

화학사고 원인분석을 통한 예방대책 수립에 관한 연구

이형섭 · 임지표*

한국산업안전보건공단

(2017. 1. 23. 접수 / 2017. 3. 25. 수정 / 2017. 6. 3. 채택)

A Study on Prevention Measure Establishment through Cause Analysis of Chemical-Accidents

Hyung-Sub Lee · Ji-Pyo Yim*

Korea Occupational Safety & Health Agency

(Received January 23, 2017 / Revised March 25, 2017 / Accepted June 3, 2017)

Abstract : Even if several chemical accident prevention systems such as PSM(Process Safety Management), RMP(Risk Management Plan), etc. have been carried out, many chemical accidents have still occurred at industrial plants in Korea. We describe the status of chemical industry and the trend of occurrence of chemical accidents in Korea. And this paper analyzes the recent chemical accidents in eight ways. These ways include chemical accident forms, ignition sources, sources of chemical equipment, human vs equipment/material causes, worker's working situation, employee scale, hazardous substances, week & time, fatalities of manufacture & contractor's workers. Finally we proposes the four representative prevention measures brought to result of cause analysis by accident statistics.

Key Words : chemical accident, fire & explosion, major (industrial) accident, cause analysis, prevention measure

1. 서론

화학공장 등 위험물을 취급하는 사업장에서는 화재, 폭발 및 독성물질 누출 등의 중대산업사고와 같은 화학사고 발생가능성이 상존하고 있다. 1996년 중대산업사고를 예방하기 위한 PSM(Process Safety Management) 제도가 도입되기 전에는 매년 수십건의 크고 작은 화학사고가 발생하였다. 대표적인 사고가 1989년 23명이 사망한 ABS 압출기 폭발사고¹⁾, 1994년 3명이 사망하고 41명이 중독된 TDI 공장 독성가스 누출사고²⁾ 등이다. 참고로 고압가스에 의한 화학사고를 예방하기 위하여 SMS(Safety Management System)는 '96년부터 시행되었으며 유해화학물질에 의한 화학사고를 예방하기 위한 RMP(Risk Management Plan)는 '15년부터 시행되고 있다.

PSM이 도입된 후 중대산업사고의 발생이 획기적으로 감소하였지만 아직도 지속적으로 발생하고 있다. Table 1은 '96년부터 '16년까지 발생한 중대산업사고 발생추이^{3,4)}이다. 금년도에도 포스겐, 불산, 황산 등의

누출에 의한 중대산업사고가 발생하여 다수의 근로자가 사망하고 인근 지역여까지 피해를 주었다.

'96년 20건이 발생하던 중대산업사고는 '16년 11건으로 약 45% 감소하였다. 중대산업사고에 의한 사망자도 15명에서 6명으로 60% 감소하였다. 하지만, 우리나라의 경제수준이 오르고 화학물질 유통량이 증가한 것을 고려하면 중대산업사고 감소 비율은 훨씬 높다. Fig. 1⁵⁾은 4년 주기(14년부터 2년 주기)로 환경부에서 조사하는 국내 화학물질 유통량 대비 중대산업사고 발생건수 추이이다. '96년에는 조사하지 않아 추정치이다. 화학물질 유통량은 '14년 '96년 대비 308% 증가했지만 중대산업사고는 45% 감소하였다.

또한, 석유화학 규모를 나타내는 에틸렌 생산량이 '96년 400만톤에서 '15년 864만톤으로 약 216% 증가한

Table 1. Occurrence trend of MA(Major Accident)

년도	'96	'00	'05	'10	'11	'12	'13	'14	'15	'16
MA(case)	20	10	5	5	3	5	5	11	11	11
fatalities(person)	15	9	3	6	9	15	7	3	8	6

* Corresponding Author : Ji-Pyo Yim Tel : +82:52-703-0597, E-mail : jpyim@mail.kosha.or.kr

Professional Engineering Bureau, Korea Occupational Safety & Health Agency, 400 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan 44429, Korea

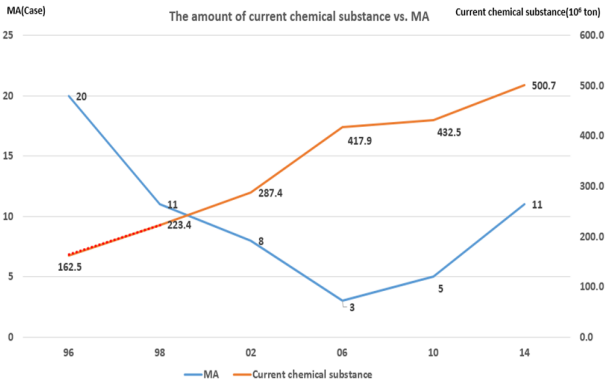


Fig. 1. Occurrence trend of MA vs current amount of chemical substances.

