

〈技術論文〉

## 火焰으로부터의 辐射 热流束의 計測(Ⅰ) —热流束計의 設計 및 檢定—

정종수\* · 인종수\*\* · 신현동\*\*\* · 김승수\*\*\*\*

(1989년 10월 16일 접수)

### A Study on the Measurement of Radiative Heat Flux from the Flame(Ⅰ) —Design and Calibration of a Heat Flux Meter—

J. Jurng, J.S. In, H.D. Shin and S.S. Kim

**Key Words:** Heat Flux(熱流束), Heat-Flux Meter(熱流束計), Calibration(檢定), Resolution(分解能), Electromotive Force(起電力, e.m.f.)

#### Abstract

A heat-flux meter has been designed and manufactured to measure the heat flux from the flame. A calibration method of the heat-flux meter by a calibration furnace has also been proposed. The K-type (Chromel-Alumel) thermocouple material has been used as the material for the heat-flux meter. The electromotive force (e.m.f.) from the K-type thermocouple is shown to be linearly proportional to the heat flux absorbed. The characteristics of the heat-flux meter become better as the radius of heat absorbing disk becomes larger and its thickness thinner.

#### 기호설명

$A_1, A_2, A_3$	: 표면적 (surface area) [ $m^2$ ]
$b, c$	: 기전력 특성식의 상수 [식 (2)]
$C_o$	: 열유속계 특성식 상수 [식 (5)] [ $kcal/(m^2 \cdot hr \cdot mV)$ ]
$E_d$	: 기전력 (起電力, electromotive force) [ $mV$ ]
$k$	: 열전도율 (heat conductivity) [ $kcal/(m \cdot hr \cdot K)$ ]
$k_o$	: 기준 온도에서의 열전도율
$q$	: 열유속 (heat flux) [ $kcal/(m^2 \cdot hr)$ ]
$R$	: 원판 반경 [mm]
$T$	: 절대온도 (absolute temperature) [K]
$t$	: 원판 두께 [mm]

$\alpha$	: 온도에 따른 열전도율의 1차 상수 [식 (1)]
$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$	: 표면 방사율 (放射率, emissivity) [-]
$\sigma$	: Stefan-Boltzmann 상수 [ $= 4.876 \times 10^{-8} kcal/(m^2 \cdot hr \cdot K)$ ]

#### 1. 서 론

화염으로부터의 열유속 (熱流束, heat flux), 특히 복사 열유속을 측정하는 것은 실제 보일러로 내 등에서의 전열 (傳熱) 상태의 해석을 위해서 매우 중요하다. 열유속을 측정하기 위한 열유속계 (熱流束計, heat flux meter)는 1950년대에 최초로 나타나고 있는데, 그 중요성에 비하여 개발이 늦어진 것은 복사 열전달 현상 자체가 매우 복잡하고, 그 측정이 어려운 점이 주 원인이라고 생각된다<sup>(1,2)</sup>.

본 연구는 열유속을 측정하기 위한 열유속계의 설계, 제작 및 검정 방법에 대한 연구이다. 열전대

\*정회원, 한국과학기술연구원 공조·환경제어연구실

\*\*한국과학기술원 기계공학과

\*\*\*정회원, 한국과학기술원 기계공학과

금속 재료 중에서 비교적 열전도율이 작은 chromel을 재료로 열유속 감지부(感知部)인 원판을 만들고, chromel과 쌍을 이루는 alumel을 재료로 하여 원판 주위의 몸체를 제작하였다. 원판에 도달하는 열유속에 의하여 발생하는 원판 중심부와 주변부와의 온도차에 의한 열전대 재료의 기전력을 이용하여 열유속계를 사용한다. 제작한 열유속계를 실제로 사용하기 위해서는 검정이 필요하며, 이를 위하여 검정로를 고안, 제작하여 검정을 수행하였다. 또한 열유속계의 설계변수의 변화에 따른 기전력 특성의 변화를 조사하기 위하여 실험을 수행하였으며, 실제의 보일러로에 대한 실험을 수행하였다.

## 2. 열유속 계측 원리

열유속 측정기(heat flux meter, 이하 열유속계)는 열유속 감지부(sensor)가 열유속을 감지하는 방식에 따라 분류하면, 총탄형(slug type), 얇은 원판형(thin disk type), 얇은 막형(thin film type), 두꺼운 막형(thick film type), 얇은 판형(wafer type) 등이 있다<sup>(3)</sup>.

