

〈論 文〉

## 페타이어 시편의 연소 특성 및 착화지연에 관한 실험적 연구

정종수\* · 박은성\* · 박종원\*\*

(1994년 1월 17일 접수)

### An Experimental Study on Burning Time and Ignition Delay of Waste Tire Chips in High Temperature Environments

Jongsoo Jurng, Eun-Sung Park and Jong Won Park

**Key Words :** Waste Tire (페타이어), Ignition Delay (착화지연), Pyrolysis (열분해)

#### Abstract

Experiments have been carried out to investigate the burning characteristics of waste tires in high temperature environments. The burning of waste tire chips consists of four stages; evaporation of volatile matters, ignition, burning of volatile matters, and burning of solid carbon. Burning time of waste tire chips depends on the gas temperature and the initial weight of the chip. However, the ignition delay depends on not only the gas temperature but also the oxygen concentration of the environments. In the ceramic matrix burner with a ceramic radiation shield, the burning time of the waste tire chips becomes shorter than that without the shield. This is due to the increase in heat transfer to the tire chips by radiation.

#### 기 호 설 명

$A_i$  : 페타이어 시편의 초기 단면적 [ $\text{mm}^2$ ]

$h$  : 측정위치의 높이 [ $\text{mm}$ ]

$T$  : 측정부의 가스온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$t_b$  : 페타이어 시편의 연소 소요시간 [ $\text{sec}$ ]

$W_i$  : 페타이어 시편의 초기 중량 [ $\text{mg}$ ]

이용은 유럽 국가 등 여러 선진국에서 실용화되어 상당한 성공을 거두고 있고, 많은 장점을 지닌 것으로 평가되고 있다. 시멘트 킬른내부는  $1,000^{\circ}\text{C}$  이상의 고온이고 킬른내에 투입된 페타이어의 체류 시간은 충분히 길어 완전 연소되게 함으로 페타이어의 소각처리시의 매연이나 악취발생문제가 심각하지 않다.<sup>(2~8)</sup>

본 연구에서는 시멘트 공정중의 페타이어 투입 기술의 개발에 앞서 페타이어 소각시의 오염물질의 배출과 이에 따른 환경오염에 대한 평가를 위해서 먼저 페타이어 연소시의 화염구조 및 연소반응에 중점을 두어 실험적 연구를 수행하였다. 시멘트 킬른내에 투입된 페타이어의 소각에 필요한 소요시간 및 착화지연 등은 킬른내의 페타이어 투입위치에서의 온도 및 산소농도 조건 등에 따라 달라진다.<sup>(9)</sup> 본 연구에서는 페타이어 시편에 대한 예비 연소실험 결과를 바탕으로 실제 시멘트 킬른의 페타이어 투입조건과 유사한 조건을 만들 수 있는 세라믹 매

#### 1. 서 론

페타이어에 의한 환경오염을 방지하기 위한 처리 문제는 연간 1천만개 정도 발생하는 우리 나라에서도 사회적으로 큰 관심의 대상이 되고 있고 여러 가지 처리방법에 대해 활발한 연구가 진행되고 있다.<sup>(1)</sup> 페타이어의 처리방법으로 시멘트 소성용 킬른의

\*정회원, 한국과학기술연구원 열·유체공학연구소

\*\*정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

트릭스버너를 이용한 실험장치를 설계, 제작하여 이러한 여러가지 주위 조건들의 차이에 따른 화염 상태 및 연소 소요시간 등의 변화에 대한 실험을 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

