

정수처리에서 생물활성탄의 전처리로서 고급산화처리법의 평가

김 우 항
목포해양대학교 해양 및 조선공학부
(1999년 8월 11일 접수)

Evaluation of Advanced Oxidation Process(AOP) as a Pretreatment Process of Biological Activated Carbon in Drinking Water Treatment

Woo-Hang Kim

Faculty of Ocean & Naval Architecture Engineering, Mokpo Natural Maritime University,
571 Chukkyo-dong, Mokpo, Chonnam, 530-729, Korea
(Manuscript received 11 August, 1999)

The advanced oxidation process (AOP) using ozone combined with hydrogen peroxide and ultraviolet treatment were evaluated for biodegradable dissolved organic carbon (BDOC) formation and dissolved organic carbon (DOC) removal. Oxidation treatment were conducted alone or combination with ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet processes.

Ozone dosage of ozone process was varied from 0.5mg/ℓ · min to 5mg/ℓ · min. Ozone/hydrogen peroxide process was done using 20mg/ℓ of hydrogen peroxide concentration. Ozone/ultraviolet process was irradiated with 12mW/cm² of density and 254nm. Ozone dosage was varied from 0.5mg/ℓ · min to 5mg/ℓ · min at the ozone/hydrogen peroxide and ozone/ultraviolet processes too. Contact time of all the process was 20 minutes. Oxidation treatment were performed on microfiltration effluent samples.

BDOC formation was reached to an optimum at ozone dosage of 1.5 mg/ℓ · min in the ozone/hydrogen peroxide process and 1 mg/ℓ · min in ozone/ultraviolet process, after which BDOC formation was decreased at higher ozone dosages. But BDOC formation was increased with ozone dosages increasing in ozone process. The efficiency of DOC removal was higher AOPs than ozone process. Ozone/ultraviolet proces was the highest for DOC removal efficiency in each process. THMFP removal efficiency by ozone/ultraviolet process was higher than that by each of ozone process and ozone/hydrogen peroxide process.

Key words : advanced oxidation process(AOP), biodegradable dissolved dorganic carbon(BDOC), ozone, hydrogen peroxide, ultraviolet

1. 서 론

수도수원의 오염으로 고도정수처리의 필요성이 높아지고 있으며 정수의 고도처리로서 가장 주목을 받고있는 공정중의 하나는 오존-활성탄공정이다. 오존은 유기물과의 직접반응과 동시에 오존의 자기분해에 의해 강력한 산화제로 작용하는 OH·라디칼이 생성되어 연쇄적으로 유기물을 산화한다. 그러므로 고분자를 저분자화하며, 소수성물질을 친수성물질로 변화시켜 미생물에 의해 분해성을 증가시키는 것으로도 잘 알려져 있다.^{1,2)} 이와 같이 오존처리에 의해 생성된 생분해성용존유기물(BDOC)은 생물활성탄에서 미생물에 의해 제거가 가능하므로 활성탄의 흡착부하를 감소시킬 수 있다. 실제 Kim 등^{3,4)}은 오존처리 후 생성된 BDOC의 대부분은 활성탄의 흡착도 가능하나 거의 대부분이 생분해에 의해서 제거된 것으로

보고하고 있다. 또한 활성탄이 흡착평형에 도달한 후에도 오존처리에 의해 증가한 BDOC는 생물활성탄에서 제거가 가능하므로 처리수의 수질을 향상시킨다. 그러므로 오존처리공정에서 직접 산화에 의한 유기물의 제거와 더불어 BDOC의 증가는 생물활성탄처리에서 처리수의 수질을 향상시키는 것으로 보고하고 있다.^{4,5)}

그러나 오존 단독으로는 처리가 곤란하거나 BDOC를 증가시키는데는 한계가 있어 최근 오존공정에 과산화수소나 자외선공정을 병용함으로써 처리효율을 증대시키는 연구들이 진행되고 있다. 오존과 과산화수소를 주입하여 처리하는 오존/과산화수소공정은 과산화수소가 오존에 의해 분해되면 OH·라디칼이 다량 생성되어 유기물의 산화를 증대시킬 수 있다.⁶⁾ 또한 오존을 주입하면서 자외선을 조사하는 오존/자외선공정은 오존이 자외선

