

ORIGINAL ARTICLE

## 오존처리공정의 배오존 재활용 마이크로버블시스템 개발

조영만 · 정재억 · 이광현<sup>1)</sup> · 정용준<sup>2)\*</sup>

(\*)한국이엔지, <sup>1)</sup>광운대학교, <sup>2)</sup>부산가톨릭대학교

## Development of a Micro-Bubble System for Ozone Off-Gas Recycling in the Ozone Treatment Process

Young-Man Cho, Jae-Ouk Jung, Kwang-Heon Lee<sup>1)</sup>, Yong-Jun Jung<sup>2)\*</sup>

Hankook eng., Yangsan 50530, Korea

<sup>1)</sup>Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University Seoul 01897, Korea,

<sup>2)</sup>Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea

### Abstract

The purpose of this study was to develop a recycling system for ozone off-gas. Although the ozone transmission rate of the injector method differs slightly depending on the ozone injection rate, it reaches approximately 99%, which is very high. During the increase in water inflow to the ozone recycling system from 2 L/min to 10 L/min, the average ozone recycling rate was 99.4% at a 1 ppm ozone injection rate, 98.6% at a 2 ppm ozone injection rate, 98.1% at a 3 ppm ozone injection rate. Ozone treatment facility operating costs can be divided into the costs of pure oxygen production, ozone production, and maintenance. The annual operating costs of ozone treatment facilities in Korea are estimated to be approximately 38.9 billion won. The annual savings are estimated to be approximately 5.8 billion won when the ozone transfer rate of the diffuser method, which is mostly employed in domestic water treatment plants, is 85% and 15% of the ozone is recycled.

**Key words** : Ozone off-gas, Ozone destruction, Operating cost, Ozone recycling system

### 1. 서론

2020년 현재 국내 정수장은 484개, 시설용량은 27,323,000 m<sup>3</sup>/일 규모로, 처리 공정은 급속여과방식이 55.1%, 오존-활성탄 방식의 고도처리시설은 41.0%, 0.8%가 막여과 시설이다(Ministry of Environment of Korea, 2020). 산업의 고도화와 구조변화에 따른 신규 미량유해물질 검출, 기후변화에 따른 강우의 지역적 편차 증가, 이상 고온현상 및 하천의 체류시간 증가로 인한

조류 대 발생 등에 대응하기 위해 정부는 2025년까지 고도정수처리시설을 70%까지 확충할 계획이다(Ministry of Environment of Korea, 2016).

국내 고도정수처리시설은 대부분 오존-활성탄 처리 공정으로 구성되어 있다. 수처리 과정에서 오존의 반응은 오존에 의한 직접 산화반응과 자기 분해되어 생성된 OH 라디칼을 포함한 자유라디칼에 의한 산화 반응으로 구분되며, 오존과 OH 라디칼은 높은 산화 전위(oxidation potentials)를 가지므로 난분해성 유기오

Received 28 October, 2022; Revised 21 November, 2022;

Accepted 30 November, 2022

\*Corresponding author : Yong-Jun Jung, Department of Environmental engineering, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea  
Phone : +82-51-510-0625  
E-mail : yjjung@cup.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.  
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



Fig. 1. Schematic diagram of advanced treatment process of 1-series.

