



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

선진 Bow-Tie 위험성평가기법을
활용한 근본원인분석에 대한 연구



부 경 대 학 교 산 업 대 학 원

안 전 공 학 과

노 영 남

공 학 석 사 학 위 논 문

선진 Bow-Tie 위험성평가기법을 활용한 근본원인분석에 대한 연구

지도교수 : 장 성 록

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2020년 8월

부 경 대 학 교 산 업 대 학 원

안 전 공 학 과

노 영 남

노영남의 공학석사 학위논문을 인준함.

2020년 8월 28일



위 원 장 공학박사 서용윤

위 원 공학박사 박현곤

위 원 공학박사 장성록

목 차

제 I 장 서 론	1
1.1 연구의 필요성	1
1.2 연구 방법	2
1.3 연구의 목적	2
제 II 장 이론적 고찰	4
2.1 근본원인분석	4
2.2 4M 기법	6
2.3 5Why 기법	10
2.4 Apollo 기법	12
2.5 Bow-tie 위험성평가기법	13
제 III 장 연구 결과	15
3.1 Bow-tie와 5Why기법을 활용한 사고조사 프로세스	15
3.2 '과열판 터짐'사고 케이스 스터디	17
3.3 '보수작업 중 일산화탄소 중독'사고 케이스 스터디	24
3.4 '하단 밸브 통한 유기용제 누출'사고 케이스 스터디	30
3.5 각 기법들 비교	34

제 IV 장 결 론	35
참고문헌	37

표 목 차

Table 1. Bow-tie 용어 정의	13
Table 2. RCI 장단점 차트	34



그 립 목 차

Fig 1. 4M Chart	7
Fig 2. 5Why Chart	11
Fig 3. Apollo RealityCharting	12
Fig 4. Bow-tie 선도	14
Fig 5. 사고조사절차	15
Fig 6. '파열판 터짐'에 대한 4M기법	18
Fig 7. '파열판 터짐'에 대한 5Why기법	20
Fig 8. '파열판 터짐'에 대한 Apollo기법	22
Fig 9. '파열판 터짐'에 대한 Bow-tie with 5Why기법	24
Fig 10. '일산화탄소 중독사고'에 대한 4M기법	25
Fig 11. '일산화탄소 중독사고'에 대한 5Why기법	26
Fig 12. '일산화탄소 중독사고'에 대한 Apollo기법	28
Fig 13. '일산화탄소 중독사고'에 대한 Bow-tie with 5Why기법	29
Fig 14. '하단밸브 통한 유기용제 누출사고'에 대한 4M기법	31
Fig 15. '하단밸브 통한 유기용제 누출사고'에 대한 5Why기법	31
Fig 16. '하단밸브 통한 유기용제 누출사고'에 대한 Apollo기법	32
Fig 17. '하단밸브 통한 유기용제 누출사고'에 대한 Bow-tie with 5Why 기법	33

Advanced Bow-tie Risk Assessment for Root Cause Analysis

Youngnam Noh

Department of Safety Engineering Graduate School of Industry

Pukyong National University

Abstract

In chemical plants that handle toxic and hazardous materials under various operating conditions, Toxic and hazardous materials are highly likely to cause serious industrial accidents, such as fires, explosions, and toxic material leaks. In order to prevent serious industrial accidents, it is necessary to systematically analyze the large and small accidents that have occurred and find the root cause to prevent serious industrial accidents.

Currently, under Articles 54, 55, 57, and 73 of the Enforcement Rules of the Industrial Safety and Health Act, all employers are obliged to report and investigate the cause of accidents and plan to prevent recurrence. The disaster investigation table in attached Form 30 of the Enforcement Rules is not enough to prevent serious industrial accidents by analyzing the cause of accidents and establishing measures to prevent recurrence of accidents due to unclear analysis method and guidance. Therefore, many companies have

established measures to analyze causes and prevent recurrence through several accident cause analysis techniques.

These day, many Korean companies use simple techniques such as 4M (Man, Machine, Method, Material), and 5-Why, and large and global companies use techniques such as Taproot, Systematic Cause Analysis Technology (SCAT) and Apollo to analyze the root cause.

This study look into the functions of various root cause techniques, and found that most fundamental cause analysis techniques focused on the consequence of accidents. Therefore, it is lacked education to prevent recurrence of accidents due to poor cause and consequence relationship. I proposed a new method of combining the Bow-Tie technique, which is a risk assessment technique, and the 5 why cause analysis technique, so that the relationship between the cause and consequence of the accident can be easily identified through new technique.

제 I 장 서 론

1.1 연구의 필요성

유해, 위험물질들을 다양한 운전조건에서 취급하고 있는 화학공장에서는 화재, 폭발 및 독성물질 누출 등 중대산업재해가 발생할 가능성이 크며, 중대산업재해를 방지하기 위해서는 발생한 크고 작은 사고들에 대해서 체계적으로 분석하여 근본원인을 찾아내어 중대산업재해가 발생하지 않게 막아야 할 필요성이 있다.

현재 산업안전보건법 54조, 55조, 57조, 시행규칙 73조 등에 의하여 모든 사업주는 사고 발생 시 보고 및 원인 조사, 재발방지 계획 등의 의무가 있다. 시행규칙 별지 제30호서식에 의한 재해조사표로는 사고원인 분석 및 가이드가 불명확하여 제대로 된 사고원인 분석 및 재발방지대책을 수립하여 중대산업재해를 예방하는 데 부족함이 있다. 그래서 많은 기업에서는 별도의 사고원인분석 기법들을 통하여 원인분석 및 재발방지대책을 수립하고 있다.

현재 국내 여러 기업에서는 4M(Man, Machine, Method, Material), 5Why 등의 단순한 기법들이 많이 사용되고 있으며, 대기업 및 Global 기업들에서는 Taproot, SCAT(Systematic Cause Analysis Technology), Apollo 등의 기법들을 활용하여 근본원인분석을 하고 있다.

본 연구에서는 여러 기법의 기능들을 살펴보았으며, 대부분 근본원인분석 기법들이 발생한 사고에 대하여 중점을 두고 접근하여 사고의 원인에

대해 분석만 하고 있으며, 사고와 원인의 인과관계에만 중점적으로 집중을 하게 되어 있다. 그러나 Bow-tie기법은 사고, 원인, 예방대책, 감소대책, 결과를 하나의 그림으로 제시를 할 수가 있으며 정밀한 사고원인분석 및 교육용으로 활용하기에 우수하다고 생각이 된다.

그래서 새롭게 위험성평가 기법인 Bow-tie 기법과 5 why 원인분석기법을 병합하여 사고, 원인, 결과의 인과관계를 쉽게 알 수 있는 방식에 대하여 제안해 보았다.

1.2 연구 방법

본 연구에서는 우선 Bow-tie기법과 5Why 기법을 결합하여 근본원인분석을 하기 위한 새로운 방식을 제안하였으며, 새로운 방식의 우수성 검증을 위해 기존 원인분석기법인 4M, 5Why, Apollo 기법을 비교 대상으로 선정하여 3가지 실제 사고 케이스에 대하여 각각 근본원인 분석표를 작성하여 비교해보았다. 그리고 각 원인분석 결과들에 대하여 여러 전문가와 브레인스토밍 방식을 통해 각 기법들의 장단점을 찾아냈다.

1.3 연구의 목적

본 연구의 목적은 복잡한 공정 사고를 발생 인과관계에 따라 다이나믹하게 원인과 발생 경과, 최악의 결과를 한 차트를 통해 분석할 수 있는 새로운 사고조사 방법에 대한 제안에 있으며, 근본원인분석에서 원인에만 집중하지 않고 사고와 원인 그리고 주변 여러 방벽 및 최악의 경우까지 고려하여 근본원인분석의 필요성이 있다. 이렇게 함으로써 한 차트를 통해 전체

를 파악하고 현재 가지고 있는 여러 방법들이 잘 작동하고 있는지 추가 방법이 필요한지도 파악 할 수 있다.

두 번째로 Bow-tie를 활용한 새로운 근본원인분석 방식을 통해 만들어진 차트를 활용하여 효율적으로 재발방지 교육에 목적이 있다.



