

LOPA 및 SIF기법에 의한 LPG 인수기지의 안전성향상에 대한 연구

이일재* · 김래현**†

*한국가스안전공사
369-811 충북 음성군 맹동면 원중로 1390
**서울과학기술대학교 화학생명공학과
139-743 서울 노원구 공릉로 232

(2014년 11월 4일 접수, 2014년 12월 31일 수정본 접수, 2014년 12월 31일 채택)

Safety Enhancement of LPG Terminal by LOPA & SIF Method

Il Jae Lee* and Rae Hyun Kim**†

*Korea Gas Safety Co., Wonjung-ro, Maengdong-myeon, Eumseong-gun, Chungcheongbuk-do 369-811, Korea
**Department of Chemical & Biomolecular Engineering, Seoul National University of Science & Technology,
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

(Received 4 November 2014; Received in revised form 31 December 2014; accepted 31 December 2014)

요 약

본 연구에서는 LPG(Liquefied Petroleum Gas) 인수기지에 대해 HAZOP(Hazard and Operability), LOPA(Layer of Protection Analysis) 및 SIL(Safety Integrity Level) 위험성 평가기법을 적용하여, 국내 LPG 인수기지 중 사고발생시 피해영향이 가장 큰 부탄 및 프로판 저장탱크를 중심으로, 사고위험성을 감소시킬 수 있는 방안을 고찰하였다. HAZOP 기법을 통해 잠재위험성을 분석하여 사고시나리오를 도출하고, 사고피해영향이 큰 시나리오를 선정하여 LOPA를 분석하였다. LOPA 분석시에는 해당시나리오에 대한 IPL(Independent Protection Layer)을 분석하여 완화된 결과의 빈도를 도출한 후, 설정된 위험성 허용기준(1.0×10^{-5} /년)에 대한 충족여부를 판단하였다. LOPA의 독립방호계층으로서 SIF(Safety Instrumented Functions)의 경제성을 분석하여 SIF가 현장의 특성에 맞는 IPL이 되도록 개선안을 제시하였다. 또한, 독립방호계층으로서 해당공정에 사용된 SIF의 수준을 분석해보고, SIF의 수준에 따라 공정의 사고발생빈도가 어느 정도 변화하는지를 당해 공정에서 도출된 사고시나리오를 중심으로 연구하였다.

Abstract – The methods which decrease the accident hazards of LPG(Liquefied Petroleum Gas) terminal on the basis of butane & propane storage tanks by applying HAZOP(Hazard and Operability), LOPA(Layer of Protection Analysis) and SIL(Safety Integrity Level) are suggested. The accident scenarios were derived by analyzing latent risks through the HAZOP. The scenarios which would have the big damage effect in accidents were selected and then LOPA was assessed by analyzing IPL(Independent Protection Layer) about the correspond accident scenarios. The improved methods were proposed on the basis of level of SIF(Safety Instrumented Functions) as a IPL considering satisfied condition of risk tolerance criteria(1.0×10^{-5} /y). In addition, The proposed IPLs were basis on the economic analysis. The effect of SIF as a IPL considering the changes of accident frequency was studied in case of the accident scenarios derived from the concerned process.

Key words: LPG Terminal, HAZOP, LOPA, SIF

1. 서 론

LPG인수기지는 LPG저장 및 수요자로의 공급에 있어서 중요한 역할을 하고 있으며, 특히 세계 9위의 에너지 소비대국이며, 에너지

의 약 96%를 수입에 의존하는 국가인 우리나라의 경우, LPG인수기지의 안전성확보는 매우 중요하다. LPG인수기지는 석유화학시설과 마찬가지로, 사고발생시 대형사고로 전파될 가능성이 매우 높고, 화재, 폭발 등으로 사고가 발전할 경우, 인적·물적 피해는 물론 국민생활과 국가경제에 미치는 악영향이 매우 커 국가의 경쟁력 약화를 초래하게 된다. 영국의 안전보건청인 HSE에서는 산업시설에서 안전 및 시스템고장으로 발생한 공정사고를 조사하였는데, 사고의 주요원인으로는 잘못된 장치사양이 44.1%로 가장 큰 원인을 차지하였고, 시운전 후 시설변경이 20.6%, 잘못된 공정설계와 시행이

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: lhkim@seoultech.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

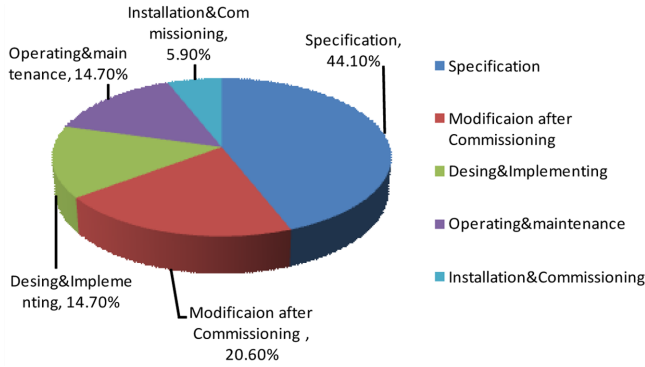


Fig. 1. Incident rates in different phases of plants taken from [1].

14.7%, 운전 및 유지보수미흡이 14.7%, 시공 및 시운전 과정에서 5.9%의 사고원인을 차지하였다[1].

이와 같이 공정상의 사고원인은 다양하며, 잠재된 위험성으로 인해 사고로 발전될 가능성이 항상 존재하기 때문에, 위험성평가기법인 LOPA, SIL기법 등을 적용하여 LPG인수기지의 사고위험성을 감소시킬 수 있는 방안을 연구해보고자 한다.

2. 이론적 고찰

2-1. HAZOP 기법

정성적 위험성평가기법인 HAZOP는 공정에 존재하는 위험요소들과 운전상의 문제점을 알아내고자 이용되는 간단하고 구조적인 분석 방법이다. 이 방법은 설계의도에서 벗어나는 이탈현상을 찾아내고 공정의 위험요소와 운전상의 문제점을 알아내기 위하여 자유로운 토론방식(Brainstorming)을 사용하며, HAZOP 검토결과 기록지는 Table 1과 같다.

분석대상에 대한 HAZOP 수행절차는 다음과 같다

- (가) 분석대상 공정도면(P&ID) 선정
- (나) 분석구간(Study Node) 구분
- (다) 공정변수(Parameter) 선정
- (라) 이탈 현상(Deviation) 선정
- (마) 원인(Cause) 규명
- (바) 결과(Consequence) 예측
- (사) 심각도(Severity) 평가
- (아) 현재의 보완조치(Safeguard) 검토
- (자) 발생가능성(Likelihood) 평가
- (차) 위험등급(Risk Rank) 결정
- (파) 개선 및 권고사항(Recommendation) 제시
- (하) 모든 이탈 현상에 대해 (마)~(파) 과정 반복
- (가) 모든 공정변수에 대해 (라)~(하) 과정 반복

Table 1. HAZOP Work Sheet taken from [2]

Unit No :		Date :	
DWG No :		Design Intent :	
Node :			
Deviation	Cause	Consequence	
	Safety Guards	Risk Rank	Recommndation

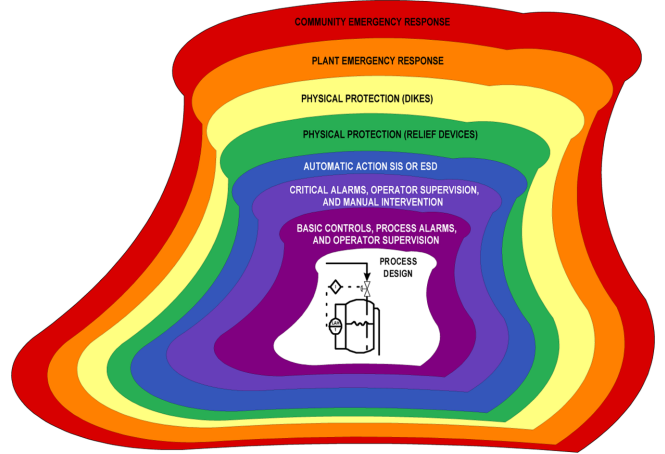


Fig. 2. Concept of LOPA taken from [3].

