

〈論 文〉

## Liquid Crystal을 이용한 원형충돌분류의 전열특성 연구

오승묵\* · 이상준\*\*

(1992년 3월 3일 접수)

### Heat Transfer on a Heated Flat Plate by an Impinging Round Jet Using Liquid Crystal

Seung-Mook Oh and Sang-Joon Lee

**Key Words :** Impinging Round Jet(원형충돌분류), Liquid Crystal, 영상처리(Image Processing), Heat Transfer Coefficient(전열 계수)

#### Abstract

Local heat transfer characteristics for a round air jet impinging normally on a heated flat plate were experimentally investigated. The problem parameters investigated were jet Reynolds number,  $Re=4000, 10000$ , and  $20000$ , and nozzle-to-plate spacing ( $L/D$ ) of  $2, 6$ , and  $10$ . The temperature variations on the flat uniform heat flux surface were mapped using a thermo-sensitive liquid crystal sheet. The isochromatic images corresponding to the characteristic temperature of liquid crystal were analyzed with the help of a digital image processing system. The local Nusselt number,  $Nu$  decreased rapidly in the impingement region and exhibited a similar profiles in the wall jet region independent of the nozzle-to-plate spacing  $L/D$ . In the case of large Reynolds number, heat transfer rate ( $Nu$ ) was proportional to  $0.5$  power of the Reynolds number. For  $L/D=2$ , a secondary peak in the heat transfer rate was seen in the region of  $X/D=1.5\sim 3$  due to the transition from laminar to turbulent boundary layer.

### 1. 서 론

충돌분류(impinging jet)는 충돌면에서의 높은 열 및 물질 전달율로 냉각, 건조등 넓은 공업적 응용분야를 가지고 있다. 예를 들어 제철공정에서의 고온강판 냉각, 유리의 템퍼링, 터빈 블레이드 냉각, 종이, 필름의 건조 등에 충돌 분류가 이용되고 있다. 특히 제품 생산공정에서의 응용은 제품의 품질을 크게 좌우하기 때문에 이와 관련한 충돌분류연구는 매우 중요하다. 최근에는 대규모집적회로(VLSI)의 발달과 함께 반도체 제품의 냉각을 위하

여 충돌분류가 이용되기도 한다.

충돌분류는 그 응용분야가 넓은 만큼 연구범위도 다양하며 그동안 많은 연구들이 수행되어 왔다.<sup>(1)</sup> 충돌분류에 관한 연구는 크게 유동장(flow field) 해석과 전열면에서의 전열해석으로 나눌 수 있으나 기존의 연구중 대부분은 전열면에서의 전열현상에 관한 것으로 온도측정을 통한 전열계수해석이 큰 비중을 차지하고 있다. 충돌분류의 전체 유동장은 크게 세부분으로 나눈다. 먼저 자유분류(free jet) 영역은 노즐출구로부터 충돌면 위쪽까지 충돌면의 영향을 받지않는 부분을 말하며, 충돌영역(impingement region)은 유동이 충돌면에 충돌하기 전후 흐름방향이  $90^\circ$  바뀌는 부분으로 압력변화는 중심에서 최대값을 가진후 바깥쪽으로 나아가면서 점차

\*한국기계연구원 동력기계실

\*\*정회원, 포항공과대학 기계공학과

외부압력으로 변화한다. 벽분류(wall jet) 영역은 분류의 내부압력이 외부 압력과 같게되는 충돌영역의 바깥부분으로 이곳에서 분류의 압력구배는 없으며 점성력의 영향을 많이 받는다. 기존의 연구에 의하면 충돌분류의 전열현상은 실험결과에 따라 차이를 보이고 있으나, 일반적으로 노즐과 충돌면사이의 거리(L/D)가 증가할수록 열전달율은 감소하며, 전열면을 따라  $1/X$  (X: 정체점으로부터의 반경방향거리)에 비례하여 감소하는 경향을 보인다.

Gardon & Akfirat<sup>(2)</sup>은 난류강도를 증가시키기 위하여 슬릿노즐에 18 mesh의 스크린을 장착하여 자유분류의 난류강도를 조절함으로써 난류가 충돌면에서의 열전달에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. Hoogendoorn<sup>(3)</sup>은 형태가 다른 두 가지 노즐을 사용하여 노즐형상이 전열현상에 미치는 영향을 조사하기 위하여 일정온도 경계조건을 갖는 전열면에서 liquid crystal을 사용하여 정체점 근방의 전열현상을 연구하였다. 이 연구에서 그들은 노즐과 충돌면 사이의 거리가 짧은 경우 ( $1 < L/D < 10$ )에 한하여 난류강도(Tu)의 영향을 고려한 정체점에서의 열전달 관계식을 제안하였다. Goldstein & Timmers<sup>(4)</sup>는 다중 노즐에 의한 충돌분류(impinging jet)의 실험적 연구에 liquid crystal을 이용하였다.