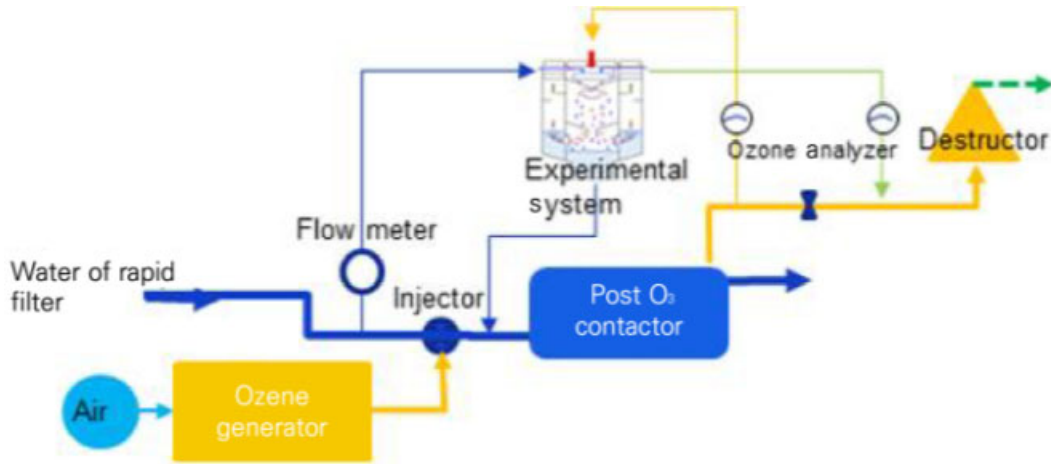


Fig. 2. Composition of ozone treatment facility and laboratory facility.

염물질을 효율적으로 분해할 수 있다(Kim and Park, 2009). 수중 오염물질 제거율에 영향을 주는 오존전달 효율은 오존 접촉조의 수리학적 특성과 체류시간 등에 의해 영향을 받는데, 오존 주입농도에서 미 반응하고 배출되는 배오존 농도를 제외한 값을 주입농도로 나누어서 계산할 수 있으므로 배오존 농도를 최소화해야 전달 효율을 높일 수 있다. 현재 국내에서 활용되고 있는 오존 접촉은 디퓨저, 인젝터, 터빈 등의 방식이 있는데, 가장 일반적으로 활용되고 있는 디퓨저방식의 접촉 효율은 대체로 80~90% 수준(Chung et al., 2010) 이므로 10~20% 배오존이 발생함에 따라 고가의 오존 생산 비용에도 불구하고 오존 파괴기에 의해 분해되어 대기중으로 방출되게 된다.

국내에서 가장 보편적으로 활용되고 있는 배오존 파괴기법인 열분해법은 배오존에 300℃~350℃로 가열하여 오존을 분해하는 방법으로 에너지 소모가 크다(Maarten et al., 1980; Jung, 2007). 에너지 소모를 줄일 수 있는 방법인 활성탄 흡착방식은 효율이 낮아 소규모로 활용되고 있고, 촉매분해법은 MnO, FeO, NiO 등의 촉매를 이용하여 50℃ 정도에서 분해가 가

능하지만 촉매 교체 등의 유지관리 문제가 있어 국내에서는 대부분 열분해 방식을 활용하고 있다(Kang et al., 2005). 오존은 대기환경기준에서 8시간 평균 농도는 평균 0.06 mg/L이고, 1시간 평균 농도는 0.1 mg/L 이하로 처리해야 하는 독성물질이다(Lee, 2003).

본 연구는 오존처리 공정에서 배출되는 고가의 오존을 배오존 분해 방식으로 낭비되는 기존의 방식을 개선하여 발생하는 배오존을 전량 공정수로 다시 용해시켜 재활용함으로써 오존처리 효율을 높이고 동시에 경제성을 향상시킬 수 있는 마이크로버블 시스템 개발을 목적으로 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험 장치

국가물산업클러스터 정수처리 시설은 1계열 표준고도처리공정 1일 1,000 ton 규모와 2계열 유망기술고도처리공정 1일 1,000 ton으로 구성되어 있다. 연구시설은 Fig.1과 같은 공정 흐름도를 가진 1계열 표준고도처리공정을 대상으로 후오존시설에 설치하여 평가하였다.

실험장치의 구성은 Fig. 2와 같이 후오존 접촉조에서 발생하는 배오존을 미세기포를 발생(Jung and Jung, 2020)시키는 마이크로 버블 시스템으로 유입시킴과 동시에 여과수도 실험장치로 유입시켜 배오존을 용해시킨다. 실험 장치를 통과한 여과수(오존 용해수)는 후오존접촉조로 유입되어 배오존을 재활용하는 방식으로 공정을 구성하였다.

