

## Bow-Tie 분석을 통한 저장탱크 방지대책 효율성 분석

이현진·정수민·강석민·채승빈·강승균\*·<sup>†</sup>고재욱\*\*

광운대학교 화학공학과 석박통합과정, \*광운대학교 화학공학과 박사과정,

\*\*광운대학교 화학공학과 교수

(2020년 7월 27일 접수, 2020년 8월 24일 수정, 2020년 8월 25일 채택)

## Efficiency Analysis of Storage Tank Prevention Measures by Bow-Tie

Hyun-Jin Lee · Soomin Jung · Seok-Min Kang · Seungbeen Chae ·  
Seung-Gyun Kang · <sup>†</sup>Jae Wook Ko

Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University

(Received July 27, 2020; Revised August 24, 2020; Accepted August 25, 2020)

### 요약

본 연구에서 다루고 있는 문제점은 공정 사고 감소는 산업 안전 감소보다 덜 감소하고 있으며, 석유 및 가스 공정 산업의 주요 사고로 인한 손실은 지난 몇 년 동안 감소하지 않고 있는 상태이다. 특히 저장탱크에서 현재의 위험 접근 방식은 안전운전을 유지하는 것에 비해 설계의 안전성을 향상시키는 것에 더 중점을 두고 있다. 이에 Bow-Tie 방법을 활용하여 적절하게 사용한다면 공정의 안전성을 향상시킬 수 있다. Bow-Tie 방법은 운영적 측면에 초점을 맞추고 모든 중요한 안전 배리어를 명확하게 강조하고 배리어 효율성을 분석하여 적합성을 평가할 수 있다.

**Abstract** - The problem addressed in this study is that the reduction in process accidents is less than the reduction in industrial safety, and the losses from major accidents in the oil and gas processing industry have not decreased over the years. In particular, current risk approaches in storage tanks place more emphasis on improving the safety of the design than maintaining safe operation. The Bow-Tie method can be used properly to improve process safety. The Bow-Tie method can assess compliance by focusing on operational aspects, clearly highlighting all important safety barriers, and analyzing barrier effectiveness.

**Key words** : Bow-tie, storage tank, prevention, efficiency

### I. 서론

본 논문에서는 실제 저장탱크의 사고 사례를 바탕으로 Bow-Tie를 수행하였다. 저장 탱크는 공장에서 구조에 따라 적용 분야가 달라지며 또한 안전성 측면에서도 달라진다. IGU(International Gas Union)에서 1994년에 분류한 저장 탱크에 Bow-Tie 방법을 활용하여 적절하게 사용한다면 공정의 안전성을 향상시킬 수 있다. 필요한 안전설비를 확보하기

위해 사고 사례를 분석하고, 사례들을 바탕으로 Bow-Tie 방법을 수행하여 배리어를 확보하려 한다. 운영적 측면에 초점을 맞추고 모든 중요한 안전 배리어를 명확하게 강조하여 배리어의 적합성을 평가하는데 도움을 줄 수 있을 것이다.

### II. 저장 탱크

저장 탱크의 수량들이 계속해서 증가하면서 오래된 저장 탱크들의 유지와 관련하여 대형 사고 예방 측면에서 저장 탱크에 대한 안전성 문제와 운영 체계도 계속해서 문제되고 있다. 즉, 저장 탱크의

<sup>†</sup>Corresponding author:jwko@kw.ac.kr

Copyright © 2020 by The Korean Institute of Gas

효과적인 관리를 위해 전문 회사 등이 전문성과 경제적 측면에서 계속해서 검토할 필요가 있을 것으로 보인다.

저장탱크의 형태별 화재특성은 여러 가지이다. 대표적으로 다음의 예들이 있다.

CRT(Cone Roof Tank)의 화재 특성은 초기 폭발의 가능성이 높다는 것, 증기압이 높은 제품은 개구부에서만 화재가 발생한다는 것이 있다.

FRT(Floating Roof Tank)의 화재 특성은 초기에는 Seal 부근에서만 화재가 발생하는 것, 화재가 지속적으로 진행되어도 큰 변형이 없다는 것이 있다.

IFRT(Internal Floating Roof Tank)의 화재특성은 초기 화재는 FRT의 경우와 같다는 것, 부유식 지붕의 Seal이 부적합한 경우 내부 증기의 연소 범위 내 조성으로 폭발할 위험성이 존재한다는 것, 부유식 지붕이 화재에 의한 변형으로 가라앉을 시 CRT와 같은 양상으로 화재가 진행된다는 것이 있다.

### III. Bow-Tie

#### 3.1. Bow-Tie

Bow-Tie 방법의 시작은 1970년대 전후이며, 이는 1988년 Piper Alpha의 사고 이후로 시작이 되었다. 해당 사고는 Royal Dutch Shell의 해상 플랫폼에서 작업자의 실수로 인해 고압가스가 누출되어 폭발하여 167명의 사망자를 기록한 사고이다.

