

# 고압가스 사용시설 내 안전밸브 설치유형별 리스크 분석

김명철 · 우정재 · 이형섭 · 백중배<sup>†</sup>

한국교통대학교 안전공학과

(2017. 3. 16. 접수 / 2017. 6. 6. 수정 / 2017. 8. 19. 채택)

## Risk Analysis for Installation Types of Pressure Safety Valve used in the High-pressure Gas Facility

Myung-Chul Kim · Jeong-Jae Woo · Hyung-Sub Lee · Jong-Bae Baek<sup>†</sup>

Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation

(Received March 16, 2017 / Revised June 6, 2017 / Accepted August 19, 2017)

**Abstract :** This study investigated the probability of possible accident through qualitative and quantitative analysis of the pressure safety valve types installed in facilities using high pressure gas to compare the installation domestic and foreign pressure safety valve standards sought the safety characteristics and safety improvement direction accordingly. The three types are the case where the shut-off valve is not installed at the front of the PSV (Case A), If a shut-off valve is installed at the front of the PSV for inspection (Case B) and If a shut-off valve is installed in front of PSV (C.S.O), PSV is installed in parallel (Case C). Three types of cases were compared with FTA and HAZOP. The results of study of the possible accidents due to over-pressure safety valve installation type, used in a high-pressure gas facilities was shows in the following order Case B > Case A > Case C. The results of analysis through FTA was in order to protect the reservoir for the possible occurring of accident the safety valve installation is depend on its type. In the FTA analysis, defects in the device itself which attached to the storage tank as a substitute for analysis of the probability of operator mistakes was Case B with as high as  $2.01 \times 10^{-6}$ . Depending on the type of installation analysis of Case B in order to ensure safety is prohibited to install shut-off valve and believes that mandatory regulations are needed. Rationally installing of pressure safety valve in the high pressure using facilities will be expected to improve the industrial safety from severe accidents such as high-pressure gas fire explosion.

**Key Words :** high-pressure gas facility, pressure safety valve(PSV), shut-off valve, risk analysis

### 1. 서론

고압가스 중에서 천연가스(NG)나 액화석유가스(LPG)는 취급이 간편하고 깨끗한 이유로 범용적으로 사용되고 있으며 최근 국제적으로 환경보호가 강화되는 추세에 따라 사용량이 증가하고 있다. 이에 고압가스 누출을 비롯한 화재, 폭발사고를 예방하기 위한 기술적, 관리적 노력에 따라 사고가 감소하고 있으나 아직도 크고 작은 사고가 발생하고 있는 실정이다. 고압가스 사용시설은 설치·이전 및 주요 구조부분 변경 단계에서부터 안전성을 심사하고 사전에 유해위험요인(Hazard)을 제거하기 위하여 「산업안전보건법」과 「고압가스안전관리법」에 따라 안전관리가 이루어지고 있다. 특히, 고압가스 사용시설은 장치의 고장이나 운전조작의 실수 등으로 인해 공정의 안전수준을 초과하는 압력이 발생하는

위험을 예방하기 위하여 초과압력에 도달하기 전에 액체 또는 기체를 방출시키기 위하여 안전밸브를 설치하고 있다<sup>1)</sup>. 그러나 안전밸브의 전·후단에 차단밸브 설치에 대한 기준은 「산업안전보건법」과 「고압가스안전관리법」에서 상이하게 규정하고 있어 산업현장에서 규제 준수 및 안전관리에 어려움이 발생하고 있다. 리스크 측면에서 볼 때 차단밸브를 설치한 경우 검사 또는 정비 후 실수로 차단밸브를 개방하지 않는다면 용기에 과압 발생 시 폭발하게 되므로 휴면에러가 발생하지 않도록 철저한 관리가 필요하다. 비록 차단밸브 미개방으로 인한 사고사례는 아니지만 부천의 LPG충전소 폭발사고(98. 9. 11)처럼 밴트 밸브의 작동실수나 탱크로리의 연결부위 조작성실수의 등의 원인으로 심각한 사고가 발생하였다. 산업현장에서는 항상 인적오류에 대한 잠재적인 리스크가 존재하고 있다.

<sup>†</sup> Corresponding Author : Jong Bae Baek, Tel : +82-43-841-5337, E-mail : jbaek@ut.ac.kr

Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation, 50 Daehak-ro, Chungju 27469, Korea

