

공학석사 학위논문

액정을 이용한 평행평판 내의
혼합대류에 관한 연구

지도교수 배 대 석

이 논문을



학위논문

출함

2003년 8월

부경대학교 대학원

자동차공학과

박 일 용

박일용의 공학석사 학위논문을 인준함

2003 년 6 월 26 일

주 심 공학박사 김 남 식

위 원 공학박사 이 도 형

위 원 공학박사 배 대 석



- 목 차 -

Abstract

제 1 장 서 론	1
1.1 서 언	1
1.2 종래의 연구	3
1.2.1 속도장의 계측	3
1.2.2 온도장의 계측	3
1.2.3 속도장과 온도장의 동시계측	4
1.3 본 연구의 목적	5
제 2 장 유동의 가시화와 화상계측 시스템	6
2.1 실험 장치	6
2.2 컬러 화상처리 시스템	14
2.3 실험 방법	15
제 3 장 속도장의 계측	17
제 4 장 온도장의 계측	19

4.1 액정의 특성	19
4.2 RGB표색계와 색/온도변환	20
4.3 뉴럴 네트워크를 이용한 RGB표색계의 색/온도변환	24
 제 5 장 결과 및 고찰	 28
5.1 자연대류	28
5.2 혼합대류	32
 제 6 장 결 론	 43
 참 고 문 헌	 44

A Study on the Mixed Convection in Parallel Plates Using Liquid Crystals

Ri-Long Piao

Department of Automotive Engineering, Graduate School.
Pukyong National University

Abstract

This paper describes the influence of through-flow on the mixed convection in a parallel plates with the upper part is cooled and the lower part heated. When forced convection is imposed on natural convection, it is found that the flow pattern of mixed convection in the parallel plates can be classified into three patterns which was affected by Reynolds number. In such a mixed convection, the flow pattern plays an important role in the heat transfer process. In this study, thermo-sensitive liquid crystal suspension method is employed, then the visualization image acquired through the above method is processed by the color image processing technique and the two-dimensional velocity vector and temperature configuration are simultaneous measured.

제 1 장 서 론

1.1 서언

기계공학을 비롯하여 많은 공학 분야에서 열 유체의 거동을 정확히 파악하는 것은 기기, 시스템설계에서 아주 중요하다. 따라서 열 교환기, 원자로, 전기 기기 등의 설계와 제작을 위해서는 열 유체의 유동에 관한 고찰이 반드시 필요하다. 이런 열 유체의 거동을 해석하는 방법의 하나로써 감온액정이 이용되고 있으며 최근 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^{1)~18)}. 감온액정을 이용하면 온도를 시각적으로 판별하기 쉬운 색으로 변환할 수 있어 열 유동현상에 있어서 색에 의한 온도를, 입자의 이동에 의한 흐름을 동시에 가시화 할 수 있어 대류패턴의 인식 등 정성적인 열 유동현상을 쉽게 얻을 수 있으므로 여러 가지 연구에 사용되었다^{12)~14)}. 또한 최근에 컴퓨터 하드웨어, 광학적 영상처리 기기, 가시화기술의 발달과 더불어 감온액정 추적자를 이용한 열 유동장의 정량적 가시화가 가능하게 되어 정량적으로 속도장 또는 온도장 전체의 정보를 동시에 계측할 필요가 있는 실험에 감온액정을 이용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

감온액정은 온도에 의하여 색깔이 변화하는 광학적인 특성을 나타내고 있으므로 색과 온도사이의 상관식을 구하여 색/온도 변환에 의한 정량적인 온도정보를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 액정입자를 추적입자로 사용하여 유동장의 속도를 정량적으로 계측할 수 있다. 이런 계측방법은 측정온도범위가 감온액정의 발색범위라는 제한이 있지만 점 계측인 열전대나 국소 유속계 등과는 달리 온도장, 속도장 동시 계측이 가능하며, 복

잡한 형상의 온도측정, 순시 속도측정, 과도현상의 측정에 적합하고 또한 유체에 현탁되는 감온액정의 입자가 아주 미소하여 유동장에 주는 영향을 거의 무시할 수 있는 등의 이점이 있어 더욱 주목되고 있다.

유동장의 가시화화상에 디지털 화상처리를 하여 유속분포를 정량적으로 화상 처리하는 방법의 개발은 매우 광범하게 진행되고 있다. 그 중에서 추적자의 이동거리로부터 간접적으로 흐름의 속도분포를 계측하는 추적자 궤도 추적법, 상관법 등 유효한 방법들이 발표되고 있다. 그리고 그 연구범위도 계산속도의 향상을 목표로 하는 새로운 알고리즘의 개발이나 2차원 정상류의 계측으로부터 3차원 난류 계측으로 확대되고 있다. 온도 계측에 있어서도 칼라화상처리를 해서 액정의 색을 온도 정보로 변환하는 방법인 만셀(Munsell)표색계에 의한 색/온도 교정 알고리즘이 주로 사용되었지만 최근 뉴랄 네트워크를 색/온도 교정에 사용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 따라서 본 연구에서는 이들의 칼라화상처리기술을 이용해서, 감온액정에 의한 열 유동현상의 가시화화상으로부터 속도장과 온도장을 동시에 계측할 수 있는 시스템을 개발하여 상부가 냉각되고 하부가 가열되는 밀폐된 평행평판내의 혼합대류 연구에 적용하였다^{19)~23)}. 촬영된 감온액정의 가시화영상에 칼라화상처리기술을 응용하여 온도장, 속도장을 동시에 계측하였으며, 속도벡터분포 계측에는 계조치 상호 상관법^{15)~16)}을, 온도분포 계측에는 뉴랄 네트워크^{7)~8)}에 의한 색/온도 교정 알고리즘을 개발하여 사용하였다.

1.2 종래의 연구

1.2.1 속도장의 계측

이전에는 유동의 정성적인 파악에만 이용되었던 가시화기술에 디지털 화상처리기술을 응용하여 유동장의 정량적인 속도 벡터분포를 구하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 방법에는 추적입자의 이동을 추적하여 속도를 계측하는 방법(추적입자 추적법)과 개개의 추적입자를 추적하는 것이 아니라 추적입자를 포함한 화상을 공간적인 농도패턴으로 하여 얻는 방법, 즉 일정시간 간격을 가진 두 개의 추적입자화상을 소 영역으로 분할해서, 각각의 영역에 있어서의 농도패턴 상호상관계수를 계산해서 그 최대치의 공간위치로부터 추적입자군의 이동거리 및 방향을 구해 속도벡터를 계산하는 방법(상관법) 두 가지가 있으며 그 연구성과도 다수 보고되고 있다. 예를 들면 吉川, 小林 등은 급확대류로, 원주후류, 실내기류 등의 속도장을 추적입자 추적법으로 측정하였고 木村 등은 상관법으로 원주에서의 속도 분포, 사각수로내의 3차원속도분포를 화상 계측한 결과를 발표하였다.

1.2.2 온도장의 계측

감온액정의 선택성 산란광은 온도에 강한 의존성을 나타내며, 온도의 상승에 따라 산란광의 파장은 짧게 된다. 이 산란광의 온도에 대한 의존성을 온도계측에 이용하고 있다. 감온액

정을 액체중에 현탁 시키면 액체의 온도가 색 정보로 변환되어 온도분포가 색 분포로 되어 나타나게 되므로 유동장 전체의 온도분포가 쉽게 파악될 수 있으므로 감온액정을 이용한 가시화실험이 널리 응용되고 있다. 과거의 연구에서는 인간의 색채감각에 의한 계측법도 있지만 이런 방법으로는 색과 온도의 관계를 정확히 얻는 것이 어려웠다. 秋野등은 인간이 색채감각에 의존하지 않는 감온액정막을 이용한 온도화상계측시스템을 개발하고 그 유효성을 실제적으로 증명하였다. 이 방법은 시각보다 상세한 결과를 얻을 수 있지만 비정상현상을 처리할 수 없는 문제점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 木村, 小澤등은 칼라화상을 그대로 처리할 수 있는 칼라화상처리 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 색을 온도로 변환하는데 있어서 RGB표색계에서 색을 식별하는 알고리즘을 사용하였다. 그 후 木村, 小澤은 만셀표색계에 의한 색/온도 변환, 뉴럴 네트워크를 이용한 색/온도변환 알고리즘을 개발하여 발표하였다.

1.2.3 속도장과 온도장의 동시측정

감온액정을 이용한 속도장과 온도장의 동시 계측에 관한 연구도 최근 많이 진행되고 있다. 木村, 小澤등⁵⁾은 감온액정을 이용하여 Hele-Shaw cell 내 자연대류 유동장과 온도장을 정량적으로 가시화 하였고 Anmen등⁶⁾은 Hele-Shaw cell내에 강제대류를 작용시켜 그 영향을 고려하였다. Bae등¹¹⁾은 기포유동에 대한 속도장과 온도장을 정량적으로 제시하였다.

1.3 본 연구의 목적

본 연구에서는 감온액정현탁법을 이용하여 얻은 밀폐된 평행평판내의 가시화 화상에 칼라화상처리기술을 응용하여 2차원 속도벡터분포와 온도분포를 동시에 계측하는 것을 목적으로 하여 아래와 같이 진행하였다.

1) 감온액정현탁법을 이용하여 패턴의 궤적에 의한 유동장과, 색에 의한 온도장을 동시에 가시화 하였다.

2) 계조치 상호 상관법(Grey-level cross-correlation)을 가시화 화상에 적용하여 속도벡터분포를 측정하였다.

