

정전 용량변화에 따른 대기압 DBD 반응기의 동작 특성 연구

박봉경 · 김윤환 · 장봉철 · 조정현 · 김곤호†

한양대학교 과학기술대학 응용물리전공
(논문접수일 : 2001년 8월 31일)

The operation properties of DBD reactors in air pressure with varying the capacitance of reactors

Bong-Kyoung Park, Yun-Hwan Kim, Bong-Chul Jang, Jung-Hyun Cho, and Gon-Ho Kim†

Department of Physics, Hanyang University
(Received August 31, 2001)

요 약

논문에서는 원통형 및 평판형 반응기에 20 kV의 사각파형 펄스전원을 인가하여 대기압 절연막 방전 플라즈마 반응기의 동작특성을 관찰하였다. 전류-전압파형과 하전량-전압곡선을 관찰한 결과 반응기의 정전용량 크기에 따라서 최적의 운전효율을 갖는 최적운전주파수 f_o 가 $f_o \propto \exp(-C)$ 의 관계를 갖고 있음을 알았다. 이 관계를 이용하여 반응기에서 소실되는 소모전력을 구하였다. 반응기의 소모전력은 반응기의 구조와 전극의 유전물질의 종류 등의 함수인 반응기 정전용량 값에 따라서 변화하였으며 반응기의 특정한 정전용량 값에서 최대값을 가졌다. 이 정전용량 값을 이용하여 최적효율을 갖는 DBD 반응기를 설계할 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract

The operation properties of DBD plasma reactors were observed by using 20 kV square pulse at the cylindrical and planar type of reactors in the condition of air pressure. The optimum operation frequency f_o which optimizes the efficiency of operation was found as such $f_o \propto \exp(-C)$ when the current-voltage curve and charge-voltage curve were observed. Using these properties the dissipated power was evaluated. The dissipated power at the optimum frequency of operation was varied as the value of capacitance which is dependent on the structure and the dielectric material of the reactor, and had the maximum value at the specific value of capacitance. With these value of capacitance, DBD reactors which has a high level of efficiency can be formed.

1. 서 론

오존의 발생기 등으로 광범위하게 이용되고있는 DBD(Dielectric Barrier Discharge ; 절연막 방전)는 1857년 Von Siemen [1]에 의해 처음 개발되었다. DBD는 대기압 조건에서 두 개의 전극사이에 유전체를

삽입하여 고전압 펄스로 인한 아크방전을 억제하고 유전체 전극에서 형성되는 벽전하(표면전하)의 충전과 방전을 이용하여 플라즈마를 발생시키는 장치이다. 인가된 고전압펄스의 처음 반사이클 동안에는 유전체 전극에서 형성되는 전기장과 전극사이에 서 형성되는 전기장에 의해서 절연체의 벽전하가

† E-mail : ghkim@bohr.hanyang.ac.kr

충전된다. 그 다음 반사이클 동안에는 전극사이의 전기장과 벽전하에 의해 형성된 전기장의 위상이 일치하여 전극사이의 전기장 세기는 증가하여 전극간의 방전 전기장의 크기가 충족되면 절연과파괴가 일어나 micro-discharge 스트리머를 형성한다. 따라서 DBD 반응기에서는 각 주기에 한번씩 micro-discharge 스트리머가 전극판 사이에서 전 범위에 걸쳐 발생되며, 방전특성은 반응기의 유전체 특성, 입력 주파수에 영향을 받게 된다 [2]. 일반적인 micro-discharge는 2~3 ns의 수명을 가지며, 약 10^{14} cm^{-3} 정도의 전자밀도와 약 4~5 eV의 전자온도를 가진다고 알려져 있다 [3].

Manley [4]와 Kuchler [5]는 그림 1과 같이 DBD 반응기에 인가된 전압에 따라 하전되는 전하량의 변화(Q-V Lissajou)를 관찰하여 반응기의 소모에너지와 소모전력을 측정하였으며, 소모전력은 반응기를 구성하는 유전물질의 정전용량과 반응기에 인가된 주파수에 선형적으로 비례함을 보였다.

특히 Manley는 Q-V Lissajou의 곡선을 평행사변형이라 가정하여 반응기에서 소모된 에너지를 계산하였으며 이때 반응기의 소모에너지를 식 (1)과 같이 나타내었다 [4-5].

$$E = 4C_g V_0 \left(V_m - \left(\frac{C_a + C_g}{C_g} \right) V_0 \right) \quad (1)$$

여기서 C_g 는 반응기를 구성하는 절연물질의 정전용량이고 C_a 는 반응기의 전극간에 존재하는 공기의 정전용량을 나타낸다. 또 V_0 는 절연과파괴전압이고 V_m 은 최대 인가전압을 나타내며 이 값들은 각각 그림 1의 Q-V Lissajou에서 곡선에 나타내었다. 또한 그림 1의 AB와 CD구간은 방전이 일어나지 않는 구간으로 이에 해당하는 각각의 기울기는 C_a 와 C_g 를 포함한 반응기의 총 정전용량 C_T 를 나타낸다. 그림에서의 AC와 BD구간은 방전이 일어나는 구간으로서 AC와 BD의 기울기는 공기의 절연과파괴가 일어나 전기전도도가 높은 플라즈마가 발생되어 공간내의 유전값이 없고 반응기를 구성하는 절연물질만으로 구성된 정전용량 C_g 에 해당된다고 가정하였다.

