J of Korean Inst. of Resources Recycling
Vol 9. No. 1, 2000, 27-35
≫ 研究論文 ≪

廢타이어 및 廢合成樹脂類의 乾溜가스化 特性

†盧南善 · 金廣鎬 · 申大鉉 · 金東燦

韓國에너지技術硏究所 에너지環境硏究部

Pyrolytic Gasification Characteristics of Waste Tires and Waste Synthetic Resins

†Nam-Sun Roh, Kwang-Ho Kim, Dae-Hyun Shin and Dong-Chan Kim

Energy and Environment Research Department, Korea Institute of Energy Research

요 약

본 연구에서는 150 kg/batch(승용차용 타이어 기준) 규모의 건류가스화 장치를 이용하여 폐타이어와 7 종류의 폐합성수지에 대한 건류가스화 실험을 실시하여 폐기물 종류별 건류가스화 특성을 파악하고, 건류시간 및 1차 공기량에 따른 건류가스의 발생량과 성분 조성 등의 변화 경향등을 분석하였다. 폐타이어의 경우 반응기 내부에서 연소영역과 가스화 영역의 뚜렷한 구별이 확인되었고, 건류용 1차 공기량에 대해 1.05~1.35 배의 비율로 발생되는 생성가스는 비가연성성분 이외에 CO, H_2, C_1~C_3 범위의 탄화수소로 구성되었으며, 정상상태에서는 1,500~3,000 kcal/Nm^3, 종말처리 단계에서는 250~500 kcal/Nm^3의 발열량을 각각 나타냈다. 폐합성수지류는 생성가스의 온도변화가 심하고, N_2, CO_2, O_2의 구성비율이 85% 이상인 건류생성가스는 원료폐기물이 가진 열량의 10~35%에 해당하는 300~2,900 kcal/Nm^3의 발열량을 보유하였다.

주제어 : 건류가스화, 폐타이어, 폐합성수지, 생성가스

ABSTRACT

Characteristics of pyrolytic gasification were examined for the waste tire and 7 types of waste synthetic resin, using a bench scale experimental facility. The product gas temperature of waste tires was 150~300°C and the temperature profile in the combustion zone of the lower reactor part tended to be clearly distinguished from that in the gasification zone of the upper part. However, in the case of waste synthetic resins, there were no clear distinction and temperature fluctuation was severe, depending on the reaction time. Product gas quantity, which depends on that of supplied (1st) air, was found to be 105~135% of the 1st air amount at the steady state. The concentration of noncombustible components in product gas was 80~90 vol.% and the high heating value of the product gas calculated from gas compositions was 1,500~3,000 kcal/Nm^3 for waste tire, and 300~2,900 kcal/Nm^3 for waste synthetic resins, respectively. Heating value of product gas and combustible gas concentration were increased in proportion to 1st air amount when 1st air amount is below 0.35 Nm^3/min.

Key words: Pyrolytic gasification, waste tire, waste synthetic resin, product gas

1. 서 론

폐기물의 건류가스화는 저산소 상태(이론공기량보다 적은 양의 공기를 공급함) 하에서 폐기물의 일부를 연소시켜서 발생되는 열로 폐기물을 열분해하여 가연성 가스를 얻는 방법을 의미하며, 건류가스화소각 또는 건류소각은 건류가스화에 의해 발생된 생성가스를 보일러에서 연소시키는 과정을 일컫는다.[1,2] 일반적으로 건류가스화에 의해 생성된 가스는 공기와 연소가스가 혼입되어 2000~3000 Kcal/Nm^3 이하의 낮은 발열량을 가

† 1999년 9월 6일 접수, 1999년 11월 23일 수리
† E-mail: nsroh@kier.re.kr

지나 생성가스를 그대로 보일러에서 연소시킬 수 있고, 직접소각 공정이 가지고 있는 끄름 발생, 유독성가스의 배출, 열가소성수지의 용융적하 현상 등의 문제점들을 해결할 수 있기 때문에 중소규모의 폐기물 처리공정에 적당한 기술로 평가되고 있다.[3,4]

국내에서는 외국으로부터 건류가스화 공정에 대한 기술 도입이 1980 년대 중반기부터 본격적으로 추진되기 시작하여 현재는 타이어, 식품, 섬유, 제지, 피혁, 신발 등의 제조업체들을 중심으로 국내에서 제작된 약 100 여기 이상의 건류가스화 설비가 가동 중에 있다.[3,5] 각 설비들은 전체적인 공정구성이 거의 유사하지만 제작업체에 따라 단위 장치의 규격 및 구성, 폐기물의 투입 및 배출장치, 배가스 처리시설 등에서 약간의 차이점이 있는 것으로 알려졌다.

국내에서 건류가스화 기술과 관련하여 수행된 연구실적을 살펴보면 우선 건류가스화 공정에 대한 기초적인 연구와 폐기물별 특성에 대한 실험들[6-8]이 대학을 중심으로 진행된 바 있고, 건류가스화 설비의 장치 및 공정 개선과 산업체 생산공정에 적용하는 기술 등에 대한 연구 결과[2,9-11]가 몇가지 보고되었다

이러한 몇 건의 연구개발 실적과 설비에 대한 설계제작 및 운전 경험 등을 통하여 건류가스화 공정에 대한 기술축적은 상당히 진척된 상태이나 폐기물 종류에 따른 건류가스의 정량적인 발생특성, 1차 건류용 공기와 건류가스의 상관관계, 1/2차 건류공기의 제어에 의한 자동조절 방법, 연속식 건류가스화 반응기의 설계 등과 같은 핵심적인 사항에 대해서는 아직도 정량적인 자료와 정확한 설계기준이 상당히 부족한 실정이다. 특히 1996 년도을 기준으로 년간 약 1,500만 개가 발생되는 폐타이어와 년간 340만톤 정도가 배출되는[12,13] 폐합성수지류는 건류가스화 과정를 통하여 처리비율을 높이고 자체 보유열량을 에너지원으로 활용할 수 있는 가장 유력한 폐기물이므로 이에 대한 보충적인 연구가 필요하다고 판단된다.

