

HAZOP을 이용한 공정위험성 평가

A Process Hazard Analysis using HAZOP

이 동 형 *

Lee, Dong Hyung

배 기 응 *

Bae, Gie Woong

남 소 영 *

Nam, So Young

남 경 돈 *

Nam, Kyoung Don

이 준 열 *

Lee, Jun Youl

ABSTRACT

Hazard and operability Review(HAZOP) is widely used as a process safety analysis which systematically identifies potential process deviations and settles the problems.

In this paper, we carried out a process hazard analysis using HAZOP in K chemical plant. As a result, we showed that the plant could be operated more safely and be saved a lot of money by eliminating several existing hazardous factors through the change of processes and designs.

1. 序 論

복잡하고, 정교한 여러 분야의 기술이 집약된 설비로 구성된 화학공장에서는 원료, 중간물질, 첨가제, 용제 및 제품형태의 유해하고 위험한 화학물질을 사용 및 취급, 저장하고 있기 때문에 화재나 폭발, 위험물질 누출 등의 사고 위험성이 매우 크다.

화학공장에서의 안전사고는 일반적으로 발생빈도는 낮으나 작업장의 인명 및 재산 손실은 물론 인근 지역 주민이나 나아가 환경과 생태계에도 심각한 악영향을 미칠 수 있다는 점에서 공장에 내재되어 있는 잠재 위험 요소의 파악 및 계량적 평가 그리고 그 위험성을 제거하기 위한 체계적이고 종합적인 안전관리가 필요하다. 이를 위해 정부에서는 1996년부터 PSM(Process Safety Management, 공정안전관리)제도를 시행하여 오고 있는데 이중 공정 위험성 평가가 가장 핵심부분이라고 할 수 있다.

* 대전산업대학교 산업공학과

공정위험성평가는 유해·위험 화학물질을 취급하는 제조공정 및 설비를 대상으로 화재·폭발·위험물누출 등과 같은 잠재적 위험을 도출해내고, 잠재적 위험이 실제 사고로 연결될 가능성과 사고 발생시의 피해의 크기를 예측하여 평가·분석하고, 사고발생 확률과 피해의 크기를 최소화하는 것을 목적으로 한다.[2]

위험성 평가는 많은 시간, 노력, 전문지식이 필요한 활동이며, 그 방법은 크게 나누어 위험요소의 존재 유무를 찾는 정성적 분석방법(Hazard Identification Methods)과 위험요소를 확률적으로 분석, 평가하는 정량적 평가방법(Hazard Assessment Methods)으로 분류된다. Hazard Identification Methods에는 공정과 시스템 체크리스트, 안전성 검토, 예비 위험 분석, 위험과 운전성 분석, 인간 에러 분석 등이 있고, Hazard Assessment Methods에는 이상 트리 분석, 사건 트리 분석, 원인-결과 분석 등이 있다.

그 중에서도 HAZOP(Hazard Operability Review) 기법은 대표적인 정성적 평가기법으로 화학공정의 위험성 평가 방법으로 가장 널리 이용되고 있다. 이 기법은 다양한 분야의 전문가들이 모여 각각의 공정에서 발생 가능한 모든 이탈(deviations)을 분석 검토, 해결책을 찾아야 하므로 많은 반복 작업과 그에 따르는 시간소요가 많고 분석자의 지식 수준에 따라서 서로 다른 결과가 나오기도 하는 단점도 없지 않지만 공정에서 발생 가능한 모든 위험성과 사고의 원인을 도출, 사고 방지책을 제시하거나 공정의 운전상 발생할 수 있는 모든 비효율적 문제를 해결하는데 매우 효과적인 방법이다.

따라서 本 研究에서는 이러한 HAZOP 분석을 이용하여 K공장의 TGIC 공정에 대한 위험성 평가를 하고자 한다.

2. 기존연구의 고찰

HAZOP 분석 기법은 화학 공장에서 발생 가능한 모든 비정상적 이탈과 그에 대한 원인과 결과를 체계적으로 검토할 수 있어 가장 널리 이용되는 안전성 평가 방법이다. 근래에 들어서면서 화학 공정의 운전성 평가문제는 공정의 설계 단계에서 가장 필수적인 부분으로 인식되고 있다[1][3]. 특히 HAZOP은 1960년대 말부터 대두되었으며 1970년대 초 ICI, U. K.에서 화학 공업의 위험성 평가를 위한 실질적인 방법으로 개선되었다[10].

