한국화재 · 소방학회, 제15권 제1호, 2001년
[논 문]

T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.
Vol. 15, No. 1, 2001

석유화학플랜트에서 발생하는 PP(Poly Propylene) 및 LLDPE(Linear Low Density Poly Ethylene) 분진의 연소 위험성에 관한 연구

Fire Hazard of PP and LLDPE dust in Chemical Plant Process

김정환† · 이창우* · 현성호* · 권경옥**

Jung-Hwan Kim† · Chang-Woo Lee* · Seong-Ho Hyun* · Kyung-Ok Kwon**

강원대학교 재료공학과
*경민대학 소방안전관리과
**한국소방검정공사 연구부

(2000. 12. 20 접수/2001. 01. 20 채택)

요 약

석유화학플랜트에서 다량 부산되는 가연성 고체인 PP(Polypropylene) 및 LLDPE(Linear low density polyethylene)의 열적특성과 압력용기를 이용하여 산화제와의 혼촉위험성을 조사하였다. 시차주사열량계 및 열중량 분석기를 이용하여 온도에 따른 발열개시온도 및 중량감소를 조사하였고, PP 및 LLDPE의 혼촉위험성을 살펴보고자 소방법상 제1류 위험물로 분류되고 있는 몇 가지 대표적인 산화성 고체와 혼합하여 무게비에 따른 압력용기 내에서의 혼촉위험성을 조사하였다. 또한 가스농도 측정기를 이용하여 PP 및 LLDPE에 대한 연소생성물의 농도를 측정하였다. DSC 분석 결과 열분해에 따른 발열 피크가 PP의 경우 220~250°C 부근에서 나타나고 있으며, TGA 분석결과 PP 및 LLDPE의 분해온도는 각각 200~350°C, 300~500°C 범위이다. 압력용기 시험에 의한 산화제와 PP 및 LLDPE 분진의 혼촉위험성은 오리피스 직경이 감소할수록, 산화제와의 혼촉 무게비가 증가할수록 그리고 시료의 분해온도와 산화제의 분해온도가 비슷한 경우 혼촉위험성이 크게 나타났다. 또한 시료의 연소가스 분석결과 PP의 경우 LLDPE보다 상당히 많은 양의 일산화탄소가 발생하는 반면 LLDPE가 PP보다 더 많은 양의 이산화탄소 가스를 발생하였다.

ABSTRACT

Thermal properties of PP and LLDPE dusts from chemical plant and their risks of coexisting with oxidizer were investigated by a pressure vessel. The thermal decomposition of PP and LLDPE dusts with temperature using DSC and the weight loss with temperature using TGA were also investigated to find the thermal hazard of PP and LLDPE dusts. Using the pressure vessel which can estimate ignition and explosion of PP and LLDPE dusts coexisting with oxidizer, a series of bursting of a rupture disc, experiments has been conducted by varying the orifice diameter, the weight ratio of the sample coexisting with oxidizer, and the species of oxidizer. And fire gases was measured by gas analyzer (ECOM-A$^+$). According to the results of the thermal analysis of PP and LLDPE dusts, the decomposition temperature range of PP and LLDPE dusts was 200 to 350 and 300 to 500°C, respectively. The risk of PP and LLDPE dusts coexisting with oxidizer was increased as the orifice diameter was decreased. On the other hand, it was increased as the weight ratio of the sample to the oxidizer were increased. In addition, the risk of PP and LLDPE dusts coexisting with oxidizer was affected by the decomposition temperature of the sample and oxidizer. It is found that the risk of fire becomes high when the decomposition temperature of the sample is about same as that of oxidizer. Also, the fire gases was occurred carbon monoxide and carbon dioxide. The amount of carbon monoxide generated was found to be much higher in PP decomposition than in LLDPE due to incomplete combustion of PP which has high content of carbon in chemical compound.

