

# 유속 및 열전대 위치의 영향을 고려한 열경계층 내부의 복합열전달 해석

전 병 진,<sup>1</sup> 이 주 안,<sup>2</sup> 최 형 권<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup>서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지시스템공학과

<sup>2</sup>서울과학기술대학교 기계자동차공학과

## NUMERICAL ANALYSIS OF CONJUGATE HEAT TRANSFER INSIDE A THERMAL BOUNDARY LAYER CONSIDERING THE EFFECTS OF A FREE STREAM VELOCITY AND A THERMOCOUPLE POSITION

B.J. Jeon,<sup>1</sup> J.A. Lee<sup>2</sup> and H.G. Choi<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Energy System, Graduate School of Energy and Environment, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

<sup>2</sup>Dept. of Mechanical/Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology.

*The error in measuring temperature profiles by thermocouple inside boundary layer mostly comes from the conduction heat transfer of the thermocouple. The error is not negligible when the conductivity of the thermocouple is very high. In this study, the effect of conduction heat transfer of the thermocouple on the temperature profile inside boundary layer was examined by considering both free-stream velocity and a thermocouple position. The conduction error of an E-type thermocouple was investigated by numerical analysis of three-dimensional conjugate heat transfer for various velocity profiles of boundary layer and thermocouple positions.*

**Key Words** : 전산유체역학(CFD), 열전대(Thermocouple), 복합열전달(Conjugate Heat Transfer), 평판유동(Flat-Plat Flow), 정상유동(Steady Flow)

### 기호설명(Nomenclature)

- $J_1, J_2$  : 열전대의 온도 측정점 및 냉점
- $D$  : 열전대의 지름(mm)
- $H_2$  : 열전대의 높이(mm)
- $H_3$  : 열전대의 측정 부위와 바닥과의 거리(mm)
- $W_2$  : 열전대의 폭(mm)
- $L$  : 수치해석 계산영역의 x축 길이(mm)
- $H_1$  : 수치해석 계산영역의 y축 길이(mm)
- $W_1$  : 수치해석 계산영역의 z축 길이(mm)
- $u_\infty$  : 속도경계층 밖의 속도(m/s)
- $T_\infty$  : 온도경계층 밖의 온도(K)
- $T_W$  : 계산영역 바닥의 온도(K)

### 1. 서 론

온도를 측정하는 것은 경우에 따라서 매우 중요한 문제가 된다. 실험이나 제조공정에서는 주위의 온도에 따라서 그 결과가 다르게 나오는 경우도 있으며, 정밀한 온도측정에 따른 체어가 필요한 경우가 발생한다. 따라서 많은 연구자들은 정확한 온도를 측정하기 위해서 여러 가지 방법들을 제시하였다. 하지만 정확한 온도를 측정하는 것은 매우 어려운 문제이다. 온도계의 종류는 수은과 같이 온도에 따라서 물체의 부피가 변하는 열역학적 성질을 이용한 역학적 온도계, 온도의 변화에 따라서 다르게 측정되는 전기적 양을 이용한 전기적 온도계, 복사 에너지를 이용한 복사 온도계, 복합적인 기능을 갖는 특수 온도계로 구분된다. 온도계는 그 종류와 특성에 따라서 온도측정의 정확도나 온도측정범위의 제한과 같은 문제점들을 갖는다. 최근에 산업용으로는 RTD(Resistance Temperature Detector) 센서와 열전대(Thermocouple)가 많이 사용된다. RTD는 정밀한 온도 측정과 절대 온도를 알 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 온도측정 범위가 좁고, 4선을 이용하는 방식이기 때문에 상대적으로 구조가 복잡하다는 단점을 가지고 있다.

Received: December 6, 2012, Revised: January 29, 2013, Accepted: January 30, 2013.

