

전자부품의 친환경 세정공정 적용을 위한 유전체장벽 방전 플라즈마 생성 장치 개발

Development of the Dielectric Barrier Discharge Plasma Generator for the Eco-friendly Cleaning Process of the Electronic Components

손영수^{1,✉}, 함상용¹, 김병인¹

Young Su Son^{1,✉}, Sang Yong Ham¹ and Byung In Kim¹

¹ 한국기계연구원 로봇메카트로닉스연구센터 (Robot mechatronics Research Center, KIMM)

✉ Corresponding author: ysson@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7712

Manuscript received: 2011.1.14 / Accepted: 2011.7.6

In this paper, the dielectric barrier discharge plasma generator has been studied for producing of the high concentration ozone gas. Proposed plasma generator has the structure of extremely narrow discharge air gap(0.15mm) in order to realize the high electric field discharge. We investigate the performance of the dielectric barrier discharge plasma generator experimentally and the results show that the generator has very high ozone concentration characteristics of 13.7[wt%/O₂] at the oxygen flow rate of 1[l/min] of each discharge cell. So, we confirmed that the proposed plasma generator is suitable for the high concentration ozone production facility of the eco-friendly ozone functional water cleaning system in the electronic components cleaning process.

Key Words: Wet Cleaning Process (습식세정공정), Dielectric Barrier Discharge (유전체장벽방전), Plasma Generator (플라즈마 생성장치), Ozone (오존), Functional Water (기능수)

기호설명

E : Electric Field
N: gas density
V: discharge voltage
d: discharge air gap

1. 서론

반도체, 태양전지, FPD 등과 같은 전자부품 제조과정에서의 세정기술개발은 기존의 습식 화학 용액을 기반으로 하는 세정공정의 문제점인 비 환경친화적/고비용 공정 문제점을 개선 또는 대체하

는 방향으로 이루어져 왔다. 이러한 기술개발 방향은 습식세정공정 반응 후의 유해 배출물을 저감하거나 또는 원천적으로 무배출하기 위한 전해 이온수, 오존 및 수소수와 같은 기능수(functional water)와 친환경 계면활성제 등의 친환경 습식 세정기술 분야와 레이저, 플라즈마, CO₂ UV 등을 이용하는 건식세정기술의 두 분류로 나뉘어 활발한 연구개발이 진행되어 왔다.¹⁻⁵

국내에서 개발되고 있는 전자부품 세정기술은 대부분 반도체 및 FPD 제조공정에서 실리콘 웨이퍼나 유리기판 상의 디바이스 제조 공정에서 요구되는 정밀 세정분야에 집중되어 왔으며 주로 플라즈마, 레이저, UV/O₃ 등 건식세정기술개발에 치우

처 있다. 또한 현실적으로 이들 공정분야에서는 일부 건식세정기술을 적용한 양산화 장비의 대체가 부분적으로 이루어지고 있으나 세정효율 문제로 전적으로 습식세정공정을 대체하고 있지 못한 상황이다.

환경 친화적인 습식세정기술 연구는 수계 및 준수계 세정기술로서 공정 후 폐수처리가 필요없는 기술개발에 중점을 두고 연구가 진행되고 있으며 대표적인 기술이 기능수를 이용한 세정 방법이라 할 수 있다. 기능수란 크게 오존수, 수소수, 전해이온수를 의미하는 것으로 대표적인 기능수 공정연구로는 T. Ohmi 등에 의해 연구된 초 순수에 오존을 용해시킨 오존수 습식세정, 수소 가스를 초순수에 용존시킨 수소수 습식세정 등이 있으며, H. Aoki 등에 의해 보고된 바 있는 초순수를 전기분해한 전해수 세정기술 등이 있다.

이 중에서 오존기능수 세정공정의 핵심은 기능수를 효과적으로 세정에 이용하기 위하여 초순수에 용해되는 기능성 가스인 오존 가스를 고농도로 생성하기 위한 오존 가스 생성기술과 기능수의 고효율 제조기술 그리고 공정 적용기술 등이다.