- (나) 모든 분석구간에 대해 (다)~(가) 과정 반복
- (다) 모든 분석대상 공정도면에 대해 (나)~(나) 과정 반복

2-2. LOPA 기법

방호계층분석(LOPA)은 어떤 사고 시나리오에 대하여 안전조치를 독립적인 여러 개의 층(Layer)으로 구분하고 각 방호계층(Protection Layer)의 실패확률로부터 이 사고 시나리오의 발생확률을 정량적으로 계산하는 방법이다.

LOPA는 보통 어떠한 사고 시나리오의 위험성을 정량화하기 위하여 개시사건빈도(Initiating Event Frequency)의 크기, 사고결과 심각성(Severity) 및 독립방호계층(IPL) 등을 이용한다. LOPA의 주요 목적은 어떠한 사고 시나리오에 대하여 충분한 방호계층이 있는지를 결정하기 위함이다. LOPA는 어떠한 사고 시나리오에 대하여 사고 위험을 제어하기 위하여 충분한 IPL이 있는지를 판단하기 위한 기본 자료를 제공한다. 어떠한 시나리오에 대하여 계산된 위험이 허용할 수 없는 수준일 경우, 다른 IPL을 추가한다.

LOPA 수행절차는 다음과 같다.

- (가) 1단계 : 시나리오 분석을 위한 사고결과 확인
- (나) 2단계 : 사고 시나리오 선택
- (다) 3단계 : 시나리오의 개시사건(Initiating Event) 규명 및 빈도 (회/연간) 결정
- (라) 4단계 : IPL 규명 및 각 IPL에 대한 요구시 실패 확률(PFD; Probability of Failure on Demand) 산정
- (마) 5단계 : 개시사건, IPL 데이터 및 피해결과를 수학적으로 조합하여 시나리오의 위험성 산정

$$f_i^C = f_i^I \times \prod_{j=1}^J PFD_{ij}$$

$$f_i^C = f_i^I \times PFD_{i1} \times PFD_{i2} \times \dots \times PFD_{ij}$$

f_i^C = 사고시나리오 i에 해당하는 사고가 일어날 확률

f_i^I = 사고시나리오 i에 해당하는 사고가 일어날 개시사건의 확률

PFD_{ij} = 사고시나리오 i가 발생하는 것을 막기 위한 IPL의 PFD

(바) 6단계 : 시나리오의 위험성 결정

2-3. SIL기법

SIS(Safety Instrumented System)는 아무런 조치를 취하지 않으면 위

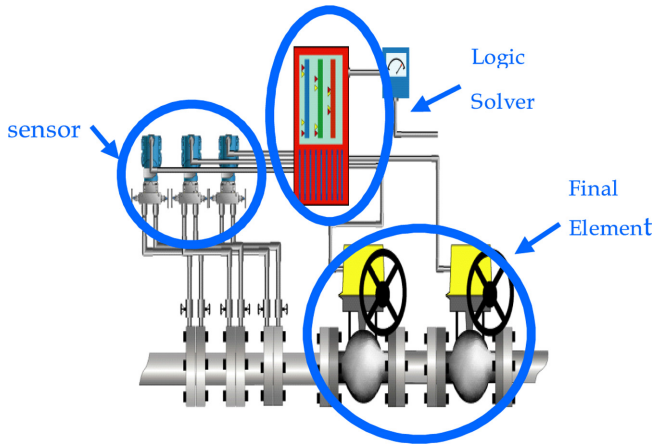


Fig. 3. Examples of SIS elements taken from [4].

SIL	PFD	1/PFD
Safety Integrity Level	Probability of failure on demand per year (Demand mode of operation)	Risk Reduction Factor
SIL 4	$\geq 10^{-5}$ to $< 10^{-4}$	100000 to 10000
SIL 3	$\geq 10^{-4}$ to $< 10^{-3}$	10000 to 1000
SIL 2	$\geq 10^{-3}$ to $< 10^{-2}$	1000 to 100
SIL 1	$\geq 10^{-2}$ to $< 10^{-1}$	100 to 10

Fig. 4. Safety Integrity Level taken from [4].

험이 증가하는 공장 내의 위험을 예방하거나 위험스러운 사고를 완화시키기 위한 조치를 수행하는 시스템이다. SIS는 Sensor, Logic Solver, Final Element, 세 가지 요소의 조합으로 구성되며 일반적으로 Instrument Loop로 알려진 SIF를 하나 또는 그 이상을 수행하는데 사용된다.

SIL은 일정 기간 내에 SIS가 요구되어진 SIF를 만족스럽게 수행할 확률의 등급을 말한다.

SIL이 높을수록 요구되어진 SIF를 잘 수행할 확률이 더 높아지며 이용 가능성(Availability) 과 시스템의 구성의 요구 사항이 증가한다.

SIF로 구성된 SIS의 PFD값을 산정하기 위해서는 Sensor, Logic Solver, Final element로 구성된 SIF의 평균적인 PFD값을 알아야 하며, 다음과 같이 각 구성요소의 PFD값으로 구할 수 있다.

$$PFD_{AVG} = \sum PFD_{SE} + \sum PFD_{LS} + \sum PFD_{FE}$$

PFD_{AVG} = Average PFD of SIF

PFD_{SE} = PFD of Sensor

PFD_{LS} = PFD of Logic Solver

PFD_{FE} = PFD of Final Element

3. 사례연구

3-1. 분석공정의 선정

3-1-1. 프로판(Propane) 공정

액화 프로판은 냉동 원양선으로 전용부두를 통하여 수입된다. 주요 입하설비는 프로판 UNLOADING ARM, JETTY BOOSTING PUMP, 프로판 BOOSTING PUMP, 프로판 히터 등으로 구성된다.

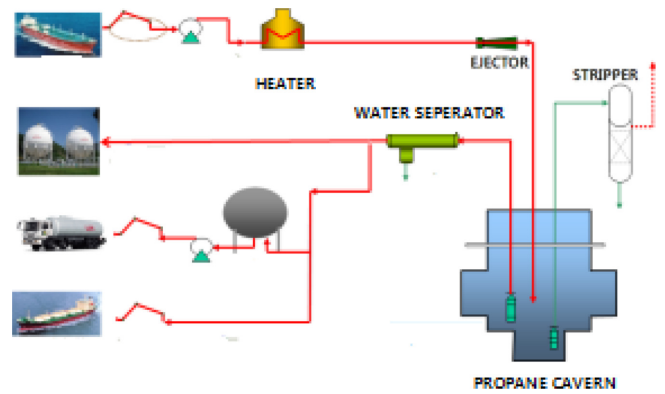


Fig. 5. Schematic diagram of Propane process taken from [5].

