

온도 경계층 측정용 열전대 센서 개발

서종범* · 한상조**

* 서울과학기술대학교 기계자동차공학과

Development of Thermocouple Sensor for Thermal Boundary Layer Measurement

Jongbeom Seo* and S. Han**

* Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology.

(Received May 10, 2014 ; Revised August 27, 2014 ; Accepted September 23, 2014)

Key Words: Thermocouple(열전대), Thermal Boundary Layer(온도 경계층), Nusselt Number(누셀 수)

초록: 본 연구에서는 등온 벽에서 가까이에 위치한 유동과 같이 온도 구배가 큰 곳에서 발생하는 전도 오차를 줄이기 위해 새로운 열전대의 형상 설계 및 제작 방법을 제안하고자 한다. 전도오차를 줄이기 위하여 지름이 79.9 μm 인 열전대를 이용했으며, 아크 용접을 통해 제작된 상대적으로 접점이 큰 일반 열전대와 다른 butt-welded 열전대를 제작하기 위하여 용접용 5축 장비가 고안됐다. 열전대의 단면을 맞게 하여 용접해 접합부위 크기를 최소화 했다. 온도 보정 실험을 통하여, 일반적인 형상의 열전대와 이 연구에서 제안하는 열전대의 온도 측정 결과가 동일함을 알 수 있었다. 접합부가 79.9 μm 지름을 가지는 butt-welded 열전대를 온도 경계층에 침투시켜서 전도에 의한 오차를 최소화하여 급격히 변하는 온도 경계층의 온도를 효과적으로 측정할 수 있게 되었다. 개발된 센서를 이용하여 선형 터빈 날개가 장착된 풍동에서 온도 경계층을 측정하였고, 측정된 결과를 Nusselt 수로 나타내었다.

Abstract: This research focused on designing an appropriate thermocouple sensor for a thermal boundary layer with a large temperature gradient. It was designed to minimize the conduction error from a constant temperature wall in a boundary layer. A 79.9- μm thermocouple was chosen, and a five-axis device jig was developed to fabricate a butt-welded thermocouple, which is different from arc-welded junction thermocouples. This was used to minimize the size of the thermocouple junction. In addition to fabricating butt-welded thermocouples, a thorough calibration was conducted to decrease the internal error of a multimeter to ensure that the data from the butt-welded and regular thermocouples were almost the same. Based on this method, a butt-welded thermocouple with a small junction was found to be suitable for measuring the temperature in a thermal boundary layer with very large thermal gradients. Using this thermal boundary layer probe, the thermal boundary layers in a turbine cascade were measured, and the Nusselt numbers were obtained for the turbine endwall.

- 기호설명 -

1. 서론

- C_L : 터빈 블레이드의 특성 길이
- n : 등온 벽으로부터의 거리
- h : 대류 열전달 계수
- Nu : 누셀 수(Nusselt number)
- TC : 열전대(Thermocouple)

많은 에너지 시스템에서 열에너지의 변화는 온도를 측정함으로써 계산할 수 있다. 온도는 상대적으로 쉽게 측정할 수 있는 물리량으로 수은 온도계, RTD(Resistance temperature detector), 열전대(Thermocouple), 적외선 측정기, Thermistor, 반도체 온도센서 등을 이용해서 측정할 수 있다. Thermistor의 경우에는 측정 가능 범위가 제한적이고, RTD는 높은 정확도를 가지지만 가격이 비싸며

† Corresponding Author, sjhan@snu.ac.kr
© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

