

소형저장탱크의 가스발생능력에 관한 연구

이경식, 김지윤, 조영도, 유광수
한국가스안전공사 가스안전연구개발원

A Study on the prediction of the maximum evaporation rates from LPG storage tanks

Lee Kyung Sik, Kim Ji Yoon, Jo Young Do, Yu Kwang Soo
Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Cooperation

1. 서론

LP가스를 가정에서 연료로서 사용하는데 있어서, 소형저장탱크를 이용한 벌크공급 시스템은 용기에 의한 공급시스템과 비교하여 안전성이 높으며 또한 경제성도 우수한 것으로 알려져 있다. 벌크공급 시스템은 용기공급시스템에 비하여 배관이나 밸브 등의 접속부가 상대적으로 적고, 또한 LP가스 공급빈도가 낮아 공급에 따른 인력 및 운반비용을 절감할 수 있기 때문이다.

벌크공급시스템은 LP가스의 공급이 중단되거나 공급량이 부족하지 않도록 LP가스 사용 가구의 최대가스소비량을 초과하는 가스량을 소형저장탱크를 이용한 벌크공급시스템이 발생할 수 있도록 설계하여야 한다.

이때 벌크공급시스템에서 공급할 수 있는 가스량은 소형저장탱크의 가스발생능력이 되며, 소형저장탱크 선정기준이 된다. 즉 벌크공급시스템의 가스공급량은 소형저장탱크의 가스발생능력이 되는 것이다. 현재 우리나라에서 사용하는 소형저장탱크의 가스발생능력은 대부분 일본의 기준을 적용하여 사용하고 있으나, 우리나라에서 제조하는 소형저장탱크는 충전량, 내용적, 전체중량 등이 일본의 소형저장탱크와 상이하므로 일본의 소형저장탱크의 가스발생능력 기준을 우리나라에서 제조하는 소형저장탱크에 그대로 적용하는 것은 적합하지 않다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 용기에 의한 공급시스템보다 안전하고 경제적인 소형저장탱크를 이용한 벌크공급시스템의 보급을 확대시키기 위하여, 벌크공급시스템의 가스공급량의 기준이 되는 소형저장탱크의 가스발생능력을 산정하여 제시하였다.

2. 가스발생능력 산정식

소비를 시작하면 소형저장탱크 기상부의 증기가 소형저장탱크 외부로 나가기 때문에 소형저장탱크의 압력이 저하하여 액의 증발속도가 커진다. 이때 액의 증발에 필요한 열은 액 자신이 보유하고 있는 현열에 의해 공급되므로, 액 및 액에 접하는 소형저장탱크의 온도가 저하해 외부 공기온도와의 사이에 온도차이가 발생하고 소형저장탱크 주위로부터 입열이 발생한다. 이상과 같은 증기 발생 현상보다 액상에 대한 열의 평형을 생각하면, 소비 중의 입열의 시간에 대해 증기 발생 현상에 관한 기초식을 구할 수 있다.

또한 소형저장탱크의 현열에 의한 가스발생능력에 기여하는 부분과 소형저장탱크 내의 기상부분이 가스발생능력에 기여하는 부분을 고려하여야 하며, 이에 따른 가스발생능력 산정식은 다음과 같다.

$$W = \frac{U \cdot A \cdot \Delta T_E}{L} \cdot \frac{1}{1 - \exp(-a \cdot \tau_E)} + (V - \frac{w}{\rho_L}) \cdot \rho_v \cdot \frac{\Delta P_E}{0.101325} \cdot \frac{a \cdot F(\tau_E)}{1 - \exp(-a \cdot \tau_E)} \quad (1)$$
$$a = \frac{3.6 \cdot U \cdot A}{uC_l + w_m C_m}, \quad F(\tau_E) = \frac{a \cdot \tau_E \cdot \exp(-a \cdot \tau_E)}{1 - \exp(-a \cdot \tau_E)}$$

$$\Delta T_E = T_a - T_E \quad \Delta P_E = P_s - P_E$$

2.1 LP가스의 물성치

가스발생능력 산정에 사용되는 LP가스의 물성치 계산은 다음과 같으며, Θ 는 온도($^{\circ}\text{C}$), 아래 첨자 p는 프로판, b는 부탄, x는 LP가스 중의 프로판의 조성을 나타낸다. 또한 본 연구에서는 액상조성 변화에 대해서는 프로판과 부탄의 2성분계로 하여 계산을 시도하였다.

