

3상 전압인가형 중첩방전 오존발생기의 오존생성 상승효과

論 文

49C-8-7

Ozone Generation Synergy Effects of Three-Phase Voltage Apply Type Superposed Discharge Ozonizer

全炳俊* · 李相根* · 宋炫直** · 金榮燾*** · 朴元柱[§] · 李廣植[§]

(Byung-Joon Chun · Sang-Keun Lee · Hyun-Jig Song · Yeong-Hun Kim · Won-Zoo Park · Kwang-Sik Lee)

Abstract - Nowadays, ozone is mainly utilized for water treatment and home equipments. Although the demand for ozone is increasing, the ozone yield of silent discharge type ozonizer is low. Therefore, it is expected to improve the energy efficiency and ozone yield of an ozonizer. In this paper, a new ozone generation system is proposed. The 60[Hz] three-phase voltage is applied to three-phase superposed discharge type ozonizer(3PSDO) which has three electrodes(central, internal and external electrodes). There is no discharge pause time when three-phase voltage is applied due to 120-degree phase difference of applied voltage. The synergy effect of the three-phase superposed discharge type ozonizer is investigated by comparing with the three sort of single-phase discharge type ozonizer(1PDO). So, three-phase superposed discharge type ozonizer is able to obtain high ozone yield, and optimize discharge space, because this can increase the discharge power at low applied voltage.

Key Words : ozone, three-phase voltage, three-phase superposed discharge type ozonizer(3PSDO), synergy effect, single-phase discharge type ozonizer(1PDO)

1. 서 론

산업혁명 이후 공업선진국들을 중심으로 국부(國富)의 축적을 위하여 산업화와 도시집중화를 추구함에 따라 경제성을 위해서는 환경을 어느 정도 무시할 수밖에 없다는 논리가 지배적이었으나 21세기에는 이러한 논리는 더 이상 국제사회에서 통용될 수 없다. 왜냐하면 이제는 오염물질의 배출을 제한하여 환경과피를 막는 단계를 지나 오염된 환경을 복원하는 재생기술(Remediation Technology)이 선진국들을 중심으로 활발히 연구되어 환경산업기술로 강력한 수출상품이 되고 있기 때문이다.

이의 중심 기술 중의 하나가 오존(O₃)관련기술이다. 오존은 강한 산화력을 지니고 있으면서 최종적으로는 자기분해되어 산소로 환원되므로써 2차 오염의 우려가 없기 때문에 살균, 탈취, 탈미, 실내 공기정화, 식품보존, 오페수 정수처리 및 의료분야 등으로의 활용에 관한 연구가 진행되고 있다.[1][2][3]

현재, 오존이용의 一례로 수 처리에는 통상 염소가 사용되어 왔지만 염소는 부생성물로서 인체에 유해한 트리할로메탄(THM) 등의 유기염소화합물을 생성하는 것으로 알려

져 큰 문제가 되고 있다. 그러나 오존은 염소에 비하여 산화력이 약 1.5배 강할 뿐만 아니라 앞서 언급한 바와 같이 유해물질의 산화분해, 살균 및 불활성화 등의 작용을 가지므로 상·하수도의 처리에 오존을 응용할 경우 소량, 단시간에 큰 효과를 거둘 수가 있다.[3]

이러한 오존발생장치에 관한 연구는 다방면으로 이루어지고 있다. 산업용으로의 응용은 무성방전형 오존발생기를 시작으로 연면방전형, 복합방전형 등 여러 가지의 오존발생기가 개발되고 있는 실정이다.

그러나, 가장 많이 사용되고 있는 무성방전형 오존발생기는 오존생성수율이 대단히 낮기 때문에 오존생성수율의 향상을 위하여 종래의 오존발생기를 개량한 소형의 오존발생기, 무성방전에 절소방전광을 조사하는 방법, 동일한 방전공간 내에 두 개의 무성방전을 중첩시키는 방법 등이 제안되고 있지만, 현재까지도 1개의 gap 과 2개의 전극을 사용하는 무성방전형 오존발생기를 개선하여 오존생성수율의 증대 및 농도의 증대에 관한 연구가 절실히 요구되고 있다.[4][5]

이러한 관점에서 본 논문에서는 오존발생기의 방전공간에 3개의 전극(중심전극(central electrode, 이하 CE), 내부전극(internal electrode, 이하 IE) 및 외부전극(external electrode, 이하 EE))을 장착한 후 이 세 개의 전극에 상용주파수 60[Hz]의 3상 교류전압을 인가하여 발생하는 3개의 무성방전이 동일한 공간 내에서 연속적으로 중첩되는 3상 중첩무성방전(3-Phase Superposed Discharge Type Ozonizer, 이하 3PSDO)을 발생시켰다. 또한 세 개의 전극 중에서 하나의 전극에 상용주파수 60[Hz]의 단상 교류전압을 인가하고 임의의 한 전극을 접지시켜 3가지 형태의 단상무성방전(Single-Phase Discharge Type Ozonizer, 이하

* 正 會 員 : 嶺南大 電氣電子工學部 博士課程

** 正 會 員 : 嶺南大 工業技術研究所 研究員

*** 正 會 員 : 浦項1大學 電氣科 副教授 · 工博

[§] 正 會 員 : 嶺南大 電氣電子工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2000年 3月 22日

最終完了 : 2000年 6月 28日

1PDO)을 발생시켰다.

이 때, 3PSDO와 세 가지 형태의 1PDO의 방전특성 및 오존생성특성을 비교·분석하고, 생성된 오존의 고농도화 및 오존생성 상승효과에 관하여 검토하였다.

2. 실험장치, 방법 및 이론

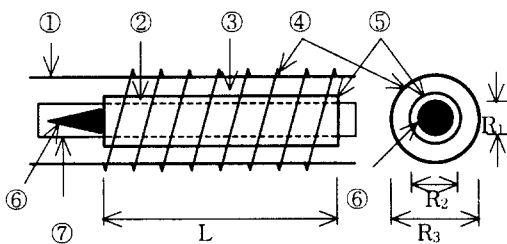
2.1 실험장치 및 이론

그림 1은 본 연구에서 사용된 중첩방전형 오존발생기의 개략도이다. 이 오존발생기는 3개의 전극과 유전체로 사용된 내측의 납 유리관과 외측의 pyrex 유리관으로 구성된 동축 이중 원통구조의 SDO로 각각의 전극은 다음과 같이 구성되었다.[6]

(1) 중심전극(이하 CE) : 두께 1[mm], 외경 12[mm]의 원통형 납 유리관 내부에 원추형 산화철 전극을 장착한 방전관을 중심전극으로 사용하였다. 이 방전관의 내부를 10^{-1} [torr]의 저압으로 유지시키므로서 고전압 인가시 전리가스가 충만된 방전관으로 이루어져 수 방전관 내부가 전극의 역할을 하므로서 전극면적의 극대화를 이룰 수 있다.