Keywords : PP and LLDPE dusts, Thermal hazard, Pressure vessel, Bursting, Fire gases

† E-mail: kjh6749@orgio.co.kr

1. 서 론

최근 화학공업의 발달은 고무류 및 플라스틱과 같은 유기화합물의 축·중합에 의한 고분자 재료 산업의 발달을 가져왔으며, 이러한 고분자 화합물은 일상생활의 기본 요소인 가정용 제품, 자동차, 가전제품 및 일반기계의 케이스나 비닐이라 알려진 여러 가지 제품의 원료로 널리 알려져 있는 다수의 제품 원료로 이용되고 있다.

그러나 이러한 고무류나 플라스틱의 제조 원료는 가연성이 대단히 큰 유기화합물을 이용하기 때문에 화재의 위험성이 대단히 크며, 특히 제품을 생산하는 과정에서 화재가 발생하는 경우 인명이나 재산상의 피해규모는 심각하다고 볼 수 있다.[1] 최근 고분자 촉매를 생산하는 울산의 한 석유화학플랜트에서의 화재는 이러한 위험성에 대한 대표적인 재해사례로서 그 피해규모가 막대하다는 것에 대해서는 의심할 여지가 없을 지경이다.[2]

한편, 이와 같은 석유화학플랜트에서 제조되는 가연성 고분자 즉, 플라스틱이나 고무류와 같은 물질이 분체로 생산되는 경우는 드물지만, 공정상 분진의 형태로 존재하게 되는 경우 그 위험성은 한층 증가한다. 이와 같은 사례로서 최근에 천연이나 인조섬유분진의 착화에 의한 방적공장에서의 화재가 점차 증가하고 있는 추세에 있으며, 이들 섬유공장에서의 화재로 인해 수억원 내지 수백억원에 이르는 재산피해의 형태는 대형화재가 빈번히 발생하고 있는 실정이다. 이중 석유화학플랜트에서 발생하는 플라스틱류와 섬유공장에서 발생하는 분진의 형태가 대단히 위험성이 큰 유기 화합물이라는 점에서 이들 고분자 유기물 분진이 기계설비 등에 근접해 있으면 마찰 또는 충격 등과 같은 점화원에 의해 분진폭발이나 산화 등으로 인한 열의 축적으로 자연발화나 훈소와 같은 위험성을 항상 내포하고 있기 때문인 것으로 볼 수 있다. 특히 고분자 물질의 경우는 유기물의 연소 특성상 순간적인 확대가 가능하며, 화염과 유해가스 등의 발생으로 진화가 어려워 그 피해 규모는 다른 화재에 비해 상대적으로 심각한 실정에 있다.[3-5]

이들 고분자 재료 중에서 폴리에틸렌 및 폴리프로필렌의 경우 원유를 증류해서 얻어지는 납사를 원료로 하는 에틸렌 및 프로필렌의 중합에 의해 만들어지며, 특히 선형저밀도 폴리에틸렌(Linear Low Density Poly Ethylene, LLDPE)의 경우 농업용 필름(비닐하우스용), 포장용 필름, 전선피복, 압축코팅 등의 재료로 사용되고, 폴리프로필렌(Poly Propylene, PP)의 경우 파이프, 용기, 가구부품, 자동차부품 등의 용도로 폭넓게 사용되고 있어 그 수요도 매우 확대되는 추세이다. 이와 같이 폭넓은 용도를 갖는 고분자 유기물의 경우 약 150°C부근에서 연화하기 시작하며 연화된 물질은 쉽게 휘발하여 주위의 점화원에 의해 인화됨으로서 화재로의 발전 가능성이 매우 크다.[6] 또한 고온에서 연화된 유기물이 유동성으로 인하여 화재시 연소의 확대가 우려된다. 더욱이 분자량이 대단히 큰 고분자 물질은 연소에 필요한 이론 산소량이 대단히 크기 때문에 연소시 불완전 연소 생성물인 미연소탄소 및 유독가스인 CO(TLV=100 ppm)와 CO_2(TLV=5,000 ppm)를 다량 방출하는 특성[7,8]을 지니고 있어 인명피해가 상당히 클 것으로 생각된다. 특히 플라스틱과 같은 고분자 물질뿐 아니라 가연성 고분자의 경우 입자가 미세해지면 연소속도가 빨라질 뿐 아니라 분진폭발의 위험성도 크게 증가하는 것으로 볼 수 있다. 한편 수요의 확대에도 불구하고 국내의 경우 유기화합물에 대한 화재 및 연소 위험성에 대한 평가나 분진폭발에 관한 연구 결과는 상당히 미진한 형편이다.

