



테레프탈산(TPA) 사일로 해체작업 중 분진폭발

contents

- I. 사고개요 / 5
- II. 사업장 현황 / 6
- III. 사고분석 / 12
- IV. 사고발생 원인 / 20
- V. 동종사고 예방대책 / 22
- VI. 사고로부터 얻은 교훈 / 23
- VII. 유사 사고사례 / 24
- VIII. 참고자료 / 25

용어설명

01 분진(Dust)

직경 500마이크로미터(μm) 이하인 미세한 고체상의 분말 물질로서 적절한 비율로 공기와 혼합되면 점화원에 의하여 폭발할 위험성이 있는 물질을 말한다.

02 사일로(Silo)

사일로는 곡물이나 시멘트와 같은 분말체를 저장하기 위한 높은 직립 원통 또는 각형의 통으로 된 저장고를 말한다. 콘크리트, 강판, 목재 등으로 만들어지고 저장량에 대한 바닥 면적이 적은 것이 특징이다.

03 분진폭발하한농도(Dust Explosion Lower Concentration)

분진폭발의 발생을 결정하는 조건. 분진의 폭발한계는 실험적으로 측정이 어렵기 때문에 일반적으로 분진-공기 혼합물 중의 분진농도가 폭발을 일으키는 필요 최소한의 양으로서 폭발하한농도를 말한다.

04 최대폭발압력(Maximum Explosion Pressure)

밀폐 공간 내의 분진운이 발화하여 화염이 전파하고 발생한 열에 의해 용기 내의 압력이 상승하는데 반응이 분진운 전체로 진행하여 나타난 압력의 최대값을 폭발압력이라 하고, 이러한 폭발압력 중 농도 변화에 따라 가장 큰 값을 가질 때의 폭발압력을 최대폭발압력이라 한다.

용어설명

05 최대폭발압력상승속도(Rate of Maximum Pressure Rise)
밀폐 공간 내의 분진이 착화하여 발생한 열로 압력이 상승하여 폭발 압력으로 나타나는데, 일정 분진농도에서의 폭발압력을 폭발압력이 최대로 도달하는데 걸리는 시간으로 나눈 값을 말한다.

06 최소산소농도(Minimum Oxygen Concentration)
연소를 지속적으로 전파하기 위해 필요한 최소한의 산소농도를 말한다.

07 분진폭발지수(K_{st})
밀폐 공간 내에서 연소로 인하여 상승되는 최고 압력 상승율 $(\frac{dP}{dt})_{max}$ 로부터 계산되며, $K_{st} = (\frac{dP}{dt})_{max} \cdot V^{1/3}$ 로 나타낸다.

I

사고개요

2016년 10월 19일(수) 경북 칠곡군 소재 (주)△△ 철거공사 현장에서 (주)○○ 건설이 테레프탈산(TPA) 사일로 해체를 위해 사일로 지붕과 본체 측면부 맨홀 덮개의 용단작업을 하던 중 사일로 내부에서 폭발이 발생한 사고이다.



[사진 1] 사고발생 사일로

인명피해

- 사망 1명

물적피해

- (주)△△ 사일로 파손
- 주변 사업장 창문 다수 파손

II 사업장 현황

(주)△△은 경북 칠곡군에 위치하고 있으며, 테레프탈산(TPA)과 에틸렌글리콜(EG) 등을 원료로 사용하여, 폴리에스터 원사 등을 제조하는 사업장이다. 사고 발생 사일로는 원료인 테레프탈산(TPA)을 저장하는 설비이며 사고 당시에는 가동 중지 상태였다.

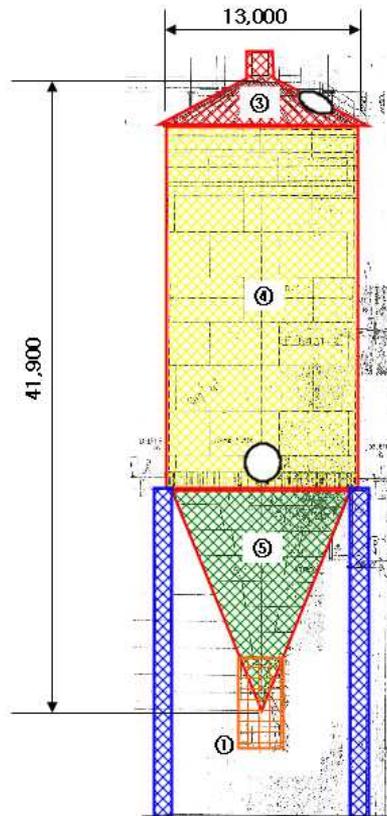


[사진 2] 테레프탈산(TPA) 사일로 및 폭발 현장

1 시설현황

사고발생 테레프탈산(TPA) 사일로

- 명칭 : 테레프탈산(TPA) 사일로
- 용량 : 3,250 m^3 (ID 13,000 ϕ × 41,900 H)
- 재질 : 스테인리스 스틸(SUS304)
- 현황 : (주)△△은 가동중지(2011년)상태였으며, 사일로 내부는 원료인 테레프탈산이 일부 남아있었음



[그림 1] 사고 발생 사일로 제원

2 위험물질목록

테레프탈산(TPA) (Cas No. 100-21-0)

(1) 성상

물질명	폭발하한농도 (g/m ³)	인화점 (°C)	발화점 (°C)	입경(입도)
테레프탈산	50	260	496	130 μm

※ 경고표지 그림문자



생식독성 : 구분2



경고

(2) 특성

- 화학적 안전성 : 분말 형태일 경우 공기와 혼합 시 분진폭발위험
- 열분해생성물 : 자극성/독성 흡(또는 가스)
- 소화 시 포말, 파우더, 이산화탄소 또는 물 분무 사용