Bow-Tie는 Fig. 1 같이 좌우로 나뉘어 ETA와 FTA 분석 방법이 이어져 있는 모델이다. Top Event를 기점으로 하여 Top Event의 발생 과정을 왼쪽, Top Event 이후 사고결과 도출을 오른쪽에서 나열한다.

Bow-Tie의 경우 다음과 같은 시기에 실시한다.

- 다른 정성적 리스크 평가 결과 중 심각도가 높은 경우
- 새로운 공정이나 설비를 도입하는 경우
- 공정 또는 작업 방법을 변경할 경우
- 새로운 물질을 사용할 경우
- 사고발생 시 원인을 파악하고 대책의 적절성을 평가할 경우
- 이해당사자에게 사용하는 설비의 안전성을 쉽게 설명하고자 할 경우

Fig. 1.의 Bow-Tie를 구성하는 주요 요소는 총 8가지로 다음과 같다.

1. Hazard : Hazrd로부터 Bow-Tie를 시작.

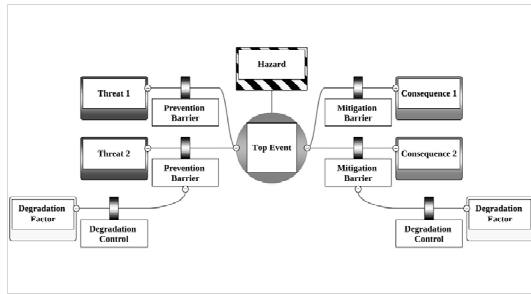


Fig. 1. Bow-Tie component

2. Top Event : Hazrd에 대한 통제 실패.
3. Threats은 Bow-Tie의 왼쪽에 표시됨(일반적으로 예방적인 측면).
4. Consequences는 Hazard의 통제 실패의 결과로 Bow-Tie의 오른쪽에 표현(일반적으로 완화에 해당).
5. 다이어그램의 왼쪽에 있는 Prevention Barriers는 방지대책이며, 방지대책을 기반하여 Top Event를 발생하지 않도록 막음.
6. Top Event 오른쪽에 표시된 Prevention Barriers는 Top Event를 완화하는 완화책(바람직하지 않은 결과의 규모를 줄이고 가능성을 줄여줌).
7. Degradation Factors는 방지 및 완화 요소에 적용할 수 있으며, 이로 인해 방지대책의 손상 또는 고장이 발생할 수 있음.
8. Degradation Controls는 악화요소를 완화하여 방지대책 및 완화책이 제 기능을 할 수 있도록 도움을 주며, 방지대책 및 완화책에 효과적이고 독립적이며 감사 가능한 기준을 제시할 수 있지만 반드시 만족할 필요는 없음.

#### 3.2. Bow-Tie 분석 절차

Bow-Tie의 분석을 수행하기 전 팀 리더는 리스크 평가의 목적과 범위를 정한 후 평가에 필요한 자료를 수집하게 된다. 리스크 평가 시 필요한 자료의 경우 다음과 같이 구성된다.

- 과거의 리스크 평가 실시 결과서
- 공정설명서 및 제어계통 개념과 제어시스템 관련 자료
- 공정흐름도(PFD) 및 물질수지
- 공정배관계장도(P&ID)
- 기기사양서
- 전체배치도 및 기기배치도

## Bow-Tie 분석을 통한 저장탱크 방지대책 효율성 분석

- 물질안전보건자료
- 정상 및 비정상 운전절차서
- 안전밸브 및 파열판 명세 등등

위의 자료를 기반으로 Bow-Tie 리스크 평가를 수행하게 된다. 리스크 평가의 수행절차는 11단계의 세부 단계를 지니게 된다.

1. 유해위험요인 파악 : 유해위험요인별 분류 및 점검 확인사항에서 소개되는 요인을 참조하여 파악
2. 사상 파악 : 특정한 단위 상황의 발생 또는 변화를 의미하는 사상을 파악
3. 위협 또는 원인 파악 : 어떤 사상을 일으키는 모든 원인을 파악
4. 결과파악 : 사상이 발전되어 최종적으로 나타나는 결과를 파악
5. 예방대책 파악 : 파악된 원인이 사상으로 발생하는 것을 방지하기 위한 예방대책을 파악
6. 감소대책 파악 : 발생된 사상이 결과로 이어지는 것을 방지하기 위한 감소 대책을 파악
7. 약화요소 파악 : 예방 및 감소대책의 역할과 기능을 약화시키거나 무효화시킬 있는 요소를 파악한다.
8. 약화요소 방지대책 파악 : 예방 및 감소 대책의 역할과 기능을 약화시키거나 무효화시킬 수 있는 요소에 대한 방지대책을 파악
9. 수행업무 파악 : 예방대책 및 감소대책이 계속 유효함을 보증하기 위해 수행하는 업무가 무엇인지 파악
10. 반정량적 리스크 평가 : 반정량적 리스크 평가는 Fig. 2.의 흐름에 따라 수행
11. 수행업무 추적관리 : 예방대책, 감소대책, 약화요소 방지대책의 관리

### 3.3. Bow-Tie 분석 방법의 특징

Bow-Tie 분석은 유해위험요인, 사상의 원인, 결과, 예방, 감소하기 위해 대책, 예방 및 감소 대책의 약화, 예방 및 감소 대책의 약화의 예방이 포함되어 있으며, 설계의 안전성을 향상시키는 것에만 중점을 두는 것이 아닌 안전운전을 유지하는 것에 목표를 가지고 있는 리스크 평가 방법이다.

