존, GAC, 그리고 오존/GAC공정을 거친 처리수를 대상으로 DOC와 UV₂₅₄를 측정하였다. DOC와 UV₂₅₄는 0.45 μm membrane 여지(Millipore HA type)로 거른 다음 각각 TOC 분석기(Phoenix8000, Dohrmann)와 UV/Vis Spectrophotometer(CARY300, Varian)로 분석하였다.

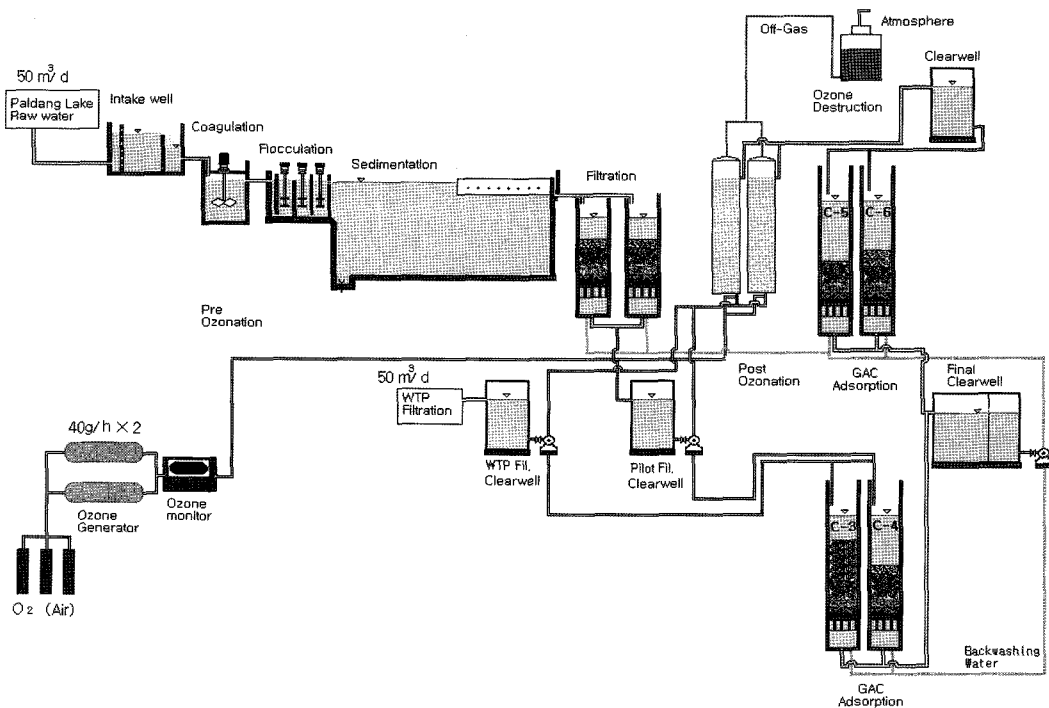


Fig. 1. Schematic diagram of pilot-scale water treatment plant include with advanced treatment processes.

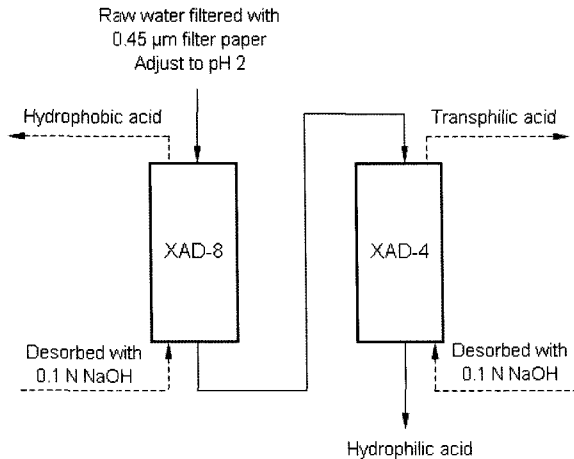


Fig. 2. Diagram of DOM(dissolved organic matter) isolation and fractionation procedure.

