

액화석유가스 용기의 자연 증발량에 관한 연구

† 조 영 도 · 김 지 윤

한국가스안전공사

(2001년 1월 20일 접수, 2001년 5월 22일 채택)

A Study on the Natural Evaporation Capacity of LPG Container

Young-Do Jo and Ji-Yoon Kim

Korea Gas Safety Corporation,

(Received 20 January 2001 ; Accepted 22 May 2001)

요 약

체적저래제에 의하여 소규모 공동주택에 가스를 공급하기 위하여 적절한 용기설치수의 결정 및 용기교체시기에 대한 검토가 필요하다. 그러나 지금까지 국내에 축적된 자료가 없을 뿐만 아니라 용기 설치수의 결정과 용기수 및 가스사용 형태에 따라 용기교체시 남아 있는 액화석유가스 양에 대한 이론적 검토가 없었다. 따라서 본 연구에서는 자연기화능력, 잔량, 용기의 온도, 용기내부 압력 등을 시뮬레이션으로 살펴보았다. 용기표면으로부터 액화석유가스 용기의 총괄 열전달계수의 변화에 따른 자연기화량 변화는 크지 않으며, 실험으로부터 구한 값은 약 $9\sim 13 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ 이었다. 그리고 액화석유가스 용기내부의 압력이 압력조정기의 압력조정 하한계에 도달하였을 때 가스방출 유량은 공기로부터 전달되는 열량과 균형을 이루는 일정한 값으로 급격히 감소하였다. LP가스용기의 자연기화능력은 외기온도 및 프로판의 조성에 따라 증가하였고, 연속사용시간에 따라 초기 급격히 감소하여 일정한 값으로 수렴하였다. 한 가구당 용기수는 자동절체기 사용에 의하여 감소시킬 수 있는 것을 알 수 있다.

Abstract - The number of gas containers and the period of exchanging gas containers are very important in designing liquefied petroleum gas(LPG) supply system for small capacity domain. And also the evaluation of remaining LPG in containers to be exchanged is very useful information in commerce. However seldom has been studied on calculating method about those with respect to gas consumption pattern. In this study, a simulation method was developed to estimate the evaporation capacity of LPG container, the mass gas flow rate from LPG container, the temperature and vapor pressure of LPG, and the remained LPG at containers to be exchange by using LPG property equations, mass balance equation, and heat balance equation. The simulation results were correlated well with experimental data. The overall heat transfer coefficient from air to LPG is approximately $9\sim 13 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ and does not strongly affect on the evaporation capacity of LPG container. The mass gas flow rate from LPG container is constant when the vapor pressure of LPG is within pressure regulator's control range. While, out of range, it suddenly reduce to a evaporation rate which is balanced with heat transfer from air. The evaporation capacity of LPG container increased with surrounding temperature and the composition of

propane, and decreased drastically with continuous gas consumption. The number of gas containers divided the number of houses using gas supply system was reduced by using automatic gas feeding device.

Key words : LPG supply system, Natural evaporation capacity of LPG container, LPG, Automatic gas feeding device.

1. 서 론

LP가스 유통구조 개선과 안전기기개발 촉진 및 산발적으로 분산되어 설치되어 있는 용기를 한 곳에 모아서 관리하고, 고무호스에서 강관 사용으로 유도하여 사고를 감소시키기 위한 방안으로 기존의 중량거래형식을 체적거래 형식으로 전환토록 '97. 2. 14일 액화석유가스의 안전및사업관리법 시행규칙이 개정되었다. 기존의 공동주택은 2001년 12월까지, 단독주택에는 2003년 12월까지 체적거래를 하여야 함에 있어서 부실시공을 방지하기 위하여 가스소비량에 따른 적절한 설치 용기수와 배관경에 대한 기초자료가 매우 중요하다. 이미 도시가스의 시공 경험으로 배관경 결정에 대한 자료는 이미 국내에 축적되어 있지만, 가스소비량에 따른 설치 용기수 결정에 대한 기초자료는 부족한 실정이다. 그리고 소규모 LP가스 공급시설은 기화기를 설치하지 않고, LP가스 용기 자체의 가스발생 능력을 이용하는 것이 경제적인 측면과 안전적인 측면에서 효율적이다.

