

판열유속계를 이용한 복사열유속 측정 실험 §

박 원 희*† · 윤 경 범**

*한국철도기술연구원 에코시스템연구실, **중앙대학교 기계공학부

Measurement of Radiative Heat Flux Using Plate Thermometer

Won-Hee Park*† and Kyung-Beom Yoon **

* Eco-Transport Systems Research Division, Korea Railroad Research Institute,

** Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

(Received May 16, 2012 ; Revised July 18, 2012 ; Accepted July 11, 2012)

Key Words: Plate Thermometer(판열유속계), Heat Flux(열유속)

초록: 고온환경의 복사열유속을 측정하기 위하여 판열유속계를 제작하였다. 열유속은 스테인리스스틸로 제작된 판열속계 뒷면에서 측정된 온도를 이용하여 계산되어진다. 스미트-볼터게로 측정된 열유속을 기준값으로 이용하였다. 단열재료의 열손실, 판열유속계 두께방향으로의 전도 및 평판의 위치에 따라 온도가 상이하여 발생하는 열전달 등을 고려하기 위하여 전도상수를 도입하였다. 이 상수는 반발입자군집 최적화법으로 구하였다.

Abstract: Plate thermometers are used for measuring the radiative heat flux in high-temperature surroundings. The heat flux is calculated from the temperature measured at the back surface of the stainless steel surface of the meter. Heat fluxes from a Schmidt-Boelter gauge are measured as reference heat fluxes. A combined conductive coefficient is introduced to consider the heat loss to insulation, conduction through the stainless plate depth, and conduction from the non-uniform temperature of the plate of the plate thermometer. This coefficient is obtained using the repulsive particle swarm optimization.

1. 서 론

고온 환경에서의 복사열전달은 다른 열전달 모드(대류 및 전도열전달)보다 특히 중요하다⁽¹⁾. 특히 화재현상의 경우 화염 및 고온의 환경에서 유입되는 복사열전달로 인하여 고체의 열분해 및 화염이 유발된다. 이러한 복사열유속을 측정하기 위하여 열유속계 (Heat flux gage)가 사용되는데 고온의 열환경인 화재현상에서의 열유속을 측정하는 Gardon, Schmidt-Boelter 열유속계가 대표적이다. 하지만 이런 종류의 열유속계는 매우 민감하고 정확한 측정을 위하여 물을 순환시키는 등 실제의 화재실험에서 여러 추가작업을 수반하여야 하며 고가인 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 단점

을 극복하기 위하여 고안된 가격이 저렴하고 튼튼한 판열유속계를 제작하여 복사열유속을 측정하였다. 단열재료의 열손실, 판열유속계 두께방향으로의 전도 및 평판의 위치에 따라 온도가 상이하여 발생하는 열전도 등을 고려하기 위하여 전도상수를 도입하였다. 이 상수는 반발입자군집 최적화(RPSO, Repulsive Particle Swarm Optimization)⁽²⁾로 구하였다.

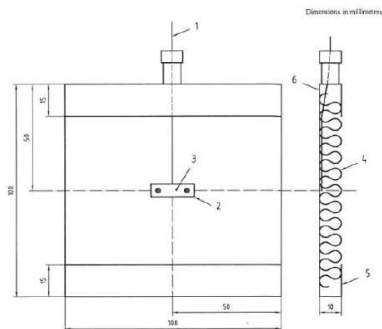


Fig. 1 Schematic of a plate thermometer^(3,4)

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 열공학부분 춘계학술대회(2012. 5. 23.-26., 용평리조트) 발표논문임.

† Corresponding Author, whpark@krii.re.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers



(a) Front



(b) Before insulation



(c) After insulation

Fig. 2 Pictures of the plate thermometer

2. 판열유속계 제작

판열유속계는 Fig. 1 과 같이 ISO834-1⁽³⁾과 EN136 3-1⁽⁴⁾에 규격이 제시되어 있다. 규격에서는 150 mm x 100 mm 의 0.71 mm 두께의 니켈합금 (INCONEL® 600)을 100 mm x 100mm 의 단면으로 접고 가운데에 열전대를 접촉하고 접힌 영역에 단열재를 설치하도록 되어 있다. 본 연구에서는 0.9

Table 1 Heat fluxes by the SB and PT and measured temperature of back surface of the PT

