

측정각도를 고려한 액정교정기법의 개선

윤순현* · 심재경** · 우창수**
(1999년 3월 31일 접수)

Improvement of Calibration Method of Thermochromic Liquid Crystal Reflecting Measurement Angle

Soon Hyun Yoon, Jae Kyung Sim and Chang Soo Woo

Key Words : Thermochromic Liquid Crystal(온도에 민감한 액정), Hue(색상), Saturation(채도), Intensity(강도), Colorimetric Transformation(색도 좌표 변환), Digital Image Processing(디지털 화상 처리), Measurement Angle(측정각도)

Abstract

Thermochromic liquid crystal reflect a unique color at even temperature. Therefore, they have been successfully applied to non-intrusive heat transfer research. Hue capturing method is widely used in the quantitative measurement from the TLC image. However it is affected by several measurement conditions. The distances of camera and light source have little influence on the color, but the value of hue is seriously affected by the measurement angle. In this study, the hue capturing method is improved by considering the effect of measurement angle. This improved calibration method can diminish the misreading of temperature caused by curvature of test surface.

기호설명

$A_H, A_L, B_H, B_L, C, D, E$: 교정 상수
 d_c : 카메라 설치거리(cm)
 d_L : 광원 설치거리(cm)
H, S, I : Hue, Saturation, Intensity
NAMAS : National Measurement Accreditation Service
NTSC : National Television System Committee
R, G, B : Red, Green, Blue
T : 열전대를 이용하여 측정된 온도(°C)
 T_{cal} : 교정식을 통하여 계산한 온도(°C)

그리스문자

φ_c : 카메라 설치각도(degree)

φ_L : 광원 설치각도(degree)
 $\Delta\varphi$: 카메라와 광원의 각도차(degree)
($=|\varphi_L + \varphi_c|$)(degree)

1. 서론

온도에 민감하게 반응하는 액정(Thermochromic liquid crystal; 이하 TLC)은 주어진 온도에서 특정한 색상을 나타내므로, 이를 이용한 열유속의 계측기법은 모델 표면에서의 연속적인 온도분포를 얻을 수 있고 온도장의 분포를 가시적으로 나타낼 수 있으며, 유동에 대한 교란이 적다는 점에서 주목받고 있다.

TLC는 초기에는 온도장의 가시화 방법의 하나로 정성적인 열전달 해석에 사용되었으나, 최근에 정량적인 측정이 시도되고 있다. 초기의 정량적인 측정기법은 눈으로 색상을 감지하여 온도로 환산하였으므로, 주관적이며 재현성도 낮았다.^(1,2)

이후 특정 주파수만을 통과시키는 필터를 사용

* 회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : yghoon@hgowon.pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2314 FAX : (051)514-7640
** 부산대학교 대학원 기계공학과

하여 실험자의 주관적인 색상판단으로 인한 문제를 보완하였으나, 측정영역의 전체적인 온도분포를 나타내지 못하는 문제점을 가지고 있었다.^(3,4)

이에 반하여 측정영역의 TLC 화상을 디지털 영상처리 기술을 통하여 색상(Hue), 채도(Saturation), 강도(Intensity)로 나타내고, 이 중 색상과 온도의 대응관계를 통하여 측정영역의 온도를 획득하는 색상포착기법(Hue capturing method)은 실험의 재현성과 전체 측정영역의 연속적인 온도분포를 나타낼 수 있다.⁽⁵⁻⁷⁾

