

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(7), 545-551(2016)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.7.545

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

적외선 카메라를 이용한 표면온도측정의 왜곡 보정

이성민\*, 김익현\*, 이종국\*\*, 변영환\*\*\*, 박기수\*\*\*\*

Distortion Correction of Surface Temperature Measurement Using an Infrared Camera

Sungmin Lee\*, Ikhyun Kim\*, Jong Kook Lee\*\*, Yunghwan Byun\*\*\* and Gisu Park\*\*\*\*

Korea Advanced Institute of Science and Technology\* \*\*\*\*

Agency for Defense Development\*\*

Konkuk University\*\*\*

ABSTRACT

Surface temperature of supersonic wind tunnel model was measured using an infrared thermography technique. To measure the temperature quantitatively, various calibration techniques such as blackbody calibration which converts detected camera signal to temperature, distortion correction due to the camera lens and an imbalance of camera pose, and emissivity calibration which considers viewing angles to the model surface, were employed. Throughout the study, for the quantitative as well as qualitative surface temperature measurement, it was verified that the distortion correction must be considered even for the use of two-dimensional model in aerodynamics testing.

초 록

적외선 열화상 방식을 사용하여 초음속 풍동모델 표면온도를 측정하였다. 표면온도를 정량적으로 파악하기 위해 적외선 카메라 감지신호의 흑체 보정, 카메라와 렌즈의 불완전한 평행 등으로 야기되는 왜곡 보정, 그리고 모델표면 시야각에 따른 방사율 보정을 수행하였다. 본 연구를 통해 적외선 카메라를 이용한 표면온도측정의 왜곡보정 기술을 확보하였으며, 공력특성 실험을 통해 통상적으로 사용되는 이차원 시험모델 사용시 정성적일 뿐만 아니라 정량적인 계측을 위해서는 왜곡보정이 고려되어야 함을 입증하였다.

**Key Words** : Infrared Thermography(적외선 열화상 방식), Emissivity(방사율), Supersonic (초음속), Calibration(보정)

1. 서 론

국내외적으로 초고속 비행체의 선두부 및 흡

입구, 동체-날개 교차부 등과 같은 이중압축램프 형태의 표면을 지나는 유동에 관한 연구가 활발히 수행되어왔다. 유동특성의 기초가 되는 경계

† Received : March 5, 2016      Revised : May 26, 2016      Accepted : June 29, 2016

\*\*\*\* Corresponding author, E-mail : gisu82@kaist.ac.kr

층 및 박리/천이 파악, 열유량 측정을 위해 적외선 열화상 방식의 표면온도측정 연구가 미국과 유럽을 주축으로 활발히 진행되어 왔다[1].

적외선 열화상 방식(Infrared Thermography; IRT)은 비접촉, 비방해 온도측정방식으로 피사체가 적외선 영역에서 방사하는 복사 에너지를 복사검출기로 신호를 감지하여 정량적인 온도 데이터로 전환시켜준다. 해당 방식은 적외선(IR) 카메라를 사용하여 열전대에 비해 공간적인 제한이 적으며 전체 표면 온도장 측정이 가능하다[2].

Henckels 등은 재진입(re-entry) 환경에서의 극초음속 유동장에서 IRT 기법을 이용한 열교환량 측정을 통해 유동 천이 및 박리현상을 확인하였다[3]. Schrijer 등은 극초음속 유동장에서 발생하는 충격파와 경계층 관측에 IRT 기법을 사용하였다[4]. 이와 같이 비방해적 온도측정방식의 장점을 고려하여 유동해석 및 열유량 측정에 IRT 기법이 활발히 사용되어 왔다. 최근 Cardone 등은 곡선 또는 경사각이 있는 풍동시험 모델에 대하여 방사율과 적외선 카메라의 렌즈 왜곡률 등으로 야기되는 왜곡을 추가적으로 보정하는 연구가 수행된 바 있다[2].

