

벤젠 분해를 위한 글라이딩 아크 플라즈마의 전극형태에 따른 방전 특성

고 광, 이종문*, 신백균
 인하대학교
 (fruciante@nate.com*)

Discharge characteristics of gliding arc plasma for decomposition of benzene according to the electrode form

K. Ko, J. M. Lee*, P. K. Shin
 Inha Univ.
 (fruciante@nate.com*)

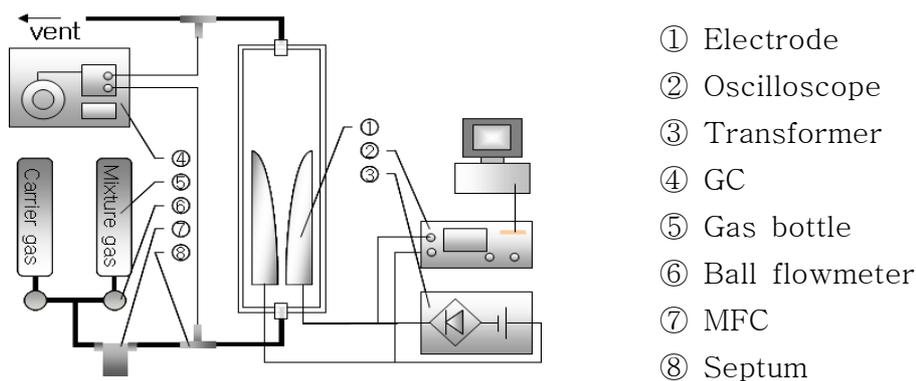
1. 서론

산업혁명 이후 인류는 눈부시게 빠른 발전을 이루어내어 이전 세대에 비해 높은 삶을 영위할 수 있게 되었으나 그 이면에는 산업 활동의 부산물로 인한 환경오염을 초래하게 되었다. 20세기에 들어와서 일부 선진국들은 이를 자각하고 그 피해를 최소화하기 위해 다양한 방법으로 접근이 시도되어 어느 정도의 성과를 내고 있는 실정이다. 하지만 국내의 사정은 단 시간 내의 양적인 성장에 치우친 정책적인 문제와 의식부족으로 인해 선진국에 비해 관련 연구가 뒤쳐져 있는 것이 사실이나 근래에 들어와 환경오염관련 법률이 제정되어 구체적인 규제대상 및 시설이 추가되고 있다.

산업 활동의 부산물을 처리할 수 있는 여러 방법 중 최근 플라즈마의 화학적 반응성을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구는 글라이딩 아크 플라즈마를 이용하여 휘발성 유기 화합물의 일종인 벤젠을 분해 하는 연구를 진행하였다. 글라이딩아크 플라즈마는 고온 플라즈마와 저온 플라즈마가 복합적으로 나타나는 특성을 이용하여 각 각의 상태의 장점을 고루 이용할 수 있을 뿐만 아니라 전극의 설계 또한 복잡하지 않고 별도의 냉각 시스템이 필요 없는 장점을 가지고 있다.

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

2. 이론



<그림 1> 장치 구성도

글라이딩 아크 플라즈마를 발생시키기 위한 장치가 <그림 1>에 나타나있다. 본 실험에서는 <그림 1>의 ①처럼 전극간격이 증가되도록 설계된 전극을 이용하였다. 처음 아크는 전극간격이 가장 가까운 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 진행하는 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].

글라이딩 아크 플라즈마의 상변화는 글라이딩 아크의 에너지 밸런스를 분석함으로써 이해할 수 있다. Elenbass-Heller model[1]을 통해 에너지 밸런스를 다음 식(1)과 같이 수식화 할 수 있다.

$$-\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r\lambda \frac{dT}{dr}) + \alpha(T)E^2 = 0 \quad (1)$$

$\lambda(T)$ - thermal conductivity, $\alpha(T)$ - electrical conductivity

식(1)에서 방전 초기의 글라이딩 아크 플라즈마의 아크채널은 열전도성 교환으로 인해 안정화 상태를 유지한다[2]. 아크채널의 단위 길이 당 소요전력(W)는 식(2)과 같다.

$$W = 16\pi\lambda(T_0)(kT_0/E_\infty)T_0 \quad (2)$$

T_0 - 가스 방전 중심 온도, E_∞ - 유효 이온화 포텐셜

$$P_0 = IV_0 = W \quad (3)$$

반응 가스의 종류에 따라 단위 길이 당 소요전력(W)값의 차이는 있지만 일반적으로 대기 상태의 6000-12,000K의 온도범위에서 50-70 kW/m로 간주한다.[1] 또한 식(3)의 옴의 법칙에 따라 전극간의 아크채널의 길이가 커질수록 열평형 상태를 유지하기 위한 소요전력 또한 증가하게 된다. 그러므로 한계적인 전원으로는 어느 순간 에너지 밸런스를 맞추어 열적평형 상태를 유지하지 못하고 부분적인 열적 비평형상태를 띄게 된다. 아크채널의 길이가 더욱 길어지게 되면 아크채널 상태를 유지할 수 없을 정도가 되고 방전이 원래 시작되었던 지점에서 새로운 방전이 시작되게 된다.

