

# 오존 접촉 반응기의 용존 오존 농도 및 페놀 분해에 미치는 운전변수의 영향

## Effects of Operating Parameters on Dissolved Ozone and Phenol Degradation in Ozone Contact Reactor

정재우<sup>†</sup> · 박정욱\* · 이춘식  
 Jae-Woo Chung<sup>†</sup> · Jeong-Wook Park\* · Chun-Sik Lee

진주산업대학교 환경공학과, \*산청군 환경보호과  
 Department of Environmental Engineering, Jinju National University  
 \*Department of Environmental Protection, Sancheong-gun

(2009년 12월 19일 접수, 2010년 2월 18일 채택)

**ABSTRACT** : The Effects of operating parameters such as initial pH, gaseous ozone concentration, supplied gas flow rate on dissolved ozone concentration and phenol degradation in ozone contact reactor were investigated. Dissolved ozone concentrations were saturated to constant values after a certain ozone contact time. The saturation values were influenced by experimental parameters. Dissolved ozone concentration decreased with the increase of initial pH because the ozone is unstable in high pH regions. The gaseous ozone concentration in a constant gas supply affected the saturation concentration of dissolved ozone and the injection rate of gas with a constant ozone concentration determined the rate to reach dissolved ozone saturation. Effects of operating parameters on phenol degradation were closely related with those of parameters on dissolved ozone concentration. Phenol degradation was enhanced by the increase of initial pH, because the degradation of dissolved ozone gave birth to free radicals which have much higher reactivity with phenol. Increase of gaseous ozone concentration and gas flow rate promoted the phenol degradation through the generation of dissolved ozone which plays the role in phenol degradation. The injection of methanol deteriorated the phenol degradation through the scavenging effect on OH radicals.

**Key words** : Ozonation, Dissolved ozone, Phenol degradation, Operating parameters

**요약** : 오존 접촉 반응기에서 용존 오존 농도 및 페놀 제거에 미치는 운전변수의 영향에 대해 실험실 규모 실험을 수행하였다. 반응기로 가스상 오존이 공급되고 일정한 시간이 경과한 후에 용존 오존 농도는 포화 농도에 도달하였으며 포화 농도의 크기는 운전 변수에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다. 수용액내의 오존은 높은 pH 조건에서 불안정하므로 용존 오존 농도는 용액의 초기 pH값이 증가함에 따라 감소하였다. 일정한 유량의 기체가 반응기로 공급되는 조건에서 가스상 오존 농도의 크기는 용존 오존의 포화농도에 중요한 영향을 미치며 일정한 농도의 가스상 오존이 공급될 때 가스 유량은 용존 오존이 포화되는 속도에 영향을 주는 것으로 관찰되었다. 페놀 제거에 미치는 운전변수의 영향은 각 운전변수가 용존 오존 농도에 미치는 영향과 밀접하게 관련되어 있는 것으로 나타났다. 용존 오존은 높은 pH 조건에서 빠르게 분해되어 페놀과의 반응성이 높은 자유라디칼을 생성시키므로 pH가 증가함에 따라 페놀 제거가 향상되었다. 동일한 pH 조건에서 가스상 오존 농도 및 가스 공급량의 증가는 용존 오존을 증가시킴으로써 페놀 분해를 증진시키는 것으로 나타났다. 메탄올의 주입은 OH 라디칼을 소비시켜 페놀 분해를 방해하는 것으로 관찰되었다.

**주제어** : 오존 접촉조, 용존 오존, 페놀 분해, 운전 변수

### 1. 서론

산업이 발달되고 산업구조가 다양화됨에 따라 기존의 생물학적 처리방법에 의해 분해가 되지 않는 난분해성 유기오염물질의 발생량이 증가하고 있으며 이러한 물질들은 인체 및 환경에 미치는 유해성이 높은 것으로 알려져 있다.<sup>1,2)</sup> 건강

과 환경에 대한 국민적 관심이 날로 증가하고 있으며 이를 반영하여 배출수의 수질기준을 비롯한 각종 환경 규제가 강화되고 있다. 이러한 시대적 흐름에 맞추어 사업장별 오염물질 발생 특성에 맞는 최적 공정을 도출하여 적용함으로써 오염물질을 저감시키는 노력이 필요한 실정이다.

