

화학사고 예방 및 원인규명을 위한

건축 단열재 화재 위험성 평가

김천동·서동현·최이락·정기혁·고윤현

산업재해예방
안전보건공단
산업안전보건연구원



요약문

- 연구기간 2025년 4월 ~ 2025년 8월
- 핵심단어 건축 단열재, 경질 우레탄 폼, 보온재, 보온판
- 위험성평가명 건축 단열재 화재 위험성 평가

1. 연구배경

건축 현장에서는 건축물의 에너지절약설계기준 등 관계 법령에 따라 열손실을 방지하기 위하여 단열재를 사용하고 있다. 이 단열재 대부분은 난연성 재료이다. 이는 연소하지 않는 것이 아니라 연소가 어려운 것(가열 개시 후 5분간 총방출열량이 8 MJ/m^2 이하일 것 등)으로 지속적인 열원이 공급되면 연소한다. 이들 단열재에는 난연제로 포함된 할로젠 원소 등이 포함되어 연소 시 CO_2 , CO 뿐 아니라 HCl , HBr 등 유독가스가 발생하고, 대피가 늦는 경우 이 유독가스로 사망사고가 발생할 위험이 크다.

실제 202X년 리조트 건축 현장에서 배관용접작업(TIG) 중 단열재(경질 우레탄 폼 보온판, 배관 보온재 등)에 화재가 발생하여 6명이 사망하는 사고가 발생하였다. 이처럼 건축 현장의 단열재는 연소 시 유독가스가 많이 발생하는 화재의 특성상 대형 사고로 이어지는 경우가 많다.

이에 본 위험성평가에서는 건축 단열재의 화재 사례 등을 조사·분석하였고, 압출법 보온판, 경질 우레탄 폼 보온판, 페놀 폼, 배관 보온재에 대한 물리적 위험성 시험·평가를 통해 시험데이터 기반의 물질 특성을 파악하여 관련 자재 사용 시 화재 사고 예방을 위한 정보를 제공하고자 한다.

2. 주요 연구내용

본 위험성평가에서는 실제 건설 현장에서 사용하는 단열재 4종 11개를 제공받아 시험을 실시하였다. 표면의 온도를 승온시킴에 따라 발화하는 온도를 측정하는 Hot-Surface Ignition Temperature 시험, Gas Ignitor로 시료의 점화 여부를 확인하는 착화 시험, 큐브에 시료를 넣은 뒤 오븐의 온도를 400 ℃까지 승온한 뒤 자연발화 여부를 확인하는 자연발화점 시험, 열안전성과 열중량 감소를 확인하는 열분석(DSC, TGA) 시험, 경질 우레탄 폼에 샌드 버너 및 가스 토치를 이용한 연소 시험 등 총 5종의 시험을 실시하였으며 주요 결과는 아래와 같다.

〈건축 단열재의 화재 시험 결과 요약〉

구분		압출법 보온판	경질 우레탄 폼 보온판	페놀 폼	배관 보온재
Hot-Surface Ignition Temperature		150 ~ 155 ℃ (용융 시작)	311 ~ 318 ℃ (탄화 시작)	288 ~ 291 ℃ (탄화 시작)	170 ~ 187 ℃ (용융 시작)
		405 ~ 413 ℃ (기화 시작)			
착화 시험 (연소지속시간)		착화 후 시료 전체 연소 (6분)	부직포 부분만 착화 후 연소 (1분)	착화 안됨	심재 착화 연소 (15초)
자연발화점		측정 안됨	측정 안됨	측정 안됨	측정 안됨
열분석	DSC	210 ~ 221 ℃ (발열개시온도)	244 ℃ (발열개시온도)	214 ℃ (발열개시온도)	217 ~ 224 ℃ (발열개시온도)
	TGA	- (94 ~ 96)% (질량변화율)	- (58 ~ 59)% (질량변화율)	- (72 ~ 81)% (질량변화율)	- (67 ~ 70)% (질량변화율)
경질 우레탄 폼 보온판 연소 시험 (연소여부)		샌드 버너	연소하지 않음		
		가스 토치	연소함		

1) 건축 단열재의 화재 특성 분석

Hot-Surface Ignition Temperature 시험 결과 시료 4종 모두 연소는 관찰되지 않았지만, 압출법 보온판과 배관 보온재는 용융이 진행되어 시료가 모두 증발하였다. 착화 시험 시 압출법 보온판은 시료 전체가 연소하였으나 경질 우레탄 폼 보온판은 바깥의 부직포 부분만 일부 연소하다가 꺼졌으며, 배관 보온재는 폴리 에틸렌이 주성분인 심재만 연소가 진행되다가 중지되었다. 자연발화점은 시료 4종 모두 측정되지 않았다. DSC 시험에서 발열개시온도는 4종 시료 모두 비슷하였고, TGA 시험의 질량 변화율은 차이가 있었다. 또한 경질 우레탄 폼의 연소 시험의 경우 LPG를 이용한 샌드 버너 사용 결과 연소되지 않았으나, 부탄을 이용한 가스 토치 시험에서는 연소하였다.

시험 결과 압출법 보온판은 건설 현장에서 자주 취급하는 점화원(용접 불꽃 등)으로 연소가 확대될 가능성이 있었다. 다른 3종의 시료는 재료에 포함된 난연제(할로젠 등)로 인하여 순간적인 연소는 발생할 수 있으나 연소가 확대되는 것을 방지하는 것으로 나타났다.

2) 건축 단열재의 화재 예방 및 피해감소 대책

다양한 자재를 사용하는 건설 현장 특성상 다른 가연물이 지속적으로 연소되면서 열량을 난연재료에 공급하면 난연성능을 확보할 수 없다. 연소가 중단되는 2종(폴리 우레탄 폼, 페놀 폼)은 난연재료이긴 하나 5분간 가열 시 난연성능이 확보된 것(난연 3급, 난연2급은 10분)으로 다른 가연물이 연소하면서 지속적으로 열량을 공급하면 난연재료도 같이 연소가 일어난다. 또한 폴리에틸렌이 주성분인 배관 보온재의 경우 난연시험은 수평 연소성에 관한 시험이라 배관이 수직으로 설치된 곳의 엘보우 같은 부분에 점화원이 발생하여 연소가 시작되면 난연성능을 보장할 수 없다. 이에 건설 현장의 화재 예방 및 피해감소 대책을 다음과 같이 제시하고자 한다.

인화성 액체, 가스, 고체 등 가연성 물질의 반입은 1일 사용량 입고를 원칙으로 하되, 곤란할 경우 점화원과 격리된 보관 장소에 안전하게 보관가능한 물량만 입고하여야 한다. 또한 단열재, 경질 우레탄 폼, 내장재 등 부피가 큰 자재와 같이 별도의 저장소에 보관이 어려운 경우 지상층의 별도 구획화된 장소에 보관하고, 화기작업 금지 안내 및 소화용구를 비치하여야 한다.

또한, 건설 현장에서 점화원이 될 위험이 있는 용접·용단 작업은 가능한 지양하고, 외부에서 용접 등 화재의 위험이 있는 모든 작업을 마친 자재를 반입하여 화기를 사용하지 않는 조립 등의 설치를 할 수 있게 하여야 한다. 부득이하게 현장내에서 화기작업을 실시해야 하는 경우에는 가연성 자재의 반입을 원칙적으로 금지해야 하며, 부득이 가연물이 반입된 경우 충분한 안전거리를 확보하거나 불티방지포 등 비산 방지조치를 하여야 한다. 특히 배관의 개구부, 피트 등 아래층이나 육안으로 확인하기 어려운 곳으로 불꽃이 들어갈 위험이 있는 장소를 모두 밀폐하고 작업하여야 한다.

화재 발생시 사업장 내 근로자의 대피를 유도하기 위한 화재감시자를 배치해야 하며, 화재감시자는 근로자들(외국인 근로자 포함)간 의사소통을 원활하게 하여 비상시 대피를 원활하게 하여야 한다. 또한 업무 수행에 필요한 확성기, 휴대용 조명기구 및 화재 대피용 마스크 등 대피용 방연장비를 소지하여야 하고 이를 능숙하게 사용할 수 있어야 한다. 항상 피난로에는 자재 등의 장애물이 없도록 관리하여야 하며, 화재 시 발생한 연기 및 정전으로 시야 확보가 어려움으로 비상전원에 연결된 간이피난유도선 및 비상조명등을 설치하여야 한다.

3. 연락처

- 평가책임자 : 산업안전보건연구원 산업안전연구실 차장 김천동
 - ☎ 042) 869. 0335
 - E-mail : sakarasano@kosha.or.kr

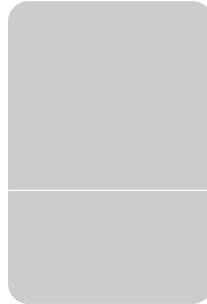
— |

| —



— |

| —



목 차

I. 서론	1
1. 배경 및 목적	3
2. 위험성평가 대상 물질	5
3. 평가 범위 및 내용	7
II. 건축 단열재 개요 및 사고사례	9
1. 건축물 단열 관련 법규 및 시험 대상 단열재	11
2. 건축 단열재 난연 성능 관련 기준	22
3. 사고사례 및 우레탄의 열분해 메커니즘	25

Ⅲ. 시험장비 및 방법	31
1. Hot-Surface Ignition Temperature 시험	33
2. 착화 시험	35
3. 자연발화점 시험	37
4. 열분석(DSC, TGA) 시험	39
5. 연소 시험	44
Ⅳ. 결과 및 고찰	49
1. Hot-Surface Ignition Temperature 시험 결과	51
2. 착화 시험 결과	56
3. 자연발화점 시험 결과	61
4. 열분석(DSC, TGA) 시험 결과	63
5. 연소 시험 결과	73

6. 시험 결과 종합 정리	76
V. 요약 및 결론	81
1. 건축 단열재의 물리적 위험성 시험 결과	83
2. 건축 단열재 화재 예방 및 피해감소 대책	85
참고문헌	90

표 목차

〈표 I-1〉 단열재의 종류 및 특성	4
〈표 I-2〉 위험성평가 대상 시료	5
〈표 II-1〉 지역별 건축물 부위의 열관류율표	11
〈표 II-2〉 단열재의 두께	13
〈표 II-3〉 단열재의 등급 분류	16
〈표 II-4〉 건축자재의 난연성능 등급 및 성능기준	22
〈표 II-5〉 국내 건설업 화재 사고 재해자 및 사망자 수(2020~2024)	25
〈표 II-6〉 우레탄 연소시 발생 가스 및 Cf 농도(ppm)	26
〈표 II-7〉 건설 현장 우레탄 단열재 대형 화재 사고	26
〈표 III-1〉 열화상 카메라 장비 주요 사양	36
〈표 III-2〉 자동발화점 측정 장비 사양	38
〈표 III-3〉 열분석 방법	39
〈표 III-4〉 DSC measuring cell 사양	41
〈표 III-5〉 TGA 사양	43
〈표 IV-1〉 Hot-Surface Ignition Temperature 시험 결과(압출법 보온판)	52
〈표 IV-2〉 Hot-Surface Ignition Temperature 시험 결과(경질 우레탄 폼)	53
〈표 IV-3〉 Hot-Surface Ignition Temperature 시험 결과(페놀 폼)	54
〈표 IV-4〉 Hot-Surface Ignition Temperature 시험 결과(배관 보온재)	55

표 목차

〈표 IV-5〉 자연발화점 측정 결과	62
〈표 IV-6〉 압출법 보온판의 DSC 결과 요약	64
〈표 IV-7〉 경질 우레탄 폼 보온판의 DSC 결과 요약	65
〈표 IV-8〉 페놀 폼의 DSC 결과 요약	66
〈표 IV-9〉 배관 보온재의 DSC 결과 요약	67
〈표 IV-10〉 압출법 보온판의 TGA 결과 요약	69
〈표 IV-11〉 경질 우레탄 폼 보온판의 TGA 결과 요약	70
〈표 IV-12〉 페놀 폼의 TGA 결과 요약	71
〈표 IV-13〉 배관 보온재의 TGA 결과 요약	72
〈표 IV-14〉 연소 시험 결과 요약	73
〈표 IV-15〉 Hot-Surface Ignition Temperature 시험 결과	76
〈표 IV-16〉 착화 시험 결과	77
〈표 IV-17〉 자연발화점 시험 결과	77
〈표 IV-18〉 시차주사열량계(DSC) 시험 결과	78
〈표 IV-19〉 열중량분석(TGA) 시험 결과	79
〈표 IV-20〉 경질 우레탄 폼 보드 연소 시험 결과	80
〈표 V-1〉 건축 단열재의 화재 시험 결과 요약	83

그림목차

[그림 I-1] 평가 대상 시료 (예)	6
[그림 II-1] 압출법 보온판 시공 모습	18
[그림 II-2] 경질 우레탄 폼 보온판 시공 모습	19
[그림 II-3] 페놀 폼 시공 모습	20
[그림 II-4] 배관 보온재 시공 모습	21
[그림 II-5] 폴리우레탄의 열분해 메커니즘	27
[그림 II-6] 폴리우레탄의 연소과정에서 난연제의 영향	29
[그림 III-1] Hot-Surface Ignition Temperater Tester	33
[그림 III-2] 열화상 카메라 Testo 885 pro	35
[그림 III-3] 자동발화점 측정 장비	38
[그림 III-4] DSC 장비	40
[그림 III-5] TGA 장비	43
[그림 III-6] 데이터 측정장치 및 온도 보상 도선(Thermocouple)	45
[그림 III-7] 복사열(Heatflux) 측정기	45
[그림 III-8] 샌드 버너 및 가스 토치	46
[그림 III-9] 시료 설치 모습	46
[그림 III-10] 측정 기구 설치 모습	47

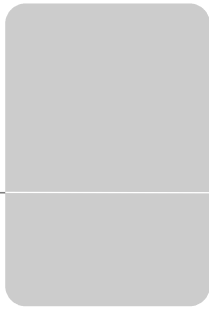
그림목차

[그림 N-1] Hot-Surface Ignition Temperature 시험 모습(압출법 보온판)	52
[그림 N-2] Hot-Surface Ignition Temperature 시험 모습(경질 우레탄 폼)	53
[그림 N-3] Hot-Surface Ignition Temperature 시험 모습(페놀 폼)	54
[그림 N-4] Hot-Surface Ignition Temperature 시험 모습(배관 보온재)	55
[그림 N-5] 착화 시험 모습(압출법 보온판)	57
[그림 N-6] 착화 시험 모습(경질 우레탄 폼 보온판)	58
[그림 N-7] 착화 시험 모습(페놀 폼)	59
[그림 N-8] 착화 시험 모습(배관 보온재)	60
[그림 N-9] 자연발화점 시험 전·후 시료 모습	61
[그림 N-10] 배관 보온재 시료 3종	62
[그림 N-11] 압출법 보온판의 DSC 결과	63
[그림 N-12] 경질 우레탄 폼 보온판의 DSC 결과	64
[그림 N-13] 페놀 폼의 DSC 결과	65
[그림 N-14] 배관 보온재의 DSC 결과	66
[그림 N-15] 압출법 보온판의 TGA 결과	68
[그림 N-16] 경질 우레탄 폼 보온판의 TGA 결과	69
[그림 N-17] 페놀 폼의 TGA 결과	70
[그림 N-18] 배관 보온재의 TGA 결과	71
[그림 N-19] 샌드 버너 연소 시험 결과	74
[그림 N-20] 가스 토치 연소 시험 결과	75

[그림 V-1] 위험물 저장소 및 자재 보관장소 구획화	85
[그림 V-2] 자동확산소화장치 및 화재 감지 경보기	86
[그림 V-3] 불티 방지포 및 비산 방지 조치	87
[그림 V-4] 용단 작업 시 화재 발생 과정	87
[그림 V-5] 화재감시자 배치 예시	88
[그림 V-6] 비상조명등 설치 사진	89

I. 서론

.....



I. 서론

1. 배경 및 목적

건축물은 효율적인 에너지 관리를 위하여 열손실 방지 등의 기준을 녹색건축물 조성 지원법 및 건축물의 에너지절약설계기준(국토교통부고시 제 2024-1026호) 등 관련 법령으로 정하고 있다. 건축물을 건축하거나 대수선, 용도변경 등 건축물대장의 기재 내용을 변경하는 경우에는 거실의 외벽, 최상층에 있는 거실의 반자·지붕 등에 지역별 열관류율 또는 단열재의 두께 기준을 준수하여야 한다.

이때 사용되는 단열재는 재료의 성분에 따라 <표 I-1>과 같이 유기단열재와 무기단열재로 나뉘어지고¹⁾, 유기 단열재는 압출법 보온판, 경질 우레탄 폼 보온판, 페놀 폼 등이 사용되고 이들 중 다수는 난연성 재료이다. 난연재료는 불에 잘 타지 않는 성능을 가진 재료이나, 이는 연소하지 않는 것이 아니라 연소가 어려운 것(가열 개시 후 5분간 총방출열량이 8 MJ/m^2 이하일 것 등)으로 지속적인 열원이 공급되면 연소한다. 이들 난연재는 연소시 CO_2 , CO , HCl 등의 유해가스가 발생²⁾하며, 이 유해가스로 사망사고가 발생할 위험이 크다.

-
- 1) 김수민, 재난대응 유연성 및 화재안전 확보를 위한 고난연·고단열 샌드위치패널 개발 최종보고서, 국토교통부 국토교통과학기술진흥원, 2023
 - 2) 김종복 외 1명, 주요 건축 재료별 연소가스 유해성 평가, 한국목재공학회지 2016: 제 44권 제5호 639~654p

〈표 1-1〉 단열재의 종류 및 특성³⁾

구분	유기단열재			무기단열재	
	열가소성		열경화성	글라스울 (GW)	미네랄울 (MW)
	비드법 (EPS)	압출법 (XPS)	경질 우레탄 (PIR)		
열전도율 (W/mK)	0.036~ 0.038	0.027~ 0.031	0.020~ 0.021	0.032~ 0.036	0.035~ 0.037
단열성능	보통	보통	높음	낮음	낮음
수분흡수	보통	높음	높음	낮음	낮음
내화성능	가연	가연	가연	준불연	불연

실제 202X년 리조트 건축 현장에서 배관용접작업(TIG) 중 단열재(경질 우레탄 폼 보온판, 배관 보온재 등)에 화재가 발생하여 6명이 사망하는 사고가 발생하였다. 이처럼 건축 현장의 단열재는 연소 시 유독가스가 많이 발생하는 화재의 특성상 대형 사고로 이어지는 경우가 많다.

이에 본 위험성평가에서는 건축 단열재의 화재 사례 등을 조사·분석하였고, 압출법 보온판, 경질 우레탄 폼 보온판, 페놀 폼, 배관 보온재에 대한 물리적 위험성 시험·평가를 통해 시험데이터 기반의 물질 특성을 파악하여 관련 자재 사용 시 화재 사고 예방을 위한 정보를 제공하고자 한다.

