



전열온수식 LPG기화기의 열전달 해석

†최성준 · 권정락 · 김광석* · 김 효*

한국가스안전공사 가스안전연구원, *서울시립대학교 화학공학과
(2007년 6월 12일 접수, 2007년 7월 24일 채택)

Heat Transfer Analysis of a Coil-Typed LPG Vaporizer with an Electrically Heating Water Bath

†Sung-Joon Choi · Jeong-Rock Kwon · Kwang-Seok Kim* · Hyo Kim*

Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation

**Department of Chemical Engineering, University of Seoul*

(Received 12 June 2007, Accepted 24 July 2007)

요 약

본 연구는 전열온수식 LPG기화기에서의 열전달 현상을 실험적인 방법에 근거하여 분석하였다. 전기가 열식 온수 수조로부터 공급되는 열량은 처음에 액화석유가스(LPG)의 온도를 높이는 현열에 사용되고, 이후 기체가스(PG) 상태로 만들기 위한 잠열공급 및 기화된 가스의 온도 상승에 사용된다. 코일내부에서 기-액이 공존하는 two-phase flow가 형성되는 영역은 그 지역에서의 온도의 주기적인 파동현상을 통하여 확인될 수 있었으며, 이 영역 이후부터는 기상상태로 현열효과만이 존재함을 알 수 있었다. 기화기의 열전달 능력은 총괄열용량으로 정의하였으며, 총괄열용량과 온수의 온도 및 가스유량에 따른 상관관계를 구하였다. 본 연구의 실험적 결과를 이용하면 전열온수식 LPG기화기의 열전달 특성 해석을 용이하게 수행할 수 있기 때문에, 향후 기화기 설계에 유용하게 적용할 수 있을 것이다.

Abstract – The heat transfer phenomena in a coil-typed LPG vaporizer with a hot water bath employed an electrical heating system were experimentally analyzed. The heat energy is initially used to sensible heat region to heat LPG, and then is done to latent heat region to vaporize LPG and to heat up the vaporized gas. A two-phase flow region could be found from periodic temperature fluctuations, and only sensible heat effect was found after passing through the region. The overall heat capacity was defined as multiplying the overall heat transfer coefficient by the heat-transfer area and we found a correlation employing the heating water temperature and LPG flow rate. The results of this work can effectively be applied for the design of field scale LPG vaporizers in the near future because they can predict the features of heat transfer on a kind of coil type LPG vaporizer.

Key words : Coil-type LPG vaporizer, Overall heat transfer coefficients, Heat-transfer area

I. 서 론

LPG(Liquefied Petroleum Gas)는 원유의 채굴, 정제 과정에서 생산되는 기체상의 탄화수소를 액화시킨 혼합물로서, 프로판(Propane) 제품과 부탄(Butane) 제품으로 구분하여 사용한다. 프로판 제품은 프로판(C_3H_8)이 주성분이며, 소량의 메탄, 에탄, 부탄 등이 혼합되어 있다. 주로 가정용 및 상업용 취사, 난방 등에 사용되며 도시가스의 제조 원료로도 공급되고 있다. 부탄제품은

노말 부탄($n-C_4H_{10}$), 이소부탄($i-C_4H_{10}$) 등 부탄성분이 대부분을 차지하며, 프로판 등 타 성분이 일부 혼합되어 있는 제품이다. 국내에서는 주로 자동차용 연료로 사용되고 있으며 난방용 연료 및 석유화학 원료로도 사용되고 있다.

이렇게 다양한 사용 형태 중 대부분의 경우 LPG를 연료로서 사용하기 직전에는 연소의 3요소 중의 하나인 산소와 혼합하기 위해 PG로 기화를 시킨다. 일반적으로 가정용 LPG의 경우에는 시간당 사용량이 많지 않아 LPG 용기 내에서 자연 기화하는 양으로도 충분히 사용할 수 있는 반면, 대형 식당이나 공장 등 LPG의

†주저자:shoo@kgs.or.kr

시간당 사용량이 많은 시설에서는 용기 내에서의 자연 기화량으로는 LPG 사용량을 충족시킬 수가 없으므로 기화기를 사용하여 강제 기화시켜 사용하게 된다. 특히 질소, 산소, 아르곤 및 암모니아와 같은 산업용 가스들은 상온에서 기화 온도가 낮기 때문에 공온식으로 기화하는 반면에, LPG는 상온에서 기화온도가 상대적으로 높아 전열 온수식 기화기를 사용하여 기화를 시켜야 한다.

