

LPG 충전시설에 대한 신뢰도 분석과 정량적 위험성 분석에 관한 연구

진 상 화 · 김 태 우 · 김 인 태* · †김 인 원 · 여 영 구**

건국대학교 화학공학과

* 한국화재보험협회

** 한양대학교 화학공학과

(2001년 9월 30일 접수, 2001년 11월 5일 채택)

A Study on Reliability Analysis and Quantitative Risk Analysis for Liquefied Petroleum Gas Station

Sang-Hwa Jin, Tea-Woo Kim, In-Tae Kim*, In-Won Kim¹⁾ and Yeong-Koo Yeo**

Department of Chemical Engineering, Konkuk University, Korea

**Korean Fire Protection Association*

*** Department of Chemical Engineering, Hanyang University, Korea*

(Received 30 September 2001 ; Accepted 5 November 2001)

요 약

본 연구에서는 LPG 충전소에 대하여 Fussell-Vesely 중요도와 RDF 및 RIF 중요도를 수행하여 위험성 등급(Risk Rank)을 설정하였다. 설정된 위험성 등급에서 위험성이 가장 큰 장치 및 설비에 대하여 정량적 위험성 분석을 수행하였다.

LPG 충전소에 대한 중요도 분석결과 외부사고가 가장 위험하다고 확인되었으며, ekda으로 구조물 결함과 파이프 배관의 부식의 위험등급이 높았다. 정량적 위험성 분석 결과로는 LPG 충전소 저장탱크의 완전히 파열하였을 경우에 대한 BLEVE의 경가 발생하였을 경우에 복사열에 의해 공정 설비에 손해를 입히기에 충분한 거리는 46.3m로 분석되었다.

Abstract - For a Liquefied Petroleum Gas(LPG) station, the reliability analysis, such as Fussell-Vesely importance, risk decrease factor and risk increase factor, was carried out and the risk ranks of events were determined. In order to confirm the degree of the risks identified in the reliability analysis, the quantitative risk analysis was done for the equipments which had the large values of risk ranks.

As a result of the importance analysis for the LPG station, the external event was identified as the most riskful event. The defect of construction structure and the pipe corrosion were riskful as well. The result of quantitative risk analysis showed that the length of 46.3 meters were estimated to damage the process equipments by the thermal flux from the catastrophic rupture of storage tank in Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion.

Key words : Reliability Analysis, Quantitative Risk Analysis

1. 서 론

우리나라의 천연가스 산업은 1983년 인도네시아와 20년간의 장기 도입 계약을 맺고, 한국가스공사가 발족된 후, 1987년부터 수도권 지역을 대상으로 공급되기 시작하면서 본격화되었다. 충전의 취사용, 택시용 등의 이용도가 한정되어 있던 가스가 최근에는 가스보일러의 보급으로 인한 냉방용, 산업용, 자동차용 등 각 분야에서 복잡하고 다양한 형태로 사용되고 있다[1]. 이제 가스는 국민생활과 산업활동에 없어서는 안될 가장 중요한 역할을 담당·수행하고 있다. 다량으로 취급되는 고압가스의 종류는 해마다 증가하고 있다. 따라서 이러한 소비 증가와 보급에 따른 제반문제를 원활하게 해결하기 위해서 가스 생산시설, 대형 저장시설, 운송시설, 저장·충전시설 등의 증설을 요구하고 있는 실정이다[2]. 이에 따라서 대형 가스산업 시설에 대해서 크고 작은 다양한 사고가 발생하고 있으며, 이러한 대형 가스산업 시설물의 안전성 확보를 위하여 1995년 산업안전보건법에 PSM(Process Safety Management) 보고서 작성을 의무화하는 법안을 제정하였으며 1996년부터 시행한 SMS(Safety Management System) 제도는 국내 안전문화에 많은 영향을 가져왔다[3]. 이러한 정부정책의 시행과 크고 작은 사고 때문에 가스산업 시설에 대해서 여러 가지 방법의 정성적·정량적 위험성 분석이 수행되고 있다. 이러한 위험성 평가 방법들의 특성은 장치 및 설비에 대한 최악의 시나리오를 가정하여 시스템에 대한 위험도를 평가하는 결정론적 방법이 주로 이용되어왔다. 따라서 장치가 시스템에 어느 정도의 중요도를 가지고 있는지 또는 장치가 시스템 상에 어느 정도의 기여도를 가지고 있는지 분석할 수 없으며, 장치가 가지고 있는 신뢰도 데이터에 따라서 위험성의 증가·감소의 효과를 분석할 수 없다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 확률론적 방법인 신뢰도 분석이 이용되기 시작했으며, 현재 우리 나라의 신뢰도 분석은 초기단계라고 할 수 있다. 우리 나라에서 신뢰도 분석을 위해 개발된 도구로는 한국원자력 연구소(KAERI; Korea Atomic Energy Research Institute)에서 개발된 KIRAP이라는 분석도구가 있으며, 화학공장의 위험설비 및 기기에 대한 신뢰도 분석을 위한 데이터베이스 구축에 많은 시간과 비용을 투자하고 있다[4].

