

120톤/일 처리 페타이어 열분해 상업화 설비 개발

김 성연¹⁾, 김 기경

Waste Tire Pyrolysis Commercialization Plant for 120t/d Treatment

Seongyeon Kim, Kikyeong Kim

Key words : Waste tire(페타이어), Pyrolysis(열분해), Plant design(설비설계), Commissioning(시운전)

Abstract : The 120t/d pyrolysis commercial plant for waste tire recycling have been constructed in Malaysia and is going to be operated. The plant have the tube reactor with chain conveyer attached disk developed in demonstration research stage. The reactor temperature for commercial plant is about 500deg.C and reactor inside pressure is -100~-120mmHg. Non-condensable gas is used as fuel for pyrolysis heat source, and the exhausted heat is recovered for cogeneration to produce steam and electric power of 600kw.

1. 서 론

페타이어는 타이어 자체로서의 가장 견고하게 구성되는 성질 때문에 이들의 처리와 재처리 과정을 어렵게 만들고, 생물학적 분해에 거의 영향을 받지 않기 때문에 페타이어의 처리는 전 세계적으로 주요한 환경문제로 점점 증가되고 있다. EU와 북미지역에서 발생하는 페타이어는 각각 연 250만톤이며, 일본에서는 대략 연간 100만톤이, 우리나라도 2007년도 기준 대략 30만 톤 규모로서 대략 1인당 0.8개의 페타이어가 발생하고 있는데 이들 중 63% 이상이 시멘트 킬른과 건류소각에 사용되고 있고, 유효자원을 회수하기 위한 이용 방안은 높지 않은 실정이다.¹⁾

현재 페타이어의 열분해는 고형탄소잔류물, 오일, 가스, 철심의 유효성분들을 확보할 수 있게 해준다는 측면에서 직접연소를 통한 에너지원 활용보다는 사업적 포트폴리오가 유리하며, 고유가 대응과 자원재활용, 기후변화 협약 대응 측면에서 주목하게 된다. 페타이어 열분해에 관해서는 80년도부터 실험실규모와 pilot 규모, 산업규모 등 수없이 다양하게 진행되어 왔고, 수율과 성분 역시 다양하게 보고되었는데 이는 열분해공정에서 규정 지워진 특성들, 즉 온도, 압력, 가열속도, 페타이어 크기, 페타이어 종류, 공정 규모 등에 따라 달라진다.

페타이어 재활용처리를 위한 열분해공정에서 상업적 성패는 생성물의 안정된 수율과 일정한 성분을 유지하는 것이 관건이며 대형화된 규모를 유지하기 위해 연속식 공정의 개발이 필수 불가결하다. 아울러 열분해 시 발생하는 배출

열을 회수하여 이를 에너지화 하고 활용하는 것이 효율을 높일 수 있다. 이를 위해 열분해공정과 열병합 공정을 복합화한 공정의 상업화 적용이 필요하다.

이를 위해 당사에서는 KIER와 실험실 규모의 연구를 진행하였고, 2003년부터는 2.4t/d 규모의 pilot scale을 통해 운전의 적정성과 수율을 확인한바 있다. 2006년 8월부터 신재생에너지센터에서 지원하는 실증사업의 일환으로 10t/d의 상업적 규모의 연속실증설비를 개발하여 3년에 걸쳐 연구를 진행 중에 있으며, 여기서 획득한 기술을 120t/d 상업화 설비에 적용하였다.²⁾

본 연구에서는 페타이어 열분해 시 발생하는 코킹을 기계적으로 제거하기 위해 열분해 반응기 형식을 디스크 이동식 튜브 형식을 가지는 상업화 설비의 공사내용과 현황을 소개하고 지속적인 개발 내용에 대해서 논의한다.

2. 열분해 시스템 개발

2.1 페타이어 성분특성

페타이어의 일반적인 원소분석결과로는 Table 1에 있는 바와 같으며, 90% 이상이 탄소와 수소로 이루어져 있다.

원료분석결과를 보면 가장 많이 차지하고 있는 부분이 원료인 고무성분은 SBR(Styrene

1) (주)기경아이이앤드씨
E-mail : penstorm@kkie.com
Tel : (051)740-6640 Fax : (051)740-6642

Butadiene Rubber)이며 다른 첨가제가 포함되어 있는 것을 알 수 있다.