반응기의 소모전력은 식 (1)을 이용하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

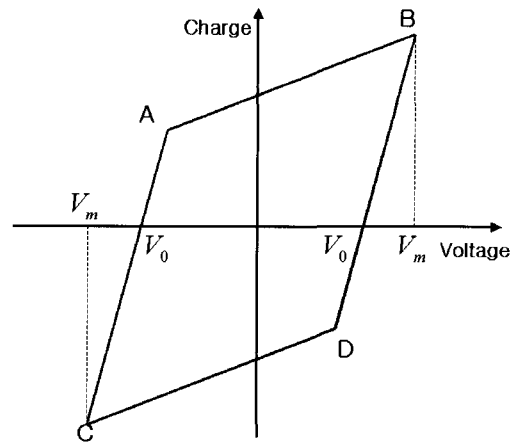


그림 1. Q-V Lissajou figure

AB, CD영역은 방전이 일어나지 않는 구간으로 각각의 기울기는 공기와 유전물질의 정전용량이고, AC와 BD영역은 방전이 일어나는 구간으로 AC와 BD의 기울기는 유전물질만의 정전용량이 된다. V_m 은 최대 인가전압이고, V_0 는 공기의 절연과파괴 전압이다.

$$W = 4fC_g V_0 \left(V_m - \left(\frac{C_a + C_g}{C_g} \right) V_0 \right) \quad (2)$$

여기서 f 는 반응기에 인가된 전압의 주파수를 나타낸다. 식 (2)를 통해서 반응기내에서의 소모전력은 주파수와 반응기를 구성하는 유전물질의 정전용량에 비례함을 알 수 있다. 하지만 DBD 반응기는 유전체 전하의 충전과 방전에 의해 동작하므로 반응기의 유전용량을 결정짓는 유전체 전하량은 반응기의 최적 운전주파수에 영향을 주기 때문에 운전주파수와 반응기의 정전용량은 서로 독립적인 인자가 될 수 없다. 따라서 반응기에서 소모되는 전력은 반응기를 구성하는 유전물질의 종류와 반응기의 구조 등에 의해 영향을 받게 될 것이다.

반응기의 정전용량과 운전주파수 및 소모되는 전력간의 관계를 연구하기 위해서 본 연구에서는 반응기를 구성하는 유전체 전극의 유전용량 및 전극간 유전용량의 변화에 따른 운전 주파수의 특성 변화를 전류-전압파형과 Q-V Lissajou를 이용하여 관찰하였다. 또한 이들 결과로부터 반응기에서 소모된 에너지와 전력 값을 측정하고 이 값을 이론값과 비교 분석하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 DBD 반응기를 병렬로 연결하여 일정한 절연과파괴전압 V_0

를 가지면서 C_g 와 C_a 가 동시에 변하는 조건을 갖는 원통형 반응기와 전극사이의 간격을 조절하여 V_0 와 C_a 가 동시에 변하고 일정한 C_g 를 유지하는 조건을 갖는 평판형 반응기를 구성하여, 각각의 조건으로부터 정전용량의 변화에 따른 최적의 방전효율을 갖는 특성 주파수를 찾는 연구를 진행하고, 전류-전압 파형과 Q-V Lissajou를 사용하여 식 (2)에 해당하는 각각의 인자를 관찰하였다. 여기서 얻은 인자들을 이용하여 반응기의 소모에너지와 소모전력을 측정하고 반응기의 정전용량과 소모전력의 관계를 관찰하였다.

2. 실험 장치 및 조건

본 실험의 실험장치 구성은 그림 2와 같다. 입력 전원은 Function Generator의 10 V 펄스신호를 2000배 증폭시켜서 20 kV, 20 mA의 전원을 제공하는 Trek사의 20/20 C High Voltage Amplifier를 사용하였으며 Oscilloscope를 사용하여 반응기에 인가된 전류와 전압 파형을 측정하였다. 주파수를 100 Hz에서 2 kHz까지 변화시키면서 운전주파수에 따른 DBD 반응기의 인자들을 관찰하였다. 10~100 kΩ의 가변저항과 0.01 μF의 정전용량의 캐패시터를 사용한 OP-Amp 적분기를 사용하여 전압에 따른 반응기에 하전되는 전하량의 변화를 관찰하였다.

본 연구에서 사용한 평판형 DBD 반응기는 전극사이의 간격을 임의로 조절할 수 있어 V_0 와 C_a 가 동시에 변하고 일정한 C_g 를 유지하는 조건을 가질 수 있도록 구성하였다. 평판형 반응기의 구성요소

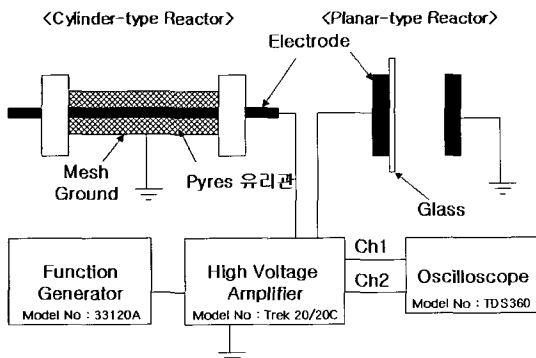


그림 2. 반응기의 구성도.

는 지름 100 φ인 스테레스를 사용하였고 평판을 감싸고 있는 절연체는 두께가 2 mm인 유리를 사용하였다. 또한 본 연구에서 사용된 원통형 반응기는 반응기의 전극간의 간격을 일정하게 유지하여 일정한 절연과피 전압 V_0 를 갖도록 하였으며, 이들 반응기를 1개에서 4개까지 병렬로 연결하여 C_g 와 C_a 를 동시에 변하는 조건을 갖도록 구성하였다. 또한 원통형 DBD반응기는 지름 6 mm에 길이 150 mm의 stainless electrode와 외경 22.4 mm, 내경 20 mm에 길이 150 mm인 원통형 pyrex를 유전물질로 사용하였고, 이를 테플론으로 고정시켰다. pyrex 둘레는 6 mm × 4 mm의 마름모 형태의 알루미늄 mesh로 둘러싸은 후 접지 시켰다.

