

도깨비棒形 오존發生裝置의 펄스코로나放電에 의한 오존發生特性

High Efficiency Ozone Generation Using a Pyramid-Project-Embossed Rod-to-Cylinder Electrode and a Pulse Corona Discharge

文 在 德* · 李 根 宅**
(Jae-Duk Moon · Kun-Taek Lee)

요 약

螺線形線대 오존發生裝置의 内部放電電極을 金屬도깨비棒形으로 改良함으로써 종래의 장치보다 高 効率化할 수 있었으며, 인덕턴스가 큰 선대형의 문제점이었던 임피던스 整合問題도 용이하게 해결할 수 있음이 확인되었다. 裝置의 最適條件導出을 위해 펄스形成 콘덴서, 給電線과 裝置의 整合問題, 放電空間間隔, 放電突起密度 및 供給空氣의 溫도와 流速을 파라미터로 하여 檢討한 結果, 最大發生 오존은 펄스 形成콘덴서의 값이 약 500pF, 給電線 및 장치의 靜電 容量이 整合된 70pF, 放電突起密度가 16mm² 일때 얻어졌으며, 이때 直徑이 틀리는 3종류(D=56.5, 61.5, 68.5mm)의 도깨비봉형 장치의 오존 收率은 각각 79, 77, 80 g/kwh로 종래형의 약 30%이상의 높은 收率이 얻어졌다.

Abstract- The conversion efficiency of an ozone generator can be significantly improved by modifying the discharge electrode of a helical strip line rod-to-cylinder type ozone generator to a pyramid-project-embossed rod, and by using a pulse corona discharge. Parametric studies have been carried out to obtain optimum values of peak pulse voltage, pulse forming capacitance, feeder cable and ozone generator capacitance, interelectrode spacing and corona tip density of ozone generator, and feed air flow rate and temperature. The generated ozone concentration was very dependent upon the values of pulse forming capacitance, feeder cable and ozone generator capacitance, and corona tip density. Maximum conversion efficiency was obtained with a pulse forming capacitance of about 500pF, a 75pF matched feeder cable and ozone generator, and a corona tip density of 16mm². When operated at optimum values, ozone yield of 79, 77, 80 g/KWh for the different interelectrode type ozone generators tested were obtained, which are approximately 30% higher than that of an industrial ozone generator.

1. 서 론

오존은 自然界에서 弗素다음의 鹽素의 7배나 되는 強力한 酸化力을 가지면서도 最終的으로는 分解되어 酸素로 되돌아가므로 二次公害를 일으키지 않기 때문에 上下水處理는 물론 惡臭, 排煙, 脫色 등의 處理, 食品의 저장 및 살균 처리, 나아가 병원의 수술실이나 半導體素子製造室인 클린룸(clean room)의 空氣靜化에 이르기까지 광범위하게 使用하기에 이르렀다. [1, 2]

그러나 現在 使用되고 있는 오존發生裝置는 1857年 獨의 Siemens에 의해 개발된 無聲放電形이 一部 改良되어 사용되어지고 있으나[3], 效率은 5%를 넘지 못하고 있는 실정이다. [4]

最近 增田 및 Salge에 의해 進行波 펄스電壓 및 交流矩形波 電壓을 使用함으로 오존效率을 크게 增加시킬수 있음이 보고된바 있다. [5, 6]

그러나 Salge의 裝置는 構造上 콘덴서負荷이므로 裝置가 커지면 靜電容量이 커져서 오존효율이 감소되며, 增田에 의한 方法은 進行파 펄스전압이 放電極을 따라 進行함에 따라 첨두부분(crest)만 감소되어 오존效率을 감소시키며, 또 裝置가 큰 약점이 있다. [7, 8]

筆者등은 이상의 裝置를 改良하여 보고한바 있으나[7, 8], 이 장치는 放電極모양이 얇은 선띠(0.1mm thick, 5mm width, 3m long)이므로 펄스전압에 대한 表皮 및 인덕턴스분에 의한 공진특성을 갖게되어 電源과의 임피던스정합이 어려운 문제점이 있었다. [7, 8]

그래서 絶緣棒上的 선띠放電電壓을 金屬棒表面上에 放電突起를 刻削한 도깨비棒形電極으로 代置한다면 인덕턴스분의 감소효과, 放電突起密度的 최적화, 임피던스정합의 용이한 해결등이 기대되며, 본 研究은 이 기대효과를 實驗的으로 檢討한 結果이다.

