

전기장에 의해 생성된 미세기포를 이용한 페놀의 오존산화

신원태 · 정유진* · 성낙창^{†*}

한국과학재단 전문위원실 · *동아대학교 환경공학과

(2003년 9월 30일 접수, 2005년 12월 18일 채택)

Oxidation of Phenol Using Ozone-containing Microbubbles Formed by Electrostatic Spray

Won-Tae Shin · Yoo-Jin Jung* · Nak-Chang Sung^{†*}

Chemical Discipline Office of Directorates, Korea Science and Engineering Foundation

*Department of Environmental Engineering, Dong-A University

ABSTRACT : The use of ozone in water and wastewater treatment systems has been known to be a process that is limited by mass transfer. The most effective way to overcome this limitation is to increase the interfacial area available for mass transfer by decreasing the size of the ozone gas bubbles that are dispersed in solution. Electrostatic spraying(ES) of ozone into water was investigated in this work as a method of increasing the rate of mass transfer of ozone into a solution and thereby increasing the rate of phenol oxidation. Results were obtained for ES at input power levels ranging from 0 to 4 kV and compared with two different pore-size bubble diffusers(10~15 μm and 40~60 μm). It was determined that the rate of mass transfer could be increased by as much as 40% when the applied voltage was increased from 0 to 4 kV as a result of the smaller bubbles generated by ES. In addition, ES was shown to be more effective than the medium-pore-size(10~15 μm) bubble diffuser and the best results were achieved at low gas flow rates.

Key Words : Electrostatic Spraying, Microbubbles, Ozonation, Bubble Column

요약 : 상수나 하수처리장에서 쓰이는 오존처리는 물질전달에 제약을 받는 공정임은 알려져왔다. 이런 물질전달의 한계를 극복하는 방법으로 매우 효과적인 것은 오존가스를 함유한 기포의 크기를 줄임으로써 물질전달에 필요한 접촉면적을 넓히는 것이다. 오존의 전달을 크게 하기 위한 방법으로서 본 연구에서는 전기장분사(Electrostatic spraying; ES)를 사용하였다. 실험에서는 ES와 기포발생판을 비교하였는데 ES실험에서는 전압을 0 kV에서 4 kV 범위까지 높여주어 물질전달효과를 살펴보고 기포크기가 다른 두 가지 기포발생판(미세기공: 기공크기 10~15 μm, 중간기공: 기공크기 40~60 μm)을 사용하여 물질전달효율을 비교 분석 하였다. 물질전달효율은 시간의 경과에 따른 용존오존농도의 측정과 페놀의 산화시간으로 간접 계산하였다. 실험 결과 ES의 경우 전압을 0 kV에서 4 kV까지 올렸을 때 기포의 크기가 작아짐으로 인해 오존전달율을 약 40% 정도 향상시킬 수 있었다. 또한 ES와 기포발생판의 물질전달 비교실험에서 미세기공 기포발생판보다 4 kV의 ES가 더 효과적임을 알 수 있었다.

주제어 : 미세기포, 전기장분사, 오존처리, 기액반응기, 페놀, 오존

1. 서 론

최근 사업장에서 배출되는 유해 유기물을 함유한 폐수의 증가로 인해 음용수와 폐수에 함유된 유기물 처리의 중요성이 증가하고 있는 추세에 있다. 특히 주목할 만한 배출원은 제지 사업장, 석유제품 사업장, 식품제조 공장, 대도시에서 흘러나오는 폐수 등을 들 수 있다. 유기폐수 중에서도 배출량이 높고 오염에 대한 높은 관심의 대상이 되는 화합물로는 페놀류를 들 수 있다.¹⁾ 이런 유해 폐기물의 처리는 음용수 및 폐수 처리 사업장의 주요 관심사가 되고 있으며 처리공정의 지속적인 발전을 보여 왔다. 유해 폐기물처리가 중요하게 된 또 다른 원인은 방류수의 수질기준을 높이는 정부의 법률 때

문이기도 하다. 미국의 예로 1996년 제정된 The Safe Drinking Water Act(SDWA)는 haloacetic acid나 트리할로메탄같은 염소소독으로 인해 발생하는 소독부산물(Disinfection by-products: DBPs)에 관한 법도 포함하고 있는데 DBPs는 음용자의 건강을 위협할 수 있으므로 중요시되고 있다. 이로 인해 염소소독이 아닌 다른 소독방법들의 필요성이 점차 높아져 가고 있다. 이에 발맞추어 최근 음용수 및 상용수의 소독제로서 오존이 인기를 얻고 있다.