자체발열, 측정 가능한 온도 범위의 제한이 존재한다. 반면 열전대의 경우에는 보정실험을 통해서 오차를 최소화 시킬 수 있으며, 높은 내구성과 설치의 편의성 때문에 일반적으로 넓은 범위에서 온도 측정에 사용된다. 그러나, 이러한 온도 측정용 센서들은 적외선 측정기를 제외하고는 모두 측정하고자 하는 대상 속에 침투하거나 대상의 표면에 부착함으로써 대상물과 센서 사이의 열전도에 의해 발생하는 전도오차에 취약한 문제를 가지고 있다. Turbine cascade 의 열전달 분석, 열전달과 물질전달의 상사성 등에 관련된 Nusselt number 와 heat transfer coefficient 를 구함에 있어서 벽에 근접한 곳의 온도 측정이 큰 영향을 미친다. 그런데 등은 벽에 가까이 위치한 유동과 같이 급격한 온도 구배를 보이는 유동 속에서 측정에 사용하는 센서를 통한 전도 오차는 심각하다. 그러한 환경에서 정확한 온도를 측정하는 것은 단순히 정밀한 센서를 사용하는 것만으로 해결되지 않는다. 측정을 위해서는 전도 오차를 최소화하기 위한 적절한 형상의 설계가 반드시 수반되어야 한다. Blackwell 등⁽¹⁾은 느린 속도의 난류 경계층에서 전도에 의한 오차를 제거하는 것을 최우선적 목표로 작은 온도 측정용 열전대 센서를 제작하였다. 이 선행연구에서는 센서의 기하학적 구조뿐만 아니라 열과 전기 사이의 특성도 전도에 의한 오차에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이렇게 제작된 열전대는 국소 열전달 계수를 측정하는데 적절한데 Qiu 등⁽²⁾은 특히 벽 근처에 대해 연구 했다. Han 등⁽³⁾은 터빈 날개의 등은 표면에서 열전달을 측정하였는데 열 경계층 측정을 통해 온도분포와 Nusselt number 변화에 대한 결과를 보여주었다. Sundqvist 등⁽⁴⁾은 100-450 K 에서 열전대의 주요한 재료가 되는 금속인 Chromel, Alumel, Constantan 의 thermal diffusivity 와 thermal conductivity 에 관한 이론을 설명하고 있으며 450K 를 넘어갈 경우 50%이상 thermal conductivity 가 증가하는 것을 발견했다. 온도경계층 중 벽에 가까운 곳에 온도를 측정할 경우에는 대류보다 전도에 의한 열전달 효과가 더욱 중요한데 이러한 결과는 다음의 선행연구들을 통해 알 수 있다. Durst 등⁽⁵⁾은 높은 thermal conductivity 를 가지는 벽에서 hot-wire 를 이용한 속도 측정 중 추가적인 열 손실로 인한 오차를 교정했고, Bhatia 등⁽⁶⁾은 벽 근처에서 수치해석을 이용해서 hot-wire anemometer 를 교정하였다. Shi 등⁽⁷⁾는 마이크로 사이즈의 실린더의 벽면 효과에 따른 열전달을 수치적으로 해석하였고, Durst 등⁽⁸⁾은 수치해석을 통해 Couette flow 에서 hot-wire 센서를

이전의 수치해석보다 더 발전된 모델을 사용 교정하였다. Aiba 등⁽⁹⁾은 원형 실린더의 표면에서의 열전달을 직접 측정한 실험적인 데이터를 제공하였다. 또 Aiba 등⁽¹⁰⁾은 벽 근처에서 실험적으로 얻어진 hot-wire 정보를 보정하는데 수치해석을 사용하여 측정 오차를 계산하였다. 이러한 hot-wire 의 연구는 마이크로 사이즈의 열전대의 온도측정 시에 생기는 벽면 효과에서 생기는 오차에 줄이는데 크게 도움이 될 것으로 생각된다.

본 연구에서는 열전달 분석의 중요한 열경계층의 온도 측정은 전도 오차 때문에 측정이 난해한 점을 butt-welded 된 열전대를 이용하여 해결하고자 한다. 열경계층은 이론적으로 Fig. 1과 같은 형상을 가지고 있는데, 실제로 butt-welded 된 열전대를 이용하여 측정해 보면 Fig. 2에서와 같이 경계층 두께는 약 0.4mm 로 얇아 온도가 급격하게 변화한다. 따라서 온도측정에 일반적으로 사용되는 아크 용접된 열전대는 접점의 지름이 0.3mm 정도로 경계층의 온도를 측정하는데 적절하지 않다.

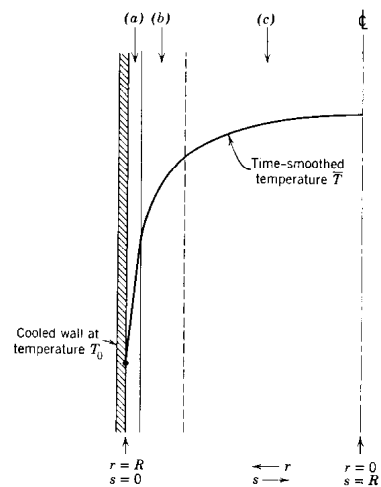


Fig. 1 Analytic thermal boundary layer (Bird, R.B.⁽¹¹⁾)

