

# 발포제의 성상과 위험성 및 화재감식사례

서상빈, 조남성

광주광역시 남부소방서 현장대응과

## 1. 서 론

### 1.1 연구 배경 및 목적

오늘날 산업현장의 건물, 설비 등의 보온 및 단열을 위해 우레탄폼, 스티로폼 등 다양한 종류의 플라스틱류 단열재를 사용하고 있다. 이들은 착화 및 연소속도가 빠르고 연소시 유독가스를 다량 발생시켜 심각한 재산 및 인명피해를 초래하고 있다.

본 연구에서는 여러 사업장에서 건물이나 설비 등의 보온 및 단열을 위해 많이 사용되고 있는 플라스틱류 단열재들에 대해 착화특성과 연소가스 분석을 통해 단열재의 화재위험 특성을 규명함으로써 단열재로 인한 화재로부터 인명과 재산피해를 최소화시킬 수 있는 예방대책 수립에 활용하고자 한다.

### 1.2 연구 방법 및 범위

각 산업현장에서 여러 용도로 사용되고 있는 발포제(단열재)의 종류와 물리화학적 성상 및 특성에 대하여 서술함으로써 발포제에 대한 이해를 높이도록 하였다. 그리고 전국과 광주광역시의 발포제 관련 화재발생현황을 분석하고, 몇 가지 화재사례를 연구

하여 발포제가 화재로 이어질 수 있는 원인을 파악하였다.

또한, 발포제를 사용함에 있어 화재가 발생할 수 있는 요인의 실증을 위하여 발포제의 착화 실험과 여러 전문 기관의 발포제 관련 실험결과를 통하여 발포제 관련 화재조사 시 화재감식 기법의 기준을 제시해 보고자 하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 발포제의 화재 특성

#### 2.1.1 발포제의 정의

발포제는 폴리머와 배합되어 스폰지나 스티로폼같은 다공성의 발포체를 제조하기 위한 첨가제로써, 원래 폼은 연속기포를 의미하고 스폰지는 독립기포를 의미하여 각각 지칭되었으나 현재는 두 가지가 혼용되어 사용되고 있다. 폴리머의 발포는 저밀도 제품의 생산으로 인한 원료절감, 전기절연성·단열성·방음성 향상, TV·오디오 등에 사용되어 음향효과 개선, 충격흡수력 향상 등의 기대효과를 얻기 위해 행해진다. 발포제의 종류는 물리적 발포에 사용되는 용제형(부탄, 프로판, 프레온가스)과 화학적 발포에 사용되는 반응형으로 대별되며, 이외에도 순수한 발포제의 경우 분해온도가 너무 높아 발포온도를 낮춰주고 발포제를 활성화시키는 역할을 담당하는 Kicker가 사용된다. 발포제는 그 분류기준이 여러 가지가 있지만 보편적으로 사용되는 분류기준은 발포제의 발포체 형성에 사용되는 가스의 방출 메커니즘에 따라 아래와 같이 구분된다.

#### (1) 화학적 발포제(Chemical blowing agents)

열분해, 화학반응에 의해 가스(gas)가 방출되는 형태이며 대부분이 고체상태의 화합물이다. 화학적인 변화 없이 주로 증발, 탈착 등의 형태로 기체화하고, 주로 액체상태의 물질이다. 페이스트수지 업계에서는 주로 화학적 발포제를 사용한다.

#### (2) 물리적 발포제(Physical blowing agents)

물리적인 발포제 선정 시 주요 고려사항은 다음과 같다.

(a) 액상에서 불활성일 것, 즉 수지 및 기타 첨가제에 물리적, 화학적 성질에 영향

- 을 미치지 않을 것
- (b) 수지 및 첨가제와 배합이 용이할 것
- (c) 기체상태에서도 열적으로 안정되고 화학적으로도 불활성일 것
- (d) 상온에서 증기압이 낮을 것
- (e) 기체화된 후 수지내에서 기체확산 속도가 낮을 것
- (f) 기타사항 : 무독성, 무취성, 경제성 등 물리적 발포제의 특징은 가격은 저렴하나, 효과적인 사용을 위해 정해진 발포체 생산을 위해 특별 제작된 설비를 필요로 하는 문제점이 있다. 물리적 발포제는 상태에 따라 기체상 발포제 및 액상 발포제로 대별되며 기체상의 발포제로는 질소, 공기, 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 가스 등이 있으며 질소와 공기는 고압공법, 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)는 저압공법에 주로 이용된다. 반면에, 액상 발포제는 110 ℃ 이하의 비교적 저비점을 갖는 휘발성 액체가 주로 사용된다.

## 2.1.2 발포제의 종류

### (1) Azodicarbonamide(ADCA)

ADCA는 Hydrazine과 Urea를 원료로 중합과 산화반응을 거쳐 만들어진다. 지금까지 나온 상업적 발포제 중 가장 경제적인 ADCA는 발포제중 유일하게 자기 소화성이 있어 화재위험성이 적고 저안정이 우수하다.

### (2) 개질 Azodicarbonamide

ADCA를 함유하는 여러 종류의 화합물을 개질 ADCA라고 하며 가장 간단하면서도 오래전부터 사용된 개질 ADCA로는 ADCA Paste가 있는데, 분산제와 Kickers의 성질을 포함하고 있다. ADCA Paste의 주활용 분야는 PVC Plastisol로써 분산성이 좋아지고 분해온도가 낮아진다.

