

가스 산업 시설의 잠재위험성 평가기법 선정 방법에 관한 연구

김 정 원 · * 고 재 옥

광운대학교 화학공학과

(2004년 11월 13일 접수, 2004년 12월 14일 채택)

A Study on Selection Method of Hazard Evaluation Technique for Gas Industries

J. W. Kim and J. W. Ko

Dept. of Chemical Engineering, Kwangwoon University

(Received 13 November 2004 ; Accepted 14 December 2004)

요 약

본 연구에서는 가스 산업 시설에서의 적합한 잠재위험성 확인 기법을 선정하기 위해 가스 산업 시설 및 12가지의 기법들을 분석하고, 기법 선정에 영향을 미치는 6가지의 요소를 적용하여 기법 선정에 대한 guideline을 제시하였다. 합리적인 기법의 선정을 위해서 선정에 영향을 미치는 요소들과 각 공정 또는 설비별 사고 발생의 원인과 결과를 8가지의 특성으로 분류하여 4가지의 index를 작성하였다. 또한, flowchart 형식의 의사 결정 과정에 작성된 index를 대입하여 사용이 부적합한 기법들을 소거하고, 최적의 기법 사용에 대한 대안을 제시할 수 있도록 하였다. 또한, 규제요건 비대상 사업장의 자체적 내부 안전성 향상을 위한 guideline으로 활용될 수 있을 것이다.

Abstract - This research was for the analysis of gas industries and 12 hazard evaluation techniques for the industries, and present the selection guideline of the techniques using 6 factors affecting them. 4 indexes & consequences of incidents into 8 characteristics. Also, combining the indexes with the selection procedure in flowchart format could reduce improper techniques and present alternatives. Also, it is used as guidelines to get safety improvement plan to gas companies.

Key words : Gas Industries, Hazard Evaluation Techniques, HAZOP

1. 서 론

오늘날 가스 연료는 편리한 연료로 국민의 생활 연료로 자리 잡고 있으며, 취사용, 가스보일러, 냉방용, 산업용, 자동차용 등 각 분야에서 일반 고압가스, 도시가스, 특수가스 등 다양한 형태로 보급되고 있다. 가스의 소비 증가와 보급에 따른 제반 문제를 원활하게 해결하기 위해 가스 생산시설, 저장시설, 운송시설, 충전시설 등의 증설이 요구되었으며, 시설 규모가 확대됨에 따라 사고 발생 시 공장 및 인근 지역

사회에도 큰 영향을 끼칠 수 있는 잠재위험성을 보유하게 되었다.

가스를 사용하는 시설에서의 사고는 화재, 폭발, 누출 등 대형사고로 이어지는 경우가 많으며, 특히 가스, 정유, 석유화학 시설은 거대한 규모로 인한 대형 재해로의 발전 가능성이 그 어떤 산업보다 크다. 이와 같이 중대 산업사고로 발전할 수 있는 가스 산업시설의 높은 위험성을 고려할 때, 사고 발생이전에 사고 발생 가능성을 내포하고 있는 잠재위험성의 확인 및 제거/감소 활동이 상당히 중요하다. 규제대상 사업장의 경우, 풍부한 인적

* 주저자 : jwko@daisy.kw.ac.kr

자원, 공정정보 및 경험을 토대로 HAZOP 분석 기법을 사용하는데 큰 무리가 없으나, 공정개발 및 운영단계, 각 공정을 이루고 있는 장치의 특성 및 설치목적, 조업 특성 등에 따라 각 특성에 맞는 다양한 기법을 적용하는 것이 잠재위험성 확인에 보다 적합할 수 있다

따라서, 본 연구에서는 규제대상 사업장의 경우, 각 공정 및 설비의 특성 별로 다각화된 잠재위험성 평가 기법들을 적용하여 보다 효과적인 안전성 향상을 제시하고, 비대상 사업장의 경우, 자체적인 내부 안전성 향상을 위한 잠재위험평가 기법 선정에 대한 guideline을 개발하고자 한다. 먼저 LPG, LNG, 도시가스 등을 취급하는 가스 산업의 공정 및 설비 시설을 파악하고, 기존에 개발된 12개의 잠재위험성 평가 기법을 분석하여 guideline을 제시하고자 한다.

