

밸리스트 수 처리를 위한 Plasma Gun의 오존생성에 미치는 운전변수의 영향

이현돈* · 김종오** · 정재우†

*경상대학교 환경보전학과 대학원, **경상대학교 도시공학과 교수/환지연, † 진주산업대학교 환경공학과/녹색기술연구소 교수

Effects of Operating Parameters on Ozone Production by Plasma Gun for Ballast Water Treatment

Hyeon-Don Lee* · Jong-Oh Kim** · Jae-Woo Chung†

*Department of Environmental Protection, Gyeongsang National University

**Professor, Department of Urban Engineering/ERDI, Gyeongsang National University

† Professor, Department of Environmental Engineering/Green Technology Institute, Jinju National University

요 약 : 밸리스트수 처리를 위한 Plasma Gun의 전기적 특성과 오존 생성에 미치는 주요 운전변수들의 영향에 관해 실험실 규모 연구를 수행하였다. 방전개시전압보다 높은 전압이 인가되면 방전이 시작되고 오존이 생성되었으며 전압이 증가함에 따라 기체로 전달되는 에너지 및 오존 농도가 거의 선형적으로 증가하였다. 오존 생성 측면에서 최적의 에너지 효율성을 얻을 수 있는 전극간 거리가 존재하였으며 실험된 장치에서는 1.95 mm의 전극간 거리에서 최적 효율이 얻어졌다. 전기에너지 특성에 미치는 내부전극 재질의 영향은 무시할만한 수준이었으나 내부전극의 전기전도도와 열전도도 차이가 오존 생성에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 일정한 Plasma Gun 구조에서 오존 생성은 기체로 전달되는 에너지밀도에 의해 중요한 영향을 받는 것으로 나타났으며 유입되는 기체의 산소함량이 증가할수록 오존 생성이 증가하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : Plasma Gun, 전기적 특성, 오존 생성, 운전 변수, 에너지 효율성

Abstract : Effects of operating parameters on electrical properties and ozone generation of Plasma Gun for ballast water treatment were investigated in a laboratory scale experiment. Electrical discharges and ozone generation initiated with applying voltages higher than discharge onset value. Ozone concentration was almost linearly increased with the increase of applied voltage. The optimum electrode gap distance which gave the optimum energy efficiency of ozone generation was 1.95 mm in the experimented apparatus. The effect of inner electrode material on the electrical energy transfer was negligible, however, the difference of electrical and thermal conductivities between electrode materials significantly influenced the ozone generation. In a constant geometrical structure, the electrical energy density played an important role in the ozone generation. The increase of oxygen content in the feeding gas enhanced the ozone generation by lowering ionization potential and promoting ozone source.

Key words : Plasma Gun, Discharge characteristics, Ozone generation, Operating parameters, Energy efficiency

1. 서 론

선박 운행중에 선박의 균형을 유지하고 안정성을 높이기 위해 사용되는 밸리스트수에 의해 해양오염뿐만 아니라 막대한 생태적, 경제적 피해가 유발되고 있다(Finnoff et al., 2005). 밸리스트수에 의해 발생하는 환경피해를 방지하고자 국제사해기구(IMO)는 2004년에 밸리스트수와 침전물 관리에 관한 국제협약을 채택하였으며 2009년에 발효되었다. 이에 따라 밸리스트수 처리시스템의 설치가 2012년부터 인도되는 선박에 의무화되고 2017년까지 기존의 모든 선박들로 확대될 예정이다(박·

김, 2004a). 밸리스트수 처리 분야의 시장규모는 2009년부터 연간 약 50조원 규모가 될 것으로 예측된 바 있으며 향후 더욱 증가할 것으로 전망된다(IMO, 2004). 이러한 시대적 흐름에 맞추어 세계 최대의 조선강국인 우리나라는 밸리스트수 처리 분야의 시장을 선점하기 위한 노력이 필요하다.

우리나라를 비롯한 세계 주요 국가들은 밸리스트수 처리기술 개발을 위해 노력해오고 있다. 여과, 오존화, 전기분해, 자외선 조사 등 다양한 기술을 이용하는 밸리스트수 처리공정이 개발되고 있다. 이러한 노력의 결과로 선박의 오·폐수 처리나 밸리스트수 처리에 관한 다수의 연구논문들이 발표되고 있다

* 대표저자 : 정희원, navy7417@naver.com 055)751-3341

** 정희원, kjo1207@gsnu.ac.kr 055)751-5323

† 교신저자 : 정희원, jwchung@jinju.ac.kr 055)751-3348

(박·김, 2004b; 박 등, 2008; Margaret et al., 2008; Tang et al., 2009; Oemcke and Leeuwen, 2005). 밸러스트수 처리장치는 선박에 탑재하여 운전되어야 하며 많은 유량을 짧은 시간에 처리해야 하므로 규모가 최소화되고 빠른 처리속도가 요구된다.