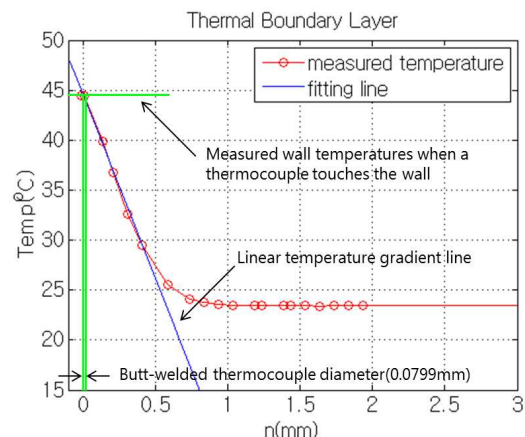


Fig. 2 Typical thermal boundary layer profile in laminar flow

2. 열전대 제작 및 성능시험 장비

2.1 열전대 제작

본 연구의 벽면근처 유동 속에서 온도 경계층을 측정하는데 사용되는 79.9 micron 지름의 열전대를 용접하는 방법 및 장비에 대해서 소개하도록 한다. 일반적인 열전대는 벽면 유동의 경계층(Fig. 1)에서 온도를 측정할 때 둥근 형태의 접점의 크기가 경계층의 급격한 온도변화 구간의 폭보다 크기 때문에 경계층의 온도를 측정하는데 한계가 있다. 이 문제를 해결하기 위해서는 급격히 변하는 온도경계층의 두께보다 얇은 열전대를 이용하여 접점의 크기를 최소로 만들어서 측정하는 방법이 있다. 상업적으로 사용이 가능한 최소 두께의 열전대의 지름은 79.9 micron 이나 이 열전대의 접점을 최소의 크기로 제작하는 것은 쉽지 않은 과정이다. 접점의 크기를 최소로 제작하기 위해서는 butt-welding 기술을 이용하여 전선의 두께와 같은 열전대 접점을 만들어야 한다.

하지만 지름 79.9 micron 의 열전대를 이러한 방식으로 용접하는 것은 쉽지 않다. 그래서 열전대 용접을 위한 전용 5 축 용접 장비를 직접 설계 하여 제작하였다. 5 축 용접용 지그는 얇은 두 개의 금속선을 일렬로 배열하기 위하여 x, y, z 의 3 축과 θ_1 , θ_2 의 두 방향으로 각도를 조정하는 것이 가능하다(Fig. 3). 이와 같은 5 개의 축을 가진 장비를 이용하여 열전대의 끝을 평행하게 접촉 시킬 수 있다. 두 개의 가는 열전대선의 접촉은 약 100 배율의 광학 현미경을 사용하여 확인하였다. 열전대의 용접은 두 개의 구리 집게에 용접할 열전대를 피복을 벗겨 전류가 통할 수 있도록 고정하고, 반대편 양 끝을 각각 양극과 음극에 연결한 후 열전대의 양 끝을 5 개의 축을 이동하여 맞춘 후 열전대 용접기를 이용하여 용접했다. 용접 시에는 광학현미경을 이용하여 열전대의 양끝의 단면이 서로 일치하도록 맞닿게 하고 전압을 조절하여 용접 한다. 일반적인 열전대와 본 연구에서 다루는 열전대의 외관적 차이는 Fig. 4에서 확인할 수 있다. Fig. 4에서 왼쪽은 일반적인 열전대로 열전대의 끝 부분인 접합부를 보면 원형으로 접합되어 있는 것을 볼 수 있다. 아크 용접에 의해서 두 개의 금속이 녹으면서 접합이 되기 때문에 왼쪽 그림과 같이 끝 부분이 원형으로 열전대 두께보다 더 큰 접점이 생성된다. 오른쪽 그림에는 5 축 용접 장비를 통해서 제작된 본 연구의 열전대이다. 앞에서 언급한 접점의 크기를 최소화하기 위해서 열전대의 각 금속 양끝이 평행하게 접촉하게 한 후 용접하였다. 이러한 평행 조건을 맞춰주기 위해서 5 축 용접 장비가 사용되었다.

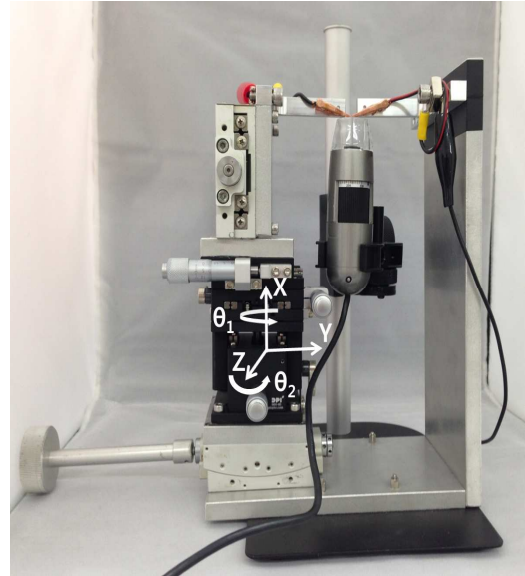


Fig. 3 5 axis device to fabricate the butt-welded TC

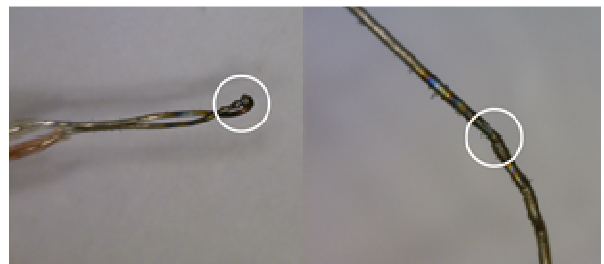


Fig. 4 The contact point of the ordinary TC(left) and of the butt-welded TC(right)