### (3) OBSH

OBSH는 157~160 ℃의 분해온도를 가지는 흰색 결정성 분말로써 분해가스량은 125 ml/g이다. OBSH의 효과적 분해신장을 위해서는 Hydroxy Group을 가지고 있는 솔벤트와 같은 산화제가 필요하다. 클로로프렌고무, PVC, EPDM, 벽지 등에 광범위하게 쓰이고 있으며 유연성은 좋으나 가격은 약간 비싸다.

#### (4) DPT

DPT는 범용 발포제 중에서 가장 오래전부터 사용되고 있는 담황색의 미세한 결정분말로 분해온도 200~205 °C 정도에서 급격히 분해한다. 일반적으로 요소계 조제와 병용하고 분해온도를 조절하여 천연고무, 합성고무, 페놀 등의 발포에 널리 사용되며 단가당 발생가스량이 가장 많은 제품으로 경제적인 발포제다.

#### (5) TSH

TSH는 분해온도 105 °C 전후로 질소가스를 발생하는 백색 미분말로써 다른 발포제에 비해 가스배출이 완만하고 고무의 일반가황 조건과 비슷하기 때문에 주로 고무용 발포제로 사용된다. 또한 오염성과 수축률이 적고 미세한 기포를 갖는 발포제를 제조할 수 있으며 주로 벽지 등 고급제품에 사용되는 고가의 발포제다.

#### (6) PTSS

PTSS는 228~235 °C의 분해온도에서 140 ml/g의 가스를 방출시키는 백색 미분말로써 백색도가 요구되는 Plastisol 가공에서 초기발포의 위험성이 있는 카렌다성형에 사용되며 특히 ABS, HIPS, PP, 나일론, 변성PPO의 압출성형에서는 성형조건에 맞추어 사용할 수 있는 장점이 있다.

### 2.1.3 발포제의 생산현황

국내에서 생산되고 있는 단열재의 생산 및 시공업체를 지역별, 품목별로 조사한 결과 단열재의 국내 제조업체수는 약 170개사이며, 이중 71 %인 122개사가 발포스티렌 단열재 업체로 나타나 산업용 단열재의 주종이 발포 폴리스티렌 단열재임을 알 수 있다.

경질 우레탄 단열재 제조업체는 15개사 8 %를 점유하고 있어 발포 폴리스티렌 단열재 다음이었다. 무기질 단열재인 암면, 유리면의 생산이 많은 것은 사용온도 범위가 높은 관계로 산업용에 많이 사용되고 있다고 생각된다.

### 2.1.4 발포제의 화재 특성<sup>1)</sup>

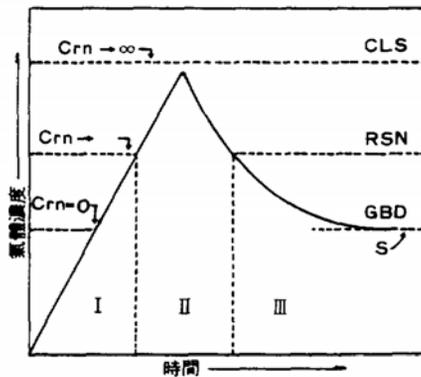
단열재 화재는 아파트, 빌딩 및 공장 등에서 가장 많이 발생하였으며, 발화원은 용접·용단 불티, 누전 및 배선불량 등 전기에 의한 것과 담뱃불 순이었다. 플라스틱류

단열재의 착화온도는 SIT가 410~510 °C 범위이고 FIT는 370~450 °C 범위에 있다. 착화 시간은 폴리에틸렌시이트(비난연)가 가장 짧았으며, 폴리스틸렌 보드(압출법)가 가장 긴 것으로 나타났다. 일반적으로 밀도가 증가하면 착화시간은 길어지는 경향을 나타내었으며, Heat flux의 크기가 증가하면 착화시간은 짧아지는 것으로 나타났다. 연소가스 분석에서 단열 재료는 30분 동안 CO에 노출될 때 사망하는 농도의 결과 값을 갖고 있었다. 또한, CO<sub>2</sub>를 발생하는 것으로 나타났다.

### 2.1.5 발포제의 생성원리<sup>2)</sup>

#### (1) 기포의 생성

용액 속에 기체가 발생하면 기체농도가 증가하여 포화농도를 넘게 된다. 과포화 상태에서는 기포의 생성이 시작되며, 기포생성으로 용액속의 기체농도가 급격히 감소하여 기포생성 속도가 줄어든다. 용액속의 기체는 생성된 기포속의 기체농도가 줄어들며 포화농도에 도달하면 확산이 끝난다. 이때 기체의 확산은 작은 기포에서 큰 기포로 일어나며 이 속도는 액상의 온도나 점도 등에 의해 결정된다.



