

## 하이브리드 수중 플라즈마 토치를 이용한 수처리 특성연구

(The Study of the Characteristics on Water Treatment Using Hybrid Water Plasma Torch)

이수호 · 조만철 · 권순결\*

(Su-Ho Lee · Man-Chul Cho · Soon-Kurl Kwon)

### 요 약

본 연구는 상용화에 관점에서 수처리용 플라즈마리액터를 제작하여 수처리 특성을 연구한 것으로, 본 연구에 사용된 하이브리드 수중 플라즈마 토치는 기존의 네온트랜스라는 저가의 전원을 사용한다는 측면에서 경제적으로 매우 우수하며 더불어 저전력용으로 제작되어 에너지 효율적 측면에서도 매우 우수하다. 특히 연구에 사용된 하이브리드 수중 플라즈마 토치는 두 종류의 플라즈마영역을 가지고 있어 각각의 영역의 장점을 물에 투입 할 수 있다는 특수한 장점을 가지고 있다. 이러한 하이브리드 수중 플라즈마 토치를 사용한 결과 얻은 다음과 같은 데이터(용존 오존(2.8[ppm]), 과산화수소(100[ppm]), 2[PH])는 살균에 매우 유용할만한 가치 있는 수치로서 실제 대장균 처리에 적용해본 결과 최대 10분 안에 대장균 완전 박멸이라는 매우 우수한 결과를 가질 수 있었다.

### Abstract

This research emphasis the commercialize and experiment in the quality of water treatment by making water treatment reactor. The hybrid water plasma torch used this research is excellent in terms of economical efficiency because of using existent neon transformer. Further more, It has excellent energy efficiency because it is manufactured by low electric power. Especially hybrid water plasma torch used this research has two filed of water plasma and inputs each strong point into the water. Following The data such as dissolved ozone(2.8[ppm]), hydrogen peroxide(100[ppm]), 2[PH], are very affordable data and immensely useful in sterilization. Those data have excellent result: perfect eradication of a colon bacillus within maximum 10 minute applying to sterilization processing of a colon bacillus.

Key Words : hybrid water plasma torch, a colon bacillus, sterilization, hydrogen peroxide, water treatment

### 1. 서 론

인간의 경제적 경제 활동으로 인해 발생된 대기오

염물질과 각종 폐기물 중에서 인체에 유해한 성분들이 수중으로 흘러 들어가면서 화학적 반응과 생물학적 작용에 의해 지표수와 지하수는 지속적으로 오염의 정도가 더해지고 있으며, 자연발생적인 오염원의 양보다 인위적인 오염원의 량이 더욱 많이 강과 하천으로 흘러 들어감으로 인하여 인간생활의 주변 환경은 악화되고 있다. 이러한 문제점이 모든 생물의

\* 주저자 : 경남대학교 전자전기공학부 교수  
Tel : 055-249-2633, Fax : 055-249-2839

E-mail : soonkurl@kyungnam.ac.kr

접수일자 : 2005년 12월 16일

1차심사 : 2005년 12월 22일

심사완료 : 2006년 1월 4일

존립환경에 큰 영향을 끼친다는 점에서 그 심각성에 대해 매우 신중한 접근이 필요하다.

