

안전분야-연구자료

연구원 2003-84-591

플라스틱류의 화재특성 연구

A Study on the Characteristics of Fire Hazard for
Plastic Materials

2003. 12



한국산업안전공단
산업안전보건연구원

제 출 문

한국산업안전공단이사장 귀하

본 보고서를 2003년도 공단 연구사업계획에 따라 수행한 “플라스틱류의 화재특성 연구”의 최종 보고서로 제출합니다.

2003. 12.

연구기관 : 산업안전보건연구원
안전공학연구실

연구책임자 : 이근원 (선임연구원, 공학박사)

요 약 문

1. 과 제 명 : 플라스틱류의 화재특성 연구

2. 연구기간 : 2003. 1 - 2003. 12.31

3. 연 구 자 : 이 근 원

4. 연구목적 및 필요성

산업현장에서는 건물, 설비 등에 폴리프로필렌(PP), 폴리염화비닐(PVC) 및 섬유강화플라스틱(FRP)과 같은 다양한 종류의 플라스틱 제품을 많이 사용하고 있다. 이들 제품은 주로 화학탱크, 덕트, 저장조, 구조물의 내장재 등 다양한 용도로 사용되고 있다. 이들 플라스틱은 착화 및 연소속도가 빠르고 연소시 유독가스를 다량 발생시켜 심각한 재산 및 인명피해를 초래하고 있다. 플라스틱류 재료가 화재조건에 노출되었을 때 야기되는 화재 위험성을 크게 착화성, 열방출율, 화염의 전파 및 연소가스의 유해성 등으로 평가하고 있다. 외부 열원에 의한 재료의 착화 및 열방출은 화재의 성장과 전파에 직접적인 영향을 미치고 있어 정확한 열방출율의 측정은 화재안전 측면에서 매우 중요한 요소로서 인식되고 있다. 선진국 등에서는 각종 플라스틱 재료들의 화재위험성을 종합적으로 평가하기 위해 콘카로리미터(Cone calorimeter)를 이용한 열방출율에

관한 연구가 수행되고 있다. 그러나, 국내에서는 플라스틱의 연소특성 혹은 화재위험 특성 규명이 부족한 실정이다. 따라서 각 산업현장에서 사용되고 있는 플라스틱류에 대해 다양한 연소조건 하에서 재료의 착화성, 콘카로리미터를 이용한 열방출 실험 및 마우스를 이용한 연소가스의 유해성 실험을 통해 플라스틱류의 화재위험 특성 및 유해성 자료 제시하여 인명과 재산피해를 최소화시킬 수 있는 예방 대책을 수립하고자 한다.

5. 연구방법 및 내용

산업현장에서 탱크류, 닥트 및 건물·설비 등의 건축물이나 구조물로 많이 사용하고 있는 PP, PVC, FRP를 선정하였다. 선정된 플라스틱 재료의 화재위험 특성을 평가하기 위하여 ISO, ASTM 및 KS 등 시험기준에 따라 각종 화재발생 조건에서 플라스틱의 화재위험 특성을 규명하고자 다음과 같은 방법으로 연구를 수행한다.

(1) 플라스틱의 연소성 및 화재사례

성질, 연소성 및 화재사례 조사는 각종 문헌과 전문연구기관의 화재사고 DB를 이용하여 조사하였다.

(1) 플라스틱의 착화특성

플라스틱이 외부의 열원에 의하여 착화될 수 있는 최저온도인 착화온도(Ignition temperature)를 측정하기 위하여 ASTM D 1929, ISO 871 기준에 따라 Setchkin 발화시험기를 사용하여 발화온도를 측정하였고, 화재의 크기에 따른 착화시간(Time to ignition)을 측정하기 위하여 콘카로리미터(Cone Calorimeter)를 사용하여 실험을 실시하였다.

(2) 플라스틱의 열방출 특성

본 연구에서는 플라스틱의 연소 특성을 평가하기 위해 ISO 5660, ASTM E 1354 기준에서 규정하고 있는 Cone Calorimeter를 사용하여 플라스틱이 연소하면서 방출시키는 열량측정 실험을 실시한다. 선정된 플라스틱에 25 ~ 50 kW/m²의 heat flux를 가하여 플라스틱의 종류 및 heat flux별로 열 방출특성을 측정하여 분석하였다. 이들 열 방출 및 착화 특성 데이터로부터 플라스틱의 프레쉬오버 가능성과 화재위험 특성 평가하였다.

(3) 플라스틱의 연소가스 유해성

플라스틱의 연소가스 유해성은 KS F 2271¹⁾ 기준에 따라 연소로 인하여 발생하는 가스를 챔버(chamber)에 모아 마우스를 이용한 행동정지시간을 측정하여 유해성을 평가하였다.

6. 연구결과

열 가소성 플라스틱 중 폴리염화비닐(PVC), 폴리프로필렌(PP) 및 섬유강화플라스틱(FRP)를 대상으로 플라스틱의 화재위험 특성을 조사하였다. 선정된 플라스틱의 화재위험 특성을 평가하기 위하여 ISO, ASTM 및 KS 규격 및 기준에 따라 시험을 수행하였으며, 각종 화재발생 조건에서 재료의 착화성, 열방출 특성 및 유해성 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

각 재료별 자동발화온도(SIT)를 나타낸 것으로 432°C ~ 494°C로 나타났으며, 유도발화온도(FIT)는 345~437°C로 나타났다. 재료별 착화온도를 비교한 결과 폴리염화비닐(PVC)과 폴리프로필렌(PP)은 SIT가 FIT에

비하여 약 88℃ 정도 높은 것으로 나타났고 섬유강화플라스틱(FRP)은 SIT가 FIT에 비하여 약 60℃ 정도 높은 것으로 나타났다. 이들 재료의 SIT 및 FIT는 섬유강화플라스틱(FRP), 폴리염화비닐(PVC), 폴리프로필렌(PP) 순으로 높게 나타났다.

플라스틱 3종의 착화시간은 heat flux에 따라 33~883초로 나타났으며, 25 kW/m²의 heat flux에서는 착화시간이 상대적으로 길었으나 heat flux가 35 kW/m²과 50 kW/m²으로 증가함에 따라 착화시간이 급격하게 짧아지는 경향을 나타내었다. 폴리프로필렌(PP), 섬유강화플라스틱(FRP), 폴리염화비닐(PVC) 순으로 착화시간이 빠르게 나타났다.

재료별 최대 열방출율은 실험재료에 가해지는 외부의 heat flux가 증가함에 따라 실험재료의 최대 열방출율이 커지는 것으로 나타났다. 실험재료중 폴리프로필렌(PP)가 가장 큰 최대 열방출율을 갖는 것으로 나타났다. 평균 열방출율을 측정한 결과 폴리프로필렌(PP)이 가장 크며 그 다음이 섬유강화플라스틱(FRP), 폴리염화비닐(PVC) 순으로 나타났다. 또한, 프래쉬오버 가능성을 분류한 결과 PP가 프래쉬오버의 가능성이 가장 높고, 다음은 FRP 및 PVC 순으로 나타났다. 그러나 총방출율에 따른 위험 분류를 보면 3종 모두 중간정도로 나타나 프래쉬오버의 가능성과 상관관계가 적음을 알 수 있다. 플라스틱은 연소가스 유해성으로 인한 마우스의 행동정지 시간이 11분 15초에서 14분 59초로 나타났다. 3종의 플라스틱의 유해성을 비교하면 PVC나 FRP보다는 PP가 단 시간에 유해성이 큰 것으로 나타났다. 따라서, 우리나라에서도 사람이 많이 이용하는 공공시설이나 작업장 내부 혹은 사용장소에 따라 재료의 종류 및 복사열의 크기에 따라서 착화성, 열방출율 및 가스유해성이 각기

다르기 때문에 각 국의 관련기준과 본 연구의 연구결과를 비교·검토하여 사용조건에 따른 플라스틱 재료의 화재 특성을 적절하게 분류할 수 있는 평가기준을 정립하여야 할 것으로 사료된다.

7. 활용계획

- (1) 플라스틱의 종류 및 연소조건에 따른 화재위험 특성 및 유해성 자료 제공
- (2) 플라스틱의 화재모델링 및 화재거동 파악에 필요한 자료 제시
- (3) 플라스틱의 화재예방 기준 설정 및 예방대책 수립 자료 제시

8. 중심어

폴리염화비닐, 폴리프로필렌, 섬유강화플라스틱, 발화온도, 착화성, 발화시간, 열방출율, 화재위험, 콘카로리미터, 프레쉬오버(flashover)

목 차

제 1 장. 서론	1
1. 연구의 필요성 및 목적	1
2. 연구기간	2
3. 연구범위 및 방법	2
가. 연구범위	2
나. 연구방법	2
제 2 장 플라스틱의 종류와 성질	4
1. 플라스틱의 정의	4
2. 플라스틱의 종류 및 특성	4
가. 폴리염화비닐 (PVC)	11
나. 폴리프로필렌 (PP)	17
3. 플라스틱의 연소성과 화재사례	21
가. 플라스틱의 연소성	21
나. 플라스틱 화재사고 사례	24
제 3 장 실험재료 및 방법	28
1. 실험재료	28
2. 실험장치 및 실험방법	30
가. 착화온도실험 (Ignition Temperature Test)	30
나. 열방출률실험 (Heat Release Rate Test)	32
다. 가스유해성실험	39

제 4 장 결과 및 고찰	43
1. 재료의 착화성	43
가. 발화온도 (Ignition Temperature)	43
나. 착화시간 (Time to Ignition, TTI)	46
2. 열방출 특성	48
가. 최대 열방출율 (Peak Heat Release Rate, PHRR)	48
나. 총방출열량 (Total Heat Released, THR)	50
다. 평균 열방출율 (Average Heat Release Rate, Av HRR)	52
3. 프레쉬오버의 가능성 (Flashover Propensity)	54
4. 연소가스의 유해성	56
5. 플라스틱의 화재위험 특성	58
제 5 장 결 론	60
참 고 문 헌	62
부 록 1. 재료별 발화온도	67
부 록 2. 재료별 착화시간	69
부 록 3. 재료별 열방출율	70
Abstract	75

표 목 차

<표 2-1> 열가소성 플라스틱과 열경화성 플라스틱의 비교	8
<표 2-2> 열가소성 수지의 특징과 용도	9
<표 2-3> 열경화성 수지의 특징과 용도	10
<표 2-4> 연소시험을 통한 플라스틱의 특성	23
<표 2-5> 국내 플라스틱 화재사례	24
<표 2-6> 국외 플라스틱 화재사례	26
<표 3-1> 실험에 사용된 실험재료의 명세	29
<표 3-2> 유해가스 배기온도	40
<표 4-1> 재료별 heat flux에 따른 착화시간	47
<표 4-2> 각 재료별 heat flux에 따른 최대 열방출율	49
<표 4-3> 재료별 총방출열량 비교	51
<표 4-4> 재료별 프레쉬오버 가능성	55
<표 4-5> 재료별 연소 가스 유해성 시험결과	57
<표 4-6> 플라스틱 재료 등의 열방출 특성 분류체계 및 기준	59

그림 목 차

[그림 2-1] 열가소성 플라스틱의 분류	5
[그림 2-2] 열경화성 플라스틱의 분류	7
[그림 3-1] 착화온도시험장치	31
[그림 3-2] 콘칼로리미터 구조도	35
[그림 3-3] 연소가스유해성 시험장치 개략도	42
[그림 4-1] 재료별 자동발화온도	44
[그림 4-2] 재료별 유도발화온도	45
[그림 4-3] 재료별 발화온도의 비교	45
[그림 4-4] 재료별 착화시간	47
[그림 4-5] 재료별 최대 열방출율	49
[그림 4-6] 재료별 최대 열방출율	51
[그림 4-7] 재료별 평균 열방출율(180초)	53
[그림 4-8] 재료의 평균 열방출율(300초)	53

제 1 장 서 론

1. 연구의 필요성 및 목적

산업현장에서는 건물, 설비 등에 폴리프로필렌(PP), 폴리염화비닐(PVC) 및 섬유강화플라스틱(FRP)과 같은 다양한 종류의 플라스틱 제품을 많이 사용하고 있다. 이들 제품은 주로 화학탱크, 덕트, 저장조 및 구조물의 구성재료나 내장재 등 다양한 용도로 사용되고 있다. 이들 플라스틱은 착화 및 연소속도가 빠르고 연소시 유독가스를 다량 발생시켜 심각한 재산 및 인명피해를 초래하고 있다. 플라스틱류 재료가 화재조건에 노출되었을 때 야기되는 위험성을 크게 착화성, 열방출율, 화재의 전파 및 유해성 연소가스의 방출 등으로 평가하고 있다¹⁻³⁾. 외부 열원에 의한 재료의 착화 및 열방출은 화재의 성장과 전파에 직접적인 영향을 미치고 있어 정확한 열방출율의 측정은 화재안전 측면에서 매우 중요한 요소로서 인식되고 있다⁴⁾.

선진국에서는 플라스틱 재료들의 화재위험성을 평가하기 위하여 콘카로리미터를 이용한 착화성, 열방출율 및 연소가스분석 등에 관한 연구가 많이 수행되고 있다. 콘카로리미터는 기존의 개별시험에 비해 종합적인 연소특성 인자의 측정이 가능하므로, 실제 화재조건을 가장 잘 모사한 방법으로 평가받고 있다. 그러나, 국내에서는 콘카로리미터나 연소가스시험기를 이용한 종합적인 플라스틱의 화재위험 특성 규명이 부족한 실정이다⁵⁻⁶⁾. 따라서, 본 연구에서는 산업현장에서 많이 사용되고 있는 플라스틱에 대해 연소성과 화재사태를 조사하였으며, 다양한 연소 조건 하에서 콘카로리미터를 이용한 열방출 실험과 연소가스 유해성 실험을 통해 플라스틱류의 화재위험 특성 규명과 유해성 자료

제시하여 화재시 인명과 재산피해를 최소화시킬 수 있는 예방 대책을 수립하고자 한다.

2. 연구기간

2003. 1. ~ 2003.12.31

3. 연구범위 및 방법

가. 연구범위

산업현장에서는 건물, 구조물 등의 구성요소로 사용되고 있는 폴리프로필렌(PP), 폴리염화비닐(PVC) 및 섬유강화플라스틱(FRP) 제품의 화재위험 특성을 평가하여 화재예방 대책수립을 위한 기초자료로 활용하기 위해 다음과 같은 내용의 연구를 수행하였다.

- (1) 플라스틱의 종류와 성질
- (2) 플라스틱의 연소성과 화재사례
- (3) 플라스틱의 착화성 및 열특성 평가
- (4) 플라스틱의 연소가스 유해성 평가
- (4) 플라스틱의 프레쉬오버 가능성 및 화재특성 평가

나. 연구방법

플라스틱의 성질, 연소성 및 화재사례 조사는 각종 문헌과 전문연구기관의

화재사고 DB를 이용하여 조사하였다. 선정된 플라스틱 재료의 화재위험 특성을 평가하기 위하여 ISO, ASTM 및 KS 등 시험기준에 따라 각종 화재발생 조건에서 플라스틱의 화재위험 특성 파악을 위하여 다음과 같은 실험을 실시하였다.

(1) 플라스틱의 착화특성

플라스틱이 외부의 열원에 의하여 착화될 수 있는 최저온도인 착화온도(Ignition temperature)를 측정하기 위하여 ASTM D 1929⁷⁾, ISO 871⁸⁾ 기준에 따라 Setchkin 발화시험기를 사용하여 발화온도를 측정하였고, 화재의 크기에 따른 착화시간(Time to ignition)을 측정하기 위하여 콘카로리미터(Cone calorimeter)를 사용하여 실험을 실시하였다.

(2) 플라스틱의 열방출 특성

화재의 크기, 화재의 성장과 전파에 큰 영향을 미치는 열 방출율은 화재시 각종 재료 및 제품들의 발생열량을 정확하게 측정하는 것이 화재안전 측면에서 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 ISO 5660⁹⁾, ASTM E 1354¹⁰⁾ 기준에서 규정하고 있는 cone calorimeter를 사용하여 플라스틱이 연소하면서 방출시키는 열량측정 실험을 실시한다. 선정된 플라스틱에 25 ~ 50 kW/m²의 heat flux를 가하여 플라스틱의 종류 및 heat flux별로 열 방출특성을 측정하여 분석하였다.

(3) 플라스틱의 연소가스 유해성

플라스틱의 연소가스 유해성은 KS F 2271¹¹⁾ 기준에 따라 연소로 인하여 발생하는 가스를 챔버(chamber)에 모아 마우스를 이용한 행동정지시간을 측정하여 유해성을 평가하였다.