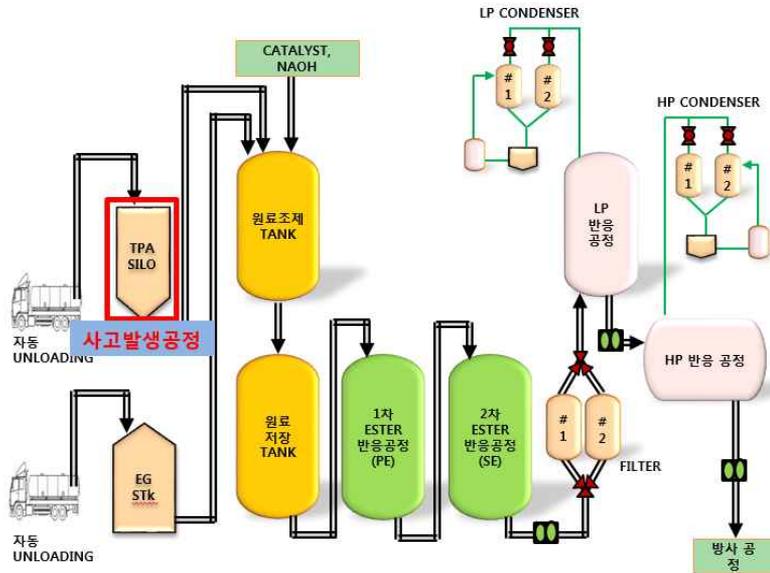
3 설비목록

1) 장치 및 설비 명세

명칭	용량	압력(MPa)		온도(°C)		재질	취급 물질	비고
		운전	설계	운전	설계			
사일로	3250 m ³ D 13,000 H 41,900	ATM	0.12	AMB	80	STS304	테레프 탈산	-

4 공정

1) 원사제조 공정도



[그림 2] 원사제조 공정도

2) 원사제조 공정설명

공정	공정 설명
원료 조제	테레프탈산(TPA), 에틸렌글리콜(EG) 투입하여 혼합
PE공정	1차 에스터(ESTER) 반응이 진행되어 모노머(Monomer)를 생성
SE공정	에스터(ESTER) 반응이 완료되는 공정으로 모노머(Monomer)를 생성
LP공정	축합반응 진행
HP공정	폴리머 생성하여 방사공정으로 이송함

5 설비배치도

1) 설비 배치

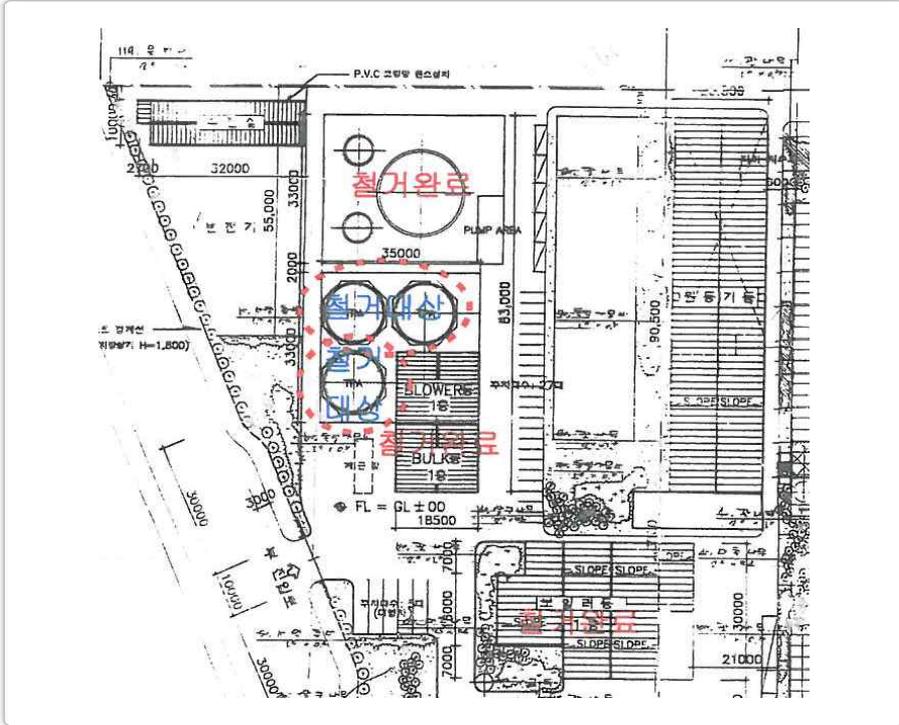


○ : 폭발지점

● : 사일로 지붕 낙하 지점

● : 재해자 발견 위치

[사진 3] 배치 평면도(위성사진)



[그림 3] 배치 평면도(확대도)

III

사고분석

1

작업현황

사고 발생 과정

(1) 사고 발생 전 상황

시간	작업 현황
10/12	(작업내용) 사일로 외부 원료 이송 배관설비 해체작업 실시 (작업목적) 사일로 내부 잔류물 유무와 그 양 확인 (작업진행 상태) 토치로 잔류물에 불이 붙는지 확인 후 사일로 내부를 물 세척하기로 함
10/19 8:00경	현장소장 및 철거 작업자 등 15명 현장 출근 - 당일 예정 작업에 대한 협의

(2) 사고 발생 상황

시간	작업조 4명 (주○○)
10/19 8:30경	(작업내용) 사일로 맨홀 해체 작업 (작업목적) 사일로 내부 물 세척 작업 (사고당시 작업진행 상태) - 2명 본체 지붕 위 맨홀 덮개 용단작업 실시 - 2명 본체 측면 부 맨홀 덮개 용단작업 실시

시간	작업조 4명 (주○○)
10/19 9:00경	(작업내용) 사일로 맨홀 해체 작업 (작업목적) 사일로 내부 물 세척 작업 (사고당시 작업진행 상태) - 사일로 지붕 맨홀 용단 후 지붕 위에 내려놓음 - 사일로 내부 부착된 잔류물이 하부 개구부로 쏟아지자 현장소장이 용단작업 중지 명령함
시간	현장소장 ○○○ (주○○)
10/19 9:18경	(작업내용) 잔류물 정리 위해 잔류물의 양 확인 (사고당시) 잔류물의 양 확인 후 사일로 밖으로 나오는 순간 폭발 발생
시간	재해자 ○○○ (○○주)
10/19 사고발생	(사고내용) 사일로 3기 연쇄 폭발하였으며, 사일로 상부에 있던 재해자는 지붕과 함께 약 150 m 떨어진 광암천 고수 부지로 추락 (사고당시) 119 구조대에 의해 심폐소생 후 인근 후송 치료 중 다발성 골절 등으로 사망

※ (주)○○ 현장소장의 면담을 근거로 작성

2 작업현황

사고 발생 과정

(1) 1차 폭발

사일로(F-5431-1)에서 발생한 1차 폭발은 사일로 내부 분진 등을 물 세척으로 제거하기 위해 맨홀 용단 작업 중 사일로 내부의 테레프탈산 분진 가연물이 가스용단 축적열에 의해 동시에 화재가 발생하였고, 이때 부유분진이 형성되면서 화염에 의해 폭발된 것으로 추정되며, 폭발 후 화재는 큰 규모로 발생되었으나 짧은 시간 내에 진화되었다.