Heat flux (SB, kW/m ²)	8.6	12.9	17.2	21.5	25.8	34.4
Heat flux (PT, kW/m ²)	5.4	12.6	17.8	23.0	27.6	36.2
Temperature of PT (°C)	209.5	336.2	401.0	455.4	494.5	560.5

* SB (Schmidt-Boelter)
PT (Plate thermometer)

mm 두께의 스테인리스스틸을 이용하여 제작하였으며 단열재로는 세라크울 1300 (100kg/m³)을 활용하였다. Fig. 2 와 같이 판 뒷면 중앙에 k-type 열전대를 점용접으로 부착하고 스테인리스 띠 판 2 개를 이용하여 열전대를 고정하였다. 판열유속계 앞면에는 방사율을 일정하게 하기 위하여 Aremco Products, Inc.의 HiE-COAT™ 840-CM(방사율 0.9)을 칠하였다.

판열유속계 뒷면에 부착된 열전대의 온도를 이용하여 복사열유속을 구할 수 있는데 다음과 같은 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\dot{q}_{rad,inc}'' = \frac{1}{\epsilon_{PT}} \rho_{PT} C_{p,PT} \delta_{PT} \frac{\Delta T_{PT}}{\Delta t} + \tag{1}$$

$$\frac{1}{\epsilon_{PT}} (K_{cond} - H_{conv})(T_{PT} - T_{\infty}) + \sigma T_{PT}^4$$

여기서 ϵ_{PT} , ρ_{PT} , $C_{p,PT}$, δ_{PT} 및 σ 는 각각 판열유속계표면의 방사율, 판의 밀도(kg/m³), 비열(J/kg K) 및 두께(m)이며 스테판-볼츠만상수 (8.3144W/m²K⁴)이다. t 는 시간(s)이며 H_{conv} 는 대류열전달계수(W/m² K)이다. K_{cond} 는 일종의 전도상수 (W/m² K)로 단열재로의 열손실, 판열유속계 두께방향으로의 전도 및 평판의 위치에 따라 온도가 상이하여 발생하는 열전도 등을 포함한다.⁽⁵⁾

3. 복사열유속 측정

3.1 정상상태 열유속 측정

콘칼로리미터(ISO 5660⁽⁶⁾)를 이용하여 일정한 열유속환경을 조성하고 Schmidt-Boelter 열유속계와 제작된 판 열유속계를 설치하여 측정된 열유속을 비교하였다. Table 1 은 Schmidt-Boelter 열유속계와 제작된 판열유속계로 측정한 열유속 및 판열유속계 뒷면에 부착된 TC 의 온도를 나타내고 있다. PT 의 열유속은 식 (1)에서 비정상항인 우측의 첫번째항을 제외하고 계산한 열유속이다. 열유속이 12.9 kW/m² 으로 작은 경우에 판열유속계에서 측정된 열

유속은 기준열유속보다 작게 측정되나 이보다 큰 열유속에서는 기준열유속보다 크게 측정되었다. 여기서 K_{cond} 는 참고문헌⁽⁶⁾과 같이 $22\text{W/m}^2\text{K}$ 설정하였는데 열유속의 증가에 따른 열손실 양을 과소



