

유전체 장벽 방전을 이용한 오존 발생기의 전원장치 최적 설계 및 비교

김봉석¹, 신영철¹, 고광철^{1,a}

¹ 한양대학교 전기공학과

The Design of a Power Supply for Planer Type of the Dielectric Barrier Discharge Ozone Reactor with Impedance Matching

Bongseong Kim¹, Young-Chul Shin¹, and Kwang-Cheol Ko^{1,a}

¹ Department of Electric Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received July 5, 2010; Revised October 14, 2010; Accepted December 17, 2010)

Abstract: Dielectric Barrier Discharge (DBD) reactor with sinusoidal AC type of power supply is very widely adopted for its compact size and effective discharging mechanism to generate high density of ozone radicals. However, at the aspect of design on power supply, its optimal switching conditions and topology is achieved by empirical test.

Therefore, throughout this paper, it is proposed a design method of DBD power supply to guarantee a maximum ozone yield rate in accordance with DBD reactor modification and impedance variation when rapid gas discharging in the DBD reactor is proceeded.

Keywords: DBD power supply Impedance matching, Dielectric Barrier Discharging

1. 서 론

유전 장벽 방전 (dielectric barrier discharge, DBD) 메커니즘을 사용하는 오존 발생 장치는 기간 산업 분야인 환경, 의료 및 반도체 산업에서 널리 사용되고 있다 [1-4]. 따라서 DBD 방전 메커니즘에 관련한 연구가 매우 심도적으로 연구되어지고 있으나, DBD용 전원 장치에 관련한 최적의 전원 설계 방법에 관련한 연구는 잘 알려져 있지 않다. 이는 DBD에 있어서 전원 장치의 가장 중요한 설계 파라미터인 인가 전압의 크기, 인가 전압의 파형, 동작 주파수, 소모 전력, duty rate 등이 DBD 반응기의 형태 및

DBD 환경에 대해 매우 크게 달라지기 때문이다. 기본 DBD 전원 장치 특성은 DBD 반응기의 크기, 주입 가스의 압력, 반응기 내부 패스의 형상, 전극간의 거리, 유전체의 종류, DBD 반응기 내부의 방전 전후의 회로 특성에 따라 결정된다. 게다가, DBD를 사용한 오존 발생 장치들은 안정상의 이유 및 상압의 기체 방전 특성으로 인하여 직접적으로 DBD 반응기 내부의 물리적 특성을 측정할 수 없는 문제점이 발생하기 때문에 일반적인 DBD용 전원장치의 설계 및 제작은 인가 전압/전류의 크기 및 입력 전력 대비 오존 발생량을 점차 개선하는 방향으로 수행되고 있다.

하지만, 오존 발생량이 목표 오존 발생량에 미치지 않는 경우, 길이 및 방전 면적 변화를 통한 DBD 반응기의 재설계 또는 DBD 반응기의 병렬 연결을 통

a. Corresponding Author; kwang@hanyang.ac.kr

하여 필요 오존 발생량을 충족시키기 때문에 전원 장치 또한 재설계 및 추가 제작이 필요하다는 단점이 있다.

따라서 본 논문은 인가 전압의 크기가 정해진 DBD반응기 (반응기 내부 gap distance가 고정되어 있는 경우)의 면적 변화 또는 병렬 연결 운용시 기존의 최적화된 전원 장치를 재설계 및 추가 제작 단계를 간소화하기 위하여 DBD전원과 DBD 반응기 간의 임피던스 매칭 및 운전 조건 변화를 용이하게 하여 인가전압 대비 DBD 반응기 내부로 인가되는 방전 전류 극대화 방법에 관련하여 기술하였다.

DBD전원과 DBD반응기의 임피던스 매칭을 가장 큰 전원 장치의 설계 변수로 잡은 이유는 1-100kHz의 동작 주파수 영역을 지나는 AC전원 인가형 DBD전원의 경우, DBD 반응기와 고주파 변압기의 2차측 임피던스 값에 따라 공진 주파수가 존재하여 이 공진 주파수 대역에서 오존 발생량이 최대로 나타나는 특성이 존재하기 때문이다. DBD반응기의 임피던스 특성 및 변화를 예측하기 위해서 첫 번째로 2-port circuit matrix (2단자쌍 회로망 해석법)를 이용한 전기 모델링을 통하여 DBD 반응기에서 방전 개시 전/후의 임피던스 변화를 DBD 반응기 및 DBD 반응기 내부의 회로 모델링을 통하여 예측하였다.