반응기의 정전용량은 반응기의 형태 및 유전체 물질의 특성과 관계되며 이는 DBD 반응기의 운전 특성에 영향을 미치게 된다. 평판형 반응기의 유전용량은 다음과 같이 나타낼 수 있다 [6].

$$C = \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (3)$$

이며, 여기서 $\epsilon_r = k\epsilon_0$ 이고,

$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} C^2/N^2m^2$, k 는 유전물질의 상대 유전상수, A 는 전극 평판의 면적, d 는 전극간의 거리이다. 또한 원통형 반응기의 정전용량은 [6]

$$C = \frac{2\pi\epsilon_r l}{\ln(r_2/r_1)} \quad (4)$$

이며 l 은 반응기의 길이, r_1 은 전극의 외부반지름, r_2 는 pyrex유리관의 내부 반지름을 나타낸다. 식 (3)과 (4)를 이용하여 반응기의 전극간의 정전용량 C_a 와 유전체의 정전용량 C_g 를 계산할 수 있으며 Manley에 의하면 DBD의 C_a 와 C_g 는 직렬로 연결된 회로로 가정하고 반응기의 총 정전용량 C_T 는 식 (5)와 같이 나타내었다 [4].

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_a} + \frac{1}{C_g} \quad (5)$$

또한 반응기의 유전체 전극의 정전용량 C_g 의 값

을 분석하기 위해서는 유전물질의 상대유전상수에 대한 정확한 값을 필요로 한다. 이를 위하여 그림 3과 같은 LC 공진회로를 사용하여 공진 주파수를 얻어 식 (6)으로부터 유전물질의 정전용량을 구하고 식 (3) 과 식 (4)를 사용하여 유전상수를 구하였다 [7].

$$C[\mu F] = \frac{2.54 \times 10^4}{f[kHz]^2 \times L[\mu H]} \quad (6)$$

평판형 반응기에 사용된 유리의 경우, 유리의 구성 성분에 따라서 상대유전상수가 4~9라고 [8] 알려져 있으나 본 실험에서 사용된 유리의 구성성분을 알 수 없어 그림 3과 같은 실험에서 측정할 결과 공진 주파수 $f=8.3 MHz$ 를 측정할 수 있었으며 식 (6)을 이용하여 유리의 상대유전상수는 10.9를 얻었고 이 값을 평판형 반응기의 결과해석에 사용하였다. 원통형 반응기의 경우, 공진 주파 $f=9.7 MHz$ 로 이 값으로 구해진 반응기에서 사용된 유전체 전극 pyrex의 상대유전상수는 4.78 이었다. 이 값은 기존

에 알려진 pyrex의 상대유전상수의 값인 4.81과 [8] 유사하여 본 연구에서는 원통형 반응기의 경우 상대유전상수를 4.81을 사용하였다.

평판형 반응기는 유리전극의 면적을 일정하게 유지시켜 C_g 는 0.363 nF의 일정한 값을 갖도록 하였으며, 전극간 거리를 2.1 mm, 3.5 mm, 4.2 mm, 5.2 mm로 조절하여 C_a 를 33.0 pF, 19.8 pF, 16.5 pF, 13.3 pF으로 각각 변화시켰으며, 절연파괴전압도 전극변화에 따라 변화되어 각각 6.7 kV, 10.6 kV, 12.7 kV, 15.6 kV의 값을 가졌다. 또한 원통형 반응기는 반응기의 개수를 1개에서 4개까지 병렬로 연결하여 절연 파괴전압을 약 13.5 kV로 일정하게 유지시키면서 C_a 를 7.14 pF, 13.95 pF, 20.89 pF, 27.84 pF으로 C_g 를 0.36 nF, 0.61 nF, 0.96 nF, 1.23 nF으로 C_a 와 C_g 를 동시에 변화시키며 반응기의 정전용량에 대한 운전 특성을 관찰하였다. 평판형과 원통형 반응기의 정전용량과 절연파괴전압 등을 각각 표 1과 2에 정리하였다.

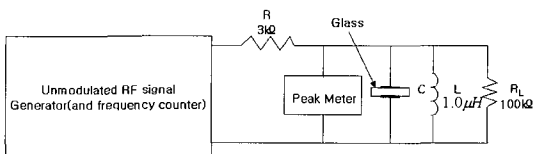


그림 3. 유전물질의 상대유전상수를 측정하기 위한 LC공진회로도.

4. 실험 결과 및 고찰

그림 4는 반응기에 20kV의 사각파 펄스를 인가했을 때 주파수의 변화에 따른 전류 및 전압 파형의 특성을 나타낸 것으로 원통형 및 평판형 모두 동일한 형태의 파형을 얻을 수 있었다. 그림 4(a)는

표 1. 평판형 반응기에서 정전용량의 계산값과 측정값.

전극간거리 [mm]	C_a [pF] (측정값)	C_a [pF] (계산값)	C_g [nF] (측정값)	C_g [nF] (계산값)	C_r [pF] (측정값)	C_r [pF] (계산값)	f_0 [Hz]	V_0 [kV]	V_m [kV]
2.1	36.2	33.0	0.434	0.363	33.3	30.22	800	6.5	20.05
3.5	23.6	19.8	0.434	0.363	22.4	18.77	1000	10.6	20.05
4.2	19.8	16.5	0.434	0.363	18.9	15.78	1300	12.7	20.05
5.2	18.6	13.3	0.434	0.363	17.8	12.83	1700	15.6	20.05

표 2. 원통형 반응기에서 정전용량의 계산값과 측정값.

