



## 수소충전시설에 대한 정량적 위험성 평가 및 모델적용에 관한 연구

신정수 · †변헌수

전남대학교 공학대학 생명화학공학부

(2012년 11월 30일 투고, 2012년 12월 26일 수정, 2012년 12월 26일 채택)

### A Study on Quantitative Risk Analysis & Model Application for Hydrogen Filling Center

Jung-Soo Shin · †Hun-Soo Byun

School of Biotechnology and Chemical Engineering, Chonnam National University, Yeosu,  
Jeonnam 550-749, Korea

(Received November 30, 2012; Revised December 26, 2012; Accepted December 26, 2012)

#### 요약

가스 산업은 고도화와 복잡성으로 인하여 잠재적인 대형사고의 발생위험이 날로 높아가고 있으며, 특히 가연성, 인화성, 폭발성 및 독성물질 등을 대량으로 취급 및 제조함으로써, 사고발생 가능성은 낮지만 일단 사고가 발생하게 되면 사업장 내부의 근로자뿐만 아니라 인근 주민과 환경에 까지 영향을 미치며, 가스제조 시설의 특성상 산업계에 끼치는 파급효과도 매우 크다.

수소가스는 화학 산업 및 산업계 전반에 걸쳐 중요하게 사용되는 기초 원료이며, 특히 2000년 이후 지구온난화가 대두됨에 따라 지구온난화를 방지할 수 있는 대체에너지로 각광 받고 있으나, 분자량이 낮아 다른 가스에 비하여 고압(150 bar.g 이상)으로 실린더 등의 저장용기에 충전하여 사용해야 한다. 수소는 가연성, 폭발성 물질로써 누출(Leakage)로 인하여 화재나 폭발로 이어지는 사고가 많이 발생하고 있다. 이러한 재해를 줄이기 위해서는 단순한 안전관리에서 벗어나 생산 공정중의 잠재위험(Hazard)을 확인하여 기술적으로 평가한 후, 이 결과를 반영하는 체계적인 안전관리 시스템이 필요하다.

본 연구는 산업계 전반에서 사용되고 있는 기초 원료인 가연성, 폭발성의 수소가스 충전시설에 대한 정량적 위험성평가를 실시하였으며, 평가 결과 수소 충전시설에 대한 중요안전요소(EIS, Elements Important for Safety)의 도출 및 이의 효과적 관리방안을 제안하였으며, 사고사례를 통하여 위험성평가 모델의 신뢰성을 검증하였다.

**Abstract** - In gas industries, the potential risks of serious accidents have been increased due to high technology application and process complexities. Especially, in case of gas-related accidents, the extent of damage is out of control since gas plants handle and produce combustible, flammable, explosive and toxic materials in large amounts. The characteristics of this kind of disaster is that accident frequency is low, while the impact of damage is high, extending to the neighboring residents, environment and related industries as well as employees involved.

The hydrogen gases treated important things and it used the basic material of chemical plants and industries. Since 2000, this gas stood in the spotlight the substitution energy for reduction of the global warming in particular however it need to compress high pressure(more than 150 bar.g) and store by using the special cylinders due to their low molecular weight. And this gas led to many times the fire and explosion due to leak of it. To reduce these kinds of risks and accidents, it is necessary to improve the new safety management system through a risk management after technically evaluating potential hazards in this process.

†Corresponding author:hsbyun@chonnam.ac.kr

This study is to carry out the quantitative risk assesment for hydrogen filling plant which are very dangerous(fire and explosive) and using a basic materials of general industries. As a results of this risk assesment, identified the elements important for safety(EIS) and suggested the practical management tools and verified the reliability of this risk assesment model through case study of accident.

**Key words** : quantitative risk analysis, hydrogen filling center, elements important for safety

## I. 서론

가스제조 시설들은 불활성 가스공급을 통하여 제조업 시설의 안전한 운영 및 유지하는 담당하며, 폭발성, 가연성, 독성가스를 공급하여 화학제품 제조에 필요한 기초 원료의 공급을 담당하는 역할을 한다. 또한 가스의 제조과정에서 고온, 고압, 초저온, 촉매반응 등의 운전조건 하에서 제조시설이 운전되기 때문에 안전하고 신뢰성 있는 운영이 반드시 필요하다. 이러한 재해를 줄이기 위해서는 단순한 안전관리에서 벗어나 생산 공정중의 잠재위험(Hazard)을 확인하여 기술적으로 평가한 후, 위험관리(Risk Control)를 통한 손실방지(Loss Prevention)개념이 포함된 새로운 안전관리 시스템이 절대적으로 필요한 시점에 왔다[1,2]. 특히 가스 산업은 기초 화학분야 관련시설에 적용되었던 정량적 위험성 분석 방법을 검토 및 보완하여 가스제조 업종의 공정 특성에 맞는 새로운 정량적 위험성 평가 방법의 모델인 GRA(Generic Risk Analysis)를 적용하여, 사고 발생확률(Probability)과 치명도(Severity)를 조합한 초기 위험도(Initial Criticality)를 계산하고, 적절한 안전방벽(Safety Barriers)을 적용하여 잔여 위험도(Residual Criticality) 산정하였으며, 위험성 평가결과 대상설비의 운영 및 효율적인 관리에 필요한 중요안전요소(EIS, Element Important for Safety)를 도출하고 이의 효과적인 관리방법에 대해 제안하는 것이다. 또한 유사한 설비에 대한 사고사례 연구를 통하여 위험성평가 모델을 검증하였으며, 위험성 평가 대상시설에 안전한 운전 및 유지를 위해 가장 중요한 중요안전요소 들의 도출 및 이의 우선순위를 제시하였다. 이를 기반으로 대상설비에 대한 효과적인 관리방법을 제시함으로써, 제조공정의 안전성(Safety)과 신뢰성(Reliability)을 향상시켜 생산 활동 및 제반활동에 이익에 기여하고자 한다.

본 연구는 가스제조시설에 대한 명확한 위험성 평가방법을 통하여 이 결과를 기반으로 설비들을 안전하고 신뢰성 있는 운전, 정비 및 유지표준 구축하는데

그 목적이 있다. 설비에 대한 위험성 평가는 정성적 평가 및 정량적 평가 방법 등을 통하여 실행되었으나, 평가방법의 복잡성 및 전문성으로 인하여 가스제조 설비들에 적용이 매우 어렵고 복잡한 절차 및 프로그램들이 필요하였다. 따라서 본 연구에서는 기존의 정성 및 정량적 평가 방법들의 단점들을 개선하고 장점들을 조합하여, 적절하고 신뢰성 있는 평가 기법을 통한 위험성 평가 및 평가 결과로 도출된 중요안전요소에 대한 효과적인 안전관리 및 시행절차의 구축을 제안하였다.

## II. 위험성 평가 모델

위험성 평가의 모델은 설비의 설계, 시 운전, 운전 및 정지하는 과정에서 중대사고가 발생할 수 있는 잠재위험들을 찾아내어 사고발생 가능성과 사고결과로 나타난 치명도의 함수로 위험성을 평가하는 체계[3]이다. 이것은 평가대상으로 선정된 설비 또는 시스템을 묘사한 후 공정에 관한 정보를 분석하여 여러 개의 분석

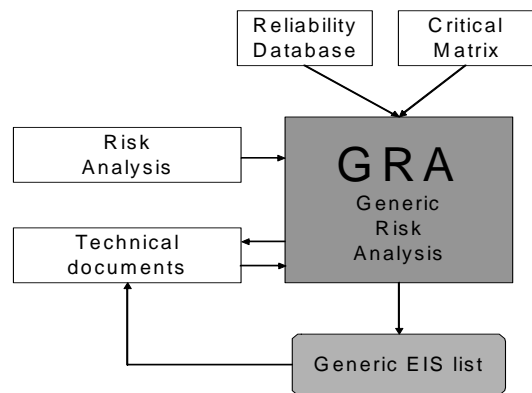


Fig. 1. The framework of the generic risk analysis(GRA) model.

단위로 분할하여 하나씩 평가를 수행한다. 설비의 재해를 예방하기 위해서는 위험성 평가가 필요하나 국내에서 개발된 위험성평가 모델이 체계화 및 평가기준이 정량화 되지 않아 위험성 평가에 어려움이 있는 실정[4,5]이다.

