

## 가연성 천연고분자 분체의 훈소에 관한 연구

### Smouldering Combustion of Combustible Natural Polymer Dust Layer

김 홍\*  
Hong Kim

#### ABSTRACT

This study measured the smouldering temperature of dust layer for various combustible natural polymer material by practical apparatus. The dust layer was either put on the preheated plate of constant temperature, or formed with cylindrical metal sleeve of various diameters and depths at room temperature and then heated up to a pre-determined smouldering temperature. Plots of arrival times versus smouldering temperature were made to compare the smouldering characteristics with kinds of dusts. The natural polymer material was divided into three groups by characteristics of smouldering mechanism. This groups are cellulose group, lipide group and glucose group.

#### 1. 서 론

가연성 분체가 장시간 동안 고온표면에 쌓여있을 경우나 고온 방사열원에 오랫동안 노출되었을 때 분체가 발화하거나 연소되어 화재나 폭발을 일으키는 경우가 많다. 이와같이 가열에 의한 유기질 고분자 분체의 다량의 연기와 유독가스 및 연기를 방출하지만 화염이 형성되지 않은 연소 현상을 훈소(Smouldering) 혹은 무염연소라고도 한다. 가연성 분체층의 훈소현상은 일반적으로 농산물을 가공하는 분체공장이나 농산물보관 창고 등에서 발생되며

다량의 유독가스와 연기의 발생으로 인한 인적, 물적피해가 매우 큰 경향이 있다. 따라서 각종 분체공장의 화재 및 폭발재해 방지를 위하여 가연성분체의 훈연온도를 측정하여 그 결과를 토대로 기계나 기구의 표면온도를 안정치 이하로 유지할 수 있도록 하기 위한 기초자료가 필요하다.

훈소에 대한 최초의 연구는 콜크 분진을 이용한 공기중의 전파속도를 측정한 Palmer<sup>1)</sup>의 연구를 시초로하여, 여러가지의 재료를 이용한 시료의 형상과 위치를 변화시켜 실험을 수행한 예가 있다. 이들의 연구내용을 고찰해보면 분진입경이 작을수록 발화온도가 낮고 분체층의 두께가 클수록 낮아진다고 하였으며, 고온표면에 있어서 분체층의 발화문제를

---

\* 正會員 : 호서대학교 산업안전공학과

열발화 이론에 적용시켜 한계조건에서의 온도와 시료의 두께와의 관계를 구하였다. 최근에는 혼소 중의 유독가스의 발생특성과 목질계 혼소의 자체 소염성, 인공 고분자 재료의 혼소 발생과 전파기구 등에 대한 연구가 발표되었으나 가연성분체층을 취급한 것은 거의 없다.

따라서 본 논문은 실제로 혼연연소가 가장 일반적으로 발생하는 농산물 분체를 이용하여 혼연온도를 측정하고 분체들의 혼소현상을 관찰하여 셀룰로오스계, 지질계, 당질계 등으로 구분하였으며 이들의 혼소메카니즘을 고찰하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 실험장치

혼연연소의 측정장치는 길이 20cm×20cm, 직경이 0.6cm인 알루미늄 원판에 전기저항선을 이용하여 하부를 균일하게 가열하는 형식을 취하였다. 장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었으며 가열판의 온도 제어 및 측정을 위한 CA형 열전대를 가열판 중심으로 부터 4cm에 위치한 곳에 설치하였다.

온도 변화는 온도 기록계에 연속적으로 기록하도록 하였고 일정 온도제어 중의 온도 변화는 PID형 온도조절기(EUROTHERM, Type 211, MK 2)를 이용하여 ±1°C의 범위로 조절하였다. 가열판의 시료와 접하는 표면의 온도분포는 분체시료의 열전

달과 비교하여 매우 크기 때문에 무시하였다. 또한, 가열용 전기저항선은 2종류를 설치하여, 상대적인 저 고온에서의 가열용으로 사용하였다.

### 2.2. 분체 시료

혼연연소를 일으키는 분체는 대부분 농산물이기 때문에 미송을 이용하여 기본적인 실험을 행하였다. 다른 시료와 비교하기 위하여 쌀, 보리, 겨자, 펄프, 콩, 슌, 전지분유, 탈지분유, 밀가루 등도 사용하였다.

### 2.3 측정 방법

가열판 위에서의 시료의 성형은 임의의 두께와 직경을 갖는 성형 다이를 사용하였다. 시료의 두께와 직경은 시료의 혼연온도에 영향을 미치는 중요한 인자이지만, 분체층의 충전밀도는 두께가 아주 작은 경우에만 영향이 있는 것으로 밝혀졌기 때문에 충전밀도에 대한 상세한 실험은 행하지 않았다. 평량한 분체시료는 성형다이 내에 균일하게 배열하고 위로부터 평판으로 눌러서 성형하였다. 성형다이는 후에 제거하였다.