비교적 최근부터 강도 높은 연구가 진행되고 있는 수중 플라즈마 공정은 처리수내에 직접적으로 전기방전을 유발시켜 발생하는 화학적 활성종들을 활용하므로 소규모 장치로 대용량 처리에 적용될 수 있는 장점을 가지고 있다. 여러 가지 형태의 방전기술중에 펄스 코로나 방전(pulsed corona discharges), 무성 방전(dielectric barrier discharges), 전기분해(electrolysis)의 3가지 기술이 수처리에 활용될 수 있다 (Muhammad et al., 2001). 밸러스트수 처리를 위해 전기방전 기술을 이용할 경우에 해수의 높은 전기전도도로 인해 적용 가능한 방전 형태는 제한된다. 폐수처리에 적용할 목적으로 강도 높은 연구가 진행되고 있는 펄스 코로나 방전은 30 mS/cm에 이르는 전기전도도를 가진 해수에 적용할 경우에 안정적인 방전을 유지할 수 없으므로 적용성이 떨어진다. 이러한 경우에 적용할 수 있는 전기방전의 형태는 기체 방전을 주된 형태로 하며 부분적으로 액체방전을 유발시킬 수 있는 무성방전이 될 수 있다.

본 연구팀에서는 밸러스트수 처리에 적용할 수 있는 무성방전을 기초로 한 Plasma Gun을 개발 중에 있으며 소규모 실험용 장치를 설계·제작한 상태이다. 본 연구에서는 Plasma Gun의 성능을 시험하고 최적 운전조건을 도출하기 위한 기초자료를 얻기 위해 기체상 오존 발생에 미치는 주요 운전변수의 영향을 평가하고자 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험재료 및 장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험장치의 구성도를 나타내고 있다. 실험장치는 Plasma Gun 시스템, 전원공급부, 기체공급부 및 측정장치로 구성되어 있다. Plasma Gun은 무성방전 형태를 기초로 하여 설계·제작되었다. 유전물질로 pyrex tube를 사용하여 중앙부에 내부전극으로 얇은 직경의 전극봉을 설치하였으며 외벽에 구리 테이프를 감아 외부전극으로 활용하였다.

Plasma Gun에 고전압을 공급하기 위해 220V의 교류전압을 neon transformer(1:15000)를 이용하여 증폭시켰다. 전압의 조절을 위해 슬라이다스를 이용하였다. 이러한 전원공급장치는 적은 비용으로 시중에서 구할 수 있으므로 경제적인 장점을 갖는다.

수처리에 중요한 역할을 하는 화학적 활성종들을 생성시키기 위해 Plasma Gun으로 다양한 조성의 기체를 유입시킬 수 있다. 본 연구에서는 유입기체로 산소, 질소, 공기를 이용하였으며 유량을 조절하기 위해 gas regulator와 rotameter를 이용하였다.

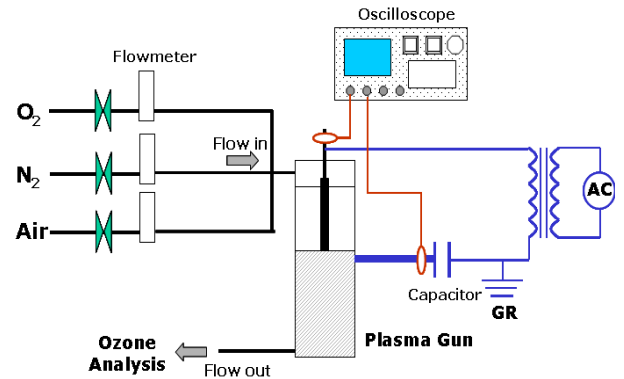


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

이렇게 구성된 Plasma Gun을 수용액내에 설치하여 전압을 인가하면 Fig. 2와 같은 방전현상을 관찰할 수 있다. 설계·제작된 시스템은 간단한 구조를 가지며 쉽게 수용액내에 설치할 수 있으므로 제한된 공간에서 많은 양의 물을 처리해야 하는 밸러스트수 처리공정으로서 적합하다.

