



## LPG충전소 안전장치의 사고방지 효과에 대한 정량적 분석

†이진한 · 유광수 · 박교식

한국가스안전공사 가스안전연구개발원  
(2006년 2월 14일 접수, 2006년 3월 14일 채택)

## Availability Analysis of Safety Devices installed for Preventing Accidental Events in the LPG Refuelling Station

†Jin Han Lee · Kwang Soo Yu · Kyo Shik Park

Korea Institute of Gas Safety R&D  
(Received 14 February 2006, Accepted 14 March 2006)

### 요 약

LPG충전시설에 설치된 각종 안전장치의 유효성을 평가하기 위해 하역작업 중 탱크로리의 비등액체팽창증기폭발(BLEVE, Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) 시나리오에 대해 빈도분석을 수행하였으며, 분석방법으로는 정량적인 분석법인 결함수목분석(Fault Tree Analysis)법을 사용하였다. 안전장치의 유효성은 안전장치의 부착여부와 용량변화에 따른 빈도변화를 관찰함으로써 간접적으로 평가하였다. 이 분석을 통해 허용 가능한 위험수준을 만족하기 위해 필수적인 안전장치와 설치 우선순위를 도출할 수 있었다.

**Abstract** – For the purpose of evaluating the availability of manifold safety devices installed in the LPG(Liquefied Petroleum Gas) refuelling stations, the quantitative analysis of the frequency on BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) scenario was performed. The amount of frequency reduction was the way of assessing safety devices availability. In this analysis, we could find out what sorts of safety devices are essential to satisfy acceptable social risk criteria and are prioritized to install in the future.

**Key words** : Liquefied petroleum gas, Fault tree, Safety device

### I. 서 론

국내에 설치된 LPG충전시설은 '98년 부천 LPG충전소 대형 폭발사고 이후 도심 외곽으로 이전을 정책적으로 추진할 결과 2005년 8월말 기준으로 현재 14.2%인 192개소만 주거 또는 상업지역에 설치되어 있다. 자동차 충전소의 경우 그 특성상 접근의 편의성이 어느 정도 유지되어야 하므로 어쩔 수 없이 도심에 위치하게 되며, 외국의 경우도 도심설치를 허용하고 있다. 심지어 영국과 같이 석유류판매소(주유소)와 겸용으로 판매가 허용되어 있는 국가도 있다. 다만, 영국을 포함한 유럽의 경우 위험관리는 사회적 위험분석(Social Risk Analysis) 방법을 통해 허용 가능한 위험수준에 이르지 못하면 설치가 불허된다. 영국의 분석사례를 살펴보면, 1995년 최악의 시나리오인 탱크로리의 하역작업 중 BLEVE확률을 정량적으로 분석한 결과  $1.1 \times 10^{-8} \sim 6.7$

$\times 10^{-10}/\text{delivery}$ 라는 결과를 얻어 충전소가 도심에 설치되어 있더라도 사회적 위험수준이 충분히 낮으므로 도심설치 가능성에 대한 정당성을 부여한 바 있다[1]. 그러나 이 사례와 같이 위험수준에 대한 정량적 평가 결과는 시설기준, 설치관행과 운전절차, 방법에 따라 큰 차이를 나타낼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 상기 사례와 유사한 방법으로 국내에 설치된 LPG자동차 충전소의 전형적 설치형태 및 설치기준에 따라 위험을 분석하고 나아가 위험확률을 줄일 수 있는 시설기준 개선방안을 제시하였다.

### II. 접근방법

#### 2.1. 시나리오 선정

정량적 위험분석에서는 발생 가능한 다양한 사고시나리오에 대해 모두 분석한다. 그러나 이러한 작업은 매우 많은 시간과 인력이 소모된다. 따라서 최근의 위험분석 경향은 가능한 한 단순함과 계량화를 추구한

†주저자:imhappy@kgs.or.kr

다. 최근의 위험분석 방법론인 방호계층분석(LOPA, Layer of Protection Analysis)도 계량화 기법을 사용함으로써 사용자가 확대되고 있는 추세이다[2]. 이 방법론에 따르면 먼저 사고영향(Consequence)이 큰 시나리오를 선정하고 그 시나리오에 대해서 사고빈도를 추정하여 개선권장사항을 도출해 낸다. 본 연구에서도 먼저 사고영향이 가장 큰 시나리오를 선정하였는데 LPG충전시설의 경우 단연 저장탱크의 BLEVE시나리오가 가장 최악의 시나리오이다. 다만, 국내 충전 시설의 저장탱크는 지하에 매설되어 있으므로 하역작업중인 탱크로리의 BLEVE를 목표 시나리오로 선정하였다. 영국 HSE(Health & Safety Executive)도 동 시나리오를 도심 충전소 위험분석에 사용한 바 있다[1].