반응기의 개수	C_a [pF] (측정값)	C_a [pF] (계산값)	C_g [nF] (측정값)	C_g [nF] (계산값)	C_r [pF] (측정값)	C_r [pF] (계산값)	f_0 [Hz]	V_0 [kV]	V_m [kV]
1	7.14	6.9	0.36	0.27	7.0	6.73	1500	13	20.05
2	13.95	13.8	0.61	0.54	13.64	13.46	1100	13.2	20.05
3	20.89	20.7	0.96	0.81	20.45	20.19	800	14	20.05
4	27.84	27.6	1.23	1.08	27.2	26.92	600	13.5	20.05

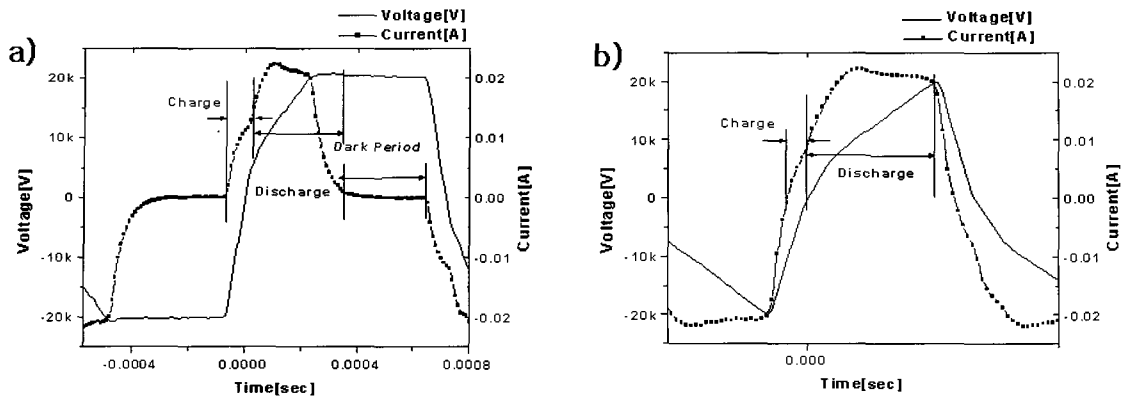


그림 4. 원통형 반응기의 주파수 변화에 따른 전류 및 전압 파형

- a) 1개의 반응기에 700 Hz의 펄스를 인가했을 때의 전류 및 전압 파형. 충전, 방전이 일어나지 않는 dark period가 존재함을 관찰할 수 있다.
- b) 1개의 반응기에 1.5 kHz의 펄스를 인가했을 때의 전류 및 전압 파형. 700 Hz의 주파수 범위에서 볼 수 있었던 dark-period영역이 최대한 줄어들었음을 관찰할 수 있다.

원통형 반응기에 700 Hz의 주파수를 인가시켰을 때의 전류 및 전압 파형으로서 반응기에 벽전하가 축적되는 충전(charge)영역과 축적된 전하를 방전시키는 방전(discharge) 영역 그리고 전압이 인가되었음에도 불구하고 충전과 방전이 일어나지 않는 dark period 영역으로 나눌 수 있다. Charge 영역이후 방전이 일어나면서 시간에 대한 전류와 전압곡선의 기울기가 변하며 절연과피가 완전하게 일어나고 전류의 값이 최대가 되어 충전된 전하를 소모하는 동안 방전이 유지된다. 방전 후 dark period는 전압은 인가되지만 전류가 흐르지 않는 구간으로 반응기의 운전효율의 감소요인이 된다. 그림 4(b)는 반응기에 1.5 kHz의 주파수를 인가하였을 때의 전류 및 전압 파형을 나타낸 것으로 충전과 방전이 일어나는 구간은 보이나 dark period영역이 없는 경우이다. 이때는 dark period가 시작되기 전에 다시 전극의 유전체에 충전이 시작되어 다음 방전이 시간지연 없이 인가전압에 따라 형성되고 있음을 보여준다. 따라서 반응기 형태 및 정전용량 값이 정해지면 운전 주파수를 변화시켜 dark period 영역을 최소화하여 반응기의 운전효율을 극대화시킬 수 있다. 본 논문에서는 이때의 주파수를 반응기 최적 운전주파수 f_o (Optimum Frequency)라 정의하였다.

그림 5(a)는 1개의 원통형 반응기에서 운전 주파수의 변화에 따른 Q-V Lissajou를 나타낸 것이고 이

곡선의 면적은 반응기의 소모에너지에 해당한다. 그림 5(b)는 주파수 변화에 대한 소모전력과 에너지를 나타낸 것이다. 그림 5(a)를 보면 운전주파수 $f=1.1$ kHz와 1.3 kHz에서 Q-V Lissajou의 면적은 거의 일정하였고 이는 반응기의 소모에너지는 거의 일정함을 나타낸다. $f=1.5$ kHz보다 큰 주파수 영역에서는 Q-V Lissajou의 면적이 점차 줄어들며 따라서 반응기의 소모에너지가 감소함을 알 수 있다. 그림 5(b)는 그림 5(a)의 결과를 정리한 것이다. 운전주파수 1.5 kHz보다 작은 주파수 영역에서는 반응기에서 소모되는 에너지는 약 0.15 J로 일정하게 유지되고 있으며 소모되는 전력은 주파수의 크기에 비례하여 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 그림에 나타낸 실선은 전력이 선형적으로 증가함을 보여준다. 그러나 1.5 kHz이상의 주파수 영역에서는 소모 에너지와 소모전력 모두 선형적으로 감소하였고(그림내의 실선 참조), 두 개의 실선이 만나는 지점의 주파수를 최적 운전주파수 f_o 라 선택하였으며, 이 그림의 경우 $f_o=1.5$ kHz이다. 따라서 최적 운전주파수보다 작은 주파수영역에서 반응기의 소모전력은 식 (1)과 같이 주파수의 크기에 비례하여 증가하였으나 최적 운전주파수보다 큰 주파수 영역에서는 오히려 작아지는 것을 관찰할 수 있었다.