본 연구에서는 원형수직 충돌분류에 의한 가열평판의 전열특성을 해석하기 위하여 최근 표면온도 측정에 많이 사용되고 있는 liquid crystal을 이용하였다. 즉 liquid crystal의 감온특성과 영상처리 기법을 이용하여 레이놀즈수 및 노즐과 충돌판 사이의 거리(L/D) 변화에 따른 전열면의 온도장 변화를 측정하였다.

## 2. Liquid Crystal

Liquid crystal은 분자구조가 액체와 고체상태 사이의 변화 과정 중에 고체의 결정구조(crystalline)와 액체의 등방성(isotropy)의 중간 상태(mesophase)가 존재하는 모든 물질을 이야기한다. 이 과정중에 liquid crystal은 액체의 기계적 성질(유동성 및 표면 장력)과 고체 결정체의 광학적 성질을 갖는다.<sup>(5)</sup> 열에 의하여 고체에서 액체로의 용해(melting)가 일어나는 과정중에 liquid crystal의 중간 상태(mesophase)를 갖는 물질을 thermotropic liquid crystal이라고 하며 이러한 liquid crystal의 열광학

적(thermo-optical) 성질은 cholesteric liquid crystal에서 나타난다.

Cholesteric liquid crystal은 처음의 고체 결정상태에서 열에 의하여 liquid crystal 상태로 변화하면서 처음에는 붉은색만 반사하고 나머지는 모두 통과시킨다. Fig. 1는 cholesteric liquid crystal의 온도에 따른 색깔변화를 보여 주는 그림이다. 온도가 올라감에 따라 붉은색에서부터 보라색까지 가시광선 범위내의 빛을 차례로 반사시킨 후 등방성 액체 상태로 완전히 상태변화를 하게 됨에 따라 원래의 색으로 돌아간다. 온도에 따라 색깔이 변화하는 이 과정은 가역적으로도 일어난다.

Liquid crystal은 투명하고 점도가 높은 형태의 물질로서 실험적 연구에는 다음과 같은 두가지 형태로 사용되고 있다. 즉 순수한 liquid crystal 물질 그 자체로서 실험에 사용되는 경우와 수십 마이크로미터에서 수 밀리미터크기로 마이크로 캡슐화되어 사용되는 경우의 두가지가 있다. 먼저 순수한 형태로 사용될 경우에는 색깔이 선명하고 응답속도가 빠르기 때문에 비정상 상태의 실험에 적합하나, 외부에 직접 노출됨으로써 쉽게 특성이 변할 우려가 있기 때문에 비교적 불안정하다. 또한 전단력(shear stress)에 민감하므로 온도 측정에는 적합하지 않는 면이 있다. 이에 비해 마이크로캡슐화된 liquid crystal은 안정된 특성을 가지고 있으나 응답속도가 느리다. 그러나 각기 다른 온도특성을 갖는 liquid crystal 캡슐을 혼합하여 여러가지 온도범위를 갖도록 할 수 있다.

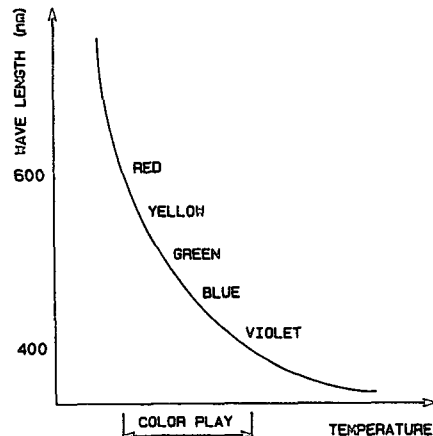


Fig. 1 Typical reflected wavelength of liquid crystal to temperature change

본 실험에서는 마이크로캡슐화된 liquid crystal 은 폴리에스테르 시트(polyester sheet)에 검은색 잉크와 함께 코팅한 것으로 liquid crystal이 중간 상태(mesophase)에 있을 경우를 제외하고는 항상 검은색을 띠고 있다. Liquid crystal은 온도에 따라 색깔이 변하는 특성을 가진 것으로 온도장의 정성적 해석을 위한 가시화 및 정량적 해석도 가능케 함으로 열유체분야 연구에 많이 사용되고 있다. 즉 liquid crystal의 감온특성을 이용한 유동가시화 이외에도 온도, 압력, 전단응력(shear stress)등의 측정에 사용된다.<sup>(6)</sup>

열전대(thermocouple)나 다른 온도 측정장치에 비교하여 온도분포변화를 연속적으로 알 수 있으며 온도장 전체를 한번에 가시화 할 수 있는 정성적 해석의 잇점은 liquid crystal을 이용한 온도측정을 크게 확대시켜 왔다. 초기의 liquid crystal 보정(calibration)방법은 육안 구분에 의존했으나 계속적인 보정 기술의 발달로 지금은 상당히 정확한 온도해석 결과를 보여주고 있다. 최근에는 컴퓨터 기술의 발전과 함께 영상처리(image processing) 기법이 응용되면서 liquid crystal의 온도분포를 디지털(digital)화하여 해상도(resolution)를 크게 향상시켰다.<sup>(7)</sup>

### 3. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용되어진 실험 장치의 개략도를

Fig. 2에 나타내었다. 분류는 건물 내부의 압축 공기관으로부터 공급되며 필터, 압력조정기 및 유량계를 거쳐 스테인레스 스틸 파이프노즐(pipe nozzle)로 나오게 된다. 파이프 노즐의 직경(D)은 10 mm이며 노즐의 길이는 600 mm로 하였다. 노즐은 고정장치에 부착하여 전열면에 수직되게 설치하였으며 이송장치를 이용하여 노즐과 전열면사이의 거리(L)를 0~200 mm 범위에서 조절할 수 있도록 하였다. 또한 노즐 출구에서 200 mm 상류쪽에 장착한 T형(copper-constantan) 열전대로부터 분류의 온도를 측정하였다.