대부분의 리스크 평가 방법은 Bow-Tie와 달리 설계적인 안전성 향상을 중점을 두기 때문에 불안전행동의 방지대책이 리스크를 감소시킬 수 있는지를 분석하는데 어려움이 따른다. 하지만 Bow-Tie 분석 방법은 다른 리스크 평가방법이 다루고 있지

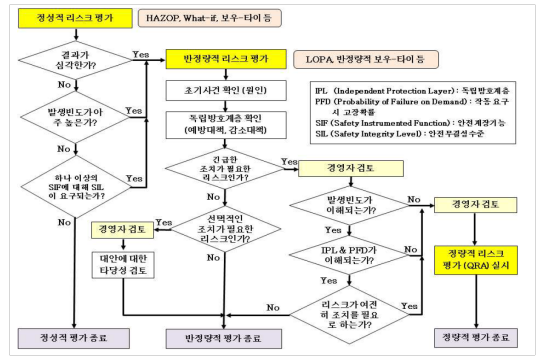


Fig. 2. Flowchart of Risk assessment Type

않은 위험요인과 그 관리요소를 모두 다루고 있기 때문에 불안전행동에 대한 방지대책이 리스크 감소에 영향을 줄 수 있는 것을 확인할 수 있다.

## IV. 화학공장에서의 사고 예방방법

화학 산업은 거의 모든 산업에 관련이 있으며, 산업규모면에서도 매우 큰 비중을 차지하고 있다. 하지만 대부분의 화학공정은 높은 압력, 높은 온도, 유독물질을 사용하고 있기 때문에 사고가 발생하면 다른 산업에 비해 큰 피해를 끼치게 된다. 이에 화학공장에서는 사고를 방지하기 위한 시스템을 보유하고 있으며, 이러한 시스템을 SIS(Safety Instrument System)이라고 한다.

SIS의 정의는 아무런 조치를 취하지 않을 시 공정의 위험도가 증가할 때, 이를 방지하거나 피해의 규모를 완화시키기 위한 조치를 취할 수 있는 시스템이다. SIS는 ESD(Emergency Shut Down)이라고 부르기도 한다.

SIS는 CCPS의 Publication에서 처음 소개가 되었고, 그 후 지속적인 연구를 통해 현재의 규격으로 정립되었다. SIS의 국제 표준은 IEC 60511과 IEC 61508, ANSI/ISA-S84.00.01이 있다.

일반적으로 SIS는 BPCS(Basic Process Control System)과 독립적으로 작동하는 것이 바람직하다. 이러한 이유로 SIS를 구성하는 배리어를 IPL이라고 하며 IPL은 위험이 해제되어 결과를 초래하지 않도록 하는 제어 및 복구 조치를 뜻하며 Fig. 3.과 같이 구성된다. 하지만 IPL의 경우 모두 세이프가드의 역할을 수행하지만 모든 세이프 가드가 IPL인 것은 아니다 이는 IPL이 Effective, Independent, Auditable의 특성을 보유하여야 하며, 다음과 같은 의미를

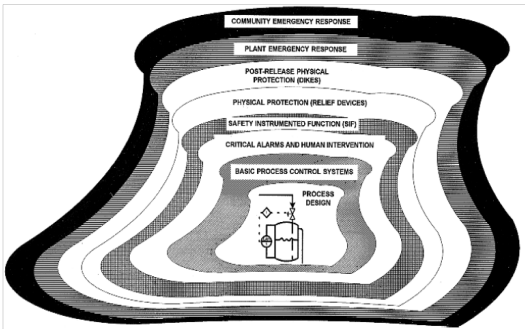


Fig. 3. Process protection layer

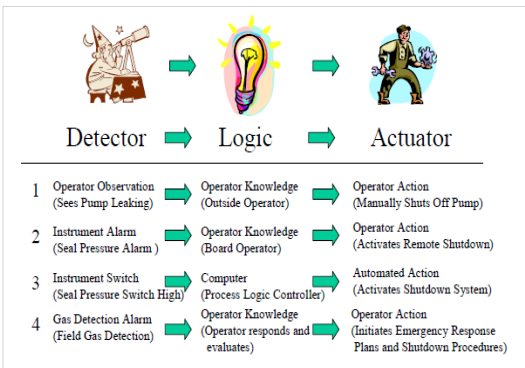


Fig. 4. IPL Effective of three component.

지낸다.