Fig. 3 Installed PT and SB

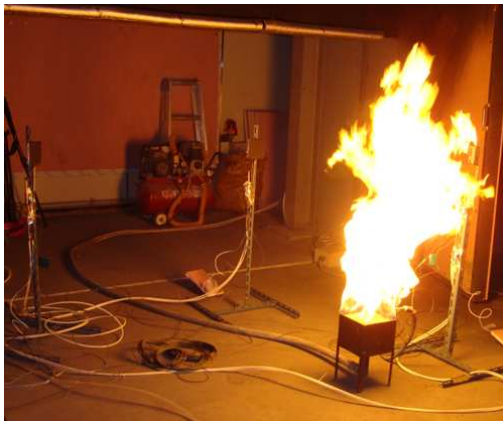


Fig. 4 Plate thermometer and Schmidt-Boelter meter

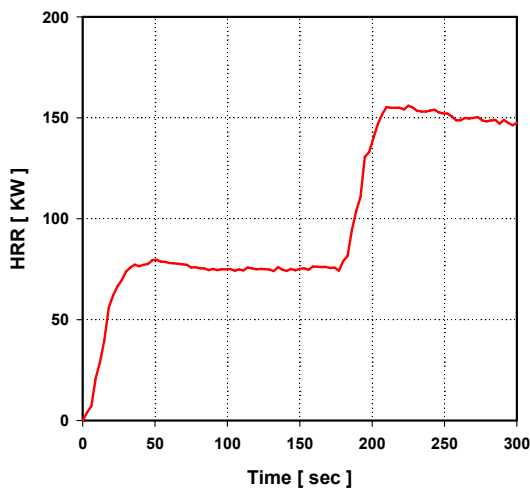


Fig. 5 Heat output of the sand burner

평가하여 발생된 오차로 추측된다.

3.2 비정상상태 열유속 측정

비정상 상태에서의 PT 로 측정된 열유속과 SB 로 측정된 열유속을 비교하기 위하여 계단모양의 출력을 갖도록 설정한 burner 를 이용하였다. Fig. 3 은 지그에 부착된 PT 와 SB 열유속계를 보여주 고 있다. 각각의 열유속계가 부착된 3 개의 지그를 화원으로부터 0.5, 1.0, 1.5m 거리를 두고 설치하였 다. plate thermometer 가 설치된 높이는 0.84m 이고 Boelter meter 가 설치된 높이는 0.79m 이다. Fig. 5 는 화원으로 사용된 burner 의 출력으로 출력이 상승함에 따라 설치된 센서로 들어오는 열유속이 증가한다.

3.3 전도상수 추정

단열재료의 열손실, 판열유속계 두께방향으로의 전도 및 평판의 위치에 따라 온도가 상이하어 발생하는 열전달 등을 고려하기 위하여 식 (1)에 도입된 전도상수는 반발입자군집 최적화법⁽²⁾으로 구하였다. 반발입자군집 최적화법은 입자군집최적화법 (PSO, Particle Swarm Optimization)⁽⁷⁾이 진화된 방법이다. 입자군집최적화법은 생체군집인 새 떼 및 물고기 떼 등의 사회적 행동양식에 대한 규칙성 증명에 착안하여 개발되었는데 해의 탐색공간이 매우 광범위하고 지역 최적값이 매우 복잡한 최적화 문제에 군집이 지역 최적값으로 조기 수렴함으로써 전역 최적값을 찾기 어려워질 수 있다는 단점이 있다.⁽⁸⁾ 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 전체 군집의 최적 위치 대신에 무작위로 선택한 입자들의 최적 위치를 이용한 방법이 반발입자군집 최적화법이다. 식 (1)에 포함된 최적화하고자 하는 열전도 상수는 PT 뒷면에 부착된 열전대에서 측정된 온도와 외부 온도 차이의 $n_k - 1$ 승과 a_K 에 곱으로 아래와 같이 설정하였다.

$$K_{cond} = a_K (T_{PT} - T_{\infty})^{n_k - 1} \quad (2)$$

즉 반발입자군집 최적화법으로 최적화될 입자는 a_K 및 n_k 이며, 본 연구에서는 Park et al.⁽⁹⁾에서 사용한 아래와 같은 식을 이용하여 적합성을 평가하였다.

$$pfitness = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} \left\{ \left(q_{SB}''(t_i) - \bar{q}_{SB}'' \right)^2 - \left(q_{SB}''(t_i) - q_{PT}''(t_i) \right)^2 \right\}}{\sum_{i=1}^{N_i} \left(q_{SB}''(t_i) - \bar{q}_{SB}'' \right)^2} \quad (3)$$

