

## 디스크 이동식 페타이어 열분해 실증 설비의 운전 특성 고찰

\*하 현정<sup>1)</sup>, 김 성연<sup>2)</sup>, 김 기경<sup>3)</sup>

### Study on Operation Characteristics of Waste Tire Pyrolysis Demonstration Plant with Moving Disk Tube Reactor System

\*Hyunjung Ha, Seongyeon Kim, Kikyeong Kim

**Key words** : Waste Tire(페타이어), Pyrolysis(열분해), Carbon Black(카본블랙), Recovered Oil(재생 오일), Non Condensing Gas(비응축 가스)

**Abstract** : 본 연구에서는 디스크 이동식 페타이어 열분해 실증 설비(10톤/일)를 설계, 제작 그리고 시운전을 통하여 열분해 설비의 안정적인 연속 운전이 가능함을 확인하였다. 시운전 결과 반응기 내부 온도는 500~600℃, 내부 압력은 -80~-100mmHg, 체류시간은 60~90min 범위에서 안정적인 열분해가 일어났다. 또한 이번 과제 수행을 통해 NC 가스의 연소기를 개발 적용하여 NC 가스의 열분해 열원으로 사용 가능성을 확인하였으며, NC 가스 연소 시 대기 측정을 통하여 규제치도 만족함을 확인할 수 있었다. 지금까지 나온 결과는 장기 연속 운전과 scale-up을 위한 기초 자료가 될 것이다.

### 1. 서 론

열분해 기술은 무산소 조건에서 물질에 열을 가하여 분해함으로써 부가가치가 높은 기체, 액체, 고체 생성물을 회수하는 공정으로써 300년이 넘는 시간동안 공정과 기술이 발전되어 왔다. 최근 일본을 비롯한 선진국들을 중심으로 활발하게 개발되어 적용을 시작한 열분해 기술은 다이옥신 등 심각한 공해물질의 배출이 거의 없고 바닥재와 비산재 등 소각 후 발생하는 고품 폐기물의 발생도 없으며, 열분해 가스로부터 직접 에너지를 회수할 수 있는 폐기물 자원화 등 많은 장점을 갖고 있다.

국내 페타이어의 열분해에 관한 연구는 그동안 활발히 진행되었다. 김<sup>1)</sup>등은 실험실규모로 타이어를 열분해 했으며, 최종 온도 700℃, 승온 속도 20℃/min일 때 55%로 가장 높은 오일 수율을 나타낸다고 하였으며, 정<sup>2)</sup>등은 실험실 규모의 기초 실험을 통하여 페타이어와 폐유를 동시 열분해 하여 400℃ 근처에서 폐유가 가열매체로 활용이 가능하며, 열분해 생성오일의 수율을 향상시킨다고 하였다.

그러나 열분해 기술은 방법론 자체는 매우 단순하지만 고분자 물질의 열적 거동이 복잡할 뿐만 아니라 본질적으로 흡열반응이므로 분해된 생

성물의 에너지 함량이 증가함에도 불구하고 비산 화적 분위기 하에서 폐기물 원료를 간접적으로 가열해야 하기 때문에 열손실이 커서 경제성을 확보하는데 어려움이 있다. 또한 장치 내부의 coking 현상과 성상이 복잡한 생성물의 분리, 최종 생성물인 char의 취급 문제와 국내 환경산업에서의 고가의 설비 투자 및 전문 인력 부족 등으로 인하여 열분해 공정의 실용화 개발이 늦어지고 있다. 이에 따라 국내 실정에 맞고 경제성이 높은 열분해용 처리 기술의 개발이 절실히 요구되고 있다.<sup>3)</sup>

당사의 기술 개발은 산업자원부의 신재생에너지 기술개발 사업의 일환으로 “디스크 이동식 페타이어 열분해 실증 공정개발”의 과제명으로 당사가 주관기관이 되어 위탁기관인 한국에너지기술연구원과 공동으로 실증설비를 현재 3년째

