

## 열복사에 의한 고체연료 점화 연구

김 명 호\* · 백 승 욱\*\*

(1997년 3월 13일 접수)

### Ignition of a Solid Fuel by Thermal Radiation

Myeong-Hyo Kim and Seung-Wook Baek

**Key Words :** Solid Fuel(고체연료), Ignition(점화), Thermal Radiation(열복사), Vertical Fuel Plate(수직연료면), Block(장애물)

#### Abstract

Ignition characteristics of a vertical solid fuel plate with block have been investigated experimentally. For low radiant heat flux, ignition does not occur in a vertical solid fuel plate without block. In the case with the block on a vertical fuel plate, however, ignition can occur by increasing the residence time and the time to absorb the incident radiation flux by fuel vapor in gas phase. The ignition occurs below block and the point varies according to the block location and the block height. As the block height increases, the block locates at higher position, and the hot wall temperature increases, the ignition delay time decreases. Also as the initial temperature of fuel plate rises, the ignition delay time of the solid fuel plate decreases. The temperature distribution of solid fuel plate with block is nearly proportional to the radiant heat flux distribution. Therefore, the effect temperature by natural convection heat transfer is of the same order as that of inhibition of temperature increase by pyrolysis.

#### 1. 서 론

고체연료의 점화에 관한 연구는 화재 방재와 고체추진제 연소의 연구 측면에서 중요하기 때문에 많은 연구자들에 의해 연구가 진행되어 왔다. 화재 방재 측면의 연구에서는 고체연료의 점화 기구에 대한 연구가 필수적이고 고체추진제 연소 측면에서는 복사열전달에 의한 점화 및 연소 문제가 매우 중요하다.

점화에 관한 연구는 주로 점화가능성의 예측과 점화기구의 해석 등이 수행되어 왔다. 점화가능성은 예기치 못한 점화에 의한 화재를 방지하기 위해

적당한 건축 자재를 선택하거나 고체추진제의 등급을 매기고 선택하는데 중요하며 점화기구의 해석은 실험적으로 관찰된 점화거동을 설명하고 현상을 예측하기 위해 필요하다.

열복사에 의한 고체연료의 점화에 대하여 실험적 연구가 많이 진행되어 왔다. 그 결과 복사 열유속이 낮을 때에는 고체장에서 점화가 일어나고 복사 열유속이 높아지면 열분해된 연료기체와 산소가 기체장에서 혼합되어 점화가 일어난다는 사실이 규명되었다. 그러나 이러한 기체장 점화 모델은 열분해된 기체의 복사 흡수율도 고려하지 않았으나 Kashiwagi<sup>(1,2)</sup>는 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 실험을 통해 복사 열유속이 증가함에 따라 점화 지연시간이 짧아지는 것과 열분해된 기체에 의해 입사하는 복사에너지의 양이 줄어드는 것을 측정하였고 이런

\*삼성항공산업(주)

\*\*회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

복사흡수에 의해 기체장에서 점화가 일어날 수 있다고 주장하였다. 또 Kashiwagi<sup>(3)</sup>는 연료면 위치에 따른 점화현상의 변화를 CO<sub>2</sub> 레이저와 열복사판(radiant panel)을 이용하여 실험하였다.

Hung and Shiau<sup>(4)</sup>는 고온 수직벽면에 장애물이 있는 경우가 장애물이 없는 경우보다 장애물 하류에서 열전달계수가 커진 것을 측정하였고 Shakerin et al<sup>(5)</sup>은 사각 밀폐공간에서 고온 벽면에 유한개의 장애물이 있을 때 자연대류에 의한 효과를 온도장 가시화를 통하여 측정하였다. 한편 Abu-Mulaweh et al<sup>(6)</sup>은 수직벽면에 위치한 step 주위의 자연대류 유동장을 실험적, 수치적인 해석을 하였는데 step에 의해 대류열전달 계수가 향상됨을 보였다.

열복사에 의한 고체연료 점화기구는 고체연료 표면이 복사열에 의해 가열되어 열분해된 기체가 나오고 이 기체가 복사에너지를 흡수하여 온도가 발화점 이상으로 올라가면 점화가 일어난다고 알려져 있다. Park and Tien<sup>(7)</sup>은 기체장과 고체장에서의 복사흡수와 자연대류 효과를 고려한 1차원 모델을 이용하여 기체장의 복사 흡수가 점화의 중요한 요인임을 밝혔다. Han and Baek<sup>(8)</sup>은 화학반응과 자연대류 유동장을 고려한 2차원 모델을 사용하여 열복사에 의한 수직 고체연료면의 점화현상을 수치해석하였다. 한편 Baek and Kim<sup>(9)</sup>은 표면복사를 고려하여 복사와 대류에 의한 사각 밀폐공간 내 고체

연료 점화에 미치는 요소들에 대한 수치해석을 하였고 Kim and Baek<sup>(10)</sup>은 적외선 복사원을 이용하여 복사열원(고온 벽면)의 온도와 위치를 달리할 때 사각 밀폐공간 내 고체연료 점화 현상의 변화를 실험적으로 살펴보았다.