(2) 내부전극(이하 IE) : 두께 0.035[mm], 길이 130[mm]의 원통형 스테인레스 mesh 를 중심전극이 장착된 내측의 납 유리관과의 gap d_1 을 0.4[mm]로 유지하면서 납 유리관 주위를 둘러 내부전극으로 사용하였다.

(3) 외부전극(이하 EE) : 두께 1[mm]의 구리에 규석 도금한 세선(細線)을 두께 1.2[mm], 외경 19[mm]인 원통형의 pyrex 유리관 외측 표면에 길이 130[mm], 피치 5[mm] 간격의 나선형으로 감아 외부전극으로 사용하였다. 여기에서 내부전극과 외부유전체 내경 사이의 방전 gap d_2 는 1.9[mm]로 유지하였다.



- ① pyrex 유리 ② 방전 gap d_1 ③ 방전 gap d_2
- ④ 전극 EE ⑤ 전극 IE ⑥ 전극 CE ⑦ 납유리
- R_1 : CE의 외경 12[mm], R_2 : IE의 외경 12.8[mm]
- R_3 : 외부 유전체의 외경 19[mm], L : 길이 130[mm]

그림 1 3PSDO의 개략도

Fig. 1 A schematic diagram of 3PSDO

이들 3개의 전극에 인가되는 전압의 방식에 따라 단상전압을 인가하는 3가지의 1PDO와 3상 전압을 3개의 전극에 동시에 인가하는 3PSDO로 나누어 실험을 행하였다. 여기에서 3가지의 1PDO와 3PSDO는 고전압을 인가하는 전극과

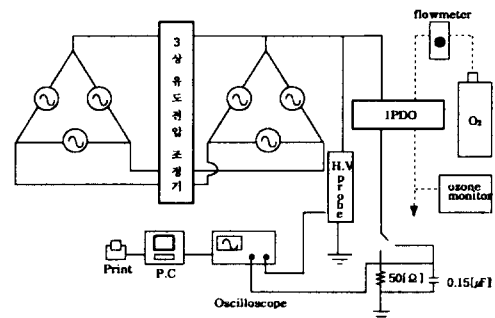
접지전극에 따라 다음과 같이 구분된다.

(1) 단상전압의 인가방식에 따른

- ① IE(H.V) - CE(ground)의 1PICDO
- ② EE(H.V) - IE(ground)의 1PEIDO
- ③ CE(H.V) - EE(ground)의 1PCEDO 및

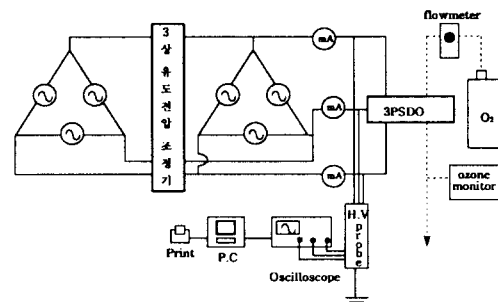
(2) 120° 의 위상차를 가진 3상 전압을 3개의 전극에 동시에 인가하는 3PSDO로 구분하였다.

그림 2의 (a) 및 (b)는 본 연구에서 설계·제작한 오존발생기(SDO)를 이용하여 방전특성 및 오존생성 특성을 연구하기 위한 실험장치의 배치도이다. 여기에서 실선은 오존발생기의 방전특성을 조사하기 위하여 전원장치와 계측장치들을 연결한 회로이며, 점선은 오존생성특성을 연구하기 위한 연료가스 공급장치, 계측장치를 통과하는 산소 및 오존화가스의 흐름을 나타내는 가스 흐름선도이다.



(a) 단상전압을 이용한 오존발생장치의 배치도

(a) Arrangement diagram of ozonizer system using single-phase voltage



(b) 3상 전압을 이용한 오존발생장치의 배치도

(b) Arrangement diagram of ozonizer system using three-phase voltage

그림 2 오존발생장치의 배치도

Fig. 2 Arrangement diagram of ozonizer system

그림 2의 (a)는 단상전압 인가시의 오존발생기(1PDO)의 배치도로서 단상 교류고전압의 전원으로서 그림과 같이 3개의 승압용 neon transformer(이하 NT)를 Δ 결선한 후 2차측 3선 중 1선만을 1PDO의 고전압 전극에 연결하여 고전압을 인가하였다.

그리고, 방전전압·전류 및 파형은 각각 고전압 프로브

(주파수 대역 DC ~ 50[MHz], 내압 50[kV], 분압비 2000:1, Pulse Electronics 社)에 의하여 감쇄된 전압과 무유도 저항(50[Ω] ± 0.1[%])의 양단전압을 digital storage oscilloscope(500[MHz], 1[Gs/s], LeCroy 社), personal computer(CPU 80586) 및 프린터를 사용하여 측정 및 출력하였다. 또한 1PDO의 방전전력은 고전압 프로브에 의하여 감쇄된 전압과 방전전하 측정용 콘덴서(0.15[μF])의 양단전압에 의한 Lissajous 도형을 사용하여 측정하였다.

이러한 무성방전형 오존발생기(1PDO)의 경우, 산소가 원료가스인 경우에는 주로 식 (1)과 같은 반응에 의하여 오존이 생성된다.



그림 2의 (b)는 3상 교류전압 인가시의 오존발생기 (3PSDO)의 전원으로서 3개의 승압용 NT를 Δ 결선하여 3PSDO의 각 전극에 고전압을 인가하였다. 이 때 3PSDO의 방전전압은 1PDO와 마찬가지로 고전압 프로브를 사용하여 측정하였지만, 방전전력의 경우 3상 교류 고전압에 의한 3상 중첩 무성방전이 불평형 상태이므로 방전전력을 직접 측정하는 것은 불가능하다.

따라서 본 논문에서는 3상 중첩 무성방전 시 각 상에 흐르는 전류를 측정하여 이 전류치에 대응하는 방전전력을 단상 무성방전(1PDO) 시의 Lissajous 도형으로부터 구한 방전전류-방전전력 특성을 이용하여 구한 후, 이들의 합으로부터 3PSDO의 방전전력을 계산하였다.