최근 수중플라즈마를 이용한 유해성 세균 및 폐수 정화연구가 매우 활발히 진행되고 있다. 이는 처리수의 성상에 제약받지 않고 2차 오염원을 발생시키지 않는 고도산화기술이기 때문이다[1-2]. 그러나 소비전력, 운전 그리고 경제적 측면이 상용화로의 접근을 어렵게 하고 있다. 1997년 Schwinkendorf 등에 의해 수중의 유해 유기 화합물을 처리하는데, 전기적 방전 방법이 기존의 화학적 방법들에 비해 매우 효율적으로 분해 및 처리가 가능하다고 보고하였으며[3], Anpilov 등은 강한 펄스 방전을 이용하여 수중 버블 중에서 오존, 과산화수소, 그리고 UV 발생에 대하여 논하였다. 또한 그들은 펄스 에너지를 증가시키에 따라서 생물학적으로 활성영역의 자외선 강도가 295~220[nm] 증가함을 보였다[2]. 이러한 펄스 방전 플라즈마 중에서 물 분자 및 산소 분자 등이 전자와의 충돌에 의하여 OH, O, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> 등과 같은 활성종들이 생성되고, 이들에 의해서 수중 유해물질이 분해된다고 알려져 있다. Sato 등은 펄스 방전에 의해 H와 OH 라디칼과 같은 활성종들이 생성되고, 최종적으로 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)를 발생시킴에 의하여 효모균 제거에 효과가 있음을 예측하였다[4]. 이러한 우수한 특성 때문에 수중플라즈마를 이용한 여러 가지 반응기가 연구되고 있지만 전기적 현상에 따른 물의 특성 변화 때문에 안정적인 수중플라즈마의 발생이 매우 힘들다는 게 현실이다[5-10].

본 논문에선 앞서 언급한 여러 문제점을 해결하고 실용화를 가능하게 하기 위해 저가의 상용제품인 네온트랜스의 용량에 맞춘 하이브리드 수중 플라즈마 토치를 제작하여 이의 효율을 검증하고 수중플라즈마에 의한 수질특성분석에 대해 연구하였다.

## 2. 본 문

### 2.1 실험방법

본 연구에 사용된 실험장치의 개략도는 그림 1에 나타내었다. 실험에 사용된 전원은 시중에 판매되는 전자식 네온트랜스(출력전압 15[kV], 20[kHz])를, 주

입된 공기는 일반 대기공기를 사용하였다. 플라즈마는 공기량과 압력에 따라 형상이 달라지는데 본 논문에선 최상의 플라즈마가 발생하는 3[l/min]의 유량으로 고정하였다. 소비전력의 측정은 플라즈마 토치의 소비전력을 측정할 것이 아니라 실험에 이용된 네온트랜스와 플라즈마 토치의 소비전력의 전체를 측정하기 위해 네온트랜스 입력단에서 측정하였다. 때문에 본 논문에서의 소비전력은 네온트랜스에서 소비되는 전력과 플라즈마 토치에서 소비되는 전력의 총합을 의미한다. 본 실험에 사용된 물의 양은 10[l]이며 하이브리드 수중 플라즈마 토치의 소비 전력은 네온트랜스의 소비전력과 합하여 50[W]가 소비되도록 하여 하이브리드 수중 플라즈마 토치 2 본을 투입하였다. 이 이유는 현재 기성제품인 네온트랜스의 용량이 전자식의 경우 80[W]를 상회한다. 때문에 네온트랜스의 안정적인 사용을 위해 전원공급기의 약 60[%]정도인 50[W]급으로 제작하였다.

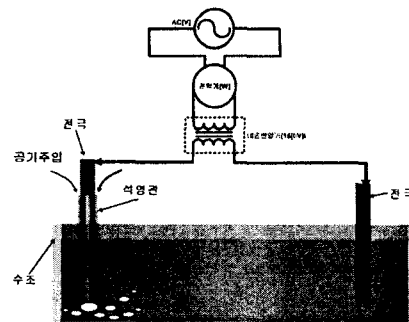


그림 1. 실험장치 개략도  
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup

연구의 데이터는 일반 수도물을 이용하여 용존오존과 과산화수소, 배오존 그리고 [PH] 변화를 조사하였으며 이러한 결과를 바탕으로 실제 살균효과를 보기 위하여 하수종말처리장의 유입수를 직접 투입하여 대장균의 살균효과를 살펴보았다.

### 2.2 플라즈마반응기의 구조와 메커니즘

플라즈마반응기의 구조를 그림 2와 그림 3에 나타내었다.