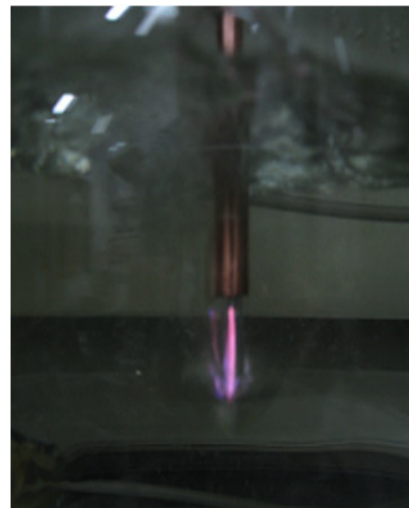


Fig. 2 Discharge phenomenon of Plasma Gun in aqueous solution

본 연구의 주요 측정항목은 전기적 특성 및 오존 농도이다. 전압, 전류, 전기 에너지와 같은 전기적 특성을 측정하기 위해 Fig. 1에 나타나 있는 전기 회로를 구성하였다. 전극으로 인가되는 고전압은 내부전극에 1000:1 고전압 프로브(PPE20KV, Lecroy)를 연결하여 측정하였으며 전류와 전하량은 외부전극에 연결된 콘덴서(capacitance, 1.5μF) 양단에 형성되는 전압을 측정하여 계산하였다. 전압 측정을 위해 100:1 고전압 프로브(PPE 5KV, Lecroy)를 사용하였다. 각각의 고전압 프로브는 500 MHz의 bandwidth와 1GS/sec의 샘플링 속도를 지닌 오실로스코프(LT354, Lecroy)에 연결하여 데이터를 수집하였다.

이러한 과정을 통해 시간에 따른 전압, 전류, 전하량의 값을 구하게 되면 반응기로 전달되는 에너지는 전압 및 전류의 곱형을 시간에 대해 적분하거나 전하량-전압 그래프의 면적을 계산함으로써 구할 수 있다(Carlins and Clark, 1982). 무성방

전의 전기적 특성값을 계산하는 방법은 기존의 문헌을 통해 설명된 바 있다(정 등, 2004).

Plasma Gun으로부터 발생하는 오존 농도를 측정하기 위해 오존 분석기(In USA IN-2000, USA)를 사용하였다.

2.2 실험방법

Table 1은 Plasma Gun의 전기적 특성 및 오존 생성에 미치는 운전변수의 영향을 규명하기 위해 변화시킨 실험조건을 나타내고 있다. 실험의 주된 전기적 운전변수는 Plasma Gun으로 인가되는 전압이며 0~23 kV의 교류전압을 60 Hz로 인가하였다. 이러한 조건에서 얻어지는 한 사이클의 전압 파형당 전기 에너지는 0~109.1 mJ이었다.

Table 1 Major operating parameters and ranges

Parameters	Range
Voltage	0~23 kV peak
Frequency	60 Hz
Energy	0~75 mJ/cycle
Inner diameter of reactor	6.9 mm
Length of outer electrode	200 mm
Electrode gap distance (sus)	0.85, 1.45, 1.95, 2.20, 2.35 mm
High voltage electrode	stainless steel, Yellow copper, Red copper
Gas flow rate	1, 3, 6, 9 LPM
Gas composition (N ₂ :O ₂)	2.4:0.6, 1.5:1.5, 0.6:2.4, only N ₂ , only O ₂

오존 발생에 미치는 주요 공정인자로 반응기의 구조, 유입기체 유량 및 조성을 설정하였다. 이러한 변수들은 방전의 전기 및 화학적 특성에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 모든 실험에서 유전물질의 두께와 내부 직경은 각각 2.0 mm와 6.9 mm로 일정하게 유지시켰다. 전극간 거리를 조절하기 위해 1.6, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0 mm의 직경을 가진 내부 전극을 사용하였으며 각각의 경우에 전극간 거리는 0.85, 1.45, 1.95, 2.20, 2.35 mm가 된다. 이와 더불어 방전 및 오존 발생 특성에 미치는 내부 전극 재질의 영향을 관찰하기 위해 stainless steel, yellow copper, red copper 재질을 이용하여 실험하였다.

오존 발생에 미치는 기체 유량의 영향을 관찰하기 위해 1~9 LPM의 범위에서 실험하였고, 오존발생에 미치는 기체조성의 영향을 관찰하기 위해 질소와 산소의 조성비를 5가지로 변화시켰다.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서 설계·제작된 Plasma Gun은 무성방전의 전극구조를 갖추고 있으나 액체상 방전과 연계될 때 실제의 방전이 무성방전과 유사하게 발생하는지의 여부를 확인할 필요가 있

다. 이와 더불어 무성방전의 전기적 특성을 평가하기 위해 기존에 활용하는 측정기법을 활용할 수 있는지를 검토하기 위해 Lissajous figure를 작성하였다. 공기를 유입기체로 하여 3 LPM의 속도로 공급하는 조건에서 약 22 kV의 교류전압이 인가될 때 발생하는 전하량을 구하였다. 이렇게 얻어진 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Plasma Gun의 전기적 특성이 전형적인 무성방전에서 얻어지는 특성과 유사한 것을 알 수 있으며 운전 조건별 전기적 특성을 분석하기 위해 Lissajous figure를 활용할 수 있는 것으로 나타났다.