본 연구에서 혼연온도의 정의는 일정한 온도를 유지한 가열판의 시료가 화염없이 연기와 그을음을 내면서 타는 경우의 가열판의 온도를 말한다. 실온으로 승온시켜서 일정온도를 유지시키는 가열방법에서의 시료의 성형은 용이하지만, 일정온도로 가열한 표면에 시료를 성형하는 것은 분체의 종류에

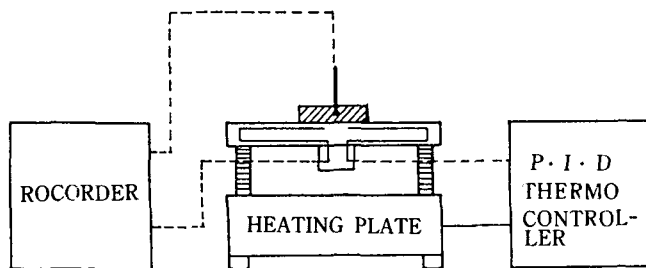


Fig. 1 Schematic diagram of the hot-surface apparatus

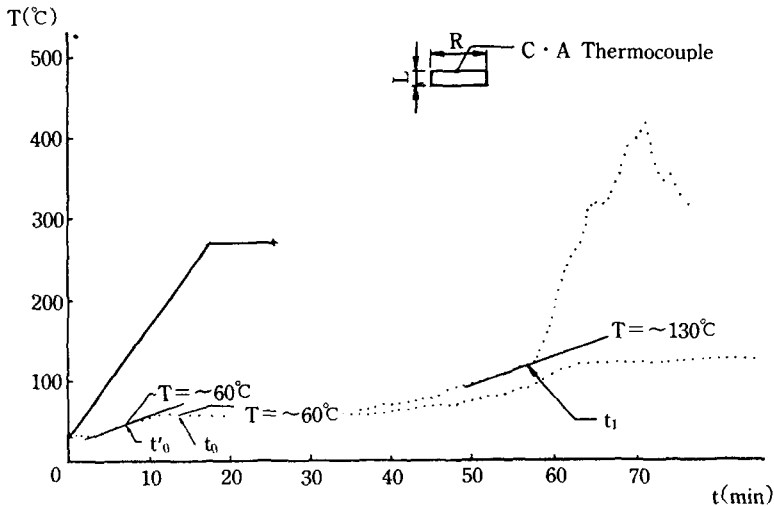
따라서는 상당히 곤란한 경우도 있다. 이 경우 성형한 시료를 가열판 위에 옮기는 방법을 주로 사용하였으며 이때 30초 이내로 재빨리 행하였다. 혼연온도의 최저치를 구하는 경우 최소치 부근에서는 상당한 편차를 나타내므로 5°C 단위로 조절한 온도에 대하여 4회 반복실험을 통하여 혼연연소 현상을 나타내는 최저온도를 구하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 혼연연소과정의 시료층 표면의 온도변화

Fig. 2에 미송 분체 시료층의 냉각측 표면 중심에서 5mm 아래 부분의 온도 변화를 기록하였다. 시료의 직경은 10cm이고 두께는 2cm, 밀도 0.233 g/cm<sup>3</sup>인 것에 대하여 실온으로부터 승온 가열시켜 일정온도를 270°C 및 260°C로 유지시킨 경우의 표면중심의 온도변화를 나타내었다.

설정온도까지의 가열속도는 15°C/min.으로 하였으며 2개의 곡선에서 혼소가 일어난 경우와 그렇지 않은 경우의 구별이 명백하게 나타났다. 즉 시료는 실온으로부터 가열되어 표면온도 약 60°C에서 온도상승이 정지하였다. 이 부분은 시료중의 수분이 기화하는 것이므로 함수율이 큰 분체일수록 길어지고 또 시료의 두께에도 의존한다. 그후 시료는 서서히 승온을 계속하고 경우에 따라서 약간의 분해 가스 및 연기를 방출하지만 이 단계에서의 온도변화로 부터는 이후 발열반응이 진행될지 안될지에 대해 알지 못한다. 그러나 대부분의 경우에 혼소가 일어나는 경우 계속해서 분해가스와 연기가 발생되고 탄소질 잔유 생성물이 표면 중심에 나타나면서 급격한 온도상승이 처음으로 기록되기 때문에 대부분의 분체에서는 혼연소 현상을 탄소질 잔사물의 생성에 의해 외관으로 쉽게 구별할 수 있다. 급격한 온도상승 후에 열전대에 탄소질 잔사물이 용융 접촉하여



A : non-smouldering at T=260°C    B : smouldering combustion at T=270°C  
 C : hat surface of the plate to T=270°C

Fig. 2 Temperature-time records on hot surface of the saw dust layer (L=2cm, R=10cm)

열전도도가 떨어져 온도가 하강되는 경우도 있으나 충분한 산소 공급이 있으면 적열되어 다시 표면 연소를 시작하여 온도 상승을 나타내다가 연소가 완료되면 온도가 하강하게 된다.

훈연연소에 이르지 않는 경우는 분체층의 방열 조건과 가열조건으로 결정되는 측정 표면온도로 일정하게 유지되지만 이 한계 가까이에서는 실제 상당한 발열을 나타낸후 전체적으로 훈연연소에 도달하지 않는 경우에는 다시 온도가 저하되고 어느정도 후에 일정온도에 도달한다. 즉, 훈연 연소 현상을 나타내지 않는 경우일지라도 반응물의 소모가 있는 작은 발열 피크를 나타내며 분체층을 불활성으로 생각해서는 안된다.

일정온도로 가열된 표면의 시료를 성형한 경우 시료의 표면온도변화는 Fig. 3에 나타낸 것처럼 상온으로부터 승온된 경우와 같은 동향을 나타낸다. 시료층내의 온도 분포에 대해서는 나중에 고찰하겠지만, 분체층 내에서의 탄화 또는 연소의 전파속도를 고려하면 측정 위치, 분체층의 크기등에 큰 영향을 받은 것이 예상된다. 그러나 시료의 윗표면은 방열측면에서 볼 때 열흐름의 경계에 위치하므로 분체층의 크기와 관계없이 용이하게 측정할 수 있으므로 훈연온도의 측정에 있어서 전체 시료 표면 중심의 온도를 기록해서 고찰하였다.

