

## 회전하는 충돌제트/유출냉각기법에서 분사홀 변화에 따른 열/물질전달 특성

홍성국\* · 조형희\*\*

### Heat/Mass Transfer Characteristics for Variation of Injection Hole in Rotating Impingement/Effusion Cooling System

Sung Kook Hong\*, Hyung Hee Cho\*\*

*Key Words* : *Impingement/effusion cooling* (충돌제트/유출냉각), *Heat/mass transfer* (열/물질전달), *Rotation* (회전), *Coriolis force* (코리올리력)

#### ABSTRACT

The present paper deals with the heat/mass transfer characteristics for the rotating impingement/effusion cooling system. By changing the size and number of injection hole, its effects on heat/mass transfer are investigated and three different injection hole cases are considered such as LH, DH and SH, respectively. Reynolds number based on the effusion hole diameter is fixed to 3,330 and two jet orientations are considered. A naphthalene sublimation method is used to obtain the heat/mass transfer coefficients on the effusion plate. The LH case shows that the local heat/mass transfer is significantly varied by the rotation. Moreover, the low and non-uniform Sh distributions occur because the impinging jet is deflected by Coriolis force. Meanwhile, for DH and SH cases, the local heat/mass transfer coefficients are enhanced significantly compared to LH case and the rotation effect decreases with increasing the jet velocity. The averaged Sh value of DH and SH case rises up to 45%, 85% than that of LH case. However, the uniformity of heat/mass transfer deteriorates due to the steep variation of heat/mass transfer.

#### 1. 서 론

가스터빈 엔진에서 터빈입구 온도의 상승은 터빈의 효율 및 성능을 향상시키므로 터빈입구의 온도는 지속적으로 상승되어 오고 있다. 이러한 고온의 연소가스로

부터 가스터빈 엔진을 보호하기 위해 많은 복합냉각기술이 적용되고 있으며 복합냉각기술 중에 하나인 보호하고자 하는 가스터빈 요소부품의 내부 및 외부표면에 막냉각과 충돌제트를 동시에 적용하는 기술로써 매우 높은 냉각성능을 갖게 된다. 최근 들어, 터빈입구 온도의 증가로 인해 정지된 연소실 벽면 (combustor liner)이나 1단 베인 (vane) 이외에도 1단 터빈 블레이드 (blade)에도 충돌제트/유출냉각기법이 적용이 되고 있는 추세이다.

\* 연세대학교 대학원

\*\* 연세대학교 기계공학과

E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

그러나 지금까지 충돌제트/유출냉각에 관한 연구는 정지된 경우에 대한 연구들<sup>(1)~(5)</sup>이 대부분이며 회전하는 충돌제트/유출냉각기법에 대한 연구는 아직까지 많은 연구가 진행되지 못하고 유출홀이 없는 단순배열제트에 대한 회전효과에 대한 연구가 제한적으로 이루어졌다.

Epstein 등<sup>(6)</sup>은 회전하는 터빈블레이드의 선단영역 (leading edge)에 대해 충돌제트를 적용한 연구를 최초로 발표하였다. 분사된 제트가 코리올리력 (Coriolis force)에 의한 제트 휨 (jet deflection) 현상이 일어나고 회전현상으로 인해 충돌면에서의 열전달이 감소됨을 보고하였다. 또한, Mattem 등<sup>(7)</sup>은 나프탈렌 승화법을 이용하여 분사제트간의 간격, 제트와 충돌면간의 거리 및 제트 Reynolds 변화에 따른 열/물질전달 계수를 측정하였다. Parsons 등<sup>(8)</sup>은 블레이드의 선단영역 (leading edge)이 아닌 중심영역 (midcore)을 모사하여 다열 배열제트에 대한 열전달 특성을 보고하였다. 최근에는, Iacovides 등<sup>(9)</sup>이 LDV를 이용하여 매우 높은 Rotation 수 ( $Ro=0.18$ )에서의 충돌제트 유동특성에 대한 연구를 진행하였다.

이와 같이, 기존의 연구들은 단순 충돌제트에 대해서만 이루어졌기 때문에 최신의 가스터빈에 적용되고 있는 1단 터빈블레이드와 같이 다열의 막냉각홀이 적용되는 형상에 대한 최적의 설계를 위해서는 다수의 유출홀을 갖는 충돌/유출면에서의 상세한 열전달 정보가 필요하다. 또한, 터빈블레이드의 선단영역에 적용되고 있는 충돌제트/유출냉각기법의 경우, 유출홀에 비해 과도하게 큰 분사홀이 적용되고 있기 때문에 열전달 성능을 개선하기 위한 분사홀 변화가 요구된다고 하겠다.