- **Effective** : IPL은 설계된 대로 기능을 수행하여 결과를 방지해야하며, 효과적인 IPL은 3요소는 Fig. 4이다.
  - **Detector** : 조치가 필요한 상태를 감지하고
  - **Logic solver** : 행동을 취하기로 결정하고
  - **Actuator** : 조건을 해결하기 위해 조치를 취한다.
- **Independent** : 배리어는 Initiating Event 및 동일한 조건에 대해 이미 검증된 다른 배리어의 구성요소와 독립적으로 구성되어야한다. Common Cause Failure가 존재하면 독립적이라고 간주하지 않는다.
  - **Dependence**의 예시 : 흐름 제어 루프용 송신기가 실패, 동일한 트랜스미터를 사용하는 운전자의 응답이 필요한 알람은 Dependence를 보유

이러한 배리어들을 기반으로 하여 SIF(Safety Instrument Function)을 구성하게 된다. 이는 공장 내의

위험요인이 도출될 때, 이를 예방하거나 완화시킬 수 있는 장치들의 모임이다. SIF를 구성하기 위해서는 장비들은 다음의 세 가지의 요소를 기반으로 하여야 한다.

- **Sensor** : 공정변수의 상태를 측정하여 Logic solver로 신호를 보내는 장치
  - ex) Transmitters, Transducers, Process switches 등등
- **Logic solver** : Sensor로부터 받은 신호를 하나 이상의 Logic을 기반으로 하여 처리하고, Final element를 작동시키는 장치
  - ex) Electrical systems, Electronic systems, Programmable electronic systems, pneumatic system 등등
- **Final Element** : Logic solver로부터 신호를 받아 공정을 정상상태로 만들기 위해 최종 작동하는 장치
  - ex) Valve, Switch gear 등등

## V. 방지대책 도출 및 효율성 평가

### 5.1. 방지대책 도출

Bow-Tie와 LOPA에서 말하고 있는 방지대책을 Table 1에 정리하였다. 이 중 IPL에 해당 하는 방지대책은 3.1의 화학공장의 방지대책의 3가지에 대한 특성을 보유하고 있다.

일반적으로 배리어는 지속적으로 사용이 가능해야하며, 기능이 유지되어야 한다. 성능이 유지되어야 배리어는 제대로 된 역할을 수행할 수 있다. 이에 불안전행동을 예방할 수 있는 배리어는 다음의 IPL을 유지할 수 있는 방법으로 도출하였다. 배리어가 항상 유지되기 위해서는 다음의 세 항목이 필요하다.

- 고장, 위험 및 사고 상황으로 이어질 수 있는 조건을 식별한다.
- 발생, 발전의 실패, 위험 및 사고의 가능성을 줄인다.
- 가능한 한 피해를 줄일 수 있다.

배리어의 경우 위과 사고를 방지하거나 그 결과를 완화하기 위해 구현된 측정이다. 이에 배리어 자체에는 기능이라고 하는 목적과 역할이 부여되어 있어, 부여된 목적과 역할에 맞게 기능이 수행되어야한다. 예를 들면 “HC 누출 방지”와 같은 배

Bow-Tie 분석을 통한 저장탱크 방지대책 효율성 분석

Table 1. Protection layer of chemical process

독립방호계층	PFD	비고
국제적인 안전기준 이상으로 공장이 설계, 제조 및 유지되는 경우	1×E-02	매우 엄격한 기준 적용
국내 안전기준 이상으로 공장이 설계, 제조 및 유지되는 경우	1×E-01	안전보건경영시스템 도입(보수적인 관점 유지)
압력방출장치(스프링작동 안전밸브)	1×E-02	
파열판(안전밸브와 별도로 설치된 경우)	1×E-02	
기본공정제어시스템(BPCS) (사건 원인이 아닐 경우)	1×E-01	압력, 유량, 온도 등의 제어시스템
방유둑 (Dike) 또는 수동적 방호장치	1×E-02	
지하 비상 배출 시스템	1×E-02	
개방된 벤트 라인(차단밸브가 없는 경우)	1×E-02	
내화설비-1시간인 경우	1×E-01	
내화설비-2시간 이상인 경우	1×E-02	
방폭벽 또는 벙커	1×E-03	
화염방지(적절한 설계, 설치, 유지 시)	1×E-02	
용기의 설계압력이 예상 가능한 최대 내부/외부 압력의 2배 이상인 경우	1×E-04	압력용기의 과압이 원인인 경우
자동 Deluge/스프링클러 시스템	1×E-02	
자동 증기 감압 시스템	1×E-02	BPCS와 무관하게 작동
원격작동 비상차단밸브	1×E-01	
패일 세이프 기능의 자동 격리 밸브	1×E-02	
과류방지(Excess flow) 밸브	1×E-02	
동일 종류의 예비 설비	1×E-01	
다른 종류의 예비 설비	1×E-(01-02)	공급업체의 고장을 확인
SIS(안전계장시스템) 또는 BPCS와 독립적인 내부의 기계적인 안전 트립 장치	1×E-(01-02)	공급업체의 확인 및 측정주기에 의존함
내·외부의 과압 원인에 대한 최대 과압이상으로 설계된 압력용기	1×E-04	압력용기의 과압이 원인인 경우
경보작동 및 평균적인 훈련을 받은 운전원의 조치(높은 스트레스 상태)	(0.5-1)×E-00	Start-up, Shut-down 등
경보작동 및 평균적인 훈련을 받은 운전원의 조치(낮은 스트레스 상태, 알려진사건, 분기 1회 이상 수행업무)	1×E-01	조치하는데 10분 이하의 시간적 여유
경보작동 및 평균적인 훈련을 받은 운전원의 조치(낮은 스트레스 상태, 알려진사건, 분기 1회 미만 수행업무)	1×E-02	조치하는데 10-30분의 시간적 여유
SIS - SIL 1	1×E-01	
SIS - SIL 2	1×E-02	
SIS - SIL 3	1×E-03	
기타 방호장치		경험 또는 공급업체의 자료를 참조하여 적절히 부여할 수 있음