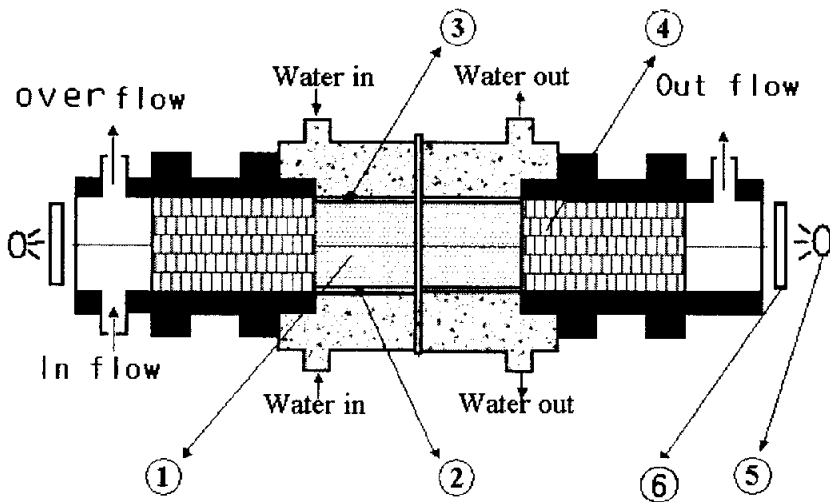
3) 뉴랄 네트워크(Neural-Network)를 이용한 색/온도변환 알고리즘을 이용하여 온도분포를 측정하였다.

4) 2),3)의 계측법을 실제 혼합대류에 적용하여 그 결과에 대하여 고찰하였다.

제 2 장 유동의 가시화와 화상계측 시스템

2.1 실험 장치

Fig.1은 실험장치를 나타낸다. 실험장치는 주로 실험부(Test section), 할로겐 램프 2대, 가열면과 냉각면, 그리고 열 교환기 등으로 구성되었다.



① test section	④ honey comb
② heating surface	⑤ light source
③ cooling surface	⑥ water filter

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig.2는 실험부를 나타낸다. 실험부는 두께가 15mm인 투명한 아크릴로 구성되었고 전열면인 동판과 수직으로 조립되었다. 또한 반사광에 의한 해상도의 손실을 막기 위해 동판의 앞부분 상하에 모두 검정색 종이를 부착하였다.

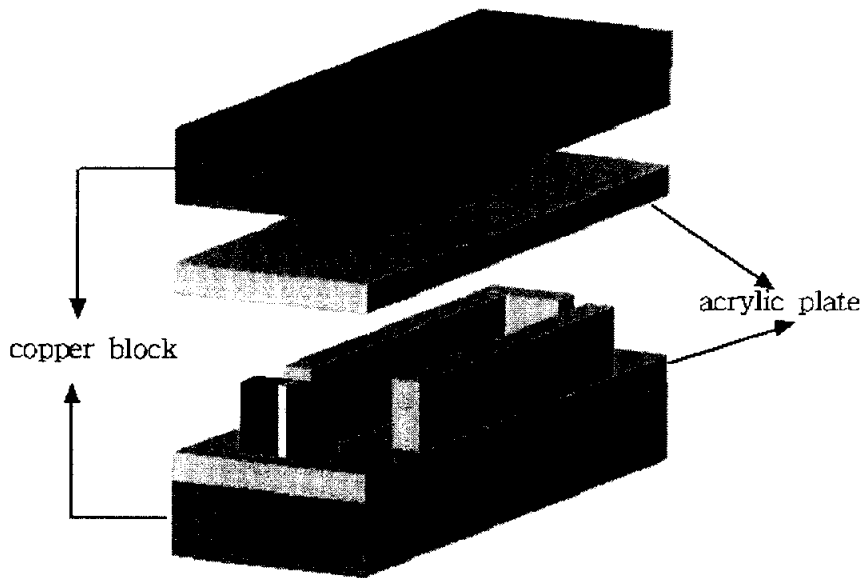


Fig.2 Schematic diagram of test section

실험부는 Photo.1과 같이 폭은 140mm, 깊이는 10mm, 높이는 15mm인 하부에서 가열, 상부에서 냉각하는 직사각 밀폐 모형으로 제작되었다. 반사광에 의한 해상도의 손실을 막기 위해 영상획득 부분을 제외한 실험부의 촬영전면에 검정색 종이를 부착하였고, 영상획득 부분 뒷면에도 감온액정의 발색을 보다 잘 촬영하기 위해 검정색 종이를 부착하였다.

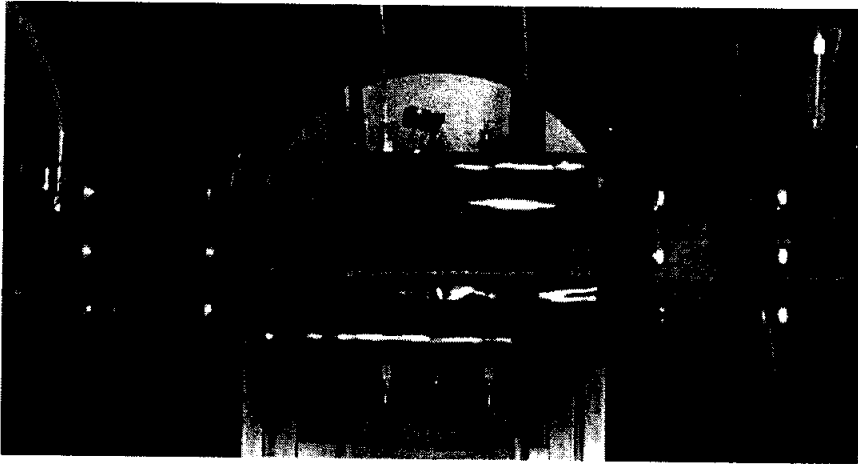


Photo.1 Photograph of the test section setup

상, 하부 냉각면과 가열면은 각각 두께가 15mm인 동판으로 구성되어있고 전열면인 동판내부에는 순환수의 이동통로를 만들어 향온순환장치(Photo.2)로 등온의 순환수를 순환시켰다. 강제대류는 Stepdos펌프(Photo.3)를 사용하여 작용하였고 연속적인 유동을 공급하기 위해 펄스 댐퍼(Photo.4)를 설치하였으며 입구에서 동일한 유동을 공급하기 위해 실험부 양쪽에 Honey combs를 설치하였다. 실험부내에 들어가는 유체의 온도는 실험부 좌측에 설치한 온도제어장치(Photo.5)에 의해 억제되고 보존된다. 광원인 할로겐 램프(Photo.6)는 실험부의 좌·우에 검정색 종이로 만들어진 2mm 슬릿(Slit)을 통하여 조사하였고 실험시 조명에 의한 복사열전달을 최소화하기 위해 물 필터(Photo.7)를 사용하였다. 영상획득은 슬릿 광에 대해 수직방향으로 2m 위치에 설치된 컬러 디지털 카메라(Photo.8)에 의해 이루어졌다. 실내 온도의 영향을 감소시키기 위해 별도의 차단벽을 설치하였으며 실내온도를 실험부 상하면의 평균온도로 설정하여 실험하였다.

Fig.3과 같이 상, 하부 동판에는 열전대가 각 3부분에 설치되었고 디지털 온도계(Photo.9)를 통해 그 온도가 측정되었다.

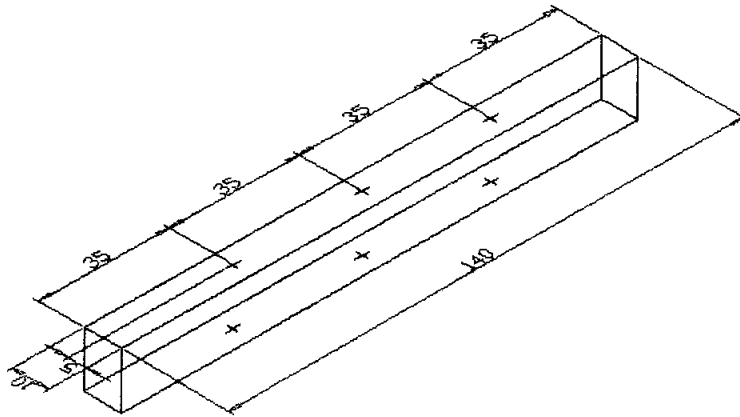


Fig.3 Thermocouple position in the test section

작동 유체로는 Shin-Etsu Silicon Oil KF-96-100cst (Shin-Etsu Chemical Co.,Ltd)를 사용하였고, 그 물성치를 Table.1에 나타내었다. 액정에는 RM2830(Japan capsular products INC.)를 사용하여 실리콘오일의 점성에 영향을 미치지 않도록 중량비 약 0.1%로 혼합하였다.

Table.1 Properties of silicon oil at 25°C

Silicon oil [viscosity, ν]		100cst
Density	ρ [kg/m ³]	963.1
Specific heat	C_p [J/kg.K]	1507
Thermal conductivity	λ [W/m.K]	0.16
Expansion coefficient	β [K ⁻¹]	9.5×10^{-4}
Thermal diffusivity	α [m ² /s]	1.1×10^{-7}
Pr number	Pr	909.1