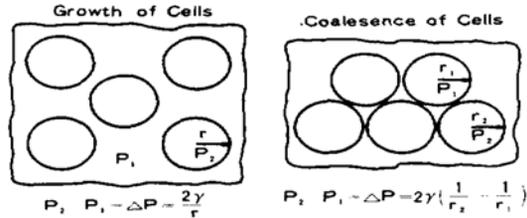
Crn=Nucleation rate  
 CLS=Critical limiting supersaturation  
 RSN=Rapid self-nucleation partial relief of supersaturation  
 GBD=Growth by diffusion  
 S=Saturation

Fig. 3. 氣體濃度, nucleation, cell의 成長과의 關係

Figure 1. 기체농도, nucleation, cell의 성장과의 관계

기포생성에 영향을 주는 인자는 기포생성 촉진제, 기체농도, 반응속도, 계면활성제 등이 있다.

계면활성제에 의한 표면장력의 감소는 기포생성에 필요한 기체농도를 낮추어 미세한 많은 기포가 생성되게 한다.



. Cell의 成長과 消滅의 關係

Figure 2. Cell의 성장과 소멸의 관계

(2) 기포의 성장과 안정화

유체속에서 기포의 성장은 기포 내외부의 압력차에 의해 조절된다. 이 압력차는 반경이 작은 기포의 내부 압력이 큰 기포의 내부 압력보다 크다. 작은 기포는 없어지려는 경향이 있고, 큰 기포는 더욱 커지며 기산이 지남에 따라 기포의 크기는 증가하고 입자수는 줄어든다. 발포 조성물속에 표면장력을 떨어뜨리는 계면활성제를 첨가하는 것은 이와 같은 원리를 이용한 것이다. 발포의 생성 성장에 의한 자유에너지는 표면적에 비례하여 증가 하므로 표면적을 될 수 있는 한 적게 하려는 경향이 있다.

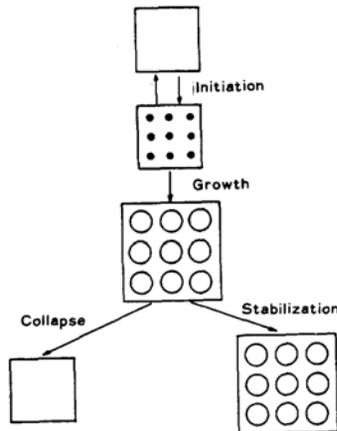


Fig. 2. 發泡體의 生成 段階

Figure 3. 발포체의 생성단계

### (3) 발포체 물성의 결정 인자

발포체의 물성은 구조적 인자라고 불리는 발포체의 조성 및 형태와 관계가 있다. 이들 구조적 인자가 발포체 물성에 어떤 영향을 주는지 살펴보기로 한다.

#### (a) 비중

고분자 발포체의 압축강도, 인장강도를 포함한 모든 강도적 성질을 결정하는 직접적인 인자이며 비중이 증가함에 따라 강도적 성질이 좋아진다. 그러나 대부분의 경우 단열성과 가격은 비중이 감소할수록 좋아진다.

#### (b) 기포의 구조

발포체 중의 기포 크기, 모양, 개개 기포의 배치 등은 발포체 물성을 좌우하는 중요한 인자이다.

##### 1) 발포의 크기

발포의 크기는 발포체의 기계적 열적 성질을 좌우한다. 기포 크기가 작고, 기포 수가 많을수록 탄성, 전기 및 열전도도, 강도적 물성이 좋아진다.

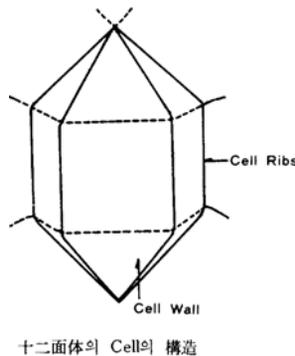


Figure 4. 십이면체 Cell의 구조

##### 2) 기포의 모양

기포의 모양은 최종제품의 비중과 발포처리 제조 시 팽창해서 안정화되지 않았을 때 발포구조에 가해진 외부의 힘에 의해 결정된다. 외부의 힘이 없이 발포체를 제조할 때 기포의 부피가 70~80 %이하가 되면, 기포는 원형이나 타원형이 되려고 한다. 기포의 부피가 이보다 클때 정12면체를 포개놓은 형태에 가까워진다.

##### 3) 열린 기포의 비율

기포의 많은 수가 서로 연결되어 있으면 기체의 유동이 자유로우며 열린 기체가

한 기포에서 다른 기포로 얼마나 빨리 지나갈 수 있는지에 의하여 결정된다. 열린 기포의 함량이 많으면 수분이나 증기의 투과도가 크므로 투과나 흡수 방음 등의 용도에 사용하기 좋다. 반대로 닫힌 기포의 함량이 많으면 수분이나 증기의 투과도가 낮고 강도 및 단열성이 증가하므로 구조적 응용, 단열재, 부표 등으로 사용할 수 있다.

#### (4) 고분자 발포체의 응용

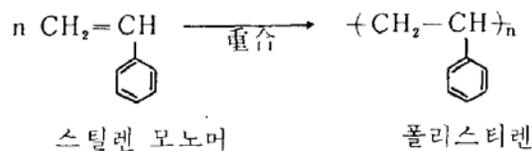
고분자 발포체의 화학적 안정성, 온도 안정성, 난연성 내후성 등의 물성은 고분자 자체의 물성에 의해 결정되므로 고분자 발포체의 응용 시에는 고분자의 선택이 중요하다. 고분자 발포체는 고분자중에 기체가 분산되어 있으므로 다음과 같은 특수한 성질을 가지며 이것을 응용하여 여러 가지 용도에 사용하고 있다.

