

## 신경망 적용의 온도장 측정법 개선 방안

황태규† · 도덕희\* · 김동혁\* · 방광현\* · 문지섭\*\* · 홍성대\*\*\* · 장태현\*\*\*\*  
(원고접수일 : 2004년 12월 20일, 심사완료일 : 2005년 1월 27일)

### Improvements of Temperature Field Measurement Technique using Neural Network

Tae-Gyu Hwang† · Deog-Hee Doh\* · Dong-Hyuk Kim\* · Kwang-Hyun Bang\* ·  
Ji-Seob Moon\*\* · Seong-Dae Hong\*\*\* · Tae-Hyun Chang\*\*\*\*

**Abstract :** Thermo-chromic Liquid Crystal(TLC) particles were used as temperature sensor for thermal fluid flow. 1K × 1K CCD color camera and Xenon Lamp(500W) were used for the visualization of a Hele-Shaw cell. The characteristic between the reflected colors from the TLC and their corresponding temperature shows strong non-linearity. A neural network known as having strong mapping capability for non-linearity is adopted to quantify the temperature field using the image of the flow. Improvements of color-to-temperature mapping was attained by using the local color luminance (Y) and hue (H) information as the inputs for the constructed neural network.

**Key words :** TLC particles(감온액정입자), Hele-Shaw cell(헤레쇼 셀), Neural network(신경망)

#### 기호설명

$E_k$  : 신경망에 의한 온도측정 오차  
 $t_k$  : 열전대측정에 의한 온도  
R,G,B : Red, Green, Blue 계조치  
r, g, b : Normalized Red, Green, Blue  
HSI : Normalized Hue, Saturation, Intensity  
Y : Normalized luminance

$R_a$  : Rayleigh 수  
 $\Delta T$  : Hele-Shaw cell의 온도차

#### 1. 서 론

열유동의 온도측정에는 열전대, 수은온도계, 저항온도계, 복사온도계 등을 널리 쓰고 있는데, 이중 열전대는 정확도가 우수하고 가격이 상대적으로 저렴하다는 장점으로 인하여 가장 널리 사용되

† 책임저자(한국해양대 대학원 기계공학과), E-mail : andrew@bada.hhu.ac.kr, Tel : 051)410-4957

\* 한국해양대(기계정보공학부)

\*\* (주)대우일렉트로닉스

\*\*\* 한빛파워서비스(주)

\*\*\*\* 경남대학교(기계자동화공학부)

고 있다. 그러나, 열전대는 유동 속에 삽입하여 온도를 측정하는 접촉식인데다가, 한 점만에 대한 온도를 측정하므로 비정상 유동의 온도장 측정해석에는 원리상 적용이 불가능하다. 최근, 온도장의 측정을 위하여 감온액정(Thermo-Chromic Liquid Crystal)을 이용한 새로운 기술<sup>[1], [7]</sup>이 개발되었다. 이 기술은 감온액정의 온도변화에 따른 색상 변화특성을 정량화 하는 기술로서 감온액정입자를 열유동장에 투입, 유동장 전체에 걸친 온도장의 정보를 제공하는 측정법으로 열전달 분야에서의 온도측정법으로서 그 타당성이 입증되었다<sup>[1]~[7]</sup>. 감온액정의 온도변화에 따른 온도에 대한 R, G, B 색상과의 관계를 정량화하는 대신에 Dabiri와 Gharib<sup>[3]</sup>는 Hue(색상)값을 켈리브레이션의 변수로 사용하는 것을 제안하였다. 그들은 Hue와 온도사이에 유용한 관계가 있음을 보여주었다. 이후, Hue 켈리브레이션 기술은 Ozawa, et al.<sup>[1]</sup>, Nozaki, et al.<sup>[5]</sup> 그리고 Kobayashi, et al.<sup>[6]</sup> 등에 의해 몇몇 온도장 현상에 성공적으로 적용되어져 왔다. 그러나, Hue값의 곡선은 이후에 기술되지만 낮은 온도 및 높은 온도범위에서는 그 값이 포화(saturation)됨과 동시에 동일한 Hue값에 2개의 값을 지니는 강한 비선형성을 지니므로 온도-색상관계를 정량화하는데 한계를 지니고 있었다. 이후, Fujisawa et. al.<sup>[7]</sup> 은 감온액정의 R, G, B 색상변화를 사용하는 대신에 이들의 값을 바탕으로 비선형성 매핑에 강한 특성을 지닌 신경망 알고리즘을 적용함으로써 온도-색상 매핑범위의 한계를 극복하였다. 그러나, 이들의 연구성과에서는 중간층(은닉층)이 3개로 된 신경망을 이용한 온도-색상 켈리브레이션 결과를 적용하였다는 점, 측정영역 전 범위에 걸친 광학적 조건이 불균일하다는 점 등의 이유로부터 온도-색상 켈리브레이션 매핑에는 한계가 있어왔다. 본 연구에서는 R, G, B와 휘도(Y), 색상(H)을 신경망의 입력값으로, 온도를 목적함수로 설정함과 동시에 광학적 조건의 불균일성을 고려하여 측정범위 전 영역에 걸쳐 영역별로 온도-색상의 관계를 등록(registration)시킨 '영역정보등록-신경망 알고리즘'을 구현함으로써 전 영역에 걸쳐서 온도-색

