



공학석사 학위논문

선박용 단열재인 폴리우레탄의 연소특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Combustion Characteristics of Polyurethane as Marine Insulation





소방공학과

오 상 훈

선박용 단열재인 폴리우레탄의 연소특성에 관한 실험적 연구

지도교수 최재욱

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

IONAI

2017년 6월

부경대학교 산업대학원

CH

Ot y

소방공학과

오 상 훈

오상훈의 공학석사 학위논문을 인준함



목 차

1. 서 론

1.1. 연구의 배경
1.2. 최근 폴리우레탄 폼에 대한 연구 동향
1.3. 연구의 필요성
1.4. 연구의 목적
. 이론적 배경

2. 이론적 배경

NATIONAL
. 이론적 배경
2.1. 선박용 폴리우레탄 폼 단열재의 화재 사례 4
2.2. 선박건조작업의 공정
2.3. 단열재의 화재위험성7
2.4. 국제적 난연시험기준9
2.5. 독일 'DIN 4102'에 의한 난연성능 등 시험기준
2.6. 선박건조작업 중 단열재의 시공
2.6.1. 액화가스 운반선에서의 단열재 사용
2.6.2. LPG 선박에서의 단열재 시공방법(현장작업방법 중심)13
2.7. 선박용 폴리우레탄 폼의 난연성능 검토
2.7.1. 선박 단열재의 대표적 난연화 방법
2.7.2. 폴리우레탄 폼의 난연화 실태

3. 실험장치 및 실험방법

3.1.	실험 조건	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	18
3.2.	실험재료		18

3.3.	실험방법		19
3.4.	발 화 원		20
3.5.	연소특성	실험 내용	21
3.6.	실험장비	목록	22
3.7.	단열재 연	소특성 실험방법	23
3.7	7.1. 수직 설	치 실험체의 연소실험	23
3.7	7.2. 수평 설	치 실험체의 연소실험	24
3.8.	실험장치의	의 설치	25

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 기상상황	6
4.2. 수직 설치 실험체의 연소실험 ·······2	6
4.2.1. DIN 4102 B2 Class 적용 연소실험	6
4.2.2. 측방향 발화원으로 인한 발화 가능성	9
4.2.3. 측방향 발화원으로 인한 발화시 독립연소시간	9
4.2.4. 측방향 발화원으로 인한 발화시 잔연시간4	7
4.3. 수평 설치 실험체의 연소실험5	8
4.3.1. 수직방향 발화원으로 인한 발화 가능성	8
4.3.2. 가열 금속판 낙하실험 6	5

참고문헌		·6	jC)
------	--	----	----	---

표 목 차

[표 1] 소규모 화원에 단열재의 착화위험특성

- [표 2] 폴리우레탄 폼 분해시 발생되는 물질의 폭발범위 등
- [표 3] 국제적 난연시험기준
- [표 4] LEG · LPG 운반선의 단열재
- [표 5] 단열재 시공 작업
- [표 6] 고난연성 단열재의 시험기준
- [표 7] 실험체의 특성 및 크기 등
- [표 8] 연소 실험별 시편 제작 수량
- [표 9] 선박용 단열재 연소 실험을 위한 주요 시험내용
- [표 10] 연소 실험을 위한 발화원의 종류
- [표 11] 실험 내용별 시료의 설치방법 및 수량
- [표 12] 실험장비 목록
- [표 13] 연소 불꽃의 높이와 자기소화시간 측정(DIN 4102 B2)
- [표 14] 측방향 산소절단기 불티로 인한 발화 가능성
- [표 15] 측방향 그라인더 불티로 인한 발화 가능성
- [표 16] 절단 판재의 두께 및 불티 발생 높이
- [표 17] 거리에 따른 연기발생 및 독립연소에 소요되는 평균시간
- [표 18] 발화원별 거리 변화에 따른 연기발생시간
- [표 19] 산소절단기 불티에 의한 독립연소시간
- [표 20] 그라인더 불티에 의한 독립연소시간
- [표 21] 실험체별·거리별 독립연소시간
- [표 22] 발화원별 불티의 크기 측정
- [표 23] 산소절단기 불티에 의한 잔연시간
- [표 24] 그라인더 불티에 의한 잔연시간
- [표 25] 산소절단기 불티에 의한 잔연시간
- [표 26] 실험체와의 거리에 따른 연기발생에 필요한 소요시간
- [표 27] 연기 발생을 위한 그라인더 불티 접촉 시간

- [표 28] '실험체 1·2'의 거리별 평균 잔연시간 비교 [표 29] 폴리우레탄 단열재 연소시 연기의 색상
- [표 30] 산소절단기 용융물 낙하에 의한 연소 특성
- [표 31] 그라인더 불티에 의한 연소 특성
- [표 32] 수평 실험체의 연소특성 비교
- [표 33] 가열 금속판 낙하실험 결과
- [표 34] '실험체 3', '실험체 4'의 연소특성



그림목차

[그림 1] 선박 건조 작업 절차 [그림 2] DIN 4102, B2 Class 시험장치 (연소 불꽃 높이 측정) [그림 3] 단열재 연소실험을 위한 실험장치의 설치 [그림 4] '실험체 3 · 4'의 연소불꽃의 높이 및 자기소화시간 [그림 5] 산소절단기 불티에 의한 연기발생 소요시간 [그림 6] 산소절단기 불티에 의한 독립연소 소요시간 [그림 7] '실험체 1 · 2'에서 연기 발생을 위한 그라인더 불티 접촉 횟수 [그림 8] '실험체 1 · 2'에서 연기 발생을 위한 소요시간 [그림 9] 산소절단기 불티에 의한 연기 발생을 위한 소요시간 [그림 10] '실험체 1' 거리별 독립연소시간 [그림 11] '실험체 2' 거리별 독립연소시간 [그림 12] '실험체 3' 거리별 독립연소시간 [그림 13] '실험체 4' 거리별 독립연소시간 [그림 14] 발화원과의 거리에 따른 연기발생시간 및 독립연소시간의 변화 [그림 15] 실험체별 거리에 따른 독립연소시간 [그림 16] 실험체별 독립연소시간 HOIN [그림 17] 발화원별 불티의 크기 [그림 18] '실험체 1'의 잔연시간 변화 [그림 19] '실험체 2'의 잔연시간 변화 [그림 20] '실험체 3'의 잔연시간 변화 [그림 21] '실험체 4'의 잔연시간 변화 [그림 22] 실험체와의 거리에 따른 연기발생에 필요한 소요시간 [그림 23] 실험체별 잔연시간 편차 [그림 24] '실험체 1'의 독립연소시간과 잔연시간 비교 [그림 25] '실험체 2'의 독립연소시간과 잔연시간 비교 [그림 26] '실험체 3'의 독립연소시간과 잔연시간 비교 [그림 27] '실험체 4'의 독립연소시간과 잔연시간 비교 [그림 28] '실험체 1 · 2'의 거리별 평균 잔연시간 비교

[그림 29] 수평 설치된 실험체의 '발화소요시간, 독립연소시간, 잔연시간'
[그림 30] 0.5 m 거리에서 수평 설치·수직 설치된 실험체의 발화소요시간
[그림 31] 0.5 m 거리에서 수평 설치·수직 설치된 실험체의 독립연소시간
[그림 32] 0.5 m 거리에서 수평 설치·수직 설치된 실험체의 잔연시간
[그림 33] 수평·수직 설치된 실험체의 연소를 위한 불티접촉 횟수
[그림 34] 수직 · 수평 실험체의 연소 특성 비교
[그림 35] 수평 실험체의 용융 깊이
[그림 36] 수평 실험체의 가열금속판 낙하시 탄화면적
[그림 38] 수평 실험체의 가열금속판 낙하시 독립연소시간



사진목차

[사진 1] H 중공업 LPG 선박 화재사고 [사진 2] D 조선 LPG 선박 화재사고 [사진 3] 대형 원유운반선 블록 제작 [사진 4] 대형 선박 블록 이동 [사진 5] LEG 탱크에 선 제작된 단열재 판넬을 현장에서 탱크 표면에 부착 [사진 6] LPG 탱크 표면에 폴리우레탄 폼을 120mm 두께로 직접 발포 시공 [사진 7] 단열재 혼합장치 [사진 8] Primer 도장 작업 [사진 9] 폴리우레탄 폼 발포 작업 [사진 10] 단열재의 발포 밀도 측정 [사진 11] Sanding 작업 [사진 12] 단열재 마감 작업 [사진 13] LPG 탱크 단열재의 층 구조 [사진 14] 고난연성 단열재의 시험방법 [사진 15] 가스절단기 [사진 16] 그라인더 [사진 17] 가열금속판 [사진 18] 실험장치의 배치 [사진 19] DIN 4102, B2 시험 결과 [사진 20] 산소절단기 불티에 의한 표면온도의 변화 [사진 21] 그라인더 불티 비산 실험 [사진 22] 그라인더 불티에 의한 실험체 표면온도의 변화 [사진 23] 실체 현미경 [사진 24] 용융물의 색상 및 크기 [사진 25] 산소절단기 용융물과 그라인더 불티 [사진 26] 단열재에 침투된 불티의 크기 측정 [사진 27] 단열재 주변에 낙하된 가스절단기 불티 [사진 28] 그라인더 불티

[사진 29] '실험체 1' 연기 색상
[사진 30] '실험체 2' 연기 색상
[사진 31] '실험체 3' 연기 색상
[사진 32] '실험체 4' 연기 색상
[사진 33] 산소절단기 불티 낙하실험
[사진 34] 불티의 단열재 관통 형태
[사진 35] '실험체 4' 산소절단기 불티에 의한 표면 탄화
[사진 36] '실험체 4' 탄화 깊이측정
[사진 37] 그라인더 불티 접촉 실험
[사진 38] '실험체 1, 실험체 4' 표면상태 및 침식 깊이 측정
[사진 39] 용융물에 의한 단열재 관통
[사진 40] 탄화 중 표면 균열
[사진 41] 실험체별 용융깊이 및 탄화면적
[사진 42] 탄화면적측정기를 이용한 탄화면적 측정

1. 서 론

1.1. 연구의 배경

조선산업은 대규모 부지에 작업 분야별·공정별로 '건축물형 작업장(선각·주조· 단조 등 작업장), 야드형 작업장(블록 단위 작업장), 도크 작업장(블록 단위 결 합 등 최종 작업 후 진수하는 작업장)의 특징적 작업공간의 형태로 구분하여 운 영된다. 이는 동일한 장소에서 처음부터 끝까지 작업하는 것이 공간활용성 및 작업경제성이 낮아, 선박의 각 부분을 블록 단위로 제작한 후 도크에서 결합·조 립하는 방식으로 건조된다. 선박 건조 과정에서 블록 대형화 시스템이 생산성 향상에 미치는 영향에 관한 연구¹⁾에서 블록 단위 구조물을 도크 내에서 결합하 는 단계를 도크 탑재공정(Dock erection)이라 한다. 이 공정에서는 단위 블록의 결합 및 유틸리티 설비의 설치 및 상호연결하기 위한 용접 등의 화기작업이 빈 번히 이루어진다. 또한 부분 도장작업 및 단열재 보완작업 등 유증기가 발생되 는 작업이 병행되어 화재위험성이 매우 높은 공정이라 할 수 있다.

도크 탑재 공정 내 선박 작업장은 선실·화물칸·격벽 등의 선박 내부 구획으 로 인해 환기가 어려운 무창층의 구획실이 되고, 유증기가 발생할 수 있는 작업 장·용접 등 화기를 취급하는 작업장이 홀드(건조 선박 블록별 작업공간)에 산 재되어 화재 발생의 위험성이 높다. 선박의 특성상 내부는 미로형 구조의 통로 가 배치되는 사례가 많아 화재시 작업자 대피활동이 제한될 수 있는 공간적 특 성을 보인다²⁾.

선박 작업장의 구조적 특성은 물론, 화물의 온도를 유지하기 위해 단열재를 설 치하는 경우, 일반적 구획실 화재와는 다른 화재특성이 나타난다. 폴리우레탄 폼 등 화학합성물 단열재가 설치된 선박에서의 도크 탑재공정은 화재의 발생 및 인명피해 발생 위험이 매우 높은 단계이기도 하다. 한 예로, LPG 운반선 화 물탱크는 액화가스가 기화로 손실되는 현상을 방지하기 위해 온도를 영하 50 ℃ 이하로 유지하여야 한다. 이를 위해 열전도율이 낮은 폴리우레탄 폼 단열재 탱크 외부에 도포하며, 이 물질은 열분해 온도가 낮아 용접불티에 의해 쉽게 착

1

화되고 급격히 연소되는 특성을 가지고 있다. 최근 선박 건조 작업장 화재 사례 를 보면 폴리우레탄 등 화학합성물 단열재에 용접 불티로 인한 화재가 발생하 는 사례가 많으며, 연소시 단열재의 열분해에 의해 유독성 가스의 발생 및 연소 확대가 빨라 단시간 내 많은 인명피해가 발생되는 사례를 볼 수 있다.

특히, 2014년 4월 'H중공업' 및 2015년 8월부터 2016년 1월까지 'D조선'에서 발 생한 4건의 잇단 「LPG 운반선 건조 작업 중 화재사고」는 도크 탑재공정의 위험성을 보여주는 전형적인 사례로, 인명피해 20명(사망 5, 부상 15), 소방서 추산 재산피해 18,961,011천원의 피해가 발생했다. 이 화재의 공통점은 '① 도크 탑재공정에서 화재 발생 ② LPG 운반탱크 폴리우레탄 폼 단열재에 착화·발화 ③ 단열재 연소시 유독성 가스의 분출'을 들 수 있다³⁾.

따라서, 조선사업장에서는 위와 같은 폴리우레탄 폼 단열재의 화재위험성을 경 감하기 위해 기존의 단열재에 난연성 물질을 첨가하는 방식 또는 단열재 외부 피복제인 폴리우레아의 난연화를 진행⁴⁾하고 있으며, 국제법의 적용을 받는 선박 의 특성상 독일 건축재료의 난연성능 시험기준인 DIN 4102 B2⁵⁾에 의한 난연성 능을 갖춘 제품이 현장에 도입되고 사용 분야가 확대되고 있는 추세이다.

1.2. 최근 폴리우레탄 폼에 대한 연구 동향

최근 폴리우레탄 폼에 대한 국내의 연구는 김⁶⁾의 새로운 인계 난연재의 합성 과 그에 따른 폴리우레탄 폼의 난연성 연구와 권 등⁷⁾은 난연재 종류에 따른 연 질 폴리우레탄 폼의 난연 특성에 대한 연구를 하였으며, 경남소방본부⁸⁾에서는 전국 화재조사 심포지엄 연구 논문에서 Poly urea 수지 난연기준 개정을 위한 난연성 실험 연구를 하였고, 또한 박⁹⁾은 산업용 단열재의 연소위험 특성에 관한 실험적 연구를 하여 폴리우레탄 폼 단열재의 난연성 향상 및 화재 위험성이 높 은 산업용 단열재에 대한 연소생성물 등의 위험에 대한 연구를 중심으로 수행 되고 있다.