리어의 기능은 기술 시스템을 이용하여 자동으로 수행될 수 있거나, 작업자가 수동으로 수행을 하는 방법의 배리어가 있다. 이 때 기술 시스템이 자동으로 작동하는 것은 2.4.1에서 말하는 SIS이며, 작업자가 수행하는 배리어는 Human IPL로 말하게 된다.

IPL에 영향을 줄 수 있는 요인과 배리어에 대한 영향과 이를 방지할 수 있는 요인들을 기반으로 하여 Bow-Tie의 악화요소와 악화요소 방지로 도출하여 Table 2과 Table 3에 나타내었다.

Table 2. Escalation factor

악화요소	
외부인으로 인한 로딩 실패	Shutoff 밸브 실패
게이지 노후화 및 오작동	잘못된 지역에 설치
배터리의 실패	긴급밸브 시작 실패
부적절한 공구 사용	절차를 따르지 않음
시스템의 실패	Bypass 라인의 실패
펌프의 실패	교육의 부재
작업허가 없이 작업	모니터링의 실패
절차가 존재하지 않음	개인보호구의 실패
주기적인 검사 미수행	동기부여 프로그램 미수행
적절한 장소에 있지 않음	의사소통 툴의 실패

Table 3. Escalation factor control

악화요소 방지 대책	
작업허가 적용	모니터링 시스템 활용
주기적인 점검	작업 전 점검
비상대응훈련	작업자 안전교육
프로세스 리뷰 수행	절차 관리
동기부여 프로그램 활용	개인보호구 점검
SOP 활용	열작업 절차 확인
디자인 적용	디자인 변경
사고 보고서 활용	변경관리 절차

4.2. Bow-Tie를 통한 방지대책 효율성 분석

도출한 예방책이 효율성이 있는 것을 확인하기 위해 저장탱크의 사고사례를 분석하여 Bow-Tie 위험성 평가를 수행하였다. 저장탱크 사례를 분석하여 탱크 사고가 발생하는 요인 및 예방할 수 요인을 Fig. 5., Fig. 6.에 나타내었다. 이를 기반으로 Bow-Tie 분석을 위한 요소를 도출하였다.

선정한 사고 사례는 4개의 사례를 선정하였다. 영국 번스필드사고, 인도 자이푸르 사고, 베네수엘라 사고, 이탈리아 나폴리 탱크 폭발 사고를 분석하여 공통적인 위험사항을 Fig. 5.의 사고 원인 요인에 따라 분석하였다.

(1) 영국 번스필드 원유탱크 화재·폭발 사고

- 사고 발생 경과
  - 파이프라인을 통해 탱크로 제품 이송하였으며, 유량은 550 m<sup>3</sup>/h
  - 액위값이 변하지 않았지만 시간당 550m<sup>3</sup>의 유량으로 제품 이송이 계속 이루어졌으며, 이 상태가 지속될 경우 5시 20분경 탱크에서 overflow (넘침) 발생