국내 화학공장 안전사고의 유형을 분석해 보면 작업자의 실수에 의한 안전사고는 작업행동(불필요한 동작: 14%), 조작실수(s/w, valve, key:13.5%), 잘못된연결(12.5%), 작업 기준 미비(12%), 정보 미공유(11.5%)로 인하여 문제로 전체 64%정도로 안전사고에서 많은 부분을 인적오류의 인자가 차지하고 있는 것으로 보고되고 있으며<sup>2)</sup>, 국내의 1970년부터 1999년까지의 항공기 관련 사고도 75%가 인적오류에 기인한다고 보고되었다<sup>3)</sup>. 따라서 리스크 분석 시 인적오류를 검토하는 것은 가능한 사고를 예측하고 방지방안을 극대화시킬 수 있다. 이러한 이유로 미국과 영국 등에서는 리스크 평가 및 관리 방안을 수립할 때 휴먼에러를 검토하여 반영하도록 의무화하고 있다<sup>4,5)</sup>. 특히 HAZOP 분석을 할 때에는 개인 요인과 조직요인에 의하여 발생하는 휴먼에러의 종류를 누락오류, 실행오류, 과잉행위, 순차오류, 시간오류 등으로 구분하여 검토하고 있다. 따라서 리스크 분석 시 고압가스 사용시설 내 안전밸브 설치유형별로 휴먼에러가 발생할 수 있는 가능성을 검토할 필요가 있다. 고압가스 사용시설의 안전밸브 설치에 대한 3가지 시나리오를 선정하여 휴먼에러를 포함한 유해위험요인(Hazard)을 파악한 후 안전밸브 설치유형별 리스크를 분석(Risk analysis)하고자 하였다. 3가지 시나리오에 대한 정성적 평가로 HAZOP, 정량적 평가로 FTA를 선택하여 위험성을 평가하고 위험(Risk)에 따라 감사의 주기, 방법 등을 위험 정도가 높은 설비에 초점을 맞추어 유지, 보수 관리함으로써 최소의 비용으로 설비의 안전을 확보하고 가동률을 향상시키고자 하였다. 먼저 HAZOP Study를 통해 고압가스 시설의 유해위험요인(Hazard)을 파악하였고, FTA(Fault Tree Analysis)를 통해 유해위험요인(Hazard)과 관련된 사건의 발생과정을 분석하였다. 또한, HAZOP Study를 통해 찾아낸 각 시나리오의 유해위험요인(Hazard)이 사고로 전이될 수 있는 사고 발생확률을 산정하기 위하여 정량적 위험성

평가방법인 FTA를 수행하여 고압가스 사용시설에 내 설치된 안전밸브 설치유형별 Case를 리스크 비교·분석하였다.

## 2. 국내·외 안전밸브 설치기준 비교

국내 「산업안전보건법」과 「고압가스안전관리법」에서 안전밸브 설치기준을 살펴보면, 산업안전보건법에서는 안전밸브의 전·후단에 차단밸브를 설치하지 못하도록 규정하고 있는 반면에 고압가스안전관리법에서는 차단밸브를 설치하고 개방상태로 유지하도록 규정하고 있어 서로 상이한 기준을 정하고 있다. 이로 인하여 고압가스 사용시설에서는 법규를 준수하고 안전한 설치 및 사용관리에 혼란을 초래하고 있다. Table 1에 산업안전보건법과 고압가스안전관리법 상의 해당 규정을 제시하였다.

외국의 고압가스 사용시설 안전밸브 설치기준을 검토하기 위하여 ISO 4126(Safety devices for protection against excessive pressure)의 Part1(Safety valves)과 Part6 (Application, selection and installation of bursting disc safety devices), BS 6759 Part3(Specifications for Safety Valves for Process Fluids), NFPA 58(Specifications for Safety Valves for Process Fluids), API RP 520(Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries)을 살펴보았다. 검토결과, Table 2에서 보는 바와 같이 모든 규정에서 안전밸브를 설치하도록 요구하고 있었다. 그리고 BS 6759 Part3, NFPA 58, API RP 520에서는 안전밸브와 파열판을 직렬로 연결하도록 요구하고 있었다. 안전밸브의 전·후단에 차단밸브를 설치하도록 규정하고 있는 기준은 API RP 520에서만 제시하고 있었는데 차단밸브를 설치할 때는 밸브 핸들을 체인으로 고정시켜 특별한 지시가 없이는 조작할 수 없도록 요구하고 있었다(Car Sealed Open).

Table 1. Safety valve installation regulations used in high-pressure gas facility(korea)<sup>6,7,8,9,20)</sup>

Occupational Health and Safety Act	High-Pressure Gas Safety Control Act
<p>Article 23 (4) of the Occupational Safety and Health Act and Article 266 of the Occupational Safety and Health Standard (Prohibition of Installation of Shutoff Valves)</p> <p>The employer shall not install a shut-off valve at the front end or the rear end of the safety valve. However, a lock-type or equivalent type shut-off valve may be provided in any of the following cases.</p>	<p>The facility standards and technical standards for the manufacture, storage and sale of high pressure gas in accordance with Article 4 (4) of the Act, the facility standards and technical standards for the high pressure gas import business pursuant to Article 5-3, Paragraph 2 of the Act, The facility standards and technical standards of high pressure gas transportation vehicles in accordance with the following paragraphs are as follows.</p> <p>“High Pressure Gas Safety Act Enforcement Rules”</p> <p>Article 8, Article 28, Article 30, Article 31, Article 47, Article 48 Related Annex 8 Facilities, technology and inspection standards for high-pressure gas storage and use</p> <p>I. Technical standards</p> <p>F) Stop valves installed on safety valves or discharge valves shall always be fully open, except when specifically required for repair of such valves.</p>