상의 매핑성능향상을 구현하고자 한다.

## 2. 온도장 계측을 위한 신경망 알고리즘

신경망알고리즘은 인간이나 동물들이 가지고 있는 생물학적인 뇌의 신경세포(neuron)를 모델링한 것으로, 인간의 뇌에 존재하는 생물학적 신경세포와 이들의 연결 관계를 단순화시켜 수학적으로 모델링하여 병렬 시스템인 인간의 두뇌가 나타내는 지능적 형태를 구현한 것인데, Fig. 1과 같이 다입력 1출력 소자로 구성되며 각 신경은 다른 신경으로부터 신호를 받아들이는 형태의 모델로 표현될 수 있는데 그 관계식은 식 (1)과 같이 표현될 수 있다<sup>[9]</sup>. 뉴런(neuron)의 출력값은 net값에 신경망의 임계 함수적인 동작을 잘 표현할 뿐만 아니라 미분가능하고 수학적으로 편리한 특성을 가지고 있는 것으로 알려져 있는 식(2)와 같은 시그모이드 함수(Sigmoid function)<sup>[9]</sup>를 사용하여 구한다. 여기서 a, b는 임의의 상수인데 본 연구에서는 학습의 포화(saturation)구간에서의 계산능력을 향상시키기 위하여 Fig. 2와 같이 출력값에 바이어스(0.166666)를 둔 형태의 함수를 사용하였다.

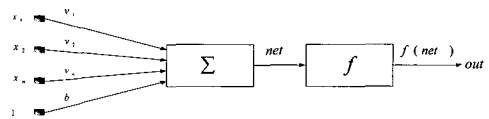


Fig. 1 Artificial neuron.

$$out = f(\sum v_i x_i + b) = f(net) \tag{1}$$

$$f(x) = \frac{1}{(1 + e^{-(ax-b)})} \tag{2}$$

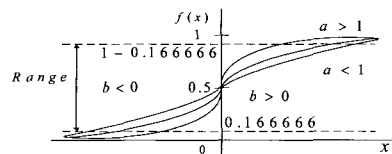


Fig. 2 Used Sigmoid function.

신경망은 반복학습에 의해서 원하는 지식을 습득하는 것인데, 본 연구에서는 학습 오차가 원하는 수준으로 감소할 때까지 결합하중과 바이어스를 조정하는 방식인 오류 역전파 알고리즘(Back-propagation Algorithm: 이하 BP법)<sup>[9]</sup>을 사용하였다. Fig. 3은 BP법 계산을 위한 신경망구조를 나타내는데 본 연구에서는 입력층과 출력층이 1개, 은닉층이 50개로 구성하였으며 알고리즘 계산과정은 다음과 같다.