을 받아 과산화수소를 생성하여 오존의 광분해의 개시제로 사용되거나 직접적으로 강력한 산화제인 OH·라디칼을 생성함으로써 유기물의 산화율을 증대시킬 수 있는 공정이므로 많은 연구들이 진행되고 있다.⁷⁾

오존과 산화제를 병용한 고급산화처리의 연구는 오존에 과산화수소나 자외선을 병용함으로써 산화력은 더욱 강하게 하여, 유기물,^{6,7)} 유기염소화합물,⁸⁾ 염소소독부산물,⁹⁾ 기타화학물질^{10,11)}의 제거효율을 증가시키거나, BDOC의 비율을 증가¹²⁾시킨다고 보고하고 있다. 그러나 이러한 처리는 정수처리에서 활성탄의 전처리로서 사용할 경우 처리수의 수질을 향상시키기 위해서는 유기물의 직접적인 제거와 더불어 BDOC의 증가를 동시에 평가하는 것이 매우 중요하다.

그러므로 오존과 과산화수소, 오존과 자외선을 병용한 고급산화처리를 오존단독처리와 비교하여 유기물의 제거와 더불어 생분해성 유기물의 “증가, 그리고” THMF (Trihalomethane Formation Potential)의 제거 관점에서 평가하였다.

2. 실험방법 및 조건

2.1. 실험방법

실험에 사용한 장치를 Fig. 1에 나타내었다. 반응조는 용적 500mℓ 인 뚜껑이 달린 유리플라스크를 사용하였다. 오존의 주입은 오존 발생기로부터 발생한 오존을 분산하기 위하여 산기석을 통하여 연속으로 주입하였으며, 과산화수소와 병용(오존/과산화수소공정)한 공정은 과산화수소를 직접 반응조에 주입하고 오존의 주입량을 변화시켰다. 자외선과 오존을 병용(오존/자외선공정)한 공정은 유리플라스크의 중앙에는 UVP사의 저압수은램프를 설치하고 오존 주입량을 변화시켰다. 실험은 회분식으로 20℃의 항온조내에서 실시하였으며 실험에 사용한 시험수는 수원지의 수도원수를 MF막으로 여과한 여과수를 사용하였다. MF막 여과수는 정수장에서 재래식 처리공정을 대신하여 도입된 연속처리공정이며 본 실험은 연속식 처리공정에서 처리수를 사용하였다. 그러나 실험의 시

가 다르므로 사용된 시료의 수질은 조금씩 다르게 나타났다. 실험에 사용된 시료의 수질은 단독처리시 DOC 1.90mg/ℓ, BDOC 0mg/ℓ이며 병용처리시 DOC 1.99mg/ℓ, BDOC 0.12mg/ℓ 이었다. 그리고 pH와 탁도는 7.0과 0으로 같았다.

2.2. 실험조건

산화처리에서 처리공정을 결정하기 위하여 오존, 과산화수소, 자외선을 단독으로 처리하였다. 단독으로 처리한 결과를 사용하여 오존 단독공정, 오존/과산화수소공정 그리고 오존/자외선공정을 처리공정으로 선택하여 실험하였다. 실험에 사용한 산화제와 실험조건을 Table 1에 나타내었다. 오존단독공정은 접촉시간 20분으로 하여 오존 주입량을 0.5~5mg/ℓ·min으로 변화시켰고, 과산화수소 단독공정은 접촉시간 20분에서 과산화수소 농도를 5~100mg/ℓ로 변화시켰으며, 자외선 단독공정은 자외선 강도를 일정하게(12mW/cm², 파장 254nm) 하고 접촉시간을 10~120분까지 변화시켰다. 오존/과산화수소공정은 과산화수소농도 20mg/ℓ로 고정하고 오존 주입량을 0.5~5mg/ℓ·min으로 변화시켰으며 접촉시간은 20분으로 하였다. 오존/자외선공정의 자외선 강도는 12mW/cm²이고 파장은 254nm 이며 접촉시간은 20분으로 일정하게 유지하면서 오존 주입량을 0.5~5mg/ℓ·min으로 변화시켰다.

