

냉각유로방식 변화에 따른 슬롯 막냉각에서의 유동 및 열전달 특성

함진기* · 조형희**
(1999년 11월 12일 접수)

Flow and Heat Transfer Characteristics in a Slot Film Cooling with Various Flow Inlet Conditions

Jin-Ki Ham and Hyung Hee Cho

Key Words: Slot Film Cooling(슬롯 분사 막냉각), Gas Turbine(가스터빈), Combustor Liner(연소실내벽), Heat Transfer(열전달), Naphthalene Sublimation Method(나프탈렌 승화법)

Abstract

An experimental investigation is conducted to improve a slot film cooling system which can be used for the cooling of gas turbine combustor liner. The tangential slots are constructed of discrete holes with different injection types which are the parallel, vertical, and combined to the slot lip. The investigation is focused on the coolant supply systems of normal-, parallel-, and counter-flow paths to the mainstream direction. A naphthalene sublimation technique has been employed to measure the local heat/mass transfer coefficients in a slot with various injection types and coolant feeding directions. The velocity distributions at the exit of slot lip for the parallel and vertical injection types are fairly uniform with mild periodical patterns with respect to the hole positions. However, the combined injection type increases the nonuniformity of flow distribution with the period equaling twice that of hole-to-hole pitch due to splitting and merging of the ejected flows. The secondary flow at the lip exit has uniform velocity distributions for the parallel and vertical injection types, which are similar to the results of a two-dimensional slot injection. In the results of local heat/mass transfer coefficient, the best cooling performance inside the slot is obtained with the vertical injection type among the three different injection types due to the effect of jet impingement. The lateral distributions of Sh with the parallel- and counter-flow paths are more uniform than the normal flow path. The averaged Sh with the injection holes are 2~5 times higher than that of a smooth two-dimensional slot path.

기호설명

D : 분사 홀 직경
 D_{naph} : 공기 중에서의 나프탈렌 확산계수
 h_m : 물질전달계수
 l : 슬롯 립의 길이
 M : 분사율, $(\rho_2 u_2)/(\rho_\infty u_\infty)$
 \dot{m} : 단위시간 당 단위면적으로부터의 나프탈

렌 승화량
 P : 홀과 홀 사이 간격
 Sh : 국소 Sherwood 수, $h_m Z_c / D_{naph}$
 \overline{Sh} : 평균 Sherwood 수
 t : 슬롯 립 두께
 T : 측정위치에서의 유동온도
 u : 유동 속도
 X : 슬롯의 립이 끝나는 위치에서 주유동 방향 거리
 X^* : 슬롯의 립이 시작하는 위치에서 주유동 방향 거리

* 연세대학교 대학원

** 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

TEL : (02)361-2828 FAX : (02)312-2159

- Y : 시험시편 바닥중심에서의 횡방향 거리
- Z : 시험시편 바닥 면에서의 높이
- Z_c : 분사 슬롯의 높이

그리스문자

- θ : 무차원 온도, $(T-T_\infty)/(T_2-T_\infty)$
- ρ : 공기의 밀도
- ρ_s : 고체 나프탈렌 밀도
- $\rho_{v,w}$: 나프탈렌벽면에서의 나프탈렌 증기밀도
- $\rho_{v,\infty}$: 주유동에서의 나프탈렌 증기밀도

하첨자

- ∞ : 주유동
- 2 : 분사 유동
- m : 물질전달
- v : 나프탈렌 증기

1. 서 론

추진기관의 연소실 내벽은 고온의 연소가스로 부터 큰 열부하를 받고 있다. 이와 같은 높은 연소가스 온도로부터 연소실 내벽을 보호하기 위해서는 적절한 냉각방법의 사용이 요구된다. 막냉각(film cooling)은 연소실과 같이 고온 조건에서 사용되는 요소를 보호하기 위하여 사용되는 대표적인 방법이다. 벽면상의 구멍이나 슬롯(slot)을 통하여 분사되는 냉각 유체는 요소 표면에 일종의 단열막을 형성함으로써 고온의 연소가스로부터 표면을 보호하게 된다.⁽¹⁾

일반적으로 연소실을 냉각하는데 사용되는 환형의 슬롯은 냉각공기를 공급받는데 있어서 연소실 내벽과 외벽사이의 플레넘(plenum)으로부터의 작은 구멍을 사용하게 된다. 이 작은 구멍들은 큰 압력구배를 형성하여 균일한 유량을 공급해주며 이로써 안정된 유동장을 얻을 수 있다. 또한 압력구배는 역류를 막아 줌으로써 고온의 연소가스가 슬롯내부로 흡입되는 것을 방지해 준다. 특히 연소실 등 추진기관 요소들의 냉각에서는 전체적인 평균벽면온도를 낮추어야 하는 것은 물론 열용력을 최소로 하기 위해 균일한 벽면온도를 얻는 것이 중요하다. 이러한 슬롯막냉각 방법에서의 막냉각 효율 향상은 설치되는 슬롯의

형상, 슬롯 내 홀의 크기 및 간격, 분사 방법, 주유동에 대한 분사속도비의 적절한 선정에 의해 크게 좌우되게 된다. 따라서 슬롯막냉각에 대한 주요 연구분야는 냉각되는 벽면상의 단열벽면온도(adiabatic wall temperature) 및 열전달 계수(heat transfer coefficient)의 측정, 슬롯출구 및 하류부분에서의 복잡한 3차원 속도, 온도장에 대한 정확한 예측 등이 포함되며 이에 관한 다수의 연구결과가 보고되었다.