(2) 2, 3차 폭발

1차 폭발한 사일로(① F-5431-1)에서 발생된 폭발의 영향이 사일로 간 연결된 10"배관을 통해서 인접 사일로 (② F-5431-2와 ③ F-5431-3)로 전파되어 분진폭발이 연속적으로 발생한 것으로 추정된다.



[사진 4] 사고 발생 사일로

순서	작업구분	세부작업	비고
①	사일로 주변 및 하부 배관설비 등 철거		
②	분진 등을 제거하기 위한 작업 (수세작업)	<div style="border: 1px solid red; padding: 5px;"> 맨홀 덮개(○) 용단작업¹⁾ </div> 잔류물질 세척 ²⁾	재해 발생
③	지붕 철거		
④	본체 철거		
⑤	본체 하부 철거		

※ 사일로를 지지하고 있는 하부 콘크리트 구조물()은 철거 제외

※ 1) 맨홀 덮개(○) 용단작업 : 사일로 내부 잔류물 세척용 공간 확보

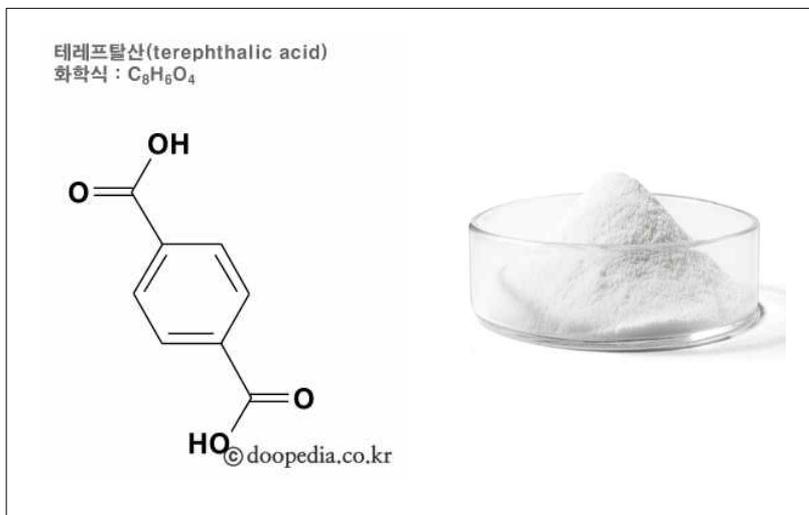
2) 잔류물질 세척 : 개방된 맨홀 뚜껑을 통해 호스를 투입하여 물로 세척

3 사고발생 원인추정

1) 가연물

○ 사일로 상부 맨홀 덮개 용단 작업으로 사일로 내부에 부착되어 있던 잔류물이 쏟아짐

가동 중지 후 사일로의 동체 내부 벽면에 전체적으로 테레프탈산(TPA) 분진이 일정 부분 퇴적 및 부착되어 있었으며, 철거 작업을 위한 사전 작업 시 상부 맨홀뚜껑 탈착 제거 등에 의한 진동 발생에 따라 벽면에 부착된 일부 퇴적물이 떨어지면서 부유분진이 발생했다.



[사진 5] 분자구조식 및 물질

2) 점화원 추정

○ 용단 축적열 또는 용단불꽃에 의한 점화

수세작업을 위해 설비에 가해진 용단 축적열 또는 용단 불꽃이 사고 당시의 차량 블랙박스 등 동영상([사진 7] 참고)에서도 나타나지만, 폭발 직전에 용단이 진행되고 있던 과정에서 폭연에 의한 화재가 발생하고 곧이어 폭굉에 의해 폭발하였다.



화재 및 폭연 진행



폭굉으로 1차 폭발 순간

[사진 6] 사고당시 차량 블랙박스 화면

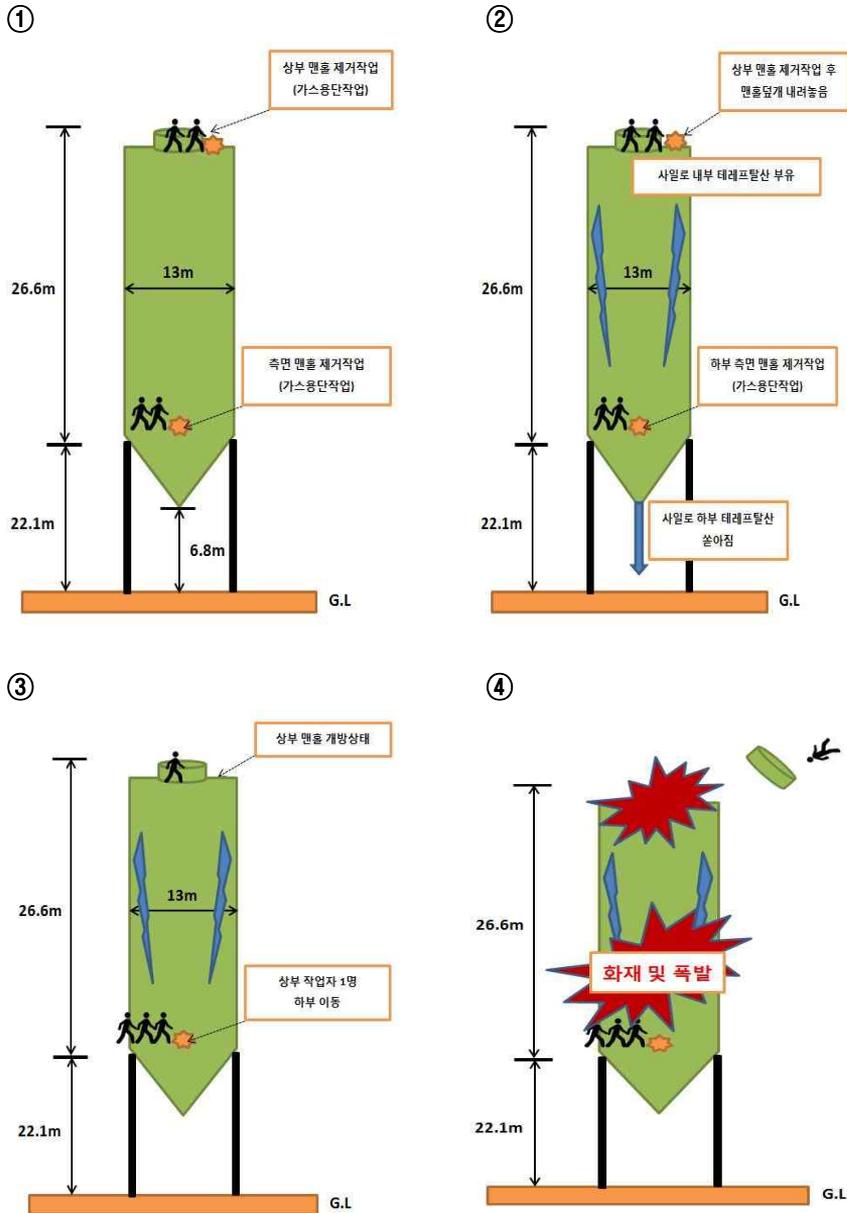
가스용단(불꽃온도 약 600 °C ~ 1100 °C)은 가연성 물질이 존재하는 동체에 직접 가해졌다. 용단 시 발생하는 열에너지는 아주 커서 용단의 축적열 및 불꽃(에너지)이 점화원으로 작용될 수 있다.

