

<기술논문>

폐타이어의 열분해장치 개발

김태규* · 양상민†

(2007년 6월 12일 접수, 2007년 10월 3일 심사완료)

Development of Pyrolysis Equipment to Depolymerize the Waste Tire

Tae Kyu Kim and Sang Min Yang

Key Words: Waste Tire(폐타이어), Pyrolysis(열분해), Heat Flow(열유동), Thermal Deformation(열변형)

Abstract

Some structural problems and temperature difference of the pyrolysis equipment were improved by using the structure analysis and the optimal design of torch. The pyrolysis equipment developed in this study is expected to the excellent pyrolysis effect. To modify user-friendly the dimension of a part, we developed the feature modeling system that all of the related parts automatically change applying to the three-dimensional modeling method.

1. 서론

자동차 보급의 증가로 인한 폐타이어의 발생량은 매년 꾸준히 증가하고 있으나 폐타이어는 소각에 의한 열 이용과 시멘트 킬른용으로 재활용되고 있어 2차 환경오염과 자원의 소모라는 문제가 제기되고 있다. 특히, 매립되거나 방치되고 있는 폐타이어는 화재의 위험과 해충의 서식지가 되고 있어 이러한 사회적인 문제를 해결할 수 있는 폐타이어의 재활용 방안이 절실히 요구되고 있다.⁽¹⁾

최근 폐타이어의 열분해를 통한 기름 생성에 대한 관심이 증가하고 있으나 폐기물로부터 에너지를 회수하는 공정은 경제성 확보와 더불어 친환경적인 조건이 수반되어야 대체에너지로서의 성

공을 확보할 수 있다.

따라서 폐타이어의 열분해장치의 실용화를 위한 장치개발이 절실히 요구되고 있으며 최근에는 폐타이어의 연소 중 발생하는 환경오염을 극소화할 수 있는 최적 공정조건에 대한 연구와^(2,3) 더불어 열분해에 의한 오일화 방법에 대한 연구가⁽⁴⁻⁶⁾ 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 폐타이어 열분해장치에 대한 구조해석과 열유동 해석기법을 적용하여 열전달로 인한 내부의 스크류의 구조적인 문제점을 해결하였고 토치의 최적설계를 통해 열분해로의 상부와 하부의 온도차를 극소화함으로써 우수한 열효율을 기대할 수 있는 열분해장치를 개발하였다.

2. 열분해로의 열유동 해석 및 구조해석

열분해장치는 가동 중 온도가 약 500℃까지 올라가는 고온의 장치로 시스템의 안정성이 매우 중요하므로 일반기계장치처럼 제작 후 문제점을 파악하기에는 많은 위험요소가 있다. 따라서 설계단계 및 제작단계에서 시스템의 안전성을 확보

* 대덕대학 정밀기계시스템과

† 책임저자, 회원, (주)한빛파워서비스 AOV팀

E-mail : s_smyang@cnu.ac.kr

TEL : (042)821-7625 FAX : (042)825-7625

할 수 있도록 공정조건을 고려한 해석적인 검토가 요구되고 있다. 특히, 열분해 후 생성되는 오일 증기가 외부로 유출하는 경우 화재의 위험성이 매우 높다. 따라서 열분해장치를 구성하는 배관요소가 열변형에 의한 구조적 결함이 발생하지 않도록 설계되어야 한다. 본 연구에서는 열에 의한 구조적 변형을 예측하고 이를 해결하기 위해 구조해석을 수행하였고 열분해 효율을 극대화하기 위해 열유동 해석을 수행함으로써 토치의 최적설계에 관한 연구를 병행하였다.

2.1 열분해로의 열유동 해석

폐타이어의 열분해를 통해 얻을 수 있는 생성물의 품질을 높이고 환경오염을 극소화하기 위해서는 열분해로의 온도를 고르게 분포하도록 설계하는 것이 요구된다. 그러나 기존의 열분해장치에서 적용하고 있는 열분해로는 하나의 분출구에서 열원을 발생하는 단일 토치의 구조로 되어 있어 열분해로의 상부와 하부의 온도차가 많은 구조적 문제가 있었다. 온도편차가 많은 열분해장치는 구조물간의 온도 편차에 의한 열변형에 매우 취약하고 양질의 오일을 생성할 수 없는 점에서 열분해장치의 높은 효율을 기대하기 어렵다.