2. 理論的 檢討

2.1 오존의 生成과 解離

氣中放電에 의한 오존生成은 電界中的 加速電子들에 의해 衝突解離된 酸素原子들이 酸素分子들과

結合하여 式(1)과 같이 되며, 이때의 電子의 에너지 E_e 는 4~9eV이고 6.2eV에서 최대값을 가짐이 알려져 있다. [9] 그러나 이와같은 오존生成反應은 낮은 放電電流密度 및 溫度下에서 有効하며, 또 반드시 式(2)와 같은 오존分子的 解離作用도 동시에 일어나게 되므로 실용최대오존수율은 공기 원료일때 60g/kwh를 넘기지 못하고 효율도 5%로 낮게 된다. [4]



따라서 오존의 效率인 生成을 위해서는 일단 生成된 오존의 熱分解作用을 最小化함과 오존생성 시간과 가속전자의 수명의 최적화에 있다고 볼수 있다. 그러나 이들의 적정관계는 아직 미확인상태이며, 단지 이와같은 상태도출을 위해서는 立上時間이 짧은 矩形波電壓이나 極短펄스電壓이 기본적으로 有効한 것이 알려져 있는 정도이다. [5, 6]

2.2 펄스電源과 電力評價

펄스電力W는 式(3)과 같이 나타낼수 있다. 또 펄스發生裝置를 콘덴서 放電形으로 構成할때는 式(3)을 式(4)와 같이 나타낼수 있다.

$$dW = fV(t)I(t)dt \quad (3)$$

$$Wc = \frac{1}{2} f C_p V_p^2 \quad (4)$$

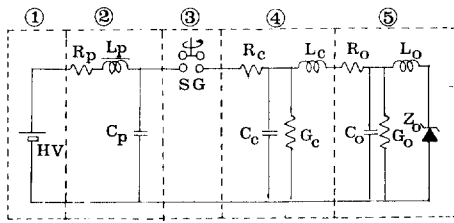
式(4)와 같이 펄스電源은 f와 C_p 를 가변가능하므로 V_p (또는 I_p)를 저하시키지 않고 Wc를 줄일수 있게 됨은 물론, 펄스 電壓立上時의 強力한 加速衝突電子들을 生成시키고 다음의 펄스電壓反復時까지 充分한 오존生成時間을 갖게 할수 있음은 물론 直交流電壓보다 더 높은 絶緣破壞電壓(1.5배까지 可能)[10]을 갖게 할수 있으므로 前述한 것과 같이 理想的인 電源이라고 할수 있다.

2.3 給電線과 오존發生器의 임피던스 整合

펄스 電源을 使用하는 경우 電源부와 給電線 및 오존發生器와의 임피던스정합문제는 오존生成에 영향을 미치는 重要要因中的 하나이다.

그림1은 본 研究에 使用된 펄스電源부와 給電線

*正 會 員：慶北大 工大 電氣工學科 副教授·工博
**正 會 員：慶北大 工大 電氣工學科 碩士課程
接受日字：1989年 3月 2日
1次修正：1989年 6月 12日
2次修正：1989年 7月 10日



① ; dc high volt source ② ; filter ③ ; spark gap
④ ; feeder cable ⑤ ; ozone generator

그림 1 實驗裝置의 等價回路

Fig. 1 Equivalent circuit of the experimental set-up

및 오존發生器의 개략적인 等價回路이다. 本 研究에서는 규정된 ①, ② 및 ③에 대한 ④와 ⑤의 整合問題만을 檢討하였다. 왜냐하면 ①, ② 및 ③에 의해 形成供給된 펄스 電壓이 ④를 통하여 ⑤로 給電될때 펄스 電壓波형이 주로 L_c, C_c, L_o 및 C_o 에 의해 크게 變形되어 原波형이 供給되지 못하기 때문이다.