1.3. 연구의 필요성

위와 같이 화재에 취약한 폴리우레탄 단열재의 난연성능 개선을 위한 연구 및

조선사업장에서 자율적으로 개발 중인 'DIN 4102, B2'의 시험기준에 적합한 난 연성 단열재의 사용 확대에도 불구하고, 기존 단열재와 난연성 단열재에 대한 연소특성에 관한 연구는 아직 이루어지지 않고 있다.

난연재료란 '불에 잘 타지 아니하는 성질을 가진 재료'¹⁰⁰를 말하며, 우리나라의 경우 건축법의 하위법령인 『건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙』¹¹⁾, 『건축물 마감재료의 난연성능 및 화재확산 방지구조 기준』¹²⁾에 의한 '열방출 률시험(KS F ISO 5660-1)'¹³⁾ 및 '가스유해성시험(KS F 2271)'¹⁴⁾에 의하지만, 'DIN 4102(B2)'는 수직으로 설치된 실험체의 하단부에 불꽃을 직접 접촉하는 방법에 의한 연소속도를 중심으로 한 시험으로 그 목적과 시험방법을 달리하고 있어, 조선사업장에서 보급되고 있는 폴리우레탄 폼 단열재의 '난연성'이라는 의 미는 우리나라의 법령에 의한 난연재료로서의 난연성능과 다르다 할 수 있을 것이다. 그러나, 조선사업장에서 새롭게 개발·보급되고 있는 난연성·고난연성 폴리우레탄 단열재에 대해 '불이 붙지 않는 단열재 또는 불티를 직접 접촉시키 는 경우에도 쉽게 불이 붙지 않는 난연재료'로 인식되고 있으며, 더 나아가 불 을 사용하는 작업에도 소방기본법상 안전조치인 '불티방지작업도 필요 없는 단 열재'라는 인식이 확산되고 있어 안전관리에 혼선이 발생되고 있다. 따라서, 현 장에서 사용되고 있는 난연성능 단열재의 연소특성에 대한 이해가 필요하다.

1.4. 연구의 목적

따라서, 본 연구는 조선사업장에서 사용되고 있는 비난연성·난연성·고난연성 단열재를 건조작업에서 사용되는 화기작업방법을 이용하여 각 제품의 연소특성 을 살펴보고자 한다. 또한 새로운 난연성 단열재 개발시 적용된 'DIN 4102 B2' 에 의한 연소실험, 발화원의 종류·거리·실험체의 설치 방향 등 조건에 의한 단열재의 연소특성 및 난연성 단열재의 연소 범위 제어 및 자기소화성능을 비 교해 보고자 한다. 이 실험을 통해 선박용 단열재로 사용되고 있는 폴리우레탄 의 연소특성을 비교함으로써, 선박 건조 작업장에서의 예방적 안전기준 정립과 화재 등 사고조사활동에 기초자료로 활용될 수 있기를 기대한다.

TH OT

З

2. 이론적 배경

2.1. 선박용 폴리우레탄 폼 단열재의 화재사례

최근 LPG 운반선 건조 작업 중 용접 불티에 의해 발생된 아래의 화재사례는 선박 건조 작업장의 화재 위험성을 단적으로 설명해 준다. 2년간 4건의 화재로 인명피해 20명(사망 5, 부상 15), 재산피해 18,961,011천원의 피해가 발생했다.

2.1.1. 2014. 4. 21. H중공업 LPG 운반선 화재

- ▶ 원 인 : 용접 불티로 인한 선박 단열재에서 화재 발생
- ▶ 장 소 : 선박 내부 선수 우현 LPG 탱크 홀더 내부
- ▶ 피 해 : 인명피해 3명(사망 2, 부상 1), 재산피해 137,843천원

2.1.2. 2015. 8월 ~ 2016. 1월 D조선 LPG 운반선 화재[5개월 내 3건]

- ▶ 원 인 : 용접 불티로 인한 선박 단열재에서 화재 발생
- ▶ 장 소 : 선박 내부 LPG 탱크 홀더 내부
- ▶ 피 해 : 인명피해 17명(사망 3, 부상 14), 재산피해 18,823,168천원



[사진 1] H 중공업 LPG 선박 화재사고.



[사진 2] D 조선 LPG 선박 화재사고.

2.2. 선박건조작업의 공정

대규모 선박 제조사에서는 생산성 향상을 위해 선박의 각 부분을 블록 단위로 제작하고, 단위 블록을 연결해 나가는 과정으로 운영하고 있다. 선박 건조 작업 장의 특성을 이해하기 위하여 '선박 건조 과정에서 블록 대형화 시스템이 생산 성 향상에 미치는 영향에 관한 연구'에 따라 대표적 과정을 간략히 소개하고자 한다.



[그림 3] 선박 건조 작업 절차.

《※ 출처 : 선박 건조 과정에서 블록 대형화 시스템이 생산성 향상에 미치는 영향에 관한 연구》

2.2.1. 선행탑재(P.E : Pre-Erection)

선행탑재는 도크의 탑재 효율을 높이는 방안으로 고안된 조립과 탑재의 중 간 공정으로서 조선소의 운반 장비용량의 사정에 따라, 도크 주변(Pre-erection area : 선행탑재장소)에서 이미 공장내에서 제작된 두 개 이상의 선체 블록과 이들이 구성하는 공간에 설치되는 의장품 등이 함께 설치되어 하나의 대형 또는 초대형 블록(Grand block or super grand block : MEGA & GIGA)의 구조물 로 구성되는 도크 탑재전의 공정이다. 현재는 블록 대형화 개발로 인한 도크 이용률을 획기적으로 향상시켜 생산성을 높이고 있다. 선행탑재가 완성된 후 의 최대 탑재 중량은 조선소 크레인 용량에 따라 달라지며, 전체 의장의 약 95 %에 해당하는 선행의장이 완성된다.



[[]사진 3] 대형 원유운반선 블록 제작. [사진 4] 대형 선박 블록 이동.

2.2.2. 도크탑재(Dock erection)

전체 선박의 건조 기간 중 1/4을 차지하는 중요한 공정으로서 선체건조의 마 지막 단계이다. 건조 도크의 이용률을 높이기 위한 방안으로 세미탠덤 (Semi-tandem) 건조 방식과, 특히 최근에는 블록 대형화를 개발하여 도크 회 전율을 크게 향상시킬 수 있는 탑재공법이 적용되고 있다. 모듈 생산, 블록 대형화 등 일부 공법들이 차세대 생산 방식으로 인정을 받고있으며, 모듈 생 산 방식의 기술을 개발하여 블록의 모듈화를 통해 용접 및 가공 시간의 단축 등 공수를 줄이고, 자동화 도입을 용이하게 하여 생산성 향상에 크게 기여하 고 있다.

2.3. 단열재의 화재위험성

건축물 및 설비의 단열을 위해 설치되는 단열재는 불연성 재질과 가연성 재질 로 구분되며, 가연성 재질의 경우 불티 등 소규모의 열원과 접촉하여도 쉽게 착 화될 수 있다. 일반적으로 폼과 같이 단열재 내부에 공기층이 형성된 단열재는 동일한 물성을 가진 원료로 제작된 제품이더라도 밀도가 높은 무거운 것보다 밀도가 낮은 가벼운 것이 쉽게 착화되고 급격한 연소가 될 수 있다. 즉, 산업현 장에서 사용되고 있는 폴리스틸렌, 폴리우레탄 등은 상대적으로 밀도가 낮아 가 법고, 작업이 용이한 단열재이지만 화재의 위험성이 높은 물질이라 할 수 있다.

『산업용 단열재의 연소위험 특성에 관한 실험적 연구』에서 소규모 화원에 의한 단열재의 착화위험을 다음과 같이 정리하고 있다.

재 료			점	화 원	
		성냥불	담배불	Hot Plate	가열된 전선
불연성 제품		착화되지 않음	착화되지 않음	착화되지 않음	착화되지 않음
Urea Forr	naldehyde	착 화	착화되지 않음	탄 화	착화되지 않음
Phenol Formaldehyde		착화되지 않음	훈 소	탄 화	훈 소
Polyurethane		착 화	착화되지 않음	탄 화	착화되지 않음
A Grade		착화되지 않음	착화되지 않음	착화되지 않고 연기방출	착화되지 않고 용융
bead	N Grade	착 화	착화되지 않음	착화되지 않고 연기방출	착화되지 않고 용융
Polyisocyanurate		착화되지 않음	착화되지 않음	연기방출/탄화	착화되지 않음
셀룰로우스 섬유		착화되지 않음	착화되지 않음	착화되지 않음	훈 소

[표 1] 소규모 화원에 단열재의 착화위험특성

단열재의 화재 위험성은 위 표와 같이 작은 점화원에 의해서도 착화될 수 있 다는 점이다. 예를 들면, 폴리우레탄 폼의 분해 온도는 200 ℃ ~ 300 ℃이며 분해가스의 발화온도가 낮아 가스화와 동시에 발화하는 등 화재시 급속한 연소 확대의 위험성이 높다. 또한 화재시에는 검은 연기와 함께 '표 2'와 같은 유해가 스를 발생시켜 작업자들의 자력탈출 가능성을 낮추며 발생가스에 질식되어 사 망하는 사례가 많이 발생하고 있다. 특히, 밀폐 구획실과 같은 선박 건조 작업 장에서의 단열재의 연소는 유해가스에 의한 위험요인을 증가시키게 된다. 단열 재의 화재시 발생된 유해가스는 인체에 유해성을 가지는 것은 물론, 가연성을 가진 물질로 화재의 확산속도 및 연기발생량을 증가시킬 수 있는 독립된 가연 성 물질로서의 역할을 할 수 있다.

발생물질	폭발범위	위험도	인화점	자연발화	증기밀도	비고
일산화탄소(CO)	12~74 %	5.16	자료없음 (인화성)	605 ℃	0.97	사고대비물질
시안화수소(HCN)	5.5~46 %	7.36	-18 ℃	535 ℃	0.94	사고대비물질
벤 젠(C ₆ H ₆)	1.2~8 %	5.66	-11 ℃	498 °C	2.8	사고대비물질
이소시아네이트	1.3~10 %	6.69	11 ℃	자료없음	3.4	-

[표 2] 폴리우레탄 폼 분해시 발생되는 물질의 폭발범위 등

※ 참 조 : 2012. 일본 소방청. 화재 연소생성물의 독성 자료 및 안전보건공단(화학물질정보)

일반적으로 화학합성물 단열재는 가연성으로 무기단열재 및 동식물 단열재에 비해 화재 발생이 쉽고, 연소 속도가 빠르며, 열에 의한 분해율이 높다. 특히, 폴리우레탄·폴리스티렌 폼은 작은 점화원에 의해서도 쉽게 착화될 수 있으며, 화재의 전파속도가 빠르고 연기의 발생량이 많아 화재의 피해를 확대시키는 요 인이 된다. 이러한 단열재는 화재위험성에도 불구하고 산업현장 및 생활공간에 서 광범위하게 사용되고 있어, 가연성 단열재의 화재안전성능을 확보하는 등 안 전기준이 필요하다.

2.4. 국제적 난연시험기준

난연시험방법은 산소지수측정·연소속도·연소시간 및 연기발생 정도를 측정 하며, 각 국은 자국 규격을 가지고 있거나 전세계적으로 통용되는 국제기준을 준용하는 방법을 사용하고 있다.

구 분	건축분	0‡	자동차선박비행기		
이국 ASTM E8484 이국 ASTM E119 ASTM 2843		연소성 연기발생측정	FMVSS FAR SOLAS(1974) ASTM E 162	자동차 내장재 항공기 내장재 선박 방화구조	
케나다	ULC-CAN4S-101 -M82ULC-S102-M83	건축재 내화시험 포면연소시험	SOLAS	선박 방화구조	
독 일	DIN 4102 DIN 18230 DIN 18231	비닐재료 내화성 공장건물 내화성 건축구조 내화성 FAR part 23		항공기 내장재 선박용 재료 차량 내화성 항공기용 재료	
영 국	BS 876 part 4 BS 876 part 7 BS 876 part 11 BS 2782	불연재료 시험 표면연소 시험 열 발생 시럼 플라스틱 시험	BS 6583 SOLAS	차량 선박용	
일 본	JIS A 1321 JIS A 9511	건설성 고시 제1231호	JISD 1201 FMVSS 302	자동차 내장재	
한 국	KS F ISO 1182 KS F 2271 KS F ISO 5660-1	건축재료 불연성 가스유해성시험 열방출률시험	III	_	

[표 3] 국제적 난연시험기준

우리나라의 난연성능에 관한 기준은 건축물 화재시 내장재의 유독가스 발생 및 화재확산을 방지하여 인명 및 재산을 보호하기 위해 『건축물 마감재료의 난연성능 및 화재확산 방지구조 기준』으로 정하고 있으며, 가스유해성시험(KS F 2271 : 2006), 열방출률시험(KS F ISO 5660)의 방법을 사용한다. 그러나 선박 은 국제해사기구에 의한 'FTP Code'¹⁶⁾에 의한 선박내장재·부재의 난연·내화 성를 요구하고 있다. 그러나, 선박 내 화물탱크 등에 설치되는 단열재의 경우 난연성능에 관한 일반적 기준이 없는 상태이다. 이로 인해 조선산업 현장에서는 단열재의 난연성능 측정을 위해 독일 건축재료의 난연성능시험 기준인 'DIN 4102'를 적용하고 있다.

2.5. 독일 'DIN 4102'에 의한 난연성능 등 시험기준

2.5.1. DIN 4102 화재테스트의 거동표준

Class A	A1	Non-combustible Materials	Class A2 + 관련 시험규격 충족
	A2	(불연성 자재)	DIN 4102-16 + 관련 시험규격 충족
Class B	B1	Not Easily Flammable (불꽃 연소가 용이하지 않음)	DIN 4102-15에 지정된 장비를 사용한 DIN 4102-16 시험요건 충족
	B2	Flammable (불꽃 연소함)	DIN 66081을 충족하고 Class 2 요건 충족
	B3	Easily Flammable (쉽게 불꽃 연소됨)	

2.5.2. DIN 4102 B2 Class 시험

가) 적용분야 : DIN4102-1이 적용되는 독일의 건축재료 등급(B2 등급)

나) 시 험 체

Complete Test,	10 test specimens with the dimension 90 mm x 230 mm
10 Tests	and 5 test specimens with the dimension 90 mm \times 190 mm.
Indicative Test,	2 test specimens with the dimension 90 mm x 230 mm
2 Tests	and 1 test specimen with the dimension 90 mm \times 190 mm.

2.5.3. DIN 4102(Class B2) 시험기준

가) 연소 시작점으로부터 높이 150 mm 지점에 기준선 표시, 수직방향 고정

- 나) 시편 밑면 가장자리에 20 ㎜의 불꽃(500 ℃)을 15초간 시편표면에 접촉
- 다) 불꽃 차단 후 20초간 150 mm 이내로 타면 B2 Class 획득



[그림 2] DIN 4102, B2 Class 시험장치 (연소 불꽃 높이 측정).