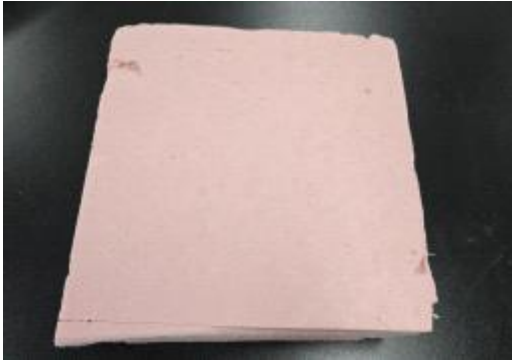
3) 김수민, 재난대응 유연성 및 화재안전 확보를 위한 고난연·고단열 샌드위치패널 개발 최종보고서, 국토교통부 국토교통과학기술진흥원, 2023

2. 위험성평가 대상 물질

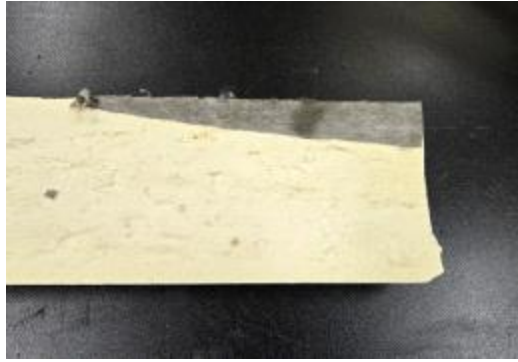
본 위험성평가에서는 건축물의 에너지절약설계기준 상에서 구분하는 지역별(중부1지역, 중부2지역, 남부지역)과 공사 종류별 건설현장(아파트, 주상복합, 체육관)을 고려하여 총 4개사로부터 시료를 제공받았다. 공사 종류별로 쓰이는 자재가 달라 <표 I-2>과 같이 총 4종(압출법 보온판, 경질 우레탄 폼 보온판, 페놀 폼, 배관 보온재) 11개를 대상 시료로 선정하였다.

<표 I-2> 위험성평가 대상 시료

회사명	공사 종류	압출법 보온판	경질 우레탄 폼 보온판	페놀 폼	배관 보온재
A사	아파트	O	O	O	O
B사	체육관	X	O	O	X
C사	주상복합	O	X	X	O
D사	주상복합	O	X	O	O
시료 구분	총 11종	3종	2종	3종	3종



(a) 압출법 보온판



(b) 경질 우레탄 폼 보온판



(c) 펄스 폼



(d) 배관 보온재

[그림 1-1] 평가 대상 시료 (예)

3. 평가 범위 및 내용

시료 4종이 모두 고체이므로 고체에 대한 시험을 실시하였다. 4종 모두 Hot-Surface Ignition Temperature 시험, 착화 시험, 자연발화점 시험, 열분석(DSC, TGA) 시험 등 4종류의 시험을 실시하였고, 최근 사고가 발생한 경질 우레탄 폼 보드는 연소 시험을 추가로 실시하였다.

Hot-Surface Ignition Temperature(고온 표면 점화온도) 장비를 사용하여 시험을 실시하였으며, 시료를 놓은 표면을 상온에서 500 ℃ 까지 10 ℃ /min의 속도로 가열한 후 화염, 연기, 용융 시작 시 온도를 측정하였다.

착화 시험은 시료에 Gas Igniter로 10초 동안 직접 화염을 가하여 화염 전파 유무 및 지속시간, 시료 전체가 연소하는 시간을 측정하였다. 또한 열화상 카메라를 이용하여 시료의 연소 시 최대 온도를 측정하였다.

자연발화점 시험은 NF T20-036 「Chemical products for industrial use determination of the relative temperature of the spontaneous flammability of solids」 규격에 따라 시험을 실시하였다. 큐브에 해당 시료를 넣고 외부 오븐 온도를 400 ℃까지 가열하면서 시료 온도가 400 ℃를 초과하였을 때의 온도를 자연발화온도로 하는 시험방법이다.

산화분해 개시온도 등의 열안정성을 평가를 위해 시차주사열량계(DSC, Differential Scanning calorimeter)를 사용하였다. DSC는 물질을 일정한 승온 속도로 가열하면서 엔탈피 변화(흡열 및 발열)를 측정하여 유리전이, 산화분해, 열분해 등과 같은 열적 특성을 분석하고 이를 통해 물질의 열안정성 및 반응 특성을 분석할 수 있다.

- 개시온도 : 발열 및 흡열반응이 시작되는 지점의 온도로서 기준선(baseline) 이탈 시작점
- 외삽개시온도 : 기준선과 발열 및 흡열 그래프의 접선을 외삽(extrapolation) 하여 만나는 지점의 온도
- 최대온도 : 구간 내 최대가 되는 온도
- 반응열(ΔH) : 에너지를 흡수하면 흡열, 방출하면 발열 반응임

열중량 분석(TGA, Thermo Gravimetric Analysis)은 일정한 속도로 온도를 변화시켰을 때의 시료의 질량 변화를 시간이나 온도의 함수로서 측정한다. 시료의 질량 변화는 증발(vaporization)이나 가스를 생성하는 화학반응(Chemical reaction) 등에 의해 발생하게 되며, 저울(microbalance)에 의해 연속적으로 측정된다. TGA에 의한 질량-온도 곡선을 이용해 온도변화에 따른 질소, 산소, 공기 등의 분위기하에서 분해 거동을 관찰할 수 있으며, 시료의 열안정성 및 휘발성 물질이나 첨가제들의 함량 및 조성 비율 등을 알 수 있다. TGA는 산소가 결합하는 산화나 가스가 방출되는 열분해와 같은 온도 증가에 따른 질량 변화가 일어나는 물질에 적용할 수 있으며 시료 준비 과정에서 휘발될 수 있는 끓는점이 낮은 물질은 측정이 불가하며, 측정 가능한 시료의 최대량은 900 μl 로 매우 소량이기 때문에 불균일 혼합물의 경우 측정 결과의 재현성에 영향을 줄 수 있다.

연소 시험은 최근 사고가 발생했던 경질 우레탄 폼 보온판만 실시하였다. 지속적인 열량 공급을 위한 LPG 샌드 버너 및 부탄가스 토치로 직접 화염을 시료에 접촉하였으며, 하부, 중간, 상부 세 곳에 열전대(Thermocouple)을 설치하여 온도를 측정하였다. 또한 열화상 카메라를 사용하여 시료의 온도를 측정하였다.

Ⅱ. 건축 단열재 개요 및 사고사례



II. 건축 단열재 개요 및 사고사례

1. 건축물 단열 관련 법규 및 시험 대상 단열재

1) 건축물의 지역별 단열재 관련 기준

건축물의 효율적인 에너지 관리를 위하여 건축물을 건축하거나 대수선, 용도변경 및 건축물대장의 기재 내용을 변경하는 경우에는 열 손실 방지 등의 에너지 이용 합리화를 위한 조치를 하여야 한다. 거실의 외벽, 최상층에 있는 거실의 반자 또는 지붕, 최하층에 있는 거실의 바닥 등은 4개 지역(중부1지역, 중부2지역, 남부지역, 제주도)에 따라 <표 II-1> 열관류율 기준 또는 <표 II-2> 단열재 두께 기준을 준수하여야 한다.

<표 II-1> 지역별 건축물 부위의 열관류율표

(단위 : $W/m^2 \cdot K$)

건축물의 부위		지역				
		중부1지역	중부2지역	남부지역	제주도	
거실의 외벽	외기에 직접 면하는 경우	공동주택	0.150 이하	0.170 이하	0.220 이하	0.290 이하
		공동주택 외	0.170 이하	0.240 이하	0.320 이하	0.410 이하
	외기에 간접 면하는 경우	공동주택	0.210 이하	0.240 이하	0.310 이하	0.410 이하
		공동주택 외	0.240 이하	0.340 이하	0.450 이하	0.560 이하

건축 단열재 화재 위험성 평가

건축물의 부위		지역		중부1지역	중부2지역	남부지역	제주도
최상층에 있는 거실의 반자 또는 지붕	외기에 직접 면하는 경우		0.150 이하		0.180 이하	0.250 이하	
	외기에 간접 면하는 경우		0.210 이하		0.260 이하	0.350 이하	
최하층에 있는 거실의 바닥	외기에 직접 면하는 경우	바닥난방인 경우	0.150 이하	0.170 이하	0.220 이하	0.290 이하	
		바닥난방이 아닌 경우	0.170 이하	0.200 이하	0.250 이하	0.330 이하	
	외기에 간접 면하는 경우	바닥난방인 경우	0.210 이하	0.240 이하	0.310 이하	0.410 이하	
		바닥난방이 아닌 경우	0.240 이하	0.290 이하	0.350 이하	0.470 이하	
바닥난방인 층간바닥			0.810 이하				
창 및 문	외기에 직접 면하는 경우	공동주택	0.900 이하	1.000 이하	1.200 이하	1.600 이하	
		공동주택 외	창	1.300 이하	1.500 이하	1.800 이하	2.200 이하
			문	1.500 이하			
	외기에 간접 면하는 경우	공동주택	1.300 이하	1.500 이하	1.700 이하	2.000 이하	
공동주택 외		창	1.600 이하	1.900 이하	2.200 이하	2.800 이하	
		문	1.900 이하				
공동주택 세대현관 문 및 방화문	외기에 직접 면하는 경우 방화문		1.400 이하				
	외기에 간접 면하는 경우		1.800 이하				

비 고

- 1) 중부1지역 : 강원특별자치도(고성, 속초, 양양, 강릉, 동해, 삼척 제외), 경기도(연천, 포천, 가평, 남양주, 의정부, 양주, 동두천, 파주), 충청북도(제천), 경상북도(봉화, 청송)
- 2) 중부2지역 : 서울특별시, 대전광역시, 세종특별자치시, 인천광역시, 강원특별자치도(고성, 속초, 양양, 강릉, 동해, 삼척), 경기도(연천, 포천, 가평, 남양주, 의정부, 양주, 동두천, 파주 제외), 충청북도(제천 제외), 충청남도, 경상북도(봉화, 청송, 울진, 영덕, 포항, 경주, 청도, 경산 제외), 전북특별자치도, 경상남도(거창, 함양), 대구광역시(군위)
- 3) 남부지역 : 부산광역시, 대구광역시(군위 제외), 울산광역시, 광주광역시, 전라남도, 경상북도(울진, 영덕, 포항, 경주, 청도, 경산), 경상남도(거창, 함양 제외)

〈표 II-2〉 단열재의 두께

[중부1지역]

(단위:mm)

건축물의 부위		단열재의 등급		단열재 등급별 허용 두께			
				가	나	다	라
거실의 외벽	외기에 직접 면하는 경우	공동주택	220	255	295	325	
		공동주택 외	190	225	260	285	
	외기에 간접 면하는 경우	공동주택	150	180	205	225	
		공동주택 외	130	155	175	195	
최상층에 있는 거실의 반자 또는 지붕	외기에 직접 면하는 경우		220	260	295	330	
	외기에 간접 면하는 경우		155	180	205	230	
최하층에 있는 거실의 바닥	외기에 직접 면하는 경우	바닥난방인 경우	215	250	290	320	
		바닥난방이 아닌 경우	195	230	265	290	
	외기에 간접 면하는 경우	바닥난방인 경우	145	170	195	220	
		바닥난방이 아닌 경우	135	155	180	200	
바닥난방인 층간바닥			30	35	45	50	

[중부2지역]

(단위: mm)

건축물의 부위		단열재의 등급	단열재 등급별 허용 두께			
			가	나	다	라
거실의 외벽	외기에 직접 면하는 경우	공동주택	190	225	260	285
		공동주택 외	135	155	180	200
	외기에 간접 면하는 경우	공동주택	130	155	175	195
		공동주택 외	90	105	120	135
최상층에 있는 거실의 반자 또는 지붕	외기에 직접 면하는 경우		220	260	295	330
	외기에 간접 면하는 경우		155	180	205	230
최하층에 있는 거실의 바닥	외기에 직접 면하는 경우	바닥난방인 경우	190	220	255	280
		바닥난방이 아닌 경우	165	195	220	245
	외기에 간접 면하는 경우	바닥난방인 경우	125	150	170	185
		바닥난방이 아닌 경우	110	125	145	160
바닥난방인 층간바닥			30	35	45	50

[남부지역]

(단위: mm)

건축물의 부위		단열재의 등급	단열재 등급별 허용 두께			
			가	나	다	라
거실의 외벽	외기에 직접 면하는 경우	공동주택	145	170	200	220
		공동주택 외	100	115	130	145
	외기에 간접 면하는 경우	공동주택	100	115	135	150
		공동주택 외	65	75	90	95
최상층에 있는 거실의 반자 또는 지붕	외기에 직접 면하는 경우		180	215	245	270
	외기에 간접 면하는 경우		120	145	165	180
최하층에 있는 거실의 바닥	외기에 직접 면하는 경우	바닥난방인 경우	140	165	190	210
		바닥난방이 아닌 경우	130	155	175	195
	외기에 간접 면하는 경우	바닥난방인 경우	95	110	125	140
		바닥난방이 아닌 경우	90	105	120	130
바닥난방인 층간바닥			30	35	45	50

[제주도] (단위: mm)

건축물의 부위		단열재의 등급	단열재 등급별 허용 두께			
			가	나	다	라
거실의 외벽	외기에 직접 면하는 경우	공동주택	110	130	145	165
		공동주택 외	75	90	100	110
	외기에 간접 면하는 경우	공동주택	75	85	100	110
		공동주택 외	50	60	70	75
최상층에 있는 거실의 반자 또는 지붕	외기에 직접 면하는 경우		130	150	175	190
	외기에 간접 면하는 경우		90	105	120	130
최하층에 있는 거실의 바닥	외기에 직접 면하는 경우	바닥난방인 경우	105	125	140	155
		바닥난방이 아닌 경우	100	115	130	145
	외기에 간접 면하는 경우	바닥난방인 경우	65	80	90	100
		바닥난방이 아닌 경우	65	75	85	95
바닥난방인 층간바닥			30	35	45	50

2) 건축물의 단열재 등급 분류

건축 단열재는 KS L 9016 「보온재의 열전도율 측정 방법」, KS ISO 8301 「Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Heat flow meter apparatus」, KS L ISO 8302 「Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Guarded hot plate apparatus」 규격에 따른 열전도율의 범위에 따라 가~라 4가지 등급으로 분류한다.

열전도율의 범위가 0.034 W/mK 이하는 가등급, 0.035~0.040 W/mK는 나등급, 0.041~0.046 W/mK는 다등급, 0.047~0.051 W/mK는 라등급으로 분류하며 단열재의 종류는 <표 II-3>와 같다.

〈표 II-3〉 단열재의 등급 분류

비 규 범 이 내	열전도율의 범위 (KS L 9016, KS L ISO 8301 또는 8302에 의한 20±5℃ 시험조건)	관련 표준	단열재 종류
가	0.034 W/mK 이하	KS M 3808	- 압출법보온판 특호, 1호, 2호, 3호 - 비드법보온판 2종 1호, 2호, 3호, 4호
		KS M 3809	- 경질우레탄폼보온판 1종 1호, 2호, 3호 및 2종 1호, 2호, 3호
		KS M ISO 4898	- 압출법보온판 I종 (A-1, A-2), II종 (A, B-1, B-2), III종 (A, B-2, C) - 비드법보온판 I종 A-1, II종 A-1, III종 (A-1, A-2, B) - 경질우레탄폼보온판 I종 (A, B, C, D, E), II종(A, B, C), III종 (A, B, C) - 페놀 폼 I종 (A, C, D), II종 A
		KS L 9102	- 그라스울 보온판 48K, 64K, 80K, 96K, 120K
		KS M 3871-1	- 분무식 중밀도 폴리우레탄 폼 1종(A, B), 2종(A, B)
		KS F 5660	- 폴리에스테르 흡음 단열재 1급
		기타 단열재로서 열전도율이 0.034 W/mK 이하인 경우	

규격 범위	열전도율의 범위 (KS L 9016, KS L ISO 8301 또는 8302에 의한 20±5℃ 시험조건)	관련 표준	단열재 종류
나	0.035~0.040 W/mK	KS M 3808	- 비드법보온판 1종 1호, 2호, 3호
		KS M ISO 4898	- 비드법보온판 I종 A-2, II종 (A-2, B), III종 C - 페놀 폼 I종B, II종B, III종A
		KS L 9102	- 미네랄울 보온판 1호, 2호, 3호 - 그라스울 보온판 24K, 32K, 40K
		KS M 3871-1	- 분무식 중밀도 폴리우레탄 폼 1종(C)
		KS F 5660	- 폴리에스테르 흡음 단열재 2급
		기타 단열재로서 열전도율이 0.035~0.040 W/mK 이하인 경우	
다	0.041~0.046 W/mK	KS M 3808	- 비드법보온판 1종 4호
		KS M ISO 4898	- 비드법보온판 I종 (B, C)
		KS F 5660	- 폴리에스테르 흡음 단열재 3급
		기타 단열재로서 열전도율이 0.041~0.046 W/mK 이하인 경우	
라	0.047~0.051 W/mK	기타 단열재로서 열전도율이 0.047~0.051 W/mK 이하인 경우	

본 평가를 실시한 단열재는 가등급 3종(압출법 보온판, 경질 우레탄 폼 보온판, 페놀 폼)이다. 배관 보온재는 건축물 단열 관련 법규에 포함되지 않으며, 재료 선정과 설계 기준은 ASTM 또는 발주자가 제시하는 보온기술규격에 따르고 있다.

3) 시험 대상 단열재 및 보온재

압출법 보온판은 KS M 3808 「발포 폴리스티렌(PS)단열재」, 경질 우레탄폼 보온판은 KS M 3809 「경질 폴리우레탄 폼 단열재」 관련 표준에 따라 제작되었으나, 두 규격 모두 2024년 7월 18일 폐지 후 폐놀 폼의 관련 규격인 KS M ISO 4898 「경질 발포 플라스틱-건축물 단열재-규격」으로 통합되었다.

(1) 압출법 보온판

Polystyrene이 80~90% 정도 주원료로 구성되어 있으며, 통칭으로 아이소핑크라고 하며, XPS(Extruded Polystyrene)이라고 한다. 폴리스티렌 또는 그 공중합체로 스킨층의 유무와 무관하게 발포, 압출된 독립 기포 구조를 가지는 경질 발포 플라스틱 단열재로 단열효과가 높고, 시공이 간단한 편이나 비드법 보온판 1종(EPS)보다 가격이 비싼편이고, 열에 약해 70 ℃ 이하에서 사용한다.



