한국신·재생에너지학회 2008년도 춘계학술대회논문집 pp.456~459

디스크이동식 폐타이어 열분해 실증설비 설계와 시운전

김 성연[1], 김 기경

Design and Commissioning on Waste Tire Pyrolysis Demonstration Plant with Disk Moving Tube Reactor System

Seongyeon Kim, Kikyung Kim

Key words : Disk moving tube reactor(디스크이동식 튜브반응기), Waste tire(폐타이어), Pyrolysis(열분해), Plant design(설비설계), Commissioning(시운전)

Abstract : The 10t/d pyrolysis demonstration plant for waste tire recycling have been constructed and operated for commissioning of the plant. The plant have the tube reactor with chain conveyer attached disk. The reactor temperature is 500~600deg.C and pressure is -80~-100mmHg. Non-condensable gas is used as fuel for pyrolysis heat source.

1. 서 론

전 세계에서 발생하는 폐타이어는 연간 5백만 톤 규모로서 총 고형폐기물의 2%수준에 육박하며 미국, 일본, 유럽 등 선진국에서는 연간 1인당 1개정도의 폐타이어가 발생한다. 우리나라도 2007년도 기준 대략 30만 톤 규모로서 대략 1인당 0.8개의 폐타이어가 발생하고 있는데 이들 중 63%이상이 시멘트킬른과 건류소각에 사용되고 있고, 유효자원을 회수하기 위한 이용 방안은 높지 않은 실정이다.[1] 폐타이어는 석탄이나 바이오매스보다 발열량이 높고, 높은 휘발물질 함유와 낮은 회분함량으로 인해 연소, 열분해, 가스화 이용에 이상적인 물질임을 알 수 있다. 현재 폐타이어의 열분해는 고형탄소잔류물, 오일, 가스, 철심의 유효성분들을 확보할 수 있게 해준다는 측면에서 직접연소를 통한 에너지원 활용보다는 사업적 포트폴리오를 유리하게 해주고 있다. 특히 고유가 대응과 자원재활용 측면에서 주목하게 해준다. 폐타이어 열분해시 생산되는 고형카본잔류물은 타이어에 제조단계에서 투입된 광물질을 포함하고 있으며 무연연료, 카본블랙, 활성탄으로 사용되어질 수 있다. 폐타이어 열분해시 생성되는 오일은 aromatics계열조성물을 포함하여 5-20탄소수를 가지는 복합성분으로 구성되어 직접 연료로 사용하거나 석유정유의 원료(예, cutter stock)로 사용되어질 수 있고 정제된 화학물질(예, limonene)의 중요한 소스가 될 수 있다. 폐타이어 열분해시 새성되는 비응축 가스는 CO, CO_2, H_2, 가벼운 탄화수소계열로 구성되어 열분해 열원 생성을 위해 연료로 사용되어진다.[2]

생성물 수율과 성분은 열분해 반응조건과 반응시스템에 따라서 달라진다. 폐타이어 열분해에 관해서는 80년도부터 실험실규모와 pilot규모, 산업규모 등 수없이 다양하게 진행되어 왔고, 수율과 성분역시 다양하게 보고되었는데 이는 열분해공정에서 규정 지워진 특성들, 온도 압력, 가열속도, 폐타이어크기, 폐타이어종류, 공정규모 등에 따라 달라진다. 그러나 일반적으로 고형잔류물과 오일의 수율은 거의 40~50%수준이며, 반응온도가 증가함에 따라 오일과 가스의 수율이 증가하는 경향을 보인다. 고온에서 오일수율은 최대치에서 감소하는 경향을 보이는데 이는 오일의 크래킹에 의해 가스의 수율이 증가하기 때문이다. 어떤 경우는 탄소잔류물이 온도가 높은 경우 증가하는데 이는 aromatization reaction동안 생성된 탄화부착물(carbonaceous deposits)에 의한 것으로 여겨진다. 가스의 발생량도 5%에서 53%까지 실험 장치와 온도 조건에 따라서 다양한 변화를 보이는 것으로 보고되었다.[2,3,4]

폐타이어 열분해공정에서 상업적 성패는 생성물의 안정된 수율과 일정한 성분의 유지하는 것이 관건이며 대형화된 규모를 유지하기 위해 연속식 공정의 개발이 필수 불가결이다. 이를 위해

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

당사에서는 실험실 규모를 넘어 2003년부터 2.4t/d 규모의 pilot scale을 통해 운전의 적정성과 수율을 확인한바 있으며, 2006년 8월부터 신재생에너지센터에서 지원하는 실증사업의 일환으로 10t/d의 상업적 규모의 연속실증설비를 개발하여 3년에 걸쳐 연구를 진행 중에 있다.

