

전자 소자를 이용한 연소열 측정

임기원* · 전진용** · 이병준****

Measurement of Calorific Value Using Flame Calorimeter

Ki Won Lim, Jin Young Jun and Byeong Jun Lee

ABSTRACT

Calorific value of mixed gas, like liquefied natural gas (LNG), is strongly depends on its compositions which are affected by the mining place and producing time. The variation in calorific value have an direct influence on the combustion characteristics and performances of boiler, burner, vehicle, power plants etc. Thus, developing experimental method to measure exact calorific value is becoming an issue in the related industrial fields. Flame calorimeter is developed to get calorific value at the dynamic equilibrium state using electric substitution method. Refrigerant-11 carries heat from combustor and/or heater to the Peltier elements which pumped it out to the cooling water. It is found out that error in the measured calorific value of methane is 2.86% compared with the theoretical one. Developed design technique and the experimental data will be applied to design the national standard gas calorific value measuring apparatus.

Key Words : Flame calorimeter, Heating value, Peltier element

1. 서론

우리나라는 총 에너지의 97% 이상을 수입에 의존하고 있다. 그 중 천연가스는 총 수입 에너지의 약 14%(2008년, 에너지경제연구원자료)를 차지하고 있으며, 매년 증가하는 추세에 있다. 그리고 천연가스의 수요 증가와 자원의 고갈의 영향으로 수입국 또한 다양화 되고 있다.

천연가스는 메탄이 약 90% 이상, 에탄, 프로판, 부탄 등이 수 %를 차지하고, 부수분등 비연소 성분의 함유된 혼합연료로서 성분비가 일정하지 않고 생산지별로 다르다. 또한 동일한 생산지이더라도 생산 시기별로 성분의 차이가 나기 때문에 발열량이 변하게 된다. 이로 인해 천연가스를 사용하여 전기 혹은 열과 같이 변환된 형태의 에너지를 생산하는 업체는 직접적인 영향을 받게 된다. 그러므로 천연가스의 구성 성분에 따른 에너지 방출량을 검증하는 일은 국가 산업 전반에 많은 영향을 미치게 된다.

가스 연소열은 연료의 질을 정량화하는 한 방법으로 열량계(calorimeter)를 이용하여 측정한다. 열량계는 주로 물질의 비열, 반응열, 잠열 또는 연료의

발열량을 측정하는데 사용된다. 가스열량계에서 열량에 대한 정의는 대기압에서 일정한 양의 가스가 완전 연소되고 연소된 가스가 초기 반응물의 온도 상태로 되돌아갈 때 방출되는 열의 양이다[1]. 가스 열량계는 연소방식에 따라 나누면 크게 bomb 열량계, 촉매형 열량계, 화염 열량계 등으로 구분 할 수 있다[2].

Bomb 열량계는 일정한 질량(혹은 체적)의 연료를 산소가 차있는 밀폐된 용기에서 점화시켜 연소할 때 발생된 열을 열흡수 매체로 전달시켜 온도변화를 측정하여 발열량을 구하는 열량계이다. 이 방법은 장입한 연료를 밀폐된 공간에서 연소시켜 발생한 열을 측정하는 방법으로 비연속적인 계측법이다[3]. 이 방법은 정확한 양의 가스를 계측하여 장입하여야 하므로 고정도의 장비를 요구하게 된다.

화염형 열량계(flame calorimeter)는 일정한 양의 가스를 완전연소 시켜서 발생한 열을 열흡수 매체에 흡수시키고, 흡수된 열에 의한 온도 증가를 측정하여 발열량을 계산하는 장치로써 Junkers 열량계, Reineke 열량계, Thomas-Cambridge 열량계, Cutler-Hammer 열량계 등이 사용되어 왔다. 이들은 화염에 의해 발생된 열을 열교환기를 통하여 흐르는 열흡수 매체(공기 혹은 물)에 전달시키고, 상승된 온도로부터 열량을 구한다[4]. 이 방법들은 장치가 커지고 정확도가 떨어지는 단점이 있다.

* 한국표준과학연구원 유동음향 센터

** 영남대학교 기계공학부 대학원

***영남대학교 기계공학부

† 연락처자, bjlee@yu.ac.kr

촉매형 열량계에서는 다른 열량계와는 달리 화염을 형성하지 않고 촉매에 의한 화학반응으로 열을 발생시킨다. 그러나 촉매가 작동하기 위해서는 작동 온도가 높아야하고, 시간이 지남에 따라 촉매의 피독현상이 나타나며, 혼합된 가스인 경우에는 모든 가스를 완전히 산화시킬 수 없다는 단점이 존재한다[4].

