

< 논문 >

계단형 슬롯출구의 높낮이 변화에 따른 2차원 막냉각 특성

이근식[†] · 손창호* · 김태목**
(2004년 7월 6일 접수, 2004년 11월 2일 심사완료)

2-Dimensional Film Cooling Characteristics with the Height Variation of a Stepped Slot Exit

Geun Sik Lee, Chang Ho Son and Tae Mook Kim

Key Words: Film Cooling(막냉각), Stepped Slot Exit(계단형 슬롯출구), Blowing Ratio(분사비), Injection Angle(분사각), Turbulent Kinetic Energy(난류운동에너지)

Abstract

Film cooling characteristics has been examined numerically for the height variation of a stepped slot exit. In this study, the upstream wall height of the stepped slot exit varies from $-2d$ ($d = \text{slot width}$) to $3d$, blowing ratio ranges from 0.5 to 3, and injection angles are 15° , 30° , and 45° . The results showed that film cooling performance was mainly subjected to the magnitude of recirculation region near the downstream-side slot exit as well as the magnitude and the distribution region of turbulent kinetic energy due to the local velocity and momentum differences between the coolant and the main flow near the slot exit. The up-1d type slot at higher blowing ratios over 2 and the flat type slot at lower blowing ratios below 1 have the best film cooling performances, in case of the injection angles of 30° and 45° , respectively. Compared with the other injection angles, in case of the injection angles of 15° , the best film cooling performances was shown in even a higher upstream wall (up-3d) at higher blowing ratio like 3 by the gradual reduction of the coolant velocity which minimizes the local velocity differences between the coolant and the main flow near the slot exit.

기호설명

br : 분사비($= \frac{\rho_c V_c}{\rho_m V_m}$)

d : 슬롯 폭, 각도(degree)

T : 온도

V : 속도

x, y : 주유동방향, 수직방향 좌표

θ : 분사각도

하첨자

c : 냉각제

m : 주유동

그리스 문자

ρ : 밀도

1. 서론

가스터빈엔진의 효율 및 출력을 높이기 위해 터빈입구온도를 높이게 된다. 그러나 고온에 견딜 수 있는 재료 개발은 한계가 있기 때문에 연소실이나 터빈 깃의 냉각기술이 필요하다. 이러한 냉각기술 중에서 막냉각은 고온요소의 표면에 비교적 저온의 유체를 분사하여 고온의 연소가스와 고체표면 사이에 일종의 단열막을 만들어 보호하는 방법이다. 기본적인 막냉각에 대한 유동

† 책임저자, 회원, 울산대학교 기계자동차공학부

E-mail : gslee@mail.ulsan.ac.kr

TEL : (052)259-2135 FAX : (052)259-1680

* 회원, 울산대학교 기계자동차공학부

** 울산대학교 대학원 기계자동차공학과

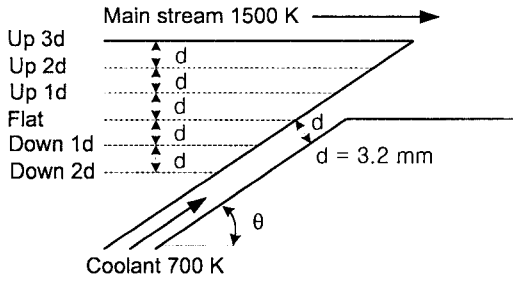
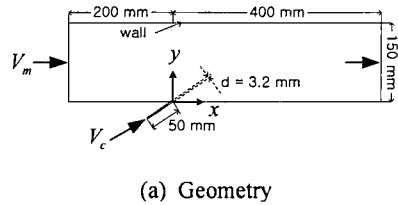
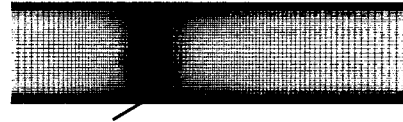


Fig. 1 Schematic diagram of film cooling with up or down upstream wall



(a) Geometry



(b) Grid

Fig. 2 Geometry and grid for main-stream and coolant flow

및 열전달 특성에 대한 일반적인 고찰은 Goldstein⁽¹⁾에 의해, 최근의 동향은 조형희⁽²⁾에 의해 잘 정리되어 있다.

