

헬륨을 이용한 열유속센서 검정방법의 실험적 연구

양훈철[†] · 송철화^{*} · 김무환^{**}

An Experimental Study on Calibration Method of Heat Flux Sensor by using Helium Gas

Hooncheul Yang, Chul Hwa Song and Moo Hwan Kim

Key Words : Helium(헬륨), Heat Flux Sensor(열유속센서), Calibration(검정), Conduction(전도), Standards(표준), Sensitivity(민감도)

Abstract

The objective of this study is to propose an experimental calibration facility in which a heat flux sensor can be calibrated under conductive condition by using helium gas. The heat flux calibration facility was designed, simulated and manufactured for use in a high heat transfer condition. It delivers heat fluxes up to a maximum of 35 kW m^{-2} . A copper block heated electrically with 3.5 kW power is designed to produce uniform temperature up to 600 K across its face. High heat fluxes are provided between hot plate and cold plate by 1 mm height helium filled gap. A cold plate is maintained around 300 K through pool boiling using a refrigerant and water-cooled heat exchanger. A simulation was conducted to verify the design of the main test section. To verify the performance of calibration facility, a heat flux sensor was examined. The measured heat fluxes were compared to the calculated one.

기호설명

C	: 비열	[J/kg.K]
d	: 열유속센서의 두께	[m]
k	: 열전도도	[W/m.K]
q"	: 열유속	[W/m ²]
S	: 민감도	[mV/W/m ²]
ΔT	: 온도차	[K]
그리스문자		
ρ	: 밀도	[kg/m ³]

1. 서론

열전달 현상의 경계조건 중에서 온도조건과 함께 중요한 매개변수 중의 하나가 열유속 조건이다. 열유속(heat flux)은 단위면적 당 열전달의 양(단위: W/cm²)으로 열유동 조건에서 관심부위의 열전달 현상 해석을 위해서는 온도, 열유속 등을 정확하게 측정하는 측정기술의 연구가 필수적이다. 온도 측정용 센서로 열전대나 측온저항체가 사용되는 것처럼 열유속을 측정하기 위해서 열유속센서(heat flux sensor)가 사용된다. 열유속센서는 열전대와 유사한 원리로 열유속에 비례하는 열기전력(thermo electromotive force) 값을 전압신호로 발생하므로 이 전압신호에 해당하는 표준 열유속 값이 알려진 검정장치에서 검정해야 한다. 열유속센서의 검정 방법은 다양하게 연구되고 있으나 열전달 현상마다 해석의 관점들이 다르기 때문에 표준 규격이 정해지지 않은 상태이다. 이에 따라 새로운 열유속센서 검정방법을 개발하는 것이 중요한 연구분야로 대두된다.

[†] 회원, 한국에너지기술연구원 건물에너지연구센터
포항공과대학교 기계공학과 대학원

E-mail : yang@kier.re.kr

TEL : (042)860-3214 FAX : (042)860-3202

^{*} 회원, 한국원자력연구소 열수력 안전연구팀

^{**} 회원, 포항공과대학교 기계공학과

열전대를 이용한 열유속 측정방법, 다양한 열유속센서의 원리, 열유속 측정방법 및 검정방법에 대한 연구는 Diller^(1,2)와 Childs 등⁽³⁾에 의해 광범위하게 정리되었다. 또한 Jones 등⁽⁴⁾도 열유속센서와 열유속 측정방법을 연구하였다.

Grosshandler 등^(5,6)은 고온의 전도 열유속 검정방법의 연구를 위해 구리로 만든 지름 100 mm, 높이 38 mm의 주시험부에 7 개의 히터를 대칭으로 수직배열하고 2,000 W의 전력을 이용해 최대 열유속 가능 범위가 100 kW/m²인 열유속 검정장치를 수치해석적으로 연구하였다.