그러나 HAZOP 분석과 같은 위험과 운전성 평가는 상당히 어려운 작업이고, 많은 시간이 집중적으로 소요되어야 하며, 노동 집약적인 작업이기 때문에 분석에 필요한 시간과 노동력을 줄이고자 하는 요구가 대두되었다. 그 결과 최근에는 HAZOP 분석과정에서 요구되는 시간과 노력을 줄이고 분석자의 실수를 줄이기 위해 HAZOP 분석의 자동화를 모색하는 인공 지능을 활용한 지식 기반 전문가 시스템(Knowledge-Based Expert System)에 대한 연구가 수행되고 있다[6-9].

3. HAZOP 분석에 의한 공정위험성 평가

3.1 사례회사의 공정현황

K공장은 천연 고분자화학 변성체의 생산을 시작으로 특수 기능성 정밀 화학제품을 생산하고 있으며 주요 생산품은 TGIC(Triglycidylisocyanate)이다. 이 제품은 Triazine 고리의 구조를 가진 3개의 Functional group(Epoxy Ring)을 가지고 있는 Epoxy 화합물로서 반응성이 우수하고 가교밀도가 높기 때문에 Polyester계 분체도료 및 Photo Solder Resist Ink, EMC(LED Sealing) 등의 경화 개질제로 응용되고 있다.

현재 동사의 기술수준은 스위스 CIBA-GEIGY, 일본 NISSAN CHEMICAL과 비교하여 결코 뒤떨어지지 않는 정도이며, 생산량의 80% 이상을 수출하고 있다. 그러나 동사에서 TGIC가 세계적으로 최첨단의 제품임을 자부함에도 불구하고 그 합성법이 까다롭고 복잡하여 공정중 위험요소가 아직도 많이 상존하고 있다. 즉, 동 제조공정은 ICA(Isocyanuric Acid)에 Epoxy Ring을 형성시키기 위해 위험물질을 진공중에서 반응시키고 MeOH을 이용, 재결정을 시키는 공정이므로 항상 화재·폭발의 위험성이 크다.

지난 7년 동안 다행스럽게도 인명사고 없는 안전사고가 2번밖에 발생되지 않았지만 화학공정의 특성상 안전사고의 위험성은 상상할 수 없을 정도로 크기 때문에 보다 안전하고 효과적인 안전생산체제의 지속적인 유지활동은 매우 필요하다. 이에 동사에서는 최근 안전하고 효과적인 안전생산체제의 지속적인 유지를 위한 PSM(Process Safety Management)을 추진하였다.

3.2 공정위험성 평가

3.2.1 HAZOP 분석의 개요

1. 정의 및 주요 용어

HAZOP(Hazard and Operability Review)은 공장설계의 목적으로부터의 이탈에 따른 위험성 과 운전상의 문제점을 확인하기 위한 평가팀의 창의적이고 체계적인 접근방식이다. 즉, 위험(hazard)과 운전성(operability)을 정해진 규칙과 설계도면에 의하여 체계적으로 분석, 평가하는 방법이다.

HAZOP의 주요 용어들을 정의하면 다음과 같다.

1) 공정변수(process parameter)

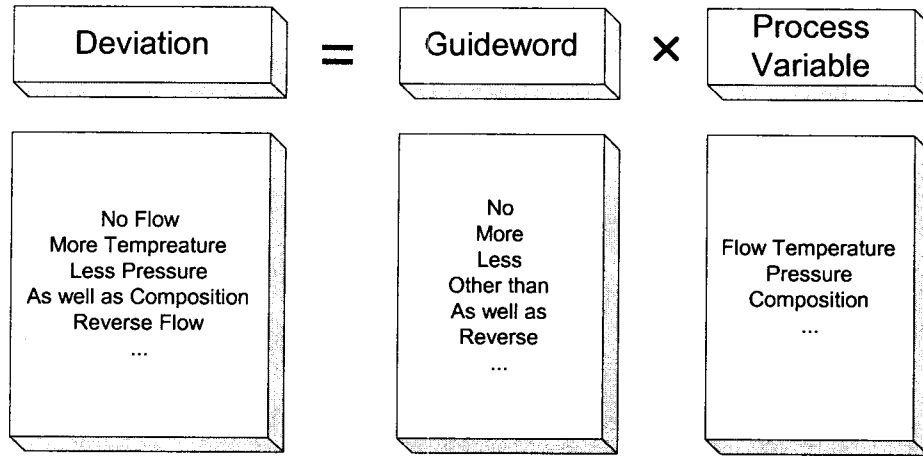
유량(flow), 압력(pressure), 온도(temperature), 구성성분(composition)등 물리적인 특성이나 보수, 정비, 샘플링 등 공정의 흐름 조건을 나타내는 변수이다.