II. 이론적 배경

2.1. LPG/LNG 공정의 주요시설

가스를 각 지역에 원활하게 공급하기 위해서는 유량조절설비, 가스히터, 가스여과기, 정압기 계측장치, 안전장치, 가스여과기 등 여러 가지 장치가 요구된다. 정압기지, 차단기지, 계량기지에 설치되는 장치 및 기능은 Table 1.과 같다. LNG 생산시설을 살펴보면 하역설비, 저장탱크, 증발가스 압축기, 재액화 설비, 2차 펌프, 고압 기화기로 크게 구분할 수 있다.

1) 하역설비(Unloading arm)

3개의 LNG 하역설비(Loading arm)와 1개의 NG 하역설비를 연결하고 LNG 선측의 이송펌프를 이용하여 육상의 저장탱크로 하역배관을 통해 LNG를 이송하게 된다.

2) 저장탱크(Storage Tank)

LNG 저장탱크는 특수 콘크리트의 외벽 및 -162℃의 액상 LNG를 외부의 온도로부터 보호하기 위한 보냉체로 구성되어 있다. 부속 설비로는 1차 펌프 및 각종 계기설비와 안전설비 등이 있다.

3) 증발가스 압축기(Boil-off gas compressor)

증발가스 압축기는 초저온 액상 LNG가 탱크 및 배관의 외부로부터 전달되는 열에 의해 증발된 가스를 압축하기 위해 설치된다.

4) 재액화 설비(Re-liquified gas)

증발가스 압축기에서 압축된 증발가스를

LNG와 혼합하여 재액화 시키는 설비로서, 저온의 LNG와 상대적으로 온도가 높은 증발가스의 열교환을 통해 응축되어 2차 펌프로 이송된다.

5) 2차 펌프

장거리 배관망으로 LNG를 공급하기 위해 2차 펌프를 통해 약 80kg/cm²의 고압으로 압축한다. 2차 펌프는 크게 펌프와 모터로 구성되어 있고, 펌프의 흡입 배관에는 필터가 설치되어 있으며, 흡입배관으로 유입된 LNG는 펌프 하부를 통하여 여러 단의 압축단계를 거친 후 기화기로 이송된다.

6) 고압 기화기(Open rack vaporizer)

기화기는 LNG의 기화를 위해 해수를 이용하는 해수식 기화기와 천연가스 연소 시 발생하는 열을 이용하는 연소식 기화기의 2종류로 크게 구분된다.

Table 1. Equipments and function of static pressure base.

장치 및 기기	기능
정압기 (Governor)	정압기 기지의 주장치. 고압으로 수송된 가스를 설정된 압력으로 감압
가스히터 (Gas Heater)	정압기를 통한 감압시 발생하는 온도강하에 따른 가스의 상변화 및 주변기기와 배관시설이 저온에서 손상되는 것을 방지
가스 여과기 (Gas Filter)	정압기 및 유량계 등의 설비가 수송가스 중의 미세 분진에 의해 손상되는 것을 막기 위해 가스를 여과 하는 장치
소음기 (Silencer)	정압기에서 가스감압시 발생하는 소음을 방지하기 위해 정압기 상, 하류측에 설치
정압기 차단 MOV	긴급사고시 정압기를 Block 시키는 전동 밸브
정압기 차단 ESV	정압기의 이중 Block용 유압식 밸브
온도계 (Temperature Indicator)	가스히터 상, 하류측에 설치. 수송 가스의 온도 및 가스히터 운전상태를 나타냄
압력차계 (Pressure Differential Indicator)	가스 여과기 상, 하류측에 설치하여, 가스여과기를 통한 압력강하 측정하며, 가스여과기의 운전상태 확인
압력경보계 및 스위치 (Pressure Alarm & Switch)	정압기 하류측에 설치, 압력이 설정치 이상으로 상승한 경우 경보가 울리게 되며 압력스위치는 정압기 차단 MOV를 작동시킴.