고체연료면이 수직 벽면을 이루고 있을 때 복사 열유속이 작으면 점화가 일어나기 힘들지만 장애물이 있으면 자연대류유동을 방해하여 열분해된 기체들의 체류시간을 길게 만들어 주기 때문에 점화가 발생할 수 있다. 따라서, 건축물 내 수직벽에 있는 장애물 때문에 화재가 발생할 경우에 대비하기 위한 기본적인 연구가 필요하다. 본 연구에서는 이런 현상이 일어나는 조건을 찾아보고 연료벽면에 장애물이 있을 때 점화가 일어나는 열유속과 점화지연 시간이 변하는 것을 살펴보고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

실험장치를 구성하고 있는 것들은 Fig. 1에서와 같이 열복사원인 고온 벽면과 PMMA로 이루어진 고체연료면, 그리고 고체연료면 바깥쪽으로 열손실을 막기 위한 단열재 등으로 구성된 시험부, 고온 벽면을 일정 온도 또는 일정 열유속으로 유지하기 위한 온도 및 전력 제어부, 연료면의 온도 변화를 측정하는 열전대 및 A/D 변환기, 점화현상을 보기 위한 VCR 및 화상처리장치 부분이 있다.

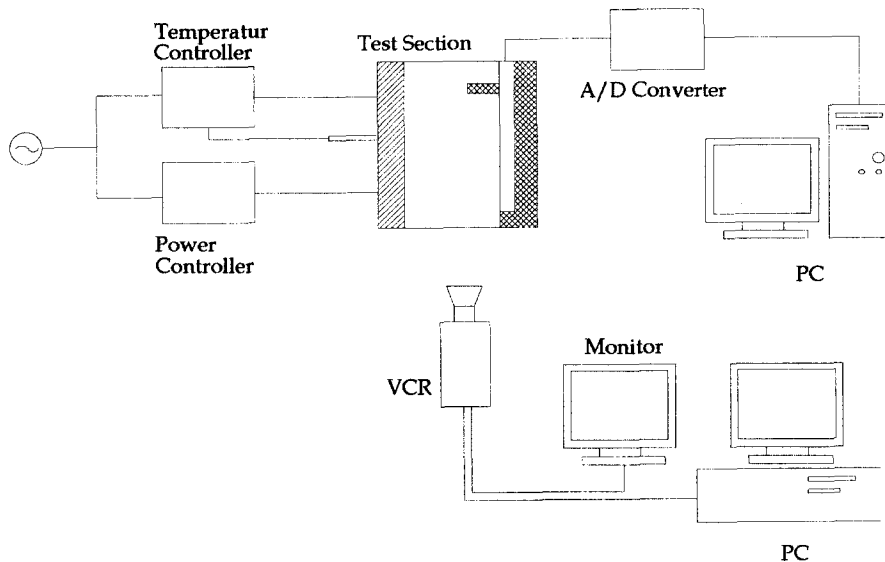


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

온도 측정에는 열전대와 광학온도계(optical pyrometer)가 사용되었다. 열전대에서 나온 신호는 온도표시기 또는 A/D 변환기를 통해 PC에서 신호를 받음으로써 온도로 표시할 수 있다. 광학온도계는 물체 표면에서 나오는 복사에너지를 측정하여 온도로 표시하는 장치이다. 복사에너지와 표면의 방사율만 알면 정확한 온도를 알 수 있다. 표면 방사율을 측정하는 방법과 실험에 사용된 각 재료의 표면방사율 값은 Kim<sup>(11)</sup>에서 찾을 수 있다.

VCR로 녹화한 내용을 바탕으로 점화 지연시간, 점화 위치 및 점화 후 화염 전파 등 점화 특성을 파악하고자 한다. 점화 위치와 점화 후 화염 전파 상황은 눈으로 식별이 힘들 만큼 순식간에 일어나기 때문에 녹화 후 테이프를 천천히 돌려면서 점화 특성을 살펴보았다. 점화 지연시간은 VCR에 내장된 시계를 이용하여 고온 벽면을 시험부에 설치한 시점에서 화염이 생성되는 시점까지 걸린 시간으로 구하였다. 실험을 통해 보게 되는 점화특성들은 계산 결과와 비교할 수 있고 또 점화가 일어나는 기구를 설명할 수 있는 중요한 근거가 된다. 이 실험에서는 화염이 발견된 시점을 점화시점으로 하였다.

고체연료면의 위치와 장애물의 부착 위치, 장애물의 높이, 그리고 고온 벽면과 고체연료면 사이의 거리에 따라 점화 현상의 변화를 실험하였다. 시험부를 측면에서 바라보았을 때 고온 벽면과 연료면의 위치는 Fig.2와 같다. 실험에 사용된 장애물은 석고보드를 사용하여 제작하였고 두께는 모든 경우

에 대해서 8 mm로 동일하다. 고온 벽면의 경계조건은 온도조절기를 이용하여 일정 온도 또는 일정 열유속으로 유지하였다. 연료면 중앙부에 온도 측정을 위해 각각 다른 높이로 열전대를 5개 설치하였다. 이들이 설치된 높이는 Fig.4와 Fig.5에 표시되어 있다.

### 3. 고체연료면 온도 분포

고온의 복사에 노출된 고체연료면의 시간에 따른 온도 변화를 연료면에 설치한 열전대를 이용하여 측정하였다. 실험에서 사용한 기하학적 형상은 수직 벽면이므로 이때는 복사에 의한 영향 뿐만 아니라 자연대류에 의한 영향도 존재하게 된다. 복사에 의해서는 고체연료면의 온도가 상승하지만 자연대류에 의한 대류열전달로 기체상의 온도에 따라 고체연료면이 가열 또는 냉각된다. 따라서 복사열전달만이 존재하는 경우와 대류열전달이 함께 존재하는 경우의 온도 분포는 달라지게 된다.