하이브리드 수중 플라즈마 토치를 이용한 수처리 특성연구

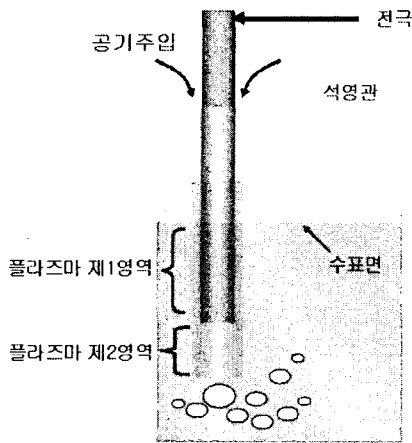


그림 2. 하이브리드 수중 플라즈마 토치의 영역  
Fig. 2. Area of the hybrid water plasma torch

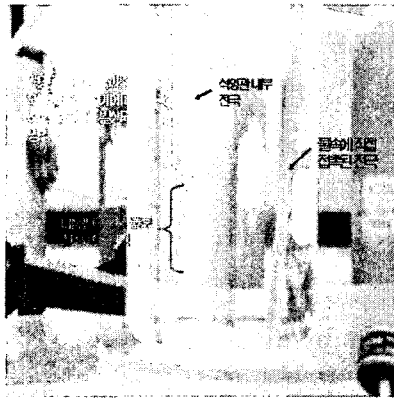


그림 3. 하이브리드 수중 플라즈마 토치의 방전특성  
Fig. 3. Discharge characteristic of the hybrid water plasma torch

1) 플라즈마 영역

본 장치에서 플라즈마의 주 활성 메커니즘은 석영관내부의 전극과 물에 직접 접촉해 있는 전극 사이에 석영관이 존재하고 이 석영관내부에 공기를 불어 넣어주어 석영관내의 전극과 물과의 단락을 주입된 공기압으로 공간을 만들어 전로를 차단하여 이 공간에서 플라즈마를 발생시킨다는 것이다. 석영관에서는 두 종류의 플라즈마가 발생된다. 제1영역에선 공간적 플라즈마로 스트리머가 형성되고, 제2영역에선 석영표면을 타고 트리형식인 연면방전 플라즈마가 발생된다. 일반적으로 수중에서 전류의 단락에 의한

플라즈마의 소실을 방지하기위해 펄스전원을 이용하여 플라즈마를 발생시키지만 이러한 경우에는 경제부분의 부담과 방전시 협소한 플라즈마 영역 때문에 본 실험에 사용된 소비전력과 비교해 대등한 전력을 사용할 경우 물 특성의 변화를 주기가 매우 힘들었다.

2) 플라즈마 영역과 형성에 대한 설명

① 플라즈마 제1영역

플라즈마 제1영역은 석영관내의 전극과 석영관 외부의 물(대향전극이 물속에 직접 접촉되어 있기 때문에 물 자체의 하나의 전극의 역할을 한다)과 대전을 일으켜 기중방전의 하나인 스트리머가 발생한다. 제1영역에서 발생하는 스트리머는 보통 수~수백 [μA]의 전류가 흐르는데 제1영역에선 공기의 활성화를 일으킨다. 만약 공기가 주입된다면 대량의 오존을 발생시키면서 공기에 의해 발생된 자외선도 석영관을 통해 방사된다. 때문에 제1영역에선 플라즈마의 일차적인 에너지를 물에 투입시키는 것보단 여기서 생성된 오존이나 라디칼 그리고 자외선 등의 이차적 효과가 더욱 큰 영역이라 할 수 있다.