제 2 장 플라스틱의 종류와 성질

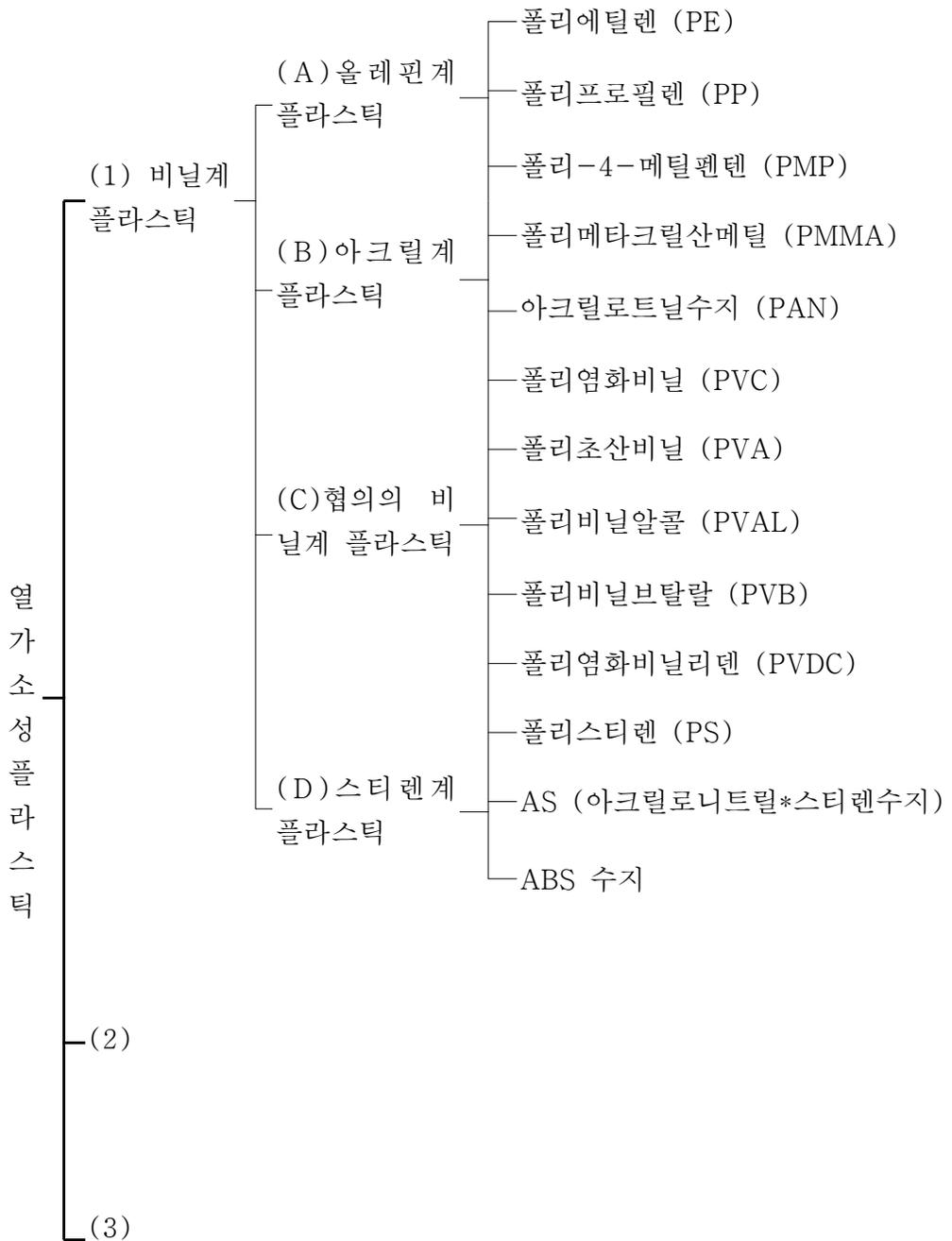
1. 플라스틱의 정의

플라스틱(plastic)이라 함은 열이나 압력 또는 양자에 의하여 가성변형을 시켜 성형할 수 있는 고분자 화합물을 말한다. 즉 가소성을 가진 물질이다. 가소성(plasticity)은 고체 물질에 그 탄성한계를 넘어서 외력을 가했을 때 그 물질이 가하여진 외력 방향으로 변형이 생겨 외력을 제거하여도 변형이 그대로 남는 것을 말하며 이런 가소성을 가진 고분자화합물에는 천연수지(natural resin)와 합성수지(synthetic resin)가 있는데 보통 플라스틱이라 하면 합성수지를 가리키며 플라스틱과 합성수지는 동의어로 사용되고 있다.

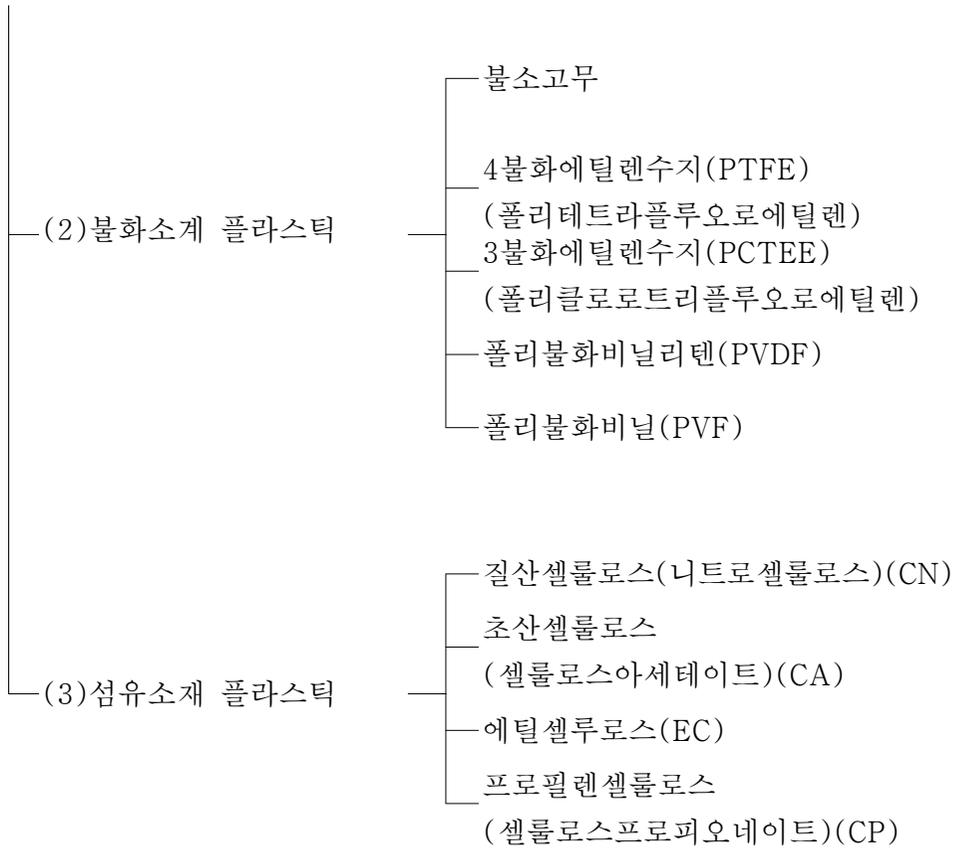
2. 플라스틱의 종류 및 특성¹²⁾

현재 생산되고 있는 플라스틱의 종류는 수 십 종류에 달하고 있으며 공업적으로 가열할 때 일어나는 상태변화에 따라 분류해 보면 열가소성 플라스틱과 열경화성 플라스틱으로 나눌 수 있으며 이를 [그림 2-1]과 [그림 2-2]에 나타내었다. 열가소성 플라스틱은 비닐계 플라스틱, 불화소계 플라스틱 및 섬유소재 플라스틱으로 나눌 수 있다. 열경화성 플라스틱은 포르말린계와 기타의 플라스틱으로 나눌 수 있다. 또한, 열가소성 플라스틱과 열경화성 플라스틱을 비교하여 [표 2-1]에 나타내었다.

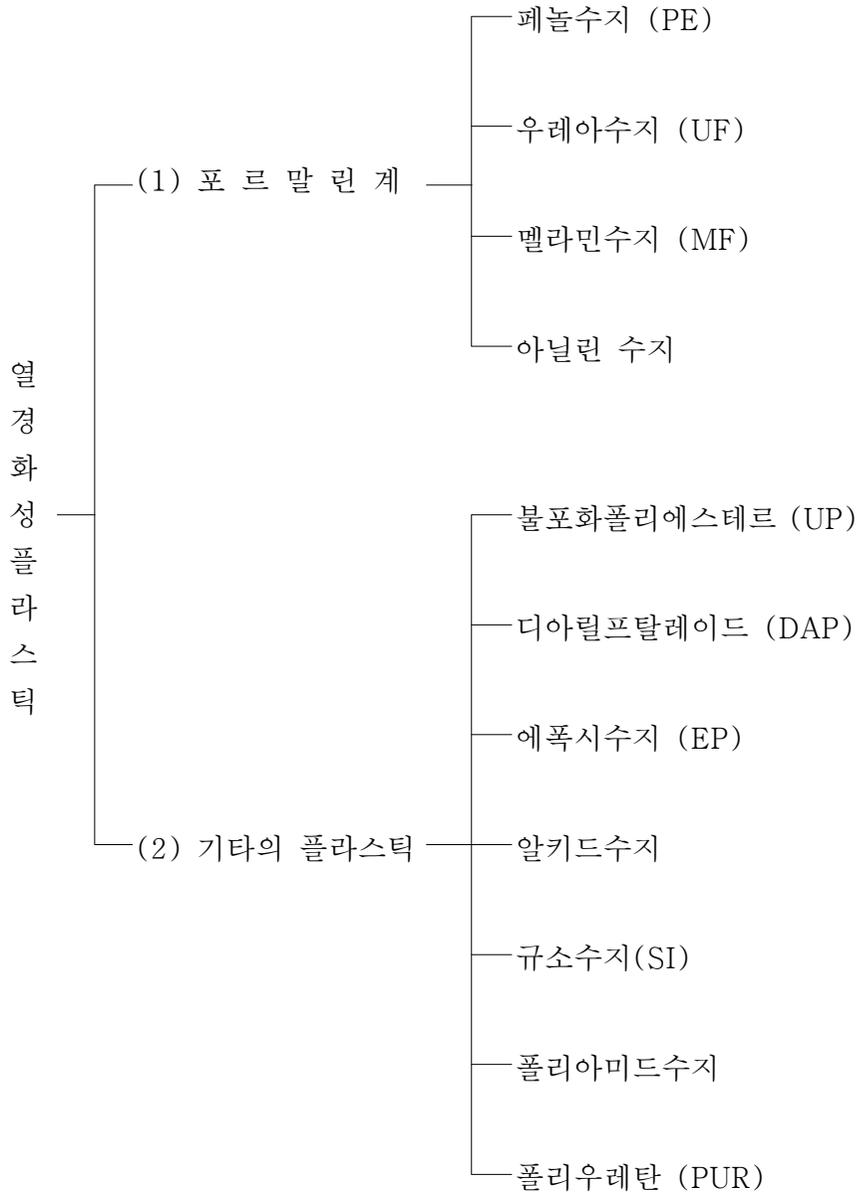
이들 주요 플라스틱의 특징과 용도를 요약하여 [표 2-2]에 나타내었다. 본 연구의 재료로 선정된 폴리염화비닐(PVC)과 폴리프로필렌(PP)에 대해 성질과 가공법 등을 다음에 자세히 기술하였다.



[그림 2-1] 열가소성 플라스틱의 분류



[그림 2-1] 의 계속



[그림 2-2] 열경화성 플라스틱의 분류

<표 2-1> 열가소성 플라스틱과 열경화성 플라스틱의 비교

구 분	열가소성(Thermoplastics) 플라스틱	열경화성(Thermosetting) 플라스틱
성 상	가열하면 연화되어 유동성이 되고 냉각하면 다시 경화하는 변화를 가역적으로 반복할 수 있는 것	가열하면 처음에는 연화되어 유동성을 나타내게 되나 차차 분자 중에 남아있던 미 반응기가 서로 반응하여 중합도가 커지게 되고 가교결합이 진행되어 망상구조를 형성하게 되어 불용불용의 상태로 되는 것
열변형 온도	150℃에서 변형되는 것이 많다	제품은 불용불용이며 일반적으로 150℃에서 견딜 수 있다
성형능률	사출, 압출성형 등의 능률적이고 연속적인 가공법을 사용할 수 있다	압축, 적층성형 등의 가공법에 의해 성형되므로 능률적이지 못하다
재활용성	성형시 화학적인 변화를 일으키지 않기 때문에 원칙적으로 재활용이 가능하다	성형시 3차원 구조가 형성되기 때문에 성형불량품은 재활용이 불가능하다
투명도	대부분의 재료에서 투명한 제품을 얻을 수 있다.	대부분이 불투명 또는 반투명 제품을 얻을 수 있다
충진제 등	충진제를 이용하지 않는 경우가 많다	충진제 강화제를 사용하는 것이 많으나 제품성능을 향상시킬 수 있다
수지의 종류	PE, PP, PVC, PS, PVA, PVDC, Nylon, PET 등	Phenol, Urea, Melamine, Epoxy 등

<표 2-2> 열가소성 수지의 특징과 용도

구분	합성 수지명	특 징	용 도
열 가 소 성 수 지	염화비닐수지	가소재배합에 의해 연전품이 만들어진다. 내약품성, 전기절연성 양호 (내열성이 약하고 연소에 의하여 염화수소가스발생)	파이프, 필름, 화학공장 배관, 전선 피복, 시이트 등
	염화비닐리텐 수지	염화비닐수지보다 내열성, 내약품성 양호, 습기나 기체가 통하기 어렵다.	
	초산비닐수지	무색투명, 접착성이 크고 연화온도가 낮다.	
	폴리스티렌	무색투명, 전기절연성, 내약품성 양호(연화점 낮다)	보온재료, 스티로폼, 완구병 등
	AS수지	투명, 강도 높고 폴리스티렌 보다 내열성, 내후성, 내유성이 강함	
	ABS수지	강인, 광택양호, 내약품성, 내유성 양호	텔레비전, 자동차 쉼터 및 내장품, 운동용구 등,
	메타크릴수지	무색투명, 내후성, 광학적 성질양호	네임프레이트 등
	폴리에틸렌	가볍고, 유연, 전기절연성, 내약품성, 내수성 양호(인쇄, 접착성이 나쁘다)	전선케이블, 석유통, 정화조, 차량 부품, 필름, 식음료 상자 등
	폴리프로필렌	폴리에틸렌과 매우 비슷하지만 보다 투명하고 연화점이 높고 반복 굽힘에 잘 견딘다.	약품용기, 파이프, 바닥인조피혁, 침막, 전기기기케이스 등
	불소수지	내약품성, 내마모성, 열안전성, 전기절연성(비싸다)	
폴리카보네이트	강인, 전기적 성질, 내열성, 내한성, 내구성은 좋고 투명		

<표 2-3> 열경화성 수지의 특징과 용도

구분	합성 수지명	특 징	용 도
열 경 화 성 수 지	페놀수지	전기절연성, 강도, 내열성, 내산성이 양호(암색으로 알칼리에 약함)	전기용프러그, 소켓, 커넥터류 등
	우레아수지	무색으로 착색이 자유롭고 기타 페놀수지와 닮았고 값이 싸다. (내수성, 내열성이 약함)	화장품용기, 조명기구, 라디오 케이스
	멜라민수지	우레아수지와 비슷하나 경도가 높고 내수성도 좋다.	각종 식기류, 재털이
	알키드수지	접착성, 유연성 좋고 내후성 양호	
	폴리에스테르	저압성형이 가능하며 유리섬유를 보강기 재료 한 것은 강인하다.	약품탱크, 음료수병, 연료탱크 등
	디아릴프탈레이트 수지	저압성형이 가능, 전기절연성, 척도(자) 안정성, 내열성 양호(다소 비싸다)	
	에폭시수지	금속이나 무기물질과의 접촉성 양호, 전기절연성, 내약품성 양호	기계부품, 공구류
	규소수지	전기절연성, 내열성, 발수성 양호, 액상, 고무상, 수지상의 각종류가 있다(비싸다)	
폴리우레탄	탄성이 있고 강인, 내마모성, 내유성이 양호(산, 알칼리, 뜨거운 물에 약함)	전선피복, 각종 성형품	

가. 폴리염화비닐 (PVC)

(1) 개요

석회석을 출발원료로 하는 아세틸렌과 염산을 반응시키면 모노머를 얻을 수 있다. 이것을 아세틸렌법이라고 한다. 한편, 석유의 분해에서 얻어지는 에틸렌과 염소에서 2염화에틸렌(EDC)을 합성하고 이것을 열분해하여 염화비닐과 염산을 얻고, 다시 부생한 염산은 카바이드 아세틸렌과 반응시켜서 염화비닐로 만드는 생산방법이 있으며 이것을 EDC법이라고 한다. EDC의 열분해로 부생하는 염산에 산소와 에틸렌을 혼합하여 반응시키면 EDC가 된다. EDC는 위에서 기술했듯이 열분해되어 염화비닐이 되므로 아세틸렌을 사용하지 않고 모노머를 만들 수가 있다. 이 방법은 옥시클로리네이션법이라하며 이것은 모노머 제조의 주력으로 되어 있다. 모노머는 분자량 62.5, 무색, 인화점 -78°C , 공기중에서의 폭발한계 4~22%(용량비)이다.

모노머를 중합시켜서 중합체(폴리머)를 얻는다. 염화비닐에서는 현탁중합이 생산의 95%를 점하고 그 밖에는 유화중합으로 페이스트 레진, 용액중합으로는 도료, 접착제등이 얻어지는데 특수한 목적이외에는 그다지 사용되지 않는다. 중합도는 150~3000의 것이 제조되고 있는데 그 대부분은 중합도 700~1300이다.

(2) 성질과 특성

수지는 비중 약 1.4의 백색분말이며 내수성, 내산성, 내알칼리성, 무독, 난연성, 양전기절연성과 그밖에 많은 용제류에도 견디는 성질이 있다. 용제에 대한 용해성의 개략을 나타내면 다음 표와 같은데 일반적으로 중합도가 낮고 코모노머(co-monomer) 성분이 많은 공중합체일수록 용해하기 쉽다. 수지는 $65\sim 85^{\circ}\text{C}$ 에서 연화하고, $120\sim 150^{\circ}\text{C}$ 에서 완전히 가소성으로 된다. 170°C 이상에서는 용융하고 190°C 이상이 되면 격렬하게 염산을 방출하면서 분해를 시작한다. 따라서 가공적정 온도는 $150\sim 180^{\circ}\text{C}$ 의 범위라고 할 수 있다. 그러나 수지의 성질은 중합체 조성, 중합도 및 제조방법도 커다란 차이를 갖고 있으므로 용도, 목적에

따라서 적당한 수지를 선택한다.