제 II 장 이론적 고찰

2.1 근본원인분석

근본원인분석(root cause analysis)은 안전, 보건, 환경 및 품질 등의 측면에서 발생한 사건.사고 또는 잠재적 문제점의 근본원인을 조사하고 분류하며 통계적인 방법을 적용하여 시스템적 해결방안을 제시하는 관리적인 도구이다. 조사원은 특정 기간 무엇이 발생했는지 기술하고, 그 사건이 어떻게 발생했는지 결정하며, 그 사건이 왜 발생하였는지를 체계적으로 분석해야 한다. 효과적인 근본원인분석을 위해서는 몇 가지 확실한 문제해결 방법론과 전술(즉, 사건이 무엇이고 왜 일어나는가를 밝히기 위해 만들어진, 잘 정의된 구조적 접근 방법)의 정확한 적용이 필요하다. 근본원인분석(root cause analysis)은 순서에 맞게 정확하고 엄격하게 사용하면 매우 복잡한 사건일지라도 그 주요 원인을 쉽게 찾을 수 있다. 사건.사고 또는 잠재적 문제점에 대한 근본원인분석 절차는 아래와 같은 절차로 이루어진다.¹⁾

가. 1단계 :자료 수집

근본원인분석의 첫 번째 단계는 자료를 모으는 것이다. 완전한 정보 및 사건의 이해 없이는 사건과 관련된 원인 인자와 근본원인을 확인할 수 없다. 자료 수집 활동으로 얻은 사실적 증거는 모든 결론 및 근본원인 분석으로 생성된 대책 수립에 영향을 미친다. 자료 수집은 분석하는 동안

계속되는 작업이다. 자료(data)의 유형은 사람, 물질, 위치, 문헌 등 4가지이며, 이 중 가장 변형하기 쉬운 것은 사람에 의한 자료이다.¹⁾

나. 2단계 : 원인 인자 도표화(사고 분석)

자료 분석은 조사원 또는 조사팀이 수집한 정보를 분석하고 조직하는 방법이다. 원인 인자 도표화(cause factor charting) 방식은 조사원이 처음부터 마지막까지 사건.사고를 그래픽으로 묘사하는 연속 다이어그램(sequence diagram)이다. 원인 요소 도표화(cause factor charting) 기법은 사건.사고 또는 잠재적 문제점에 대한 조사 분석 도구의 활용을 위해 사용했다. 이 기법은 사건 주변의 조건(condition)과 원하지 않은 사건.사고 또는 잠재적 문제점까지 발생 순서별로 기술할 뿐만 아니라, 사건.사고 또는 잠재적 문제점 발생을 나타내는 연속 다이어그램(sequence diagram)으로 표현한다. 따라서 자료를 분석할 수 있을 뿐만 아니라 사건.사고 또는 잠재적 문제점 발생의 주요 원인 인자(cause factor)를 찾을 수 있다.¹⁾

다. 3단계 :근본원인 확인

근본원인분석 Map으로 불리는 결정 다이어그램(decision diagram)을 이용한다. 각각의 원인 인자를 하나씩 근본원인분석 Map을 활용하여 분석한다. 근본원인분석 Map은 조사원이 원인 인자가 존재하거나 발생하는 이유에 관한 질문에 답할 수 있도록 합리적인 프로세스로 구성된다.

조사원은 근본원인분석 Map을 이용할 때 주어진 주요 원인 인자 Map상단(top)단계에서 시작하여 Map의 경로에 따라 가능한 한 최하위의 단계로

진행한다. 만약 Map의 최하위 경로로 진행할 수 없는 정보라면 조사원은 현재의 단계까지만 확인한다. 만약 한 개의 원인 인자에 대해 한 개 또는 둘 이상의 근본원인이 존재할 수 있으므로 각각의 원인 인자를 하나씩 근본원인분석 Map을 활용하여 분석하고 사건에 대한 근본원인을 추적한다.¹⁾

라. 4단계 :대책수립

근본원인분석에서 가장 중요한 단계는 마지막 단계인 대책수립 단계이다. 근본원인을 확인한 후, 사건이 재발하는 것을 막기 위한 시정 조치 방법에 대하여 대책 사항을 제시한다. 시정조치는 발생한 사건·사고 또는 잠재적 문제점의 구체적인 환경뿐만 아니라 근본원인에 해당하는 시스템 개선이 다루어져야 한다.¹⁾

2.2 4M 기법

4M 기법은 문제의 원인이나 해결해야 하는 과제를 누락 없이 분석하기 위하여 원인의 범위를 인적요인, 기계적요인, 재료적 요인, 방법적 요인으로 분류하여 문제의 근본원인을 합리적으로 분석하는 기법이다.²⁾

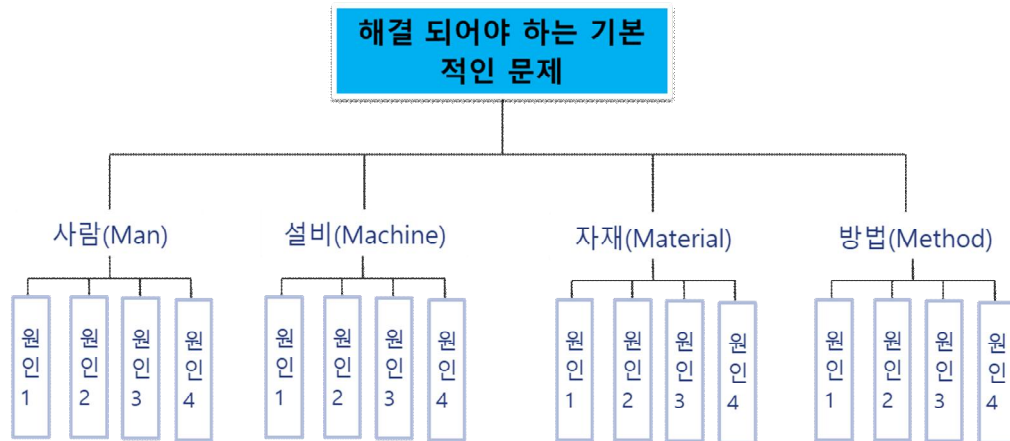


Fig 1. 4M Chart

가. 인적요인(Man)

활동의 주체인 사람과 관련된 스킬, 조직체계, 환경, 마인드 측면에서의 원인을 찾아낸다.

(1) 작업스킬

- 그 업무는 그 사람이 할 수 있는가? (적재적소)
- 고유기술을 향상시켜 가고 있는가?
- 작업자 교육은 실시 목표를 정하여 진행하고 있는가?

(2) 조직체계

- 각 담당자의 역할분담은 정해져 있는가?
- 작업자 보고에 대하여 조언 및 피드백이 잘 이루어지고 있는가?
- 감독자는 정기적으로 순회 점검 하고 있는가?

(3) 작업환경 및 마인드

- 이상하다고 생각되면 곧바로 작업 방법 검토 및 보고를 하고 있는가?
- 3무(낭비, 무리, 불균형)을 항시 개선하고 있는가?

- 작업개선은 하고 있는가?
- 정해 놓은 작업 방법에 따라 작업을 하고 있는가?²⁾

나. 설비(Machine)

생산의 수단인 설비 및 공도구와 관련된 체크 항목

(1) 설비관리유무

- 가동 정도나 처리능력이 적합한 설비를 사용하고 있는가?
- PM은 충분히 기능을 발휘하고 있는가?
- 설비 청소, 주유, 일상점검, 수리는 이행하고 있는가?
- 생산 기술적인 아이디어를 추가하고 있는가?
- 필요한 개조, 개선은 되고 있는가?

(2) 공도구관리 유무

- 사용 시의 변형을 고려하고 있는가?
- Fool Proof 기능을 가지고 있는가?
- 조정이 용이한가?
- 점검이나 보수가 용이한가?
- 고장이 없고 내구성이 우수한가?¹⁾

다. 재료(Material)

생산 기자재(제작, 구매, 외주품)와 관련된 체크 항목

(1) 기자재 관리

- 품질 사양은 명확한가?
- 납입, 수입 검사 방법에 대하여 정해져 있는가?
- 재료, 부품 보관 방법은 양호한가?
- 공정 투입 전 재료나 부품에 잘못이 없는지 확인하는가?

(2) 불량품 관리

- 불량은 잠정대책과 항구 대책으로 나누어 조치가 취해지고 있는가?
- 만성 불량을 줄이기 위해 조치가 취해지고 있는가?²⁾

라. 방법(Method)

작업지시, 작업 방법, 표준화 여부, 시스템구축/활용과 관련된 체크 항목

(1) 작업지시방법

- 작업을 올바르게 지시하고 있는가?
- 지시계통은 일원화되어 있는가?
- 지시는 구두가 아닌 문서화된 것으로 하고 있는가?

(2) 작업방법

- 작업표준에 의해 작업이 진행되고 있는가?
- 실수는 없는가?

(3) 표준화여부

- 공정도가 만들어져 있는가?
- 작업기준에는 작업의 급소가 망라되어 있는가?
- 작업표준은 알아보기 쉽게 되어 있는가?

