

# 채널유동성분이 존재하는 오목 충돌면에서 배열충돌제트에 의한 국소 열전달 특성 고찰

이원희<sup>†</sup>·황상동\*·조형희\*\*

## Local Heat Transfer Characteristics of Array Impinging Jets with Channel flow on the Concave Surface

Won Hee Lee, Sang Dong Hwang and Hyung Hee Cho

**Key Words:** Heat Transfer Coefficient(열전달계수), Array jets(배열제트), Impingement(충돌), Channel Flow(채널유동), Concave Surface(오목표면), TLC method(감온액정법)

### Abstract

In this study, the effect of channel flow in the concave surface on local heat transfer characteristics of array jets was investigated experimentally. A TLC method is employed to determine local heat transfer coefficients on the target plate and also flow visualization has been conducted to investigate the behavior of a row of impinging jets and array of impinging jets. Two different array patterns of impinging array jets devices are tested for Reynolds number(Re=10,000). In a row of impinging jets, secondary vortex is strongly maintained by main vortex at nozzle-to-plate distance of H/d=2. Therefore, the Nusselt number slowly decreased at the mid-way region between adjacent jets. In array jets, the local maximum Nusselt number region move further in the downstream direction due to the increase of channel flow velocity.

#### 기호설명

$A$	: 금박막의 표면적	$X$	: 폭방향 좌표
$d$	: 분사노즐 직경 [mm]	$Nu$	: Nusselt 수
$f$	: 금박막의 균일성	$Re$	: Reynolds 수
$H$	: 노즐과 충돌판사이의 거리 [mm]	$\theta$	: 원주방향 각도
$h$	: 국소 열전달 계수		
$l$	: 전류		
$k$	: 냉각공기의 열전도 계수		
$p$	: 분사노즐 사이의 폭방향 간격 [mm]		
$q_w$	: 금박막에서의 열유속		
$R$	: 폭방향 좌표		
$T_j$	: 제트 온도		
$T_w$	: 가열된 평판의 국소 벽면 온도		

### 1. 서론

국소적으로 높은 열전달 효과를 가지는 충돌제트(impinging jets)는 터빈 블레이드와 연소기 내벽의 냉각, 고온강관의 냉각, 종이와 천의 제조과정에서의 건조에 사용되고 있다. 일반적으로 배열충돌제트(array impinging jets)의 경우 단일충돌제트(single impinging jets) 경우 보다 넓은 영역에서 균일한 열전달 효과를 얻을 수 있다. 배열충돌제트는 열전달 향상 및 균일성을 높이기 위해서 제트와 제트사이의 간격, 제트 배열방법 및 분사노즐과 충돌면 사이의 간격을 변화시키면서 연구가 수행되어져 왔다.

기존 연구들에서 일열 충돌제트(a row of

<sup>†</sup> 연세대학교 대학원 기계공학과  
E-mail : whlee@yonsei.ac.kr  
TEL : (02)2123-2828 FAX : (02)312-2159

\* 연세대학교 대학원 기계공학과

\*\* 연세대학교 기계공학과

impinging jets)에 대하여 Koopman and Sparrow<sup>(1)</sup>는 나프탈렌 승화법을 이용하여 실험을 수행하였으며 Brevet and Vullierme<sup>(2)</sup>의 경우 적외선 카메라를 이용하여 실험을 수행하였다. 이것은 1열의 충돌제트와 3열의 배열충돌제트에 대하여 실험을 수행하였으나 채널 내의 배열제트의 특성을 보이지 못하고 있다. Yoon 등<sup>(3)</sup>은 나프탈렌 승화법을 이용하여 배열충돌제트에서 횡방향유동성분에 따른 열/물질 전달 특성에 대하여 연구하였다. Bailey and Bunker<sup>(4)</sup>는 감온성 액정을 이용하여 제트열의 밀집정도에 따른 유동방향으로의 열전달 특성에 대하여 연구를 수행하였다. 실제 사용되어지는 블레이드의 경우 충돌면이 오목채널의 형태를 가지고 있고 이러한 형상은 유동특성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 곡률을 가진 충돌면에서의 배열제트 실험을 통하여 곡률에 의한 영향이 배열제트의 열전달 특성에 어떠한 영향을 미치는가에 관한 연구가 필요하다.