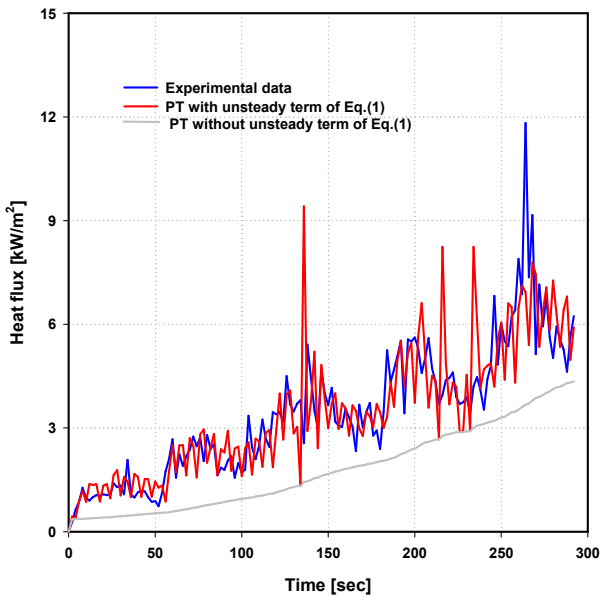


Fig. 6 Measured heat fluxes

여기서, $q_{SB}''(t_i)$ 및 $q_{PT}''(t_i)$ 는 t_i 에서 SB 및 PT 로 측정된 열유속이며, \bar{q}_{SB}'' 는 평균 열유속이다. 일정 범위에서 랜덤하게 군집에서의 입자 위치를 생성하고 식 (3)을 이용하여 입자의 적합성을 평가하고 이에 따른 입자군의 위치를 갱신하여 최적된 입자의 위치를 반복적으로 탐색하게 된다. 반복계산수는 200 으로 설정하였는데 64 번째 반복에서 최적값이 산출되었다. K_{cond} 를 구성하는 상수는 $\alpha_K = 2.29$ 및 $n_k = 1.31$ 로 최적화되었다.

Fig. 6 은 화원으로부터 1.0m 떨어진 센서지그에서 측정된 열유속이다. 파란색 선은 Schemidt Boelter 열유속계로 측정된 열유속이며 붉은색과 검은색 선은 plate thermometer 로 측정된 열유속인데 붉은색 선은 식 (1)에서 비정상항을 포함하여 계산한 값이며 회색선은 식(1)에서 비정상항을 제외하였을 경우의 값이다. Sand burner 의 화염이 일정하지 않고 많이 흔들려서 열유속의 변화가 심하였고 버너의 출력과 같이 계단식으로 열유속이 증가하지는 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 고온의 환경인 화재 실험에서 활용하기 용이한 판열유속계를 제작하여 측정값을

기존의 열유속계와 비교하였다. 이를 위하여 판열유속계의 단열재료의 열손실, 판열유속계 두께방향으로의 전도 및 평판의 위치에 따라 온도가 상이하여 발생하는 열전달 등의 효과를 고려하기 위해 도입된 전도상수를 반발입자군집 최적화법으로 최적화하였다. 제작된 판열유속계는 재료의 간단성 및 제작비용이 저렴하여 철도차량 화재시험 등의 매우 큰 열유속 환경하의 내부에 설치되어 활용될 수 있다.

참고문헌

- (1) Park, W.-H. and Kim T.-K., 2008, "Numerical Solution of Radiative Transfer Within a Cubical Enclosure Filled with Nongray Gases Using WSGGM," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, No. 2, pp. 1400~1407.
- (2) Mishra, S. K., 2006, *Repulsive Particle Swarm Method on Some Difficult Test Problems of Global Optimization*, Munich personal repec archive.
- (3) International Organisation for Standardization, 1999, *ISO 834 Fire-Resistance Tests - Elements of Building Construction - Part 1: General Requirements*.
- (4) *EN 1363 Fire Resistance Tests, Part 1: General Requirements*, 1999, British Standards Institute, London, UK.
- (5) Ingason, H and Wickstrom, U. 2007, "Measuring Incident Radiant Heat Flux Using the Plate Thermometer," *Fire Safety Journal*, Vol.42, pp. 161~166.
- (6) International Organisation for Standardization, 2002, *ISO 5660 Reaction to Fire Tests - Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate - Part 1: Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method)*.
- (7) Kennedy, J. and Eberhart, R. C., 1995, "Particle Swarm Optimization," *Proceedings of the 1995 International Conference on Neural Networks*, vol. 4, IEEE Press, Piscataway, NJ, pp.1942~1948.
- (8) Lee, K. H., Baek, S. W. and Kim, K. W., 2008, Inverse Radiation Analysis using Repulsive Particle Swarm Optimization Algorithm, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51, pp.2772~2783.
- (9) Park, W.-H., Yoon, K.-B. Chang, H.-C. and Kim, T.-K., Estimation of Pyrolysis-Related Properties Using Repulsive Particle Swarm Optimization, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 7, pp. 2129~2132.