임피던스 변화에 대한 DBD 반응기의 방전 현상에 있어서 가장 주요하게 변화되는 회로 정수 값은 기체 방전에 의한 커패시턴스 값의 변화로 예측했으며, 이 특정 커패시턴스 값의 변화 및 DBD 반응기의 회로 변화 값에 따른 임피던스 매칭을 유지시키기 위하여 상용 인버터 타입 DBD 전원 장치에서 공진형 DBD 전원 장치를 제시하였다.

논문에서 제안한 공진형 상용 DBD 전원 장치는 E class type 과 flying capacitor를 사용한 멀티레벨 LC타입 공진형 인버터로 부하의 임피던스 매칭 조건의 유지 이외에 추가적으로 스위칭 손실 및 동작 주파수 영역의 확대에도 목적을 두고 있다.

2. 실험 방법

2.1 DBD 반응기의 임피던스 특성

2.1.1 DBD 반응기의 임피던스 특성과 오존 발생량의 관계

그림 1은 본 실험에서 사용한 전형적인 AC파형 인

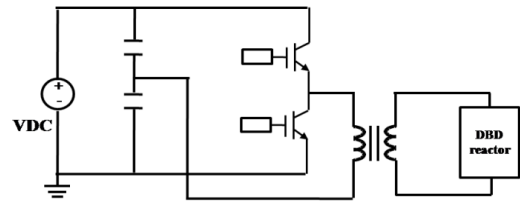


Fig. 1. Conventional AC power supply for Dielectric Barrier Discharging Reactor.

가용 DBD 전원 시스템을 보여주고 있다. 1-100kHz의 운전 동작 주파수로 1-4kV의 사인파형의 AC전원을 출력하며, 고주파 변압기는 1:20의 권선비를 지니고 있다. 따라서 고주파 변압기의 2차측 권선비 특성에 의한 인덕턴스 성분은 DBD반응기의 임피던스의 주요 값으로 영향을 미치며 DBD반응기 자체의 임피던스 성분 중 가장 주요한 값은 커패시턴스 성분으로 DBD반응기와 고주파 변압기의 2차측 권선비 특성에 따라 DBD 반응기의 공진 주파수가 결정된다. 그림1에서 제시한 바와 같이 AC전원의 측의 임피던스는 변압기 1차측의 인덕턴스 성분을 그리고 DBD반응기는 고주파 변압기의 2차 인덕턴스 성분을 가지고 있기 때문에, DBD반응기의 임피던스를 고려하기 위해서는 고주파 변압기의 특성을 고려해야 한다. 그림 2(a)는 고주파 변압기의 1차측 입력 전압 대비 2차측에 인가되는 출력 전압을 측정한 값으로 약 20kHz대역에서 가장 큰 전압이 인가되고 있는 것을 보여주고 있다. 이때 측정한 오존 발생량은 그림2(b)에서 제시한 바와 같이 공진주파수 대역 변화 주파수 내에서 최대를 기록하고 있다. 하지만, 공진주파수가 기체 방전이 없는 경우, 20kHz 주파수 근처에 측정되는데 비하여 최대 오존 발생량은 25kHz 근처에서 측정되는 것으로 측정됐으며, 이는 기체 방전에 의한 임피던스 변화에 의한 DBD 반응기 내부로 인가되는 방전 전류의 양이 차이가 나기 때문으로 판단되었다. 따라서 만약, DBD 반응기의 방전 면적 변화 및 DBD 반응기의 병렬 운전 등을 통한 오존 발생량 증대를 고려할 때, DBD 전원 장치와 DBD 반응기의 임피던스 매칭 조건을 유지시켜 준다면 추가적인 고주파 변압기 제작 및 전원의 재설계 없이 DBD전원의 보정이 가능할 것으로 판단된다.

또한 비선형 시변환 전기 회로 특성을 지니는 기체 방전 메커니즘에서 기존의 DC-DC, AC-DC 변환기법에서 사용되는 공진 회로의 개념에 의한 임피던스