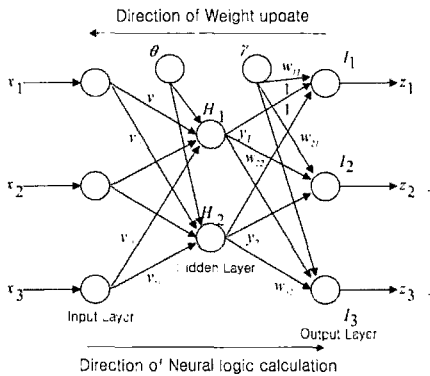


Fig. 3 Neural network connections and variables.

식(3)은 입력층에서의 입력데이터(\$x\_i, i=1\sim4\$)와 결합하중(\$v\$) 및 바이어스(\$\theta\$)의 합을 나타낸 것이며, 이를 시그모이드 함수로 전이하여 식(4)와 같이 은닉층에서의 출력데이터가 구해진다. 다음으로 은닉층의 출력(\$y\$)과 결합하중(\$w\$) 및 바이어스(\$v\$)의 합으로 되는 식(5)가 재차 시그모이드 함수로 전이되어 식(6)으로 표현된 출력층에서의 출력데이터(\$z\$)가 구해지게 된다. 마지막으로 식(7)과 같이 표현될 수 있는 출력데이터와 원하는 출력데이터(\$t\$: teaching)와의 오차가 감소되도록 입력층과 은닉층, 은닉층과 출력층사이의 결합하중 및 바이어스계수를 식(8)과 같이 갱신하여 반복계산을 수행하면서 오차가 가장 작은 최적화된 결합하중과 바이어스가 구해지면 학습을 종료시킨다.

$$H_j = \sum_{i=1}^{50} x_i v_{ij} + \theta_j \quad (3)$$

$$y_j = f(H_j) = \frac{1}{1 + \exp(-H_j)} \quad (4)$$

$$I_k = \sum_{j=1}^{50} y_j w_{kj} + \gamma_k \cdot 1 \quad (5)$$

$$z_k = f(I_k) = \frac{1}{1 + \exp(-I_k)} \quad (6)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_k \delta_k^2, \quad \delta_k = (t_k - z_k) \quad (7)$$

$$w_{kj} = w_{kj} + \Delta w_{kj}, \quad v_{ji} = v_{ji} + \Delta v_{ji} \\ \gamma_k = \gamma_k + \Delta \gamma_k, \quad \theta_j = \theta_j + \Delta \theta_j \quad (8)$$

### 3. 온도장 측정실험

#### 3.1 실험장치 및 방법

온도장을 계측하기 위한 센서로서 온도에 따라 선택적으로 색을 발하는 특징을 지닌 감온액정(TLC: Thermo-chromic Liquid Crystal)을 사용하였다. 감온액정은 얇은 여러 개의 분자층으로 구성되어 있고 같은 층의 분자들은 일정한 방향을 향하고 있다. 각 층에서의 분자배열은 아래층으로 내려가면서 나선형으로 회전하는 구조를 가지고 있는데 온도의 증가에 따라 층간의 거리가 달라짐으로써 선택된 빛이 발하는 특징을 가지는데 온도가 증가하면 붉은색에서 푸른색으로 변하게 되는 성질을 지닌다. 이와 같은 성질을 지닌 감온액정을 입자화(encapsulation)하여 이들을 온도센서로서 작동유체(물)에 투입하여 이들의 색변화에 대하여 칼라카메라 영상해석을 수행함으로써 열유동장의 온도분포 정량화가 가능하게 된다. 본 연구에서는 직경 10μm, 비중 1.02인 감온액정을 캡슐화(encapsulation)한 입자를 작동유체(물)에 투입하였다. Fig. 4는 온도장의 정량적인 평가를 위한 실험장치의 구성도로서 Xenon light source(500W, DC), 두 대의 향온조, 칼라 CCD 카메라(1K×1K)와 이미지 그래버로 구성하였다. Fig. 5는 실험에 사용되어진 Hele-Shaw cell로서 Test cell의 가로와 세로의 길이는 각각 48mm이며, 폭은 9.8mm이다. Test cell의 상하부 구리블록의 온도는 두 대의 향온조로부터 ±0.1℃의 정확도로 순환되는 물에 의해 일정하게 유지되어지며, cell의 측면부는 단열조건

