

전력 변화에 따른 글라이딩 아크 플라즈마의 방전 특성

임재성¹, 고 광¹, 신백균¹, 유도현², 박종관³, 육재호³, 이능현⁴, 강대하⁵
¹인하대학교, ²안산공과대학, ³유한대학, ⁴경원대학교, ⁵부경대학교

Discharge characteristics of gliding arc plasma according to power variation.

J.S. Lim¹, K. Ko¹, P.K. Shin¹, D.H. You², J.K. Park³, J.H. Yuk³, N.H. Lee⁴, D.H. Kang⁵
¹Inha Univ., ²Ansan Tech. Coll., ³Yuhan Coll., ⁴Kyungwon Univ., ⁵Pukyong Univ.

Abstract - 글라이딩 아크 플라즈마의 화학적 반응성을 이용하여 대표적 휘발성 유기 화합물인 벤젠의 분해를 위한 연구를 수행하였다. 실험에는 벤젠과 공기의 mixture gas를 사용하였다. 글라이딩 아크 플라즈마에 공급되는 전력을 변화시키며 각 regime의 방전 특성을 아크주의 방전 특성을 나타낸 O. Mayr의 식에 따라 살펴보았으며 플라즈마와의 반응 전·후의 mixture gas내 포함되어 있는 벤젠 peak area의 크기를 GC(Gas Chromatography)를 통해 분석하였다.

2.2 분해 가스

분해를 위한 모의가스로는 대표적인 휘발성 유기 화합물인 벤젠을 사용하였다. 고 순도의 공기에 벤젠 500ppm을 혼합하여 고압 가스용기에 담고 다른 고압 가스용기에 담긴 고 순도의 공기를 사용하여 반응기로 흘러들어가는 가스의 농도 및 유량을 조절하였다. flow-meter와 MFC (mass flow controller)를 사용하여 반응기에 흘러들어가는 유량을 2500 sccm, 벤젠농도를 100ppm, 최종 반응플라즈마 반응기에 흘러들어가는 유속을 2.7 m/s로 흘려주었다.

1. 서 론

산업혁명을 필두로 인간의 생산 활동을 통해 인류는 현재까지 눈부시게 빠른 변화와 발전을 맞이하였으며 인류는 이전과는 현저하게 높은 수준의 윤택한 삶을 영위하게 되었다. 하지만 이런 활발한 생산 활동의 이면에는 필연적으로 생산 활동 본래의 명분에 역행하는 환경오염이라는 결과를 초래하게 되었다. 20세기에 들어오면서 선진국들은 생산 활동으로 인한 환경오염문제를 자각하고 법제정을 통해 이를 제재하며 그 폐해를 최소화하는 다양한 연구를 진행하여 왔다. 최근 우리나라에서도 환경오염관련 법률이 제정되어 구체적인 규제대상 및 시설이 추가되고 있는 실정이다.

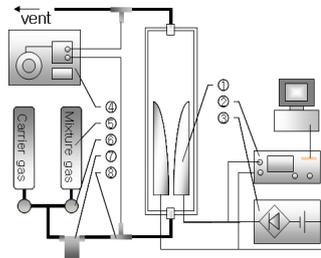
산업 활동의 부산물로 발생하는 각종 유해물질을 분해하는 여러 가지 연구가 진행되어 왔고 최근 들어 플라즈마의 화학적 반응성을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 글라이딩 아크 플라즈마의 경우 고온 열평형상태와 저온 비열평형 상태가 아크주의 진행에 따라 복합적으로 나타남으로 각 상태의 단점을 보완해주고 장점을 이용할 수 있는 방법으로 주목받고 있다. 또한 기타 플라즈마를 이용한 여러 방법과는 다르게 특별한 냉각시스템이 필요하지 않아 플라즈마를 생성하는데 매우 편리할 뿐 아니라 그 응용에 있어서 설치비용을 줄일 수 있는 등의 여러 장점을 가지고 있어 최근 그에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 글라이딩 아크 플라즈마를 발생시키기 위한 장치가 <그림 1>에 나타나 있다. 본 실험에서는 <그림 1>의 ①처럼 전극간격이 증가되도록 설계된 전극을 이용하였다. 처음 아크는 전극간격이 가장 작은 부분에서 발생한다. 이때 전극 사이로 반응가스를 흘려주면 반응가스의 기류의 진행방향에 따라 아크는 반응가스의 속도에 비례해 진행하게 된다. 초기 아크의 상태는 열 플라즈마와 같은 고온 열평형 상태를 유지하지만 전극을 따라 진행되는 아크의 길이가 늘어남에 따라 열역학적 평형을 유지하기 위해 필요한 에너지를 전원 공급 장치로 공급 받을 수 없게 되면 글로우 방전과 비슷한 형태의 저온 비열평형 상태를 띄게 된다. 이후 더욱 아크주의 길이가 증가함에 따라 아크채널 자체를 유지할 수 없게 되어 글라이딩 아크 플라즈마가 소멸된다. 그와 거의 동시에 처음 방전이 시작되었던 지점에서 재방전이 시작된다[1].

