

다중 펄스 방식에 의한 고성능 오존발생 제어장치 개발

論 文
52C-5-6

Development of High Performance Ozone Generating Controller

李 弘 熙* · 金 亨 俊**
(Hong-Hee Lee · Hyung-Jun Kim)

Abstract - When an excessive voltage is applied to the discharge gap in ozone generator, the discharge room temperature becomes higher. As is well known, the efficiency of the ozone generation is deteriorated by the excessively hot temperature because of the decomposition reaction. In this paper, the simple small capacity ozone generating controller has been introduced, which provides effective and stable silent discharge characteristics over wide range input power. The proposed power controller has two important advantages, which imply that the production rate of ozone can be controlled linearly according to the delivered power and the surplus energy is recovered to the source. The experimental results are given to verify the performance of the proposed controller.

Key Words : 오존발생장치, 방전관, 무성방전

1. 서 론

오존은 천연 물질로서는 불소 다음으로 강한 산화력을 가지므로 그 산화력을 이용해 오수·상수·폐수의 탈색, 탈취, BOD, COD제거, PHENOL, CN분해 등과 같이 산업용에서 가정용에 이르기까지 다양한 분야에서 응용되어지고 있다.^{[1]-[2]} 오존발생장치는 전기분해법, 광화학법, 방사선조사법 등 여러 가지 형태가 있으나 기체방전 원리를 이용해 비교적 효율이 좋고 고농도의 오존을 만들 수 있는 무성방전형 오존발생기가 일반적으로 사용되고 있다.

무성방전형 오존발생기는 방전방법에 따라 공간방전방식과 연면방전방식이 있다. 공간방전방식은 제어가 용이해 오존생성수율은 좋으나 발생농도가 낮아 잘 쓰이지 않고 실험실 등에서만 일부 사용되고 있고, 연면방전방식은 오존생성수율은 공간방전방식에 비해 낮으나 오존발생농도가 높아 산업용으로 많이 사용된다.

오존방전관에서는 오존생성반응과 동시에 오존분해반응이 일어난다. 오존생성 수율을 극대화시키려면 이 오존분해반응을 줄이는 것이 대단히 중요하다.^[2] 오존분해반응의 주요 원인으로서는 전자충돌과 방전실 내의 온도상승을 들 수 있으며 방전실내의 온도에 비해하여 오존분해반응은 증가한다. 방전실내의 온도변화 요인은 여러 가지가 있으나 그 가운데 방전관에 인가되는 전계의 세기가 중요한 요소인데 방전관에 전계가 과도하게 인가될 경우 대단히 높은 온도상승으로 이어진다.^[3] 기존의 오존발생전원장치에서 오존발생량 제

어는 초퍼방식이나 PWM, PDM과 같은 형태를 사용하고 있으나 초퍼방식의 전압제어방법의 경우 발생량 제어는 가능하나 스위칭 소자에 스트레스를 가중되고 스위칭 손실이 높아 전원장치의 효율이 떨어진다. PWM, PDM 방식은 제어면에서는 우수하나 오존발생효율이 그리 높지 않고 전력회로를 구성하기 위해 4개 이상의 스위칭 소자를 필요로 한다. 또한, 방전개시전압을 낮추기 위해서는 기본적으로 8KHz 이상의 스위칭 주파수가 필요로 하고 정밀한 발생량 제어를 위해서는 고성능 프로세서가 요구된다.^{[6]-[8]} 이 이외에도 소용량 오존발생장치의 경우 공진형 오존발생장치가 있으나 정해진 공진주파수로 말미암아 광범위한 오존발생량 제어가 어렵다.

본 연구에서는 소용량 오존발생장치에서 연면방전방식을 이용해 오존을 생성시킬 경우 오존생성수율이 높고 제어가 간편하면서도 방전실내의 전력 조절이 용이할 뿐만 아니라 입력전력에 비해하여 선형적으로 오존발생량을 조절할 수 있는 오존발생전원장치를 개발하고자 한다. 개발된 전원장치는 100W급으로 방전관에 인가되는 다중 펄스 형태의 전압에 대한 전체 주기는 고정시키고 이 주기 내에서 인가되는 전압의 펄스 수만을 제어하도록 하여 전력제어장치가 지극히 간단하면서도 오존발생량 제어가 용이하다. 또한, 방전관 내부 특성의 변화로 인해 방전관에 인가되는 전압의 크기가 바뀔 경우 발생하는 잉여전력을 전원으로 반환시킴과 동시에 방전관 내부에 일정 크기 이상의 전압이 인가되지 않도록 하여 방전관 수명연장은 물론 방전효율을 향상시켰다.