따라서, 본 연구에서는 회전하는 다열의 유출홀을 갖는 충돌제트/유출냉각기법에 대한 기본적인 열/물질전달 특성을 파악하고 보다 향상된 냉각성능을 얻고자 분사홀의 크기와 개수를 변화시켜 가면서 충돌/유출면에서의 열/물질전달 계수가 어떻게 달라지는가에 대한 실험을 수행하였다. 자세한 열/물질전달 특성을 파악하기 위해 본 연구에서는 나프탈렌 승화법을 이용하여 충돌/유출면에서의 국소적인 열/물질전달 계수를 측정하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험장치

Figure 1은 회전실험을 위해 구성된 장치의 개략도로, 직경 1 m의 원판위에 테스트 덕트 (test duct)가 장착되며 타코미터 (tachometer)와 인버터 (inverter)를 통

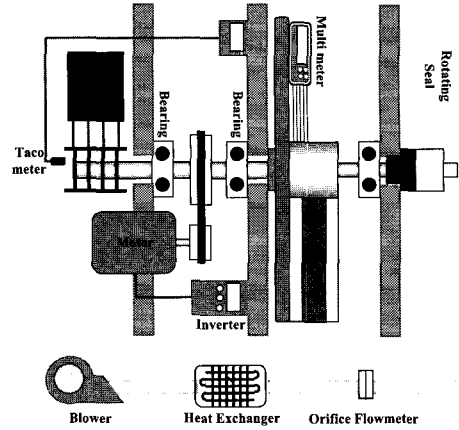


Fig. 1 Test facility

해 회전속도를 제어하였다. 본 실험에서는 블루투스 (bluetooth) 장비를 이용하여 측정면에 설치된 J-type 열전대의 신호를 무선으로 외부의 데이터 수집장치에 실시간으로 전송하도록 하였다. 작동유체는 공기를 사용하였으며 blowing type의 송풍기 (blower)를 통해 유동은 mechanical seal을 거쳐 중공관으로 유입된 후, 테스트 덕트를 지나가도록 하였다. 회전원판에 설치되는 테스트 덕트의 길이 (L), 높이 (H), 너비 (W)는 각각

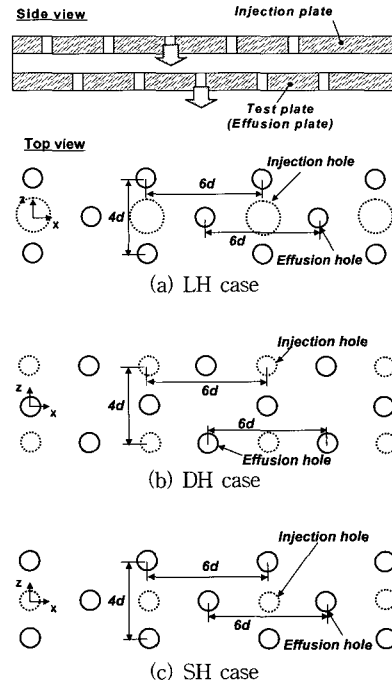


Fig. 2 Schematic view of different test duct

280 mm, 30 mm, 50 mm이며 회전축으로부터 테스트 덕트 중심거리는 350 mm이다.

분사홀의 변화에 따른 영향을 보기 위해 다른 분사홀 크기와 개수를 갖는 3개의 테스트 덕트를 고려하였다. Fig. 2는 증돌/유출 덕트의 개략도로 Top view에서 점선과 실선으로 표시된 것이 각각 분사홀과 유출홀을 의미한다. 첫 번째는 터빈 블레이드의 선단영역에 적용되고 있는 분사홀로써 유출홀보다 2배 큰 직경을 갖는 경우이다. 두 번째는 유출홀과 동일한 직경의 분사홀이 2열로 설치되는 경우이며, 세 번째는 동일한 직경의 유출홀과 분사홀을 설치되는 예이다. 본 연구에서는 각각의 경우에 대해 LH, DH, SH로 명명하였다. 그림에서와 같이 LH와 SH 경우에는 1×8열로 총 8개의 분사홀이 적용되며 DH에는 2×8열로 총 16개의 분사홀이 위치하게 된다. 또한, 모든 경우에 3×8열의 24개 유출홀이 분사홀과 엇갈린 배열을 갖는다. 모든 덕트의 유출홀 직경 ( $d$ )은 5 mm이며 각 경우에 따른 분사홀의 직경 ( $D$ )은 Table 1과 같다.

### 2.2. 실험조건

본 연구에서는 회전현상을 모사하기 위하여 테스트 원판을 560 RPM으로 일정하게 회전시켰다. 이 때, 식 (1)과 같이 정의되는 코리올리력 대 관성력 비인 Rotation 수는 각각의 경우에 따라 0.075, 0.019, 0.0095를 갖는다.

$$Ro = \frac{\Omega D}{V_{jet}} \quad (1)$$

식 (1)에서  $\Omega$ 는 각속도,  $D$ 는 분사홀 직경,  $V_{jet}$ 은 제트의 평균속도를 의미한다. 모든 실험에서는 동일한 냉각 유량을 적용하였으므로 유출홀 직경 ( $d=5$  mm)을 기준으로 유출유동의 Reynolds 수는 동일하다. 각 경우에 대한 자세한 실험조건은 Table 1에 제시된 바와 같다.

