



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2010년 2월  
석사학위 논문

글라이딩 아크 플라즈마를 이용한  
타르 제거 연구

조선대학교 대학원

환경 공 학 과

양 윤 철

# 글라이딩 아크 플라즈마를 이용한 타르 제거 연구

A study on Tar removal using Gliding Arc Plasma

2010 년 2 월 25 일

조선대학교 대학원

환 경 공 학 과

양 윤 철

# 글라이딩 아크 플라즈마를 이용한 타르 제거 연구

지도교수 전 영 남

이 논문을 환경공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2009 년 11 월

조선대학교 대학원

환 경 공 학 과

양 윤 철

# 양윤철의 석사 학위 논문을 인준함

위원장    조선대학교 교수 신 대 윤 인

위    원    조선대학교 교수 정 경 훈 인

위    원    조선대학교 교수 전 영 남 인

2009 년    11 월

조선대학교 대학원

# 목 차

List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv
ABSTRACT .....	v
제1장 서론 .....	1
제2장 이론적 고찰 .....	3
제1절 타르 .....	3
1. 타르의 정의 .....	3
2. 타르의 종류 .....	3
제2절 플라즈마 .....	4
1. 플라즈마 .....	4
2. 플라즈마 종류 및 특성 .....	4
제3절 글라이딩 아크 플라즈마 .....	5
1. 글라이딩 아크 플라즈마 원리 .....	5
2. 글라이딩 아크 플라즈마 방전현상 .....	6
제3장 실험장치 및 방법 .....	7
제1절 실험장치 .....	7
1. 글라이딩 아크 플라즈마 반응기 .....	9
2. 전원공급장치 .....	9
3. 가스/수증기 공급라인 .....	9
4. 측정 및 분석장비 .....	9
5. 제어 및 모니터링 시스템 .....	10
제2절 실험방법 .....	11
1. 벤젠 제거 실험방법 .....	11
2. 나프탈렌 제거 실험방법 .....	13
3. 실험결과 데이터 처리 .....	15

<b>제4장 실험결과 및 고찰</b>	16
제1절 벤젠 제거 특성	16
1. 수증기 주입량 변화	18
2. SEI 변화	20
3. 전체 가스량 변화	22
4. 초기 농도 변화	24
5. 유입가스 온도 변화	26
6. 노즐직경 변화	28
7. 전극간격 변화	30
8. 전극길이 변화	32
제2절 나프탈렌 제거 특성	34
1. 수증기 주입량 변화	36
2. SEI 변화	38
3. 전체 가스량 변화	40
4. 초기 농도 변화	42
5. 전극길이 변화	44
<b>제5장 결론</b>	46
제1절 벤젠 제거 특성	46
제2절 나프탈렌 제거 특성	47
<b>참고문헌</b>	48

## LIST OF TABLES

Table 1. Chemical components in biomass tars .....	3
Table 2. Optimum conditions and their results of benzene reactor .....	17
Table 3. Optimum conditions and their results of naphthalene reactor .....	35



## LIST OF FIGURES

Fig.2-1. phenomenon of gliding arc discharge. ....	6
Fig.3-1. Schematic diagram of a gliding arc plasma removal tar. ....	7
Fig.3-2. Photography of gliding arc plasma removal tar. ....	8
Fig.3-3. Photography of experiment equipment. ....	10
Fig.3-4. Effect of temperature on the performance of benzene reactor. ....	12
Fig.3-5. Effect of temperature on the performance of naphthalene reactor. ....	14
Fig.4-1. Effect of various steam/carbon ratio in benzene reactor. ....	19
Fig.4-2. Effect of various specific energy input in benzene reactor. ....	21
Fig.4-3. Effect of various total gas flow rate in benzene reactor. ....	23
Fig.4-4. Effect of various inlet gas flow rate in benzene reactor. ....	25
Fig.4-5. Effect of various initial gas temperature in benzene reactor. ....	27
Fig.4-6. Effect of various nozzle diameter in benzene reactor. ....	29
Fig.4-7. Photography of various nozzle diameter in benzene reactor. ....	29
Fig.4-8. Effect of various electrode gap in benzene reactor. ....	31
Fig.4-9. Effect of various electrode length in benzene reactor. ....	33
Fig.4-10. Effect of various steam/carbon ratio in naphthalene reactor. ....	37
Fig.4-11. Effect of various specific energy input in naphthalene. ....	39
Fig.4-12. Effect of various total gas flow rate in naphthalene reactor. ....	41
Fig.4-13. Effect of various inlet gas flow rate in naphthalene reactor. ....	43
Fig.4-14. Effect of various electrode length in naphthalene reactor. ....	45

# ABSTRACT

## A study on Tar removal using Gliding Arc Plasma

Yoon Cheol Yang

Advisor : Prof. Young Nam Chun, Ph.D.

Department of Environmental Engineering,

Graduate School of Chosun University

Pyrolysis/gasification technique is the energy conversion technique which produces the industrially useful syngas from various waste resources. But the energy conversion technique is not easy to use the facility applications because the condensed tar in process occurs the corrosion and operation problems. Specially, condensation tar on a process generates a corrosion issue by a failure of a device and a conduit line and some organic acid and difficult occurrence for a driving of equipment and maintenance.

Currently plasma technology has been applying to a variety and a division a new method. Had potential compare with electric discharge methods to be different through application study in various fields during the last ten years formal a gliding arc electric discharge among them is commercial, and is already known that is a favorable method. With representative characteristics, response adjustment is easy, and conversion rate is high, and there is a high merit, and an energy efficiency is developing as eco-friendly new alternatives.

Experiments should be made to study on optimum design of plasma reformer and reduction of tar. Benzene, Naphthalene by representative matter during various tar components, and proceeded study as used gliding arc plasma reactor in order to removal this. The parametric screening studies were carried out according to the changes of steam/carbon ratio, input discharge power, total gas flow rate and initial concentration. The results are as follows was benzene removal efficiency 95% and naphthalene removal efficiency 90%.

# 제1장 서론

최근 화석연료의 연소시 발생하는 지구온난화 가스 증가로 인한 환경문제의 발생 및 연료의 한계성으로 인한 에너지 고갈문제가 점차 심각해지고 있다. 따라서 바이오매스, 도시고형폐기물(MSW), 슬러지 폐기물 등이 재생가능에너지(renewable energy)의 하나로 관심이 집중되고 있다. 특히 폐자원의 열분해/가스화 에너지 전환기술은 환경문제의 해결과 다양한 분야로의 적용 가능한 재생 에너지의 창출이라는 관점에서 볼 때, 우리나라와 같이 에너지 빈국의 경우 필수적으로 개발되어야 할 기술이다. 하지만 열분해 공정상에 발생하는 열분해가스 중의 타르(tar)로 인해 각각의 기술에 대해 적용이 쉽지 않은 상태이다[1,2]. 공정상의 응축타르는 장치 및 관로의 장애와 일부 유기산에 의한 부식문제를 발생시킨다. 결과적으로 타르의 제거가 어려운 경우 설비의 청소 및 정비를 위해 운전을 빈번히 정지해야 하기 때문에 동일용량의 두 설비가 필요하며 이에 설치 등 비용 부담이 크다[3].

이에 대한 문제점을 해결하기 위하여, 많은 연구가 진행되고 있다. 현재 대표적으로 진행되고 있는 방법으로 크게 타르 제거 부대설비가 추가되지 않고 운전조건 개선, 가스화 기술의 개발하는 열분해로 내 처리법(In-Pyrolyzer Technology; IPT)과 열(thermal), 촉매(catalyst), 플라즈마(plasma), 필터, 스크러버, 흡착 등의 후처리 공정을 이용하는 열분해로 후 처리법(Technology After Pyrolyzer; TAP)이 있다. 열분해로 내 처리법(In-Pyrolyzer Technology; IPT)은 타르의 합성 가스 생산은 달성하였으나, 장치의 규모개선(scale-up), 복잡한 열분해 반응기 제작의 설치비용 문제 등의 한계를 극복하지 못하고 있다[2,3]. 그래서 열분해 공정 후 타르를 제거하는 TAP에 대한 기술에 관심이 증대되어 왔다. 열분해로 후 처리법 중 고온 크래킹(thermal cracking)의 경우 높은 온도와 충분한 체류시간의 유지가 필요하며, 촉매 타르 크래킹의 경우 촉매 활성 저하로 인해 개질장치의 효율이 급격히 떨어지는 것은 물론이고 운전비용이 많이 드는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 펄스 저온 플라즈마 크래킹에 대한 기초연구를 수행하여, 기존의 열 및 촉매 크래킹에 비해 플라즈마 방전의 경우 라디칼(radical) 형성으로 인해 타르 제거율이 높다는 것을 보였다[4].

그 외에 일부 경질 방향족 타르(light aromatic tar)인 벤젠, 톨루엔, 크실렌 등이 포함된 VOCs(volatile organic compounds) 제거에 대한 연구가 진행되었다.

플라즈마를 이용하여 VOCs를 저감하는 기술은 주로 코로나 방전(corona discharge), DBD(dielectric barrier discharge), 글라이딩 아크 방전(gliding arc discharge) 플라즈마 등에 대해 일부 연구가 수행 되었는데, 에너지 효율이 높으며, VOCs의 종류와 농도에 영향을 크게 받지 않는 장점이 있어 점차 관심이 증가되고 있다[5-7].

하지만 이러한 저온 플라즈마(5,000K 이하)의 관련 연구의 경우, 각각의 문제점을 가지는데, 코로나 방전은 펄스전원 공급장치 제작비용과 짧은 수명이 문제가 있으며, Glow 방전, DBD(dielectric barrier discharge), 마이크로 웨이브 방전은 특성상 개질 유량이 소량이므로 학술적으로 연구로는 적당하나 상업화 가능성이 낮으며, 개질 반응에서 생성되는 생성물의 선택도를 조절하는 것이 어렵다는 단점이 있다[4,8,9]. 이러한 문제점을 해결하기 위한 글라이딩 아크 방전 형식은 지난 수 십년 동안 다양한 분야에 적용 연구를 통해 다른 방전방식에 비해 잠재성을 가진 상업적으로 유리한 방식이라고 이미 알려져 있다. 대표적인 특징으로는 반응 조절이 용의하고 전환율이 높으면서 에너지 효율도 높은 장점이 있어 환경 친화적인 새로운 대안으로 발전하고 있다[10]. 이러한 장점을 이용하여 타르 성분의 제거에 관하여 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 장치가 컴팩트하고, 수초의 빠른 시동특성 및 응답시간, 타르 성분 중 고분자 탄화수소를 포함한 다양한 종류의 연료 및 바이오 가스의 적용이 가능하며, 높은 전환율과 가스 성상에 대해 최적 운전상태 유지 등의 장점을 가지는 글라이딩 아크 플라즈마 반응기를 이용하여 타르 제거 글라이딩 아크 플라즈마 반응기를(gliding arc plasma reactor)를 설계 및 개발하였다.

타르 성분 중 액상인 벤젠과 고상인 나프탈렌을 대표 물질로 선정하였으며, 이들 물질의 농도는 하수 슬러지 열분해 시 생성되는 배출가스 중의 타르 성분으로 각각 약 3.5%, 1%로 산정하였다[11,12]. 실험은 타르 제거 분해효율 및 에너지 효율을 높이기 위하여 steam/carbon 비, SEI, 전체 가스량, 초기 농도 변화, 유입가스 온도 변화, 노즐직경, 전극간격, 전극길이 변화에 대하여 각각 변수별 실험을 진행하였다.

