

# LPG 저장탱크 전환을 위한 잔여 LPG 기화방안 연구

손영순, 이영범, 김석순, 양영명

한국가스공사 연구개발원

## Study on Vaporization of Residual LPG in LPG Storage Tank

Youngsoon Sohn, Yeongbeom Lee, Seogsoon Kim, Youngmyung Yang  
R&D Division, Korea Gas Corporation

### 1. 서론

LPG 액화기지에서 운영중인 프로판 저장탱크를 부탄 저장탱크로 전환하기 위하여서는 탱크 내 LPG를 모두 제거하고 내부 검사를 수행한 후 용도를 전환하여야 한다. 먼저 저장탱크 내에 설치된 잠액 펌프로 가능한 최저 레벨까지 LPG를 제거한 후 잔여 부분에 대한 기화를 수행한다. 프로판 특성상 외부 열유입에 의한 자연기화의 경우 프로판의 물성 때문에 매우 긴 시간이 필요할 것으로 예상되므로 잔여 프로판의 제거에 대한 추가적인 검토가 필요하다. 잔여 LPG 제거 방법으로는 Hot 가스 주입방법, 소용량 펌프를 이용한 제거 방법 등이 제안될 수 있다. 여기서는 자연 기화시 잔여 LPG 기화 시간을 추정하고 기화시간을 최소화할 수 있는 방안에 대해 고찰하였다.

### 2. 잔여 LPG로의 열유입량 계산

#### 2.1 LPG 저장탱크 조건

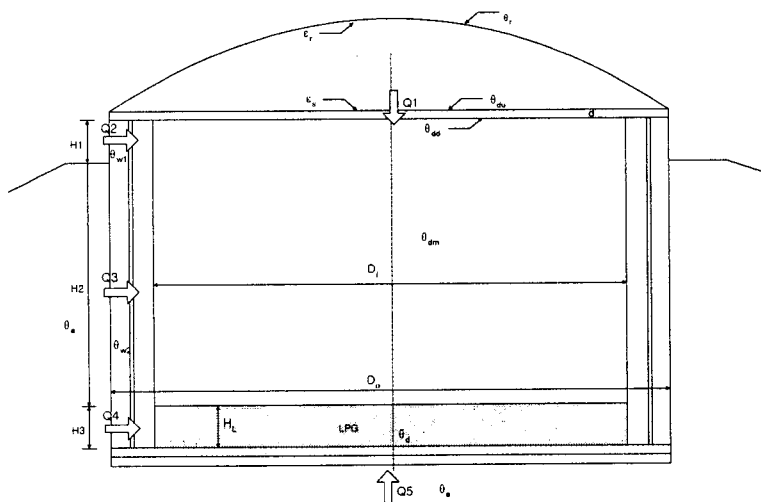


그림 1 지중식 LPG 저장탱크 개략도

- LPG 탱크의 내부반경,  $r_i = 27.75 \text{ m}$
- 벽면의 높이 :
  - 외부에 노출된 부분,  $H_1 = 1.5 \text{ m}$
  - 토양 내부에서 탱크 내 기체와 접한 부분,  $H_2 = 21.5 \text{ m}$
  - 토양 내부에서 탱크 내 액체와 접한 부분,  $H_3 = 1.0 \text{ m}$

### 2.1.2 온 도

- 지붕철판의 온도 :  $\theta_r = 80.0^\circ\text{C}$ (during 12 hours),  $30.0^\circ\text{C}$ (during 12 hours)
- 외부에 노출된 벽면의 외부온도 :  $\theta_{w1} = 80.0^\circ\text{C}$ (during 6 hours),  $30.0^\circ\text{C}$ (during 18 hours)
- 토양에 접한 벽면의 외부온도 :  $\theta_{w2} = 18.0^\circ\text{C}$
- 토양온도 :  $\theta_e = 18.0^\circ\text{C}$ , LPG 온도 :  $\theta_d = -44.0^\circ\text{C}$  (34 mbarg 기준)