회전이 발생되면 분사제트와 회전축의 방향에 따라 분사되는 제트유동 특성이 달라진다. 본 연구에서는 2가

Table 1 Geometry and operating condition

	$D$ (mm)	$Re_{eff}^*$	$Re_{imp}^{**}$	$Ro$	$H/D$
LH	10	3,330	5,000	0.075	3
DH	5	3,330	5,000	0.019	6
SH	5	3,330	10,000	0.0095	6

\* : Reynolds No. based on effused flow

\*\* : Reynolds No. based on injected flow

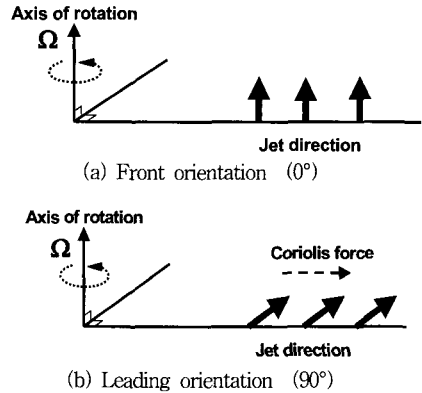


Fig. 3 Schematic view of jet direction

지의 회전축과 분사제트의 방향에 대해 실험을 수행하였다. Fig. 3에서 보이는 바와 같이 회전축과 제트방향이 일치하는 경우 (0°)는 회전축과 제트의 방향이동일하기 때문에 주제트에 대한 코리올리력이 작용하지 않는다. 이에 비해 회전축과 제트방향이 엇갈린 경우 (90°), 분사되는 제트는 그림에서 보는 바와 같이 바깥쪽으로 향하는 코리올리력을 받게 된다. 여기서, 회전축과 분사제트방향이 동일한 경우를 Front로, 엇갈리는 경우를 Leading으로 명명하였다.

### 2.3. 열/물질 전달계수

본 연구에서 국소적인 열/물질전달 특성을 파악하고자 나프탈렌 승화법을 이용하였다. 이 때, 측정된 국소 물질전달계수는 다음과 같이 정의된다.

$$h_m = \frac{\dot{m}}{\rho_{v,w} - \rho_{v,\infty}} = \frac{\rho_s (\Delta y / \Delta \tau)}{\rho_{v,w}} \quad (2)$$

본 연구에서는 유입되는 유동에 나프탈렌이 포함되어 있지 않으므로  $\rho_{v,\infty}=0$ 이다. 여기서, 표면에서의 나프탈렌 증기밀도는 Ambrose 등<sup>(10)</sup>이 제안한 실험식으로부터 얻은 나프탈렌의 포화증기압을 이상기체 방정식에 대입하여 구한다. 물질전달계수의 무차원 형태인 Sherwood 수는 다음과 같이 표현된다.

$$Sh = h_m d / D_{naph} \quad (3)$$

본 연구에서 Sherwood 수의 특성길이는 유출홀 직경 ( $d$ )에 해당되며 나프탈렌의 물질확산계수 ( $D_{naph}$ )는 Goldstein과 Cho<sup>(11)</sup>에서 제시된 것을 사용하였다. 앞에

Table 2 Uncertainty of main parameters

$\rho_{v,w}$	$\rho_s$	$d_v$	$h_m$	$d$	$D_{naph}$
6.9%	1.1%	0.7%	7.0%	1.0%	5.1%
$\frac{\Delta Sh}{Sh} = \left( \left( \frac{\Delta h_m}{h_m} \right)^2 + \left( \frac{\Delta d}{d} \right)^2 + \left( \frac{\Delta D_{naph}}{D_{naph}} \right)^2 \right)^{1/2} = 8.7\%$					

서 계산된 물질전달계수는 Eckert<sup>(12)</sup>가 제시한 열전달과 물질전달간의 유사성을 이용하여 열전달계수로 전환할 수 있으며, 그 식은 다음과 같다.

$$Nu/Sh = (Pr/Sc)^{0.4} \quad (4)$$

본 실험결과의 오차해석은 Kline과 McClintock<sup>(13)</sup>이 제시한 방법을 이용하여 95%의 신뢰도로 불확실성 해석을 하였으며, 중요인자에 대한 불확실성은 Table 2와 같으며 전체적으로 ±8.7% 이내의 불확실성을 갖는 것으로 나타났다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. LH 경우에 대한 열/물질전달 특성

Figure 4는 LH 경우에 대한 열/물질전달 분포를 나타낸 것이다. 정지된 경우 (Fig. 4(a))에는 분사된 제트가 충돌/유출면에 충돌 후, 주변 유출홀로 빠져나가면서 전체적으로 균일한 열/물질전달 특성이 나타난다. 정체 영역에서의 높은  $Sh$ 값과 함께 유출홀 근처에 유동의 가속으로 인한 열/물질전달이 증가됨을 볼 수 있다. 이러한 특성은 회전으로 인해 달라지는데 회전축과 분사제트 방향이 동일한 Front 경우 (Fig. 4(b))에는 코리올리력이 제트 주속도 성분에 영향을 주지 않으므로 정지된 경우와 유사한  $Sh$ 분포를 갖는다. 그러나 회전으로 인한 유동의 불균일성 증가로 비대칭적인  $Sh$ 분포가 나타난다. Leading 경우 (Fig. 4(c))에는 코리올리력에 의한 제트 휨 (jet deflection) 현상이 발생되기 때문에 분사홀 중심점에서 하류방향으로 편향되는 열/물질전달 분포를 보이게 된다.