그림 6은 원통형 반응기에서 반응기의 정전용량 C_T 에 따른 최적 운전주파수에서 반응기의 전류 및 전

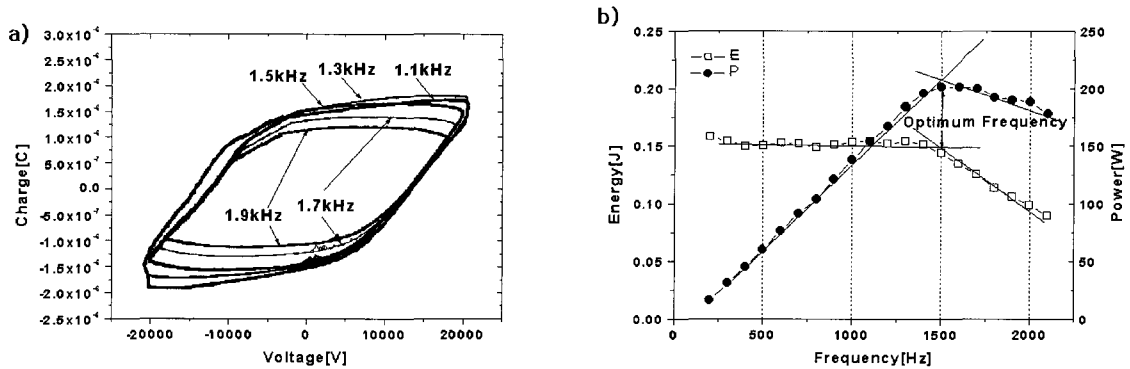


그림 5. 1개의 원통형 반응기에서 주파수변화에 따른 소모에너지와 소모전력; a) 1개의 원통형 반응기에서 주파수 변화에 따른 Q-V Lissajou, b) 1개의 원통형 반응기에서 소모에너지와 소모전력.

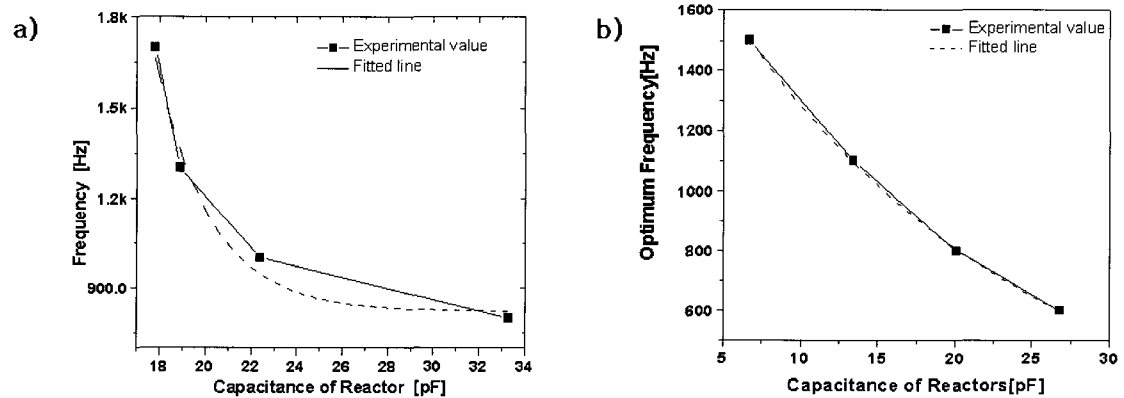


그림 7. 반응기의 정전용량의 변화에 따른 최적 운전주파수 변화; a) 평판형 반응기, b) 원통형 반응기
평판형 반응기와 원통형 반응기 모두 정전용량이 변화함에 따라 최적 운전주파수의 크기가 지수 함수적으로 감소하였다.

압 파형을 나타낸 것이다. 그림 6(a)는 C_T 가 7.0 pF 인 1개의 반응기에서 운전 주파수 1.5 kHz의 자료로서 그림 5에 의하면 이 값이 최적 운전주파수임을 알 수 있다. 그림 6(b)는 C_T 가 27.2 pF인 4개의 반응기에 $f_o = 600$ Hz의 주파수를 인가하였을 때의 파형이며, 이 결과는 반응기의 정전용량의 크기가 증가할수록 최적 운전주파수가 감소함을 보여준다. 이와 같은 경향은 평판형 반응기에서도 유사하였으며 평판형 반응기의 총 정전용량 C_T 가 12.83 pF, 15.78 pF, 18.77 pF, 30.22 pF로 증가함에 따라 최적 운전주파수는 각각 1.7 kHz, 1.3 kHz, 1 kHz, 800 Hz로 그 크기가 감소하였다. 평판형과 원통형 반응기에서 측정된 이 값들을 표 1과 2에 정리하였다.

그림 7은 반응기의 정전용량의 변화에 따른 최적 운

전주파수 변화를 나타낸 것이다. 그림에 보여지는 파선은 최적 운전주파수의 변화를 근사 함수의 값으로 나타낸 것으로 이 결과 최적 운전주파수는 반응기의 정전용량이 증가함에 따라서 지수 함수적으로 감소함을 보여준다. 반응기의 형태에 따른 최적 운전주파수의 변화는 평판형인 경우 $f_o \approx 769 + 14664e^{-C_T/4.7}$ 이고 원통형인 경우 $f_o \approx 75 + 1992e^{-C_T/20}$ 의 근사함수로 나타낼 수 있다. 여기서 C_T 는 pF의 크기를 갖는다.

