

# LPG소형저장탱크 BLEVE 발생 시점 예측 툴 개발

채충근<sup>†</sup> · 이재훈<sup>\*\*</sup> · 채승빈<sup>\*\*\*</sup> · 김용규<sup>\*\*\*</sup> · 한신탭<sup>\*\*\*\*</sup>

## Development of a Tool for Predicting the Occurrence Time of BLEVE in Small LPG Storage Tanks

Chung Keun Chae<sup>†</sup> · Jae Hun Lee<sup>\*\*</sup> · Seung Been Chae<sup>\*\*\*</sup> · Yong Gyu Kim<sup>\*\*\*</sup> · Shin Tak Han<sup>\*\*\*\*</sup>

### <sup>†</sup>Corresponding Author

Chung Keun Chae  
Tel : +82-2-868-6108  
E-mail : chae@meri.co.kr

Received : June 24, 2020  
Revised : July 2, 2020  
Accepted : August 6, 2020

**Abstract** : In Korea, about 110,000 LPG small storage tanks of less than three tons have been installed in restaurants, houses and factories, and are used as LPG supply facilities for cooking, heating and industrial use. In the case of combustible liquefied gas storage tanks, the tank may rupture due to the temperature increase of the tank steel plate (approximately 600°C) even when the safety valve is operating normally, causing large-scale damage in an instant. Therefore, in the event of a fire near the LPG small storage tank, it is necessary to accurately predict the timing of the BLEVE(Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) outbreak in order to secure golden time for lifesaving and safely carry out fire extinguishing activities. In this study, we have first investigated the results of a prior study on the prediction of the occurrence of BLEVE in the horizontal tanks. And we have developed thermodynamic models and simulation program on the prediction of BLEVE that can be applied to vertical tanks used in Korea, have studied the effects of the safety valve's ability to vent, heat flux strength of external fires, size of tanks, and gas remaining in tanks on the time of BLEVE occurrence and have suggested future utilization measures.

**Key Words** : BLEVE, LPG tank accident, finite difference method, lumped capacity method, thermodynamic model, simulation

Copyright©2020 by The Korean Society of Safety All right reserved.

## 1. 서론

「액화석유가스의 안전관리 및 사업 법령」에서는 저장능력이 3톤 미만인 LPG저장탱크를 소형저장탱크로 정의하고 3톤을 초과하는 탱크에 비하여 주거지역 또는 상업지역 등에서 안전하게 사용할 수 있도록 특화된 안전기준을 규정하고 있다. 소형저장탱크 공급방식은 20 kg 또는 50 kg 용량의 소형 용기 공급방식에 비해 가스공급비용을 절감할 수 있는 장점이 있다. 공급자 부담으로 탱크를 설치해주는 방식에 의해 안정적인 공급권을 확보할 수 있고, 배달을 계획적으로 하는 방식에 의해 인력 투입을 최소화할 수 있기 때문이다. 이러한 장점에 힘입어 2000년대 이후 국내 소형저장탱크

보급량은 급격하게 증가하였고, Table 1에서 보는 바와 같이 2018년 말 현재 약 11만 개가 보급되어 사용되고 있다<sup>1)</sup>.

Table 1. Status of installation of LPG small storage tanks in Korea

| Tank capacity (kg) | - 2015 | 2016   | 2017   | 2018   | Total   |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 200 ≤              | 6,362  | 2,772  | 3,554  | 4,164  | 16,852  |
| 200 - 250          | 9,495  | 2,451  | 5,019  | 5,361  | 22,326  |
| 250 - 500          | 20,125 | 5,360  | 5,314  | 3,601  | 34,400  |
| 500 - 1,000        | 14,091 | 2,422  | 1,985  | 1,500  | 19,998  |
| 1,000 - 2,000      | 4,849  | 304    | 306    | 305    | 5,764   |
| 2,000 - 3,000      | 6,975  | 784    | 782    | 653    | 9,194   |
| Total              | 61,897 | 14,093 | 16,960 | 15,584 | 108,534 |

<sup>†</sup>미래기존연구소 소장 (Mirae EHS-code Research Institute)

<sup>\*\*</sup>한국가스안전공사 에너지안전실중연구센터 부장 (Institute of Gas Safety R&D)

<sup>\*\*\*</sup>미래기존연구소 선임연구원 (Mirae EHS-code Research Institute)

<sup>\*\*\*\*</sup>미래기존연구소 주임연구원 (Mirae EHS-code Research Institute)

| <b>Nomenclature</b> |   | <b>Subscript</b>   |                                     |
|---------------------|---|--------------------|-------------------------------------|
| $A$                 | Surface area of tank, $m^2$   | $b$                | Body wall of tank                   |
| $C_p$               | Specific heat capacity, $J/(kgK)$                                   | $c$                | Cap of tank                         |
| $D$                 | Innerdiameter of tank, $m$  | $cd$               | Conduction                          |
| $F$                 | Geometric view factor   | $cv$               | Convection                          |
| $h$                 | Heat transfer coefficient, $W/(m^2K)$                               | $g$                | Gas in tank                         |
| $H$                 | Hight of tank, $m$  | $hf$               | Heat flux to tank                   |
| $k$                 | Thermal conductivity, $W/(mK)$                                      | $i$                | Number of node in cap of tank       |
| $\dot{m}$           | Mass flow rate, $kg/s$  | $j$                | Number of node in body wall of tank |
| $L$                 | Evaporation latent heat, $J/kg$                                     | $in$               | Inside of a tank cap and body wall  |
| $M$                 | Number of node in body cap of tank                                  | $l$                | Liquified gas in tank               |
| $N$                 | Number of node in body wall of tank                                 | $out$              | Outside of tank cap and body wall   |
| $P$                 | Pressure, $MPa$   | $psv$              | Pressure safety valve               |
| $Q$                 | Heat transferred, $J$   | $rd$               | Radiation                           |
| $T$                 | Temperature, $K$  | $tk$               | Tank                                |
| $t$                 | Time, $s$   | <b>Superscript</b> |                                     |
| $V$                 | Volume, $m^3$   | $A$                | Above side of a cell                |
| $W$                 | Output of safety valve, $kg/s$                                      | $B$                | Below side of a cell                |
| $x$                 | Thickness of tank cap or body wall, $m$                             | $i$                | Number of node in cap of tank       |
| <b>Greek</b>        |   | $j$                | Number of node in body of tank      |
| $\epsilon$          | Emissivity  | $L$                | Left side of a cell                 |
| $\rho$              | Density of gas or liquid, $kg/m^3$                                  | $m$                | Number of node in body cap of tank  |
| $\sigma$            | Stefan-Boltzmann constant ( $5.6697 \times 10^{-8}$ ), $W/(m^2K^4)$ | $n$                | Number of node in body wall of tank |
|                     |   | $R$                | Right side of a cell                |

소규모 용기 여러 개를 연결해 사용하는 시설에 비해 하나의 소형저장탱크를 설치하고 사용하는 시설의 경우에는 잦은 용기 배달 및 교체가 필요 없고 배관의 이음매도 적어 가스누출로 인한 화재나 폭발사고 발생 확률을 크게 낮출 수 있는 장점도 있다. 반면에 소형저장탱크에는 BLEVE(Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion)라고 하는 특이한 위험성이 내재되어 있다<sup>2)</sup>.