\* Corresponding author, E-mail: hgchoi@seoultech.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2013.18.1.077>

© KSCFE 2013

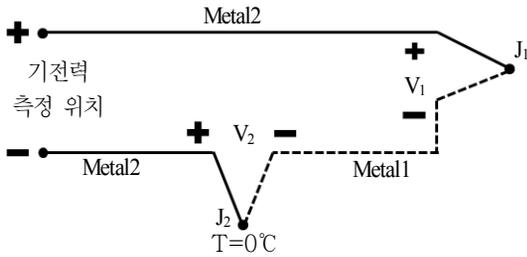


Fig. 1 Schematic diagram of a thermocouple

본 연구에서 다루게 될 온도계는 열전대[1]이다. Fig. 1과 같이 열전대는 두 종류의 다른 금속도체로 폐회로를 형성하고 두 결합 부위( $J_1$ ,  $J_2$ )의 온도 차를 유지하면 폐회로 내에 기전력(Electromotive Force)이 발생하는 원리(제백효과)를 이용한 온도계이다. 냉접점( $J_2$ )을 정확하게  $0^\circ\text{C}$ 로 유지해주고 측정점( $J_1$ )을 측정하려는 대상에 놓아두면, 기전력이 발생하여 온도를 측정할 수 있다. 열전대는 매우 넓은 온도 범위를 측정할 수 있고, 센서의 견고함으로 여러 환경에서 활용이 가능하다. 하지만 열전대는 구성하는 금속에 의한 전도의 영향과 열전대의 형상에 의한 주위 유동의 변화 등에 의해서 오차가 발생한다. 따라서 이러한 오차의 원인들을 보정하기 위한 연구는 여러 연구자들에 의하여 수행되었다. Sundqvist[2]는 열전대의 구성 재료인 금속을 통해서 일어나는 전도에 의한 영향을 알아보기 위해서 각 금속의 열 확산성에 대해서 연구하였다. Blackwell and Moffat[3]은 낮은 속도의 경계층에서 사용되는 열전대의 오차를 보정하기 위해 열전대의 디자인과 제작 방법에 대한 연구를 하였다.

한편, Shi et al.[4], Lange et al.[5], Bhatia et al.[6], Durst et al.[7], Durst et al.[8]은 2차원 수치해석을 통해서 벽 근처에 존재하는 실린더 주변의 전도를 포함한 복합 열전달을 연구하였으며, 높은 열전도성을 갖는 벽 근처에서의 속도를 열선풍속계(Hot Wire Anemometer)로 측정할 때, 열선풍속계 내부와 열선풍속계 주위에 일어나는 열전달에 의한 측정 오차를 연구하였다. 또한 여러 가지 조건의 실험과 수치해석 결과를 기반으로 오차를 보정하는 방안을 연구하였다. Chew et al.[9]은 채널 유동에서 열선풍속계를 이용하여 속도를 측정할 때 생기는 오차를 알아보기 위한 실험을 진행하였다. 위의 선행 연구들은 열전대를 사용하는 본 연구와 유사한 조건에서의 열선풍속계 주위의 복합열전달이 측정오차에 미치는 영향에 대한 연구들을 수행하였다. 하지만, 직경이 매우 작은 열전대로 온도를 측정할 때 공간적으로 큰 온도구배를 가지는 온도장의 측정오차에 관한 연구는 많이 이루어지지 못하였다. 최근에 Kulkarni et al.[10]은 지름  $0.076\text{ mm}$ 의 매우 작은 열전대를 이용한 실험을 바탕으로 수치해석을 이용하여 2차원 형상

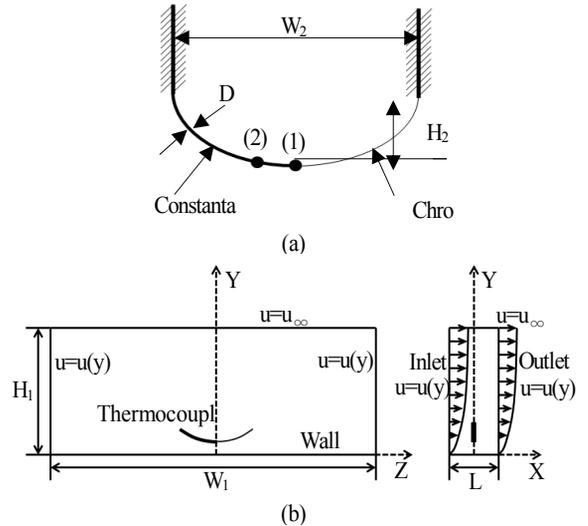


Fig. 2 Schematic diagram of the present simulation

에 대한 온도 측정의 오차를 연구하였다.

본 연구에서는 다양한 온도 및 속도 경계조건에 대해서 열전대를 포함한 전도 및 대류의 직접수치해석을 상용 CFD (Computational Fluid Dynamics) 프로그램을 이용하여 수행하였다. 수치해석 결과를 분석하여 열전대에 의한 속도장의 왜곡과 대류/전도를 포함한 복합열전달 현상이 열전대의 측정 오차에 미치는 영향을 정량적으로 고찰하였다.