Table 2. Safety valve installation regulations and codes used in high-pressure gas facility<sup>11,12,13,14,20)</sup>

	(a)	(b)	(c)
Occupational Health and Safety Act(korea)	○	○	○ (C.S.O)*
High-Pressure Gas Safety Control Act(korea)	○		○
ISO 4126 : 2015 Part1, Part6	○		
BS 6759 Part 3	○	○	
NFPA 58	○	○	
API RP 520	○	○	○ (C.S.O)*

- (a) Installation using a high-pressure gas facility safety valve
  - (b) Safety valve and rupture disc installation serial connection
  - (c) Shut-off valves can be installed at the front and rear of the PSV, but only when installed in parallel.
- \* Car Sealed Open

현행 안전밸브 점검주기로 고압가스 안전관리법 시행규칙 [별표 4]에서는 공급소에 설치된 안전밸브 설정 압력의 작동여부를 2년에 1회 점검하고 기록을 유지하며, 작동이 불량할 때는 즉시 교체하거나 수리 하는 등 필요한 조치를 하여야 한다고 명시되어 있다.

또한, 산업안전보건기준에 관한 규칙 제261조에서는 화학공정 유체와 안전밸브의 디스크 또는 시트가 직접 접촉하는 경우 매년 1회 이상, 안전밸브 전단에 파열판이 설치된 경우 2년마다 1회 이상, 산업안전보건법 시행령 제33조의 6에 따라 공정안전보고서 제출 대상으로 고용노동부장관이 실시하는 공정안전보고서 이행 상태 평가 결과가 우수한 사업장의 안전밸브의 경우 4년마다 1회 이상 점검 하도록 명시 되어 있다.

위험관리는 운전시간이 지나갈수록 어떤 파손에 대한 잠재 가능성이 증가하게 되지만, 허용 위험수준을 수립하여 필요한 조치를 취하게 되면 파손가능성이 낮은 상태에서 설비 운전을 지속적으로 유지할 수 있다.

한편, 검사주기가 너무 짧으면(Fig. 1 참조), 허용 위험수준 이하에서 위험관리가 수행되어 과도한 유지보수가 이루어지게 되며, 필요 이상의 설비관리를 수행하여 인적·물적 자원이 낭비될 수 있다. 또한 검사주기를 너무 길게 수립하여 위험관리를 수행하면, 허용 위험수준을 초과한 상태에서 설비가 관리되기 때문에 최악의 경우에는 설비가 파손되어 막대한 손해를 야기할 수 있을 것이다. 따라서 위험기반검사를 수행함으로써 설비의 사용조건 및 상태에 따라서 적절한 위험관리를 수행할 수 있고, 설비를 효율적으로 운전하고, 과도한 검사를 지양하여 인적·물적 자원의 효율적인 운영이 가능할 수 있게 될 것이다.

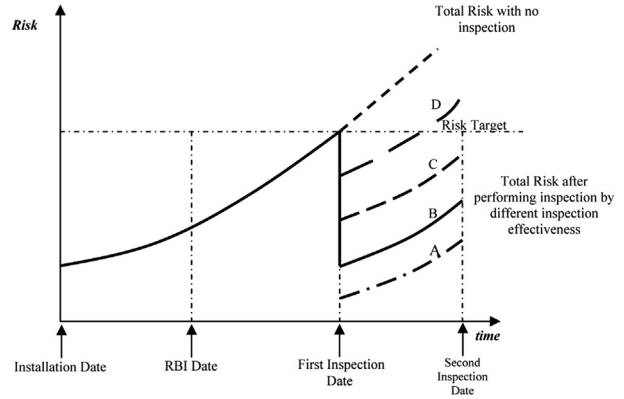


Fig. 1. Schematic presentation of risk-based inspection planning procedure<sup>10,20)</sup>

국내·외 안전밸브 설치기준 및 점검주기를 비교한 결과, 국내 산업안전보건법과 고압가스안전관리법을 비롯한 모든 규정에서 고압가스 사용시설에 안전밸브를 설치하도록 제시하고 있었다. 하지만 국내 고압가스안전관리법과 미국석유협회(API)의 API RP 520에서만 안전밸브 전·후단에 차단밸브 설치금지 규정을 두지 않고 있다. 특히 API RP 520에서는 반드시 C.S.O 조치를 하도록 요구하고 있었으나, 국내 고압가스안전관리법에서는 시건장치를 의무화하지 않고 있어 휴먼 에러 발생 시 사고가 발생할 가능성을 예방하지 못하는 것으로 파악되었다. 또한, 각 상급기관별, 업종별 점검주기가 달라 사업장에 초래하는 혼란과 점검에 대한 신뢰도가 떨어져 안전 불감증으로 이어질 수 있다. 따라서 신뢰성 있는 점검주기 설정이 필요하다.