국내에서 개발되어 실용화되고 있는 오존 가스 발생장치의 대부분은 공기청정이나 식음료의 살균소독, 수 처리산업 분야를 대상으로 하고 있으며, 주로 3-8 [wt%] 대의 저농도, 대용량 오존발생기술이 주를 이루고 있다. 근래 들어서 고농도 오존발생에 적합한 중첩방전(또는 다중 방전)에 대한 연구 등 고농도 오존발생 시스템 개발에 대한 연구가 국내에서도 활발히 진행되면서, 비교적 고농도의 오존수를 필요로 하는 염색 폐수처리 분야 등에 적용하기 위한 연구가 시도되어 왔으나, 반도체, 전자부품 세정분야와 같은 고농도 오존 응용분야로의 오존생성기술 개발은 활발히 이루어지지 않고 있다.

본 연구는 전자부품의 친환경 습식세정방식으로 최근 활발히 공정 연구개발이 진행되고 있는 오존기능수 세정기술과 관련하여, 기능성 가스인 오존을 산업적으로 고농도 고효율로 대량 생성하기 위한 고전압 방전 플라즈마 생성장치에 관한 것이다.

전기방전에 의한 플라즈마 생성장치와 관련한 많은 방전구조와 관련한 연구가 있어 왔으나,^{6,7} 본 연구에서는 유전체장벽 방전구조를 가지며 고농도 오존가스 생성을 위한 조건 중의 하나인 환산전계

강도가 높은 방전공간을 실현하기 위해 초미세 방전공극을 갖는 대기압 플라즈마 생성 장치를 제안한다. 제안한 플라즈마 생성장치 성능실험을 통하여 오존기능수 습식 세정공정 설비로써 기능성 가스인 오존 생성을 위한 플라즈마 생성장치 효율성을 검토한다.

2. 유전체장벽 방전 플라즈마 생성장치

고전압 방전에 의해 플라즈마를 고효율로 생성하기 위해서는 공급하는 기체유전체의 유량 및 밀도, 방전장치 구조 및 재질, 고전압 전원공급장치와 전극냉각방법 등과 같이 플라즈마 특성을 결정하는 많은 설계 요소가 있다. 따라서 전기방전에 의해 생성된 플라즈마의 사용목적에 따라 상기의 설계요소를 적절히 선정하여 방전 장치를 개발하게 된다. 대표적인 유전체 장벽 방전방식인 무성방전구조를 Fig. 1에 나타내었다.

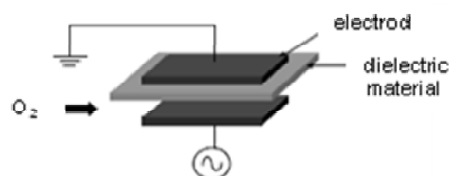


Fig. 1 Basic schematics of dielectric barrier discharge

이 방전장치 구조는 두 개의 금속전극 사이에 고체 유전체를 삽입하여 AC 고전압을 인가하여 전극 구조로 결정되는 특정 전압에 도달하게 되면 양 전극 사이에서 유전체 면을 따라 미세한 절연 파괴에 의한 코로나 방전이 형성되어 플라즈마를 발생하게 되며, 국내의 유전체 장벽방식 오존발생장치는 대부분 방전공극을 1mm 내외로 유지하면서 다른 설계 파라미터의 조합을 통하여 각기 그 형상을 원통형 또는 평판형으로 달리한 오존생성농도 10[wt%] 이하의 성능을 갖는 오존 발생장치들이 개발되어 왔다.^{8,9}

고효율로 플라즈마를 생성하여 고농도의 오존을 얻기 위한 조건으로서 플라즈마 특성을 결정하는 중요 파라미터 중 하나가 환산전계강도로 알려져 있다. 이 환산전계강도는 식 (1)과 같이 전계강도 E를 가스 밀도 N으로 나눈 값으로서,

$$E/N = V/(N \times d) \tag{1}$$

여기서 V 는 방전개시전압이며 d 는 두 전극 사이의 거리 즉, 공극(air gap)을 나타낸다.