복사열전달의 효과를 고려하기 위해서 연료면 상에서 연료면 하단으로 부터 일정한 높이에 있는 얇은 띠와 고온 벽면 사이의 형상계수를 도입하였는데 이는 다른 조건들이 같을 때 고체연료면 일정부분으로 입사하는 복사열유속은 형상계수에 비례하기 때문이다. 이 형상계수는 3차원 상에 평행하게 존재하는 얇은 띠와 사각 평판 사이의 형상계수이다. 고온 벽면, 연료면의 온도와 표면방사율을 알면 복사열유속은 Stefan-Boltzman 법칙과 이 형상계수를 이용하여 구할 수 있다.

Fig.3은 자연대류 효과가 나타나지 않는 수평연료면일 경우의 실험으로 장애물이 있을 때와 없을

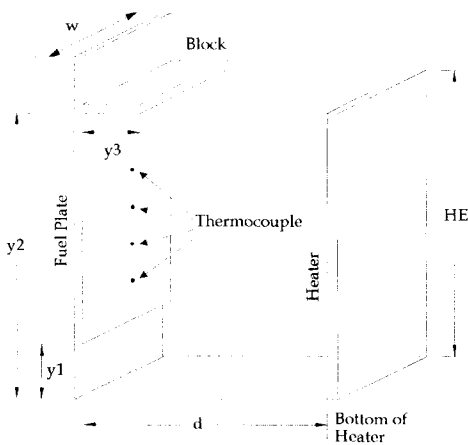


Fig. 2 Geometry of the location of the heater and the solid fuel plate.

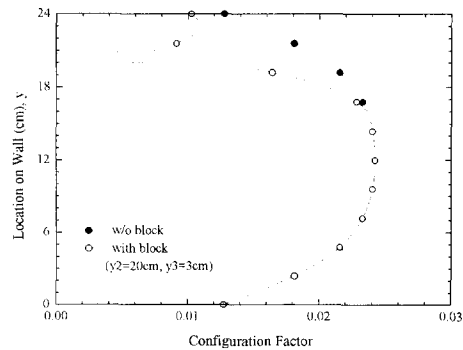


Fig. 3 Configuration factor from heater to solid fuel plate(HE=24 cm, w=12 cm, d=6 cm).

때 3차원적으로 본 고온 벽면과 고체연료면 사이의 연료 벽면 상의 위치에 따른 형상계수이다. 여기에서 볼 수 있는 것은 고온 벽면의 중간 위치에서 형상계수가 가장 크다는 점이다. 이것은 이곳으로 입사하는 복사열유속이 가장 크고 따라서 고체연료면의 온도도 가장 높으며 결과적으로 가장 많은 양의 열분해가 일어나는 것을 의미한다. 이 사실은 실험시 열분해가 가장 먼저 일어나고 또한 가장 많이 일어나는 것으로 확인된다.

고온 벽면 온도 등 실험 조건이 같은 경우 자연대류 효과가 없는 경우와 있는 경우(수평 연료면일 때와 수직 연료면일 때)의 온도 분포의 차이를 Fig. 4에 나타내었다. 여기에서 세로축은 고체 연료면에 설치한 열전대의 위치이고 가로축은 그 각 위치의 온도를 나타낸다. 수직 연료면에서 자연대

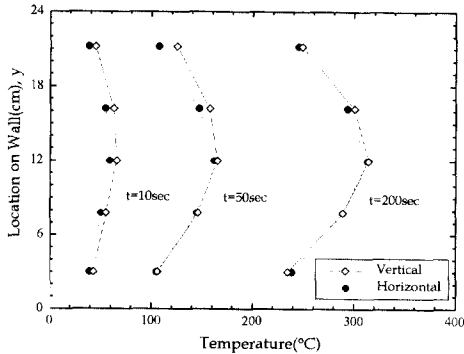


Fig. 4 The difference of the temperature distribution between the horizontal fuel plate and the vertical fuel plate ( $T_h=630^\circ\text{C}$ ).

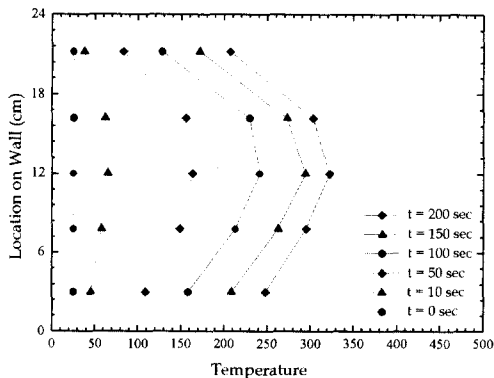


Fig. 5 Spacial distribution of the temperature of the solid fuel plate with block ( $T_h=650^\circ\text{C}$ ,  $HE=24.0\text{ cm}$ ,  $d=6.0\text{ cm}$ ,  $w=14.0\text{ cm}$ ,  $y_2=22.0\text{ cm}$ ,  $y_1=2\text{ cm}$ ).

