

오존 발생용 평판형 유전장벽방전 시스템의 회로 모델링

김봉석, 고광철

대전력응용 공학연구소, 한양대학교

Circuit modeling of Planer type Ozone Reactor Using Dielectric Barrier Discharging

Bongseong Kim, Kwang-Cheol Ko

Applied High Power Lab, Hanyang university

Abstract - 상업에서의 유전장벽방전(DBD: Dielectric Barrier Discharging) 방법은 현재 높은 효율성과 공정의 편이성으로 인하여 높은 진공도를 요구하는 반도체 공정 단계 및 광원 또는 오존 발생 장치로 각광받고 있다. 하지만, 기존의 플라즈마 진단 방법 및 분석 방법을 통하여 특성 부하 목적으로 사용되는 유전장벽 방전의 특성을 파악하는 것은 한계가 있다. 본 논문은 오존 발생용 평판형 DBD 반응기 및 전원 장치를 전기 모델링하여 평판형 DBD 반응기의 변화 및 전원 장치의 최적 조건을 판별하는 것을 목적으로 하고 있다.

1. 서 론

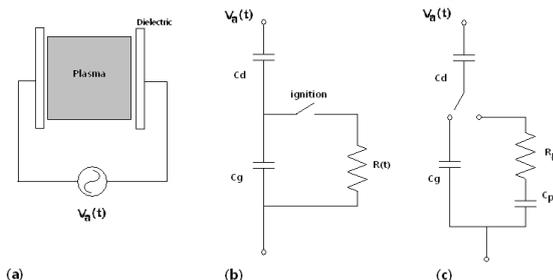
DBD 방식의 오존 발생 방법은 의료 산업 및 환경 산업에 있어서 매우 뛰어난 어플리케이션 특성을 보여주고 있다 [1]. 이와 같은 특성으로 인하여 DBD방식의 방전 메커니즘이 많이 연구되고 있지만, 전원 장치 및 부하 관점에서의 연구는 미진한 편이다. 특히, 어플리케이션에 의한 DBD반응기의 형태, 유입 가스의 압력, 가스 flow의 패스에 따라 동일 반응기의 전기회로 모델링에 있어서도 매우 다른 차이를 보여주고 있다. 또한, DBD용 전원 장치에 있어서는 최적의 전원 조건이 입력 전압의 크기, duty rate, 동작 주파수 및 입력 전압의 형태를 DBD 반응기의 시간적인 변화에(국소 유전율의 변화, 열적 특성) 의하여 보정해 줘야 한다. 따라서 본 논문은 평판형 DBD 오존 발생 장치의 전기 모델링을 기반으로 하여 평판형 DBD 반응기에서의 방전 조건의 변화에서도 최적의 방전 전압/전류를 인가해 줄 수 있는 전원 기법을 최종적으로 제안 하고 있다. 그 내용은 본론2.1-2.2에서 제시하는 오존 발생장치의 모델링을 기반으로 하여 2.3에서는 전원장치의 종류 및 특성을 비교하여 평판형 DBD 반응기에서 최적의 전원 입력 방법을 제시하고 있다.

2. 본 론

2.1 DBD 반응기의 기본 회로 모델링 및 방전 메커니즘

2.1.1 DBD반응기의 기본 회로 모델링

가장 간단하고 효과적인 DBD 반응기의 모델링은 전기 회로를 사용하여 DBD 반응 메커니즘을 사용하는 방법으로 numerical analysis를 사용하는 경우에 비하여 짧은 계산 시간과 모델의 범용성에 매우 뛰어난 장점이 있다. 가장 기본적으로 그림1.(b)에서 제시하고 있는 바와 같은 방식의 passive circuit component를 사용한 DBD circuit modeling이 가장 기본적인 DBD반응기의 모델이다[2].그림1.에서 보여지는 모델링은 PDP cell 및 lamp방식의 DBD 반응기의 모델링에 효과적이며, DBD반응기 자체를 하나의 커패시터의 조합으로 표시한다. C_d 는 방전 길이에 의해 나타나는 커패시턴스 성분이며, C_g 는 입력 가스의 방전 이후에 나타나는 커패시턴스를 R은 방전에 의해 DBD반응기에서 소모하는 방전 전력을 표시하고 있다. 그림1.(b)에서 제시하고 있는 기본 모델은 전원 장치에 의하여 방전 이후 plasma를 보다 상세히 나타내기 위하여 C_p 를 첨가한다. 따라서 가장 간단한 모델은 그림1.(c)와 같은 모델로 도출 된다.