환산전계강도를 높게 유지하여 플라즈마 생성 효율을 높이기 위해서는 방전개시전압을 높이거나 가스밀도와 공극의 적이 낮아야 하나, 가스밀도는 오존의 생성효율과 밀접한 관련이 있는 파라미터로서 방전공간 내의 가스밀도는 높게 유지해야 하므로 본 연구에서는 방전공극을 극단적으로 미세하게 형성하는 방법을 택하였다. 이를 위해 0.15mm 두께의 세라믹 스페이서를 가공하여 두개의 전극사이에 삽입함으로써 초 미세공극 확보의 확보가 가능하도록 설계하였다.

또한, 두 전극의 냉각효율을 높이기 위한 양면 냉각구조로 단위 방전장치를 설계하였으며, 필요한 오존가스 용량에 대응할 수 있도록 적층 또는 확장이 가능한 구조를 갖는다.

3. 실험장치 구성

본 연구에서 설계한 단위 플라즈마 생성 장치 구조를 Fig. 2 에 보였다. 단위 방전장치(unit discharge cell)는 두 개의 전극과 유전체 그리고 두개의 냉각수 자켓으로 구성되며, 두 전극 어셈블리를 맞붙여 하나의 방전장치를 이룬다.

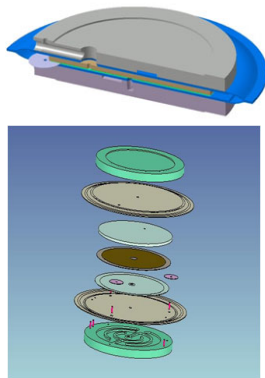


Fig. 2 Proposed narrow air-gap discharge cell

제작한 단위 방전장치는 고전압 전극으로 세라믹 유전체 상에 금속전극을 스퍼터링과 스크린 프린팅 방식 두가지로 금속박막을 형성하여 제작하였으며, 접지전극은 높은 경도를 갖는 텅스텐을 사용하여 방전으로 인한 표면의 금속 이온 입자 방출이 적도록 구성하였다. 본 단위 방전장치는 방전 공간을 완전히 밀폐하여 생성한 오존가스로

인한 방전공간의 오염을 차단할 수 있는 장점이 있어 고순도 오존생성이 가능한 구조이나 방전 cell의 고장 발생 시 유지 보수가 곤란한 측면이 있다.

전기방전에 의해 플라즈마를 생성하기 위해서는 인가하는 전원의 시간적 변화에 따라 직류, 교류, 고주파 및 펄스 방전으로 분류되며, 생성하고자 하는 플라즈마의 특성에 따라 전원 사양을 결정하게 된다. 본 연구에서는 대기압상태에서 저온 플라즈마를 발생하여 고농도 오존을 생성하는 것이 목적이므로 소비전력이 다소 높더라도 고주파수, 저 전압 방식으로 설계방향을 설정하였으며, 고속 스위칭에 의한 손실을 줄이기 위해 공진모드 제어기법을 이용하였다. 공진형 인버터 방식의 전력소자 드라이브 방식을 이용, 25-30 [kHz]급의 공진주파수에서 전력소자인 IGBT 를 제어하는 전용 전원공급장치를 설계하였다. 또한 방전전압은 매우 작은 방전공극을 가지며, 고농도 오존발생을 위한 방전관 구조에 적합하도록 2-4[kV]로 구성한 바, 본 연구에서 설계한 초미세 방전공극을 갖는 방전구조에 적합한 전원공급장치로 활용할 수 있



Fig. 3 Developed unit discharge cell & power supply

Table 1 Specifications of the power supply

Item	Specification
Control Circuit	IGBT Half Bridge
Output	Resonance Mode Control
Input Voltage	AC 220V
Output Voltage	6- 10KVA (500W)
Control Voltage	0 - 10 V
Frequency	F : 20 - 30kHz
Power Factor	Above 65%

도록 하였다. Fig. 3 에 제작한 단위 방전장치와 전원공급장치를 나타내었으며, Table 1 에 전원공급장치 설계 사양을 보였다.