따라서 본 논문에서는 건류가스화 공정에 대하여 핵심적이고 정량적인 기초자료의 확보를 목적으로 Bench 규모인 150 kg/batch(승용차용 타이어 기준) 처리용량의 건류가스화 실험장치를 이용하여 반응기 내부의 온도분포 변화, 폐기물 종류별 반응 특성, 1차 공기량과 생성가스 발생량과의 관계, 생성가스의 구성성분 및 조성, 건류가스화 시간 및 1차 공기량에 따른 가연성가스의 조성과 생성가스의 발열량 변화 등과 같은 건류가스의 발생 특성들을 폐타이어와 7 종류의 폐합성수지를 대상으로 살펴보았다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

건류가스화 실험에 사용된 폐기물은 승용차용 폐타이어와 산업체에서 수집한 7 종류의 폐합성수지류이다. Table 1 은 각 시료의 원소분석치 및 발열량을 표시한 것이다. 발열량은 합성수지 B가 중유와 비슷한 9,870 kcal/kg으로 가장 높으며, 제조공정에서 불연성의 충진제가 포함된 비닐장판 계통의 합성수지인 E, F, G 의 경우는 원소 조성이 다른 폐기물과 많은 차이를 보이고 발열량도 4,000 kcal/kg 이하인 것으로 측정되었다.

2.2. 실험장치

건류가스화 실험설비는 건류가스화 반응기, 건류가스

Table 1. Ultimate analysis and heating value of waste materials

		Ultimate Analysis (wt %)				Heating Value (kcal/kg)
		C	H	N	S	
Waste Tire		85.41	7 11	0.32	1.43	8,840
WSR*	A	63.13	6 17	6.49	0.78	5,990
	B	80.07	12.81	3 20	0 34	9,870
	C	73.25	9 61	3.38	0.53	8,750
	D	70.81	11 29	0.27	0 50	8,280
	E	36.70	4 51	0.12	8 61	3,760
	F	33.07	4.45	0 32	6 18	3,820
	G	35.91	4.50	0.20	6 34	3,500

*Waste Synthetic Resin

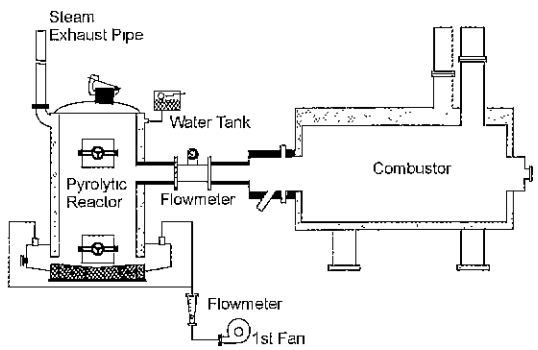

Fig. 1. Schematic diagram of test facilities for pyrolytic gasification.

연소용 버너, 건류가스 연소로 등의 주요 장치와 연소용 공기 공급장치, 냉각수 공급장치, 보조연료 연소장치 등의 부대시설로 구성되었다. Fig. 1 은 실험장치의 구성도를 나타낸 것이다.[5]

건류가스화 반응기는 내경이 1,000 mm, 높이가 2,000 mm인 원통형 구조로 제작되었고, 반응기 외부는 100 mm 두께의 수냉벽으로 쌓여 있다. 건류용 공기는 1차 fan으로부터 유량조절 밸브를 거쳐서 반응기 하부로 공급되며, 유량은 rotameter를 이용하여 측정하였다. 반응기의 외벽 상부에는 폐기물 투입구를, 외벽의 하부에는 회재 배출구를 각각 설치하여 폐기물을 장입하고 반응후의 잔류물을 처리할 수 있도록 하였다. 반응기 내부에는 높이에 따라 6개의 열전대를 설치하여 각 부위의 온도를 연속적으로 측정하였고, 건류가스의 생성량은 반응기의 상부에 위치한 가스 배출구와 건류가스 연소용 버너의 중간에 설치된 오리피스 유량계(내경 : 50 mm)를 이용하여 순간치와 적산치를 동시에 측정하였다.

원통형으로 제작된 건류가스 연소용 버너는 외경이 500 mm, 길이가 800 mm이며 내벽이 10 mm 두께의 내화물로 처리되었고, 건류가스 연소로는 내경이 600 mm, 외경이 1,000 mm, 길이가 3,000 mm인 2중 원통형 구조로 제작되었다.

2.3. 실험방법

실험과정을 살펴보면 우선 50~100 mm의 크기를 가진 폐합성수지류나 통타이어 형태의 승용차용 폐타이어를 건조시킨 후 무게를 측정하고 투입구를 통하여 건류반응기 내부로 장입하였다. 회재 배출구를 이용하여 폐기물을 점화시킨 후 배출구를 완전히 차단하고 1차 fan으로 건류용 공기를 공급하여 건류가스화 반응을 진행시킨다. 건류가스의 연소 화염이 불안정하고 검은 연기가 발생되기 시작하면 건류가스화 반응이 거의 종료되는 단계이므로 1차 공기 밸브를 최대한 열어서 반응기 내의 잔류물을 연소(종말 처리)시키고 반응기 내부에서 불꽃이 완전히 소멸된 후 배출구를 열어서 회재를 처리하였다.

