

천연섬유분진의 연소특성에 관한 연구

A Study on Combustion Properties of Natural Fiber Dust

이창우* 김정환* 현성호*

Lee Chang-Woo* · Kim Jung-Hwan* · Hyun Seong-Ho*

Abstract

We had investigated combustion properties of natural textile dusts. Decomposition properties of natural textile dusts scavenged by precipitator of spinning factory were investigated using DSC(Differential Scanning Calorimeter) and TGA(Thermogravimetric Analysis) by temperature changes. Combustion properties of natural textile according to size distribution and amount were checked as temperature variation according to time using spontaneous ignition apparatus. Moreover, combustion properties with blowing or without blowing condition were checked in order to investigate combustion properties in spontaneous ignition apparatus according to flow condition of air.

As results of thermal analyses, increase in raising temperature causes initial smoldering temperature to move towards low temperature section and initial smoldering temperature was decreased more remarkably in atmosphere than in inert gas and that condition allowed heating value to increase considerably. In addition, as amount and size distribution of natural textile dusts were increased, initial smoldering temperature was lowered. All of combustion forms were smoldering combustion. Initial smoldering temperature was low more slightly with blowing condition than without blowing condition in spontaneous ignition apparatus, which condition made heating value high.

국문 요약

천연섬유분진의 연소특성을 조사하고자 국내 방적공장의 집진기에서 직접 포집된 천연섬유분진을 열시차 및 열중량 분석기를 이용하여 온도에 따른 분해 특성을 조사하였고, 자연발화 시험기를 이용하여 시료의 입도분포 및 시료량에 따른 천연섬유의 연소특성을 시간에 따른 온도의 변화로 측정하였다. 또한 자연발화 시험기 내부의 공기흐름에 따른 연소특성을 조사하고자 송풍과 무풍 상태에서의 자연발화 또는 훈소특성을 조사하였다.

열분석 결과 승온속도가 증가할수록 발열개시온도가 저온부로 이동하고 있으며, 불활성 기체 중에서 보다 대기 중에서 발열개시온도가 현저히 낮았고 발열량도 크게 증가하였다. 또한, 천연섬유분진은 시료량과 입도가 증가할수록 발열개시온도가 낮아지고 있으며, 연소형태는 모두 훈소 상태를 보였다. 시험기 내부가 송풍상태일 때 보다 무풍상태로 실험하였을 때 발열개시온도가 약간 낮으며, 발열량도 크게 나타났다.

* 경민대학 소방안전관리과 * Dept. of Fire Safety Management, Kyung Min College

1. 서 론

근간 산업이 고도로 발달함에 따라 분체를 취급하는 공정이 날로 증가하고 있는 추세이다. 특히 최근에 와서는 섬유분진의 착화에 의한 방적공장에서의 화재[1]가 점차 증가하며, 이와 같은 섬유공장에서의 화재로 인해 수억원 내지는 수백억원에 이르는 재산피해의 대형화재가 빈번히 발생하고 있다. 이는 섬유공장의 공정상 가연성 원료와 제품이 작업장 내에 널리 산재해 있으며, 기계설비 등이 근접해 있어 마찰 또는 충격 등과 같은 점화원에 의해 분진 폭발이나 산화 등으로 인한 열의 축적으로 자연발화나 혼소와 같은 위험성을 항상 내포하고 있기 때문으로 볼 수 있다[2,3]. 특히 섬유의 원료 특성상 연소는 순간적으로 확대되어 화염과 유해가스등의 발생으로 진화가 어려워 그 피해 규모는 다른 화재에 비해 상대적으로 심각한 실정이다[4].