으로 간주하였다. Test cell 내부의 유체는 구리 블록에 의해서 하부(40°C)로부터 가열되어지고 상부(20°C)로부터는 냉각되어지면서 순환하게 된다. 두 블록 내부 표면의 온도는 열전대로 측정되어 입력장치에 저장되어진다. 자연대류가 완전 발달된 후에 즉, 전체 측정영역에 TLC가 고루 섞였을 때의 영상을 칼라카메라 및 이미지 그라버를 통하여 호스트 컴퓨터에 저장한다. Rayleigh number는  $Ra=5.522 \times 10^7$  (이 때, 동점성 계수  $\nu = 0.8007 \times 10^{-6} [m^2/s]$ , 열확산 계수  $\alpha = 1.486 \times 10^{-7} [m^2/s]$ , 열팽창 계수  $\beta = 30.314 \times 10^{-5} [K^{-1}]$ ,  $\Delta T = 20^\circ C$ )이다.

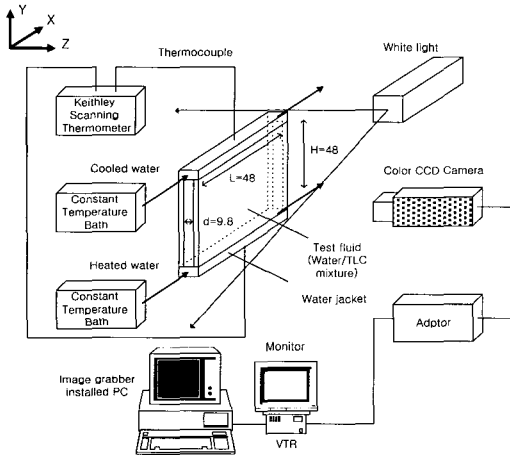


Fig. 4 Diagram of the experimental apparatus.

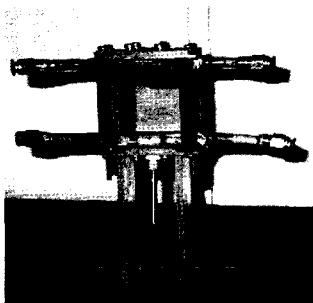


Fig. 5 Picture of used Hele-Shaw cell.

3.2 온도장 측정 및 결과

온도장 측정을 위해서는 감온액정의 온도변화에 대한 색상변화 관계를 알아두어야 하는데 이를 켈

리브레이션 과정이라고 하며, 이 과정과 본 실험 과정 동안의 광학적 조건은 같도록 하여야 한다. 한편, TLC 특성상 조명 및 관찰각도에 따라 동일한 온도라 할지라도 색상이 다르게 되는 특성을 지니므로 전술의 온도-색상의 비선형성 외에도 측정영역에 걸친 비선형성도 존재하므로 측정영역 전부를 고려한 온도-색상 캘리브레이션 데이터의 획득이 어렵게 된다. 본 연구에서는 이를 고려하여 감온액정의 색변화에 따른 온도 맵핑능의 극대화를 위해 '영역정보등록-신경망 알고리즘'을 구현하였다. 이는 Fig. 6과 같이 측정영역을 N x N 다영역(multi-region)으로 분할한 다음 이들 각 영역별 모든 색상정보를 신경망에 학습시키는 알고리즘이다. 본 연구에서는 영역을 4 x 4로 분할하여 계산하였다.

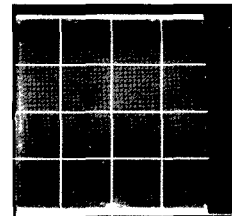
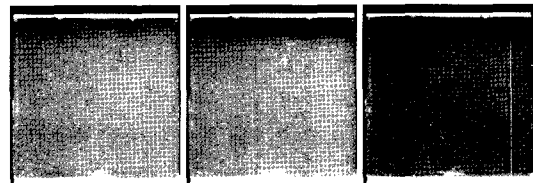


Fig. 6 Concept of Multi-region.