최근에 Yuri A. Alexandrov는 Fig. 1과 같은 칼로리미터를 제작하였다[5]. 이 열량계는, 고온부에서 발생한 열을 증발하는 매체인 프레온이 흡수하여 증발하면 상부에 있는 Peltier 소자가 프레온 증기로부터 열을 제거하는 방식이다. 화염없이 내부에 놓인 히터에 전력(P_0)을 가하여 발생하는 열을 제거하는 실험과, 화염을 켜고 히터의 전력(P_{comp})을 줄여가면서 다른 조건들을 앞의 실험과 동일하게 만드는 실험으로부터 연소열을 구하였다. 이상적인 상황이면 $P_0 - P_{comp}$ 가 연소열이 된다. 입구온도의 표준편차가 0.002°C 인 환경에서 실험하여 메탄의 연소열을 불확도 0.1%로 구하였다.

현재 우리나라에서 혼합연료인 천연가스에 대한 열량 측정은 GC(gas chromatography)로 성분비를 측정하고 이를 바탕으로 열량을 추정하는 방법[1]을 사용하고 있다. 그러나 이 방법은 비연소 성분이나 예측하지 못한 성분으로 인하여 열량을 추정할 때 측정의 불확도가 커지는 단점이 있다.

연료의 발열량을 정확히 측정하기 위해서는 연료를 직접 연소하고 이때 발생한 열량을 측정하는 방법이 이상적이므로 표준화된 열량계의 설계 및 제작과 측정 절차에 대한 표준화가 필요하다.

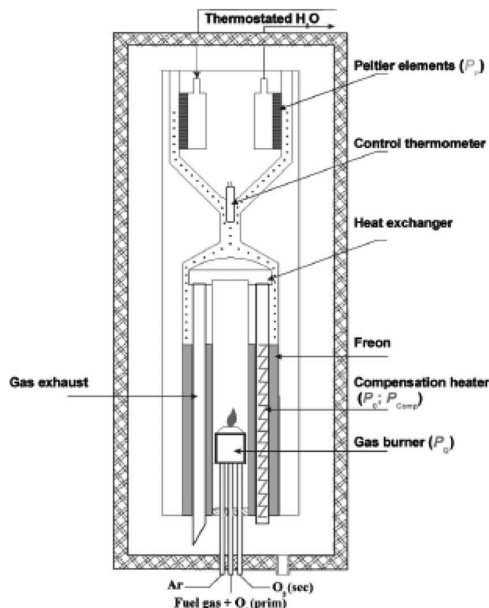


Fig. 1. Yuri A. Alexandrov의 flame calorimeter[5].

본 연구는 천연가스를 포함한 연료용 가스의 열량측정에 대한 국가표준장치를 개발하기 위한 기초 연구로써, Alexandrov의 모델을 기반으로 한 열량계를 제작하고 이를 일반적인 환경에서 작동시켰을 때의 성능평가 및 측정 불확도를 평가하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

가스열에 대한 국가표준을 세우기 위해서는 정확도가 높고 안정된 측정결과를 얻을 수 있는 모델의 선정이 중요하다. Bomb 열량계는 측정원리 및 구조상 정확히 측정된 미소한 양의 연료를 연소시켜 균일한 온도 분포를 맞춘 후 상대적으로 높은 정확도의 온도 측정으로부터 열량값이 얻어지므로 불확도를 줄이는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 비교적 최근에 Yuri A. Alexandrov가 Thermochemica가 발표한 논문[5]의 모델을 기본으로 하여 열량계를 제작하였다.

2.1. 실험장치

실험장치는 크게 열량계부, 냉각부, 단열부, 연료/산화제 공급부, 전력공급부 및 측정부로 나누어진다 (Fig. 2 참조).

열량계부는 열발생부, 열 흡수부, 제어용온도계 및 열량계 케이스로 구성되어 있다(Fig 3 참조). 열발생부는 내부에 화염이 형성되는 연소실, 기연가스가 지나가는 통로이면서 열교환을 하는 열교환 파이프 및 히터로 이루어져 있다. 열흡수부는 열량계 내부에 위치한 냉각핀과 냉매로 이루어져 있다. 연소실과 히터에서 발생한 열은 프레온-11(이후 R11)에 의하여 흡수되고 열량계 윗 천장에 놓인 냉각핀(3R system사, Iceball IB-40NB)에 의하여 외부로 방출된다. 열량계 케이스는 내부에 있는 냉매가 방출되는 것을 막아주고, 외부와 차단하기 위한 용기로서, 내부

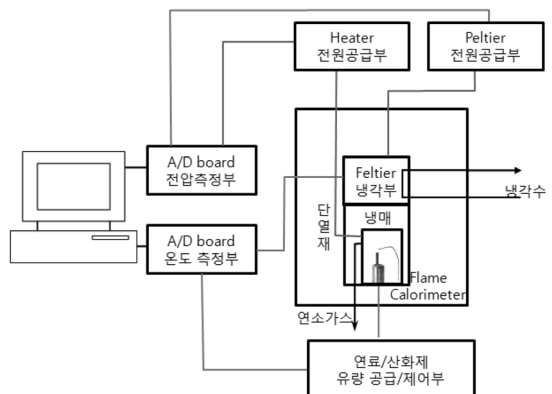


Fig. 2. Block diagram of experimental setup.