2.3. 고도처리공정별 유기물의 분리 및 분할

고도처리공정에 따른 유기물의 분리(isolation) 및 분할(fractionation)을 위하여 Standard Methods의 XAD 수지를 이용한 방법(Method 5510C)으로 분석하였다(APHA, 1998). NOM 분리과정을 통해 유기물을 소수성(hydrophobic DOC, HPO), 반친수성(transphilic DOC, THP), 친수성(hydrophilic DOC, HPI)으로 분류하였다. pH 2 이하로 조절한 시료를 XAD-8과 XAD-4 수지(resin)에 통과시켜 각 수지에 유기물을 흡착시키거나 통과시켜 세 부분으로 분류하였다.¹⁴⁾ HPO는 XAD-8수지에, THP는 XAD-4 수지에 각각 흡착되며, 흡착된 HPO와 THP는 0.1 N NaOH용액으로 추출하였다. 반면, HPI는 XAD-8과 XAD-4 수지에 흡착되지 않는 부분이다(Fig. 2 참조).

2.4. 잔류염소 감소 및 THM 생성

수체반응을 통한 잔류염소 감소를 관찰하기 위하여 Serum bottle(160 mL)과 테프론 코팅이 되어있는 실리콘 마개(20 mm teflon silicon septa, Wheaton), 그리고 알루미늄 캡(20 mm Aluminium seal, Wheaton)을 이용하여 bottle test를 실시하였다.¹⁵⁾ 실험상의 오차를 최소화하기 위하여 실험에 사용한 시료병을 초음파 세척기로 약 1시간 세척한 후 초순수로 깨끗하게 씻은 다음 105°C에서 건조시켰다. 시료병을 대상 시료로 3회 정도 세척한 후 기포가 발생하지 않도록 시료를 병목까지 가득 채웠다. 모든 실험은 온도에 대한 영향을 최소화하기 위하여 20°C 조건에서 수행하였다. 차아염소산나트륨 농도가 160 mg/L인 stock 용액 1 mL를 각각의 bottle에 넣어 잔류염소 농도가 1 mg/L가 되도록 한 다음 incubator에 보관하고 반응시간에 따라 시료를 채취하여 잔류염소 및 THM 농도를 측정하였다. 잔류염소는 시료채취 즉시 Pocket colorimeter(Hach)로 유리염소(free chlorine)를 측정하였으며, THM은 시료 내 존재하는 유기물과 염소와의 반응이 더 이상 일어나지 않도록 아황산나트륨(sodium sulfite, Na₂SO₃) 일정량을 넣어 분석하기 전까지 냉장고에 보관한 다음 GC/MS(Agilent 6890N GC/5973N MSD)를 이용하여 분석하였다.¹⁶⁾

3. 결과 및 고찰

3.1. 고도처리공정별 유기물의 제거특성

3년간(2003년 4월~2005년 10월) 사이의 총 운전기간 중에서 2005년 1월~10월까지 모래여과, 오존, GAC, 그리고 오존/GAC공정을 거친 처리수의 DOC 및 UV₂₅₄의 변화를 Fig. 3에 나타내었으며, 각 처리수의 DOC 및 UV₂₅₄의 최대값, 최소값, 그리고 평균값을 Table 1에 요약 정리하였다. 표에서 보는 바와 같이 모래여과수의 평균 DOC는 1.464 mg/L, UV₂₅₄는 0.016 cm⁻¹이었다. 모든 공정에서 DOC 제거율보다 UV₂₅₄ 유발물질의 제거율이 우수한 것으로 나타났으며, 오존공정보다는 GAC공정, GAC공정 보다는 오존/GAC공정이 DOC와 UV₂₅₄제거율 측면에서 우수한 것으로 나타났다. 각 공정별 제거율을 살펴보면, 오존공정에 의한 DOC 제거율은 모래여과수 대비 약 4%에 불과하였으나, UV₂₅₄는 약 17%로 DOC 제거율보다 훨씬 더 우수한 경향을 보였다. 이는 오존이 소수성 물질과 반응성이 높기 때문에 소수성 물질들을 산화하여 친수성 물질로 전환시켰기 때문이다.^{17~19)} GAC공정의 UV₂₅₄제거율은 오존공정과 큰 차이(약 3%)를 보이지는 않았으나 DOC 제거율은 약 10% 정도로 2.5배 높게 나타났는데, 이는 GAC 흡착에 의해 유기물이 제거되었기 때문으로 판단된다.⁹⁾ 오존/GAC공정은 DOC 제거율이 약 30%, UV₂₅₄제거율이 약 40% 정도로 고도처리공정 중에서 가장 우

