

원형충돌제트에서 다공질판에 의한 열전달 향상

김윤택* · 이영민* · 원세열** · 이대희†
 (2000년 6월 23일 접수, 2001년 2월 19일 심사완료)

Heat Transfer Enhancement by the Perforated Plate of Round Impinging Air Jets

Yun Taek Kim, Young Min Lee, Se Youl Won and Dae Hee Lee

Key Words: Round Impinging Jet(원형충돌제트), Perforated Plate(다공질판), Gold Film Intrex(금박막 필름), Liquid Crystal(액정), Neural Networks and Median Filtering(신경회로망과 미디안 필터링)

Abstract

The purpose of this study is to investigate the heat transfer augmentation using the perforated plate placed in front of a target plate in an axisymmetric impinging air jet system. The new liquid crystal technique using Neural networks with median filtering is used to determine the Nusselt number distributions on the target surface. The experiments were made for the jet Reynolds number (Re) 23,000. The effects of the pitch-to-diameter (p/d_1) from 1.5 to 2.5 in the perforated plate, the hole diameter on perforated plate (d_1) from 4mm to 12mm, the perforated plate to target surface distance (z/d_1) from 1 to 3, and the nozzle-to-target surface distance (L/d) from 2 to 10 on the heat transfer characteristics were experimentally investigated. It was found that when the perforated plate was located between the nozzle exit and the target plate, the average heat transfer rate at the stagnation region corresponding to $r/d \leq 1.0$ was increased up to the maximum 2.3 times compared to the case without the perforated plate.

기호설명

A : 금박막 필름의 면적(m^2)
 d : 노즐의 직경(m)
 d_1 : 다공질판 구멍의 직경(mm)
 H : 다공질판 정사각형 구멍의 한 변 길이(mm)
 f : 금박막 필름의 도금 균일도
 h : 국소 열전달 계수(W/m^2K)
 I : 금박막 필름에 공급되는 전류 (A)
 k : 공기의 열전도도(W/mK)

L : 노즐과 평판 사이의 거리(m)
 L/d : 노즐과 평판 사이의 무차원 거리
 Nu : 국소 Nusselt 수 $\left(= \frac{h_c d}{k_a} \right)$
 Nu_{avg} : 평균 Nusselt 수
 Nu_{st} : 정체점 Nusselt 수
 p : 다공질판 위의 원형 구멍간 피치(mm)
 p/d_1 : 다공질판 위의 구멍과 피치의 무차원 거리
 q_c : 전도 열손실(W/m^2)
 q_r : 복사 열손실(W/m^2)
 q_v : 순수 열유속(W/m^2)
 r : 정체점으로부터 유체흐름 방향으로의 거리(m)
 r/d : 정체점으로부터 유체흐름 방향으로의 무차원 거리

† 책임저자, 회원, 인제대학교 기계자동차공학부
 E-mail: mechdhl@ijnc.inje.ac.kr

TEL : (055)320-3185 FAX : (055)324-1723

* 인제대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 인제대학교 대학원 기계공학과

- Re : Reynolds 수 $\left(= \frac{U_{ce}d}{\nu} \right)$
 t : 다공질판의 두께
 T_a : 평판 주위의 온도(°C)
 T_j : 노즐 출구의 제트온도(°C)
 T_w : 평판의 벽면온도(°C)
 U_c : 제트 중심선 평균속도(m/s)
 U_{ce} : 노즐 출구의 제트 중심선 평균속도(m/s)
 $\sqrt{u^2}/U_{ce}$: 노즐 출구의 난류강도
 V : 급박막 필름에 공급되는 전압(V)
 Z : 아크릴 판의 길이(m)
 z/d_1 : 충돌면과 다공질판과의 거리(m)

그리스문자

- ϵ : 액정과 검정페인트가 코팅된 표면의 방사율
 σ : Stefan-Boltzman 상수(W/m^2K^4)
 ν : 공기의 동점성 계수(m^2/s)

1. 서 론

충돌제트는 열 및 물질 전달율을 증대시키는 데 많이 사용되는 방법 중의 하나로 강판의 냉각, 유리의 템퍼링(tempering), 종이 및 필름의 건조, 가스터빈 날개와 전자부품의 냉각, 박막액정 표시장치(TFT-LCD)의 제조 등의 산업에 광범위하게 응용되고 있다. 충돌제트에 관한 연구는 주로 레이놀즈 수, 노즐과 충돌면 사이의 거리, 노즐형상, 제트온도와 방향, 다중제트, 교차유동, 충돌면의 형상 등이 유동과 열전달에 미치는 영향을 다루었고, Martin,⁽¹⁾ Down과 James,⁽²⁾ Goldstein 등,⁽³⁾ Viskanta 등⁽⁴⁾에 의해 연구가 수행되었다.

다중 배열제트를 이용하여 열전달을 증대시키는 방법에 관하여 Kurima 등⁽⁵⁾은 원형제트에서 제트출구와 충돌면 사이에 다공질판을 삽입할 경우 정체점에서의 열전달 계수가 다공질판이 없는 경우에 비해서 2.3배 정도 증가한다고 하였으며, Goldstein과 Timmer⁽⁶⁾는 배열 다중 충돌 제트에서 액정을 이용하여 열전달 가시화를 연구하였는데, 충돌면에서 이웃한 제트의 영향으로 열전달 계수가 증가한다고 보고하고 있다. 그리고, Ali khan 등⁽⁷⁾은 원형 충돌제트에서 지그재그 배열의 다공질판을 삽입할 경우 다공질판의 수평 구멍 방향과, 그리고 수평과 30도의 각도를 이루는 구멍

방향으로 열전달 계수를 구하였으며, 송풍기 출력의 증가 없이도 다공질판의 영향으로 정체점에서의 열전달계수가 증가하였다고 보고하고 있다. Behbahani와 Goldstein⁽⁸⁾은 충돌면의 한쪽 유로가 막힌 경우에 있어서 제트 출구와 충돌면 사이에 지그재그 배열의 다공질판을 삽입할 경우 충돌면의 열전달계수를 구하였는데, 이때 최대 열전달 계수는 다공질판의 제트 구멍들 사이의 위치에서 나타나는 것을 알아냈다.