본 연구에서는 산업 활동의 부산물로 발생하는 각종 유해 가스를 글라이딩 아크 플라즈마를 이용한 분해 공정에서의 저비용 고효율의 최적화를 위한 전방적 기초 데이터와 분해 반응의 전압에 따른 방전 특성을 해석하는 데에 그 주된 목적을 두기로 한다.

2. 실험

2.1 실험 장치

<그림 1>에 실험장치의 구성도를 나타내었다. 반응기는 내경 95mm 길이 300mm의 석영관으로 제작되었다. 반응기 위와 아래는 베이클라이트 판으로 실링하였다. 전극은 길이 150mm이고 그 재질은 SUS-304이다. 전극 간의 반응관내 최소 근접 간격은 2.5mm이다. 반응 가스는 전극과 전극 사이로 내경 6mm의 튜브를 통해 직접 분사된다. 플라즈마 발생용 전원은 상용전원(220V, 60Hz)을 Transformer(플라즈마테크)를 통하여 DC(10kV, 100mA)상태로 공급하였다.



- ① Electrode
- ② Oscilloscope
- ③ Transformer
- ④ GC
- ⑤ Gas bottle
- ⑥ Ball flowmeter
- ⑦ MFC
- ⑧ Septum

<그림 1> 장치 구성도

2.3 실험 방법

전극에 인가시키는 전력을 가변하여 주었다. 전극에 인가되는 전압은 high voltage probe(Tektronics, P-6015)를 이용하여 digital oscilloscope (Tektronics, TDS3012)로 측정하였다. 반응관에 투입되는 가스의 유량은 MFC(mass flow meter, Sierra c100)와 ball-flowmeter를 사용하여 조절하였다. 반응 후의 분해된 반응가스 내 포함된 벤젠가스의 양을 확인하기 위하여 반응 전·후의 반응가스를 GC(gas-chromatography, Agilent6890)를 이용하여 정량적으로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전력 변화에 따른 방전 특성

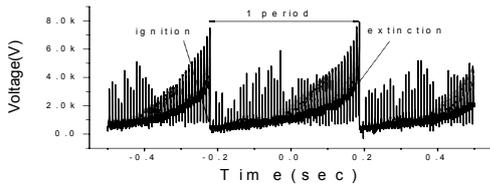
3.1.1 전력변화에 따른 주기의 변화

<그림 2>는 전극양단에 걸리는 전력을 변화시켜주면서 한주기 동안의 전압 변화양상을 X축(시간) scale을 100ms로 본 것이다. 그림에서 양단에 걸리는 전력이 증가할수록 전극사이에 발생하는 글라이딩 아크 플라즈마의 소멸과 생성의 주기가 길어지는 것을 볼 수 있다. 1.6kV/80mA의 조건에서 1초 동안 글라이딩 아크는 약 3회에 걸쳐 소멸과 생성이 반복되었고, 1.0kV/75mA의 조건에서는 약 8회 걸쳐 반복되었으며, 1.2kV/56mA의 조건에서는 17회에 걸쳐 반복되었다.