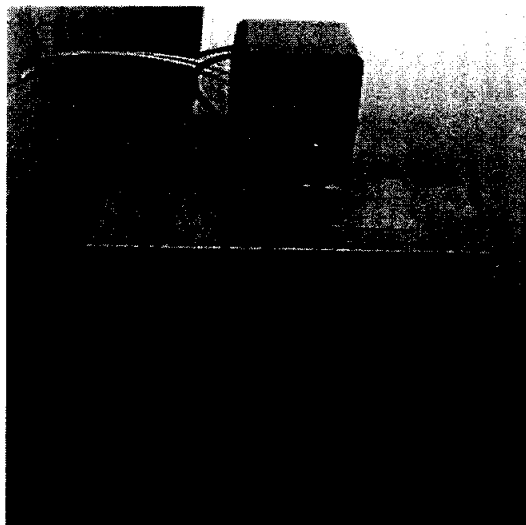


Photo.2 Photograph of constant temperature bath

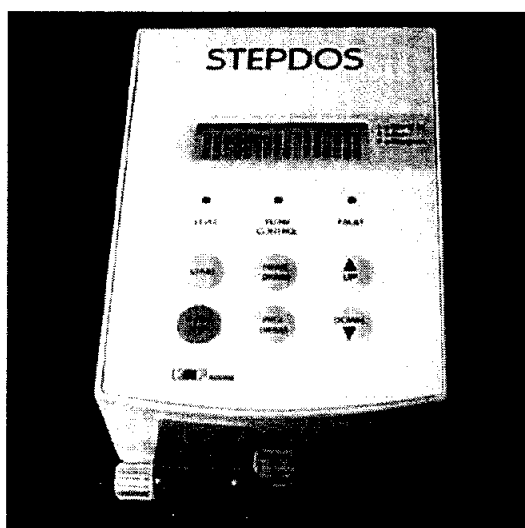


Photo.3 Photograph of stepdos pump

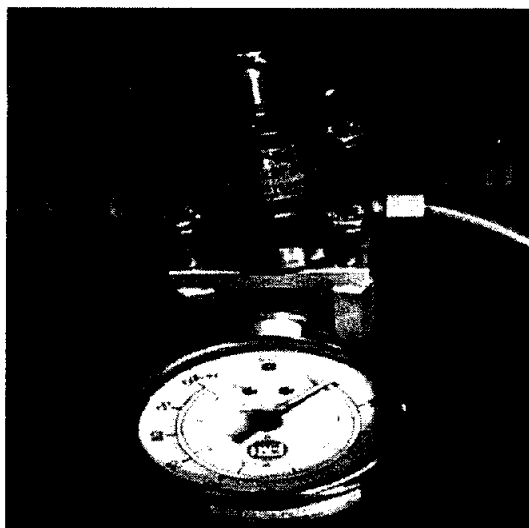


Photo.4 Photograph of pulse dampener

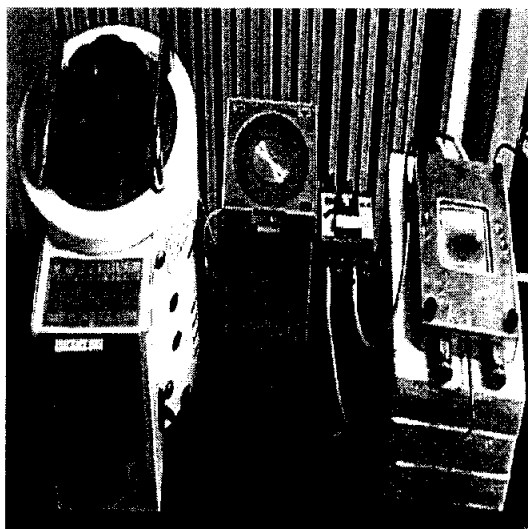


Photo.5 Photograph of temperature regulator

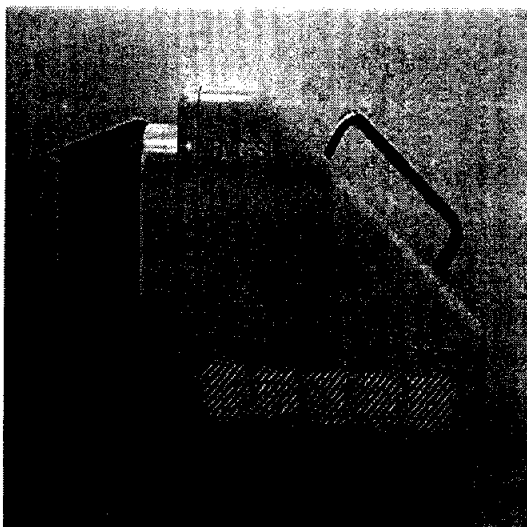


Photo.6 Photograph of halogen light

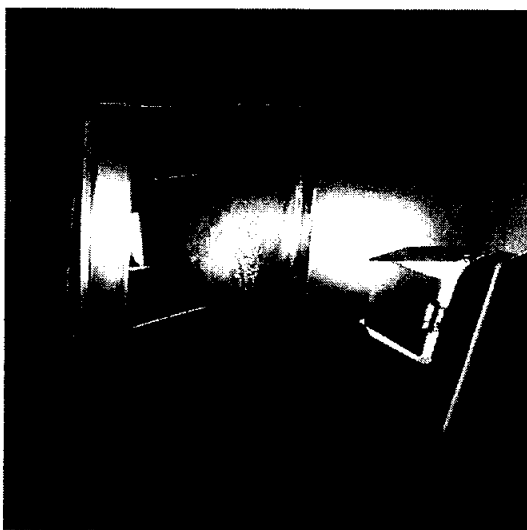


Photo.7 Photograph of water filter

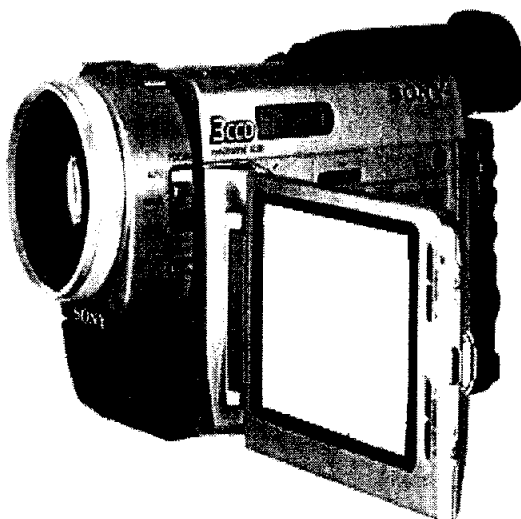


Photo.8 Photograph of digital video camera

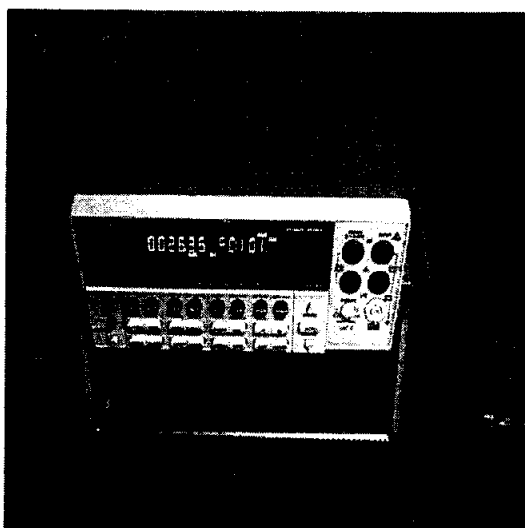


Photo.9 Photograph of digital thermometer

2.2 컬러 화상처리 시스템

본 연구에서 사용한 컬러 화상처리 시스템의 구성도를 Fig.4에서 나타낸다.

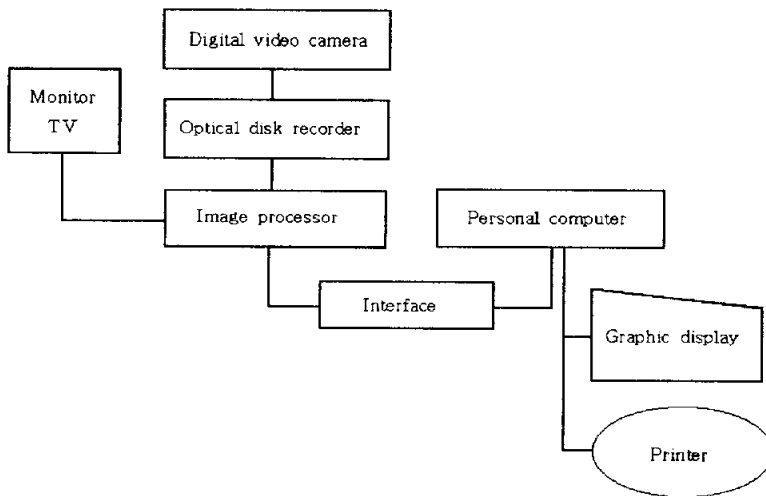


Fig.4 Schematic diagram of image processing

우선 컬러 디지털 비디오로 촬영된 화상은 1/30초 간격으로 Image process에 보내져 NTSC신호부터 R, G, B (Red, Green, Blue)의 3원색 신호로 색 분해되었고, 분해된 색상정보는 1프레임 당 3화면의 수치데이터로 기록되었다. 이 화상을 Personal computer로 보내어 속도벡터분포, 온도분포 등 필요한 계산을 처리하였고, 그 결과를 Graphic display, Deskjet printer등의 화상출력장치로 출력하였다.

2.3 실험 방법

먼저, 실험부에 실리콘 오일과 액정의 혼합액을 주입하고, 항온순환장치를 작동시켜 상부에서 냉각, 하부에서 가열한다. 혼합액은 Stepdos Pump에 의해 실험부내에서 아주 천천히 혼합된다. 입자들이 실험부내의 모든 영역에서 완전히 혼합된 후 펌프를 정지하고 상하면의 온도를 같게 하여 대류가 완전히 제거되는 열 평형상태로 만든다. 이때 감온액정은 실험부의 전 영역에 대하여 동일한 색을 발산하며 Photo.10 과 같다.



Photo.10 Photograph of the thermal equilibrium state
;(T=28℃)

다음, 실험부를 상부를 가열하고 하부를 냉각한다. 충분한 시간이 지나면 실리콘 오일은 열전도 상태로 전환되고 유동이 없어진다. 이 때 상부 동판의 유입관을 통해 열 전대를 실험부 내부에 삽입하여 감온액정의 다양한 발색에 대한 온도정보를 파악한다.

다시 열 평형상태로 전환하고, 완전한 열 평행상태 확인 이후 하부를 가열하고 상부를 냉각시킨다. 실험부내에 자연대류가 충분히 발달하여 정상상태가 된 후 Stepdos Pump로 유체를 실험부내로 유동시킨다. 혼합대류가 완전히 형성된 후 유동현상을 디지털 비디오 카메라로 촬영한다. 본 실험에서 실험부내에 흘러 들어가는 유체의 온도는 상부와 하부의 평균온도이다.

본 연구에서는 이러한 실험방법을 통해 교정실험과 자연대류와 혼합대류 실험을 실시하였으며, 촬영한 영상으로 속도·온도장 계측을 실시하였다.