Table 1. Experimental conditions of different oxidation processes

Oxidant	Combination	Contact Time(min)	Condition
O ₃ (0.5~5mg/ℓ·min)	none	20	-
	UV	20	12mW/cm ²
	H ₂ O ₂	20	20mg/ℓ
UV	none	10~120	12mW/cm ²
H ₂ O ₂	none	20	5~100mg/ℓ

오존단독공정, 오존/과산화수소공정 그리고 오존/자외선공정에서는 처리 후 잔류오존을 제거하기 위하여 질소로서 10분간 탈기하여 잔류 오존을 제거하였으며 또한 과산화수소공정, 오존/과산화수소공정에서는 카타라제를 첨가하여 잔류과산화수소를 제거한 후 분석하였다.

2.3. 분석방법

시료는 GF/C로 여과후 여액은 용존유기탄소 (DOC), 트리할로메탄생성능(THMF)를 측정하였다. DOC는 고감도측매를 증진한 총유기탄소분석기(SHIMADZU TOC-5000)을 사용하였다. THMF는 염소를 첨가하여 1일간 반응시킨 후 잔류염소 농도가 1~2mg/ℓ의 범위에 있는 시료를 가지고 THM을 측정하였다. THM 측정은 전자포획검출기가 부착된 가스크로마토그래피(SHIMADZU GC-14B)를 사용하여 Headspace법으로 측정하였다. 생

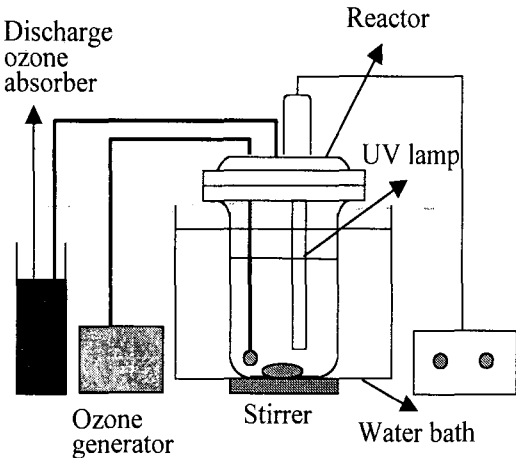


Fig. 1. Schematic diagram of experimental system.

분해성 DOC¹³⁾는 0.2 μ m Polycarbonate membrane 여지를 사용하여 여과 멸균한 시료 200ml를 사용하였으며 식중수는 실험에 사용한 원수와 같은 호수 수를 2.0 μ m Polycarbonate membrane 여지를 사용하여 여과한 여과수를 사용하여 2ml 첨가하였다. 그리고 20 $^{\circ}$ C에서 1주일 간 배양 후 DOC를 측정하여 분해된 양으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 단독처리공정에서 DOC제거와 BDOC의 증가

각각의 단독 산화처리공정으로 처리한 후 DOC의 제거와 BDOC의 증가로부터 활성탄의 흡착부하감소 측면에서 평가하여 고급산화 처리공정을 결정하였다. 오존 단독공정에서 DOC와 BDOC의 변화를 Fig. 2에 나타내었다.

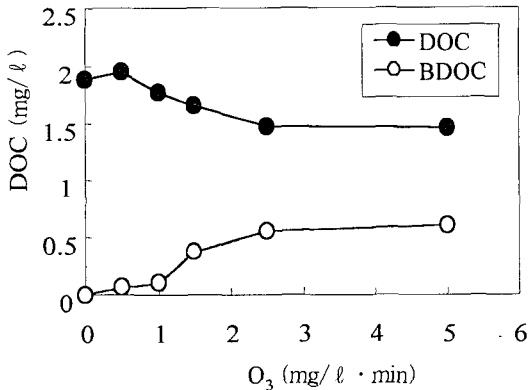


Fig. 2. Variation of DOC and BDOC during oxidation by ozone process.

