

## DOF(Dissolved Ozone Flotation)를 이용한 부유물질과 총인의 제거와 소독의 동시효과에 관한 연구

### Disinfection and Removal of SS and T-P Using DOF (Dissolved Ozone Flotation)

이병호<sup>1,\*</sup> · 김성혁<sup>2</sup> · 이상배<sup>3</sup> · 김미정<sup>4</sup>

Lee, Byoung-Ho<sup>1,\*</sup> · Kim, Sung-Hyuk<sup>2</sup> · Lee, Sang-Bae<sup>3</sup> · Kim, Mi-Jeong<sup>4</sup>

1 울산대학교 건설환경공학부

2 (주)미시간기술

3 양산대학 환경안전보건과

4 대원과학대학 보건환경과

(2003년 10월 27일 접수: 2004년 2월 16일 최종수정논문채택)

#### Abstract

Effluent of wastewater treatment plant is to be disinfected to protect drinking water sources. DOF (Dissolved Ozone Flotation) was developed to meet this purpose. DOF was developed by combining DAF system with ozone. DAF system has good floating power with numerous microbubbles, and ozone has strong oxidation capability. And DOF system has good floating power and strong oxidation capability simultaneously. When DOF was applied to secondary wastewater effluent, color of 11CU in raw water which was secondary effluent was reduced to 1CU by the DOF system. Removal rate of other water quality parameters treated by DOF were also higher than that by DAF, which were proved the strength of oxidation capability of ozone. When ozone concentration of 3.3mg/l were applied in DOF system, general aerobic bacteria were reduced to 5CFU/ml from TNTC (Too many Numbers To Count). With the same ozone concentration, total coliform were not detected at all. These figures are under the numbers of drinking water regulation. These microbes were the target parameters of DOF. It was proved that DOF was very effective in disinfection of wastewater treatment plant effluent as well as in removal of color, turbidity, and T-P.

**Key words:** DOF, DAF, Ozone, Coliform, General bacteria, Color, Turbidity

**주제어:** DOF, DAF, 오존, 대장균, 일반세균, 색도, 탁도

\*Corresponding author Tel: +82-52-259-2279, Fax: +82-52-259-2629, E-mail: bhlee@ulsan.ac.kr (Lee, B.H.)

## 1. 서론

정부에서는 상수원을 보호하기 위하여 처리된 모든 하수는 소독을 한 후에 방류토록 하고 있다. 이에 따라 현재 우리나라에서 하수처리장의 방류수를 소독하기 위한 수단으로 많은 하수처리장에서 자외선을 도입하고 있다. 자외선은 소독 부산물이나 잔류성분이 없어서 방류되는 수체에 해를 주지 않는 장점이 있으나 여러 가지 단점도 가지고 있다. 예를 들면 하수처리장의 방류수는 부유물질을 많이 함유하고 있기 때문에 자외선 램프에 이물질이 덮이게 되어 자외선의 강도가 떨어지게 되면 살균효과가 떨어지게 된다. 또한 하수처리장의 방류수에 함유되어 있는 부유물 속에 존재하는 미생물은 살균이 잘 되지 않는 단점도 있다. 본 연구에서 개발된 DOF(Dissolved Ozone Flotation) 시스템은 오존과 DAF가 결합된 기술로 오존의 강력한 살균력과 DAF의 탁월한 부유물질 제거 능력을 결합한 기술이다(Matthew, 1996). 폐수처리에 있어서 오존처리 목적은 세균, 바이러스의 살균, 유기성 착색성분의 분해, 악취 및 불쾌한 냄새물질의 분해, COD등의 감소, 유독성 및 유해물질의 분해등의 다양한 목적을 가지고 있다(Shigeo Yasutake, 1994). DOF는 하수처리장의 방류수 속에 존재하는 미생물의 살균은 물론 부유물질 자체도 제거하여 2가지의 목적을 한 개의 단위공정으로 해결할 수 있는 기술이다. 그리고 DOF는 고압에서 오존을 물에 용해시키기 때문에 오존의 효과가 뛰어나고 용해된 오존이 석출되는 과정에서 부유물질도 동시에 제거하게 된다. DOF 시스템 개발에 우선 과제인 DAF 시스템에 대한 연구는 오랜 경험과 실제 운전을 통해 많은 know how를 가지고 있으며, 고도정수처리과정에서 오존에 대한 연구를 많이 수행한 관계로 오존에 대한 특성을 많이 연구한 경험이 있다. 본 연구에서는 용존공기부상(DAF) 공정과 오존(Ozone)의 두 공정을 하나로 결합하여 뛰어난 살균효과와 부유물질의 제거를 동시에 이루려고 하였다. 국내에서는 오존과 DAF가 분리되어 사용되고는 있으나 그 사용정도는 미미한 실정이다. 특히 DAF의 경우 시스템의 제작기술이 미흡하여 외국의 기술이 대부분 도입되고 있다. 오존은 오존대로 따로 적용되고 있기 때문에 두 가지 기