BLEVE란 가연성 액화가스 탱크가 화염에 노출될 경우 안전밸브가 정상적으로 작동되는 상태에서도 기상부 탱크 강판 온도가  $600^\circ C$  내외까지 상승하여 강판의 인장강도가 낮아지고 안전밸브 작동압력에서 탱크가 파열되어 탱크 내부에 있던 고온의 액화가스가 한꺼번에 대기 중으로 방출되면서 폭발하는 현상을 말한다<sup>3)</sup>. BLEVE는 안전밸브가 정상적으로 작동되는 상태에서도 발생할 수 있기 때문에 탱크 주변에 화재가 발생하면 BLEVE가 일어나지 못하도록 탱크 기상부에 물을 뿌려주는 등의 조치를 하여야 한다. BLEVE가 발생하면 한꺼번에 유출된 고온의 액화가스가 증발하면서 버섯 형상의 Fire ball을 형성하게 되고 주변에 엄청난 복사열을 방사하여 막대한 인명피해와 재산피해를 유발한다. 특히, BLEVE 발생 가능성을 모르고 가까이

에서 소방활동을 전개하던 소방관들이 대규모 피해를 입는 경우가 많이 발생하였다. 그래서 가연성 액화가스 탱크 주변에 화재가 발생한 경우에는 BLEVE 발생 시점을 정확하게 예측하는 것이 중요하다.

1980년대 후반 미국, 캐나다, 유럽 등에서는 열차 운반용 탱크(Railroad tank car)에서 빈발하는 BLEVE 피해를 예방하기 위해 BLEVE 발생 시점 예측에 관한 연구를 많이 수행하였다. 특히 미국 운수성에서는 AFFTAC (Analysis of Fire Effects on Tank Cars)이라는 BLEVE 예측 프로그램을 개발하여 무료로 일반에게 개방하였고, 현재에도 관련 인터넷 사이트를 통해 이 프로그램을 다운로드 받을 수 있다.

대형 열차 운반용 탱크는 물론 LPG소형저장탱크의 BLEVE 예측에 관한 많은 연구가 국외에서 수행되었지만 국외에서 수행된 연구는 모두 횡형 탱크를 대상으로 수행된 것이어서 국내에서 사용 중인 입형의 LPG소형저장탱크에 바로 적용하는 것은 불가능하다는 문제가 있다. 입형과 횡형의 탱크는 기상부의 모양이 달라 기상부 탱크 내면에서 액상 가스 표면으로 전달되는 복사열의 계산방식과 그 결과가 많이 다르기 때문이다. 그래서 이 연구에서는 국외에서 수행된 횡형

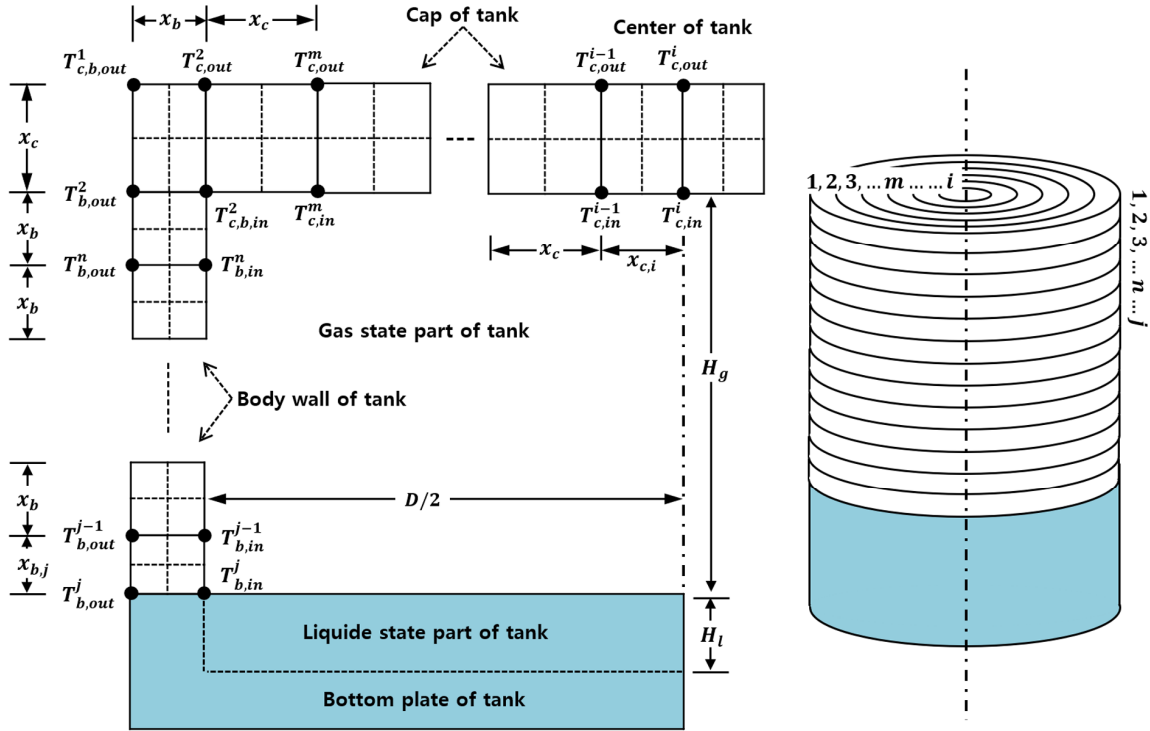


Fig. 1. Composition of nodes for calculation.

탱크 연구결과를 참고하여 국내 입형 탱크에 적용할 수 있는 열역학적 모델을 개발하고 BLEVE 시뮬레이션이 가능하도록 프로그래밍하여 LPG소형저장탱크의 BLEVE 발생 위험성과 중요 이슈별 특성을 분석해보고, 향후 활용방안을 살펴 보았다.

## 2. 열역학적 모델 개발

외부화재 발생 시 저장탱크 기상부 강판의 시간 경과에 따른 온도 변화는 유한차분법(Finite difference method) 또는 집중열용량법(Lumped capacity method)에 의하여 계산할 수 있다<sup>4)</sup>. 유한차분법을 적용하기 위해 Fig. 1과 같이 볼륨요소(Volume element) 즉 셀(Cell)을 나누고 온도 계산을 위한 노드를 구성하였다<sup>5)</sup>. 이 논문에서 셀을 횡으로 나눈 이유는 Pool fire(저장탱크가 불에 완전히 휩싸이는 화재) 영향분석의 경우 탱크 강판의 온도가 좌우로는 같고 상하로만 차이가 나는 것으로 간주하였기 때문이다. 유한차분법에 있어서 계산은 2차원 비정상상태 열전달(Two-dimensional transient heat transfer)로 보고 수행하였다. 이 연구에서는 계산을 신속하게 하기 위하여 집중열용량법도 적용하였는데, 이 경우에는 기상부 탱크 강판 전체의 온도가 동일한 것으로 간주하여 기상부 강판 전체를 하나의 셀로 보고 하나의 노드를 설정하여 계산을 수행하였다<sup>4)</sup>.

