

ORIGINAL ARTICLE

고속 교반을 이용한 기-액 혼합 플라즈마방전 시스템의 성능 향상

박영식*

대구대학교 기초교육대학

Performance Enhancement of Gas-Liquid Mixed Plasma Discharge System using High Speed Agitation

Young-Seek Park*

DU University College, Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea

Abstract

Dielectric Barrier Discharge (DBD) plasma is a new technique for use in environmental pollutant degradation, which is characterized by the production of hydroxyl radicals as the primary degradation species. Due to the short lifetime of the chemically active species generated during the plasma reaction, the dissolution of the plasma gas has a significant effect on the reaction performance. The plasma reaction performance can be enhanced by combining the basic plasma reactor with a homogenizer system in which the bubbles are destroyed and turned into micro-bubbles. For this purpose, the improvement of the dissolution of plasma gas was evaluated by measuring the RNO (N-dimethyl-4-nitrosoaniline, an indicator of the generation of OH radicals). Experiments were conducted to evaluate the effects of the diameter, rotation speed, and height of the homogenizer, pore size, and number of the diffuser and the applied voltage on the plasma reaction. The results showed that the RNO removal efficiency of the plasma reactor combined with a homogenizer is two times higher than that of the conventional one. The optimum rotor size and rotation speed of the homogenizer were 15.1 mm, and 19,700 rpm, respectively. Except for the lowest pore size distribution of 10-16 μ m, the pore size of the diffuser showed little effect on RNO removal.

Key words : Dielectric barrier discharge plasma, Plasma gas, Oxidant dissolution, OH radical, Homogenizer

1. 서론

플라즈마는 방전에 의해 생긴 음전하를 가진 전자와 양전하를 띤 이온으로 분리된 기체 상태를 말한다. 플라즈마는 발생 온도와 밀도에 따라 고온, 고밀도 영역의 핵융합 플라즈마, 저온 영역의 응용 플라즈마, 저밀도 영역의 우주 플라즈마 등으로 분류할 수 있다. 저온 플라즈마는 섭씨 수천-수만도 정도로 이온화되지

않은 중성의 원자나 분자가 섞여 부분 전리된 상태로 있으면서 국소 열평형(local thermal equilibrium)을 이루고 있는 열 플라즈마(thermal plasma)와 실온 부근에서 비평형(non-equilibrium) 상태의 저온 플라즈마(cold plasma)로 나눌 수 있다(The Kor. Ins. of Sur. Eng., 2007; Park, 2015).

저온 플라즈마는 저압 또는 상압 상태에 있는 기체나 유체 증기들을 전기적으로 방전시키면 쉽게 얻을

Received 7 March, 2017; Revised 10 April, 2017;
Accepted 19 April, 2017

*Corresponding author: Young-Seek Park, DU University College,
Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea
Phone: +82-53-850-4571
E-mail: ysparkk@daegu.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.

수 있고, 전자만 고온이고, 배경 가스는 주변 온도와 비슷하다(Choi et al., 2000). 저온 플라즈마 중 전극 사이에 유전체를 삽입하여 상온에서 두 전극 사이에 고전압을 인가하여 플라즈마를 발생시키는 유전체장벽 방전 플라즈마(DBD plasma, dielectric barrier discharge plasma)는 표면 세정, 화학기상증착, 코팅 분야, 고분자 중합, 표면 코팅 등에 산업적으로 많이 이용되고 있는 공정이다(Choi and Na, 2001; Kim and Song, 2004).

지금까지 환경 분야에서는 열 플라즈마인 플라즈마 토치를 사용한 폐기물의 열분해 공정과 SO_x, NO_x, VOCs 등의 유해가스 처리 분야에서 이용되어 왔다(Kor. Ins. of Sur. Eng., 2007).

최근에는 DBD 플라즈마 공정이 고전압 기체 방전의 일종으로 오존 발생기에 이용되어 수처리에 이용되기 시작하였다(Robinson et al., 2000). 유전체장벽 방전을 이용하여 플라즈마가 생성되면 ·H, ·O, ·O₂, ·HO₂, ·OH, 자외선 등의 유리 라디칼과 H₂O₂ 및 O₃ 등의 화학적 활성종들이 생성되는 것으로 알려져 있다(Lukes et al., 2004; Kim and Park, 2013). 그러나 화학적 활성종들의 반감기가 매우 짧고, 오존과 같은 물질은 물에 대한 용해도가 0°C의 물에서 1 부피의 물에 대해 0.494 부피%로 매우 낮기 때문에 플라즈마 반응에서 발생하는 화학적 활성종들과 물의 접촉을 증가시켜 용해도를 증가시키면 반응의 효율성과 성능 증대를 기대할 수 있다(Kim and Park, 2014).

