

# 지상식 LPG 저장탱크의 외부화재에 의한 BLEVE 가능성 해석

이 승 립, 이 영 순

한국가스안전공사 가스안전시험연구원 제품연구실, 서울산업대 안전공학과

## A Study on the Probability of BLEVE of Above-ground LP Gas Storage Tanks Exposed to External Fire

Seung-Lim Lee, Young-Soon Lee

Products R&D Division, Gas Safety Technology R&D Center, Korea Gas Safety Co.  
Dept. of Safety Engineering, Seoul National Univ. of Technology

### 1. 서 론

본 연구에서는 상대적으로 위험성이 큰 지상식 LPG 저장탱크의 BLEVE 가능성에 대해 외국의 Pilot 탱크 시험 결과 및 BLEVE 발생을 위한 소요입열량 계산값을 이용 연역적 계산방법을 통해 BLEVE 조건 및 가능성을 정량화하여 규명코자 하였다. 특히, 탱크 사양 등에 있어 1999년의 부천사고와 동일한 탱크 사양을 이용해 당시의 상황을 연역적 계산에 의해 접근코자 하였다.

### 2. 이 론

BLEVE 발생 메커니즘을 고온에서의 재료강도 저하와 내부 비등에너지의 관계에서 접근해 보면 다음과 같다.

#### 2.1 파단(ruptures)의 형태

Birk<sup>[4]</sup>등은 모든 BLEVE 시험의 경우에 있어 파손 절차(failure process)는 균열(crack) 또는 틈(breach)이 용기 벽체에 생성됨으로써 시작되었음을 밝혔다. 균열은 토치화염의 충돌로 인해 국부적으로 재료 강도가 80% 이상 감소된 증기공간의 동판(shell plate)에서 형성되었다. 일단 균열이 형성되면 프로판 증기는 용기로부터 벤트되기 시작하였다. 이 때에 3가지의 가능한 결과가 관찰되었다.

- (a) 단순한 제트 유출을 동반하는 정지된 균열
- (b) 정지하지 않고 급속하게 진전되어 TLOC(total loss of containment) 및 BLEVE로 연결되는 균열
- (c) 제트 유출을 동반하며 균열이 일시 정지하였다가 재진전하여 TLOC 및 BLEVE로 연결되는 균열

## 2.2 파손 시간

보통 PLG(pressure-liquefied gas)의 TLOC가 일어날 경우에 한하여 BLEVE는 발생된다. 탱크는 압력하중(pressure stress)이 탱크 벽체에서 전체 용기의 길이방향을 따라 파괴가 진전될 수 있는 요구수준을 초과할 경우에 TLOC가 발생되게 된다.

TLOC 발생을 위한 필요 에너지는 탱크내 증기 및 액으로부터 발생된다. 증기공간의 에너지는 용기의 초기파손에 즉각적으로 이용될 수 있다. 그러나 액에너지는 단지 상변화(즉, 액은 반드시 증기 생성이 가능하도록 비등 또는 flash되어야 함.) 이후에 이용 가능하다. 여기에는 일정 시간이 요구된다.

Birk의 시험 결과에 근거해 정리해 보면, 단기간(초기 균열발생으로부터 10ms 이내)에 발생하는 BLEVE는 주로 약한(동일 재질의 경우 두께가 얇은) 탱크에서 나타나고, 이것은 증기공간의 에너지에 의해서 발생가능하며 액온도는 이들 형태의 BLEVE에서는 그렇게 중요하지 않다는 것을 제안하였다. 이러한 사실은 약한 탱크에서 평균 액온도가 20°C에서 BLEVE가 관찰됨으로써 증명되었다.

반면에 강한(동일 재질의 경우 두께가 두꺼운) 탱크에서는 상대적으로 중·장기간(초기 균열 발생으로부터 500ms~3s)에 걸쳐 BLEVE가 발생 가능하고, 이것들은 내부 증기압에 의한 초기 탱크 파손 이후에 탱크내 격렬한 비등 또는 과가열한계 형태의 폭발적인 비등에 의해 발생하는 것으로 보고되고 있다. 증기공간의 에너지는 단지 초기파손에 영향을 미치고 장시간의 이들 BLEVE의 TLOC에는 영향을 미치지 않는다.