본 연구에서는 폐타이어 열분해시 발생하는 코킹을 기계적으로 제거하기 위해 열분해 반응기 형식을 디스크 이동식 튜브 형식을 가지는 10t/d 실증설비 개발 내용과 설비의 시운전 내용에 대해서 소개하고 지속적인 개발 내용에 대해서 논의한다.

2. 열분해 시스템설계

2.1 공정개발

현재까지 개발된 다수의 폐타이어 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 폐타이어를 분해하기 위한 반응기 열만 필요로 한다. 반응기에 질소 같은 불활성 기체로 가압하여 공기가 반응기로 스며드는 것을 방지하는 반면 타이어에 가황제로 첨가된 황과 반응시키기 위해 수소를 주입하여 H2S를 만들 수도 있다. 여러 가지 종류의 반응기가 폐타이어 열분해를 위해 사용되어 왔는데 주로 batch형식의 밀폐된 용기 반응기가 주로 사용되어왔다. 반응기 설계는 균질한 온도 구배와 분진들의 부착에 의해 생산되는 char의 질에 중요한 영향을 주며 주로 적용되는 형식은 밀폐용기, 로타리킬른, 스크류, 이송화격자, 유동층 등이 사용되며 이러한 다른 반응기 설계들은 기술적 복합성과 비용 측면에서 논의되어진다. char의 질 역시 개선되어야 하지만 설비가 개선된 후라도 대부분 응용되고 있는 카본블랙과 비교할 만 한 품질 높은 것을 생산하지 못한다.

밀폐 반응용기를 적용한 공정은 가장 단순하지만 가장 많은 노동력이 내포된다. 이 공정에서 통타이어가 수동으로 각 끝단에 공기 밀폐 형 헤드를 가진 철제 실린더에 쌓여지고 열이 외부나 직접적으로 반응기 안으로 전달되어 요구되는 열분해 온도에 도달시키는 형태다. 반응기는 수 시간 동안 그 온도를 유지하고 반응기가 냉각되고 개봉되어 수동으로 탄소잔류물, 철심, 섬유잔류물들을 제거하기 위하여 청소한다. 그리고 다시 재가동되어지는데 이러한 과정은 반복된다.

로타리 킬른은 개념적으로 단순하지만 실제적으로 운전에 있어서는 매우 어렵다. 가장 큰 운전상의 문제는 공기가 스며들지 않도록 하는 킬른 내부에서의 실링이다. 스크류 형식은 고정된 철제 원통내에 회전형 스크류를 장착하여 원통을 통해 물질을 이송할 수 있도록 하는데 소형에 적용되고, 일반적인 주입 대상물은 철심을 제거하고 잘게 부순 타이어칩이며, 철심이 있을 경우 이송과 취급의 문제를 야기한다. 일차적인 장점은 스크류 축이 작아 로타리 킬른보다 상대적으로 누설을 방지하기 용이하나 고온과 침식 환경 내에서 움직이는 스크류의 기계적 문제를 고려해야 한다. 이동식화격자형식은 고정용기에 체인연결형 화격자가 설치되어 있고 연속적으로 투입부에서 배출부 끝까지 움직이는 데 직접 또는 간접적으로 가열할 수 있다. 이 또한 밀봉유지와 고온 분위기 및 침식 환경에서 나타나는 기계적 문제가 있을 수 있다. 유동층 반응기는 유동화 적정크기유지와 기화된 가스로부터 비산된 고체를 제거하는 것이 필요하며, 고온의 유동화 가스를 유지가 문제지만 양호한 고체물질의 혼합과 고체 층물질의 균일한 온도분포를 형성하는 장점이 있고 그 어떤 열분해 공정보다도 가장 미세한 등급의 char를 생산할 수 있게 해준다.