이에 본 연구에서는 가스제조설비의 위험성 평가를 기본으로 하여 가스 제조업의 위험성 평가에 적합한 GRA(Generic Risk Analysis) 모델을 이용하여 설비들에 대한 위험성을 평가하였고, 발견된 중요안전요소(EIS, Elements Important for Safety)들 즉, 사고의 발생가능성과 사고결과로 나타난 치명도가 큰 요소(위험도가 높은 요소)들에 대한 관리방법을 말하며 전체적인 평가방법은 요약하여 Fig. 1에 제시하였다.

## 2.1. 위험성평가 모델의 구성요소

### 2.1.1. 치명도(Severity)

치명도는 인명의 피해정도, 환경적 피해 및 재산손실에 대하여 5단계로 구분하였으며 사고 발생에 따른 손실정도이다. 먼저 안전부분을 살펴보면, 0단계인 인명피해 없음부터 4단계인 다수인원의 사망사고의 5단계로 구분하였으며 개별회사의 여건에 따라 각 단계의 내용을 변경할 수 있다. 1단계에서 언급된 시간손실(Lost Time)의 의미는 사고 발생 후, 다음날 정상적인 근무시간에 재해자가 본인의 업무에 종사 할 수 없는 경우를 의미한다.

환경부분은 0단계인 환경피해 없음부터 4단계인 환경재앙의 5단계로 구분되었으며, 각 단계는 사고의 여파로 인하여 환경적 피해를 복구 하는데 소요되는 시간을 기준으로 구분하였다.

재산손실부분은 0단계인 재산손실 없음부터 4단계인 재산 또는 공장의 파손의 5단계로 구분하였고 개별 회사 및 공장의 규모에 따라 단계를 달리 할 수 있으며, 이는 재보험과 연관된 손실감수 금액(Deductable)을 고려하여 산정해야 한다. 이 구분표의 각 단계는 회사의 위험관리정책(Risk Management Policy)에 따라서 관리되어야 하며, GRA 모델에 사용된 치명도 구분에 대한 자세한 내용은 Table 1에 나타내었다.

### 2.1.2. 발생확률(Probability)

사고 발생확률은 0단계인  $f \leq 10^{-7}$ 부터 4단계  $f > 10^{-1}$ 까지 5단계로 구분 되고, 고장률(f)은  $10^6$  시간을 기준으로 하는 연속사용시간 고장률( $\lambda$ )과 요구고장률(PDF, Probability of Failure on Demand)로 구성되어 있다.

설비에 대한 고장률을 다른 의미로 나타내면,

$$\text{고장률 (f)} = \frac{1}{MTBF}$$

여기서, MTBF (Mean Time Between Failure)는 어떤 설비의 고장과 고장사이 즉, 순수 운전시간을 말한다. 기계, 설비 및 부품 등의 고장률은 제품 생산자가 고장률 데이터를 제출하기 때문에 이의 산정이 비교적 간단하며, 같은 제품일지라도 생산자에 따라서 고장률이 다르게 산정된다. 이러한 편차를 없애기 위하여 고장률 데이터는 신뢰성 있는 평균고장률을 이용하여 계산되어진다.

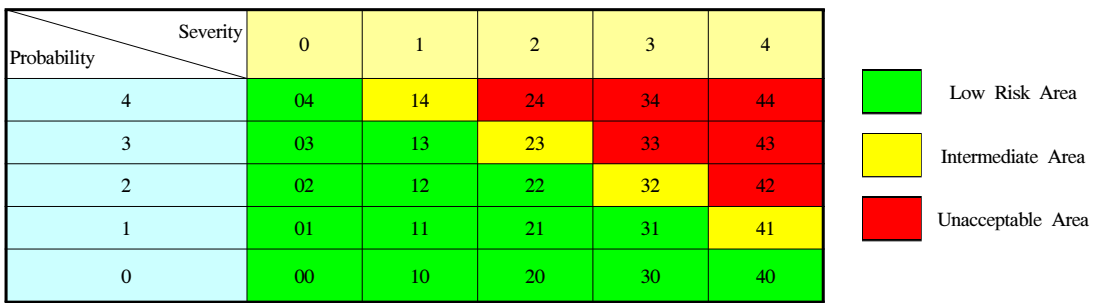
만약 위험성 평가를 실시하려는 대상에 대한 고장률 데이터가 없을 경우 "Category Name" 또는 "Qualitative Equivalent"에 있는 자료를 이용하여 단계를 결정하는데, 이러한 경우 전문가의 의견이 매우 중요하게

Table 1. Definition of severity

Severity level	Bodily Injury (Safety)	Environmental Damage (Environment)	Damage to Property (Property)
0	No bodily injury	No damage to the environment	No damage to property
1	Minor injury with no lasting effect	Moderate damage with no long-term affects (temporarily exceed regulatory limits or products spilled on site)	Light property damage (light damage to the buildings) Damage cost < 50 k\$
2	Serious injury (localized accident resulting in serious consequences for personnel)	Serious damage but may be corrected (a localized accident causing serious ecological damage to the environment, but which may be quickly treated and eliminated)	Important property damage Damage cost : 50 to 500 k\$
3	Potential fatality	Serious and long-term damage (accident causing serious and long-term damage to the site and surrounding areas)	Serious property damage Damage cost : 500k\$ to 10 millions \$
4	Major accident, several fatalities	Ecological disaster	Massive destruction to property or facilities - Damage cost > 10 millions \$

**Table 2.** Definition of probability

Probability Level	Category Name	Probability (per Year)	Qualitative Equivalent
0	Improbable	$f \leq 10^{-7}$	There are no known events of this kind.
1	Very Rare	$10^{-7} < f \leq 10^{-5}$	Event requiring a combination of rare events.
2	Rare	$10^{-5} < f \leq 10^{-3}$	Event has occurred once on similar equipment or facility of gas industry.
3	Possible	$10^{-3} < f \leq 10^{-1}$	Event has occurred once during the life of similar equipment or facility.
4	Frequent	$f > 10^{-1}$	Event has occurred several times during the life of similar equipment or facility.



**Fig. 2.** Definition of critical matrix.

대두되며 이러한 이유로 위험성평가에 참여하는 사람들은 각 분야의 전문가 즉, 기계/배관 전문가, 전기/계장 전문가, 공정/운전 전문가 및 위험관리자의 참여가 반드시 필요하다. 사고의 발생확률은 정해진 시간 내에 주어진 사건이 일어날 수 있는 가능성을 말하며 GRA 모델에 사용된 발생확률은 Table 2에 나타내었다.

**2.1.3. 위험등급(Critical Matrix)**

위험등급은 치명도와 사고 발생 확률의 조합으로 나타내며, 녹색지역은 치명도가 높더라도 발생가능성이 낮은 경우, 발생가능성이 높더라도 치명도가 낮은 경우, 치명도 및 발생가능성이 낮은 경우의 조합으로 수용 가능한 위험을 나타낸다.

노란색 지역은 위험도가 낮은 상태로 가기 위하여 추가 위험성 평가가 필요하거나 위험도 경감(Mitigation) 행위가 필요함을 나타내며, 만약 위험도를 이 지역에 유지하고자 할 경우에는 이유에 대해서 기술적으로 명확한 설명을 해야 한다.

적색지역은 치명도 및 사고 발생확률이 아주 높은 조합의 경우를 말하며 수용할 수 없는 위험 이라고 할 수 있다. 위험성평가 결과 적색지역에 해당하는 위험도로 판명될 경우에는 반드시 위험도를 줄이는 행위 및 설비를 해야 하며 위험도표는 Fig. 2로 나타내었다.

**2.1.4. 신뢰도 자료 (Reliability Database)**

GRA 위험성평가 모델에 사용되는 일반적인 신뢰도 데이터베이스는 발생사건(FE, Feared Event)의 주기 및 안전방벽들(Safety Barrier)이 작동하지 않을 가능성(Probability)에 대해 작성되었다.

이 결과는 회사의 운전경험 및 여러 산업현장의 공공 데이터베이스를 인용하였으며, 인용된 기관은 OREDA (Offshore RELiability DAtabase) 및 EIREDA (European Industry Reliability DAta bank) 등이다.

