

〈논 문〉

밀폐공간내 복사에 의한 고체연료 점화의 실험적 연구

김영관* · 백승욱**

(1996년 2월 24일 접수)

Experimental Study of Solid Fuel Ignition in a Confined Enclosure

Young-Kwan Kim and Seung-Wook Baek

Key Words : Gas Phase Ignition(기체상 점화), Ignition Delay(점화지연), Ignition Point(점화점), PMMA Surface Temperature(PMMA 표면온도), Buoyancy Effect(부력효과), Mixing-Controlled Ignition(혼합 점화제어기구), Flame Propagation(화염전파)

Abstract

An experimental study has been conducted to explore the behaviors of the radiative ignition of polymethylmetacrylate (PMMA) in a confined enclosure such as the ignition delay time, PMMA surface temperature, the ignition location and the ignition process. In addition, the effects of hot wall orientation on the ignition delay and PMMA surface temperature were studied. When the hot wall is located at the bottom, ignition delay time is the shortest. Ignition surface temperature becomes the lowest for the hot top wall case. These are due to buoyancy effect. Since the radiative heat flux of hot wall is rather lower than laser source, the ignition is considered to be controlled by the mixing process. Therefore, the ignition location, where appropriate mixture of fuel and oxygen exists, occurs near the hot wall. The flame propagates along the hot wall where there exists sufficient oxygen.

1. 서 론

산업화가 되어감에 따라 실내의 내장재로 플라스틱 재료를 많이 사용하게 되었다. 플라스틱재는 가연성 재료로서 고온의 노출이나 급작스런 가열에 의해 가연성 물질의 열분해(pyrolysis)와 이에 따른 예기치 못한 자연발화(autoignition)로 인하여 엄청난 경제적 손실과 인명피해를 몰고 오는 화재 사고의 주요원인이 되고 있다. 특히 일반가정 및 대형 빌딩 내부장식재 등은 가연성 플라스틱이나 유기물인 목재를 많이 사용하기 때문에 화재 예방 측

면에서 밀폐공간내의 연소현상해석과 이에 대한 고찰과 검증이 필수적이라 하겠다. 이러한 현상에 대한 지금까지의 연구는 크게 두 가지 줄기로 파악할 수 있다. 하나는 고체연료 점화의 메커니즘에 관한 연구이고 다른 하나는 밀폐공간내의 복사를 수반한 자연대류 현상에 관한 연구이다.

고체연료의 열분해와 점화에 관한 연구는 열분해 특성의 이해 및 수식화, 이에 따른 점화가능성(ignitability)의 예측, 점화기구의 해석 등으로 수행되어 왔다.

Simms⁽¹⁾과 Martin⁽²⁾은 고체상 점화(solid phase ignition) 모델을 제시하였고, Alvares and Martin⁽³⁾과 Ohlemiller and Summerfield⁽⁴⁾은 기체상 점화(gas phase ignition) 모델을 제시하였다. 그 후 여

*삼성항공주식회사 항공우주연구소

**회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

러 사람⁽⁶⁻⁸⁾이 기체장과 고체장의 현상을 접목하여 일반적인 복사점화의 이론적 분석을 행하였다. 한편, 실험적 연구는 Kashiwagi⁽⁸⁻¹⁰⁾와 Mutoh *et al.*⁽¹¹⁾에 의해서 행하여져 왔는데, Kashiwagi는 실험 결과를 통해 복사열유속이 증가함에 따라 점화지연 시간이 짧아진다는 것과 열분해 생성물에 의해 고체 표면에서 입복사(irradiation)의 감소가 이루어진다는 것을 보여주었다. 또한 Kashiwagi,⁽¹⁰⁾ Mutoh *et al.*⁽¹¹⁾ 등은 고체연료면의 위치, 즉 수직면과 수평면일 때의 점화지연 차이를 측정하여 물리적인 근거를 제시하였다.

최근에 와서 Park and Tien⁽¹²⁾은 고체내부와 기체장의 복사열전달을 모두 고려하여 수직연료면의 열분해와 이에 따른 점화현상을 연구하였으며, Kim⁽¹³⁾은 밀폐공간내의 복사에 의한 고체연료 점화의 이론적 연구를 통하여 점화의 지배기구를 규명하려는 시도를 처음으로 연구하였다.

한편, 밀폐된 사각공간내의 자연대류는 Rayleigh수(Ra)와 Prandtl수(Pr)의 변화에 따라 유동특성이 매우 다양하여 많은 실험적 연구가 수행되었으며 컴퓨터 용량의 증가에 힘입어 80년도에 들어서는 수치해석적 연구도 많이 발표되었다. Patterson and Imberger⁽¹⁴⁾는 처음으로 비정상상태 경계조건에 대한 고려를 한 해석을 하였으며, Bratis and Novonty⁽¹⁵⁾는 복사열전달을 고려한 밀폐공간내의 자연대류현상에 대한 실험적 연구를 하였고, Larson and Viskanta⁽¹⁶⁾는 대류와 복사가 혼합된 밀폐공간내의 과도 흐름을 조사한 결과, 고온인 경우 복사는 밀폐공간내의 열전달을 지배하고 대류흐름 형상에 상당히 영향을 준다는 것을 보여주었다.