얇은 원판형은 평형 상태형(steady state type), 또는 가든 게이지(Gardon gauge)라고도 하는데, 열전도율이 비교적 낮은 열전대(thermocouple)급 속으로 되어 있는 원판(disk)과 주변에 원판 재료와 열전대를 이루는 금속재의 몸체(body)가 접해 있다. 원판의 후부와 몸체는 진공으로 이루어진 폐공간을 이루고 몸체에 냉각수를 순환시킴으로써 원판 표면에 열유속이 흡수되면 원판의 중앙과 가장 자리에 온도차가 발생하여 이를 열전대 원리에 의해 기전력으로 전환시킬 수 있다. 따라서, 이 형은 기전력에 의해 열유속을 측정하는 방법이다. 이 형의 열유속계는 냉각수의 순환이 필요하고 측정할 수 있는 열유속 범위의 제한이 있으나 반응이 비교적 빠르며, 측정되는 기전력이 직접 열유속과 비례함으로써 측정값 해석이 용이하고 열유속이 시간에 따라 변화하는 곳에서 오랫동안 측정이 가능한 장점이 있다<sup>(3)</sup>.

따라서 본 연구에서는 이런 장점을 지닌 얇은 원판형의 열유속계에 대하여 연구하였는데, Fig. 1은 열유속 감지부의 개략도이다<sup>(4)</sup>. 감지부는 원판과 원판 주변에 연결된 몸체로 이루어져 있으며 몸체 및 원판으로 둘러싸인 내부는 진공으로 되어 있다.

원판 내면의 중앙 A점과 몸체 내측면의 임의의 점 C에 몸체와 같은 열전대선을 각각 접속하고 몸체와 원판 재료는 열전대를 형성하는 금속 재료를 선택한다. 몸체 후부에 냉각수를 흐르게 하고 원판 표면측에 열유속을 주면, 열유속계 감지부에 흡수된 열은 냉각수에 흡수된다. 여기서 원판상에서 흡수된 열유속은 원판 중앙으로부터 반경 방향으로 흘러 원판의 외주에 접해 있는 몸체로 들어간다. 따라서, 원판상의 온도는 A점에서 최고가 되고 B 접면에서 최저가 되는데, 전기 회로로 생각하면, [리드선(몸체와 동일 재료)-C접점-몸체-B접면-원판-A접점-리드 선(몸체와 동일 재료)]의 회로가 되어, A점을 고온 접점, B접면을 저온 접점으로 하는 (몸체재-원판재)의 열전대가 된다. 따라서, A접점과 B접면 사이에 온도차가 있으면 열전대의 원리에 의해 이 회로로부터 온도차에 의한 기전력을 측정할 수 있다<sup>(5,6)</sup>. 이 기전력은 원판의 A점과 B접면 사이의 온도차에 비례하고, 또한 A점과 B접면 사이의 온도차는 원판 표면이 흡수한 열유속에 비례하므로, 이러한 관계로부터 기전력을 측정함으로써 원판 표면이 흡수하는 열유속량을 측정할 수 있다.

본 열유속계에 대해 기전력과 열유속 간의 관계식을 이론적으로 유도하기 위하여 다음과 같은 가정을 사용하였다.

- (1) 열유속계 원판 표면에서 일정한 열유속( $q$ )이 흡수된다.

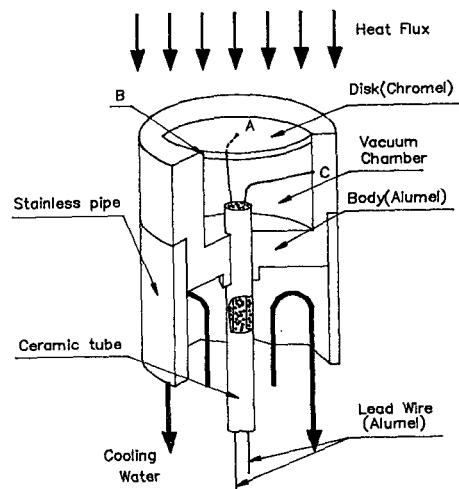


Fig. 1 Sensor part of heat-flux meter

(2) 열유속계는 Fig. 1과 같이 몸체와 원판에서의 온도 분포는 중심에 관하여 축대칭이다.

(3) 원판의 두께( $t$ ) 방향의 온도 구배는 무시할 수 있다.

(4) Fig. 1의 열유속계 진공실(vacuum room) 내에서의 열전달은 무시한다.

(5) Fig. 1과 같이 냉각수를 순환시켜 몸체 후부를 냉각하므로, 원판은 열적 평형 상태에 도달되었단다고 가정한다.