실험은 폐기물 종류에 따른 건류가스화 특성을 살펴보고 이를 건류가스화 설비의 설계에 필요한 기초자료로 활용할 목적으로 진행되었고, 주로 건류반응기 내부의 온도 변화, 1차 및 2차 공기의 공급량, 건류가스의 발생 시간, 생성량 및 성분 등의 항목들이 측정되었다.

건류가스의 온도는 가스 배출구에 설치된 열전대(①)로 측정하였고, 건류반응기 하단으로부터 30 cm의 높이 간격으로 6개의 열전대(120 cm : ② & ③, 90 cm : ④, 60 cm . ⑤ & ⑥, 30 cm : ⑦)를 부착하여 반응기 내부의 온도변화를 관찰하였다.

건류반응기에서 생성되는 건류가스는 가스 연소용 버너에 연결된 배출관에서 일부가 채취되어 성분과 조성비율이 측정되었다. 가스 채취는 진공 펌프를 이용하여 가스 중의 일부를 흡입한 후 콘덴서에서 1차적으로 응축오일을 제거시키고 다시 필터를 이용하여 액체성분을 걸러내어 포집병으로 포집하였다. 가스 채취는 이 방법 이외에도 50 ml 용량의 주사기를 이용하여 배출관에서 직접 건류가스를 흡입하는 방법도 병행하여 사용했다. 포집된 가스는 GC(모델명 : HP-5890)를 이용하여 O_2, N_2, CO_2, CO, H_2, CH_4, C_2H_4, C_2H_6, C_3H_6, C_3H_8의 10개 항목을 측정하였다. Detector로는 TCD를 채택했고, Molecular Sieve 13X, Carbosieve S-II, Porapak Q의 3가지 Column이 성분 측정에 사용되었다.[2,5]

2.4. 실험조건

Table 2 는 폐기물 종류별로 실험조건들을 요약한 것으로서 폐기물의 종류별 특성을 잘 잘 나타내고 있다. 장입량이 10~120 kg 범위로 크게 차이를 보이는 것은 겉보기 밀도(apparent density)의 차이에 따른 것이며, 장입량에 비례하여 건류시간도 50~400 분으로 차이를 보이고 있다. 종말처리 시간은 폐타이어의 경우를 제외하고는 대부분이 비슷함을 알 수 있다.

Table 2. Summary of experimental conditions

		Feeding Weight (kg)	1st Fan Air (Nm^3/min)	Gas Production Time (min)	Final Treatment Time (min)
Waste Tire		40~120	0.2~0.6	300~400	30~40
WSR	A	7~10	0.2~0.4	60~70	15~25
	B	7~9	0.4~0.5	50~60	10~15
	C	20~30	0.3~0.5	150~200	15~20
	D	10~12	0.3~0.5	60~70	10~15
	E	30~60	0.4~0.6	200~350	15~20
	F	40~50	0.4~0.5	200~300	15~20
	G	30~50	0.4~0.6	200~300	10~20

3. 결과 및 고찰

3.1. 반응온도 및 건류가스화 특성

3.1.1. 폐타이어

Fig. 2 는 폐타이어를 건류가스화할 때 각 반응기의 부위별 온도분포를 건류시간에 따라 나타낸 대표적인 그림이다. 150~300°C 범위인 건류가스의 온도는 건류반응기 상부(②, ③, ④번 위치)의 온도와 거의 비슷한 온도변화를 보여주고 있고, 종말처리 단계에서 온도가 다소 상승하다가 종말처리가 종료됨에 따라 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 온도분포를 보면 경과시간에 따라서 차이가 있지만 상부(②, ③, ④번 위치)에서는 600~1.000°C, 하부 (⑤, ⑥, ⑦번 위치)에서는 150~300°C 범위의 온도를 나타내고 있다. 이는 반응기의 하부로부터 건류용 공기가 공급되기 때문에 하부에서는 주로 건류가스화 반응에 필요한 열을 공급하는 연소반응이 진행되고 상부에서는 연소열에 의해서 열분해 및 가스화 영역이 존재한다는 것을 확인시켜주는 결과이다.

경우에 따라서는 반응기의 하단(⑦번 위치)보다 그 윗부분(⑤, ⑥번 위치)의 온도가 더 높게 나타나는데 이는 연소반응이 건류반응기의 하단에서부터 정상적으로 개시되지 않고 중간부위에서도 진행됨을 보이는 것으로서 종말처리 후의 잔류물 발생량도 상대적으로 증가하였다. 따라서 본 실험장치에서와 같이 반응기 내부 각 부위의 온도를 연속적으로 측정해 보는 것이 건류가스화 반응의 진행 상태를 확인할 수 있는 하나의 방법이 될 수