Papell,⁽²⁾ Folyan와 Whitelaw,⁽³⁾ Sturgess,⁽⁴⁾ Sivasegaram⁽⁵⁾ 등은 여러 가지 조건에서 슬롯 막냉각에 대한 연구를 수행하여 발표하였다. 특히 Seban⁽⁶⁾은 슬롯 립의 길이에 따른 하류방향에서의 막냉각 효율을 연구하였다. 슬롯 립의 길이가 짧은 경우에는 2차유동이 불균일한 속도분포를 가지고 분사되어서 주유동과 쉽게 혼합됨에 따라 막냉각 효율이 떨어지게 되며, 긴 경우에는 슬롯 내의 압력강하가 커지게 됨을 보였다. Farmer 등⁽⁷⁾은 2차원 슬롯을 통한 막냉각 적용에 있어서, 35°의 경사각으로 분사되는 덕트모양의 슬롯과 형상화된 슬롯에 대하여 연구하였다. Simon⁽⁸⁾은 가스터빈 연소기 전반에 걸쳐 설계시 고려해야 할 인자들과 다양한 냉각방법들을 설명하고 각 방법에 따른 장단점과 막냉각 효율에 대하여 연구하였다.

이와 같이 슬롯형상, 분사율, 분사방법, 냉각유로방식에 따른 국소적인 열전달계수의 분포 및 막냉각효율을 파악하기 위하여 여러 가지 연구를 수행하였지만 슬롯 내부 및 출구에서의 유동을 이해하거나, 국소적인 열전달 현상을 설명하기에 충분한 국소값을 얻지 못했다. 그러므로 슬롯의 각 인자변화에 따른 최적 설치조건을 알아내기 위해서는 이러한 슬롯내·외의 복잡한 속도의 분포를 얻기 위한 연구와 이로 인한 국소적인 열전달 특성에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 주어진 덕트에서 분사율, 분사방법, 냉각유로방식에 따른 슬롯 출구에서의 유동장 측정과 함께 물질전달 방법을 이용하여 슬롯 립(slot lip) 내벽에서의 자세한 국소 열/물질전달계수를 구하였다. 이렇게 함으로써 슬롯 내 유동 및 열전달 현상에 대한 특성을 국소적으로 규명하여 연소실 내벽에서의 열용력 및 열변형 해석과 더불어 냉각성능 향상을 위한 최적 설계조건을 구할 수 있다.

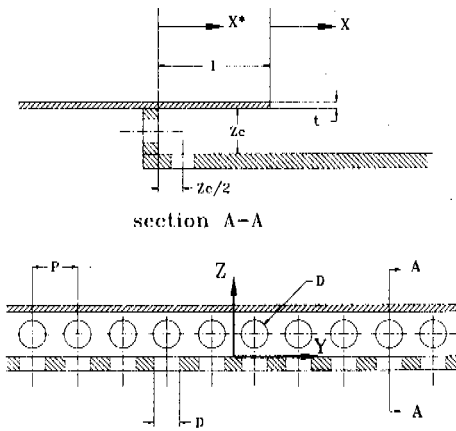


Fig. 1 Slot configuration and coordinate system

2. 실험 장치 및 방법

본 실험에 이용되는 장치는 풍동, 2차유동분사장치, 슬롯 막냉각 시험시편 등으로 구성되어진다. 2차 유동을 분사시키기 위한 장치는 송풍기, 오리피스유량계, 플레넘으로 구성되어진다. 유량은 오리피스 유량계로 측정하였으며, 오리피스를 통과한 공기는 플레넘을 통하여 슬롯내부로 공급된다. 자세한 실험장치의 사안은 합진기 등⁽⁹⁾에 제시되어 있다.

2.1 슬롯 막냉각 시험시편

Fig. 1은 본 실험에서 사용된 시험시편의 개략도로써 아크릴로 제작되었다. 슬롯 내부에는 주유동과 수평, 수직의 일렬로 천공된 홀이 있으며, 슬롯 내부 홀의 크기와 위치가 실험결과에 큰 영향을 줄 수 있으므로 매우 정밀하게 제작하였다. 시험시편의 자세한 조건은 Table 1에 나타내었다. 또한 슬롯내부홀이 천공된 판의 두께는 5 mm이다.

X, Y, Z는 각각 유동방향거리, 횡방향, 바닥으로부터 수직거리를 나타내며, 좌표계의 원점은 유동방향으로 립 끝단, 횡방향으로는 중앙의 분사홀과 분사홀 사이, 바닥면에 위치한다. 이 후 제시될 그래프상의 모든 길이는 슬롯의 높이인 Z_c 로 나누어 무차원화하였다.

본 연구에서는 물질전달 실험을 위하여 주조를 통해 나프탈렌 표면을 형성한 시험판을 슬롯 립

Table 1 Experimental conditions for test plate

Slot Height (Z_c)	Lip Length (l)	Lip Thickness (t)	Pitch (P)	Diameter (D)
15 mm	45 mm	3 mm	15 mm	10.5 mm

내벽에 설치하여 분사율, 분사방법, 냉각유로방식에 따른 립 내벽에서의 물질전달계수 분포를 측정하였다. Y, Z축은 Fig. 1의 속도측정 시험판에서의 축과 동일하며, X축은 슬롯의 립이 시작하는 위치에서부터 X^* 라고 정의한다. 물질전달계수의 계산은 2차원 자동이송장치로 이송되는 선형가변차동변환기(LVDT ; linear variable differential transformer)를 이용하여 시험시편의 표면고도를 실험 전후에 측정함으로써 이루어진다.⁽⁹⁾

2.2 냉각유로방식 변화

본 연구에서는 냉각유로방식의 변화에 따른 영향을 고찰하기 위해서 Fig. 2에서와 같이 냉각유체를 주유동과 같은 방향, 반대방향으로 공급하는 슬롯 막냉각 방법에 대하여 연구하였다. 이 경우 연소기 내벽은 플레넘으로부터 공급되는 2차유동에 의해 먼저 냉각되고, 슬롯을 통해 분사된 유동에 의해서 다시 한번 냉각되므로 냉각유체를 최대한 활용할 수 있는 장점이 있다.⁽⁸⁾ 가이드 베인(guide vane)의 높이는 슬롯 높이와 동일하게 제작하였다.