이런 첨가제 중 보통 카본블랙은 고무의 성질을 강화시키며 마찰과 저항을 감소시키는 역할을 하며, extender oil은 고무에 탄성을 주는 방향족 탄화수소물이다. 황성분은 고무내의 분자사슬에 가교결합의 역할을 하고 열에 강한 성질을 부여하며 탄성을 갖도록 한다.

열분해 잔류물, 특히 비응축가스에 잔존하는 유황화합물은 연소 시에 황산화물 배출의 원인이 되는 바 연소가스를 세정하여 배출하도록 하여야 한다.

Table 1 Composition and ultimate analysis of waste tires

Tire Type	Composition						Recoverable Rubber*	
	Natural Rubber	Synthetic Rubber	Carbon Black	Steel	Sulfur (average)	Fabric, Fillers, Accelerators		
Passenger	14	27	28	10-15	1.2	16-17	60-70	
Truck/Bus	27	14	28	10-15	2.3	16-17	60-70	
* Passenger tires = 35% natural, 65% synthetic								
* Truck tires = 65% natural, 35% synthetic								
Ultimate Analysis (percent by weight)								
Tire Type	Heating Value in BTU/Lb	Carbon	Hydrogen	Oxygen	Nitrogen	Sulfur	Chlorine	Ash
Passenger	15,843	89.48	7.61	<0.01	0.27	1.88	0.07	3.9
Truck	14,968	89.65	7.50	<0.01	0.25	2.09	0.06	5.5
TDF	15,688	89.51	7.59	<0.01	0.27	1.92	0.07	4.2
Coal	13,560	75.8	5.1	8.2	1.5	1.6	Not listed	7.8
* TDF: Tire Derived Fuel								
* Coal: Typical bituminous coal								

2.2 열분해 공정 개발

페타이어의 열분해 반응에서 가장 중요한 관점은 반응로 안에서 각각의 타이어 입자 내에서의 열적인 분자 재구성 즉 열분해 과정이라 볼 수 있다. 이런 열분해 과정은 열전달, 질량전달, 운동학적 반응의 현상들이 서로 상호 작용을 하여 복합적으로 일어나는 현상으로서 열분해 반응 후의 높은 온도의 반응로 안에서의 페타이어는 열분해 된 분자의 액체 및 기체가스와 카본블랙에 고찰된 잔류물로 나누어져 있다. 이런 상태는 복잡한 물리적, 화학적 과정을 통하여 도달 되는데, 투입된 페타이어 입자 크기 (particle size), 온도(temperature), 가열율 (heating rate), 압력(pressure)이라는 4가지 변수에 영향을 받는다고 볼 수 있다. 그 중 페타이어 입자 크기는 50mm이하 정도이고, 휘발물질 (volatile matter)은 열분해 되어 가스화 될 수 있는데 투입 타이어 총 질량의 60~69%정도를 차지한다.

Fig.1에서 보듯이 페타이어의 열분해과정을 통해 생성되는 물질의 수율과 성분은 열분해 반응조건과 반응시스템, 투입되는 페타이어 성상에 따라 달라지나 대체로 고품질잔류물이 30~40%, 오일이 40~60%, 가스가 5~20% 수준의 수율이 일반적이다. 페타이어의 열분해시 생산되는 고품질 카본잔류물은 타이어의 제조단계에서 투입된 광물질과 카본블랙을 포함하고 있으며 고무 강화제, 무연연료, 황성탄으로 사용되어질 수 있다.

페타이어 열분해시 생성되는 가스는 오일회수 후 남는 비응축가스로서 CO, CH₄, C₂H₄, C₃H₆, CO₂, H₂, H₂S등의 가벼운 탄화수소계열로 구성되어 열분해 열원 생성을 위해 연료로 사용되어진다.

열분해 공정 개발을 위한 적합한 기준은 1) 외부로부터 반응기 내부로의 공기 유입을 차단, 2) 24시간 연속운전이 가능, 3) 코킹의 제거 및 최소화, 4) 철심에 의한 이송 및 추출 장애 제거, 5) 운전의 용이성, 6)용량의 대형화 가능성, 7) 투입원료 크기의 유연성, 8)에너지회수의 최대화이다.

이러한 기준을 만족하기 위해 기준에 제안된 반응기 형식 중에서 장점만을 취합한 디스크 이동식 페타이어 열분해 반응기를 적용한 연속식 공정을 개발하였고 pilot scale 연구와 실증연구를 거쳐 상업화에 성공적으로 적용시켰다.