2.2. FTA 구성

사고빈도를 예측하는 정량적인 분석법은 전통적으로 FTA(Fault Tree Analysis)법이 널리 사용되어 왔다. 특히, LPG충전소와 같이 설비고장뿐만 아니라 인적오류가 사고빈도에 중요한 비중을 차지하는 경우에 특히 유용하다. Fig. 1에 Fault Tree의 최상위 사건을 나타내었다. 하위사건에 대해서는 본 고에 모두 나타내기가 어려워 Fig. 2에 디스펜서지역의 화재로 탱크로리가 가열되는 사건을 그 예로서 나타내었다.

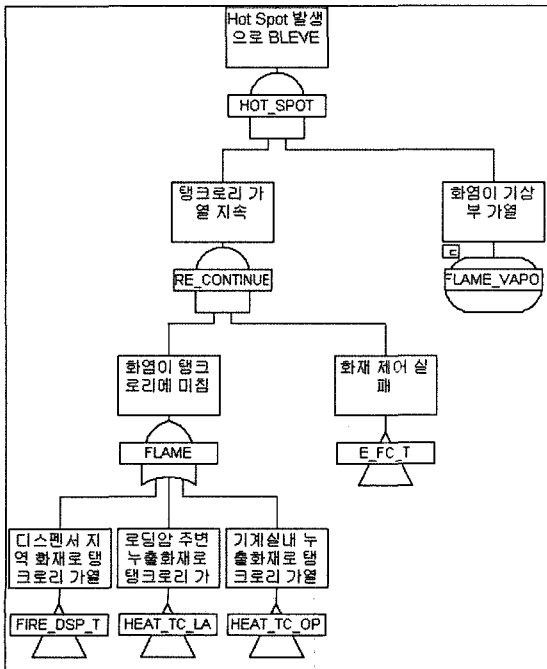


Fig. 1. Top event of fault tree.

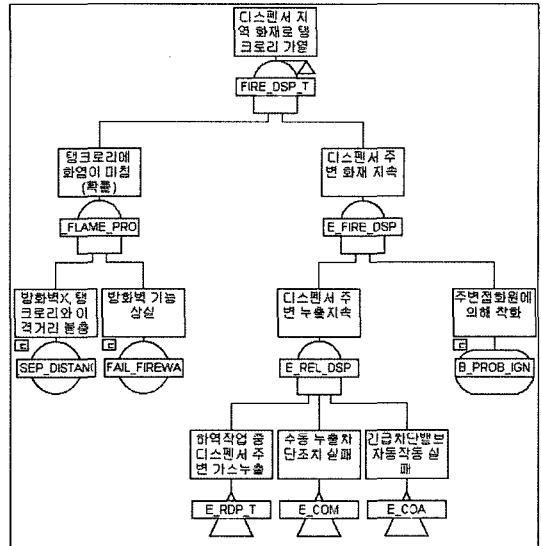


Fig. 2. Intermediate event example; Tankcar attacked from the fire around dispensing area.

2.3. 기본사건 데이터

국내 설치된 충전소내 일반적인 시설형태를 고려하여 탱크로리 BLEVE시나리오를 유발할 수 있는 기본사건을 38개의 기본사건으로 구성하였다. 기본사건은 3가지 형태 즉, ① 장치의 고장, ② 인적오류, ③ 상태의존적 확률사건으로 구성된다.