※ 스테인리스 스틸(SUS304) 열전도도는 21.5 W/m·K 임

○ 정전기에 의한 점화

작업자들이 작업 중에 움직이면서 발생된 정전기가 인체에 축적되었다가 방전하면서 불꽃을 일으켜 점화시킬 가능성도 있다. 특히, 가을철은 상대습도가 비교적 낮아 정전기가 축적 되고 불꽃을 일으킬 수 있다. 하지만, 사고당일 아침 구미지역은 안개가 자욱이 끼어 있었고 상대습도는 92.5 %(기상청 자료: 10월 19일)로 정전기가 방전을 잘 일으키는 영역의 최대습도인 60 %를 초과하였다. 따라서 충분한 양의 정전기가 축적되지 않았을 것으로 추정된다.

또한, 가연물은 사일로 내부에 있고, 작업자는 사일로 외부에 있었으므로 정 전기가 점화원으로 작용되었을 가능성은 낮다.



[그림 4] 사일로(F-5431-1)에서 폭발 진행 과정

3) 산소

가연성 분진은 공기 중에 노출되면 분진 폭발의 위험성이 상당히 높아지므로 공장이 정상적인 가동 상태였다면 질소 등 불활성 기체 등을 이용하여 산소 분위기를 만들지 않도록 치환 등 밀봉(Sealing)상태로 유지 되었을 것이다. 하지만 폐업으로 인해 상당기간동안 해당 설비가 방치되어 있었고, 철거 작업 시 개방 작업이 이루어지고 있었으므로 대기 중 공기의 출입이 자유로워 폭발에 필요한 산소가 충분히 공급될 수 있었다.

※ 테레프탈산 분진과 같은 일반적인 가연성 물질의 최소산소농도는 8 % 정도이나, 사일로 철거 작업으로 인한 개방 작업으로 사일로 내부는 대기 중의 산소 농도와 동일하여 폭발을 일으키는데 충분한 농도였을 것으로 추정됨

IV

사고발생 원인

원인

1

가연성분진 제거 방법 불량

가연물이 관리의 대상인 경우에는 이를 제거하는 것이 원칙이며, 테레프탈산 분진을 가장 효율적이고 완전하게 제거하는 방법은 물로 내부를 세척하는 방법이 일반적이다.

당시 수세작업을 위해 사일로 본체의 맨홀 덮개 개방을 시도하였으며, 이 때 맨홀 덮개 고정용 볼트를 가스로 용단 하던 중 사일로 내부에 잔류하던 테레프탈산 분진이 가연물로 작용하게 되었다.

원인

2

사전조사 및 작업계획서 작성 미실시

사업주는 사일로 해체 작업 시 해당 사업장이 폐업이 된 상태이더라도 관계자에게 정보요청을 하여 해체 대상 사일로 구조물의 상태, 사일로 내부 잔류물의 존재 여부, 사일로 내부에 저장했었던 가연성 분진의 종류와 성질 및 화재·폭발에 대한 위험성 등에 대한 정보를 습득하는 등 사전조사를 실시하고, 그 조사 결과를 고려하여 해체 방법 및 순서 등이 포함된 작업계획서를 작성하고 그 계획에 따라 작업했어야 하나 이를 실시하지 않았다.

원인 3 ▶ 도급사업 시 안전보건정보 제공·교육 미실시

테레프탈산을 저장하였던 사일로 해체작업 등을 도급하는 자는 해당 작업을 수행하는 수급인의 근로자의 재해를 예방하기 위해 사일로 내부에 저장했던 물질의 종류와 위험성 등 안전·보건에 관한 정보를 제공하고, 교육을 실시했어야 하나, 정보제공 및 교육이 실시되지 않은 상태에서 수급인은 작업 경험에 따른 불확실한 사실 확인과 판단으로 해체 작업을 진행하였다.

원인 4 ▶ 화기사용 금지 미실시

사일로 내부의 잔류물이 불이 붙는 것을 확인하고, 사일로 내부를 물로 씻어내기로 했다는 것을 감안했을 때, 화재·폭발에 대한 위험성을 충분히 인지하고 있었으나, 화기를 사용하였다.

V

동종사고 예방대책

대책 1 가연성 분진의 안전한 제거 절차 수립

가연성 분진이 사일로 내부에 잔존하고 있는 상태에서는 반드시 가스용단 작업 등 점화원의 원인이 될 수 있는 작업을 금지하고, 물 세척 등의 방법으로 사일로 내부의 가연성분진 발생이 완벽히 제거된 상태에서 작업이 이뤄질 수 있도록 해야 한다.

대책 2 사전조사 및 작업계획서 작성

사업주는 사일로 해체 작업 등의 경우 해당 설비의 취급 물질 등에 대한 정보를 습득하는 등 사전조사를 실시하고, 그 조사 결과를 고려하여 해체 방법 및 순서 등이 포함된 작업계획서를 작성해야 하며, 작성된 작업계획서의 내용에 대해 근로자를 교육하여 그 계획에 따라 작업이 진행되도록 해야 한다.

대책 3 도급사업 시의 안전·보건정보 제공

테레프탈산을 저장하였던 사일로 해체 작업을 도급하는 자는 해당 작업을 수행하는 수급인의 근로자 재해를 예방하기 위해 사일로 내부에 저장했던 물질의 종류와 위험성 등 안전·보건에 관한 정보를 제공하는 등 필요한 조치를 하여야 한다.

대책 4 화기사용금지

사업주는 가연성 분진이 들어있어 화재·폭발 위험이 있는 사일로 해체 등의 작업 시 볼트·너트 풀림용 전용 기계기구나 기계식 절단기를 사용하는 등 화기를 사용하지 않도록 하여야 한다.

VI 사고로부터 얻은 교훈

테레프탈산(TPA) 사일로에서 철거 작업 중 폭발사고로 작업 중이던 근로자 1명이 사망하는 사고가 발생하여 정비보수 등의 작업 시 안전보건 확보의 중요성을 인식하게 된 계기가 되었다. 이번 사고로부터 얻은 교훈은 다음과 같다.