그리고, 本 實驗의 給電線 및 오존 發生器의 C , L 및 Z 는 式(5)로 계산하였다.

$$C = 2\pi\epsilon / \ln(b/a)$$

$$L = \mu\ln(b/a) / 2\pi$$

$$Z = [(R + j\omega L) / (G + j\omega C)]^{1/2} \quad (5)$$

3. 實驗裝置 및 方法

그림2는 本 實驗에 사용된 電源回路와 오존發生裝置의 개략도로서, 直流高電壓發生部, 펄스電源部, 給電線部 및 오존 發生器로 構成되어 있다. 이때 사용된 自爆放電裝置(self-triggering spark gap)는 각각 24cm 간격으로 放電球가 부착된 回轉圓版(rotor disk)과 積장간격(2mm)을 유지한 固定圓板(stator disk)으로 構成되어 있으며, 스텐레스放電球(spark ball, 22mm diam)는 移轉(wanderung)에 의한 磨耗損을 줄이기 위해 니켈도금(0.2mm thick)하여 사용하였다.

本 實驗의 경우 펄스發生裝置의 出力펄스는 1/500 μ s 정도로서 反復週波數 60pps, 最大피크電壓은 80KV 정도이며, 오존收率이 높은 正極性펄스만에 한하여 수행하였다. [7,8]

사용된 高電壓同軸給電線은 A 및 B의 두 종류로

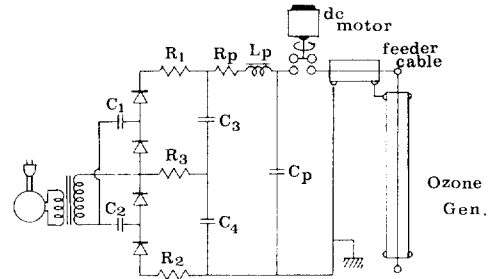
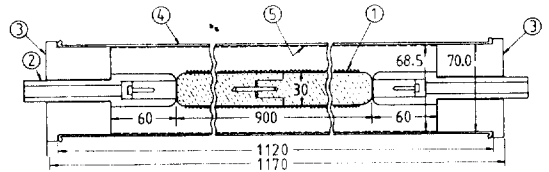


그림 2 오존發生裝置 및 펄스 電源의 回路圖
Fig. 2 Test circuit with pulse generator



① ; corona electrode ② ; electrode supporter
③ ; insulator ④ ; glass cylinder
⑤ ; stainless wire mesh electrode

그림 3 도깨비棒形 오존發生裝置의 構造圖

Fig. 3 Schematic diagram of the ozone generator.

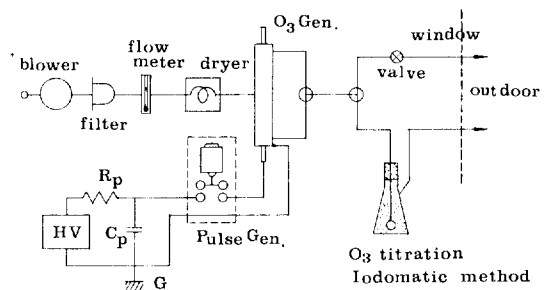


그림 4 供給空氣流通圖

Fig. 4 Feed air flow diagram with pulse generator.

서 內導體外徑은 各各 1.0 및 1.5mm, 外道體內徑은 7.2 및 9.3mm로서 公칭임피던스는 모두 75 Ω (式(5)에 의한 계산값은 79, 73 Ω)인 것을 積정길 이로 하여 사용하였으며, C_c 및 L_c 는 65, 70 pF/m 및 0.40, 0.37 μ H/m를 적용하였다.