현재, 난분해성 유기물을 처리하기 위해 OH 라디칼, 오존

<sup>†</sup>Corresponding author : E-mail : jwchung@jinju.ac.kr Tel: 055-751-3348 Fax: 055-751-3484

등을 포함한 물리·화학적 활성인자들을 활용하는 다양한 종류의 고급산화공정(AOPs, Advanced Oxidation Processes)이 개발되어 적용되고 있다. 현재까지 개발되어 적용되고 있거나 개발 중인 고급산화공정으로는 펜톤 산화공정, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV, UV/광촉매, 오존화 공정, 오존/UV, 플라즈마 공정 등을 들 수 있다.<sup>3~7)</sup>

이중 오존 처리공정은 정수처리 및 폐수처리 공정에서 유기물 산화, 소독, 살균 등을 위해 광범위하게 적용되어 왔으며 국내에서도 일부 정수처리장의 고도정수 처리공정으로 적용되고 있다. 오존 처리공정은 처리방법이 비교적 간단하고 처리 후에 발생하는 부산물이 적다는 장점을 가지고 있다.<sup>8~10)</sup>

수 처리과정에서 오존의 반응은 1) 오존에 의한 직접 산화 반응과 2) 오존이 자기분해되어 생성된 OH 라디칼을 포함한 자유라디칼에 의한 산화 반응으로 구분할 수 있다.<sup>11~13)</sup> 오존과 OH 라디칼은 높은 산화 전위(oxidation potentials)를 가지므로 난분해성 유기오염물질을 효율적으로 분해할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 오존은 OH 라디칼에 비해 높은 선택성(selectivity)을 가지므로 오염물질의 종류에 따른 적용상의 제한성을 가지게 된다. 이에 반해 OH 라디칼은 강한 산화력과 더불어 선택성이 낮으므로 거의 모든 유기오염물질을 효율적으로 처리할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 OH 라디칼은 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, SO<sub>3</sub><sup>-</sup> 등 물속에 존재할 수 있는 다양한 라디칼 소비인자(scavenger)의 영향을 받는다는 단점을 가지고 있는 것으로 알려져 있다.<sup>13,14)</sup> 즉, OH 라디칼과의 반응속도 측면에서 제거하고자 하는 유기오염물질과 비교하여 비슷하거나 높은 반응속도를 가진 소비인자가 존재하는 경우에 유기오염물질의 분해가 크게 방해받게 된다. 이러한 측면에서 오염물질 처리에 오존 및 OH 라디칼을 동시에 활용할 수 있는 오존 처리공정은 오존의 선택성과 라디칼 소비인자에 의한 OH 라디칼의 제한성을 상호 보완할 수 있다는 장점을 가지고 있는 것으로 평가할 수 있다.

오존 접촉 공정은 다양한 현장 적용이 이루어지고 있는 상태이나 다양한 운전조건의 검토를 통해 얻어진 최적 운전조건에서 운전될 필요가 있다. 즉, 공정을 효율적으로 적용하기 위해서는 오존 접촉 공정의 유기오염물질 제거 특성에 영향을 미칠 수 있는 다양한 운전변수의 영향을 명확하게 규명할 필요가 있다. 본 연구에서는 오존 접촉 공정의 주요 운전인자들을 중심으로 공정 효율에 미치는 영향을 실험함으로써 유기오염물질 처리를 위한 오존 접촉 공정의 적용 측면에서 고려하여야 할 기초 자료들을 얻고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치의 구성도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험에서 사용된 오존 접촉 공정은 가스상 오존 발생장치, 오존 접촉 반응기 및 분석 장치로 구성되었다. 가스상 오존을 발생시키기 위해 무성 방전(dielectric barrier discharges)을 활용하는 오존 발생기(Fischer Ozone 500M, Germany)를 사용하였으며 유입 기체로 순산소를 주입시켰다. 오존 접촉 반응기는 직경 7.5 cm, 높이 61 cm로 원통형 아크릴관을 사용하여 제작하였으며 가스상 오존의 공급은 반응기의 하단부에 설치된 산기석을 통해 이루어졌다. 오존 접촉 실험을 수행하는 동안에 시료의 채취와 용액의 혼합을 위해 peristaltic pump(EYELA, RP-1000)를 이용하여 용액을 순환시키면서 실험하였다. 본 실험의 주요 분석항목은 가스상 오존, 용존 오존 및 페놀의 농도이며 이들의 측정을 위해 분석기기를 이용한 분석 또는 화학적 분석 방법을 이용하였다.