따라서 본 연구에서는 LP가스 용기의 가스 발생능력을 산정하여 체적거래 시설에 따른 용기의 설치수를 결정하고, 용기 교체시 발생하는 LP가스 잔량을 예측하기 위하여 LP가스의 물성, 기화능력에 영향을 주는 여러 가지 인자에 대한 분석과 실험자료에 의한 검증을 통하여 고찰하고자 한다.

2. 지배방정식

용기내부의 LP가스액을 기준으로 외부에서 열유입과 가스 유출에 의한 열손실을 고려하여 에너지 수지를 아래식과 같이 간단하게 나타낼 수 있으며, 이식을 이용하여 LP가스 액상의 온도변화를 구할 수 있다.

$$mc \frac{d\theta}{dt} = qA(\theta_o - \theta) - \lambda G \quad (1)$$

위 식에서 전열면적은 LP가스 액체의 위치가 용기의 밑 경부 보다 높은 경우와 낮은 경우에 대한 근사식은 아래와 같다.

- 액면이 경부보다 높은 경우

$$A = n \left(\frac{4m/n}{\rho D} - \frac{4V_{mi}}{D} + A_{mi} \right) \quad (2)$$

- 액면이 경부보다 낮은 경우

$$A = n \left(\frac{am/n}{\rho} + b \sqrt{\frac{m/n}{\rho}} \right) \quad (3)$$

여기서 m은 잔액량(kg), n은 설치용기의 본수 그리고 LP가스 용기의 형상에 대한 각 변수들은 Table 1과 같다[1].

Table 1. Constants of LPG Container for using heat balance.

Capacity of Container (kg)	Diameter D(m)	Area of Bottom Cap $A_{mi}(m^2)$	Volume of Bottom Cap $V_{mi}(m^3)$	a	b
50	0.3593	0.1399	0.006072	-3.938	2.088
20	0.313	0.1062	0.004014	-4.564	1.951
10	0.294	0.0937	0.003326	-4.850	1.890

LP가스의 주성분이 프로판과 부탄이므로 이에 대한 프로판과 부탄의 밀도, 정압하에서 비열 그리고 증발잠열은 아래 식으로 예측할 수 있다[2~7].

- 밀도

$$\rho_p = 1000(0.5303 - 0.001385 \times \theta - 4.262 \times 10^{-6} \times \theta^2) \quad (4)$$

$$p_b = 1000(0.6039 - 9.4304 \times 10^{-4} \times \theta - 2.828 \times 10^{-6} \times \theta^2) \quad (5)$$

- 정압하에서 비열

$$c_p = 0.6582 + 0.0019131 \times \theta + 1.08696 \times 10^{-5} \times \theta^2 \quad (6)$$

$$c_b = 0.5730 + 0.0012265 \times \theta + 4.5113 \times 10^{-6} \times \theta^2 \quad (7)$$

- 증발잠열

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

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

여기서 θ 는 LP가스의 온도(°C)를 나타낸다. LP가스 액체의 조성은 초기 농도와 잔액체도에 따라 계속 변하게 된다. 즉 초기 LP가스 액체의 조성은 대부분 90% 이상이 프로판이지만, 용기 교환시 남아 있는 LP가스에는 대부분 부탄의 조성이 높다. 따라서 프로판을 100%로 가정하여 자연기화량 예측 및 잔량을 계산하게 되면, 실제 상황과는 차이가 발생하게 된다. 특히 LP가스를 반복하여 충전하게 되면 부탄의 농도가 계속 증가하게 됨으로 자연기화량 계산에서 부탄을 고려하지 않을 수 없다.