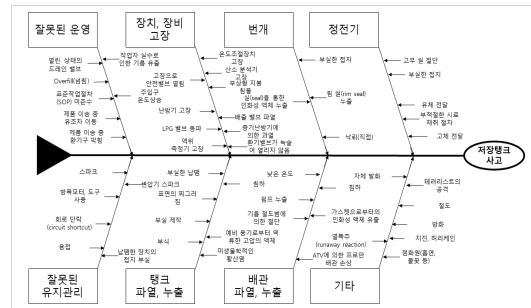


Fig. 5. Factor of Tank accident cause

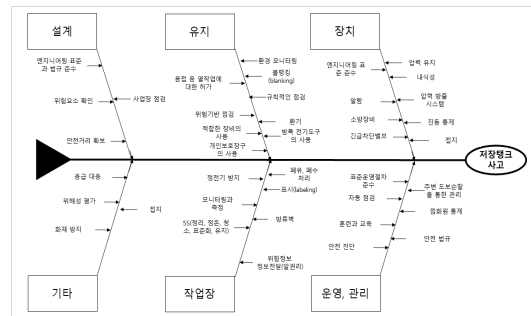


Fig. 6. Factor of Tank accident prevention

Bow-Tie 분석을 통한 저장탱크 방지대책 효율성 분석

- 12월 11일 새벽 5시 30분경 CCTV 화면에 증기가 발생한 것이 관찰되었으며, 6시 1분에 1차 폭발 발생
- 사고 원인 분석
- 탱크에는 작업자가 충전 작업을 모니터링 할 수 있는 액위계와 탱크 넘침이 발생할 경우 충전작업을 자동으로 중지하는 원격 스위치가 설치되어 있었음
- 새벽 3시경 제품 이송 파이프의 유량계는 시간당 550 m<sup>3</sup>에 멈추어 있었지만, 실제로는 지속적으로 증가하여 폭발 직전인 6시경에는 시간당 890 m<sup>3</sup>에 달한 것으로 보임
- 액위계와 충전 제어 시스템이 제대로 작동하지 않았음
- 재발방지대책
- 장치 혹은 장비의 기능에 문제가 없어야함
- 자동으로 작동될 수 있어야함
- 액위기는 독립적으로 작동되어야 함

(2) 인도 자이푸르 원유배관·탱크 화재·폭발 사고

- 사고 발생 경과
- 저장탱크로 휘발유를 이송하던 중, 배관에서 대량의 휘발유 누수 현상이 발생
- 드레인 밸브를 통해 유수관으로 휘발유가 누출되고 증기운이 발생- 탱크가 폭발하여 진동 발생
- 12개의 탱크로 화재가 확산
- 사고 원인 분석
- 탱크는 부상형 지붕식 탱크로 처음 폭발로 인해 증기설이 있는 가장자 리로부터 누출이 시작
- 작업자가 휘발유가 누출된 걸 확인하고도 적절한 조치를 취하지 않음

사고에 대한 분석과 사고원인 요인 통해 Top Event를 가연성 물질 누출로 분석을 하였다. 분석 위험에 대해 Table 4에 잠재위험에 대해 나타내었다.

위의 Top Event의 가연성 물질의 누출의 위험요인은 총 3가지로 도출하였다.

Table 4. Hazard Identification

위험성 설명	위험성 위치	원인	결과
가연물 저장	저장 탱크	Loss of Containment, Overfill	액면 화재 폭발

- Threat 1 : 작업자의 실수/오작동
- Threat 2 : 끊어 넘침
- Threat 3 : 공정설비의 실패

도출된 위험요인에 대한 배리어와 악화요소, 악화요소 방지 대책을 분석하여 다음 Table 5, Table 6, Table 7, Table 8에 정리하였다.

분석된 구성요소를 기반으로 하여 Fig. 7., Fig. 8., Fig. 9.에 Bow-Tie 다이어그램을 작성하였으며, Top event를 중심으로 하여 왼쪽은 예방 대책, 오른쪽

Table 5. Barrier, Escalation factor, Escalation control factor of Threats

No.	Barrier	악화요소	악화요소 방지대책
1	적용 가능한 표준을 가진 설계 프로그램	표준을 따르지 않음	절차 준수
			MOC 절차
		부적절한 공구 사용	절차 준수
			MOC 절차
2	절차	절차를 따르지 않음	프로세스 리뷰
			동기부여 프로그램
		적합하지 않은 절차	감사 프로그램
			절차 재정비
3	장비 모니터링	시스템의 실패	프로세스 리뷰
			주기적 검사
			작동 절차
4	경보작동 작업자의 반응	시스템의 실패	표준 준수
			절차 개입
			절차 재정비
		적합하지 않은 절차	프로세스 리뷰
			주기적 점검
			표준 준수
5	Relief 장치	시스템의 실패	주기적 검사
			절차 준수

Table 5. Continue

No.	Barrier	약화요소	약화요소 방지대책
1	적용 가능한 표준을 가진 설계 프로그램	표준을 따르지 않음	절차 준수
			MOC 절차
			감사프로그램 활용
		부적절한 공구 사용	절차 준수
			MOC 절차
2	절차	절차를 따르지 않음	프로세스 리뷰
			동기부여 프로그램
			감사 프로그램
		적합하지 않은 절차	절차 재정비
			프로세스 리뷰
3	장비 모니터링	시스템의 실패	주기적인 검사
			작동 절차
			표준 준수
4	유지보수 및 테스트 프로그램	프로그램 미수행	프로세스 리뷰
			교육 프로그램
			작업 활동 확인
		절차를 따르지 않음	교육 프로그램
			작업 활동 확인
		부적절한 도구 사용	절차 재구성
5	장비 정기 점검	부적절한 활동	교육 프로그램
			프로세스 리뷰