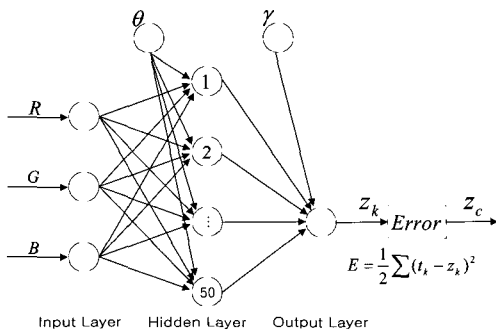


(a) 20°C (b) 28°C (c) 36°C

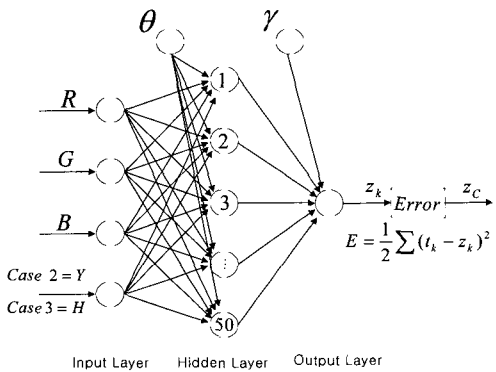
Fig. 7 TLC color image for calibration

한편, Test cell의 상, 하부 온도를 동일하게 한 다음, 측정영역내의 감온액정의 색상이 더 이상 바뀌지 않는 완전 정상상태에서 매 온도마다 영상을 기록하였다. 20°C에서 40°C까지 2°C간격으로 온도변화에 따른 TLC의 칼라변화를 영상으로 저장하였으며, Fig. 7은 Cell내부의 온도가 정상 상태로 20°C, 28°C, 36°C 일 때의 색상변화를 나타낸 것으로 온도가 낮을 때 붉은색에서 온도가 높아질수록 푸른색으로 전이됨이 보이는데 이때

각 영역별 색상정보가 신경망 학습계산에 적용된다. Fig. 8는 본 연구에 적용된 신경망을 나타낸다. BP법의 초기 입력데이터로써 R, G, B 이외에 보다 정확한 온도장의 온도분포를 구하기 위해서 국부적인 칼라의 휘도(Y)와 색상(H)을 추가하여 이들 입력값에 따른 온도장 계측의 상대적으로 비교하였으며, 이때 Y와 H는 식(9)으로 구하였다<sup>[8]</sup>. 사용된 신경망 은닉층의 개수는 측정영역별 매핑성능을 향상시키기 위하여 50개로 하였다.



(a) case 1



(b) case 2 and case 3

Fig. 8 Used neural network.

$$H = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2} [(R-G) + (R-B)]}{[(R-G)^2 + (R-B)(G-B)]^{1/2}} \right\}$$

(when  $B \leq G$ )

$$H = 2\pi - \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2} [(R-G) + (R-B)]}{[(R-G)^2 + (R-B)(G-B)]^{1/2}} \right\}$$

(when  $B > G$ )

$$Y = 0.3R + 0.59G + 0.11B \tag{9}$$

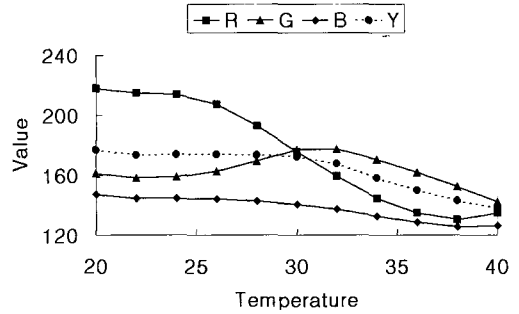


Fig. 9 Relation between temperature versus R, G, B, Y.