다른 반응기들과 공정들은 고온오일탕(hot oil bath), 용융염탕(molten salt bath), 촉매주입, 초임계유체이용, 마이크로웨이브 및 플라즈마 방식들이 있다. 이러한 공정들은 실험실 규모로 진행되며 어떤 경우는 pilot 스케일 규모로 이루어지고 있으나 상업적 성공기대는 시간이 더 필요한 실정이다.

기존의 공정들로부터 가장 적합한 기준은 1) 외부로부터 반응기로의 공기 유입을 차단, 2) 24시간 연속운전이 가능, 3) 코킹의 제거 및 최소화, 4) 철심에 의한 이송 및 추출 장애제거, 5) 운전의 용이성, 6)용량의 대형화 가능성, 7) 투입원료 크기의 유연성, 8)에너지회수의 최대화이다. 이러한 기준을 만족하기 위해 당사에서는 기존에 제안된 반응기 형식 중에서 장점만을 취합한 디스크 이동식 폐타이어 열분해 반응기를 적용한 연속식 공정을 개발하였고 pilot scale 연구를 거쳐 본 실증연구에 적용하였다.[5)]

2.2 시스템설계 및 구성

앞서 살핀 국내외 공정개발 사례를 벤치마킹하여 PyroCogen이라는 디스크이동식열분해 반응기를 가지는 연속식 열분해 열병합 복합공정을 개발하였고, 이를 위한 종합 공정 블록도를 Fig. 1에 나타냈다.

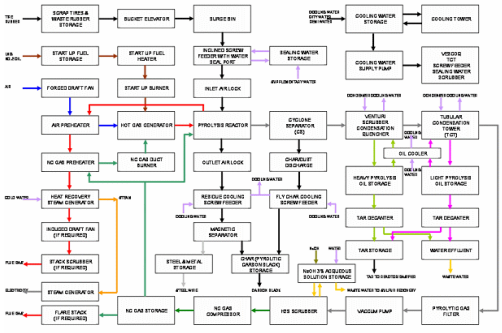

Fig. 1 PyroCogen 종합공정 블록도

본 실증연구에서는 PyroCogen 공정 중에서 Cogen공정시스템을 제외한 디스크 이동식 폐타이어의 열분해 반응기 공정시스템만을 대상으로 하였으며 Fig. 2와 같은 10t/d 처리용량을 가지는 공정과 시스템을 구성하여 진행하였다.

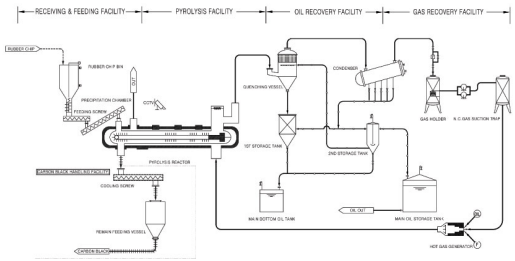

Fig. 2 디스크이동식 폐타이어열분해공정도

2.3 주요장치설계 및 제작

열분해 반응기는 파쇄타이어를 공급받아서 열분해 시키며, 열분해반응에 의해 생성된 오일증기와 잔류물 슬러지를 배출시키는데 Fig. 3에서 반응기의 개략도와 설치된 반응기 본체를 보여준다. 반응기는 상하 두 개의 수평원통의 이동층부로 구성되어 지는데 이동층부의 상부 끝은 파쇄타이어 주입용 스크류 콘베이어에 연결되고, 하부는 잔류물 저장조에 연결된다. 원통형 이동층 반응기의 측벽에는 파쇄타이어 열분해시 배출되는 오일증기와 비응축가스를 인출하는 배관이 연결되어 급냉조와 응축기로 진행할 수 있도록 하였다. 반응기의 외벽은 이중으로 하여 고온가스 발생기로부터 생성된 열풍공급에 의해 가열할 수 있도록 한다.