## 3. BLEVE 가능성 해석

### 3.1 해석을 위한 접근 방법

BLEVE 가능성을 해석하기 위해 두 가지 접근 방법으로 그 가능성을 정량화하고자 하였다. 하나는 BLEVE 발생 조건중 탱크 내부의 조건으로 탱크 벽체 고온강도 저하, 내부액체 온도 및 상대 액충전량의 관계를 시험에 의해 유도된 계산식에 의해 규명하는 것이고, 또 다른 하나는 BLEVE 발생 가능한 외부화재조건으로 BLEVE에 이르기 위한 외부 누출조건(누출 소요량, 누출속도, hole 구경) 및 외부 화재 조건(플화재 상당 직경 및 높이)을 계산하고자 하였다.

### 3.2 BLEVE MAP을 이용한 가능성 해석

#### 3.2.1 탱크 재료의 열화 데이터

Birk가 제시한 일반적인 저탄소강 재료의 온도에 따른 열화조건은 Fig. 1과 같다.

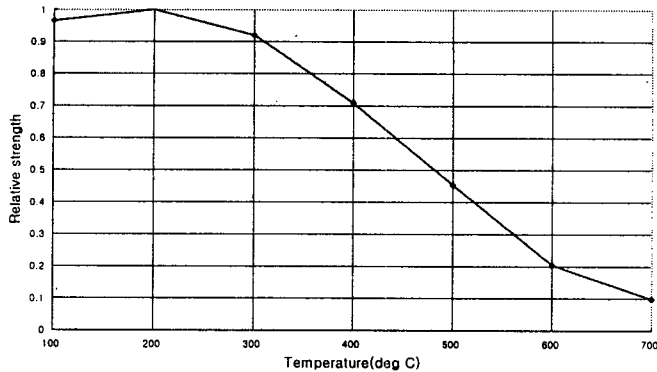


Fig. 1 tensile strength & temperature of Carbon Steel<sup>[4]</sup>

위 Fig. 1에서의 온도별 상대값을 SPPV 490에 적용하여 그 값을 계산하면 Table 1과 같다.

Table 1 tensile strength according to temperature of SPPV 490

온도	재료강도 감소율(%)	인장강도 (N/mm <sup>2</sup> )	비고
200℃	100	610	
300℃	92	561	
400℃	71	433	
500℃	45	275	
<b>600℃</b>	<b>20</b>	<b>122</b>	<b>BLEVE 가정</b>
700℃	9.8	60	

### 3.2.2 BLEVE map

BLEVE Zone은 단순히 탱크 재료의 강도와 탱크내 액화가스의 내부압력관계에서 벗어나 파열 강도(burst strength)와 파손시 액(liquid)의 에너지관계로 규정할 수 있다. Birk가 제시한 Fig. 2의 BLEVE map을 사용하면 BLEVE Zone은 BLEVE Zone과 non-BLEVE Zone으로 구분할 수 있었다.

이 그림은 추정된 저장탱크의 파열강도와 파손시의 액 에너지와의 관계로 BLEVE 가능성을 설명하고 있다. 탱크의 파열강도는 탱크 파열시 실제 증기공간 탱크 벽 평균온도와 동일한 온도에서의 재료강도를 사용하여 식(1)과 같이 계산하였다.(높은 벽 온도는 재료의 강도를 저하시키고, 따라서 탱크 파열압력(burst pressure)도 줄어들게 된다.) 한편, 파열압력은 파손시 탱크 강도의 추정값이다.

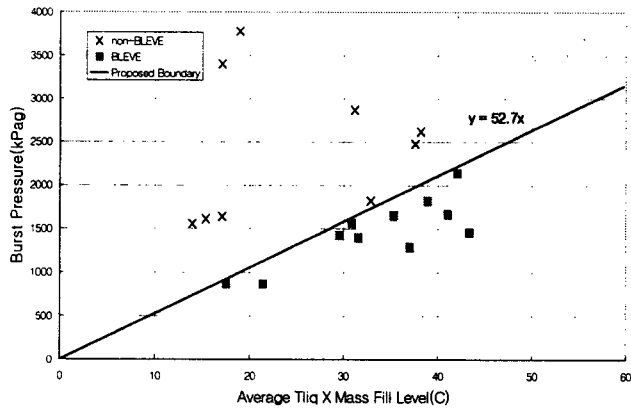


Fig. 2 BLEVE map of 400 l -Propane tanks<sup>[4]</sup>

$$P_{burst} = 2 \sigma_{y(T_w)} \frac{t}{D} \quad (1)$$

여기서, P : 파열압력(burst pressure)

t : 벽두께

D : 탱크 직경

$\sigma_{y(T_w)}$  :  $T_w$ 에서의 재료 최대강도( $T_w$ 는 증기공간에서의 평균 동판 온도를 의미)