### 2.1.3 복사능 (Emissivity)

- 구형돔의 복사능 :  $\epsilon_r = 0.79$  (LNG 탱크의 구형 돔의 복사능 적용)
- 현수천정 단열재 표면의 복사능 :  $\epsilon_s = 0.055$
- 현수천정 바닥면의 복사능 :  $\epsilon_{sd} = 0.055$
- 현수천정과 바닥에 있는 LPG 사이의 view factor :  $F = 0.80$

### 2.1.4 열전도도

- 콘크리트의 열전도도 :  $2.0 \text{ kcal}/(\text{m}\cdot\text{hr}\cdot\text{K})$
- 현수천정 단열재의 열전도도 :  $0.033 \text{ kcal}/(\text{m}\cdot\text{hr}\cdot\text{K})$
- Foamglas의 열전도도 :  $0.035 \text{ kcal}/(\text{m}\cdot\text{hr}\cdot\text{K})$
- Sand의 열전도도 :  $0.56 \text{ kcal}/(\text{m}\cdot\text{hr}\cdot\text{K})$
- PUF의 열전도도 :  $0.023 \text{ kcal}/(\text{m}\cdot\text{hr}\cdot\text{K})$
- Air의 열전도도 :  $0.0225 \text{ kcal}/(\text{m}\cdot\text{hr}\cdot\text{K})$

## 2.2 열유입량

### 2.2.1 총 열유입량

$$Q_{\text{tot}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

여기서,

$Q_1$  : 지붕을 통한 열유입량,  $Q_2$  : 벽면1을 통한 열유입량

$Q_3$  : 벽면2를 통한 열유입량,  $Q_4$  : 벽면3을 통한 열유입량

$Q_5$  : 바닥을 통한 열유입량

### 2.2.2 지붕을 통한 열유입량, $Q_1$

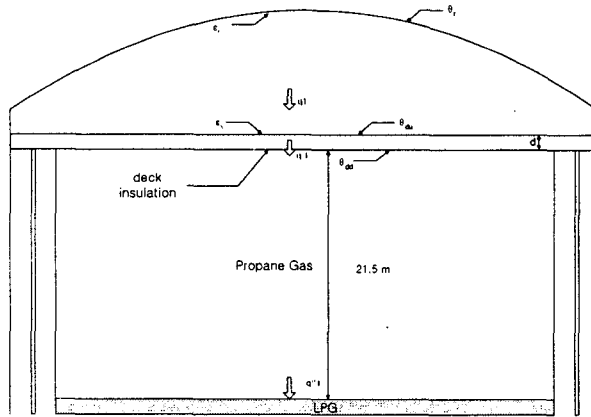


그림 2 지붕을 통한 열유입 개략도

계산의 간략화를 위해 다음의 가정들을 적용하였다.

- 열전도도가 매우 큰 carbon steel을 사용하고 있으므로 tank roof shell의 내부온도는 shell 외부온도와 동일함
- Roof 공간에 존재하는 가스를 통한 열전달은 무시함
- Roof 공간에서 일어나는 모든 열전달의 방향은 vessel 내부로 함함.
- 기화된 LPG는 바닥에서 현수천정 방향으로 이동하므로 vessel 내부의 전도와 대류에 의한 현수천정에서 LPG 쪽으로의 열전달은 무시함

$q_1$  : 구형돔에서 현수천정 단열재 표면으로 복사에 의한 열전달 [kcal/(m<sup>2</sup>.hr)]

$$q_1 = \frac{4.88}{1/\epsilon_r + 1/\epsilon_s - 1} \left[ \left( \frac{273 + \theta_r}{100} \right)^4 - \left( \frac{273 + \theta_{du}}{100} \right)^4 \right]$$