- 
- 1) (주)기경 IE&C  
E-mail : hjha@kkie.com  
Tel : (051)740-6640~1 Fax : (051)740-6642
  - 2) (주)기경 IE&C  
E-mail : penstorm@kkie.com  
Tel : (051)740-6640~1 Fax : (051)740-6642
  - 3) (주)기경 IE&C  
E-mail : kkkimbb@kkie.com  
Tel : (051)740-6640~1 Fax : (051)740-6642

진행 중이며, 10톤/일급 디스크 이동식 페타이어 열분해 시스템이 설계, 제작되고 수정 보완을 통한 운전 실험이 수행 중이다. 본 논문에서는 이 운전실험에 대한 내용을 간략히 소개하고자 한다.

## 2. 플랜트의 구성과 특징

### 2.1 플랜트 구성

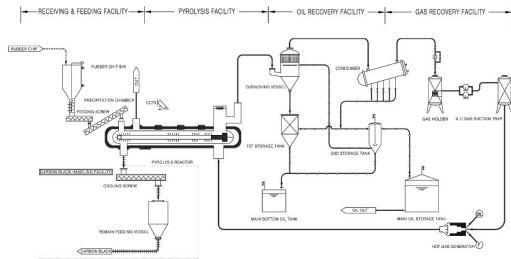


Fig. 1 Flow Sheet of the Waste Tire Pyrolysis plant

본 플랜트는 디스크 이동식 페타이어 열분해 설비로서 처리 용량은 10톤/일이며, 길이 12m, 내경 350mm의 원형관 내에 디스크 이동식 콘베이어를 설치하여 가동하였다. Fig. 1은 당사의 디스크 이동식 페타이어 열분해 시설의 개략도이다. 페타이어 열분해 플랜트는 페타이어 전처리 및 투입 공정, 열분해 반응 공정, 오일/카본블랙 처리 공정 그리고 NC(Non-Condensed) 가스 회수 공정, 이렇게 4부분으로 구성되어 있다.



Fig. 2 Picture of Plant

### 2.2 페타이어 전처리 및 투입 공정

Shredder에서 25mm 이하로 파쇄 된 페타이어 조각(Rubber Chip)들은 Bucket Elevator로 투입되고 1, 2차 Scrap Silo를 거쳐 Screw Conveyor를 통해 정량으로 Pyrolysis Reactor에 공급된다. 이때, 1, 2차 Scrap Silo 유입부에 각각 두개의 Knife Gate Valve를 교차적으로 개폐 작동시켜 타이어가 투입될 때 외부공기의 유입이나 내부 가스의 유출을 방지하여 진공 상태가 유지되도록 하였다.

### 2.3 열분해 반응 공정

반응기는 원통 안에 scraper가 부착된 체인식 컨베이어로 구성되어 있다. 공급된 Rubber Chip은 Pyrolysis Reactor의 상부 체인에 공급되고 체인에 의해 하부쪽으로 이동하면서 가열, 열분해하여 카본블랙은 전면하부 배출구를 통해 배출되고, 이동중부에서 증발되는 열분해 가스는 응축 설비로 배출된다. 배출된 열분해 가스는 Quenching Vessel을 통과하면서 응축하여 오일이 생성된다.