오존 단독공정은 오존 주입율이 0.5mg/l · min에서는 거의 변화가 없으나 주입농도가 1.5mg/l · min으로 증가함에 따라 DOC는 1.56mg/l로 18%제거되었으며 BDOC는 0.36mg/l로 19%를 나타내었다. 그러므로 오존의 주입 농도가 증가함에 따라 난생분해성 DOC(NBDOC)가 BDOC로 변화한 것으로 나타났다.

과산화수소 단독공정에서 과산화수소의 농도를 변화시키면서 DOC와 BDOC의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 과산화수소 농도를 100mg/l까지 증가시켰으나 DOC와 BDOC의 변화는 나타나지 않았다.

자외선 단독공정에서는 조사시간을 변화시키면서 DOC와 BDOC의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 자외선의 조사시간을 120분까지 변화시켰으나 DOC의 감소는 나타나지 않았다. 그러나 BDOC는 조사시간 30분까지는 증가하였으며 그 이후에는 더 이상 증가하지 않았다. 조사시간 30분에서 BDOC의 농도는 0.37mg/l로서 19%를 나타내었다.

활성탄의 전처리공정으로서 DOC의 감소와 BDOC의 증가는 활성탄의 부하를 감소시키는 결과가 된다. 그러므로 오존 단독처리가 DOC의 감소와 더불어 BDOC의 증가율이 가장 높은 것으로 나타나 오존공정을 기준으로

과산화수소와 자외선을 병용하여 고급산화처리공정으로 실험을 실시하였다.

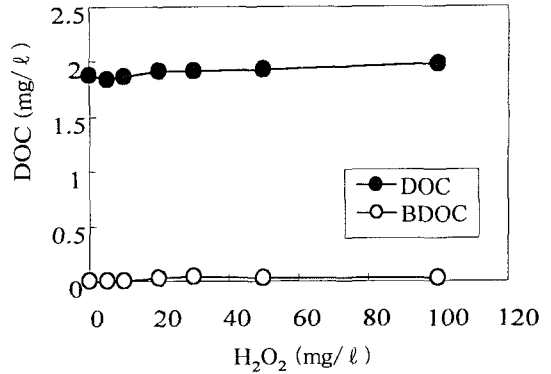


Fig. 3. Variation of DOC and BDOC during oxidation by hydrogen peroxide process.

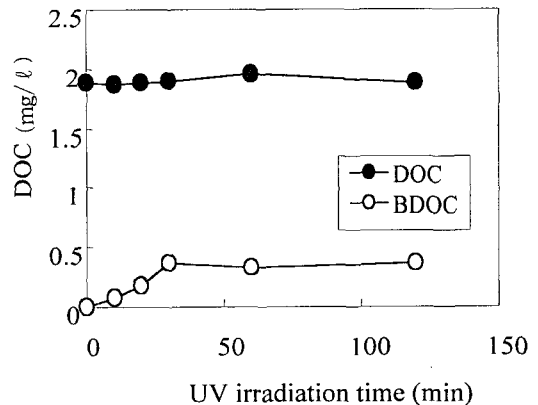


Fig. 4. Variation of DOC and BDOC during oxidation by UV process.