시멘트 킬른내 페타이어 투입부는 킬른 외부의 단열재가 고온으로 가열되어 강한 복사장을 형성하고 있으며, 페타이어 투입부분의 연소가스 온도는 1,000~1,100°C 정도의 고온이고, O<sub>2</sub>농도는 1~2% 수준, CO농도는 0.5~1% (5,000~10,000 ppm) 수준이다.<sup>(9)</sup> 따라서 본 연구에서는 페타이어 시편을 고온의 연소가스 중에서 연소시키는 실험장치를 설계, 제작하였다. 본 실험에서 페타이어의 연소실험을 위해서 사용한 연소장치는 Fig. 1과 같은 세라믹 매트릭스버너를 이용한 예혼합방식의 연소기로 내경 90 mm, 길이 20 mm인 다공성 세라믹을 연소기의 내부에 설치하여 이 세라믹 매트릭스버너의 표면에 화염이 부착되거나 세라믹 내부에 화염이 형성되도록 하였다.

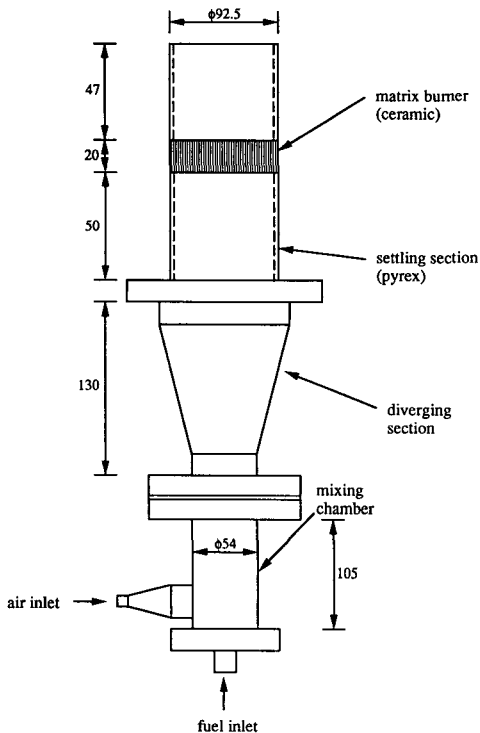


Fig. 1 Experimental apparatus

연소기의 하단으로 공급된 연소용 공기와 노즐에서 분출된 연료는 연소기 하단의 혼합실에서 잘 혼합된 후 확대노즐을 지나 스테인레스 스틸재 정류망(100 mesh)을 통과하여 세라믹 매트릭스버너로 들어간다. 실험에서 사용된 연료는 상용 프로판가스로 저발열량은 24,200 kcal/Nm<sup>3</sup>이다. 연소기의 지지대와 세라믹 사이에는 내경이 90 mm인 파이렉스관을 설치하여 화염을 관찰할 수 있도록 하였다. 이러한 세라믹 매트릭스버너를 사용함으로써 유동장이 균일하게 될 뿐 아니라 다공성 세라믹내에 1000°C 이상의 고온 예혼합 화염이 형성되어 세라믹 연소기는 고온의 복사체가 된다. 이러한 강한 복사장이 있는 조건이 실제 킬른에서의 페타이어 투입시의 킬른내부의 조건과 유사한 상태가 된다. 본 연구에서 사용한 세라믹 매트릭스는 미국의 Corning사 제품으로 자동차의 배기가스 정화를 위한 삼원 촉매장치 내에 삽입되는 cordierite계 세라믹 매트릭스이다.

0.5 mm Pt-Pt/Rh의 R-type 열전대를 사용하여 화염대와 배기가스의 온도를 측정하였으며, 이로부터 발생하는 기전력을 디지털온도계(YEW Model 2851)를 사용하여 측정하였다. 배기가스 중 각종 화학종의 농도는 연소분석기(combustion analyser; Kane-May, KM9006)로 측정하였는데, 이 측정기로 측정가능한 화학종은 O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 등이다.

## 3. 실험결과 및 검토

### 3.1 페타이어 시편 연소시의 화염형태

일반적으로 연소실험에 있어서 화염형태의 관찰은 매우 중요하며 화염의 상태에 대한 물리적 개념을 얻도록 해 준다. 따라서 본 실험에서는 당량비 및 투입부의 온도의 변화에 따른 페타이어 시편의 화염의 형태를 육안으로 관찰하는 동시에 직접 사진촬영을 하여 관찰하였다.