따라서 본 연구에서는 석유화학공장에서 다량 부산되는 PP 및 LLDPE 분진의 열적 위험성을 조사하기 위하여 DSC와 TGA를 사용하여 분해속도와 분해에 따른 무게감량 등을 조사하였으며, 압력용기 시험장치를 이용하여 PP 및 LLDPE 분진과 소방법상 제1류 위험물로 분류되는 산화성 고체 중 대표적인 몇몇 산화제와 혼합하여 혼촉위험성을 조사하고자 하였다. 또한 가스농도측정기를 이용하여 PP 및 LLDPE에 대한 연소생성물의 농도를 측정하였다. 이를 바탕으로 유기분진인 PP 및 LLDPE의 연소특성을 조사함으로서 취급시 안전대책에 관한 기초자료를 얻고자 하였다.

2. 실험방법

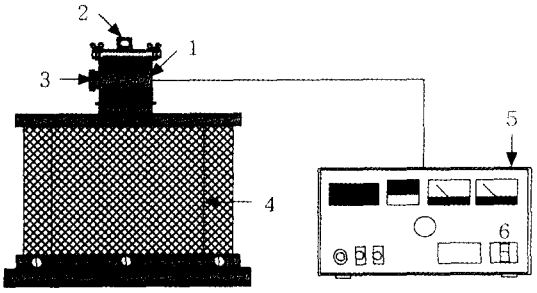
2.1 시료의 준비

본 연구에 사용한 PP 및 LLDPE 분진은 충남 소재의 ○○석유화학 플랜트에서 부산되는 것으로 32~200 mesh의 입도분포를 갖는 PP와 LLDPE 분진이 각각 95% 및 85% 이상을 차지하고 있었으며, 이를 시료로 사용하였다. 또한, 압력용기에 의한 혼촉위험성실험에 사용한 산화제로는 $NaNO_3$, KNO_3, NH_4NO_3, 및 $KClO_3$이며, 이들 산화제와 시료를 막자사발을 이용하여 일정 무게비로 혼합·분쇄하고, 60°C로 유지된 oven에서 24시간 건조시킨 후 데시케이터(Desiccator)에서 48시간 방냉하여 실험에 사용하였다.

2.2 특성 평가

2.2.1 열적 위험성 평가

시료로 사용한 PP 및 LLDPE 분진의 열적 안정성 평가를 위해 승온속도에 따라 시차주사 열량계(Differential Scanning Calorimeter, DSC)[Model : DSC 2910, TA Instruments, U.S.A.]를 이용하여 발열개시온도를 측정하였다. 또한 시료의 열분해 위험성을 평가하기 위하여 열중량 분석기(Thermogravimetric Analysis, TGA)[Model : STD 2960, TA Instruments, U.S.A.]를 이용하여 분해개시온도 및 열분해 특성을 측정하였다.