류 유동의 하류에 해당하는 연료면 상단에서 온도가 더 높은 것을 확인할 수 있다. 그러나 이것은 연료면 온도에 비하면 미미한 차이에 지나지 않고 시간이 지나 고체연료의 열분해가 활발한 때에는 그 차이가 거의 없어진다.

자연대류는 고온의 공기를 윗방향으로 운반해 주는 역할을 하게 되므로 복사열유속 외에 대류열유속이 존재하게 된다. 복사열유속에 의해 고체 연료면이 가열되고 가열된 벽면을 따라서는 자연대류 경계층이 형성된다. 상류에서는 경계층의 온도가 표면온도보다는 낮아서 표면을 냉각시키고 하류로 갈수록 경계층의 온도가 상승하여 냉각되는 정도도 작아지거나 가열된다. 따라서 온도분포는 대칭적인 형태가 아닌 아래쪽 보다 위쪽의 온도가 높은 비대칭적인 형태를 나타내게 된다. 하지만 상류와 하류의 온도차이가 크지 않기 때문에 그 차이는 작다.

고체연료면으로 입사한 에너지는 고체연료면의 온도를 높이거나 고체연료를 열분해시키는데 필요한 잠열로 사용되게 된다. 또한 고체연료면은 자신의 온도에 맞는 열복사를 내놓게 된다. 이것들은 에너지 방정식에서 각각의 항으로 표현되고 평형을 이루게 된다. 따라서 입사한 복사열유속, 연료면의 온도와 온도 변화율을 이용하여 고체연료의 열분해율을 계산할 수 있다.<sup>(11)</sup>

고체 연료의 열분해율은 연료면의 온도가 높을수록 커진다. 이것은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 일정한 복사에너지가 들어올 때 시간이 지남에 따라 온도 상승이 느려지는 것에서 알 수 있다. 시간이 더 지나면 온도가 거의 일정하게 유지되는데 이때는 들어온 에너지의 대부분이 고체연료를 열분해시키는데 사용되므로 준평형 열분해 가정이 가능한 상태이다.

Fig. 5는 장애물이 있는 경우 수직 연료면에서 위치에 따른 온도 분포를 나타낸 것이다. 장애물이 있을 때는 유동과 복사열전달 특징이 모두 바뀐다. 장애물에 의해 복사열전달이 방해받게 되어 장애물 부근에서 형상계수 값이 줄어들게 되므로 이곳으로의 열전달 양이 줄어들고 유동장 역시 복잡한 구조를 가지게 된다. 장애물에 가까이 있는  $y=20.5\text{ cm}$ 인 위치에서는 열유속이 작기 때문에 온도 상승이 다른 곳보다 훨씬 느림을 볼 수 있다. 그러나 장애물에서 먼 지역의 온도 상승은 장애물이 없는 경우와 거의 비슷하다.

다른 조건들이 일정할 때 복사열유속은 형상계수

에 비례하기 때문에 고체연료면 일정 위치에 도달하는 복사열유속과 온도분포 사이의 관계를 살펴보기 위해 형상계수와 실제 온도분포를 비교하면 시간에 상관없이 거의 같은 경향을 나타냄을 볼 수 있다. 이는 연료면이 복사를 받기 시작한 초기에는 복사열유속의 대부분이 연료면의 온도 상승에 사용되고 표면온도가 낮아서 자연대류 효과가 크지 않기 때문이다. 시간이 지남에 따라 열분해가 진행되고 자연대류에 의한 효과들이 커지면 온도 분포와 복사열유속의 경향은 달라질 것이지만 실험결과는 그 경향이 계속 비슷하게 유지되고 있다. 시간에 따른 온도 분포를 살펴보면 온도상승율이 줄어드는데 이것은 열분해 과정의 진행으로 인한 온도 상승 지연효과가 크다는 것을 알 수 있다. 이것에서 열분해로 인한 온도 상승 지연 효과와 자연대류 열전달에 의한 온도 상승 효과가 서로를 상쇄시킬 정도로 비슷한 수준임을 짐작할 수 있다. 이 경우 열전대를 이용하여 온도를 측정할 때 대류 및 복사열전달에 의한 오차가 존재하지만 그 차이는 별로 크지 않을 것이므로 무시하였다.

#### 4. 수직 연료면 점화 특성

개방된 곳에 놓여 있는 고체연료는 강한 복사를 받으면 점화를 일으킨다. 이때 연료면의 위치가 수평이고 복사의 방향이 수직방향인 경우가 연료면의 위치가 수직이고 복사의 방향이 수평방향인 경우보다 점화가 더 잘 일어난다. 이들 경우 모두 점화를 일으키는 한계열유속이 존재하고 연료면의 위치가 수평일 때가 수직일 때보다 이 한계열유속이 작다.<sup>(2)</sup>

수직 연료면에 대해 외부 열복사가 점화를 일으킬 수 있는 한계열유속 보다 작으면 점화가 일어나지 않는다. 그러나 수직 연료면에 장애물이 존재하여 유동장의 체류시간을 길게 해주면 점화가 일어날 수 있다. 실험에서 사용한 복사 열원의 경우 고온 벽면의 온도를 최고 72°C까지 올릴 수 있다. 이 범위에서는 수직 연료면의 복사에 의한 점화는 일어나지 않는다. 고온 벽면과 고체 연료면의 거리가 가까우면 점화가 가능하지만 거리가 가까울수록 고온 벽면에서의 전도 및 대류에 의한 효과가 커지기 때문에 본 연구의 관심사인 복사에 의한 점화와의 거리가 멀어진다.