제안된 오존발생장치의 성능 평가를 위해 오존생성특성, 오존생성농도 [g/m^3], 오존발생량 [g/hr], 그리고 오존생성수율 [g/kWh] 등을 실험적으로 비교 분석했다.

2. 오존발생 원리

산소가 방전관에 유입될 경우, 무성방전형 오존발생장치의

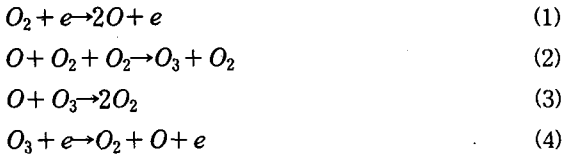
*正會員 : 蔚山大 工大 電氣電子情報시스템工學部 教授 · 工博

**準會員 : 蔚山大 工大 制御計測學科 碩士

接受日字 : 2002年 10月 8日

最終完了 : 2003年 3月 10日

오존생성 과정은 전자충돌에 의한 산소 활성화종의 생성, 오존 생성반응 및 오존분해반응 등으로 이루어진다. 이 과정에서 주요 반응식은 식 (1)~(4)와 같다.^[5]



식(1)과 (2)는 오존생성반응식이고 식(3)과 (4)는 오존분해 반응식이다. 식(1)에서 알 수 있는 바와 같이 산소활성종은 방전시 전자와의 충돌에 의하여 생성된다. 즉, 방전시 전자의 충돌로 인하여 산소가 이온화되기 때문에 오존발생량은 전하량에 비례하여 증가하게 된다. 따라서 한 주기 동안의 오존발생율은 식(5)와 같이 표현될 수 있다.^[6]

$$R = k \cdot \frac{\epsilon}{d} S (V_i - V_T)^2 \quad (5)$$

단, R : 오존발생율 ϵ : 방전관의 유전율 d : 방전관의 공극 k : 실험상수 S : 방전관면적 V_i : 입력전압 V_T : 방전유지전압

전계세기가 증가함에 따라 전자의 속도에너지는 증가하게 되고 이들 전자의 충돌에 의한 열은 더욱 증가하게 되는데 이 경우 방전실내의 온도와 전계세기와의 관계를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dkT}{dx} = E \quad (6)$$

단, T : 방전실내 온도 k : 볼츠만 상수 x : 전자의 경로의 길이 E : 전계세기

오존은 600℃에서 수초만 가열하여도 완전히 분해될 정도로 열에 민감하다. 그리하여 일반적으로 방전실의 온도가 상승하면 오존분해율이 증가하여 전체 오존발생율은 감소하게 된다. 이러한 온도상승율은 참고문헌[9]에서 알 수 있는 바와 같이 방전관의 단면적과 가스유입량에 반비례하게 되므로 오존발생율에 관한 식(5)는 식(7)과 같이 된다.

$$R = k \cdot \frac{\epsilon}{d} S (V_i - V_T)^2 (1 - e^{-aT/dSF_r}) \quad (7)$$

단, T_k : 방전관 내부온도 F_r : 가스유입량 a : 실험상수

식(7)은 오존발생율에 관한 관계식으로 인가전압에 따라 오존발생량을 조절할 수 있으나 인가전압이 과도할 경우 높은 전계로 말미암아 온도상승이 커지고 이러한 온도상승은 오존발생량 저하를 초래함과 동시에 방전실 내부의 유전물질에 스트레스를 주어 내구성을 떨어뜨리고 아크방전이 발생할 수 있다. 아크방전의 경우 국부적으로 수천도의 온도상승을 가져오고 방전면적이 줄어들어 효율이 떨어진다.^[5] 따라서 방전관 내부의 전계가 일정 값 이상으로 상승하는 것을 막을 필요가 있는데 본 연구에서는 클램핑 회로를 추가하여 방전관 내부의 전계의 세기가 일정 값 이상으로 상승하는 것을 억제하고, 과도하게 공급된 에너지를 전원으로 반환시킬 수 있도록 했다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 오존발생장치