2.2. 잠재위험성 평가 기법

잠재위험성은 언제, 어디서든 존재한다. 이러한 잠재위험성을 사고로 진행되기 전에 확인, 위험성을 감소시키는 것은 필수적이다. 본 연구에서 고려된 12가지 잠재위험 평가기법은 다음과 같다.

1) 안전성 검토(Safety Review)

공장, 실험실 등에서 기술사 및 안전전문가가 함께 모여 관련 자료의 및 토론을 통하여 안전상의 문제점을 확인하고 해결하는 위험 확인 기법이다.

2) 체크리스트 분석(Checklist Analysis)

체크리스트는 기준 절차에 따라 일이 진행되고 있는가를 보여주기 위해서 자주 사용된다.

3) 상대적 위험 등급(Relative Ranking)

상대적 위험 등급은 화학 공장에 존재하는 잠재위험에 대해 상대적인 위험 순위를 제공한다.

4) 예비 위험 분석(Preliminary Hazard Analysis, PHA)

PHA의 주목적은 위험을 일찍 인식하여 위험이 나중에 발견되었을 때 드는 비용을 절약하는 것이다.

5) What-If 분석(What-If Analysis)

What-if 분석의 목적은 원하지 않는 결과를 초래할 수 있는 사건을 세심하게 고려해 보는 것으로, 설계 단계, 건설 단계, 운전 단계, 공정의 수정 등에서 생길 수 있는 일탈 현상의 조사가 포함된다.

6) What-If/Checklist 분석

공정이나 조업 활동에서 발생할 수 있는 사고들의 일반적인 유형을 고려하여 사고 영향을 정량적으로 평가한 후, safeguards에 상응하는 지를 결정하는 것이 목적이다.

7) HAZOP 분석 (Hazard and Operability Analysis)

HAZOP 분석은 공정에 존재하는 위험 요소들이나 공정의 효율을 저하시킬 수 있는 운전상의 문제점을 체계적으로 확인하기 위해 각 분야의 전문가들로 팀을 구성하여 위험성을 정성적으로 평가하는 기법이다.

8) 고장형태 및 영향분석(Failure Modes and Effects Analysis, FMEA)

FMEA의 목적은 공정이나 제품의 오류(failure)가 발생할 가능성이 있는 모든 경로를 확인하는 것이다.

9) 인간 신뢰도 분석(Human Reliability Analysis, HRA)

조업자, 유지/보수 staff, 기술자 및 plant 내의 인간에게 영향을 미치는 요소들을 체계적으로 평가하는 기법이다.

10) 이상 트리 분석(Fault Tree Analysis, FTA)

연역적인 분석 방법이며, 대상 시스템의 환경을 분석하여 예기치 못한 사건이 일어날 수 있는 모든 가능한 방법들을 발견하는 분석기술이다.

11) 사건 트리 분석(Event Tree Analysis, ETA)

Event tree는 초기사건으로부터 출발하여 최종 결과로 진행되는 것으로 구성된다. 즉 귀납적인(inductive)방법이다.

12) 원인-결과 분석(Cause-Consequence Analysis, CCA)

FTA와 ETA를 혼합한 기법으로, 예측되는 결과의 발생 빈도를 정량화하는데 사용된다.

2.3. 잠재위험 평가기법 선정에 영향을 미치는 요소

적합한 HE(Hazard Evaluation, 잠재위험 평가)기법의 선정은 기술적이며, 다양한 변수들이 의사 결정에 영향을 미칠 수 있다. 다음의 6가지 요소들은 분석자들이 기법 선정에 고려해야할 요소들이다.