2.6. 선박건조작업 중 단열재의 시공

2.6.1. 액화가스 운반선에서의 단열재 사용

선박은 화물을 적재하고 물 위에서 부양하고 자력으로 추진할 수 있는 동력장 치를 갖춘 구조물로, 선원이 일하며 살 수 있는 거주시설과 사고를 대비한 인명 구조설비를 갖추는 등 일반건축물과 유사한 특징을 가지고 있다. 또한 선박 내 부와 외부 온도차이에 의해 에너지 손실은 물론 결로현상으로 인한 수송물품의 품질 저하 등의 문제점이 발생될 수 있어, 사용목적에 따라 무기질 및 화학합성 물 단열재가 선택적으로 사용된다.

화학합성물 단열재가 사용되는 선박의 경우 제조 현장에서 부분적 발포작업 또는 단열재 판넬 부착 후 용접 등 화기취급 작업방식에 의해 화재의 위험요인 이 높은 특성을 가진다. 이와 같은 화학합성물 단열재가 선박 주요구조부에 시 공되는 대표적 선박은 LPG 운반선과 같은 액화가스 운반선을 들 수 있으며, 단 열재의 종류와 시공 특성을 비교하면 다음과 같다.

구 분		LEG 운반선	LPG 운반선	
단열	단 열 재	폴리스티렌 폼 (발포두께 230 mm)	폴리우레탄 폼 (발포두께 120 mm)	
재질	커버	Stainless Steel Sheet (0.5 mm)	POLYMERIC COATING (0.5 mm)	
	대기온도	45 °C	45 °C	
온도	최대수온	32 °C	32 °C	
	탱크설계온도	−104 °C	−50 °C ~ − 55 °C	
시공방법		단열재 판넬 선 제작 후 현장부착방법 • General : Attach with GLUE • Anti Floating : PU Injection	폴리우레탄 폼 현장 발포 방법 ► General : PU Spray	

[표 4] LEG · LPG 운반선의 단열재

※ LNG 운반선 : 폴리우레탄 폼 단열재를 판넬로 제작하여 현장부착하는 방법으로 시공



[사진 5] LEG 탱크에 선 제작된 단열재 판넬을 현장에서 탱크 표면에 부착.



[사진 6] LPG 탱크 표면에 폴리우레탄 폼을 120mm 두께로 직접 발포 시공.

2.6.2. LPG 선박에서의 단열재 시공방법(현장작업방법 중심)

LPG 운반선은 액화된 프로판 가스의 액상 상태를 유지해 운반 중 기화로 인한 손실을 막기 위해 탱크의 단열작업이 중요한 선박으로, LPG 운반탱크의 보온 작업은 탱크 제작 후 별도의 작업공간에서 외부에 단열재를 도포한 뒤 선박에 안착시키는 방법으로 진행된다. 액화가스 운반탱크의 단열을 위한 작업은 현장 발포작업의 용이성 및 단열재 접합부가 없어 결로의 위험이 적은 장점이 있는 폴리우레탄 발포 방식이 적용되며, 이러한 작업은 다음의 순서로 진행된다.

(1) 사전준비단계 및 표면처리

폴리우레탄 폼의 탱크 표면 접착력 향상을 위한 프라이머 도장(Primer, 밑 칠페인트)·폴리우레탄 폼 보호를 위한 코팅제 등 재료물질에 대한 시험성적 서를 확인하고, 발포장비의 시험 등 정상적 물질 혼합을 위한 계기류 점검 및 작업보류구간 등을 지정한다. 탱크 표면의 불량한 페인트 상태, 녹, 먼지, 기름 등의 오염물은 단열재의 접착력을 저하시키는 요인으로, 작업 전 검사 를 통해 그라인더 작업 및 세척 작업 등으로 오염부위를 정리한다. 또한 발 포 범위에 대한 경계를 설정하고 탱크별로 보양작업 및 단열재로 인한 오염 이 예상되는 구간은 비닐포 등을 이용하여 보호조치를 진행한다.

(2) 프라이머 도포

프라이머는 탱크의 표면과 폼의 접착력을 좋게 하기 위해 도포하며, 도포막 의 두께는 페인트 종류에 따라 분무형태로 시공한다.



[사진 7] 단열재 혼합장치.

(3) Spray Foaming

스프레이 장비를 이용하여 단열재 원액인 Polypropriene Glycol과 경화재인 Methylene Diphenyl Diisocyanate를 표면에 도포하는 작업을 실시한다. 이 경우 작업장의 온도와 습도가 발포 성능에 영향을 미치며, 일반적으로 탱크 표면온도가 최소 5 ℃ 이상이고 이슬점보다 주변 온도가 3 ℃ 이상일 것을 작업 환경 조건을 정하고 있다. 폴리우레탄 폼은 단계별로 탱크표면에 고정 되도록 발포하며, 단열조건에 의한 두께로 높여가는 작업으로 다음과 같이 진행된다.

[표 5] 단열재 시공 작업

작업단계	주요 작업내용
1st Foam Spray	 ▶ 프라이머 도장 위에 폼을 처음으로 도포하는 공정(두께 1~2 mm) ▶ 우레탄 폼과 탱크 표면과의 접착력을 높이기 위해 도포하는 과정
2nd Foam Spray	▶ 초벌 도포에서 5~10 ㎜의 두께로 폼의 기본형태를 확보하는 과정
Main Foam Spray	 ▶ 단열을 위한 두께인 120 mm를 형성시키기 위한 작업 단계 ▶ 폼 층은 두께 20~35 mm씩 수차례 반복 도포하는 과정
Final Foam Spray	 ▶ 표면검사(육안검사 및 두께측정)를 실시 ▶ 단열재의 두께 부족 부분 보완 작업 실시하는 단계



[사진 9] 폴리우레탄 폼 발포 작업.

[사진 10] 단열재의 발포 밀도 측정.

(4) Sanding

Final Foaming 전 단열재 처리면이 불규칙하여 코팅제 도포시 문제가 발생 할 수 있는 부분을 Sanding 작업으로 사전에 제거하는 공정이다.

(5) Coating 및 Sealing

코팅제는 폴리우레탄 폼을 외부로부터 보호해 주는 역할을 하며, 일반적으 로 사전점검 및 시공방법은 우레탄 폼의 도포작업과 유사하다. Sealing은 폴 리우레탄 폼 단열재의 핀홀 발생 부위 보수작업으로 단열재와 동등 이상의 자재를 사용하여야 한다.



[사진 11] Sanding 작업.

[사진 12] 단열재 마감 작업.



[사진 13] LPG 탱크 단열재의 층 구조.

《※ 출처 : 경남신문(2016.07.05.) '현대중, LPG 운반선에 '고난연성 단열재 최초 적용》¹⁵⁾

LPG 운반탱크의 단열재는 위 사진과 같이 강재의 표면에 부식방지제를 도포 하고 폴리우레탄 폼을 발포하고, 발포된 폼을 보호하기 위해 폴리메릭코팅제를 도포하는 방식을 시공된다. 현재 폴리우레탄 폼은 DIN 4102 B2 Class의 제품이 사용되고 있다.

2.7. 선박용 폴리우레탄 폼의 난연성능 검토

2.7.1. 선박 단열재의 대표적 난연화 방법

선박 단열재의 난연화에 관한 연구는 폴리우레탄을 중심으로 수행되고 있다. 이는 PPG와 MDI 합성 과정에 난연재를 첨가하는 방법으로 다양한 물성의 제 품을 개발하기 용이하며, 폴리우레탄의 기본적 성질의 변형이 적기 때문이다. 이러한 난연성능 개선을 위한 연구는 폴리우레탄의 단열성능을 유지를 전제 조 건으로 함으로 난연성능과 단열성능의 최적화를 모색해가는 과정으로서 의미를 가지고 있다 할 수 있다. 이를 위해 인계 난연재 및 무기계 난연재를 중심으로 개발되고 있으며, 인계 난연재를 혼합한 폴리우레탄 폼의 발포시 단열성능이 일 부 저하되는 점 및 제조 비용이 무기계 난연재에 비해 비싸다는 점에서 인계난 연재의 활용성은 낮은 상태이다.

2.7.2. 폴리우레탄 폼의 난연화 실태

폴리우레탄 폼은 다른 단열재에 비해 단열성(0.021 kcal/m・h・℃)과 방수성능이 우수하여 LPG 운반선 등에서 많이 사용되나, 작은 화원에 의해서도 쉽게 발화 되고 시안화수소 등 독성 연소가스를 방출하여 건조 중 선박 화재시 피해를 확대하는 원인이 되어 왔다. 폴리우레탄 폼은 시공은 탱크 표면에 일정 두께 이상으로 단열재를 발포 시공하고, 단열재의 손상을 막기 위해 표면에 코팅작 업을 실시하는 방법으로 수행된다. 현재 폴리우레탄 폼의 난연화는 DIN 4102 B2 Class의 인증을 받은 제품은 물론, 단열재가 직접 연소되는 경우에도 4 분 이내 자기소화능력과 용융물의 생성을 제어하는 성질을 가진 고난연성 단열재 가 개발되어 현장에 도입되고 있다.

구 분	인 증 범 위
자기소화시간	4 분 이내
용융깊이	용용깊이 20 mm 이하 (3회 실시 후 평균 용융깊이로 선정)
탄화면적	200 mm(W) X 135 mm(L) 이하
화염퍼짐특성	엄격하게 화염퍼짐을 제한

[표 6] 고난연성 단열재의 시험기준





자기소화시간 측정 (4 분 이내)

용융깊이 (20 mm 이하)

[사진 14] 고난연성 단열재의 시험방법.

건축재료의 난연성능에 관한 시험방법은 국내의 『건축물 마감재료의 난연성 능 및 화재확산 방지구조 기준』 및 독일 DIN 4102와 같은 기준이 있으나, 이 는 건축물의 마감재료를 규율 대상으로 하고 있어 선박용 단열재의 난연성능 의 기준을 제시할 수 없다. 또한, 선박 내 화물탱크의 단열재는 국제해사기구 (IMO)에 의한 내화성능을 가진 마감재의 사용이 필요한 대상도 아니며, 독일 SCH SV Part 등 선박의 난연성능 기준도 단열재에는 적용되지 않는다. 즉, 선박에서 사용되는 폴리우레탄 단열재에 관한 난연성능에 대한 직접적인 시험 방법은 없다. 그러나, 공해상을 운항하는 선박은 국제법에 따라 국제적으로 인 증된 기준을 준용할 수 있다는 규정에 따라, 독일 건축재료 난연성능시험 방식 인 DIN 4102에 의한 시험방법을 준용하고 있는 실정이다.

국내에서 난연재료로 인증받기 위해서는 화재시 유독가스의 발생 및 화재확 산 방지를 위한 '가스유해성시험 및 열방출률시험 '에 의하지만, 'DIN 4102'는 실험체를 수직으로 설치하고 하단부에서 불꽃의 직접 접촉방법에 의한 "연소 확산"을 제어하는 성능을 시험하고 있다.

17

3. 실험장치 및 실험방법

3.1. 실험 조건

○ 온·습도 : 자연적 기상상황에 의함

○ 장 소 : 용접작업장 등 실내로 하되 무풍상태의 유지가 가능한 장소

○ 배출설비 : 열분해된 유해가스를 배출하기 위해 배출설비가 설치된 장소

3.2. 실험재료

LPG 운반탱크에 발포되는 폴리우레탄 폼은 탱크표면의 단열을 위한 두께인 120 mm로, 발포밀도 40 kg/m³가 되도록 수차례 반복 도포하는 방법으로 시공된 다. 따라서, 폴리우레탄 폼 단열재 연소실험에 사용될 실험체는 발포밀도 40 kg/ m³을 기준으로 하며, 원활한 실험을 위해 60 mm의 두께로 제작하여 시편을 다음 과 같이 준비하였다.

실험재료	구 분	<mark>시료밀도</mark> (kg/m³)	<mark>시료크기(mm)</mark> [W X D X H]	제작 수량	ב וו
실험체 1	단열재	40±4	200 X 200 X 60 500 X 500 X 60	57 3	ньюм
실험체 2	단열재	50±4	200 X 200 X 60 500 X 500 X 60	57 3	0228
실험체 3	단열재	40±4	200 X 200 X 60 500 X 500 X 60	57 3	난연성 (DIN4102, B2)
실험체 4	단열재	40±4	200 X 200 X 60 500 X 500 X 60	57 3	고난연성 (B2 + 자기소화성)

[표 7] 실험체의 특성 및 크기 등

[표 8] 연소 실험별 시편 제작 수량

	실험체 수직설치				실험체 수평설치				
실험재료	1.0 m	0.5 m	0.3 m	0.1 m	절단기	그라 인더	금속판	접염	시료수
실험체 1	12	12	12	12	3	3	3	3	60
실험체 2	12	12	12	12	3	3	3	3	60
실험체 3	12	12	12	12	3	3	3	3	60
실험체 4	12	12	12	12	3	3	3	3	60

3.3. 실험방법

선박 단열재 연소특성 실험은 단열재의 난연성 인증을 시험하기 위한 것이 아 니라 제품별 연소특성을 분석하기 위한 실험으로 앞선 'DIN 4102 B2 Class'에 대한 국내 기준 적용 검토와 달리 '조선산업 현장에서 일반적으로 사용하고 있 는 난연성능 유무에 따른 용어를 사용'하고자 한다. 실험체는 ① 일반적인 폴리 우레탄 폼(밀도차 2종) ② 난연성 폴리우레탄 폼(1종) ③ 고난연성 폴리우레탄 폼(1종)으로 구분한다. 발화원은 실제 LPG 운반선 화재사례와 유사한 발화조건 을 조성하기 위해 산소절단기·그라인더 불티로 연소특성을 비교하고, DIN 4102 B2 Surface Ignition(화염 직접접촉) 실험 및 가열금속판 낙하실험으로 연 소속도 및 탄화면적 등의 연소 특성을 비교하기 위한 연소실험을 진행하였다.

