



아크릴산 제조공정 사고사례를 통한 소각 시스템의 안전성 향상 방안

마병철 · 이근원* · 임지표** · †김영철***

전남대학교 대학원 화학공학과 · *산업안전보건연구원 · **한국산업안전보건공단

***전남대학교 공과대학 응용화학공학부 및 촉매연구소

(2012년 4월 20일 투고, 2012년 8월 16일 수정, 2012년 8월 27일 채택)

A Study on the Safety Improvement in Incineration System from the Case Study of Acrylic acid manufacturing process Accident

Byung-Chol Ma · Keun-Won Lee* · Ji-Pyo Im** · †Young-Chul Kim***

Department of Chemical Engineering, Chonnam National University Graduate School,
Gwangju 500-757, Korea

*Occupational Safety & Health Research Institute

**Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA)

***Faculty of Applied Chemical Engineering and the Research Institute for Catalysis,
Chonnam National University, 300 Yongbong-dong, Gwangju 500-757, Korea

(Received April 20, 2012; Revised August 16, 2012; Accepted August 27, 2012)

요약

최근 대기환경규제의 강화로 화학공장에서 발생하는 폐가스를 소각 처리하는 경우가 증대되고 있다. 이러한 소각설비는 저장탱크 상부와 배관을 통해 연결되어 화염을 통하여 폐가스를 연소 소각시키기 때문에, 배관을 따라 화염이 역화될 경우에는 치명적인 사고로 연결될 수 있다. 본 연구는 아크릴산 제조공정의 소각시스템에서 발생한 중대산업사고에 대해 폭발의 3요소와 화염의 전파 원인을 분석하여 사고 예방대책 및 안전성 향상 방안을 다음과 같이 제시하였다. 첫째, 소각시스템의 송풍기를 재 가동하기 전에는 공기 또는 불활성 가스로 충분히 희석하여 폭발을 예방하여야 한다. 둘째, 폭풍으로 전이된 화염이 저장탱크로 전파되지 않도록 소각설비의 전단 및 저장탱크 상부에 폭풍용 화염방지기를 설치하는 것이 필요하다. 셋째, 폭연용 화염방지기를 그대로 사용할 경우에는 그 전단에 파열판을 설치하거나 저장탱크 상부와 소각설비의 배관을 후드식으로 연결하여 폭풍으로 전이된 화염을 저장탱크 밖으로 분출시켜야 한다. 마지막으로, 소각설비에 연결된 송풍기의 제어반(MCC)에 순간정전 보상장치인 시간 지연계전기(TDR: time delay relay) 등을 설치하여 순간정전 후에도 자동으로 재가동될 수 있도록 조치해야 한다.

Abstract - Recently, waste gas incineration is increasing due to strong environmental regulatory system in Korea. These incinerating facilities are usually connected with the top of the storage tank through pipeline and incinerate off gas with the flame. Therefore, the flame originated from these facilities is likely to move back into pipeline and might cause an explosion of the storage tank. Accordingly, the purpose of this study is to suggest the preventive measures and the way to improve the safety of these incineration systems through the cause analysis of a major industrial accident occurred in an acrylic acid manufacturing process in Korea. As a result of the study, the preventive measures are suggested as follows. (1) Air or inert gas inflow facilities should be well designed to dilute flammable gases into air or inert gas sufficiently before the blower is restarted in order to prevent the explosion (2) It is needed for the detonation-type flame arresters to be installed on the top of the storage tanks. (3) In case of using the deflagration-type flame arresters, it is necessary to install a rupture disk before the arresters, or blow off the flame outside tanks by connecting the tank top and the incinerator with hood-type pipe. (4) TDR should be installed to be restarted automatically after the momentary power failure.

Key words : waste gas, incineration system, detonation flame arrester, deflagration flame arrester, safety code

†주저자:youngch@chonnam.ac.kr

I. 서 론

화학공정에서 발생하는 폐가스(off gas)는 연소/소각, 대기배출 및 흡수/흡착 방법을 통해 안전하고 무해한 가스로 처리되어 대기로 배출된다. 이중 저장탱크 등에서 발생한 폐가스는 주로 소각설비를 통해 소각 후 대기로 내보내고 있다. 그로 인해, RTO (regenerative thermal oxidizer) 등의 소각설비를 이용한 소각 시스템(incineration system)의 적용이 점차 증대되고 있다.