Figure 5는  $z/d=0.0$ 과  $-2.0$ 에서의 국소적인  $Sh$ 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이,  $Sh$ 분포가 반복적으로 나타나기 때문에 열/물질전달 특성을 보다 잘 관찰하기 위해  $10.0 \leq x/d \leq 30.0$ 의 구간에 대한  $Sh$  값을 도시하였다. 이 때, 그림에서 0으로 표시되는 부분은 유

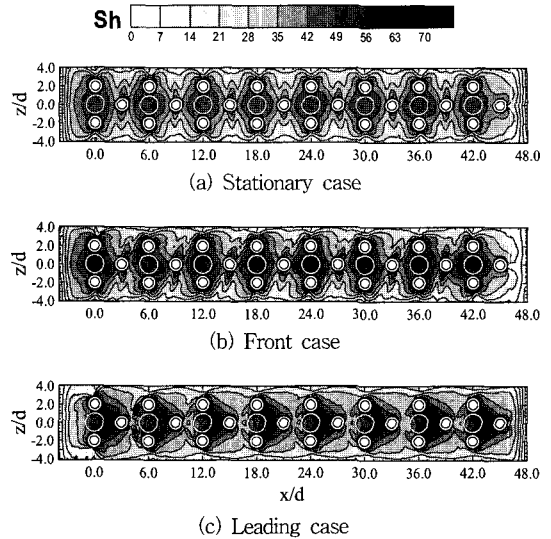


Fig. 4 Contour plots of  $Sh$  for LH case with various rotating conditions

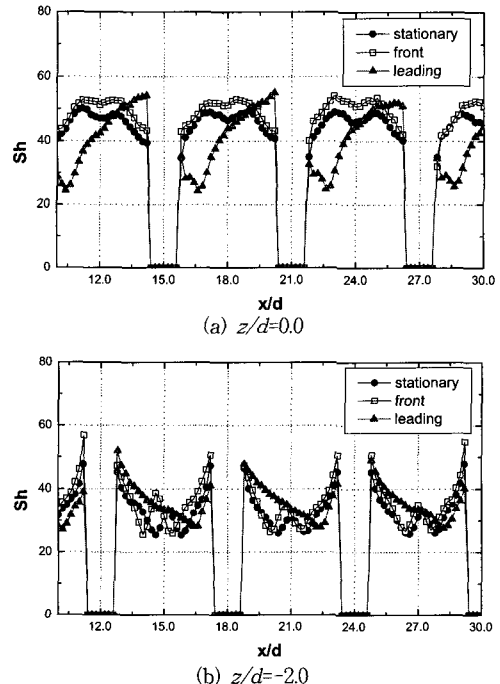


Fig. 5 Local plots of  $Sh$  for LH case with various rotating conditions

출홀이 존재하는 위치이다.

Figure 5(a)와 같이 분사홀이 위치하는  $z/d=0.0$ 에서는 제트와 충돌면간의 거리비 ( $H/D$ )가 작기 때문에 정

체점으로부터  $0.5D$  (분사홀 직경 기준) 정도 떨어진 거리에서 정체영역에서의 유동가속에 의한  $Sh$ 값 상승이 일어난 후, 유동의 경계층 발달로 인해  $Sh$ 값이 감소되는 특성이 나타난다. Front 경우에는 정지된 경우와 유사한  $Sh$ 분포를 보이게 되나 절대값이 증가되는 특성을 보인다. 이는 반경반향으로 확산되어 나가는 제트의 성분이 회전의 영향으로 스웰 속도성분을 갖게 되면서 결국, 제트유동의 난류강도가 증가되기 때문이다. Leading 경우에는 제트 휨 현상으로 인해 분사되는 제트유동이 하류방향으로 쏠리기 때문에 유출홀 전단영역에서는 높은 열/물질전달이 일어나지만 유출홀 후단영역에서는 상대적으로 낮은 열/물질전달 분포가 발생되어 전체적으로 불균일한  $Sh$ 분포가 형성된다.

$z/d=-2.0$  (Fig. 5(b))에서는 정지된 경우와 Front 경우에 유사한  $Sh$ 분포를 보이거나 Leading 경우에는 편향된 벽제트로 인해 유출홀 사이영역에서도 벽제트 간의 간섭에 의한 2차 극대영역이 사라지면서 편향된  $Sh$ 분포가 나타난다.