[그림 II-1] 압출법 보온판 시공 모습

(2) 경질 우레탄 폼 보온판

경질 우레탄 폼 보온판은 폴리우레탄 또는 우레탄/이소시아네이트 중합체를 기본으로 하는 본질적으로 독립 기포 구조를 가지는 경질 발포 플라스틱 단열재는 말한다. 단열재용 우레탄 폼의 주원료는 액상의 이소시아네이트와 폴리올이며, 부원료로는 반응속도 조절을 위한 촉매류 및 정포제와 발포제 등을 사용한다.¹⁾ 우수한 단열효과를 가지고 있어 난연성이 뛰어나고, 차습성 및 방음성이 뛰어나다. 하지만 가격이 비싸고 시공 방법이 잘못되면 단열효과가 떨어지며, 계절에 따른 온도 변화에 따라 수축과 팽창이 생겨 장기간 사용 시 열효율이 떨어질 수 있다.

또한 연소 시 CO₂, CO, HBr, HCl 등 유독가스가 방출되고 특히 염화수소는 치사농도(500 ppm)를 초과하는 농도로 발생²⁾ 하는데 이는 난연제로 할로젠화합물이 사용되었기 때문이다.

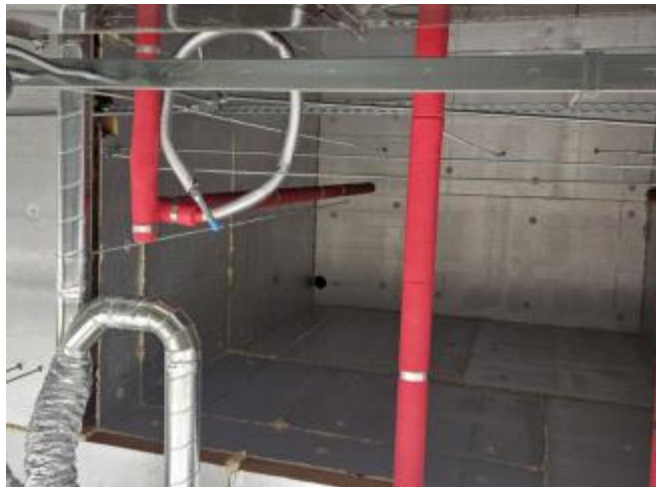


[그림 II-2] 경질 우레탄 폼 보온판 시공 모습

- 1) 기술지원규정(코샤가이드) F-3-2014 경질폴리우레탄폼 취급시 화재예방에 관한 기술지침
- 2) 김종복 외 1명, 주요 건축 재료별 연소가스 유해성 평가, 한국목재공학회지 2016: 제 44권 제5호 639~654p

(3) 페놀 폼

페놀 폼은 페놀 단독 또는 알데히드, 케톤 유도체의 축증합에 의해 주로 제조되는 고분자 구조를 가지는 경질 발포 폼으로써 페놀수지의 함유량이 70 % 정도로 구성되어 있다. 열경화성 수지로서 내열성이 우수하며 자기소화온도가 480 ℃로 매우 높으며, 연소 시 분해가스로 이산화탄소와 물이 주 생성물이다. 연기발생량 및 독성가스의 발생량이 적어 발포 폼 형태의 제품으로 개발·생산되고 있다³⁾. 하지만 수분 흡수 시 열저항이 크게 감소하여 단열성능이 낮아지고, pH가 낮아져 강철 등 금속을 부식시킬 수 있다.



[그림 II-3] 페놀 폼 시공 모습

(4) 배관 보온재

배관 보온재는 열의 흐름을 지연시켜 동파나 결로 현상을 방지하기 위해서 사용되는 재료로 주택이나 빌딩 등 건축물 내부 천장과 반자 사이의 배관 설비에 널리 활용되고 있다⁴⁾. 배관 보온재는 주요 재질로 발포폴리에틸렌, 고무

3) 박형주, 페놀 폼의 연소특성에 관한 연구, 한국화재소방학회 논문지 2010: 제24권 제1호 122~127p

4) 유우준 외 4명, 배관용 보온재의 난연 성능 시험방법에 따른 최대 발열량 분석, 한국화재소방학회 논문지 2020: 제34권 제1호 18~25p

발포보온재가 사용되며 상가, 오피스텔, 백화점 등에서 조사 결과 8:2 비율로 시공되어 있는 것으로 보고되었다.⁵⁾

배관 보온재의 난연성능 시험은 KS M ISO 9772 「발포 플라스틱-소형 화염에 의한 수평 연소성의 측정」 KS M ISO 4589-2 「플라스틱-산소 지수에 의한 연소 거동의 측정-제2부: 상온 시험법」에 따라 진행하고 있다. 주로 발포폴리에틸렌은 수평 연소성 시험에서 HF-1 등급⁶⁾ 이상인 제품을 사용하고, 고무 발포보온재는 한계산소지수 수치가 28 이상인 제품이 사용되고 있다. 본 평가에서는 발포폴리에틸렌 배관 보온재에 관하여 시험을 실시하였다.



[그림 II-4] 배관 보온재 시공 모습

- 5) 임옥근 외 2명, 룬코너 시험을 이용한 배관용 보온재의 난연성능 분석, 한국화재소방학회 논문지 2019: 제33권 제4호 1~8p
- 6) KS M 9772에 의한 시험을 실시하였을 때 선형 연소 속도가 해당 없음, 시험편의 잔광 연소 시간이 30초 미만, 시험편의 손상길이가 60mm 등 해당 규격에 의한 성능을 만족하는 등급

2. 건축 단열재 난연 성능 관련 기준

건축 단열재 난연 성능 관련 기준은 건축법 시행령, 건축물의 피난방화구조 등의 기준에 관한 규칙(국토교통부령 제1483호) 등 관련 법규에서 정하고 있다. 불연재료, 준불연재료, 난연재료의 시험방법은 표<II-4>과 같이 분류할 수 있다.

<표 II-4> 건축자재의 난연성능 등급 및 성능기준⁷⁾

구분	1급 (불연재료)	2급 (준불연재료)	3급 (난연재료)	시험방법
온도차 (ΔT)	20분간 20 K 이하			KS F ISO 1182
질량감소율 (Δm)	가열 종료 후 30% 이하			
총 방출열량		10분 가열 시 8 MJ/m ² 이하	5분 가열 시 8 MJ/m ² 이하	KS F ISO 5660-1
최대 열방출률		10분 가열 시 10초 이상 연속으로 200 kW/m ² 를 초과하지 않을 것	5분 가열 시 10초 이상 연속으로 200 kW/m ² 를 초과하지 않을 것	
겉모양		10분간 가열 후 시험체를 관통하는 방화상 유해한 균열, 구멍 및 심재의 전부 용융, 소멸이 없을 것	5분간 가열 후 시험체를 관통하는 방화상 유해한 균열, 구멍 및 심재의 전부 용융, 소멸이 없을 것	
가스유해성 (실험용 쥐의 평균 행동정지 시간)	9분 이상	9분 이상	9분 이상	KS F 2271

7) 김수민, 재난대응 유연성 및 화재안전 확보를 위한 고난연·고단열 샌드위치패널 개발 최종보고서, 국토교통부 국토교통과학기술진흥원, 2023

1) 불연재료

불연재료는 불에 타지 아니하는 성질을 가진 재료로서, 콘크리트, 석재, 벽돌, 기와, 철강, 알루미늄, 유리, 시멘트 모르타르 및 회 등을 말한다.

한국산업표준 KS F ISO 1182 「화재연소 시험방법-불연성 시험」에 따라 가열시험 개시 후 20분간 가열로 내의 최고온도가 최종평형온도를 20 K 초과 상승하지 않아야 하고, (단, 20 동안 평형에 도달하지 않으면 최종 1분간 평균온도를 최종평형온도로 한다) 가열 종료 후 시험체의 질량 감소율이 30% 이하여야 한다.

또한, 한국산업표준 KS F 2271 「건축물 마감재료의 가스유해성 시험방법」에 따라 시험 시 실험용 쥐의 평균행동정지 까지의 시간⁸⁾이 9분 이상이어야 한다.

2) 준불연재료

불연재료에 준하는 성질을 가진 재료로서, 한국산업표준에 따라 시험한 결과 가스 유해성, 열방출량 등이 국토교통부장관이 정하여 고시하는 준불연재료의 성능기준을 충족하는 것을 말한다.

한국산업표준 KS F ISO 5660-1 「연소성능시험-열방출률, 연기발생률, 질량감소율-제1부: 열방출률(콘칼로리미터법) 및 연기발생률(동적 측정)」에 따라 시험 시 가열 개시 후 10분간 총방출열량이 8 MJ/m^2 이하여야 하고, 10분간 최대 열방출률이 10초 이상 연속으로 200 kW/m^2 를 초과하지 않아야 한다. 또한 10분간 가열 후 시험체를 관통하는 방화상 유해한 균열(시험체가 갈라져 바닥면이 보이는 변형을 말한다), 구멍(시험체 표면으로부터 바닥면이

8) 가열을 시작해서 시험용 흰 쥐가 행동을 정지할 때까지의 시간으로 8마리 실험용 흰 쥐의 행동 정지 시간의 평균값에 표준편차를 감하여 구한 시간을 말한다.

보이는 변형을 말한다) 및 용융(시험체가 녹아서 바닥면이 보이는 경우를 말한다) 등이 없어야 하며, 시험체 두께의 20%를 초과하는 일부 용융 및 수축이 없어야 한다.

또한, 한국산업표준 KS F 2271 「건축물 마감재료의 가스유해성 시험방법」에 따라 시험 시 실험용 쥐의 평균행동정지 시간이 9분 이상이어야 한다.

3) 난연재료

불에 잘 타지 아니하는 성능을 가진 재료로서, 한국산업표준에 따라 시험한 결과 가스 유해성, 열방출량 등이 국토교통부장관이 정하여 고시하는 난연재료의 성능기준을 충족하는 것을 말한다.

한국산업표준 KS F ISO 5660-1 「연소성능시험-열방출률, 연기발생률, 질량감소율-제1부: 열방출률(콘칼로리미터법) 및 연기발생률(동적 측정)」에 따라 시험 시 가열 개시 후 5분간 총방출열량이 $8 \text{ MJ}/\text{m}^2$ 이하여야 하고, 5분간 최대 열방출률이 10초 이상 연속으로 $200 \text{ kW}/\text{m}^2$ 를 초과하지 않아야 한다. 또한 5분간 가열 후 시험체를 관통하는 방화상 유해한 균열(시험체가 갈라져 바닥면이 보이는 변형을 말한다), 구멍(시험체 표면으로부터 바닥면이 보이는 변형을 말한다) 및 용융(시험체가 녹아서 바닥면이 보이는 경우를 말한다) 등이 없어야 하며, 시험체 두께의 20%를 초과하는 일부 용융 및 수축이 없어야 한다.

또한, 한국산업표준 KS F 2271 「건축물 마감재료의 가스유해성 시험방법」에 따라 시험 시 실험용 쥐의 평균행동정지 시간이 9분 이상이어야 한다.

3. 사고사례 및 우레탄의 열분해 메커니즘

1) 최근 5년간 건설업 화재 사고 재해자 현황

2020 ~ 2024년 동안 국내 건설업의 화재 사고 재해자 수와 사망자 수는 <표 II-5>와 같다. 재해자 수는 2020 ~ 2023년까지 감소하는 추세이다가 24년에 상승하였고, 사망자는 2023 ~ 24년에는 발생하지 않았다. 하지만 2020년에 36명의 사망자가 발생하였는데, 이는 건축 단열재 화재 사고로 독성가스로 인하여 대량의 인명피해가 발생하였기 때문이다.

<표 II-5> 국내 건설업 화재 사고 재해자 및 사망자 수 (2020~2024, 승인연도기준)

연도	합계	'20년	'21년	'22년	'23년	'24년
재해자 수(명)	279	88	67	43	35	46
사망자 수(명)	40	36	3	1	0	0

2) 건설현장 우레탄 단열재 관련 화재 사고

<표 II-6>과 같이 우레탄 연소 시 독성가스가 많이 발생하고, 화재 확산 속도가 매우 빨라 대피로를 확보하지 못하여 대형 사고가 발생하는 경우가 많다. 국내에서 발생한 건설 현장 우레탄 단열재의 대형 화재 사고는 <표 II-7>와 같다.

〈표 II-6〉 우레탄 연소시 발생 가스 및 Cf 농도(ppm)⁹⁾

가스명	CO ₂	HBr	HCl	NO ₂	SO ₂	CO
발생 가스 농도	42,538	11	698	434	342	1,141
Cf 농도 ¹⁰⁾	100,000	150	500	250	400	4,000

〈표 II-7〉 건설 현장 우레탄 단열재 대형 화재 사고

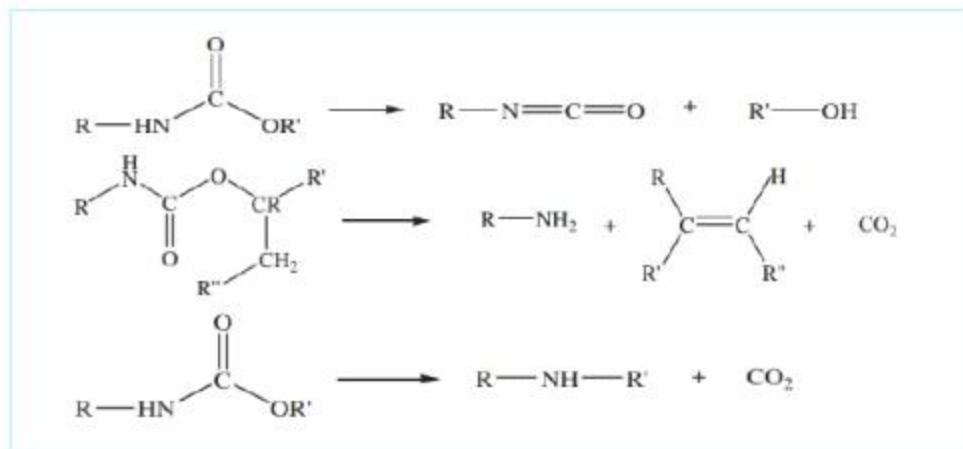
연번	재해 연월	재해개요
1	'25.2.	· 리조트 신축공사 현장에서 용접 불티에 의한 우레탄 폼 착화(사망 6명)
2	'20.4.	· 냉동창고 신축공사 현장에서 용접 불티에 의한 우레탄 폼 착화(사망 38명, 부상 10명)
3	'18.6.	· 주상복합 신축공사 현장에서 가설 조명등 연결전선 단락 스파크에 의한 우레탄 착화(사망 3명, 부상 37명)
4	'18.3.	· 주상복합 신축공사 현장에서 용접 불티에 의한 우레탄 착화(사망 3명)
5	'17.2.	· 쇼핑몰 원상복구공사 현장에서 용접 불티에 의한 우레탄 착화(사망 2명, 부상 8명)
6	'16.9.	· 근린생활시설 신축공사 현장에서 그라인더 불티에 의한 우레탄 착화(사망 4명, 부상 2명)
7	'12.8.	· 미술관 건립공사 현장에서 가설 조명등 전기 스파크에 의한 우레탄 폼 착화(사망 4명, 부상 9명)
8	'08.1.	· 냉동창고 신축공사 현장에서 용접 불티에 의한 우레탄 폼 착화(사망 40명, 부상 10명)

9) 김종복 외 1명, 주요 건축 재료별 연소가스 유해성 평가, 한국목재공학회지 2016: 제 44권 제5호 639~654p

10) 사람이 30분간 노출되었을 때 죽음에 이르는 가스 농도

3) 우레탄의 열분해 메커니즘¹¹⁾

경질 우레탄 폼의 열적 분해는 복잡한 불균일(heterogeneous) 반응이며 하나의 반응에 지배되는 것이 아닌 여러 개의 물리적/화학적 현상의 복합적인 결과물이다. 폴리우레탄 폼이 열적으로 여기(excitation)되면 폴리우레탄 고리 내에 공유결합은 각각의 위치에서 복잡한 진동과 회전을 시작하고, 가열이 더 진행되면 그 결합이 끊어져서 다양한 활성분자(radical)와 작은 분자들로 나누어진다. 그리고 이것들은 상호 결합하거나 더 작게 쪼개져서 결국에는 증발하거나 확산하여 물질의 손실이 발생되고 최종적으로는 탄화되어 숯(char)을 형성한다.



[그림 II-5] 폴리우레탄의 열분해 메커니즘

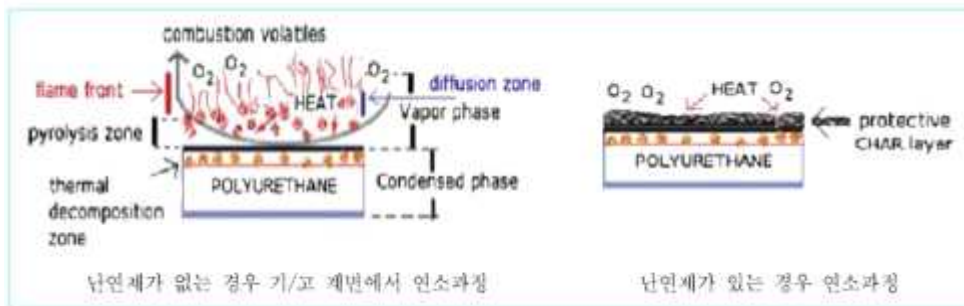
[그림 II-5]는 폴리우레탄이 열적 여기에 의해 가열된 후 분해 과정에서 발생하는 대표적인 반응 메커니즘을 도식화하여 나타낸 것이다. 임계온도 이상으로 가열된 폴리우레탄의 열적 분해는 상기 메커니즘 중에서 첫 번째와 세 번째에 의해서 지배적으로 발생하는 것으로 알려져 있다. 첫 번째 단계는 경질

11) 이정석 외 5명, LPG 운반선 탱크용 보온재의 물리적 위험성 평가, 2016, 안전보건공단 산업안전보건연구원

부분(HS)의 열적 붕괴에 기인하는 것으로 그 결과물로 이소시아네이트와 알콜, 1차/2차 아민과 올레핀 그리고 이산화탄소가 형성된다. 첫 번째 단계의 속도는 사용된 연질 부분(SS)의 함량이 높을수록 감소하는 경향이 있으며, 두 번째, 세 번째 단계는 연질 부분의 열적 분해가 발생하는 단계이다. 결과적으로 폴리우레탄의 열적 분해는 우선적으로 내재된 휘발성 물질이 손실되고 그 다음에 분리(Scission)와 해중합(Depolymerization)이 발생한다. 이런 일련의 과정을 통해서 질량 감소와 기계적 성질의 손실이 발생하고 최종적으로는 단순 탄화수소 혼합물, 일산화탄소, 이산화탄소, 시안화수소, 아세토니트릴, 아크릴로니트릴 등과 잔유물이 남는다.