3.2. 시료의 크기와 훈연온도의 관계

훈연온도의 측정에 있어서 가장 큰 영향을 미치는 인자는 분체층 내에서의 축열조건과 주위에 대한 방열조건에 영향을 주는 인자라고 생각할 수 있고 그 중 분체층의 성형크기는 직접적인 변수라고 간주할 수 있다. 성형크기는 직경 및 두께의 변수로 변화할 수 있지만 측정상의 형편을 생각하면 상당히 큰 크기에서 다량의 분체를 사용하는 것은 실용적이지 못하다. 따라서 시료의 직경을 6-12cm로 하고 두께를 0.5-3.5cm로 하였을 때 미송에 대한 시료의 두께와 직경과 최저 훈연온도와의 관계를 Fig. 4에

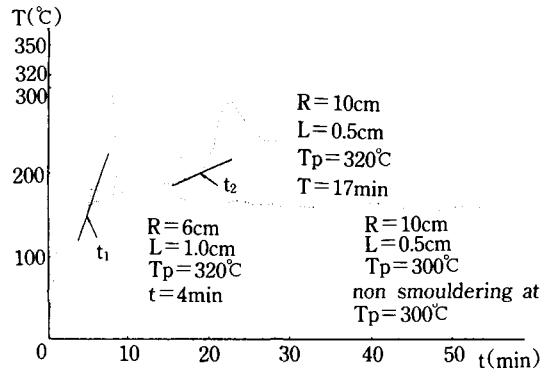


Fig. 3 Smouldering combustion of saw dust layer on preheated plate and difinition of Arrival time.

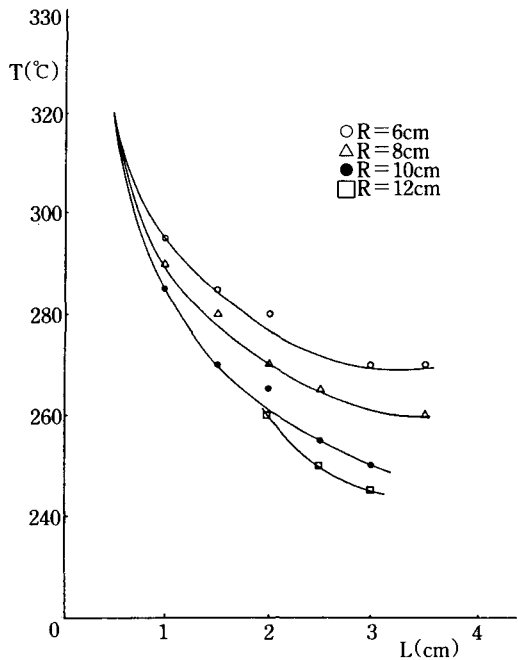


Fig. 4 Smouldering temperature as function of width(L) and diameter (R) for saw dust on hot surface

표시하였다. 이 경우에 두께 5mm에 있는 직경의 영향을 받지 않고 전체 320°C의 최저 혼연온도에 나타내었으며 두께가 두꺼울수록 직경에 의한 온도차가 커지는 현상을 나타내었다.

### 3.3. 혼소 도달 시간과 온도의 표시

미송에 대한 표면 중심에 있어서 온도 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 일반적으로 평판을 일정온도로 유지시켜 측정할 경우에 평판의 온도가 일정온도에 도달한 후 급격한 온도 상승이 시작되기까지의 시간을 취했을 때 시료 표면에서의 혼소현상이 나타났다. 즉 도달 시간이라는 것을 정할 수 있다. Fig. 3에 있어서 이 도달시간 ( $t$ )를  $t=t_1-t_0$ 에 의해 정의하였다. 초기 개시 온도는 Fig. 3에 나타난 것처럼 초기의 온도 상승 곡선의 접선 기울기의 중점 시점으로 하여 ( $t=t_1-t'_0$ ) 시료 및 열전대 등의 설치에 따른 오차를 줄였다. 대부분의 경우 기울기 중점의 온도는 약 45°C 이었다. 이렇게 구한 미송의 혼소 도달 시간은 반드시 명확한 관계를 나타내지 않으므로 반대수 그래프에 혼소도달시간 ( $t$ )와 온도(절대온도  $T_0$ )의 역수관계 즉 아레니우스형 관계식을 나타내었을 때  $\log t$ 와  $(1/T_0)$ 의 관계는 거의 직선을 나타내었다. 이 경우 시료의 두께에 의한 편차는 비교적 적었고 데이터간 직선을 긋는 것이 가능하였다.

### 3.4. 분체의 입도와 도달시간과의 관계

미송의 시료 입도가 100mesh 이하인 것은 거칠고 거의 평판에 가깝다. Fig. 6에 정온법에 의한 혼소도달 시간에 미치는 미송의 입도의 영향을 표시하였다. 입도가 클수록 명확하게 도달시간이 크게 나타났으나 직선의 기울기는 같게 나타났다. 즉 이들의 기울기는 분체의 반응에 관련된 것으로 분체의 입도와 관련없이 일정하게 나타난 것이라고 생각할 수 있다. 또 분체의 수분 함유량에 대해서도 이와 같은 관계를 예측할 수 있다.