밀폐공간내에 비정상상태의 특이유동 존재는 열전달 및 물질전달 특성을 지배하므로 본 연구에 있어서 매우 중요한 요소임은 자명하다. 따라서 열원인 고온벽은 매우 높은 온도로 유지되기 때문에 기존의 낮은 온도 연구와는 달리 표면복사에 의한 가열이 유동 특성을 완전히 바꾸어 놓으며 매우 복잡한 유동을 유발하여 가연성 기체와 산화제의 혼합이 촉진되리라고 예측할 수 있다.

기존의 고체연료점화 실험 및 계산이 개방상태의 문제를 다룬 반면 본 연구에서는 사각형 밀폐공간내의 연료면의 가열, 온도상승, 점화 등을 살펴봄으로써 실내에서 화재가 발생하는 것을 모사하고 화재예방 차원의 자료를 제공하고자 하였다.

실험은 고온벽의 온도를 실험변수로 하여 밀폐공간내의 발화지점, 점화지연시간, 그리고 내부벽의 시간에 따른 온도 변화 등을 측정하였다. 또한 고온벽의 위치에 따라 부력에 의해 점화현상이 어떻게 달라지는지도 비디오 카메라 촬영을 통해 파악하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 해석하고자 하는 현상적 모델을 Fig. 1에 도시하였다. 복사열이 급작스럽게 고체연료면에 주어지면 고온벽에 인접한 먼 연료면의 표면온도는 올라가고 일정온도 이상이 되면 열분해를 시작하여 가연성 기체연료를 발산한다. 이 연료는 대류와 확산에 의해 이미 발달되어 있거나 발달 중인 유동장내에서 산화제인 공기와 섞이게 된다. 이런 과정 속에서 산화제와 연료의 혼합이 당량비에 맞게 이루어져 있고 고온 조건을 만족하는 곳에서 국부적인 점화가 발생한다.

2.1 실험장치

밀폐공간내 복사에 의한 점화를 실험 측정하기 위하여 구성된 실험장치는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 실험 대상이 되는 밀폐공간, 경계조건을 조절해 주는 온도 조절기, 데이터 처리장치 및 화상처

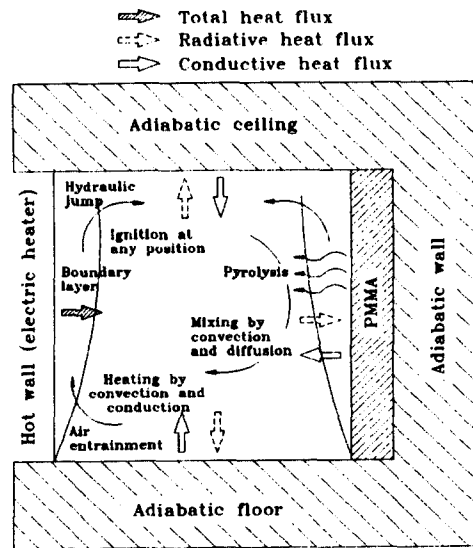


Fig. 1 Schematic representation of physical phenomena [Kim⁽¹³⁾]

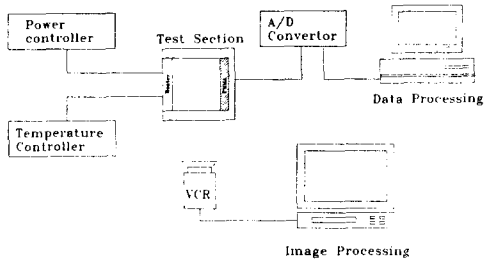


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

리장치로 구성되어 있다.

밀폐공간의 외벽은 가로×세로×폭이 18.5×20×25cm로 제작된 1.2mm 두께의 스테인리스 강판으로 외벽을 구성하였다. 이 치수는 Kim⁽¹³⁾의 이론 해석조건 10×10cm과 동일한 상태를 주기 위해서 정한 값이다.

고온벽을 제외한 외벽인 천정, 바닥, 그리고 PMMA벽 뒤쪽에 사용된 단열재는 두께 5cm의 초고온 내화단열재를 사용하였고, 고체연료는 두께 0.8cm의 PMMA (polymethyl methacrylate)를 사용하였다.

