

DOF 공정에 의한 정수처리 효과

이병호 · 송원철[†]

울산대학교 건설환경공학부

(2008년 3월 19일 접수, 2008년 7월 9일 채택)

Effect of Drinking Water Treatment by DOF(Dissolved Ozone Flotation) System

Byoung-Ho Lee · Won-Chul Song[†]

Department of Civil and Environmental Engineering, Ulsan University

ABSTRACT : In water treatment plant the Dissolved Ozone Flotation(DOF) System may be employed because this system has various abilities, such that it can remove SS using microbubbles, and it can exert strong oxidation power in removing taste and odor, color, and microbial agents. In order to investigate effectiveness of the DOF system in water treatment, removal characteristics of various water quality parameters were observed depending on the different levels of ozone concentrations. Removal efficiencies of water quality parameters in DOF system were compared with those in DAF(Dissolved Air Flotation) system and in CGS(Conventional Gravity Settling) system. Optimum ozone dose obtained in the pilot experiments was 2.7 mg/L. With increasing ozone dose higher than 2.7 mg/L, removal rates of turbidity, KMnO₄ consumption, UV₂₅₄ absorbance, and TOC were reversely lowered. High concentration of ozone disassociate organic matter in water, so that increasing dissolved organic level in effluent. Removal rates of water quality parameters at optimum ozone dose were obtained, such that removal rates of turbidity, KMnO₄ consumption, TOC, and UV₂₅₄ absorbance were 88.9%, 62.9%, 47%, and 77.3% respectively. Removal rate of THMFP was 51.6%. For all the parameters listed above, the DOF system was more effective than the DAF system or the CGS system. It is found that the DOF system may be used in advanced water treatment not only because the DOF system is more efficient in removing water quality parameters than the existing systems, but because the DOF system is also required smaller area than the CGS system for the treatment plant.

Key Words : Ozone, DAF, DOF, CGS, Advanced Water Treatment

요약 : 본 연구에서는 용존오존부상법(Dissolved Ozone Flotation; DOF)을 이용한 정수처리 효과를 파악하기 위하여 적정 오존 주입 농도와 오존 주입 농도별 처리 특성에 대해서 연구하였으며, 또한 용존공기부상법(Dissolved Air Flotation; DAF) 및 중력식 침전법(Conventional Gravity Sedimentation; CGS)과 DOF의 처리 성능을 비교하였다. 최적 오존 주입 농도를 산정하기 위한 실험에서 최적 오존 주입농도는 2.7 mg/L로 나타났으며, 오존 주입 농도가 증가할수록 탁도 및 KMnO₄ 소모량, UV₂₅₄ 흡수도, TOC 등과 같은 제거효율이 낮아지는 것으로 나타났다. DOF와 DAF, CGS의 처리성능을 비교한 결과 오존 주입 농도 2.7 mg/L로 운전한 DOF 시스템의 탁도 제거효율은 88.9%, 유기물질 항목의 경우 KMnO₄ 소모량은 62.9%, TOC 47%, 그리고 UV₂₅₄ 흡수도 77.3% 그리고 THMFP 제거율의 경우 51.6%로 다른 두 공정보다 높거나 비슷하게 나타났다. 따라서 응집·부상 공정과 오존 산화 공정이 하나의 반응기에서 일어나는 DOF 시스템은 정수처리시설의 소유부지 감소와 기존 CGS 시스템에서 처리가 어려운 조류 및 용존성 유기물질의 제거를 통해 소독부산물의 생성을 감소시킴으로 향후 고도정수처리시스템으로 적용 가능성이 충분한 것으로 판단된다.

주제어 : Ozone, DAF, DOF, CGS, 고도정수처리

1. 서론

최근에 우리나라는 급격한 인구증가와 도시화, 그리고 산업발전으로 새로운 유해오염물질이 배출되고 생활하수 및 산업폐수의 증가로 상수원 수질오염이 가중되고 있는 실정이다. 특히 상수원수 중의 휘발성 유기화합물, 합성세제, 그리고 조류의 증가는 기존의 응집·침전 및 모래여과를 기본으로 하는 정수처리공정에서는 완전한 처리가 어

려워 양질의 수돗물을 생산하는데 어려움을 겪고 있다.

특히 낙동강을 포함한 경남지역의 경우 여름철에는 *Microcystis*와 같은 남조류와 녹조류가 대량 번식하고, 겨울철에도 *Stephanodiscus*, *Syndra acus*, *Aulacoseria*, *Cyclotella* 등의 규조류가 대량 번식하여 정수장에서의 조류에 의한 정수처리 장애를 겪고 있는 실정이다. 이러한 조류의 발생과 미량유해물질은 맛과 냄새를 유발시키고 공중 보건상 위협을 초래하고 있으며, 또한 정수처리 과정에서 조류의 낮은 비중과 높은 음전하, 조류 유래물질은 응집침전을 방해하여 *floc*의 침강성을 악화시키고, 후속공정인 여과지 폐색을 유발하는 다양한 정수처리 장애를 발생시키고 있다.¹⁾

[†] Corresponding author

E-mail: won72@shinbiro.com

Tel: 052-259-1660

Fax: 052-259-2629

이러한 문제를 극복하기 위해서 고도정수처리를 도입하여 오존과 활성탄 등을 이용한 정수처리 시설이 보급되고 있고, 현재는 철(III) 응집제를 이용한 고도응집에 대한 연구 및 고도산화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.²⁾

현재 우리나라에서는 고도정수처리 공정으로 이용하고 있는 오존산화와 활성탄처리는 전처리과정이 매우 중요한 것으로 알려져 있다. 그러나 기존의 응집·침전방법으로는 고도정수처리에 대한 전처리과정으로 한계가 있다고 판단되어 침전공정의 대체공정으로 조류 및 저탁도 수질에 처리효율과 경제성이 우수한 용존공기부상법(Dissolved air flotation : DAF)이 정수처리 공정으로 적용되고 있다.

오존은 강력한 산화력을 가지고 있어 하·폐수 처리에 다양하게 적용되고 있고, 정수 처리공정에서도 국내 정수장의 13곳, 정수생산능력의 약 20%에 오존처리 공정이 적용되고 있다.³⁾ 그러나 현재 국내 정수장의 오존처리는 별도의 오존접촉시설을 설치하여 이루어지기 때문에 부지와 설비의 유지보수에 많은 어려움이 있다.