프로판 암반저장소는 지하 심층암반에 굴착된 동굴에 프로판을 저장한다. 완공 후 동굴 입구는 콘크리트로 밀폐되고 물을 채워 봉인하게 된다.

프로판 암반저장조에 저장된 액화 프로판은 펌프에 의해 이송되어 수분분리기에서 수분이 제거된 후 프로판저장탱크(T-6201B)로 이송되어 탱크로리 출하되거나 연안선 출하를 위하여 부두로 이송된다.

3-1-2. 부탄(Butane) 공정

액화 부탄은 원양선 PUMP에 의해 프로판 출하와 공용인 UNLOADING ARM에 의해 부탄 냉동탱크(T-4001A/B/C)로 입하된다. 부탄냉동탱크로부터 기화되는 부탄은 간접 냉동방식의 프로판 냉동기에 의해 액화되어 저장조로 회수된다.

부탄냉동탱크로부터 발생하는 BOIL-OFF GAS를 액화시켜 회수하기 위한 설비로서 냉매로는 프로판이 사용된다.

부탄냉동 패키지(PACKAGE)에는 REFRIGERATION COMPRESSOR, REFRIGERANT RECEIVER, REFRIGERANT CONDENSER 및 BUTANE CONDENSER/REFRIGERANT EVAPORATOR 등이 포함된다. 부탄 냉동탱크(T-4001A/B/C)에 저장된 액화부탄은 펌프에 의해 이송되어 부탄구형저장탱크(T-6201A)에 저장하거나 부탄로딩펌프의 후단에 연결하여 트럭 로딩 및 연안선으로도 출하할 수 있도록 설계되어 있다.

3-2. HAZOP의 수행

연구를 위하여, 선정된 공정에 대한 잠재적인 위험성을 파악하기

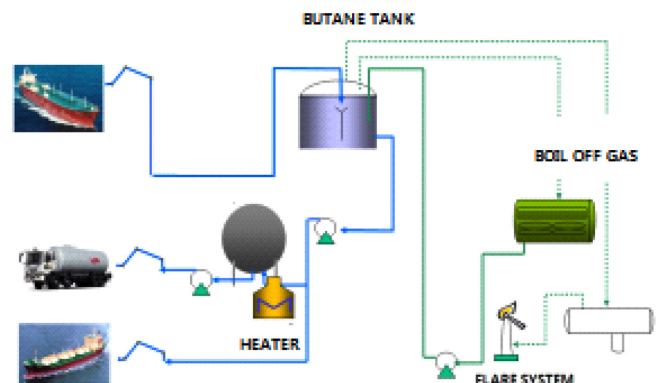


Fig. 6. Schematic diagram of Butane process taken from [5].

위해 사고발생시 피해영향이 큰 저장탱크를 중심으로 HAZOP을 실시하고, LOPA 분석을 위한 사고 시나리오를 도출하였다.

3-2-1. 부탄냉동저장탱크의 HAZOP 분석

지상에 설치된 냉동부탄저장탱크(T-4001A/B/C)를 손상시킬 수 있는 과압 및 부압발생 가능성을 검토하기 위하여 저장탱크를 중심으로 5개의 검토구간(NODE)을 구분하여 HAZOP를 분석하였으며, 총 20개 저장탱크의 과압 및 진공발생 가능시나리오를 도출하였다.

3-2-2. 출하용 부탄 및 프로판 구형저장탱크의 HAZOP 분석

지상에 설치된 출하용 부탄구형저장탱크(T-6201A) 및 프로판 구형저장탱크(T-6201B)를 손상시킬 수 있는 과압 및 진공발생 가능성을 검토하기 위하여 저장탱크를 중심으로 각 3개씩의 검토구간(NODE)을 구분하여 HAZOP를 분석하였으며, 부탄탱크 8개, 프로판탱크 9개의 가능시나리오를 도출하였다.

부탄냉동저장탱크(T-4001), 부탄 구형저장탱크(T-6201A) 및 프로판 구형저장탱크(T-6201B)에 대해서는 공정이탈현상을 다음 Table 2와 같이 분석하였다.

다음 Table 3은 수행했던 HAZOP 분석결과에 대한 예시를 보였다.

3-3. LOPA 및 SIL분석을 위해 활용된 Failure Data

LOPA 및 SIL분석을 위해 활용된 빈도(Frequency)값에 대한 기본정보는 CCPS(Center for Chemical Process Safety)의 Layer of Protection Analysis에서 제공되는 자료를 활용하였으며, IPL 중 SIS에 대한 빈도 값은 OREDA (Offshore Reliability Data), CCPS의 Guidelines for process equipment reliability databook 등을 참고하였다[9-11].

Table 2. Summary of HAZOP Scenario

	Deviation	HAZOP Scenario	LOPA Scenario
T-4001	High Flow	Butane Refrigeration Tank -20 Scenarios	-Even though different deviation in Hazop scenario, in case that cause and consequence of scenario is same, LOPA scenarios are selected by considering only one deviation.
	Low Level		
	High Level		
	Low Pressure		
	High Pressure		
External Fire			
T-6201A/B	High Flow	Butane Tank (T-6201A) - 8 Scenarios	· T-4001: 15 · T-6201A:5 · T-6201B: 6
	Low Level		
	High Level		
	Low Pressure		
	High Pressure		
High Temperature	Propane Tank (T-6201B) - 9 Scenarios		
External Fire			

Table 3. HAZOP work sheet

Deviation	Cause	consequence	Safety Guard
High Level	PV-4003 Full open by malfunction	Because Feed flow increase, T-4001A Butane tank Level increase & pressure increase	ESV-4002A
			PV-4001
Low Level	Butane Liquid excess shipment by P-4101A	while butane is unloading, vacuum of butane tank (T-4001A) and potential for tank rupture leakage	PSV-4001A~E
			PAHH-4004A
			LAHH-4003A
			& compressor stop by PALL-4010
			PC-4002A

3-4. LOPA 및 SIF의 수행

먼저, 부탄냉동저장탱크인 T-4001A에 대해서는 총 20개의 HAZOP 시나리오 중 15개를 선정하여 LOPA를 분석하였으며, 부탄구형저장탱크(T-6201A)에 대해서는 총 8개의 HAZOP 시나리오 중 5개를 선정하여 LOPA를 분석하였다. 또한, 프로판 구형저장탱크(T-6201B)에 대해서는 총 9개의 시나리오 중 6개를 선정하여 LOPA를 분석하였다.

본 연구에서는 LOPA의 독립방호계층(IPL) 중 위험물의 외부누출로 인한 사고발생 후 사고결과를 완화시키는 완화적 독립방호계층(Mitigation IPL)인 방류독, 플랜트 비상대응 등은 고려하지 않고, 사고예방에 중점을 둔 예방적 독립방호계층(Prevent IPL)인 BPCS(Basic Process Control System), 운전자 개입(Operator Intervention), SIS 등에 중점을 두고 LOPA분석을 수행하였다.