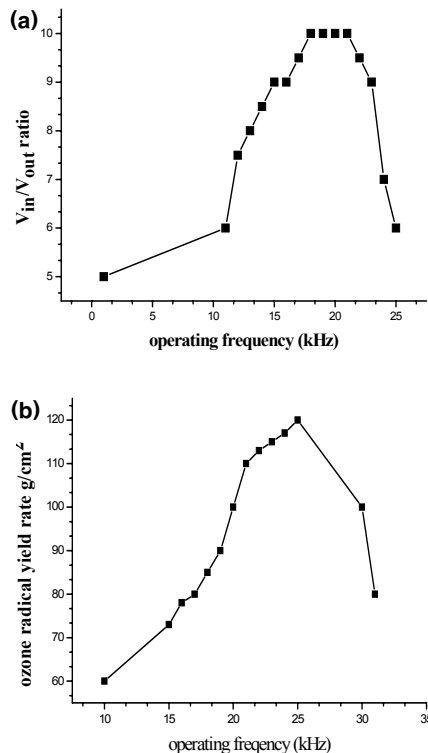


Fig. 2. characteristics on operating frequency of DBD power supply at the aspect of impedance and ozone yield rate (a) impedance characteristics of DBD reactor and secondary side of high frequency transformer while the operating frequency modulation (b) ozone yield rate characteristics while the operating frequency modulation.

매칭이 방전 효율의 향상에 영향을 주는 것으로 판단된다.

2.1.2 DBD 반응기의 기본 회로 모델링

그림 3은 본 실험에서 사용한 평판 타입의 DBD 반응기를 보여주고 있다. DBD 메커니즘을 사용하여 오존을 발생시키는 방법에 있어서 DBD 반응기의 형태는 크게 실린더 타입과 평판 타입이 사용된다. 실린더 타입의 DBD 반응기의 경우 DBD 반응기의 유전체 및 반응기를 비교적 쉽게 조정 가능하기 때문에 방전 전압을 효과적으로 증대시킬 수 있다. 하지만, 단일 실린더 타입 DBD 반응기는 많은 오존을 발생시키기에는 방전 면적이 작기 때문에, 평판 타입의 DBD 반응기가 동일 크기의 반응 면적에 있어서 비교적 오존 발생 측면에 있어서 효과적일 것으로 판단

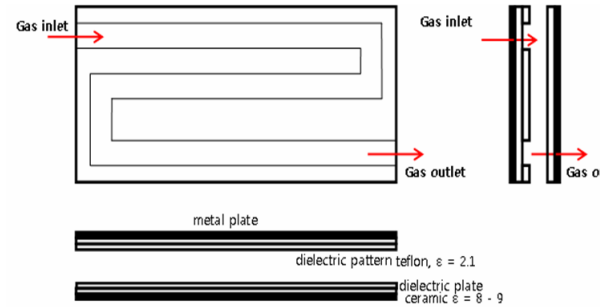


Fig. 3. Configuration of the planer type DBD reactor used in the paper.

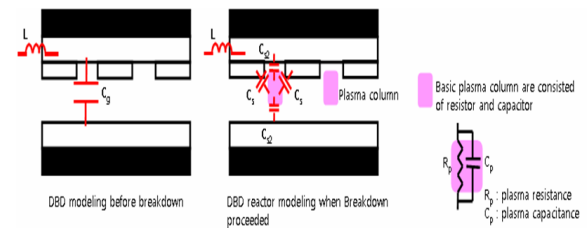


Fig. 4. Electrical characteristics of the DBD reactor

된다.

방전이 개시되기 직전 또는 pre-discharging phase에서 인덕턴스 (L)는 반응기의 면적으로 인해 나타나는 값이며, 반응기 내부에 제시된 커패시턴스 (C_g)는 반응기의 main gap distance로 인해 나타나는 회로 정수 값으로 이는 DBD 반응기의 주요한 회로 값으로 정의될 수 있다. 방전이 개시된 후에 안정 상태의 방전이 DBD 반응기 내부에 형성되면 sheath capacitance (C_s , C_{s2})가 형성된다. 안정 상태에서의 플라스마 column은 플라스마 커패시턴스 (C_p) 및 플라스마 레지스턴스 (R_p)의 조합으로 기술하였다.

그림 5는 방전 전후의 steady state discharging phase를 기술하기 위한 DBD 반응기의 회로 모델링이다. 본 연구는 방전 직전과 방전 이후의 안정 방전 상태에서의 임피던스 변화량을 기준으로 하여 DBD 전원 장치에서 임피던스 매칭을 유지하는 것을 목적으로 하고 있기 때문에, 과도 상태 동안 DBD 반응기에서 가장 크게 변화하는 회로 정수 값인 C_g 에서 C_s , C_{s2} 및 C_p 조합으로의 커패시턴스 변화 및 과도 방전 상태에서 안정 방전 상태로 전이 시 나타나는 레지스턴스 변화를 계산해야 한다. 위에 기술한 과도상태에서 커패시턴스 및 레지스턴스 변화량을 기술하기 위

