

범용 고분자 제조공정의 재해분포 특성

황동준 · †이근원

한국산업안전보건공단

(2018년 10월 2일 접수, 2019년 2월 18일 수정, 2019년 2월 19일 채택)

Characteristics of Accidents Distribution in General Polymers Manufacturing Processes

Dong-Jun Hwang · †Keun Won Lee

Korea Occupational Safety and Health Agency

(Received October 2, 2018; Revised February 18, 2019; Accepted February 19, 2019)

요약

산업현장에서는 폴리에틸렌(PE), 폴리프로필렌(PP), 폴리염화비닐(PVC), 폴리스티렌(PS) 및 폴리우레탄(PU)과 같은 다양한 종류의 범용 고분자 제품들이 광범위하게 제조·사용되고 있으며, 이들 제조현장에서는 화재·폭발 등으로 인해 산업재해가 많이 발생하고 있다. 이러한 사고를 예방하기 위해서는 과거에 발생한 사고사례를 수집·분석하여 사고특성 등을 파악하여 동종 혹은 유사사고 예방에 활용하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 안전보건공단에서 운영하고 있는 산업재해통계시스템의 데이터베이스를 기초로 하여 SPSS를 활용하여 범용 고분자 제조공정별 재해분포 특성을 고찰하였다. 이들 결과는 범용 고분자 제조공정의 사고를 방지하고, 공정의 안전성을 확보하는데 활용하고자 한다.

Abstract - A variety of general purpose polymer products such as polyethylene (PE), polypropylene (PP), polyvinyl chloride (PVC), polystyrene (PS) and polyurethane (PU) are widely produced and used in the industrial field. Many industrial accidents have occurred due to fire and explosion at the manufacturing site. In order to prevent such accidents, it is important to collect and analyze accident cases that occurred in the past to identify the characteristics of accidents and to use them to prevent the same kind of accidents or similar accidents. In this study, the accident distribution characteristics of general polymer manufacturing process were examined by using SPSS based on the database of the industrial accident statistics system operated by the Korea Occupational Safety and Health Agency. These results can be used to prevent accidents in the general-purpose polymer product process and ensure the safety of the process.

Key words : polymer products, accident distribution, industrial accident statistics system

I. 서론

오늘날 산업현장에서는 폴리에틸렌(PE), 폴리프로필렌(PP), 폴리염화비닐(PVC), 폴리스티렌(PS) 및 폴리우레탄(PU)과 같은 다양한 종류의 범용 고분자 제품들이 사용되고 있다. 이러한 완성된 고분자

제품 및 제품의 유해·위험성은 크지 않다. 그러나, 중합(polymerization)공정과 그 밖의 관련 제조공정에서는 화재 폭발사고 등이 매년 발생하여 근로자들이 부상당하고, 많은 생명을 잃는 경우가 지속적으로 발생하고 있다. 특히, 2013년에는 HDPE 제품(분체) 공정에서 폭발사고로 인하여 6명이 사망하고, 16명이 부상당하는 대형사고가 발생하였다[1]. 이러한 고분자 중합공정은 고도의 기술집약적 장치산업으로서 여러 종류의 화학물질의

†Corresponding author: leekw@kosha.or.kr
Copyright © 2019 by The Korean Institute of Gas

원료 · 중간제 · 첨가제 · 용제 및 제품의 형태로 사용 · 취급 및 저장하고 있으며, 이들 물질의 보유량이 많고, 시스템이 복잡하여 누출 또는 화재 · 폭발과 같은 사고가 발생한 경우에는 공정내의 근로자뿐만 아니라 공장 인근의 주민 및 환경에 까지 막대한 영향을 끼칠 수 있는 게 현실이다. 또한 이로 인한 인명피해 뿐만 아니라 설비파손은 재산상의 매우 큰 손실을 가져오고, 파손된 설비를 복구하는데 상당한 시간이 걸리므로, 이와 관련된 산업에 필요한 원재료 수급 등에 차질을 가져와서 국가 전체 경제에까지 커다란 영향을 미치는 경우도 많다.