그림1은 본 연구에 사용된 중첩형방전실로 180° 위상차를 가지는 교류전압을 3개의 전극을 사용해 방전면적을 넓게 한 모델로 연면방전실에 비해 효율이 좋다.^[9]

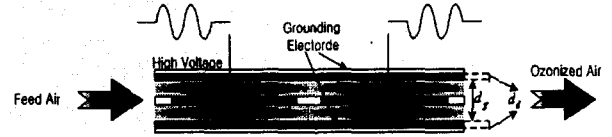


그림 1 방전실의 종류 중첩형 연면방전방식 그림
Fig. 1 Superposed barrier discharge.

그림2는 본 연구에서 사용한 오존발생장치의 등가회로로 본 논문에서 제안한 전원장치와 그림1과 같은 형태의 방전실에 대한 등가회로를 나타내고 있다. 등가회로상의 정수값들은 공기의 유입량, 공극, 방전실의 형태, 유전체의 종류, 유입하는 공기의 종류, 그리고 방전실의 압력 등에 따라 결정된다.^[4]

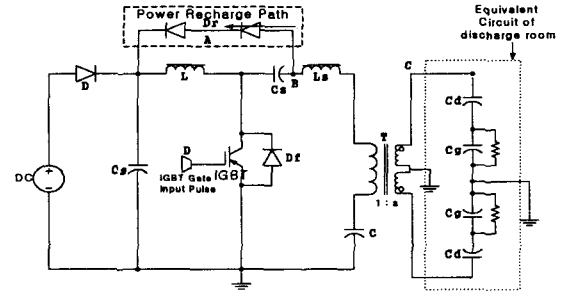


그림 2 오존발생기 전원 장치 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of ozonizer power supply.

그림 2의 등가회로에서 전원장치의 동작을 간단히 설명하면 IGBT가 오픈된 상태에서 정류된 직류 전원으로 부터 콘덴서 C에 에너지가 충전되고 IGBT가 도통하게 되면 C_s , L_s 공진회로와 변압기를 통해 방전관에 전압이 인가된다. 오존발생량을 효과적으로 제어하기 위해서는 주어진 전압의 크기에서 방전관의 특성이 바뀌더라도 일정량의 오존을 발생시키는 것이 중요하다. 본 논문에서는 식(7)과 같이 일정한 전압을 가할 때 방전실 특성 변화로 인해 변압기 전단에서 전류가 변화하게 되면 이 전류의 변화를 L_s 를 통해 전압의 변화로 나타나게 하여 방전실 양단에 과도한 전압이 발생할 경우 다이오드 D_r 이 도통하여 일정 크기 이상의 전압이 방전관에 인가되지 않도록 할 뿐만 아니라 과도하게 공급된 에너지를 평활용 콘덴서로 재충전할 수 있도록 했다.

3.2 전압제어 원리 및 구현

오존발생과정을 살펴보면 일정 전압을 인가한 후에 일반적으로 일정기간 동안 휴지기간이 있는데 이는 식(1)과 같이 산소활성종은 nsec 단위에서 생성되고 식(2)와 같은 오존생성반응은 msec 단위에서 이뤄지기 때문이다. 즉, 유입되는 공기의 속도와 산소활성종의 발생 시간과의 관계를 생각하면 지속적인 전계의 공급은 무의미하고 지속적으로 전자를 생성할 경우 발생된 오존이 방전관을 빠져나가기 전에 식(4)와 같은 분해반응을 일으켜 오존발생수율을 감소시키

는 결과를 초래하게 된다. 따라서 생성된 산소활성종으로부터 오존이 생성될 수 있는 시간이 필요하다. 이와 같은 원리를 이용해 본 논문에서는 오존발생량을 제어하기 위해 그림 3과 같이 일정 전압이 인가되는 주기를 설정해 두고 이 주기 내에서 인가되는 일정 폭의 전압의 펄스 수를 조절하는 방법을 사용하고 있다. 즉, 인가 전압의 전체 주기를 T 라고 두고 이 주기 T 내에서 주기 T_1 인 펄스상의 전압의 수 N 를 조절함으로써 오존발생량을 제어할 수 있도록 했다. 주기 T_1 인 파형은 그림 4와 같은 간단한 회로를 이용해 얻을 수 있으며 T_1 파형의 수와 전체 주기 T 는 낮은 성능의 프로세서나 디지털 소자로도 간단히 제어할 수 있기 때문에 제어기의 구현이 매우 간단하다.