하지만 TLC 화상은 실험조건에 많은 영향을 받으므로 이로 인하여 온도측정에 오차를 유발한다고 보고되었다.⁽⁸⁾ 종전의 색상포착기법을 이용한 TLC의 교정에서는 교정장치 표면의 온도를 교정하고 그에 해당하는 TLC의 화상을 분석함으로써 색상과 온도의 상관관계를 구하였다. 그러나 이러한 교정작업을 통해서 측정조건의 변화에 따른 오차를 고려할 수 없으므로, 실험 시에는 최대한 교정실험과 동일한 조건을 설정하여 오차를 최소화하였다.⁽⁹⁾ 그러나 실험대상의 형상이 복잡하여 교정실험에서와 동일한 조건을 형성하기가 어려운 경우에는 실험조건의 변화에 의한 측정오차를 정량적으로 고려할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 카메라와 광원을 특정한 것으로 고정하여 사용하더라도 열전달 표면의 위치에 따라 변할 수 밖에 없는 열전달 표면에 대한 광원 및 카메라의 거리 및 각도를 중심으로, 이들이 온도-색상 관계에 대해 어떻게 영향을 미치는지를 고찰하여 이들 인자의 영향을 고려할 수 있도록 교정기법을 개선하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

교정 실험장치를 Fig. 1에서 나타내었다. 사각주는 열전도도가 높은 구리로 제작되었으며 넓이 70 mm, 높이 150 mm, 두께 25 mm이다. 사각주의 상부에 막대형 열원(cartridge heater)을 설치하여 측정표면의 온도는 공급전압을 통하여 조절하였다. 표면온도의 측정에 사용된 열전대(T-type)는 NAMAS(National Measurement Accreditation Service)에서 -70℃~420℃ 구간을 교정하여 ± 0.01℃의 측정오차를 가지는 백금저항온도계(Pt100Ω, SDL Co. T25/30)로 교정하였으며, 구리각주의 상단에서 10 cm 아래 지점에 상·하 5 mm 간격으

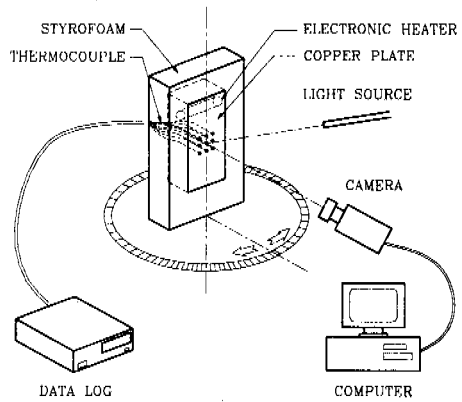


Fig. 1 Apparatus for TLC calibration

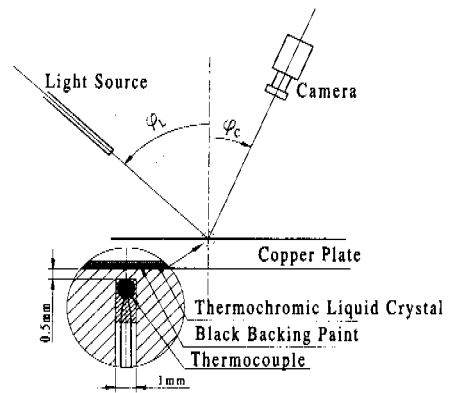


Fig. 2 Definition of distance and angle of camera and light source

로 9개를 설치하여 균일한 온도분포 형성을 확인하였다. 사각주의 주위는 단열재(styrofoam)로 감싸서 측정 표면 이외의 열전달을 차단하였으며, 열전대의 온도 값은 자료획득장치(data logger, Fluke Co. 2625A)를 통하여 컴퓨터에 저장하였다.

측정 표면의 온도는 중앙에 설치된 열전대에서 측정하고, 그 지점에서 온도에 해당하는 화상을 획득하였다. 화상 획득 시에는 열전대 설치 지점을 기준으로 상·하 4 픽셀, 좌·우 4 픽셀을 취하여 총 9×9 픽셀을 평균하였다. 측정 표면의 화상은 비디오 카메라로 포착하였으며, 화상 획득장치(frame grabber)를 통하여 컴퓨터에 저장하였다. 외부로부터의 빛에 의한 교란을 방지하기 위하여 암실에서 실험을 수행하였으며, 측정표면의 촬영을 위하여 백색광을 비추었다. 광원에 의한 열발생을 방지하기 위하여 광섬유조명(fiber optic

illuminator, Halla optical engr. Co.)을 사용하였다.