본 실험에서는 연료와 공기의 유량범위를 각각 0.7~3.0 l/min, 25~123 l/min에 걸쳐 변화시킨 조건하에서 페타이어 시편 투입시의 화염형태를 관찰하였다. 이 경우 화염의 당량비  $\phi$ 는 0.5~1.6의 범위이며 미연혼합기의 평균유속은 투입부의 중심부 온도는 약 750~1,300°C의 범위이다. 세라믹 연소기 표면으로부터 47 mm 높이에 시편을 투입하였다. 이 조건에서는 페타이어 시편을 투입하고 약 5

초 정도 경과한 후에 착화가 일어나는데, 이때 착화는 타이어 시편의 표면에서 직접 일어나는 것이 아니라 타이어 구성성분중의 휘발성분들이 증발 및 열분해(pyrolysis)를 일으킨 후, 휘발성성분들이 타이어의 상부로 올라가서 착화되는 형태를 보이는 것이 관찰된다. 대략 900°C 이하의 온도에서는 화염은 매우 불안정하며, 투입부의 온도가 떨어질수록 착화가 늦어지고 연소가 불안정해지는 것이 관찰된다. 이러한 조건에서는 전반적으로 화염이 페타이어 시편에 직접 부착되어 형성되지 않고 타이어 상부의 상당히 떨어진 곳에서 발생하게 되며, 매우 불안정하게 상하좌우로 펼쳐거리며 지속되다가 꺼지게 된다. 825°C 정도의 낮은 온도에서는 연소 초기에 착화가 일어나서 화염이 형성되었다가 일단 꺼진 후에 다시 재착화가 반복되는 현상도 관측되었는데, 이는 휘발성 물질들의 증발, 착화의 반복 등이 원인인 것으로 생각된다. 일단 휘발성분들의 연소 반응이 끝난 후에는 페타이어속에 포함되어 있는 카본블랙 등의 고형성분이 연소된 후 백색 분말상의 재가 남는다. 대략적으로 약 0.72g의 시편을 연소시킨 후에 남은 잔류성분의 질량은 약 0.2g 정도이다.

Fig. 2는 페타이어 투입 후의 경과시간에 따른 화염형태의 변화를 보여주는 사진으로 이때의 실험 조건은 연료와 공기의 유량이 각각 0.7과 32 l/min ( $\phi=0.52$ ,  $U=0.09$  m/s)이고 투입부의 온도는 약 900°C이다. 이러한 고온 상태에서는 타이어 시편을 투입하자마자 거의 즉시 착화가 일어나게 되며(2초 이내에서) 착화 초기에서부터 페타이어 시편의 표면에서 직접 활발한 반응이 일어나며 화염이 타이어 시편 전체를 둘러싸는 형태로 형성된다. 이 조건에서는 페타이어 시편의 휘발과 동시에 연소가 이루어지는 것이라고 생각된다. 투입부의 온도가 더욱 증가하면 보다 활발한 반응이 페타이어 시편 전체에 걸쳐서 일어나게 되며 따라서 초기 착화시간뿐 아니라 연소 소요시간도 짧아지게 된다. 한편 이 조건에서는 시편의 연소시 상당한 양의 soot가 형성되어서 재연소되지 않고 하류로 빠져 나가는 현상이 관찰되므로, 이러한 soot를 재연소시킬 수 있는 방안에 대한 고려가 필요하리라고 생각된다.