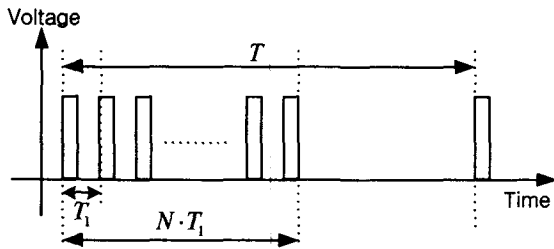


그림 3 IGBT 게이트 입력파형
Fig. 3 Typical waveforms of IGBT gate input pulse

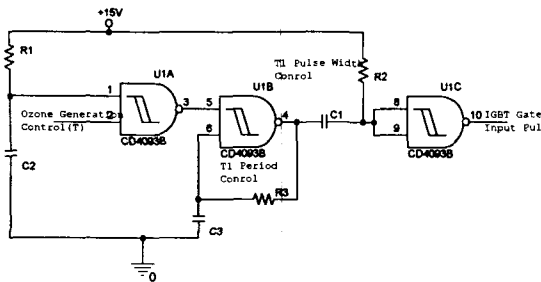


그림 4 IGBT 게이트 펄스 발생 회로
Fig. 4 IGBT gate pulse generator

C_s - L_s 공진회로의 동작특성은 부하의 상태, 즉, 방전실의 상태에 따라 영향을 받는데 이 경우 영향을 받는 정도는 변압기 권선비의 제곱에 비례하게 된다. 따라서 안정된 동작을 위해서는 변압기의 권선비를 최대한 낮추는 것이 좋으며 이를 위해서는 변압기의 입력전압을 가능한 크게 하는 것이 좋다.

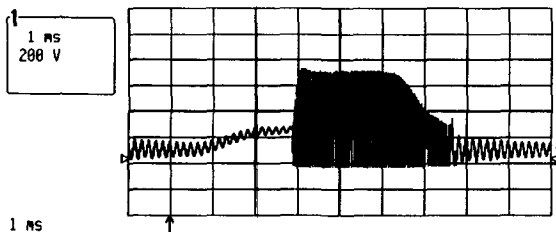


그림 5 B점에서의 전압파형
Fig. 5 Typical waveforms of voltage at the point B

그림 5는 그림 2의 B부분에서의 전압파형이고 변압기 입력 전압을 600V로 설정하고 방전실에 안정된 전원공급을 위해

서 그 이상의 전압은 클램핑 회로를 통하여 충전용 콘덴서로 반환시켜 효율을 높임과 동시에 안정된 방전을 유지할 수 있는데 그림 6은 그림2의 D_r 을 통하여 회귀하는 전압파형을 보여주고 있다.

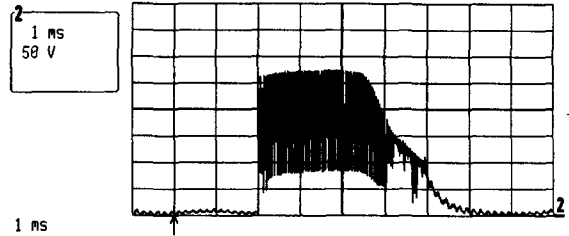


그림 6 A점에서의 전압파형
Fig. 6 Typical waveforms of voltage at the point A

그림7은 방전관에 공급되는 전압 및 전류 파형을 나타내고 있다. 스위칭 주파수가 20KHz이상으로 가청주파수 대역을 넘어서기 때문에 스위칭 소음이 없다.

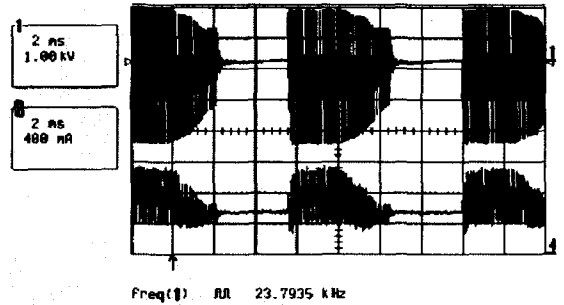


그림 7 방전관에 공급되는 전압, 전류 파형
Fig. 7 Typical waveforms of voltage and current in discharge room

4. 실험결과 및 고찰

그림 8은 제안한 전원장치를 사용한 오존발생장치의 개략도로써 이를 이용해 오존발생장치의 특성을 평가했다.

