수처리용 유전체 장벽 방전 플라즈마 반응기 개발

김동석 · 박영식^{1)*}

대구가톨릭대학교 환경과학과, ¹⁾대구대학교 기초교육원
(2012년 1월 27일 접수; 2012년 3월 2일 수정; 2012년 4월 17일 채택)

Development of Plasma Reactor of Dielectric Barrier Discharge for Water Treatment

Dong-Seog Kim, Young-Seek Park^{1)*}

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

¹⁾*Faculty of Liberal Education, Daegu University, Gyeongbuk 712-830, Korea*

(Manuscript received 27 January, 2012; revised 2 March, 2012; accepted 17 April, 2012)

Abstract

Non-thermal plasma processing using a dielectric barrier discharge (DBD) has been investigated as an alternative method for the degradation of non-biodegradable organic compounds in wastewater. The active species such as OH radical, produced by the electrical discharge may play an important role in degrading organic compound in water. The degradation of N, N-Dimethyl-4-nitrosoaniline (RNO) was investigated as an indicator of the generation of OH radical. The DBD plasma reactor of this study consisted of a plasma reactor, recycling pump, power supply and reservoir. The effect of diameter of external reactor (15 ~ 40 mm), width of ground electrode (2.5 ~ 30 cm), shape (pipe, spring) and material (copper, stainless steel and titanium) of ground electrode, water circulation rate (3.1 ~ 54.8 cm/s), air flow rate (0.5 ~ 3.0 L/min) and ratio of packing material (0 ~ 100 %) were evaluated. The experimental results showed that shape and materials of ground were not influenced the RNO degradation. Optimum diameter of external reactor, water circulation rate and air flow rate for RNO degradation were 30 mm, 25.4 cm/s and 4 L/min, respectively. Ground electrode length to get the maximum RNO degradation was 30 cm, which was same as reactor length. Filling up of glass beads decreased the RNO degradation. Among the experimented parameters, air flow rate was most important parameters which are influenced the decomposition of RNO.

Key Words : Dielectric barrier discharge, Non-thermal plasma, OH radical, N, N-Dimethyl-4-nitrosoaniline, Wastewater treatment

1. 서론

플라즈마는 1808년 H. Davy에 의한 직류 아크방전과 1830년대 M. Faraday 등의 고전압 아크방전 튜브개발에서 시작되었다고 볼 수 있으며, 19세기동안

아크 방전이나 직류 전기방전 플라즈마는 가스램프를 대치하기 위해 활발히 연구되어 왔었다(Dendy, 1993).

1879년 W. Crookes는 플라즈마는 물질의 제 4 상태라고 규명하였다. 플라즈마 속에는 전기적으로 중성인 원자들로만 이루어진 고온 기체와는 달리 서로 반대의 전하를 띤 입자들, 즉 전자와 양이온이 뒤섞여 존재한다. 따라서 전체적으로는 중성이지만 국부적으로 양이온과 전자 사이의 전하 분리에 의해 전기장이,

*Corresponding author : Young-Seek Park, Faculty of Liberal Education, Daegu University, Gyeongbuk 712-830, Korea
Phone: +82-53-850-4571
E-mail: ysparkk@daegu.ac.kr

그리고 전하의 흐름에 의해 전류와 자기장이 발생하게 된다. 전기장과 자기장은 보다 넓은 영역에 효력을 미치게 되어 매우 복잡하지만 활용성이 높은 물리적 현상이 나타난다. 지상에서 자연적으로 발생하는 플라즈마에는 번개와 오로라가 있다. 대기권을 벗어나면 지구 자장과 태양풍의 상호작용으로 생성된 플라즈마인 자기권이 존재한다(한국표면공학회, 2007a).

플라즈마는 핵융합 플라즈마와 같이 이온과 전자로 완전 격리된 수억도 내외의 고온 플라즈마와 수천 내지 수만도 정도의 저온 플라즈마로 구분되며 저온 플라즈마는 아크나 고주파 유도결합 방전에 의해 발생된 아직 이온화되지 않은 중성입자(원자, 분자)의 부분 전리된 상태로 동일한 상태를 유지하며 국부 열평형(local thermal equilibrium)을 이루고 있는 열 플라즈마(thermal plasma)와 높은 전자 온도에 비해 무거운 이온과 중성 입자는 실온 정도의 온도로 비평형(non-equilibrium) 상태의 적은 열용량을 가지고 있는 비열 플라즈마(non-thermal plasma)로 다시 구분할 수 있다(한국표면공학회, 2007b).