그림3은 제안된 오존발생기의 구조로서 오존 發生電極과 接地電極으로 構成되어 있다. 오존발생

전극은 길이 90cm 직경 $d=3.0\text{cm}$ 의 낫쇠봉의 表面을 陽刻하여 四面體形(pyramid type, 4mm^2 base, 2mm height)의 돌기(project)를 形成시킨 것으로 이 때 突起의 h 는 最適豫測값인 2mm[11, 12]로 하였으며, 전체 모양은 도깨비봉 모양이다. 스텐레스接地電極은 오존이 生成되는 S_0 의 크기 ($D-d$)를 고려[7, 8, 11, 12]하여 3종류($D=56.5, 61.5, 68.5\text{mm}$)로 하였으며, 이 중에서 특히 $D=68.5$ 는 유리관(pyrex, 70mm diam)內에 스텐레스金屬網(25mesh)을 內插시킨 것으로 實驗時 放電狀態를 直接 觀測할수 있도록 하였다.

그림4는 供給空氣流通圖로서 原料空氣는 겨울철의 室內空氣($18\pm 3^\circ\text{C}$ $50\pm 10\%\text{RH}$)와 dry ice로 過冷却된 低溫乾燥空氣를 사용하였으며, 流速은 4 l/min로 固定하여 사용하였다.

그리고, 空氣中の 오존含量測定은 KI滴定法[7, 8]을 이용하였으며, 이때 最大測定誤差는 ± 30 volppm이다.

4. 實驗結果 및 考察

그림5는 유리관 오존발생기의 V_p 에 따른 CO_3 特性으로 CO_3 는 V_p 의 증가에 따라 증가하여 最大값을 가지며, 이 이상의 V_p 에서는 급격히 감소함을 보여준다. 이는 V_p 의 증가에 따라 S_0 가 상대적으로 커지고 E_0 가 적정값[9] (6.2eV)에 이르기 때문에 Q_0 가 증대되기 때문이며, 이 이상의 V_p 에서는 E_0 가 너무 커져서 酸素解離効率が 감소하게 됨과 동시에 S_0 內의 T 가 상승하여 v_0 가 급격히 커지기 때문에 Q_0 가 급격히 감소된다고 사료된다. 또 CO_3max 이상의 V_p 에서 放電極의 放電狀態를 유리電極을 통하게 관찰해 보면 放電狀態가 매우 不規則한 強弱狀態를 나타내므로 CO_3 도 그림5와 같이 변동한다고 사료된다.

그러나, CO_3max 상태의 방전극의 코로나 放電狀態는 늦은 저녁노을같이 放電突起上에서만 일정하게 일어나고 있음이 관측되었다.

그림6은 C_p 에 따른 CO_3max 특성으로 C_p 의 증가에 따라 CO_3 는 증가하나 C_p 가 500pF를 넘으면 포화하는 경향을 보여준다. 이 결과는 공진현상을 보여주는 나선매형[7, 8]에 비하면 本 裝置가 L_0 ($0.15\mu\text{H/m}$)가 적은 負荷(C dominant load)임을 나타내며, 따라서 L_0 ($0.40\mu\text{H/m}$)가 적은 給電線과의 整合은 기대한 대로 용이하리라고 판단된다.

그림7은 W_c 에 따른 Y 특성으로 W_c 가 증가하면 Y 는 급격히 감소하는 경향을 보여준다. 이는 낮은 W_c 상태에서는 CO_3 는 낮으나 낮은 W_c 에 대한