방전특성을 분석하기 위해 원료가스는 건조 공기와 산업용 산소를 사용하였다. 방전관의 유량이 일정할 때 공급전력의 변화에 대한 오존생성수율의 변화와 공급전력이 일정한 경우 유량변화에 대한 오존생성수율의 변화를 실험하였다.

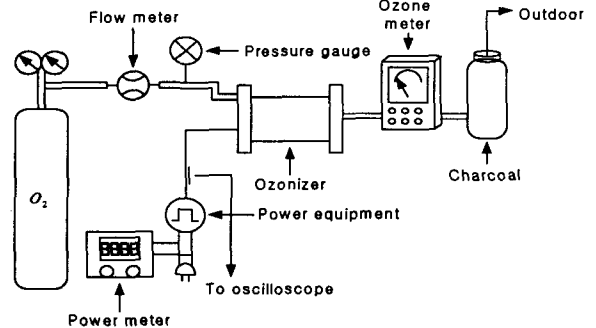


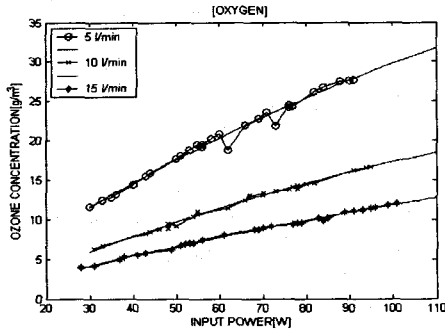
그림 8 오존발생기 실험 장치 구성
Fig. 8 Experimental set-up for generation of ozone

실험조건으로는 방전관 내부의 유전체는 유리(glass)이고 공극은 0.6 [mm]이며 기압은 0.5기압으로 고정시켰고 냉각

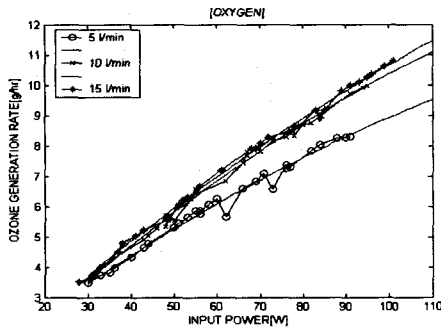
방식은 공냉식으로 소형 팬을 사용했다. 전원장치측의 출력은 사용주파수는 18~22 [kHz] 출력 전압은 4~5 [kV]로 하여 실험을 하였다.

제한된 오존발생장치의 특성을 알아보기 위해 유입되는 가스의 종류에 따라 공급전력량을 변화시키면서 발생하는 오존에 대해 농도, 발생량 및 수율을 측정해 보았다. 또한, 공급전력을 일정히 유지하면서 유입되는 가스량만을 변화시킬 경우의 특성도 살펴보았다.

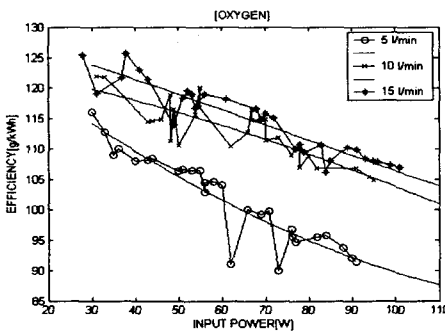
그림 9는 공업용산소가 방전관에 유입될 경우에 대한 오존생성특성을 나타낸 것으로 유입량이 각각 5 [l/min], 10 [l/min], 15 [l/min]일 때 공급전력에 따른 오존의 농도(그림 9(a)), 발생량(그림 9(b)) 및 수율(그림 9(c))을 나타낸 것이다. 오존발생량이 방전전력에 따라 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 오존생성수율은 산소 유입량이 10~15 [l/min]에서 방전전력을 30~110 [W]로 가변시켰을 경우 발생량은 3~11 [g/hr]로 변하지만 오존생성수율은 약 10 [g/kWh] 정도 밖에 떨어지지 않는 것을 볼 수 있다.