열 플라즈마 기술은 환경 분야에서 고온을 이용하여 생활 및 산업폐기물을 열분해하여 연소 가스로 활용하거나 유리 고화시켜 안정화하는 등 폐기물 처리에 주로 활용되고 있다(엄 등, 2006).

비열 플라즈마 또는 저온 플라즈마 공정은 두 전극 사이에 고전압을 인가하여 음극에서 방출되는 전자가 두 전극 사이에 존재하는 가스 분자들에 충돌하여 가스 분자를 이온화시켜 발생한다. 전자의 활동은 매우 활발하지만 이온 또는 가스 분자의 활동은 활발하지 않다. 전자온도는 높고, 이온 온도는 낮아 비열 플라즈마 상태를 얻는데 많은 전력이 필요하지 않다. 비열 플라즈마의 발생원으로는 electron beam irradiation이나 electrical discharge에 의해 발생된다(이, 2005). 비열 플라즈마 공정은 반응을 통해 산소 또는 수증기에서 OH 라디칼 및 $\cdot H$, $\cdot O$, $\cdot O_2$, $\cdot HO_2$, H_2O_2 와 O_3 등과 같은 라디칼 및 산화제들이 생성되며 여러 가지 오염물질을 산화시킨다. 비열 플라즈마 공정은 상온 대기압 상태에서 운전이 가능하며 오염물질 처리능이 높고 다른 기술과의 접목 용이하여 다양한 형태의 하이브리드 기술이 가능하다는 장점이 있다(Hayashi 등, 2001).

수중의 오염물질을 분해 시키는 수처리를 위한 비열 유전체 장벽 플라즈마 공정은 최근에 연구되고 있는 공정이기 때문에 설계 자료나 운전 자료가 많지 않은 편이다(Zhang 등, 2008). 특히 본 연구와 같이 교류를 이용하고 액체를 순환시키는 방식의 플라즈마 공정은 기존의 플라즈마 반응기와는 형태가 다르기 때문에 전극 재질, 전극 형태, 외부 반응기 직경, 액체 순환 유량, 공기 유량 및 충전제 충전율 등 유전체 장벽 플라즈마 반응기 설계에 필요한 기본적인 설계인자와 운전인자에 대한 기초연구를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

유전체 방법 방전 플라즈마 공정의 성능을 평가하기 위하여 분해대상물질로 N, N-Dimethyl-4-nitrosoaniline (RNO)을 선택하였다. $\cdot OH$ 은 생성량을 직접적으로 측정하기 어려워 RNO와 같이 $\cdot OH$ 과 선택적으로 반응하는 것으로 알려진 물질의 분해를 통하여, $\cdot OH$ 의 생성 여부를 간접적으로 확인 가능한데 특히 RNO는 표백효과에 의해 육안으로 쉽게 확인이 가능하고 분석이 간편하여 RNO를 사용하였다(Li 등, 2009).

실험에 사용한 플라즈마 반응기 시스템의 개요도를 Fig. 1에 나타내었다. 반응기 시스템은 방전 전극, 유전체, 외부 유리관 반응기 및 접지 전극으로 이루어진 플라즈마 반응기와 공기 펌프, 1차 전원장치와 네온트랜스로 이루어진 전원 공급장치 및 순환펌프와 저장조로 이루어진 저장소 등 크게 네 부분으로 나뉘어진다. 유전체는 두께가 1 mm, 내경이 7 mm인 석영관을 사용하였다. 방전 전극(내부 전극)은 봉형 전극이었으며, 소재는 티타늄이었으며, 전극 두께는 2 mm이었다. 접지 전극(외부 전극)은 스프링 및 파이프 형이며 실험의 종류에 따라 길이 또는 면적을 달리 사용하였다. 접지 전극의 재질은 구리, 티타늄 및 스테인리스 스틸이었다. 실험 조건을 Table 1에 나타내었다. 반응기에 주입하는 가스로는 공기를 사용하였으며 공기 펌프에서 발생한 공기를 rotameter를 이용하여 유량을 조절한 뒤 공급하였다. 순환펌프를 이용하여 플라즈마 반응기에서 반응한 반응물을 저장조로 이송하였으며 저장소에서는 중력에 의해 반응기로 다시 유입된다.