장치의 고장을 자료는 OREDA(Offshore Reliability Data) 또는 TRDH(The Reliability Data Handbook)을 사용하였다[3,4]. 장치의 일반 신뢰도 자료는 주로 고장빈도로 표현된다. 그러나 안전장치시스템(Trip, Shut down 등)의 고장을 분석은 요구고장율(PFD, Probability of Failure on demand) 즉, 안전장치의 작동이 요구될 때 기능고장을 유발할 확률로 표현되고 분석된다. 단일 채널을 가진 장치의 평균 요구 고장율은 고장빈도와 검중주기의 함수로 다음과 같이 근사된다[5].

$$PFD_{avg} = \frac{1}{2} \theta T \tag{1}$$

여기서,  $\theta$  = 장치의 평균 고장율  
 $T$  = 작동 테스트 주기

과거 사고경험으로 볼 때 LPG충전소의 사고는 인적오류가 80% 이상을 차지한다[6]. 이를 볼 때 인적신뢰도 데이터가 매우 중요함을 알 수 있다. 그러나 불행히도 인적오류 분석 데이터는 많이 존재하지 않는다. 다만 원전시설에 제한적이지만 인적오류를 유형별로 구

Table 1. 기본사건 빈도/확률(출처: HSE[1], ORE[3], TRD[4], NUR[7]).

Basic Event Description	P/F	L	M	S	Ref.
주변화재로 인해 살수장치 작동불가	P	0.2	0.1	0.01	HSE
안전관리자 현장 이탈로 살수장치 작동불가	P	0.05	0.05	0.05	NUR
안전관리자 현장이탈시 종사자 살수장치 조작방법 모름	P	0.25	0.25	0.25	NUR
살수장치용 펌프 기동실패, 1년주기 성능시험	P	1.6E-3	1.6E-3	1.6E-3	ORE
화재(연기)감지기 작동실패, 1년주기 성능시험	P	2.7E-3	2.7E-3	2.7E-3	ORE
탱크로리 안전밸브 작동실패(fail to open), 1년주기 성능시험	P	0.061	0.061	0.061	ORE
살수량 불충분(대누출 -화염이 미치는 면적비율)	P	0.5	0.3	0.2	추정
살수 노즐 1개이상 고장(PFD_avg)	P	0.12	0.12	0.12	계산
소방서 화재진압 효과적이지 못함	P	1	0.5	0.01	HSE
소방서 화재진압차량 너무 늦게 도착	P	1	1	0.01	HSE
종업원 초기진화 실패	P	1	1	0.2	-
주변점화원에 의해 착화	P	0.296	0.01	0.002	HSE
로딩암주변 화재로 화염이 탱크로리에 미침	P	0.8	0.5	0.3	추정
하역작업 빈도	F	계산			-
커플러 체결 불량 확률(Recovery Factor; 0.05)	P	0.0012	0.0012	0.0012	NUR
플랜지 누출 빈도	F	0	8E-5	3.2E-4	HSE
하역작업 소요시간비율	P	계산			-
리미트 스위치고장		0.0036	0.0036	0.0036	TRD
운전자 실수(2 step Slip오류)	P	0.003	0.003	0.003	NUR
탱크로리 과류차단 안전장치 고장	P	0.01	0.01	0.01	HSE
탱크로리 수동차단밸브 고장(fail to close), 1년주기 성능시험	P	0.0078	0.0078	0.0078	ORE
탱크로리 긴급차단밸브 고장(fail to close), 1년주기 성능시험	P	0.01	0.01	0.01	ORE
탱크로리 운전자 현장이탈	P	0.1	0.1	0.1	NUR
기타 종사자 조작방법 모름	P	0.5	0.5	0.5	NUR
누출경보기 고장(fail to function), 1년주기 성능시험	P	0.003	0.003	0.003	ORE
사무실 종사자 누출 경보 무시	P	0.01	0.01	0.01	NUR
가용전 차단안전장치 작동실패	P	0.012	0.012	0.012	ORE
역류방지 밸브고장	P	0.01	0.01	0.01	ORE
충전중 자동차 출발	F	계산			NUR
안전장치 탈착 실패	P	0.005	0.005	0.005	ORE
과류차단 안전장치 고장	P	0.0001	0.0001	0.0001	ORE
디스펜서 충들로 전도	F	계산	계산	계산	NUR
디스펜서 보호대 방호실패	P	0.01	0.01	0.01	추정
디스펜서 주변 플랜지 누출	F	1E-5	1E-5	1E-5	HSE
저장탱크 긴급차단밸브 고장(Fail to close)	P	0.025	0.025	0.025	ORE
저장탱크 수동차단밸브 고장(Fail to close)	P	0.001	0.001	0.001	ORE
현장 누출확인 실패	P	0.01	0.01	0.01	NUR
화염이 기상부 가열	P	0.8	0.8	0.8	HSE

