

디스크이동식 페타이어 열분해 실증공정 개발의 성과와 과제

김 성연¹⁾

Result and Assignment on Development of Waste Tire Pyrolysis Demonstration Plant with Disk Moving Tube Reactor System

Seongyeon Kim

Abstract : The 10t/d pyrolysis demonstration plant have been developed for waste tire recycling treatment and value added commercialization. The initial plant model had been started under 2.4t/d capacity with continuous operation, and the commercial plant has been achieved to the 120t/d based on demonstration plant having the tube reactor with chain conveyer attached disk. The next generation pyrolysis plant for waste tire is reviewed and the assignment for plant development is presented briefly.

Key words : Disk moving tube reactor(디스크이동식 튜브반응기), Waste tire(페타이어), Pyrolysis(열분해), Demonstration plant(실증설비)

1. 서 론

페타이어는 물리·화학적으로 안정되어 있어 처리하기가 힘들며, 화재 발생의 위험성이 높고 모기 등의 좋은 서식처가 되는데 이를 방지하는 것은 환경적·위생적으로 바람직하지 못하며, 페타이어의 견고한 성질 때문에 이들의 처리와 재처리 과정을 어렵게 만들고 있는데 생물학적 분해에 거의 영향을 받지 않기 때문에 페타이어 처리는 전 세계적으로 주요한 환경문제로 점점 증가 되고 있다.

우리나라도 2007년도 기준 대략 30만 톤 규모로서 대략 1인당 0.8개의 페타이어가 발생하고 있다. 90년대 후반 우리나라 페타이어의 재활용율은 90%를 상회하였으나 당시 발생량의 40% 이상이 군부대 진지 구축용으로 활용되었고, 이 후 페타이어 발생량의 60% 이상이 시멘트생산을 위한 보조연료로 사용되어 처리되고 있다. 최근 TDF의 법제화에 따라 순환유동층연소 열병합 설비에서 석탄과 같이 보일러 연료로서 대체 사용할 수 있는 상황이나 아직 이용효율은 TDF수급과 수입유연탄 가격의 안정화로 제한적이다.¹⁾

EU와 북미지역에서 발생하는 페타이어는 각각 년 250만톤이 발생하며, 일본에서는 대략 연간 100만톤이 발생하는데 이들의 양은 연간 1인당 1개 정도의 페타이어 발생 규모이다. 산업국가에서는 페타이어가 총 고형폐기물의 2%이내지만 이에 대한 처리애로로 환경문제가 증대되고 있는 실정이다. 미국의 경우 보조연료, crumb rubber로 이용되고 매립되는데 800만 개 이상의 타이어가 2002년 이후 매립되고 있다. 수년간 캘리포니아에서는 페타이어를 불법 덩핑과 불법/합법적으로

(stockpile 형성) 쌓아 두었고, 1990년 대 후반 Westley 의 Filbin 타이어 더미와 Tracy의 Royster 더미에서 화재가 발생했다. 1200만 개 이상의 타이어가 이 두 화재로 뒀으며, 심각한 환경 피해와 지역주민들에게 악영향을 초래했다. Westley 화재 후 처리는 3년 간 지속되었으며, 1700만 달러 이상의 비용이 들었다. Tracy 화재는 진압까지 2년 동안 지속되었고 2003년 봄부터 cleanup이 시작되었다. 그리고 900만 달러의 비용이 cleanup에 사용되었다. 유럽의 타이어 매립은 완전 제거 되었으며 타이어 조각에 엄격한 규제를 가하고 있다. 미국의 11개 주에서 타이어 매립을 금지하고 있다. 몇몇 주는 타이어를 보조연료로 이용을 권장하고 애리조나와 같은 주는 고무아스팔트로 이용함으로써 페타이어를 재활용 할 것을 촉구하고 있다. 이처럼 전 세계적으로 페타이어의 처리 및 관리가 여전히 문제로 남아 있다.²⁾

페타이어의 다각적 재활용을 위한 처리기술로 원형이용의 처리방법, 재생타이어, rubberized asphalt concrete, TDF이용과 같은 에너지 및 열분해처리 방법, 파쇄에 의한 마이크로화 이용방법, 압출에 의한 재활용, 극저온 냉간 파쇄 등 여러 가지 처리방법 등이 있다. 이러한 기술 발전에도 불구하고 해마다 증가하는 페타이어를 처리하기 위한 다양한 페타이어활용 시장 확대의 요구가 여전히 존재하며, 석유와 같은 화석에너지의 가격 상승과 맞물려 열분해, 가스화 및 액화 기술이 페타이어를 다각적으로 활용할 수 있는 기술로서 관심의 대상이 된다. 이러한 기술들은 유럽 및 일본