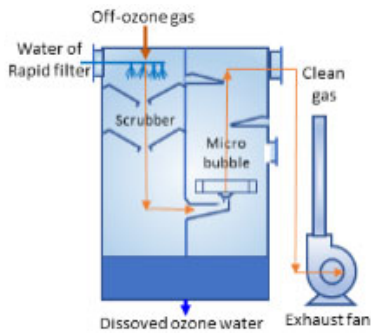


Fig. 3. Schematic diagram of laboratory

본 실험장치의 주요 공정은 Fig. 3과 같이 유입된 배오존 가스를 1차로 처리하는 세정공정과 2차로 처리하는 마이크로버블 공정으로 구성되어 있다. 세정공정에서는 배오존과 용해수가 강한 난류 접촉을 통해 배오존 용해가 이루어지고, 마이크로버블 공정에서 배오존 기체를 마이크로 단위로 기포화하여 용해수와 접촉시킴으로서 용해도를 극대화하였다. 실험장치의 배오존 용량은 0.5 m<sup>3</sup>/min 이며 흡입 송풍기를 통해 배오존을 실험 장치로 유입시키는 구조로 되어 있다.

연구시설의 오존 생산 원료 가스는 공기를 압축한 다

음 질소를 제거하여 순수 산소로 제조된 원료로 오존 발생기에서 오존을 생산하는 방식이다. 오존 발생기의 생산 농도와 주입농도 및 생산된 오존의 유입수량 대비 투입량은 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of ozone treatment and generation facility

Parameter	Range
Injection ozone (mg/L)	1~3
Ozone production con. (g/m <sup>3</sup> )	150
Raw gas	Pure oxygen
Oxygen flow (L/hr)	164 ~ 492
Inlet flow of water (m <sup>3</sup> /hr)	24

2.2. 실험 방법

후오존 공정에서 오존은 인젝트 방식으로 투입되고, 투입된 오존은 용존 오존측정기와 배오존은 배오존 측정기로 측정하였으며, 실험 장치에 유입된 오존도 방출 오존측정기로 측정하여 오존 물질수지를 계산하였다. 오존 접촉조와 실험 장치에 부착된 오존측정기 구성은 Fig. 4와 같다.

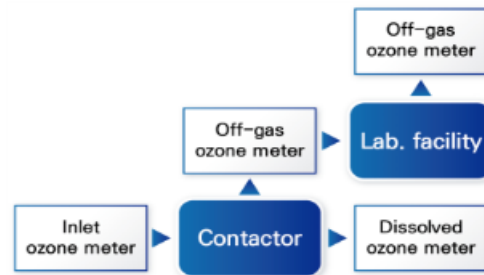


Fig. 4. Location of the installed ozone meter. facility.

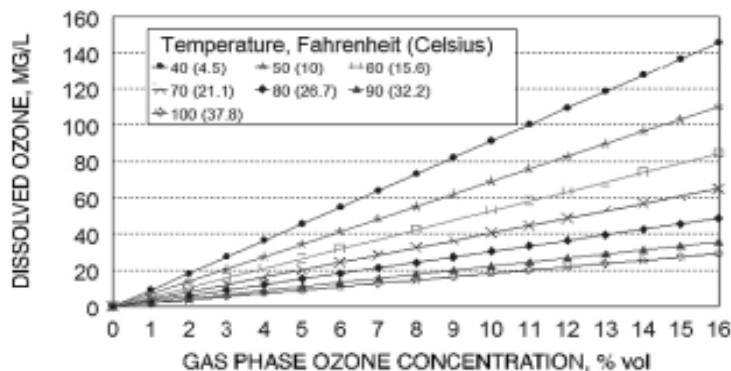


Fig. 5. Effect of gas phase concentration on ozone solubility (Busca et al., 2008).