Tabakoff and Clevenger<sup>(5)</sup>의 경우 오목곡면(concave surface) 형상의 충돌면에 슬롯제트(slot jet), 1열 충돌제트 그리고 배열충돌제트에 대하여 실험을 수행하였다. 그러나 이들은 열전대(thermocouple)의 이용으로 인하여 측정위치의 및 개수의 제한으로 인하여 국소값을 얻어내지 못하였다. Cornaro 등<sup>(6)</sup>은 곡률의 영향, 노즐 직경 그리고 유속에 변화에 따른 제트의 유동구조를 연선법(smoke wire flow visualization)을 이용하여 제트의 유동현상을 설명하였다. 그러나 열전달 특성과의 연관성에 대하여 언급하지 않았다. Taslim and Setayeshgar<sup>(7)</sup>는 충돌면의 형상이 열전달 특성에 어떠한 영향을 주는지 열전대를 이용하여 냉각성능을 비교하였다. 이처럼 여러 형태의 충돌면 혹은 제트에 대한 기존 연구를 통하여 여러 유동특성과 열전달특성이 밝혀졌다. 그러나 곡면형상의 채널 유동에서 배열제트에 의한 열전달 특성에 관한 연구는 수행되지 않았다. Lim 등<sup>(9)</sup>은 오목표면(hemispherical concave surface)곡률 변화가 충돌제트의 열전달에 미치는 영향을 감온성 액정을 이용하여 연구하였다. 그러나 어떠한 유동현상에 의하여 열전달 특성이 변화하였는지에 대하여 설명이 미흡하다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 오목곡면에서의 1열의 충돌제트에 대해서 채널유동 방향을 따라 유동 가시화 실험을 함으로써 채널을 따라서 유동이 어떤 영향을

받는지 고찰 하였다. 또한 TLC 기법(Thermochromic Liquid Crystals method)을 이용하여 1열 충돌제트에서 충돌면에 대하여 열전달 특성에 대한 실험을 수행하였다. 이를 바탕으로 Re수가 10,000 그리고 H/d가 2일 경우에 대하여 배열제트에서 채널유동(횡방향 유동)의 영향을 받는 경우에 대하여 제트의 배열변화에 따른 열전달 특성을 고찰하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에서는 오목곡면 형상의 충돌면을 가지는 장치를 설계하여 홀의 배열변화에 따른 충돌면에서의 열전달 특성 변화를 측정할 수 있도록 장치를 설계하였다.

Fig. 1은 실험장치 개략도를 나타낸 그림이다. 주제트 유동은 송풍기(7.5KW 출력)를 통하여 공급하였으며, 송풍기에 연결된 인버터(inverter)를 통해 속도를 조절하였다. 송풍기를 통해 흡입된 공기는 항온조(constant temperature water bath)와 연결된 열교환기를 지나게 함으로써 유동의 온도를 조절할 수 있도록 하였다. 충돌제트의 유량은 열교환기와 정체실(settling chamber)사이에 설치된 오리피스 유량계(orifice flow meter, ASME 규격)를 사용하여 측정하였으며, 오리피스를 지난 공기는 섭동성분을 줄여서 균일한 충돌제트를 만들 수 있도록 망(mesh)과 허니콤(honeycomb)이 설치되어 있는 정체실(plenum chamber)을 통과 하도록 하였