$q'_1$  : 현수천정 단열재를 통한 열전달 [kcal/(m<sup>2</sup>.hr)]

$$q'_1 = \frac{\lambda_s}{d} (\theta_{du} - \theta_{dd})$$

$q''_1$  : 현수천정 표면과 LPG 표면 사이의 복사에 의한 열전달 [kcal/(m<sup>2</sup>.hr)]

$$q''_1 = \frac{4.88}{1/\epsilon_{sd} + 1/\epsilon_{LPG} - 1} \times F \times \left[ \left( \frac{273 + \theta_{dd}}{100} \right)^4 - \left( \frac{273 + \theta_d}{100} \right)^4 \right]$$

여기서  $q_1 = q'_1 = q''_1$  로 가정함.

$$\begin{aligned} \frac{4.88}{1/\epsilon_r + 1/\epsilon_s - 1} \left[ \left( \frac{273 + \theta_r}{100} \right)^4 - \left( \frac{273 + \theta_{du}}{100} \right)^4 \right] &= \frac{\lambda_s}{d} (\theta_{du} - \theta_{dd}) \\ &= \frac{4.88}{1/\epsilon_{sd} + 1/\epsilon_{LPG} - 1} \times F \times \left[ \left( \frac{273 + \theta_{dd}}{100} \right)^4 - \left( \frac{273 + \theta_d}{100} \right)^4 \right] \end{aligned}$$

지붕의 온도 : 주간 80°C(12시간), 야간 30°C(12시간)로 가정함

· 주간 (12시간)

$$\theta_r = 80^\circ\text{C}, \theta_{du} = 64.66^\circ\text{C}, \theta_{dd} = 3.85^\circ\text{C}, \theta_d = -44.0^\circ\text{C},$$

$$q'_1(\text{day}) = \frac{\lambda_s}{d} (\theta_{du} - \theta_{dd}) = \frac{0.033}{0.3} (64.66 - 3.85) = 6.69$$

· 야간 (12시간)

$$\theta_r = 30^\circ\text{C}, \theta_{du} = 17.10^\circ\text{C}, \theta_{dd} = -15.26^\circ\text{C}, \theta_d = -44.0^\circ\text{C},$$

$$q'_1(\text{night}) = \frac{\lambda_s}{d} (\theta_{du} - \theta_{dd}) = \frac{0.033}{0.3} (17.10 + 15.26) = 3.56$$

$$Q_1 = [q'_1(\text{day}) \times 0.5 + q'_1(\text{night}) \times 0.5] \times A_{\text{roof}} \\ = [6.69 \times 0.5 + 3.56 \times 0.5] \times 2419.22 = 12397.6 \text{ kcal/hr}$$

### 2.2.3 벽면을 통한 열 유입량

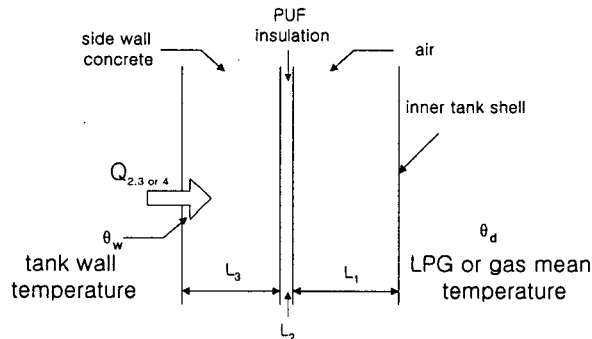


그림 3 탱크 벽면을 통한 열유입 개략도

계산의 간략화를 위해 다음의 가정들을 적용하였다.

- 벽면에 공기를 통한 열전달은 전도에 의해서만 이루어짐
- 열전도도가 매우 큰 carbon steel을 사용하고 있으므로 내조의 온도는 LPG 온도와 동일함

#### 2.2.3.1 외부에 노출된 부분, Q<sub>2</sub>

외부에서 벽면의 콘크리트, PUF 단열재 및 공기를 통해 vessel 내부로 유입된 열량은 다시 vessel 내부의 propane gas를 거쳐 저장되어 있는 LPG로 전달된다. 저장되어 있는 LPG의 수위가 매우 낮아서 propane gas로 채워져 있는 공간이 매우 크고 또 propane gas의 열전도도가 상온에서 0.016 kcal/(m.hr.K)로 매우 작으며, 또한 벽면과 vessel에 저장되어 있는 LPG는 서로 마주보고 있지 않으므

로 복사에 의한 열전달도 매우 작기 때문에 외부에 노출된 벽면을 통해 전달되는 열량은 매우 미미할 것으로 사료되므로 이를 무시한다.

