

플라스틱의 高爐 吹入時 熱分解特性 및 燃燒舉動

*許南煥 · 白贊英 · 任昌熙

浦項製鐵 技術研究所

Thermal Decomposition and Combustion Behavior of Plastics into Blast Furnace

Nam-Hwan Heo, Chan-Yeong Baek and Chang-Hee Yim

Technical Research Labs., POSCO

요 약

자원을 절약하고 환경을 보호하기 위해 철강업체에서는 폐플라스틱을 재활용하기 위한 기술개발에 힘쓰고 있다. 본 연구에서는 플라스틱의 고로 취입시 연소대내 거동을 이해하기 위해, 열분해 실험과 연소실험을 실시하였으며 플라스틱 취입시 연소온도에 대해 이론적으로 검토하였다. 대기조건에서 열중량분석장치를 이용하여 3종류의 플라스틱을 대상으로한 열분해 실험을 통해서, 열분해 개시온도와 최대 열분해 온도는 승온속도가 증가함에 따라 지수적으로 증가하는 것으로 나타났다. 코크스 충전층 연소장치를 이용하여 플라스틱 취입에 따른 연소거동을 모사하였다. 플라스틱의 연소효율은 미분탄에 비하여 낮았으며, 산소부화는 플라스틱의 연소효율을 효과적으로 증대시킬 수 있는 방법으로 밝혀졌다. 또한 플라스틱 취입시 연소온도를 계산하였으며, 이를 기준으로 고로에 최대 취입가능한 플라스틱의 량을 예측하였다.

주제어: 플라스틱, 열분해, 연소, 연소온도, 고로

ABSTRACT

There are many intensive efforts to develop the recycling technologies of waste plastics in steel works to tackle the saving of resources and the protection of the natural environment. In this study, the thermogravimetric analyses for three kinds of plastics, the combustion experiments and the theoretical approach for calculating the flame temperature in the blast furnace had been performed to understand the behavior of plastics in the raceway. The thermal decompositions of plastics were studied using thermogravimetric analyzer under the atmospheric condition. The starting temperature of thermal decomposition and the maximum weight loss point were increased in proportion to the logarithmic values of heating rate. The combustion characteristics of plastics were simulated in a coke-bed combustor. The combustion efficiency of plastics was lower than that of pulverized coal. The oxygen enrichment was found out to be one of the useful methods to increase the combustibility of plastics in raceway. The maximum injection rate of plastics was calculated based on the flame temperature.

Key words: Plastics, thermal decomposition, combustion, flame temperature, blast furnace

1. 서 론

에너지 사용비중이 큰 철강제조공정에서는 에너지의 효율적인 사용과 함께 CO₂ 배출에 대한 환경적 책임이 점차 강조되고 있는 실정이다. 그러나 기존 화석연료를

사용한 제조공정에서 CO₂ 발생량을 줄이기 위해서는 현실적으로 탄소량이 적은 에너지에 대한 선택의 여지가 거의 없는 만큼 기존 공정의 효율을 개선하고 나아가 획기적인 새로운 공정개발이 또한 요구되고 있다.

이러한 배경에서 독일과 일본의 몇몇 고로사에서는 폐플라스틱을 고로의 환원제로 사용하여 코크스 사용량을 절감하며, 이를 통해 석탄자원을 절약하고 궁극적으

* 2000년 2월 21일 접수, 2000년 10월 30일 수리

* E-mail: naman@posco.co.kr

로는 CO₂의 발생량을 줄이려는 기술개발활동을 계속하고 있다. 포항제철에서는 1996년 11월 주물선고로 풍구 1본을 대상으로 플라스틱을 취입할 수 있는 기술개발을 완료한 바 있다.¹⁾

본 연구에서는 3종류의 플라스틱을 대상으로 승온속도 변화에 대한 열분해 거동을 측정하였다. 충전층형 연소실험장치를 이용하여 플라스틱 취입량의 변화와 산소부화에 따른 연소특성을 조사하였으며, 미분탄 취입 조건과도 비교하였다. 또한 플라스틱의 고로 취입시 연소대 온도변화에 대해 이론적으로 검토하였으며, 이론연소온도를 기준으로 최대 취입가능한 플라스틱의 량을 계산하였다.

2. 플라스틱의 열분해 및 연소특성

열중량 분석기(TGA, Thermogravimetric Analyzer)를 이용하여 3종의 플라스틱에 대한 열분해 거동을 조사하였다. 아울러 코크스 충전층 연소실험로를 이용하여 플라스틱의 취입량과 산소부화량의 변화에 따른 모사실험을 실시하였다.