LPG충전소 안전장치의 사고방지 효과에 대한 정량적 분석

분하여 분석한 데이터를 얻을 수 있다[7]. 이 데이터는 인간 행동의 관점에서 분석된 데이터로서 석유화학시설의 정량적 분석에도 준용되고 있다. 여기서는 대부분의 경우 원전의 인적오류 분석 데이터를 참조하였다[7]. 인적오류는 진단오류와 수행오류로 구분되며, 진단오류는 주로 제어계측실에서 일어나는 인지오류를 말하며, 수행오류는 누락, 지역, 잘못된작 등 행동오류를 말한다. 수행오류는 오류 수정을 고려하여야 한다.

상태기본사건(Conditional Event)은 특정 기본사건이 발생하는 데 필요한 조건을 설정하는 데 사용된다. 화염이 탱크로리에 미치는 확률을 나타내는 기본사건을 예로 들면, 이는 화염의 소스와 탱크로리와의 거리에 의존하게 된다. 즉, 거리가 멀면 멀수록 화염이 닿을 확률이 낮아지다가 일정 거리이상(약 20 m)이면 화염이

탱크로리에 닿지 않게 된다

Table 1에 전술한 Fault Tree에 사용된 기본사건의 목록을 나타내었다. 여기에 표현된 빈도 또는 확률 값은 전형적인 값으로서 이중 일부사건은 후술할 분석목적에 따라 분석변수로서 변할 수 있는 값이다.

2.4. 분석 대상

본 연구의 목적은 안전장치의 성능변화에 따른 위험변화를 평가하여 설치된 안전장치들의 사고예방 효과를 고찰하고 나아가 최적의 안전장치 설치기준을 제시하는 데 있다. 따라서 먼저 국내 LPG충전소의 시설설치 기준 및 운영사례를 토대로 안전장치의 설치 여부 및 설치형태(또는 성능)에 따라 어떠한 위험변화 요소가 있는지 검토하였다. Table 2에 안전장치의 설치여부

Table 2. 안전장치들의 설치상태에 따른 위험변화 요소.

설비/장치	위험변화 요소	개선방향
살수장치	살수장치가 없는 직경 2.5 m 탱크로리는 탱크 상부 Jet Fire의 경우 약 7분, Pool Fire의 경우 약 20분, 탱크 하부 Jet Fire의 경우 약 100분 소요	하역작업 지역에 살수장치
	현행 기준의 5 liter/min/m <sup>2</sup> 의 속도로 살수할 경우 1개의 노즐 파열시에도 BLEVE발생 가능	살수장치 살수량 증가, 노즐 막힘 방지
	현행 살수장치 기준은 원격작동만 요구됨. 추가적으로 화재감지기와 연동한다면 신속한 작동 및 인적오류 방지	화재감지기와 연동
	화재시 쉽게 접근할 수 없는 살수지역내 차단밸브가 설치되었을 경우 잠금상태에 있을 개연성 존재	차단밸브 개방상태에서 시건 조치
안전밸브	설치후 작동테스트 이루어지지 않음	멀티포트, 유효기간
	분출용량시험 하지 않아, 불확실성 존재	시험기준 마련
방호벽	현행 기준에는 탱크로리와 충전장간의 안전거리 또는 방호벽 설치 기준 없어 시설의 배치형태에 따라 안전성이 차이 존재	변경시설에 대해 방호벽 설치
안전탈착장치	충전구 미분리 상태에서 주행시 안전탈착 목적 부작, 가해지는 힘에 방향에 따라 탈착이 되지 않음 개연성 존재(일일 정차 충전)	충전호스 고정장치 기준 개선
과류차단밸브 (충전기측)	허용 유속이상일 경우 차단(대부분 디스펜서에 부착)되어 안전탈착장치 고장에 따른 2차 안전장치. 다만 최신 제품에 부착된 제한 충전량이상 흐름시 자동차단되는 과류차단장치가 더 효과적	누적용량형 과류차단장치 설치 권장
과류차단밸브 (탱크로리측)	하역작업중 커플러 체결불량 또는 탱크로리 오발진으로 인한 커플러 이탈시 과류(차압)에 의한 자동차단으로 누출 방지	과류차단장치 설치 설치 의무화
충돌보호대	오발진으로 인한 충전기 전도를 방지하기 위함. 충전기간 거리가 가까울 경우 방지효과 줄어듦. (후방주차일 경우)	보호대 방호 성능 향상
긴급차단장치	현행 긴급차단장치 기준은 원격작동만 요구됨. 추가적으로 가스감지기와 연동한다면 신속한 작동 및 인적오류 방지	가스감지기와 연동
	공기작동형(주로 설치됨) ESV경우 용량이 큰 자동형 공기압축기에 연결되어 있는 경우 있음. (신속한 차단 어렵거나 차단되지 않음.)	차단밸브 잠금상태에서 시건 수동펌프 권장
저장용량	저장탱크 용량이 탱크로리 보다 적은 경우 하역작업 시간이 많이 소요 되어 장기간 위험에 노출됨. 15톤 탱크로리의 경우 1회 하역작업 시간은 1시간 30분 정도이나 10톤 저장탱크에 하역시 탱크로리 초과용량 5톤이 소진될 때까지 하역라인 체결상태에서 대기(4시간)시간 추가 소요	저장용량 증설