Fig. 1과 Fig. 2는 기존에 적용하고 있는 열분해로의 형상과 열유동해석 결과를 보여주고 있다. 기존의 열분해로는 토치 1개의 열원과 내부에 격막이 설치되어 있어 전체적인 열유동이 매우 비효율적이다.

Fig. 3은 본 연구에서 개발한 열분해로의 형상으로 열분해로의 하부에서 다수의 토치로 열을 공급함으로써 열분해로 전체에 열이 고르게 분포되고 있음을 알 수 있다. Fig. 4는 열분해로 내부의 열유동에 대한 형상을 3차원으로 나타낸 것이다. 열분해로 내부 전역에 걸쳐 열유동이 매우 잘 이루어짐을 알 수 있다. 이로 인해 상부와 하부의 온도차가 적어 열분해로 전체가 고르게 열이 전달됨으로써 열편차가 적은 우수한 열분해효과를 기대할 수 있다.

2.2 열분해로의 구조해석

고온의 공정에서 작동하는 열분해 장치는 열변형에 의한 구조적 문제가 수반된다. 따라서 본 연구에서는 열변형을 고려한 시스템의 구조해석을 수행하였다. 이것은 토치의 열에 의해 이송장

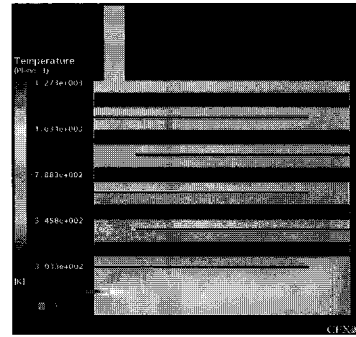


Fig. 1 Schematic of pyrolysis furnace with a torch

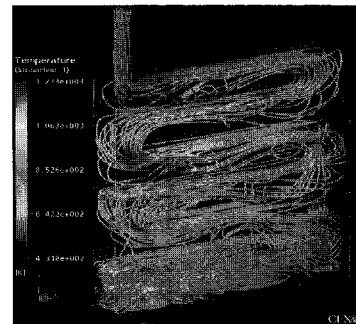


Fig. 2 Analysis result on heat flow of furnace with a torch

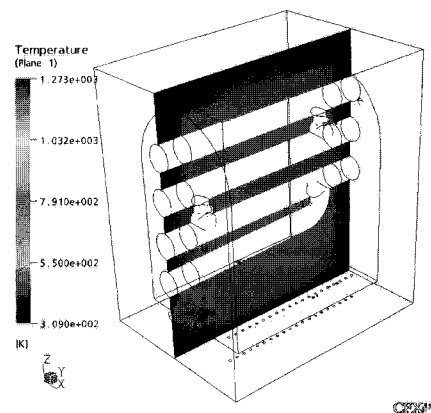


Fig. 3 Schematic of a developed pyrolysis furnace

치인 스크류의 처짐이 발생하고 이로 인해 이송관의 파손이 유발되는 것을 방지하기 위해 반드시 필요한 절차이다. 열분해로의 이송관은 3단

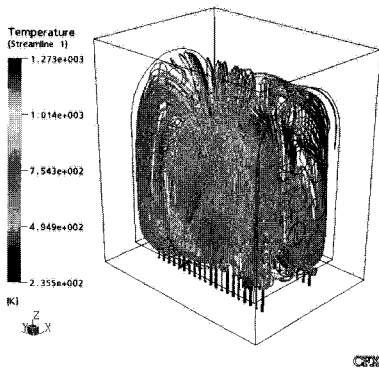


Fig. 4 Analysis results on heat flow of developed furnace

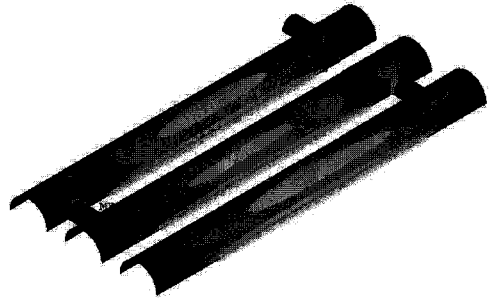


Fig. 6 The stress contour of furnace structure under none thermal condition

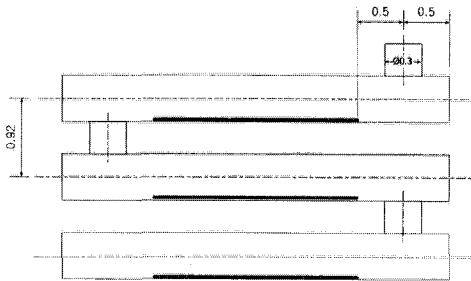


Fig. 5 Schematic of transfer pipe of furnace



Fig. 7 The stress contour of joint part under thermal condition