본 연구는 플라즈마 반응기의 성능을 높이기 위해서 플라즈마 가스의 수중 용존율을 높이는 방안으로 플라즈마 반응기를 거쳐 산기관을 통하여 수중으로 배출되는 플라즈마 가스를 미생물 파쇄 등에 사용되며 고속으로 회전하는 균질기(homogenizer)를 이용하여 잘게 파쇄시켜 미세기포를 만들고 혼합하는 새로운 방법을 이용하였다(Kim and Park, 2014). 또한 기존 플라즈마 가스의 산기에 사용되는 산기관과 성능 비교를 통하여 플라즈마 공정의 성능 향상의 가능성을 확인하였다. 이를 위해 플라즈마 가스와 물 혼합의 증진 정도는 OH 라디칼 발생지표인 RNO (N, N-dimethyl-4-nitrosoaniline)의 분해를 통하여 RNO 분해 정도를 관찰하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료 및 실험방법

전체 반응기 시스템은 크게 플라즈마 반응기 시스템, 산기관과 균질기(homogenizer)로 이루어진 기-액 혼합 반응기로 두 부분으로 구성되어 있으며, 반응기 시스템의 개요도를 Fig. 1에 나타내었다. 플라즈마 반응기 시스템은 플라즈마 반응기, 3구 노즐, 고전압장치 및 계전장치 등으로 구성되어 있다. 플라즈마 반응기는 재질이 티타늄인 방전 전극과 유전체(석영관)로 구성되어 있다. 접지전극은 반응기이며, 수도꼭지를 연결하였다. 공기는 펌프와 로타미터를 거쳐 플라즈마 반응기 상부로 유입된 후 유전체 내부에서 플라즈마 반응을 거쳐 플라즈마 가스가 생성된 후 반응기 하부로 유출되고 산기관을 거쳐 수중으로 배출된다. 플라즈마 반응기는 고전압을 9, 11, 13, 15, 17 kV를 인가하여 실험하였다. 기-액 혼합 반응기는 반응 부피가 5 L이고, 균질기의 회전자(rotor)를 산기관 바로 밑에 위치시켜 산기관에서 배출되는 플라즈마 가스를 미세기포로 분쇄하면서 물과 혼합시키는 역할을 한다. 통상의 플라즈마 반응기의 성능 실험은 플라즈마 가스를 산기관을 통하여 배출시킨 후 반응에 이용하였다. 균질기를 이용한 성능 향상 실험은 플라즈마 가스를 균질기를 통하여 파쇄한 후 이용하였다.

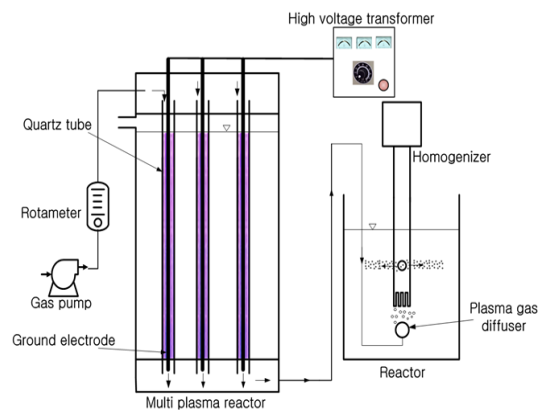


Fig. 1. Schematic diagram of plasma and gas mixing system.

2.2. 분석 및 측정방법

RNO는 초기농도가 5.3 mg/L인 용액을 사용하였으

며, RNO 농도는 UV-VIS spectrophotometer(Genesis 5, Spectronic)를 사용하여 농도가 다른 RNO 용액을 만들어 최대 흡수파장인 440 nm에서 흡광도와 농도 관계를 검량선을 사용하여 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. RNO 분해에 대한 산기관과 균질기 성능 비교

플라즈마 반응기에서 발생하는 플라즈마 가스는 보통 산기관과 같은 배출장치를 통해 수중으로 배출되고 수중에서 오염물질과 반응한다. 플라즈마 가스의 수중 용존이 수중의 반응속도와 직접 관계되기 때문에 플라즈마 가스의 용존이 플라즈마 반응에서 매우 중요한 인자이다.

