

# 가연성 배기덕트-흙 화재위험성 평가에 관한 연구

윤여송<sup>†</sup> · 이영순<sup>\*</sup>

서울산업대학교 에너지환경대학원 · \*서울산업대학교 안전공학과  
(2009. 10. 25. 접수 / 2010. 1. 26. 채택)

## A Study on the Fire Risk Assessment of Combustible Exhaust Duct-fume

Yeo-Song Yoon<sup>†</sup> · Young-Soon Lee<sup>\*</sup>

Graduate School of Energy and Environment, Seoul National University of Technology

<sup>\*</sup>Department of Safety Engineering, Seoul National University of Technology

(Received October 25, 2009 / Accepted January 26, 2010)

**Abstract** : When back-out & firing Process applies heat, hume is piled up in exhaust duct by organic compound and it have high dangerousness. There by, the process is happening a lot of damage that is exhaust duct fire. However we do not have certain fire dangerousness estimation and digestion countermeasure. So we need preventive measure. Back-out & firing is a process which has fine structure, electrical and mechanical characteristics, such as firing kiln and back-out kiln which has pipe line and box type. The box oven is made of heating coil, fan motor and control panel. Back-out & firing process has air circulation institution of quick ventilation type. When we operate this process for long time, fire can break out easily. Duct is made by zinc shredder. If fire breaks out in duct inside, fire by deposit fume can be dispersed easily. Accordingly, This project estimate danger for back-out & firing process exhaust duct through real fire test. And there is purpose of study to establish preventive measure.

**Key Words** : back-out & firing process, exhaust duct fire, duct fume

### 1. 서론

Back-out & Firing Process는 특성상 항상 열에 의해 가열되고, 가열 시 발생하는 유기화합물에 의해 배기 덕트로 흙이 퇴적되어 높은 화재위험성이 높다. 최근 국내외적으로 유사 공정의 배기덕트 화재가 발생하여 큰 피해를 초래하고 있으나 이와 관련한 화재 위험성평가 및 소화대책이 없는 것이 현실이다. 가소-소성공정은 제품에 미세구조와 전기적, 기계적 특성을 지니도록 하기 위하여 제품에 섞여 있는 바인더를 제거하고 냉각시키는 공정이다.

이런 Back-out & Firing Process는 주로 가소로와 소성로를 많이 사용하는데 터널식 소성로와 박스형태의 오븐을 사용하기도 한다. 박스오븐은 열선코일과 팬모터 그리고 제어판으로 구성 되어 있다.

이런 가소-소성공정은 주로 급배기 형태의 공기순환시설을 갖추고 있으며, 장시간 공정을 운전하는 경우 덕트에 휘발성 흙이 퇴적되어 화재위험을

가중시킬 수 있다. 덕트 재질은 주로 아연도강판을 사용하는데 장기간에 걸쳐 흙 등이 퇴적되어 이로 인한 화재가 발생하면 화염이 덕트 내부로 일시에 전파되어 상당한 피해를 줄 수 있다.

따라서 본 연구에서는 Back-out & Firing Process 배기덕트에 대한 화재 위험성을 실험화재 실험을 통하여 평가하고 방지대책을 수립하는데 목적이 있으며, 이에 따른 화재 소화설비 중 CO<sub>2</sub> 소화설비와 Water mist 소화설비의 작동실험을 통하여 두설비의 소화성능을 비교하여 배기 덕트화재 시 소화설비의 적용효과를 예측하는 자료로도 활용하는데 목적이 있다.

### 2. 실험

#### 2.1. 실험 환경

본 실험에 사용된 실험 장치는 가소-소성공정과 동일한 덕트 내부 환경조건을 만들고, 실제 설치된 배기덕트와 동일한 모델의 구조로 제작하였다.

소화실험장치는 CO<sub>2</sub> 소화설비와 Water mist소화

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
tntyys@yahoo.co.kr

설비의 두 가지를 설치하여 실제 화재 실증시험을 실시하여 각각의 소화성능을 확인하고 비교하였다.

## 2.2. 실험기구 제작

본 실험에서는 우선 배기덕트를 제작 하였는데 가소-소성공정과 동일한 구조로 Fig. 1과 같이 메인 덕트(600\*300mm, 6M)에 두 개의 서브 덕트(400\*250mm, 6M) (500\*300, 6M)를 연결하였다.