으로 설계하였고 배관 하나의 길이는 5.5 m, 직경은 0.62 m, 관의 두께는 4.5 mm, 열분해로의 온도는 500℃로 결정하였다. 또한 관의 재료는 SUS 300A로 선정함으로써 배관재료의 물성인 탄성계수는 190 GPa, 밀도는 7920 kg/m³, 푸아송비 (poisson's ratio)는 0.28, 열팽창률(thermal expansion ratio)은 17.3×10⁻⁶ mm/℃, 항복응력(yield strength)은 275 MPa 이다.

Fig. 5에서 반응로에 표시된 굵은 실선은 페타이어의 질량분포를 나타낸 것이며 질량값은 다음과 같이 계산하였다. 반응로에 50%의 페타이어가 채워져 있다고 가정하여 페타이어의 비중은 1.5, 반응로 1개의 체적은 1.66 m³이므로 반응로 1개에 존재하는 페타이어의 중량은 1245.7 kg을 적용하였다. 반응로의 구조해석은 반응로와 가열로 간의 경계조건에 따라 고려되었으며 가해진 하중 조건에 따라 자중에 의한 하중조건과 열하중으로 구분하여 해석하였다.

Fig. 6은 반응로의 응력분포를 나타내고 있다. 해석조건으로, 반응로는 내부에 페타이어 분말의

무게와 반응로의 자중을 고려하였다. 해석결과는 반응로의 원통부 중간에서 응력과 변형이 높게 발생되었으며, 43 MPa의 응력을 나타내고 있다. 반응로의 최대응력은 원통과 원통 사이의 연결부 위에서 발생되었으며, 53.5 MPa의 응력을 나타내고 있다. 따라서 항복강도의 경우에서 최대응력이 안전한 조건임을 알 수 있다.

Fig. 7은 온도조건을 고려한 반응로의 응력을 나타내고 있다. 해석조건으로, 반응로는 내부에 페타이어 분말 무게, 반응로의 자중 및 온도조건을 고려하였다. 해석결과 원통과 원통의 연결부 위에서 최대응력이 발생되었으며, 응력값은 약 200 MPa이 발생되었다. 열이 작용하는 경우와 작용하지 않는 경우는 약 370%의 차이가 발생되었다. 즉, 열이 발생하는 조건에서 응력이 과하게 증가되는 경향을 나타내었다.

Table 1 Maximum displacement of a shaft according to various internal diameter of pipe

Internal Dia.	50 mm	60 mm	70 mm	80 mm
Max. displacement	9.1 mm	8.4 mm	7.9 mm	7.6 mm

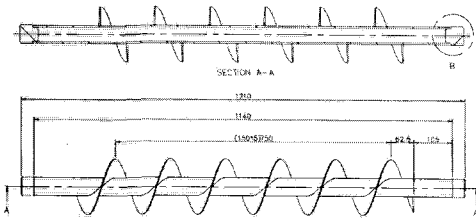


Fig. 8 Schematic drawing of a screw

2.3 이송장치 설계

이송장치를 지지하는 베어링 간의 간격은 6 m, 스크류의 두께를 4 mm로 고려하였다. 이송장치에 대한 축의 외경은 100 mm로 빔의 굽힘식을 이용하여 내경을 결정하였고 구조해석을 수행한 결과 내경의 변화에 따른 최대변위를 Table 1에서 보여주고 있다.

