

ORIGINAL ARTICLE

## 수처리용 다중 유전체 방벽 방전 플라즈마 반응기 개발

김동석 · 박영식<sup>1)\*</sup>

대구가톨릭대학교 환경과학과, <sup>1)</sup>대구대학교 기초교육원

### Development of Multi Dielectric Barrier Discharge Plasma Reactor for Water Treatment

Dong-Seog Kim, Young-Seek Park<sup>1)\*</sup>

Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Gyeongsan 712-702, Korea

<sup>1)</sup>Faculty of Liberal Education, Daegu University, Gyeongsan 712-830, Korea

#### Abstract

Dielectric discharges are an emerging technique in environmental pollutant degradation, which that are characterized by the production of hydroxyl radicals as the primary degradation species. For practical application of the plasma reactor, reactor that can handle large amounts of water are needed. Plasma research to date has focused on small-scale water treatment. This study was carried out basic study for scale-up of a single DBD (dielectric barrier discharge) plasma reactor. The degradation of N, N-Dimethyl-4-nitrosoaniline (RNO, indicator of the generation of OH radical) was used as a performance indicator of multi-plasma reactor. The experiments is divided into two parts: design parameters [effect of distance of single plasma module (1~14 cm), arrangement of ground electrode (single and multi), reactor number (1~5) and power number (1~5)]; operation parameter [effect of applied voltage (60~220 V), air flow rate (1~5 L/min), electric conductivity of solution (1.4  $\mu$ S/cm, deionized water)~18.8 mS/cm (addition of NaCl 10 g/L) and pH (5~9)]. Considering the electric stability of the plasma reactor, optimum spacing between the single plasma module was 2 cm. Multi discharge electrodes - single ground electrode array was selected. Combination of power 3-plasma module 5 was the optimal combination for maximum RNO degradation. The optimum 1st voltage and air flow rate for RNO degradation were 180 V and 4 L/min, respectively. The pH and conductivity of the solution was not influencing the RNO degradation.

**Key words** : Dielectric barrier discharge, Reactor module, Multi plasma, Design parameter, Water treatment

#### 1. 서론

산업이 발달함에 따라 세계적으로 난분해성 유기 물질의 종류가 다양해지고 생산량이 증가하고 있다 (Yeo 등, 2006). 이들 난분해성 유기물질을 함유하고 있는 폐수를 처리하기 위하여 활성슬러지 공정과 같은 생물학적 처리법, 활성탄 흡착 및 응집 등의 물리·

화학적 처리방법 등 기존의 처리공정을 이용하여 처리할 경우 완전한 무기화가 어렵거나 2차 오염물질이 생성되거나 비용이 많이 소요되는 등의 단점이 있다 (Kim과 Park, 2011; Ha와 Cho, 2003).

기존의 공정을 대체하기 위한 여러 가지 공정 중 난분해성 유기물질을 산화시키는 가장 효율적인 방법 중의 하나가  $\cdot$ OH,  $\cdot$ O, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 및 O<sub>3</sub>와 같이 산화 전

Received 31 January, 2013; Revised 8 March, 2013;

Accepted 4 April, 2013

\*Corresponding author : Young-Seek Park, Faculty of Liberal Education, Daegu University, Gyeongsan 712-830, 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.

위(oxidizing potential)가 높은 화학물질을 이용하는 것이다(Kim 등, 2010).  $\cdot\text{OH}$  생성을 촉진시켜 유기물질을 제거할 수 있는 여러 가지 고급 산화공정이 난분해성 물질 처리 공정으로 평가받고 있다(Park, 2007).

최근에는 고급 산화공정의 한 종류로 플라즈마를 발생시켜 난분해성 물질을 처리하는 연구가 주목받고 있다. 플라즈마는 전기적인 방전에 의해 생긴 전하를 띤 양이온과 전자들의 집단을 말하는데(Lee, 2005), 플라즈마 발생 온도와 플라즈마의 밀도에 따라 고온, 고밀도 영역의 핵융합 플라즈마, 저온 영역의 응용 플라즈마, 저밀도 영역의 우주 플라즈마 등으로 분류할 수 있다. 핵융합 플라즈마와 같이 이온과 전자로 완전 전리된 일억도 내외의 고온 플라즈마에 비해 섭씨 수천-수만도 정도의 저온 플라즈마는 아직 이온화되지 않은 중성의 원자나 분자가 섞여 부분 전리된 상태로 있어서, 이들 입자가 모두 같은 온도를 유지하여 국부 열평형(local thermal equilibrium)을 이루고 있는 열 플라즈마(thermal plasma)와 실온 정도의 온도에서 비평형(non-equilibrium) 상태의 적은 열용량을 가지고 있는 저온 플라즈마(cold plasma)로 다시 나눌 수 있다(The Korean Institute of Surface Engineering, 2007a).

열 플라즈마는 플라즈마 토치를 이용하여 제강분진처리, 폐기물 처리 및 용융·소각 처리 등에 주로 이용되고, 비열 플라즈마는 휘발성 유기화합물이나  $\text{NO}_x$  등 유해 공기오염물질 분해, 내연기관의 배기가스 정화 장치 등에 이용되어 왔으며, 최근에는 수중에서 플라즈마를 발생시키는 공정이 개발되어 수처리에 이용되기 시작하고 있다(The Korean Institute of Surface Engineering, 2007b).