프로판과 부탄의 2성분으로 구성된 LP가스의 프로판 물질수지로부터 잔량변화에 따른 조성변화는 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dx}{dL} = \frac{y-x}{L} \quad (10)$$

위 식에서 프로판의 액체조성(x)과 기체조성(y) 간의 평형관계식은 다음과 같다.

$$y = \frac{xP_p}{xP_p + (1-x)P_b} \quad (11)$$

프로판과 부탄의 증기압(P_p , P_b)을 온도에 따른 Antoine 식으로 나타내면 다음과 같다[1].

$$P_p = e^{9.16205 + \frac{-1896.04}{\theta + 249.026}} \quad (12)$$

$$P_b = e^{9.07356 + \frac{-2169.97}{\theta + 239.659}} \quad (13)$$

체적거래 시설에서 배관의 마찰에 의한 압력

강하를 무시하고 압력조정기의 특성을 고려하여 압력과 가스공급유량 변화를 고려하면 다음과 같다. 자동절체기(공급측 용기의 압력이 설정치 이하가 되면 자동적으로 예비측의 용기밸브를 개방)가 포함된 자동절체식 조정기를 사용할 경우 2단 감압식으로 용기의 압력과 관계없이 일정한 유량이 흐르지만, 자동절체기를 사용하지 않을 경우, 일단 감압식 조정기의 특성에 의하여 압력조정범위에서는 다음식과 같이 용기내부 압력 변화에 따라 유량변화를 나타낼 수 있다.

$$Q = Q_o + sPQ_o \quad (14)$$

그러나 압력조절 불가능한 범위($\leq 0.7 \text{ kg/cm}^2$)에서는 아래식과 같이 표현된다.

$$Q = k\sqrt{P} \quad (15)$$

가스공급 유량과 용기내의 가스물성 변화를 식(1)에서 식(15)까지 전산모사를 통하여 해석할 수 있다.

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

지배방정식의 수치해석에서 시간간격을 가스를 많이 사용하는 피크시는 1분으로 하고, 피크시 이외의 사용에 대하여서는 5분으로 하여 시뮬레이션을 행하였다.

20 kg용기에 가스를 충전하여 16°C, 습도 78%의 대기에 30분 이상 방치한 후, 용기밸브를 완전히 개방하고 조정기를 통해 가스를 방출시키면, 약 30분 경과 후에 용기의 표면에 결빙이 일어나기 시작하였다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 방출속도는 약 40분 경과 후 급격히 감소하여 1시간 후 일정하였다. 이때 용기의 내부압력은 거의 0 이었다. 총괄열전달계수의 변화에 따라 가스방출속도 변화는 크지 않지만, 총괄열전달계수를 9~13 kcal/m²·hr·°C로 하는 경우 계산치와 실험치가 잘 일치하였다. 그러나 결빙현상에 의하여 유량에 대한 계산결과가 실험치보다 약간 낮게 나타났었다[8].

수증기의 응축과 결빙에 의한 현상을 배제하기 위하여 습도를 제거한 상태의 0°C에서 남아 있는 LPG량이 14 kg이고, 가스 소비량이 2.34 kg/hr의 일정한 속도로 하였을 때의 실험한 결과와 계산치를 Fig. 2에 나타내었다. 이때 압력조정기의 특성에서 비례상수 s를 0.014로 하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 용기표면에 수증기가 응축이 되어 결빙현상이 일어나지 않을

경우, 시뮬레이션 결과가 실험치와 매우 잘 일치함을 알 수 있었다.

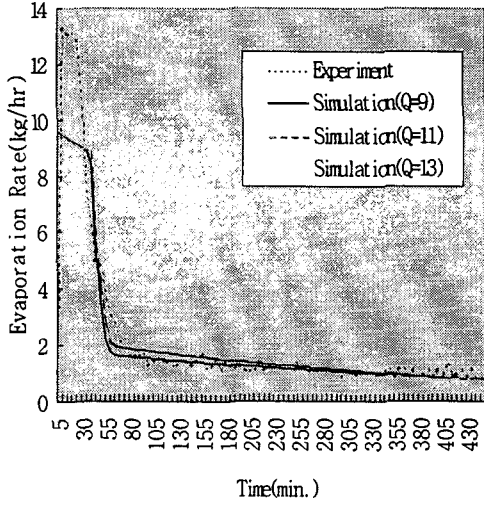


Fig. 1. Evaporation rate of LPG container with time.