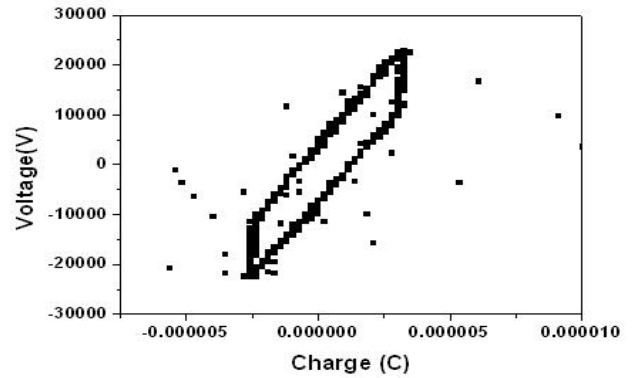


Fig. 3 Lissajous figure of Plasma Gun(V= 22 kV)

Plasma Gun에 인가되는 한 사이클의 교류전압에 의해 전달되는 에너지는 다음과 같이 전압 및 전류 파형을 적분하여 구할 수 있다.

$$E_{cycle} = \int_t VI dt \tag{1}$$

또한 전압 파형당 에너지는 Lissajous figure를 이용하면 쉽게 얻을 수 있다. 즉, 전압-전하량 그래프의 면적을 계산함으로써 전압 파형당 Plasma Gun으로 전달되는 에너지를 계산할 수 있다(이 등, 2002).

플라즈마 화학의 중요한 지표가 되는 에너지 밀도(energy density)는 방전으로 유입되는 단위 기체 유량으로 전달되는 에너지로 정의되며 다음과 같이 주어진다.

$$ED = \frac{E_{pulse} f}{q} [J/L] \tag{2}$$

여기에서 f는 교류전압의 주파수(Hz)이며 q는 Plasma Gun으로 공급되는 기체유량(liter/sec)이다.

Fig. 4는 내부 전극으로 3 mm의 stainless steel을 사용하는 조건에서 3 LPM의 공기를 유입시킬 때, Plasma Gun으로 전달되는 전기에너지 특성에 미치는 인가전압의 영향을 나타내고 있다. 일정한 값(방전개시전압, V_{on}) 이상의 전압이 인가되면 기체흐름으로 에너지 전달이 이루어져 방전이 개시된다. 실험조건에서 방전개시전압은 약 8 kV이었으며 전압 증가에 따라 거의 선형적으로 에너지가 증가하는 것으로 나타났다. 인가

전압을 8~22 kV로 증가시키에 따라 한 사이클의 전압 파형당 전달되는 에너지는 14.2~109.1 mJ이었으며 유입기체 유량을 고려한 에너지밀도는 17.0~130.8 J/L이었다.

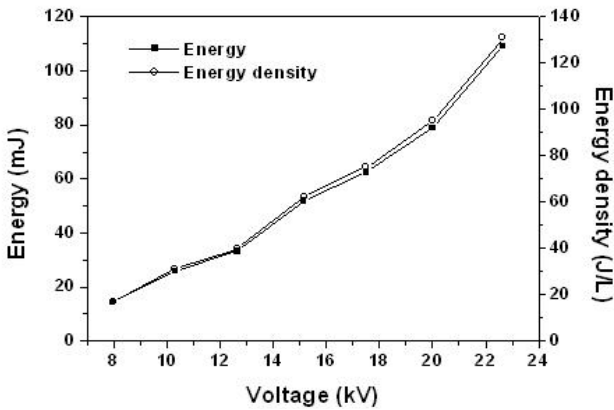


Fig. 4 Effect of applied voltage on electrical energy

동일한 운전조건에서 인가전압에 따른 오존 발생량을 Fig. 5에 나타내었다. 전압이 증가함에 따라 오존 농도가 거의 선형적으로 증가하는 현상이 관찰되었다. 인가전압을 8~22 kV로 증가시키에 따라 오존 농도는 84~515 ppm의 범위에서 증가하는 것으로 나타났다.

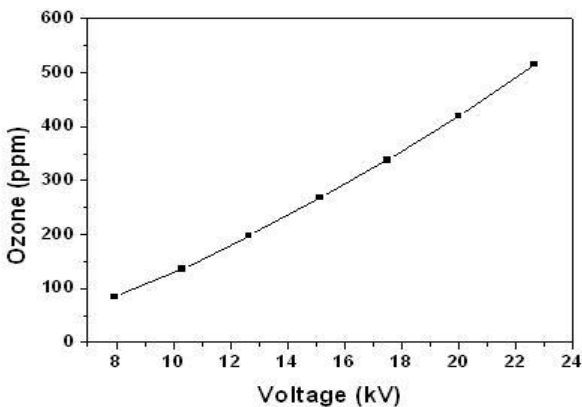
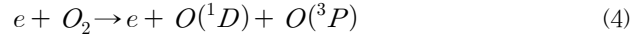
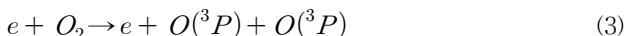