교훈 1 가연성 물질 제거 후 작업 실시

가연성 물질을 제거하는 방법으로는 물 세척에 의한 방법, 불활성 기체로 불어내는 방법 등을 이용하여 제거할 수 있다. 물질의 특성에 따라 적절한 방법을 선정하고 사전조사를 실시한 후 그 결과를 고려하여 해체 방법 및 순서 등이 포함된 작업계획서를 작성해야 한다.

교훈 2 협력업체 근로자 보호를 위한 안전보건교육 선행

정비·보수·철거 작업 등 작업 전 협력업체 근로자가 취급하는 화학물질의 유해·위험성, 작업상 주의사항, 사고 발생 시 긴급조치 등에 대한 안전보건정보를 사전에 제공하고 작업범위·순서 등에 관하여 전반적인 사항을 충분히 이해하고 작업할 수 있도록 원청의 협력업체 근로자에 대한 보다 책임 있는 교육이 필요하다.

VII

유사 사고사례

1 HDPE 저장 사일로 폭발사고

발생일시	2012년 6월 28일(목) 01:20경
사고장소	△△산업(주) 여수공장 HDPE 저장공정
피해내용	사일로(Silo)2기 및 부속설비 파손
사고내용	<ul style="list-style-type: none"> 고밀도폴리에틸렌(HDPE) 공장에서 정상운전 중이던 펠릿저장조(Pellet Silo)에 잔류하고 있던 미반응 가스에 의해 1차 폭발이 발생되고, 폭발압력을 동반한 화염이 상부로 연결된 12" 배관을 통해 전파되어 연결된 집진기에서 2차 폭발이 발생됨 폭발과 함께 화재가 발생된 집진기 내부의 분체가 집진기 양측 노즐로 분출되어 인접한 분체저장조 2기의 하부를 손상시킴

2 HDPE 저장 사일로 폭발사고

발생일시	2013년 3월 14일(목) 20:50
사고장소	△△산업(주) 여수공장 HDPE 저장공정 (1번 사례와 동일 공정임)
피해내용	사일로(Silo) 3기 파손 및 6명 사망, 부상 11명
사고내용	<ul style="list-style-type: none"> 고밀도폴리에틸렌(HDPE) 제품을 저장하는 사일로 2층에서 정비보수업체 근로자가 사일로(Silo) 하부 측면에 맨홀 설치를 위해서 구멍을 뚫은 후 맨홀을 붙이는 작업 중 사일로 내부에 잔존한 HDPE 분진이 용접불티에 점화되어 폭발 발생

VIII

참고자료

1 TPA 분진의 폭발 위험성

시험항목	시험결과
최대폭발압력(P_{max})	729 kPa (7.3 bar)
최대폭발압력상승속도	52,053 kPa/s (521 bar/s)
분진폭발지수(K_{st})	14,129 m·kPa/s (141 m·bar/s) (분진 폭발등급 : St 1)
분진폭발하한농도(LEL)	50 g/m ³
최소점화에너지(MIE)	10 mJ < MIE < 30 mJ (Es=22 mJ)

[표 1] 산업안전보건 연구원의 시험 결과

※ 비교

1. Es 값은 시험 데이터를 바탕으로 한 점화 확률을 이용하여 추정된 최소점화에너지
2. MIE(Minimum Ignition Energy): 점화를 일으키는데 필요한 최소 에너지
3. 분진폭발지수(K_{st}) : 분진의 폭발강도의 척도를 나타냄

분진 폭발등급	K_{st} [bar·m/s]	폭발의 특징
St1	0~200	폭발에 의한 위험성이 약한 분진
St2	200~300	폭발에 의한 위험성이 큰 분진
St3	300초과	폭발에 의한 위험성이 매우 큰 분진

[표 2] 분진 폭발 등급

2 TPA 분진의 점화민감도

분진 취급 시 점화민감도란 분진의 최소점화에너지(MIE)를 토대로 분진이 실제 얼마나 쉽게 점화할 수 있는지를 나타내는 것으로서 이는 분진의 최소점화에너지에 대한 이해가 필요하다.

MIE는 일반적으로 분진이 점화되지 않는 가장 높은 에너지와 점화시킬 수 있는 가장 낮은 에너지의 범위로서 표현되는데(No ignition < MIE < Ignition), 이 때 수십·수백회의 시험 데이터를 바탕으로 한 점화 확률을 이용하여 추정된 최소점화에너지를 의미하는 E_s 값이 계산되어진다.

이 값을 기준으로 아래 표와 비교하여 점화민감도를 분류하며 일반 공정에서 사용되는 분진의 점화민감도(Ignition Sensitivity)가 Normal ignition sensitivity일 경우, 분진 폭발을 방지하기 위하여 실질적인 점화원 제거(Avoiding effective ignition sources)만으로도 어느 정도 충분한 효과가 있고, Extremely ignition sensitive로 분류되어진다면, 실질적인 점화원 제거와 더불어 Inerting 및 방폭 등의 설계가 필요하다.

최소점화 에너지(mJ)	분류	비고
$MIE \geq 10$	Normal Ignition Sensitivity	
$3 \leq MIE < 10$	Particularly Ignition Sensitivity	
$MIE < 3$	Extremely Ignition Sensitivity	

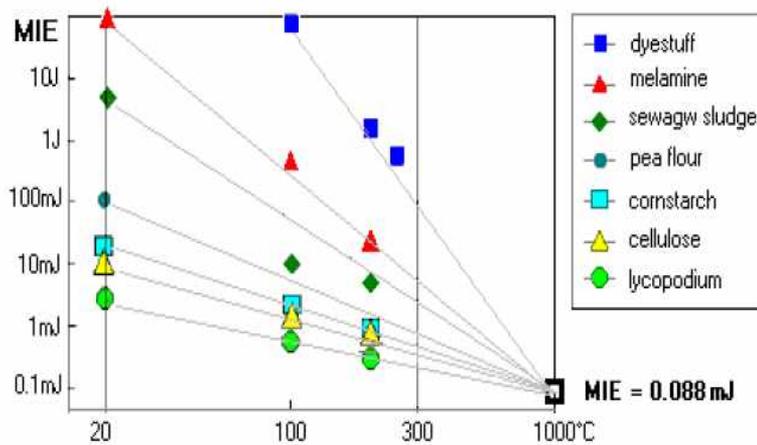
[표 3] 분진의 최소점화에너지에 따른 점화민감도

다양한 농도에서 측정하여 최소점화에너지 범위를 정하고, 타 시험장비와 비교 목적으로 사용하기 위하여 시험 데이터를 바탕으로 한 점화 확률을 이용하여 추정된 최소점화에너지를 의미하는 E_s 값이 계산되어지는데 TPA 시료의 최소점화에너지는 $10 < MIE < 30$ mJ로 측정되어졌으며, E_s 값은 22 mJ로 계산되어졌다.