### 2.2.3.2 토양에서 탱크 내 기체와 접한 부분, $Q_3$

토양 내에서 벽면의 콘크리트, PUF 단열재 및 공기를 통해 vessel 내부로 유입되는 열량은 vessel 내부의 propane gas를 거쳐 저장되어 있는 LPG로 전달된다. 토양의 온도는 18°C로 유지되기 때문에 상대적으로 온도차가 크지 않아 전달되는 열량이 크지 않을 것으로 판단되며 저장되어 있는 LPG의 수위가 매우 낮아 propane gas로 채워져 있는 공간이 매우 크고 또 propane gas의 열전도도가 상온에서 0.016 kcal/(m.hr.K)로 매우 작고 벽면과 vessel에 저장되어 있는 LPG는 서로 마주보고 있지 않으므로 복사에 의한 열전달도 매우 작을 것으로 판단되기 때문에 외부에 노출된 벽면을 통해 전달되는 열량은 매우 미미할 것으로 판단되므로 이를 무시한다.

### 2.2.3.4 토양에서 탱크 내 액체와 접한 부분, $Q_4$

$$Q_4 = 2\pi \times H_3 \times U_3 \times (\theta_{w2} - \theta_d)$$

$$\frac{1}{U_3} = \frac{\ln[(r_i + L_1)/r_i]}{k_1} + \frac{\ln[(r_i + L_1 + L_2)/(r_i + L_1)]}{k_2} + \frac{\ln[(r_i + L_1 + L_2 + L_3)/(r_i + L_1 + L_2)]}{k_3}$$

$L_1 = 1.50$  m (air),  $L_2 = 0.70$  m (PUF),  $L_3 = 1.20$  m (콘크리트)

$k_1 = 0.0225$  kcal/(m.hr.K),  $k_2 = 0.023$  kcal/(m.hr.K),  $k_3 = 2.0$  kcal/(m.hr.K)

$U_3 = 0.4059$  kcal/(m.hr.K)

$\theta_d$ 는 LPG온도로서 -44°C,

$$Q_4 = 2\pi \times 1.0 \times 0.4059 \times (18+44) = 158.1 \text{ kcal/hr}$$

### 2.2.7 바닥면을 통한 열 유입량, $Q_5$

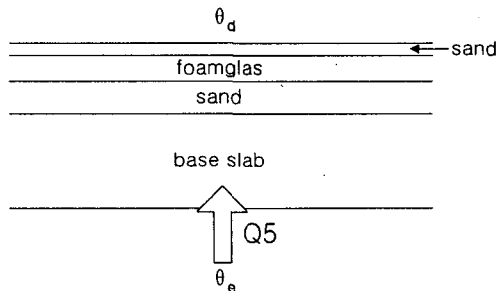


그림 4 탱크 바닥면을 통한 열유입 개략도

계산의 간략화를 위해 다음의 가정들을 적용하였다.

