

## 충돌 분류의 열전달 특성향상을 위한 실험적 연구

정기호\* · 김예용\*\* · 김귀순\*\*\*

### An Experimental Study for the Heat Transfer Augmentation of an Impinging Jet

G.H. Jeong\* · Y.Y. Kim\*\* · K.S. Kim\*\*\*

#### ABSTRACT

In this study, the heat transfer augmentation without additional blower power was obtained by using punched plate. Though this scheme has some disadvantages such as decrease of momentum caused by the punched plate, it has significantly increased heat transfer coefficients in the stagnation region. Compared with the case of no punched plate, heat transfer coefficients were increased by punched plate more than 2 times near the optimum condition determined in this study. Liquid crystal and hue-capturing technique were used in this study to obtain heat transfer coefficients.

#### 초 록

본 연구에서는 송풍기의 출력이 일정한 상태에서 열전달 계수의 증가를 가져오기 위한 방법으로 다공판을 이용하였다. 이 방법은 다공판에 의한 운동량 감소 등의 몇 가지 단점이 있지만 특정한 조건에서 사용될 때, 정체 유동 영역에서 다공판이 없는 경우보다 최고 2배 이상 열전달 계수가 증가하였다. 본 연구에서는 정확하고 간편한 실험을 위하여 액정을 온도 지시계로 사용하였으며, 액정을 이용하면 열전달 대 등을 온도 지시계로 이용하는 실험보다 훨씬 간단하고 정확한 실험이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

기 호 설 명		<i>R35CIW</i>	35°C로부터 1°C 범위 내에서 반응을 시작하는 액정
<i>CCD</i>	Charge Coupled Device	<i>HUE</i>	색상
<i>h</i>	대류 열전달 계수, [W/m <sup>2</sup> K]	<i>H/D</i>	노즐 출구에서 충돌판까지의 거리와 노즐 직경의 비
<i>k</i>	판의 열전도율, [W/m K]	<i>k/d</i>	다공판에서 충돌판까지의 거리와 다공 직경의 비
<i>Nu</i>	Nusselt 수, $Nu = \frac{hD}{k}$		

\* 부산대학교 항공우주공학과 대학원 (Pusan National University Dept. of Aerospace Eng. Graduate School)

\*\* 부산대학교 기계공학과 대학원 (Pusan National University Dept. of Mechanical Eng. Graduate School)

\*\*\* 부산대학교 항공우주공학과 (Pusan National University Dept. of Aerospace Eng.)

## 그리스 문자

- $\alpha$  열 확산도, [m<sup>2</sup>/s]  
 $\beta$  무차원 시간,  $\beta = \frac{h}{k} \sqrt{\alpha t}$

## 하 첨 자

- w 충돌판의 벽면 조건  
 i 초기 상태  
 ref 참고 조건

## 1. 서 론

충돌 분류는 정체점 부근에서 높은 열전달 계수를 나타내므로 가열, 냉각 및 건조 등에 매우 효과적이다. 그래서 뜨거운 철판의 냉각, 유리의 tempering, 종이나 필름의 건조, 터빈 블레이드의 냉각 그리고 전자 부품의 냉각 등 많은 분야에 응용되고 있다. 이에 따라 충돌 분류에 관해서는 이론적으로나 실험적으로 많은 연구가 수행되었으며 이는 Downs & James<sup>(1)</sup>에 잘 요약되어 있다. 먼저 Gardon & Cobonpue<sup>(2)</sup>는 충돌 분류가 다른 유동장에서 보다 훨씬 큰 열전달 계수를 나타내고 있다는 것을 보여 주었다. 그리고 Gardon & Akfirat<sup>(3)</sup>은 노즐 출구와 평판 사이의 거리와 Reynolds 수가 열전달 특성에 미치는 효과를 고찰하였는데, 이 두 가지가 열전달 특성에 가장 크게 영향을 미치므로 충돌 분류에 대한 대부분의 연구는 이들이 미치는 효과를 고찰하였다. Goldstein 등<sup>(4)</sup>은 여러 개의 노즐이 배열되어 있을 때, 열전달 표면의 열전달 특성을 고찰하였으며, Ali Khan<sup>(5)</sup> 등은 다공판을 이용하여 열전달 계수를 증가시키는 실험을 수행하였다. 이 외에도 많은 연구가 수행되어 충돌 분류의 유동 특성이나 열전달 특성은 잘 알려져 있는 단계이고 많은 경험식이 제시되어 현장에서 사용되고 있다.