수중 플라즈마 공정은 주로 코로나 방전이나 유전체장벽 플라즈마 장치를 이용하여 수중에서 플라즈마를 발생시키는 방법으로, 수중 플라즈마 공정은 약품 투입이 필요 없고 처리 공정도 간단한 새로운 수처리 공정으로 반응기의 열화가 방지되고 수표면이나 수중에서 강한 전계를 형성하여 효율적으로 에너지를 전달할 수 있는 장점이 있다(Moon 등, 2008; Jung, 2009). 수중에서 방전시켜 플라즈마가 발생되면  $\cdot\text{OH}$ ,  $\cdot\text{H}$ ,  $\cdot\text{O}$ ,  $\cdot\text{O}_2$ ,  $\cdot\text{HO}_2$  등의 라디칼,  $\text{H}_2\text{O}_2$ 와  $\text{O}_3$  등의 산화제, 자외선과 shock wave도 발생하는데 이들이 유

기 물질 처리에 이용된다(Kim과 Park, 2011; Shi 등, 2009).

지금까지 여러 가지 형태의 수중 플라즈마 방전용 반응기가 개발되어 왔다. 기본 반응기 형태는 수중에서 두 개의 대향 전극에 대해 전압을 가하는 형태와, 유전체를 이용하여 유전체 내부에 공기나 산소 등의 가스를 공급하면서 전기가 통하지 않는 상태에서 방전시키는 유전체장벽방전 플라즈마 공정이 주요 기본 공정이다(Sugiarto 등, 2003; Kim과 Park, 2011). 수처리용 플라즈마 반응기에 대한 연구는 이들 두 공정을 기본으로 하여 성능을 향상시키는 방법에 대한 연구가 주를 이루고 있다(Wang과 Quan, 2006; Zhang 등, 2008). 그러나 소규모 폐수를 처리할 수 있는 반응기에 대한 연구가 주를 이루고 있어 실제 폐수 처리를 위해서는 처리 용량의 증가시킬 수 있는 반응기에 대한 연구가 필요하다. 본 연구는 수중 플라즈마 반응기의 스케일 업을 위한 기초 연구로서 유전체 방전 플라즈마 반응기에 대해 실시한 기본 설계인자를 도출한 후 스케일 업용 멀티 플라즈마 반응기 설계에 대한 기초 연구를 수행하고, 전압, 공기 유량 및 전기전도도와 같이 멀티 플라즈마 반응기에의 운전 성능에 영향을 주는 운전인자에 대한 기초 연구를 수행하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 실험재료

멀티 플라즈마 반응기에서의 성능을 평가하기 위하여 RNO (N, N-Dimethyl-4-nitrosoaniline)을 분해 물질로 선택하였다.  $\cdot\text{OH}$ 은 수명이 매우 짧기 때문에 생성량을 직접적으로 측정하기 어렵다.  $\cdot\text{OH}$  라디칼 probe로 널리 알려진 4-CBA (chloro benzoic acid)나 RNO와 같은 물질의 분해를 통하여,  $\cdot\text{OH}$ 의 생성 여부를 간접적으로 확인 가능한데 특히 RNO는 표백 효과에 의해 육안으로 쉽게 확인이 가능하고 분광광도계로 분석하기 때문에 분석이 간편하여 RNO를 사용하였다(Li 등, 2009).

멀티 플라즈마 반응기의 기초가 되는 단일 플라즈마 반응기의 기본 모듈은 Fig 1(a)에 나타내었다. 기본 모듈은 접지 전극, 유전체 및 방전 전극으로 이루어져 있으며, 기 연구에서 최적 설계 조건을 도출하였다

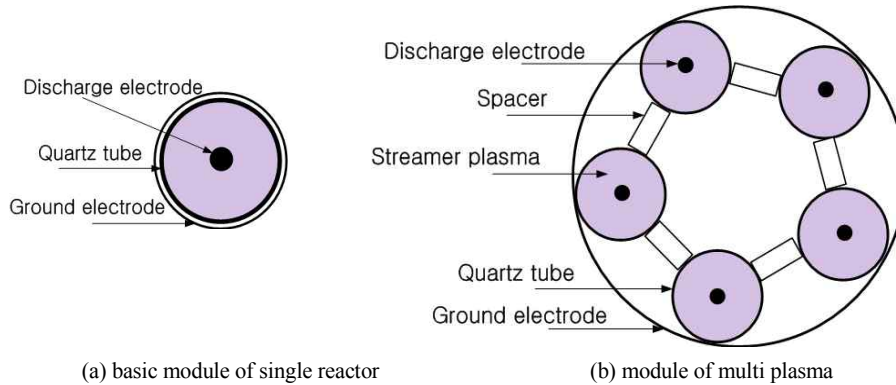


Fig. 1. Schematic diagram of a cross-sectional drawing of basic module and multi plasma reactor.