상수와 하수처리에서 상용되는 기포제조기에는 기포발생판이나 고무막 등 매우 다양한 방법들이 사용되고 있다. 기포발생판이나 막과 더불어 믹서나 임펠러같은 기계적인 힘을 사용하여 반응기내에서 기포를 제조하는 방법도 사용된다. 하지만 이런 종류의 기포제조법은 에너지를 유체전체에 투여함으로써 막대한 에너지손실을 가져오며 경우에 따라 반응기내에 물질전달을 방해하는 역교반(backmixing)도 야기할 수 있다. 현재 쓰이고 있는 기포제조법의 이런 단점들 때문에 물

[†] Corresponding author
E-mail: ncsung@donga.ac.kr
Tel: 051-200-7480

Fax: 051-200-7610

질전달율이 좋고 에너지도 절감과 동시에 좋은 교반조건을 만드는 새로운 기포제조방법이 개발되었는데 이 방법이 이번 논문의 실험에서 사용한 전기장분사(electrostatic spray: ES) 법이다. 전기장분사(ES)는 전도성이 낮은 용액에서 효과적으로 미세기포를 만들 수 있다고 알려져 있다.^{2,3)} 전기장분사법은 고전압을 사용하나 매우 낮은 전류(mA 수준)를 사용함으로써 적은 에너지를 소비하는 것으로 보고되고 있어 많은 동력을 필요로 하는 일반 기포발생법보다 경제적으로도 이점이 있다고 보고되고 있다.³⁾

본 연구에서는 상하수에 포함된 유기물 제거를 위해 새롭게 개발된 반응기인 전기장 오존 반응기(Electrostatic Ozonation Reactor: EOR)의 성능을 고찰하고자 한다. 기존의 오존 반응기와 마찬가지로 EOR도 기액반응기의 형식을 취하고 있지만, 기포제조방법이 기존의 오존 반응기와 구별된다. 기존의 오존 반응기는 기포발생판(diffuser)을 사용하거나 물리적인 교반기(mixer)를 사용하는 반면 EOR은 Shin 등³⁾에 의해 발표된 ES법에 오존가스를 적용한 방식을 이용하고 있다. 전자장분사방식을 사용하여 약 50 μm 정도의 미세기포를 만들 수 있는데, 이 미세기포로 기체상에서 액체상으로의 물질 전달율을 증가시킬 수 있어 오존처리의 효과를 높일 수 있다.²⁾ 또한 EOR에서는 전기장에 의해서 생성되는 전기유체적 흐름으로 교반에 필요한 기계적인 조작 없이 충분한 교반이 반응기내에서 이루어진다. 따라서 직접적인 교반이 없어 역교반이 생길 우려도 줄어든다.

이번 연구논문의 목적은 실제 공정에 사용되는 기포제조방식인 기포발생판과 새로운 공정인 EOR을 비교분석하는데 있다. 비교에는 폐놀의 산화실험과 오존의 물질전달 실험 및 모델링을 사용하였다. 이번 연구의 결과로 EOR이 실제 오존처리 공정에 적용될 수 있을지의 가능성여부를 검증하는 기회가 될 것으로 사료된다.