(4) 시스템구축/활용

- 품질 관리 시스템은 신속, 정확하게 구축되어 있는가?
- 변경관리가 시스템에 따라 잘 진행되는가?²⁾

2.3 5Why 기법

5Why기법이란 Root Cause Analysis의 한 종류로서 어떤 사고(event), 결함이나 문제의 근본원인을 찾으려는 문제해결 방법이다. 즉 어떤 사고의 증후(현상)를 단순히 주시하는 것과 반대로 근본원인을 찾고 사고의 재발 방지를 위한 대책을 마련하는 방법이며, 반복적인 “Why(왜)”라는 질문과정에서 사고와 원인의 인과관계를 맨 아래 하단까지 조사하는 과정에서 근본원인을 도출하고 그에 따른 현실적인 개선방안을 모색하는 Process이다.³⁾

가. 주된 목표는 동종·유사 사고의 재발을 방지하는 데 있다. 즉, 사고의 근본원인에 따라 어떠한 행동, 조치, 조건의 개선이 필요한지와 그에 따른 대책이 궁극적으로 안전사고 재발을 방지하는 데 기여하는가에 있다.³⁾

나. 원인분석 -> 대책 마련의 과정은 관련 조직원이 함께 참여하는 체계적인 활동이어야 한다. 즉, 전문가 한 사람의 주관적인 판단과정보다는 관련 조직원의 다각적인 생각을 공유하고 토론하는 과정에서 체계적인 활동으로 전개되어야 한다.³⁾

다. 5Why 분석과정에서 찾은 원인을 토대로 수립된 대책을 이행하였음에도 불구하고 동일한 사고나 문제점이 재발한다면 기존의 원인과 그에 따른 대책의 오류에 대해 검증하고 다시 분석해야 한다. 따라서 끈기를 갖고 최종적인 대책이 마련될 때까지 필요한 노력을 지속하는 것이 중요하다.³⁾

라. 만약 Why 5단계에서 답이 나오지 않으면 Why 6단계 이상으로 갈 수 있으나 인과관계와 논리의 비약 여부를 판단하여 진행 여부를 결정한다.³⁾

조사자가 근본원인을 구하기 전에 어떤 증상(징후)에서 분석을 멈추는

경향이 있다. 이에 대해 관리자 또는 경영자는 조사자가 문제를 성공적으로 분석할 수 있도록 지속적인 관심과 지원이 필요하며 결과에 대해 처벌하지 않는 풍토와 정책이 마련되어야 한다.

조사자의 현재 지식수준에 따라 근본원인이 더 아래 단계까지 진척되지 않거나 내용이 부실하게 될 수 있다. 이에 대해 조사자에 대한 전문교육 실시와 함께 반복적인 사례 연구 등을 통해 지식수준의 향상을 추구해야 한다.

동일한 문제에 대해 다른 사람이 5Why를 이용하여 분석할 경우 다른 원인이 도출될 수 있다. 즉 보는 관점이나 성향, 입장에 따라 다른 결론이 나올 수 있다. 따라서 각 단계별로 why에 대한 인과관계를 확인하고 최종 근본원인에서 거꾸로 검증해가는 과정이 필요하다. 즉, 대책을 시작으로 해서 “그래서”의 질문을 최초 사고 발생 과정으로 거슬러 올라가 인과관계를 검증해야 한다.³⁾

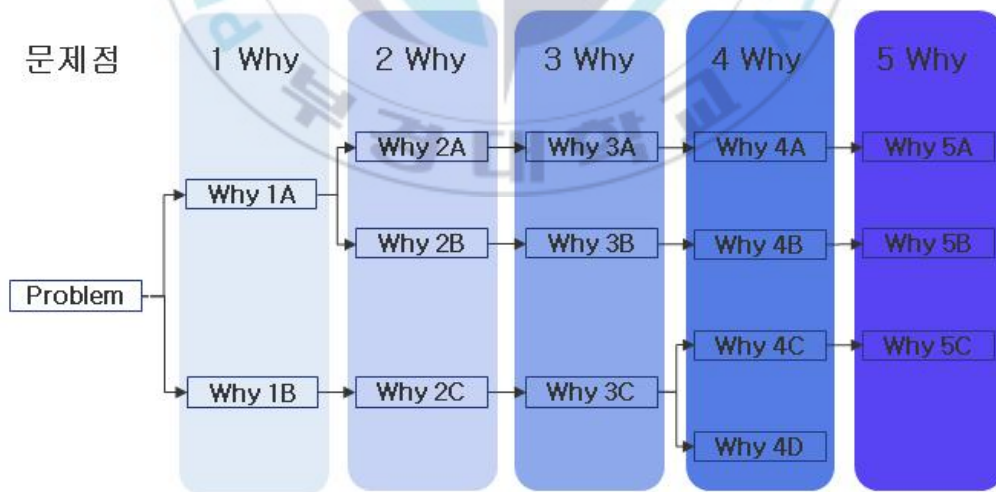


Fig 2. 5Why Chart

2.4 Apollo 기법

Apollo 기법은 5Why와 비슷하게 사건의 원인을 분석해가는 기법으로 인과관계를 명확하게 정의하는 것이 핵심인데, 원인을 이해함으로써 통제할 수 있는 것들을 찾아내고 개선할 수 있기 때문이다. Apollo에서는 원인을 상황(Condition), 행동(Action) 2가지 유형으로 구분한다. 상황(condition)은 ‘사건이 발생하기 이전부터 존재하고 있던 환경’ 등을 말하며, 행동(action)은 ‘사건이 발생한 상황에서의 동작이나 변화’를 말한다. RealityCharting이라는 도구를 사용하여 사건의 인과관계를 찾아내 재발방지대책을 세우는 기법이다. 각각의 원인 박스에는 원인의 유형과 내용, 관련된 근거, 개선 활동을 함께 작성할 수 있다. 또한, 단계마다 수행해야 하는 항목을 모두 수행하였는지 확인하는 기능이 있어 사용자가 근본원인분석을 수행하는 것을 도와준다. ⁴⁾

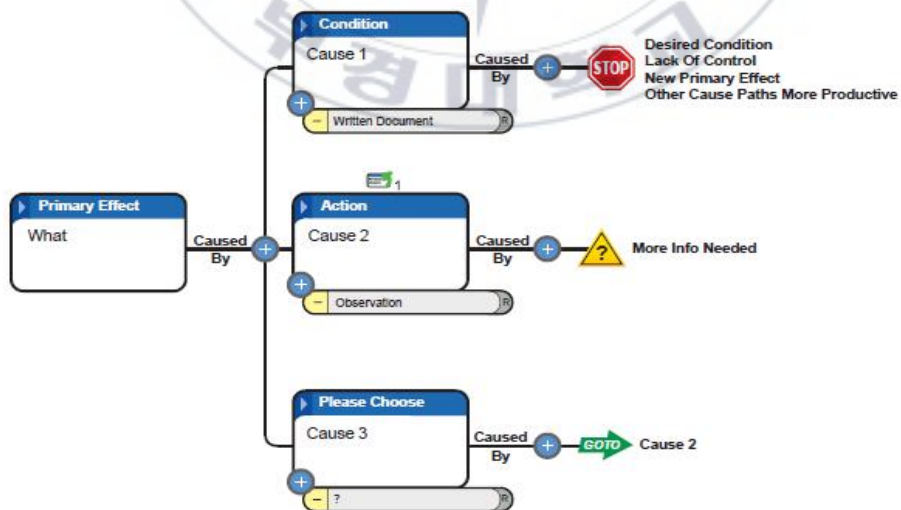


Fig 3. Apollo RealityCharting

2.5 Bow-tie 위험성평가기법

Bow-tie기법은 ETA(Event Tree Analysis)와 FTA (Fault Tree Analysis)가 결합한 방법으로, 사건에 대하여 원인과 결과를 분석하고 원인과 결과의 예방대책 및 감소대책을 나비넥타이 형태로 도식화한 기법이다. ⁵⁾

Table 1. Bow-tie 용어 정의

Term	Meaning
사상(Event)	유해위험요인이 있는 사건
위협(Threat)	사상의 원인을 말하며, 원인과 동일한 개념이다.
결과(Consequence)	사상의 결과로 발생할 수 있는 화재, 폭발, 인명사고 등과 같은 사건을 말한다.
예방대책(Preventive barrier)	유해위험요인이 사상으로 전개되는 것을 방지하는 모든 대책을 말한다.
감소대책(mitigation barrier)	사상이 사고의 결과로 이어지는 것을 방지하는 모든 대책을 말한다.
악화요소(Escalation Factor)	예방 및 감소대책의 역할 또는 기능을 악화 시키거나 무효화시키는 요소를 말한다.