본 연구에 앞서 선행연구의 동향을 살펴보면 이근원(2003년)은 산업현장의 건물, 설비 등에 사용되고 있는 PP, PS와 PU폼에 대한 화재위험 특성을 규명하기 위한 연구가 수행되었다[2]. 또한 고분자 제조공정에만 국한된 것은 아니지만, 화학공장에서 발생하고 있는 화재, 폭발 사고 등의 중대산업사고 사례를 통계적 방법에 의한 분석 연구를 2005년도에 수행하였다[3]. 산업재해에 관한 통계적 분석을 활용한 유사한 연구로 조명우(2007년)는 2001년부터 2005년에 걸친 산재원인조사의 자료를 통계적 기법 등을 활용 · 분석하여 산업재해모델 연구를 수행하였다[4]. 범용 고분자에 관한 안전보건 관련 연구를 살펴보면 이근원 등(2003년)은 폴리프로필렌에 대해 다양한 연소조건에서 콘칼로리미터를 이용한 열방출 실험과 연소가스의 유해성 실험을 통한 화재위험특성을 연구하였고[5], 정지연(2007년)은 폴리우레탄 폼 및 수지 생산공정을 중심으로 유해물질의 발생실태 및 작업환경에 관한 개선연구를 수행하기도 하였다[6].

산업현장에서는 범용 고분자 제품들이 광범위하게 제조되고 그 현장에서 산업재해가 다수 발생하고 있다. 고분자 관련 제품의 화재 특성 등에 관한 연구는 수행되었으나, 현재까지 범용 고분자 제조공정 관련 전체적인 산업재해예방을 위한 선행연구는 수행되지 않았다. 이러한 사고를 예방하기 위해서는 과거에 발생한 사고사례를 수집 · 분석하여 사고특성 등을 파악하여 동종 혹은 유사사고 예방에 활용하는 것이 중요하다[7]. 따라서 본 연구에서는 1999년부터 2015년까지 우리나라에서 발생한 범용 고분자 제조공정 관련 사고사례를 수집 · 분석하여 통계적 방법을 활용하여 재해분포 특성을 고찰하였다. 이들 연구결과로부터 향후 고분자 제조공정의 사고를 예방하기 위한 대책수립의 기초 자료를 제공하고, 공정의 안전성을 확보하고자 하는데 기여하고자 한다.

II. 조사 및 분석 방법

본 연구에서 분석된 범용 고분자 제조공정관련 재해건수는 안전보건공단에서 운영하고 있는 산업재해통계시스템의 데이터베이스를 기초로 하였다. 범용 고분자의 재해분포특성을 파악하기 위하여 산업재해통계시스템의 재해자 리스트에서 1999년부터 2015년까지의 최근 17년간의 데이터를 기준으로 설정하고, 재해자 LIST를 조회하여 검색된 재해자 LIST를 항목별로 분류하여 통계적 분석을 위하여 엑셀시트로 변환하였다. 통계시스템에서 재해자 검색을 위하여 사용한 해당 키워드는 고분자, 폴리스티렌, 폴리에틸렌, 폴리비닐클로라이드, 폴리프로필렌, 폴리우레탄, 폴리아-, PE, PVC, PS, PP, PU, LDPE, HDPE를 사용하였다.

그 중 본 연구를 위하여 검색된 재해자 LIST 중 선정된 재해사례는 발생형태가 화재, 폭발, 파열, 화학물질 누출에 의한 사고이면서 고분자 제조공정과 직 · 간접적으로 관련된 재해가 156건이었고, 주요 범용 고분자인 PE, PP, PS, PVC, PU 관련 재해건수는 111건이었다. 그리하여 선정된 주요 범용 고분자 제조공정과 관련된 재해건수 111건에 대하여 재해 개요 조사를 파악하여 범용 고분자 제품별 공정별로 분류하고, 사고원인별(안전작업절차 미준수, 설비유지관리 미흡 등 7개), 발생형태(화재, 폭발 · 파열, 화학물질 누출 · 접촉, 직업병), 재해자 구분별(사고부상자, 업무상사고 사망자, 질병이환자, 질병사망자), 사업장 상시 종사 근로자수의 규모별, 재해일자 등의 항목으로, 재해자 LIST를 재분류하였다.