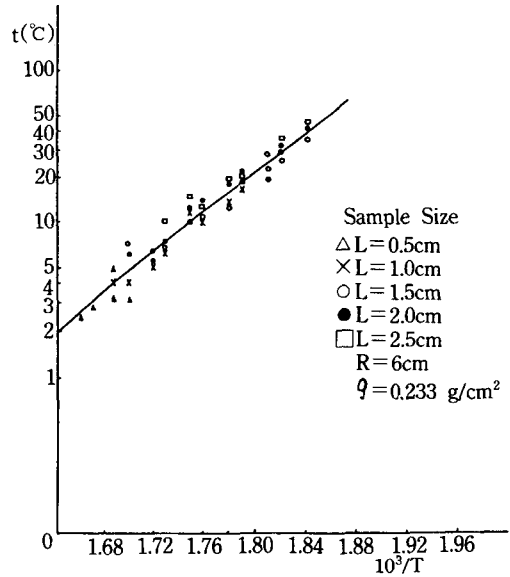


Fig. 5 Semi-logarithmic representation of the results :  $\text{Log}t = \phi(1/T_0)$  for measurement on the preheated plate.

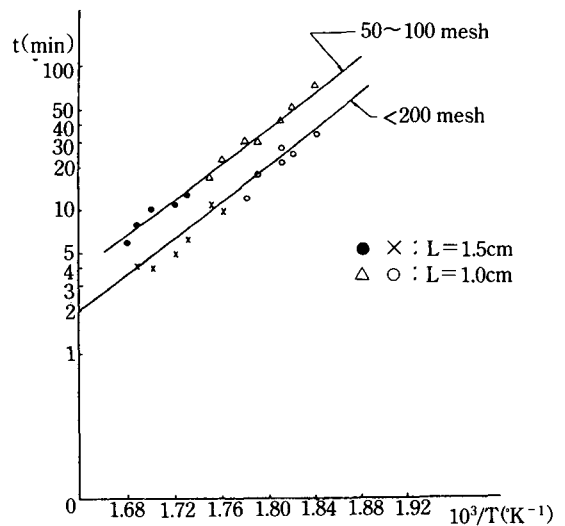


Fig. 6 Effect of particle size on arrival time for saw dust layer. (on the preheated plate  $R=6\text{cm}$ )

3.5. 각종 분체의 혼소 현상

3.5.1. 셀룰로오스계 분체

Table 1에 대표적인 셀룰로오스계 분체를 나타내었으며 이들의 혼연연소 현상을 대표적으로 미송에 대한 사진과 이때의 표면 온도변화를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다.

Table 1. Compositions of cellulose group dusts.

Sample	Cellulose, %	Lignin, %	Ash, %	Lipide, %
Hemlock Spruce	71.3	28.4	0.3	0
Lauan	66.0	33.8	0.2	0
Pulp	100	-	-	0

이들 시료들은 연소 초기에 소량의 분해가스 및 연기가 발생하면서 시료 밑부분이 탄화되기 시작하여 (A) 서서히 윗부분으로 혼소가 진행된다. (B) 맨 윗면의 연소가 바깥 부분에서부터 탄화되기 시작하다가 공기와의 접촉이 좋은 가장자리의 탄화된 부분에서 적열을 동반하는 표면연소가 일어나면서 많은 반응열이 발생하게 되어 시료온도가 급상승하게 된다(C). 표면연소가 활발히 진행됨에 따라

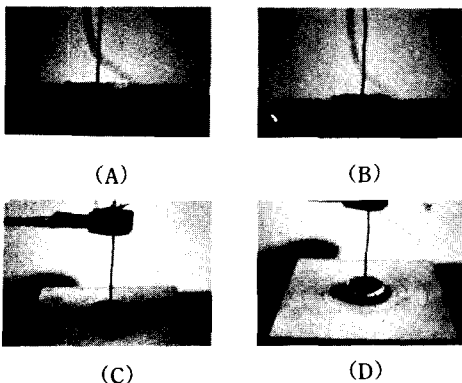


Fig. 7 Photograph of smouldering combustion for saw dust layer on hot surface

시료의 가장자리에 하얀 재(D)가 나타나면서 연소가 종료되어 온도가 하강되고 연소잔류물은 시료의 약 1% 정도인 회분만이 남게된다.

따라서 이들 시료의 혼연온도는 시료표면 중심 온도로 부터 쉽게 구할 수 있었으며 각 시료 대표적인 혼연온도를 직경이 10cm이고 두께가 5mm인 경우를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Smouldering temperatures of cellulose group dusts.

Sample	Particle size	Smou. temp.	Max. temp. of center
Hemlock Spruce	under 200 mesh	320(°C)	445(°C)
Lauan	under 200 mesh	320	460
Pulp	under 200 mesh	380	312

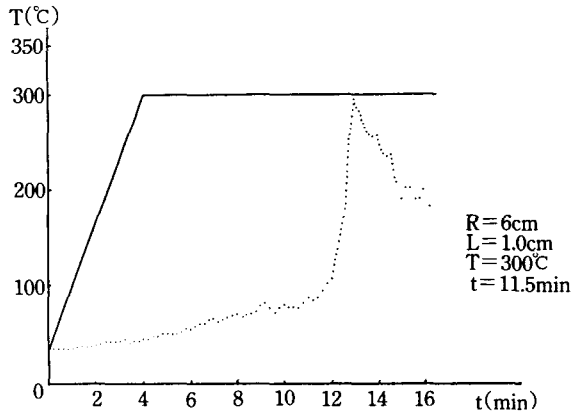


Fig. 8 Temperature-time records on hot surface of saw dust layer.