카메라와 광원의 거리는 교정장치에 설치한 열전대 위치를 원점으로한 거리로 나타내었으며, 설치각도는 사각주에 수직인 선과 이루는 각도로 정의하였다. 본 연구에서는 다양한 측정각도에 대한 교정실험을 수행하여 각도변화의 영향을 고려하였다. (Fig.2)

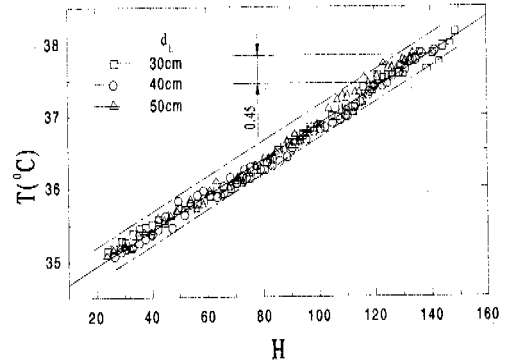
본 연구에서 사용되는 TLC 화상의 획득 및 처리장치는 NTSC(National Television System Committee) 방식으로 작동된다. 먼저 TLC의 색상정보는 비디오 카메라에 내장된 필터에 의해 R, G, B 성분으로 나누어지고, 각각의 성분은 색상감지기에 의해 감지된다. 획득된 영상신호는 화상 처리장치에 의하여 이산화되어 컴퓨터에 저장된다. TLC 화상은 장치 독립적 비트맵(device independent bitmap)형식으로 저장되어 있으며, 이를 색도 좌표 변환(colorimetric transformation)을 통하여 색상(Hue), 채도(Saturation), 강도(Intensity)로 변환한다.

실험에 사용된 TLC(R35C3W, Hallcrest.)는 콜레스테롤계 액정(cholesteric TLC, nematic TLC의 한 종류)이며, 미세 캡슐화(microencapsulated) 되어 있다. 측정 범위는 35℃에서 38℃까지이며, 온도가 상승함에 따라서 빨강 색에서 보라색까지 색상이 연속적으로 변화한다. TLC의 색상분포를 포착할 때 주변의 반사로 인한 영향을 차단하기 위하여 검은색 도료(black backing paint)를 칠하고 그 위에 TLC을 분사하였다.

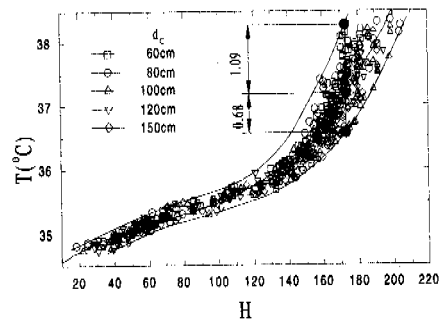
3. 실험결과

3.1 측정거리의 변화에 따른 영향

TLC를 이용한 열유속의 계측에서는 측정 영역의 영상을 통하여 온도 분포를 측정하므로 이를 위한 카메라, 광원의 거리 및 각도는 계측 결과에 많은 영향을 줄 수 있다. Fig. 3은 광원 및 카메라의 거리 변화에 따른 교정실험 결과이며, 광원의 거리의 변화에 따른 영향을 보기 위하여 광원의 각도를 $\varphi_L=10^\circ$, $\varphi_c=0^\circ$ 로 고정하고($\Delta\varphi=10^\circ$), 광원의 거리를 각각 30, 40, 50 cm로 변화시키면서 교정실험을 수행하였다. 그리고 카메라의 거리변화에 따른 영향은 Fig. 3(b)에서 나타내었으며 카메라와 광원의 각도를 각각 30° 로 고정하고($\Delta\varphi=60^\circ$) 카메라의 거리를 60,



(a) Light source distance(d_L)



(b) Camera distance(d_C)

Fig. 3 Effects of the distance of camera and light source

100, 120, 150 cm로 변화시키면서 온도와 색상의 관계를 구하였다.