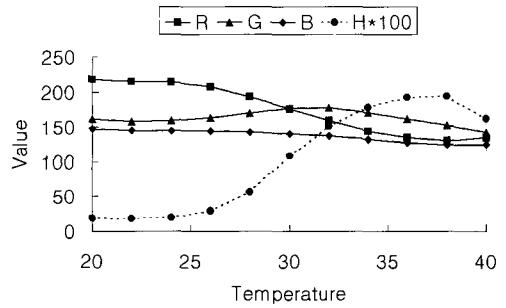


Fig. 10 Relation between temperature versus R, G, B, H.

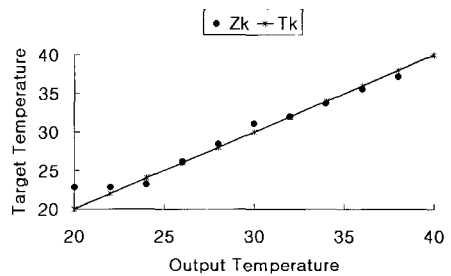
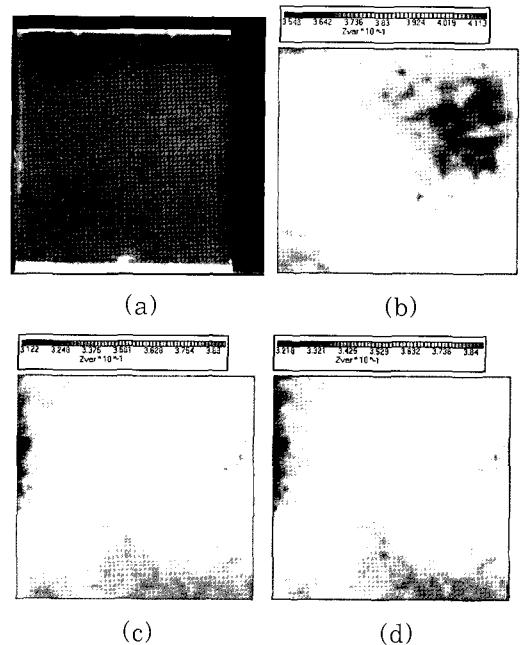


Fig. 11 Temperature fitting curve.

Fig. 9, 10은 캘리브레이션 영상 전체영역에 걸쳐서 모든 점들 각각의 R, G, B, Y 및 H의 평균값(색상의 밝기정도를 나타내는 값, 255가 최대치임) Value와 온도 °C에 대한 관계를 나타낸 것으로 이들값이 모두 비선형임을 보여주고 있는데 이들 온도-색상의 데이터를 신경망의 계산의 학습

입력 데이터로 사용하였다. Fig.11은 실제온도와 학습결과에 의한 온도-색상 간의 캘리브레이션 결과를 그래프로 나타낸 것으로 전반적으로 넓은 온도범위에 걸쳐서 매핑 성능이 우수함이 보인다. 20℃에 존재하는 오차는 전체 데이터의 오차전파에 따른 것으로 사료된다. 캘리브레이션의 결과, 열전대 온도계로 측정된 결과와 구축한 신경망 알고리즘으로 측정된 결과와의 평균오차는 0.817℃였으며, 전체 데이터 평균오차는 0.937℃이었는데 상대오차가 5%보다 적음을 의미한다. Fig. 12(a)는 Fig. 5의 Hele-Shaw cell이 상하부의 온도차에 의하여 유동장이 정상상태로 발달하였을 때, 순간의 TLC칼라 영상을 나타낸다. 이 영상의 모든 픽셀상의 칼라정보는 온도-색상 캘리브레이션 과정에서 이미 학습된 신경망의 입력데이터로 입력되며 신경망의 출력치가 측정된 온도가 된다. 신경망은 이미 학습된 상태이므로 순간온도장의 영상정보를 입력시키면 온도장 전체에 걸친 온도 분포가 일의적으로 구해지게 된다. 상부, 하부 구리 블록에 의한 조명반사 영향을 최소화하기 위해 측정영역은 Fig. 12(a)에 표시된 사각형 영역(34,98 ~ 416, 459 pixel 영역)으로 하였다. Fig. 12 (b)~(d)는 Fig. 8에 제시된 신경망을 이용하여 획득되어진 측정결과이다. (b)는 R, G, B만을 신경망의 입력값으로 사용한 결과의 순시 온도분포이며, (c)는 R, G, B의 입력값에 밝기의 영향만을 고려한 Y를 추가함으로써 얻은 순시 온도 분포이다. (d)는 칼라 고유정보인 H값을 입력값으로 추가하여 얻은 순시 온도분포를 보여주고 있다. Test cell의 상부 가장자리 근처의 푸른색을 띠는 낮은 온도의 유체는 test cell의 상부 가장자리를 따라 하강하였으며, 하부의 블록에 의해 가열되어진 유체는 test cell 중앙의 수직선상을 따라 상승하고 칼라는 상부의 낮은 온도의 구리 블록 영향에 의해 점점 붉은색에서 녹색 그리고 푸른색으로 변함으로써, 이들 결과가 자연대류 현상을 잘 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. R, G, B 색상정보만을 이용한 신경망에 의한 온도장 측정 결과보다는 휘도(Y)와 색상(H)을 추가한 BP에서의 결과가 자연대류에 의한 온도장 해석을 더