분진폭발의 경우는 폭발압력이 약 10kg/cm²으로 낮으나 폭발압력의 상승속도가 대단히 크기때문에 일반의 화재와 같은 재해에 비해 그 피해 규모는 대단히 크므로 분진폭발에 대한 연구는 많이 진행되고 있으며, 그에 따른 연구 결과도 상당히 발표되고 있다[5-9]. 그러나 자연발화나 혼소의 경우 장기간에 걸친 분해나 대기 중에서의 산화에 의한 산화열이나 분해열 등의 축적이 있어야 하기 때문에 장시간의 방치 등에 의해서만 발생하는 것으로 인식되어 그 위험성이 간과되고 있다. 분진의 자연발화는 분해나 산화에 의한 열의 축적뿐 아니라 공정의 복잡함으로 인해 열교환기나 모터등 가열된 구조물에 퇴적되는 경우 분진의 화학적 조성, 활성화에너지, 표준 연소열, 분진의 입도와 형상, 분산상태, 수분함량, 비표면적, 존재하는 산소의 량, 기체 중 분진의 농도 등 여러 가지 변수에 따라 자연발화의 위험이 증대된다. 또

한 퇴적 분진에 분해가 쉬운 가연성 유기물인 경우 외부의 열원에 의해 장시간 열이 축적되면 표면 산화반응에 의해 유기물은 분해하여 다량의 연기와 유독가스를 방출하나 화염을 형성하지 않는 혼소 현상을 일으킨다[10]. 이러한 혼소 현상은 화염을 일으키지는 않지만 독성 물질을 배출하고 유염 연소의 개시에 커다란 영향을 미치기 때문에 대단히 위험하다. 따라서 유기물 분진의 자연발화나 자연발화로 전이되는 혼소는 유기물의 분해속도와 밀접한 관계가 있으며, 분해온도에 큰 영향을 받는다.

특히 복합단백질의 고분자로 구성된 동물성 섬유의 착화가 어려운 것에 비해 주성분이 셀룰로오스로 구성된 식물성 섬유인 천연섬유는 연소시 유독가스인 CO(TLV=100 ppm)와 CO₂ (TLV=5,000 ppm)를 다량 방출하며 점화원 제공시 쉽게 연소하는 특성을 지니고 있다. 더우기 방적공장은 공장 내 온·습도를 조절하기 위해 공조설비를 갖추는데, 이의 기계설비로부터 폐분진을 흡입하는 과정에서 불씨가 흡입되어 타설비로 연소가 확대될 위험성이 있으며 화재진압도 상당히 곤란하다[4,10].

따라서 본 연구에서는 기존 셀룰로오스에 관련된 혼소연구를 바탕으로[11] 다음과 같은 방법을 통하여 천연섬유분진의 연소특성에 대하여 조사하고자 하였다. 우선 방적공장의 집진기에서 포집된 천연섬유분진을 열시차 및 열중량 분석기를 이용하여 온도에 따른 분해 특성을 조사하였고, 자연발화 시험기를 이용하여 시료의 입도분포, 시료량에 따른 천연섬유의 연소특성을 시간에 따른 온도의 변화를 측정하여 연소개시시간 및 연소시 상승하는 온도를 측정함과 동시에 육안으로 연소특성을 조사하고자 하였다. 한편 자연발화 시험기 내부의 공기흐름에 따른 연소특성을 조사하기 위하여 송풍과 무풍 상태에서의 연소특성을 조사하고자 하였으며 이를 바탕으로 천연섬유분진으로 인

해 발생할 수 있는 재해를 예방하기 위한 기초 자료로 활용하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 시료의 준비

본 실험에 사용한 시료는 국내 (주) ○○방직의 집진기에서 채취한 천연섬유분진으로서 분쇄과정을 행하지 않고 체가름하여 시료로써 사용하였다. 이와 같이 준비된 시료는 110℃로 유지된 건조기(Drying Oven) 속에서 2시간 건조시킨 후 데시케이터 (Desiccator)에서 48시간 방냉하여 실험에 사용하였다.