2.3 2차원 슬롯 시험시편

본 연구에서는 분사율, 분사방법, 냉각유로방식을 변화시킨 실험결과들에 대한 기준값을 제시하기 위해 실제적으로 슬롯 막냉각의 가장 기본적인 형태인 2차원 슬롯을 Fig. 3과 같이 제작하였다. 2차원 슬롯 출구부분에서 균일 유동을 얻기 위해서는 슬롯 안쪽면에 좀 더 긴 평행유로가 필요하다. 이를 위하여 실험장치 플레넘 하단부에서 고운 망과 일정한 곡률을 가지는 덕트를 만들어 분사유동이 슬롯 출구까지 균일하게 공급될 수 있도록 하였다. 여기서 슬롯 립의 길이는 90 mm이다.

2.4 속도 측정

슬롯 출구와 하류 부분에서의 속도 및 난류성분 측정은 열선 유속계(hot-wire anemometer;

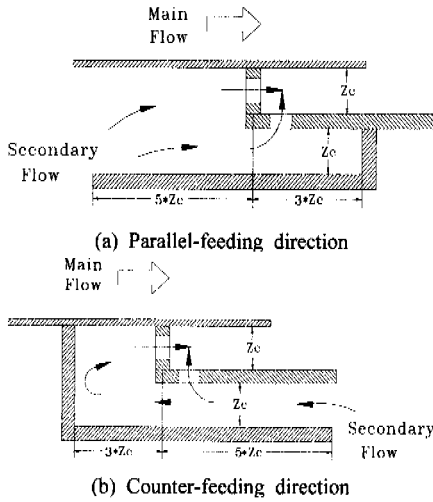


Fig. 2 Schematic view of different flow feeding direction

TSI-IFA300)와 피토폴(pitot tube)을 사용하였다. 열선 유속계는 피토폴을 사용하여 보정하였으며, 센서는 I형 텅스텐선을 사용하였다. 열선유속계는 CTA(constant temperature anemometer)로 평균속도와 주유동방향 난류성분 $\sqrt{u'^2}$ 의 값을 얻었다. 열선 유속계 센서는 3축 이송장치에 고정하여 주유동의 진행 방향과 횡방향으로 이송하면서 측정하였다. 속도측정의 불확실도는 95% 신뢰수준에서 4% 이내이다.

2.5 국소 열/물질 전달 계수 측정

본 실험에서는 열전달과 물질전달의 상사성을 이용하여 열전달 실험을 대신하여 나프탈렌 승화법(naphthalene sublimation method)에 의한 물질전달 실험을 수행하였다. 풍동 내에서 유동장에 노출되어 있는 동안 승화된 나프탈렌층의 표면고도차(승화깊이)로부터 물질전달계수를 계산하고 그 결과는 물질전달계수의 무차원형태인 Sherwood 수로 나타낼 수 있는데, 다음과 같이 정의된다.

$$Sh = \frac{h_m Z_c}{D_{naph}} \quad (1)$$

여기서 Z_c 는 슬롯의 높이이고, D_{naph} 는 공기 중에서의 나프탈렌의 확산계수이다.

실험결과에 대한 불확실성은 Kline과 McClintock⁽¹⁰⁾

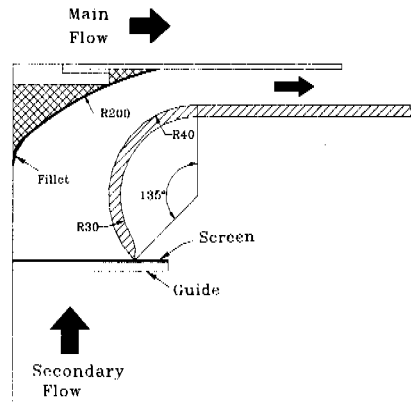


Fig. 3 Schematic diagram of test plate for 2-dimensional continuous slot experiments

이 제시한 방법을 이용하여 수행하였으며, 95% 신뢰수준에서 전달계수의 무차원수인 Sherwood 수의 불확실도는 7.9% 이내이다. 이러한 오차는 주로 나프탈렌의 증기밀도나 공기중에서의 나프탈렌의 확산계수와 같은 불확실한 물성치에 기인하였다.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 접선 슬롯 막냉각(tangential slot film cooling)의 냉각성능에 대한 체계적인 고찰을 위하여 먼저 2차원 슬롯에 대하여 속도측정 및 물질전달 실험을 수행하고, 2가지 냉각유로를 갖는 2차유동을 주유동 방향에 3가지의 각기 다른 분사형태(평행분사(PI), 수직분사(VI), 혼합분사(CI))⁽⁹⁾로 분사시킴으로써 이에 따른 슬롯 출구에서의 속도를 측정하였다. 또한 립 내벽에서의 열전달 특성을 살펴보기 위해 나프탈렌 승화법을 이용해 물질전달계수를 구하였다.