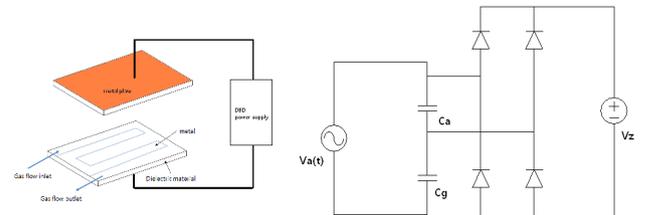
<그림1. 기본 DBD 반응기의 회로 모델링>
(a)간략화된 DBD반응기 (b) 전기 소자를 사용한 회로 모델링
(c)방전후 플라즈마 임피던스를 고려한 회로모델링

2.1.1 DBD반응기의 기본 회로 모델링

실제적으로 평판형 DBD 반응기의 구성은 그림2.(a)와 같이 구성되기 때문에 인덕턴스 성분과 함께, 국소 방전 모드(streamer와 glow type의 DBD 방전의 특성이 다르나 본 논문에서는 glow type의 DBD 방전 특성의 모델링을 고려한다.)에 의하여 그림1.(b)에서 제안한 모델은 적절치 않다.

그림2.(b)에서 제시하고 있는 DBD반응기[3]는 그림1.(b)에서 반응기의 geometry에 의한 inductance 성분과 gas flow를 나타내는 C_a 를 제시하고 있다. 여기서 V_z 는 discharging voltage를 의미한다. gas flow에 의한 영향을 커패시턴스 성분으로 제시하였지만, 직접적으로 압력에 의한 영향이며 또한 air로 입력되는 gas의 특성(N2와 O2혼합여부 또는 N2와 O2의 혼합비율)에 따라 C_a 로 대표되는 gas flow의 특성이 달라지게 된다. 이 gas flow는 또한 직접적으로 gas의 입력 flow로 결정되기도 하나, 그림2.(a)에서 보여지는 바와 같이 상용 평판형 DBD반응기의 경우, 원통형 DBD 반응 방식을 사용하는 것과 다르게 flow path는 반응면적을 높이기 위하여 매우 긴 flow path를 지닌다.

또한, 방전전압은 Pd곡선에 의하여 결정되기 때문에 반응기 내부의 gas pressure 또한 반응기의 gap distance 및 반응기의 inductance로 제시되는 넓이 만큼 매우 중요한 파라미터로 제시된다. 따라서, 2.1.1에서 다룬 바와 같은 간단한 회로 모델링을 기반으로 제안한 그림2.(b)의 모델은 추가적인 모델링을 요구한다.



<그림2.> DBD반응기의 회로 모델링
(a)실제 평판형 DBD 반응기의 형태 (b)DBD반응기의 회로 모델화

2.2 DBD 메커니즘을 고려한 추가적인 DBD 반응기의 회로 모델링

그림3은 본 연구에서 기본으로 설정한 평판형 DBD 반응기의 회로 모델링을 보여주고 있다. 그림1.과 그림2.에서 제시한 회로 모델링의 혼합 형태로 반응기의 gap distance에 의하여 나타나는 주 커패시터 용량을 C_s 로 L_s 는 반응기 전체 인덕턴스 및 부유 인덕턴스 성분을 모두 포함하여 제시하고 있다. C_{d1} , C_{d2} 는 유전장벽에 의한 커패시터 성분을 표시하고 있으며, C_a 는 2.1.2에서 제시한 바와 같은 gas flow 및 gas temperature에 의한 영향을 나타내고 있는 커패시턴스 성분이다. 항복 전압 이상의 전압이 인가되어 방전이 시작되면(Sw가 closed) 진행되는 플라즈마의 임피던스는 Z_d 로 표시하고 있다.그림3.에서 C_{d1} 및 C_{d2} 의 성분은 실제적으로 temperature 및 그 배치에 의해 다른 값을 지나나 power supply의 operation frequency가 10~100kHz 정도의 symmetrical sine waveform 인가 시 local dielectric variation이 그리 크지 않기 때문에 일정한 커패시턴스 성분으로 표기한다.