(6) 원판 재료의 열전도율은 온도에 따라 선형적으로 변화한다.

$$k = k_0(1 + \alpha T) \quad (1)$$

(7) 열전대의 온도차에 따른 기전력은 다음과 같이 2차식으로 나타낼 수 있다.

$$E_a = b(T_A - T_B) + c(T_A^2 - T_B^2) \quad (2)$$

이상과 같은 가정하에 Fig. 1의 열전대에서 원판에 도달하여 흡수되는 열유속  $q$ 와 A와 B점 사이의 온도차와의 관계를 열전도 방정식으로부터 구하면, 온도차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_A - T_B = \frac{qR^2}{4k_0t} \frac{1}{1 + \alpha(T_A + T_B)/2} \quad (3)$$

식 (2)에 식(3)을 대입하여 열유속  $q$ 와 기전력  $E_a$ 와의 관계를 구하면 아래와 같다.

$$q = \frac{4k_0t}{bR^2} \frac{1 + \alpha(T_A + T_B)/2}{1 + c(T_A + T_B)/b} \quad (4)$$

그런데, 일반적으로  $\alpha$ 나  $c/b$ 의 값은 매우 작은 값이고, 대략  $\alpha/2 \approx c/b$ 라고 할 수 있으므로<sup>(8)</sup>, 식 (4)를 아래 식과 같이 간단하게 정리할 수 있다.

$$q = \frac{4k_0t}{bR^2} E_a = C_o E_a \quad (5)$$

식 (5)에서  $C_o$ 는 열유속계의 재질 및 형상에 따른 상수이므로, 열유속  $q$ 와 기전력  $E_a$ 간에는  $C_o$ 를 기울기로 하는 선형적 비례 관계가 성립된다.

또한 열유속계의 기전력  $E_a$ 는 열유속계의 형상 및 재질에 따라 다음의 특성을 갖는다.

(1) (원판 재료/몸체 재료)의 열전대에서 온도차에 대한 기전력 특성식의 1차 계수  $b$ 에 비례하고, 원판 재료의 열전도율  $k$ 에 반비례한다.

(2) 원판 두께  $t$ 에 반비례하고, 원판 반경  $R$ 의 제곱에 비례한다.

### 3. 열유속계의 설계

열유속 계측 원리에 의해 설계된 열유속계의 개략도가 Fig. 2에 표시되어 있다. 본 열유속계는 다음의 점에 유의하여 설계하였다.

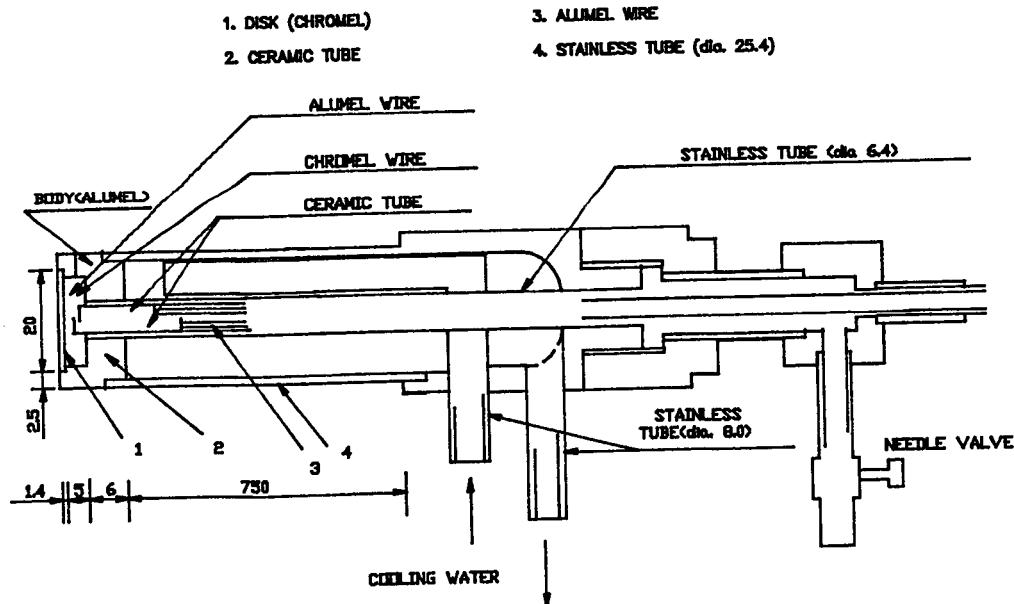


Fig. 2 Heat-flux meter

(1) 열유속계에서 열을 흡수하는 감지부는 Fig. 1에 표시된 구조로 설계되었다.

(2) Fig. 1에서 원판과 몸체의 재료는 각각 열전대를 형성하는 재료를 선택하여야 한다. 그런데 식(5)에 의하면 같은 열유속량에 대하여 기전력은 원판의 열전도율에 반비례하므로, 원판 재료로는 비교적 열전도율이 작은 열전대 재료인 chromel (90% Ni, 10% Cr), 그리고 몸체재료는 alumel (94% Ni, 3% Mn, 2% Al, 1% Si)을 사용한다.

(3) 원판 표면이 흡수하는 같은 열유속량에 대하여 가능한 한 기전력값이 크게 출력되도록 설계한다. 식(5)에 의하면 같은 열유속량에 대하여 기전력값은 원판 반경의 제곱에 비례하고 원판 두께에 반비례하므로 원판 반경  $R$ 은 크게, 두께  $t$ 는 가능한 한 작게 설계하였다. ( $R=10\text{mm}$ ,  $t=1.4\text{mm}$ )

(4) Fig. 1에서와 같이 진공실을 진공으로 만들기 위해 Fig. 2에서와 같이 내관을 통해 후부에서 공기를 뽑아낼 수 있도록 하였다.