본 연구에서는 IRT 기법 결과를 그대로 사용한 기존 연구들과 다르게 초음속 유동조건에서의 이중압축램프 표면온도측정의 정량적 분석을 위해 왜곡보정을 수행하였다. 모델 표면에서 감지된 신호를 흑체 보정을 통해 온도값으로 변환하고, 카메라 보정과 좌표변환을 통해 보정된 온도 분포를 삼차원으로 구현하였다. 이를 통해 간단한 이차원 모델 사용시에도 정량적 분석을 위해서는 왜곡 보정이 고려되어야 함을 확인하였다.

## II. 실험 구성

### 2.1 열화상 측정장비 구성

풍동시험은 건국대학교 초음속 풍동 시험장비(MAF, The Model Aerodynamic Facility)에서 수행되었다. 본 시험에서는 적외선 영역대 7.5-13.0  $\mu\text{m}$ , 해상도 640×480인 FLIR사의 A655SC IR 카메라와 anti-reflection 코팅처리된 ZnSe(Zinc Selenide) 광학창을 사용하였다. IRT기법 장비 구성과 장비들간의 거리 및 위치 정보를 개략도 Fig. 1에 나타내었다. 경계층 효과(boundary layer effect) 등과 같은 유동흐름에 미치는 영향을 일정하게 유지하기 위하여 모든 실험에서 노즐(nozzle)과 디퓨저(diffuser)와의 거리를 일정하게 유지하였다. 그리고 지지대를 이

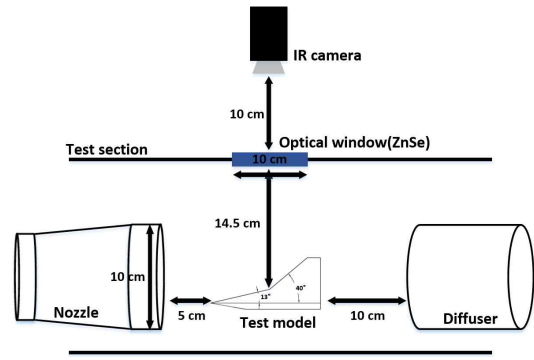


Fig. 1. Testing Arrangement

용하여 노즐의 중앙과 모델의 중앙이 동일선상에 위치하도록 고정하였다.

### 2.2 모델 및 유동조건

본 연구의 실험 모델로 이중압축램프를 사용하였다. Fig. 2에서와 같이 앞전의 무딘 정도에 따른 영향을 극대화하기 위하여 날카로운 모델(sharp model)과 무딘 모델(blunt model)의 앞전 반지름(leading edge roundness)을 각각 0.0mm, 2.0mm으로 선정하였다. 이중압축램프에 사용되는 두 가지 경사각은 13°, 40°의 경사각을 사용하였고 모델 재질은 열화상가시화방식에 영향을 미치는 방사율과 열 전도성을 고려하여 Acrylic 소재(PMMA; Poly Methyl Meta Acrylate)를 사용하였다.

자유류와 모델길이를 기준으로 한 유동조건은 Table 1에 요약하였고, 압력측정에 사용된 피도

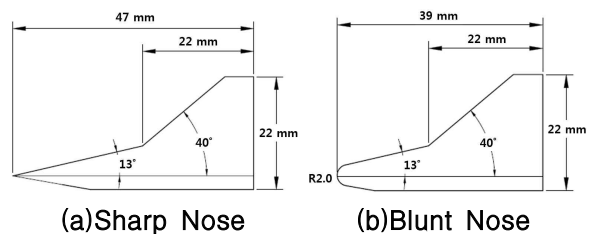


Fig. 2. Schematic of Test Models

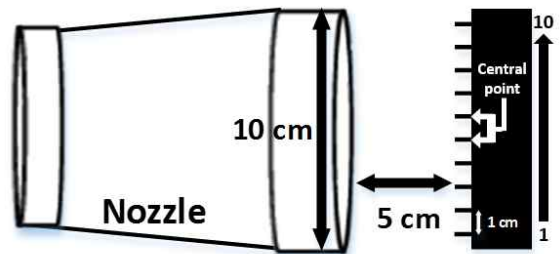


Fig. 3. Pitot Rake Position

레이크(pitot rake) 개략도는 Fig. 3과 같다.

