

초기 횡방향 유동이 존재하는 충돌제트/유출냉각에서 요철이 설치된 유출면에서의 열/물질전달 특성

이동호*·남용우*·조형희†
(2003년 10월 6일 접수, 2004년 2월 5일 심사완료)

Heat/Mass Transfer Characteristics on Rib-roughened Surface for Impingement/Effusion Cooling System with Initial Crossflow

Dong Ho Rhee, Yong Woo Nam and Hyung Hee Cho

Key Words: Impingement/Effusion Cooling(충돌제트/유출냉각), Initial Crossflow(초기 횡방향 유동), Rib Turbulator(요철), Heat and Mass Transfer Analogy(열/물질전달 유사성)

Abstract

The present study is conducted to investigate the effect of rib arrangements on an impingement/effusion cooling system with initial crossflow. To simulate the impingement/effusion cooling system, two perforated plates are placed in parallel and staggered arrangements with a gap distance of 2 times of the hole diameter. Initial crossflow passes between the injection and effusion plates, and the square ribs (3mm) are installed on the effusion plate. Both the injection and effusion hole diameters are 10 mm and Reynolds number based on the hole diameter and hole-to-hole pitch are fixed to 10,000 and 6 times of the hole diameter, respectively. To investigate the effects of rib arrangements, various rib arrangements, such as 90°transverse and 45°angled rib arrangements, are used. Also, the effects of flow rate ratio of crossflow to impinging jets are investigated. With the initial crossflow, locally low transfer regions are formed because the wall jets are swept away, and level of heat transfer rate get decreased with increasing flow rate of crossflow. When the ribs are installed on the effusion plate, the local distributions of heat/mass transfer coefficients around the effusion holes are changed. The local heat/mass transfer around the stagnation regions and the effusion holes are affected by the rib positions, angle of attack and rib spacing. For low blowing ratio, the ribs have adverse effects on heat/mass transfer, but for higher blowing ratios, higher and more uniform heat transfer coefficient distributions are obtained than the case without ribs because the ribs prevent the wall jets from being swept away by the crossflow and increase local turbulence of the flow near the surface. Average heat transfer coefficients with rib turbulators are approximately 10% higher than that without ribs, and the higher values are obtained with small pitch of ribs. However, the attack angle of the rib has little influence on the average heat/mass transfer.

기호설명

d : 분사홀 및 유출홀의 내경
 D_h : 덕트 수력직경
 D_{naph} : 공기 중에서의 나프탈렌의 물질확산계수
 e : 요철의 높이
 H : 분사판과 유출판 사이의 간격

h_m : 물질전달계수
 M : 분사비, Q_c/Q_i
 Nu : Nusselt 수
 Pr : Prandtl 수
 P_{hole} : 분사홀 또는 유출홀 사이의 간격
 P_{rib} : 요철 사이의 간격
 Q_c : 횡방향 유동의 유량
 Q_i : 분사제트의 유량
 Re_d : Reynolds 수, $Re_d = \rho V_j d / \mu$
 Re_{Dh} : 수력직경에 기초한 Reynolds 수

* 회원, 연세대학교 대학원
† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과
E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr
TEL: (02)2123-2828 FAX: (02)312-2159

- Sc : Schmidt 수
 \overline{Sh} : Sherwood 수, 식 (2)
 $\overline{\overline{Sh}}$: 폭방향 평균 Sherwood 수
 Sh : 전체 평균 Sherwood 수
 t : 분사판의 두께
 V_c : 횡방향유동의 유속
 V_i : 분사제트의 유속
 W : 유로의 폭
 w : 요철의 폭
 x, z : 유출홀 중심으로부터의 좌표 (Fig. 1(b))

1. 서론

가스터빈 엔진의 열효율과 추력의 향상을 위하여 압축기의 압력비, 연소가스의 터빈 입구온도의 상승은 필수적이다. 그러나 이는 터빈 블레이드(blade)와 베인(vane)에 열부하를 가중시키고 이로 인해 부품의 수명을 단축시키게 된다. 따라서, 고온의 연소가스로부터 블레이드와 베인을 보호하고 적정 수명을 유지하기 위한 냉각방법에 대한 연구가 지속되어왔으며, 대표적인 냉각방법으로는 막냉각(film cooling), 충돌제트냉각(impingement cooling), 내부관 대류냉각(internal channel convective cooling) 등을 들 수 있다. 최근에는 더 높은 냉각효율을 얻기 위해 복합냉각기술인 충돌제트/유출냉각기법에 대한 연구가 진행되고 있다. 충돌제트/유출냉각기법은 연소실이나 터빈블레이드와 같은 고온요소와 내부표면을 충돌제트를 이용하여 냉각시킨 후, 막냉각을 통하여 고온가스와 접촉하는 표면을 보호하는 방법으로써 충돌제트냉각과 막냉각의 효과를 동시에 얻을 수 있는 이점을 갖는다.

지금까지 충돌제트/유출냉각에 관한 기초적 연구들이 수행되어왔지만,⁽¹⁻⁵⁾ 실제 연소실이나 터빈 블레이드의 내부유로에는 횡방향 유동이 존재하며, 이에 따른 냉각특성에 대한 연구가 필요하다. 지금까지 횡방향 유동이 존재하는 경우의 열전달 특성에 관한 연구는 주로 내부유로에서의 배열 충돌제트의 경우에 대하여 이루어져 왔다. Metzger와 Korstad,⁽⁶⁾ Florschuetz 등,⁽⁷⁾ Haiping 등⁽⁸⁾은 배열 충돌제트에서 횡방향 유동이 열전달 특성에 미치는 영향에 대해서 고찰하였으며, 그 결과 횡방향 유동이 상류영역에서의 열전달에 좋지 않은 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 윤필원 등⁽⁹⁾

과 이동호 등⁽¹⁰⁾은 배열 충돌제트 냉각에서 횡방향 유동에 따른 열전달 특성을 고찰하였으며, 이때 횡방향 유동이 없는 경우와 비교하였다. 그 결과, 횡방향 유동은 충돌면에서의 열전달에 매우 안 좋은 영향을 끼치며, 횡방향 유동이 없는 경우에 비해 최대 10% 이상 냉각성능이 감소하는 것으로 나타났다.