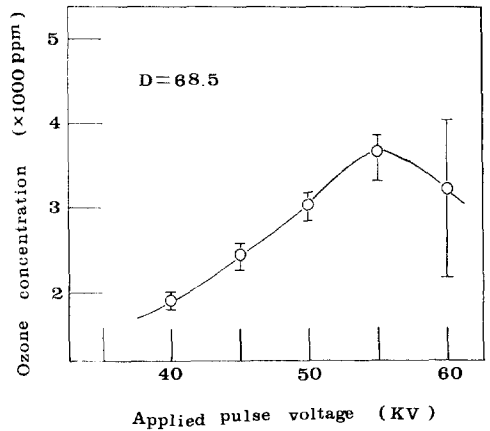


그림 5 인가전압이 發生오존濃도에 미치는 影響
Fig. 5 The effect of peak voltage on ozone generation

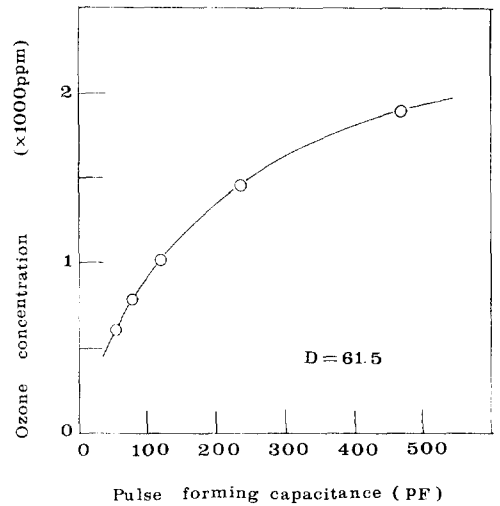


그림 6 펄스形成콘덴서가 發生오존濃도에 미치는 影響
Fig. 6 The effect of pulse forming capacitance on ozone generation.

상대적인 Y 값은 높음을 보여주나, W_c 가 증가하면 CO_3 는 증가하나 S_0 內의 T 가 매우 커져서 式(2)의 v_0 가 相對적으로 커져서 잔류검출되는 Y 는 크게 감소되기 때문으로 사료된다.

그림8은 방전극의 냉각효과를 검토하기 위한 v_a 에 따른 CO_3 特性으로 冷却效果가 낮은 15l/min이하에서는 Q_0 가 直線上的 豫定값보다 작으나, 冷却效果가 큰 30l/min이상에서는 豫定값보다 매우 큰

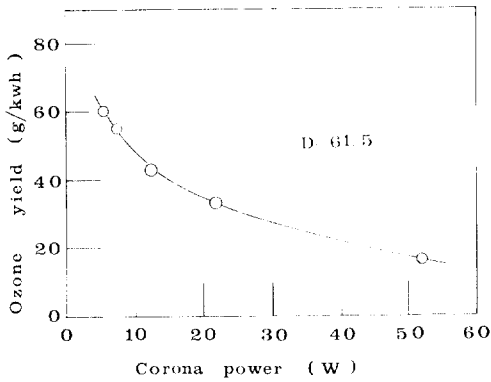


그림 7 코로나 電力이 오존收率에 미치는 影響
 Fig. 7 The effect of corona power on ozone yield.

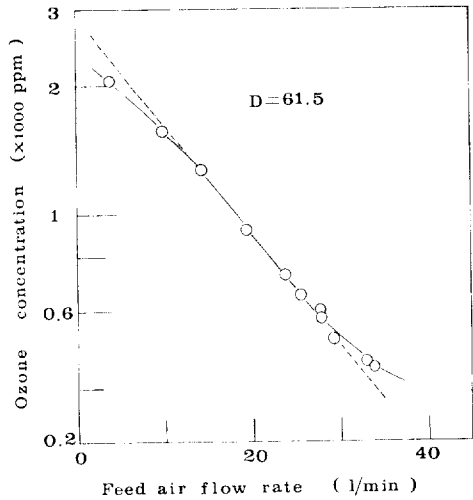


그림 8 供給空氣流速이 發生오존濃度에 미치는 影響
 Fig. 8 The effect of feed air flow rate on ozone generation

값을 보여준다.

