



Bow-Tie기법을 이용한 제조공정의 위험성평가 연구

태찬호 · 이헌석 · 변철현 · 양재모* · 박철환* · †고재욱*

GS칼텍스 보건안전기획팀, *광운대학교 화학공학과
(2013년 4월 24일 투고, 2013년 6월 27일 수정, 2013년 6월 27일 채택)

A Study on Risk Analysis of Manufacturing Process Using the Bow-Tie Method

Chan Ho Tae · Heon Seok Lee · Chul Hyun Byun ·
Jae Mo Yang* · Chulhwan Park* · †Jae Wook Ko*

Team of Health and Safety Planning, GS Caltex, Seoul 135-985, Korea

*Dept. of Chemical Engineering, Kwangwoon University, Seoul 156-701, Korea

(Received April 24, 2013; Revised June 27, 2013; Accepted June 27, 2013)

요약

화학공장은 다량의 화학물질을 사용하기 때문에 사고가 발생하면, 많은 피해가 발생한다. 따라서 사고를 예방하기 위하여 위험성평가를 실시하고 있다. 화학공정은 HAZOP 기법을 이용하여 위험성평가를 실시하고 그 결과를 많이 활용하고 있다. 이 연구에서는 HAZOP 기법과 Bow-Tie 기법을 분석하고, Bow-Tie 위험성평가를 수행하였으며, 그 결과 다른 위험성평가에서 발견할 수 없었던 위험성이 도출되었고, 그 위험성을 제거하기 위한 14개의 개선사항이 도출되었다. Bow-Tie 위험성평가가 현장의 적용성과 위험요인을 도출하고 개선대책을 수립하는데 적합하다는 것을 확인하였다.

Abstract - The chemical industries have used large amounts of chemicals. If an accident occurs, it caused physical and human damage. We intended to investigate risk assessment for the prevention of accidents. The risk assessment by HAZOP technique has been applied to major chemical industries, and that result has been utilized efficiently. In this study, we analyzed Bow-Tie and HAZOP technique, and risk assessment was performed by Bow-Tie on toxic material process. As a result, the risk that can not be found in the risk assessment of the other is derived, and improvements of 14 to remove the dangers derived. Bow-Tie risk assessment is suitable to derive the applicability of risk factors in the field and to establish the improvement measures.

Key words : Bow-Tie, HAZOP, risk assessment, power plant, toxic material

1. 서론

제조공장은 대량 생산을 위하여 설비의 대형화가 진행되었고, 생산성 향상을 위하여 고온·고압에서 가연성 물질, 반응성 물질 취급하는 경우가 많아졌다. 또한 복잡한 공정제어로 인하여 과거의 제조시설에서 발생하지 않았던 문제들이 많이 발생하였고,

이로 인한 원료인 유독성 물질이나 가연성 물질에 의한 누출·폭발·화재 사고 등 많은 사고가 발생하였다.

화학물질에 의한 누출·폭발·화재 사고는 다른 산업사고와는 달리 사업장의 근로자는 물론, 인근 지역주민이나 나아가 환경·생태계에까지 심각한 영향을 미치는 중대 산업사고로서 이를 방지하기 위한 노력이 다각도로 이루어져 왔다[1]. 그리고 국내에 공정안전관리(PSM, Process Safety Management) 제도의 시행으로 국내 화학공장에 공정 위험성평가

†Corresponding author:jwko@kw.ac.kr

를 위해 HAZOP(HAZard and OPerability)기법이 도입되었다[2]. 또한 위험성평가를 통하여 제조공장에 대해서 안전관리, 안전교육, 시설물의 위험요인을 제거 활동이 강화되어 사고가 많이 감소되었다.

제조공정 내 위험요인을 찾는 효과적인 방법이 바로 위험성평가이다. 국내에서는 Checklist, HAZOP, FMEA(Failure Mode & Effect Analysis), K-PSR(KOSHA-Process Safety Review), 4M(Machine, Media, Man, Management) 기법 등과 같은 정성적 위험성평가 방법과 FTA(Fault Tree Analysis), ETA(Event Tree Analysis), CA(Consequence Analysis)와 같은 정량적 위험성평가 방법이 사용되고 있다.