### 3.2. DH 경우에 대한 열/물질전달 특성

Figure 6은 DH 경우에 대한  $Sh$ 분포를 나타낸 것이다. 정지된 경우 (Fig. 6(a))에는 분사홀 크기 감소로 인해 제트와 충돌면간의 거리비 ( $H/D$ )가 증가함에 따라 기존 단일제트의 결과<sup>(14)</sup>와 같이 정체점을 기준으로 단

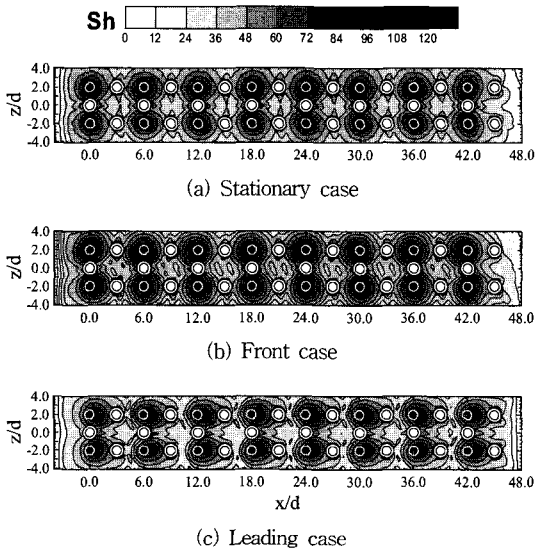


Fig. 6 Contour plots of  $Sh$  for DH case with various rotating conditions

순 감소되는 열/물질전달 특성을 보이게 된다. Front 경우 (Fig. 6(b))에는 유동의 불균일성으로 인해 정체점의 위치가 조금씩 이동되나 정지된 경우와 유사함을 볼 수 있다. Leading 경우 (Fig. 6(c))는 정체영역이 하류로 편향되는 분포를 보이는데 이는 서술한 바와 같이 제트 휨 현상에 기인한다. 그러나 LH 경우와 다르게 분사홀 면적 감소로 인한 제트의 속도가 증가되므로 동일한 회전 속도에서 제트유동에 대한 코리올리력의 영향이 감소된다. 따라서, 제트 휨 특성과 같은 회전효과가 LH 경우에 비해 상대적으로 줄어든다.

Figure 7은 DH에 대한 국소적인  $Sh$ 분포이다. 분사홀을 지나는 위치 ( $z/d=-2.0$ )에서의  $Sh$ 분포는 정체점을 기준으로 단조 감소되는 열/물질전달 분포가 유지되게 된다. Front의 경우에는 앞서 서술한 LH와 달리 정지된 경우와 유사한 값을 갖게 되는데 이는 회전효과 ( $Ro$ 수) 감소와 함께 제트와 충돌면간의 거리비 ( $H/D$ )가 증가함에 따라 분사된 제트의 난류강도 증가현상이 상대적으로 정지된 경우에 비해 커지지 않기 때문이다.