2) 가이드워드(guide word)

공정변수의 질이나 양을 표현하는 간단한 용어로서 No(Not 또는 None), More, Less, Reverse, As well as, Parts of, other than이 있다.

3) 이탈(deviation)

가이드워드와 공정 변수가 조합되어 유체의 흐름정지 또는 과잉상태와 같이 설계의 도로부터 벗어난 상태를 의미한다. (그림1 참조)



<그림 1> 이탈의 형성

2. 분석절차

HAZOP 분석은 공정이나 조업에서 특정 부분을 분석 노드(study node)로 분류하여, 여기에 분석의 초점을 맞추어 수행한다. 분석 노드에서 발생할 수 있는 가능한 모든 이탈의 원인과 그에 의한 결과를 밝혀냄으로써 사고의 재발생 방지 등을 목적으로 한다. 여기서 수행한 분석 절차를 보면 다음과 같이 평가 전 준비 단계, 실제 평가 수행 단계, 수행후의 문서화 단계를 거쳐 실행된다. [2][3][5]

1) 준비 단계로서 분석의 목적, 목표, 범위를 정하고 분석 인원을 구성한 후 필요한 자료를 수집한다.

2) 분석을 실행할 공정을 선택한 후 공정의 흐름에 따라 검토할 라인과 분석 노드를 정하고 설계 목적과 특성을 파악한다. 여기서는 부가반응, EPOXY 반응, 수세, EPCH 유거, 정석, 건조, 선별 및 MeOH 증류공정으로 분류하였다.

3) 분석 노드가 선정되면, HAZOP을 적용시킬 변수와 가이드워드를 선택, 조합하여 이탈을 전개시킨다. 공정이 정상 운전상태로부터 벗어나는 발생 가능한 모든 이탈에 대한 원인과 결과를 규명한다.

4) 이탈에 대한 원인과 결과를 파악한 후, 각 이탈을 미연에 방지할 수 있는 안전 조치를 강구한다. 해당 분석 노드에서의 분석이 끝나면, 다음분석 노드에 앞의 방법을 반복 실행하여 공정 전체까지 확장시킨다.

3.2.2 HAZOP분석에 의한 공정의 위험성 평가

TGIC 공정의 위험성 평가를 위해 다음과 같이 각 공정검토 구간별 HAZOP 분석을 실시하였다. 단, 여기서는 지면관계상 주요 공정인 부가반응 및 정석공정에 대한 HAZOP 검토 결과만을 소개하고 각 공정흐름도(PFD)는 생략한다.

1. 부가반응공정(NODE #1)

1차 반응인 부가반응 공정에서 용매를 TV-1이라는 용기에 유출을 하는 공정은 작

업자실수로 인해 용매가 Over flow될 경우 ① 원료가 외부로 유출되어 용매의 loss 발생 ② 생산성 저하로 인한 생산원가 상승 ③ 유독 물질인 용매의 폐수처리장 유입으로 인한 공장 전체의 휴지 ④ 유독 gas에 의한 대기 오염 등 생산현장에 미치는 영향은 대단히 크다.

현재의 안전조치로는 TV-1에 설치된 Level gauge를 작업자가 육안으로 관찰, 일정량이 유출되었을 때 밸브를 차단하는 방법밖에 없다. 이에 대하여 HAZOP 기법을 적용한 결과 TV-1에서 TV-2로 Over flow가 될 수 있는 배관을 설치하여 작업자가 실수로 인해 밸브를 잠그지 못해 TV-1에서 Over flow가 될 경우라도 설치된 배관을 따라 TV-2로 흘러 들어갈 수 있도록 조치를 취하였다.