## 제 2장 이론적 고찰

### 제1절 타르

#### 1. 타르의 정의

타르는 정의는 아직까지 연구자에 따라 차이가 있으나 일반적으로 알려진 정의로는 대기 조건에서 응축하기 쉬운 탄화수소의 혼합물로서 벤젠고리가 하나서부터 여러 개로 구성된 방향족 물질이라고 표현되며, 가스화 과정 중에 발생하는 열분해로(gasifier), 후처리 설비(conversion device), 배기 관로(downstream process)에서 생성되는 응축성 물질로 방향족물질(aromatics)을 말한다[1,2,13].

#### 2. 타르의 종류

타르는 경질타르(light tar)와 중질타르(heavy tar)로 구분될 수 있다. 경질타르는 벤젠고리가 하나로 구성된 경질 방향족물질(light aromatics)과 2 ~ 4개의 벤젠고리를 가지고 있는 경질 다환 방향족 탄화수소(light polycyclic aromatic hydrocarbon; light PAH)이고, 중질타르는 5개 이상의 벤젠고리를 가지고 있는 중질 다환방향족 탄화수소(heavy PAH)이다[13]. 또한 타르는 온도나 연소산화 조건에 따라 Table 1에서 볼 수 있듯이 생성물이 차이를 보인다.

Table 1. Chemical components in biomass tars

Conventional Flash Pyrolysis (450–500°C)	High-Temperature Flash Pyrolysis (600–650°C)	Conventional Steam Gasification (700–800°C)	High-Temperature Steam Gasification (900–1000°C)
Acids			Naphthalene
Aldehydes	Benzenes	Naphthalenes	Acenaphthylene
Ketones	Phenols	Acenaphthylenes	Phenanthrene
Furans	Catechols	Fluorenes	Fluoranthene
Alcohols	Naphthalenes	Phenanthrenes	Pyrene
Complex Oxygenates	Biphenyls	Benzaldehydes	Acephenanthrylene
Phenols	Phenanthrenes	Phenols	Benzanthracenes
Guaiacols	Benzofurans	Naphthofurans	Benzopyrenes
Syringols	Benzaldehydes	Benzanthracenes	226 MW PAHs
Complex Phenols			276 MW PAHs

## 제2절 플라즈마

### 1. 플라즈마

플라즈마는 고온에서 음전하를 가진 전자와 양전하를 띤 이온으로 분리된 기체 상태로써 전하분리도가 상당히 높으면서도 전체적으로는 음과 양의 전하수가 같아서 중성을 띠는 기체들을 나타낸다.

특히 플라즈마 방전은 높은 에너지를 가져 주입가스를 다양한 가치가 있는 합성 가스로 강하게 전환 반응이 촉진될 수 있는 활성 화학종(전자, 이온, 원자, 라디칼, H, H\*, H<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>\*, H<sub>3</sub>\*, O, O<sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>-</sup>, OH, OH\*, HO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>, CH, CH<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>, CO\*, CO<sub>2</sub>\* 등의 여기분자)을 생산한다. 따라서 다른 물질에 에너지를 쉽게 전달하는 특징을 가지게 되어 반응성이 낮은 화합물질도 쉽게 변화시킬 수 있는 특성이 있다.

일반적으로 플라즈마는 고압, 평형 플라즈마로 불리는 고온 플라즈마와 저압, 비평형(non-equilibrium) 플라즈마로 불리는 저온 플라즈마의 두가지 형태로 분류된다.[14]

### 2. 플라즈마의 종류 및 특징

고온 플라즈마는 전력(electric power)이 1 kW이상 인가될 때 생성된다. 가스(neutral species)와 전자(electron)의 온도가 약 5,000 ~ 10,000K로 동일하다. 그래서 고 밀도 이온 상태를 유지함으로 다른 물질에 에너지를 쉽게 전달하는 특징을 가지고 있기 때문에 반응성이 낮은 화합물질도 쉽게 개질시킬 수 있는 특징이 있다. 하지만 반응기의 온도 유지와 소비되는 에너지가 큼으로 경제성에 문제가 있다.

저온 플라즈마는 전력이 매우 낮은 수 백 와트(watt)정도에서 생성된다. 가스와 전자의 온도가 동일하지 않으며 전자의 온도만 5,000K로 고온이 유지된다. 따라서 대상가스에 대해 플라즈마가 에너지를 공급하는 것이 아니고 화학반응을 일으키고 증대시키는데 기여하는 기(radical)와 여기체(excited species)를 생성한다. 그래서 저압 또는 상압 상태에 있는 기체나 유기 증기들을 전기적으로 방전시키면서 손쉽게 얻을 수 있어 많은 분야에서 응용되고 있다. 또한 장치의 컴팩트화, 수초의 빠른 시동 및 응답시간, 고분자 탄화수소를 포함한 다양한 종류의 연료 및 바이오 에너지 적용 가능, 넓은 범위의 유량과 가스성상에 대해 최적 운전상태 유지 등의 특징을 가지고 있다[9].

## 제3절 글라이딩 아크 플라즈마

### 1. 글라이딩 아크 플라즈마 원리

글라이딩 아크 플라즈마는 고온 플라즈마와 저온 플라즈마 영역이 구분되어 순차적으로 과도형상(transient phenomenon)을 보이며 지속적으로 발생된다. 글라이딩 아크 방전 형식은 지난 수 십년 동안 다양한 분야에 적용 연구를 통해 다른 방전방식에 비해 잠재성을 가진 상업적으로 유리한 방식이라고 이미 알려져 있다 [15,16]. 특히 전극이 3개인 3상 글라이딩 아크 방전(three phase gliding arc discharge) 방식인데 기존의 2전극 직류 글라이딩 아크 방식보다 100배 이상의 플라즈마 영역을 형성하고 방전 시 선회 와류 난류 유동(vortex turbulent flow)로 인해 반응성이 증대되어 기존의 다른 플라즈마 방전보다 월등히 경제성이 확보된다고 알려져 있다[17].

## 2. 글라이딩 아크 플라즈마 방전현상

글라이딩 아크 방전현상은 Fig.2-1에 나타낸 바와 같이 초기방전 단계(intake break-down stage), 평형단계(equilibrium stage), 비평형단계(non-equilibrium stage)로 구분된다[16]. 전극에 고전압이 인가되면 두 전극사이에 초기 방전이 형성된다. 노즐에서 분사되어 초기 방전된 가스는 부채꼴형 전극을 타고 상부로 이동하면서 평형 플라즈마 영역을 형성한다. 그 후, 전극간격의 증가로 비평형상태의 플라즈마로 전환되어 플라즈마 영역을 확장시킨 다음 에너지 손실과 함께 소멸되며 다시 초기 방전의 상태로 가는 이 과정이 반복된다.

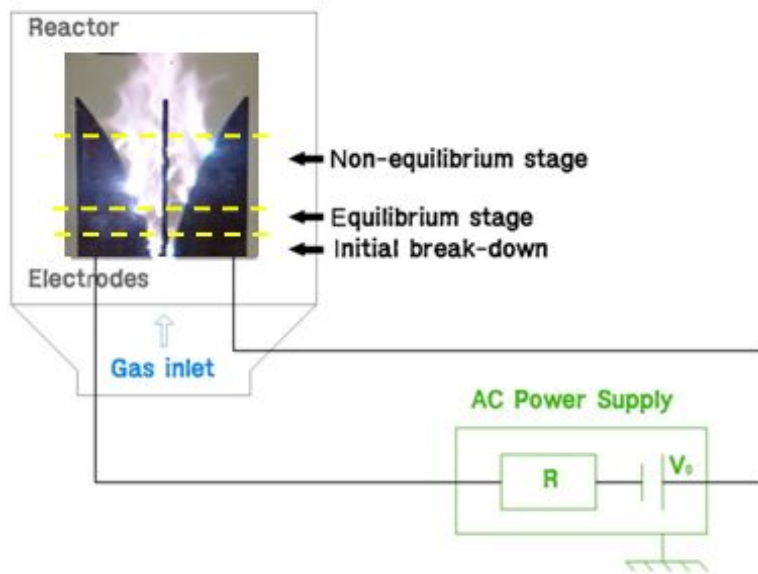


Fig.2-1. Phenomenon of gliding arc discharge.



### 제3장 실험 장치 및 방법

#### 제1절 실험장치

Fig.3-1은 타르 제거 글라이딩 아크 플라즈마 실험장치 구성도를 나타내며 Fig.3-2는 타르 제거 글라이딩 아크 플라즈마 실험장치 사진을 나타내고 있다.

타르 제거 글라이딩 아크 플라즈마 실험장치는 글라이딩 아크 플라즈마 반응기, 전원공급장치, 수증기 공급라인, 측정 및 분석 라인, 제어 및 모니터링 시스템으로 구성되어 있다.

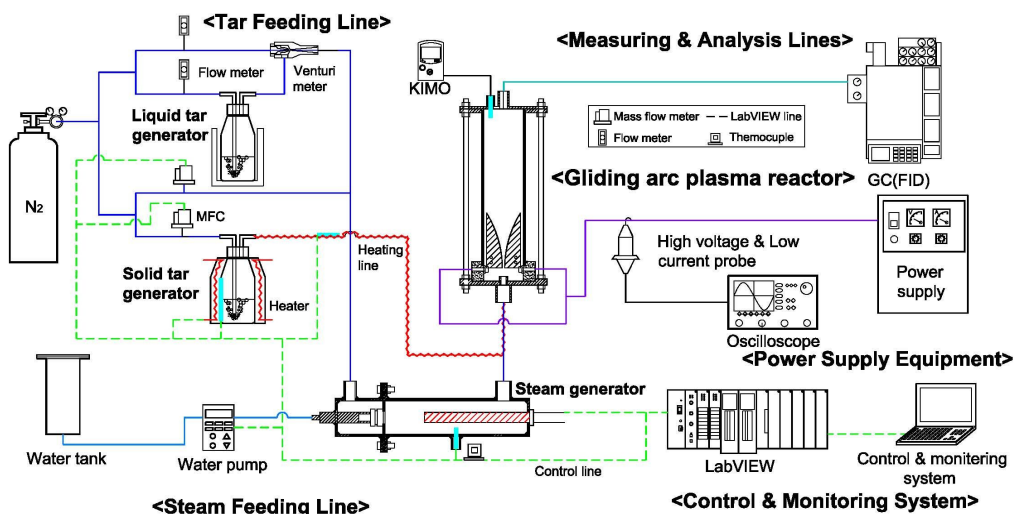


Fig.3-1. Schematic diagram of gliding arc plasma removal tar.