수행된 결과로부터 내경을 60 mm으로 결정하였으나 베어링의 흔들림을 고려하여 반응로와 간섭이 되지 않도록 스크류의 높이를 결정하여야 한다. 베어링의 흔들림을 3 mm로 가정하면 스크류는 반응로와 11.4 mm의 간격을 유지하고 스크류의 높이는 286 mm이하로 고려하여 스크류의 외경을 570 mm로 Fig. 8과 같이 결정하였다. 이송장치를 작동하기 위한 운전토크는 1개의 반응로에서 운반되는 내용물의 하중 1245 kg과 마찰계수 0.3을 고려하여 이송장치에 수직으로 발생하는 하중은 3737 N으로 결정하였다. 이러한 하중에 의한 마찰력이 스크류의 끝단에 작용하면 하중이 1121 N이므로 토크는 319.5 N·m이다. 따라서 설계토크를 고려한 구동모터를 180 W(60Hz), 정격회전수는 1800 rpm로 선정하였다.

3. 열분해장치의 3차원모델링 및 시제품

열분해장치를 개발하기 위해 모델링된 부품들

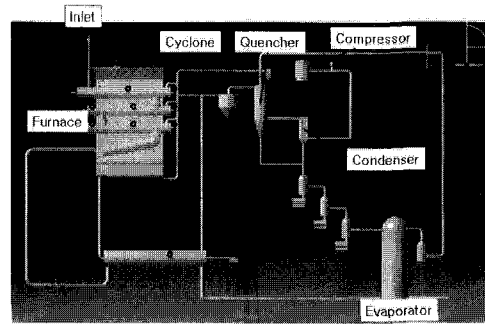


Fig. 9 Schematic of pyrolysis equipment

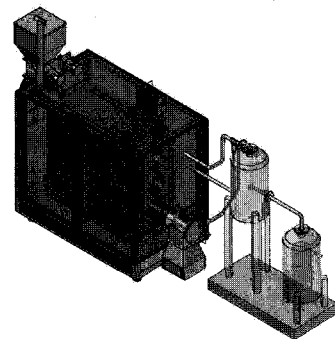


Fig. 10 The feature modeling system of pyrolysis equipment

은 어셈블리 기능을 통하여 서로 결합되어 있다. 따라서 각 요소들은 서로 상관관계가 주어져 있기 때문에 연관된 한 요소의 치수를 변경하게 되면 전체적인 시스템의 치수가 달라지게 된다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완할 수 있도록 3차원 모델링을 통한 특징형상 모델링 시스템을 구축하였다. Fig. 9는 3차원 모델링을 통하여 원하는 형상의 크기를 자동으로 변경할 수 있는 특징형상 모델링 시스템의 개략도를 보여주고 있다.

열분해장치의 가장 핵심 분야는 열분해로에 있다. 열분해로의 안정적인 온도분포와 오일 증기의 유출이 없는 열분해로의 개발이 매우 중요하다. Fig. 10은 시스템 개략도로서 문제의 발생 여부를 파악하기 위하여 3차원 모델링을 실시하여 검토한 것이다.

본 연구에서는 페타이어를 열분해하여 양질의

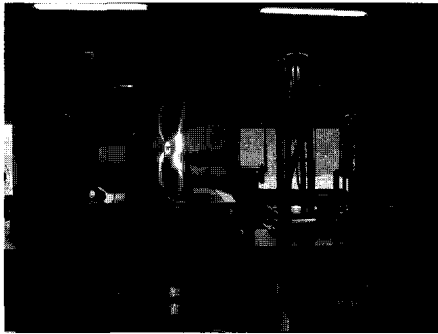
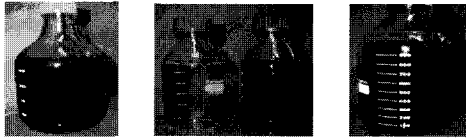


Fig. 11 Test model of pyrolysis equipment



(a) Pyrolysis oil (b) Refined oil (c) Carbon black
Fig. 12 An extract of pyrolysis equipment

청정연료 및 카본블랙을 생산할 수 있는 페타이어 열분해장치의 시제품을 제작하였다. 본 연구에서 개발한 열분해 장치는 연속처리방식을 적용하여 코킹현상을 극소화하였고 최적의 열분해 온도 도출을 위한 시스템 운영능력을 확보하였다.