(Kim과 Park, 2011). 기본 모듈에서 유전체는 두께가 1 mm, 내경이 7 mm인 석영관을 사용하였다. 방전 전극과 접지 전극은 모두 티타늄을 사용하였다. 방전 전극은 직경이 2 mm인 봉 형 전극을 사용하였고, 접지 전극은 직경이 1 mm인 전극을 스프링 형태로 만든 후 사용하였다. 기본 모듈을 바탕으로 실험 후 최종 선정된 멀티 플라즈마 반응기의 배열은 Fig. 1(b)와 같다. 방전 전극이 내부에 장착되어 있는 유전체가 spacer에 의해 2 cm간격으로 배치되어 있고, 유전체-spacer 문지 외부로 1개의 접지 전극이 스프링 형태로 감겨있다. 스트리머 형태의 플라즈마가 각 유전체 내부에서 발생한다. 실험에 사용한 플라즈마 반응기 시스템의 개요도를 Fig. 2에 나타내었다. 반응기의 부피는 5 L 이었다. 플라즈마 반응기 시스템은 방전 전극, 유전체 및 1개의 접지 전극으로 이루어진 플라즈마 반응기와 공기 펌프와 로터미터로 이루어진 공기 공급장치, 정전압 공급기와 네온트랜스로 이루어진 전원 공급장치 등 세부부분으로 나누어진다. 멀티 플라즈마 반응기의 기본 모듈 개수는 실험 목적에 따라 1개-5개를 사용하였다. 플라즈마 반응기에 주입하는 가스로는 공기를 사용하였으며 공기 펌프에서 발생한 공기를 rotameter를 이용하여 유량을 조절한 뒤 공급하였다. 1차 전압은 정전압 공급기를 이용하여 전압을 80~220 V로 조절한 후 네온트랜스(15 kV, 20 kHz)에서 고전압을 발생시켜 전극에 공급하였다.

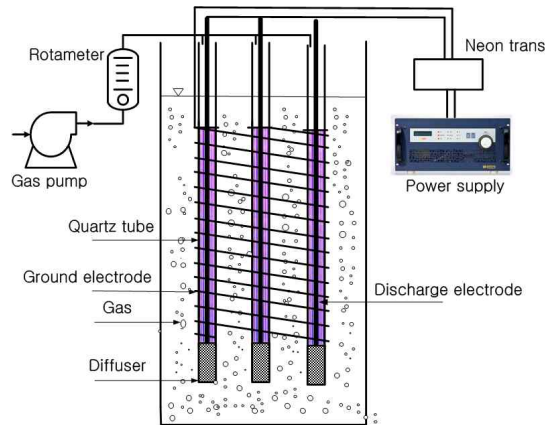


Fig. 2. Schematic diagram of a multi plasma reactor system.

2.2. 분석 및 측정

RNO는 초기농도가 50 mg/L인 용액을 사용하였으며, RNO 농도는 UV-VIS spectrophotometer (Genesis 5, Spectronic)를 사용하여 RNO의 최대 흡수파장인 440 nm를 측정하여 검량선을 사용하여 농도로 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. RNO 분해에 미치는 단일 플라즈마 반응기 사이의 간격과 접지 전극 배열의 영향

멀티 플라즈마 반응기 설계를 위한 기초 연구로 반응기 간격의 영향을 알아보기 위하여 Fig. 1(a)의 단일 플라즈마 반응기 2개 사이의 간격을 1 cm에서 14 cm

까지 변경하여 플라즈마 반응기 간격이 RNO 분해에 미치는 영향을 Fig. 3에 나타내었다. 이때 플라즈마에 공급하는 전원 공급기는 1대였으며, 1차 전압은 220 V, 공기 공급량은 각 유전체에 5 L/min이 공급되었다.

두 반응기의 간격이 14 cm까지 차이 있지만 간격 차이에 다른 플라즈마 반응기의 RNO 분해성능은 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 따라서 멀티 플라즈마 반응기 제작시 플라즈마 반응기의 크기를 고려하여 반응기를 제작하는 것이 유리한 것으로 사료되었다. 그러나 플라즈마 반응기의 간격이 1 cm인 경우 멀티 플라즈마 반응기 제작시 방전이 대부분의 경우 유전체 내부에서 일어나지만 일부의 경우 거리가 가까운 유전체 외부의 전극끼리 방전이 일어나 안전성에 문제가 있는 것으로 나타나 2 cm로 간격을 늘렸다. 2 cm인 경우 외부 방전이 발생하지 않아 멀티 반응기의 간격을 2 cm로 결정하였다.

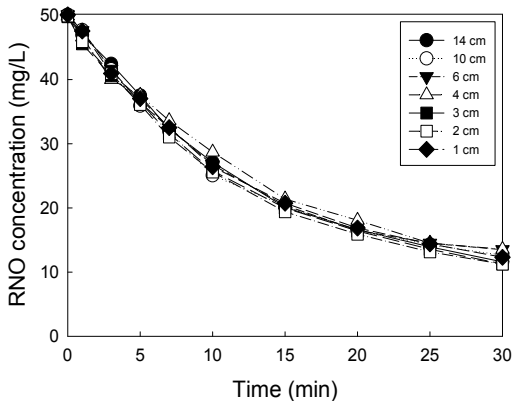


Fig. 3. Effect of distance between single reactor on the degradation of RNO.