[표 9] 선박용 단열재 연소 실험을 위한 주요 시험내용

발 화 원	실험내용	시 혐 방 법
산소절단기	 한화원에 의한 발화 가능성 알화시 독립연소시간 독립연소 후 잔연시간 특성 불꽃 및 표면온도 측정 	▶ 실제 화재 관련 불티 비산 실험
그라인더	 한화원에 의한 발화 가능성 알화시 독립연소시간 3 독립연소 후 잔연시간 특성 실 불꽃 및 표면온도 측정 	▶ 실제 화재 관련 불티 비산 실험
가열금속판 (800 ℃ 이상)	 실험체 관통실험 용융 깊이 독립연소시간 및 잔연시간 (전소여부 및 전소시간) 탄화면적 측정 자기소화성 비교 실험 	 ▶ 고난연성 단열재 실험 - 800 ℃로 가열된 철편 단열재 표면에 접촉시 불꽃 연소시작부터 불꽃연소 종료까지의 시간이 4 분 이내 - 화염 접촉시 용융깊이가 20 mm 이하 - 화기 손상영역 200 mm x 135 mm 이하
화염 직접 접촉	① 불꽃 연소높이 비교 ② 자기소화성 비교실험	 ▶ DIN 4102 B2 SURFACE IGNITION 실험 - 연소 시작점으로부터 높이 150 mm 지점에 기준선을 표시한 후, 수직방향으로 거치대에 고정 - 시편 밑면 가장자리에 20 mm의 불꽃(500 ℃)을 15 초간 점화시켜 시편표면에 접촉 - 불꽃 차단 후 20 초간 150 mm 이내

3.4. 발화원

최근 선박 건조 작업장에서는 불티가 직접적으로 비산되지 않는 이산화탄소 용접기를 주로 사용하고 있어, 기존의 용접 작업과 유사한 불티 비산 형태를 나 타내는 가스절단기를 이용한 용단 작업과 선체 내부 마감 작업시 빈번히 사용 되는 그라인더 불티를 발화원으로 선정하였다. 또한, 용융물이 작업장소 하부에 집적되는 상황을 위해 가열된 금속판(800 ℃)을 발화원으로 추가 선정하였다. 각각의 발화원에 대하여 다음과 같은 실험을 위해 실험체를 수직 또는 수평으 로 설치하고 발화원과 직접 접촉시키는 방법으로 실험을 실시한다.

발 화 원	장비의 종류	실험목적
절단기 불티	산소절단기 (LPG + 산소)	용단 불티 용접 불티로 인한 단열재의 연소 여부 및 재연 실험
그라인더 불티	그라인더	그라인더 불티로 인한 단열재의 연소 여부 및 재연 실험
가열 금속판 (800 ℃ 이상)	100 X 35 X 10 mm	800 ℃ 이상으로 가열된 추를 낙하시켜 실험체의 관통성 및 연소특성 실험[손상영역 및 용융깊이 측정 등]
직접 화염 접촉	산소절단기	직접 화염 접촉시 연소특성 실험

[표 10] 연소 실험을 위한 발화원의 종류



[사진 15] 가스절단기.

[사진 16] 그라인더.

[사진 17] 가열금속판.

3.5. 연소특성 실험 내용

선박 단열재 연소실험은 산업현장에서 사용 중인 폴리우레탄 폼의 난연성능에 따라 실제 작업에서 접촉 가능한 발화원과 유사한 조건에 따라 실험을 수행한 다. 실제 단열재는 수직부분과 수평부분으로 시공되며, 시공되는 방향에 따라 발화원이 표면에 닿는 면적·시간 등의 조건이 달라질 수 있어 실험체를 수 직·수평의 방법에 따라 구분하여 실험조건을 지정했다. 특히, 발화원은 강재를 용접·절단하는 작업의 조건과 유사한 '① 산소절단기 ② 그라인더(회전 절단 기) ③ 가열 금속판(용융물의 낙하 상황 가정) ④ 화염의 직접 접촉'의 방법을 적용하여 조건별로 발화시간, 독립연소시간, 탄화면적 및 용융깊이 등의 연소특 성을 다음과 같이 실험하고자 한다. 실험체 세트는 비난연성 실험체 1·2 및 난 연성 실험체 3·4 각 1점을 1세트로 구성하여 동일 조건에서 실험한다.

발화원	실험내용	시 료 수 량	비고
산소 절단기	 1) 발화원에 의한 발화 가능성 2) 발화시 독립연소시간 3) 독립연소 후 잔연시간 특성 ④ 불꽃 및 표면온도 측정 	<수직설치> [발화] 거리별 4 회 X 발화원(절단기) = 4 세트 [용융] 거리별 2 회 X 발화원(절단기) = 2 세트 <수평설치> [발화] 0.5 m X 발화원(절단기) = 1 세트 [용융] 발화원(절단기) X 1 세트 = 2 세트	9 세트
그라 인더	 1) 발화원에 의한 발화 가능성 2) 발화시 독립연소시간 3) 독립연소 후 잔연시간 특성 ④ 불꽃 및 표면온도 측정 	<수직설치> [발화] 거리별 4 회 X 발화원(그라인더) = 4 세트 [용융] 거리별 2 회 X 발화원(그라인더) = 2 세트 <수평설치> [발화] 0.5 m X 발화원(그라인더) = 1 세트 [용융] 발화원(그라인더) X 1 세트 = 2 세트	9 세트
가열 금속판	 ① 실험체 관통실험 ② 용융 깊이 ③ 독립연소시간 및 잔연시간 (전소여부 및 전소시간) ④ 탄화면적 측정 ⑤ 자기소화성 비교 실험 	<수평설치> [용융형태 등] Jig 낙하 X 3 회 = 3 세트	3 세트
화염 직접 첩촉	① 불꽃 연소높이 비교 ② 자기소화성 비교실험	<수평설치> [용융형태 등] 화염 접염 X 3 회 = 3 세트	3 세트

[표 11] 실험 내용별 시료의 설치방법 및 수량

3.6. 실험장비 목록

폴리우레탄 폼 실험체간의 연소특성을 실험하기 위해 다음과 같은 실험장비를 활용한다. 실험장비는 소방기본법 제29조(화재의 원인 및 피해조사) 및 동법 시 행규칙 제12조 제4항(화재조사장비)에 의한 화재조사장비를 사용한다.

구 분	수량	사 용 목 적
실체현미경	1	절단기, 그라인더 등 발화원과 단열재의 접촉 부분 표면 촬영
버니어캘리퍼스	1	불티의 크기 및 단열재 용융 깊이 등 측정
U형 자석	1	용융 불티 등 표본 수거
디지털카메라	2	연소실험 상황 기록
거리측정기	51	실험체와 불티와의 거리 조정 등
초시계	2	연소실험 상황 기록
온도·습도계	21	연소실험시 주변 기상상황 측정
적외선열화상카메라	1	단열재 열축적 및 연소상황 기록
접촉식 표면온도계	1	연소실험시 실험체 표면온도 및 강철 금속판 가열시 온도 측정
탄화면적측정기	1	단열재의 연소 범위 측정용(방염성능 측정장비)
보호용 작업복	2	연소실험시 개인 보호용
보호용장갑	2	연소실험시 개인 보호용
안전화	2	연소실험시 개인 보호용
안전모	2	연소실험시 개인 보호용
마스크	2	연소실험시 개인 보호용
보안경	2	연소실험시 개인 보호용

[표 12] 실험장비 목록

3.7. 단열재 연소특성 실험방법

3.7.1. 수직 설치 실험체의 연소실험

(1) DIN 4102 B2 Class 적용 실험

- ▶ 실험목적 : DIN 4102 B2 Class 적합성 및 실험체간 연소특성
- ▶ 실험방법 : DIN 4102 B2 Class 시험방법 준용
 - 연소시작점에서 높이 150 mm 지점에 기준선 표시 후, 수직방향으로 고정
 - 시편 밑면에 20 ㎜의 불꽃(500 ℃)을 15 초간 접촉 후 시편 표면 접촉
 - 불꽃 차단 후 20 초간 150 mm 이내로 연소

(2) 측방향 발화원으로 인한 발화 가능성 실험

- ▶ 실험목적 : 실험체와 발화원과의 거리에 따른 발화시간 비교
- ▶ 실험방법 : 거리와 발화에 필요한 소요시간 측정
- ▶ 발 화 원 : 산소절단기 및 그라인더에 의한 불티
- ▶ 이격거리 : 1.0 m, 0.5 m, 0.3 m, 0.1 m
- ▶ 불티 발생 시간 : 1 회당 30 초 / 10 초 간격으로 20 회 실시
 □ 측정사항 : 불티 접촉 횟수 및 발화까지 소요된 시간(초)

(3) 측방향 발화원으로 인한 발화시 독립연소시간

- ▶ 실험목적 : 발화원과의 거리에 의한 독립연소시간에 미치는 영향 비교
- ▶ 실험방법 : 발화부터 독립연소 상태가 그칠 때까지의 시간
- ▶ 발 화 원 : 산소절단기 및 그라인더에 의한 불티
- ▶ 측정방법 : 열화상카메라 이용 열축적 상태 및 독립연소시간 측정
- ▶ 이격거리 : 1.0 m, 0.5 m, 0.3 m, 0.1 m

▷ 측정사항 : 불티 접촉시 표면 열축적 상태 및 실험체의 독립연소시간

(4) 측방향 발화원으로 인한 발화시 잔연시간

- ▶ 실험목적 : 실험체별 독립연소 후 연기의 발생시간 비교
- 실험방법: 실험체가 독립연소 후 연기 발생상태가 그칠 때까지의 시간 (독립연소 없이 연기만 발생된 경우 연기발생시간을 잔연시간으로 함)
- ▶ 발 화 원 : 산소절단기 및 그라인더에 의한 불티
- ▶ 이격거리 : 1.0 m, 0.5 m, 0.3 m, 0.1 m

▷ 측정사항 : 독립연소가 종료된 때부터 연기 발생이 그칠 때까지의 시간

3.7.2. 수평 설치 실험체의 연소실험

(1) 수직방향 발화원으로 인한 발화 가능성 실험

- ▶ 실험목적 : 수평 설치된 실험체의 발화시간 등 비교
- ▶ 실험방법 : 발화원에 의한 발화 속도 및 연소면적·연소시 관통성 비교
- ▶ 발 화 원 : 산소절단기 및 그라인더에 의한 불티
- ▶ 발화원과의 거리 : 0.5 m
- ▶ 불티 발생 시간 : 1 회당 30 초 / 10 초 간격으로 20 회 실시
- ▶ 측정장비 : 탄화면적 측정기, 버니어캘리퍼스 등

▷ 측정사항

- 실험체별 발화원에 의한 발화 시간
- 독립연소 및 잔연 후 탄화면적 및 용융 깊이
- 고난연성 단열재의 자기소화능력 및 화기 손상영역 확산 특성

(2) 가열 금속판(Jig) 낙하실험

- ▶ 실험목적 : 800 ℃으로 가열된 금속판(Jig) 접촉시 연소 특성 비교
- ▶ 실험방법 : 가열 금속판의 직접 접촉시 용융 및 연소특성을 비교
- ▶ 금 속 판 : 가로 100 mm X 세로 35 mm X 두께 10 mm 금속판
- ▶ 가열온도 : 800 °C ± 10 °C(산소절단기로 직접 가열)
- ▶ 측정장비 : 접촉식 표면온도계, 탄화면적 측정기, 버니어캘리퍼스 등
 □ 측정사항 : 실험체 관통여부, 고난연성 단열재의 연소특성

발화원 공급 연기발생 불꽃연소시작 불꽃소멸 연기발생 종료	
연기발생소요시간 독립발화소요시간 독립연소시간 잔연시간	
3.8. 실험장치의 설치

실험장소는 바람 등 환경적 요인에 의한 실험변수를 최소화하고, 실험장 주변 에는 소화기 및 불티방지포 등 안전시설을 설치하였다. 또한, 실험체와 발화원 의 거리 등 실험조건을 실험장에 표시하여 실험체간의 실험 오차를 최소화할 수 있도록 실험장을 구성하였다.



[그림 3] 단열재 연소실험을 위한 실험장치의 설치.



[사진 18] 실험장치의 배치.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 기상상황

- 실험장소 : 배관 용접 작업실 [바닥면적 330 m² (지붕높이 3.5 m)]
- 풍향상태 : 무풍실 [출입구 2 개소(폐쇄), 배출장치 1 개소(정지)]
- ○날 씨
 - DIN 4102 B2 Class : 맑음, 실내 20 ℃, 습도 29 %
 - 수직 설치 실험체 실험 : 맑음, 실내 19 ℃, 습도 30 %
 - 수평 설치 실험체 실험 : 흐림, 실내 17 ℃, 습도 42 %

4.2. 수직 설치 실험체의 연소실험

수직으로 설치된 실험체에 수평방향으로 발화원을 공급하는 경우, 실험체별 발화시간 및 독립연소 특성 등 비교를 위한 연소실험을 실시하였다. 또한 발화 원별 불티가 실험체에 침투되는 깊이 및 실체현미경을 이용한 불티의 형태의 차이점과 수평 설치된 실험체와의 차이점을 고찰하였다.

4.2.1. DIN 4102 B2 Class 적용 연소실험

○ 실험목적 : DIN 4102-1 B2 Class 적합성 및 실험체간 연소특성 비교
○ 실험방법 : DIN 4102-1 B2 Class 시험방법
- 연소 시작점으로부터 높이 150 ㎜ 지점에 기준선 표시 후, 수직방향으로 고정
- 시편 밑면 가장자리에 20 ㎜의 불꽃(500 ℃)을 15 초간 시편 표면에 접촉
- 불꽃 차단 후 20 초간 150 ㎜ 이내로 연소

(1) DIN 4102 B2 Class 연소실험

구 분	실험체 1	실험체 2	실험체 3	실험체 4		
20초 이내 기준선에 도달되는지 여부	0	0	Х	Х		
불꽃의 자기소화능력(초)	Х	Х	〇 (16 초)	(15 초)		
최대불꽃높이(㎜)	기준 초과	기준 초과	148 mm	68 mm		



[사진 19] DIN 4102, B2 시험 결과.

L	1	실험	체 3		실험체 4					
E	1차	2차	3차	평균	1차	2차	3차	평균		
연소불꽃높이(mm)	148	146	147	147	74	75	55	68		
자기소화시간 (초)	17	15	16	16	16	17	12	15		

[표 13] 연소 불꽃의 높이와 자기소화시간 측정(DIN 4102 B2)



[그림 4] '실험체 3·4'의 연소불꽃의 높이 및 자기소화시간.

(2) 결과분석

'사진 19'와 같이 DIN 4102 B2 Class에 따라 실험체를 수직으로 설치하고, 하단 표면에 20 mm(500 ℃) 높이의 불꽃을 직접 접촉시켜 실험체별로 다음의 사항을 실험하였다.

① 실험체별 규정 높이(20초간 150 mm 이내)로 연소되는지 여부

② 실험체가 직접 불꽃 접촉되어 연소시 자기소화시간 측정

가. 'DIN 4102 B2 Class'에 의한 난연성 단열재

조선산업 현장에서는 일반적으로 'DIN 4102 B2 Class'의 제품을 난연성능 이 있는 제품이라 말하고 있지만, 앞서 살펴본바와 같이 국내 기준에 의한 난연성능(난연 3 등급)을 공인받지 못하여 가연성 물질로서 취급하는 것이 바람직할 것이다. 이는 열방출률시험 및 가스유해성시험에 적합한 폴리우레 탄 폼 단열재는 현재까지 개발되지 않았기 때문이다.

나. 난연성 폴리우레탄 단열재의 불꽃높이 제어 성능

DIN 4102 B2 Class 시험방법에 따른 연소실험결과, 일반적인 비난연성 폴 리우레탄 폼인 '실험체 1'(밀도 40 kg/m²), '실험체 2'(밀도 50 kg/m²)는 연소 시작점에서 500 ℃의 불꽃을 15 초간 접촉시킨 후 20 초간 연소된 높이가 150 mm를 초과하여 표면 전체가 탄화되어 실험체와 불꽃의 접촉면 전체가 빨리 연소되었다. 그러나, 난연성 단열재인 '실험체 3' 및 고난연성인 '실험체 4'는 '사진 19'와 같이 불꽃 차단 20 초 후 기준선인 150 mm 이내로 연소되었 다. '실험체 3'의 연소높이는 평균 147 mm로 '실험체 4'의 평균연소높이 68 mm 보다 2.16 배 높이 연소되어, 실험체의 난연성능에 따른 불꽃높이의 차이가 크게 나타났다.