따라서 본 연구에서는 LPG 충전시설에 대하여 개개의 장치가 가지는 중요도를 분석하였으며 장치가 가지고 있는 신뢰도 데이터를 분석하여 장치의 고장율의 증가·감소에 따라서 어느 정도 위험성의 증가·감소하였는지 분석하였다. 또한 분석된 신뢰도 자료를 통하여 정량적 위험성 분석을 수행하였다.

2. 이론적 배경

신뢰도 분석은 안전과 효율 그리고 경제적 설계와 산업시설의 운전에서 매우 중요한 역할을 담당하고 있으며, 설계자들이 증점적으로 분석·검토하여야 하는 항목이기도 하다.

매개변수(parameter)에 대한 중요도의 계산은 기본사상과같은 유사한 방법에 따라서 계산이 수행되어진다. 계통에 대한 최소단절군이 구해지면 최소단절군을 구성하는 각 기본사상에 대하여 중요도 분석(Importance Analysis)을 수행한다. 중요도 분석은 완전한 구성요소나 하부조직으로부터의 결함에 대한 위험성 평가의 등급과 정량화를 정하는 분석방법이다[5].

기본사상에 대한 중요도는 이용불능상태에 각 기본사상이 기여하는 정도를 수치로 나타내는 것이다. 중요도 분석은 플랜트에서 정상사상의 사건 발생빈도 관점에서 주요 사고, 계통고장, 기계고장, 및 인간오류 등을 찾기 위하여 수행한다. 중요도 평가 기법에는 여러 가지가 있는데 그 중 Fussell-Vesely(FV) 중요도, 위험성 증가요소 (RIF: Risk Increase Factor), 위험성 감소요소 (RDF: Risk Decrease Factor)의 3가지 중요도를 평가한다.

지금까지 수행되고 있는 정량적 위험성 분석(QRA; Quantitative Risk Analysis)은 결정론적 방법을 주로 사용하여 위험성을 평가하였지만, 신뢰도 분석을 수행하여 기본사상에 대하여 중요도 및 민감도 분석을 수행하여 위험성 등급(Risk Rank)이 높은 기본사상을 중심으로 정량적 위험성을 평가하였다.

2.1. FV(Fussell-Vesely) 중요도

기본사상에 대한 Fussell-Vesely(FV) 중요도 분석은 기본사상을 포함하는 모든 최소단절군에 근거하여 정상사상의 이용불능상태를 계산하는 방법과 FV 중요도는 항목 i 와 기본적인 정상사상의 이용불능상태에 대한 비로 표현하는 방법이 있다[5].

FV 중요도는 아래의 식으로 표현된다.

$$I_i^{FV} = \frac{Q_{TOP}(MCS \text{ including } i)}{Q_{TOP}} \quad (1)$$

여기서,

Q_{TOP} : 정상사상이 발생할 확률
 $Q_{TOP}(MCS \text{ including } i)$: 최소단절군 i 를 포함한 정상사상의 발생확률

2.2. RIF(Risk Increase Factor)

위험성증가 요소(Risk Increase Factor)는 Risk Achievement Worth로도 알려져 있으며, 위험성 증가요소는 중요도를 측정하고자 하는 사건이나 계통이 이용불능상태라고 가정할 때의 위험성 증가효과를 나타내는 중요도로서 현재의 위험성에 대한 증가된 위험성과의 비율로서 다음과 같이 표현 할 수 있다[5].

$$RIF = \frac{Q_{TOP}(Q_i=1)}{Q_{TOP}} \quad (2)$$

여기서,

Q_{TOP} : 정상사상이 발생할 확률
 $Q_{TOP}(Q_i=1)$: 설비 i 가 확실한 고장을 일으킬 때의 정상사상 발생확률

어떤 사건이나 계통에 대하여 위험성 증가요소가 크게 나타나면 그 사건이나 계통이 이용불능상태에 대한 설비의 위험도가 크게 증가하는 것을 뜻한다. 따라서 위험성 증가요소로 나타낸 중요도 순위는 신뢰도 보증 프로그램, 시험 및 보수 등의 우선 순위 결정에 사용된다.

