

대류방식을 이용한 열유속센서의 검정에 관한 연구

양훈철[†] · 송철화* · 김무환**

A Study on Calibration of Heat Flux Sensor by using Convective Heat Transfer

Hooncheul Yang, Chul Hwa Song and Moo Hwan Kim

Key Words : Heat Flux Sensor(열유속센서), Calibration(검정), Convection(대류), Standards(표준), Sensitivity(민감도), Uncertainty(불확실성)

Abstract

The objective of this work is to propose calibration facility in which a thin film type heat flux sensor can be calibrated under convective flow condition by using a small wind tunnel with the constant temperature plate condition. A small wind tunnel has been built to produce a boundary layer shear flow above a constant temperature copper plate. 12-independent copper blocks, thin film heaters, insulators and temperature controllers were used to keep the temperature of flat plate constant at a specified temperature. Three commercial thin film-type heat flux sensors were tested. Convective calibrations of these gages were performed over the available heat flux range of 1.4~2.5 kW/m². The uncertainty in the heat flux measurements in the convective-type heat flux calibration facility was $\pm 2.07\%$. Non-dimensional sensitivity is proposed to compare the sensitivity calibrated by manufacturer and that of experiment conducted in this study.

기호설명

d	: 열유속센서의 두께	[m]
D	: 동판 측면 에폭시의 깊이	[m]
H	: 열유속센서의 높이	[m]
k	: 열전도도	[W/m K]
P	: 동판주위 둘레길이	[m]
q"	: 열유속	[W/m ²]
R ²	: 회귀곱	[-]
Re	: 레이놀즈 수	[-]
S	: 민감도	[mV/W/m ²]
t	: 단열재의 두께	[m]
ΔT	: 온도차	[K]

V	: 공기의 속도	[m/sec]
w	: 동판 간 에폭시의 두께	[m]
x	: 노즐출구와 센서의 거리	[m]

그리스문자

ϵ	: 방사율	[-]
ν	: 동점성계수	[m ² /sec]

하첨자

conv	: 대류조건
flow	: 공기유동 조건
epoxy	: 에폭시
lateral	: 동판의 측면방향
insu	: 단열재

manufactured	: 열유속센서 공급업체의 검정장치
measured	: 대류형 검정장치
Non-dim	: 무차원
ref	: 기준 위치
sen	: 센서부착 위치
vert	: 동판의 수직방향

[†] 회원, 포항공과대학교 대학원 기계공학과,
한국에너지기술연구원 건물에너지연구센터

E-mail : yang@kier.re.kr

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

* 한국원자력연구소 열수력 안전연구팀

** 회원, 포항공과대학교 기계공학과

1. 서 론

열전달 현상을 분석함에 있어 온도와 함께 중요한 인자로 평가되는 것은 열유속이다. 온도를 측정하는 센서로 열전대나 측온 저항체(RTD)가 사용되는 것처럼 열유속을 측정하기 위해 열유속 센서(heat flux sensor)가 사용된다. 열유속 센서는 열전대와 달리 열유속에 비례하는 열기전력(thermo electromotive force) 값을 전압신호로 발생하므로 이 전압신호에 해당하는 표준 열유속 값이 알려진 검정장치에서 검정해야 한다. 일반적으로 대류 열전달 조건이 지배적인 환경에서 열유속 센서가 많이 사용되고 있으며 이를 위해 이 조건에서 열유속 센서를 검정하는 방법이 필요하다.

열전대, 열유속 센서 등을 이용한 열유속 측정에 대한 연구는 Diller⁽¹⁾와 Childs⁽²⁾ 등에 의해 정리된 바 있다. 또한 Jones⁽³⁾ 등은 열유속 센서와 표면에서의 열유속 측정방법을 정리하였다.

Borell 과 Diller⁽⁴⁾는 대류 검정방법의 한가지 방법으로 소형풍동을 이용한 충돌공기제트(impinging air jet)를 이용하여 정상상태(steady state)에서 Gardon 센서(Gardon-type circular foil gage)를 검정한 바 있다. 열유속 센서의 검정결과는 복사방식의 선형적 관계와 달리 비선형적인 검정결과를 얻었다. 이 비선형성은 복사조건에서는 무시할 만 하지만 대류조건에서는 영향을 준다고 하였다.

