

LPG 충전시설에 대한 신뢰도 분석에 관한 연구

진상화, 한의진, 서재민*, 김인원
건국대학교 화학공학과
* 광운대학교 화학공학과

A Study on the Reliability Analysis for LPG Stations

Sang-Hwa Jin, Eui-Jin Han, Jae-Min Seo*, In-Won Kim

Department of Chemical Engineering, Konkuk University, Korea

* Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University, Korea

1. 서론

1990년 이후 국내 가스에너지의 연평균 소비증가율은 약 12.6%로 높은 증가추세를 보여왔으며, 수요 가구수도 1986년에 약 270만 가구에 불과하던 것이 1999년에는 약 1,592만 가구로 증가하였다[1]. 그에 따라 일반 가정에서 발생하는 크고작은 사고를 비롯하여 부천 도시가스 폭발사고 등 다양한 가스사고가 발생하였다.

본 연구에서는 국내 가스시설에서 사용하는 장치·설비 및 인적오류 등에 대하여 위험성 평가를 수행하는데 그 목적이 있다. 세부 내용으로는 첫째, 가스시설에 대한 정량적 위험성 평가를 수행하여 발생 가능한 사고에 대한 모든 시나리오를 평가할 수 있으며 발생가능성 및 발생 빈도를 평가하였다. 둘째, 각각의 시나리오 대한 중요도와 불확실성 분석을 수행하여 각각의 시나리오가 시스템에 어떠한 영향을 주는지 평가하였으며, 구성성분이 가지고 있는 위험성에 대한 순위를 책정하였으며 이에따른 안전관리에 우선순위를 책정함으로써 보다 효율적이고 경제적인 안전관리를 수행할 수 있게 하였다. 그리고 중요도 분석 결과를 이용하여 LPG 누출에 따른 가상 시나리오를 작성하여 정량적 위험성 평가를 수행하여 주변지역, 환경에 어떠한 영향을 주는지 평가하였다.

2. 이론적 배경

HAZOP study는 정상사상에 대해 발생가능한 모든 사건 시나리오를 결정하며, 결합수목분석(Fault Tree Analysis; FTA)은 시스템의 고장메카니즘에 대한 논리모델로부터 평가되어진 Top event에 대한 사건의 빈도를 결정한다. 최소단절군(Minimal Cut Set; MCS) 분석은 정상사상(Top event)에 영향을 주는 결과로 기본사상(Basic Event)의 모든 결합을 확인하기 위한 결합수목의 논리 구조를 조작하는 수학적 기술이다[2].

중요도 분석(Importance Analysis)은 완전한 분석의 구성요소나 하부조각으로부터의 결합에 대한 위험성 평가의 등급과 정량화를 정하는 분석방법이다. 기본사상에 대한 Fussel-Vesely(FV) 중요도는 중요도를 측정하고자 하는 사건이나 계통이 현재의 위험도에 기여하는 정도를 나타내는 중요도로서 현재의 위험도에 대한 중요도 측정대상 사건이나 계통을 포함하고 있는 최소단절군에 의한 위험도의 비로 표현한다.

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

여기서 : $Q_{TOP}(MCS \text{ including } i)$ = i 번째 구성성분을 포함한 Top Event Probability

Q_{TOP} = Top Event Probability

즉, FV 중요도는 항목 i 가 정상사상에 어느 정도 영향을 주는가를 분석할 수 있는 값

을 제공한다.

위험성증가 요소(Risk Increase Factor)는 Risk Reduction Worth로도 알려져 있으며, 위험성감소 요소(Risk Decrease Factor)와 Risk Achievement Worth로도 알려져 있다. 기본 사상에 대한 RIF와 RDF는 아래의 식으로 표현되어진다.

$$RIF = \frac{Q_{TOP}(Q_i=1)}{Q_{TOP}} \quad RDF = \frac{Q_{TOP}}{Q_{TOP}(Q_i=0)}$$

여기서 : Q_{TOP} 은 정상사상의 발생확률

$Q_{TOP}(Q_i=0)$ 은 기본사상 Q_i 가 완벽한 신뢰성을 가질때의 정상사상의 값

$Q_{TOP}(Q_i=1)$ 은 기본사상 Q_i 가 확실한 고장을 일으킬 때 정상사상의 결과

위험성증가 요소는 중요도를 측정하고자 하는 사건이나 계통이 이용불능이라 가정할 때의 위험도 증가효과를 나타내는 중요도로서 현재의 위험도에 대한 증가된 위험도와의 비율을 나타내며, 위험성감소 요소는 중요도를 측정하고자 하는 사건이나 계통이 완전히 이용가능이라 가정할 때의 위험도 감소효과를 나타내는 중요도로서 감소된 위험도에 대한 현재의 위험도와의 비율 혹은 차이로 표현된다.

3. 사례연구

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 충전을 하는 사업장이다. 대상공정은 LPG 충전공정이고, 저장물질은 LPG(propane, butane)이며 저장압력은 7~8atm이고 저장 온도는 5~30℃이다[3].

사고원인 분석

잠재위험 확인을 위한 목적으로 이용되는 위험성 평가 방법은 여러 가지가 이용되고 있지만 본 연구에서는 대표적인 잠재위험 확인 방법인 PHA와 HAZOP study를 연구 검토하여, LPG 충전시설의 잠재위험을 확인하였다. LPG 충전시설에 대한 잠재위험원과 각각의 잠재위험에 대한 고장확률 및 error factor의 값을 아래의 표 1에 정리하였다.