Table 1. Experimental Conditions of DOF

Flow rate(L/min)	10	
Rapid mixing(rpm)	200	
HRT of rapid mixing zone(min)	1	
Flocculation tank	1st(rpm)	9
	2nd(rpm)	6
	3rd(rpm)	3
HRT of flocculation tank(min)	30	
Recycle rate(%)	18	
PAC dosage(ppm)	15	

술을 극대화시키지 못하고 있다. 따라서 이 두 가지 기술이 결합되면 환경기술적인 측면에서는 오존의 강력한 살균력과 DAF의 부유물질 제거능력이 한 개의 단위공정에서 극대화되고, 사회경제적으로는 건강한 생태계를 지키면서 상수원을 효과적으로 보호할 수 있을 것으로 분석된다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 실험장치

본 실험에 사용된 Pilot plant는 급속혼화조-플록형성조-DOF조로 구성되어 있다. DOF조 내의 오존 투입량은 오존 가스와 가압순환수의 유량을 조절함으로써 결정된다.

실험에 사용된 DOF 시스템의 운전조건을 Table 1에 나타내었다.

본 실험은 pilot plant를 제작하여 실험을 수행하였

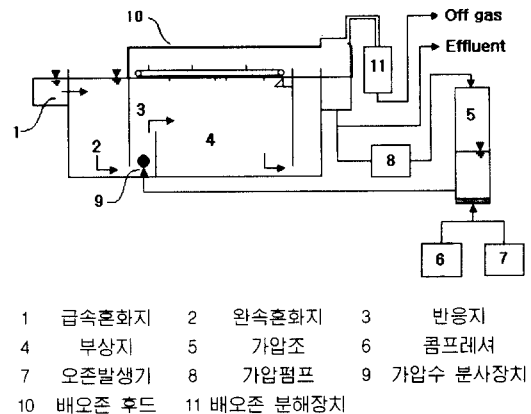


Fig. 1. Schematic Diagram of DOF(Dissolved Ozone Flotation) Pilot plant.

으며 실험에 사용된 DOF Pilot Plant의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

### 2.2. 대상시료

실험에 사용된 시료는 U시 H하수처리장의 방류수를 사용하였다. H하수처리장은 일반적인 활성슬러지 공법에 의하여 처리되고 있다. 현재 처리된 방류수는 하천의 유지용수로 사용되고 있다. 본 연구에서는 방류수를 대상으로 DOF를 적용하여 나타나는 일반적인 처리효과와 일반세균과 대장균의 소독효과에 대하여 연구를 수행하였다. 즉, 가압수내 오존농도 변화에 따른 UV-254, 색도, 탁도, SS, BOD, COD, T-N, T-P, 일반세균, 대장균 제거 효과를 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 DOF의 처리 효과

하수처리장의 방류수를 DOF에 의하여 처리한 결과에서 부유물질과 탁도의 처리효율이 높았으며 색도와 인의 제거 효과도 높게 나타났다. 본 연구에서 주요 목표로 설정한 일반세균과 대장균의 처리효과도 만족한 결과를 가져왔다. DOF에서는 오존의 농도가 재순환율에 의해서 희석되는 효과가 있다. 그래서 실제로 원수에 주입되는 농도를 기준으로 하기 위해서는 가압탱크 내에서의 오존의 농도를 측정하여 산출

하여야 한다. 방류수를 원수로 하여 DOF에 의하여 처리한 결과를 Table 2. ~ Table 4.에 정리하였다.