그림9는 給電線의 C_c 에 따른 CO_3max 특성을 나타낸 것으로 CO_3max 값이 두 급전선의 C_c 에 따라 모두 最大값이 존재함을 보여주며, 특히 CO_3max 의 피이크값을 갖는 C_c 는 두 급전선 A 및 B 모두 C_0 의 값과 동일한 75pF에서 가짐을 보여주었으며, C_c 의 값이 C_0 의 값보다 커지나 작아지면 CO_3max 도 급격히 감소함으로 보여준다. 이는 電源部와 오존發生器 사이에 最適整合條件이 C만의 函數로 주어짐을 보여준다. 이때의 C_{CA} , C_{CB} 및 $C_{OD} =$

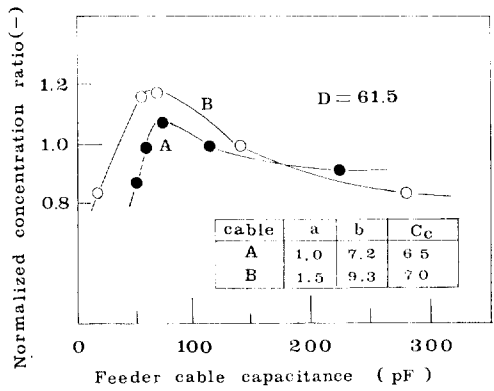


그림 9 給電線의 靜電容量이 發生오존농도에 미치는 影響
 Fig. 9 The effect of feed cable capacitance on ozone generation

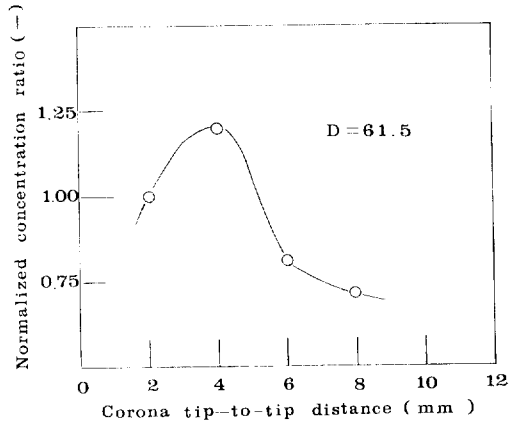


그림 10 放電突起間隔의 發生오존濃度에 미치는 影響
 Fig. 10 The effect of geed cable capacitance on ozone generation.

61.5는 式(5)에 의해 계산한 값인 64, 69pF/m 및 76pF와 測定(LCR meter, YHP 4332A)한 값인 65, 70pF/m 및 84pF와는 잘 일치하나, $C_{OD} = 61.5$ 의 경우만 측정값이 10%정도 큰 값을 나타내는데 이는 계산시 放電極의 有效길이(90cm)만 고려한 때문이며 지지연결부분(8cm)를 계산에 넣지 않은 때문이다.

이와 같은 구조의 오존발생기는 $(D-d)/2$ 와 放電突起의 h의 비가 오존發生에 큰 영향을 주며, 이에 대해서는 이미 보고한 바있다. [13, 14] 本實驗의 경우 $2h/(D-d) \ll 1$ 이므로 D의 變化는 그림

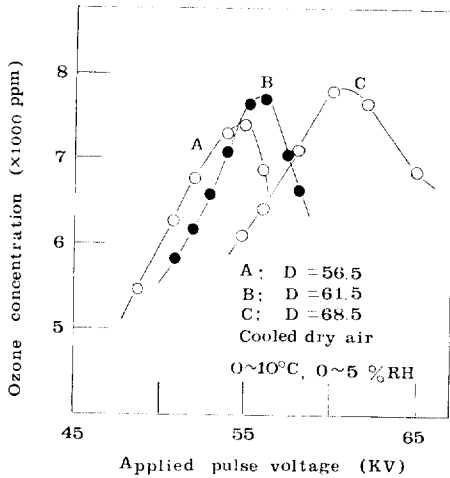


그림 11 低溫乾燥空氣에 대한 오존發生器의 直徑別 오존濃度
Fig. 11 The effect of peak voltage and diameter of corona electrode on ozone generation

11에서 보는 바와 같이 그다지 큰 영향을 주지 않는다.