FTA 분석

그 중에서도 적재/적하(loading/unloading) 작업시, 외부사고, 그리고 초기 설계 단계에서의 오류(error)도 무시할수 없는 잠재위험으로 파악되었다. HAZOP study 결과를 가지고 결함수목분석을 통하여 정상사상의 발생확률과 최소단절군이 정상사상에 어떻게 영향을 미치는가를 아래의 표 2에 정리하였다. 정상사상에 대한 계산은 Risk Spectrum 프로그램을 사용하였다[4].

사고 발생빈도에 대한 정량화 계산결과 LPG 충전소에서 가스 누출 빈도는 1.22E-02/년으로 나타났으며 이는 대략적인 값으로 80년에 한번 정도 누출이 발생한다는 것을 의미한다.

누출 빈도에 기여하는 최소 단절군은 아래의 표 2에서 제시하였는데 이중 두 번째 기본사상(구조물의 결함)이 5.00E-03의 값으로 가장 중요한 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 이는 설계시에 최악의 시나리오를 가정하여 건물자체에 대한 화재·폭발에 대한 방호장치를 설치하였는지 그리고 설치된 방호장치는 정기적으로 유지보수되어 적절히 작동하는지 살펴볼 필요성이 있다. 다음으로 외부사고(External event)로 나왔는데 이를 예방하기 위해서는 LPG 배관의 매설지역에 대한 상세정보가 각 건설회사 및 해당 담당자에게 배포하여 LPG 배관의 위치를 숙지하여 건설 중장비 공사시 배관의 위치에 신중을 기해야 한다.

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

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 volume 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	백분율(%)	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

신뢰도 분석

중요도 및 불확실성 분석에 대한 결과는 아래의 표 3에 정리하였다. 아래의 표 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.

RDF 값이 크게 나온 기본사상으로는 여러 가지가 있지만 그중 첫 번째와 두 번째 기본사상에 대해 분석하여 보았다. 우선 두 번째 기본사상인 구조물의 결함에 대한 발생 확률을 줄이기 위해서는 구조물 설계 단계에서 수행되어지는 구조물 자체에 설치되는 안전 설비(스프링 클러, 화재 경보기 등)가 지정된 장소에 설치되어서 제 기능을 발휘할 수 있는가? 그리고 각각의 안전장치에 대한 신뢰도와 고장률 데이터에 따른 건물내 설비에 어느정도 안전성을 증·감 시킬 수 있는지 살펴볼 수 있다. 다음으로 외부사고의 경우를 살

펴보면 외부사고로 발생하는 LPG 누출 발생확률을 줄이기 위해서는 고압가스 안전법에 제시된 사항을 충실히 수행하여야 하며, 주된 외부사건의 발생은 LPG 배관의 배치를 공사현장이나 작업자가 모르기 때문에 발생한다. 그러므로 발생확률을 줄이기 위해서는 LPG 배관 뿐만아니라 도시가스의 배관에 대한 배관도의 확인이 작업전 필요하며, 공사현장에서 지속적인 주의 및 교육이 수행되어야 한다.

위에서 설명한 두가지 기본사상은 모두 장치나 설비 쪽이 아니므로 설비적 측면에서 어떠한 배치나 위치의 변화등으로 어느정도 안전성이 향상 될 수 있는지를 고려할 수가 없다.

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

정량적 위험 분석

외부사건에 대해 최악의 시나리오를 가정하여 누출이 발생하였을 상황을 전제로 하여 LPG 충전소에 대한 정량적 위험성 평가를 수행하여 주변에 미치는 영향 및 환경과 폭발 과압, 폭발형태, 화구형성 및 화구의 크기등에 대한 위험성 평가를 수행하였다.

누출 시나리오는 외부도로 공사중이던 건설 중장비인 천공기계가 LPG 배관의 배치를 모르고 천공작업을 진행중에 LPG 배관을 건드려서 LPG가 누출한다고 가정하였다. LPG 누출시 주변 공사지역의 점화원과 결합하여 화재·폭발이 발생할 수 있다. 이와같은 시나리오를 가지고 정량적 위험성 분석을 수행하였다.

4. 결론

본 연구에서는 LPG 충전 시설에대한 신뢰도 분석 및 정량적 위험성 평가를 수행하였다. 그리고 중요도 분석 및 RDF, RIF 분석을 수행하여 HAZOP study의 결과 누출이 발생할 수 있는 사건에 대한 잠재위험에 대한 우선순위를 고려하였다. 이렇게 설정된 위험성 등급(Risk ranking)의 활용으로 보다 체계적이고 효율적인 안전관리 지침을 제시할 수 있다. 또한 책정된 위험성 등급으로 인해 위험성 평가 및 유지보수에 드는 불필요한 시간·재정적 손실을 줄일수 있다.

참고문헌

- (1) 한국가스안전공사, 고압가스통제, 2000.
- (2) CCPS, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, AIChE, 1989.
- (3) 서재민, *가스산업시설의 사고 빈도 분석 프로그램 구축*, 석사학위논문, 광운대학교, 1998.
- (4) Relcon AB, *Risk Spectrum User's Guide*, 1998.
- (5) CCPS, *Guidelines for Proess Equipment Reliability Data with Data Tables*, AIChE, 1989.