4. 성능실험 및 결과

본 연구로 제안한 미세 방전 공극을 갖는 단위 플라즈마 생성장치로부터 발생하는 오존생성능 확인을 위해, 고농도 오존생성조건인 방전관 압력, 산소 유량 및 냉각수 온도 등의 조건변화와, 전기 방전에 있어 원료가스와 함께 소량의 불순물 가스를 주입함으로써 전기방전으로 생성되는 오존의 분해를 억제하는 효과가 있는 것을 알려진 불순물 가스 영향¹⁰을 확인하기 위해 질소가스 공급장치를 포함한 성능시험 장치를 Fig. 4 와 같이 제작하였다



Fig. 4 Unit discharge cell performance test bench

개발한 단위 플라즈마 생성장치의 성능시험은 산소유량 1[l/min]에서 오존생성농도 10[wt%] 이상의 특성을 갖는 플라즈마가 생성되는 지의 여부를 확인하는 데 있으며, 이를 통하여 전자부품의 오존 기능수 세정공정에 있어 고효율의 오존 생성장치로서 적용하기 위한 효용성 여부를 검토하였다.

개발한 단위 플라즈마 생성장치에 대하여 오존생성의 주요 파라메터인 방전관 내부 압력, dopant 가스(질소)의 유,무 그리고 방전전력 3 가지 조건 변화에 따라 플라즈마 생성장치에서 토출되는 오존가스의 농도 변화를 측정하여 최적 조건을 도출하였다. 질소는 불순물 가스 역할을 하여 효과적인 오존생성에 관여하는 것으로 알려져 있는 바, 도출한 최적 파라메터 조건에서 산소유량 변화에

대한 오존가스 생성농도 변화를 관찰함으로써 개발 장치의 목표성능 달성 여부를 판단하였다.

본 개발 방전장치의 방전개시전압은 6-7[kV] 사이로 측정 되었으며, 주파수는 25-30kHz 부근을 유지하며 방전 현상에 따른 정전용량 변화에 따라 전력 공급이 추종됨을 확인하였다. 오존생성농도의 측정은 Teledyne API Ozone Monitor 를 이용하였으며, 산소 및 질소유량은 정밀 유량조절 장치 인 MFC 를 통하여 방전 cell 내부로 공급하였다.

주요 파라메터 변화에 따른 최적의 오존생성 조건을 도출하기 위해 우선 전기방전에 있어 불순물 가스를 산소와 일정비율로 주입함으로써 플라즈마 방전에 미치는 영향을 조사하였다. 미량의 질소가스를 주입함으로써 질소가스의 자외선에 의한 초기전자발생에 따른 방전의 안정화 효과가 있는 것으로 알려져 있다. Fig. 5 에 산소유량을 1[l/min], 방전전력을 140[W], 냉각수온도 16 도 인 조건에서 방전관 압력을 14[PSI]와 21[PSI]인 경우 질소유량을 2 [cc/min]씩 변화하면서 오존 생성농도를 측정하였다.

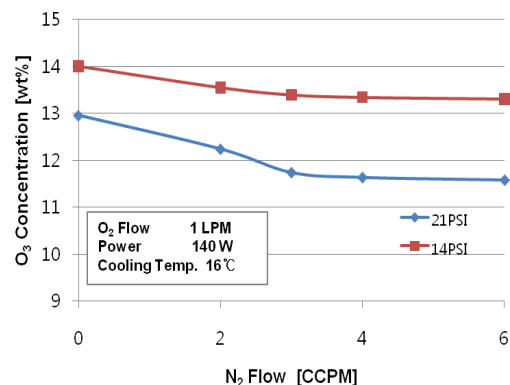
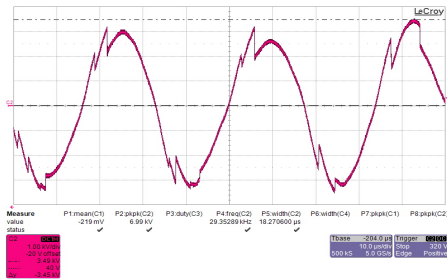