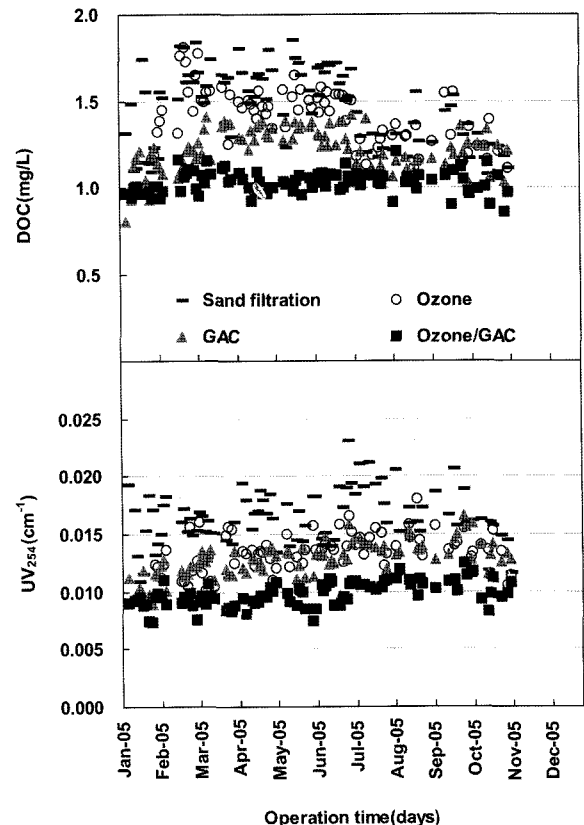


Fig. 3. Variation of DOC and UV₂₅₄ as function of operation time according to advanced treatment processes.

Table 1. Summary of DOC concentration and UV₂₅₄ according to advanced treatment processes(n = 89)

Process	Item	DOC(mg/L)			UV ₂₅₄ (cm ⁻¹)		
		Max.	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.
Sand filtration		1.855	1.030	1.464	0.023	0.011	0.016
Ozone		1.811	1.111	1.409	0.018	0.010	0.013
GAC		1.417	0.802	1.222	0.017	0.009	0.013
Ozone/GAC		1.213	0.861	1.028	0.013	0.007	0.010

수한 효율을 보였다.¹²⁾ 유사한 기존연구에서는 모래여과수에 비해 오존 처리수는 약 20%, BAC와 GAC 처리수는 약 42%의 DOC가 더 제거되는 것으로 보고하였다.²⁰⁾

3.2. 고도처리공정별 용존유기물질의 분리 및 분할

고도처리에 따른 유기물질의 특성을 평가하기 위하여 용존 유기물질(DOM)을 소수성(HPO), 반친수성(THI), 친수성(hydrophilic, HPI)으로 분류하였다. Table 2는 고도처리공정에 따라 NOM 분리비율과 DOC 농도의 평균값을 요약 정리한 것이다. 모래여과수의 DOM 분리비율은 HPI 비율이 약 50% 정도로 가장 높았으며, 다음으로는 HPO, THI 비율 순이었다. 오존공정의 경우 HPO 부분이 HPI부분으로 전환하여 HPI 비율이 다소 증가하는 것으로 여러 연구에서 보고되었으나,^{11,21)} DOM 분리비율과 각 분리비율의 DOC 농도는 여과수에 비해 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.²²⁾ 그러나 HPI의 DOC 농도는 여과수와 유사하였으나, 상대적으로 HPO는 많이 감소하였다. 한편, GAC공정의 경우 오존공정과 비교해 볼 때 DOM 분리비율 분포는 거의 유사한 반면, DOC 제거율은 오존공정이 5.0%, GAC 공정이 16.7%로 큰 차이를 보였다. 일반적으로 소수성 유기물질의 제거율이 뛰어난 GAC 공정과는 달리 본 연구결과에서는 HPI의 DOC 농도가 HPO에 비해 급격하게 감소하였는데, 이는 DOC에 대한 파급이 이미 끝나 생물학적 기작에 의해 유기물질이 제거되었기 때문인 것으로 판단된다. GAC공정의 경우 오존/GAC공정에 비해 THP 비율은 상대적으로 낮고 HPI 비율이 상대적으로 높았다. 이는 GAC공정에 비해 오존/GAC공정에서 활성화된 생물학적 기작에 의해 더 많은 HPI가 제거되어 전체적인 DOC 제거효율이 향상된 것으로 판단된다. 오존/GAC공정을 제외