이 논문에서 기상부 탱크 강판의 온도 계산에 적용한 가정은 다음과 같다<sup>6)</sup>. (1)탱크 내부의 기상 가스, 액상 가스 및 액상 gas와 접하고 있는 탱크 강판 온도는 동일한 것으로 간주하였다. (2)기상 gas와 접하고 있는 탱크 내부 표면의 온도와 기상 gas의 온도는 상이한 것으로 간주하였다. (3)탱크 강판에서 액상 gas 및 기상 gas로 열이 전달되는 경로는 탱크 동판을 통한 전도, 기상부 탱크 강판과 기상 gas 사이의 대류 및 기상부 탱크 강판과 액상부 액면 사이의 복사로 간주하였다.

탱크 강판의 온도를 계산할 때에 가장 먼저 고려하여야 하는 것은 탱크 주변에서 발생한 화염으로부터 탱크로 입열되는 열량이며, 그 계산식은 식 (1)과 같이 표현된다<sup>7)</sup>. 이 식에서  $q_{hf}$ 를 Heat flux라고 하는데, 열의 전달방식에 관계없이 저장탱크 외부 표면의 단위 면적당 입열량을 의미한다.

$$Q_{hf} = q_{sf}A_{out} \quad (1)$$

주변 화재 종류에 따른 Heat flux 크기는 Table 2와 같다<sup>8)</sup>. 이 표에서 탱크의 안전밸브 계산에 적용된 Heat flux는 KGS FU432<sup>9)</sup>에서 안전밸브 용량 산정에 적용된 식 (2)에 의하여 계산되는 총 입열량(액상 gas와 접촉하는 탱크 강판을 통해 탱크로 들어가는 열량)을 탱크

Table 2. Heat flux according to the type of fire

| Tank capacity(kg) | Heat flux(kW/m <sup>2</sup> ) |                               |   |
|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|---|
|                   | PSV                           | Nearby fire                   | AFFTAC  |
| 500               | 41                            | 50<br>(USA Military standard) | 79<br>(Value applied to simulation by AFFTAC) |
| 1,000             | 38                            |                               |   |
| 2,000             | 34                            |                               |   |
| 3,000             | 32                            |                               |   |

외부 표면 전체를 통한 입열량이라고 가정하고 이 논문 에 의해 개발된 열역학적 모델에 의해 산출한 값이다.

$$W = \frac{61,000 A_{out,l}^{0.82}}{L} \quad (2)$$

Fig. 1에서 설정한 각 노드의 온도를 구하기 위해서는 해당 노드가 속한 셀로 들어오는 전도열, 대류열 및 복사열을 고려하여야 한다. 각 노드의 온도를 구하는 방법은 동일하기 때문에 이 논문에서는 탱크 동판의 n 번째 셀의 안쪽 노드인  $N_{in}$ 의 온도  $T_{b,in}^n$ 를 구하는 방법을 대표적으로 기술한다(Fig. 2 참조).

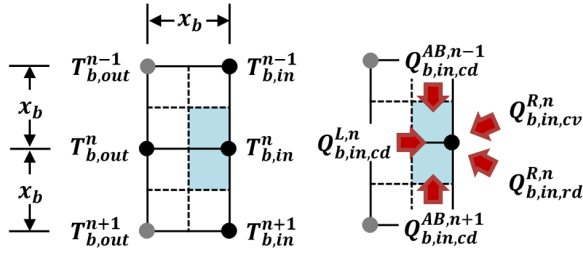


Fig. 2. Heat transfer to node  $n_{in}$ .

노드  $N_{in}$ 으로 들어오는 전도열의 종류로는 좌측에서 들어오는 전도열, 위에서 들어오는 전도열, 아래에서 들어오는 전도열이 있다. 이들을 표현하는 계산식은 각각 식 (3) 내지 식 (5)와 같다<sup>10</sup>.

$$Q_{b,in,cl}^{L,n} = k A_{b,in}^{L,n} \frac{T_{b,in}^n - T_{b,out}^n}{x_b} \quad (3)$$

$$Q_{b,in,cl}^{A,n} = k A_{b,in}^{A,n} \frac{T_{b,in}^n - T_{b,in}^{n-1}}{x_b} \quad (4)$$

$$Q_{b,in,cl}^{B,n} = k A_{b,in}^{B,n} \frac{T_{b,in}^n - T_{b,in}^{n+1}}{x_b} \quad (5)$$

또한 탱크 내 기상부 가스에서 대류에 의해 노드  $N_{in}$ 으로 들어오는 열은 식 (6)과 같이 표현된다.

$$Q_{b,in,cv}^{R,n} = h A_{b,in}^{R,n} (T_g - T_{b,in}^n) \quad (6)$$

이 식에서  $h$ 는 대류의 열전달계수인데, AFFTAC에서는 탱크의 충전상태 및 안전밸브 분출 속도에 따라 Table 3과 같은 값을 적용하고 있다<sup>8</sup>.

Table 3. Convective Heat Transfer Coefficients

| Fill Condition               | Vapor and Liquid in Tank with PRV Open |                     |
|------------------------------|--|---------------------|
|                              | $1.5 \leq \dot{m} < 11.4$              | $11.4 \leq \dot{m}$ |
| $0.6 \leq \text{Fill}$       | $h = 2.9$                              | $h = 2.9$           |
| $0.4 \leq \text{Fill} < 0.6$ | $h = 1.5$                              |                     |
| $\text{Fill} \leq 0.4$       | $h = 5.7$                              |                     |

액상 가스 표면에서 당해 노드  $N_{in}$ 으로 들어오는 복사열은 식 (7)에 의해 구할 수 있다<sup>6,11-14</sup>.

$$Q_{b,in,rd}^{R,n} = f_{l-tk,n} \sigma (T_l^4 - T_{tk,n}^4) \frac{A_n}{A_{g,total}} \quad (7)$$

이 식에서  $f_{l-tk,n}$ 는 액상 가스 표면에서 노드  $N_{in}$ 으로 복사열이 전달되는 경우의 표면배열인자 (surface configuration factor)를 표시하는데, 2면 밀폐 구조의 경우 이 값은 식 (8)과 같이 정의된다. 그리고 탱크 내의 액상 가스 표면은 탱크 기상부 내부 표면만을 바라보기 때문에 이 식의  $f_{l-tk,n}$ 는 1로 볼 수 있다<sup>15</sup>. 또한  $A_n$ 는 해당 노드의 셀이 기상부 가스와 접하는 면적을 표시하고,  $A_{g,total}$ 는 기상부 탱크 표면적 전체를 표시하는데, 탱크 기상부 표면의 온도가 동일하다고 가정하면 모든 기상부 탱크 셀에 대하여 동일한  $f_{l-tk,n}$  값을 적용할 수 있으므로 해당 셀의 면적 점유율을 곱하여 해당 셀로 들어오는  $Q_{c,in,rd}^{R,n}$  값을 구할 수 있다.