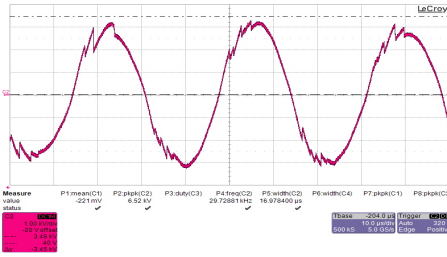
Fig. 5 The effect of dopant gas on ozone generation Characteristics

질소유량이 증가함에 따라 오존생성효율은 약간 감소하고 있으나 방전상태를 방전전류파형으로 관찰한 결과 Fig. 6 과 같이 질소를 투입하지 않은 경우보다 투입한 경우가 방전상태가 안정화됨을 확인하였다. 따라서 본 성능시험에서는 질소가스 유량을 3 [cc/min]로 정하였다.

Fig. 7 은 산소유량 1[l/min], 질소유량 3 [cc/min], 방전전력 140[W], 냉각수온도 16 도인 조건에서 방전관 압력을 14[PSI], 21[PSI] alc 28[PSI]인 경우의 오존생성농도 변화를 측정한 결과이다.



(a) Dopant gas 0 [cc/min]



(b) Dopant gas 3 [cc/min]

Fig. 6 Discharge voltage waveforms according to the dopant gas injection

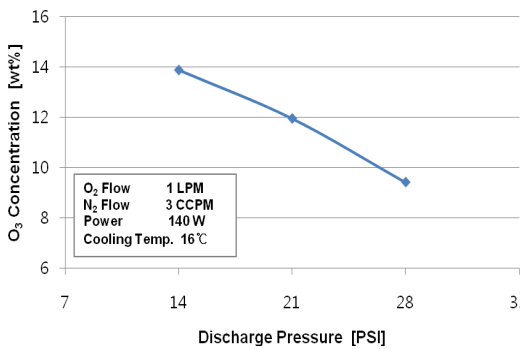


Fig. 7 The effect of gas pressure on ozone generation Characteristics

그림에서와 같이 방전관 내에 주입된 산소 압력이 14[PSI]인 경우 가장 오존생성농도가 높은 것으로 관찰되었으며 압력이 더 높을수록 생성효율이 감소함을 보였다. 방전관 내의 가스 압력에 대한 영향은 방전장치의 구조에 따라 각기 다른 특성을 가지며, 방전관 내의 압력을 높이는 것은 원료 가스의 산소분자 밀도를 높이기 위한 것으로 유전체장벽 방전방식의 경우 방전장치 구조에 따라 2-3[kg/cm²] 이상으로 방전관 압력을 유지하는 경우도 있다. 개발한 방전장치는 0.15 mm 의 초미

세 방전공극을 가지므로 공극이 큰 타 방전장치 구조에 비해 상대적으로 낮은 방전장치 내 압력에서도 오존생성농도가 저하하는 것은 좁은 방전공간에서 가스 밀도가 높게 되어 전하의 이동에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 8 은 동일한 조건에서 특정 방전관 압력에 대해 전원공급장치의 방전전력을 80[W]-140[W] 사이에서 변화시키면서 오존생성농도 변화를 보였다. 동일조건 하에서 방전전력이 증가할수록 오존생성농도 또한 증가함을 볼 수 있는데, 이는 방전전력이 증가하면 방전장치 내의 전력밀도가 증가하여 전자의 생성이 활발해지며 이에 따른 산소분자와의 충돌확률이 많아져 여기 산소분자 수의 증가로 인한 오존생성농도가 증가하는 것이다. 그러나 방전전력을 너무 높게 하면, 고 전자 밀도에 의한 온도상승으로 오존분해현상도 활발해지기 때문에 원하는 오존생성특성을 갖도록 적절히 방전전력을 인가하여야 한다.