LPG 기화기는 전국적으로 약 5천여 개소에 설치되어 있으며, 주로 도시가스가 공급되지 않는 지역을 중심으로 중·소규모 특정사용시설(공장, 학교, 식당 등)과 집단공급시설(아파트)에서 사용되고 있다. 그런데 이러한 전열 온수식 기화기와 관련된 사고가 끊임없이 발생하고 있어, 그 원인을 분석한 결과 최근 10년간 총 26건의 기화기 관련 사고가 발생하였는데, 그 중 3건은 소비자 과실, 2건은 설치불량, 그리고 21건이 제품불량에 의한 기화기 액 유출 사고로 분석되었다[1].

현재 국내에 LPG 기화기가 보급/사용된 지 30여년이 지났지만, 기화기 설계는 경험에만 의존하고 있을 뿐 구체적인 실험이나 열전달 해석에 근거하지 못하는 실정이다. 따라서 본 연구는 기화기 액 유출 현상의 가장 근본적인 원인이 되는 기화기 내 열교환 코일에서의 열전달 체계의 해석, 정량화하는 방법론 및 적정한 전열면적의 제안에 관하여 수행하였다. 열전달 현상 및 기화 현상은 기화기 설계에 있어서 가장 중심이 되는 요소로서 이 부분이 제대로 분석되지 않은 상태에서는 계속적인 사고가 발생할 것이고, 사고 방지를 위해 단순히 기화기 용량만을 크게 설계하여 사용할 경우 제작비용이 급등하는 등 비현실적인 자원 낭비만을 초래할 뿐이다. 따라서 열전달 현상의 분석을 통해 기화기 열전달과 관련한 사고를 최대한 줄이고 자원 절감, 제작비용 절감, 에너지 절약 및 대외 기술 경쟁력 강화에 기여하고자 한다.

II. 이 론

2.1. 열전달에 관련된 LPG 물성

LPG는 석유 정제 시에 나오는 여러 가지 성분이 혼합된 혼합물이지만 실제 사용시설에서 기화기에 공급되어지는 LPG의 주성분은 프로판이므로 본 연구에서 다루는 LPG의 물성은 모두 Propane(MW=44.1 g/mole)의 물성을 따랐으며, 실제 구성 성분과의 차이에서 오는 오차는 크지 않다.

열전달에 관련된 물리적 성질로는 현열효과에 관여하는 열용량(Heat Capacity)인데 프로판이 두 가지 상

(Phase)으로 존재하고 있으므로 각각의 상태에 따른 열용량 해석과 LPG가 PG로 기화할 때 필요한 기화 잠열 효과를 고려해야 한다. 일반적으로 기화 잠열은 현열 효과에서 나타내는 열량보다 수백 배 이상 크게 나타나기 때문에 이러한 경우 현열 효과를 무시하는 것으로 통용하고 있으나 본 연구에는 이러한 현열 효과도 포함시켜 결과를 산출했다. 상기의 세 가지 데이터는 온도에 관한 식으로 정리되어 있으며, 그 식은 다음과 같다[2,4].

$$\Delta H_v \left[\frac{J}{kmole} \right] = C_1(1-T_r)^{(C_2+C_3T_r+C_4T_r^2)} \quad (1)$$

여기서, $C_1=2.9209 \times 10^7$, $C_2=0.78237$, $C_3=-0.77319$, 그리고 $C_4=0.39246$ 이다.

$$C_{PG} \left[\frac{J}{kmole \cdot K} \right] = C_1 + C_2 \left[\frac{C_3}{T} / \sinh \left(\frac{C_3}{T} \right) \right]^2 + C_4 \left[\frac{C_5}{T} / \cosh \left(\frac{C_5}{T} \right) \right]^2 \quad (2)$$

여기서, $C_1=0.5192 \times 10^5$, $C_2=1.9245 \times 10^5$, $C_3=1.6265 \times 10^3$, $C_4=1.1680 \times 10^5$ 그리고 $C_5=723.6$ 이다.

$$C_{LPG} \left[\frac{J}{kmole \cdot K} \right] = \frac{C_1^2}{t} + C_2 - 2C_1C_3t - C_1C_4t^2 - C_3^2t^3 - \frac{C_3C_4}{2}t^4 - C_5^2t^5 \quad (3)$$

여기서, $t=1-T_r$, $C_1=6.2983 \times 10^4$, $C_2=1.1363 \times 10^5$, $C_3=6.3321 \times 10^2$, $C_4=-8.7346 \times 10^2$ 이며 $C_5=0$ 이다.

식 (1)은 온도에 따른 프로판의 기화열을 나타내고 식 (2)는 액체 프로판의 열용량을 나타낸 식으로 두 식에 적용할 수 있는 온도 범위는 85.47부터 369.83 K까지이다. 반면에 식 (3)은 온도에 따른 기체 프로판의 열용량에 관한 식으로 적용할 수 있는 온도 범위가 200에서 1500 K까지이다.