Sumikama⁽⁷⁾는 센서가 부착되는 표면에서 공기중으로 자연대류에 의해 열이 발산되는 방식을 사용하는 전도방식의 열유속 검정장치를 연구하였다. 검정장치에서 사용한 15,000 개의 구리-콘스탄탄 쌍으로 이루어진 서모파일은 고온부의 상부측으로만 열이 공급되도록 하기 위한 영점 지시계 역할을 한다. 주시험부는 1,500 W의 전기입력을 인가하여 주위의 공기와 자연대류에 의한 열전달이 이루어진다. 열유속측정은 4 개의 온도대역에 대해 실시하며 최대표면온도는 400 °C까지 가능하다.

Hwang 등⁽⁸⁾은 이론해가 알려져 있는 수직벽면에서의 균일 열유속에 의한 자연대류 열전달을 이용하여 열유속센서를 검정하였다. 주가열판은 고유저항 5.15 W/m, 폭 4.6 mm, 두께 0.16 mm의 니크롬선을 운모판 사이에 배열하고 발생하는 열이 모두 전면을 통해 방열되도록 하기 위하여 주가열판 뒤쪽에 같은 규격의 보조가열판을 설치하고 그 사이에 5 mm 두께의 석면판에 100 개의 쌍을 갖는 보조서모파일을 설치하여 열손실을 감지하도록 하였다. 주가열판의 전력은 전압조절기에 의하여 일정하게 공급되고 보조가열판의 전력은 보조 열유속계의 전력전위가 0이 되도록 위상제어방식으로 자동조절 하였으며 온도차가 0.05 °C 이내로 유지되었다. 보조가열판 후면은 가열량을 감소시키기 위하여 단열층을 형성하였다. 자체 제작한 열유속센서로 출력전위를 측정된 결과 최대오차는 1.81%, 표준편차는 0.66%를 나타낸다.

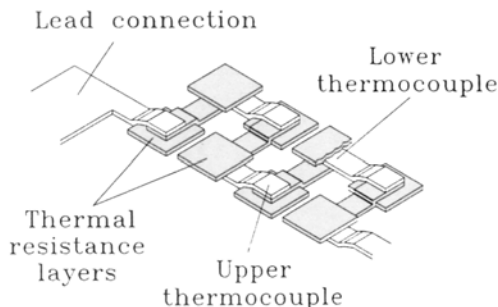


Fig. 1 Schematic diagram of micro heat flux sensor

본 연구는 고온, 고열유속 조건에서 열유속센서를 효과적으로 검정할 수 있는 검정장치를 실험적 방법으로 개발하는 것이다. 이를 위해 헬륨 기체를 이용한 열유속센서 검정방법을 디자인하고, 열유체 해석 프로그램인 FLUENT⁽⁹⁾를 이용하여 디자인된 열유속센서 검정장치의 주시험부에 대해 내부 열유동을 해석하였다. 또한 열유속센서 검정장치를 자체 제작하고, 미국 V사의 고 열유속용 상용 열유속센서를 사용하여 개발된 검정장치에서 열유속 검정실험을 수행하고 그 결과를 입력된 열유속 결과와 비교하여 분석하였다.

2. 실험

2.1 열유속센서

Fig.1은 미국 V사의 고온형 열유속센서의 주요 개략도이다. 이 센서는 열저항 물질로 작용하는 박막층에 스퍼터(sputtering) 공정을 이용해 제작된 2 개의 금속으로 이루어진 서모파일을 형성하여 열유동 시 박막의 상·하단에 존재하는 온도차에 해당하는 기전력을 발생시킨다. 방열면에 열전도율이 k이고 두께 d가 충분히 얇은 판이 형성되며 열유동이 정상상태에 도달하고 난 후 이 얇은 판을 통과하여 흐르는 열유속, q"은 다음의 식으로 나타난다.

$$q'' = \frac{k \cdot \Delta T}{d} \quad (1)$$

2.2 열유속센서 검정장치의 디자인

일반적인 열유속 검정장치의 구조는 열을 발산하는 열원, 열을 받아들이는 히트싱크, 열을 공급하기 위한 히터, 히터의 열손실을 보정하기 위한 보조히터, 히터에 전원을 공급하는 직류전력, 히터와 보조히터 사이에 설치되는 서모파일, 열유속센서의 신호를 감지해 보조히터의 전원을 인가할 수 있는 조절기, 검정장치를 주위조건으로부터 차단하는 항온부로 구성된다.⁽⁷⁾ Fig.2는 TNO-TPD에서 제안된 열유속센서 검정장치를 나타내며 사용가능