② 플라즈마 제2영역

제2영역은 플라즈마를 연면방전형태로 직접 물에 에너지를 조사시키는 역할을 하는 영역이다. 제2영역은 공기압에 의해 마치 수표면방전과 같이 수표면 위에 전극이 놓여있는 형태로 되어 진다. 그러나 그냥 수표면에 전극을 두고 방전을 일으킬 경우 전압을 높여 절연과피로 이행되었을 경우 아크방전이 발생하여 단락을 일으키면서 매우 높은 소비전력을 발생시킬 뿐 아니라 높은 전류로 인한 차단기의 동작으로 동작이 멈추어 진다. 그러나 본 기술의 경우는 유전체(석영관)표면에서 전하의 충 방전이 성장과 소멸을 일으켜 자동적으로 단락을 차단해 주기 때문에 연속적인 전원공급시에도 과전류에 의한 문제를 발생시키지 않는다. 때문에 연속적인 전원 공급이 가능하면서 유전체에서의 연면방전이 마치 펄스플라즈마처럼 물속에 주입되는 것이다.

③ 플라즈마 영역별 특징

위의 설명과 같은 이유로 제1영역에서는 공기와 접촉해서 H<sup>+</sup>, O<sub>3</sub>, 라디칼 및 이온들의 혼합물을 생

성시키는 데 주 역할을 담당하는데 이러한 부산물은 수중에서 수산화, H<sup>+</sup>, OH, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 그리고 각종 라디칼을 생성시킨다. 그리고 제2영역에서는 직접 플라즈마를 물에 조사시키므로 제1영역에서의 효과보다 훨씬 큰 플라즈마 효과를 가져다 줄 수 있다. 물에 직접 조사된 플라즈마는 물에 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>와 용존오존 그리고 PH를 변화시키는 직접적인 요인으로 작용한다.

④ 효과

이렇게 발생된 플라즈마는 약품처리 없이 살균이 가능하며 염색폐수 처리에도 사용이 가능하다.

2.3 결과 및 고찰

그림 4에 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 변화량을 나타내었다. 시간의 증가에 따라 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 농도는 매우 빠른 시간에 증가함을 보였다. 논 연구에 사용된 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 측정 장비의 최대 측정값이 100[ppm]이었기 때문에 그 이상의 측정을 할 수 없었다. 아래의 화학반응식에 의해 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>가 생성되며 시간의 경과에 따라 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>가 누적되어 시간의 경과에 따라 더욱 급격한 농도의 증가를 나타내었다.

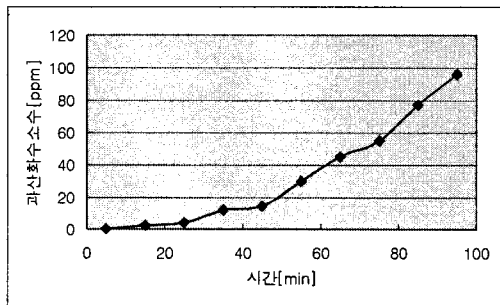
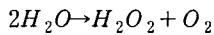
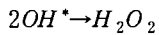
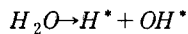


그림 4. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 변화곡선  
Fig. 4. Variation curve of the H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration

그림 5는 용존오존의 변화를 나타내었다. 용존오존의 경우 35분까지는 급격히 증가하였으나 그 이후에는 거의 포화곡선을 나타내었다. 35분 이후부터 포화곡선을 나타내는 이유는 물의 용존오존의 수용률

이 포화 되었다고 할 수 있지만 용존오존은 아래의 식과 같이 OH<sup>-</sup>이온에 의해 자기분해가 일어난다. 때문에 플라즈마에너지에 의해 물의 활성화가 심해질수록 용존오존과 배오존이 분해되어는 활동이 증가되어 용존오존의 경우는 포화곡선을 나타낸다.