그렇지만 이러한 소각 시스템은 연소 소각에 사용되는 고온의 화염이 배관을 통해 저장탱크 및 연결설비로 역화되어 저장탱크 등에서 폭발이 발생할 수 있으므로 설계 및 운전이 있어서는 그 안전성이 충분히 검토되어야 한다[1].

실제로 이러한 설비의 운전미흡으로 2010년 9월, L화학 아크릴산 제조공정의 소각 시스템에서 화재·폭발이 발생하여 저장탱크 3기가 폭발하고 근로자 2명이 부상을 입은 중대산업사고가 발생하였다[2].

본 연구는 위 공정의 소각 시스템에서 발생한 중대산업사고에 대하여 폭발의 3요소에 의한 폭발 원인 규명 및 화염 역화의 원인을 분석하여 소각 시스템의 사고예방 대책과 안전성 향상 방안을 제시하고자 한다.

II. 사고개요 및 원인

2.1. 사고사례 개요

2010년 9월 L화학에서 순간정전으로, 저장탱크에서 발생한 인화성증기(톨루엔 성분 등)를 소각로로 이송시키는 송풍기가 정지되었고 약 30분 후, 송풍기를 재가동하기 위해 흡입밸브를 여는 순간 송풍기가 폭발하였으며 송풍기 전단의 배관에 연결된 저장탱크 3기가 연쇄적으로 폭발하였다.

2.2. 사고 원인물질

사고 원인물질은 소각설비 송풍기 및 송풍기 흡입측에 연결된 배관 및 저장탱크 상부공간에 체류하고 있던 톨루엔 및 아크릴산 등의 가연성 증기 성분으로서 주요 물성은 Table 1과 같다.

2.3. 사고설비

사고설비는 송풍기와 송풍기 흡입측과 연결된 상압 탱크(총 3기)로서, 사양은 Table 2 및 Table 3과 같다. 송풍기는 폭발로 인해 양쪽 덮개가 파열되었고, TK-2 탱크는 용기 상판의 취약부분(weak seam)이 분리되면서 화재로 이어져 주변 설비들이 검게 그을

렀으며 TK-3 탱크는 압력에 의해 탱크 상부를 덮고 있던 콘크리트가 손상되었다. 또한, TK-4 탱크는 폭발로 용기 상판의 취약부분이 분리되었다.

2.4. 사고발생 공정

사고발생 공정은 Fig. 1과 같이 아크릴산을 생산하는 공정으로, 프로필렌과 공기 중의 산소를 2단계로 산화 반응시켜 아래와 같이 아크롤레인(acrolein) 및 아크릴산(acrylic acid)을 생산하는 공정이다.

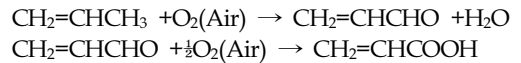


Table 1. Properties of materials related to accident

Material	Vapor pressure [mmHg]	Explosion limits [Vol %]	Flash Point [°C]	Auto Ignition Point [°C]
Toluene (C ₇ H ₈)	28.4 (25°C)	1.1 / 7.1	4	480
Acrylic acid (CH ₂ CHCO OH)	4.0 (20°C)	2.0 / 8.0	50	438

Table 2. Specification of blower

Capacity (Nm ³ /Hr)	RPM/ Discharge Pressure[mmH ₂ O]	Watts [Kw]	Material
900	3,560 / 2,000	45	STS304

Table 3. Specification of storage tank

Item no.	Volume [m ³]	DP/DT (OP/OT) [°C]	Diameter/ Height [mm]	Material
TK-2	2.3	F.W/ 100 (ATM/50)	1,500/1,500	STS 304
TK-3	5.6	F.W/ 100 (ATM/50)	1,800/2200	STS 304
TK-4	0.35	F.L/ 50 (ATM/30)	700/900	STS 304

※ 탱크의 내용물은 공정 중 발생되는 톨루엔, 아크릴산 증기성분이 포함된 스티프 용축수임.