다. 난연성 폴리우레탄 단열재의 자기소화성능

자기소화시간의 경우, '실험체 1·2'는 표면 전체가 연소된 후 소화되어 자기 소화시간의 의미를 부여할 수 없었으며, '실험체 3·4'의 자기소화시간은 '실험 체 3' 16 초, '실험체 4' 15 초로 큰 편차가 없음을 확인할 수 있었다. 연소높 이 및 자기소화시간의 차이는 '표 13' 및 '그림 4'와 같다.

이를 종합하여 볼 때, 단열재의 수직면과 닿는 불꽃에 의한 단위시간당 연소 높이는 실험체의 난연성능과 반비례하고 있으나, '실험체 3·4'의 자기소화시간 의 편차가 거의 없는 것을 볼 때 연소높이의 차이는 실험체의 독립연소시간 이 아닌 실험체의 연소속도와 직접 관련이 있는 것으로 보인다.

4.2.2. 측방향 발화원으로 인한 발화 가능성

\bigcirc	실험목적 : 실험체별 발화 가능거리 및 소요시간 실험
0	실험방법 : 실험체와 발화원의 거리이격에 따른 발화시간 측정
0	발 화 원 : 산소절단기 불티, 그라인더 불티
0	이격거리 : 1.0 m, 0.5 m, 0.3 m, 0.1 m / 발화원 발생 시간 : 1회당 30초
\bigcirc	발화원 발생 횟수 : 10 초 간격으로 20 회 실시(발화시 실험 종료)

(1) 산소절단기 불티에 의한 발화 특성 측정

시청궤		1.0 m		0.5 m		0.3 m	0.1 m		
걸입세	발화	발화시간	발화 발화시간		발화	발화 발화시간		발화시간	
실험체1	х	《연기발생》 12회/460초	0	11회/430초 《연기발생》 10회/380초	0	10회/370초 《연기발생》 7회/270초	0	6회/230초 《연기발생》 3회/110초	
실험체2	Х	《연기발생》 15회/590초	0	15회/580초 《연기발생》 10회/380초	0	13회/510초 《연기발생》 9회/350초	0	12회/470초 《연기발생》 5회/150초	
실험체3	Х	_ (불티자국)	0	19회/740초 《연기발생》 12회/460초	0	12회/470초 《연기발생》 9회/340초		11회/430초 《연기발생》 7회/260초	
실험체4	Х	_ (불티자국)	0	19회/750초 《연기발생》 14회/550초	0	16회/630초 (불티자국) 《연기발생》 13회/510초	0	15회/590초 《연기발생》 12회/460초	

[표 14] 측방향 산소절단기 불티로 인한 발화 가능성

(2) 산소절단기에 의한 발화 가능성

선박 건조 작업장에서 사용되는 발화원의 종류를 산소절단기 및 그라인더 작 업으로 인한 불티를 대표적 발화원으로 가정하여 실험하였다. 이는 최근 불티 의비산이 없는 이산화탄소 용접기의 사용이 증가하는 특성을 감안하여, 용접 봉에 의한 기존의 용접방식을 배제하고 산소절단기에 의한 용융 절단물 및 그라인더 불티에 의한 직접 접촉 실험을 실시하였다.

실험체는 바닥과 수직으로 설치하고 바닥과 수평되는 방향으로 불티가 비산 되도록 실험장을 준비하고, 용단 불티가 직접 실험체의 표면에 닿을 수 있도 록 하기 위해 『용접작업 현장의 화재발생 방지에 관한 연구』¹⁷⁾를 참조하여 다음과 같이 불티의 발생 높이를 조정하여 설치하였다.

실험체와의 거리(m)	1.0 m	0.5 m	0.3 m	0.1 m
절단 판재의 두께(mm)	10	10	10	10
불티 발생 높이(m)	800	500	300	200

[표 16] 절단 판재의 두께 및 불티 발생 높이

가. 측방향의 발화원에 의한 영향

실험체의 측방향에서 실험체 전면을 덮는 방사형으로 발화원을 공급하는 경우, 발화원과 실험체와 가까울수록 표면에 영향을 미치는 불티의 양이 증 가하고, 실험체가 충분히 열에 의해 가열되기 전에 비산된 불티는 실험체 표 면에 접촉시 '사진 20'과 같이 튕겨져 나오는 현상이 발생되었다. 불티 접촉 횟수가 증가할수록 표면에 침투되는 불티의 양이 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이는 가스절단기에 의해 가열된 불티가 수평방향으로 이동할 때.

① 실험체의 표면에 작용하는 발화원의 접촉 면적이 제한되고,

② 고밀도의 선박용 단열재(실험체 1·3·4 : 40 kg/m³, 실험체 2 : 50 kg/m³) 표면에서 튕겨져 실험 초기 불티가 실험체에 쉽게 침투되지 못하는 것이 관찰되었으며, 표면이 가열될수록 표면의 연소에 영향을 미치는 불티의 양이 증가하는 것으로 관찰되어 표면의 가열이 선행된 후에 불티가 단열 재의 내부로 침투되고 발화되는 것을 확인할 수 있었다.



[사진 20] 산소절단기 불티에 의한 표면온도의 변화.

나. 연기발생 및 독립발화 개시시간

산소절단기 불티와 실험체의 거리에 따른 실험체 표면의 연기발생 및 발화 시간의 차이는 '표 17'와 같이 거리에 따라 편차가 발생되었다. 실험체와의 거리에 따른 연기발생시간 및 독립연소 개시 시간은 이격된 거리가 멀수록 화재의 진행 속도가 늦어지고, 거리가 가까울수록 연기발생 및 독립연소현상 이 발생되는 시간이 짧아지는 공통적인 특성을 확인할 수 있었다.

Ξ	17]	거리에	따른	연기발생	및	독립연소에	소요되는	평균시간	(단위 :	호)
---	-----	-----	----	------	---	-------	------	------	-------	----

구 분	1.0 m	0.5 m	0.3 m	0.1 m
연기발생시간 평균 (실험체 1~4)	525 초	442 초	392 초	245 초
평균 독립연소시간 (실험체 1~4)	_	625 초	470 초	430 초



'표 17'와 같이 거리별에 의한 연소특성을 보면, 1.0 m의 거리에서 발화원 인 불티가 지속적으로 공급되는 경우에도 실험시간 중 독립된 발화현상이 없었으며 '실험체 1·2'에서만 불티를 공급하기 시작한 후 평균 525 초만에 표 면이 탄화되며 연기가 발생되었다. 0.5 m의 거리에서는 평균 442 초만에 연 기가 발생되고 독립된 연소에 필요한 평균시간은 625초가 소요, 0.3 m의 거 리에서는 평균 392 초만에 연기가 발생되고 독립연소에 필요한 평균시간은 470 초가 소요, 0.1 m의 거리에서는 평균 245 초만에 연기가 발생되고, 독립 된 연소에 필요한 평균시간은 430 초가 소요되는 것으로 관찰되었다.

다. 난연재 함유량에 의한 연소특성

실험체, 거리에 따른 연기발생 및 독립연소시간의 추이를 살펴보면 '그림 5 ~ 그림 6'과 같다. 실험체의 연기발생 및 독립연소 개시시간의 그래프를 볼 때, 실험체와 거리가 가까울수록 연소에 필요한 시간이 작아지는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 난연재가 함유된 실험체 경우일수록 동일한 거리에서 공 급되는 불티에 의한 화재 발생의 가능성이 낮아지는 경향을 보여준다.



[그림 5] 산소절단기 불티에 의한 연기발생 소요시간.



[그림 6] 산소절단기 불티에 의한 독립연소 소요시간.

실험결과를 보면, 산소절단기에 의한 연기발생 및 독립연소에 필요한 시간 은 거리가 가까울수록 짧아지며, 오른쪽 방향으로 하향되는 일반적인 특성을 보여주고 있다. 따라서, 발화원과 폴리우레탄 폼 단열재와의 거리는 연소현 상과 직접적인 관계가 있음을 보여주고 있다. 또한 난연재가 함유된 제품('실 험체 4〉실험체 3〉실험체 1·2'의 순)일수록 동일 거리조건에서 연기발생 및 독 립연소에 필요한 시간이 상대적으로 길게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 일반 폴리우레탄 폼 단열재는 난연재가 함유된 단열재보다 빨리 연소현상이 발생 됨을 알 수 있다.

이를 종합하여 볼 때, 폴리우레탄 폼 단열재에 함유된 난연재는 불꽃의 높 이 및 주변으로의 연소속도를 늦추는 능력을 가지고 있다. 또한, 실험체 표 면의 열축적에 의해 급격히 열분해되는 특성이 상대적으로 낮게 나타나는 것으로 보이며, 동일 시간연소시 연소로 인한 면적을 제한할 수 있을 것으로 보인다.

(3) 그라인더 불티에 의한 발화 특성 측정

실험체		1.0 m		0.5 m	-	0.3 m	0.1 m		
284	발화	발화시간	발화	발화시간	발화	발화시간	발화	발화시간	
실험체1	Х	_ (불티 부착)	X	《연기발생》 18회/710초	Х	《연기발생》 17회/650초	Х	《연기발생》 15회/590초	
실험체2	Х	_ (불티 부착)	х	- (불티자국, 침식)	자국, X 《연기발생》 (신) X 17회/650초 X		Х	《연기발생》 16회/630초	
실험체3	Х	_ (불티 부착)	Х	 (불티자국, X (불티자국 침식) 침식)		_ (불티자국, 침식)	Х	- (불티자국, 침식)	
실험체4	Х	_ (불티 부착)	Х	- (불티자국, 침식)	Х	- (불티자국, 침식)	Х	- (불티자국, 침식)	

[표 15] 측방향 그라인더 불티로 인한 발화 가능성



[사진 21] 그라인더 불티 비산 실험.

(4) 그라인더에 의한 발화 가능성

'사진 23'에는 산소절단기 불티 비산실험과 동일한 조건으로 그라인더 불 티를 발생시켜 발화시험을 하였다. 실험결과 그라인더에 의한 불티는 산소 절단기 불티에 비해 미세한 입자로 비산되었다. 질량이 낮은 그라인더 불티 는 발화에 충분한 열량을 축적하기 어려움은 물론 비산 중 주변의 차가운 공기에 의해 냉각되어 실험체 표면에서 연소특성을 발견하기 어려웠다.

또한, 실험체와 근거리에서 비산되는 경우에도 불티에 의한 표면 가열보다 실험체 침식현상으로 불티가 표면을 가열하기 위한 충분한 시간을 확보하 기 어려운 것으로 보였다. '그림 7 ~ 그림 8'에는 그라인더 작업 중 발생되 는 불티에 의해 '실험체 1·2'에서만 연기가 미량 발생되는 것이 관찰되었으 며, '실험체 1'은 최대 710 초 / 최소 590 초, '실험체 2'는 최대 650 초 / 최 소 630 초가 소요되어, 실험체와의 거리가 짧아질수록 연기발생 시간이 줄 어들고 있음을 알 수 있다.



[사진 22] 그라인더 불티에 의한 실험체 표면온도의 변화.



[그림 7] '실험체 1·2'에서 연기 발생을 위한 그라인더 불티 접촉 횟수.



[그림 8] '실험체 1·2'에서 연기 발생을 위한 소요시간.

실험체에 대한 발화원별 거리 변화에 따른 연기발생을 측정한 결과는 '표 18'과 같으며, 평균소요시간은 1.0 m 262 초, 0.5 m 576 초, 0.3 m 521 초, 0.1 m 427 초로, 산소절단기에 의한 소요시간보다 약 2 배 정도 소요시간이 길게 나타나고 있다. 따라서, 주변의 인화성 물질의 유무·지속적 열원의 축적 가능성을 별도로 할 경우, 그라인더 불티 단독 원인에 의한 화재 발생 가능성은 극히 낮은 것으로 볼 수 있다.

) 구		산소절[그라인더(초)						
	1.0 m	0.5 m	0.3 m	0.1 m	1.0 m	0.5 m	0.3 m	0.1 m			
실험체 1	460 초	380 초	370 초	110 초		710 초	650 초	590 초			
실험체 2	590 초	380 초	350 초	150 초	2		650 초	630 초			
실험체 3	13	460 초	340 초	260 초	-	E	-	-			
실험체 4	12	550 초	510 초	460 초	-	-	- \	-			
평 균	525 초	442 초	392 초	245 초	-	710 초	650 초	610 초			

[표 18] 발화원별 거리 변화에 따른 연기발생시간



[[]그림 9] 산소절단기 불티에 의한 연기 발생을 위한 소요시간.

이를 종합하여 볼 때, 산소절단기에 비해 연기발생에 필요한 소요시간이 길 고, 연기발생 후 잔연시간은 1~3초 정도에 불과하여 그라인더 불티에 의한 연소가 시작된 것으로 보기 어려운 점이 있다. 또한, 그라인더 불티에 의한 국소 부위의 축열에 의한 훈소화재 가능성을 배제하는 경우, 그라인더 불티만 으로는 독립된 발화원으로 작용하기 어려운 점을 확인할 수 있다.

이는 발화원과 실험체와의 거리 조건이 표면에 도달되는 불티의 양과 주변 공기에 의한 냉각작용 영향, 불티의 속도에 의한 표면침투력이 직접적인 연관 을 가진다는 것으로 볼 수 있으며, 현장 작업시 안전관리에 있어서 단열재와 발화원과의 거리를 이격하는 것이 중요한 관리의 요인이라는 것을 추정해 볼 수 있다. 따라서, 물리적 거리의 이격이 불가능한 경우 불티방지포 및 주변 온도를 낮추어 공기에 의한 냉각작용을 크게 하면 연소현상의 지연에 효과적 일 것으로 판단된다.