노즐 출구 중앙점의 시간에 따른 압력변화 측정을 통해 정상 유동(steady flow)상태를 확인하였다(Fig. 4). 그리고 노즐 출구의 세로방향 높이에 따른 마하수의 분포를 확인하여 유동의 평형상태를 검증하였다(Fig. 5).

Table 1. Flow Condition

Property	Value
$M_\infty$	3
$P_\infty$ [kPa]	24
$T_\infty$ [K]	105
$\rho_\infty$ [kg/m <sup>3</sup> ]	0.79
$u_\infty$ [m/s]	617
$Re_{\infty,D}$	$3.1 \times 10^6$

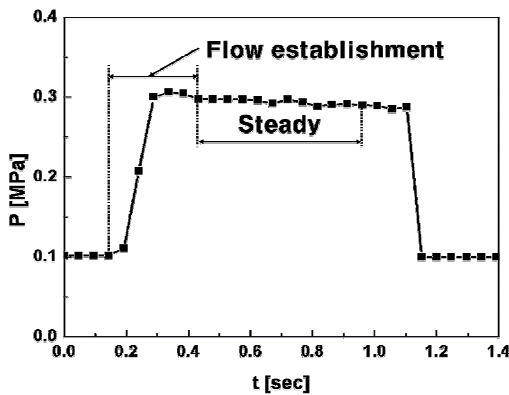


Fig. 4. Typical Pressure Trace at the Nozzle-exit Center

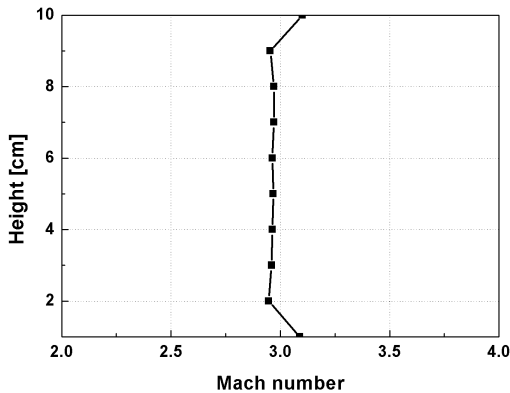


Fig. 5. Pitot Pressure Distribution Along the Nozzle-exit

### III. 왜곡 보정

본 연구에서는 IR camera를 통해 이차원 픽셀 이미지로 구성되는 모델 표면의 감지신호(detected signal)로부터 삼차원 실제 이미지로 좌표변환을 수행한다. 좌표변환은 흑체 보정(blackbody calibration), 카메라 보정(camera calibration) 및 영상처리기법(OpneCV)을 통해 신호변환상수(R, B, F), 카메라 내부·외부파라미터들을 확보한다. 확보된 파라미터들로 좌표변환 행렬식을 구성하고, 이를 사용해 이차원 픽셀 이미지로부터 왜곡 보정된 실제 이미지로의 좌표변환 및 왜곡보정을 수행하게 된다.

#### 3.1 좌표변환

이차원 픽셀 이미지 좌표계와 삼차원 실객체 좌표계 사이의 변환을 위해 Fig. 6에 나타난 원근감 있는 투영(perspective projection model)을 고려한다[5].

투영의 중심점은 카메라 프레임(C)의 원점 O이다. 주축(principal axis) z축을 따라 초점거리만큼 떨어져있는 xy평면이 이미지 평면이다. 3차원 실객체 좌표계상의 임의의 점 P는 z축을 따라 이미지 평면(II)의 p로 투영된다. 점 P의 좌표계는 카메라 프레임에서  $[x, y, z]^T$ , 실객체 프레임(W)에서는  $[X, Y, Z]^T$ , 그리고 이미지 프레임(I)에서는  $[u, v]^T$ 이고, 식 (1)과 같은 변환관계식으로 표현할 수 있다. s는 미터법 단위를 픽셀 단위로 바꿔주는 일종의 scale factor이며, P는 카메라

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \propto PM \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