그림3.의 모델에서 임피던스는 C_s 의 커패시턴스 성분과 $C_{d1}+C_g+C_{d2}$ 커패시터 성분의 병렬 합, $C_{total} = C_s \parallel (C_{d1}+C_g+C_{d2})$ 과 plasma impednace성분의 합으로 계산된다. 그림1.과 2의 모델과 다른 특징은 V_d 로 표시되는 DBD 반응기에서 나타나는 전압과 DBD 반응기에서 방전 전압 $V_g(t)$

의 메커니즘을 분리하여 계산한다는 점이다. $I_{dis}(t)$ 로 표시하는 전류 성분은 실제적으로 DBD 반응기 내부의 C_a effect과 Z_d 성분에 의해 나타나는 방전 특성을 측정할 수 없기 때문에 $I_{dis}(t)$ 는 인가전압 $I(t)$ 와 반응기의 커패시턴스로 투입되는 전류 $I_s(t)$ 와 DBD 반응기로 인가되는 전류 $I_{dbd}(t)$ 의 전류 합을 통하여 계산된다. 실제 방전 실험 결과에 의하면 음전압과 양전압의 phase에 의해 나타나는 C_{d1} 과 C_{d2} 의 시간에 따른 커패시턴스 변화가 보고되고 있으나 [4], $C_g(t)$ 의 변화량에 비하여 크지 않기 때문에 이에 관한 영향을 무시하고 $C_{d1}=C_{d2}=C_d$ 로 통일하여 계산하였으며, 커패시턴스 값의 변화가 없음을 가정하여 모델링을 수행하였다.

DBD 방전기 내부의 전계인 $V_g(t)$ 는 측정가능한 인가전압 $V_a(t)$ 와 dielectric component의 변화 및 memory 전압으로 표시되는 V_m 의 합으로 계산된다. memory 전압은 DBD 반응기용 전원장치의 인가 전압에 의해 여기된 전하 Q 에 의하여 나타나는 전압으로 DBD 반응기에 사용된 유전체와 DBD의 반응기에 인가된 $I_{dbd}(t)$ 의 형태로 계산된다.

$$I_{dg}(t) = C_g \frac{dV_g(t)}{dt} \quad (1)$$

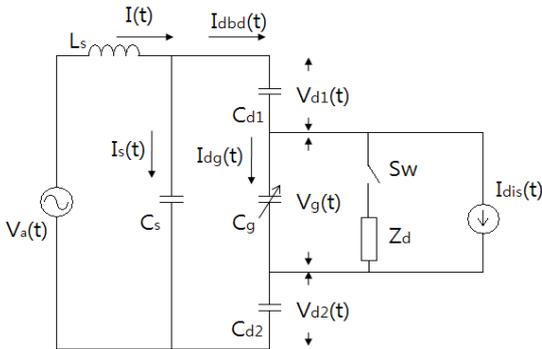
$$\frac{dV_a(t)}{dt} = \frac{1}{C_g} (I_{dbd}(t) - I_{dis}(t)) + \frac{I_{dbd}(t)}{C_d(t)} \quad (2)$$

$$I_{dis}(t) = (1 + \frac{C_g}{C_d}) I_{dbd}(t) - C_g \frac{dV_a(t)}{dt} \quad (3)$$