3. 실험

3.1 실험 장치

<그림 1>에 실험장치의 구성도를 나타내었다. 반응기는 내경 95mm 길이 300mm의 석영관으로 제작되었다. 반응기 위와 아래는 베이크라이트 관으로 실링하였다. 전극은 플라즈마가 생성되는 양날의 마주보는 각도에 따라 총 3가지 타입이 제작 되었다. 전극의 길이는 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.

3.2 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 1000 sccm, 벤젠농도를 100ppm, 최종 반응플라즈마 반응기에 흘려주었다.

3.3 실험 방법

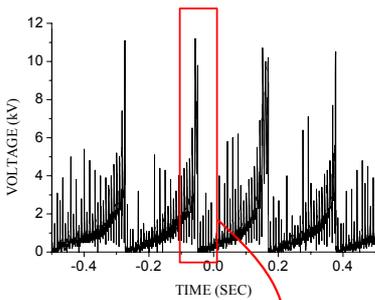
플라즈마가 생성되는 날의 각도에 따라 3가지 형태의 전극을 사용하여 그 방전특성을 관찰하였다. 전극에 인가시키는 전력은 Transformer(플라즈마테크)를 사용하였다. 플라즈마 생성용 전극에 인가되는 전압과형 특성을 알아보기 위하여 high voltage probe(Tektronics, P-6015)를 이용하여 digital oscilloscope (Tektronics, TDS3012)로 측정하였다. 반응관에 투입되는 가스의 유량은

MFC(mass flow meter, Sierra c100)와 ball-flowmeter를 사용하여 조절하였다. 각 전극별로 반응 후의 분해된 반응가스 내 포함된 벤젠가스의 양을 확인하기 위하여 반응 전·후의 반응가스를 GC(gas-chromatography, Agilent6890)를 이용하여 정량적으로 분석하였다.

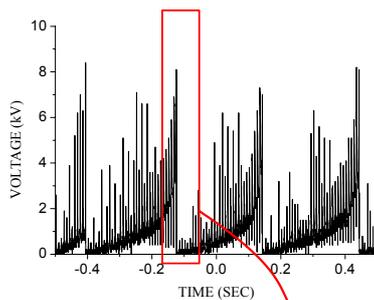
4. 결과 및 토론

4.1 전극 형태에 따른 전압파형 변화

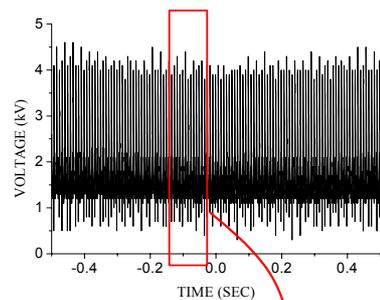
<그림2,3,4>는 벤젠 100ppm의 압축공기 1000sccm을 글라이딩 아크 플라즈마를 발생시키는 3가지 형태의 전극에 흘려주었을 때 전극 양단에 걸리는 전압파형을 보여주고 있다. <그림2-a>의 경우 양전극의 간격이 가장 가파르게(wide type) 증가한다. 이에 따라 아크채널 또한 벌어지는 간격에 비례하여 빠른 속도로 증가하게 된다. 그러므로 한계적인 전원에서 채널이 충분히 길어질 경우 채널유지를 위한 충분한 전력을 공급할 수 없으므로 곧 채널이 소멸된다. <그림 2-a>은 가파른 전극 각도로 인해 전극 양단의 한 채널의 주기가 다른 전극보다 매우 짧은 것을 볼 수 있다. <그림 4-a>의 경우 양전극은 평행에 가까운 가까운 정도(semi-parallel)의 간격을 유지하고 있다. 그래서 양전극 끝단의 간격이 좁아 아크채널의 길이유지를 위한 전력을 한계적인 전원으로 충분히 공급 가능하므로 소멸되지 않고 계속 유지되게 된다. <그림 3-a>는 전극의 각도가 wide type과 semi-parallel type의 중간인 semi wide type이다. 이때 아크채널 길이의 증가는 wide type보다 느려 아크 채널의 주기가 길어지는 것을 볼 수 있다.