그러나 이제까지의 실험은 열전대를 이용하여 한 지점에서 측정된 온도를 보간하여 사용하는 방법이 대부분이었다. 그러한 방법들은 전체적인 온도 분포를 측정하는 것이 아니라 열전대가 설치된 지점들의

온도를 가지고 전체의 온도 분포를 예측하는 방법이므로 오차가 발생할 가능성이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 액정을 온도 지시계로 사용하기 시작했고, Kim<sup>(6)</sup> 등에 의해 온도와 액정의 색상과의 관계가 정립되며 액정을 온도 지시계로 사용하게 되었다.

따라서, 본 연구에서는 새로운 온도 지시계로 이용되고 있는 액정을 이용하여 기존의 충돌 분류의 열전달 현상을 규명함으로써 액정을 이용한 열전달 실험의 타당성을 얻는다. 그리고 다공판을 이용하여 정체 유동 영역의 열전달 계수를 증가시키는 실험에 적용한다. 기존의 다공판을 이용한 실험은 몇 개의 열전대를 충돌판에 부착하는 것으로 온도 분포를 얻고 액정은 단지 가시화에만 이용되었으나, 본 연구에서는 액정을 이용하여 충돌판 전체의 온도와 열전달 계수 분포를 구한다.

## 2. 열전달 모델 및 측정 방법

열전달 실험은 열전달 계수를 정확하게 구하는 것이 중요하다. 식(1)과 같이 정의되는 열전달 계수의 측정 방법은 크게 두 가지로 분류할 수가 있는데, 과도 방법과 정상 방법이 그것이다.

$$h = \frac{\ddot{q}_w}{T_w - T_{ref}} \quad (1)$$

본 연구에서 사용하는 과도 방법은, 벽면의 열플럭스를 구하는 정상 방법과는 달리 비정상 열전달 모델에서 벽면온도와 시간을 측정하여 열전달 계수를 구하는 방법으로서, Schultz & Jones<sup>(7)</sup>를 포함한 많은 연구자들에 의해 시도되었다. 충돌판의 표면온도보다 높은 온도의 유동을 갑자기 흘려주면, 벽면 부근에서의 온도 기울기는 벽에 수직인 방향으로 크며 다른 방향의 온도 기울기는 무시할 수 있기 때문에 다음의 1차원 비정상 열전도 방정식을 얻는다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial n^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

위의 지배 방정식을 풀이하기 위한 초기 조건과 경계 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \ddot{q}_w(t) &= h(T_w - T_{ref}) = -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=0} \\ T &= T_i \quad \text{at } n = -\infty \\ T &= T_i \quad \text{at } t = 0 \end{aligned}$$

초기 조건과 경계 조건을 이용하면 1차원 비정상 열전도 방정식의 해는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta = \frac{T_w - T_i}{T_{ref} - T_i} = 1 - e^{-\beta^2} \operatorname{erfc} \beta \quad (3)$$

여기서,  $\beta$ 는 무차원 시간으로서  $\beta = \frac{h}{k} \sqrt{\alpha t}$  과 같이 정의되고,  $T_i$ 는 초기 표면 온도이다. 그러므로, 표면 온도( $T_w$ )와 액정의 반응 시간( $t$ )을 측정하여 식(3)에 대입하면 열전달 계수를 얻을 수 있다. 이를 위한 실험 구성은 Fig. 1에 나타내었다.

열전달 실험용 충돌판은 투명 아크릴 판의 표면에 액정(Hallcrest, R35C1W)과 검은 페인트를 고르게 도포하여 만든다. 액정을 도포한 충돌판은 낮은 열전도도를 가지는 10mm 두께의 아크릴 판을 사용하였고 크기는 700mm×700mm이다. Nusselt 수 계산에 사용되는  $\sqrt{\rho c k}$  값은 Baughn<sup>(8)</sup> 등이 ±5%의 불확실성을 갖는다고 기술한 569 W s<sup>1/2</sup>/(m<sup>2</sup>K)를 사용하였다.

과도 방법의 실험 성공 여부는 정확한 온도 측정과 아울러 유동 온도가 사각파(step function)형태로 주어지게 실험을 수행하느냐에도 달려 있다. 이를 위해 송풍기의 노즐 앞에 유동을 가로막는 판을 설치한다. 그리고 유동의 온도가 정상 상태에 이르면 판을 순간적으로 제거하여 유동을 내보내게 된다. 이 때 판에 설치된 타이머가 작동하면서 반응 시간을 측정하게 되는 것이다. 타이머에 나타나는 시간은 충돌판 표면의 액정이 반응하는 모습과 함께 영상으로 기록되므로 정확한 반응 시간을 얻을 수 있다.