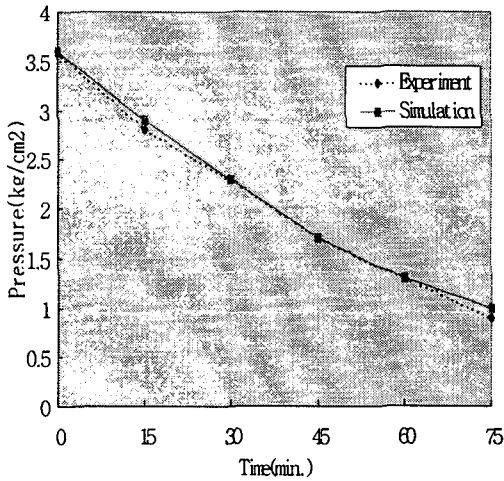


Fig. 2. The change of pressure in the LPG container with time (Gas consuming rate : 2.3 kg/hr).

따라서 본 시뮬레이션은 수증기가 용기표면에 응축되고 결빙이 일어나는 조건에서는 가스 발생량 및 용기내부 압력은 실측치보다 약간 낮게 계산되고, 수증기가 응축되지 않으면 실험치와 계산치가 잘 일치하였다. 그리고 일반적으

로 LP가스 용기의 자연기화능력을 이용한 가스 공급 시스템에서 수증기 응축 및 결빙현상은 정상적인 공급상태에서는 일어나지 않는다.

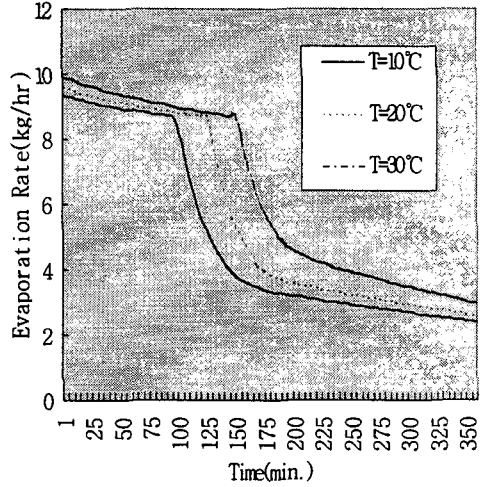


Fig. 3. Effect of external temperature on the evaporation rate of LPG container (Gas consuming rate : 10 kg/hr, Fraction of propane in LPG : 0.95, Capacity of container : 50kg).

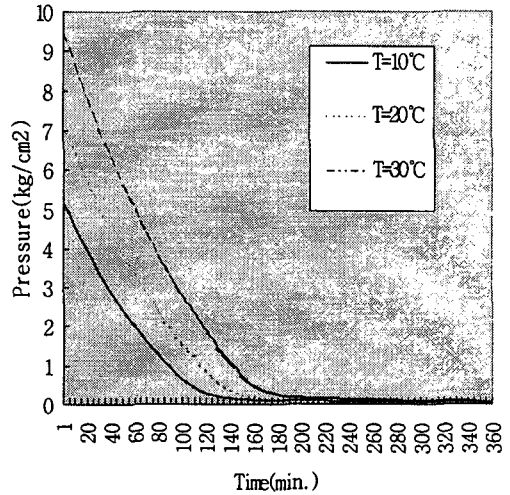


Fig. 4. Effect of external temperature on the pressure in the LPG container (Gas consuming rate : 10 kg/hr, Fraction of propane in LPG : 0.95, Capacity of container : 50kg).