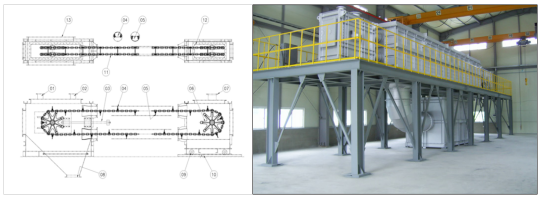

Fig. 3 디스크이동식 열분해반응기

따라서 반응기 내부에서의 최적 반응온도를 유지하는 것과 잔류물의 스케일 형성 현상을 최소화할 수 있는 열분해 반응기의 개발은 폐타이어를 이용한 열분해 오일화 장치에 있어서 핵심이 되는 부분이지만, 아직까지 이러한 문제점을 완전하게 극복한 열분해 반응기는 없는 실정이다.

본 반응기는 이동층부를 체인형태에 스크래퍼를 설치하여 반응기 내부에서 발생한 코킹을 긁어서 코킹발생을 억제하고 원통하단부에 모여진 열분해하고 있는 파쇄타이어를 서서히 이동시키는 기능을 하도록 하여 충분히 외부로부터 열을 흡수하고, 철심과 카본블랙 등 잔류물이 정체되지 않도록 하였다.

공급 장치는 정량장치와 투입장치로 구성된다. 공급 속도를 조절하기 위한 정량장치는 로드셀을 이용한 Hopper Scale 을 이용하며, 투입장치는 직렬로 연결한 두 개의 Knife Gate Valve를 교차적으로 개폐 작동시켜 타이어가 투입될 때 외부공기의 유입이나 내부 가스의 유출을 방지하는 기능을 갖는다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 타이어 공급 장치는 Fig. 4에서 보는 바와 같다.

잔류물 배출장치는 반응기 후단에 부착되어 잔류물을 가스의 출입 없이 잔류물처리장치로 배출하는 기능을 갖는다. 장치의 구성은 타이어 공급 장치 중 정량부를 제외한 투입장치와 동일하다.

Fig.4 공급 및 배출장치와 밸브

오일회수장치는 급냉기 및 응축기로 이루어지며, 급냉기는 반응기에서 발생되는 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.

Fig. 5 3차원모델 및 실제설치 설비

본 실증연구를 위해 장치를 설계하고 제작 설치 전에 배치와 간섭을 검토하기 위해 Inventor 프로그램을 사용한 3차원 CAD를 이용하여 제작과 설치 조립시간을 최소화하도록 하였다. Fig. 5은 3차원모델과 실제 설치된 설비를 보여준다.

3. 시운전

디스크이동식 폐타이어 열분해설비는 설치된 후 총 13차에 걸쳐서 시운전이 진행되었으며 주로 1차에서 10차까지의 시운전은 무 부하상태에

서 냉간 및 열간 운전을 포함한 단독기기 시험과 계통상의 trouble shooting을 위해 진행되었다. 투입된 폐타이어는 20~30㎜크기의 칩형태를 사용하였으며 약간의 철심을 포함하고 있는 것을 투입하였다.

반응기의 온도 유지를 위한 가열은 반응기의 외벽을 가열하는 것으로 이루어지는데 초기 기동시에는 경유버너를 작동하여 반응기 온도를 섭씨 400도까지 가열하고 이후 폐타이어를 투입하여 열분해할 수 있도록 한다. 반응기를 가열하는 열원은 고온가스 발생 장치에서 비응축 가스를 연소한 섭씨900도 이상의 가스로 반응기를 가열하도록 하였고 반응기내부의 온도를 감지하여 고온가스 온도를 조절하는데 비응축가스 공급량을 줄이거나 과잉공기를 조절하여 가스온도를 제어하도록 하였다. 폐타이어투입량이 작은 저부하저하시 비응축가스의 발생량이 작을 경우 경유를 연소하여 반응기 온도를 유지하도록 하였다.

현재 실증연구용으로 설치된 설비의 온도제어는 제어판에 설치된 온도를 모니터링하면서 수동으로 조절할 수 있도록 하였고, 긴급 상황 시 운전자가 수동으로 버너를 OFF하면서 온도를 낮추고, 냉각을 위해 송풍기만 가동할 수 있도록 하였다.