Fig. 2(a)는 산기관을 이용하는 일반적인 공정으로 플라즈마 가스를 반응기에 투입한 후 초기 농도 5.3 mg/L의 RNO 용액의 분해를 산기관 유량에 따라 나타내었다. 플라즈마에 인가되는 고전압은 13 kV, 초기 플라즈마 가스 유량이 0.1 L/min에서는 초기 5.25 mg/L에서 240초에 4.71 mg/L로 10.3%의 RNO가 제거되었다. 플라즈마 가스 유량이 0.10 L/min에서 0.50 L/min으로 증가되면서 RNO 제거가 직선적으로 증가하였다. 0.5 L/min이상의 플라즈마 가스 유량에서는 가스 유량이 2.5 L/min까지 증가할 때 RNO 제거율은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 일정한 고전압 하에서 플라즈마 반응은 일정하기 때문에 생성되는 플라즈마 가스 중의 총 산화제 농도는 일정하며 플라즈마 반응기로 공급되는 공기의 유량이 적으면 고농도의 산화제를 함유하고 있는 플라즈마 가스가 소량 발생된다. 공기 유량이 증가되면 저농도의 산화제를 함유하고 있는 대량의 플라즈마 가스가 발생한다. 따라서 소량의 고농도 플라즈마 가스가 산기관을 통해 용존될 경우 물과의 접촉이 적어 용존율이 적다(Park and Kim, 2014). 다량의 저농도 플라즈마 가스가 배출될 경우 물과의 접촉기회는 높지만 기포의 크기가 커지고 농도가 저농도이기 때문에 용존되는 농도가 낮고, 다량의 기포가 빠른 속도로 대기 중으로 배출되기 때문에 중간 정도에서 최적의 플라즈마 가스 유량이 존재하며, 최적 유량은 0.5 L/min인 것으로 판단되었다.

플라즈마 반응기에서 발생한 플라즈마 가스의 유량을 0.10-2.50 L/min으로 변화시키면서 산기관을 이용하여 19,700 rpm으로 고속 회전하는 균질기 하부에 공급하여 RNO 분해 실험을 실시하고 Fig. 2(b)에 나타내었다. 플라즈마 가스 유량이 0.10 L/min에서는 산기관과 균질기의 RNO 제거율은 거의 비슷하였으며, 가스 유량이 0.25 L/min으로 증가되면서 균질기의 RNO 제거율이 산기관보다 높게 나타났다. 플라즈마 가스 유량이 0.50 L/min으로 증가되면서 균질기에 의한 RNO 제거가 산기관보다 크게 증가하는 것으로 나타났다. 1.00 L/min 이상의 플라즈마 가스 유량에서는 RNO 제거율 증가가 크지 않아 균질기의 최적 플라즈마 가스 유량은 1.00 L/min으로 판단되었다. 균질기에서 1.00 L/min의 플라즈마 가스 유량에서 240초 후의 RNO 농도는 3.15 mg/L(RNO 제거율은 40%)이었으며, 산기관의 경우 RNO 제거율이 19.8%로 나타나 RNO