2.1. 실험장치 및 방법

2.1.1. 플라스틱 열분해 실험

열분해실험을 위해 사용된 측정장치는 TGA(일본 Sinku-Riko社, TGD-9600 모델) 이었다. 40 mg의 플라스틱 시료를 이용하여 대기분위기에서 시간에 따른 시료 무게의 변화를 기준으로 열분해 거동을 측정하였다. 승온속도는 5, 50 및 100°C/min 이었으며, 시료는 PE, PP 및 PBT 등 모두 3종류였다. 이중 PE, PP는 純品이었으며, PBT는 사용후 폐기된 스크랩을 시료로 사용하였다. 열분해 실험에 사용된 3종류의 플라스틱에 대한 주요한 물성을 Table 1 에 정리하였다.

2.1.2. 플라스틱 연소실험

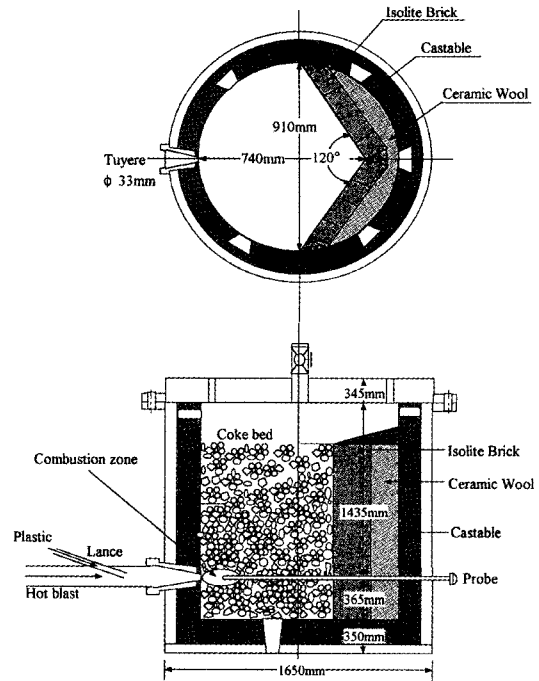


Fig.1. Schematic diagram of coke-bed combustion simulator.

Fig. 1 은 플라스틱 취입시 연소특성 모사실험을 위한 코크스 충전층 연소실험로의 개요도로, 풍구 반경방향의 가스조성과 온도를 측정할 수 있는 장치가 삽입되어 있다. 입도 -15 mm인 코크스를 충전층로에 장입하고, 공기 예열장치를 이용하여 승온시킨 송풍온도가 700°C에 도달하면 실험을 시작하였다. 플라스틱의 취입중 용착을 방지하기 위해 2중관 형태의 렌스를 사용하여 외관에는 공기로 냉각시켰으며, 렌스의 내경은 14 mm였다. 또한 실험에 사용된 플라스틱 시료는 순품 PP(한화종합화학 제품)로 평균입도는 4 mm 였으며, 미분탄 취입효과와 비교하기 위해 현재 포항제철 고로에 취입중

Table 1. Properties of sample plastics

Name (abbreviation)	Polyethylene (PE)	Polypropylene (PP)	Polybutylene Terephthalate (PBT)
Molecular Formula	[H ₂ C=CH ₂] _n	[H ₂ C=CH-CH ₃] _n	[COO-C ₆ H ₄ -COO-C ₄ H ₈ -O] _n
Molecular wt. of Monomer(n)	28 (4300~12000)	42 (2000~3500)	236
Specific Gravity	0.91~0.965	0.902~0.906	1.06~1.46
Calorific Value (kcal/kg)	11040	11040	5680
Usage	Food bag, Toy,Cases, . Wire cover	Film, Pipe, Rope,Cases	Parts of computer, electronics, car

Table 2. Proximate and ultimate analyses of sample coal

Proximate analysis (%)				Ultimate analysis (%)				
Inherent Moisture	Ash	Volatile matter	Fixed Carbon	C	H	N	O	S
1.78	10.18	25.84	62.20	85.45	5.30	1.76	10.07	0.43