전원 공급장치로 2차 전압이 15 kV이고 주파수가 20 kHz인 네온트랜스를 이용하였다. 초기 운전 조건은 다음과 같다. 전압조건은 1차 전압은 220 V, 2차 전압은 15 kV로 운전하였고, 공기 공급량은 4 L/min, 플라즈마 반응기에서의 초기 순환 유량은 13.2 cm/s로 운전하였다.

Fig. 1. Schematic diagram of 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 외부 유리관 직경의 영향

접지 전극, 유전체 및 방전 전극으로 이루어진 기존 유전체 장벽 방전 반응기는 반응기 전체가 수중에 잠겨 있어 플라즈마를 발생시키기 때문에 절연이 잘 이루어지지 않아 단락 현상이 발생하기 쉬어 플라즈마가 발생하지 않거나 스파크가 튀는 등 성능이나 안전상의 문제가 발생하여 개선할 필요가 있어 여러 가지 시도를 하여 방전 전극과 유전체(석영관)로 이루어진 반응기, 플라즈마와 반응하는 물, 외부 반응기 및 외부 반응기에 설치된 접지 전극으로 반응기 시스템을 구성하였다. 내부 전극인 방전 전극과 유전체인 석영관에 대한 기초 자료는 본 연구자들이 앞서 연구한 자료에서 확립된 조건(방전 전극 직경, 2 mm; 석영관 내경, 7 mm)에서 접지 전극인 외부 전극이 감기는 외부 반응기의 직경을 15 ~ 40 mm(접지 전극과 방전 전극의 간격, 8 ~ 21 mm)로 변화시켜 실험하였다(김과 박, 2011).

실험 결과 RNO 분해는 외부 반응기 직경의 증가에 따라 증가하다 35 mm 이상의 직경에서는 감소하여 최적 외부 반응기의 직경이 존재하는 것으로 나타났고, 30 mm(접지 전극과 방전 전극의 간격, 16 mm)인 것으로 사료되었다. Sugiarto와 Sato(2001)는 needle-plate 펄스 플라즈마 반응기에서 두 전극 사이의 간격이 6 ~ 45 mm인 경우 간격에 따라 발생하는 플라즈마의 형태가 달라지며 spark와 streamer 방전이 동시에 일어나는 15 mm인 경우가 폐놀 제거율이 가장 높다고 보고하였다.

Chen 등(2004)은 needle과 plate의 간격이 3 cm와 5

Table 1. Experimental parameters

Items	Value
External electrode	
Height of external electrode	2.5, 5, 10, 20, 30 cm
Type of external electrode	plate, spring
Materials of external electrode	Stainless steel, Titanium, Copper
Operation parameters	
Water circulation rate	3.1, 13.2, 25.4, 38.6, 54.8 cm/s
Air flow rate	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 L/min
Packing ratio of packing material	0, 33, 67, 100 %

cm인 경우 거리가 가까우면 플라즈마 채널을 형성하기 쉽고 더 많은 에너지가 용액 속에 축적되어 산화물질이 더 생성되지만, 접지 전극과 방전 전극의 거리가 먼 경우 플라즈마 채널 형성에 더 많은 에너지가 필요하여 더 적은 에너지가 축적된다고 보고하였다. 본 플라즈마 반응기에서는 streamer 방전이 발생하며, 다른 연구자와 플라즈마 발생형태가 다르고 전극 형태가 달라 정확한 설명은 어렵지만 플라즈마 발생과 관련한 에너지 축적과 관련이 있는 것으로 사료되었다. Sugiarto와 Sato(2001)의 연구와 유사한 두 전극 사이의 거리가 16 mm인 외부 반응기의 최적 직경인 것으로 사료되었다.

Fig. 2. Effect of diameter of external tube on the degradation of RNO (air flow rate, 1 L/min; water circulation rate, 13.2 cm/s; width of ground electrode, 20 cm).