**Table 2.** Transmission and utilization rate by ozone injection rate

Injection con. (g/m <sup>3</sup> )	1 ppm	2 ppm	3 ppm
(g/hr)	24	48	72
Exhaust con. (mL/m <sup>3</sup> )	9.4	231.7	657.7
(g/hr)	0.0066	0.1626	0.4616
Dissolved con. (g/m <sup>3</sup> )	0.001	0.109	0.322
g/hr	0.024	2.616	7.728
Transmission rate (%)	100.0	99.7	99.4
Utilization rate (%)	99.9	94.2	88.6

실험은 오존 주입량을 1 ppm에서 3 ppm까지 증가시키면서 접촉조에서 발생하는 배오존을 실험장치로 유입시키고 여과수를 일정량 씩 증가시키면서 용해도를 산출하였다. 실험 장치에 이용한 여과수량은 분당 2 L에서 10 L까지 실험하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 후오존 접촉조 오존 이용률

오존의 물에 대한 용해도는 물의 온도, 압력 그리고 용액 내 오존 가스의 양에 의해 결정된다. 오존 용해도는 헨리의 법칙으로 설명되며 포화 비율을 이용하여 다음과 같이 표현될 수 있다(James et al., 2007).

$$CL = CG \times S \times P$$

CL = 액체에 용해된 농도 (mg/L)

CG = 가스 농도 (g/m<sup>3</sup>)

S = Bunsen coefficient(용해도비), 온도 의존

P = 가스 압력(대기)

오존의 포화비는 순수한 물에 대한 비율이며 실제 오존 용해도는 물속에 유기물 농도, pH, 오존 반감기 등은 여러 변수에 의해 감소한다. 투입된 오존의 전달율은 투입된 오존량에서 배오존량을 제외한 값으로 산정할 수 있다. 즉 전달율은 처리수에 의해 분해된 오존량과 물에 녹은 용존 오존량을 의미한다. 또한 오존 이용률은 처리수에 의해 소모된 오존량으로 투입된 오존량에서 용존 오존량과 배오존량을 제외한 값으로 나타낸다(Malik et al., 2001).

$$\begin{aligned} \text{오존 전달효율} &= (\text{주입 오존량} - \text{배오존량}) / \text{주입 오존량} \\ \text{오존 이용률} &= (\text{주입 오존량} - \text{용존오존량} - \text{배오존량}) / \\ &\quad \text{주입 오존량} \end{aligned}$$

Table 2와 같이 오존 전달률은 1 ppm 주입시 거의 100%이었고, 3 ppm 주입시에도 99.4%로 매우 높게 나타났다. 1 ppm 오존 주입시 용존 오존농도가 매우 낮은 것은 후오존 유입수인 사여과지 유출수에 의해 오존이 모두 소모되었기 때문이다. 오존 접촉조에서 오존이 충분히 반응하였다는 것을 의미하므로 인젝트 방식 오존 투입은 오존의 전달률이 매우 높다는 것을 알 수 있다.

또한 오존 이용률은 1 ppm 주입시 99.9%이었고 2 ppm에서는 94.1%, 3 ppm은 88.6%인 점을 감안해 볼 때 대상 연구시설의 사여과지 유출수에 대한 후오존 주입률은 1 ppm 정도가 적정할 것으로 판단된다.

#### 3.2. 배오존 재활용 효율

후오존 접촉조에서 배출되는 배오존 농도를 1분 간격으로 측정하여 재활용 시설에 유입시키고 이를 여과수 유량 2 L/min 물량으로 실험장치를 통과시킨 후 실험장치에서 배출되는 오존 농도를 측정하였다. 1 ppm의 오존을 주입하였을 때, 오존접촉조에서 배출되는 배오존 농도는 Fig. 6과 같고, 4일 동안 배출되는 평균 배오존 농도는 9.4 mL/m<sup>3</sup>이었다. 또한 실험장치에서 재활용된 후에 배출되는 오존 농도는 Fig. 7과 같이 평균 농도가 0.18 mL/m<sup>3</sup>이었으므로 이용률은 98.2%이었다.