Table 2. Distribution of DOM isolation fraction and average DOC concentration according to advanced treatment processes(n = 10)

Process	Sand filtration		Ozone		GAC		Ozone/GAC	
	Avg. DOC (mg/L)	Frac. (%)	Avg. DOC (mg/L)	Frac. (%)	Avg. DOC (mg/L)	Frac. (%)	Avg. DOC (mg/L)	Frac. (%)
HPO	0.482	34.7	0.439	33.3	0.402	34.7	0.357	35.3
THP	0.230	16.5	0.209	15.8	0.175	15.2	0.193	18.8
HPI	0.680	48.8	0.675	50.9	0.584	50.1	0.465	45.9
Sum	1.393	100.0	1.323	100.0	1.161	100.0	1.016	100.0

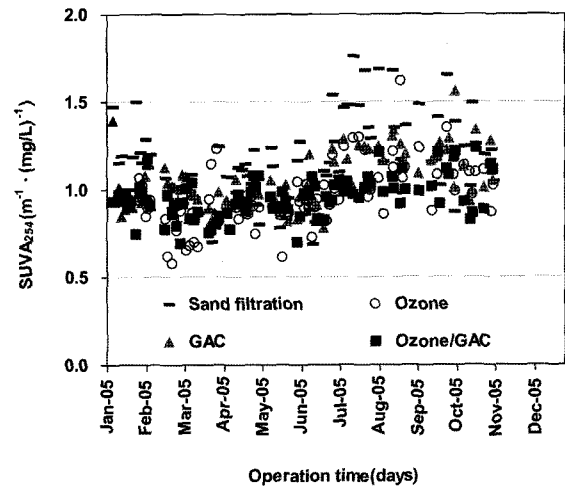


Fig. 4. Variation of SUVA as function of operation time according to advanced treatment processes.

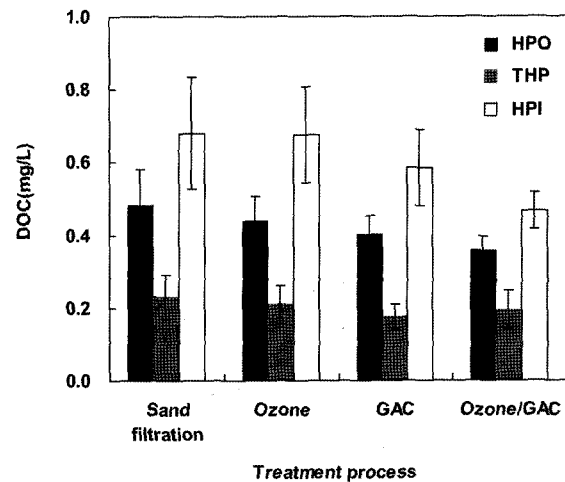


Fig. 5. Variation of DOC distribution of DOM isolation fraction according to advanced treatment processes.

하고 모든 공정에서 DOM의 분율이 유사한 것으로 나타났으나, 각 분율의 DOC 농도는 모래여과, 오존, GAC, 오존/GAC 공정으로 갈수록 감소하는 경향을 보였다. Fig. 5에서는 2005년 1년 동안 처리공정별 DOM 분리비율의 DOC 농도변화를 나타내었다.

3.3. 고도처리에 따른 잔류염소 감소 및 소독부산물 생성특성

잔류염소의 감소는 다양한 인자에 의해 영향을 받지만, 관로 내에서 점진적으로 감소하는 것은 대부분 느리게 반응하는 유기물 때문이다. 이러한 유기물은 정수처리공정에 따라 큰 영향을 받으며, 특히 최근에 도입되고 있는 오존, GAC 등의 고도처리공정의 경우 유기물질의 분획, 용해도 등을 변화시킴에 따라 염소의 반응성과 잔류성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Campos와 Harmant는 PAC/UF와 오존/BAC 시스템을 적용한 정수장에서 유기물질량의 감소로 인하여 염소소계수가 약 1/5 정도로 감소하였다고 보고하였다.²³⁾