공기부상에 의하여 처리효과가 나타난 항목은 turbidity, SS, T-P 등이다. Recycle rate 18%에서 turbidity가 10NTU에서 0.9NTU로 낮아져서 90%이상의 제거효율을 보였다. 부유물질인 SS도 16.2mg/l에서 2.9mg/l로 낮아져 82%이상 처리가 되었다. 특히 T-P의 제거는 95%가 제거되어 부영양화가 일어날 수 있는 농도 이하까지 제거가 되었다.

본 연구에서는 이러한 용존공기부상에 의한 효과와 더불어 오존의 강력한 산화력에 의한 효과를 추가로 얻기 위하여 용존공기 대신에 용존오존을 사용하였다. 용존오존이 1.1mg/l 주입되었을 때 색도가 6CU에서 1CU로 대폭 낮아져 83%의 제거 효율을 보였다. UV-254흡광도도 47%가 낮아져 오존의 효과를 증명해주고 있다.

특히 본 연구에서 처리목표로 하고 있는 소독의 효과에서는 더욱 오존의 효과가 뚜렷하게 나타났다. 일반세균이 원수에서 셀 수 없이 많은 숫자가 검출되었으나 처리수에서는 55 CFU/ml로 낮아졌다. 또한 대장균도 700MPN/ml에서 8MPN/ml로 낮아져서 99% 가까이 제거가 되었다.

오존을 2.5mg/l 가 주입되었을 때 부상효과에 의한 turbidity는 1.1mg/l 가 주입되었을 때와 비슷한 결과가 나왔다. 그러나 부유물질인 SS가 1.1mg/l를 주입

Table 2. Results of Wastewater Treatment Using DOF

Ozone Concentration in Recycled Water: 13ppm (Ozone Dosage in Raw Water 1.1ppm)

Sample	Raw water	Effluent
Temperature (C°)	21.2	20.8
pH	6.87	6.75
DO (mg/L)	4.9	10.3
UV-254 (ABS)	0.168	0.089
Color (CU)	6	1
Turbidity (NTU)	10	0.9
SS (mg/L)	16.2	2.9
COD (mg/L)	9.8	6.8
BOD (mg/L)	4.3	3.1
T-N (mg/L)	8.23	5.68
T-P (mg/L)	0.79	0.04
Total aerobic bacteria (CFU/mL)	TNTC	55
Coliform group (MPN/mL)	700	8

Table 3. Results of Wastewater Treatment Using DOF

Ozone Concentration in Recycled Water: 30ppm (Ozone Dosage in Raw Water 2.5 ppm)

Sample	Raw water	Effluent
Temperature (C°)	22.4	21.8
pH	6.97	6.83
DO (mg/L)	5.2	10.8
UV-254 (ABS)	0.173	0.072
Color (CU)	11	1
Turbidity (NTU)	9.9	0.9
SS (mg/L)	18.3	1.7
COD (mg/L)	8.0	4.6
BOD (mg/L)	4.4	2.8
T-N (mg/L)	7.40	5.27
T-P (mg/L)	0.47	0.02
Total aerobic bacteria (CFU/mL)	TNTC	15
Coliform group (MPN/mL)	820	0

했을 때 보다 더 높은 제거 효율을 보인 것은 용존성 부유물질이 오존의 산화에 의하여 비용존성으로 바뀌면서 더 높은 제거된 것으로 분석된다. UV-254 absorbance의 제거율도 58%로 높아져 1.1mg/l가 주입되었을 때 보다 10%이상 높아졌다. 색도도 90%이상 제거가 되어 처리수에서 1CU로 측정되었다. COD와 BOD는 물론이고 T-N, T-P까지도 모두 제거율이 높아진 것은 오존의 주입 농도가 높아지면서 산화력이 증가하여 생긴 현상으로 분석된다. COD와 BOD가 모두 5.0mg/l 이하로 나타나 처리수의 재이용할 수 있는 가능성도 제시해주고 있다.