앞에서 두 개의 단일 플라즈마 반응기 사이의 최적 간격을 구한 결과 2 cm인 것으로 나타났다. 두 개의 단일 플라즈마 반응기에서 방전 전극은 유전체 내부에 있는 조건은 유지하면서 접지 전극은 Fig. 4(a)와 같이 유전체 외부에 각각 감은 2 방전 전극-2 접지 전극 반응기와 Fig. 4(b)와 같이 유전체-spacer-유전체 외부에 단일 접지 전극을 감은 2 방전 전극-1 접지 전극인 경우로 나누어 접지 전극의 배열이 RNO 분해에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에서 보듯이 2중 반응기에서 개별 단일 반응기를 연결한 경우(●)이나 2개의 방전 전극과 유전체는 독립적이지만 접지 전극은 1개인 경우(○)의 RNO 분해는 거의 유사한 것으로 나타나 어떠한 반응기 배열을 선택하여도 상관이 없는 것으로 나타났다. 두 개의 접지 전극 배열 중에서 전극 소요량이나 제작의 간편성을 위해 단일 접지 전극 배열을 선택하고 향후 실험은 방전 전극의 수에 관계없이 단일 접지 전극 배열을 이용하여 실험하였다.

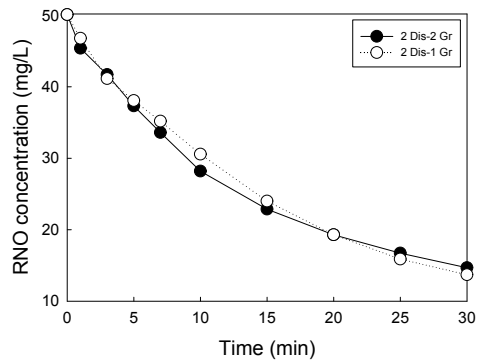
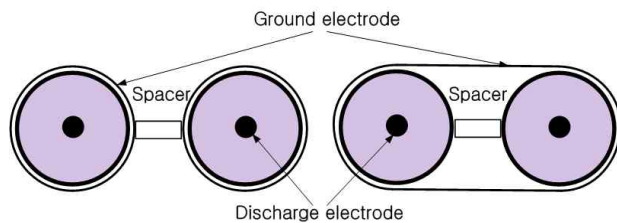


Fig. 5. Effect of ground electrode arrangement on the degradation of RNO in dual reactor.



(a) 2 discharge-2 ground electrode (b) 2 discharge-1 ground electrode

Fig. 4. Schematic diagram of two type of electrode arrangement.

### 3.2. RNO 분해에 미치는 멀티 플라즈마 반응기에서 플라즈마 모듈 수와 전원 수의 영향

방전 전극과 유전체로 이루어진 멀티 플라즈마 반응기의 기본 모듈들의 간격을 2 cm 유지하면서 멀티 플라즈마 반응기의 개수를 1~5개로 제작하고 단일 전원 공급장치를 1대에서 전원을 방전 전극 5개에 공급하였다. 이때 초기 1차 전압은 220 V를 유지하였으며, 각 멀티 플라즈마 기본 모듈에 각각 5 L/min의 공기를 공급하였다.

Fig. 6에 단일 전원 공급장치에서 멀티 플라즈마 반응기의 개수에 따른 RNO 농도 변화를 나타내었다. 반응기 개수에 관계없이 시간에 따라 직선적으로 농도가 감소하는 경향을 나타내었다. 단일 반응기인 경우 30분의 반응시간에서 최종 농도가 25.4 mg/L로 나타나 49.2%의 제거율을 보였고, 반응기 개수가 증가함에 따라 제거율도 증가하여 3개인 경우 71.3%로 나타나 22.1%의 제거율 증가 효과를 나타내었다. 그러나 멀티 반응기의 개수가 4개로 증가하면서 반응속도가 느려져 30분 후 RNO 제거율이 62.2%로 느려졌고, 5개로 증가하였을 때는 31.8%의 제거율을 나타내었다. 플라즈마 성능을 발휘할 수 있는 최적의 멀티 플라즈마 반응기 개수가 존재하는 것으로 나타났고 3개인 것으로 사료되었다.

단일 전원 공급장치 하에서 반응기 개수에 따른 RNO 분해 성능 차이를 밝히기 위하여 각 플라즈마 모듈에서 발생하는 플라즈마를 관찰하여 보았다. 플라즈마 반응기 모듈의 수가 1, 2개인 경우 유전체인 석영관 내부 전체에 걸쳐 스트리머형 플라즈마가 발생하는 것이 관찰되었다. 반응기 모듈의 수가 3개인 경우 전체 유전체 길이의 2/3에 해당하는 부분까지 플라즈마가 형성되었으며, 모듈의 수가 4개인 경우 각 모듈 유전체의 1/3정도만 플라즈마가 형성되었으며, 개인 경우 모듈 5개 모두 유전체 내부의 플라즈마 발생 가능 영역의 1/5 이하만 생성되는 것으로 나타났다. 또한 플라즈마 모듈의 수가 증가할수록 발생하는 플라즈마의 색깔이 옅어지는 것으로 나타났다. 이는 전원 공급장치 1개에서 플라즈마 모듈에 전기를 공급하는데 모듈의 수가 증가할수록 모듈당 공급되는 전기의 양이 감소하기 때문에 모듈 수 증가에 따라 플라즈마의 발생이 감소하는 것으로 사료되었다. 그러나 플