2.3. RDF(Risk Decrease Factor)

위험성감소 요소(Risk Decrease Factor)는 또한 Risk Reduction Worth로도 알려져 있으며, 위험성 감소요소는 중요도를 측정하고자 하는 사건이나 계통이 완전히 이용 가능 상태라고 가정할 때의 위험성 감소효과를 나타내는 중요도로서 감소된 위험성에 대한 현재의 위험성과의 비율 혹은 차이로서 다음과 같이 나타낸다[5].

$$RDF = \frac{Q_{TOP}}{Q_{TOP}(Q_i=0)} \quad (3)$$

여기서,

Q_{TOP} : 정상사상이 발생할 확률
 $Q_{TOP}(Q_i=0)$: 설비 i 가 확실한 신뢰도를 가질 때의 정상사상 발생확률

어떤 사건이나 계통에 대하여 위험도 감소가치가 크게 나타나면 그 사건이나 계통이 완전한 이용 가능시 설비의 위험도가 크게 감소하는 것을 뜻하고 있으므로 위험성 감소가치로 나타낸 중요도 순위는 설계개선 부분의 우선 순위 결정에 사용한다.

각 사건이나 계통에 대한 중요도분석, RIF와 RDF 분석결과로부터 시스템이나 설비에 대한 위험성에 대하여 다음과 같은 설비, 시스템의 개선방법 및 유지·보수 방법 등을 제시할 수 있다.

- 위험성 감소요소가 큰 부분에 대하여 우선적으로 설계 개선을 하는 것이 효과적이다.
- 위험성 증가요소가 큰 부분에 대하여는 절차서 개선, 정기검사, 보수, 및 운전요원 훈련 등을 강화하여야 한다.
- 위험성 감소요소와 위험성 증가요소가 모두 낮은 부분에 대하여는 별도의 특별한 조치가 필요 없고 현재의 설계상태 및 유지·보수 상태를 유지한다.

2.4. 정량적 위험성 분석

정량적·정성적 위험성 평가 연구는 일반적으로 공정의 안전문제에 초점을 두고 있다. 이러한 연구는 추락방지, 개인보호용구의 사용 등과 같은 전통적인 산업 보건 및 안전활동을 보완하는 역할을 수행한다. 많은 위험성 평가 방법들이 플랜트에 대한 잠재위험·확인 및 위험성 감소의 역할뿐만 아니라 조업성(operability), 경제적 문제(economical problem), 환경 문제(environmental problem)와 같은 안전 이외의 필요조건을 충족시키는데 도움을 주고 있다[6]. 위험성 평가 연구는 일반적으로 어떤 사건을 일으킬 수 있는 잠재적인 장치의 오류나 인적 오류를 분석하는 정성적인 방법을 사용하지만 그와 더불어 그 조직의 공정 안전 프로그램을 운영하는 시스템에서의 빈틈에 좀더 비중을 두고 플랜트 내에서 발생할 수 있는 사건에 대해 피해정도, 피해규모, 환경적 영향 및 주변 주민들에게 미치는 영향 등을 평가하는 정량적 위험

성 평가 방법이 시행되고 있다. 예를 들어, 현존하는 공정의 위험성평가 연구는 시설의 유지·보수에서의 문제점이나 비효율성을 찾아낼 수 있다[7].

3. 사례 연구

본 연구에서는 위에서 제시한 이론적 지식을 실제 LPG 충전시설에 대하여 적용하여 보았다. 그리고 분석된 신뢰도 자료를 이용하여 정량적 위험성 분석을 수행하여 위험성 등급에 따라서 어떠한 위험성 평가 결과를 분석하였다.

3.1. 공정개요

사례에 적용한 LPG 충전시설은 탱크로리(tank lorry)로부터 받은 LPG를 지하 저장탱크에 저장한 후, 가정용 실린더 용기와 산업용 소형 저장탱크, 그리고 부탄을 사용하는 차량에 충전하는 사업장이다. 대상공정은 LPG 충전공정이고, 저장물질은 LPG(propane, butane)이며 저장압력은 7~8atm이고 저장 온도는 5~30℃이다[2].

3.2. 사고원인 분석

잠재위험 확인을 위한 목적으로 이용되는 위험성 평가 방법은 여러 가지가 이용되고 있지만 본 연구에서는 대표적인 잠재위험 확인 방법인 HAZOP study를 연구 검토하여, LPG 충전시설의 잠재위험을 확인하였다. 그 중에서도 적재/적하(loading/unloading) 작업 시, 외부 사고, 그리고 초기 설계 단계에서의 오류(error)도 무시할 수 없는 잠재위험으로 파악되었다. HAZOP 연구를 통하여 LPG 충전소에서 가스가 누출될 수 있는 잠재위험을 가지고 있는 요소는 20가지로 분석되었다. Table 1은 HAZOP 연구를 통하여 검토된 기본사상에 대한 고장 발생확률 및 error factor 값을 제시하였다.