충돌제트/유출냉각의 경우도 횡방향 유동에 따른 냉각특성의 변화경향은 배열 제트의 경우와 유사한 것으로 나타났다. Rhee 등⁽¹¹⁾에 따르면, 충돌제트/유출냉각에서 횡방향 유동이 존재하는 경우, 배열제트 냉각의 경우에 비해서는 냉각성능이 높지만, 횡방향 유동의 유량이 증가할수록 충돌제트에 의한 열/물질전달 촉진현상이 크게 저하되고, 유출홀 사이에 열/물질전달계수가 낮은 영역이 형성되는 것으로 나타났다.

이렇게 국소적으로 열/물질전달계수가 낮은 영역이 발생하는 경우, 불균일한 냉각으로 인해 요소의 내구성 등에 매우 좋지 않은 영향을 미치게 된다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 영역을 축소시키고 보다 더 균일한 냉각성능을 얻을 수 있는 방법으로 유출판의 표면에 요철(rib turbulator)을 설치하는 경우에 대한 연구를 수행하였다.

요철이 설치된 표면 및 내부 유로에서의 배열 충돌제트 냉각에 대한 연구가 몇몇 연구자에 의해 이루어졌지만,⁽¹²⁻¹⁵⁾ 유출홀이 있는 경우에 대한 연구는 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 영역을 감소시키고 보다 더 균일한 냉각성능을 얻을 수 있는 방법으로 초기 횡방향 유동이 존재하는 충돌제트/유출냉각방법에 대하여 유출판의 표면에 요철(rib turbulator)을 설치하는 경우에 대한 실험을 수행하였다. 이 때, 요철의 배열 및 충돌각, 횡방향 유동의 유량을 변화시켜가며 실험을 수행하였고 요철이 설치되지 않은 경우와 냉각성능을 비교하였다.

본 연구에서는 전체적인 열/물질전달 특성뿐만 아니라 국소적인 열/물질전달 특성을 고찰하기 위하여 물질전달실험방법 중의 하나인 나프탈렌 승화법을 이용하여 유출판 표면에서의 국소 물질전달계수를 측정하였다. 나프탈렌 승화법은 열전달 실험에서의 전도 및 복사오차를 제거할 수 있는 장점을 갖으며, 나프탈렌 표면은 등온조건에, 그 외의 부분들은 단열조건에 해당한다.

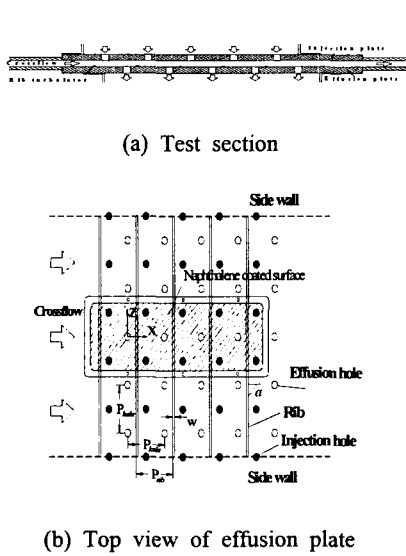


Fig. 1 Schematic view of test section

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 크게 분사부, 유출부, 횡방향 유동부로 구성된다. 실험장치의 자세한 구성 및 사양은 Rhee 등⁽¹¹⁾에 제시되어 있다.

Fig. 1은 시험부 및 유출판(effusion plate)의 개략도를 나타내는 그림이다. Fig. 1(a)에 제시된 바와 같이 시험부는 윗면에 분사판, 아래 부분에 유출판이 설치되어 있으며 그 사이에 횡방향 유동이 지나는 덕트가 설치되어 있다. 이 때 덕트의 단면은 300 mm(W)×20 mm(H)이며, 수력직경(D_h)은 37.5 mm이다. 횡방향유동 덕트의 입구에는 균일한 유동을 얻기 위해 면적비 6:1인 수축부가 존재하며, 횡방향유동 덕트의 입구에서 첫 분사홀까지의 거리는 400 mm($10.7D_h$)이다. 횡방향유동 덕트의 입구부에 트립와이어(trip wire)와 사포(sand paper)를 부착하여 측정영역에서는 완전 발달된 난류유동을 얻을 수 있었다.

유출판 내부표면에서의 열전달계수는 유출판 외부에서의 횡방향 유동(주유동)에 영향을 받지 않기 때문에⁽¹⁶⁾ 유출판 외부에서의 유동 영향을 고려하지 않았다.

Fig. 1(b)는 유출판의 개략도를 나타내는 그림이다. 여기서 검은 원은 분사홀의 상대적 위치

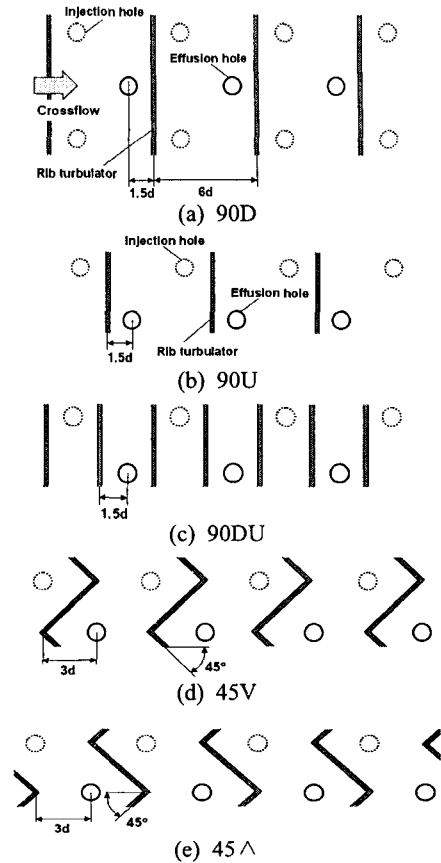


Fig. 2 Rib configurations

를 나타낸다. 분사홀과 유출홀의 직경(d)은 10 mm이며, 판의 두께는 20 mm($t/d=2.0$)이다. 분사판과 유출판은 각각 사각배열인 25(5×5)개의 홀을 갖으며, 홀 직경 대 간격(P_{hole}/d)은 6.0이다. 이 때, 분사판과 유출판의 홀 배열은 엇갈림 배열(staggered array)이 되도록 하였다.

국소 열/물질전달계수를 측정하기 위하여 나프탈렌이 주조된 시험시편을 유출판에 설치하였다. 시험시편은 4개의 유출홀을 갖도록 하였다. 시험시편에 주조된 나프탈렌의 면적은 $8.4d \times 28d$ 이며 나프탈렌 표면에서의 온도를 측정하기 위해 시편 내에는 T-type 열전대를 설치하였다.