막냉각의 성능에 영향을 주는 인자는 여러 가지(자유흐름 레이놀즈수, 자유흐름 난류강도, 주류면의 형상, 냉각제 분사구 형상,⁽¹⁻³⁾ 분사비와 분사각도,⁽⁴⁾ 주류흐름의 온도에 대한 냉각제의 온도를 포함하는 요소)가 있다. 분사구 형상은 홀과 슬롯으로 나누어 생각할 수 있다. 최근에는 출구가 확대되는 변형된 홀을 이용하여 냉각유체의 표면이탈을 방지하여 막냉각 성능을 향상시키는 연구가 이루어지고 있다.⁽⁵⁾ 홀이 슬롯보다 실제적이거나, 슬롯이 홀보다 막냉각 성능이 우수하기 때문에, 최근에는 가공기술의 발달로 슬롯과 유사한 막냉각성능을 나타내는 사각홀도 사용되고 있으며 이에 대한 연구⁽⁶⁾도 이루어지고 있다. 냉각제 슬롯출구 상류면의 상승과 하강에 따른 막냉각 성능은 노석만 등⁽⁷⁾이 분사비를 1, 분사각을 30도로 일정하게 유지하였을 때 조사하였으며, 연구결과에 의하면 분사출구 상류면을 슬롯폭 만큼 상승하였을 때 막냉각 성능이 가장 우수함을 밝혔다. 그러나 위의 연구결과는 물성치가 일정하다는 가정하에 얻은 결과이므로 밀도 등 물성치가 온도의 함수로 주어질 때 결과가 달라질 수 있으며, 분사비와 분사각도가 달라질 때 분사슬롯 상류면 높이에 따른 막냉각 특성이 달라질 수 있음을 예상할 수 있다. 본 저자들은 이러한 점에 착안하여 본 연구를 수행하게 되었다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 슬롯출구 상류면의 상승과 하강에 따른 막냉각 성능을 조사한다. 온도에 따른 물성치 변화를 고려하며, 분사비와 분사각을 변화시켜 가면서 막냉각 특성을 조사한

다. 본 연구에는 후향계단형상유동과 분사유동의 박리-재부착 특성이 포함되어 있으므로, 본 연구에서 사용할 격자와 난류모델의 타당성에 대한 예비 검증단계로 이 두 가지 유동을 계산하고 선행 실험 및 계산결과와 비교 분석한다. 슬롯출구 상류면의 상승과 하강범위는 $-2d$ (d 는 슬롯폭)에서 $3d$ 까지, 분사비는 0.5에서 3까지, 분사각은 15도, 30도, 45도이다. 해석방법은 전산열유동해석 상용 소프트웨어인 FLUENT를 이용하여 유동장과 온도장을 계산한다. 이로부터 압력분포, 유선분포, 난류강도분포, 온도분포를 구하여 하류의 막냉각 특성을 밝히고 설계 맵을 제공하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 수치계산

본 연구에서는 유한체적법을 사용하는 상용 전산열유동해석 코드인 FLUENT 5를 사용하여 수치적 계산을 수행하였다. 온도에 따른 공기의 물성치 즉 정압비열, 열전도율, 점성계수의 변화를 고려하였으며, 특히 밀도의 변화는 마하수가 작으므로 압력에 관계없이 온도만의 함수로 가정하는 비압축성 이상기체로 취급하여 계산하였다. 난류 모델로는 유동박리 등을 잘 예측하는 것으로 알려진 실현가능(realizable) $k-\epsilon$ 모델⁽⁸⁾을 사용하였다. Fig. 2(a)는 계산할 열유동장 영역을 표시하며, Fig. 2(b)는 계산에 사용된 격자계 중의 하나를 보여준다. 이 경우는 상류측 벽면이 하류측 벽면과 같은 높이인 평평면으로 주 유동영역은

261×111, 슬롯부는 31×36로 냉각제가 주류와 혼합되는 영역 근처와 벽 근처를 조밀하게 자른 가변 격자를 구성하였다. 상류측 벽면이 상승하거나 하강한 경우에도 이와 비슷한 방법으로 격자를 구성하였다.