3.1 2차원 슬롯 실험결과

Fig. 4(a), (b)는 2차원 슬롯의 슬롯 출구에서의 유동특성을 알아보기 위해 횡(Y)방향, 높이(Z)방향으로 $X/Z_c=0.25$, 분사율 $M=1.0$ 인 조건에서 측정 한 속도분포이다. 사각덕트 모양의 슬롯을 통해 2차 유동이 분사되므로 횡(Y)방향으로 매우 균일한 속도분포가 나타났으며, 높이(Z)방향으로도 관내 유동과 유사하게 거의 포물선 형태의 모양이

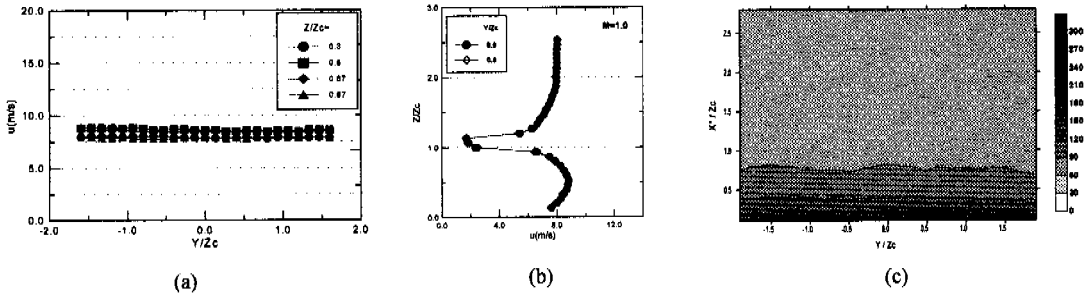


Fig. 4 Velocity and Sh distributions of 2-dimensional continuous slot for $M=1.0$
 (a) Lateral velocity distributions at $X/Z_c=0.25$ (b) Vertical velocity distributions at $X/Z_c=0.25$
 (c) Contour plots of Sh on the inside surface of slot lip

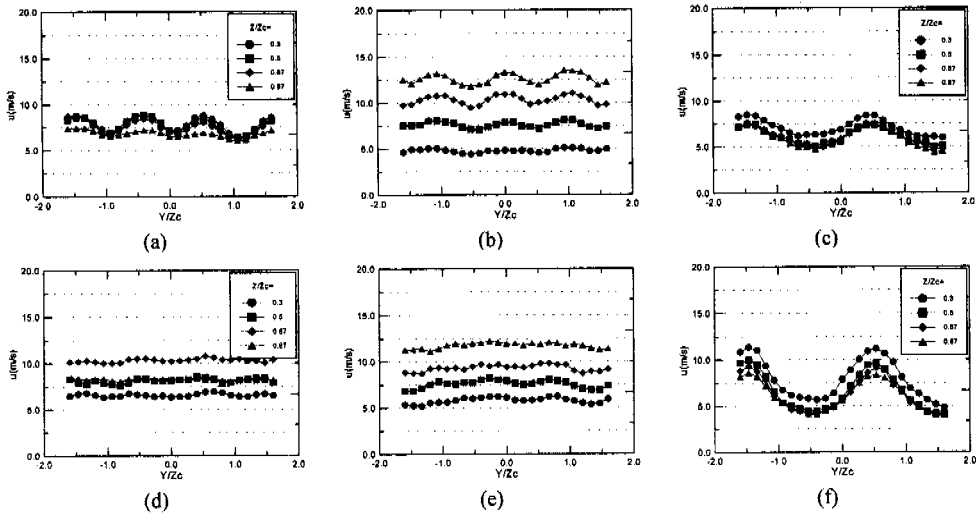


Fig. 5 Lateral velocity distributions for $M=1.0$ at $X/Z_c=0.25$
 (a) PI, (b) VI, (c) CI ; parallel-feeding direction, (d) PI, (e) VI, (f) CI ; counter-feeding direction

나타났다. 특히 홀의 영향이 없으므로 횡(Y)방향으로 위치가 변화하여도 속도차가 거의 나타나지 않음을 볼 수 있다. Fig. 4(c)는 슬롯 립 내벽에서의 물질전달계수 분포 결과로써 립 시작부분에서 가장 높은 값을 가지나 점차적으로 감소하여서 $X^*/Z_c=1.0$ 이후에서는 균일한 분포를 보여주고 있다.

3.2 속도장 측정 결과

슬롯 립 끝에서 주유동의 경계층 두께는 11 mm로 슬롯높이(15 mm)보다 약간 작다. Fig. 5는 분사율 $M=1.0$ 으로 2차유동이 분사될 때, 높이(Z)방향으로 측정위치의 높이($Z/Z_c=0.3, 0.5, 0.67, 0.87$)를 변화시키면서 횡방향으로 측정한 속도분포이다.

Fig. 5(a), (b), (c)는 주유동과 같은 방향의 냉각유로를 부착한 경우로 수평분사의 경우는 홀 중앙($Y/Z_c=\pm 0.5, \pm 1.5$)에서 극대값이, 홀 사이($Y/Z_c=0.0, \pm 1.0$)에서 극소값이 나타났다. 수직분사의 경우도 수평분사의 경우와 동일한 간격으로 극대점과 극소점이 반복되나, 슬롯 내부에서의 혼합으로 인해 홀 사이에서 극대점이 나타난다. 혼합분사의 경우는 앞선 두 경우와 달리 극대, 극소값이 분사홀 간격의 2배 주기를 갖는다. 즉 수평분사된 유동이 수직분사된 유동에 중첩되어서 극대, 극소값의 차이가 약간 커졌다. 이에 반해 Fig. 5(d), (e), (f)의 주유동과 반대 방향의 냉각유로를 통해 2차유동을 분사시키는 경우에는 수평, 수직분사에 있어서 홀의 위치에 따른 속도의 불균일