4.2.3. 측방향 발화원으로 인한 발화시 독립연소시간

\bigcirc	실험목적 :	발화원과의 거리에 의한 독립연소시간에 미치는 영향 비교 실험
\bigcirc	실험방법 :	실험체의 발화부터 불꽃을 올리며 연소상태가 그칠 때까지의 시간측정
\bigcirc	발 화 원 :	산소절단기에 의한 불티, 그라인더에 의한 불티
\bigcirc	이격거리 :	1.0 m, 0.5 m, 0.3 m, 0.1 m

(1) 산소절단기 불티에 의한 발화시 독립연소시간 측정

시허궤 버충		독립연소시간(분)											실제
실엄자	에 먼호	5 초 이내	10 초 이내	20 초 이내	30초 이내	40 초 이내	50 초 이내	60 초 이내	70 초 이내	80 초 이내	90 초 이내	90초 초과	연소 시간
	1.0 m		연	!기 발상	성 후 독	립연소현	현상 없음	음(연기털	발생 12:	회 460결	<u>ร</u> ้)		_
심	0.5 m		15	3)	0				Ľ				25초 22초 46초
- 험 체	0.3 m		5				0	Δ		1			44초 45초 56초
Ι	0.1 m		2			•		0 Δ			0		58초 35초 55초
	평균	1	2							15	1		42.9초
	1.0 m		연	기 발생	성 후 독	립연소현	현상 없음	음(연기털	발생 15:	회 590칠	Ē)		_
Л	0.5 m			×	0	Δ		01	J.	>			25초 28초 35초
헐 험 체	0.3 m				0								28초 36초 31초
2	0.1 m					0							35초 41초 42초
	평균												33.4초
	1.0 m				절단	용용 불	불티만	표면에	접촉				_
심	0.5 m												9초 7초 10초
험제	0.3 m		Δ	0									13초 14초 10초
3	0.1 m												21초 25초 22초
	평균												14.6초

[표 19] 산소절단기 불티에 의한 독립연소시간

시키구	: Ш – Ц – С					독립	연소시건	반(분)					실제
227	네 먼오	5 초 이내	10 초 이내	20 초 이내	30 초 이내	40 초 이내	50초 이내	60 초 이내	70 초 이내	80 초 이내	90 초 이내	90초 초과	연조 시간
	1.0 m				절딘	88 5	불티만	표면에	접촉				_
싴	0.5 m	0	Δ										2초 2초 6초
험제	0.3 m	\bigtriangleup	0										7초 6초 3초
4	0.1 m	•	O A										8초 3초 6초
	평균		•	<u>.</u>				<u>.</u>	•	<u>.</u>			4.8초

※ 비 고 : 1차 실험 ○, 2차 실험 ●, 3차 실험 △

(2) 그라인더 불티에 의한 발화시 독립연소시간 측정

				1									
시키구	ᅨ비ᆕ					독립	연소시건	만(분)			11		실젰
실업시	네 먼오	5 초 이내	10 초 이내	20 초 이내	30 초 이내	40 초 이내	50 초 이내	60 초 이내	70 초 이내	80 초 이내	90 초 이내	90초 초과	연조 시간
	1.0 m	X	3								5/		-
실	0.5 m	×	Ø						/		/		-
염 체 1.2	0.3 m	×		R				61	S	>			-
·3·4	0.1 m	×											-
	평균		·		<u>, </u>						·		0.0초

[표 20] 그라인더 불티에 의한 독립연소시간

※ 비 고 : 1차 실험 ○, 2차 실험 ●, 3차 실험 △

(3) 산소절단기 불티에 의한 독립연소시간

가. 난연재 함유량에 따른 독립연소시간

산소절단기 불티를 실험체 표면에 직접 접촉시켜 발화여부 및 독립연소시 간을 측정하였다. 실험체의 난연성능에 따른 독립연소시간은 발화원과 실험 체와의 거리에 따라 큰 편차가 나타났다. 1.0 m의 거리에서 불티를 비산시킨 경우 모든 실험체에서 독립연소현상은 발견되지 않았으며, 발화원과 실험체 의 거리가 가까울수록 독립연소시간이 길어지는 것을 확인할 수 있다. 각 실 험체에 대한 독립연소시간 측정 결과 산소절단기 불티와 그라인더 불티에 의한 측방향 발화원으로 인한 발화 가능성과 유사한 연소특성이 나타났다. 발화원과 실험체와의 거리가 가까울수록 독립연소에 소요되는 시간이 짧아 지고, 독립된 연소가 이루어지는 시간이 길어지는 것을 볼 수 있다.

[표 21] 실험체별·거리별 독립연소시간 (단위 : 초)

		실험	체 1		실험체 2			실험체 3				실험체 4				
_ ' ਦ	평균	1차	2차	3차	聁	1차	2차	3차	폀균	1차	2차	3차	馰	1차	2차	3차
1.0 m	0.0	-	-	-	0.0	-	_	-	0.0	-	I	I	0.0	-	_	-
0.5 m	31.0	25	22	46	29.3	25	28	35	8.7	9	7	10	3.3	2	2	6
0.3 m	48.3	44	45	56	31.7	28	36	31	12.3	13	14	10	5.3	7	6	3
0.1 m	49.3	58	35	55	39.3	35	41	42	22.7	21	25	22	5.7	8	3	6
편 차	18	33	23	9	10	10	13	11	14	12	18	12	2	6	4	3

※ 편 차 : 거리별 독립연소시간의 최대값에서 최소값을 뺀 시간으로 함.



0.00 0 0 0 0.00 1.0m 0.5m 실험체2 평균 ■1차 ■2차 ■3차

45.00

40.00

35.00

30.00

25.00

20.00

15.00

10.00

5.00

[그림 10] '실험체 1' 거리별 독립연소시간.

[그림 11] '실험체 2' 거리별 독립연소시간.

35

29.33

25

31.67

0.3m

41 42 39.33

0.1m



[그림 12] '실험체 3' 거리별 독립연소시간.



나. 폴리우레탄 단열재의 밀도차이에 의한 독립연소시간 변화

발화원과 실험체의 거리가 동일한 경우, 실험체가 독립연소되는 시간은 독 립연소되지 않은 1.0 m의 거리를 제외한 각 거리 조건에서 '실험체 4 → 실 험체 3 → 실험체 2 → 실험체 1'의 순으로 길게 나타났다.

난연성능이 없는 일반 폴리우레탄 폼 단열재의 경우, 밀도(실험체1 : 40 kg/m, 실험체2 : 50 kg/m)가 높을수록 독립연소시간이 짧게 나타났다. 두 실험체의 독 립연소시간 편차는 0.1 m에서 10.0 초, 0.3 m에서 16.7 초, 0.5 m에서 1.67 초가 발생되고 있다. 이는 단열재 표면에 불티가 닿을 때, 초기에 불티는 실 험체 표면에서 튕겨져 나가며 지속적으로 표면온도를 상승시키다. 이러한 단 열재의 특성은 고온체가 접촉되는 경우에도 표면이 쉽게 용융되지 않아 불 티가 침투하기 어려운 상태를 유지하며, 특히 밀도가 높을수록 불티에 용융 되는 부분을 제한하는 것으로 보인다.



[그림 14] 발화원과의 거리에 따른 연기발생시간 및 독립연소시간의 변화.

다. 폴리우레탄 단열재의 평균 독립연소시간 분석

실험체별 거리에 따른 독립연소시간의 평균 변화 추이는 '그림 15 ~ 그림 16'과 같이 나타났다. 동일 실험체의 경우 거리가 가까울수록 독립연소시간

이 길고, 실험체의 밀도가 높을수록 독립연소시간이 줄어들고, 난연성능이 있는 실험체일수록 독립연소의 시간이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 따라서, 밀도에 의한 차이(실험체 1·2)는 제한된 불티 접촉시간 내 실험체 표면으로 침투되는 불티 양의 차이에 의해 발생되고, 난연성능(실험체3·4)에 의해 독립 연소되는 시간이 줄어드는 것으로 보인다.



[그림 15] 실험체별 거리에 따른 독립연소시간.



[그림 16] 실험체별 독립연소시간.

실험체별 독립연소시간 편차는 '실험체 1 → 실험체 3 → 실험체 2 → 실험 체 4'의 순으로 발생했으며, 이는 '실험체 1'(밀도 40 kg/m')과 '실험체 2'(밀 도 50 kg/m')는 일반적 폴리우레탄 단열재로 밀도의 차이에 의한 편차 및 '실험체 3'(난연성)과 '실험체 4'(고난연성)는 난연성능의 차이가 독립연소시 간에 영향을 미친 것으로 보인다. 그러나, '실험체 4'에 대한 독립연소시간 측정(그림 13. '실험체 4' 거리별 독립연소시간)의 0.1 m의 2차 실험결과의 편차는 실험자가 불티 비산 조건을 형성시 화구의 방향 및 절단 모재의 폭 열에 의한 순간적 비산 등의 영향도 편차에 영향을 미쳤을 것으로 보인다.

라. 밀도 · 난연제 함유 편차에 의한 연소특성

'실험체 1·2'와 같이 밀도차는 발화원에 의한 불티의 침투 깊이 및 침투량 을 제한하여 독립연소되는 시간을 제한할 수 있으며, '실험체 3·4'와 같이 난연재가 함유된 경우 난연성능의 차이로 인해 독립연소시간이 제한될 수 있다. 특히, 실험체 3(난연성)의 경우 불티가 침투될 때 단열재 내부가 공동 화되는 특성을 보이며 연소가 진행되는 특성으로 인해 독립연소시간의 편차 가 크게 발생되는 것으로 보인다.

(4) 그라인더 불티에 의한 독립연소시간

그라인더 불티에 의한 실험 결과, 그라인더 불티는 산소절단기 불티에 비해 미세한 입자로 비산(표 22. 발화원별 불티의 크기 측정)되고, 불티의 표면적이 상대적으로 넓어 비산 중 방열되는 에너지가 커 단열재의 표면을 가열하는데 긴 시간이 소요되었다. 또한 실험체와 근거리에서 비산되는 경우에는 불티에 의한 표면 가열보다 침식현상이 진행되어 독립연소를 위한 열축적이 어려운 것으로 보인다.

(5) 발화원별 불티의 특성

발화원별 불티의 크기 및 표면의 특징을 실체현미경을 활용하여 분석하였다. 실험장에서 수집된 불티 표본의 크기는 다음과 같다. 산소절단기에 의해 비산 된 불티 중 단열재 주변 바닥으로 낙하된 불티는 평균 직경 1.4 mm의 윤기나 는 매끄러운 구형의 구슬형태 또는 구슬형태의 입자가 상호 붙은 형태로 나 타났다. 이에 반해 단열재 표면에 침투된 불티는 평균 직경 3.7 mm로 연소과 정에서 탄화물이 피복되어 윤기가 없는 검은색의 구슬형태로 차이점을 보였 다. 그라인더에 의한 불티는 비산 중 공기에 산화되어 윤기 없는 검은색의 철 가루로 입자가 작고 거친 형태로 실체현미경으로 측정한 결과 평균 0.09 mm이 며, 단열재 표면 침식으로 자석으로 수집시에도 단열재의 박리 부분이 확인되 었다.

산소절단기 - 관통된 용융물 산소절단기 - 주변 낙하 용융물 그라인더 (단열재 내부 침투 불티) (단열재 표면 부착 불티) (단열재 주변 불티) 평 평 평 7 8 9 1 2 3 4 5 6 10 11 12 13 14 15 균 균 균 0.1 0.02 0.06 0.08 3.5 5 4 4 2 3.7 1 2 1 1 2 1.4 0.2 0.09

[표 22] 발화원별 불티의 크기 측정 (단위 : mm)

※ 단열재에서 수집된 불티 중 임의적으로 5개를 선정하여 측정.



[[]그림 17] 발화원별 불티의 크기.



[사진 23] 실체 현미경.



[사진 24] 용융물의 색상 및 크기.



[사진 25] 산소절단기 용융물과 그라인더 불티 (불티 표면이 탄화물로 검게 변색).

[사진 26] 단열재에 침투된 불티의 크기 측정.



[사진 27] 단열재 주변에 낙하된 가스절단기 불티 (불티는 구형으로 표면엔 광택이 나타남).



[사진 28] 그라인더 불티(미세한 철 조각).

4.2.4. 측방향 발화원으로 인한 발화시 잔연시간

\bigcirc	실험목적	:	실험체 독립연소 후 연기의 발생시간 비교 실험
\bigcirc	실험방법	:	실험체가 독립연소 후 연기 발생상태가 그칠 때까지의 시간
\bigcirc	발 화 원	:	산소절단기에 의한 불티, 그라인더에 의한 불티
\bigcirc	이격거리	:	1.0 m, 0.5 m, 0.3 m, 0.1 m

(1) 산소절단기 불티에 의한 발화시 잔연시간

						잔	연시간(분)					연기
실염서	웹 먼호	5 초 이내	10 초 이내	20 초 이내	30 초 이내	40 초 이내	50 초 이내	60 초 이내	70 초 이내	80 초 이내	90 초 이내	90 초 초과	발생 시간
	1.0 m		•	0 Δ									25초 18초 28초
실	0.5 m			$\langle \cdot \rangle$	A			0					75초 58초 43초
험 체 1	0.3 m	/	\leq	2/									57초 53초 55초
	0.1 m	1	2/				•		0				100초 58초 85초
	평균	-	4							15	2		54.6초
	1.0 m	0	Δ							4			9초 8초 16초
실	0.5 m				0		Δ	<u></u>	3	~			38초 41초 55초
험 체 2	0.3 m				0				~				34초 39초 42초
٢	0.1 m						0						57초 65초 65초
	평균												39.1초
	1.0 m	Х											-
신	0.5 m		0										18초 21초 21초
험 체	0.3 m	\bigtriangleup	0										11초 14초 4초
3	0.1 m												21초 25초 22초
	평균		-				-						17.4초

[표 23] 산소절단기 불티에 의한 잔연시간

시키구	: Ш – Ц – С					잔	연시간(분)					연기
실업서	네 먼오	5 초 이내	10 초 이내	20 초 이내	30 초 이내	40 초 이내	50 초 이내	60 초 이내	70 초 이내	80 초 이내	90 초 이내	90 초 초과	일생 시간
	1.0 m	Х											-
신	0.5 m		0	$\overset{\bigtriangleup}{\bullet}$									5초 5초 9초
험제	0.3 m		Δ	0	•								24초 32초 15초
4	0.1 m		•	O A									25초 18초 23초
	평균												17.3초

※ 비 고 : 1차 실험 ○, 2차 실험 ●, 3차 실험 △

(2) 그라인더 불티에 의한 발화시 잔연시간

		/	0/			잔	연시간(·	분)		10	1		연기
실험치	비 번호	5 초 이내	10 초 이내	20 초 이내	30 초 이내	40 초 이내	50 초 이내	60 초 이내	70 초 이내	80 초 이내	90 초 이내	90 초 초과	발생 시간
	1.0 m	Х									4/		-
실	0.5 m	•	0							4	/		11초 8초 13초
- 험 체 1	0.3 m			0			/	01	J.	>/			23초 22초 18초
	0.1 m			0									25초 16초 18초
	평균												17.1초
	1.0 m	Х											-
실	0.5 m	\bigcirc	Δ										9초 8초 13초
- 험 체	0.3 m	•	0 Δ										16초 10초 22초
2	0.1 m		•	O A									25초 18초 21초
	평균												15.8초
실험	험체 3·4	연기 발생 없음											

[표 24] 그라인더 불티에 의한 잔연시간

※ 비 고 : 1차 실험 ○, 2차 실험 ●, 3차 실험 △

(3) 산소절단기 불티에 의한 잔연시간

가. 난연재 함유에 의한 잔연시간 특성

산소절단기 불티에 의한 독립연소가 종료된 후 잔연시간은 난연재가 함유 된 단열재일수록 잔연시간이 짧게 나타났으며, 불티 접촉 거리가 가까울수록 잔연시간이 길어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 표면에 침투되는 불티의 양 과 밀접한 관계가 있는 것으로 보이며, 단열재에 침투된 불티의 열에너지 축 적양에 따른 차이가 잔연시간의 편차에 영향을 미치는 것으로 보인다.