2. 실험

2.1. 실험방법

본 연구에 사용된 EOR 장치를 Fig. 1에 나타내었다. 오존 발생에 사용한 산소는 초건조, 초순도의 압축산소를 사용하였다. 오존은 코로나방전 오존발생기(O3 Associates, Model O3-22)를 사용하여 제조하였고 오존제조 후 지름 7.5 cm, 높이 30 cm인 유리 용기에 담아두었다. 반응기내로 일정한 농도의 오존을 공급하기 위하여 용기내의 오존이 자외선 흡광도(Hewlett-Packard, Model HP8452)로 측정된 수치가 일정한 농도에 도달한 것을 확인한 후, 50 mL 유리 주사기에 담아서 주사기펌프를 이용해 반응기로 보냈다. 오존이 반응기에 들어온 것을 확인한 후 고전압발생기(Spellman High Voltage Electronics, Model SL1200)를 이용하여 고전압을 걸어주고 동시에 UV/Vis를 작동시켜 반응기에 들어가고 나가는 오존의 농도를 석영셀을 이용하여 연속으로 측정하였다. 반응기를 빠져나가는 오존의 농도를 측정하는 다음 2% KI 용액으로 통과시켜 잔존농도를 제거하였다.

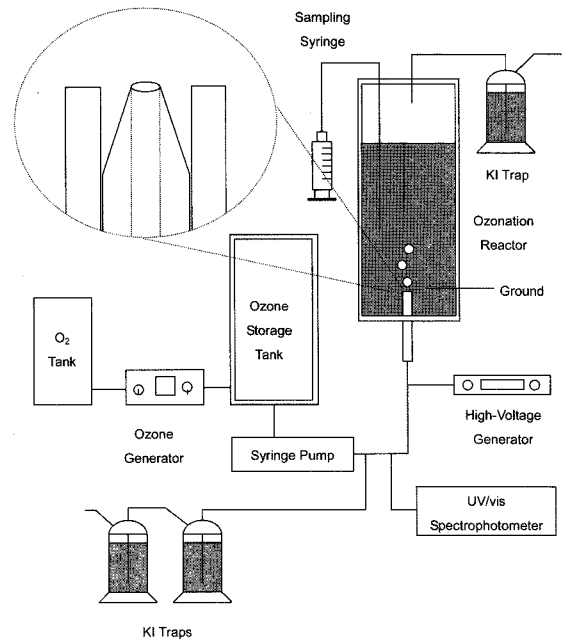


Fig. 1. Experimental setup of the electrostatic ozonation reactor(EOR) system with corona-discharge ozone generator.

Table 1. Average bubble diameter produced by electrostatic spraying(ES) and bubble diffuser(BD)

Method	0 kV(ES)	2 kV(ES)	4 kV(ES)	Diffuser(BD_M)
Diameter(mm)	1.34	0.45	0.05	0.36

반응기 속에 있는 용존 오존과 폐놀의 농도를 측정하기 위하여 실험이 진행되는 동안 일정한 시간간격으로 미량의 시료를 채취하였다. 시료는 반응기의 중간부분에 위치한 테프론관을 통해서 주사기로 채취하였다. EOR과 성능을 비교하기 위해서 사용한 기포발생판은 Pyrex(미세기공: 기공크기 10~15 μm(BD_M), 중간기공: 기공크기 40~60 μm(BD_C))제품을 사용하였다.

Table 1은 이번 실험에 사용된 두 가지 기포제조법(ES법과 기포발생판)으로 제조한 기포의 평균 크기를 나타내었다. 반응기로 유입되는 오존의 유량은 2.1 mL/min이었으며 ES의 경우 직경 0.25 mm인 모세관을 사용하여 오존을 반응기로 주입하였다. Table 1에서 보는바와 같이 미세기공 기포발생판(BD_M)은 약 2 kV의 ES와 상응되는 크기의 기포를 제조할 수 있는 것으로 나타났다. 하지만 ES 4 kV의 경우 미세기공 기포발생판보다 약 7배 작은 기포를 제조할 수 있어 미세기포 제조능력에서는 ES가 월등하다는 것을 알 수 있다.

2.2. 측정방법

2.2.1. 오존 측정

반응기로 유입되는 기체상의 오존농도는 UV/Vis를 사용하여 측정하였다. UV/Vis를 반응기 입구와 출구에 연결하고 연속으로 실시간 오존농도를 측정하였다. 측정은 UV파장 254 nm로 하였으며 측정치는 분자 흡수치를 사용하여 농도단위로 환산하였다.⁴⁾ 반응기내의 시료에 녹아있는 용존 오존농도

는 인디고 발색법을 이용하여 측정하였다. 실험이 진행되는 동안 일정한 시간간격으로 채취한 시료를 계산된 농도의 인디고용액에 넣어 반응시킨 다음 자외선 흡수법을 이용하여 남아있는 인디고염료의 농도를 계산하였다. 측정은 파장 600 nm에서 행했으며 측정치는 Standard methods Test 4500-O3 B5)에 따라 농도로 환산하였다.