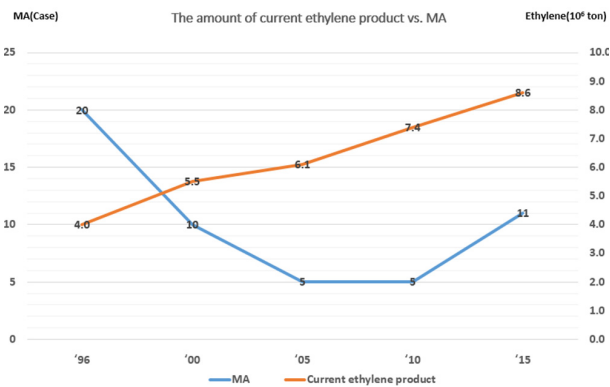


Fig. 2. Occurrence trend of MA vs amount of ethylene products.

것을 고려하면 중대산업사고는 4배 이상 감소한 것이 된다. Fig. 2⁶⁾는 한국석유화학협회에서 발표하는 연도별 에틸렌 생산량 대비 중대산업사고 발생건수 추이이다.

하지만, 대형 화학사고도 간헐적으로 발생하여 사회적으로 큰 파장을 일으켰다. 2000년 6명이 사망하고, 19명이 부상당한 MEK-PO 폭발사고²⁾, 2000년 5명이 사망하고 48명이 부상당한 방부제 공장 반응기 폭발사고²⁾ 등이 대표적인 사고들이다. 이런 과거의 사고들은 정비보수 작업중에 발생하는 경우도 있지만 운전 중에 설비 또는 공정상의 문제로 발생하는 경우도 많았다. MEK-PO 폭발사고의 경우도 잔존황산과 MEK-PO의 분해폭발에 의해 발생하였으며, 방부제 공장 폭발사고의 경우에도 반응기 내부 온도 상승으로 DEG(Di Ethylene Glycol) 등의 폭발이 발생하였다.

반면, 최근들어 발생한 화학사고는 정비보수, 입·출하 등 근로자의 작업과정에서 발생하는 경우가 대부분이다. 대표적인 사고가 2012년 5명이 사망한 불화수소 누출사고⁷⁾, 2013년 6명이 사망한 고밀도폴리에틸렌(HDPE) 사이로 폭발사고⁸⁾, 2015년 6명이 사망한 폐수집수조 폭발사고⁹⁾ 등이 있다. 불화수소 누출사고의 경우 입하 과정에서 밸브의 오조작에 의해 발생하였으며,



Fig. 3. Picture after explosion of waste water pond.

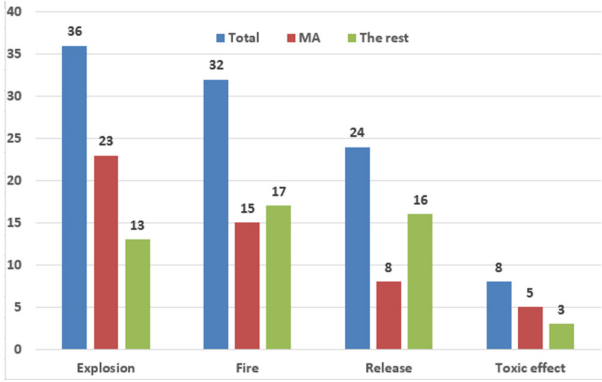
HDPE 사이로 폭발사고의 경우 사이로에 맨홀을 설치하는 과정에서 가연성 분진인 HDPE를 완전히 제거하지 않은 상태로 화기작업을 실시하다가 발생하였다. 또한, 폐수집수조 폭발사고의 경우도 VAM(Vinyl Acetate Monomer) 증기에 의해 폭발분위기를 형성하고 있는 폐수집수조 상부에서 연삭기를 이용한 절단 작업 중 발생한 불꽃이 점화원이 되어 발생한 사고이다. Fig. 3은 폐수집수조 폭발사고 현장이다.

본 연구에서는 2010년 이후 발생한 화학사고에 대해 발생형태별, 설비별, 인적·물적원인별, 작업상황별, 위험물별 및 요일별·시간별 사고발생 현황과 화재·폭발사고의 점화원 및 원·하청업체별 인명피해 현황을 분석한 후 분석결과에 따른 재발방지대책을 제시하고자 한다. 분석대상은 2010년 이후 2016년까지 발생한 중대산업사고 51건과 기타 화학사고 49건이다¹⁰⁾. 하지만, 본 논문에서 분석한 화학사고가 실제 발생한 모든 화학사고를 포함하는 것은 아니며, 기타화학사고는 PSM 대상사업장에서 발생한 중대산업사고가 아닌 화학사고와 PSM 비대상 사업장의 화학사고가 일부 포함된다.