주요 범용 고분자 제조공정 관련 재해들을 분석하기 위하여 재해발생개요를 조사하여 재해 원인별 분석을 실시하였고, 156건의 재해를 정밀 분석하여 주요 범용고분자의 재해분포 특성을 파악하기 위하여 연도별, 제품별, 발생형태별, 재해자 구분별, 규모별로 빈도분석을 실시하였다. 또한 각 물질별로 재해발생형태, 재해종류, 사업장 규모 등에서 통계적으로 유의미한 평균차이를 살펴보기 위해 고분자 제조공정을 중심으로, 물질 종류, 발생형태, 주요 재해원인, 재해종류 그리고 사업장 규모를 독립변인으로 하고, 1999년부터 2015년까지 17년간 주요 범용 고분자 제조공정에서 발생한 산업재해의 평균을 종속변인으로 하여 SPSS ver.19를 이용하여 일원변량분석(F-검증)을 실시하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 연도별 범용 고분자의 재해발생 분포

1999년부터 2015년까지 국내 사업장에서 발생한 주요 고분자 제품의 제조공정관련 재해건수를 분석해보면 Fig.1과 같다. Fig.1에서 보는 바와 같이 고분자 제품 제조공정 관련 재해건수는 해마다 증감을 반복하고 있으나, 연도별 재해발생건수의 뚜렷한 증감의 상관관계는 없음을 보여 주고 있다. 그러나 2013년 이후 지속적인 증가 추세의 경향을 보이고 있다. 이는 최근 몇 년 동안의 석유화학경기 불황에 따라 설비 교체시기에 교체하기 보다는 유지보수로 인해 노후된 설비의 결함 등으로 전체적인 화학사고의 증가에 따라 고분자 제조공정관련 재해도 증가하는 것으로 판단된다.

3.2. 주요 범용 고분자의 제조공정별 재해발생 분포

고분자 제조공정별 재해발생 분포는 Fig. 2에 나타내었다. 최근 17년 동안 전체 고분자 제조공정관련 재해 중 약 71%가 PE, PVC, PS, PU 및 PP 등의 주요 범용 고분자 제조 관련 공정에서 발생하였다. 이는 이러한 주요 범용 고분자 제품관련 공정에서 재해를 감소시키는 것이 전체 고분자 제품관련 재해건수를 획기적으로 감소시킬 수 있음을 보여준다. 그리고 주요 범용 고분자의 재해발생 분포를 보면 PE제조 공정관련 사고가 전체 재해의 약 28%로 가장 높은 점유율을 보이고 있다. 특히, PE 공정 중에서 LDPE는 세계에서 가장 많이 만들어

지는 고분자 중의 하나로, 제조방법은 초고압 상태하의 자유 radical 반응으로, 에너지 사용이 다른 고분자 물질의 제조공정보다 많은 편이어서 그만큼 에너지 사용량에 따른 재해도 다른 물질의 공정보다 많이 발생한 것으로 나타났다. 이 밖에 PVC, PS, PU, PP의 순으로 높은 점유율을 보이고 있다. 특히, PU 관련 사고는 주로 건설현장 등에서 폴리우레탄 폼에 의한 화재사고의 경향을 나타내었다. 그리고 약 29%의 점유율을 보이고 있는 기타 고분자 물질 제조공정으로는 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET), 폴리에스터(polyester) 공정 등에서 발생한 재해이다. 이때, 주요 범용 고분자 제조공정에 따른 일원변량분석 결과는 통계적으로 유의미한 차이가 있었다($F=4.466, p<.001$).

3.3. 주요 범용 고분자 제조공정의 발생형태별 재해발생 분포

주요 범용 고분자의 제품공정의 발생형태별로 재해분포는 Fig. 3과 같다. 폭발·파열에 의한 재해가 43%로 가장 높은 점유율을 보였고, 그 다음으로 화재가 29%, 누출·접촉이 23%, 그 밖의 직업병이 약 5%를 차지하였다. 폭발 재해는 고압용기 파열에 의한 기계적 폭발을 비롯하여 화학반응에 의한 팽창폭발 또는 미세 고체입자의 급격한 연소에 의한 분진폭발 등을 말한다. 또한 누출에 의한 화상 및 피부염 등의 사고가 주요 범용 고분자 제품 제조공정 관련 재해의 약 23%를 차지하고 있다. 이는 선진공업국과는 대조적인 현상이며, 누출에 대비한 가스검지 및 흡수세정 설비를 비롯한 공정체 내의