Fig. 3(a)에서 색상값에 따른 온도는 거의 선형적인 분포를 가진다. 측정 자료는 선형 근사 함수에 대하여 0.45°C 의 범위에 분포하며, 자료의 산란도는 0.08°C 이다. 그리고 광원의 거리변화가 색상값의 증·감에 일관성 있는 영향을 주지 않는다. Fig. 3(b)에서 광원과 카메라의 각도의 차가 증가함에 따라 온도와 색상값은 선형적인 분포에서 벗어나므로 온도와 색상값을 3차 다항식으로 상관관계를 구하였다. 측정 자료는 근사 함수에 대하여 최대 1.09°C 최소 -0.68°C 의 범위에 분포하며, 자료의 산란도는 0.49°C 이다. 역시 카메라의 거리변화도 색상값의 변화에 일관성 있는 영향을 주지 못하였다. 따라서 광원의 세기와 카메라의 감도에 따라 적절한 측정 거리범위가 주어지면, 측정 범위 내에서의 거리변화는 색상값에

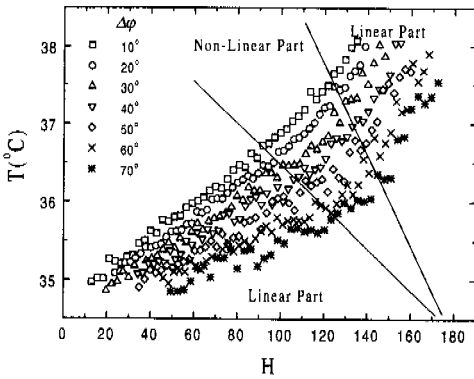


Fig. 4 Effects of the angle of camera

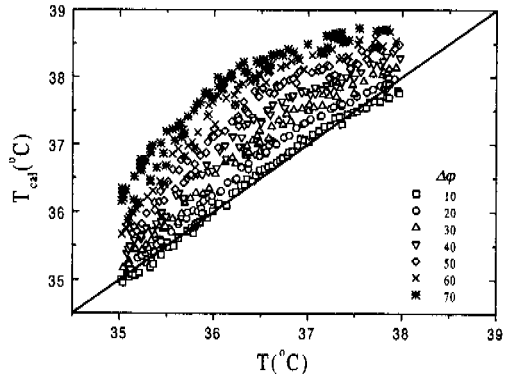


Fig. 6 Result of calibration(Camci et al., 1993).

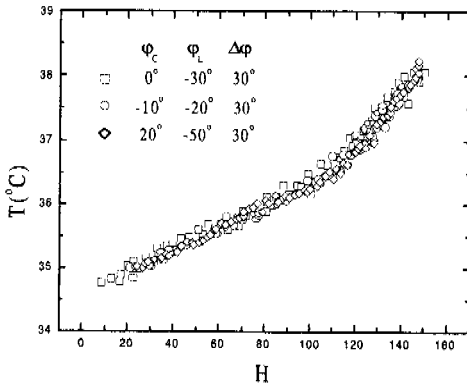


Fig. 5 Correlations of temperature between hue at constant $\Delta\phi$

영향을 주지 않는다.