그림 8(a)는 평판형 반응기의 전극 사이의 거리를 5.2 mm, 4.2 mm, 3.6 mm, 2.1 mm로 변화시켜 반응기의 정전용량 C_T 를 조절하여 각각에 해당하는 최적 운전주파수(f_o) 1.7 kHz, 1.3 kHz, 1 kHz, 800 Hz에서의 Q-V Lissajou를 나타낸 것이다 그림 8(b)는 원통형 반응기를 1개에서 4개까지 병렬 연결하여 반응기의

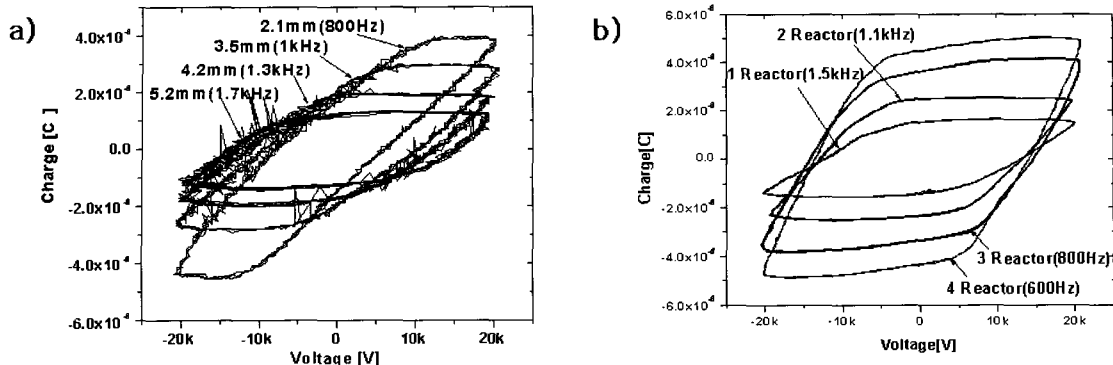


그림 8. 최적 운전주파수에서 반응기의 정전용량에 따른 Q-V Lissajou

- a) 평판형 반응기의 정전용량 변화 조건에 대한 Q-V Lissajou. 전극의 면적은 일정하게 유지시켜 C_g 를 일정하게 하고 전극간 거리를 조절하여 C_a 와 V_0 를 변화시켰다.
- b) 원통형 반응기의 정전용량 변화 조건에 대한 Q-V Lissajou. 반응기를 병렬 연결하여 절연파괴전압 V_0 는 일정하게 유지시키고 유전물질의 정전용량 C_g 와 공기의 정전용량 C_a 를 동시에 변화시켰다.

정전용량 C_T 를 변화시켜 각각의 정전용량에 해당하는 최적 운전주파수(f_o) 1.5 kHz, 1.1 kHz, 800 Hz, 600 Hz에서의 Q-V Lissajou를 나타낸 것이다. 반응기의 총 정전용량 C_T 와 반응기를 구성하는 유전물질의 정전용량 C_g 는 Q-V Lissajou의 기울기로부터 얻을 수 있었고, C_a 는 측정값 C_T 와 C_g 를 식 (5)에 대입하여 구하였다. 이 값들을 표 1과 2에 정리하였다. 평판형 반응기에서 C_a 의 정전용량 값은 평판사이의 거리에 따라 반비례하기 때문에 전극의 거리가 멀어짐에 따라 전극간의 정전용량 C_a 는 36.2 pF, 23.6 pF, 19.8 pF, 18.6 pF으로 감소하였고 예상과 같이 방전개시 전압은 6.7 kV, 10.6 kV, 12.7 kV, 15.6 kV로 증가하였다. 따라서 충전 영역이 증가하고 방전 영역은 감소하여 C_a 가 증가할수록, Q-V Lissajou의 면적이 증가하여 많은 에너지가 소모되고 있음을 알 수 있다. 그림 8(a)에서 전극간격이 2.1 mm($C_T=33.3$ pF)인 경우 $f_o=800$ Hz 인 조건에서 Q-V Lissajou의 면적이 가장 큰 경향을 보여주고 있다. 그림 8(b)에서는 원통형 반응기의 전극간 거리가 일정하므로 방전개시 전압은 약 13.5 kV로 일정하였고 반응기 개수의 증가에 따라 C_g 는 0.36 nF, 0.61 nF, 0.96 nF, 1.23 nF로 C_a 는 7.14 pF, 13.95 pF, 20.89 pF, 27.84 pF로 동시에 증가하였고, 따라서 충전 영역과 방전 영역이 증가하므로 Q-V Lissajou의 면적은 반응기의 연결 수를 늘려감에 따라 증가하였다.