(a) 발생농도



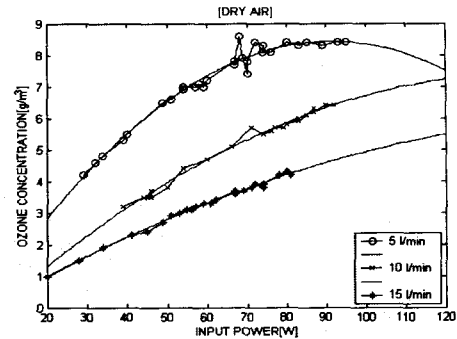
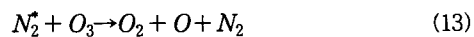
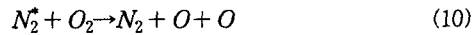
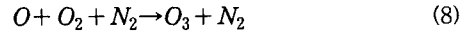
(b) 발생량



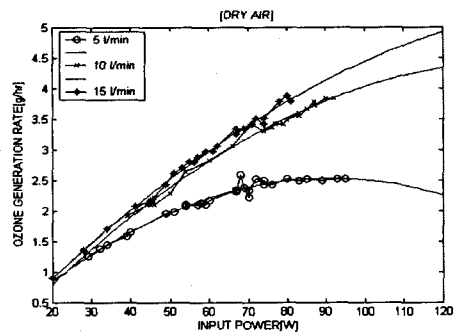
(c) 생성수율변화

그림 9 공급공기를 산소로 하였을 때 방전전력에 따른 오존의 발생특성
Fig. 9 Production of ozone as a variable discharge power for Oxygen

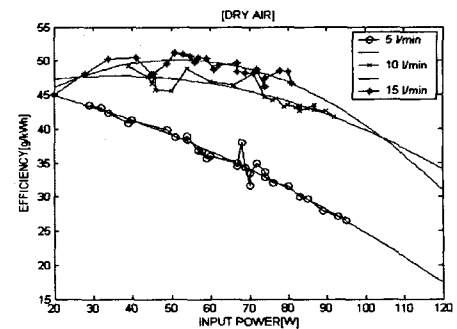
그림 10은 건조공기가 방전관에 유입될 경우에 대한 오존생성특성을 나타낸 것으로 유입량이 각각 5 [l/min], 10 [l/min], 15 [l/min]일 때 공급전력에 따른 오존의 농도(그림 10(a)), 발생량(그림 10(b)) 및 수율(그림 10(c))을 나타낸 것이다. 건조공기의 경우 공기 중에 포함된 다량의 질소로 말미암아 전술한 산소에 대한 오존생성식 식(1)~(4) 이외에도 식(8)~(13)과 같은 질소에 의한 부가적인 반응이 있어서 산소에 비해 떨어지는 것을 볼 수 있다.



(a) 발생농도



(b) 발생량



(c) 생성수율변화

그림 10 공급공기를 건조공기로 하였을 때 방전전력에 따른 오존의 발생특성
Fig. 10 Production of ozone as a variable discharge power for dry air

실험결과 오존생성수율이 10~15 [l/min]의 경우 오존생성수율은 45~50 [g/kWh] 정도로 산소에 비하여 떨어지는 것을 알 수 있다. 오존발생량은 방전전력에 비례하여 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있으나 질소에 의한 부과적인 반응으로 인해 5 [l/min]의 경우 70 [W] 이상에서는 발생량의 증가가 없는 것을 볼 수 있다.

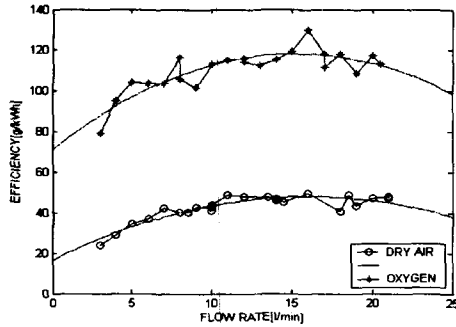


그림 11 공급전력은 일정하게 하였을 때 유입량의 변화에 따른 오존생성수율특성
 Fig. 11 Efficiency of Production ozone for different flow rate (Unit discharge Power Case)

그림 11의 실험 조건은 공기의 유입량이 없을 때 소비전력이 108 [W]인 경우이다. 실험결과에 의하면 공기의 유입량이 5~20 [l/min] 변하였을 때 오존발생수율의 변화는 건조공기인 경우, 34~47 [g/kWh]가 변하였다. 산소인 경우, 오존발생량은 104~117 [g/kWh]으로 일정한 발생수율을 보였다.