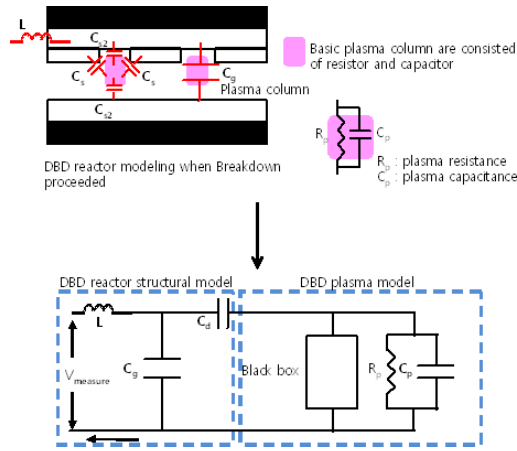


Fig. 5. Electrical modeling of the planar type DBD reactor.

해 black box를 넣어 새롭게 DBD 반응기 모델링을 개선하였다.

2.1.3 DBD 반응기의 정밀 회로 모델링

그림 5를 기반으로 하여 그림 1에서 제시한 power supply와 circuit components, DBD reactor 회로 모델링은 그림 6에서 제시되었다. 그림 6에서 제시된 전원 장치 블록 (circuit components block)은 실제로 고주파 변압기를 나타내며, 여기서 κ 는 유도결합계수 (coupling coefficient constant), n 은 N_1/N_2 의 턴 비율, L_p 는 1차측의 인덕턴스를 의미하며 전원 장치는 간단한 회로 분석을 위하여 $V_{input}(S)/I_{input}(S)$ 로 간략하게 표기하였다.

또한 C_p 와 C_p' 는 각각 방전 직전의 커패시턴스 및 steady state discharging phase에서의 커패시턴스를 의미한다. C_g 와 C_p 를 분리하여 각각 방전 직전의 커패시턴스 영향을 고려한 것은 gas의 압력에 의해 반응기의 커패시턴스 차이가 있기 때문이다. 내부의 플라즈마 column에 의한 플라즈마 커패시턴스 값을 기술하는 C_p' 값은 정확하게 정의할 수 없으며, C_g , C_p 의 영향에 따라 값이 결정되도록 설정되었다.

Black box로 표현된 방전 개시 전압에 대한 영향 및 transient discharging phase는 실제 그림 7에서 보여지는 것처럼 실험 파형의 $V_{input}(t)$ 대비 $V_{measure}(t)$ 를 측정하고 $V_{input}(S)$ 및 $V_{measure}(S)$ 로 변환하여 분석되었다.

그림 6에서 제시된 전압 파형 (a)와 (b)는 3 "kV" 정현파형을 1-30 "kHz" 영역에서 동작시키면서 평판형 DBD 반응기에서 공진 특성을 보여주는 동작 주