고온벽은 전기히터 (electric heater)를 사용하여 실험조건인 급작스런 고온 노출을 주기 위해 충분히 가열된 다음 깊이 방향(y방향)으로 미끄러져 들어가도록 설계하였다.

내부공간의 모습을 관찰하기 위해서는 고온에서 견딜 수 있는 창(window)이 필요하여 깊이 방향(y)의 한쪽면을 두께 1/4인치인 석영판으로 하여 밀폐공간 내부에서 일어나는 현상을 비디오로 촬영할 수 있도록 하였다.

온도 조절은 고온벽 중앙 가운데(y방향으로 10cm, z방향으로 5cm), 연료면은 y방향으로 10cm인 곳에서 z방향의 중심에서 위, 아래로 2.2cm의 등간격 5군데를 측정점으로 하였고, 고온벽 인접면은 마찬가지로 y방향으로 10cm인 곳에서 고온벽으로부터 1.2cm 떨어진 위치로부터 2.2cm의 등간격 5군데의 측정점을 잡았다. (Fig. 3)

실험조건의 변수로서 고온벽 온도를 일정하게 유지하는 것이 중요하다. 일정한 벽면온도를 유지하기 위해서 디지털 온도조절기와 전력조정기를 이용하여 온도 조절 장치를 구성하였다. 점화현상의 가시화에 사용되는 화상처리장치로는 초당 30장을 찍을 수 있는 비디오 카메라를 이용하였고, 녹화된 이미지는 이미지 처리 소프트웨어를 이용하여 편집

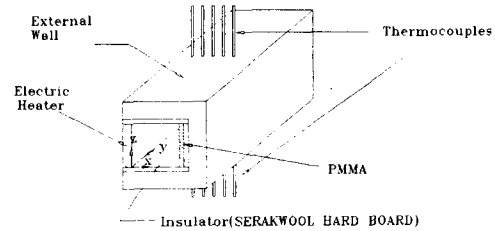


Fig. 3 Schematic diagram of the enclosure arrangement

이 용이한 파일 형태로 저장하였다.

2.2 실험 방법

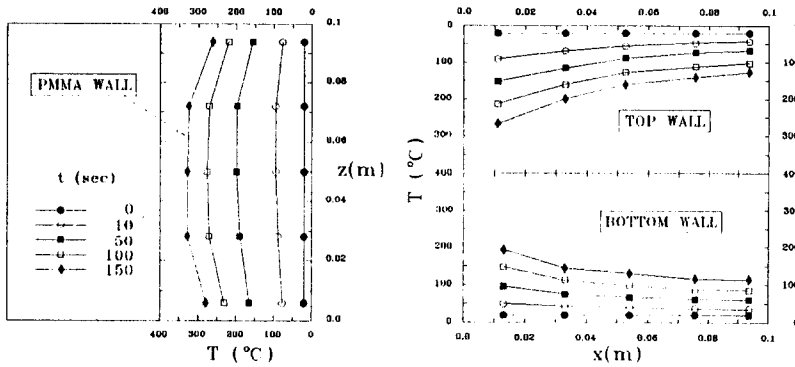
점화위치와 점화지연의 측정을 위해 먼저 PMMA(10×24cm)를 고체연료가 놓이게 될 벽에 설치한다. 한쪽 깊이 방향(y방향)은 단열재를 다른 한쪽은 석영판(Quartz Plate)으로 막아 내부 형상을 볼 수 있게 하고 각 면에 열전대를 설치한다. 그 다음 온도조절기의 설정치를 지정한 후 전원을 공급하여 외부 먼 곳에 위치한 고온벽을 가열한다. 이때 고온벽 온도가 설정치에 맞게 정상상태에 이르렀을 때 고온벽을 이동시켜 밀폐공간 안으로 측면에서 떨어 놓으면서 비디오 카메라, A/D 변환기를 작동시킨다.

점화 과정을 비디오 카메라로 포착한 후 VCR을 이용하여 모니터에서 재생한다. 모니터에서 점화의 과정을 1/30 초씩의 정지 화면으로 분석하여 점화의 위치, 점화지연 시간을 측정하고 비디오 테이프에 녹화된 화상을 발화 단계 과정에 따라 정지한 후 화상처리 장치를 통해 아날로그 이미지를 디지털 이미지로 받아 저장한다. A/D 변환기를 통해 기록된 각 면의 온도 분포를 시간-온도의 함수로 정리한다. 부력에 의한 자연대류가 점화에 어떤 영향을 미치는지 파악하기 위해 고온벽과 PMMA벽의 위치를 바꾸어 가며 똑같은 실험을 반복하였다(① 고온벽이 천정면, PMMA가 바닥면 ② 고온벽이 바닥면, PMMA가 천정면).