PVC는 유리전이온도(T_g)가 약 80°C 인 단단한 열가소성 플라스틱이며, 비결정성(amorphous)고분자 물질이다. PVC는 상당히 큰길이의 대칭구조(Syndiotactic Structure)를 가지고 있기 때문에 부분적인 결정구조를 가지고 있으며 이 결정부분의 melting point는 225°C 근처이다. 그러나 실제로는 이 온도에 도달하기 전에 열분해가 일어나기 때문에 용점을 관찰하기 매우 어렵다. 열분해가 시작되면서 PVC 구조 중에서 염산이 이탈하게 되는데 순수한 PVC는 실제 가공온도보다 낮은 100°C 가 넘기 시작하면 상당한 양의 염산 gas가 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 적절한 열안정제의 선정과 사용이 PVC가공에는 매우 중요하다.

(3) 성형가공

수지에 가소제, 안정제, 안료 등을 첨가하여 직접 가공하는 것을 1차 가공이라고 하며 필름, 시트, 판, 파이프 등에 엠보싱, 인쇄, 고주파 가공, 진공성형, 기타의 가공을 하는 것을 2차 가공이라고 부른다.

가) 가소제 (Plasticizer)

가소제는 수지와 상용성의 우열에 따라서 1차 가소제와 2차 가소제로 구분한다. 후자는 상용성이 뒤지기 때문에 보통 1차 가소제의 15%이하를 치환해서 사용한다. 가격의 절하와 그밖에 내연성의 부여, 전기절연성의 향상, 열안정 효과 등의 특수한 성질을 보완하는 목적으로 사용된다.

나) 충격보강제 (Impact Modifier)

경질제품에 고무상 탄성을 가진 고분자물 6~15부를 첨가하여 내충격성을 개질할 수가 있다. 특히 첨가량이 6~10부의 사이에서 뚜렷한 효과를 볼 수 있다.

다) 안정제 (Stabilizer)

PVC는 열이나 빛에 대해서 안정성이 없기 때문에 가공할 때 및 제품화한 다음의 착색, 분해를 방지하는데 필요하다. 수지에는 분해의 기점이 되는 결합이 약한 부분이 여기저기 생기며 거기에서 탈염산이 일어나서 폴리엔이 생성된다. 분해는 연쇄적으로 확대된다. 안정제는 열안정제, 킬레이트, 산화방지제, 자외선 흡수제등으로 분류되지만 그 종류는 지극히 많다.

라) 착색제 (Colorant)

열, 산, 가소제, 자외선등에 안정하며 견고하고 농도 짙은 선명한 것이 바람직하다. 무기안료, 레이키안료, 유기안료등이 사용되지만 불투명제품에는 무기안료, 레이키 안료가 사용된다. 착색제는 안료분말외에 가소제에 분산시킨 토너 컬러, 고농도에 염화비닐 수지와 혼합한 마스터배취가 시판되고 있으며 이것을 얇게 하여 사용한다.

마) 충전제 (Filler)

착색, 전기절연성, 내노화성, 열에 의한 팽창, 수축도 등의 조절을 목적으로 하여 첨가하는 일이 많고 탄산칼슘, 2산화 티탄, 클레이 등이 사용된다.

바) 윤활제 (Lubricant)

캘린더가공, 압출성형등의 경우, 소량을 첨가한다. 금속면과의 이형을 잘하며 그밖에 마찰열의 발생을 억제하기 때문에 열안정 효과가 있다. 스테아린산, 스테아릴 알콜, 스테아린산 부틸, 왁스, 저분자량 폴리에틸렌, 유동과라핀등이 사용되고 있다. 너무 많이 배합하면 혼련이 오히려 곤란하게 되고 제품표면에 스며든다든지 투명성이 저하되기도 한다.

(4) 가공

가공의 주력은 캘린더가공, 압출성형이며, 연경질을 통해서 그 대부분을 차지

한다. 우선 계량된 수지와 배합제는 연질배합에서는 리본·블렌더로 10~20분 간 혹은 고속믹서로 5분동안 혼합한다. 가소제에 안정제를 첨가하여 120℃로 가열하고 수지에 첨가하면 안정제의 균일한 분산을 돕기 때문에 이 방식을 취하는 곳이 많다. 혼합물을 100℃정도로 가온하면 가소제는 수지에 완전히 흡수되고, 분체로서 유동이 가능한 드라이블렌드로 되므로 펠레트로 하지않는 압출기에 공급할 수가 있다. 경질배합에서는 고속믹서로 격렬하게 혼합한다. 그 때에 수지온도를 외부가열과 마찰열에 의해서 100~120℃정도로 한다. 이렇게 혼합한 것은 반버리믹서(Banbury mixer), 혼련롤, 압출기등으로 혼련하고 압출기, 캘린더롤, 사출성형기를 사용해서 제품을 만든다.

가) 롤가공

블렌더로 혼합된 것을 혼련롤로 140~170℃에서 약 10분 혼련하면 용해되어 균일한 겔상이 된다. 다음에 혼합물을 부분적으로 채취하여 겔화가 불충분한 것이 없는가를 잘 확인하고 작업을 다음으로 이행한다. 이것을 펠러타이저에 넣으며 펠레트가 된다. 표면에 주름모양을 내기 위해서는 캘린더에서 나온 시트를 주름롤로 주름을 넣는 경우와 일단 말아올린 것을 텀블러(주름 넣는 기계)에 넣어서 주름을 넣는 방법이 채용되고 있다. 경질판은 캘린더로 압연한 것을 적당히 겹쳐서 대형의 다단 프레스로 열프레스한다.

롤로 만들 수 있는 제품의 두께는 0.08mm에서 0.6mm까지, 그 이상의 것은 겹쳐서 프레스하면 20mm정도의 것도 만들 수 있다. 0.2mm이하를 필름, 그 이상을 시트 및 판으로 구분한다. .

나) 압출가공

드라이 블렌드 또는 페레트를 호퍼에 넣으면 회전하는 스크류에 의해서 앞쪽으로 보내지고 다이의 형태대로 압출되어 제품이 된다. 성형소재에는 드라이 블렌드를 사용하는 것이 많다. 호스, 파이프, 과형판, 필름, 벨트, 병등이 이 가공으로 만들어지는데 다이 부분에 동선을 통하면 비닐피복 전선이 된다. 또한 압출중인 튜브에 공기를 보내어 팽창시키면 얇은 튜브(인플레이션 튜브)가 되

며 튜브(파리슨)를 형으로 끼우고 공기를 취입하면 병이 된다. 캘린더가공에서는 0.08mm이하, 혹은 0.6mm이상의 필름, 시트는 T다이 압출로 만든다.

다) 사출성형

PVC는 열 안정성이 나쁠 뿐만 아니라 용융할 때의 점도가 높고, 디소트로피(움직이고 있으면 유동성이 있지만 정지하면 유동성을 잃는 현상)거동을 일으키기 때문에 사출성형은 폴리스티렌이나 폴리에틸렌처럼 용이하지 않다. 이 때문에 경질에서는 그다지 큰 것은 만들어지지 않고 경질 파이프의 이음매, 펄프, 전화기 정도의 크기가 고작이다. 가소제를 조금 넣으면 흐름이 매우 개선되어 사출성형이 용이하게 되는데 일부에 대해서 약 1.8℃씩 연화온도가 낮아지며 크립(Creep)에 의한 변형을 일으키기 쉬우므로 첨가량은 제품에 요구되는 성능에 따라 결정할 필요가 있다. 연질 배합에서는 성형도 용이하며 장화, 구두창, 소켓등이 고능률로 만들어지고 있다. 성형기에는 인라인 스크류식의 것을 사용하고, 체류부분이 없도록 한다. 수지의 분해가 일어났을 경우는 즉시 작업을 중단하고 내부를 소제하는 일 등이 필요하다. 성형 수축률은 경질에서 0.1~0.4%, 연질의 경우 1.0~5.0%이다.

라) 적층가공

0.5mm두께로 압연된 경질시트를 수십장씩 겹쳐, 금속판에 끼워서 열프레스를 하면 경질판이 된다. 작업은 보통 다단 프레스를 사용한다. 충분히 예열 시간을 두고 연화시킨 다음에 프레스를 하므로 온도상승에서 냉각까지 길면 2시간 이상에도 이른다. 같은 방법을 소형으로 하여 바닥타일의 적층을 하고 있으며 충전재가 많은 시트와 무늬가 들어간 시트를 서로 접촉시키고 있다. 캘린더로 압연된 각종 필름이나 시트를 접합기로 길게 연속적으로 적층 할 수가 있다. 각 시트를 열 드럼 위에서 겹쳐 놓고 위에서 적외선 시트로 가열하여 충분히 연화시킨 다음, 철롤과 고무롤의 조합으로 만든 프레스롤로 연속적으로 프레스한다.

(5) 용도

농업용 비닐필름, 전선피복, 페이스트 제품(인형, 완구, 방수장갑), 경질파이프
혹은 판, 병, 컵 및 섬유 등에 사용된다.

나. 폴리프로필렌(PP)

(1) 개요

폴리프로필렌은 에틸렌과 마찬가지로 석유(나프타)의 분해에 의해서 얻을 수 있다. 폴리프로필렌은 그 제조기술에서 보더라도 또한 성능에서 보더라도 폴리에틸렌과 밀접한 관계에 있다. 고분자량, 결정성, 고융점의 폴리프로필렌(아이소택틱 폴리프로필렌)의 발명은 1954년, 이탈리아의 Natta에 의해 이루어졌다. 그 전년에 독일의 Ziegler가 알루미늄과 티타늄의 복합촉매로 저압에서 고밀도의 폴리에틸렌을 중합할 수 있다는 것을 발견했는데 Natta는 Ziegler촉매를 약간 고친 촉매를 이용하여 폴리프로필렌의 중합에 성공하였다.

(2) 성질과 특성

폴리프로필렌은 각종 성질이 폴리에틸렌과 매우 비슷하지만 비중은 더욱 작아서(0.9~0.92) 모든 플라스틱 중에서 최소의 부류에 속한다. 발화하면 폴리에틸렌처럼 불타지만 특이한 냄새를 내기 때문에 폴리에틸렌과 간단히 구별할 수가 있다.

고밀도 폴리에틸렌과 비교하면 연화온도가 현저하게 높고, 인장강도, 굽힘강도, 강성등도 크지만 충격강도는 매우 뒤진다. 적당한 조건 하에서 연신을 가하면 인장강도, 강성, 충격강도 등은 더욱 향상되고 내굽힘 피로성도 현저히 개량된다. 또한 폴리에틸렌보다 성형품의 투명성, 표면광택은 양호하며, 성형수축률이 작기 때문에 외관 및 치수정도란 점에서 안성맞춤이다. 폴리프로필렌이 저온에서의 내충격성은 폴리에틸렌보다 뒤지는 것이 결점이다. 폴리프로필렌의 기계적 성질은 여러 가지 충전재의 배합에 의해서 상당히 개변할 수가 있다. 충전재료로서는 석면, 실리카 운모, 유리섬유 등이 잘 이용되지만 이것들을 적당량씩 첨가함으로써 굽힘탄성률이나 경도 등을 광범위하게 바꿀 수가 있고 또한

열팽창률을 많은 열경화성 수지와 같은 정도까지 낮출 수도 있다. 전기적 성질 중에서 유전율이나 역률은 폴리에틸렌과 거의 같으며 내전압, 내아크성은 약간 뛰어나고 고주파 절연재료로서 우수한 성능을 갖고 있다.

폴리프로필렌의 내약품성은 고밀도 폴리에틸렌과 동등 내지 약간 우세한 정도인데 스트레스 크래킹에 대한 저항성이 폴리에틸렌 보다 각별히 뛰어난 것이 특징이다. 폴리프로필렌은 폴리에틸렌과 같이 방향족 탄화수소나 염화탄화수소에는 80℃ 이상에서 용해하고 상온에서는 겨우 팽윤하는 정도이다.

폴리프로필렌의 투명성은 폴리에틸렌 보다도 매우 뛰어나다. 이것은 뛰어난 기계적 강도나 내열성과 더불어 필름등의 포장재료로서 사용하는데 특히 인기 있는 성질이지만 더욱 투명도를 증가시키기 위해서는 결정조해제의 첨가가 유효하다. 조해제라는 것은 폴리프로필렌의 결정핵으로 되는 것이며 이것을 적당량 배합하면 용융 폴리머가 냉각할 때에 극히 미세한 구정의 생성을 촉진하기 때문에 투명도가 좋아지고 강인성이나 저온에서의 내충격성도 약간 향상되는 것이다. 조해제로서 방향족 카르본산의 Na, Zn, Al 등의 금속염이 유효하다고 알려져 있다.

(3) 성형가공

폴리프로필렌은 폴리에틸렌과 같이 대단히 성형성이 좋은 재료이며 보통 타입의 사출성형기나 압출기를 사용하여 각종 성형품, 봉, 파이프, 필름, 시트, 병, 모노필라멘트 등으로 가공할 수 있다. 성형 수축률은 고밀도 폴리에틸렌 보다 작고 또한 수축률의 방향성 정도도 작으므로 적당한 성형조건을 고르면 치수정도가 양호한, 잔류변형이 적은 성형품을 얻을 수가 있다.

폴리프로필렌을 연신하면 내굽힘피로성이 현저히 향상되지만 이 성질을 잘 이용하여 갖가지 용기의 덮개와 본체를 연결하는 일체성형 Hinge(경첩)를 사출성형을 하고 완전히 냉각하기 전에 뽑아내어 곧바로 Hinge부분을 굽혀서 연신효과를 부여하면 이 부분의 내굽힘피로성이 향상되고 디자인과 성형조건이 적절하다면 0℃에서 300만번 이상의 개폐에 견딜 수 있는 것을 얻을 수 있다고

한다. 단 금형의 설계에 있어서 게이트 위치에 주의하고 성형재료가 Hinge부분을 직각으로 횡단해서 흐르게끔 성형할 일이 중요하다.

폴리프로필렌의 필름 및 라미네이트는 T다이법에 의한 경우는 폴리프로필렌 용의 설비를 그대로 사용하여 제조할 수가 있다. 통상의 공냉 방식을 채용하고 있는 인플레이션법에서는 필름의 냉각속도가 늦기 때문에 취약하고 투명도가 나쁜 필름밖에 얻을 수 없다. 그러나 최근에는 수냉자켓을 이용한다든지 물을 직접 필름과 접촉시킨다든지 하는 급냉 방식이 개발되어 폴리프로필렌의 인플레이션 필름도 대량으로 생산되고 있다. 또한 폴리에틸렌, EVA, 폴리아미드, 폴리염화비닐리덴 등과의 복합 필름도 T다이법 혹은 인플레이션법에 따른 복합압축에 의해서 제조되고 있다.

폴리프로필렌 필름은 강인하고 투명성이 좋은 것이 특징이지만 이것을 다시 가열하면서 새로워 가로로 잡아 늘리고 2축연신을 가하면 강도나 여러 물성이 각별하게 향상된다. 2축연신 방법으로는 우선 세로 방향으로 연신한 다음 텐터그립으로 양쪽 끝을 잡아쥐고 가로 방향으로도 연신하는 방식과 튜브상의 필름에 가압공기를 불어넣어 종횡의 양방향을 동시에 연신하는 방식 등이 있다.

(4) 용도

폴리프로필렌의 사출성형품은 식기, 바게스(물통), 목욕용품 등의 가정용품이나 완구 등의 약전기기나 자동차부품 등의 공업용품에 사용되고 있다. 특히 주목되고 있는 것은 맥주병 등의 수송용 상자, 농수산물의 수확 컨테이너등의 대형성형품에 이용되고 있다.

폴리프로필렌 필름은 강력하고 질기고, 또한 셀로판과 같은 정도의 투명성의 것을 쉽게 얻을 수 있기 때문에 포장용 필름으로서 대량으로 사용되고 있다. 또한, 저온취약성이 개량된 그레이드의 개발에 수반하여 압출성형 시트의 열성형품이 각종냉동식품의 포장용기로서, 또한 폴리프로필렌 시트는 내약품성이 요구되는 분야에서의 라이닝 재료로 사용되고 있다.

폴리프로필렌의 스플리트안은 화물포장용 끈, 묶음 테이프, 수예재료등에서

특히 얇을 짜서 만든 크로스 주머니는 종래의 마대대신에 쌀, 보리등의 곡물이나 화학비료용의 주머니, 토목공사용의 모래주머니 등에 많이 사용되고 있다. 또한 얇을 짠 제품은 실내장식용의 크로스, 카펫트, 커튼등에도 상당한 양이 사용되고 있다.

취입성형의 분야에서는 폴리에틸렌에도 압도되고 있지만 물통, 보온병 등 내열성이 요구되는 제품에 사용된다. 폴리프로필렌의 다양한 기계적 강도와 내약품성이 우수하기 때문에 공업용 부품으로서도 사용되고 특히 내산성이나 내알칼리성이 요구되는 화학장치의 부품이나 라이닝의 재료에 매우 적당하다. 또한, 폴리프로필렌 섬유는 주로 여과포, 어망, 로프 등의 산업자재로서 이용된다.

3. 플라스틱의 연소성과 화재사례

가. 플라스틱의 연소성

플라스틱 제품의 성능을 평가하기 위해서는 역학적, 열적, 광학적, 내구성, 전기적, 화학 및 물리적 시험 등을 행하고 있다. 플라스틱 시험은 재료와 제품의 제 성질을 합리적이고 정확히 파악하기 위하여 행하는 것으로 제조사의 품질과 공정관리의 척도가 될 사용적성, 가공적성 및 그 한계 등을 알며, 신재료의 평가와 응용, 물성, 구조 연구의 수단으로서도 중요하다.

플라스틱 시험을 하는 목적을 대별하면

- (1) 재료의 기본적 성질을 확인 그재료의 특성을 파악하는 것
- (2) 각종 사용목적에 응용하여 최적의 재료를 선택하는 것
- (3) 플라스틱 제품을 제작하는 경우의 공학적 설계자료를 얻는 것
- (4) 생산 및 품질관리 수단으로 하는 것
- (5) 재료의 구입과 제품의 판매를 위하여 검사를 응용하는 것
- (6) 시험을 통하여 재료와 제품의 규격화 표준화를 도모하는 것

등이다.