3.2. RNO 분해에 미치는 접지 전극 길이의 영향

실험에 사용한 외부 전극은 파이프 형태로써 외부 반응기 전체 외부를 감싸는 형태로 되어 있다. 파이프형 외부 전극의 길이가 RNO 분해에 미치는 영향을 Fig 3에 나타내었다. 파이프 형태인 외부 전극의 길이가 2.5 cm에서 5 cm로 증가됨에 따라 RNO 분해율이 빠르게 증가되었으며 외부 전극의 길이가 증가됨에 따라 RNO 분해율이 증가되어 최대 RNO 분해율을 얻을 수 있는 길이는 반응기 구조상 최대 길이인 30 cm인 것으로 나타났다. 2.5 cm에서는 플라즈마가 집중되어 플라즈마의 밀도는 높은 것으로 사료되었다.

플라즈마 밀도의 측정은 불가능하였으나 플라즈마가 형성되는 공간의 플라즈마 색으로 육안으로 판별하였다. 외부 전극의 길이가 길어질수록 자외선의 빛의 세기는 감소하는 것으로 나타났으나 30 cm의 경우 전체 석영관에서 플라즈마가 형성되는 것으로 나타났다. 이후 실험은 최대 전극 길이인 30 cm에서 실험을 수행하였다.

Fig. 3. Effect of length of external (ground) electrode on the degradation of RNO (air flow rate, 1 L/min; water circulation rate, 13.2 cm/s; diameter of external reactor, 30 mm).

3.3. RNO 분해에 미치는 접지 전극 형태와 재질의 영향

Fig. 4는 전극 형태를 파이프 형과 wire 형태로 하였을 때 RNO 분해율을 비교하여 나타낸 것이다. 전극의 길이가 30 cm이었을 때 전극의 형태를 파이프 형이던지 wire형이던지 플라즈마 발생에는 영향을 주지 않는 것으로 나타나 wire로 하는 것이 경제적으로 나은 것으로 판단되었다. 이와 같은 결과는 접지 전극, 유전체 및 방전 전극으로 이루어진 반응기에서 접지 전극의 형태가 파이프형, 봉 형 및 스프링 형 등 접지 전극의 형태와 무관하였다고 김과 박(2011)이 보고한 결과와 일치하였다.

Fig. 5에서 보여지듯이 접지 전극의 재질을 구리, 티타늄 및 스테인리스 스틸을 이용하여 전극의 재질이 RNO 분해에 미치는 영향을 고찰한 결과 외부 전극인 접지 전극의 재질이 RNO 분해에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그러나 방전 전극의 경우는 플라즈마가 직접 발생하는 전극이며, 또한 Zhang 등

(2008)도 플라즈마가 발생하는 방전 전극의 경우 전극이 소모된다고 보고하고 있기 때문에 수중에 소모된 전극 성분이 용출되어도 위해성이 상대적으로 적고 부식성이 적은 전극을 사용할 필요성이 제기되어 방전 전극인 내부 전극은 내구성이 우수한 티타늄을 사용하였다.

Fig. 4. Effect of type of external (ground) electrode on the degradation of RNO(air flow rate, 1 L/min; water circulation rate, 13.2 cm/s; diameter of external tube, 30 mm; width of ground electrode, 30 cm).

Fig. 5. Effect of material of external (ground) electrode on the degradation of RNO(air flow rate, 1 L/min; water circulation rate, 13.2 cm/s; diameter of external reactor, 30 mm; width of ground electrode, 30 cm).

3.4. RNO 분해에 미치는 순환 유량의 영향

본 반응기는 플라즈마가 발생하는 유전체 내부와 플라즈마 반응에 의해 발생한 이온화 가스가 산기관을 통해 배출되어 수중에서 반응하는 외부 반응기의 직경이 적어 전체 반응기의 반응 면적이 적어 반응기 외부에 저장소를 두어 펌프로 순환시켰다. 순환 펌프는 이온화가스와 반응한 물을 저장소로 보내는 역할을 할 뿐만 아니라 이온화 가스가 수중에 용존시키기 위한 물질전달을 높일 수 있는 역할도 할 수 있다.

반응기에서 플라즈마와 반응한 물을 순환 펌프로 저장소로 순환시키는데 순환수의 순환 유속이 RNO 분해에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다. 순환 유속이 3.1 cm/s에서 25.4 cm/s로 증가함에 따라 RNO 분해율도 증가하였다. 25.4 cm/s 이상의 순환 유속에서는 RNO 분해가 감소하여 최적 순환 유속은 25.4 cm/s인 것으로 나타났다. 순환 유속이 증가하면 물질전달 속도가 증가하고 이에 따라 이온화 가스가 물속으로 용존하는 속도가 증가하고 RNO 분해율이 증가하는 것으로 사료되었다. 그러나 일정 유량 이상의 순환 유속에서 RNO 분해가 감소하는 것은 일정 유속 이상에서는 물질전달 상승으로 인한 이온화 가스의 용존량이 더 이상 증가하지 않기 때문인 것으로 사료되었다.