2.2. LPG 기화기 열교환기에서의 열전달

LPG 기화기는 단함형 열교환기의 한 형태로서 관벽이나 평판 또는 다양한 형태의 전열표면에 의해 뜨거운 유체와 찬 유체가 서로 혼합이 없이 분리되어 흐르면서 열 교환이 이루어지는 장치로 열교환기 중 가장 널리 사용되고 있다. 이 열교환기에 있어서 에너지 전달은 먼저 뜨거운 유체에서 전열표면으로의 대류에 의한 에너지 이동이 일어난 후, 전열표면을 통한 전도에 의한 에너지 이동, 전열표면으로부터 찬 유체로의 대류에 의한 에너지 이동 등 3단계 과정을 거친다.

기화기에서의 총괄열전달율은 다음의 식으로 표현할 수 있다[3].

$$Q \left[\frac{J}{hr} \right] = UA \frac{(T_w - T_2) - (T_w - T_1)}{\ln[(T_w - T_2) - (T_w - T_1)]} \quad (4)$$

여기서, Q 는 전달된 열, U 는 총괄열전달계수, A 는 전 열면적, T_w 는 수조온도, T_1 은 기화기로 공급되는 LPG 온도, T_2 는 기화기 출구의 PG 온도이다.

이상적인 기화기를 고려한다면, 상변화가 일어나는 동안에는 온도변화가 없기 때문에 들어가는 흐름과 나가는 흐름의 온도변화가 없고 단지 열매체의 온도만 낮아지게 된다. 그러나 실제 기화기에서는 이러한 일은 일어나지 않는다. 일단 기화가 되면 증기는 끓는점 보다 높은 온도를 가지게 되고 기화기를 들어가는 액체가 끓는점에 도달하지 못하였다면 기화가 되기 전에 우선 액체의 온도가 끓는점까지 올라가게 될 것이다. 따라서 이러한 복잡한 상황을 해석하기 위해 기화기 열전달을 대표하는 온도차를 정의하였고 그 온도 차이를 이용하여 총괄열전달 계수를 계산하였다.

III. 실험방법

3.1. 실험대상

Fig. 1과 같이 전열 온수식 기화기는 온수통 안에 열교환 코일이 잠겨있고 열매체인 물의 온도를 올리는 데 사용하는 전열기구로 구성되어 있다. 액체 상태인 LPG가 코일 한쪽 끝에서 들어와 코일을 따라 나선형으로 흘러 내려가면서 코일 외부에 있는 따뜻한 물로부터 열을 공급받아 기화가 되고, 가운데 보이는 액유출 방지 장치가 탑재된 기화통을 통해 기화기 출구로 빠져나가

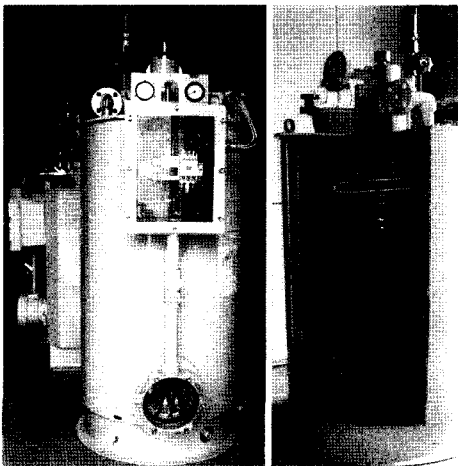


Fig. 1. Photographs of a 50 kg/hr coil-typed LPG vaporizer.

게 된다.

실제로 열 교환 코일 내부에서 일어나는 일을 눈으로 확인 할 수 있는 방법은 현실적으로는 없지만 코일은 분명히 동심원을 그리면서 감겨있고 반지름이 매우 커 그 굴곡 정도가 심하지 않아 직선관의 형태로 볼 수 있다. 코일의 입구에서 LPG와 이미 기화된 PG가 함께 들어오고 관 양 끝에서의 압력차로 인하여 코일 아래 쪽으로 흘러 내려간다. LPG는 기화가 되면 부피가 약 270배 정도로 팽창하므로 액체보다 매우 빠르게 코일을 빠져나갈 것이고, 액체도 코일을 흘러내려가는 동안 점점 기화가 진행이 되어 결국에는 더 이상 액체가 존재하지 않는 지점이 존재할 것이다. 이것을 본 연구에는 Vapor Point라고 정의하였다.

결국 열매체인 온수로부터 코일 벽을 통하여 코일 내부로 전달되는 에너지는 액체 LPG가 코일 내부로 들어와 온도가 올라가고(현열 효과), LPG가 PG로 기화하고(잠열 효과), 저온의 PG가 고온의 PG로 되는 현상(현열 효과)에 필요한 에너지의 총 합과 같다.