고온 벽면의 높이(HE)가 높아질수록(24 cm와 36 cm일 경우) 연료면에 도달하는 총 복사열유속

은 증가하지만  $Ra$  수가 커지고 난류로 천이하게 되어 상승 속도가 증가해서 오히려 체류시간이 줄어들기 때문에 점화가 일어나기 힘들어진다. 또 고온 벽면과 연료면 사이의 거리( $d$ )가 멀어질수록(6 cm와 8 cm) 연료면에 도달하는 총 복사열유속이 줄어들기 때문에 역시 점화가 일어나기 힘들다.

고온 벽면을 일정 온도로 유지시키고 실험한 경우 고온 벽면 온도와 점화 지연시간 사이의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. 고온 벽면의 온도가 높을수록 점화 지연시간은 짧아지고 어떤 온도 이하에서는 점화가 일어나지 않는다. Fig. 7에 표시된 조건인 경우 점화가 일어나기 위해서는 최소한 고온 벽면의 온도가 60°C 이상이 되어야만 한다. 고온 벽면 온도가 그 이하이면 복사에 의한 점화는 일어나지 않는다.

실험을 통해 보려고 하는 것은 장애물 위치, 높이 변화에 따른 점화 현상의 변화로 2차원적인 모델 해석을 위한 것이다. 그러나 실험은 시험부의 x방향으로 치수가 크지 않기 때문에 유동장과 복사열전달에서 3차원 효과가 나타나게 된다. 이러한 효과를 보기 위하여 연료면 너비를 하나의 변수로 삼았는데 연료면의 너비가 넓어지면 Fig. 6에서와 같이 점화 지연시간은 짧아진다. 이런 3차원 효과를 없애고 엄밀하게 2차원 효과를 보기 위해서는 연료면 너비를 더욱 크게 하여 점화 지연시간의 변화가 없는 경우를 잡아야 한다. 그러나 고체연료면의 깊이 방향 뿐만 아니라 표면을 따라서도 온도구배가 존재하므로 전도열전달이 일어나기 때문에 연료면의 너비를 크게 하면 전도 열손실 효과가 커진다. 따라서 이 실험에서는 표면을 따라 온도구배가

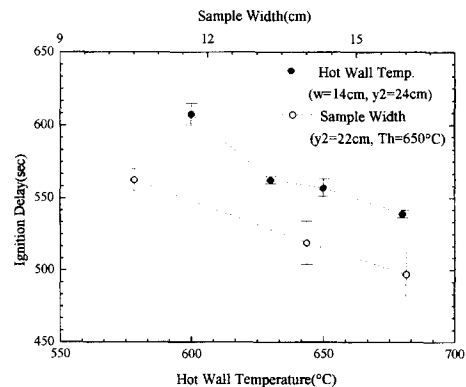


Fig. 6 Ignition delay with respect to hot wall condition (HE=24 cm,  $y_1=0$  cm,  $y_3=3$  cm,  $d=6$  cm).

크게 나타나지 않아 연료면 전체에서 열분해가 고르게 진행될 수 있는 크기인  $w=14$  cm를 주로 사용하였다.

연료면 너비가 커질 수록 점화 지연시간이 짧아지는 것은 복사강도의 변화는 없지만 연료면에 도달하는 총 복사열유속이 연료면 넓이에 비례하여 증가하고 고체연료의 열분해량도 많아지기 때문이다. 연료면 너비가 작아지면 점화가 일어나기 힘들어지고 역시 어떤 너비 이하에서는 점화가 일어나지 않는다. 그러나 복사강도가 크면 조사 면적이 좁더라도 점화가 일어난다.<sup>(2)</sup>

다른 조건들이 일정할 때 장애물의 부착 위치에 따른 점화 지연시간 변화는 Fig. 7에서 볼 수 있는 것처럼 장애물이 높은 위치에 부착되어 있을 때 점화가 더 잘 일어나고 어느 위치 이하가 되면 점화가 일어나지 않는다. 이것은 장애물의 부착 위치가 낮을 수록 장애물에 의한 복사열전달의 방해가 커지기 때문이다. 장애물의 부착 위치가 연료면 하단부분으로 내려가면 연료면 시작위치( $y_1$ )가 크고 장애물이 없는 경우와 같다고 할 수 있다. 장애물이 없는 경우에는 실험에 사용한 조건들에서는 점화가 일어나지 않기 때문에 장애물이 연료면 하단에 부착되어 있을 때도 역시 점화가 일어나지 않을 것이다.

장애물의 높이는 장애물이 부착된 위치 못지않게 유동장과 복사열전달에 중요한 영향을 미치므로 점화 특성도 변하게 된다. 이 실험의 경우에는 고온 벽면과 연료면 사이가 좁기 때문에 ( $d=6-8$  cm) 장애물 높이에 따라 유동장 특성이 크게 변하게 된다. Hung and Shiau<sup>(4)</sup>에 의하면 고온 벽면의 온도

가 아주 높지 않을 때 장애물이 없는 경우에는 경계층 영역이 얇기 때문에  $d=6$  cm 이상이면 완전 격리된 평판이라 가정할 수 있다. 그러나 고온 벽면의 온도와 장애물의 높이가 높아질 수록 장애물 주위의 유동때문에 대류열전달과 전도열전달도 점화에 큰 영향을 미치게 된다.