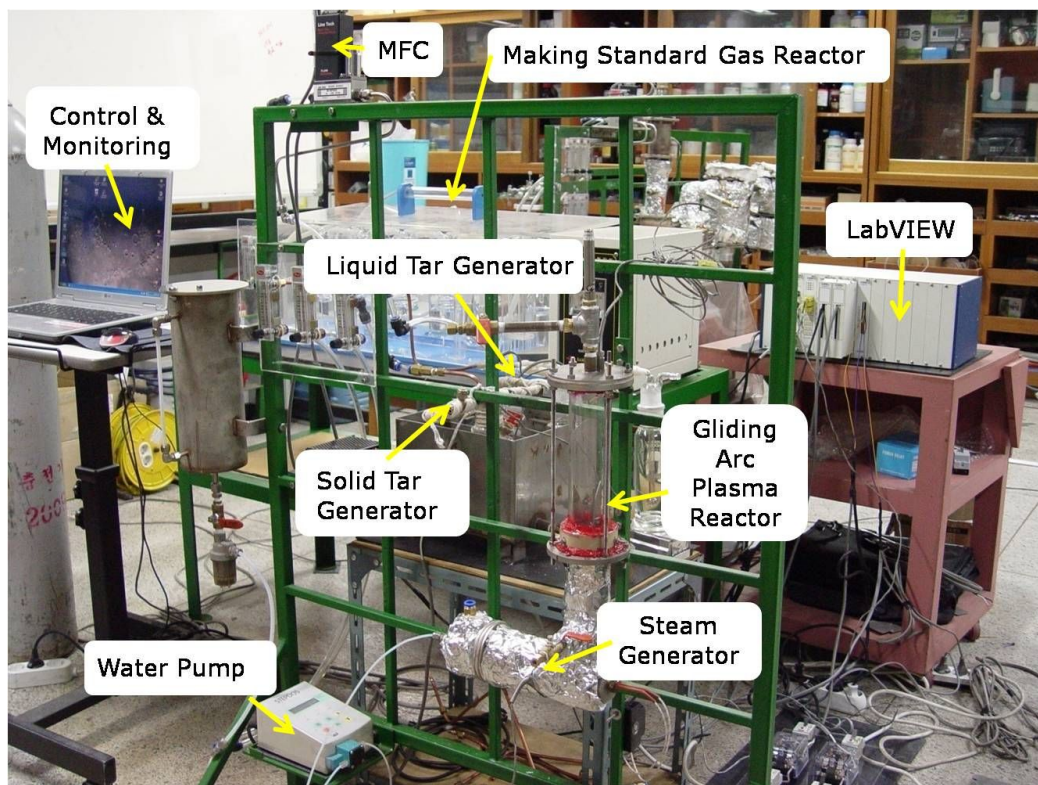


Fig.3-2. Photography of a gliding arc plasma removal tar.

## 1. 글라이딩 아크 플라즈마 반응기

글라이딩 아크 플라즈마 반응기는 3개의 부채꼴 형태의 전극이 반응기 내부에 120도로 위치하여 전극 간격을 3 mm로 유지하였으며, 세라믹( $Al_2O_3$  wt 96%)을 이용하여 반응기 절연 및 전극을 고정하였다. 또한 가스분사 노즐이 전극 상단에 직경은 1.5 mm로 설치되어 있으며, 플라즈마 반응기 외통은 절연 및 내부를 관찰할 수 있도록 석영관을 사용하였다.

## 2. 전원공급장치

전원공급장치(유니콘 테크, UAP-15K1A, Korea)는 반응기 내부에 안정적인 플라즈마 방전을 유지하기 위한 장치로 최대용량이 15 kW(전압: 15 kV, 교류전류: 1 A)인 고전압 파워 서플라이를 제작하였다.

## 3. 가스/수증기 공급라인

희석용 질소 MFC(BRONKHOST, F201AC-FAC-22-V, Netherlands)와 모사 타르 가스 발생용 질소 MFC(LINETECH, M3030V, Korea)를 이용하여 글라이딩 아크 플라즈마 반응기에 가스 유량을 정밀하게 주입되도록 제어하여 플라즈마 반응기 내부로 공급하였다. 수증기는 물탱크에서 공급된 물을 정량펌프(KNF, STEPDOS<sup>®</sup>03, Switzerland)를 사용하여 수증기 발생장치로 공급하였다.

## 4. 측정 및 분석장비

측정 장비로는 플라즈마 방전 특성을 파악하기 위하여 오실로스코프(Tektronix, TDS 3052, USA)에 연결된 고전압 probe(Tektronix, P6015, USA)와 전류 probe(Tektronix, A6303, USA)를 이용하여 측정하였다. 온도 측정은 K-type 열전대를 이용하여 LabVIEW(National Instrument, LabVIEW 8.6, USA)로 실시간 측정하였으며, 글라이딩 아크 플라즈마 반응기 내부의 온도는 데이터 로거(KIMO, KTT300, France)를 이용하여 실시간으로 측정하였다.

가스분석은 분석장비인 가스크로마토그래프(SHIMADZU, GC-14B, Japan)를 이용하였다. 분석컬럼으로 DB-1(30 m×0.25 mm×0.25  $\mu$ m) 컬럼을 이용하여 벤젠과 나프탈렌 성분을 각각 분석하였다.

## 5. 제어 및 모니터링 시스템

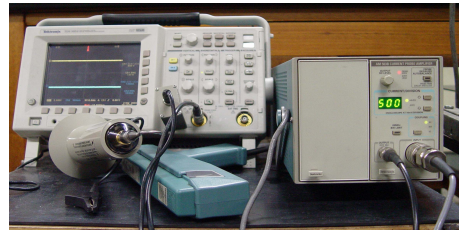
제어 및 모니터링 시스템은 LabVIEW를 이용하여 MFC, 물펌프, 히터를 연결하여 컴퓨터로 제어를 하였다. 또한 온도에 따른 히터 작동유무를 자동화 하였으며, 각각의 상태 변화 및 실험 조건 변화를 연속적으로 모니터링을 하였다.



(a) Water pump



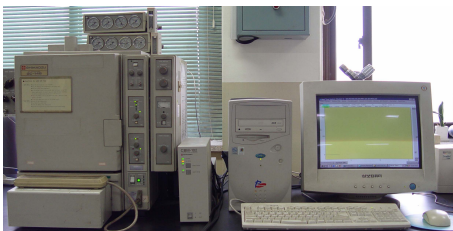
(b) Data logger



(c) Oscilloscope



(d) LabVIEW



(e) Gas chromatography



(f) Power supply

Fig.3-3. Photography of experiment equipment.

## 제2절 실험방법

### 1. 벤젠 제거 실험방법

Fig.3-4는 글라이딩 아크 플라즈마 반응기의 벤젠 제거 시 초기시동 특성을 나타내고 있다. 실험은 수증기 발생장치 온도를 약 300℃로 유지한 상태에서 벤젠 생성 장치에 0.3 L/min 희석용 질소를 10 L/min를 각각 벤츄리 믹서에 공급하여, 완전 혼합을 시킨다. 일정 시간동안 안정화 시킨 후 플라즈마 반응기 주입 전 타르 성분을 샘플링을 진행하였으며, 이후 수증기를 주입과 동시에 글라이딩 아크 플라즈마 반응기의 방전을 형성하여 벤젠 가스를 제거하였다. 반응기를 통과한 후 벤젠을 샘플링하여 GC FID로 분석을 진행하였다. 샘플링은 출구에 설치된 샘플링 포트에서 이루어지며, GC에 유입하여 분석을 진행하였다. GC의 분석조건으로 Injector 200℃, Detector 280℃를 유지하였으며, Oven은 40 ~ 80℃ 동안 10 °C /min 승온을 80 ~ 300℃ 동안 10 °C/min 승온을 한 후 5 min 안정화 상태에서 분석을 진행하였다.

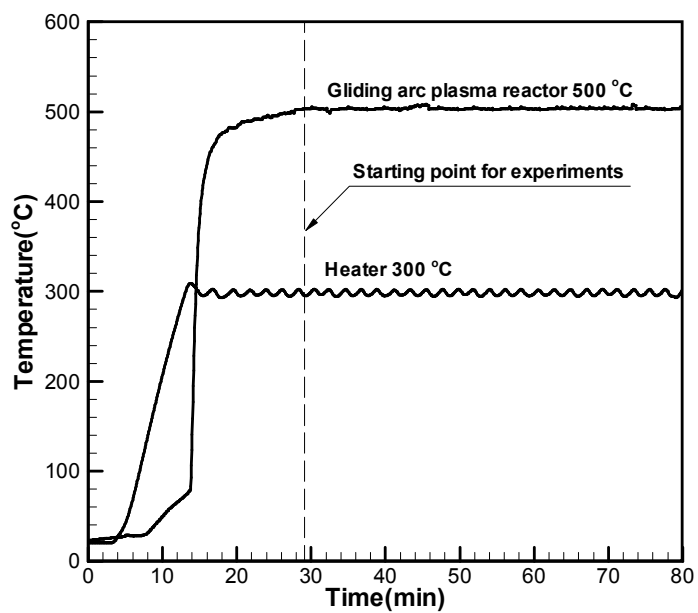


Fig.3-4. Effect of temperature on the performance of benzene reactor.

## 2. 나프탈렌 제거 실험방법

Fig.3-5는 글라이딩 아크 플라즈마 반응기의 나프탈렌 제거 시 초기시동 특성을 나타내고 있다. 실험은 수증기 발생장치 온도를 500℃로 유지하였다. 나프탈렌의 경우 끓는점이 약 218℃이기 때문에 가스 상태를 유지하기 위하여 나프탈렌이 흐르는 관은 모두 테입 히터로 온도를 유지하였다. 온도는 LabVIEW를 이용하여 300℃로 유지하였다. 나프탈렌 반응기의 경우 녹는점이 약 80℃이기 때문에 액체상태를 유지하기 위하여 반응기 외벽 온도를 LabVIEW를 이용하여 90℃로 안정되게 유지하였다. 이 상태에서 질소를 나프탈렌 가스 생성 장치에 질소 0.4 L/min, 수증기 발생장치에 희석용 질소를 8 L/min을 주입하여 수증기 기화장치 이후에서 섞여 플라즈마 반응기로 공급된다. 일정 시간 동안 안정화 시킨 후 플라즈마 반응기 주입 전 나프탈렌 성분을 샘플링을 진행하였다. 이후 수증기를 주입과 동시에 글라이딩 아크 플라즈마 반응기의 방전을 형성하여 나프탈렌 가스를 제거하였다. 반응기를 통과한 후 나프탈렌을 샘플링하여 GC FID로 분석을 진행하였다. 샘플링은 출구에 설치된 샘플링 포트에서 이루어지며, GC에 유입하여 분석을 진행하였다. GC의 분석조건으로 Injector 200℃, Detector 280℃를 유지하였으며, Oven은 40 ~ 320℃에서 10 °C/min 승온하였으며, 이후 20 min 동안 안정화 상태에서 분석을 진행하였다.

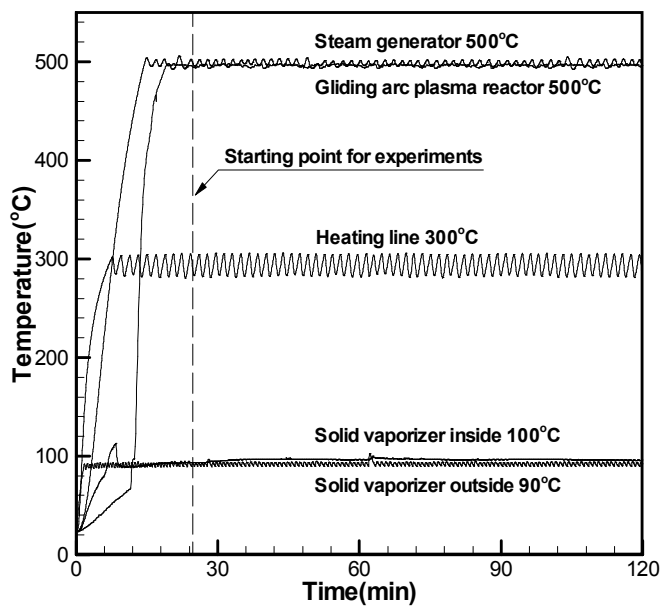


Fig.3-5. Effect of temperature on the performance of naphthalene reactor.



### 3. 실험결과 데이터 처리

글라이딩 아크 플라즈마 반응기의 타르 분해효율, 에너지 효율, Specific energy input은 식(1)~(3)에 의해 계산되어진다.

타르 분해효율은 식(1)와 같다.

$$\eta_t (\%) = \frac{[Inlet Tar] - [Outlet Tar]}{[Inlet Tar]} \quad (1)$$

여기서, [Inlet Tar]는 타르 유입농도(%), [Outlet Tar]는 타르 유출농도(%)이다.