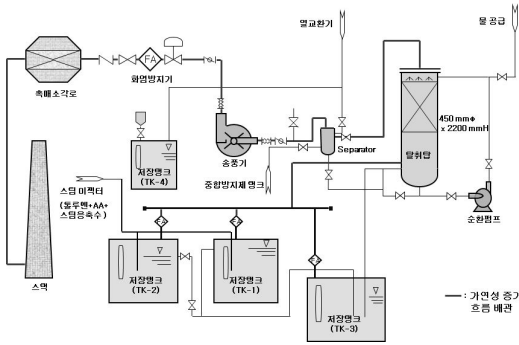


Fig. 1. Schematic diagram of accident process.

이때, 미정제 아크릴산은 후단공정인 흡수 공정과 물분리 공정을 거친 후에 정제 아크릴산이 된다. 물분리 및 정제과정에서 사용되는 톨루엔(아크릴산에 포함된 초산성분을 분리하기 위한 공비증류에서 공비제로 사용) 및 아크릴산 등의 증기성분들은 송풍기를 통해 응축되고, 미응축된 증기성분들은 스팀 이젝터 등을 통해 TK-1, TK-2 및 TK-3에 스팀 응축수와 함께 저장된다.

TK-2 탱크에는 톨루엔성분이 많이 포함된 액체성분(스팀 응축수 + 톨루엔 + 아크릴산)이 저장되고 일정량 이상 저장될 경우는 다시 TK-3탱크로 이송되어 저장된다. 또한, TK-4탱크는 주로 아크릴산 증기가 포함된 액체성분이 저장된다.

TK-1,2,3의 상부공간의 증기성분은 송풍기를 통해 탈취탑 및 기액 분리기(separator)를 통과 한 후 촉매소각로에서 소각된다. 또한, TK-4의 증기성분은 탈취탑을 거치지 않고 곧바로 기액 분리기를 통해 다른 증기 성분들과 합류되어 소각된다.

2.5. 사고발생 과정

2010년 9월 10시 37분경 네오펜틸글리콜(NPG)공장에서 전기실 고압반 커패시터(capacitor)의 이상으로 정전이 발생하였고, 이 영향으로 3AA공장역시 순간정전이 발생하여 사고발생 송풍기가 가동 중지 되었다. 이후, 11시 06분경 송풍기를 재가동하기 위해 생산팀 직원 2명이 현장에 도착하여 한 명은 흡입밸브를 잠그고 다른 한 명은 토출밸브를 열었다(Fig 2 참고).

그 다음, 현장에 있는 송풍기 가동 스위치를 켜고 흡입밸브(나비형 밸브)를 여는 순간, 송풍기가 폭발하여 근로자 한 명이 폭발 비산물(송풍기 측면 커버)로 인해 두부에 손상을 입었고 다른 한 명은 폭발과 동시에 발생한 화염에 의해 팔과 목에 화상을 입었다. 송풍기 폭발 직후, 송풍기 흡입측에 연결된

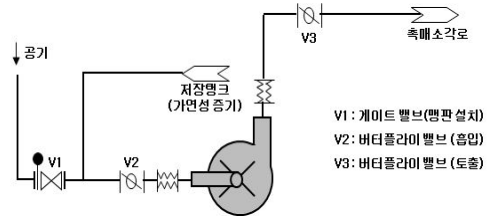


Fig. 2. Schematic diagram of blowing system.

TK-2, TK-3 및 TK-4에서 연쇄적으로 폭발이 발생하였고, TK-2에서는 폭발과 동시에 화재가 발생하였다.

III. 사고원인 및 예방대책

3.1. 폭발의 3요소 분석

폭발원인을 화재·폭발의 3요소(가연물, 산화제 및 점화원)로 분석하여 그 원인을 다음과 같이 제시하였다.

(1) 가연물

사고발생 송풍기는 저장탱크 상부의 가연성 증기성분들을 흡입하여 촉매소각로로 이송하는 설비로서, 정전의 영향으로 약 30분 동안 가동 정지되었고 이 기간 동안에 저장탱크에서 발생하는 가연성 증기성분들(톨루엔 및 아크릴산 등)은 송풍기에 연결된 배관, 기액 분리기(separator) 및 탈취탑에 정상 운전시 보다 높은 농도로 체류하였을 것으로 추정된다.

또한, 저장탱크들의 상부공간의 가연성 증기들이 정상적으로 배출되지 못한 관계로 탱크 상부공간에는 정상시보다 높은 농도의 가연성 증기들이 축적되었을 것으로 추정된다(폭발범위 하한치 이상으로 체류했을 가능성이 큼).