1) (주)기경아이이앤씨

E-mail : penstorm@kkie.com

Tel : (051)740-6640 Fax : (051)740-6642

에서 석탄 등의 원료로 하여 전환하는데 사용되어 왔으며 공정 자체는 19세기부터 검증된 것이라 하겠다. 따라서 페타이어를 처리하기 위한 공정으로부터 생산된 제품들은 시장성을 갖게 될 것이고 이는 기술개발과 사업화의 동기를 제공하는 계기가 된다. 고분자 합성물질인 페타이어는 석탄이나 바이오매스보다 발열량이 높고, 높은 휘발물질 함유와 낮은 회분함량으로 이들의 열분해처리는 고형탄소잔류물, 오일, 가스, 철심의 유효성분들을 확보할 수 있게 해준다. 이런 측면에서 직접연소를 통한 에너지원 활용보다는 유효성분들의 회수를 통해 산업적으로 활용하는 방안이 처리 및 재활용공정에서 연소에 적용되지 않기 때문에 이산화탄소 배출저감에도 유리하여 기후변화협약 대응 측면에서 주목할 수 있으며, 고유가 대응과 폐기물재활용처리 관점에서 적절한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 페타이어로부터 유효가치성분을 회수하기 위한 열분해공정을 적용하여 개발해온 디스크이동식 열분해 반응기를 가지는 실증설비에 관해 논의하고, 3년간 진행된 실증설비 연구와 개발과정을 전후에 진행된 pilot, 상업화설비 현황을 소개하고, 향후 전개되어야 할 개발 요구 과제들을 제안한다.

2. 디스크이동식 열분해 실증공정

2.1 페타이어 열분해

열분해(Pyrolysis)기술은 소량의 산소나 무산소를 이용하여 고온의 열로 고분자를 저분자로 분해시키는 기술로서 페타이어 열분해에 관해서는 80년도부터 실험실규모와 pilot 규모, 산업규모 등 수없이 다양하게 진행되어 왔고, 수율과 성분역시 다양하게 보고되었는데 이는 열분해공정에서 규정치위진 특성들, 즉, 온도 압력, 가열속도, 페타이어 크기, 페타이어 종류, 공정규모 등에 따라 달라진다. 그러나 일반적으로 고형잔류물과 오일 및 가스가 대부분으로서, 열분해 반응온도가 증가함에 따라 오일과 가스의 수율이 증가하는 경향을 가지며, 고온에서는 오일수율이 최대치에서 감소하는 경향을 보인다. 이는 오일의 크래킹에 의해 가스의 수율이 증가하기 때문이다. 탄소잔류물은 온도가 높은 경우 증가하는데 이는 aromatization reaction 동안 생성된 탄화부착물(carbonaceous deposits)에 의한 것으로 여겨지는 것으로 알려져 있다.³⁾

페타이어의 일반적인 원소분석결과로는 90% 이상이 탄소와 수소로 이루어져 있다. 원료분석결과를 보면 가장 많이 차지하고 있는 부분이 원료인 고무성분은 SBR (Styrene-Butadiene-Rubber)이며 다른 첨가제가 포함되어 있다. 이런 페타이어 재활용처리를 위해 열분해공정에서 상업적 성패는 생성물의 안정된 수율과 일정한 성분을 유지하는 것이 관건이며 대형화된 규모를 유지하기 위해 연속식 공정의 개발이 필수 불가결하다. 이를 위해 기존의 배치식이나 로타리킬른 유동층반응기보다는 페타이어 열분해 시 발생하는 코킹을 연속적으로 제거하고 반응기로 투입된 원료를 연속적으로 이송할 수 있도록 하는 공정이 바람직하다 하겠다.

페타이어의 열분해 처리에서 가장 중요한 관점은 열전달, 질량전달, 운동학적 반응의 현상들과

이들의 복합적인 상호 작용을 제어하는 것인데, 투입된 페타이어 크기, 열분해 온도, 가열율(heating rate), 반응기 내부압력이라는 4가지 변수에 의해 영향을 받는다고 볼 수 있다. 그 중 페타이어 입자 크기는 50mm 이하 정도가 일반적이고, 열분해 반응온도는 섭씨 450-550도 범위에서 유지되도록 하고, 압력은 대기압보다 약간 높거나 진공상태를 유지하는 데, 이는 열분해가 무산소하에서 진행되기 때문에 반응기 주변의 공기에 대해 기밀을 유지하기 위함이다. 가열속도는 분당 섭씨 5도~10도를 유지하고, 투입 타이어 조각들이 열분해를 위해 체류하는 시간을 60분 이상 유지하도록 한다.