3.2 측정각도의 변화에 따른 영향

카메라의 각도변화가 교정실험에 미치는 영향을 보기 위해 $\phi_L=10^\circ$ 로 고정하고 카메라의 각도를 $\phi_c=0\sim60^\circ$ 까지 증가시키면서 교정실험을 수행하였다. 그 결과 $\phi_c=10^\circ$ 인 경우 색상값의 증가에 따른 온도의 증가는 Fig. 3(a)에서와 같이 거의 선형적이다. 그러나 각도차($\Delta\phi$)가 증가함에 따라 비선형성이 증가하고 있다. 이는 Fig. 4에 나타낸 것처럼, 저온부에서는 비교적 각도변화에 따른 색상값의 변화가 적게 나타났으나, $36\sim37^\circ$ 영역에서는 그 차이가 매우 커서 동일온도에서 색상값의 차이가 약 80정도로 크게 나타났다. 이것은 기존의 온도와 색상값의 선형비례관계를 이용한 교정기법을 사용할 때, 약 2°C 정도의 측

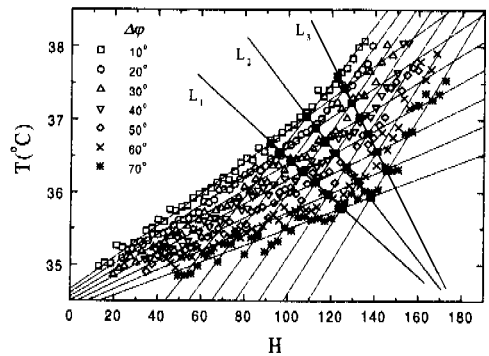
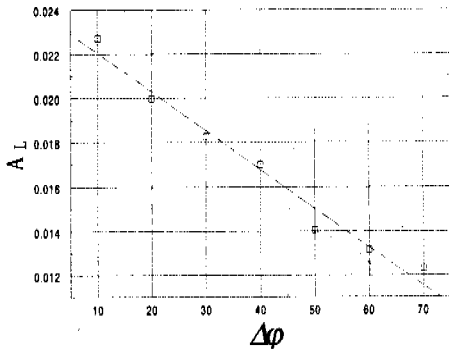


Fig. 7 Fitting functions for the measuring angle

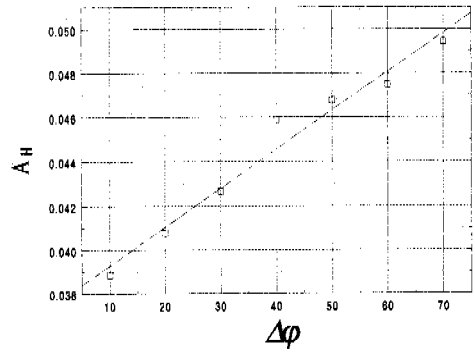
정오차를 발생시킨다. 그리고 중간 영역에서 비선형적인 상관 관계를 보이고 있고, 그 이외의 영역에서는 각도별로 어느 정도 선형적인 분포를 보이고 있음을 관찰할 수 있다.

Fig. 5는 카메라와 광원의 각도가 각각 다르지만 그 각도차를 일정하게 하였을 경우에 대한 온도와 색상값의 상관관계를 나타내었다. 이를 통하여 카메라와 광원의 각도가 변하더라도 그 각도차가 일정하게 유지되면 일정한 상관관계를 보이고 있다. 따라서 카메라와 광원의 각도차를 각각 고려할 필요가 없고, 각도차를 통하여 측정각도의 변화에 따른 교정오차를 고려할 수 있다.

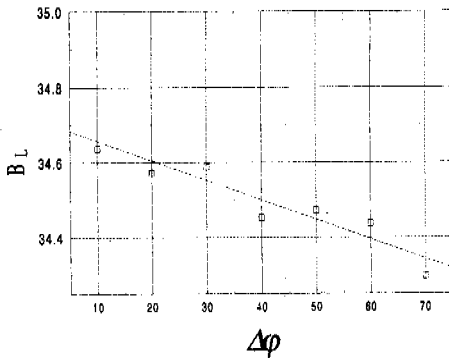
Fig. 6에서 $\phi_L=10^\circ$ 인 경우에 Camci 등⁽⁷⁾이 사용한 교정 방법을 이용하여, 카메라의 각도를 변화시키면서($\phi_c=0\sim60^\circ$) 교정한 결과를 보인 것이다. 그림의 가로축은 열전대에 의해 측정된 결과이다. 그림에서 카메라 각이 0° ($\Delta\phi=10^\circ$)인 경우는 TLC와 열전대를 이용한 측정결과가 잘