### 3. 사례연구

#### 3.1 리스크분석 방법

고압가스 사용시설 내 안전밸브 설치 유형별 리스크를 비교분석하기 위하여 HAZOP(Hazard and Operability Studies)과 FTA(Fault Tree Analysis)방법을 적용하였다. 대상공정의 유해위험요인(hazard)을 파악하기 위한 목적으로 수행한 HAZOP은 공장설계의 목적으로부터 이탈에 따른 위험성과 운전상의 문제점을 확인하기 위한 체계적인 접근방식이다. HAZOP은 유량(Flow), 압력(Pressure), 온도(Temperature) 등의 공정 변수(Process parameter)와 No, More, Less, 등의 가이드워드(Guide word)를 조합한 이탈(Deviation)상태에서 유해위험요인을 파악하게 된다. 특히, 이탈이 발생하는 원인을 검토할 때 휴먼에러를 포함하여 분석할 수 있는 장점이 있다<sup>15)</sup>. HAZOP을 통해 파악된 유해위험요인들 중 안전밸브와 관련해서는 과압으로 인한 누출 및 폭발사고를

고려할 수 있다. 따라서 FTA를 통해 과압으로 인한 사고가 발생하는 과정을 검토하여 3가지 시나리오를 도출하였으며 시나리오별 사고발생확률을 분석하였다.

### 3.2 대상공정 설명

사례연구에서는 고압가스 사용시설 중 LPG 사용시설에 대한 공정도면과 각종 운전조건 자료를 토대로 연구를 수행하였다. 액화석유가스는 고압가스 중에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 물질이면서 인화성, 폭발성으로 인해 많은 사고가 발생하고 있다. Fig. 2는 사례연구 필요한 사용시설의 도면을 보여준다. 사례 검토 점선에 표시된 부분을 대상공정으로 탱크로리(tank lorry)로부터 받은 LPG를 사용시설 저장탱크에 저장한 후, 대상설비로 가스를 공급하는 장치들이며, Fig. 2에서 보듯이 LPG사용시설의 저장용기(Storage Tank), 기화기(Vaporizer-1, 2), 압력계, 밸브, 안전밸브 등 각종설비로 구성되어 있다. 이중 고압가스용기를 중심으로 안전밸브 설치유형별 리스크분석을 실시하였다. 고압가스 사용시설에서 저장된 물질은 LPG(propane, butane)이며, 저장압력은 0.7~0.8 MPa, 저장온도는 5~30℃이다. 그리고 저장용기에 부착된 안전밸브 구경은 40mm이다.

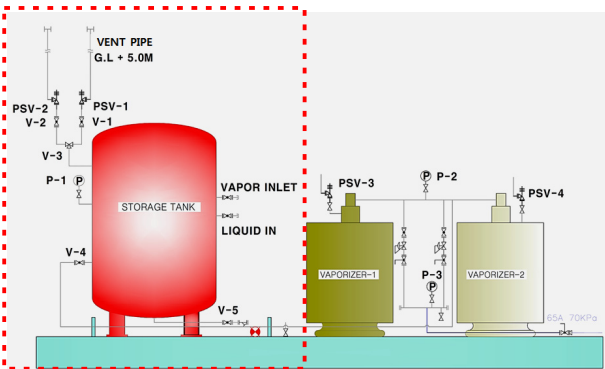


Fig. 2. Study node of high-pressure gas facilities<sup>20)</sup>.

### 3.3 리스크분석 절차

고압가스 사용시설의 리스크분석 절차는 Fig. 3에서 제시된 바와 같이 평가대상을 선정하고 자료수집, 사고시나리오 구성, 사고발생 빈도순으로 수행하였다. 평가대상 선정은 LPG저장탱크를 중심으로 사례연구를 하였고, 각종 자료집은 사용시설 운전에 관한 지침서, 설비명세서, 참고문헌 등을 바탕으로 수집되었다. 사고시나리오선정 단계에서는 과압으로 인한 저장탱크의 폭발가능성을 중점으로 3가지 시나리오를 선정하여 HAZOP을 통해 정성적으로 도출하였다. 이후 FTA를 통해 사고가능성에 대한 리스크를 FT도로 도식화 하였

Hazard section
· Storage tank
▼
Data collection
· Safety valve /shut-off valve specifications · Probability data · High-pressure gas facility operating data
▼
Accident scenario
· 3 case HAZOP (Only pressure parameter)
▼
Frequency analysis
· 3 case FTA

Fig. 3. Procedures for study.

으며 각 시나리오별 사고확률을 계산하였다. 사고확률 계산 Data 수집에는 미국 화학공정안전센터(CCPS)의 ‘Guidelines for process equipment reliability data with data tables’ 문헌과 사업장에서 보유하고 있는 확률데이터를 적용하였다.