## 2. 수치해석 방법

본 연구는 정상상태의 평판유동[11]에 대해서 해석을 수행하였으며, 본 연구에서 사용된 E-type 열전대는 Han and Goldstein[12]의 연구에서 그 성능이 입증된 모델이며, 같은 형상으로 모델링 하였다. Table 1은 열전대를 구성하는 금속의 물성치이다. Fig. 2는 본 연구의 수치해석 개략도이다. Fig. 2(a)에서와 같이 열전대의 양쪽 지지대는 단열처리(빗금친 부분)가 되어 있고 관심 해석영역에서 멀리 떨어져 있기 때문에 Fig. 2(b)에서와 같이 외부에 노출되어 있는 금속 부분만 모델링하여 수치해석을 수행하였다. 열전대의 크기는  $H_2=3\text{ mm}$ ,

Table 1 Material properties of constantan, chromel and mixture

Material	Density ( $\text{kg/m}^3$ )	Specific heat ( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ )	Thermal Conductivity ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ )
Constantan	8,900	390	19.5
Chromel	8,500	448	19
Mixture	8,825	420	20

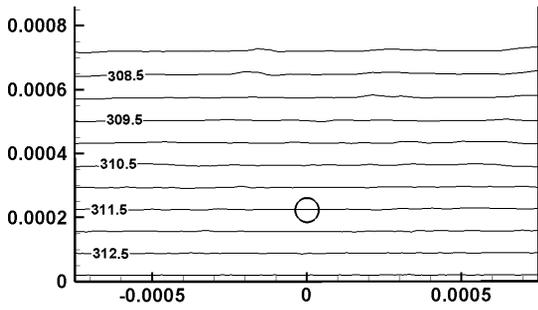


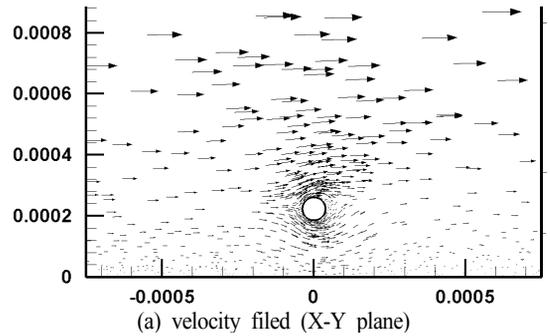
Fig. 3 Temperature contours for the case without thermocouple

$D=0.076$  mm,  $W_2=15$  mm이며, 계산영역의 크기는  $L=1.5$  mm,  $H_1=10$  mm,  $W_1=40$  mm이다. 바닥면은 No-slip 조건을 적용하였다. 속도분포는 Cubic polynomial 분포[13]를 적용하였으며,  $u_{\infty}=3$  m/s와  $u_{\infty}=6$  m/s인 경우에 대해서 수치해석 하였다. 또한 Fig. 2(b)의 입구 면과 좌, 우 경계면에서는 동일한 경계층 속도 분포가 주어지며, 출구 면은 무응력(Traction free) 조건을 적용하였다. 온도 분포는 속도 분포와 동일한 방식으로 Cubic polynomial 분포를 사용하였으며,  $T_{\infty}=27^{\circ}\text{C}$ 와  $T_{\infty}=14^{\circ}\text{C}$ 인 경우에 대해서 수치해석 하였다. 또한 Fig. 2(b)의 입구, 양쪽 면은 동일한 온도분포가 지정되었으며, 바닥의 온도는  $T_W=40^{\circ}\text{C}$ 이다. Kulkani et al.[10]의 평판 위의 열전대에 대한 2차원 수치해석에서 사용된 조건을 참고하여 속도경계층의 두께는 2.2 mm이며, 온도경계층의 두께는 2.65 mm로 가정하였다.