국내 기화기 제조 회사들이 제조·시판하는 기화기는 주문제작을 제외하고 시간당 30 kg의 기화능력을 가진 것에서부터 300 kg의 기화능력을 가진 것까지 6종류가 있다. 이 중 가장 많이 사용하는 기화기는 시간당 50 kg의 기화능력을 가진 기화기로 이를 실험 대상으로 선정하였다. Table 1은 용량 50 kg/hr 기화기 코일의 외경, 내경, 길이와 각각의 전열 면적을 계산한 것이다.

기화기 내에서 열을 전달받을 수 있는 금속 부분의 전체넓이는 0.551 m²이지만 이 면적이 모두 LPG를 PG로 기화시키는데 사용되지는 않는다. 따라서 본 연구에서 전열 면적이라고 함은 LPG가 접촉하는 코일의 면적이라고 재 정의해야 한다. 그러나 코일 내에서의 난류흐름으로 인해 전열면적이 흐름방향의 길이에 대하여 비례관계가 성립하지 않는다. 다시 식 (4)로 돌아가면, Q 는 LPG 기화기의 입장에서 보면 LPG가 PG로 기화할 때 필요한 기화열과 LPG 및 PG의 현열 효과의

Table 1. Specification of heat exchanger.

	O.D (mm)	I.D (mm)	Length (m)	A (m ²)
Coil (Sch 80)	27.2	19.4	5.8	0.353
Gas chamber (Sch 40)	139.8	126.6	0.5	0.198
Overall heat transfer area	0.353+0.198 = 0.551 m ²			

함으로 나타난다. 결국 적당한 LMTD 값과 전열 면적을 알면 총괄 열전달계수를 구할 수 있다는 결론이 나온다. 그러나 위에서 언급했듯이 LPG가 접촉하여 지나가는 코일의 면적을 확인하는 것은 불가능하므로 총괄 전열계수와 전열면적의 곱인 UA 값을 확인해야 한다.

본 실험에서는 실험군과 대조군을 선정했는데, 대조군은 일반적으로 많이 사용하고 있는 기화기의 운전 조건으로 선정하였고, 실험군은 대조군으로부터 특정한 변수들(온도, 압력 등)을 정해 변화시키면서 대조군에서부터 얻은 실험 결과와 비교하도록 하는 대상이다. 대조군의 변수는 LPG 사용량과 기화기 온수조의 세팅 온도이다. 총괄 열전달 계수와 전열 면적의 곱인 UA는 결국 전달되어야 하는 열량과 코일 내부와 외부의 온도구배에 대한 함수로 나타난다. 결국 LPG 사용량의 변화는 코일 면을 통해 전달되어야 하는 열량의 변화를 의미하는 것이고, 온수조의 세팅온도라는 것은 코일 내·외부의 온도 구배를 변화시키는 것이다.

3.2. 실험장치

실험을 위하여 제작한 기화기에는 상용 기화기에 있는 기화통이 없다. 액 유출이 발생할 경우 바로 확인할 수 있도록 완충 구간을 제거해버린 것이다. 기화통이라고 하는 것은 어디까지나 코일에서 열 교환이 충분히 이루어지지 않아 코일 밖으로 액체가 유출되었을 때 그 액체들이 기화기를 빠져나가기 전에 기화시키기 위한 수단이다. 따라서 바람직한 기화기라면 기화통에는 액체가 존재해서는 안된다. 또한 열교환 코일 내부에서 일어나는 현상을 나타내기 위해 Fig. 2에서와 같이 모두 11개의 열전쌍 온도계를 코일 내부에 설치하였다.

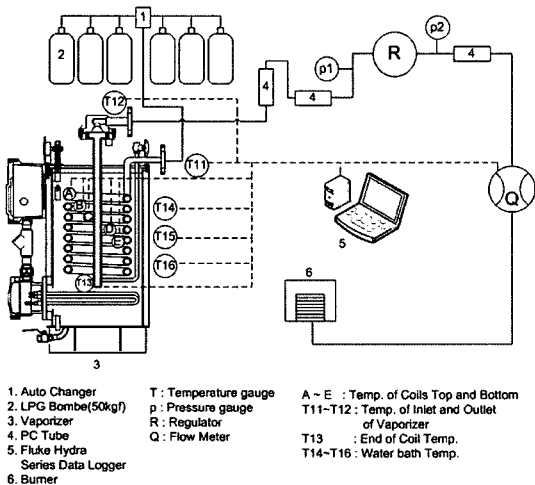


Fig. 2. Schematic of experimental apparatus.

그 중 10개는 2개씩 위·아래로 짝지어 코일 입구에서부터 667 mm의 일정한 간격으로 배치하였고, 각 쌍에서 한 온도계는 코일의 위쪽에 다른 한 개는 아래쪽에 놓이게 하였다. 마지막 열한번째 온도계(T13)는 코일의 가장 마지막 부근에 설치하였다.