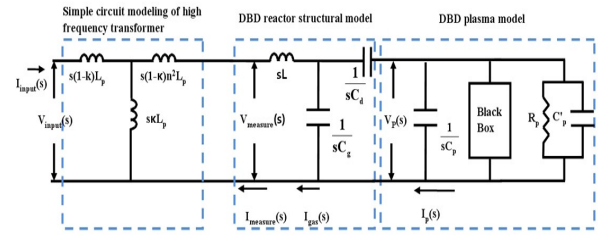


Fig. 6. An advanced electrical modeling of the DBD reactor

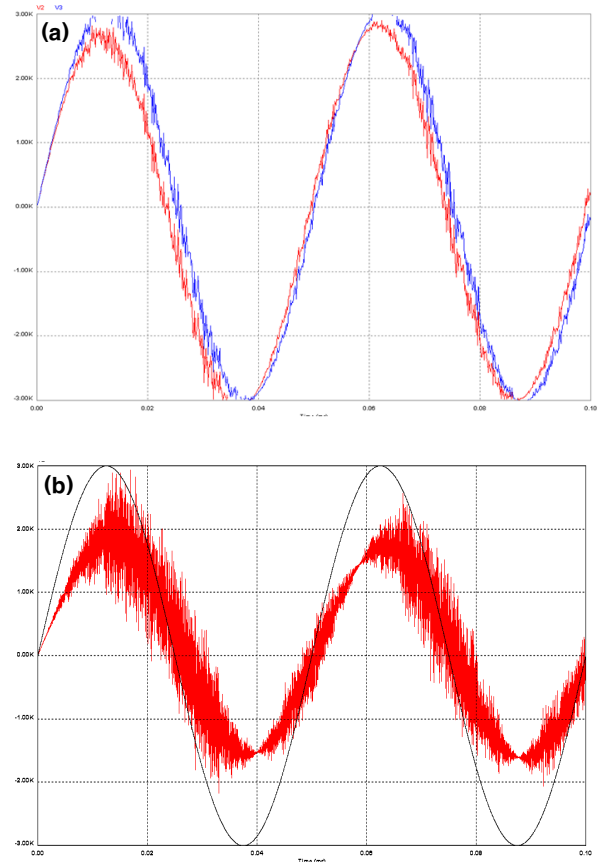


Fig. 7. Wave differences between $V_{input}(t)$ and $V_{measure}(t)$ (a) before and (b) after breakdown.

파수 조건에서 비교되었으며, 공진 주파수에서 inlet gas pressure를 조정하여 측정한 데이터이다.

그림 6 (a)에서 얻어진 DBD 반응기의 main gap capacitance (C_g) 및 dielectric component에 의하여 나타나는 capacitance (C_d)는 0.5 duty rate, 25 "kHz"의 정현파형에 대하여 2 "L/min"의 가스 입력 시 각각 300 "pF" 및 22 "pF" 근방의 값을 지니는 것으로

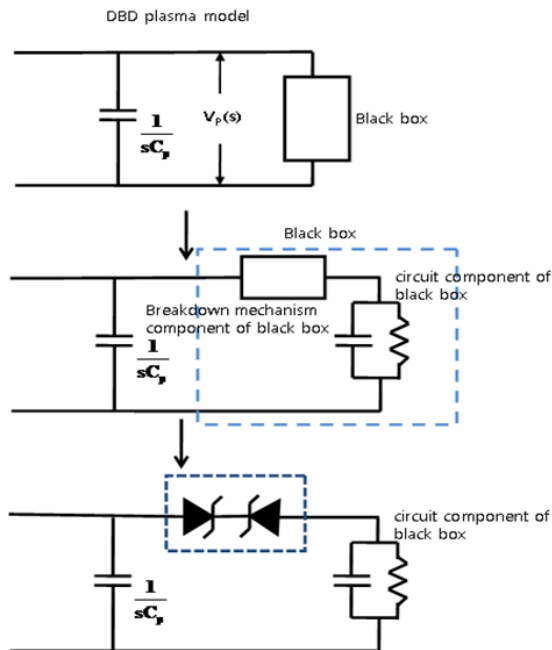


Fig. 8. Detailed modeling of the black box.

계산되었다.

플라즈마 전압 및 전류를 의미하는 $V_p(s)$ 및 $I_p(s)$ 를 $V_{\text{measure}}(s)/I_{\text{measure}}(s)$ 에서 분리하여 계산하기 위해서는 방전 개시 전압 및 방전에 의한 전압 강하 특성에 관련한 데이터가 필요하며, 이때 전압 강하 전/후에 대한 커패시턴스 변화량에 대하여 충분한 해석이 필요하다는 점이 그림 7 (b)에 근거하여 나타나고 있다. 인가 전압에 의한 방전 개시 현상을 기술하기 위하여 사용된 black box는 과도 상태에서 레지스턴스 변화를 보여주는 기존의 연구에 근거하여 두 개의 제너 다이오드의 집합으로 표기하였으며 [5-7], 안정 방전 상태에서의 제너 레지스턴스는 매우 작아 플라즈마 레지스턴스 (R_p)에 큰 영향을 미치지 못한다고 판단하였다.

그림 6 및 7의 결과를 기반으로 하여 구성된 black box는 그림 8과 같이 제너 다이오드로 구성되는 회로로 제작하였으며, 이는 방전 직전 및 안정 방전 상태로의 전이 전후만을 기술하도록 구성하였다. 구성된 회로 모델은 DBD 전원 장치에서 방전 전후의 DBD 반응기의 레지스턴스 및 커패시턴스의 변화량의 정도를 예측하여 방전 전후 단계에서 DBD 반응기와 전원장치 사이의 임피던스 매칭을 유지하도록 하는 모델로는 효과적으로 판단된다.