(2) 산화제(공기)

송풍기에 연결된 배관은 저장탱크의 상부까지 연결되었고 탱크 상부는 불활성가스(질소 등)로 봉입(sealing)하지 않기 때문에, 저장탱크 및 연결배관 등을 통해 외부 공기가 충분히 유입될 수 있다. 이렇게 유입된 공기는 증기성분들과 혼합되어 송풍기 흡입측과 연결된 배관 및 설비 그리고 저장탱크 상부공간에서 폭발분위기를 형성하였을 것으로 추정된다.

또한, TK-4 저장탱크의 상부에 설치된 벤트를 통해 배관 및 기액분리기 등으로 공기가 지속적으로 유입되었을 것으로 추정된다.

(3) 점화원

점화원은 다음과 같이 4가지로 추정할 수 있고 이 중,

금속의 충돌로 인한 불꽃(spark)의 가능성이 가장 높다.

(가) 금속의 충돌로 인한 불꽃에 접화

흡입 배관내에 존재하는 금속 이물질이 송풍기 가동시 임펠라 몸체와 부딪쳐 발생하는 불꽃에 의해 접화될 가능성이 있다.

(나) 금속의 마찰로 인한 마찰열에 의한 접화

송풍기 임펠라와 케이싱의 틈새(clearance)가 충분하지 않아 금속간 마찰에 의해 접화할 가능성이 있으나 송풍기의 임펠라 및 케이싱이 부딪힐 경우, 소음 및 진동이 발생하는데 사고 직전에는 송풍기에서 특별한 소음 및 진동을 감지하지 못하였고 송풍기를 가동 한 후 폭발발생까지의 시간이 10~15초 정도로 짧았던 점으로 미루어 보아 임펠라와 케이싱의 마찰에 의한 접화 가능성은 낮다고 판단된다.

(다) 정전기에 의한 접화

송풍기 토출부에 설치된 밸브의 개도가 조금 열린 상태에서 송풍기가 가동되고 증기흐름이 밸브 개도부를 빠른 속도로 통과하면서 정전기가 발생하여 접화할 가능성이 있으나, 송풍기나 배관이 접지되어 있고 증기나 공기성분에 포함되는 단위부피당 정전기의 용량이 크지 않아 가능성은 낮다고 판단된다.

(라) 소각로에서의 역화

화염이 송풍기 후단의 촉매소각로에서의 배관을 통해 송풍기까지 역화될 가능성이 있으나 가연성 증기가 송풍기 후단의 6"배관에서 34" 소각로 주 배관에 합류되어 배관의 면적이 32배로 확대 되면서 소각로로 흐르던 공기와 희석되기 때문에, 소량 유입된 가연성 증기로 인해 34"이상의 배관내에서 가연성 증기의 농도가 폭발분위기를 형성하기는 어렵다고 판단된다. 또한, 현장조사 결과 송풍기 후단 배관(6")과 34"배관 사이에 화염방지기 및 체크밸브가 설치되어 있고 연결 배관 및 설비에서 화염에 의한 손상 및 흔적이 없는 것으로 미루어 보아, 소각로에서의 역화에 의한 접화가능성은 낮다고 판단된다.

이상과 같이 화재·폭발의 3요소를 분석한 결과 폭발의 원인은 다음과 같다. 즉, 송풍기 가동정지로 사고발생 저장탱크의 상부 공간 및 연결배관에는 평상시 보다 높은 농도의 가연성 증기가 공기와 혼합되어 폭발분위기를 형성하였고 송풍기를 가동하고 흡입측 밸브를 여는 순간에 송풍기에서 발생한 불꽃에 의해 송풍기가 폭발하였다. 이때, 발생한 화염이

송풍기 흡입 측에 연결된 배관을 따라 저장탱크(TK-2, TK-3 및 TK-4)에 전파되어 저장탱크에서 폭발이 발생한 것으로 추정할 수 있다.