1. Reactor 2. Rupture disk 3. Orifice
4. Electric furnace 5. Temp. controller 6. Power

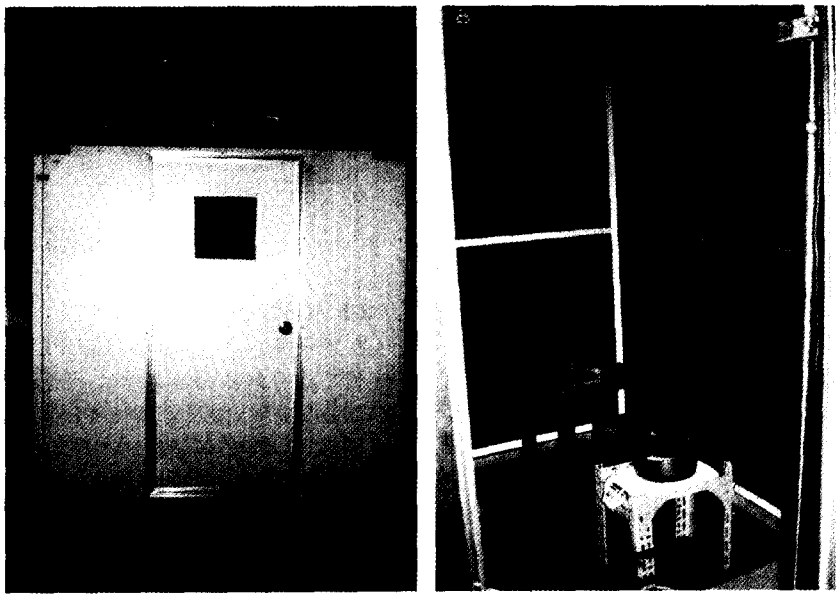
Fig. 1. Sketch of pressure vessel apparatus.

2.2.2 혼촉 위험성 평가

PP 및 LLDPE 분진과 여러 산화제와의 혼촉 위험성을 평가하고자 압력용기를 이용하여 실험을 수행하였다. 본 연구에 사용된 실험 장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 우선 압력용기실험장치[Model : PVT-02, pillip trading co. Ltd.]내 전기로의 온도를 일정하게 설정하고, 압력용기의 측면에 부착된 오리피스의 직경을 3.0 mm로 선택하여 부착시킨 후, 각 시료와 산화제를 일정 비율로 혼합하여 용기의 중앙에 위치하도록 넣어준 다음 온도센서를 시료의 중앙에 위치하도록 설치하였다. 또한, 압력용기 상단에 파열판을 부착한 후 파열판이 터질 때까지 또는 설정온도에 도달할 때까지 전기로를 가열함으로서 하나의 시료에 대해 10회 반복 실험하여 파열판 면적의 50% 이상이 파열되는 것이 5회 미만이면 오리피스 직경이 작은 것으로 바꿔 동일한 실험을 수행하였다. 이 때 5회 이상 파열된 경우 발화온도와 폭발 후 용기 내부온도 상승폭을 측정하여 PP 및 LLDPE 분진의 혼촉 위험성을 평가하였다.

2.2.3 연소가스 분석

PP 및 LLDPE의 연소생성물을 조사하기 위하여 Fig. 2(a)와 같이 8 m^3(2.0 m×2.0 m×2.0 m) 크기의 연소실을 제작하여 실험을 하였다. 연소실의 내부는 Fig. 2(b)와 같으며, 시료 50 g을 용기에 담아 연소실 중앙에 위치시키고 시료용기의 밑에서 전열기를 이용하여 열원



(a) Outward show (2m x 2m x 2m) (b) Inside

Fig. 2. Analysis chamber of fire gases.

을 공급하였다. 또한, 바닥에서 1.2 m 높이에 가스농도 측정기인 ECOM-A$^+$의 가스센서를 위치시켰다. 한편, 시료에 불이 붙은 후 발생되는 가스의 성분 및 농도를 시간의 변화에 따라 연속적으로 측정하였으며, 이를 RS-232 port를 이용하여 컴퓨터로 데이터를 수집하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열분석

본 연구에 사용된 시료인 PP 및 LLDPE 분진의 열적 안정성을 조사하고자 시차주사열량계(DSC)와 열중량분석기(TGA)를 이용하여 승온속도에 따른 PP 및 LLDPE 분진의 분해온도와 분해시 발열량 및 무게감량을 측정하였다.