경계조건은 모든 벽면에서 점착조건과 단열조건을 적용하였고 주류와 냉각제의 유입부에서는 모두 균일한 속도와 온도를 지정하였다. 출구에서는 압력을 제외한 모든 물리적 양의 출구단면에 수직인 방향으로의 변화율을 0으로 지정하였다. 모든 계산에서 주류의 입구온도는 1500 K, 입구속도는 20 m/s로 지정하였고 냉각제의 입구온도는 700 K, 입구속도는 분사비에 해당하는 질량유량이 되도록 지정하였다. 이산화 방법으로는 2차 풍상 차분법(2nd order upwind difference)을 선택하였다. 수렴조건은 조건에 따라 달랐지만 각 경우마다 대체로 상대오차를 10^{-4} 으로 하였으며 이에 따른 반복계산 횟수는 12,000~20,000번 사이로 수행되었다.

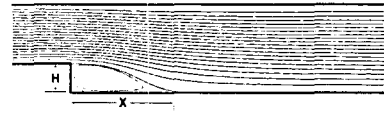
막냉각 특성을 나타내는 막냉각효율(film cooling effectiveness) η 은, 0과 1사이의 값을 가지며 다음 식으로 정의되는 무차원 단열벽면온도를 나타내는 변수이다.

$$\eta = \frac{T_m - T_{aw}}{T_m - T_c} \quad (1)$$

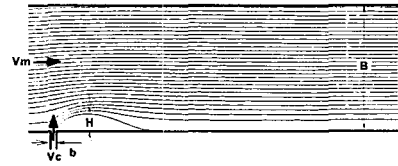
위의 식에서 T_m 는 1500 K의 주류의 회복온도(recovery temperature)이며, T_c 는 냉각제의 전온도이고, T_{aw} 는 단열벽면온도(adiabatic wall temperature)이다.

3. 수치해석 방법의 검증

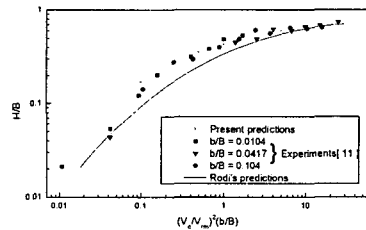
서론에 언급한 바와 같이 본 수치해석 방법의 적절성을 검증하기 위하여 Fig. 3(a)와 (b)에 제시된 것과 같은 후향계단형상유동과 수직분사유동을 선택하였다. 본 절에서의 관심사는 본 연구에서 사용할 난류모델이 선행연구결과와 비교할 때 타당한가를 검증하는 것이므로, 계단형상유동의 재부착길이 또는 수직분사유동의 재순환영역의 크기를 서로 비교하고자 한다. 격자계는 계단형상유동에서는 200×100 으로 하였고 수직분사유동의 주류영역은 300×100 , 분사유동 영역은



(a) Backward facing stepped wall



(b) Perpendicular coolant injection



(c) Calculation result

Fig. 3 Schematic diagram of backward facing stepped wall and perpendicular coolant injection and the calculation result of the perpendicular coolant injection

20×50 으로 하였다.

계산 및 경계조건은 다음과 같다. 계단형상유동에서는 입구 레이놀즈 수 46,000, 주류속도 20 m/s이다. 수직분사유동에서는 주류속도 2 m/s 이고, 분사비는 0.707~5 이고, 주류 폭과 분사슬롯 폭의 비는 0.2이다.

Fig. 3(a)의 후향계단 유동의 결과를 살펴보면, 양희천 등⁽⁹⁾이 계산한 표준 k- ϵ 모델과 RNG k- ϵ 모델에서는 무차원 재부착길이[(재부착길이 X)/(계단높이 H)]가 각각 6.0과 6.5로 Kim et al.⁽¹⁰⁾의 실험결과인 7.1보다 작은 값이나, 본 연구에서 사용한 실현가능 k- ϵ 모델에서는 7.0으로 실험결과에 더 가까운 값을 확인할 수 있다.

Fig. 3(c)의 하류수직분사형상의 유동의 결과를 살펴보면, 재순환 에디 크기 [(재부착 에디의 높이 H)/(주 유로 폭 B)]가 실험치⁽¹¹⁾와 비교할 때

Rodi 등⁽¹²⁾이 계산한 표준 $k-\epsilon$ 모델에서는 실험치보다 작게 예측되었으나, 본 연구에서 사용한 실현가능 $k-\epsilon$ 모델에서는 실험결과에 더 가까운 값을 확인할 수 있다.