앞서 살펴본 바와 같이 폴리우레탄에 온도를 증가시키면 공유결합에 열적여기(Thermal excitation)가 발생되고 임계온도에 도달하면 분해되면서 작은 분자와 가스를 발생시킨다. 이때 분해된 작은 분자는 증발하고 고분자/air 계면 위의 공기층으로 확산되어 공기와 혼합하여 폭발성 혼합물을 형성하고, 이 혼합물의 농도와 계의 온도가 폭발범위에 들어가면 타기 시작한다. 연소에 의해 발생하는 열은 다시 미분해 고분자로 환류(Feed back)되고 더 많은 휘발성 물질의 생성을 유발시킴으로써 연소가 유지되고 최종적으로는 다른 형태의 연소생성물을 형성하면서 연소가 종료된다. 가연성(Flammability)은 초기 분해 단계에서 발생하는 가연성 가스 형태의 분해산물의 형성과 관련이 있으며, 그 분해반응의 속도와 정도가 화염 전파의 제어와 연결되는 것으로 알려져 있다.

따라서 폴리우레탄을 사용함에 있어서 화재 관련 안전성을 증가시키는 방법은 열적으로 안정하고 쉽게 분해되지 않은 구조를 가지며 분해가 시작되더라도 비가연성 생성물을 형성할 수 있도록 하는 것이다. 이러한 방법 중에 대표적인 것이 난연제 혹은 화염 지연제(Flame retardants)를 사용하는 것인데, 난연제의 사용은 화재 시에 화염 전파와 연소속도를 감소시킴으로써 폴리우레탄의 본질적인 화재위험을 감소시킬 수 있다. 화염 지연제의 작동기작은 물리적 혹은 화학적 또는 둘의 혼합에 의해서 고체상과 기체상에서 연소과정을 방해한다.



[그림 II-6] 폴리우레탄의 연소과정에서 난연제의 영향

폴리우레탄의 난연화 방법에는 할로젠화 파라핀, 무기계 산화물/수산화물과 같은 물질을 혼합하는 물리적 방법과 인, 질소 또는 할로젠과 같은 난연 성분을 화학적으로 원료인 폴리올이나 이소시아네이트에 결합시키는 화학적 방법이 있으며, 현재에는 난연제를 첨가하는 방식이 주를 이루고 있다. 주로 사용되는 첨가형 난연제로는 할로젠계 난연제, 인계 난연제, 질소계 난연제와 무기계 난연제 등이 있다. 할로젠 원소는 연소에 의해 가스 상에서 분자 또는 원자 상태로 되며, 분해에 의해서 생성되는 활성 라디칼을 안정화시키는 역할을 한다. 인계 난연제는 열분해에 의해 생성되는 인산에 의한 탈수 및 탄화작용에 의한 숯의 형성과 인 함유 라디칼이 수소 및 히드록시 라디칼을 포획하여 난연 효과를 발현하는 것으로 알려져 있다. [그림 II-6]는 난연제의 유/무에 따른 폴리우레탄폼의 연소과정의 차이를 개략적으로 나타낸 것으로 난연제를 사용하지 않는 경우는 앞서 살펴본 바와 같이 분해와 가스의 연소에 의한 환류로 지속적인 연소가 발생하지만, 난연제를 사용한 경우에는 응축상(Condensed phase)에서 분해된 고분자가 연소면에서 숯 층의 형성을 가속화시킴으로써 난연성능을 발현한다. 특히 인과 질소를 포함하는 난연제는 부풀어오름(Intumescence)이라는 현상을 통해서 표면에 발포메트릭스 구조물을 형성한다. 화재 시에 연소물질 표면에 발생하는 숯의 형성은 연소하는 고분자에서 생성되는 휘발성 물질의 향을 제한할 뿐 아니라, 표면에 열적으로 보온되는 장벽(Layer)을 형성함으로써 미연소 고분자로의 열과 휘발성 물질, 산소, 공기 등의 물질전달을 방해함으로써 화염 및 열에 대한 가연성 고분자의 좋은 보호층 역할을 하는 것으로 알려져 있다.

하지만 난연제를 주입하여도 지속적인 열원이 공급되면 결국엔 연소를 시작하면서 독성가스를 방출한다. 우레탄 제조 시 폴리에틸렌글리콜과 다이아이소아이안산과 폴리올(Polyol), 정포제, 촉매제(CFC, HFC 또는 HCFC), 보조제 등이 쓰이는데 이때 촉매제의 성분이 PVC처럼 높은 열로 인해 분해되며 여러 성분 중 염소 이온과 수소 이온이 결합한 것으로 추정된다.

Ⅲ. 시험장비 및 방법

.....

Ⅲ. 시험장비 및 방법

1. Hot-Surface Ignition Temperature 시험

열변형이 적은 금속 재질(STS 310)로 된 열판에 시료를 올린 후 가열하여 발화가 일어나는 최저 온도를 측정하는 장치이다. 산화 반응이나 분해반응을 확인하기 위하여 모니터링하고, 붉은 화염이나 불꽃과 같이 연소의 가시적인 증거가 나타나는 온도를 측정한다.

1) 시험 장비

(1) 장비명 및 제조사

- (장비명) Hot-Surface Ignition Temperature Tester
- (제조사) SD-D(대한민국)



[그림 Ⅲ-1] Hot-Surface Ignition Temperature Tester

(2) 장비 구성 및 사양

- (가열장치) 전력 800 W, Thermocouple K-Type, 최대 온도 1,000 ℃, 재질 STS 310
- (제어함) 전력 제어 용량 25 A, Thermocouple K-Type, 노트북의 전용 프로그램으로 온도 설정 가능

(3) 시험 중 주의 사항

- 열판에 접촉 시 화상을 입을 수 있으므로 시험 장비 주변에서는 각별한 주의를 기울여야 하며, 방열장갑 등 안전보호구를 착용하여야 한다.
- 폭발성, 반응성이 높은 물질에는 사용할 수 없으며, 시료 연소 시 발생하는 독성 가스 및 연소생성물을 고려하여야 한다.
- 열을 방출하므로 안전한 장소에 설치해야 하며, 환기가 잘 되는 후드나 연소 시 발생하는 연기를 제거할 수 있는 적절한 환기 시설이 있는 구역에 설치하여야 한다.

2) 시험방법

- 시료를 가로 3 cm X 세로 3 cm X 높이 3 cm로 동일하게 절삭한다.
- 절삭한 시료를 열판에 올리고 10 ℃/min의 속도로 500 ℃까지 가열을 실시한다.
- 가열 중 연기 발생, 용융 시작, 화염 발생 온도를 기록한다.
- 열판의 온도가 500 ℃ 도달 후 시험을 종료하고, 상온까지 냉각 후 다음 시험을 실시한다.

2. 착화 시험

점화원은 가연물과 산소가 충분할 때 연소시킬 수 있는 점화에너지를 전달할 수 있는 것을 말한다. Gas Igniter의 불꽃을 점화원으로 시료에 직접적으로 화염을 가하여서 착화, 용융 여부 등 연소 특성을 확인한다. 또한 열화상 카메라를 이용하여 연소 시 최고 온도를 측정하였다.

1) 시험 장비

(1) 장비명 및 제조사

- (장비명) 열화상 카메라 Testo 885 pro
- (제조사) Testo (독일)



[그림 Ⅲ-2] 열화상 카메라 Testo 885 pro

(2) 장비 사양

검출기 유형, 열감도, 해상도, 온도 범위, 정확성 등 열화상 카메라의 주요 사양은 <표 III-1>과 같다.

<표 III-1> 열화상 카메라 장비 주요 사양

연번	구분	사양
1	검출기 유형(Detector type)	FPA 320 x 240 pixel
2	열 감도(NETD)(Thermal sensitivity)	< 30 mK at 30 °C
3	해상도	640 x 480 pixel
4	온도 범위	0 °C ~ 650 °C
5	정확성(Accuracy)	± 2 °C

(3) 시험 중 주의 사항

- Gas Igniter의 화염 및 시료에 옮겨 붙은 화염으로 화상을 입을 위험이 있기 때문에 방열 장갑 등 안전 보호구를 착용하고 시험을 실시한다.
- 시료가 연소 시 독성가스가 발생할 위험이 있으므로 환기가 잘 되는 후드나 연소 시 발생하는 연기를 제거할 수 있는 적절한 환기 시설이 있는 구역에 설치하여야 한다.

2) 시험방법

- 시료를 가로 3 cm X 세로 3 cm X 길이 30 cm로 동일하게 절삭한다.
- Gas Igniter로 10초간 화염을 시료에 직접 접촉한다.
- 연소 시 시료의 길이인 30 cm까지 전소시키는 시간을 측정한다.
- 연기 발생, 용융 등 특이사항을 기록한다.

3. 자연발화점 시험¹⁾

자연발화(Spontaneous ignition), 자동발화(Auto ignition), 이 두 가지 개념은 국내에서는 ‘자연발화’라는 총칭으로 활용되는 경우가 많아 크게 구분되는 개념은 아니지만, 발화 메커니즘이 달라질 수 있는 문제이고, 이론적 접근 방법이 구분되어 정의될 필요가 있다.

ASTM E659-24나 NFPA 921에 따르면 자동발화는 어떤 물질이 특정 온도에 달했을 때, 외부의 점화원 없이 발화하는 현상을 의미한다고 정의하고 있다. 다시 말해 어떤 물질을 서서히 가열한다고 생각했을 때, 이 물질에서 자연발화성(Pyrophoric)이나 자기발열성(Self heating)이 있고 없고를 고려하지 않는다는 의미이다.

한편 자연발화는 자연발화성이나 최소한 자기발열성을 전제조건으로 하는 현상을 의미하므로, 생각하기에 따라서는 자동발화의 개념이 자연발화의 개념보다 넓은 범위라고 판단할 수 있으나, 실제로 자연발화성 물질의 자동발화 온도를 측정할 수 없는 경우도 많기 때문에, 단정적으로 개념상의 집합 관계를 설명하기는 어려운 것으로 판단된다.

1) 자동발화점 측정 시험 장비

앞서 언급한 바와 같이 사실 자연발화점 측정 시험을 엄밀하게 말하자면 자동발화점(Auto ignition temperature) 측정 시험을 의미한다. 다시 말해서 가열 과정에서 산화, 분해 등으로 자연발화하거나 자기발열 현상을 검토하는데 한계가 있다는 의미이다. <표 III-2>와 [그림 III-3]에서와 같은 형태로, 8 cm³ 크기의 시료 큐브에 시료를 담은 상태로 가열로를 0.5 °C/min 속도로 가열하

1) 정기혁 외 4명, 목재펠릿 분진의 화재·폭발 위험성 평가, 2025, 안전보건공단 산업안전보건연구원

면서 발화 여부를 확인하는 시험 장비로 분진이 부유한 상태인 분진운의 특성을 시험하는 장비와는 다르다고 할 수 있다.

분진운의 최소 점화 온도를 측정하는 장비는 주로 BAM오븐장비(BAM furnace apparatus), G-G오븐장비(Godbert-Greenwald furnace apparatus)가 사용되고 있으며, 이런 시험 장비의 경우에는 분진이 부유된 상태인 분진운의 최소 점화 온도를 측정하는 방식이다 보니 자동발화온도 보다 높게 측정되는 것이 일반적이다.

〈표 III-2〉 자동발화점 측정 장비 사양

연번	구분	장비	비고
1	모델명	ZPA-3	-
2	제조사	페트로테스트(Petrotest)	
3	가열속도	0.5 °C/min	
4	시험표준	NF T 20-036(1985)	



[그림 III-3] 자동발화점 측정 장비

4. 열분석(DSC, TGA) 시험

1) 시차주사열량계(DSC)

열분석이란 물질의 물리적 변수(Physical parameter)를 온도의 함수로 나타내는 분석 방법이다. 즉 물질의 온도를 일정하게 변화시킴에 따라 나타나는 열적 특성 변화를 분석하는 것이다. 이때 어떤 물리적 변수의 변화를 볼 것인가에 따라 여러 가지 방법들이 있으며 대표적인 방법들은 <표 Ⅲ-3>과 같다. 본 시험 평가에서는 DSC를 이용한 열분석을 실시하였다.

<표 Ⅲ-3> 열분석 방법

측정법	관측량	기호	단위
DTA(Differential thermal analysis)	온도차	ΔT	K
DSC(Differential scanning calorimeter)	열유속	Δq	Joule/s=Watt
TGA(Thermo gravimetric analysis)	중량	g(%)	g
TMA(Thermo mechanical analysis)	길이	$\Delta L(\%)$	m

DSC는 시료와 불활성 기준물질을 동일한 온도 프로그램에 따라 변화시키면서 온도와 시간의 함수로서 측정된 시료와 기준물질의 열유속 차이(Difference in heat flow)를 측정한다. 열유속(Heat flow)은 와트(W; Watt)나 밀리وات(mW)단위로 전달되는 열에너지를 말한다. 열유속을 시간으로 미분하면 에너지량으로 환산되며 mW.s나 mJ로 나타낸다. 열에너지는 시료의 엔탈피(Enthalpy) 변화에 상당하며 시료가 에너지를 흡수하면 엔탈피 변화는 흡열(Endothermic)이며 에너지를 방출하면 발열(Exothermic)이라 한다. DSC는 엔탈피 변화와 전이에 의해 발생하는 열적 거동에 대한 다양한 정보를 제

공하며 비열, 열적 효과, 유리전이(Glass transition), 화학반응, 녹는점 거동 등과 같은 물리적 변화량을 구할 수 있다. 수 밀리그램 정도의 시료로 발열량과 발열개시온도 등을 측정할 수 있어 화학물질의 열적 위험성을 예측하는 예비 시험으로 매우 유용하다.

(1) 평가 장비

열분석 시험에 사용된 DSC는 스위스의 METTLER TOLEDO(모델명 DSC5+)에서 제작한 장비로 [그림 III-4]에 나타내었다. DSC는 시료가 담긴 crucible(pan)과 표준물질로 사용되는 빈 pan이 들어가는 measuring cell, 시료가 담긴 crucible을 자동으로 cell에 투입해주는 샘플 로봇, 냉각장치로 구성되어 있으며 measuring cell의 사양을 <표 III-4>에 나타내었다.



(a) 시차주사열량계(DSC)



(b) aluminum pan



(c) DSC sensor

[그림 III-4] DSC 장비

〈표 Ⅲ-4〉 DSC measuring cell 사양

항목	사양
온도 범위	(-50~700) °C
온도 정밀도	±0.2 K
가열 속도	(0.01~200) K/min
온도 정밀도	0.02 K

DSC는 유기 화합물 및 고분자 등에 적용할 수 있으며, 시료 준비 과정에서 휘발될 수 있는 끓는점이 낮은 물질은 측정이 불가하며, 또한 측정 가능한 시료의 양은 100 μ l 이하로 매우 소량이기 때문에 불균일 혼합물의 경우 측정 결과의 재현성에 영향을 줄 수 있다.

(2) 평가 방법

DSC의 시료 용기는 알루미늄 재질의 standard pan 40 μ m을 사용하였으며, 시료를 넣은 후, piercing kit를 이용하여 직경 50 μ m의 핀홀(pinhole)을 만들어 내부 압력과 외부 압력을 평형화시킨 개방형 조건을 사용하였다. 시료량은 (0.5~1) mg, 10°C/min의 승온 속도로 (30~600) °C의 온도 범위, 공기 분위기에서 평가하였다.

시료가 반응성이 큰 경우 시료의 용기를 담는 pan의 선택이 매우 중요하며 밀폐형(통상적인 개방형이 아닌) pan의 경우 자가촉매 효과나 시료 내 증발 또는 분해물질에 의한 가압 효과를 유발할 수 있으며, 개방된 pan의 경우 물질의 증발 등으로 인해 열손실 등을 유발하여 실제 반응열보다 작게 나올 수 있다.

2) 열중량분석기(TGA)

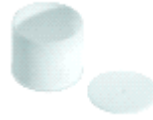
열중량분석기(TGA, Thermo Gravimetric Analysis)는 일정한 속도로 온도를 변화시켰을 때의 시료의 질량 변화를 시간이나 온도의 함수로써 측정한다. 시료의 질량 변화는 증발(vaporization)이나 가스를 생성하는 화학반응(Chemical reaction) 등에 의해 발생하게 되며, 저울(microbalance)에 의해 연속적으로 측정된다. TGA에 의한 질량-온도 곡선을 이용해 온도변화에 따른 질소, 산소, 공기 등의 분위기하에서 분해 거동을 관찰할 수 있으며, 시료의 열안정성 및 휘발성 물질이나 첨가제들의 함량 및 조성 비율 등을 알 수 있다. TGA는 산소가 결합하는 산화나 가스가 방출되는 열분해와 같은 온도 증가에 따른 질량 변화가 일어나는 물질에 적용할 수 있으며 시료 준비 과정에서 휘발될 수 있는 끓는점이 낮은 물질은 측정이 불가하며, 측정 가능한 시료의 최대량은 900 μ l로 매우 소량이기 때문에 불균일 혼합물의 경우 측정 결과의 재현성에 영향을 줄 수 있다.

(1) 평가 장비

열중량분석기는 스위스의 METTLER TOLEDO에서 제작한 시험 장비(모델명 TGA/DSC3+)로 [그림 III-5]에 나타내었다. TGA는 가열로(Furnace), 저울, 시료의 온도를 측정할 수 있는 TGA 센서, 샘플 로봇으로 구성된 본체와 냉각장치로 구성되어 있고 사양은 <표 III-5>와 같다.



(a) 열중량분석기(TGA)



(b) alumina crucible



(c) TGA/SDTA 센서

[그림 III-5] TGA 장비

<표 III-5> TGA 사양

항목	사양
온도 범위	(RT~1,100) °C
온도 정밀도	±0.2 K
저울 측정 범위	≤1 g
Balance resolution	0.1 µg
Calorimetric resolution	0.5 mW
Sample volume	900 µl

(2) 평가 방법

시료 물질의 양을 약 (2~3) mg을 분취하여 alumina(Aluminum oxide) 재질의 open pan에 시료를 담아 저울에 올려놓은 후, 공기 분위기(유량 50 ml/min)에서 10 °C/min의 승온 속도로 (30~800) °C의 온도 범위에서 측정 하였다.

5. 연소 시험

착화 시험은 가연물과 산소가 충분할 때 점화 여부를 판단하기 위하여 실시한 시험이었다. 하지만 이는 단순 착화 여부를 판단하는 것으로 실질적으로 지속적인 열량이 공급되어 연소를 지속하는 것과는 차이가 있다. 이에 사고가 났었던 경질 우레탄 폼 보온판에 지속적인 열량을 가하여 연소 특성을 파악하였다.

LPG 가스 버너와 부탄가스 토치로 직접 화염을 시료에 가하였으며, 열전대(Thermocouple)를 화염 접촉면, 시료의 중간, 상부 3군데에 설치하여 시간에 따른 온도 변화를 측정한다. 또한 열화상 카메라로 측정하여 온도 및 열 유속을 측정한다.