열전달 모델 영상은 고감도 칼라 CCD 감지기를 가진 카메라(Panasonic, WV-CL320)를 이용하여 색상 정보를 포함하고 있는 액정 표면의 영상으로

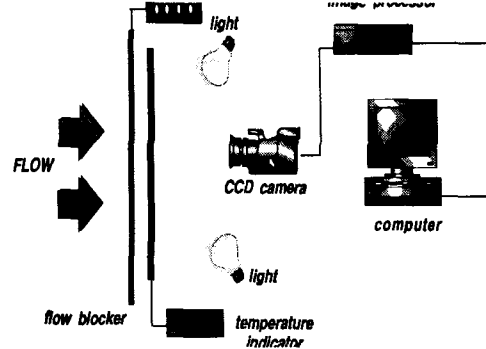


Fig. 1. Experimental setup

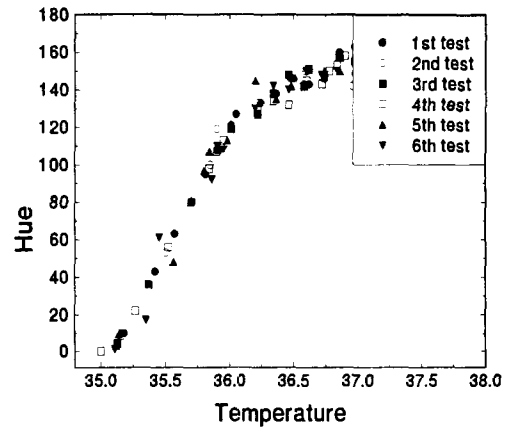


Fig. 2. Hue vs. temperature relation

획득된다. 이 카메라는 액정이 칠해진 반대편에 열전달 표면에 수직하게 위치시킨다. 이렇게 함으로써 CCD 카메라와 열전달 표면 사이의 장애물이 없으므로 정확한 색상 측정을 가능하게 한다. 그리고 선명한 액정영상을 얻기 위해 필요한 광원은 카메라 방향에 나란히 위치시킨다. 이는 열전달 표면과 CCD 카메라가 수직을 유지하면서 광원과 CCD 카메라가 근접할수록 색상과 온도와의 관계가 선형성을 유지하고 분산 오차도 작아진다는 김예용 등<sup>(9)</sup>의 연구 결과에 따른 것이다. CCD 카메라에서 받아들인 열전달 모델의 영상은 영상처리장치(Data Translation, DT2871)를 거쳐 컴퓨터에서 색상 정보를 변환되어 본 연구에서 필요한 색상값을 얻게 된다.

그리고 색상과 온도와의 관계 규명을 위해서 액정이 칠해진 면에 얇은 박판 형태의 열전대(Omega,

CO<sub>2</sub>-K)를 부착하여 표면 온도를 측정하는데, 그 결과는 온도 지시계(Omega, DP41-TC)에 나타나 액정 영상과 함께 카메라에 포착된다. 이렇게 함으로써 열전대 위치의 색상과 열전대로 측정된 온도를 비교할 수 있게 된다. 본 연구에 사용된 액정의 색상 보정 실험은 정확도를 기하기 위해 6번의 반복 실험을 수행하였으며, 액정 색상과 온도와의 관계를 보면 Fig. 2와 같다. 실험이 종료한 후에, 영상 처리 장치에서 변환된 색상값과 보정 결과에서 정립된 온도와 색상과의 관계식을 이용하여 열전달 표면 전체의 온도를 알아낸다.

그리고, 송풍기의 노즐은 길이가 720 mm이고 출구 직경이 70 mm인 형상으로 완전히 발달된 유동을 내보내는데 유동의 레이놀즈수는 24500 정도로 고정시켜 실험하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 다공판 설치전의 열전달 특성

먼저 Fig. 3에 본 연구의 실험 조건과 유사한 조건에서 수행된 기존의 연구 결과와 비교하였다. 각 결과들은 정체점을 비롯한 모든 영역에서 조금씩 차이를 보여주고 있는데, 이러한 차이는 각 실험에서의 출구 유동 조건이 다르기 때문이다. 그러나, 본 연구의 결과는 기존 연구 결과들과 크게 차이나지 않으므로 믿을 수 있다고 생각된다.