Hager 등⁽⁵⁾은 소형풍동에서 충돌공기제트를 이용한 검정방법을 보완하고 정상상태 조건에서 자체 제작한 열유속 센서를 검정하였다. 여기서 사용된 가드히터(guard heater)는 열유속의 손실을 최소화하기 위해 사용되었다. 이는 검정평면에서 충돌공기제트의 균일성에 대한 불확실성을 검토하였다.

Holmberg 등⁽⁶⁾은 일체형 동판과 독립히터 제어 방식을 이용한 대류열전달 조건에서 열유속 센서를 검정하는 방법을 제시하였다. 이 연구는 Schmidt-Boelter 열유속 센서 및 박막형 열유속 센서에 대한 검정실험을 수행하여 검정장치의 불확실성을 검증하였다.

Holmberg 등⁽⁷⁾은 세그먼트(segment) 형식의 동판과 에폭시(epoxy)로 구성된 대류 검정장치를 구성하고 실린더 형태의 열유속 센서를 동판에 삽입하여 열유속을 측정함으로써 검정장치의 불확실성을 검증하였다. 불확실성의 주요 원인은 실린더 형태인 열유속 센서와 동판의 결합 문제, 동판 하부로의 전도 및 평판상의 경계층 성장으로 분석하였다.

전재철 등^{(8),(9)}은 MEMS 방법을 이용하여 제작한 열유속 센서를 검정하기 위하여 소형풍동을 제

작하였으며 일체형 동판과 판상형 히터를 이용하여 등열유속(constant heat flux) 벽면조건에서 열유속 센서를 검정하였다.

이상과 같이 대류 검정방식에 대한 기존 연구를 분석한 결과 초음속 유동 조건에서 열유속 센서의 특성을 파악하는 경우⁽¹⁰⁾를 제외하면 소형풍동을 이용한 수직벽면상의 충돌공기유동과 평판상의 균일유동이 대표적인 대류형 검정방식이다.

기존 연구는 검정장치에서 열유속 센서를 검정함에 있어서 민감도에 대한 분석보다 불확실성을 위주로 기술하였다. 그러나 열유속 검정장치에 상용 열유속 센서를 적용하는 경우 열유속 센서 제작업체마다 제공하는 민감도(sensitivity)에 대한 신뢰도 및 열유속 측정 시 출력신호의 신뢰도에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 상용 제품인 R사와 C사의 박막형 열유속 센서를 구입하여 분석한 후 대류형 검정장치에서 이 센서들을 이용한 열유속 측정을 통하여 제작업체에서 제안하는 민감도를 검정하였다. 또한 무차원 민감도(non-dimensional sensitivity) 개념을 도입하여 제작업체의 민감도와 대류형 검정장치의 민감도를 분석하였다. 마지막으로 세그먼트 형태의 동판으로 구성된 대류 검정장치의 불확실성을 평가하여 본 연구의 신뢰도를 확인하였다.

2. 실험

2.1 소형풍동

열유속 센서가 부착되는 주시험부(test section)에 균일한 평판유동을 발생시키기 위하여 Fig.1 과 같이 저속 개방형 소형풍동을 자체 설계 및 제작하였다.

송풍기는 주시험부의 평판상에 균일한 공기유동을 형성하기 위해 사용되며 최대 출력용량 10.3 m³/min의 단상모터와 주파수 0.5 Hz단위로 조절이 가능한 인버터 조절기로 작동된다. 공기는 송풍기에서 주름관을 지나 1차 확관부와 열교환기를 지난다. 열교환기는 등온의 공기를 주시험부에 공급할 수 있도록 8,000 W급 항온수조로부터 냉각수를 공급 받는다. 알루미늄 열교환기는 환이 부착된 2단 11열의 형태로 구성된다. 열교환기를 통과한 공기는 2차 확관부를 지나 노즐부 및 1,200 mm의 수평 안정부로 이어진다. 안정부의 단면은 폭×높이=300 mm×300 mm의 크기를 갖는다. 수평부를 통과한 공기는 메쉬(mesh)를 지나 수축부를 통과하여 주시험부에 공급된다. 수축부는 300 mm×300 mm의 단면에서 300 mm×10 mm의 단면으로 수축

되어 30:1 의 수축비율을 갖는다. 수축부는 164 mm 의 길이와 2 차원 형상을 가진다. 수축부의 형상은 Holmberg 등^{(6),(11)}의 관계식을 이용하여 제작하였다. 주시험부의 평판상에는 레이놀즈 수 $Re=0\sim 40,000$ 인 층류유동이 형성된다.