2.2. 특성 평가

2.2.1. 열적 위험성 평가

본 실험에서 사용한 천연섬유분진의 열적 안전성 평가를 위해 시차주사 열량계(Differential Scanning Calorimeter, DSC) [Model : DSC 2910, TA Instruments, U.S.A.]를 이용하여 발열개시온도, 발열최고온도, 발열종료온도 및 발열량 등을 측정하였다. 이 때 승온속도 및 분위기 기체에 의한 영향을 고찰하였고, 승온속도에 따른 열분해 위험성을 평가하기 위하여 열중량 분석기(Thermogravimetric Analysis, TGA) [Model : STD 2960, TA Instruments, U.S.A.]를 이용하여 분해개시온도 및 무게감량을 측정하였다.

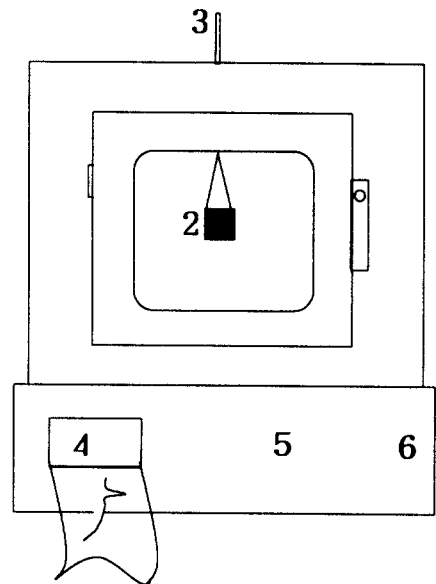
2.2.2. 비체적의 측정

천연섬유분진의 입도분포별 연소특성을 살펴보기에 앞서 5×5×5 cm의 시료용기에 천연섬유분진을 가볍게 뿌려서 담고, 시료 용기를 바닥에 서너번 두드려서 균일하게 채우는 방법인 Pouring method를 사용하였다[11].

2.2.3. 연소특성 평가

본 연구에서 사용한 천연섬유분진의 연소특성을 조사하기 위하여 천연섬유분진을 체가름하여 각각의 입도별로 분리한 후 자연발화 시험기를 이용하여 온도를 변화시키면서 각각의 입도분포 및 시료양에 따른 천연섬유분진의 연소특성을 조사하였으며 실험에 사용한 장치도를 Fig. 1.에 나타내었다.

먼저 시료용기(5cm×5cm×5cm)에 각 입도의 시료를 일정량씩 채운 후 전기 가열 열풍식 자연발화 시험기의 중앙에 위치시킨 후 송풍과 무풍 상태에서 온도를 서서히 승온하면서 천연섬유분진 내부의 온도 변화를 열전대를 이용하여 측정, 기록계를 통하여 온도의 변화를 기록하였다. 이때 시료내부의 온도가 급격히 상승할 때 혼소(무염연소)와 유염연소 여부를 창을 통해 육안으로 관찰하였다.



1. Air heating furnace 2. Sample container
3. Thermocouple 4. Temperature recorder
5. Temperature controller 6. Power supply

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

3. 결과 및 고찰

3.1. 열중량 분석기(TGA)에 의한 특성 평가

Fig. 2는 천연섬유분진의 열분해 특성을 조사하기 위하여 30/50 mesh의 입도를 갖는 시료를 사용하여 승온속도를 변화시키면서 분위기 기체 N_2 를, 60 ml/min의 속도로 흘려보냈을 때 분해에 따른 무게감량을 측정함으로써 분해 개시온도나 분해특성에 미치는 영향을 TGA 분석한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 천연섬유분진의 승온속도에 따른 분해개시온도는 약 200°C 부근으로 비슷하나 승온속도가 5°C/min일 경우 동일한 온도에서의 무게감량이 다른 경우보다 크게 나타나고 있으며, 750°C까지 약 90% 분해에 따른 무게감량을 보이고 있다. 그러나 승온속도가 10°C/min 이상인 경우에는 750°C까지 분해에 따른 무게감량이 약 78%이며 분해속도 및 분해특성이 거의 비슷한 것을 볼 수 있다. 이는 승온속도가 빠른 경우 내부물질의 분해가 느리기 때문에 발생하는 현상으로 볼 수 있다.