분석결과, 부탄냉동저장탱크인 T-4001A에 대해서는 총 15개의 LOPA 시나리오 중 1개가 위험허용기준(Risk Tolerance Criteria)를 벗어났으며, 부탄구형저장탱크(T-6201A)에 대해서는 총 5개의 LOPA 시나리오 중 2개가 위험허용기준을 벗어났다. 또한, 프로판 구형저장탱크(T-6201B)에 대해서도 총 6개의 LOPA 시나리오 중 2개가 위험허용기준을 벗어났고, 이를 바탕으로 위험감소(Risk Reduction)대책을 검토하였다.

다음 Table 4는 수행했던 LOPA에 대한 예시를 보였다.

LOPA의 IPL로서 적용된 SIF의 PFD(Probability of Failure on Demand)값에 대해서는 다음 그림과 같이 FTA(Fault Tree Analysis)를 이용하여 분석하였다.

Table 4. LOPA spreadsheet of Incident Scenario No.2 for T-4001A

Scenario No. 2.	Scenario Title: Level increase of butane tank(T-4001A) by PV-4003 malfunction	Node No.1
Date	Description	Probability
Consequence Description/ Category		Frequency (per year)
	Level increase of Butane tank(T-4001A) due to feed increase, and potential for tank overpressure, leakage, rupture	
Risk Tolerance Criteria (Frequency)	Action required Tolerable	$\leq 1.0 \times 10^{-05}$
Initiating Event	PV-4003 full open by malfunction	1.0×10^{-01}
Frequency of Unmitigated Consequence		1.0×10^{-01}
Independent Protection Layers	PV-4001 (BPCS)	1.0×10^{-01}
	PAHH-4004A	1.0×10^{-01}
	ESV-4002A (SIF)	2.60×10^{-02}
	C-4303 (SIF)	5.76×10^{-02}
	C-4301A/B (SIF)	1.08×10^{-02}
	PSV-4001A~E	1.0×10^{-02}
Total PFD for all IPLs		1.62×10^{-09}
Frequency of Mitigated Consequence (per year)		1.62×10^{-10}
Risk Tolerance Criteria Met?		YES

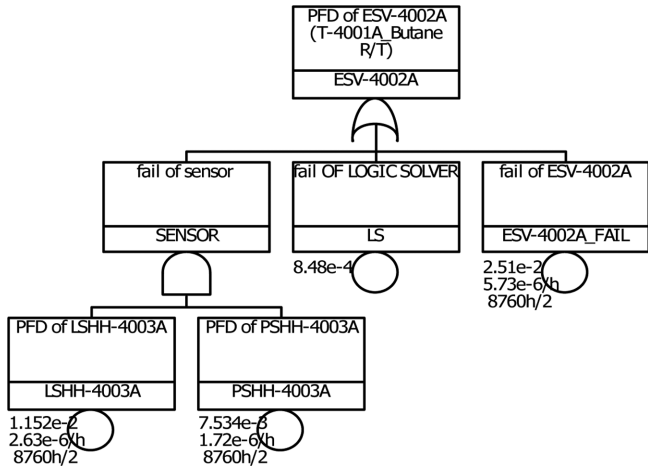


Fig. 7. Probability of Failure on Demand of Safety Instrumented Functions.

3-5. 위험감소대책을 위한 IPL의 효과 및 경제성분석

본 연구에서는 연구대상 공정의 LOPA에 활용된 독립방호계층(IPL) 중 완화된 사고결과의 빈도(Frequency of Mitigated Consequence)가 위험허용기준(Risk Tolerance Criteria) 조건을 만족시키지 못한 경우에 수행한 위험감소 대책을 위한 IPL의 효과 및 경제성을 상호 비교분석함으로써 경제적인 IPL을 제시하고자 하였다.

냉동부탄저장탱크인 TA-4001A/B/C의 경우, 사고시나리오에 따라, 저압발생으로 인한 저장탱크의 손상 발생가능성을 예방하기 위한 IPL을 검토하였는데, IPL 중 하나인 SIF의 인터록 루프(Interlock Loop)중 한 개가 센서가 단독 설치되어 센서 고장 시 해당 인터록 루프 전체가 사용불가능하게 되는 문제점이 발견되었다. 특히, 당해 인터록 루프에는 Final Element로서 압축기, 펌프, 압력경보기 등이 연결되어 있어 인터록에 문제 발생 시 공정사고와 연계될 수 있는 가능성이 크다. 또한 저장탱크의 저압발생에 따른 압력경보장치가 해당 인터록 루프에서만 작동하게 설계되어 있어서, 이와는 별도의 압력전송기(Pressure Transmitter)와 연계된 압력 경보장치를 설치해야 하는 것으로 분석되었다.

위험감소를 위한 추가 IPL검토결과, 별도의 압력전송기(Pressure Transmitter)와 연계된 저압경보장치를 추가할 경우(방법 1)와 인터록 루프의 단독 센서를 2 out of 3 시스템에 따라 복수의 센서로 설치한

Table 5. Risk Reduction of Incident Scenario 14 for T-4001A/B/C

Sector	Before Risk Reduction	After Risk Reduction (CASE 1)	After Risk Reduction (CASE 2)
Risk Tolerance Criteria	$\leq 1 \times 10^{-5}$	$\leq 1 \times 10^{-5}$	$\leq 1 \times 10^{-5}$
Initiating Event	1.0×10^{-1}	1.0×10^{-1}	1.0×10^{-1}
PC-4002A	1.0×10^{-1}	1.0×10^{-1}	1.0×10^{-1}
VRV-4001A/B	1.0×10^{-2}	1.0×10^{-2}	1.0×10^{-2}
IPL PAL (New)		1.0×10^{-1}	
Interlock System (SIF)-PT-A/B/C	No Active	N/A	8.48×10^{-4}
Total PFD for all IPLs (A)	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-5}	8.48×10^{-7}
Frequency of Mitigated Consequence (B)	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-6}	8.48×10^{-8}
Risk Tolerance Criteria Met?	NO	YES	YES

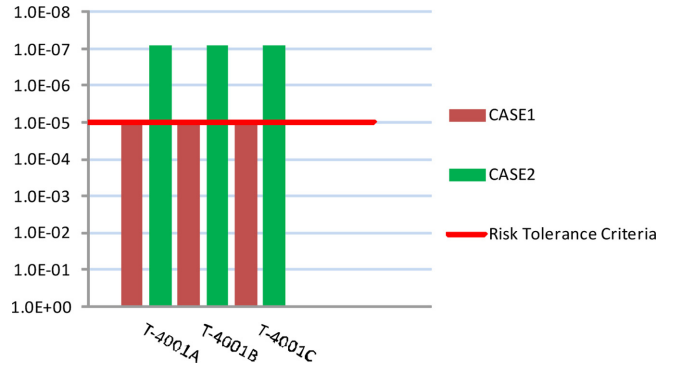


Fig. 8. Risk Reduction of Incident Scenario for T-4001A/B/C.

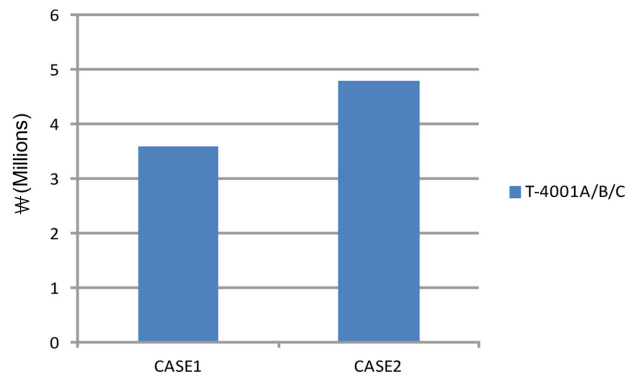


Fig. 9. Risk Reduction Cost Review of Scenario for T-4001A/B/C.