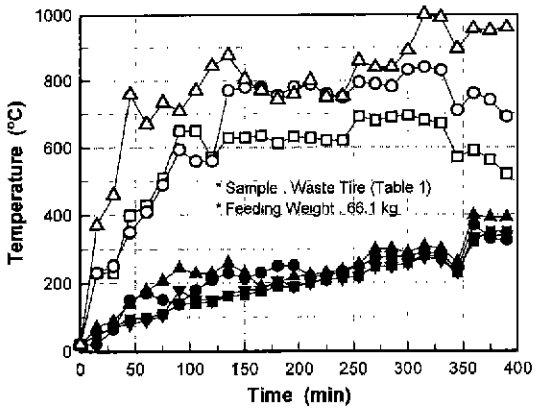

Fig. 2. Reactor temperature distribution for waste tire. (TC No. : ●, ①; ▼, ②; ■, ③; ▲, ④; □, ⑤; ○, ⑥; △, ⑦)

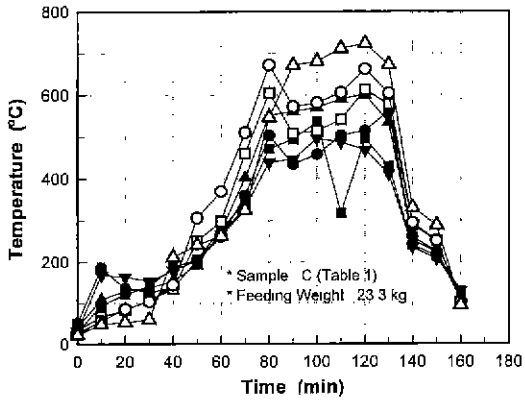

Fig. 3. Reactor temperature distribution for WSR C. (TC No. . ●, ①; ▼, ②; ■, ③; ▲, ④; □, ⑤; ○, ⑥; △, ⑦)

있을 것으로 판단된다.

3.1.2. 폐합성수지

Fig. 3 은 폐합성수지 C를 건류가스화할 때의 온도분포를 나타낸 것이다. 폐타이어의 경우와는 달리 반응기 내부의 온도가 부위별로 차이가 없이 비슷한 변화 경향을 보이고, 반응기 내부와 비슷한 분포를 보이는 생성가스의 온도는 합성수지 종류에 따라 많은 차이를 나타내어 낮은 것은 100~150°C, 높은 경우에는 최고 500°C 정도이다. 이는 연소반응과 열분해 및 가스화 반응이 단계별로 나누어 진행되지 못하고 반응기 내부의 각 부위에서 3 가지 반응이 동시에 진행되는 것을 보이는 현상으로 해석된다. 또한 폐합성수지 B와 C의 경우는 건류반응이 진행되면서 시료가 반응기 밑바닥에 용융되어 쌓이는 특이한 현상이 관찰되었다.

한편 폐합성수지 A, B, D의 경우는 Fig. 3 에 나타난 것과 비슷한 온도분포를 보였으나 폐합성수지 E와 G의 경우는 다른 폐합성수지에 비해 반응기 내부의 온도분포가 비교적 균일하게 유지되고, 연소 부위와 가스화 부위의 구별도 어느 정도 가능하였다. 또한 합성장판 계통인 폐합성수지 E, F, G의 경우는 시료의 크기와 장입 상태에 따라서 건류가스의 생성량, 반응 온도, 잔류물 배출량 등의 전반적인 운전 상태가 심한 차이를 나타냈다.

3.2. 건류가스 발생량

Flg. 4 는 폐타이어를 건류가스화할 때 건류용 1차 공기량에 따른 건류가스의 생성량의 변화를 건류시간에 따라 표시한 것이다.

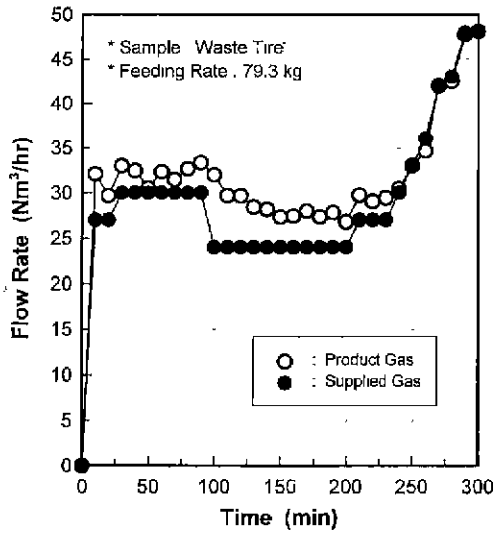

Fig. 4. Flow rate of product gas with 1st fan air amount.

점화 후 약 10분 이내에 정상적으로 건류가스가 발생되기 시작하며, 경과시간에 따라서 1차 공기 공급량에 대한 건류가스의 발생비율이 차이를 보였으나 발생속도는 1차 공기량에 의해 지배됨을 알 수 있다. 건류가스는 1차 공기량의 1.10~1.20 배가 발생되며, 건류가스화 반응의 진행이 거의 완료되고 종말처리를 위하여 1차 공기량을 증가시키기 시작하면 건류가스의 발생량과 1차 공기량이 거의 비슷해짐을 그림에서 볼 수 있다. 또한 폐타이어의 경우 건류가스의 총 발생량은 1차 공기량의 약 1.10배 정도로 측정되었다.

폐합성수지의 경우에도 폐타이어와 마찬가지로 모두 점화 후 10 분이 경과한 후부터는 1차공기량의 변화에 따라 1.05~1.35배의 비율로 건류가스가 생성되었다. 폐합성수지 중에서는 F의 경우가 건류가스의 총 발생비율이 1차 공기량의 1.11배 정도로 가장 높게 나타났고, C의 경우가 1.03배로 가장 낮은 수치를 보였다.