이 때 3개의 전극에 3상 전압을 동시에 인가하는 경우 (3PSDO)의 각 전극간 전위차와 방전범위는 그림 3과 같다.

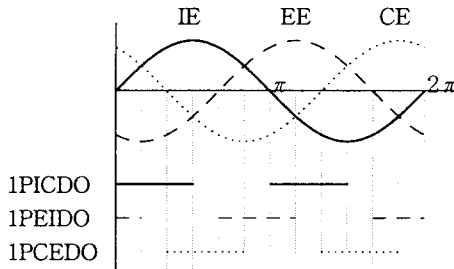
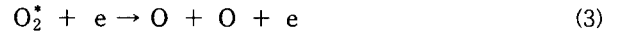


그림 3 3상 전압 인가시, 각 전극간의 전위차와 방전범위
Fig. 3 The potential difference and discharge period between each electrode when three-phase voltage is applied

그림 3과 같이 오존발생기의 각 전극에 120[°]의 위상차를 가진 고전압을 인가하여 IE-CE사이, EE-IE사이 및 CE-EE 사이에서 무성방전이 연속적으로 발생되도록 하였다.

이와 같이 3PSDO에서는 1PDO와는 달리 각 상에서의 무성방전이 연속 또는 중첩되므로 방전휴지구간을 극소화시킬 수 있는 구조이다. 또한 고농도·고수율의 오존발생기를 개발하기 위하여 식 (2) 및 식 (3)과 같이 중첩무성방전 시 방전공간에 존재하는 여기(勵起) 산소분자(O₂^{*})를 함유하는 오존생성기구의 유효성을 고려할 수 있다.



여기에서 O₂^{*} : 여기상태의 산소분자

즉, O₂^{*}는 O₂보다도 낮은 에너지의 전자에 의하여 해리되므로 O₂^{*}가 존재하면 식 (3)의 반응은 식 (1)의 반응보다 빠르고 더욱 활발하게 진행된다. 그러나, 1PDO의 경우 O₂^{*}에 전자가 충돌하지 않을 확률이 많으면 방전휴지구간에서 O₂^{*}가 해리 또는 전리되지 않고 탈여기(脫勵起)하여 기저상태로 되돌아가는 여기산소분자가 많게 된다.[7][8][9]

반면, 3PSDO는 120[°]의 위상차를 가진 3상 전압을 각 전극에 동시에 인가하므로 1PDO와는 다르게 여기산소분자가 기저상태로 전이하기 전에 후속(後續) 방전에 의하여 생성된 전자와 충돌하여 해리 또는 전리하게 된다. 그러므로 식 (1)에 의한 기저상태의 산소분자의 해리보다 낮은 에너지에서 해리가 발생되기 때문에 낮은 에너지의 전자 또한 효과적으로 이용할 수 있으므로 3상 중첩무성방전법으로 오존생성수율의 증대효과를 기대할 수 있다.[10][11]

2.2 실험방법 및 이론

본 연구에 사용된 원료가스는 상업용 산소(순도 : 99.99[%])를 사용하였으며, regulator(0 ~ 250[kgf/cm²])와 flowmeter(0 ~ 25[ℓ/min])를 사용하여 산소 원료가스의 유량(Q)이 2, 4, 8, 12 및 16[ℓ/min]가 되도록 조정하면서 상온(18±1[°C]), 대기압 상태에서 1PDO 및 3PSDO에 유입시켜 단상무성방전과 3상 중첩무성방전에 의하여 오존화가스가 생성되는 구조이다. 이때, 기상용 오존모니터(0 ~ 100,000 [ppm], Okitronics 社)를 사용하여 생성된 오존화가스를 매 실험마다 0.3[ℓ/min]로 표본 추출하여 오존생성농도(O_{3con})를 측정후, 오존발생량(O_{3g}) 및 오존생성수율(O_{3y})을 계산하였다. 전원장치는 그림 2와 같이 상용주파수의 Neon transformer (입력전압 : AC 220[V], 출력전압 : 0 ~ 15[kV])를 단상 및 3상 Δ 결선하여 사용하였다.

1PDO의 방전전력(W_d)은 무성방전 시의 Lissajous 도형의 방전전압-전하량(V-q) 특성에 의하여 구할 수 있다. 그림 4는 1PCEDO일 때, Q가 2[ℓ/min]인 경우, NT의 출력전압(V₂) 변화에 따른 Lissajous 도형을 보여주고 있다. 여기에서 Lissajous 도형의 x축 CH1은 1PCEDO의 고전압 전극으로 사용된 CE에 인가된 전압(V_{dc})이 고전압 프로브를 사용하여 감쇄되었을 때의 파형을 측정된 것이며, y축 CH2는 방전전하(q) 측정용 콘덴서(0.15[μF])의 양단전압(V_{cc}) 파형을 나타낸 것이다.

1PDO 시의 방전전력은 그림 4와 같이 오존발생기에 인가된 전압과 그에 따른 전하량을 이용한 V-q 특성곡선에서 구할 수 있다. 즉, 무성방전과 같이 교류전압을 인가할 때의 순시전력을 p라고 정의하면, 이 순시전력 p는 부하에 가해진 전압 v_g(t)와 오존발생기에 흐르는 전류 i(t)의 곱이 되므로 이 때, 1주기의 전력 즉, 방전전력(W_d)은 다음 식 (4)와 같다.

$$W_d = \frac{1}{T} \int_{t=0}^{t=T} p dt = \frac{1}{T} \int_{t=0}^{t=T} v_g(t) \cdot i(t) dt \quad (4)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 방전특성

그림 5의 (a), (b) 및 (c)는 단상무성방전(1PICDO, 1PEIDO 및 1PCEDO)에서 V_2 가 220[V]이고 Q 가 2[ℓ/min]일 때, $V_d \cdot I_d$ 파형을 측정 한 것이다. 그림 5의 (a), (b) 및 (c)에서 CH1의 V_{di} , V_{de} 및 V_{dc} 파형은 단상무성방전에서 각 1PDO의 형태에 따라 고전압전극으로 각각 사용된 IE, EE 및 CE에 인가된 주파수 60[Hz]의 고전압 파형이다. 여기에서 각 1PDO에 인가된 단상교류고전압은 NT를 Δ결선한 전원장치에서 임의의 단상전원을 1PDO에 인가한 것이다. 또한, CH2는 각 1PDO에서 각각 접지전극으로 사용된 CE, IE 및 EE전극 측에 50[Ω] 무유도 저항을 삽입하여 측정 한 I_d 파형이다.