**2.1.5. 장치들에 대한 고장률 계산 (Failure Database for Equipment)**

장치에 대한 데이터베이스는 연속사용시간 고장률과 요구고장률로 구성되어 있으며, 첫 번째로 연속사용시간 고장률(Failure Rate)을  $\lambda$ 로 표시하고 기준시간은  $10^6$  시간이다. 두 번째로 장치의 기능(Function) 점검 시에 발생하는 고장 즉, 요구고장률(PFD, Probability of Failure on Demand)이며 고장률 산정에 사용되는 시도 횟수는 연간  $10^3$  번이다.

연속사용시간 고장률은 설비의 가동시간을 기준으로 위험성평가 대상설비의 고장횟수를 말하며, 요구고장률은 사고를 방지하기 위하여 설치된 안전방벽(Safety Barrier)의 계산에 이용되는 고장률로서,

$$PFD = \lambda \times \frac{T}{2}$$

여기서,  $\lambda$ 는 연속사용시간 고장률을 말하며, T는 안전방벽의 연간 점검횟수를 의미한다. 예를 들면 3년에 1회 점검하면 T = 3이고, 매 6개월 마다 1회 점검하면 T = 0.5이다. GRA 프로그램에서는 MS사의 Excel 프로그램 기능인 매크로(Macro)기능을 이용하여, 여러 주요 장치 및 시스템들에 대한 고장률의 계산이 가능하도록 구성 하였다. 간편한 계산을 위하여 장치의 모든 고장률에 대하여 불안전 요소(Unsafe)처럼 오직 하나의 고장모드(Failure Mode)를 반영하였으며 이것은 보수적인 계산결과를 가져온다. 예를 들면 밸브들은 FC(Fail to Close), FO(Fail to Open) 및 밸브내부 또는 외부의 누출(Leak) 등 여러 가지 고장이 있지만, 단지 하나의 고장모드인 FO가 안전을 확보하기 위해 필요한 대표적인 불안전 요소(Unsafe)로 계산되었다. 이러한 계산은 위의 4가지 고장모드를 대표하여 계산되므로 보수적인 결과를 가져온다. 데이터베이스에는 분석기(Analyzer), 전력공급설비(Power supply), 변전설비(Transformer), 압축기(Compressor), DCS(Distributed Control System), PLC(Programed Logic Controller), Motors, Fans, Gasket, 열교환기, 호스, 펌프, 안전밸브(Safety Valve) 및 Transmitters 등에 대한 고장률 자료가 포함되어 있다.

## 2.2. 위험성평가 (GRA, Generic Risk Analysis) 프로그램

### 2.2.1. 함수그룹(Functional Groups)

GRA는 함수그룹들로 나누어진 MS-Excel의 Worksheet들로 아래와 같이 구성되어 있으며 각각의 내용은 다음과 같다.

- 1) 사고결과(Consequence) 및 원인(Causes)로 구성된 사고시나리오
- 2) 각각의 시나리오에 대한 초기 치명도 및 발생확률을 포함한 초기 위험도(Initial Criticality) 평가 결과
- 3) 사고 발생확률과 치명도를 줄이기 위한 안전방벽(Safety Barrier) 및 위험도 경감 방법(Risk Mitigation Measures)
- 4) 발생확률과 치명도 경감을 반영한 후의 잔여 위험도(Residual Criticality)

### 2.2.2. 위험성평가 프로그램 구성요소

#### 1) 사고 시나리오의 구성요소

(1) 관련설비(Concerned Equipment): 위험성 평가 대상 압축기, 흡착탑, 저장탱크 등 공정과 관련된 장치 또는 공정을 표기한다.

(2) 공장 또는 장치의 상태(Plant or Equipment Status): 정상운전, 정비, 가동개시 등의 공장 또는 설비의 상태를 표시한다.

(3) 위험물질(Dangerous Substances): 0 또는 1로 표시하며, 유럽의 SEVESO II 규정에 매우 위험한 물질 목록에 해당하는 물질, 미국규정인 OSHA 1910.119 Appendix A에 해당하는 물질 또는 EPA 규정에 정의된 40 CFR Part 68에 해당되는 물질 및 국내규정인 산업안전보건법, 유해화학물질관리법 및 위험물안전관리법에 해당되는 물질이 있을 경우 "1"로 표기한다.

(4) 발생사건(FE, Feared Event): 발생 사건들은 정성적 위험성 평가의 방법인 HAZOP 및 FMEA에서도 출된 사건 또는 설비 및 공정이 동일하거나 비슷한 곳의 사고이력 또는 관련시설의 전문가에 의해 도출 및 표기한다.

(5) 발생사건의 결과(Consequences of Feared Event): 폭발, 화재, 환경오염 등의 사고의 발생으로 인하여 발생하는 안전, 환경 및 재산손실 등 사건의 최종 결과들에 대해서 표기한다.

(6) 발생사건의 원인(Causes of Feared Event): 공정 운전 실수 및 장치의 손상 등 발생사건의 원인에 대해서 표기한다.

## 2) 초기위험도 (Initial Criticality) 평가

(1) 초기 치명도(Initial Severity), Si: 먼저 각각의 발생사고 (FE, Feared Event)에 대하여 위험도를 평가하며, 평가표기는 사람에게 대해 영향이 있으면 "S"이고, 환경오염은 "E"이고, 생산설비 및 재산손실에 대해서는 "P"로 표기한다.

(2) 초기 사건 발생확률(Initial Probability), Fi: 발생된 사건 시나리오의 결과로서 신뢰도 데이터베이스(Reliability Database) 및 위험성 평가자의 의견을 반영하여 계산 및 결정한다.

(3) 초기 위험도(Initial Criticality), Ci: 위에서 계산한 초기 치명도 및 발생확률의 조합으로 산정되며 위험도의 높고 낮음을 GRA 프로그램을 통하여 자동으로 저 위험도(Low Risk), 중 위험도(Intermediate Risk) 및 고 위험도(Unacceptable Risk)로 산정된다. 초기위험도 평가는 현재 공정 및 장치에 반영되어 있는 안전방벽(Safety Barrier)들에 대한 위험도를 반영하지 않고 평가를 실시하며, 자세한 내용은 Table 3에 나타내었다.

## 2.2.3. 안전방벽(Safety Barrier) 및 잔여위험도 산정

### 1) 안전방벽(Safety Barrier) 산정

안전방벽은 발생사건에 대하여 치명도 (Severity) 및 발생확률(Probability)의 위험수준을 낮추는 기능은

**Table 3.** Definition of initial risk level

Si	Log fi	Fi	Ci
<b>Initial severity</b> class of the consequences of the feared event	Log of the scenario's initial frequency e.g. : $f_i = 10^{-2}$ (once every 100 years) $\rightarrow \log f_i = -2$	The scenario's <b>initial frequency</b> class	<b>Initial criticality</b>
Determined in the GRA using the <b>severity class</b> (table 1)	Determined in the GRA using internal or public available reliability statistics for both equipment and scenarios.	Determined in the GRA using the <b>frequency class</b> .	Determined in the GRA using the criticality matrix

**Table 4.** Definition of active and passive safety barriers

limiting the severity of the feared event		limiting the frequency of the feared event	
PASSIVE	ACTIVE	PASSIVE	ACTIVE
Wall, Containment, Retention pit, etc.	Fire Fighting System, Water Curtain, etc.	Equipment Design, Overflow Drain, etc.	Safety Valve, Bursting Disk, Safety Instrumented Function, Operating Procedure, etc.

**Table 5.** Definition of safety barriers

A	Alarm
D	Design (e.g. pipe sizing, material choice, ...)
PRD	Pressure Relief Device (Mainly the safety relief valves)
PR	Procedure
SPL	Safety Protection Loop (e.g. Pressure Sensor + PLC + Valve)
O	Other Safety Features

**Table 6.** Definition of residual risk level

fc	Sr	log fr	Fr	Cr
Corrective factor for each safety barrier.	<b>Residual severity</b> of the feared event's consequences.	Log of the scenario's residual frequency.	Residual frequency of the scenario.	Residual criticality
Determined in the GRA using the <b>reliability database</b> table, by experience feedback or expert opinion.	Determined in the GRA using the <b>severity class</b> table. (Table 1)	Determined in the GRA with log fi and corrective factor of each safety barrier. $\log f_r = \log f_i + \sum (f_c)$	Determined in the GRA using the <b>frequency class</b> table.	Determined in the GRA using the criticality matrix.