리스크분석에 필요한 시나리오는 Fig. 4와 같이 고압가스 사용시설의 저장탱크에 「산업안전보건법」 기준에 맞는 안전밸브 설치(Case A), 고압가스 사용시설의 저장탱크에 「고압가스안전관리법」에 따른 안전밸브와 안전밸브 전단에 차단밸브를 설치(Case B), 「산업안전보건법」에서 차단밸브를 설치할 경우 복수방식으로 안

Type	Description
Case A	
Case B	
Case C	

Fig. 4. Cases for Safety valve installation type<sup>20)</sup>.

전밸브를 설치(Case C) 등 3가지 시나리오를 선정하여 리스크를 분석하였다.

Case A의 경우 산업현장에서 고압가스 저장용기를 보호하고 과압에 따른 폭발방지를 위하여 폭발방지성능과 규격에 갖춘 안전밸브 설치를 의무화하고 있다. 또한 산업안전보건에 관한 규칙 266조에는 차단밸브의 설치 금지 조항을 두어 안전밸브 전·후단에 차단밸브 설치를 금지하고 있다. 그러나 Case B의 설치형태는 고압가스용기에 안전밸브 설치기준을 준수 하고 있으나 안전밸브 전단에 차단밸브가 설치된 것을 보여주고 있다. 마지막으로 Case C의 유형은 복수방식으로 설치된 안전밸브를 보여준다.

### 3.4 분석결과

선정된 3가지 시나리오에 대한 HAZOP 분석 결과는 Table 3에서, FTA 분석 결과는 Fig. 5에서 제시하였다. 각 시나리오별 HAZOP 기법을 적용한 결과는 압력의 공정변수와 가이드워드인 more, less를 적용하였다. 저장탱크의 충전 중 또는 외부의 영향에 의해 과압이 발생할 때의 이탈을 가정하였으며, 3가지 Case에서 안전밸브의 자체결함으로 인한 저장용기의 파열 또는 휴먼에러에 의한 과압이 발생하는 것을 비교 분석하였다.

안전밸브 결함이 원인일 경우 가능한 조치사항으로 정기적인 검사, 과압 축적시 고압을 알려주는 알람기능을 추가하는 결과를 얻었다. 또한 Case B 경우에는 과압 발생시 안전밸브 자체결함 뿐만 아니라 안전밸브 전단에 차단밸브 설치로 인한 운전상의 휴먼에러, 차단밸브 자체결함으로 인하여 저장탱크의 과압 축적이 발생하거나 안전밸브 기능을 상실하는 결과를 초래하였다.

따라서 Case B의 경우에는 안전밸브 전단에 설치된 차단밸브를 제거하거나 반드시 차단밸브 핸들을 체인으로 고정시켜 특별한 지시가 없이는 조작할 수 없도록 하는 조치(Car Sealed Open)가 필요한 것으로 분석되었다. 복수 방식으로 설치된 Case C에서는 차단밸브가 동시에 닫힐 경우나 또는 안전밸브가 동시에 고장날 경우 과압 축적으로 인한 저장용기 폭발의 가능성을 분석했다. 또한 Case A의 경우에는 안전밸브 기능이 정상작동 할 경우 과압으로 인한 저장용기의 폭발을 방지할 수 있다. 그러나 Case B에서는 안전밸브가 정상 작동하더라도 차단밸브의 자체결함 또는 운전자의 실수 등으로 닫힐 경우에는 과압으로 인한 저장용기의 폭발을 예방할 수 없는 것으로 파악되었다. Case C의 경우는 안전밸브를 복수방식으로 설치함으로써 Case B에서 초래할 수 있는 결과를 예방할 수 있는 결과를 얻었다.

HAZOP을 통해 유해위험요인을 파악하여 고압가스 사용설비에 일어날 수 있는 사건을 파악하고 필요한 조치를 할 수 있었다. 파악된 사고시나리오를 바탕으로 Fig. 5와 같이 FTA를 수행하였다. LPG사용시설의 가스누출 가능성을 정상사상으로 설정하여 HAZOP을 통해 파악된 결과를 바탕으로 기본사상(basic event)에 적용하여 가스누출 가능성을 FT도화 하였다. FT분석에는 고압가스사용시설에서 내의 안전밸브 설치 유형별 시나리오를 적용했다. 기본사상의 고장률이 정의가 되면 And Gate, Or Gate를 따라 중간사상의 발생확률을 다음과 같이 계산하고, 게이트에 대하여는 And gate의 계산은 식 (1)에, Or gate의 계산은 식 (2)에 나타내었다<sup>16,20)</sup>.