### 2.2. 실험 및 분석 방법

본 연구에서는 오존 접촉 공정의 용존 오존 농도 및 페놀 분해 특성에 미치는 주요 운전변수의 영향을 관찰하고자 하였으며 실험된 운전 변수 및 범위를 Table 1에 나타내었다.

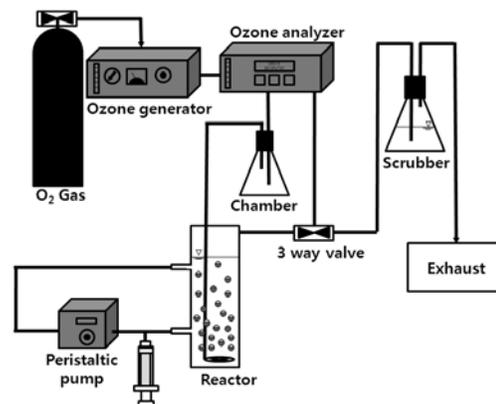


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

Table 1. Major experimental parameters and ranges

Parameter	Range
Phenol Concentration (mg/L)	100
Ozonation time (min)	100
O <sub>3</sub> Concentration (ppm)	1400~8000
Gas flow rate (LPM)	0.2~1.0
Initial acidity (pH)	3~11
Methanol concentration (mM)	0~6

모든 실험은 오존 접촉 반응기에 2 L의 수용액을 주입시킨 후에 오존을 포함한 가스를 100분간 공급하면서 batch식으로 진행하였다.

용존 오존 농도에 미치는 운전 변수의 영향을 관찰하기 위해 오존 접촉 반응기에 증류수를 채운 후에 가스상 오존을 공급하였다. 오존 농도에 미치는 가스상 오존 농도를 관찰하기 위해 2,000~8,000 ppm의 오존 농도를 가진 가스를 0.5 LPM의 속도로 공급하면서 용존 오존 농도를 분석하였다. 가스상 오존이 공급이 시작된 후에 초기에는 5분 간격으로 용존 오존을 분석하였으며 10분이 경과한 후부터는 10분 간격으로 분석하였다. 용존 오존 농도에 미치는 가스 공급량의 영향을 관찰하기 위해 5000 ppm의 오존 농도를 가진 가스를 0.2~1.0 LPM의 속도로 공급하였다. 초기 pH의 영향을 관찰하기 위해 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)과 수산화나트륨(NaOH)을 사용하여 3~11의 범위에서 pH를 변화시키며 실험하였다.

오존 접촉 반응기에서 폐놀의 분해 특성에 미치는 운전 변수의 영향을 관찰하기 위해 100 ppm의 폐놀 농도를 가진 수용액을 대상으로 폐놀 제거에 미치는 가스상 오존 농도, 가스 공급량, pH의 영향을 알아보고자 하였다. 폐놀 분해에 미치는 가스상 오존 농도의 영향을 관찰하기 위해 1,400~8,000 ppm의 범위의 오존 농도를 가진 기체를 1 LPM의 속도로 공급하였다. 폐놀 분해에 미치는 가스 공급량 및 pH의 영향을 보기 위해서는 용존 오존 실험과 동일한 조건에서 실험하였다. 이와 더불어 0~6 mM의 메탄올을 주입하여 실험함으로써 폐놀 분해 특성에 미치는 라디칼 소비인자(scavenger)의 영향을 관찰하고자 하였다. 모든 실험은 20~25°C의 상온조건에서 수행하였다.

오존 접촉 반응기로 공급되는 가스상 오존 농도는 254 nm의 파장의 흡수 특성을 이용하는 오존 분석기(In USA In-2000, USA)를 사용하여 측정하였다. 용존 오존 농도를 분석하기 위해 용존 오존에 의한 인디고 시약의 탈색 특성을 활용하는 인디고 방법(indigo method)을 이용하였다.<sup>15,16)</sup> 일정한 시간 간격으로 채취된 시료를 인디고 용액과 혼합한 후 UV/VIS Spectrophotometer(Agilent Technologies 8453)를 이용하여 600 nm의 파장에서 흡광도를 측정하였다. 폐놀 농도를 분석하기 위해 고성능 액체크로마토그래피(HPLC, Agilent 1200 Series)를 사용하였다. 비극성 칼럼(Zorbax C18)을 사용하였으며 메탄올과 증류수를 60:40의 비율로 혼합한 용액을 이동상으로 하여 0.9 mL/min의 속도로 주입하면서 254 nm의 파장에서 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 용존 오존 농도에 미치는 운전변수의 영향