2. 화학사고 원인분석

2.1 발생형태별 사고발생 분석 현황

발생형태별로는 폭발 및 화재에 의한 화학사고가 각각 36건(36%) 및 32건(32%)으로 가장 많다. 하지만, 기타 화학사고를 제외한 중대산업사고는 폭발 사고가 23건으로 전체 51건의 45%를 점유한다. 이는 화재나 누출에 의한 사고보다는 폭발에 의한 사고가 근로자에게 피해를 입힐 가능성이 커서 중대산업사고로 이어지기 때문이다. 아울러, 화재나 누출사고는 인명피해 가능성이



* The rest : Chemical accidents except for MA

Fig. 4. Analysis of occurrence by accident forms.

적어 중대산업사고 보다는 기타화학사고로 이어지는 경우가 많다. 참고로 중대산업사고와 기타화학사고는 인명피해 발생 여부에 따라 결정되는 경우가 많다. 즉, 화학사고가 발생하여 인명피해가 발생하면 중대산업사고로 분류하며 그렇지 않으면 기타화학사고로 분류하는 경우가 일반적이다. 그렇지만, 인명피해가 없더라도 사회적 파장이 큰 화학사고는 중대산업사고로 분류하는 경우도 있다. Fig. 4는 발생형태별 화학사고 발생 분석현황이다.

2.2 화재·폭발사고 점화원 분석 현황

화재나 폭발에 의한 화학사고의 점화원을 분석한 결과 정전기에 의한 점화가 68건 중 26건(38%)으로 가장 많고, 전기스파크나 마찰과 충격이 각각 13건, 11건으로 다음으로 많다. 특히, 중대산업사고의 경우 정전기에 의한 화재 및 폭발이 전체 사고 38건 중 47%(18건)를 차지한다. 이는 인화성액체나 인화성가스의 최소점화에너지는 대부분 1 mJ 미만으로 대단히 낮아 폭발 분위만 형성되면 화기, 전기스파크 등의 점화원이 아니더라도 이송과정에서 발생한 가연물의 정전기, 근로자의 몸에서 발생한 정전기에 의해 점화될 수 있기

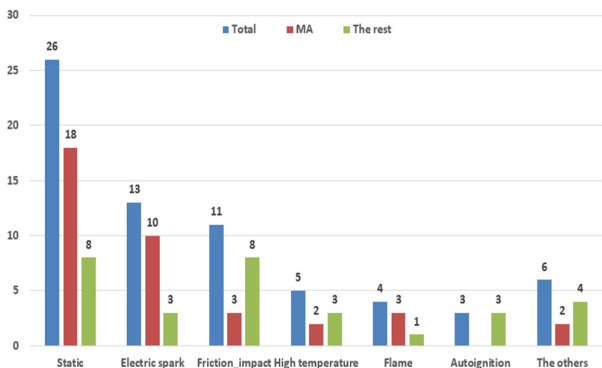


Fig. 5. Analysis of ignition sources for fire & explosion.

때문이다. 그러므로 위험물의 취급설비, 위험물 자체, 설비 및 위험물을 직접 조작하거나 취급하는 근로자에서 발생하는 정전기의 관리가 무엇보다 중요합니다. 이를 위해서는 도전성 재질의 사용, 유속 제한, 접지 및 본딩, 이송배관의 침액구조, 인체의 정전기를 제거하기 위한 제전화, 제전복, 제전장갑 등의 사용이 필수적입니다. Fig. 5는 화재 및 폭발사고 점화원 분석 현황이다.

2.3 설비별 사고발생 분석 현황

중대산업사고는 저장탱크의 청소작업 중 및 회분식 반응기의 운전과정에서 많이 발생하고, 기타화학사고는 운전중인 배관의 플랜지 누출사고가 가장 많았다. 저장탱크의 청소작업시 발생하는 사고의 대부분은 내부의 위험물이 완전히 제거되지 않아 발생하는 경우가 많다. 가스나 순수 액체상태 위험물의 경우 질소를 통한 퍼지로 내부의 위험이 충분히 제거되지만, 슬러지 상태의 위험물은 질소는 물론 스팀을 이용한 퍼지를 실시하여도 완전히 제거되지 않기 때문이다. 회분식 반응기 사고는 주로 내부가 용매 등에 의해 폭발분위기가 형성된 상태에서 맨홀을 통해 원료를 주입하는 과정에서 발생하는 경우가 많으며, 반응폭주가 발생하였으나 안전밸브는 설치되어 있지만 파열판이 설치되지 않거나 파열판은 파열되었으나 방출되는 위험물이 안전하게 처리되지 않아 발생한 사고도 있었다. 또한, 배관 플랜지에서 누출사고는 다행히 운전 중에 주변에 근로자가 없어 중대산업사고로 이어지지 않은 경우가 많다. 사고원인은 플랜지 사이에 설치된 가스켓의 손상이 많으며, 고온·고압에서 운전되는 경우 운전개시 또는 운전정지 과정에서 과도한 압력 또는 온도 변화로 플랜지에 체결된 볼트가 이완되어 발생하는 경우⁹⁾도 있었다. Fig. 6은 설비별 화학사고 발생 분석현황이다.