사고 발생빈도를 정량화하기 위하여 결합수목을 작성하여 최소단절군의 생성결과로 LPG 충전소에서 가스 누출 빈도는 1.22×10^{-12} /year로 나타났으며 이는 대략적인 값으로 80년에 한번 정도 누출이 발생한다는 것을 의미한다.

정상사상의 발생확률에 기여하는 최소단절군은 Table 2에서 제시하였는데 이중 두 번

Table 1. Description of Basic Event, Means value and Error factor[7].

| Basic Event No. | Description | Means | Error Factor | Remark |
|-----------------|--------------------------------|----------|--------------|--------------------|
| Basic Event 01 | External event | 3.10E-03 | 5.00 | Engineer Judgement |
| Basic Event 02 | Defect at the construction | 5.00E-03 | 3.00 | Engineer Judgement |
| Basic Event 03 | Pipe corrosion | 1.00E-03 | 3.00 | Engineer Judgement |
| Basic Event 04 | Faulty of tank | 9.55E-05 | 3.88 | CCPS |
| Basic Event 05 | Loading frequency | 3.00E+02 | 1.00 | Engineer Judgement |
| Basic Event 06 | Failure of safety system | 1.45E-02 | 2.85 | CCPS |
| Basic Event 07 | Overpressure of liquid pump | 5.00E-03 | 3.22 | CCPS |
| Basic Event 08 | Failure of relief valve | 2.12E+04 | 3.76 | CCPS |
| Basic Event 09 | Close of back flow line | 3.55E-01 | 3.86 | CCPS |
| Basic Event 10 | Faulty of relief valve system | 5.18E-03 | 4.38 | CCPS |
| Basic Event 11 | Faulty of hose | 4.97E-03 | 3.85 | CCPS |
| Basic Event 12 | Miss contact hose | 4.97E-03 | 3.85 | CCPS |
| Basic Event 13 | Operator error | 1.00E-06 | 3.00 | Engineer Judgement |
| Basic Event 14 | Excess flow R.G. tank | 5.57E-04 | 3.88 | CCPS |
| Basic Event 15 | Outlet valve closed | 1.61E-03 | 4.14 | CCPS |
| Basic Event 16 | P.I. failure | 6.02E-04 | 3.77 | CCPS |
| Basic Event 17 | Failure of/at ignoring L.I. | 7.91E-01 | 4.07 | CCPS |
| Basic Event 18 | Insufficient vloume in tank | 1.86E-02 | 3.88 | CCPS |
| Basic Event 19 | External thermal heat | 1.00E-03 | 3.00 | Engineer Judgement |
| Basic Event 20 | G.L. closed during the loading | 1.00E-07 | 3.00 | Engineer Judgement |

Table 2. Top Event Probability.

| Top Event Probability=1.22E-02 | | | | | |
|--------------------------------|-----------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| MCS No. | Frequency | Percentage(%) | Event 1 | Event 2 | Event 3 |
| MCS 01 | 5.00E-03 | 41.15 | Basic Event 02 | | |
| MCS 02 | 3.10E-03 | 25.51 | Basic Event 01 | | |
| MCS 03 | 2.41E-03 | 19.83 | Basic Event 05 | Basic Event 17 | Basic Event 18 |
| MCS 04 | 1.00E-03 | 8.23 | Basic Event 03 | | |
| MCS 05 | 3.00E-04 | 2.47 | Basic Event 05 | Basic Event 13 | |
| MCS 06 | 1.71E-04 | 1.41 | Basic Event 05 | Basic Event 12 | |
| MCS 07 | 1.71E-04 | 1.41 | Basic Event 05 | Basic Event 11 | |
| MCS 08 | 1.09E-08 | 0 | Basic Event 04 | | |
| MCS 09 | 6.66E-11 | 0 | Basic Event 07 | Basic Event 08 | Basic Event 09 |
| MCS 10 | 3.56E-13 | 0 | Basic Event 19 | Basic Event 16 | Basic Event 10 |
| MCS 11 | 1.72E-16 | 0 | Basic Event 06 | Basic Event 14 | Basic Event 15 |
| MCS 12 | 3.56E-17 | 0 | Basic Event 20 | Basic Event 16 | Basic Event 10 |

째 기본사상(구조물의 결함)이 $5.00 \times 10^{-03}/\text{year}$ 의 값으로 전체 기본사상 중에서 약 40% 이상의 비율을 차지하여 가장 중요한 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 다음으로 외부사고(External event)로 26%로 시스템에 영향을 주는 것으로 분석되었다.

3.3. 신뢰도 분석

중요도 분석에 대한 결과는 Table 3에 정리하였다. Table 3에서 보여주는 것처럼 기본사상이 첫 번째, 두 번째, 다섯 번째 기본사상의 값이 가장 큰 변화를 나타내고 있다. 첫 번째와 두 번째 기본사상은 각각 외부사고와 구조물의 결함(Defect at the construction)이다. 그리고 다섯 번째는 적재(load) 작업 시 가스의 누출이 발생하는 기본사상이다.