경우(방법 2), 2가지 모두가 완화된 사고결과의 빈도(Frequency of Mitigated Consequence)값이 위험허용기준(Risk Tolerance Criteria) 조건을 충족시킨 것으로 나타나서 2가지 방법 모두 활용 가능하다

반면, 2가지 방법에 대한 경제성을 분석해보면, Fig. 9에서와 같이 인터록시스템의 센서를 복수화하는 (방법2)가 (방법1)보다 비용 측면에서 약간 비싼지만, 효과측면에서는 IPL의 PFD값이 8.48×10^{-4} /y로서 1.0×10^{-2} /y보다 매우 개선효과가 높고 인터록시스템의 신뢰도를 대폭 향상시킬 수 있다는 측면에서 볼 때 (방법2)를 적용할 것을 제안한다.

상기제안에 따라 위험감소 대책을 수행한 결과를 Fig. 10에 적색으로 표시하였다.

두 번째로, 부탄구형저장탱크인 T-6201A의 경우, 사고시나리오에 따라, 이송펌프에 의한 부탄의 과잉출하로 인해 저장 탱크의 액위 감소 및 부압발생으로 최악의 경우 저장탱크의 손상 발생가능성을 예방하기 위한 IPL을 검토하였는데, 완화된 사고결과의 빈도(Frequency of Mitigated Consequence)값이 위험허용수준(Risk Tolerance Criteria) 조건을 충족하기 위한 방법에는 기존의 인터록 루프를 보완하여 현재 한 개만 설치된 액위 센서에 액위 트랜스미터 및 저 액위 경보기(Low Level Alarm)를 추가설치하고 Final Element인 긴급차단밸브 및 펌프의 테스트 주기를 1년에서 6개월로 단축하는 방법을 고려하여 IPL인 SIF의 수준을 향상시키는 방법이 있다 (방법 1).

다른 방법으로는 기존의 인터록 루프를 보완하여 현재 한 개만 설치된 액위 센서에 액위 트랜스미터 및 저 액위 경보기를 추가설치하고 출하를 긴급차단하기 위한 긴급차단밸브를 추가 설치함으로

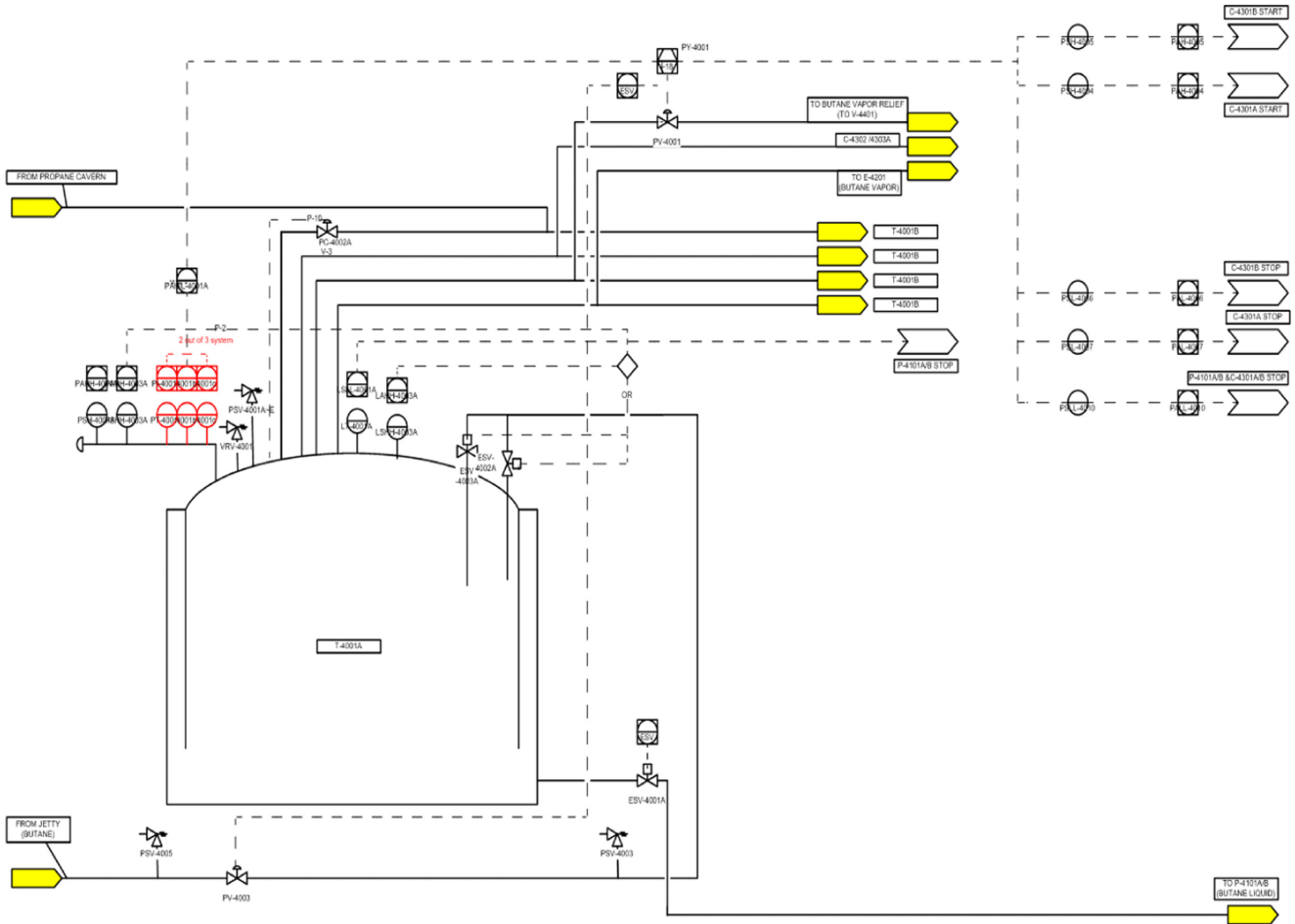


Fig. 10. Risk Reduction DWG. of Incident Scenario for T-4001A/B/C.

Table 6. Risk Reduction of Incident Scenario 2&4 for T-6201A

Sector	Before Risk Reduction	After Risk Reduction (CASE 1)	After Risk Reduction (CASE 2)
Risk Tolerance Criteria	$\leq 1 \times 10^{-05}$	$\leq 1 \times 10^{-05}$	$\leq 1 \times 10^{-05}$
Initiating Event	1.0×10^{-01}	1.0×10^{-01}	1.0×10^{-01}
LAL-6201B	1.0×10^{-01}	1.0×10^{-01}	1.0×10^{-01}
LAL-6203		1.0×10^{-01}	1.0×10^{-01}
	1.4×10^{-02}		
IPL			
Add			
-LT			
Interlock			
-Test		3.6×10^{-03}	
System (SIF) Period			
Add			
-LT			1.1×10^{-03}
-ESV			
Total PFD for all IPLs	1.4×10^{-03}	3.6×10^{-05}	1.1×10^{-05}
Frequency of Mitigated Consequence	1.4×10^{-04}	3.6×10^{-06}	1.1×10^{-06}
Risk Tolerance Criteria Met?	NO	YES	YES

써 SIF인 인터록 시스템의 신뢰도를 높여 완화된 사고결과의 빈도 (Frequency of Mitigated Consequence)가 위험허용수준(Risk Tolerance Criteria) 조건을 충족시키도록 하는 방법도 있다(방법 2).