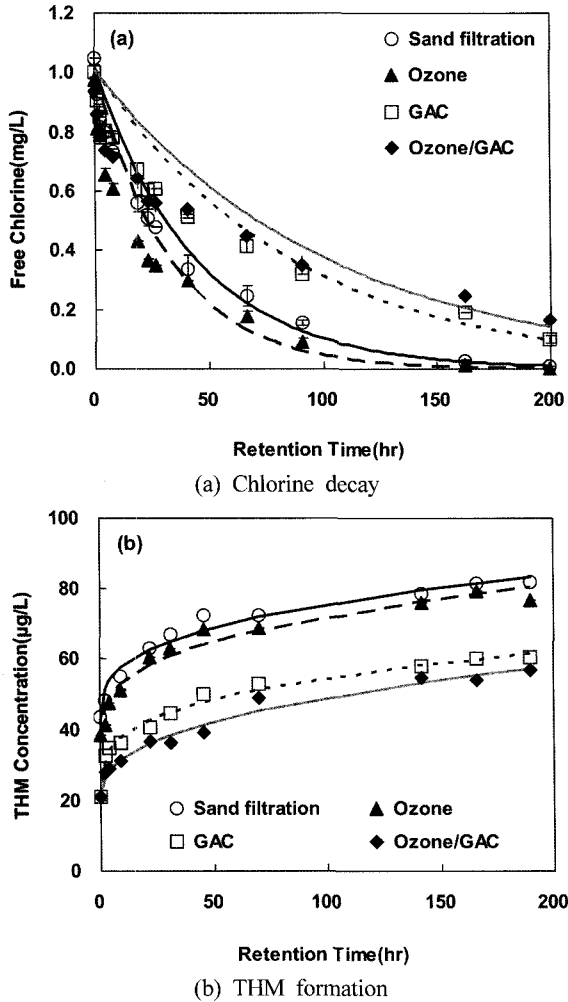


Fig. 6. Variation of chlorine decay and THM formation as function of retention time according to advanced treatment processes.

Fig. 6은 고도처리공정을 거친 처리수를 대상으로 잔류염소 감소와 소독부산물의 생성특성을 나타낸 결과이다. Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 잔류염소는 1차 지수함수($C = C_0 e^{-kt}$)의 형태로 감소하였다. 모래여과, 오존, GAC, 그리고 오존/GAC공정을 거친 처리수의 잔류염소 감소계수(k_b)는 0.0230, 0.0307, 0.0117, 그리고 0.0098 hr^{-1} 을 보였으며, 오존공정을 제외하고 처리수의 유기물 농도가 낮을수록 잔류염소 감소계수가 작아지는 경향을 보였다. 특히, 오존공정의 경우 잔류염소 감소계수가 모래여과 공정에 비해 오히려 크게 나타났는데, 이는 오존처리에 의한 유기물 성장변화가 염소소비에 영향을 미쳤기 때문으로 사료되며, 이 부분에 대한 추가적인 연구와 해석이 필요할 것으로 판단된다. 그림에서 모래여과수의 경우 약 70시간 이후 잔류염소 농도가 0.25 mg/L이었으나, GAC와 오존/GAC공정 처리수의 경우에는 동일한 농도까지 감소하는데 약 160시간이 소요되어 잔류염소의 지속성이 약 2.3배 증가하는 경향을 보였다. 이와 같이 고도처리공정 도입에 따른 염소 소비량의 감소는 궁극적으로 관로 내 염소의 잔류성을 증대시키는 결과를 가져오며, 동시에 관말지역까지

적정 잔류염소를 만족시키기 위한 정수장 염소투입량을 낮출 수 있을 것으로 예상된다.

한편, Fig. 6(b)는 THM 농도의 변화를 나타낸 것으로 잔류염소 결과에서 예상된 바와 같이 고도처리공정에 의해 THM 생성이 감소하였다.^{11,20,24-26)} 190시간 반응 이후 모래여과수는 THM이 81.8 µg/L 생성된 반면, 오존, GAC, 그리고 오존/GAC의 처리수는 모래여과수에 비해 각각 6.0, 26.2, 30.3% 적게 생성되었다. 특히, 오존처리수의 경우 모래여과수에 비해 잔류염소가 약간 더 감소했음에도 불구하고 THM 생성이 적었던 것은 염소가 주로 HPO와 반응함에 따라 오존처리를 통한 유기물의 성장변화가 THM 생성에 영향을 미쳤기 때문으로 추측된다. 반면, GAC공정은 유기물 자체가 흡착에 의해 제거됨으로 인해 모래여과공정이나 오존공정에 비해 THM 생성이 적었으며, 오존/GAC공정이 THM 생성억제측면에서 가장 우수하였다.