2.2.2. 페놀농도 측정

SPME(Solid-phase Microextraction)는 물에 녹아 있는 페놀의 농도를 측정하기 위하여 Buchholz와 Pawliszyn⁶⁾에 의해 개발된 농축방법이다. 기존의 농축방법인 Liquid-Liquid Extraction(LLE)은 복잡한 준비과정과 많은 약품이 필요로 하는데 비해 SPME는 짧은 준비시간과 간단한 기기를 이용하는 장점이 있다. 무엇보다도 LLE는 분석오차가 15~20%를 보이는데 비해, SPME는 분석오차가 5~10% 범위라는 것이 큰 장점이라고 할 수 있다. SPME는 특수코팅섬유를 이용하여 분석코자 하는 물질을 흡수한 다음 GC를 이용하여 분석하는데, 코팅섬유는 분석대상에 따라 여러 가지를 사용할 수 있다. 극성 반휘발성 화합물인 페놀의 경우 85 μm polyacrylate coated fiber를 이용할 수 있다. 5 mL의 시료를 채취한 다음 고농도의 NaCl을 넣어 페놀을 코팅섬유로 이동하게 만든다. 약 15분간 시료내의 페놀을 코팅섬유로 흡수시키는데 이 시간동안 페놀은 코팅섬유 내에서 포화상태에 도달하게 된다. 흡수된 페놀은 GC에서 열에 의해 코팅섬유를 빠져나간다. GC Injector는 200℃로 유지시키고 splitless상태에서 운전하였다. 코팅섬유에서 페놀을 완전히 빼내기 위하여 코팅섬유는 7분 동안 GC injector에 놓아두었다. 최초 칼럼 hold-time은 45℃에서 7.7분이었고 그 뒤 온도는 10℃/min으로 190℃까지 올라가게 하였다. GC 주입 후 페놀은 12.9분에 peak가 나타나게 되는데 이때의 peak 면적을 표준농도 peak 면적과 비교하여 농도로 환산하였다.

페놀을 SPME법을 이용해 측정된 결과 농도치의 상대표준 편차는 6.4%를 보였다. 이 결과는 Buchholz와 Pawliszyn이 보인 결과와 유사한 값을 보이므로 이 실험에 쓰인 방법이 타당하다고 할 수 있겠다. 페놀 농도 측정에 사용한 GC는 Varian 3600CX GC with FID(Flame Ionization Detector)를 이용하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 실험결과 토의

실험에서 생성된 기포는 산소와 오존을 동시에 함유한 가스혼합물이다. 오존/산소 혼합가스를 주사기에 넣어서 UV/Vis에서 측정해 본 결과 시간의 변화에 따른 농도의 변화가 거의 없다는 것을 알 수 있었으며 이때 오존의 농도는 약 10 mg/L로 나타났다. 같은 농도를 이번 실험동안 계속 사용하였다.

Fig. 2는 반응기에 증류수를 넣고 오존을 분사시켜 시간의 변화에 따른 용존오존 농도의 변화를 보인 것이다. 이 실험

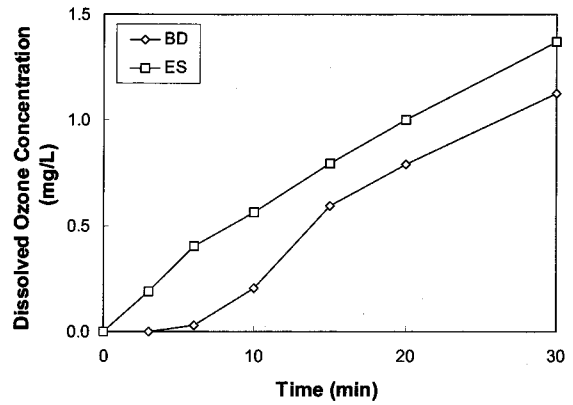


Fig. 2. Comparison of dissolved ozone concentration for electrostatic spraying and a bubble diffuser: ozone input concentration=10 mg/L and flow rate=2.1 mL/min.