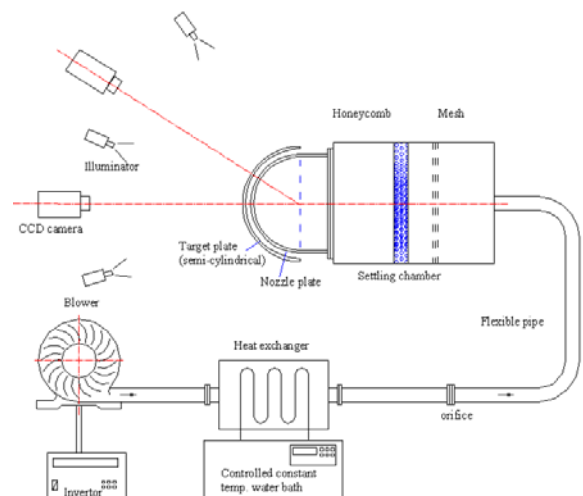


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

다. 정체실을 통과한 유동은 분사판(nozzle plate)을 통해 분사되며, 충돌면(target surface)에 충돌 후 배출된다. 충돌제트의 온도는 정체실에서 J-type 열전대를 설치하여 측정하였고 충돌면의 온도는 충돌면에 붙어있는 감온성 액정을 이용하여 측정하였다. 감온성 액정 시트는 충돌면의 중심으로부터 유동 방향으로  $-35^{\circ} \sim +65^{\circ}$ , 유동의 횡방향으로  $x=-100 \text{ mm} \sim +100 \text{ mm}$  영역을 측정 할 수 있도록 설치하였고, TLC 영상을 획득하기 위하여 수직위치( $0^{\circ}$ )와  $30^{\circ}$ 위치에 2개의 CCD 카메라를 설치하였다. 수직 위치에 설치된 카메라는  $-35^{\circ} \sim +35^{\circ}$  영역의 이미지를,  $30^{\circ}$ 위치의 카메라는  $0^{\circ} \sim +65^{\circ}$  영역의 이미지를 얻어내어 Matrox사의 이미지 보드(meteor-2)에 획득된 신호는 자체 제작한 프로그램을 이용하여 후처리를 하였다.

Fig. 2는 충돌면과 분사판에 대한 개략도이다. 충돌면에서의 열전달계수는 표면에서 균일열유속(constant heat flux)을 만든 후 제트를 충돌시켜 충돌면에서의 온도분포를 측정하여 구하였다. 균일열유속 조건을 만들기 위해 금박막시트(gold coated film, AuARE-12 (7mil), Courtaulds)를 사용하였으며, 고전압 직류전원장치(10A-200V DC)를 사용하여 금박막에 전류를 가하였다. 가해지는 전류는 분류기(shunt, 10A-50mV)를 사용하여 정확한 전류값을 측정하였다. 금박막시트의 표면에 20

$0 \times 300 \text{ mm}^2$  넓이의 감온성액정 시트를 부착시켰으며 충돌면 외부와의 단열을 위하여 감온성액정 시트(R20C20W HALLCREST Ltd.)와 10 mm 두께의 곡면(내경 165 mm)의 아크릴판 사이에 공기단열층을 형성할 수 있도록 하였다. 아크릴판은 외부에서 CCD 카메라를 이용하여 이미지를 얻을 수 있도록 투명도를 유지 하였다.

분사판은 Fig. 2(b), (c)의 개략도와 같이 두께가 10 mm이고 외경이 145 mm인 사각 배열과 엇갈림 배열의 홀( $d=10$ ) 배열을 가질 수 있도록 하였으며 분사판에서 충돌면까지의 거리 즉,  $H/d=2$ 를 유지하도록 설치하였다.

TLC로부터 정확한 온도를 읽기 위해서는 반드시 교정 작업을 해야 한다. 교정 실험을 위하여 열전달 실험장치와 같은 곡률을 가진 교정 장치를 만들었으며, 교정작업은 카메라의 위치와 조명의 위치가 실험조건과 같은 상태에서 실시하였다. 각각의 CCD 카메라에 대하여 교정 실험을 실시하여 색상과 온도간의 관계를 교정식으로 나타내었고 열전달 실험에 적용하였다.

2.2 열전달 계수

표면에서의 열유속은 금박막시트의 경우 96% 이상의 균일도를 가지는 것으로 보고되고 있으며, 중심부를 사용할 경우 균일도(uniformity; f)를 1로 가정할 수 있기 때문에 본 실험에서도 균일도를 1로 가정하였다. 따라서 금박막시트에서의 열유속( $q_w$ )은 가해진 전류(I)와 금박막시트의 전기 저항(R)을 이용해 식(1)과 같이 발열량을 계산할 수 있다. 여기에서 A는 TLC의 면적이다.

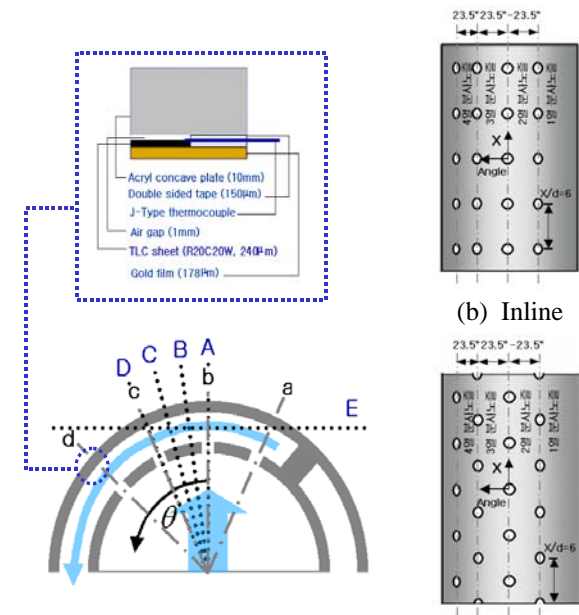
$$q_w = \frac{I^2 R}{A} = \frac{I^2 R}{A} \quad (1)$$