- 1) 연구의 동기 및 목적
- 2) 연구 결과의 유형
- 3) 연구 수행에 사용 가능한 정보의 유형
- 4) 분석 대상의 특성
- 5) 공정 위험의 감지
- 6) 자원의 활용 가능성 및 분석/경영의 우선권

2.4. 가스 산업 시설에서의 HE 평가기법 선정

Fig. 1.은 가스 산업시설의 HE기법 선정을 위한 의사 결정 과정을 나타낸 흐름도이다.

III. 사례 연구

3.1. 연구대상의 분석

사례 연구 대상은 LPG/LNG 저유시설로서, 연안의 탱커로부터 원료를 입하하여 저장, 탱크로리로 충전, 출하하는 시설이며 전 공정에 대한 PFD는 Fig. 2.와 같다.

본 연구에서는 전체의 공정을 이루고 있는 대표적인 설비를 입하설비, 저장설비, 펌프설비, 응축설비, 응축 및 여과설비의 4가지로만 분류하였다.

- 1) 입하설비(인수/인하)
 - 원인 : Physical(☉), Mechanical(●), Human(●)
- 2) 저장설비(storage tanks and etc.)
 - 원인 : Chemical(○), Electrical(☉), Physical(☉), Mechanical(●), Human(☉)
- 3) Pump 설비(loading pumps and ect.)
 - 원인 : Electrical(○), Physical(●), Mechanical(●)
- 4) 응축 설비 및 여과 설비(액화 및 여과)
 - 원인 : Physical(☉), Mechanical(●)

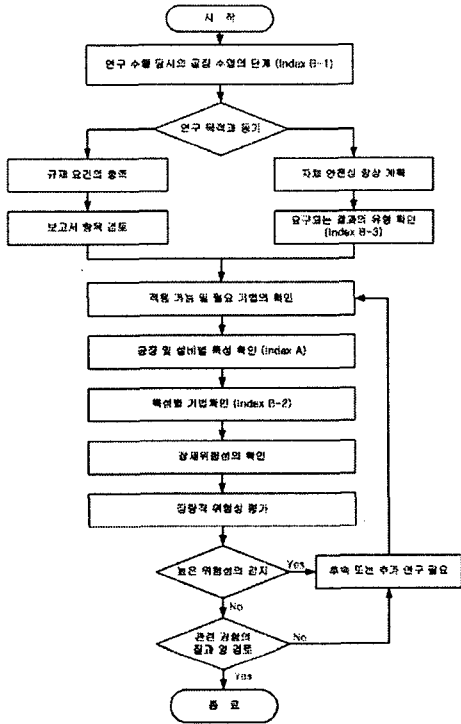


Fig. 1. Making decision process for selection of HE technique.