Fig. 7에서 알 수 있는 것처럼 장애물의 높이가 높을 수록 점화 지연시간은 짧아지는데 이것은 장애물의 높이가 높을 수록 유동을 방해하는 효과가 커지고 따라서 열분해된 기체의 체류시간이 길어져서 점화를 일으킬 가능성이 더 커지기 때문이다. 장애물의 높이가 아주 높아지면 고온 벽면의 자연 대류 경계층과 장애물이 있는 연료면 주위의 유동이 혼합되어 복사에 의한 영향 보다 대류, 전도에 의한 영향이 더 지배적인 경우가 되어 고온 벽면에서 전도와 대류열전달에 의해 점화가 일어난다.

장애물 위쪽에 있는 연료면에도 복사열유속이 존재하므로 열분해가 진행되지만 유동의 후류이기 때문에 점화 현상에 직접적인 영향을 주지 못한다. 점화 현상에 직접적인 영향을 주는 장애물 아래쪽에 위치한 연료면에 대해서 연료면 전체에도 도달하는 총 복사열유속은 고온 벽면과 그 연료면 사이의 형상계수에 비례하게 될 것이다. 이때의 형상계수는 3차원 상에 평행하게 존재하는 임의의 두 사각 평판 사이의 형상계수에서 구할 수 있다. 따라서 장애물 아래쪽에 있는 연료면의 넓이 뿐만 아니라 그 위치도 중요하다. 복사열유속은 형상계수 뿐만 아니라 고온 벽면과 연료면의 온도에도 관계가 있다. 이들을 고려한 복사열유속 값이 클 수록 점화 지연시간이 짧아진다.

대부분의 실험의 경우에 대해 연료면의 초기온도는 대기온도이고 한 경우에 대해서만 연료면의 초기온도를 높게 하였는데 이 때 점화 지연시간이 짧아진다. 실내는 계절에 따른 온도 변화가 그리 크지 않지만 실외는 온도 변화가 심하므로 주변 온도도 점화에 큰 영향을 미치는 변수가 된다.

점화를 지배하는 변수들의 영향을 보기 위해 점화 가능 영역을 표시하였다. 실험의 경우가 많지 않기 때문에 자세하지는 않지만 대략적으로 그 영역을 예상할 수 있다. Fig. 8에 나타낸 장애물 높이와 장애물 부착 위치에 대한 점화지도(ignition map)에서 장애물이 수직벽면의 높은 위치에 있고 그 높이도 높으면 점화가 일어나는 영역에 포함됨을 알 수 있다. 고온 벽면 온도와 장애물 위치에

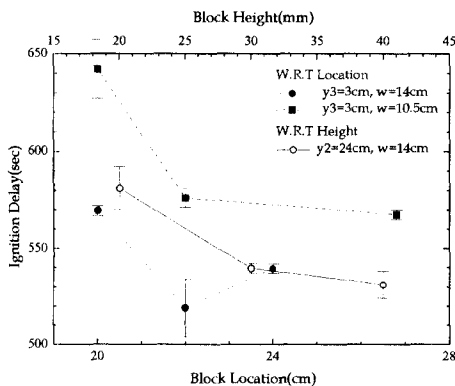


Fig. 7 Ignition delay with respect to block height (HE=24 cm,  $y_1=0$  cm,  $d=6$  cm,  $T_h=650^\circ\text{C}$ ).

대한 점화지도에서는 고온 벽면의 온도가 높으면 점화가 일어나는 영역에 포함된다. 또 고온 벽면 온도와 장애물 높이에 대한 점화지도에서도 역시 고온 벽면의 온도가 높으면 점화가 일어나는 영역에 포함됨을 알 수 있다.<sup>(11)</sup>

Fig. 9와 Fig. 10에서 볼 수 있는 것과 같이 점화 위치는 수직벽면에서 장애물의 부착 위치와 장애물의 높이에 따라 달라진다. 여기에서 고온 벽면은 왼쪽에 있고 장애물이 부착된 고체연료면은 오른쪽

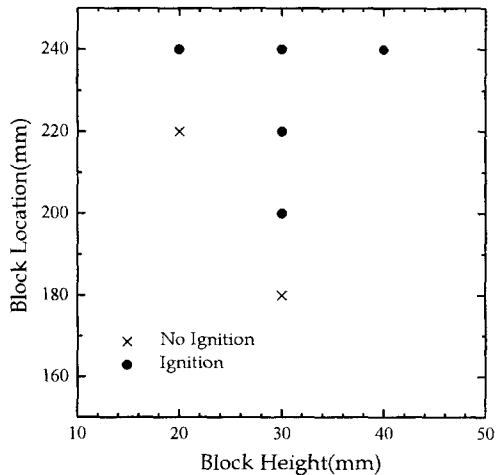


Fig. 8 Ignition map between block height and block location (HE=24 cm, w=14 cm, d=6 cm, Th=650°C).