예를 들어 두 번째 온도계 쌍이 가리키는 온도가 서로 다르다고 하면 두 번째 온도계가 있는 지점에서는 액체와 기체가 공존하는 것을 말하는 것이다. 좀 더 엄밀히 이야기하자면 코일의 윗부분에 설치된 온도계의 지시 값이 아랫부분에 설치된 온도계가 지시하는 값보다 훨씬 크게 나타나야 한다. 코일 이외에도 기화기 외부에 있는 액체 입구, 가스 출구, 수온, 유량 등을 측정할 수 있도록 센서를 설치하였고, 그 데이터를 Fluke Hydra Series II Data Logger로 매 5초 마다 저장하였다. 그 이외에는 상용 기화기와 형상, 구조 및 재질 등이 동일하다.

3.3. 실험조건

대조군은 일반적으로 사용하고 있는 LPG 기화기의 운전 조건으로 선택을 하였고, 그 조건을 가감하여 실험군의 조건으로 설정하였다. 대조군의 유량은 일반적으로 50 kg/hr 용량의 기화기에 권장하는 최대 유량인 25 Nm³/hr으로 설정하였고, 온수 온도 조절기 설정값은 65°C로 하였다. 실험군의 조건으로 온수 온도 조절기의 설정값을 55, 60, 65°C로 하였고, 유량은 10~35 Nm³/hr로 각각 9단계로 변화시키면서 측정하였다.

IV. 실험결과 및 고찰

4.1. 실험데이터 해석

대조군과 실험군의 조건을 가지고 각 지점에서의 온

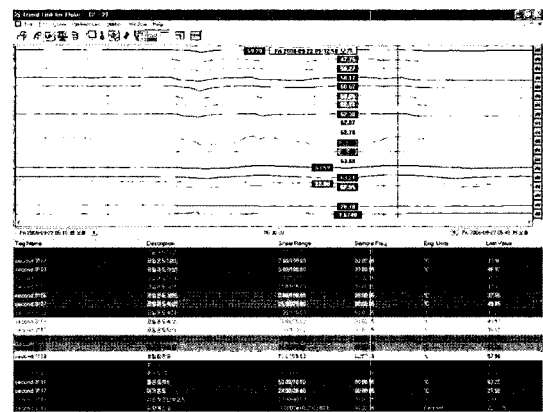


Fig. 3. Main screen of Hydra Series II data logger program.

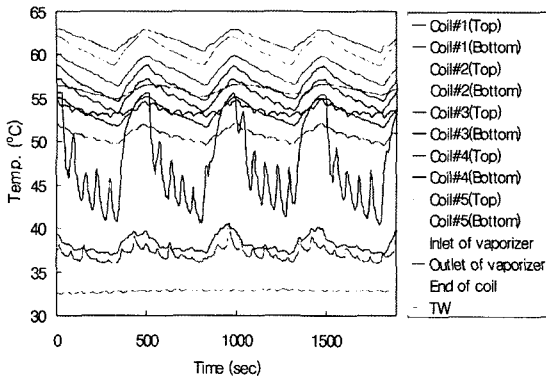


Fig. 4. Temperature profiles with time at the interior points of coil and water bath.

도 및 유량을 매 5초 마다 기록하였다. Fig. 3은 그러한 방법으로 얻은 데이터들 중 일부를 보여준다.

Fig. 3과 같은 화면은 Hydra Series II의 전용 프로그램인 Trend Link인데 여기서는 18개 채널의 값을 서로 비교하기가 쉽지 않기 때문에 18개 지점의 온도를 한 그래프에 그려 Fig. 4에 나타내었고, 이것들을 좀 더 쉽게 비교할 수 있게 하였다.

Fig. 4는 온수 온도 설정값을 65°C, LPG 사용량을 10 Nm³/hr로 하였고 곡선들은 한눈에 보아도 주기성을 가지고 있다. 이러한 주기성은 온수 온도가 ON-OFF 제어를 받기 때문이다.

Fig. 4에서 가장 아래에 위치하고 있는 곡선이 입구 LPG의 온도이고 가장 위에 있는 곡선이 온수의 온도를 나타낸다. 특별히 주목해야 할 곡선은 아래에서 4번째 위치한 곡선이다. 온도 변화 폭이 가장 심하기 때문이다. 이 곡선은 코일내부에 설치한 3번째 위치의 온도계 중 아래쪽에 있는 온도계이다. 따라서 같은 위치 상단의 온도계의 값과 비슷하면서 온도 변화 폭이 심하다는 것은 그 온도계 주변이 열역학적으로나 유체역학적으로 매우 불안정하다는 것을 의미한다. 수온이 조금 높을 때에는 PG가 그 온도계를 덮고 있고 약간 낮은 온도에서는 LPG가 그 온도계와 접촉한다는 것을 의미하기 때문이다. 한마디로 3번째 온도계 위치 부근에서 완전 기화가 일어난다는 것이다. 이와 비슷한 현상이 다른 조건에서도 일어난다. 따라서 이러한 온도 변화를 관찰하면 어느 지점에서 기화가 완전히 일어나는지를 예측할 수 있다.