플라스틱 시험이 갖는 의미에 대해서 플라스틱 공업발달의 과정과 관련하여 고찰해보면, 일반적으로 어떤 재료만 해도 그것을 기초적인 물성과 화학구조와 결부하여 올바른 이해와 평가를 하여 합당한 용도를 개척하여 사용조건에 대응한 바른 사용법을 고객에게 제공하는 것이다. 그러나, 플라스틱 시험은 사용 및 가공의 적정성 등에 관한 시험으로 실제 화재 안전적 측면에서는 고려된 시험은 하나도 없다. 따라서, 본 연구에서는 이들 플라스틱에 관해 연소성 혹은 화재 특성 실험을 통해 제품의 사용용도에 따른 적절한 열특성 혹은 유해성 자료를 제시하는 것이 화재예방 대책 수립에 기여할 것으로 판단된다.

<표 2-4>은 주요 플라스틱에 대한 연소시험을 통해 플라스틱의 특성을 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 일반적으로 열가소성 플라스틱은 열경화성 플라스틱 보다는 연소가 쉽고, 불꽃을 제거하여도 쉽게 연소됨을 알 수 있다. 또한 연소시 플라스틱이 용융낙하 되므로 화재를 더 쉽게 옮기거나 연소확대가 쉽다. 열가소성이나 열경화성 플라스틱 모두 연소시에는 고유한 그리고 특유의 냄새를 발생시킨다. 또한, 각종 첨가제에 의한 다양한 유독가스가 발생하기 때문에 연소가스에 의한 질식의 우려가 높다.

<표 2-4> 연소시험을 통한 플라스틱의 특성

	종류	연소 난이	불꽃제거후 연소여부	플라스틱의 상태	냄새
열가소성 플라스틱	스틸렌수지	쉬움	연소	경화	스틸렌모노머 냄새
	아크릴수지	쉬움	연소	경화	아크릴 모노머의 특유의 냄새
	폴리에틸렌	쉬움	연소	용융낙하	파라핀 타는 냄새
	폴리프로필렌	쉬움	연소	용융낙하	석유냄새
	폴리초산비닐	쉬움	연소	경화	초산 냄새
	폴리비닐브터롤	쉬움	연소	용융낙하	특유한 냄새
	폴리염화비닐	어려움	안됨	경화	산의 자극성 냄새
	염화비닐 초산비닐 공중합체	어려움	안됨	경화	특유의 냄새
	폴리염화비닐렌		안됨	경화	특유의 냄새
	폴리카보네이트	쉬움	서서히 꺼짐	경화	특유의 냄새
폴리아세탈	쉬움	연소	용융낙하	포르말린 냄새	
열경화성 플라스틱	페놀수지	어려움	안됨	팽윤, 쪼개짐	강력포르말린 냄새
	우레아수지	어려움	안됨	팽윤	포르말린 냄새
	메라민수지	어려움	안됨	팽윤	유레아와
	폴리에스테르수지	쉬움	연소	팽윤	스틸렌모노머 냄새

나. 플라스틱 화재사고 사례

국내외 플라스틱 화재사례 조사를 위해 한국화재보험협회에서 발간한 화재사고사례 자료¹³⁾와 삼성화재위험관리연구소에 의뢰하여 국내 플라스틱 화재와 국외에서 발생한 플라스틱 화재사례⁶⁾를 <표 2-5>과 <표 2-6>에 각각 나타내었다. 플라스틱류 중 스티렌(스티로폼), 우레탄 폼의 화재가 많고, 사고조사시 관련물질이 밝혀지지 않은 플라스틱류와 보온 단열재의 화재가 대부분이다. 간혹, 폴리에틸렌이나 폴리염화비닐 플라스틱의 화재사례를 볼 수 있다. 이들 화재사례에서 보듯이 플라스틱 중 모두 열가소성 플라스틱 화재이다. 따라서, 열가소성 플라스틱이 화재에 취약하며 이들에 대한 특성을 조사하여 사용장소나 조건에 따라 적절한 가이드라인을 제시할 수 있기 때문에 여러 종류의 플라스틱 화재특성 규명이 필요하다.

<표 2-5> 국내 플라스틱 화재사례

사고일자	장소	사고내용	관련물질	피해액	비고
1990.10	전자공장 (광주)	용접작업의 용접불티에 의해 자재창고에 쌓여 있던 플라스틱 등의 태우면서 연소 확대	플라스틱		삼성화재위험 관리연구소
1994. 6	합성수지 제조공장	산소용접 중 용접불티가 플라스틱 완제품이나 포장재에 착화 됨	플라스틱	사 망:1명 피해액:400억	삼성화재위험 관리연구소
1998. 10	00 냉동 (부산)	냉동창고 신축공사중 우레탄폼 분사과정에서 발생한 유증기가 용접 불티에 의해 인화	폴리 우레탄	사 망:27명, 부 상:16명, 피해액:2억	연합통신, 98.10.29
1996. 5	00 제분 (부산)	철구조물을 철거하기 위해 볼트를 절단하다가 절단화기가 벽속에 있는 단열재에 착화	스티로폼	피해액 50만원	화재발생 보고서

(표2-5의 계속)

1996. 5	00 빌딩 (부산)	천장내 배관닥트실에서 배관 교체작업중 배관 단열재에 용접불티에 의해 착화	배관 단열재	피해액: 30만원	특수건물 화재통계 (1996)
1995. 7	(부산)	옥내 전기합선으로 천장 가연성물질 및 단열재 발화	스티로폴	피해액: 350만원	화재발생 보고서, 화보험
1982	H화학 (서울)	제품창고에서 원인미상의 화재 발생, 플라스틱 제품에 급격히 연소	발포 폴리 스티렌	피해액: 5천만원	한국화재 보험협회
1988. 3	(주)S	난방용 배관밸브 교체를 위해 산소 용단작업중 불티가 비산 파이프 스티로폴에 착화	스티로폴	사망:1명 부상:12명	
1978	S화학 (경기)	고열로 발포한 스폰지 제품의 자연발화	스폰지	피해액: 1억2천만 원	한국화재 보험협회
1982	S화학 (서울)	연탄불에 의해 플라스틱 부스러기에 착화되어 작업장내 연소확대	플라스틱	피해액: 2천만원	한국화재 보험협회
1981	S화학 (부산)	발포 폴리스티렌 공장의 마감작업실에서 원인미상 화재 발생	폴리스티렌	피해액: 6천만원	한국화재 보험협회
1997. 4	K수지 (인천)	누전으로 건축용 단열재인 스티로폼에 착화	스티로폴	95,000	
1993. 5	J산업 (경기)	인쇄기를 수리 하던중 용접 불티가 주위 인화물에 튀어 발화. 불은 건물 천정 보온재를 태우면서 연소 확대	보온재	피해액: 30만원	
1994. 3	00전기 (구미)	공동구내의 조명용 형광등이 보온재에 착화되어 케이블이 연소.	PVC 케이블	피해액: 4,300만원	
1996. 1	S양회 (서울)	부품창고내 히팅코일의 과열로 코일 피복에 착화. 배관 보온재에 발화 추정	배관 보온재	150만원	

<표 2-6> 국외 플라스틱 화재사례

1973	A합성수지 (일본)	기계과열로 인해 플라스틱원료(입상) 등에 발화됨	플라스틱	피해액: 8천억원	한국화재 보험협회
1973	C합성수지	발포제 배합믹서 모터가 가열되어 발포제에 발화	플라스틱 발포제	피해액: 7천억원	한국화재 보험협회
1986.12	군마 (일본)	가구공장에서 의자 우레탄표면에 접착제를 스프레이로 도포시 발화	폴리우레탄	사망: 1명	
1995.11	기옥현 (일본)	곤포기내의 캔파렛트의 곤포재 폴리에틸렌 시트와 전열히터가 접촉 착화	폴리에틸렌	사망 3명 부상 6명	
1966. 2	나고야 (일본)	LNG탱크 골재에 단열재인 우레탄 점착작업중 발화. 단열재의불완전 연소로발생한 가스때문에 내부작업자 탈출 못함	폴리 우레탄	사망 15명 부상 6명	
1979. 5	오오사카 (일본)	공장 4층에서 용접작업중 불꽃이 1층창고에 낙하 우레탄이 급속히 연소	폴리 우레탄	사망 7명	
1984. 1	궁성	가구공장의 2층 창고에 쌓아둔 우레탄에서 출화.	폴리 우레탄	사망 1명, 부상 3명	
1985. 9	북해도 (일본)	우레탄을 내부의단열재로서 Spray시공한바, 전선이 과열하여 우레탄이 발화	폴리 우레탄	미상	
1977. 5	(동경)	창고수리를 위해 가스용접 중 우레탄 단열재에 인화	폴리 우레탄	소방관 부상	火災 1987(4)

(표 2-6의 계속)

1973. 2	TETCO사 (뉴욕)	탱크수리 작업중 폴 리우레탄 단열재 화 재	폴리 우레탄	사망40명, 부상 3명	위험관리, 1984(1월)
1967. 4	(미국)	폴리우레탄 단열재 화재	폴리 우레탄		화재, 1985(2월)
1994. 5	오레곤 (미국)	냉동창고의 전기합선 으로 벽체의 우레탄 폼에 화재	폴리 우레탄폼	피해액 150만 달러	NAPA Journal, 1994(5-6)
1975. 3	알라바마 (미국)	촛불을 이용해 케이블 관통부기밀시험 중 폴 리우레탄 피복재에 인 화	폴리 우레탄	\$100,000 천원	
1979.10	00저유소 (독일)	단열재교체중 용접불 티가 우레탄에 발화하 여 광유저장탱크 야드 화재·폭발	폴리 우레탄		火災, 1987(4)
1979. 1	00저장소 (독일)	동결된 원유를 가스 버너로 가열중 우레 탄 단열재가 발화	포리 우레탄	피해액 탱크 7기 파손	火災 1987(4)
1993. 5	قم부리아 (영국)	창고내 히타의복사열 이 창고내 폴리에티 렌폼에 발화	폴리에틸 렌폼	부상 1명 £5,000,000	

제 3 장 실험재료 및 방법

1. 실험재료

앞장의 화재사례 조사에서 살펴보았듯이 대부분의 플라스틱의 화재는 열가소성 플라스틱에서 발생되고 있다. 이근원(1999)은⁶⁾ 기존 연구에서 화재가 많이 발생하는 폴리스티렌, 폴리우레탄 및 폴리에틸렌의 화재특성을 파악하였기 때문에 본 연구에서 폴리염화비닐(PVC), 폴리프로필렌(PP) 및 섬유강화플라스틱(FRP)을 선정하였다.

본 연구에서 선정된 실험재료는 현재 산업현장에서 약품탱크, 덕트, 자징조 및 구조물의 내장재로 많이 사용되고 있는 플라스틱재료 중 폴리프로필렌(PP), 폴리염화비닐(PVC) 및 섬유강화플라스틱(FRP)제품 3종에 대하여 실시하였으며, 세부적인 실험재료 내역은 <표 3-1>에 나타내었다. 실험재료는 모두 KS 지정 품목이며, 실험이 용이하도록 두께 3mm 판상으로 성형하였다. 플라스틱 3종 모두 제조사가 다르며, 폴리염화비닐과 섬유강화플라스틱은 첨가제의 성분은 알 수 없었다.

<표 3-1> 실험에 사용된 실험재료의 명세

실험재료명	구분	조 성	두께 (mm)	밀도 (kg/m ³)	용도
폴리염화비닐 (PVC)	A	PVC : 85±5 %, 안정제 : 7.5±5 % Filler : 7.5±5 %	3.0	1483	화학탱크 전해조 저장조 오수처리장치 덕트
	B	PVC : 85±5 %, 안정제 : 7.5±5 %, Filler : 7.5±5 %	3.0	1463	
	C	PVC : 85±5 %, 안정제 : 7.5±5 %, Filler : 7.5±5 %	3.0	1528	
폴리프로필렌 (PP)	A	PP : 100 %, 기타	3.0	884	약품탱크 덕트 전해조 저장조
	B	PP : 100 %, 기타	3.0	882	
	C	PP : 100 %, 기타	3.0	947	
섬유강화 플라스틱 (FRP)	A	불포화폴리에스테르수지 : 20%, Al ₂ (OH) ₃ : 40%, Glass Fiber : 25%, 기 타:15%	3.0	1818	탱크류 배전반 내장판 천정재
	B	불포화폴리에스테르수지: 20%, Al ₂ (OH) ₃ : 35%, Glass Fiber: 25%, 난연 제 : 5%, 기타: 15%	3.0	1836	
	C	불포화폴리에스테르수지: 14 %, Al ₂ (OH) ₃ : 65%, Glass Fiber: 15 %, 기 타: 6%	3.0	2051	

2. 실험장치 및 실험방법

가. 착화온도실험 (Ignition Temperature Test)

플라스틱이 외부의 열원에 노출되었을 때 착화될 수 있는 최저온도인 착화온도(Ignition temperature)를 측정하는 시험이다. 착화온도 측정에는 2가지 방법이 있는데 SIT(Self-Ignition Temperature)와 FIT(Flash-Ignition Temperature)가 있다. SIT는 착화원(Flame)이 없이 스스로 자기가열에 의해 착화가 일어나는 최저온도를 측정하고, FIT는 착화원(Flame)이 존재할 때 착화가 일어나는 온도를 측정하는 실험이다.

(1) 실험장치

착화온도를 측정하기 위해 사용한 실험장치는 [그림 3-1]과 같은 발화온도시험기(미국, ATLAS사 Setchkin self-ignition tester CS-81)를 사용하였다. 실험장치의 구조는 가열로, 온도조절기, 공기공급 및 제어장치, 공기공급 펌프, 시편홀더, 파일럿 버너 등으로 구성되어 있다. 가열로는 원통형으로 길이 220 mm, 직경 100 mm 로 되어있으며 내부에 세라믹재질의 길이 220 mm, 직경 76 mm 의 실린더가 들어간다. 이 내부의 실린더 안에 시료가 들어간다. 가열로의 온도는 1000℃ 까지 조정할수 있으며 실린더내부 및 시료의 온도를 측정하기 위해 K타입 열전대를 이용하였다.

실험방법은 100 kg/m³보다 큰 밀도를 가진 재료에 대해서는 3.0±0.2 g의 시편을 사용하고, 알약형태나 파우더의 형태로 시험한다. 판형태의 재료는 20±2 mm×20±2 mm로 하여 시편중량이 3.0±0.2 g이 되는 두께 로서 실험을 실시한다. 100 kg/m³ 보다 작은 셀루라 재료는 바깥표피를 제거하고 20±2 mm×20±2 mm×50±5 mm의 블록형태로 잘라 시험한다. 정확한 판단을 위해서 반복시험이 필요하므로 다수의 시편을 제작한 다음온도 23±2 ℃, 상대습도 50±5

%에서 40시간 이하로 양생한다.



[그림 3-2] 착화온도시험장치

(2) 자동발화온도 (Self-Ignition Temperature, SIT) 측정

- 가) 시험기기의 온도조절기를 측정하고자 하는 온도에 설정한 다음 시험기의 컨트롤러의 모터를 가동하여 공기를 흘린 다음 공기의 유속을 맞춘다.
- 나) 설정된 온도에서 안정이 되면 미리 양생된 시료를 시료컵에 넣고 열전대를 부착한 다음 시험기 내부에 삽입한다.
- 다) 시험기 위쪽에 부착한 거울로 시험기 내부의 시료를 관찰한다. 만약 설정된 온도에서 폭발, 불꽃 혹은 작열이 일어나거나 열전대의 온도가 급격히 상승하면 착화가 된 것이다.
- 라) 만약 설정된 온도에서 5분간 유지했을 때 폭발, 불꽃, 작열 등이 나타나지 않거나, 시료가 불꽃 없이 다 타서 소멸되었으면 착화가 되

지 않은 것이다. 따라서 착화여부에 따라 설정된 온도를 50 °C 맞추거나 높인다.

마) 다시 높이거나 낮추어진 온도가 안정될 때까지 기다렸다가 새로 운 시료를 넣는다. 이 절차를 반복하여 착화가 일어나는 가장 낮은 온도를 찾는다.

(3) 유도착화온도 (Flash-ignition temperature, FIT) 측정

SIT(Self-ignition temperature)의 측정방법과 동일하나 시험기 위쪽의 시료를 삽입하는 내부실린더 위에 과일릿 버너가 달려 있어서 여기로 프로판가스를 공급하여 점화원을 준다. 시료가 열원에 의해 가연성 증기를 발생시키는데 이때 가연성증기와 점화원이 접촉하여 착화되는 최저온도를 찾는다.

나. 열방출률실험 (Heat Release Rate Test)

(1) 콘칼로리미터의 이론적 배경

재료의 순연소열량은 연소에 필요한 산소의 양에 비례한다는 점에 기초를 두고 있다. 즉, 연소중에 산소 1 kg이 소비되면 약 13.1×10^3 MJ의 열이 방출된다는 관계가 성립한다.

열방출 특성은 연소생성물 흐름속의 산소농도와 유속으로부터 유도된 산소소비를 측정함에 의하여 결정한다. 연소로 인해 열량이 발생되기 위해서는 배출 흐름 속으로부터 제거되는 일정한 수의 산소분자들이 있어야 한다. 이 개념으로부터 연소생성물의 배출속도를 변화시키거나 추가적인 희석흐름을 도입한다 하더라도 이 방법의 결과는 변하지 않는다는 것이 명확해진다. 실제로 사람들이 산소의 몰수를 셀 수는 없으나 산소의 농도와 유량의 측정은 가능하다. 그

러므로 산소소비방정식의 실제적인 이행은 유입과 유출 흐름사이의 물 변화, 가스분석기로부터 어떤 가스의 포착 등과 같은 문제들과 관계되어지는 것이다. 그 결과로 도출된 방정식은 간단하지만은 않으나 대부분의 관계되는 조건들에 대해서 상세하게 연구되었으며, 이들 방정식들을 근거로 산소소비열량계(콘칼로리미터)가 개발되었다.