2. EPOXY 반응공정(NODE #2)

EPOXY 반응 공정에서의 주요 관점은 온도 상승문제로서 이의 주요 원인은 스팀밸브의 고장이며 이의 결과로는 제품수율 저하, 원료 loss 발생 및 생산 원가 상승을 가져오게 된다. 작업자의 지속적인 확인 온도 기록계 설치, 수동밸브 설치 및 냉각수 투입장치 설치 등 현재의 안전조치를 검토한 결과 위험은 거의 없는 것으로 판단되었다.

3. 수세공정(TGIC를 물로 세척하는 공정)(NODE #3)

TGIC 반응액을 2회에 걸쳐 세척을 해 주는 공정으로서 반응액 이송시 작업자의 실수로 인해 밸브를 차단하지 못해 반응액이 Over flow, 외부로 유출될 경우에는 NODE #1과 같은 문제가 발생한다. 이를 방지하기 위하여 반응액 이송 저장 탱크에 High Level 센서를 부착, 일정량 이상이 되면 센서가 작동을 하여 반응액 이송 펌프가 멈출 수 있도록 조치를 취하였다.

4. EPCH 유기공정(용매회수 공정)(NODE #4)

TR-6 반응기에 진공을 걸고 스팀으로 열을 가하여 용매를 회수하는데 작업자 실수로 인해 온도 조절이 안되고 계속 온도가 올라갈 경우 상당한 위험을 초래한다. 유독 물질인 EPCH gas가 대기로 방출되어 대기오염의 원인이 됨은 물론 TGIC의 분해(120℃)로 인한 폭발의 위험성도 있다. 현재의 안전조치로는 반응기에 부착된 $\phi 200\text{mm}$ 의 파열판과 작업자가 30분 간격으로 온도를 체크하는 것이다. 그러나 이 조치로는 충분치 못하므로 우선 반응기 내부 온도에 의해 스팀 투입을 조절할 수 있는 “온도조절 자동밸브”를 설치하는 한편 이의 보완조치로 Setting 온도이상 올라갈 때 미리 알려주는 경광등 및 ALARM 장치를 부착하도록 하였다.

5. 정석(결정화) 공정(NODE #5)

1) TR-10에 100% MeOH를 투입시 작업자 실수로 투입 펌프를 잠그지 못해 Over flow가 될 경우 ① 용매 loss에 의한 생산 cost 상승, ② 대기오염 및 화재위험 ③ 폐수처리장 유입시 공장 휴지 등의 손실이 뒤따른다. 현재 안전조치로는 작업자가 관찰 확인하는 방법밖에 없다. 이에 대하여 TR-10에 High Level 센서를 부착, MeOH이 Over flow가 될 경우 경광등이 켜지도록 조치하였다.

2) TR-7의 정석 승온 반응기 자켓에 스팀을 투입 반응물(TGIC)을 60℃까지 승온후 재정석을 실시하는데 작업자 실수로 인해 스팀밸브를 잠그지 못했을 경우 반응기 내부 온도가 상승하여 용매가 외부로 유출, 1)과 같은 손실이 따른다. 현재 이에 대한 안전

조치로는 작업자가 육안으로 온도계를 관찰하고 있다가 적정온도에 도달하면 스팀밸브를 수동으로 차단하고 있는 정도이다. 추가 안전조치 사항으로 내부온도를 센서에 의해 감지, 자동으로 스팀이 차단될 수 있는 자동온도센서 밸브를 부착하도록 하였다.

3) TR-11에 온도가 50~60℃인 100% MeOH이 TR-7에서부터 이송되어 저장된 후 TR-6에서는 EPCH 유거 반응액을 여과, 투입하여 1차 결정을 하게 되는데 이 과정에서 MeOH loss가 생긴다. 이의 조치사항으로 현재 공장에 재고로 보유중인 콘덴서를 TR-11 상부에 설치하여 증발되어 날아가는 MeOH gas를 포집, 재 사용하도록 하였다.

6. 건조, 선별공정(NODE #6)

건조공정에서는 특별한 문제점은 없으나 TGIC 건조시 유동층 건조기(라디에이터의 열기와 Air를 이용한 건조방법)를 사용하고 있는데 TGIC 분진의 유동에 의한 분진폭발의 위험성이 있다. 이의 안전조치로 건조기 본체에 접지선을 달아 정전기 발생을 제거하도록 하였다.