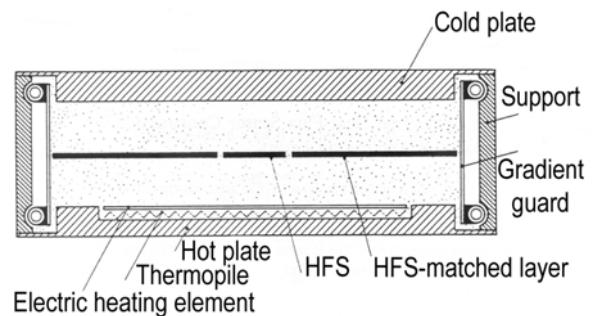


Fig. 2 Schematic diagram of the calibration facility for heat flux sensor, TNO-TPD

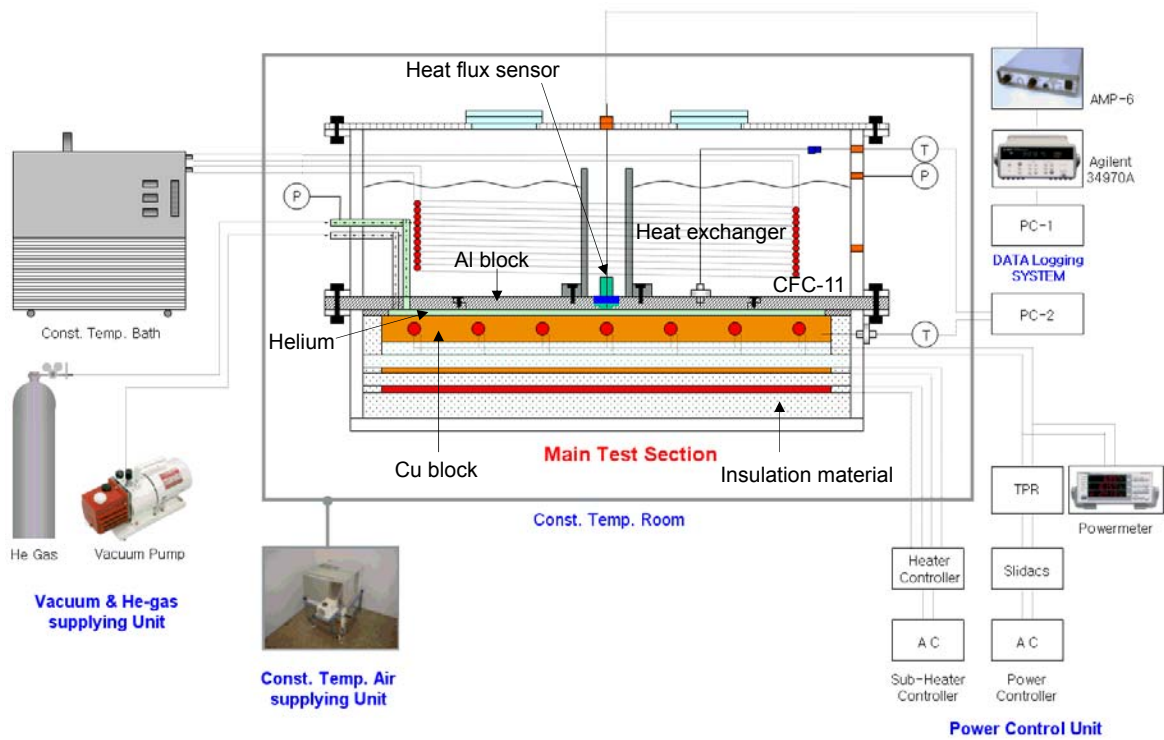


Fig. 3 Schematic diagram of calibration facility

조건은 저온, 저열유속에 국한된다.