연소시스템에서 발생하는 열량과 공기로부터 소모되는 산소의 양 사이에는 상관관계가 있음이 실험적으로 오래 전부터 알려져 왔다. Parker 의 실험연구 "An investigation of fire environment in the ASTM E 84 Tunnel test"가 발표되기 전까지는 이러한 사실이 실제로 활용되지 않았다. 이로부터 얼마 후 Hugget가 이 상관관계에 관한 상세한 실험을 수행하여 "Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements"을 발표하였다.

그는 고분자재료, 유기성액체, 천연재료를 포함한 대부분의 가연성 재료들은 소비된 산소 1 kg당 13.1 MJ의 열량을 방출하며 이것은 거의 근사한 대표값이라는 것을 발견했는데 이 때 평균값의 편차는 $\pm 5\%$ 정도였다.

13.1 MJ/kg O₂라는 상수값은 15.7 MJ/kg O₂의 값을 갖는 아세틸렌 같은 극소수의 예외를 제외하고 모든 탄화수소계물질(C, H로 구성된 재료)에 대하여 거의 같다. O, N, C, Br, F, S의 성분이 많은 가연물 들에 있어서의 상관관계는 덜 정확하다. 많은 가연물들에 대한 상세한 상수값들이 NFPA Handbook 에 표(Tables and Charts, Heats of Combustion and Related Properties For Pure, Simple Substances)로 열거되어 있다. 일반적으로 사용되는 가연성 고체가 아닌 재료로 비표준화된 특별한 상수값을 필요로 하는 재료의 경우에는 이 표가 매우 중요한 의미를 갖는다. 열방출율은 다음 식(1)과 (2)에 의해 구할 수 있다.

$$\dot{q}''(t) = \dot{q}(t)/A_s \dots\dots\dots (1)$$

$$\dot{q}(t) = (\Delta h_c/r_o) (1.10) \cdot C \frac{\sqrt{\Delta P}}{T_e} \frac{X_{O_2}^0 - X_{O_2}}{1.105 - 1.5 X_{O_2}} \dots\dots\dots$$

(2)

여기서

$\dot{q}''(t)$: 단위면적당열방출률 (kW/m^2)

\dot{q} : 열방출률 (kW)

A_s : 실험재료의공칭표면적 (0.01 m^2)

Δh_c : 순수연소열 (KJ/kg)

r_0 : 화학양론적산소대연료질량비

($\Delta h_c/r_0$ 는 NFPA Handbook을 참조하고 정확한 값을 알고 있지 못하면 $13.1 \times 10^3 \text{ KJ}/\text{kg}$ 으로 설정한다.)

C : 산소소비량 보정상수 ($\text{m}^{1/2}\text{kg}^{1/2}\text{k}^{1/2}$)

ΔP : 오리피스의 압력차

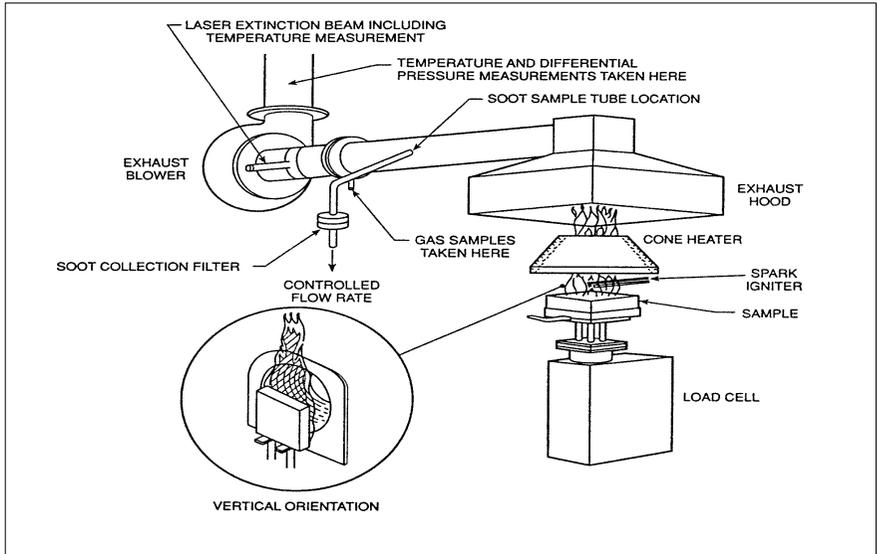
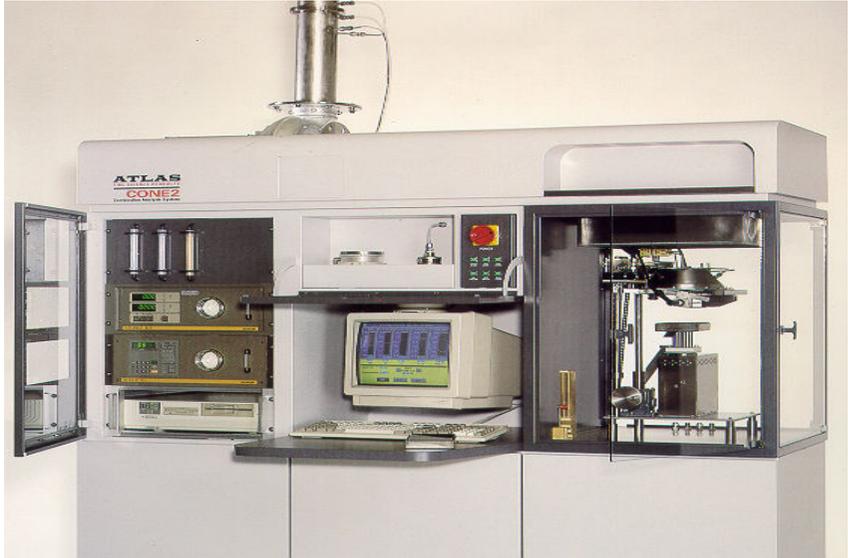
T_E : 오리피스에서의 기체의 절대온도

X_{O_2} : O_2 의 몰분율에 대한 산소분석기 눈금 판독값

$X_{O_2}^0$: 산소분석기 눈금의 초기값

(2) 실험장치

실험장치는 [그림 3-2]와 같이 콘 형태의 복사전기히터, 시편의 질량을 측정하기 위한 무게측정장치, 시편홀더, 산소분석장치, 유량측정장치를 부착한 배출 시스템, 스파크점화회로, heat flux meter, 교정용 버너 및 데이터 수집 및 분석시스템들로 구성된 콘칼로리미터를 (미국 ATLAS사의 AUTOCAL, Model: CONE 2A) 사용하였다



[그림 6-2] 콘칼로리미터 구조도

(3) 실험방법

가) 실험준비

시편을 100 mm×100 mm ($^{+0}_{-2}$ mm) 크기로 준비하여 시험에 앞서 온도 23±2 °C, 상대습도 50±5 % 함량이 될 때까지 유지한다. 24시간 마다 측정했을 때 무게가 0.1 % 또는 0.1 g 이상 차이가 나지 않을 때를 항량으로 한다. 전처리된 시편은 0.03~0.05 mm의 알루미늄 호일로 비노출면을 감싸고 이 때 호일의 반짝거리는 면이 시편을 향하도록 한다.

나) 실험장치의 교정

(가) 히터 교정

매일 시험을 실시할 때 또는 복사열의 크기를 변화시킬 때에는 콘히터가 원하는 복사열을 ±2%이내의 범위내에서 발생시킬 수 있도록(heat flux meter에 의해 측정함) 복사열 제어조절장치를 조정한다.

heat flux meter를 교정위치에 삽입했을 때에는 시편이나 시편홀더는 사용하지 않아야 한다. 콘히터를 작동시켜 설정값에서 10분 이상 안정시키고, 이교정을 시작하기 전에 조절기가 그 비례폭 내에 있는지 확인한다.

(나) 산소분석기 교정

산소분석기의 영점을 맞추고 교정을 실시한다. 이 교정은 콘히터가 작동중일 때나 작동하지 않을 때 실시할 수 있으나 히터를 워밍업하는 동안에는 실시하지 않아야 한다. 배출팬을 켜고 배출유량을 0.024 m³/s±0.002 m³/s로 설정한다. 교정은 건조한 주위공기를 사용하여 실시하며 산소농도가 20.95 %±0.01 %가 되도록 조

정한다.

(다) 열방출율 교정

오리피스 상수 C를 결정하기 위하여 열방출율 교정을 실시한다. 이 교정은 콘히터가 작동중일 때나 작동하지 않을 때 실시할 수 있으나, 히터를 워밍업할 동안에는 실시하지 않아야 한다. 배출팬을 켜고 배출유량을 $0.024 \text{ m}^3/\text{s} \pm 0.002 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 설정한다. 모든 계기의 출력값이 평형상태에 도달한 후 3분 동안에 걸쳐 5초간격으로 데이터를 수집한다.

3분동안 측정된 q_b , T_e , ΔP 및 X_{O_2} 를 사용하여 오리피스상수 C를 계산한다. $X_{O_2}^0$ 는 1분동안에 걸쳐 측정된 산소분석기 Baseline 출력값의 평균으로 결정한다. 연소한 연료 총질량에 연료의 순연소열을 곱한 다음 불꽃연소한 시간으로 나누어 평균 이론 열방출율을 구한다.

(라) 질량측정장치 교정

질량측정장치는 시편질량 범위에 있는 표준추를 사용하여 교정해야 한다. 질량측정장치의 교정을 실시하기 전에 콘히터를 끄고 시험장치는 주위온도까지 냉각시켜야 한다. $250 \text{ g} \pm 25 \text{ g}$ 의 추와 함께 빈 시편홀더를 질량측정장치 위에 얹는다. 이 무게에는 교정에서 사용하지 않는 고정틀도 포함한다. 질량측정장치의 출력을 측정하고 이 값을 기계적으로나 전자적으로 0에 맞춘다. 50 g과 200 g 사이의 질량을 갖는 추를 시편홀더 위에 조심스럽게 놓은 다음, 출력값이 안정된 값에 도달한 후에 질량측정장치의 출력값을 측정한다. 동일한 질량의 추를 얹은 다음 이 절차를 4회 이상 반복한다.

교정이 끝났을 때 홀더 위에 얹은 추의 총질량은 최소한 500 g

이상이어야 한다. 질량측정장치의 정확도는 추의 질량과 교정을 실시하는 동안 기록된 질량측정장치의 출력사이의 최대차이 값으로서 결정된다.

(3) 실험절차

- (가) CO₂ 트랩과 최종 수분트랩을 확인한다. 필요하다면 용제를 교체한다. Cold trap 분리챔버내에 축적된 물을 배수시킨다. Cold trap의 정상적인 작동온도는 4 °C를 초과하지 않아야 한다.
- (나) 콘히터의 바닥판과 시편의 상부 표면사이의 거리를 2.54 cm로 조정한다.
- (다) 배출유량을 0.024 m³/s±0.002 m³/s으로 설정한다.
- (라) 데이터 수집을 개시한다.
- (마) 준비된 시편과 시편홀더를 질량 측정장치 위에 놓고 실험을 개시한다.
- (바) 인화 또는 일시적인 불꽃연소가 발생된 때에는 그 시간을 기록한다. 지속적인 불꽃연소가 발생한 때에는 그 시간을 기록하고 스파크 전원과 점화장치를 제거한다. 만일 스파크 전원을 차단한 후에 불꽃이 꺼지면 점화기를 재 삽입하고 5초이내에 스파크를 가한 다음 시험이 완료된 때까지 스파크를 제거하지 않는다.
- (사) 실험시간동안 모든 데이터를 수집한다.
- (아) 시편과 시편홀더를 제거한다. 질량측정장치 위에 열차단 장치를 놓는다.
- (자) 3개의 시편에 대해 실험을 실시하고 실험결과를 기록한다.

(4) 실험결과의 계산

다음식에 의해 열방출율과 단위면적당 열방출율을 계산한다.

$$q(t) = (\Delta h_c / r_0) (1, 10) \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \frac{X_{O_2}^0 - X_{O_2}}{1.105 - 1.5 X_{O_2}}$$

$$q(t) = q(t) / A_s$$

A_s : 시편의 초기 노출면적

다. 가스유해성 실험

건축용 내장재료의 난연성 시험방법인 KS F 2271(건축물의 내장 재료 및 구조의 난연성 시험방법)중 6. 가스유해성 시험 방법에 따라 실시하여 규정 시간에 마우스의 행동정지유무를 관측하여 가스의 유해정도를 판정한다.

(1) 실험장치

가스유해성시험장치는 마우스를 이용하여 건축재료 및 내장재의 연소시 발생하는 가스의 유해성을 평균행동정지시간으로 측정하는 장치이다. 본 장치는 가열로, 교반 상자, 피검 상자, 마우스 행동기록계로 구성되며, 가열로에서 실험재료가 연소시 발생하는 연소가스는 교반 상자에서 교반되고, 피검 상자속으로 유입되어 마우스가 흡입하도록 되어있다. 가열조건은 건조양생된 표준판(KS L 5114에 규정하는 두께 10mm의 0.8 석면필라이트판)을 부착하고 먼저 부열원(LPG 사용, 공급량 350ml/min)으로 3분간 가열한 후, 다시 주 열원으로 3분간 가열하였을 때 <표 3-2>에 나타난 배기온도를 10℃ 이내의 오차로 재현할 수 있어야 한다.

<표 3-2> 유해가스 배기온도

경과시간 (분)	1	2	3	4	5	6
배기온도 (℃)	70	85	100	140	170	195

(2) 실험 준비

시편의 크기는 가로, 세로 각각 220mm로 하고 두께는 실제의 것과 같은 것으로서(단, 두께가 15mm를 초과할 때는 실험재료의 방화상 성능을 증대 시키지 않고, 또한 연기 발생 정도를 감소시키지 않는 방법으로 그 두께를 15mm까지 감소할 수 있다) 통풍이 잘 되는 실내에 약 1개월 이상 방치한 것을 35~45℃의 건조기 안에서 24시간 이상 건조시킨 후, 데시케이터 속에서 24시간 이상 방치하여 양생한 것으로 사용하였다.

실험동물인 마우스는 DD계 또는 ICR계 암놈으로 5주령 정도되고 체중은 18~22 g의 마우스를 사용하였다.

(3) 실험방법

- 가) 가열 시험은 위에서 설명한 시편을 부열원으로 3분간 가열한 후 다시 주열원으로 3분간 가열한다.
- 나) 공기는 가열 중에 한하여 공급하며, 그 공급량은 가열로의 1차 공급 장치에 의해 매분3.0 ℓ, 2차 공급 장치에 의해 매분 25.0 ℓ로 하여야 한다.
- 다) 피검 상자의 배출 장치에 의한 기체는 가열 중에 한하여 배출하며, 그 배출량은 매분10.0 ℓ로 하여야 한다.
- 라) 배기 온도측정은 열전대로 측정하여야 한다.
- 마) 가열 시험은 시험 시작 전에 표준판을 사용하여 예비 가열한 후, 뒤

뚜껑을 열어, 실온에서 배기 온도를 측정하는 열전대의 표시 온도가 약 50℃이하로 강하한 다음 시작하는 것으로 한다. 다만 계속해서 가열 시험을 하는 경우에는 표준판에 의한 예비 가열을 하지 않는다.

바) 가열 시험은 시작할 때 피검 상자 내의 온도는 30℃로 하고, 시험용 마우스를 1마리씩 넣은 회전 바구니(회전 바구니의 회전 부분은 원칙적으로 알루미늄제로 하되, 무게는 75g 이하로 하여야 한다.) 8개를 피검 상자 내에 넣어야 한다.

사) 가열을 시작해서 시험용 마우스가 행동을 정지할 때까지의 시간(이하 행동 정지 시간이라 한다.)의 측정은 자동 기록할 수 있는 장치를 사용하여야 하며, 기록은 가열 시작 후 15분간 각각의 시험용 마우스마다 실시하여야 한다.

(4) 결과의 계산 및 판정

시험용 마우스의 평균 행동 정지 시간(x)은 다음 식에 따라 구한다.

$$x = \bar{X} - \sigma$$

여기에서 \bar{X} : 8마리 시험용 마우스의 행동 정지시간(시험용 마우스가 행동을 정지하지 않은 경우에는 15분으로 한다)의 평균값(단위 : 분)

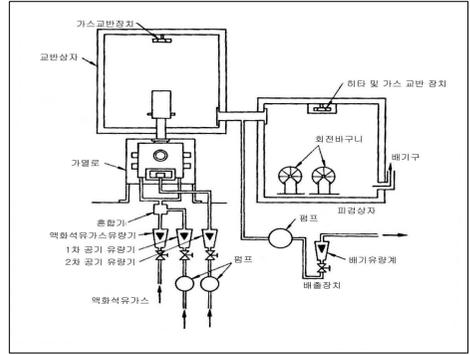
$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + \dots + x_7 + x_8}{8}$$

σ : 8마리 시험용 마우스 행동 정지 시간(시험용 마우스가 행동을 정지하지 않은 경우에는 15분으로 한다.)의 표준 편차(단위 : 분)

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{X})^2 + (x_2 - \bar{X})^2 + \dots + (x_7 - \bar{X})^2 + (x_8 - \bar{X})^2}{8}}$$

판정은 시편 2개에 대한 다의 가열 시험 및 라의 계산 결과에서 시편 각각의

마우스 평균행동 정지시간(x)의 값이 9분보다 클 경우 합격으로 한다.