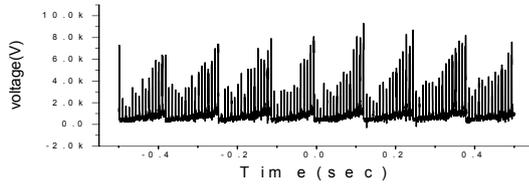
$$P_0 = IV_0 = W \quad \text{위의 법칙 (1)}$$

W- 단위길이당소요전력

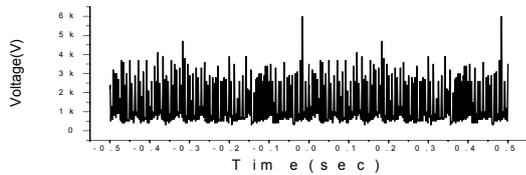
이러한 아크의 생성과 소멸의 주기는 전극간격의 변화에 따른 아크주의 길이변화와 밀접한 관계를 가진다. 반응 가스의 종류에 따라 차이는 있지만 아크주의 열역학적 안정화 상태를 유지하기 위하여 일반적으로 대기 상태의 6000-12,000K의 온도범위에서 단위 길이 당 소요전력은 50-70 kW/m로 간주한다.[1] 그러므로 아크의 길이가 길어질수록 안정화 상태를 유지하기 위한 소요전력 또한 증가하게 된다. 그 결과 <그림 2>에서처럼 공급전력이 충분할 경우 아크주의 주기가 연장되어 더욱 긴 시간동안 아크를 유지할 수 있게 된다.



<그림 2-a> 1.6kV/80mA



<그림 2-b> 1.0kV/75mA



<그림 2-c> 1.2kV/56mA

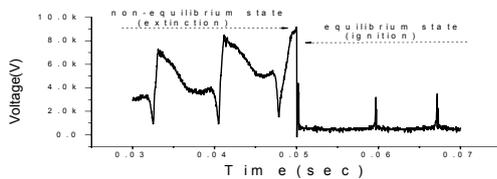
3.1.2 전력에 따른 글라이딩 아크 플라즈마 내의 상태변화

<그림 3>은 전력변화에 따른 아크방전이 개시되고 소멸할 때의 전압 양상을 통해 글라이딩 아크 플라즈마 내부의 상태를 보여 주고 있다.

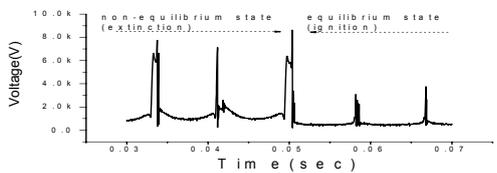
$$\frac{dG}{dt} + \frac{N_0}{Q_0}G = \frac{I^2}{Q_0} \quad \text{Mayr의 식 (2)}$$

Q_0 - 아크주의 온도등의 함수, N_0 - 단위 시간당 열손실

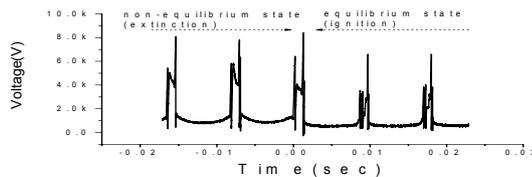
Mayr의 식 (2)에 따라 아크주의 열손실과 아크주의 온도 등의 함수, 플라즈마 내부 저항 등을 고려하여 고온 열평형 상태와 저온 비열평형 상태의 전압 파형을 구할 수 있다[3].



<그림 3-a> 1.6kV/80mA



<그림 3-b> 1.0kV/75mA



<그림 3-c> 1.2kV/56mA

<그림 3-a>는 전형적인 글라이딩 아크 플라즈마의 전압 파형을 보여 주고 있다. 그림에 나타난 방전 초기와 말기의 파형은 Mayr의 식에 따른 고온 열평형 상태와 저온 비열평형 상태의 전압 파형과 일치한다. 실

험된 다른 조건들 보다 상대적으로 높은 전력을 공급한 <그림 3-a>의 파형은 열적 평형 상태와 비열평형 상태가 적절히 혼합된 이상적인 글라이딩 아크 플라즈마 상태를 띄고 있다. <그림 3-b>는 방전 초기의 전압 파형은 고온 열평형 상태를 유지하고 있으나 공급 받는 전력이 작아 아크길이 증가함에 따라 저온 비열평형 상태로 변화하여 그 방전을 유지할 수 없으므로 곧 소멸되고 있다. <그림 3-c>는 방전 초기와 말기의 전압 파형은 거의 변화하지 않았다. 방전초기에 나타나는 글라이딩 아크 플라즈마의 고온 열평형 상태의 작은 길이의 아크의 유지에 필요한 전력이 공급되지 못하고 곧 소멸되는 것을 볼 수 있다.