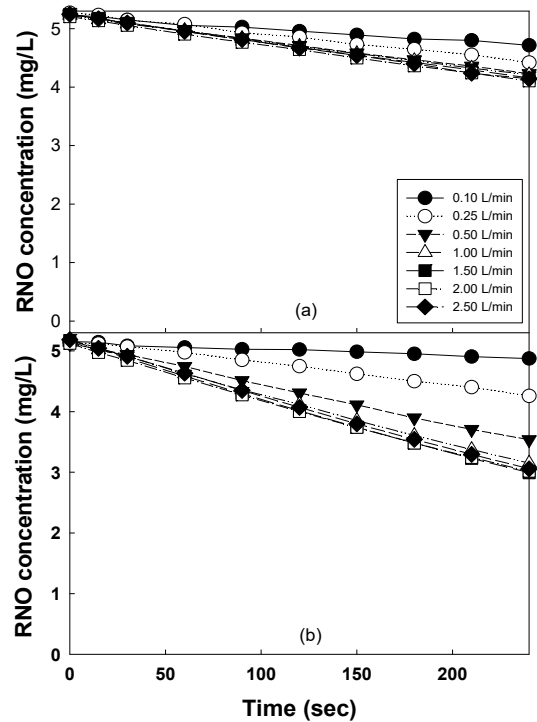


Fig. 2. Comparison of diffuser and homogenizer on RNO degradation (Plasma, 13 kV; rotor diameter, 15.1 mm; rotor distance from bottom, 7.5 cm; rotor speed, 19700 rpm).

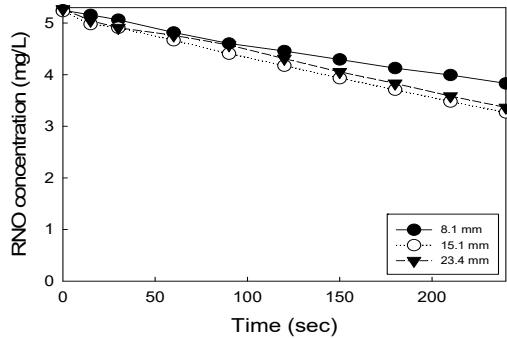


Fig. 3. Effect of homogenizer rotor diameter on RNO degradation (Plasma, 13 kV; rotor speed, 19700 rpm; rotor distance from bottom, 7.5 cm; plasma gas flow rate, 0.5 L/min).

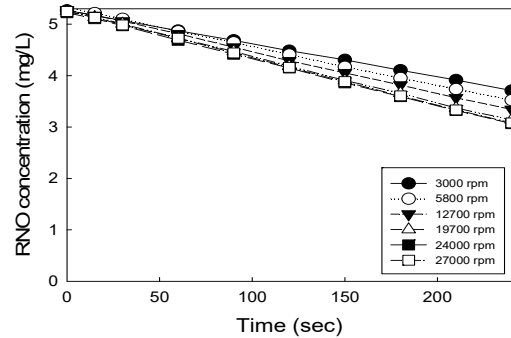


Fig. 4. Effect of homogenizer rotor speed on RNO degradation (Plasma, 13 kV; rotor diameter, 15.1 mm; rotor distance from bottom, 7.5 cm; plasma gas flow rate, 0.5 L/min).

제거속도가 2배 이상 높은 것으로 나타나 플라즈마 가스의 용존을 향상시키기 위해 균질기를 적용하는 것이 가능하다고 판단되었다.

3.2. RNO 분해에 대한 균질기의 회전자 직경, 속도 및 위치의 영향

플라즈마 가스 유량을 0.50 L/min, 균질기 회전속도를 19,700 rpm으로 유지한 조건에서 균질기 회전자의 직경이 RNO 분해에 미치는 영향을 Fig. 3에 나타내었다. 회전자의 직경이 8.1 mm인 경우 240초에서 최종 RNO 농도는 3.83 mg/L, RNO 제거율이 27.0%, 회전자 직경이 15.1 mm에서 최종 RNO 농도는 3.26 mg/L, RNO 제거율이 37.9%, 23.4 mm인 경우 최종 RNO 농도는 3.36 mg/L, RNO 제거율은 36.0%로 나타났다. 산기관에서 발생하는 기포가 균질기의 회전자에 유입되어 분쇄되는 과정을 육안으로 관찰한 결과 회전자 직경이 8.1 mm인 경우는 직경이 작기 때문에 직경이 2.5 cm인 산기관에서 발생한 기포가 회전자 쪽으로 모두 빨려 들어가지 못하고 일부 기포들이 그냥 상승하는 것으로 나타났다. 회전자 직경이 15.1 mm와 23.4 mm인 경우는 산기관에서 발생한 기포가 모두 회전자 쪽으로 빨려 들어가 기포가 분쇄되고 수중의 RNO 용액과 혼합되는 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 1과 같이 회전자 중간부분으로 파쇄된 기포와 물이 배출될 때 직경이 23.4 mm의 기포 크기가 15.1 mm보다 큰 것이 관찰되었다. 이는 기포의 파쇄 후 기