Kercher와 Tabakoff,⁽⁹⁾ Hollworth와 Berry⁽¹⁰⁾는 정방향 배열의 다공질판을 삽입시킴으로써 열전달 계수와 각 변수에 대한 상관 관계식을 구하였으며, Florschuetz 등,⁽¹¹⁾ Florschuetz와 Su⁽¹²⁾는 터빈 날개에서의 2차원 교차유동에 배열충돌제트를 이용하였다. 또한, Treuren 등,⁽¹³⁾ Huber와 Viskanta,⁽¹⁴⁾ Chang 등⁽¹⁵⁾은 정방향의 다공질판을 통과하는 배열충돌제트의 경우 충돌면에서의 국소열전달계수를 액정을 이용하여 구하였으며, 각 변수에 대한 상관관계식을 구하였다. 그밖에, Huang 등⁽¹⁶⁾은 과도상태 기법에서 액정을 이용하여 다중 배열제트의 출구 유로 방향에 따른 열전달계수의 영향을 연구하였다. 그리고, Guo 등⁽¹⁷⁾은 다공질판을 이용한 충돌제트의 열전달계수를 나프탈렌을 이용하여 측정하였으며, Barata⁽¹⁸⁾는 교차유동에서 다중충돌제트에 의한 열전달 효과를 3차원 그래프를 이용하여 가시화 하였다.

본 연구에서는 완전발달 유동을 생성할 정도로 길이가 충분히 긴 원형지관으로부터 다공질판을 통과하는 공기 제트를 이용하여 충돌면에서의 열전달 계수를 측정하고자 하였다. 실험은 노즐 직경에 기초한 제트의 레이놀즈수가 $Re=23,000$ 이며, 노즐 직경과 충돌면 사이의 거리가 $L/d=2\sim 10$, 다공질판과 충돌면과의 거리가 $z/d_1=1\sim 3$, 다공질판 위의 원형구멍 사이의 거리가 $p/d_1=1.5\sim 2.5$, 다공질판 위의 구멍의 내경은 $d_1=4\sim 12$ mm의 경우에 대해서 실험하였다. 충돌면상의 균일한 열유속을 만들기 위해 직류 전기로 가열되는 도금된 Intrex를 사용하였다. 또한, 표면에서의 열전달계수를 측정하기 위해 온도에 따라 칼라가 변하는 액정을 사용하였으며, 액정 칼라의 정확한 온도 결정의 수단으로 이미 Lee 등⁽¹⁹⁾에 의해 그 정확성이 입증된 디지털 칼라화상처리장치와 미디안 필터링을 이용한 신경회로망을 사용하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용한 장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었고, 다공질판의 규격과 좌표계는 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 1에 보면 비디오 카메라를 충돌면의 뒤쪽에 설치해서 화면을 뒤에서 보게 되어 있는데, 그 이유는 앞쪽에서는 다공질판에 가려서 화면을 볼 수 없기 때문이다. 실험실 공기는 2마력의 원심송풍기에 의해 먼저 내경 6.35 cm의 동관으로 보내어지며, 동관은 ASME 오리피스 유량계가 설치된 내경 6.3 cm 아크릴 관과 연결되어 있다. 그리고, 동관의 하류에는 내경 $d = 3.4$ cm와 길이 $Z = 197$ cm의 아크릴관이 설치된다. 이때, 아크릴 관 길이에 대한 내경의 비는 $Z/d \approx 58$ 로서 노즐 끝에서 분사되는 제트는 완전 발달된 난류의 속도분포를 갖게 됨을 증명하였다 (Lee 등⁽²⁰⁾).

제트의 온도를 측정하기 위하여 지름이 0.25 mm인 Chromel-Constantan(E-type) 열전대를 이용하였으며, 실험모델의 주위 온도를 측정하기 위해 동일한 형태의 열전대 2개를 사용하였다. 그리고, 이 실험에 사용된 열전대는 데이터 수집 시스템

Board & Pentium /PC)에 연결되어 있으며, 오차가 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 인 항온조(NESLAB/RTE-221D) 내에서 백금온도센서에 대하여 교정하였다. 원관은 피스톤-실린더 형태로서 노즐 출구와 평판 중심 사이의 거리를 0.5 mm의 정확도로 최대 $L = 48$ cm까지 변화시킬 수 있다. 열교환기는 노즐로부터 분사되는 제트온도를 조절하기 위하여 사용되며, 주위의 온도와 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 내에서 유지되도록 하였다. 송풍기의 속도는 인버터로 조절되며, 유량은 ASME 오리피스와 0.01 mm(water column)의 정확도를 가지는 마이크로 마노미터(MERRIAM /34MB2 -TM)로 측정하였다.

실험모델은 열손실을 최소화하기 위해서 두께가 1.5 cm이고 크기가 40 cm × 40 cm인 plexiglas plate 위에 두께 3 mm인 유리로 공기 단열막을 형성하여 이중 단열을 하였으며, 충돌면에는 단면적이 0.02 m²(0.1 m × 0.2 m)인 직사각형의 Intrex를 접착시켰으며, 구리전극을 Intrex 양단에 붙였다. 이때, 구리전극과 Intrex면 사이의 전기적 접촉을 돕기 위하여 은이 함유된 페인트를 칠하여 전류가 흐를 때 균일한 열유속 경계조건이 Intrex의 표면에 형성되도록 하였다. 전극은 용량 100V, 7 amps인 직류 전원 공급장치를 사용하여 Intrex에 공급되는 전류를 조절할 수 있게 하였다. 한편, 본 연구에서 사용한 액정(HALLCREST "R35C5W")은 약 5°C의 온도 구간에 걸쳐서 전체 갈라 스펙트럼이 나타난다. 또한, 온도에 대한 정확한 액정 칼라의 측정과 시각적·광학적 오차를 최소화하기 위해서 디지털 칼라화상처리장치를 이용한 in-situ method로 액정을 교정하였다.