Table 3. The result of HAZOP for 3 cases<sup>20)</sup>

Deviation		Cause of deviation	Consequences	Existing controls	Possible action	Comment
Pressure	More	1. Safety valve(PSV-1) fails closed	Storage tank overpressure /rupture	None	1. Consider high pressure alarm 2. Periodical inspection(monthly) 3. Testing every year	Case A
		1. Safety valve(PSV-1) fails closed 2. Shut-off valve(V-1) closed by human error or V-1 failure	Storage tank overpressure /rupture As above	None	1. Consider high pressure alarm 2. Periodical inspection 3. Remove or c.s.o of installed Shut-off valve	Case B
		1. Safety valve(PSV-1) and Safety valve (PSV-2) fails closed simultaneously 2. Shut-off valve(V-1) and shut-off valve (V-2) closed simultaneously by human error or valve failure	Storage tank overpressure /rupture As above	None None	1. Consider high pressure alarm 2. Periodical inspection(monthly) 3. Testing every year 4. Remove or c.s.o of installed Shut-off valve	Case C
	Less	1. Safety valve fails open	Release to atmosphere As above	None	1. Consider detection and emergency planning	Case A, B, and C
		2. Filling hose ruptures		Operator action	2. Periodical inspection 3. Check integrity of hose and quality control	

$$\text{And Gate} = X_1 \times X_2 \times X_n = \prod_{i=1}^n X_i \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Or Gate} &= 1 - (1 - X_1)(1 - X_2)(1 - X_n) \\ &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - X_i) \end{aligned} \quad (2)$$

정상사상이 발생할 확률계산에는 미국 화학공정안전센터(CCPS)의 ‘Guidelines for process equipment reliability data with data tables’ 문헌과 사업장에서 보유하고 있는 확률 데이터를 적용하였다. Table 4는 FTA에 적용한 고장율 데이터 제시하고 있으며, 안전밸브의 “Fails to Open on Demand”과 “Failure to Reclose Once Open” 2가지 고장에 대한 고장확률을 적용하여 FTA를 분석·비교하였다.

시나리오에 적용된 FTA는 과압에 의한 누출을 중점으로 계산되었다. 또한 HAZOP 검토결과 나타날 수 있는 결과분석(Consequence analysis)은 이 연구에서는 3가지 시나리오에 적용하지 않았다. 결과분석은 동일한 조건으로 가정 하였으며, 빈도분석(Frequency analysis) 적용된 기본사상으로 안전밸브의 결함, 충전시 압력계 이지 결함, 충전시 운전자실수, 차단밸브의 결함, 운전자실수 등으로 나타났다. 기본사상의 확률값을 And Gate, Or Gate에 따라 중간사상 발생확률을 계산하는 과정을 거쳐 각 Case를 사례연구에 적용하여 과압으로 인한 누출값을 얻었다. Case A는  $2.33 \times 10^{-7}$ 로 나타났다

Table 4. Description of basic event, failure rate[Means]<sup>18,19,20)</sup>

NO	Description	Failure rate	Remark
01	Failure of safety valve	2.12E-04	Fails to Open on Demand[CCPS]
		5.18E-03	Failure to Reclose Once Open[CCPS]
02	Failure of valve(Stop valve)	1.61E-03	Fails to Check[CCPS]
03	Closed by operator error	1.00E-06	Engineer judgement
04	Failure of safety valve	2.12E-04	Fails to Open on Demand[CCPS]
		5.18E-03	Failure to Reclose Once Open[CCPS]
05	Failure of valve(Stop valve)	1.61E-03	Fails to Check[CCPS]
06	Closed by operator error	1.00E-06	Engineer judgement
07	Loading human error	1.00E-03	Engineer judgement
08	Failure of pressure guage	1.00E-04	Engineer judgement
09	Corrosion of tank surface	1.00E-03	Engineer judgement
10	Tank failure	1.88E-04	Engineer judgement
11	Failure of pipeline	1.00E-03	Engineer judgement
12	Pipeline corrosion	1.00E-03	Engineer judgement
13	External overpressure	1.06E-02	Engineer judgement

\* CCPS, “Guidelines for process equipment reliability data with data tables”, 1989

Table 5. Result of risk analysis<sup>19,20)</sup>

Type	Strength	Weakness	Probability
Case A	- Industrial Safety and Health Act compliance - Prevention of Human Error - Protection of storage tank	- Periodical inspection or if failure occurs, drain the content of vessel	$2.33 \times 10^{-7}$ <sup>a)</sup> $5.70 \times 10^{-6}$ <sup>b)</sup>
Case B	- Safety valve test and if failure occurs, can easily block	- Failure to comply Industrial safety and Health Act, additional regulations - If accident occurs, have serious damage	$2.01 \times 10^{-6}$ <sup>a)</sup> $7.47 \times 10^{-6}$ <sup>b)</sup>
Case C	- Industrial Safety and Health Act compliance - Protection of storage tank	- Increase of installation cost	$3.66 \times 10^{-9}$ <sup>a)</sup> $5.07 \times 10^{-8}$ <sup>b)</sup>

a) Pressure safety valve(PSV) fails to open on demand.

b) Failure to reclose once open pressure safety valve(PSV).