(5) Fig. 1에서와 같이 냉각수를 몸체 후부에 순환시키기 위하여 Fig. 2에서와 같이 냉각수 유입관을 사용하여 냉각수가 순환하도록 하였다.

(6) Fig. 1에서와 같이 중앙점 A와 원판과 몸체의 접촉점 B의 온도차에 의해 발생하는 기전력값을 측정하기 위하여 Fig. 2와 같이 Alumel 선을 A와 C점에 각각 용접하여 내관을 통해 열유속계 외부로 뽑아냈다.

(7) 검정시 원판의 온도를 측정하기 위하여 Fig. 2에서와 같이 Chromel선을 C점에 용접하여 내관을 통해 외부로 뽑아냈다.

#### 4. 열유속계의 검정

##### 4.1 검정로의 설계

본 열유속계를 검정하기 위하여 Fig. 3과 같이 검정로 내면, 받침대와 열유속계 원판 표면으로 폐공간을 형성하게 하고 각 내면의 온도 및 방사율(emissivity)을 알 수 있다면 검정로 내면으로부터 열유속계 원판 표면에 전달되는 열유속을 계산할 수 있어 열유속계에서 측정되는 기전력과 그때의 열유속계 원판 표면에 전달되는 열유속의 관계를 구할 수 있다. 또한, 열유속계의 검정시 검정로의 온도를  $1000\text{K}$ 정도로 높게 함으로써, 검정로 내면으로부터 원판 표면으로 전달되는 열유속 중 대류 및 전도에 의한 열전달은 상대적으로 무시하고, 복

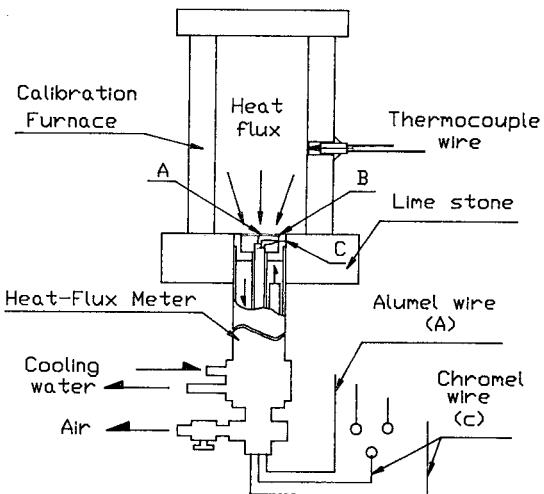


Fig. 3 Calibration furnace

사 열전달 만을 고려한다.

Fig. 3의 검정로 내면과 열유속계 원판 표면 및 받침대가 이루는 폐공간에서 원판의 표면적을  $A_1$ , 검정로 내부 표면적을  $A_2$ , 받침대 표면적을  $A_3$ , 원판 표면 온도를  $T_1$ , 검정로 내면 온도를  $T_2$ , 받침대 표면 온도를  $T_3$ , 원판 표면의 방사율을  $\varepsilon_1$ , 검정로 내면의 방사율을  $\varepsilon_2$ , 받침대 표면의 방사율을  $\varepsilon_3$ 이라고 하고, 각각의 온도 및 방사율을 균일하다고 가정하면 복사에 의해 검정로 내면에서 원판 표면에 전달되는 열유속  $q$ 는 아래와 같이 주어진다<sup>(7)</sup>.

$$q = \frac{\left[ \sigma(T_2^4 - T_1^4) + \frac{A_1}{A_2} \varepsilon_3 \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} (T_3^4 - T_1^4) \right]}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left( \frac{A_1}{A_2} + \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \frac{A_3}{A_2} \right)} \quad (6)$$

한편  $A_1/A_2$ ,  $A_3/A_2$ 가 충분히 작은 값을 갖는다면 식(6)을 다음 식과 같이 정리할 수 있다.

$$q = \varepsilon_1 \sigma (T_2^4 - T_1^4) \quad (7)$$

식 (2)에서 원판 표면이 흡수하는 열유속  $q$ 값은 원판 표면의 방사율  $\varepsilon_1$ 에 비례하고 검정로 내면의 절대 온도의 4승과 원판 표면의 절대 온도 4승의 차에 비례하므로 검정로 내면의 온도를 원판의 내면 온도보다 상당히 크게 하면 원판 표면이 흡수하는 열유속은 검정로 내면의 절대 온도 4승에 비례한다.

이상과 같은 원리를 근거로 검정로를 다음과 같

은 점에 유의하여 제작하였다.