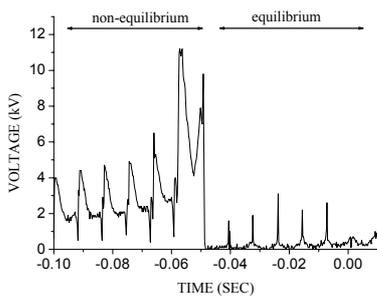
<그림2-a>



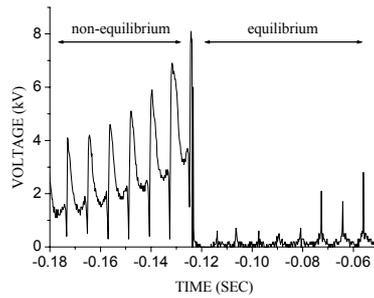
<그림3-a>



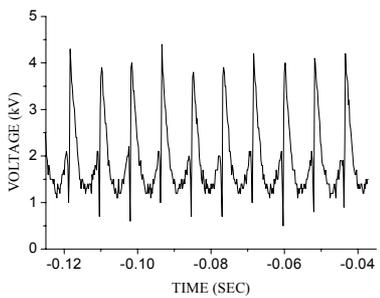
<그림4-a>



<그림2-b>



<그림3-b>



<그림4-b>

<그림 2-b, 3-b, 4-c>에서 글라이딩 아크 플라즈마 내부의 상태를 판단하기 위하여 주기가 끝나고 시작되는 지점을 확대하여 그 파형을 관찰하였다. <그림 1-b, 2-b>에서 측정된 전압 파형은 mayr의 식에 따라 방전초기에는 열적 평형상태를 유지하다가 점점 열적 비평형 상태로 넘어가는 것을 볼 수 있다[4]. 아크의 발생과 소멸이 반복되고 반응가스의 낮은 온도로 인해 반응기와 전극의 온도는 크게 증가하지 않는다. <그림 3>의 semi-parallel type의 전극의 경우 아크채널이 전극의 양 끝에 계속 머물게 되는데 그 상태는 <그림 1-b, 2-b>의 방전 말기와 같이 열적 비평형상태와 같은 파형을 유지하고 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 이 아크채널은 전극의 한 부분에서 정지하

게 되므로 전극의 열화를 가져옴으로써 반응기의 온도를 크게 증가 시키게 된다.

4.2 전극 형태에 따른 분해 효율 변화

글라이딩 아크 플라즈마가 발생하는 전극을 변화시키며 100ppm의 벤젠 가스를 공기와 혼합하여 1000sccm을 공급하여 반응 전후의 가스를 GC(Agilent 6890N)를 통해 분석하였다(표1). 글라이딩 아크 플라즈마에 사용되는 에너지 중 약 75%가 넘는 양이 열적 비평형 상태로 전이 되는 과정에서 전달되는 것을 알 수 있다[3]. 분해율 또한 열적 비평형 상태만을 나타내는 semi parallel 전극에서 가장 높게 나타났다.

$$DR = \frac{(\text{inlet peakrate}) - (\text{outlet peakrate})}{(\text{inlet peakrate})} \times 100\% \quad , \quad DR - \text{Decomposition Rate}$$

<표 1> Peak area of benzene

Test	inlet(peak area) / outlet(peak area)		
	wide 90mA/2kV	semi wide 85mA/1.6kV	semi parallel 83mA/2kV
1	7.0 / 2.8	5.9 / 2.8	10.7 / 2.4
2	7.3 / 3.0	6.1 / 2.6	11.5 / 1.5
3	6.7 / 2.6	6.4 / 2.5	10.0 / 1.6
Aver.	7.0 / 2.8	6.2 / 2.6	10.7 / 1.8
DR(%)	60.0	58.07	83.18

<표 2> Operating condition of GC

Instrument	: Agilent 6890N
Column	: Packed Column, 20% Rtx-1 Silcoport 100/120 6ft, stainless
Oven temperature	: 200°C
Carrier gas	: He, 20ml/min
Injector	: 150°C, 225ml/min, splitless
Detector	: 250°C, FID
Sample size	: 500ml
Concentration range	: 100ppm

5. 결론

본 연구를 통하여 휘발성 유기화합물의 일종인 벤젠의 분해를 위한 글라이딩 아크 플라즈마의 전극 형태에 따른 특성변화에 대해 연구가 수행되었다. 전극형태에 따른 아크 채널의 주기와 내부 상태 변화를 전압 파형을 분석함으로써 확인하였고 다음과 같은 사실을 도출하였다.

1. 전극의 각도가 클(wide type)수록 방전 주기가 짧아지고 작을(semi parallel type)수록 방전 주기가 길어진다.
2. 글라이딩 아크 플라즈마는 열적 평형 상태와 열적 비평형 상태를 가지는 것을 전압파형을 통해 확인할 수 있다.
3. Semi parallel type의 전극에서 최고의 분해 효율을 보였다.
4. 열적 비평형 상태가 커질수록 벤젠의 분해 효율이 증가한다.

감사의 글

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

6. 참고문헌

- [1] Frank-Kamenetski DA. "Diffusion and heat transfer in chemical kinetics", Moscow, Nauka, 1987: 491.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Hayashi Izumi, "高電壓 放電 plasma 工學", Japan, 原出版社, 1996.