Leading 경우에는 제트 휨 현상으로 정지된 경우에

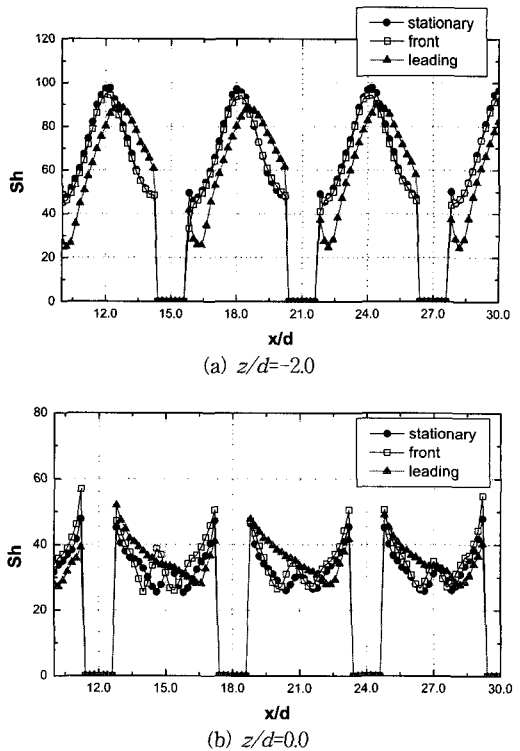


Fig. 7 Local plots of  $Sh$  for DH case with various rotating conditions

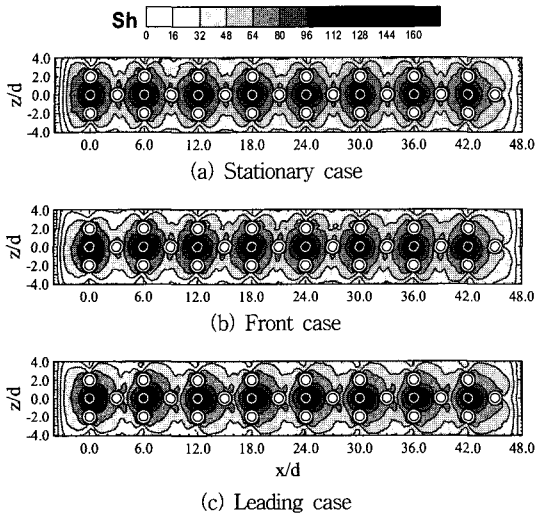


Fig. 8 Contour plots of  $Sh$  for SH case with various rotating conditions

비해 극대점이 하류로 이동하면서 상대적으로 낮은 값이 나타난다. 이는 분사제트가 편향되면서 제트의 운동량 감소로 인한 결과로 사료된다.

$z/d=0.0$ 을 따라가면서 발생하는 열/물질전달 특징으로는 분사홀 끝단지점에서 유출유동의 가속에 의한 극대값과 유출홀 사이영역에서의 벽체트 간의 간섭에 의한 2차 극대값 형성을 볼 수 있다. 그러나 벽체트는 주변에 존재하는 다수의 유출홀로 유동이 바로 빠져나가기 때문에 유출홀 중간영역까지는 잘 발달하지 못하므로 유출홀 사이영역에서 상대적으로 낮은  $Sh$ 영역이 형성된다. Leading 경우, 충돌/유출면에 충돌 후 발달하는 벽체트도 정체점 기준으로 하류방향으로 편향되기 때문에 유출홀 후단 영역에서 낮은  $Sh$ 값을 갖는다.

### 3.3. SH 경우에 대한 열/물질전달 특성

Figure 8은 분사홀과 유출홀이 동일한 크기를 가지며 유출홀 중심선상에 놓여지는 SH 경우에 대한 열/물질전달 분포를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)는 정지된 경우로써 DH처럼 분사홀 중심에서 일정하게 단소 감소되는 열/물질전달 분포를 보인다. SH 경우는 제트 분사속도가 더욱 증가되므로 가장 낮은  $Ro$ 수를 갖게 된다. 따라서, 회전된 경우에도 제트의 영향이 지배적이므로 정지된 경우와 유사한 열/물질전달 분포를 형성한다. Leading 경우에도 정체점과 유출홀 부근에서 하류로 편향되는  $Sh$  분포가 약하게 나타난다.

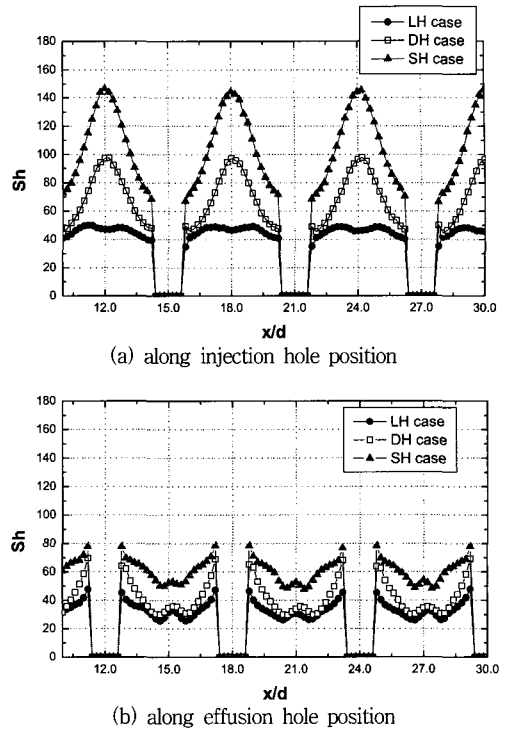


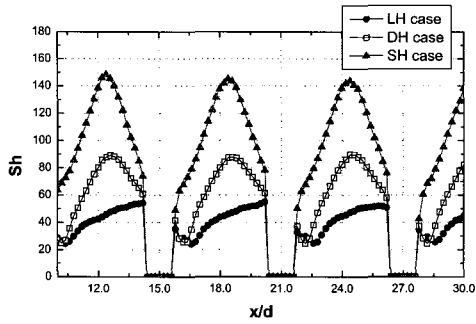
Fig. 9 Local plots of  $Sh$  for different injection hole cases at stationary condition

### 3.4. 분사홀 변화에 따른 열/물질전달 특성

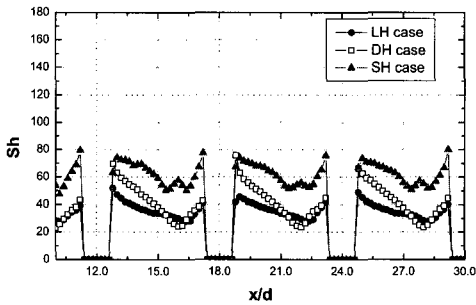
Figure 9는 정지된 경우, 분사홀 중심이 지나는 위치에서의 국소적인  $Sh$ 분포를 나타낸 것이다. 이 때, LH와 SH 경우에는  $z/d=0.0$ 에 해당되며 DH 경우에는  $z/d=-2.0$ 에 해당되는 지점에서의 국소적인  $Sh$ 값이다. 제트 운동량의 증가로 인해 SH 경우에 가장 큰 극대값을 갖게 되며 정체점으로부터 멀어지면서 크게 감소되는  $Sh$  분포가 나타난다. 이에 비해 작은 제트 운동량을 갖는 LH 경우에는 낮은 정체값과 함께  $Sh$ 변화가 완만하게 일어남을 볼 수 있다.