일정 열유속(constant heat flux) 경계조건을 갖는 전열면을 만들기 위하여 두께  $t=30 \mu\text{m}$ 의 스테인레스 포일(stainless steel foil)을 발열체로 사용하여 전기적으로 가열하였다. 전열면의 구성도를 나타낸 Fig. 3에서와 같이 스테인레스 포일은 전기 저항이 작으므로 폭 30 mm로 잘라서 이것들을 liquid crystal sheet에 약간의 간격을 두고 평행하게 붙인 다음 직렬로 이것들을 liquid crystal sheet에 약간의 간격을 두고 평행하게 붙인 다음 직렬로 연결하여 전류를 가하였다. 이때 스테인레스 포일과 전극사이의 접촉저항을 줄이기 위해 전극에 silver paste를 얇게 칠하였다. 본 실험에 사용된 온도 측정용 liquid crystal sheet는 liquid crystal을 마이크로캡슐화하여 폴리에스테르막에 접착액과 함께 붙인 것으로 온도변화에 따른 응답속도는 약

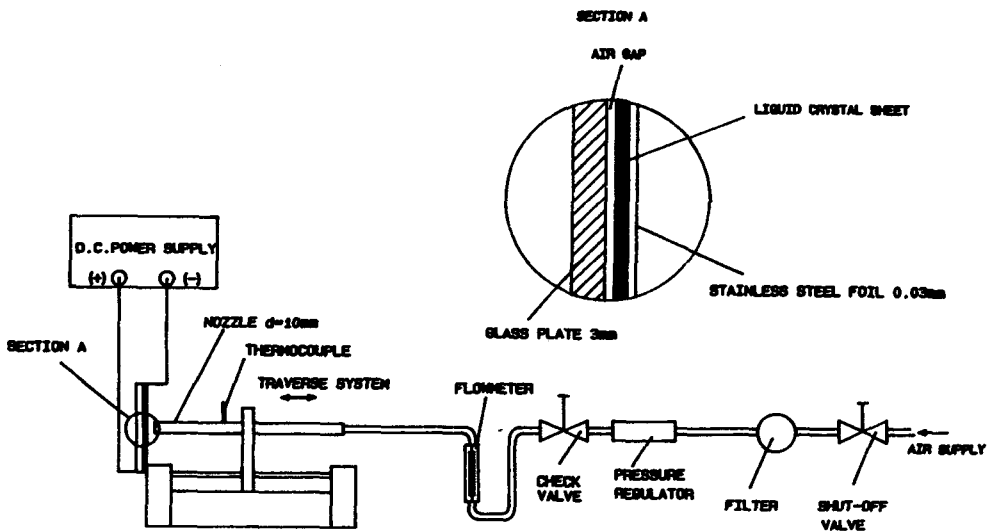


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

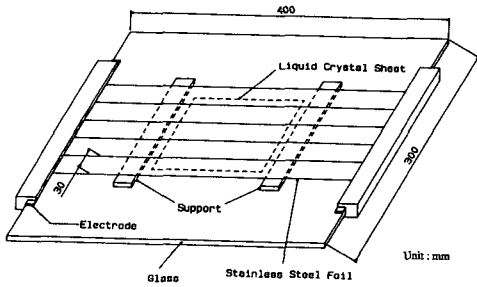


Fig. 3 Assembly of the heated flat plate

간 느리지만 liquid crystal이 캡슐에 의해 보호되기 때문에 온도 특성이 쉽게 바뀌지 않으며 오래 사용할 수 있어 그만큼 실험 오차를 줄일 수 있다. 이 liquid crystal sheet는 Hallcrest사 제품(R45 C5W)으로 색갈변화는 45°C에서 50°C사이로 5°C의 온도범위를 갖는다.

스테인레스 포일에 전류공급을 위한 전극은 베이 크라이트판에 구리 테잎을 붙여서 만들었고 전류공급을 위하여 30 Volt·20 Amp.의 직류전원공급기를 사용하였다. 분류충돌면 반대쪽에 liquid crystal sheet를 부착한 다음 C자형 클램프로 고정하였으며 단열을 위하여 유리판과 스테인레스 포일 사이에는 공기층을 두었다.