4. 결과 및 토의

4.1 슬롯출구 높낮이에 따른 막냉각 특성

Fig. 4는 분사비가 3이고 분사각도가 30도일 때

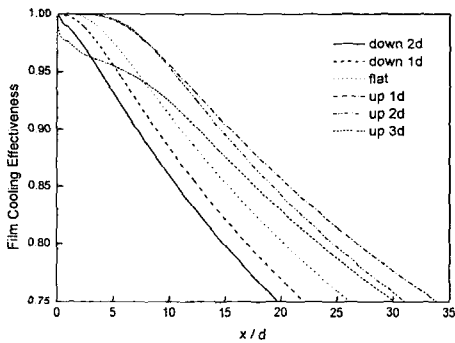
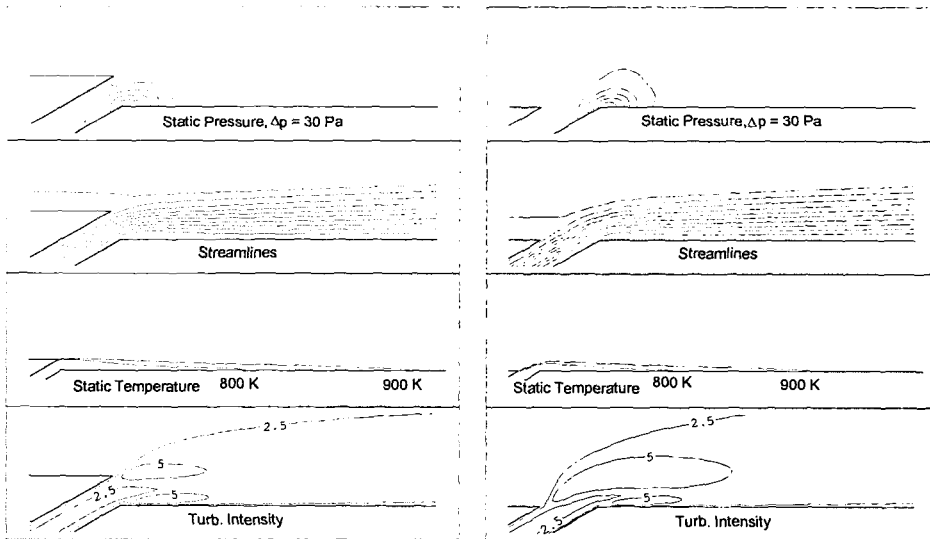


Fig. 4 Film cooling effectiveness for various up or down upstream walls (br=3, $\Theta=30^\circ$)

슬롯출구 높낮이에 따른 막냉각 효율을 제시하고 있다. 상류면을 2d-하강면부터 3d-상승면까지 높일 때 1d-상승면까지는 막냉각 효율이 좋아지나 2d-상승면부터는 막냉각효율이 오히려 감소함을 볼 수 있다. 대표적으로 1d-상승면과 평평면을 선정하여 이에 대한 압력분포, 유선분포, 온도분포, 난류운동에너지분포를 Fig. 5에 제시하였다. 평평면의 경우 슬롯출구 상류에서 마주치는 냉각제와 주류의 속도와 운동량 차이가 커서 큰 평균속도구배가 발생하게 되며 이로 인한 난류운동에너지 생성량이 커지므로 난류강도가 높은 영역이 넓게 분포하고 있다. 이에 반해, 1d-상승면의 경우 슬롯출구 상류면이 주류와 1차적으로 만나는 효과를 지연함과 동시에 냉각제의 속도와 운동량이 다소 감소된 상태에서 주류와 만나게 되어 큰 평균속도구배가 발생하는 영역이 상대적으로 좁으므로 난류강도가 높은 영역이 좁게 분포한다. 난류운동에너지가 냉각제와 주류의 혼합을 지배하므로 1d-상승면의 경우 막냉각 효율이 좋음을 유추할 수 있다.

3d-상승면의 경우 슬롯 출구 바로 하류에서 급격히 막냉각 효율이 감소하는 독특한 경향을 볼 수 있다. 이에 대한 현상은 4.3절의 유사 예를 통하여 추후 밝히기로 한다.



(a) Up-1d

(b) Flat

Fig. 5 Contour plots for flow and temperature field (br=3, $\Theta=30^\circ$)

4.2 분사비에 따른 막냉각 특성

분사각도가 30도일 때 분사비에 따른 막냉각 특성은 Fig. 6에서 살펴볼 수 있다. 각각의 분사비에서 가장 막냉각 효율이 높은 2가지 슬롯 형상을 한 그래프에 조합하여 나타내었다. 분사비가 클수록 막냉각 효율이 높아지나 분사비 증가에 따른 막냉각 효율의 증가가 둔해짐을 볼 수 있다.