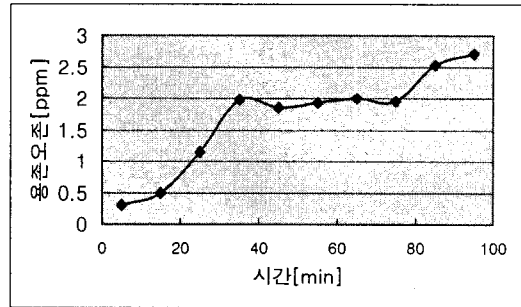
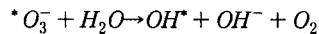
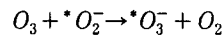
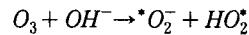


그림 5. 용존오존의 변화곡선  
Fig. 5. Variation curve of the dissolved ozone concentration



배오존의 경우 수화되는 오존과 OH<sup>-</sup>이온에 의해 분해되는 현상 때문에 시간이 지남에 따라 배출량이 줄어들다가 75분 이상부터 발생과 분해의 비가 같아져 포화곡선을 나타내었다. 배오존의 변화곡선은 그림 6에 나타내었다.

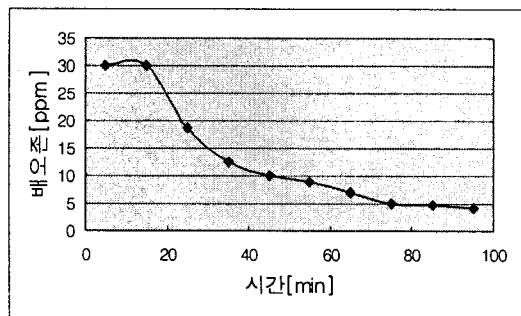


그림 6. 배오존의 변화곡선  
Fig. 6. Variation curve of the exhaust ozone

Johannes Staehelin 과 Jurg Holgne에 의하면 산도 (PH)가 2이하가 되면 용존오존은 과산화수소의 분자와 반응하고, 이 반응은 용존오존의 분해속도를 매우 느리게 한다고 한다. 그림 7에 나타낸 [PH]변화곡선에서 25분 이후부터 물은 [PH]가 2이하를 나타내며 포화곡선을 그리는 것을 볼 수 있다. [PH]가 2를 나타내는 25분 이후부터 용존오존의 양의 증가가 급격히 증가하는 것도 이 때문이라 사료된다. 아래에 식에서 볼 수 있듯이 2몰의 오존과 1몰의 과산화수소가 반응하기 때문에 분해되는 량보다 생성되는 량이 많다고 볼 때 용존오존보다 과산화수소의 증가가 더욱 많아지게 되는 것이다(그림 4와 그림 5 비교 참조).

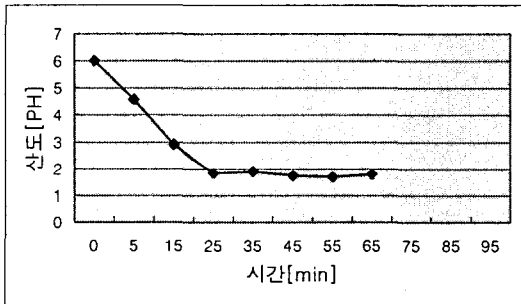
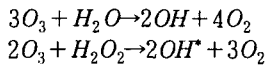


그림 7. PH농도 변화곡선  
Fig. 7. Variation curve of the PH concentration

표 1. 하이브리드 수중 플라즈마 토치를 이용한 대장균 시험  
Table 1. A colon bacillus test using hybrid water plasma torch

대상물질	하수종말처리장의유입수대장균 유입수대장균 9만 마리				
	토치 1분/10[ℓ]				토치 2분 /10[ℓ]
처리시간	10분	20분	30분	40분 이후	10분
처리결과	200마리	200마리	100마리	0	0

본 연구에 사용된 하이브리드 수중 플라즈마 토치를 이용하여 실제 종말처리장 유입수의 대장균 테스트

트의 결과를 표 1에 나타내었다. 하이브리드 수중 플라즈마 토치를 1분 사용했을 경우에도 상당한 살균 효과를 볼 수 있었지만 40분 이후 완전박멸이 이루어졌으나, 하이브리드 수중 플라즈마 토치 2분을 사용했을 경우 10분 만에 대장균 완전박멸을 볼 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에 사용된 하이브리드 수중 플라즈마 토치는 경제적인 측면과 운전 및 설치적 측면에서 기존의 수중플라즈마발생 장치에 비해 우수한 점이 매우 많다. 실용화에 입각해 제작된 하이브리드 수중 플라즈마 토치를 이용한 수질특성 변화에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 플라즈마 처리시간이 증가됨에 따라 과산화수소, 용존오존의 량은 증가 하지만 배오존과 [PH]는 감소됨을 알 수 있었다.