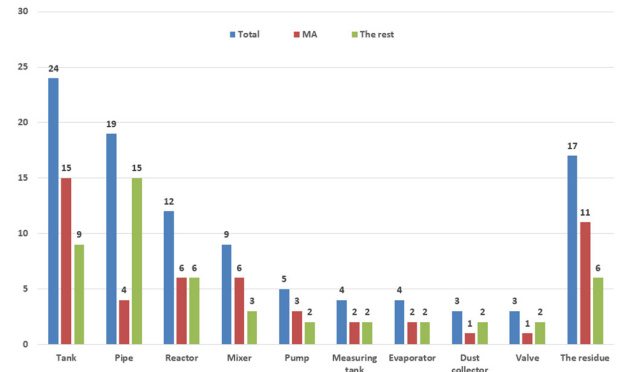


Fig. 6. Analysis of chemical equipment.

2.4 인적 또는 물적 원인별 사고발생 분석 현황

중대산업사고는 인적원인 특히, 안전작업허가 및 절차 미준수와 안전운전절차 미준수에 의해서 대다수 발생하고 있다. 하지만, 기타화학사고는 인적원인에 의한 사고와 물적원인에 의한 사고가 비슷하다. 이는 물적원인에 의한 화학사고는 사고 당시 주변에 근로자가 없어 중대산업사고로 이어지지 않기 때문이다. 하지만, 아차사고를 포함한 이런 물적원인에 의한 화학사고가 비록 인명피해는 발생하지 않았지만 언제든지 대형 중대산업사고로 이어질 수 있음을 간과해서는 아닌 된다. 한편, 대규모 사업장의 경우 정비보수 작업 중 협력업체 근로자가 안전작업허가 및 절차를 준수하지 않거나 안전작업절차가 작성되지 않거나 미흡하여 발생한 경우가 많으며, 중소기업 사업장의 경우 안전운전절차를 준수하지 않아 정상운전 중 발생하는 경우가 많다. 또한, 사고는 인적 및 물적원인이 복합적으로 작용하여 발생하는 경우도 많이 있다. 하지만 이번 논문에서는 보다 사고발생에 영향을 미치는 원인이 무엇인지 판단하여 인적 또는 물적원인으로 구분하였다. Table 2는 인적 및 물적·원인별 화학사고 발생 분석현황이다.

Table 2. Analysis of chemical accidents by human vs equipment/material cause

구분	Total	MA	The rest
합계	100	51	49
Human cause	60	37	23
Work permission	28	15	13
Operation procedure	23	17	6
Mal-operation	5	2	3
Education & training	3	2	1
Skill & experience	1	1	0
Physical cause	40	14	26
Maintenance	23	6	17
Design	12	7	5
Instrumentation	2	1	1
Inspection	1	0	1
Material	1	0	1

2.5 작업상황별 사고발생 분석 현황

화학사고를 작업상황별로 구분하면 정상운전 중에 가장 많이 발생하고, 다음으로 정비보수작업 중에 발생하고 있으며 시운전 중, 입출하 및 Shutdown 과정에서 일부 발생하였다. Fig. 7은 작업상황별 사고발생 분석 현황이다.

중대산업사고의 경우를 규모별로 재분류하면 중소기업 사업장에서 회분식 반응기 등의 정상가동 중에

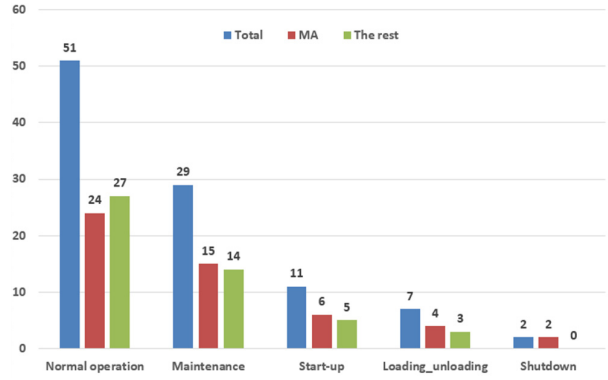


Fig. 7. Analysis of chemical accidents by working situation.

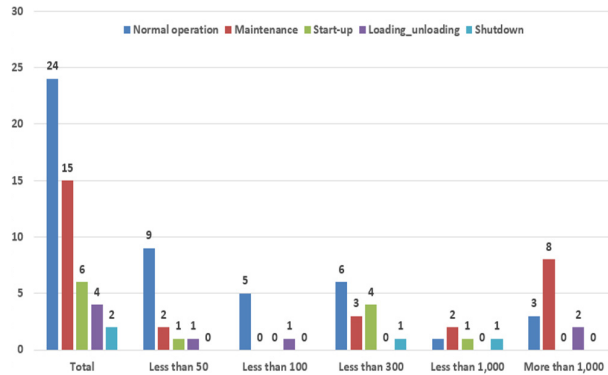


Fig. 8. Analysis of major accidents by employee scale.