Fig. 3은 설정유량을 10 kg/hr로 하였을 때 외부온도 변화가 시간에 따른 유량변화에 미치는 영향을 나타내었다. 앞서서도 언급하였듯이 단단식 조절기는 조절기 전단 압력 변화에 의하여 약간의 유량변화가 있었다. 외부온도가 10℃인 경우 100분, 20℃인 경우 130분, 30℃인 경우 155분에서 유량감소가 급격히 일어났다. 유량의 급격한 변화를 일으키는 100분, 130분, 155분에서의 압력은 시간에 따른 압력변화 곡선을 나타낸 Fig. 4로부터 약 0.7 kg/cm²임을 알 수 있다. 따라서 용기내부의 압력이 조절기의 압력조정 하한계인 0.7 kg/cm²에서 급격한 유량변화가 일어남을 알 수 있었다. 시간이 어느 정도 경과하게 되면 시간에 따라 특성이 변하지 않는 정상상태에 도달하게 되며, 정상상태에서 용기내부의 압력은 거의 0이고, 액화석유가스의 온도는 약 -40℃이었다. Fig. 5, 6에서 충전시 프로판의 조성이 높을수록 유량이 급격히 감소하는 시간은 길어지고, 정상상태에서 유량은 조성에 따라 약간 증가하고, 용기내 LP가스의 온도는 감소하였다. 또한 프로판의 조성이 낮을수록 최소도달온도는 높고, 최소온도에 도달 후 시간에 따라 서서히 증가하는 온도의 기울기가 큰 것을 알 수 있었다. 시간에 따라 온도가 증가하는 것은 부탄의 농도가 계속 증가하기 때문으로 사료된다.

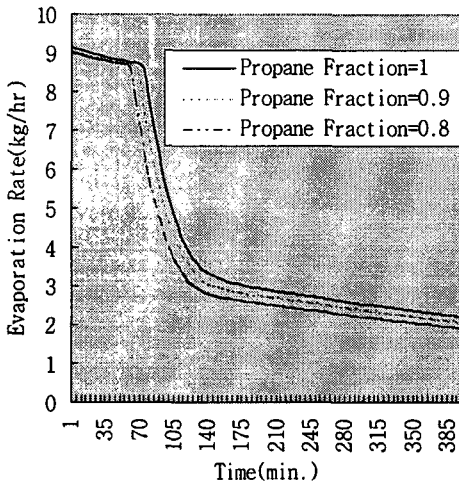


Fig. 5. Effect of propane fraction in LPG on the evaporation rate of LPG container (Gas consuming rate : 10 kg/hr, External temperature : 0℃, Capacity of container : 50kg).

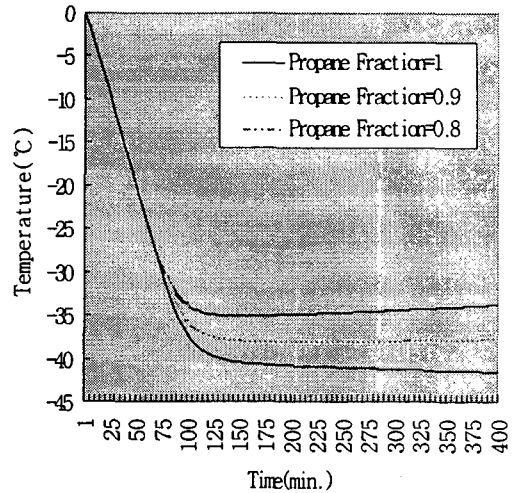


Fig. 6. Effect of propane fraction in LPG on the temperature in .LPG container (Gas consuming rate : 10 kg/hr, External temperature : 0℃, Capacity of container : 50kg).