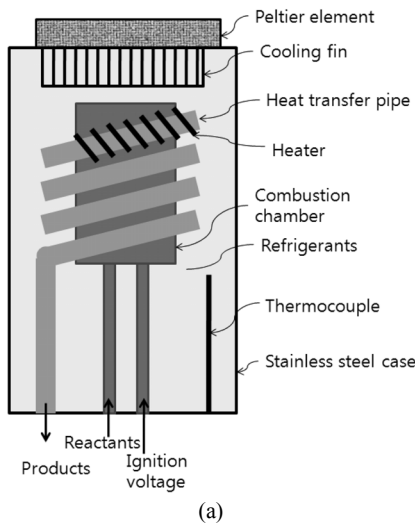


Fig. 3. Schematic diagram of flame calorimeter part(a) and shape of combustion chamber and heat transfer pipe(b).

에 연소실, 열전대, 전원공급선들이 조립된 상태에서 내부체적은 644 mL이다.

연소실은 내부에 화염을 형성하기 위한 부분으로 외경 25.4 mm의 스테인리스 파이프로 만들어졌다 (Fig. 3(b) 참조). 윗면은 냉매가 들어오지 못하도록 막혀있으며, 상부로부터 2.5 cm 지점에 외경 6.3 mm의 스테인리스 파이프를 용접하여 기연가스가 통과하여 나가도록 하였다. 연소열의 정의에 의하여 기연가스의 온도는 25°C이어야 하므로 이 파이프를 통한 열전달 효과를 증대시키고 내부에서 응축되는 수증기가 관을 막지 못하도록 하기 위하여 연소실을 감싸고돌면서 아랫방향을 향하게 하였다. 연소실 내부에는 화염을 형성하기 위해 연료와 산화제를 공급하는 관과 전기접촉용 전극이 삽입되어 있다. 연료와 일부의 산화제 및 희석제가 공급되는 1/16"관과 이를 동축으로 감싸고 있는 외경 1/4"의 산화제 공급관이 화염형성부를 형성한다.

연소실과 열교환파이프 외부에 전기히터가 감져 있다.

냉각부는 열량계부에서 전달되어 온 열을 외부로 방출하기 위한 펠티어소자(Acetec사 HMN 1550)와 이 펠티어소자를 냉각하기 위한 냉각수 공급장치로 구성되어있으며 열량계부의 케이스(Fig. 3(a) 참조) 윗표면에 부착되어 있다. 단열부는 열량계를 감싸고 있는 외경 200 mm, 두께 10 mm의 아크릴 통과 그 내부의 ceramic fiber 단열재로 구성되어 있다.

연료/산화제 공급부(MKS Co. 1179A, Full Scale의 $\pm 1\%$ 의 오차)는 화염을 만들기 위하여 사용되는 연료와 산화제를 일정한 양으로 공급하기 위한 부분이다.

전력제어부는 펠티어소자와 내부에 삽입되어있는

히터에 전력을 공급하고 제어하기 위한 부분으로, 펠티어 소자용은 아이텍 전자의 IT6153(정확도 : $0.02\% + 6 \text{ mV}$, $0.1\% + 15 \text{ mA}$)를, 히터는 아이텍 전자의 IT6720(전압 정확도 : $<0.01\% + 3 \text{ mV}$, 전류 정확도 $<0.01\% + 3 \text{ mA}$)를 사용하였다.

측정부는 온도와 전압을 측정하고 이를 저장하기 위한 부분으로 Omega 사의 DaqBoard/2000과 온도측정모듈인 DBK-82를 이용하였으며 온도측정의 정확도는 본 실험의 범위에서 ± 0.6 도이다. 냉각수 입출구, 연료입구, 기연가스 출구, 열량계 내부 2곳, 외부공기의 온도를 열전대를 사용하여 측정하였다.

2.2. 실험방법

본 연구에서 연소에 의해 발생하는 열량은 크게 화염이 있는 경우와 없는 경우의 두가지 실험으로부터 구한다. 동일한 온도로 30분 이상 유지되면 정상상태로 판단하였다.

화염이 있는 경우의 실험은, 화염이 켜져 있고 히터에 전력 P_1 이 공급될 때, 배기가스 출구의 온도를 25°C로 맞추기 위해 필요한 펠티어 구동 전력(P_2)과 열량계 내부의 온도 T_1 을 구하는 실험이다.