페타이어의 열분해과정을 통해 생성되는 물질은 수율과 성분이 열분해 반응조건과 반응시스템, 투입되는 페타이어 성상에 따라 달라지지만 대체로 고형카본잔류물이 30 ~ 40%, 오일이 40 ~ 60%, 가스가 5 ~ 20% 수준의 수율이 일반적이다. 열분해 후 회수되는 오일은 aromatics계열조성물을 포함하여 5 ~ 20탄소수를 가지는 복합성분으로 구성되어 직접 연료로 사용하거나 석유정유의 원료나 limonene과 같은 정제된 화학물질의 중요한 원료가 될 수 있다. 페타이어 열분해 시 생성되는 가스는 오일 회수 후 남는 비응축 가스로서 CO, CH₄, C₂H₄, C₃H₆, CO₂, H₂, H₂S 등의 가벼운 탄화수소계열로 구성되어 열분해 열원 생성을 위해 연료로 사용되어진다.⁵⁾

2.2 디스크이동식반응기 개발과 적용

열분해 반응기 설계 시에는 페타이어 분해 열량을 투입된 원료에 균질하게 제공할 수 있도록 해야 한다. 기존에 주로 적용되는 반응기 형식은 밀폐용기, 로타리킬른, 스크류 이송방식, 화격자, 유동층 등이 사용되며 이러한 다른 반응기 설계들은 기술적 복잡성과 비용 측면에서 논의되어왔다. 열분해 카본잔류물의 질 역시 개선되어야 하지만 대부분 상업적으로 사용되고 있는 카본블랙과 비교할 만 한 품질 높은 것을 생산하지 못하는 실정이다. 다른 반응기들과 공정들은 고온 오일탕(hot oil bath), 용융염탕(molten salt bath), 촉매주입, 초임계유체이용, 마이크로웨이브 및 플라즈마 방식들이 있다. 이러한 공정들은 실험실 규모와 pilot 스케일 규모로 이루어지고 있으나 경제성을 내포한 상업적 성공기대는 시간이 더 필요한 실정이다.

따라서 기존의 공정들로부터 가장 적합한 기준을 벤치마킹하면 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 기존에 제안된 반응기 형식 중에서 장점을 취합한 디스크 이동식 페타이어 열분해 반응기를 적용한 연속식 공정을 개발하였는데 이러한 디스크이동식 열분해반응기는 KIER와 같이 2002년 하반기부터 2003년 상반기에는 screw 형식의 반응기를 가지는 lab 및 bench scale의 기초연구에서 기본 개념이 설정되었고, KIER가 보유한 페타이어 열분해 공정 know how와 기술을 도입하여 1세대의

디스크이동식 pilot 설비를 개발하여 2006년과 2007년 field test를 위해 운용하였다. 이후 정부실증사업화 지원을 받아 2세대에 해당하는 실증설비와 상업설비를 개발하였고, 상업설비는 말레이시아에 수출한 바 있으며 현재는 3세대에 해당하는 개량된 실증설비를 운용하고 있다.^{4),5)}