Table 3. Experimental conditions for simulating the combustion characteristics

Injection rate of plastics			Oxygen enrichment (%)	Remarks
Experiment (EXP, g/min)	Based on one tuyere (TUY, kg/hr)	Converted injection rate (PCR, kg/thm)		
51	263	55	0, 2	
83	428	89	0, 2	Comparison to pulverized coal
96	495	103	0, 2	
113	582	121	0, 2	

$$*TUY = \frac{EXP}{1230} \cdot \frac{2115}{20} \cdot 60$$

$$PCR = \frac{TUY \cdot 20 \cdot 24}{2300}$$

인 석탄 1종에 대한 연소실험도 실시하였으며, 사용한 석탄의 공업분석과 원소분석 결과는 Table 2 에 나타냈다. 송풍량은 1.1 Nm³/min, 플라스틱 수송공기는 80 l/min, 렌스 냉각공기는 50 l/min 였으며, 산소부화 유량 32~38 l/min 였다. 또한 플라스틱의 취입량은 screw feeder의 회전수를 통해 변화시켰다. 다음의 Table 3 에는 충전층 연소실험장치를 이용한 실험조건을 정리하였다. 표에는 주물선고로 풍구 1분을 대상으로한 플라스틱 시험취입조업시¹⁾ 氣/固비를 기준으로하여 실험조건인 플라스틱 취입량, 주물선 고로 풍구 1분 및 20분 전체 취입을 가정하여 계산한 취입량과 취입비를 함께 나타냈다. 이때 주물선 고로 조업조건은 생산량 2300 thm/d, 송풍량과 수송공기량 등 공기유입량 2115 Nm³/min를 기준 조건으로 하였다.

2.2. 결과 및 고찰

2.2.1 플라스틱 열분해 특성

Fig. 2 에는 3가지 시료의 열분해 온도에 따른 시료무게의 변화를 승온속도 50°C/min를 대표적으로 나타냈다. 시료의 5% 중량이 감소하는 지점의 온도를 열분해 개시온도(Ts), 열분해 속도가 최대가 되는 지점의 온도를 최대 열분해온도(Tp) 그리고 중량감소

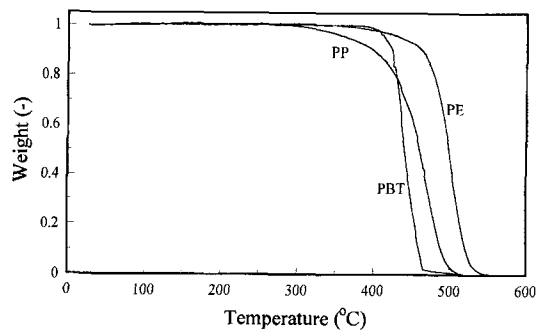


Fig. 2. Thermogravimetric analysis of plastics at heating rate of 50°C/min.

율이 0.1% 이하가 되기 시작하는 지점의 온도를 열분해 종료온도(Te)로 정의³⁾한 후, 3종류의 플라스틱 시료에 대해 승온속도에 따른 열분해 특성을 검토하였다.

Fig. 3 에는 3종류의 플라스틱의 열분해 개시온도를 승온속도 변화에 따라 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 모든 플라스틱은 승온속도가 對數적으로 증가함에 따라 열분해 개시온도는 선형적으로 증가함을 알 수 있으며, PE와 PP의 경우 절대값의 차이는 있지만 승온속도의 증가에 따른 열분해 개시온도의 상승경향은 유사하였다.

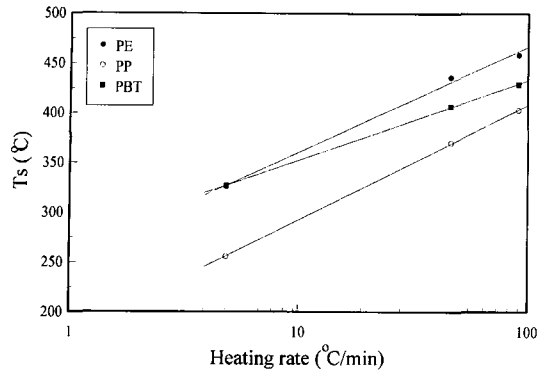


Fig. 3. Relation between the starting temperature of thermal decomposition and heating rate for several plastics.

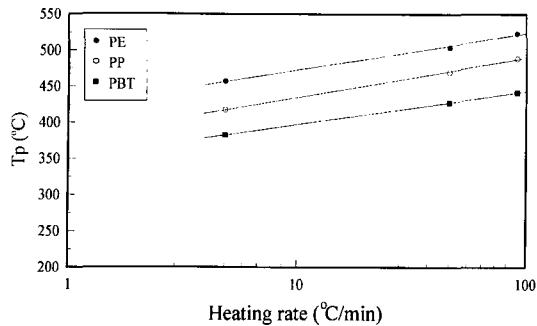


Fig. 4. Relation between the temperature of maximum weight loss and heating rate during thermal decomposition for plastics.