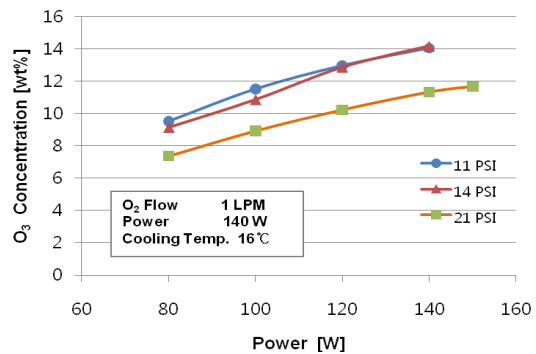


Fig. 8 The effect of electric power on ozone generation characteristics

산소유량 1[l/min]에서 방전전력 140[W]인 경우, 약 14[wt%]의 오존생성농도 특성을 나타내었다. 개발한 전원공급장치는 단위 플라즈마 생성장치에 200[W] 이상의 전력을 인가할 수 있도록 설계되어 있으나, 방전장치 및 전원공급 장치의 안정적 운용을 고려하여 150[W] 부근에서 인가하는 것으로 하였다.

지금까지 시험을 통해 도출한 방전관 압력, 불순물가스 주입 유,무 그리고 방전전력 등 주요 파라미터 별 최적 오존생성조건에 의해 산소유량 변화에 따른 단위 방전장치의 오존생성농도 특성을 측정하였다. 산소유량에 따른 오존생성 특성은 방전장

치의 성능을 평가하는 대표적인 항목으로서, 측정된 오존생성농도에 의해 오존생성량을 계산하게 된다.

Fig. 9 에 산소유량을 0.4~1.6 [ℓ/min]으로 변화한 경우의 오존생성농도 측정치 및 오존생성량 계산결과를 나타내었다. 일반적으로 산소가스의 공급 유량이 증가할수록 오존생성농도는 저하되는 것으로 알려져 있는데, 이는 유량이 증가할 경우 오존 생성에 영향을 미치는 여기 산소 분자의 수는 증가하지만, 유속이 빨라져서 방전공간 내에 발생 한 오존가스의 손실이 증가하여 오존 농도가 저하되기 때문이다.

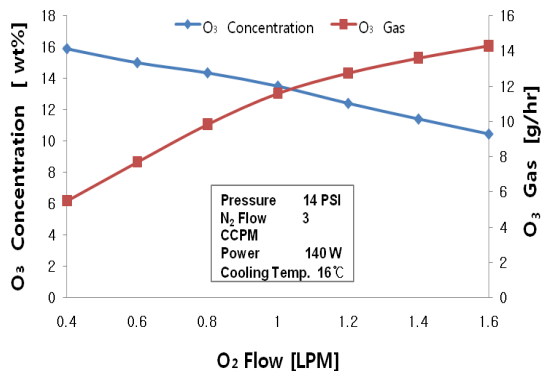


Fig. 9 Ozone concentration characteristics according to the oxygen gas flow rate variation

개발한 단위 플라즈마 생성장치의 특성을 결정하는 주요 파라미터를 최적화 조건으로 설정한 상태에서 산소유량 1[ℓ/min]에서 약 13.7[wt%]의 오존생성농도를 얻었으며, 이는 당초 설계목표인 10[wt%] 예상 성능을 훨씬 상회하는 플라즈마 생성특성을 달성하였다. 오존생성량은 측정된 오존생성농도에 의해 계산한 결과로서 산소유량 1[ℓ/min]에서 약 11.8[g/hr]을 생산할 수 있는 것으로 계산되었다.

따라서, 양면 수 냉각방식의 초미세 방전공극을 갖도록 개발한 본 플라즈마 생성장치는 반도체 등 높은 산화력이 필요한 전자부품 세정을 위한 고 농도 오존생성특성을 가짐으로써 친환경 오존기능수 세정공정에 필요한 고농도 플라즈마 생성장치로 충분히 효용성이 있음을 확인하였다.