특히 HAZOP은 대상 공정 내에 존재하는 위험요소 및 조업상의 어려운 요소를 분할된 노드(node)에 대해 단계적으로 검토해 나가는 방법론이다. 현재 정성적인 방법론 중 체계적인 면에서는 가장 적당하여 화학공장에의 적용시 많이 사용되는 방법론이다 [3]. 그러나 HAZOP 기법은 화학물질을 취급하는 화학공장의 공정을 중심으로 개발되었기 때문에 기계 공장 등에서는 그대로 적용하기가 곤란한 점이 있다[4].

기존의 위험성평가 기법으로는 공정의 위험요인은 분석이 가능하지만, 비정상적인 운전 상황의 위험, 설비 외 운전원의 작업에 대해서는 적용하는데 다소 적합하지 않는 위험성평가 기법이다. 따라서 공정의 위험뿐만 아니라 비정상상태의 작업까지 위험성을 분석할 수 있는 위험성평가 기법이 필요하다. 이러한 점을 보완하기 위하여 4M 기법, Bow-Tie 기법이 국내에 보급되었다.

본 논문에서는 다양한 제조시설에서 적용 가능한 Bow-Tie 위험성평가를 실제 공정에 적용하여 그 결과물을 분석하여 다양한 위험요인을 도출할 수 있는지, 그 위험성을 감소시킬 수 있는 방안을 도출할 수 있는지를 확인하였다.

II. 위험성평가 기법

2.1. 정성적인 위험성평가 기법

체크리스트 기법은 사용하기 쉽고 프로젝트나 플랜트 개발 단계에서 적용할 수 있다. 이 기법은 어떤 일을 하는데 발생할 수 있는 최소한의 위험도를 인지시키는 데 유용한 기법이며, PHR(Preliminary Hazard Analysis)는 다른 위험 방법에 선행해서 실시하며, 이것은 공장의 초기에 위험을 확인하기 위한 효과적인 방법을 제공한다. 또한 새로운 공정처럼 안전문제에 대한 경험이 거의 없는 경우에 대해서도 적용할 수 있다. FMEA의 목적은 공정이나 제품의 오류가 발생할 가능성이 있는 모든 경로를 확인하는

것이다[5]. 국내에서 주로 사용되는 HAZOP 기법은 공정 내에 존재하는 위험요인을 확인하고, 감소대책을 찾기 위한 위험성평가 기법이다. 각 분야의 전문가들이 공정을 노드(node)로 나누고, 해당 노드의 공정 이탈 가능성과 이탈시 공정에 어떤 영향을 미치는지 분석하게 된다. 이 기법은 위험성평가 참석자의 기술이나 경험에만 의존하지 않고 보다 체계적이고 합리적인 분석방법으로 검토시 누락의 가능성을 배제하고 비교적인 객관화된 평가서를 작성할 수 있다.

정성적인 위험성평가 기법은 위험원인의 파악이 빠르고 비전문가도 수행할 수 있으나, 평가자의 수준에 따라 주관적인 평가로 치우치기 쉽다. 또한 국내 위험성평가는 화학공정에 주로 적용하다보니 화학공장 외 다른 제조시설에는 적용하는데 어려움이 있다.

2.2. 정량적인 위험성평가 기법

정량적인 위험성평가 기법은 사고 발생 시나리오를 기반으로 발생 가능성, 발생 시 피해정도를 정량적인 수치로 나타낸다.

FTA는 공정이 고장이 발생할 수 있는 모든 사건을 발견하는 분석기법으로 고장 빈도까지 계산할 수 있는 기법이며, ETA는 초기사건 이후의 가능한 결과를 확인 및 정량화 하는 방법으로 고장의 발생경로와 안전장치의 작동여부 등 사고 발생 확률을 계산할 수 있는 기법이다.