Fig. 3은 PP 및 LLDPE의 온도에 따른 열분해 특성 및 열적 안정성을 조사하기 위하여 승온속도 10°C/min 하에 분위기 기체로 공기를 60 ml/min의 속도로 주입하면서 열분석한 결과이다. Fig. 3(a)는 각 시료의 온도에 따른 무게감량을 측정하여 분해개시온도와 분해특성에 미치는 영향을 TG분석한 결과이며, Fig. 3(b)는 DSC분석 결과이다. Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 PP의 분해온도는 약 200°C이며, 300°C 부근에서 급격한 무게감량을 보이고 있으며, 이 온도부근에서 열분해가 가장 활발하게 일어나는 것을 알 수 있다. 온도가 350°C에서는 약 90%이상의 무게감량을 보였으며 열분해속도도 감소하였다. 한편 LLDPE의 경우 PP보다 100°C정도 높은 300°C부근에서 분해가 일어나기 시작하며, 90%정도의 무게감량을 나타내는데도 500°C부근으로 비교적 높은 온도를 보이고 있다. 따라서 PP의 경우 LLDPE에 비해 낮은 온도에서 분해가 개시되고 있어 열적 위험성을 내포하고 있다. 그러나 열분해 속도는 LLDPE가 PP의 경우보다 조금 더 큰 것으로 나타났다. 비슷하다는 것을 알 수 있다. 한편, Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 승온속도에 관계없이 200°C 내에서 시료 내 잔존하고 있던 수분의 증발에 따른 흡열피크를 볼 수 있으며, 320°C까지 분석한 결과 PP의 경우 250°C부근에서 발열피크가 발생되고 있으나, LLDPE의 경우 이 온도범위에서 발열피크가 발생되지 않는 것으로 보아 그 이상의 온도에서 발열피크가 발생할 것으로 사료된다. 따라서 PP가 LLDPE에 비해 열분해시 큰 위험성을 내포하고 있으며, 이는 실제 연소시에도 위험할 것으로 사료된다. 이러한 결과는 열중량 분석과도 일치되는 결과이다.

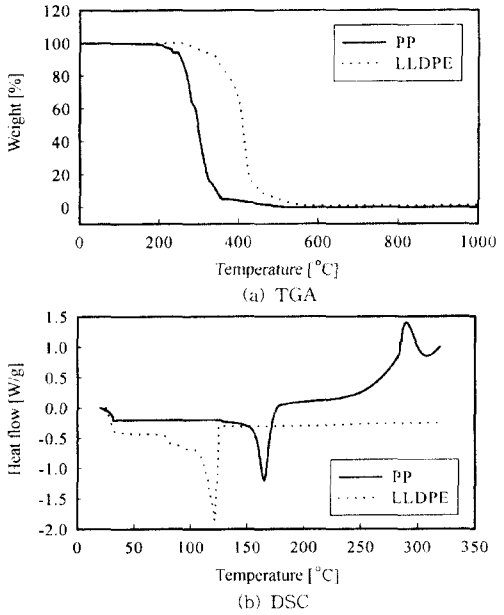


Fig. 3. Thermal analysis curves of PP and LLDPE [10°C/min].

3.2 혼촉위험성 평가

PP 및 LLDPE 분진과 산화제의 혼촉위험성에 있어서 압력용기 측면에 부착된 오리피스의 직경, 각 시료에 대한 산화제의 무게비, 및 산화제의 종류에 따른 혼촉위험성을 조사하였다.