Figure 9(b)는 유출홀만 위치하는 지점에서의  $Sh$ 분포로써, SH와 LH 경우에는  $z/d=-2.0$ , DH 경우는  $z/d=0.0$ 에 각각 해당된다. SH와 LH 경우에는  $Sh$ 의 절대값 차이는 발생되지만 분사홀과 유출홀간의 동일한 배열로 인해 전체적으로 유사한 경향을 보이며 인접 벽체트간의 간섭에 의한 약한 2차 극대점이 나타남을 볼 수 있다. 이에 비해 DH 경우는 벽체트가 잘 발달하지 못하기 때문에 열/물질전달 변화가 크게 일어남을 알 수 있다.

Figure 10은 회전축과 제트방향에 엇갈리게 회전하는



(a) along injection hole position



(b) along effusion hole position

Fig. 10 Local plots of  $Sh$  for different injection hole cases at leading orientation condition

경우 (Leading)에 대한 국소적인  $Sh$ 값이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 제트 운동량이 지배적이므로 회전 조건에서도 분사홀 변화에 따른  $Sh$ 값 차이는 정지된 경우와 유사하다. 그러나  $Ro$ 이 큰 LH 경우에는 다른 경우들과 달리 정체점이 크게 하류로 이동되면서 정지된 경우에 비해  $Sh$ 분포의 변화가 커진다.  $Ro$ 이 작은 SH에서는 제트의 휨 효과가 줄어들면서 LH처럼 유출홀 사이영역에서의 낮은 열/물질전달이 발생되지 않고 정체점이 분사홀 위치에서 크게 벗어나지 않음을 알 수 있다. 따라서, 분사홀 변경을 통해  $Sh$ 값 증가와 함께 회전효과를 감소시킴으로써 냉각하고자 하는 특정위치에서 높은 냉각성능을 얻을 수 있다.

Figure 11은 본 실험에서 수행된 모든 경우에 대한 평균 열/물질전달 값을 나타낸 것으로 이 때, 면적평균의 구간은  $-0.0 \leq x/d \leq 45.0$ ,  $-4.1 \leq z/d \leq 4.1$ 에 해당된다.

국소적인  $Sh$ 값에서 예상되는 바와 같이 분사홀 변경에 따른 평균값 변화는 크게 일어난다. 제트 운동량의 증가로 인해 DH와 SH 경우 LH에 비해 각각 45%, 85% 이상 증가됨을 볼 수 있다. 그리고 회전으로 인한 국소적인 열/물질전달 분포가 변함에도, 평균  $Sh$ 값의 차이는 크지 않다. 따라서, 제트의 운동량이 회전효과에 비해 평균

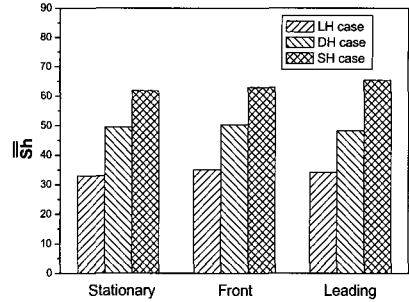


Fig. 11 Overall averaged  $Sh$  for all experimental cases

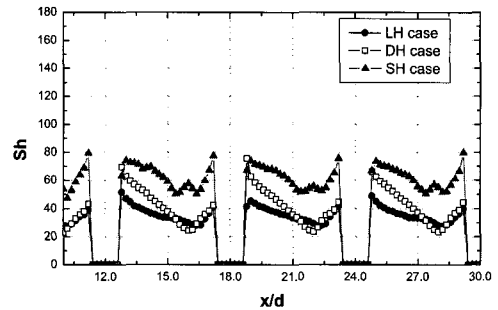


Fig. 12 Uniformity of  $Sh$  for all experimental cases

열/물질전달 값에 지배적인 인자임을 확인할 수 있다.