Table 4. Summary of Ts and Tp as a function of heating rate

	Ts = a ln H + b		Tp = a ln H + b	
	a	b	a	b
PE	45.24	254.28	21.66	421.87
PP	49.18	176.99	23.38	380.04
PBT	34.22	272.14	19.66	351.31

* a, b : regression constants, H : heating rate (°C/min)

그리고 이들에 비해 PBT의 경우 승온속도의 증가에 따른 열분해개시온도의 증가폭은 작아지는 것으로 나타났다.

Fig. 4 에는 승온속도의 변화에 따른 플라스틱 시료의 최대 열분해온도의 변화를 나타낸 것으로, 열분해 개시온도와 같이, 승온속도가 대수적으로 증가함에 따라 최대 열분해온도는 직선적으로 증가함을 알 수 있었다. Table 4 에는 승온속도에 따른 3종류의 플라스틱의 열분

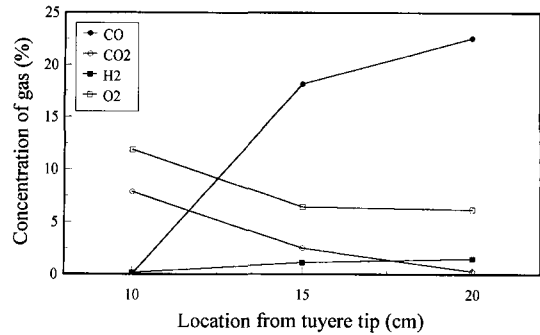


Fig. 5. Typical distributions of gas compositions in radial direction at tuyere level at injection rate of 55 kg/thm without oxygen enrichment.

해 개시온도와 최대 열분해온도의 상관식을 정리하였다. 열분해 개시온도와 최대 열분해온도의 결과와는 달리, 승온속도의 증가에 따라 열분해 종료온도는 일반적으로 증가하는 경향을 보였으나, 상관성은 뚜렷하지 않았다.

2.2.2 플라스틱 연소특성

플라스틱의 취입량 변화, 산소부화량 변화에 따라 풍구위치 반경방향의 가스조성 및 온도분포를 측정하여 플라스틱의 연소특성을 검토하였다.

Fig. 5 에는 풍구위치 반경방향의 가스조성을 측정 한 대표적인 결과를 나타낸 것으로 환산취입비 55 kg/thm 인 경우 산소부화를 하지 않았을 때의 모사실험결과이다. 즉 21%의 조성을 가지고 연소대내로 유입된 산소는 플라스틱 및 raceway 코크스와 연소반응을 하여 점차 그 농도가 감소하며, 이와는 반대로 연소반응에 의해 연소대 입구 부근에서 CO₂의 농도는 최고치를 나타내다가 차츰 CO가스로 전환되어 감소되는 경향을 나타내고 있다. 그리고 CO가스는 계속 증가하여 연소대를 나가게 되며, 플라스틱의 연소가 진행됨에 따라 H₂는 연소대 출구에 가까울 수록 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 가스조성의 형태는 미분탄 연소실험의 결과⁴⁻⁸⁾와도 일치하는 것이다.

Fig. 6 에는 산소부화를 하지 않을 경우 플라스틱 취입비에 따른 노내 온도분포를 측정한 결과로써, 플라스틱의 취입비가 증대될수록 연소대의 온도는 낮아지는 경향을 나타내고 있다. 특히 환산취입비가 100 kg/thm 이상인 조건에서는 그 변화폭이 큰 것으로 보아, 이를 기준으로 연소대내에서 플라스틱의 연소조건이 급격하게 나빠지는 것으로 추정할 수 있다. 환산취입비가 100 kg/thm 이상인 조건으로 실험할 경우, 연소대의 휘도가

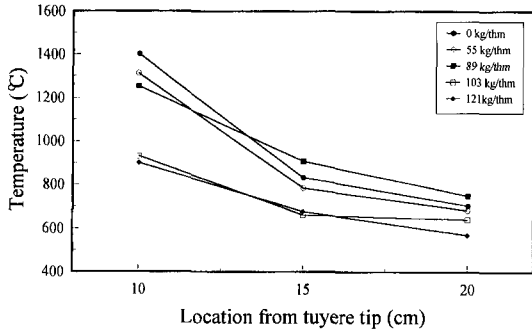


Fig. 6. Changes of temperatures with plastic injection rate at the oxygen enrichment of 0%.