발생하는 경우가 많고, 대규모 사업장에서는 정비보수 작업 중에 대부분의 사고가 발생하고 있다. 중소기업 사업장의 경우 정상운전이 자동화되어 있지 않아 위험물을 직접 취급하는 경우가 많지만 안전교육 등의 미흡으로 근로자의 안전의식 수준이 낮아 운전 및 작업 절차를 준수하지 않기 때문이다. 또한, 대규모 사업장은 전공장이 자동화되어 있어 위험물을 직접 다루지 않지만 정비보수 작업중에는 전문지식과 경험이 부족한 협력업체 직원이 위험물을 취급하는 작업을 직접 수행하기 때문이다. 예를 들면, 중소기업 사업장은 회분식 반응기에 원료 투입시 내부의 유증기를 제거하지 않은 상태로 맨홀을 개방하는 경우가 많지만 대규모 사업장은 맨홀을 개방하지 않고 컨베이어, 자동밸브 등을 통해 투입하고 있다. Fig. 8은 작업상황 및 사업장 규모별 중대산업사고 발생 분석 현황이다.

2.6 위험물질별 사고원인 분석 현황

위험물질별로 사고원인을 분석하면 인화성액체에 의한 사고가 가장 많다. 이는 모든 사업장에서 가장 많이 취급하기 때문이기도 하지만 인화성액체의 경우 누출되더라도 쉽게 확산되지 않아 폭발분위기를 형성하기 쉽기 때문이다. 다음으로 급성독성물질, 인화성가스,

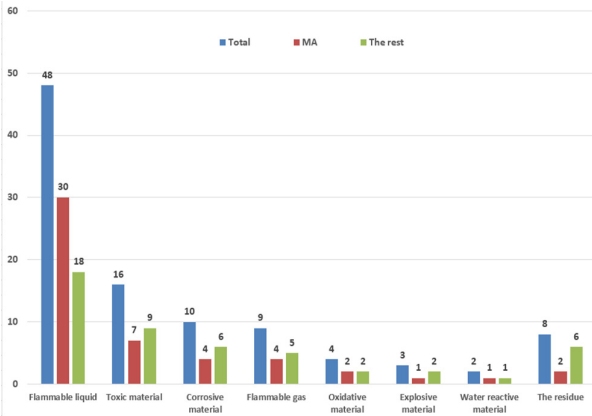


Fig. 9. Analysis of chemical accidents by hazardous substances.

부식성물질의 순이다. 하지만, 금년도에 발생한 화학사고 19건 중 4건은 불산, 황산 등 부식성물질에 의한 사고이므로 집중적인 관리가 필요하다. Fig. 9는 위험물질별 화학사고 원인분석현황이다.

2.7 원청·하청업체별 인명피해 분석 현황

사망자는 원청업체(37명)와 하청업체(33명)에서 비슷하게 발생하였다. 일반적으로 사망자의 대부분은 하청업체 근로자라고 알고 있는 것과는 다른 결과이다. 이는 앞에서도 언급했듯이 대규모 사업장에서는 정비 보수과정에서 하청업체 근로자의 인명피해가 크지만 중소규모 사업장의 경우에는 정상운전 중에 원청업체 근로자의 인명피해가 크다. 이는 중소규모 사업장은 협력업체에 도급을 주지 않고 직접 운전을 하기 때문이기도 하다. 아울러, 300인 이상 1,000인 미만 사업장에서 원청업체 사망자가 많은 이유는 시운전과정에서 1,4-Dioxane 폭발로 원청업체 근로자 6명이 사망한 사고가 있었기 때문이다. Fig. 10은 원청·하청업체 및 규모별 사망자 발생 분석 현황이다.

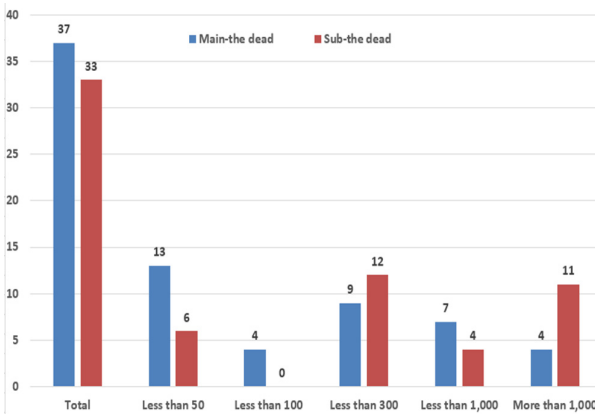


Fig. 10. Analysis of fatalities of prime contractor's or subcontractor's workers by employee scale.