따라서, 점화민감도는 Normal 수준으로 접지 등의 실질적인 점화원 제거 예방대책 만으로도 충분히 분진 폭발을 예방할 수 있다고 알려져 있다.

다만, 공정 온도에 따른 부유분진의 최소점화에너지 상당한 변화가 있는데 대표적인 분진에 대한 온도 변화에 따른 점화에너지의 변화는 [그림 5]와 같으며, 추정식은 아래와 같다.

$$MIE(T) = 10^{-4.056 + (1.873 - 0.624 \log T) \cdot (\log MIE(25^\circ\text{C}) + 4.056)}$$



[그림 5] 물질 별 온도 영향에 대한 최소점화에너지 변화

추정식을 토대로 TPA 사고 분진에 대한 공정운전온도 변화에 따른 최소점화에너지값의 변화는 [표 4]에 나타내었다. 결론적으로, TPA를 취급하는 사업장에서는 취급공정 온도 선정 시, 100 °C부터는 점화민감도(Ignition Sensitivity)가 Extremely ignition sensitive로 매우 민감하므로 실질적인 점화원 제거와 더불어 Inerting 및 분진 방폭 등의 설계가 반드시 필요하다.

공정온도(℃)	TPA분진 Es(mJ)	비고
25	22	시험값
30	16	추정값
50	8	
70	5	
100	3	
107	2	
130	2	
150	2	
151	1	

[표 4] 공정온전온도 변화에 따른 최소점화에너지값 변화

분진 폭발을 일으키기 위해 필요한 점화원으로 작용할 수 있는 것은 대표적으로 정전기 방전에너지가 있으며, 일반적으로 정전기 방전의 종류에는

- Corona discharge(0.025 mJ 이하),
- Brush discharge(3 mJ 이하),
- Conical pile discharge(1 J 이하),
- Spark discharge(1 J 이하),
- Propagating brush discharge(10 J 이하) 등이 있다.

3 테레프탈산 폭발에 관여한 양 추정

1. 테레프탈산 폭발 하한치 적용

테레프탈산 폭발 하한치 50 g/m³를 적용하여 폭발에 관여한 최소량을 추산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{최소 폭발량} &= \text{폭발하한치} \times \text{사일로 부피} \\ &= 50 \text{ g/m}^3 \times 3,250 \text{ m}^3 \\ &= 162,500 \text{ g} = 162.5 \text{ kg} \end{aligned}$$

2. Scaling 법칙 적용

공장 내 최초 폭발이 발생한 사일로에서 창문이 깨진 인근 공장(140 m 거리)의 위치를 이용하여 폭발압을 계산하면 다음의 Scaling 법칙에 의해 폭발 시 테레프탈산의 양을 추산할 수 있다.

가. 폭발 추정지점에서 약 140 m 떨어진 공장의 유리창이 부서지며 일부 창틀이 파손

$$Z_e = \frac{r}{m_{tnt}^{1/3}}$$

여기서, r : 폭심으로부터의 거리(m 또는 ft)

m_{tnt} : TNT 질량(kg 또는 lb)

Z_e : 환산거리(m/kg^{1/3} 또는 ft/lb^{1/3})

나. 창틀 파손 과압(3.5 kPa)을 환산거리와 과압과의 관계표에 대입하면 약 18 m/kg^{1/3} 임.[그림6 및 표5 참조]

$$18 \text{ m/kg}^{1/3} = 140 \text{ m/m}_{tnt}^{1/3}, m_{tnt} = 470.5 \text{ kg}$$

따라서, 인근공장 창틀 파손 거리로 계산하면 TNT 470.5 kg에 상당하는 폭발이 있었다고 추정할 수 있다.

다. 폭발 시 테레프탈산 양의 환산

TNT 상당량을 연소 가능한 에너지로 다음 식으로부터 전환할 수 있다.

$$Q_{TNT} = \frac{\eta H_c W_c}{H_{c_{TNT}}}$$

여기서, Q_{TNT} = TNT 상당량(kg)

η = 실험적 폭발효율(0.01~0.2)

H_c = 연소성 분진의 연소열(kJ/kg),

테레프탈산 연소열 : 18.42 kJ/g

W_c = 누출된 가연성 물질의 질량(kg)

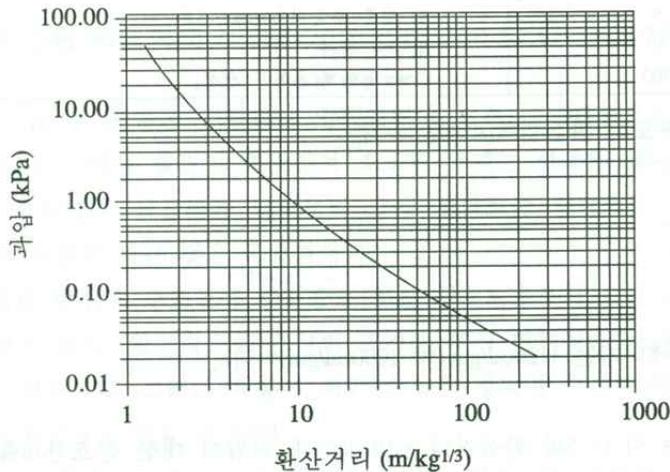
$H_{c_{TNT}}$ = TNT의 연소열(4,680 kJ/kg)

라. Q_{TNT} 를 470.5 kg를 대입하고, η 에 0.2을 적용,

테레프탈산 연소열(Perry's Handbook(8판) 2-203))

: 18.42 kJ/g을 적용하면,

폭발 시 테레프탈산의 양은 597 kg 정도이었을 것으로 추산할 수 있다.