본 연구에서 제안된 검정장치의 특징은 일반적인 저온, 저열유속 상태에서 사용하는 전도형 열유속센서 검정장치와 달리 고온, 고열유속 상태의 열유동 조건에서 열유속센서를 검정하기 위해 열유동장 중에 헬륨(helium)을 사용하는 것이다. 헬륨은 일반 기체에 비해 열전도도, 0.2 W/m.K가 상대적으로 높은 안정된 기체이다. 헬륨이 고온의 열원부와 대용량의 히트싱크의 구조 사이에 존재하는 경우 고온, 고열유속의 조건으로 열전달 현상이 발생하며 이 원리를 이용하여 고온, 고열유속 열유동 조건에서 열유속센서를 검정하는 방법으로 사용될 수 있다. 이를 위해 Fig.3 과 같이 검정장치를 디자인하였다. 이는 구리블록 내의 전기 히터로부터 발생하는 열이 구리블록을 통해 헬륨과 알루미늄 블록으로 전달되고 이는 다시 CFC-11 냉매와의 상변화 열전달을 통해 항온조에서 공급되는 냉각수와 열교환하여 시스템 밖으로 배출되는 구조이다.

2.3 열유속센서 검정장치의 해석

열유속센서 검정장치를 제작하기 앞서 FLUENT를 이용한 열유속센서 검정장치의 수치해석을 통해 시스템 주시험부의 온도와 열유속을 평가하고 시스템의 안정성을 확인하였다.

시스템의 중심부는 우측 경계조건으로 사용하고 중심과 가장 가까운 원형 히터의 중심부까지

길이를 L 이라고 할 때 L/2 길이(폭=22.5 mm)에 해당하는 부분을 모델링 하였다. Fig.4 는 주시험부의 격자구성을 나타내고 있다. FLUENT 의 해석은 2-차원, 정상상태, 층류유동 조건으로 해석하였다. 주위온도는 바닥면의 경우 주위온도인 293K 이며 상측면의 온도는 CFC-11 냉매와 닿아 있기 때문에 증발 온도인 297 K 이다. CFC-11 냉매가 위치하는 열교환기부에서 냉매의 증발온도는 24℃이므로 알루미늄 블록의 온도는 이 이상 증가하지 않는 것으로 가정하여 해석한다. 주요 물질의 물성은 Table 1 과 같다.

Fig.5 는 주시험부의 전체온도분포에 대한 수치 해석 결과이다. 구리블록상의 온도는 헬륨이 존재하는 부분에서 온도가 급격하게 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 원형 히터가 삽입된 구리블록 부분의 온도가 구리블록의 최저온도 부위보다 2K 높은 것을 알 수 있다.

Table 1 Material properties used in simulation

Material	Thermal conductivity k (W/m.K)	C _p (J/kg.K)	ρ (kg/m ³)
Helium	0.152	5193	0.1625
Insulation board	0.173	2310	700
Copper	387.6	381	8978
Aluminum	202.4	871	2719
Air	0.0242	1006.43	1.225