횡방향 유동이 존재하는 층돌제트/유출냉각에서 요철 설치에 따른 열/물질전달 특성을 고찰하기 위해 Fig. 1(b)에 제시된 바와 같이 유출판 위에 횡방향 유동에 수직되도록 요철을 설치하였다. 요철의 형상 및 배열은 다음 절에 제시되어 있다.

2.2 요철형상 및 배열

본 연구에서는 요철설치 및 요철배열변화에 따른 열/물질전달 특성을 고찰하기 위하여 5가지의 요철배열에 대해서 실험을 수행하였다.

요철은 높이(e)와 폭(w)이 3 mm인 정사각 단면을 갖도록 제작하였고, 이 때 요철 높이 대 덕트 수력직경비(e/D_h)는 0.08이다. 요철은 아크릴 혹은 알루미늄으로 제작하여 유출판 위에 양면테이프를 이용하여 부착하였으며, 요철배열은 Fig. 1(b)에 제시된 바와 같이 첫째 분사홀의 상류에서부터 시작되도록 하였다.

Fig. 2는 여러 요철배열에 대한 개략도를 나타내는 그림이다. 여기서 점선으로 표시된 원은 분사홀의 위치를 나타내며, 실선으로 표시된 원은 유출홀을 나타낸다. 유동에 대한 요철의 충돌각(angle of attack)이 90°인 경우와 45°인 경우에 대해서 유출홀에 대한 요철의 상대적인 위치 및 요철사이 간격을 변화시켜가며 실험을 수행하였다.

충돌각이 90°인 경우, 유출홀에 대한 요철의 상대적 위치에 따라, 요철이 유출홀의 하류에 위치하는 경우(90D, Fig. 2(a)), 요철이 유출홀의 상류에 위치하는 경우(90U, Fig. 2(b)), 요철이 유출홀과 분사홀 중간영역에 위치하는 경우(90DU, Fig. 2(c)) 등 세 가지의 요철 배열에 대하여 실험을 수행하였다. 90D와 90U의 경우 요철 사이 간격 대 요철 높이의 비(P_{nb}/e)는 20이며, 90DU의 경우는 10이다.

충돌각이 45°인 경우는 유출홀을 기준으로 유동 방향에 대한 요철의 상대적 배치에 따라 두 가지 경우(45V, 45Λ)에 대하여 실험을 수행하였다. 이 때 요철 사이 간격 대 높이 비(P_{nb}/e)는 20이다.

앞서 언급했듯이, 본 연구에서는 나프탈렌 승화법을 사용하였기 때문에 요철 면은 단열벽면 경계조건으로 유출판 표면과 경계조건이 다르게 된다. 하지만, Cho 등⁽¹⁷⁾이 다른 연구자들의 결과^(18~20)를 통해 제시한 바에 따르면, 요철의 열경계조건 변화에 따른 요철 사이 열전달계수 분포의 차이는 10% 이내인 것으로 나타났다. 또한, Taslim과 Spring⁽²¹⁾와 Liou와 Hwang⁽²²⁾도 열전달계수는 벽면의 경계조건에 크게 영향을 받지 않는다고 제시하였다. 따라서, 본 연구에서도 요철의 경계조건에 따른 열전달계수 분포의 변화는 적을 것으로 예상된다.

2.3 작동 조건

본 연구에서는 초기 횡방향유동의 영향을 고찰하기 위해 분사제트의 유량을 일정하게 유지하고 이에 대한 횡방향유동의 유량을 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 이때 횡방향 유동과 분사제트의 유량 비를 분사비라고 하였으며, 다음과 같이 정의된다.

$$M = Q_c / Q_j \quad (1)$$

요철이 설치된 경우 분사비를 0.5에서 1.5까지 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 이 때, 덕트의 수력직경을 기준으로 한 횡방향 유동의 Reynolds 수는 $Re_{Dh}=6,000 \sim 18,000$ 에 해당한다.

분사비를 변화시키기 위하여 본 연구에서는 분사제트의 총 유량과 유출홀을 통해 나가는 유량을 홀 직경 기준 Reynolds 수 $Re_d=10,000$ 으로 일정하게 유지하고, 횡방향 유동의 유량을 변화시켰다.

2.4 열/물질전달계수

본 연구에서는 국소 열/물질전달 특성을 고찰하기 위하여 물질전달실험방법 중의 하나인 나프탈렌 승화법을 이용하였으며, 결과는 물질전달계수의 무차원 형태인 Sherwood 수로 제시하였다.

Sherwood 수는 다음과 같이 표현된다.

$$Sh = h_m d / D_{naph} \quad (2)$$

여기서, D_{naph} 는 Goldstein과 Cho⁽²³⁾가 제시한 나프탈렌의 물성치에 근거하였다.

물질전달계수는 Eckert⁽²⁴⁾가 제시한 열전달과 물질전달간의 유사성을 이용하여 열전달계수로 전환할 수 있으며, 그 식은 다음과 같다.

$$Nu/Sh = (Pr/Sc)^{0.4} \quad (3)$$

본 실험은 상온에서 이루어졌으며, 25°C 기준으로 $(Pr/Sc)^{0.4}=0.627$ 이다.

Sherwood 수에 대한 오차해석은 Kline과 McClintock⁽²⁵⁾이 제시한 방법을 이용하여 95%의 신뢰도로 불확실성 해석을 하였으며, 전체적으로 $\pm 7.1\%$ 의 불확실성을 갖는 것으로 나타났다.