라즈마 모듈이 1개에서 3개로 됨에 따라서 RNO 분해가 증가하는 것은 공기와 관련이 있는 것으로 사료되었다. 즉 플라즈마 모듈이 1개인 경우 직경 2 mm의 방전 전극이 있는 내경 7 mm의 유전체에 공기가 5 L/min의 속도로 통과하기 때문에 선속도는 2.37 m/sec로 매우 빨라 플라즈마 밀도는 높지만 발생하는 산화제의 양은 적은 것으로 사료되었다. 플라즈마 모듈 수의 증가에 따라 플라즈마 밀도는 낮아 각 모듈당 발생 산화제는 적지만 산화제가 발생하는 곳이 3 곳이기 때문에 전체 산화제의 농도가 높아 OH 라디칼 발생 지표인 RNO 분해율이 높다고 사료되었다. 플라즈마 모듈이 4개 이상에서는 플라즈마 밀도가 낮아져 충분한 산화제가 생성될 수 있는 조건이 형성되지 못하기 때문에 적절한 플라즈마 밀도에서 산화제가 많이 발생할 수 있는 모듈의 개수가 존재한다고 사료되었다.

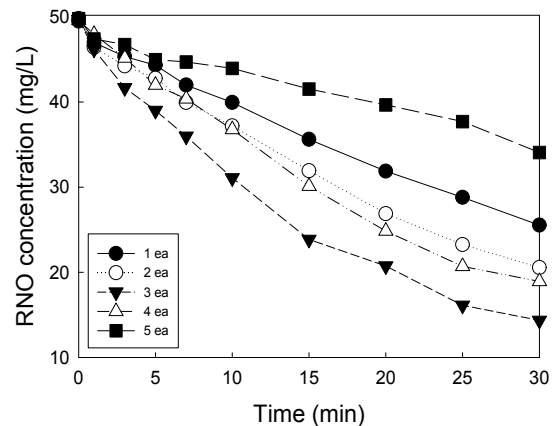


Fig. 6. Effect of plasma module number on the degradation of RNO in multi discharge and single ground electrode system.

Fig. 7에 플라즈마 모듈의 수를 5개로 유지한 조건에서 220 V의 전원이 공급되어 각 유전체에 15 kV의 고전압이 인가되고 있는 전원 공급장치의 개수에 따른 RNO 농도 변화를 나타내었다. 전원이 1개인 경우 거의 직선적으로 농도가 감소하는 것으로 나타났다. 전원2-반응기 5개인 경우 RNO 농도가 빠르게 분해되어 곡선의 형태로 나타났으며, 전원3-반응기 5개의 경우 전원수가 적은 경우보다 초기 RNO 분해속도가 빨

라지고 반응 종결시 농도가 낮은 것으로 나타났다. 그러나 전원의 수가 4개 이상인 경우 RNO 분해율이 비슷하게 나타나 전원3-반응기 5개의 플라즈마 모듈-전원수가 최적의 조합인 것으로 나타났다.

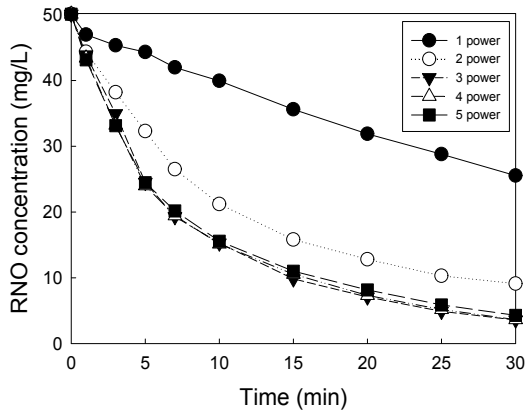


Fig. 7. Effect of power number on the degradation of RNO in multi discharge and single ground electrode system.

Fig. 6에서 전원 1개인 조건에서 플라즈마 모듈을 변화시켰을 때 플라즈마 모듈이 3개인 조건의 RNO 분해가 높았으며, Fig. 7에서는 반응기가 5개인 조건에서 전원 공급장치 개수가 3개인 경우의 RNO 분해율이 높은 것으로 나타났다. Fig. 6과 7의 결과로 볼 때 전원 공급장치와 플라즈마 모듈의 개수비가 1:1.7~1:3인 조건의 RNO 분해율이 높은 것으로 나타났다.

이의 확인을 위하여 Fig. 8에 전원 공급장치 개수를 3개로 고정한 조건에서 플라즈마 모듈의 개수를 3~5개로 변화시켜 전원 공급장치와 플라즈마 모듈의 비를 1:1~1:1.7의 비로 변화시켜 RNO 분해에 대한 플라즈마 모듈/전원 공급장치 비의 영향을 나타내었다. Fig. 8에서와 같이 전원 공급장치가 3개인 조건에서 플라즈마 모듈 개수가 증가하여 비가 증가할수록 RNO 분해가 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 6~8의 결과를 종합해볼 때 플라즈마 모듈과 전원 공급장치의 비는 1:1 보다는 플라즈마 모듈의 개수가 많은 것이 RNO 분해에 유리하며 그 비율은 1:1.7~1:3부근인 것으로 사료되었다.

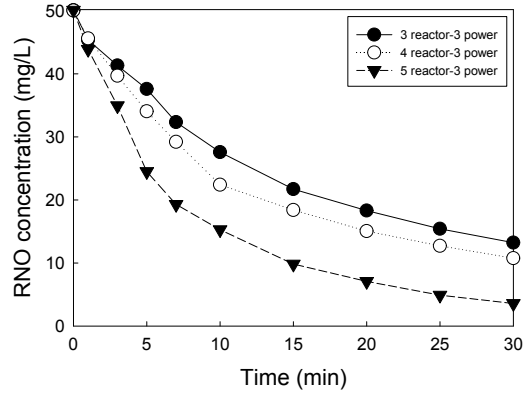


Fig. 8. Effect of reactor-power number on the degradation of RNO in multi discharge and single ground electrode system.