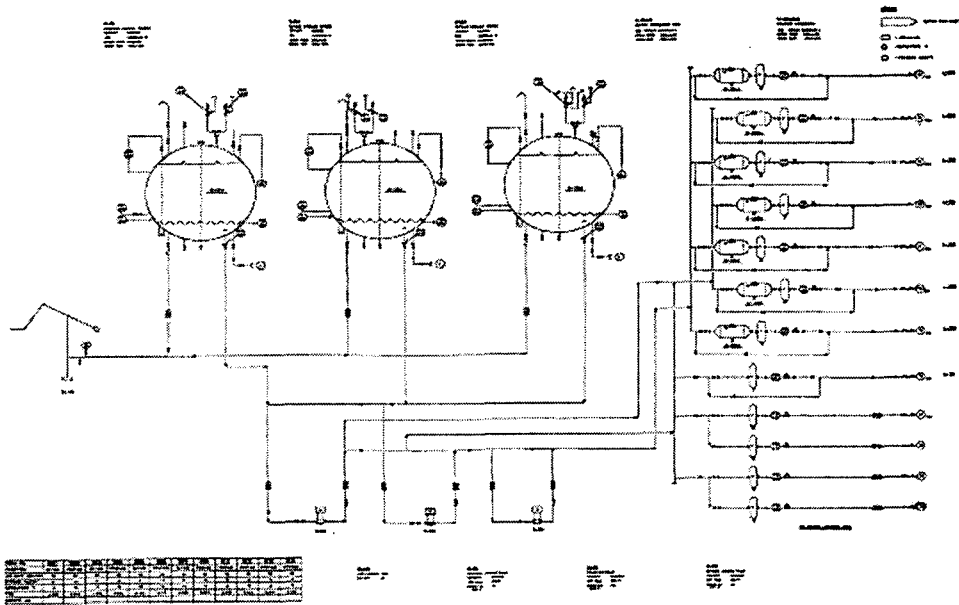


Fig. 2. PFD of facilities for storing LPG/LNG

3.2. 연구 수행 당시의 공정 수명의 단계
공정이 조업 중인 경우로 가정하였다. Fig. 3.를 참조하면 Relative Ranking 기법과 Preliminary Hazard Analysis 기법은 사용이 제한적이거나 연구 성과의 질이 저하됨을 알 수 있다.

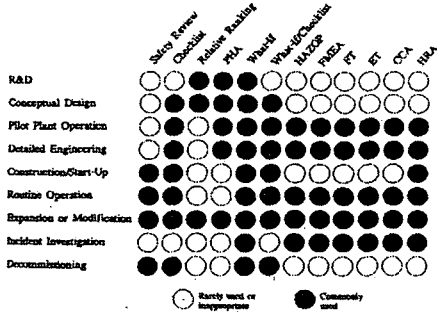


Fig. 3. The traditional application of the HE technique.

3.3. HE 기법별 특성의 확인

소거된 Relative Ranking과 Preliminary Hazard Analysis 기법을 제외한 사용 가능한 10가지 기법을 살펴보면, Human Reliability Analysis 기법의 경우, 인적 오류인 Human 특성에만 해당되기 때문에 단독 사용이 제한적임을 알 수 있다.

3.4. 연구 목적과 결과의 유형 확인

연구 목적은 규제 요건의 충족이므로, Table 2.에 의하여 FMEA, HAZOP, WI/CL의 기법이 단독으로 사용될 수 있으며, 보유한 관련 경험과 정보, 결과의 요구 사항에 따라 12가지의 기법을 분야별로 활용할 수 있다.

Table 2. Typical selection of HE technique for motivation and types of results

Regulation (SMS, PSM etc.)	Internal safety improvement tool
FMEA or HAZOP or What-If/Checklist	All of HE techniques

Table 3의 index를 참조하였을 때, SMS 보고서 작성에 필요한 조치 사항의 등급 부여를 위해서는 SR, CL, RR 기법의 단독 사용은 고려대상에서 제외시킬 수 있다.

Table 3. Classification of HE technique for the purpose of Ranking Action Items.

Usually does not	May	Usually does
Safety Review Checklist	PHA	FMEA, HAZOP, FTA, ETA, CCA
Relative Ranking	What-If/Checklist	HRA

3.5. HE 기법 선정을 위한 의사 결정 과정

연구 대상에 대한 특성을 확인하면, Fig. 1.의 의사 결정 과정을 이용하여 기법을 선정하게 된다. 의사 결정은 다음과 같이 진행된다.