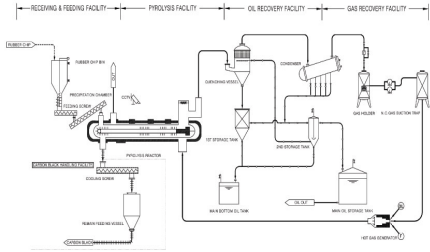


Fig. 1 Waste tire pyrolysis process flow diagram with disk moving tube reactor

Fig. 1은 실증 및 상업화 설비에 적용된 디스크 이동식 페타이어 열분해설비의 기본 공정흐름을 나타낸 것이다. 이러한 기본 공정은 pilot, demonstration, commercial 설비들에 대해 동일하게 적용되었다. 본 설비의 주요 구성은 열분해반응기, 고온가스발생기, 오일회수를 위한 급냉기와 응축기, 진공펌프시스템, 페타이어투입 및 잔류물 배출 air lock시스템 및 부속설비로 되어있다. 열분해 반응기는 과쇄타이어를 공급받아서 열분해시키고, 열분해반응에 의해 생성된 오일증기와 잔류물 슬러지를 배출시키는데 Fig. 2에서의 반응기 조립도와 같다. 이 반응기는 상하 두 개의 수평원통의 이동층 부로 구성되어 있는데 이동층 부의 상부 끝은 과쇄타이어 투입용 스크류 콘베이어에 연결되고, 하부는 잔류물 저장조에 연결된다. 원통형 이동층 반응기의 내부에는 과쇄타이어 열분해 시 배출되는 오일증기와 비응축 가스를 인출하는 배관이 연결되어 있고 오일증기로부터 열분해 오일을 회수할 수 있는 급냉 장치와 응축기로 진행할 수 있도록 하였다.

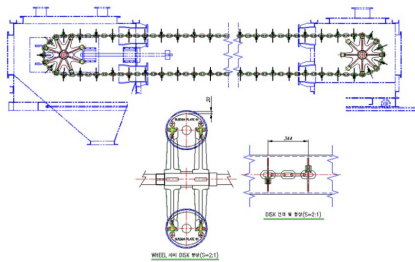


Fig. 2 Disk moving reactor assembly

반응기의 외벽은 이중으로 하여 비응축 가스를 연료로 사용하는 고온가스발생기로부터 생성된 섭씨900도 내외를 유지하는 연소가스를 공급하여 가열할 수 있도록 한다. 반응기 내부에서의 최적 반응온도를 유지하는 것과 잔류물의 스케일 형성 현상을 최소화할 수 있는 열분해 반응기의 개발은 페타이어를 이용한 열분해 장치에 있어서 핵심이 되는 부분이다. 이 반응기는 고온연소가스를 외부에서 간접적으로 가열하면서 내부의 열분해오일증

기와의 접촉을 차단하여 폭발을 피하고, 연소가스의 온도를 비응축 가스공급량과 tempering air를 포함한 연소용 공기로 조절함으로써 반응기 온도를 적절히 제어할 수 있도록 하였다. 본 반응기는 이동층 부를 체인에 디스크 형 부착물을 설치하여 반응기 내부에서 발생한 코킹을 긁어서 제거할 수 있도록 하였고, 제거된 코킹 덩어리와 열분해 카본잔류물은 디스크 이동에 의해 쓸려가면서 원통 하단부에 모여 냉각 회수 될 수 있도록 하였다. 동시에 이러한 디스크는 열분해하고 있는 과쇄타이어를 서서히 이동시키는 기능을 하도록 하여 충분히 외부로부터 열을 흡수하고, 철심과 카본블랙 등 잔류물이 정체되지 않도록 하였다.

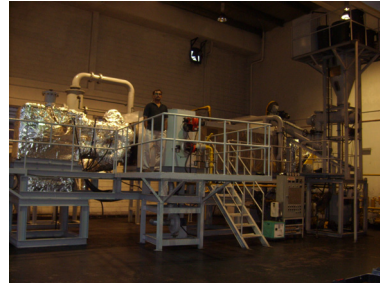


Fig. 2 Pilot plant



Fig. 3 Demonstration plant



Fig. 5 Commercial plant

Fig.3에서 Fig.5는 이러한 디스크 이동식 열분해 반응기가 적용된 pilot설비와 10t/d실증설비, 상업화설비의 현장 모습이다.

3. 개발 성과와 과제

2.4t/d의 pilot설비 운용시험 단계를 거쳐 10t/d규모의 실증설비를 개발하였고 이 과정에서 획득한 운전개념과 설계기술들은 20t/d규모의 6기로 구성된 120t/d 상업화 설비에 적용되었다. 페

타이어 열분해시 발생하는 코킹은 디스크이동방식을 적용한 경우 1주일 기간의 운전 후 검사한 결과 비교적 청결한 상태를 유지하는 것으로 확인되었다. 그러나 반응기 내부는 코킹을 제어할 수 있었으나 반응기를 벗어나 오일회수장치와 연결되는 배관부분에서 코킹발생을 제어할 수는 없었다. 실증설비는 상업화설비 전단계로서 설계와 제작 전에 문제점을 간파할 수 있는 가교역할을 하였고, 상업설비의 성공과 운용에 크게 도움이 되었다.