템에 영향을 가장 많이 주는 첫 번째와 두 번째 기본사상에 대해 분석하여 보았다. 우선 두 번째 기본사상인 구조물의 결함에 대한 발생확률을 줄이기 위해서는 구조물 설계 단계에서 수행되어지는 구조물 자체에 설치되는 안전설비(스프링 클러, 화재 경보기 등)가 지정된 장소에 설치되어서 제 기능을 발휘할 수 있는가? 그리고 각각의 안전장치에 대한 신뢰도와 고장율 데이터에 따른 건물내 설비에 어느 정도 안전성을 증가·감소시킬 수 있는지 살펴볼 수 있다. 다음으로 외부사고의 경우를 살펴보면 외부사고로 발생하는 LPG 누출 발생확률을 줄이기 위해서는 고압가스 안전 법에 제시된 사항을 충실히 수행하여야 하며, 주된 외부사건의 발생은 LPG 배관의 배치를 공사현장이나 작업자가 모르기 때문에 발생한다. 그러므로

Table 3. Importance of Basic Event.

| Basic Event No. | FV | RDF | RIF | Sens. |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| Basic Event 02 | 4.13E-01 | 1.70E+00 | 9.99E+99 | 7.44E+00 |
| Basic Event 01 | 2.56E-01 | 1.34E+00 | 9.99E+99 | 4.26E+00 |
| Basic Event 05 | 2.52E-01 | 1.33E+00 | 9.99E+99 | 4.19E+00 |
| Basic Event 17 | 1.99E-01 | 1.25E+00 | 4.58E+02 | 3.38E+00 |
| Basic Event 18 | 1.99E-01 | 1.09E+00 | 1.14E+01 | 3.38E+00 |
| Basic Event 03 | 8.26E-02 | 1.03E+00 | 9.99E+99 | 1.87E+00 |
| Basic Event 13 | 2.48E-02 | 1.01E+00 | 2.46E+04 | 1.25E+00 |
| Basic Event 11 | 1.41E-02 | 1.01E+00 | 2.46E+04 | 1.14E+00 |
| Basic Event 12 | 1.41E-02 | 1.00E+00 | 2.46E+04 | 1.14E+00 |
| Basic Event 04 | 9.01E-07 | 1.00E+00 | 8.26E+01 | 1.00E+00 |

RDF 값이 크게 나온 기본사상으로는 여러 가지가 있지만 그중 최소단절군 분석에서 시스

발생확률을 줄이기 위해서는 LPG 배관뿐만 아니라 도시가스의 배관에 대한 배관도의 확인이

작업 전 필요하며, 공사현장에서 지속적인 주의 및 교육이 수행되어야 한다.

위에서 설명한 두 가지 기본사상은 모두 장치나 설비 쪽이 아니므로 설비적 측면에서 어떠한 배치나 위치의 변화 등으로 어느 정도 안전성이 향상 될 수 있는지를 고려할 수가 없다.

Table 4는 매개변수에 대한 중요도를 제시한 것이다. 이는 위험성 등급의 상위에 속해 있는 7개의 기본 사상에 대한 매개변수의 의미 및 중요도 값을 제시하였다.

Table 4에서 제시된 것처럼 정상사상에 가장 큰 영향을 미치는 기본사상이 발생확률 및 발생빈도 단일요소로 된 구성요소인 경우를 제외하고 고장율(r)과 검사기간(TI)의 경우를 비교하여 보면 장치 가 가지고 있는 고장율보다 검사기간의 FV 중요도가 크게 분석되었다. 즉, 장치가 고장율이 낮은 장치를 사용하는 것보다 장치의 유지·보수 시기를 자주 하는 것이 플랜트의 위험성을 감소시키는데 더욱 효과적이라고 할 수 있다.

281.1K이고 상(phase)은 기상이며 저장 압력은 0.10pa이다. 그리고 저장량은 0.5ton이 저장되어 있다고 설정하였다. 풍향은 동풍, 습도는 65%로 정의하였으며, 바람의 세기는 5m/s로 대기 안정등급은 D등급으로 설정하였다.

- 저장 용기의 완전 파열

저장용기의 완전파열에 대한 시나리오는 비등 액체 폭발 (BLEVE; Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)의 경우와 증기운 폭발 (VCE; Vapor Cloud Explosion)의 두 가지 경우에 대해 살펴보았다.