일반세균도 원수에서는 셀 수 없이 검출이 되었으나 처리수에서는 15CFU/ml만이 검출되어 살균효과가 4배 가까이 증가하였다. 대장균은 원수에서 820MPN/ml 까지 검출되었으나 오존의 농도를 2.5mg/l로 높인 후에는 완벽하게 제거가 되어 전혀 검출이 되지 않았다.

하수처리장의 2차 처리수가 오존을 2.5mg/l를 주입한 DOF에 의하여 음용수를 제외한 대부분의 재활용수로 사용될 수 있을 정도로 처리가 되었다.

DAF(Dissolved Air Flotation)와 DOF(Dissolved Ozone Flotation)의 차이를 보기 위하여 같은 하수처리장의 방류수에 대하여 DAF로 처리한 결과와 DOF로 처리한 결과를 비교하여 보았다. Table 4에서와 같이 DAF에 의한 처리수보다 DOF에 의한 처리수가

거의 모든 항목에서 훨씬 높은 제거율을 보여주고 있다. 이것은 오존의 산화력이 미세한 기포에 의하여 효과적으로 적용이 되어 나타난 결과로 분석된다. DAF와 DOF에 의한 처리 효율을 비교하기 위하여 DAF의 처리결과를 오존의 농도가 3.3mg/l로 다소 높게 주입되어 처리된 결과를 비교하였다.

부상효과에 의해 제거되는 Turbidity와 SS의 제거율도 DOF에 의한 처리수에서 높게 나타났다. 이것은 hydrophilic 물질들의 일부가 오존의 산화에 의해서 hydrophobic 물질로 변해서 주위의 플러들과 함께 제거가 되는 것으로 분석된다. 특히 오존의 산화력이 영향을 미치는 항목들은 모두 DOF에서 제거율이 훨씬 높았다.

UV-254의 absorbance는 DOF에서 2배 이상 제거율이 증가하였다. 색도는 DAF로 처리했을 때 3NTU까지 떨어져 57%의 제거율을 보이는 것과 비교하면 원수의 색도가 11CU인데도 DOF에 의하여 1CU까지 떨어져 91%의 제거율을 보였다. COD와 BOD가 DAF에 의하여 37%와 62%가 제거된 것과 비교하면 DOF에 의해서 55%와 73%로 증가하여 오존의 효과를 보여주고 있다. 이것은 오존에 의한 산화에 의해서 일부 제거가 된 부분도 있다고 분석되나 부유물질의 제거효율이 높아지면서 부유성 COD와 BOD의 제거율이 높아졌기 때문으로 분석된다. T-N과 T-P의 DAF에 의한 제거율이 33%와 88%였으나, DOF

Table 4. Results of Wastewater Treatment Using DOF

Ozone Concentration in Recycled Water: 40ppm (Ozone Dosage in Raw Water: 3.3 ppm)

Sample	DAF			DOF		
	Raw water	Effluent	Removal Rate(%)	Raw water	Effluent	Removal Rate(%)
Temperature (C°)	23.5	23.0	—	22.8	22.4	—
pH	6.92	6.84	—	6.98	6.86	—
DO (mg/l)	5.2	9.8	—	5.4	10.5	—
UV-254 (ABS)	0.131	0.085	35	0.171	0.042	75
Color (CU)	7	3	57	11	1	91
Turbidity (NTU)	10.8	0.8	93	12.5	0.7	94
SS (mg/l)	14.5	2.1	86	18.1	1.2	93
COD (mg/l)	8.3	5.2	37	9.8	4.4	55
BOD (mg/l)	4.0	1.5	62	4.1	1.1	73
T-N (mg/l)	13.5	9.0	33	8.6	2.3	73
T-P (mg/l)	0.98	0.12	88	0.84	0.09	89
Total aerobic bacteria (CFU/ml)	TNTC	TNTC	-	TNTC	5	99
Coliform group (MPN/ml)	680	124	82	840	0	100

에 의한 처리에 의하여 73%와 89% 높아진 것도 부유물질의 제거 의한 효과가 큰 것으로 분석된다.