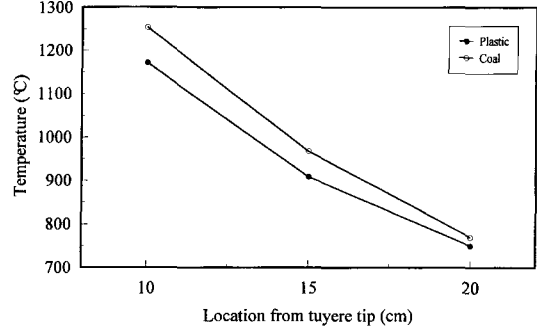


Fig. 8. Comparison of gas temperature distribution between with plastic and pulverized coal injections at injection rate of 89 kg/thm.

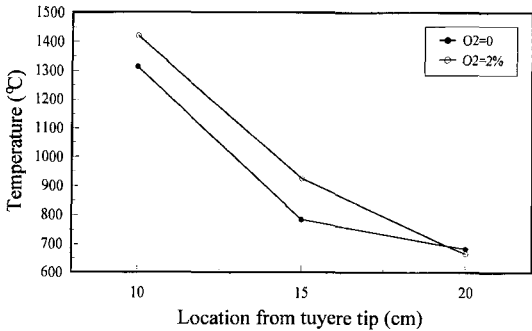


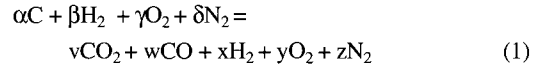
Fig. 7. Effect of oxygen enrichment on the gas temperatures at injection rate of 55 kg/thm.

급격하게 저하되는 등 연소성이 나빠지는 것을 육안 관찰을 통해서도 알 수 있었다.

Fig. 7 에서 보듯이 55 kg/thm 동일 취입비에 대해 산소부화를 할 경우, 연소대내 온도는 산소부화를 하지 않을 경우보다 상대적으로 높게 유지되고 있었다. 이를 통해, 미분탄 취입과 마찬가지로, 산소부화는 플라스틱의 연소성을 향상시키기 위한 중요한 조업인자가 될 것으로 판단할 수 있었다.

환산취입비가 89 kg/thm인 동일조건에서 플라스틱을 취입할 경우와 미분탄을 취입할 경우에 대한 연소 실험결과를 Fig. 8 에 나타냈다. 그림에서와 같이 미분탄 취입시 연소대내 가스온도는 플라스틱의 경우에 비하여 상대적으로 높은 것으로 측정되었으며, 이것은 플라스틱 시료가 미분탄 보다 약 100배정도 입도가 크며 이로 인해 연소반응속도가 늦어지기 때문으로 사료된다.

충전층 연소실험 장치의 연소대에서의 반응은 다음과 같이 설정할 수 있다.



여기서 코크스 충전층 연소실험장치로 공급되는 송풍량(Qa)과 플라스틱 또는 미분탄의 수송공기 유량(Qb), 렌스냉각 공기유량(Qc) 그리고 부화산소 유량(Qd)과 플라스틱 또는 미분탄의 취입속도를 Wp(kg/hr), 취입플라스틱중 탄소함량을 Cp (wt.%)라고 한다면, 불활성 기체인 N₂를 기준으로 반응전 플라스틱 또는 미분탄의 탄소량과 가스화된 탄소량의 비를 통해 연소효율을 산정할 수 있다. 석탄 등의 연소효율은 공로(空爐)를 이용한 연소 실험의 경우 가스조성의 변화나 배출되는 미연소 char의 회분분석을 통해 산정하는 것이 일반적이다. 그러나 본 실험과 같이 고로 연소대 상황을 모사할 수 있는 코크스가 충전된 연소실험장치에서는 이런 방법에 의한 절대적인 연소효율을 계산하기가 어렵다. 즉 취입되는 플라스틱이나 미분탄 외에도 탄소가 주성분인 코크스가 함께 존재하며 또한 미연소된 취입물질을 채취하기가 매우 어렵기 때문에, 유입되는 탄소량과 연소대내에서 가스화된 탄소량의 비를 기준으로 단순하게 상대적인 연소효율을 산정하고 이를 기준으로 각 실험조건에 대해 비교하였다. 이때 연소대내에 존재하는 코크스의 연소에 의한 가스화된 탄소량은 모든 실험조건에서 동일하다고 가정하였다.

유입되는 탄소량은 α/δ 이 되며, 연소대내에서 가스화된 탄소량은 CO₂와 CO의 합으로 표시되기 때문에 $(v+w)/z$ 이 된다. 그러므로 연소효율은 가스화된 탄소량/유입탄소량이 된다. 실험조건의 변수 및 측정 가스 조성을 이용하기 위해 간략화하면 연소효율은 다음과 같다.