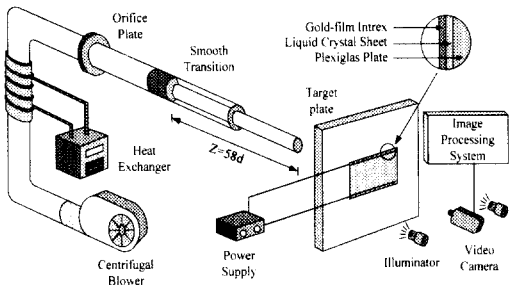


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

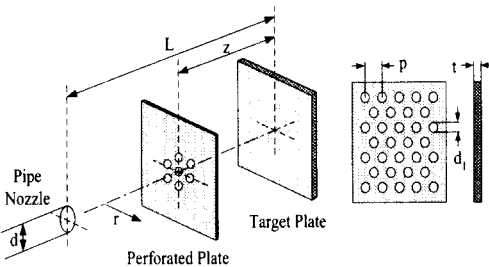


Fig. 2 Coordinate system of experimental setup (STRAWBERRY TREE/DATA Shuttle 12-bit A/D

Table 1 Nusselt number uncertainty analysis

X_i	Value	δX_i	$\left(\frac{\delta X_i}{X_i} \frac{\partial Nu}{\partial X_i} \right) \times 100(\%)$	
			$r/d = 0$ 3.3	
f	1	0.02	1.99	2.05
T_w	36.6;40.5(°C)	0.25	1.65	1.37
T_i	21.53;21.5(°C)	0.15	0.97	0.66
q_c	0(w/m ²)	38.92;4.97	0.97	0.84
V	21.23;8.60	0.125	0.59	1.49
I	1.94;0.62	0.01	0.51	1.65
A	0.010355	5×10^{-5}	0.48	0.58
d	3.4(cm)	5×10^{-3}	0.14	0.12
ϵ	0.9	0.05	0.12	1.03
Total Nu uncertainty		$\delta Nu / Nu =$	3.07	3.68

In-situ method는 실험과 동일한 조건하에서 교정을 하는 방법으로서, 본 연구에서는 실험시에 사용하는 동일한 액정면 위에 정체점을 기준으로 원주 방향으로 총 4개의 열전대를 부착한 후 액정의 교정을 실행하였다. 그래서, 특별한 장치에서 액정을 교정할 때와는 달리 실제 실험과 동일한 조건에서 교정을 하므로, 실험 시에 나타나는 온도에 따른 액정 칼라의 변화를 분석할 때 오차를 최소화 할 수가 있다. 한편, 다공질판의 두께(t)는 1 mm이고 크기가 22 cm× 22 cm로서 평판의 Intrex 충돌면을 완전히 덮고 있다.

3. 실험해석

본 연구에서 이용한 방법은 미디안 필터링을 적용한 신경회로망을 이용하여 액정을 교정하고, 액정의 칼라를 인식하여 표면 온도를 측정하는 방법이다. 이 방법은 모든 작업이 컴퓨터 프로그램으로 이루어져 보다 정확한 결과값을 산출할 수 있다. 또한, 기존의 Hue-온도 교정방법보다 액정의 사용 가능한 온도범위를 넓게 사용할 수가 있어서 실험과 측정시간을 절약할 수 있다는 장점이 있다. 한편, 도금된 Intrex를 전기적으로 가열시킴으로써 벽면에 균일한 열유속 조건을 형성할 수 있으며, 열유속은 Intrex를 지나서 전류를 바꿈으로써 조절할 수가 있다. 이 때, 일정한 열유속 조건하에서 Intrex 표면상의 특정한 칼라(등온선)는 열전달계수로 나타내어지며, 열유속이 바뀔 때 칼라의 위치도 바뀌게 된다. 특정한 칼라 위치에서의 국소 열전달계수는 다음 식 (1)으로 계산할 수 있다.

$$h = \frac{q_v}{T_w - T_j} \quad (1)$$

여기서, T_w 는 액정의 칼라에 의해 측정되는 벽면온도, T_j 는 제트온도, 그리고 q_v 는 Intrex의 전체 열유속으로부터 열손실을 제외한 순수 열유속이다. 즉,

$$q_v = \frac{fIV}{A} - \epsilon\sigma(T_w^4 - T_a^4) - q_c \quad (2)$$

여기에서 f 는 Intrex에서 국소적인 전기가열과 평균가열의 비로서 Intrex의 도금코팅의 균일성을 나타낸다. Baughn 등⁽²¹⁾은 Intrex의 시험부를 코팅이 비교적 균일한 roll의 중앙부에서 취할 경우 코팅의 균일도가 98%에 이른다는 사실을 알

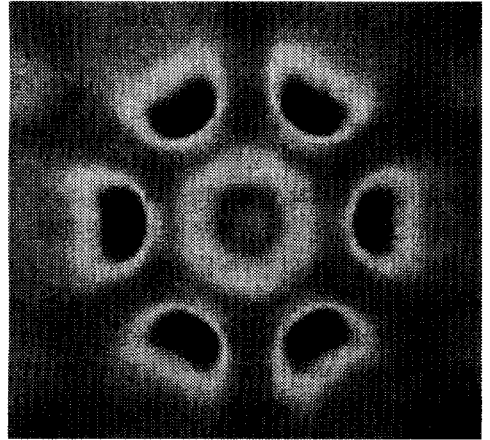


Fig. 3 Heat transfer visualization using the liquid crystal thermography for $L/d=2$, $z/d_1=2$, $p/d_1=1$, $d_1=8$ mm (circular hole)