Fig. 5 는 폐합성수지 F에 대하여 1차 공기와 건류가스의 누적 발생량을 건류시간에 따라 표시한 것으로서 폐타이어와 본 실험에 사용된 폐합성수지는 모두 이 그림과 거의 유사한 경향을 나타내고 있다.

3.3. 건류가스의 성분 및 조성

건류가스화 반응에 의해 생성된 가스는 대부분이 CO, H_2, 탄화수소 등의 가연성 성분과 N_2, CO_2, O_2 등의 불연성 성분으로 구성되어 있다. 그러나 탄화수소 중에서 탄소수가 큰 성분들은 상온에서 응축되기 때문에 본 실험에서는 앞에서 언급한 바와 같이 상온에서 포집된 건류가스 중에서 C_1~C_3 범위에 포함된 5개의 탄화수소의 성분비율을 측정하였다.

3.3.1. 폐타이어

Fig. 6 과 Fig. 7 은 승용차용 폐타이어를 건류가스화

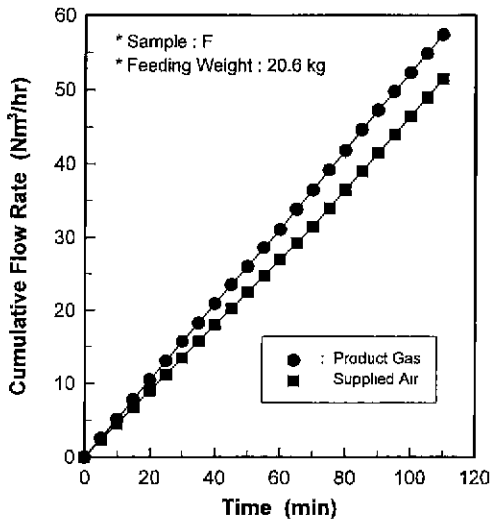

Fig. 5. Cumulative flow rate of product gas with 1st fan air amount.

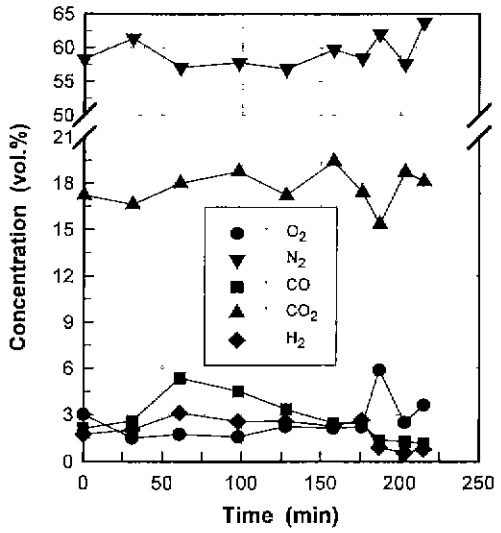

Fig. 6. Variation of gas composition with time for waste tire(1). (feeding weight : 56.4 kg, 1st air flow rate : 0.3 Nm^3/min)

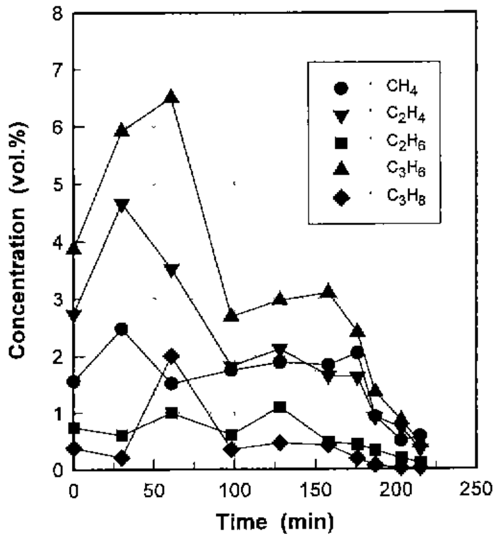

Fig. 7. Variation of gas composition with time for waste tire(2). (feeding weight : 56.4 kg, 1st air flow rate : 0.3 Nm^3/min)

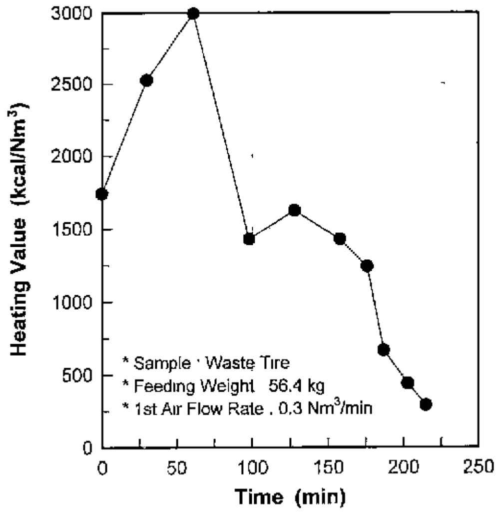

Fig. 8. Heating value of product gas with time.