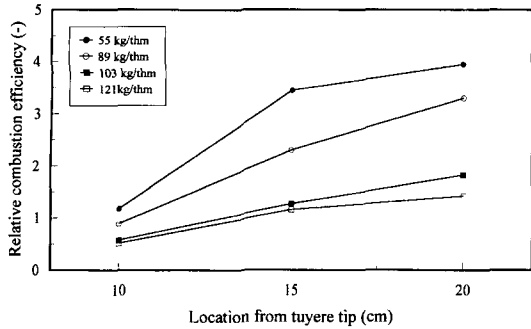


Fig. 9. Changes of the relative combustion efficiencies with plastic injection rate at oxygen enrichment ratio of 0 %.

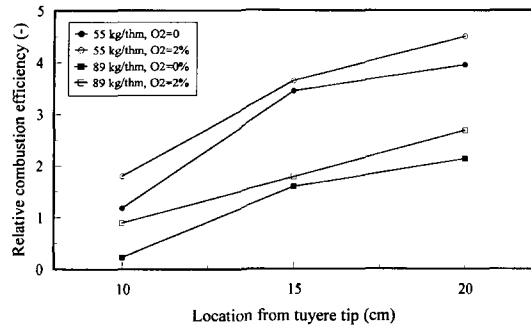


Fig. 10. Changes of the relative combustion efficiencies with oxygen enrichment.

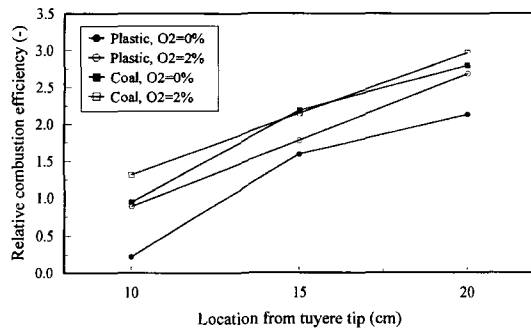


Fig. 11. Changes of the relative combustion efficiencies for plastic and pulverized coal injections at the injection rate of 89 kg/thm.

$$f = \frac{12N_{2,i}(Qa+Qb+Qc)(CO_{2,r}+CO_r)}{22.4N_{2,r}W_pC_p} \quad (2)$$

여기서 f 는 연소율(-), N_2 , CO_2 , CO 는 각각 가스조성(vol.%)을 나타내며, 첨자 i 는 연소대내로 유입되는 기체이며, r 은 연소대내 측정가스를 뜻한다.

Fig. 9~Fig. 11 에는 코크스 충전층 연소로 반경방향의 위치별로 식(2)에 의해 계산된 상대적인 연소율 변화를 나타냈다. Fig. 9 에서 보듯이 플라스틱의 취입비가 증가할 수록, 그리고 풍구선단에서 멀어질 수록 연소율은 상대적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 환산취입비가 103 kg/thm 이상인 경우 취입비의 변화에 따른 차이는 크지 않았다. Fig. 10 에는 환산취입비가 55 및 89 kg/thm인 경우 산소부화에 따른 연소효율의 증가현상을 보여주고 있으며, Fig. 11 에는 환산취입비가 103 kg/thm인 경우 플라스틱과 미분탄 취입을 비교하여 연소효율을 계산한 결과이다. 앞서 언급한 바와 같이, 동일 취입조건에서 미분탄의 경우가 플라스틱에 비하여 연소효율이 높은 것으로 나타났다.

3. 폐플라스틱 취입시 이론연소온도

이론연소온도는 고로 연소대의 특성을 나타내는 주요한 조업인자이다. 이 온도는 연소생성물이 주위로 열손실이 없이 모두 연소대를 승온시키는 데 사용되었을 때 연소대내부의 기체가 도달하는 이론적인 단열온도로 정의할 수 있다.⁹⁾

현재 고로조업자는 다음과 같은 선형관계식을 이용하여 미분탄 조업 등을 고려한 이론연소온도를 계산하고 있다.

$$T_f = 1559 + 0.839 T_B - 6.033 W_{H_2O} - 3.0 PCB + 4973 V_{O_2} \quad (3)$$

여기서 T_f 는 이론연소온도(°C), T_B 는 송풍온도(°C), W_{H_2O} 는 송풍중 조습량(kg/Nm³), V_{O_2} 는 송풍중 산소부화량(Nm³/Nm³-blast)이다. 그리고 PCB는 다음과 같이 정의되는 미분탄 취입과 관련된 항목이며, 식에서 PCR(Pulverized Coal Injection Rate, kg-coal/thm)은 단위 생산량당 취입되는 미분탄 량이다.