(1) 열유속계 검정시, 열유속계 원판 표면이 흡수하는 열유속을 구하는 식으로써 식 (7)을 사용하기 위하여  $A_1/A_2$  및  $A_3/A_2$ 값을 작게 하여 제작하였다( $A_1/A_2=0.01$ ,  $A_3/A_2=0.08$ ).

(2) 검정로 내면 온도를 균일하게 하여 온도 구배가 생기지 않도록 열용량이 큰 재료(주강)로 두께를 크게 하였다(약 14mm).

(3) 대기 중에서 고온으로 가열된 검정로의 냉각 속도를 충분히 작게 하기 위하여 검정로를 2중관으로 제작하고 내관과 외관 사이는 공기로 채웠다.

(4) 검정로 내면의 온도 측정에 대해서는 내면을 폐공간으로 하기 위해서 열전대를 외측으로부터 삽입하였다. 그러나 측정하려는 온도는 검정로 내면의 온도이므로 열전대의 접점이 복사 전열을 받지 않도록 내부로부터 1mm정도까지 외부로부터 구멍을 뚫어 열전대를 삽입하였다. 사용한 열전대는 K-type 열전대(chromel/alumel)이다.

## 4.2 검정 및 실험 방법

열유속계의 검정을 하기 위하여 Fig. 4의 검정 장치를 사용하여 검정을 하였다. 검정 실험은 다음과 같은 순서로 하였다.

(1) 열유속계 원판 표면을 처리하여 깨끗하게 한 후 냉각수를 순환시키고, 열유속계의 진공실을 진공 펌프를 사용하여 진공으로 만든다.

(2) 열유속계의 기전력 및 원판 표면 온도를 측정하기 위한 리드선들을 Fig. 4에 표시된 것과 같이 multipoint selector에 연결한다.

(3) 검정로를 전기로에서 일정한 온도까지 가열한 후 Fig. 3에 표시된 것과 같이 검정로 내면과 열유속계 원판 표면이 폐공간을 형성하도록 반침대 위에 놓고 검정로 내면 온도 측정용 열전대를 multipoint selector에 연결한다.

검정로 내면이 원판 표면에 전달해 주는 열유속과 그때의 열유속계 기전력 측정 방법은 다음과 같다. Fig. 3에 표시된 바와 같이 검정로 내면 온도를 K-type 열전대로 측정한다. 또한, Fig. 1의 몸체 C점에 접속되어 있는 alumel 선 (A) 및 chromel 선 (C)으로부터 몸체 C점의 온도를 측정한다. 원판의 중앙 (A)에 접속되어 있는 alumel 선 (A) 및 몸체 (C)에 접속되어 있는 alumel 선 (C)에서 기전력 ( $E_d$ )을 측정한다. 기전력 및 몸체 C점의 온도로부터 원판의 온도를 계산한다. 이상과

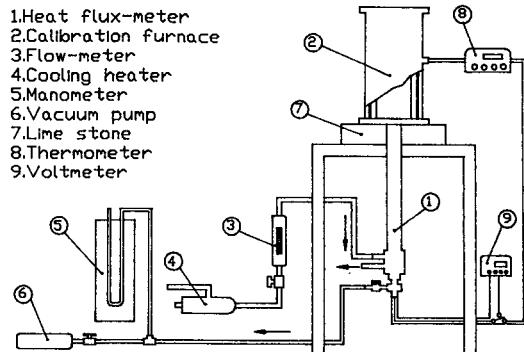


Fig. 4 Apparatus for the calibration and experiments

같이 측정한 검정로의 내면 온도 및 원판의 표면 온도를 식 (7)에 대입하여 검정로 내면에서 원판 표면에 도달되는 열유속값을 구한다. 따라서 검정로 내면으로부터 원판 표면에 도달되는 열유속값에 따른 열유속계의 기전력을 구할 수 있다.

이상과 같은 방법으로 열유속계를 검정하면서 원판 표면 상태, 열유속계 냉각수의 온도 및 유량 변화, 진공실의 진공도 등의 변화에 따른 열유속계의 특성의 변화를 조사하였다. 원판의 표면 상태에 따른 열유속계 특성의 변화를 조사하기 위하여 원판의 표면에 carbon black 및 lamp black으로 coating을 하여 실험하고 coating을 하지 않은 경우와 비교하였다. 이때 냉각수 유량 및 온도는 일정하게 하고 진공실의 진공도는 10mmHg(abs)으로 하였다. 원판 표면에 coating을 할 때는 원판 표면에 oil을 접착제로 하여 carbon black을 칠하고, 표면 상태를 균일하게 하기 위해 건조 후 사포로 표면을 다듬질하였으며, 매 실험 시마다 감지부 표면의 오물을 oil로 닦아 제거하였다.