7. MeOH 증류공정(NODE #7)

MeOH 증류공정에서는 작업자 조작실수로 인해 TR30에 Flow High현상이 나타나면 생산원가 상승, 원료 누출, 폐수처리장 유입으로 인한 공장 휴지 등의 문제가 발생할 수 있다. 현재의 안전조치로는 작업자의 충실한 관찰과 레벨 게이지의 설치 등이다. 추가 안전조치로 반응액 이송량이 일정량 이상이 되면 이송펌프가 자동으로 멈추도록 High Level센서를 부착하였다.

3.2.3 공정 개선 효과분석

공정의 위험성 평가를 통해 3.2.2에서 강구된 여러 가지 방안을 적용할 경우 안전사고의 원인을 사전에 제거함으로써 공정안전에 크게 기여할 것으로 기대된다. <표 1>은 HAZOP 분석을 통해 기대되는 주요 공정안전의 효과를 요약한 것이다. 한편 HAZOP의 적용결과 공정개선을 통한 원가절감의 효과도 기대되는데 이중 대표적인 것은 <표 2>에서 보는 바와 같이 정석공정(NODE #5)에서 공기 중에 사라지는 MeOH를 콘덴서를 설치, 회수하는 경우로서 현재 batch당 약 250ℓ의 MeOH 손실중에서 200ℓ만 회수한다고 가정한다면 연간 ₩13,802,880의 원가절감을 달성할 수 있을 것으로 예상된다.

4. 結 論

K공장은 PSM 추진의 일환으로 TGIC 공정에 대한 위험성을 평가함으로써 여러 가지 성과를 거두었다.

먼저 공정개선 및 설계변경 등을 통해 잠재적 위험요인을 제거하는 한편 원료 및 용매손실 감소 등 공장 운영의 효율화를 도모함으로써 연간 약 1,300만원 이상의 원가절감을 가져올 수 있었다. 아울러 근로자 및 최고경영자에게 안전 및 품질의 중요성을 일깨워 주었을 뿐만 아니라 안전관리 시스템의 보다 체계적인 확립을 통해 근로자가 가진 설비운전 정보의 질적 수준을 향상시킬 수 있었다.

<표 1> HAZOP 분석에 의한 주요 공정의 안전 기대효과

	주요 위험요인	HAZOP 실시 전	HAZOP 실시 후
부가 반응 공정	1. R-0반응기에 원료 주입시 계측기 고장 및 작업자실수로 인한 원료 유출	원료유출로 인한 대기오염 및 화재발생 가능성 있음	반응기에 레벨 게이지를 부착, 계측기와 동시 비교 확인함으로써 위험 요인 사전 차단
	2. TE-0에 냉각수가 순환이 안되어 용매 가스 방출	용매(Epoch) gas가 대기로 방출되어 대기 오염의 위험상존	TE-0 gas배관에 온도계 설치하여 디지털 표시기에 연결하고 냉각수 밸브 ON-OFF 표시기를 Control 패널에 설치, 작업자 관찰 및 응급 조치함으로써 위험발생 예방
	3. TV-1에서 작업자 실수로 인한 용매 over flow	용매(유독물)의 폐수처리장 유입으로 인한 공장휴지 및 유독gas에 의한 대기오염	TV-1에서 TV-2로 over flow배관을 설치하여 용매 loss 및 유독물의 폐수처리장 유입방지
수세 공정	4. 작업자의 실수로 인한 TR-6의 반응액 over flow	용매(유독물)의 폐수처리장 유입으로 인한 공장휴지 및 유독gas에 의한 대기오염	반응기에 Hight Level센서 및 경광등 부착으로 문제발생시 즉각 펌프의 작동정지가 가능하여 위험의 사전예방
EPCH 유거 공정	5. TR-6에서 작업자의 온도Control 실수로 인한 용매의 유출	용매(Epoch)의 유출로 인한 대기오염 및 화재위험, 그리고 TGIC분해에 의한 폭발의 위험성 발생가능	온도조절 자동밸브 부착 및 이상온도 상승시 경광등 및 ALARM장치부착으로 위험성 사전 차단
정석 공정	6. TR-10에서MeOH의 over flow	MeOH gas로 인한 화재위험 및 대기오염 발생 가능	Hight Level센서에 의해 경광등이 작동, 작업자의 즉각적인 조치가능으로 위험요인 예방
	7. TR-7에서 작업자의 온도Control 실수로 인한 용매 및 TGIC의 유출	용매와 TGIC의 폐수처리장으로 유입으로 인한 공장휴지와 대기오염 및 화재위험	온도자동조절Stop밸브 부착으로 위험요인 사전제거
건조 선별 공정	8. TR-11의 벤트를 통해 용매의 대기중 비산	용매의 대기중 비산으로 인한 대기오염 및 화재위험	TR-11의 벤트 배관에 콘덴서를 설치하여 대기중으로 비산되는 용매의 gas를 포집, 재사용함으로써 위험요인 제거
	9. TM10-1과 TM-2 (양방향 Wet cake 이송스크류)의 선택 스위치 오조작	기계저항으로 인한 스크류 파손위험	TM10-1과 TM10-2와의 인터록장치를 부착하여 작업자의 오조작을 방지, 위험요인 제거
	10. 분진폭발의 위험 (TM-16)	제품의 유동시 정전기발생에 의한 분진폭발위험	건조기(TM-16)본체에 접지선을 달아 정전기발생을 제거함
	11. 건조시 미세한 분진발생	분진노출에 의한 작업자 피부질환 및 호흡기 질환발생	국소 배기장치 설치 및 작업자에게 주기적 안전교육실시(송풍기식 마스크, 보호의 착용 및 작업완료시 샤워실시 등)