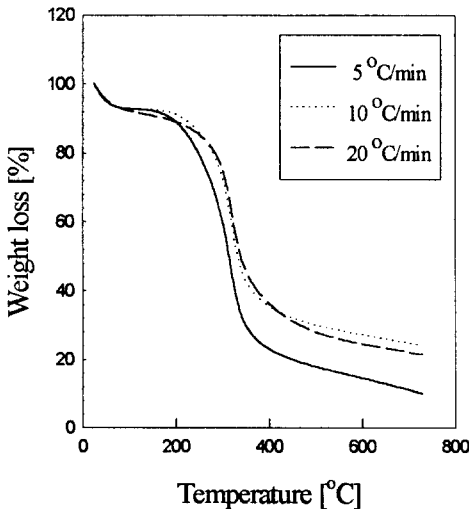


Fig. 2. TGA curves of natural textile dust according to raising temperature rate. [Purge gas : N_2]

3.2. 열시차 분석기(DSC)에 의한 특성 평가

3.2.1. 승온속도의 영향

승온속도에 따른 열적 안정성을 조사하기 위하여 30/50 mesh의 입도를 갖는 천연섬유분진 5 mg을 기준으로 하여 분위기 가스인 Ar을 60 ml/min의 속도로 주입하면서 승온속도를 5°C/min, 10°C/min 및 15°C/min 로 변화시키면서 DSC 분석을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 승온속도가 증가할수록 발열개시온도가 저온부로 이동하고 있으며, 발열량 또한 증가하고 있다. 따라서 승온속도가 증가할수록 천연섬유분진의 분해 위험성이 증가하며 이는 일반적인 가연성 물질의 위험성 평가 결과와 동일한 결과를 나타내고 있다. 또한 천연섬유분진의 입도가 작은 경우 1차 분해만 보이는 반면, 시료가 커질수록 1차 및 2차 분해가 일어나는 것을 볼 수 있다. 이는 시료의 입자가 큰 경우 내부의 물질이 분해가 느리기 때문에 발생하는 현상으로 사료된다.

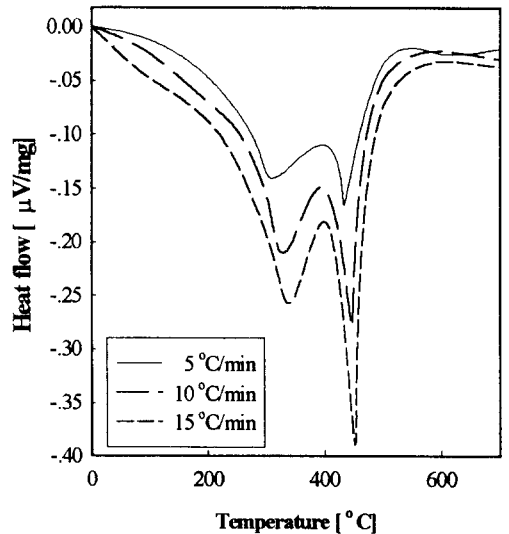


Fig. 3. DSC curves of natural textile dust according to raising temperature rate. [Purge gas : Ar]

3.2.2. 분위기 기체의 영향

30/50 mesh 사이의 입도를 갖는 시료를 5 mg, 승온속도를 15 °C/min 조건하에서 분위기 기체로 Air 및 Ar을 각각 60 ml/min의 속도로 주입하면서 DSC 분석을 실시하여 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 분위기 기체를 불활성 기체인 Ar을 사용하는 경우보다 조연성 기체를 포함하는 Air를 사용하는 경우 발열개시온도가 낮아지고 있으며, 발열량도 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 분위기 기체로 조연성 기체를 사용하는 경우 가연성 분진의 산화 분해를 촉진하여 그 위험성이 매우 증가하는 것으로 볼 수 있으며, 따라서 천연섬유 분진을 취급하는 장소가 대기 중인 경우 화재의 위험성을 내포하고 있다고 볼 수 있을 것이다.