### 3.2 페타이어 시편의 연소 소요시간

본 실험에서는 페타이어 시편을 투입시킬 때의 투입부의 위치, 투입부의 온도, 시편의 중량 및 배

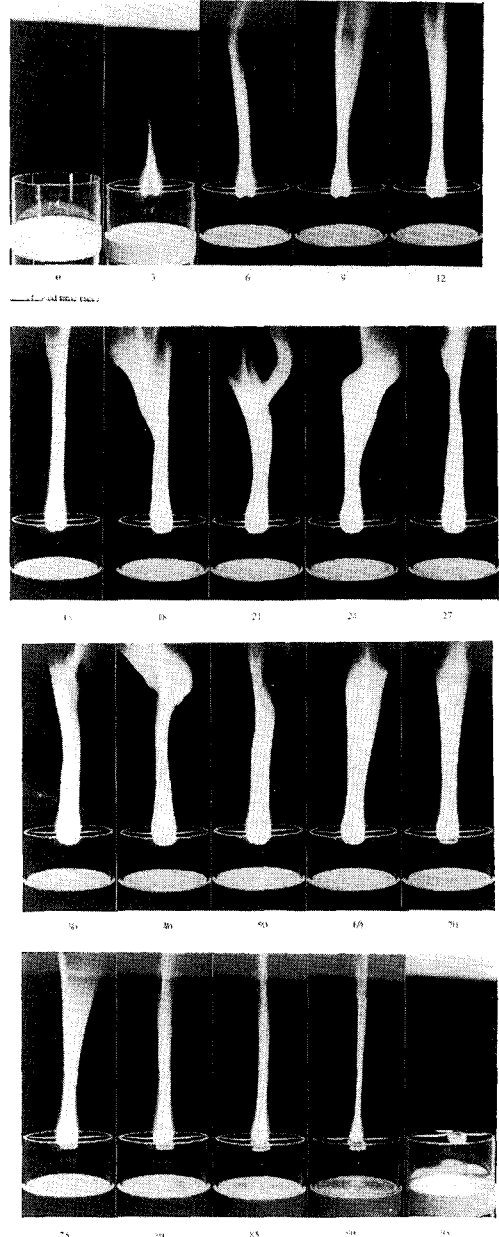


Fig. 2 Burning types of waste tire chips along elapsed time (fuel/air flow rate=0.7/32 l/min, h=47 mm)

출가스 중의 산소농도의 변화 등에 따른 착화 지연 시간 및 연소 소요시간을 측정하였다. 착화 지연시간은 시편 투입후 착화가 관찰될 때까지의 경과시간으로 정의하였으며 연소 소요시간은 화염이 관찰된 시점으로부터 페타이어 시편의 화염이 꺼져서 보이지 않게 될 때까지의 소요시간을 기준으로 하

였다. 사용한 페타이어 시편의 형태는 두께 3 mm 정도의 정사각형 모양으로 투입전의 초기 중량을 전자 저울로 측정하여 중량오차가 미리 정해진 중량의 3%를 넘지 않도록 하였다.

3.2.1 투입부의 온도 및 위치의 영향

페타이어 시편 투입부의 연소가스의 온도는 페타이어 시편의 연소시간을 결정하는 중요한 인자이다. Fig. 3은 페타이어 투입부의 온도의 변화에 따른 연소 소요시간을 나타낸 그림이다. 사용된 페타이어 시편은 크기가 10×10×3 mm로 질량은 0.72~0.73 g 정도이다. 페타이어의 투입위치는 세라믹 연소기 표면으로부터 47 mm 지점으로 고정하고, 연료 및 공기유량을 변화시키면서 투입위치의 가스 온도, 착화 지연시간 및 연소 소요시간 등을 측정하였다. 연료유량은 0.5~3.0 l/min의 범위이고 공기유량은 20~140 l/min 사이에서 변화시켜 당량비를 0.4~1.0의 범위에서 변화하도록 하였다.