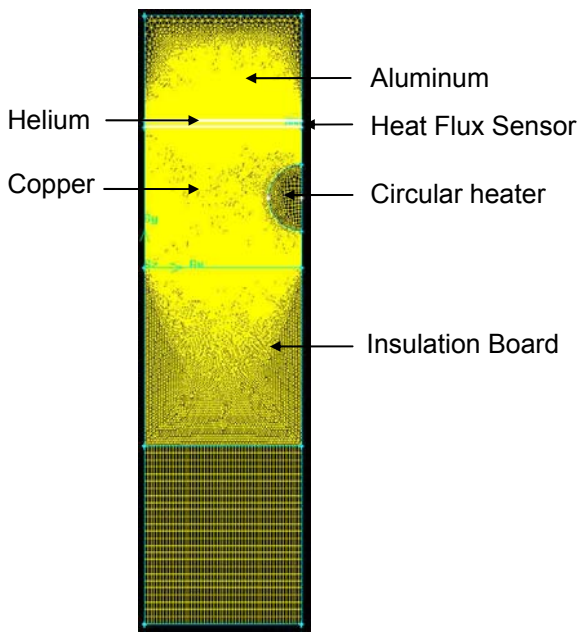


Fig. 4 Grid generation in the main test section

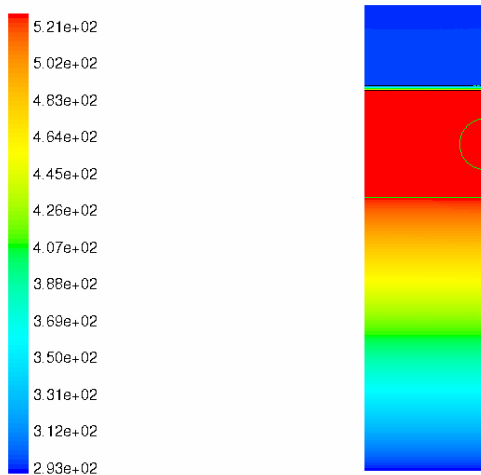


Fig. 5 Temperature distribution in the main test section

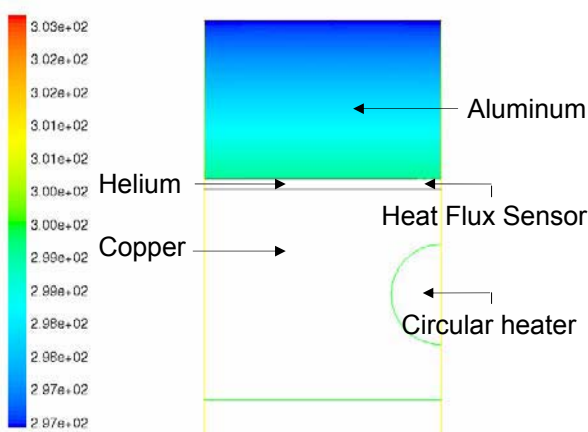


Fig. 6 Temperature distribution on the aluminum block

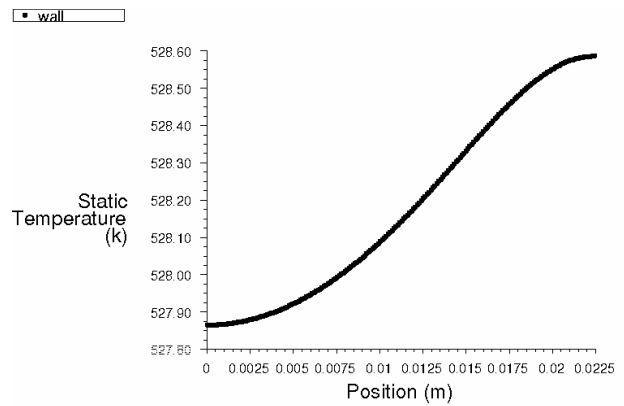


Fig. 7 Temperature distribution on the heat source

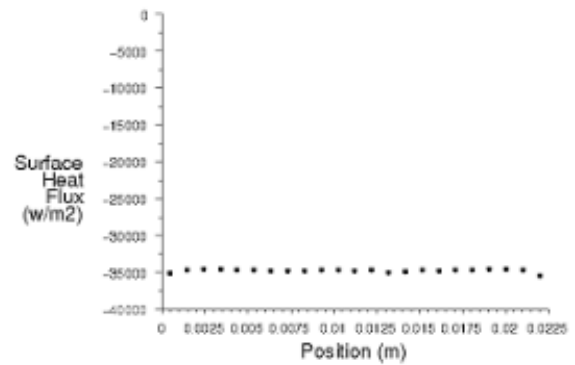


Fig. 8 Heat flux distribution in the main test section

검정장치에서는 열유속센서가 부착되는 알루미늄 부분의 온도분포가 중요하므로 Fig.6 과 같이 알루미늄 상.하단의 온도차를 해석하였다. 이 온도차는 3K 로 나타나며 실제 실험에서 알루미늄에 센서를 부착하는 경우 히트싱크 부분의 설계가 중요한 이유로 작용한다.