[그림 3-3] 연소가스유해성 시험장치 개략도

제 4 장 결과 및 고찰

1. 재료의 착화성

가. 발화온도 (Ignition Temperature)

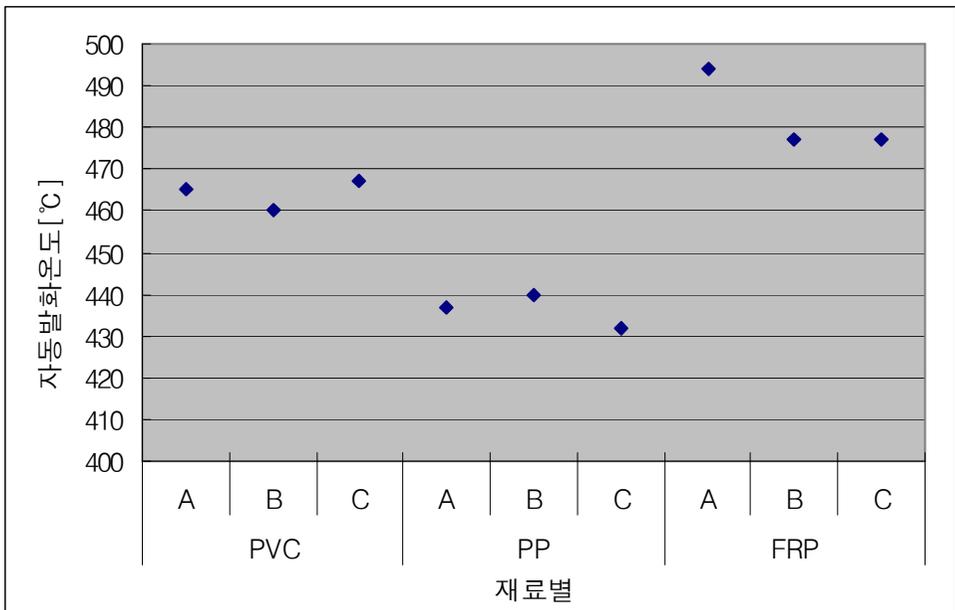
플라스틱 재료의 발화특성을 평가하기 위하여 폴리염화비닐(PVC), 폴리프로필렌(PP) 및 섬유강화플라스틱(FRP)의 자동발화온도(SIT)와 유도발화온도(FIT)를 측정한 실험결과를 부록 1에 나타내었다. 부록 1의 실험결과를 이용하여 각 재료별 발화온도의 특성을 [그림 4-1] ~ [그림 4-3]에 나타내었다.

[그림 4-1]는 각 재료별 자동발화온도(SIT)를 나타낸 것으로 432°C ~ 494°C로 나타났으며, 각 재료별로 살펴보면 폴리염화비닐(PVC)이 460~467°C, 폴리프로필렌(PP)가 432~440°C, 섬유강화플라스틱(FRP)이 477~494°C로 나타났다. SIT의 경우 섬유강화플라스틱(FRP)은 폴리염화비닐(PVC)보다 17~27°C, 폴리프로필렌(PP) 보다는 45~54°C 높은 것으로 나타났고, PVC는 폴리프로필렌(PP)보다 평균 27~28°C 높게 나타났다.

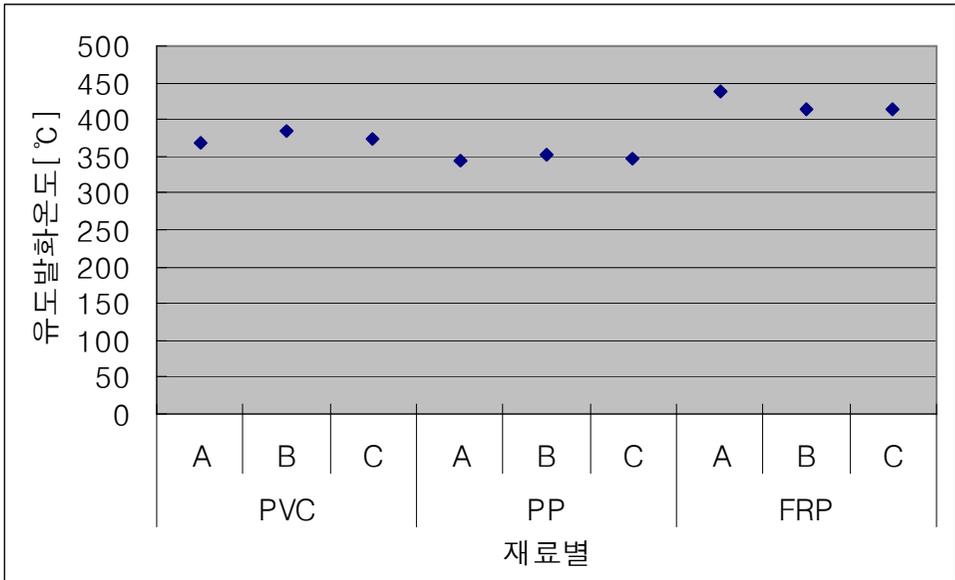
[그림 4-2]는 각 재료별 유도발화온도(FIT)를 나타낸 것으로 PVC가 367~384°C, 폴리프로필렌(PP)이 345~352°C, 섬유강화플라스틱(FRP)이 415~437°C로 나타났다. 각 재료별로 살펴보면 FIT의 경우 섬유강화플라스틱(FRP)은 폴리염화비닐(PVC)보다 48~53°C, 폴리프로필렌(PP)보다는 70~85°C 높은 것으로 나타났고, 폴리염화비닐(PVC)은 폴리프로필렌(PP)보다 22~32°C 높게 나타났다.

[그림 4-3]은 재료별 착화온도를 비교하여 나타낸 것으로, 폴리염화비닐(PVC)과 폴리프로필렌(PP)은 SIT가 FIT에 비하여 약 88°C 정도 높은 것으로 나타났고 섬유강화플라스틱(FRP)은 SIT가 FIT에 비하여 약 60°C 정도 높은 것으로 나타났다. 이들 재료의 SIT 및 FIT는 섬유강화플라스틱(FRP), 폴리염화비닐(PVC), 폴리프로필렌(PP) 순으로 높게 나타났다.

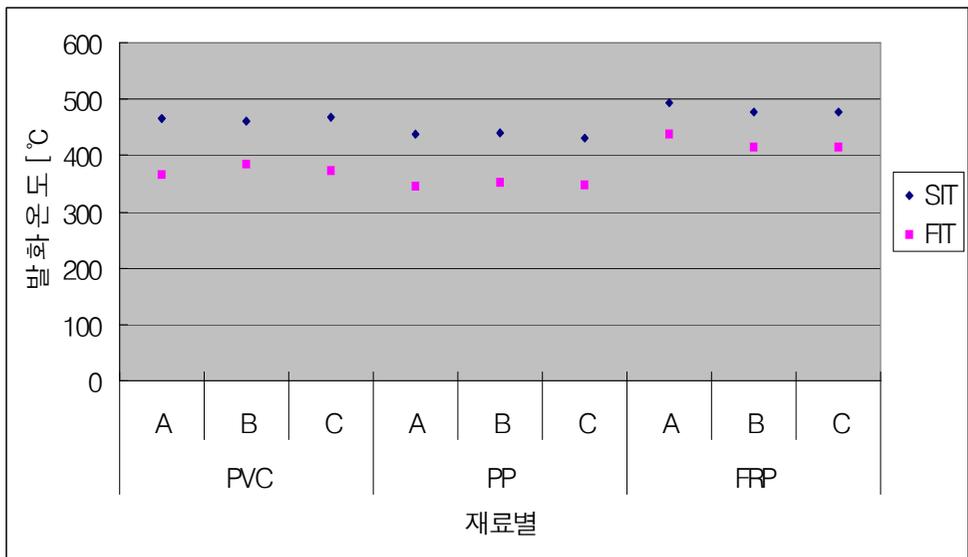
앞에서 살펴본 바와 같이 자동발화온도(SIT)은 착화원이 없는 경우 자동발화 온도 이상에서 발화할 수 있는 온도이며, 유도발화온도(FIT)는 착화원을 가하면 재료가 열원에 의해 가연성 증기를 발생시켜 가연성 증기와 점화원이 접촉하여 착화되는 최저온도이다. 실제 산업현장에서는 용접불티, 스파크 등에 의해 착화되는 유도발화온도(FIT)가 유용한 자료로 판단된다. 따라서, 탱크나 닥트 등 플라스틱 재료를 사용하는 현장에서는 화재나 복사열에 의해 플라스틱 재료의 온도가 350℃ 이상 올라가지 않도록 관리하여야 할 것이다.



[그림 4-1] 재료별 자동발화온도



[그림 4-2] 재료별 유도발화온도



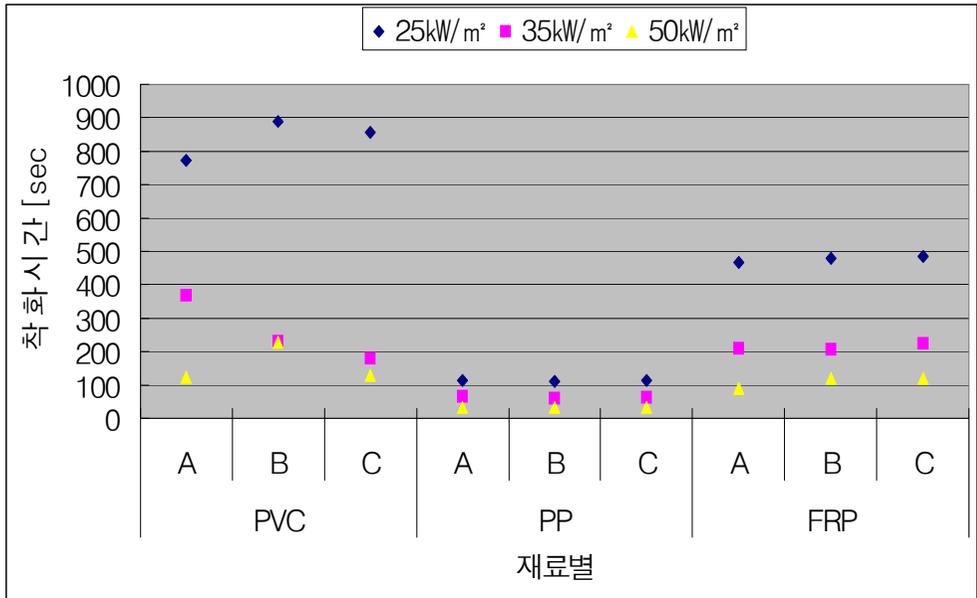
[그림 4-3] 재료별 발화온도의 비교

나. 착화시간 (Time to Ignition, TTI)

대부분의 플라스틱 재료들은 충분히 큰 에너지를 갖는 열원에 노출되면 대부분 착화하게 된다. 본 연구에서는 콘칼로리미터를 사용하여 콘히터로부터 25 kW/m², 35 kW/m², 50 kW/m² 3가지 크기의 복사열에 노출시켰을 때 시편이 착화되어 10초 이상 연소를 지속하는데 소요되는 시간을 초단위로 측정하였다. 본 실험에서 사용한 플라스틱류의 착화시간을 측정한 결과를 부록 2에 나타내었으며, 이들 재료별 착화시간을 [그림 4-4] 및 <표 4-1>에 각각 나타내었다.

플라스틱 3종의 착화시간은 heat flux에 따라 33~883초로 나타났으며, 모든 실험재료에서 25 kW/m²의 heat flux에서는 착화시간이 상대적으로 길었으나 heat flux가 35 kW/m²과 50 kW/m²으로 증가함에 따라 착화시간이 급격하게 짧아지는 경향을 나타내었다. heat flux가 25 kW/m²에서 35 kW/m²로 증가함에 따라 폴리염화비닐(PVC), 폴리프로필렌(P.P) 및 섬유강화플라스틱(FRP) 각각의 착화시간은 약 2.4~4.3배, 1.7~1.8배, 2.2~2.3배정도, heat flux가 35 kW/m²에서 50 kW/m² 증가했을 때 폴리염화비닐(PVC), 폴리프로필렌(PP) 및 섬유강화플라스틱(FRP) 각각의 착화시간은 약 1.4~1.6배, 1.8배, 1.7~2.2배정도 짧아졌다.

폴리프로필렌(PP), 섬유강화플라스틱(FRP), 폴리염화비닐(PVC) 순으로 착화시간이 빠르게 나타났다. 착화시간은 실험재료의 밀도가 작은 것이 짧아지는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 외부의 복사열에 노출된 3종은 heat flux가 증가하면 착화시간은 짧아지고 반면에 밀도가 증가하면 착화시간은 길어지는 경향을 보이는 것으로 나타났다.



[그림 4-4] 재료별 착화시간

<표 4-1> 재료별 heat flux에 따른 착화시간

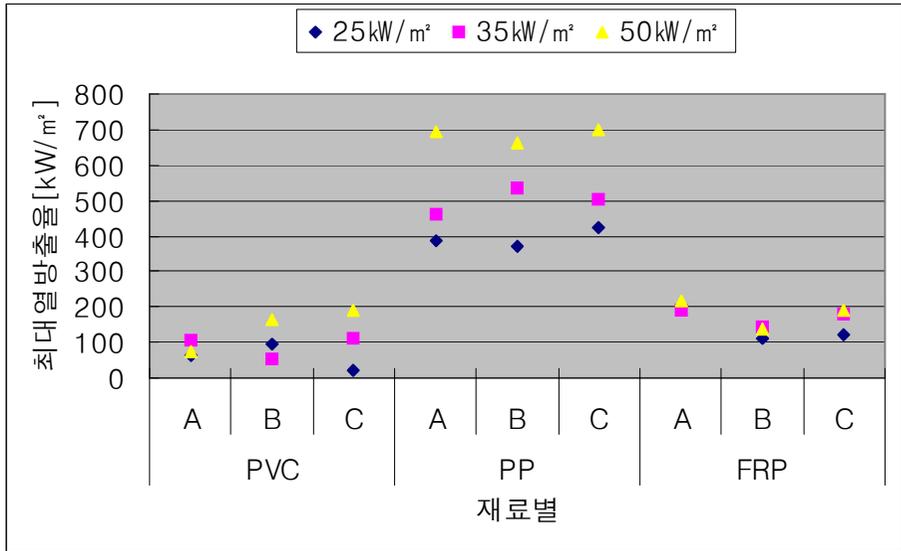
시 험 체	착화시간(초)		
	25 kW/m ²	35 kW/m ²	50 kW/m ²
PVC	773.1~888.1	178.5~366.8	123.6~227.5
PP	111.1~114.6	59.6~64.7	32.7~34.0
FRP	468.2~486.1	205.1~224.6	89.8~120.5

2. 열방출 특성

가. 최대 열방출율 (Peak Heat Release Rate, PHRR)

열방출율은 시료 표면적당 발생한 순간적인 열량의 크기이며, 각각의 실험에서 최대 열방출율 값은 화재의 위험특성을 평가하는 중요한 값으로서 평가한다. 하나의 데이터를 추출함으로써 발생할 수 있는 잘못된 데이터의 수집을 피하기 위하여 5포인트의 데이터를 평균하여 데이터를 얻으며, 열방출율값은 측정된 산소농도와 대기중의 산소농도의 차이에 의하여 계산된다. 각 재료의 주어진 heat flux 조건에서 최대 열방출율 값을 부록 3(가)에 나타내었으며, 이들 값으로부터 재료별 최대 열방출율을 [그림 4-5] 및 <표4-2>에 각각 나타내었다.

실험재료가 착화되면 재료의 연소성의 정도에 따라 열을 방출하는데 최대 열방출율은 화재의 초기성장 속도와 크기를 나타내는 중요한 변수이다. 최대 열방출율은 실험재료에 따라 큰 차이를 보이나, 같은 재료의 경우 제조자에 따른 변화는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 실험재료에 가해지는 외부의 heat flux가 증가함에 따라 실험재료의 최대 열방출율이 커지는 것으로 나타났다. 이는 높은 heat flux에서는 열분해가 더욱 잘 진행되어 실험재료가 많은 양의 열을 방출하면서 빠른 속도로 연소하기 때문으로 보인다. 실험재료 중 폴리프로필렌(PP)가 가장 큰 최대 열방출율을 갖는 것으로 나타났다.



[그림 4-5] 재료별 최대 열방출율

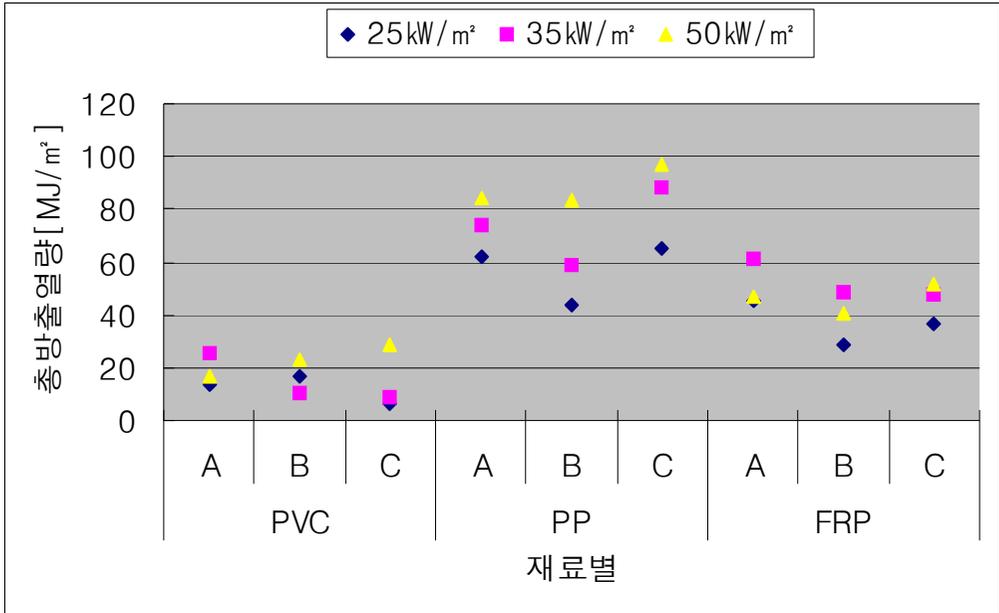
<표 4-2> 각 재료별 heat flux에 따른 최대 열방출율

구분	최대 열방출율(kW/m²)		
	25 kW/m²	35 kW/m²	50 kW/m²
PVC	19.4~97.1	55.2~111.8	75.6~190.0
PP	370.5~421.6	463.5~532.9	661.7~699.0
FRP	111.2~202.8	145.1~191.1	138.2~216.6

나. 총방출열량 (Total Heat Released, THR)

총방출열량은 각 실험에서 실험재료의 연소로 인해 방출된 총열량으로서 시료표면적당 시간에 대한 함수로 표현되는 열방출율(HRR) 값들을 적분하여 구한다. 본 연구에서는 총방출열량을 20분간의 실험시간에 대하여 계산된 값이며, 이를 부록 3(나)에 나타내었다. 이들 값들로부터 재료별 최대 열방출율을 [그림 4-6] 과 <표 4-3>에 각각 나타내었다.