$$f_{l-tk,n} \equiv \frac{1}{\frac{1}{F_{l-tk,n}} + \left(\frac{1}{\epsilon_l} - 1\right) + \left(\frac{A_l}{A_n}\right) \left(\frac{1}{\epsilon_{tk,n}} - 1\right)} \quad (8)$$

$$= \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\epsilon_l} - 1\right) + \left(\frac{A_l}{A_n}\right) \left(\frac{1}{\epsilon_{tk,n}} - 1\right)}$$

노드  $N_{in}$ 이 속한 셀로 들어오는 전도열, 대류열 및 복사열은 해당 셀의 온도를 올리는데 사용되므로 이에 관한 지배방정식은 식 (9)와 같이 표현할 수 있으며,  $T_{b,in}^{n+1}$ 는 식 (10)으로부터 유도된 식 (11) 및 식 (12)에 의해 구할 수 있다.

$$\rho V_{bin}^n C_p \frac{T_{bin}^{n,t+1} - T_{bin}^{n,t}}{\Delta t} = Q_{bin}^{A,n} + Q_{bin}^{L,n} + Q_{bin}^{B,n} + Q_{bin,sc}^{R,n} + Q_{bin,sr}^{R,n} \quad (9)$$

$$Q_{total} = Q_{bin}^{A,n} + Q_{bin}^{L,n} + Q_{bin,sc}^{R,n} + Q_{bin,sr}^{R,n} + Q_{bin}^{B,n} \quad (10)$$

$$T_{bin}^{n,t+1} = \Delta t \frac{Q_{total}}{\rho V_{bin}^n C_p} + T_{bin}^{n,t} \quad (11)$$

Fig. 1에서  $N_{b,out}^j$  및  $N_{bin}^j$  은 액상 gas와 접해있는 노드이며 이 노드들의 온도  $T_{b,out}^j$  및  $T_{bin}^j$  는 액상 gas의 온도와 같다고 보기 때문에<sup>6)</sup> 이 노드들의 온도 즉 액상 gas의 온도는 식 (12)에 의해 구할 수 있다.

$$T_l^{n+1} = T_{b,out}^{j,n+1} = T_{bin}^{j,n+1} = \left\{ (Q_{hf,l} + Q_{cd,l}^j + Q_{cv,l}^j + Q_{rd,l}^j + Q_{psv}) / (\rho_l V_l C_{pl}) \right\} + T_l^n \quad (12)$$

여기에서  $Q_{hf,l}$ 는 액상 gas와 접하는 탱크 강판을 통해 액상 gas로 들어오는 Heat flux,  $Q_{cd,l}^j$ 는 탱크 기상부 강판에서 액상부 강판으로 들어오는 전도열,  $Q_{cv,l}^j$ 는 기상부 강판 내부표면에서 기상부 gas로 들어오는 대류열,  $Q_{rd}^j$ 는 기상부 강판 내부표면에서 액상부 표면으로 들어오는 복사열,  $Q_{psv}$ 는 안전밸브를 통해 분출되는 gas의 증발잠열을 나타낸다.

한편 안전밸브 분출량 계산은 KGS FU432에서 규정하고 있는 식 (2)에 의해 계산할 수 있다<sup>9,16)</sup>.

$$A = \frac{13160 W \sqrt{TZ}}{CK_d K_b K_c P_1 \sqrt{M}} \quad (13)$$

KGS FU432에서  $A$ 는 안전밸브의 오리피스 단면적 ( $m^2$ ),  $W$ 는 소요분출량( $kg/h$ ),  $T$ 는 분출량 결정압력에서 gas의 절대온도( $K$ ),  $Z$ 는 gas의 압축계수,  $C$ 는 비열용량계수,  $K_d$ 는 분출계수(안전밸브의 경우 0.975),  $K_b$ 는 배압용량계수,  $K_c$ 는 결합보정계수,  $P_1$ 은 분출량 결정압력(설정압력과 초과압력의 합,  $MPa(a)$ ),  $M$ 은 gas의 분자량을 나타낸다.

스프링식 안전밸브의 경우 오리피스의 개도율 변화는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 압력이 상승할 때와 압력이 하강할 때에 다른 양상을 보인다. 이 그림에서 Alternate closing path는 오리피스가 개방되는 도중에 압력이 하강하여 오리피스가 폐쇄되는 경우의 경로를 나타낸다. 탱크 내 압력이 상승하는 때에는 압력  $P_{ssv}$ 에서 안전밸브가 개방되기 시작하여  $F_{open} \times P_{ssv}$ 에서

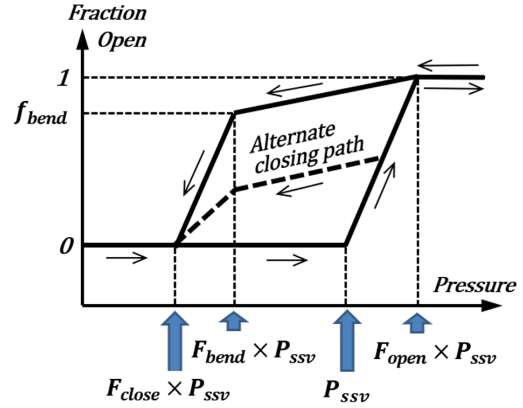


Fig. 3. Model for the spring loaded PRV.

완전히 개방된다. 압력이 하강하는 때에는  $F_{open} \times P_{ssv}$ 에서 폐쇄되기 시작하여  $F_{close} \times P_{ssv}$ 에서 완전히 폐쇄되는데,  $F_{bend} \times P_{ssv}$ 를 기점으로 개도율 감소비율이 달라진다. 이 논문에서  $F_{open}$  값은 KGS FU432에 따라 1.21로 하였다.  $F_{bend}$  값과  $F_{close}$  값은 각각 0.88와 0.82로 하고,  $F_{bend} \times P_{ssv}$ 에서의 오리피스 개도율  $f_{bend}$  값은 0.85로 하였다<sup>6)</sup>.

### 3. 프로그래밍 및 시뮬레이션

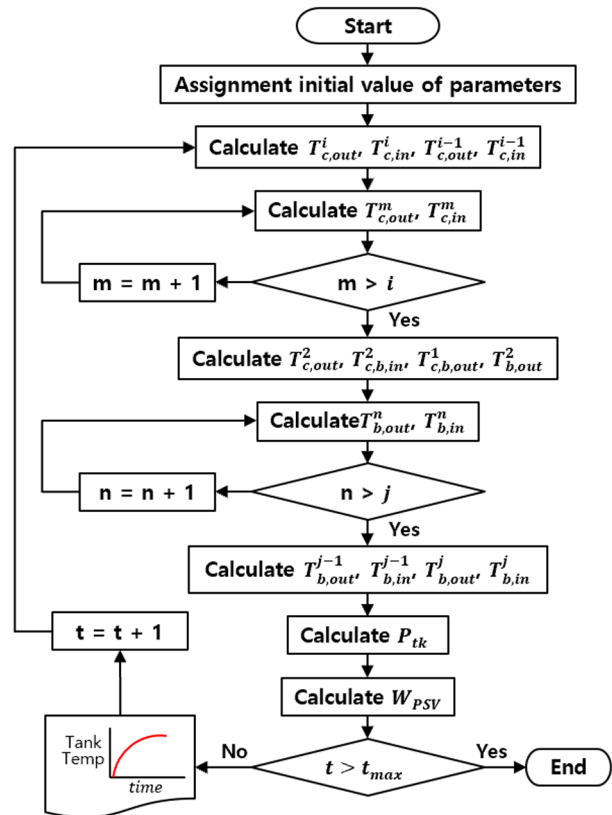


Fig. 4. Flow chart for calculation.