(1) LP가스 액체의 밀도

$$\rho_p = 1000(0.5303 - 0.001385 \times \Theta - 4.262 \times 10^{-6} \times \Theta^2) \quad (2)$$

$$\rho_b = 1000(0.6039 - 9.4304 \times 10^{-4} \times \Theta - 2.828 \times 10^{-6} \times \Theta^2) \quad (3)$$

$$\rho = x\rho_p + (1-x)\rho_b \quad (4)$$

(2) LP가스 액체의 비열

$$c_p = 0.6582 + 0.0019131 \times \Theta + 1.08696 \times 10^{-5} \times \Theta^2 \quad (5)$$

$$c_b = 0.5730 + 0.0012265 \times \Theta + 4.5113 \times 10^{-6} \times \Theta^2 \quad (6)$$

$$c = xc_p + (1-x)c_b \quad (7)$$

(3) LP가스의 증발잠열

$$\lambda_p = 89.256 - 0.3593 \times \Theta - 0.0010413 \times \Theta^2 \quad (8)$$

$$\lambda_b = 93.067 - 0.2579 \times \Theta - 3.5138 \times 10^{-4} \times \Theta^2 \quad (9)$$

$$\lambda = x\lambda_p + (1-x)\lambda_b \quad (10)$$

(4) LP가스의 증기압

Antonie 식으로 온도에 따른 LP가스 증기압의 예측식은 다음과 같다.

$$P_p = e^{9.16205 + \frac{-1896.04}{\Theta + 249.026}} \quad (11)$$

$$P_b = e^{9.07356 + \frac{-2169.97}{\Theta + 239.659}} \quad (12)$$

$$P = xP_p + (1-x)P_b \quad (13)$$

2.2 총괄전열계수

소형저장탱크의 총괄전열계수는 소형저장탱크 주위의 풍속 및 표면에 부착한 수분·서리의 상황 등에 의해 변화한다. 총괄전열계수는 소형저장탱크 주위의 풍속을 0.3m/s로 하며, 횡형 또는 횡형에 따라 약간 다르다.

횡형 소형저장탱크의 총괄전열계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U = \gamma \left(\frac{\Delta T}{Z_{max}} \right)^{1/4} \quad (14)$$

$$Z_{max} = \frac{Z \cdot (H + \sqrt{(H \cdot D)})}{Z + \sqrt{(H \cdot D)}} \quad (15)$$

종형 소형저장탱크의 총괄전열계수는 횡형 소형저장탱크의 총괄전열계수를 구하는 식과 같으며, 다만 액의 평균 높이를 다음과 같이 구하여 총괄전열계수 구하는 식에 사용한다.

$$\frac{1}{Z_{max}} = \frac{1}{Z} + \frac{1}{D} \quad (16)$$

2.3 액의 높이

횡형 소형저장탱크일 경우의 액의 높이를 구하는 식은 다음과 같다.

$$V_z = V \frac{\theta}{\pi} \quad (17)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{b-z}{b} = 1-2q \quad (18)$$

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (a < b) \quad (19)$$

$$z = q \cdot D \quad (20)$$

입의 액의 높이 z의 용적은 잔액량과 액밀도를 이용하여 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$V_z = \frac{w}{\rho_l} \quad (21)$$

또한, 중형 소형저장탱크의 액의 높이 z는 다음과 같이 구한다.