오존 주입률을 2 ppm으로 하였을 때, 오존접촉조에서 배출되는 오존 농도는 Fig. 8과 같이 평균 배오존 농도는 231.7 mL/m<sup>3</sup>이었고, 실험장치에서 재활용된 후에 배출되는 평균 오존 농도는 Fig. 9와 같이 4.89

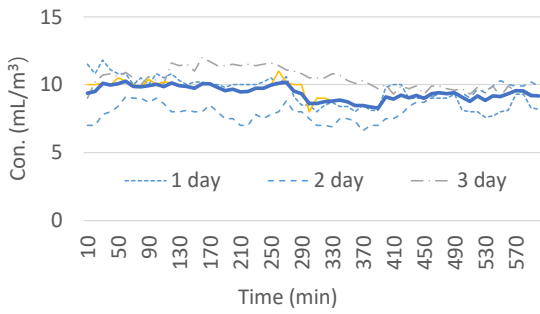


Fig. 6. Concentration of ozone off-gas emitted from ozone contact tank (1 ppm).

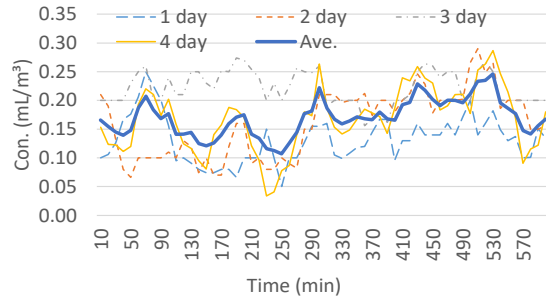


Fig. 7. Concentration of ozone off-gas ozone emitted from laboratory facility (1 ppm).

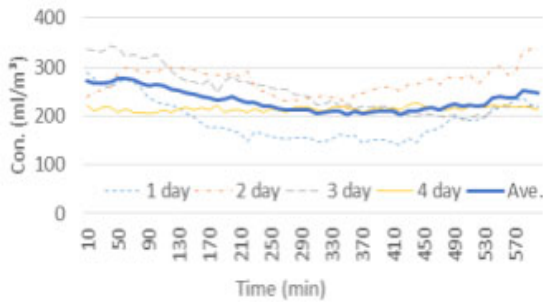


Fig. 8. Concentration of ozone off-gas emitted from ozone contact tank (2 ppm).

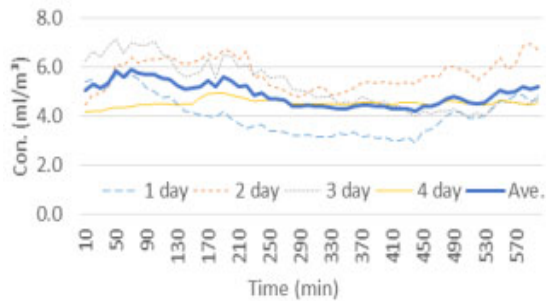


Fig. 9. Concentration of ozone off-gas emitted from laboratory facility (2 ppm).

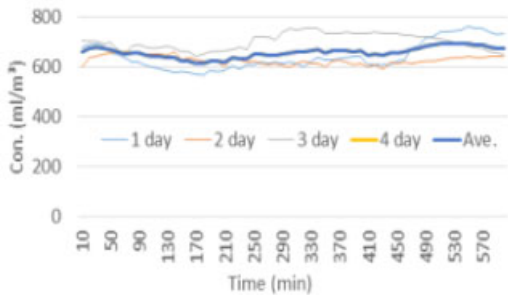


Fig. 10. Concentration of ozone off-gas emitted from ozone contact tank (3 ppm).