에너지 효율은 식(2)와 같다

$$\eta_e (g/kWh) = \frac{[Tar]_{removal} \times Total\ gas\ flow\ rate}{Power\ input} \quad (2)$$

여기서, [Tar]removal는 타르 제거 농도(%)이다. Total gas flow rate는 반응기에 주입되는 가스량(g/hr), Power input은 플라즈마 입력방전 전력(kW)이다.

Specific energy input(SEI)는 식(3)와 같다.

$$SEI(kWhm^{-3}) = \frac{Discharge\ power}{Total\ gas\ flow\ rate} \quad (3)$$

여기서, Discharge power는 플라즈마 방전 전력(kW), Total gas flow rate는 반응기에 주입되는 가스량(m<sup>3</sup>/hr)이다.

## 제4장 실험결과 및 고찰

### 제1절 벤젠 제거 특성

본 연구에서 개발된 글라이딩 아크 플라즈마 반응기는 분해효율이 최대이며, 낮은 소비전력에서 플라즈마 방전이 안정화 되는 최적조건을 기준조건으로 정하였으며, 이때의 조건 및 결과는 Table 2와 같다.

벤젠의 초기 농도는 3.5%를 유지하였으며, steam/carbon 비는 3이고, 유입가스 온도는 300℃로 기준으로 정하였다. 또한 전체 가스량은 반응기 내 체류시간이 최대로 확보되어 분해효율이 높으면서 방전이 안정적으로 형성되는 범위인 14 L/min으로 정하였으며, SEI 변화는 벤젠 분해효율 및 에너지 효율이 최적인 지점인 0.98 kWhm<sup>-3</sup>을 기준조건으로 정하였다. 노즐직경, 전극간격, 전극길이는 각각의 벤젠 분해효율이 최적 조건인 1.5 mm, 3 mm, 95 mm를 기준조건으로 정하였다.

Table 2. Optimum conditions and their results of benzene reactor

Experimental conditions					
Conditions	S/C	Initial temperature (°C)	Plasma reactor temperature (°C)	Total gas flow rate (L/min)	Specific energy input(kWhm <sup>-3</sup> )
Value	2	300	500	14	0.98
Experimental data					
Inlet concentration(%)	Outlet concentration(%)	Removal efficiency(%)	Energy efficiency (g/kWh)		
3.5	0.184	95	119		

## 1. 수증기 주입량 변화

Fig.4-1는 수증기 주입량 변화를 나타낸 것이다. 유입가스 온도 300℃, 전체 가스량을 14 L/min, SEI 0.98 kWhm<sup>-3</sup>로 고정한 상태에서 수증기 주입량 변화에 대해 실험을 수행하였다.

본 장치의 경우 steam/carbon 비 0.5이하에서는 플라즈마 반응기 내부에 카본 블랙(carbon black)이 형성되었으며, 6이상에서는 주입되는 물의 증가로 인한 수증기 발생장치의 온도 감소 현상이 나타났다. 따라서 steam/carbon 비 실험 범위를 0.6 ~ 6로 정하고 실험을 진행하였다.

실험결과는 steam/carbon 비가 증가함에 따라 점차적으로 분해효율이 증가하다 steam/carbon 비 2에서 최대 95%를 나타내었다. 이후 steam/carbon 비가 증가함에 수증기량의 증가로 인한 따라 점차적으로 농도가 감소됨을 알 수 있다.

이는 플라즈마에 수증기 주입시 대표적인 생성물은 \*OH와 HO<sub>2</sub>\*가 생성이다. 때문에 방전 중 수증기의 증가는 \*OH와 HO<sub>2</sub>\*와 같은 화학종의 증가를 나타낸다. 그러나 너무 많은 물분자의 증가는 시스템 내 전자밀도에 제한을 가지며 활성 화학종의 소멸을 가져온다. 그러므로 수증기 주입량은 잘 조절되어야 한다[7].

결과적으로 steam/carbon 비가 적을 때는 수증기에 의한 OH 라디칼의 생성이 부족함에 따라 분해효율이 감소하게 되며, steam/carbon 비 20이상의 경우는 수증기 주입량의 증가함에 따라 반응기내 전체 가스량이 증가됨을 알 수 있는데, 이로부터 벤젠이 분해 될 수 있는 충분한 체류시간이 확보되지 않는 것으로 보여진다.

에너지 효율의 경우 steam/carbon 비가 증가함에 따라 급격히 증가한 후 약 steam/carbon 비 4.5 이후에서 142 g/kWh로 거의 일정하다.

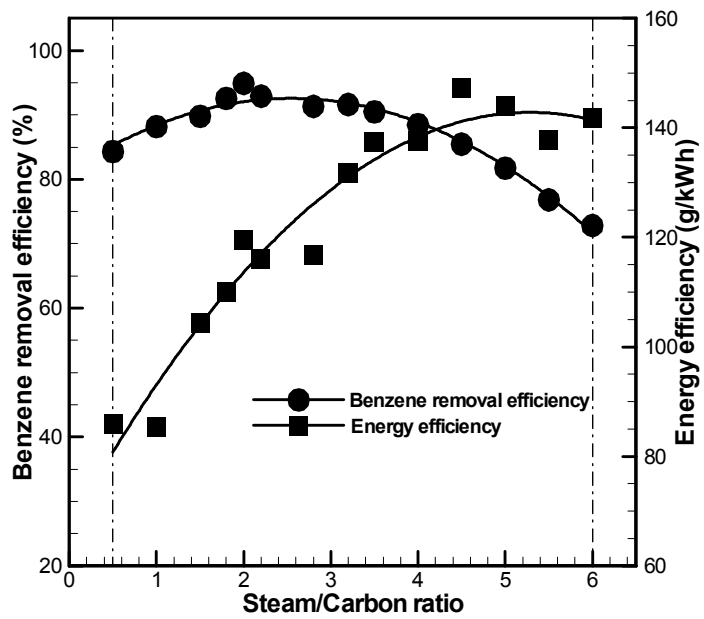


Fig.4-1. Effect of various steam/carbon ratio in benzene reactor.

## 2. SEI 변화

Fig.4-2는 입력방전 전력 변화인 Specific energy input(SEI)에 따른 영향을 나타내고 있다. steam/carbon 비 2, 유입가스 온도 300℃, 전체 가스량을 14 L/min로 고정한 후 SEI 변화 실험을 진행하였다. 실험은 입력방전 전력 0.22 ~ 1.33 kW로 조절함에 따라 SEI 0.26 ~ 1.58 kWh<sup>-3</sup> 범위에서 진행하였다.

SEI가 점차적으로 증가함에 따라 벤젠 분해효율이 증가하여 0.9 kWh<sup>-3</sup> 이후부터 90%이상의 높은 벤젠 분해효율을 나타내고 있었다. 이는 입력방전 전력의 증가는 전자의 초기 반응이 잘 이루어지게 하는데 이는 더 많은 전자와 충돌이 일어나기 때문이다[10]. 또한 에너지 효율은 217 g/kWh에서 81 g/kWh로 SEI가 증가함에 따라 감소됨을 점차적으로 알 수 있다. 벤젠 분해효율 및 에너지 효율을 고려하였을 때 최적 조건은 0.98 kWh<sup>-3</sup>에서 분해효율은 95%임을 알 수 있었으며, 에너지 효율은 119 g/kWh 임을 알 수 있다.

본 연구에서 개발된 플라즈마 반응기의 경우 기존의 연구 결과인 벤젠 분해효율이 약 60%, 에너지 효율 16.9 g/kWh에 비하여 상대적으로 높은 값을 가지는 것을 알 수 있었다.[18]

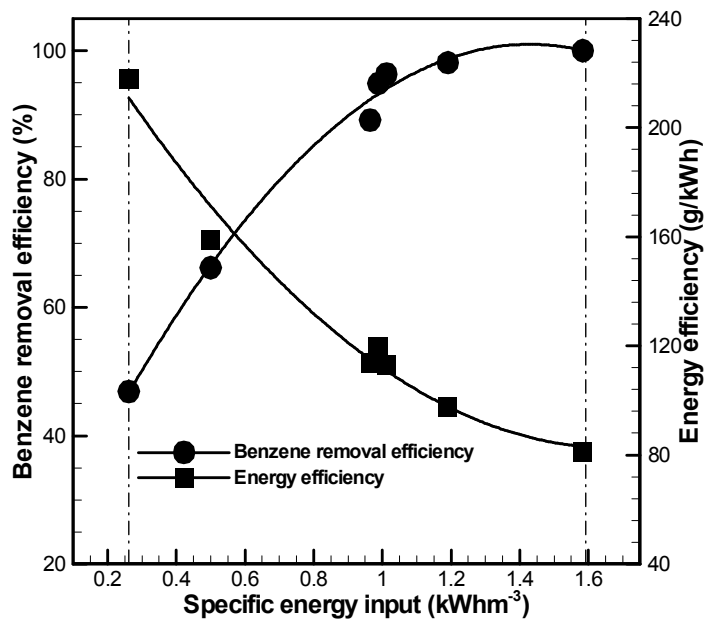


Fig.4-2. Effect of various specific energy input in benzene reactor.

### 3. 전체 가스량 변화

Fig.4-3은 전체가스량 변화에 따른 영향을 나타내고 있다. Steam/carbon 비 2, 유입가스 온도 300℃, SEI 0.98 kWhm<sup>-3</sup>로 정한 후 전체 가스량 변화 실험을 진행하였다. 전체 가스량을 7 ~ 28 L/min으로 조절하여 주입하였다. 전체 가스량 7 L/min 이상에서 방전이 형성된 후 간헐적으로 형성되다 10 L/min 이상부터 플라즈마 방전이 안정적으로 형성되었다.

실험결과는 전체 가스량이 7 L/min에서 80%의 분해효율이 10 L/min 이후 90%이상의 분해효율을 나타내었으며, 14 L/min에서 최대 95%의 분해효율을 나타내었다. 그러나 14 L/min 이후에서는 전체 가스량이 증가하면서 점차적으로 분해효율이 감소한다. 이는 전체 가스량이 증가함에 따라 동일 직경의 노즐을 통한 가스 유속의 증가로 방전 영역에서의 체류시간의 감소하기 때문으로 보여진다. 일반적으로 전체 가스량의 증가로 인한 분해효율은 화학적 구조와는 상관없이 급격히 감소되는데, 플라즈마 방전 영역과 벤젠 사이의 상호작용 시간과 접촉이 줄어들며 이것은 각각의 반응 이온과 라디칼과의 전자 충돌이 감소되기 때문이다[19]. 에너지 효율은 전체 가스량이 증가함에 따라 급격히 증가되는 것을 알 수 있다.



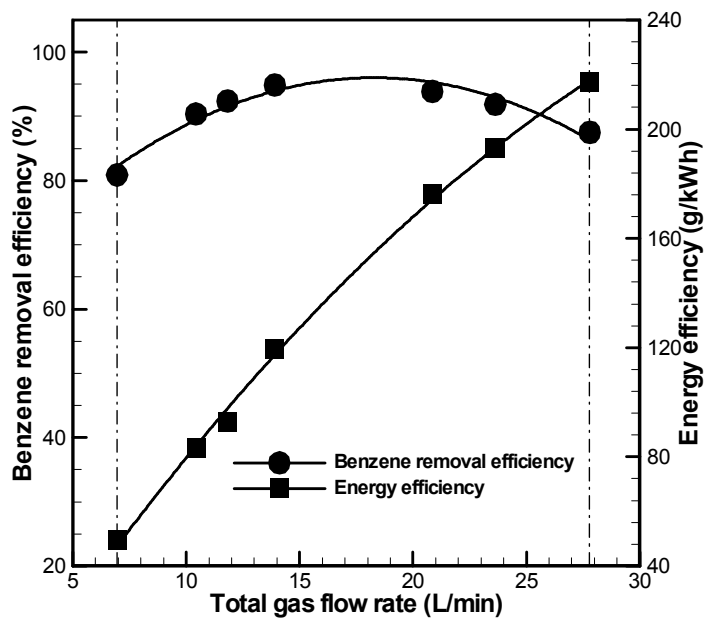


Fig. 4-3. Effect of various total gas flow rate in benzene reactor.