2.8 요일별 및 시간별 사고발생 분석 현황

마지막으로 요일별로 전체 화학사고를 분석한 결과 일주일이 시작하는 월요일과 끝나는 금요일에 가장 많이 발생하였다. 이는, 주말을 쉬고 월요일에 작업을 시작하는 과정에서 안전의식의 낮은 상태에서 자주 발생하고, 금요일 작업을 급하게 마무리하려는 과정에서 많이 발생하였을 것으로 추정된다. 휴일 후 작업을 시작하는데 집중할 수 있도록 안전교육이 필요하며, 휴일전에는 일을 차분히 마무리 할 수 있도록 과한 업무량을 주지 않는 사업주 또는 관리감독자의 배려가 필요하다. 시간대별로 오전 10시부터 12시와 오후 2시부터 4시 즉, 가장 일이 많이 할 시간에 발생하였다. 마찬가지로 작업이 하루의 일정 시간에 집중되지 않고 골고루 분산하는 것이 필요하다. Table 3은 요일별·시간별 화학사고 발생분석 현황이다.

Table 3. Analysis of chemical accidents by week and time (Unit : case)

Time	Total	Sun	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat
Total	100	6	16	14	16	18	22	8
0 ~ 2	3	0	1	0	1	0	1	0
2 ~ 4	2	0	0	1	0	1	0	0
4 ~ 6	3	1	0	0	1	0	1	0
6 ~ 8	3	1	1	0	0	0	0	1
8 ~ 10	12	2	2	2	0	2	4	0
10 ~ 12	26	1	1	3	7	7	4	3
12 ~ 14	7	0	2	0	1	0	3	1
14 ~ 16	18	0	3	5	3	2	2	3
16 ~ 18	8	0	2	1	1	2	2	0
18 ~ 20	10	1	2	0	1	3	3	0
20 ~ 22	6	0	2	2	0	1	1	0
22 ~ 24	2	0	0	0	1	0	1	0

3. 화학사고 예방대책

화학사고는 발생형태별로는 폭발 및 화재에 의한 사고가 가장 많으므로 위험물 중 폭발성물질, 인화성액체, 인화성가스 등의 관리가 무엇보다 중요하다. 특히 연소를 위해서는 가연물, 점화원, 공기 등 3요소가 필수적이지만 인화성액체 등 가연물의 누출이 발생하면 화재나 폭발로 이어지는 경우가 대부분이므로 가연물의 누출되지 않도록 밸브, 플랜지, 맨홀 등 누출가능 요소에 대한 철저한 관리가 필요하다.

또한, 인화성액체나 인화성가스 등 가연물이 누출될 경우 점화원은 정전기가 가장 많으므로 반응기, 원료 투입 및 제품 이송설비는 도전성 설비를 사용한 후 접

지를 실시하고, 반응기와 원료 투입 및 제품 이송설비 간에 등전위 본딩을 실시하여야 한다. 또한, 액상의 원료 투입배관 및 제품 이송배관은 침액구조로 설치하고 인체의 정전기를 제거하기 위해 제전복, 제전화, 제전장갑, 도전성 바닥 등을 사용하는 정전기의 관리가 무엇보다 중요하다.

세 번째로 화학사고는 탱크, 배관 및 (회분식)반응기에서 많이 발생하고 있으므로 다른 설비보다도 점검주기를 단축하고 운전·취급 중 주의가 필요하다. 특히 저장탱크 청소작업 시 내부의 위험물을 완전히 제거한 상태에서 질소 등을 이용한 퍼지를 철저히 한 후 저장탱크에 연결된 배관의 밸브는 차단하고 맹판을 설치하여 위험물의 출입을 차단하여야 한다. 아울러, 저장탱크 내부에 슬러지 등이 있어 청소작업 중 지속적으로 위험물의 증기가 발생한 경우에는 스팀을 이용한 퍼지로 슬러지 등의 내부 위험물을 완전히 제거하고 작업 중에도 수시로 가스농도를 측정하여 위험한 상황에서는 즉시 작업을 중지하고 대피하여야 한다. 또한, 배관 플랜지에 설치된 가스킷은 주기적으로 교체하여 가스킷에 의한 누출 사고를 예방하여야 한다. 특히 고압 또는 고온에서 운전되는 경우에는 운전 중인 상태에서 볼트를 재체결하는 핫볼팅(Hot bolting)¹¹⁾을 실시하여 과도한 압력 및 온도의 변화에도 볼트가 이완되지 않도록 하여야 한다. 회분식 반응기의 사고를 방지하기 위해 반응기 내부의 폭발분위에서 원료를 맨홀을 통해 투입하지 않도록 퍼지 설비와 원료를 공급할 수 있는 중간호퍼의 설치가 필수적이다. 또한 반응폭주 가능성이 있는 반응기의 경우 충분한 크기의 파열판을 설치하고 방출되는 위험물을 흡수 또는 회수 등으로 안전하게 처리할 수 있는 설비를 설치하는 것이 필요하다. 특히, 톨루엔 등은 비수용성 위험물을 사용하는 경우 흡수탑에서 처리가 불가능하므로 냉각드럼의 설치가 바람직하다.¹²⁾