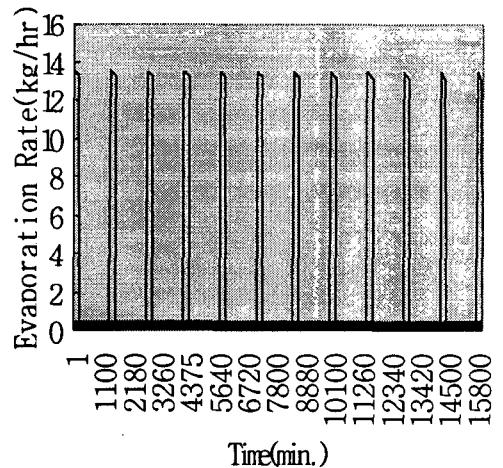


Fig. 7. Gas consuming pattern with time (External temperature : -5℃, Gas consuming rate : 15 kg/hr, Gas consuming time per day : 1 hr/day Capacity of container : 50kg, Number of container : 4).

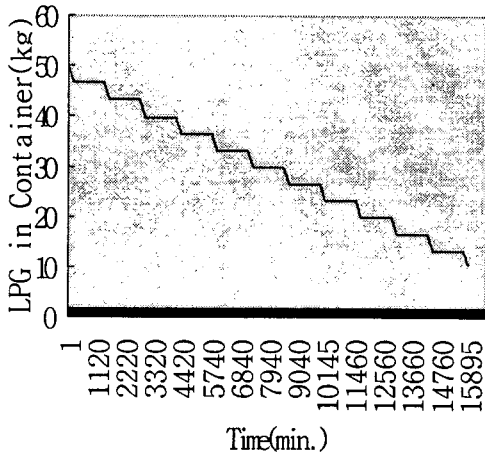


Fig. 8. LPG Remained in container with time(External temperature : -5°C , Gas consuming rate : 15 kg/hr, Gas consuming time per day : 1 hr/day Capacity of container : 50kg, Number of container : 4).

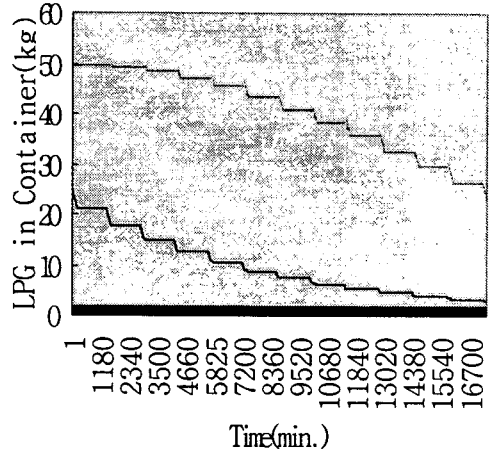


Fig. 10. LPG Remained in container with time (External temperature : -5°C , Gas consuming rate : 15 kg/hr, Gas consuming time per day : 1 hr/day Capacity of container : 50kg, Number of container : 4, -- spare part, — supply part).

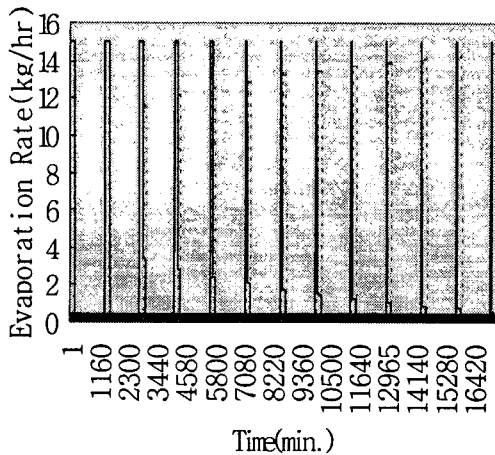


Fig. 9. Gas consuming pattern using automatic gas feeding device (External temperature : -5°C , Gas consuming rate : 15 kg/hr, Gas consuming time per day : 1 hr/day Capacity of container : 50kg, Number of container : 4, -- spare part, — supply part).