Bow-tie는 사상(Event)을 중심으로 왼쪽에는 결함수분석(FTA : Fault Tree Analysis), 오른쪽에는 사건수분석(ETA : Event Tree Analysis)를 배치하고, 아래에는 원인요소차트(CFC : Causal Factors Charting)를 배치한다. 다시 말해, 원인 관련은 결함수분석과 같은 형태이고, 결과 관련은 사건수분석과 같은 형태이고, 수행업무 관련은 원인요소차트와 같은 형태를 가지게 된다. ⁵⁾

Bow-tie 기법은 한 도식을 통해 관련 내용이 표시되므로 모든 과정을 한눈에 볼 수 있어 이해하기가 쉽다. 또한, 위험성 평가뿐만 아니라 위험도 관리가 가능하므로 모든 방호대책에 대한 담당자 지정 및 관련 절차를 연

결할 수 있고, 정량적이나 반 정량적 위험성 평가기법과 연계될 수 있다. 그러므로 Bow-tie 기법은 보안, 안전, 영업, 정치, 환경 등 다양한 분야에 적용할 수 있으며 또한, 초기 또는 최종단계의 위험성 평가 및 사고조사에도 적용할 수 있다. ⁵⁾

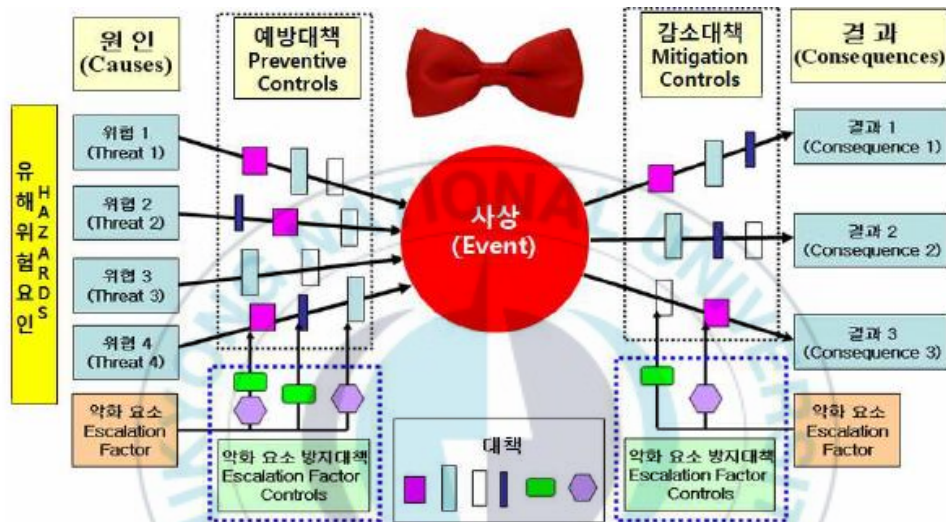


Fig 4. Bow-tie 선도

제 III 장 연구 결과

본 연구에서는 새로운 Bow-tie와 5Why를 활용한 사고조사방식과 기존 Apollo, 5Why, 4M 기법들을 가지고 실제 화학공정에서 일어난 사건들에 대하여 근본원인분석을 하여 그 결과에 대하여 여러 전문가와 함께 브레인스토밍을 통해 각 기법의 장단점을 비교해보았다.

3.1 Bow-tie와 5Why 기법을 활용한 사고조사 프로세스

Bow-tie를 활용하여 사고조사를 하기 위해서는 아래 Fig. 9 사고조사절차 같은 프로세스에 따라 진행하여야 한다.

1. 사건의 발생 과정 정리

2. 사건의 직접원인 및 중요 직접원인 파악

3. 직접원인에 대한 **Bowtie** 작성

4. 5Why 근본원인분석 진행

5. 재발방지 대책 수립

Fig 5. 사고조사절차

Bow-tie를 사용하여 사고조사를 할 때 사상(Event)을 중심으로 왼쪽에는 사건의 원인을 결함수분석(FTA : Fault Tree Analysis), 오른쪽에는 발생 가능한 결과들을 사건수분석(ETA : Event Tree Analysis)를 배치한다.⁵⁾ 예를 들어 화학공정에서 파열판이 터졌을 경우에 대한 사고조사를 할 때, 사상(Event)에 ‘파열판이 터짐’을 두고 왼쪽으로는 파열판이 터질 수 있게 하는 ‘압력상승’, ‘온도상승’ 등과 같은 원인을 나열하고, 오른쪽에는 파열판이 터짐으로 인해 발생할 수 있는 ‘화재 및 폭발’, ‘유독물질 누출’ 등과 같은 결과들을 나열한다. 그리고 나서 각 원인에 대한 예방대책과 각 결과에 대한 감소대책들을 세울 수 있다. 예를 들어 원인인 ‘온도상승’에 대한 예방대책으로는 ‘온도 게이지 설치’, ‘DCS를 통한 온도상승 시 알람 및 설비 중지’ 등이 있다. 그리고 ‘화재 및 폭발’과 같은 결과에 대한 감소대책으로는 ‘소화설비 설치’, ‘화재 알람 시 긴급대피 및 소화실시’, ‘LEL 감지기’ 등이 있다. 이렇게 ‘파열판 터짐’에 대한 Bow-tie 차트를 만들고 나면 거기에서 어떤 예방대책 또는 감소대책에서 직접원인들을 찾을 수 있다. 직접원인을 찾고 나면 각 직접원인들에 대하여 5Why 기법을 사용하여 근본원인에 대하여 찾아낸다. 예를 들어 ‘온도상승’에 대한 예방대책 중 냉난방 시스템이 있는데 ‘공조시스템이 꺼져 있었다.’가 직접원인이 되는 것이다. 그리고 직접 원인에 대한 근본원인을 찾아내는 것이다. ‘공조시스템이 꺼져 있었다.’에 대한 근본원인으로 ‘공조시스템 중단에 대한 절차서가 없었다.’가 될 수 있다. 최종적으로는 각 근본원인들에 대한 재발방지대책을 세우고 실행하게 되면 사고조사가 끝난다.

이렇게 Bow-tie기법과 5Why 기법을 활용하여 사고조사 및 근본원인 분석을 진행할 수 있다.

3.2 ‘파열판 터짐’사고 케이스 스터디

본사고는 실제 화학공장에서 발생한 사건이며, 사건의 개요는 다음과 같다. 계절은 무더운 한여름이었으며, 회분식 공정이며, 500 Gal 짜리 압력용기 안에 제조 공정을 세정 후 다음 배치 공정을 위해 인화성액체가 가득 채워진 상태로 며칠째 방치되어 있었다. 그리고 그 당시 공조기 정비보수 작업을 위해 공조기를 꺼 두고 있었다. 아침에 출근하였더니 압력용기의 파열판이 터져 있었다. 자칫 잘못했으면 밤사이에 큰 화재 폭발로 인하여 공장에 큰 피해를 줄 수도 있는 사건이었다. 파열판이 터진 후 DCS를 확인해 보니 밤사이에 온도와 압력이 상승하면서 파열판이 작동한 사실을 알 수 있었다.

이와 같은 사건에 대하여 아래 4M, 5Why, Apollo, Bow-tie + 5Why 기법들을 통해 근본원인분석을 실시하여 각 결과를 작성하여 비교해보았다.

3.2.1 4M 기법

4M 기법으로 ‘파열판 터짐’ 사고에 대하여 원인분석을 실시한 결과는 아래 Fig 6과 같이 나왔다. 원인으로서는 Man에서 ‘처음 설치 시 DCS 설정이 잘못되었다.’와 ‘설치 검사가 제대로 되지 않았다’가 찾아졌고, Machine에서는 ‘HVAC 가동 중단 시 위험에 대한 파악이 되지 않았다.’가 원인으로 나타났다. 그리고 Material에서는 ‘베셀안이 유기용제로 가득 차 있었다.’가 나왔고, Method에서는 ‘최초 설치 후 점검 절차가 제대로 안 되어 있다.’와 ‘HVAC 가동 중단 시 체크리스트나 절차서가 없었다’가 원인으로 나왔다.

4M 기법은 쉽게 사용할 수 있었으며, 원인과 재발방지 대책을 바로 세울 수 있다는 장점이 있다.

그러나 4M 기법에서는 사고의 원인들을 바로 찾아내서 적게 되면서 사고와 원인의 인과관계를 알 수 없는 단점이 있었다. 그래서 사고조사자의 지식과 경험 의존성이 강하다는 단점이 있다.