Fig. 2는 오존 접촉 반응기로 공급되는 가스의 유량을 0.5 LPM으로 일정하게 유지시킨 조건에서 용존 오존 농도에 미치는 가스상 오존 농도의 영향을 나타내고 있다. 실험된 모든 가스상 오존 농도 조건에서 일정 시간이 지나면 용존 오존 농도가 포화되는 현상이 관찰되었으며 포화 농도는 가스상 오존 농도가 증가함에 따라 높은 값을 가지는 것으로 나타났다. 또한 가스상 오존 농도가 증가함에 따라 용존 오존 농도가 포화되는데 걸리는 시간이 감소하는 현상이 관찰되었다. 즉, 가스상 오존 농도를 2,000, 5,000, 8,000 ppm으로 증가시키기에 따라 용존 오존의 포화농도는 약 0.6, 1.5, 2.0 ppm으로 증가하였으며 포화 농도에 도달하는 시간은 대략 30분, 20분, 10분으로 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 오존 접촉 반응기에서 공급되는 가스의 오존 농도가 증가할수록 수용액으로의 오존 전달이 원활하게 이루어져서 나타나는 현상인 것으로 판단된다.

가스상 오존 농도가 5,000 ppm으로 일정한 조건에서 용존 오존 농도에 미치는 가스 공급량의 영향을 Fig. 3에 나타내었다. 모든 유량조건에서 일정한 시간이 경과한 후에 용존 오존 농도가 거의 비슷한 값으로 포화되었으며 가스의 공급

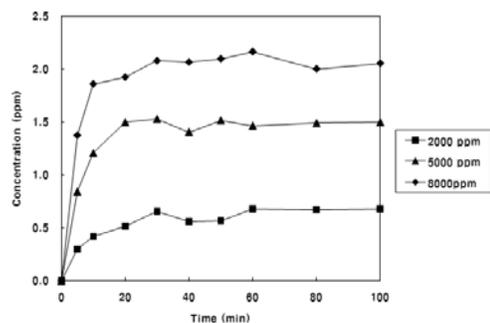


Fig. 2. Effect of gaseous ozone concentration on dissolved O<sub>3</sub> concentration (gas flow rate = 0.5 LPM).

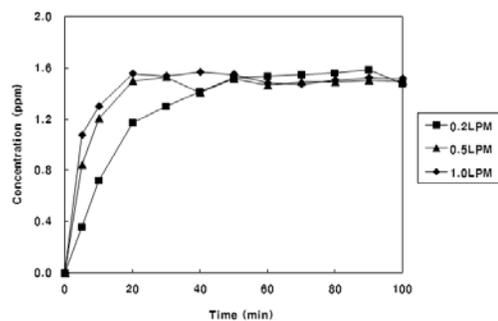


Fig. 3. Effect of gas flow rate on dissolved O<sub>3</sub> concentration (gaseous O<sub>3</sub> conc.=5000 ppm).

량이 증가할수록 빠르게 포화되는 현상이 관찰되었다. 가스 공급량이 0.2, 0.5, 1.0 LPM으로 증가함에 따라 용존 오존의 포화농도에 도달하는 시간은 각각 50분, 20분, 15분으로 감소하는 것으로 나타났다.

이상과 같은 결과들로부터 용존 오존의 포화농도는 가스상 오존의 농도에 의해 큰 영향을 받으며 포화농도에 도달하는 속도는 가스상 오존 농도뿐만 아니라 가스 공급량에 의해서 영향을 받는 것을 알 수 있다. 즉, 용존 오존의 포화농도는 공급되는 가스상 오존의 농도를 높여 증가시킬 수 있으며 이에 미치는 가스 유량의 영향은 크지 않은 것으로 보인다. 또한 일정한 오존 농도를 가진 가스의 공급량을 증가시킴으로써 용존 오존의 포화농도에 도달하는 시간을 감소시킬 수 있다.