5. 결론

본 논문은 효율과 제어성능이 우수한 소용량 오존 발생용 전원장치의 개발에 대한 연구이다. 즉, 방전관에 인가되는 다중 펄스 형태의 전압 펄스 수만을 조절하여 낮은 성능의 프로세서로도 오존발생량을 손쉽게 조절할 수 있고 방전관 내부 특성이 바뀌더라도 방전관 내부의 전계의 세기를 일정 값 이하로 유지시켜 안정된 동작을 할 수 있도록 했다. 제안한 전원장치의 특성을 살펴보기 위해 건조공기일 때 3 [g/hr]의 오존발생장치를 개발하여 제반특성을 분석한 결과 오존생성수율이 최고 125 [g/kWh]으로 타 오존발생장치에 비하여 효율이 좋음을 알 수 있었다. 또한, 방전관에 공급되는 전력에 무관하게 오존생성수율이 거의 일정해 공급전력에 따라 전체 오존발생량을 선형적으로 조절할 수 있는 이점이 있다. 이는 제안된 오존발생 전원장치가 기존의 전원장치에 비하여 효율적인 오존발생량 제어가 가능함을 의미한다. 아울러 본 제어장치는 그 구현이 매우 간단하고 경제적이어서 향후 소형 오존발생장치의 상품화를 통해 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 울산대학교와 한국과학기술원 지정 울산대학교 네트워크 기반 자동화연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고 문헌

- [1] R. Ouellet, M. Barbier, and P. Cheremisinoff, "Low Temperature Plasma Technology Applications." Ann Arbor, MI : Ann Arbor Science Publ., 1980.
- [2] U. Kogelschatz, "Industrial Ozone Production", Proc. of Int. Ozone Symp., Switzerland, pp. 253-265, 1999.
- [3] C. Gutierrez-Tapia, "Perturbative Method for Ozone Synthesis From Oxygen in a Single Discharge" Proc. of the IEEE, Vol. 22, No. 5, pp. 979-985, October 1994.
- [4] L.M.L.F Hosselet, "Ozonbildung mittels elektrischer Entladungen", TH-Report 71-E-19, TH Eindhoven. 1971.
- [5] P. Pignolet, et al., "Ozone generation by point to plane corona discharge," J.Phys. D: Appl. Phys., Vol. 23, pp. 1069-1072, 1990.
- [6] I.D. Chalmers, R C Baird and T Kelly, "Control of an ozone generator-theory and practice" Meas. Sci. Technol. 9, pp.983-988. Printed in the UK, 1998.
- [7] W.J.M. Samaranyake, et al., "Ozone Production by Pulsed Power in Dry Air", H. Pulsed Power Conference, Digest of Technical Papers. 12th IEEE International, Vol 2 , pp. 1326-1329, 1999.
- [8] Y.L.Feng, et al., "Next generation current-source soft-switched PDM and PWM hybrid mode inverter for silent discharge ozone generating tube drive" Power Electronics and Motion Control Conference Proceedings, Vol 1, pp. 312 -317, 2000.
- [9] 송 현직, 우 성훈, 이 상근, "중첩형 오존발생기에 관한 연구(I)" 97 대한전기학회 창립 50주년 하계학술대회 논문집, DHP 5, pp.1724-1726, 1997.

저 자 소 개



이 홍 희(李弘熙)

1957년 10월 15일생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1994~1995년 Texas A&M 방문교수. 현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 교수
 Tel : 052-259-2187, Fax : 052-259-1686
 E-mail : hhlee@mail.ulsan.ac.kr



김 형 준(金亨俊)

1974년 8월 15일생. 2001년 울산대 제어계측학과 졸업. 2003년 동 대학원 제어계측학과 졸업(공석).
 Tel : 052-951-4423
 E-mail : swhome@hananet.net