수행한다. 안전방벽은 항상 작동이 가능한 것(Passive: Always Available) 것과 항상 작동하지 않는 (Active: Could be Unavailable) 것으로 구분할 수 있으며, 자세한 사항은 Table 4에 요약하여 나타내었다.

안전방벽(Safety Barriers)의 종류는 6가지 종류가 있으며, Table 5에 요약하여 나타내었다.

**2) 잔여위험도(Residual Criticality) 산정**

잔여위험도는 초기의 사고 발생확률 및 치명도를 감소시키기 위하여 사용된 안전방벽(Safety Barrier)의 연속사용 고장률( $\lambda$ ) 및 요구고장률(PFD, Probability of Failure on Demand)의 합을 통하여 계산된다.

요구고장률의 계산식은 다음과 같다.

Probability	4	04	14	24	34	44
	3	03	13	23	33	43
	2	02	12	22	32	42
	1	01	11	21	31	41
	0	00	10	20	30	40
	0	1	2	3	4	
Severity						

Fig. 3. Definition of risk mitigation.

$$\text{요구고장률 (PFD)} = \lambda \times \frac{T}{2}$$

T는 안전방벽의 연간 점검횟수를 의미하며, 예를 들면 3년에 1회 점검하면 T=3이고, 매 6개월 마다 1회 점검하면 T=0.5이다. 분자의 2는 요구고장률의 기준이 1년에 안전설비에 대해 1,000번 작동시켜 고장여부를 판단하므로 그 값은 1,000/365 = 2.74이나, 보수적인 값을 넣어서 2로 계산하였다.

공장 및 설비에 설치되어 있거나 반영되어 있는 안전방벽 들을 반영하여 산정하며, 적용방법에 대한 자세한 내용은 Table 6에 나타내었다.

### 2.2.4 위험도의 경감 (Risk Mitigation) 방법

모든 위험도는 인명, 환경 및 재산에 대해서 관리가 필요하며, 모든 프로젝트 및 기존의 설비에 대해서 위험도의 경감은 반드시 충분하게 검토되고, 효과성 측면에서 검토가 필요하며 잔여위험도 위험도가 낮은 지역으로 낮춰야 한다. Fig. 3과 같이 각각의 위험들을 위험도가 낮은 지역인 녹색지역으로 낮추어야 한다.

### 2.2.5. 중요안전요소(EIS, Elements Important for Safety)의 도출

위험성 평가결과 위험도가 높게 평가된 고 위험도, 즉 Fig. 2에 따른 24, 34, 44, 33, 43 및 42를 중요안전요소라 하며, 이러한 초기 위험도는 위험도 경감을 통하여 수용 가능한 위험도로 낮추어야 한다. 또한 위험성 평가결과 위험도가 낮은 것으로 계산되어 녹색지역으로 구분된 낮은 위험도(Low Level Risk)들도 가능하다면 더 낮출 수 있도록 하여야 한다.

## III. 위험성평가 기법의 현장적용

### 3.1. 수소 충전시설에 대한 위험성평가 기법적용

수소는 통상 4가지 방법으로 생산되는데, 물을 전기 분해하여 생산하는 전기분해법, 탄화수소를 고온의

니켈촉매 하에서 반응시켜 생산하는 스팀 리포밍법 (Steam Reforming), 메탄올 리포밍법 및 암모니아 분해법이 있다.

산업계 전반에서 사용되고 있는 기초 원료인 수소의 원활한 공급을 위하여 수소를 고압으로 압축, 저장하는 시설 및 설비를 가동해야 한다. 가연성, 폭발성 가스인 수소를 취급하기 위해서는 안전(Safe)하고 신뢰성(Reliable) 있는 운전 및 운영이 필요하며, 이를 달성하기 위해 신뢰성 있는 정량적 위험성 평가가 필요하다. 위험성 평가 결과 수소 충전시설에 대한 중요안전 요소의 도출 및 이의 효과적 관리를 위하여 수소충전 시설에 대해 GRA 모델을 적용하여 위험성 평가를 실시하였다.

수소 충전시설은 크게 저장탱크, 압축기, 수소가스를 저장 및 운반하는 소형 및 대형실린더로 구성되어 있고, 대상 설비의 주요 목록 및 사양은 아래와 같이 구성되어 있다.

- 1) 수소가스 압축기(Hydrogen Gas Compressor): 최고 충전압력 200 bar.g
- 2) 수소가스 충전 판넬(Hydrogen Filling Panel): 3기
- 3) 수소튜브트레일러(Hydrogen Tube Trailer): 최고 충전압력 200 bar.g

### 3.2. 시설 공정 흐름도(PFD, Process Flow Diagram)

위험성평가 대상 시설은 압축된 수소를 임시저장 및 공정의 압력을 일정하게 유지하는 역할을 하는 압력용기(Buffer Vessel), 수소가스 이송배관, 수소가스 압축기(Compressor, 최고 충전압력 200 bar.g) 2기, 압축된 수소를 각 저장시설에 이송하는 충전 판넬 및 저장시설인 수소 튜브트레일러로 구성되어 있으며, 자세한 사항은 Fig. 4에 나타내었다.

### 3.3. 수행방법 및 수행절차

#### 3.3.1. 초기 위험도 (Initial Criticality) 평가

위험성평가 대상을 선정하고 초기 위험도(Initial Criticality) 평가를 실시한다. 각 셀의 항목에 대해 평가 및 입력방법은 앞서 설명하였으며, 각 셀은 다음과 같이 입력 및 계산되었다.

- Index 항목: 위험성 평가와 관련된 내용 및 P&ID (Piping & Instrument Diagram) 내용을 입력한다.
- Concerned Element 항목: 위험성 평가를 실시하는 설비를 입력하며 여기에서는 수소가스파이프에 대해서 평가를 실시하였다.
- Plant or Equipment Status 항목: 장치 및 설비의 상태를 표시하며 정상운전, 정비 및 비상정지 등의 상태를 표시한다.
- Dangerous Substance (1) or Not (0) 항목: 위험물

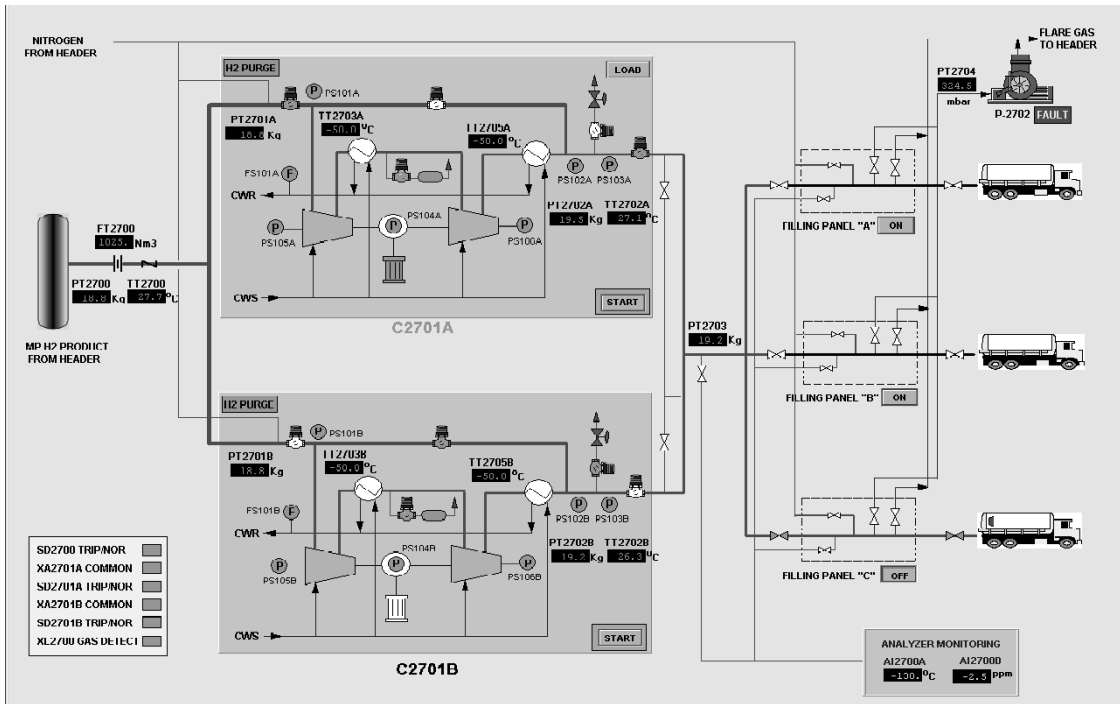


Fig. 4. Process flow diagram(PFD) for hydrogen filling center.