이 그림에서 알수 있는 바와 같이 투입부의 온도가 낮으면 연소 소요시간은 길어지며 본 실험에서의 온도 범위 내에서는 연소 소요시간은 온도에 거의 선형적으로 반비례하는 관계가 있음을 관찰할 수 있다. 온도가 1300°C인 경우에는 연소 소요시간이 약 70초 정도인데 반해 750°C인 위치에서는 100초 이상으로 40 %이상의 시간이 더 소요되는 것이 관찰된다.

한편 Fig. 4는 연료유량을 0.7 l/min, 공기 유량을 20 및 32 l/min으로 고정된 경우 페타이어의 투입위치를 변화시키면서 실험한 결과를 나타내고 있다. 페타이어 시편의 크기와 질량은 앞서의 실험과 동일한 조건으로 하였으며 투입위치는 각각 버너 표면으로부터 35, 50, 92 및 180 mm로 변화시켰다. 이 그림에서 알수 있는 사실은 투입위치와 비교적 무관하게 투입위치에서의 온도에 따라 연소 소요시간이 비례하며 온도가 상승함에 따라 거의 선형적으로 줄어드는 것을 알 수 있다. 한편 이 그림에서 관찰되는 바와 같이 공기유량을 20 l/min에서 32 l/min로 변화시키는 경우에도 동일한 주위 온도조건에 대해서는 시편의 연소소요시간에는 큰 차이가 없었다. 공기유량을 20 l/min에서 32 l/min으로 증가시키면 당량비가 감소하므로 배출가스 중의 O<sub>2</sub> 성분이 증가하게 된다. 따라서 본 실험의 결과는 페타이어의 연소소요시간에는 본 실험에서의 범위내에서는 주위의 O<sub>2</sub>농도의 변화에 따른 직

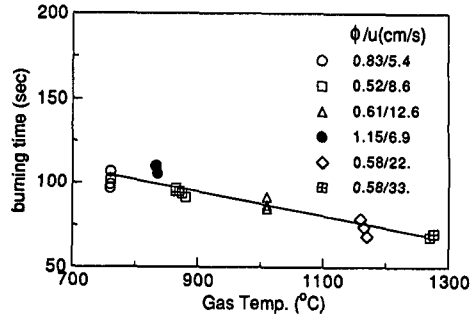


Fig. 3 Burning time of waste tire chips vs. gas temperature for various air/fuel ratios

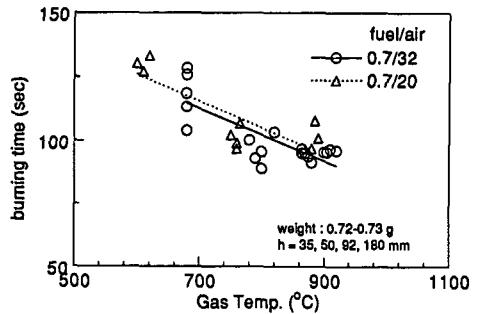


Fig. 4 Burning time of waste tire chips vs. gas temperature at various height

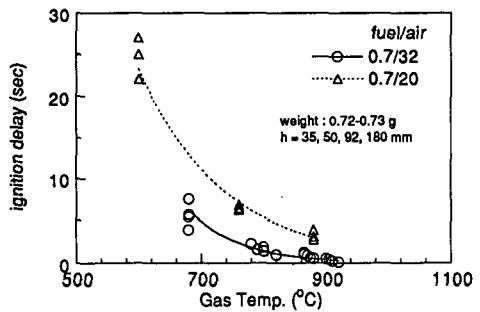


Fig. 5 Ignition delay time of waste tire chips vs. gas temperature for different air/fuel ratios

접적인 영향이 없으며 투입부의 온도가 페타이어의 연소 소요시간을 결정하는 가장 중요한 인자라는 것을 의미한다.