4.2. 데이터 처리

앞에서 얻은 초기 데이터를 가지고 식 (4)를 이용하여 UA 값을 구하기 위해 필요한 데이터를 유도하였

다. 프로판이 LPG 또는 PG를 대체할 수 있다는 가정을 계속 사용할 것이고, 따라서 모든 열역학적 관계와 유체역학적 관계는 프로판의 것을 이용하였다.

먼저 LPG와 PG에 전달되는 총 열량을 계산해야 한다. 실험에 사용하고 있는 차압식 유량계가 나타내는 유량은 표준 상태(0°C, 1 atm)일 때의 값이기 때문이다. 표준 상태의 기체의 압축인자는 거의 대부분 0.99보다 높은 값을 가지고 있기 때문에, 1이라고 가정해도 결과 값에 크게 영향을 주지 않는다. 이는 곧 LPG 또는 PG의 질량유속 또는 몰 유속을 구하기 위해서 이상기체 상태방정식을 도입해도 된다는 결론을 얻을 수 있다. 또 한 가지 고려해야 할 것은 단위 환산에 관한 것이다. 기체 및 액체의 열용량, 기화잠열 등의 단위가 온도는 절대온도 K, 에너지는 J, 체적은 kmol로 나타나는 반면 이상기체 상태방정식에 사용되는 기체 상수는 8.31 J/mol·K이므로 이 기체 상수에 1000을 곱하여 사용하여야 한다. 결과적으로 다음 식이 될 것이다.

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{1 \text{ atm} \times V \text{ m}^3/\text{hr}}{0.082 \text{ atm} \cdot \text{l}/\text{mol} \cdot \text{K} \times 273.15 \text{ K}}$$

$$= \frac{V}{22.4} \text{ kmol/hr} \quad (5)$$

코일을 통해 전달된 총 열량은 다음 세 가지 열전달 효과에서 일어나는 에너지 차이의 합으로 구할 수 있다. 첫째, 입구에서 들어온 LPG가 코일 내에 있는 LPG의 온도가 될 때까지 필요한 현열 효과이다. 이 열량은 앞의 열용량 구하는 식으로 부터 계산할 수 있다. 다음은 포화 LPG가 증발하는데 필요한 잠열 효과이다. 기화 잠열을 구하는 식에 적용한 온도는 코일 내에 존재하는 액체의 산술 평균 온도이다. 원칙적으로는 질량 평균 온도를 사용하여야 하지만 각 지점에서 액체가 얼마나 존재하는 지 정확하게 알 수 있는 방법이 없으므로 적은 온도 범위에서 기화열이 크게 달라지지 않는다는 가정을 사용하였다. 마지막으로 증발된 PG가 코일을 빠져나가는 PG의 온도까지 되는데 필요한 현열 효과이다. 기체의 열용량을 계산할 때 사용한 온도범위는 액체의 온도에서 코일 끝에서의 온도까지이다. 결국 코일 벽면을 통해 전달된 열량은 코일 출구로 나가는 PG의 엔탈피에서 코일 입구로 들어가는 LPG 및 PG의 총 엔탈피를 뺀 값과 같다.

마지막으로 온도차는 다음의 과정을 고려하여 결정하였다. 일단 기화기도 일종의 열 교환기 이므로 온도 차이를 정의할 때 대수평균 온도차를 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 이론상으로 보면 상변화가 일어날 때에는 온도변화가 없기 때문에 평균온도라고 하는 것이

의미가 없을뿐더러 대수평균온도차에서 분모에 있는 자연대수의 지수부분이 1이 되고 결국 분모가 0이 되기 때문에 수학적으로 불능 상태가 된다. 하지만 실제 코일 내부의 온도를 측정하면 온도는 시간에 따라 수시로 변화하고 위치에 따라서도 상당히 달라진다. 본 연구에서는 이러한 현상이 일어나는 것을 확인 하고 이 온도를 이용해 대수평균온도차를 구하였다.

결국 위에서 구한 총 에너지 전달량과 대수평균 온도차를 이용해 코일의 UA 값을 구할 수 있다.