- 바닥 면의 단열재는 바닥 전체에 걸쳐 균일하게 적용되어 있음
- 바닥 면을 통해 유입되는 열은 모두 vessel 내부로 전달됨

$$Q_5 = \frac{\pi D_o^2}{4} U_b (\theta_e - \theta_d)$$

$$\frac{1}{U_b} = \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{L_3}{k_3}$$

$L_1 = 0.25$  m (sand),  $L_2 = 0.150$  m (Foamglas),  $L_3 = 0.30$  m (콘크리트)  
 $k_1 = 0.56$  kcal/(m.hr.K),  $k_2 = 0.035$  kcal/(m.hr.K),  $k_3 = 2.0$  kcal/(m.hr.K)  
 $U_b = 0.2048$  kcal/(m.hr.K)

따라서

$$Q_5 = \frac{\pi (61.04)^2}{4} \times (0.2048) \times (18 + 44) = 37162.1 \text{ kcal/hr}$$

$$Q_{tot} = 12397.6 + 158.1 + 37162.1 = 49717.8 \text{ kcal/hr}$$

### 3. 잔여 LPG 기화소요일수

#### 3.1 LPG 조성

LPG는 일반적으로 Propane 및 Butane 기준이 있고 조성은 다음과 같다.

표 1 프로판 기준 LPG 조성 (mol%)

Components	Boil off condensate	Total product rundown to storage	Sold product during loading mode
C2	12.79	2.53	2.00
C3	87.13	97.08	97.60
i-C4	0.07	0.29	0.30
n-C4	0.01	0.10	0.10

#### 3.2 예상 기화 소요일수

여기서는 LPG 저장탱크내의 송출펌프를 사용하여 최저 level 까지 송출 후 잔여 LPG를 저장탱크로의 열 유입에 의해 자연 기화되는 시간을 계산하였다.

##### 3.2.1 저장탱크 최저 저장량

- Level 1m 가정 (송출펌프 사용 최저 액위)
- 저장 부피 :  $(55.5)^2 \times \pi / 4 \times 1 = 2,419 \text{ m}^3$

##### 3.2.2 LPG (Commercial Propane) 기화 소요일수

- 저장탱크 운전압력 : 37 mbar

- 열유입량 : 49,717.8 kcal/h
- 잔여 LPG 용량 : 2419 m<sup>3</sup> (1,409,550 kg)

표 2 기화시간에 따른 잔여 LPG 조성변화 및 열유입량

잔여량(m <sup>3</sup> )	2419	1220	600	310	142	20	0
몰분율(Ethane)	0.0253	0.007	0.0018	0.0005	0.0001	0	0
몰분율(Propane)	0.9708	0.9867	0.9878	0.9832	0.972	0.9191	0.7173
몰분율(i-Butane)	0.0029	0.0046	0.0073	0.0112	0.0185	0.0479	0.1318
몰분율(n-Butane)	0.001	0.0017	0.0031	0.0051	0.0094	0.0331	0.1509
온도(°C)	-44.48	-42.17	-41.44	-41.15	-40.89	-39.84	-35.31
밀도(kg/m <sup>3</sup> )	582.7	581.4	579.1	581.4	581.9	581.9	592.5
분자량	43.8	44.09	44.22	44.32	44.49	45.23	48.06
증발열(kcal/kg)	103.39	102.23	101.92	101.89	101.96	102.37	102.70
열유입(kcal/hr)	7.32E+07	3.72E+07	1.68E+07	1.00E+07	7.28E+06	1.13E+06	-

- 잔여 LPG 전량 기화시 필요 열량 : 145,712,000 kcal
- 잔여 LPG 기화 소요 시간  
145,712,000 kcal / 49,717.8 kcal/h = 2930.8 hour (122일)

### 3.2.3 시간경과에 따른 LPG 물성변화

시간경과에 따른 잔여 LPG 물성 변화추이는 아래와 같다.