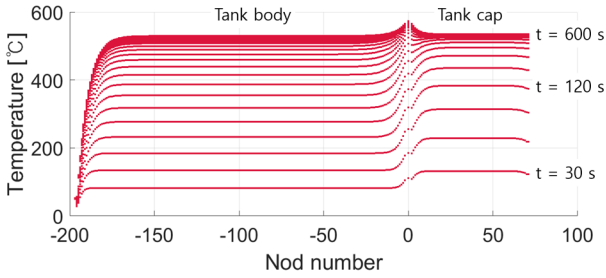


Fig. 5. Temperature distribution on tank wall;  $q_{s,f} = 50 \text{ kw/m}^2$ ,  $Fill = 0.2$ ,  $A_{PSV} = 962 \text{ mm}^2$ ,  $Tank\ capacity = 500 \text{ kg}$ .

수리모델 및 논리모델을 만들고 이것을 컴퓨터가 계산할 수 있도록 하는 것을 프로그래밍 시뮬레이션이라고 한다. 이 연구에서 수리모델은 유한차분법(Finite difference method)과 집중열용량법(Lumped capacity method)에 기반한 열전달 이론에 의하여 개발하였고, 기본적인 자료로는 AFFTAC의 데이터를 활용하였다. Matlab R2019a를 사용하여 구현한 프로그램 로직은 Fig. 4와 같다<sup>17)</sup>.

시뮬레이션 결과 시간 경과에 따른 각 노드의 온도는 Fig. 5와 같은 양상을 보이는 것으로 나타났다. 이 그림에서 양의 값을 가지는 노드 번호는 탱크 상부 경판(Tank cap) 가장자리에서 중앙부분으로 부여된 번호를 나타내고, 음의 값을 가지는 노드 번호는 기상부 탱크 동판(Tank body) 상부에서 하부 방향으로 부여된 번호를 나타낸다. 화재 발생 초기에는 경판부의 온도가 높은 것으로 나타나지만 시간이 경과함에 따라 그 온도는 동일하게 되는 것으로 나타났다. 결과적으로 액상부에 가까운 기상부 동판 일부(액상부로부터 동판 두께의 약 30배에 해당하는 높이 이하)를 제외한 대부분의 기상부 동판 및 경판은 온도가 동일한 것으로 나타났다. 이것은 유한차분법(Finite difference method)과 집중열용량법(Lumped capacity method)의 결과가 크게 다르지 않다는 것을 시사한다. 이것이 AFFTAC과 다수의 선행연구들에서는 집중열용량법을 적용한 이유인 것으로 이해된다<sup>4)</sup>. 이 논문에서도 기상부 탱크 강판의 온도 계산에는 집중열용량법을 적용하였다. 유한차분법으로 할 경우 계산시간의 간격을 0.001초 이상으로 하여야 하고 이렇게 할 경우 계산시간이 너무 많이 소요되는 등의 문제가 있었기 때문이다.

3톤 탱크에 대한 AFFTAC의 시뮬레이션 결과와 동일 조건에서 수행한 이 논문의 시뮬레이션 결과는 각각 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다. AFFTAC의 결과는 횡형 탱크에 적용한 것이고 이 논문의 결과는 입형 탱크에 적용한 결과라는 차이점 때문에 그래프의 모양은 다소 다르지만 기상부 강판의 온도 상승률은 유사한 것으로

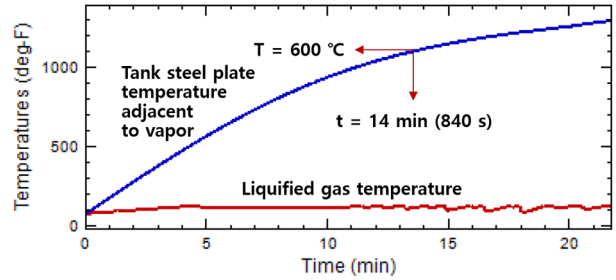


Fig. 6. Tank wall temperature simulated by AFFTAC ;  $q_{s,f} = 79 \text{ kw/m}^2$ ,  $Fill = 0.5$ ,  $Tank = 3 \text{ t}$ ,  $A_{PSV} = 962 \text{ mm}^2$ .

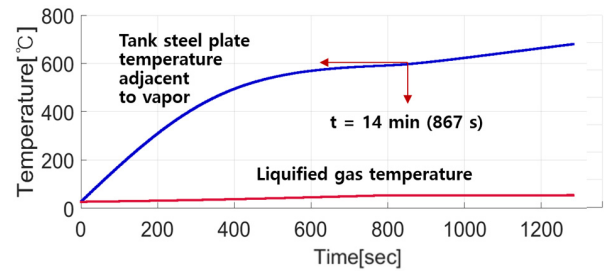


Fig. 7. Tank wall temperature simulated by this work ;  $q_{s,f} = 79 \text{ kw/m}^2$ ,  $Fill = 0.5$ ,  $Tank = 3 \text{ t}$ ,  $A_{PSV} = 962 \text{ mm}^2$ .

나타나 이 논문에 의한 시뮬레이션 결과를 탱크 용량이나 잔량 수준 등이 BLEVE 발생 시점에 미치는 영향의 특성을 분석하는 용도로 사용하는 것은 가능하다고 판단하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 주변 화재에 따른 탱크 강판 온도 상승 현상

Pool fire 또는 외부 화재로 인한 Heat flux가 탱크로 들어오기 시작하면 탱크 강판의 온도가 상승하게 되고 그 열이 액상 및 기상의 가스로 전달되어 가스의 온도도 상승하게 된다. 액상 가스 온도가 계속 상승하여 그 증기압이 안전밸브 작동압력에 도달하면 기상 가스가 안전밸브 오리피스를 통해 외부로 방출되고 방출될 양만큼 액상 가스가 기화되어 기상부를 채우게 된다. 탱크로 들어오는 Heat flux가 안전밸브 설치기준에 상응하는 값 이하인 경우에는 들어오는 열이 모두 액상 가스가 기화하는 증발잠열로 소진되어 액상 가스의 온도는 더 이상 올라가지 않게 되고 증기압은 일정한 값을 유지하게 된다. Fig. 8은 시간의 경과에 따라 일어나는 이러한 현상을 잘 설명해주고 있다.