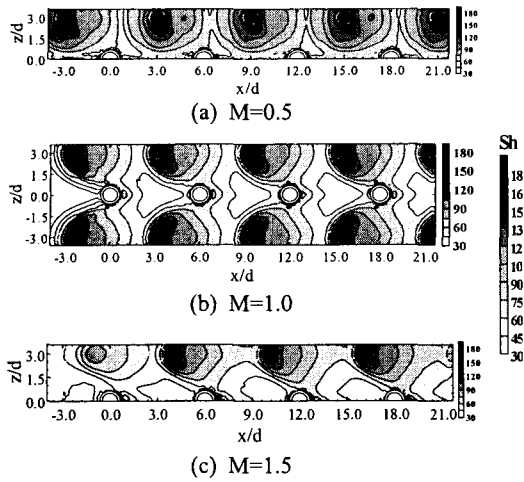


Fig. 3 Contour plots of Sh for impingement/effusion cooling without ribs at various blowing ratios

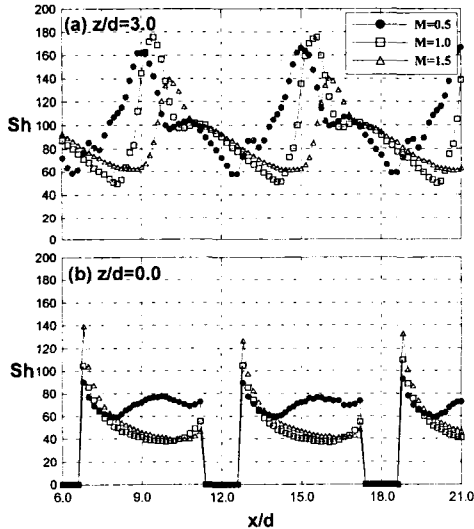


Fig. 4 Local plots of Sh for impingement/effusion cooling without ribs at various blowing ratios

3. 결과 및 고찰

3.1 국소 열/물질전달 특성

3.1.1 요철이 설치되지 않은 경우

Fig. 3은 충돌제트/유출냉각에서 요철이 설치되지 않은 경우 분사비 변화에 열/물질전달계수 분포를 나타내는 그림이다. 그림에서 흰색의 원(점선)과 작은 반원($M=1.0$ 인 경우엔 원형)은 각각 분

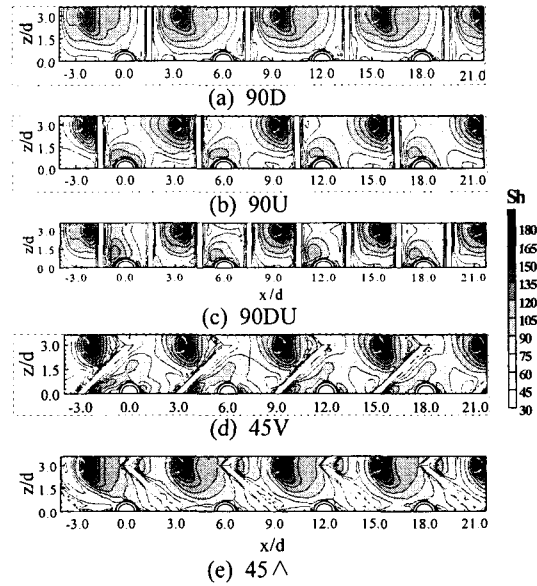


Fig. 5 Contour plots of Sh for impingement/effusion cooling with various rib arrangements at $M=1.0$

사홀의 투영된 위치와 유출홀을 나타낸다.

분사비가 작은 경우($M=0.5$), 횡방향유동의 영향이 약하기 때문에 횡방향유동이 없는 경우⁽¹¹⁾의 분포와 유사하다. 하지만 정체점(stagnation point) 부근에서 열/물질전달계수가 높은 영역이 횡방향으로 퍼지는 것으로 나타났다. 또한, 유출홀 하류 영역에서 열/물질전달계수가 낮은 영역이 형성되는 것을 알 수 있다. 분사비가 증가함에 따라 위에서 언급한 현상들이 심화되며, 정체점이 하류 방향으로 치우치게 된다. $M=1.0$ 인 경우, 열/물질전달 촉진영역이 하류방향으로 치우쳐 비대칭적인 분포가 나타나며, 벽제트(wall jet)가 횡방향 유동에 의해 하류방향으로 끌려가고 유출홀을 통해 밖으로 배출되기 때문에 유출홀 사이에 열/물질전달계수가 낮은 영역이 형성된다. $M=1.5$ 인 경우, 전체적인 분포는 $M=1.0$ 인 경우와 유사하나, 횡방향 유동의 영향이 증가하기 때문에 정체점이 좀더 하류방향으로 치우치며, 열/물질전달이 더욱 감소하는 것으로 나타났다.

이러한 현상은 Fig. 4에서 제시된 국소적인 Sh 수 분포에서 보다 명확히 나타난다. Fig. 4(a)를 보면, $M=1.5$ 인 경우 분사비가 낮은 경우에 비해 정체점이 약 $1d$ 하류 쪽으로 치우치며, 최대값이 10% 이상 감소한다. 또한, 유출홀이 위치하는

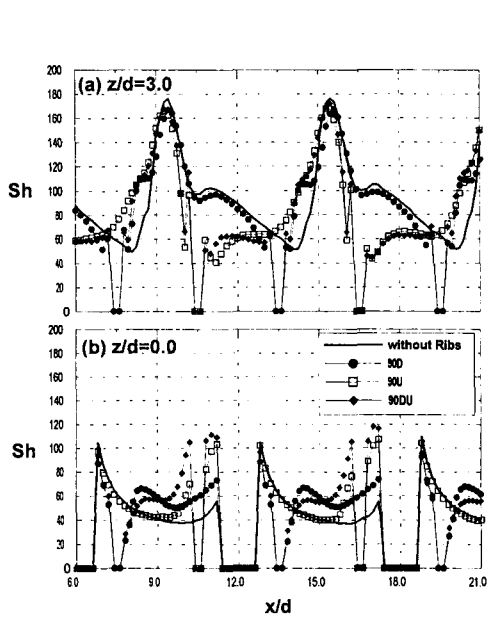


Fig. 6 Local plots of Sh for impingement/effusion cooling with 90° rib arrangements at $M=1.0$

$z/d=0.0$ 에서의 분포를 보면(Fig. 4(b)), $M \geq 1.0$ 인 경우 유출홀 인접하류 부근을 제외하면 열/물질전달 계수가 약 50% 감소한 것을 알 수 있다.

이와 같이 분사비, $M \geq 1.0$ 인 경우, 유출홀 사이에 국소적으로 열/물질전달 계수가 낮은 영역이 형성되기 때문에, 냉각성능을 향상시키기 위해서는 이 영역에서의 열/물질전달 증가가 필수적이다.

3.1.2 요철이 설치된 경우

Fig. 5는 분사비 $M=1.0$ 일 때 여러 가지 배열의 요철이 설치된 경우 열/물질전달 계수 분포를 나타내는 그림이다.