Table 1. Risk evaluation of sample with oxidizer ($NaClO_3$) according to orifice diameter [Set temperature =700°C

Orifice Diameter[mm]	Weight ratio of polymer to oxidizer	Sample	
		PP	LLDPE
3.0	0.5	×	×
	1.0	○	○
	1.5	○	○
	2.0	○	○
2.0	0.5	×	×
	1.0	○	○
	1.5	○	○
	2.0	○	○
1.0	0.5	×	×
	1.0	○	○
	1.5	○	○
	2.0	○	○

[주] × : 폭발안됨, ○ : 폭발.

먼저 대표적인 산화제로 제1류 위험물인 염소산 나트륨($NaClO_3$)과 PP 및 LLDPE의 혼촉위험성을 조사하기 위하여 전기로의 온도를 700°C로 설정하고 오리피스의 직경과 PP 및 LLDPE에 대한 산화제의 무게비를 변화시키면서 폭발여부를 조사하여 Table 1에 나타내었다. 표에서 나타난 바와 같이 오리피스의 직경이 작을수록 화염 및 화염을 동반한 폭발이 많이 발생되는 것을 볼 수 있다. 또한 오리피스 직경에 관계없이 산화제와의 무게비가 PP의 경우 1.0 이상에서 혼촉위험성이 있다는 것을 알 수 있으며, LLDPE의 경우 오리피스 직경이 작아지면 혼촉 무게비 0.5에서도 폭발이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 앞서 열분석 결과 LLDPE보다 PP의 열적 위험성이 큰 것으로 나타났지만, 혼촉위험성의 경우 산화제로서 염소산나트륨을 사용하는 경우는 PP보다 LLDPE가 더 위험한 것으로 나타났다. 이는 Table 2에 나타낸 산화제의 분해온도와 열분석 결과에서 보신 바와 같이 염소산나트륨과 LLDPE의 분해온도가 공히 약 300°C로서 비슷하기 때문인 것으로 사료된다. 반면 PP의 경우 분해온도 200°C로 너무 낮아 염소산나트륨이 분해하기 이전에 이미 분해하여 오리피스를 통해 빠져나가기 때문에 폭발의 횟수가 낮은 것으로 생각할 수 있다. 따라서 산화제로서 염소산나트륨을 사용할 경우 PP에 비해 LLDPE의 혼촉위험성이 크다는 것을 알 수 있다.

앞의 Table 1의 폭발조건에서 PP와 LLDPE에 대한 발화개시온도를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 오리피스의 직경이 작아질수록, 또한 무게비가 커질수록 발화개시온도가 낮아지고 있으며, 동일한 조건에서 LLDPE가 PP에 비해 발화개시온도가 다소 낮은 것으로 보아 혼촉위험성이 크다는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 PP 및 LLDPE와 염소산나트륨과의 혼촉위험성을 폭발여부에 의해 판정한 결과와 일치함을 알 수 있다. 한편, 두 시료 모두 폭발 당시의 발화개시온도는 400°C내외에서 시작되는 것을 알 수 있었다.

PP 및 LLDPE 분진과 산화제의 혼촉위험성에 있어서 산화제의 종류가 혼촉위험성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 전기로의 설정온도를 700°C로 설정한 후 오리피스의 직경과, PP 및 LLDPE 분진에 대한 산화제의 무게비를 변화시키면서 각 산화제의 혼촉에 따른 PP 및 LLDPE 분진의 폭발여부를 Table 2에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 실험에 사용된 산화제 중 질산암모늄을 제외한 나머지 산화제의 경우 폭발을 관찰할 수 없었다. 더우기 이들 산화제의 경우 분해온도