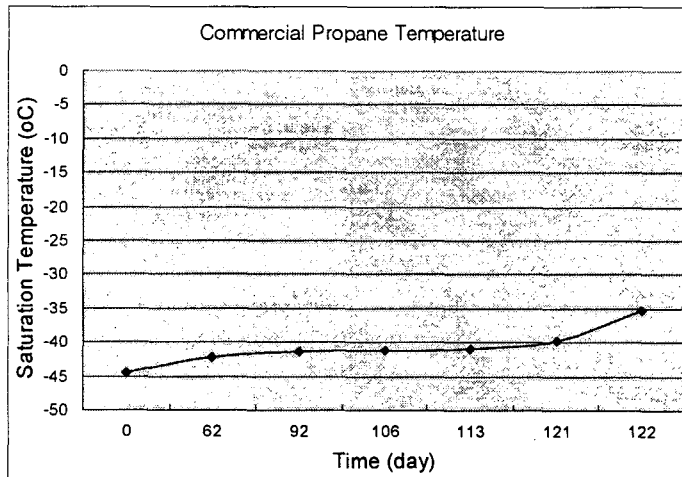


그림 5 시간경과에 따른 잔여 LPG 포화온도 변화

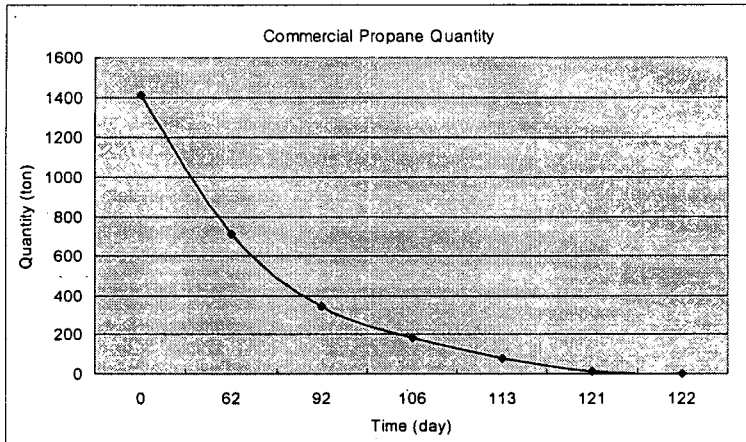


그림 6 시간경과에 따른 LPG 잔여량 변화

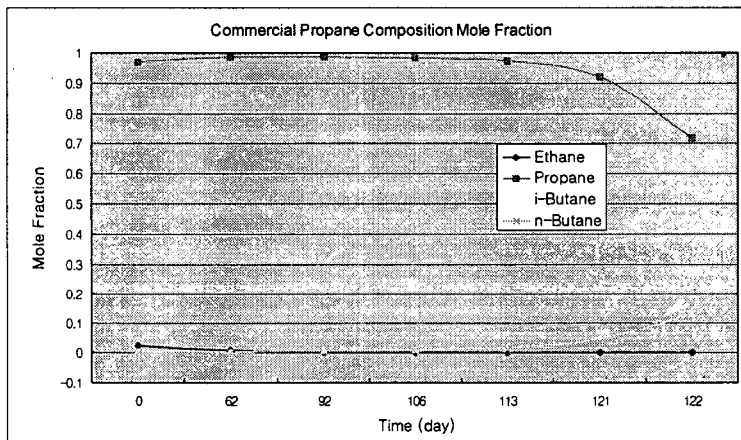


그림 7 시간경과에 따른 잔여 LPG 조성 변화

#### 4. 잔여 LPG 기화촉진방안

##### 4.1 Strip 펌프 설치

가능한 최단 시간내 LPG 저장탱크 전환을 위해서는 탱크내 잔여 LPG를 가능하면 가장 적게 남기는 것이 무엇보다 중요하다. 카타르 LPG 저장탱크의 형식은 9% 니켈형으로 탱크내 내조와 외조 사이에 비상시를 대비하여 몇기의 탱크에 소용량의 Strip 펌프가 설치되어 있는데 이를 이용할 경우 LPG 탱크내 LPG를 최저액위는 300mm를 남기고 제거할 수 있을 것으로 판단된다. 이를 적용할 경우 상기에서 계산한 자연기화시간이 30%로 단축할 수 있을 것으로 판단된다.