화염이 없는 경우의 실험은, 펠티어 소자에 공급되는 전력을 P_2 로 고정하고, 히터에 공급되는 전력(P_3)을 변화시키면서 Flame calorimeter 내부 열전대의 온도값이 T_1 으로 30분 이상 유지되도록 하는 히터 전력(P_3)을 구는 것이다.

모든 조건이 이상적이라면 $P_3 - P_1$ 이 공급된 연료의 발열량이 된다.

실험시에 발생하는 노이즈를 감소시키기 위하여 0.25초 동안에 800개의 데이터를 샘플링하고 이를 평균한 값을 1/4 Hz로 취득하였다.

실험에 사용된 유량은 메탄 48.82 mL/min, 1차 산소 28.25 mL/min, 2차 산소 117.1 mL/min, 아르곤 44.82 mL/min이다.

3. 결과 및 고찰

일반적으로 열량계 내부에서 발생된 열은 열량계 주위에 있는 열을 흡수하는 매체가 흡수하게 된다. 밀폐형 열량계는 열을 흡수한 열매체의 온도 증가로부터 열량을 구하게 되므로 동일한 열을 흡수하여도 온도 변화가 큰 물질이 유리하지만, 본 실험과 같은 개방형의 경우에는 온도변화가 적은 물질이 열 흡수 매체로 유리하므로 적당한 매체의 선정이 중요하다. 또한 화염열량계의 기본 원리상 배출되는 가스의 온도를 25°C로 하여야 하기 때문에 열량계 주위를 감싸고 있는 열흡수매체는 열이 흡수되더라도 25°C 주위를 유지할 수 있는 특성이 있어야 한다. 이러한 조건을 만족시키기 위해서는 25°C에서 상변화가 일어나는 물질이 가장 효과적일 것으로 판단된다. 열의 흡수를 위하여 고안된 물질이 냉매이므로 이를 중심으로 고찰하였다. Fig. 4는 여러 가지 냉매의 포화온도와 포화압력의 관계를 나타낸다. R11, R12, R134a 및 R22은 25°C에서 포화압력이 각각 0.10184, 0.63045, 0.64288, 1.0119MPa 임을 볼 수 있다. R11을 열흡수매체로 사용하면 포화압력이 대기압근처이므로 온도가 올라가더라도 장치가 고압에 노출되지 않아 안전성이 확보할 수 있고, 대기압에서의 포화온도가 24.86°C이므로 배출되는 가스의 온도를 열량 측정온도인 25°C로 맞출 수 있음을 알 수 있다.

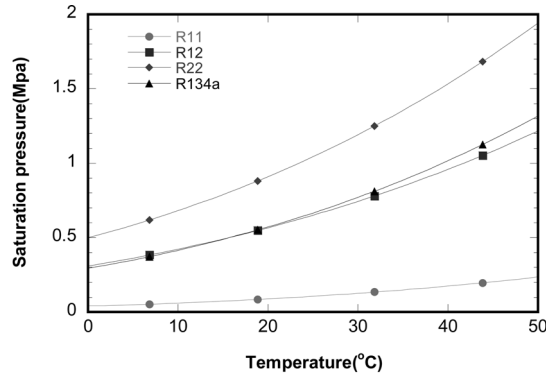


Fig. 4. Saturation temperature vs saturation pressure for various coolants.

또한 R11은 열용량이 물의 19.6%밖에 안되기 때문에 적은양의 열을 흡수하더라도 온도가 민감하게 변할 수 있으므로 본 실험의 열흡수매체로 채택하였다.

화염열량계 구성에서 중요한 변수중에 하나는 연소된 가스가 25°C까지 냉각되는데 필요한 열전달 파이프의 길이이다. 이를 결정하기 위하여 외경 12.7 mm, 6.3 mm, 1.6 mm의 관들을 모두 동축으로 제작하여 실험을 수행하였다(Fig. 5 참조). 실제 열량계의 연소기와 동일하게 가장 작은 관으로 메탄/ 1차 산소 혼합기, 6.3 mm의 관의 내부에는 2차 산소, 가장 큰 관으로는 아래에서부터 위쪽으로 냉각수가 흐르도록 보조 실험장치를 제작하였다. R11은 상온에서 증발하므로 24°C의 물로 실험을 수행하여 노즐 출구로부터 높이에 따른 배기가스 온도의 변화를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 하류로 가면서 연소가스의 온도