4. 결론

1) 오존, GAC, 오존/GAC공정에서 DOC보다는 UV₂₅₄ 제거율이 우수한 것으로 나타났으며, 오존, GAC, 그리고 오존/GAC공정 순으로 DOC와 UV₂₅₄ 제거율이 우수한 것으로 나타났다. 오존공정에 의한 DOC 제거율은 여과수 대비 약 4%에 불과하였으나, UV₂₅₄는 약 17%로 DOC 제거율보다 훨씬 더 우수한 경향을 보였는데, 이는 오존이 소수성 물질과 반응성이 높기 때문에 소수성 물질들을 산화하여 친수성 물질로 전환시켰기 때문이다. 특히, 오존/GAC공정은 DOC 제거율이 약 30%, UV₂₅₄제거율이 약 40% 정도로 고도처리공정 중에서 가장 우수한 효율을 보였다.

2) 오존/GAC공정을 제외하고 모든 공정에서 DOM의 분율이 유사한 것으로 나타났으나, 각 분율의 DOC 농도는 여과수, 오존, GAC, 오존/GAC공정 순으로 감소하는 경향을 보였다. 오존공정의 경우 기존의 연구결과와는 달리 DOM 분리비율은 여과수에 비해 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며, DOC 농도 또한 거의 변화를 보이지 않았다. GAC공정의 경우 오존공정과 비교해 볼 때 DOM 분리비율 분포는 거의 유사한 반면, DOC 제거율은 오존공정이 5.0%, GAC공정이 16.7%로 큰 차이를 보였다.

3) 모래여과, 오존, GAC, 그리고 오존/GAC공정을 거친 처리수의 잔류염소 감소계수는 각각 0.0230, 0.0307, 0.0117, 그리고 0.0098 hr^{-1} 로 나타나 고도처리공정에 의해 염소의 잔류성이 향상되는 것으로 나타났다. 특히, 오존공정의 경우 잔류염소 감소계수가 모래여과 공정에 비해 큰 것으로 나타났는데, 이는 오존처리에 의한 유기물 성장변화가 염소소비에 영향을 미쳤기 때문인 것으로 사료되며, 이 부분에 대한 추가적인 연구와 해석이 필요할 것으로 판단된다.

4) 고도처리공정에 의해 THM 생성이 감소하였으며, 오존 처리수의 경우 모래여과수에 비해 잔류염소가 약간 더 감소했음에도 불구하고 THM 생성이 적었던 것은 염소가 주로 HPO와 반응함에 따라 오존처리를 통한 유기물의 성장변화가 THM

생성에 영향을 미쳤기 때문인 것으로 추측된다. 반면, GAC 공정은 유기물 자체가 흡착에 의해 제거됨으로 인해 모래여과공정이나 오존공정에 비해 THM 생성이 적었으며, 오존/GAC공정이 THM 생성억제측면에서 가장 우수하였다.