CO<sub>2</sub> 소화설비는 Fig. 2와 같이 스테인레스 강관 15A를 사용하였으며, 배관은 덕트에 설치한 지지대에 U볼트를 사용하여 견고히 고정시키고 헤드는 6m 덕트의 두 지점에 총 4개의 헤드(15A)를 설치하였으며, 헤드내부에는 수리계산에 의하여 계산된 값(2.3mm)의 오리피스를 설치하여 실험의 오차가 없도록 하였다.

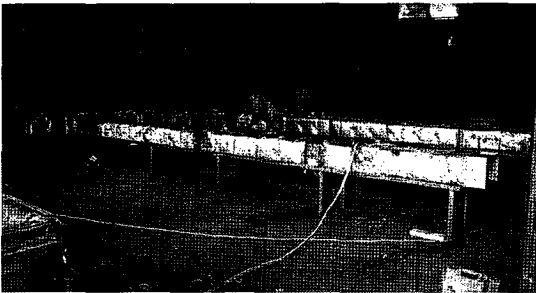


Fig. 1. Exhaust duct model manufacture.

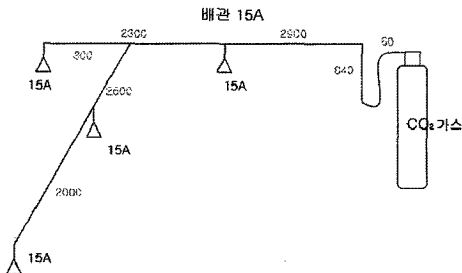


Fig. 2. CO<sub>2</sub> Fire fighting equipment diagram.

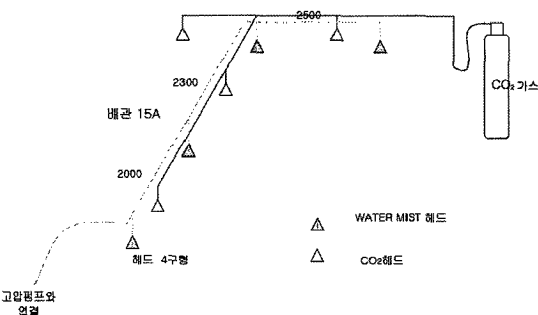


Fig. 3. Water mist fire fighting equipment diagram.

Water mist 소화설비는 Fig. 3과 같이 배관 및 부속으로 1/2inch SUS Pipe를 사용하였고, 배관은 Support frame에 U볼트를 사용하여 견고히 고정시킨 구조로 하였고, 6m 덕트의 두 지점 총 4개 지점에 덕트화재 적응성이 있는 방사각조정이 가능한 Water mist 헤드를 설치하였다.

## 2.3. 실험방법

실험방법은 배기덕트 내부에서 발생한 흙(Fume)의 휘발성 침전물의 화재성상을 분석하여 발화에서 연소 확대까지 소요시간, 화재전파속도, 연소 확대 범위를 측정하였다.

CO<sub>2</sub> 소화설비는 덕트 모델 상부에 낸 구멍을 통하여 흙 액화물질을 부어 고르게 퍼지도록 하고, Heptane(3L)를 같은 방법으로 덕트 내부에 붓고 소화약제 방출점화 30초 후에 CO<sub>2</sub> 소화약제를 방출시켰다.

Water mist 소화설비도 덕트 모델 상부에 낸 구멍을 통하여 흙 액화물질을 부어 고르게 퍼지도록 하고 Heptane(3L)를 같은 방법으로 덕트 내부에 붓고 소화약제 방출점화 30초 후에 CO<sub>2</sub> 소화약제를 방출시켰다.

이때 공급펌프의 사양은 헤드 당 토출압력은 80 bar, 토출 양은 8lpm, 약제방사시간은 30sec로 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

CO<sub>2</sub> 소화설비 시험은 Thermocouple을 이용하여 온도변화 분석과 위치별로 열화상카메라를 설치하여 온도 값을 측정하였다.

### 3.1. CO<sub>2</sub> 소화설비 실험결과

CO<sub>2</sub> 소화설비 시험에서는 Fig. 4와 Table 1과 같은 측정값을 얻을 수 있었다.