그러나 안전밸브의 작동으로 액상 가스 온도가 일정하게 유지되는 경우에도 탱크 강판 온도는 계속 상승하게 되는데, 이것은 안전밸브가 작동되기 시작한 후 저장탱크 내의 가스가 밖으로 분출되어 줄어들면 액상

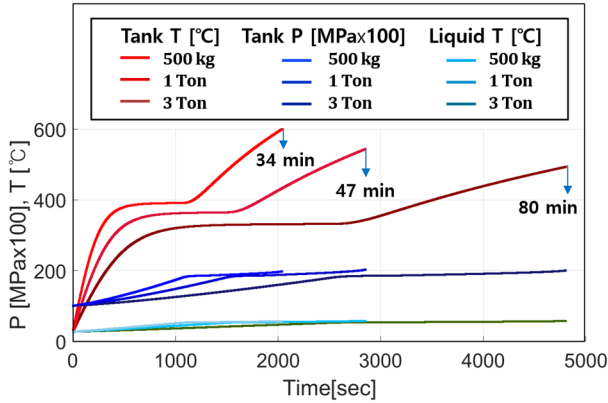


Fig. 8. Tank wall temperature of various tank;  $q_{sf} = 41, 38, 32 \text{ kW/m}^2$ ,  $A_{PSV} = 116, 164, 289 \text{ mm}^2$ ,  $Fill = 0.85$ .

부 액위가 하강하게 되고 그만큼 액상부 액면 위쪽의 기상부 탱크 강판 넓이가 증가되어, 탱크 강판으로부터 액상 가스로 들어가는 복사열이 증가하기 때문이다 (식 (7) 및 식(8) 참조). Fig. 8을 통해 확인할 수 있는 것과 같이 안전밸브가 작동되기 시작하면 기상부 탱크 강판의 온도는 급격하게 상승한다. 특히 용량이 작을 수록 온도는 더 높은 수준까지 상승하는데, 안전밸브 설치기준에 상응하는 Heat flux(Table 2 참조)에서도 500 kg 탱크의 경우에는 그 최종 온도가 BLEVE 발생 우려가 있는 600°C 가까이 까지 상승할 수 있다는 것을 보여준다.

#### 4.2 안전밸브 분출능력의 영향

앞에서 기술한 것과 같이 KGS FU432에서는 식 (2)에 따라 LPG소형저장탱크에 설치하는 안전밸브의 분출능력을 계산하도록 되어 있다. 이 계산식에 따라 안전밸브 오리피스 면적을 계산하면 탱크 용량별 그 최소값은 Table 4와 같이 된다.

안전밸브 분출능력과 관련한 첫 번째 의문 사항은 “KGS FU432 기준에서 규정하는 안전밸브 분출능력은 충분할까”하는 것이다. 결과적으로 이번 연구 결과에 따르면 BLEVE 예방 관점에서 안전밸브 용량 기준은 충분하지 못한 것으로 나타났다. Fig. 9 및 Fig. 10에서 보는 바와 같이 안전밸브 분출량 산정 기준에 적용된 Heat flux(Table 2 참조)에서는 BLEVE 발생 가능성이 낮지만, 주변 화재의 경우 예상되는 Heat flux 50  $\text{kW/m}^2$  또는 AFTTAC에서 Pool fire의 시뮬레이션에 적

Table 4. Venting area of pressure safety valve

| Tank capacity (kg)          | 500 | 1,000 | 2,000 | 3,000 |
|-----------------------------|-----|-------|-------|-------|
| PSV area (mm <sup>2</sup> ) | 116 | 164   | 234   | 289   |

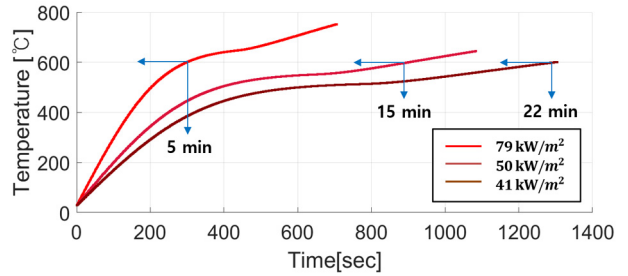


Fig. 9. Tank wall temperature of 0.5 t tank according to various heat flux;  $Fill = 0.5$ ,  $q_{sf} = 79, 50, 41 \text{ kW/m}^2$ ,  $A_{PSV} = 116 \text{ mm}^2$ .

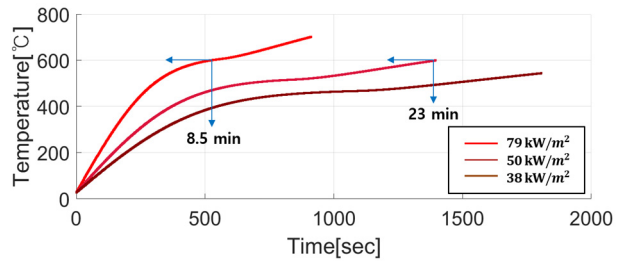


Fig. 10. Tank wall temperature of 1 t tank according to various heat flux;  $Fill = 0.5$ ,  $q_{sf} = 79, 50, 38 \text{ kW/m}^2$ ,  $A_{PSV} = 164 \text{ mm}^2$ .

용한 Heat flux 79  $\text{kW/m}^2$ 에서는 BLEVE 발생 가능성이 높은 것으로 나타났다. 취사·난방용 또는 업무용으로 사용되는 소형저장탱크는 주거지역 또는 상업지역에 설치되는 경우가 많기 때문에 주변에서 화재가 발생할 우려는 상존한다. 그래서 안전밸브 분출능력 산정기준을 주변 화재 Heat flux 수준인 50  $\text{kW/m}^2$  이상이 되도록 강화하는 것이 필요하다고 할 수 있다.

안전밸브 분출능력과 관련한 두 번째 의문 사항은 “기준보다 큰 용량의 안전밸브를 설치하면 작은 것을 설치하는 경우에 비하여 BLEVE 발생 위험성이 낮아질까”하는 것이다. 연구 결과에서는 반드시 그렇다고 할 수는 없는 것으로 나타났다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 오리피스 면적이 큰 경우에는 작은 경우에 비하여 기상부 저장탱크 강판의 온도 상승속도가 빠른 것으로 나타난다. 이것은 안전밸브를 통한 가스 분출 속도가 빨라, 기상부 탱크 면적이 빨리 증가하고, 이에 따라 기상부 탱크에서 액상부 표면으로 들어가는 복사열이 빨리 증가하기 때문인 것으로 이해된다. 그렇다고 오리피스 면적이 큰 경우에는 작은 경우에 비하여 BLEVE 발생 시점도 반드시 빨라진다고 단언하기도 어렵다. 오리피스 면적이 작은 경우에는 안전밸브가 작동되는 상태에서 가스의 압력이 안전밸브 작동압력 이상으로 증가하게 되고 이렇게 되면 탱크 강판의 온도가 600°C에 이르기 전에 BLEVE가 발생할 수 있기 때문이다.

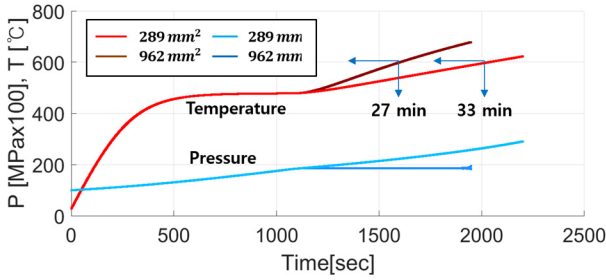


Fig. 11. Tank wall temperature and pressure of 3,000 kg tank according to various PSV area;  $Fill = 0.85$ ,  $q_{sf} = 79 \text{ kW/m}^2$ .