및 성능에 따른 위험변화 요소를 요약하여 나타내었다. 한편, 이들 변수들을 사건수목분석의 변수로 설정하여 그 결과 즉 사고빈도의 변화를 분석하였다.

### III. 분석결과

#### 3.1. 안전장치의 사고방지 효과

분석의 단순화를 위해 국내 시설기준을 최소로 만족하는 표준시설을 가정하였다. 표준시설은 저장용량 10톤(지하매물), 디스펜서 2기, 월 판매량 800톤(도심기준), 15톤 탱크로리 사용, 하역지역에 살수장치가 설치되지 않은 자동차 충전소를 가정하였다. 개선방향은 미국, 영국의 충전소 시설기준을 참고하였다[2,3].

Fig. 3의 결과로 부터 각종 안전장치를 설치함에 따른 BLEVE 발생빈도 변화를 함축하여 표현하였다. 이 결과는 문헌에 나타난 평균 고장율, 인간오류를 등을 가정한 것으로 절대적인 결과가 아님을 밝혀둔다.

LPG충전소의 법적 최소기준을 만족할 경우 BLEVE 발생빈도는 약  $2.4 \times 10^{-5}/\text{yr}$ 로 예측되었다. 이는 국내 1,000개의 충전소가 있다고 가정할 때 25년에 1회 꼴로 탱크로리 BLEVE사고가 발생할 수 있음을 나타낸다. 만약 현재 설치된 안전장치인 안전방출밸브, 안전탈착장치, 긴급차단밸브, 역류방지밸브를 모두 설치하지 않았었다면 빈도는 10배 정도 증가하여  $3.0 \times 10^{-4}/\text{yr}$ 이었다. 즉, 3년에 1회 꼴로 BLEVE사고가 발생될 수 있는 것으로 예측되었다.

본 연구의 목적은 향후 추가적인 안전장치를 부가할 경우 사고발생빈도의 감소정도를 분석하고 그 우선순

위를 정하는 데 있다. Fig. 3의 결과와 같이 ① 냉각살수 장치, ② 냉각살수장치 자동작동, ③ 탱크로리 과류 차단밸브, 탱크로리 보호용 방화벽, ④ 저장탱크 긴급 차단장치 자동작동기능 부가, ⑤ 충전기에 누적형 과류 차단기능 부가를 순서대로 적용하였을 경우 사고빈도 감소정도를 나타내었다. 여기서 알 수 있듯이 냉각살수 장치, 탱크로리과류차단밸브, 탱크로리 보호용 방화벽은 각각 BLEVE사고빈도를 약 1/10 수준으로 낮출 수 있으며, 이 세 가지를 모두 설치할 경우 사고 빈도를 현재보다 약 1/1,000 정도로 낮출 수 있음을 알 수 있었다.