이 두 가지 방법에 대한 효과 및 경제성을 분석해보면, 먼저 효과

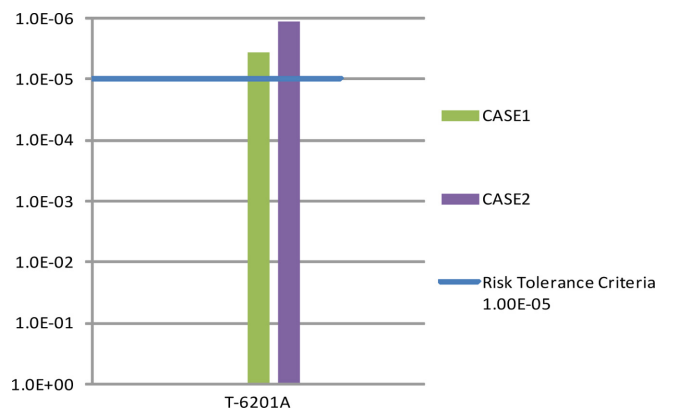


Fig. 11. Risk Reduction of Incident Scenario for T-6201A.

적인 측면에서, (방법1)과 (방법2)에 대한 완화된 사고결과의 빈도 (Frequency of Mitigated Consequence)값을 비교하여 볼 때, Final Element인 긴급차단밸브 및 펌프의 테스트 주기를 1년에서 6개월로 단축하는 방법을 고려하는(방법1) 보다는 긴급차단밸브를 추가 설치하는 (방법2)이 인터록 시스템의 신뢰도를 좀더 높이는 방법이라는 것을 알 수 있다.

다음으로 경제적인 측면에서 두 가지 방법을 비교하여 볼 때, (방법1)이 (방법2)보다는 효과 대비 훨씬 경제성이 뛰어남을 알 수 있다.

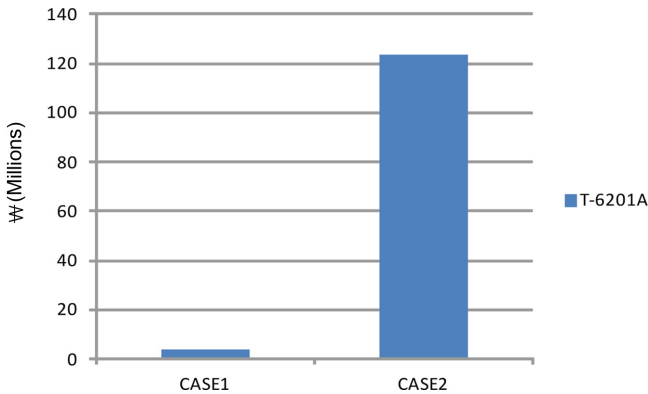


Fig. 12. Risk Reduction Cost Review of Scenario for T-6201A.

위 분석결과를 바탕으로 부탄구형저장탱크인 T-6201A의 경우, 효과대비 비용이 절감되는 (방법1)의 경우를 선택하는 것이 보다 적절할 것으로 판단된다.

상기제안에 따라 위험감소 대책을 수행한 결과를 Fig. 13에 적색으로 표시하였다.

세 번째로, 프로판 구형저장탱크인 T-6201B의 경우, 사고시나리오에 따라, 부탄 구형저장탱크와 마찬가지로 이송펌프에 의한 프로판의 과잉출하로 인해 저장 탱크의 액위 감소 및 부압발생으로 최악의 경우 저장탱크의 손상 발생가능성을 예방하기 위한 IPL을 검토하였는데, 완화된 사고결과의 빈도(Frequency of Mitigated Consequence) 값이 위험허용수준(Risk Tolerance Criteria) 조건을 충족하기 위한

Table 7. Risk Reduction of Incident Scenario 2&4 for T-6201B

Sector	Before Risk Reduction	After Risk Reduction (CASE 1)	After Risk Reduction (CASE 2)
Risk Tolerance Criteria	$\leq 1 \times 10^{-05}$	$\leq 1 \times 10^{-05}$	$\leq 1 \times 10^{-05}$
Initiating Event	1.0×10^{-01}	1.0×10^{-01}	1.0×10^{-01}
LAL-6202B	1.0×10^{-01}	1.0×10^{-01}	1.0×10^{-01}
LAL-6204		1.0×10^{-01}	1.0×10^{-01}
		1.4×10^{-02}	
IPL Interlock System (SIF)		3.6×10^{-03}	
Add -LT -Test Period			1.1×10^{-03}
Add -LT -ESV			1.1×10^{-05}
Total PFD for all IPLs	1.4×10^{-03}	3.6×10^{-05}	1.1×10^{-05}
Frequency of Mitigated Consequence	1.4×10^{-04}	3.6×10^{-6}	1.1×10^{-06}
Risk Tolerance Criteria Met?	NO	YES	YES

방법에는 기존의 인터록 루프를 보완하여 현재 한 개만 설치된 액위 센서에 액위 트랜스미터 및 저 액위 경보기(Low Level Alarm)를 추가설치하고 Final Element인 긴급차단밸브 및 펌프의 테스트 주기를 1년에서 6개월로 단축하는 방법을 고려하여 IPL인 SIF의 수준을 향상시키는 방법이 있다(방법 1).