3.5.2. 지질계 분체

Table 3에 대표적인 지질계의 분체를 나타내었으며 이들의 혼소현상에 대하여 대표적으로 대두를 선택하여 연소사진과 이때의 표면 온도 변화를 Fig. 9와 Fig. 10에 각각 나타내었다.

이들 시료들은 온도가 상승함에 따라 소량의 분해 가스 및 연기를 발생하면서 시료의 밑부분 부터 탄

Table 3. Compositions of lipide dusts.

(cont. of 100g)

Sample	Water, %	Protein, g	Lipide, g	Carbohydrate, g		Ash, g
				Glucose	Cell.	
Soy bean	9.2	41.3	17.6	22.6	3.5	5.8
Whole milk	2.2	26.7	26.8	38.4	0	5.9
Mustard	8.3	33.7	21.6	26.8	4.9	5.6

화되기 시작하였으며(A) 시료의 온도가 계속 상승 되면 시료중의 지방질의 연소 등에 의해 다량의 연기와 함께 연소부분이 윗쪽으로 전파되었다(C) 연소가 계속되면서 시료의 연소된 부분과 미연소 부분의 밀도차에 의해서 시료의 바닥이 뜨고 균열이 일어나기 시작하여 균열된 부분에서의 연소가 다른 부분에서보다 활발히 진행되어 분해 생성물을 형성하는 것을 관찰할 수 있다.

이들 시료들은 분해 생성물을 형성하고 이것을 일정온도의 고온 표면에 장시간 방치시켜도 이른바 탄소질 성분의 표면연소에는 도달하지 못하여 다량의 탄소질 잔사물을 생성하는 특징이 있었다. 이 경우에는 도달시간을 나타내는 온도의 시작이 명

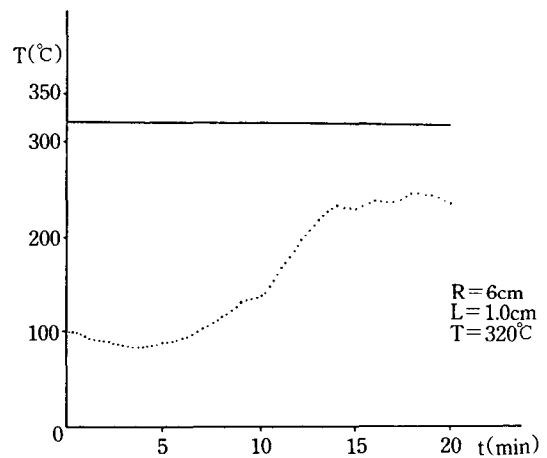


Fig. 10 Temperature—time records on preheated plate of soybean dust layer.

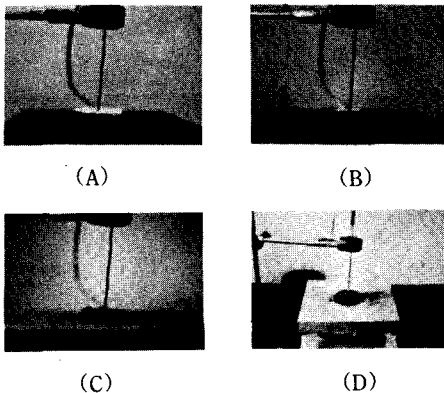


Fig. 9 Photograph of smouldering combustion for soybean layer on hot surface.

Table 4. Smouldering temperatures and residues of lipide group dust

Sample	Particle size	Smou. temp.	Max. temp. of center	Residue
Soy bean	under 200 mesh	250(°C)	205(°C)	43(%)
Whole mili	◇	270	173	53
Mustard	◇	290	163	57

확하지 않고 총체적인 발열량도 작게 나타났다. 온도의 변화는 시료중 표면중심에서 측정하므로 시료의 분해에 동반하는 혼소현상의 전파가 시료의 가장자리로부터 시작되어 중심으로 진행되고 중심의 열전대가 혼소를 일으키는 분체층에 접촉되는

순간에 약간의 온도상승이 기록되었다. 이와 같이 온도변화가 불명확한 경우에는 시료의 외관상의 변화를 관찰한 결과와 종합하여 혼연온도를 구할 수 있었다. 이 경우에도 시료표면의 온도변화와 시료의 외관을 관찰하여 시료의 직경이 10cm이고 두께가 5mm일 때 각시료에 대한 혼연온도와 탄소잔유물의 Table 4에 나타내었다.

### 3.5.3. 당질계 분체

당질이 많이 포함된 시료는 쌀, 보리, 밀가루 등의 곡물과 전분등의 가공 식품 등이며 Table 5에 이들의 성분을 나타내었다. 이들중 대표적으로 옥수수 전분을 선택하여 혼소 사진과 이때의 표면 온도 변화를 Fig. 11과 Fig. 12에 각각 나타내었다.

Table 5. Compositions of glucose dusts.