며, Case B는  $2.01 \times 10^{-6}$ , Case C는  $3.66 \times 10^{-9}$ 으로 계산되었다. 따라서 고압가스 사용시설에 설치된 안전밸브 유형에 따라 사고 발생확률은 큰 차이를 보여준다. Case C와 같이 설치될 경우 안전성을 가장 높게 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 분석결과를 요약하면 Table 5와 같다. 국내기준을 비교하여 설치유형에 따른 법규준수, 안전사고발생 가능성, 정기검사의 용이성, 비용발생 등의 장·단점을 도출하였다. 또한, 선행 연구를 살펴본 바에 의하면 노르웨이의 해양 석유 산업에서 사용되는 PSV에 대한 점검주기를 설정하였다. PSV의 고장 모드가 아닌 수명 손실(PLL)만 고려한 연구결과로, 현재의 점검주기보다 완화된 점검주기를 제시하는 내용을 실고 있어, 현재의 점검 주기를 완화하기 위한 주장에 힘을 실는 연구 결과이다<sup>17)</sup>.

## 4. 결론

지금까지 고압가스사용시설에 설치된 안전밸브 유형별 발생 가능한 사고들에 대하여 정성적, 정량적 분석을 통해 사고확률을 검토하였으며 국내 안전밸브 설치 기준 및 외국의 설치기준을 비교하여 그에 따른 안전특성과 안전성 향상 방향을 모색하였다. 3가지 유형의 사례를 HAZOP과 FTA 통해 비교·분석하였다.

이 연구 결과 고압가스 사용시설의 안전밸브 설치유형별 장·단점 및 과압으로 인한 사고의 발생가능 확률값은 Table 5와 같이 분석결과로 정리된다. Case A의 경우 「산업안전보건법」을 준수하여 설치된 유형의 사고발생 확률값을 보여주며, Case B의 경우 「고압가스 안전관리법」에 의해 설치된 유형의 사고발생 확률값을

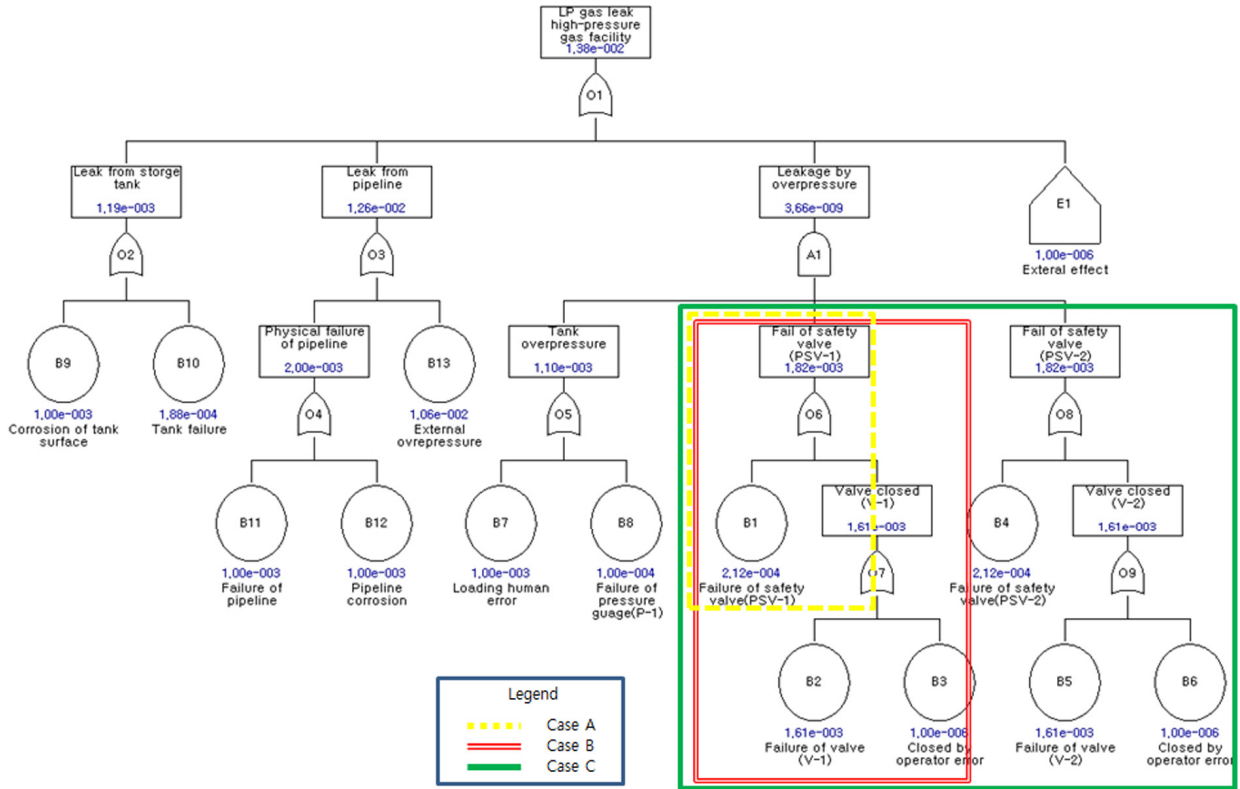


Fig. 5. The result of FTA for 3 cases<sup>18,19,20</sup>.

