

# 전열온수식 LPG기화기 액유출 원인 및 총괄열전달계수 분석

최성준, 권정락, 원용준, 김 효\*

한국가스안전공사, \*서울시립대학교 화학공학과

## Analysis on Overflow and Overall Heat Transfer Coefficient in Coiled Vessel Type LPG Vaporizer

Sung Ioon Choi, Jeong Rock Kwon, Yong Joon Won, Hyo Kim\*

Korea Gas Safety Corporation, \*Department of Chemical Engineering, The University of Seoul

### 1. 서론

국내에 강제기화용 전열온수식 기화기가 공급·사용된 지는 30년 이상이 되었으며, 90년대 중반부터 체적거래제가 시행되면서 계량기 파열사고가 발생하였다. 그 주된 원인으로는 기화기 및 조정기의 제품불량, 재액화, 용기 또는 소형저장탱크내의 불순물 혼입, 그리고 기화기 출구부에서의 액유출 현상에 기인한다. 10년간 기화기 사고를 분석한 결과 총 26건의 사고가 발생하였고 그중에서 제품불량으로 인한 사고가 21건, 인적오류 등에 의한 사고가 5건이었으며, 특히 액유출 방지장치의 불량률이 제품불량의 62%를 차지하는 것으로 확인되었다. 국내 LPG기화기는 전열온수식이 주종을 이루고 있고, 전원차단 등의 원인으로 기화기내부에 용기나 저장탱크의 액체 LPG가 공급될 경우 출구노즐을 차단하는 액유출 방지장치가 결합에 의해 출구노즐을 완전히 차단하지 못하게 되면 액상의 LPG가 조정기와 계량기로 유입, 기화되어 파열사고를 일으키게 된다.

### 2. 실험

#### 2-1 액유출 방지기구 비중측정 및 플로트 시험

Table 1과 같이 8개의 액유출 방지기구(Fig 3)의 비중을 측정한 결과 0.39~0.73(A사는 부력을 증가시키기 위해서 스프링을 추가로 사용)이었다. 액유출방지장치의 작동상태를 확인하기 위하여 Fig 4와 같이 실제와 동일한 크기의 투명한 플로트 시험장치를 개발하여 LPG액체를 공급한 결과 비중차에 따라 다양한 높이에서 출구부를 차단하였고, 사고가 난 D사의 경우 다량의 액유출이 발생되었다. 가스공급유량을 기화기 상용유량으로 공급 시에는 대부분 차단이 불량한 결과를 확인하였다.

#### 2-2 기화기 성능평가 시험

플로트를 장착한 액유출 방지기구는 기화기가 정상작동을 못하는 경우 즉, 전원차단, 설정온도 이하, 용량초과 사용의 경우 등에 해당되므로 Fig 1의 분석을 한 후 LPG사용량이 100kg/hr 이하인 기화기를 기준으로 기화기 성능평가를 수행 하였다(Fig 5). 실험장치는 기화기 입·출구 및 조정기 전·후단의 온도, 압력, 유량, 그리고 액유출을 확인할 수 있는 투명배관으로 구성하였다.

### 3. 결과 및 토론

#### 3-1 비중측정 및 플로트 시험분석

기화기 출구노즐을 차단하는 액유출방지기구의 플로트 비중은 기화기 내부로 유입되는 LPG액체의 온도에 따라 변하는 액비중보다 항상 낮아야만 정상작동을 할 수 있다. 즉 LPG 50kg 싸이폰 용기나 소형저장탱크내의 기액평형상태에 있는 LPG의 액비중은 100% 프로판의 경우 계절에 따라 0.46~0.56(Fig 2)으로 변하고 따라서 A사, C사, O사, 사고가 난 기화기의 경우 스프링이 고장 나거나 대기온도가 20℃ 이상에서 기화기 내부로 LPG액체가 유입되면 신속한 차단이 불가능하다. 플로트 시험장치(Fig 4)에서 각각의 액유출 방지기구를 실험한 결과 사용량이 적을 경우 조정기 전·후단의 차압이 적어 플로트 시험장치 내부로 액의 유입이 서서히 이루어져 플로트가 부상되는 거리의 차이는 있지만 정상작동을 하였다. 그러나 사고가 난 C사의 경우 기화기 상용 용량에 해당하는 유량으로 가스를 사용하면 플로트 시험장치 내부로 다량의 액이 공급되면서 기화현상에 의해 액이 끓어올라 액유출 방지기구가 기화기 출구노즐을 차단하지 못하게 방해하여 다량의 액이 유출된다. 유출된 액은 조정기를 통과 하면서 플래시 상태가 되고 대기와 열교환을 하면서 급격한 기체팽창과 압력상승을 동반한다. 이때 사용을 계속한다면 단열팽창 현상에 의해 온도가 하강하여 외부배관에 성애가 발생하게 되고, 사용을 중지하면 잔류한 액체는 외부(대기)의 열을 받아 기체로 바뀌면서 250배의 부피 팽창을 일으켜 조정기와 계량기를 파열시키게 된다. 실험결과 플로트 시험장치 전·후단의 온도는 21℃에서 후단부가 최대 -31℃까지 하강하였고, 조정기 후단의 배관 표면온도는 7.3℃였다.(대기온도 26℃) 또한 사고가 난 D사의 액유출방지기구는 비중이 높아 기화기 출구를 차단하지 못하고 액에 잠기는 현상이 관찰 되었고 분해확인결과 제조결함으로 액유출방지기구 출구노즐이 기화기 출구를 확실히 차단하지 못하는 구조였다.