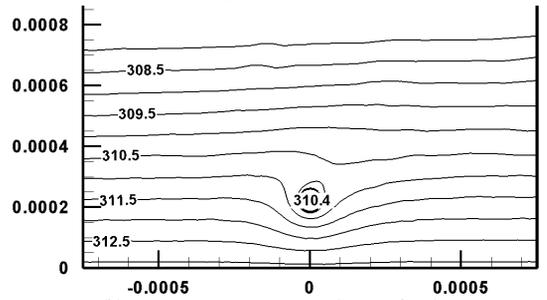
본 연구에서 사용된 3차원 격자는 2,502,000개의 사면체 격자로서, 격자생성 전용 프로그램인 ICEM-CFD 13.0 프로그램을 이용하여 생성하였다. 3차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식과 에너지방정식을 수치적으로 풀기 위해서 상업용 CFD 프로그램인 Ansys-Fluent 13.0을 사용했다. SIMPLE 알고리즘을 사용하였으며, 난류 모델은 고려하지 않았다. 그리고 운동량 방정식과 에너지 방정식에 대한 공간 차분은 2차 상류도식을 사용하였다.

### 3. 수치해석 결과

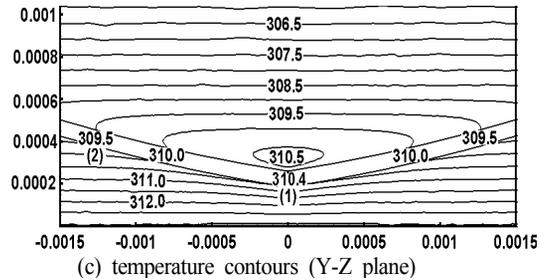
Fig. 3은 경계조건이  $u_{\infty}=3\text{m/s}$ ,  $T_{\infty}=27^{\circ}\text{C}$ 인 평판유동으로 열전대가 존재하지 않는 경우의 온도장이다. Fig. 4는 Fig. 3과 동일한 경계조건에서 열전대가 존재하는 경우로, Kulkani et al.[10]의 해석 조건과 동일한 조건이다. 열전대의 온도 측정 부위를 X-Y 면과 Y-Z 면으로 절단한 단면의 온도장 및 속도 벡터를 나타내었다. 본 연구에서는 Fig. 4의 경계조건을



(a) velocity field (X-Y plane)



(b) temperature contours (X-Y plane)



(c) temperature contours (Y-Z plane)

Fig. 4 Velocity field and temperature contours of the reference case

기준으로 조건들을 변경하며, 다른 경계조건에 대한 해석들을 수행하였다. Fig. 3과 Fig. 4(b)를 비교해보면 Fig. 4에서 열전대의 온도측정 부위의 온도가 Fig. 3에 비해서 약 1.1도 가량 낮은 것을 알 수 있다. Fig. 4(a)를 보면 열전대의 형상에 의해서 유동이 변하게 되어 열전대 주위의 열전달에 영향을 주게 되는 것을 알 수 있다. Fig. 4(c)를 보면 측정 온도의 오차가 발생하는 다른 원인을 알 수 있다. 온도를 측정하는 열전대의 중심 지점인 위치 (1)의 온도(310.4K)와 위치 (2)의 온도(309.5K) 간의 차이가 존재하는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 4(b)를 보면 온도측정 부위 (1)의 온도보다 주위의 온도가 상대적으로 높은 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과를 통해 열전대의 온도를 측정하는 부위는 전도에 의해 냉각효과가 발생하여 온도가 내려가는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 열전대가 존재하는 3차원 평판유동 해석에

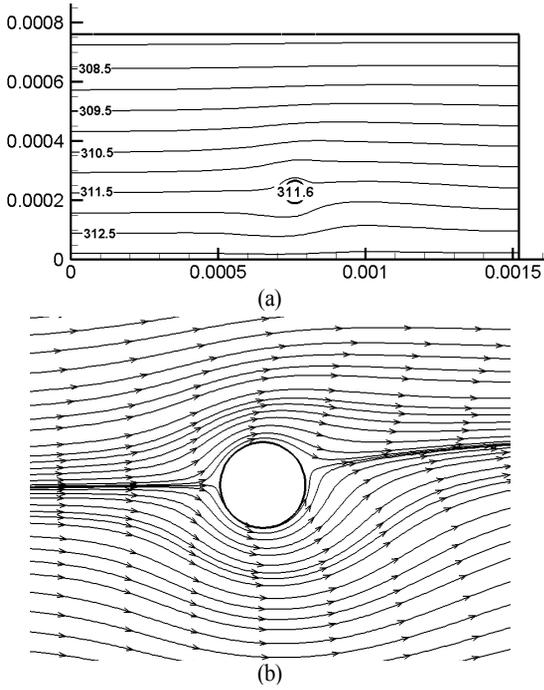


Fig. 5 Temperature contours(a) and streamlines(b) of 2D simulation (X-Y plane)