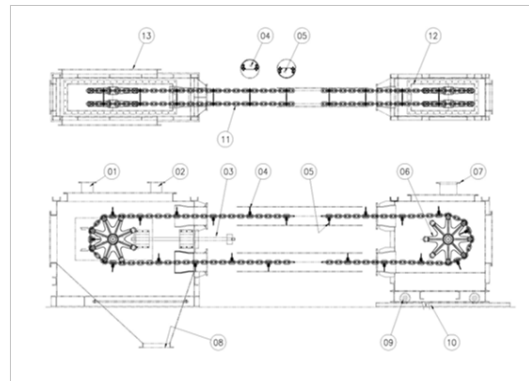


Fig. 3 Diagram of the Pyrolysis Reactor

### 2.3 오일/카본블랙 처리 공정

열분해 반응기에서 발생하는 열분해 가스는 Quencher와 Condenser를 거치면서 냉각되고 응축되면서 오일이 생성되고, 응축되지 못한 열분해 가스는 가연성가스로 분리된다. 응축기 전단 Quencher에서는 장치 상부에서 분무되는 오일에 의해 냉각되어 응축이 일어나며, 분사 오일 유량에 의해 응축 온도를 조절한다. 응축기 전단에 Quencher를 설치한 이유는 반응기에서 비산되는 입자들과 tar 성분들이 Condenser에 유입되는 것을 방지하기 위한 것이다. 응축된 오일은 Oil Storage Tank에 모아 정지하여 밀도차에 의한 상분리가 일어나도록 한다. 상부의 오일은 월류에 의해 자동으로 배출되고, 필터에 의해 정제한 후 main oil storage tank에 저장된다.

반응기에서 배출된 카본블랙은 Cooling Screw에서 냉각하고 Magnetic Separator로 잔여 철심을 제거한 후 저장한다.

### 2.4 NC 가스 회수 공정

Condenser에서 분리 배출되는 가연성 NC 가스는 Gas Holder에 압축/저장된다. Gas Holder는 반응기 내부의 압력 신호를 받아 작동되며, 반응기 내의 압력을 약한 정압으로 유지해 준다. 저장된 NC 가스는 Pyrolysis Reactor를 가열하는 연료로 사용된다.

### 3. 플랜트 시운전

#### 3.1 시운전 실험 개요

디스크 이동식 페타이어 열분해 실증 설비는 설계, 설치된 후 총 14차에 걸쳐서 시운전이 진행되었으며, 1차~8차까지의 시운전은 무부하 상태에서 trouble shooting을 위해 진행되었다. 투입된 페타이어는 20~30mm 크기의 chip 형태를 사용하였으며 약간의 철심을 포함하고 있는 것을 투입하였다.

초기 반응기의 온도는 경유버너를 이용하여 승온 하였으며, 반응기 재질의 열적응력을 높이기 위해 100℃씩 올라갈 때마다 10분간 버너를 정지시키고, 온도를 유지시켰다. 반응기 온도가 400℃에 도달하면, Rubber Chip을 상부에서 투입하였으며, Rubber Chip의 투입과 함께 열분해 반응이 시작되었다. 반응기를 가열하는 열원은 Hot Gas Generator에서 NC 가스를 연료로 연소한 약 900~1000℃의 가스로 반응기를 가열하도록 하였고, 반응기 내부의 온도를 감지하여 NC 가스 공급량을 줄이거나 파잉 공기를 조절하여 Hot Gas 온도를 제어하였다. 페타이어 투입량이 작은 저부하 시 비응축가스의 발생량이 작을 경우 경유를 연소하여 반응기 온도를 유지하도록 하였다.

디스크 이동식 페타이어 열분해는 550℃에서 수행되었다. 페타이어 열분해를 통해 얻어진 생성물은 solid 상으로는 Carbon Black과 Steel, liquid 상으로는 Recovered Oil이 생성되었으며, gas 상으로는 NC Gas가 생성되었다. 본 실험에서 얻어진 페타이어 열분해 생성물의 수율은 무게비로 Oil이 약 40~50%, Carbon Black 30~35%, Steel 10~15%, 가연성 NC Gas 10~15% 정도가 되었다.