포의 합체가 일어나기 때문인 것으로 생각되었으나 자세한 내용은 기포 크기 측정 등 향후 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

회전자 직경을 15.1 mm, 플라즈마 가스 유량을 0.5 L/min으로 유지한 조건에서 균질기 회전자 속도를 3,000 - 27,000 rpm으로 변경시키면서 회전자 속도에 따른 RNO 농도 감소를 Fig. 4에 나타내었다. 회전자 속도가 3,000 rpm에서 19,700 rpm으로 증가하면서 RNO 농도 감소가 시간에 따라 직선적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 회전자 속도가 19,700 rpm에서 240초 후 RNO 농도는 3.14 mg/L, 24,000 rpm에서는 3.06 mg/L, 27,000 rpm에서는 3.08 mg/L로 나타나 최적 회전자 속도는 19,700 rpm인 것으로 판단되었다. 회전자 속도가 증가하더라도 RNO 분해 속도가 증가하지 않는 것은 일정한 유량으로 공급되는 플라즈마 가스 때문에 회전속도를 증가시키더라도 더 이상 파쇄될 기포가 없기 때문이라고 생각되었다. 회전속도가 높아질 경우 플라즈마 가스의 유량을 증가시키면 RNO 분해율이 증가될 것으로 판단되었다. 따라서 공급하는 플라즈마 가스의 유량에 대한 최적 균질기 회전속도가 존재할 것으로 판단되었으며, 이에 대한 것은 추후 고찰할 예정이다.

회전자 직경 15.1 mm, 플라즈마 가스 유량 0.5 L/min, 회전 속도를 19,700 rpm으로 유지한 조건에서 균질기 위치가 RNO 분해에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다. 균질기 위치는 반응기 바닥에서 플라즈마

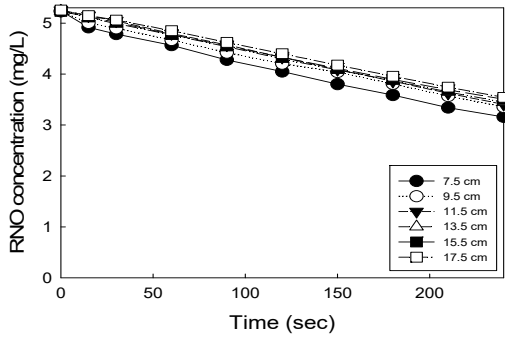


Fig. 5. Effect of homogenizer rotor height on RNO degradation (Plasma, 13 kV; rotor speed, 19700 rpm; rotor diameter, 15.1 mm; plasma gas flow rate, 0.5 L/min).

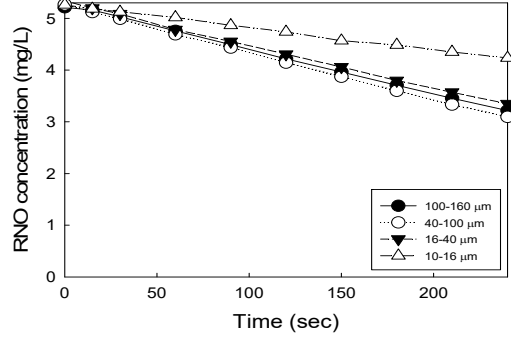


Fig. 6. Effect of pore size of diffuser on RNO degradation (Plasma, 13 kV; rotor speed, 19,700 rpm; rotor diameter, 15.1 mm; plasma gas flow rate, 0.5 L/min).

가스 배출구인 산기관 높이를 고려한 최저 높이는 7.5 cm이었다. 균질기 위치가 높아짐에 따라 산기관 높이도 같이 증가한다. Fig. 5에서 보듯이 균질기가 가장 낮은 위치에 있는 경우의 240초에서 최종 RNO 농도는 3.16 mg/L로 나타났고, 9.5 cm로 높아지면서 240초에 3.35 mg/L로 증가하였으며, 17.5 cm에서는 3.54 mg/L로 증가하였다. 이는 균질기의 위치가 낮으면 기포의 체류시간이 길기 때문에 가장 낮은 위치인 7.5 cm에서 RNO 처리율이 높은 것으로 판단되었다. 균질기 위치 효과는 간접효과로써 다른 인자들보다 RNO 분해에 미치는 영향이 적은 것으로 나타났다.