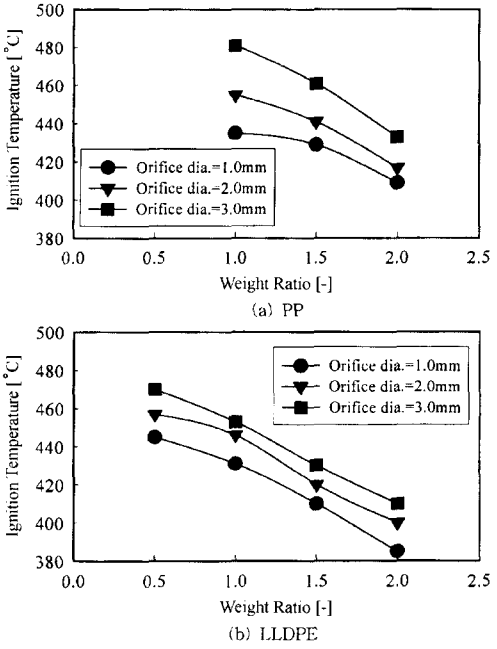


Fig. 4. Ignition temperature according to the weight ratio of sample to oxidizer($NaClO_3$) [Set temp.=700°C).

Table 2. Risk evaluation of sample with oxidizer according to species of oxidizer

Sample	Orifice dia. [mm]	Weight ratio								
		2.0	2.0+MnO_2	2.0	2.0+MnO_2	2.0	2.0+MnO_2	1.0	1.5	2.0
PP	1.0	×	×	×	×	×	×	×	○	○
	2.0	×	×	×	×	×	×	×	○	○
	3.0	×	×	×	×	×	×	×	×	○
LLDPE	1.0	×	×	×	×	×	×	×	○	○
	2.0	×	×	×	×	×	×	×	×	○
	3.0	×	×	×	×	×	×	×	×	×

× : 폭발안됨, ○ : 폭발.

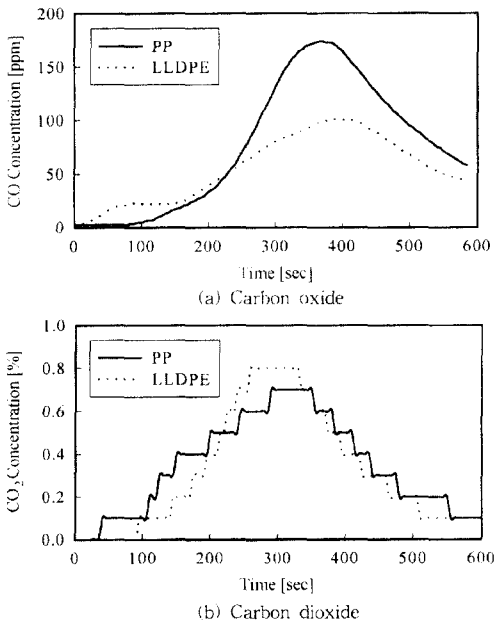


Fig. 5. Variations of CO and CO_2 concentration with time.

를 낮춰줄 수 있는 분해의 촉매로 이산화망간을 산화제에 대한 무게비로 1/2을 첨가하여 동일한 실험을 수행한 경우에도 폭발은 발생하지 않았다. 따라서 이들 산화제와의 혼촉위험성은 매우 희박한 것을 알 수 있다. 이는 각 산화제의 분해온도가 시료에 비해 상대적으로 높기 때문에 본 압력용기 내에서 폭발범위의 농도조건이 형성되기 어려운 것으로 사료된다. 한편 이에 반해 질산암모늄의 경우 오리피스의 직경이 작아질수록 폭발이 많이 발생되는 것으로 보아 혼촉위험성이 있으며, 또한 PP분진이 LLDPE분진보다 더욱 혼촉위험성이 큰 것을 알 수 있다. 이는 앞서 열분석 결과에서 보신 바와 같이 PP분진의 경우 질산암모늄의 분해온도와 유사하기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 시료와 산화제와의 분해온도가 비슷한 경우 혼촉위험성은 최대화된다는 것을 알 수 있었다.