- (a) 기체가 고분자보다 가볍기 때문에 공간의 채움이나 포장에 고분자 발포체가 많이 쓰이며 비중이 낮기 때문에 부표로도 사용된다.
- (b) 고분자 발포체는 강도가 없는 기체를 첨가했으므로 강도는 저하되나 무게에 대한 강도(Weight to Strength ratio)가 높아진다.
- (c) 자동차 부품이나 여러 가지 장식물로 많이 사용된다.
- (d) 열린 기포의 구조를 갖는 발포체의 경우 방음제로 많이 사용된다.
- (e) 고분자 발포체는 좋은 전기적 성질을 갖는다.
- (f) 단열재

고분자 발포체는 저렴한 가격과 높은 단열성 때문에 단열재로 가장 많이 사용되고 있다. 이에 대한 간략한 제조방법과 응용면을 설명코자 한다.

#### 1) 발포 폴리스티렌

폴리스티렌은 스티렌 단량체로부터 합성된다.



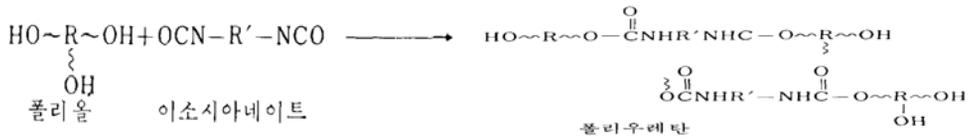
중합시에 저비점 탄화수소, 예를 들어 펜탄 같은 것을 발포제로 첨가하면 발포제가 함유된 비드가 생성되고 이 비드에 열을 가하여 발포성형 시키면 발포 폴리스티렌이 제조된다.

### 2) 폴리우레탄 발포체

폴리우레탄은 이소시아네이트기(-NCO)를 두개 이상 가진 폴리이소시아네이트와 히드록시기(-OH)를 삼개이상 가진 폴리히드록시 화합물(폴리올)과의 반응으로 생성된다.

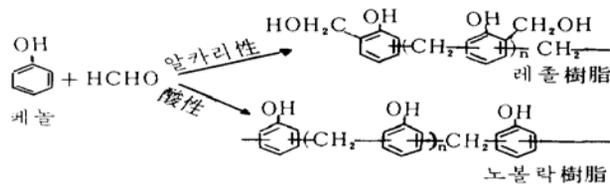
여기에 사용되는 폴리올은 구조상 폴리에스테르계, 폴리에테르계 그리고 히드록시기를 가진 천연물로서 피마자유와 그의 유도체계로 나뉜다. 이중에 폴리에스테르계와 폴리에테르계가 가장 널리 사용된다. 발포제로는 물 혹은 불소화 탄화수소 등이 사용된다. 여기서 물은 과잉의 이소시아네이트기와 반응하여 이산화탄소를 발생하기 때문에 발포제로 유용하다.

대표적인 용도로는 파이프 피복재, 모든 중량의 냉동기, 경량샌드위치형 판넬의 중심재, 이중벽과 지붕의 단열재이다.



### 3) 페놀 발포체

페놀과 포름알데히드와의 축합물을 발포시킨 것으로 중합상태에 따라 둘로 나뉜다. 산성에서 페놀을 과잉으로 하여 중합시킨 것을 노볼락(Novolac) 수지, 알칼리성에서 포름알데히드를 과잉으로 하여 중합시킨 것을 레졸(Resole)수지라 부르며 화학적 구조의 차이는 아래와 같다.



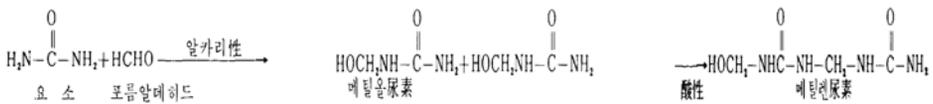
레졸 수지는 분자량이 작고 메틸올 기(-CH<sub>2</sub>OH)에 의해 수용액 상태로 될 수 있으며, 강산에 의해 액이 산성이 되면 물을 잃으며 고중합도의 삼차원적 구조로 바뀐다. 페놀 수지의 합성 후 이것에 황산, 염산, 인산 등과 혼합 발포시키면 페

늘 발포체가 된다.

페놀 발포체는 판상과 벽돌 형태 그리고 현장에서 전진발포시공으로 사용된다. 저렴한 가격이며, 양호한 기계적 강도를 가진다. 자기소화능력이 있으며 높은 온도에서도 양호한 강도를 유지한다. 대표적인 용도로는 샌드위치형 판넬 내의 중심재 등이 있다.

4) 요소-포름알데히드 발포체

요소와 포름알데히드의 축합물을 발포시켜 얻은 발포체로서 페놀 발포체와 마찬가지로 산성에서와 알칼리성에서 반응시킬 때 생성되는 물질이 각각 다르다. 여기서 실제로 발포체 제조에 사용되는 수지는 요소 대 포름알데히드의 비를 1:1.6~2로 하여 알칼리성에서 반응시킬 때 얻어지는 것이다. 이것을 발포제를 함유한 산용액을 촉매와 혼합하면서 압축공기로 스프레이 할 때 발포체가 얻어지며 서서히 경화되어 발포체가 된다.