본 연구에서는 오존처리와 부상처리를 동시에 수행할 수 있는 DOF(Dissolved ozone flotation) 시스템을 제작하였으며, 이 DOF 공정은 기존의 Wilson⁴⁾ 등에 의해 개발된 공기가 용해된 가압수와 오존기포를 별도로 주입하는 ozoflotation 방법보다 오존기포의 크기가 작기 때문에 오존 접촉효율이 향상된 공법이다.

본 연구에서는 제작된 DOF pilot plant를 이용하여 DOF 공법을 정수처리에 적용했을 경우 기존의 중력식 침전법(Conventional gravity sedimentation; CGS) 및 DAF 공법과 처리효율을 비교하여, DOF 공법의 정수처리 공정으로서의 적용 가능성을 파악하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. Pilot plant의 설치

본 연구를 위해서 제작된 DOF pilot plant는 20 m³/day

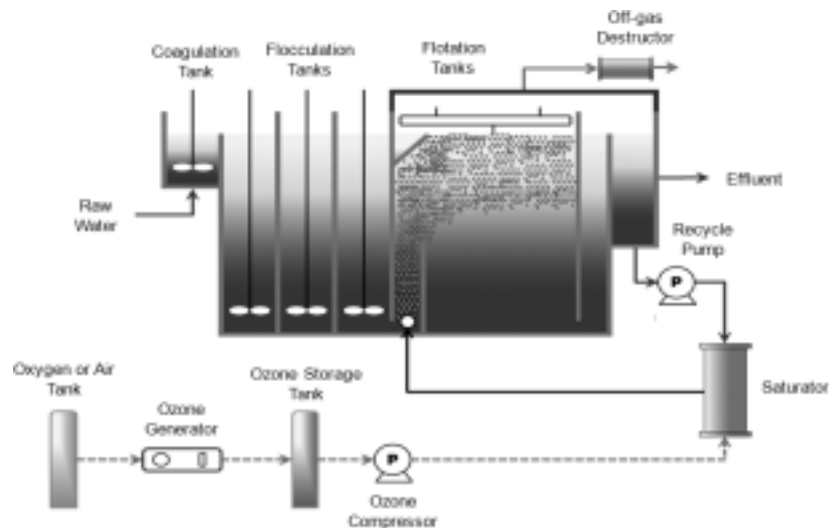


Fig. 1. Schematic diagram of the DOF system.

의 규모로, U시의 상수원으로 사용되고 있는 H댐에 설치하여 운전하였다. 이는 기존 정수처리시설의 유입원수를 사용할 경우 발생할 수 있는 전염소 처리로 인한 영향을 배제하기 위해서이다. 실험에 사용된 장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다.

Pilot plant는 크게 원수 유입부와 급속 혼화조 및 완속 혼화조, 부상조 및 오존 가압수 제조장치 및 오존발생기로 이루어져 있다. Pilot plant 장치는 오존과 직접 접촉하는 부분은 STS 316을 사용하였으며, 그 외의 부분은 STS 304를 사용하였으며, 오존과 접촉하는 비금속성 재료 및 배관은 불소수지를 사용하여 제작하였다.

H댐의 원수를 펌프를 이용하여 급속혼화조로 유입하여 혼화 및 급속교반을 시행하였다. 그리고 오존 가압수를 제조하기 위해서 가압조의 압력은 약 6 kg/cm²의 조건으로 운전하였다.

2.2. Pilot plant 운전 조건

본 연구에서는 DOF 공정에서 최적 오존 주입량을 산정하기 위하여 오존 주입 농도에 따른 실험을 진행하였으며, 기타 부상조의 HRT 및 반응율은 기존의 DAF 문헌자료와 회분식 실험을 통해 산정한 값으로 고정하여 실험을 진행하였다.^{5,6)} 산정된 적정 오존주입량으로 DOF를 운전하여 처리특성을 DAF공정 및 CGS 공정과 비교·분석하였다.

그리고 DAF 공정은 DOF 운전 중 오존을 주입하지 않고 Air를 주입하여 DAF 공정으로 전환한 후 처리 특성을 파악하였으며, CGS의 처리특성은 기존 운영 중인 H 정수처리시설의 유입수와 침전지 유출수를 분석하여 비교하였다.

본 연구를 위해 사용한 응집제로는 PACS(Poly aluminium chloride silicate)를 이용하였으며 주입량은 Jar-test를 수행하여 적정 주입량을 산정하여 주입하였다. 실험 기간 중 DOF 및 DAF의 운전조건은 Table 1에, 그리고 CGS의 운전조건을 Table 2에 정리하여 나타내었다.

Table 1. Operating conditions of DOF, and DAF systems

Parameters		DOF system	DAF system
Flow rate(L/min)		10	
Recycle ratio(%)		20	
Coagulation	Coagulant (mg as Al ₂ O ₃ /L)	10.0	
	HRT(min)	1.0	
	Mixing speed(rpm)	200	
Flocculation 1st	HRT(min)	7	
	Mixing speed(rpm)	20	
Flocculation 2nd	HRT(min)	7	
	Mixing speed(rpm)	15	
Flocculation 3rd	HRT(min)	7	
	Mixing speed(rpm)	10	
Flotation	HRT(min)	20	
	Ozone dose(mg/L)	1.1 / 2.4 / 2.7 / 3.6 / 4.3	-

Table 2. Operating conditions of CGS system

Parameters		Design values
Flow rate(m ³ /day)		120,000
Gauging well	Volume(m ³)	359.1
	HRT(min)	4.1
Coagulation tank	Volume(m ³)	108.0
	HRT(min)	1.2
Flocculation tanks	Structure	3 stage horizontal rotation type
	Volume(m ³)	2,315
	HRT(min)	26.4
Settling tanks	Volume(m ³)	17,280
	Surface loading rate (m ³ /m ² · day)	26.7
	HRT(hr)	3.3

2.3. 실험 및 분석방법

본 연구에서는 DOF 및 DAF, 그리고 CGS 공정에서 탁질의 제거효율을 평가하기 위해서 각 공정의 유입수와 처리수의 탁도를 측정하였으며, 조류의 제거효율을 파악하기 위해서 Chlorophyll-a를 분석하였다. 그리고 각 공정별 유기물질 제거효율을 살펴보기 위해서 KMnO₄ 소모량과 UV₂₅₄ 흡수도 그리고 TOC를 측정하였다. 또한 각 처리공정별 소독부산물 생성 가능성을 파악하기 위해서 THM 생성능(THM formation potential: THMFP)를 측정하였다. 그리고 DOF의 살균효과를 측정하기 위해서 일반세균 및 대장균을 측정하였다.