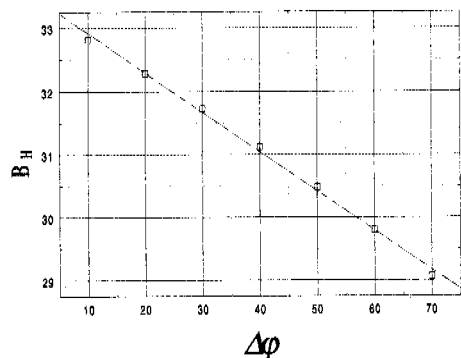
(a) A_L



(a) A_H



(b) B_L



(b) B_H

Fig. 8 Coefficients of fitting function in the lower linear part

Fig. 9 Coefficients of fitting function in the upper linear part

일치하고 있다. 그러나 카메라의 각도차가 증가함에 따라 오차는 증가하고 있으며, 최대 약 2°C까지의 오차를 보이고 있다. 본 실험에서 사용한 TLC의 온도 인식 범위가 3°C임을 고려할 때 이는 67% 정도의 큰 오차이다.

4. 교정방법의 개선

4.1 측정각도를 고려한 교정기법의 개선

지금까지의 색상포착기법에서는 온도와 색상값의 선형적인 관계를 이용하여 TLC 화상을 온도값으로 나타내었다. 이때 광원 및 카메라와 벽면과의 거리를 변화시켰을 때, 거리의 변화에 따른 영향은 거의 없었다. 그러나 Fig. 4 및 6에서 밝힌 바와 같이 카메라 각의 변화에 따른 영향은 매우 크다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 4에서와 같이 포착된 색상값에 따른 온도 분포가 선형부,

비선형부 및 선형부의 세 영역으로 나타남에 착안하여 카메라 각도 변화에 따른 교정기법을 개선했다.

Fig. 7은 교정에 사용된 근사함수를 각도별로 나타낸 것이다. 저온 선형부 및 고온 선형부에서는 각도별로 선형적인 직선함수로 표시하고, 중간 영역의 비선형부에서는 2차 곡선으로 교정식을 나타내었다. 비선형부에서 2차 곡선으로 곡선 맞추기를 하기 위해 3점이 필요하고 각도에 따른 각 점들에 대하여 선형근사함수로 L_1 , L_2 , L_3 를 통하여 나누어 구간별로 근사함수를 표시한다.

L_1 , L_2 , L_3 는 고온부와 저온부의 선형근사함수의 교점을 통하여 구해지며, 이는 온도 분포의 선형 및 비선형 구간의 경계와 잘 일치하였다. 그리고 이들 고온부와 저온부의 선형함수의 기울기와 절편을 각도차의 함수로 나타냄으로써 임의의 각도차에 대한 교정식을 구한다. 저온 및 고온부에서의 교정식은