##### 4.2 Hot gas 주입



잔여 LPG는 Propane vapor compressor 후단의 뜨거운 프로판 가스(토출량 0.6ton/h, 온도 20~25℃)를 탱크내 Purge/Vent connection (8", 탱크 바닥부근까지 연결)에 연결하여 탱크내 잔여 LPG로 직접 주입하여 기화시키는 방안을 고려하였다. 이 경우 Hot 가스 전부가 잔여 LPG 기화에 사용되는 경우, 이는 잔여 LPG로의 자연 열유입량 (49,718 kcal/hr)의 27%에 해당되는 열량이나 인입가스와 잔여 LPG와 접촉되는 면적이 작은 관계로 주입된 Hot 가스의 대부분이 잔여 LPG와의 충분한 열교환 없이 기화된 프로판 가스와 일부분 열교환 되어 탱크로 빠져 나갈 것으로 예상되므로 이로 인한 기화촉진 효과는 적을 것으로 판단된다. 그러나 잔여 LPG 중 프로판 대부분이 기화하고 무거운 성분(n-butane, 포화온도 0.39℃)이 남을 경우 이를 기화시키는 데는 효과적인 방법으로 판단된다.

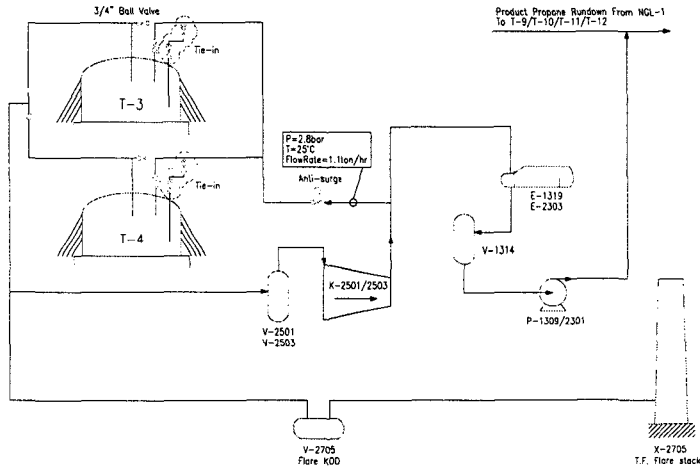


그림 8 HOT 가스를 사용한 잔여 LPG 기화 흐름도

## 5. 결론

여기서는 LPG 액화지에서 운영중인 프로판 탱크를 부탄 탱크로 전환하기 위한 잔여 LPG 기화방안에 대해 고찰하였다. 탱크내 LPG를 모두 제거하고 내부 검사를 수행하기 위해 먼저 저장탱크 내에 설치된 잠액 펌프로 가능한 최저 레벨까지 LPG를 제거하고 잔여 부분에 대한 기화방안을 검토하였다. LPG의 특성상 외부 열유입에 의한 자연기화의 경우 LPG 물성 특성으로 인하여 매우 긴 시간이 소요될 것으로 예상되므로 잔여 프로판의 제거에 대한 추가적인 검토를 수행하였다. 잔여 LPG 제거 방법으로는 Hot 가스 주입방법, 소용량 펌프를 이용한 제거 방법 등이 고려되었다. 가능한 최단 시간내 LPG 저장탱크 전환을 위해서는 탱크내 잔여 LPG를 가능하면 가장 적게 남기는 것이 무엇보다 중요하다. 여기서는 소용량의 Strip 펌프를 사용하여 LPG 탱크내 LPG를 최저역위로 남기고 제거하는 작업을 수행할 것이다. Hot 가스 주입방법은 Dock-in 작업이 주기적으로

필요한 LPG 수송선의 경우 이를 설계에 반영하여 특히 소량의 잔여 LPG는 Hot Gas를 이용하여 제거하고 있다. 지상식 LPG 저장탱크의 경우도 이러한 시스템을 도입할 경우 효과적인 방법으로 판단된다. 이러한 잔여 LPG 기화방안은 LPG 저장탱크 뿐만 아니라 LNG 저장탱크의 Decommissioning에도 직접 적용이 가능한 방법으로 판단된다.