4.3. UA-T_w 상관관계 해석

범용의 일반 기화기 설계자는 코일 내부에 있는 LPG의 대수평균 온도차를 구할 수 없으므로 쉽게 측정할 수 있는 T_w(온수의 온도)와 UA의 상관관계를 유도함으로써 현장에서의 사용과 해석을 가능하게 하고자 하였다. 이를 위하여 통계적 방법 중 직선 회귀법을 사용하는 것이 가장 편리한데, 선형 회귀를 사용하기 위해서는 우선 UA를 온수의 온도에 대하여 그래프를 그려 그 경향이 직선 회귀를 사용해서 분석한다면 그 결과를 신뢰 할 수 있는지에 대해 판단하는 작업을 수행해야 한다. 대부분 직선의 형태를 갖는 것으로 나타났다. 따라서 이 연구 결과를 선형 회귀에 의해 결론짓는 것으로 결정하였다. 따라서, UA는 온수 온도 T_w에 대하여 다음과 같은 관계를 나타낼 것이다.

$$UA = b + aT_w \quad (6)$$

여기서, b는 0이 아니고, a는 음의 값을 갖게 된다. 다음으로 고려해야 할 사항은 어떠한 방법으로 식 (6)의 직선을 데이터에 맞출 것인가 하는 문제이다. 일반적으로 선형 회귀에서는 최소 자승법을 사용하는데, 이번 실험 결과는 데이터의 개수가 많아 좀 더 통계적인 방법이 많이 적용되는 χ^2 법을 사용하는 것이 타당하다. 여기서 χ^2 는 다음과 같이 정의된다.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - ax_i - b}{\sigma} \right)^2 \quad (7)$$

여기서 σ 는 데이터들의 표준 편차를 의미한다. 그리고 최소 자승법과 같이 제공항 안에 있는 값을 모두 더하면 0이 되기 때문에 χ^2 을 위와 같이 정의 한 것이다. χ^2 방법은 위의 χ^2 값을 최소로 만드는 a와 b의 값을 구하는 것이다. 최소 자승법에서는 상관관계수라고 하여 선형 회귀로 구한 직선이 원래 데이터와 얼마나 잘 들어맞는지에 대한 척도를 사용하고 있는데 여기서는 그러한 척도로 χ^2 값을 그대로 사용하고 있다. 따라서 최소 자

Table 2. T_w-UA correlation using linear regression (temperature switch set at 65°C).

Tset (°C)	Flow rate (Nm ³ /hr)	b	a	UA at T _w = 60°C	Vapor point
65	10	380	-1.28	303	2-3
	15	708	-4.35	447	3-4
	16	686	-3.47	477	4-5
	20	728	-2.9	554	4-5
	23	1371	-12.3	632	5-
	25	1286	-10.2	672	5-
	27	1289	-9.67	709	5-
	29	3996	-52.5	847	5-
	35	1454	-9.96	856	5-

승법의 상관계수는 1일 때 모든 데이터가 직선상에 존재하고 0일 때 평균값을 사용했을 때와 별다른 이점을 얻지 못하는 것과 반대로 0이 될 때 모든 데이터가 직선상에 존재하고 커질수록 데이터들이 분산정도가 심하게 된다. Table 2는 온수 온도 조절기의 설정 온도를 65°C로 하였을 때 LPG 사용량에 따른 각 지점에서 얻은 온도와 유량 데이터를 가지고 온수 온도 T_w와 UA 값을 구한 결과이다.

그리고 그 데이터 중 사용량이 35 Nm³/hr일 때의 선형 회귀 결과를 그래프로 그려 Fig. 5에 나타내었다.

이와 같은 방법으로 유량을 변화시켜가면서 T_w와 UA값과의 관계를 선형화시켰고, 또한 다른 온수 온도 제어기 설정 값으로도 반복 실험을 하였다.

결론적으로 수조온도가 55, 60, 65°C일 때 UA (J/hr·k)와 PG의 flow rate, F(Nm³/hr)의 상관관계를 다음과 같이 얻을 수 있다.

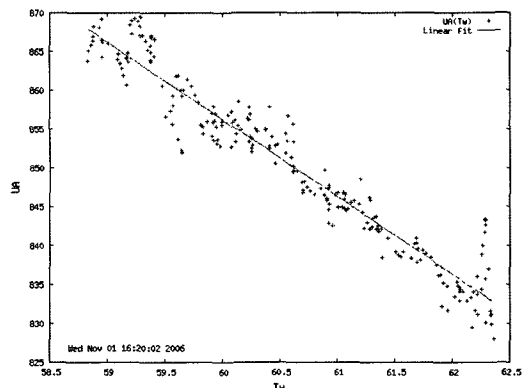


Fig. 5. UA versus T_w at 35 Nm³/hr (Initial water temp. is set at 65°C).

$$\begin{aligned}
 UA &= 27.8F + 140.0 \text{ at } T_w = 55^\circ\text{C} \\
 UA &= 23.3F + 94.2 \text{ at } T_w = 60^\circ\text{C} \\
 UA &= 18.7F + 102.6 \text{ at } T_w = 65^\circ\text{C}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

여기서, F 는 $10\sim 35 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ 이다.