본 연구에서 열전달계수(heat transfer coefficient) 및 Nu수는 Goldstein et al.<sup>(6)</sup> 방식을 따라 아래와 같이 구하였다.

$$h = \frac{q_c}{T_w - T_a}, \quad Nu = \frac{hD}{K_a}$$

$h$  : 열전달계수

$q_c$  : 열유속 ( $W/m^2$ )

$T_w$  : Liquid crystal의 붉은색온도(red line isotherm temperature, 45°C)

$T_a$  : 분류의 온도

$K_a$  : 공기의 열전도도 ( $W/m^2$ )

여기서 열유속  $q_c$ 는 전열면에 일정하게 공급되는 전력량(전압×전류)으로부터 구하였으며 충돌면의 온도는 liquid crystal에 나타나는 붉은색 등온선에 해당하는 온도로 45°C이다. 전열면에서의 복사(radiation) 및 전열면 측면방향으로의 전도에 의한 열손실은 전체 열유속의 0.5%이하로 무시하였다.

본 연구에서는 영상처리장치(image processing system)를 이용하여 liquid crystal sheet의 색깔

변화를 온도화상(temperature image)으로 컴퓨터 기억장치에 저장하였다. 본 영상처리장치의 구성은 화상을 잡기위한 CCD카메라, 입력된 화상신호를 디지털화하기 위한 프레임 그래버(frame grabber), 화상출력용 전용 모니터와 화상처리를 위한 IBM-PC/386 컴퓨터로 이루어져 있다. 해상도는 512×480이며 명암을 256단계의 휘도(intensity)로 나타낼 수 있다. 입력된 화상은 이미지 화일(image file)로 저장하여 signal conditioning 한 후 레이저 프린터로 출력하였다.

#### 4. 실험결과 및 토의

Fig. 4, 5은 liquid crystal sheet에 나타난 열유속 변화에 따른 온도장변화를 영상처리장치를 이용하여 구한 온도화상을 나타낸다.

영상처리장치에서 온도화상을 붉은색 필터(filter)를 통과시켰기때문에 희게 나타난 부분은 liquid crystal의 붉은색에 해당하는 온도를 나타낸다. 충돌중심에서 바깥으로 나갈수록 온도가 높아지므로 흰 부분과 검은 부분의 바깥쪽 경계선이 붉은색과 초록색의 온도경계에 해당한다. 그림에서 희게 나타난 부분은 같은 온도로 같은 열전달계수를 나타내는 부분이다. 본 연구의 liquid crystal sheet 보정에서 오차범위가 0.3°C이내였기 때문에 흰 부분의 안쪽경계에서 바깥쪽경계까지 최대온도차는 0.6°C정도가 될 것으로 판단된다. 그림에서 수평방향으로 가시처럼 튀어나온 것은 스테인레스 포일 스트립(strip)을 발열체로 사용하면서 스트립과 스트립 사이에 약간의 간격을 두고 liquid crystal-sheet에 붙였기 때문에 그 틈으로 열손실이 일어나서 생기는 것이다. 흰 부분이 완전한 원모양을 갖지 못하고 수직방향의 지름이 약간 길게 나타난 것은 스테인레스 스트립 측면방향으로의 전도에 의한 열손실이 있기 때문이다. 본 실험에서는 그 영향을 무시하였으며 등온선의 반지름(X)은 온도화상에서 수직방향과 수평방향의 평균반지름을 택하였다. 노즐과 가열평판 사이의 거리가  $L/D=2$ 이며  $Re=2 \times 10^4$ 인 경우(Fig. 4b)의 온도 화상을 보면 때 모양의 흰 부분이 등심원상에서 2번 나타나고 있는데 이것은 같은 열전달계수를 갖는 부분이 연속해서 나타나는 것을 의미한다. 또한 이들 2개의 등심원 사이에서 열전달이 굵은 띠 형태로 나타나는 것은 이 부분에서의 온도구배(temperature gradient)가