그림 5에서 각 1PDO의 전류파형은 오존발생기의 유전체로 사용된 glass 및 방전 gap의 정전용량 성분에 의하여 전압파형에 비하여 약 30[°] 정도 진상으로 나타났다. 또한 각 전류 펄스는 전압의 극성에 따라서 형성되고, 1주기 내에서는 正負 전류 펄스의 위상이 0 ~ 90[°] 및 180 ~ 270[°]에서 주로 형성되면서 방전구간과 방전휴지구간이 각각 2회씩 존재함을 확인할 수 있었다.

이와는 다르게 그림 6은 3상 중첩무성방전(3PSDO)에서 V_2 가 220[V]이고 Q 가 2[ℓ/min]일 때, V_d 파형이다. 그림 6에서 CH1, CH2 및 CH3는 각각 CE, IE 및 EE의 방전전압 파형이다. 그림에서와 같이 3PSDO에서는 120[°]의 위상차를 가진 교류고전압이 연속적으로 인가되어 초기 인가전압이 0(zero) 부근으로 떨어지기 전에 후속방전이 인가되는 구조이므로 방전은 쉬지않고 거의 연속방전으로 진전되어 방전휴지구간이 거의 존재하지 않으므로 인하여 전술한 바와 같이 식 (2) 및 (3)과 같은 여기산소분자의 활성이 극대화되어 결국 오존생성수율을 향상시킬 수 있는 구조이다.

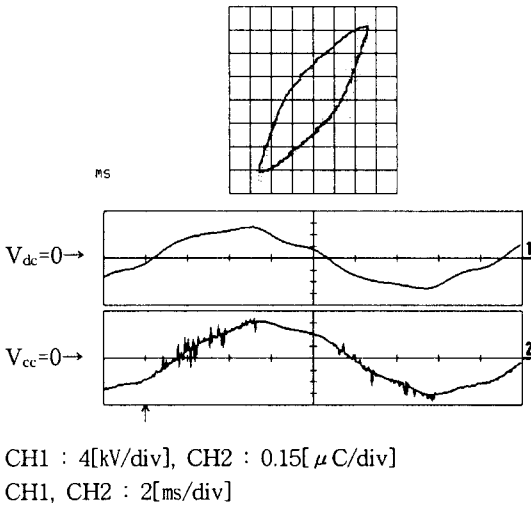


그림 4 Q가 2[ℓ/min]인 경우, 1PCEDO의 Lissajous 도형
Fig. 4 A Lissajous diagram of 1PCEDO for Q = 2[ℓ/min]

따라서, 측정 파형의 주기를 T라고 하였을 때 시간 t = 0 에서 t = T 사이에 소비된 에너지 ω는

$$\omega = \int_{t=0}^{t=T} v_g(t) \cdot i(t) dt \quad (5)$$

로 된다. 여기에서 전류가 측정용 콘덴서 C_s 를 흐르면 전류 $i(t)$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = C_s \frac{dv_c}{dt} \quad (6)$$

그러므로 식 (5)는

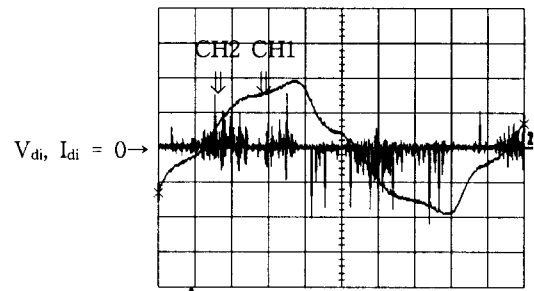
$$\omega = \int_{t=0}^{t=T} v_g(t) \cdot C_s dv_c = \int_{t=0}^{t=T} v_g(t) \cdot dq(t) \quad (7)$$

와 같이 1주기 에너지로 나타낼 수 있다. 여기에서, C_s : 콘덴서의 정전용량, v_g : 부하에 인가된 전압, v_c : 콘덴서 양단 전압이다.

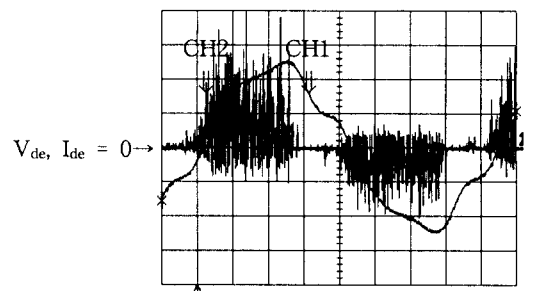
식 (7)에서 $C_s dv_c = dq(t)$ 이므로 1PDO의 1주기에서 소비된 에너지는 Lissajous 도형의 V-q 궤적의 면적과 동일함을 알 수 있다. 이렇게 1주기 동안에 소비된 에너지가 계산되면 1주기 동안 소비된 전력 즉, 방전전력 W_d 는

$$W_d = \frac{\omega}{T} = \omega \times f \quad (8)$$

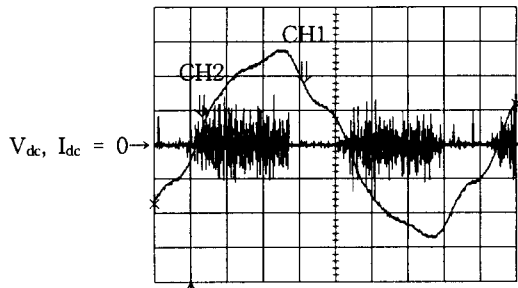
와 같이 구할 수 있다.[12][13]
여기에서 f : 인가된 전압의 주파수이다.