탁도는 탁도계(2100AN turbidimeter, HACH)를 이용하여 측정하였으며, UV₂₅₄ 흡수는 시료를 사전에 pore size 1.2 μm의 GF/C filter를 이용하여 여과한 후 UV/Vis spectrophotometer(UV MINI 1240, SHIMADZU)를 이용하여 측정하였으며, TOC는 TOC analyzer(SIVERS 900, GE)로 분석하였다. THMFP는 시료수에 24시간 후의 유리잔류염소 농도가 1.0 ± 0.5 mg/L가 되도록 염소를 주입하여 황온배양

기에서 24시간 배양하여 인산(1 + 10)과 Na₂SO₄를 사용하여 잔류염소를 고정하였으며, purge and trap(TEKMAR 3100)가 부착된 GC/ECD(HP 6890N, Hewlett-Packard)를 사용하여 분석하였다. 기타 항목은 수질오염공정시험법과 Standard method7)에 준하여 분석을 수행하였다.

DOF 실험을 위한 오존 주입농도는 2% KI 용액에 오존이 용해된 가압수를 주입하여 용존된 오존 및 대기압 상태에서 미세기포 형태로 석출되는 오존을 흡수시킨 뒤 Na₂S₂O₃로 적정하여 측정하였으며,⁷⁾ 부상조에서의 오존 농도는 다음 식 (1)을 이용하여 간접적으로 계산하였다.

$$C_f(\text{mg/L}) = \frac{C_1Q_1 + C_2Q_2}{Q_1 + Q_2} \quad (1)$$

여기서, C_f : 부상조 내 주입 오존 농도(mg/L)

C₁ : 유입 원수 중의 오존의 농도(= 0 mg/L)

C₂ : 가압수 내의 용존 오존의 농도(mg/L)

Q₁ : 유입 원수의 유량(m³/min)

Q₂ : 가압수의 유량(m³/min)

3. 결과 및 고찰

3.1. DOF 시스템의 적정 오존 주입량 결정

본 실험에서는 DOF 시스템의 운전을 위한 적정 오존 주입량을 결정하기 위하여 부상조에서의 오존 농도를 1.1 ~ 4.3 mg/L로 변화시키면서 처리특성을 조사하였다. 이때 유입수 유량 및 반응율, 그리고 부상조에서의 체류시간은 일정하게 하여 실험을 진행하였다.

아래의 Fig. 2에서 보듯이 유입원수의 탁도가 3.5 ~ 8.2 NTU로 변화가 있음에도 불구하고 0.8 NTU 이하로 나타났으며, 특히 오존 주입량이 2.4 ~ 2.7 mg/L일 때 탁도의 처리효율이 각각 94.4%와 93.6%로 0.5 NTU 이하의 탁도를 보여 최적의 처리효율을 보였다. 그러나 오존 주입량이 늘어나면서 처리수의 탁도가 오히려 증가하는 현상을 보였는데, 이는 응집된 flocc의 경우 탁도 물질 및 조류 등이 응집되어 flocc 중 유기물의 농도가 높아진 상태에서 오존이 과량으로 주입되면서 flocc 상의 유기물이 저분자화 되어 응집이 어려운 오존 산화물로 변화하여 부상조의 반응구역에서 잔여 응집제와 반응하지 못하고 유출되었기 때문이거나,⁸⁾ 또는 조류가 많이 증식된 경우 오존 처리로 인해 조류의 세포내유기물질(Intracellular organic matter ; IOM)과 세포외유기물질(Extracellular organic matter ; EOM)이 방출되어 이들 물질이 부상조의 반응구역에서의 flocc과 기포의 응집을 방해하여 처리수 중의 탁도가 증가한 것으로 판단되며, 또한 오존이 과량으로 주입되면서 pH가 낮아져 부상조의 반응구역에서 응집효과가 낮아졌기 때문으로 판단된다.⁹⁾ 이러한 오존 주입 농도에 따른 탁도의 증가 요인은 용존상의 유기물질이 콜로이드 입자를 형성하게 되어 입자수가 증가하였거나 또는 미세 콜로이드의 flocc 형

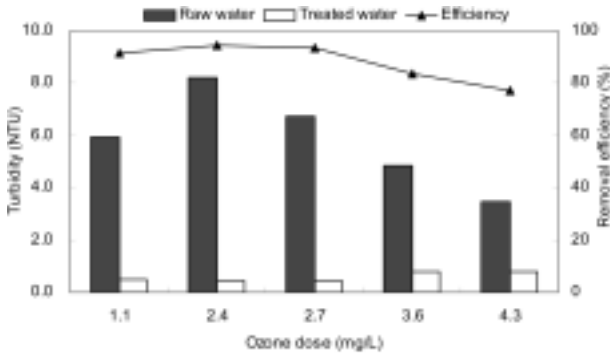


Fig. 2. Removal efficiency of turbidity in variable ozone concentrations.

성으로 인하여 입자의 크기가 탁도를 유발시킬 정도로 증가하였기 때문이라고 Reckhow¹⁰⁾ 등이 보고하였는데 본 DOF에서도 이러한 영향이 있는 것으로 판단된다.

Table 3과 Fig. 3은 오존 주입농도의 변화에 따른 유기물질 및 조류의 처리특성에 대한 결과를 나타낸 것으로, KMnO₄ 소모량 및 UV₂₅₄ 흡수도, TOC, 그리고 Chlorophyll-a를 대상으로 평가를 한 것이다.

각 항목별 유입수의 평균 농도를 살펴보면 KMnO₄ 소모량은 6.43 mg/L, TOC는 2.19 mg/L, UV₂₅₄ 흡수도는 0.04 cm⁻¹, 그리고 Chlorophyll-a는 11.86 µg/m³으로 측정되었다.