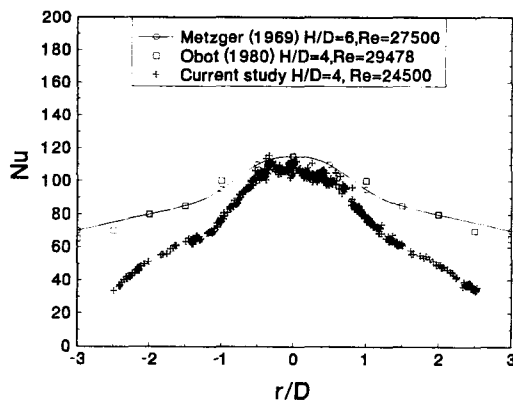


Fig. 3. Comparison of current result with other studies

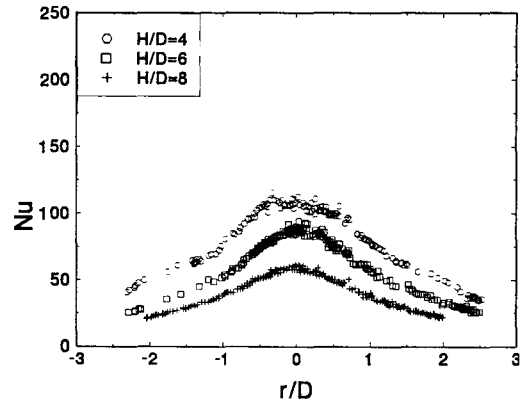


Fig. 4. Heat transfer characteristics of impinging jets without punched plate(Re=24500)

Fig. 4에는 다공판을 설치하지 않은 상태에서 수행한 실험 결과를 나타내었다. Fig. 4을 보면, H/D=4일 때의 열전달 계수가 가장 크게 나타난다. 이 경우에는 다른 두 경우보다 노즐 출구와 충돌판 사이의 거리가 짧기 때문에, 제트가 외부 공기와의 혼합이 많이 이루어지지 않은 상태이다. 그러므로 제트가 노즐 출구 상태의 조건(온도, 속도)을 유지하면서 충돌판에 다다른다. 그러면 표면에 도포되어 있는 액정의 반응 시간이 짧아지게 되고, 열전달 계수의 값이 크게 된다.

3.2 다공판 설치 후의 열전달 특성

실험에 사용되는 다공판은 Fig. 5와 같은 다공의 직경이 각각 3, 6 mm이고 다공 사이의 거리가 10 mm인 2가지 종류를 사용하여 다공비의 변화를 주

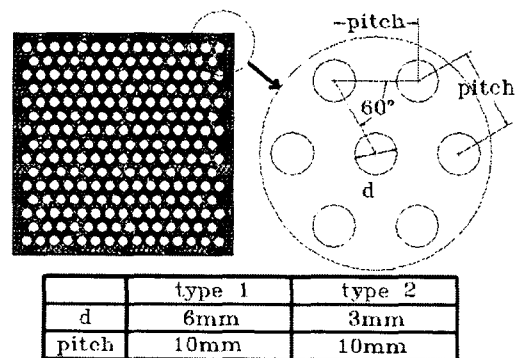


Fig. 5. Shape of punched plate

었다. 다공비는 전체 면적에 대한 유동이 자유로이 빠져나갈 수 있는 영역의 면적비를 의미한다.

### 3.2.1 다공판 형상 1

먼저 다공판 형상 1을 설치하고 다공판과 열전달 평판 사이의 거리(k)를 변화시키면서 열전달 계수 변화를 고찰하였다. 실험 결과는 Fig. 6에 H/D=4인 경우를 나타내었다. 다공판이 없는 경우에 열전달 계수의 최대 값이 110 정도로 나타나고 있는 반면에, k/d=1의 경우에 최대 값이 180 정도로 1.5배의 증가를 보인다. k/d= 2, 3인 경우에는 더욱 큰 열전달 계수의 증가를 보이는데, 약 2배 정도인 200 이상의 값이 얻어진다. k/d=4인 경우는 열전달 계수가 조금 증가한다. 그리고, 각 경우에 대해서 열전달 계수는 정체 유동 영역에서 증가하며, 이 영역을 벗어나면 다공판이 없는 경우에 비해서 오히려 감소한다.