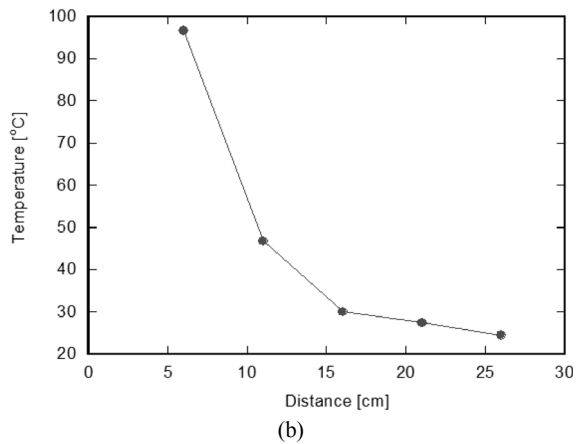
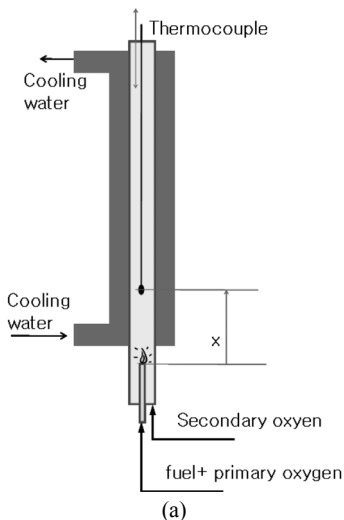


Fig. 5. Auxiliary experimental setup to determine the length of heat exchanger pipe(a) and temperature changes along burnt gas.

가 급격히 감소하여 25 cm 높이에서는 기연가스의 온도가 주위의 수온과 유사하게 되는 것을 볼 수 있다. 본 실험에서는 충분한 열교환을 위하여 열교환 파이프의 길이를 81 cm로 하였다.

3.1. 화염이 있는 경우(case A)

이 실험의 목적은 열량계 출구에서의 배기가스의 온도 25°C로 유지하면서 히터에 의하여 발생하는 열과 연소에 의하여 발생한 열을 외부로 배출하기 위해 필요한 펠티어 소자의 조건을 구하는 것이다. 편의상 펠티어 소자에 공급되는 전력과 냉각수량을 일정하게 유지하고 히터에 공급되는 전력을 변화시켜 배기가스 출구의 온도를 맞추는 실험으로 변경하였다.

Fig. 6은 배기가스 온도(T_{exit})와 열량계 내부에 있는 열전대로 측정된 온도인 제어부 온도(T_{control})의 시간에 따른 변화를 나타낸다. 실험시작 후 250분이 경과한 후에는 배기의 온도가 25°C로 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. 그러나 이 경우에도 배기가스의 온도가 약간씩 변동하고 있는 것과 제어부의 온도 변화를 배기온도가 약 15분 늦게 추종하고 있음

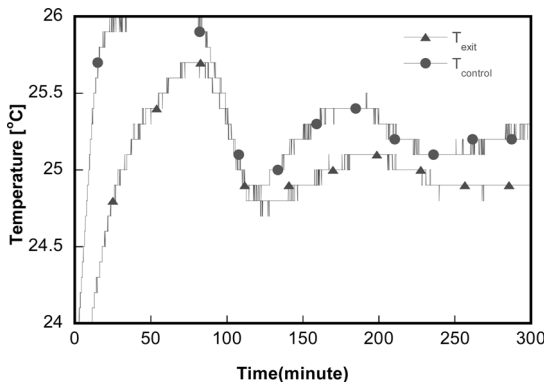


Fig. 6. Temporal temperature changes at the exit of burnt gas and within the calorimeter(case A).

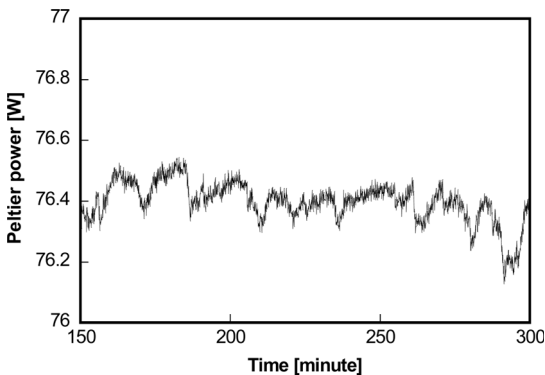


Fig. 7. Temporal changes in power for Peltier elements (case A).

을 볼 수 있다. 이는 열량계 내부의 자연대류에 기인한 내부유동에 의한 것으로 추정된다. 제어부 온도는 화염이 있는 경우와 없는 경우의 두 실험에서 동일한 내부 조건을 나타내는 척도로 사용되어진다.

Fig. 7은 펠티어에 공급되는 전력의 시간에 따른 변동을 나타낸다. 펠티어 소자에 일정하게 공급되어야 할 전력이 전력공급 장치의 한계로 인하여 시간에 따라 변동하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 변동은 실험결과와 부정확성으로 이어지게 된다.