3.2. 오존단독공정과 고급산화공정의 비교

오존 단독공정과 고급산화공정인 오존/과산화수소공정, 오존/자외선공정의 DOC 농도변화를 Fig. 5에 나타내었다. 오존의 주입량이 0mg/l · min에서는 오존 단독공정은 원수를 나타내었고 오존/과산화수소공정은 과산화수소만을 20mg/l로 주입 후 20분간 반응을 시켰으며 오존/자외선공정에서는 자외선의 조사강도를 12mW/cm²로 하여 20분간 반응시켰다. 오존 단독공정과 오존/과산화수소공정을 비교하면 오존 주입량 1mg/l · min까지는 거의 비슷한 DOC 농도를 나타내고 있으나 그 보다 높은 주입량에서는 오존/과산화수소공정의 DOC 농도가 오존 단독공정보다 낮게 나타났다. 그러나 오존 주입량이 2.5mg/l · min 이상에서는 더 이상의 DOC 감소는 나타나지 않았다. 오존 주입량 2.5mg/l · min에서 오존 단독공정의 DOC 농도는 1.66mg/l로 17%가 제거되었으며, 오존/과산화수소공정의 DOC 농도는 1.30mg/l로 35%가 제거되었다. 오존 단독공정과 오존/자외선공정의

DOC농도를 비교하면 오존 주입량이 증가하면서 오존/자외선공정은 오존 단독공정보다 급격하게 감소하고있다. 오존 주입량이 2.5mg/l · min에서 오존/자외선공정의 DOC 농도가 1.04mg/l로서 48%가 제거되어 오존 단독공정보다 31%가 높게 나타났다.

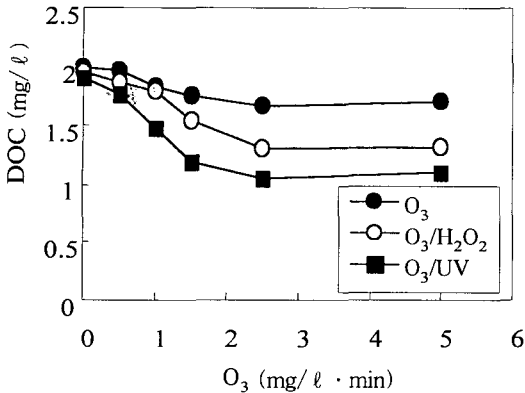


Fig. 5. Comparison of ozone and AOP processes for DOC removal.

각 공정의 미생물분해 가능한 유기물을 나타내는 BDOC의 농도 증가를 Fig. 6에 나타내었다. 오존 단독공정에서 오존 주입량이 1mg/l · min까지는 BDOC의 증가가 거의 없었으나 1.5mg/l · min에서는 BDOC 0.37mg/l로 DOC의 19%를 나타내었으며 5mg/l · min에서는 BDOC 0.52mg/l로 26%를 나타내었다. 그러나 오존/과산화수소공정에서는 오존 단독공정보다 낮은 오존 주입량인 1mg/l · min에서 증가하여 1.5mg/l · min에서는 BDOC 0.37mg/l로 DOC의 17%를 나타내었으며 최대의 BDOC 증가를 보였다. 그러나 그 이상의 오존 주입량에서 BDOC 농도는 약간 감소하였다. 또한 오존/자외선공정에서는 오존 주입량 0.5mg/l · min에서부터 BDOC가 증가하였으며 오존 주입량 1mg/l · min에서 BDOC 0.37mg/l로 최대의 증가인 DOC의 18%를 나타내었으나 1.5mg/l · min(BDOC 0.2 mg/l)에서부터 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 오존 주입량 5mg/l · min에서는 최대로 증가한 BDOC의 약 90% 이상이 제거되었다. 그러므로 오존/자외선공정에서는 오존의 주입량이 어느 정도 이상 증가하면 증가한 BDOC가 다시 분해되어 낮아지는 결과를 나타내었다. 위의 결과로부터 오존 단독공정은 오존 주입량 5mg/l · min까지는 오존 주입량이 증가함에 따라 BDOC가 증가하였으나 오존/과산화수소공정과 오존/자외선공정에서는 오존 주입량이 낮은 곳에서는 BDOC가 증가하나 오존 주입량이 어느 정도 이상 증가하면 다시 감소하는 것으로 나타났다. 이것이 고급산화공정은 오존 주입량이 높아지면 강력한 산화제인 OH · 라디칼의 생성이 촉진되어 DOC가 BDOC로 바뀐 후 다시 완전히 탄산가스로 분해되어 일어난 결과로 추측된다.