제 3 장 속도장의 계측

가시화기술에 디지털 화상처리기술을 응용하여 유동장의 속도벡터분포를 구하는 방법 즉 추적입자 추적법과 상관법을 앞에서 서술하였다.

본 연구에서는 일정시간 간격을 가진 두 개의 추적입자화상을 소 영역으로 분할해서, 각각의 영역에 있어서의 농도패턴 상호상관계수를 계산해서 그 최대치의 공간위치로부터 추적입자군의 이동거리 및 방향을 구해 속도벡터를 계산하는 계조치 상호 상관법(Gray-level cross-correlation method)으로 속도벡터분포를 계측하였다. 사용한 계조치 상호 상관법의 입자추적 알고리즘은 복수의 추적입자가 만든 소 영역의 농도패턴으로써 처리되기에 화상은 농도의 정보를 함유할 필요가 있다. 그러나, 본 실험에서 얻은 화상은 전부 컬러영상으로 되어 있기 때문에 농도뿐만 아니라 색상의 정보까지 포함하고 있어, 계조치 상호 상관법을 그대로 적용할 수 없다. 따라서, 상호상관계수의 계산에는 RGB표색계를 YIQ표색계의 1속성인 휘도신호로 변환하여 화상데이터를 이용한다. 본 연구에서는 상용프로그램인 Thinkers eyes(TNTech Co.Ltd)를 사용하여 휘도신호로 변환하고 속도장 계측을 처리하였다.

촬영된 영상은 이미지보드(IEEE 1394 card)를 통해 PC에 저장되고, 속도처리 가능한 휘도신호 영상으로 변환된다. 속도벡터를 구하기 위한 영상처리 과정 중에는 배경감산에 의한 영상의 Noise제거, 장애물 제거, 해석영역 설정 등의 전처리 과정이 필요하다. 전처리과정을 거친 화상에 계조치 상호 상관법의 추적 알고리즘을 사용하여 수분 동안의 영상을 처리한다. 획득된 영상에 Noise가 있을 경우 오류벡터가 발생할 확률이 크므로 배경영상을 만들어 각 영상으로부터 감산하게 되면 배

경영상의 제거된 영상을 추출할 수 있다(Fig.5).

일반적으로 PIV계측시 대상 유체의 유동속도에 따라 카메라가 결정되고, 속도장 해석을 위한 영상의 대상 프레임(Frame)도 결정된다. 본 연구에서는 초당 30프레임을 갖는 컬러 디지털 카메라의 영상에서 2초당 1프레임을 추출하여 속도 계측하였다. 연속된 두 프레임간의 상호상관계수는 다음의 식(3.1)으로 구해진다.

$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i) (g_i - \bar{g}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)^2 (g_i - \bar{g}_i)^2}} \quad (3.1)$$

여기서 f_i 와 g_i 는 상관영역내 각 픽셀의 계조치이다.

후처리 과정에는 이상치를 판별하여 오류 벡터를 제거하는 오류벡터 제거과정과 격자점 재배치, 실제단위로 환산, 평균벡터 계산 등이 있다.



Fig.5 Background Image

제 4 장 온도장의 계측

4.1 액정의 특성

액정은 광학적 성질과 분자 구조에 따라 smetic, nematic, cholesteric 액정으로 구분되는데 이중 cholesteric 액정은 특수한 분자구조로 인하여 온도에 따라 광학적인 특성을 나타낸다. 이러한 성질은 가역적으로 나타나므로 온도에 따라서 특정한 색을 나타낼 수 있다. 즉 온도의 상승에 따라 적색에서 황색, 녹색, 청색으로 변화하며, 발색 온도영역은 액정에 따라 다양하다. 본 실험에 사용된 감온액정의 경우 발색 온도영역은 $25.8^{\circ}\text{C} \sim 28.8^{\circ}\text{C}$ 인 감온액정을 사용하였다. 온도장의 정량적인 정보의 획득을 위해선 이 감온액정의 색상의 정보를 정의할 필요가 있다. 색은 생리학적이고 시각적인 것이지만 인간의 눈에 의해 색을 감지할 수 있는 광은 물리량이고 색을 정량화, 기호화하는 방법은 지금까지 색채학의 분야에 있어서 각종연구가 되고 있다. 일반적으로 색을 표시하는 체계를 표색계라 하는데 표색계에는 심리물리량을 표시하는 혼색계와 지각색을 표시하는 현색계가 있다. 만셀 표색계는 현색계를 대표하고 RGB표색계는 혼색계를 대표한다. 본 연구에서는 색을 정량적, 수학적으로 표시하는 혼색계를 대표하는 RGB표색계를 사용하여 색을 정의하고 칼라 화상처리를 실시하였다. RGB표색계를 이용한 색/온도변환에서는 3속성인 R, G, B와 온도의 관계가 강한 비선형으로 나타나기 때문에, 색과 온도의 관련된 정보의 처리에 뉴럴 네트워크를 이용하였다.

4.2 RGB표색계와 색/온도 변환

본 화상처리 시스템에서는 한 장의 칼라 화상이 이미지 프로세스(Image Process)에 의해, RGB표색계의 3속성인 (R, G, B)의 화상 데이터로 색 분해되어, 계산기에 입력된다. 계산기에 입력되어진 화상데이터는 1화소 당 R, G, B 3개의 농도치 정보를 가지며, Fig.6에 나타난 임의의 색 벡터(R, G, B)에 대응할 수 있다. 이처럼 3개의 농도치로 임의의 색을 표시한 것이 RGB표색계이다. 그리고, 이 R, G, B는 3자격치라고 부르고, 3자격치의 합은 자극화(刺激和) T라고 부른다.

$$T = R + G + B \quad (4.1)$$

3자격치가 R, G, B이고 화소 Q(R, G, B)이면 Fig.6과 같이 3자격치를 같은 비율로 변화시킬 경우 색조는 변화하지 않고, 밝기만 변하므로 이 색 벡터의 길이는 밝기에 관계되는데 이것을 명도(Value)라고 한다.

Fig.6과 같이 색 공간의 (1, 1, 1)면과 색 벡터 Q의 교점 q(r, g, b)의 좌표를 색도 좌표라 하고, 식 (4.2), (4.3), (4.4)에서 나타낸다.

$$r = \frac{R}{R + G + B} \quad (4.2)$$

$$g = \frac{G}{R + G + B} \quad (4.3)$$

$$b = \frac{B}{R + G + B} \quad (4.4)$$

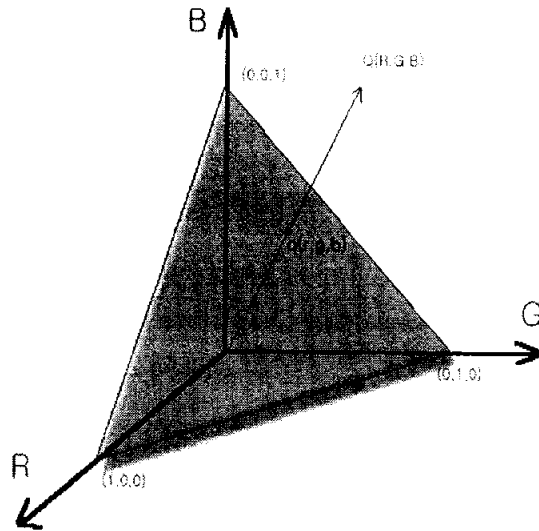


Fig.6 A color vector in color space



Photo.11 Visualized image of liquid crystal tracers

Photo.11은 온도 보정에 사용한 온도 성층의 원 화상이다. 상부와 하부의 온도차는 3°C ($25.8^{\circ}\text{C} \sim 28.8^{\circ}\text{C}$)이다. 이 원 화상의 색은 온도가 증가함에 따라 빨강, 녹색 그리고 파랑으로 변화된다는 것을 알 수 있다.

Fig.7은 보정 실험의 결과인 열전대를 이용하여 측정된 온도 T_m 와 r, g, b사이의 관계를 보여주며, 그 관계가 강한 비선형적임을 나타내고 있다. 이 비선형성 때문에 색-온도변환을 위한 방정식을 만드는 것이 대단히 어렵다. 본 연구에서는 색-온도사이의 관계를 정립하기 위해 Neural-Network를 사용한 R, G, B표색계에 의한 색-온도 변환을 진행하였다.

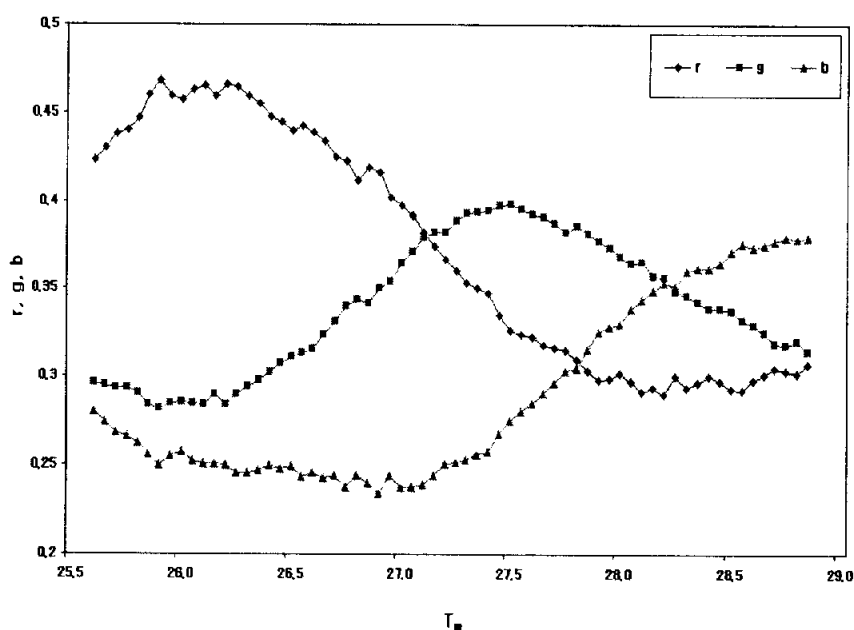


Fig.7 Relation between r, g, b and temperature T_m

이 그림으로부터 액정 발색 범위를 벗어난 온도영역은 색상이 무채색으로 나타나기 때문에 R, G, B 각각의 고유의 값을 갖지 않는다는 것을 알 수 있다. 이 부분의 데이터는 학습에 부적절하기에 본 연구에서는 R, G, B 각각의 값에 특색이 있는 25.8℃~28.8℃를 온도 교정 데이터로 사용하고 뉴럴 네트워크의 학습을 진행하기로 하였다.