#### 3.2 시운전 실험 결과 및 고찰

Fig. 4는 13차 시운전 시 플랜트 각 부의 온도를 보여주는 그래프이다. 그래프에서 보듯이 반응기 온도를 승온 하는데는 약 10시간이 소요되었음을 알 수 있었다. 플랜트 전체에 나타나는 온도의 변동은 투입 페타이어의 양, 생성되는 oil vapor 양, NC gas의 생성량에 따른 버너의 열효율 등 여러 가지의 영향을 동시에 받는 것으로 생각된다. 그리고 반응이 진행되고 난 뒤 NC 가스가 생성되기 시작하면, 경유의 공급을 중단하고 NC 가스의 연소로 Hot gas를 생성시켰는데, NC 가스의 연소만으로도 열분해 반응에 필요한 온도를 유지시키는데 충분하다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 5는 13차 시운전 시 플랜트 각 부의 압력을 보여주는 그래프이다. 열분해는 무산소 환경에서 이루어져야 하기 때문에 본 설비에서는 진공펌프를 사용하여 진공을 유지시켰다. 그래프에서 보듯이 반응이 진행되는 시간동안 각 부의 압력이 모두 0이하인 음압을 유지하는 것을 나타내고 있다. 시운전 결과 -80mmHg를 유지할 때 가장 양호한 열분해가 이루어지는 것을 발견 수 있다.

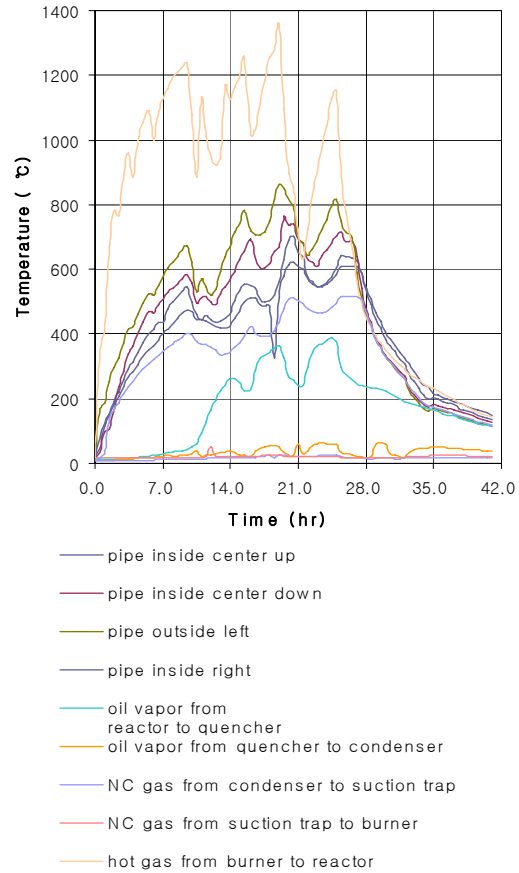


Fig. 4 Temperature Data of Each Part During Commissioning

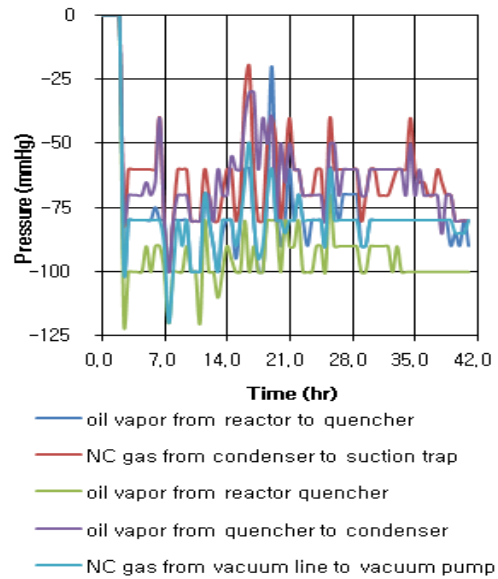
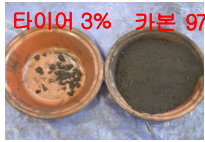
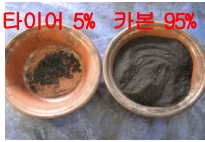




Fig. 5 Pressure Data of Each Part During Commissioning

Table 1과 Fig. 6은 디스크 이동식 페타이어 열분해 플랜트 실처리 용량 검증과 반응 시간 대비 타이어 반응 상태 결과를 보여주고 있다. 실질적으로 하루에 10톤을 처리하기 위해서는, 즉 시간당 420kg을 처리하려면 90분의 반응 시간을 가져야 안정적인 열분해가 이루어지는 것을 확인할 수 있었다.