오존단독공정과 고급산화공정의 THMFP 농도변화를

Fig. 7에 나타내었다. 원수의 THMFP는 105 μg/l로서 오존 단독공정과 오존/과산화수소공정에서 THMFP의 제거 경향은 비슷하였으며 오존 주입량 2.5mg/l · min에서 오존 단독공정과 오존/과산화수소공정의 THMFP 제거율은 27%와 29%로 나타났다. 오존 주입량이 5mg/l · min에서 오존/과산화수소공정의 THMFP가 오존 단독공정보다 약간 높게 나타나고 있다. 그러나 그 값은 큰 차이를 나타내지 않으며 실제 산화처리된 유기물은 성상이 변화하므로 높게 나타날 가능성이 있다고 사료된다. 그러나 오존/자외선공정의 오존 주입량 2.5mg/l · min에서 THMFP의 제거율은 68%로 오존 단독공정과 오존/과산화수소공정보다 제거율이 크게 높게 나타났다. 오존/자외선공정은 오존 주입량 0mg/l · min(자외선만을 20분간 조사)에서 14%가 제거되었으며 1 mg/l · min까지는 서서히 감소하고 있다. 그러나 오존 주입량이 1.5mg/l · min에서 THMFP의 농도는 42 μg/l로 60%가 제거되었으며 5mg/l · min에서 THMFP의 제거율은 74%로 나타났다.

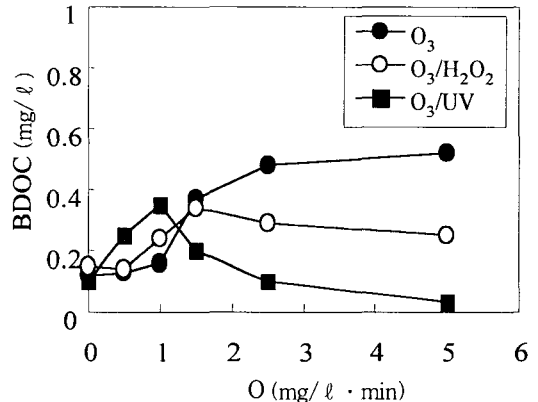


Fig. 6. Comparison of ozone and AOP processes for BDOC removal.

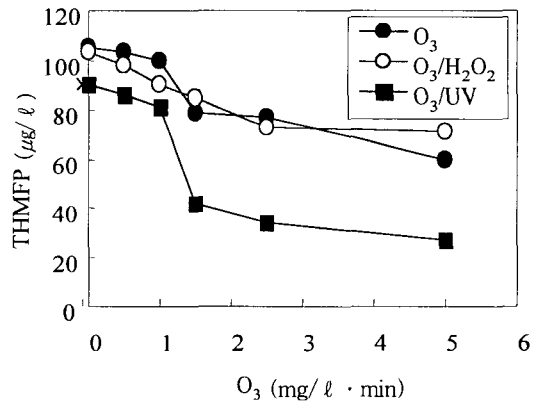


Fig. 7. Comparison of ozone and AOP processes for THMFP removal.

3.3. 고급산화공정에서 유기물의 변화
각 산화처리공정에서 오존의 주입량을 변화시키면서

DOC의 감소와 BDOC의 증가율로부터 각 공정을 평가하였다(Fig. 8).

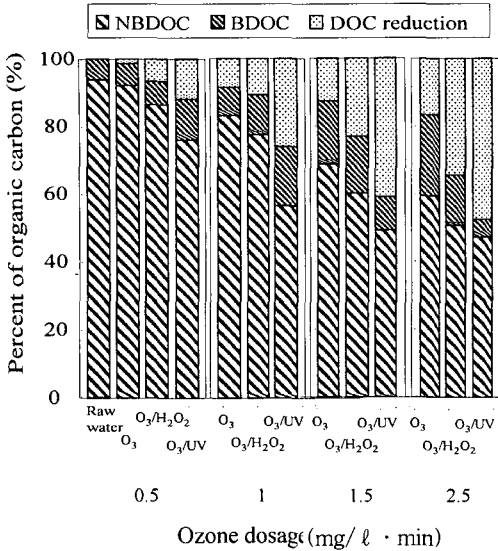


Fig. 8. Variation of DOC reduction, BDOC production and NBDOC reduction with ozone dosage in ozone and AOP processes.