원수에 포함되어 있는 일반세균은 DAF에 의하여 상당히 많은 숫자가 제거가 되었으나 제거가 된 후에도 셀 수 없을 정도로 많은 숫자가 검출이 되었다. 그러나 오존이 3.3mg/l가 주입된 DOF에 의해서 거의 제거가 되고 5CFU/ml만이 검출이 되었다. 대장균은 원수에서 840MPN/ml가 검출되었으나 처리수에서는 전혀 검출이 되지 않아서 살균이 완벽하게 이루어진 것을 볼 수 있다. 이것은 일반세균과 대장균의 음용수 수질기준을 충분히 만족시키는 수질이다.

실험결과에 의하면 DAF의 탁월한 부상효과와 오존의 강력한 살균작용이 DOF에 의하여 효과적으로 조화를 이루어 좋은 결과를 얻은 것으로 분석된다.

### 3.2. 오존의 농도에 따른 처리효과 분석

DOF에 주입되는 오존의 농도가 처리항목의 제거율에 미치는 영향을 분석하기 위한 실험을 수행하였다. 원수에 주입되는 오존의 농도를 1.1mg/l, 2.5 mg/l, 3.3mg/l로 변화시키면서 오존의 산화력에 민감한 항목들에 대하여 제거되는 정도를 Fig. 2~Fig. 13 까지 나타내었다.

오존의 농도가 증가함에 따라 UV-254의 제거가 많아지는 것을 볼 수 있다. 원수에서는 UV-254 absorbance가 0.17 내외로 비슷한 수준을 유지하고 있으나 오존의 농도증가에 따라 제거율이 급격하게 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 오존농도가 증가함에 따라 산화력이 증가하여 고분자 유기물이 저

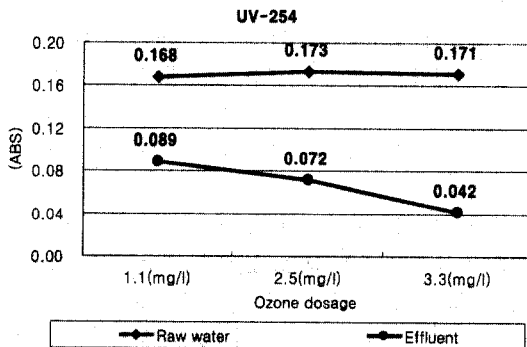


Fig. 2. Removal of UV-254 absorbance by DOF with ozone concentration.

분자 유기물로 분해 되고 있기 때문에 분석된다.

오존농도의 증가에 따라 COD와 BOD의 제거효율도 높아지는 것으로 나타났다. COD와 BOD에 대한 실험결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 이와 같이 COD와 BOD가 오존의 농도 증가에 따라 제거율이 높아지는 것은 일부 강력한 오존의 산화력에 의하여 제거된 부분이 있으나 오존의 산화력에 의하여 용존성 물질이 부유성 물질로 변화되면서 제거가 된 부분이 큰 것으로 분석된다.

T-N과 T-P도 오존의 농도가 증가하면서 제거율이 어느 정도 증가하는 현상은 보이고 있으나 그 정도는 크지 않은 것으로 나타나고 있다. T-N은 오존의 농도가 증가함에 따라 부유성 물질의 제거율이 높아지면서 부유물질에 함유된 유기성 질소의 제거율이 높아지는 경향을 보이고 있다. 그러나 오존의 직접 산화율이 낮기 때문에 오존의 농도증가에 비해 전체적인 T-N의 증가율은 낮은 것으로 분석된다.