따라서 일정 열유속조건에서 벽면에서의 온도( $T_w$ )와 제트내부에서의 온도( $T_j$ )를 측정하면 열전달계수와 Nu 수는 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$h = \frac{q_w}{T_w - T_j} \quad (2)$$

$$Nu = \frac{hd}{k} = \frac{q_w}{T_w - T_j} \frac{d}{k} \quad (3)$$

d는 제트의 노즐출구 직경이고 k는 냉각공기의 열전도계수(thermal conductivity)이다. 이때 국소열전달 계수를 구하기 위하여 자체 개발한 프로그램을 이용하여 200장의 TLC 이미지의 픽셀(pixel)에



(a) Geometry of target surface (c) Staggered  
**Fig. 2** Geometry of target surface and pattern of nozzle plates

대한 색상(hue)값을 국소적으로 평균한 것을  $h$ (local heat transfer coefficient)로 변환할 수 있는 Hue Capturing method를 사용하였다.

2.3 유동가시화 실험

곡면유로 내에서의 배열제트의 유동 특성을 관찰하기 위하여 유동을 가시화 하였다. 가시화를 위하여 Nd-Yag 레이저에서 나온 평면광(Laser sheet)을 가시화하고자 하는 영역에 위치하게 한 후에 올리브오일(olive oil)을 분무기(atomizer)를 이용하여 정체실내에 분사 시킨다. 주유동이 노즐을 통해서 분사되고 가시화 되면 정성적인 유동구조를 보여주게 된다. 동시에 고속카메라(Kodak Ekta Pro-HG Imager)를 작동하여 초당 2,000장의 이미지를 얻게 된다. 이때 고속카메라의 초점은 항상 발광면에 수직하도록 하였으며 발광면은 채널유동을 따라 유동에 수직하게 위치하도록 하였다. 또한 충돌제트 수직방향으로 발광면을 만들어 CCD카메라를 이용하여 동영상을 얻은 후 이를 후처리 하여 이미지를 획득하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 일열 충돌제트

3.1.1 일열 충돌제트의 유동가시화

오목곡면의 채널내에서의 일열 충돌제트에 의한 유동 특성을 관찰하기 위하여 분무장치를 이용하여 유동을 가시화하였다. Fig. 3은 노즐과 충돌면(impinging surface)의 거리가  $H/d=2$ 일 때 채널을 따라 흐르는 유동을 가시화한 것이다. Fig. 3에서 A,B,C 그리고 D는 Fig. 2(a)의 각각의 위치( $A=0^\circ$ ,  $B=8^\circ$ ,  $C=16^\circ$  and  $D=24^\circ$ )에서 발광면을 만들어 이미지를 얻어낸 것이다. 배열 충돌제트는 두 가지 형태의 상호작용의 영향을 받게 된다.<sup>(1)</sup> 첫째는 제트에 직접적인 영향을 줄 수 있는 인접 제트간의 상호작용이다. 둘째는 벽제트 영역(wall jet region)에서의 인접 벽제트간의 충돌에 의한 상호작용이다. A의 경우 이러한 현상을 가시적으로 보여주고 있다. 벽제트 영역에서 인접 벽제트의 충돌로 인한 2차 와류의 발생을 확인 할 수 있고 채널내의 유동이기 때문에 각각의 제트의 상호작용에 의한 유동이 셀(cell)을 형성한다. 이로 인하여 제트로의 재유입이 발생하는 것을 알 수 있다. B에서 D의 위치로 유동이 이동하면서 상호작용으