Fig. 5 Effect of applied voltage on ozone generation

Plasma Gun에서 공급되는 기체에 산소가 포함될 때, 오존은 식 (3)~(5)의 Plasma 화학반응에 의해 생성된다. 전기방전에 의해 생성되는 전자에 의한 산소분자의 충돌 분해반응은 전자 에너지에 따라 두 가지로 구분할 수 있다. 즉, 반응 (3)은 약 6 eV의 전자에너지가 필요하며 두 개의 triplet 상태를 가진 산소 원자들이 생성된다. 약 8.4 eV의 전자에너지가 필요한 반응 (4)는 singlet 상태와 triplet 상태의 산소원자들을 생성시킨다. 이렇게 생성된 산소원자들은 삼체반응(three-body reaction)을 통해 일시적인 여기상태를 거쳐 오존을 생성시킨다(Eliasson and Kogelschatz, 1987).



이와 같은 오존 생성반응들이 일어나기 위해서는 150~350 Td의 환산전기장(reduced electric field)가 필요하다(Kogelschatz, 2000). Plasma Gun에 인가되는 전압이 증가하면 유입기체로 전달되는 에너지가 증가하며 이로 인해 전자의 평균에너지가 증가하므로 오존의 발생량이 증가하게 된다.

Fig. 6은 내부전극으로 stainless steel을 사용하는 조건에서 오존 발생의 에너지 효율성에 미치는 전극간 거리의 영향을 나타내고 있다. 그래프의 횡축은 기체로 전달되는 에너지를 나타내는 에너지밀도이며 종축은 생성되는 오존의 농도이다. 따라서 조건별 그래프의 기울기가 클수록 오존 생성의 에너지 효율성이 높다.

전극간 거리가 2.35 mm로부터 1.95 mm까지는 간격이 감소함에 따라 오존 발생의 에너지 효율성이 증가하는 현상을 관찰할 수 있으나 추가의 감소에 의해서는 더 이상 증가하지 않는 것으로 나타났다.

방전내에서 오존 생성은 방전의 강도에 따라 두 가지 경향을 나타내는 것으로 알려져 있다(Eliasson and Kogelschatz, 1987; Kogelschatz, 2000). 약한 방전이 일어나는 조건에서는 오존 발생에 기여하지 못하는 다양한 이온성 물질의 이동을 위해 방전 에너지가 소모되므로 오존 생성의 에너지 효율성은 낮아지게 된다. 방전이 강해지면 하전성 물질이 증가하여 이온성 물질들이 빠른 재결합에 의해 소멸되므로 에너지 효율성이 증가하게 된다. 그러나 방전이 일정한 한계 이상으로 강해지면 오존 생성의 부반응들이 증가하므로 오존 생성의 효율성은 감소된다.

전극간 거리가 1.95 mm보다 작은 조건에서는 오존 생성반응과 부반응이 균형을 이루므로 전극간 간격에 따른 오존 발생의 효율성이 크게 변화하지 않는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 무성방전에서 2 mm의 전극간 거리 조건에서 최적의 효율성이 얻어진 선행연구의 결과와 유사하다(정 등, 2004).

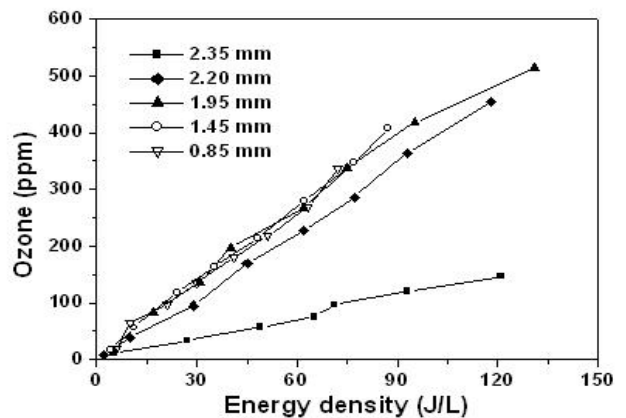


Fig. 6 Effect of electrode gap distance on ozone generation

Plasma Gun의 전기적 특성에 미치는 내부전극 재질의 영향을 관찰하기 위해 내부전극을 stainless steel, yellow copper, red copper로 변화시키면서 인가전압의 변화에 따른 한 사이클의 전압 파형당 에너지를 비교한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 모든 조건에서 전극간 거리는 1.45 mm로 일정하게 유지시켰으며 3 LPM의 공기를 Plasma Gun으로 주입하며 실험하였다.

모든 재질의 전극 조건에서 전압이 증가함에 따라 기체로 전달되는 에너지가 거의 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 동일한 전압 조건에서 전달되는 에너지는 전극재질이 yellow copper인 경우에 약간 큰 것으로 나타났으나 큰 차이를 보이지 않았다.