에 있다. 고온 벽면은 온도 상승으로 약간의 변형이 생겼지만 수직 벽면으로 가정할 수 있다. 점화 위치는 모두 장애물 아래쪽 모서리 부근이기 때문에 유속이 빨라 연료면으로 화염이 전파하지 못하고 유동에 휩쓸려 곧장 소화된다. 이것은 화염전파 속도보다 유동속도가 빠르기 때문인데 안정적인 연소가 진행되기 위해서는 유동의 속도를 느리게 하여 체류시간을 더 길게 해주어야 한다. 같은 위치에 존재하는 장애물의 높이 변화에 따른 점화 위치는 거의 비슷하며 장애물의 높이가 매우 높아 고온 벽면과의 간격이 작아지면 고온 벽면에서 점화가 일어나게 된다.

연료면의 초기온도가 높을 때 점화는 장애물과는 상관없이 복사열유속이 가장 큰 고온 벽면의 중간 높이의 유동장에서 일어나며 점화 후 연료면으로 화염이 전파하여 연료면에서 안정된 화염을 형성하게 된다. 이 경우는 초기온도가 낮을 때보다 열분해가 더 빨리 진행되어 많은 양의 연료가 유동장에 있기 때문에 장애물에 의한 유동 방해가 있기 전에 점화가 일어난 경우에 해당한다. 수직연료면에 대해 복사강도가 강하거나 이 경우처럼 점화를 일으키기에 유리한 조건이면 장애물이 없어도 점화가 일어날 수 있지만 낮은 복사열유속일 때는 장애물이 없으면 점화가 일어나지 않는다. 그러나 장애물이 존재하면 유동 방해로 인한 체류시간 증가로 점화가 일어날 수 있다는 사실을 알 수 있다.

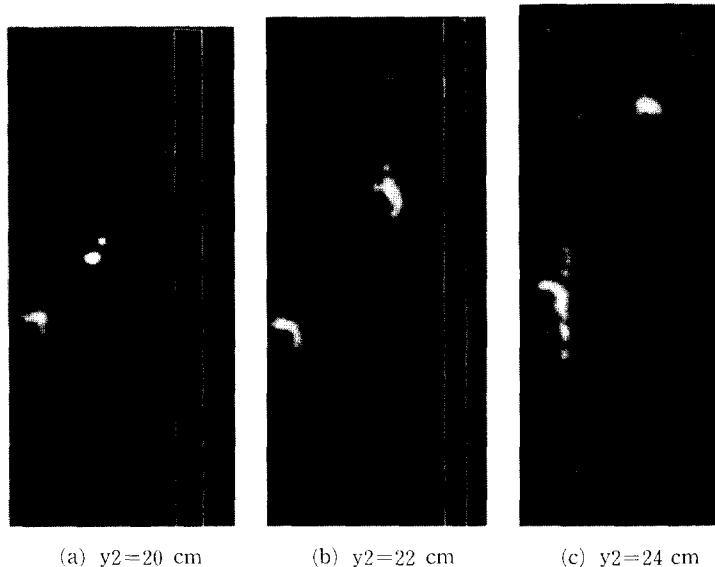


Fig. 9 Ignition point of the vertical solid fuel plate with respect to block location.

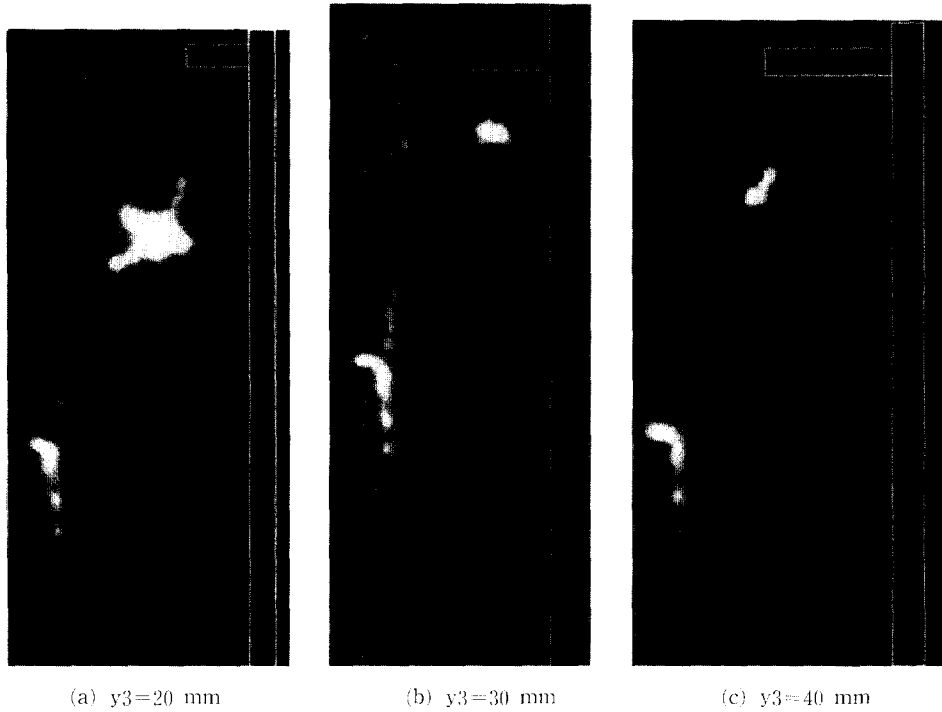


Fig. 10 Ignition point of the vertical solid fuel plate with respect to block height.