- 질의 존재여부를 표시하며 존재하면 1로 입력하고, 없으면 0으로 표시한다.
- Feared Event 항목: 사고발생 시나리오에 대해 입력하며, 여기에서는 과압으로 인하여 수소파이프 라인이 파열되는 사고 시나리오가 선정되었다.
- Consequences of Feared Event 항목: 사고발생의 여파에 대해 입력하는 항목으로서 여기에서는 수소가스의 누출로 인한 화재 및 폭발사고 발생으로 선정되었다.
- 사고원인(Causes) 항목: 사고원인을 표기하는 항목이며 여기에서는 수소가스 공급시설 또는 공급자의 압력조정밸브(Pressure Control Valve)가 고장이 발생한 하였으며, 이로 인하여 과압으로 인한 파이프의 파열 및 화재/폭발이 사고의 원인으로 선정되었다.
- Effect 항목: 발생한 사고가 안전이면 "S"로, 환경은 "E"로, 재산손실은 "P"로 입력한다.
- Si(Initial Severity) 항목: 초기 치명도를 의미하고 Table 9의 치명도(Severity) 표에 의하여 산정하며, 여기에서는 수소배관의 파열로 인하여 수소누출 및 화재/폭발로 인하여 운전자가 심각한 부상을 입을 가능성이 있으므로 치명도 레벨 "3"으로

선정하였다.

- log fi 항목: 초기 발생확률에 사용자의 이해 및 계산의 편의를 위하여 십진수의 숫자로 바꾸기 위해 log를 취하였으며 계산된 식은 아래와 같다.

$$\log fi = \log(OP \times (\lambda_{PCV} \times YEAR)) + \log(10^{-14} + I_{159})$$

여기서, "OP"의 의미는 MS-Excel 프로그램의 매크로(Macro) 기능을 이용한 "Short Cut"의 함수로서, 운전원이 사고현장에 상주하는 시간을 의미하며 값은 0.08이다.

" $\lambda_{PCV}$ "는 위의 경우와 같이 매크로 기능에 의해 자동으로 계산된 수치이며, 부록1의 설비에 대한 신뢰도 데이터(Reliability Database for Equipment) 항목 중  $10^6$  시간당 압력조정밸브(PCV, Pressure Control Valve)의 고장률로서[21] 값은 0.35회이다.

"YEAR"의 의미는 수소압축설비의 연간 운전시간을 의미하며 값은 8,760 시간이다.

$\log(10^{-14} + I_{159})$ 항은  $I_{159}$  칼럼의 시나리오 발생 시나리오가 계산된 사고 발생확률과의 관련성에 대해 검토하고 입력하는 항목으로서, 관련이 있으면 "1" 없으면 "0"을 입력한다.



Table 7. Methods of risk assessment for initial criticality

Index	Concerned element	Plant or Equipment status	Accident										
			Dangerous Substance (1) or not (0)	Feared event	Consequences of feared event	Causes	Yes (1) / No (0)	Effect	Si	log fi	Fi	Ci	Type
GASEOUS SOURCE (FROM PIPE-LINE OR TRAILERS)													
_Source of H2 & interfaces_159	GH2 pipe	Normal operation	Hydrogen	Pipe rupture due to high pressure of H2 source	H2 release Potential fire / Explosion	Failure of one pressure control valve managed by the H2 supplier	1	S	3	-3.59	2	32	PRD

- Fi(Initial Probability) 항목: 초기 사고발생 확률을 의미하며 계산된 발생확률의 값이  $1.0 \times 10^{-3.35}$  이므로 레벨 "2"에 해당하는 초기 발생확률로 계산되었다.
- Ci(Initial Criticality) 항목: 초기 치명도와 초기 사고발생확률의 조합으로 판정되는 초기 위험도를 의미하며 Fig. 2의 위험도 구분표에 따라 "32"의 중 위험도(Intermediate Area)군으로 평가되었다. 발견된 위험도를 감소시키기 위하여 위험도 경감이 필요한 것으로 계산되었으며 사고시나리오 선정 및 초기 위험도 평가에 대한 자세한 내용은 Table 7에 나타내었다.

3.3.2. 잔여 위험도 (Residual Criticality) 평가

앞에서 평가된 "32"의 위험도를 저 위험도(Acceptable Risk)로 감소시키기 위하여 6가지의 안전방벽(Safety Barrier)들을 적용시켜 목표하는 저 위험도로 낮추는 작업을 실시하며, 배관 및 계장도면(P&ID)에 나타나 있는 안전방벽들을 반영하여 위험도 경감을 실시한다.

만약, 위험도가 요구하는 낮은 수준까지 낮추어지지 않을 경우 추가 안전방벽을 설치하여 위험도를 낮추어야 한다.

위험도를 낮추기 위한 안전방벽에는 아래의 6가지 종류가 있다.

- 가) A: 경보기(Alarm)
- 나) D: 설계(Design) 반영사항 - 파이프의 직경, 재질 등
- 다) PRD: 압력완화장치(Pressure Relief Device) - PSV, PCV 등
- 라) PR: 절차서(Procedure) - 표준운전절차서, 매뉴얼 등
- 마) SPL: 안전제어장치 (Safety Protection Loop) - 압력센서 +PLC +밸브
- 바) O: 기타의 안전행위 (Other Safety Features)

잔여위험도 평가표의 각 셀에는 다음과 같이 입력하고 계산을 수행하였다.

- Type 항목: 위에서 언급된 안전방벽의 6가지 종류 즉, 경보기, 설계반영 사항, 압력완화장치, 운전매뉴얼, 안전제어장치 및 기타 안전행위 중 하나를 선택하여 입력하며, 여기에서는 압력완화장치가 초기 위험도를 낮추기 위한 안전방벽으로 선택되었다.
- Limiting the Severity of the Feared Event 항목: 발생사건의 치명도를 줄이기 위한 안전방벽이 있는 경우에 입력하는 항목이다.
- Limiting the Frequency of the Feared Event 항목: 발생사건의 발생확률을 줄이기 위한 안전방벽이 있는 경우에 입력하는 항목이며, 여기에서는 압력완화장치를 이용하여 과압으로 인한 수소 가스 파이프 라인의 파열 및 화재/폭발의 위험도를 줄이기 위한 안전방벽이 사용되었다.
- fc(Corrective Factor) 항목: 안전방벽에 대한 교정변수의 항목으로서 설치된 안전방벽에 대하여 위험도 경감 정도를 계산하여 반영 하였으며, 과압 발생 시에 배관 내에 흐르는 수소가스의 유량 100%를 배출할 수 있는 압력완화장치 1개를 설치하여 위험도를 경감시키는 방법이 적용되었다. 설치된 압력완화장치는 항상 작동하는 것이 아니기 때문에 고장률을 적용하여 위험도 경감 수치를 계산하며, 계산식은 아래와 같다.

$$fc = \log ((PFD_{PSV} \times TESTPSV \times 10^{-3}))$$

여기서, " $PFD_{PSV}$ "는 압력완화장치가 1년에  $10^3$  번 작동했을 경우의 요구고장률을 말하며 값은 0.47이다. " $TESTPSV$ "는 압력완화장치에 대한 점검주기를 의미하며, 위험성평가자들이 결정한 바와 같이 (3년에 1회 정비) 그 값은 3이다.

이 기준을 바탕으로 fc를 계산한 식과 결과 값은 아래와 같다.

**Table 8.** Methods of risk assessment for residual criticality

Type	n° EIS	Limiting the SEVERITY of the feared event	Limiting the FREQUENCY of the feared event	Yes (1) / No (0)	fc (Corrective factor)	Sr	log fr	Fr	Cr
PRD			Pressure safety valve (PSV) 1x100% upstream the gas pressure regulator station or on incoming pipe	1	-2.85	3	-6.44	1	31

$$fc = \log((PFD_{PSV} \times TESTPSV \times 10^{-3})) = -2.85$$

- Sr 항목: 초기 치명도에 안전방벽을 적용한 후에 결정되는 값으로서 여기에서는 적용되지 않았으나, 초기 치명도 계산과 동일한 방법으로 계산한다.
- log fr 항목: 사건의 잔여 발생확률에 log를 취하여, log fi(초기 사고발생확률)와 안전방벽의 교정변수(fc)를 합산하여 산정하며, 식과 계산 값은 아래와 같다.

$$\log fr = \log fi + \sum(fc) = (-3.59) + (-2.85) = -6.44$$

- Fr(잔여 발생확률) 항목: Table 2의 기준에 따라 발생 잔여확률을 산정하며, 그 값이  $1.0 \times 10^{-6.44}$  이므로 수준 "1"에 해당된다.
- Cr(잔여 위험도) 항목: 잔여 치명도(Sr) 및 잔여 발생확률(Fr)의 조합으로 잔여위험도가 산정되며, 여기에서는 "31"로 판명되었고 Fig. 2의 위험도 평가 구분표에 따라 저 위험도로 판명되었다.