Table 5. Continue

No.	Barrier	약화요소	약화요소 방지대책
1	적용 가능한 표준을 가진 설계 프로그램	표준을 따르지 않음	절차 준수
			MOC 절차
			감사프로그램 활용
		부적절한 공구 사용	절차 준수
			MOC 절차
2	절차	절차를 따르지 않음	프로세스 리뷰
			동기부여 프로그램
			감사 프로그램
		적합하지 않은 절차	절차 재정비
			프로세스 리뷰
3	유지보수 및 테스트 프로그램	프로그램 미수행	프로세스 리뷰
			교육 프로그램
			작업 활동 확인
		절차를 따르지 않음	교육 프로그램
			작업 활동 확인
		부적절한 도구 사용	절차 재구성
4	장비 정기 점검	부적절한 활동	교육 프로그램
			프로세스 리뷰



Bow-Tie 분석을 통한 저장탱크 방지대책 효율성 분석

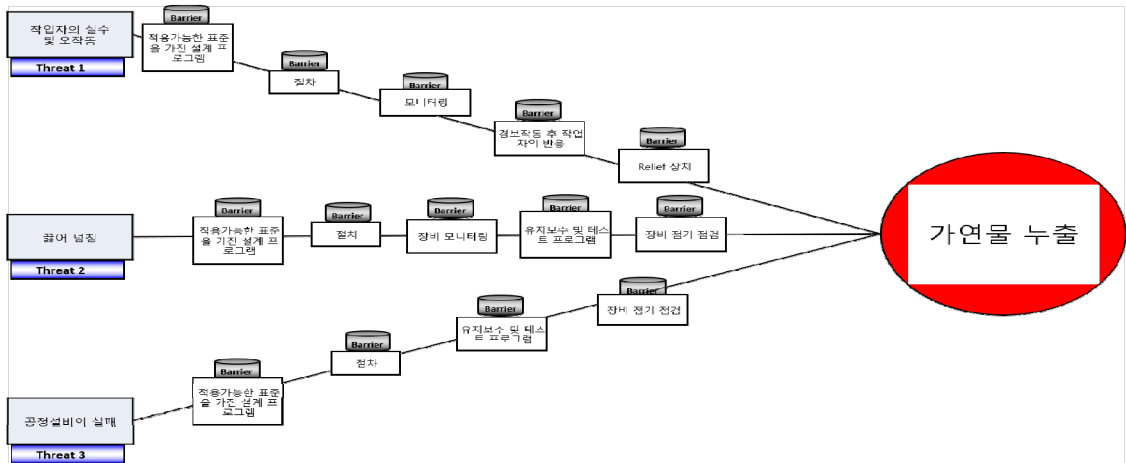


Fig. 7. Tank accident Bow-Tie

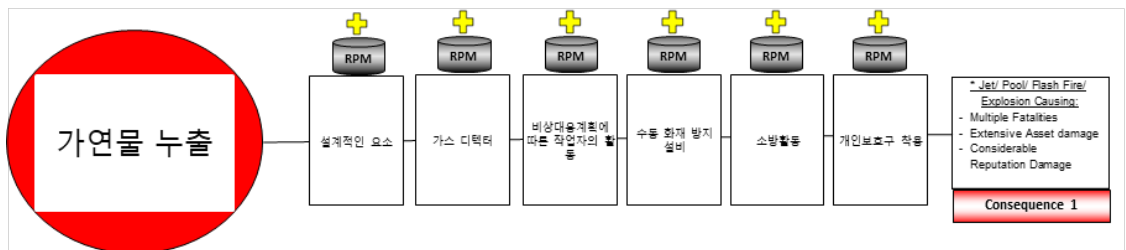


Fig. 8. Tank accident Bow-Tie(Continue)

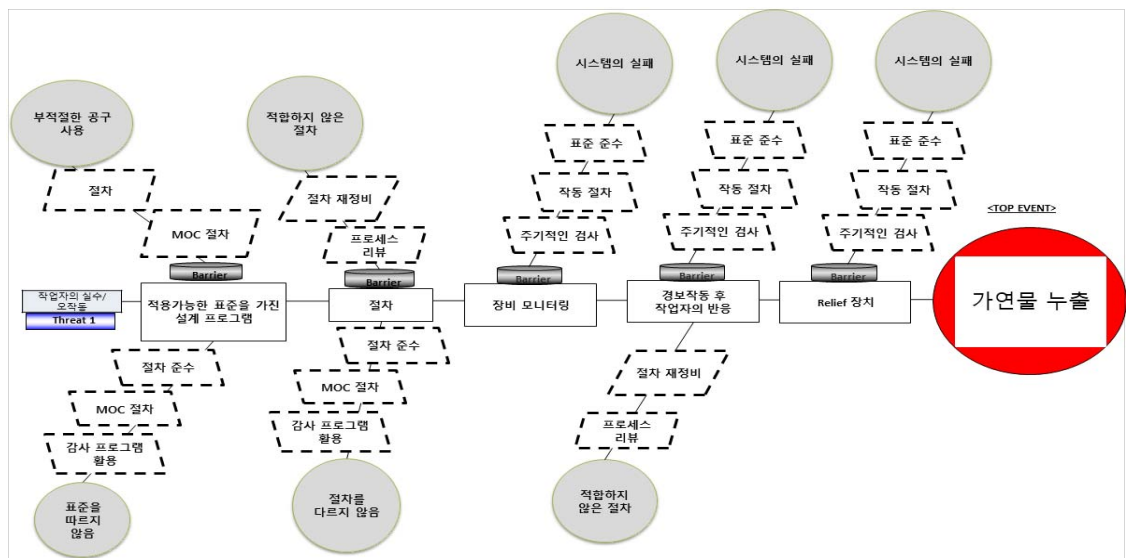


Fig. 9. Tank accident Bow-Tie(Continue)