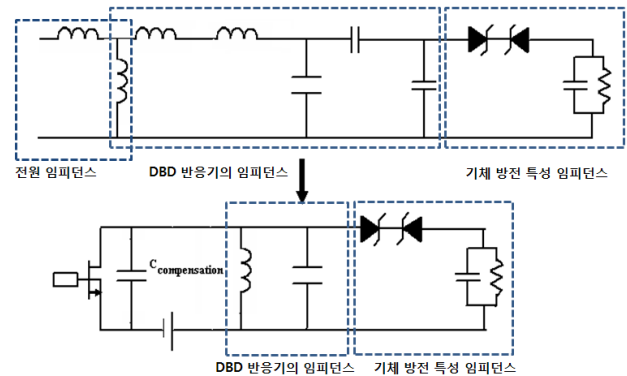


Fig. 9. Equivalent circuit modeling of DBD system.

2.2 DBD용 전원 장치의 설계 및 비교

2.2.1 DBD 반응기의 임피던스 변화량 및 전원에서의 영향

그림 9는 2장에서 제시한 2단자쌍 회로망 분석기법을 이용한 실제 DBD 반응기의 회로 모델과 전원과의 연계를 보여주고 있다. 여기서, DBD 전원 장치를 설계 시 세가지 핵심 변인이 존재하는데 하나는 전원단에 사용한 고주파 변압기의 인덕턴스 성분 특성, DBD반응기의 고유 임피던스 성분, 그리고 기체 방전으로 인하여 급격하게 변화하는 레지스턴스 성분과 커패시턴스 성분이다.

전원단에서 사용한 고주파 변압기의 1차측 권선 및 mutual inductance성분에 의한 인덕턴스 성분은 전원의 임피던스 특성으로 결정되며, DBD반응기의 임피던스 성분은 고주파 변압기의 2차측 권선 및 mutual inductance 성분을 포함하며 이는 회로 합성을 통하여 그림 9에서 보여지는 바와 같이 병렬 LC 컴포넌트로 해석이 가능하다. 이때 병렬 LC 컴포넌트의 고유 Q값에 일치하는 공진 주파수로 AC전원을 인가한다면, 실제적으로 전원과 고주파 변압기 그리고 DBD 반응기 임피던스 성분에 의한 에너지 손실은 최저로 평가할 수 있기 때문에, 인가 전압에 의한 기체 부하 특성 임피던스로 흐르는 전류량은 최대로 계산된다. 따라서, 기체 부하 특성 임피던스의 커패시턴스 또는 레지스턴스 변화에 의한 임피던스 보상이 부분적으로 가능하다면 인가 전압 대비 방전 전류량을 효과적으로 증가시켜 더 높은 오존 발생량을 얻을 수 있는 가능성이 있다.

2.2.2 DBD 반응기의 임피던스 변화의 보상 방법 제안

3.1에서 제안한 바와 같이 일정 임피던스 특성을 보여주는 전원과 DBD반응기의 고유 임피던스는 LC 공진 방법을 사용하여 임피던스 매칭이 가능하며 이때 인가 전압 대비 전류는 가장 효과적일 것으로 판단된다. 그림 9에서 제시한바와 같이 Pre-discharging phase에서 DBD system은 간단한 인덕턴스와 커패시터의 조합으로 모델링이 가능하지만, 방전이 개시된 이후 R_p 및 C_p 와 C_p' 의 급격한 변화로 인하여 임피던스 매칭이 이루어지지 않는다. 이에 관련하여, 반응기와 전원 장치에서 반응 전후의 임피던스를 유지하기 위해서는 커패시턴스 값의 급격한 변화를 보상시켜주는 것이 가장 큰 핵심으로 판단할 수 있다.

그림 9와 10에서 보여 지는 바와 같이 $C_{compensation}$ 이라는 커패시턴스 성분을 전원 장치에 인가하여 방전 개시 후 반응기의 커패시턴스 값과 전원 장치의 커패시턴스 성분의 값을 일치시켜 반응기와 전원 장치간의 임피던스를 매칭시키는 방법을 제시하였다.

그림 10 (a)에서 보여지는 DBD 전원 장치는 Series Resonant Circuit (SRC)방식으로 고주파 변압기의 1차 측의 스위치와 연동하여 $C_{compensation}$ 을 사용하는 방법이다 [8]. 이 전원 장치는 E class resonant 방식 전원장치 원리를 이용했으며, 커패시턴스 성분 보상을 맞추는 Q factor는 단일 스위치 사용으로 인하여 한계가 있다. 따라서 그림 10 (b)와 같은 flying capacitor를 사용하는 DBD 전원 장치를 또한 제시하였으며, 이 DBD 전원 장치는 multi-level LC resonant inverter [9]와 비슷한 구조를 지니고 있다. 두 전원 장치 모두 동작 원리는 참고문헌 [9]의 원리를 이용하여 동작하도록 고안되어있다.