### 3-2 기화기 성능평가 시험결과

기화기 수조내의 열매체인 물을 히터로 60℃ 가열한 상태에서 전원을 차단시킨 다음 50kg/hr(=25 m<sup>3</sup>/hr)의 유량으로 사용 시(Fig 6) 정상 작동하는 기화기는 10분경과 후 수조온도와 기화기 출구 온도차가 15℃, 기화기 입·출구 온도차가 5℃ 일 때 액유출 방지기구가 작동하여 출구부를 차단 하였으나, 불량 기화기는 12분경과 후 각각의 온도차가 18℃, 2℃ 일 때 액유출 현상이 발생되었고, 17분경과 후에는 조정기 후단에 액유출과 배관 외부에 성애가 관찰 되었다. 설정온도 이하에서 사용 시(Fig 7) 정상 작동 기화기는 사용가능 하였으나, 불량 기화기는 각각의 온도차가 5~6℃, 4~5℃ 일 때 액유출이 발생 하였다. 기화기 용량을 1.4배 초과하여 사용할 때(Fig 8) 정상 기화기는 사용가능 하였으나, 불량 기화기는 5분경과 후 각각의 온도차가 18℃, 1~2℃에서 액유출과 조정기 후단에 성애가 관찰되었다.

### 3-3 총괄열전달계수 분석

일반적인 열교환기는 뜨거운 유체와 찬유체가 모두 질량유속을 갖고 향류로 열교환을 하지만, LPG기화기의 경우 뜨거운 유체는 히터로부터 열을 받고 자연대류에만 의존한다. 찬유체(LPG)가 얻은 열량을 기준으로 간접적인 대략의 총괄열전달계수를 다음과 같이 구하였다.(여기서 LPG액체는 25℃로 공급, 30℃에서 상전이, 40℃까지 가열된 것으로 가정하였음)

① 25℃ → 30℃ 현열공급 (liq)

$$\dot{m}_c c_p (T_{cb} - T_{ca}) = q \text{로부터}$$

$$50\text{kg/hr} * 0.59\text{kcal/kg}^\circ\text{C} * (30^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = 147.5\text{kcal/hr}$$

② 30℃에서의 증발잠열은

$$\dot{m}_c \lambda = q \text{로부터}$$

$$50\text{kg/hr} * 77.1\text{kcal/kg} = 3856\text{kcal/hr}$$

여기서, 증발잠열( $\lambda$ )는 watson식을 이용

③ 30℃ → 40℃ 현열공급 (vap)

$$\dot{m}_d c_{pc}(T_{cb} - T_{cw}) = q \text{로부터}$$

$$50\text{kg/hr} * 0.42\text{kcal/kg}^\circ\text{C} * (40^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}) = 210\text{kcal/hr}$$

물로부터 얻은 열량의 합은 ①+②+③ = 4213.2kcal/hr가 된다.

$$\dot{m}_d [\lambda + c_{pc}(T_{cb} - T_{cw})] = q = UA\Delta T$$

여기서,  $\Delta T$  = 뜨거운 유체온도-찬유체 입구온도

A=전열면적

위 식에 값을 대입하면,

$$4213.2\text{kcal/hr} = U * 0.6\text{m}^2 * (60 - 25)^\circ\text{C}$$

$$\therefore U = 200.6\text{kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$$