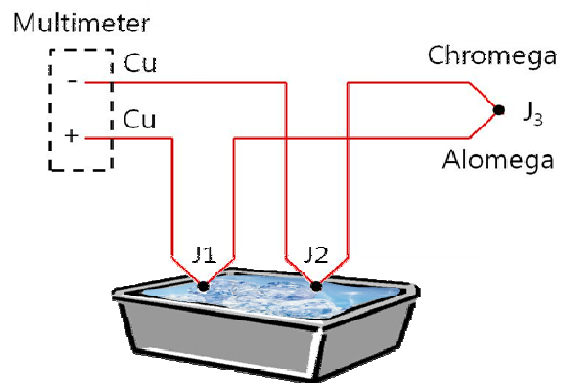


Fig. 5 The schematic of thermocouple measurement circuit

2.2 열전대의 성능 평가를 위한 오차 교정

앞 절에서 설명한 용접 장비를 이용하여 만들어진 열전대의 성능을 평가하기 위해서는 오차 교정이 수반되어야 한다. 정확한 교정을 위하여 우선 측정 장비의 오차 교정(Calibration)을 수행하였다. 측정 장비로는 Agilent의 Multimeter 34970A를 사용하여 각 열전대의 기전력(emf)값을 측정하였다. 멀티미터의 uncertainty는 장비의 분해능(resolution)이 가장 큰 영

향을 미친다. 멀티미터의 분해능은 $1 \mu\text{V}$ 로 온도로 환산하면 약 0.0025 K 이다. 그러므로 멀티미터에 의한 uncertainty 는 0.0025K 으로 볼 수 있다. 일반적으로 멀티미터의 데이터수집보드의 Low 와 High 터미널에 열전대를 연결하고, 온도 값을 측정한다. 하지만 여기에는 여러 가지 오차가 존재한다. 예를 들면, 온도계산을 위한 내장함수가 실험에 사용하려는 열전대와 맞지 않거나, 내부 ice point 로 사용하는 칩의 기준점 온도가 채널 별로 다른 오차들이 존재한다. 이러한 오차를 줄이기 위하여 내부 기준 온도를 이용하여 온도를 측정하는 것이 아니라, 실제 얼음물을 이용하여 Seebeck effect 에 따라 생성되는 기전력(emf)을 직접 측정하였다. 또한 장비 자체의 오차를 최소화하기 위해 내부 전압 차를 0 으로 만드는 교정을 먼저 수행하였다.

장비 자체의 내부 전압차이를 교정한 과정은 다음과 같다. 첫 번째로 사용하려는 데이터 수집보드의 터미널을 구리 선으로 연결할 경우, 이론적으로 모든 금속이 Cu 로 연결되기 때문에 기전력이 0 V 가 나와야 한다. 하지만 실제로 사용되는 부품들의 차이로 모든 터미널에서 정확히 0 V 가 측정되지 않는다. 그러므로 구리 선을 연결한 상태에서 측정되는 전압차를 열전대를 이용하여 측정된 값에서 보정해 주어야 한다. Table 1은 구리 선을 이용하여 측정 단자를 열전대 없이 직접 연결한 상태에서 1 ms 간격으로 100 회 측정한 후 평균을 취한 결과이다. 이 측정 결과는 이론적으로는 0 V 를 나타내야 하므로 이 값을 실제 온도 측정시험에서 측정되는 기전력에서 반영하여 기전력을 보정하였다.

멀티미터의 A 채널과 B 채널에서 측정된 값은 일정한 값의 차이를 보였으며, 각 열전대(ordinary TC, butt-welded TC)를 서로 다른 채널에 연결했을 때도 같은 현상이 나타났다. 이는 장비의 각 채널의 오차로 판단된다. Table 2는 일반 열전대를 멀티미터의 A 채널에 연결하고, 본 연구의 butt-welded 열전대를 B 채널에 연결한 후 측정된 데이터이다. Table 3은 Table 2에서와 반대로 열전대를 연결했다. 그 결과 둘 다 A 채널이 조금 높게 측정되었다. 이와 같은 결과는 데이터 수집보드의 채널간의 오차로 볼 수 있다. 이후 두 채널에 대하여 각각의 교정 방정식을 따로 계산하여 교정을 수행하였다. 위 두 가지 방법을 통해 측정 장비에 대한 오차 교정을 수행하였다.

2.3 Butt-welded 열전대의 성능평가

열전대의 성능시험은 열전대 접점의 크기에 변화에 따라 온도 측정의 특성 변화 여부에 대해 알아보기 위하여 수행하였다. 시험에 사용된 열전대

Table 1 Comparison of internal voltage in multimeter

	Ch. A	Ch. B
Offset Voltage	$1.037 \mu\text{V}$	$0.922 \mu\text{V}$

Table 2 Measured emf data without A/B channel calibration

TC Temperature	Ordinary TC (Ch. A)	Butt-welded TC (Ch. B)	Relative difference
25.7°C	1.028mV	0.944mV	8.2%
29.5°C	1.201mV	1.117mV	7.0%
36.5°C	1.446mV	1.373mV	5.0%
41.2°C	1.654mV	1.598mV	3.4%
46.0°C	1.858mV	1.818mV	2.1%
Standard deviation	0.334mV	0.353mV	