점화 이후의 온도변화는 점화 후 20초에 T-1과 T-2의 Peak온도가 나타나며, 약제방사 이후부터 온도가 완만하게 하강하는 것으로 덕트 내 가연물이 소진되었음을 알 수 있다. Peak온도는 화재전파 방향을 따라 T-1, T-2에서 T-3, T-4 방향으로 순차적으로 나타났다. 서브 덕트로부터 메인 덕트로의 화재전파 양상 T-1 과 T-2의 Peak온도가 점화 약 20초 경과 후 거의 비슷한 시점에 나타나는 반면, T-3와 T-4의 피크 점은 점화 약 50초 경과 후에 나타났다. 또 점화 60초 후에 소화약제를 방사하였더니,

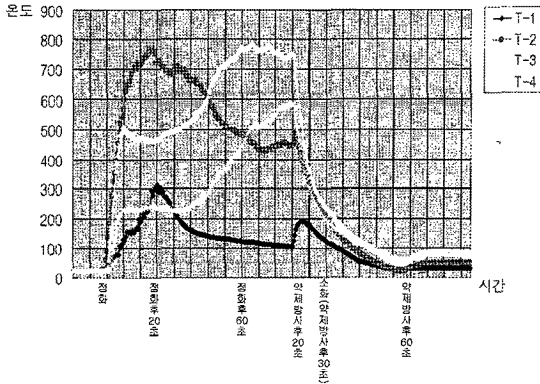


Fig. 4. CO<sub>2</sub> Fire fighting equipment test a result,

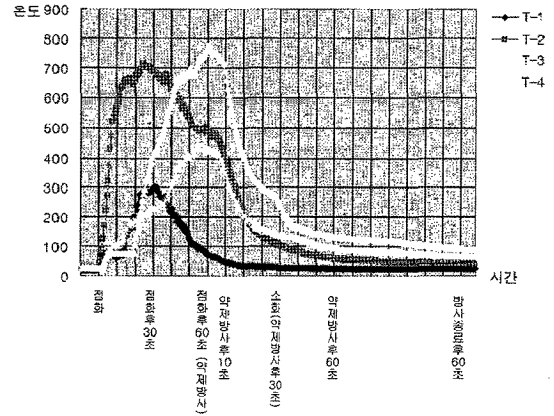


Fig. 5. Water mist fire fighting equipment test a result,

Table 1. CO<sub>2</sub> Fire fighting equipment test measurement

Time	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5
	℃	℃	℃	℃	
14:59:00	23.631	23.907	23.708	22.452	점화전
14:59:00	24.333	23.706	24.009	22.151	점화
14:59:10	113.447	569.25	496.535	227.033	점화 10초
14:59:20	223.762	748.059	467.156	234.83	점화 20초
14:59:30	238.939	690.016	493.824	225.829	점화 30초
14:59:40	154.066	664.211	548.609	251.246	점화 40초
14:59:50	133.363	535.594	698.785	348.867	점화 50초
15:00:00	120.961	478.738	774.227	457.773	점화 60초
15:00:10	109.042	450.922	762.008	561.891	약제방출 10초
15:00:20	188.453	405.109	516.043	411.598	약제방출 20초
15:00:30	126.415	207.093	223587	198.398	약제방출 30초
15:00:40	73.913	108.695	150.015	136.58	약제방출 40초
15:00:50	42.555	52.806	91.474	94.908	약제방출 50초
15:01:00	27.899	21.52	48.212	60.529	약제방출 60초
15:01:10	33.142	43.108	81.859	76.254	방출종료 10초
15:01:20	31.978	50.03	86.527	78.084	방출종료 20초
15:01:30	31.965	48.542	83.293	75.001	방출종료 30초
15:01:40	31.58	45.308	78.614	72.044	방출종료 40초
15:01:50	30.226	43.271	74.266	68.566	방출종료 50초
15:02:00	29.383	41.101	71.252	65.537	방출종료 60초

약제방출 후 20초 이후부터 200℃ 이하의 안정적인 온도를 유지했다.

약제 방사 이후의 온도변화는 T-1과 T-2의 온도가 약제방사 이후 온도가 떨어짐을 확인할 수 있었다.

### 3.2. Water mist 소화설비 실험 결과

Water mist 소화설비 시험결과는 Fig. 5와 Table 2와 같은 측정값을 얻을 수 있었다.