에서는 오존유입 유량을 2.1 mL/min으로 유지하였고 ES법과 미세기공 기포발생판(BD_M)을 비교하였다. ES법에서는 전압을 4 kV로 유지하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 ES법이 기포발생판보다 더 높은 용존오존 농도를 보인다는 것을 알 수 있다. ES법은 미세기공 기포발생판보다 실험의 시작부터 30분까지 더 높은 용존오존 농도를 보였는데 30분후의 용존오존농도는 약 1.4 mg/L까지 도달하였다. 이 실험은 Table 1에서 보인 기포의 크기와 비례하는 결과를 보인 것이다. 즉, ES법의 작은 기포가 미세기공 기포발생판보다 더 많은 오존을 가스상에서 액상으로 전달했기 때문인 것으로 판단된다.

다음 실험에서는 반응기에서 빠져나가는 기체상 오존의 농도를 측정하였다. 반응기를 빠져나가는 오존의 농도는 다음 두 경우를 의미한다. 즉, 오존이 기포에서 물로 전달되지 못하고 반응기를 빠져나오든지 아니면 물이 이미 오존으로 포화되어 더 이상 용해되지 못하고 빠져나오는 경우를 들 수 있다. 반응기 내의 교반조건이 좋지 못하여 지역적인 포화상태를 보이는 경우 반응기내의 교반조건이 좋다면 더 많은 오존이 용해될 수 있을 것이다. 실험에는 전압 1 kV, 2 kV, 3 kV, 4 kV의 ES법과 미세기공 기포발생판(BD_M), 중간기공 기포발생판(BD_C)을 사용하였다.

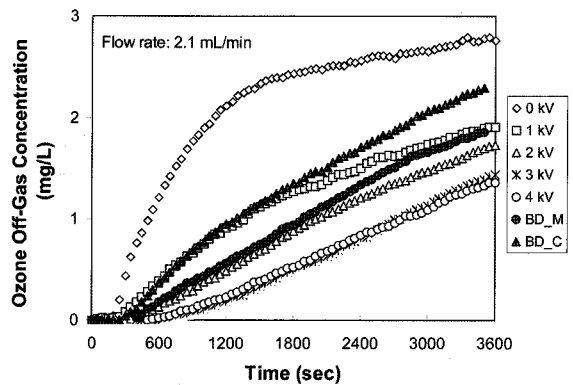


Fig. 3. Ozone off-gas measurements for ES and BD at ozone input concentration=10 mg/L and flow rate=2.1 mL/min.

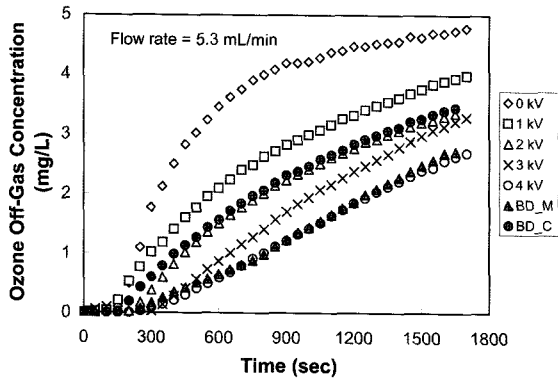


Fig. 4. Ozone off-gas measurements for ES and BD at ozone input concentration=10 mg/L and flow rate=5.3 mL/min.