커패시턴스 값 $C_{compensation}$ 은 방전 전후의 C_g 값과 C_p , C_p' 의 합성 값 사이의 커패시턴스 값이 사용되었으며, 방전 실험에 따른 오존 발생량의 측정에 따라 $C_{compensation}$ 값을 조정하였다.

3. 결과 및 검토

그림 10는 그림 8과 9에서 고안한 DBD 반응기의 임피던스 변화를 보상하는 DBD 전원 장치로 V_E 는 Class E type의 전원 장치의 파형을, V_F 는 플라잉 커패시터를 사용하여 DBD 반응기에 인가한 파형을 보여주고 있다.

두 파형 모두 기준 파형으로 설정한 정현 전압 입력 파형과 비교하여 방전 시 나타나는 전압 파형의

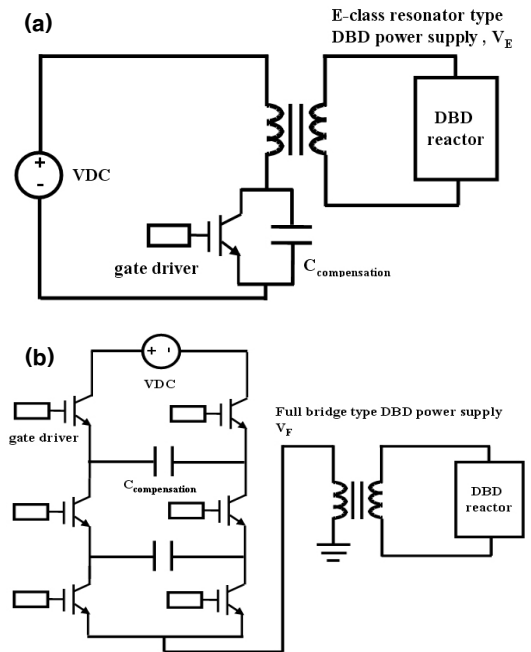


Fig. 10. DBD power supply to compensate the capacitance of the DBD reactor; (a) Class E type of resonant power supply (b) Multi-level LC resonant type of DBD power supply with flying capacitor.

페이즈 보정 및 플라즈마 레지스턴스에 의한 전압 강하 측면에서 보상 방법을 사용하지 않은 방전 파형을 나타낸 그림 6(b)에 비해 향상된 임피던스 매칭 특성을 보여주고 있다.

따라서 두 전원 장치 모두 임피던스 매칭에는 효율적으로 판단되었으나, 결과적으로 2 “L/min”의 가스 입력, 25 “kHz”의 동작주파수, 3 “kV”의 정현파형 입력 방전 조건에서 커패시턴스 보상을 사용하지 않는 전원 장치를 사용했을 경우 120 “g/cm³”의 오존 발생량을 측정하는데 비하여, 그림 8에서 제시된 두 가지 방식의 전원 장치 모두 오존 발생량 부분에 있어서 15~20 “%” 정도의 향상이 있었음을 측정하였다.

이는 전원 장치와 DBD 반응기 사이의 임피던스 매칭으로 인한 최대 에너지 전달 방법이 오존 발생량과 직접적으로 밀접하게 연관되어 있지 않음을 의미한다. 따라서 오존 발생량을 효과적으로 증대시키기 위해서는 electron temperature를 효과적으로 높일 수 있는 또 다른 연구가 필요할 것으로 판단된다.

이에 관련하여 AC전원 사용 시 electron temperature (전자 운동 에너지)를 선별적으로 높여주는 방법은

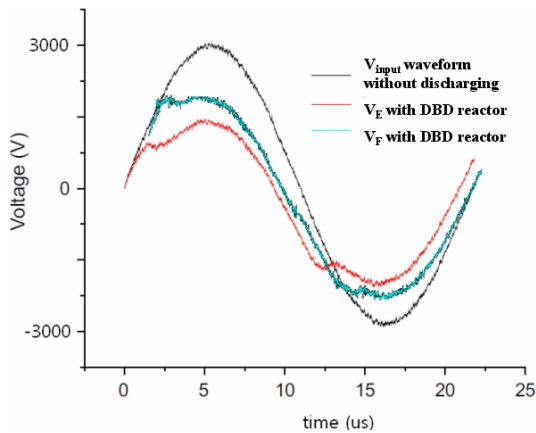


Fig. 11. Applied voltage waveform comparison between compensation methods in the DBD power supply as shown in Fig. 10

존재하지 않기 때문에, Sinsodual AC전원을 사용하는 DBD 전원 장치에서 최적의 오존 발생량을 제공하는 방법은 실제적으로 임피던스 매칭 조건 하에 인가 전압 대비 DBD 반응기에 흐르는 전류 값을 최대한 맞춰주는 방법이 가장 효과적이다.