※ WATSON EQUATION

$$\frac{\Delta H_2}{\Delta H_1} = \left( \frac{1 - T_2}{1 - T_1} \right)^{0.38}$$

$$\text{여기서, } T_1 = \frac{T_1}{T_c}$$

$$T_2 = \frac{T_2}{T_c}$$

$$T_1 = -42.1\text{CENTIGRADE}$$

$T_2$  = 원하는 온도

$$T_c = 369.8\text{K}$$

$\Delta H_1$  = -42.1CENTIGRADE에서의 증발잠열

$\Delta H_2$  = 원하는 온도에서의 증발잠열

#### 4. 결론

기화기의 정상 작동을 위한 액유출 방지장치의 플로트는 안전을 고려하여 비중이 최소 0.4이하로 설계되어야 하고, 기화기 내부로 LPG액체가 공급되므로 열교환기는 상변화에 따른 다량의 열량이 필요하게 되므로 열매체인 수조내의 물의 온도는 일반열교환기와는 달리 자연대류에만 의존하므로 65℃ 이상으로 조정하는 것이 바람직하다. 실험 결과에 의해 액유출 발생 조건은 열매체의 온도가 50℃ 이하, 기화기 입·출구 온도차가 2℃ 이하 일 때 나타남을 알 수 있다. 재액화 및 액유출 발생 사고는 주로 여름에 일어나는데, 이는 조정기 후단에 잔류하는 LPG액체가 기화하여 35℃, 12kg/cm<sup>2</sup>(절대압력)이상이 되어 조정기와 계량기를 파열시키기 때문이다. 반면 겨울에는 0℃, 4.6kg/cm<sup>2</sup>(절대압력)이하가 되므로 액유출이 발생 하여도 위험성이 줄어든다. 현재 각 기화기 제조사는 동일한 소재와 형태의 열교환기를 설계함에도 불구하고, 총괄열전달계수를 상이하게 적용(380~710kcal/m<sup>2</sup>·hr·°C)하므로 이에 대한 기준정립이 필요하다.

#### 5. 참고문헌

1. Reid, R. C., Prausnitz, J. M., and Poling, B. E., The Properties of Gases and Liquids, 4th ed., McGraw-Hill, new york, 29-73(1986).
2. 한국가스안전공사, "가스사고연감 1997 - 1999".
3. Robert H. Perry. and Don W. Green, Perry's Chemical Engineers' Handbook, 6th ed., McGraw-Hill, new york.
4. R. A. Smith., Vaporizers, 1st ed., Longman Scientific & Technical, 229-238 (1986).
5. 민의동, 열교환기 이론과 설계, 영풍문고, 329-372(1996).
6. J. M. Smith, H. C. Vanness, Introduction To Chemical Engineering Thermodynamics, 4th ed., McGraw-Hill, new york, 114-116(1987).

Table 1. LPG overflow-protector specific gravity and test results.

구분	weight(g)	volume(㎤)	sp.gr	amb. temp(℃)	shut-off distance(cm)
A사	178	245	0.73	26.6	21.5
B사	322	770	0.42	26.0	17.5
C사	690	1465	0.47	26.6	-1.5
D사	246	670	0.37	27.4	15.5
E사	259	660	0.39	26.9	16.5
○사	161	320	0.50	-	-
사고C사	643	1490	0.43	26.0	2.5
사고D사	89	170	0.52	27.0	overflow

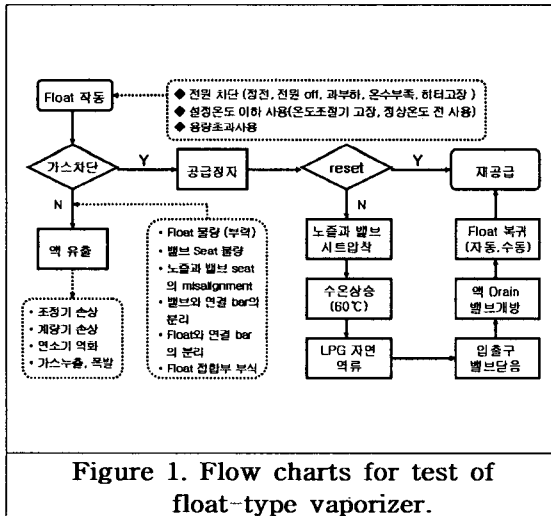


Figure 1. Flow charts for test of float-type vaporizer.

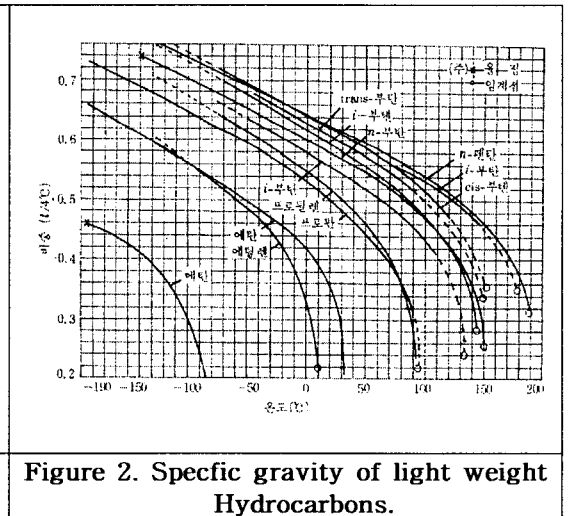


Figure 2. Specific gravity of light weight Hydrocarbons.