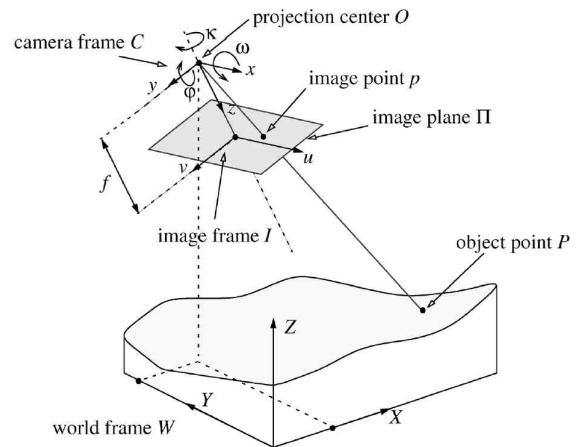


Fig. 6. Perspective Projection Model [5]

라 내부특성을 나타내는 초점거리와 주점들로 구성되는 I 프레임에서 C 프레임으로 변환하는 camera matrix이다(식 2). 그리고 M은 4×4 행렬으로 W 프레임에서 I 프레임으로 변환하는 행렬이다(식 3).

$$P = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x & 0 \\ 0 & f_y & c_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 R은 직교회전행렬(orthogonal rotational matrix), t는 프레임 사이의 병진벡터(translation vector)로써 카메라의 설치 높이, 방향 등 카메라의 외부 공간과의 기하학적 관계에 관련된 외부 파라미터이며 영상처리기법(OpenCV; Open Computer Vision)을 통해 얻게 된다.

### 3.2 흑체 보정

IR 카메라의 신호감지 신뢰성 확보를 위하여 흑체를 실험모델과 동일한 거리에 두고 두 가지 온도에 대하여 보정작업을 수행한다(Fig. 7).

모델표면으로부터의 방사, 주변으로부터의 반사, 주변으로부터의 방사를 고려한 복사량 공식과 플랑크 법칙으로부터 detected signal( $U_D$ )은 (식 4)으로 정의된다.  $U_D$ 는 ZnSe 재질의 광학창이 45-60° 이내의 반사각에서 갖는 0.95의 일정한 크기의 방사율( $\epsilon$ ), IR 카메라의 노출시간과 파장의 함수인 R, IR 카메라 파장의 함수 B, 그리고 항상 1의 값을 갖는 상수 F로 구성된다[6]. 두 개의 변수를 구하기 위하여 2가지 온도(40°C, 10°C)에서 흑체 보정을 수행하였다.

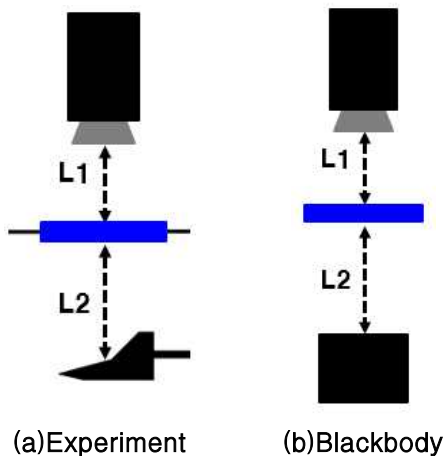


Fig. 7. Blackbody Calibration

$$U_D = \epsilon(\theta) \frac{R}{e^{B/T_{obj}} - F} + [1 - \epsilon(\theta)] \frac{R}{e^{B/T_{amb}} - F} \quad (4)$$

연립방정식 풀이를 통해 얻은 R, B 값은 각각 16021, 1417 이며, 이를 사용하여 나타낸 물체표면 온도는 다음과 같다(식 5). 이로써 카메라를 통해 감지된 신호로부터 모델표면의 정확한 온도 값을 얻게 되며 흑체 보정은 IR 카메라가 갖는 ±2°C 오차범위의 정확도를 갖는다.

$$T_{obj} = \frac{B}{\ln \left( 1 + 0.95 \left( \frac{R}{U_D - \left( 0.05 \frac{R}{e^{(B/T_{amb})} - F} \right)} \right) \right)} \quad (5)$$