KMnO₄ 소모량의 제거효율은 오존 주입농도 2.4 mg/L에서 81.3%로 가장 높은 효율을 나타내었으며, 오존 주입농도가 3.6 mg/L로 증가되었을 때 제거효율이 31.2%로 낮아졌다. 그러나 다시 오존 주입농도가 4.3 mg/L로 증가함에 따라 제거효율이 65.5%로 증가하는 경향을 보였다.

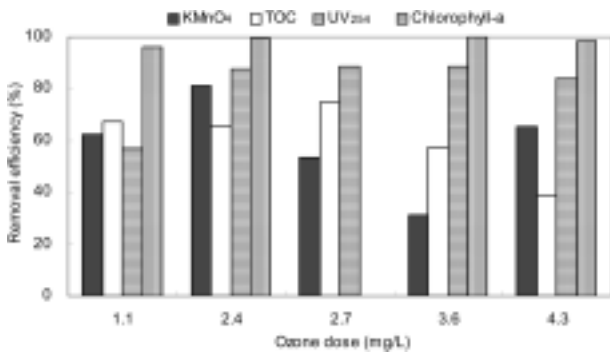


Fig. 3. Removal efficiency of KMnO₄ consumption, TOC, UV₂₅₄ absorbance and Chlorophyll-a in variable ozone doses.

그리고 TOC의 제거효율을 살펴보면 유입수의 평균 농도는 큰 변화가 없지만 오존 주입농도 2.7 mg/L에서 74.9%로 가장 높은 제거효율을 보였고, 오존 주입농도가 3.6 mg/L에서 4.3 mg/L로 증가하면서 처리효율이 점차 낮아는 경향을 나타내었다.

이러한 경향은 원수중의 일부 입자상 물질이 오존에 의해 산화되면서 용존성 유기물질이 용출되었기 때문으로 판단된다. 류⁹⁾ 등의 연구결과에 의하면 이러한 입자상 물질 및 조류의 오존 산화에 의해서 생성된 용존성 유기물을 제거하기 위해서는 오존 주입농도가 5 mg/L 이상이어야 이러한 용존성 유기물의 농도가 감소하는 것으로 보고하였다.

자연수 중의 유기물질을 정량화하는 방법 중에서 효과적이고 간단한 UV₂₅₄ 흡수도의 제거효율을 살펴보았다. 자연수 중에 방향족 화합물질과 불포화 및 포화 지방족 화합물 등 이중결합 이상을 가진 유기물질은 오존과 반응하여 산화·분해되면서 254 nm 파장의 흡수도가 감소하게 되기 때문이다.

오존 주입 농도가 1.1 mg/L일 때 제거효율은 57.1%였으나, 주입농도가 증가하면서 88.8%까지 증가하였으며, 오존 주입농도가 3.6 mg/L 이상에서는 84% 이상의 일정한 처리효율을 보이는 것으로 나타났다. 류⁹⁾ 등의 연구결과에서도 2 mg/L 이상의 오존 주입 농도를 유지할 때 UV₂₅₄ 흡수도의 효율적인 제거가 가능한 것으로 보고하였다.

오존 주입 농도에 따른 살조 효과를 파악하기 위해서 실험한 Chlorophyll-a의 경우 평균 98.5%의 제거효율을 보였으며, 오존 주입농도 2.4~3.6 mg/L에서는 99.6% 이상의 높은 효율을 보였다. 그러나 오존 주입 농도 4.3 mg/L에서는 제거효율이 98.4%로 다소 감소하는 경향을 나타내었는데 이는 탁도의 처리효율이 감소하면서 제거효율이 낮아진 것으로 판단된다.

오존 주입 농도에 따른 소독부산물의 생성능을 파악하기 위해서 THMFP를 분석한 결과는 다음 Fig. 4에 나타내었다. THMFP 제거효율은 오존 주입 농도 2.4 mg/L에서 46.5%로 나타났으나 오존 주입농도가 2.7 mg/L에서 57.6%로 가장 높은 효율 보였다. 그리고 오존 주입 농도가 3.6 mg/L 및 4.3 mg/L에서 각각 55.2%와 53.7%로 오존 주입 농도 2.7 mg/L에 비해서 처리효율이 약간씩 감소하는 경향을 보였다. 이는 오존 주입 농도가 증가하면서 고분자 유기물질이 저분자 및 중간 분자량대의 유기물질로 전환되고

Table 3. Characteristics of organic matter removal in variable ozone concentrations

Ozone dose (mg/L)	KMnO ₄ consumption (mg/L)		TOC (mg/L)		UV ₂₅₄ absorbance (cm ⁻¹)		Chlorophyll-a (µg/m ³)	
	Influent	Effluent	Influent	Effluent	Influent	Effluent	Influent	Effluent
1.1	7.74	2.90	2.11	0.69	0.042	0.018	6.41	0.27
2.4	8.09	1.52	2.10	0.72	0.041	0.005	15.83	0.06
2.7	4.87	2.27	2.04	0.51	0.039	0.004	-	-
3.6	5.96	4.10	2.33	0.99	0.039	0.005	13.31	0.00
4.3	5.50	1.90	2.37	1.45	0.043	0.007	11.89	0.19

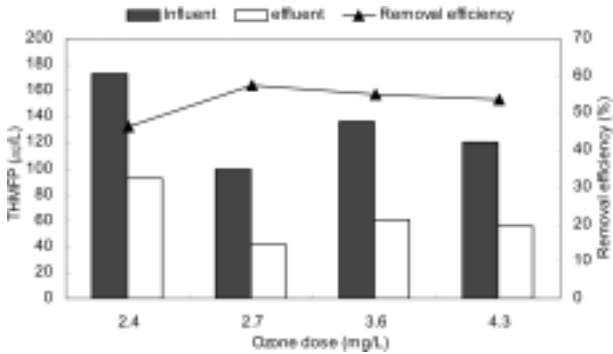


Fig. 4. Removal efficiency of THMFP in variable ozone doses.