Fig. 6. Effect of circulation rate of water on the degradation of RNO(air flow rate, 1 L/min; diameter of external reactor, 30 mm; width of ground electrode, 30 cm).

3.5. RNO 분해에 미치는 공기 공급량의 영향

유전체인 석영관 내부로 공급하는 공기의 유량을 변경하였을 때 RNO 분해에 미치는 공기유량의 영향을 Fig. 7에 나타내었다. 공기 공급량이 0.5 L/min에서 1 L/min으로 증가시에는 RNO 분해율이 매우 빠르게 증가하였으며, 1 L/min에서 2.5 L/min으로 증가시에는 RNO 분해율이 서서히 증가하였으며, 3 L/min에서는 RNO 분해율이 감소하여 최적 공기량은 2.5 L/min으로 나타났다. 0.5 L/min의 공기 공급량과 1 L/min의 공기 공급량에서의 RNO 분해율이 차이나는 것은 윤(2008)이 보고한 것과 같이 유전체 방전 플라즈마는 석영관 내부로 유입시키는 가스의 유량이 적으면 물이 석영관 내로 침투하여 단락이 생겨 플라즈마가 발생하지 않는 특징에 대한 설명과 같이 0.5 L/min에서는 절연 유지가 어렵기 때문이라고 사료되었다. 공기 공급량이 1 L/min 이상에서는 안정적인 플라즈마가 발생하는 구간이며, 공기 공급량의 증가에 따라 공기 중의 산소가 오존과 같은 산화제 생성 양이 증가하기 때문이라고 사료되었다.

Li 등(2007)은 펄스 플라즈마 반응기를 이용한 폐놀 처리에서 공기의 첨가량이 증가하면 공기 중의 산소 때문에 오존 등의 산화제 농도가 많이 증가하게 되며 이 때문에 폐놀 제거율이 증가하는데, 오존 등의 최적 생성에 필요한 최적 공기 공급량이 존재하기 때문에 폐놀 제거에 대한 최적 공기 공급량이 존재한다고 보고하였다. Zhang 등(2008)은 needle-plate 플라즈마 반응기에서 메틸오렌지 제거에서 공기 공급량이 0.93 ~ 2.00 L/min인 조건에서 최적 공기 공급량은 1.6 L/min이라고 보고하였다. 최적 공기 공급량까지 공기 유량은 기상에서 오존이 액상으로의 물질전달이 증가하지만, 최적 공기 공급량 이상에서는 본 연구의 저장소와 유사한 역할을 하는 pre-oxidation zone에서의 체류시간이 짧아지기 때문에 오존의 이용 효율이 감소하여 처리율도 감소한다고 보고하였다. 타 연구자들의 연구결과와 비교할 때 최적 공기 공급량은 반응기의 구조 등에 따라 달라질 수 있지만 타 연구자들과 같이 최적 공기 공급량이 존재하는 것으로 사료되었다.

Fig. 7. Effect of flow rate of air on the degradation of RNO(water circulation rate, 25.4 cm/s; diameter of external reactor, 30 mm; width of ground electrode, 30 cm).

3.6. RNO 분해에 미치는 충전물의 영향

유전체인 유리구슬을 반응기에 충전하여 유리구슬의 충전이 RNO 분해에 미치는 영향을 Fig. 8에 나타내었다. 유리구슬을 충전할 경우 이온화 가스와 물의 접촉이 늘어 RNO 분해율이 늘어날 것으로 예상되었다. 충전량이 증가할수록 RNO 분해율이 조금 감소하는 경향을 나타내었는데, 이는 충전물이 방해할 때 문인 것으로 사료되었다.

Fig. 8. Effect of height of packing on the degradation of RNO(air flow rate, 2.5 L/min; water circulation rate, 25.4 cm/s; diameter of external tube, 30 mm; width of ground electrode, 30 cm; packing material, 7 mm glass bead).