일반적인 QRA(Quantitative Risk Assessment)는 위험요소 확인과 사고 시나리오 수립, 사고 시나리오에 대한 빈도 분석과 결과 분석, 개인적/사회적 위험도 분석, 위험 감소 방안 수립으로 정리된다. 위험요소를 확인하는 단계에서는 정성적인 위험성평가 기법이 적용될 수 있으며 사고 빈도 분석은 통계 데이터나 FTA 분석 기법 등이 적용된다. 사고결과 분석은 누출 시나리오에 근거하여 거리별 복사열이나 폭발 압력 피해규모를 해석하고 사람이나 건물 피해 영향 해석을 포함한다. 사고 빈도와 사고결과 분석을 이용하여 개인적 위험도나 사회적 위험도가 기하학적인 위치와 연계되어 계산되고 표현된다[6]. 정량적인 위험성평가는 QRA 전문가와 많은 시간과 비용이 필요하여 다양한 공정에 적용하는데 다소 어려움이 있다.

다양한 제조시설에 대해서 적용할 수 있는 위험성평가와 위험요인에 대해서 등급을 확인할 수 있는 위험성평가 기법이 필요성이 대두되었으며, 본 논문에서는 Bow-Tie 위험성평가 기법을 이용하여 공정 내 위험성을 확인하고, 그 결과를 설비 및 업무절차서에 어떻게 적용되는지 분석하였다.

III. Bow-Tie 위험성평가

3.1. Bow-Tie 위험성평가

1970년대 후반에 ICI의 데이비드 길리 원인결과도 (Cause Consequence Diagram)를 발전시켜 그가 처음으로 이것을 Bow-Tie로 불렀다고 알려지고 있다. 문헌상으로 호주 퀸즈랜드의 ICI Hazan Course Notes에서 처음 사용되었다[7,8].

국내의 다른 연구에서는 비상대응을 수립하는 데 Bow-Tie를 이용하였으나[9], 이 연구에서는 Bow-Tie 선도(Bow-Tie Diagram)를 이용하여 위험요인(Hazard)으로부터 결과까지 리스크 경로를 따라 예방대책 및 감소대책을 분석·설명하기 위해 Bow-Tie 선도를 사용하면서 대책의 효과성을 평가하는 방법이다. Bow-Tie 위험성평가는 위험요인을 선정하고 그 위험요인이 발현되었을 때의 정상 사상(Top Event)

에 대해서 원인과 결과를 분석하는 기법이다. 정상 사상을 찾고, 정상사상이 가능하게 하는 원인과 정상사상으로 인한 사고결과를 작성하고, 원인과 결과의 예방대책 또는 감소대책(Barrier)을 찾고, 악화요소(Escalation Factor)를 Fig. 1과 같이 도식화 하면 나비넥타이와 같이 Bow-Tie 형태로 표현된다.

3.2. Bow-Tie 위험성평가 방법

Bow-Tie 위험성평가 방법은 위험요인을 찾고 현재의 대책, 추가할 대책, 위험도 산정 등 다른 위험성평가 방법과 논리적으로는 유사하나, Bow-Tie 선도를 사용함으로써 위험성평가 결과를 쉽게 확인할 수 있다. Bow-Tie에서 사용되는 기호는 Table 1에 나타내었으며, Bow-Tie 위험성평가 방법은 다음과 같다[10].

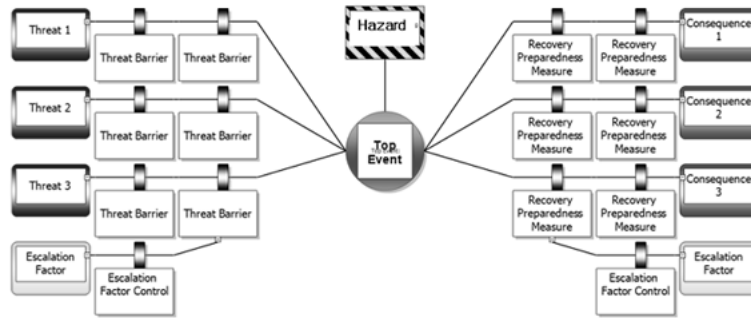


Fig. 1. The form of bow-tie risk assessment.