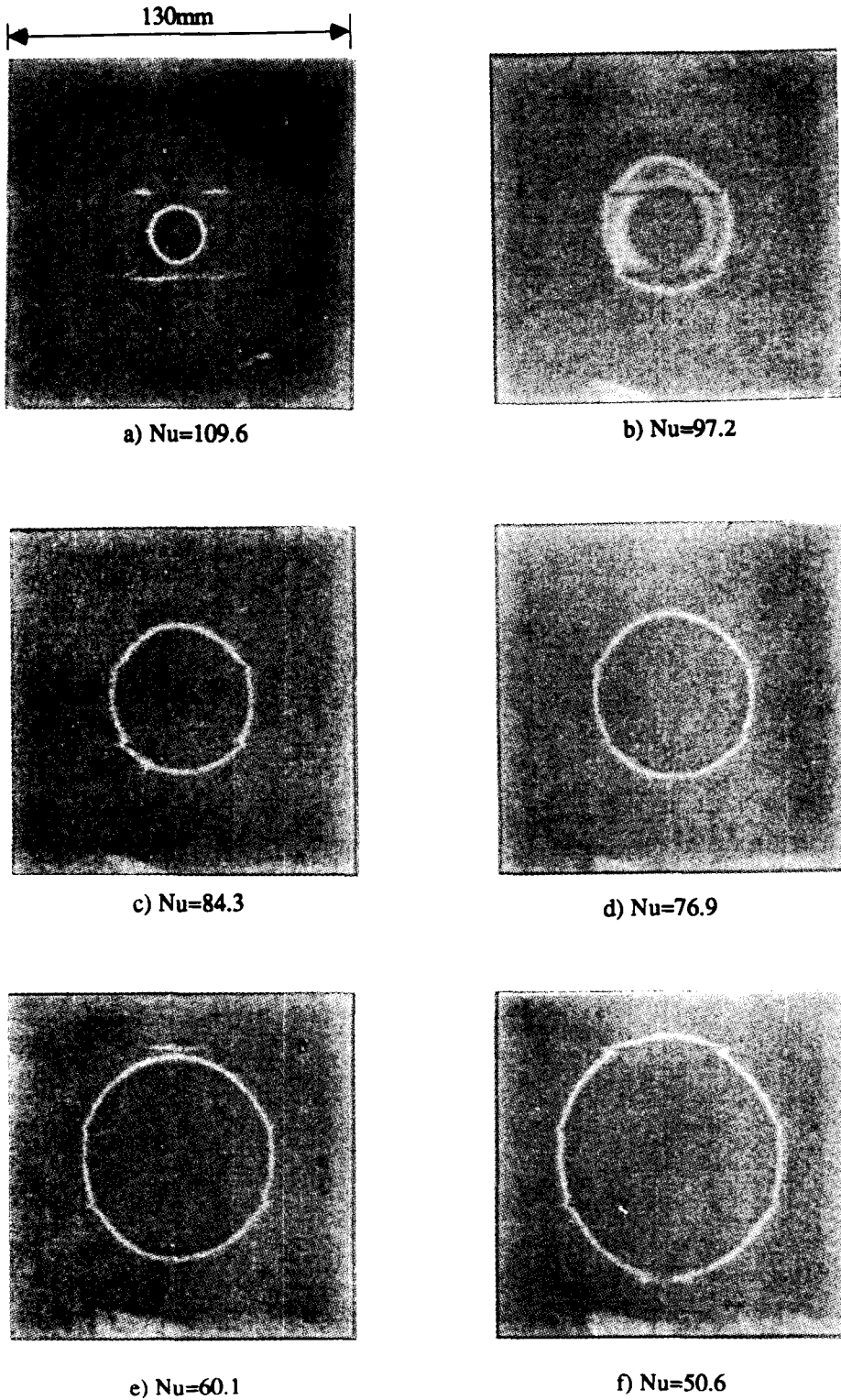


Fig. 4 Liquid crystal image of red line isotherm (about 45°C) at different heat fluxes when  $Re=2 \times 10^4$  for  $L/D=2$