다른 방법으로는 기존의 인터록 루프를 보완하여 현재 한 개만 설치된 액위 센서에 액위 트랜스미터 및 저 액위 경보기를 추가설

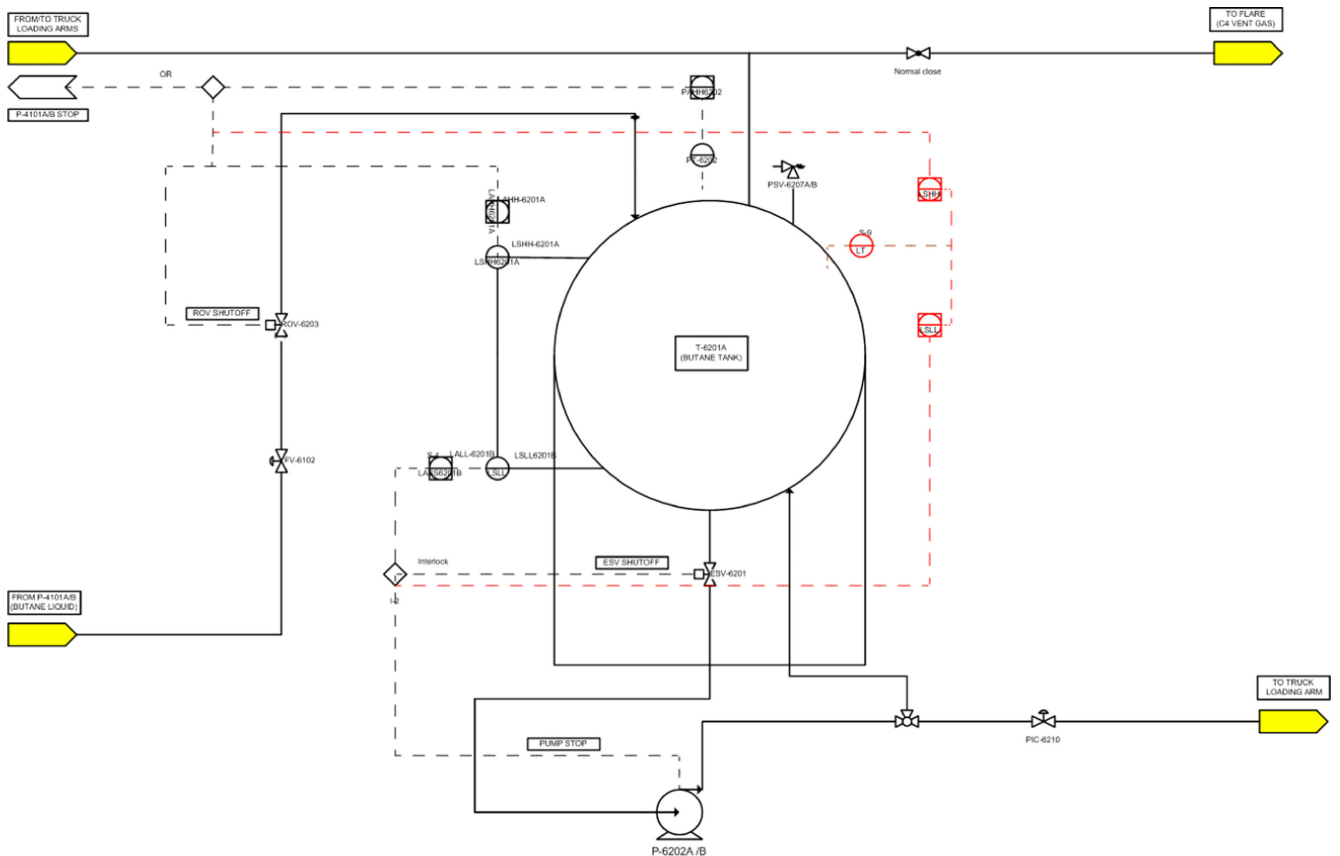


Fig. 13. Risk Reduction DWG. of Incident Scenario for T-6201A.

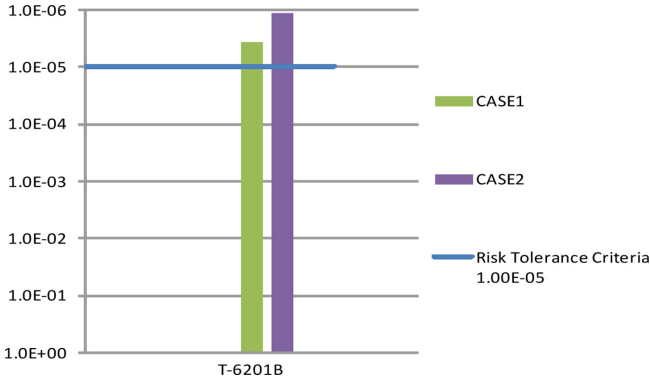


Fig. 14. Risk Reduction of Incident Scenario for T-6201B.

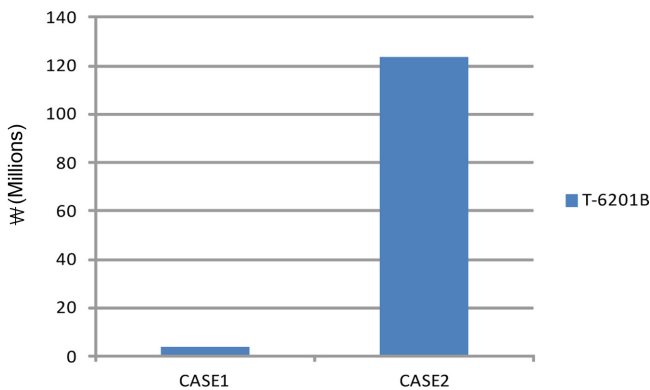


Fig. 15. Risk Reduction Cost Review of Scenario for T-6201B.

치하고 출하를 긴급차단하기 위한 긴급차단밸브를 추가 설치함으로써 SIF인 인터록 시스템의 신뢰도를 높여 완화된 사고결과의 빈도 (Frequency of Mitigated Consequence)가 위험허용수준(Risk Tolerance Criteria) 조건을 충족시키도록 하는 방법도 있다(방법 2).

이 두 가지 방법에 대한 효과 및 경제성을 분석해보면, 먼저 효과적인 측면에서, (방법1)과 (방법2)에 대한 완화된 사고결과의 빈도 (Frequency of Mitigated Consequence)값을 비교하여 볼 때, Final Element인 긴급차단밸브 및 펌프의 테스트 주기를 1년에서 6개월로 단축하는 방법을 고려하는(방법1) 보다는 긴급차단밸브를 추가 설치하는 (방법2)이 인터록 시스템의 신뢰도를 좀더 높이는 방법이라는 것을 알 수 있다.

다음으로 경제적인 측면에서 두 가지 방법을 비교하여 볼 때, (방법1)이 (방법2)보다는 효과 대비 훨씬 경제성이 뛰어난 것을 알 수 있다.

위 분석결과를 바탕으로 구형저장탱크인 T-6201B의 경우, 효과 대비 비용이 절감되는 (방법1)의 경우를 선택하는 것이 보다 적절할 것으로 판단된다.

상기제안에 따라 위험감소 대책을 수행한 결과를 Fig. 16에 적색으로 표시하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 LPG인수기지 중 시범공정을 선정, LOPA를 분석하였으며, LOPA 분석결과와 완화된 사고결과의 빈도(Frequency of Mitigated Consequence)가 위험허용수준(Risk Tolerance Criteria) 조건($\leq 1.0 \times 10^{-5}/y$)을 충족시키지 못하는 시나리오에 대해서는 독립 방호계층인 IPL의 효과 및 경제성을 분석하여 위험허용수준(Risk