Sample	Water, %	Protein, g	Lipide, g	Carbohydrate, g		Ash, g
				Glucose	Cell.	
Corn starch	14.9	0.1	0.1	85.0	0	0.1
Potato starch	15.9	0.1	0.1	83.8	0	0.1
Rice	11.7	6.8	1.6	79.6	0.4	0.5
Barley	14.7	10.3	1.9	68.4	2.6	2.1
Wheat powder	13.3	10.4	1.1	74.6	0.2	0.4

이 시료는 흡습성이 강하고 또 당질의 열적 변성이 일어나기 쉬운 시료이므로 혼소현상에 도달하는 건조단계에 분체의 열적 성질의 변화가 커서 이후의

열분해과정에 영향을 미친다고 생각할 수 있다. (B) 발열에 대한 온도상승은 상당히 크지만 다량의 형상이 변하고 이것이 시료 전체에 균열을 형성시키는

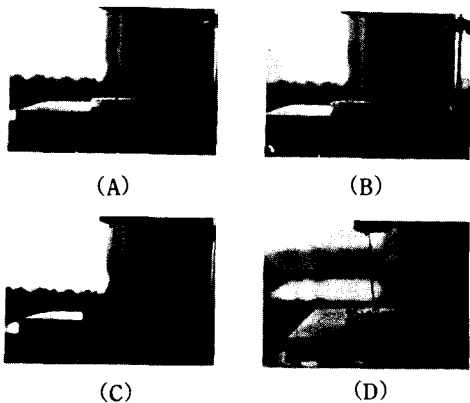


Fig. 11 Photograph of smouldering combustion of corn starch layer on hot surface.

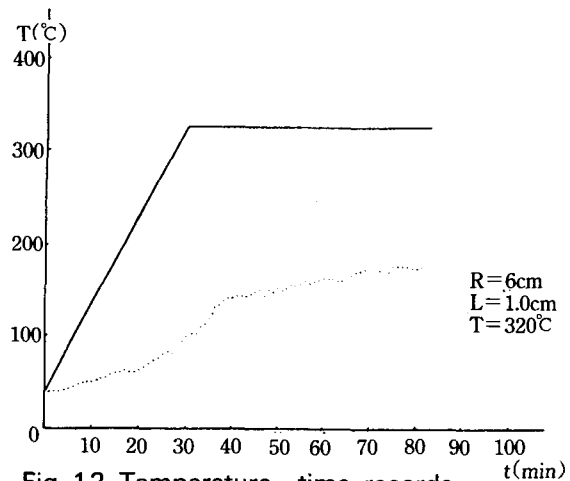


Fig. 12 Temperature—time records on hot surface of corn starch layer.



원인이 된다. (C) 이것은 시료층의 당질이 카라멜화 되면서 열전도와 밀도가 변화되었기 때문으로 사료되며 이 현상은 시료의 두께가 클수록 균열의 발생이 크고 탄화 잔사물의 연소에 영향을 준다.

따라서 시료를 일정온도에서 계속 방치해 두어도 시료의 윗 부분에는 미분해된 부분이 남아 있어 옥수수 전분, 감자 전분에서는 시료전체가 탄화되는 현상을 관찰할 수는 없었으나 (D) 쌀, 보리, 밀가루 등은 심한 균열을 보이면서 시료 전체가 탄화되었으나 역시 다량의 탄소질 잔사물이 형성되면서 연소가 중단되었다.

당질이 다량 함유된 시료의 혼소 온도 측정 결과를 시료의 직경이 10cm 두께가 5mm인 경우에 Table 6에 나타내었다.

Table 6. Smouldering temperatures and residues of glucose group dust

Sample	Particle size	Smou. temp.	Max. temp. of center	Residue
Corn starch	under 200 mesh	260(°C)	180(°C)	82(%)
Potato starch	〃	255	175	85
Rice	〃	260	158	85
Barley	〃	265	185	83
Wheat powder	〃	260	135	87

### 3.6. 시료층 내부의 온도분포

앞의 실험결과는 주로 시료표면 중심에서의 온도변화로부터 구한 도달시간과 혼연온도를 이용하였다. 이것이 시료층 내부의 온도분포와 혼소현상과 어떤 관계가 있는가를 조사하는 것도 도달시간의 해석상에 필요한 요인이지만, 실험적으로 고찰했을 때 분체의 종류와 입도 및 기하학적인 형태에 따라서 차이를 나타내었으며 명확한 관계를 구할 수가 없었다. 이 현상은 가열시 시료층 내부의 온도분포를 고찰하므로써 어느 정도의 원인 분석을 할 수 있었으며, 시료층 내부의 온도분포는 수직방향과 수

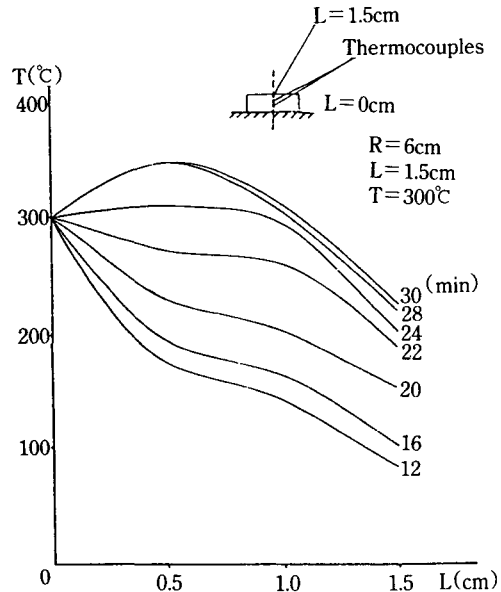


Fig. 13 Temperature distribution in the soybean dust layer.