1) 시험 장비

(1) 데이터 측정 장비(Data Logger)

- $\pm 20 \text{ mV} \sim \pm 550 \text{ V}$ 고전압 측정가능하며, 센서들의 전압값을 통하여 온도 및 전압을 1초 단위로 기록하는 장치로써 그래프를 통하여 결과 값 도출 가능

(2) 온도보상도선(Thermocouple)

- K type으로 $-200 \sim 1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 측정 범위이며 3개(시료의 상,중,하 부분에 측정)를 사용



[그림 Ⅲ-6] 데이터 측정장치 및 온도 보상 도선(Thermocouple)

(3) 복사열(Heatflux) 측정기

- (5 to 200) X $10^3/m^2$ 범위로 복사열 및 열유속 측정 가능



[그림 Ⅲ-7] 복사열(Heatflux) 측정기

(4) 점화원

- (샌드 버너) LPG(프로판)를 사용한 장치로서 20 cm(가로) X 20 cm(세로) X 20 cm(높이)의 크기로 직접 불꽃 및 복사에너지로 시료에 열량을 전달

- (가스 토치) 부탄가스를 사용하는 장치로 직접 불꽃으로 시료에 열량 전달



[그림 Ⅲ-8] 샌드 버너 및 가스 토치

2) 시험 방법

(1) 시험 시료

- 경질 우레탄 폼 보온판을 40 cm(가로) X 40 cm(세로) X 11 cm(높이) 크기로 절삭하여 지지대 위에 설치



[그림 Ⅲ-9] 시료 설치 모습

(2) 측정 기구 설치

- (열화상 카메라) 시료에서 약 3m 위치에서 Spot 열화상 촬영
- (열유속계, Heat Flux) 시료에서 약 1m 위치한 측면에 설치
- (Thermocouple) 상부 중앙에서 4 cm(Top-Inner), 하부 중앙에서 4 cm(Bottom-Inner), 화염이 직접 닿는 하부 표면(Surface)에 설치



[그림 Ⅲ-10] 측정 기구 설치 모습

(3) 점화원

- (샌드 버너) LPG와 연결 후 시료의 하부에 설치 후 점화
- (가스 토치) 시료에 화염을 직접 접촉

건축 단열재 화재 위험성 평가

IV. 결과 및 고찰



건축 단열재 화재 위험성 평가

IV. 결과 및 고찰

본 위험성평가에서는 4개의 건설 현장에서 사용 중인 총 11종의 시료를 제 공받아 시험을 수행하였다. 각 시험에서 시료는 건조나 열처리 등의 전처리는 실시하지 않았으며, 사업장에서 제공된 상태로 변경 없이 실온·상압의 조건으로 시험·평가를 수행하였다.

1. Hot-Surface Ignition Temperature 시험 결과

시료를 균일한 크기(3 cm 큐브)로 하여 열판(Hot Plate)에 올린 후 10 °C/min의 속도로 가열을 하여, 온도 상승에 따른 시료의 변화를 확인하였다. 시료 4종 모두 가열함에 따라 화염이 발생하는 발화는 일어나지 않았으나, 연기가 발생하고 용융되는 시료도 있었다.

1) 압출법 보온판(XPS)

〈표 IV-1〉과 같이 시료 A, B, C 모두 열판 온도 약 150 °C부터 용융이 시작되었고, 용융을 완료된 후 약 405 °C부터 연기를 발생하면서 끊기 시작하였다. 폴리스티렌의 문헌상 녹는점인 240 °C, 비점 430 °C 와 차이를 보였다. 이는 시료 내 폴리스티렌 조성의 차이 및 녹는점의 통상적인 측정 방법인 모세관법, 시차주사열량계법(DSC), 용점 측정기 등의 방법이 아닌 열판에 서서히 온도를 올리는 방법이라 차이가 나는 것으로 사료된다. 열판의 온도를 500 °C까지 상승시켰지만, 화염 발생 등 연소 현상은 관찰되지 않았다.



(a) 상온(시험 시작시) (b) 211 °C(18분 경과) (c) 500 °C(46분 경과)

[그림 IV-1] Hot-Surface Ignition Temperature 시험 모습(압출법 보온판)

〈표 IV-1〉 Hot-Surface Ignition Temperature 시험 결과
(압출법 보온판)

시료명	용융시작온도(경과시간)	기화시작온도(경과시간)
압출법 보온판 A사	155 °C(11분)	413 °C(36분)
압출법 보온판 C사	150 °C(12분)	405 °C(37분)
압출법 보온판 D사	151 °C(11분30초)	406 °C(36분 30초)

2) 경질 우레탄 폼 보온판

〈표 IV-2〉와 같이 시료 2종은 약 310 °C부터 열판에 접촉된 바닥면이 탄화되면서 연기가 발생하였으나, 500 °C까지 온도를 높여도 화염 발생 등 연소 현상은 관찰되지 않았다. 문헌상 자연발화온도¹⁾는 493 °C이나, 이는 일정한 온도의 고온 공기에 노출시켜 재료가 착화되는 온도를 측정하는 ASTM D 1929-23 「Standard Test Method for Determining Ignition Temperature of Plastics」의 규격에 따라 시험한 것으로, 열판에 서서히 온도를 올리는 방법과는 차이가 있는 것으로 사료된다.

1) 공영건 외 1명, 경질 폴리우레탄폼의 착화성 및 열방출특성 연구, 한국화재소방학회 논문지 2003: 제17권 제4호 117~123p



(a) 상온(시험 시작시)

(b) 429 °C(40분 경과)

[그림 IV-2] Hot-Surface Ignition Temperature 시험 모습(경질 우레탄 폼 보온판)

〈표 IV-2〉 Hot-Surface Ignition Temperature 시험 결과
(경질 우레탄 폼 보온판)

시료명	탄화 및 연기 발생 온도(경과시간)
경질 우레탄 폼 보온판 A사	318 °C(28분 30초)
경질 우레탄 폼 보온판 B사	311 °C(28분)

3) 페놀 폼

〈표 IV-3〉와 같이 시료 3종은 약 290 °C부터 열판에 접촉된 바닥면의 탄화가 시작되었으나, 500 °C까지 온도를 높여도 연기 및 화염 발생 등 연소 현상은 관찰되지 않았다. 시험 종료 후 시료를 관찰한 결과 열판에서 가열되었던 바닥면에만 5mm 정도 깊이의 탄화가 확인되었다. 이는 페놀 폼이 열경화성 수지로서 내열성이 우수하면서 자기소화온도가 480 °C로 매우 높아²⁾ 단열성이 커서 열 전파가 안되었기 때문으로 추정된다.

2) 박형주, 페놀 폼의 연소특성에 관한 연구, 한국화재소방학회 논문지 2010: 제24권 제1호 122~127p



(a) 상온(시험 시작시) (b) 429 °C(36분 경과) (c) 시험 종료 후

[그림 IV-3] Hot-Surface Ignition Temperature 시험 모습(페놀 폼)

〈표 IV-3〉 Hot-Surface Ignition Temperature 시험 결과(페놀 폼)

시료명	탄화 시작 온도(경과시간)
페놀 폼 A사	291 °C(26분)
페놀 폼 B사	296 °C(26분 30초)
페놀 폼 D사	288 °C(25분)

4) 배관 보온재

〈표 IV-4〉와 같이 배관 보온재는 약 170 °C ~ 187 °C에서 용융하면서 기화가 시작 되었다. 녹는점이 120 °C인 폴리에틸렌이 주원료(약 70 %)이긴 하나, 발포제로 쓰이는 아조다이카본아마이드 등 다른 성분이 포함되어 있으며, 겉에 도포된 은박(Aluminum foil)이 단열 효과를 내어 녹는점이 높아진 것으로 추정된다. [그림 IV-4] 와 같이 500 °C까지 가열하고 시험이 종료된 후 보온재의 내부의 물질은 모두 용융하면서 증발하였지만, 은박은 남아있는 것을 확인할 수 있다.



(a) 상온(시험 시작시) (b) 330 °C(30분 경과) (c) 시험 종료 후

[그림 IV-4] Hot-Surface Ignition Temperature 시험 모습(배관 보온재)

〈표 IV-4〉 Hot-Surface Ignition Temperature 시험 결과
(배관 보온재)

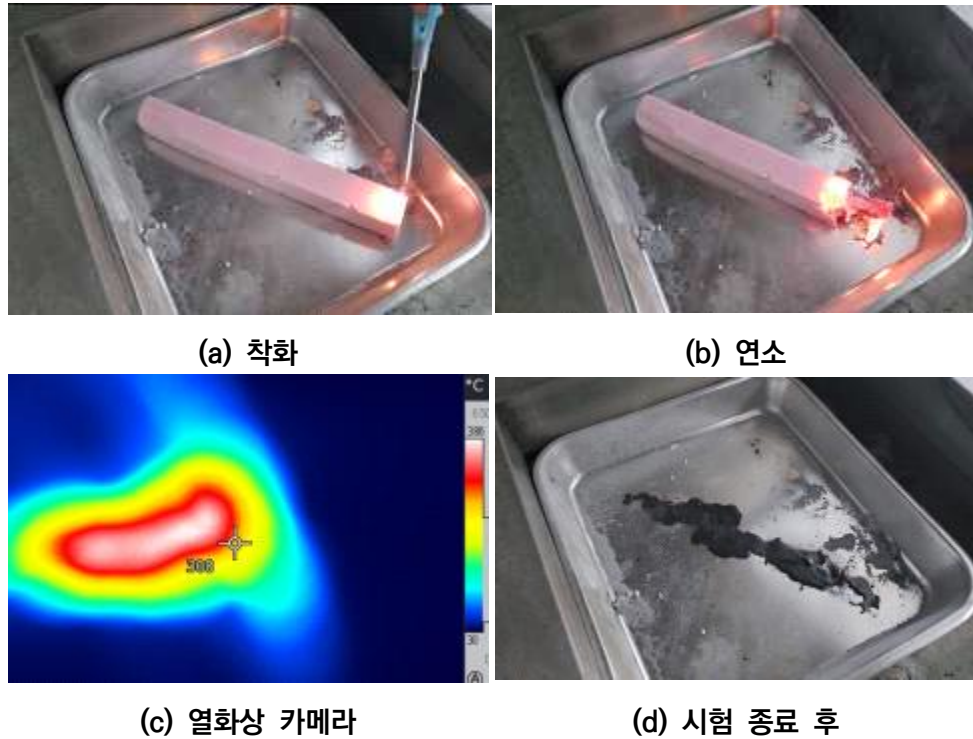
시료명	용융 시작 온도(경과시간)
배관 보온재 A사	171 °C(14분 30초)
배관 보온재 C사	187 °C(16분)
배관 보온재 D사	170 °C(14분)

2. 착화 시험 결과

시료를 3 cm(가로) X 3 cm(세로) X 30 cm(길이)로 균일하게 하여 Gas Igniter를 사용하여 10초 동안 직접 화염을 접촉하여 착화를 시도하였다. 압출법 보온판은 화염이 전파되어 연소가 진행되었으나, 나머지 시료 3종은 화염이 옮겨 붙지 않거나, 도중에 화염이 소멸되었다. 이는 난연 성분이 포함되어 자기소화 능력이 있기 때문이다.

1) 압출법 보온판(XPS)

[그림 IV-5] 같이 Gas Ignitor로 불을 붙이자 연소를 시작하면서 약 6분간 30cm 길이의 시료 전체가 연소되었다. 화염의 온도로 인한 용융이 생기면서 시료를 따라 연소가 진행되었으며, 열화상 카메라로 측정 결과 화염의 최고온도는 385 °C까지 상승하였다. 연소 시 검은 연기를 발생하였는데, 이 연기의 성분은 일산화탄소, 이산화탄소, 염화수소, 브롬화수소 등이 혼합된 유독가스로 추정된다. 압출법 보온판 제조 시 주성분인 폴리스티렌 외 난연제로 HCFC 계열의 할로젠 원소가 포함되어 연소 시 HCl, Hbr 등의 유독가스가 발생기 때문이다.



(a) 착화

(b) 연소

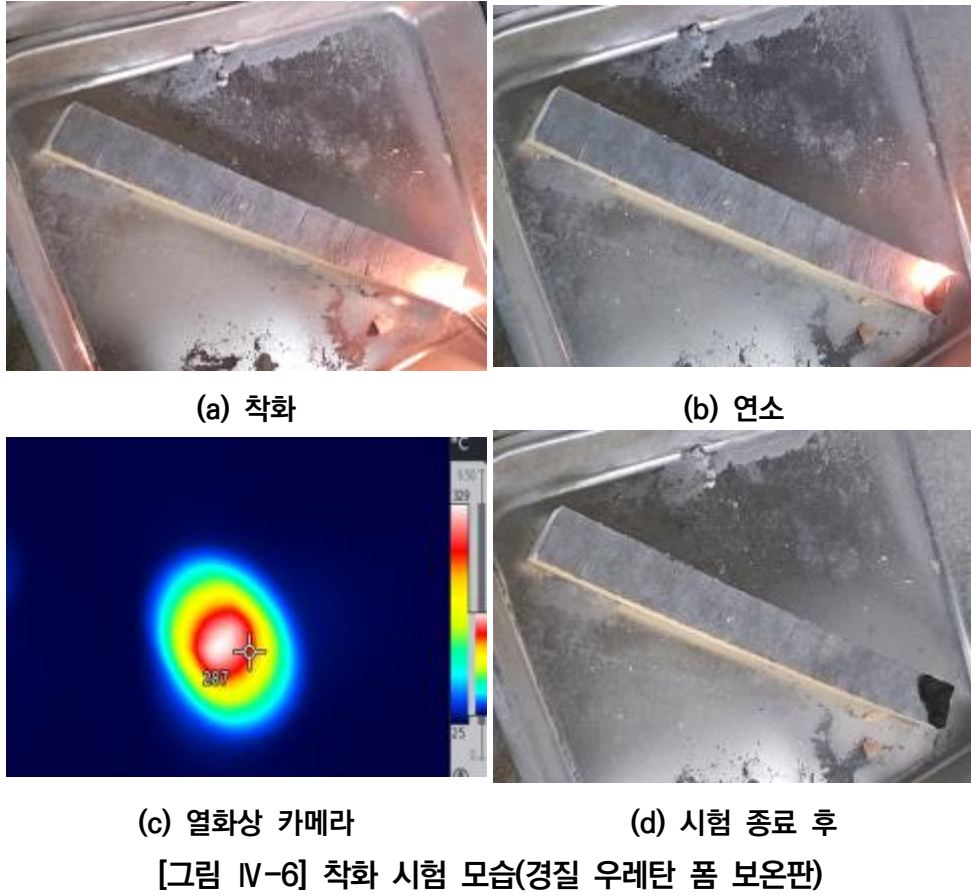
(c) 열화상 카메라

(d) 시험 종료 후

[그림 IV-5] 착화 시험 모습(압출법 보온판)

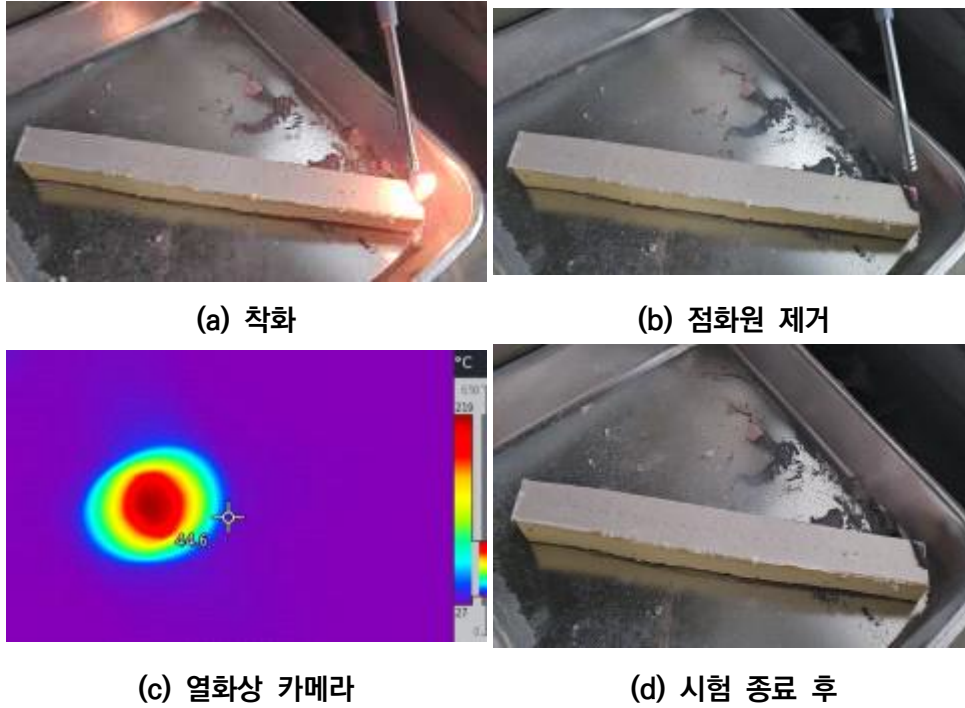
2) 경질 우레탄 폼 보온판

[그림 IV-6] 같이 Gas Igniter로 화염을 시료에 접촉하자 표면의 부직포에서 약 1분간 연소가 진행되었다. 길이 약 4 cm 가량의 표면은 탄화하였으며, 열화상 카메라로 측정 결과 화염의 최고온도는 329 °C까지 상승하였다. 우레탄 폼 제조 시 사용되는 난연제의 자기소화 능력으로 단순 착화 시 부직포 부분을 따라 연소가 진행되다가 화염이 소멸되었다. 압출법 보온판과 같이 난연제로 할로젠 원소가 사용되어 연소 시 HCl, Hbr 같은 유독가스가 발생한다.



3) 페놀 폼

[그림 IV-7] 같이 Gas Igniter의 작동을 정지하자 부직포 부분의 화염이 즉시 소멸하였다. 열화상 카메라로 측정 결과 화염의 최고온도는 219 °C까지 상승하였다. 우수한 난연 성능을 가진 페놀 폼은 Gas Igniter의 10초간 화염으로는 연소가 불가하였다.



[그림 IV-7] 착화 시험 모습(페놀 폼)

4) 배관 보온재

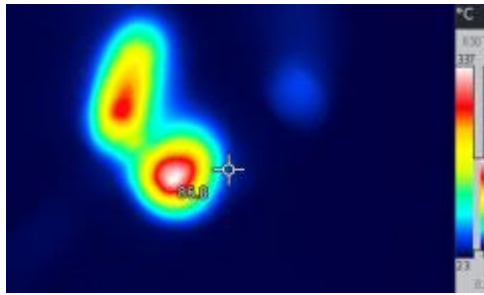
[그림 IV-8] 같이 Gas Igniter로 화염을 시료에 접촉하자 외피인 은박에는 불이 붙지 않았지만, 심재는 불이 붙어 약 15초간 연소를 진행하다가 연기를 발생시키면서 불이 꺼졌다. 열화상 카메라로 측정 결과 화염의 최고온도는 337 °C까지 상승하였다. 배관 보온재도 다른 시험대상 단열재와 같이 연소 시 유독가스가 발생한다. 또한 폴리에틸렌 소재의 배관 보온재의 난연 성능은 KS M ISO 9772 「발포 플라스틱-소형 화염에 의한 수평 연소성의 측정」에서 HF-1 이상인 것으로 수평연소에 저항력이 있어 화염이 확산되지 않은 것으로 추정된다.