90° 요철이 설치된 경우(Fig. 5(a)~(c)), 정체점이 형성되는 지점은 요철이 설치되지 않은 경우와 거의 같은 것으로 나타났다. 하지만, 유출판 표면 부근에서의 벽체트가 요철 설치로 횡방향 유동에 의해 쓸려 가는 현상이 거의 나타나지 않았다. 따라서, 요철이 설치되지 않은 경우 나타나는 유출홀 사이의 낮은 열/물질전달 영역이 사라지고 균일한 냉각성능을 갖는 것을 알 수 있다.

요철의 위치변화에 따른 영향을 살펴보면, 요철이 유출홀의 하류 쪽에 설치된 경우(90D) 요철에 의한 촉진영역은 거의 나타나지 않지만, 상류 쪽에 위치하는 경우(90U)는 분사된 제트가 요철

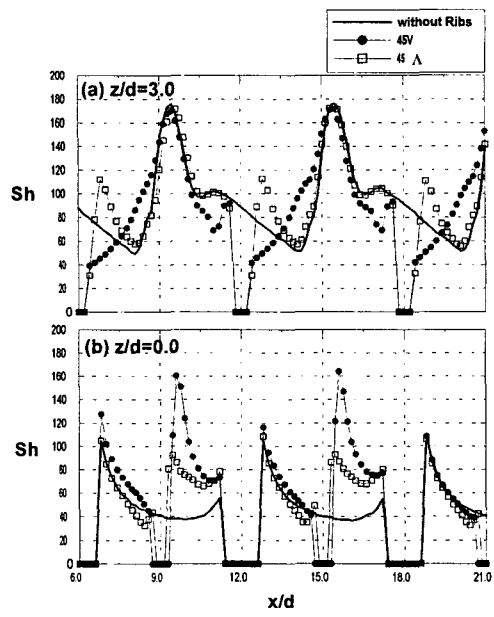


Fig. 7 Local plots of Sh for impingement/effusion cooling with 45° rib arrangements at $M=1.0$

을 지난 후 유출홀 인접영역에서 재부착된 후 유출홀을 통해 배출되기 때문에 유출홀 주위에서 상대적으로 높은 열/물질전달 계수를 갖는 것으로 나타났다. 하지만, 전체적인 열/물질전달 계수 분포는 요철 위치 변화에 상관없이 유사한 것으로 보인다. 요철 사이 간격이 작은 경우(90DU) 요철에 의한 영향이 다른 두 경우에 비해 증가하기 때문에 좀 더 높은 열/물질전달 계수를 갖는 것으로 나타났다.

충돌각이 45° 인 요철이 설치되는 경우, 최청 등⁽²⁶⁾에 의해 제시된 바와 같이 요철에 의해 상향류(upward flow)와 하향류(downward flow)를 갖는 이차유동이 형성된다. 정체점 부근에서의 분포는 충돌제트의 영향이 지배적이므로 90° 요철이 설치된 경우와 유사하지만, 이차유동의 영향으로 인해 이차유동의 하향류 영역에서 상대적으로 높은 열/물질전달 계수를 갖는다.

$45V$ 의 경우 상대적으로 열/물질전달 계수가 낮은 영역인 유출홀 인접영역에서 하향류가 발생하기 때문에 좀 더 균일한 냉각성능을 가지며, $45A$ 의 경우는 충돌제트에 의해 하향류의 영향이 약화되며 유출홀 인접영역에서 상향류(upward flow)가 형성되기 때문에 요철 주변에서의 열/물질전달이 상대적으로 낮은 것으로 나타났다.

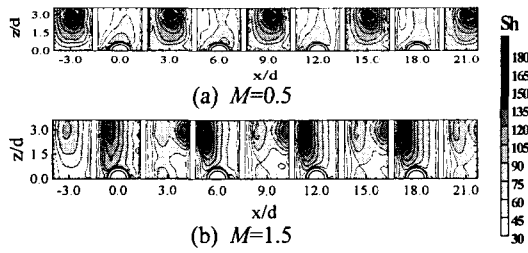


Fig. 8 Contour plots of Sh for 90DU at different blowing ratios

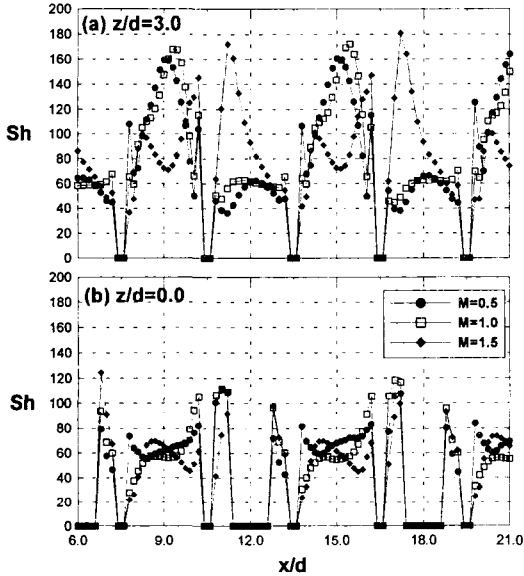


Fig. 9 Local plots of Sh for 90DU with various blowing ratios

Fig. 6은 분사비 $M=1.0$ 일 때 총돌각이 90° 인 요철이 설치된 경우 $6.0 \leq x/d \leq 21.0$ 구간에 대해서 $z/d=0.0, 3.0$ 에서의 국소 Sh 수 분포를 나타내는 그림이다. 그림에서 0으로 표시된 부분은 요철의 위치 혹은 유출홀의 위치를 나타낸다.

Fig. 6(a)에 제시된 바와 같이 $z/d=3.0$ 인 경우, 요철이 설치된 경우와 그렇지 않은 경우 모두 정체점은 거의 같은 곳에 형성된다. 하지만, 요철이 설치되지 않은 경우 정체점 부근에 열/물질전달계수 분포가 하류 쪽으로 치우친 반면, 요철이 설치된 경우 정체점의 상류 쪽에도 열/물질전달계수가 높은 것을 알 수 있다. 또한, 요철의 앞부분에서는 Cho 등⁽¹⁷⁾의 경우와 같이 요철배열에 상관없이 모서리와류(corner vortex)가 발생하여 국소적으로 극대값이 나타났다.

$z/d=0.0$ 인 경우(Fig. 6(b)), 요철의 영향으로 유동의 재부착 현상 등에 의해 요철이 설치되지 않은 경우에 비해 전체적으로 열/물질전달이 촉진되는 것으로 나타났다. 특히, 90D와 90DU의 경우 요철이 없는 경우에 비해 유출홀 하류에서의 열/물질전달이 20% 이상 증가하였다.