Fig. 4는 5,000 ppm의 오존 농도를 가진 가스를 0.5 LPM의 속도로 공급하면서 용존 오존 농도에 미치는 초기 pH의 영향을 관찰한 결과이다. 용액의 초기 pH가 산성인 경우(pH 3, 5)에 용존 오존의 농도는 초기 20분까지 빠른 속도로 증가하여 비교적 일정한 농도로 포화되었다. 초기 pH가 9인 조건에서는 용존 오존 농도가 50분까지 증가하다가 50분 이후부터 다소 감소하였으며 pH가 11인 조건에서는 가스상 오존의 공급 시간에 상관없이 0~0.1 ppm의 낮은 값을 가지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 용존 오존이 낮은 pH에서는 안정적으로 유지되며 pH가 증가할수록 빠르게 분해됨을 보여준다. 앞에서 설명한 바와 같이 오존의 자기분해는 OH 라디칼을 포함한 다양한 활성 라디칼들을 생성시킬 수 있으므로 오존화 공정이 유기오염물질을 처리할 때 가지는 선택성(selectivity) 문제를 감소시키는 효과를 가져올 수 있다. 오존은 OH<sup>-</sup>와 반응하여 일련의 연쇄 반응(chain reactions)을 통해 OH 라디칼을 생성한다. 이러한 오존의 자기분해 반응은 일련의 연쇄반응을 통해 일어나며 용존 유기물의 특성에 따라 가속화되거나 방해받을 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>14)</sup>

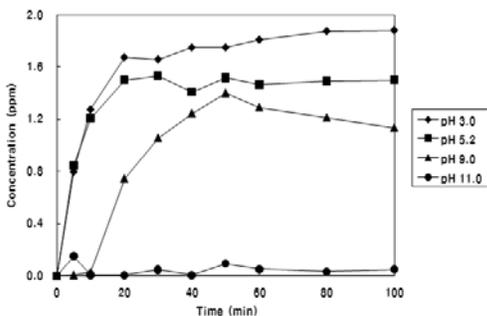


Fig. 4. Effect of initial pH on dissolved O<sub>3</sub> concentration (gaseous O<sub>3</sub> conc = 5000 ppm, gas flow rate = 0.5 LPM).

따라서 pH 증가에 따라 용존 오존 농도가 감소하는 것은 pH가 증가함에 따라 수용액내에 OH<sup>-</sup> 이온이 증가함으로써 오존의 자기분해를 촉진시켜 얻어진 결과로 해석된다.

### 3.2. 페놀 분해에 미치는 운전 변수의 영향

100 ppm의 초기 페놀 농도를 가진 수용액에 1 LPM의 일정한 유량으로 가스를 공급한 조건에서 페놀 분해에 미치는 가스상 오존 농도의 영향을 Fig. 5에 나타내었다. 모든 가스상 오존 농도 조건에서 오존 접촉시간이 증가함에 따라 페놀 분해가 증가하며 가스상 오존 농도가 증가함에 따라 페놀 분해 속도가 커지는 현상을 관찰할 수 있다. 반응기로 주입되는 가스상 오존 농도가 1,400, 3,000, 5,000, 8,000 ppm인 조건에서 접촉 시간 100분 경과한 후에 얻어진 페놀 분해 효율은 각각 58.7%, 77.1%, 84.7%, 93.4%인 것으로 나타나 가스상 오존 농도가 증가할수록 페놀 제거 반응이 활발하게 진행됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 앞에서 나타난 바와 같이 가스상 오존 농도가 증가할수록 높은 농도의 용존 오존이 페놀과 반응하여 얻어진 것으로 판단된다.

Fig. 6은 반응기로 주입되는 가스상 오존의 농도가 5,000 ppm인 조건에서 페놀 분해에 미치는 가스 공급량의 영향을 나타내고 있으며 가스 공급량이 증가함에 따라 페놀의 분해

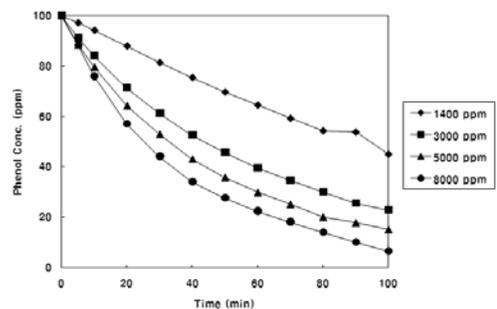


Fig. 5. Effect of gaseous ozone concentration on phenol decomposition (gas flow rate = 1.0 LPM, pH<sub>0</sub> = 5.1~5.5)

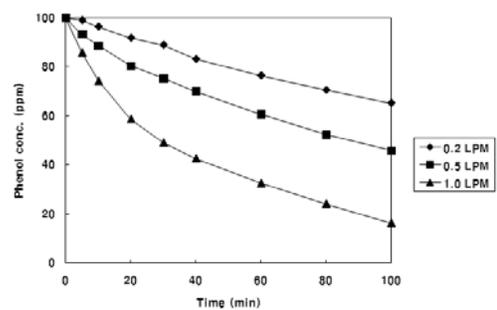


Fig. 6. Effect of input gas flow rate on phenol decomposition (gaseous O<sub>3</sub> conc. = 5000 ppm, pH<sub>0</sub> = 5.1~5.5).