**Table. 1 Pressure Data of Each Part During Commissioning**

tire 투입 조건	screw rpm 조건			시간	진공 mmHg	진공 펌프
	체인	2차 호퍼	2차 피딩			
160 kg/hr	670	600	270	90분	-80	1대 가동
200 kg/hr	670	600	300	60분	-80 ~ -100	1대 가동
220 kg/hr	670	600	320	90분	-80	1대 가동
300 kg/hr	670	600	350	60분	-60 ~ -80	1대 가동
420 kg/hr	670	600	430	60분	-60 ~ -80	2대 가동
	620	600	430	90분	-60 ~ -80	2대 가동
	670	600	500	90분	-80	2대 가동

투입량	200kg/hr	300kg/hr
반응 시간	60분	60분
선별 모습		
투입량	420kg/hr	420kg/hr
반응 시간	60분	90분
선별 모습		

**Fig. 6 Sorting Image of Tire and Carbon**

시운전을 통해 위와 같이 페타이어 열분해를 안정적으로 수행하기 위한 최적의 조건이 도출되었지만, 그에 못지 않게 많은 문제점이 발견되었다. 먼저 1, 2차 Oil Storage tank 하부에 Oil Sludge가 정체되었고, Weighing Hopper 내에 Tire Chip을 200kg 이상 공급할 시 호퍼 교반 모터가 오작동 되는 현상이 일어났다. 3차년도 과제를 진행함에 있어서는 위에서 언급한 사항의

개선과 더불어 Carbon Black을 더 안전하게 추출하기 위한 구조를 고안하고, Carbon Black과 미반응된 타이어의 구분을 위한 선별기도 추가로 제작하는 등 연구에 박차를 가할 예정이다.

#### 4. 결론

디스크 이동식 페타이어 열분해 실증 설비(10톤/일)를 개발하고 시운전을 통해 안정적인 연속 운전이 가능함을 확인하였다. 시운전 결과, 반응기 내부 온도는 500~600℃, 내부 압력은 -80~-100mmHg, 체류시간은 60~90min 범위에서 가장 안정적인 열분해가 일어났다.

이번 과제 수행을 통해 NC 가스의 연소기를 개발 적용하여 NC 가스의 열분해 열원으로써 사용 가능성을 확인하였으며, NC 가스 연소 시 대기 측정을 통하여 규제치도 만족함을 확인할 수 있었다.<sup>4)</sup> 그리고 열분해 오일 및 카본 블랙의 특성 분석을 통해 부가가치 향상을 위한 개발을 진행 중이다.

당사는 이에 그치지 않고 수율 향상을 위한 개발을 지속적으로 진행할 것이며, 장기 연속 운전을 위한 최적 조건을 도출할 것이다. 그리고 설비 상용화를 위한 설계 데이터 확보에 노력할 것이다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 에너지관리공단의 신·재생에너지기술개발 사업 일환으로 수행 되었습니다. 에너지관리공단과 한국에너지기술연구원(KIER)의 지원에 감사드립니다.

#### References

- [1] 김원일, 김성덕, 백경준, 김형진, 홍인권, “열분해공정을 이용한 페타이어의 최적분해조건 설정”, Applied Chemistry, Vol. 3, No. 1, pp 245-248, 1999
- [2] 정수현, 김상국, 신대현, 김동찬, “오일회수를 위한 페타이어/폐유의 복합 열분해”, J. Korea Solid Wastes Engineering Society, Vol. 14, No. 5, pp484-490, 1997
- [3] 송만식, 정준석, 이해평, 류경옥, “수증기 분위기 하에서 페타이어의 열분해에 따른 생성물의 회수 특성”, J. Korea Solid Wastes Engineering Society, Vol. 15., No. 6, pp592-603, 1998
- [4] 김성연, 김기경, “디스크이동식 페타이어 열분해 실증설비 설계와 시운전”, 2008년도 신재생 에너지 학회 춘계학술대회