2.2 주시험부

Fig.2 는 열유속 측정을 수행한 주시험부의 개략도이다. 주시험부의 평판은 5 mm 두께를 갖는 12 개의 서로 다른 크기의 동판과 에폭시 접착부로 구성되어 있다. Fig. 2(a)의 상단으로부터 1 행, 3 행, 4 행 동판은 가로×세로=300 mm×25.4 mm의 크기로 구성된다. 2 행의 동판은 가로×세로=25.4 mm×25.4 mm의 동판 7 개와 좌·우측에 가로×세로=2"×1"의 동판 2 개를 포함하여 총 9 개로 구성된다.

박막 센서가 부착되는 부분은 Fig.2(a)에 "S"로 표시된 중앙의 동판이며 "R"로 표시된 우측의 동판은 기준(reference) 열유속 측정 시 사용된다.

주시험부에서 동판의 온도를 측정하기 위해서 각 동판은 두께 5 mm 의 윗면으로부터 0.5 mm 떨어진 아래부분의 좌·우측면에 지름×깊이=0.3 mm×5.0 mm의 구멍을 제작하고 열전대는 이 구멍에 삽입하여 사용한다. 표준 RTD 센서와 항온조를 이용하여 검정된 열전대는 구멍 내부의 열전도 향상 및 고정을 위해 전도성 접착제(OMEGA-THERM)로 구멍내부를 메운다. 각 동판은 동판간의 열전도를 최소화하기 위하여 열전도도가 낮은 에폭시(epoxy)를 이용하여 연결하며 동판간의 간격은 1 mm가 되도록 유지한다.

12 개의 동판과 에폭시를 이용하여 1 개의 주시험부를 형성하기 위해서는 주시험부 모양의 틀에 12 개의 동판을 수평으로 배열한 후 동판의 구멍에 열전대를 각각 삽입하고 동판 표면의 반대방향에서 액체 에폭시를 부어 고체상태가 되도록 작업해야 한다. 이 후 동판 표면의 에폭시를 정리하면 동판과 에폭시가 차례로 배열된 평판을 구성하게 된다. 동판은 복사열의 흡수를 방지하기 위해 최대한 연마하여 방사율을 낮게 유지한다. Fig.2(b)는

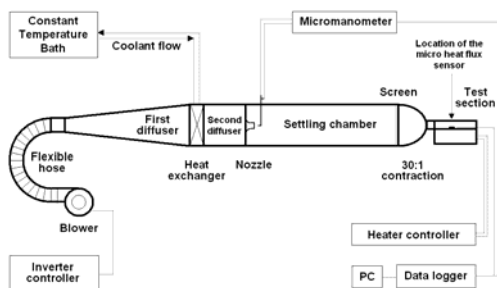


Fig. 1 Schematic diagram of the test facility

주시험부의 단면도이다. 각 동판을 가열하기 위해 가로×세로=25.4 mm×25.4 mm, 25.4 mm×50.8 mm, 25.4 mm×300 mm인 박막히터를 사용하였다.

2.2.1 히터 조절기

동판표면의 온도를 일정한 정상상태 조건으로 만들기 위해 박막히터에 공급되는 전력(power)은 12 개의 히터조절기로 각각 조정한다. 정상상태의 운전조건을 구현하기 위해 히터의 전력 공급을 일정하게 만들기 위한 정류기(rectifier)를 사용한 직류전원 구성과 PID 제어를 사용한다.