Fig. 7은 H/D=6인 경우이다. 다공판이 없는 경우에 열전달 계수의 최대 값이 90 정도로 나타나는데, k/d=1의 경우에 140정도의 값으로 1.75배의 증가를 보인다. k/d=2, 3일 때는 H/D=4인 경우와 마찬가지로 열전달 계수가 크게 증가하는데, 약 2배 정도의 열전달 계수가 얻어진다. k/d=4인 경우는 최대 값이 110 근방이다. H/D=4인 경우와 마찬가지로 열전달 계수는 정체 유동 영역에서 증가하며 영역을 벗어나면 열전달 계수가 다공판이 없는 경우에 비해서 감소하는 것을 볼 수 있다.

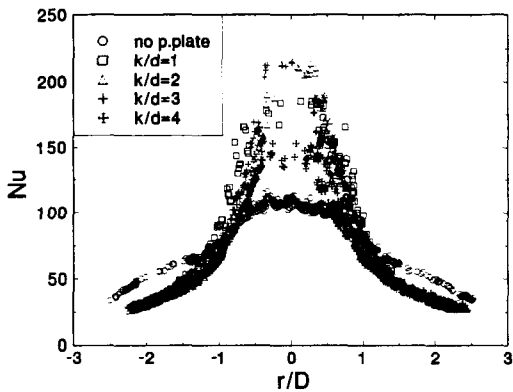


Fig. 6. Nusselt number distribution(Re=24500, type 1, H/D=4)

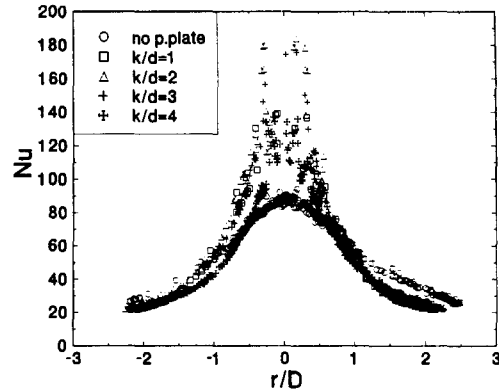


Fig. 7. Nusselt number distribution(Re=24500, type 1, H/D=6)

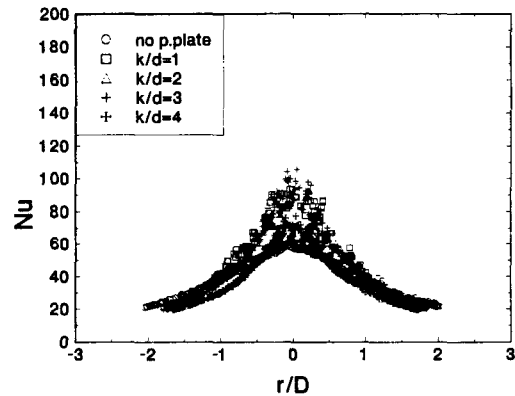


Fig. 8. Nusselt number distribution(Re=24500, type 1, H/D=8)

Fig. 8에는 H/D=8인 경우를 나타내었다. 다공판을 설치하면 정체 유동 영역에서 k/d=1의 경우에 다공판이 없을 경우보다 1.5배 증가하며, k/d=2, 3인 경우에는 약 1.75 배 증가한다. 그러나, k/d=4인 경우는 별다른 열전달 계수의 증가를 보이지 못한다.

### 3.2.2 다공판 형상 2

다공판 형상 1보다 상대적으로 다공비가 작은 다공판 형상 2를 충돌판 앞에 설치하고, k/d를 변화시키면서 실험을 수행하였다. Fig. 9는 H/D=4인 경우의 결과이다. 다공판이 없는 경우에 최대 열전달 계수의 값이 110 정도이며, 다공판을 설치한 후

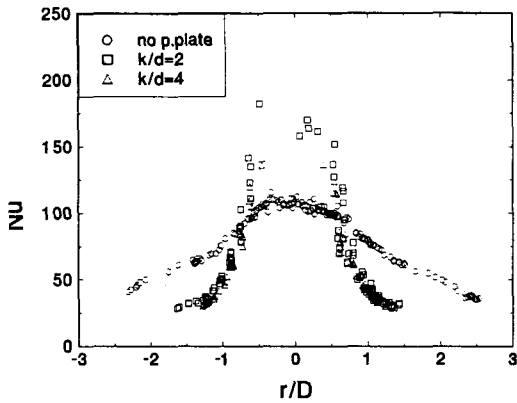


Fig. 9. Nusselt number distribution(Re=24500, type 2, H/D=4)