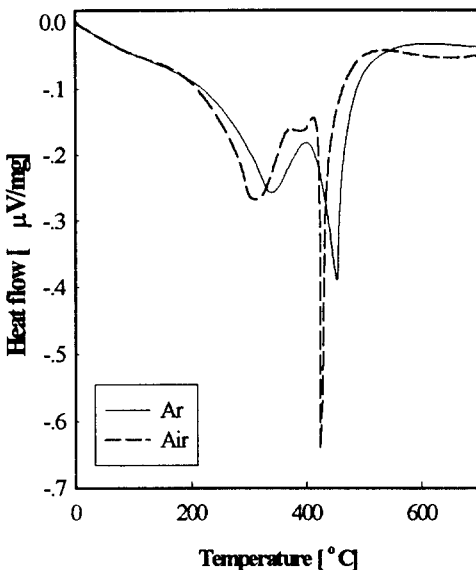


Fig. 4. DSC curves of natural textile dust according to purge gases. [Raising temperature rate : 15 °C/min]

3.3. 연소특성 평가

먼저 천연섬유분진의 입도와 양이 연소특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 시료의 입도를 20/30, 30/50, 50/170 및 170 mesh 이하로 체가름하여 시료의 양을 0.5, 1.0 및 3.0 g으로 변화시키면서 시료용기에 충전하고, 시험기 내부를 송풍과 무풍상태로 변화시키면서 시간에 따른 훈소 개시온도를 조사하여 그 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 먼저 Fig. 5는 송풍상태에서 시료의 입도와 양이 연소에 미치는 영향을 조사하기 위하여 시료량을 0.5, 1.0 및 3.0 g으로 변화시키면서 각각의 입도에서 훈소 개시온도를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 발열개시온도는 약 220°C ~ 250°C 범위에 있으며 이는 TGA와 DSC 분석에서 나타난 중량 감소가 발생하는 온도와 거의 일치하는 온도이다. 또한 시료의 양에 관계없이 입도가 미세해질수록 훈소 개시온도가 높아짐을 알 수 있다. 이는 시료로 사용된 천연섬유 분진이 섬유상의 형태를 갖고 있으므로 입도가 작아질수록 충전율이 증가함으로써 대기와의 접촉이 좋지 않고, 열의 축적이 원활하지 않기 때문인 것으로 사료된다. 한편 천연섬유분진의 입도분포별 비체적 측정결과를 Table 1에 나타내었다. Table 1과 같이 시료의 입도가 작아질수록 비체적이 감소함을 볼 수 있다. 이러한 결과로 입도가 미세해질수록 시료내부에서의 온도를 측정할 수 있는 능력이 작아져 훈소 개시온도가 높아지는 것이라고 할 수 있다.

또한 시료량이 증가함에 따라 훈소 개시온도가 감소함을 알 수 있으며, 이는 시료의 양이 증가함에 따라 분해되는 양이 증가하기 때문에 보다 낮은 온도에서 발열 peak가 발생하는 것으로 사료되며 이러한 발열은 유염연소가 아닌 훈소현상에 의한 것이었다.

Table 1. Specific Volume according to Size Distribution of Natural Textile Dusts.

Size distribution [mesh]	20/30	30/50	50/170	170 under
Specific volume [cm ³ /g]	22.88	13.48	7.25	3.77

Fig. 6은 무풍상태에서 동일한 실험을 수행하여 얻어진 결과이다. 송풍시와 마찬가지로 혼소 개시온도는 입도가 작아짐에 따라 증가하며, 시료량이 증가함에 따라 감소한다. 그러나 동일한 조건에서는 송풍시보다 약간 낮은 발열 개시온도를 나타내고 있으며, 이는 대기의 흐름이 없는 무풍 상태에서 시료 내부에 열 축적이 보다 용이하기 때문이다.