<표 2> 공정개선에 의한 연간 절감액

1) 현재의 손실량(100% MeOH)
TGIC 1 batch 당 ≈250 ℓ
2) 250 ℓ 손실중 200 ℓ 만 회수하여 사용할 경우의 성과산출
① TGIC 작업시간 : 19 hr/bat
② 연간작업 batch 수 (작업일수 : 330일/년)
- 330日×24hr/日÷19 hr/bat = 416 bat
③ MeOH 회수량 산출(년간)
- 416 bat×200 ℓ = 83,200 ℓ
- 100% MeOH 비중 = 0.79
- 83,200 ℓ×0.79 = 65,728kg
④ 연간 절감액 산출
- 65,728kg×₩210 = ₩13,802,880 (100% MeOH kg당 단가 : ₩210)

따라서 앞으로 정부에서는 근로자 안전보호 및 기업의 생산성 향상 측면에서 효과가 큰 것으로 나타난 HAZOP에 의한 공정 위험성 평가를 PSM 대상 사업장에 국한시키지 말고 전 사업장에 확대 적용시키되 각 분야별로 세분화하여 필요한 부분만 적용해 나가도록 할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. 이진명, “화학공정의 위험성 평가를 위한 HAZOP 분석 전문가 시스템의 구축,” 부산대학교 대학원 석사학위 논문, 1998.
2. 한국산업안전공단, “공정안전관리제도,” 1997.
3. 한국산업안전공단, “공정안전관리업무편람,” 1999. 2.
4. 한국산업안전공단, “공정안전보고서 작성(예시),” 1996. 2.
5. D. P. Nolan, “Application of HAZOP and What-If Safety Reviews to the Petroleum, Petrochemical and Chemical Industries,” Noes Publications, New Jersey, 1994.
6. V. Venkatasubramanian, R. Vaidhyanathan, “A Knowledge-Based Framework for Automating HAZOP Analysis,” AIChE Journal, 40, 496-505, 1994.
7. V. Venkatasubramanian, R. Vaidhyanathan, “Experience with an Expert System for Automated HAZOP Analysis,” Comput. chem. Engng, 20, 1589-1954, 1996.
8. Y. Shimada, K. Suzuki, H. Sayama, “Computer-Aided Operability Study,” Comput. Chem. Engng, 20, 905-913, 1996.
9. Horacio Leone, “A Knowledge-Based System for HAZOP Studies,” Comput. chem. Engng, 20, 369-374, 1996.
10. H., G. Lawley, “Operability Studies and Hazard Analysis,” Chemical Engineering Progress, 70, 45-55, 1974.