Fig. 8은 오존 생성에 미치는 내부전극 재질의 영향을 나타내고 있다. 앞에서 나타난 바와 같이 기체로 전달되는 에너지에 미치는 전극 재질의 영향은 무시할만한 수준임에도 불구하고 오존 생성에 미치는 전극 재질의 영향은 뚜렷하게 관찰되었다. 구리전극을 사용한 경우에 yellow copper나 red copper의 에너지밀도 증가에 따른 오존 농도는 거의 비슷한 것으로 나타났다. 그러나 stainless steel 전극의 경우에 구리전극에 비해 상대적으로 높은 농도의 오존이 생성되는 현상을 관찰할 수 있다.

이러한 현상은 명확하게 규명되지 않았으나 전극 재질별 전기전도도 및 열전도도의 차이로 인해 얻어진 결과로 사료된다. 구리의 전기전도도($0.596 \times 10^6 / \text{cm}\Omega$)는 철의 전도도($0.0993 \times 10^6 / \text{cm}\Omega$)보다 약 6배 정도 높으며 yellow copper의 열전도율은 약 95 kcal/°C로서 stainless steel의 14 kcal/°C보다 약 7배 높다.

전기전도도가 높은 재질은 동일한 에너지 조건에서 전류의 흐름을 활성화시켜 전위차를 감소시키게 되므로 전자에너지를 감소시키고 오존 발생의 에너지 효율성을 낮추게 된다. 또한 열전도도가 높은 재질의 전극을 사용할 경우에 ohmic heating에 의해 높은 온도를 형성하게 된다. 오존은 열적으로 불안정한 물질이므로 높은 온도 조건에서 생성속도가 감소하게 된다. 이러한 효과들로 인해 stainless steel에 비해 높은 전기전도도와 열전도도를 가진 구리 전극을 사용할 때 오존 발생의 에너지 효율성이 감소하는 것으로 판단된다.

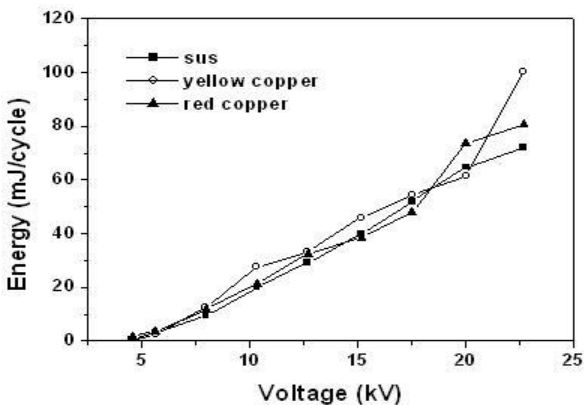


Fig. 7 Effect of inner electrode material on electrical energy transfer

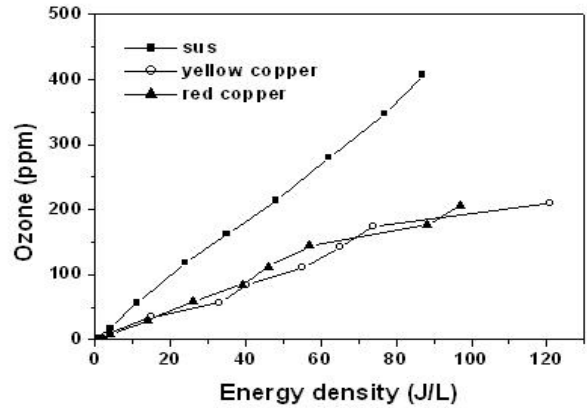


Fig. 8 Effect of inner electrode material on ozone generation

그림 9는 내부전극으로 stainless steel을 사용하고 전극간 거리가 1.95 mm인 조건에서 오존 발생의 에너지 효율성에 미치는 기체 유입속도의 영향을 나타내고 있다. 모든 조건에서 전압의 증가에 따라 오존 농도가 선형적으로 증가하는 현상을 관찰할 수 있다. 각각의 조건별 동일한 전압에서 생성되는 오존 농도는 기체 유입속도가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. Plasma Gun으로 인가되는 전압이 23 kV인 조건에서 기체 유입속도가 1, 3, 6, 9 LPM으로 증가할 때, 오존 농도는 각각 1242, 454, 214, 157 ppm으로 감소하는 것으로 나타났다.

이러한 현상은 기체 유입속도가 증가함에 따라 Plasma Gun의 방전영역에서 기체가 체류하는 시간이 짧아서 얻어진 결과이다. 즉, 방전영역에서의 기체 체류시간이 낮을수록 단위 기체로 많은 에너지가 전달되어 Plasma 화학반응이 활성화되므로 오존 농도가 증가하게 된다.