Table 3 Measured emf data after exchanging thermocouple

TC Temperature	Butt-welded TC (Ch. A)	Ordinary TC (Ch. B)	Relative difference
23.2°C	0.956mV	0.929mV	2.8%
31.4°C	1.291mV	1.257mV	2.6%
37.7°C	1.544mV	1.519mV	1.6%
41.7°C	1.710mV	1.679mV	1.8%
47.7°C	1.955mV	1.931mV	1.2%
Standard deviation	0.385mV	0.386mV	

는 K Type 열전대로 Omega 의 TT-K-40-SLE 를 사용하였다. 동일한 Spool 에서 나온 열전대 선을 이용하여 Fig. 5의 회로대로 일반 접점과 butt-welded 접점으로 만들어진 열전대 2 개의 세트 로 실행하였다. Fig. 5에서 멀티미터에 연결된 두 채널을 구리선으로 연결하고 K type 열전대의 Chromega(Ni-Cr), Alomega(Ni-Al)와 용접시켜 Reference point 로 사용 될 접합부(J1, J2)를 만들었다. 단열을 위해 얼음물(0°C)을 스티로폼(Styrofoam)상자를 담아서 온도를 유지하도록 하였다. J1, J2 를 얼음물에 담았기 때문에 J3 에서 발생하는 기전력은 얼음물과 J3 의 온도 차이를 나타낸다. 이상적으로 얼음물의 온도는 0°C 이므로 Reference point 를 사용하기에 적절하며, 실제로 0.1°C 분해능을 갖는 수은 온도계로 측정된 결과 0°C 가 측정되었다. J3(ordinary TC, butt-welded TC 총 2 개)는 진공 보온병에 수은온도계와 함께 넣었으며 두 개의 열전대는 거의 동일한 위치에서 측정을 하였다. $20\sim 50^\circ\text{C}$ 의 물을 보온병에 넣어 열전대로 측정했으며, 충분히 섞은 후 수은온도계의 값과 기전력 값이 안정된 것을 확인하고 측정 값을 수집하였다. 보온병 입구에서 대류 열전달과 물의 물질전달은 미미하여 무시

Table 4 Measured emf data with A/B channel calibration

TC Temperature	Ordinary TC (Ch. A)	Butt-welded TC (Ch. B)	Relative difference
25.7 °C	0.961mV	0.944mV	1.8%
29.5 °C	1.134mV	1.117mV	1.5%
36.5 °C	1.378mV	1.373mV	0.4%
41.2 °C	1.586mV	1.598mV	-0.8%
46.0 °C	1.791mV	1.818mV	-1.5%
Standard deviation	0.3343mV	0.3529mV	
Error	0.6551mV	0.6917mV	

Table 5 Thermal boundary layer measurement conditions 1

	Experiment 1	Experiment 2
Wall temp.	45.48 °C	45.39 °C
Mainstream temp.	24.08 °C	23.92 °C
Temp. gradient	-41.58 °C/mm	-38.73 °C/mm
Inlet velocity	8.14 m ² /s	8.14 m ² /s
Outlet velocity	22.14 m ² /s	22.13 m ² /s
Inlet reynolds number	0.948×10 ⁵	0.949×10 ⁵
Outlet reynolds number	2.578×10 ⁵	2.580×10 ⁵
Turbulent intensity	0.2%	0.2%

Table 6 Thermal boundary layer measurement conditions 2

	Experiment 3	Experiment 4
Wall temp.	45.61 °C	45.66 °C
Mainstream temp.	23.92 °C	23.69 °C
Temp. gradient	-39.35 °C/mm	-32.67 °C/mm
Inlet velocity	8.13 m ² /s	8.13 m ² /s
Outlet velocity	22.13 m ² /s	22.12 m ² /s
Inlet reynolds number	9.49×10 ⁵	9.500×10 ⁵
Outlet reynolds number	2.582×10 ⁵	2.584×10 ⁵
Turbulent intensity	0.2%	0.2%

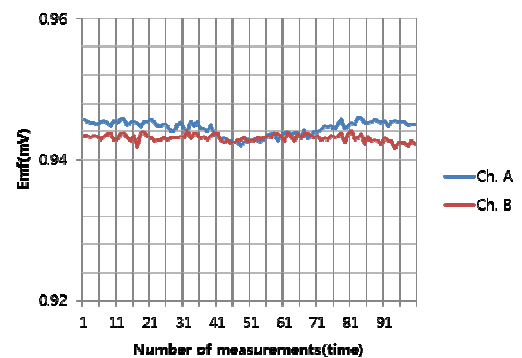


Fig. 6 Emf measurement distribution at 25.7 °C

할 수 있다. Fig. 6은 Table 4의 25.7 °C를 측정하였을 때 두개의 채널에서 emf 값의 변화를 보여 준다. 평균 값은 Table 2에서 확인할 수 있으며, 표준 편차는 Ch. A가 0.001 mV, Ch. B가 0.0005 mV이다. 기전력 값은 노이즈에 의한 오차를 줄이기 위하여 1 ms 간격으로 100 회 측정(약 2 초) 후 평균값을 취하였다. 열전대의 uncertainty는 약 0.0583 K으로 열전대를 교정하는 과정에서 발생하는데, 측정된 emf 값과 온도를 가지고 curve fitting 하는 과정에서 생긴 오차와 emf와 온도 측정의 오차로 구성된다. 이 결과를 통하여 일반적으로 만들어진 열전대와 butt-welded 된 열전대의 측정 특성은 동일하다고 판단된다.