### 3.3. RNO 분해에 미치는 운전인자의 영향

전원 공급장치 3-플라즈마 모듈 5의 조건에서 1차 전압이 RNO 분해에 미치는 영향을 Fig. 9에 나타내었다. 전극에 고전압을 인가하는 네온트랜스는 220 V의 1차 전압이 인가될 때 설계 고전압인 15 kV의 출력을 나타내고, 1차 전압이 감소하면 출력 전압인 고전압이 직선적으로 감소한다. 180 V는 12.7 kV, 140 V는 9.8 kV, 120 V는 7.8 kV, 100 V는 6.3 kV, 80 V는 4.3 kV에 해당한다. Fig. 9에서 보듯이 1차 전압이 80 V에서 증가할수록 RNO 분해율이 증가하는 것으로 나타났다. 80 V에서 100 V로 증가할 때의 RNO 분해율이 가

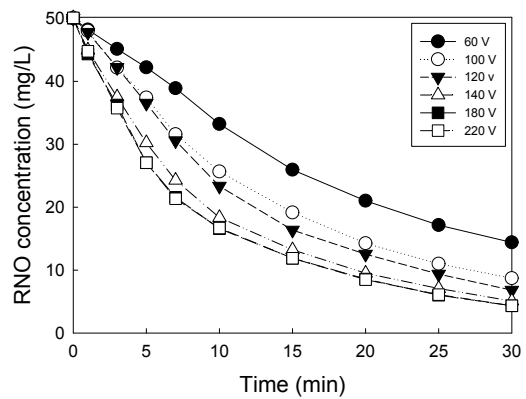


Fig. 9. Effect of voltage on the degradation of RNO in multi discharge and single ground electrode system .

장 많이 증가하였으며, 그 이상의 V에서는 증가율이 감소되었다. 180 V와 220 V의 RNO 분해율은 거의 같은 것으로 나타나 최적 전압이 존재하며 최적 전압은 180 V인 것으로 사료되었다. Kim과 Park(2012)은 본 멀티 플라즈마 반응기의 전원 공급장치가 1개, 플라즈마 모듈 1개인 기본 반응기로 실험한 결과 160 V에서 최적 RNO 분해율이 나타나 기본 반응기와 멀티 반응기의 최적 운전 조건은 전원 공급장치와 플라즈마 모듈 수의 차이와 이로 인해 발생하는 산화제 생성 농도 차이로 최적 1차 전압이 차이 나는 것으로 사료되었다.

유전체 내부로 공급하는 공기와 같은 가스는 전극 사이의 절연을 유지할 뿐만 아니라 산화제의 생성과도 관련이 있기 때문에 공기 공급량은 중요한 운전인자 중의 하나이다(Zhang 등, 2007). 각 플라즈마 모듈에 공급하는 공기 공급량을 1~7 L/min으로 변화시켜 공기 공급량이 RNO 분해에 미치는 영향을 Fig. 9에 나타내었다. 공기 공급량이 1 L/min 인 경우 RNO 분해율이 매우 낮은 것으로 나타났으나 3 L/min으로 증가하면서 RNO 분해율이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 공기 공급량이 4 L/min으로 증가하면서 RNO 분해율 증가는 적어지는 것으로 나타났고, 공기 공급량이 5 L/min 이상에서는 RNO 분해율이 오히려 감소하는 것으로 나타났다. RNO 분해에 직접적인 영향을 주는 Fig. 9의 1차 전압과 같은 요소 외 공기 공급량은 최적 공기 공급량 이상에서는 RNO 분해에 큰 영향을

주지 않지만 적정 공기 공급량 이하에서는 1차 전압보다 더 큰 영향을 미치는 것으로 사료되었다. 이는 적정 공기 공급량 이하에서는 산화제 생성에 큰 역할을 하는 산소의 비율이 낮아 적절한 농도의 산화제가 생성되지 않기 때문인 것으로 사료되었다. 반면 최적 공기 공급량 이상에서의 RNO 분해 감소는 발생 산화제의 체류시간을 줄여주는 역 효과가 있기 때문에 최적 공기 공급량에서의 운전이 주요한 운전 요소인 것으로 사료되었다(Lukes 등, 2005).

용액의 전기전도도와 pH가 RNO 분해에 미치는 영향을 Fig. 11(a)와 (b)에 나타내었다. 용액의 전기전도도는 NaCl을 이용하여 전기전도도를 변화시켰다. 초순수의 전기전도도는 1.4  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , NaCl 1 g/L는 2.3 mS/cm, 10 g/L첨가시는 18.8 mS/cm로 나타났다. Fig. 11(a)에서 보듯이 전기전도도가 낮을수록 RNO 분해율이 높은 것으로 나타났지만 차이는 크지 않았다. 전기전도도가  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 mS/cm로 단위가 크게 바뀌어도 RNO 분해는 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다. 이는 같은 전극을 사용하지만 전기전도도가 직접 성능에 영향을 미치는 전기분해 공정과는 달리 유전체 내부에서 플라즈마가 발생되어 이온화된 가스가 외부로 유출되기 때문인 것으로 사료되었다(Kim과 Park, 2007). 전기전도도는 멀티 플라즈마 반응기의 운전시 고려하지 않아도 되는 것으로 사료되었다.