Figure 12는 측정된 면적에서  $Sh$ 분포의 균일도를 얻기 위해 측정된 모든 값을 이용하여 표준편차를 나타낸 것으로 표준편차가 작은 것이 균일도가 좋다는 것을 의미한다. 그림에서와 같이 균일도 측면에서는 완전한 열/물질전달 분포를 갖는 LH 경우가 가장 좋게 나타나며 DH와 SH 순으로 균일도가 나빠지는데 이는 높은 제트 운동량에 의한 급격한 열/물질전달 변화 때문이다. 또한, 회전된 경우에는 국소 열/물질전달 분포에서 예측될 수 있듯이 불균일하고 낮은  $Sh$ 영역의 발생으로 인해 정지된 경우에 비해 불균일도가 상대적으로 증가됨을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 회전하는 총돌제트/유출냉각기법에서 분사홀 변화에 따른 국소 열/물질전달 특성을 고찰하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 큰 분사홀을 갖는 LH 경우에는 높은 회전효과로 인해 국소적인 열/물질전달 특성이 크게 변화하였다. 회전축과 제트방향이 일치하는 Front 경우

에는 제트의 난류강도 증가로 인해 정체영역에서 열/물질전달이 증가되며, 회전축과 제트방향이 엇갈리는 Leading 경우에는 제트 휨 현상으로 인해 하류방향으로 편향되는 열/물질전달 특성과 함께 유출홀 사이영역에서 낮은 열/물질전달 분포가 발생되었다.

- 2) 분사홀 면적이 감소된 DH 경우에는 제트 운동량 증가로 인해 회전효과가 감소되었다. 이러한 특징은 분사제트의 운동량이 가장 큰 SH경우에 더욱 뚜렷하게 나타나 정지된 경우와 유사한 열/물질전달 특성이 나타났다.
- 3) 동일한 냉각유량 적용시, 분사홀의 변경은 국소적인 열/물질전달 특성 및 평균값에도 큰 차이를 일으켜 DH와 SH의 경우, 평균 열/물질전달 값이 LH에 비해 45%, 85%가 증가되었다. 그러나 충돌/유출면의 균일도 측면에서는 급격한 열/물질전달 분포로 인해 SH가 가장 저하되었다. 또한, 회전된 경우가 불균일한 열/물질전달 분포의 형성으로 정지된 경우에 비해 균일도가 저하됨을 확인할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 전력기반조성사업센터 주관 전력산업기술개발산업의 지원에 의한 결과이며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Hollwarth, B. R. and Dagan, L., 1980, "Arrays of Impinging Jets with Spent Fluid Removal through Vent Holes on the Target Surface Part 1: Average Heat Transfer," *Journal of Engineering for Power*, Vol. 102, pp. 994~999.
- (2) Cho, H. H. and Goldstein, R. J., 1996, "Effect of Hole Arrangements on Impingement/Effusion Cooling," *Proceeding of the 3rd KSME-JSME Thermal Engineering Conference*, pp. 71~76.
- (3) Rhee, D. H., Choi, J. H. and Cho, H. H., 2002, "Flow and Heat (Mass) Transfer Characteristics in an Impingement/Effusion Cooling System with Crossflow," *J. of Turbomachinery*, Vol. 125, pp. 74~82.
- (4) 홍성국, 이동호, 조형희, 2004, "충돌제트/유출냉각기 법에서 핀-휨 설치에 따른 냉각특성에 대한

연구," 제3회 한국유체공학 학술대회, pp. 663~666.

- (5) 홍성국, 이동호, 조형희, 2005, "가스터빈 연소실 냉각을 위한 충돌제트/유출냉각기법에서 사각핀 설치에 따른 열/물질전달 특성," *유체기계저널*, 제8권, 제4호, pp. 39~47.
- (6) Epstein, A. H., Kerrebrock, J. L., Koo, J. J. and Preiser, U. Z., 1985, "Rotational Effects on Impingement cooling," *GTL Report No. 184*.
- (7) Mattern, Ch. and Hennecke, D. K., 1996, "The Influence of Rotation on Impingement Cooling," *ASME Paper No. 96-GT-161*.
- (8) Parsons, J. A. and Han, J. C., 1998, "Rotation effect on jet impingement heat transfer in smooth rectangular channels with heated target walls and radially outward crossflow," *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 41, No. 13, pp. 2059~2071.
- (9) Iacoviets, H., Kounadis, D., Launder, B. E., Li, J. and Xu. Z., 2005, "Experimental Study of the Flow and Thermal Development of a Row Cooling Jets Impinging on a Rotating Concave Surface," *J. of Turbomachinery*, Vol. 127, pp. 222~229.
- (10) Ambrose, D., Lawrenson, I. J. and Sparke, C. H. S., 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene," *Journal of Chemical Thermodynamics*, Vol. 7, pp. 1173~1176.
- (11) Goldstein, R. J. and Cho, H. H., 1995, "A Review of Mass Transfer Measurement Using Naphthalene Sublimation," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 10, pp. 416~434.
- (12) Eckert, E. R. G., 1976, "Analogies to Heat Transfer Processes," in *Measurements in Heat Transfer*, ed. Eckert, E. R. G. and Goldstein, R. J., pp. 397~423, Hemisphere Pub., New York.
- (13) Kline, S. J. and McClintock, F., 1953, "Describing Uncertainty in Single Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (14) Viskanta, R., 1993, "Heat Transfer to Impinging Isothermal Gas and Flame Jets," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 6, pp. 111~134.