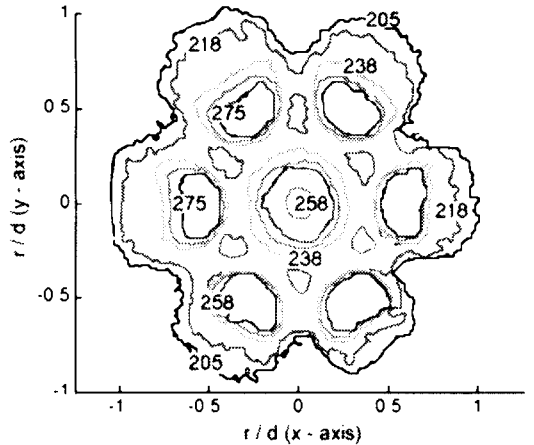


Fig. 4 Contours of constant Nusselt number lines on a flat plate under the impinging round jet with the perforated plate for $L/d=2$, $z/d_1=2$, $p/d_1=1$, $d_1=8$ mm (circular hole)

았다. 실제로 본 실험의 경우 Intrex roll의 중앙부의 코팅이 균일한 부분을 사용하였으므로, $f=1$ 이라고 가정하여 열유속을 계산하였다. 그러나, 추후 열유속의 불확실도 계산시 금코팅의 균일도가 불확실도에 미치는 영향을 고려하기 위하여 식 (2)에 f 를 그대로 두었다. 실험모델 벽에서의 전도 열손실 q_c 는 표면에서의 전체 가열에 비하여 매우 작기 때문에 0으로 가정하였으나, 전체적인 불확실도 해석에 필요하기 때문에 식 (2)에 또한 포함시켰다. Nusselt 수의 불확실도 해석을

하기 위하여 Kline과 Mcklintock⁽²²⁾의 방법을 이용하였다. 계산한 결과인 Table 1에 의하면 $Re=23,000$, $L/d=2$, $z/d_1=2$, $p/d_1=2$, $r/d=0$ 과 3.3일 경우에 Nusselt 수의 불확실도는 각각 3.07%와 3.68%이다. 이때, $r/d=0$ 에서 도금의 균일도 f 의 불확실도가 가장 크게 나타났고, 액정에 의해 측정된 평판의 벽면온도의 불확실도가 그 다음으로 큰 것으로 나타났다.

4. 결과 및 토의

Fig. 3은 $L/d=2$, $p/d_1=2$, $z/d_1=1$, $d_1=8$ mm의 경우, 노즐과 충돌면 사이에 다공질판을 삽입할 때에 액정을 이용하여 평판에 충돌하는 원형제트의 열전달 가시화를 보여주고 있다. Fig. 3을 보면 충돌면에서의 다공질판의 배열 구멍의 효과가 매우 잘 가시화되어 있다. 정체점 영역을 보면 내부 피크가 생기는 것을 알 수가 있는데, 이는 유체가 다공질판의 좁은 구멍을 통과하면서 가속화에 의한 영향 때문인 것으로 보여진다. 그리고, 정체점 영역은 등온선의 형상이 둥글지만 벽제트 영역으로 갈수록 반달 형상으로 변하고 있다. 이는 다공질판에 의한 유체의 2차원 교차유동 효과 때문일 것으로 추측할 수 있다. 한편, 본 연구에서 교정한 액정의 온도범위는 $35^{\circ}\text{C} \sim 42^{\circ}\text{C}$ 이다. 그림에서, 붉은색의 칼라가 시작하는 온도는 35°C 이며, 점점 보라색으로 칼라가 끝나는 온도는 42°C 를 넘어서고 있다.

Fig. 4는 Fig. 3과 같이 다공질판을 이용한 복잡한 형상을 가지는 실험모델에서 나타나는 열전달 현상에서 등온선을 Nusselt 수로 변환한 결과이다. Fig. 4에서 x-축과 y-축은 수평 방향과 수직 방향의 r/d 를 나타내고 있다. 그리고, 그림 내부에 표시된 수치는 그 곡선의 Nusselt 수를 나타내고 있다. Fig. 3에서 액정에 의해서 나타난 칼라의 분포를 가진 화면을 본 실험실에서 개발한 프로그램을 이용하여 화면의 모든 지점을 온도와 Nusselt 수로 표현하는 것이 가능하다. 이 프로그램은 C++을 이용하여 미디안 필터링을 적용한 신경회로망으로 구성하였다. Fig. 3과 같은 화면의 각각의 픽셀에서 나타난 R. G. B.의 값들을 1차적으로 미디안 필터링을 거쳐서 신경회로망에 적용한다. 그리고, 각각의 픽셀에 해당하는 온도로 변환한 후 다시 5~6회 정도 미디안 필터링을

반복한다. Fig. 4는 이러한 과정을 거친 후에 화면 전체에 대한 온도 및 Nusselt 수를 등온선의 형태로 표현한 것이다. 한편, 등열유속 경계조건 하에서는 등온선이 곧 등열전달계수선이 된다. Figs. 5~10은 위의 과정을 거친 후 $r/d=0$ 인 지점에서 r/d 의 변화에 따른 수평 방향으로의 Nusselt 수와 정체점에서 ± 60 도의 방향에 대한 Nusselt 수의 분포를 평균을 내서 표현한 것이다. 본 실험실에서 개발한 프로그램은 액정에 의해서 칼라가 나타나는 모든 영역에 대해서 온도 또는 Nusselt 수와 같은 정확한 수치로 표현할 수 있는 장점이 있다.

Fig. 5는 $L/d=2$, $p/d_1=2$, $z/d_1=1$, $d_1=4$ mm에서 지그재그배열(staggered array)과 정방향배열(in-line array) 다공질판을 제트의 출구와 충돌면 사이에 삽입할 경우의 Nusselt 수 분포를 비교하고 있다. Fig. 5에서 정체점 영역인 $r/d \leq 1.0$ 까지 평균 Nusselt 수(Nu_{avg})는 지그재그배열이 정방향배열보다 약 8% 정도 더 우수함을 보여준다. 지그재그배열의 경우에는 일정한 간격으로 배열되어 있는 구멍들 사이의 지점에 또 다른 구멍들이 있어서 그 구멍들의 위치가 정삼각형의 형상을 이루고 있다. 그래서, 다공질판을 통과한 유체가 더욱 잘 섞이는 효과를 가져와 열전달이 감소하는 지점에서의 Nu_{min} 는 정방향배열의 경우보다 오히려 상승시킨다. 더불어 Nu_{max} 도 정방향배열보다 증대시키는 효과를 가져오고 있다. 그러나, $r/d \geq 1.7$ 일 경우에는 다공질판의 구멍 배열의 형상이 열전달에 거의 영향을 주지 못하고 서로 일치함을 볼 수 있다.