속도가 증가하는 현상을 관찰할 수 있다. 오존 접촉 반응기로 공급되는 가스 유량이 0.2, 0.5, 1.0 LPM인 조건에서 각각 34.8%, 54.2%, 83.7%의 페놀 분해 효율이 얻어졌다.

Fig. 5 및 Fig. 6에서 나타난 페놀 제거에 미치는 가스상 오존 농도 및 가스 공급량의 영향에 관한 결과들은 앞에서 나타난 용존 오존 농도에 미치는 이들 운전인자의 영향과 관련되어 얻어진 것으로 판단된다. 즉, 수용액의 초기 pH가 산성 조건임을 고려할 때, 용존 오존의 자기분해는 크게 일어나지 않으며 이러한 조건에서 용존 오존에 의한 산화반응이 페놀 분해에 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다. 즉, 가스상 오존 농도 및 가스 공급량이 증가함에 따라 용존 오존이 증가하므로 페놀 분해 효율이 증가하는 것으로 판단된다.

오존 접촉 반응기로 5,000 ppm의 오존 농도를 가스를 1.0 LPM의 속도로 공급할 때, 페놀 분해에 미치는 초기 pH의 영향을 Fig. 7에 나타내었다. 모든 pH 조건에서 오존 접촉 시간이 경과함에 따라 페놀 분해가 증가하였으며 pH가 증가할수록 페놀 분해 속도가 크게 증가하는 현상이 관찰되었다. 앞에서 살펴본 바와 같이 용존 오존은 산성 조건에서 안정하며 pH가 증가함에 따라 OH<sup>-</sup> 이온이 참여하는 자기분해 반응의 속도가 증가하여 OH 라디칼을 포함한 자유 라디칼을 증가시키게 된다. 즉, 페놀의 제거는 초기 pH가 낮은 경우에는 오존의 자기분해가 느리므로 오존과의 반응에 의해 주로 일어나며 pH가 높은 경우에는 오존의 자기분해에 의해 생성된 자유 라디칼과의 반응에 의해 일어나게 된다.<sup>14)</sup> 페놀과 오존의 반응( $k=1.3 \pm 0.3 \times 10^3 \text{ mol}^{-1}\text{s}^{-1}\text{L}$ )은 OH 라디칼의 반응( $k=6.6 \times 10^9 \text{ mol}^{-1}\text{s}^{-1}\text{L}$ )보다 매우 느리므로<sup>17~19)</sup> 높은 pH 조건에서 용존 오존의 자기분해는 페놀의 분해 속도를 크게 증가시키게 된다. 초기 pH가 3, 5, 7, 9인 조건에서 100분의 오존 접촉이 이루어진 후에 남아있는 페놀의 농도는 각각 43.64 ppm, 15.26 ppm, 17.1 ppm 및 8.33 ppm으로 나타났으며 pH가 11인 경우에는 50분이 경과한 후에 모든 페놀이 분해되는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 오존 접촉 공정에서 페놀 제거에 미치는 메탄올 주입의 영향을 나타내고 있다. 메탄올의 주입량은 6.8 mM 및 0.68 mM이었다. 각 조건별 오존 접촉 시간 100분이 경과한 후에 얻어진 페놀 분해 효율은 메탄올을 주입하지 않은 조건에서 84.7%, 0.68 mM의 메탄올을 주입한 조건에서 76.6%, 6.8 mM의 메탄올을 주입한 조건에서 55.5%인 것으로 나타났다. 즉, 메탄올의 주입으로 인해 페놀의 분해 효율이 감소되는 현상이 관찰되었으며 주입된 메탄올 양이 높을수록 페놀 분해 효율의 감소폭이 큰 것으로 나타났다.