(a) 1PICDO

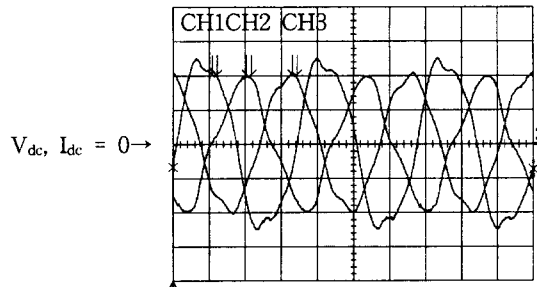


(b) 1PEIDO



CH1 : 4[kV/div], CH2 : 100[mA/div]
CH1, CH2 : 2[ms/div]
(c) 1PCDO

그림 5 Q=2[l/min], V₂=220[V]일 때, 각 1PDO의 V_d · I_d 파형
Fig. 5 V_d · I_d waveforms of each 1PDO for Q = 2[l/min], V₂ = 220[V]



CH1, CH2, CH3 : 2.40[kV/div], 5[ms/div]

그림 6 Q=2[l/min], V₂=220[V]일 때, 각 3PSDO의 V_d 파형
Fig. 6 V_d waveform of 3PSDO for Q=2[l/min], V₂=220[V]

3.2 오존생성특성

그림 7은 3상 교류고전압을 인가할 때 3PSDO의 오존생성농도(O_{3con}) 특성을 나타낸 것이다. 3상 소비전력(W_{d3})이 증가할수록 방전공간에서는 전력밀도의 증가가 동반된다. 이에 미소방전이 활성화됨에 따라 방전공간을 통과하는 산소분자가 전자와 충돌할 확률이 높아져 산소원자의 수가 많아지게 된다. 이렇게 생성된 많은 수의 산소 원자가 식(1) ~ (3)과 같이 다른 산소원자, 산소분자 및 여기산소분자와의 충돌확률 또한 높아지게 되어 O_{3con}이 상승되는 것으로 사료된다.

또한, Q가 감소될수록 원료가스 중에 포함된 산소분자가 방전공간에 체류하는 시간이 길어지게 되면서 3PSDO의 중첩무성방전에 의하여 생성된 전자와 산소분자와의 충돌횟수가 증가하게 되고, 원료가스의 유량에 의한 방전공간의 냉각효과 또한 낮아지게 되어 중첩무성방전이 더욱 활성화된 결과 O_{3con}이 상승하게 되는 것이다. 그러나 W_{d3}가 비교적 높은 경우에는 W_{d3}의 증가에 따른 O_{3con}의 상승률이 둔화된다. 이것은 오존생성반응과 함께 방전공간의 높은 전력밀도로 인한 식(9)와 같은 오존분해반응과 방전공간의 온도상승에 의한 오존의 열분해 반응이 W_{d3}에 비례하여 상대

적으로 활성화되므로 O_{3con}의 상승률이 둔화되는 것으로 사료된다.



이 결과 그림 7에서 Q가 2[l/min]이고 W_{d3}가 3.16[W]일 때 5039[ppm]의 최대 O_{3con}을 얻을 수 있었다.

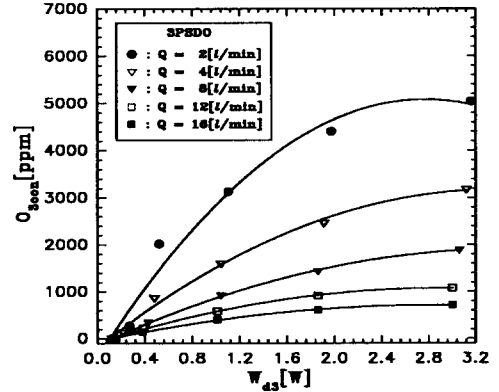


그림 7 Q 및 W_{d3} 변화에 따른 3PSDO의 O_{3con} 특성
Fig. 7 O_{3con} characteristics of 3PSDO with variation of Q and W_{d3}

그림 8은 W_{d3} 및 Q의 변화에 따른 3PSDO의 오존생성량(O_{3g}) 특성을 측정된 것이다. 그림과 같이 각 Q에서 W_{d3}가 증가됨에 따라서 거의 비례적으로 O_{3g}가 상승되었으며, W_{d3}가 일정할 때 Q가 상승되다가 감소되었는데 즉, Q가 8[l/min]인 경우 최대 O_{3g}가 나타나다가 그 이상의 Q에서는 감소되는 것으로 나타났다.

이것은 W_{d3}가 일정할 때 Q가 증가함에 따라서 오존으로 변환될 수 있는 산소분자의 수가 많아지므로, O_{3con}이 상승하는 확률과는 반대로 산소분자가 방전공간에 체류하는 시간이 짧아지게 된다. 이에 3PSDO의 중첩무성방전에 의하여 발생된 전자와의 접촉확률이 낮아지므로 O_{3con}이 저하되는 비에 따라 O_{3g}가 결정되기 때문이다.

이러한 결과로 3PSDO에서 Q가 8[l/min]일 때, 산소분자 수의 증가에 의한 O_{3con}이 상승하는 비율에 비하여 원료가스의 냉각효과와 산소분자가 방전영역에서 체류하는 시간이 단축됨에 따른 O_{3con}의 저하비율이 상대적으로 낮으므로 O_{3g}가 최대로 나타나는 것이라고 생각된다.

이 결과, Q가 8[l/min]이고, W_{d3}가 3.06[W]일 때 최대 1773[mg/h]의 O_{3g}를 얻을 수 있었다.

W_{d3} 및 Q의 변화에 따른 오존생성수율(O_{3Y})은 그림 9와 같다. 그림에서와 같이 동일한 Q에서 W_{d3}가 증가됨에 따라서 O_{3Y}가 상승하다가 W_{d3}가 약 0.6[W]이상이 되면 서서히 저하된다. 그리고 W_{d3}가 일정할 때 Q가 8[l/min]에서 W_{d3}가 최대가 되었다가 그 이상의 Q가 되면 다시 저하되는 경향으로 나타났다. 그 결과 Q가 8[l/min]이고, W_{d3}가 0.43[W]일 때 851[g/kWh]의 최대 O_{3Y}를 얻을 수 있었다.

1/W_d와 O_{3g}의 적(積)으로 주어지는 O_{3Y}는 W_d가 일정할 때, O_{3g} 특성에 의하여 결정된다.

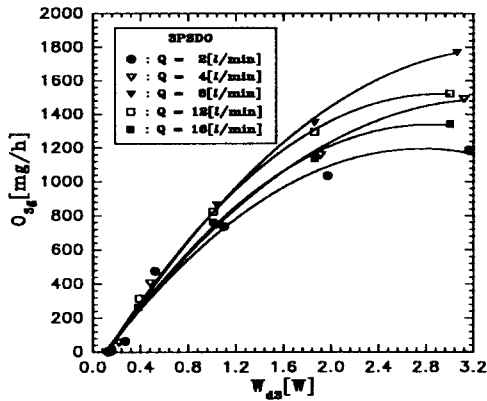


그림 8 Q 및 W_{d3} 변화에 따른 3PSDO의 O_{3g} 특성
 Fig. 8 O_{3g} characteristics of 3PSDO with variation of Q and W_{d3}

이때, Q의 변화에 따른 O_{3con}과 오존으로 생성되는 산소 원료가스의 공급량으로 결정되는 O_{3g}는 Q가 낮을수록 전술한 바와 같이 O_{3con}은 상승하지만, 원료가스 공급량은 Q가 증가할수록 많아지므로 O_{3con}과는 Q의 증가에 따라서 서로 역의 관계라 할 수 있다.