2.4 열 경계층 측정

기존의 열전대가 점점이 크기 때문에 전도에 의해 온도 변화가 급격한 열 경계층 측정이 어려웠다. 본 연구를 통해 제작한 열전대를 이용하여 등

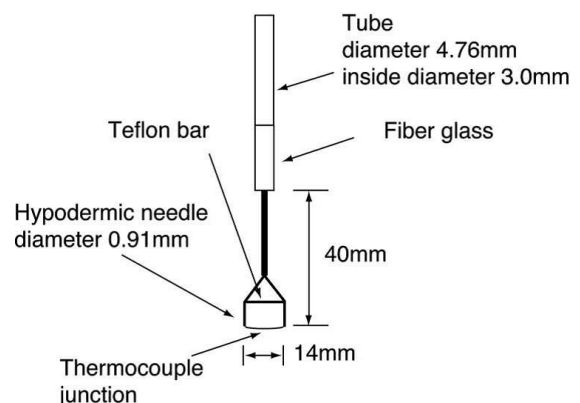


Fig. 7 The schematic of the butt-welded TC sensor

온 조건을 유지하여 butt-welded 열전대를 이용하여 제작된 센서(Fig. 7)를 가지고 열 경계층 측정(Fig. 8)을 했고, 일부 열경계층 측정 및 Nusselt number 계산 결과를 Fig. 10~ Fig. 13까지 나타내었다. Fig. 8은

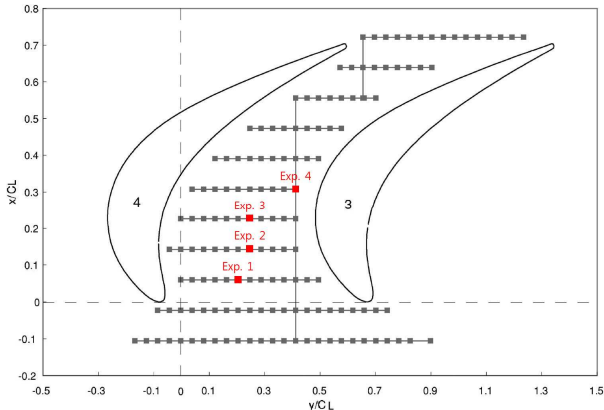


Fig. 8 Enwall measure points on turbine blade test section for thermal boundary layer

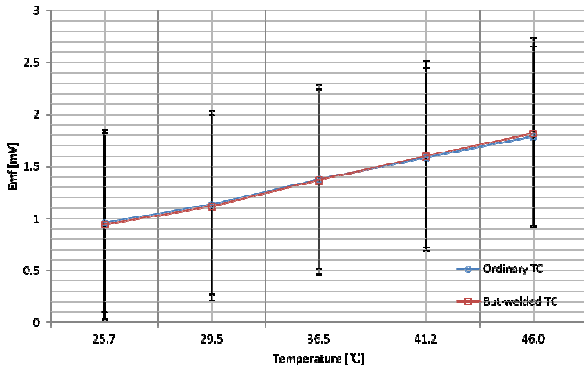


Fig. 9 Measured emf data from each TC after calibration

풍동의 test section 에서 열 경계층을 측정 한 점들을 보여준다. Table 5와 Table 6은 열 경계층 측정의 풍동 및 test section 의 실험 조건들이다.

3. 열경계층 측정 실험결과

장비의 offset 보정 없이는 Table 2, Table 3에서 보이는 것과 같은 오차가 나타난다. 앞에서 설명한 바와 같이 Table 4에서 구리 선을 터미널에 직접 연결 후, 얼음물을 이용한 교정을 수행한 후에 측정 한 값을 보면 일반적인 열전대와 butt-welded 열전대에서 측정되는 기전력은 수십 μV 정도의 오차만을 보이고 있다. 일반적인 열전대와 온도 경계층 측정을 위하여 제작된 열전대는 측정장비의 내부 오차를 보정 후 성능 시험을 한 결과 동일한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다(Table 4). 또한 Fig. 9의 그래프를 보면 확인할 수 있듯이 온도에 따른 기전력의 변화율도 두 열전대 모두 선형성을 나타내었다. 이 데이터는 99% 신뢰구간 기준, 각각 0.8624 mV 와 0.9105 mV 의 오차를 갖는데, 이를 온도로 환산하면 약 0.95 $^{\circ}C$ 이다. 이 결과는 일반적으로 접합부가 구형으로 용접된 열전대와 5 축 용접장비로 제작된 접합부가 최소화된 열전대의 온도 측정 능력이 같음을 보여준다. 따라서 butt-welded 열전대를 이용하여