3.2. 화염이 없는 경우(case B)

펠티어 소자로 공급되는 전력, 주위온도, 냉각수량, 냉각수 온도 등 다른 조건을 변화시키지 않고, 히터에 공급되는 전력의 변화만으로 내부 온도를 case A와 동일하게 맞추어야만 이론적으로 정확한 열량을 구할 수 있다. 따라서 화염이 있는 경우의 실험과 동일한 전력을 펠티어 소자에 공급하면서, 열량계 내부의 온도인 T_{control} 을 case A와 동일한 값인 25.37°C가 되도록 히터의 출력을 변화시키며 실험을 수행하였다.

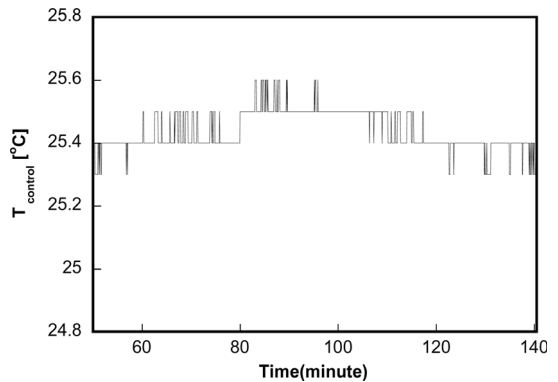


Fig. 8. Temporal temperature changes within the calorimeter(case B).

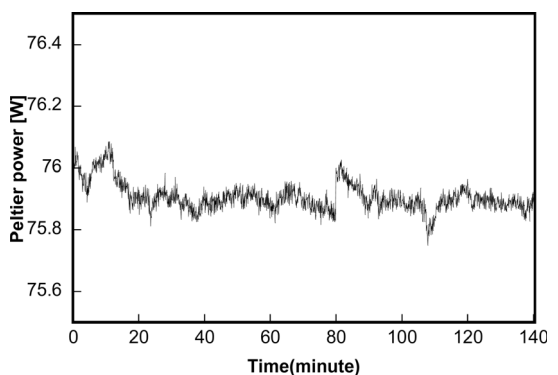


Fig. 9. Temporal changes in power for Peltier elements (case B).

Fig. 8은 시간에 따른 열량계 내부의 온도 변화를 나타낸다. 100분이 경과한 다음에는 열량계 내부의 온도가 Case A의 결과와 유사하게 25.4도 근처에서 유지되고 있음을 볼 수 있다. Fig. 9는 펠티어에 공급되는 전력의 변화를 나타낸다. 전력을 일정하게 공급하도록 설정을 하였지만 case A와 마찬가지로 장치의 한계로 인하여 전력이 미소하게 변동하고 있음을 볼 수 있다.

3.3. 두 경우의 비교

case A 경우에 30분 이상 배기가스 출구 온도가 25°C로 유지되는 구간의 온도 및 동력의 평균값과, case B의 열량계 내부 온도가 30분 이상 동안 case A와 0.02도 이내로 유지되는 구간의 평균값을 table 1에 나타내었다. 두 경우를 비교해보면 본실험에서 외부환경에 해당하는 외기의 온도, 냉각수 수온이 서로 차이가 나고 있음을 볼 수 있다. 또한 일정하게 유지되어야 할 펠티어 동력과 냉각수에 전달된 동력 등이 약간의 차이를 나타내고 있음을 볼 수 있다. Alexandrov 형태의 열량계는 근본적으로 외부조건인 대기온도, 냉각수 유량과 온도 및 펠티어 전력이 두 경우에 동일하게 유지되어야 정확한 열량을 구할 수 있으나, 본 연구는 환경이 정확히 제어

되는 항온항습실이 아닌 일반 실험실에서 수행되었다. 이에따라 여러 가지 손실이 발생하므로 이러한 손실들을 고려하여야 발열량을 구할 수 있다.

3.4. 열량 계산 및 보정

전술한 바와 같이 외기 온도, 냉각 수온의 변화 및 각 동력의 차이를 고려하기 위하여 Fig. 10과 같이 화염을 제외한 모든 부분을 검사체적으로 하여 에너지 정산을 하였다.

화염이 있는 경우(case A)에는, 화염으로부터 열 (P'_{flame}), 펠티어소자에 공급된 전력($P'_{Peltier}$), 히터에 공급된 전력(P'_{heater})이 검사체적으로 공급되고, 냉각수로 P'_{water} , 열량계에서 외부로의 에너지 손실 P'_{Loss} 를 배출하게 된다. 이에 대하여 에너지 보존식을 표시하면 다음과 같다.

$$\text{Case A : } P'_{water} = P'_{heater} + P'_{Peltier} + P'_{Loss} + P'_{flame} \quad (1)$$

화염이 없는 경우(case B)에는 이러한 에너지 중에 화염에 의한 열발생이 없으므로 이를 상첨자 없이 표현하면 다음과 같다.