Fig. 1 End-products in waste tire pyrolysis

디스크 이동식 연속운전 기능을 가진 페타이어 열분해 상용화 플랜트 개발 과정은 다음과 같다.

- 1) KIER의 기술 이전
 - 1997년 KIER 1차 기술 개발
 - 2003년 KKIEC 기술 이전
- 2) 2.4T/D Prototype Plant(Malaysia) 고도 설계 기술개발 적용
 - 지역특화 기술개발 사업 참여
 - 주관 : 산업자원부(현 지식경제부)
 - 개발 기간 : 2004년 9월~2006년8월
 - 개발 비용 : 4억원
 - 자체 기술 개발 비용 : 3억원
- 3) 10T/D Pyrolysis Plant(Korea) 차세대 핵심기술 적용
 - 디스크 이동식 페타이어 열분해 플랜트
 - 신재생에너지 기술개발 사업 참여
 - 주관 : 지식 경제부 에너지 관리공단 신재생에너지센터
 - 참여기관 : 한국에너지 기술연구원
 - 개발 기간 : 2006년8월~2009년7월
 - 개발 비용 : 40억원
- 4) 120T/D Continuous Process Pyrolysis Plant(Malaysia) 상용화
 - 공사명 : 120t/d Continuous Process Pyrolysis Plant in Malaysia
 - Capacity : 120t/d (20ton x 6units)
 - 공사기간 : 2007.01~2008.10 (2007.1.17기공식)
 - 공사금액 : 300억원
 - 발주처 : Advanced Pyrotech Sdn. Bhd.
 - Site : West Port, Selangor Darul Ehsan, Malaysia

2.3 열분해 열병합 복합시스템 구성

페타이어 열분해 시 발생하는 코킹과 기계적 운전 용이성, 밀봉의 적합성 등을 고려하여 열분해 공정개발 사례를 벤치마킹하였고, 여기에 열병합 증기사이클을 추가한 통칭 IPCogen (Integrated Pyrolysis Cogeneration) 혹은 PyroCogen™ 이라는 디스크이동식열분해 반응기를 가지는 연속식 열분해 열병합 복합공정을 개발하여 상업화에 적용하였고, 이에 관한 종합 공정 블록도는 Fig. 2와 같다.

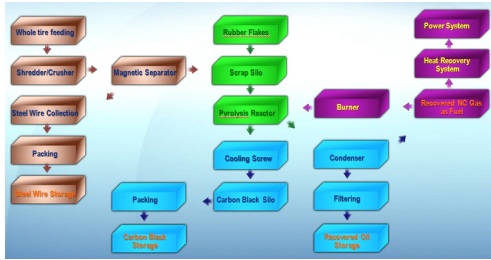


Fig. 2 IPCogen Process block diagram

본 열분해 열병합 복합공정은 120t/d 페타이어 처리를 위한 상업설비에 적용되었고, 9월 현재 시험운전 중에 있다. Fig.3은 이러한 120t/d 에 대한 열 및 물질 수지를 나타낸 것이다.

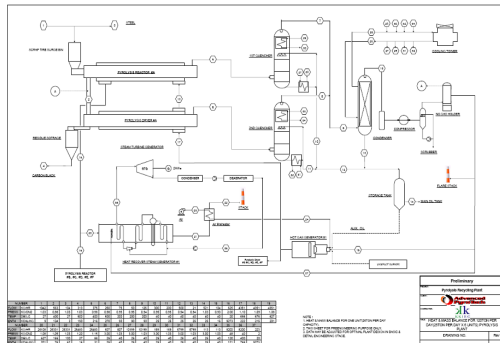


Fig. 3 Heat & mass balance of 120t/d integrated pyrolysis cogeneration plant for waste tire recycling

현재까지 개발된 다수의 페타이어 열분해 공정은 대체로 두 가지 범주 즉, 환원과 산화공정으로 나눌 수 있는데 산화공정은 산소나 공기를 반응기 안에 주입하기 때문인데 가스화(gasification)과정이며, 열분해의 고전적인 정의는 산소 없는 분위기에서 재료의 열적 분해(thermal decomposition)로서 환원공정이다. 이런 환원공정은 타이어 열분해를 위한 전통적인 방법에 해당하며 무산소하에서 페타이어를 분해하기 위한 반응기 열만 필요로 한다. 이를 위해 반응기에 질소 같은 불활성 기체로 가압하여 공기가 반응기로 스며드는 것을 방지하는 반면 타이어에 가황제로 첨가된 황과 반응시키기 위해 수소를 주입하여 H₂S를 만들 수도 있다. 현재까지 여러 가지 종류의 반응기가 페타이어 열분해를 위해 사용되어 왔는데 주로 batch형식의 밀폐된 용기 반응기가 주로 사용되어 왔다.