4.3 뉴럴 네트워크를 이용한 RGB표색계의 색/온도변환

Fig.8은 3계층인 뉴럴 네트워크(Neural-Network)구조를 나타낸다. 좌측에서 다중입력, 즉 r, g, b 값이 입력되어지고, 우측에서 입력 값에 대한 온도 T_c 가 구해진다. 좌측의 입력층(Input layer)은 하나의 온도에 대해 R, G, B 세 값을 갖기 때문에 세 유닛(Unit)으로 구성되고, 입력 데이터는 자격화(T)를 이용하여, 그 값이 0부터 1사이가 되는 규격화된 값(r, g, b)을 이용한다. 중간층(Hidden layer)은 유닛 수를 늘리면 계산 시간이 증가되고, 줄이면 중간층의 존재의미가 저하한다. 본 연구에서는 경험적으로 5유닛으로 한다. 출력 층(Output layer)은 온도의 상태로 유닛 수는 1이다. 이러한 모델을 결정한 뒤 사전에 결합하중(結合荷重)인 초기값을 적당하게 주고 규격화된 입력 데이터와 대응하는 온도의 교사신호를 사용하여 오차역전법(Back-Propagation)에 의해 학습하였다.

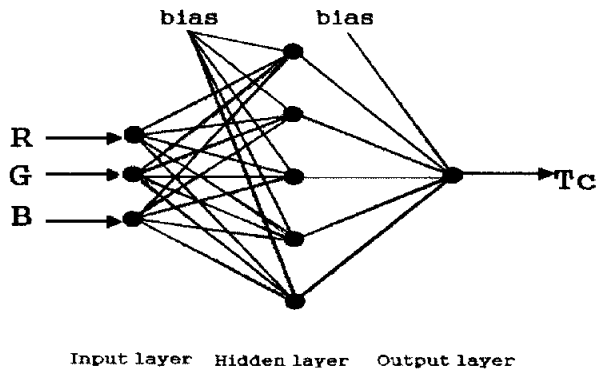


Fig.8 Neural network structure

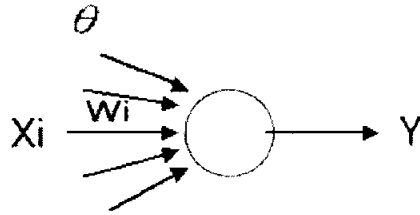


Fig.9 Neuron Model

Fig.9는 각 층을 구성하는 유닛인 Neuron모형을 나타내고 있다. 이 Neuron은 앞 층의 Neuron으로부터 입력된 값의 가중치 합을 계산한 후, 시그모이드 함수(sigmoid function)를 사용하여 출력 값을 결정한다. 입력 값의 가중치 합을 구하는 식은 식(4.5)와 같으며, 출력은 식(4.6)으로 구해지고 이식을 시그모이드 함수(sigmoid function)라고 부른다.

$$u = \sum_{i=1}^n w_i x_i + \theta \quad (4.5)$$

$$y = f(u) = \frac{1}{1 + \exp(-u)} \quad (4.6)$$

여기서 X_i 는 neuron의 입력 값이고, W_i 는 가중치, 그리고 θ 는 역치를 나타낸다. Neural-Network의 학습은 입력 r , g , b 에 의한 출력 T_c 가 열전대에 의해 측정된 온도 T_m 와 일치하도록 수행되어진다. 따라서 Neural-Network의 학습은 식(4.7)의 오차함수 E 가 최소가 되도록 하는 가중치 W_i 와 역치 θ 를 구하는 것이라고 할 수 있다.

$$E = \frac{1}{2} \sum (T_c - T_m)^2 \quad (4.7)$$

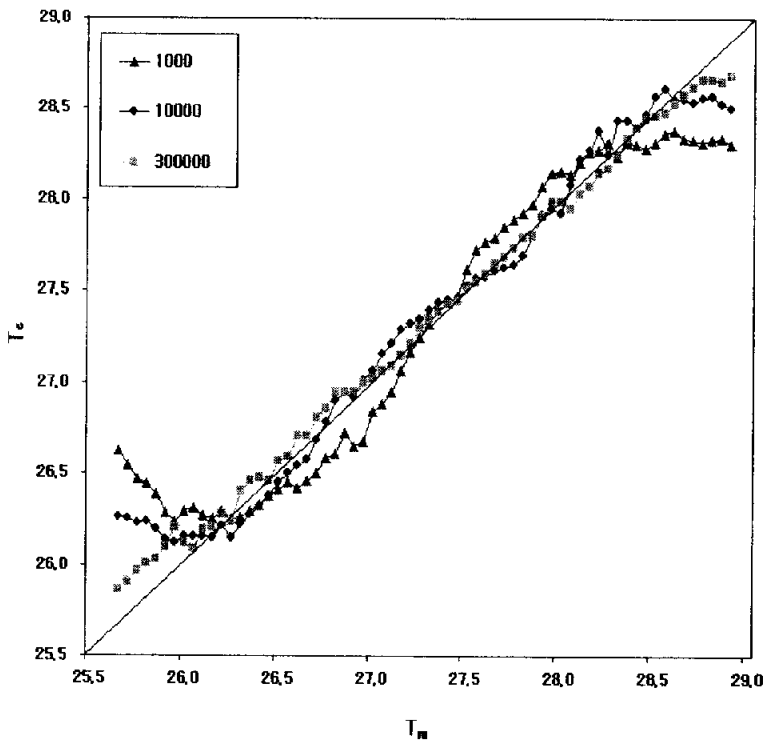


Fig.10 Results of neural network calibration

Fig.10은 열전대로 측정한 온도 T_m 와 신경회로망의 출력 T_c 사이의 관계에 미치는 반복횟수의 영향을 나타낸다. 그림으로부터 학습 회수가 증가하면 더욱 좋은 결과를 유출하여, 반복 횟수가 3×10^5 인 경우 T_m 와 T_c 가 가장 잘 일치 하다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 이 결과를 색-온도 교정 자료로 사용하였으며, 본 결과로부터 Neural-Network가 색-온도변화에 매우 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

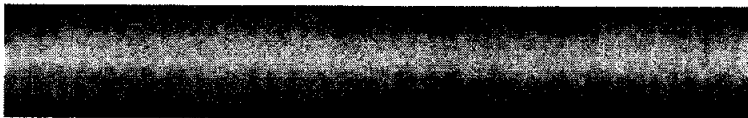
제 5 장 결 과 및 고 찰

5.1 자연대류

층상화 된 온도구배가 있는 유체내의 온도장을 감온액정을 사용하여 가시화 하였다. 상부와 하부표면의 온도차는 3°C ($25.8^{\circ}\text{C} \sim 28.8^{\circ}\text{C}$)이다. Fig.11(a)는 유체내의 층상화 된 온도분포를 감온액정으로 가시화한 원 화상이다. 이 원 화상의 상태는 유동은 전혀 없고, 열 경계층은 오로지 순수한 열 전도에 의해 성장되는 상태를 나타낸다. 이 원 화상에 뉴럴 네트워크(Neural-Network)를 이용하여 색-온도변환을 한 후 24비트 전색으로 표시한 것이 Fig.11(b)이다. 원 화상의 색은 온도가 증가함에 따라 빨강, 녹색 그리고 파랑으로 변한다. 즉 빨강은 낮은 온도를 나타내고 파랑은 높은 온도를 나타낸다.



(a) Visualized image



(b) Evaluated temperature

Fig.11 Visualized image of liquid crystal tracers
and evaluated temperature distribution

Photo.12는 점성이 100cSt인 실리콘 오일을 사용하여 형상비
 폭 140mm, 높이 15mm, 온도차 ΔT 는 각각 1.2°C, 3°C, 8°C인
 Rayleigh-Bernard 대류의 원 화상을 나타낸다. 사진에서 보는
 바와 같이 온도차 즉 Rayleigh수가 상대적으로 작으면 축과
 평행인 10개의 불안정한 셀이 관측되었다(Photo. 12a). 온도차
 가 증가하면 10개의 안정된 셀이 관측되었고(Photo. 12b) 온도
 차가 더욱 증가하면 10개의 안정된 셀과 우측에서 작은 한 개
 의 셀이 더 관측되었다(Photo. 12c). 이런 현상은 밀폐된 가는
 평행평판 내에서 나타나는 전형적인 유동형태로 본 연구에서
 도 확인되었다.