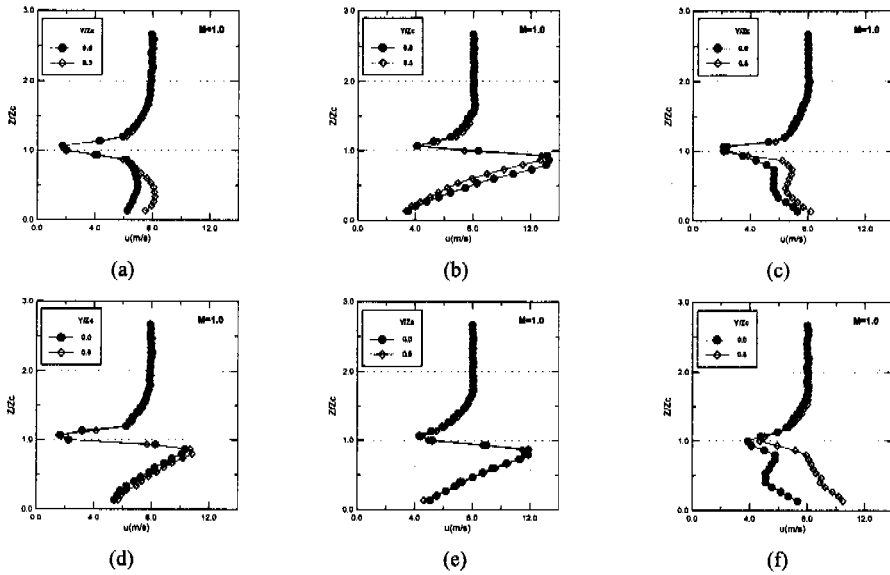


Fig. 6 Vertical velocity distributions for $M=1.0$ at $X/Z_c=0.25$
 (a) PI, (b) VI, (c) CI : parallel-feeding direction, (d) PI, (e) VI, (f) CI : counter-feeding direction

성이 완화되어 2차원 슬롯 유동에 매우 근접하게 나타났다. 그러나 혼합분사의 경우는 오히려 더욱 불균일한 속도분포가 나타났다. 이로써 혼합분사는 냉각유로방식에 상관없이 2차유동이 분사된 이후 립 내벽에서 매우 복잡하게 혼합하며 슬롯 출구로 진행하고 횡방향으로 큰 속도차에 의해 슬롯 출구 이후 하류지역에서 주유동과의 혼합이 가장 잘 이루어지기 때문에 막냉각 효율이 다른 두가지 경우에 비해 낮을 것으로 예상된다.

Fig. 6은 각 경우에 대하여 홀 중앙($Y/Z_c=0.5$), 홀 사이($Y/Z_c=0.0$)에서 높이(Z)방향으로 측정위치를 변화시키면서 측정한 속도분포이다. $Z/Z_c=1.0$ 인 곳이 슬롯 립이 설치된 위치이므로 이를 경계로 하여 2차유동과 주유동의 수직 속도분포가 잘 나타난다. Fig. 6(a), (b), (c)는 주유동과 같은 방향의 냉각유로방식 결과로 수평분사의 경우는 횡(Y)방향으로 속도차는 크게 나타나지만 2차원 슬롯 유동과 유사하게 포물선 형태의 속도분포가 나타났다. 수직분사의 경우는 충돌제트의 영향으로 인해 최대속도 지점이 립 높이에 근접하게 이동하였다. 또한 횡방향 속도분포에서 나타났던 것처럼 슬롯 립으로 근접할수록 홀의 위치에 따른 속도차가 증가하는 것을 볼 수 있다. 혼합분사는 수평, 수직분사의 혼합으로 인해 바닥면과 립 부근에서의 속도가 최대가 되었다. Fig. 6(d), (e), (f)은 주유동

과 반대방향의 냉각유로방식 결과로서 먼저 수평분사의 경우는 냉각유로의 형상 변화에 의해 수직분사의 결과와 유사하게 속도의 최대점이 립에 근접하였다. 수직분사의 유동형태는 앞선 결과(Fig. 6(b))와 유사하지만 횡방향 속도분포가 훨씬 균일해지고, 바닥면에서의 속도의 최소값이 약간 증가하는 반면 립 근접 부분에서의 속도의 최대값이 약간 감소하였다. 혼합분사의 경우는 역시 매우 불균일하게 나타났다.

3.3 립 내벽의 물질전달계수 분포

립 내벽은 슬롯 내부의 유동 형태에 따라 열전달 특성이 가장 크게 변화하는 영역이며, 립두께에 걸쳐 큰 온도구배가 존재하게 될 것이다. 그러므로 슬롯 막냉각시 고온의 연소가스에 노출되어 있는 슬롯 립에 대해서 전체적인 냉각효과가 커야 하는 것은 물론 열용력을 최소화 하기 위해 균일한 냉각분포를 갖는 것이 중요하다. 또한 슬롯 분출구 하류에서 주유동의 막냉각 영역내로의 침투를 막기 위해서는 슬롯 내부에서 균일한 유동형태를 갖는 것이 매우 중요하다.