요소-포름알데히드 발포체는 슬라브 혹은 현장발포시공으로 사용 된다. 특성으로는 양호한 단열효과를 나타내나 기계적 강도가 떨어진다고 보고되어 있다. 매우 낮은 밀도를 가지고 있어 미리 설치된 건축에 발포된다. 대표적인 용도로는 이중벽의 단열이다.

5) 발포 PVC

중합된 그 자체만의 PVC(Polyvinyl chloride)는 단단하고 포약한 플라스틱이나 디옥틸프탈레이트(DOP) 같은 가소제에 첨가하여 가첨하면 액상의 플라스틱올(plasticol)이 생성된다.



이것을 압축용기에 넣고 이산화탄소 같은 불활성 가스로 압력을 가하면서 용해시킨후 압력을 풀면서 발포시키면서 냉각하여 발포체를 제조한다.

대표적인 용도로는 샌드위치형 판넬, 저온저장용기이다.

### 3. 발포제에 의한 화재통계와 화재사례

#### 3.1 발포제에 의한 화재통계<sup>3)</sup>

본 연구를 시작하면서 우려되었던 부분이 발포제에 의한 화재 통계가 없고, 현 시스템에서 통계산출이 어려운 상황에서 차선택으로 최초 착화물(우레탄)에 주안점을 두게 되었다. 2007년 1월부터 2009년 12월말까지 전국 및 광주광역시의 화재발생현황을 살펴보면 전국 총 111,975건, 광주 4,637건의 화재가 발생하여 그 중에서 발포제 화재는 전국에서 216건, 광주에서 6건이 발생하였다. 【Table 1】에서처럼 발포제 화재는 전체 화재에서 전국 0.19%, 광주 0.13%의 점유율을 나타내고 있어 화재발생빈도가 낮은 것으로 나타났다.

【Table 1】 전국 및 광주광역시 발포제 화재발생건수 분석(2007.1~2009.12)

【Table 1.1】 전국

구분 (년도)	총 발생건수	발포제 화재			점유율	비고
		건수	인명피해(사망/부상)	재산피해(천원)		
2007	47,882	73	23(12/11)	2,620,939	0.15	
2008	49,631	76	3(0/3)	1,145,490	0.15	
2009	47,318	67	7(0/7)	1,065,732	0.84	
총계	111,975	216	33(12/21)	4,832,161	0.19	

【Table 1.2】 광주광역시

구분 (년도)	총 발생건수	발포제 화재			점유율	비고
		건수	인명피해(사망/부상)	재산피해(천원)		
2007	1,386	1	0	39	0.07	
2008	1,711	2	0	13,265	0.12	
2009	1,540	3	0	556	0.19	
총계	4,637	6	0	13,860	0.13	

#### 3.2 발포제 화재와 소송사례

발포제 화재사례를 통해 발포제의 위험성과 화재특성을 이해하고, 화재예방을 위해 최근 국내·외에서 발생한 발포제 관련 화재와 소송 사례를 살펴보면 다음과 같다.

### 3.2.1 화재사례(발포제 폭발) 1

- (1) 일 자 : ○○○○. ○○. ○○.
- (2) 원 인 : 전기스파크 추정
- (3) 개 요 : 작업자가 발포제 입도분류 작업 중 건조기 내부에서 미상 화종의 이물질 유입으로 불티가 발생되어 폭발한 화재로 추정됨

【Figure 1】 화재현장 사진



#### (4) 대상물 현황

##### 위험물시설 현황

설치장소		위험물 시설			
구조	규모	시설구분	저장·취급위험물	수량	비고
블록조	3/0 11,374 m <sup>2</sup>	제조소	제5류 아조화합물류	30톤	제조허가량

#### (5) 소방시설 등 현황

- (a) 소화난이도 : 소화기 초기 자체진화 실패, 선착소방대 연소확대 저지, 4개분대 자체탱크와 소화전 활용 진압
- (b) 소방시설 : 자동화재탐지설비, 옥내소화전, 포소화전
- (c) 자체소방대 현황 : 해당없음

#### (6) 사고 전 조치사항

##### 소방관서(최근 1년간)

조치구분	날짜	조치결과	비고
정기소방검사	2005.03.08	해당사항 없음	

(7) 피해 현황

(a) 재산피해 : 건물 일부와 발포제 수리비 등 470만원

(b) 인명피해 : 해당없음

(8) 관련법 위반사항과 조치계획

(a) 위반사항 : 해당없음

(b) 조치결과 : 해당없음

(9) 문제점과 개선대책

(a) 문제점 : 중국산 발포제의 입도분류 작업 시 건조기내 미상의 이물질의 반응으로 인한 폭발

(b) 개선대책 : 위험물질의 성분 분석 등 면밀한 기술적 검토 후 작업토록 하여 화재사고 미연에 방지

### 3.2.2 화재사례 2

(1) 일 시 : 2000. 00. 00. 00:00경

(2) 장 소 : 0구 00동 00번지 00공사장

(3) 원 인 : 부주의(용접 추정)