(a) 착화



(b) 연소



(c) 열화상 카메라



(d) 시험 종료 후

[그림 IV-8] 착화 시험 모습(배관 보온재)

3. 자연발화점 시험 결과

시료 4종, 11개 모두 자연발화 온도는 측정되지 않았으며, 시험 결과는 <표 IV-5>와 같다. 시험 장비는 NF T 20-036 「Chemical product for industrial use. Determination of relative temperature of spontaneous flammable of solids」의 규격에 의한 장비인데, 오븐 내의 온도를 0.5 °C/min의 속도로 400 °C까지 상승하는 동안 내부의 온도가 400 °C가 되었을 때를 자연발화온도로 측정하기 때문으로 추정된다. [그림 IV-9]와 같이 경질 우레탄 폼과 페놀 폼은 시료가 상당 부분 증발 및 탄화하였으며, 배관 보온재는 은박만 남고 나머지 부분은 증발하였고, 압출법 보온판은 용융되어 45 mesh 사이로 흘러 내린 것으로 판단된다. 페놀 폼은 착화 시험시 연소가 되지 않았고, 경질 우레탄 폼의 문헌상 자연발화온도는 493 °C라 기계의 최대온도인 400 °C에서는 질량감소가 없어야 하지만, 장시간(12시간 이상) 고온에 노출되어 증발된 것으로 추정된다. 또한 장비의 규격에 따른 자연발화점은 측정되지 않았지만, 실험 후 시료의 상태로 추정하였을 때 자연발화를 하지 않았다고 단정하긴 어렵다.



[그림 IV-9] 자연발화점 시험 전·후 시료 모습

〈표 IV-5〉 자연발화점 측정 결과

시료명	시험전(g)	시험후(g)	감소량(g)	감소율(%)
압출법 보온판 A	0.09	0	0.09	100
압출법 보온판 C	0.08	0	0.08	100
압출법 보온판 D	0.12	0	0.12	100
경질 우레탄 폼 보온판 A	0.15	0.05	0.10	66.7
경질 우레탄 폼 보온판 B	0.09	0.03	0.06	66.7
페놀 폼 A	0.12	0.02	0.10	83.3
페놀 폼 B	0.14	0.03	0.11	78.6
페놀 폼 D	0.11	0.02	0.09	81.8
배관 보온재 A	0.08	0.01	0.07	87.5
배관 보온재 C	0.13	0.04	0.09	69.2
배관 보온재 D	0.13	0.04	0.09	69.2

시료 3종(압출법 보온판, 경질 우레탄 폼 보온판, 페놀 폼)은 실험 전·후 질량 감소율이 비슷하였으나 배관 보온재 A와 C,D는 차이가 있었다. 이는 [그림 IV-10]과 같이 A는 외피에 은박이 없었으나 C와 D는 외피에 알루미늄 은박으로 둘러싼 타입이기 때문이다.



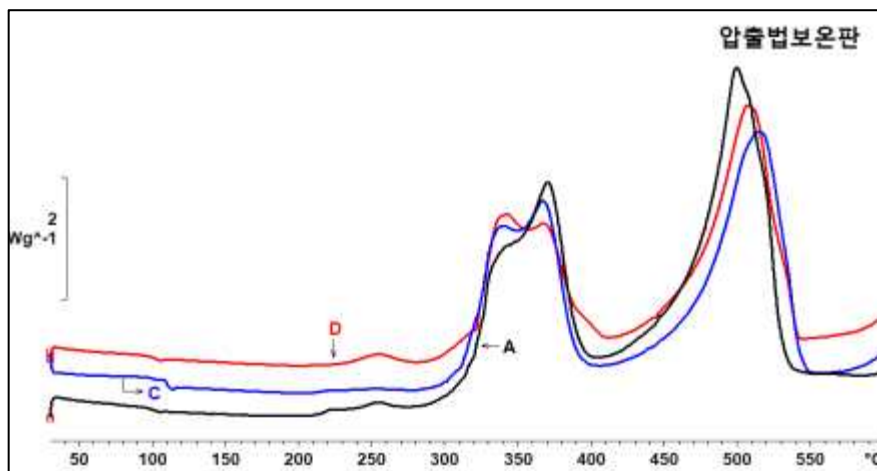
[그림 IV-10] 배관 보온재 시료 3종

4. 열분석(DSC, TGA) 시험 결과

1) 시차주사열량계(DSC) 결과

공기 분위기에서 10℃/min의 승온속도로 (30~600) ℃의 범위로 가열한 결과를 [그림 IV-11]~[그림 IV-14]과 <표 IV-6>~<표 IV-9>에 나타내었다.

압출법 보온판의 주성분은 폴리스티렌(PS, Polystyrene)으로 (100~120) ℃ 구간에서 유리전이온도(Tg, Glass Transition Temperature)가, (210~280) ℃ 구간에서 첨가제 및 발포제 등 잔류성분의 산화 등에 의한 약한 발열이 관찰되었다. 분해는 2단계로 일어나며 (279~409) ℃에서 주사슬 절단 등의 분해와 산화 단계, (409~550) ℃에서 탄화물의 산화 및 연소 단계로 볼 수 있다³⁾. 이는 Hot-Surface Ignition Temperature 시험 결과의 응용시작온도인 (150~155) ℃와는 차이가 있었으나, 기화시작온도인 (405~413) ℃와는 유사한 것을 확인하였다.



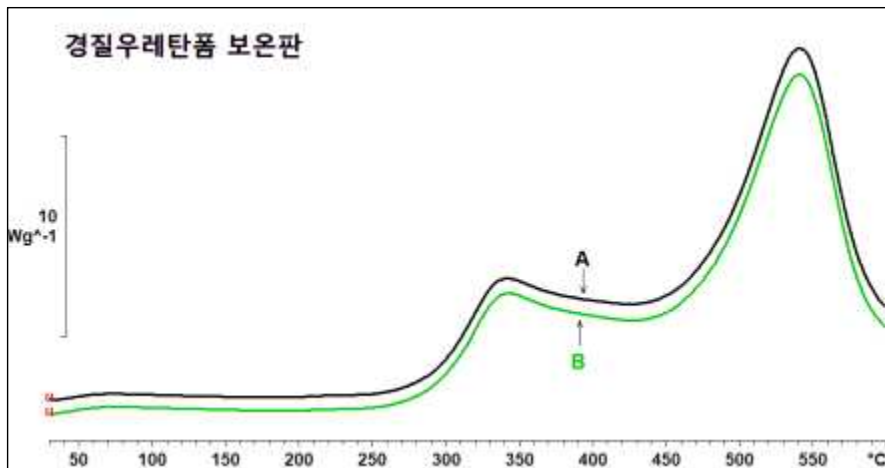
[그림 IV-11] 압출법 보온판의 DSC 결과

3) Jiao L. L., Sun J., A thermal degradation study of insulation materials extruded polystyrene, Procedia Engineering, 71, 622-628, 2014.

〈표 IV-6〉 압출법 보온판의 DSC 결과 요약

시료 명	step	발열개시온도 [°C]	외삽개시온도 [°C]	최대온도 [°C]	반응열 [J/g]
A	1	210	233	253	19
	2	279	320	370	951
	3	409	470	500	1,357
C	1	279	300	367	934
	2	409	470	516	1,194
D	1	221	231	254	23
	2	279	320	342	757
	3	409	468	508	1,083

경질 우레탄 폼 보온판은 244 °C부터 발열이 시작되며, 첫 번째 발열 피크는 우레탄 결합(-NHCO-O-)의 열분해에 기인하며, 434 °C에서 시작하는 두 번째 발열 피크는 탄화 잔류물의 산화 및 연소 단계로 볼 수 있다⁴⁾.



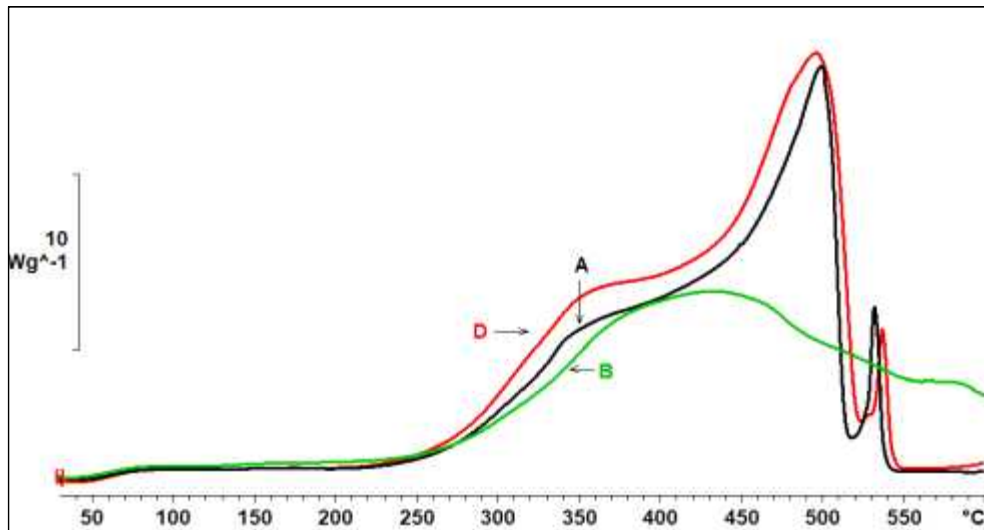
[그림 IV-12] 경질 우레탄 폼 보온판의 DSC 결과

4) Tang Z., etc. Thermal degradation behavior of rigid polyurethane foams prepared with different fire retardant concentrations and blowing agents, Polymer, 46(24), 6471-6479, 2002.

〈표 IV-7〉 경질 우레탄 폼 보온판의 DSC 결과 요약

시료 명	step	발열개시온도 [°C]	외삽개시온도 [°C]	최대온도 [°C]	반응열 [J/g]
A	1	244	293	333	>1,187
	2	434	478	541	5,139
B	1	244	293	334	>1,216
	2	434	477	541	5,000

페놀 폼 시료 3개에 대한 DSC 실험 결과, A와 D는 유사한 경향을 보였으나 B는 피크가 완만하고 낮은 결과를 보였다. MSDS 확인 결과 A와 D의 페놀 수지 함량은 70%이나 B의 경우 94%로 페놀 수지 함량이 높아 그러한 것으로 추정되며, 600 °C까지 발열반응이 끝나지 않은 것으로 보아 내연성이 높아 완전 연소가 지연된 것으로 판단된다. 3개 시료 모두 214 °C에서 주요 사슬이 분해되면서 발열이 시작되며, 이후 탄화 잔류물의 산화 및 연소에 의한 500 °C 부근에서 최대 발열피크가 관찰되었다.

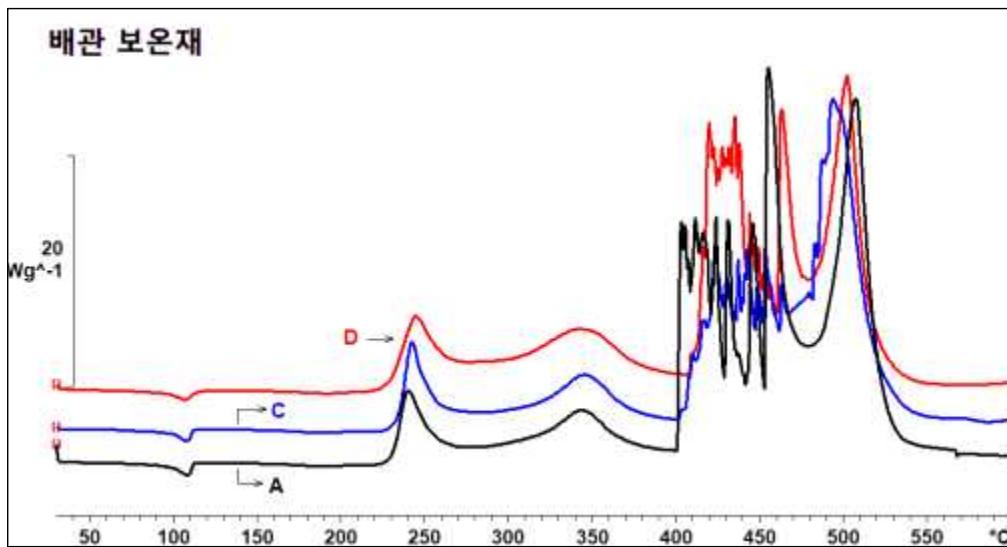


[그림 IV-13] 페놀 폼의 DSC 결과

〈표 IV-8〉 페놀 폼의 DSC 결과 요약

시료 명	발열개시온도 [°C]	외삽개시온도 [°C]	최대온도 [°C]	반응열 [J/g]
A	214	266	499	15,140
B	214	292	395	6,715
D	214	268	496	17,910

배관 보온재의 경우, 110 °C 부근에서 흡열을 보였으며, (217~221) °C 구간에서 발열이 시작되었다. 400 °C 이후 급격한 발열반응으로 날카로운 피크들이 관찰되었으며, 발화에 의한 격렬한 반응으로 추정된다.



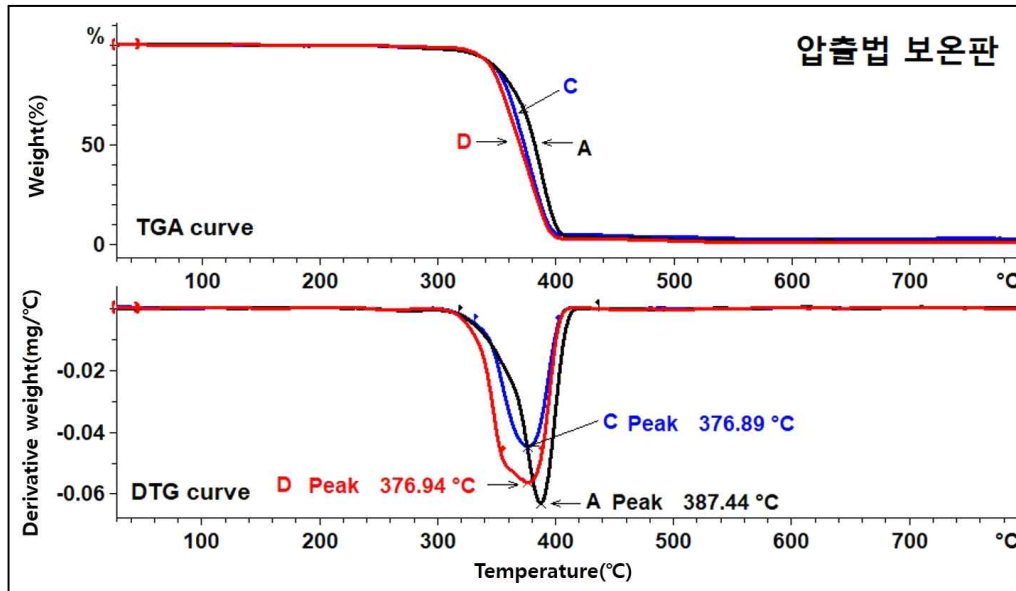
[그림 IV-14] 배관 보온재의 DSC 결과

〈표 IV-9〉 배관 보온재의 DSC 결과 요약

시료명	step	발열개시온도 [°C]	외삽개시온도 [°C]	최대온도 [°C]	반응열 [J/g]
A	1	221	231	240	541
	2	290	316	345	781
	3	400	401	456	11,360
C	1	224	234	242	570
	2	274	316	346	802
	3	400	401	493	8,873
D	1	217	229	244	615
	2	274	305	346	979
	3	400	401	502	9,276

2) 열중량분석(TGA) 결과

공기 분위기에서 10 °C/min의 승온 속도로 (30~800) °C의 범위로 가열한 결과를 [그림 IV-15]~[그림 IV-18]과 <표 IV-10>~<표 IV-13>에 나타내었다. TGA 곡선은 가열에 따른 질량 변화를 나타내며, DTG(Derivative Thermal Gravimetry)는 TGA 곡선을 1차 미분하여 질량 변화 속도를 온도의 함수로 나타낸 것으로 DTG 곡선을 통해 복합적인 분해 과정을 단계별로 구분하고, 질량손실속도가 최대가 되는 온도를 확인할 수 있다. 압출법 보온판 3개 시료 모두 (283~410) °C 범위에서 주요 분해가 일어나며, 420 °C 이후 탄화물이 완전 연소되면서 잔류물이 거의 남지 않았다. 질량손실속도가 가장 빠른 DTG 곡선의 피크 온도는 A는 387 °C, C는 377 °C, D는 377 °C이다.

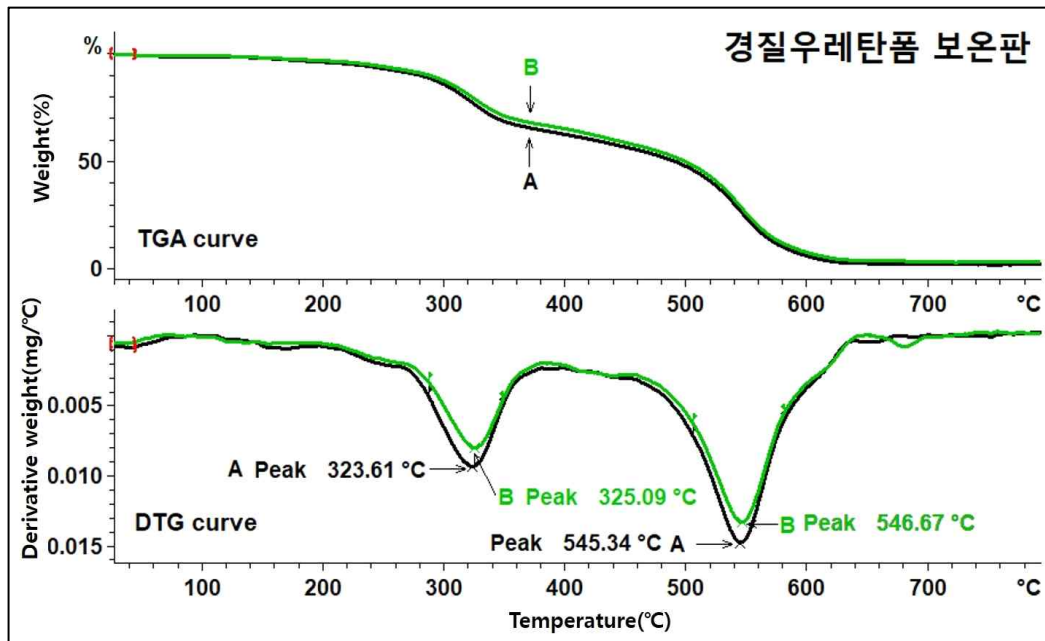


[그림 IV-15] 압출법 보온판의 TGA 결과

〈표 IV-10〉 압출법 보온판의 TGA 결과 요약

시료명	조건	온도범위 [°C]	질량변화율 [wt %]
A	공기	283 ~ 410	(-) 95 (residue 4.0%)
C	공기	283 ~ 410	(-) 94 (residue 4.8%)
D	공기	283 ~ 410	(-) 96 (residue 3.0%)

경질 우레탄 폼 보온판은 질량감소구간을 크게 3단계로 나눌 수 있으며, 263 °C 이하에서 보이는 미세 질량감소구간은 수분 또는 휘발성 첨가제의 휘발에 따른 감소로 추정되며, 두 번째 (263~412) °C 구간은 우레탄 결합 절단 등의 분해, 세 번째 (412~630) °C 구간은 탄화물의 산화 및 연소로 인한 질량감소로 볼 수 있다. 질량손실속도가 가장 빠른 DTG 곡선의 피크 온도는 A는 545 °C, B는 547 °C이다.