(a) $\Delta T=1.2^{\circ}\text{C}$, $Ra=170$

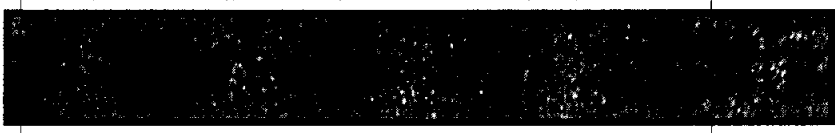


(b) $\Delta T=3^{\circ}\text{C}$, $Ra=349$

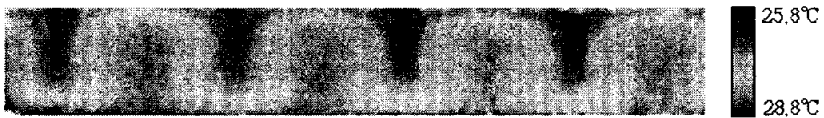


(c) $\Delta T=8^{\circ}\text{C}$, $Ra=931$

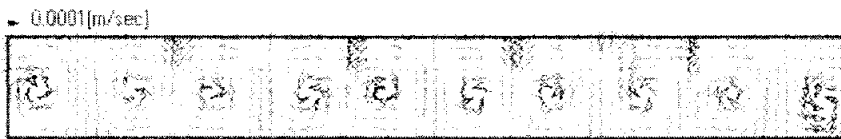
Photo.12 Natural convection pattern



(a) Visualized image



(b) Evaluated temperature



(c) Velocity vector



(d) Path line

Fig.12 Experimental results at $H/L=15/140$, $\Delta T=3^{\circ}\text{C}$

Fig.12는 안정된 10개의 셀을 이루고 있는 상부와 하부표면의 온도차가 3°C 일 때의 Rayleigh-Bernard 대류 실험 결과이다. (a)는 감온액정을 촬영한 영상이며, (b)는 촬영한 영상에 뉴탈 네트워크를 이용하여 색/온도 변환한 온도 분포이다. 온도분포는 높은 온도(28.8°C)의 푸른색과 낮은 온도(25.8°C)의 붉은 색이 맞물린 톱니바퀴 형상이며, 색상의 변화로 전열현상을 확인할 수 있다. (c)는 촬영영상에 계조치 상호 상관법을 적용하여 유동장을 속도벡터로 나타낸 것이고, (d)는 계측된 유동의 유적선(Path line)이다. 이 경우, 대류는 10개의 셀 유동과 좌우대칭 구조를 갖는다. 각 셀은 인접한 셀 유동과 상호작용하며, 그로 인해 전열면에 수평인 셀의 유속에 비해 상승 또는 하강하는 부분의 유속이 더 크다. 또한 각 셀의 하강속도가 상승속도보다 크고, 속도 경계층도 하강 속도 경계층이 상승 속도 경계층보다 크게 나타난다. 셀의 중앙부는 정체되어 상당히 작은 유속을 가지며, 셀 유동의 축이 된다. 각 셀의 축은 가열, 냉각면에 평행하게 배열되어 있는 것을 확인할 수 있다.

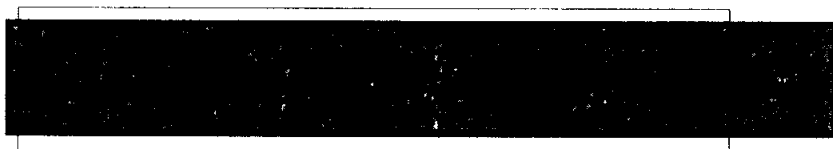
5.2 혼합대류

Fig.13부터 Fig.16은 유량별 혼합대류 패턴의 실험 결과를 나타낸다. 온도차는 모두 3°C (상, 하부 표면 온도는 각각 25.8°C 와 28.8°C)이고 대응되는 Ra수는 349이며, 실험부의 왼쪽 면으로부터 유량별 일정유속의 유체가 펌프에 의해 유입되었으며, 상, 하부 평판의 온도차에 의해 발생한 자연대류(Photo.12b)에 작용하였다. 즉 Fig.13부터 Fig.16은 유속 이외에 모든 조건은 동일하다. Fig.13부터 Fig.16에서의 (a)는 감온 액정을 촬영한 원 화상이고, (b)는 촬영한 영상에 뉴랄 네트워크를 이용하여 색/온도 변환한 온도 분포이며, (c)는 촬영한 영상에 계조치 상호 상관법을 적용하여 유동장을 속도벡터로 나타낸 것이고, (d)는 예측된 유동의 유적선(Path line)이다.

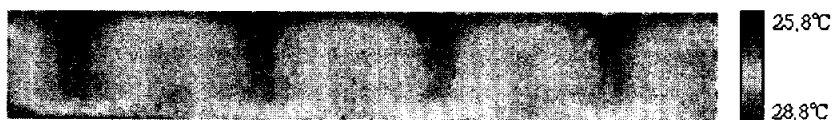
입구의 평균 유속 $U=1.6\text{mm/min}$ ($Re=4.0 \times 10^{-3}$) 일 때 유입된 유량은 실험부의 전 영역에 걸쳐 자연대류에 의해 발생한 Rayleigh-Bernard 셀에 거의 영향을 미치지 않고 계속 자연대류 구조를 유지하면서 이동한다. 즉 유동은 자연대류에 의해 지배된다. (Fig.13)

입구의 평균 유속 $U=5.2\text{mm/min}$ ($Re=1.3 \times 10^{-2}$) 일 때 입자들은 거의 중간 높이에서 상승 및 하강을 하면서 오른쪽의 다음 셀로 이동하면서 사인 곡선형태의 유동을 형성하는 것을 관측하였다. 또한 입구영역의 유동은 점차적으로 성층 형태를 유지하는 것을 관측하였는데 이는 입구 유속이 증가하기에 나타나는 현상이다. 그러나 입구 유속의 영향은 약하고 여전히 부력에 의한 자연대류의 영향이 실험부의 전 영역에 걸쳐 지배적인 역할을 한다. (Fig.14)

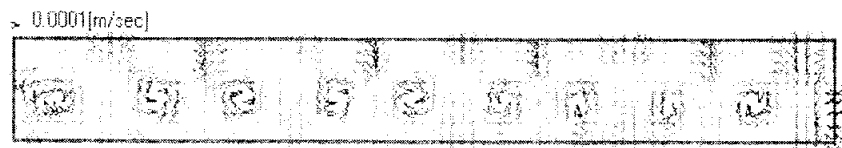
Fig.15는 입구의 평균 유속이 7.5mm/min ($Re=1.9 \times 10^{-2}$) 일 때의 혼합대류 패턴을 보여준다. 유동패턴은 사인 곡선형으로



(a) Visualized image



(b) Evaluated temperature

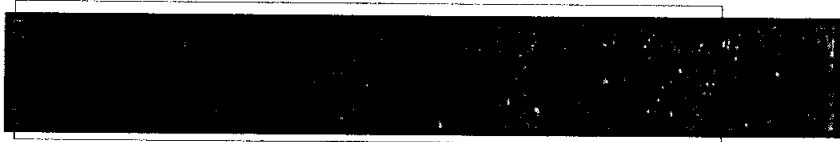


(c) Velocity vector

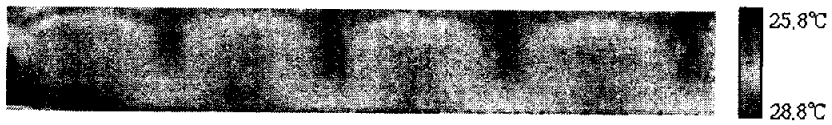


(d) Path line

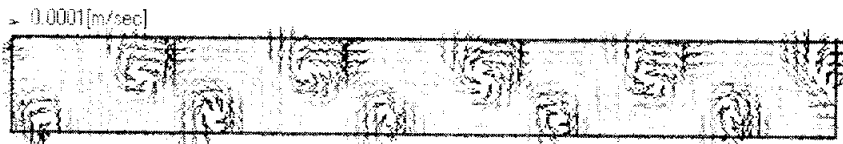
Fig.13 Experimental results at $\Delta T=3^{\circ}\text{C}$, $U=1.6[\text{mm/min}]$,
 $\text{Re}=4.0 \times 10^{-3}$, $\text{Ra}=349$



(a) Visualized image



(b) Evaluated temperature

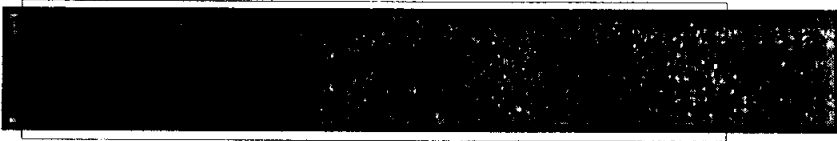


(c) Velocity vector



(d) Path line

Fig.14 Experimental results at $\Delta T=3^{\circ}\text{C}$, $U=5.2[\text{mm/min}]$,
 $\text{Re}=1.3 \times 10^{-2}$, $\text{Ra}=349$



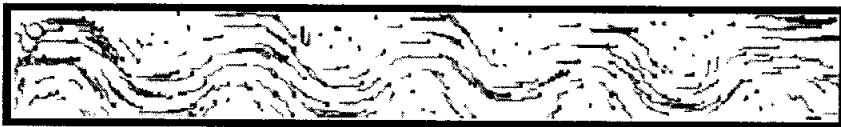
(a) Visualized image



(b) Evaluated temperature

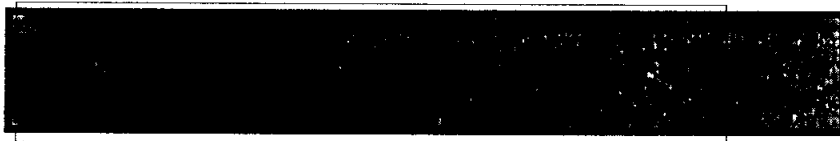


(c) Velocity vector

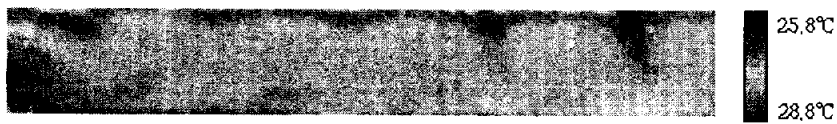


(d) Path line

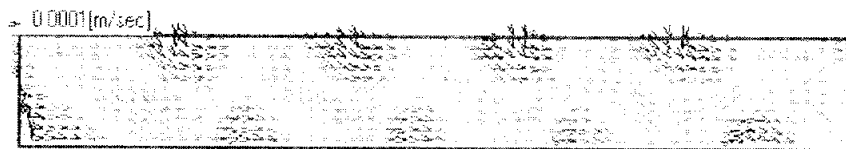
Fig.15 Experimental results at $\Delta T=3^{\circ}\text{C}$, $U=7.5[\text{mm}/\text{min}]$,
 $\text{Re}=1.9 \times 10^{-2}$, $\text{Ra}=349$



(a) Visualized image



(b) Evaluated temperature



(c) Velocity vector



(d) Path line

Fig.16 Experimental results at $\Delta T=3^{\circ}\text{C}$, $U=11.7[\text{mm}/\text{min}]$,
 $\text{Re}=2.9 \times 10^{-2}$, $\text{Ra}=349$

나타나고 실험부 내의 수직속도는 Fig.13과 Fig.14에 비해 작다는 것을 관측했다. 이것은 유체의 유동에서 부력에 의한 자연대류의 영향은 감소하고 펌프에 의한 강제대류가 주요한 역할을 하기 때문이다. 또한 입구 영역의 유동패턴은 거의 성층 형태를 형성하고, 실험부의 중앙 상하면 가까이에는 여전히 자연대류의 셀 구조를 유지한다.