3.2. 송풍기 배관을 통한 화염전파 근거

사고원인 추정에 의하면 송풍기에서 발생한 화염이 송풍기 흡입측에 연결된 배관을 따라 저장탱크에 전파되어 저장탱크에서 폭발이 발생하였다고 추정하였다. 그렇지만, Fig. 1의 공정도에서 알 수 있듯이 화염이 저장탱크로 전파되기 위해서는 탈취탑(물이 순환되는 흡수탑)과 저장탱크 상부에 설치된 화염(역화)방지기를 통과해야만 한다. 즉, 화염이 이러한 설비를 통과하면서 소멸되지 않은 상태로 저장탱크까지 전파되어야 한다는 것이다. 이러한 현상에 대해서는 충분히 납득할만한 설명이 필요하다고 판단하여 문헌들을 참고하여 다음과 같이 추정에 대한 근거를 제시하였다.

(1) 화염이 화염방지기를 통과할 수 있는가?

TK-1,2,3 탱크 상부에 설치된 화염방지기는 영국 MARVAC사 제품(1997년 설치)으로 제품 사양서에는 화염속도 500 ft/sec 이내의 화염전파 방지 장치이며, 굽힘이 없는 직선배관으로 화염발생 지점으로부터 5 m이내에 설치될 경우에 한하여 그 성능을 보장한다고 기록되어 있다.

그렇지만, API RP 2028(Flame Arresters in piping Systems) 4.4절[4]에서는 화염이 배관을 통해 역화될 경우, 배관길이가 길어지고 굽힘 부분이 많을수록 화염의 전파속도가 빨라져서 그 속도는 음속이나 음속이상(1,000 ~ 수천 ft/sec 이상)이 되고 압력 또한 초기압력의 20배 이상이 되므로, 이 경우에는 폭발방지용 화염방지기를 설치하도록 규정하고 있다. 또한, Ciccarelli 등(1998년)[5]은 덕트에서의 화염가속 및 폭발로의 전이에 대한 논문에서 화염의 폭발로의 전이는 덕트의 길이가 길고 난류(turbulence)를 일으키는 장애물이 많을수록 덕트 내부로 전파된 화염이 빠른 속도로 변하여 폭발로의 전이된다는 사실을 보고하고 있다.

또한, Dow chemical사에서는 직경 2 in(0.508 m), 길이 15 ft(4.6 m)인 직선배관(Case 1)과 직경이 2 in(0.508 m), 길이 16.4 ft(5.0 m)인 직선배관에 5.25 ft(1.6 m)의 엘보우를 연결한 배관(Case 2)에 4.3% 프로판/공기를 각각 채운 후, 화염을 직선관의 끝지점에 점화시키고 연결배관 끝지점에서 전파되는 화염의 속도 및 압력을 측정하였다. 그 결과, 화염속도는 Case 1(150 m/s)에 비해 Case 2(2,012 m/s)가 무려 13.4배 이상 빨랐고 압력 또한, Case 1(0.41 kg/cm²)

에 비해 Case 2(17.7 kg/cm²)가 무려 43.2배 이상 크게 나타났다[6]. 위 결과는 가연성가스가 공기와 함께 채워져 있고 엘보우 등으로 연결된 배관(직선길이 5 m 이상)으로 화염이 전파될 경우에는 배관 끝단에서의 화염속도 및 압력이 크게 증가한다는 사실을 말해준다.

위 내용으로 미루어 볼 때, 사고당시 송풍기와 사고 저장탱크에 연결된 연결배관은 엘보우 등을 사용하여 굽힘 부분이 여러 있고, 직선 배관길이 또한 5 m 이상(약 30 m)이기 때문에 화염이 역화되어 화염방지기를 통과할 시점에는 그 화염속도가 500 ft/sec보다 훨씬 빠르고 높은 압력이 동반되었으므로 폭굉으로 전이된 화염을 충분히 제어하지 못하였을 것으로 짐작할 수 있다.

(2) 화염이 탈취탑(물이 순환되는 흡수탑)을 통과할 수 있는가?