원수 중 BDOC는 6%로 거의 생물학적으로 분해되기 어려운 유기물로 나타났다. 이것을 사용하여 오존단독공정으로 처리한 결과 오존 주입량이 1mg/l · min에서 직접산화에 의한 DOC의 감소율은 9%, BDOC는 8%이며 오존 주입량이 2.5mg/l · min에서는 DOC의 감소율이 17%, BDOC는 24%를 나타내었다. 이것은 오존 주입량이 1mg/l · min에서 2.5mg/l · min으로 증가시킨 결과 DOC감소/BDOC의 비율은 1.1에서 0.7로 나타나 오존 주입량의 증가는 DOC의 감소보다 BDOC의 증가에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

그러나 오존/과산화수소공정은 오존 주입량 1mg/l · min에서 DOC의 감소는 11%, BDOC는 12%이며, 오존 주입량 2.5mg/l · min에서는 직접산화에 의한 DOC의 감소는 35%, BDOC는 13%를 나타내었다. 그러므로 오존 주입량이 1mg/l · min에서 2.5mg/l · min로 증가시킨 결과 DOC감소/BDOC의 비율은 0.9에서 2.7로 증가하여 오존 주입량이 증가하면서 DOC의 직접적인 감소가 BDOC증가보다 많은 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 또한 오존/자외선공정은 오존 주입량이 1mg/l · min에서 직접산화에 의한 DOC의 감소는 27%, BDOC에 증가는 18%로 나타났으며 오존 주입량이 2.5mg/l · min에서는 직접산화에 의한 DOC의 감소는 48%, BDOC는 5%이었다. 오존 주입량을 1mg/l · min에서 2.5mg/l · min로 증가시키면서 DOC감소/BDOC의 비율은 1.5에서 9.6으로 증가하여 오존 주입량의 증가에 따른 흡착부하의 감소는 DOC의 직접적인 감소에 의한 것으로 나타났다.

그러므로 오존단독공정에서는 오존 주입량의 증가에

따라 산화에 의한 DOC의 감소와 동시에 BDOC의 증가에 의해 흡착부하의 감소가 일어나고 있으나 오존/과산화수소공정과 오존/자외선공정의 고급산화공정에서는 오존의 주입량이 낮은 곳에서는 산화에 의한 DOC의 감소와 동시에 BDOC의 증가에 의해 흡착부하가 감소하고 있으나 오존 주입량이 높은 곳에서는 BDOC의 증가에 의한 흡착부하의 감소보다는 DOC의 감소에 의한 흡착부하의 감소가 큰 것으로 나타났다. 이 결과는 오존단독공정으로 활성탄의 흡착부하를 감소시키기 위해서는 오존의 농도를 증가시켜 BDOC를 증가시킨후 처리하는 것이 유리하나 고급산화 처리에서는 오존의 농도가 낮은 곳에서도 DOC의 감소와 더불어 BDOC의 증가로 활성탄의 흡착부하를 감소시키는 것으로 나타났다. 그러나 고급산화에서 오존의 주입농도를 높게 유지하면 증가한 BDOC가 다시 분해하여 제거되므로 흡착부하의 감소는 오존의 주입량의 증가에 반하여 크게 일어나지 않는 것으로 나타났다.

4. 결 론

생물활성탄처리의 전처리로서 고급산화공정인 오존/과산화수소공정과 오존/자외선공정을 오존단독공정과 비교하여 평가하였다.