오존 접촉 공정에서 페놀과 메탄올이 동시에 존재하는 경

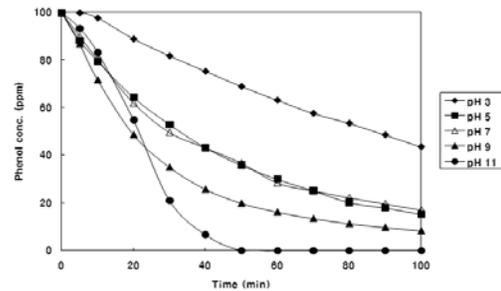


Fig. 7. Effect of initial pH on phenol decomposition (gaseous O<sub>3</sub> conc. = 5000 ppm, gas flow rate = 1.0 LPM).

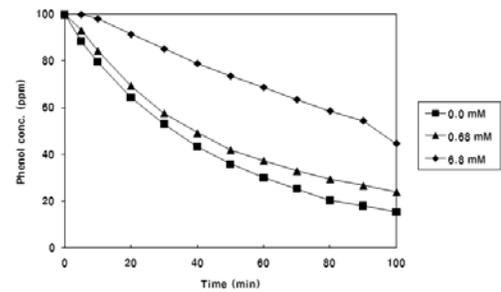


Fig. 8. Effect of methanol injection on phenol degradation.

우에 오존과 메탄올의 반응속도( $k=2.4 \times 10^{-2} \text{ mol}^{-1}\text{s}^{-1}\text{L}$ )는 오존과 페놀의 반응속도( $k=1.3 \pm 0.3 \times 10^3 \text{ mol}^{-1}\text{s}^{-1}\text{L}$ )에 비해 매우 낮으므로 오존은 페놀의 분해를 위해 이용된다.<sup>17,18)</sup> 그러나 OH 라디칼의 경우, 페놀과의 반응속도( $k=6.6 \times 10^9 \text{ mol}^{-1}\text{s}^{-1}\text{L}$ )가 메탄올과의 반응속도( $k=9.7 \times 10^8 \text{ mol}^{-1}\text{s}^{-1}\text{L}$ )와 큰 차이를 보이지 않으므로<sup>19)</sup> 메탄올은 OH 라디칼의 소비인자(scavenger)로 작용할 수 있다. 따라서, 메탄올의 주입에 의해 OH 라디칼에 의한 페놀 분해 반응을 억제되므로 페놀의 분해 효율이 감소하게 되며 이러한 경우에 O<sub>3</sub>의 역할이 상대적으로 중요하게 된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 오존 접촉 반응기에서 용존 오존 농도 및 페놀 분해에 미치는 주요 운전변수들의 영향에 관해 실험하였으며 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 용존 오존 농도에 미치는 운전 변수의 영향을 관찰한 결과, 용존 오존은 모든 조건에서 일정한 오존 접촉 시간이 경과한 후에 포화농도에 도달하는 것으로 나타났으며 포화농도의 크기는 가스상 오존의 농도에 큰 영향을 받으며 포화농도에 도달하는 속도는 가스상 오존농도 뿐만 아니라 가스 공급량에 의해 영향을 받는 것으로

관찰되었다.

2. 오존 접촉 반응기에서 페놀의 분해 특성에 미치는 운전 변수의 영향은 용존 오존 농도에 미치는 운전 변수의 영향과 밀접하게 관련되어 있는 것으로 관찰되었다. 높은 가스상 오존 농도를 가진 가스가 주입되는 조건에서 상대적으로 높은 농도의 용존 오존이 생성되므로 페놀 분해를 증가시키며 가스 공급량이 많을수록 용액으로의 오존 전달이 원활하게 진행되므로 페놀 분해를 향상시키는 것으로 나타났다.
3. 용액의 pH는 오존의 안정성과 자기분해에 영향을 미치므로 용존 오존 농도 및 페놀 분해 특성에 영향을 주는 것으로 나타났다. 오존은 낮은 pH 조건에서는 안정하므로 높은 용존 오존 농도가 형성되며 pH의 증가함에 따라 불안정해져서 OH 라디칼을 비롯한 활성 라디칼로 자기 분해되므로 낮은 용존 오존 농도가 형성되는 것으로 나타났다. 오존의 자기 분해에 의해 생성되는 활성 라디칼은 페놀과의 반응성이 훨씬 높으므로 페놀의 분해 효율은 pH가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다.
4. 오존 접촉 반응기에 OH 라디칼의 소비 인자로서 주입된 메탄올은 페놀의 분해를 방해하는 것으로 나타나 오존 접촉 공정에서 유기 오염물질의 제거효율이 원수에 존재할 수 있는 탄산염 이온, 황산염 이온 등 다양한 OH 라디칼 소비 인자에 의해 영향을 받을 수 있음을 나타내며 공정의 운전에 있어 원수의 성상을 면밀하게 검토할 필요가 있음을 보여준다.