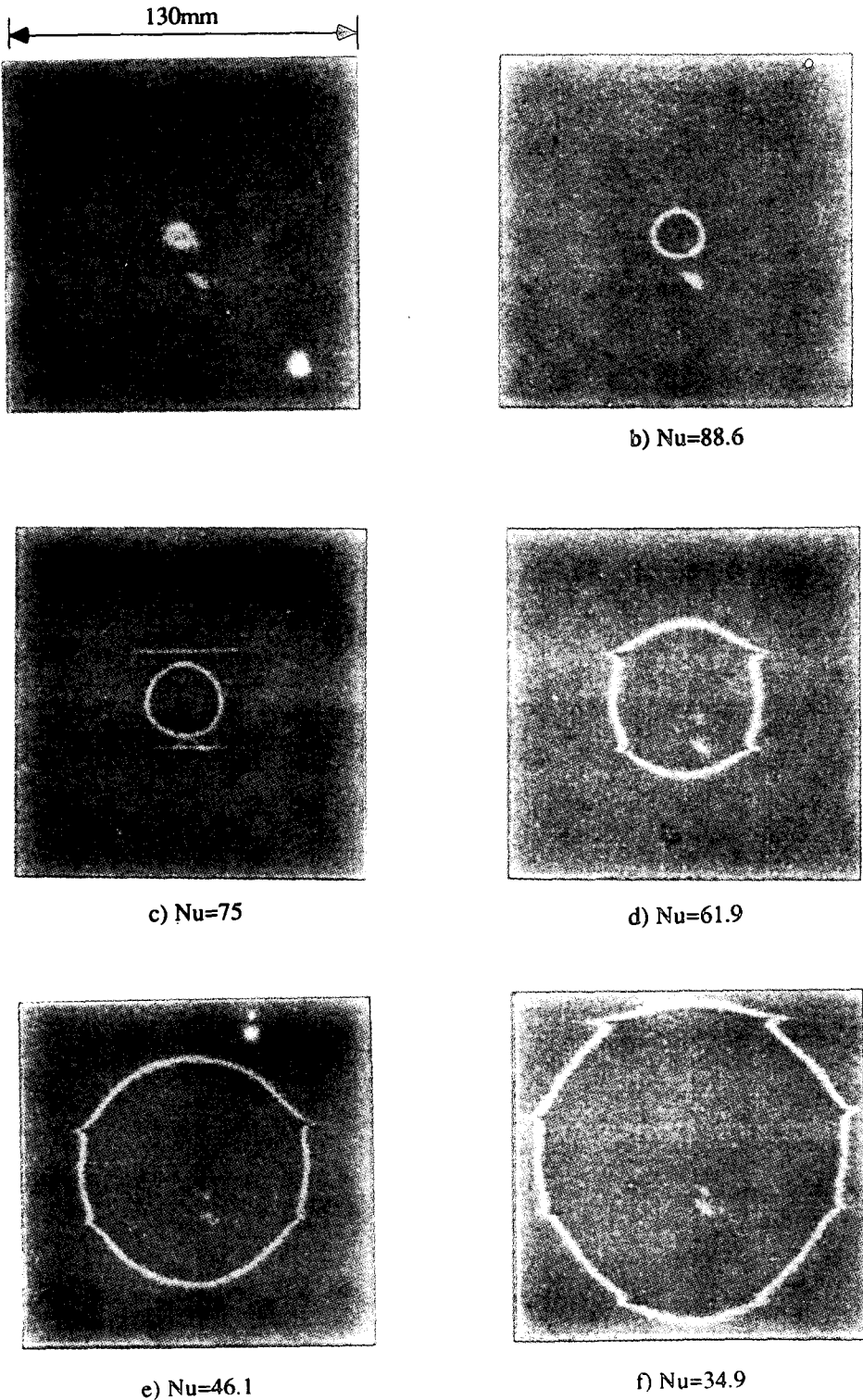


Fig. 5 Liquid crystal image of red line isotherm (about 45°C) at different heat fluxes when  $Re = 2 \times 10^4$  for  $L/D=6$

작다는 것을 의미한다.

Fig. 6~8은 L/D 변화에 따른 충돌면에서의 전 열계수 Nu수의 변화를 나타낸다. 전체적으로 충돌 영역 (impingement region)에서 Nu수는 급속히 감소하나 벽분류(wall jet) 쪽으로 가면서 L/D에 상관없이 비슷한 분포를 보여주고 있다.

Fig. 6은  $Re=4000$ 의 실험조건에서 L/D를 변화시켜 가면서 정체점에서 X방향으로 측정된 전 열계수(Nu) 분포를 나타낸 것이다. 여기서 보면 L/D=6에서 전체적으로 큰 전 열계수(Nu) 값을 보여주고 있다. L/D=10의 경우에는 자유분류(free jet)

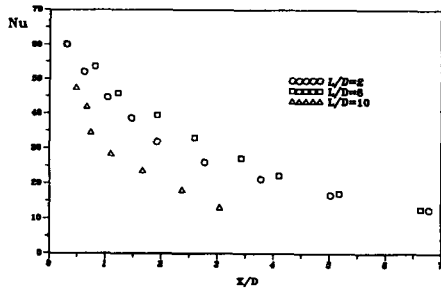


Fig. 6 Nusselt number distribution along the heated surface at  $Re=4 \times 10^3$

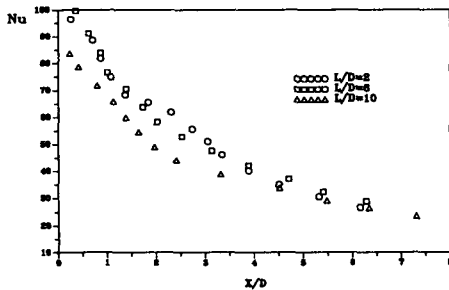


Fig. 7 Nusselt number distribution along the heated surface at  $Re=10^4$

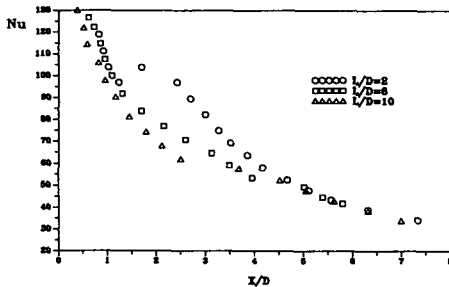


Fig. 8 Nusselt number distribution along the heated surface at  $Re=2 \times 10^4$

영역에서 주위유체 유입에 의한 혼합으로 이미 많은 운동량을 잃었기 때문에 충돌면의 벽분류에서는 낮은 열전달률을 보이고 있다.

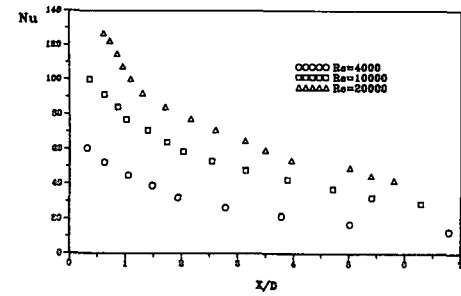
Fig. 7은 노즐출구 평균속도에 기준한 레이놀즈 수  $Re=1 \times 10^4$ 인 조건에서 같은 실험을 수행한 결과로서  $Re=4000$ 에서처럼 여전히 L/D=6일때가 정체점 부근과 벽분류 영역에서 큰 열전달률을 보여주고 있다. 노즐과 충돌면 사이거리가 L/D=2인 경우  $X/D=1.5$ 부근에서 Nu수의 감소율이 갑자기 줄어들어  $X/D=1.5 \sim 3$ 영역에서 L/D=6 경우보다 큰 Nu 수 값을 가진다.