또한 인적 및 물적 원인별로는 인명피해를 동반하는 중대산업사고는 근로자의 실수에 의한 사고가 많고, 기타화학사고는 물적원인에 의한 사고가 많다. 이것은 근로자가 직접 화기작업 등을 수행하는 경우에는 안전작업 허가 및 절차의 준수가 무엇보다 중요함을 의미한다. 그러므로 위험한 작업시에는 작업시작을 위한 위험요소 제거의 확인과 작업절차의 준수를 철저히 감독하는 것이 필요하다. 또한 비록 근로자가 주변에 없어 인명피해로 연결되지 않은 기타화학사고를 예방하기 위해서는 철저한 설비유지관리가 선행되어야 한다.

아울러 화학사고는 위험물 중 인화성액체에 의한 사고가 가장 많이 발생한다. 이는 앞에서 언급한 발생형

태별로 화재 및 폭발사고가 가장 많이 발생하는 원인과 일맥상통하므로 가연물이 누출되지 않도록 하는 것이 가장 중요하다.

일곱 번째로 사업장 규모 및 작업 상황별로 분석한 결과 대규모 사업장의 경우 정비보수 작업 중 안전작업허가 및 절차 미준수에 의한 협력업체 근로자의 사고가 대부분이다. 정비보수작업 시 협력업체에 의한 사고를 예방하기 위해서는 협력업체 근로자의 안전지식 및 안전의식 수준을 원청업체 근로자와 동등한 수준으로 향상시키는 것이 선행되어야 하며, 그런 다음에 협력업체의 화기, 밀폐공간 작업 등 위험한 작업 시 원청업체 근로자의 관리감독하에 안전작업허가 및 절차가 철저히 준수되어야 할 것이다. 이를 위해 정비·보수작업 전 협력업체 뿐만 아니라 원청업체 근로자에게 철저한 교육이 필요하다. 반면, 중소기업 사업장의 경우 회분식반응기 등의 운전과정에서 안전운전 및 작업절차 미준수에 의해 다수 발생하였다. 중소기업 사업장의 사고를 예방하기 위해서는 중소기업 사업장의 경우도 대기업 수준의 안전지식 및 안전의식이 필요하며 안전운전 및 작업 절차를 준수할 수 있도록 철저한 교육이 선행되어야 한다.

마지막으로 작업요일 및 시간대별로 분석한 결과 금요일 및 10시부터 12시와 14시부터 16시에 가장 많이 발생하고 있다. 금요일에 가장 많이 발생하는 이유는 주말 전에 작업을 빨리 마무리하고 싶어 급하게 서두르기 때문 일 것이다. 가급적 금요일에는 위험한 작업은 자제하고 일주일을 차분히 마무리하는 것이 좋을 것이다. 또한, 10시부터 12시와 14시부터 16시에 무리해서 많은 작업을 하지 말고 8시간을 적절하게 안배해서 작업을 실시하는 것이 바람직하다.

4. 결론

본 연구에서는 2010년부터 2016년까지 국내에서 발생한 화학사고의 원인을 분석하였다. 발생형태별로는 화재 및 폭발 사고가 가장 많이 발생하고, 화재 및 폭발의 점화원은 정전기가 가장 많았다. 설비별로는 중대산업사고는 저장탱크에서, 기타화학사고는 배관에서 가장 많이 발생하였다. 인적·물적 원인별로는 인적원인이 다소 많은데 인적원인 중에서는 안전작업허가 및 절차와 안전운전절차 미준수에 의한 사고가 가장 많으며, 물적원인 중에서는 점검 및 보수 불량에 대부분을 차지하였다. 작업상황별로는 중소기업 사업장에서는 정상운전 중, 대규모 사업장에서는 정비보수 작업 중에 대부분의 사고가 발생하였다. 또한 위험물 중에서는

인화성액체 의한 사고가 가장 많이 발생하였으며 인명 피해는 대규모 사업장에서는 대부분 정비보수 작업 중 하청업체 근로자에서 발생하였다. 중소기업 사업장의 경우 정상운전 중에 원청업체 근로자의 인명피해가 가장 많았다. 또한 화학사고는 일주일 중 금요일과 하루 중에는 10시부터 12시 및 14부터 16시에 가장 많이 발생하였다.