식 (7)로 주어진  $q$ 는 원판 표면에 도달하는 열유속 중 원판의 복사율에 따라 표면이 흡수하는 열유속을 나타낸다. 그런데 측정하려는 열유속은 원판 표면에 흡수된 열유속이 아닌 원판 표면에 도달된 열유속량이고, 열유속계의 검정시 측정하여야 하는 것은 원판 표면에 도달된 열유속량과 기전력과의 관계이다. 검정로 내면에서 원판 표면에 도달된 열유속량  $q$ 는 식 (7)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$q = \sigma (T_2^4 - T_1^4) = 4.876 \times 10^{-3} (T_2^4 - T_1^4) \quad (8)$$

이 식에서  $\sigma$ 는 stefan-Boltzmann 상수 (=  $4.876 \times 10^{-8}$  kcal/(m<sup>2</sup>·hr·K))이다.

### 4.3 실제 보일러로에서의 열유속 측정

설계 제작한 열유속계로 실제 보일러로의 내벽에서의 열유속을 측정하기 위하여 (한국 동력 자원 연구소)의 보일러 연구실에 있는 보일러에서 열유속을 측정하였다. 이 보일러는 수냉벽 파형 노동 보일러로 좌우에 각각 8개의 측정공(peep hole)이 설치되어 있다. 사용 버너는 유압식으로 내경 270mm, 최대 용량 280l/hr이고 모델은 ELCO EDR type이다. 사용 연료는 벙커-C유이고 측정시 연료 유량은 150 l/hr, 과잉 산소량은 3%, 이론 공기량은  $10.245 \text{Nm}^3/\text{kg}$ 이다<sup>(6)</sup>.

## 5. 결과 및 검토

### 5.1 검정 결과

Fig. 5는 검정로의 온도에 따라 열유속계의 기전력 측정치를 나타내는 그림으로 열유속계 감지부의 온도 및 이 온도들로부터 구한 열유속을 함께 보여주고 있다. 이 경우 감지부의 표면은 carbon black으로 coating하였으며, 냉각수의 온도는 23°C, 유량은 2 l/min이다. 열유속과 기전력의 관계는 선형적으로 이론적으로 예측된 것과 일치하며, 실험 결과로부터 최소 자승법(least square method)을 사용하여 구한 1차 곡선의 기울기  $C_o$ 는  $3.33 \times 10^4$ 이다. 한편 열유속은 검정로의 절대온도 (absolute temperature)의 4승과 열유속계 감지부 온도의 4승의 차에 비례하며, 기전력도 이에 비례한다. 그러므로 기전력이 증가함에 따라 검정로의 온도는 기전력의 0.25승에 비례하는 것을 이 그림에서 알 수 있다. 한편, 열유속계 감지부의 온도는 열유속의 증가에 따라 상승하는 것을 알 수 있으나, 냉각수를 계속 순환시키므로 그 상승폭은 그다지 크지 않다.

Fig. 6은 열유속계의 실제 검정 곡선과 이론 검정 곡선을 비교하고 있다. 이론 계산으로 구한 검정 곡선과 마찬가지로 실제 검정 곡선도 1차 직선의 형태이다. 검정 곡선의 기울기  $C_o$ 를 이론적으로 계산하면, 식 (5)를 이용하여  $k_o = 16.34 \text{kcal}/(\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C})$ ,  $b = 3.89 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ ,  $R = 10\text{mm}$ ,  $t = 1.4 \text{ mm}$ 를 대입하면,  $C_o$ 의 이론 설계치는  $2.35 \times 10^4$ 이다. 실제 검정 결과의  $C_o$ 는  $3.33 \times 10^4$ 이므로 절대값으로 약 40%의 차이가 있다.

Fig. 7은 열유속계 감지부 표면의 coating에 따른 열유속값의 변화를 나타내는 그림이다. coating

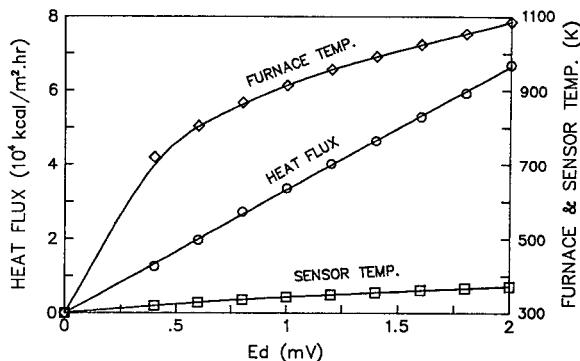


Fig. 5 Furnace temperature, sensor temperature and heat flux vs. EMF of heat-flux meter