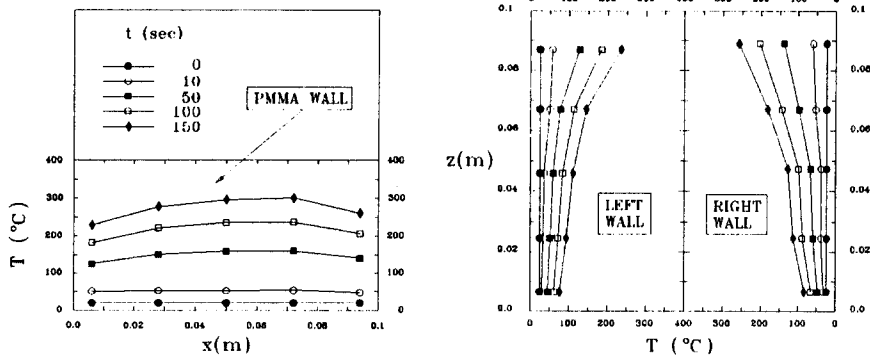
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 벽면의 온도분포

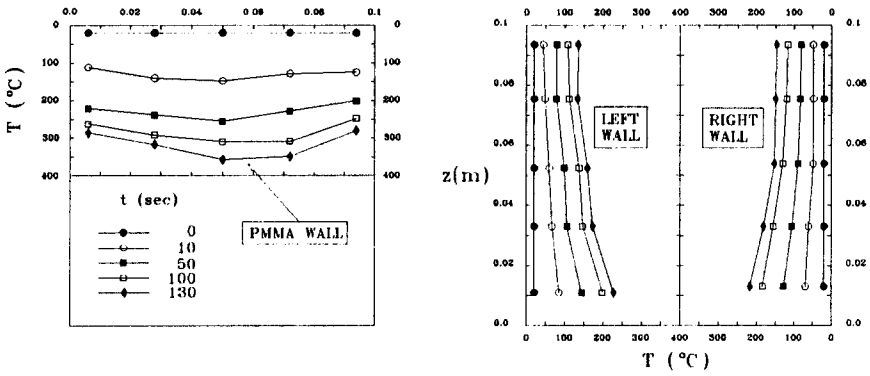
Fig. 4는 고온벽 온도(T_h)가 720°C일 때 실험 결과로, Fig. 4(a)는 고온벽이 좌측이고 우측은 PMMA벽일 때 시간에 따른 벽면온도의 변화를 그



(a) Left(Hot wall) and right(PMMA)



(b) Top(Hot wall) and bottom(PMMA)



(c) Bottom(Hot wall) and top(PMMA)

Fig. 4 Transient plot for temperature of PMMA and adiabatic wall(Hot wall temp.=720°C)

린 것이고, Fig. 4(b)는 고온벽이 천정면일 때, Fig. 4(c)는 고온벽이 바닥면일 때의 각 벽면의 온도변화를 나타낸 그림이다.

PMMA벽의 온도분포를 보면 가운데 부분의 온도가 가장 높게 나온다. 이것은 형상계수(view factor)가 중심부에서 가장 높게 나오는 복사이론

과 잘 일치한다. 고온벽 인접면의 온도분포는 고온벽에서 멀어지면서 내려감을 알 수 있다.

Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)를 비교하면 거리에 따른 온도의 감소율은 고온벽이 천정면 조건일 때 급격히 증가한다. 이것은 고온벽이 바닥면일 경우는 고온벽 인접한 부근에서 가열되어 상승한 고온 기체

들이 천정에 모여 밖으로 퍼지면서 벽면을 가열하고 상승하면서도 벽면으로 열을 전달하기 때문에 고온벽에서 멀어져도 급격한 감소가 이루어지지 않는다. 하지만 고온벽이 천정면인 경우는 복사에 의한 가열이 주가 되고 가열 방향과 반대로 부력이 작용하기 때문에 고온벽에서 멀어질수록 온도가 급격히 떨어진다.

Fig. 4(a)에서 천정과 바닥면의 온도가 대칭을 이루지 않고 천정면이 조금 높게 나타난 것도 마찬가지로 고온기체가 벽면을 타고 흐르며 가열하는 현상 때문이다.

3.2 고온벽 온도와 점화지연의 관계

점화지연은 고온벽의 온도 조건을 준 후 초기 화염 발생까지 걸린 시간으로 정의한다.

Fig. 5는 고온열원벽의 초기 온도에 따라 점화지연시간이 어떻게 변해가는지를 나타낸 그림으로 점화지연시간과 초기 고온벽 온도와의 관계를 나타내고 있다. 더욱 높은 고온의 복사열을 받으면 PMMA의 표면온도는 빠르게 상승하여 열분해 조건과 점화 조건에 이르는 것이 가속화되고 점화지연시간이 짧아진다.