Fig.7, Fig.8 은 주시험부의 열원인 구리블록의 온도분포와 열유속 분포를 해석한 결과이다. 중심부분과 중심에서 22.5 mm 떨어진 위치의 주위온도가 0.7K 의 차이를 나타내며 열유속센서가 부착되는 부위는 0.3K 작은 온도차를 나타내므로 열원과 히트싱크의 설계는 충분하다.

검정장치에서의 열유속은 균일해야 하며 Fig.8 에서 알루미늄 블록을 지나는 열유속은 35 kW/m² 로 일정함을 알 수 있다. 이 경우 단열재의 하측면을 기준으로 유출되는 열유속의 값은 약 0.47 kW/m² 이다. 결국 열원으로부터 방출되는 열은 98% 이상 알루미늄 블록의 상측면으로 유출되는 것을 알 수 있다.

2.4 열유속센서 검정장치의 제작

본 연구는 상용 열유속센서를 검정할 수 있는

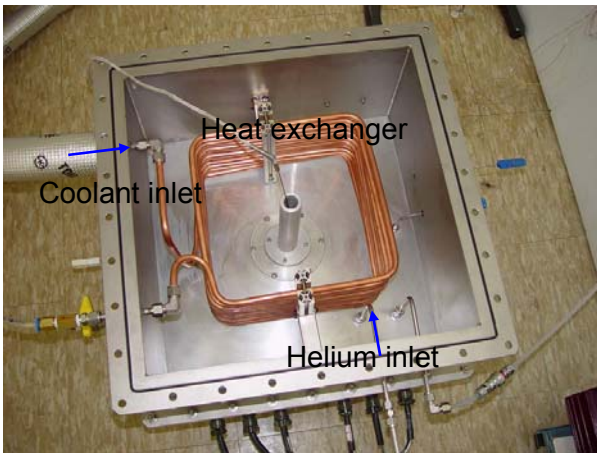


Fig. 9 Photograph of main test section

헬륨기체를 이용한 검정장치를 자체적으로 제작하여 실험을 수행하였다.

Fig.3, Fig.9 와 같이 검정장치의 주시험부는 상단에 투명 가지창을 갖는 투시부, 구리블록과 단열재 및 보조히터를 적재하기 위한 기저부, 알루미늄으로 제작되어 하단으로부터의 열전달을 이롭게 하고 열유속센서를 삽입할 수 있는 고정부가 제작되어 있는 센서 부착부, 7 개의 3/8" 실린더 히터를 구리블록에 삽입하여 4,200 W(240 VAC 입력기준)의 전기입력을 공급할 수 있는 히터부 및 구리블록으로부터 나오는 열을 흡수한 CFC-11 냉매와 항온조에서 공급되는 물과의 열교환을 원활하게 하기 위한 구리파이프를 갖는 열교환기부로 구성된다.

주시험부의 구리블록은 가로×세로×높이=320 mm×320 mm×20 mm의 구리블록 내부에 용량이 600 W/240 VAC 인 7 개의 실린더 히터를 수평으로 삽입하여 열의 발생을 유도하고 열유동은 주시험부의 상부로 이루어지도록 구성하였다. 실린더히터에 전원을 공급하기 위하여 슬라이드스와 릴레이를 사용하였다. 구리블록 하단으로의 누설 열량을 분석하기 위하여 크기 가로×세로=320 mm×320 mm, 용량 50-100 W 급의 보조히터를 사용하였으며 구리블록과 보조히터 사이에는 열유속의 출력 값이 0 이 되도록 조절하기 위하여 320 mm×320 mm의 평판형 열유속센서를 사용하였다. 이 열유속센서에서의 출력값이 0 이 되도록 조절할 수 있는 보조히터조절기를 제작하여 사용하였다.

열유속센서가 부착된 알루미늄 판과 구리블록 사이는 1 mm 높이의 공간이 형성되며 여기에 헬륨기체가 존재한다. 헬륨을 충전하기 위하여 내부의 공기는 진공펌프로 빨아내고, 100 기압의 가스원으로부터 헬륨이 주시험부로 공급되는 방식이다.