그러나 그림 10에서와 같이 CO₂는 D_t를 변화시킬때는 매우 큰 영향을 받는다. 즉 放電突起를 絶緣體로 싸서 突起의 放電을 하나 건너 하나씩 시

킬 경우(D_t=16mm²)가 全部 放電시킬 경우(D_t=4mm²) 보다 약 20%나 큰 Q₀를 얻을 수 있으며, 둘 건너서 하나를 방전시킬 경우(D_t= 36mm²)는 전부 방전시킬 경우보다 20%정도 감소함을 보여 주었다. 이는 D_t에 最適値가 存在함을 보여주며, D=61.5mm, h=2mm 일때 D_t=16mm²가 最適條件임을 보여준다.

그림11은 D가 상이한 3種類의 오존 發生器에 dry ice에 의해 脫溫濕한 乾燥空氣(0~10°C, 0~5%RH)를 供給했을 때의 V_p에 따른 CO₂특성으로 常溫常濕때의 값의 2倍정도의 큰 CO₂가 얻어짐을 보여준다.

表1은 그림11및 實驗裝置로부터 얻어진 값과 三菱OE型[3]과의 比較表이다. 本 裝置3種 모두 OE型보다 15%, 一般工業用보다는 30% 이상의 Y값 증가를 보여준다. OE型 裝置가 상업화된 장치 중 가장 高收率裝置임을 고려할 때 本 도깨비棒型의 포텐셜은 큰 편이며 아직 개량의 여지가 있다고 볼때 實用化에의 개발가능성도 있다고 판단된다.

5. 結 論

螺旋形線더 오존發生裝置의 内部放電電極을 金屬 도깨비棒形으로 改良함으로써 종래의 裝置보다 高効率化할수 있는 可能性을 확인할 수 있었으며,

표 1 本裝置의 工業用裝置와의 特性比較表

Table 1 Specific data of the test ozone generator compared with a high yield industrial one.

구분	三菱OE形	도깨비棒形			비고
		D=56.5	D=61.5	D=68.5	
1. 電源	ac 3KHz	pulse, 60pps			
2. 放電條件, 기타					
供給空氣壓	1.6atm	1.0atm			
電極冷却	0°C water	自然冷却(20°C)			
放電空間隔	1mm	13~19mm			
放電部 길이	100mm	900mm			
外觀 크기	125mmφ×1200mm	600~700mmφ×1200mm			
inductance	1.4μH 정도	0.1μH 이하			
capacitance	300pF 정도	85pF 이하			
3. 裝置性能					
오존濃度	—	7370ppm	7700ppm	7859ppm	
오존効率	67g/kwh	79g/kwh	77g/kwh	80g/kwh	
收率比	1.00(기준)	1.18	1.15	1.19	
一般工業에 대한 비	60g/kwh(기준)	1.31	1.28	1.33	

線더形의 문제점이었던 펄스電源과의 임피던스정합문제도 용이하게 해결할 수 있음이 확인되었다. 研究結果를 要約하면 다음과 같다.

- 1) 小容量性負荷로서 펄스전원과의 임피던스정합이 용이함을 보여주었다.
- 2) 接地電極을 可視化함으로 放電極上의 코로나發生狀態를 관측확인 할수 있었으며, 보고된 대로 最大오존發生은 streamer corona가 활발하게 일어나고 있을 때임이 확인되었다.
- 3) 最適放電突起密度가 存在하며 본 장치에서는 16mm²當 한 돌기로서 4및 36mm²때에 비해 20%이상의 오존濃度增加를 보여 주었다.
- 4) 低溫乾燥空氣(0~10°C, 0~5%RH, 4l/min flow rate)및 最適條件에서의 도깨비棒形裝置의 發生오존濃度は 各各 7370, 7700및 7850ppm vol.으로서 오존수율은 79, 77및 80 g/kwh로서 工業用에 비해 30%, 高効率裝置인 三菱OE型에 비해서도 15% 이상의 높은 값을 보여 주었다.