체적거래시설에서 자동절체기를 사용하지 않고, 충전시 프로판의 조성이 95%인 50 kg 용기 4개를 사용측에 설치하고, 외기 온도가 -5°C 일 때 용기내부 압력변화, 액화석유가스 온도 변화, 잔액변화, 프로판조성 변화를 계산하여 유량변화에 대한 시뮬레이션 결과를 Fig. 7, 8에 나타내었다. 용기내부의 압력은 공급시작 일로부터 9일되는 시점에 0.7 kg/cm^2 이하로 되고, 11일 되는 시점에 0.2 kg/cm^2 이하로 되었다. 이때 용기내부 LP가스의 잔액은 16.6kg 과 10.5kg이었다. 그리고 LP가스 잔액이 감소할수록 피크시 압력과 온도 감소폭은 증가하는 현상이 나타났다.

자동절체기 사용할 때 초기 공급측의 잔액은 50%이고, 예비측의 잔액은 100%로 하여 시뮬레이션한 결과를 Fig. 9, 10에 나타내었다. 예비측 용기내부의 압력은 공급 시작일로부터 12 일되는 시점에 1 kg/cm^2 이하로 되고, 이때 사용측 용기의 잔액은 3kg 정도 된다. 따라서 자동절체기가 없을 경우 잔량이 21%정도 발생하게 되는 것이 자동절체기를 사용할 경우 약 6%정도 인 것을 보아 자동절체기의 사용으로

잔량을 획기적으로 감소시킬 수 있는 것을 알 수 있었다. Fig. 9에서 보듯이 공급측에서 부족한 가스를 예비측에서 공급하게 된다.

용기 1개당 가스발생능력은 외부온도, 충전시 프로판조성, 피크시 연속사용시간에 크게 영향을 받는 것을 Table 2에서 볼 수 있다. 가스발생능력은 온도와 프로판 분율이 낮을수록 감소하였고, 자동절체기를 사용할 경우 항상 높으며, 차이는 프로판 조성과 온도가 높을수록 크다.

Table 2. Natural evaporation capacity of LPG container(kg/hr)*

Temp (°C)	Composition (propane%)	Container			Container using automatic gas feed device		
		50kg	20kg	10kg	50kg	20kg	10kg
5	95	5.4	2.2	1.2	7.4	3.0	1.6
	90	4.8	1.9	1.1	6.2	2.9	1.5
	80	3.5	1.4	0.8	4.9	2.3	1.2
0	95	4.3	1.9	1.0	5.7	2.3	1.2
	90	3.8	1.6	0.9	4.9	2.0	1.1
	80	2.4	1.0	0.6	3.9	1.6	0.8
-5	95	3.3	1.4	0.8	4.1	1.8	0.9
	90	2.8	1.2	0.7	3.5	1.6	0.8
	80	1.7	0.7	0.4	2.5	1.1	0.5
-10	95	2.5	1.1	0.6	3.0	1.2	0.7
	90	2.0	0.9	0.5	2.5	1.0	0.5
	80	0.9	0.4	0.2	1.4	0.6	0.3
-15	95	1.7	0.7	0.4	1.8	0.8	0.4
	90	1.2	0.5	0.3	1.3	0.6	0.3
	80	0.2	-	-	0.4	0.2	-

- : Natural evaporation capacity is lower than 0.1 kg/hr

* When the gas consuming time is longer than 1 hr, the natural evaporation capacity is lower than that in this table.

Fig. 11에 나타나 있듯이 피크사용시간에 따른 용기의 가스발생능력을 살펴보면, 4시간까지는 시간의 증가에 대하여 급격하게 감소하고 4시간보다 길 때에는 거의 일정한 값을 갖는다. 따라서 연속사용시간이 4시간보다 짧은 영역에서 용기의 설치수는 연속사용시간에 따라 급격하게 증가하지만, 4시간보다 길 때에는 용기설치수는 피크시간에 관계없음을 알 수 있었다.