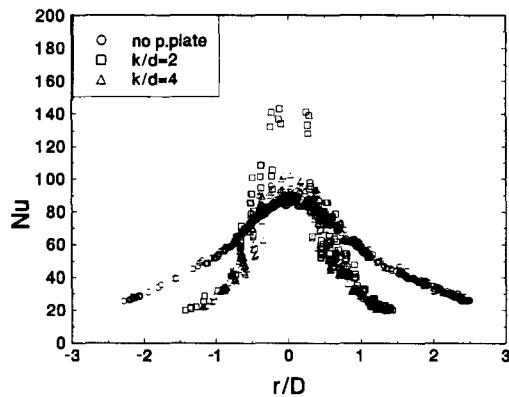


Fig. 10. Nusselt number distribution(Re=24500, type 2, H/D=6)

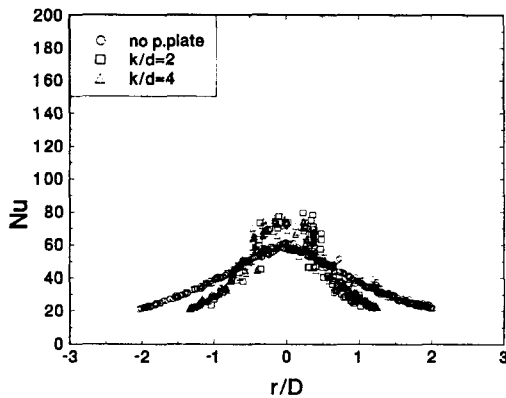


Fig. 11. Nusselt number distribution(Re=24500, type 2, H/D=8)

$k/d=2$ 의 경우에 180 정도의 값으로 1.5배의 증가를 보인다.  $k/d=4$ 인 경우는  $k/d=2$ 의 경우보다 조금 떨어지는 열전달 계수 증가의 효과를 보인다. 열전달 계수 증가의 효과는 직경의  $\pm 0.75$ 배 정도의 영역에서 두드러지며 이 영역을 벗어나면 열전달 계수가 다공판이 없는 경우에 비해서 큰 폭으로 감소한다.

Fig. 10은  $H/D=6$ 인 경우의 결과이다.  $k/d=2$ 의 경우에 열전달 계수가 140 정도의 값으로 1.75배의 증가를 보인다.  $H/D=6$ 인 경우에는 열전달 계수 증가의 효과가 직경의  $\pm 0.5$ 배의 영역에서 나타나며 이 영역을 벗어나면 열전달 계수가 다공판이 없는 경우에 비해서 감소하게 된다.

Fig. 11은  $H/D=8$ 인 경우의 결과이다. 다공판이 없는 경우에 최대 열전달 계수 값이 60정도로 나타나고 있다.  $k/d=2$ 의 경우에 75 정도의 값으로 약 1.2배의 증가를 보인다.  $k/d=4$ 인 경우는 다공판이 없을 경우와 별다른 차이가 없다.  $H/D=8$ 인 경우에는  $k/d=2$ 일 때와  $k/d=4$ 일 때의 증가폭이 비슷하다. 결국 다공판 형상 2를 사용한 경우에는 열전달 계수 증가의 효과가 직경의  $\pm 0.5$ 배보다 좁은 영역에서 나타나며 이 영역을 벗어나면 오히려 감소하게 된다.

### 3.2.3 다공판 형상 1과 형상 2의 비교

$H/D=4$ 인 경우에 Fig. 12,  $H/D=6$ 인 경우에 Fig. 13,  $H/D=8$ 인 경우에 Fig. 14에 각각 다공판 형상 1과 2의 결과 중에서 높은 열전달 계수를 가지는 경우를 비교해 보았다. 다공판 형상 2의 경우는 열전달 계수가 증가하는 영역이 다공판 형상 1의 경우에 비해 좁다. 따라서, 구멍 사이의 거리( $p$ )가 같은 상태에서 구멍의 직경이 어느 정도 커질수록 보다 넓은 영역에서 열전달이 잘 일어남을 알 수 있다. 다공판 형상 2에서의 정체 유동 영역내의 열전달 계수는 다공판 형상 1의 경우보다는 좁은 영역에서 비슷한 값을 보인다. 앞서 언급했듯이 다공사이의 거리( $p$ )가 같은 상태에서 다공의 직경이 커질수록 보다 넓은 영역에서 열전달이 잘 일어남을 알 수 있다. 이는 다공판 형상 1의 다공비가 형상 2에 비해 크므로 다공판에 부딪힌 유동이 비교적 넓은 영역에서 다공판을 통과하기 때문인 것으로 보인다. 정체