그러므로 O_{3g}는 Q의 증가에 따른 O_{3con}의 감소분과 산소 원료가스 공급량 증대에 따른 O_{3g}의 상승분이 서로 같게 되는 유량영역에서 최대 O_{3g} 즉 O_{3Y}가 나타난다. 따라서 필자들의 여러 연구결과를 토대로 하여 O_{3con}이 상승할수록 Q가 낮은 경우보다 높은 경우에 Q의 증가에 따른 상대적으로 O_{3g}의 감소분이 작아져서 Q가 높은 경우(8[l/min])에 최대 O_{3Y}가 나타나는 것을 확인할 수 있었다.[6][7][8]

이상의 결과로부터 3PSDO의 경우, 그림 9와 같이 W_{d3} 증가에 따라서 비교적 낮은 W_{d3}(약 0.4 ~ 0.8[W])에서 오존생성수율의 극대점이 나타났다. 그 이상의 W_{d3}에서는 방전밀도의 증가에 의한 방전공간 내부의 온도상승으로 인하여 식(9)와 같은 오존의 열분해 반응의 증대가 관건이 되고, 그 이하의 W_{d3}에서는 입력전력이 상대적으로 적으므로 방전이 원활하게 발생되지 못한 결과 O_{3Y}가 저하하게 된다. 따라서 3PSDO는 저 전력만으로도 높은 수율을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

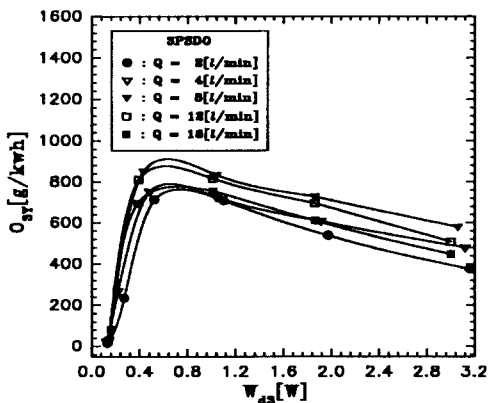


그림 9 Q 및 W_{d3} 변화에 따른 3PSDO의 O_{3Y} 특성
 Fig. 9 O_{3Y} characteristics of 3PSDO with variation of Q and W_{d3}

3.3 3PSDO의 상승효과

3.3.1 오존생성능도의 상승효과

그림 10은 3가지의 1PDO 및 3PSDO의 O_{3con} 특성을 비교·검토하고자, Q가 2[l/min]일 때, 전압인가 방식에 따라서 구분되는 오존발생기의 형태와 각 오존발생기의 방전전력의 변화에 따른 O_{3con}을 측정된 것이다.

그림 10에서 W_d가 약 0.4[W]까지는 O_{3con}이 1PEIDO > 1PCEDO > 1PICDO > 3PSDO의 순으로 나타났지만, 그 이상의 방전전력에서는 3PSDO > 1PEIDO > 1PCEDO > 1PICDO의 순으로 나타났다. 이것은 오존발생기에 3상 교류고전압을 인가하면 방전 gap의 길이에 따라서 상대적으로 짧은 gap d₁(0.4[mm])의 무성방전이 가장 먼저 발생되고, 그 다음으로 gap d₂(1.9[mm])의 무성방전, gap d₁ + d₂(0.4[mm] + 1.9[mm])의 무성방전 순으로 발생하는 방전개시전압의 순서에 의한 것이다.

즉, W_d가 약 0.4[W] 이상의 조건에서 3PSDO의 O_{3con} 상승효과가 나타났다. 이것은 단독 무성방전 시 전자의 평균 에너지는 약 5[eV] 정도로써 기저상태 산소분자의 해리에너지 5.1[eV]보다 낮은 상태로 존재하는데, 이러한 낮은 에너지 준위의 전자들은 오존분해반응에 기여하여 O_{3con} 특성을 저하시키는 원인으로 작용하게 된다. 따라서 단독 무성방전 시 포함되어 있는 10[%] 내외의 여기 산소분자를 낮은 에너지의 전자로써 해리시켜야 고농도의 O_{3con}을 얻을 수 있다.

그러나 여기 산소분자의 수명은 약 10⁻⁴[ms] 정도로 대단히 짧기 때문에 단독 무성방전 시에는 4.2[ms] 정도의 방전휴지구간에서 다수의 여기 산소분자가 기저상태로 천이(遷移)하게 된다.

이러한 관점에서 3상 중첩무성방전은 120[°]의 위상차를 가지는 무성방전이 연속적으로 발생되므로 방전휴지구간이 거의 존재하지 않게 되어 식(2) 및 (3)과 같이 여기 산소분자가 기저상태로 천이하기 전에 후속방전에 의하여 발생된 전자와 충돌하는 것이 가능하므로 동일한 방전전력에서 단독 무성방전에 비하여 높은 O_{3con}의 상승효과를 얻을 수 있다.

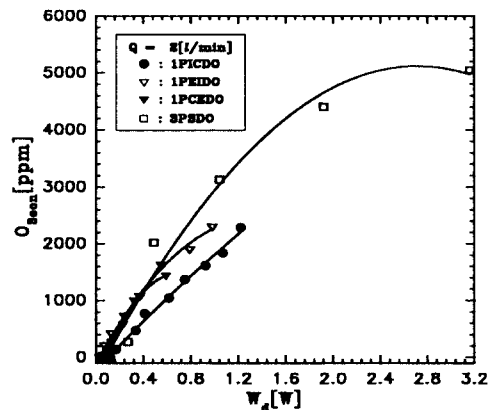


그림 10 Q가 2[l/min]인 경우, 오존발생기의 형태 및 W_d 변화에 따른 3PSDO의 O_{3con} 특성

Fig. 10 O_{3con} characteristics of 3PSDO with variation of ozonizer type and W_d for Q = 2[l/min]

3.3.2 오존생성량의 상승효과

그림 11은 3가지의 1PDO 및 3PSDO의 O_{3con} 특성을 비교·검토하고저, Q가 2[l/min]일 때, 전압인가 방식에 따라서 구분되는 오존발생기의 형태와 각 오존발생기의 방전전력의 변화에 따른 O_{3g} 를 측정 한 것이다.