#### 4. 초기 농도 변화

Fig.4-4는 초기 농도 변화에 따른 영향을 나타내고 있다. Steam/carbon 비 2, 유입가스 온도 300℃, SEI 0.98 kWhm<sup>-3</sup>, 전체 가스량 14 L/min로 초기 농도 변화에 대한 실험을 진행하였다.

초기 농도의 변화는 파워소비에 중요한 영향을 나타낸다. 플라즈마 특성은 전자 에너지와 밀도를 통하여 벤젠의 농도를 낮추는 역할을 한다. 하지만 높은 농도의 분자의 경우 전자에너지와 밀도가 각각 분자와 반응한 후 남기 때문에 제거율은 낮아진다[7].

질소유량은 10 L/min 으로 고정하였으며, 초기 벤젠 주입량을 0.1 ~ 0.5 L/min 을 변수로 실험을 진행하였다. 그 결과 벤젠의 초기 농도는 1.4 ~ 7.0%까지 변화하였으며, 반응기를 거친 후의 분해효율은 초기 농도가 1.4% 일 때 100%부터 점차적으로 감소하여 벤젠 초기농도 7%일 경우 84%까지 감소됨을 알 수 있다. 이로부터 초기 농도가 증가하면 플라즈마에 의한 분해되어야 할 벤젠의 양이 증가하기 때문에 벤젠 분해효율이 낮아지는 것으로 보여진다.

에너지 효율의 경우 벤젠의 초기 농도가 증가함에 따라 steam/carbon 비를 2로 고정하였기 때문에 수증기 주입량이 증가하게 되며, 이로부터 주입되는 전체 가스량이 크게 증가하게 되어, 에너지 효율은 41 g/kWh에서 242 g/kWh까지 점차적으로 증가됨을 알 수 있다.

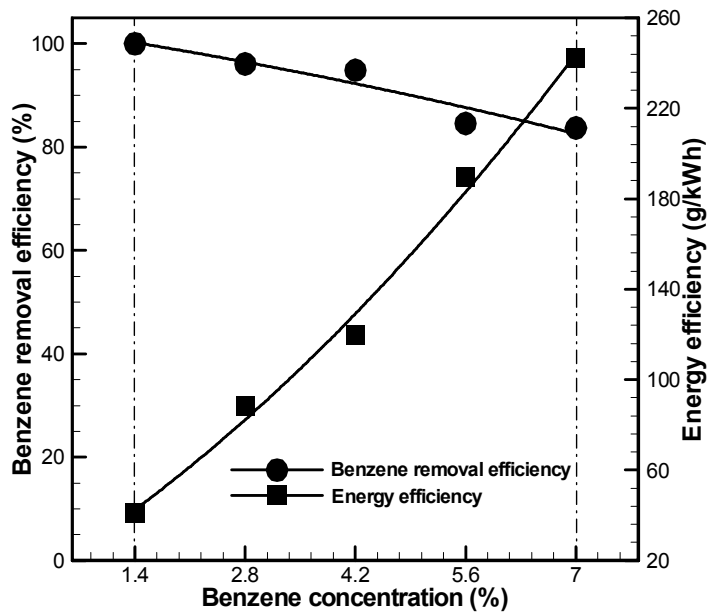


Fig. 4-4. Effect of various inlet gas flow rate in benzene reactor.

## 5. 유입가스 온도 변화

일반적으로 열분해로 배출부에서의 온도는 150 ~ 200°C 정도를 유지하고 있다. 이러한 배출가스의 온도에 의하여 분해효율에 영향이 있는지를 파악하기 위하여 플라즈마 반응기의 유입 가스 온도에 따른 벤젠 분해효율에 대하여 실험을 진행하였다.

Fig.4-5는 유입 가스 온도 변화에 따른 영향을 나타내고 있다. Steam/carbon 비 2, SEI 0.98 kWhm<sup>-3</sup>, 전체 가스량 14 L/min로 유입가스 온도 변화에 대한 실험을 진행하였다. 실험은 수증기로 환산된 물을 동시에 주입되기 때문에 충분히 기화시킬 수 있는 최소 온도인 150°C부터 최대 450°C까지 실험을 진행하였다.

실험 결과는 유입가스 온도 150°C 일 경우 벤젠 분해효율이 91%에서부터 온도가 증가함에 따라, 점차적으로 증가하기 시작하며, 300°C 이후부터는 평균 95%로 비교적 안정적으로 유지됨을 알 수 있다. 이는 주입가스의 온도 증가는 평균 전자에너지(mean electron energy)와 OH 라디칼(OH radical) 농도가 증가되어 벤젠 분해효율이 증가한다[7]. 이로부터 플라즈마에 의한 벤젠 제거 시 유입가스 온도의 최적 조건이 300°C 임을 알 수 있었다. 벤젠 분해효율이 증가함에 따라 에너지 효율의 또한 118 g/kWh에서 125 g/kWh까지 점차적으로 증가함을 알 수 있다.

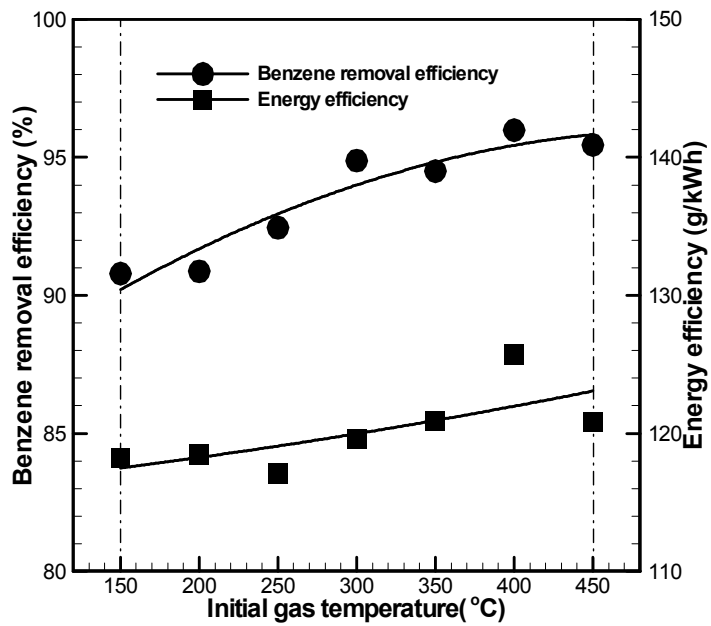


Fig.4-5. Effect of various initial gas temperature in benzene reactor.

## 6. 노즐직경 변화

Fig.4-6은 노즐직경 변화에 따른 영향을 나타내고 있으며, Fig.4-7은 노즐에 의한 플라즈마 방전 사진을 나타내고 있다. 실험은 기준조건인 steam/carbon 비 2, 유입가스 온도 300℃, SEI 0.98 kWhm<sup>-3</sup>, 전체 가스량 14 L/min로 전극간격은 3 mm이며, 전극길이는 95 mm를 유지하면서 노즐직경 변화에 대한 실험을 진행하였다.

Fig.4-6은 노즐직경 1.5 mm 최대 95%에서 점차 감소하여 5 mm의 경우 76%까지 분해효율이 급격히 감소됨을 알 수 있었다. 이때의 에너지효율 또한 119 g/kWh에서 98 g/kWh까지 감소됨을 알 수 있었다.

Fig.4-7의 사진에서 볼수 있듯이 노즐직경 1.5 mm 인 경우 전극간격 3 mm 내에 분사되어 방전이 전극 선단부터 끝까지 균일하게 잘 발생되는 것을 알 수 있다. 하지만 노즐직경 3 mm 이상의 경우는 일부 주입가스가 전극 사이에 분사되지 못하고 주위로 확산되어 충분히 방전이 이루어지지 못하고 있다. 특히 5 mm의 경우 전극선단에서 거의 방전이 이루어지지 못한 상태에서 전극 후류에서 일부가 방전되는 것을 알 수 있다. 그러므로 벤젠 분해효율과 에너지 효율이 노즐직경 증가에 따라 감소하는 것이다.

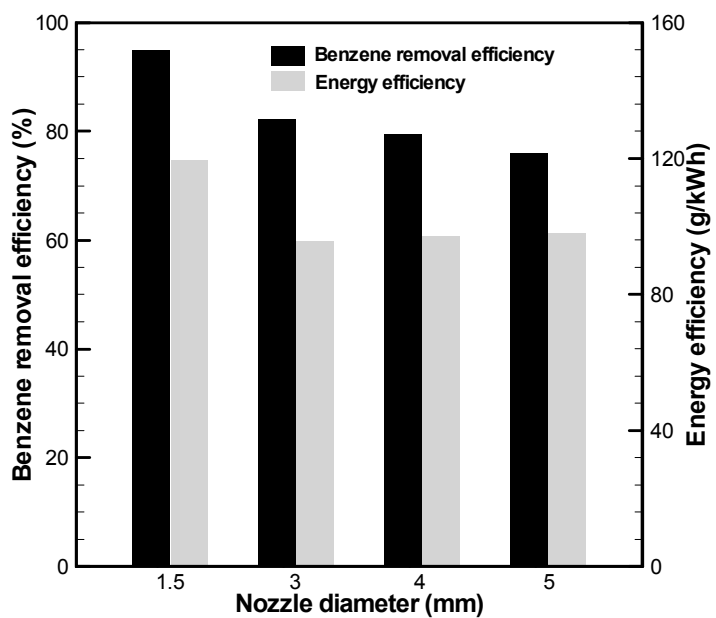


Fig.4-6. Effect of various nozzle diameter in benzene reactor.

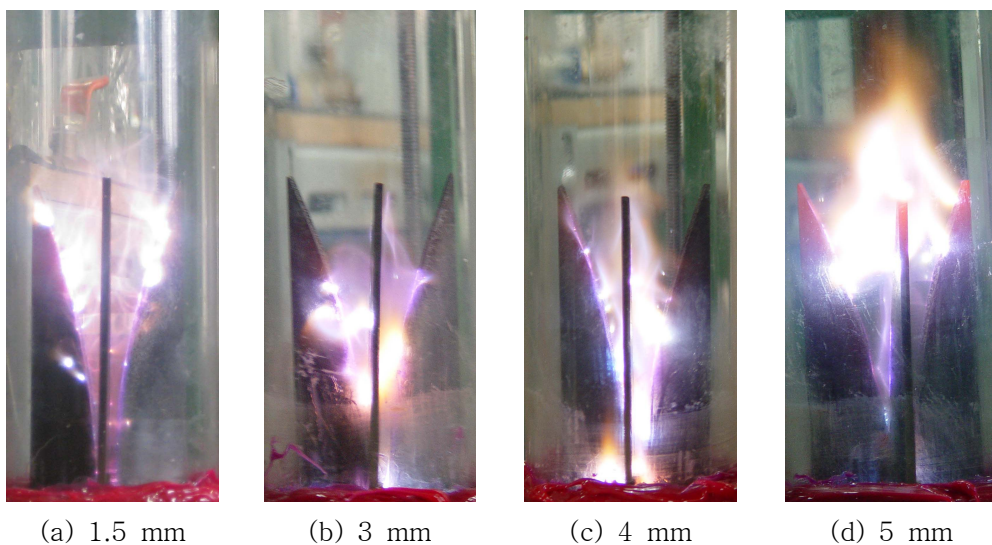


Fig.4-7. Photography of various nozzle diameter in benzene reactor.