Fig. 7은 분사비 $M=1.0$ 일 때 총돌각이 45° 인 요철이 설치된 경우 $6.0 \leq x/d \leq 21.0$ 구간에 대해서 $z/d=0.0, 3.0$ 에서의 국소 Sh 수 분포를 나타내는 그림이다. $z/d=3.0$ 에서의 분포를 보면, 90° 요철의 경우와 마찬가지로, 요철이 설치되지 않은 경우와 정체점은 같은 지점에 형성된다. 45° 의 경우 정체점의 상류 쪽에도 상대적으로 높은 열/물질전달계수를 갖는 것을 알 수 있다. 45° 의 경우는 요철에 의해 하향류가 $z/d=3.0$ 에서 형성되기 때문에 요철의 뒤편에 극대값이 형성된다.

$z/d=0.0$ 에서의 분포를 보면, 45° 의 경우 하향류가 형성되기 때문에 45° 의 경우에 비해 월등히 높은 열/물질전달계수를 갖는다. 45° 의 경우도 요철에 의한 유동교란으로 유출홀의 상류부분에서의 열/물질전달이 요철이 설치되지 않은 경우에 비해 높은 것으로 나타났다.

이와 같이, 요철을 설치함으로써 국소적으로 열/물질전달계수를 증가시킬 수 있었으며, 균일하고 향상된 냉각성능을 얻을 수 있었다.

3.1.3 분사비 변화에 따른 영향

Fig. 8과 Fig. 9는 총돌각이 90° 인 요철이 설치된 경우 분사비 변화에 따른 국소 Sh 수 분포를 나타내는 그림이다. 분사비가 작은 경우($M=0.5$), 요철에 의한 효과는 거의 나타나지 않으며, 오히려 벽제트에 의한 열/물질전달 촉진효과를 감소시켜 정체점 하류에서의 열/물질전달계수가 낮은 결과를 얻었다. $M=1.5$ 인 경우, $M=0.5, 1.0$ 인 경우와 다르게 정체점이 요철인접부분에서 형성되며, 요철 주변에 국소적으로 유동의 재부착에 의해 열/물질전달이 촉진되는 영역이 형성되는 것으로 나타났다.

Fig. 10과 Fig. 11은 총돌각이 45° 인 경우 분사비 변화에 따른 국소 Sh 수 분포를 나타내는 그림이다. 분사비가 낮은 경우, 정체점 부근에서의 열/물질전달계수는 요철이 설치되지 않은 경우(Fig. 3(a))와 거의 유사하다. 하지만, 이차유동의 효과가 거의 없으며 요철 하류에서 재순환 영역

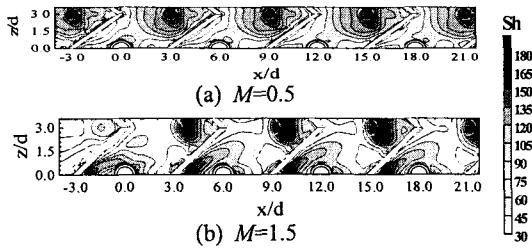


Fig. 10 Contour plots of Sh for 45V with different blowing ratios

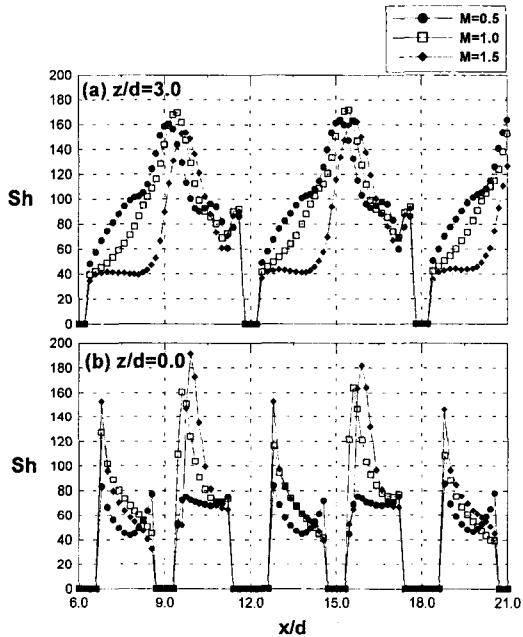


Fig. 11 Local plots of Sh for 45V with various blowing ratios

형성으로 인해 열/물질전달이 감소하기 때문에 요철이 설치되지 않은 경우에 비해 냉각성능이 더 떨어질 것으로 예상된다. 분사비가 증가할수록 정체점 부근에서의 분포는 하류 쪽으로 치우치며 열/물질전달계수가 높은 영역이 축소되는 것으로 나타났다. 또한, 정체점 부근($z/d=3.0$) 요철 하류에는 상향류가 형성되기 때문에 요철 하류영역에서의 열/물질전달이 매우 낮은 것을 알 수 있다. 하향류가 형성되는 $z/d=0.0$ 부근에서는 분사비가 증가할수록 극대값 또한 증가하는 것으로 나타났으나, 열/물질전달 촉진영역의 크기가 작기 때문에 전체적인 열/물질전달계수는 감소하는 것으로 생각된다.

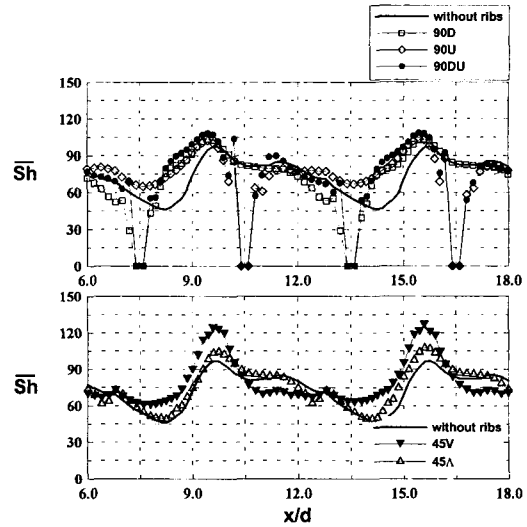


Fig. 12 Spanwise averaged Sh for impingement/effusion cooling with various rib arrangements at $M=1.0$

3.2 평균 열/물질전달

Fig. 12는 분사비 $M=1.0$ 인 경우 다양한 요철배열에 대하여 폭방향으로 평균된 열/물질전달계수 분포를 나타내는 그림이다. 폭방향 평균을 계산하기 위해 $0.0 \leq z/d \leq 3.0$ 구간에서 값을 취하였다. 그림에서 값이 0으로 표시된 곳은 요철이 설치된 것을 의미한다.