Fig. 8은  $Re=2 \times 10^4$ 인 경우의 실험결과를 나타낸다. 정체점 부근과 벽분류 영역에서 Re수가 증가함에 따라 L/D 변화에 따른 Nu 수의 차이는 감소하며 특히  $X/D > 5$ 영역에서는 L/D에 상관없이 거의 일치된 Nu수 분포를 보여 주고 있다.

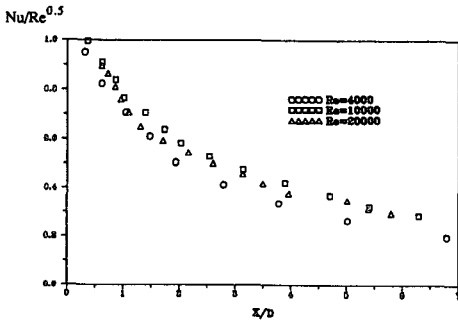
노즐과 충돌면사이거리(L/D)가 자유분류의 potential core 길이보다 짧을 경우, 충돌영역에서 압력과 운동량의 영향이 매우 크게 작용하여 빠르게 얇은 필름형태로 층류화되어 반경방향으로 퍼져 나간다. 충돌면을 따른 이 유동은 천이영역에 이르러 속도가 크게 떨어지고 벽와류(wall vortices)와 갑자기 합체되면서 발달된 난류벽분류(developed turbulent wall jet)로 바뀌게 된다. 아주 낮은 L/D 조건에서의 충돌분류는 기존의 이론적 연구와 큰 차이를 보여주고 있으며 이부분에 대한 자세한 유체역학적 해석연구가 요구된다.

L/D=2인 경우  $X/D=1.5 \sim 3$  부근에서 2차 정점(secondary peak)현상이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 2차 정점 현상은 앞에서 설명한 난류경계층으로의 천이(transition)에 의해 난류강도가 증가하면서 열전달이 함께 증가하는 현상으로 설명할 수 있으며 Gardon & Akifirat<sup>(2)</sup>은 비슷한 연구에서 이러한 현상을 밝힌 바 있다.  $Re=1 \times 10^4$ 인 경우 (Fig. 7)에 있어서 L/D=2일때 이 구간에서 Nu수의 감소율이 줄어든 것도 같은 이유에서이다. 이 경우에 해당하는 liquid crystal의 온도화상(Fig. 4b)은 앞에서 설명한 바와 같이 굽은 띠 형상을 보여주고 있다.

Fig. 9(a)는 L/D=6일때 Re수 변화에 따른 Nu수의 변화를 비교해 본 것이다. 여기서 보면 Re수가 증가함에 따라 열전달은 일정 비율로 증가하고 있음을 알 수 있다. Fig. 9(b)는 L/D=6 조건에서 Y축의 Nu수를 Re수의 0.5승으로 나누어 차원해석



a) Nu vs. X/D



b) Nu/Re<sup>0.5</sup> vs. X/D

Fig. 9 Correlation between Nusselt number and Reynolds number along the heated surface for L/D=6

한 결과를 나타낸 것으로 Re수가 큰 경우 전열계수가 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 기존의 비슷한 연구 결과를 보면 Goldstein & Behbahani<sup>(9)</sup>는 Nu수는  $Re^{0.6}$ 에 비례한다고 했으며 goldstein & Franchett<sup>(10)</sup>는 수직노즐의 경우  $Re^{0.8}$ 에 비례하는 결과를 얻었다. 따라서 본 연구에서 얻은 결과는 이들에 비하여 상대적으로 Re수의 영향이 적음을 의미한다.

Fig. 10은 노즐이 충돌면에 가까운 L/D=2인 경우의 전열계수를  $Nu/Re^{0.5}$  형태로 표시한 것이다. 충돌거리 L/D=2인 경우에는 충돌영역(impingement region, X/D<1.2)에서는 Re수에 관계없이 잘 일치하나 벽분류영역으로 나가면서 적은 Re수(Re=4000)의 경우 상대적으로 작은 전열계수값을 가진다. 이것은 Re수가 큰 경우(Re=1×10<sup>4</sup>, 2×10<sup>4</sup>) 이 구간에서 2차 정점 현상으로 큰 전열계수를 갖는데 비해 레이놀즈수 Re=4000인 경우는 이와 같은 현상이 나타나지 않기 때문이다. 비슷한 연구를 수행한 다른 연구자들의 실험에서는 노즐과 충돌면 사이거리가 모두 L/D>4인 경우로 이러한