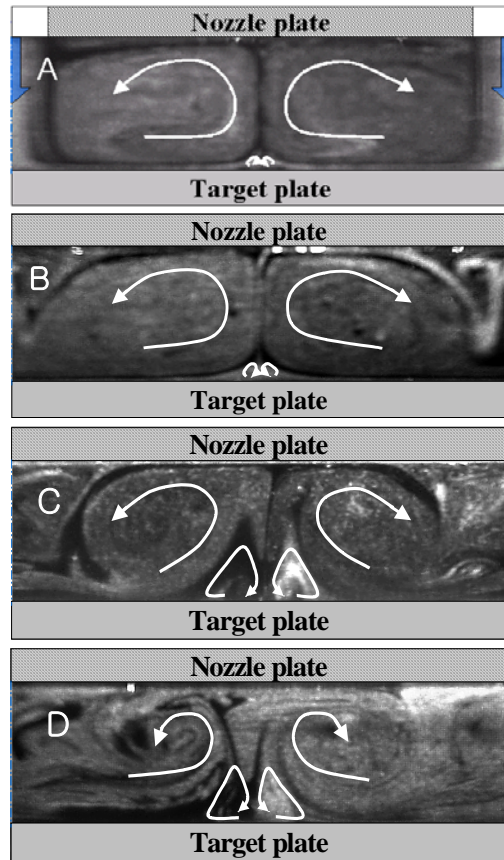


Fig. 3 Visualized flow of a semi-cylindrical concave channel by a row of jets.

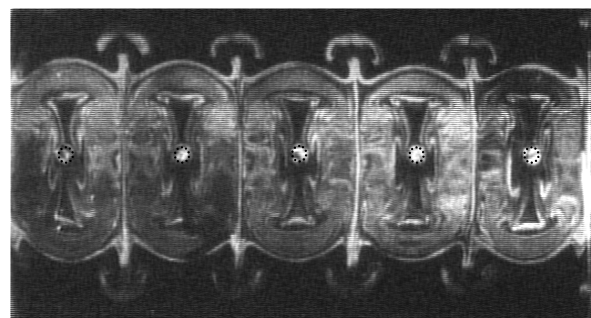


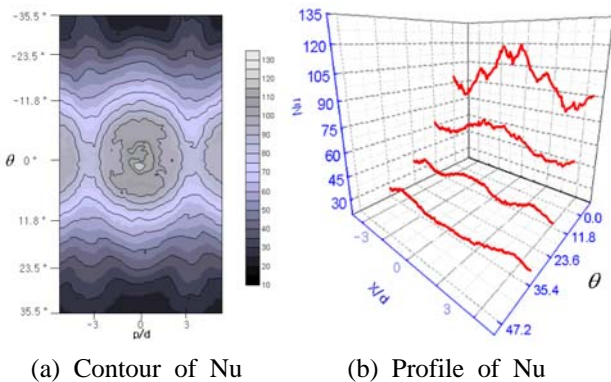
Fig. 4 Visualized flow of a concave channel by a row of jets with laser sheet (E).

로 발생하는 와류가 약해지면서 상대적으로 2차 와류에 의한 영향이 커짐을 알 수 있다.

Fig. 4는  $H/d=1$ 위치에 발광면을 제트에 수직하게 만들어 이미지를 얻어낸 것이다. 이것은 제트와 제트 사이의 영역에서 벽제트가 서로 충돌함으로써 2차와류를 형성하게 되고 이 와류가 채널을 통해서 발달한다는 것을 보여준다.

3.1.2 일열 충돌제트의 열전달 특성

Fig. 5(a)는 제트의 Re수가 20,000인 조건에서



(a) Contour of Nu (b) Profile of Nu  
**Fig. 5** Contour and profile of Nu as function angle for a row of jets ( $Re=20,000, H/d=2$ )

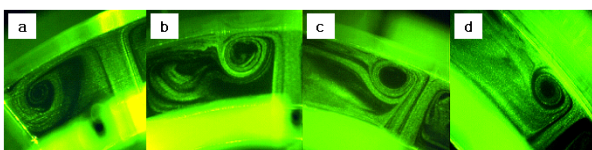
충돌면에서 측정된 Nu수의 분포를 나타내고 있다. Nu수의 분포를 보면 2차 와류에 의한 채널유동 영역에서는 Nu수가 채널을 따라 천천히 감소함을 확인할 수 있다. 반면에 제트에 영향을 받은 채널 유동 영역에서는 Nu수가 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있고  $\theta=23.5^\circ$  이후 영역에서는 2차 와류의 영향을 받는 영역보다 Nu수가 작아지게 된다.