4M	Cause	Corrective action
Man	- Improper DCS Setting(Fault Close) - Inadequate inspection after installation	- Reinspection of all DCS setting. Change to Fault Open position - Set up the regular inspection of DCS
Machine	- Lack of risk identification for HVAC shut down	- Conduct risk assessment and training for HVAC shut down
Material	- Full of chemical inside vessel	- Develop the HVAC shut down procedure (drain the vessel)
Method	- Lack of inspection process after installation - No procedure or checklist for HVAC shut down	- Develop the DCS inspection procedure - Develop the checklist for HVAC shut down - In case of HVAC shut down, drain the vessel

Fig 6. ‘파열판 터짐’에 대한 4M

3.2.2 5Why 기법

5Why 기법을 통해 왼쪽에 사건을 적고 오른쪽으로 원인에 대하여 왜 발생하였는지에 찾아가는 방식으로 나열하였다. 5 Why 기법에서는 “왜”라는 질문과정에서 사고와 원인의 인과관계를 막힐 때까지 조사하는 과정에서 근본원인을 도출해 낼 수 있다. 그러나 4M과 5Why 기법에서는 사건의 원인에만 집중하여 접근하다 보니 깊숙이 숨어있는 근본원인을 찾아내는 데에는 한계가 있다. 5Why를 통한 원인 분석을 해보니, 파열판이 터진 1차 이유가 ‘압력이 5.7 Bar 이상으로 상승하였다.’, ‘용기 안이 유기용제로

가득 차 있었다.’, ‘온도가 29도 이상으로 상승하였다.’ 이렇게 세 가지가 나왔다. 먼저 ‘압력이 5.7 Bar 이상 상승하였다.’에 대한 이유는 ‘HVAC이 가동 중단되어 있었다.’, ‘고온으로 인해 기체팽창이 생겼다.’, ‘하단 밸브가 잠겨 있었다.’가 발견이 되었다. 다음 단계에서는 ‘실내 온도가 상승하였다.’, ‘DCS 설정이 밸브 차단으로 되어 있었다.’, ‘업체에서 초기에 잘못 DCS이 되어 있었다.’, ‘DCS 초기 설정값 검증이 제대로 안 되었다.’가 원인으로 발견되었다. ‘용기 안이 유기용제로 가득 차 있었다.’에 대한 후속 원인들을 찾으면 ‘세정 작업 후 유기용제를 비우지 않았다.’, ‘세정 작업에 대한 절차서대로 작업을 했다.’, ‘세정작업 절차서가 이전 경험으로 작성되었다.’, ‘과거에 잠재적인 품질 문제가 있었다.’가 발견이 되었다. 마지막으로 ‘온도가 29도 이상으로 상승하였다.’에 대한 추가 원인에서는 ‘여름이었다.’, ‘HVAC이 유지보수를 위해 가동 중단되었다.’ ‘HVAC 가동 중단에 대한 위험성 평가를 미시행 하였다.’, ‘HVAC 가동 중단에 대한 체크리스트가 없었다.’, ‘HVAC 가동중단이 공정에 끼치는 영향에 대한 인식이 부족했다.’, ‘야간에 압력상승에 대한 알람이 울렸으나, 아무도 조치하지 않았다.’, ‘야간에는 원래 작업자가 없다.’가 발견되었다. 이러한 원인 중에서 근본원인을 찾게 되면 ‘업체에서 DCS 설정이 잘못되었다’와 ‘초기 점검 절차가 제대로 안 되어 있었다.’ ‘HVAC 가동 중단에 대한 체크리스트나 절차서가 없었다.’ ‘HVAC 가동 중단에 대한 위험성을 인식하지 못했다’가 근본원인으로 나왔다. 그리고 그 외에도 사고와 원인에 인과관계에 따라 원인이 될 수도 있었던 사항들을 같이 볼 수가 있었다.

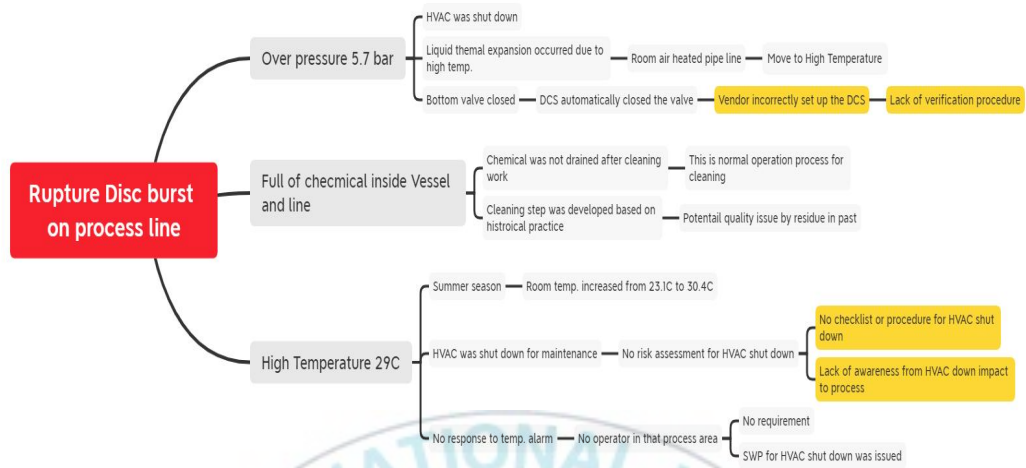


Fig 7. '파열판 터짐'에 대한 5Why

3.2.3 Apollo 기법

RealityCharting을 사용하여 Apollo 기법으로 만든 근본원인분석 차트이다. 원인에 대하여 Action과 Condition 두 가지로 나누어서 구분하며, 그리고 근본원인이 되는 항목에 대해서는 노란색으로 Root Cause로 선택하게 된다. 왼쪽 끝에 발생한 사건을 두고 오른쪽으로 발생한 원인에 대하여 STOP 될 때까지 계속 파고드는 방식은 5Why 비슷하다. 그러나 Apollo 기법에서는 원인뿐만 아닌 당시 상황이나 행동까지 같이 나열하여 숨어있는 근본원인을 찾아갈 수 있다. Apollo 기법을 통해서는 5Why에서는 나온 원인 외에 ‘PGMEA 유기용제로 내부가 가득 차 있었다’와 ‘세정 절차서가 이전 경험으로 인해 만들어졌다.’라는 추가적인 원인을 발견할 수 있었다.

상황으로는 ‘PGMEA 유기용제가 200kg 가득 차 있었다.’, ‘과열판이 6.3 Bar로 설정되어 있었다.’, ‘하단 밸브가 잠겨 있었다.’, ‘자동차단밸브의 비상시 설정이 잠금으로 되어 있었다.’, ‘처음 설계에는 자동차단밸브의 비상시 설정이 열림으로 되어 있었다.’ 등들이 발견되었다. 행동으로는 ‘공정 배관 압력이 5.7 Bar 이상으로 올라갔다.’, ‘DCS시스템에서 자동적으로 밸브를 잠겼다.’, ‘실내 온도가 배관의 온도를 올렸다.’, ‘온도 상승에 의한 기체팽창이 발생했다.’ 등이 발견되었다. Apollo기법에서는 5Why와는 다르게 당시 상황과 행동들에 대해서도 같이 나열하여 분석하였다.

3.2.4 Bow-tie기법 + 5Why 기법

발생한 사건을 중심에 두고 왼쪽에는 사고의 원인이 될 수 있는 항목들을 나열하고 그사이에 사고가 발생하지 않기 위해 만들어진 예방대책들을 나열한다. 그리고 그 예방대책 중 어디에서 문제가 생겼는지 파악한다. 그러면 그 항목들이 직접원인이 되겠다. 그리고 각 직접 원인에 대하여 5Why 기법을 사용하여 근본원인을 찾아낸다. 이렇게 사고를 분석함으로써 단편적인 부분만이 아닌 하나의 사건에 대하여 전체적인 부분을 한눈에 볼 수 있게 만들어 다른 사람들이 쉽게 사건에 대하여 이해하고 최악의 경우 어떠한 결과가 발생할 수 있었는지도 전달할 수 있다.

Bow-tie with 5Why를 통한 근본원인분석 결과 앞선 기법들에서 발견하지 못한 근본원인을 ‘loop test 목록이 너무 많다.’라는 더 찾을 수 있었다. 그리고 그 외에도 원인이 될 수 있는 방벽들인 ‘알람시스템’, ‘작업허가서’, ‘DCS시스템’이 제대로 작동했는지와 최악의 상황인 화재/폭발이 발생하지 않게 하기 위한 방벽인 ‘LEL 감지기’, ‘소화기 및 스프링클러’, ‘비상대응시스템’ 등이 정상적으로 작동되는지도 확인할 수 있었다.