그림 9는 정전용량의 변화에 따른 최적 운전주파수 f_o 에서 반응기의 소모에너지와 소모전력을 나타낸 것이다. 소모에너지와 전력은 전류-전압 파형과 그림 8에서 보여지는 Q-V Lissajou를 이용하여 측정하였다. 계산값은 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 얻은 정전용량과 최적 운전주파수 f_o 를 식 (2)에 대입하여 최적의 소모 전력 $W_0(-\oplus)$ 을 계산하였고 이를 측정값과 비교하였다. W_0 는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있으며 이때의 소모에너지($-\ominus$)는 $E_o = W_0/f_o$ 로부터 구하였다.

$$W_o = 4f_o C_g V_0 \left(V_m - \left(\frac{C_a + C_g}{C_g} \right) V_0 \right) \quad (7)$$

그림 9(a)는 전극간의 거리 조절에 의해 전극간의 정전용량 C_a 와 절연파괴전압 V_0 가 모두 변하는 조건을 갖는 평판형 반응기에서 얻은 결과이다. 반응기 전체의 정전용량 C_T 가 증가함에 따라서 소모전력이 증가하다가 약 18 pF 이후부터 감소하는 경향을 보인다. 또한 그림 9(b)는 반응기를 병렬로 연결하여 공기의 정전용량 C_a 와 유전물질의 정전용량 C_g 가 동시에 변하고 절연파괴전압 V_0 는 일정한 조건을 갖는 원통형 반응기에서 구한 결과이다. 반응기 전체의 정전용량 C_T 의 증가에 대해 소모전력은 반응기의 정전용량의 크기에 비례하여 일정하게 증가하다가 정전용량이 약 20 pF 이후부터는 전

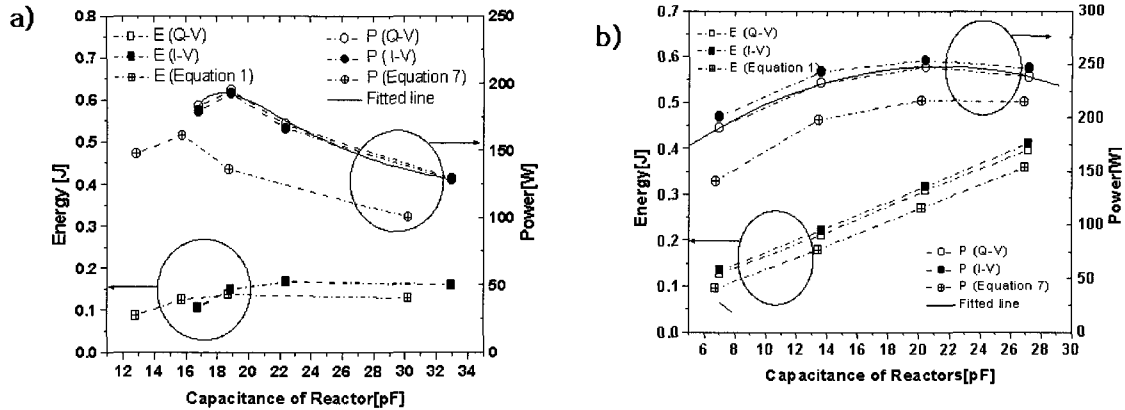


그림 9. 최적 운전주파수에서 반응기의 정전용량 변화조건에 따른 소모 에너지와 전력; a) 평판형 반응기의 소모 에너지와 전력, b) 원통형 반응기의 소모 에너지와 전력.

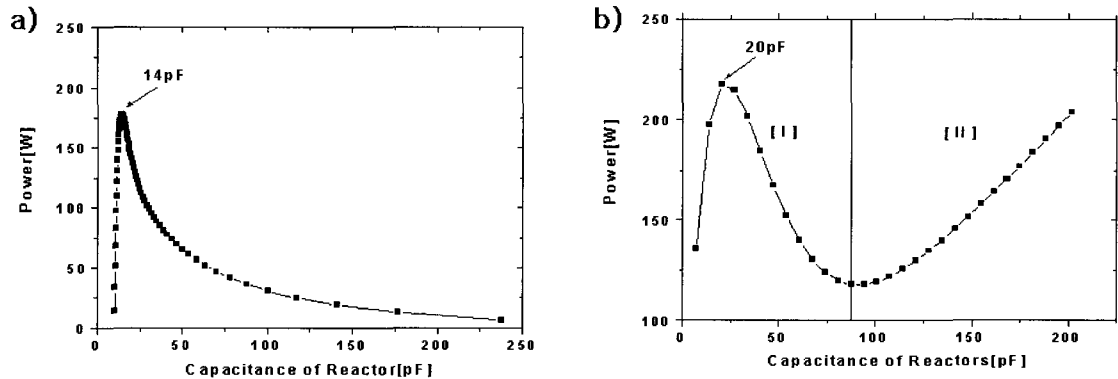


그림 10. 반응기의 정전용량 변화조건에 따른 최적 운전주파수에서의 소모전력; a) C_g 가 일정하고 V_0 와 C_a 가 동시에 변할 경우, b) V_0 은 일정하고 C_g 와 C_a 가 동시에 변할 경우

력이 포화되고 약간씩 감소하는 경향을 보인다. 그림 9(a)와 9(b)에서 Q-V Lissajou를 이용하여 구한 에너지(\square)와 전력(\circ)을 전류-전압파형을 이용하여 얻은 에너지(\blacksquare)와 전력(\bullet)의 결과를 비교한 결과 매우 유사하여 이는 반응기의 소모 에너지와 소모전력의 측정값이 검증되었음을 의미한다. 식(3)과 식(4)에 의해 계산된 정전용량을 식(7)에 대입하여 계산된 소모 에너지(\blacksquare) 및 전력(\oplus)값은 실험결과와 매우 유사한 경향을 보이나 계산식으로부터 얻어진 값들이 작게 나타난다. 이는 표 1과 표 2에 나타난 것처럼 각각의 반응기 조건에서 실제로 측정된 정전용량의 값이 식 (3)과 식 (4)에 의한 계산값 보다 크게 측정되어 나타났기 때문이다. 이 결과는 계산식 포함되어 있지 않는 반응기 구조등에서 만들어지는 정전용량의 변화가 실험값에 포함되