Table 2. Water mist Fire fighting equipment test measurement

Time	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5
	℃	℃	℃	℃	
15:25:45	19.601	22.939	25.094	23.59	점화전
15:25:46	20.491	22.774	24.879	23.525	점화
15:25:56	81.319	598.719	75.341	104.079	점화후 10초
15:26:06	274.512	685.236	196.983	193.092	점화후 20초
15:26:16	267.041	662.641	470.949	234.556	점화후 30초
15:26:26	174.673	566.859	671.566	381.301	점화후 40초
15:26:36	83.262	497.625	745.256	429.368	점화후 50초
15:26:46	49.735	405.949	689.473	349.082	점화후 60초
15:26:53	35.646	233.637	424.297	218.526	약제방출후 10초
15:27:03	29.938	134.034	295.895	152.188	약제방출후 20초
15:27:13	28.178	98.145	207.461	132.739	약제방출후 30초
15:27:23	27.794	76.275	156.516	115.887	약제방출후 40초
15:27:33	25.512	63.165	137.657	95.485	약제방출후 50초
15:27:43	25.797	56.739	127.233	87.666	약제방출후 60초
15:27:53	24.963	53.026	120.179	83.259	방출종료 10초
15:28:03	24.374	49.17	118.375	79.18	방출종료 20초
15:28:13	24.79	46.577	108.49	75.93	방출종료 30초
15:28:23	24.59	43.818	99.762	69.646	방출종료 40초
15:28:33	24.202	42.546	93.854	66.281	방출종료 50초
15:28:43	24.841	39.863	88.904	64.413	방출종료 60초

Water mist 소화설비는 점화직후 온도변화는 1차 Water mist 시험시 물이 덕트 내 체류로 인하여 T-1, T-3와 T-4의 온도는 점화직후 상승하지 않다가 약 30초 경과한 후에 상승하였다. 서브덕트에서 메인덕트로의 화재전파 양상이 T-1과 T-2는 점화 후 30초 경과 시점에서 피크온도를 기록했으며, T-3와 T-4는 점화 후 60초 경과시점에서 피크온도를 기록했다. 점화 후 60초 경과 후에 소화약제를 방사

하였는데 약 30초 이후부터 약 200℃ 이하의 안정적인 온도를 유지했다.

약제방사 이후의 온도변화는 T-1~T-4 모두소화약제 방사후 10초 이내에 급격히 온도가 하강함을 확인할 수 있었다.

### 3.3. 열화상카메라 온도 분석

CO<sub>2</sub>소화실험에서 화원의 초기 위치에서 약 2m 정도 이격하여 직렬형태로 측정하였는데, 온도범위는 0~500℃로 설정하였다. CO<sub>2</sub>설비 초기점화 후 Fig. 6과 같이 60초에 작동하여 30초 만에 소화되었다.

이때 완전소화는 되었으나 연기 및 잔류 온도가 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

Water mist 설비 소화시험도 화원의 초기 위치에서 약 2m 정도 이격하여 직렬형태로 측정하였으며, 온도범위는 0~500℃로 설정하였다. Fig. 7은 배기덕트 내 화재발생 시 화원의 온도분포를 나타내고 있다. Water mist를 점화 후 62초에 작동하여 약 30초 만에 완전 소화되었다. 역시 완전히 소화는 되었으나 내부의 연기 및 잔류 열기온도가 나타남을 알 수 있었고, 결과적으로 보면 소화 후 점차 온도가 하강하는 모습을 볼 수 있으며, 화원의 최고온도는 823.246℃로 나타났다.