요철이 설치되지 않은 경우는 $x/d \cong 8.0, 14.0$ 근방에서 낮은 값을 갖는데, 이는 앞서 언급한 바와 같이 벽제트가 횡방향 유동에 의해 하류로 흘러나가는 현상이 나타나기 때문이다. 90°요철을 설치한 경우, 요철에 의해 벽제트가 흘러나가는 현상이 약화되며, 요철 주변에서 유동의 박리 및 재부착 현상으로 인해 충돌제트의 상류부분 열/물질전달계수가 요철이 없는 경우에 비해 높은 것을 알 수 있다. 요철 배열변화에 따른 영향을 살펴보면, 90D의 경우와 90U의 경우는 평균값의 분포가 거의 유사하며, 90DU의 경우가 요철의 영향이 크기 때문에 나머지 두 경우에 비해 약간 더 높은 값을 갖는 것으로 나타났으나, 그 차이는 크지 않은 것을 알 수 있다. 이는 전체적인 열전달은 충돌제트에 의한 영향이 지배적이기 때문이다.

45°요철이 설치된 경우도 충돌제트에 의한 효과가 크기 때문에 요철배열 변화에 따른 차이는 크게 나타나지 않는다. 하지만, 45V인 경우 이차유동

의 하향류에 의해 열전달이 촉진되는 영역과 충돌 제트에 의해 촉진되는 영역이 폭방향으로 같은 곳에 위치하기 때문에 $x/d \geq 10$, 16 근방에서 상대적으로 높은 값을 갖는 것으로 나타났다.

Fig. 13은 분사비 $M=1.0$ 인 경우 각각의 요철배열에 대한 면적 평균된 열/물질전달계수를 나타내는 그림이다. 이때 면적평균을 위한 구간은 $-3.0 \leq x/d \leq 21.0$, $0.0 \leq z/d \leq 3.0$ 으로 하였다. 국소 열/물질전달계수 분포에서 알 수 있듯이, 요철을 설치하는 경우, 그렇지 않은 경우에 비해 열/물질전달계수가 4~11% 높은 것으로 나타났다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 요철설치에 따라 벽체트가 하류방향으로 흘러나가는 정도가 감소하며, 유동의 재부착 및 이차유동에 의한 열전달 촉진영역이 형성되기 때문이다.

요철이 설치된 경우, 요철 사이 간격이 작은 90DU의 경우가 평균 열/물질전달계수가 제일 높은 것으로 나타났다. 하지만, 요철 사이 간격이 동일한 경우, 요철의 위치 혹은 충돌각 변화에 따른 영향은 거의 없었다.

Fig. 14는 요철이 설치되지 않은 경우와 90DU, 45V의 경우 분사비 변화에 따른 평균 열/물질전달계수 분포를 나타내는 그림이다. 분사비가 낮은 경우($M=0.5$), 요철을 설치하는 경우가 요철이 없는 경우에 비해 약 10% 낮은 값을 갖는 것으로 나타났다. 이는 요철이 없는 경우에는 Fig. 3(a)에 제시된 바와 같이 충돌제트에 의해 열전달이 촉진되는 영역이 넓게 나타나지만, 요철을 설치하는 경우 오히려 벽체트의 진행을 방해하기 때문에 유출홀 주위에 열/물질전달 계수가 낮은 영역이 형성되기 때문이다.

분사비가 증가함에 따라 횡방향 유동에 의한 효과가 증가하기 때문에 평균 열/물질전달계수가 감소하는 경향이 나타나지만, 요철이 설치된 경우가 요철이 없는 경우에 비해 높은 값을 갖는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 초기 횡방향유동이 존재하는 충돌제트/유출냉각방법에서 요철을 설치하는 경우 국소 열/물질전달 특성을 고찰하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 초기 횡방향 유동이 존재하는 충돌제트/유출냉각의 경우, 분사비가 작을 때에는 균일한 열/

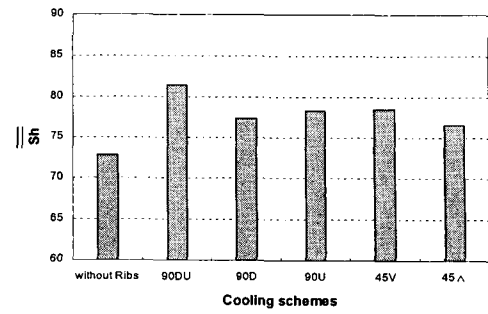


Fig. 13 Overall average Sh for impingement/effusion cooling with various rib arrangements at $M=1.0$

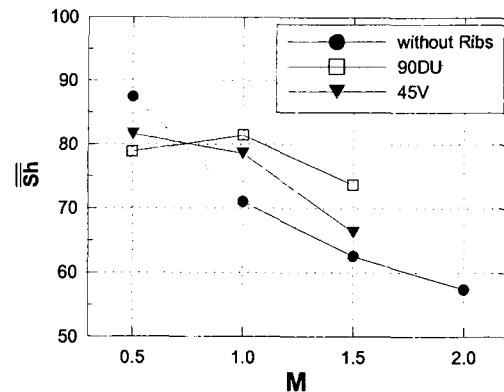


Fig. 14 Overall average Sh for impingement/effusion cooling at various blowing ratios

물질전달계수 분포를 보이지만 분사비가 증가함에 따라 유출홀 사이영역에서 국소적으로 열/물질전달계수가 낮은 영역이 형성되며, 전체적인 냉각성능이 저하된다.

(2) 요철을 설치하는 경우, 분사비가 낮은 경우를 제외하면, 정체점에서의 열/물질전달은 충돌제트의 영향이 지배적이기 때문에 요철이 없는 경우와 거의 동일한 반면 벽체트가 횡방향 유동에 의해 흘러 나가는 현상이 줄어들기 때문에 국소적으로 낮은 열/물질전달계수가 나타나는 영역이 축소되거나 소멸되었다. 이로 인해 요철이 설치되지 않은 경우에 비해 전체적으로 4~10% 높은 냉각성능을 얻을 수 있었다.