위험도는 가능하면 낮출수록 좋으므로 추가로 안전방벽을 설치할 수 있으며, 통상 사고의 치명도를 낮추는 것보다 발생확률을 낮추는 방법이 투자비용 측면에서 효과적이라고 할 수 있다. 안전방벽의 적용 및 잔여 위험도를 평가한 결과는 Table 8에 나타내었다.

**3.4. 평가기준**

위험도 평가결과에 따라 녹색 부위로 표시되는 저 위험도 군(Low Level Risk Area), 노란색 부위로 표시되는 중 위험도 군(Intermediate Area) 및 적색으로 표시되고 위험도가 높은 고 위험도 군(Unacceptable Risk Area)으로 평가 하며, 특히 고 위험도 군으로 평가된 24, 34, 44, 33, 43 및 42를 저 위험도로 낮추기 위해 사용

되었던 6종의 안전방벽들을 중요 안전요소(EIS, Elements Important for Safety)라 한다. 이는 수소 충전시설의 운전 및 안전 유지를 위하여 가장 중요한 사항이라 할 수 있으며, 위험도에 따른 자세한 평가기준은 Fig. 2에 따라 실시한다.

**3.5. 결과분석**

**3.5.1. 수소 충전시설에 대한 위험성평가 영역 구분 및 사고시나리오**

수소 충전시설에 대한 위험성평가 영역은 아래의 3개 부분으로 분리하여 총 23개의 사고시나리오를 바탕으로 위험성 평가를 수행 하였으며 자세한 내용은 다음과 같다.

**1) 수소가스 공급부분(H<sub>2</sub> Source): 3개 사고 시나리오**

- 가) 수소 공급부의 과압으로 인한 파이프라인 파열
- 나) 압력조절 부 후단의 파이프 파열
- 다) 수소 공급배관에서 수소가스 소량분출 (12mm hole)

**2) 수소가스 압축부분(H<sub>2</sub> Compression): 14개 시나리오**

- 가) 수소 압축기 흡입부(수소압축기 저압부)로 공기의 유입
- 나) 압축기 가동정지(Shutdown)시 압축기로 공기 유입
- 다) 압축기 흡입단에서 과압 발생
- 라) 압축기 토출단에서 과압 발생
- 마) 과압으로 인한 프랙시블 호스의 파열 또는 수소 가스 누출
- 바) 압축기 케이싱(casing)에 고온발생
- 사) 압축기의 윤활계통에 과압 발생

- 아) 압축기 냉각수 라인으로 고압의 수소가스 유입
- 자) 압축기 크랭크 케이스의 오일 온도 상승(High temperature)
- 차) 운전자가 압축기의 뜨거운 부분에 접촉됨(예, 케이스 등)

**3) 수소가스 저장부분(H<sub>2</sub> Storage): 6개 시나리오**

- 가) 수소 저장소에 수소가스의 축적(폭발하한 이상)
- 나) 충전 시스템에 수소가스 압력이 차있고 운전되고 있는 상태에서 운전원(작업자)이 실린더 또는 번들(실린더 묶음)을 조작함
- 다) 스트레스 및 누후화로 인한 플렉시블 호스의 파열 또는 수소가스 누출
- 라) 플렉시블 호스의 파열 또는 수소가스 누출
- 마) 수동 충전 작업 중, 수소 트레일러에 과압 발생

**3.5.2. 위험성평가 결과**

**1) 초기위험도(Initial Criticality) 평가결과**

초기위험도 평가 실시결과 수소 가스의 누출로 인한 화재, 폭발 사고시나리오 총 23개의 사고시나리오 중, 고 위험도 군(Unacceptable Area) 8개 항목, 중 위험도 군 (Intermediate Area) 14개 항목 및 저 위험도 군(Low Level Risk Area) 1항목으로 평가 되었으며, 이와 관련된 초기위험성 평가결과는 Fig. 5에 나타내었다.

**2) 안전방벽을 반영한 잔여 위험도**

초기 위험도 평가결과를 바탕으로 수소 충전시설에 대해 고 위험도 군 11항목, 중 위험도 군 14항목 및 저 위험도 군 1항목에 대해 위험도 경감을 실시하였으며, 위험도 경감을 위하여 반영한 안전방벽(Safety Barrier)들은 안전제어장치, 압력완화장치, 절차서 및 안전 조치 행위이다. 총 23항목의 사고 시나리오에 대해 안전방벽들을 적용시킨 후, 계산된 위험도 평가결과는

		Severity (치명도)				
		0	1	2	3	4
Probability (발생가능성)	4		4			
	3		1	4	11	
	2				3	
	1					
	0					

**Fig. 5.** Initial risk analysis results for hydrogen filling center.

모두 저 위험도 군으로 평가 되었으며, 수소 충전시설에 대한 자세한 잔여위험도 평가 결과는 Fig. 6에 나타내었다.

**3) 중요안전요소 도출결과 및 안전방벽**

위험성 평가결과 수소 충전시설의 안전한 운전 및 사고예방을 위해서 반드시 유지 및 관리해야 할 중요 안전요소는 24, 34, 44, 33, 43 및 42의 고 위험도 군으로 평가된 위험도를 줄이기 위하여 반영 되었던 안전방벽을 말하며, 평가결과 총 8개의 중요안전요소가 도출되었다.

8개의 중요안전요소들에 대한 안전방벽들(Safety Barriers)은 안전제어장치(SPL) 2, 압력완화장치(PRD) 4, 절차서(PR) 1 및 기타 안전행위(O, Other Safety Features) 1 항목으로 도출 되었으며, 각 설비 및 장치에 대해 최소한으로 점검 및 확인해야 할 연간주기도 표시하였다.

여기서, "Corrective Factor" 의미는 해당 안전방벽(Safety Barrier)이 위험도를 낮추는데 얼마나 많은 기여를 하는지에 대한 가중치를 의미한다. 선정된 중요 안전요소 11개는 수소 충전시설의 안전을 위하여 매우 중요한 사항들이지만 가중치의 관점에서 볼 때, 압력완화장치가 가장 높은 중요도를 차지하며, 다음으로 수소 압축기 전단 배관에 산소검지기의 설치 및 이의 알람 발생 시에 설비를 자동으로 정지시키는 장치인 안전 제어장치이다.

위험성평가를 실시한 수소 충전시설의 안전방벽에 대한 점검주기는 사용설비의 치명도 및 발생확률을 낮추기 위하여 설정된 정기 점검주기이며, 공장 또는 설비들에 대한 정기보수(Turnaround)의 기준으로 설정할 수 있는 장점이 있다.