3.3 페타이어 시편의 착화지연시간

한편 착화지연시간은 페타이어 투입부의 온도조건 뿐만 아니라 산소농도에도 영향을 받는다. Fig. 5는 페타이어 투입위치에서의 온도와 착화 지연시간간의 관계를 나타내는 그림이다. 온도가 낮으면

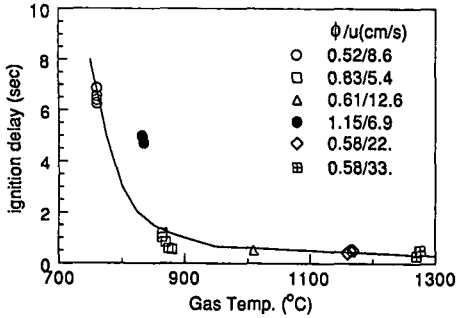


Fig. 6 Ignition delay time of waste tire chips vs. gas temperature for various air/fuel ratios

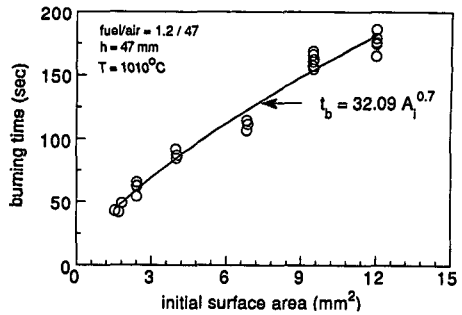


Fig. 8 Burning time of waste tire chips vs. initial surface area

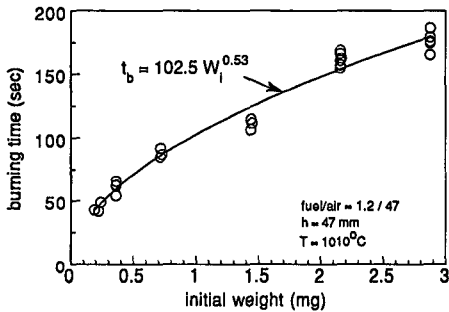


Fig. 7 Burning time of waste tire chips vs. initial weight

예상대로 착화 지연시간이 급격히 길어지게 된다. 투입부의 온도가 450°C 인 경우에는 착화가 일어나지 않고 페타이어 성분중의 휘발성분만이 기체화되어 배기가스 중으로 배출된 후에 탄화되는 현상이 관찰되었다. 동일한 연료유량(0.7 l/min)에서 공기유량을 32 l/min에서 20 l/min로 감소시키면 동일한 온도에서의 착화지연시간이 약 5~10초 정도 길어진다. 앞서 설명한 대로 동일한 연료유량에 대하여 공기유량의 변화는 배출가스 중의 산소농도의 변화를 가져오게 되므로, 동일한 온도조건에서 관찰되는 착화 지연시간의 차이는 산소농도 변화의 영향임을 알 수 있다. 즉, 투입부의 온도조건이 동일하다면 페타이어 투입부의 산소농도가 높을수록 착화가 빨라진다는 것이다.

Fig. 6은 고정된 페타이어 투입위치에서 연료/공기유량을 변화시켜 온도변화에 따른 착화 지연시간의 변화를 나타낸 그림이다. 투입부의 온도가 어느 온도이상(여기서는 850°C)이 되면 거의 착화지연 없이 거의 즉각적으로(0.5초 이내에서) 착화된다. 그러나 800°C를 기준으로 이보다 낮은 온도에서는

상당한 시간 동안의 착화지연이 발생된다.

### 3.4 초기 중량의 변화에 따른 영향

Fig. 7은 투입된 페타이어 시편의 초기 질량의 변화에 따른 연소 소요시간의 변화를 나타낸 그림이다. 이때의 연소조건은 연료유량과 공기유량이 각각 1.2 l/min와 47 l/min이며 페타이어 시편의 투입위치는 세라믹 표면으로부터 47 mm로 고정하였고 페타이어 투입부의 온도 평균치는 1010°C이었다. 시편의 연소 소요시간은 거의 페타이어 시편의 초기 중량의 제곱근에 비례하여 증가하며 이때의 최소자승법으로 구한 관계식은 대략 다음 식과 같다.

$$t_b = 102.5 W_i^{0.53} \quad (4-1)$$

여기서,  $t_b$ 는 페타이어 시편의 연소 소요시간(sec)이고,  $W_i$ 는 시편의 초기 질량(g)이다.