### 3.3 카메라 보정

카메라 내부속성을 나타내는 camera matrix는 카메라 내부파라미터인 초점거리(focal length), 주점(principal point)과 왜곡계수(distortion coefficient)로 구성된다(식 2). 격자이미지(chessboard)를 통해 모서리 점들을 감지하여 카메라 내부파라미터를 추출하는 공개프로그램인 GML camera calibration toolbox를 통해 얻은 파라미터들을 Table 2에 요약하였다.

f와 c는 초점거리와 주점을 의미하고, k와 p는 각각 반경방향(radial)과 접선방향(tangential)으로의 왜곡계수를 의미한다.

열화상카메라 이미지를 카메라 보정 프로그램에서 선명히 감지되기 위하여 검정색과 흰색으로 방사율 차이를 최대화 할 수 있는 검정 시트(self adhesive film)를 사용하였다. 격자는 두 가지 종류(30mm 5×6, 21mm 8×11)를 사용하였으며, 본 프로그램은 Zhang의 카메라 보정기법을 사용하므로 보다 나은 결과를 위해 4장 이상의 이미지를 사용하였다[7]. 결과값은 약 ±10%의 정확도를

Table 2. Camera Calibration Constants

Variable	Constant
$f_x$	1278.18
$f_y$	1232.57
$c_x$	323.01
$c_y$	237.92
$k_1$	1.93
$k_2$	-9.85
$p_1$	-0.03
$p_2$	-0.19

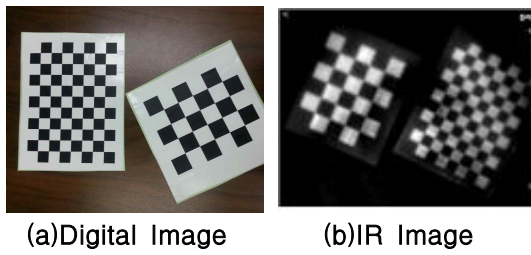


Fig. 8. Camera Calibration Images

가지며, 일반 디지털카메라와 열화상카메라로 획득한 이미지를 Fig. 8에 비교하였다.

카메라의 내부속성을 나타내는 내부파라미터 (Table 2)를 이용하여 영상처리기법인 오픈소스 라이브러리 OpenCV(Open Computer Vision)를 통해 외부파라미터를 구할 수 있다. 풍동실험 모델의 IR 카메라를 통해 얻어지는 이차원 픽셀 이미지 좌표와 삼차원 실객체 좌표를 부합시키고 내부파라미터를 사용하여 직교회전행렬과 병진벡터를 구성하는 외부파라미터를 얻게 된다(식 6, 7).

$$R = \begin{bmatrix} -0.9996 & 0.0135 & 0.0266 \\ -0.0137 & -0.9999 & -0.0088 \\ 0.0265 & -0.0092 & 0.9996 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$t = \begin{bmatrix} 11.4487 \\ 23.0812 \\ -193.9094 \end{bmatrix} \quad (7)$$

영상처리기법을 통해 얻은 외부파라미터는 카메라의 위치 및 방향정보를 나타내는 식 (3)의 변환행렬(M)을 구성하며, 이를 통해 좌표변환에 필요한 행렬식을 모두 확보하게 된다[2].

### 3.4 방사율 보정

곡선을 갖는 실험 모델의 경우에는 방사각에 따른 방사율을 고려해주는 과정이 반드시 필요하다. 온도와 방사율의 관계는 식 (4)에 기술된 바와 같다. 물질의 종류에 따라서 방사율의 크기는 다르지만, 방사각 60° 이하에서는 방사율의 변화가 거의 없는 동일한 경향을 가진다[8]. 본 연구의 실험모델은 첫 번째와 두 번째 경사각이 각각 13°, 40° 이므로 방사각에 따른 방사율에 대한 고려를 무시하고, PMMA 재질의 방사율은 0.90으로 약 ±5% 오차를 갖는 일반적으로 사용되는 수치를 사용하였다.