수소 충전시설의 경우에는 1년에 1회 반드시 점검을 실시해야 하는 항목들이 PSV(Pressure Safety Valve) 및 파열판(Rupture Disk)이므로 이를 이중으로 설치

		Severity (치명도)				
		0	1	2	3	4
Probability (발생가능성)	4					
	3					
	2	1		1		
	1		4		3	
	0		2	2	10	

**Fig. 6.** Residual risks for hydrogen filling center.

**Table 9.** Elements important for safety(EIS) and safety barriers for hydrogen filling center

Concerned Element	Feared Event	EIS type	Barriers limiting the SEVERITY of the feared event	Barriers limiting the FREQUENCY of the feared event	Initial Criticality (SIF)	Residual Criticality (SrFr)	Test frequency (Year)	Corrective factor
<b>Compression</b>								
H2 compressor	Low pressure in the compressor suction line leading to air ingress in the H2 compressor	SPL		_Application of GT-PR-COM-040 : PSL on H2 compressor suction line trips the H2 compressor (hard wired logic)	33	30	3.00	-1.68
		SPL		_Application of GT-PR-COM-040 : Oxygen analyser installed downstream the last potential vacuum source. Automatic shutdown of the compressor in case of detection of oxygen (setpoint to be defined) (hard wired logic)	33	30	3.00	-2.05
		SPL		_Application of GT-PR-COM-040 : PSL on H2 compressor suction line trips the H2 compressor (hard wired logic)	33	30	3.00	-1.68
		SPL		_Application of GT-PR-COM-040 : Oxygen analyser installed downstream the last potential vacuum source. Automatic shutdown of the compressor in case of detection of oxygen (setpoint to be defined) (hard wired logic)	33	30	3.00	-2.05
	Air ingress in the compressor during a compressor shutdown	PR		_Start up procedure as per GT-PR-COM-040 with check of the compressor suction pressure	33	30		-1.00
		SPL		_Application of GT-PR-COM-040 : Oxygen analyser installed downstream the last potential vacuum source. Automatic shutdown of the compressor in case of detection of oxygen (setpoint to be defined) (hard wired logic)	33	30	3.00	-2.05
	High pressure in the compressor suction line	PRD		_Pressure safety valve on the compressor suction line	33	30	1.00	-2.85
	High pressure at compressor discharge	PRD		_Pressure safety valve on compressor discharge designed for full flow and sent to safe location	33	30	1.00	-2.85
H2 compressor - water cooling circuit	Leak of HP hydrogen to the cooling water circuit	PRD		_Pressure safety valve on compressor cooling water circuit	33	30	1.00	-2.85
<b>Filling</b>								
Filling circuit	Substantial H2 leak in the filling room	O		_Automatic check of the tightness of the connections (Recipe zero done by DCS), pressurization at 5 bar of the capacities and check of the pressure several minutes later to detect a leak of the system	33	11		-1.30
H2 trailers	Overpressure in the trailer during manual filling	PRD		_Pressure safety valve on filling circuit upstream cylinders (set point = pressure allowing cylinders filling and lower than cylinders test pressure)	33	30	1.00	-2.85

하면, 낮은 위험도에서도 2배의 정기보수 기간을 늘릴 수 있는 장점이 있으나 이는 관련설비에 대한 투자비용과 운전이익(Operating Profit)을 비교하여 결정해야 하는 사항이다.

수소 충전시설에 대한 위험성 평가 결과 도출된 중요안전요소 및 위험도를 낮추기 위해 설치된 안전방벽, 초기위험도, 잔여위험도 및 점검주기에 대해서 Table 9에 자세히 나타내었다.

### 3.6. 사고사례를 통한 위험성 평가의 신뢰성 검증

#### 3.6.1. 사고사례와 위험성 평가결과의 비교

사고사례에 적용되었던 위험성평가결과에서 사고의 근본원인인 수소 충전시설에 공기유입의 차단이 설비의 안전한 운전과 유지를 위해 반드시 필요한 중요안전요소에 포함되어 있는지, 또한 안전방벽(Safety Barrier)은 사고결과보고서와 일치하는 지를 검토해 보고자 한다.

전라북도 군산시에 소재한 000산업(주) 수소 충전 시설에서 수소 트레일러 충전 및 공급공정에서 피해자가 트레일러 내 압축된 수소 농도 측정을 위한 시료 채취과정에서, 트레일러와 수소 공급라인의 배관 연결부분을 분리하던 중, 수소트레일러의 실린더 4개가 폭발하여 1명이 사망하고 1명이 부상당한 재해가 2010년 3월에 발생하였다. 수소트레일러는 수소를 저장하는 실린더가 20개 묶여 있는 차량운반용 설비로서 수소를 고압(200 bar.g)으로 압축하여 필요한 고객사에 차량운송을 통하여 공급하는 설비이다.

사고 수소 충전시설은 정량적 위험성 평가를 실시한 설비와 유사한 설비로 구성되어 있으며 Fig. 7에 나타내었다.

#### 3.6.2. 사고의 원인

수소 가스의 화재 및 폭발이 발생하기 위해서는 연소의 3요소가 충족되어야 한다. 즉 가연물, 산소 또는 공기, 점화원의 조건이 갖춰져야만 화재 및 폭발이 진행될 수 있다. 폭발의 원인은 수소 실린더에 산소가 유입되어 폭발범위 내로 존재한 상태에서 피재가가 시료채취를 위해 연결부위를 해체 하던 중, 금속의 전위 차로 인하여 발생된 정전기(점화원)에 의해 폭발이 발생될 가능성이 높은 것으로 판단된다.

#### 3.6.3. 수소 충전시설의 안전대책

화재 및 폭발 사고예방을 위해서는 화재 및 폭발의 3요소인 가연물, 산소(공기) 및 점화원(불꽃) 중 어느 한 요소를 제어할 경우 사고를 예방할 수 있다. 수소를 압축하여 충전하는 공정의 특성상 가연물을 제거하기는 어려우며, 수소 압축기로 유입되는 산화제(공기)를 제어하여 폭발재해를 예방하는 것이 바람직한 방법이며, 이러한 사고를 예방하기 위하여 다음의 두 가지 사항을 반드시 실시해야 한다.

산화제(공기) 제어방법으로 전해조 공정의 보수 등의 사유로 가스 홀더의 양압이 유지되지 못할 경우, 외부에서 공기가 홀더로 유입되는 문제점을 예방하기 위해 공급사의 전해조 정비 후 압축기 가동 시에는 수소 내

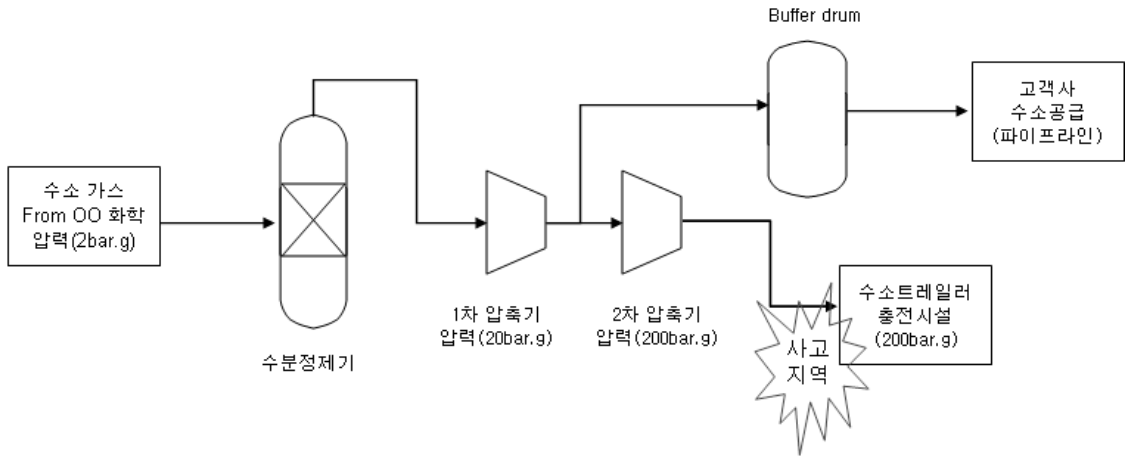


Fig. 7. Schematic diagram for hydrogen filling center.



사진1 : 폭발사고 현장 모습



사진2 : 폭발발생 지점 모습



사진3 : 폭발로 비산한 수소 실린더



사진4 : 파열된 수소 실린더

Fig. 8. Accident pictures of hydrogen filling center.