## 7. 전극간격 변화

Fig.4-8은 전극간격 변화에 따른 영향을 나타내고 있다. 실험은 기준조건인 steam/carbon 비 2, 유입가스 온도 300°C, SEI 0.98 kWhm<sup>-3</sup>, 전체 가스량 14 L/min로 노즐직경은 1.5 mm이며, 전극길이는 95 mm를 유지하면서 전극간격 변화에 대한 실험을 진행하였다.

전극간격 경우 방전영역의 차이를 나타내며, 방전영역의 크기에 따라 많은 수의 활성종이 생성된다. 전극 간격이 최소인 경우 방전영역이 상대적으로 작게 형성되며, 전극간격이 증가함에 따라 방전영역이 넓어지게 되어 보다 많은 수의 활성종이 생성된다[9].

전극간격은 1,2,3 mm로 실험을 진행하였으며, 전극 간격 1 mm에서 벤젠 분해효율은 77% 나타내고 있으며, 전극 간격이 증가함에 따라 3 mm에서 95%까지 증가되었다. 이는 전극 간격이 증가함에 따라 방전을 형성하는 영역의 면적이 크게 증가하기 때문에 분해효율이 증가된 것으로 보여진다. 에너지 효율 또한 96 g/kWh에서 119 g/kWh까지 증가되어 벤젠 제거 효율이 증가됨을 알 수 있었다.

방전사진에서 볼 수 있듯이 전극간격이 1 mm 인 경우 노즐직경 1.5 mm 보다 상대적으로 전극간격이 좁아 방전이 끝부분까지 타고 올라오지 못하는 현상이 나타났으며, 방전현상도 비교적 불안정적인 모습을 나타내었다. 특히 전극간격이 3 mm 인 경우는 전극후단까지 방전이 안정적으로 형성되는 것을 볼 수 있었다.

글라이딩 아크 플라즈마 반응기 설계에서 노즐직경과 전극간격은 플라즈마 방전의 형상에 주는 중요한 인자로 알려져 있으며, 전극간격과 노즐직경의 비가 1 이상이 안정된 플라즈마를 형성한다고 알려져 있다[19]. 본 연구의 경우 노즐을 통한 기체 유속이 130 m/s 인 상태에서 전극 간격과 노즐 직경비가 2 일 때 최적의 플라즈마 방전이 형성되었다.



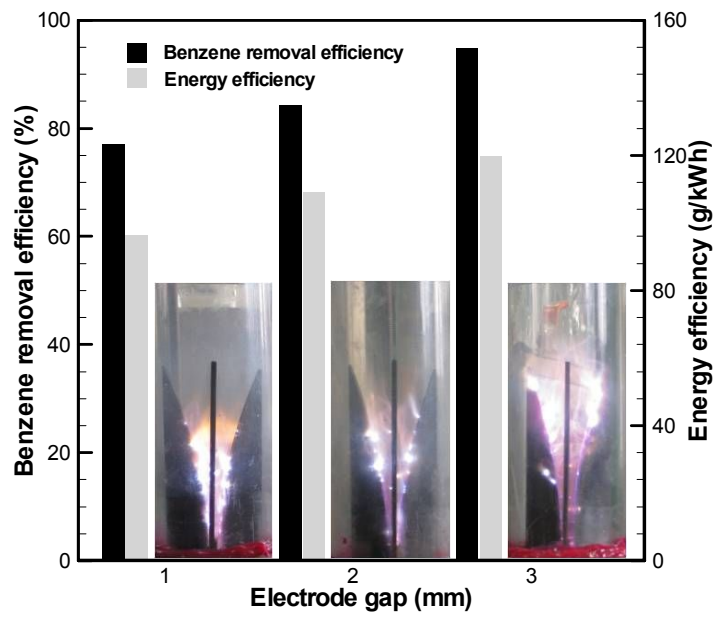


Fig.4-8. Effect of various electrode gap in benzene reactor.

## 8. 전극길이 변화

Fig.4-9는 전극길이 변화에 따른 영향을 나타내고 있다. 실험은 기준조건인 steam/carbon 비 2, 유입가스 온도 300℃, SEI 0.98 kWhm<sup>-3</sup>, 전체 가스량 14 L/min로 노즐직경은 1.5 mm이며, 전극간격은 3 mm를 유지하면서 전극길이 변화에 대한 실험을 진행하였다.

전극길이는 동일 형상의 전극의 길이를 70, 80, 95 mm로 실험을 진행하였다. 벤젠 분해효율의 경우 동일 조건에서 전극길이가 길어짐에 따라 78%에서 95%까지 증가됨을 알 수 있으며, 에너지 효율의 경우 98 g/kWh에서 119 g/kWh까지 증가됨을 알 수 있었다. 이는 전극길이가 작을수록 방전영역이 작게 형성되어 통하여 가스가 통과시 체류시간의 감소가 인하여 분해효율이 낮아지는 것으로 보여진다.

사진에서 전극길이가 70 mm의 경우 방전영역이 짧게 형성되며, 전극 자체가 불게 변하면서 과부하가 걸리는 것으로부터 전극에 전력이 과도하게 들어간 것으로 보여진다. 또한 전극길이가 점차적으로 증가함에 따라 방전이 영역이 넓어지며, 전극 길이 95 mm 일때 안정적으로 형성됨을 알 수 있었다.

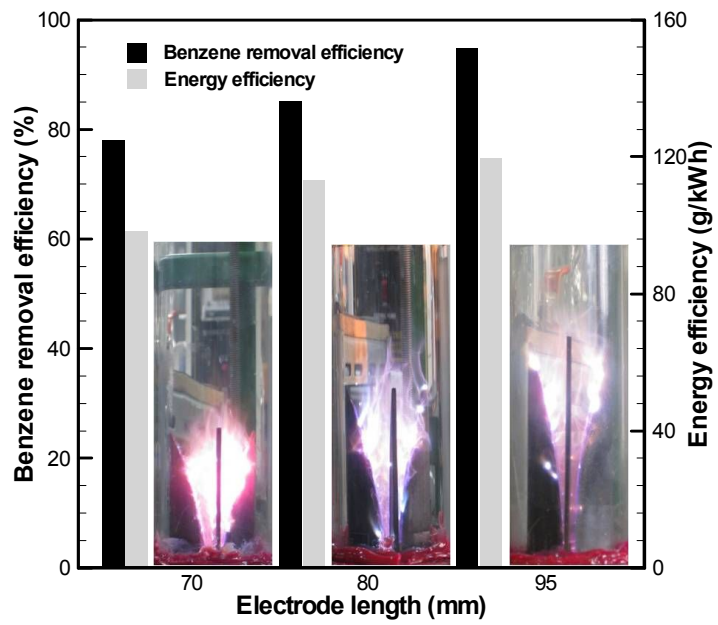


Fig.4-9. Effect of various electrode length in benzene reactor.

## 제2절 나프탈렌 제거 특성

본 연구에서 개발된 글라이딩 아크 플라즈마 반응기를 이용하여 안정적인 방전 형성과 나프탈렌의 분해효율이 최대이며, 낮은 소비전력에서 최적조건을 파악하였다. 또한 Table 3은 기준조건 및 그 결과값을 나타내고 있다.

나프탈렌의 초기 농도는 약 1%를 유지하였으며, steam/carbon 비 2.5이고, SEI 변화는 나프탈렌 분해효율 및 에너지 효율이 최적인 지점인  $1.00 \text{ kWhm}^{-3}$  을 기준조건으로 정하였다. 또한 전체 가스량은 반응기 내 체류시간이 최대로 확보되어 분해효율이 높으면서 방전이 안정적으로 형성되는 범위인  $18.4 \text{ L/min}$ 으로 정하였으며, 전극길이 변화는 분해효율이 최적 조건인  $95 \text{ mm}$  를 기준조건으로 정하였다.

Table 3. Optimum conditions and their results of naphthalene reactor

Experimental conditions				
Conditions	Steam/carbon ratio	Specific energy input (kWhm <sup>-3</sup> )	Total gas flow rate (L/min)	Electro length (mm)
Value	2.5	1.00	14	95
Experimental data				
Inlet concentration(%)	Outlet concentration(%)	Removal efficiency(%)	Energy efficiency (g/kWh)	
1.0	0.218	79	47	

## 1. 수증기 주입량 변화

Fig.4-10는 수증기 주입량 변화를 나타낸 것이다. SEI는  $1.00 \text{ kWhm}^{-3}$ , 초기농도는 약 1%로 고정한 상태에서 수증기 주입량 변화에 대해 실험을 수행하였다.

Steam/carbon 비 1.2이하에서는 플라즈마 반응기 내부에 카본 블랙(carbon black)이 형성되었으며, 4.5이상에서는 주입되는 물의 증가로 인한 수증기 발생 장치의 온도 감소 현상이 나타났다. 따라서 steam/carbon 비 실험 범위를 1.2 ~ 4.5로 정하고 실험을 진행하였다.

실험 결과는 steam/carbon 비가 증가함에 따라 점차적으로 분해효율이 증가하다 steam/carbon 비 2에서 최대 79%를 나타내었다. 이후 steam/carbon 비가 증가함에 따라 점차적으로 농도가 감소됨을 알 수 있다. Steam/carbon 비가 적을 때는 수증기에 의한 애 라디칼의 생성이 부족함에 따라 분해효율이 감소하게 되며, steam/carbon 비 2.5이상의 경우는 수증기 주입량의 증가함에 따라 반응기내 전체 가스량이 증가됨을 알 수 있다. 이로부터 나프탈렌이 분해될 수 있는 충분한 체류시간이 확보 되지 않는 것으로 보여진다.

에너지 효율의 경우 steam/carbon 비가 증가함에 따라 점차적으로 증가한 후 3.5에서 최대  $63 \text{ g/kWh}$ 를 나타낸다. 이후 에너지 효율이 감소함을 알 수 있는데, 이는 steam/carbon 비 증가 시 전체 가스량이 증가하여 체류시간이 감소되기 때문이다. 기준조건은 분해효율이 최대이면서 에너지 효율이 최적 조건인 steam/carbon 비 2.5를 기준조건으로 정하였다.

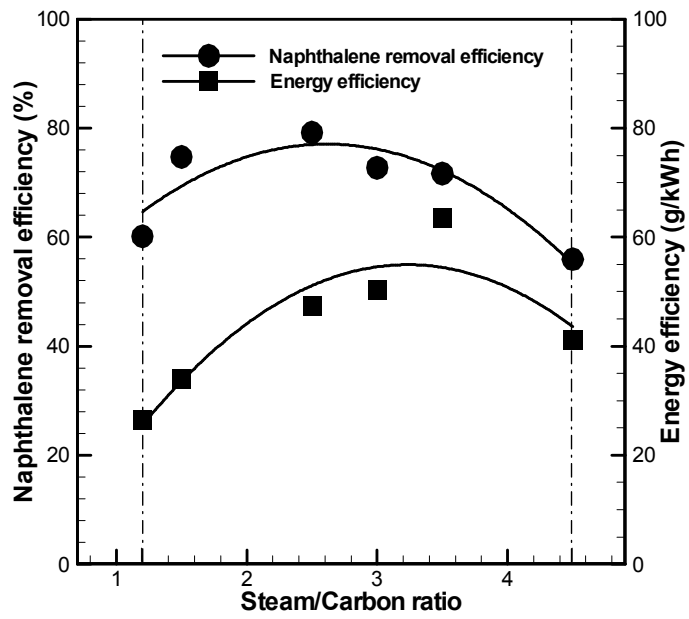


Fig.4-10. Effect of various steam/carbon ratio in naphthalene reactor.