욱 상세하게 표현함을 확인할 수 있었다. 또한 Y와 H를 각각 적용한 경우보다는 R, G, B, H(또는 Y)를 모두 입력으로서 사용한 경우가 실제 자연대류에 온도분포를 잘 나타내고 있음이 확인되었는데 이는 광원의 조명효과(반사 등)를 고려한 것이므로 온도장 측정의 경우에 권장되는 사항으로 나타났다.



**Fig. 12** (a) Instantaneous raw image. (b) Measured temperature distribution with RGB. (c) Measured temperature distribution with RGBY. (d) Measured temperature distribution with RGBYH.

#### 4. 결 론

감온성 액정 (TLC) 입자를 온도센서를 이용한 Hele-Shaw cell내의 자연대류의 온도장 분포를 정량화하는 과정을 통하여 다음과 같이 요약될 수 있다.

신경망 알고리즘기반의 온도장 측정법을 구축함으로써 기존의 Hue(색상)정보를 이용한 온도측정

범보다 넓은 범위의 온도측정이 가능하게 하였다.

또한 신경망 알고리즘기반의 온도장 측정법을 적용하고자 할 경우 R, G, B 색상정보만을 이용하는 것보다 R, G, B, Y(혹은 H)를 적용하는 것이 온도측정오차를 줄일 수 있음이 입증되었다.

본 연구에서 구축된 온도장 측정법은 자연 대류 및 열유동장의 온도장분포를 정량화하는데 적용될 수 있다.

### 후 기

이 논문은 과학기술부 I-NERI사업의 일환으로 수행되었으며 일부는 교육부 BK21의 지원으로 이루어졌음.

### 참고문헌

- [1] Ozawa.M., Muller.U., Kimura,I. and Takamori,T., Flow and temperature measurement of natural convection in a Hele-Shaw Cell using a thermo-sensitive liquid-crystal tracer, *Experiments in Fluids*, Vol.12, pp.213-222, 1992.
- [2] Doh, D. H., Kobayashi,T., Saga,T. and Segawa, S., A new consideration for measuring temperature and velocity: Particle Imaging Thermometry and Velocimetry, Proc. 3rd of JSME-KSME Fluid Engineering Conference, pp.154-159, 1994.
- [3] Lee, S. J., J.H.Yoon, Doh,D.H., Simultaneous velocity and temperature measurement of thermo-fluid flows by using Particle Imaging Technique, *KSME(B)*, Vol. 20, No.10, pp.3334-3343, 1996.
- [4] Dabiri,D. and Gharib,M., Digital Particle Image Thermometry : The method implementation, *Experiments in Fluids*, Vol.11, pp.77-86, 1991.
- [5] Nozaki, T., Mochizuki, T., Kaji, N., Mori, Y. H., Application of liquid-crystal thermometry to drop temperature measurements, *Experiments in Fluids*, Vol.18, pp.137-144, 1995.
- [6] Kobayashi.T., Saga.T. and Doh,D.H., A Three-dimensional simultaneous scalar and vector tracking method, Proc. Intl. Workshop on PIV, Fukui, Japan, pp.33-43, 1995.
- [7] Fujisawa,N., Adrian,R.J., Three-dimensional temperature measurement in turbulent thermal convection by extended range scanning liquid crystal thermometry, *J. of Visualization*, Vol. 1, No.4, pp.355-364, 1999.
- [8] Bernard G., Basic television and video systems, *McGraw-Hill*, 5th Edition, 1984.
- [9] Rumelhart,D.E., Hinton,G. E., Williams R.J., Learning representations by back-propagating errors, *Nature*, pp.323-333, 1986.
- [10] Buler,L., Erhard,P., Gunther,G., Muller, U. and Zimmermann, G., Natural convection in vertical gaps heated at the lower side on experimental and numerical study, Proc. of Bifurcation Phenomena in Thermal Process and Convections (eds. Bau, H. M., Bertram, L.A. and Lorpela,S.A.), ASME HTD-Vol.94, IAMD-Vol.89, pp.67-74, 1987.