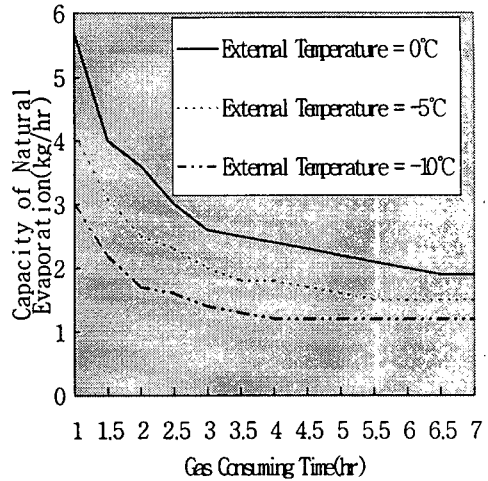


Fig. 11. Natural evaporation capacity of LPG container with peak gas consuming time(Fraction of propane in LPG : 0.95, Capacity of container : 50kg,).

4. 결 론

본 연구에서는 액화석유가스의 물성 예측식들을 이용하여 자연기화량능력, 용기의 온도, 용기내부 압력 등을 시뮬레이션으로 살펴본 결과는 다음과 같다.

용기표면으로부터 액화석유가스로 전달되는 총괄 열전달계수는 실험결과와 비교하여 약 $9 \sim 13 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{°C}$ 임을 알 수 있었다. 액화석유가스 용기내부의 압력이 압력조정기의 압력조정 하한계에 도달하였을 때 가스방출 유량은 공기로부터 전달되는 열량과 균형을 이루는 일정한 값으로 급격하게 감소하였고, 대기온도의 증가에 따라 가스 방출유량이 급격히 일정한 값으로 감소하는 시점이 길어지며, 일정한 시간동안 용기 한 개당 가스발생능력이 증가하였다. 또한 용기에 가스 충전시 프로판의 농도가 증가할수록 용기 한 개당 가스발생능력은 증가하고 용기 교체시 남아있는 액화석유가스의 양이 감소하였다. 가스를 많이 사용하는 시간(피크사용시간)이 증가할수록 용기 한 개당 가스발생능력은 급격히 감소하였고, 4시간 이후 일정한 값으로 수렴하였다.

Notation

참 고 문 헌

A	:	熱傳達面積(m ²)
A _{mi}	:	경부의 面積(m ²)
D	:	容器直徑(內徑)(m)
G	:	供給量(kg/hr)
L	:	容器에 남아있는 LP가스量(몰)
P	:	壓力(atm)
P _b	:	부탄의 蒸氣壓(kgf/cm ²)
P _p	:	프로판의 蒸氣壓(kgf/cm ²)
Q	:	流量(m ³)
Q _o	:	設定流量(m ³)
V _{mi}	:	경부의 부피(m ³)
c	:	比熱(kcal/kg. °C)
m	:	容器內 殘額量(kg)
n	:	設置容器的 個數(使用側)
q	:	總括熱傳達係數(kcal/m ² .hr. °C)
θ	:	溫度(°C)
λ	:	蒸發潛熱(kcal/kg)
ρ	:	密度(kg/m ³ , g/ml)
ρ _b	:	부탄 液體의 密度(kg/m ³)
ρ _p	:	프로판 液體의 密度(kg/m ³)

1. 高壓가스保安協會 液化石油가스研究所, “液化石油가스研究所 論文集”, p.486, 1995
2. Reid, R. C., Prausnitz, J. M., and Poling, B. E.; “The Properties of Gases and Liquids”, 4th ed., McGraw-Hill, pp29-73, 1986
3. Spencer, C. F., and Danner, R. P.; J. Chem. Eng. Data, 17: p.236, 1972
4. Hankinson, R. W., and Tomsom, G. H., AIChE J., 25, p.653, 1979
5. Ambrose, D.: “Vapor-Pressure Eqations,” Natl. Phys. Lab. Rep. Chem., November, p.19, 1972
6. Pitzer, K. S., Lippmann, D. Z., Curl, R. F., Huggins, C. M., and Petersen, D. E., J. Am. Chem. Soc., 77, p.3433, 1955
7. Lee, B. I., and Kesler, M. G., AIChE J. 21, p.510, 1975
8. 한국가스안전공사, “가스 방출 실험 보고서”, 1996