위의 식에 의해 온도별 재료강도와 내부액 온도를 사용해 BLEVE 발생 가능한 최소액위한계를 계산하면 Table 2와 같다.

Table 2 required minimum liquid level for BLEVE occurrence

plate 표면온도 (°C)	강도 (Kpag)	내부액 온도 (°C)	BLEVE 가능 최소 액위(%)
550	201,300	53	72.07
600	122,000		43.68
650	915,000		32.76
700	60,000		21.48

### 3.3 BLEVE 발생 가능한 외부누출 및 외부화재 조건 계산

#### 3.3.1 BLEVE 발생 가능 입열량 계산

BLEVE 생성 조건을 최저 과가열온도인 53℃로 가정하고, 압력방출밸브 분출 개시 소요시간은 최초 점화후 3분으로 잡았고, BLEVE 발생까지의 총 소요시간은 10분으로 상정하였다. 대기온도에서 이 온도까지 상승하는데 소요되는 열량과 압력방출밸브를 통해 증발되는 가스량의 증발잠열을 계산하여 총소요열량으로 상정하였다. 그 결과는 Table 3에 나타내었다.

Table 3 required heat capacity for BLEVE occurrence

구분	온도	ΔT	ΔH (kcal)	비고
현열	Ambient(15℃)~53℃	38℃	288,750	
잠열	안전밸브 방출 (증발분)	-	316,964	분출시간: 7분 상정
계			605,714	

#### 3.3.2 BLEVE 발생 가능 누출 속도

BLEVE 발생 가능한 외부화재 형성을 위한 누출속도를 계산하면 다음과 같다.

$$H_n (\text{총입열량}/T[\text{시간}]) = \eta (20\% \text{ 열효율}) \times \text{kg/s}(\text{누출속도}) \times H_L(\text{발열량}) \quad (2)$$

$$605,714 \text{ kcal}/420\text{s} = 0.2 \times \text{누출속도}(\text{kg/s}) \times 12,042 \text{ kcal/kg}$$

$$\text{액상가스 누출속도} \approx 0.60 \text{ kg/s}$$

##### 3.3.2.1 액상누출시 누출 상당구경

누출조건을 저장탱크로부터 hole 발생에 의한 액상누출로 가정하고 누출속도 (W)를 구하는 식에 의해 누출원의 상당면적을 구하면,

$$W = C A \sqrt{2 (P_1 - P_2) \rho} \quad (\text{kg/s}) \quad (3)$$

여기서 C : 누출계수(0.6 : sharp-edged orifice)

A : 누출원의 상당면적( $\frac{\pi d^2}{4}$ )

P<sub>1</sub> : 탱크 및 배관내 압력(15℃ : 6.293 bar)

P<sub>2</sub> : 대기 압력

ρ : 프로판의 밀도(584 kg/m<sup>3</sup>)

A = 4.53 × 10 m<sup>2</sup> 가 되고, 누출직경(d)은 7.2 mm가 된다.

따라서 액상누출시 BLEVE 발생을 위한 탱크의 최소 누출직경은 7.2mm가 된다.

### 3.3.2.2 이상(two-phase) 누출시 누출 상당구경

인접한 저장탱크나 탱크로리의 연결 배관이나 호스로부터 이상누출 발생시의 누출구경을 PHAST(Version 6.00) 프로그램을 이용하여 trial and error 방법으로 계산하였다. 결과적으로 2상(two-phase) 누출시에는 최소 상당직경 17.6 mm 이상의 홀이 생성되어야 BLEVE가 발생 가능한 것으로 계산되었다.