Fig.16은 입구의 평균 유속이 11.7mm/min ($Re=2.9 \times 10^{-2}$) 일 때의 혼합대류 패턴을 보여준다. 입구영역의 성층은 유동이 작을때보다 더욱 분명히 나타나고 하류유동에서는 강제대류의 영향이 증대되어 실험부의 전 영역에 걸쳐 강제대류가 지배적 영향을 한다.

본 실험의 결과로부터 평행평판 내의 혼합대류는 크게 3가지의 유동형태로 분류할 수 있음을 알 수 있다. 즉 첫 번째는 실험부 전 영역의 유동형태가 자연대류에 의한 셀 유동(Fig.13), 두 번째는 실험부 전 영역의 유동형태가 사인 곡선형 유동(Fig.14, Fig.15), 그리고 세 번째는 입구 영역의 유동은 성층형태이나 하류유동은 사인 곡선형 유동(Fig.16)을 갖는 경우로 나눌수 있다.

Fig.17.1부터 Fig.17.4는 입구의 평균 유속 $U=9.0\text{mm/min}$ ($Re=2.3 \times 10^{-2}$)이고 온도차는 3°C (상, 하부 표면온도는 각각 25.8°C 와 28.8°C), Ra 수는 349인 시간에 따른 혼합대류 패턴을 나타낸다. Fig.17.1은 촬영한 감온 액정의 원 화상을 나타낸다. Fig.17.2는 촬영한 영상에 뉴랄 네트워크를 이용하여 색/온도 변환한 온도 분포이다. 그림으로부터 시간에 따라 입구 영역의 성층은 점차적으로 커지고 셀의 축은 유속에 의해 오른쪽으로 기울어 지며, 일정한 시간이 지나면 새로운 하나의 주기가 생긴다. Fig.17.3은 촬영한 영상에 계조치 상호 상관법을 적용하여 속도장을 속도벡터로 나타낸 것이다. 그림으로부터 전 영역의 유동형태가 사인 곡선형이라는 것을 알수 있다. Fig.17.4는 계측된 유동의 유선(Streamline)이다. 이 유선은 사인 곡선형



(1) $t=0$ sec



(2) $t=75$ sec

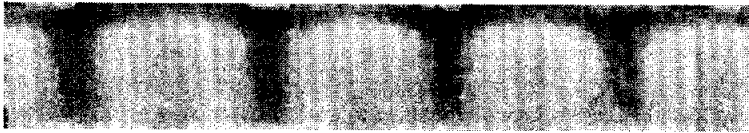


(3) $t=150$ sec

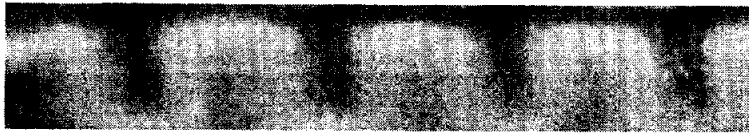


(4) $t=225$ sec

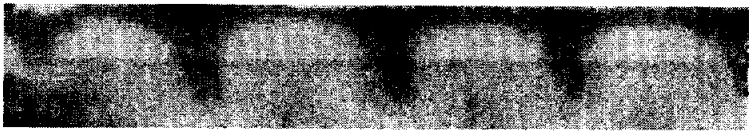
Fig.17.1 The visualized image of $U=9.0\text{mm/min}$, $\Delta T=3^\circ\text{C}$,
 $Re=2.3 \cdot 10^{-2}$, $Ra=349$



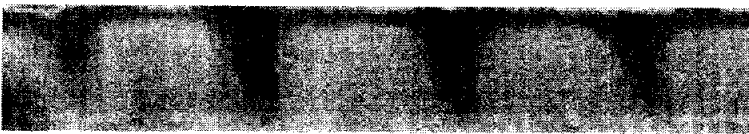
(1) $t=0$ sec



(2) $t=75$ sec



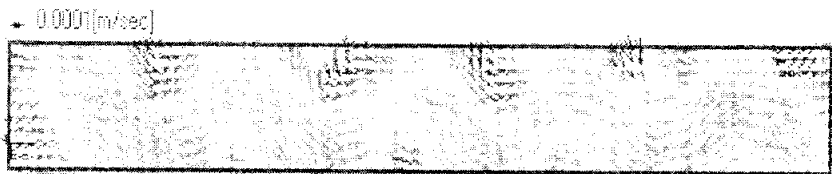
(3) $t=150$ sec



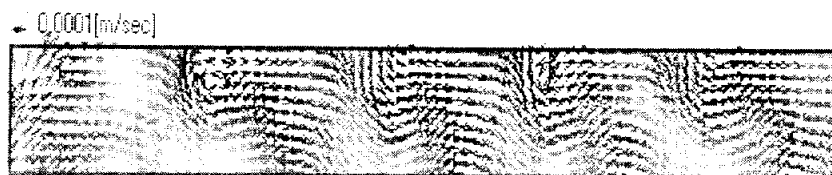
(4) $t=225$ sec



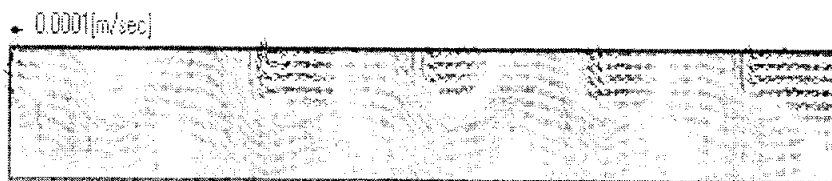
Fig.17.2 The evaluated temperature of $U=9.0\text{mm/min}$,
 $\Delta T=3^\circ\text{C}$, $Re=2.3 \times 10^{-2}$, $Ra=349$



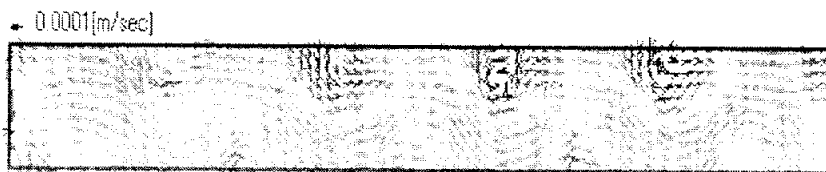
(1) $t=0$ sec



(2) $t=75$ sec



(3) $t=150$ sec



(4) $t=225$ sec

Fig.17.3 The velocity vector of $U=9.0\text{mm/min}$, $\Delta T=3^\circ\text{C}$,
 $Re=2.3 \times 10^{-2}$, $Ra=349$

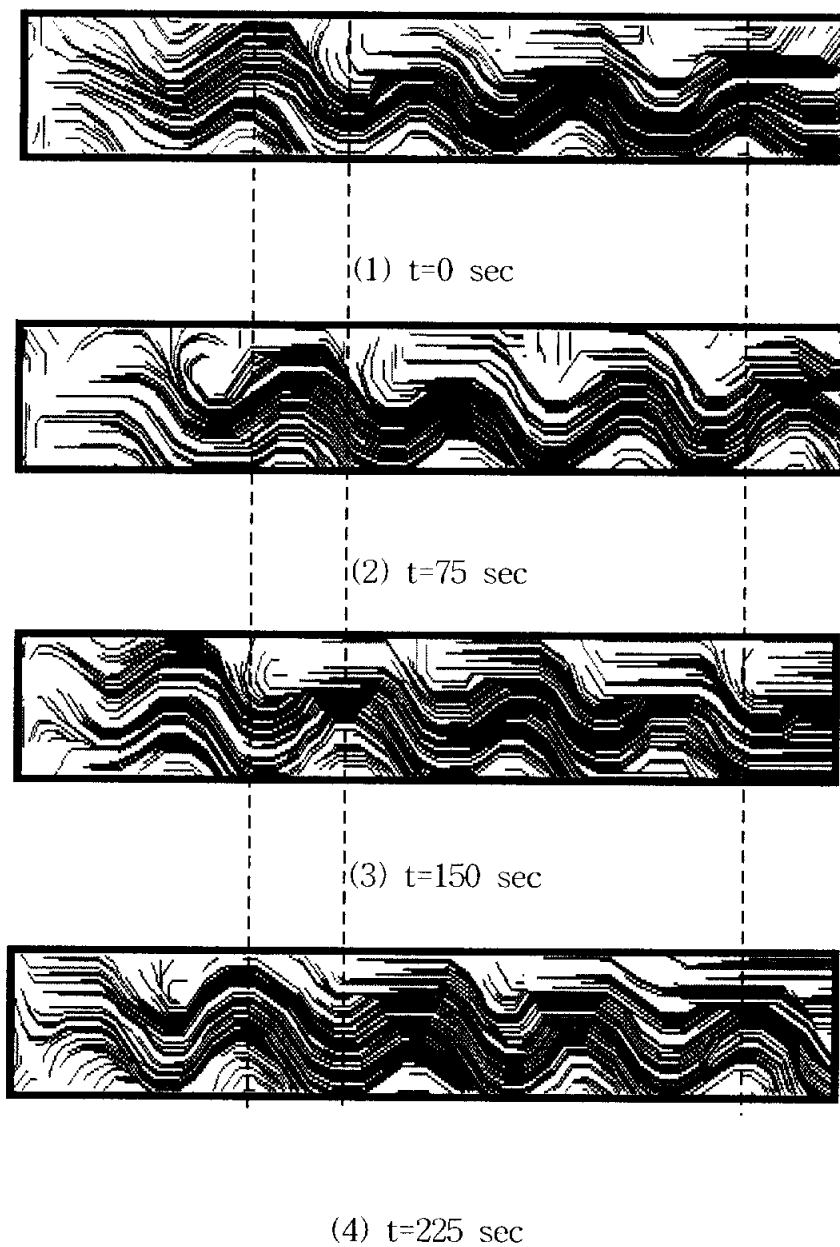


Fig.17.4 The streamline of $U=9.0\text{mm/min}$, $\Delta T=3^\circ\text{C}$,
 $Re=2.3 \cdot 10^{-2}$, $Ra=349$

의 유동형태를 더욱 선명하게 나타내고 있다. 점선을 친 부분으로부터 $t=0$ sec 와 $t=225$ sec의 유동 형태가 거의 일치함을 알 수 있다.