[그림 6] Scale Rule에 환산거리 및 과압 관계표

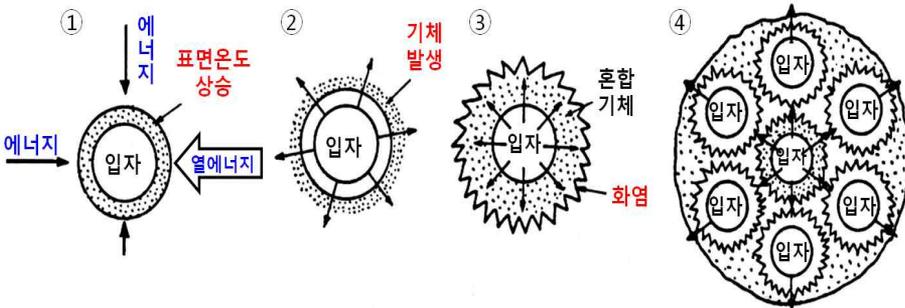
- ※ 단, [그림6]에서 제시한 환산거리는 평평한 지면 위 TNT 폭발에 대해서 적용한 수치임
- ※ 테레프탈산 폭발에 필요한 양은 597 kg 이나, 폭발효율을 제일 큰 것으로 선정하였다는 것을 고려하면 이보다 훨씬 많은 양이 폭발하였을 것으로 추산됨

과압		영 향
kPa	(psi)	
0.15	0.02	소음 발생
0.2	0.03	유리창 일부 파손
0.3	0.04	큰 소음 발생
1	0.15	유리파열 압력
2	0.3	집의 지붕과 유리창의 10% 파손
3	0.4	구조물의 가벼운 손상
3.5-7	0.5-1.0	유리창이 부서지며 일부 창틀이 파손
5	0.7	주택의 구조물 파손
7	1.0	주택의 일부 파손(복구불가능)
9	1.3	철구조물이 약간 손상
15	2	주택의 벽과 지붕이 약간 파손
15-20	2-3	비강화콘트리트 벽 파손
16	2.3	구조물이 심하게 손상되기 시작
18	2.5	주택의 블록이 50%정도 파손
20	3	건축물의 철구조물 손상, 기초에서 이탈
20-28	3-4	지지대 없는 철제 건축물/기름 저장 탱크 파손
30	4	공장건물의 파손
35	5	나무 기둥이 부러짐
35-50	5-7	주택의 완파
50	7	짐 실은 화물차가 전복
50-55	7-8	두께 20-30 cm 의 벽돌벽이 붕괴
60	9	대형 화물차의 전파
70	10	대부분의 건축물 전파

[표 5] 과압의 영향

4 분진 폭발의 구조

1. 입자표면에 열에너지가 주어져서 표면온도가 상승
2. 입자표면의 분자가 열분해 또는 건류작용을 일으켜서 기체로 되어 입자의 주위에 방출
3. 이 기체가 공기와 혼합하여 폭발성 혼합기체를 생성한 후 발화하여 화염을 발생
4. 이 화염에 의해 생성된 열은 다시 분말의 분해를 촉진시켜 차례로 기상에 가연성 기체를 방출시켜 공기와 혼합하여 발화 전과



[그림 7] 분진폭발의 연쇄적 Mechanism

5 폭발 당시 진행상황



최초 발화 및 화재



화재 및 폭연 진행



폭굉으로 1차 폭발 순간



2차 폭발 후 상부 지붕 비래



3차 폭발 순간



3차 폭발로 인접 사일로 지붕 비래

[사진 7] 폭발 당시 진행 상황 (출처 : 유튜브)

6 OSHA Fact Sheet(1/2)

Hazard Alert: Combustible Dust Explosions

Combustible dusts are fine particles that present an explosion hazard when suspended in air in certain conditions. A dust explosion can be catastrophic and cause employee deaths, injuries, and destruction of entire buildings. In many combustible dust accidents, employers and employees were unaware that a hazard even existed. It is important to determine if your company has this hazard, and if you do, you must take action now to prevent tragic consequences.

How Dust Explosions Occur

In addition to the familiar fire triangle of oxygen, heat, and fuel (the dust), dispersion of dust particles in sufficient quantity and concentration can cause rapid combustion known as a deflagration. If the event is confined by an enclosure such as a building, room, vessel, or process equipment, the resulting pressure rise may cause an explosion. These five factors (oxygen, heat, fuel, dispersion, and confinement) are known as the “Dust Explosion Pentagon”. If one element of the pentagon is missing, an explosion cannot occur.

Catastrophic Secondary Explosions

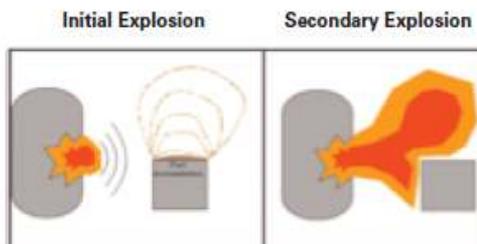
An initial (primary) explosion in processing equipment or in an area where fugitive dust has accumulated may dislodge more accumulated dust into the air, or damage a containment system (such as a duct, vessel, or collector). As a result, if ignited, the additional dust dispersed into the air may cause one or more secondary explosions. These can be far more destructive than a primary explosion due to the increased quantity and concentration of dispersed combustible dust. Many deaths in past accidents, as well as other damage, have been caused by secondary explosions.



A pharmaceutical plant after a dust explosion.

Industries at Risk

Combustible dust explosion hazards exist in a variety of industries, including: agriculture, chemicals, food (e.g., candy, sugar, spice, starch, flour, feed), grain, fertilizer, tobacco, plastics, wood, forest, paper, pulp, rubber, furniture, textiles, pesticides, pharmaceuticals, tire and rubber manufacturing, dyes, coal, metal processing (e.g., aluminum, chromium, iron, magnesium, and zinc), recycling operations, and fossil fuel power generation (coal).



Prevention of Dust Explosions

To identify factors that may contribute to an explosion, OSHA recommends a thorough hazard assessment of:

- All materials handled;
- All operations conducted, including by-products;
- All spaces (including hidden ones); and
- All potential ignition sources.

7 OSHA Fact Sheet(2/2)

Dust Control Recommendations

- Implement a hazardous dust inspection, testing, housekeeping, and control program;
- Use proper dust collection systems and filters;
- Minimize the escape of dust from process equipment or ventilation systems;
- Use surfaces that minimize dust accumulation and facilitate cleaning;
- Provide access to all hidden areas to permit inspection;
- Inspect for dust residues in open and hidden areas at regular intervals;
- If ignition sources are present, use cleaning methods that do not generate dust clouds;
- Use only vacuum cleaners approved for dust collection; and
- Locate relief valves away from dust deposits.

Ignition Control Recommendations

- Use appropriate electrical equipment and wiring methods;
- Control static electricity, including bonding of equipment to ground;
- Control smoking, open flames, and sparks;
- Control mechanical sparks and friction;
- Use separator devices to remove foreign materials capable of igniting combustibles from process materials;
- Separate heated surfaces from dusts;
- Separate heating systems from dusts;
- Select and use industrial trucks properly;
- Use cartridge activated tools properly; and
- Use an equipment preventive maintenance program.