본 논문에서 제시한 전원 장치를 사용할 경우, 특정 DBD 반응기의 임피던스 특성에 최적화된 DBD 전원 장치를 DBD반응기의 방전 면적 및 운전 조건을 변환하여 사용 시, DBD전원 장치와 고주파 변압기의 재설계 및 추가 제작 단계 없이 DBD반응기 임피던스 변화를 LC공진형 인버터 타입을 사용하여 전원과 DBD 반응기의 임피던스를 보상이 가능하며, 전원 자체는 soft switching이 가능하기 때문에 상용 AC전원에 비하여 넓은 동작 주파수 영역에서 동작시킬 수 있는 장점이 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 오존 발생용 DBD 전원 장치 중 전원 장치에서 DBD 반응기로의 효과적인 방전 에너지 공급 및 DBD반응기의 운전 변동 시 DBD 전원 장치의 개선 및 설계 방법을 제안하였다. 정현 입력 전압을 사용하는 DBD 전원 장치는 특정 공진 주파수에서 오존 발생량이 증가하기 때문에 DBD의 전원 장치와 DBD 반응기의 임피던스 매칭을 방전 전후에 유지시켜 인가 전압 대비 DBD 반응기에 흐르는 전류를 최대한 맞춰주고자 DBD 반응기의 임피던스 및

전원 장치의 임피던스를 평가하기 위한 모델링을 1차적으로 수행하였다.

따라서 DBD 반응기의 방전 전후 모델링을 통하여 DBD 전원 장치에서 보상 방법을 제시하였으며, 실험 파형의 비교에 있어서 class E type과 flying capacitance를 사용하는 resonant inverter 방식은 모두 LC공진 특성을 이용하여 DBD 반응기와 DBD전원 간의 임피던스 매칭이 유지도록 설계 되었다. 기존의 LC 공진형 전원 장치와 비교하여 가장 큰 특징은 추가적으로 DBD반응기 내부의 임피던스 성분 중 커패시턴스 변화량에 관련하여 $C_{compensation}$ 을 고안하여 기체 방전/전후에 있어서 DBD반응기 내부의 급격한 임피던스 변화를 보상하도록 제안하였다.

상용전원과 동일 운전 조건에서 간단한 전원의 추가회로를 통하여 향상된 오존 발생량을 보여주고 있으나, 획기적인 오존 발생량 특성은 보여지지 않고 있다. 하지만, DBD 반응기의 변화 및 DBD반응기의 운전 조건 변화에 의한 DBD 전원의 최적설계에 있어서 논문에서 제시한 방법은 추가적인 전원의 재설계 및 제작이 필요없이 간단한 조정으로 인가 전압 대비 최적 방전 전류를 DBD 반응기에 투입이 가능하기 때문에, AC전원을 사용하는 DBD 전원의 설계에 있어서 매우 효과적으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] J. Lam, and P. K. Jain, *IEEE PESC' 06 Conference*, (Jeju, Korea, 2006) p. 1.
- [2] J. M. Alonso, J. García, A. J. Calleja, J. Ribas, and J. Cardesín, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **41**, 1364 (2005).
- [3] K. Yan, T. Yamamoto, S. Kanazawa, T. Ohkubo, Y. Nomoto, and J. C. Chang, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **37**, 1499 (2001).
- [4] J. S. Chang, K. Urashima and M. Arquilla, *T Ito, Combust. Sci. and Tech.*, **133**, 31 (1998).
- [5] J. Park, I. Hennins, H. W. Herrmann, G. S. Selwyn, J. Y. Jeong, R. F. Hicks, D. Shim, and C. S. Chang, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 288 (2000).
- [6] B. Eliasson, and U. Kogelschatz, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **19**, 309 (1991).
- [7] K. Yoshinaga, S. Okada, D. Wang, T. Namihira, S. Katsuki, and H. Akiyama, *the 2nd Euro-Asian Pulsed Power Conference*, (Vilnius, Lithuania, 2008) p. 1050.
- [8] Marian Kazimierzczuk, *IEEE Journal of Solid state circuit*, **SC-18**, 214 (1983).
- [9] M. Weber, T. Nitsch, S. Clutterbuck and G. Lindsay, University of Victoria, July 28, 2006.