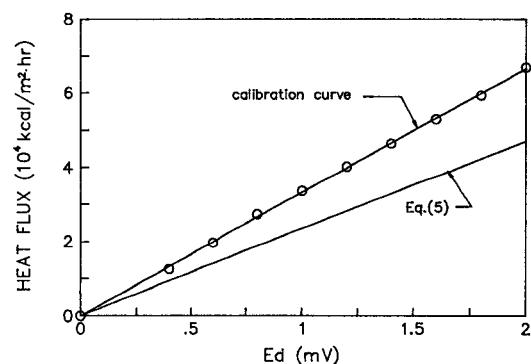


Fig. 6 Comparison of the calibration curve with theory

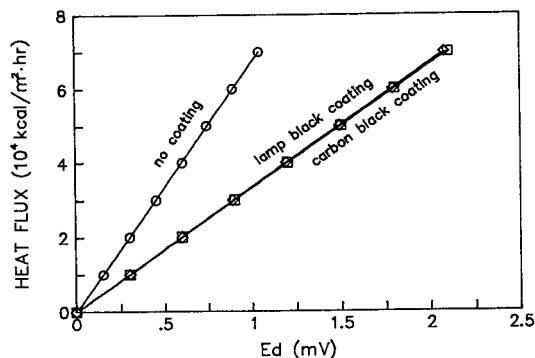


Fig. 7 Effect of surface coating on heat flux-EMF characteristics

없이 chromel 표면 상태 그대로의 검정 결과  $C_o$ 는  $6.67 \times 10^4$ 으로, lamp black coating의  $3.36 \times 10^4$ , carbon black coating의  $3.33 \times 10^4$ 에 비하여 약 2 배 큰 값을 보이고 있는데, 이는 열유속계의 분해

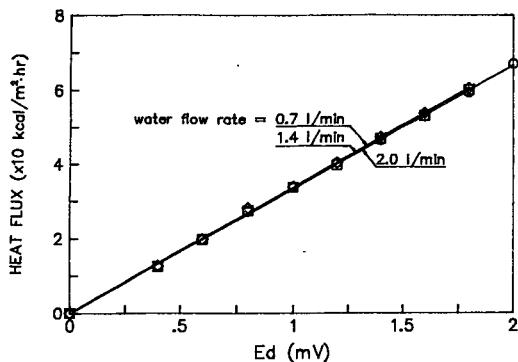


Fig. 8 Effect of flow rate of cooling water on heat flux-EMF characteristics

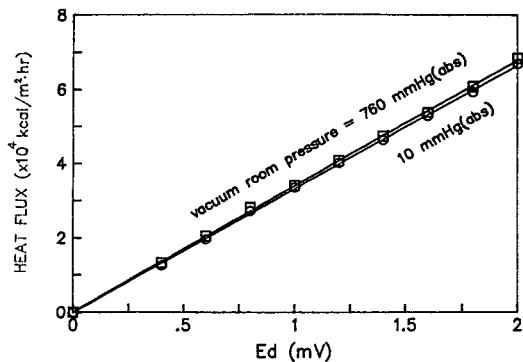


Fig. 9 Effect of vacuum pressure of vacuum room on heat flux-EMF characteristics

능(分解能)이 그만큼 저하한다는 것을 의미한다.

열유속계 원판을 냉각시키기 위하여 사용되는 냉각수의 온도 및 유량의 영향을 조사하기 위하여 원판 표면을 carbon black으로 coating하고 진공실의 진공도를 10 mmHg(abs)로 일정하게 하고 냉각수의 온도 및 유량을 변화시키면서 실험을 하였다. Fig. 8은 그 결과를 나타내는 그림으로 냉각수 온도나 유량의 영향은 거의 없는 것을 알 수 있다. 그러나 검정시 공기의 습도가 높고 측정 열유속이 작은 경우에는, 냉각수의 온도가 낮으면 원판의 온도가 낮아져서 원판 표면에 응축이 발생하여 열유속의 흡수를 방해할 수 있으므로, 원판 표면 온도를 65°C 이상으로 유지하여 원판 표면의 응축을 방지할 필요가 있다. 따라서 냉각수를 일정 온도까지 가열할 필요가 있다. 냉각수 유량을 변화시키면서 실험한 결과 원판이 흡수한 열유속값은 거의 변화가 없으나 원판 표면 온도는 냉각수 유량이 감소하면 약간 상승한다. 냉각수 유량의 변화는 열유속계의 측정값에 거의 영향을 미치지 않지만 측정 열유속이 클 때 냉각수 유량이 작으면 냉각수 모두가 증발할 우려가 있으며, 냉각수 유량이 작으면 평형 상태에 도달하는 것이 늦어지므로, 냉각수 유량은 가능한한 크게 하는 것이 좋다. 본 열유속계의 경우 2 l/min 이상으로 하였다.