2.2.2 데이터 수집장치

각 박막히터에 공급되는 전력을 측정하기 위하여 히터공급선 양단의 전류와 전압 신호를 측정하였다. 전압과 전류의 신호로부터 노이즈를 제거한 후 곱셈 회로를 이용하여 오실로스코프(Tektronix, TDS3034)에 연결하면 입력 전력에 해당하는 전압 신호가 얻어진다. 히터에 공급되는 전력값은 데이터 수집용 프로그램(Wavestar, Tektronix)을 이용하여 평균값을 측정하였다. 열유속센서에서 출력되는 열기전력 신호, 온도 신호와 노즐부의 속도신호 및 주변온도 측정은 20 Hz의 데이터 수집장치(Agilent, 34970A)를 사용하여 측정한다.

2.3 열유속센서

열유속센서 중 가장 일반적인 센서는 Fig.3 과 같이 열저항 물질로 작용하는 박막 층상 내에서 모파일(thermopile)을 형성하여 열유동 시 박막의 상·하단에 존재하는 온도차에 해당하는 기전력을 발생시키는 층상형 게이지(differential layered gage)이다. 방열면에 열전도율이 k 이고 두께 d 가 충분히 얇은 판을 부착하면 열유동이 정상상태에 도달하고 난 후 이 얇은 판을 통과하여 흐르는 열유속 q'' 은 다음의 식으로 나타난다.

$$q'' = \frac{k \cdot \Delta T}{d} \tag{1}$$

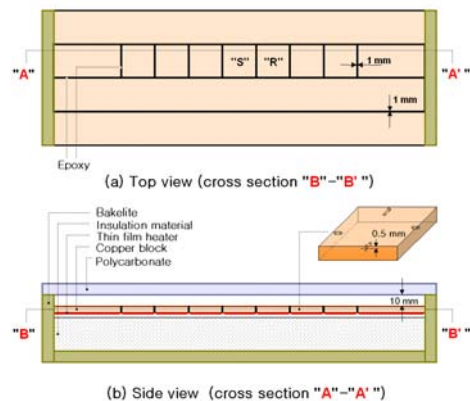


Fig. 2 Schematic diagram of the main test section

Table 1 Heat flux sensor specifications

Maker	Total size(W×D×H) ,mm Effective size(W×D×H) ,mm Effective size/total size, %	Sensitivity , μV/(W/m²)	Maximum operating temp. , °C	emmissivity	Thermocouple type
R corp. (A type)	17.8×6.4×0.3 5.5×3.0×0.4 14.5	0.4152	260	ε =0.6	T-type
R corp. (B type)	25.4×19.0×0.4 16.0×14.0×0.4 46.4	3.2268	260	ε =0.6	T-type
C corp.	16.5×11.3×0.5 6.5×11.3×0.5 39.4	1.44	150	ε =0.6	T-type

여기서 ΔT 는 얇은 열저항 물질내부에 있는 서모파일 상·하단의 온도차이다. 따라서 k 및 d 를 알고 있다면 ΔT 에 비례하는 열기전력 신호를 측정하여 열유속 q"을 구할 수 있는 것이 박판형 열유속센서의 측정 원리이다.

본 연구에 사용한 열유속센서는 Table 1 에 표시하였다. 열유속센서는 열저항 물질 내에 서모파일과 함께 T 형 열전대를 대부분 포함하고 있다. 또한 열유속센서의 전체면적에서 서모파일이 차지하는 유효면적은 15~50 % 이다. 박판형 열유속센서의 최대 사용온도는 Kapton 재질의 변형 혹은 용융 등을 고려하여 260 °C 이하에서 주로 사용한다. 열유속센서를 동판상에 부착하는 경우 동판과 열유속센서간의 열저항을 최소화하기 위하여 두께 0.05 mm의 열전도성 양면테이프(thermal conductive adhesive-9882, 3M)를 사용하였다.

2.4 실험조건

본 연구에서는 주시험부 평판상에서 수평벽면의 온도변화 및 열유속센서 부착부(S)와 기준부(R) 사이의 열유속 변화에 대한 실험을 통해 열유

속센서 검정장치의 특성과 열유속센서의 성능을 분석하였다. 여기서 레이놀즈 수는 다음과 같이 정의한다.

$$Re = \frac{V \cdot x}{\nu} \quad (2)$$

항온조의 냉각수를 소형풍동의 열교환기에 공급하면서 유지되는 공기온도는 23 °C이다. 소형풍동의 주시험부를 지나는 공기의 속도는 11.3 m/sec 이며 이에 대한 레이놀즈 수는 37,300 이므로 층류조건에 해당한다. 주시험부의 평판 벽면온도 변화는 40~90 °C 구간에서 5~10 K 간격 조건을 유지하였다. 따라서 벽면온도와 유동공기 간의 온도차는 17~67 K 이다. 본 연구의 실험조건은 Table 2 에 표시하였다.