$$w/\rho_l \geq V_d \text{ 일 경우 } Z = \frac{4}{\pi D^2} \left(\frac{w}{\rho_l} - V_d \right) + Z_d \quad (22)$$

$$w/\rho_l < V_d \text{ 일 경우 } \frac{4}{3} Z^3 - D \cdot Z^2 + \frac{w}{\pi \rho_l} = 0 \text{의 해 } Z \quad (23)$$

2.4 전열면적

형 소형저장탱크의 전열면적은 다음과 같은 근사식으로 구할 수 있다.

$$A = H \cdot D \cdot \cos^{-1}(1-2q) + \frac{\pi a}{b} \left[b^2 \sqrt{(1-\beta^2)} + \frac{b^2}{\beta} \sin^{-1} \beta - (b-z) \sqrt{(b^2 - \beta^2 (b-z)^2)} - \frac{b^2}{\beta} \sin^{-1} \frac{\beta(b-z)}{b} \right] \quad (24)$$

$$\beta = \sqrt{1 - a^2/b^2} \quad (25)$$

중형 소형저장탱크의 전열면적은 다음과 같이 구한다.

$$w/\rho_l \geq V_d \text{ 일 경우 } A = 4 \frac{w}{D \rho_l} - \frac{4}{D} V_d + S_d \quad (26)$$

$$w/\rho_l < V_d \text{ 일 경우 } A = S_d \frac{V_z}{V_d} \quad (27)$$

S_d는 경판부의 표면적(m²)으로 다음과 같이 근사적으로 구한다.

$$S_d = \pi a^2 + (\pi a b / e) \sin^{-1} e \quad (e = \sqrt{1 - a^2/b^2}) \quad (28)$$

2.5 소형저장탱크의 현열

가스의 발생에 기여하는 소형저장탱크 질량은 소형저장탱크가 잔액량에 의해 침수된 부분의 질량으로, 소형저장탱크 전체질량과 이것을 소형저장탱크 전체의 표면적에 대한 침수 면적비율로 근사하면 가스의 발생에 기여하는 소형저장탱크의 현열을 구할 수 있다.

$$w_m = w_{m0} \cdot \frac{S_z}{S_{dt}} \quad (29)$$

3. 가스발생능력 산정

3.1 산정범위

본 연구에서 산정한 소형저장탱크의 가스발생능력의 범위는 다음과 같다.

- ① 소형저장탱크의 충전량 : 249kg, 500kg, 1,000kg, 1,600kg, 2,000kg, 2,900kg
- ② LP가스의 조성 : 충전시의 프로판의 조성 90%, 95%
- ③ 외기온도 : 5℃, 0℃, -5℃, -10℃
- ④ 연속사용시간 : 1시간, 2시간, 3시간, 4시간, 5시간, 6시간, 7시간, 8시간
- ⑤ 잔액량 : 20%, 30%, 40%, 50%

또한, 본 연구에서 사용하는 가스발생능력은 소비를 시작할 때의 LP가스 액체의 온도가 외기온도와 동일한 상태에서 자연기화로 소비하여, 소비를 종료할 때의 소형저장탱크 압력이 0.16997MPa로 저하한 때의 평균 LP가스발생량을 말한다. 그리고 충전시의 조성은 초기에 소형저장탱크의 잔액량이 없는 상태에서 LP가스를 충전하는 경우에 LP가스의 프로판 조성을 말한다.

3.2 소형저장탱크의 규격

우리나라에서 현재 많이 사용되고 있는 중형 소형저장탱크의 가스발생능력의 산정에 있어서, 충전량에 따른 소형저장탱크의 치수, 중량 등의 규격은 표1과 같다.