## 2. SEI 변화

Fig.4-11은 입력방전 전력 변화인 Specific energy input(SEI) 변화에 따른 영향을 나타내고 있다. Steam/carbon 비 2.5, 전체 가스량 14 L/min, 초기농도는 약 1%로 고정한 후 SEI 변화를 진행하였다. SEI 변화는 입력방전 전력을 0.85 ~ 1.33 kW로 조절함에 따라 0.77 ~ 1.17 kWh<sup>-3</sup> 범위에서 실험을 진행하였다.

실험 결과는 SEI가 증가할 때 점차적으로 분해효율이 증가하며, 1.00 kWh<sup>-3</sup> 이후부터는 약 79%로 나프탈렌 분해효율이 비교적 일정하게 나타났다. 에너지 효율은 SEI가 증가함에 따라 50 g/kWh부터 26 g/kWh로 감소되었다. 최적 조건은 에너지 효율 및 나프탈렌 분해효율을 고려하여 1.00 kWh<sup>-3</sup>이었으며, 이때의 분해효율은 79%, 에너지 효율은 47 g/kWh를 나타내었다.

본 연구에서 개발된 플라즈마 반응기의 경우 기존의 연구 결과인 나프탈렌 분해효율은 약 70% 정도이며, 에너지 효율의 경우 2.38 g/kWh에 비하여 상대적으로 높은 값을 가지는 것을 알 수 있었다[20].



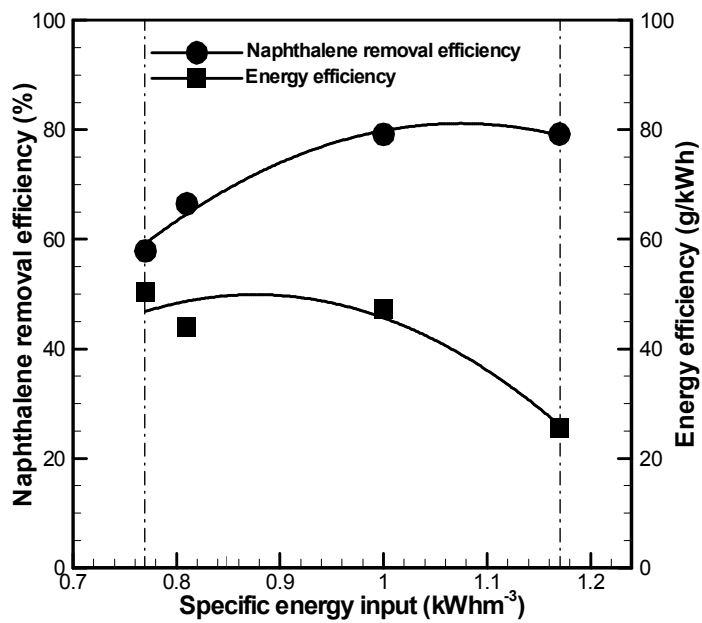


Fig.4-11. Effect of various specific energy input in naphthalene.

### 3. 전체 가스량 변화

Fig.4-12는 전체 가스량 변화에 따른 영향을 나타내고 있다. Steam/carbon 비 2.5, SEI는  $1.00 \text{ kWhm}^{-3}$ , 초기 농도는 약 1%로 고정한 후 전체 가스량 변화를 진행하였다.

전체 가스량은 10.5 ~ 27.6 L/min으로 조절하여 주입하였다. 전체 가스량 10.5 L/min 이상에서 방전이 형성된 후 간헐적으로 형성되다 18.4 L/min 이상부터 플라즈마 방전이 안정적으로 형성되었다. 실험결과는 전체 가스량이 10.5 L/min에서 59%의 분해효율이 18.4 L/min 이후 79% 이상의 나프탈렌 분해효율을 나타내었다. 그러나 23 L/min 이후에서는 전체 가스량이 증가함에 따라 동일직경의 노즐을 통한 가스의 유속의 증가로 방전영역에서의 체류시간이 감소하기 때문이다. 일반적으로 전체 가스량의 증가로 인한 나프탈렌 분해효율은 화학적 구조와는 상관없이 감소되는데, 이는 플라즈마 방전영역과 나프탈렌 사이의 상호작용에 따른 시간과 접촉이 짧아져서 각각의 반응 이온과 라디칼 전자 충돌이 감소하기 때문이다[19]. 에너지 효율의 경우 전체 가스량이 증가함에 따라 급격히 증가되는 것을 알 수 있다.

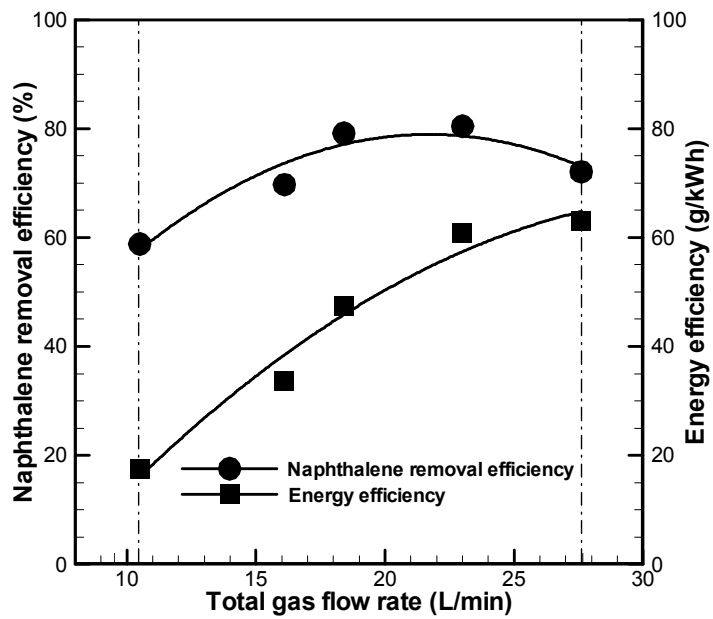


Fig.4-12. Effect of various total gas flow rate in naphthalene reactor.

#### 4. 초기 농도 변화

Fig.4-13는 초기 농도 변화에 따른 영향을 나타내고 있다. Steam/carbon 비 2.5, SEI는  $1.00 \text{ kWhm}^{-3}$ 로 고정하였으며, 희석용 질소 유량은  $10 \text{ L/min}$ 으로 고정하였으며, 초기 나프탈렌 주입량을  $0.1 \sim 0.5 \text{ L/min}$ 의 변수로 실험을 진행하였다.

실험결과 나프탈렌의 초기 농도는  $0.6 \sim 1.3\%$ 까지 변화하였다. 결과는 반응기를 거친 후의 나프탈렌 분해효율은 초기 농도  $0.6\%$  일 때의 나프탈렌 분해효율은  $49\%$ 를 나타냈으며, 초기농도가 증가함에 따라 나프탈렌 분해효율이  $1\%$ 일 때  $79\%$ 까지 증가함을 알 수 있다. 일반적으로 초기 농도가 낮은 성분의 경우 높은 성분에 비하여 분해효율이 높게 나타남을 알 수 있다. 하지만 초기 농도가 증가함에 따라 점차적으로 나프탈렌 분해효율이 증가하는 이유로는 steam/carbon 비가 일정함에 따라 초기 농도에 대한 각각 수증기 주입량이 증가한다. 이로부터 전체 가스량의 경우  $13 \sim 20 \text{ L/min}$ 까지 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 그래서 초기 농도가 낮을 시에는 방전이 간헐적으로 형성됨을 알 수 있었으며, 초기 농도가 증가함에 따라 점차적으로 나프탈렌 분해효율이 증가하게 된 것으로 보여진다. 초기 농도  $1.3\%$ 의 경우에는 일정 유량이 형성되기 때문에 방전이 안정적이며, 초기 농도가 증가함에 따라 분해효율이 감소됨을 알 수 있었다.

에너지 효율의 경우 나프탈렌의 초기 농도가 증가함에 따라 steam/carbon 비를 2.5로 고정하였기 때문에 수증기 주입량이 증가하게 되며, 이로부터 전체 가스량이 증가하게 되어, 에너지 효율은  $12 \text{ g/kWh}$ 에서  $58 \text{ g/kWh}$ 까지 점차적으로 증가됨을 알 수 있다.

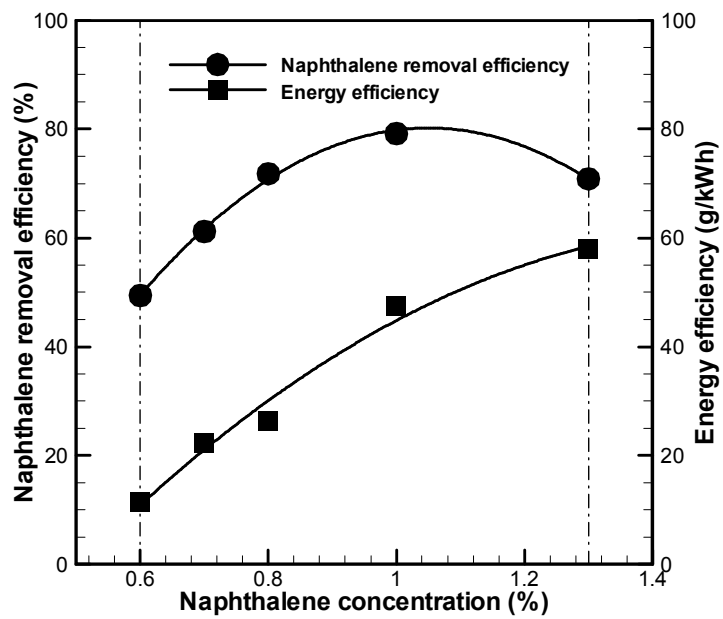


Fig.4-13. Effect of various inlet gas flow rate in naphthalene reactor.

## 5. 전극길이 변화

Fig.4-14은 전극길이 변화에 따른 영향을 나타내고 있다. Steam/carbon 비 2.5, SEI는  $1.00 \text{ kWhm}^{-3}$ , 전체 가스량 14 L/min, 초기 농도는 약 1%이며, 노즐직경은 1.5 mm 이며, 전극간격은 3 mm 를 유지하면서 전극길이 변화에 대한 실험을 진행하였다. 전극 길이는 동일 형상의 전극의 길이를 70, 80, 95 mm로 변화시키고 실험을 진행하였다.

실험결과 나프탈렌 분해효율의 경우 동일 조건에서 전극 길이가 70 mm에서 95 mm로 길어짐에 따라 70%에서 79%까지 증가됨을 알 수 있었으며, 에너지 효율의 경우 38 g/kWh에서 47 g/kWh까지 증가됨을 알 수 있었다. 이는 플라즈마 방전 사진에서 볼 수 있듯이 전극 길이가 길어질수록 방전영역이 크게 형성되어 가스가 통과시 체류시간의 증가로 인하여 나프탈렌 분해효율과 에너지 효율이 증가되는 것을 알 수 있다.