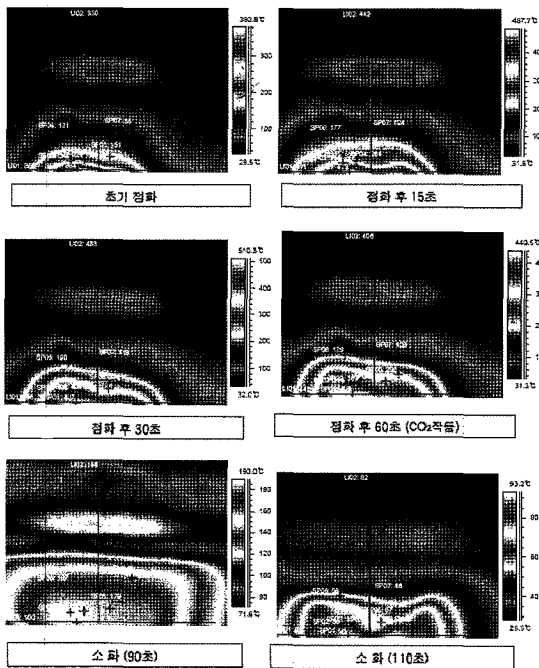


Fig. 6. CO<sub>2</sub> Thermal CAM a photograph.

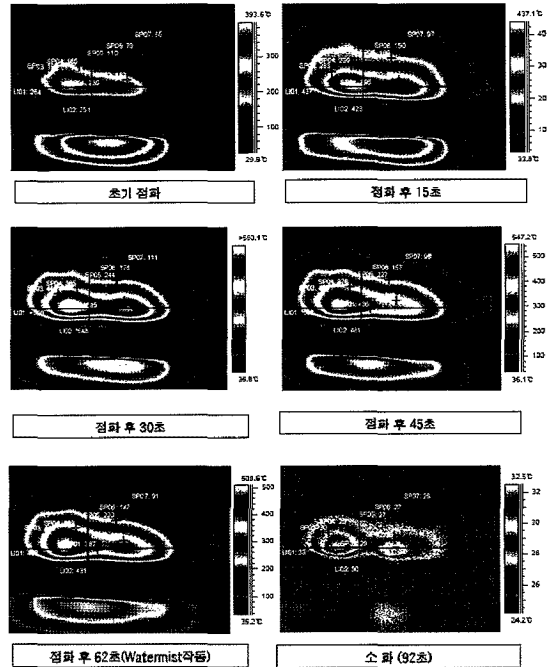


Fig. 7. Water Mist ThermaCAM a photograph.

### 3.4. CO<sub>2</sub>와 Water mist 소화설비 실험 비교

Fig. 7과 Fig. 8에서 보듯이 Thermocouple을 이용한 CO<sub>2</sub>와 Water mist 소화설비 실험 비교결과 점화 후 약 10초 이내에 모든 THCP 지점에서 급격한 기울기로 온도상승이 공통적으로 나타났다.

T-3와 T-4에서 CO<sub>2</sub>시험에 비하여 Water mist 시험에서 약 100℃ 정도 낮은 Peak 온도를 기록하고 있다. 이외에는 점화 후 소화약제 방사 이전까지의 온도그래프가 거의 비슷한 모습을 나타내고 있다.

서브 덕트로부터 메인 덕트의 화재전파 양상은 점화 후 30초 시점에서 T-1과 T-2에서 Peak 온도를 기록하였다. 그 후 30초 경과 후에 T-3와 T-4에서 Peak온도를 기록하였고, 서브 덕트로부터 메인 덕트의 화재전파는 약 30초의 시간차를 두고 Peak 온도를 기록하면서 화재가 전파되었다.

CO<sub>2</sub> 소화실험은 약제방사 후 30초, Water mist소화실험은 20초 이후부터 안정적인 온도를 유지하기도 했다.

시험 결과를 종합하면, 소화약제 방사이후 완전 소화까지의 시간이 Water mist는 20~30초, CO<sub>2</sub>약제의 경우 50~70초가 소요됨을 알 수 있었다. CO<sub>2</sub>약제의 경우 소화시간 변동 폭이 큰 것은 약제 방출 중에도 배풍기 동작으로 밀폐가 어려워 소화시간에 큰 변수로 작용했기 때문으로 분석된다.