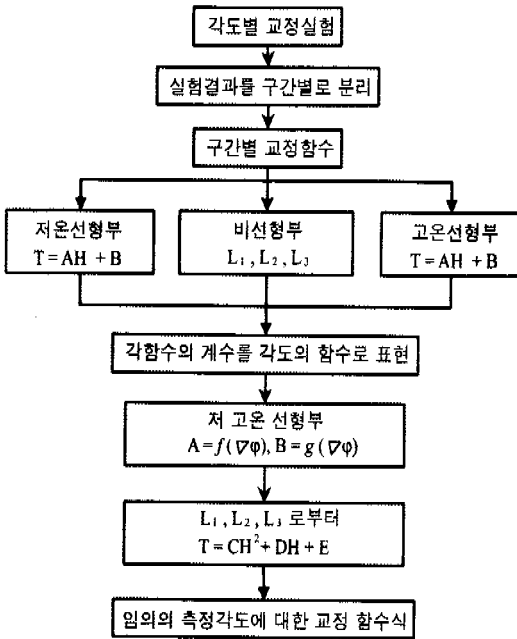


Fig. 10 Block diagram of calibration procedure

$$T_{cal} = A_H H + B_H \quad (1)$$

$$T_{cal} = A_L H + B_L \quad (2)$$

로 표현할 수 있다. 여기서 A_H, B_H, A_L, B_L 은 각각 각도차의 함수이며, Fig. 8과 Fig. 9에 저온부와 고온부의 근사함수의 계수와 각도차의 상관 관계를 나타내었다. 저온부와 고온부의 경계 지점과 그 중간값을 측정각도의 함수로 선형근사하여 선형함수 L_1, L_2, L_3 을 구하면, 비선형 구간에서 임의의 측정각도에 대한 3개의 자료를 획득할 수 있으므로, 이를 통하여

$$T_{cal} = C H^2 + D H + E \quad (3)$$

와 같이 2차 다항식 근사함수를 구한다. Fig. 10은 개선된 교정 과정의 흐름도를 나타낸 것이다.

4.2 교정결과

본 연구를 통하여 개선된 교정 기법을 사용한 교정결과를 Fig. 11에서 제시하였다. 측정각도를 고려하지 않은 Fig. 5에 비해 측정각도를 고려한 교정 결과인 Fig.11에서는 열전대에 의한 결과와

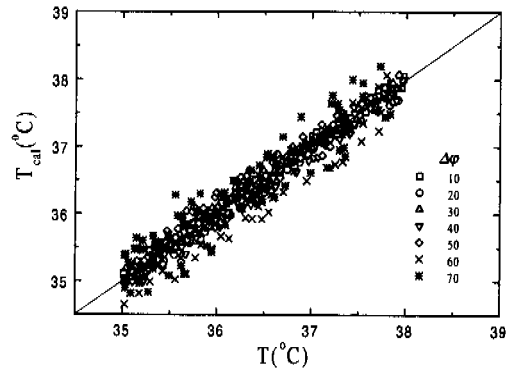


Fig. 11 Result of Calibration(present work)

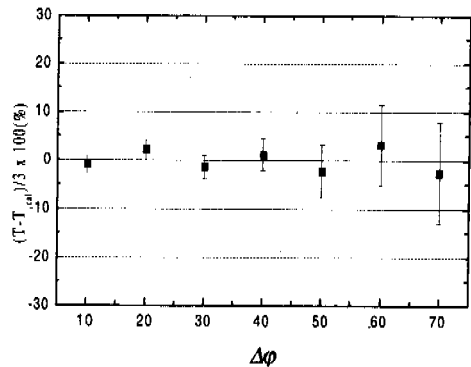


Fig. 12 Calibration errors for the measuring angle

Table 1 Dispersion of calibration results

Difference of angle ($\nabla \varphi$)	Dispersion (%)
10	0.113(3.7%)
20	0.125(4.2%)
30	0.134(4.5%)
40	0.203(6.8%)
50	0.324(10.8%)
60	0.493(16.4%)
70	0.626(20.9%)

잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 여기서 보면 각도차가 작은 경우에는 매우 좋은 결과를 보이고 있으나, 측정각도가 매우 큰 경우에는 오차가 커지고 있음을 알 수 있다. 이러한 오차의 표준편차를 통한 산란도를 각도차 별로 조사한 결과는 Fig. 12에 나타내고 이를 Table 1로 정리하였다.

이 결과에 의하면 측정각도가 50도 미만에서는 온도의 평균오차는 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 이내이며, 산란도 0.2 $^\circ\text{C}$ 이하의 비교적 신뢰성 있는 결과를 보이고 있다. 그러나 각도차가 50 $^\circ$ 이상에서는 측정자료의 산란도가 크게 나타나므로 실제적인 적용이 어렵다.