$$PCB = \frac{16666 PCR(g/hr)}{\text{송풍량}(Nm^3/min)} \quad (4)$$

위의 관계식은 이론적으로 도출된 결과를 이용하여 각 송풍조건에 대해 선형화한 것이며, 특히 미분탄중의 특성에 따라 이론연소온도를 보정할 수 없다는 큰 문제점을 가지고 있었다.¹⁰⁾ 본 연구에서는 연소대를 단열과 정으로 가정하여 다음과 같은 열 및 물질수지를 수립하였다.

$$\begin{aligned} & \text{Heat Output in Combustion Gases} & (5) \\ & = \text{Heat Input from Blast Sensible Heat} \\ & + \text{Heat Input from Combustion} \\ & + \text{Heat Input from Coke Combustion Sensible Heat} \end{aligned}$$

연소대내로 유입되는 반응물로는 O₂, N₂, H₂O, H₂(coal or plastic) 및 C(coke, coal or plastic)이며, 연소대로부터 유출되는 생성물로는 CO, H₂ 및 N₂라고 가정하였다. 또한 유입되는 코크스의 온도는 이론연소온도의 0.75의 값을 가진다고¹⁰⁾ 하였다. 이러한 가정으로 부터 반응물의 유입속도 및 온도 그리고 조성을 이용하여 열 및 물질수지를 통해 세워진 수치식으로 부터 이론연소온도를 구할 수 있다.

PE, PP, PBT 3종류의 플라스틱과 연소실험에 사용된 미분탄에 대해 여러 가지 송풍조건에 대해 취입비 별로 이론연소온도의 변화를 조사하였다. 플라스틱의 발열량은 석탄의 발열량을 추정하는 데 널리 사용되고 있는 아래의 Dulong 관계식¹¹⁾을 이용하여 계산하였다.

$$Q_1 = 80.8 X_C + 344.6 \left(X_H - \frac{X_O}{8} \right) + 22.5 X_S \quad (6)$$

여기서 Q₁은 발열량(kcal/kg) 이고 X는 하첨자 원소의 무게분율이다.

또한 플라스틱과 석탄의 분해열은 다음의 관계식으로 부터 계산하였다.¹²⁾

$$Q_1 = X_C H_{CO_2}^f / 1200 + X_H H_{H_2O}^f / 200 + H_W^f \quad (7)$$

여기서 H_W^f는 분해열(kcal/kg)이며, H^f는 생성열(298 K, kcal/kg)이다.

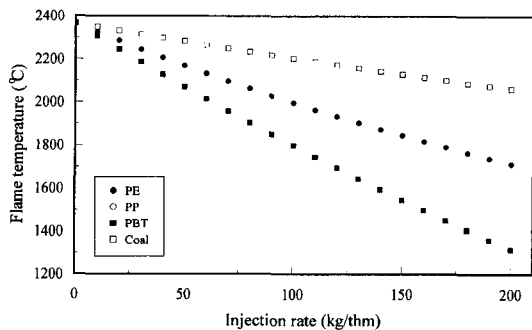


Fig. 12. Relation between the flame temperatures and injection rate for of various plastics and pulverized coal at the oxygen enrichment ratio of 3 %.

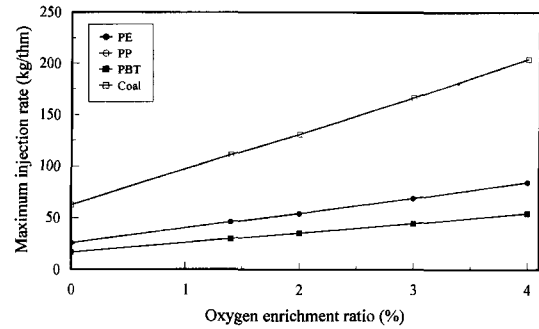


Fig. 13. Relationship between the oxygen enrichment ratio and the maximum injectable rate of plastics and pulverized coal at the moisture in blast of 42 g/Nm³.

Fig. 12 에는 포항제철 주물선고로 조업조건을 기준으로 산소부화율이 3%인 경우, 플라스틱 및 미분탄의 취입비 변화에 따른 이론연소온도의 변화를 조사한 결과이다. 플라스틱의 경우보다 미분탄의 경우 동일 취입비에 대해 높은 이론연소온도를 나타내고 있으며, 플라스틱 종류에 따라서는 PE = PP > PBT의 순서를 보이고 있다.

고로조업에서는 한계 이론연소온도를 관리하고 있으며, 그 기준온도를 2100°C라고 가정하여 플라스틱의 취입량 한계를 산정할 수 있다. Fig. 13 은 포항제철 주물선 고로를 대상으로 조습량이 42 g/Nm³일 때 산소부화율의 변화에 따른 연소온도를 고려한 최대 취입가능량을 조사한 결과를 보여주고 있다.