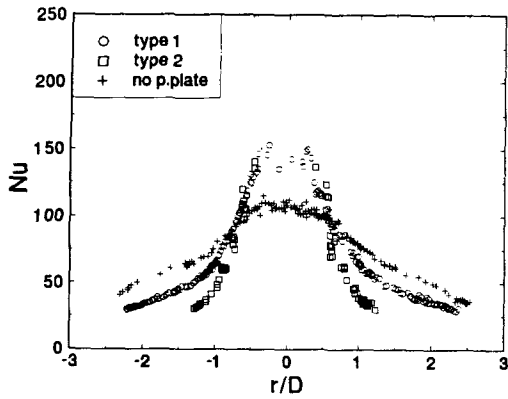


Fig. 12. Comparison of type 1 and 2(Re=24500, H/D=4)

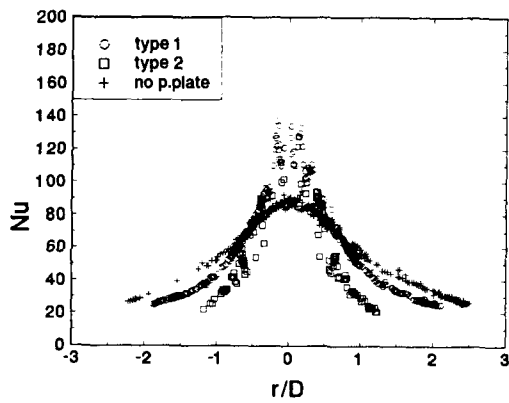


Fig. 13. Comparison of type 1 and 2(Re=24500, H/D=6)

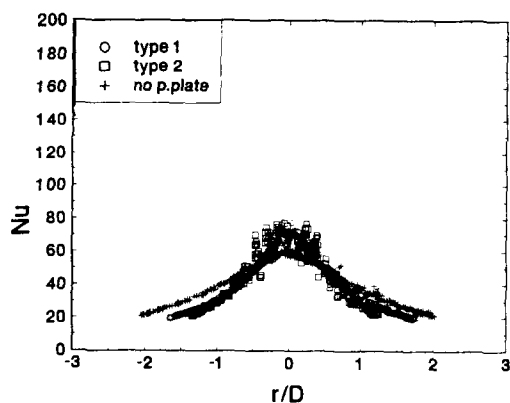


Fig. 14. Comparison of type 1 and 2(Re=24500, H/D=8)

유동 영역을 벗어나면 다공판에 부딪힌 유동의 흐름이 다공판과 수평하거나 역류되는 성분이 많아지므로 다공판이 없을 때에 비해 오히려 열전달 계수가 작아짐을 볼 수 있다.

다공비가 더 작은 경우는 다공판이 없는 경우에 비해서 오히려 열전달 계수의 감소를 가져온다. 다공사이의 거리가 10mm 이상인 경우는 다공판에 충돌하여 역류되는 유동이 훨씬 많아져 많은 운동량의 감소를 가져옴을 알 수 있었다.

### 3.3 열전달 계수 분포

충돌 분류의 실험에서 액정을 온도 지시계로 사용하면, 충돌판에 나타나는 복잡한 형상의 온도와 열전달 계수의 분포도 한번의 실험으로 알아낼 수 있다. Fig. 15에는 다공판을 설치하지 않았을 경우의 충돌판 열전달 계수의 분포를 나타내었고, Fig. 16에는 다공판을 설치했을 경우에 대한 열전달 계수의 분포를 나타내었다. 이 그림들에서, 우리는 충돌 분류에 의해 충돌판의 온도와 열전달 계수가 어떻게 변화하는지를 한 번의 실험으로 쉽게 볼 수 있다.

다공판을 설치하지 않았을 경우에, 열전달 계수는 Fig. 15와 같이 축대칭의 분포를 가지며 정체 영역에서 가장 큰 값을 나타내고 정체 영역에서 멀어질수록 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나, 다공판을 설치하게 되면 Fig. 16과 같이 축대칭 분포는 나타나지 않는다. 그러나 다공판이 있는 경우와 없는 경우를 비교한 Fig. 6부터 Fig. 14까지의 결과는 어떤 특정한 방향으로의 열전달 계수 분포를 비교한 것이다.