Table 4. Total colony and total coliform disinfection results in variable ozone doses

Ozone dose (mg/L)	Total colony count (CFU/mL)			Total coliform (MPN/100 mL)		
	Influent	Effluent	Efficiency(%)	Influent	Effluent	Efficiency(%)
1.1	1,300	190	85.39	-	-	-
2.4	82,789	15	99.98	250,000	0	100.00
2.7	33,100	0	100.00	30,000	0	100.00
3.6	7,100	1	99.99	600	0	100.00
4.3	12,900	0	100.00	4,120	0	100.00

이로 인해서 THMFP가 증가한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Owen,¹¹⁾ Veenstra와 Schnoord¹²⁾의 연구 결과에서 고분자보다 저분자 유기물질에서 염소 소독부산물 생성능이 더 높은 것으로 보고한 결과와도 유사한 경향을 보였다.

Table 4는 오존 주입 농도 변화에 따른 살균효과를 나타낸 것이다. 일반세균은 오존 주입 농도 1.1 mg/L에서 85.4%의 낮은 제거효율을 보였으나 주입량이 증가하면서 살균효과가 99.99%(3 Log) 이상으로 증가하는 것으로 나타났다. 대장균 군의 경우는 오존 주입농도 1.1 mg/L에서 99.5%에서 가장 낮은 제거효율을 보였으나 주입량이 증가하면서 100% 불활성화 되는 것으로 나타났다. 일반적으로 오존은 미생물 세포 자체를 파괴하기 때문에 많은 미생물에서 0.1~0.3 mg/L 정도의 잔류농도에서 몇 분 이내에 99% 이상의 미생물 불활성화가 일어난다.¹³⁾ 그러나 본 연구에서 85.39%의 낮은 효율이 나타난 것은 상수원수에 포함되어 있는 유기물과 알칼리도, 온도 등의 영향으로 용존 오존의 농도가 낮았기 때문으로 판단된다.

이상의 결과를 바탕으로 U시 H 댐의 상수원수를 DOF로 처리할 경우 유기물질 제거효율 및 살균효율 등을 종합적으로 고려할 때 최적 오존 주입 농도는 2.7 mg/L인 것으로 판단되었다.

3.2. 연속식 실험에 의한 각 공정별 처리특성 비교 · 평가

앞의 실험에 의해서 산정된 최적 오존 주입 농도를 바탕으로 DOF 시스템을 운전하였다. 그리고 DAF와 CGS의 처리효율을 DOF와 비교 검토 하여 정수처리시설에 DOF

Table 5. Water quality characteristics of raw water

Parameters	DOF	DAF	CGS
Turbidity(NTU)	2.37~10.76	3.35~10.09	4.38~12.54
KMnO ₄ consumption(mg/L)	3.71~10.84	3.41~9.10	4.80~9.91
TOC(mg/L)	2.04~7.08	1.84~3.29	2.02~3.59
UV ₂₅₄ absorbance(cm ⁻¹)	0.036~0.072	0.035~0.053	0.039~0.068
THMFP(µg/L)	58.1~205.0	89.5~215.0	76.0~232.5
Chlorophyll-a(µg/m ³)	6.4~25.6	6.1~23.6	6.0~19.1

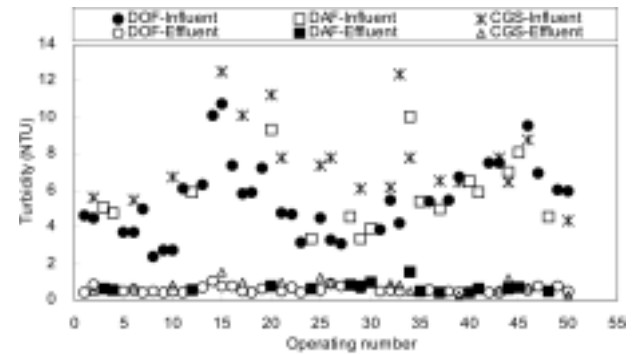


Fig. 5. Removal of turbidity by DOF, DAF and CGS systems (ozone dose : 2.7 mg/L, recycle ratio : 20%, flotation time : 20 min).

의 적용 가능성을 평가하였으며, 이때 실험에 사용된 원수의 성상은 Table 5와 같다.

3.2.1. DOF, DAF 그리고 CGS의 탁도 제거 효율 비교 평가
운전 기간 중 DOF 및 DAF, 그리고 CGS의 탁도 제거 효율을 Fig. 5에 나타내었다.

운전기간 중 원수의 탁도는 5.5~10.7 NTU였으며, 처리수의 평균 탁도는 DOF의 경우 0.58 NTU, DAF는 0.71 NTU, 그리고 CGS의 경우는 0.78 NTU로 나타났으며, 평균 탁도 제거효율은 DOF 88.9%, CGS 89.8% 그리고 DAF 86.9%로 비슷한 효율을 보였다.

3.2.2. DOF, DAF, 그리고 CGS의 유기물질 제거 효율 비교 분석

KMnO₄ 소모량 및 TOC, UV₂₅₄ 흡수도, Chlorophyll-a 항목에 대한 DOF, DAF 그리고 CGS의 처리효율을 Fig. 6~9에 나타내었다.

각 정수처리 시스템별 KMnO₄ 소모량의 제거효율은 DOF에서 평균 62.9%, DAF는 60.4%, 그리고 CGS는 61.2%로 나타났다. 그리고 TOC의 경우는 DOF에서 47.0%, DAF 56.0%, 그리고 CGS 40.7%로 나타났다. DOF의 TOC 제거효율이 DAF보다 낮은 이유는 유입수의 평균 농도가 3.12 mg/L로 DAF의 2.41 mg/L보다 높았기 때문이며, 제거량을 비교해 보면 DOF에서 평균 1.48 mg TOC, DAF에서는 1.34 mg TOC로 DOF의 TOC 제거량이 더 큰 것으로 나타나 TOC제거에서도 DOF가 DAF보다 더 나은 결과를 보인 것으로 나타났다.