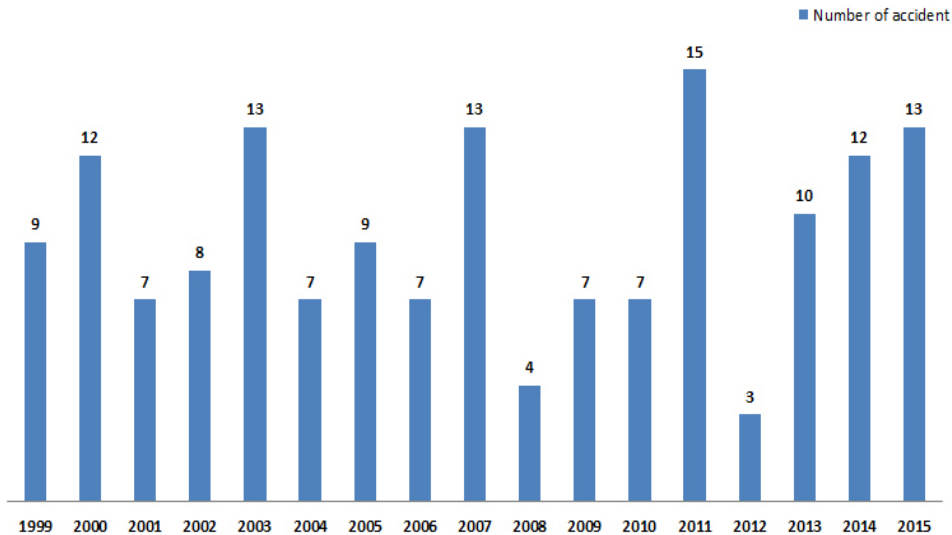


Fig. 1. Accident occurrence-distributions of polymer by year.

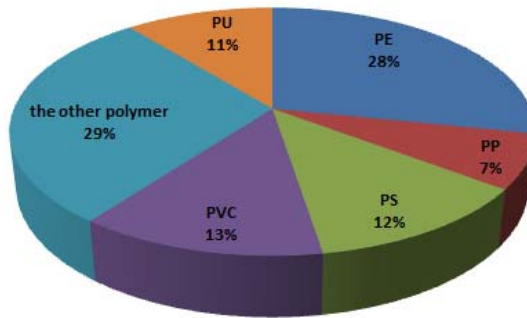


Fig. 2. Accident distributions in polymer manufacture process.

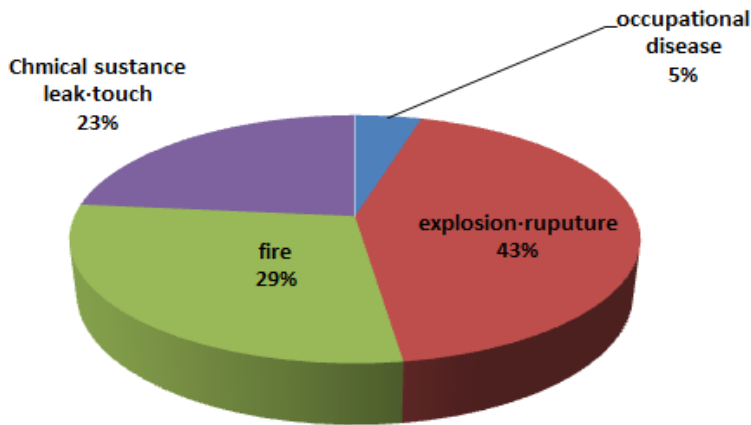


Fig. 3. Accident distributions by accident patterns in polymer manufacture process.

완충 내지 처리설비 등이 미비한 것으로 인한 사고로 판단된다. 또한 적절한 보호구만 착용하였더라도 누출에 의한 화상 등의 사고를 방지할 수 있는 재해사례가 다수 발견되었다. 이때, 주요 범용 고분자 제품 제조공정의 발생형태에 따른 일원변량 분석 결과는 통계적으로 유의미한 차이가 있었다 ($F=4.476, p<.01$).