$$\text{Case B : } P_{water} = P_{heater} + P_{Peltier} + P_{Loss} \quad (2)$$

Table 1. Measured temperature and power

Case		출구온도	열량계내부 온도	대기온도	냉각수 출구온도	냉각수 입구온도	히터동력 (W)	펠티어동력 (W)	냉각수동력 (W)
A	평균	25.02	25.37	21.13	23.10	20.85	19.61	76.42	121.24
	표준편차	0.044	0.044	0.081	0.010	0.050	0.006	0.033	2.662
B	평균	25.22	25.39	20.46	22.92	20.70	47.41	75.89	119.77
	표준편차	0.042	0.051	0.050	0.039	0.019	0.061	0.023	2.208

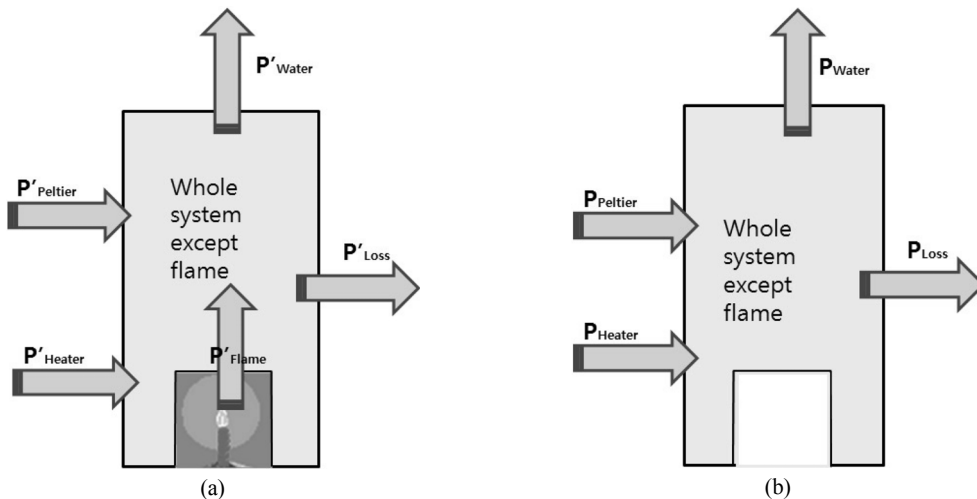


Fig. 10. Energy balance for the flame calorimeter (a) case A, (b) case B.

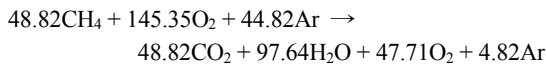
공기온도의 변화가 없다면 손실된 열량은 두 경우 모두 일정할 것이나, 본 실험의 경우와 같이 외기 온도가 열량계 내부보다 더 내려간 case B의 경우(Table 1 참조)에는 화염이 있을 때에 비하여 더 많은 손실이 있다. 열손실을 간단한 모델로부터 구하면 본 실험에서는 $P_{Loss} = P'_{Loss} + 0.07$ 이다.

화염의 에너지 방출 즉 발열량을 구하기 위하여 위의 두식을 사용하여 P'_{flame} 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

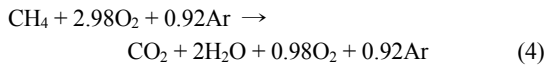
$$P'_{flame} = (P'_{Water} - P_{water}) + (P'_{heater} - P_{heater}) + (P'_{Peltier} - P_{Peltier}) + (P_{Loss} - P'_{Loss}) \quad (3)$$

윗 식에 Table 1의 값을 대입하면 본 연구에서 P'_{flame} 는 28.81 W이다. 공급되는 메탄의 유량을 고려하여 본 실험의 경우에 메탄의 발열량을 구하면 53.91 MJ/kg이다.

측정된 발열량의 정확도를 평가하기 위해서 메탄의 엔탈피를 계산하여 비교하면 다음과 같다. 공급 유량을 고려한 이론적인 화학 반응식은,



혹은



평형 조성을 구하는 코드인 STANJAN[7]을 사용하여 반응물 조건으로부터 생성되는 미소화합물까지 고려한 생성물에 대한 엔탈피 값을 구하면 Table 2와 같다. 생성물에 포함된 물이 액체로만 있는 경우는 생성물 1, 액체와 기체가 평형상태로 있는 경우는 생성물 2로 표시하였다.

반응열은 25°C의 반응물이 연소하여 액체 상태로만 존재하는 물을 함유하는 25°C의 생성물이 되는 경우에 해당하므로, 메탄에 대하여 Table 2를 이용하여 구하면 $-4666.8 - (-60161.8) = 55495 \text{ kJ/kg} = 55.495 \text{ MJ/kg}$ 이다. 이 값을 기준으로 하여 실험오차를 계산하면 2.86%이다.