[표 25] 산소절단기 불티에 의한 잔연시간 (단위 : 초)

<u> </u>		실험체 1				실험	체 2			실험	체 3		실험체 4			
구 문	뮰	1차	2차	3차	野	1차	2차	3차	野	1차	2차	3차	墛	1차	2차	3차
1.0 m	23.7	25	18	28	11.0	9	8	16	0.0	1	Y	5	0.0	-	_	_
0.5 m	58.7	75	58	43	44.7	38	41	55	20	18	21	21	6.3	5	5	9
0.3 m	55.0	57	53	55	38.3	34	39	42	9.7	11	14	4	23.7	24	32	15
0.1 m	81.0	100	58	85	62.3	57	65	65	22.7	21	25	22	22.0	25	18	23
편차	57.3	75	40	57	51.3	48	57	49	13	3	4	18	17.3	20	27	14



[그림 18] '실험체 1'의 잔연시간 변화.







[그림 20] '실험체 3'의 잔연시간 변화.



[[]그림 21] '실험체 4'의 잔연시간 변화.

나. 발화원과의 거리와 난연재 함유와 잔연시간

실험체별 잔연시간은 평균적으로 난연성능이 있는 단열재일수록 짧게 나타 났으며, 발화원과의 거리가 가까울수록 잔연시간이 길게 나타났다. 이는 단 열재에 축열된 불티의 양에 의해 잔연시간이 영향을 받는 것으로 볼 수 있 으며, 난연재가 함유되지 않은 단열재의 경우에 거리에 따른 잔연시간의 편 차가 크게 발생되는 것을 볼 수 있다. 이는 난연재가 함유된 '실험체 3·4'의 경우 불티로 인한 열분해 속도가 제어되어, 발화원과의 거리에도 불구하고 잔연시간의 편차가 크지 않은 것으로 보인다.

[표 26] 실험체와의 거리에 따른 연기발생에 필요한 소요시간

구 분	1.0 m	0.5 m	0.3 m	0.1 m
실험체 1	23.7 초	58.7 초	55 초	81 초
실험체 2	11 초	44.7 초	38.3 초	62.3 초
실험체 3	0	6.3 초	9.7 초	22.7 초
실험체 4	0	20 초	23.7 초	22 초
평 균	8.7 초	32.4 초	31.67 초	47 초



[그림 22] 실험체와의 거리에 따른 연기발생에 필요한 소요시간.

실험체별 평균잔연시간은 '실험체 3' 9.7 초, '실험체 4' 16.4 초, '실험체 2' 39.1 초, '실험체 1' 54.6 초의 순으로 나타났다. 일반적 폴리우레탄 폼 단열 재의 경우 밀도가 높을 경우 잔연시간이 짧게 나타났으며, 기존의 연기발생 및 독립연소 개시 소요시간의 실험결과와 유사한 특성을 보였다. 그러나, 난 연재가 함유된 단열재의 경우는 난연성이 낮은 '실험체 3'이 '실험체 4'보다 6.7 초 짧게 나타나, 기존의 연기발생 및 독립연소 개시 소요시간의 실험결 과와 다른 결과가 도출되었다. 이는 연소속도를 제어하는 난연성능이 우수한 단열재도 연소가 진행될 경우 잔연시간이 상대적으로 길게 나타나 연기로 인한 위험요인이 있다는 점을 확인할 수 있었다.

또한, 실험체에 대해 잔연시간의 편차(잔연시간의 최대값에서 최소값을 뺀 시간)는 '그림 22'와 같이 나타나, 난연재가 함유된 제품일수록 편차가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 이는 난연재가 함유된 단열재일수록 발화원과의 거리에도 불구하고 균일한 연기발생량을 발생하고 있는 것으로 볼 수 있다. 따라서, 연소특성상 난연성능이 높은 단열재일수록 균일한 패턴으로 연소되는 것을 확인할 수 있다.

52



[그림 23] 실험체별 잔연시간 편차(단위 : 초).

다. 실험체별 독립연소시간 및 잔연시간

실험체별로 독립연소시간과 잔연시간의 특성을 분석해 보면, '실험체 1과 실험체 2'의 경우 독립연소시간이 잔연시간보다 길게 나타나고 있어, 비교적 낮은 온도에서 쉽게 독립연소되고 연소시 오랜 시간 연소될 수 있음을 보여 주고 있다. '실험체 3'은 난연성능으로 '실험체 1·2'와 비교하여 연소시간이 짧아지고, 잔연시간도 개선되었음을 볼 수 있다. '실험체 4'는 난연성능이 강 화되어 독립연소시간이 매우 짧아지고 있으며, 잔연시간은 '실험체 3'과 유사 한 특성을 보여주고 있다.



[그림 24] '실험체 1'의 독립연소시간과 잔연시간 비교.



[그림 25] '실험체 2'의 독립연소시간과 잔연시간 비교.



[그림 26] '실험체 3'의 독립연소시간과 잔연시간 비교.



[그림 27] '실험체 4'의 독립연소시간과 잔연시간 비교.

이를 종합하여 볼 때, 산소절단기 불티에 의한 잔연시간은 일반적으로 발화 원과의 거리가 가까울수록 잔연시간이 길게 나타났다. 또한, 난연재가 함유되 고 발화원과의 거리가 멀수록 잔연시간이 짧게 나타났다. 이러한 특성은, 불 티로 인한 축열현상 및 독립연소 후에도 일정시간 지속되는 것을 보여준다. 특히, 난연재가 함유된 '실험체 3·4'의 경우, 난연성능이 높은 '실험체 4'가 독 립연소 후 잔연시간이 '실험체 3'보다 길게 나타나, 잔연시간은 난연성능에 의 해 결정되는 것이 아님을 추정해 볼 수 있다. '실험체 4'는 보다 높은 난연성 능을 가지고 있으나, 연소 후 잔연이 상대적으로 길게 나타나 연기로 인한 인 명피해 등 안전관리의 관심이 지속적으로 이루어져야 함을 보여 주고 있다.

(4) 그라인더 불티에 의한 연소시간

그라인더 불티에 의한 실험체의 연기 발생에 필요한 불티의 접촉 횟수 및 시간을 측정하였다. 실험을 위해 1 회당 10 초 간격으로 30 초간 불티를 실험 체 표면에 접촉시켜, 연기발생에 필요한 불티 접촉횟수를 측정했다. 그라인더 에 의해 발생되는 불티는 실험체에 불티가 장시간 직접 접촉되는 경우에 연 기가 발생되지만, 불티의 공급이 중지되면 연기의 발생도 급격히 감소되는 현 상이 반복되었다. 연기발생의 시간은 20 회 접촉 후 표면에서 연기가 완전히 없어질 때까지의 시간은 '표 27'과 같다.

		1.0 m		0.5 m		0.3 m		0.1 m
실 험 체	발화	발화시간	발화	발화시간	발화	발화시간	발화	발화시간
실험체 1	Х	_ (불티 부착)	Х	《연기발생》 18회/710초	Х	《연기발생》 17회/650초	Х	《연기발생》 15회/590초
실험체 2	Х	_ (불티 부착)	Х	_ (불티자국,침식)	Х	《연기발생》 17회/650초	Х	《연기발생》 16회/630초
실험체 3,4				연기발생 및 듹	특립연소	현상 없음		

[표 27] 연기 발생을 위한 그라인더 불티 접촉 시간

※ 발화원의 지속적 접촉에 의한 축열로 연기가 발생되기까지의 소요시간

그 결과, 그라인더 불티로 인한 잔연현상은 미세한 분체형태의 불티로 표면 적이 커 열발산이 쉬워 단열재에 충분한 열을 공급하지 못했으며, 특히 표면 침식이 병행되어 열축적을 어렵게 하는 특성을 보였다. 부분적 축열로 연기 가 발생되는 경우에도 '실험체 1' 17.1 초, '실험체 2' 15.8 초에 불과하여, 지속적인 열분해가 이루어지지 않음을 볼 수 있다.

0.5 m 0.3 m 0.1 m 전체 구 분 평균 평균 2차 3차 평균 2차 3차 평균 2차 3차 1차 1차 1차 22 실험체 1 17.1 10.7 8 21.0 23 18 19.7 25 16 11 13 18 8 실험체 2 15.8 10.0 16.0 22 21.3 25 9 13 16 10 18 21

[표 28] '실험체 1·2'의 거리별 평균 잔연시간 비교



[그림 28] '실험체 1·2'의 거리별 평균 잔연시간 비교.

[표 29] 폴리우레탄 단열재 연소시 연기의 색상

[사진 29]'실험체 1'연기 색상.

[사진 30] '실험체 2' 연기 색상.



[사진 31] '실험체 3' 연기 색상.

4.3. 수평 설치 실험체의 연소실험

수평으로 설치된 실험체에 수직방향으로 발화원을 공급하는 경우, 실험체의 발 화시간 및 독립연소 특성을 비교하고, 단열재의 종류별 연소특성에 대한 비교 연소실험을 실시하였다. 또한 발화원별 불티가 실험체에 침투되는 깊이 등을 이 용한 불티의 형태의 차이점과 수직설치된 실험체와의 차이점을 고찰하였다.

4.3.1. 수직방향 발화원으로 인한 발화 가능성

\bigcirc	실험목적 : 수평 설치된 실험체에 발화원 낙하시 발화시간 등 비교 실험
\bigcirc	실험방법 : 실험체별 발화원에 의한 발화 속도 및 연소면적·연소시 관통성 비교
\bigcirc	발 화 원 : 산소절단기 불티, 그라인더 불티
\bigcirc	이격거리 : 0.5 m / 발화원 발생 시간 : 1 회당 30 초
0	발화원 발생 횟수 : 10 초 간격으로 5 회 실시(발화시 실험 종료)

(1) 산소절단기 불티에 의한 발화 가능성

실험체	발화	0.5 m 발화소요시간	독립연소 시간(초)	잔연시간 (초)	용융깊이	내부용융형태
실험체 1	0	3회/110초	65	45	관통 : 〇 깊이 : 60 mm	불티 침투 후 주변 공동화
실험체 2	0	4회/145초	72	47	관통 : X 깊이 : 38 mm	표면 균열 (침투 없음)
실험체 3	0	4회/150초	35	42	관통 : X 깊이 : 55 mm	불티 침투 후 주변 공동화
실험체 4	0	4회/150초	28	44	관통 : X 깊이 : 14 mm	접촉면 가루화 (침투 없음)

[표 30] 산소절단기 용융물 낙하에 의한 연소 특성



[사진 33] 산소절단기 불티 낙하실험.

[사진 34] 불티의 단열재 관통 형태.



[사진 35] '실험체 4' 산소절단기 불티에 의한 표면 탄화(접촉면 가루화).

[사진 36] '실험체 4' 탄화 깊이측정.

(2) 그라인더 불티에 의한 발화 가능성

실험체	0.5 m		독립연소	잔연시간	보디저초 트서	키시 기이
	발화	발화소요시간	시간(초)	(초)	물디접속 국정	참작 깊이
실험체1	X	- (불티 부착)	-	-	그라인더 불티로 인한 표면 침식	10 mm
실험체2	х	- (불티 부착)	-	-	그라인더 불티로 인한 표면 침식	2 mm
실험체3	Х	- (불티 부착)	-	-	그라인더 불티로 인한 표면 침식	6 mm
실험체4	Х	- (불티 부착)			그라인더 불티로 인한 표면 침식	2.5 mm

[표 31] 그라인더 불티에 의한 연소 특성

※ 거리 : 발화원과 실험체와의 수직거리(m)를 말함



[사진 37] 그라인더 불티 접촉 실험.

[사진 38] '실험체 1, 실험체 4' 표면상태 및 침식 깊이 측정.

(3) 결과분석

수평으로 설치된 실험체에 대해 상부에서 발화원인 불티를 공급하는 방식으 로 연소실험을 실시하였다. 또한, 실험체 표면의 열축적이 곤란한 수직 설치 실험체와 발화소요시간·독립연소시간·잔연시간 등 연소특성을 비교하였다. 그라인더 불티에 의한 연소실험의 결과, 수직·수평 실험체에서 유의미한 차 이점이 발생치 않아 가스절단기에 의한 연소특성을 중심으로 실험하였다.

실험체	불티접촉(회)		발화소요시간(초)		독립연소시간(초)		잔연시간(초)		용융깊이 (mm)
	수직	수평	수직	수평	수직	수평	수직	수평	(~~~~) [수평설치]
실험체1	16	3	430	110	31	65	58.7	45	60
실험체2	15	4	580	145	29.3	72	44.7	47	38
실험체3	19	4	740	150	8.7	35	6.3	42	55
실험체4	19	4	750	150	3.3	28	20.0	44	14
평 균	17.25	3.75	625	138.75	18.08	50	32.43	44.5	41.75

[표 32] 수평 실험체의 연소특성 비교(불티 낙하 높이 : 0.5m)



[[]그림 29] 수평 설치된 실험체의 '발화소요시간, 독립연소시간, 잔연시간'.


[그림 30] 0.5 m 거리에서 수평 설치·수직 설치된 실험체의 발화소요시간.



[그림 31] 0.5 m 거리에서 수평 설치·수직 설치된 실험체의 독립연소시간.



[그림 32] 0.5 m 거리에서 수평 설치·수직 설치된 실험체의 잔연시간.



[그림 33] 0.5 m 거리에서 수평·수직 설치된 실험체의 연소를 위한 불티접촉 횟수.



[그림 34] 수직·수평 실험체의 연소 특성 비교.



[그림 35] 수평 실험체의 용융 깊이.

가. 불티 공급 방향에 의한 발화소요시간의 변화

실험체 표면과 0.5m 이격된 수직상부에서 용접불티를 떨어뜨렸을 경우, 평 균 발화시간은 138.75초로 수평 설치 실험체 625초에 비해 빨리 발화되는 것 을 볼 수 있으며, 수평 설치 실험체에서의 연소개시 소요시간의 변화가 매우 적은 것을 볼 수 있었다. 이는 실험체 표면에 불티가 직접 접촉되고 장시간 넓은 표면에 열축적이 용이하기 때문이다. 수직실험체(625초)가 수평실험체 (138.75초)보다 4.5배 긴 시간이 소요되는 것으로 나타났다.

나. 불티 공급 방향 및 난연재의 함유에 의한 연소특성

독립연소시간은 수직 실험체 및 수평 실험체 시험결과 그래프의 모양이 매 우 유사한 형태로 나타났다. 평균 독립연소시간은 수직 실험체 18.08초, 수평 실험체 50초로 열축적이 용이한 수평 실험체에서 독립연소시간이 길게 나타 났으며, 난연재가 함유된 단열재일수록 독립연소시간이 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 수평실험체(50초)가 수직실험체(18.08초) 보다 2.8배 긴 시간동안 독립연소되었고, 잔연시간도 수평실험체가 1.37배 긴 것으로 나타났다.