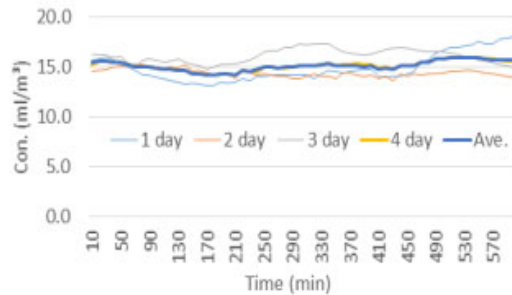


Fig. 11. Concentration of ozone off-gas emitted from laboratory facility (3 ppm).

mL/m<sup>3</sup>으로 이용률은 97.9%이었다.

오존 주입률이 3 ppm일 때, 오존접촉조에서 배출되는 오존 농도는 Fig. 10과 같이 평균 657.7 mL/m<sup>3</sup>이었고, 실험장치에서 재활용된 후에 배출되는 오존 농도는 Fig. 11과 같이 평균 15.12 mL/m<sup>3</sup>으로 이용률은

97.5%이었다.

오존 주입률을 1 ppm에서 3 ppm으로 증가하면 오존의 이용률은 98.2%, 97.9%, 97.5%로 조금씩 감소하는 경향을 보였는데, 이는 오존 농도가 높아질수록 오존의 분해 또는 흡수율이 감소한다는 것을 의미한다.

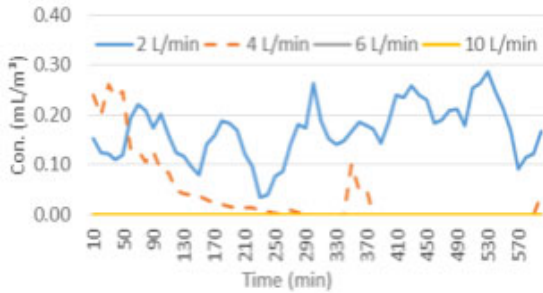


Fig. 12. Ozone utilization rate with increasing water flow (1 ppm).

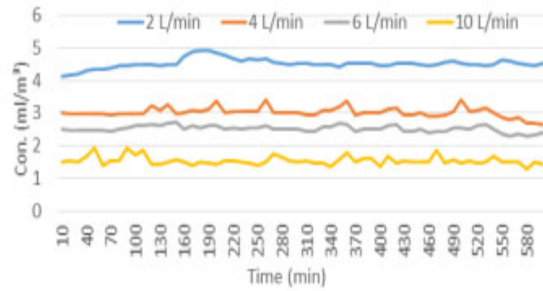


Fig. 13. Ozone utilization rate with increasing water flow (2 ppm).

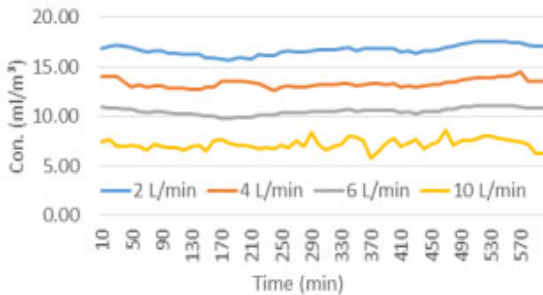


Fig. 14. Ozone utilization rate with increasing water flow (3 ppm).

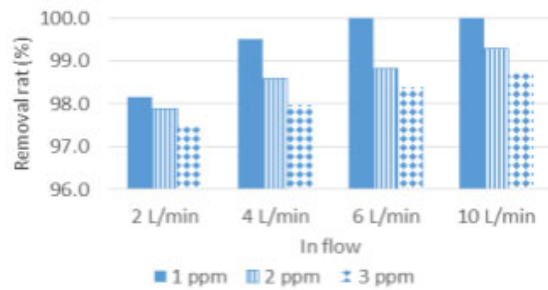


Fig. 15. Summary of ozone utilization with increasing water flow.