3.3. RNO 분해에 대한 산기관 공극 크기와 산기관 개수의 영향

회전자 직경 15.1 mm, 플라즈마 가스 유량 0.5 L/min, 회전 속도를 19,700 rpm으로 유지한 조건에서 균질기의 회전자로 공급하는 산기관의 공극 크기도 균질기에 공급하는 기포의 크기와 관계되며, 플라즈마 가스의 용존과 관계될 수 있다. 기공의 크기를 모르는 일반 수족관용 산기관 대신 기공의 크기분포가 알려진 산기관을 이용하여 산기관의 기공 크기가 플라즈마 가스의 용존에 미치는 영향을 고찰하였다. 공극 크기가 100-160 μm, 40-100 μm, 16-40 μm, 10-16 μm로 알려진 지름 2 cm 크기의 유리 필터 디스크(Glass filter disc)를 산기관 형태로 가공한 후, 산기관의 기공 크기가 RNO 분해에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다.

기공 크기가 가장 큰 100-160 μm 산기관의 최종 RNO 제거율은 39.4%, 40-100 μm인 경우의 RNO 제거율은 41.7%로 산기관 기공의 크기가 줄어들면 약 2.3% 정도의 제거율이 증가하는 것으로 나타났다. 산기관의 기공 분포가 16-40 μm인 경우 RNO 제거율은 36.9%로 기공 크기가 작아지면서 RNO 제거율이 낮아지는 것으로 나타났고, 기공 분포가 가장 낮은 10-16 μm인 경우 RNO 제거율은 20.0%로 나타나 RNO 제거율이 거의 50% 감소하였다. 이는 산기관 기공 크기가 너무 적은 경우 배출되는 플라즈마 가스 기포의 크기는 작지만, 0.5 L/min로 설정한 공급 공기의 유량이 플라즈마 반응에 모두 공급되지 못하고 부하가 걸려 0.1-0.2 L/min만 공급하기 때문에 균질기로 유입되는 플라즈마 가스의 유량이 적어 플라즈마 가스의 용존이 어려운 것으로 판단되었다. 육안관찰 결과 일반 산기관과 기공 크기가 100-160 μm인 산기관의 기공 크기가 비슷하게 보여 일정 크기 분포의 기공 크기면 플라즈마 가스의 용존에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단되었으며, 기공 크기 분포는 본 실험 범위에서 판단할 때 대략 40-160 μm인 것으로 판단되었다. Kim and Park(2012)은 산기관 기공 크기가 100-160 μm, 40-100 μm, 16-40 μm인 산기관을 이용하여 플라즈마 가스를 용존시켰을 때, 최적의 기공 크기는 40-100 μm(초기 RNO 농도, 50 mg/L; 반응시간, 30분; RNO 제거율 91.4%)이며, 기공 크기가 100-160 μm인 경우 기포가 커서 RNO 제거율이 79.7%로

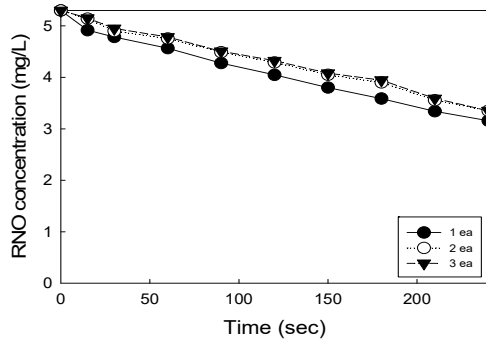


Fig. 7. Effect of diffuser number on RNO degradation (Plasma, 13 kV; rotor speed, 19,700 rpm; rotor diameter, 15.1 mm; plasma gas flow rate, 0.5 L/min).

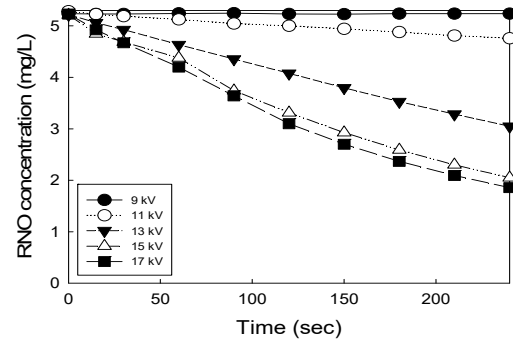


Fig. 8. Effect of high voltage on RNO degradation (rotor speed, 19,700 rpm; rotor diameter, 15.1 mm; plasma gas flow rate, 0.5 L/min).