Fig. 7, Fig. 8은 Sherwood 수의 분포를 나타내며 분사형태와 분사유에 따른 전달계수 분포의 변화를 잘 보여준다. 참고로 수평분사의 경우는 수직, 혼합분사와 동일한 스케일(scale)로 결과를

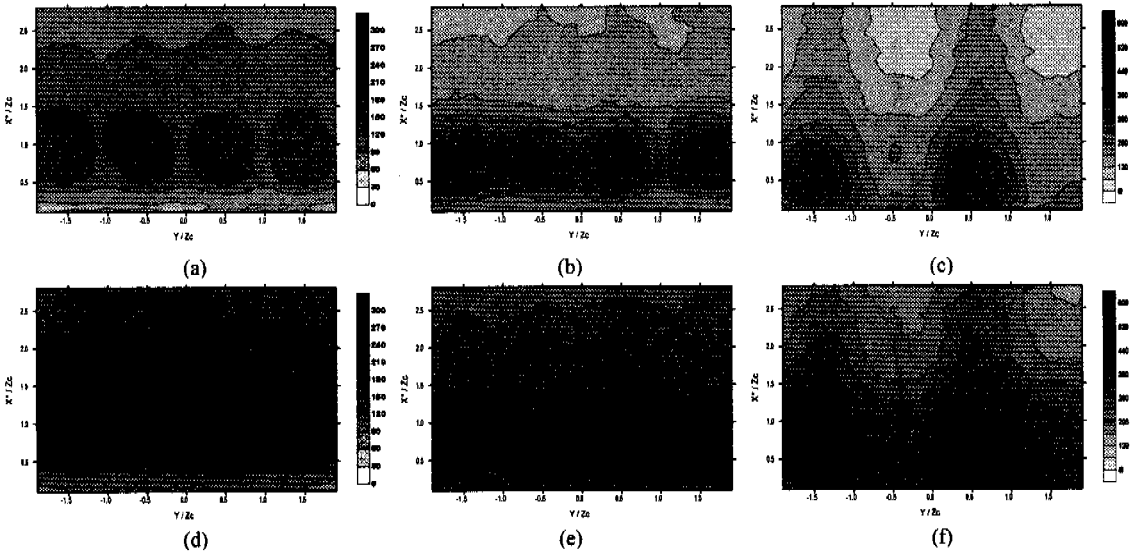


Fig. 7 Contour plots of Sh with parallel-feeding direction
 (a) PI, (b) VI, (c) CI ; $M=0.5$, (d) PI, (e) VI, (f) CI ; $M=1.0$

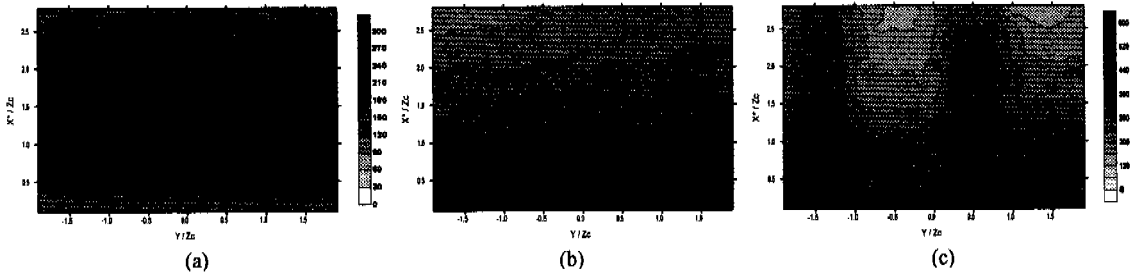


Fig. 8 Contour plots of Sh for $M=1.0$ with counter-feeding direction
 (a) parallel injection(PI), (b) vertical injection(VI), (c) combined injection(CI)

표시할 경우 국소적인 전달계수 분포의 특성을 파악할 수가 없으므로 다른 스케일로 제시하였다. 먼저 Fig. 7(a)는 분사율 $M=0.5$, 수평분사의 경우로 분사홀 위치($Y/Zc=\pm 0.5, \pm 1.5$)에 대응하여 $X^*/Zc \approx 1.0$ 근방에서 최대값이 나타났으며 하류로 진행함에 따라 물질전달계수의 값은 점차 낮아지나, 2차유동의 슬롯 립 내벽에서의 상호작용으로 인하여 홀 위치에 상관없이 열/물질전달 분포가 균일해짐을 볼 수 있었다.

Fig. 7(b)는 수직분사의 경우로 바닥홀에서 분사된 제트가 슬롯 립의 안쪽면에 충돌함으로써 내벽을 냉각시킨 후 슬롯을 통하여 분사된다. 즉 충돌제트 효과로 인하여 $X^*/Zc \approx 0.7$ 근방에서 최대값을 보이며, 립 내벽의 충돌된 분사유동이 슬롯 립을 따라 고르게 퍼짐으로써 $0 \leq X^*/Zc \leq 0.5$

영역에서도 횡방향으로 비교적 고른 전달계수 분포를 보였다.

Fig. 7(c)는 혼합분사의 경우로 냉각유로의 변화로 인하여 수평분사유동이 수직분사유동 제트 쪽으로 이동하며 중첩되어 수직분사되는 유동을 따라서 립 끝단까지 계속된다. 특히 립 시작부분 ($0 \leq X^*/Zc \leq 0.5$)에서 수평분사홀 위치($Y/Zc=-0.5, 1.5$)를 살펴보면 홀에서 분사되고 난 후 곧 수직분사($Y/Zc=-1.5, 0.5$) 유동쪽으로 편향되어서 중첩되는 것을 관찰할 수 있다. 또한 슬롯 내벽에서의 이러한 유동특성으로 인하여 Fig. 5(c)의 슬롯 출구부분 횡방향 속도분포가 수직분사홀 위치($Y/Zc=-1.5, 0.5$)에 따라 속도의 최대값이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 전체적으로 분사율이 증가함에 따라 Fig. 7(d), (e), (f)에 나타난 것과 같이