서 경계층의 온도구배에 의한 열전대 중심점에서 양 끝 단 방향으로의 냉각 효과를 확인하기 위해 z방향으로 무한대의 길이를 가지는 가상의 2차원(열전대 중심에서의 X-Y 평면) 평판유동에 대해서 해석을 수행하였다. Fig. 5는 경계조건이  $u_{\infty}=3 \text{ m/s}$ ,  $T_{\infty}=27^{\circ}\text{C}$ 인 2차원 평판유동으로 열전대가 존재하는 경우의 온도장(Fig. 5(a))과 공기의 유선 분포(Fig. 5(b))이다. Fig. 5(a)에서 온도측정 부위의 온도는 Fig. 3의 온도측정 부위의 온도보다 약  $0.1^{\circ}\text{C}$  높고, Fig. 4의 온도측정 부위의 온도보다는  $1.2^{\circ}\text{C}$  정도 높은 것을 볼 수 있다. 그 이유는 2차원 해석의 경우에는 열전대가 Z방향으로 무한한 실린더 문제와 동일하게 해석되어, 3차원 수치해석에서 나타나는 열전대 내부의 전도에 의한 영향이 전혀 나타나지 않기 때문이다. 그리고 Fig. 5(b)에서와 같이 공기의 유동은 열전대를 지나면서 위로 상승하고, 열전대는 바닥의 높은 온도의 영향을 받게 되

Table 2 The conditions of the simulations

	Conduction	Convection	Material	$u_{\infty}$ (m/s)	$T_{\infty}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
Case 1	O	O	Air	3	27
Case 2	O	X	Thermocouple	3	27
Case 3	O	O	Thermocouple	6	27
Case 4	O	O	Thermocouple	3	14

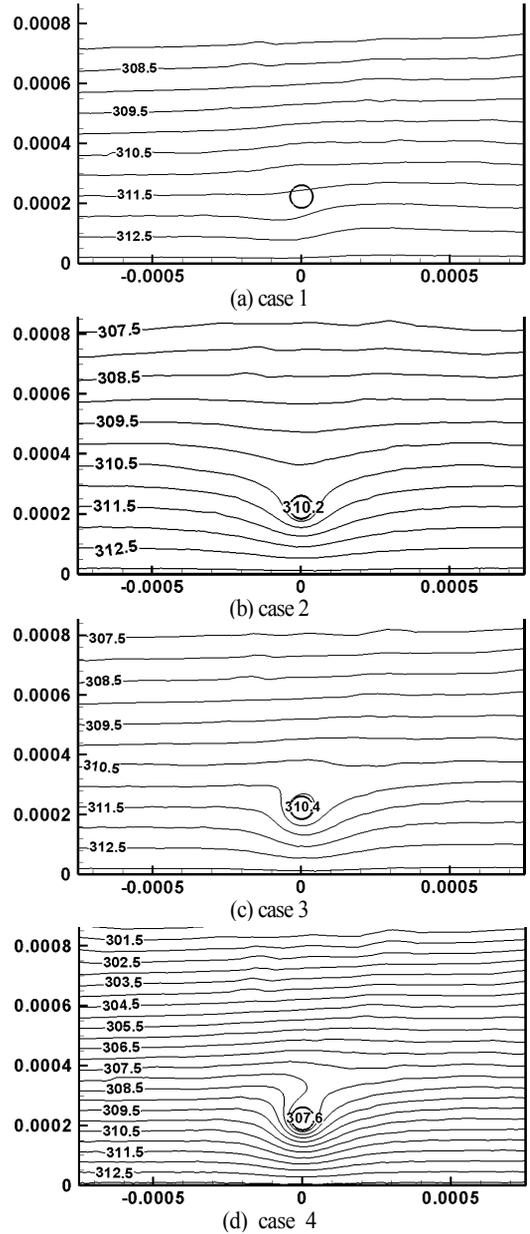


Fig. 6 Temperature contours of the four cases (X-Y plane)

어 Fig. 3보다 상대적으로 온도측정 부위의 온도가 높게 측정된다.