실험장치에 유입되는 여과수 유량을 2 L/min에서 4 L/min, 6 L/min, 10 L/min으로 점차 증가시키면서 방출되는 오존 농도를 측정하여 오존 재활용 효율을 평가하였다. Fig. 12에 제시한 바와 같이 오존 주입률이 1 ppm에서는 유량이 6 L/min 이상이면 이용률이 100%이었다. 주입률 2 ppm에서는 Fig. 13과 같이 유량 증가에 따라 97.6% 98.6% 98.8%, 99.3%로 나타나 평균 이용률은 98.6%이었고, 3 ppm에서는 Fig. 14와 같이 평균 98.1%이었다. Fig. 15에 정리한 바와 같이 유량이 증가하면 이용률도 증가하지만 주입률이 높아지면 증가 폭은 약간 감소하는 경향을 보였다.

### 3.3. 경제성 분석

오존처리 공정의 유지관리 비용은 크게 오존을 생산하기 위한 전 단계인 순 산소생산 비용과 오존생산 비용 및 시설공정 수선 유지관리비용으로 구분할 수 있다. 순 산소비용과 오존생산비 및 유지관리비용의 산정식은

아래와 같이 표현된다(Lee et al., 2008). 실험장치의 운영비용인 전력비는 연간 약 946천원으로 추정되며 전체 절감비용 산정 즉 경제성 분석에서는 제외하였다.

$$\begin{aligned} \text{실험장치 전력비} &= \text{단가}(112 \text{ 원/KWh}) \times \text{송풍기전력} \\ &\quad (108 \text{ KWh} \times 24\text{h} \times 365\text{d}) = 946\text{천원} \\ \text{순산소 비용} &= \text{산소구입비}(380\text{원/kg}) \times \text{평균오존주입율} \\ &\quad (\text{kg/m}^3) \times \text{연간 생산량}(\text{m}^3/\text{y}) / \text{오존발생농도} \\ &\quad (0.1\text{-}0.2) \\ \text{오존생산 전력비} &= \text{단가}(112\text{원/KWh}) \times \text{연간 생산량} \\ &\quad (\text{m}^3/\text{년}) \times \text{오존생산단가}(0.015\text{kWh/ton}) \\ \text{유지관비} &= \text{오존설비비}(15\text{원/ton}) \times 15\%/\text{년} \end{aligned}$$

오존처리시설의 운영비용인 순산소 생산비, 오존생산비, 시설유지관리비 등을 산출한 결과는 Table 3과 같다. 전체 비용 중에서 순산소 생산비용이 가장 높았고, 국내 오존처리시설 물량 대비 연간 오존생산과 유지관리 비용은 약 389억원으로 추정된다. 현재 국내 오존

**Table 3.** Calculation of ozone production cost and facility maintenance cost

Cost	Unit price	Calculation criteria	Calculation cost (thousand won)	Annual savings (thousand won)
Oxygen	380 (w/kg)	Injection rate : 2ppm Ozone con. 10%	31,075,541	38,864,870 × 0.15 = 5,829,731
Ozone	112 (w/kwh)	Power Consumption. 0.015(kwh/m <sup>3</sup> )	6,869,330	
Maintenance	15 (w/m <sup>3</sup> )	0.015/y	920,000	

\* Yearly production (m<sup>3</sup>/y) = 27,323,000 (m<sup>3</sup>/d) × 365 d × 0.41 (Ratio for ozone treatment) = 4,088,886,950

투입방식은 대부분 산기관 방식이 일반적으로 활용되고 있으나, 최근 시설은 인젝터 방식이 도입되고 있다. 산기관 방식의 오존 전달률은 대체로 80~90%로 알려져 있으므로 본 실험 장치를 도입하여 평균 약 15% 정도의 배오존을 활용한다고 가정할 경우 순수하게 오존 처리비용의 15%인 연간 약 58억 정도의 오존처리비용 절감 효과가 있을 것으로 추정된다.