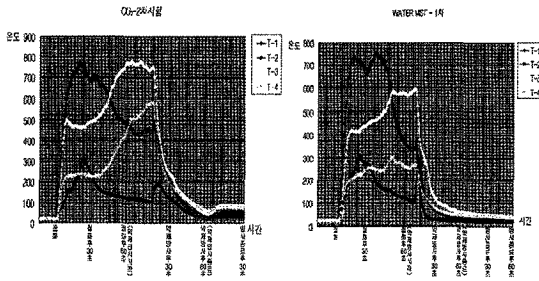


Fig. 8. CO<sub>2</sub>와 Water mist comparison test a result,

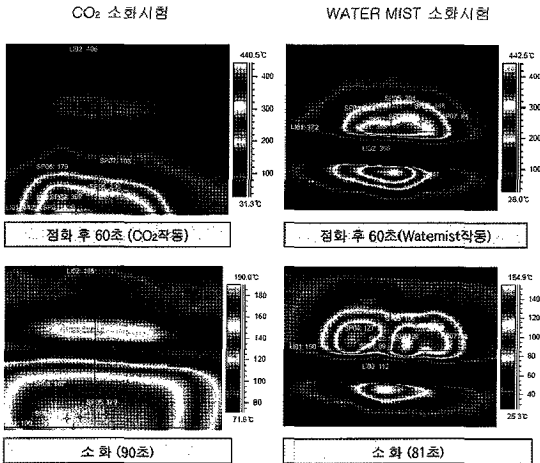


Fig. 9. CO<sub>2</sub>와 Water Mist ThermalCAM a photograph comparison.

3.5. 화재성상 분석

화재가 확산하는 속도는 화염이 발화지점으로부터 가연물질의 큰 면적으로 증가하면서 얼마나 빠르게 확산하는가에 의존하는데 중력과 바람의 영향이 중요하기 때문에 배기덕트에서 공기흐름에 의한 확산은 그 양상이 비정상상태로 변화하기 때문에 점화 후 약 1분 동안 화재전파양상이 비슷한 모습으로 전개 되었다.

Table 3에서 보듯이 점화 후 20초 후 T-2에서 600℃ 이상, 점화 40초 후 T-3에서 600℃ 이상 기록 하였으며 T-1과 T-4에서는 600℃ 이상을 기록하지 않았다.

시험Data로 화염의 확산속도를 계산하면 다음과 같은 값을 얻을 수 있다.

$$V_{T-2} = \frac{2m}{20sec} = 0.1 \text{ m/s}$$

$$V_{T-3} = \frac{5.25m}{40sec} = 0.13 \text{ m/s}$$

Table 3. Fire fighting equipment test measurement

time after ignition	Test name	T-1	T-2	T-3	T-4
		℃	℃	℃	℃
10초	CO <sub>2</sub> 1차	113.447	569.25	496.535	227.033
10초	CO <sub>2</sub> 2차	113.447	569.25	496.535	227.033
10초	Watermist 1차	83.851	302.473	120.655	47.452
10초	Watermist 2차	81.319	598.719	75.341	104.079
20초	CO <sub>2</sub> 1차	223.762	748.059	467.156	234.83
20초	CO <sub>2</sub> 2차	223.762	748.059	467.156	234.83
20초	Watermist 1차	255.874	725.012	414.043	215.175
20초	Watermist 2차	274.512	685.236	196.983	193.092

발화에서 연소 확대까지의 시간은 T-2에서 점화 후 10초가 경과하자 500℃ 이상 온도를 기록하였으며, 20초가 경과하자 700℃ 이상의 온도를 기록했다. 밀폐 공간 내에서 완전 성장연소가 되기 위해서는 고온을 형성하기에 충분한 어떤 크기 이상으로 화재가 성장되어야 한다. 발화 후 10~20초가 경과하자 화재는 배기덕트 내에서 고온을 형성하는 완전 성장연소로 확대되기 시작했다.

4. 결론

배기덕트 화재 실험결과 가소-소성공정은 화재에 큰 위험성이 있다는 것을 확인하였다. 아직 국내에 배기 덕트에 대한 화재 안전기준 등이 마련되지 않아 방지대책을 찾는 데 어려움이 있다. 일반적으로 덕트 재질을 보통 아연도금강판으로 사용하고 있기 때문에 화재위험성은 가중된다. 또한 덕트화재는 발생 시 덕트 내부에 가연성물질의 액체가 존재 한다는 점을 감안할 때, 연기질식 등의 인명안전 등을 고려한다면 자동식 Water mist 소화설비가 적합한 소화설비라고 볼 수 있겠다.