- 1) 연구 수행 당시의 공정 수명의 단계 Relative Ranking과 Preliminary Hazard Analysis 기법이 제외되었다.
- 2) 연구 목적과 동기
규제 요건의 충족으로서 SMS 보고서를 작성하기 위한 것이다.
- 3) 보고서 항목 검토 및 필요 기법의 확인
SMS 보고서 세부 내용 기재를 위해서 단독 기법의 사용, 여러 기법의 혼용의 두 가지 방안으로 생각할 수 있으며, 본 연구에서는 후자를 사례로 제시 하고자 한다.
- 4) HE 평가 기법과 대상 공정의 특성의 비교 분석
단독으로 수행이 가능한 FMEA, HAZOP, WI/CL을 제외한 나머지 기법 중, 4가지의 대표적인 설비의 특성과, HE 기법의 특성을 비교 분석하여 가장 중대한 영향을 미치는 특성끼리의 조합을 통해 다음과 같은 결과를 도출하였다. 도출된 숫자는 영향을 미치는 정도이며, 본 연구에서는 단순히 (○)는 1점, (◐)는 2점, (●)는 3점으로 점수를 부여 하였고, Table 4와 Table 5를 동시에 사용하여 서로 해당되는 설비 특성 X 기법 특성'의 점수를 계산하여 합산하였다.

▶ 입하 설비 (인수/하역)

- 원인 : Physical(2), Mechanical(3), Human(2)
- SR : $(2 \times 3) + (3 \times 2) + (2 \times 1) = 16$
(+Action items)
- CL : $(2 \times 2) + (3 \times 3) + (2 \times 2) = 17$
- WI : $(2 \times 2) + (3 \times 2) + (2 \times 2) = 14$
- HRA : $(2 \times 0) + (3 \times 0) + (2 \times 3) = 6$
- ETA/FTA : $(2 \times 2) + (3 \times 3) + (2 \times 3) = 19$

▶ 저장 설비(storage tanks and etc.)

- 원인 : Chemical(1), Electrical(2), Physical(2), Mechanical(3), Human(2)

가스 산업 시설의 잠재위험성 평가기법 선정 방법에 관한 연구

- SR : $(1 \times 3) + (2 \times 2) + (2 \times 3) + (3 \times 2) + (2 \times 1)$
= 21 (+Action items)
- CL : $(1 \times 3) + (2 \times 2) + (2 \times 2) + (3 \times 3) + (2 \times 2)$
= 24
- WI : $(1 \times 3) + (2 \times 2) + (2 \times 2) + (3 \times 2) + (2 \times 2)$
= 21
- HRA : $(1 \times 0) + (2 \times 0) + (2 \times 0) + (3 \times 0) + (2 \times 3)$
= 6
- **ETA/FTA** : $(1 \times 3) + (2 \times 2) + (2 \times 2) + (3 \times 3)$
 $+ (2 \times 3) = 26$

- HRA : $(1 \times 0) + (3 \times 0) + (3 \times 0) = 0$
- **ETA/FTA** : $(1 \times 2) + (3 \times 2) + (3 \times 2) = 14$

▶ 응축 설비(condenser) 및 여과 설비(filter) (액화 및 여과)

- 원인 : Physical(2), Mechanical(3)
- SR : $(2 \times 3) + (3 \times 2) = 12$ (+Action items)
- **CL** : $(2 \times 2) + (3 \times 3) = 13$
- WI : $(2 \times 2) + (3 \times 2) = 10$
- HRA : $(2 \times 0) + (3 \times 0) = 0$
- **ETA/FTA** : $(2 \times 2) + (3 \times 3) = 13$

- ▶ Pump 설비(loading pumps and etc.)
- 원인: Electrical(1), Physical(3), Mechanical(3)
- SR : $(1 \times 2) + (3 \times 3) + (3 \times 2) = 16$
(+Action items)
- **CL** : $(1 \times 2) + (3 \times 2) + (3 \times 3) = 17$
- WI : $(1 \times 2) + (3 \times 2) + (3 \times 2) = 14$

연구 수행자는 관련 경험과 정보의 활용을 고려하여 한 가지의 기법을 선정할 수 있으며, 보다 체계적이고 객관적인 선정을 위해 해당 항목의 수와 신뢰성을 높이는 방안도 고려할 수 있다.

Table 4. Example of HE technique index for characteristic of process.