3.4. 주요 범용 고분자의 제조공정의 재해원인별 재해발생 분포

주요 범용 고분자 제품의 제조관련 공정의 재해원인별 재해발생 분포는 Fig. 4와 같이 전체 재해의 약 34%가 안전작업 절차 미준수, 약 13.5%가 설비유지관리 미흡에서 기인하는 사고이었다. 그리고 약 14.7%의 사고는 단순 누출에 의한 접촉과 화상 등의 기타 사고로 보호구만 착용했더라도 충분히 예방할 수 있는 사고라 할 수 있다. 과거의 화재·폭발 사고는 주로 설비에 의한 사고가 많은 부분을

차지하였으나, 최근에 이르러 정비·보수 작업 및 운전 시 안전운전절차 미준수 등의 작업자의 실수에 의한 사고가 점점 증가하는 실정이다. 또한 화학물질에 대한 정보 부족이나 취급·사용·저장상의 잘못으로 인한 사고도 자주 발생하는 경향을 나타내고 있다. 이는 산업의 다양화와 신제품 개발의 영향으로 위험한 화학물질을 사용하거나, 위험성이 확인되지 않은 화학물질을 사용함에 크게 기인하는 것으로 판단된다.

특히, 안전작업절차 미준수, 보호구 미착용 등 근로자의 불안정한 행동에 의한 재해가 전체 재해의 약 70% 이상을 차지함으로써 설비유지관리 미흡 등의 불안정한 상태에 의한 재해의 약 2배 이상 발생함을 알 수 있었다. 이는 고분자 제조공정의 산업현장에서도 설비 등의 개선에 의한 재해예방보다는 지속적인 인적관리에 의한 재해예방활동이 중요함을 보여주고 있음을 알 수 있다. 이때, 주요 범용 고분자 제품 제조공정 주요 재해원인 구분에

범용 고분자 제조공정의 재해분포 특성

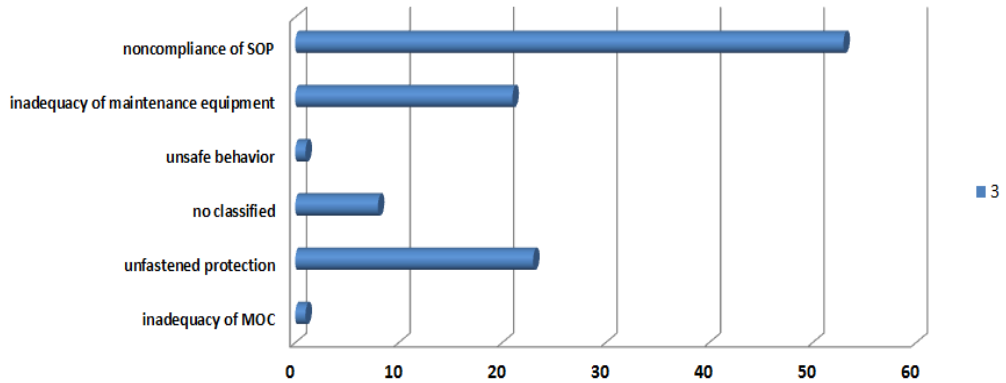


Fig. 4. Accident distributions by accident causes in polymer manufacture process.

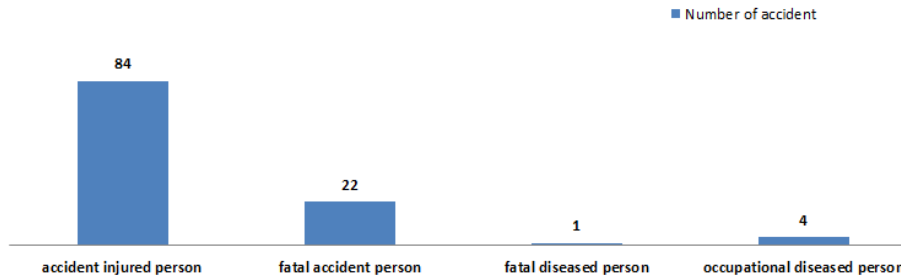


Fig. 5. Accident distributions by accident victims in polymer manufacture process.

다른 일원변량분석 결과는 통계적으로 유의미한 차이가 있었다($F=10.178$, $p<.001$).