일반적으로 페타이어와 같은 고형 폐기물의 연소에 있어서 착화가 일어나기 전까지의 연소 초기에는 열분해(pyrolysis)로 인해 페타이어 성분중의 휘발성 기체가 외부로 방출되어 착화를 일으킨 후 나머지 잔류성분들이 연소되는 것으로, 휘발성성분의 가스화는 초기 페타이어 시편의 표면적과 밀접한 관계가 있다. 따라서 Fig. 8에 페타이어 시편의 초기 표면적의 차이에 따른 연소 소요시간을 나타냈다. 이 그림에서 시편의 초기 표면적이 증가함에 따라 연소 소요시간은 대략 초기 표면적의 0.7승에 비례하여 증가하는 관계를 관찰할 수 있었으며 이 실험에서의 측정결과는 최소자승법에 의해 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$t_b = 32.09 A_i^{0.7} \quad (4-2)$$

여기서,  $t_b$ 는 연소 소요시간이고  $A_i$ 는 페타이어 시

편의 초기 표면적을 나타낸다.

### 3.5 열회수용 세라믹 매트릭스를 설치한 경우의 연소 소요시간

시멘트 킬른에서의 페타이어 투입부의 조건은 앞서 설명한 바와 같이 고온일 뿐 아니라 가열된 주위 벽으로부터 강한 복사열을 받고 있는 상태이다. 본 실험에서는 세라믹 매트릭스버너의 하류에 또 하나의 열회수용 세라믹 매트릭스를 설치하였다. 이 세라믹 매트릭스는 배기가스에 의해 고온으로 가열되어 세라믹 버너간에 강한 복사장을 형성하게 되며 열회수용 세라믹 매트릭스를 설치하지 않은 경우와 비교하여 복사장의 강도의 차이가 크다.

Fig. 9는 온도에 따른 세라믹 매트릭스 Shield의 사용에 따른 페타이어 연소 소요시간의 변화를 나타낸 그림으로 이때의 시편의 질량은 약 0.7g정도이고(3% 이내 오차) 투입부의 높이는 47mm로 고정하였다. 동일한 투입부의 온도에 대해서 양단에 세라믹 연소기를 투입하였을 경우는 두 연소기 사이의 거리는 110mm이고 이때 시편의 투입위치는 하단의 연소기 표면으로부터 47mm 높이이다. 두 경우 모두 페타이어 투입부의 온도가 증가함에 따라서 연소 소요시간은 거의 선형적으로 감소하나, Shield를 설치하였을 때 감소하는 기울기가 약간 완만하다. 동일한 투입부의 온도에 대해서 양단에 세라믹 연소기를 설치한 경우 연소 소요시간이 감소하게 되는데 이는 앞서의 설명대로 양단의 세라믹으로부터의 복사에 의한 열전달량이 증가하기 때문이라고 생각된다. 한편 세라믹 매트릭스 Shield가 없는 경우 이 조건에서 페타이어 시편을 착화시킬 수 있는 최저 온도가 약 750°C 정도인데 세라믹 매트릭스 Shield를 설치한 경우에는 700°C 근처의

온도에서도 착화가 일어났다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 고온의 연소가스 중에서의 페타이어 시편의 연소실험을 통해 연소시의 화염의 형태와 연소 소요시간 및 착화지연에 미치는 주위 조건, 즉 온도 및 산소농도의 영향을 조사하기 위한 실험을 수행하였으며 실험 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 페타이어 시편의 연소과정은 성분 중의 휘발성 물질들의 증발, 착화, 휘발분 연소, 고형성분의 연소 등의 과정을 거치며 최종적으로 백색 분말상의 재가 남는다.