3.2 벤젠의 분해

글라이딩 아크 플라즈마가 발생하는 전극의 양단에 걸리는 전력을 변화시키며 100ppm의 벤젠 가스를 공기와 혼합하여 2.7m/s의 유속으로 공급하여 반응 전후의 가스를 GC(Agilent 6890N)를 통해 분석하였다(표 1). 반응가스의 글라이딩 아크 플라즈마와의 반응 전 벤젠의 peak area는 평균 11.1이었으며 반응 후 전력공급이 증가할수록 벤젠의 peak area와 DR수치가 감소하는 경향을 보였다.

$$DR = \frac{(inlet\ peak\ rate) - (outlet\ peak\ rate)}{(inlet\ peak\ rate)} \times 100\% \quad (4)$$

DR - Decomposition Rate

이론적 모델링을 통하여 글라이딩 아크 플라즈마에 사용되는 에너지 중 약 75%가 넘는 양이 열적 비열평형 상태로 전이 되는 과정에서 전달되는 것을 알 수 있다[2]. 그러므로 수행된 실험 중 가장 상태변화의 양상이 뚜렷하였던 <그림 2-a>, <그림 3-a>에서의 분해율이 가장 높을 것으로 예상되었고 분석결과 다음 표1과 같이 일치하였다. 전압 파형의 변화가 거의 없었던 1.2kV/56mA를 공급했던 실험에서 가장 낮은 분해율을 보였다.

벤젠의 분해에 대한 데이터를 통해 발생한 글라이딩 아크 플라즈마 내부의 비열평형 상태가 두드러졌을 때 벤젠의 분해율이 높은 것으로 나타났다. 비열평형 상태를 띄는 아크주의 범위를 증가시키므로 분해를 향상시킬 수 있을 것으로 예측된다.

표 1. Peak area of benzene for different conditions

Test	inlet (peak area)	outlet(peak area)		
		1.2kV/56mA	1.0kV/75mA	1.6kV/80mA
1	11.4	5.5	3.6	1.2
2	10.7	5.6	3.9	1.2
3	11.2	5.9	3.9	1.1
Aver.	11.1	5.66	3.8	1.16
DR(%)	0	49	65.7	89.5

4. 결 론

본 연구를 통해 벤젠의 분해를 위한 글라이딩 아크 플라즈마의 전력 변화에 따른 방전 특성을 알아보았다. Mayr의 식에 따른 방전초기와 말기의 아크주의 전압파형을 오실로스코프를 통해 측정된 파형을 비교함으로써 글라이딩 아크 플라즈마의 상태를 확인하였다. 공급전력의 변화에 따라 글라이딩 아크 플라즈마 내부의 상태와 분해율은 다음과 같은 특징을 나타내었다.

1. 일정 전력이상에서의 글라이딩 아크 플라즈마는 한 주기 동안 내부의 상태는 열평형 상태와 비열평형 상태가 복합적으로 나타난다.
2. 일정 전력이하에서의 글라이딩 아크 플라즈마의 전형적인 성질인 상태변화가 일어나지 못하고 소멸된다.
3. 전력이 감소할수록 아크주의 생성과 소멸을 주기가 짧아진다.
4. 비열평형 상태가 커질수록 벤젠의 분해효율이 증가한다.

본 연구는 산업자원부 지정 RIC 인하대학교 열플라즈마 환경기술연구센터의 2007년도 지원에 의한 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] A. A. Fridman, S. Nester, L. A. Kennedy, A. Saveliev, and O. Mutaf-Yardimci, "Gliding arc gas discharge", Prog. Energy Combust. Sci. 25, 211, 1999.
- [2] O. Mutaf-Yardimci, A. V. Saveliev, A. A. Fridman, and L. A. Kennedy "Thermal and nonthermal regimes of gliding arc discharge in air flow", J. Appl. Phys, 87, 4, 2000.
- [3] Hayashi Izumi, "高電壓 放電 plasma 工學", Japan, 原出版社, 1996.