3.5. 주요 범용 고분자 제조공정의 재해자 구분별 재해발생 분포

주요 범용 고분자 제조공정의 재해자 구분별 재해발생 분포는 Fig. 5와 같다. 재해자 구분별로 분석을 해보면 전체 재해의 53.8%가 사고성 부상자이고, 14.1%가 업무상 사망자이다. 화학사고는 빈도는 낮으나, 발생하게 되면 치명적이어서 공장 내의 근로자뿐만 아니라, 인근 주민에 까지 막대한 영향을 준다.

또한 최근 17년 동안 전체 고분자 제조공정 관련 업무상 사고 사망자 재해자 28명 중에서 27명이 주요 범용 고분자(PE, PVC, PS, PU, PP) 제조 관련 공정에서 발생하여 범용 고분자 제품이 일상생활에서 광범위하게 활용되는 만큼 산업재해, 특히 근로자가 사망하는 중대재해에서도 전체 고분자 제조공정관련 사고에서도 절대 다수를 차지하고 있다. 이때, 주요 범용 고분자 제조공정 재해자 구분

에 따른 일원변량분석 결과는 통계적으로 유의미한 차이가 있었다($F=26.692$, $p<.001$).

3.6. 주요 범용 고분자 제조공정의 규모별 재해 발생 분포

주요 범용 고분자의 제조공정과 관련된 재해의 사업장 상시 근로자수의 규모별 재해발생 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서와 같이 재해발생 건수는 5인 미만 사업장에서 가장 많이 발생하였음을 보여주고 있다. 300인 이상 규모의 사업장은 상대적으로 낮은 재해평균을 나타내었다. 특히, 50인 미만 소규모 사업장에서 발생한 재해가 전체 재해의 60.3%를 차지하고 있다. 이는 영세한 소규모 사업장에서의 화재·폭발 재해예방을 위한 지속적인 관리와 안전성 확보는 주요 범용 고분자 제조공정의 안전성 확보에 중요한 요소로 판단된다. 이때, 주요 범용 고분자 제조공정 사업장 규모에 따른 재해발생 현황에 대한 일원변량분석 결과는 통계적으로 유의미한 차이가 있었다($F=3.823$, $p<.01$).

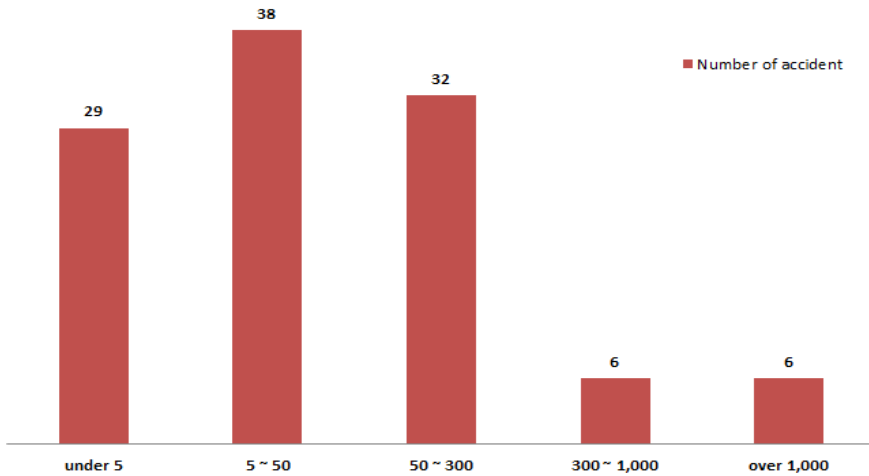


Fig. 6. Accident distributions by business sizes in polymer manufacture process.