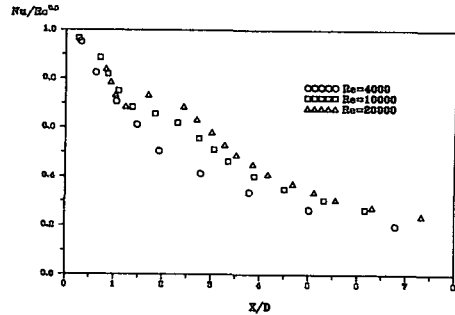


Fig. 10 Correlation with measured Nusselt numbers for L/D=2

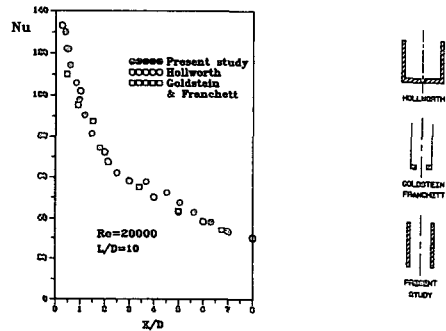


Fig. 11 Heat transfer distribution for a normal round jet

현상에 대한 언급이 없으며 2차 정점 현상은 나타나지 않았다.

Fig.11에서는  $Re=2 \times 10^4$ ,  $L/D=10$ 일때의 실험 결과를 Goldstein & Franchett<sup>(10)</sup>와 Hollworth<sup>(11,12)</sup>의 결과와 비교해 보았다. Hollworth와 Goldstein & Franchett의 실험에서는 오리피스(orifice) 형태의 노즐을 사용하였다. 여기서 보면 본 연구의 결과는 벽분류영역에서 조금 큰 값을 가지며 충돌영역에서는 Hollworth의 결과와 잘 일치하고 있으며 대체로 비슷한 경향을 보여주고 있다. 결과 비교에서 나타난 미소한 차이는 각각의 연구에서 사용되어진 노즐형태가 서로 다르기 때문일 것으로 생각된다. 따라서 충돌분류와 열전달 특성은 노즐형태에도 민감함을 알 수 있다.

### 5. 결 론

Liquid crystal을 이용하여 원형수직 충돌분류에 의한 가열평판의 전열특성을 실험적으로 연구하였다. 즉 레이놀즈수(Re) 및 노즐과 충돌판 사이의



거리(L/D) 변화에 따른 전열면에서의 온도장변화를 liquid crystal의 감온특성과 영상처리기법을 이용하여 측정하였다. 본 연구에서 가열평판은 일정 열유속 경계조건을 갖으며 파이프노즐을 사용하였다.

본 연구를 통하여 liquid crystal을 이용한 온도 측정의 유용성을 확인하였으며 레이놀즈수가 큰 경우 가열평판의 전열계수, Nu수는  $Re^{0.5}$ 에 비례하였는데 오리피스형태의 노즐을 사용한 기존의 다른 결과와 비교하여 레이놀즈수 영향이 적게 나타났다. 또한 층돌거리가 짧은  $L/D=2$ 의 경우  $X/D=1.5\sim 3$ 부근에서 난류경계층으로의 천이(transition)에 의해 난류강도가 증가하면서 열전달이 증가하는 2차 정점 현상이 나타났다.

## 후 기

본 연구는 포항공대 자체연구 및 첨단유체공학센터(AFERC)의 연구지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Downs, S.J. and James, E.H., 1987, "Jet Impingement Heat Transfer-A Literature Survey," Rolls-Royce Reprint.
- (2) Gardon, R. and Akfirat, J.C., 1965, "The Role of Turbulence in Determining the Heat Transfer Characteristics of Impinging Jets," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.8, pp. 1261~1272.
- (3) Hoogendoorn, C.J., 1977, "The Effect of Turbulence on Heat Transfer at a Stagnation Point," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.20, pp. 1333~1338.
- (4) Goldstein, R.J. and Timmers, J.F., 1982, "Visualization of Heat Transfer From Arrays of Impinging Jets," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 25, pp. 1857~1868.
- (5) Fergason, J.L., 1964, "Liquid Crystals," Scientific American, Vol.222, pp. 76~85.
- (6) Moffat, R.J., 1990, "Some Experimental Methods for Heat Transfer Studies," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.3, pp. 14~32.
- (7) Akino, N., Kunugi, T., Ichimiya, K., Mitsushiro, K. and Ueda, M., 1989, "Improved Liquid-Crystal Thermometry Excluding Human Color Sensation," J. of Heat Transfer, Vol.112, pp. 608~611.
- (9) Goldstein, R.J. and Behbahani, A.I., 1977, "Impingement of a Circular Jet With and Without Cross Flow," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.25, No.9, pp. 1377~1382.
- (10) Goldstein, R.J. and Franchett, M.E., 1988, "Heat Transfer From a Flat Surface to an Oblique Impinging Jet," J. of Heat Transfer, Vol. 110, pp. 84~90.
- (11) Hollworth, B.R. and Wilson, S.I., 1984, "Entrainment Effects on Impingement Heat Transfer: Part I-Measurements of Heated Jet Velocity and Temperature Distributions and Recovery Temperatures on Target Surface," J. of Heat Transfer, Vol.106, pp. 798~803.
- (12) Hollworth, B.R. and Gero, L.R., 1985, "Entrainment Effects on Impingement Heat Transfer; Part II-Local Heat Transfer Measurements," J. of Heat Transfer, Vol. 107, pp. 910~916.