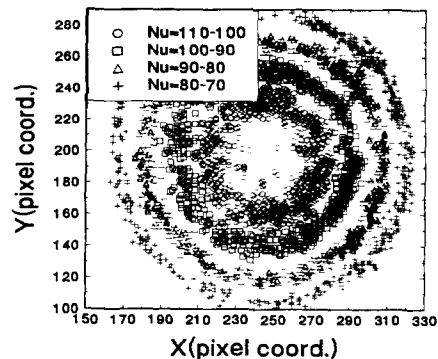


Fig. 15. Heat transfer coefficient distribution (Re=24500, H/D=4, without punched plate)

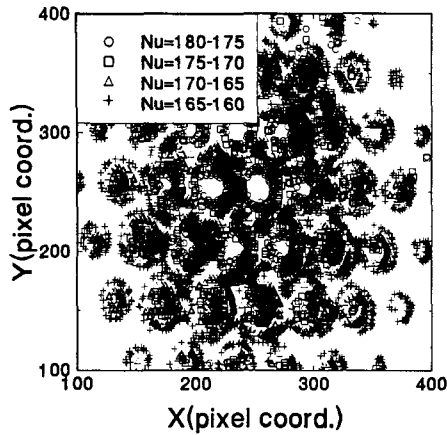


Fig. 16. Heat transfer coefficient distribution (Re=24500, H/D=4, k/d=3, type 1)

#### 4. 결 론

다공판을 이용한 충돌 분류의 열전달 특성을 실험적으로 고찰한 결과들을 정리하면 다음과 같다.

- 과도 방법에서는 노즐 출구와 충돌판 사이의 거리가 짧을수록 액정의 반응 시간이 짧은 관계로 열전달 계수가 커진다.
- 다공판을 설치한 경우에는 부가적인 송풍기의 출력 증가 없이도 다공판이 없을 경우보다 최대 2배(H/D=4, k/d=3)의 열전달 계수 증가를 얻을 수 있지만, 이 증가 효과는 정체 유동 영역에 국한되며 이 영역을 벗어나면 오히려 다공판이 없는 경우보다 열전달 계수가 작아지게 된다.
- 다공판과 충돌판 사이의 거리와 다공의 비가 2, 3일 때, 즉 k/d=2, 3의 조건에서 열전달 계수가 가장 큰 폭으로 증가한다.
- 다공판의 다공비가 클수록 정체 영역에서의 열전달 계수 증가폭이 크다.

#### 후 기

이 논문은 부산대학교 기성회 재원 연구비에 의해

연구되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Downs S. J. and James, E. H., (1987) "Jet Impingement Heat Transfer - A Literature Survey," ASME 87-HT-35, pp.1~11
2. Gardon, R. and Cobonpue, J., (1961) "Heat Transfer between a Flat Plate and Jets of Air Impinging on It," International Developments in Heat Transfer, Part II, pp.454~460
3. Gardon, R. and Akfirat, J. C., (1966) "Heat Transfer Characteristics of Impinging Two-dimensional Air Jets," J. of Heat Transfer, Vol. 88, p.101.
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, No. 12, pp.1857~1868
5. Ali Khan, M. M., Hirata, M., Kasagi, N. and Nishiwati, N., (1982) "Heat Transfer Augmentation in an Axisymmetric Impinging Jet," 7th Proc. Int. Heat Transfer Conference, pp.363~368.
6. Camci, C., Kim, K., Hippensteele, S.A., (1992) "A New Hue Capturing Technique for the Quantitative Interpretation of Liquid Crystal Images Used in Convective Heat Transfer Studies," Trans. of the ASME, Journal of Turbomachinery, Vol. 114, pp. 765~775.
7. Schultz, D. L., and Jones, T. V., (1973) "Heat Transfer Measurements in Short Duration Hypersonic Facilities," Agardograph, No. 165
8. Baughn, J. W., Ireland, P. T., Jones, T. V., and Saniei, N., (1989), "A Comparison of the Transient and Heated-Coating Methods



for the Measurement of Local Heat Transfer Coefficients on a Pin Fin", Trans. of the ASME, J. of Heat transfer, Vol. 111, pp 877~881

9. 김예용, 김귀순, (1995) "액정을 이용한 열전달 측정방법에서의 측정오차를 줄이기 위한 연구," 한국항공우주학회지, Vol. 23, NO. 4.