표1 소형저장탱크의 규격

종류	충전량 (kg)	내용적 (m ³)	동판부 길이(m)	동판의 내경(m)	경판의 단축길이 (m)	경판의 장축길이 (m)	전체 표면적 (m ²)	전체중량 (kg)	
중형	249	249	0.568	1.038	0.76	0.191	0.381	3.830	191
	500	500	1.213	1.394	0.95	0.238	0.475	6.272	465
	1000	1000	2.412	1.384	1.30	0.325	0.650	9.608	930
	1600	1600	3.767	1.34	1.60	0.400	0.800	12.729	1420
	2000	2000	4.699	1.804	1.60	0.400	0.800	15.060	1614
	2900	2900	6.794	1.625	1.95	0.488	0.975	18.858	1715
횡형	500	500	1.170	2.06	0.8	0.2	0.4	5.924	550
	1000	1000	2.296	2.59	1.0	0.25	0.5	9.304	850

3.3 가스발생능력 산정

표1과 같은 소형저장탱크의 가스발생능력을 잔액량, 프로판의 조성, 외기온도 및 연속 사용시간에 따라 산정하였으며, 표2는 249kg 소형저장탱크의 잔액량이 30%, 프로판의 조성이 95%일 경우의 가스발생능력은 나타낸다.

표2 249kg형, 잔액량 30%, 충전시 조성(프로판) 95%

충전시 조성 (C ₃ H ₈)	연속사용시간 (h)	발생능력(kg/h)			
		5℃	0℃	-5℃	-10℃
95%	1	17.8	14.8	12.0	9.2
	2	9.9	8.2	6.6	5.0
	3	7.3	6.0	4.8	3.7
	4	6.0	5.0	3.9	3.0
	5	5.3	4.3	3.4	2.6
	6	4.8	3.9	3.1	2.3
	7	4.5	3.7	2.9	2.2
	8	4.3	3.5	2.7	2.0

3.4 중형 및 횡형 저장탱크의 가스발생능력 비교

충전량 500kg, 1000kg의 횡형 및 중형 소형저장탱크에 대하여 프로판의 조성 95%, 잔액량 30%의 조건에서 가스발생능력을 비교한 결과는 표3, 표4와 같다. 표3과 표4를 보면 전반적으로 횡형 저장탱크의 가스발생능력이 중형 저장탱크보다 약 5% 정도 높게 발생하는 것으로 나타났다.

표3 500kg형 횡형 및 종형 가스발생능력 비교

조건	외기온도 (℃)	연속사용시간 (h)	발생능력(kg/h)		차이	
			500kg횡형	500kg종형	값	비율
프로판의 조성 : 95% 잔액량 : 30%	5	1	36.5	35.9	0.6	0.984
		2	19.7	19.4	0.3	0.985
		3	14.2	14.0	0.2	0.986
		4	11.5	11.3	0.2	0.983
		5	9.9	9.7	0.2	0.980
		6	8.8	8.7	0.1	0.989
		7	8.1	7.9	0.2	0.975
		8	7.6	7.4	0.2	0.974

표4 1000kg형 횡형 및 종형 저장탱크의 가스발생능력 비교

조건	외기온도 (℃)	연속사용시간 (h)	발생능력(kg/h)		차이	
			1000kg횡형	1000kg종형	값	비율
프로판의 조성 : 95% 잔액량 : 30%	5	1	70.9	69.8	1.1	0.984
		2	37.5	36.9	0.6	0.984
		3	26.4	26.0	0.4	0.985
		4	20.9	20.6	0.3	0.986
		5	17.7	17.4	0.3	0.983
		6	15.5	15.2	0.3	0.981
		7	14.0	13.7	0.3	0.979
		8	12.9	12.6	0.3	0.977

4. 결론

LP가스를 일반 가정용 연료로서 이용하는 경우에 소형저장탱크의 가스발생능력은 주로 소비자의 최대가스소비량에 비해 가스발생량이 저하하는 것이 문제가 된다. 그 이유는 LP가스의 지속적인 사용으로 남아있는 LP가스액이 감소함에 따라 액의 현열, 전열면적, LP가스의 조성 및 외기온도와외 온도차 감소 등에 의해 가스발생능력이 현저하게 저하하기 때문이다. 그러므로 공급이 중단되거나 가스발생량이 저하됨이 없이 소비자가 계속 사용할 수 있도록 소형저장탱크를 선정하여야 한다. 이에 소형저장탱크 선정의 기준이 되는 가스발생능력을 여러 변수에 대하여 검토하였다. 기액평형 상태 및 프로판, 부탄 2성분계로 가정하여 소형저장탱크의 가스발생능력을 충전량, 잔액량, 연속사용시간, 외기온도 및 프로판의 조성에 따라 산정하여 제시하였다. 제시된 소형저장탱크의 가스발생능력에 대한 사항을 살펴보면 다음과 같다.