비등 액체 폭발의 사고가 발생하였을 경우 Table 5에서 제시된 방사열 등급을 참조하여 공정 설비에 손해를 입히기에 충분한 열을 발생시키는 복사 강도 $37.5kW/m^2$ 는 직경 46.3m로 분석되었으며, 무한정 긴 시간 노출되었을 경우 합성수지 배관을 녹일 수 있는 최소 에너지가 발생할 수 있는 복사 강도 $12.5kW/m^2$ 은

Table 4. Importance for Parameters.

| ID | Type | FV | RDF | RIF | Sens |
|----------------|------|----------|----------|----------|----------|
| Basic Event 02 | f | 5.00E-03 | 2.09E+00 | 9.99E+99 | 1.07E+01 |
| Basic Event 01 | f | 3.10E-03 | 1.48E+00 | 9.99E+99 | 5.49E+00 |
| Basic Event 03 | f | 1.00E-03 | 1.12E+00 | 9.99E+99 | 2.13E+00 |
| Basic Event 05 | f | 3.11E+02 | 1.05E+00 | 9.99E+99 | 1.52E+00 |
| Basic Event 13 | q | 1.00E-06 | 1.03E+00 | 3.22E+04 | 1.33E+00 |
| Basic Event 12 | r | 6.51E-11 | 1.01E+00 | 3.22E+04 | 1.09E+00 |
| Basic Event 12 | TI | 8.76E+03 | 1.01E+00 | 3.22E+04 | 1.09E+00 |
| Basic Event 11 | r | 6.51E-11 | 1.01E+00 | 3.22E+04 | 1.09E+00 |
| Basic Event 11 | TI | 8.76E+03 | 1.01E+00 | 3.22E+04 | 1.09E+00 |

3.4. 정량적 위험성 분석

본 절에서는 LPG 충전소에 대한 정량적 위험성 분석을 수행하였다. LPG 충전소에 대한 누출 시나리오에 대한 신뢰도 분석을 수행하여 얻은 결과로부터 위험성 등급이 높은 구조물의 결함과 파이프 부식 두 가지 경우에 대하여 정량적 위험성 분석을 수행하였다. 구조물의 결함은 저장 용기의 완전 파열로 가정하여 사고 시나리오를 설정하였으며, 파이프 부식은 파이프 부식 부분에서 누출이 발생하였을 경우에 대해 정량적 위험성 분석을 수행하였다.

LPG 충전소의 저장상태에 대해서 간략하게 살펴보면, 저장 물질은 부탄이며, 저장온도는

직경 72.5m 정도까지 그 영향력이 나타나며 20초 이내에 방어하지 못할 경우 인체에 통증을 주기에 충분한 복사 강도 $4.0kW/m^2$ 은 대략적으로 135.2m로 분석되었다.

증기운 폭발의 경우 폭발 과압의 설정된 등급에 따라서 강제 프레임으로 구성된 건물이 휘어지는 정도의 과압 3.0psi이 발생하는 범위는 9.8m로 분석되었으며, 파형 석면이 부서지는 과압 1~2psi이 발생하는 범위는 대략적으로 12.0m로 분석되었다. 그리고 10% 정도의 유리창이 파손될 압력 0.3psi에 의해 영향을 받는 지역은 대략적으로 20.8m로 분석되었다.

Table 5. Practical Significance of the Thermal Radiation Levels.

| Radiation Intensity (kW/m ²) | Observed Effect |
|--|--|
| 37.5 | Sufficient to cause damage to process equipment |
| 25.0 | Minimum energy required to ignite wood at indefinitely long exposures (nonpiloted) |
| 12.5 | Minimum energy required for piloted ignition of wood, melting of plastic tubing |
| 9.5 | Pain threshold reached after 8sec; second degree burns after 20sec |
| 4.0 | Sufficient to cause pain to personnel if unable to reach cover within 20sec; however blistering of the skin(second degree burns) is likely; 0% lethality |
| 1.6 | Will cause no discomfort for long exposure |

- 파이프 누출

파이프 누출의 경우 저장 표면에서 누출지점 또는 파이프까지의 거리를 0.5m로 가정하였으며, 누출 부분의 파이프의 지름은 0.3m이며, 파이프의 재질은 steel, 누출시간은 5분 정도 누출되었다고 가정하였다.

파이프에서 누출이 발생하여 누출된 가스가 증기운 폭발이 발생하였을 경우 강제프레임으로 구성된 건물이 휘어질 정도의 압력 3.0psi를 받는 범위는 19.6m로 분석되었으며, 파형 석면이 부서지는 정도의 압력 1~2psi는 24.0m로 분석되었다.

가스를 이송하기 위해 설정된 파이프에서 누출이 발생하여 누출원에서 바로 점화가 이루어져 제트 화재(Jet Fire)가 발생하였을 경우 화재에 의해 발생된 압력에 의해 주변의 공장 설비에 손해를 줄 수 있는 압력 37.5kW/m² 정도의 복사강도에 영향을 받는 지역은 2.3m로 분석되었으며, 20초 이내에 제어하지 못했을 경우에 인체에 통증을 줄 수 있는 압력 4.0kW/m²의 복사 강도에 영향을 받는 지역은 대략적으로 6.8m로 분석되었다.