탈취탑(450 mmφ × 8,500 mmH)은 물이 순환 살수되며 충진재(packing) 층은 2단이며 각 단의 높이는 2,500 mm이다. 충진물은 Pall ring(1 1/2", STS 304)이 사용되었으며, 충진물 사이에는 공극이 존재하는 구조이다. 이 공극사이로 가연성 증기(톨루엔 증기)와 공기가 혼합되어 폭발분위기를 형성한 상태에서 화염이 전파될 수 있는지를 확인하기 위해, 톨루엔 증기의 최대안전틈새를 문헌에서 찾아보았다. 그 결과, IEC 60079-1에서는 톨루엔의 최대안전틈새(maximum experimental safe gap)를 1.06 mm로 규정하고 있었다[7]. 이는, 톨루엔 증기로 폭발분위기를 형성한 두 챔버를 금속관으로 연결하였을 경우, 금속 표면 틈새를 통하여 한쪽 챔버에서 다른쪽 챔버로 화염이 전파되는 것을 방지할 수 있는 틈새의 최대 간격치가 1.06 mm이고 이 틈새보다 클 경우에는 화염이 금속관을 통해 다른 챔버로 충분히 전파될 수 있다는 것을 의미한다.

또한, API RP 2028(Flame Arresters in piping Systems)의 5.4.2절에서도 Liquid wetted packing은 화염전파속도가 낮은 경우에는 역화 방지가 가능하나, 화염속도가 빠른 경우에는 일반적인 설계기준을 적용할 수 없다고 규정하고 있다[4].

위 내용으로 미루어 볼 때, 탈취탑의 살수가 거의 없는 상태에서 충진재 충진간격이 톨루엔 증기의 화염이 통과할 수 있는 틈새가 있고 화염이 폭굉으로 전이되어 빠른 속도로 탈취탑을 통과할 경우에는, 비록 Liquid wetted packing층이라도 화염이 Packing층을 통과할 수 있다는 사실을 알 수 있다.

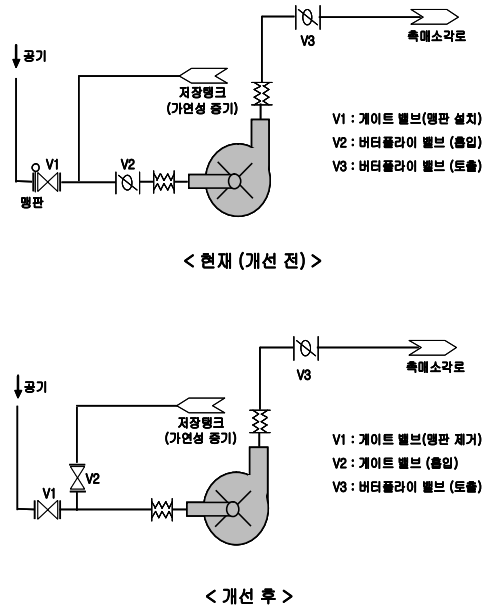


Fig. 3. Blowing system(Before and After).

3.3. 사고예방 대책

저장탱크내 발생된 유증기를 송풍기를 이송하여 소각시키는 공정에서 위 사고와 같이 송풍기가 일시 정지하고, 이를 다시 재가동할 경우에는 공기 또는 불활성가스 유입관을 열어 공기 또는 불활성가스를 충분히 주입시키고 이후, 고농도의 증기성분을 유입시켜 안전하게 재가동 시키는 것이 필요하다. 이를 위해, Fig. 3과 같이 설비를 변경하는 것이 필요하다.

즉, Fig. 3과 같이 V2밸브(흡입측 나비형 밸브)는 가연성 증기를 효과적으로 차단할 수 있는 위치(가연성 증기와 공기 또는 불활성 가스가 합류되는 지점 부근의 가연성 증기 유입 배관)에 나비형 밸브(quick open type)가 아닌 게이트밸브로 설치하여 순간 작동으로 인해 다량의 가연성 증기가 일시에 송풍기로 유입되지 않도록 조치해야 한다. 또한, 송풍기 등 화학설비에 있어서 그 운전이 일시적 또는 부분적으로 중단된 때의 작업방법 또는 운전 재개시의 작업방법(송풍기 전단에 설치된 공기 유입배관의 설치목적 및 사용방법을 포함)을 작성하고 이에 따라 작업하도록 관리 감독하는 것이 필요하다. 재가동의 작업순서는 Table 4의 내용을 포함시켜 작성해야 한다.