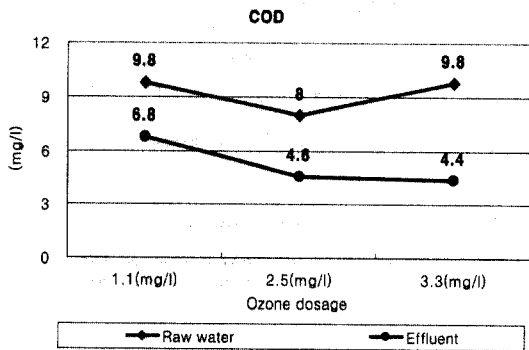


Fig. 3. Removal of COD by DOF with ozone concentration.

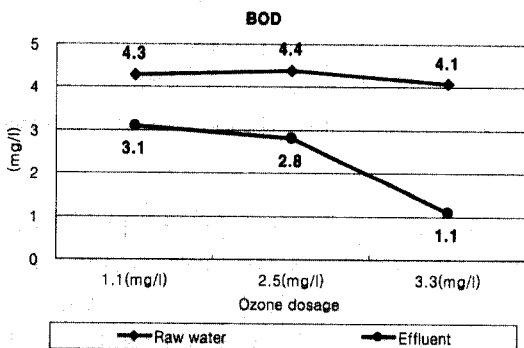


Fig. 4. Removal of BOD by DOF with ozone concentration.

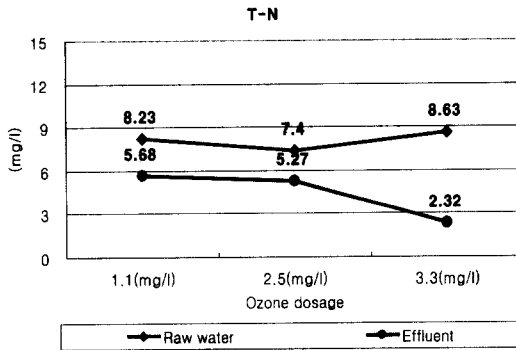


Fig. 5. Removal of T-N by DOF with ozone concentration.

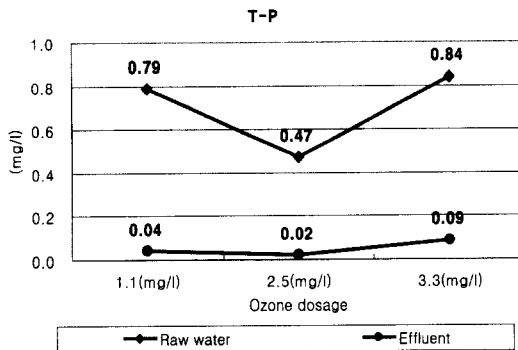


Fig. 6. Removal of T-P by DOF with ozone concentration.

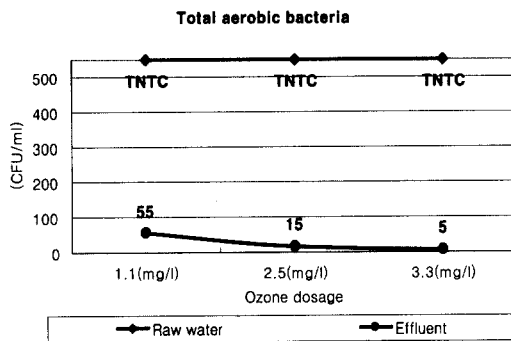


Fig. 7. Removal of total aerobic bacteria by DOF with ozone concentration.

T-P의 제거는 대부분 응집과정에서 이루어지기 때문에 오존농도의 증가에 의한 제거율은 크게 높아지지 않는 것으로 나타났다. 유기성 인의 경우도 유기성 질소와 마찬가지로 부유물질의 제거율이 높아지기 때문에 유기물에 내포되어 있는 인의 제거는 다소 높

아지는 것으로 분석된다.