열분해로의 온도가 너무 높으면 유해가스가 배출되고, 너무 낮으면 열분해가 제대로 생성되지 않음으로써 오일생성 양이 급격히 감소하게 된다. 따라서 열분해로의 내부에 온도센서를 삽입하여 열분해 온도를 450℃ ~ 500℃ 로 제어할 수 있는 시스템을 구축하였다. 또한 페타이어 칩의 투입량을 조절할 수 있도록 하는 기능과 콘덴서(condenser)의 냉각수 작동 기능도 함께 갖추고 있다. Fig. 11은 본 연구에서 개발한 열분해장치의 시제품으로 현재 각 공정조건의 변화에 따른 많은 시험을 수행 중에 있다. Fig. 12는 열분해장치에서 추출한 열분해유와 이를 정제한 이후의 오일 및 카본블랙을 보여주고 있다. Fig. 13은 열분해 장치로부터 추출된 성분에 대한 성분분석을 수행한 결과로 청정연료 41%, 비응축 가스 14%, 카본블랙을 포함한 잔류물 31.5% 그리고 철심을 포함한 고철이 13.5%이었다.

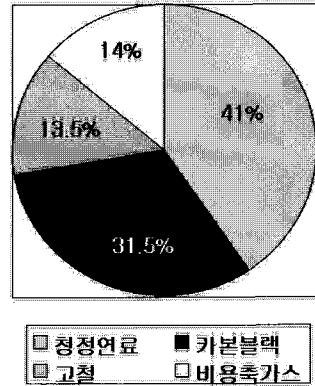


Fig. 13 Component ratio of an extract

4. 결 론

본 연구에서는 구조적 안정성을 확보하고 열분해 효율을 증가시킬 수 있는 페타이어 열분해장치의 개발에 관한 연구를 수행하였다.

(1) 열분해로의 토치구조를 최적화함으로써 열분해로 전체의 온도편차를 극소화함으로써 우수한 열분해 효율을 기대할 수 있다.

(2) 구조해석을 통해 열분해로의 이송장치에 대한 설계를 수행하였으며 공정조건에 적합한 설계조건을 제시하였다.

(3) 열분해장치의 3차원 모델링을 통해 일부 부품의 치수변경을 전체시스템에 고려하여 재 모델링할 수 있는 특징형상 모델링 시스템을 개발하였다.

(4) 향후 본 연구에서 개발된 열분해장치는 각 공정조건에 따른 페타이어의 열분해 효율과 추출물의 성능분석에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

- (1) Kim, Y. W. and Kim, J. O., 1987, "A Study on Reutilization of Waste Tires by Pyrolysis Facilities," *Journal of Korea Solid Wastes Engineering Society*, Vol. 4, No. 2, pp. 105~117.
- (2) Jung, J. S., Park, E. S. and Park, J. W., 1994, "An Experimental Study on Burning Time and Ignition Delay of Waste Tire Chips in High

- Temperature Environments," *Journal of the Korea Society of Mechanical Engineers*, Vol. 18, No. 7, pp. 1833~1839.
- (3) Jung, J. S., Lee, G. W. and Park, J. W., 1994, "An Experiment on Carbon Monoxide Emission from Burning of Waste Tire Chips," *Proceedings of the KSME*, pp. 77~82.
- (4) Kim, W. I., Kim, S. D., Beak, K. J., Kim, H. J. and Hong, I. K., 1999, "Optimum condition design of waste tire pyrolysis process," *Applied Chemistry*, Vol. 3, No. 1, pp. 245~248.
- (5) Kim, D. C., 1995, "Oil Recovery through Waste Tire/Waste Oil Pyrolysis," *Journal of Korean Inst. of Resource Recycling*, Vol. 4, No. 4, pp. 12~15.
- (6) Kim, K. H., Roh, J. K. and Yoo, K. O., 1996, "A Study on Resource Recovery from Pyrolysis of Waste Tires," *Journal of Korea Solid Wastes Engineering Society*, Vol. 13, No. 4, pp. 329~338.