3.5. 극한 신뢰도 분석

Tables 6과 7 그리고 Table 8은 각각 평균값과 극한 신뢰도 값을 사용한 LPG 충전소에 대한 정상사상의 발생확률과 FV 중요도, RDF 및 RIF 중요도 그리고 민감도 분석을 수행한 결과를 제시하였다. 20개의 기본사상 중에 중요도가 큰 상위 7개의 기본사상만을 나열하였다. Table 6은 장치의 평균 고장율 값을 사용

하였으며, Tables 7과 8은 각각 하한 값과 상한 값을 사용한 기본사상에 대한 중요도 분석 결과와 정상사상의 발생확률을 나타내었다. Tables 6과 7 그리고 Table 8에서 사용된 기본사상은 다음과 같다.

- Basic Event 01 : External Event
- Basic Event 02 : Defect at the Construction
- Basic Event 03 : Pipe Corrosion
- Basic Event 05 : Loading Frequency
- Basic Event 11 : Fault of Hose
- Basic Event 12 : Miss Contact Hose
- Basic Event 13 : Operator Error

Tables 6과 7 그리고 Table 8에서 보여주는 것처럼 FV 중요도, RDF 및 RIF 중요도에는 평균값이나 극한 신뢰도 값에 대해 큰 변화는 발생하지 않는다. 이는 개개의 장치나 설비가 가지고 있는 중요도는 평균값 또는 극한값을 사용하였을 경우에도 변하지 않기 때문이다. 그러나 Tables 6과 7 그리고 Table 8에서 제시된 정상사상의 발생빈도는 2.25×10⁻⁰⁵/year와 9.59×10⁻⁰³/year 그리고 4.20×10⁻⁰²/year로 분석되었다. 이는 신뢰도 데이터 수집의 중요성을 단적으로 보여주는 것이다. 이러한 차이가 발생하는 이유는 첫째로 장치 및 시스템이 불확실성을 가지고 있기 때문이며, 두 번째로 결합수목 분석방법이 Boolean 수식을 사용하기 때문에 장치 및 시스템 내에 존재하는 잠재위험의 발생확률이 높아질수록 정상사상의 발생 확률 높이가 나타나게 된다. 그러므로, 장치의 고

장을 및 유지·보수 사항을 빠짐없이 기록해 을 미치는 기본사상으로는 구조물의 결함과 외
 높을 필요가 있다. 부사고로 분석되었다.

Table 6. Using the Mean Parameter Values.

| Top Event Frequency=9.59E-03 | | | | | |
|------------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| ID | Nom. Val. | FV | RDF | RIF | Sens |
| Basic 02 | 5.00E-03 | 5.23E-01 | 2.09E+00 | 9.99E+99 | 1.07E+01 |
| Basic 01 | 3.10E-03 | 3.24E-01 | 1.48E+00 | 9.99E+99 | 5.49E+00 |
| Basic 03 | 1.00E-03 | 1.05E-01 | 1.12E+00 | 9.99E+99 | 2.13E+00 |
| Basic 05 | 3.11E+02 | 5.11E-02 | 1.05E+00 | 9.99E+99 | 1.52E+00 |
| Basic 13 | 1.00E-06 | 3.25E-02 | 1.03E+00 | 3.22E+04 | 1.33E+00 |
| Basic 12 | 2.85E-07 | 9.27E-03 | 1.01E+00 | 3.22E+04 | 1.09E+00 |
| Basic 11 | 2.85E-07 | 9.27E-03 | 1.01E+00 | 3.22E+04 | 1.09E+00 |

Table 7. Using the Extreme Lower Parameter Values.

| Top Event Frequency=2.25E-05 | | | | | |
|------------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| ID | Nom. Val. | FV | RDF | RIF | Sens |
| Basic 02 | 1.28E-05 | 5.68E-01 | 2.32E+00 | 9.99E+99 | 1.25E+01 |
| Basic 01 | 5.23E-06 | 2.32E-01 | 1.30E+00 | 9.99E+99 | 3.90E+00 |
| Basic 03 | 4.50E-06 | 2.00E-01 | 1.25E+00 | 9.99E+99 | 3.41E+00 |
| Basic 05 | 3.00E-01 | 2.73E-05 | 1.00E+00 | 9.99E+99 | 1.00E+00 |
| Basic 13 | 1.06E-09 | 1.41E-05 | 1.00E+00 | 1.33E+04 | 1.00E+00 |
| Basic 12 | 4.95E-10 | 6.59E-06 | 1.00E+00 | 1.33E+04 | 1.00E+00 |
| Basic 11 | 4.95E-10 | 6.59E-06 | 1.00E+00 | 1.33E+04 | 1.00E+00 |