Fig. 9는 진공실 진공도의 변화에 따른 영향을 조사하기 위하여 진공도를 10 mmHg(abs) 및 760 mmHg(abs)로 하여 측정한 결과이다. 진공도를 변화시킨 결과 열유속이 크지 않은 경우는 진공도의 차이에 따른 영향이 거의 없는 것을 알 수 있다. 그러나, 열유속이 커짐에 따라, 760 mmHg

(abs)로 한 경우, 10 mmHg(abs)보다 동일한 열유속에 대한 기전력이 크게 나타나는 것을 알 수 있으며, 이는 진공실의 공기를 통한 열전달 현상 때문이라고 생각된다. 본 실험에서 검정값의 차이가 거의 없는 것은 원판의 온도가 높지 않기 때문이다. 그러나 열유속값이 큰 경우 원판의 온도가 높아짐에 따라 차이가 많을 것으로 예측되며, 높은 열유속의 측정시는 진공으로 하는 것이 좋다. 그러나 열유속값이 크지 않은 경우에는 진공으로 하지 않아도 무방할 것으로 생각된다.

## 5.2 실제 보일러로에서의 열유속 측정결과

실제 보일러로에서의 열유속의 측정은 버너 출구로부터 보일러의 길이 방향으로 이동하면서 하였으며, 열유속계 원판 표면은 carbon black으로 coating하였다. 측정된 열유속값이 Fig. 10에 표시되어 있다. 열유속값은 버너 출구로부터 증가하여  $X/L$ (버너 출구로부터 거리/보일러의 노통 길이)

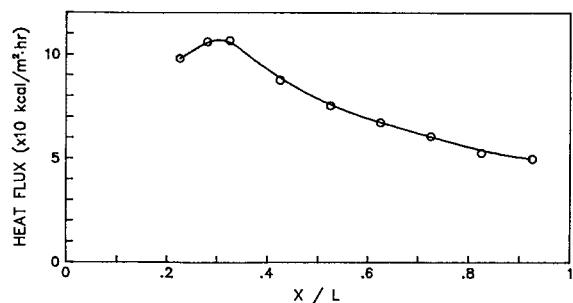


Fig. 10 Distribution of heat flux at the furnace wall

=0.3부근에서 최대값을 나타낸 후 하류 측으로 가면서 점차 감소하였다.

오차가 발생할 가능성이 있으므로, 진공실의 진공도를 유지하는 편이 유리할 것이다.

## 6. 결 론

(1) 열전대 재료인 chromel을 원판 재료로, alumel을 몸체 재료로 사용하여 열전대의 기전력을 측정함으로써 열유속을 측정할 수 있는 열유속계를 설계, 제작할 수 있다. 이 형의 열유속계로부터 측정되는 기전력은 원판에 흡수되는 열유속에 선형적으로 비례한다. 한편, 열유속계의 기전력 특성은 원판의 반경이 클수록, 원판의 두께가 얕을수록 좋아지고, 원판재의 열전도율에 반비례한다.

(2) 열유속계의 열유속-기전력 특성은 원판의 표면 상태에 따라 크게 달라지며, 원판 표면의 방사율(放射率, emissivity)이 클수록 특성이 좋아지므로 원판 표면을 carbon black등으로 coating하여 사용하는 것이 좋다.

(3) 냉각수의 온도나 유량의 변화는 열유속-기전력 특성에 큰 영향을 미치지는 않으나, 열유속이 작은 경우에는 원판 표면에서의 수증기의 응축 문제가 있으며, 열유속이 큰 경우에는 냉각수가 증발해 버리는 문제가 발생할 수 있다.

(4) 열유속계 원판 후방의 진공실의 진공도는 열유속이 크지 않은 경우에는 거의 영향이 없으며, 반드시 진공으로 해야 할 필요는 없을 것으로 생각된다. 그러나 열유속이 큰 경우에는 진공도에 따른

## 참 고 문 헌

- (1) Hornbaker, D.R. and Rall, D.L., 1968, "Heat Flux Measurement—A Practical Guide", Instrumentation Technology, Feb., p. 51.
- (2) Sparrow, E.M A. and Cess, R.D., 1966, "Radiation Heat Transfer", Brooks/Cole Pub. Co.
- (3) Moore, Ralph, 1976, "Basic Instrumentation Lecture Notes and Study Guide", Instrument Society of America, Chap.8
- (4) 인종수, 1986, "보일러로 내에서 학염으로부터의 열유속 측정에 관한 연구", M.S.Thesis, 한국과학기술원
- (5) American Society for Testing and Materials, 1966, "Manual on the use of Thermocouples in Temperature Measurements".
- (6) Benedict, Robert P., 1966, "Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow measurements", John Wiley & Sons, Inc.
- (7) 内田秀雄, 1969, "傳熱工學", 裳華房.
- (8) 한국동력자원연구소, 1983, "고효율 유류 보일러 기술 개발 연구(3)－설계, 제작 및 운전에 관한 기술", 연구보고서.
- (9) Touloukian, Y.S.A. and R.W. Powel, C.Y. Ho, and P.G. Klement, 1970, "Thermophysical Properties of Matter, the TTRRC Data Series," IFI/DIENUM, Vol. 1(Thermal Conductivity).