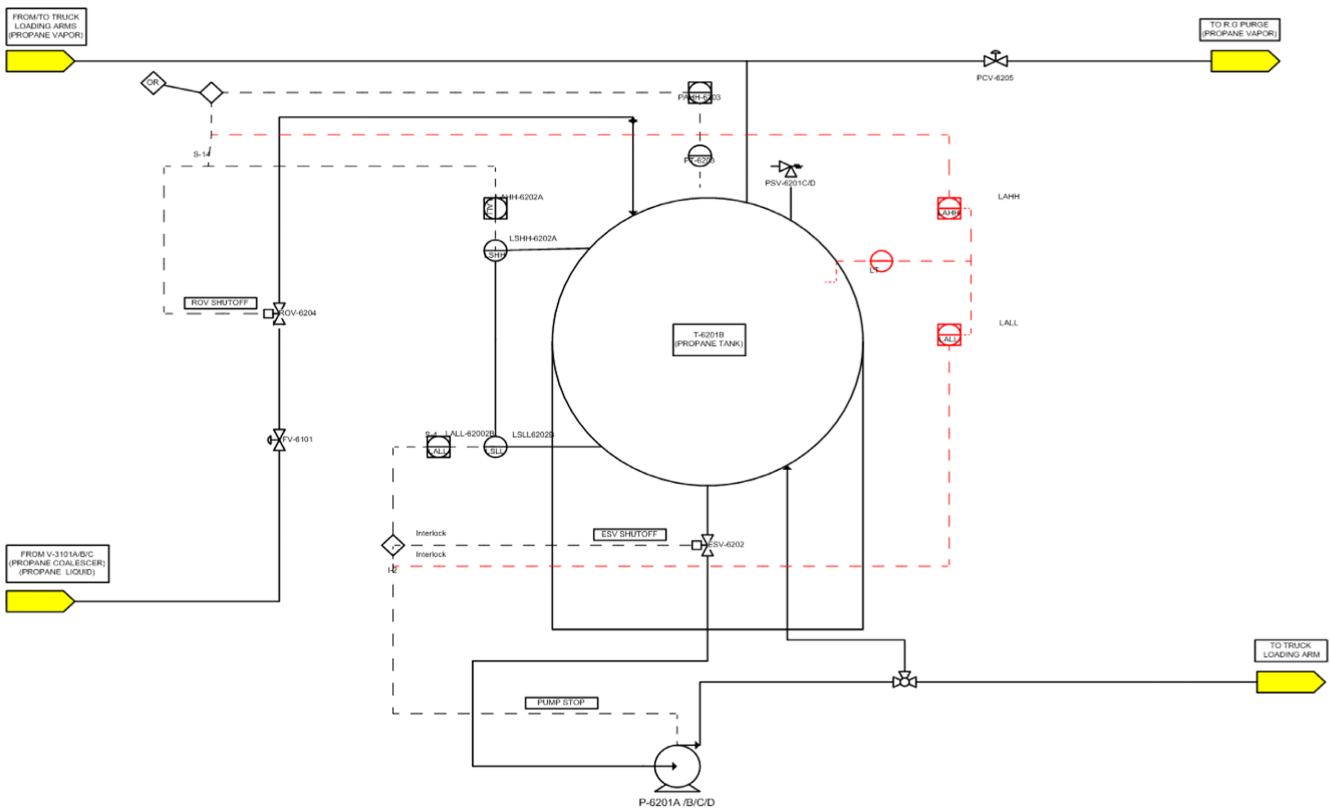


Fig. 16. Risk Reduction DWG of Incident Scenario for T-6201B.

Tolerance Criteria) 조건을 충족시키는 IPL을 SIF의 수준을 분석하여 제시하였으며, 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

부탄냉동저장탱크인 TA-4001의 경우, SIF인 Interlock 시스템의 Sensor가 단독으로 설치되어 있어, 고장발생시 Interlock 시스템이 정상작동하지 못하여, Final Element인 Pump(P-4101) 및 압축기(C-4301) 등의 긴급가동정지가 이루어질 수 없는 상황으로 전개될 수 있는 문제점의 위험감소(Risk Reduction) 대책으로서, 단독으로 설치된 Sensor를 2 out of 3 시스템으로 구성하여 Sensor의 신뢰도를 높임으로써 완화된 사고결과의 빈도(Frequency of Mitigated Consequence)가 위험성 허용기준(Risk Tolerance Criteria) 조건을 충족시키도록 할 수 있었다.

구형 부탄/프로판 저장탱크인 TA-6201A/B의 경우, 이송펌프에 의한 제품의 과잉출하로 인해 저장탱크의 액위 감소 및 부압발생으로 최악의 경우 저장탱크의 손상을 초래할 수 있는 문제점의 위험감소(Risk Reduction) 대책으로서, 기존의 Level Switch에 의해 단독으로 구성된 Interlock 시스템(SIF)을 보완하여, 구성요소 중 Level Transmitter 및 출하를 긴급차단하기 위한 저액위 경보 시스템을 추가설치하고, Final Element인 Emergency Shutoff Valve 및 Pump의 테스트 주기를 1년에서 6개월로 단축하는 방법을 고려함으로써 SIF의 신뢰도를 높여 완화된 사고결과의 빈도(Mitigated Consequence)가 위험성 허용기준(Risk Tolerance Criteria) 조건을 충족시키도록 할 수 있었다.

본 연구결과를 통하여, SIF의 SIL수준을 높이는 방법에는 Sensor, Logic Solver, Final Element의 구성방법 등에 따라 다양하며, SIS의 테스트 주기를 낮추는 것도 SIL수준을 높이는 방법이라는 것을 알 수 있었다. 다만, 높은 SIL등급의 SIF를 구성할수록 많은 비용이 요구되므로 LOPA의 완화된 사고결과의 빈도(Frequency of Mitigated Consequence)분석을 통해 위험허용기준(Risk Tolerance Criteria)을 만족시키는 조건 내에서 공정에 적절한 SIF의 구성이 요구된다.

· 또한, LOPA 분석시, SIF를 포함한 다양한 독립방호계층(IPL)의 효과를 알 수 있었고, 완화된 사고결과의 빈도(Frequency of Mitigated Consequence)가 위험허용기준(Risk Tolerance Criteria) 조건을 충족시키지 못하는 경우에는 현장에 적용된 SIF 등 IPL의 효과 및 경제성 분석을 통하여 현장에 보다 적합한 IPL을 제시하여 위험허용기준(Risk Tolerance Criteria) 조건을 충족하게 함으로써 SIF가 공정 내의 잠재위험을 효과적으로 감소시킬 수 있는 방법임을 알 수 있었다. 따라서, 국내 다른 플랜트에도 많은 이러한 문제점이 잠재할

수 있으므로 본 기법을 활용한다면, 플랜트의 위험성을 낮추는데 큰 도움이 될 것이다.

References

1. Kim, J. H., "Safety Enhancement of Chemical Process using SIL Method," M. S. (2010).
2. Center for Chemical Process Safety, CCPS, "Guidelines for Hazard Evaluation Process," NewYork, 1-380(1989).
3. Center for Chemical Process Safety, CCPS, "Layer of Protection Analysis," NewYork, 1-258(2001).
4. International Electrotechnical Commission, IEC, "Functional Safety Instrumented Systems for the Process Industry," IEC61508(2003).
5. "A" Company, "Technical Data for LPG Terminal Operation," (2013).
6. Instrumentation & Systems and Automation Society, SA "Safety Integrity Level Selection," North Carolina, 1-244(2002).
7. Dowell, A. M., "Layer of Protection Analysis and Inherently Safer Process," 1-220(1999).
8. Instrumentation & Systems and Automation Society, ISA, "Application of Safety Instrumented Systems for the Process Industries," ANSI/ISA-84.02, North Carolina(1996).
9. Center for Chemical Process Safety, CCPS, "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis," NewYork, 267-276(2000).
10. Crowl & Louvar, "Chemical Process Safety-Fundamentals with Applications," Prentice Hall PTR, NJ, 448-454(2002).
11. SINTEF Industrial Management, "OREDA: Offshore Reliability Data," Trondheim, Norway(2002).
12. Center for Chemical Process Safety, CCPS "Guidelines for Process Equipment Reliability Data," NewYork(1989).
13. Reliability Information Analysis Center, RICA "Nonelectronic Parts Reliability Data," (1996).
14. ABS Consulting, PSI, "Layer of Protection Analysis," TN(2003).
15. Roodbol, H. G., "Risk Analysis of Six Potentially Hazardous Industrial Object in the Rijnmond Area, A Pilot Study," (1982).
16. Marszal, E. M., Fuller, B. A. and Shah, J. N., "Comparison of Safety Integrity Level Selection Methods and Utilization of Risk Based Approaches," *Process Safety Progress*, **18**(4), 189-194(1999).
17. Chae, D. J., "Paradigm of Domestic Gas Development," M.S. (2003).