## IV. 실험 결과

픽셀 좌표계에서의 이차원 모델이미지를 실객

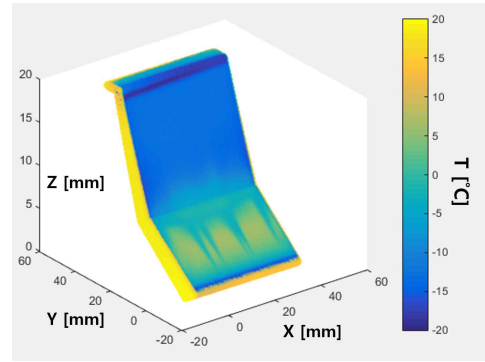
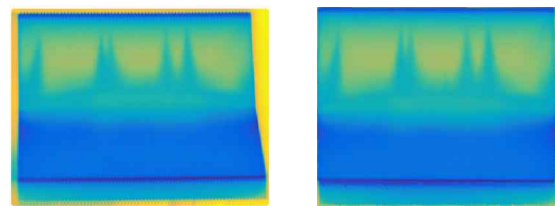


Fig. 9. Surface Temperature After Distortion Correction



(a)Before Correction (b)After Correction

Fig. 10. Surface Temperature Comparison

체 좌표계에서 z축 방향을 추가 고려한 삼차원 모델이미지로 변환하였다. Fig. 9는 최소 -20°C, 최대 20°C의 온도 스케일 조건에서 변환된 이중 압축램프 표면의 온도분포를 보여준다. 완벽한 날카로운 모델 제작은 불가능할 뿐만 아니라, 가공 중에 생기는 미세한 손상 등으로 인한 표면 불균일성으로 인해 유동선(streakline) 또한 관측되었다. 보정되지 않은 감지신호를 사용한 이차원 이미지와 보정된 이차원 이미지를 모델의 폭에 맞춰 Fig. 10에 비교하였다.

보정되지 않은 이미지(Fig. 10(a))는 유동의 반대방향으로 갈수록 모델의 폭이 약 7% 좁아지는 왜곡이 발생한다. 반면, 보정된 이미지(Fig. 10(b))는 폭의 왜곡이 상대적으로 줄어들었음을 확인하였다. Fig. 11과 12는 두 가지 모델에 대해 동일한 위치에서 온도 보정과 왜곡 보정 결과를 3가지 흐름선으로 x축과 y축에 따라 나타내었다. 보정 없이 픽셀이미지로부터 얻은 raw data와 왜곡 보정을 통해 정확한 위치에서 추출된 corrected data를 비교하였다. 흐름선 1번은 스펠길이 중간 지점의 온도값을 유동방향 길이에 따라 나타내고, 2번과 3번은 앞전으로부터 0.7mm, 두 번째 램프의 중간지점의 온도값을 스펠길이(y)에 따라 나타내었다. 획득된 데이터는 6개 데이터당 1개 데이터를 표현하였으며, 데이터 추적은 목표지점 ±0.1 mm 오차범위 내에서 이루어졌다.