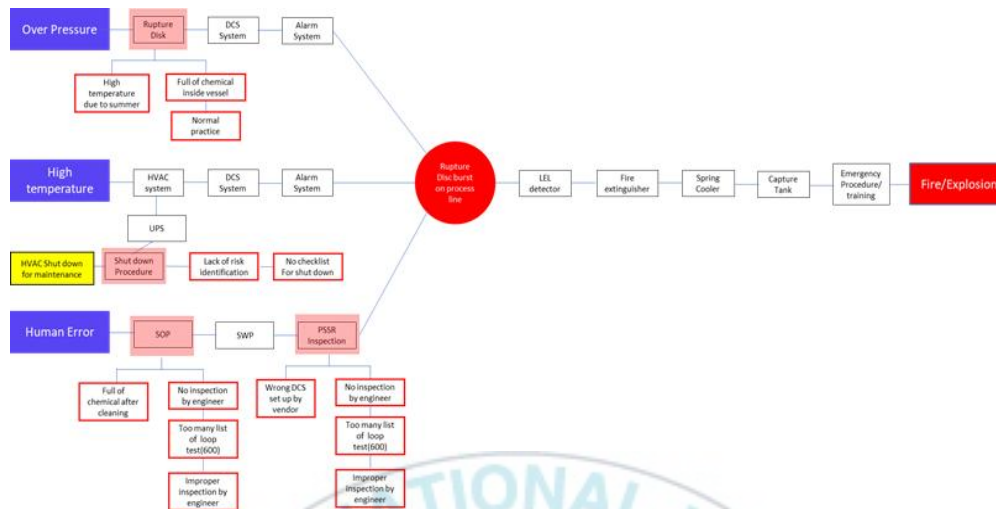


Fig 9. '파열판 터짐'에 대한 Bow-tie with 5Why 기법

3.3 '보수작업 중 일산화탄소 중독'사고 케이스 스터디

본사고는 실제 화학공장에서 발생한 사건이며, 사건의 개요는 다음과 같다. 위험물 제조소 내 실내 트랜치 설치 작업을 위해 운전은 중단된 상태였으며, 기존 설비 보호를 위해 투명 비닐로 보양을 해놓고 있었다. 작업자 3명이 들어와서 가솔린 콘크리트 절단기를 사용하여 바닥 절단 작업을 시작하였다. 작업을 시작한 지 1시간 후 작업자들이 두통과 메스꺼움을 호소하여 즉시 병원으로 이송하여 치료를 받았다.

이와 같은 사건에 대하여 아래 4M, Apollo, 5Why, Bow-tie + 5Why 기법들을 통해 근본원인분석을 실시하여 각 결과를 작성해 보았다.

3.3.1 4M 기법

일산화탄소 중독사고에 대하여 4M 기법으로 분석한 결과 아래와 같은 원인들을 찾을 수 있었다. Man에서 ‘작업자 및 관리자 지식 및 경험 부족’, ‘현장 관리 감독 부족’, Machine에서 ‘가솔린엔진에서 일산화탄소 발생에 대한 인식 없음’, ‘장비 사용 전 점검 미 실시’, Material에서는 ‘가솔린 엔진 기계 사용’, Method에서 ‘사전 작업허가서 작성 및 위험성평가 실시 미흡’, ‘작업 중간 환경이 변화되었는데도 변화에 대한 위험성 분석 미 실시’가 원인으로 발견되었다.

4M	Cause	Corrective Action
Man	- Supervisor and Worker's lack of knowledge and skill - Inadequate supervision	- Special Safety training to supervisor and workers - Improve the process of worker acceptance
Machine	- No aware of carbon monoxide generation in gasoline engines - No inspection prior to using equipment	- Using ventilation fan for working area - Using an exhaust fan, conduct carbon monoxide exhaust from concrete cutters - Develop a checklist before using the equipment
Material	- Using Gasoline engine machine	- Using ventilation and exhaust fan - Using a O2 detector during working time
Method	- Poor pre work permit and risk assessment - Failure to analyze the risk of change when the working environment has changed	- Re-certification of work permit issuer - Implementation of risk assessment training - Create risk assessment samples for frequent tasks

Fig 10. ‘일산화탄소 중독사고’에 대한 4M 기법

3.3.2 5Why 기법

5Why 기법을 통하여 원인분석을 한 결과 4M에서는 발견하지 못했던 ‘사업장 내 장비 및 전동공도구 점검 절차가 제대로 없다’라는 부분을 발견할 수 있었으며, ‘업체가 실외 공간에서의 작업 경험만 있어서 실내에서의 일산화탄소 발생에 대한 인식이 없었다.’, ‘가솔린 엔진에서 일산화탄소 발생 위험성을 몰랐다.’라는 사고와 원인의 인과관계를 볼 수 있었으며, ‘작업 구간 환기가 충분하지 않았다.’, ‘충분한 환기가 필요한지 몰랐다.’, ‘사용하는 장비에 대한 지식이 부족했다.’, ‘위험성평가 중 이산화탄소 발생이 고려되지 않았다.’, ‘비닐 보양과 가솔린 엔진 장비로 인한 새로운 위험성을 인식 못했다.’라는 인과관계를 찾을 수 있었다.

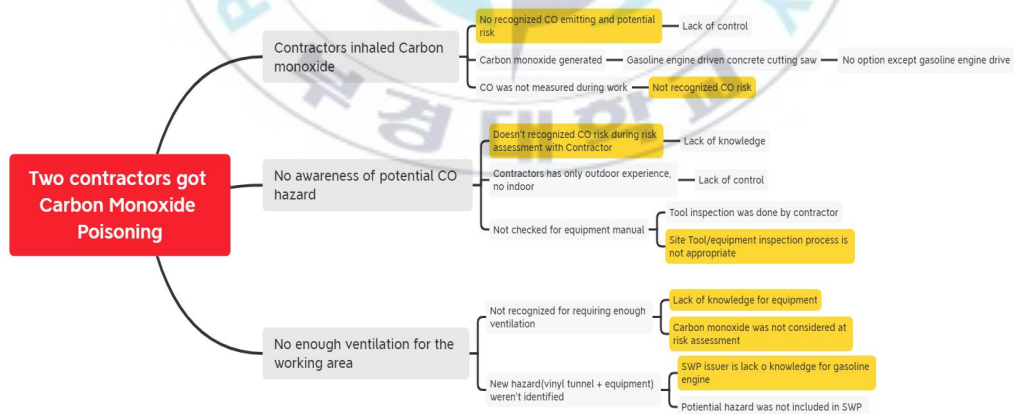


Fig 11. ‘일산화탄소 중독사고’에 대한 5Why 기법

3.3.3 Apollo 기법

일산화탄소 중독사고에 대하여 Apollo 기법을 통하여 근본원인분석을 한 결과 5Why 기법으로 분석했을 때와 비교하여 원인은 똑같이 나왔지만, 추가적인 불안전한 상태와 행동이 나오게 된 인과관계를 더 자세히 알 수 있었다. 불안전한 상태 및 행동에는 실내 비닐 보양으로 인해 HVAC 시스템이 무효화 된 상황에서 환기를 위해 환기팬을 설치하는 하였지만 비닐 보양한 부분이 계속 환기팬에 빨려들어 오면서 환기팬을 위험성 분석 없이 자체적으로 작동 중단시켰다는 인과관계를 알 수가 있었다. 그 외에도 ‘작업 구간 중 한 구간만 개방되어 있었다.’, ‘40분간 작업하는 동안 일산화탄소 중독에 대한 증상이 없었다.’ 등과 같은 추가적인 정보를 알 수가 있었다.

3.3.4 Bow-tie기법 + 5Why 기법

일산화탄소 중독사고에 대하여 Bow-tie with 5Why 기법으로 근본원인 분석을 한 결과 기존에 다른 원인분석기법에서 알 수 없었던 최악의 상황에 대한 감소대책 중 ‘일산화탄소 감지기’가 빠져 있다는 부분을 알 수 있었다. 다행히 비상상태대응 절차에 따라 신속히 병원으로 이송하여 진료를 받아 아무런 이상이 없었지만, 최악의 상황에 대한 심각성에 대하여 고려할 수 있었다. Bow-tie with 5Why 기법을 통하여 살펴보니 일산화탄소 중독이란 사건의 발생이 대부분 방벽들이 제대로 작동하지 않아 결국 발생하게 되었다는 인과관계를 더욱 쉽게 파악할 수 있었다.