이로부터 이 경우 전 영역의 유동형태는 사인곡선형이고 주기가 $t=225$ sec 인 주기적인 특성을 나타낸다는 것을 확인하였다. 이 주기적 현상은 자연대류에 의해 좌측면에서 생성된 새로운 유동을 우측으로 이동시키면서 우측 끝의 기존유동을 연속적으로 소멸시킨다. 이 주기적인 특성은 입구 유속이 낮은 경우는 입구 유속이 전체 유동형태에 영향을 미치지 못하여 나타나지 않으나, 입구 유속이 증가하면서 주기적 유동형태는 나타나지만 그 주기가 매우 길고 명확하지 않다. 그러나 입구 유속이 9.0mm/min 인 경우는 주기적인 유동형태를 명확히 보이고 있다.

본 연구에서 개발된 감온액정을 이용한 온도, 속도 동시 측정법을 혼합대류에 적용한 결과, 그 유효성이 입증되었다. 하지만 실험 중 감온액정이 관찰 창에 부착 또는 침전되거나, 현탁된 감온액정 자체가 빛을 산란시켜 오차가 발생하기도 하였다. 따라서 이러한 문제점을 해결할 수 있는 실험방법의 개발이 필요하다.

제 6 장 결 론

감온액정에 의한 열 유동 현상의 가시화화상으로부터 제조
치 상호 상관법을 적용한 속도장, 뉴럴 네트워크에 의한 색/온
도교정 알고리즘을 이용한 온도장의 동시계측시스템을 개발하
여 상부가 냉각되고 하부가 가열되는 밀폐된 평행평판 내의
혼합대류에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 감온액정을 이용한 온도장과 속도장의 동시계측 시스템
을 개발하여 혼합대류에 적용하여 온도장, 속도장을 동시
에 정량적으로 가시화 할 수 있었다.
- 2) 평행평판 내의 혼합대류의 유동은 크게 3가지로 분류할
수 있었다.
 - (i) 자연대류가 전 영역의 유동형태에 지배적인 유동
 - (ii) 전 영역의 유동형태가 사인 곡선형인 유동
 - (iii) 입구는 성층 유동이고, 하류는 사인 곡선형인 유동
- 3) 평행평판 내의 혼합대류에 주기적인 유동형태가 존재함
을 확인하고 가시화 할 수 있었다.

- 참 고 문 헌 -

- [1] D. Lee, J. Chung, S. Won, Y. Kim and K. Boo, "A New Liquid Crystal Color Calibration Technique Using Neural Networks and Median Filtering", KSME International Journal, Vol. 14, No. 1, pp. 113-120, 2000.
- [2] 이기백, 김태영, 양장식, "색상 포착 기법과 수치계산을 이용한 3차원 밀폐 공간 내의 자연 대류 연구", 대한기계학회논문집(B) 제21권 제12호, pp. 1595-1607, 1997.
- [3] 윤정환, 도덕희, 이상준, "TLC와 컬러화상처리를 이용한 Hele-Shaw Cell 내부 대류 온도장 측정", 대한기계학회논문집(B) 제20권 제3호, pp. 1114-1122, 1996.
- [4] J. C. Simonich, R. J. Moffat, "Liquid Crystal Visualization of Surface Heat Transfer on a Concavely Curved Turbulent Boundary Layer", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 106, pp.619-627, 1984.
- [5] M. Ozawa, U. Muller, I. Kimura and T. Takamori, "Flow and temperature measurement of natural convection in a Hele-Shaw cell using a thermo-sensitive liquid-crystal tracer", Experiments in Fluids 12, 213-222, 1992.
- [6] R. Anmen, M. Shinoki and M. Ozawa, "Mixed Convection in a Rectangular Slender Channel", 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference, pp.199~204, 2000.
- [7] 윤석호, 김민수, "액정을 이용한 R-22와 R-407C의 원주방향 증발열전달계수 측정", 대한기계학회논문집 B권, 제23권 제4호, pp. 502-510, 1999.
- [8] I. Kimura, T. Hyodo and M. Ozawa "Temperature and

Velocity Measurement of a 3-D Thermal Flow Field using Thermo-sensitive Liquid Crystals", Journal of Visualization, Vol. 1, pp.145-152, 1998.

[9] 張曦, 翁文國, 張嘉鋒, 何世平, “液晶測溫測速技術在流體實驗中的應用”, Journal of China University of Science and Technology, Vol.30, No.1 Feb. 2000.

[10] 이상준, 백승조, 윤정환, 도덕희, “화상처리기법을 이용한 온도장 및 속도장 동시 측정기법 개발”, 대한기계학회논문집 (B) 제20권 제10호, pp. 3334-3343, 1996.

[11] D. S. Bae, Y. Murai, J. M. Kim, M. Ozawa and I. Kimura, " Bubbly flow in a vertical temperature gradient", 6th Asian Symposium on Visualization, pp.342~344, 2001.

[12] C. Camci, K. Kim, S. A. Hippensteele, P. E. Poinsatte, "Evaluation of a Hue Capturing Based Transient Liquid Crystal Method for High-Resolution Mapping of Convective Heat Transfer on Curved Surfaces", Journal of Heat Transfer, Vol. 115, pp. 311-318, 1993.

[13] 김예용, 김귀순, “액정을 이용한 열전달 측정 방법에서의 측정 오차를 줄이기 위한 연구”, 한국항공우주학회지 제23권 제4호, pp.74~82, 1995.

[14] 김예용, 김귀순, 정규하, “Lumped Capacitance 방법을 이용한 환-관 열교환기의 정량적 국소 열전달 해석을 위한 실험적 연구”, 대한기계학회논문집(B) 제25권 제2호, pp.205~215, 2001.

[15] 조원호, 배대석, 권오봉, 이도형, 김남식, “PIV계측에 의한 상부가 개방된 경사진 캐비티에서의 자연대류에 관한 연구”, 한국동력기계공학회지 제6권 제1호 pp. 36-42 2002.

[16] 배철환, 배강열, 정효민, 정한식, 이철재, “PIV에 의한 사각공간 내의 자연대류 속도 계측”, 해양산업연구소보 J. Ins.

Marine Industry 13, 57-63. 2000.

[17] 阮曉東, 宋嚮群, 山本富士夫, "用流動可視化技術研究混閤器內流暢及混閤效果", Journal of Chemical Industry and Engineering (China), Vol.51, No 1 February 2000.

[18] L. F. A. Azevedo, E. M. Sparrow, "Natural Convection in Open-Ended Inclined Channels", Journal of Heat Transfer, Vol. 107, pp. 893-901, 1985.

[19] T. F. Lin, C. P. Yin, W. M. Yan, "Transient Laminar Mixed Convective Heat Transfer in a Vertical Flat Duct", Journal of Heat Transfer, Vol. 113, pp. 384-390, 1991.

[20] C. Gau, K. A. Yih, W. Aung, "Reversed Flow Structure and Heat Transfer Measurements for Buoyancy-Assisted Convection in a Heated Vertical Duct", Journal of Heat Transfer, Vol. 114, pp. 928-935, 1992.

[21] 이철재, 정한식, 권순석, "좁은 환기구를 가진 사각공간에서의 혼합대류 열전달", 空氣調合·冷凍工學 論文集 第7卷 第2號, pp. 207-216, 1995.

[22] 이광성, 신제호, 이중섭, 정한식, 정효민, "가변 격판을 갖는 사각공간 내의 혼합대류에 대한 실험과 수치해석", 설비공학논문집 제13권 제12호, pp.1230-1235, 2001.

[23] 박희용, 박경우, 이상철, "임의형상을 갖는 납작판에서의 혼합대류 열전달 해석", 설비공학논문집 제13권 제5호, pp. 398-410, 2001.

감사의 글

부족한 저에게 관심과 성원을 보내어 주신 많은 분들께 이렇게 짧은 글로 감사의 마음을 전합니다.

먼저, 지난 시간 아낌없는 배려와 관심으로 지도해 주신 배대석 지도교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한, 심사를 맡아주신 김남식 교수님, 이도형 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

가시화정보실험실에서 함께 공부하며 즐겁게 생활한 여러 선·후배님들, 어려울 때 많은 도움을 준 여러 대학원 선배님들께도 고마움을 전합니다. 특히, 실험에 많은 도움을 준 김현호에게 고마움을 전합니다.

지금껏 키워주시고, 힘들 때나 어려울 때 힘이 되어 주신 부모님께 고개 숙여 감사드리며, 또한 항상 충고를 아끼지 않으신 누님과 매형에게도 감사드립니다. 마지막으로 곁에서 항상 힘이 되어준 아내에게도 사랑하는 마음과 함께 진심으로 고마움을 전합니다.