

## LPG충전소내 안전장치 설치에 따른 사고발생 빈도변화 예측

이진한\* 박교식  
 한국가스안전공사 가스안전연구개발원  
 (imhappy@kgs.or.kr\*)

Accidental Frequency Variations on the Capabilities of Safety Devices  
 Installed in the LPG Refuelling Stations

Jin-Han Lee\* Kyo-Shik Park  
 Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation  
 (imhappy@kgs.or.kr\*)

### 서론

LPG충전시설은 설계, 배치에 따라 안전장치의 성능과 사고확산 및 방지효과에 차이가 있으나, 현행 시설의 설치기준은 이러한 편차로 발생할 수 있는 위험도에 따른 적절한 규제를 반영하고 있지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 안전장치의 구조, 용량, 고장율에 따른 안전장치의 성능변화와 이에 따른 사고빈도 감소효과를 정량적으로 분석하여 안전장치의 설치 우선순위를 정하고 아울러 최적의 안전장치 설계 및 설치기준을 제시하는 것을 목적으로 한다. 국내에 설치된 LPG충전시설은 1998년 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 위험관리 는 사회적 위험분석(Social Risk Analysis)방법을 통해 허용 가능한 위험수준에 이르지 못 하면 설치가 불허된다. 영국의 분석사례를 살펴보면, 1995년 최악의 시나리오인 탱크로리의 하역작업중 BLEVE(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)확률을 정량적으로 분석한 결과 하역작업당  $1.1 \times 10^{-8}/\text{yr} \sim 6.7 \times 10^{-10}$  수준이라는 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 시설 기준, 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.

### 접근방법

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 추구한다. 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 분석대상 시나리오로 선정하였다. 영국 HSE(Health & Safety Executive)도 동 시나리오를 도심 충전소 위험분석에 사용한 바 있다.[1]

사고빈도를 예측하는 정량적인 분석법은 전통적으로 FTA(Fault Tree Analysis)법이 널리 사용되어 왔다. 특히, LPG충전소와 같이 설비고장뿐만 아니라 인적오류가 사고빈도에 중요한 비중을 차지하는 경우에는 유용하다. FTA 구성 및 분석에는 상용 분석 툴인 FaultTree+(Isograph Reliability Software)를 사용하였다.

Fig. 1에 Fault Tree의 일부분을 나타내었다. 국내 설치된 충전소내 일반적인 시설형태를 고려하여 탱크로리 BLEVE시나리오를 유발할 수 있는 기본사건을 38개의 기본사건으로 구성하였다. 기본사건은 된다. 기본사건은 3가지 형태 즉, ①장치의 고장, ②인간오류, ③상태의존적 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 검증주기의 함수로 다음과 같이 근사된다[5].

$$PFD_{avg} = \frac{1}{2} \theta T, \quad \text{여기서, } \theta = \text{장치의 평균 고장율, } T = \text{작동 테스트 주기 (Eq. 1)}$$

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 데이터를 많이 존재하지 않는다. 다만 원전시설에 제한적이지만 인적오류를 유형별로 구분하여 분석한 데이터를 얻을 수 있다.[7] 이 데이터는 인간 행동의 관점에서 분석된 데이터로서 석유화학시설의 정량적 분석에도 준용되고 있다. 여기서는 대부분의 경우 NUREG의 데이터를 사용하였다. 인적오류는 진단오류와 수행오류로 구분되며, 진단오류는 주로 제어계측실에서 일어나는 인지오류를 말하며, 수행오류는 누락, 지역, 잘못조작 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 20m)이면 화염이 탱크로리에 닿지 않게 된다.

본 연구의 목적은 안전장치의 성능변화에 따른 위험변화를 평가하여 설치된 안전장치들의 사고예방 효과를 고찰하고 나아가 최적의 안전장치 설치기준을 제시하는 데 있다. 따라서 국내 LPG충전소의 시설설치 기준 및 운영사례를 토대로 안전장치를 어떤 형태로 설치하는 것이 사고예방효과가 높은지 분석하였다. 이를 위해 먼저 최소한의 시설기준을 만족하는 경우 대비 안전장치를 추가함으로써 얻어질 수 있는 사고발생확률 감소효과를 분석하는 방법으로 이루어졌다.

## 분석결과

분석의 단순화를 위해 국내 시설기준을 최소로 만족하는 표준시설을 가정하였다. 표준시설은 저장용량 10톤(지하매몰), 디스펜서 2기, 월 판매량 800톤(도심기준), 15톤 탱크로리 사용, 하역지역에 살수장치가 설치되지 않은 자동차 충전소를 가정하였다. 개선방향은 미국, 영국의 충전소 시설기준을 참고하였다[8][9].

Fig 2에 각종 안전장치를 설치함에 따른 BLEVE 발생빈도 변화를 함축하여 표현하였다. 이 결과는 문헌에 나타난 평균 고장율, 인간오류율 등을 가정한 것으로 평균적인 상

황에서의 예측결과이다. 따라서, 시설의 유지관리 정도, 종사자의 교육훈련 정도에 따른 차이는 반영되지 않았음을 밝혀둔다.