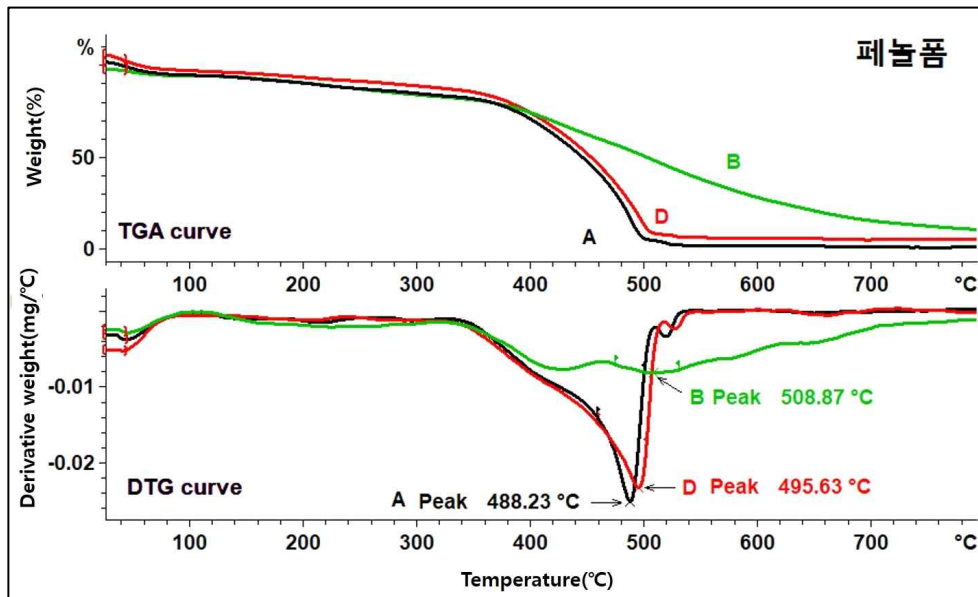


[그림 IV-16] 경질 우레탄 폼 보온판의 TGA 결과

〈표 IV-11〉 경질 우레탄 폼 보온판의 TGA 결과 요약

시료명	step	온도범위 [°C]	질량변화율 [wt %]
A	1	147 ~ 263	(-) 6
	2	263 ~ 412	(-) 31
	3	412 ~ 630	(-) 58 (residue 3.0%)
B	1	147 ~ 263	(-) 5
	2	263 ~ 412	(-) 29
	3	412 ~ 630	(-) 59 (residue 4.4%)

페놀 폼 시료 3개에 대한 TGA 실험 결과, DSC 결과와 마찬가지로 A와 D는 유사한 경향을 보였으나 B는 완만한 질량 감소가 시작되어 분해가 길게 이어지며 잔류물 비율도 상대적으로 높게 나왔다. A와 D의 주요 분해는 (322~531) °C에서 일어났으며 B는 322 °C부터 가열종료온도인 800 °C까지 분해가 이어졌다. 질량손실속도가 가장 빠른 DTG 곡선의 피크 온도는 A는 488 °C, B는 509 °C, D는 496 °C이다.

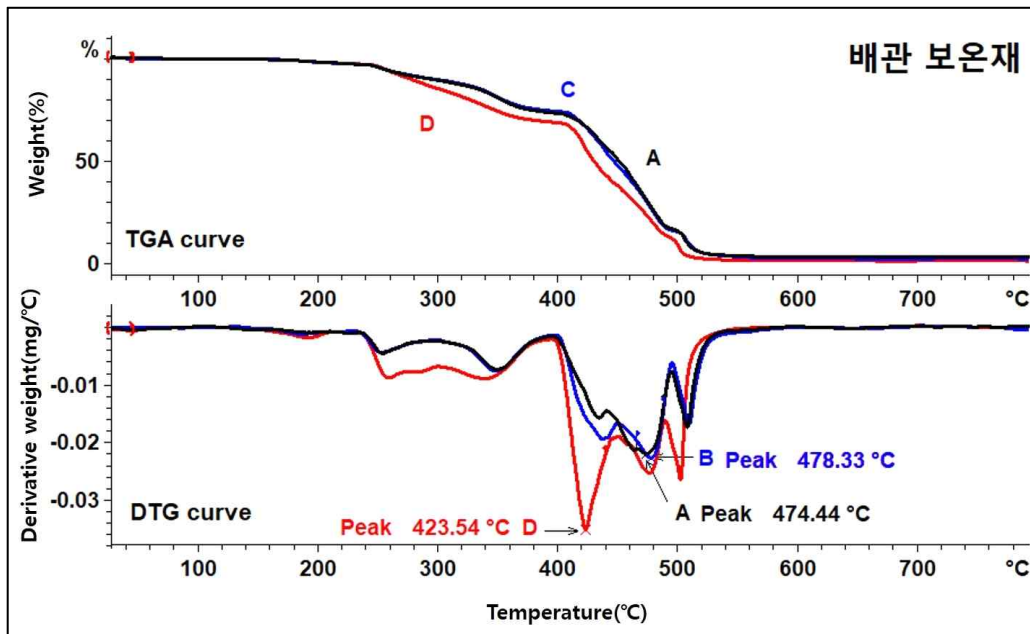


[그림 IV-17] 페놀 폼의 TGA 결과

〈표 IV-12〉 페놀 폼의 TGA 결과 요약

시료명	step	온도범위 [°C]	질량변화율 [wt %]
A	1	상온 ~ 100	(-) 7
	2	322 ~ 531	(-) 81 (residue 1.8%)
B	1	상온 ~ 100	(-) 4
	2	322 ~ 800	(-) 72 (residue 10%)
D	1	상온 ~ 100	(-) 9
	2	322 ~ 531	(-) 81 (residue 6.3%)

배관 보온재 3개 시료는 236 °C부터 주요 분해가 시작되며, 보온재 내의 다양한 성분(수지, 난연재, 발포제 잔류물, 가소제 등)으로 인해 여러 단계로 분해가 일어나는 것으로 추정된다. 질량손실속도가 가장 빠른 DTG 곡선의 피크 온도는 A는 474 °C, B는 478 °C, D는 424 °C이다.



[그림 IV-18] 배관 보온재의 TGA 결과

〈표 IV-13〉 배관 보온재의 TGA 결과 요약

시료명	step	온도범위 [°C]	질량변화율 [wt %]
A	1	236 ~ 395	(-) 23
	2	395 ~ 530	(-) 69 (residue 4.2%)
B	1	236 ~ 395	(-) 23
	2	395 ~ 530	(-) 70 (residue 4.1%)
D	1	236 ~ 395	(-) 28
	2	395 ~ 530	(-) 67 (residue 1.8%)

5. 연소 시험 결과

연소 시험 결과 샌드 버너를 사용했을 때 경질 우레탄 폼은 연소되지 않으나 가스 토치를 사용했을 때는 화염과 연기를 발생하면서 연소하였다. 초당 소비 열량은 샌드 버너가 더 컸으나 열손실이 많고, 가스 토치는 열손실이 거의 없어서 그런 것으로 추정된다. 시험 시간, 점화 결과, 소비 열량 등 시험 결과 요약은 <표 IV-14>와 같다.

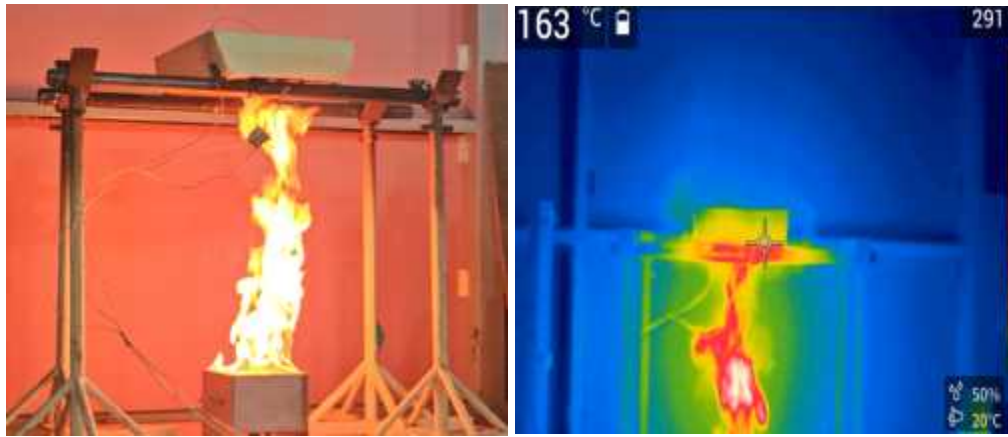
<표 IV-14> 연소 시험 결과 요약

점화원 (연료)	시료	시험시간	점화결과 (점화 시간)	소비열량	표면 최고 온도
샌드 버너 (LPG)	경질 우레탄 폼 보드 (가로 40cm x 세로 40cm x 높이 11cm)	1,600초	미연소, 표면탄화	사용연료량: 0.579 m ³ LPG의 열량: 24,000 kcal/m ³ 0.579 X 24,000 = 13,869 kcal 초당 8.865 kcal/s	410 °C
가스 토치 (부탄)	경질 우레탄 폼 보드 (가로 40cm x 세로 40cm x 높이 11cm)	210초	연소 (10초)	사용연료량: 3.34 g 부탄의 열량: 12 kcal/g 3.34 X 12 = 40 kcal 초당 4 kcal/s	1,048 °C

1) 샌드 버너 연소 시험 결과

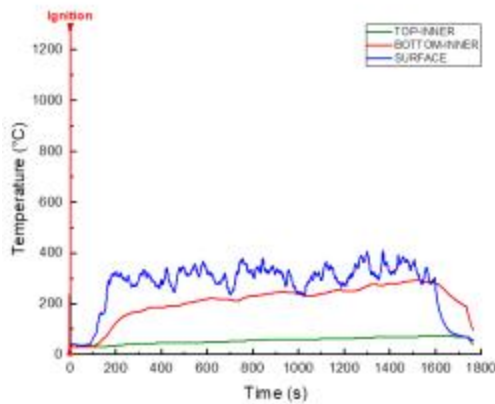
시료에 샌드 버너로 26분 40초 동안 화염을 시료에 접촉하였으나 연소는 하지 않았으며, 하부 표면재 부분만 탄화되었다. Themocouple 3개 중 표면 (Surface)과 하부(Bottom-Inner) 부분은 점화 후 100초 ~ 200초 사이 급격하게 상승을 하였으나, 표면은 410 °C, 하부는 292 °C가 최고 온도였다. 또한 상부(Top-Inner) 부분은 29 °C ~ 72 °C로 시험이 끝날때 까지 온도 범위가 큰 폭으로는 상승하지 않았다. 열화상 카메라의 화염의 최고 온도는 291 °C

였으며, 열유속(HF)은 서서히 상승하였다.

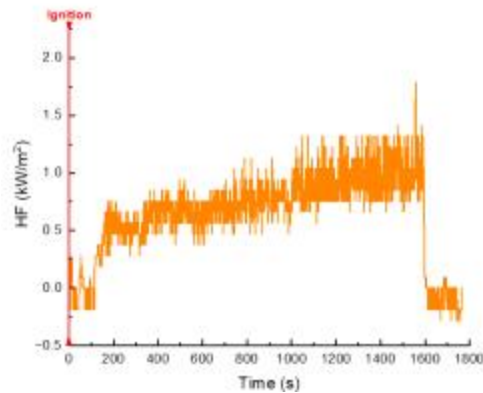


(a) 시험 모습

(b) 열화상 카메라



(c) Thermocouple 온도 변화



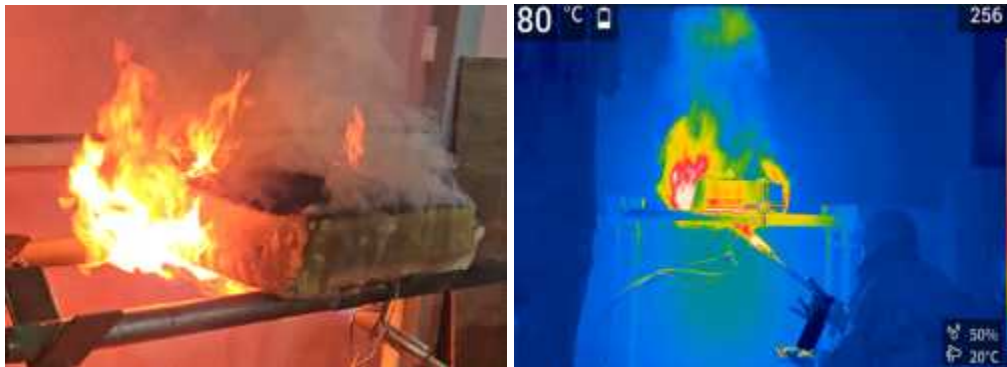
(d) 열유속 변화

[그림 IV-19] 샌드 버너 연소 시험 결과

2) 가스 토치 연소 시험 결과

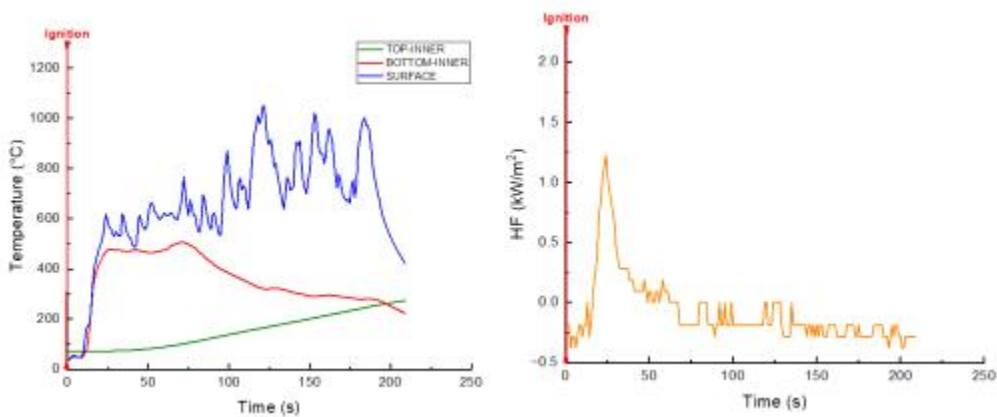
시료에 가스 토치로 3분 30초 동안 화염을 접촉하였고, 약 10초가 경과하였을 때 연소가 시작되었다. 육안으로 우레탄 폼에 불이 붙으며 연기를 급격

하게 방출하는게 확인되었으며, Thermocouple의 표면온도는 618 °C, 하부의 온도 477 °C까지 급격하게 상승하는 것이 관찰되었다. 열유속 또한 시험 시작 30초 후 1.25 kW/m² 까지 급격하게 상승하다가 0.25 kW/m² 줄어들었는데 이는 경질 우레탄 폼이 연소를 하면서 열 방출을 하여(가스 토치의 열량+시료의 방출열량) 열유속이 상승하다가, 시료가 모두 연소하여 열 방출이 끝나고 가스 토치의 열량만 측정되어 그러한 것으로 판단된다. Thermocouple의 최고 온도는 표면 1,048 °C, 하부 507 °C, 상부 273 °C 였다. 열화상 카메라의 최고 온도는 256 °C 였는데 이는 초점(Focus)이 고온의 화염을 정확하게 인지하지 못한 것으로 추정된다.



(a) 시험 모습

(b) 열화상 카메라



(c) Thermocouple 온도 변화

(d) 열유속 변화

[그림 IV-20] 가스 토치 연소 시험 결과

6. 시험 결과 종합 정리

건축 단열재의 화재 특성을 파악하기 위하여 총 6종류의 시험을 실시하였다. 각 시험의 결과를 표로 정리하면 Hot-Surface Ignition Temperature 시험은 <표 IV-15>, 착화 시험은 <표 IV-16>, 자연발화점 시험은 <표 IV-17>, 시차주사열량계(DCS) 시험은 <표 IV-18>, 열중량분석(TGA) 시험은 <표 IV-19>, 경질 우레탄 폼의 연소 시험은 <표 IV-20>과 같다. 시험 결과 압출법 보온판과 배관 보온재보다 경질 우레탄 폼 보온판과 페놀 폼이 내열성이 우수하고 화염에 강한 것을 확인할 수 있었다.