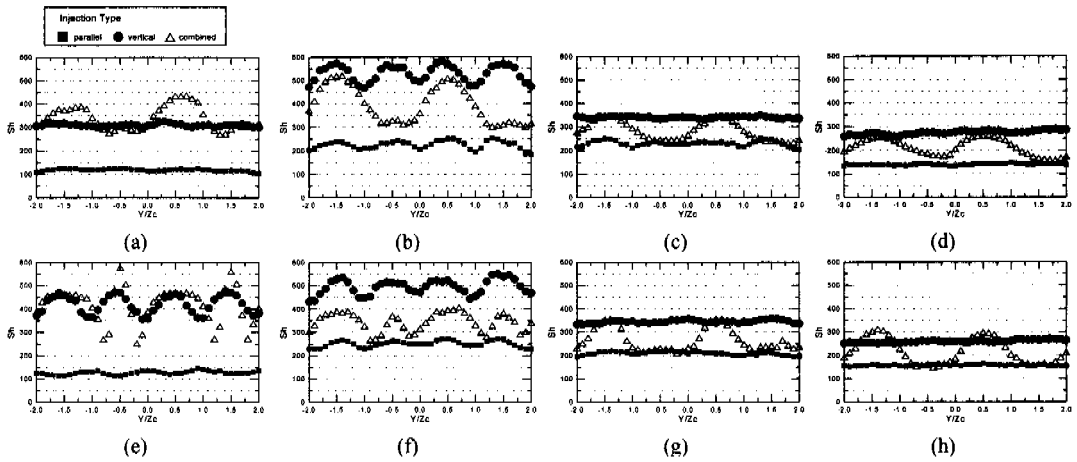


Fig. 9 Lateral distributions of Sh for various injection types at $M=1.0$
 (a) $X^*/Z_c=0.2$ (b) $X^*/Z_c=0.7$ (c) $X^*/Z_c=1.5$ (d) $X^*/Z_c=2.5$; parallel-feeding direction,
 (e) $X^*/Z_c=0.2$ (f) $X^*/Z_c=0.7$ (g) $X^*/Z_c=1.5$ (h) $X^*/Z_c=2.5$; counter-feeding direction.

내벽의 국소적인 물질전달계수 값은 커지나 비수한 형태를 나타내었다.

Fig. 8은 주유동과 반대방향의 냉각유로방식 결과로 전체적으로 냉각유로 형상의 변화로 인해 물질전달계수의 최대값을 나타내는 영역이 슬롯 립의 시작점 방향으로 이동하였다. 특히 수평분사(Fig. 8(a))의 경우는 최대값이 $X^*/Z_c \approx 0.8$ 근방에서 나타나며, 수직 분사와 유사하게 홀의 위치에 따라 집중적으로 높은 물질전달계수 분포를 보였다. 이는 Fig. 6(d)의 높이(Z)방향 속도분포 결과에서 설명한 바와 같이 2차유동이 슬롯 립에 비스듬히 분사되므로 슬롯 립 내벽에서의 국소적인 물질전달계수 값이 커졌다. Fig. 8(c)는 혼합분사의 경우로 슬롯 립 시작부분에서는 어느 정도 수평, 수직분사가 각각의 운동량을 지닌 채로 분사되지만 $X^*/Z_c \approx 1.0$ 이후에서는 주유동과 같은 방향의 냉각유로방식과 유사하게 운동량이 큰 수직분사 쪽에 수평분사유동이 편향되어서 중첩되는 형태를 띄고 있다. 역시 이러한 슬롯 내벽에서의 물질전달계수 분포는 Fig. 5(f)의 불균일한 횡방향 속도분포를 그 원인으로서 제시할 수 있다.

Fig. 9는 분사율 1.0일 때의 Sherwood 수 분포를 횡방향(Y/Z_c)을 따라 나타낸 결과이다. 횡방향 전달계수 분포는 전체 주유동 범위인 $0.1 \leq X^*/Z_c \leq 2.8$ 중에서 $X^*/Z_c=0.2, 0.7, 1.5, 2.5$ 의 위치에서 분사방법, 냉각유로방식에 따라 나타내었다. 전체

적으로 수직, 수평분사의 경우는 진폭의 차이는 있으나 홀의 위치에 따라 주기적으로 극대, 극소 값이 반복되었고 점차 하류로 진행함에 따라 매우 균일해졌다. 이에 반해서 혼합분사의 경우는 홀 근접부분에서는 오히려 수직분사보다 부분적으로 더 높은 전달계수 분포를 보이나, 수평분사와 수직분사간의 운동량 차에 의해서 횡방향으로 변화의 폭이 크며 립 끝단에서도 수평, 수직분사에 비하여 상당히 불균일한 전달계수 분포가 나타났다. 전체적으로 기존의 슬롯 막냉각 방법⁽⁹⁾에 비해 냉각유로를 설치했을 경우, 수평, 수직분사의 슬롯 립 내벽에서의 횡방향 물질전달계수 분포는 매우 균일하게 나타났다.

2차원 슬롯과 각 냉각유로방식에 따라 측정된 평균물질전달계수 분포의 전체적인 경향을 비교하기 위하여 Fig. 10과 같이 각 분사방법에 따라 나타내었다. 먼저 Fig. 10(a)는 수평분사의 경우로 2차원 슬롯에 비하여 약 2배 이상의 물질전달 촉진이 일어남을 알 수 있다. 특히 역방향 냉각유로방식에서는 유로를 통해 공급된 2차유동이 정반대로 회전하면서 분사되므로 슬롯 립쪽으로 비스듬히 분사되는 형태를 띤다. 그러므로 상류($X^*/Z_c=0.7$)에서 가장 높은 물질전달계수 분포가 나타났다. 이와 같은 특징은 Fig. 10(b)의 수직분사에서 더욱 자세히 관찰할 수 있다. 즉 최대값을 나타내는 영역이 역방향 냉각유로방식의 경우에는 슬롯 립 시작부분쪽으로, 동일방향 냉각유로