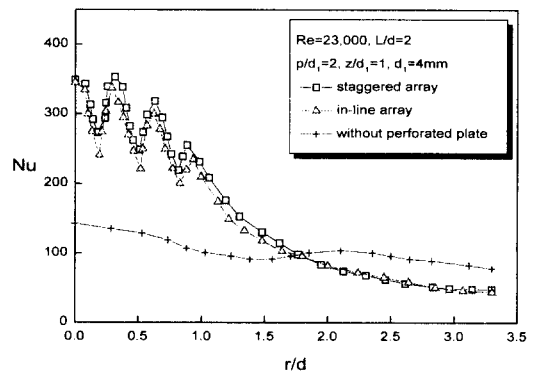


Fig. 5 Comparison between the result by the staggered array and result by the in-line array perforated plate

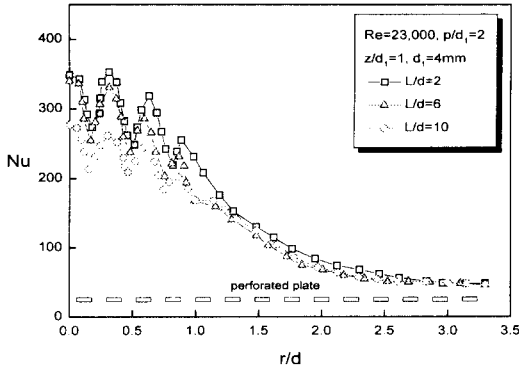


Fig. 6 The effect of spacing between the nozzle exit and impinging plate on the radial Nusselt number distributions

Fig. 6은 $p/d_1=2$, $z/d_1=1$, $d_1=4$ mm일 경우의 지그재그 배열의 다공질판에 관한 충돌면에서 유체 유동방향으로의 국소 Nusselt 수의 분포를 노즐출구와 충돌면 사이의 무차원 거리인 L/d 의 변화에 따라서 나타내고 있다. 또한, 다공질판의 형상을 나타내기 위하여 그림의 수평 좌표계에 다공질판의 각 구멍의 위치를 나타내었다. 그림에서 보면 $L/d=2$ 의 경우가 열전달이 가장 잘 된다는 것을 알 수가 있다. 그리고, 정체점 영역인 $r/d=1.0$ 까지의 평균 Nusselt 수(Nu_{avg})를 비교해 보면 $L/d=2$ 는 $L/d=6$ 보다 약 10%, $L/d=10$ 보다는 30% 정도 더 열전달이 잘 된다. 즉, 충돌면 사이의 거리가 가까울수록 열전달이 잘 되는 것을 알 수가 있다. 다공질판이 없는 원형 충돌체의 경우는 $L/d=6\sim7$ 지점에서 열전달이 가장 잘 된다⁽²³⁾. 하지만, 다공질판이 있는 경우는 다공질판을 통과하는 유체가 노즐과 충돌면 사이의 거리와 상관없이 충분한 난류강도를 가지게 된다. 따라서, 유체의 운동량이 가장 높은 $L/d=2$ 가 열전달이 가장 잘 된다. 그리고, 벽제트 영역으로 갈수록 다공질판의 영향과 L/d 의 영향이 점점 없어짐을 볼 수가 있다.

Fig. 7은 $L/d=2$, $z/d_1=1$, $d_1=4$ mm일 경우 지그재그 배열의 다공질판에 관한 다공질판 위의 구멍의 간격인 $p/d_1=1.5, 2.0, 2.5$ 의 변화에 따른 Nusselt 수의 분포를 나타내고 있다. 그림에서 보면 $p/d_1=2.0$ 의 경우가 가장 열전달이 잘 된다는 것을 알 수가 있다. 정체점 영역인 $r/d \leq 1.0$ 까지의 평균 Nusselt 수(Nu_{avg})를 비교해 보면 $p/d_1=2.0$ 의 경우가 다른 경우보다 대략 5~6% 정도 더 열전

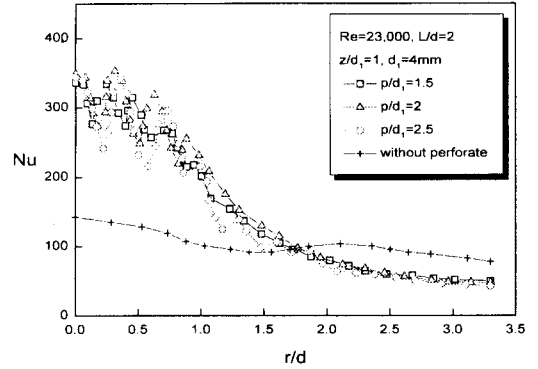


Fig. 7 The effect of the pitch-to-diameter of the holes in the perforated plate on the radial Nusselt number distributions

달이 잘 된다. 그리고, 벽제트 영역인 $r/d \leq 3.3$ 까지 비교해 보더라도 4~5% 정도 열전달이 잘 된다. 한편, 다공질판이 있는 경우의 Nusselt 수와 다공질판이 없는 경우의 Nusselt 수가 서로 교차하고 있는 지점은 $r/d \approx 1.7$ 인 지점이다. 그리고, $r/d \geq 1.7$ 인 영역에서 다공질판의 p/d_1 의 영향이 없어져서 각각의 Nusselt 수가 서로 일치함을 볼 수가 있다.