(4) 개 요

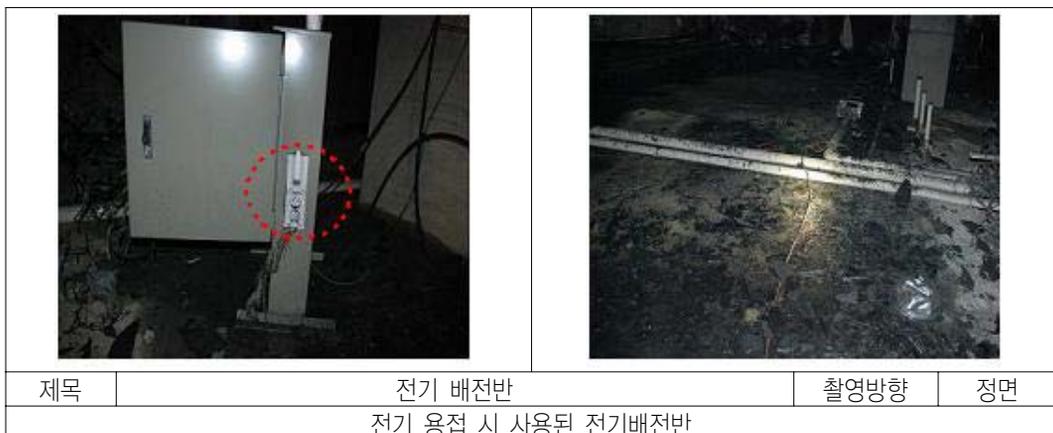
00동 공장 화재 출동지령에 따라 현장 도착한 바 공사 중인 김치000 전면과 후면 부분에서 검은 연기가 외부로 분출되고 있는 상태였음. 신고자(김00.남.76년생.00건설 대리)에 의하면 사무실(00건설)에서 업무를 보고 있는데 실화자로 추정되는 사람이 자신의 사무실(00건설)로 들어와 소화기를 요구하였고, 소화기를 주면서 동행하여 확인해 보니, 조치할 수 없는 상황이 되어 사무실로 돌아와 119에 신고 후 창문을 통해 대피하였다고 진술함. 이00(남.76년생.00소속 용접작업팀장)에 의하면 10:00경부터 작업인부 3명과 함께 대형 냉장고 판넬 설치작업을 시작하였으며, 용접작업 5개소 중 4개소 작업 완료 후 다섯 번째 장소 용접 작업 시작 시 우레탄부분에서 불꽃이 발생하여 비치해 둔 소화기로 소화를 시도하였다고 진술함. 김00(남.72년생.00테크소속)에 의하면 화재가 발생한 장소(양념창고)와 인접한 장소(냉장

탈수실)에서 당일 배수관 우레탄 작업을 완료하였고, 화재가 발생했다는 소리를 듣고 확인해 보니 우레탄 부분에 불꽃이 보여서 소화기로 소화를 시도하였다고 진술함. 현장 조사한 바 지하층 일부가 연소된 상태로 양념창고와 냉장 탈수실 예정부지를 중심으로 소실된 것으로 보아 발화지역으로 추정되며 발화지역 내 전기시설(배전반)부분에서는 특이점이 발견되지 않는 점. 미소화원의 특이점을 발견할 수 없는 점. 방화의 특이점 발견되지 않는 점. 발화 지점내 용접용 작업도구(용접봉, 용접기 등)가 발견되는 점. 기타 다른 화인이 없는 것으로 보아 용접 작업 시 발생한 용접불티가 우레탄에 착화되면서 발생한 화재로 추정됨.

【Figure 2】 화재현장 사진



【Figure 3】 화재현장 사진



【Figure 4】 화재현장 사진

			
제목	소화기	촬영방향	정면
현장에서 사용된 것으로 추정되는 소화기의 모습			

【Figure 5】 화재현장 사진

			
제목	판넬의 소훼 흔	촬영방향	정면
발화지점 부분에서 발견된 판넬의 소훼흔			

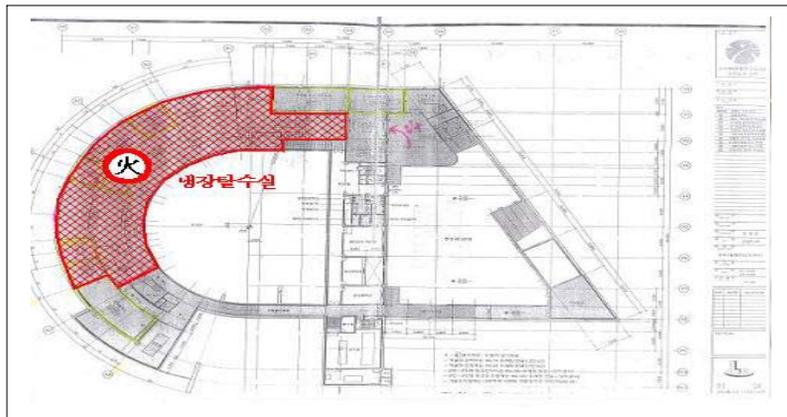
【Figure 6】 화재현장 사진

			
제목	용접봉과 전기 용접기	촬영방향	정면
발화지점 부분에서 발견된 용접봉과 전기 용접기			

【Figure 7】 화재현장 사진



【Figure 8】 화재현장 평면도



## 4. 발포제 관련 실험

### 4.1 실험 개요

오랜 동안의 경험으로부터 조건설정이 표준화되어 있는 석유화학공업과는 달리 정밀화학공업에 있어서는 대상이 되는 공정의 반응조건 등을 제조자 스스로 결정해야 하는 경우가 많다. 또한, 취급하는 화학물질의 열분해 또는 반응위험성에 대한 위험성 평가는 물론 물질안전자료(MSDS)도 확보되지 않은 상태에서 취급되는 경우가 많아