반응기의 설계는 균질한 온도 구배와 분진들

의 부착에 의해 생산되는 char의 질에 주요한 영향을 준다. 이러한 반응기에 주로 적용되는 형식은 밀폐용기, 로타리킬른, 스크류, 이송화격자, 유동층등이 사용되며, 반응기 설계에는 기술적 복잡성과 비용 측면을 고려해야 한다. 열분해 고형잔류물인 Char는 순수 카본블랙과 비교하여 높은 품질의 것을 생산하지 못하는 실정이기 때문에 무엇보다 품질이 개선되어야 한다.

상업화설비에서는 반응기내부에 실증연구에서 개발된 이동식 디스크를 설치하여 페타이어 열분해 시 발생하는 코킹을 제거하도록 하였고, 에너지회수의 최대화를 위해 배출되는 연소가스로부터 열을 회수할 수 있도록 보일러를 설치하였고, 여기서 발생하는 증기를 터빈과 주변공정에 공급할 수 있도록 하였다.

2.4 장치설계 및 설치

열분해 반응기는 파쇄타이어를 공급받아서 열분해 시키며, 열분해반응에 의해 생성된 오일증기와 잔류물 슬러지를 배출시키는데 Fig. 4에서 반응기의 조립도와 Fig.5에서 설치된 열분해 반응기 본체를 보여준다. 반응기는 상하 두 개의 수평원통의 이동층부로 구성되어 있는데 이동층부의 상부 끝은 파쇄타이어 주입용 스크류 콘베이어에 연결되고, 하부는 잔류물 저장조에 연결된다. 원통형 이동층 반응기의 측면에는 파쇄타이어 열분해 시 배출되는 오일증기와 비응축가스를 인출하는 배관이 연결되어 급냉조와 응축기로 진행할 수 있도록 하였다. 반응기의 외벽은 이중으로 하여 고온가스발생기로부터 생성된 열풍 공급에 의해 가열할 수 있도록 한다.

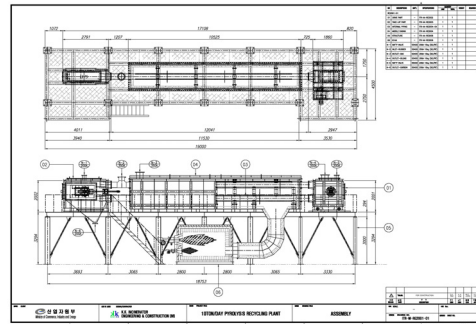


Fig. 4 10t/d reactor proper assembly

본 반응기의 이동층부는 체인형태에 디스크를 설치하여 반응기 내부에서 발생한 코킹을 긁어서 코킹발생을 억제하고, 원통하단부에 모여진 열분해 진행 중인 파쇄타이어를 서서히 이동시키는 기능을 하도록 하였다. 그리고 원통은 외부로부터 충분히 열을 흡수하고, 철심과 카본블랙 등 잔류물이 정체되지 않도록 하였다.

120t/d 상업화 설비를 제작, 설치 하기 전에 배치와 간섭을 검토하기 위해 Inventor프로그램을 사용하였고, Fig. 6은 3차원 CAD 도면을 나타낸 것이다. 이와 같은 작업을 통해 제작과 설치, 조립시간을 최소화하도록 하였다. Fig.7은 상업설비의 배치도를 나타낸 것이다.