DOC의 제거에서는 고급산화공정이 오존단독공정보다 높았으며, 특히 오존/자외선공정이 다른 공정에 비해 DOC의 제거율이 높은 결과를 나타내었다. BDOC의 증가량은 오존 주입량이 낮은 1.5mg/l · min이하에서 고급산화공정이 높았으며, 오존 주입량이 1.5mg/l · min 이상에서는 오존 단독공정이 고급산화공정보다 높은 것으로 나타났다. 그러므로 오존 단독공정에서는 오존 주입량이 5mg/l · min까지 증가하면서 BDOC는 증가하고 있으나, 고급산화공정에서는 낮은 오존의 주입량에서는 BDOC가 증가하나 높은 오존의 주입량에서는 BDOC가 감소하였다. THMFPP의 제거는 오존 주입량 2.5mg/l · min에서 오존 단독공정과 오존/과산화수소공정의 THMFPP 제거율은 27%와 29%로 비슷하였으며 다른 오존 주입량에서도 큰 차이를 나타내지 않았다. 그러나 오존/자외선 공정에서는 THMFPP의 제거율은 68%로 오존 단독공정과 오존/과산화수소공정보다 제거율이 크게 높게 나타났다.

참 고 문 헌

- Hozalsk, R. M., S. Goel, and E. J. Bouwer, 1995, TOC removal in biological filters *J. AWWA*, 87(12), 40~54.
- Weber Jr, W. J. and A. M. Jodellah, 1985, Removing humic substances by chemical treatment and adsorption *J. AWWA*, 77(4), 132~136.
- Kim W. H., N. Wataru, S. Eiji, and O. Mitsumasa, 1997, Pilot Plant Study on Ozonation and Biological Activated Carbon Process for Drinking Water Treatment, *Water Science and Technology*, 35(8) 21~28.
- Kim W. H., N. Wataru, and O. Mitsumasa, 1997,

- Competitive removal of DOC by adsorption and biodegradation on biological activated carbon, *Water Science and Technology*, 35(7) 147~153.
- 5) 金于伉, 西嶋 涉, 岡田光正, 1997, 浄水處理におけるオゾン-生物活性炭 プロセスの評価、水環境學會誌 20(2) 103~107.
 - 6) Allemane, H., B. Delouane, H. Paillard, and B. Legube, 1993, Comparative efficiency of three systems(O_3 , O_3/H_2O_2 and O_3/TiO_2) for the oxidation of natural organic matter in water, *Ozone Science & Engineering*, 15, 419~432.
 - 7) 山越裕司, 菅原勝康, 菅原拓男, 1997, 過酸化水素併用 UV-C酸化パイロットプラントにおける全有機体炭素分解特性, 水環境學會誌 20(3), 198~202.
 - 8) Shuen Y. S., Y. Ku, and K. C., Lee, 1995, The effect of light absorbance on the decomposition of chlorophenols by ultraviolet radiation and U.V./ H_2O_2 Processes, *Water Research*, 29(3), 907~914.
 - 9) Symons, J. M. and K. L. Worley, 1995, An advanced oxidation process for DBP control, *J. AWWA*, 87 (11), 66~75.
 - 10) Christoph, K. S. and H. F. Fritz, 1995, Degradation of phenol and salicylic acid by ultraviolet radiation/hydrogen peroxide/oxygen, *Water Research*, 29(10), 2346~2352.
 - 11) Trapido, M., J. Veressinina, and R. Munter, 1994, Ozonation and AOP treatment of phenanthrene in aqueous solutions, *Ozone Science & Engineering*, 16, 475~475,
 - 12) Volk, C., P. Roche, C. Renner, H. Paillard, and J. C. Joret, 1993, Effects of ozone-hydrogen peroxide combination on the formation of biodegradable dissolved organic carbon, *Ozone Science & Engineering*, 15, 405~418.
 - 13) 西嶋 涉, 金于伉, 正藤英司, 岡田光正, 1996, 活性炭に對する吸着性及び生分解性に基づく溶存有機物の分割, 水道學會雜誌, 65(4) 25~30.