Table 1. The explanation of symbols

Symbol	Term	Meaning
	Hazard	The Hazardous element(materials or environmental)
	Top Event	The Top Event is that the hazard is expressed.
	Cause	The Cause means a cause that have been made to the top event hazard.
	Consequence	The Consequence for the damage when the top event has been progress in an accident
	Preventive / Mitigation Control	The Preventive/Mitigation Control is measures to reduce or prevent accidents.
	Escalation Factor	The Escalation Factor which means that the Preventive / Mitigation Control fails.
	Risk Ranking	The Risk Ranking of Human, enviroment and equipment

(1) 위험요인 파악

공정 내에서 손실이나 상해와 같은 사고를 야기할 수 있는 잠재적인 원인을 파악한다.

(2) 정상사상 파악

위험요인이 발현되는 사건으로 화재, 폭발 등 중대사고로 이어지기 직전의 사건을 의미한다.

(3) 원인 파악

정상사상이 발현하게 하는 원인을 찾는 단계로, 위험요인이 통제되지 않도록 하는 원인들을 파악하는 단계이다.

(4) 결과 파악

정상사상으로 인하여 최종적으로 나타나는 결과로 화재, 폭발과 같은 중대사고 뿐만 아니라 유무형의 손실도 파악한다.

(5) 예방대책 파악

파악된 원인이 사상으로 진행되는 것을 방지하기 위한 예방대책으로 위험요인 제거, 기술적인 대책, 관리적인 방안, 교육 등이 포함된다.

(6) 감소대책 파악

정상사상이 결과로 진행되는 것을 막기 위한 감소대책을 각각의 결과에 대해서 파악하는 단계이다.

(7) 악화요소 파악

예방대책, 감소대책의 역할이나 기능을 약화시킬 수 있는 요소를 파악한다.

(8) 악화요소 방지대책 파악

파악된 악화요소가 발현되지 않도록 방지대책을

수립한다.

(9) 위험도 산정

도출된 결과에 대해서 사고의 빈도와 강도를 위험등급표를 이용하여 위험도를 산정한다.

(10) Follow Up

작성된 예방대책, 감소대책, 악화요소 방지대책에 수행할 부서를 작성한다. 부서별로 추가적인 대책을 수행하여 정상사상의 발현과 사고로의 진행을 막는다.

3.3. Bow-Tie와 HAZOP의 비교

국내에서는 각각의 공정에 맞는 위험성평가 기법을 선정하여 수행하고 있으나, 설계·건설·시운전 단계에서 위험성평가를 많이 수행하고 있으며, 널리 사용되고 있는 위험성평가는 HAZOP이다.

HAZOP은 노드별로 설계 의도로부터 벗어날 수 있는 다양한 변수에 대해서 원인, 결과, 기존 안전대책, 위험도 순위로 분석하는 기법이다. HAZOP은 체계적으로 위험요인을 분석하는데 적합한 위험성평가 기법이다. 하지만 노드 위주의 분석으로 공정의 전반적인 위험성평가가 어렵고, 연속 공정에 적합하며, 또한 설비가 아닌 휴먼에러와 같은 운전원의 작업에 대해서는 분석하기 부족한 것이 사실이다.

하지만 Bow-Tie 위험성평가 기법은 분석할 위험요인에 대해서 공정 전체를 대상으로 원인과 결과의 분석이 가능하며, 운전원의 작업도 안전대책(예방대책, 감소대책)으로 포함할 수 있어서 휴먼에러 분석과 발생원인(악화요소)을 분석할 수 있다. 또한 도식적인 Bow-Tie 선도로 구현되어 누구나 쉽게 이해할 수 있으며, 다른 안전관리 시스템과도 연계가 가능하다. Bow-Tie와 HAZOP의 기법의 차이는 Table 2와 같이 정리할 수 있다[11].