열유속센서로부터의 열유속 변화에 따른 출력

값은 Lemo 커넥터를 이용하여 신호증폭기로 입력된 후 신호수집기와 PC 를 이용하여 측정한다.

구리로 제작된 열교환부는 히트싱크의 역할을 수행하기 위해 8,000 W 급 항온수조로부터 냉각수를 공급 받아 히트싱크인 CFC-11 과 알루미늄 블록의 온도를 일정하게 유지하는 역할을 한다. CFC-11 냉매는 실내온도가 24℃ 이상이면 증발하기 때문에 실내온도를 20℃ 이하로 유지하는 것이 절대적으로 필요하다. 항온수조의 온도는 5℃로 유지하여 이 냉각수가 열교환기 내를 순환하도록 한다. 이 경우 CFC-11 의 온도는 17℃ 내외를 유지한다.

주시험부의 바닥면에 삽입되는 단열재는 고온에 견딜 수 있도록 실리카가 함유된 고온용 단열재보드를 가공하여 사용하며, 열원인 구리블록의 가장자리 부분에도 단열재를 감싸 주시험부의 횡방향 열누설을 최소화한다.

구리블록과 알루미늄블록 사이의 공간에 대한 진공과 헬륨의 공급은 알루미늄블록의 상단에서 이루어지는데 이는 헬륨의 공급으로 인한 주시험부 내부의 단열재 분진의 발생을 최소화하기 위한 것이다. 진공펌프는 일본 ULVAC 사의 GVD-050A 로터리 모델로, 진공용량은 60 lpm 이다. 최대진공압력은 5×10^{-4} torr 이다. 냉매의 온도와 바닥의 온도는 T-형 열전대를 통해 측정하며 구리블록 내의 온도측정은 고온용 K-형 열전대를 사용한다.

주시험부의 진공 전.후에는 퀵커플러를 사용하여 진공펌프와 주시험부를 격리한다. 진공 후에는 바로 헬륨을 충전하며 헬륨 충전 후에는 Swagelok 의 밸브를 사용하여 잠근다.

본 연구에서 사용하는 측정장비는 열유속센서, 신호증폭기, 오실로스코프 및 신호수집기이다. 열유속센서와 증폭기는 미국 V 사의 제품을 사용하였다. V 사의 열유속센서는 shadow 마스크와 스퍼터를 이용하여 제작된 박막의 열유속센서를 실린더 모양의 니켈 하우징에 부착한 형태이다. 열유속센서의 가장자리에는 온도가 변화하면 저항이 변화하는 RTS(Resistance Temperature Sensor)가 있기 때문에 온도측정이 가능하다. 히터에 공급되는 전력값은 데이터 수집용 프로그램(Wavestar)을 이용하여 평균값을 측정하였다. 열유속센서에서 출력되는 열기전력 신호, 온도 신호와 노즐부의 속도신호 및 주변온도 측정은 20 Hz의 데이터 수집장치(Agilent, 34970A)를 사용하여 측정한다.

2.5 열유속 검정

주시험부에 전력을 인가한 후 30 분이 경과하면 열유속센서의 열기전력은 정상상태의 값을 나타낸

다. Fig.10 은 전기히터의 입력을 조정하면서 열유속의 변화에 따라 열유속센서에서 측정된 열유속은 15-25 kW/m² 범위에 대해 나타난다. 히터에 공급되는 전력이 증가함에 따라 열유속의 값은 점진적인 증가추세를 나타내며 절편값이 0 인 추세선의 경향은 계산된 열유속과 유사한 경향을 나타낸다. 검정장치에서 측정된 열유속의 평균값은 히터에 인가된 전력을 기준으로 계산된 열유속의 평균값보다 크게 나타나지만 낮은 열유속 범위에서는 실제 측정된 열유속의 평균값이 작게 나타난다. 상용 열유속센서는 열유속 측정 시 주시험부의 진공부분과 접하고 있으므로 압력계이므로 측정되지 않는 미세한 누설의 가능성이 있으며 이에 따라 센서의 주위에 존재하는 차가운 냉매의 영향으로 인해 열유속센서 주위의 열전달 특성이 변화될 것으로 추정된다. 측정된 열유속의 평균값은 전력 입력을 기준으로 계산된 열유속 평균값과 비교하여 13%의 오차범위를 갖는다.