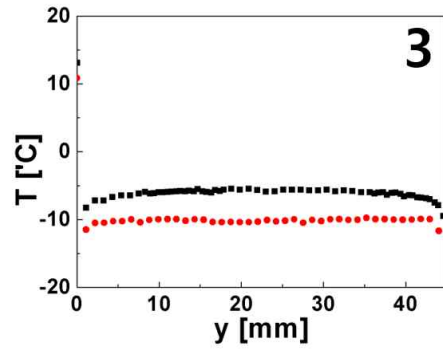
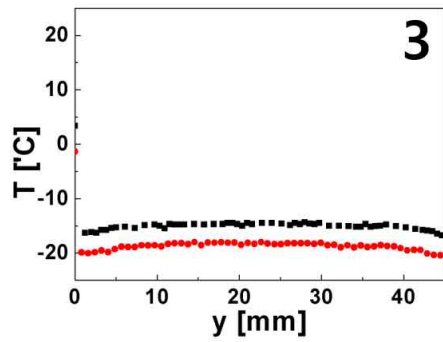
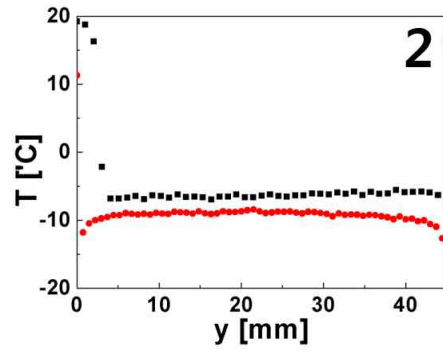
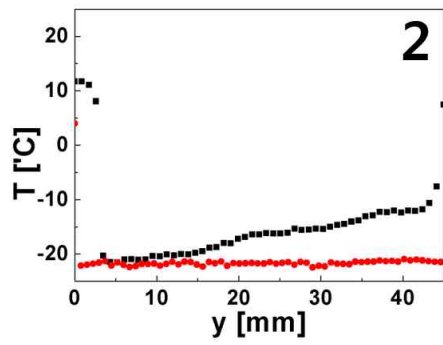
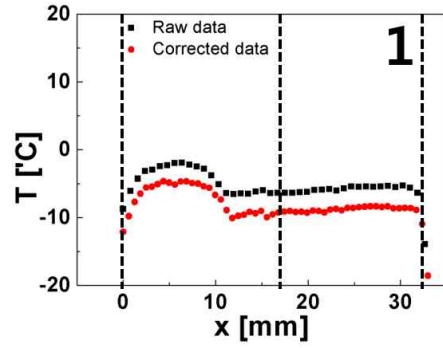
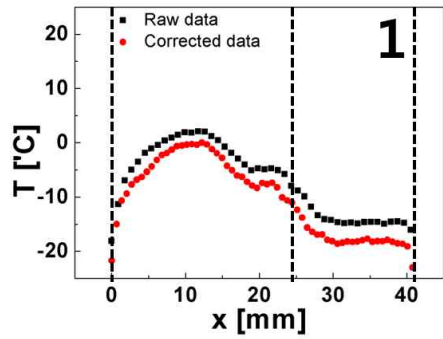
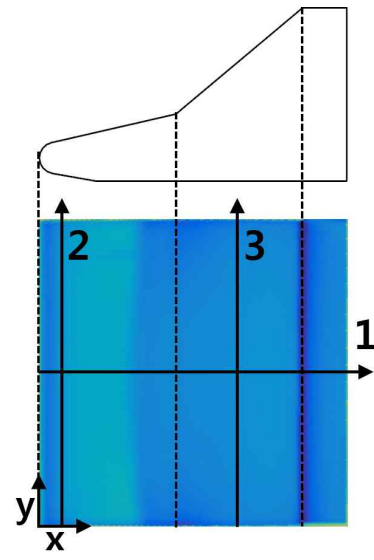
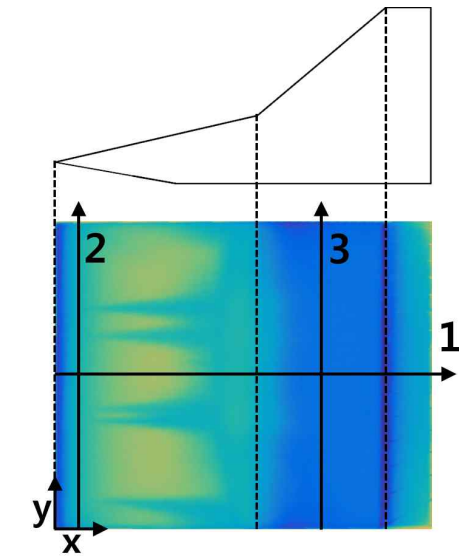


Fig. 11. Sharp Nose Data

Fig. 12. Blunt Nose Data



흐름선 1번의 경우, 박리충격파와 힌지포인트로 인한 온도변화 경향이 일치하였고, 약 3°C의 온도가 보정되었다. 흐름선 2번에서는 왜곡 보정 전에는 왜곡현상으로 인하여 스펠길이에 따라 온도가 선형적으로 상승되었지만, 왜곡 보정 후에는 스펠길이에 따라 일정한 온도분포를 가짐을 확인하였다. 또한, 상대적으로 균일한 두 번째 램프의 온도분포와 유동방향을 따라 감소되는 왜곡정도로 인해 흐름선 3번의 경우에는 모델 양쪽에서의 왜곡보정이 크지 않음을 확인하였다.