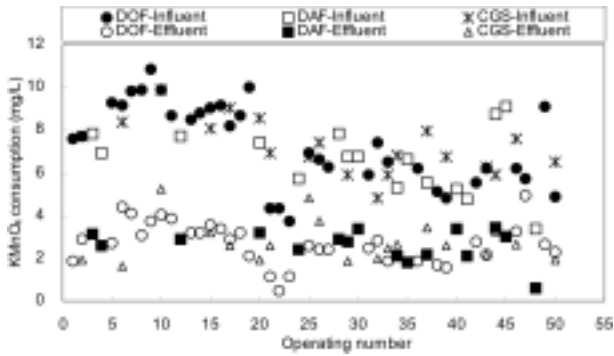


Fig. 6. Removal of KMnO₄ consumptions by DOF, DAF and CGS systems (ozone dose : 2.7 mg/L, recycle ratio : 20%, flotation time : 20 min).

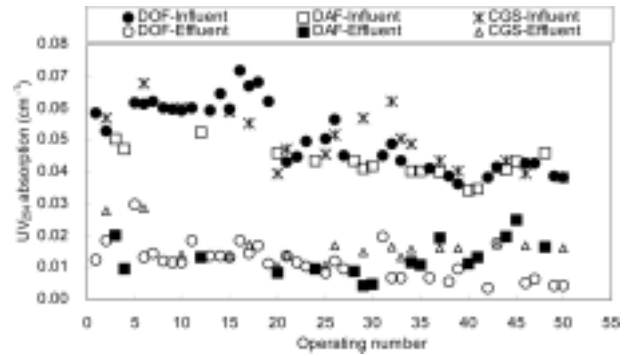


Fig. 8. Removal of UV₂₅₄ absorbance by DOF, DAF and CGS system (ozone dose : 2.7 mg/L, recycle ratio : 20%, flotation time : 20 min).

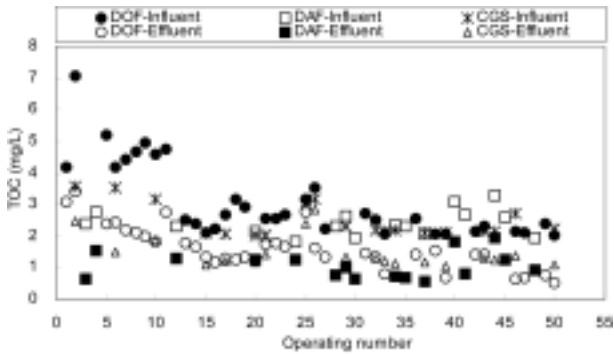


Fig. 7. Removal of TOC by DOF, DAF and CGS systems (ozone dose : 2.7 mg/L, recycle ratio : 20%, flotation time : 20 min).

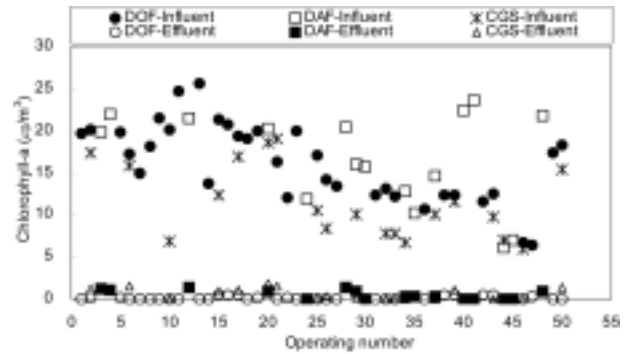


Fig. 9. Removal of Chlorophyll-a by DOF, DAF and CGS systems (ozone dose : 2.7 mg/L, recycle ratio : 20%, flotation time : 20 min).

그리고 각 시스템의 조류제거 효율을 파악하기 위해서 분석한 Chlorophyll-a의 경우 DOF가 99.2%로 가장 높은 처리효율을 보였으며, DAF는 97.2%, 그리고 CGS는 96.1%의 처리효율을 나타내었다. 그리고 DOF와 DAF, DOF와 CGS의 처리효율에 대한 T-test를 통해서 처리효율의 유의성을 검토한 결과 $P < 0.05$ 이하로 나타나 DOF의 처리효율이 DAF나 DOF보다 높은 것으로 판단된다. DOF에서 조류의 제거효율이 DAF보다 높은 이유는 오존의 용해도가 일반 공기의 용해도 보다 크기 때문에 부상조에서 미세기포의 발생량이 DAF보다 더 많아 효율적인 부상이 이루어졌기 때문이며, 또한 오존에 의한 flocc의 응집 효과 개선, 조류의 biopolymer 효과에 의한 응집력의 증대 등이 그 원인이 된다고 판단된다.¹⁴⁾

이상의 결과에서 DOF 공정에서 오존은 부상조에서 기포와 flocc의 응집력을 향상시켜 효율적인 부상분리가 일어나게 하는 것으로 판단된다. 그러나 Becher⁸⁾ 등의 연구 결과에서는 오존이 과다하게 주입되면 과잉의 저분자 유기물질 및 오존 산화물질이 생성되고, 조류 세포벽 파괴로 생성된 유기물질들이 응집 특성을 감소시켜 탁도 및 유기물의 제거특성이 감소된다고 보고하고 있어 각 원수의 특징에 맞는 적정 오존 주입량의 산정이 필요할 것으로 판단되며, 향후 오존 주입 농도별 용존 유기물의 성장 변화에 따른 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3.2.3. 각 공정별 소독부산물 생성능(THMFP) 비교
일반적으로 상수원수 중의 유기물질들을 효율적으로 제거하지 못했을 경우 맛, 냄새, 색도 등을 유발하고, 급배수 관망에서 잔류염소의 소비와 더불어 소독부산물인 trihalomethanes (THMs), haloacetic acids (HAAs), haloacetonitriles (HANs), halo ketones (HKs) 등과 같은 소독부산물을 생성시킨다.^{15,16)} 따라서 본 연구에서는 각 공정별 처리수의 소독부산물 생성능력을 파악하기 위해서 THMFP를 분석하였으며, 그 제거특성을 Fig. 10에 나타내었다.