실험결과 각종 유형의 점화원에 따른 방지대책은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 전기회로나 전기기구에서 발생되는 열이나 스파크가 발생하지 않도록 하여야 한다. 특히 모터나 히팅코일의 과열, 컨트롤판넬, 전기접속부의 안전이 확보되어야 한다.
- 2) 기체가 유동, 분출할 때 이물질이 마찰 등에 의해 대전할 수 있으므로 녹, 먼지, 흙 등의 이물질을 가능한 제거해야 한다.
- 3) 흙 액화물질의 증기는 덕트 내 체류 중 응축되어 액상물질로 덕트 하부에 잔류하기 때문에 덕트 Clean작업이 매우 중요하며, 덕트를 주기적으로

교체하는 것도 중요한 안전조치가 될 것이다. 금번 실험 대상이었던 가소-소성공정의 흡 액화물질의 주 성분인 Bis(2-ethyl hexyl)phthalate은 인화점이 215℃, 발화하한치 0.3%, 자연발화점 390℃로서 화재위험이 크며, 발열량 35040J/g로서 화재에 의한 피해가 클 것으로 평가 되었다.

4) 덕트는 Glass wool 보온재에 의해 싸여있어 흡 액화물질은 덕트 이음매의 틈새 또는 작은 구멍 등을 통하여 미세한 양이 누수 될 수 있으므로 주기적인 확인이 필요하다.

5) 배풍기가 작동 시에는 배기방향 한 방향으로만 화재가 확산되지만 배풍기가 미작동할 경우에는 배기방향의 반대 방향으로 화재가 확산되는 모습을 관찰할 수 있었다. 이는 덕트 내 화재가 크게 확산된 상태에서 배풍기가 정지하게 되면, 한쪽방향으로 확산되던 화재는 반대방향을 향해 급속히 확산되는 것이다. 따라서 배풍기의 모터는 덕트 외부 부착형으로 설치해야 적합하다.

6) 점화 후 20초 경과 후 화재가 발생한 서브 덕트 내부 온도(T-2)는 약 700℃까지 급격히 상승하였다. 이후 700℃의 Peak 온도는 약 30초 후 메인덕트에서 나타나 급속히 빠르게 성장하는 Flash over 현상이 발생하게 되어 덕트 내부의 소화설비의 설치가 중요한 요소임을 알게 되었다.

7) 아연도강판 재질의 덕트는 내부 화재발생으로 770℃에 이르게 되면 취성과 강도가 저하된다. 공정 천장과 벽에서 약 500~600℃ 이상의 열 방출을 나타내면서 공정 전체로의 급작스런 화재확산이 되면 대형화재로 확대될 우려가 있기 때문에 배기 덕트 재질도 매우 중요한 안전조치 항목이다.

8) 실험 시 배기 덕트의 이음 부를 통하여 화염 및 연기가 계속해서 분출됨을 확인하였다. 밖으로 분출된 불꽃과 화염은 외부화재로 확대되어 화재 확산속도를 가속화 시키게 됨으로 덕트의 연결 및 마감 공사를 철저히 하는 것도 중요하다.

9) NFPA 기준에서는 덕트의 가장 큰 내경이 10 inch 이상인 모든 가연성의 배기 덕트는 내부에 자동식 스프링클러설비 및 배수설비를 설치해야 한다고 권고하고 있다. 덕트 소화설비가 작동한다고 해도 덕트 외부를 냉각 시킬 뿐, 덕트 내부화재를 효과적으로 소화하기는 힘들 것이다. 따라서 덕트 내부에 자동 소화설비를 설치한다면 조기 화재감지 및 확실한 소화대책이 될 것이다.

### 참고문헌

- 1) NFPA. 318, "Clean Room 배기덕트 설치 기준", pp. 3~8, 2007.
- 2) FM Global Property Loss Prevention Data Sheets 7-91. Hydrogen, 2000.
- 3) 송윤석, 윤명오, "Clean room 위험성평가에 따른 안전성확보 연구", 서울시립대 석사학위논문, 2003.
- 4) SEMI, "Safety Guidelines of Semiconductor Equipment and Material international", 2004.
- 5) KOSHA CODE 공정안전지침, pp. 154~155, 1998.
- 6) Fire Protection System Inspection, Test and Maintenance Manual, pp. 16~19, 2003.
- 7) Kevin McGrattan, Glenn Forney Fire dynamics simulator (virsion 4) User's Technical Reference Guide, pp. 15~16, 2005.
- 8) Ashire Hand Book, 미국공조협회, 2005.