HE 평가기법	공정 특성							
	Chemical	Electrical (+ static)	Physical	Electronic	Mechanical	Computer	Biological (+ toxic)	Human
SR	●	⊙	●	○	⊙	○	○	○
CL	●	⊙	⊙	⊙	●	⊙	⊙	⊙
WI	●	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
HRA								●
FTA/ETA	●	⊙	⊙	⊙	●			●

Table 5. Example of index for characteristics of equipments and processes.

공정 및 설비/기기	특성		Chemical		Electrical (+ static)		Physical		Electronic		Mechanical		Computer		Biological (+ toxic)		Human		
	원인	결과	원인	결과	원인	결과	원인	결과	원인	결과	원인	결과	원인	결과	원인	결과	원인	결과	
공급	원인/ 결과 해당사항	원인	결과	원인	결과	원인	결과	원인	결과	원인	결과	원인	결과	원인	결과	원인	결과	원인	결과
	압축		⊙	○		●	●			●	⊙					○			⊙
	액화					⊙	⊙			●									
	정제(흡착)	⊙				⊙	○			●	○								
	여과(필터)					○	○			●	○								
유틸리티	기화				○	⊙				●									
	냉각수, 용수						●			○									
일반/기타	발전, 연료	○	⊙	○		●		⊙		●		⊙							●
	운송	○	●	⊙		⊙				●								●	●
	저장	○	●	⊙		●	●			●	●								●
	인수/하역		●			⊙				●								⊙	●

IV. 결 론

본 연구에서는 가스 설비 및 공정의 잠재위험성을 보다 효과적이고 객관적으로 확인할 수 있도록 잠재위험성 평가기법 선정에 위한 index와 의사 결정과정을 다음과 같이 제시하였다.

첫째, 연구 대상 공정 또는 설비에 대하여 사고 발생의 원인 및 결과의 유형을 분석하고, 분석된 원인 및 결과를 8가지의 특성으로 구분하는 index를 작성하였다.

둘째, 12가지의 잠재위험성 평가기법을 공정 수명의 단계 및 연구 목적에 따라 구분하고, 각 평가기법에 대하여 8가지의 특성으로 분류하여 연구 대상 공정이나 설비에 대한 index와 대입하여 적합한 기법을 선정할 수 있도록 하였다.

셋째, 기법 선정에 영향을 미치는 요소를 통해 사용이 제한되거나 부적합한 기법을 소거할 수 있도록 하는 의사결정 과정을 제시하였다.

또한 기법 선정에 영향을 미치는 요소들의 특성을 확인하고, 연구 목적과 동기를 2가지로 구분하여 사업장에서 보다 쉽게 접근할 수 있도록 하였다. 본 연구를 보다 효과적으로 활용하고, 연구의 신뢰성을 확보하기 위해서는 사업장에서의 연구 결과를 통한 재검토가 요구되며, 객관적인 index 작성을 위해서 관련 경험 및 지식, 정보가 충분히 뒷받침 되어야 한다.

따라서 본 연구에서 제시된 기법 선정과정은 전체의 대상 공정에 대해 일률적으로 한 가지의 기법만을 사용하거나, 적절하지 못한 기법을 사용하여 연구의 본래 목적을 충족시키지 못하는 사업장에게 있어 보다 효과적이고 합리적인 guideline으로 적용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. AIChE/CCPS, Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, 2nd Ed. New York (1992)
2. AIChE/CCPS, Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, 2nd Ed. New York (2000)
3. AIChE/CCPS, Chemical Process Safety, Fundamentals with Applications, 2nd Ed. New York (2002)
4. AIChE/CCPS, Guidelines for Process Equipment Reliability Data, New York (1989)
5. 한국산업안전공단, "공정안전보고서(예시)", 산업안전보건연구원, (2001)
6. 한국가스안전공사, "안전성 향상 계획서 작성요령", (2002)
7. 한국가스안전공사, "장치산업에서의 정량적 위험 평가", 시스템 안전처, (1997)
8. 서재민, "가스 산업시설의 사고 빈도 분석 프로그램 구축", 광운대학교 화학공학과 석사논문, (1998)