(2) 페타이어 시편의 연소 소요시간은 온도가 증가하면 급격히 짧아지나 주위의 농도변화에 따른 연소 소요시간의 변화는 본 실험 범위내에서는 큰 차이가 나타나지 않았다. 따라서 산소농도보다는 투입부에서의 온도가 페타이어의 연소 소요시간을 결정하는 중요한 인자라고 생각된다.

(3) 페타이어 투입부의 온도와 산소농도가 높을수록 착화가 빨라진다.

(4) 페타이어 시편의 연소 소요시간은 거의 시편의 초기 중량의 제곱근에 비례하여 길어 지며 시편의 표면적에 대해 0.7승에 비례하여 증가한다.

(5) 열회수용 세라믹 매트릭스를 설치하여 양단의 세라믹 연소기 사이에 페타이어 시편을 투입하였을 경우, 복사에 의한 페타이어 시편으로의 열전달량의 증가로 동일 온도조건에 대해서 설치하지 않은 경우와 비교해 볼 때 연소 소요시간이 짧아지며 또한 착화를 위한 최저 임계온도도 약 50°C 정도 낮아진다.

## 후 기

본 연구는 과학기술처 및 환경처에서 시행한 선도기술개발사업의 연구결과임을 밝힙니다. 또한 본 연구가 원만히 진행되도록 지원하여 주신 (주)쌍용양회의 서형석 대리 외 여러분, 동양시멘트의 관계자 여러분께도 특별한 감사를 드립니다.

## 참고문헌

(1) 이덕수, 최재성, 1989, "페타이어의 연료활용

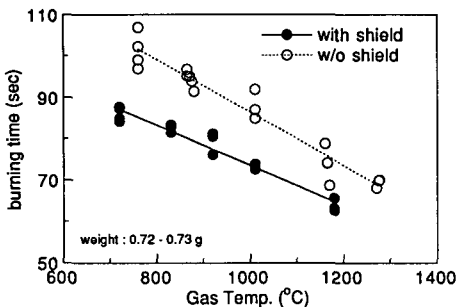


Fig. 9 Effects of ceramic matrix shield on burning time of waste tire chips

- 과 그 전망,” 에너지관리, pp. 60~65.
- (2) Zement-Kalk-Gips, 1980, “Economical Burning of Waste Tyres in Rotary Cement Kilns,” *Zement-Kalk-Gips*, Vol. 33, No. 2, pp. 101.
- (3) 中島幸男, 1981, “廢타이어의 Cement 燒成用 燃料로서의 利用,” *Cement工業*, No. 166, pp. 11~13.
- (4) Blumental Michael, 1992, “The Use of Scrap Tyres in the US Cement Industry,” *World Cement*, December pp. 14~20.
- (5) Hochdahl, O., 1985 “Brennstoffe und Waerme-wirtschaft Kongress-Band,” *VDZ* 1985, pp. 286~302.
- (6) Hochdahl, O., 1978, “Experience and View-points with Regard to the Use of Substitute Fuels,” *Zement-Kalk-Gips*, Vol. 31, No. 9, pp. 421~424.
- (7) Saito, I., Sakae, K. and Ogiri, T., 1987, “Development of Waste Tyre Gasifier,” 小野田研究報告, Vol. 39, No. 116, pp. 29~39.
- (8) Weislehner, G., 1983, “Utilization of Old Motor Tyres as Fuel by Rohrbach-Zement, Dotternhausen,” *Zement-Kalk-Gips*, Vol. 36, No. 8, pp. 454~457.
- (9) 정중수 외, 1993, “시멘트 킬른에서의 페타이어 열이용-페타이어 열이용과정 중 공해물질 생성 및 방지에 관한 연구,” 선도기술과제보고서, UCN 1028-4932-2, 환경처/과학기술처.