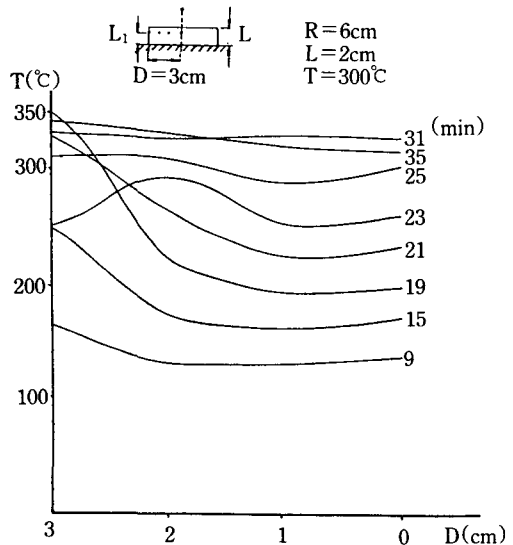


Fig. 14 Temperature distribution along some levels soybean dust layer.

평방향으로 나누어 고찰하였다.

Fig. 13에 대두에 대한 시료층 내부의 수직방향 온도분포를 나타내었다. 분체시료는 고열 가열판으로 부터의 열전달에 의하여 가열되기 때문에 가장 먼저 높은 온도를 나타낸 부분은 가열판 표면 부근이었다. 그 후 축열 과정으로 부터 층내부의 온도가 상승해서 심한 발열을 나타낼 때까지의 시간적인 온도변화는 열발화 이론에 의하여 주어지는 온도분포와 근본적으로 같다고 사료된다.

시료의 종류에 따라서는 수분과 휘발분의 기화 및 열적변화에 따른 시료층 내부의 온도변화가 나타났다. 내부온도는 혼소현상이 확인되는 시점에서 가열 표면온도 보다도 높게 나타났으나, 시료의 외부 표면온도는 가열표면의 온도에 비하여 낮은 온도를 나타내었다. 하지만 이런 상태에서도 시료표면의 온도의 변화율과 시료의 외관의 변화, 분해가스 발생 및 연기의 발생을 관측 하므로서 혼소시간을 정할 수 있었다.

사용한 분체층내에서의 혼연연소 발생점으로부터 표면중심으로의 연소속도에 관하여 도달시간과 관련 지우는 이유는 시료층 내의 수평방향의 온도분포를 나타내어 시료의 측면으로부터 혼소가 발생되는 경우가 있기 때문이다. Fig. 14는 임의의 높이(Lcm)에 있어서 수평방향의 시료층 내부의 온도분포를 나타내었다. 시료의 수평방향의 온도 상승은 시료의 가장자리에서 가장 높은 온도를 나타내다가(23분까지) 이측으로 부터 1cm지점에서 급격한 온도 상승이 관측되었으며, 2cm지점에서 최대 온도가 나타났다.(31분) 마지막으로 시료의 모든 부분에서의 온도가 일정하게 되는 시간은 32분에서 나타났다. 이러한 현상은 대두의 경우 시료의 가장자리 부분에서 발열이 일어나면서 이때 발생된 열이 중심쪽으로 전파된다는 것을 암시하는 것이다. 이는 시료의 외관을 관찰한 결과(Fig. 9)와 일치하였으며 시료의 외측에서 부터 열분해가 먼저 일어나서 시료의 중심부분이 열분해 잔류층으로 둘러쌓인 상태로 관

찰되었다. 이와같은 이유는 공기의 대류에 의해서 일어나는 산소의 확산에 의한 것으로 사료되어 진다.

이처럼 시료층 표면에서의 온도변화에 의해 구하는 도달시간과 층내부에서의 혼소현상의 개시시간과의 관계는 각 분체시료의 분체층 내부의 온도 분포를 상세히 측정하므로서 검토하여야 하지만 본 실험과 같이 성형 크기가 작은 분체층의 경우 열기류와 같은 분위기의 영향을 받기 쉽고, 일정한 혼소전파성이 나타나지 않는다. 그렇지만 지금까지 고찰한 것처럼 도달시간이 혼소온도와 일정한 관계를 나타내는 것은 혼소도달시간을 혼소유도시간과 같은 의미로 생각할 수 있다고 사료된다.

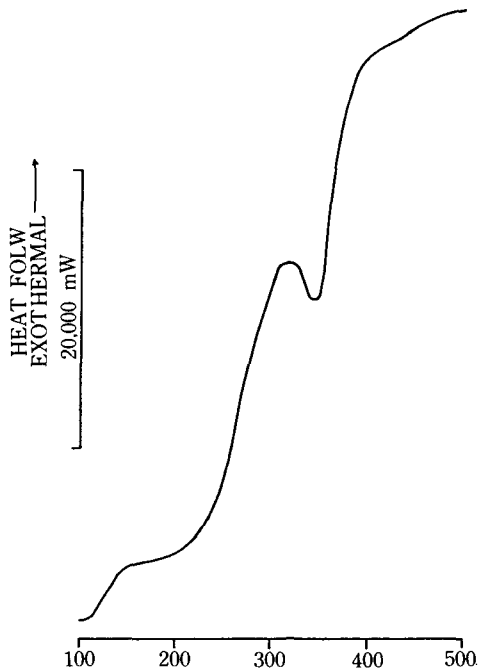


Fig. 15 DSC curve of sawdust.