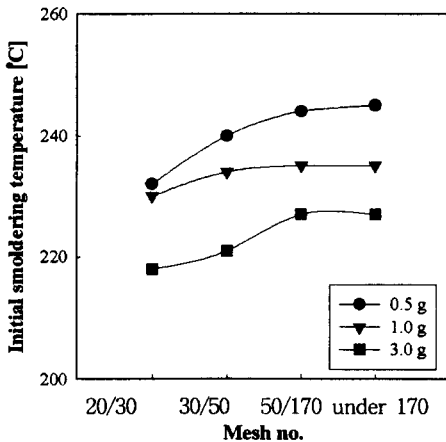


Fig. 5. The changes of initial smoldering temperature according to size distribution with blowing.

천연섬유분진의 입도를 20/30, 30/50, 50/170 및 170 mesh 이하로 체가름하여 시료의 양을 0.5, 1.0 및 3.0g으로 변화시키면서 시료용기에 충전하고, 시험기 내부를 송풍과 무풍상태로 변화시키면서 시료의 입도분포별 혼소시 시료의 내부온도 변화량을 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7과 8에서 보는 바와 같이

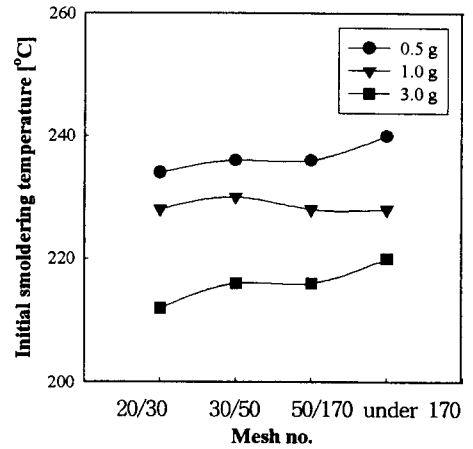


Fig. 6. The changes of initial smoldering temperature according to size distribution without blowing.

송풍·무풍 상태에 관계없이 시료의 양이 증가할수록 또한 시료의 양에 관계없이 30/50 mesh의 입도를 갖는 시료에서 온도차가 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 이유는 앞서 제시한 Table 1에서와 같이 입도가 작을수록 충전율이 증가함으로써 대기와의 접촉이 좋지 않고, 열의 축적이 원활하지 않기 때문인 것으로 사료된다. 한편, 입도가 가장 큰 20/30 mesh의 경우 30/50 mesh보다 상대적으로 온도차가 작은 이유는 입자의 크기가 커 분해속도가 느려 발생한 것으로 사료된다.

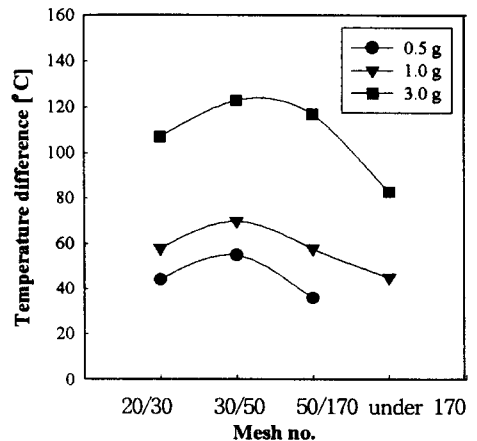


Fig. 7. Temperature difference according to size distribution with blowing.