3. 실험 결과

3.1 불확실성 분석

본 연구에서의 불확실성은 대류형 검정장치의 불확실성과 열유속 측정 시의 불확실성 및 히터에 공급되는 전력 측정시의 불확실성으로 구분된다. 대류형 검정장치의 불확실성은 동판의 측면방향·수직방향으로의 전도에 의한 불확실성과 복사 의한 불확실성이 대표적이다. 열유속 측정 시의 불확실성은 동판상에서 센서부착 부분의 열유속 분포의 불확실성이 대표적이다. 또한 히터전력 측정 시의 불확실성은 사용한 저항의 오차와 전류 및 전압 측정 시 계측기의 오차 때문에 나타난다.

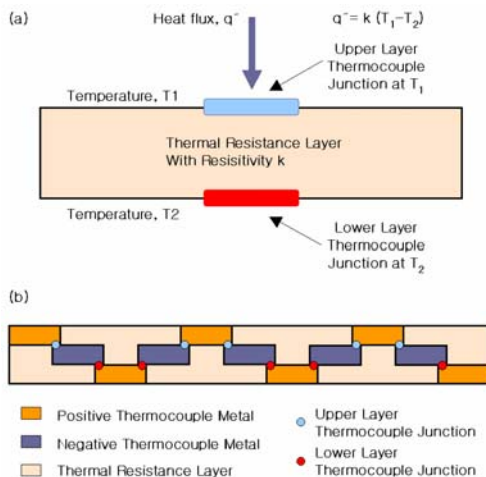


Fig. 3 Schematic diagram of heat flux sensor

Table 2 Experimental conditions

condition	remark
Reynolds number	37,300
Wall temp. (°C)	40/45/50/55/60/70/80/90
Air temp. (°C)	23
Position of HFS	Sensor part / reference part

3.1.1 측면방향 전도의 불확실성

동판 간의 측면방향 열전도에 의한 불확실성은 에폭시를 통한 열전도로부터 계산된다. 센서부착부의 동판 면적은 $25.4 \text{ mm} \times 25.4 \text{ mm}$ 이다. 에폭시의 폭은 1 mm 이다. 센서부착부의 동판에서 벽면온도와 공기온도의 차이인 ΔT_{flow} 는 50 K 에 대해 계산하였다. 센서부착부의 전력입력을 측정하여 q_{conv} 을 계산하고 에폭시를 통한 열누설은 식(3)을 이용하여 계산한다.

$$q_{\text{lateral}} = k_{\text{epoxy}} \cdot P \cdot D \cdot \frac{\Delta T_{\text{lateral}}}{W} \quad (3)$$

식(3)에서 k_{epoxy} 는 $0.2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이다. 동판의 센서 부착부와 기준부 온도차, $\Delta T_{\text{lateral}}$ 는 구리-콘스탄탄으로 제작한 서모파일로 측정하며 온도조절기의 최소조절 온도차, $\Delta T_{\text{lateral}}$ 로 인한 불확실성은 0.05 K 이다.

측정된 q_{conv} 이 0.915 W 의 경우 식(3)으로부터 계산된 q_{lateral} 은 0.0021 W 이다. 따라서 벽면방향 전도의 불확실성은 $q_{\text{lateral}}/q_{\text{conv}}$ 로부터 0.23% 이다.