급냉 장치로 유입되는 오일증기는 장치상부에서 분무시키는 냉각오일에 의해 냉각되어 응축이 일어나며, 응축온도는 분사되는 오일 유량에 의해 조절한다. 즉 급냉기 출구에서 비응축가스 온도를 감지하여 급냉기로 송출되는 오일유량을 조절하는데, 본 설비의 시운전단계에서는 이렇게 할 경우 열분해 오일에 포함된 tar성분에 의해 온도제어밸브가 손상될 우려가 있어 온도와 부하에 관계없이 일정량을 분무하도록 하였다.

Fig. 6은 60시간 연속 운전시 기록한 반응기 내 외부 온도와 열분해 장치 공급 가스온도 및 배출 가스온도를 나타낸다. 이때 열분해 반응기 압력은 -80~-100㎜Hg를 유지하였다.

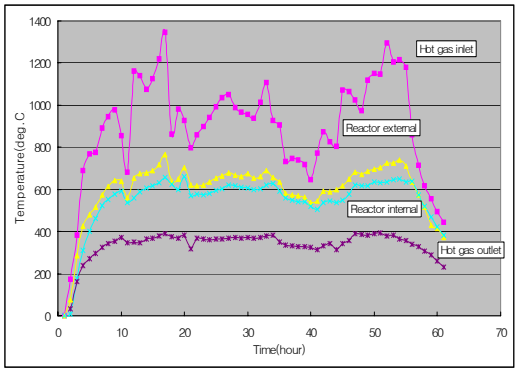

Fig. 7 반응기운전온도

시운전시 비응축가스와 경유연소로 열원을 공급하는 경우 배출되는 공해물질을 측정하였는데 Table 1에 나타낸 바와 같다. 비응축가스의 경우 3차례에 걸쳐 측정하였으며 SOx 배출이 103.3ppm에서 32.1ppm까지 다양한 범위를 보이는 것은 투입되는 폐타이어의 성상이나 온도조건의 차이에 따른 H2S의 생성 정도에 따라 차이를 보이는 것으로 추정된다.

Table 1 비응축가스 연소 대기측정 결과

Item	NO2 oil	NCgas	NCgas	NCgas
Dust (mg/Sm3)	13.9	-	29.2	-
SOx (ppm)	39.5	103.3	32.1	58.5
NOx (ppm)	26	40.6	22.3	30.9
CO	5.1	0.2	11.7	3.0
CO2	5.9	-	5.9	3.0
O2	12	12	12	12
HCL	-	-	-	-
Temp (C)	283	295	279	185

4. 결 론

10t/d 처리용량을 가지는 디스크이동식 폐타이어 열분해설비를 설계하여 제작 설치 완료하였고 시운전을 진행하였다. 반응기 온도 범위는 섭씨500~600도 범위에서 운전하였는데 설비에서는 특별한 문제점을 발견할 수 없으며 가동이 잘되는 것으로 확인되었다. 본 설비에서 비응축가스를 열분해 열원으로 사용하기에 충분하고, 이를 연료로 사용할 경우 공해물질 배출도 규제치를 만족할 수 있는 수준임을 확인했다. 시운전시 확보한 운전정보와 지속적인 시험운전을 통해 설비를 개선하고 수율을 향상시킬 수 있도록 오일 및 카본 블랙에 대한 연구를 본 실증설비를 통해 지속적으로 진행할 예정이다.

후 기

본 실증연구는 신재생에너지센터에서 지원하는 실증사업의 일환으로 1차년도 연구를 진행하였으며 2차년도 진행 중에 있다.

References

[1] 타이어공업협회 홈페이지
[2] J.Dodds., "Scrap tires: a resource and technology evaluation of tire pyrolysis and other selected alternate technologies", U.S DOE,1983
[3] F.Fortuna., "Pilot-scale experimental pyrolysis plant: mechanical and operational aspects", J. of Analytical & Applied Pyrolysis, vol 40-41, pp.403-417,1997
[4] V.K. Sharma., "Disposal of waste tires for energy recovery and safe environment-review",Energy Convers.Magmt,vol39, pp.511-528,1998
[5] (주)기경IE&C, "120t/d waste tire pyrolysis plant technical specification", 2005