즉, ① 전원 차단 시, V2(가연성 증기 유입밸브)를 Close하고, ② 재가동시 V1(공기 또는 불활성 가스 주입 밸브)을 Open 하고 V3(토출밸브)를 Open하며,

Table 4. Operation step of blowing system at start-up

Step	V1 (Air or inert gas inflow valve)	V2 (Flammable vapor inflow valve)
1st	O	C
2nd	O	O
3rd	C	O

(O: Open, C: Close)

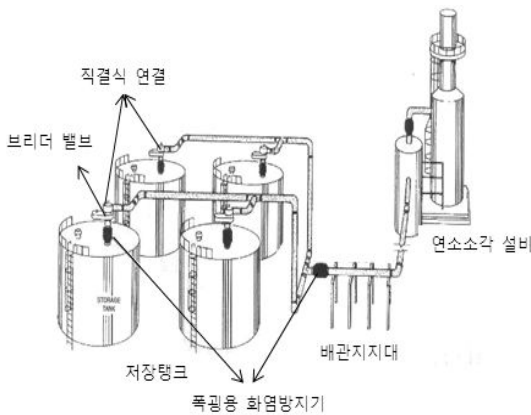


Fig. 4. Use of detonation flame arresters in piping system.

③ 송풍기 전원을 On 하고, V2(가연성 증기 유입밸브)를 서서히 Open하며, ④ 일정시간 후, V1(공기 또는 불활성가스 주입 밸브)을 Close하는 순서로 작업을 실시해야 한다. 또한, 운전원에게 이 내용을 교육하여 운전원이 송풍기 재가동시 배관내에 체류하는 고농도의 가연성 증기를 공기 또는 불활성 가스로 충분히 희석시킨 후, 소각로로 보내어 폭발로 인한 사고가 발생하지 않도록 조치하는 것이 필요하다.

소각로(RTO, RCO, CO 등)와 연결된 저장탱크 상부에 설치된 화염방지기는 Fig. 4와 같은 위치(소각로로 연결되는 배관 및 저장탱크 상부)에 폭굉용 화염방지기를 설치하는 것이 필요하다.

그렇지만 이러한 폭굉용 화염방지기는 가격이 고가이거나 무게가 많이 나가, 소규모 공정이나 시스템에서는 적용하는데 한계가 있다. 이런 경우에는 Fig. 5와 같이 전단에 파열판 등 취약부분을 설치하여 폭발로 전이된 화염이 폭연용 화염방지기를 통과하기 전에 파열판 등의 취약부분으로 분출될 수

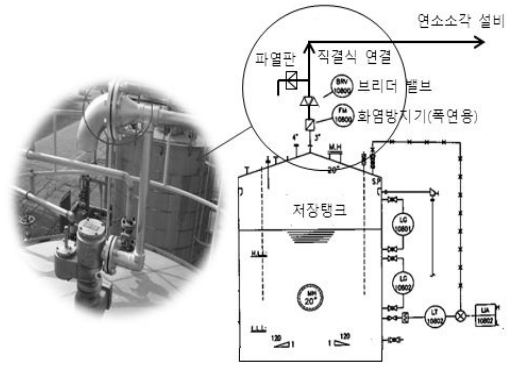


Fig. 5. Rupture disk before deflagration flame arrester in piping system.

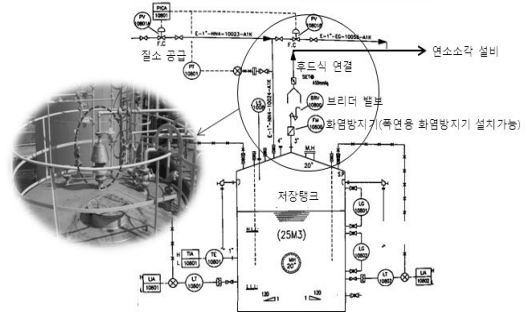


Fig. 6. Use of deflagration flame arresters in piping system.

있도록 조치하여야 한다. 다른 방법으로는, Fig. 6과 같이 소각설비에 연결된 배관과 저장탱크 상부의 통기관(화염방지기를 설치)을 직결식이 아닌 후드식으로 연결하여 평상시에는 후드식 배관을 통해 저장탱크 상부의 증기를 소각설비 등으로 이송시키고 소각하여 대기로 배출시키고, 소각설비 등에서 화재·폭발이 발생하여 화염(폭굉)이 역화될 경우에는 화염을 후드 하부로 분출시켜 화염이 저장탱크까지 역화되지 않도록 하는 것이 필요하다.