본 연구에서의 이러한 오차의 원인으로는 크게 생성물과 반응물의 온도가 25°C로 유지되지 못한 것, 생성된 물이 모두 액체 상태가 아닌 것 및 측정 장비의 오차에 기인하는 것으로 나눌 수 있다.

본 실험의 경우에는 유체의 유속이 느리므로 장기간 대기와 열교환할 시간이 길어 공급되는 연료, 산소, 아르곤의 온도를 대기온도라고 가정할 수 있다. 생성된 물이 모두 액체 상태가 아니고 일부는

Table 2. Enthalpies for the reactants and products in equation (4) calculated by STANJAN code

	생성물 중에 H ₂ O의 물분율		엔탈피 kJ/(kg CH ₄)
	Vapor	Liquid	
21.13°C 반응물			-4696.0
25.00°C 반응물			-4666.8
25.00°C 생성물 1	0	4.09E-01	-60161.8
25.00°C 생성물 2	1.91E-02	3.90E-01	-59905.4
25.02°C 생성물 1	0	4.09E-01	-60159.0
25.02°C 생성물 2	1.93E-02	3.89E-01	-59899.8

증기 상태로 있는 것에 기인한 오차는 위의 Table 2로부터 구할 수 있다. 반응물의 온도(21.13°C)가 낮은 것과 생성물의 온도(25.02°C)가 높은 것 등은 모두 발열량을 낮추는 방향이므로 위의 Table 2에서 $\{(25^\circ\text{C} \text{ 반응물의 엔탈피}) - (21.13^\circ\text{C} \text{ 반응물의 엔탈피})\} + \{(25.02^\circ\text{C} \text{ 생성물 2의 엔탈피}) - (25^\circ\text{C} \text{ 생성물 1의 엔탈피})\} = 291.2 \text{ kJ/(kg CH}_4\text{)}$ 가 되고 이를 보정해 주면 오차는 2.33%가 되어 보정없이 비교한 값에 비하여 편차가 약간 줄어드는 것을 알 수 있다. 따라서 고정밀도의 열량을 구하기 위해서는 입구 반응물의 온도와 증기의 포화도 등을 고려하여야 한다.

그 외에 측정 불확도에 영향을 미칠 수 있는 요소는 측정기기에 기인하는 것으로 판단된다. 열량 측정에 사용되는 유량계, 온도계 등 측정기기는 측정 불확도에 직접적으로 영향을 미친다. 외부온도 변화에 기인한 열손실 또한 불확도에 영향을 미치게 되므로 단일 혹은 일정한 온도 유지가 필수적이다.

화염 열량계에 사용되는 계측기기의 정확한 교정과 실험과정에서 확인된 불확도 요소를 줄이기 위한 설계를 보완하면 보다 정확한 화염 열량계를 제작할 수 있을 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 한국표준과학연구원 기본연구사업의 ‘신수요 대응 기반측정표준확립연구’의 지원으로 수행되었습니다.

4. 결론

천연가스와 같이 여러 성분이 혼합된 가스 연료의 열량을 직접 측정할 수 있는 열량계를 제작하여 실험으로 그 성능을 확인하였다.

이론적인 엔탈피 값과 비교한 열량 측정의 불확도 평가 결과 2.86%의 편차를 보였다.

제작된 열량계는 연소에 의하여 생성된 열을 전

기적인 신호로 변환시켜 측정하는 원리를 사용하고, 가스가 연속적으로 연소되면서 열량을 측정하므로 측정정확도와 안정도를 상대적으로 높일 수 있다. 따라서 본 연구의 불확도 평가 및 실험은 국가표준 기급 열량측정 장치 개발의 기술기반 확립 및 국가표준기급 열량계 개발에 활용될 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] KS M ISO, 2002, Natural gas-Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe index from composition.
- [2] 日本化學會 編, 2003, 實驗化學講座 6, 第 5版, 丸善株式會社.
- [3] L. I. Vorob'yov, T. G. Grishchenko, and L. V. Dekusha, 1997, Review : bomb calorimeters for determination of the specific combustion heat of fuel, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 70, No. 5.
- [4] P. Ulbig, D. Hoburg, 2003, Determination of the calorific value of natural gas by different methods, *Thermochimica Acta*, Vol. 382.
- [5] Y. I. Alexandrov, 2002, Estimation of the uncertainty for an isothermal precision gas calorimeters, *Thermochimica Acta*, vol. 382.
- [6] Yunus A Cengel, 2004, "Heat transfer," 2ed, McGraw-Hill Korea.
- [7] Reynolds, W. C., STANJAN-Interactive computer programs for chemical equilibrium analysis, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, 1995.

접수일 : 2010. 07. 21
 심사완료일 : 2010. 09. 10