Table 2. The Comparison of the Bow-Tie and HZAOP Method

구분	Bowtie	HAZOP
목적	위험성평가 및 관리	위험성 확인
집중부분	방호층 (Layer of Protection)	하드웨어 설계 및 성능 유지
적용대상	모든 공정 및 업무	연속공정
인적요소	반영됨	반영되지 않음
방호장치의 성능평가	유효성을 위해 검토함	미수행
반정량적평가	LOPA 등과 연계하여 가능	일반적으로 곤란
타 시스템과 연계부분	내부감사 등과 연계 가능	없음
도식적 표현	가능	불가능

Bow-Tie기법을 이용한 제조공정의 위험성평가 연구

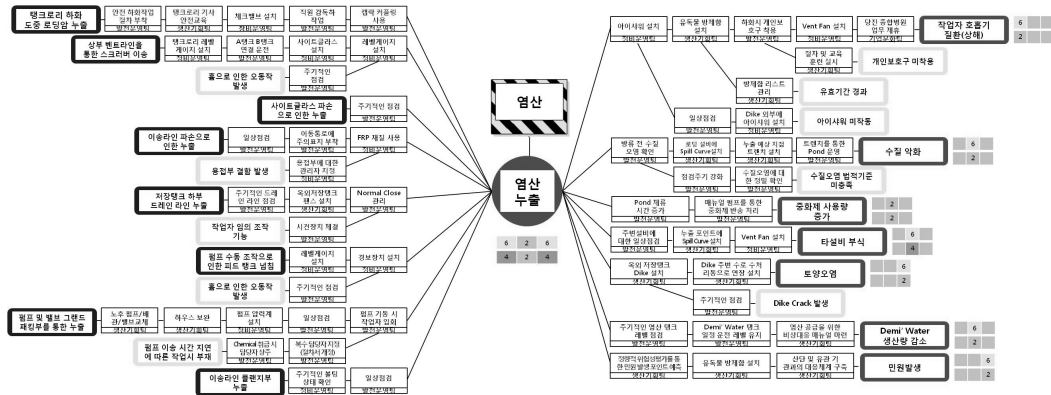


Fig. 2. The Bow-Tie Diagram of HCl.

IV. 사례연구

4.1. 공정 설명

발전소에서는 연소된 가스를 이용하여 터빈을 돌리는 가스터빈 발전과 폐열을 이용하여 스팀을 생산하여 전력생산 및 난방수를 공급할 수 있는 스팀터빈 발전이 있다. 발전소의 스팀은 고온, 고압이며 설비 내부의 부식과 손상을 일으킬 수 있어서 Demineralized Water를 이용하여 생산한다. 발전소에는 Demineralized Water를 생산하는 공정이 있으며, 이 공정에서 사용하는 여러 화학물질을 사용하고 있다.

4.2. Bow-Tie 위험성평가 수행

발전소에서 사용하는 화학물질 중 취급량이 많은 염산을 위험요인으로 선정하여 Bow-Tie 위험성평가를 수행하였다. 공정내의 화학물질에서 발생하기 쉬운 정상사상은 외부로 유출이며, 염산 특성상 화재, 폭발의 위험은 없으나, 인근 작업자에게 상해, 수질 오염의 사고결과를 발생시킬 수 있다. 염산의 외부 유출의 원인은 플랜지 연결부위와 사이트 글라스, 밸브 그랜드의 패킹부 등 설비의 문제와 탱크로리에서 저장탱크로 하화와 이송작업과 같은 운전원의 휴면에러까지 다양한 원인이 분석되었다. 누출시 결과로는 작업자 상해와 수질오염, 중화제 사용량, 생산감소 등 결과가 도출되었으며 염산 누출의 Bow-Tie 선도는 Fig. 2와 같이 표현된다.

4.3. Bow-Tie 위험성평가 효과

기존의 안전대책을 제외한 추가로 수행할 예방·감소대책은 16개이며, 이중 설비와 관련된 것은 4개(설비 개조 및 신규 설치)이며, 교육 및 업무절차서

개선이 10건(안전교육, 관리 포인트 선정, 절차서 개정 등), 추가적인 분석이 2건(정량적 위험성평가 등)이다.