- (1) 가스를 많이 사용하는 시간이 길어질수록 가스발생능력은 급격히 일정한 값으로 현저히 감소하였다.
- (2) 외부온도의 증가에 따라 가스발생능력은 높아지며, 일정한 값으로 감소하는 시간이 길어진다.
- (3) 소형저장탱크에 충전하는 가스의 프로판 조성이 증가할수록 가스발생능력은 증가하였다.
- (4) 소형저장탱크 내의 잔액량이 많아질수록 소형저장탱크의 가스발생능력은 현저히 증가하였다.
- (5) 종형 저장탱크의 가스발생능력은 동일한 충전량의 횡형 저장탱크에 적용할 수 있다.

기 호 설 명

W	: 가스발생능력(kg/h)
U	: 총괄전열계수($W/m^2 \cdot K$)
A	: 전열면적(m^2)
ΔT_E	: 소비종료시의 액온과 외기온의 온도차(K)
T_a, T_E	: 외기온도 및 소비종료시의 액의 온도(K)
L	: 증발잠열(kJ/kg)
τ_E	: 소비시간(h)
w	: 잔액량(kg)
C_l	: 액비열(kJ/kg · K)
C_m	: 소형저장탱크의 비열 ≈ 0.4605 (kJ/kg · K)
V	: 소형저장탱크의 내용적(m^3)
ρ_l, ρ_v	: 액밀도 (kg/m^3) 및 증기밀도 (kg/m^3)
ΔP_E	: 소비를 시작한 때와 소비를 종료한 때의 압력차(MPa)
P_S, P_E	: 소비 시작한 때와 소비를 종료한 때의 압력(MPa)
u	: 풍속(m/s), 풍속은 0.3m/s로 한다.
γ	: 계수 $\gamma = 1.16279 \cdot \exp(1.289 + 0.374u + 0.125u^2)$
ΔT	: 온도차(K)
Z_{mean}	: 액의 평균 높이(m)
z	: 액의 높이(m)
H	: 동판부의 길이(m)
V_z	: 액의 높이 z 일 때의 용적(m^3)
V	: 소형저장탱크의 전체용적(m^3)
Θ	: 계산에 의한 평면각(rad)
a, b	: 경판부의 단축(m) 및 장축(m)
D	: 동판부의 내경(m)
q	: 액의 높이와 동판부 내경의 비율을 표시하는 값
Z_d	: 경판부의 액의 높이(m)
V_d	: 경판부의 부피(m^3)
w_m	: 액체에 침수된 부분의 중량(kg)
w_{m0}	: 저장탱크 본체 중량(kg)
S_z	: 액체에 의해 침수된 부분의 면적(m^2)
S_{all}	: 저장탱크의 전체 표면적(m^2)

참 고 문 헌

1. 日本LP가스協會, “LP가스技術總覽”, 技報堂出版株式會社. 1981.
2. 조영도, 김상섭, 최송천, 이경식, 장성동, “LP가스 자연기화량의 산출방법에 관한 연구”, 한국가스안전공사, 1998.
3. 日本LP가스団体協議會, “地上設置式横型バルク貯槽等の發生能力”, 1999.
4. 大井登, “LP가스容器的發生能力推算法”, 高壓ガス Vol.16 No.9, 1979.
5. 伊藤工機株式會社, “新バルク供給システム提案書”, 2005.
6. 이종대, “LPG 벌크공급시스템”, 가스안전 Vol.31 No.6, 2005.