3.1.2 수직방향 전도의 불확실성

박막히터로부터 하단에 존재하는 공기로 전달되는 열의 계산은 Mills⁽¹²⁾의 자연대류 상관식으로부터 구해진다. 동판은 에폭시로 연결되어 있고 이를 베크라이트로 제작된 틀에 맞추어 넣었기 때문에 동판과 박막히터는 단열재 상단과 직접 접촉하지 않는다. 수직방향 전도 측정에서의 불확실성은 온도측정 시 데이터 수집장치의 정확도에 의존한다. 식(3)과 유사하게 계산한 불확실성은 식(4)와 같이 계산된다.

$$q_{\text{vert}} = k_{\text{insu}} \cdot \left(\frac{P}{4}\right)^2 \cdot \frac{\Delta T_{\text{insu}}}{t} \quad (4)$$

식(4)에서 k_{insu} 는 $0.03 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이다. ΔT_{insu} 는 온도측정 시 데이터 수집장치의 정확도로 1.0 K 이다. 바닥 단열재의 두께는 10 mm 이므로 식(4)로부터 계산된 q_{vert} 는 0.0021 W 이다. 한 개의 동판에 대한 대류 열전달량이 0.915 W 인 경우 수직방향 전도의 불확실성은 0.23% 에 해당한다.

3.1.3 복사 에 의한 불확실성

대류조건에서 복사에 의한 불확실성은 작게 평가된다. 기존연구⁽⁷⁾에서 제안된 복사의 불확실성인 0.01% 를 유지하기 위해 주시험부의 바닥은 복사열이 흡수되지 않도록 하며 나머지 부위에서는 가능한 모든 열을 흡수해야 한다.

3.1.4 열유속 분포의 불확실성

신호증폭기의 불확실성은 1.50% 이며 데이터 수집장치에서 DC 입력에 대한 신호측정의 불확실성

Table 3 Experimental uncertainties

condition	uncertainty
Lateral conduction	0.23 %
Vertical conduction	0.23 %
Radiation	0.10 %
Heat flux distribution	1.51 %

은 0.004% 이다. 따라서 열유속센서에 연결된 신호 증폭기와 데이터수집장치의 불확실성의 합은 1.50% 이다.

센서를 동판상의 센서부에 붙인 경우 측정된 열유속과 기준 센서부의 열유속을 비교한 결과 $q''_{\text{sen}}/q''_{\text{ref}}$ 의 값은 0.974 이다. 기존의 이론적·수치적 해석⁽¹³⁾으로부터 평판에서 경계층의 성장에 따라 변화하는 열유속 분포의 불확실성은 기준 열유속부와 비교하여 0.20% 의 불확실성을 갖는다.

따라서 열유속분포에 따른 열유속 측정시의 불확실성은 계측기의 불확실성과 열유속분포의 불확실성을 합한 1.51% 이다.

3.1.5 히터 전력의 불확실성

히터 전력의 불확실성은 대류형 검정장치의 주 시험부 내에 존재하는 히터에 공급되는 전력의 불확실성을 나타낸다. 곱셈기에서 출력되는 전력신호는 오실로스코프로 측정하는데 정확도는 0.02% 이다.

3.2 상용 열유속센서의 열유속 측정

상용 열유속센서 민감도의 신뢰성을 검증하기 위해 대류형 검정장치에서 열유속 증가에 따라 민감도의 추이를 분석하였다.

Fig.4는 대류형 검정장치에서 측정된 상용 박막형 열유속센서 3개 모델에 대한 열유속과 무차원 민감도의 관계이다. 무차원 민감도(non-dimensional sensitivity)는 열유속센서 제조사에서 제시한 민감도를 본 연구에서 측정된 민감도로 나눈 값으로 각 열유속센서의 검정방법에 대해 평가할 수 있는 지표로 사용할 수 있으며 식(5)와 같다.

$$S_{\text{Non-dim}} = \frac{S_{\text{measured}}}{S_{\text{manufactured}}} \quad (5)$$

R사의 두 가지 센서와 C사의 한 가지 센서를 7개의 각각 다른 열유속 범위에 대해 무차원 민감도를 측정된 결과 각 센서의 무차원 민감도 값은 $0.76 \sim 1.13$ 에 분포되어 있다. 실험결과와 같이 각 제조사의 무차원 민감도는 기준보다 $-24 \sim +17\%$ 범위의 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 표준형 열유속센서의 검정장치에 대한 요구가 필요하다.