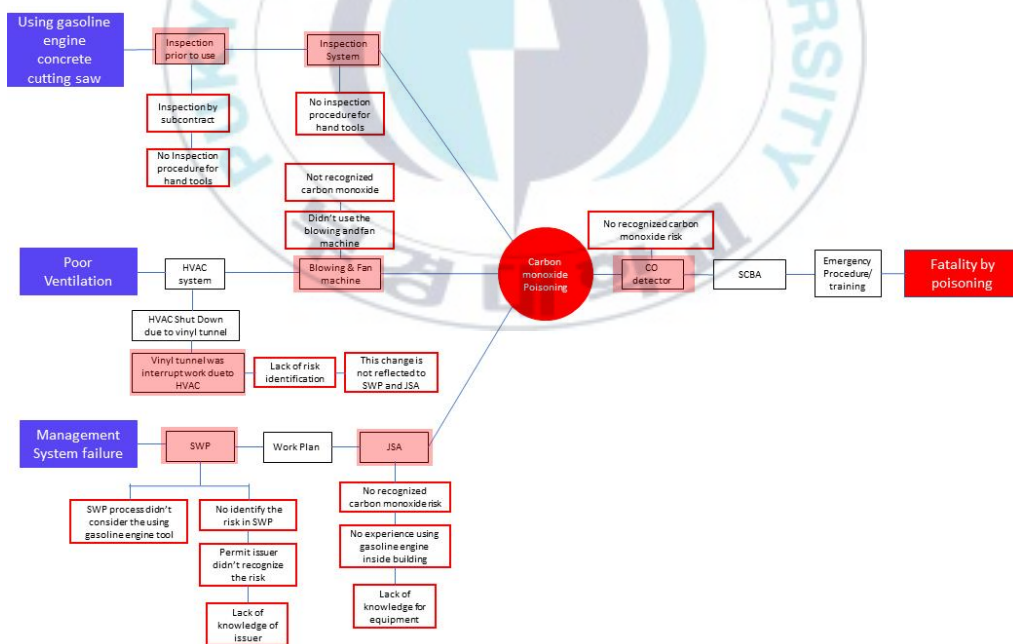


Fig 13. ‘일산화탄소 중독사고’에 대한 Bow-tie with 5Why 기법

3.4 '하단 밸브 통한 유기용제 누출'사고 케이스 스터디

마지막 케이스도 실제 화학공장에서 발생한 사건이며, 사건의 개요는 다음과 같다. 300 Gal 짜리 압력용기에 유기용제를 채우고 순환 작업이 진행되고 있었다. 순환 작업이 1시간 정도 지났을 때 주변 작업자가 화학물질 냄새를 맡고 살펴보니 용기 하부 밸브에서 유기용제가 소량 떨어지고 있음을 발견하였다.

이와 같은 사건에 대하여 아래 4M, 5Why, Apollo, Bow-tie + 5Why 기법들을 통해 근본원인분석을 실시하여 각 결과를 작성해 보았다.

3.4.1 4M 기법

하단 밸브 통한 유기용제 누출사고에 대하여 4M 기법으로 원인분석을 한 결과 Man에서 '볼트가 느슨해질 수 있다는 위험성에 대해 모르고 있었다.', Machine에서는 '볼트가 조임에 대한 표시가 없었다.', Material에서는 '장기간 운전을 하게 되면 볼트가 점느슨해진다.', Method에서는 '제조사로 부터 볼트 조이는 부분에 점 대한 가이드가 없었다.', '정기적으로 볼트를 조이지 않았다.'가 발견되었다.

4M	Cause	Corrective Action
Man	- Lack of understanding of the risks of loosening bolts as you drive	
Machine	- No indication of loosen bolt	- Markings for tightening bolts/nuts
Material	- Loosen bolt after long operation	- Change the type of bolt and valve
Method	- No guide for bolt tightening from manufacturer Failure to tighten the bolts periodically	- Reinforcement of bolts every three months

Fig 14. '하단 밸브 통한 유기용제 누출사고'에 대한 4M 기법

3.4.2 5Why 기법

하단 밸브 통한 유기용제 누출사고에 대하여 5Why 기법을 통하여 근본원인분석 결과 4M에서는 알 수 없었던 볼트가 느슨해지는 원인으로 '펌프에 진동이 존재한다.', '한 배치에 2시간 정도의 낭비 시간이 있다.', '공기 제어 밸브가 50% 개방 상태였다.'와 같은 원인들을 파악 할 수 있었다.

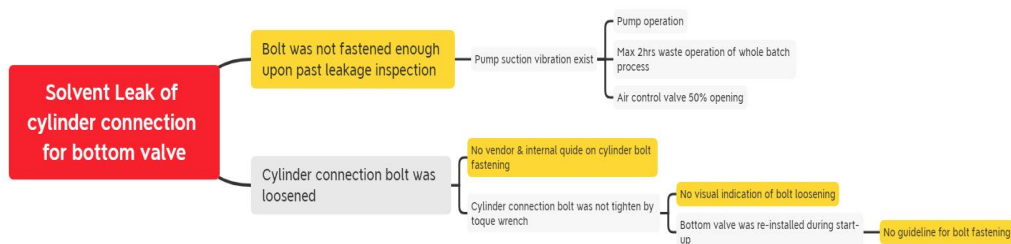


Fig 15. '하단 밸브 통한 유기용제 누출사고'에 대한 5Why 기법

3.4.3 Apollo 기법

하단 밸브 통한 유기용제 누출사고에 대하여 Apollo 기법 사용하여 근본원인분석을 한 결과를 5Why 비교해보니, 당시 압력용기의 사고 당시의 상황에 대하여 추가로 알 수가 있었으며, 상황에는 ‘400kg 유기용제가 용기 안에 채워져 있었다.’, ‘DCS 시스템이 정상 가동 중이었다.’, ‘하단 밸브에 대한 누출 테스트를 진행했었다.’, ‘설치 후 7개월 동안 누출이 없었다.’와 같은 상황을 알 수 있었다.

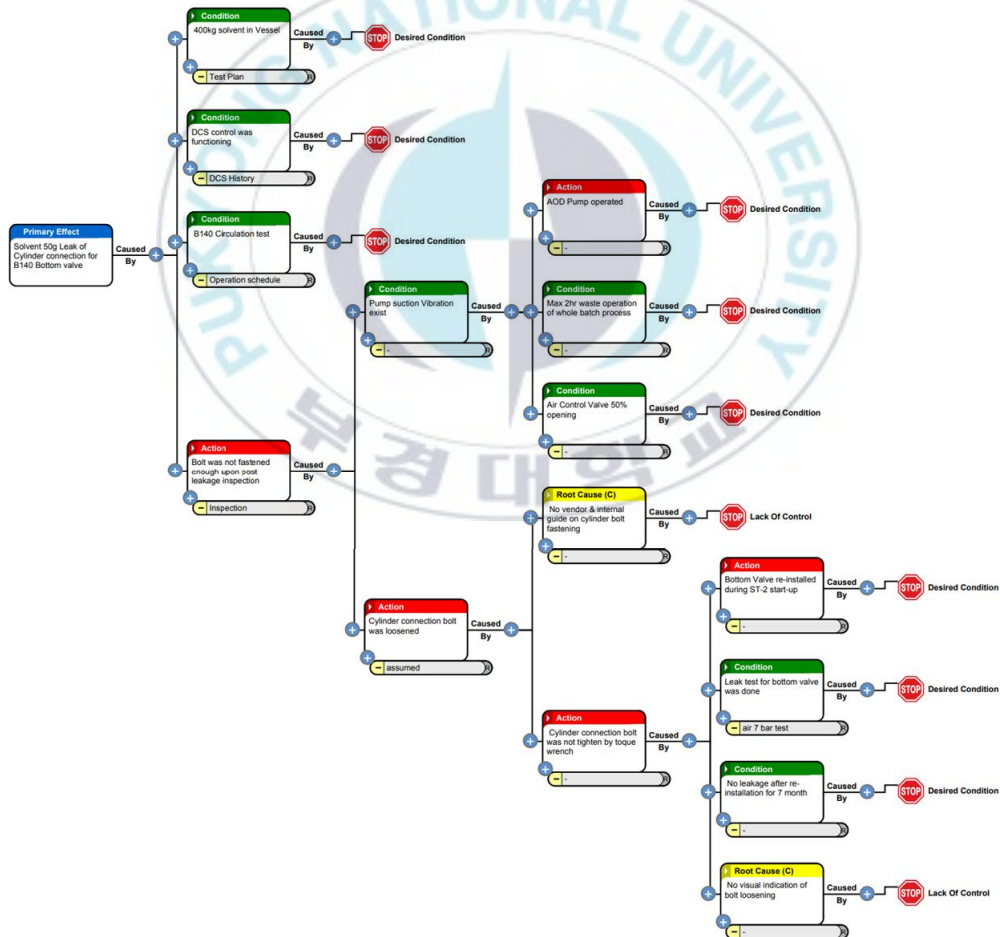


Fig 16. ‘하단 밸브 통한 유기용제 누출사고’에 대한 Apollo 기법

3.4.4 Bow-tie기법 + 5Why 기법

마지막으로 하단 밸브 통한 유기용제 누출사고에 대하여 Bow-tie with 5Why 기법으로 근본원인분석을 한 결과 다른 기법들과 비교하여 다양한 부분들에 볼 수 있었다. 다른 기법들에서는 다루어지지 않았던 압력상승, 진동, 운전원 오작동에 대한 부분들이 있었으며, 그 중 안전밸브, DCS 시스템, 알람시스템, AOP펌프, 공기 제어 밸브, 가동 전 점검, 알람 시스템, 안전운전절차서, 일일점검 등과 같은 각 방벽들이 제대로 작동하는지 살펴 볼 수 있었고, 최악의 결과인 화재/폭발과 그 방벽들인 인화성가스측정기, 소화시스템 및 스프링클러, 집수조 및 트렌치, 비상조치계획 등 방벽들이 잘 작동하고 있는지 알 수 있었다.