#### 3.2. 안전장치 추가설치 제한

앞서 열거된 안전장치와 기능들은 모두 설치하여 사고빈도를 최소화 하면 좋을 것이나, 경제적 여건과 서비스의 용이성도 고려되어야 한다. 그러면 향후 어떤 안전장치를 부가적으로 부착하여 어느 정도까지 사고빈도를 낮추는 것이 적정할 것인가? 이에 대한 명확한 정의를 내리기는 어렵다 다만, 유럽의 경우를 살펴보면 개별 사고시나리오의 경우  $1 \times 10^{-6}/\text{yr}$  이하로 유지될 것을 권고하고 있다. 이러한 외국의 사회적 위험(Social Risk) 요구조건을 만족하려면 최소한 냉각살수장치와 과류차단장치는 설치되어야 할 것으로 판단된다.

### IV. 결 론

본 연구를 통해 LPG충전소에 설치되어 있거나, 설치 가능한 개별 안전장치의 사고방지효과를 사고발생빈도

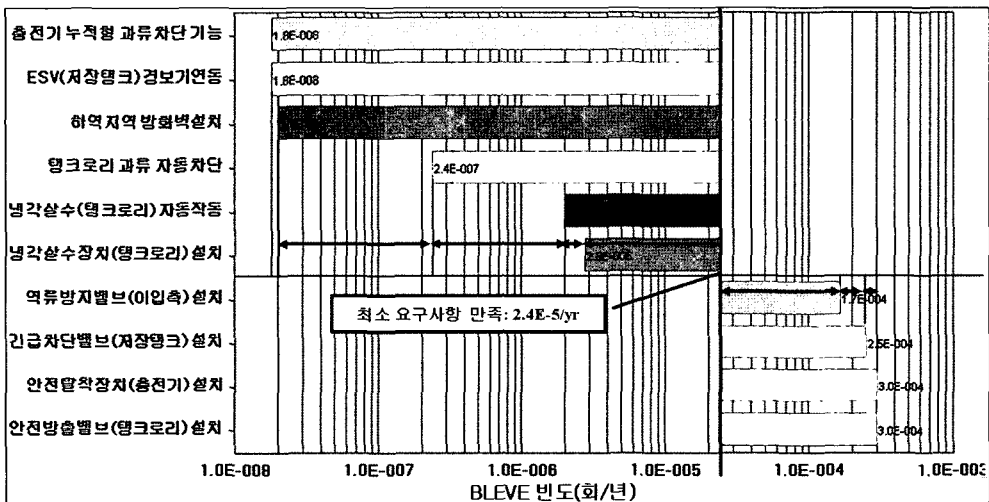


Fig. 3. 안전장치 설치에 따른 BLEVE사고 사고빈도 변화.

의 정량적인 감소량으로 분석함으로써 간접적으로 측정할 수 있음을 보였다.

한편, 안전장치에 따른 사고빈도 분석결과와 국내에는 설치의무화가 되어있지 않으나, 외국에 설치가 의무화되어 있는 안전장치를 비교하여 향후 추가적으로 설치되어야 하는 안전장치의 우선순위를 검토한 결과 하역지역 냉각살수장치와 탱크로리 과류차단장치로 나타났다.

### 참고문헌

- [1] A.B. Harding, BLEVE Probability of an LPG Road Tanker during Unloading, AEA Technology/HSE R1043, (1995)
- [2] CCPS, Layer of Protection Analysis- Simplified Process Risk Assessment, AIChE, New York, NY, (2001)
- [3] SINTEF Industrial Management, OREDA 2002 - Offshore Reliability Data, 4th ed., DNV, Norway, (2002)
- [4] T.R. Moss, The Reliability Data Handbook, ASME Press, (2005)
- [5] E.M. Marszal, Safety Integrity Level Selection- Systematic Methods Including Layer of Protection Analysis, Instrumentation Systems and Automation Society, (2002)
- [6] 한국가스안전공사, 가스사고연감, (2003)
- [7] A.E. Swain and Guttman, H.E., Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, NUREG/CR-1278, SNL, (1983)
- [9] T.C. Lemoff, LP-Gas Code Handbook, 7th Edition, National Fire Protection Association, Massachusetts, (2004)
- [10] LPGA, Automotive LPG Refuelling Facilities, Code of Practice 20, The LP Gas Association, (2001)