4. 결 론

1) RNO 분해는 외부 반응기 직경의 증가에 따라 증가하다 35 mm 이상의 직경에서는 감소하여 최적 외부 반응기의 직경이 존재하는 것으로 나타났고 30 mm(접지 전극과 방전 전극의 간격, 16 mm)인 것으로 사료되었다. 파이프 형태인 외부 전극의 길이가 2.5 cm에서 5 cm로 증가됨에 따라 RNO 분해율이 가장 많이 증가되었으며 5 cm이상에서도 외부 전극의 길이가 증가됨에 따라 RNO 분해율이 서서히 증가되어 최대 RNO 분해율을 얻을 수 있는 길이는 반응기 구조상 최대 길이인 30 cm인 것으로 나타났다.

2) 방전 전극을 봉 형으로, 재질을 티타늄으로 고정 한 조건에서 접지 전극인 외부 전극의 형태(파이프와 스프링 형)와 재질(구리, 스테인리스 스틸 및 티타늄)은 RNO 분해에 영향을 미치지 않았다. 충전재로 7 mm인 유리구슬을 충전한 결과 유리구슬의 충전은 RNO 분해를 방해하는 것으로 나타났다.

3) 플라즈마 반응기에서 저장소로 물과 이온화 공기를 순환시키는 순환수의 순환 유속이 3.1 cm/s에서 25.4 cm/s로 증가하면서 RNO 분해율도 증가하였다. 25.4 cm/s이상의 순환 유속에서는 RNO 분해가 감소하여 최적 순환 유속은 25.4 cm/s인 것으로 나타났다. 공기 공급량이 0.5 L/min에서 1 L/min으로 증가하면서 RNO 분해율이 매우 빠르게 증가한 후 1 L/min에서 2.5 L/min으로 증가하면서 RNO 분해율이 서서히 증가하였다. 3 L/min에서는 RNO 분해율이 감소하여 최적 공기량은 2.5 L/min으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 산학협동재단의 지원을 받아 진행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김동석, 박영식, 2011, 수처리용 유전체장벽 플라즈마 반응기에 대한 기초 연구, 한국환경과학회지, 20(5), 623-630.
- 엄태인, 채종성, 이각로, 장동순, 김영석, 2006, 플라즈마 토치 시스템을 유해폐기물 용융처리기술 개발, 한국 폐기물학회지, 23(3), 175-180.
- 이은주, 2005, 이온화가스에 의한 축산폐수 중 난분해성 물질 분해 특성, 박사학위논문, 전북대학교.
- 윤석현, 2008, 하이브리드 수중플라즈마 토치의 방전특성 연구, 석사학위논문, 경남대학교.
- 한국표면공학학회, 2007a, 플라즈마 기술 개요 및 산업응용 현황, 재료마당, 20(4), 4-19.
- 한국표면공학학회, 2007b, 플라즈마를 이용한 환경기술, 재료마당, 20(4), 20-29.
- Chen, Y. S., Zhang, X. S., Dai, Y. C., Yuan, W. K., 2004, Pulse high-voltage discharge plasma for degradation of phenol in aqueous solution, Separation and Purification Technology, 34, 5-12.
- Dendy, R., 1993, Plasma Physics: an Introductory Course, 1st ed., Cambridge University Press, Cambridge, 1-20.
- Hayashi, N., Suganuma, H., Satoh, S., Yamabe, C., 2001, Treatment of volatile organic compounds by positive streamer corona using a series gap, Japanese Journal of Applied Physics, 40, 6104-6018.
- Li, J., Sato, M., Ohshima, T., 2007, Degradation of phenol in water using a gas-liquid phase pulsed discharge plasma reactor, Thin Solid films, 515, 4283-4288.
- Li, M., Feng, C., Hu, W., Zhang, Z., Sugiura, N., 2009, Electrochemical degradation of phenol using electrodes of Ti/RuO₂-Pt and Ti/IrO₂-Pt, Journal of Hazardous Materials, 162, 455-462.
- Sugiarto, A. T., Sato, M., 2001, Pulsed plasma processing of organic compounds in aqueous solution, Thin Solid films, 386, 295-299.
- Zhang, Y., Zheng, J., Qu, X., Chen, H., 2008, Design of a novel non-equilibrium plasma-based water treatment reactor, Chemosphere, 70, 1518-1524.