Fig. 8은 지그재그 배열의 다공질판에 대해서 $L/d=2$, $p/d_1=2$, $d_1=4, 8, 12$ mm일 때 국소 Nusselt 수의 분포를 z/d_1 의 변화에 따라서 나타내고 있다. 그림에서 보면 하부에 다공질판의 형상을 나타내기 위하여 수평 좌표계에 다공질판의 각 구멍의 위치를 나타내었다. Fig. 8에서 보듯이 다공질판이 있는 경우가 없는 경우보다 Nusselt 수가 월등히 높음을 알 수가 있다. 이는 다공질판을 통과한 인접한 제트들 사이에서 효과적인 상호 충돌 작용이 활발하게 일어나면서 난류강도가 증가하기 때문이다. 한편, 다공질판과 충돌면의 거리(z/d_1)가 가까워질수록 다공질판을 통하여 나오는 제트가 강한 운동량의 다중충돌체트의 성질을 갖고, 제트간의 활발한 상호작용으로 인해서 열전달이 급격하게 증가한다. 그러나, 이에 반해 다공질판과 충돌면의 거리가 멀어지면 오히려 제트간의 상호작용으로 제트의 운동량이 감소하기 때문에 열전달이 줄어들게 된다.

또한, 다공질판의 영향으로 나타나는 Nu_{max} 는 $d_1=4$ mm의 경우는 $r/d \approx 1.0$ 까지 나타나고, $d_1=8$ mm는 $r/d \approx 1.8$ 까지, $d_1=12$ mm는 $r/d \approx 2.5$ 까지 나타

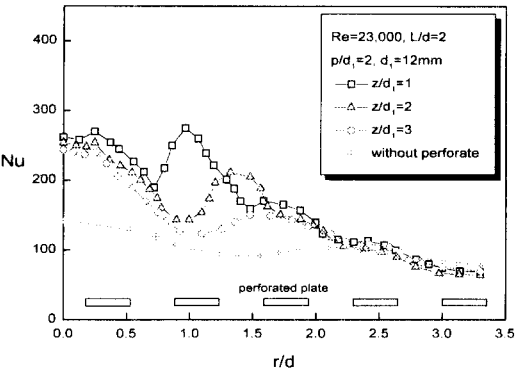
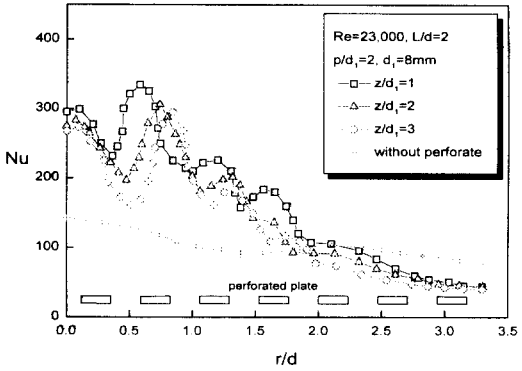
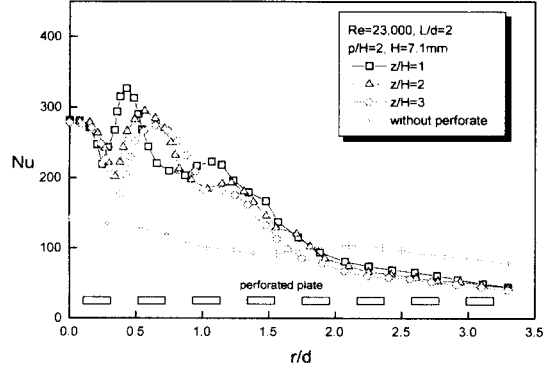
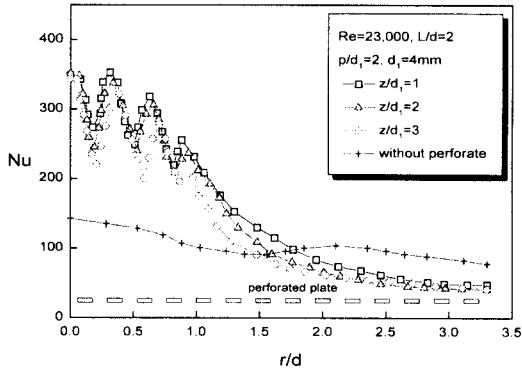


Fig. 8 The effect of spacing between the perforated and impinging plate on the radial Nusselt number distributions for $d_1=4, 8, 12$ mm

Fig. 9 The effect of spacing between the perforated and impinging plate on the radial Nusselt number distributions for square hole shape

향이 벽제트 영역까지 넓어진다는 것을 보여준다. 그리고, 이 교차하는 구간을 지나면 오히려 열전달이 감소하는 효과가 나타나고 있다. 한편, 다공질판 위의 모든 구멍의 크기에 대해서 z/d_1 이 증가할수록 충돌면에서의 Nu_{max} 는 점점 감소하면서 그 위치도 하류방향으로 이동하고 있다. 또한, 벽제트 영역으로 갈수록 다공질판과 충돌면 사이의 거리인 z/d_1 의 영향이 없어져 각각의 Nusselt 수가 점차적으로 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 $L/d=2, p/H=2$ 인 경우에 대해서 z/H 의 변화에 따른 Nusselt 수의 변화를 나타내고 있다. Fig. 9는 다공질판 위의 구멍의 형상이 정사각형이며, 사각형 한 변의 길이 $H=7.1$ mm이다. $H=7.1$ mm로 한 이유는 Fig. 8의 내경 $d_1=8$ mm와 비교하기 위해서인데, 사각형 구멍과 원형 구멍의 면적의 차이가 약 0.3% 정도로 미소하다. Fig. 9를 보면 Fig. 8과 유사한 결과를 나타내고 있는데, 정체점에서의 Nu_{max} 보다 두 번째 Nu_{max} 가 더 높으며, 세 번째 부터는 점점 감소함을 알 수 있다. 그리고, z/H 가 증가할수록 그 위치도 하류방향으로 점차 이동하고 있다. $r/d \geq 1.8$ 부터는 다공질판의 영향이 거의 없어져 Nu_{max} 도 나타나지 않으며, 다공질판이 없는 경우보다 더 낮은 Nusselt 수를 보여준다. 그리고, 벽제트 영역으로 갈수록 z/H 의 영향이 없어져서 각각의 Nusselt 수가 서로 일치하고 있다.