(3) 분사비가 낮은 경우에는 요철의 효과가 거의 없고 오히려 벽체트가 요철에 의해 막히는 현상이 발생하여 충돌제트에 의한 효과가 감소하기 때문에 요철이 설치되지 않은 경우보다 약 10%

냉각성능이 감소하는 것으로 나타났다. 그러므로, 요철의 설치는 분사비 등의 작동조건에 따라 고려되어야 할 것으로 생각된다.

(4) 국소 열/물질전달계수 분포에서는 90°요철이 설치된 경우 90D와 90DU의 경우가 유출홀 하류에서의 열/물질전달이 크게 증가하였으며, 45°요철의 경우는 위치변화에 따른 효과가 크지 않은 것으로 나타났다. 또한, 요철 사이의 간격이 작은 경우가 냉각성능이 제일 높으며, 요철 사이 간격이 동일한 경우, 요철의 충돌각변화에 따른 효과는 거의 없는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정 연구실 사업 지원의 결과이며 이에 감사 드립니다.

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," *J. of Engineering for Power*, Vol. 102, pp. 994~999.
- (2) Hollwarth, B. R. and Lehmann, G. and Rosiczkowski, J., 1983, "Arrays of Impinging Jets with Spent Fluid Removal through Vent Holes on the Target Surface Part 2: Local Heat Transfer," *J. of Engineering for Power*, Vol. 105, pp. 393~402.
- (3) 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.
- (4) Cho, H. H. and Rhee, D. H., 2001, "Local Heat/Mass Transfer Measurement on the Effusion Plate in Impingement/Effusion Cooling System," *J. of Turbomachinery*, Vol. 123, pp. 601~608.
- (5) Cho, H. H., Choi, J. H. and Rhee, D. H. 2001, "The Effects of Hole Arrangements on Heat/Mass Transfer of Impingement/Effusion Cooling System," *Proceedings of ExHFT-5*, pp. 975~980.
- (6) Metzger, D. E. and Korstad, R. J., 1992, "Effects of Cross flow in Impingement Heat Transfer," *J. of Engineering for Power*, Vol. 94, pp. 35~41.
- (7) Florschuetz, L. W., Metzger, D. E. and Su, C. C., 1984, "Heat Transfer Characteristics for Jet Array Impingement With Initial Crossflow," *J. of Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 34~41.
- (8) Haiping, C., Wanbing, C. and Taiping, H., 1999, "3-D Numerical Simulation of Impinging Jet Cooling with Initial Crossflow," *ASME Paper No. 99-GT-256*.
- (9) Yoon, P. H., Rhee, D. H. and Cho, H. H., 2000, "Effect of Arrays of Impinging Jets with Crossflow on Heat/Mass Transfer," *Trans of KSME (B)*, Vol. 24, No. 2, pp. 195~203.
- (10) Yoon, P. H., Rhee, D. H. and Cho, H. H., 2001, "Flow and Heat/Mass Transfer Characteristics of Arrays of Impingement Jets with Effusion Holes," *Trans of KSME (B)*, Vol. 25, No. 11, pp. 1606~1615.
- (11) 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.
- (12) Chung, Y. S., Lee, D. H. and Lee, J. S., 1998, "Heat Transfer Coefficient Measurement by a Jet Impinging on a Rib-Roughened Convex Surface," *Trans of KSME (B)*, Vol. 22, No. 3, pp. 373~385.
- (13) Lee, D. H., Won, S. Y. and Lee, J. S., 1999, "Heat Transfer Measurement by a Round Jet Impinging on a Rib-Roughened Concave Surface," *Trans of KSME (B)*, Vol. 23, No. 6, pp. 734~743.
- (14) Haiping, C., Dalin, Z., Dong, H. and Taiping, H., 1996, "Experimental investigation on Impingement Heat Transfer from Rib roughened surface within Arrays of circular jet: Effect of Geometric Parameters," *ASME Paper No. 98-GT-208*.
- (15) Gau, C. and Lee, C. C., 1992, "Impingement Cooling Flow Structure and Heat Transfer Along Rib-Roughened Walls," *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 35, pp. 3009~3020.
- (16) Cho, H. H. and Goldstein, R. J., 1995, "Heat (Mass) Transfer and Film Cooling Effectiveness with Injection through Discrete Holes Part I: within holes and on the back surface," *J. of Turbomachinery*, Vol. 117, pp. 440~450.
- (17) Cho, H. H., Wu, S. J., and Kwon, H. J., 2000,

- "Local Heat/Mass Transfer Measurements in a Rectangular Duct with Discrete Ribs," *J. of Turbomachinery*, Vol. 122, pp. 579~586.
- (18) Han, J. C., Chandra, P. R. and Lau, S. C., 1988, "Local Heat/Mass Transfer Distributions Around Sharp 180 Deg Turns in Two-Pass Smooth and Rib-Roughened Channels," *J. Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 91~98.
- (19) Chandra, P. R., Han, J. C. and Lau, S. C., 1988, "Effect of Rib Angle on Local Heat /Mass Transfer Distribution in a Two-Pass Rib- Roughened Channel," *J. of Turbomachinery*, Vol. 110, pp. 233~241.
- (20) Ekkad, S. V. and Han, J. C., 1997, "Detailed Heat Transfer Distributions in Two-pass Square Channels with Rib Turbulators," *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 40, No. 11, pp. 2525~2537.
- (21) Taslim, M. E. and Spring, S. D., 1994, "Effects of Turbulator Profile and Spacing on Heat Transfer and Friction in a Channel," *J. of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 8, No. 3, pp. 555~562.
- (22) Liou, T. M. and Hwang, J. J., 1993, "Effect of Ridge Shapes on Turbulent Heat Transfer and Friction in a Rectangular Channel," *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 36, No. 4, pp. 931~940.
- (23) Goldstein, R. J. and Cho, H. H., 1995, "A Review of Mass Transfer Measurement Using Naphthalene Sublimation," *Exp. Thermal and Fluid Science*, Vol. 10, pp. 416~434.
- (24) Eckert, E. R. G., 1976, "Analogies to Heat Transfer Processes, in Measurements in Heat Transfer," *ed. Eckert, E. R. G. and Goldstein, R. J., Hemisphere Pub., New York*, pp. 397~423.
- (25) Kline, S. J., and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (26) Choi, C. C., Rhee D. H. and Cho H. H., 2002, "Heat/Mass Transfer and Pressure Drop in A Square Duct with V-Shaped Ribs," *Trans of KSME (B)*, Vol. 26, No. 11, pp. 1542~1551.