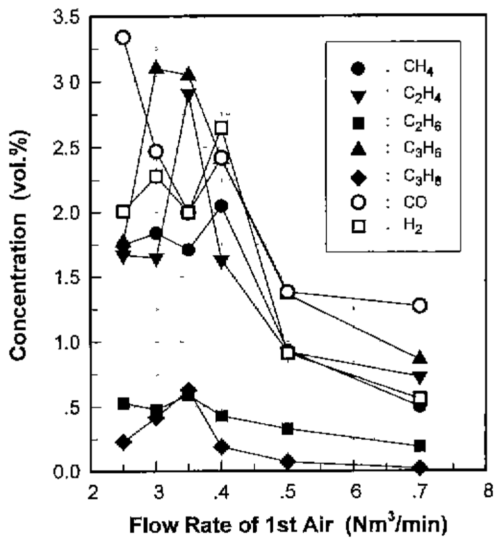

Fig. 9. Variation of gas composition with the 1st air flow rate for waste tire. (feeding weight : 56.4 kg)

시킬 때 반응 시간에 따른 건류가스의 대표적인 조성 변화를 나타낸 것이다. 폐타이어의 장입량은 56.4 kg이고 건류용 1차 공기의 공급량은 0.3 Nm^3/min로 유지시켰다.

그림을 살펴보면 비가연성 성분인 N_2, CO_2, O_2의 비율이 전체의 80~90% 범위로 대부분을 차지하고 있으며, 반응 시간에 따른 조성 비율의 변화폭이 가연성 가스에 비하여 상대적으로 작음을 알 수 있다. N2는 55~65%, CO_2는 15~20%, O_2는 2~4% 범위의 농도를 보이고, CO와 H_2 성분은 반응 초기에 농도가 증가하여 일정한 수치를 유지하다가 반응이 종료됨에 따라 다시 감소하는 경향을 나타내고 있다.

탄화수소 성분 중에서는 C_3H_6의 비율이 최대 6.5% 정도로 가장 높았으며, C_2H_4가 0.5~4.5%, CH_4가 0.5~2.5%, C_2H_6가 0.2~1.1%, C_3H_8가 0.1~0.5% 범위의 조성비율을 보이고 있다. 또한 탄화수소 성분들의 비율은 Fig. 6 에 표시된 CO와 H_2의 경우처럼 반응 초기부터 증가하기 시작하여 40~60분 범위에서 최대치를 나타내고 이후부터는 계속 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 6 과 Fig. 7 에서 가연성 성분인 CO와 H_2 및 탄화수소의 발생비율이 초기에 증가하다가 최대치를 나타낸 후에 다시 감소하는 경향을 보이는 것은 초기의 가열 및 건조과정, 생성가스의 발생이 진행되는 건류가스화과정, 종말처리과정의 3가지 단계로 구분될 수 있는 건류가스화 반응의 진행과정에 기인한 것으로 판단된다.[1,3,7]

Fig. 8 은 Fig 6 과 Fig. 7 에 나타난 성분들의 조성비율을 기준으로 하여 계산된 건류가스의 고발열량(high heating value)을 반응시간에 따라 표시한 것이다.

건류가스의 발열량은 250~3,000 kcal/Nm^3 범위로서 건류반응 시간에 따른 변화폭이 상당히 크게 나타났다. 또한 각 성분들의 조성비율과 발열량은 차이가 있으나 각 성분의 조성비율로부터 계산된 건류가스의 발열량은 Fig. 7 에 나타난 탄화수소 성분들의 변화 경향과 마찬

가지로 60분 근처에서 최대값을 보이다가 계속 감소하여 반응 말기에는 최대치의 1/10 이하인 250 kcal/Nm^3 정도로 측정되었다.

Fig. 9 는 건류가스 중의 가연성 성분에 대한 조성 변화를 건류용 1차 공기의 공급량에 따라 나타낸 것이다. 폐타이어 공급량은 Fig. 6 및 Fig. 7 과 마찬가지로 56.4 kg이고, 각 성분의 비율은 건류가스화 반응이 시작된 후 100 분이 경과한 시점에서 측정한 결과이다.

CO를 제외한 모든 성분들의 구성 비율은 건류공기량이 0.3~0.4 Nm^3/min인 범위에서 최대값을 나타내고 이후부터는 건류공기량이 증가함에 따라 조성 비율이 감소한다. CO의 경우는 1차 공기량이 증가함에 따라 농도가 지속적으로 감소하는 경향을 보이는데 이는 건류용 1차 공기량이 증가할수록 공기와 폐타이어의 접촉면적이 증가하여 미연탄소(unburned carbon)의 발생이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig 10 은 건류가스를 구성하는 각 성분들간에 상호작용(dependency)이 없다는 가정하에 Fig. 9 에 표시된 가연성 성분의 비율과 물질별 발열량을 곱하여 계산된 건류가스의 고발열량을 건류용 1차 공기량을 독립변수로 하여 정리한 것이다.

발열량은 건류공기량에 거의 직선적으로 비례하여 증가하다가 최고치를 보인 이후에는 건류공기량에 반비례하여 감소하는 경향을 보인다. Fig. 10 에 표시된 발열량의 최대치(1차 공기량 : 0.35 Nm^3/min)와 최소치(1차 공기량 : 0.70 Nm^3/min)의 비율은 4 : 1 정도로서 건류시간에 따른 발열량의 최대 변화폭인 10 : 1 보다(Fig 8. 참조) 훨씬 낮았다.

앞 부분에서 언급한 바와 같이 건류반응의 초기와 종료 시점을 제외하면 1차 공기량에 대한 건류가스의 생성 비율은 거의 일정하게 유지되므로 1차 공기량이 0.35 Nm^3/min 이하인 조건에서 Fig. 10 과 같이 1차 공기의 공급량이 커짐에 따라 발열량이 증가하는 것은 가연성 가스의 발생 증가율이 건류가스의 생성 증가율보다 크다는 것을 의미하는 것이다.