보여준다. 또한 Case C의 경우 산업안전보건법에 의해 차단밸브를 설치하여 사용할 경우 병렬 방식의 설치유형을 의무화 하고 있다. 종합적인 분석 결과에 따른 설치 유형별 법규준수, 저장용기보호, 사고발생 확률값 순으로 살펴보면 Case B > Case A > Case C 순으로 나타났다. FT도로 분석된 결과에는 저장용기를 보호하기 위해 설치되는 안전밸브의 설치유형에 따라 사고발생 확률 차이를 보였다. FTA에는 저장용기에 부착된 기기의 자체결함 뿐만 아니라 운전자의 실수에 대한 확률값을 대입하여 분석한 결과 Case B의 사례가  $2.01 \times 10^6$ 으로 가장 높게 나타났다. 분석 결과에 따라 Case B의 설치유형은 안전성 확보를 위해 차단밸브 설치금지 또는 시건장치 의무화 규제가 필요한 것으로 판단된다. 또한 안전밸브의 고장과 작업자 실수로부터 고압가스 사용시설 보호에는 Case C 가장 적은 확률값을 보이며 산업현장의 안전성 확보에 효과적으로 적용 될 것으로 판단된다.

향후 이 연구에서 적용하지 못했던 결과분석(Consequence analysis) 및 리스크 계산을 통해 고압가스 시설에 설치되는 안전밸브 유형에 따른 구체적인 리스크분석이 필요하다. 또한 이 연구를 통해 고압가스 사용시설의 안전밸브의 합리적인 설치 기준을 마련하고 고압가스 특

성상 폭발 및 화재와 같은 심각한 중대사고로부터 산업현장의 안정성 제고 효과를 기대할 수 있을 것이다.

**감사의 글:** 이 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 성장거점연계 지역산업육성사업으로 수행된 연구결과입니다.

### References

- 1) D. A. Crowl and J. F. Louvar, "Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications, 3rd Edition", pp. 430-453, 2011.
- 2) Y. G. Yoon and Y. S. Kang, "A Study on Estimation Flow of Information Analysis for Prevention of Human Error to the Operation", Journal of the Korea Safety Management & Science, pp.2 31-241, 2013.
- 3) K. S. Lee and Y. K. Lee, "Importance of Human Error to Prevent Industrial Accidents", Journal of the Ergonomics Society of Korea, Vol. 30, No. 1 pp. 151-160, 2011.
- 4) Health and Safety Executive, "The Control of Major Accident Hazards Regulations", 2015.
- 5) Occupational Safety and Health Administration, "Process Safety Management", 2015.

- 6) Korea Ministry of Government Legislation, "Occupational Safety and Health Act and Enforcement Regulations of the Act", 2016.
- 7) Korea Ministry of Government Legislation, "Regulations for Occupational Safety and Health", 2016.
- 8) Korea Occupational Safety and Health Agency, "KOSHA Guide-D - 18 - 2016 - Technical Guidelines for Estimating and Establishing Emission Capacity for Safety Valves", 2016.
- 9) Korea Ministry of Government Legislation, "High Pressure Gas Safety Control and Enforcement Rules of the Act", 2016
- 10) M. R. Shishesaz, M. N. Bajestani, S. J. Hashemi and E. Shekari "Comparison of API 510 Pressure Vessels Inspection Planning with API581 Risk-based Inspection Planning Approaches", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 111-112, pp. 202-208, 2013.
- 11) European Committee for Standardization, "Safety Devices for Protection Against Excessive Pressure - Part1: Safety Valves (ISO 4126-1:2013)", 2013.
- 12) British Standards Institution, "BS-6759 part-3, Safety valves, Specification for safety valves for process fluids, appendix D", 1984.
- 13) National Fire Protection Association, "NFPA 58-Liquefied Petroleum Gas Code", 1998.
- 14) American Petroleum Institute, "API-520- Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries Part I -Sizing and Selection", 2000.
- 15) Center for Chemical Process Safety, "Guideline for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, 2nd Edition", AIChE-CCPs, New York, 2000.
- 16) Hyeon-kyo Lim, "System Safety Engineering", Hansol Academy, pp. 146-147, 2012.
- 17) Peter Okoh, Stein Haugen, Jan Erik Vinnem, "Optimization of recertification intervals for PSV based on major accident risk", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 44, pp. 150-157, 2016.
- 18) S. H. Jin, T. W. Kim, I. T. Kim, I. W. Kim and Y. K. Yeo, "A Study on Reliability Analysis and Quantitative Risk Analysis for Liquefied Petroleum Gas Station", Journal of The Korean Institute of Gas, Vol. 5, Issue 4, pp.40-48, 2001.
- 19) Center for Chemical Process Safety, "Guidelines for process Equipment Reliability Data with Data Tables", AIChE-CCPs, pp.138-212, 1989
- 20) M. C. Kim, "Comparison of the Risk by Installation Types of Pressure Safety Valve used in the High-pressure Gas Facility", Graduate School of Global Convergence, KNUT, 2017.