폭발·화재로 인한 중대재해의 잠재적 위험성이 매우 높은 상태이다.

본 실험에서는 폼 생성 후 착화실험을 통해 착화의 특성을 알아보고, 전문연구기관의 실험에서는 공정에서의 최적 운전조건 수립이나, 적정 저장온도 결정 등에 필요한 자료를 제공 할 수 있을 것으로 사료된다.

## 4.2 실험

본 실험은 먼저 우레탄 폼 생성 후 공간(밀폐, 개방)과 시간(생성 직후, 생성 1시간 후)의 차이를 두고 착화여부를 측정하였다.

### 4.2.1 착화실험 재료 구성

【Table 2】 발포제 착화 실험 재료

연 번	품 명	수 량	비 고
1	난연성 다목적 폴리우레탄 폼	960ml	난연성
2	비디오 카메라	2대	촬영
3	DSLR	1대	
4	전기용접기	1대	
5	소화기	1대	
6	바이스	1대	
7	철제통	1개	혼합유

### 4.2.2 착화 실험 주변환경

날씨	온도	습도	풍향	풍속
구름많음	25.4 °C	77 %	남풍	3.6 m/s

### 4.2.3 착화 실험 과정

【Figure 9】 발포제 착화실험 준비



실험준비 과정



실험준비 과정

#### 4.2.4 착화 실험

##### (1) 실험 방법 1

철제통 내부에 우레탄 폼 생성하여 밀폐 1분 후 철제통 직상 부(높이 60 cm)에서 전기용접 불꽃으로 착화여부 측정

실험 결과 : 전기용접 불꽃이 철제통 내부의 우레탄 폼에 접촉되는 순간 착화·발화됨.

【Figure 10】 발포제 착화 실험 사진



철제통 내부에 우레탄 폼 생성



우레탄 폼 생성 1분 후 용접 준비



용접시작



우레탄 폼 착화(불꽃높이 : 60cm)

##### (2) 실험 방법 2

철제통 뚜껑에 우레탄 폼 생성 1분 후 철제통 직상 부(높이 60 cm)에서 전기용접 불꽃으로 착화여부 측정

실험 결과 : 전기용접 불꽃이 철제통 뚜껑의 우레탄 폼에 3~4회 접촉 되자 약 10 cm높이의 작은 불꽃이 발생되면서 착화·발화됨.

【Figure 11】 발포제 착화 실험 사진



철제통 뚜껑에 우레탄 폼 생성



우레탄 폼 생성 1분 후 용접 준비



용접시작



우레탄 폼 착화(불꽃높이 : 5cm)

### (3) 실험 방법 3

바닥에 약 2 m 길이로 우레탄 폼 생성 1분 후 우레탄 폼 직상 부(높이 60 cm)에서 전기용접 불꽃으로 착화여부 측정

실험 결과 : 전기용접 불꽃이 우레탄 폼에 접촉 되자 약 10 cm높이의 작은 불꽃이 발생되면서 착화·발화되었고, 물을 뿌릴 경우 순간 소화 되었다 재 점화되는 유류화재의 성질이 나타남.

【Figure 12】 발포제 착화 실험 사진



바닥에 우레탄 폼 생성



우레탄 폼 생성 1분 후 용접 착화



물로 소화(재 점화 반복)



소화 후 우레탄 폼

#### (4) 실험 방법 4

철제통 뚜껑에 우레탄 폼 생성 1시간 후 철제통 직상 부(높이 60 cm)에서 전기용접 불꽃으로 착화여부 측정

실험 결과 : 전기용접 불꽃이 철제통 뚜껑의 우레탄 폼에 수 십회 접촉 되자 약 10 cm 높이의 작은 불꽃이 발생되면서 착화·발화됨.

【Figure 13】 발포제 착화 실험 사진



철제통 뚜껑에 우레탄 폼 생성



우레탄 폼 생성 1시간 후 용접 준비



용접시작



우레탄 폼 착화

## 5. 발포제 화재 감식기준 제시

### 5.1 발화지점 판정

발포제 화재의 대부분은 발포제를 주로 사용하는 장소인 공사장 등 산업현장으로 발포제 화재가 발생한 경우 발포 작업을 시행한 장소 중심으로 확인한다.

화재조사 시 관계자의 진술을 통한 발포 작업의 위치 파악, 화재의 전체적인 연소상황, 내부의 가연물의 위치 및 양, 벽면과 천장 등의 연소패턴 및 방향성 등을 전반적으로 고려하여 발화지점을 검토·확인한다.