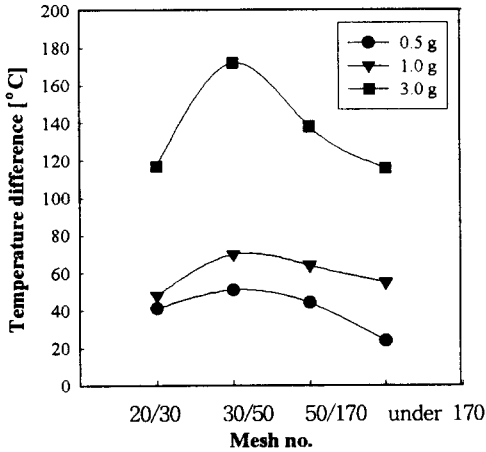


Fig. 8. Temperature difference according to size distribution without blowing.

Fig. 9는 30/50 mesh의 시료 3g을 시료용기에 충전하고 송풍 및 무풍시 시간에 따른 연소특성을 조사한 결과이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 송풍시 보다 무풍시 혼소 개시온도가 다소 빨라지고 있으며, 발열에 따른 온도 상승폭이 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 경향성은 다른 입도 분포에서도 동일한 결과를 보이고 있으며, 이는 앞서 언급한 바와 같이 무풍시 시료내 열의 축적이 용이하기 때문이다.

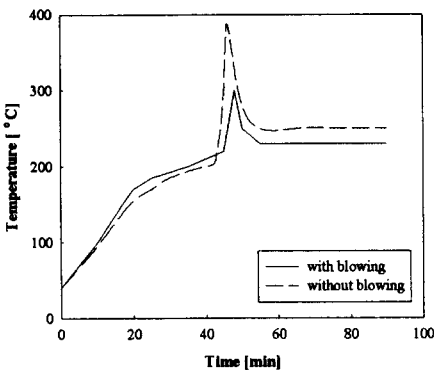


Fig. 9. Variation of temperature according to time. [30/50 mesh, sample weight = 3g]

4. 결론

이상과 같은 천연섬유분진의 연소특성에 관한 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 열중량 분석 결과 입도에 무관하게 약 220°C 부근에서 중량 감소가 발생하였으며, 승온속도가 낮은 경우 중량감소가 크게 발생하였다.
- (2) 열시차분석 결과 승온속도가 증가할수록 발열개시온도가 저온부로 이동하고 있으며, 불활성 기체 중에서 보다 대기 중에서 발열개시온도가 현저히 감소하였고 발열량도 크게 증가하였다.
- (3) 천연섬유분진은 시료량과 입도분포가 증가할수록 발열개시온도가 감소하며, 연소상태는 모두 혼소상태를 보이고 있다.
- (4) 자연발화 시험기 내부가 송풍상태일 때 보다 무풍상태로 실험하였을 경우 혼소 개시시간이 다소 빨라지고 있으며, 발열온도도 크게 나타났다.

참고문헌

- 1) 위험관리정보센터, 화재사례, 8, 한국화재보험협회 (1996)
- 2) 오백균, 위험물질론, 신평문화사 (1998)
- 3) 김 홍 외3인, 방폭공학, 동화기술 (1994)
- 4) 이재양, 섬유공장의 화재위험과 대책, 방재와 보험, 57, 한국화재보험협회 (1993)
- 5) 한국기계연구소, 가연성 더스트의 폭발방지에 관한 연구, 과학재단 연구보고서 I (1986)
- 6) 이창우, 함영민, 김정환, 현성호, "가축사료의 분진폭발 위험성에 관한 연구", 화재·소방, 12(2), (1998)

- 7) 현성호, 김정환, 이창우, Hartman식 장치에 의한 Carbon Black 분진의 부유중 폭발 위험성 평가, 화재·소방, 12(4), (1998)
- 8) K.N.Palmer, "Dust Explosion and Fire", Chapman & Hall, London.(1973)
- 9) I. Hartman 외 2인. RI 4835 U.S. Bureau of Mines (1951)
- 10) 현성호 외3인, 위험물 화학, 동화기술 (1998)
- 11) 최정화, 셀룰로우스의 혼소연소에 관한 연구, 소방논집, 7, 중앙소방학교 (1997)