Fig. 6은 다양한 조건을 적용한 수치해석 결과들의 온도장이다. Table 2는 Fig. 6의 계산 조건을 정리한 내용이다. Case 1은 열전대 형상의 물성치를 열전대가 아닌 공기와 동일하게 적용하여 수치해석을 수행하였다. Case 1의 경우에는 Fig. 4에

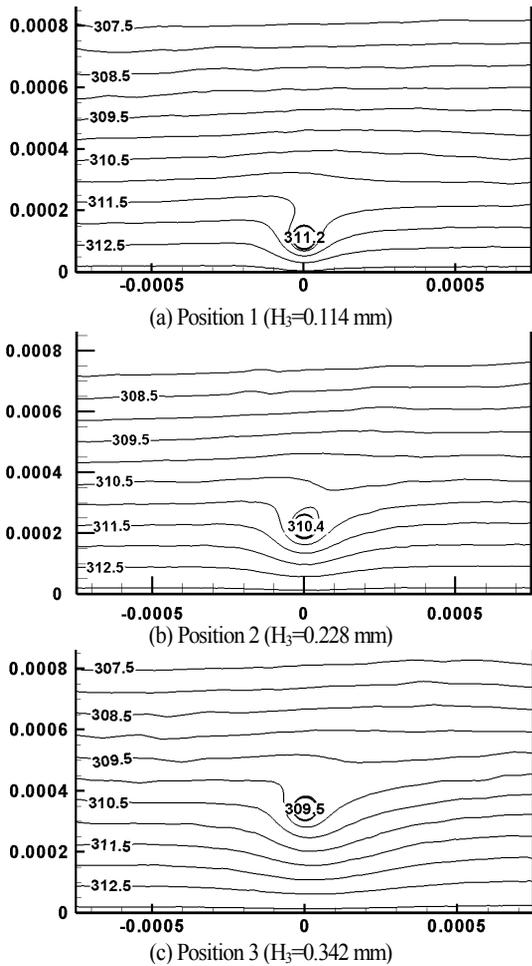


Fig. 7 Temperature contours of various thermocouple positions (X-Y plane)

서 나타나는 열전대와 주변 공기의 물성치 차이에 의한 전도 효과가 발생하지 않는다. 그리고 대류에 의한 열전달에 의해서 측정부위의 온도는 Fig. 3의 측정부위의 온도보다 약간 높게 나타난다. Case 2는 공기의 유동이 없이 열전도에 의한 영향만 고려한 조건으로 수치해석을 수행한 결과의 온도장이다. 주변 유체의 속도가 0 m/s이기 때문에 Reynolds 수는 0이 되어 열전대를 기준으로 좌, 우의 온도장이 대칭을 이루고 있다. 열전대 내부의 전도에 의해서 온도측정 부위의 온도는 Fig. 3에 비해서 1.3도 가량 낮게 나타난다. Case 3은 경계조건이  $u_{\infty}=6$  m/s,  $T_{\infty}=27^{\circ}\text{C}$ 인 경우에 대해서 수치해석을 수행한 결과의 온도장이다. 직경이 매우 작은 열전대가 벽에 가까이 위치하기 때문에 속도가 두 배로 증가하였지만 열전대 주위의 유동장에 대한 레이놀즈 수는 5이하로 여전히 매우 작다. 따라서 전도에 의한 열전달이 지배적이므로 온도측정 부

위의 온도와 열전대 주변의 온도장은 Fig. 4의 결과와 유사하게 나타난다. Case 4는 경계조건이  $u_{\infty}=3$  m/s,  $T_{\infty}=14^{\circ}\text{C}$ 인 경우에서 수치해석을 수행하였다. Case 4의 경우에는 Fig. 4의 계산 조건에 비해 온도장의 온도구배가 2배로 증가하면서 실제 측정되어야 하는 온도인 309.8K보다 낮은 온도인 307.6K으로 오차가 2배로 증가한 것을 볼 수 있다. Fig. 6의 온도장 결과에서는 열전대를 사용한 온도측정에서 발생하는 오차의 원인에 해당하는 열전대 내부의 전도와 열전대 주변의 대류에 의한 온도측정 오차의 경향성을 알 수 있다.