### 4.3 Heat flux 강도의 영향

Heat flux와 관련한 첫 번째 의문 사항은 “동일한 조건에서 Heat flux가 증가하면 BLEVE 발생 시점이 앞당겨지고 그 가능성은 높아질까”하는 것이다. 상식적으로 추정할 수 있는 것과 같이 이번 연구 결과에서도 그런 것으로 나타났다. Fig. 9 및 Fig. 10에 따르면 Heat flux가  $50 \text{ kW/m}^2$  또는  $79 \text{ kW/m}^2$ 로 증가할 경우 BLEVE 발생 시점은 앞당겨지고, 탱크 강판의 최고 온도는 더욱 높게 올라가는 것으로 나타났기 때문이다.

Heat flux와 관련한 두 번째 의문 사항은 “Pool fire (탱크 아래에서 발생한 전면 화재 즉 Heat flux  $79 \text{ kW/m}^2$ )가 아닌 일반적인 주변 화재(탱크와 떨어져 있는 인근 건축물 등에서 발생한 화재 즉 Heat flux  $50 \text{ kW/m}^2$ )에서는 KGS FU432 기준에 적합한 안전밸브가 설치되어 있고, 이것이 정상적으로 작동될 경우 BLEVE 발생 우려가 없다고 할 수 있을까”하는 것이다. 연구 결과에서는 그렇지 않은 것으로 나타났다. Fig. 9 및 Fig. 10에 따르면 Heat flux가  $50 \text{ kW/m}^2$ 인 경우에는 KGS FU432 기준에 적합한 안전밸브를 설치한 경우에도 BLEVE 발생 가능성이 있는 것으로 나타났기 때문이다. 또한 동일한 조건에서는 탱크의 용량이 작을수록 BLEVE 발생 가능성은 증가하는 것으로 나타나고 있다.

### 4.4 탱크 크기의 영향

탱크 크기와 관련한 첫 번째 의문 사항은 “작은 탱크는 큰 탱크에 비하여 BLEVE 발생 위험이 낮다고 할 수 있을까”하는 것이다. 연구 결과는 그 반대인 것으로 나타났다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 탱크 용량이 3,000 kg일 때에는 탱크 기상부 강판의 온도가  $600^\circ\text{C}$ 까지 상승하지 않지만 탱크 용량이 작아지면  $600^\circ\text{C}$  이상으로 상승할 뿐만 아니라 용량이 작아질수록 최고 상승온도는 높아지는 것으로 나타나고 있다.

탱크 크기와 관련한 두 번째 의문 사항은 “작은 탱크는 큰 탱크에 비하여 BLEVE 발생 시점이 빨라질까”

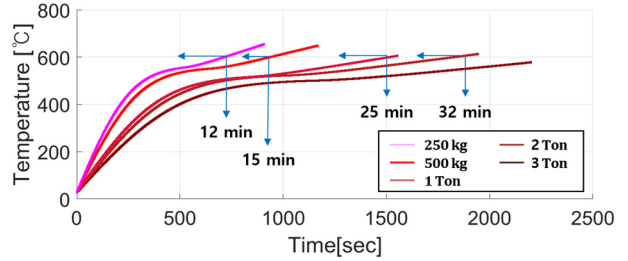


Fig. 12. Tank wall temperature of various tank;  $q_{sf} = 50 \text{ kW/m}^2$ ,  $Fill = 0.5$ ,  $A_{PSV} = 962 \text{ mm}^2$ .

하는 것이다. 상식적으로 추정할 수 있는 것과 같이 연구 결과에서는 그러한 것으로 나타났다. Fig. 12을 통하여 탱크 용량이 작은 경우에는 큰 경우에 비하여 BLEVE 발생 시점이 빨라진다는 것을 알 수 있다.

### 4.5 탱크 내 가스 잔량의 영향

탱크 내 가스 잔량이란 탱크 내에 남아 있는 가스량을 의미한다. 국내에서는 법령에 의하여 소형저장탱크에는 최대 85%까지만 충전할 수 있도록 되어 있다. 탱크 내 가스 잔량과 관련한 첫 번째 의문 사항은 “탱크 내 가스 잔량이 작은 경우에는 큰 경우에 비하여 BLEVE 발생 위험성이 낮을까”하는 것이다. 연구 결과 가스 잔량과 BLEVE 발생 가능성은 무관한 것으로 나타났다. Fig. 13에 따르면 동일한 조건에서 탱크 잔량이 감소하는 경우에도 탱크 기상부의 최고 상승온도는 동일한 것으로 나타났기 때문이다.

탱크 내 가스 잔량과 관련한 두 번째 의문 사항은 “탱크 내 가스 잔량이 작은 경우에는 큰 경우에 비하여 BLEVE 발생 시점이 앞당겨질까”하는 것이다. 연구 결과 가스 잔량이 적으면 BLEVE 발생 시점이 크게 앞당겨지는 것으로 나타났다<sup>5,18)</sup>. Fig. 13에 따르면 잔량이 85%에서 20%로 감소하면 그 시간은 20분이나 단축되는 것으로 나타나고 있다. 탱크 주변에 화재가 발생하였을 때 잔량에 따라 방재 활동의 절차와 방식이 많이 달라져야 한다는 중요한 지침을 제시해주고 있다.

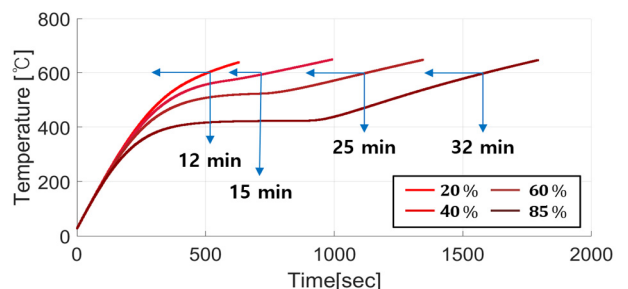


Fig. 13. Tank wall temperature of 0.5 t tank at various charge rate;  $q_{sf} = 50 \text{ kW/m}^2$ ,  $A_{PSV} = 116 \text{ mm}^2$ .