Fig. 11(b)에 용액의 pH를 5~9로 변화시킨 조건에서 pH가 RNO 분해에 미치는 영향을 나타내었다. pH가 낮을수록 RNO 분해가 증가하는 것으로 나타났으나 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 플라즈마 방전에서 pH가 감소하는 것은 방전을 위해 공급하는 공기 중의 질소가 플라즈마 반응에서 질산을 만들기 때문에 pH가 감소하는 것으로 사료되었다(Kim과 Park, 2012a).

Kim과 Park(2012b)은 단일 플라즈마 반응기에서 pH가 낮을수록 RNO 처리율이 낮지만 차이는 무시할 수 있는 정도이고, 낮은 pH에서 수중에서 검출되는 과산화수소의 농도가 높고, 염기성 영역의 pH에서는 생성된 오존이 자가 분해되어 OH라디칼을 생성하지만 생성되는 과산화수소와 오존의 농도가 0.2~0.3 mg/L 정도로 낮기 때문에 pH 변화에 따른 오존과 과

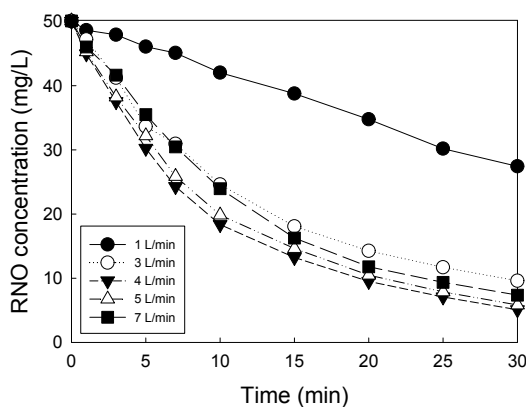


Fig. 10. Effect of air flow rate on the degradation of RNO in multi discharge and single ground electrode system.

산화수소 효과는 크지 않다고 보고하였다. 따라서 멀티-플라즈마 운전에 대한 pH 효과는 크지 않지만 플라즈마 반응 후 pH가 감소하는 경향(pH 5 → 30분 반응 후 3.36, pH 9 → 30분 반응 후 3.72)이 나타나 이에 대한 고려는 필요한 것으로 사료되었다.

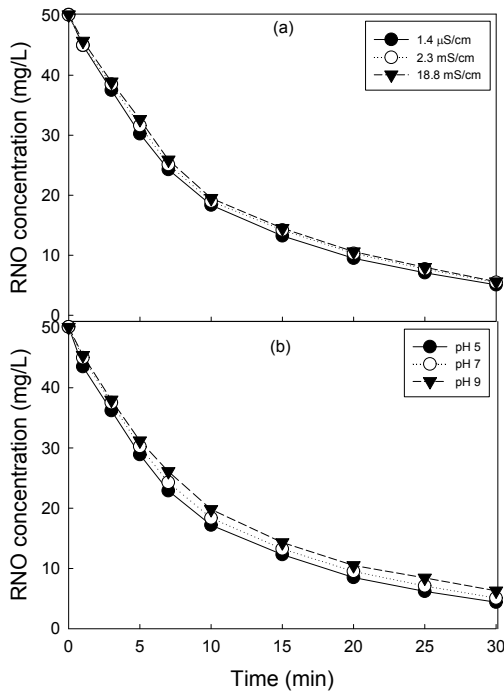


Fig. 10. Effect of conductivity (a) and pH (b) on the degradation of RNO in multi discharge and single ground electrode system.

#### 4. 결론

본 연구는 처리 용량이 적은 단일-유전체 장벽 방전 플라즈마 반응기의 스케일 업을 위해 멀티-플라즈마 반응기에 대해 기본 설계 인자를 도출하고 멀티 플라즈마 반응기의 성능에 미치는 운전인자의 영향에 대하여 고찰하여 다음의 결과를 얻었다.

1) 단일 플라즈마 반응기의 간격이 1~14 cm였을 때 단일 반응기 간격에 따른 RNO 분해 성능은 차이나지 않았으나, 안정성을 고려할 경우 최적 반응기 간격은 2 cm로 사료되었다. 단일 플라즈마 반응기를 2개 배열한 반응기 시스템(2 방전 전극-2 접지 전극 반응

기)과 방전 전극과 유전체로 이루어진 모듈 2개 외부에 접지 전극을 감은 반응기 시스템(2 방전 전극-1 접지 전극 반응기)의 RNO 분해율은 같은 것으로 나타나 접지 전극의 배열이 달라져도 멀티 플라즈마 반응기 성능에는 영향을 미치지 않은 것으로 나타나 전극 소요량이나 제작의 간편성을 위해 멀티 방전 전극-단일 접지 전극 배열을 선택하였다.