**Table 10.** Prevention measures for hydrogen filling center explosion

Concerned Element	Feared Event	EIS type	Barriers limiting the SEVERITY of the feared event	Barriers limiting the FREQUENCY of the feared event	Initial Criticality (y (SiFi))	Residual Criticality (SrFr)	Test frequency (Year)	Corrective factor
<b>Compression</b>								
H2 compressor	_Low pressure in the compressor suction line leading to air ingress in the H2 compressor	SPL		_Application of GT-PR-COM-040 : PSL on H2 compressor suction line trips the H2 compressor (hard wired logic)	33	30	3.00	-1.68
		SPL		_Application of GT-PR-COM-040 : Oxygen analyser installed downstream the last potential vacuum source. Automatic shutdown of the compressor in case of detection of oxygen (setpoint to be defined) (hard wired logic)	33	30	3.00	-2.05
		SPL		_Application of GT-PR-COM-040 : PSL on H2 compressor suction line trips the H2 compressor (hard wired logic)	33	30	3.00	-1.68
		SPL		_Application of GT-PR-COM-040 : Oxygen analyser installed downstream the last potential vacuum source. Automatic shutdown of the compressor in case of detection of oxygen (setpoint to be defined) (hard wired logic)	33	30	3.00	-2.05
	_Air ingress in the compressor during a compressor shutdown	PR		_Start up procedure as per GT-PR-COM-040 with check of the compressor suction pressure	33	30		-1.00
		SPL		_Application of GT-PR-COM-040 : Oxygen analyser installed downstream the last potential vacuum source. Automatic shutdown of the compressor in case of detection of oxygen (setpoint to be defined) (hard wired logic)	33	30	3.00	-2.05
	_High pressure in the compressor suction line _High pressure at compressor discharge	PRD		_Pressure safety valve on the compressor suction line	33	30	1.00	-2.85
		PRD		_Pressure safety valve on compressor discharge designed for full flow and sent to safe location	33	30	1.00	-2.85

산소 및 염소가스 유입 유무를 파악하기 위한 농도분석을 실시해야 한다.

산소 농도계와 압축기를 연동시키는 방법으로서, 압축기 전단에 산소 농도계를 설치하여 공급되는 가스 중의 산소가 일정범위 이상이면 압축기가 자동으로 정지하도록 연동시스템을 구축해야 한다. 수소충전 시설의 폭발사고와 관련된 사진자료는 Fig. 8에 나타내었다.

**3.6.5. 사고의 원인과 위험성평가 결과 검토**

사고사례에서 수소 충전시설의 폭발원인은 수소 트레일러에 공기의 유입 및 원인미상의 점화원으로 인하여 폭발사고가 발생하였다. 수소 충전시설의 화재 및 폭발을 예방하기 위해서는 반드시 수소압축기 전단에 산소측정기를 설치해야 하며, 만약 압축되는 수소가스 중 산소농도가 규정된 농도(산소:0.01%) 이상으로 유입될 경우 압축기가 자동으로 정지하는 안전제어장치(SPL, Safety Protection Loop)를 설치하도록 3번 평가되었으며, 관련 제어장치의 점검주기는 3년에 1회씩 실시해야 한다고 평가 되었다.

폭발사고 발생 후, 현장의 운전 상황을 조사해본 결과 산소농도 측정기는 설치되어 있었고, 2시간에 1번씩 작업자가 현장에서 확인하고 운전기록지에 기록하는 것으로 되어 있었으나 작업자가 이를 수행하지 않았다. 규정된 농도 이상의 산소가 수소 압축기에 유입시 압축기를 자동으로 정기시키는 기능을 하는 자동 차단장치도 설치되지 않았다.

따라서, 수소충전시설의 안전한 운전, 화재 및 폭발 사고의 예방을 위해서는 위험성평가 결과 도출된 중

요안전요소를 반드시 설치해야 하고, 언급된 안전방벽들(Safety Barriers)에 대해서 정해진 점검주기에 따라서 점검해야만 사고를 예방할 수 있다. 위험성평가 결과 11개의 주요안전요소 중에 산소유입으로 인한 위험도 평가결과 및 예방을 위한 내용은 Table 10에 나타내었다.

**IV. 결 론**

수소 충전시설에 대하여 3개 부분 총 23개의 사고시나리오에 대하여 정량적 위험성평가 모델인 GRA를 수행하였으며, 초기위험도 평가결과 고 위험도 8항목, 중 위험도 14항목 및 저 위험도 1항목으로 평가되었다. 초기위험도 평가결과를 바탕으로 고 위험도 8항목 및 중 위험도 1항목에 대해 위험도를 낮추기 위한 안전방벽을 적용하여 잔여 위험도를 평가 하였으며, 23개 사고시나리오 모두 저 위험도로 평가되었다.

수소 충전시설의 안전한 운전 및 사고예방을 위해 반드시 관리해야 할 주요안전요소 8항목을 도출하였으며 각 항목에 대해 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

첫째로 4개의 압력완화장치(Pressure Relief Device, PRD)로서 수소압축기 전단 흡입 배관에 설치된 PSV(Pressure Safety Valve), 수소압축기 후단 토출 배관에 설치된 PSV, 수소 압축기의 냉각수 배관에 설치된 PSV 및 수소 충전실린더(트레일러) 전단에 설치된 PSV이다. 각 PSV에 대한 정기점검 주기는 1회/년으로 결정되었고, 위험성평가 시에 위험을 경감시키는 안전방벽의 수치가 2.85이다. 이는 다른 4개의 주요안전요소보다 더 중요하게 관리해야 함을 말한다.

둘째로 2개의 안전제어장치(Safety Protection Loop, SPL)이며, 수소 압축기의 흡입 배관의 압력이 설정압력보다 낮은 경우 압축기를 자동으로 정지시키는 제어기능, 압축기 흡입 배관에 산소측정기를 설치하여 산소농도가 기준 이상으로 나타날 경우 압축기를 정지시키는 제어기능이다. 각 SPL에 대한 정기점검 주기는 1회/3년으로 결정되었고, 위험을 경감시키는 안전방벽의 수치가 각각 1.68, 2.05로 도출되었다.

셋째로 1개의 기타 안전행위(Other Safety Features)로서 실린더 및 트레일러의 접속(Connection)이 제대로 되었는지를 자동으로 확인하는 기능이며, 안전방벽의 수치가 1.30으로 도출되었다.

넷째로 1개의 절차서(Procedure, PR)이며, 수소 압축기의 가동개시 전에 압축기의 흡입압력을 점검하는 절차로서 1회/3년 주기로 절차가 원활히 시행되고 있는지를 점검해야 하며 안전방벽의 수치는 1.00으로 도출되었다.

또한 수소 충전장 폭발 사고사례 분석을 통하여 GRA모델을 이용하여 평가하고 이 결과로 도출된 중요안전요소(EIS)의 신뢰성을 검증 하였다.

### 참고문헌

- [1] International Labor Organization, "Prevention of Major Industrial Accidents", ILO, Geneva, (1993)
- [2] Crowl D. A. and Louver J. F., "Chemical Process Safety : Fundamental with Application", 3<sup>rd</sup> Ed., Prentice Hall, New Jersey, (2009)
- [3] CCPS, "Guideline for Process Equipment Reliability Data with Data Tables", AIChE, New York, (1989)
- [4] Jung J. H., Lee Y. S., Kang S. J. and Kwon H. M., "A Study on the Development of E-HAZOP Technique", Korea Risk Management Society Seminar, 10, 51-64, (1997)
- [5] Korea Gas Safety Corporation, "Qualitative Risk Assessment", Korea Association of Professional Safety Engineers, Seoul, (1999)
- [6] American Petroleum Institute, "Guide for Pressure - Relieving and Depressuring System : API Recommended Practice 521", 3<sup>rd</sup> Ed., Washington D. C., (1990)
- [7] Council of the European Communities, "Council Directive on the Major Accident Hazards of Certain Industrial Activities", Official Journal of the European Communities, (1982)
- [8] CCPS, "Plant Guideline for Technical Management of Chemical Process Safety", AIChE, New York, (1992)
- [9] CCPS, "Guidelines for Auditing Process Safety Management Systems", AIChE, New York, (1995)
- [10] CCPS, "Guidelines for Process Safety Documentation", AIChE, New York, (1995)
- [11] CCPS, "Guideline for Hazard Evaluation Procedures CCPS", AIChE, New York, (1992)
- [12] Dow Chemical Co., "Dow's Fire & Explosion Index Hazard Classification Guide", 7<sup>th</sup> Ed., AIChE, Pittsburgh, (1994)
- [13] David J. Smith, "Reliability and Maintainability in Perspective", 3<sup>rd</sup> Ed., (1988)
- [14] Gesser H.D. and Hunter N.R., "A Review of C-1 Conversion Chemistry", Catalysis Today, **42**, 183-189, (1998)
- [15] Ruckenstein E. and Hu Y.H., "Carbon Dioxide Reforming of Methane over Nickel/Alkaline earth metal Oxide Catalysts", Applied Catalyst A: General, **133**, 149-161, (1995)
- [16] CCPS, "Guidelines for Chemical Process Qualitative Risk Analysis", AIChE, New York, (1989)