그림 11에서 W_d 가 약 0.4[W]까지는 O_{3con} 과 마찬가지로 O_{3g} 가 1PEIDO > 1PCEDO > 1PICDO > 3PSDO 의 순으로 나타났지만, 그 이상의 방전전력에서는 3PSDO > 1PEIDO > 1PCEDO > 1PICDO 의 순으로 나타났다.

즉, O_{3con} 과 Q의 적(積)으로 주어지는 O_{3g} 의 경우, 3상 중첩 무성방전 시, 각 단독 무성방전의 방전개시전압이 다르기 때문에 W_d 가 약 0.4[W] 이하에서는 3PSDO와 1PICDO의 gap d₁에서 높은 전력밀도에 의해 발생된 산소원자, 전자 및 여기 산소분자 등에 의한 오존의 분해반응이 대단히 활성화 된 결과 O_{3g} 가 상대적으로 낮게 나타났으나, W_d 가 약 0.4[W] 이상에서는 3PSDO의 O_{3g} 상승효과가 O_{3con} 의 경우와 같이 나타났다.

결국, 3상 중첩 무성방전을 이용하므로써 동일한 방전공간에서 높은 O_{3g} 를 얻을 수 있으므로 단위 용적당의 오존발생량을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

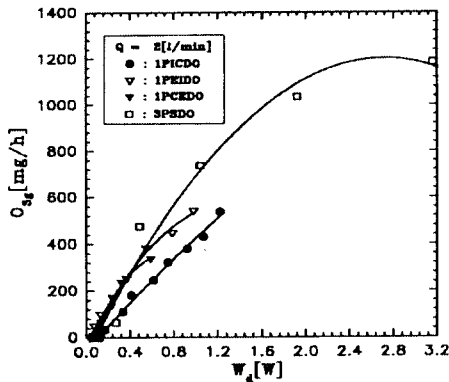


그림 11 Q가 2[l/min]인 경우, 오존발생기의 형태 및 W_d 변화에 따른 3PSDO의 O_{3g} 특성

Fig. 11 O_{3g} characteristics of 3PSDO with variation of ozonizer type and W_d for $Q = 2$ [l/min]

3.3.3 오존생성수율의 상승효과

그림 12는 단상무성방전(1PDO) 및 3상 중첩무성방전(3PSDO)의 오존생성수율 특성을 비교·검토하기 위하여 Q가 2[l/min]일 때 전압인가 방식에 따라 구분되는 오존발생기의 형태와 각 오존발생기 방전전력의 변화에 따른 O_{3Y} 를 측정 한 것이다. 이 경우 방전전력이 약 0.4[W] 이하에서는 1PDO인 1PEIDO의 O_{3Y} 가 가장 높게 나타나서 1PEIDO > 1PCEDO > 1PICDO > 3PSDO의 순으로 나타났지만, 그 이상의 전력에서는 3PSDO > 1PEIDO > 1PCEDO > 1PICDO의 순으로 3상 전압인가에 따른 상승효과가 나타났다. 즉, O_{3Y} 는 O_{3g} 와 $1/W_d$ 의 적으로 주어지기 때문에 O_{3g} 의 경우와 동일한 경향을 가지는 상승효과가 나타났다.

이러한 오존수율 비를 다음의 식으로 정의할 수 있다.

$$\eta = O_{3Y3} / O_{3Y1} \tag{10}$$

여기에서 η : 오존수율 비, O_{3Y3} : 3PSDO의 오존생성수율, O_{3Y1} : 1PDO의 오존생성수율

즉, 식 (10)에서 오존수율 비 $\eta > 1$ 이면, 3PSDO에 의한 오존생성수율의 상승효과가 얻어진 경우를 표시한다. 또한, 그림 12에서 보듯이 방전전력이 증가할수록 O_{3Y} 가 감소하는 것은 방전밀도가 증가함에 따라 높은 오존농도가 되면 오존과 산소원자에 의한 식 (9)와 같은 오존분해반응이 현저히 증가하게 되어 오존수율이 저하하는 것이라고 생각 된다.

따라서 W_d 가 0.4[W] 이상인 경우, 단상무성방전에 비하여 3상 중첩무성방전의 경우가 방전전력의 증대가 가능하여 방전공간의 이용율이 높아져 높은 수율을 얻을 수 있었으며, 오존발생기의 소형, 대용량화의 가능성을 확인할 수 있었다.

또한 식 (10)을 도식화하기 위하여 그림 13을 도입하였다. 그림에서와 같이 동일한 입력전력을 주입할 때, 1PDO의 수율값(O_{3Y1})과 3PSDO의 수율값(O_{3Y3})을 그림 13의 x축과 y축에 대입하여 η 값을 얻을 수 있다.

즉, 공업적으로 1PDO와 3PSDO를 적절히 적용할 수 있는 수율의 영역을 그림 13을 이용하여 쉽게 찾을 수 있으므로 1PDO와 3PSDO의 공업분야로의 적용에 그림 13이 상당히 유용할 것이라고 사료된다.

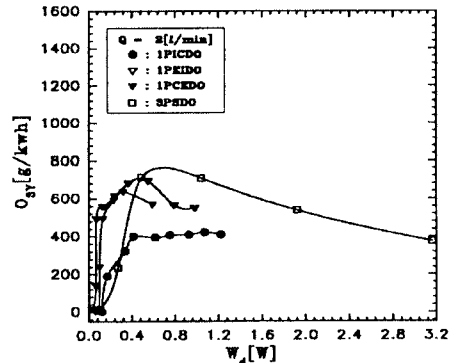


그림 12 Q가 2[l/min]인 경우, 오존발생기의 형태 및 W_d 변화에 따른 3PSDO의 O_{3Y} 특성

Fig. 12 O_{3Y} characteristics of 3PSDO with variation of ozonizer type and W_d for $Q = 2$ [l/min]