낮고, 16-40 μm 에서는 기포의 크기가 작더라도 공급되는 기포의 양이 적기 때문에 RNO 분해율이 14.4%에 불과하다고 보고하였다. 같은 산기관을 사용하였지만, 본 연구에서는 최적 기공 크기 범위가 넓고 기공 크기가 16-40 μm 인 경우도 최적 산기관 기공 크기와 RNO 제거율이 큰 차이가 나지 않는 것은 일정 크기 범위 내에 있는 기포가 균질기로 유입되어 고속으로 회전하는 회전자에 의해 미세기포로 파쇄되기 때문에 기포 크기에 의한 용존 효과가 보완되기 때문인 것으로 판단되었다.

0.5 L/min의 같은 플라즈마 가스 공급량에서 플라즈마 가스를 공급하는 산기관의 개수를 변경하여 산기관의 개수가 플라즈마 가스의 용존에 영향을 주는 지 알아보기 위하여 RNO 제거율을 고찰하여 Fig. 7에 나타내었다. 산기관 개수가 1개인 경우 RNO 제거율이 가장 높게 나타났고, 산기관의 개수가 2개와 3개인 것은 거의 같은 RNO 제거 경향을 나타내었다. 산기관의 개수가 1개인 경우와 2~3개인 경우 RNO 제거율은 대략 3.5% 정도의 제거율 차이가 나타났다. 산기관에서 나오는 플라즈마 가스가 균질기로 유입되는 현상을 관찰한 결과 산기관이 1개인 경우 산기관 직경과 균질기 rotor의 직경이 비슷하기 때문에 산기관에서 발생한 플라즈마 가스가 균질기로 유입되어 잘게 부서지지만 산기관 개수가 2개 이상인 경우 균질기의 로타 직경보다 산기관 전체 직경이 크기 때문에 균질기로 플라즈마 가스의 유입이 용이하지 않기 때문인 것으로 판단되었다.

3.4. RNO 분해에 대한 플라즈마 전압의 영향

플라즈마에 인가되는 고전압은 플라즈마 가스의 발생과 용존에 가장 큰 영향을 주는 인자 중의 하나이다. Fig. 8에 플라즈마 가스의 생성을 위해 인가하는 고전압을 9 kV에서 17 kV로 변화시키면서 플라즈마의 고전압이 RNO 분해에 미치는 영향을 나타내었다. 고전압이 9 kV에서는 플라즈마 반응이 제대로 일어나지 않아 RNO가 거의 분해되지 않은 것으로 나타났고, 11 kV에서 플라즈마 반응이 서서히 일어나는 것으로 나타났다. 고전압이 13 kV로 증가하면서 RNO 분해율이 빠르게 증가하였으며, 15 kV와 17 kV의 경우 고전압이 증가하면서 RNO 제거율이 각각 61.5%와 65.1%로 증가하였으나 제거율 증가는 감소하였다. 17 kV 이상의 고전압은 RNO분해 효과가 적고, 과도한 전압이 흘러 스파크가 발생하여 안전과 성능을 고려하여 실험하지 않았으며, 최적의 전압은 15 kV인 것으로 판단되었다.

본 연구와 고전압 발생장치가 다르지만 일반 산기관을 이용한 플라즈마 반응에서 오존과 과산화수소 생성 및 RNO 분해에서 최적의 산화제 생성에 대한 최적 고전압이 발생한다고 보고한 Kim and Park(2013)의 결과 및 발생한 산화제를 이용한 플라즈마 공정에서의 폐놀 처리에 대한 Park(2013)의 결과와 비슷한 결과를 얻었다. 이들 결과를 종합하면 산화제 자체의 생성이 최적에 도달되면 균질기를 통한 기-액 혼합 작용도 최적에 도달되기 때문인 것으로 판단되었다.