플라스틱 3종의 제품 중 밀도가 상대적으로 낮은 폴리프로필렌(PP)의 총방출열량이 크며, 섬유강화플라스틱(FRP), 폴리염화비닐(PVC) 순으로 크게 나타났다. 이는 폴리프로필렌은 열에 약한 순수 유기재로 만 이루어져 있는 데 반하여 섬유강화플라스틱 및 폴리염화비닐은 강도의 안정성과 난연성을 보강하기 위해 무기재 등의 첨가로 연소를 저지시켜 총방출열량이 순수 유기재의 연소열량 보다 적었던 것으로 판단된다. 따라서, 화재시 총방출열량이 가장 큰 폴리프로필렌의 경우는 타 플라스틱 제품보다 화재의 연소확대가 급속히 진행될 것으로 판단된다.



[그림 4-6] 재료별 최대 열방출율

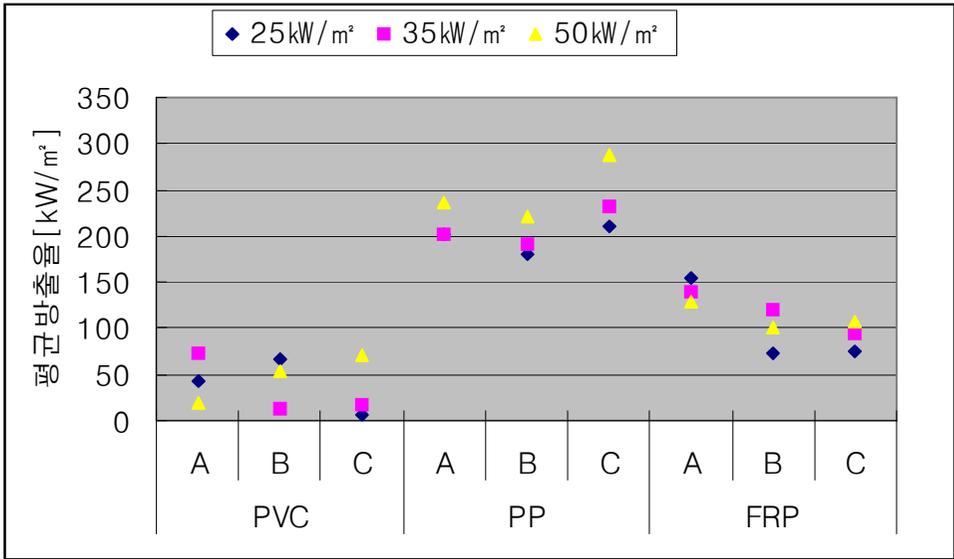
<표 4-3> 재료별 총방출열량 비교

시 험 체	총방출열량(MJ/m²)		
	25 kW/m²	35 kW/m²	50 kW/m²
PVC	6.0~16.3	8.8~25.8	16.6~28.5
PP	44.1~65.4	58.7~88.1	83.5~97.2
FRP	29.0~45.5	47.4~61.2	40.4~51.7

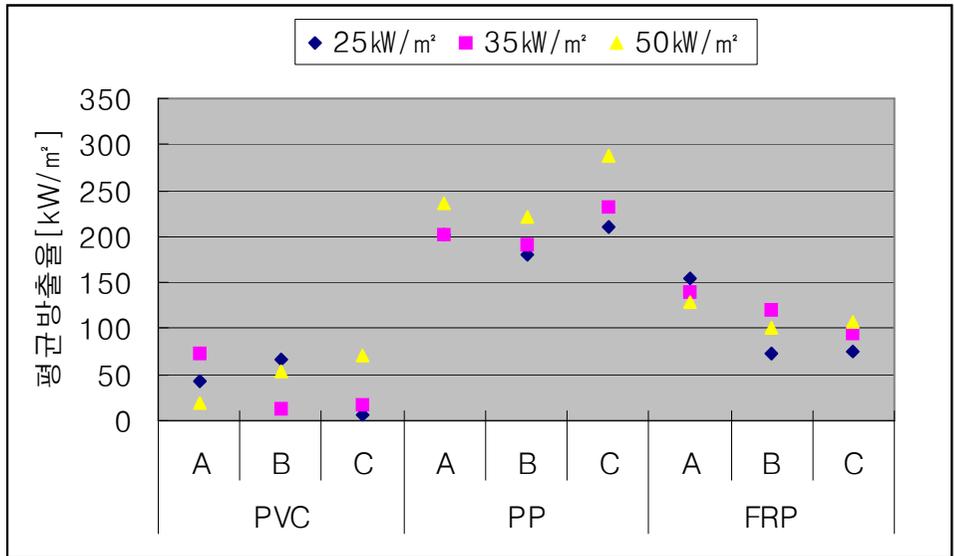
다. 평균 열방출율 (Average Heat Release Rate, Av HRR)

Babrauskas와 Krasny는 콘칼로리미터에 의한 실험을 통하여 재료가 착화후 180초에서의 평균 열방출율이 실험규모화재에서의 최대열방출율값에 상응한다고 보고한 반면에 NFL(National Fire Laboratory)의 연구결과에서는 착화후 300초에서의 평균 열방출율이 실험규모 화재실험에서의 결과와 더 좋은 상관 관계를 갖는다고 발표하였다. 이와 같은 연구결과를 바탕으로 시료의 착화후 180초에서의 평균열방출율과 300초에서의 평균 열방출율은 실제 화재에서의 연소특성을 잘 판단할 수 있다는 점에서 큰 의미를 갖고 있으며 ISO 기준을 비롯한 각국의 시험기준에서도 180초에서의 평균 열방출율과 300초에서의 평균 열방출율을 측정하고 있다.

본 연구에서도 평균 열방출율은 25 kW/m^2 , 35 kW/m^2 , 50 kW/m^2 의 복사열에 노출된 재료가 착화되어 180초에 이르기까지 방출된 평균 열방출율 (\dot{q}_{180})과 300초에 이르기까지의 평균 열방출율 (\dot{q}_{300})을 측정하였으며, 실험결과 값을 부록 4(다~마)에 나타내었다. 이들 결과 값을 이용하여 재료별 평균 열방출율을 [그림 4-7]과 [그림 4-8]에 각각 나타내었다. 그림들에서 보는 바와 같이 180초와 300초에서의 평균 열방출율은 플라스틱 3종 중 폴리프로필렌(PP)이 가장 크며 그 다음이 섬유강화플라스틱(FRP), 폴리염화비닐(PVC) 순으로 나타났다.



[그림 4-7] 재료별 평균 열방출율(180초)



[그림 4-8] 재료의 평균 열방출율(300초)

3. 프레쉬오버의 가능성 (flashover propensity)

프레쉬오버(flashover)란 시료의 전 표면이 갑작스럽게 연소된 상태를 말하며, 즉 연소열에 의하여 온도가 상승하여 600℃ 정도가 되면 방출되는 복사열에 의하여 주위에 있는 모든 가연물이 분해되어 가연성 증기를 발생하게 됨으로써 전체가 연소하게 되는 상태를 말한다. 따라서, 프레쉬오버의 가능성 예측은 사전에 화재를 탐지하거나 사람이 안전하게 피난하게 하는 화재시나리오와 관련된 중요한 변수이며 화재위험 특성 평가에 중요한 지표가 된다.

한편, Petrella(1994)는¹⁴⁾ 콘칼로리미터 실험에 의해 측정된 착화시간(TTI)과 최대열방출율(PHRR) 및 총방출열량(THR) 값을 이용하여 재료가 플래쉬오버에 기여할 수 있는 가능성을 아래 계산식을 이용하여 분류하는 방법을 제안하였다. 즉 식 (1)에 의해 계산된 x 값이 0.1~1.0 이면 낮음, 1.0~10이면 중간, 10~100이면 높음으로 분류하였고, 식 (2)에 의해 계산된 y 값이 0.1~1.0 이면 매우 낮음, 1.0~10이면 낮음, 10~100이면 중간, 100~1000이면 높음으로 분류하였다.

$$x = \frac{PHRR}{TTI} \quad (1)$$

$$y = THR \quad (2)$$

본 연구에서는 각 재료별로 복사열이 50 kW/m²에서 착화시간, 최대열방출율, 및 총방출열량을 이용하여 프레쉬오버 가능성을 분류하여 <표 4-4>에 나타내었다. 이 분류방법에 따르면, PP가 프레쉬오버의 가능성이 가장 '높음', FRP는 '중간' 그리고 PVC는 '낮음'으로 나타났다. PP로 구성된 플라스틱의 경우는 화재가 발생하면 프레쉬오버에 빨리 도달하여 화재의 진압이 어렵고, 화재 및 연기가 빠르게 확산되어 인명 피해가 커질 것으로 예상된다. 따라서 PP 화재의 경우 신속한 대피가 요망된다. 그러나, 총방출열량에 따른 위험 분류를 보면 3

중 모두 중간정도로 나타나 Petrella가 분류한 프레쉬오버의 가능성과 상관관계가 적음을 알 수 있다. 따라서, 총방출열을 이용하여 프레쉬오버의 가능성 등 화재의 위험성을 평가하기 위해서는 상세한 열방출 특성과의 상관관계 규명이 필요할 것으로 판단된다.

<표 4-4> 재료별 프레쉬오버 가능성

구 분	착화시간 (sec)	최대 열방출율 (kW/m ²)	프레쉬오버 가능성 (x)	총방출열 (MJ/m ²) (y)	분류	
					x	y
P V C	A	123.6	0.6	16.6	낮음	중간
	B	227.5	0.7	22.7	낮음	중간
	C	128.9	1.5	28.5	중간	중간
P P	A	34	20.3	84.1	높음	중간
	B	32.7	20.2	83.5	높음	중간
	C	33.2	21.1	97.2	높음	중간
F R P	A	89.8	2.4	47.1	중간	중간
	B	120.5	1.1	40.4	중간	중간
	C	119.9	1.6	51.7	중간	중간

4. 연소가스 유해성

재료의 연소가스 유해성 분석은 연소시 발생된 가스를 각각 분석하는 평가하는 방법과 흰 쥐 등 실험동물을 이용하여 연소가스의 유해성을 평가하는 방법이 있다. 연소가스를 각각 분석하는 실험은 가스 분석에 따른 소요비용이 비싸고, 분석을 위해 가스 포집시 가스가 냉각되어 실제 화재조건으로 분석·평가하기가 어렵다. 실험동물을 이용하여 연소가스의 유해성을 평가하는 방법은 연소가스의 총괄적인 독성을 평가하여 어떠한 가스에 치명적인 영향을 받는지는 알기 어렵다. 또한 동물 보호론자에 의해 동물실험을 금지하도록 요구하기 때문에 여러 국가에서는 실험동물을 이용하여 연소가스 실험을 제한하고 있다. 그러나, 한국과 일본에서는 플라스틱 재료의 연소가스 유해성을 실제 연소조건에서 흰 쥐의 행동정지시간으로 평가하고 있다. 본 연구에서는 플라스틱 3종에 대해 KS F 2271(건축물의 내장 재료 및 구조의 난연성 시험 방법)¹¹⁾에 따른 가스유해성 실험을 실시한 결과를 <표 4-5>에 나타내었다.

표에서 보는 바와 같이 본 연구에서 사용한 플라스틱은 연소가스 유해성으로 인한 흰 쥐의 행동정지 시간이 11분 15초에서 14분 59초로 나타났다. 3종의 플라스틱의 유해성을 비교하면 PVC나 FRP보다는 PP가 단 시간에 유해성이 큰 것으로 나타났다. 이는 PP가 다른 플라스틱보다는 착화시간이 짧고 열방출율이 빠르고 프레쉬오버의 가능성이 높기 때문에 초기에 연소가 빠르게 진행되어 유해가스가 단시간에 방출되었기 때문인 것으로 사료된다. 그러나, 정확한 연소가스의 유해성을 평가하기 위해서는 흰 쥐를 이용한 평균행동 정지시간과 콘카로 리미터에서 개별적 가스를 측정하여 유해성 지수를 평가하는 cone-FTIR과의 상관관계 분석을 통하여 가스 유해성을 평가할 수 있을 것이다. 한편, KS 기준에 따르면 연소가스 유해성 기준은 실험결과에서 각각의 흰 쥐 행동정지 시간의 값이 9분 보다 클 경우 합격으로 한다. 따라서, 이 기준에 의하면 이들 플라스틱을 건축물의 내장 및 구조물에 사용할 경우에는 화재가 발생할 경우 10분 이내로 대피하면 연소가스로 인한 치명상을 막을 수 있을 것으로 사료된다.

<표 4-5> 재료별 연소 가스 유해성 시험결과

실험재료		평 균	표준편차	행동 정지 시간
PVC	A	14분15초	07초	14분08초
		14분54초	06초	14분48초
	B	14분18초	25초	13분53초
		14분34초	15초	14분19초
	C	14분42초	06초	14분36초
		14분10초	07초	14분03초
PP	A	12분32초	14초	12분18초
		12분30초	17초	12분13초
	B	12분23초	08초	12분15초
		11분41초	26초	11분15초
	C	12분51초	22초	12분29초
		12분35초	16초	12분19초
FRP	A	14분53초	03초	14분50초
		14분57초	02초	14분55초
	B	14분54초	05초	14분49초
		14분59초	0초	14분59초
	C	14분38초	08초	14분30초
		14분59초	01초	14분58초

5. 플라스틱의 화재위험 특성

플라스틱 재료의 화재위험 특성을 보다 더 적절하게 평가하기 위하여 재료의 착화성, 콘칼로리미터를 사용한 열방출 특성, 연소가스의 유해성 등을 측정함으로써 재료의 위험정도를 분류하는 국가들이 증가하고 있다. 각 국에서 채택하고 있는 콘칼로리미터 시험과 재료의 열방출 특성 분류방법 및 기준¹⁵⁻¹⁷⁾을 <표 4-5>에 나타내었다. <표 4-6>에 나타난 바와 같이 각 국의 규정에서는 적용대상별로 착화 시간 및 열방출 특성에 따라 재료의 화재위험 정도를 분류하고 있다. 또한, 적용대상, 화재위험 장소에 따라 적합한 재료를 선정하여 사용할 수 있도록 함으로서 화재로 인한 인명 및 재산상의 피해를 최소화하고 있다.

앞장에서 살펴본 바와 같이 본 연구에서 선정된 실험재료에 대하여 화재위험 특성을 살펴보면 PVC의 경우는 착화시간이 상대적으로 느리며, 열방출율이 작고, 프레쉬오버의 가능성이 낮은 것으로 나타났다. PP의 경우는 착화시간이 짧아 빠른 시간내에 착화가 가능하며, 열방출율이 높고, 프레쉬오버의 가능성이 큰 것으로 나타났다. FRP의 경우는 플라스틱에 섬유를 보강한 것으로 중간정도의 위험성을 나타내고 있었다. 이러한 플라스틱의 착화시간이나 열방출 특성을 외국의 기존 문헌^{14,18)}과 비교하면 특성치의 경향은 비슷하게 나타났으나, 특성 값들은 일치하지 않았다. 이는 같은 종류의 플라스틱이라도 제품 제조시 물성이나 첨가제의 비율이 상이하기 때문에 열방출 특성이 일치하지 않는 것으로 사료된다.

따라서, 우리나라에서 생산되고 있는 플라스틱 제품도 제조자에 따라 화재위험 특성의 차이가 있다. 따라서 우리나라에서도 재료의 종류, 용도 및 사용장소에 따라 혹은 복사열의 크기에 따라서 착화성, 열방출율 및 가스유해성이 각기 다르기 때문에 각 국의 관련기준과 본 연구의 연구결과를 비교·검토하여 사용조건에 따른 플라스틱 재료의 화재 특성을 적절하게 분류할 수 있는 평가 기준을 정립하여야 할 것으로 사료된다.