**KSEE**

**감사의 글**

본 연구는 진주산업대학교 산학협력대학육성사업단 기술개발사업의 지원을 받아 (주)이앤비테크와 산학협력과제로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

**참고문헌**

1. 윤제용, 엄철민, 박훈수, “국내 정수처리공정에서 오존 공정 시설의 현황과 특성.” 상하수도학회지, **16**, 279~292(2001).
2. G. Busca, S. Berardinelli, C. Resini and L. Arrighi, “Technologies for the removal of phenol from fluid streams: A short review of recent developments,” *J. Hazard. Mater.*, **160**, 265~ 288(2008).
3. 이규훈, 정대영, 박태주, “석유화학공장 방류수내 난분해성 유기물

- 의 Fenton 산화처리,” 한국환경과학회지, **5**(1), 51~59(1996).
4. 목영선, 조진오, 김석태, 정우태, 강덕원, 이병호, 김진길, “펜톤 시스템에서의 과산화수소분해연구,” 대한환경공학회지, **29**(1), 68~73(2007).
5. 서혜민, 조순행, 하동윤, “UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/TiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Photo-Fenton 산화방법에 의한 Citric Acid의 분해효율 비교,” 대한환경공학회지, **28**(4), 429~437(2006).
6. 이병천, 이순화, 이철희, “오존산화 공정에서 염색폐수가 혼합된 하수의 색도 제거 및 분포특성 연구,” 대한환경공학회지, **29**(10), 1085~1092(2007).
7. M. A. Malik, A. Ghaffar and S. A. Malik, “Water purification by electrical discharges,” *Plasma Sources Sci. Technol.*, **10**, 82~91(2001).
8. U. Kogelschatz, “Ozone Generation and Dust Collection,” *Electrical Discharges for Environmental Purposes*, edited by E. M. Van Veldhuizen, pp. 315~ 344(1999).
9. A. G. Hill and R. G. Rice, “Historical Background, Properties and Applications,” *Handbook of Ozone Technology and Applications*, edited by R. G. Rice and A. Netzer, pp. 1~37(1982).
10. B. Eliasson and U. Kogelschatz, “Nonequilibrium volume plasma chemical processing,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **19**(16), 1063~1077(1991).
11. J. Staehelin and J. Hoigne, “Decomposition of ozone in water in the presence of organic solutes acting as promoters and inhibitors of radical chain reactions”, *Environ. Sci. Technol.*, **19**(12), 1206~1213(1985).
12. C. G. Hewes and R. P. Davison, “Kinetics of ozone decomposition and reaction with organics in water,” *AIChE J.*, **17**(1), 141~147(1971).
13. J. Hoigne, “Mechanisms, Rates and Selectivities of Oxidations of Organic Compounds Initiated by Ozonation of Water,” *Handbook of Ozone Technology and Applications*, edited by R. G. Rice and A. Netzer, pp. 341~379(1982).
14. M. S. Elovitz and U. Gunten, “Hydroxyl Radical/ Ozone Ratios During Ozonation Processes. I. The R<sub>ct</sub> Concept, Ozone,” *Science & Engineering*, **11**, 239~260(1999).
15. H. Bader and J. Hoigne, “Determination of Ozone in Water by the Indigo Method,” *Water Res.*, **15**, 449~456(1981).
16. 4500-O<sub>3</sub> Ozone(Residual), 18th edition of Standard Methods, edited by A. E. Greenberg, L. S. Clesceri and A. D. Eaton, 4~105(1992).
17. J. Hoigne and H. Bader, “Rate constants of reactions of ozone

- 
- with organic and inorganic compounds in water-I, Non-dissociating organic compounds," *Water Res.*, **17**, 173~183 (1983).
18. J. Hoigne and H. Bader, "Rate constants of reactions of ozone with organic and inorganic compounds in water-II, Dissociating organic compounds," *Water Res.*, **17**, 185~190(1983).
19. G. V. Buxton, C. L. Greenstock, W. P. Helman and A. B. Ross, "Critical Review of Rate Constants for Reactions of Hydrated Electrons, Hydrogen Atoms and Hydroxyl Radicals(-OH/O) in Aqueous Solution," *J. Phys. Chem. Data*, **17**(2), 51388(1988).