2) 단일 전원 공급장치 1대에 대해 멀티 플라즈마 반응기 1~5개로 변화시켰을 때, 단일 반응기인 경우 RNO 제거율이 49.2%의 제거율을 보였고, 3개인 경우 71.3%로 나타났으나 22.1%의 제거율 증가 효과를 나타내었다. 그러나 멀티 반응기의 개수가 증가하면서 반응속도가 느려져 최적의 멀티 플라즈마 반응기 개수가 존재하는 것으로 나타났고 3개인 것으로 사료되었다. 플라즈마 모듈의 수를 5개로 유지한 조건에서 전원 공급장치의 개수에 따른 RNO 농도 변화를 고찰한 결과 전원 3-반응기 5개의 플라즈마 모듈-전원 수가 최적의 조합인 것으로 나타났다.

3) 1차 전압이 증가할수록 RNO 분해율이 증가하는 것으로 나타났으나 180 V 이상에서 RNO 분해율은 거의 같은 것으로 나타나 최적 전압은 180 V 인 것으로 사료되었다. 적정 공기 공급량 이하에서는 공기 공급량이 1차 전압보다 RNO 분해에 더 큰 영향을 미치는 것으로 사료되었다. 전기전도도는 멀티 플라즈마 반응기의 운전시 고려하지 않아도 되는 것으로 사료되었다. 멀티-플라즈마 운전에 대한 pH 효과는 크지 않지만 플라즈마 반응 후 pH가 감소하기 때문에 이에 대한 고려가 필요한 것으로 사료되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2012년도 산학연공동기술개발사업(No. C0022924)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

#### 참고 문헌

- Ha, D. Y., Cho, S. H., 2003, Comparison of UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> photocatalytic oxidation in the dyeing wastewater treatment efficiency, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 25(9), 1123-1131.



- Jung, J. K., 2009, Generation apparatus and method on the water plasma torch with high-density, Korean Patent, 10-0924649.
- Kim, D. S., Park, Y. S., 2007, Electrochemical decolorization of a Rhodamine B using dimensionally stable anode, *Journal of the Korean Society of Water Quality*, 23(3), 377-384
- Kim, D. S., Park, Y. S., 2012a, Change of hydroponic components by treatment of ionized gas, *Journal of the Environmental Sciences*, 21(3), 363-368.
- Kim, D. S., Park, Y. S., 2012b, Study on the generation of chemically active species using air-plasma discharging system, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 28(3), 401-408.
- Kim, D. S., Park, Y., S., 2011, A basic study of plasma reactor of dielectric barrier discharge for the water treatment, *Journal of the Environmental Sciences*, 20(5), 623-630.
- Kim, S. J., Jin, M. J., Won, C. H., Hwang, J. S., Lee, G. Y., 2010, A study of advanced oxidation process for reuse of industrial wastewater, *Journal of Korean Society on Water Quality*, 26(4), 580-584.
- Lee, E. J., 2005, Degradation characteristics of non-biodegradable matter in livestock wastewater using ionized gas, Ph. D. Dissertation, Chonbuk National University.
- Li, M., Feng, C., Hu, W., Zhang, Z., Sugiura, N., 2009, Electrochemical degradation of phenol using electrodes of Ti/RuO<sub>2</sub> and Ti/IrO<sub>2</sub>-Pt, *Journal of Hazardous Materials*, 162, 455-462.
- Lukes, P., Clupek, M., Babicky, V., Janda, V., Sunka, P., 2005, Generation of ozone by pulsed corona discharge over water surface in hybrid gas-liquid electrical discharge reactor, *J of Physics D: Applied Physics*, 38, 409-416.
- Moon, J. H., Lee, H. D., Lee, M. E., Park, H. K., Chon, K. I., Jong, J. W., 2008, Phenol conversion by pulsed corona discharges in aqueous solution, *Korean Society of Environmental Engineers, Spring Conference Proceeding*, 1-3
- Park, Y. S., 2007, Decolorization of Rhodamine B by photo-Fenton oxidation, *J of Korean Society on Water Quality*, 23(2), 274-280.
- Shi, J., Bian, W., Yin, X., 2009, Organic contaminants removal by the technique of pulsed high-voltage discharge in water, *Journal of Hazardous Materials*, 171, 924-931.
- Sugiarto, A. T., Ito, S., Ohshima, T., Sato, M., Skalny, J. D., 2003, Oxidative decolorization of dyes by pulsed discharge plasma in water, *Journal of Electrostatics*, 58, 135-145.
- The Korean Institute of Surface Engineering, 2007a, Plasma technology and industry application status, *Material Yard*, 20(4), 4-19.
- The Korean Institute of Surface Engineering, 2007b, Plasma-assisted environmental technology, *Materials Yard*, 20(4), 20-29.
- Wang, H., Li, J., Quan, X., 2006, Decolorization of azo dye by a multi-needle-to-plate high-voltage pulsed corona discharge system in water, *Journal of Electrostatics*, 64, 416-421.
- Yeo, I. H., Ryu, S. M., Park, H. K., 2006, Enhancement of biodegradability of the refractory organic substances in aqueous solution with discharged water generating (DWG) system, *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, 20(1), 79-85.
- Zhang, R., Zhang, C., Cheng, X. X., Wang, L., Wu, Y., Guan, Z., 2007, Kinetics of decolorization of azo dye by bipolar pulsed barrier discharge in a three-phase discharge plasma, *Journal of Hazardous Materials*, 142, 105-110.
- Zhang, Y., Zheng, J., Qu, X., Chen, H., 2008, Design of a novel non-equilibrium plasma-based water treatment reactor, *Chemosphere*, 70, 1518-1524.