## 저 자 소개



### 황태규 (黃太奎)

1974년 4월생, 2001년 한국해양대학교 기계공학과 학사, 2003년 동 대학원 기계공학과 석사, 2003년 3월~현재 동 대학원 기계공학과 박사과정, 한국박용기관학회 학생회원.



### 도덕희 (都德熙)

1962년 10월생, 1985년 한국해양대학교 기관학과 학사, 1989년 동 대학원 기관학과 석사, 1995년 일본 동경대학교 대학원 기계공학과 박사, 1995년 3월~9월 포항공대 첨단유체공학연구센터 위촉연구원, 현재 한국해양대학교 기계정보공학부 부교수, Journal of Visualization Managing Editor, 한국박용기관학회 연구이사, 대한기계학회 유체공학부문 이사, 한국가시화정보학회 학술이사.



### 김동혁 (金東赫)

1953년 9월생, 1976년 서울대학교 공과대학 기계공학과 학사, 1984년 New Jersey Institute of Technology 기계공학과 석사, 1988년 The Johns Hopkins University 기계공학과 박사, 1976년 3월 - 1982년 8월 국방과학연구소 연구원, 1988년 9월 - 1992년

8월 한국표준과학연구원 책임연구원, 현재 한국해양대학교 기계정보공학부 교수.



### 방광현 (房光炫)

1958년 6월생, 1981년 서울대학교 원자핵공학과 학사, 1985년 퍼듀대 원자력공학과 석사, 1989년 위스콘신대 원자력공학과 박사, 현재 한국해양대학교 기계정보공학부 부교수, 대한기계학회 열공학부문 이사, 당학회 회원.



### 문지섭 (文智燮)

1974년 3월생, 1999년 한국해양대학교 냉동공조공학과 졸업, 2001년 동 대학원 냉동공조공학과 졸업(석사), 2002년 7월~현재 (주)대우일렉트로닉스 품질신타성연구소 주임연구원, 대한기계학회 정회원



### 홍성대 (洪性大)

1969년 7월생, 1992년 한국해양대학교 기관학과 학사, 1992년~1997년 거창해운(현, 한진해운)소속 선박기관사(1등기관사)로 재직, 2000년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 석사, 2003년 일본 동경대학교 대학원

에서 화학반응을 수반하는 제트유동의 가시화연구로 양자시스템공학과 졸업(박사), 2004년 1월~현재 한빛 파워서비스 AOV연구팀에서 공기구동밸브의 유동패턴 및 성능평가 프로그램 개발 연구 수행중, 한국박용기관학회 회원.



### 장태현 (張泰鉉)

1942년 2월생. 1969년 동아대학교 기계공학과 졸업. 1971년 동대학대학원 기계과 졸업(공학석사). 1991년 12월 University of Wales(Swansea, U.K.) 대학원 기계공학과 졸업(Ph.D), 2001년 5월 제6차 ASV'6(Asian Symposium on Visualization) 조직위원장 역임, 공조·냉동기계 기술사, 현재 경남대학교 기계자동화공학부 교수