Fig. 7은 서로 다른 열전대의 위치( $H_3$ )들에 대하여 복합열전달 수치해석을 수행한 결과의 온도장이다. Fig. 7(b)는 Fig. 4와 동일한 수치해석 결과이다. Position 1의 온도측정 오차는  $1.07^{\circ}\text{C}$ , Position 2의 온도측정 오차는  $1.13^{\circ}\text{C}$ , Position 3의 온도측정 오차는  $1.19^{\circ}\text{C}$ 이다. 각 경우의 공간적인 온도변화는 일정하므로 전도의 영향은 같다. 한편, 열전대의 위치가 올라갈수록 바닥에 의한 열전대 주위의 유동 변화가 적다. 따라서 각 결과 간의 차이는 대류에 의해서 생기는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

- (1) 열전대의 온도측정에서 오차가 발생하는 원인은 열전대가 열전대 주위의 유동장을 교란시키는 영향과 열전대 내부의 전도 열전달에 의한 영향이다. 한편, 열전대 주위의 유동에 의한 영향보다는 열전대 내부의 전도에 의한 영향이 지배적이다.
- (2) 열전대 내부의 전도 열전달에 의한 측정오차의 영향이 지배적이기 때문에, 열전대 측정오차는 공간적인 온도변화의 크기에 비례한다. 그러므로 공간적으로 온도의 변화가 큰 위치에서 열전대로 온도를 측정하게 되면 오차가 커진다.
- (3) 열전대가 바닥에 가까워질수록 열전대가 열전대 주위의 유동장을 교란시키는 영향이 커지므로 온도측정 지점의 실제온도보다 열전대의 측정온도가 높게 측정된다. 한편, 열전대 내부의 전도에 의해서는 실제온도보다 열전대의 온도가 낮게 측정되며 전도오차의 크기는 열전대 높이에 무관하다. 따라서 열전대가 바닥에 가까워질수록 열전대의 온도측정 오차가 작아진다.

#### 후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

[1] Omega, *The thermocouple*, Omega.

- [2] 1992, Sundqvist, B., "Thermal Diffusivity and Thermal Conductivity of Chromel, Alumel, and Constantan in the Range 100-450K," *Trans. of the J. Appl. Phys.*, Vol.72, No.2, pp.539-545.
- [3] 1975, Blackwell, B.F. and Moffat, R.J., "Design and Construction of Low Velocity Boundary-layer Temperature Probe," *Trans. of the J. Heat Trasf.*, Vol.97, No.2, pp.1-14.
- [4] 2002, Shi, J.-M., Breuer, M. and Durst, F., "Wall Effect on Heat Transfer from a Micro-cylinder in Near-wall Shear Flow," *Trans. of the Int. J. Heat Mass Trasf.*, Vol.45, pp.1309-1320.
- [5] 1999, Lange, C.F., Durst, F. and Breuer, M., "Wall Effect on Heat Losses from Hot-wires," *Trans. of the Heat and Fluid Flow*, Vol.20, pp.34-47.
- [6] 1982, Bhatia, J.C., Durst, F. and Jovanovic, J., "Corrections of Hot-wire Anemometer Measurements Near Walls," *Trans. of the J. Fluid Mech.*, Vol.122, pp.411-431.
- [7] 2002, Durst, F., Shi, J.-M. and Breuer, M., "Numerical Prediction of Hot-wire Corrections Near Walls," *Trans. of the ASME*, Vol.124, pp.241-255.
- [8] 2001, Durst, F., Zanoun, E.-S. and Paschtrapanska, M., "In Situ Calibration of Hot Wires Close to Highly Heat-conducting Walls," *Trans. of the Experiments in Fluids*, Vol.31, pp.103-110.
- [9] 1998, Chew, Y.T., Khoo, B.C. and Li, G.L., "An Investigation of Wall Effects on Hot-wire Measurements Using a Bent Sublayer Probe," *Trans. of the Meas. Sci Technol.*, Vol.9, pp.67-85.
- [10] 2011, Kulkarni, K.S., Han, S. and Goldstein, R.J., "Numerical Simulation of Thermal Boundary Layer Profile Measurement," *Trans. of the Heat and Mass Trasf.*, Vol.47, No.8, pp.869-877.
- [11] 1999, Mosad, M., "Laminar Forced Convection Conjugate Heat Transfer Over a Flat Plate," *Trans. of the Heat and Mass Trasf.*, Vol.35, pp.371-375.
- [12] 2007, Han, S. and Goldstein, R.J., "Heat Transfer Study in a Linear Turbine Cascade Using a Thermal Boundary Layer Measurement Technique," *Trans. of the ASME*, Vol.129, pp.1384-1394.
- [13] 1986, Holman, J.P., *Heat Transfer*, McGraw-Hill.