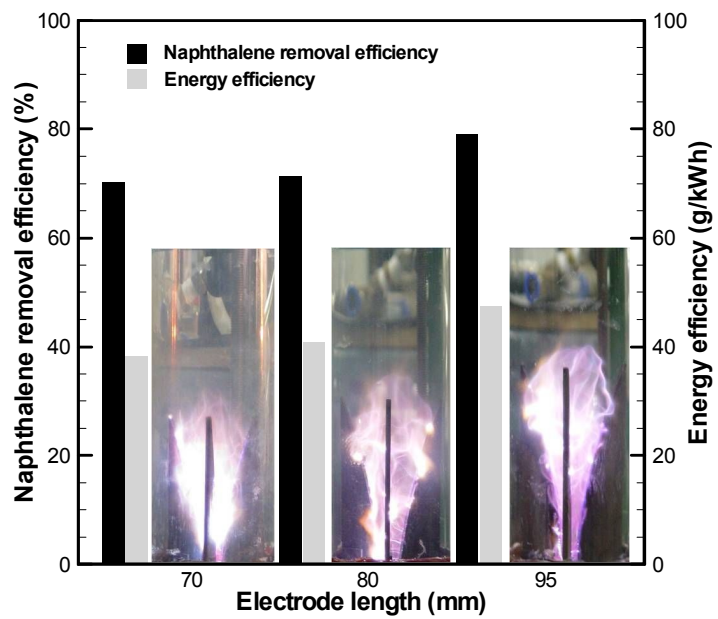


Fig.4-14. Effect of various electrode length in naphthalene reactor.

## 제5장 결론

본 연구에서는 하수슬러지 열분해 시 생성되는 타르를 제거하기 위한 글라이딩 아크 플라즈마 반응기를 개발하였으며, 대표물질로는 타르성분 중 비교적 많은 양을 차지하고 있는 벤젠과 나프탈렌을 이용하여 실험을 진행하였다.

### 제1절 벤젠 제거

변수별 연구로는 수증기 주입량 변화(steam/carbon ratio), SEI 변화, 전체 가스량 변화, 초기 농도 변화, 유입가스 온도 변화, 노즐직경 변화, 전극간격 변화, 전극길이 변화에 대하여 실험을 수행하였다.

수증기 주입량 변화는 주입량이 증가함에 따라 점차적으로 증가하다 steam/carbon 비 2에서 분해효율이 최대 95%를 나타내었으며, 이후에는 전체 가스량의 증가로 인한 체류시간의 감소 및 수증기 발생장치의 온도감소로 인한 분해효율이 점차적으로 감소되었다. SEI가 증가함에 따라 분해효율이 점차적으로 증가됨을 알 수 있어 분해효율과 에너지 효율을 고려하여 최적 조건으로 선정하였다. 전체 가스량이 적을 경우 방전이 안정적으로 형성되지 않았으며, 최적조건 이후 양이 증가함에 따라 체류시간의 감소로 인한 분해효율이 감소되었다. 초기 농도 변화는 초기 농도가 증가함에 따라 분해효율이 점차적으로 감소되며, 유입가스 온도는 온도가 증가함에 따라 점차 증가하다 300℃이후부터 일정한 분해효율을 나타내었다. 노즐직경의 경우 가스유속을 충분히 확보 할수 있는 1.5 mm에서 최적 조건이었으며, 전극간격 및 전극길이의 경우 플라즈마 방전 영역이 넓게 형성되는 지점인 3 mm, 95 mm에서 분해효율이 가장 높음을 알 수 있었다.

변수별 연구를 통하여 얻어진 최적 운전 조건과 그 결과는 다음과 같다. Steam/carbon 비 2, SEI 0.98 kWhm<sup>-3</sup>, 전체 가스량 14 L/min, 초기 농도 3.5%, 유입가스 주입온도 300℃, 노즐직경 1.5 mm, 전극간격 3 mm, 전극길이 95 mm 일 때, 벤젠 분해효율은 95%이었으며, 에너지 효율은 119 g/kWh를 나타내었다.



## 제2절 나프탈렌 제거

변수별 연구로는 수증기 주입량 변화(steam/carbon ratio), SEI 변화, 전체 가스량 변화, 초기 농도 변화, 전극길이 변화에 대하여 시험을 수행하였다.

수증기 주입량 변화는 카본 생성이 없는 steam/carbon 비 2.5 에서 분해효율이 79%를 나타냈었으며, 이후 수증기 주입량의 증가로 인하여 체류시간 및 수증기 기화장치 내부의 온도 감소로 인하여 분해효율이 점차적으로 감소되었다. SEI가 증가함에 따라 분해효율이 점차적으로 증가하다  $1.00 \text{ kWhm}^{-3}$  이후에는 평균 79%로 비교적 안정적임을 알 수 있었으며 분해효율과 에너지 효율을 통하여 최적조건을 산정하였다. 전체 가스량이 적을 경우 방전이 간헐적으로 형성되어 분해효율이 낮았으며, 최적 조건 이후 전체 가스량이 증가함에 따라 체류시간의 감소로 인한 분해효율이 감소되었다. 초기 농도 변화는 농도가 낮을 때에는 steam/carbon 비를 고정하였기 때문에 실제 주입되는 전체 가스량이 적게 되어 방전이 간헐적으로 형성되었으며, 최적 조건이후 초기 농도가 증가함에 따라 분해효율이 감소됨을 알 수 있었다. 전극길이 변화의 경우 전극길이가 증가함에 따라 플라즈마 방전 영역이 넓게 형성되는 지점인 95 mm에서 분해효율이 가장 최적 조건임을 알 수 있었다.

변수별 연구를 통하여 얻어진 최적 운전 조건과 그 결과는 다음과 같다. Steam/carbon 2.5, SEI  $1.00 \text{ kWhm}^{-3}$ , 전체 가스량 18.4 L/min, 초기 농도 1 %, 전극길이 95 mm 일 때, 이때의 나프탈렌 분해효율은 최대 79% 이었으며, 에너지 효율을 47 g/kWh를 나타내었다.

## 참고문헌

- [1] Devi, L., Ptasiński, K.J. and Janssen, F.J.J.G. "Decomposition of naphthalene as a biomass tar over pretreated olivine: Effect of gas composition, kinetic approach, and reaction scheme" *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44, pp 9096–9140(2005).
- [2] Devi, L., Ptasiński, K.J. and Janssen F.J.J.G. " A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes" *Biomass Bioenergy*, 24, pp.125–140(2003).
- [3] Bergman, P.C.A., Paasen, S.V.B.V. and Boerrigter, H. "The novel "OLGA" technology for complete tar removal from biomass producer gas" *Expert meeting, Pyrolysis and gasification of biomass and waste*, Strasbourg, France, 2002.
- [4] Nair, S.A., Pemen, A.J.M., Yan, K., Van Gompel, F.M., Van Leuken, H.E.M., Van Heesch, E.J.M., Ptasiński, K.J. and Drinkenburg, A.A.H. "Tar removal from biomass-derived fuel gas by pulsed corona discharge" *Fuel Processing Technology*, 84, pp.161–173(2003).
- [5] Wu, Z.L., Gao, X., Luo, Z.Y., Ni, M.J. and Cen, K.F. "Decomposition characteristics of toluene by a corona radical shower system" *Journal of environmental sciences*, 16(4), pp.543–547(2004).
- [6] Guo, Y.F., Ye, D.Q. Chen, K.F., He, J.C. and Chen, W.L. "Toluene decomposition using a wire-plate dielectric barrier discharge reactor with manganese oxide catalyst in situ", *Journal of molecular catalysis A:Chemical*, 245, pp.93–100(2006).
- [7] Du, C.M., Yan, J.H. and Cheron, B. "Decomposition of toluene in a gliding arc discharge plasma reactor" *Plasma sources science technology*, 16, pp.791–797(2007).
- [8] Indarto, A., Choi, J.W., Lee, H., and Song, H. K., "Effect of additive gases on methane conversion using gliding arc discharge" , *Energy*, 31, pp.2986–2995(2006).

- [9] Paulmier, T. and Fulcheri, L., "Use of non-thermal plasma for hydrocarbon reforming", *Chemical Engineering Journal*, 106., pp.59-71(2005).
- [10] Sreethawong, T., Thankonpatthanakun, P. and Chavadej, S., "Partial oxidation of methane with air for synthesis gas production in a multistage gliding arc discharge system", *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, pp.1067-1079(2007).
- [11] Dominguez, A., Menendez, J.A., Inguanzo, M. and Pis, J.J., "Investigations into the characteristics of oils produced from microwave pyrolysis of Sewage sludge" *Waste Processing Technology*, 86, pp.1007-1020(2005).
- [12] Fullana, A., Conesa, J.A., Font, R., and Martin-Gullon, I., "Pyrolysis of sewage sludge : nitrogenated compounds and pretreatment effects", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 68-69, pp.561-575(2003).
- [13] Milne, T.A., Abatzoglou, N. and Evans, R.J., "Biomass Gasifier "Tar": Their Nature, Formation, and Conversion", NREL/TP-570-25357, November(1998).
- [14] Chun, Y. N. and Song, H. O., "Syngas production Using Gliding Arc Plasma", *Energy sources*, 30, pp. 1202-1212(2008).
- [15] Czernichowski, A., "Gliding arc. Application to engineering and environment control, 66(6), pp.1301-1310(1994).
- [16] Fridman, A., Nester, S., Kennedy, L.A., Saveliev, A. and Mutaf-Yardimici, O., "Gliding arc gas discharge", *Progress in energy and combustion science*, 23, pp.211-231(1999).
- [17] Steven A. Valle, "3SAE Technologies Develops First-Ever Three-Phase Plasma Arc Technology for Fusion Splicing", 3SAE Technologies Inc.(2008).
- [18] Indarto, A., Yang, D.R., Azhari, C.H., Mohtar, W.H., Choi, J.W., Lee, H. and Song, H.K., "Advanced VOCs decomposition method by gliding arc plasma", *Chemical Engineering Journal*, 131, 337-341(2007).
- [19] Bo, Z., Yan, J., Li, X., Chi, Y. and Cen, K., "Scale-up analysis and development of gliding arc discharge facility for volatile organic

compounds decomposition", *Journal of Hazardous Materials*, 155(3), pp. 494–501(2008).

- [20] Yu, L., Yan, J.H., Li, X.D., Tu, X., Lu, S.Y., Ni, M.J., Chi, Y., Cen, K.F. "Naphthalene decomposition by atmospheric gliding arc gas discharge", *19th International symposium on plasma chemistry*, Bochum(2009).

## 감사의 글

학부과정부터 이 논문이 완성되기까지 격려와 배려를 아끼지 않으시고 부족한 제자에 대한 끊임없는 사랑과 관심으로 돌보아 주신 전영남 지도 교수님께 진심으로 감사드립니다. 더욱 발전된 모습을 보이도록 앞으로도 열심히 하겠습니다.

그리고 바쁜 시간에도 논문심사를 맡아 지도와 조언을 해주신 신대윤 교수님과 정경훈 교수님, 그리고 많은 학문적 지식과 가르침을 주신 정오진 교수님, 최형일 교수님, 이성기 교수님, 이인화 교수님, 김시욱 교수님께 감사드립니다.

대학원 입학 후 많은 조언을 아끼지 않으신 김성천 선배님, 임문섭 선배님께 감사의 말을 전합니다. 그리고 오랜 시간 같이 지내지는 못했지만 Mr.Ahmad와 묵묵히 공부와 실험을 열심히 하는 채홍, 남용, 형남과 함께 할 수 있어서 대학원생으로서 시간이 즐겁고 많은 걸 배워갈 수 있었던 것 같습니다.

대학원에 들어와 더욱 친해졌던 성훈, 근호 그리고 지치고 힘들 때 격려와 용기를 일깨워주신 대학교 선후배님들과 부족한 내 자신을 항상 감싸주며 우정을 쌓아온 친구들에게 고마움을 전합니다.

오빠로서 관심과 배려가 부족했음에도 항상 걱정을 해준 동생 윤정이 그리고 오늘날 제가 있기까지 항상 사랑과 희생으로 보살펴주신 어머니님과 오랫동안 저를 묵묵히 지켜보시며 정신적인 버팀목이 되어주신 아버지께 이 논문을 바칩니다.

2009월 11월

양윤철 올림