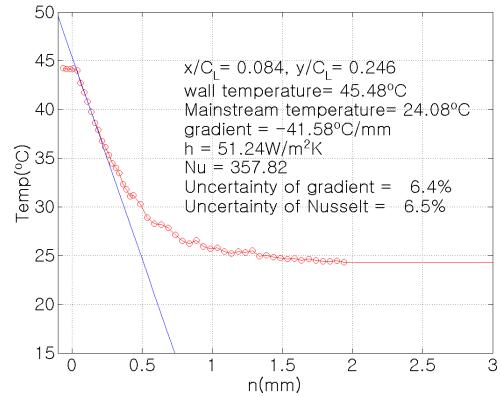


Fig. 10 Thermal boundary layer of experiment 1

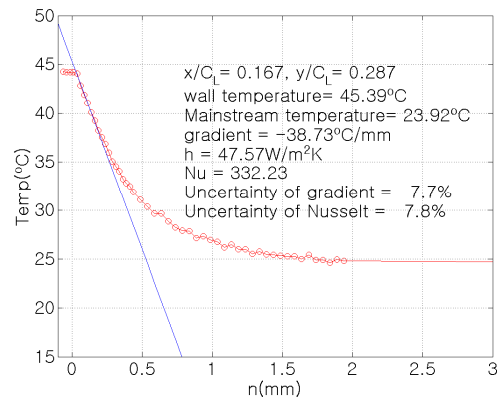


Fig. 11 Thermal boundary layer of experiment 2

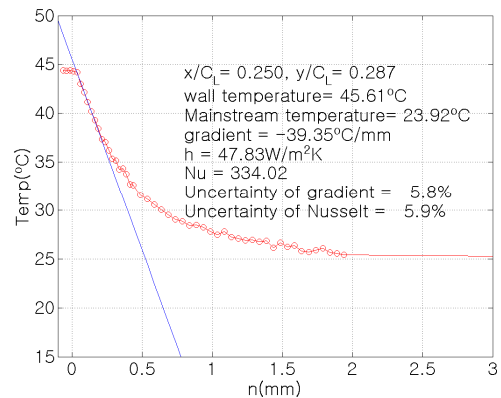


Fig. 12 Thermal boundary layer of experiment 3

열전대 접점의 크기를 지름 79.9 micron 으로 유지한 경우, Fig. 2에서 보여지는 온도경계층의 400 micron 정도 되는 온도 선형 구간에서 열전도 오차를 최소로 하여 온도 경계층의 측정이 가능하다.

Fig. 10 ~ Fig. 13은 본 연구의 열전대를 이용하여 등은 평판에서 열 경계층 측정 결과이다. 열 경계층의 전도 영역은 약 0.2 ~ 0.4 mm 이며, 벽 가까운 곳에서는 온도 구배가 약 $-40^{\circ}C/mm$ 로 매우 크다. 얇은 열 경계층에서는 일반 열전대의 접점이 경계