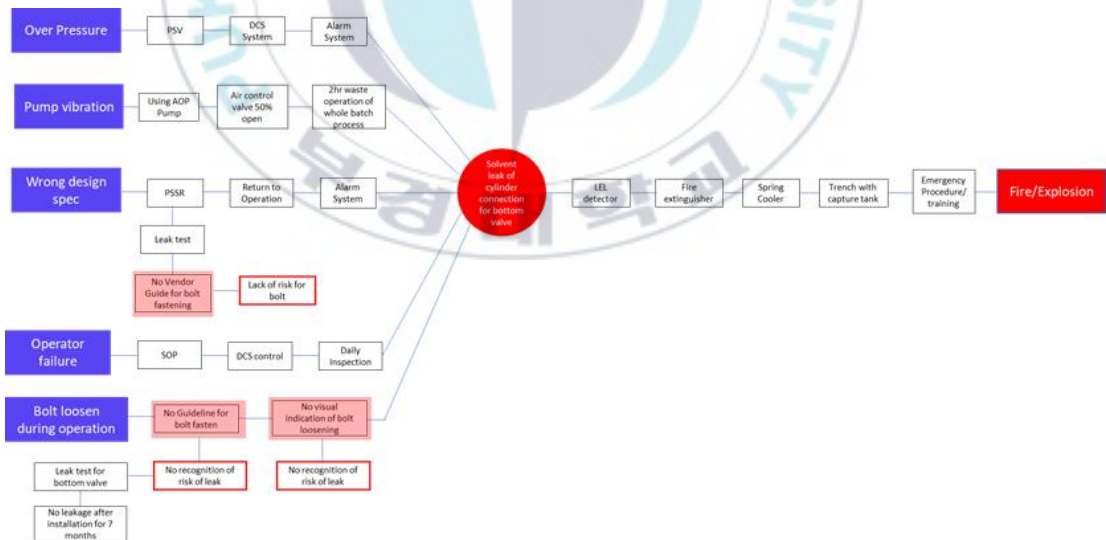


Fig 17. ‘하단 밸브 통한 유기용제 누출사고’에 대한 Bow-tie with 5Why 기법

3.5 각 기법 비교

이번 논문에서 새로운 근본원인분석 방안인 Bow-tie + 5Why 기법에 대한 유효성 검증을 위해 다른 3가지 근본원인분석 기법들과 비교를 하였다.

검증을 위해 작성해둔 근본원인분석 결과들에 대하여 공정전문가, 안전전문가, 설비전문가 등 10년 이상 경험을 가진 전문가 10명이 모여서 브레인스토밍 방식으로 토론을 통해 아래와 같은 결론을 내릴 수 있었다.

Table 2. RCI 장단점 차트

기법	장점	단점
4M	크게 4가지 원인으로 나누어서 쉽게 원인분석을 할 수 있다.	- 사고조사자의 지식 의존성이 높다. - 단편적인 원인들만 볼 수 있다.
5Why	가지 형태로 근본원인을 쉽게 찾아 갈 수 있다.	단편적인 원인들만 볼 수 있다.
Apollo	- 원인과 상황, 행동으로 나누어서 체계적으로 원인분석이 가능하다. - 복잡한 공정사고 분석에 효율적이다.	기법에 대한 사전 공부が必要하며, 원인분석에 시간이 많이 소요된다.
Bowtie with 5Why	- 사고와 원인, 결과 사이의 방벽들에 대한 부분과 최악의 경우까지 고려하여 한눈에 볼 수 있다. - 복잡한 공정사고 분석에 효율적이다. - 교육용으로 활용하기 좋다.	기법이 복잡하고 사전 공부가 필요하며, 원인 분석에 시간이 많이 소요된다.

제 IV 장 결 론

본 논문은 유해.위험물질들을 많이 다루고 다양한 운전조건에서 운영하는 화학공장에서 사고가 발생하였을 때 기존에 사용되던 근본원인분석 기법들을 사용하여 원인분석, 재발 방지 및 근로자 교육을 강화할 필요성이 있다고 생각이 되어 Bow-tie 위험성평가 기법과 5Why 원인분석 기법을 병합하여 새로운 방식을 통한 근본원인분석에 관한 연구이다.

이번 연구 결과를 통해 근본원인분석을 할 때 Bow-tie기법과 5Why 기법을 병합하여 근본원인분석을 실시하는 방법의 유효성을 여러 케이스 스터디 및 전문가집단 브레인스토밍을 통해 검증하였다.

Bow-tie기법과 5Why 기법을 병합하여 사용함으로써 사건에 대한 근본원인 분석 및 발생 가능한 결과와 그 각각의 예방대책, 감소대책을 한 차트를 통해 표현할 수 있어서 보다 직관적이며 체계적으로 작성할 수 있으며, 교육용으로도 더 우수하다는 점을 알 수 있었다. 그리고 기존 근본원인분석들은 사건과 원인에만 집중하였다고 하면, 새로운 근본원인분석 방식으로는 사건, 원인, 결과, 방벽들을 다 같이 보게 만들며, 그리고 원인이 될 가능성이 있는 부분들과 최악의 결과를 방지하기 위한 방벽들도 같이 살펴봄으로써 기존 방호벽들의 정상 작동 여부를 알 수 있었다.

결론적으로 얘기하면 작은 실수 하나로도 큰 중대산업재해(화재, 폭발, 독성가스 누출) 발생 가능성이 높은 화학공장에서는 근본원인분석을 할 때 무엇보다 체계적이고 상세하게 진행해야 할 필요성이 있다. 작은 사고도 근본원인분석을 통해 재발 방지를 하기 위해 노력을 하여야 한다. 그렇게 하기 위해서는 복잡하더라도 체계적인 근본원인조사 기법 사용이 필요하며

사건, 원인, 결과, 방벽들을 한눈에 볼 수 있는 Bow-tie기법을 활용하여야 한다. Bow-tie기법과 5Why 기법을 같이 사용함으로써 기존 근본원인분석 기법으로 찾지 못했던 원인 및 미흡한 부분을 알 수 있으며, 한 차트를 통해 전체를 볼 수 있어서 교육용으로도 우수하다.

또한, Bow-tie기법과 다른 사고조사기법들과도 충분히 병합 가능성은 있다고 생각이 되며, 여러 가지 기법들과 비교해보며 더욱 개선해 나갈 가능성이 있다고 생각이 된다.



참고문헌

1. Suk Hwa Um, "A Study on Improvement of Safety Management for Chemical Laboratories Using Root Cause Analysis Map of Accidents", Seoul National University Of Science and Technology, 2011
2. Chul Hyun Byun. "A Study on the efficient application method of Bowtie risk assessment for refinery", Chung Ang University, 2014
3. Dong Gil Shin, "The Study on the Prevention of Construction Equipment Accidents Using 5Why-Root Cause Analysis Technique", Seoul National University Of Science and Technology, 2016.
4. Eun-Young Choi, Hyeon-Jeong Lee, Min-Su Ock, Min-Woo Jo, Sang-Il Lee, "Comparison of Root Cause Analysis Software for Investigating Patient Safety Incidents", Journal of Korean Society for Quality in Health Care, 2017.
5. Ju Hyun Kim, "A Study on the Development of the Cause Analysis Methodfor Disaster Incident", Seoul National University Of Science and Technology, 2018
6. ManHyeong Han, JunHyeok Gang, YoungWoo Chon, "Root cause Analysis through Haddon Matrix and Bow-Tie : Social system and Structural Causes", Korean Journal of Hazardous Materials, Vol. 6, No. 1, pp. 54~62, June 2018
7. Ho Young Son, "Digital Factory Practical Technology for Factory Improvement : Applied Case to Farm Machine Manufacturing Line", Hoseo University, 2009.
8. Chan Ho Tae, Heon Seok Lee, Chul Hyun Byun, Jae Mo Yang,

- Chulhwan Park, Jae Wook Ko, "A Study on Risk Analysis of Manufacturing Process Using the Bow-Tie Method", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 17-3, pp. 33 - 38, 2013.
9. Jan Pranger. "Selection of incident investigation methods", Loss Prevention Bullentin, 2009
10. Lisa. Morrison, "Best practices in incident investigation in the chemical process industries with examples from the industry sector and specifically from Nova Chemicals", Journal of Hazardous Materials 111 pp. 161-166, 2004
11. Snorre Sklet, "Comparison of some selected methods for accident investigation", Journal of Hazardous Materials 111 pp. 29 - 37, 2004
12. Islam H. Afefy, "Hazard Analysis and Risk Assessments for Industrial Processes Using FMEA and Bow-Tie Methodologies", Journal of Industrial Engineering & Management Systems Vol 14, No 4, pp.379-391, Dec 2015
13. Philippa Dodshon & Robin Burgess-Limerick, "Using Bow-Tie analyses to enhance incident investigation activities", The University of Queensland, 2015