<표 4-6> 플라스틱 재료 등의 열방출 특성 분류체계 및 기준

구분 국별	적용 대상	가열조건 (Heat Flux, kW/m ²)	착화시간 (Time to Ignition, 초)	열방출특성 (Heat Release Rate)			
				Peak (kW/m ²)	Average (kW/m ²)	Total (MJ/m ²)	
IMO	선박주거 내장재료	50	20이상	60이하	20이하	20이하	
(주1) 캐나다	N	암면	50	-	20이하	5이하	3이하
	C-1	석고보드 (종이부착)		-	100이하	17이하	10이하
	C-2	난연목재		-	150이하	85이하	50이하
	C-3	일반목재		-	300이하	170이하	100이하
	C-4	일반 플라스틱폼		-	300이상	170이상	100이상
미국 (육군규격)	잠수함 내부재료	50	150이상	65이하	50이하	-	
미국 (NFPA)	A	의자, 소파 등 장식용 가구	35	-	-	280 초과	-
	B			-	-	280 미만	-
	C			-	-	160 미만	-
	D			-	-	85 미만	-
	E			-	-	45 미만	-

(주1) A: Ordinary Polyurethane foam B: Melamine-Treated foam
 C: CMHR-type foam D: Hydrophilic-type foam
 E: Neoprene foam

제 5 장 결 론

본 연구에서는 플라스틱 제품의 화재위험 특성 파악을 위해 플라스틱의 연소성과 화재사례를 조사하였다. 플라스틱은 폴리염화비닐(PVC), 폴리프로필렌(PP) 및 섬유강화플라스틱(FRP) 3종에 대해 ISO 5660, ISO 871 및 KS F 2271 기준에 따라 플라스틱 재료의 착화성, 열방출율, 연소가스 유해성 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

각 재료별 자동발화온도(SIT)를 나타낸 것으로 432°C ~ 494°C로 나타났으며, 유도발화온도(FIT)는 345~437°C로 나타났다. 재료별 착화온도를 비교한 결과 폴리염화비닐(PVC)과 폴리프로필렌(PP)은 SIT가 FIT에 비하여 약 88°C 정도 높은 것으로 나타났고 섬유강화플라스틱(FRP)은 SIT가 FIT에 비하여 약 60°C 정도 높은 것으로 나타났다. 이들 재료의 SIT 및 FIT는 섬유강화플라스틱(FRP), 폴리염화비닐(PVC), 폴리프로필렌(PP) 순으로 높게 나타났다. 플라스틱 3종의 착화시간은 heat flux에 따라 33~883초로 나타났으며, 착화시간은 heat flux가 증가함에 따라 착화시간이 급격하게 짧아지는 경향을 나타내었다. heat flux가 25 kW/m²에서 35 kW/m²로 증가함에 따라 폴리염화비닐(PVC), 폴리프로필렌(PP) 및 섬유강화플라스틱(FRP) 각각의 착화시간은 약 2.4~4.3배, 1.7~1.8배, 2.2~2.3배정도, heat flux가 35 kW/m²에서 50 kW/m² 증가했을 때 폴리염화비닐(PVC), 폴리프로필렌(PP) 및 섬유강화플라스틱(FRP) 각각의 착화시간은 약 1.4~1.6배, 1.8배, 1.7~2.2배정도 짧아졌다. 폴리프로필렌(PP), 섬유강화플라스틱(FRP), 폴리염화비닐(PVC) 순으로 착화시간이 짧게 나타났다.

최대 열방출율은 실험재료에 따라 큰 차이를 보이나, 같은 재료의 경우 제조자에 따른 변화는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 실험재료에 가해지는 외부의 heat flux가 증가함에 따라 실험재료의 최대 열방출율이 커지는 것으로 나타났다. 실험재료 중 폴리프로필렌(PP)가 가장 큰 최대 열방출율을 갖는 것으로 나타났다. 또한, 총방출열량은 폴리프로필렌(PP)의 가장 크며, 섬유강화플라

스틱(FRP), 폴리염화비닐(PVC) 순으로 크게 나타났다. 평균 열방출율은 180초에 이르기까지 방출된 평균 열방출율 (\dot{q}_{180})과 300초에 이르기까지의 평균 열방출율 (\dot{q}_{300})을 측정된 결과 폴리프로필렌(PP)이 가장 크며 그 다음이 섬유강화플라스틱(FRP), 폴리염화비닐(PVC) 순으로 나타났다.

프레쉬오버 가능성은 분류한 결과 PP가 프레쉬오버의 가능성이 가장 높고, 다음은 FRP 및 PVC 순으로 나타났다. PP로 구성된 플라스틱의 경우는 화재가 발생하면 프레쉬오버에 빨리 도달하여 화재의 진압이 어렵고, 화재 및 연기가 빠르게 확산되어 인명 피해가 커질 것으로 예상된다. 그러나, 총방출율에 따른 위험 분류를 보면 3종 모두 중간정도로 나타나 Petrella가 분류한 프레쉬오버의 가능성과 상관관계가 적음을 알 수 있었다.

플라스틱은 연소가스 유해성으로 인한 흰 쥐의 행동정지 시간이 11분 15초에서 14분 59초로 나타났다. 3종의 플라스틱의 유해성을 비교하면 PVC나 FRP 보다는 PP가 단 시간에 유해성이 큰 것으로 나타났다. 이들 플라스틱을 건축물의 내장 및 구조물에 사용할 경우에는 화재가 발생할 경우 10분 이내로 대피하면 연소가스로 인한 치명상을 막을 수 있을 것으로 판단된다.

플라스틱 3종의 화재위험 특성을 살펴보면 PVC의 경우는 착화시간이 상대적으로 느리며, 열방출율이 작고, 프레쉬오버의 가능성이 적은 것으로 나타났다. PP의 경우는 착화시간이 짧아 바른 시간내에 착화가 가능하며, 열방출율이 높고, 프레쉬오버의 가능성이 큰 것으로 나타났다. 따라서, 우리나라에서도 사람이 많이 이용하는 공공시설이나 작업장 내부 혹은 사용장소에 따라 재료의 종류 및 복사열의 크기에 따라서 착화성, 열방출율 및 가스유해성이 각기 다르기 때문에 각 국가의 관련기준과 본 연구의 연구결과를 비교·검토하여 사용조건에 따른 플라스틱 재료의 화재 특성을 적절하게 분류할 수 있는 평가기준을 정립하여야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. G. Gallina, et al. (1998), "Application of Cone Calorimeter for the Assessment of Class of Flame Retardant for polypropylene", Fire and Materials, Vol.22, pp. 15-18.
2. U. Sorathia et al. (2001), "Screening Tests for Fire Safety of Composites for Marine Applications", Fire and Materials, Vol.25, pp.215-222.
3. 이근원, 김관웅 (2001), "발포 플라스틱의 착화특성 및 연소가스 분석", 산업 안전학회지, 16(1), 48 - 52.
4. Babrauskas and S. J. Grayson (1992), Heat release in fires, Elsevier Science Publishing Co., New York.
5. 이근원, 김관웅 (2003), "콘카로리미터를 이용한 플라스틱 단열재의 화재특성", 한국화재소방학회 논문지, 17(1), 76 - 83.
6. 이근원 (1999), 산업용 단열재의 화재위험 특성에 관한 연구, 연구원 2000-18-138, 한국산업안전공단 산업안전보건연구원.
7. ASTM D 1929 (1991), Standard Test Method for Ignition Properties of Plastics, ASTM, Philadelphia.
8. ISO 871 (1996), Plastics-Determination of ignition temperature using hot-air furnace, Generer.
9. ISO 5660-1 (1993), Reaction to Fire Part 1. Rate of Heat Release from building products (Cone Calorimeter), Generer.
10. ASTM E 1354 (1990), Standard test method for Heat and Visible Smoke release rates for materials and products using an oxygen consumption calorimeter, Philadelphia.
11. KS F 2271 (1998), 건축물의 내장 재료 및 구조의 난연성 시험방법, 한국 표준협회.
12. <http://www.koreaplastic.or.kr/>, 2003.

13. 화재사고사례 DB (1999), 한국화재보험협회.
14. Petrella, R.V. (1994), The assessment of full-scale fire hazards from cone calorimeter data, *Journal of fire sciences*, vol. 12, pp. 14-43.
15. NFPA 264 A (1994), Standard Method of Test for Heat Release Rates for Upholstered Furniture Components or Composites and Mattresses Using an Oxygen Consumption Calorimeter, NFPA.
16. U.S., MIL-STD-2031 (1991), Military Standard Fire and Toxicity Test Methods and Qualification Procedure for Composite Material Systems Used Hull, Machinery and Structural Applications in side Naval Submarines Pot.
17. IMO MSC 61 (1996), Adoption of the International code for Application of Fire Test Procedures. Part 2, Smoke and Toxicity Test, IMO.
18. Babrauskas, Y. and Grayson, S.J. (1992), Heat release in Fires, pp.375 - 422. Elsevier Sci. Pub. Ltd., New York.

부 록

부록 1. 재료별 발화온도

부록 2. 재료별 착화시간

부록 3. 재료별 열방출율

부록 1. 재료별 발화온도

가. 재료별 자동발화온도

구 분		Self-Ignition Temperature(SIT, °C)			평균
		1회	2회	3회	
PVC	A	460	470	465	465
	B	455	465	460	460
	C	465	465	470	467
PP	A	435	440	435	437
	B	440	435	445	440
	C	430	435	430	432
FRP	A	490	495	497	494
	B	475	480	475	477
	C	475	475	480	477

※ 시료의 크기 : 20×20×3mm, 무게 : 3.0 g(평균)

나. 재료별 유도발화온도

구 분		Flash-ignition temperature(FIT, °C)			평균
		1회	2회	3회	
PVC	A	365	370	365	367
	B	380	385	388	384
	C	370	373	375	373
PP	A	345	340	350	345
	B	350	350	355	352
	C	345	350	345	347
FRP	A	435	435	440	437
	B	415	420	410	415
	C	415	420	410	415

※ 시료의 크기 : 20×20×3mm, 무게 : 3.0 g(평균)

부록 2. 재료별 착화시간

구 분		착화시간(초)								
		25kW/m ²			35kW/m ²			50kW/m ²		
		1회	2회	평균	1회	2회	평균	1회	2회	평균
PVC	A	763.7	782.6	773.1	345.4	388.2	366.8	118.5	128.7	123.6
	B	900.5	875.8	888.1	220.7	238.4	229.5	260.3	194.8	227.5
	C	797.4	917.5	857.4	205.3	151.8	178.5	104.6	153.3	128.9
PP	A	111.4	114.1	112.7	62.9	66.5	64.7	34.1	33.9	34.0
	B	111.4	110.9	111.1	61.9	57.4	59.6	32.5	32.9	32.7
	C	114.0	115.2	114.6	60.5	67.5	64.0	33.3	33.1	33.2
FRP	A	471.8	464.7	468.2	224.2	194.3	209.2	87.7	91.9	89.8
	B	556.4	400.8	478.6	206.5	203.8	205.1	127.7	113.4	120.5
	C	472.0	500.3	486.1	221.7	227.6	224.6	122.9	116.9	119.9

부록 3. 재료별 열방출율

가. 최대 열방출율

구 분		최대 열방출율(kW/m ²)								
		25kW/m ²			35kW/m ²			50kW/m ²		
		1회	2회	평균	1회	2회	평균	1회	2회	평균
PVC	A	64.0	67.8	65.9	135.0	75.2	105.1	67.3	83.9	75.6
	B	92.3	101.9	97.1	58.0	52.4	55.2	103.5	226.0	164.7
	C	21.0	17.8	19.4	106.9	116.7	111.8	188.6	191.5	190.0
PP	A	362.1	414.7	388.4	505.5	421.5	463.5	710.4	672.5	691.4
	B	356.2	384.8	370.5	494.2	571.7	532.9	692.3	631.1	661.7
	C	384.4	458.8	421.6	513.5	496.2	504.8	631.9	766.1	699.0
FRP	A	191.3	214.3	202.8	203.6	178.7	191.1	203.0	230.2	216.6
	B	132.5	93.1	112.8	137.9	152.3	145.1	147.9	128.5	138.2
	C	122.5	119.6	121.0	179.5	183.4	181.4	173.6	203.3	188.4

나. 총 방출열량

구 분		총방출열량(MJ/m ²)								
		25kW/m ²			35kW/m ²			50kW/m ²		
		1회	2회	평균	1회	2회	평균	1회	2회	평균
PVC	A	13.7	13.0	13.3	28.9	22.8	25.8	17.0	16.2	16.6
	B	15.7	16.9	16.3	10.2	9.9	10.0	20.4	25.1	22.7
	C	6.9	5.1	6.0	8.8	8.8	8.8	36.9	20.1	28.5
PP	A	46.5	76.9	61.7	67.2	81.3	74.2	83.3	84.9	84.1
	B	39.6	48.6	44.1	49.4	68.0	58.7	87.6	79.5	83.5
	C	50.4	80.4	65.4	89.5	86.8	88.1	89.9	104.5	97.2
FRP	A	46.5	44.5	45.5	60.2	62.2	61.2	42.8	51.4	47.1
	B	37.3	20.8	29.0	47.0	50.7	48.8	39.1	41.8	40.4
	C	36.2	37.2	36.7	46.0	48.9	47.4	53.6	49.8	51.7

다. 평균 열방출률 (180초)

구 분		180초								
		25kW/m ²			35kW/m ²			50kW/m ²		
		1회	2회	평균	1회	2회	평균	1회	2회	평균
PVC	A	46.2	39.7	42.9	88.9	55.6	72.2	18.8	21.4	20.1
	B	65.6	65.9	65.8	14.9	12.8	13.9	42.1	64.5	53.3
	C	6.7	4.0	5.4	16.2	16.6	16.4	96.1	44.2	70.2
PP	A	189.1	215.2	202.1	209.3	195.2	202.2	228.5	245.2	236.8
	B	167.3	194.7	181.0	179.8	201.0	190.4	230.5	212.4	221.5
	C	195.7	226.0	210.9	227.7	235.4	231.6	240.0	334.0	287.0
FRP	A	150.5	159.3	154.9	140.9	137.6	139.3	127.5	130.9	129.2
	B	106.9	39.7	73.3	118.0	124.4	121.2	104.4	96.8	100.6
	C	77.0	71.7	74.41	102.2	87.6	94.9	95.8	120.6	108.2

라. 평균 열방출률 (300초)

구 분		300초								
		25kW/m ²			35kW/m ²			50kW/m ²		
		1회	2회	평균	1회	2회	평균	1회	2회	평균
PVC	A	0.0	27.0	13.5	68.5	49.2	58.9	15.1	16.8	16.0
	B	43.2	45.4	44.3	10.8	9.7	10.3	30.0	43.8	36.9
	C	5.9	3.9	4.9	11.7	11.4	11.5	78.3	30.4	54.4
PP	A	132.7	163.0	147.9	150.0	151.0	150.5	161.1	176.0	168.6
	B	114.1	148.8	131.4	122.1	147.7	134.9	164.9	148.3	156.6
	C	147.0	179.4	163.2	190.1	185.2	187.7	175.6	237.5	206.6
FRP	A	124.2	125.2	124.7	145.1	142.7	143.9	134.0	154.4	144.2
	B	98.0	26.4	62.2	110.2	118.0	114.1	95.7	96.5	96.1
	C	83.5	80.3	81.91	106.2	109.4	107.8	114.4	118.8	116.6

마. 평균 열방출률

구 분		평균 열방출률(kW/m ²)								
		25kW/m ²			35kW/m ²			50kW/m ²		
		1회	2회	평균	1회	2회	평균	1회	2회	평균
PVC	A	19.3	20.9	20.1	31.0	25.6	28.3	14.5	14.1	14.3
	B	43.0	42.0	42.5	8.2	7.0	7.6	19.3	22.4	20.8
	C	5.0	3.9	4.4	7.2	6.1	6.6	30.1	17.0	23.5
PP	A	41.4	69.5	55.4	58.9	71.5	65.2	71.3	72.5	71.9
	B	29.7	44.4	37.0	43.0	58.8	50.9	74.8	63.2	69.0
	C	45.8	73.9	59.8	78.4	76.3	77.3	76.9	89.3	83.1
FRP	A	63.5	59.6	61.5	61.6	54.8	58.2	36.6	45.9	41.2
	B	25.2	12.3	18.7	46.9	50.7	48.8	35.2	38.9	37.0
	C	48.5	52.6	50.51	46.8	50.0	48.4	49.5	44.8	47.1

A Study on the Characteristics of Fire Hazard for Plastic Materials

Keun-Won Lee

Dept. of Safety Engineering Research,
Occupational Safety & Health Research Institute, KOSHA

Abstract

This study was designed to investigate fire hazard characteristics of the plastics materials such as a polyvinyl chloride (PVC), polypropylene (PP), fiber reinforced plastics (FRP) that is used as elements of buildings or structures in workplace. The fire characteristics of the plastic materials were carried out using the self-Ignition tester, the cone calorimeter and the combustion gas tester according to ASTM, ISO and KS standards. The materials used in this experiment were commercial materials the composition of which was not disclosed. As the results of this study, the self-ignition temperature of the plastic materials was from 432°C to 494°C, and the flash-ignition temperature of plastic materials was from 342°C to 437°C. The time to ignition of the polypropylene in the materials was shorter, and that of the polyvinyl chloride was longer. The heat release rate of plastic materials was increased with increasing density and heat flux. The peak heat release rate for the polypropylene in materials with heat flux of external irradiance was highest. As results of the classification to flashover propensity by Petrella, the flashover propensity of the polypropylene in plastic materials was rated as high. It was found that the relationship of

flashover propensity and total heat released could not be simply considered. The characteristics of fire hazard in plastic materials can be used to provide guidelines of combustibility and heat release rate with a kind of products and heat flux of irradiance to prevent fire risk.

Key Words: plastic materials, fire hazard, ignition temperature, time to ignition, Cone calorimeter, heat release rate, flashover

안 내 문

본 연구보고서의 내용은 연구책임자의 개인적 견해이며, 우리 연구원의 공식견해와 다를 수 있음을 알려드립니다.

산업안전보건연구원 원장

플라스틱류의 화재특성 연구

(안전분야-연구자료 연구원 2003-84-591)

발 행 일 : 2003.12.31

발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 김 광 종

연구책임자 : 안전공학연구실 선임연구원 이 근 원

발 행 처 : 한국산업안전공단 산업안전보건연구원

주 소 : 인천광역시 부평구 구산동 34-4

전 화 : (032) 510-0812

F A X : (032) 518-0867

Homepage : www.kosha.or.kr

인 쇄 : 영진인쇄사 ☎ (02)734-3713