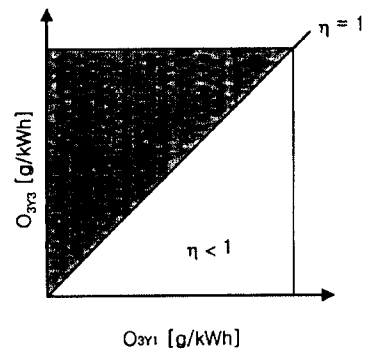


그림 13 1PDO와 3PSDO의 수율비(η) 도형
Fig. 13 A yield rate(η) diagram of 1PDO and 3PSDO

4. 결 론

참 고 문 헌

본 연구에서는 3개의 전극(중심전극, 내부전극 및 외부전극), 2개의 방전 gap 이 장착된 중첩방전형 오존발생기를 설계·제작하여 전압인가 방법에 따라서 3가지 형태의 단상무성방전형 오존발생기와 3상 중첩무성방전형 오존발생기를 구성하여 방전특성, 오존생성특성 및 오존생성 상승효과를 연구·검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 3상 중첩방전형 오존발생기는 동일한 오존발생기에 단상전원 혹은 3상전원을 인가하여 3가지 형태의 단상무성방전형 오존발생기와 3상 중첩무성방전형 오존발생기로 구성될 수 있으며, 3개의 전극에 120°의 위상차가 있는 교류고전압을 동시에 인가 하므로써 1 cycle 내에 방전휴지구간이 극소화되어 단독 무성방전형 오존발생기에 비하여 오존생성수율의 증대가 가능하였다.

2. 중심전극으로 사용된 방전관은 고전압 인가시 전리가 스가 충만된 방전관으로 이루어져 소 방전관 내부가 전극의 역할을 하므로써 전극면적의 극대화를 이룰 수 있다.

3. 단상무성방전형 오존발생기의 경우, 1PEIDO가 외부전극과 내부전극 간의 gap에서 무성방전이 가장 강하게 발생되므로써 단상무성방전 시에 가장 효과적인 오존발생기임을 확인할 수 있었다.

4. 3PSDO의 오존생성특성의 상승효과는 방전전력이 낮은 경우(0.4[W] 이하)에서는 1PEIDO > 1PCEDO > 1PICDO > 3PSDO의 순으로 나타났지만, 그 이상의 전력에서는 3PSDO > 1PEIDO > 1PCEDO > 1PICDO의 순으로 3상 전압인가에 따른 상승효과가 나타났다.

5. 공업적으로 적절한 오존발생기의 선택을 위하여 1PDO와 3PSDO의 수율비를 다음과 같이 표현하였다.

$$\eta(\text{수율비}) = \text{O}_{3\text{Y}3}(\text{3PSDO의 수율}) / \text{O}_{3\text{Y}1}(\text{1PDO의 수율})$$

η 로서 1PDO 혹은 3PSDO로의 적절한 적용을 판별할 수 있는 방법을 제시하였는 바, $\eta > 1$ 이면 3PSDO가, $\eta < 1$ 이면 1PDO가 유효함을 제시한다.

6. 이러한 결과에 따라 최대 오존생성농도, 오존생성량 및 오존생성수율은 5039[ppm], 1773[mg/h] 및 851[g/kWh]을 얻었다.

- [1] 李廣植, 李東仁, “氣體放電에 의한 오존생성과 그應用”, 大韓電氣學會 放電·高電壓(研), 學術發表會論文集, pp.32 ~ 35, 1992
- [2] Jen Shih Chang, “Corona discharge processes”, IEEE Trans. Plasma Science, Vol.19, No.8, 1991
- [3] 杉光英俊, “オゾンの基礎と應用”, 光琳, 1996
- [4] 전병준, “環境改善을 위한 新 오존발생기에 관한 연구”, 석사학위논문, 1998
- [5] 전병준, 이광식의, “Mesh형 내부전극을 사용한 2중원통형 오존발생기의 온도의존특성”, 영남대 공업기술연구소 논문집, Vol.27, No.1, pp.51 ~ 56, 1999
- [6] 전병준, 이광식의 “3상 전압을 사용한 중첩방전형 오존발생기의 오존생성 및 방전잡음특성”, 한국조명전기설비학회 논문지, Vol. 14, No. 2, pp.59~67, 2000
- [7] B.Eliasson & U.Kogejischatz et al, “Ozone synthesis from oxygen in dielectric barrier discharges”, J.Phys.D, Appl.Phys., 20, pp.1421 ~ 1437, 1987
- [8] B.Eliasson & U.Kogejischatz, “Modeling & applications of silent discharge plasma”, IEEE translation on plasma science, Vol.19, No.2, pp.309 ~ 323, 1991
- [9] J. Olof Nilsson et al, “Numerical Modeling of Ozone Production in a Pulsed Homogeneous Discharge: A Parameter Study”, IEEE translation on plasma science, Vol.25, No.1, pp.73 ~ 82, 1997
- [10] B. J. Chun, K. S. Lee et al. “The Characteristics of Double Gap Type ozonizer Using Three-Phase Voltage”, The 9th Aisan Conference on Electrical Discharge, pp.B2-1, 1998
- [11] 岸田治夫 外, “三相交流電壓によるオゾン生成システム”, 電學論A, 117卷, 6號, pp.565 ~ 570, 平成9年
- [12] R. Feng et al, “Automated system for power measurement in the silent discharge”, IEEE Trans. Indus Appl, Vol34, No3, pp.563 ~ 570, 1998
- [13] Shengpei Wang et al, “A Noble Silent Discharge Type Ozonizer Using Pulse Density Modulated High-Frequency Inverter”, Proceeding of the IEEE Industry Applications Meeting, Vol.2, 1999

저 자 소 개



전 병 준 (全炳俊)

1970년 10월 5일생. 1996년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정

Tel : 053-815-7291

E-mail : bjchun@orgio.net



김 영 훈 (金榮燾)

1963년 4월 12일생. 1984년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 포항1대학 전기과 부교수

Tel : 054-245-1095

E-mail : hun@pohang.ac.kr



이 상 근 (李相根)

1971년 1월 19일생. 1996년 계명대 물리학과 졸업. 1998년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정

Tel : 053-815-7291

E-mail : skeun2@chollian.net



박 원 주 (朴元柱)

1954년 3월 14일생. 1978년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 일본 Kyushu대 총합이공학연구과 졸업(박사). 현재 영남대 전기전자공학부 교수

Tel : 053-810-2581

E-mail : wzpark@yu.ac.kr



송 현 직 (宋炫直)

1968년 7월 30일생. 1991년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 영남대 공업기술연구소 연구원

Tel : 053-815-7291

E-mail : song3288@chunma.yeungnam.ac.kr



이 광 식 (李廣植)

1948년 10월 20일생. 1971년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수. 1998~1999 당학회 방전고전압 연구회 간사장역

임. 현재 영남대 전기전자공학부 교수, 산업기술대학원장

Tel : 053-810-2486

E-mail : kslee@yu.ac.kr