### 3.7. 발열반응의 활성화에너지

한편 미송의 활성화에너지를 DSC를 이용하여 구해보았다. 이때의 승온속도는 10°C min으로 하였으며 측정온도 범위를 100°C - 500°C로 하였을 때 나타난 결과 그래프를 Fig. 15에 나타내었다. 온도의 상승에 따라 발열곡선은 서서히 증가하거나 320°C에서 피크를 이룬후 감소하였다. 이 온도는 실험에 의해 측정된 혼연온도와 일치하며  $\Delta H$  값이 1923.3 kcal/g이며 반응차수는 1.27, 계산된 활성화에너지 값은 30.10kcal/mole이었다. 이 사실로 부터 혼소 시작되는 온도는 시료의 분해에 의해 발생하는 반응열이 최대치일 때라고 생각할 수 있으며 이 반응열과 가열판에서 발생하는 열에 의하여 분체시료가 활발히 분해된다고 할 수 있다. 또한 이때의 활성화에너지 값은 Matsuda<sup>2)</sup> 등이 미송을 시료로 하여 열발화 이론에 의해 구한값(28kcal)과 거의 일치하는 것을 알 수 있었다.

## 4. 결 론

가열판을 이용한 가연성 분체층의 혼연온도와 혼소현상의 측정과 고찰을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 미송의 경우 시료의 두께가 5mm일 때 시료의 직경과 관계없이 320°C에서 최저혼연온도를 나타낸다.
- 2) 미송의 경우 혼소기 가열판의 절대온도와 도달시간을 Arrhenius형의 관계식으로 나타내었을 때 분체층의 형태와 상관없이 직선관계를 나타내었다.
- 3) 미송의 경우 시료의 입도가 클수록 혼소도달시간이 큰 값을 나타내었으며 입도와 관계없이 직선의 기울기는 같은 값을 나타내었다.
- 4) 선택된 농산물 분체의 혼소현상을 관찰한 결과 셀룰로오스계, 지질계, 당질계로 분류할 수 있었

다.

- 5) 셀룰로오스계 분체들은 연소중에 시료 중심에 적열현상을 동반하면서 빠른 속도로 혼소가 진행되었으며 연소후 미량의 재를 남겼고 혼소온도는 시료표면온도를 이용하여 용이하게 구할 수 있었다.
- 6) 지질계분체들은 혼소중 연소된 부분과 미연소된 부분과의 밀도차에 의하여 시료의 바닥이 뜨고 균열이 심하였고 분해생성물을 장시간 가열판에 방치시켜도 표면연소에 도달하지 않았으며 혼연온도는 시료의 온도변화와 외관변화로 구할 수 있었다.
- 7) 당질계분체들은 혼소중 당질이 변하여 카라멜화 부분의 밀도차와 열전도의 장애로 인하여 시료 전체가 완화되지 않았으며 혼연온도는 표면온도와 카라멜층의 형성상태를 관찰하여 측정할 수 있었다.
- 8) 시료층 내부의 온도분포는 기본적으로 열발화이론에 의해 나타나는 것과 같았으며, 관찰된 대두의 경우 공기의 대류에 의해 일어나는 산소의 확산의 영향을 받아 시료층의 가장자리로부터 열분해가 시작되어 중심로 혼소전파가 일어나는 것을 나타내었다.
- 9) DSC에 의해 구한 활성화에너지는 30.1kcal/mole로서 열발화 이론에 의해 구한값과 거의 일치하였으며, 혼연온도와 발열곡선의 피크값과도 일치하였다.

## 후 기

이 연구는 1989년도 한국과학재단 신진연구지원에 의한 결과입니다.

과제번호 : 893-1008-007-기타

参 考 文 献

1. K. N. Palmer, Comb. and Flame 1 129 (1957).
2. T. Matsuda and M. Naito, Re. Inst. of Ind. Safe. Japan, Report RIIS-HR-24-4 (1976).
3. L. Cohen and N. W. Luft, Fuel, 34, 154 (1955).
4. T. Kinbara, H. Endo and S. Sega, Sym. Ind. on Comb., Comb. Inst. Pittsburgh, (1967).
5. A. Egerton, K. Gugan and F. Weiberg, Comb. Flame, 7, 63 (1963).
6. K. Gugan, Comb. Flame, 10, 161 (1966).
7. A. R. Shoman, A. B. Donaldsen and H. Y. Tsao, Comb. and Flame, 23, 17 (1974).
8. T. Morikawa, J. Comb. Toxi., 3, 135 (1976).
9. S. Hadvig, Charring of Wood in Bulding Fires, Tech. Univ. Denmark, (1981).
10. M. G. Oriz-Molin, et. al, 17th Symp. Comb., 1911 (1979).
11. K. N. Palmer and P. S. Tonkin, Comb. and Flame, 1, 14 (1957).
12. P. C. Bowes and S. E. Townshend. Brit. J. Appl. phy., 13, 105 (1962).
13. E. J. Anthony and D. Geraney. Comb. Sci and Tech., 21, 79 (1979).
14. P. C. Bowers, Salf heating HMSO, London (1984).
15. B. J. Tyler and D. K. Henderson. Ind. chem. Symp. Ser., 102, 45 (1987).
16. K. Kordylewski and Z. Kragewski, Comb. Flame, 62, 135 (1985).
17. A. G. Merzhanov and A. E. Averson, Comb. and Flame, 16, 89 (1971).
18. P. H. Thomas, ASTM STP, 50, 56 (1972).