사 사

본 연구는 수처리선진화사업단(환경부 ECO-STAR Project, I2WATERTECH 04-3)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Owen, D. M., Amy, G. L., Chowdhury, Z. K., Paode, R., McCoy, G., and Viscosil, K., "NOM Characterization and Treatability," *AWWA*, **87**(1), 46~63(1995).
- Suffet, I. H., Mallevalle, J., and Kawczynski, E., *Advances in taste and odor treatment and control*, American Water Works Association Research Foundation (1995).
- Kooij, D., "Assimilable Organic Carbon as an Indicator of Bacterial Regrowth," *AWWA*, **84**(2), 57~65(1992).
- Reckhow, D. A., Singer, P. C., and Malcolm, R. L., "Chlorination of Humic Materials: Byproduct Formation and Chemical Interpretations," *Environ. Sci. Technol.*, **24**(11), 1655~1664(1990).
- USEPA, *United States Federal Register*, 40 CFR Parts 9, 141 and 142, **71**(2), 388~493(2006).
- Jacangelo, J. G., Demarco, J., Owen, D. M., and Randtke, S., "Selected Processes for Removing NOM : an Overview," *AWWA*, **87**(1), 64~77(1995).
- USEPA, *Enhanced coagulation and enhanced precipitative softening guidance manual*, EPA815-R-99-012(1999).
- Crozes, G., White, P., and Marshall, M., "Enhanced Coagulation: its Effect on NOM Removal and Chemical Costs," *AWWA*, **87**(1), 78~89(1995).
- Matilainen, A., Vieno, N., Tuhkanen, T., "Efficiency of the activated carbon filtration in the natural organic matter removal," *Environ. Int.*, **32**(3) 324~331(2006).
- Chin, A. and Berube, P.R., "Removal of Disinfection by-Product Precursors with Ozone-UV Advanced Oxidation Process," *Water Res.*, **39**(10), 2136~2144(2005).
- Chang, C. N., Ma, Y. S. and Zing, F. F., "Reducing the Formation of Disinfection by-Products by Pre-ozonation," *Chemosphere*, **46**(1), 21~30(2002).
- Kainulainen, T. K., Tuhkanen, T. A., Vartiainen, T. K. and Kalliokoski, P. J., "Removal of Residual Organics from Drinking Water by Ozonation and Activated Carbon Filtration: A Pilot Plant Study," *Ozone Sci. Eng.*, **17**(4), 449~462(1995).
- 한국수자원공사, 한강수계를 중심으로 한 맛·냄새의 효율적 제거(3차년도), 한국수자원공사(2005).
- Stevenson, F. J., *Reactive Functional Groups, Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reaction*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 212~235(1994).
- Hallama, N. B., Westa, J. R., Forstera, C. F., Powell, J. C., and Spencer, I., "The Decay of Chlorine associated with the Pipe Wall in Water Distribution Systems," *Water Res.*, **36**(14), 3479~3488(2002).
- APHA, AWWA, WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed.,(1998)
- Amy, G. L., Tan, L., and Davis, M. K., "The Effect of Ozonation and Activated Carbon Adsorption on Trihalomethane Speciation," *Water Res.*, **25**(2), 191~202(1991).
- Marhaba T. F. and Van D., "Chlorinated Disinfection By-Product Formation Potential of Dissolved Organic Matter Fractions at an Ozonation Water Treatment Plant," *Advances in Environ. Res.*, **3**(3), 255~268(1999).
- Chang, P. C., Chang E. E., and Liang, C. H., "NOM Characteristics and Treatabilities of Ozonation Processes," *Chemosphere*, **46**(6), 929~936(2002).
- 구윤희, 배수시스템에서의 수질변동 특성: 잔류염소와 THMs을 중심으로, 서울시립대학교 박사학위논문(2004).
- Galapate, R. P., Baes, A. U., and Okada, M., "Transformation of Dissolved Organic Matter during Ozonation: Effects on Trihalomethane Formation Potential," *Water Res.*, **35**(9), 2201~2206(2001).
- Nissinen, T. K., Miettinen, I. T., Martikainen, P. J., and Vartiainen, T., "Molecular size distribution of natural organic matter in raw and drinking waters," *Chemosphere*, **45**(6~7), 865~873(2001).
- Campos, C. and Harmant, Ph., "Assessing the impact of dissolved organic carbon changes on disinfectant stability in a distribution system," *Water Sci. Tech.-Water Supply*, **2**(3), 251~257(2002).
- Ko, Y. W., Abbt-Braun, G., and Frimmel, F. H., "Effect of Preozonation on the Formation of Chlorinated Disinfection By-products for River Ruhr," *Acta hydrochim. hydrobiol.*, **28**(5), 256~261(2000).
- Hu, J., Wang, Z., Ng, W., and Ong, S., "Disinfection byproducts in water produced by ozonation and chlorination," *Environ. Monitoring Assess.*, **59**(1), 81~93(1999).
- Westerhoff, P., Debroux, J., Aiken, G., and Amy, G., "Ozone-induced Changes in Natural Organic Matter(NOM) Structure," *Ozone Sci. Eng.*, **21**(6), 551~570(1999).