실제 자연 발화로 인한 점화가 일어났다는 것은 발화 후 안정된 화염이 형성되었을 때이다. 화염이 형성되기 위해서는 화염이 형성되지 않는 점화를 위한 열유속보다 더 큰 열유속이 필요하다. 안정된 화염을 형성하기 위해서는 점화 위치 후류에 연료 기체와 권료면이 존재해야 한다. 이 실험의 경우 점화가 일어나는 곳이 연료면 부근이고 자연대류 유동에 의해 위로 화염이 쏠려가기 때문에 안정된 화염을 형성하기 힘들다.

## 5. 결 론

수직 벽면에서 장애물이 없을 때 복사강도가 낮아서 복사에 의한 점화가 불가능한 경우 장애물이 존재하면 자연대류가 유동장을 방해하여 상승속도를 늦추고 체류시간을 길게하여 점화를 일으킬 수 있다. 그러나 일반적인 고체연료 점화 문제와 같이 복사강도가 너무 약하면 점화가 일어나지 않는다. 불투명한 장애물이 복사에너지가 입사하는 방향을 가로막고 있으면 복사열전달을 방해하여 점화에 방해가 되지만 이 효과가 상대적으로 적은 경우에는 장애물은 점화를 일으키는데 도움을 준다.

수직 벽면에 장애물이 있을 때는 점화에 관계하는 영역, 즉 장애물 아래쪽에 있는 연료면으로 입사한 복사에너지 양이 많을 수록 점화가 잘 일어난다. 이는 고온 벽면의 경계조건이 같을 때 장애물 아래쪽에 있는 연료면의 넓이가 넓은 경우, 즉 연료면의 너비가 넓고 장애물의 부착 위치가 높거나 형상계수가 큰 경우이다. 기하학적 형상이 같은 경우 고온 벽면의 온도가 높으면 점화가 더 잘 일어난다. 고온 벽면의 경계조건과 형상계수 값이 같을 때, 즉 입사하는 복사에너지 양이 같을 때는 장애물의 높이가 높을 수록 점화가 더 잘 일어난다. 연료면에 도달하는 복사열유속의 양과 점화 지연시간은 반비례하여 복사열유속 값이 클 수록 점화 지연시간은 짧아진다. 다른 조건들이 같고 연료면의 초기온도가 높을 때 점화가 더 잘 일어난다.

고체 연료면으로 입사한 복사에너지는 초기에는 고체 연료면의 온도를 올리는데 사용되고 시간이 지남에 따라 고체 연료의 열분해에 더 많이 사용되며 시간이 많이 흘러 준평형 상태에 도달하면 대부분의 에너지가 열분해에 사용되기 때문에 온도가 거의 일정하게 유지된다. 자연대류에 의한 효과는 시간이 지남에 따라 커지지만 열분해가 활발해지면



그 영향이 줄어든다.

수직 연료면에 장애물이 있는 경우 온도 분포는 시간에 관계없이 복사열유속의 분포와 비슷한 경향을 나타낸다. 따라서 열분해에 의한 온도 상승 지연 효과가 자연대류 열전달에 의한 온도 상승 효과와 비슷한 수준이라고 볼 수 있다.

### 참고문헌

- (1) Kashiwagi, T. 1979, "Experimental Observation of Radiative Ignition Mechanisms," *Combustion and Flame* 34, pp. 231~244
- (2) Kashiwagi, T. 1979, "Effects of Attenuation of Radiation on Surface Temperature for Radiative Ignition," *Combust. Sci. Tech.* 20, pp. 225~234
- (3) Kashiwagi, T. 1982, "Effects of Sample Orientation on Radiative Ignition," *Combustion and Flame* 44, pp. 223~245
- (4) Hung, Y. H. and Shiau, W. M., 1988, "Local Steady-State Natural Convection Heat Transfer in Vertical Parallel Plates with a Two-Dimensional Rectangular Rib," *Int. J. Heat Mass Transfer* 31, pp. 1279~1288
- (5) Shakerin, S., Bohn, M. and Loehrke, R. I., 1988, "Natural Convection in an Enclosure with Discrete Roughness Elements on a Vertical Heated Wall," *Int. J. Heat Mass Transfer* 31, pp. 1423~1430
- (6) Abu-Mulaweh, H. I., Armaly, B. F., and Chen, T. S., 1996, "Measurements in Buoyancy-Opposing Laminar Flow Over a Vertical Forward-Facing Step," *Int. J. Heat Mass Transfer* 39, pp. 1805~1813
- (7) Park, S. H. and Tien, C. L., 1990, "Radiation Induced Ignition of Solid Fuels," *Int. J. Heat Mass Transfer* 33, No. 7, pp. 1511~1520
- (8) Han, C. Y. and Baek, S. W., 1995, "Radiative Ignition of Volatile Gases on a Vertical Fuel Plate," *Combust. Sci. Tech.* 109, pp. 309~325
- (9) Baek, S. W., Kim, T. Y., and Kaplan, C. R., 1997, "Ignition Phenomenon of Solid Fuel in a Confined Rectangular Enclosure," *Int. J. Heat Mass Transfer* 40, pp. 89~99
- (10) 김영관, 백승욱, 1996, "밀폐공간 내 복사에 의한 고체연료 점화의 실험적 연구," 대한기계학회지.
- (11) 김명효, 1997, "열복사에 의한 고체연료 점화 연구," 석사학위논문, 한국과학기술원, 대전