또한 야외에서 화재가 발생한 경우는 기상 여건(풍향, 풍속)를 고려하여 중점적으로 연소상황을 판단하여 발화지점을 확인한다.

## 5.2 발화요인의 검토와 증점 조사사항

발포제는 제품 자체에 난연성을 가진 것으로 표시되어 있고, 대부분의 발포 작업자가 발포제는 화재가 발생되지 않는 것으로 인식하고 있으나, 본 연구의 착화 실험을 통해 알 수 있듯이 발포 작업 후 24시간정도 경과 시 완전 경화되어 난연성을 띠며, 충전재는 대부분 가연성 가스(LPG, DME)로서 고온의 장소에 보관이 금지되어 있으므로, 관계자의 부주의(용접, 스파크 등)에 의하여 발생되므로 소수의 자연발화로 인한 화재를 제외하고, 대부분의 화재는 발포작업과 완전경화 되기 전의 발포된 폼이 선행되고, 점화원(용접, 스파크 등)의 존재가 전제되어야 한다.

공사장 등 산업현장에서 발화한 경우 우선 화재 발생 전 발포 작업을 하였던 사실, 점화원(용접, 절단 등)의 사용흔적을 입증해야 한다. 그러기 위해서는 관계자 또는 신고자의 진술확보를 통해 발포제의 종류, 사용량, 작업시간, 연소 시 화재의 특징, 점화원의 존재여부 등을 확인한다. 만약, 부주의가 아닌 자연발화로 판단되는 경우는 관계자의 진술 및 현장감식을 통해 발포제의 보관 환경(수납퇴적장소의 온도, 습도, 통풍상황), 건조과정, 운반과정 등을 조사한다. 또한 다른 화원을 부정하는 상황증거를 조사한다.

최종적으로 상기의 내용을 종합적으로 판단하여 부주의로 발생한 화재인지, 아니면 발포제 결함의 기계적인 요인, 화학적 요인, 전기적 요인, 자연적인 요인 등에 의하여 발생한 화재인지를 결정한다.

## 5.3 연소확대 사유와 문제점 등 검토

발포제 화재는 한 번 착화된 경우 쉽게 소화되지 않는다. 특히 가정 및 산업현장 등에서 발포제 화재 시 물로 소화할 경우 일부 유류화재의 성질이 나타나는 것을 알 수 있다. 이처럼 어떠한 사유로 연소가 확대되었는지 화재현장내의 가연물의 존재여부 및 양, 관계자의 부재, 화재인지 지연, 화재당시 기상상황과 화재장소의 내부온도 및 통풍상태 등을 조사한다.

## 6. 결 론

발포 플라스틱 단열재의 화재위험성 및 화재사례를 분석하였으며, 단열재의 화재위험 특성 파악을 위해 발포 플라스틱류에 대한 연소가스와 착화실험 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 발열개시온도는 136~151 °C로서 시료입도가 작을수록 보다 낮은 온도에서 발열이 시작되는데 이와 같은 결과로부터 ADCA의 입도가 작을수록 발열반응이 일어나기가 용이하다는 것을 알 수 있다.<sup>4)</sup>
- (2) 최대자기발열속도는 27~630 °C/min로 매우 크게 나타나 반응이 매우 격렬하게 진행됨을 알 수 있고 최대자기발열속도를 나타내는 온도(최대반응온도)는 182~215 °C 구간에서 나타나는데 입도가 작을수록 낮은 온도쪽에서 나타난다.<sup>4)</sup>
- (3) 연소가스 분석에서 단열 재료는 30분 동안 CO에 노출될 때 사망하는 농도의 결과 값을 갖고 있었다. 또한, CO<sub>2</sub>를 발생하는 것으로 나타났다.<sup>1)</sup>
- (4) 산업현장에서 용접작업자 대부분이 우레탄은 착화가 잘 되지 않는 것으로 인식하여 용접 작업 시 안전의식이 결여된다는 점과 밀폐된 공간에서 우레탄 폼 작업 시 점화원과 접촉할 경우 화재 발생가능성이 상당히 높다는 점을 알 수 있었다. 발포제 관련 화재통계 산출의 어려움과 발포제에 의한 화재 발생 가능성이 희박하지만, 발포제가 주로 사용되는 사업장의 경우 대형재난의 발생 가능성이 존재하므로 생산자는 보다 안전한 발포제를 생산하고, 사용자는 안전 수칙 준수 등 안전한 사용으로 안전 한국건설에 일조하였으면 하는 바램으로 본 연구를 마친다.

### 〈참고문헌〉

- [1] 이근원, 김관웅, 양성환 “발포 플라스틱 단열재의 착화특성 및 연소가스 분석” 학술발표자료, 한국안전학회 2000년도 춘계 학술논문 발표회 논문집 2000 (2000. 01. 01)

- [2] 이서봉 “발포체의 생성원리와 응용” 학술지, Polymer(Korea) Vol. 10, No.5, October 1986
- [3] <http://www.firedata.go.kr>(국가화재정보시스템)
- [4] 김관응 “ARC를 이용한 발포제 ADCA의 열분해 특성 연구” 학술발표자료, 한국 안전학회 2001년도 공동학술대회 (2001. 01. 01)