Injury and Damage Control Methods

- Separation of the hazard (isolate with distance);
- Segregation of the hazard (isolate with a barrier);
- Deflagration isolation/venting;
- Pressure relief venting for equipment;
- Direct vents away from work areas;
- Specialized fire suppression systems;
- Explosion protection systems;

This is one in a series of informational fact sheets highlighting OSHA programs, policies or standards. It does not impose any new compliance requirements. For a comprehensive list of compliance requirements of OSHA standards or regulations, refer to Title 29 of the Code of Federal Regulations. This information will be made available to sensory impaired individuals upon request. The voice phone is (202) 693-1999; teletypewriter (TTY) number: (877) 889-5627.

- Spark/ember detection for suppression activation;
- Develop an emergency action plan; and
- Maintain emergency exit routes.

Applicable OSHA Requirements Include:

- §1910.22 Housekeeping
- §1910.307 Hazardous Locations
- §1910.1200 Hazard Communication
- §1910.269 Electric Power Generation, Transmission and Distribution (coal handling)
- §1910.272 Grain Handling Facilities
- General Duty Clause, Section 5(a)(1) of the *Occupational Safety and Health Act* (Employers must keep workplaces free from recognized hazards likely to cause death or serious physical harm).

Resources

Readily available from www.osha.gov are:

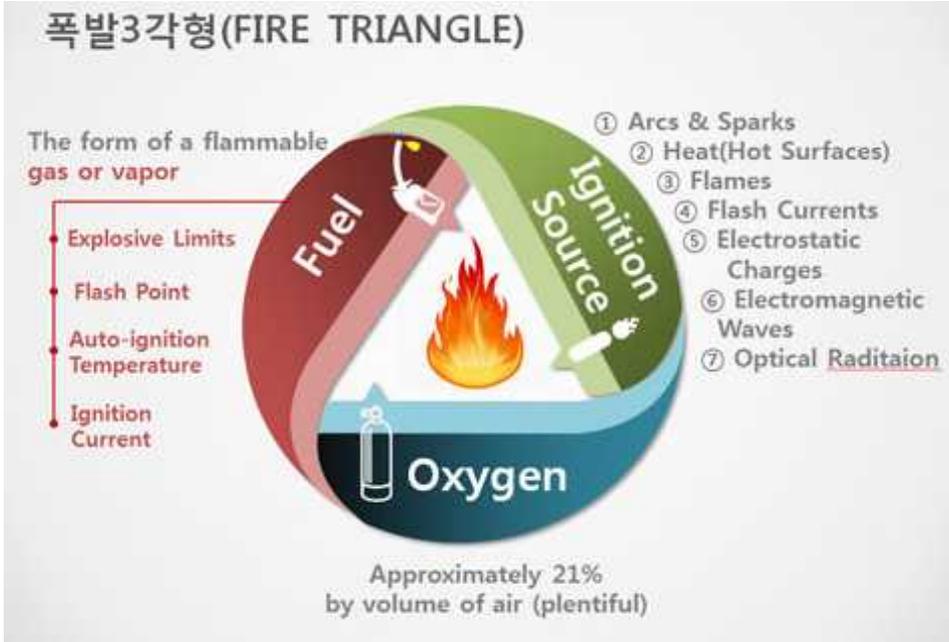
- Combustible Dust National Emphasis Program
- Safety and Health Information Bulletin (SHIB) (07-31-2005) *Combustible Dust in Industry: Preventing and Mitigating the Effects of Fires and Explosions*

See the SHIB or www.osha.gov for other applicable standards.

The primary National Fire Protection Association (NFPA) consensus standards related to this hazard are:

- NFPA 654, Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids
- NFPA 61, Standard for the Prevention of Fires and Dust Explosions in Agricultural and Food Processing Facilities
- NFPA 484, Standard for Combustible Metals
- NFPA 664, Standard for the Prevention of Fires and Explosions in Wood Processing and Woodworking Facilities
- NFPA 655, Standard for the Prevention of Sulfur Fires and Explosions
- See www.nfpa.org to view NFPA standards.

8 ▶ 폭발 3각형 및 분진폭발 5각형



▶ 작 성

고 종 기 (안전보건공단 대구지역본부 중대산업사고예방 기술지원부)

이 수 회 (안전보건공단 대구지역본부 중대산업사고예방 기술지원부)

권 용 중 (안전보건공단 대구지역본부 중대산업사고예방 기술지원부)

2017-전문-481

『테레프탈산(TPA) 사일로 해체작업 중 분진폭발』
사례 연구

발행일	2017년 7월 1일
발행인	한국산업안전보건공단 이사장 이 영 순
발행처	한국산업안전보건공단 전문기술실
주소	울산광역시 중구 종가로 400
전화	(052) 703-0600
F A X	(052) 703-0312
Homepage	http://www.kosha.or.kr
디자인·인쇄	한국근로장애인진흥회 다윈디자인프린팅 (031) 904-9957

※ 무단 복사 및 복제하여 사용하는 것을 금지함



안전한 대한민국, 청렴한 대한민국 안전보건공단이 앞장 서겠습니다

일터의 안전보건을 위해 애쓰시는 근로자와 사업주 여러분께 감사드립니다.

최근 안전에 대한 사회적 관심이 매우 큽니다.

잇따른 대형사고로 안전에 대한 국민들의 걱정과 우려의 목소리가 높습니다.

우리가 추구하는 안전한 일터, 건강한 근로자, 행복한 대한민국을 만들기 위해서는 청렴이 기본이 되어야 합니다.

우리공단은 윤리경영을 바탕으로 '일하는 사람의 행복 파트너'로서 최고의 산업재해예방 서비스 제공을 위해 노력해 왔습니다.

특히, 정부와 국민으로부터 부여받는 '일하는 사람의 생명과 건강보호'라는 미션 수행을 위해 최선을 다해 왔습니다.

앞으로 우리공단은 국민에게 신뢰받는 공공기관으로서, 안전한 대한민국, 청렴한 대한민국을 만들기 위해 앞장 서겠습니다.
여러분께서도 애정을 갖고 지켜봐주시기 바랍니다.

감사합니다.

안전보건공단 이사장

.....
업무와 관련하여 금품, 향응수수 등 비위사실을 확인하신 경우
공단 감사실로 신고하여 주시기 바랍니다.

e-mail: gamsa@kosha.net
인터넷: www.kosha.or.kr
사이버감사실, 익명신고시스템(레드휠)

.....