일반세균은 원수에서 셀 수 없을 정도로 검출이 되었다. 그러나 오존이 1.1mg/l가 주입되었을 때 55CFU/ml로 급격히 낮아졌다. 오존의 농도가 3.3mg/l로 증가하자 5CFU/ml로 낮아져 오존의 강력한 산화력을 보여주고 있다. 이러한 증가 추세에 의하면 3.5-4.0mg/l의 오존에 의하여 완전한 살균이 이루어질 것으로 분석된다.

부상조의 체류시간이 15분이기 때문에 접촉시간은 15분이 된다. 오존이 미세한 기포에 의해서 접촉이 되기 때문에 오존의 효율이 높아진 것으로 분석된다. 일반세균의 배지에 의한 배양상태를 Fig. 8에 나타내었다.

대장균은 오존농도 2.5mg/l에서 모두 사멸하였다. 오존의 농도가 3.3mg/l로 높였을 때도 전혀 검출이 되지 않는 것으로 볼 때 대장균은 2.5mg/l정도에서도 완벽한 살균이 이루어지는 것으로 분석된다. 접촉시간은 대장균도 마찬가지로 15이 된다. 오존 3.3mg/l를 주입했을 때 배지에 배양한 결과를 Fig. 10에 나타

내었다. 원수에서의 대장균에 비해 처리수에서의 결과가 선명하게 대비되었다.

DAF에 의하여 탁도와 부유물질이 효과적으로 제거되는 것으로 나타났다. 그러나 DAF에 오존을 적용한 DOF에서는 거의 모든 수질항목에 대하여 제거율이 DAF에 비해서 매우 높게 나타났다. 특히 일반세균과 대장균의 살균능력은 오존의 낮은 농도에서도 탁월한 능력을 보이는 것으로 나타났다. 이것은 DAF에 의한 부유물질의 제거능력과 오존의 강력한 산화력이 잘 조화를 이루어 나타난 것으로 나타나 DOF의 효용성을 증명하여 주었다.

#### 4. 결론

DOF는 DAF와 오존이 조화를 이룬 시스템이다. 이것은 DAF의 우수한 부유물질의 제거능력과 오존의 강력한 산화력에 대한 효과를 동시에 얻기 위한 시스템이다. DAF만 가동시켰을 때 탁도와 부유물질,

그리고 T-P의 제거율이 93%-86%의 높은 제거율을 보였다. 여기에 오존을 주입한 DOF를 운전했을 때 탁도와 부유물질을 포함한 거의 모든 항목에 대한 제거율이 높아져 오존의 산화력이 증명이 되었다. 특히 색도는 DAF에 의해서 57% 제거가 된 반면 DOF에서 91%가 제거되어 처리수의 투명도가 매우 높아졌다.

DOF의 주 목적으로 설정된 미생물의 살균은 미세 기포화된 오존에 의하여 주입농도 2.5(mg/l)에서 대장균은 모두 사멸하였으며, 오존 주입농도 3.3(mg/l)에서는 대장균은 완벽하게 제거되었고 일반세균도 5(CFU/ml)로 먹는물 수질기준인 100(CFU/ml)보다도 매우 낮은 5(CFU/ml)을 나타내었다.

#### 참고문헌

- Anne Braghetta, et al. (1997), DAF Pretreatment: its effect on MF performance, *Jour. AWWA*, **89**(10) 90.
- James K. et al. Edzwald (2000), Giardia and Cryptosporidium Removals by Clarification and Filtration, *Jour. AWWA*, **92**(12) 70.
- James K. Edzwald. et al. (1999), Integrating High-rate DAF Technology into Plant Design, *Jour. AWWA*, **91**(12) 41.
- Matthew T. Valade. et al. (1996), Particle Removal by Flotation and Filtration: Pretreatment Effects, *Jour. AWWA*, **88**(12) 35.
- Shigeo Yasutake(1994), 폐수처리시 오존의 이용, 첨단환경 기술 1월호, 환경관리연구소, pp. 49-54.
- 강준원 외 다수(2002) 오존을 이용한 수처리 기술. 동화기술교역, pp. 115-122.