Table 2와 식 (8)의 결과로부터 A(전열면적)값은 안전을 고려하여 코일길이를 4 m로 결정할 수 있으며, 이는 현재의 상용기화기에서 사용하는 5.8 m의 코일길이에 비해 1.8 m의 절감효과를 가져올 것으로 예상된다.

4.4. UA, T_w , F의 3차원 해석

이 연구의 최종 목표는 기화기 열전달 코일의 설계 인자를 찾아내는 일이다. 즉, 기화기 설계자가 필요로 하는 사용량 및 온도를 알면 UA 값을 찾아서 얼마의 코일 길이가 필요한 지 알 수 있게 하는 것이다. 이 작업을 하기 위해서는 온수 온도 T_w 와 LPG 사용량을 x-y 축으로 하고 해당 UA 값을 z 축으로 하는 3차원 그래프를 작성하면 된다. 실험을 시행할 수 있는 횟수는 한정되어 있으므로 모든 온수 온도와 LPG 사용량에 대하여 실험을 할 수 없다. 따라서 위의 작업을 실시하게 되면 실험을 통해 나온 결과들을 가지고 아직 실험하지 않은 조건(사용량, 온수 온도)에서도 UA 값을 구할 수 있다.

위에 설명한 3차원 그래프는 Fig. 6에 나타내었다. 예상한 대로 평면 형태의 모양을 가지고 있다.

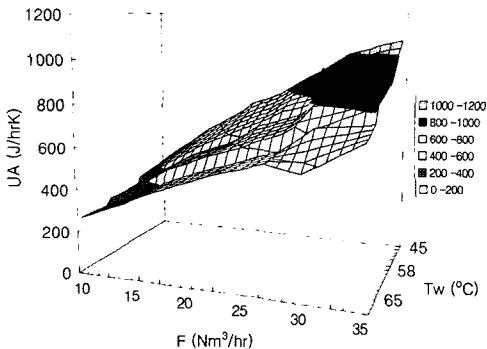


Fig. 6. UA depending on F and T_w .

V. 결 론

본 연구에서는 전열 온수식 LPG 기화기에 사용 중인 열교환기와 관련하여 전열 면적, 공급 온도 및 사용 유량 등의 인자들이 총괄 열전달 계수에 어떠한 영향을 미치는가를 검토하고 이를 토대로 열유체 해석 및 현장적용 하는 것이었다.

현재 국내 기화기 제조업체의 가장 근본적인 문제는 열 교환 코일이 얼마만큼의 열을 전달 시켜줄 수 있는지에 대한 아무런 자료가 없다는 데에 있다. 열교환기에서 열전달 능력이라는 것은 총괄 열전달 계수라는 개념으로부터 시작된다. 그런데 기화기 코일에서는 단순한 열전달만 일어나는 것이 아니라 액상이 기상으로 상변화를 일으키면서 심한 난류가 형성되므로 이러한 현상은 결국 Two-phase flow 문제로 귀결된다. 따라서 코일의 내부 면적을 일부는 액체가 접촉하고 나머지 일부는 기체가 접촉하게 된다. 다시 말해 이러한 계에서는 총괄 열전달 계수만을 구할 수 없다. 그래서 새로운 UA라는 개념을 도입하게 되었다. 또한 실험을 위해 실험용 기화기를 제작하였다. 열 교환 코일에 일정한 간격으로 온도센서를 위, 아래로 부착하여 기체, 액체의 존재여부를 판단하였다. LPG 사용량과 온수의 온도를 변화시키면서 각 부위의 온도를 기록하였다. 그 결과로부터 전달된 총 열량, 대수평균 온도차 등을 정의하였다. 또한 이제 역으로 생각하여 기화기를 어떤 조건으로 운전할 때 UA 값이 어떻게 변화되는지를 알 수 있고, 기화기를 설계할 때 코일의 길이를 어떻게 결정해야 할 지에 대한 기준이 마련된 것이다.

마지막으로, 이 연구는 50 kg/hr의 용량을 가진 LPG 기화기를 가지고 실험한 결과를 분석하였고 그 결과가 모든 기화기에 적용될 수 있다고 보기는 어렵기 때문에 모든 용량의 기화기에 대하여 UA 값을 구할 수 있는 관계식을 만들기 위해서는 여러 용량과 조건에서 반복실험이 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국가스안전공사 연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 한국가스안전공사, "LPG기화기 액유출 방지장치 성능향상 연구".
- [2] Robert H. Perry and Don W. Green, "Perry's Chemical Engineers' Handbook, 6th ed.", McGraw-Hill Book Company, NY.
- [3] B. Byron Bird, Warren E. Stewart and Edwin N. Lightfoot, "Transport Phenomena, 2nd ed.", John Wiley & Sons, Inc.
- [4] Reid, R., J. Prausnitz and T. Sherwood, "Properties of Gases and Liquids, 3rd ed.", McGraw-Hill Book Company, NY.