그래프를 자세히 살펴보면 600°C 이하에 점화한계(ignition limit)가 존재함을 알 수 있다. 그 이하의 고온벽 조건에서는 고체연료가 복사열에 의해 열변형을 일으켜 수직한 형태를 유지하면서 점화가 일어나는 것이 아니고 바닥으로 녹아 흘러 내린 것에 의한 점화이기 때문에 올바른 실험 결과로 여길 수 없다. 따라서 이러한 상태의 점화를 점화한계로

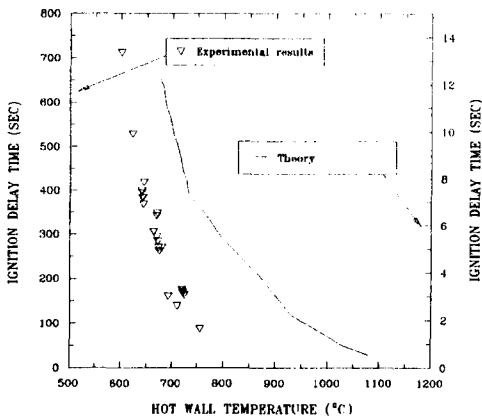


Fig. 5 Variation of ignition delay with hot wall temperature for vertical PMMA in the enclosure

정하였다.

그림에서 실선은 Kim⁽¹³⁾의 이론치이고 ∇ 는 본 연구의 결과이다. 두 데이터는 서로 경향이 비슷하지만 실제 값이 일치하지 않는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 Kim⁽¹³⁾의 이론은 2차원 공간을 층류 모델로 하여 계산인 반면 실험은 3차원 밀폐공간으로 길이 방향의 영향 때문에 측면에서 일어나는 유동장의 효과로 계산한 결과와 일치하지 않는다. 실제 실험에서 이론과는 달리 점화지연이 상당히 길게 나온 것은 고체연료면이 열분해 하면서 내놓은 기체연료가 밀폐공간을 가득 메우는데 걸리는 시간과 점화 조건에 도달하기 위해 기체장의 온도 상승에 걸리는 시간이 지배적으로 작용했기 때문이다. 하지만 점화지연의 결과가 Kim⁽¹³⁾의 연구와 비슷한 경향을 나타내고 있음은 주목할 만하다

Fig. 6은 고온면의 위치에 따른 점화지연을 나타낸 그림이다. 이 그림은 본 논문에서 관심이 있는 수직 고체연료면일 때 얻은 자료를 기준으로 하여 고온벽의 방향을 바꾸어 가며 점화지연을 비교한 것이다. 이 실험을 통하여 밀폐공간내에서 부력에 의한 대류의 영향을 살펴 볼 수 있는 기회가 되었다. 그림을 보면 바닥에 고온면이 위치할 때가 점화지연이 가장 짧고, 수직면과 천정면으로 갈수록 길어지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 고체연료면에 인접한 가열된 기체가 부력에 의해 상승하는 과정에서 연료면의 표면온도를 상승시키는 결과를 가져 온 것으로 파악할 수 있다.

바닥면이 고온벽인 경우는 바닥에서 가열된 고온

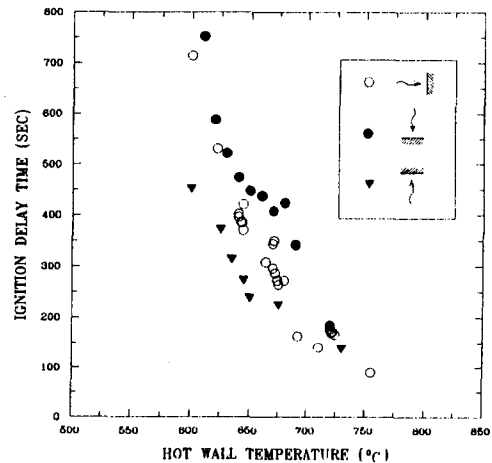


Fig. 6 Comparison of the ignition delays depending on the orientation of heater and PMMA wall

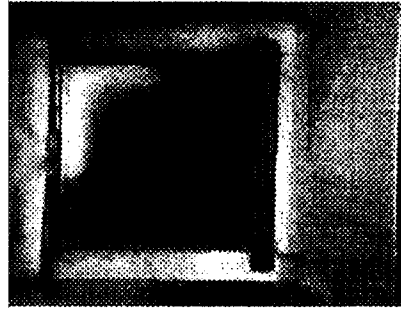
기체가 부력에 의해 상승하여 천정에 정체점이 생기기 때문에 고체연료면은 복사뿐 아니라 대류의 효과에 의해 급속하게 온도 상승이 이루어진다. 반면 천정이 고온벽인 경우는 벽면 주위에 있는 고온기체가 부력에 의해 천정으로 모이기 때문에 바닥인 고체연료면의 온도 상승은 복사에 의해 주로 이루어진다. 따라서 점화 조건에 도달하기 위한 PMMA의 열분해는 고온벽이 바닥면일 때가 빨리 이루어져 점화지연이 짧아진다.