무딘 모델의 경우, 날카로운 모델 대비 유동의 시작온도가 약 10°C 정도 높아졌음을 확인하였다. 이는 무딘 모델 앞전에 생기는 수직충격파로 인해 유동이 가열되었음을 보여준다. 그리고 박리충격파 이후 형성되는 박리거품(separation bubble)에 의해 발생하는 온도감소량이 상대적으로 작아졌으며, 무딘 모델에서는 큰 온도변화 없이 모델 끝부분까지 거의 일정한 온도가 유지되는 결과를 보였다. 무딘 모델 연구결과는 앞전반지름으로 인해 형성되는 수직충격파가 앞전을 가열하고, 박리거품의 냉유동(cold flow) 또한 가열되는 현상을 정량적 비교를 통해 보여준다. 무딘 모델 흐름선 2번은 왜곡 보정을 통해 날카로운 모델과 동일하게 raw data의 왜곡이 보정됨을 확인하였다. 흐름선 3번에서는 왜곡 보정뿐만 아니라 보정된 corrected data의 양쪽에서 3차원 열손실(leakage)로 인한 온도 감소 정도를 정량적으로 측정 가능함을 보여준다.

## V. 결 론

본 연구를 통해 적외선 열화상 방식을 통하여 표면온도 측정의 왜곡 보정 기술을 확보하였다. 해당 기법을 사용해 공력특성 실험을 수행하였고, 통상적으로 사용되는 이차원 모델의 정성적일뿐 아니라 정량적인 분석은 적외선 카메라의 흑체 보정, 카메라와 렌즈의 불완전한 평형 등으로 야기되는 왜곡 보정이 고려되어야 함을 확인하였다. 또한 보다 상세한 분석을 위해서는 모델 표면에서 미세한 차이를 갖는 시야각의 방사율 보정 등이 고려되어야 한다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소의 “IR Thermogram을 활용한 풍동시험 기술 연구” 과제 수행결과에 일부이며, 지원에 감사드립니다(계약번호 UD130042CD).

## References

- 1) Sant, Y. L., Marchand, M., Millan, P., and Fontaine, J., “An Overview of Infrared Thermography Techniques Used in Large Wind Tunnels,” *Aerospace Science and Technology*, Vol. 6, 2002, pp. 355~366.
- 2) Cardone, G., Ianiro, A., Ioio, G. D., and Passaro, A., “Temperature Maps Measurements on 3D Surfaces with Infrared Thermography,” *Experiments in Fluids*, Vol. 52, 2012, pp. 375~385.
- 3) Henkels, A., and Maurer, F., “Application of Infra-Red Thermography in a Hypersonic Blowdown Wind Tunnel,” *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 1989, CH276-3, pp. 516~524.
- 4) Schrijer, F. F. J., “Experimental Investigation of Re-Entry Aerodynamic Phenomena,” Ph.D Thesis, Delft University of Technology, 2010.
- 5) Heikkila, J., “Geometric Camera Calibration Using Circular Control Points,” *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, Vol. 22, No. 10, 2000.
- 6) Ochs, M., Horbach, T., Schulz, A., Koch, R., and Bauer, H. J., “A Novel Calibration Method for an Infrared Thermography System Applied to Heat Transfer Experiments,” *Measurement Science and Technology*, Vol. 20, 2009, 075103
- 7) Zhang, Z., “A Flexible New Technique for Camera Calibration,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 11, 2000, pp. 1330~1334.
- 8) Schmidt, E., and Eckert, E., “Uber die Richtungsverteilung der Wärmestrahlung von Oberflächen,” *Forschung im Ingenieurwesen* Vol. 6, No. 4, 1935, pp. 175~183.