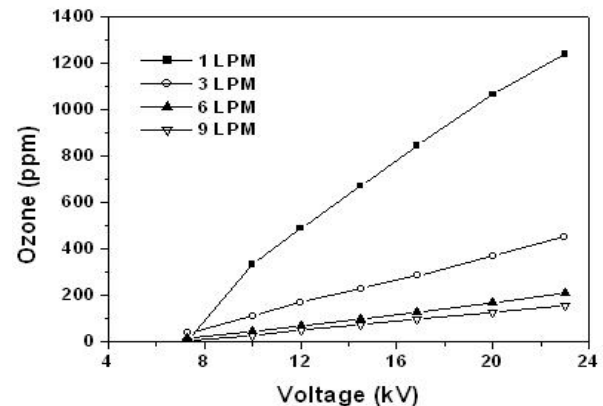


Fig. 9 Dependence of ozone generation on gas flow rate according to applied voltage

그러나 기체 유입속도의 변화는 일정한 기체로 전달되는 에너지밀도를 변화시키므로 Fig. 9로부터 각 조건별 오존 생성의 에너지 효율성을 비교할 수 없다. 기체 유입속도의 변화에 따른 오존발생의 에너지 효율성을 비교하기 위해 각 조건별 오존 농도를 에너지밀도의 향으로 Fig. 10에 나타내었다. 모든

조건에서 에너지밀도에 따른 오존 농도는 하나의 직선상에 위치함을 알 수 있다. 이러한 결과는 실험된 범위에서 오존 발생의 에너지 효율성은 기체 유입속도에 영향을 받지 않는다는 사실을 보여준다. 즉, 반응기의 구조적 조건이 일정한 상태에서 오존 생성이 에너지밀도의 주된 함수임을 나타낸다.

Plasma Gun으로 유입되는 기체의 조성에 따른 오존 생성특성을 관찰하기 위해 질소와 산소의 비율을 조절하면서 인가전압을 변화시켰다. Fig. 11은 오존 농도에 미치는 기체조성의 영향을 보여주고 있으며 산소의 조성이 증가할수록 오존 농도가 증가하는 현상을 나타내고 있다.

유입되는 기체의 산소 함량이 증가하면 두 가지 측면에서 Plasma 화학반응에 영향을 미칠 수 있다. 산소의 이온화 에너지(12.2 eV)는 질소의 이온화 에너지(15.6 eV)보다 낮으므로 유입기체의 산소함량이 증가할수록 낮은 전압에서 방전이 개시되며 전압의 증가에 따라 방전이 활발하게 일어나게 된다. 이와 더불어 Plasma Gun에서 발생하는 오존의 생성원은 산소이므로 산소함량 증가는 오존 생성을 증가시키게 된다. 실험에서 얻어진 결과는 이러한 두 가지 요인의 영향을 받아 얻어진 것으로 판단된다.

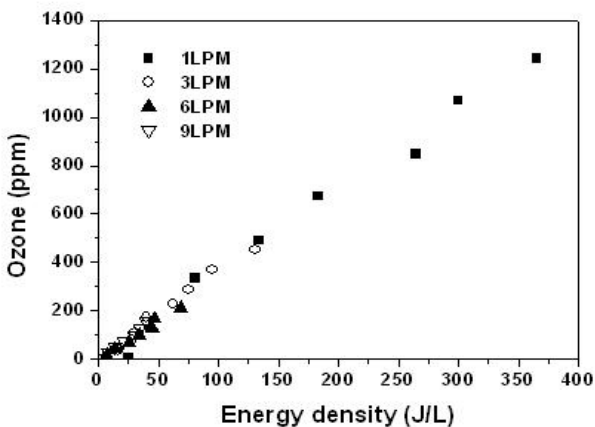


Fig. 10 Dependence of ozone generation on gas flow rate according to energy density

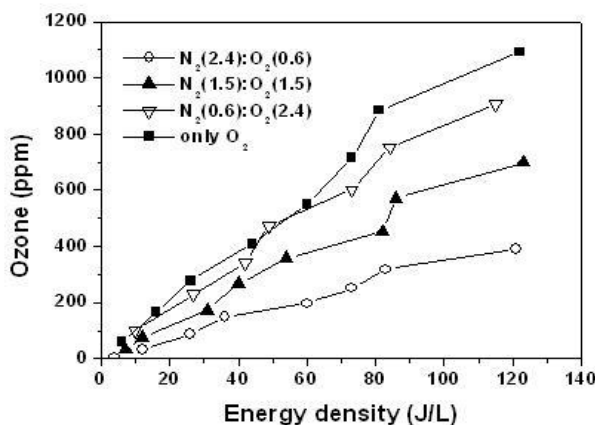


Fig. 11 Gas composition effect on ozone generation.