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 기체유량 2.1 mL/min과 5.3 mL/min일 때 반응기를 빠져나오는 오존농도를 나타낸 것이다. 이 두 그림에서 보인 바와 같이 ES법으로 전압이 높아짐에 따라 반응기를 빠져나오는 오존의 농도는 줄어들고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 기포의 크기가 줄어들어 따라 오존의 기액전달이 늘어났기 때문임을 알 수 있다. 이 그림은 또한 오존처리가 물질전달에 따라 제한되는 공정임을 보여준다. Fig. 3과 같이 기체유량 2.1 mL/min일 때, 전압 2 kV, 3 kV, 4 kV의 ES법으로 생성된 기포가 BD_M과 BD_C에서 생성된 기포보다 더 좋은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 4와 같이 기체유량 5.3 mL/min일 때는 ES의 4 kV와 BD_M이 대등한 오존전달 효과를 내고 있음을 볼 수 있다. 이는 많은 유량을 유입시킴으로써 얻을 수 있는 범람효과(flooding effect)와 기체유량이 증가했을 때는 ES법이 전이단계에 도달하여 기포의 크기가 다양하게 변하는 등의 변화가 있기 때문인 것으로 풀이할 수 있다.³⁾

EOR의 유기물 산화능력을 관찰하기 위하여 폐놀용액을 반응기에 넣고 실험을 진행하였다. Fig. 5는 0 kV와 2 kV의 ES와 BD_M를 사용했을 때 볼 수 있는 폐놀농도의 변화를 보였다. 이 실험에서는 폐놀농도 약 1.0 mg/L와 기체유량

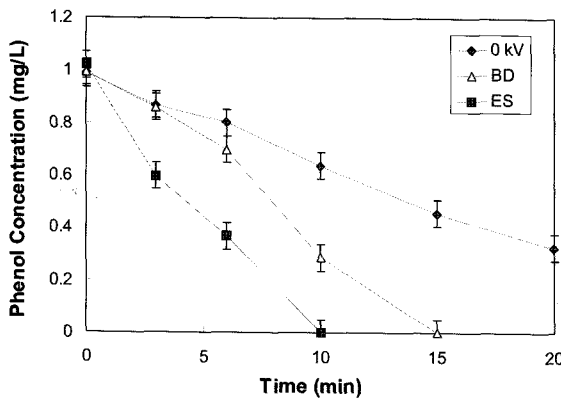


Fig. 5. Comparison of phenol oxidation: initial phenol concentration=1 mg/L, ozone input concentration=10 mg/L, and flow rate=2.1 mL/min.

2.1 mL/min을 사용하였다. 실험 중 채취한 시료는 SPME와 GC/FID를 이용하여 분석하였다. 그림에서 보는 것과 같이 2 kV의 ES법이 BD_M보다 더 빠른 폐놀 분해시간을 보여주고 있는데 이는 ES법으로 생성한 기포가 더 많은 오존을 용액으로 전달했기 때문인 것으로 풀이된다. Table 1에서 보인 바와 같이 ES법의 2 kV와 BD_M의 기포크기는 BD_M이 조금 더 작은 것으로 나타났다. 그림에도 불구하고 더 빠른 오존산화속도를 보인 것은 ES법이 보다 좋은 교반조건을 가짐으로 인함임을 알 수 있다. 즉, 더 좋은 교반으로 지역적인 포화상태를 일으키지 않아 더 많은 오존분자가 폐놀과 접촉할 수 있음을 뜻한다.

3.2. 오존전달율

기체에서 액체로의 오존전달율은 반응기로 들어가는 농도와 반응기에서 빠져나오는 농도를 비교하여 얻을 수 있다. 이때 반응기는 완전교반반응기(CSTR)라고 가정하고 오존을 분해하는 다른 인자는 없는 것으로 가정하였다.

기체상태의 오존에서 액체상태의 오존으로 물질전달은 식 (1)과 같은 물질전달 등식으로 나타낼 수 있다.

$$N_{O_3} = k_L a \{ [O_3^*] - [O_3] \} V \tag{1}$$

여기서 N_{O_3} 는 오존의 물질전달율을 나타내고, $k_L a$ 는 오존의 체적전달계수를 나타내며, $[O_3^*]$ 는 기액막에서 오존의 부분압과 평행상태에 있는 용존 오존 농도이고, $[O_3]$ 는 용존 오존농도이며, V 는 반응기의 체적이다. 반응기내의 오존에 대한 물질수지를 세우면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$N_{O_3} = Q_g [(O_3)_{in} - (O_3)_{eff}] \tag{2}$$

여기서 Q_g 는 기체 유량을 나타내고, $(O_3)_{in}$ 은 오존의 유입 농도, $(O_3)_{eff}$ 는 오존의 배출농도를 나타낸다. 완전교반반응기의 가정하에 다음과 같은 식을 세울 수 있다.