Fig. 5(b)는 각  $\theta$ 의 위치에서 충돌면의 국소 Nu수를 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서 보는 것처럼 2차 와류의 발달로 인하여 이 영향을 받는 영역에서 Nu수가 상대적으로 완만하게 감소한다는 것을 보여주고 있다. 이는 Fig. 3, 4에서 알 수 있는 유동특성과도 잘 일치한다.

3.2 배열충돌제트

3.2.1 배열충돌제트의 유동가시화

배열충돌제트의 유동특성을 이해하기 위하여 채널내의 유동을 가시화하였다. Fig. 6은 사각 배열 제트에 대하여 노즐과 충돌면(impinging surface)의 거리가  $H/d=2$ 일 때 채널을 따라 흐르는 유동을 가시화한 것이다. 이때 Fig. 2(a)에서 제시된 바와 같이 한쪽 유로에 벽을 설치하여 1,2,3 그리고 4열 분사노즐을 통해 분사된 제트가 채널유동의 영향을 받을 수 있도록 하였다. Fig. 6에서 a,b,c 그리고 d는 Fig. 2(a)의 각 열의 노즐위치( $a=-23.5^\circ$ ,



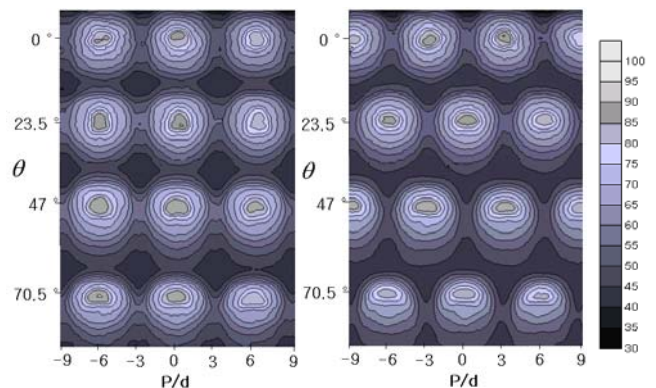
**Fig. 6** Visualized flow of a semi-cylindrical concave channel by inline array jets

$b=0^\circ, c=23.5^\circ$  and  $d=47^\circ$ )의 상류영역에서의 이미지를 얻어낸 것이다. 이때  $P/d=0$ 인 지점을 따라서 채널유동방향과 수평하게 발광면을 만들었다. a의 경우 첫 번째 열의 노즐 상류영역에서 유동특성을 보여주고 있다. 이 경우 채널유동이 제트에 거의 영향을 주지 않는 것을 확인할 수 있다. 반면에 b, c 그리고 d의 경우에는 두 번째, 세 번째 그리고 네 번째 열의 노즐 상류영역에서의 유동특성으로써 점차 채널유동이 제트를 채널을 따라 밀어내면서 재유입되는 것을 확인할 수 있다.

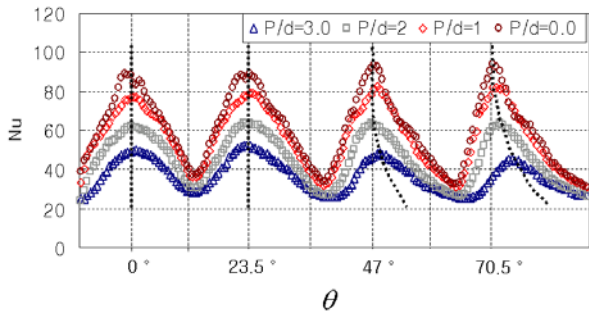
3.2.2 배열충돌제트의 열전달 특성

Fig. 7은 충돌면에서 사각과 엇갈림배열 제트의 Nu 수 분포를  $Re=10,000, H/d=2$ 의 경우에 대하여 나타낸 것이다. 분사제트 중심 기준 동심원의 축대칭 모양이 많이 변형됨은 그 부분에서의 채널유동의 영향이 뚜렷하게 나타남을 보여준다. 또한 이는 채널유동에 의하여 단일 충돌제트가 가지고 있는 열전달 분포 특성이 크게 바뀔을 의미한다.