<표 IV-15> Hot-Surface Ignition Temperature 시험 결과

시료명	용융시작온도 (경과시간)	기화시작온도 (경과시간)	탄화시작온도 (경과시간)
압출법 보온판 A사	155 °C(11분)	413 °C(36분)	탄화되지 않고 용융됨
압출법 보온판 C사	150 °C(12분)	405 °C(37분)	탄화되지 않고 용융됨
압출법 보온판 D사	151 °C(11분30초)	406 °C(36분 30초)	탄화되지 않고 용융됨
경질 우레탄 폼 보온판 A사	용융되지 않음	기화되지 않음	318 °C(28분 30초)
경질 우레탄 폼 보온판 B사	용융되지 않음	기화되지 않음	311 °C(28분)
페놀 폼 A사	용융되지 않음	기화되지 않음	291 °C(26분)
페놀 폼 B사	용융되지 않음	기화되지 않음	296 °C(26분 30초)
페놀 폼 D사	용융되지 않음	기화되지 않음	288 °C(25분)
배관 보온재 A사	171 °C(14분 30초)	용융과 기화가 동시에 일어남	탄화되지 않고 용융됨
배관 보온재 C사	187 °C(16분)		탄화되지 않고 용융됨
배관 보온재 D사	170 °C(14분)		탄화되지 않고 용융됨

〈표 IV-16〉 착화 시험 결과

구분	압출법 보온판	경질 우레탄 폼 보온판	페놀 폼	배관 보온재
착화 시험 (연소 지속 시간)	착화 후 전체 연소 (6분)	부직포 부분만 착화 후 연소 (1분)	착화 안됨	심재 착화 연소 (15초)

〈표 IV-17〉 자연발화점 시험 결과

시료명	시험전(g)	시험후(g)	감소량(g)	감소율(%)
압출법 보온판 A	0.09	0	0.09	100
압출법 보온판 C	0.08	0	0.08	100
압출법 보온판 D	0.12	0	0.12	100
경질 우레탄 폼 보온판 A	0.15	0.05	0.10	66.7
경질 우레탄 폼 보온판 B	0.09	0.03	0.06	66.7
페놀 폼 A	0.12	0.02	0.10	83.3
페놀 폼 B	0.14	0.03	0.11	78.6
페놀 폼 D	0.11	0.02	0.09	81.8
배관 보온재 A	0.08	0.01	0.07	87.5
배관 보온재 C	0.13	0.04	0.09	69.2
배관 보온재 D	0.13	0.04	0.09	69.2

〈표 IV-18〉 시차주사열량계(DSC) 시험 결과

시료명	step	발열개시온도 [°C]	외삽개시온도 [°C]	최대온도 [°C]	반응열 [J/g]
압출법 보온판 A	1	210	233	253	19
	2	279	320	370	951
	3	409	470	500	1,357
압출법 보온판 C	1	279	300	367	934
	2	409	470	516	1,194
압출법 보온판 D	1	221	231	254	23
	2	279	320	342	757
	3	409	468	508	1,083
경질 우레탄 폼 보온판 A	1	244	293	333	>1,187
	2	434	478	541	5,139
경질 우레탄 폼 보온판 B	1	244	293	334	>1,216
	2	434	477	541	5,000
페놀 폼 A	-	214	266	499	15,140
페놀 폼 B	-	214	292	395	6,715
페놀 폼 D	-	214	268	496	17,910
배관 보온재 A	1	221	231	240	541
	2	290	316	345	781
	3	400	401	456	11,360
배관 보온재 C	1	224	234	242	570
	2	274	316	346	802
	3	400	401	493	8,873
배관 보온재 D	1	217	229	244	615
	2	274	305	346	979
	3	400	401	502	9,276

〈표 IV-19〉 열중량분석(TGA) 시험 결과

시료명	step	온도범위 [°C]	질량변화율 [wt %]
압출법 보온판 A	-	283 ~ 410	(-) 95 (residue 4.0%)
압출법 보온판 C	-	283 ~ 410	(-) 94 (residue 4.8%)
압출법 보온판 D	-	283 ~ 410	(-) 96 (residue 3.0%)
경질 우레탄 폼 보온판 A	1	147 ~ 263	(-) 6
	2	264 ~ 412	(-) 31
	3	413 ~ 630	(-) 58 (residue 3.0%)
경질 우레탄 폼 보온판 B	1	147 ~ 263	(-) 6
	2	264 ~ 412	(-) 29
	3	413 ~ 630	(-) 59 (residue 4.4%)
페놀 폼 A	1	상온 ~ 100	(-) 6
	2	322 ~ 531	(-) 81 (residue 1.8%)
페놀 폼 B	1	상온 ~ 100	(-) 4
	2	322 ~ 800	(-) 72 (residue 10%)
페놀 폼 D	1	상온 ~ 100	(-) 9
	2	322 ~ 531	(-) 81 (residue 6.3%)
배관 보온재 A	1	236 ~ 395	(-) 23
	2	396 ~ 530	(-) 69 (residue 4.2%)
배관 보온재 B	1	236 ~ 395	(-) 23
	2	396 ~ 530	(-) 70 (residue 4.1%)
배관 보온재 D	1	236 ~ 395	(-) 28
	2	396 ~ 530	(-) 67 (residue 1.8%)

〈표 IV-20〉 경질 우레탄 폼 보드 연소 시험 결과

점화원 (연료)	시료	시험시 간	점화결과 (점화 시간)	소비열량	표면 최고 온도
샌드 버너 (LPG)	경질 우레탄 폼 보드 (가로 40cm x 세로 40cm x 높이 11cm)	1,600초	미연소, 표면탄화	사용연료량: 0.579 m^3 LPG의 열량: $24,000 \text{ kcal/m}^3$ $0.579 \times 24,000 = 13,869 \text{ kcal}$ 초당 8.865 kcal/s	410 °C
가스 토치 (부탄)	경질 우레탄 폼 보드 (가로 40cm x 세로 40cm x 높이 11cm)	210초	연소 (10초)	사용연료량: 3.34 g 부탄의 열량: 12 kcal/g $3.34 \times 12 = 40 \text{ kcal}$ 초당 4 kcal/s	1,048 °C

V. 요약 및 결론



V. 요약 및 결론

1. 건축 단열재의 물리적 위험성 시험 결과

본 위험성평가는 실제 건설 현장에서 사용하는 단열재 4종 11개를 제공받아 시험을 실시하였다. 표면의 온도를 승온시킴에 따라 발화하는 온도를 측정하는 Hot-Surface Ignition Temperature 시험, Gas Igniter로 시료의 점화 여부를 확인하는 착화 시험, 큐브에 시료를 넣은 뒤 오븐의 온도를 400 °C까지 승온한 뒤 자연발화 여부를 확인하는 자연발화점 시험, 열안전성과 열중량 감소를 확인하는 열분석(DSC, TGA) 시험, 경질 우레탄 폼에 샌드 버너 및 가스 토치를 이용한 연소 시험 등 총 5종의 시험을 실시하였으며 주요 결과는 <표 V-1>과 같다.

<표 V-1> 건축 단열재의 화재 시험 결과 요약

구분		압출법 보온판	경질 우레탄 폼 보온판	페놀 폼	배관 보온재
Hot-Surface Ignition Temperature		150 ~ 155 °C (용융 시작)	311 ~ 318 °C (탄화 시작)	288 ~ 291 °C (탄화 시작)	170 ~ 187 °C (용융 시작)
		405 ~ 413 °C (기화 시작)			
착화 시험 (연소 지속 시간)		착화 후 전체 연소 (6분)	부직포 부분만 착화 후 연소 (1분)	착화 안됨	심재 착화 연소 (15초)
자연발화점		측정 안됨	측정 안됨	측정 안됨	측정 안됨
열분석	DSC	210 ~ 221 °C (발열개시온도)	244 °C (발열개시온도)	214 °C (발열개시온도)	217 ~ 224 °C (발열개시온도)
	TGA	- (94 ~ 96)% (질량변화율)	- (58 ~ 59)% (질량변화율)	- (72 ~ 81)% (질량변화율)	- (67 ~ 70)% (질량변화율)
경질 우레탄 폼 보온판 연소 시험 (연소여부)		샌드버너	연소하지 않음		
		가스토치	연소함		

Hot-Surface Ignition Temperature 시험 결과 시료 4종 모두 연소는 관찰되지 않았지만, 압출법 보온판과 배관 보온재는 용융이 진행되어 시료가 모두 증발하였다. 착화 시험은 압출법 보온판은 시료 전체가 연소하였으나 경질 우레탄 폼 보온판은 바깥의 부직포 부분만 일부 연소하다가 꺼졌으며, 배관 보온재는 폴리 에틸렌이 주성분인 심재만 연소를 진행하다가 중지되었다. 자연발화점은 시료 4종 모두 측정되지 않았으며, 발열개시온도는 4종 시료 모두 비슷하였고, 질량 변화율은 차이가 있었다. 또한 경질 우레탄 폼의 연소 시험의 경우 LPG를 이용한 샌드 버너 사용 결과 연소가 되지 않았으나, 부탄을 이용한 가스 토치 시험은 연소를 하였다.

시험 결과 압출법 보온판은 건설 현장에서 자주 취급하는 점화원(용접 불꽃 등)으로 연소가 확대될 가능성이 높지만, 다른 3종의 시료는 연소가 시작하여도 재료에 포함된 난연제(할로젠 등)로 인하여 순간적인 연소는 발생할 수 있으나 연소가 확대되는 것을 방지하는 것으로 나타났다.

하지만 시험의 한계점이 있다. 다양한 자재를 사용하는 건설 현장 특성상 다른 가연물이 지속적으로 연소되면서 열량을 난연재료에 공급하면 난연성능을 확보할 수 없다. 연소가 중단되는 3종 중 2종(폴리 우레탄 폼, 페놀 폼)은 난연재료이긴 하나 5분간 가열 시 난연성능이 확보된 것(난연 3급, 난연2급은 10분)으로 다른 가연물이 연소되면서 지속적으로 열량을 공급하면 난연재료도 같이 연소가 일어난다. 또한 폴리에틸렌이 주성분이 배관 보온재의 경우 난연시험은 수평 연소성에 관한 시험이라 배관이 수직으로 설치된 곳의 엘보우 같은 부분에 점화원이 발생하여 연소가 시작되면 난연 성능을 보장할 수 없다. 이에 건설 현장의 화재 예방하기 위한 대책을 다음과 같이 제시하고자 한다.

2. 건축 단열재 화재 예방 및 피해감소 대책

연소의 3요소인 가연물, 점화원, 산소 제거 중 산소 제거는 할 수 없어 가연물, 점화원 제거 및 화재 발생시 피해감소 중점으로 대책을 제시하고자 한다.

1) 가연물 제거¹⁾

인화성 액체, 가스, 고체 등 가연성 물질의 반입은 1일 사용량 입고를 원칙으로 하되, 곤란할 경우 점화원과 격리된 보관 장소에 안전하게 보관가능한 물량만 입고하여야 한다. 또한 단열재, 경질 우레탄 폼, 내장재 등 부피가 큰 자재와 같이 별도의 저장소에 보관이 어려운 경우 지상층의 별도 구획화된 장소에 보관하고, 화기작업 금지 안내 및 소화용구를 비치하여야 한다.



(a) 위험물 저장소



(b) 자재 보관장소 구획화

[그림 V-1] 위험물 저장소 및 자재 보관장소 구획화

1) 건설현장 대형화재 예방을 위한 가연성 자재 등의 보관 가이드 라인, 2018, 안전보건공단 건설안전실

가연성 자재는 지상층에 보관하는 것이 원칙이나, 부득이하게 지하 또는 밀폐된 옥내 장소에 보관하여 할 경우에는 인근에서 화기작업을 금지하고, 화재 확산을 지연시킬 수 있는 불연재질의 (임시)방호벽을 설치하여 구획화 한 뒤 화재 감지 및 자동확산소화장치를 설치하여 보관하여야 한다.



(a) 자동확산소화장치

(b) 화재 감지 경보기

[그림 V-2] 자동확산소화장치 및 화재 감지 경보기

또한 불에 잘 타는 비닐, 종이박스, 압출법 보온판 등이 있는 구역에서 화기작업 시 이를 제거를 하고 작업을 하여야 되며, 이러한 가연물 등이 혼합되어 있는 폐기물 보관소(암물) 등은 점화원으로부터 안전한 장소에 설치하여야 하며, 주기적으로 처리하여 점화원이 생겨도 화재가 발생하지 않도록 하여야 한다.

2) 점화원 제거²⁾

또한, 건설 현장에서 점화원이 될 위험이 있는 용접·용단 작업은 가능한 지양하고, 외부에서 용접 등 화재의 위험이 있는 모든 작업을 마친 자재를 반입

2) 냉동물류창고 화재사고예방매뉴얼, 2021, 안전보건공단 사업총괄본부

하여 화기를 사용하지 않는 조립 등의 설치를 할 수 있게 하여야 한다. 부득이하게 현장 내에서 화기작업을 실시해야 하는 경우에는 가연성 자재의 반입을 원천적으로 금지해야 하며, 부득이 가연물이 반입된 경우 충분한 안전거리를 확보하거나 [그림 V-3]과 같이 불티방지포 등 비산 방지조치를 하여야 한다. 특히 배관의 개구부, 피트 등 아래층이나 육안으로 확인하기 어려운 곳으로 불꽃이 들어갈 위험이 있는 장소를 모두 밀폐하고 작업하여야 한다.



[그림 V-3] 불티 방지포 및 비산 방지 조치

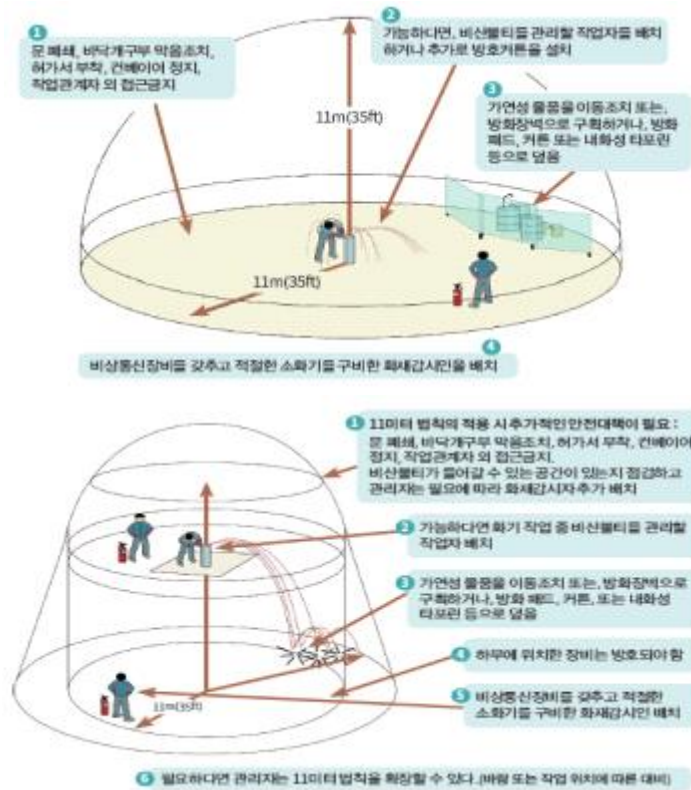
특히 용접 등 화기작업 시 다량의 불티가 발생하여 비산되고, 풍속, 풍향, 높이 등 작업 현장조건에 따라 비산 거리가 늘어날 수 있다. 불꽃은 1,600 ℃ ~ 3,000 ℃의 고온으로 비산된 후 [그림 V-4]와 같이 상당 시간 경과 후에도 축열에 의하여 화재가 발생할 위험이 있다. 이에 화기작업이 진행되는 동안에는 안전작업을 위해 화재감시자를 배치하여야 하며, 작업 후에도 일정 시간 동안 비산불티, 훈소 징후 등 감시활동을 하여야 한다.



[그림 V-4] 용단 작업 시 화재 발생 과정

3) 피해감소 대책³⁾

화재가 발생하였을 때 사업장 내 근로자의 대피를 유도하기 위한 화재감시자를 [그림 V-5]와 같이 배치하여야 한다. 화재감시자는 근로자들(외국인 근로자 포함)간 의사소통을 원활하게 할 수 있어야 하고, 화기작업 중 착화여부 감시 및 화재발생시 이를 인지하고 대피를 유도하는 해당 업무만 전담하도록 하여야 한다. 화재감시자는 업무 수행에 필요한 확성기, 휴대용 조명기구 및 화재 대피용 마스크 등 대피용 방연장비를 소지하여야 하고, 이를 능숙하게 사용할 수 있어야 한다.



[그림 V-5] 화재감시자 배치 예시

3) 화재감시자 메뉴얼, 2020, 안전보건공단 전문기술실

또한 항상 피난로에 자재 등의 장애물이 없도록 관리하여 화재 시 피난할 수 있도록 하여야 한다. 그리고 화재 시 발생한 연기 및 정전으로 인한 전등 미작동으로 대피 시 시야 확보가 어려움으로 [그림 V-6]과 같이 간이피난유도선 및 비상조명등을 설치하여야 한다. 이 간이피난유도선과 비상조명등은 정전에도 작동할 수 있도록 관련 기준에 따른 비상전원을 확보해야 한다.⁴⁾



[그림 V-6] 비상조명등 설치 사진

4) 건설현장의 화재안전성능기준(NFPC 606), 소방청고시 제2023-23호

참고문헌

건설현장 대형화재 예방을 위한 가연성 자재 등의 보관 가이드 라인, 2018, 안전보건공단 건설안전실

공연건 외 1명, 경질 폴리우레탄폼의 착화성 및 열방출특성 연구, 한국화재소방학회 논문지 2003: 제17권 제4호 117~123p

기술지원규정(코샤가이드) F-3-2014 경질폴리우레탄폼 취급시 화재예방에 관한 기술지침

김수민, 재난대응 유연성 및 화재안전 확보를 위한 고난연·고단열 샌드위치패널 개발 최종보고서, 2023, 국토교통부 국토교통과학기술진흥원

김종복 외 1명, 주요 건축 재료별 연소가스 유해성 평가, 한국목재공학회지 2016: 제44권 제5호 639~654p

냉동물류창고 화재사고예방메뉴얼, 2021, 안전보건공단 사업총괄본부

박형주, 페놀 폼의 연소특성에 관한 연구, 한국화재소방학회 논문지 2010: 제24권 제1호 122~127p

유우준 외 4명, 배관용 보온재의 난연 성능 시험방법에 따른 최대 발열량 분석, 한국화재소방학회 논문지 2020: 제34권 제1호 18~25p

이정석 외 5명, LPG 운반선 탱크용 보온재의 물리적 위험성 평가, 2016, 안전보건공단 산업안전보건연구원

임옥근 외 2명, 립코너 시험을 이용한 배관용 보온재의 난연성능 분석, 한국화재소방학회 논문지 2019: 제33권 제4호 1~8p

정기혁 외 4명, 목재펠릿 분진의 화재폭발 위험성 평가, 2025, 안전보건공단
산업안전보건연구원

화재감시자 메뉴얼, 2020, 안전보건공단 전문기술실

Jiao L. L., Sun J., A thermal degradation study of insulation materials extruded polystyrene, *Procedia Engineering*, 71, 622~628p, 2014.

Tang Z., etc. Thermal degradation behavior of rigid polyurethane foams prepared with different fire concentrations and blowing agents, *Polymer*, 46(24), 2471~6479, 2002.

연구진

연구기관: 산업안전보건연구원 산업안전연구실

평가책임자: 김천동 (차장, 위험성시험부)

참 여 자: 서동현 (부장, 위험성시험부)

참 여 자: 최이락 (연구위원, 위험성시험부)

참 여 자: 정기혁 (연구위원, 위험성시험부)

참 여 자: 고윤현 (차장, 위험성시험부)

연구기간

2025. 4. ~ 2025. 8.

본 위험성평가 보고서의 내용은 평가책임자의 개인적 견해이며,
우리 연구원의 공식 견해와 다를 수도 있음을 알려드립니다.

산업안전보건연구원장

건축 단열재 화재 위험성평가
(2025-산업안전보건연구원-963)

발행일 : 2025년 08월

발행인 : 산업안전보건연구원장

평가책임자 : 위험성시험부 김천동 차장

발행처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

주소 : (34122) 대전광역시 유성구 엑스포로339번길 30

전화 : 042-869-0335

팩스 : 042-863-9003

Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>

공공안심글꼴 : 무료글꼴, 한국출판인회의, Kopub바탕체/돋움체