이상의 結果로 보아 본 도깨비棒形 오존發生裝置는 高効率裝置로서의 開發可能性이 있다고 판단된다.

끝으로 研究費를 지원해준 韓國科學財團과 實驗에 도움을 준 김창수, 정석환, 김용군에게 감사를 표한다.

Nomenclature

- a : outer diam of inner conductor of feeder cable[mm]
- b : inner diam of outer conductor of feeder cable[mm]
- C : capacitance.[pF]
- C_c : C of cable[pF/m]
- C_o : C of ozone generator[pF]
- C_p : pulse forming C[pF]
- CO₃ : ozone concentration[ppm]
- d : diam of corona electrode[mm]
- D : diam of ground electrode[mm]
- D_t : density of corona tip[mm²]
- E_e : electron energy[eV]
- f : pulse frequency[pps]
- h : height of corona tip[mm]
- L : inductance[μH/m]
- L_c : L of cable[μH/m]
- L_o : L of ozone generator[μH/m]
- Q_o : quantity of generated ozone[ppm]
- S_o : space of ozone generation[mm³]
- T : temperature[°C]

- v_a : feed air flow rate[l/min]
- v_o : ozone decomposition rate[ppm/mm³·s·°C]
- W : power[W]
- W_c : corona power[W]
- Y : ozone yield[g/kwh]
- Z : impedance[Ω]

참 고 문 헌

- [1] 文在德 ; 오존發生裝置의 최근의 研究開發動向, 電氣學會誌, 33, 8, 495~503, 1984.
- [2] 池畑昭 ; 오존의 環境汚染への應用, 靜電氣學會誌, 7, 3, 167~175, 1983.
- [3] N.Tabata:High Power Deneity Ozonizer, 3rd Int'l Symp on Ozone Technology, Paris(1977):Int'l Ozone Institute.
- [4] 井關昇 ; 오존나이즈における오존生成機構と今後の課題, 靜電氣學會誌, 7, 3, 142~149, 1983.
- [5] S. Masuda et al ; High Efficiency Ozonizer Using Travelling Wave Pulse Voltage, Record of IEEE/IAS, Annual Meeting 978~985, 1984.
- [6] J. Salge et al ; Parameters Influencing the Synthesis of Ozone in Electrical Discharge. Proc. 5th Int'l Symposium on Plasma Chemistry Aug. 10~14, 1981.
- [7] 文在德 外 ; 급준펄스전압을 이용한 強力오존發生裝置開發에 관한 研究, 慶北大 論文誌, 40, 217~224, 1985.
- [8] Jae-Duk Moon, G.S.P. Castle and Senichi Masuda ; high Efficiency Ozone Generation Using a Helical Stripline Electrode and a Fast Rising Pulse Voltage, Record of IEEE/IAS 1986 Annual Meeting 1205~1210, 1987.
- [9] R. Peyrous et al ; Ozone Generation in Oxygen by Corona Discharge in a Point-tp-Plane Gap Subjected to a Chopped DC Positive Voltage J. Phys. D ; Appl. Phys, 14 2237~42, 1981.
- [10] H.I. Milde and Feldman ; Pulse Energization of Electrostatic Precipitator, Record of IEEE-IAS Annual Meeting, 66~70, 1987.
- [11] 文在德, 外 ; 디-질排塵用電氣集塵裝置의 性能向上을 위한 強力前置荷電裝置의 開發, 電氣學會論文誌, 33, 6, 223~232, 1984.
- [12] S. Masuda and Jae-Duk Moon ; High

Intensity Charging Device for Carbon Soot Particulate, Proc. of 2nd Int'l Conf. on ESP, 871~878, 1984.

[13] Jae-Duk Moon G.S.P. Castle ; Ozone Generation Using a Saw Tooth Disk Electrode and a

Pulse Corona Discharge Record of IEEE/IAS 1987 Annual Meeting 1713~1718, 1987.

[14] 文在德, 外 ; 圓톱날-圓筒電極間의 오존發生特性, 電氣學會 論文誌, 36, 9, 43~46, 1987.