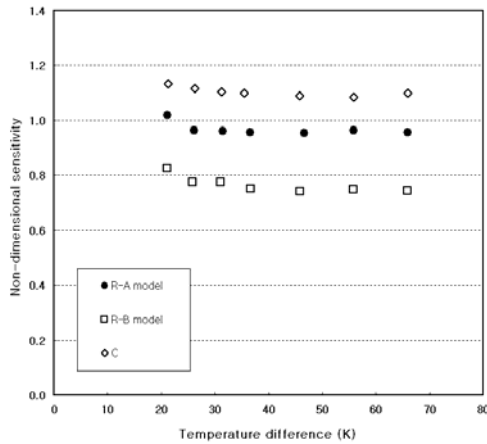


Fig. 4 Non-dimensional sensitivity

4. 결 론

본 연구는 열유속센서를 검정할 수 있는 대류형 검정장치를 자체 설계 및 제작하여 검정장치의 불확실성을 평가하고 상용 박막형 열유속센서를 2개사 3개 모델에 대해 구조분석하고 시험하여 열유속센서 제작업체에서 제공하는 민감도와 비교하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 12 개의 독립된 구리블록, 히터, 히터조절기 및 소형풍동으로 구성된 대류형 열유속 검정장치를 개발하였으며 전도와 복사에 의한 불확실성 0.56%와 열유속 측정 시의 불확실성 1.51%로 열유속센서를 검정할 수 있다.
2. 상용 열유속센서의 무차원 민감도가 0.76~1.13 범위에서 나타난 것은 열유속센서의 신뢰성을 향상시키기 위해 센서 제작업체의 검정방법과 불확실성에 대한 정보가 제공되어야 함을 나타낸다.

후 기

본 연구는 한국원자력연구소(KAERI)와 NRL 의 재정적 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Diller, T.E., 1993, "Advances in Heat Flux Measurements," *Advances in Heat Transfer*, Vol.23, Academic Press.
- (2) Childs, P.R.N., Greenwood, J.R., Long, C.A., 1999, "Heat Flux Measurement Techniques," *Proc. Instn. Mech. Engrs. Part C*, Vol. 213, pp. 655-677.
- (3) Jones, T.V., 1977, "Heat Transfer, Skin Friction, To-

- tal Temperature, and Concentration Measurements," in: *Measurement of Unsteady Fluid Dynamic Phenomena*, Hemisphere Pub. Corp., Washington, DC, pp. 63-102.
- (4) Borell G.J., Diller T.E., 1987, "A Convection Calibration Method for Local Heat Flux Gages," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 109, pp. 83-89.
- (5) Hager J.M., Simmons, S., Smith, D., Onishi, S., Langley L.W., Diller T.E., 1991, "Experimental Performance of a Heat Flux Microsensor," *J. of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 113, pp. 246-250.
- (6) Holmberg, D., Steckler, K., Womeldorf C., Grosshandler, W., 1997, "Facility for Calibrating Heat Flux Sensors in a Convective Environment," *Proc. of the ASME Heat Transfer Division*, Vol. 3, pp. 165-171.
- (7) Holmberg, D., Womeldorf C., Grosshandler, W., 1999, "Design and uncertainty analysis of a second-generation convective heat flux calibration facility," *Proc. of the ASME Heat Transfer Division*, Vol. 4, pp. 65-70.
- (8) Jaechul Chun, Moo Hwan Kim, Seung S. Lee, 1999, "Heat Transfer Measurement using Heat Flux Sensors," *Proc. of the KSME Heat Transfer Division*, pp. 16-21.
- (9) Jaechul Chun, S. Hwan Oh, Seung S. Lee, and Moo Hwan Kim, 1999, "Design and Fabrication of Micro Heat Flux Sensor," *Transducer '99*, pp. 414-417.
- (10) Holmberg, D., Diller, T.E., 1995, "High-Frequency Heat Flux Sensor Calibration and Modeling," *J. of Fluids Engineering*, Vol. 117, pp.659-664.
- (11) Morel, T., 1977, "Design of Two-dimensional wind tunnel contractions," *J. of Fluids Engineering*, pp.371-377.
- (12) Mills, A. F., 1995, *Heat and Mass Transfer*, Richard D. Irwin, Inc., p347.
- (13) Holmberg, D., Womeldorf C., 1998, "Report on the First-Generation NIST Convective Heat Flux Calibration Facility," *NIST Internal Report 6197*.