IV. 결론

본 연구에서는 범용 고분자 제조공정의 재해분포 특성을 고찰하고자, 안전보건공단 산업재해통계 시스템의 데이터베이스를 근거로 총 156건의 고분자 제조공정 관련 재해 중 111건의 범용 고분자 제조공정 관련 재해를 재분류하였다. 그리고 재분류한 사고사례를 통계적 분석방법에 의해 재해분포 특성을 분석하고, 통계적 유의성에 대한 검증을 실시하였다. 본 연구에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

2013년에서 2015년 사이의 고분자 제조공정에서 발생한 화재·폭발·누출 재해는 지속적인 증가의 경향을 보이고 있었다. 이는 최근 석유화학 경기불황에 따라 설비 교체시기에 교체하기 보다는 유지보수로 인한 노후된 설비의 결함 등으로, 전체적인 화학사고의 증가에 따라 고분자 제조공정관련 재해도 증가하는 것으로 판단된다. 그리고 전체 고분자 제조공정관련 재해중 약 71%가 주요 범용 고분자 제조공정(PE, PVC, PP, PS, PP, PU)에서 발생하였고, 그 중에서도 PE공정이 전체 재해의 28%로 가장 높은 점유율을 나타내었다. 이는 이러한 주요 범용 고분자의 제품의 광범위한 사용에 따른 고분자 제조공정 관련 재해에서는 이러한 주요 범용 고분자의 제조공정에서 사고가 절대 다수를 차지하고 있음을 보여 주고 있었다.

사고발생 형태별로 재해발생은 폭발·파열>화재>누출 순으로 나타났으며, 이는 주요 범용 고분자 제조공정의 재해를 예방하기 위해서는 산업현장에서 화재나 폭발예방 대책이 무엇보다 중요함을 알 수 있다. 또한 주요 범용 고분자 제조공정관련 공정의

재해원인은 안전작업절차 미준수>보호구 미착용>설비유지관리 미흡으로 나타났다. 이는 과거의 설비 결함에 의한 사고위주 보다는 작업자의 실수를 유발하는 관리적인 부분들과 부주의에 의한 사고가 다수를 차지하고 있음을 보여주고 있다. 따라서 부주의에 의한 사고를 예방하기 위해서는 작업자의 부주의를 방지할 수 있는 공정 시스템의 개선 및 적절한 안전작업 절차에 대한 지속적인 교육이 필요할 것이다. 이때, 사고성 부상자가 53.8%이었고, 사고성 사망자가 14.1%를 차지하고 있었다. 특히, 전체 고분자 제조공정관련 사망자 중 대다수가 (28건중 27건) 주요 범용 고분자 제조공정에서 발생하고 있었다.

사업장 상시근로자 수의 규모별 재해는 전체 재해중 소규모 사업장인 50인 미만 사업장에서 60.3%가 발생하였고, 그 중에서 5인 미만 사업장에서 5인 미만 사업장에서 40%이상을 차지하고 있었다. 이는 주요 범용 고분자 제조공정 사업장 중에서도 50인 미만의 소규모 사업장에서의 재해예방을 위한 지속적인 안전관리와 안전성 확보가 전체 주요 범용 고분자 제조공정의 안전성 확보에 있어 중요한 요소임을 알 수 있었다.

REFERENCES

[1] Han, Ou-Sup and Lee, Jung-Suk, "Pyrolysis Characteristic and Ignition Energy of High-Density Polyethylene Powder", *KIGAS*, **18**(3), 31-37, (2014)

- [2] Lee, Keun-Won, "A Study on the Characteristics of Fire Hazard for Plastic Materials", 2003-84-591, Occupational Safety & Health Research Institute, (2003)
- [3] Lee, Keun-Won, "Incident Cause Analysis Based on Major Accident Database", 2005-15-33, Occupational Safety & Health Research Institute, (2005)
- [4] Cho, Myung-woo, "A Study on the Types of Fetal and Nonfatal Occupational Injuries and Hazardous Risk Factors", 2007-42-837, Occupational Safety & Health Research Institute, (2007)
- [5] Lee, Keun-Won and Kim, Kwan-Eung, "Fire Characteristics of Plastic Insulating Materials from Cone Calorimeter Test", *T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, **17**(1), 76-83, (2003)
- [6] Jeong, Jee-Yeon, "Studies on the Actual Emitting Conditions of Hazardous Substances and the Improvement of Working Environment in Polymer Manufacturing Processes", 2007-108-1033, Occupational Safety & Health Research Institute, (2007)
- [7] Hwang, Dong-Jun, "Distribution Characteristics of Accidents Caused During the Manufacturing Processes of Major General Purpose Polymers, and Plans to Secure Safety in the Manufacturing process", Master's Thesis, Pusan National University, (2017)