3.3 점화위치 및 화염 전개 과정

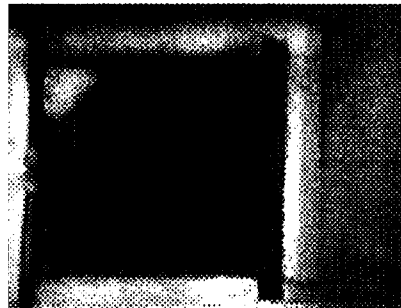
기존의 연구들이 일차원적인 해석을 했기 때문에 점화위치는 고체연료 표면에서 발생하는 것을 나타내었지만 본 실험은 밀폐공간의 실험이므로 고체면 경계층내부로 한정할 수 없고 어느 곳에서나 가능하다. 점화 이론에 의하면 점화가 일어나기 위해서는 충분한 온도, 연료와 공기의 당량비, 그리고 적당한 흐름 속도의 요건을 갖추어야 한다.

Fig. 7은 다양한 초기 점화위치의 모습을 나타낸 것이다. 고온벽의 온도에 관계 없이 고온벽 상부에서 점화가 일어나는 모습은 Kim⁽¹³⁾의 예측과도 일치하는 결과로서 혼합이 점화 제어기구(mixing-controlled ignition)로 작용하기 때문에 일어나는 현상이다. 즉 안정한 유동장 확립 후 발산되는 열분해 기체는 유동장에 의하여 점화가능온도 지역으로 전달되지만 산화제와의 혼합이 부족하여 점화가 지연되고 산화제가 충분히 공급되는 연료전달 선단에서 점화가 발생한다.

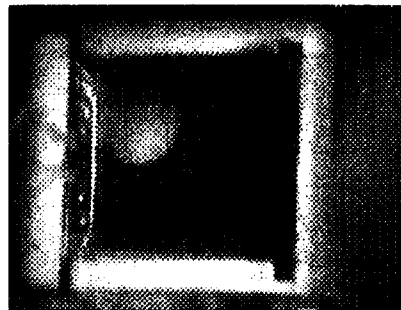
고체연료면에서 열분해되어 나오는 기체연료는 밀폐공간 때문에 시간이 지남에 따라 밖으로 빠져나가지 못하고 내부에 쌓이게 된다. 공간 내부에 점화가 일어나기에 충분한 조건에 질량분율이 되었다더라도 연료면은 점화에 충분한 이르지 못하기 때문에 고온지역인 고온벽 쪽에서 일어날 가능성이 높아진다. 고온벽 상부에서는 가열에 의해 상승하는 기체들이 천정에 부딪치면서 상부 모서리 부근에서 상당히 복잡하게 섞이는 유동이 유발되어 열분해된 연료와 혼합이 촉진되게 된다. 따라서 온도는 고온벽 때문에 이미 충분히 상승되어 있고 복잡한 유동에 의해 혼합(mixing)이 자연스럽게 이루어지고 재순환에 의해 정체 시간(residence time)도 충분하여 점화가 고온벽 상부면에서 발생한다는 것이다. 이렇게 발생한 초기화염은 바닥에 자리 잡고 있는 기체연료들을 따라 고체연료면으로



(a) Hot wall temp.=620°C



(b) Hot wall temp.=630°C



(c) Hot wall temp.=720°C

Fig. 7 Photographs of ignition position according to hot wall temperature

[· left : hot wall, · right : PMMA wall, · top and bottom : adiabatic wall]

매우 빨리 전파되어 나아간다.

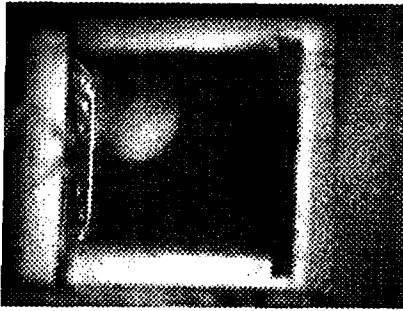
Fig. 8은 화염 발달과정을 시간에 따라 나타낸 사진이다. 밀폐공간내 화염의 생성과 화염면 전파 과정을 단계적으로 설명하면 크게 다음과 같이 여섯 단계로 나누어 볼 수 있다.