Fig. 10은 $L/d=2, p/d_1=2, r/d \leq 1.0$ 에 대해서 z/d_1

난다. 그리고, 다공질판이 있는 경우의 Nusselt 수와 다공질판이 없는 경우의 Nusselt 수가 서로 교차하는 지점은 다공질판의 구멍의 크기가 클수록 벽제트 영역으로 점차적으로 이동하고 있다. 즉, 다공질판의 구멍의 크기가 클수록 다공질판의 영

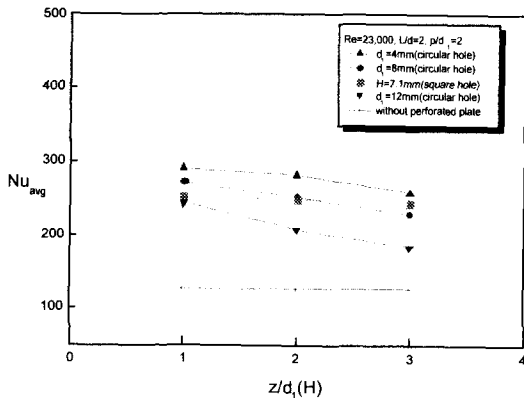


Fig. 10 The effect of perforated plate on the average Nusselt number for target area of $0 \leq r/d \leq 1.0$

의 변화에 따른 평균 Nusselt 수(Nu_{avg})를 다공질 판위의 구멍의 내경 $d_1(H)$ 과 구멍의 형상의 변화에 따라서 나타내고 있다. Fig. 10을 보면 구멍의 형상이 원형인 경우는 z/d_1 이 커질수록, 그리고 구멍의 내경 d_1 이 커질수록 Nu_{avg} 는 감소하고 있다. 한편, 구멍의 형상이 정사각형인 한 변의 길이 $H=7.1$ mm는 $d_1=8$ mm와 비교해 보면 $z/d_1(H)=1$ 인 경우는 사각형 구멍이 원형보다 Nu_{avg} 가 더 낮다. 하지만, $z/d_1(H)=2$ 인 경우는 서로 일치하고 있으며, $z/d_1(H)=3$ 인 경우는 사각형 구멍이 더 높은 Nu_{avg} 를 나타내고 있다. 미루어 추측하면, $z/d_1 \geq 3$ 인 영역인 더 먼 거리까지 측정한다면 사각형의 형상이 원형 구멍보다 Nu_{avg} 가 다소 향상 될 것이라고 추측할 수가 있다. 이는 구멍의 형상이 사각형인 경우 다공질판과 충돌면 사이의 거리 z/d_1 이 멀어 질수록 원형 형상의 구멍보다 난류강도가 더 증가하기 때문이다. $r/d \leq 1.0$ 영역에 대해서 가장 열전달이 잘 되는 조건은 $d_1=4$ mm인 경우이면서 $z/d_1=1$ 인 경우로서 다공질판이 없는 경우보다 대략 2.3배 더 우수하다. 그리고, 각각의 z/d_1 의 Nu_{avg} 를 평균하면 $d_1=4$ mm인 경우는 다공질판이 없는 경우보다 2.2배, $d_1=8$ mm는 2.0배, $d_1=12$ mm는 1.7배 더 열전달이 잘 된다. 그리고, 구멍의 형상이 정사각형인 $H=7.1$ mm는 원형인 $d_1=8$ mm의 Nu_{avg} 와 잘 일치하고 있다. 한편, 벽제트 영역인 $r/d \leq 3.3$ 까지 확대하면 다공질판이 없는 경우보다 $d_1=4$ mm는 1.3배, $d_1=8$ mm는 1.4배, $d_1=12$ mm는 1.5배로 구멍의 내경이 클수록 Nu_{avg} 는 증가한다. 이는 Fig. 8에서 구멍의 내경이 클수록 다공질판의

영향이 벽제트 영역까지 넓어지기 때문이다.

5. 결론

본 연구는 원형제트의 노즐 출구와 평판 충돌면 사이에 다공질판을 삽입했을 경우에 있어서 다공질판의 구멍의 배열모양, 노즐 출구와 충돌면 사이의 거리(L/d), 다공질판의 구멍의 간격(p/d_1)과 다공질판과 충돌면 사이의 거리(z/d_1), 그리고 다공질판의 구멍의 크기(d_1)와 형상의 변화가 열전달에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 본 연구는 입력 파워의 어떠한 증가도 없이 열전달 효율이 증대하는 것을 보여주고 있으며, 액정을 이용하여 충돌면에서의 열전달 효과를 가시화 하였다. 또한, 본 실험실에서 개발한 디지털 칼라화상처리장치와 미디안 필터링을 이용한 신경회로망을 사용하여 결과를 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 정방향배열(in-line array) 다공질판과 지그재그배열(staggered array) 다공질판을 비교하면 지그재그배열 다공질판의 Nusselt 수가 정방향보다 더 우수하다.
- (2) 노즐 출구와 충돌면 사이의 거리($L/d=2 \sim 10$)는 가까울수록, 다공질판의 구멍 사이의 간격 $p/d_1=2$ 가 가장 열전달이 잘 된다.
- (3) 다공질판과 충돌면 사이의 간격($z/d_1=1 \sim 3$)은 가까울수록, 다공질판의 구멍의 크기($d_1=4 \sim 12$ mm)는 작을수록 열전달이 증가한다.
- (4) 다공질판의 구멍 형상의 변화에서는 면적이 서로 같은 원형($d_1=8$ mm)과 정사각형($H=7.1$ mm)을 서로 비교해 보면 z/d_1 의 거리가 멀수록 정사각형 구멍의 Nusselt 수가 원형보다 크다.
- (5) 평균 Nusselt 수(Nu_{avg})는 다공질판이 있는 경우가 없는 경우보다 $r/d \leq 1.0$ 까지는 대략 2배 더 높게 나타났으며, 벽제트 영역인 $r/d \leq 3.3$ 까지 확대하면 대략 1.4배 더 우수하다.
- (6) 가장 열전달이 잘 되는 경우는 지그재그 배열에서 $L/d=2$, $p/d_1=2$, $z/d_1=1$, $d_1=4$ mm이며, 이 경우 다공질판이 없는 Nu_{avg} 보다 $r/d \leq 1.0$ 인 영역에 대해서 대략 2.3배 더 우수하다.