**4. 결론**

오존처리공정에서 배출되는 배오존을 재활용하기 위해 국가물산업클러스터의 실증플랜트실 후오존 처리시설에 연구 장치를 설치하여 운영한 결과는 다음과 같다.

- 1) 오존 주입방식인 인젝터의 오존 전달률은 오존 주입률에 따라 약간의 차이가 있지만 대체로 약 99%로 매우 높은 전달률을 나타냈다.
- 2) 오존 재활용 시스템에서 오존 용해수를 분당 2 L에서 10 L까지 증가시킬 경우, 오존 접촉조의 주입률이 1 ppm에서 오존 재활용률은 평균 99.4%이었고, 오존주입률 2 ppm에서는 98.6%, 3 ppm에서는 98.1%로 매우 높게 나타났다.
- 3) 현재 국내 오존처리시설의 운영비를 순산소생산비, 오존생산비, 유지관리비로 구분하여 산정한 결과 연간 약 389억원으로 추정되고, 국내 대부분의 오존주입방식인 산기관방식의 오존 전달률을 약 85%로 가정하여 15% 배오존을 재활용할 경우 연간 절감액은 약 58억원으로 추정된다.

**REFERENCES**

Chung, J. W., Park, J. W., Lee, C. S., 2010, Effects of operating parameters on dissolved ozone and phenol

degradation in ozone contact reactor, J. Korean Soc. Environ. Eng., 32(5), 214-247.  
 James, R. J., Meyer, R. M., Bennett, J. P., 2007, A Profile of municipal drinking water plants utilizing a sidestream injection process, J. of the Int. Ozone Ass., 29(4), 297-302.  
 Jung, J. O., Jung, Y. J., 2020, Treatment of exhaust pollutants from a lime kiln of paper-mill with micro-bubble system, J. Env. Sci. Int., 29, 1025-1032.  
 Jung, K. J., 2007, A Study on non-discharge sludge system by microbubble Ozone, Korean Society of Water and Wastewater, B66-70.  
 Kang, T. H., Oh, B. S., Kwon, W. B., Sohn, B. Y., Kang, J. W., 2005, A Study on the ozone consumption rate for drinking water treatment process with ozone application, J. Korean Soc. Environ. Eng., 27(6), 663-669.  
 Kim, J. H., Park, J. H., 2009, A Study on the static mixer and microbubble of the sidestream ozone contact system to improve water treatment efficiency, Journal of Korean Society of Water and Wastewater, 23(6), 763-768.  
 Lee, K. H., Shin, H. S., Chae, S. H., An, H. W., Lim, J. L., 2008, Cost evaluation for the decision of advanced treatment processes, Journal of Korean Society of Water and Wastewater, 22(5), 511-516.  
 Lee S. Y., 2003, A Study of dissolved characteristics by ozone contactor type in the city water and sewage, Korean Society of Water and Wastewater, D97-103.  
 Maarten, S., President of IOA, 1980, Destruction of ozone off-gas by thermal catalytic method, ozone: Science & Engineering: J. of the Int. Ozone Ass., 2(4), 367-375.  
 Malik, M. A., Ghaffar, A., Malik, S. A., 2001, Water purification by electrical discharges, Plasma Sources Sci. Tech., 10, 82-91.  
 Ministry of Environment of Korea, 2016, The National Waterworks Comprehensive Plan for 2025.  
 Ministry of Environment of Korea, 2020, National Water and Sewerage Statistics.

- 
- Dr. Young-Man Cho  
Hankook Eng.,  
cho12211@daum.net
  - Dr. Jae-Ouk Jung  
Hankook Eng.,  
kimjungp@naver.com

- 
- Doctor's course. Kwang-Heon Lee  
Department of Environmental Engineering, Kwangwoon  
University  
lkheon@naver.com
  - Professor. Yong-Jun Jung  
Department of Environmental Engineering, Catholic  
University of Pusan  
yjjung@cup.ac.kr