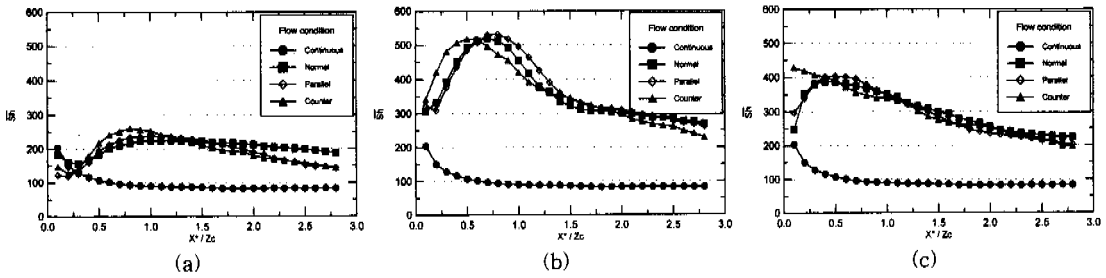


Fig. 10 Comparison of averaged Sh for $M=1.0$ with various flow feeding directions
(a) parallel injection(PI), (b) vertical injection(VI), (c) combined injection(CI)

방식의 경우는 이와 반대 방향으로 약간씩 이동하였다. 그리고 전체적으로 2차원 슬롯에 비해 최대값이 나타나는 부분은 약 5배, $1.5 \leq X^*/Z_c \leq 2.8$ 영역에서는 약 2배 정도의 물질전달이 촉진되는 것을 볼 수 있다. Fig. 10(c)는 혼합분사의 경우로, 전체적으로 2차원 슬롯에 비해 약 2배 이상의 물질전달 촉진을 보이며 슬롯 립 전반부 ($0 \leq X^*/Z_c \leq 1.0$)를 제외하면 냉각유로방식에 관계없이 거의 유사한 형태를 보여준다.

4. 결론

본 연구에서 수행된 슬롯 막냉각에 있어서의 속도장 측정 및 물질전달 실험에 의해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 전체적으로 수평, 수직분사의 경우는 홀의 위치에 따라 홀 간격과 같은 주기로, 혼합분사는 립 내벽에서의 분사유동 중첩에 의하여 홀 간격의 2배 주기로 극대, 극소값이 나타났으며, 특히 주유동과 반대 방향의 냉각유로를 통해 냉각유체를 분사시키는 경우, 수평, 수직분사의 속도분포가 2차원 슬롯 유동과 가장 유사하게 나타났다.

(2) 냉각유로방식을 변화시킴에 따라 물질전달 계수의 최대값을 나타내는 영역이 약간씩 이동하였으며, 수직분사가 충돌제트의 효과로 인하여 슬롯 내벽에서 평균적으로 가장 높은 물질전달계수 분포를 보였다.

(3) 전체적으로 혼합분사의 경우는 수평분사와 수직분사의 상호작용으로 홀에 근접한 부분에서는 넓은 영역에서 열/물질전달의 촉진을 보이나, 매우 불균일한 물질전달계수 분포를 가졌다.

(4) 냉각유로를 설치했을 경우, 수평, 수직분사

의 슬롯 립 내벽에서의 횡방향 물질전달계수 분포는 매우 균일하게 나타났다.

(5) 분사방법, 냉각유로방식을 변경함에 따라 2차원 슬롯에 비해 전체적으로 2~5배 정도의 물질전달 촉진이 일어남을 알 수 있었다.

(6) 분사율이 증가함에 따라 내벽의 열/물질전달계수 값은 커지나 경향은 유사한 것으로 나타났다.

후기

본 연구는 1998년도 학술진흥재단 과학기술기초중점연구지원(과제번호:1998-018-E00021)에 의한 결과이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Goldstein, R. J., 1974, "Film Cooling," *Advances Heat Transfer*, Academic Press, Vol. 7, pp. 321~379.
- (2) Papell, S. S., 1960, "Effect on Gaseous Film Cooling of Coolant Injection Through Angled Slots and Normal Holes," NASA Technical Note D-299.
- (3) Folyan, C. O. and Whitelaw, J. H., 1974, "The Effectiveness of Combined Tangential and Normal Film-Cooling Slots with Finite Lip," Dept. of Mechanical Eng. Imperial College, Report HTS/74/2.
- (4) Sturgess, G. J., 1980, "Account of Film Turbu-

- lence for Predicting Film Cooling Effectiveness in Gas Turbine Combustors," *ASME J. of Engineering for Power*, Vol. 102, pp. 524~534.
- (5) Sivasegaram, S., 1969, "Film Cooling Slots : The Importance of Lip Thickness and Injection Angle," *Journal of Mechanical engineering science*, Vol. 11, No. 1, pp. 22~27.
- (6) Seban, R. A., 1960, "Heat Transfer and Effectiveness for a Turbulent Boundary Layer with Tangential Fluid Injection," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 82, pp. 303~312.
- (7) Farmer, J. P., Seager, D. J. and Liburdy, J. A., 1997, "The Effect of Shaping Inclined Slots on Film Cooling Effectiveness and Heat Transfer Coefficient," *ASME Paper* No. 97-GT-339.
- (8) Simon, B., "Advanced Gas Turbine Combustor Cooling Configurations," MTU Motoren und Turbinen Union Munchen, Germany.
- (9) 함진기, 김병기, 조형희, 1999, "가스터빈 연소실 슬롯 막냉각의 분사방법 변화에 따른 열전달 특성 고찰," 대한기계학회 논문집 B권, 제23권 제4호, pp. 511~519.
- (10) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.