4. 결 론

3종류의 플라스틱에 대해 대기분위기에서의 열분해 속도 변화에 따른 열분해 실험과 코크스 충전층을 이용한 플라스틱과 미분탄의 연소실험, 그리고 플라스틱의 고로 취입시 연소온도에 대해 이론적인 검토를 통해 다음의 결론을 얻었다.

1. 열분해 개시온도 및 최대 열분해 온도는 승온속도의 對數값에 비례하여 증가하였다.
2. 플라스틱 취입비가 증가할수록 연소대내 연소성은 나빠졌으며, 특히 100 kg/thm 이상인 조건에서의 연소성은 급격하게 저하하는 것으로 조사되었다.
3. 동일 취입비의 경우 플라스틱은 미분탄에 비하여 연소성이 불량하였으며, 연소성을 개선시키는 방법으로 산소부화가 효과적이었다.

4. 페플라스틱 취입시 이론연소온도를 기준으로 취입 가능한 한계취입비를 산정한 결과, 미분탄 > PE=PP>PBT의 순서였다.

참고문헌

1. 許南煥, 任昌熙 : “플라스틱의 風口 1本 試驗吹入에 따른 高爐操業影響”, 資源리사이클링학회지, 7(2), 16-22 (1998).
2. 三方 信行, 橋本 茂, 武內 隆春, 西山 秀雄 : “廢プラスチック 熱分解特性の研究”, 新日鐵技報, 360, 38-45 (1996).
3. 김영성, 조성호, 손재익 : “플라스틱 열분해의 생성물 회수 특성-PVC의 열분해”, 화학공학, 30(4), 393-396 (1992).
4. 成田 貴一, 前川 昌大, 金山 宏志, 關 義和, 齊藤 武文 : “燃燒試驗爐における微粉炭燃燒實驗”, 鐵と鋼, 68(15), 2385-2392 (1982).
5. 大野陽太郎, 古川 武, 松浦 正博 : “レ-スウェイでの微粉炭の燃燒舉動と多量吹き込み技術”, CAMP-ISIJ, 4, 80-83 (1991).
6. 山縣 千里, 須山 眞一, 堀板 修, 梶原 義雅, 小松 周作, 紫富 田浩, 網永 洋一 : “高爐微粉炭多量吹き込時高爐内舉動の基礎檢討”, CAMP-ISIJ, 4, 84-87 (1991).
7. 有山 達郎, 佐藤 道貴, 村井 亮太, 宮川 一也, 野澤 健太郎, 上條 網雄 : “試驗燃燒爐による微粉炭多量吹き込時のレ-スウェイ内燃燒舉動とガス流れ變化”, 鐵と鋼, 81(12),

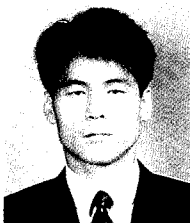
- 1114-1119 (1995).
8. 佐藤 道貴, 村井 亮太, 有山 達郎 : “微粉炭の分散を考慮した微粉炭燃燒 一次元數學モデルの開発”, 鐵と鋼, 82(9), 731-736 (1996).
9. J.G. Peacey and W.G. Davenport : “The Iron Blast Furnace - Theory and Practice”, p.205, Pergamon Press, New York (1979).
10. 백찬영, 허남환, 이정호 : “RIST Diagram을 이용한 고로 PCI조업해석모델개발”, 연구결과보고서 (POSCO., 1996).
11. S. Ergun : “Coal Classification and Characterization” in Coal Conversion Technology (C.Y.Wen and E.S.Lee Ed.), p.42, Addison-Wesley Publishing Co. (1979).
12. J.G. Peacey and W.G. Davenport : “The Iron Blast Furnace -Theory and Practice”, p.211, Pergamon Press, New York (1979).

許南煥



- 1980 부산대학교 화학기계공학과 학사
- 1983 부산대학교 화학공학과 석사
- 1998 부산대학교 화학공학과 박사
- 현재 포항종합제철 기술연구소 책임연구원

白贊英



- 1990 고려대학교 금속공학과 학사
- 1994 고려대학교 금속공학과 석사
- 현재 포항종합제철 기술연구소 연구원

任昌熙



- 1980 서울대학교 금속공학과 학사
- 1982 서울대학교 금속공학과 석사
- 1986 서울대학교 금속공학과 박사
- 현재 포항종합제철 기술연구소 선강연구그룹장