기 때문으로 사료된다. 그림 10은 정전용량 변화에 따른 각각의 최적 운전주파수 f_o 에서 소모 전력을 예상한 것으로 식 (7)을 사용하여 구할 수 있다. 그림 10(a)는 C_g 가 일정한 조건에서 전극간의 거리변화에 따라 C_a 와 V_0 가 변하는 조건을 갖는 반응기의 경우이다. C_a 의 변화에 따른 V_0 의 변화량은 $3.02 \times 10^6 \text{ V/m}$ 로 일정하므로 $V_m - ([C_a + C_g]/C_g)V_0$ 는 일정한 값을 갖게되고, $4f_o C_g V_0$ 에서 f_o 는 $f_o \propto e^{-ac\tau}$ 의 관계와 일정한 절연체의 정전용량 C_g 로 인해 소모전력은 증가 후 포화되어 감소하는 경향을 보인다. 따라서 소모전력은 특정 정전용량에서 최대값을 갖는다. 그림 10(b)는 일정한 V_0 에서 C_g 와 C_a 가 동시에 변하는 조건의 반응기에서 정전용량 C_T 의 변화에 대한 소모전력을 나타낸 것이다. 같은 크기의 정전

용량을 갖는 반응기를 병렬 연결하였기 때문에 V_0 는 일정하게 유지되고 C_g 와 C_a 의 변화량은 동일한 비율로 변화하였으므로 $V_m - ([C_a + C_g]/C_g)V_0$ 또한 일정한 값을 가졌다. 그림 10(a)와는 다르게 두 영역으로 나뉘어지며 영역 I에서는 $C_T = 20 \text{ pF}$ 에서 최대의 소모전력을 가지고 영역 II에서는 f_0 가 지수함수의 특성에 의해 감소한 후 거의 일정하게 유지되었지만 반응기를 구성하는 C_g 와 C_a 가 일정하게 증가하게 된다. 따라서 영역 II에서는 반응기의 정전용량의 증가에 비례하여 소모전력이 거의 선형적으로 증가하였다. 이 결과를 측정결과인 그림 9와 비교하면 그림 9(a)는 그림 10(a)에서 소모전력이 반응기의 정전용량에 따라 증가되고 포화된 후 감소되는 경향을 갖는 부분에 해당한다. 정전용량 변화에 따른 f_0 중에서 최대 소모전력을 갖는 반응기의 총 정전용량은 약 18 pF로 이는 계산에 의해 예측된 값과 같은 경향을 보이며 약 4 pF정도 차이가 났다. 이는 실제로 측정된 반응기의 정전용량 C_T 가 계산값보다 약 4 pF정도 오차가 생겼기 때문이다. 그림 9(b)의 경우 그림 10(b)의 영역 I에 해당하며 그림 9(b)의 Fitted line이 20 pF 정도에서 최대값을 보이며 그림 10(b)의 결과와 서로 일치하는 경향을 보인다. 따라서 f_0 를 구하고 이를 식 (7)에 대입하여 최대 소모전력을 갖는 반응기의 정전용량을 구하여 반응기의 최적 운전조건을 얻을 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구는 DBD 반응기의 방전특성을 관찰하여 반응기의 최적의 운전조건을 찾고자 하였다. 고전압 펄스를 반응기에 인가한 후 전류 및 전압 파형을 관찰한 결과 충전영역과 방전영역 그리고 충전과 방전이 일어나지 않는 dark period가 존재하며 dark period의 크기는 운전주파수에 따라 변하였다. 또한 반응기 각각의 정전용량에 따른 dark period를 최소로 하는 최적인전주파수 f_0 를 얻을 수 있었으며 이 f_0 에서 반응기의 소모전력은 최대가 되고 반응

기의 정전용량이 증가함에 따라서 f_0 는 지수함수적으로 비례 감소하는 경향을 가졌다.

만일 반응기의 정전용량이 변화되면 각각의 조건에서 최적 운전주파수가 결정되며 이 결과를 이용하여 소모전력을 측정할 결과 임의의 정전용량을 갖는 반응기에서 소모되는 전력이 최대가 되었으며 이는 식 (7)에 의해 표현할 수 있었다. 따라서 반응기의 정전용량 즉 반응기의 구성 특성은 방전효율에 절대적인 영향을 미치고 있음을 알 수 있었으며 이 결과를 이용하여 DBD반응기의 최적 운전조건 혹은 설계조건을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

감사의글

본 연구는 2001-2002년 교육부의 Brain Korea 21, 한양대학교 교내연구비 및 환경부 차세대 핵심환경 기술개발 사업의 연구비와 (주) 샘 테크놀로지의 연구 기자재 도움을 받아 수행되어 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] W. von Siemens, *Über die elektrostatische induktion und die verzögerung des stromes in flaschendrahten*, Poggendorff's Ann. Physik Chemie, 1857.
- [2] 이덕출, 황명환 "고전압 플라즈마 공학", 동일출판사, 1997.
- [3] Manheimer, Sugiyama, and Stix, *Plasma Science and The Environment*, AIP PRESS, 1997.
- [4] T. C. Manley, *The Electric Characteristics of The Ozonator Discharge*, Trans. Electrochem. Soc. 1943.
- [5] U. P. Kuchler, thesis, Rheinisch-West-falischen Hochschule, Aachen, 1990.
- [6] Reitz, Milford, Christy, *Foundations of Electromagnetic Theory*, Addison Wesley, 1993.
- [7] John D. Lenk, *Circuit Encyclopedia & Troubleshooting Guide*, Vol 1, McGraw Hill, 1993.
- [8] David R. Lide, *Handbook of Chemistry and Physics*, 73RD Edition, CRC Press, 1992.