- ① 고온벽에서의 초기 점화. [(a)]
- ② 고체연료면으로의 화염전파. [(b)]
- ③ 밀폐공간내 가득 찬 기체 연소. [(c)]
- ④ 고체연료면 층류화염 생성. [(d)]

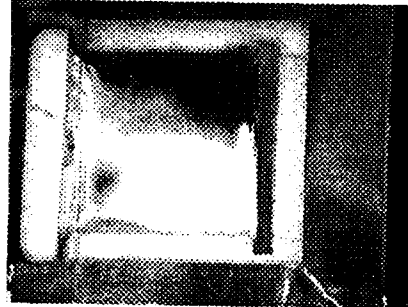
- ⑤ 고온벽으로 화염대 이동. [(e)]
 ⑥ 고온벽의 안정된 화염대 발달. [(f)]
 이다.

Fig. 8에서 초기 화염은 고체연료면으로 화염 전파가 이루어지자마자[(b)] 내부 전체는 화염에 쌓

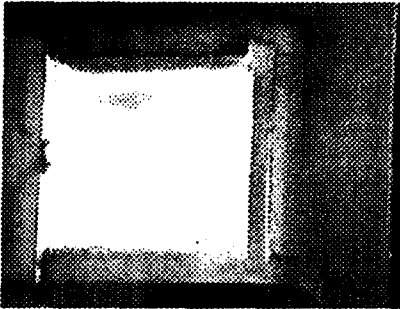
이게 된다[(c)]. 이것은 점화가 일어나기 전까지 고체연료면에서 열분해되어 나왔던 연료들이 밀폐 공간을 가득 메우고 있었기 때문에 이들 기체연료들이 순간적으로 연소 되는 현상이다. 기체 연소후 연료가 부족하게 되자 화염은 과연료(fuel rich) 지



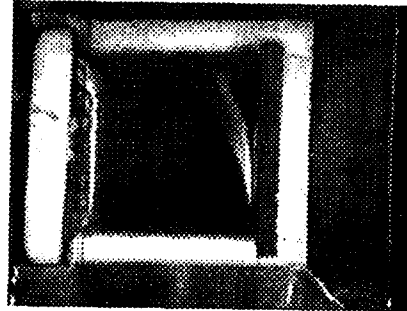
(a) Initial flame occurrence at the upper of the hot wall
 (t=0 sec)



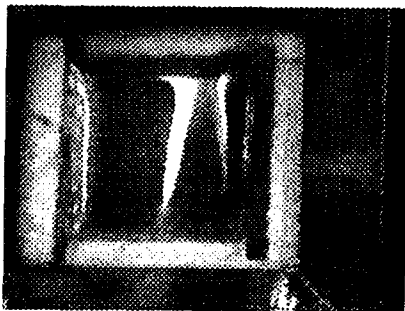
(b) Flame propagation to the PMMA wall
 (t=0.066 sec)



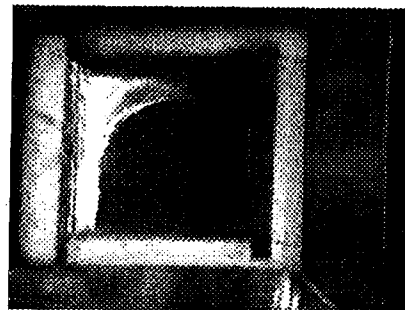
(c) Combustion of gas fuel in the confined room
 (t=0.1 sec)



(d) Laminar flame generation at the PMMA wall
 (t=1.867 sec)



(e) Flame face separation from the PMMA wall
 (t=11.3 sec)



(f) Development of stable flame zone near the hot wall
 (t=22.167 sec)

Fig. 8 Transient photographs of ignition process(hot wall temp.=720°C)
 [· left : hot wall, · right : PMMA wall, · top and bottom : adiabatic wall]

역인 고체연료면쪽에 붙어 증류화염을 형성하면서 어느 정도 안정된 상태에 들어가게 된다[(d)]. 시간이 더 경과하면 화염대는 연료면에서 이탈하여 고온벽이 부착되어 상당히 안정된 화염을 형성하게 된다[(f)]. 이렇게 화염대가 고체연료면에서 떨어져 나와 다시 고온벽으로 이동하는 것은 다음과 같이 설명할 수 있다. 고체연료면에 증류화염이 생성되면서 반응물이 증가하기 때문에 연료면에서는 상당량의 기체연료를 계속해서 밖으로 내놓게 된다. 하지만 연료면에서는 산화제 부족 때문에 화염이 계속해서 존재하지 못하고 산화제가 풍부한 고온벽 쪽으로 이동하게 되는 것이다. 더욱이 고온벽과 석영판 사이의 틈새로 새어 들어가는 공기는 적은 양일지라도 고온벽 쪽으로 화염대를 이끄는 데 많은 영향을 줄 것으로 사료된다.

4. 결 론

화재 방재의 차원에서 밀폐공간내의 열복사에 의한 점화와 화염의 전파에 대한 실험적인 연구를 수행한 것을 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 고온벽의 온도가 증가함에 따라 고체연료면 온도의 상승이 빨라져 점화지연시간이 짧아진다.