(2) 과산화수소와 용존오존의 변화곡선은 배오존과 [PH] 변화 곡선과 반비례함을 알 수 있었다.

(3) [PH] 2이하에서 용존오존의 경우 과산화수소의 분자와 반응하여 용존오존의 분해속도를 매우 느리게 하기 때문에 [PH] 2가 되는 25분 이후부터 포화곡선이 됨을 알 수 있었다.

(4) 하이브리드 수중 플라즈마 토치를 대장균처리에 사용해본 결과 매우 우수한 결과를 얻을 수 있었다.

본 논문을 작성하면서 실용화적 측면과 성능적 측면 모두에서 더욱 구체적인 연구가 필요하다는 것을 절실히 느낄 수 있었다. 앞으로 더 많은 연구 자료를 축적한다면 수처리 분야에 유용한 연구 자료가 될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 2005학년도 경남대학교 학술논문게재연구비 지원으로 이루어졌습니다.

#### References

(1) A. K. Sharma, G. B. Josephson, D. M. Camaioni, S. C. Goheen, Environ. Sci. Technol. 34, 2267(2000).  
(2) B. Sun, M. Sato, J. S. Clements, Environ. Technol. 34, 509(2000).

- [3] W. E. Schwinkendorf, Lockheed Martin Idaho Technologies Company, U. S. Department of Energy Assistant Secretary for Environmental Management, 1997.
- [4] A M Anpilov, E M Barkhudarov et al., J. Phys. D: Appl. Phys., 34, 2001, 993-999.
- [5] M. Sato, T. Ogiyama et al., IEEE Trans. Indus. App., Vol. 32, No. 1, 1996, 106-112.
- [6] Igor V.Lisitsyn, Hiroaki Nomiya, "Streamer discharge reactor for water treatment by pulsed power", Rev. Sci. Instrum. Vol. 70, No 8, August 1999.
- [7] A M Anpilov, E M Barkhudarov, "Electric discharge in water as a source of UV radiation, ozone and hydrogen peroxide", Journal of Physics, Appl. Phys. 34(2001) 993-999.
- [8] R. Peyrous, "The effect of relative humidity on ozone production by corona discharge in oxygen or air-A numerical simulation-Part 1 : Oxygen Ozone", Sci. Eng. Vol. 12, No 1, pp 19-40, 1990.
- [9] G. A. Dawson, "Electrical corona from water-drop surfaces", J. Geo-phys. Res, Vol 75, No 12, pp. 2153-2158, Apr. 1970.
- [10] P. Lukes, A. T. Appleton, B. R. Lock, "Hydrogen Peroxide and Ozone Formation in Hybrid Gas-Liquid Electrical Discharge Reactors", IEEE Trans. Vol. 40, No 1, Jan/Feb. 2004.

## ◇ 저자소개 ◇

### 이수호 (李秀鎬)

1978년 8월 19일생. 2004년 경남대 전기공학과 졸업.  
2006년 동 대학원 전기공학과 석사과정.

### 조만철 (趙萬哲)

1979년 12월 16일생. 2006년 경남대학교 전기공학과 졸업예정. 2006년 동 대학원 전기공학과 입학예정.

### 권순걸 (權純杰)

1951년 10월 19일생. 1973년 영남대 전기공학과 졸업.  
1980년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현 경남대 전자전기공학부 교수.