또한, 본 단위 플라즈마 생성장치를 적층하여 병렬로 연결 함으로써 실제 상용화 시 대량의 오존 기능수 제조에 필요한 대용량 오존가스 생성 요구에 충분히 대응할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 반도체 및 실리콘 태양전지 웨이퍼, 평판 디스플레이 기관 등의 전자부품 세정공정에 있어 최근 친환경 세정기술로 대두되고 있는 오존기능수 세정공정에 효과적으로 사용하기 위한 초미세 방전공극을 갖는 유전체 장벽 방식의 상압 플라즈마 생성장치를 개발하였다.

개발한 플라즈마 생성장치에서 발생하는 오존가스가 고농도로 생성되기 위한 조건으로서 불순물 가스인 질소를 산소와 혼합하여 주입하는 것이 안정적 플라즈마 생성에 필수적임을 알았으며 방전관 압력은 14[PSI], 방전전력은 150[W]가 적정함을 확인하였다. 본 장치의 최종성능으로서 산소유량 1[ℓ/min]에서 약 13.7 [wt%]의 고농도 오존생성특성을 얻었으며, 이때 약 11.8[g/hr]의 오존이 생성되는 고효율 오존생성 특성을 얻었다. 따라서, 본 연구로 개발한 초미세공극을 갖는 유전체장벽 방전방식의 플라즈마 생성장치는 전자부품의 친환경 습식세정 방식으로 활발히 연구개발이 진행되고 있는 오존기능수 세정공정에 있어, 기능성 가스인 오존을 산업적으로 대량 생산하는 데 효과적으로 적용할 수 있겠다.

참고문헌

1. Ruzylo, J. and Ruzyo, J., "Cleaning Technology in Semiconductor Device Manufacturing," Electrochemical Society, p. 18, 1992.
2. Wei, J. and Verhaverbeke, S., "Cleaning Technology in Semiconductor Device manufacturing V," The Electrochemical Society, Inc., pp. 496-504, 1998.
3. Nelson, S., "Ozonated Water for Wafer Cleaning and Photoresist Removal," Solid State Technology, pp. 107-112, 1999.
4. De Gendt, S., Wauters, J. and Heyns, M., "A novel Resist and Post-Etch Residue Removal process Using Ozonated Chemistry," Solid State Technology, pp. 57-60, 1998.
5. Abe, T., Ojima, S., Nitta, T., Miki, N. and Ohmi, T., "Photoresist Stripping Using Alkaline Accelerator Containing Wet-Vapor," Solid State Phenomena, Vol. 76-77, pp. 231-234, 2001.
6. Chang, M. B. and Wu, S.-J., "Experimental Study on Ozone Synthesis via Dielectric Barrier Discharge,"

- Ozone Science and Engineering, Vol. 19, No. 3, pp. 241-254, 1997.
7. Lee, H.-H., Cho, K.-H., Kim, Y.-B. and Seo, K.-S., "Ozone Generation Characteristics in Dielectric Barrier Discharge," J. of KIEE, Vol. 49C, No. 12, pp. 673-678, 2000.
 8. Song, H.-J., Lee, K.-S., Park, W.-Z., Lee, D.-H., Kim, G.-Y. and Kim, L.-K., "Trial Manufacture and Characteristics of a Multi-discharge Type ozonizer(I)," J. of KIEE, Vol. 48C, No. 7, pp. 533-541, 1999.
 9. Son, Y.-S., Han, S.-Y. and Moon, S.-H., "A Study on the Characteristics of the High Concentration Ozone Generator for the Semiconductor Wafer Cleaning with the Ozone Dissolved De-ionized Water," J. of KIEE, Vol. 52C, No. 12, pp. 579-586, 2003.
 10. Park, S.-L., Kim, J.-G. and Moon, J.-D., "Effect of Additive Gases on Ozone Generation Characteristics of High Concentration Ozone Generator," J. of Electronic Technology, Vol. 22-2, pp. 151-158, 2001.