#### 4.6 BLEVE 발생시점 예측 틀 고도화 필요성

이 논문에서 개발한 틀이 현장에서 활용될 수 있도록 하기 위해서는 추가 연구가 필요하다. 첫 번째는 BLEVE 발생 확률 및 발생 시점 예측의 정확도를 제고하기 위해 유한차분법(Finite difference method)을 적용하는 프로그램의 고도화가 필요하고, 두 번째는 프로그램의 정확도 입증에 위한 실증실험이 필요하다. 실물 크기 설비의 실증실험에는 많은 비용이 소요되겠지만 화재 발생시 LPG소형저장탱크의 BLEVE 발생 시점을 정확히 예측함으로써 인명구조의 골든타임을 확보할 수 있다는 점을 고려하면 추가 연구의 필요성은 충분히 정당화될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4.7 BLEVE 발생시점 예측 틀 활용방안

최근 LPG소형저장탱크에 의한 가스공급시스템에 IoT기술의 접목이 가속화되고 있다. 현재 국내 전체 LPG소형저장탱크 중 35% 정도에는 무선통신에 의한 잔량관리시스템이 적용되고 있고, 정부의 재정 지원이 추진되고 있어 향후 그 적용 대상은 급속히 증가할 것으로 예상된다. 잔량관리시스템은 탱크에 잔량 측정 센서를 설치하고 1일 1회 내지 2회 잔량 정보를 서버로 전송받아 가스공급자가 스마트폰 앱을 통해 잔량을 확인하고 가스 공급 시점을 결정할 수 있도록 설계되어 있다. 관련 서버에 등록되어 있는 탱크 저장용량 등의 제원과 실시간으로 측정되는 잔량 정보를 이용하면 탱크 주변에서 화재가 발생한 경우 BLEVE 발생 시점을 정확하게 예측하는 것이 가능하고 가스공급자가 소지하고 있는 스마트폰 앱을 통해 실시간으로 확인하는 것도 가능하다. 이를 통해 가스 공급사업자는 주민 대피 등 피해저감조치를 직접 수행할 수도 있고, 소화작전을 수행하는 소방대에 그 정보를 제공하는 것도 가능하게 된다.

이 연구와 추가 연구를 통해 개발되는 “BLEVE 발생시점 예측 틀”은 LPG소형저장탱크 주변 화재 현장의 화재진압 SOP에 반영되어 화재 초기 인명구조의 골든타임을 확보하는데 활용될 수 있다. 소방대가 현장에 출장하면서 해당 지역의 LPG소형저장탱크 설치 현황을 파악하고 가스 공급사업자에게 연락하여 탱크의 제원, 현재의 가스 잔량 및 BLEVE 발생시점을 확인할 수 있으므로 인명구조와 LPG소형저장탱크에 대한 살수의 우선순위를 결정할 수 있기 때문이다.

### 5. 결론

LPG소형저장탱크에서의 BLEVE 발생 시점을 예측

하기 위하여 열역학적 모델을 개발하고 BLEVE 시뮬레이션을 위한 프로그래밍을 수행하였다. 일반적으로 제기되는 이슈들에 관한 해답을 얻기 위하여 다양한 조건의 BLEVE 시뮬레이션을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 안전밸브 분출능력과 관련하여, 저장탱크 주변 화재(Heat flux  $50 \text{ kW/m}^2$ )를 고려할 경우 KGS FU432에 따른 안전밸브 분출능력 산정기준(Heat flux 기준 32 내지  $41 \text{ kW/m}^2$ )은 강화가 필요하고, 기준보다 큰 용량의 안전밸브를 설치하더라도 BLEVE 발생 위험성이 반드시 낮아진다고 할 수는 없다. 둘째, 동일한 조건에서 Heat flux의 강도가 증대되면 BLEVE의 발생 시점이 앞당겨지고 발생 가능성도 높아진다. 셋째, 작은 탱크가 큰 탱크에 비하여 BLEVE 발생 위험성이 높고 발생 시점도 빨라진다. 넷째, 탱크 내 잔량이 적은 경우에는 큰 경우에 비하여 BLEVE 발생 시점은 많이 앞당겨진다. 그러나 BLEVE 발생 가능성 자체는 동일하다.

열역학적 모델을 고도화하고 실증실험을 거쳐 예측 결과의 정확도를 높인다면 탱크 주변 화재 발생시 방해활동의 우선순위를 결정하는데 큰 도움을 줄 수 있다는 것이 확인되었다. 아울러 국내 LPG업계에서 사용 중인 잔량관리시스템과 연계·활용한다면 그 효용성의 극대화도 가능할 것으로 판단되었다.

**감사의 글 :** 이 연구는 산업통상자원부 에너지기술수용성 제고 및 사업화 촉진사업인 화재 등 외부요인에 대한 LPG탱크 안전관리기술 개선방안 연구(과제번호 : 20189220100120)의 연구비 지원으로 수행되었다.

### References

- 1) Korea Gas Safety Corporation, “Gas Statistics”, 2010-2018.
- 2) T. B. Kim, K. L. Lee, J. H. Lee, S. H. Jung and K. M. Lee, “Analysis of LPG Facility Siting Considering BLEVE”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 31, No. 2, pp. 26-32, 2016.
- 3) K. Moodie, “Experiments and Modeling:- An Overview with Particular Reference to Fire Engulfment”, Journal of Hazardous Materials, Vol. 20, pp. 149-175, 1988.
- 4) F. Heymes, L. Aprin, A. M. Birk, P. Slangen, J. B. Jarry, H. François and G. Dusserre, “An Experimental Study of an LPG Tank at Low Filling Level Heated by a Remote Wall Fire”, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 26, Issue 6, pp. 1484-1491, 2013.
- 5) Y. Cengel and A. Ghajar, “Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications”, 6th Edition, p. 820, 2014.
- 6) S. R. Runnels, “Users Manual For AFFTAC 4.00”, p. 25,

- 29, 40, 45, 2016.
- 7) P. K. Raj, “Exposure of a Liquefied Gas Container to an External Fire”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 122, Issues 1-2, pp. 37-49, 2005.
  - 8) A. M. Birk, “Review of AFFTAC Thermal Model”, p. 25, 29, 2000.
  - 9) KGS FU432, “Facility/Technical/Inspection Code for Facilities Using LP Gas in Small Storage Tanks”, pp. 61.
  - 10) P. K. Ramskill, “A Description of the “Engulf” Computer Codes - Codes to Model the Thermal Response of an LPG Tank Either Fully or Partially Engulfed by Fire”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 20, pp. 177-196, 1988.
  - 11) A. M. Birk, “Modelling the Response of Tankers Exposed to External Fire Impingement”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 20 pp. 197-225, 1988.
  - 12) D. Dancer and D. W. Sallet, “Pressure and Temperature Response of Liquefied Gases in Containers and Pressure Vessels Which are Subjected to Accidental Heat Input”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 25, Issues 1-2, pp. 3-18, 1990.
  - 13) N. U. Aydemir et al., “Thermal Response Analysis of Lpg Tanks Exposed to Fire”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 20, pp. 239-262, 1988.
  - 14) G. V. Hadjisophocleous, A. C. M. Sousa and J. E. S. Venart, “A Study of the Effect of the Tank Diameter on the Thermal Stratification in Lpg Tanks Subjected to Fire Engulfment”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 25, Issues 1-2, pp. 19-31, 1990.
  - 15) M. R. Johnson, “Tank Car Thermal Analysis, Volume II, Technical Documentation Report for Analysis Program”, pp. 22, 1998.
  - 16) J. P. Yim, B. C. Ma and C. B. Chung, “A Study on the Safety of Small LPG Storage Tanks at External Fires”, *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 30, No. 4, pp. 64-72. 2016.
  - 17) J. CASAL et al., “Modelling and Understanding BLEVEs”, *Handbook of Hazardous Spills*, McGraw Hill, New York, p. 22.6, 2001.
  - 18) S. Mannan, “Lee’s Loss Prevention in the Process Industries”, *Hazard Identification, Assessment and Control*, Vol. 1, p. 17, 172, 2012.