$$V_d(t) = \frac{1}{C_d} \int I(t) dt + V_m \quad (4)$$

$$V_g(t) = V_a(t) - \frac{1}{C_d} \int I(t) dt - V_m \quad (5)$$

$$V_m = -\frac{1}{2C_d} \int I_{dbd}(t) dt \quad (6)$$



<그림 3> DBD 반응기의 모델링

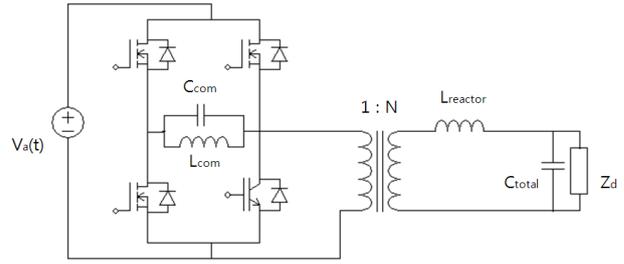
2.3 최적 전압 인가 조건 및 전원 장치 설계

2.2에서 제안한 DBD반응기의 모델을 이용하여 실제적인 최적 전압을 인가할 수 있는 전원 장치의 설계를 그림4.에서 제시하고 있다. 그림.4에서 제시하는 전원 장치의 모델은 DBD 반응기의 커패시턴스 값의 변화를 스위칭을 통해 전원을 입력할 때 보정하는 방법으로 $C_{com}||C_{total}$ 로 계산된다. ($C_{total} = C_s || (2C_d + C_g(t))$), C_{d1} 과 C_{d2} 는 같은 값(C_d)로 가정하며 C_d 는 일정한 값으로 계산한다. 따라서 $C_g(t)$ 의 커패시턴스의 변화에 따른 DBD반응기를 보정해 주기 위하여 full bridge에 추가적인 compensation capacitor를 사용하였다. 그림5(a)는 어떠한 compensation capacitor를 사용하지 않은 시뮬레이션 결과를 보여주고 있으며, 그림 5(b)는 compensation capacitor를 사용하여 스위칭 했을 때의 결과를 보여주고 있다.

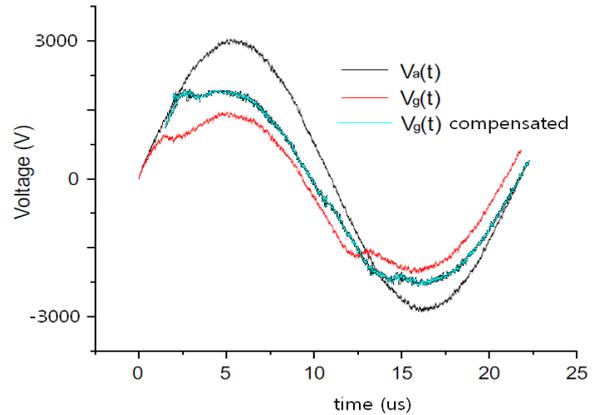
compensation capacitor를 사용하는 것은 두가지 효과를 위한 것으로 방전에 의한 임피던스 변화 Z_d 의 제어가 실제로 불가능하기 때문에, 식(5)에서 표현되는 바와 같은 $V_g(t)$ 의 크기를 그림5.에서 보여지는 C_{total} 의 값과 C_{com} 이 직렬연결되는 효과를 사용하여 $C_g(t)$ 의 급격한 변화에 의한 방전 전류의 값이 달라지는 것을 막아 일정한 $I_{dis}(t)$ 및 $C_g(t)$ 값을 유지하도록 하는 것을 목적으로 하고 있다.

다른 한가지 목적은 일반적으로 DBD반응기에 전압을 인가시, DBD반응기의 커패시턴스 성분으로 인하여 phase shift에 의한 역률의 저하형태로 특성이 나타난다는 점이다. 이는 기본적으로 dielectric component에 의해 memorize되는 전압이 커지기 때문에 실제로 방전에 관여하고 있는 $V_g(t)$ 값과 $I_{bg}(t)$ 의 값이 작아진다는 단점이 있기 때문에 부하인 DBD반응기의 변동에 의한 phase shift가 크게 나타나지 않도록 방

지하는 데 목적을 두고 있다.



<그림 4> 본 논문에서 제안하는 full bridge type의 DBD 전원 장치



<그림 5> 시뮬레이션 결과 비교

3. 결 론

그림5.는 DBD반응기에서의 인가 전압 $V_a(t)$ 대비 $V_g(t)$ 의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 2.3에서 제안한 바와 같이 시뮬레이션 결과를 보면 DBD반응기의 고유 커패시턴스 성분으로 나타나는 방전 전압의 phase delay 현상이 compensation을 하지 않은 시뮬레이션에 비교하여 낮게 나타남을 보여주고 있다. 이는 RLC 모델의 부하에 있어서 전원과 부하간의 impedance matching이 되어 있다는 것을 보여주고 있다. 하지만, 실제적으로 방전 전압의 증가로 인하여 오존 레디컬이 증가하는 지에 대하여서는 방전전압에 의한 오존 발생을 측정 비교해야 할 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] U. Konelschatz, B. Eliasson and W. Egli, "Dielectric-Barrier Discharges. Principle and Applications", J. PHYS IV FRANCE 7 (1 997)
- [2] J H. Olivares, M. Ponce-Silva, R.Osorio, M. Juarez, "DBD Modeling as a Function of Waveforms Slope", PESC2007, IEEE
- [3] M. Ponce, J.Aguilar, "Linear and non Linear Models for Ozone Generators Considering Electrode Losses", PESC2007, IEEE
- [4] Valentin Gibalov and Gehard J Pietsch, "The development of dielectric barrier discharge in gas gaps and on surface". J.Phys.D:Appl. Phys.33(2000)