참고문헌

- (1) Martin, H., 1977, "Heat and Mass Transfer

- between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces," *Advances in Heat Transfer*, Academic Press, New York, Vol. 13, pp.1~60.
- (2) Down, S. J., and James, E. H., 1987, "Jet Impinging Heat Transfer-A Literature Survey," ASME paper No. 87-H-35.
- (3) Goldstein, R. J., Behbahani, A. I., and Heppelmann, K. K., 1986, "Streamwise Distribution of the Recovery Factor and The Local Heat Transfer Coefficient to an Impinging Circular Air Jet," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 29, No. 8, pp. 1227~1235.
- (4) Viskanta, R., 1993, "Heat Transfer to Impinging Isothermal Gas and Frame Jet," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 6, pp. 111~134.
- (5) Kurima, J., Miyamoto, M., and Harada, T., 1989, "Heat Transfer Augmentation of an Axisymmetric Impinging Jet Using a Perforated Plate Set in front of a Target Plate," *Heat Transfer Japanese Research*, Vol. 18, No. 6, pp. 1~20.
- (6) Goldstein, R. J., and Timmers, J. F., 1982, "Visualization of Heat Transfer from Arrays of Impinging Jets," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 25, No. 12, pp. 1857~1868.
- (7) Ali khan, M. M., Hirata, M., Kasagi, N., and Nishiwaki, N., 1982, "Heat Transfer Augmentation in an Axisymmetric Impinging Jet," *The Seventh International Heat Transfer Conference*, Vol. 3, pp. 363~368.
- (8) Behbahani, A. I., and Goldstein, R. J., 1983, "Local Heat Transfer to Staggered Arrays of Impinging Circular Air Jets," *Journal of Engineering for Power*, Vol. 105, pp. 355~360.
- (9) Kercher, D. M., and Tabakoff, W., 1970, "Heat Transfer by a Square Array of Round Air Jets Impinging Perpendicular to a Flat Surface Including the Effect of Spent Air," *Journal of Engineering for Power*, January, pp. 73~82.
- (10) Hollworth, B. R., and Berry, R. D., 1978, "Heat Transfer from Arrays of Impinging Jets with Large Jet-to-Jet Spacing," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 100, pp. 353~357.
- (11) Florschuetz, L. W., Metzger, D. E., and Su, C. C., 1984, "Heat Transfer Characteristics for Jet Array Impingement with Initial Crossflow," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 34~41.
- (12) Florschuetz, L. W., and Su, C. C., 1987, "Effects of Crossflow Within an Array of Impinging Jets," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 109, pp. 74~82.
- (13) Van Treuren, K. W., Wang, Z., Ireland, P. T., and Jones, T. V., 1994, "Detailed Measurements of Local Heat Transfer Coefficient and Adiabatic Wall Temperature Beneath an Array of Impinging Jets," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 116, pp. 369~374.
- (14) Huber, A. M., and Viskanta, R., 1994, "Convective Heat Transfer to a Confined Impinging Array of Air Jets with Spent Air Exits," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 116, pp. 570~576.
- (15) Chang, C. T., Kojasoy, G., Landis, F., and Downing, S., 1995, "Confined Single and Multiple Jet Impingement Heat Transfer-1. turbulent Submerged Liquid Jets," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 5, pp. 833~842.
- (16) Huang Y., Srinath V. E., and Han, J. C., 1996, "Local Heat Transfer Coefficient Distributions under an Array of Impinging Jets Using a Transient Liquid Crystal Technique," *Proceedings of the 6th International symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*, Vol. 2, pp. 553~562.
- (17) Guo, T., Zhu, T., Hu, J., and Gong L., 1996, "The Effect of the Geometric Parameters of a Perforated Plate on its Heat Transfer Characteristics," *Cryogenics*, Vol. 36, No. 6, pp. 443~446.
- (18) Jorge M. M. Barata, 1996, "Fountain Flows Produced by Multiple Impinging Jets in a Crossflow," *American Institute of Aeronautics and Aeronautics Journal*, Vol. 34, No. 12, pp. 2523~2530.
- (19) 이대희, 부광석, 원세열, 정재훈, 김운택, 1999, "미디안 필터와 신경회로망을 이용한 향상된 액정교정 기술개발 및 열전달 연구에의 응용"

- 용,” 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 B, pp. 915~920.
- (20) Lee, D. H., Chung, Y. S., and Kim, D. S., 1997, "Turbulent Flow and Heat Transfer Measurements on a Curved Surface with a Fully Developed Round Impinging Jet," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 18, No. 1, pp. 160~169.
- (21) Baughn, J. W., Ireland, P. T., Jones, T. V., and Saniei, N., 1989, "A Comparison of the Transient and Heated-Coating Methods for the Measurements of the Local Heat Transfer Coefficients on a Pin Fin," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 877~881.
- (22) Kline, S. J., and McClinton, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (23) 이대회, 원세열, 이영민, 조현노, 박성은, 1998, "원형 충돌제트의 노즐 직경이 열전달에 미치는 영향," 대한기계학회 98년도 열공학부문 학술대회 논문집, pp. 71~75.