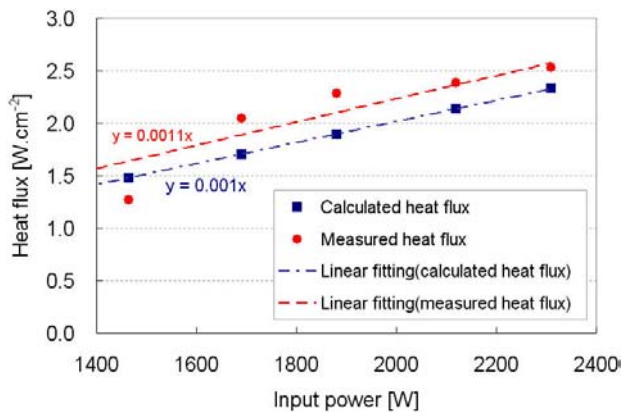


Fig. 10 Heat flux measurements in the test section

3. 결론

본 연구에서는 열전도도가 우수한 헬륨을 이용하여 열유속센서를 검정할 수 있는 열유속센서 검정장치를 디자인, 해석 및 제작하였다. 이를 통해 열유속센서 검정장치의 디자인을 평가하였다. 또한 열유속 측정실험을 수행하여 검정장치의 신뢰성을 평가하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 검정장치의 주시험부에서 7 개의 실린더 히터가 삽입된 구리블록 열원은 최대 35 kW/m²의 균일한 열유속을 나타내며, CFC-11 냉매와 열교환기로 구성된 히트싱크는 열원으로부터의 열을 효과적으로 전달하여 열유속센서의 검정이 가능하다.

2. 검정장치에서 실제로 측정된 열유속의 평균값과 히터에 인가된 전력을 기준으로 계산된 열유속의 평균값의 비교를 통해 나타난 본 검정장치의 오차범위는 13%이다.
3. 헬륨을 이용한 열유속 검정방법에서는 주시험부의 진공을 이용하므로 센서부착부의 열전달 현상과 열유속 측정 시 헬륨의 누설로 인한 열전달 현상의 비정상성을 확인하는 것이 가장 중요하다.

후 기

본 연구는 한국원자력연구소(KAERI)와 NRL의 재정적 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Diller, T.E., 1993, "Advances in Heat Flux Measurements," *Advances in Heat Transfer*, Vol.23, Academic Press.
- (2) Diller, T.E., 1999, *The measurement, instrumentation, and sensors handbook*, CRC Press.
- (3) Childs, P.R.N., Greenwood, J.R., Long, C.A., 1999, "Heat Flux Measurement Techniques," *Proc. Instrn. Mech. Engrs. Part C*, Vol. 213, pp. 655-677.
- (4) Jones, T.V., 1977, "Heat Transfer, Skin Friction, Total Temperature, and Concentration Measurements," in: *Measurement of Unsteady Fluid Dynamic Phenomena*, Hemisphere Pub. Corp., Washington, DC, pp. 63-102.
- (5) Grosshandler W., 1998, "Heat flux transducer calibration: Summary of the 2nd workshop," NISTIR 6424.
- (6) Grosshandler W., Blackburn D. 1997, "Development of a high flux conduction calibration apparatus," *Prod. ASME HTD*, Vol. 353, pp. 153-158.
- (7) Sadao Sumikama, 1984, *Introduction of Heat Flux Sensor - Its principle, construction and use*, Keigaku Publishing Co., Ltd.
- (8) Hwang D. W., Jung P. S., Joo H. H., 1999. "Performance of the heat flux sensor using thermoelectric semiconductor material," *Proc. Instrn. Mech. Engrs.*, Vol. 213, pp. 655-677.
- (9) Fluent Inc., 2001, *FLUENT 5 User's Guide*.