$$[O_3^*] = \frac{(O_3)_{eff}}{H} \tag{3}$$

식 (1)에서 (3)까지 이용해 미분식

$$N_{O_3} = \frac{d[O_3]}{dt} \tag{4}$$

는 초기 실험값을 대입하여 출구의 오존농도를 시간의 함수로 구할 수 있다. 그 결과인 $(O_3)_{eff}$ 는 다음과 같은 방정식을 표현된다.

$$(O_3)_{eff,t} = (O_3)_\infty - \frac{V(O_3)_\infty}{Q_g} H \cdot \frac{K_L a}{1 + \frac{K_L a V}{Q_g} H} \cdot \exp\left(\frac{-k_L a t}{1 + \frac{K_L a V}{Q_g} H}\right) \tag{5}$$

위 식에서 k_{La} 를 제외한 나머지 상수는 모두 알 수 있다. 헨리상수는 문헌에서 구할 수 있는데 그 값은 78 atm/M이고,⁷⁾ 이상기체방정식을 이용해 무차원 헨리상수를 구하면 그 값이 3.246으로 계산되었다. 실험에서 얻은 값을 식 (5)에 대입하여 비교하면 k_{La} 값을 구할 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 유량이 2.1 mL/min일 때 각각 2 kV와 4 kV의 ES법에 의한 실험치와 모델치를 비교한 것이다. Fig. 6에서 보인바와 같이 ES 2 kV일 때의 오존전달율은 식 (5)로 잘 나타낼 수 있다는 것을 보여준다. 모델은 ES 1 kV인 경우에도 실험치를 매우 잘 모사하고 있다. 하지만 Fig. 7에서 보인 바와 같이 ES 4 kV일 때는 실험과 모델이 잘 맞지 않는다는 것을 알 수 있다. ES 3 kV에서도 모델과 실제값과는 다소 차이를 보이고 있다. 이러한 현상은 높은 전압을 걸어주었을 때 나타나는 반응기내의 여러 가지 복잡한 유체역학적인 현상을 식 (5)가 잘 설명하지 못하고 있기 때문이라고 생각되어진다. 즉, 전압이 높아지면 반응기내에 일어나는 교반에 의한 물질전달을 향상을 설명하지 못하는 것으로 판단된다. 모델로부터 얻어진 k_{La} 값을 Table 2에 나타내었다.

Table 2에서 볼 수 있듯이 전압이 높아질수록 k_{La} 값도 높아지고 있다. 높은 물질전달계수로부터 알 수 있는 것은 전압이 증가할수록 전기적-유체역학적 혼합이 더 왕성하고, 단위 체적당 물질전달경계면이 증가하여 기체상에서 액체상으

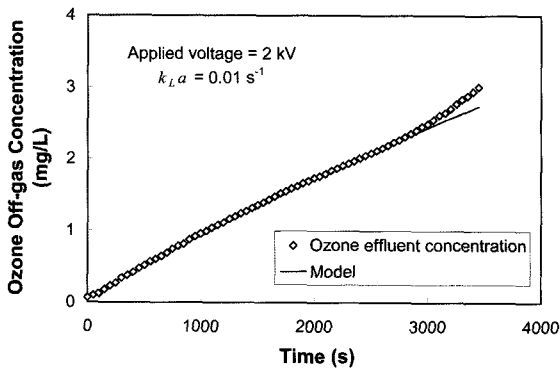


Fig. 6. Ozone off-gas concentration modeling results at ozone input concentration=10 mg/L, flow rate=2.1 mL/min, and applied voltage=2 kV.

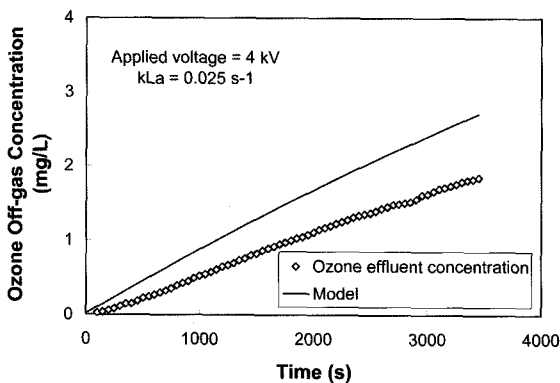


Fig. 7. Ozone off-gas concentration modeling results at ozone input concentration=10 mg/L, flow rate=2.1 mL/min, and applied voltage=4 kV.