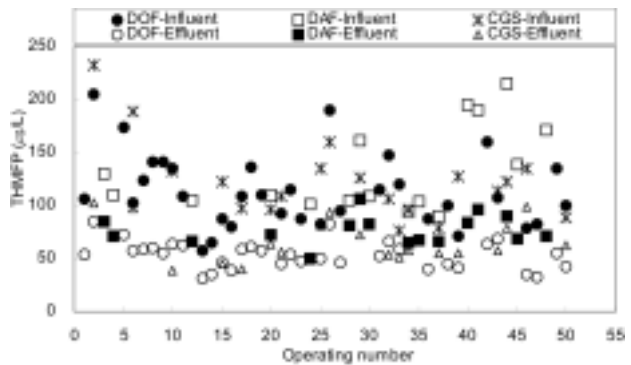


Fig. 10. Removal of THMFP by DOF, DAF and CGS systems (ozone dose : 2.7 mg/L, recycle ratio : 20%, flotation time : 20 min).

각 시스템별 THMFP 평균 제거효율을 살펴보면 DOF 51.6%, DAF 39.9%, 그리고 CGS 45.0%로 DOF의 처리효율이 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 DOF system이 응집 및 부상 분리에 의한 탁도 유발 물질의 제거 기능과 용존성 유기물의 오존을 이용한 산화 작용 및 미세기포에 의한 stripping을 통한 휘발 메카니즘을 통해 원수 중의 휘발성 유기화합물 등을 제거하여 용존 유기물의 농도를 낮추었기 때문으로 판단된다.¹⁷⁾

3.2.4. 각 공정별 살균효율 비교

Fig. 11 및 Fig. 12는 DOF, DAF, 그리고 CGS 시스템의 일반세균 및 대장균 군의 제거효율을 나타낸 것이다. DOF 시스템의 경우 응집·부상 및 산화, 그리고 소독 공정이 하나의 반응기에서 가능하기 때문에 정수처리시설의 부지 감소로 인한 시설비 절감 등의 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

DOF의 일반세균 살균효율은 99.994%로 DAF의 85.751%와 CGS의 97.864%에 비해서 높은 처리특성을 보였다. 그리고 대장균 군의 살균효율을 살펴보면 DOF와 CGS가 각각 99.995%와 99.980%로 DOF가 3Log(99.99%) 이상의 효율을 보인 반면 CGS는 3 Log 이하의 효율을 보여 DOF가 다소 높은 효율을 보였으며, DAF는 96.415%로 두 공정에

비해 낮은 처리효율을 보였다. 이는 DOF와 CGS에서는 오존과 전염소 처리를 통해서 미생물의 불활성화를 유도할 수 있으나, DAF의 경우는 응집·부상에 의한 탁도물질 제거를 통한 미생물 제거 외 다른 소독 기작이 없기 때문에 DAF의 살균 효율이 다른 DOF 및 DAF 공정에 비해서 상대적으로 낮은 것으로 판단된다.

그리고 DOF와 CGS를 비교할 때 CGS의 처리효율이 낮은 이유는 염소의 경우는 미생물의 대사계의 효소에 영향을 주어 불활성화 시키는데, *Cryptosporidium parvum* 등과 같은 일부 미생물들은 염소에 대한 강한 내성을 가지고 있기 때문에^{18,19)} 불활성화가 이루어지지 않는 경우도 있기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 오존의 경우는 2.07 V의 강력한 산화력을 바탕으로 미생물의 세포벽 등의 직접 파괴 작용에 의해 살균하기 때문에 염소보다 높은 살균효율을 보이는 것으로 판단된다.

4. 결론

정수처리에서 DOF 시스템의 처리 효율을 연구하기 위하여 pilot plant를 이용한 실험을 수행하였다. DOF 운전을 위한 최적의 오존 주입 농도를 구하였고, 최적의 DOF 운전조건에서 비슷한 시스템인 DAF의 운전결과와, 전통적인 CGS 시스템의 처리효율을 비교함으로써 DOF의 효과를 분석하였다.

1) DOF 공정의 최적 오존 주입 농도를 산정하기 위한 오존 주입 농도를 1.1, 2.4, 2.7, 3.6, 4.3 mg/L로 조절하여 DOF 실험을 실시한 결과, 최적 오존 주입 농도는 2.4~2.7 mg/L인 것으로 나타났으며, 과량으로 주입할 경우 탁도 및 유기물질의 제거효율이 낮아지는 것으로 나타났다. 이는 오존의 주입농도를 2.7 mg/L 보다 높이면 물속의 부유성 유기물질을 분해시켜 미세한 부유물질과 용존 유기물질의 농도를 증가시키는 원인으로 작용하기 때문인 것으로 분석된다. 오존 주입 농도 2.7 mg/L일 때 원수 대비 탁도는 93.6% 제거되었으며, 수중 유기물질의 지표인 KMnO₄ 소모량은 53.3%, TOC 74.9%, 그리고 UV₂₅₄ 흡수도는 88.8%의 제거효율을 보였다. 일반세균 및 대장균도 99.99%(3 Log) 이상 불활성화 하는 것으로 나타났다.

2) DOF와 DAF, 그리고 CGS의 탁도 제거 효율을 비교한 결과 DOF의 제거효율은 88.9%로 DAF의 86.9%와 CGS의 89.8%와 거의 유사한 처리 성능을 보였으나 처리수의 탁도는 DOF 처리수가 가장 낮았다.

3) DOF와 DAF, 그리고 CGS의 유기물질 제거 효율을 비교한 결과 KMnO₄ 소모량과 UV₂₅₄ 흡수도 항목에서 각각 62.9%와 77.3%로 DAF와 CGS에 비해서 상대적으로 높은 처리효율을 보였다.

4) DOF의 조류제거효율은 99.2%로 나타났으며, 일반세균 및 대장균의 살균효율은 각각 3 Log(99.99%) 이상으로 매우 높은 효율을 나타내어, DAF의 일반세균 85.8%, 대장

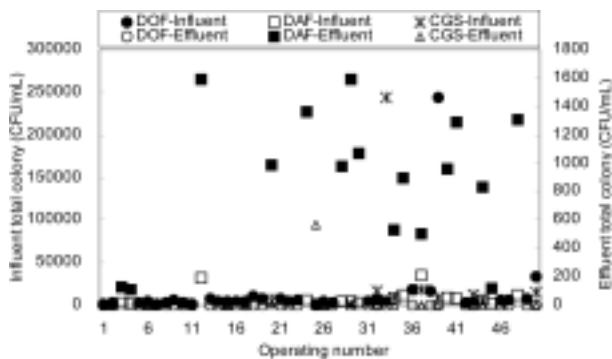


Fig. 11. Removal of total colonies by DOF, DAF and CGS systems(ozone dose : 2.7 mg/L, recycle ratio : 20%, flotation time : 20 min).