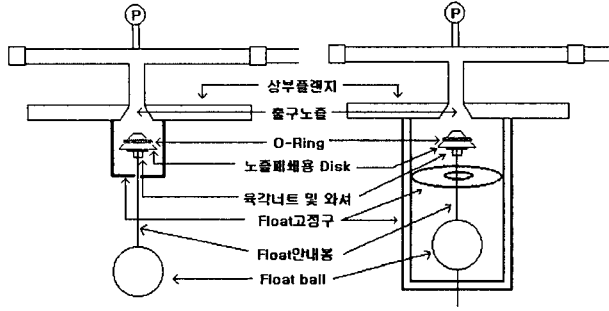


Figure 3. Diagrams of LPG overflow protecting device.

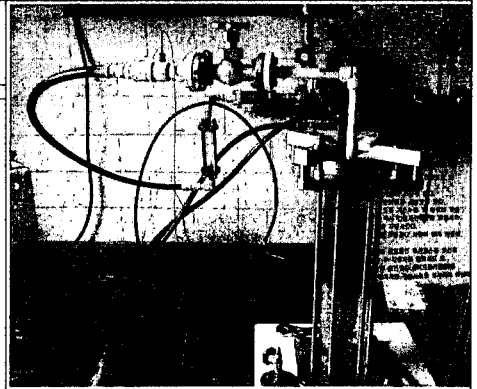
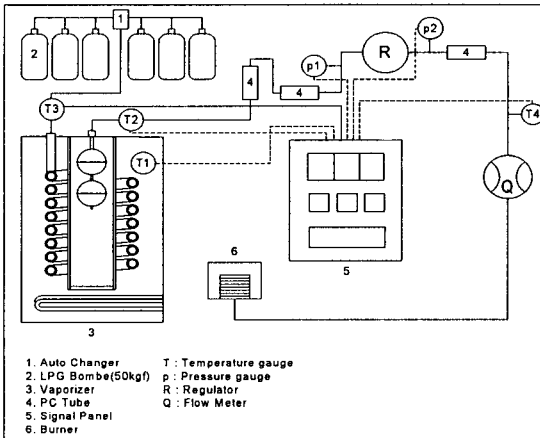


Figure 4. Float test equipment.



- 1. Auto Changer
- 2. LPG Bomb(50kg)
- 3. Vaporizer
- 4. PC Tube
- 5. Signal Panel
- 6. Burner
- T : Temperature gauge
- p : Pressure gauge
- R : Regulator
- Q : Flow Meter

Figure 5. Vaporizer performance test equipment.

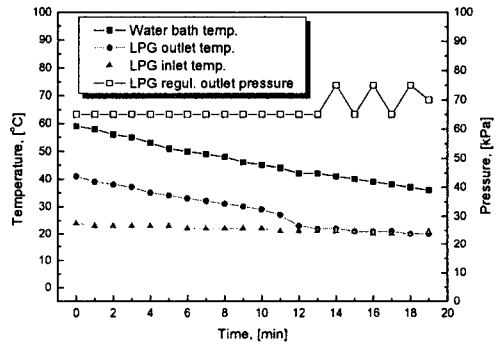


Figure 6. Temperature and Pressure transitions after power shut down.

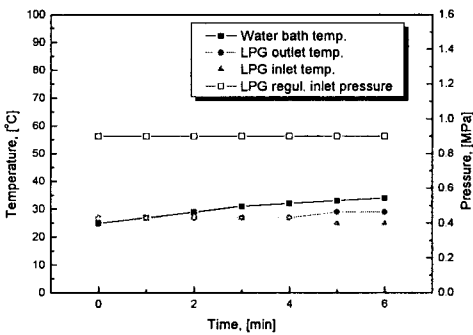


Figure 7. Temperature and Pressure transitions below the set points.

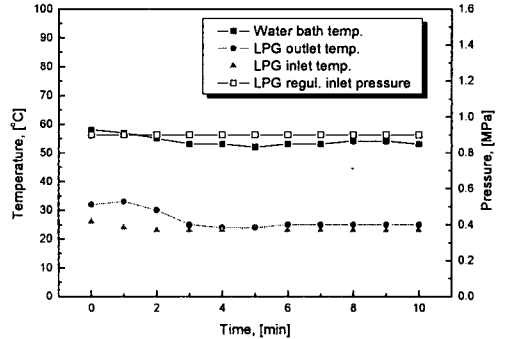


Figure 8. Temperature and Pressure transitions for overload usage of LPG