(2) 고온벽의 위치에 따라 부력에 의한 대류의 영향이 발생하여 고온벽이 바닥면 조건일 때가 가장 점화지연이 짧게 나타나고 천정면일 때 PMMA 표면온도가 낮게 나타난다.

(3) 750°C 이하의 고온벽 조건에서는 밀폐공간내 연료와 산화제의 혼합이 점화제이기구(mixing-controlled ignition)로 작용하는 기체장 점화이다. 이에 따라 수직한 고온벽일 때의 점화위치는 고온벽 상부이고, 고온벽이 천정면일 때는 고온벽 중심에서 점화가 일어난다.

(4) 수직연료면인 경우 점화 후 화염대는 고체연료면에서 분리되어 산화제가 충분한 고온벽 쪽으로 이동해 나아간다.

따라서 밀폐공간내 산화제와 연료의 혼합이 충분히 이루어지지 않게 하는 것이 안전사고 예방에 필수적이다. 그리고 화재 발생시에는 밀폐공간내 산화제의 공급이 충분한 곳이 화염면 이동을 유발하므로 상당히 위험하고 각별한 주의를 기울여야 한다. 본 실험은 작은 크기로 화재사고를 모사한 것이다. 실제의 방처럼 2m가 넘는 실내공간에서의 화재는 본 실험보다 훨씬 복잡하고 열전달 특성도 달라지

리라 생각된다. 특성길이가 변함에 따라 Ra값도 증가하고 Nu계수도 증가되어 훨씬 활발한 열전달과 함께 완전 난류 화염 구조로 되어 더욱 복잡성을 나타낼 것이다. 또한 점화지연시간 등 시간 특성도 달라질 것으로 생각된다. 이런 특성을 파악하기 위해서는 본 실험보다 더 규모를 확장시킨 화재 모사실험이 필요하다고 생각된다.

후 기

이 논문은 1994년도 학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Simms, D. L., 1960, "Ignition of Cellulosic Materials by Radiation," *Combust. Flame*, Vol. 4, pp. 293~300
- (2) Martin, S. B., 1965, "Diffusion-Controlled Ignition of Cellulosic Materials by Intense Radiation Energy," *Tenth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 877~869
- (3) Alvares, N. J. and Martin, S. B., 1971, "Mechanisms of Ignition of Thermally Irradiated Cellulose," *Thirteenth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 905~914
- (4) Ohlemiller, T. J. and Summerfield, M., 1971, "Radiative Ignition of Polymetric Materials in Oxygen/Nitrogen Mixtures," *Thirteenth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1087~1094
- (5) Linan, A. and Williams, F. A., 1971, "Theory of Ignition of a Reactive Solid by a Constant Energy Flux," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 3, pp. 91~98
- (6) Kashiwagi, T., 1974, "A Radiative Ignition Model of a Solid Fuel," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 8, pp. 225~236
- (7) Kindelan, M. and Williams, F. A., 1975, "Theory for Endothermic Gasification of a Solid by a Constant Energy Flux," *Combust. Sci. Technol.*,

- Vol. 10, pp. 1~19
- (8) Kashiwagi, T., 1979, "Experimental Observation of Radiative Ignition Mechanism," *Combust. Flame*, Vol. 34, pp. 231~244
- (9) Kashiwagi, T., 1979, "Effects of Attenuation of Radiation on Surface Temperature for Radiative Ignition," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 20, pp. 225~234
- (10) Kashiwagi, T., 1982, "Effects of Sample Orientation on Radiative Ignition," *Combust. Flame*, Vol. 44, pp. 223~245
- (11) Mutoh, N., Hirano, T. and Akita, K., 1981, "Experimental Study on Radiative Ignition of Polymethylmethacrylate," *Seventeenth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1183~1190
- (12) Park, S. H. and Tien, C. L., 1990, "Radiation Induced Ignition of Solid Fuels," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 33, No 7, pp. 1511~1520
- (13) 김택영, 백승욱, 1993, "밀폐공간내 고체연료의 점화해석," 대한기계학회 1993년 추계학술대회논문집(II), pp. 366~369
- (14) Patterson, J. and Imberger, J., 1980, "Unsteady Natural Convection in a Rectangular Cavity," *J. Fluid Mech.*, Vol. 100, part 1, pp. 65~86
- (15) Bratis, J. C. and Novotny, J. L., 1974, "Radiation-Convection Interaction in the Boundary Layer Regime of an Enclosure," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 17, pp. 23~36
- (16) Larson, D. W. and Viskanta, R., 1976, "Transient Combined Laminar Free Convection and Radiation in a Rectangular Enclosure," *J. Fluid Mech.*, Vol. 78, part 1, pp. 65~85