Fig. 5 Installed waste tire pyrolysis system for 120t/d treatment

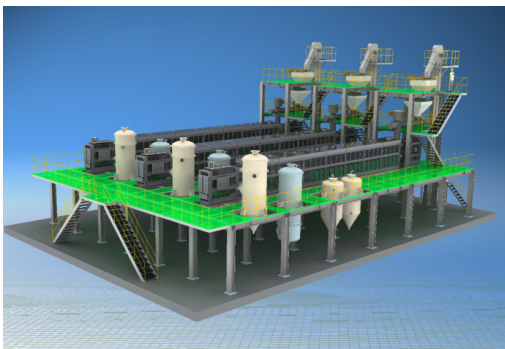


Fig. 6 3D model for 120t/d waste tire pyrolysis system

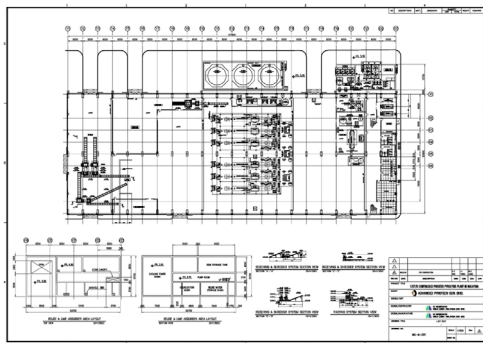


Fig. 7 120t/d commercial plant layout

열분해반응기 내부에서의 최적 반응온도를 유지하기 위해 tempering air를 공급하여 반응기를 가열하는 연소가스 온도를 일정하게 유지하도록 하였다.

오일회수 장치는 급냉기와 응축기로 이루어지며, 급냉기는 반응기에서 발생하는 오일증기를 1차 냉각시켜 타르나 고비점 오일을 응축시키고, 가스가 반응기로부터 배출될 때 비산되는 고체입자들을 제거하는 기능을 갖는다. 응축기는 냉각 tube를 가지는 형태로서 급냉기에서 응축되지 않은 잔여 오일증기를 응축시키고 응축된 오일을 섭씨40도 이하로 냉각시켜 비응축되는 가스의 양을 최소화 할 수 있도록 하였다.

3. 시운전

설치된 120t/d 플랜트는 20t/d 열분해 반응기 6대와 최대 증기 발생량 10t/h, 증기압력 10barg, 600kw출력의 증기터빈을 포함한다. 6대의 열분해 반응기에서 배출되는 섭씨400도 이상의 고온의 연소가스를 모아서 폐열회수보일러를 통과하여 증기를 발생하도록 하였다. 9월 현재 총 6기의 열분해 반응시스템에 대한 trouble shooting을 완료하였고, 부하별 시운전을 진행 중에 있으며, 증기 사이클과의 통합 운전도 진행 될 예정이다. 반응기 운전온도는 섭씨 500도, 반응기 압력은 -100~-120mmHg를 유지하도록 하고 있다. 현재 확인된 최소부하 300kg/hr투입 조건에서 6기 중 3기에 대해 3주간 연속 운전을 진행하였고, 오일 수율은 35%~40%, 열분해 카본블랙은 40~45%, 비응축가스는 25%~15%수준이 되고 있는데, 비응축 가스가 예상치 보다 다소 많이 발생하고 있어 현재는 flare stack을 통해 소각처리하고 있다. 이는 반응기 규모에 비해 투입되는 원료량이 작아 열분해공간과 반응기 접촉면이 충분해서 가스 발생이 많은 것으로 보이며, 원료 투입량을 설계치인 840kg/hr를 투입할 경우 반응기 길이에 따라 온도분포가 변하면서 오일 수율과 비응축 가스의 발생량도 변화할 것으로 예상하고 있다. 이에 대한 운전 자료는 지속적으로 수집하여 최적 운전 상태를 유지할 예정이다.

4. 결론

20t/d 6기로 구성된 120t/d 처리용량을 가지는 디스크이동식 페타이어 열분해 상업화 설비를 설계하여 제작, 설치, 완료하였고, 시운전을 진행하고 있다. 300kg/hr를 투입하고 있는 초기 시운전조건은 반응기 온도 섭씨500도 내외에서 운전하였는데 3주간 연속운전이 가능함을 확인하였다.

본 설비에서는 비응축가스를 열분해 열원으로 사용하기에 충분하고, 배출되는 연소가스로부터 열을 회수하여 열병합 설비를 가동하도록 하였다. 시운전 시 확보한 운전정보와 지속적인 시험운전을 통해 설비를 개선하고 수율을 향상시킬 수 있도록 운전과 개발을 지속적으로 진행할 예정이다.

후 기

본 디스크 이동식 열분해 실증설비는 신재생 에너지센터에서 지원받아 2차년도 연구를 진행 하였으며 3차년도 진행 중에 있다.

References

- [1] 타이어공업협회 홈페이지(www.kotma.or.kr)
- [2] S.Y.Kim and K.K.Kim., 2008, "Design and Commissioning on Waste Tire Pyrolysis Demonstration Plant with Disk Moving Tube Reactor System," 2008 Spring Conference of KSNRE, pp.456~459.