이에, 본 연구에서는 중대산업사고 등 화학사고를 예방하기 위하여 네 가지의 예방대책을 제시하고자 한다. 첫째, 인화성액체 및 인화성가스 누출시 정전기가 점화원으로 작용하지 않도록 접지 및 본딩을 철저히 하고 제전화 작용 등으로 인체의 정전기를 제거하여야 한다. 특히 전압이나 전류와 같이 정전기를 측정할 수 있는 센서를 부착하여 정전기를 관리하는 것이 정전기에 의한 사고를 예방하는 가장 중요한 방법이다.

두 번째는 화학사고가 가장 많이 발생하는 저장탱크, 배관 및 반응기에서의 사고를 방지하기 위해 저장탱크의 청소작업시에는 내부의 위험물을 완전히 제거하고 외부에서 위험물이 유입되지 않도록 맹판 설치를 철저히 한 후 내부 작업시에도 수시로 가스농도를 측정하고, 위험한 상황에서는 작업을 즉시 중지하고 안전하게 대피하는 것이다. 배관의 플랜지 가스켓은 주기적으로 교체하고 고압 또는 고온에서 운전되는 경우에는 핫볼팅을 철저히 하여야 할 것이다. 또한 회분식 반응기의 사고를 방지하기 위해 폭발분위기에서 맨홀을 통해 원료를 투입하지 않도록 하고 반응폭주시 충분히 과압을 해소할 수 있는 파열판을 설치하고 파열판에서 배출되는 위험물을 안전하게 처리하여야 한다. 특히, 회분식 반응기의 폭주를 예방하기 위해서는 파열판 외에 파열판의 설정압력 미만에 원료를 긴급차단하거나 반응기 내부물질을 긴급방출 또는 반응억제제를 공급할 수 있는 설비를 갖추는 것이 더욱 안전하다. 이때 반응기의 반응폭주는 매우 대형사고로 이어질 수 있으므로 압력을 감지하는 센서, 긴급차단 등을 제어하는 제어설비 및 최종적으로 작동하는 밸브 등에 대해서는 고도의 신뢰성을 가진 것을 설치하여야 합니다. 이 외에도 용기나 배관에 설치된 밸브, 맹판, 캡 등의 개방, 교체 등의 작업시에 근로자 실수에 의한 인화성액체 등 위험물의 누출을 예방하기 위한 관리감독의 철저가 가장 중요하다.

세 번째는 대규모 사업장에서 주로 발생하는 정비·

보수 작업 중 협력업체 근로자의 사고 및 중소기업 사업장의 정상운전 중 사고를 예방하기 위해서 지식이나 경험이 부족한 협력업체 또는 중소기업 사업장의 근로자를 대상으로 안전교육 등을 통해 안전의식 수준을 높이고 관리감독을 강화하여 작업이나 운전 절차를 철저히 준수케 하여야 한다. 특히 일부 대형 석유화학업체에서 수행하고 있는 위험작업에 대한 근로자의 자격제도를 도입하는 것을 검토하는 것도 바람직하다.

마지막으로 화학사고가 금요일이나 일정 시간에 집중해서 발생하고 있으므로 주말이나 휴일을 앞두고는 위험한 작업을 자제하고 하루 중에는 작업이 일정 시간에 집중되지 않도록 작업일정의 관리가 필요하다.

References

- 1) C. J. Ryu, Chemical Safety Engineering(2nd), pp. 591, 1999.
- 2) Korea Occupational Safety & Health Agency, "Major Industrious Accident Casebook", pp. 22, 2001.
- 3) Korea Occupational Safety & Health Agency, "Major Industrious Accident Casebook", pp. 9, 2008.
- 4) Korea Occupational Safety & Health Agency, "The Guide for Prevention of Fire, Explosion and Release", pp. 1-20, 2016.
- 5) Ministry of Environment, "Chemical Management Basic Plan", pp. 2, 2015.
- 6) Korea Petrochemical Industry Association, "Petrochemical Statistics", 2016.
- 7) Korea Occupational Safety & Health Agency, "Major Industrious Accident Case", pp. 1-32, 2013.
- 8) Korea Occupational Safety & Health Agency, "Major Industrious Accident Case", pp. 1-33, 2013.
- 9) Korea Occupational Safety & Health Agency, "Major Industrious Accident Case", pp. 1-30, 2015.
- 10) Korea Occupational Safety & Health Agency, "Chemical Accident Statistics", 2016.
- 11) Korea Occupational Safety & Health Agency, "Chemical Accident Investigation report", pp. 1-11, 2014.
- 12) J. P. Yim, D. Y. Jin, B. C. Ma, S. J. Kang and C. B. Chung, "Review of Safety for Pressure-Relieving Systems of Small to Middle Scale Chemical Plants", Journal of the Korea Society of Safety, Vol. 30, No. 6, pp. 48-55, 2015.