4. 결론

유전체장벽 방전 플라즈마 시스템에서 플라즈마 가스의 용존을 높여 플라즈마 반응기의 성능을 높이기 위한 목적으로 플라즈마 반응 후 배출되는 플라즈마 가스를 균질기로 분쇄하여 미세하게 만들어 플라즈마 가스와 물의 접촉을 높여 주요 산화제인 OH 라디칼 생성지표인 RNO 제거에 미치는 운전인자의 영향에 대하여 다음의 결과를 얻었다.

1) 플라즈마 가스 유량이 1.0 L/min에서 일반 플라즈마 반응기에 사용하는 산기관은 240초 후 최종 RNO 제거율은 19.8%로 나타났으나, 같은 조건에서 균질기를 같이 장착한 경우 RNO 제거율은 40.0%로 나타났다.

2) 중간 크기의 회전자인 15.1 mm의 RNO 분해 속도가 가장 높고, 최적 회전자 속도는 19,700 rpm으로 나타났다. 균질기 위치는 다른 인자들보다 RNO 분해에 미치는 영향이 적은 것으로 나타났다.

3) 산기관의 기공 크기는 기공 분포가 가장 낮은 10-16 μm 인 경우를 제외하고, 산기관의 기공 크기가 RNO 제거에 미치는 영향이 적은 것으로 나타났다. 산기관의 직경과 균질기 직경이 비슷한 산기관이 1개인 경우 RNO 제거율이 가장 높은 것으로 나타났다.

4) 플라즈마 가스의 생성을 위해 인가하는 고전압을 9-17 kV로 변화시켰을 때 균질기의 적용과 관계없이 최적의 전압은 15 kV인 것으로 나타났다.

5) 플라즈마 가스의 용존을 향상시키기 위해 균질기를 사용하면 산기관보다 기-액 혼합 효율이 2배 증가하여 플라즈마 가스의 기-액 혼합에 균질기를 적용하는 것이 가능하다고 판단되었다. 그러나 균질기를 사용할 경우 추가적인 시설비와 운전비가 필요하기 때문에 경제성을 같이 고려하여 종합적으로 판단하여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 대구대학교 교내연구비의 지원을 받아 진행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

Choi, J. W., Na, B. K., 2001, Low temperature plasma

application technology, News and Info. Chem. Eng., 19(5), 596-603.

Choi, Y. S., Song, Y. H., Kim, S. J., Kim, B. U., 2000, A Study on the toluene decomposition using an adsorptive dielectric discharge plasma, Hwahak Konghak, 38(3), 423-428.

Kim, D. S., Park, Y. S., 2012, Performance improvement of dielectric barrier plasma reactor for the water treatment, J. Kor. Soc. Environ. Eng., 34(7), 459-466.

Kim, D. S., Park, Y. S., 2013, A Study for oxidants generation on oxygen-plasma discharging process discharging system, J. of Environ. Sci. Int., 22(12), 1561-1569.

Kim, D. S., Park, Y. S., 2014, Improvement of OH radical generation in plasma reactor using homogenizer, 2014 Annual Conference Kor. Environ. Sci. Soc., 23, 344-348.

Kim, H. S., Song, S. J., 2004, Surface treatment technology using low-temperature/atmospheric-pressure plasma, Trends in Met. & Mat. Eng., 17(4), 21-27.

Lukes, P., Appleton, T., Locke, B. R., 2004, Hydrogen peroxide and ozone formation in hybrid gas-liquid electrical discharge reactors, IEEE Trans. Ind. Appl., 40, 60-67.

Park, Y. S., 2013, Phenol removal using oxygen-plasma discharge in the water, J. of Environ. Sci. Int., 22(7), 915-923.

Park, Y. S., 2014, Enhance of dissolved oxygen rate using a 3-prong nozzle, J. Environ. Sci. Int., 24(6), 709-720.

Park, Y. S., Kim, D. S., Improvement of OH radical generation in plasma reactor using homogenizer, Proceeding of Kor. Environ. Eci. Soc. Conf., 23, 344-348.

Robinson, J. A., Bergousnou, M. A., Cairns, W. L., Castle, G. S. P., Inculet, I. I., 2000, Breakdown of air over a water surface stressed by a perpendicular alternating electric field in the presence of a dielectric barrier, IEEE Trans. Appl., 36, 68-75.

The Korean Institute of Surface Engineering, 2007, Outline of plasma technology and its industrial application, Trends of Metals & Mat. Eng., 20(4), 4-19.