마지막으로, 송풍기의 제어반(MCC)에 순간정전 보상장치인 시간지연계전기(TDR: Time Delay Relay) 등을 설치하여, 전원이 다시 투입될 경우 송풍기가 자동으로 재가동 되도록 조치하여야 한다.

IV. 결론

본 연구는 아크릴산 생산공정의 소각시스템에서 발생한 중대산업사고의 사고원인을 분석하여 동중

재해 예방대책 및 소각 시스템의 안전성 향상 방안을 제시하였다.

4.1. 사고원인 추정

사고원인은 송풍기에서 발생한 불꽃에 의해 송풍기가 폭발하였고 이때, 발생한 화염이 송풍기 흡입측에 연결된 배관을 따라 저장탱크(TK-2, TK-3 및 TK-4)에 전파되어 저장탱크에서 폭발이 발생하였다. 화염이 화염방지 및 탈취탑을 통과한 이유는 다음과 같다.

(1) 저장탱크에 연결된 연결배관은 엘보우 등을 사용하여 굽힘 부분이 여러 있고, 직선 배관길이 또한 5 m를(약 30 m) 넘기 때문에 화염발생 지점에서 발생한 화염은 폭연에서 폭풍으로 전이되어 빠른 속도와 높은 압력으로 배관을 따라 전파될 수 있다.

(2) 탈취탑의 살수가 거의 없는 상태에서 충전제 간격이 톨루엔 증기의 화염이 통과할 수 있는 틈새가 존재하며, 이 공간에서도 가연성 증기(톨루엔 증기 등)와 공기가 혼합되어 폭발분위기를 형성한 상태에서는 폭풍으로 전이된 화염이 충전층을 충분히 통과할 수 있다.

4.2. 예방대책 및 안전성 향상 방안

(1) 소각 공정에서 송풍기를 재가동할 경우에는 Fig. 3과 같이 송풍기 전단에 공기 또는 불활성가스 주입 배관을 설치하고 송풍기를 가동시에는 Table. 4와 같이 공기 또는 불활성 가스를 충분히 주입시키고 이후, 고농도의 증기성분을 천천히 유입시켜 안전하게 가동 시키는 것이 필요하다.

(2) 소각로(RTO, RCO, CO 등)와 연결된 저장탱크 상부 및 배관에는 Fig. 4와 같이 주요 지점에 폭풍을 제어할 수 있는 폭풍용 화염방지를 설치하는 것이 필요하다.

(3) 소각설비에 연결된 배관에 폭연용 화염방지를

를 사용할 경우에는 Fig. 5와 같이 화염방지 전단에 파열판 등 취약부분을 설치하거나 Fig. 6과 같이 소각설비에 연결된 배관과 저장탱크 상부의 통기관(화염방지 설치)을 직결식이 아닌 후드식으로 연결하는 것이 필요하다.

(4) 소각설비에 연결된 송풍기의 제어반(MCC)에 순간정전 보상장치인 시간지연계전기(TDR)를 설치하여 순간정전 후에도 자동으로 재가동되어 배관내 고농도의 가연성 증기가 체류하지 않도록 조치하는 것이 필요하다.

참고문헌

- [1] 황순용, "대기오염 방지시설의 안전관리 실태분석 및 개선방안", 명지대학교 박사학위 논문, (2006)
- [2] 한국산업안전보건공단, "중대산업사고 조사보고서", (2010)
- [3] 이근원 등, "축열식 소각로의 화재·폭발 사고원인 규명", 한국가스학회지, 11(4), 7-11, (2007)
- [4] API PR 2028, "Flame Arresters in Piping systems", (2002)
- [5] G. Ciccarelli, S.Dorofeev, "Flame acceleration and transition to detonation in ducts", Progress in Energy and Combustion Science, 34, 499-500, (2008)
- [6] 한국산업안전보건공단 전남동부지도원, "화학공장의 안전장치", (2006)
- [7] IEC 60079-20-1(Part 20-1), "Material characteristics for gas and vapour classification- Test methods and data ", (2010)
- [8] KOSHA Code D-43, "연소 소각법에 의한 휘발성 유기화합물(VOC)처리설비의 기술지침", 한국산업안전보건공단, (2011)
- [9] 한국산업안전보건공단 부산지역본부, "소각법에 의한 VOC 처리설비의 안전대책", (2003)