그러나 1차 공기량이 0.35 Nm^3/min 보다 많을 경우에는 이와는 반대로 가연성 가스의 발생 증가율이 건류가스의 생성 증가율보다 낮아지게 되어 1차 공기량이 증가함에 따라 발열량이 감소한다. 이러한 현상은 반응기 하부의 연소 영역과 상부의 열분해 및 가스화 영역으로 구분되어 진행되는 건류반응 특성이 1차 공기량이 많아짐에 따라 건류가스가 생성되는 열분해 및 가스화 영역이 줄어들고 연소 영역이 반응기의 중·상부까지 확대됨에 따라 가연성 가스의 발생율이 감소하고 연소가스의 배출량이 많아지기 때문인 것으로 생각된다.

3.3.2. 폐합성수지

Fig. 11 과 Fig. 12 는 폐합성수지류에 대한 대표적인 실험결과로서 A와 D를 건류가스화할 때 발생된 가스의 성분별 농도를 1차 공기량에 따라 나타낸 것이다.

Table 1 에 표기된 폐합성수지류에서 발생된 건류가스의 성분을 살펴보면 N_2가 65~70%, CO_2가 10~17%, O_2가 3~10% 범위로서 폐타이어의 경우와 마찬가지로 비가연성 성분의 비중이 대부분을 차지하고 있고, 반응시간이나 1차 공기량에 따른 조성의 변화율이 가연성

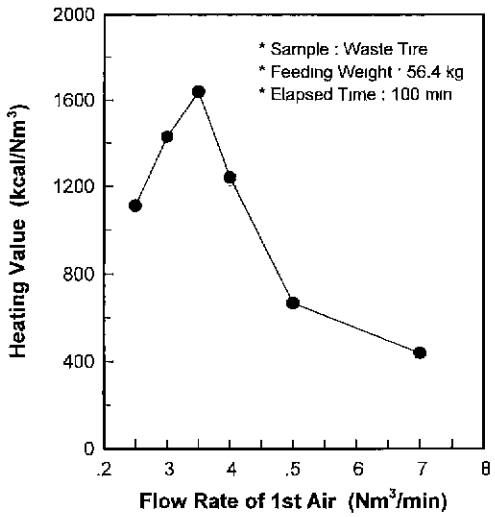

Fig. 10. Heating value of product gas with the 1st air flow rate.

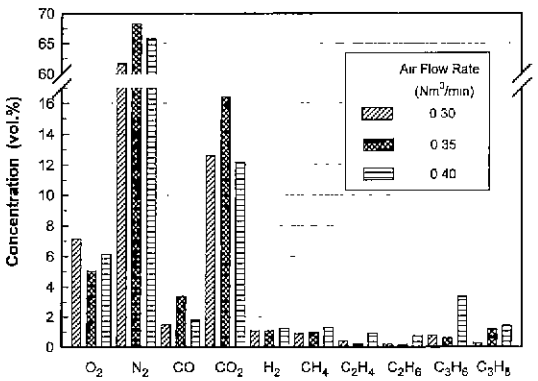

Fig. 11. Composition of product gas for WSR A. (feeding weight : 9.5 kg)

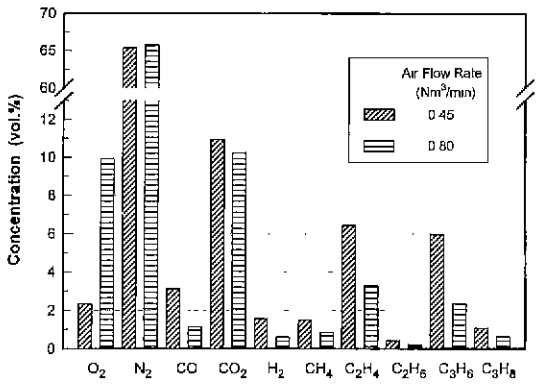

Fig. 12. Composition of product gas for WSR D. (feeding weight : 11.7 kg)

성분에 비하여 상대적으로 작았다. CO와 H_2는 0.5~3.0% 범위의 농도를 보이며, 탄화수소가스의 농도는 Table 1 의 원소분석치에 나타난 탄소 및 수소 성분비율의 차이에 의해서 폐합성수지의 종류에 따라 각 성분별로 최대 5 배 이상의 차이를 보였다.