Table 2. Volumetric mass transfer coefficients(k_{La}) calculated from the model

Method	0 kV (ES)	1 kV (ES)	2 kV (ES)	3 kV (ES)	4 kV (ES)	Medium Pore (BD)
$k_{La}(\text{s}^{-1})$	0.0005	0.002	0.01	0.025	0.025	0.019

로 오존전달이 증가한다는 사실이다. 높은 전압일 때 보이는 경계면 증가는 기포가 작고 또 반응기안에 체류하는 시간이 길기 때문인 것으로 풀이된다. 또한 Table 2의 결과는 Table 1에서 보인 기포의 크기에 반비례하고 있어 기포가 작으면 작을수록 물질전달율은 증가한다는 것을 증명하고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 전기장 분사를 이용하여 미세기포를 생성하였고 이렇게 생성된 미세기포에 오존을 넣어 반응시킨 전기장 오존반응기의 성능에 대해 알아보았다. 이번 연구의 실험에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 전기장분사방법으로 생성한 미세기포가 물질전달에 필요한 체적당 표면적비를 크게 함으로써 물질전달율을 증가시킬 수 있음을 실험 및 모델링을 통하여 증명하였다.
- 2) 기체유량 2.1 mL/min일 때, 전압 2 kV, 3 kV, 4 kV의 ES법으로 생성된 기포가 미세기공 기포발생판(BD_M)과 중간기공 기포발생판(BD_C)에서 생성된 기포보다 오존전달율이 더 좋다는 것을 알 수 있었다.
- 3) EOR은 수중에 존재하는 유기물, 특히 페놀의 산화에 사용될 수 있는 좋은 반응기임을 알 수 있었고, 기포발생판보다 빠른 시간에 유기물을 산화시킬 수 있다는 것도 증명하였다.
- 4) 높은 유량에서와 용액의 높은 전도도⁸⁾에서 보이는 EOR의 비교적 낮은 효율 등의 한계를 극복하기 위해서는 좀더 많은 연구가 진행되어야 함을 알았다.

참고 논문

1. Hawash, S., El-Ibiari, N., and El-Diwani, G., "Study of ozonation reaction in phenolic effluents," *Waste Manage.*, **10**, 269~274(1990).
2. Tsouris, C., DePaoli, D. W., Feng, J. Q., Basaran, O. A., and Scott T. C., "Electrostatic spraying of nonconductive fluids into conductive fluids," *AIChE J.*, **40**, 1920~1923(1994).
3. Shin, W. T., Yiacoumi, S., and Tsouris, C. "Experiments on electrostatic dispersion of air in water," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **36**, 3647~3655(1997).
4. Rakness, K., Gordon, G., Langlais, B., Masschelein, W., Matsumoto, N., Richard, Y., Robson, C. M., and Somiya, I., "Guideline for measurement of ozone concentration in the process gas from an ozone generator," *Ozone Sci. Eng.*,

- 18, 209~229(1996).
5. Eaton, A. D., Clesceri, L. S., and Greenberg, A. E., Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th ed., American Public Health Association, Washington DC(1995).
 6. Buchholz, K. D. and Pawliszyn, J., "Determination of phenols by solid-phase microextraction and gas chromatographic analysis," *Environ. Sci. Technol.*, **27**, 2844~2848 (1993).
 7. Kasak-Channing, L. F. and Helz, G. R., "Solubility of ozone in aqueous solutions of 0.6 M ionic strength at 530°C," *Environ. Sci. Technol.*, **17**, 145~149(1993).
 8. Tsouris, C., DePaoli, D. W., Feng, J. Q., and Scott, T. C., "Experimental investigation of electrostatic dispersion of nonconductive fluids into conductive fluids," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **34**, 1394~1403(1995).