또한 Fig. 7에서 보는 것처럼 채널유동의 영향을 받는 엇갈림과 사각배열의 경우에는 2차 와류에 의한 영향을 거의 받지 않음을 볼 수 있다. 이는 2차 와류에 의한 열전달 특성에 비하여 각 열의 제트에 의한 영향이 Nu수 분포에 주도적인 역할을 하기 때문이다. 그리고 제트 배열의 변화에 따라서 Nu수 분포가 변하게 되는데 Fig. 7(a)의 경우 네 개의 충돌제트의 상호작용으로 인하여 그 사이 영역에서 낮은 Nu수 분포를 보이는 반면 Fig. 7(b)의 경우에는 세 개의 제트 사이영역에서 낮은 Nu수 분포가 나타나며 이러한 영역이 물결 모양으로 좁고 넓게 분포하게 된다.



(a) Inline array pattern (b) Staggered array pattern  
**Fig. 7** Contours of Nu for inline and staggered array with four lines of nozzles ( $Re=10,000, H/d=2$ )



**Fig. 8** Local Nu number distribution by inline array jets ( $Re=10,000$ ,  $H/d=2$ )

Fig. 8은 사각배열에서 국소 Nu수 분포를 나타내는 그래프이다.  $P/d$ 가 0에서의 Nu수의 극대값이 나타나는 지점의 위치는 각 충돌제트의 중심 위치와 거의 일치한다. 그 이유는 분사노즐과 충돌면의 간격이 크지 않을 경우, 제트의 운동량이 채널유동의 영향을 거의 받지 않은 상태에서 충돌면까지 분사되기 때문이다.<sup>(8)</sup> 그러나 각 제트의 폭방향 중간 지점 즉,  $P/d=3$ 의 사이유로에서는 채널유동의 영향으로 Nu수의 극대값이 나타나는 지점이 점차 채널유동방향으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 Yoon 등<sup>(3)</sup>의 실험결과와 일치하는 것을 알 수 있으며 이는 배열제트에 의하여 형성되는 채널 내에서의 유동특성이 곡률형상에 의해서 발생할 수 있는 유동특성에 비하여 강하기 때문이다.

#### 4. 결 론

(1) 채널유동에서 일렬의 충돌제트의 경우 인접한 벽제트의 충돌로 인하여 발생한 2차 와류가 채널유로에서 형성된 1차 와류로 인하여 유지된다.

(2) 배열제트의 경우 2차 와류에 의한 열전달 특성은 제트 배열에 의한 열전달 특성에 비하여 매우 작기 때문에 Nu수 분포는 제트의 배열의 영향을 받는다.

(3) 배열제트의 경우 채널유동으로 인하여 Nu수의 극대점 위치가 이동함에 따라서 단일 충돌제트가 가지고 있는 열전달 분포 특성이 크게 변한다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정 연구실 사업 지원의 결과이며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Koopman, R. N. and Sparrow, E. M., 1975, "Local and Average Transfer Coefficients due to an Impinging Row of Jets," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 8, pp. 1261~1272.
- (2) Brevet, P., Dejeu, C., Dorignac, E., Jolly, M. and Vullierme, J.J., 2002, "Heat transfer to a row of impinging jets in consideration of optimization," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 4191~4200.
- (3) Yoon, P. H., Rhee, D. H. and Cho, H. H., 2000, "Effects of Arrays of Impinging Jets with Crossflow on Heat/Mass Transfer," *Transactions of the KSME, B*, Vol. 24, No. 2, pp. 195~203.
- (4) Bailey, J. C. and Bunker, R. S., 2002, "Local Heat Transfer and Flow Distributions for Impinging Jet Arrays of Dense and Sparse Extent," ASME paper No. 2002-GT-30473.
- (5) Tabakoff, W. and Clenvenger, W., 1972, "Gas Turbine Blade Heat Transfer Augmentation by Impingement of Air Jets Having Various Configurations," *J. Engineering for Power*, pp. 51~58.
- (6) Cornaro, C., Fleischer, A. S. and Goldstein, R. J., 1999, "Flow Visualization of a Round Jet Impinging on Cylindrical Surfaces," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 20, pp. 66~78.
- (7) Taslim, M. E. and Setayeshgar, L., 2001, "Experimental Leading-Edge Impingement Cooling Through Racetrack Crossover Holes," ASME paper No. 2001-GT-0153.
- (8) Metzger, D. E. and Korstad, R. J., 1972, "Effects of Crossflow on Impingement Heat Transfer," *J. Engineering for Power*, pp. 35~41.
- (9) Lim, K. B. and Lee, D. H., 1997, "Concave Surface Curvature Effect on Heat Transfer from a Turbulent Round Impinging Jet," *Transactions of the KSME, B*, Vol. 21, No. 5, pp. 691~699.