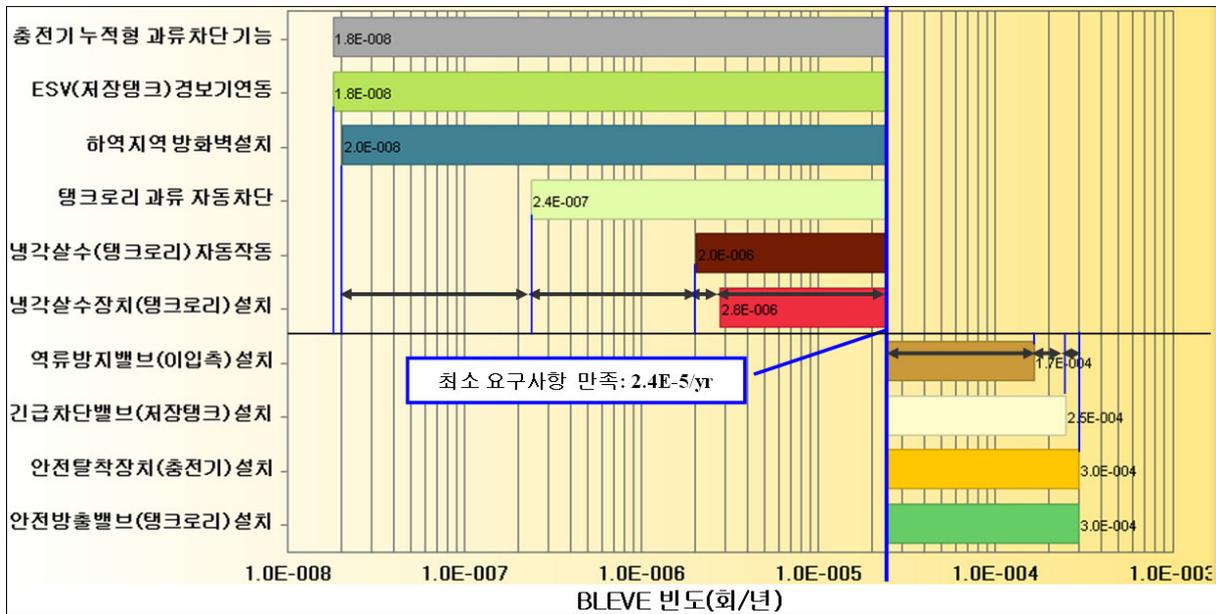


Fig. 1 안전장치 설치에 따른 BLEVE사고 사고빈도 변화

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

본 연구의 목적은 향후 추가적인 안전장치를 부가할 경우 사고발생빈도의 감소정도를 분석하고 그 우선순위를 정하는 데 있다. Fig. 2에 결과와 같이 ①냉각살수 장치, ② 냉각살수장치 자동작동, ③탱크로리 과류차단밸브, 탱크로리 보호용 방화벽, ④저장탱크 긴급차단장치 자동작동기능 부가, ⑤충전기에 누적형 과류차단기능 부가를 순서대로 적용하였을 경우 사고빈도 감소정도를 나타내었다. 여기서 알 수 있듯이 냉각살수장치, 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 있다.

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  $1 \times 10^{-6}/yr$ 이하로 유지될 것을 권고하고 있다. 이러한 외국의 사회적 위험(Social Risk) 요구조건을 만족하려면 최소한 냉각살수장치와 과류차단장치는 설치되어야 할 것으로 판단된다.

**결론**

본 연구를 통해 LPG충전소에 설치된 안전장치의 설치여부, 구조, 용량에 따른 사고시 피해가 큰 시나리오의 발생확률 변화를 분석함으로써 각종 안전장치의 사고방지 기여 정

도를 평가하여 안전장치의 설치 우선순위를 정할 수 있음을 보였다.

본 연구결과 국내에 설치된 LPG충전소의 일반적인 상황을 고려할 때 살수장치와 탱크 로리 과류차단장치를 추가적으로 설치할 경우 BLEVE사고 감소효과가 큰 것으로 분석되었으며 향후 기술기준 개정시 우선순위를 두고 고려되어야 할 것으로 판단된다.

향후 BLEVE이외의 시나리오 즉 VCE(Vapour Cloud Explosion)도 추가적으로 분석된다면 충전기 측 안전장치의 효과성에서도 정밀한 분석이 이루어 질 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. Harding, A. B.. 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. Moss, T. R.. The Reliability Data Handbook, ASME Press, 2005
5. Marszal, E. M.. Safety Integrity Level Selection-Systematic Methods Including Layer of Protection Analysis, Instrumentation Systems and Automation Society, 2002
6. 한국가스안전공사, 가스사고연감, 2003
7. Swain, A.E.; Guttman, H.E.. Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear PowerPlant Applications, NUREG/CR-1278, SNL, 1983
8. Lemoff, T.C.. LP-Gas Code Handbook, 7th Edition, National Fire Protection Association, Massachusetts, 2004
9. LPGA. Automotive LPG Refuelling Facilities, Code of Practice 20, The LP Gas Association, 2001