실증설비를 국내에서 추진하게 되어 해외에 수출한 상업설비에서 개선할 수 없는 부분들을 자체적으로 수행할 수 있게 되어 차세대 열분해설비 개발을 위한 자산을 보유하게 되어 보다 더 경쟁력있는 설비를 개발할 수 있는 토대를 구축하였다. 아울러 6건 이상의 특허를 국내외에 출원함으로써 국제적인 독자기술로서 인정받을 수 있게 하였고, 해외 사업주체나 열분해사업 바이어들이 한국에서 시험가동 되고 있는 실물을 견학할 수 있도록 하여 페타이어 열분해 사업선도 및 국내외 형성되는 페타이어 처리 시장지배에 주력할 수 있게 되었다.

본 실증설비 개발은 보여줄 수 있는 실체로서 가치뿐만 아니라, 설비를 운용하고 설계하는 인적 자원도 확보하는데 중요한 역할을 하였다. 특히 페타이어 열분해와 같은 극히 한정된 분야에 전문적으로 종사할 수 있는 고급인력을 확보한 것은 차세대 설비 개발과 프로젝트 수행을 위해 대단히 중요한 부분이라 할 수 있다.

디스크 이동식 열분해 반응기 개발은 성공적으로 이루어 졌으나 페타이어의 수집 처리되는 과정에서 열분해처리를 위한 수급과 열분해 생성물에 대한 활용가치를 높일 수 있는 방안이 시급히 마련되어야 한다. 특히 국내의 경우 TDF의 법제화에 따라서 대형 열병합 설비에서 수급량이 많은 량을 차지하기 때문에 페타이어 수급에 애로가 있어 열분해처리를 위한 재활용 가치가 인정받을 여지가 좁은 실정이다.

동시에 페타이어 열분해 생성물중 오일의 경우 폐유 정제유 기준을 만족해야 하는 어려움이 있다. 페타이어가 가지는 특성상 정제유기준의 핵심인 0.2% ~ 0.5%의 황 함량 기준을 열분해과정만으로 만족시키는 것은 별도 열분해유를 정제하지 않는 이상에는 대단히 어렵다. 아울러 유통도 자유롭지 못하기 때문에 국내에서는 페타이어 열분해설비 건설이 지극히 제한적일 수밖에 없는 실정이다. 이를 해결하기 위해 페타이어 열분해 생성물중 오일과 고형잔류물의 정제 기술 개발이 필수적이며 이는 부가가치 있는 생성물을 만들어 낸다는 점에서 차별화 될 수 있는 부분이라 하겠다. 이런 기술개발은 국내 전문연구기관과 향후 지속적으로 추진 수행되어야 할 부분이다.

열분해설비의 경우 성능을 확인받기 위한 절차와 규격이 국내외적으로 표준화되어 있지 못한 실정이며 이를 위한 규격화가 필요하며, 이러한 규격 마련은 산, 학, 연이 연합하여 공동으로 마련하는 것이 바람직하다 하겠다.

4. 결 론

디스크 이동식 페타이어 열분해 실증공정 개발을 통해 상업화설비 개발의 기반을 확보하였고, 차세대 설비 개발을 위한 지속개발과정이 진행 중에 있다. 이런 디스크 이동식 열분해설비를 소개하였고, 본 설비를 통한 성과와 더불어 페타이어 수급, 열분해 생성물의 정제기술의 개발, 설비 표준규격의 필요성을 제안하였다. 앞으로 페타이어 처리를 위한 논의가 지속되어 환경적 처리 및 열분해생성물 활용가치를 높일 수 있도록 하여 사업성이 제고될 수 있길 기대하고, 지속적으로 개발을 진행할 예정이다.

후 기

본 디스크이동식 페타이어 실증공정개발은 신재생에너지센터에서 지원하는 실증사업의 일환으로 진행하였다.

References

- [1] 타이어공업협회 홈페이지
- [2] CIWMB report, "Technology Evaluation and Economic Analysis of Waste Tire Pyrolysis, Gasification, and Liquefaction." 2006
- [3] J.Dodds., "Scrap tires: a resource and technology evaluation of tire pyrolysis and other selected alternate technologies", U.S DOE, 1983
- [4] S.Y.Kim and K.K.Kim. "Design and Commissioning on Waste Tire Pyrolysis Demonstration Plant with Disk Moving Tube Reactor System," 2008 Spring Conference of KSNRE
- [5] S.Y.Kim and M.Y.Ha., "Development on Integrated Pyrolysis Cogeneration System for Waste Tire Recycling Treatment," 2008 Fall Conference of KSME.