5. 결 론

본 연구에서는 TLC를 사용한 열유속의 측측에 있어서, 기존의 색상포착기법에서 측정시 광학적 조건을 고려할 수 있도록 교정기법을 개선하였으며 아래와 같은 결론을 얻었다.

TLC의 화상은 카메라 및 광원의 설치거리에는 큰 영향을 받지 않는다. 카메라나 광원의 거리가 멀어지면 화상의 포착 성능이 떨어져 자료의 산란도가 증가하나 색상값의 분포에는 영향을 주지 못하였다.

색상값은 카메라 및 광원의 각도에 큰 영향을 받으며 동일온도에서 설치각도의 변화에 따라 최고 80이상의 색상값 차이를 나타내었으며, 교정 과정에서는 동일한 색상값에 대하여 카메라와 광원의 설치각도 차이에 따라 전체 온도측정범위 3 $^\circ\text{C}$ 에 대하여 약 2 $^\circ\text{C}$ 정도의 큰 오차(67%)가 발생하였다.

기존의 연구에서 온도와 색상값은 선형대응관계를 가진다고 하였으나, 광원 및 카메라의 설치각도가 증가함에 따라 온도와 색상값 분포의 비선형성이 증가하였다.

광원 및 카메라의 설치각도를 교정 변수에 추가하여 새로운 교정기법을 개발하여 기존의 색상포착기법을 개선하였으며, 측정각도 50도 이내에서 평균오차 0.1 $^\circ\text{C}$, 표준편차 0.2 $^\circ\text{C}$ 이하(산란도 6.7%)의 신뢰성 있는 결과를 얻었다.

후 기

이 논문은 1997년 한국 학술진흥재단의 공모 과제 연구비에(과제번호:1997002E00010) 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Klein, E.J., 1968, "Application of Liquid Crystals to Boundary-layer Flow Visualizations," *AIAA Paper, No. 68-376, AIAA Third Aerodynamic Testing Conference.*
- (2) Hippensteele, S.A., Russel, L.M., Torres, F.J., 1985, "Local Heat Transfer Measurements on a Large Scale-Model Turbine Blade Airfoil Using a Composite of a Heater Element and Liquid Crystals," *Trans. of the ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 107, pp. 953~960.
- (3) Goldstein, R.J., Franchett, M.E., 1988, "Heat Transfer From a Flat Surface to an Oblique Impinging Jet," *Trans. of the ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 84~90.
- (4) Akino, N., Kunugi, T., Ichimiya, K., Mitsushiro, K., Ueda, M., 1989, "Improved Liquid-Crystal Thermometry Excluding Human Color Sensation," *Trans. of the ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 558~565.
- (5) Kim, K. S., 1993, "An Experimental Study on the Flow and Heat Transfer Characteristics of an Impinging Jet," *KSME J.*, Vol. 7, pp. 258~271.
- (6) Kim, K. S., 1993, "An Efficient Way of Convection heat Transfer Measurement on a Curved Surface," *KSME J.*, Vol. 4, pp. 349~363.
- (7) Camci, C., Kim, K., Hippensteele, S.A., Poinatte, P.E., 1993, "Evaluation of a Hue Capturing based Transient Liquid Crystal Method for High-Resolution Mapping of Convective Heat Transfer on Curved Surfaces," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 311~318.
- (8) 김예용, 1995, "액정을 이용한 열전달 측정방법에서의 측정오차를 줄이기 위한 연구," 부산대학교 대학원 석사학위논문.
- (9) Yoon, S. H., Kim, M. K. and Lee, D. H., 1997, "Turbulent Flow and Heat transfer Characteristics of a Two-dimensional Oblique Plate Impinging Jet," *Int. J. KSME, Vol. 11, No. 4*, pp. 476~483.