3.3 연소가스 분석

시료로 사용된 PP와 LLDPE 분진의 연소시 가스분석기에 의해 검출된 연소가스는 일산화탄소와 이산화탄소이며, 각 시료의 연소시간에 따라 측정된 일산화탄소와 이산화탄소의 농도 변화를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 PP의 경우 LLDPE보다 상당히 많은 양의 일산화탄소가 발생하는 것을 볼 수 있는 반면, Fig. 5(b)에서는 LLDPE가 PP보다 더 많은 양의 이산화탄소 가스를 발생시키는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향성은 PP와 LLDPE를 구성하는 모노머가 프로필렌과 에틸렌이므로 프로필렌이 에틸렌에 비해 분자내 탄소수가 많아 요구되는 이론적 산소량이 더 많기 때문에 동일한 연소조건에서 불완전연소를 발생시킬 확률이 크기 때문인 것으로 사료된다. 한편, 시료 50 g을 연소시켜 발생된 이산화탄소 및 일산화탄소의 최대농도는 각각 0.7~0.8% 및 100~170 ppm이었다. 이산화탄소 및 일산화탄소의 허용농도가 각각 5,000 ppm(0.5%)과 100 ppm이라는 것을 감안하면 화재시 매우 위험하다는 것을 간접적으로 볼 수 있다.

4. 결 론

이상의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

본 연구에서 시료로 사용한 PP 및 LLDPE의 TGA 분석결과 분해온도범위는 각각 220~350 및 300~500°C 범위이며, DSC 분석결과 열분해에 따른 발열 peak가 PP의 경우 220~250°C 부근에서 나타나고 있으며, LLDPE의 경우 320°C까지의 분석 결과 발열 peak는 발생되지 않았다. 이는 TG분석 결과와도 일치하는 것으로 LLDPE의 경우 비교적 높은 온도에서 분해되기 때문이다. 따라서 LLDPE에 비해 PP가 열적인 위험성을 많이 갖고 있다는 것을 알 수 있었다. 또한, 제1류 위험물로 분류되는 산화성 고체인 산화제와 PP 및 LLDPE 분진의 압력용기 시험에 의한 혼촉위험성은 PP 및 LLDPE에 대한 산화제의 무게비가 증가할수록, 압력용기 내의 오리피스 직경이 작아질수록 발화개시온도는 낮아지는 것으로 보아 혼촉위험성이 큰 것을 볼 수 있었으며, 특히 오리피스 직경과 무게비에 관계없이 시료와 산화제의 분해온도가 비슷한 경우 혼촉위험성이 최대가 된다는 것을 알 수 있었다. 또한 시료의 연소가스 분석결과 PP의 경우 LLDPE보다 상당히 많은 양의 일산화탄소가 발생하는 반면 LLDPE가 PP보다 더 많은 양의 이산화탄소 가스를 발생하였다. 이는 PP와 LLDPE 분진의 모노머가 프로필렌과 에틸렌이므로 프로필렌이 에틸렌에 비해 분자내 탄소수가 많아 요구되는 이론적 산소량이 더 많기 때문에 동일한 연소조건에서도 불완전연소를 발생시킬 확률이 크기 때문이다.

참고문헌

1. The story of the plastics industry, 13th ed.,

Society of the Plastics Industry, New York(1971).
2. 호성케멕스 폭발사고, 조선일보(2000).
3. 김상욱, 석유화학공정의 소방대책, 방재와 보험, 제44호, 한국화재보험협회(1990).
4. 이지섭, 분진폭발에 대한 소고, 방재기술, 제9호, 한국화재보험협회(1992).
5. 이재양, 석유공장의 화재위험성과 대책, 방재와 보험, 57, 한국화재보험협회(1993).
6. 소방연구실, 플라스틱의 연소와 화재에 대한 연구, 소방논집, 4, 중앙소방학교, pp69-98(1997).
7. 이창우, 김정환, 현성호 외2인, 위험물 화학, 동화기술, p325(1999).
8. 이창우, 김정환, 현성호, 천연섬유분진의 연소특성에 관한 연구, 화재 · 소방, 13(1), p3(1999).