4. 결론

밸류스트수 처리를 위한 Plasma Gun의 전기적 특성과 오존 생성에 미치는 주요 운전변수의 영향에 관해 실험실 규모 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 방전개시전압(V_{on})보다 높은 전압이 인가될 때 Plasma Gun을 통과하는 기체로 전기에너지가 전달되어 방전이 개시되었으며 오존의 생성이 시작되었다. 전압을 증가시키에 따라 기체로 전달되는 전기에너지와 오존 농도가 거의 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다.
2. 전극간 거리를 감소시켜 오존 생성의 에너지 효율성을 증가시킬 수 있으나 최적 간격보다 작은 조건에서는 더 이상 효율성이 증가하지 않는 것으로 나타났다. 사용된 Plasma Gun은 전극간 거리가 1.95 mm인 조건에서 최적 효율이 얻어졌다.
3. 전기에너지 특성에 미치는 내부전극 재질의 영향은 무시할 만한 수준이었으나 오존 생성에는 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 전기전도도와 열전도율이 낮은 stainless steel을 내부전극으로 사용할 때 가장 높은 효율을 얻을 수 있었다.
4. Plasma Gun으로 유입되는 기체의 속도는 일정한 전압 조건에서 발생하는 오존 농도에 영향을 주는 것으로 나타났으나 오존 생성의 에너지 효율성에는 영향을 주지 않으며 오존 생성은 에너지밀도에 의해 주된 영향을 받는 것으로 나타났다.
5. 공급되는 기체의 산소 함량이 증가할수록 방전이 원활하게 일어나고 오존의 생성원이 증가함으로써 오존 생성이 증가하는 것으로 나타났다.

후 기

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

참 고 문 헌

- [1] 박상호, 김인수(2004a), “선박에 대하여 변화되는 환경규제와 대응책”, 한국항해항만학회지 제 28권, 제 8호, pp. 767~773.
- [2] 박상호, 김인수(2004b), “Bacillus sp.를 이용한 연속 회분식 반응장치에서 선박 오·폐수처리”, 제 28권, 제 3호, pp. 253~258.
- [3] 박상호, 김인수(2005), “연속 회분식 공정(SBR)을 이용한 선박 오·폐수의 고도처리”, 한국항해항만학회지 제 29권, 제 5호, pp. 475~480.
- [4] 박선정, 임재동, 김동근, 김인수(2008), “밸류스트 수 처리용 필터 개발을 위한 여과특성에 관한 연구”, 한국항해항만학회지 제 32권, 제 6호, pp. 499~503.

- [5] 이용환, 정재우, 조무현(2002), “질소산화물 제거를 위한 무성 방전 공정의 전기 및 NO 전환 특성”, 대한전기학회지 51C, No. 1, pp. 15~21.
- [6] 정재우, 이현돈, 이용환, 전기일, 김형갑, 조무현(2004), “무성방전 공정의 오존 발생 특성에 관한 연구”, 대한환경공학회지, pp. 305-312.
- [7] Carlins, J.J., and Clark, R.G.(1982), “Ozone generation by corona discharge”, In Handbook of Ozone Technology and Application, Edited by R.G. Rice and A. Netzer, Ann Arbor Science Publisher, 1, pp.77-84.
- [8] Eliasson, B., Hirth, M., and Kogelschatz, U.(1987), “Ozone synthesis from oxygen in dielectric barrier discharge”, Journal of Physics D; Applied Physics, Vol. 20, pp.1421.
- [9] Finnoff, D., Shogren, J., Leung, B., and Lodge, D.(2005), “The importance of bioeconomic feedback in invasive species management”, Ecological Economics, Vol. 52(3), pp.367-381.
- [10] IMO, “International Maritime Organization”, www.IMO.org.
- [11] Kogelschatz, U.(2000), “Ozone generation and dust collection”, in Electrical Discharges for Environmental Purposes, Edited by Veldhuizen, E.V., pp. 315~344.
- [12] Margaret, E.G., Mesbahi, E., and Chris, L.J.(2008), “On board short-time high temperature heat treatment of ballast water: A field trial under operational conditions.”, Marine Pollution Bulletin, Vol. 56(1), pp.127-135
- [13] Muhammad, A.M., Abdul, G., and Salman, A.M.(2001), “Water purification by electrical discharges”, Plasma Source Science and Technology, Vol. 10, pp. 82~91.
- [14] Oemcke, D.J., and J. van Leeuwen(2005), “Ozonation of the marine dinoflagellate alga A mphidinium sp. - implications for ballast water disinfection.”, Water Research, Vol. 39(20), pp. 5119-5125.
- [15] Tang, Z., Butkus, M.A., and Xie., Y.F.(2009), “Enhanced performance of crumb rubber filtration for ballast water treatment”, Chemosphere, Vol. 74(10), pp. 1396-1399.

원고접수일 : 2010년 1월 14일
심사완료일 : 2010년 4월 14일
원고채택일 : 2010년 4월 15일