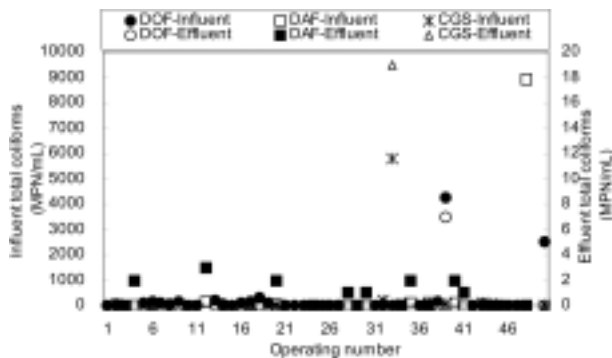


Fig. 12. Removal of total coliforms by DOF, DAF and CGS systems(ozone dose : 2.7 mg/L, recycle ratio : 20%, flotation time : 20 min).

균 96.4%, 그리고 전염소 처리를 통한 CGS의 일반세균 살균효율 97.9%에 비해 높은 효율을 나타내었다.

5) 소독부산물인 THM 생성능을 비교분석한 결과 전염소처리를 시행하는 CGS와 DAF의 평균 처리효율이 각각 45%, 39.9%인 것에 비해서 DOF의 처리효율은 51.6%로 상대적으로 높은 제거효율을 나타내었다.

6) DOF 공정은 기존의 CGS 공정에 비해서 처리시간이 1시간 이내로 짧고 별도의 오존 접촉시설이 불필요하기 때문에 시설의 소요 부지의 절감 등의 효과를 기대할 수 있고, 또한 원수 중 유기물질 및 조류제거, 그리고 살균 등의 효율이 뛰어난 특징을 보였으며, DAF에 의한 처리보다는 DOF를 이용한 처리에서 살균 및 유기물질 제거 효율이 뛰어난 것으로 판단된다. 따라서 상수원의 효과적인 고도정수처리 공정의 하나로 DOF시스템이 적용 가능할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 울산대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. 이철우, 정철우, 한승우, 강임석, 이정호, “산화와 응집공정을 이용한 조류제거,” 대한환경공학회지, **23**(9), 1527~1536(2001).
2. 박세진, 차일권, 윤태일, “정수처리공정에서 조류유래 유기물질의 제거,” 대한환경공학회지, **27**(4), 377~384(2005).
3. 조민, 정현미, 김이호, 손진식, 박상정, 윤제용, “실험실 규모의 크립토프리디움의 불활성화 실험을 통한 오존 고도정수처리 정수장에서 소독 효과 예측,” 한국물환경학회지, **21**(1), 7~13(2005).
4. Wilson, D., Lewis, J., Noguera, F., Faivre, M., and Boisdorm, V., “The use of ozoflotation for the removal of algae and pesticides from a stored lowland water,” *Ozone Science & Engineering*, **15**, 481~496(1993).
5. 이성우, 이현동, 한명호, 광동희, 김충환, “고도상수처리-원리 및 응용,” 도서출판 동화기술, pp. 515~527(2003).
6. 울산지역환경기술개발센터, “DOF(Dissolved Ozone Flotation)을 이용한 하·폐수 방류수 살균 및 고도처리 기술 개발,” 환경부, pp. 125~137(2005).
7. APHA, AWWA, WEF, “Sandard methods for the exa-

- mination of water and wastewater,” APHA, 19th Edition, 2-41~2-42(1995).
8. Becher, W. C. and C. R. O'Melia, “The effect of ozone on the coagulation of turbidity and TOC,” 12th Ozone World Congress, Proceedings, **1**, 505~516(1995)
9. 류동춘, 정형숙, 양병수, “전오존 주입이 낙동강 상수원 수수질 및 응집효과에 미치는 영향,” 한국수질보전학회지, **13**(4), 441~450(1997).
10. Reckhow, D. A., P. C. Singer and R. R. Trussell, “Ozone as a coagulant aid”, Proc. AWWA(1986).
11. Owen, D. M., Amy, G. L., Chowdhury, Z. K., Paode, R., McCoy, G., and Viscosil, K., “NOM characterization and treatability,” *J. Am. Water Works Assoc.*, **87**(1), 46~63(1995).
12. Veenstra, J. N. and Schnoord, J. L., “Seasonal variations in trihalomethane levels in an Iowa river water supply,” *J. Am. Water Works Assoc.*, **72**, 583~590(1980).
13. 宗 宮 功 편저, 강준원, 구자용, 최승일, 정재춘, 육운수 공역, “오존을 이용한 수처리 기술,” 도서출판 동화기술, 2판, pp. 115~122(2004).
14. Langlais, B., REckhow, D. A., Brink, D. R., “Ozone in water treatment application and engineering,” AWWAKF Cooperative Report, Lewis Publisher, Chelsea, Mich., 190~213(1991).
15. 손희종, 정철우, 강임석, “상수원수 중의 천연유기물질 특성과 염소 소독부산물 생성의 관계,” 대한환경공학회지, **26**(4), 457~466(2004).
16. Krasner, S. W., “Chemistry of disinfection by-product formation”, Formation and Control of Disinfection By-Products in Drinking Water, Singer, P. C.(Ed), American Water Works Association, Denver, 27~52(1990).
17. 임영성, 이홍재, 이도진, 허종수, 손보균, 조주식, “낙동강 상수원수의 오존처리 효과 - II. 회분식 오존처리에 의한 휘발성 유기화합물 및 조류제거 효과-,” 한국환경과학회지, **11**(12), 1267~1274(2002).
18. Cho, M., Chung, H., and Yoon, J., “Quantitative evaluation of the synergistic sequential inactivation of *Bacillus subtilis* spores with ozone followed by chlorine,” *Environ. Sci. Technol.*, **37**, 2134~2138(2003).
19. Rennecker, J., Marinas, B. J., Owens, J. H., and Rice, E. W., “Inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts with ozone,” *Water Res.*, **33**(11), 2481~2488(1999).