발전소 설계 시 다른 기법으로 위험성평가를 수행하였으나, 신규 예방·감소대책이 16건이나 도출되었다. 위험성평가는 위험성평가 리더의 자질이나 팀원의 참여도에 따라서 방향성이나 분석 정도가 상이할 수 있으나, 다른 위험성평가와 비교하여 더 많은 위험요인을 도출하였으며, 도면으로 분석시에는 볼 수 없었던 인근 설비의 부식이 도출되었으며, 대책도 설비의 개선이 아닌, 다양한 작업절차서 개정, 교육 등 다양한 해결책이 도출하였다. 결과물이 그림으로 표현되면서, 위험요인에 대해서 쉽게 파악할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 국내에서는 활성화되지 않은 Bow-Tie 위험성평가 기법과 HAZOP과 비교하여 Bow-Tie의 장점을 확인하였다.

Bow-Tie 기법은 많은 사용자가 아직은 익숙하지 않은 Bow-Tie 선도를 사용함으로써 위험성평가 전에 기법에 대한 교육이 선행되어야 했다. 하지만 위험성평가의 리더와 서기가 Bow-Tie 기법에 익숙한 경우에는 팀원들이 Bow-Tie에 대해서 잘 알지 못하여도 쉽게 이해할 수 있는 Bow-Tie 선도를 사용하였기에 위험성평가를 진행에는 어려움이 없었다.

또한 도출된 위험요인, 원인, 결과를 쉽게 확인할 수 있어서, 팀원들이 다양한 분석이 가능하게 되어 많이 예방/감소대책이 도출되었으며, 예방/감소대책 역시 설비 개선, 교육, 업무절차서 개정, 현장 경고표지

등 다양한 방법이 제시되었다. HAZOP을 비롯한 다른 위험성평가는 제한된 도면을 기반으로 하므로 확인하기 어려웠던 공정 전체에 대해서 분석이 가능하였으며, 위험성평가 기록지가 Bow-Tie 선도로 표현됨에 따라 운전원이 쉽게 확인할 수 있는 장점이 있다.

위험성평가는 평가를 진행하는 리더의 역량과 팀원들의 참여의지가 중요성과 체계적으로 위험을 확인하고 분석할 수 있는 기법의 선정이 가장 중요하다는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] Tae-Hwan, Kim, "The Study on the Risk Assessment Methodology", *J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.* **3(1)**, 2-5(2000)
- [2] Jae Min, Lee and Jae Wook, Ko, "A Study on Hazard Identification Method for Small and Medium Chemical Industries", *Korean Chem. Eng. Res.*, **45(1)**, 103-108(2007)
- [3] Jung Hwan, Kim and Jae Wook, Ko, "A Study of Risk Reduction by SIL(Safety Integrity Level) Determination", *KIGAS*, **15(5)**, 57-62(2011)
- [4] Sung-Man, Hong and Su-bin, Sun, "Development of Risk Assessment System for Steel and Iron Works", *Journal of the Korea Safety Management & Science*, **11(4)**, 7-14(2009)
- [5] Jung Won, Kim, "A study on Selction Method of Hazard Evaluation Techniques for Gas Industries", 13-21(2003)
- [6] Ik-Keun, Yoon and En-Sup, Yoon, "A Develop of System for Efficient Quantitative Risk Assessment on Natural Gas Supply Facilities", *KIGAS*, **16(1)**, 39-45 (2012)
- [7] Cadmus Solution Ltd., http://www.bowtiepro.com/bowtie_hisroy.asp
- [8] ICI Hazan Course Notes, University of Queensland in Australia (1979)
- [9] Heon Seok Lee, Seung Gyun Kang and Jae Wook Ko, "Development of Emergency Response System by Risk Assessment Methodology in Energy Facility", *KIGAS*, **12(2)**, 118-123 (2008)
- [10] KOSHA Gudie, "Guidelines for Semi-quantitative Risk Assessment Method Bow-Tie" (2011)
- [11] KOSHA "OSH Research Brief", 30, 32-37 (2010)