Table 8. Using the Extreme Upper Parameter Values.

| Top Event Frequency=4.20E-02 | | | | | |
|------------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| ID | Nom. Val. | FV | RDF | RIF | Sens |
| Basic 02 | 2.00E-02 | 4.83E-01 | 1.90E+00 | 9.99E+99 | 9.14E+00 |
| Basic 01 | 1.24E-02 | 2.99E-01 | 1.41E+00 | 9.99E+99 | 4.90E+00 |
| Basic 05 | 9.00E+02 | 1.35E-01 | 1.15E+00 | 9.99E+99 | 2.46E+00 |
| Basic 03 | 4.00E-03 | 9.66E-02 | 1.10E+00 | 9.99E+99 | 2.00E+00 |
| Basic 13 | 4.00E-06 | 8.70E-02 | 1.09E+00 | 2.10E+04 | 1.90E+00 |
| Basic 12 | 1.10E-06 | 2.39E-02 | 1.02E+00 | 2.10E+04 | 1.23E+00 |
| Basic 11 | 1.10E-06 | 2.39E-02 | 1.02E+00 | 2.10E+04 | 1.23E+00 |

4. 결 론

LPG 충전시설에 대한 정량적 위험성 평가 결과 대략적으로 80년에 한번 정도 정상사상(저장소에서 가스의 누출)이 발생한다는 분석 결과를 얻었다. 그리고 시스템에 가장 큰 영향

중요도 분석의 수행결과 구조물의 결함과 외부사고에 대한 개선권고사항으로는 구조물 내에 안전장치 설치 및 정기적인 유지·보수를 통하여 항상 정상적으로 작동할 수 있는 상태를 유지하도록 하여야 하며, 외부사고에 대한 경우는 증장비 작업자에게 항상 LPG 및 도시

가스 배관라인의 위치에 대한 인식이 작업 전에 필요하며, 공사현상에서 작업자들에게 지속적인 교육이 필요하다.

LPG 충전소에 대한 정량적 위험성 분석의 경우 가장 광범위하게 영향을 주는 경우는 비등 액체 폭발의 경우로 폭발에 의해 생성된 복사 강도가 135m까지 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 한 예로 부천 가스 충전소에서 발생한 폭발 사고가 비등 액체 폭발의 경우이고, 충전소 자체는 물론 인근 주변에까지 상당한 피해가 발생한 것으로 분석되었다.

중요도 분석과 극한 신뢰도 분석을 수행한 결과를 분석해 보면, 중요도 분석의 결과로 설정된 위험성 등급과 극한 신뢰도 분석을 통하여 설정된 위험성 등급의 중요도나 민감도에는 변화가 거의 발생하지 않았다. 그러나 극한 신뢰도 값을 사용한 결과는 정상상상(LPG 충전소에서 가스의 누출)이 발생할 확률은 4~5배 정도 높게 또는 낮게 분석되었다. 이는 공장이나 장치에 대한 신뢰도 데이터 베이스 구축의 필요성을 강조하였다.

따라서 신뢰도 데이터의 수집은 공장에 대해 보다 정확한 정량적 위험성 분석의 수행결과를 획득할 수 있으며, 일반적인 데이터로 분석된 경우에 대한 일반적인 결과보다 자기 회사의 운전특성과 환경 및 운전자의 아차사고(near miss) 그리고 유지·보수 등 수집된 데이터를 바탕으로 하여 보다 세부적이고 정확한 위험성 분석 결과를 획득할 수 있으며, 회사 실정에 따라 설비적 개선 또는 장치교환, 유지·보수 우선 순위 및 액수를 결정할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단(과제번호 R01-2001-00409)의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) 서재민, *가스산업시설의 사고 빈도 분석 프로그램* 구축, 석사학위논문, 광운대학교, 1998.
- (2) Green, A. E. and A. J. Bourne, *Reliability Technology*, Wiley, New York, 1972.
- (3) 김윤화, *화학공장의 데이터베이스를 기반으로 한 정량적 위험성 평가 시스템 개발*, 박사학위논문, 광운대학교, 1998.
- (4) 김영수, 유종호, 정석열: "Batch Annealing Furnace 가스설비에 대한 정량적 위험성 평가," *Theories and Applications of Chem. Eng.*, 7(1) 497-500 (2001).
- (5) Relcon AB, *Risk Spectrum User's Guide*, 1998.
- (6) CCPS, *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures*, 2nd Ed., New York, 1992.
- (7) CCPS, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, AIChE, New York, 1989.
- (8) CCPS, *Guidelines for Process Equipment Reliability Data with Data Tables*, AIChE, 1989.