건류용 1차 공기량이 0.3~0.4 Nm^3/min인 조건에서 폐합성수지류에 대한 건류가스의 발열량을 계산해 보면 D의 경우가 2,500~2,900 kcal/Nm^3로서 가장 높았고, A가 1,300~1,800 kcal/Nm^3, B가 2,000~2,400 kcal/Nm^3, C가 1,500~1,700 kcal/Nm^3인데 이는 원료 폐기물이 보유한 발열량의 20~35%에 해당하는 것이다. 그러나 E, F, G의 경우는 대개 300~400 kcal/Nm^3 범위로서 건류가스의 발열량이 원료 폐기물이 가지고 있는 발열량의 10% 이하인 것으로 확인되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 내용적이 1.4 m^3인 회분식 건류반응기에서 폐타이어와 7 종류의 폐합성수지에 대한 건류가스화 실험을 실시하여 폐기물 종류별 건류가스화 특성을 파악하고, 건류시간 및 1차 공기량에 따른 건류가스의 발생량과 성분 조성 등의 변화 경향을 측정하였다. 주요한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 폐타이어의 경우는 생성가스 및 반응기 하부의 온도가 150~300°C 범위이고, 반응기 상부는 600~1,000°C로서 연소 영역과 가스화 영역의 뚜렷한 구분이 존재하였으나 폐합성수지류는 생성가스의 온도가 100~500°C로서 변화폭이 크고, 반응기 부위별로 차이가 없이 비슷한 온도분포를 나타냈다.
2. 반응기에 공급되는 건류용 1차 공기량에 의해 결정되는 건류가스의 발생량 비율은 정상상태에서 폐타이어가 1.10~1.20배, 폐합성수지가 1.05~1.35 배이며, 1차 공기 총공급량에 대한 건류가스의 총 발생량 비율은 폐타이어가 1.10배, 폐합성수지는 1.03~1.11 배인 것으로 측정되었다.
3. 상온에서 포집된 폐타이어 건류가스는 80~90 vol.%의 비가연성 성분(N_2, CO_2, O_2)과 CO, H_2 및 C1~C_3 범위의 탄화수소가 대부분인 가연성 성분으로 구성되었다. 가연성 성분의 조성비로부터 계산된 건류가스의 고발열량은 반응 초기에 증가하다가 최대치를 나타낸 후에 다시 감소하는 경향을 보이며, 건류가스화 과정에서는 1,500~3,000 kcal/Nm^3, 종말처리 단계에서는 250~500 kcal/Nm^3이다.
4. 1차 공기량이 0.35 Nm^3/min 이하인 조건에서는 가연성가스의 발생 증가율이 건류가스의 생성 증가율보다 크기 때문에 폐타이어 건류가스의 발열량과 가연성 성분의 비율은 1차 공기량에 거의 직선적으로 비례하여 증가하고 0.35 Nm^3/min 이상에서는 1차 공기량에 반비례하여 감소한다.
5. 폐합성수지의 건류생성가스도 비가연성 성분인 N_2, CO_2, O_2의 구성비율이 85 vol.% 이상이며, 1차 공기량이 0.3~0.4 Nm^3/min인 조건에서의 건류가스 고발열량은 원소분석치 중의 탄소 및 수소성분 비율의 차이에 의해서 원료폐기물이 가지고 있는 열량의 10~35%에 해당하는 300~2,900 kcal/Nm^3인 것으로 나타났다.

참고문헌

1 노남선, 김광호, 김동찬 : "폐기물의 건류가스화 기술", 특정폐기물의 에너지화 기술 연구, 과학기술처 연구보고서 (KE-93012B), 149-160, 한국에너지기술연구소 (1993).
2. 김동찬 외 : "활성탄소 제조공정에서의 건류소각장치에 의한 폐기물 열회수 시범적용 사업", 통상산업부 연구보고서(94-P-90-6), 6-34, 한국에너지기술연구소 (1995).
3. 신대현 외 : "건류소각에 의한 폐합성수지류의 처리 및 열회수", 제10회 에너지절약기술워크샵 논문집, 291-304, 한국에너지기술연구소, 대전, 1995년 11월 2일, 신광사 (1995).
4. 김동찬 외 . "폐타이어로부터 오일회수를 위한 기본연구", 벽산개발주식회사 연구보고서, 21-25,한국동력자원연구소 (1991).
5. 김동찬 외 : "폐기물의 열분해에 의한 생성가스 및 타르의

연소기술 개발(III)". 과학기술처 연구보고서(KE-92008S), 71-124. 한국에너지기술연구소 (1993).
6. 이덕수 외 . "폐타이어의 연료 이용화에 관한 연구", 공해대책, 11 월호, 69-75 (1988).
7. 김희강 외 "폐기물의 건류가스 연료화 기술 개발", 에너지관리공단 연구보고서(88연-2), 57-94,건국대학교 산업기술연구소 (1989).
8. 구자공 외 . "건류가스 시스템을 이용한 폐타이어의 에너지화 기술개발(II)", 동력자원부 연구보고서, 47-74, 한국과학기술원 (1992).
9. 신대현 외 : "활성탄 재생로 가열용 폐타이어 건류시스템 개발" 연구보고서(KIER-965330), 한국에너지기술연구소, 45-65 (1997).
10 김석준 외 : "고분자 폐기물 연속 건류소각과 폐열회수 및 건식가스 처리기술 개발(II)", 동력자원부 연구보고서, 1-30, 한국기계연구소 (1992).
11. 김향원 외 : "폐합성고분자폐기물의 소각폐열회수를 위한 하향식 건류소각기술 실용화 개발(II)", 통상산업부 연구보고서(941D103-879DP 1), 136-144, 한국기계연구원 (1995).
12. 환경부 : "전국 폐기물 발생 및 처리현황+('96)", 1-50 (1997)
13. 김동찬 외 "폐타이어의 오일화 공정 및 플랜트화 기술 개발에 관한 최종보고서", 통상산업부 연구보고서(KIER-974411), 6-11. 한국에너지기술연구소 (1997).

盧 南 善

• 1995년 KAIST 화학공학 박사
• 현재 한국에너지기술연구소 에너지환경연구부 폐기물연구팀 선임연구원

金 廣 鎬

• 1995년 대전산업대 기계공학 석사
• 현재 한국에너지기술연구소 에너지 환경연구부 폐기물연구팀 기술원

申 大 鉉

• 1986년 충남대 화학공학 박사
• 현재 한국에너지기술연구소 에너지환경연구부 폐기물연구팀 책임연구원(팀장)

金 東 燦

• 1985년 충남대 화학공학 박사
• 현재 한국에너지기술연구소 에너지 환경연구부 폐기물연구팀 책임연구원