다. 난연성능 및 밀도차이에 의한 연소특성

실험체 표면의 용융깊이는 평균 41.75mm로 '실험체 1'관통(60mm), '실험체 3' 55mm로 평균보다 용융면의 깊이가 깊게 나타났다. '실험체 1·3'에서는 불티 와 접촉된 부분이 수직으로 깊게 용융되고, 불티가 내부에서 주변을 급격히 용융시켜 공동화되는 형태를 볼 수 있었으며, '실험체 2·4'는 표면 연소시 경화되는 형태로 불티가 단열재의 내부로 깊이 침투하지 못하는 형태로 확 인되었다.



[사진 39] 용융물에 의한 단열재 관통.

[사진 40] 탄화 중 표면 균열(관통 없음).

4.3.2. 가열 금속판 낙하실험

○ 실험목적 : 800 ℃ 이상으로 가열된 금속판(Jig) 접촉시 연소 특성 비교 실험
○ 실험방법 : 가열 금속판을 실험체 표면에 직접 낙하시켜 용융 및 연소특성을 비교
○ 발 화 원 : 가로 100 mm X 세로 35 mm X 두께 10 mm 금속판
○ 가열온도 : 800 ℃ ± 10 ℃(가스절단기로 직접 가열)

가열 금속판	관통 여부	용융깊이(mm)			탄화면적(때)			독립연소		자기소화
낙하		1차	2차	3차	1차	2차 3차 시간		시간		시간
실험체 1	0	60	60	60	245	260	235	1차	185	298
								2차	275	266
								3차	216	281
								평균	225.3	281.7
실험체 2	×	50	52	47	216	225	242	1차	140	152
								2차	173	168
								3차	165	149
								평균	159.3	156.3
실험체 3	0	60	60	60	150	215	190	1차	198	255
								2차	172	280
								3차	188	248
								평균	186.0	261.0
실험체 4	×	15	10	13	98	115	80	1차	89	115
								2차	105	65
								3차	116	78
								평균	103.3	86.0

[표 33] 가열 금속판 낙하실험 결과

[표 34] '실험체 3', '실험체 4'의 연소특성

구 분	고난연성능 인증기준	실험체	3(난연성)	실험체	4(고난연성)	비고
자기소화능력	4 분 이내	4 분 21 초		1 분 26 초		
용융깊이	20 mm 이하 (3회 측정 후 평균)	1지점	관통	1지점	15 mm	
		2지점	관통	2지점	10 mm	
		3지점	관통	3지점	13 mm	
화기손상영역	200 mm(W) X 135 mm(L) 이하	1	85 cm²	ç	98 cm²	기열 금속판 100 X 35 X 10 mm
화염퍼짐특성	화염 퍼짐 억제		×	0		



[그림 36] 수평 실험체의 가열금속판 낙하시 탄화면적(단위 : ㎡).

실험체에 대한 가열 금속판(800 ℃ ± 10 ℃) 낙하실험결과 '실험체 1·실험체 3'은 용융되어 실험체가 관통되었으며, '실험체 2'는 평균 용융깊이 49.7 mm로 거의 바닥면까지 탄화되었으며, '실험체 4'는 평균 용융깊이 12.7 mm로 단열재 의 표면에 국한된 부분에서 연소현상이 발생되었다. 또한 탄화면적은 난연성 능이 있을수록 가열 금속판(면적 35 ㎡) 주위로의 연소가 제한되어 최대값 (260 ㎡)과 최소값(80 ㎡)의 차이는 약 3배 정도로, 고난연 단열재의 경우 주 변으로의 화염퍼짐 특성이 매우 제한적임을 볼 수 있었다.



[사진 41] 실험체별 용융깊이 및 탄화면적.

가열 금속판 낙하에 의한 표면 탄화면적 측정은 '합판·목재 등 방염후처리 물품'의 방염성능시험을 위한 '탄화면적측정기'를 활용하여 회별 3회를 측정하 였다. 불티보다 표면적과 표면온도가 일정한 가열 금속판과 단열재의 급격한 연소시 주변으로의 연소범위를 측정하기 위한 실험이다. 실험결과 탄화면적은 난연성능이 있을수록 가열 금속판(면적 35 ㎡) 주위로의 연소가 제한되어 최 대값(260 ㎡)과 최소값(80 ㎡)의 차이는 약 3 배 정도로, 고난연 단열재의 경 우 주변으로의 화염퍼짐 특성이 매우 제한적임을 볼 수 있었다.



[사진 42] 탄화면적측정기를 이용한 탄화면적 측정.



[그림 37] 수평 실험체의 가열금속판 낙하시 독립연소시간(단위 : 초).



[그림 38] 수평 실험체의 가열금속판 낙하 후 자기소화시간(단위 : 초).

5. 결 론

선박 건조 작업장의 도크 탑재(Dock erection) 공정에서 잇단 'LPG 운반선' 화 재사고에 따라 난연성 단열재의 개발 및 보급이 확대되고 있지만, 폴리우레탄 단 열재의 난연성능 기준에 대한 인식차이로 안전관리방법의 혼선이 발생되고 있어 단열재별 연소특성을 실험하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- 'DIN 4102 B2 Class' 실험결과, 500 ℃·20 mm의 불꽃을 15초간 실험체의 밑면 가장자리에 접촉하고 불꽃 차단 후 20초간 연소된 높이는 '실험체 3'의 경우 148 mm, '실험체 4'의 경우 68 mm로 불꽃에 대한 수직면으로의 연소속도 가 난연성능이 높을수록 제한되는 것을 확인할 수 있었다.
- 2) '고난연성 단열재 시험방법'에 의한 실험결과, '가로 50 mm X 세로 20 mm X 두께 10 mm 금속판'을 800 ℃ ± 10 ℃로 가열한 후 수평으로 설치된 실험체 의 표면에 낙하시킨 경우, '실험체 4'의 용융깊이는 13 mm · 화기 손상된 영역 98 cm · 불꽃 연소 후 자기소화시간 1분 26초로 비난연성 단열재에 비해 화재 의 가능성 및 연소확대속도 제어능력이 높은 것을 확인할 수 있었다.
- 3) 그라인더 불티는 실험체의 설치방법 및 불티와의 거리에도 불구하고 독립적인 연소조건을 형성할 수 없었다.
- 4) 가스절단기에 의한 불티는 실험체의 설치방법 및 불티와의 거리 조건에 따라 발화소요시간, 독립연소시간, 잔연시간에서 차이점을 보였다. 실험체의 설치 방향에 따른 연소특성을 보면, 수평 설치된 실험체의 경우 수직 설치된 실험체 보다 발화소요시간은 약 4.5 배(486 초)가 빨랐으며, 독립연소시간은 2.7 배(32 초), 잔연시간은 1.4 배(12 초)가 길게 나타났다.
- 5) 단열재의 연소시 발생되는 연기는 '실험체 1·2'는 검은색, '실험체 3·4'는 회
 색·백회색으로 난연재가 함유될수록 흰색에 가까운 색깔을 나타냈다.
- 6) 새롭게 보급되고 있는 'DIN 4102 B2 Class'에 적합한 난연성·고난연성 폴 리우레탄 단열재도 설치 방향·화기작업의 방법에 따라 화재위험성 및 연소시 유해가스가 발생되는 재료로 지속적인 안전관리가 필요한 재료이다.

참 고 문 헌

- 이진태, "선박 건조 과정에서 블록 대형화 시스템이 생산성 향상에 미치는 영향에 관한 연구", 울산대학교 대학원, 박사학위논문, pp. 17~26 (2010).
- 김별, "선박 거주구역 화재 시 배연성능에 영향을 미치는 급·배기시스템에 관한 연구", 한국해양대학교 대학원, 석사학위논문, pp. 6~12 (2016).
- 울산소방본부, "선박화재 현장대응역량 강화 방안", 국민안전처 현장대응역
 량 강화 대회. pp. 24~32 (2015).
- 4. 양승남, "지방족과 방향족 이소시아네이트를 이용한 폴리우레탄 비드의 합성 및
 그 물성에 관한 연구", 성균관대학교, 박사학위논문, pp. 71~87 (2007.11.)
- 5. "European Fire Standards DIN 4102", Germany. (2005).
 -http://www.eurocobusiness.com/resources/European%20Fire%20Standards.pdf
- 김창범, "새로운 인계 난연재의 합성과 그에 따른 폴리우레탄 폼의 난연성 연구", 경기대학교 일반대학원, 석사학위논문. pp. 38~40 (2012).
- 7. 권오덕·이주찬·서기석·서중석·김상범, "난연재 종류에 따른 연질폴리우레탄 폼의 난연특성에 대한 연구", Appl. Chem. Eng. Vol. 24. No. 2. 208~213 (2013).
- 8. 경남소방본부, "Poly Urea 수지 난연기준 개정을 위한 난연성 실험 연구", 국민안전처 제7회 전국 화재조사 심포지엄 연구논문. pp. 357~364 (2016).
- 9. 박영근, "산업용 단열재의 연소위험 특성에 관한 실험적 연구", 서울시립대 학교, 석사학위논문. pp. 16~30 (2005).
- 10. 건축법(법률 제14016호), 국가법령정보센터
- 11. 건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙(국토교통부령 제238호),
 국가법령정보센터
- 12. 건축물 마감재료의 난연성능 및 화재확산방지 구조 기준(국토교통부 고시 제2015-744호), 국가법령정보센터

13. 한국산업규격 KS F ISO 5660-1(연소성능시험)

-www.kssn.net/StdKS/KS_detail.asp?k1=F&k2=ISO%205660-1&k3=2

- 14. 한국산업규격 KS F 2271(건축물의 내장재료 및 구조의 난연성 시험방법)
 -http://www.kfi.or.kr/pds/site_board/files/20121025/%EA%B0%80%EC%8A
 %A4%EC%9C%A0%ED%95%B4%EC%84%B1%EC%8B%9C%ED%97%98(
 KS%20F%202271)%20%EC%9D%98%EB%A2%B0%EC%8B%9C%ED%97
 %98.hwp
- IMO FTP CODE 2010(International Code for the Application of Fire Test Procedures)
 - -https://www.trafi.fi/filebank/a/1465988981/21e26de0d59d9efe1c226efbe9f31965/2181 2-MSC_307(88).pdf
- 16. 경남신문(2016.07.05.)-'현대중, LPG 운반선에 '고난연성 단열재 최초 적용' -http://www.knnews.co.kr/news/articleView.php?idxno=1184952
- 17. 이현, "용접작업 현장의 화재발생 방지에 관한 연구", 경기대학교 건설·산 업대학원, 석사학위논문. pp. 47~57 (2011).

11 19

A Study on Combustion Characteristics of Polyurethane Foam Insulation Material for Ship

Sang-Hoon Oh

Dept. of Fire Protection Engineering, Graduate School, Pukyong National University.

Abstract

Recently, fire accidents caused by welding spark during the LPG carrier manufacturing work have caused frequent accidents in which a lot of human lives and property damage are caused. To prevent similar accidents, the ship-building business is expanding the use of PU(polyurethane) foam with increased flame retardancy, which is used as insulation material for liquefied gas transport tanks. The use of flame retardant insulation materials certified to the 'B2 Class' and 'B2 Class + self-extinguishing performance' by the DIN 4102 standard for flame retardancy testing of German building materials is increasing.

Therefore, it is aimed to compare the combustion characteristics according to the test conditions similar to the working conditions such as the 'DIN 4102' test method and the welding fault contact for the PU foam insulation according to the flame retardant performance, and to examine the characteristics such as the self-extinguishing properties of the high flame retardant insulation.

The test specimens were compared with PU products(non-combustible, flame-retardant, and high flame-retardant insulation materials) used as ship's

71

insulation materials by applying "DIN 4102 B2 Class and High Flame-Retardant Insulation Test Standard". And the burning characteristics of the gas cutter and grinder, which are typical ignition sources of the work site, were experimented. Experiments were conducted to compare the ignition time, independent combustion time, demolition time, melting depth, and self-extinguishing ability according to the installation method of the specimen and the difference of the specimen.

- As a result of the 'DIN 4102 B2 Class' test, it was confirmed that the burning speed to the vertical plane was restricted as the flame retardant performance was higher.
- 2) When the heated metal(above 800 ℃) was dropped on the insulation according to the test for high flame resistance, it was confirmed that the combustion area control ability and the self-extinguishing performance were higher in the case of insulation materials having high flame retardancy.
- 3) The grinder bulb could not form the ignition condition by itself.
- 4) The burning by the gas cutting machine was found to be different in the independent combustion time and time required for ignition depending on the installation method of the test body and the distance to the fire.
- 5) The higher the flame retardant performance, the longer the time required for ignition and the shorter the independent combustion time.
- Horizontal specimens with easy heat accumulation showed faster pyrolysis rates than vertical specimens.

감사의 글

2001년 9월 울산광역시 소방공무원으로 임용되어 현장과 행정업무를 오 가는 동안, 소방에 대한 과학적·실험적으로 증명된 지식의 중요성을 생각 하는 시간이 나날이 늘어갔습니다. 그러던 중 우연히 접한 2015년 부경대 학교 산업대학원 모집에 떨리는 손으로 응시원서를 제출하던 그 날이 불 과 얼마 전의 일인 것 만 같습니다. 늦었다고 생각하던 나이, 어린 두 아 이와 맞벌이 부부의 시간적 제약 등 직장과 학업을 병행한다는 것은 제게 어려운 여건이었음에도 불구하고, 소방공학과 입학은 제 인생에 있어 가장 현명하고 용기 있는 결정이었다는 생각이 듭니다.

시간에 쫒기고 힘에 부치는 어려움을 느낄 때마다 따뜻한 위로와 격려 를 해주시고, 실험 및 논문작성에 지원을 아끼지 않으신 최재욱 교수님께 머리 숙여 감사드립니다. 인생이란 긴 여행길에서 소방공학에 관한 지식과 배움을 나누어 주신 최준호 교수님, 이치영 교수님, 구민성 교수님께 감사 드립니다. 어려운 살림에도 공부에 전념할 수 있도록 내조해 준 사랑하는 아내 박선향과 아빠의 공부를 도와준 오승윤·오승민 두 아들에게도 고마 운 마음을 전합니다. 또한, 학업과 실험에 격려와 도움을 주신 동부소방서 장님을 비롯한 선배님, 후배님들께도 다시 한 번 감사의 말씀을 올립니다.

공부를 하며 포기하고 싶었던 순간, '왜 시작 했을까'하는 생각이 든 힘 든 시간도 있었지만, 교수님·원우님들의 가르침과 배려로 다시 느낄 수 없는 행복한 시간을 경험할 수 있었습니다. 우둔한 제게 가르쳐 주신 지식 으로 좀 더 안전한 세상을 만들어 가는 소방공무원이 될 수 있도록 최선 의 노력을 다하겠습니다. 앞으로도 부경대학교 소방공학과의 무궁한 발전 을 기원하고, 당당히 그 일원이 될 수 있도록 감사하며 노력하겠습니다.