### 3.3.3 플화재 크기 계산

플화재의 크기를 EFFECTS(Version 2.1) 프로그램을 사용하여 위의 누출속도 (0.60 kg/s)와 상당직경(7.2 mm)을 기준하여 플화재의 상당직경 및 높이를 계산한 결과 Table 4와 같다.

Table 4 results of calculating pool fire size

누출시간 (s)	액상품의 면적(m <sup>2</sup> )	액상품의 반경(m)	플화재의 면적(m <sup>2</sup> )	플화재의 직경 (m)	플화재의 높이(m)	비고
10	4.6	1.2	6.3	2.8	9.4	
60	21.6	2.6	8.9	3.4	10.6	
120	33.3	3.3	8.5	3.3	10.5	
<b>180</b>	<b>39.7</b>	<b>3.6</b>	<b>8.5</b>	<b>3.3</b>	<b>10.4</b>	

위 표에서 알 수 있듯이 일정시간이 경과하면 연소속도와 누출속도가 균형을 이루어 그 크기는 직경이 3.3m, 높이가 10.4m 정도의 플화재가 BLEVE 생성을 위해서는 필요하다.

## 4. 결 과

BLEVE는 발생당시의 저장탱크 재료강도와 탱크 내부 액에 내재된 에너지의 크기에 기인한다. Birk의 시험결과로 볼 때 BLEVE를 야기하는 단시간 파손(failure)은 매우 약한 탱크 조건에서 기인된다. 이 조건에서 파멸적인 파손(catastrophic failure)은 증기 공간에서의 에너지에 기인한다. BLEVE를 야기하는 장시간 파손의 경우에는 보다 강한 탱크 조건과 액체의 강한 비등 반응(boiling response)에 기인한 것으로 보인다. 액에 의한 비등반응은 상승된 액의 온도 기반에서 가능하다. 중간 시간 파손은 액과 증기 공간 에너지의 조합에 기인한다. BLEVE 및 non-BLEVE 파손으로 분류하는 BLEVE map은 산출된 탱크의 파열 압력(burst pressure)과 충전량에 의해 보정된 액 온도를 사용해서 그려질 수 있

는데 이 것을 이용하여 BLEVE 조건에서 최고충전액위에 대한 상대액위(%)가 BLEVE에 어떤 영향을 미칠 것인가를 계산한 결과 plate 온도가 600℃이고, 탱크 내부 액온도가 53℃일 때 액충전량은 43.68% 이상에서 BLEVE가 발생가능하며, 이는 화재현장에서 LPG 저장탱크의 BLEVE 예방에 유익한 자료가 될 것이다.

부천 충전소 사고시와 동일한 사양인 15톤 프로판 탱크를 모델로 하여 BLEVE가 발생 가능한 외부 누출 및 화재조건을 계산한 결과, 액상 누출시 누출 상당직경은 7.2mm가, 이상 누출시 누출상당직경은 17.6mm 이상의 조건에서 BLEVE가 발생 가능한 최소한의 풀화재 생성조건이 되었고, Pool fire의 크기를 EFFECTS V2.1을 이용해서 계산한 결과 BLEVE가 발생하기 위해서는 최소 직경 3.3m, 높이 10.4m 이상의 풀화재가 생성되어야 한다는 결과를 얻을 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] Cyril F. Parry, "Relief Systems Handbook", Institution of Chemical Engineers, p.p 84~93, 1992
- [2] Frank P. Lees, "Loss Prevention in the Process Industries", 2nd Edition, Vol.2, p.p 176~184, 1994
- [3] CCPS, "Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires and BLEVEs", p.p 157~171, 1998
- [4] A.M. Birk and M.H. Cunningham, "The Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion", J. Loss Prev. Process Ind., 1994, Vol.7, No.6, p.p 474~480
- [5] 한국가스안전공사 사고조사위원회, "부천 대성에너지 LPG 충전소 가스폭발사고 관련 진행 보고서(I,II)", 2001
- [6] A. M. Birk, "Scale Effects with Fire Exposure of Pressure-liquefied Gas Tanks", J. Loss Prev. Process Ind., Vol. 8, No. 5, pp. 275~290, 1995
- [7] TNO Institute of Environmental Sciences, "EFFECTS version 2.1 Manual", pp. 1996
- [8] 한국가스안전공사, "KGS PV007(수평원통형 LPG 저장탱크 기준)", 1996