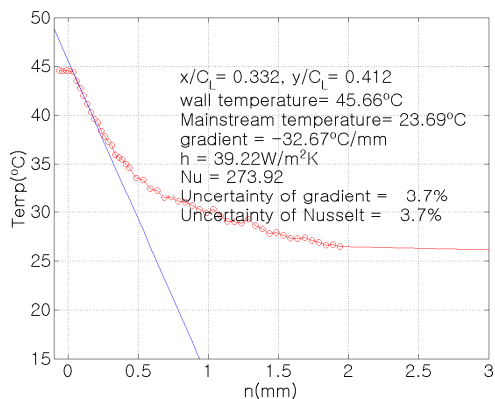


Fig. 13 Thermal boundary layer of experiment 4

층 두께보다 더 크기 때문에 열경계층의 측정이 불가능하다. 본 연구의 열전대는 일반 열전대와 동일한 성능을 가지고, 접점의 크기가 열경계층의 전도 영역의 두께 보다 작아서 얇은 열 경계층 속에서 정확한 온도 측정이 가능하다. 위에 있는 4개의 열 경계층 그래프는 Fig. 8의 x/C_L , y/C_L 의 위치에서 측정되었다. 측정된 그래프에 대하여 설명을 하면, butt-welded 된 열전대가 벽면에 접촉하여 벽면의 온도를 얻고, 벽으로부터 이동해 나오면서 전도층의 온도를 측정한다. 이때의 전도층에서 온도가 선형성을 가지기 때문에 이 기울기를 이용하여 Nusselt number를 측정할 수 있다. 유동의 발달 상태에 따라서 열 경계층의 두께가 변화되고 개발된 센서로는 전도 영역이 200 micron 정도인 열 경계층까지 Nusselt number의 uncertainty 3~7% 정도로 측정이 가능하다. 실제로 경계층이 측정된 위치를 비교해 보면 experiment 1에서 experiment 4의 측정점으로 이동할 때 유동의 속도가 증가한다. 이 유동을 butt-welded 열전대로 측정한 결과를 Fig. 10 ~ Fig. 13에서 확인해 보면 증가된 유속으로 인하여 벽면으로부터 유동의 온도가 선형적으로 변하는 전도 영역의 두께가 점점 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구를 통하여 Fig. 4에서 왼쪽의 일반적인 열전대와 오른쪽의 5축 열전대 제작 장비로 만든 butt-welded 열전대의 성능은 온도 측정 시험 결과 동일한 열전대로 취급할 수 있을 만큼 매우 유사한 결과를 얻었다. 온도 측정 성능은 일반 열전대와 동일하고 접합부의 크기가 전선의 굵기와 같으므로 본 연구를 통해 만들어진 열전대는 경계층에서 온도를 측정하는데 더 적합하다.

(1) Butt-welded 된 열전대를 제작하기 위해서 5

개의 단축 스테이지를 조합하였고, 20~200 배율 확대 가능한 광학현미경을 추가하여 장비를 완성하였다.

(2) 열전대 성능시험에 앞서 장비의 내부 전압 오차를 없애는 교정이 요구되어 장비의 오차를 보정 후 성능시험을 했다.

(3) 성능시험결과 일반적인 열전대와 개선된 열전대의 온도에 따른 기전력이 거의 동일함을 알 수 있었다. 또한 온도에 따른 기전력의 변화율도 마찬가지로 매우 유사했다. 이를 통해 butt-welded 열전대는 일반 열전대와 성능이 동일하고, 접점이 작아서 열전도 오차가 적은 강점을 가진다.

(4) Butt-welded 열전대의 성능은 일반 열전대와 동일하고, 접점의 크기가 더 작기 때문에 온도 경계층에서 Nusselt Number 측정을 위한 온도를 측정할 때 열전도에 의한 오차를 최소화할 수 있다.

(5) Butt-welded 열전대를 이용하여 풍동에서 등온 벽의 열 경계층 측정을 하였다. 열 경계층은 약 0.2 ~ 0.4 mm 정도이며, 온도 구배는 약 $-40\text{ }^\circ\text{C}/\text{mm}$ 이었다. 또 유동의 속도가 빨라짐에 따라 얇아지는 전도 영역의 두께의 변화가 측정 결과에서 확인 가능하다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것입니다. (2013R1A1A1061156)

참고문헌 (References)

- (1) Blackwell, BF. and Moffat, RJ., 1975, "Design and Construction of a Low Velocity Boundary Temperature Probe," *J Heat Transfer*, Vol. 97(2), pp. 313~315
- (2) Qiu, S., Simon, TW. and Volino, RJ., 1995, "Evaluation of Local Wall Temperature, Heat Flux, and Convective Heat Transfer Coefficient from the Near-wall Temperature Profile," *HTD Heat Transf Turbul Flows*, Vol. 318, pp. 45~52
- (3) Han, S. and Goldstein, RJ., 2007, "Heat Transfer Study in a Linear Turbine Cascade Using a Thermal Boundary Layer Measurement Technique," *J Heat Transfer*, Vol. 129, pp. 1384~1394
- (4) Sundqvist, B., 1992, Thermal Diffusivity and Thermal Conductivity of Chromel, Alumel, and Constantan in the Range 100~450 K," *J Appl Phys*, Vol. 72(2), pp 539~545
- (5) Durst, F., Zanoun, E.-S. and Pashtrapanska, M., 2001, "In Situ Calibration of Hotwires Close to Highly Heat-Conducting Walls," *Exp Fluids*, Vol. 31, pp. 103~110
- (6) Bhatia, JC., Durst, F. and Jovanovic, J., 1982,

- "Corrections of Hotwire Anemometer Measurements Near Walls," *J Fluid Mech*, Vol. 122, pp. 411~431
- (7) Shi, J.-M., Breuer, M. and Durst, F., 2002, "Wall Effect on Heat Transfer from a Micro-cylinder in Near-wall Shear Flow," *Int J Heat Mass Transf*, Vol. 45, pp. 1309~1345
- (8) Durst, F., Shi, J.-M. and Breuer, M., 2002, "Numerical Predictions of Hotwire Corrections Near Walls," *J Fluids Eng*, Vol. 124, pp. 241~255
- (9) Aiba, S. and Tsuchida, H., 1986, "Heat Transfer Around a Circular Cylinder Near a Plane Boundary," *Heat Transf Jpn Res*, Vol. 15(2), pp. 1~25
- (10) Aiba, S., 1985, Heat Transfer Around a Circular Cylinder Near a Plane Surface. *J Heat Transf*, Vol. 07(4), 916~921
- (11) Bird, R.B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E.N., 1960. *Transport Phenomena*. John Wiley and Sons.