**Table 6.** Prevention, Escalation factor, Escalation control factor

No.	Barrier	악화요소	악화요소 방지대책
1	설계적인 요소	절차를 따르지 않음	절차 준수
			MOC 절차
			감사프로그램 활용
		부적절한 공구 사용	절차 준수 MOC 절차
2	가스 디텍터	시스템의 실패	주기적인 검사
			작동 절차
			표준 준수
3	비상대응계획에 따른 작업자의 활동	절차를 따르지 않음	교육 프로그램
			MOC 절차
			감사프로그램 활용
		불충분한 프로그램	프로세스 리뷰
			절차 재구성
4	수동 화재 방지 설비	절차를 따르지 않음	절차 준수
			감사 프로그램
		부적절한 공구 사용	MOC 절차
5	유지보수 및 테스트 프로그램	절차를 따르지 않음	교육 프로그램
			프로세스 리뷰
6	개인보호구 착용	불충분한 공구	감사 프로그램
			절차 재구성

쪽은 감소대책으로 구성하였다. 작성 된 Bow-Tie에 각 예방대책 및 감소대책에 대한 PFD 값을 적용하여 사고 발생확률을 계산하였다.

- Threats 1 :  $8 \times 10^{-5}$
- Threats 2 :  $1.6 \times 10^{-6}$
- Threats 3 :  $8 \times 10^{-5}$
- Consequence 1 :  $8 \times 10^{-6}$

## V. 결 론

일반 산업분야에서 위험도의 경우  $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 의 위험도를 설정하며, 이 수치는 사업장의 방호 계층이 실패해 발생할 수 있는 사고의 확률을 말한다. 저장탱크 사고 사례 분석을 통해 얻어진 Threat의 확률과 Consequence의 확률을 계산해 봤을 때 악화요소와 악화요소 방지가 제대로 수행된다면 위협에서부터 최종적인 사고까지 발생할 확률이 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

분류 별 저장 탱크에 관한 실제 사고 사례들에 Bow-Tie 수행을 통해서 저장탱크의 안전 방지대책과 안전관리방안의 효과를 확인하기 위해악화요소 방지 등의 적용을 통해 사고 발생 확률이 줄어드는 것을 확인 할 수 있었다. 이를 통하여 얻을 수 있는 결론은 사고 사례와 분석 대상들을 확장 한다면 더 신뢰성 있는 결과들을 얻을 수 있으며 저장탱크 뿐만 아니라 여러 가지 화학설비에 적용하여 중요한 안전 배리어의 효율성을 분석하여 적합성을 평가할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 2017년도 광운대학교의 연구비 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사를 드립니다.

## REFERENCES

- [1] "Bow Ties in risk management", Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York, (2018)
- [2] "Principles for barrier management in the petroleum industry", PSA, (2013)
- [3] "Guidance for barrier management in the petroleum industry", SINTEF, (2016)
- [4] "Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector" IEC, (2016)
- [5] "Lees' Loss Prevention in the Process Indu-

Bow-Tie 분석을 통한 저장탱크 방지대책 효율성 분석

- stries”, fifth, Butterworth-Heinemann, New york, (2012)
- [6] “Lees’ Process Safety Essentials: Hazard Identification, Assessment and Control”, 1st edition, Butterworth-Heinemann, New york, (2013)
- [7] “Layer of Protection Analysis”, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York, (2001).
- [8] “Guidelines for Initiating Events and Independent Protection Layers in Layer of Protection Analysis”, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York, (2014)
- [9] “Layer of Protection Analysis\_ Simplified Process Risk Assessment ”, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York, (1994)
- [10] 안전보건공단, KOSHA Guide(X-39-2011), “정성적 보우타이(Bow-Tie) 리스크 평가 기법에 관한 지침”, (2011)
- [11] 안전보건공단, KOSHA Guide(X-40-2011), “반정량적(Semi-quantitative) 보우타이(Bow-Tie) 리스크 평가 기법에 관한 지침”, (2011)
- [12] 김정환, “SIL(Safety Integrity Level) 기법을 이용한 화학공장의 안전성 향상에 관한 연구”, 광운대학교 화학공학과 석사학위 논문, (2010)
- [13] 안전보건공단, KOSHA Guide(P-113-2012), “방호계층분석(LOPA)에 관한 기술지침”, (2012)
- [14] 김현민, “bow-tie 기법을 이용한 아크릴산 사용 공정에서의 리스크 감소에 관한 연구”, 인하대학교 환경·안전융합전공 석사학위 논문, 2018
- [15] 화학물질안전원, 국외 저장탱크 화학사고 사례 연구집