분사비 2이상일 때는 1d-상승면에서 가장 막냉

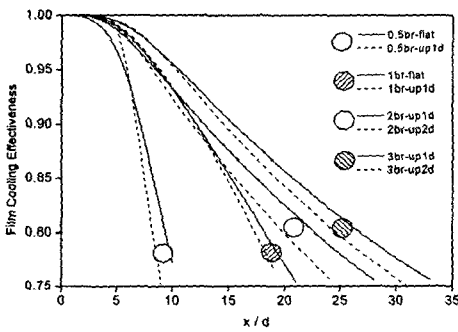
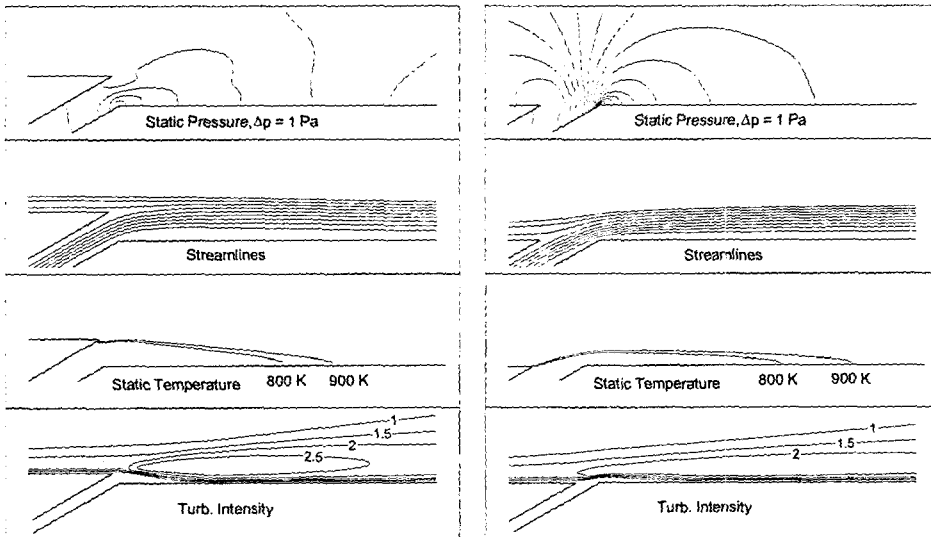


Fig. 6 Film cooling effectiveness for various blowing ratios with the best and the next geometries ($\theta=30^\circ$)

각 효율이 좋으나, 분사비 1이하에서는 평평면에서 가장 막냉각 효율이 좋음을 알 수 있다. 분사비 2이상일 때 1d-상승면에서 가장 막냉각 효율이 좋은 이유는 분사비 3의 경우를 통하여 이미 앞 절에서 규명하였다.

본 절에서는 분사비 1이하의 경우 평평면에서 가장 막냉각 효율이 좋은 이유를 규명하기 위해 대표적으로 분사비가 0.5일 때 평평면과 1d-상승면에 대한 온도분포, 유선분포, 압력분포, 난류운동에너지분포의 비교하였으며 Fig. 7에 제시되어 있다. 평평면의 경우 저속의 냉각제는 슬롯 출구를 통과한 후 주류에 제압되어 유효 유동단면적이 감소하게 되며 이로 인하여 가속되는 효과가 발생된다. 따라서 고속의 주류와 냉각제의 속도 차이가 줄어들게 된다. 그러나 1d-상승면에서는 저속의 냉각제가 가속될 기회를 갖지 못하며 따라서 고속의 주류와 속도차가 크게 유지된다. 이러한 주류와 냉각제의 속도차는 난류운동에너지 생성을 유발하므로 Fig. 7의 난류강도에서 볼 수 있듯이 평평면의 경우보다 1d-상승면의 경우 큰 난류강도를 가지는 영역이 하류 벽면 근처에 넓게 분포하게 된다. 따라서 1d-상승면의 경우 주류와 냉각제의 혼합이 활발하여 대략 $x=7d$ 이하 하류의 막냉각 효율이 평평면의 경우보다 떨어지게



(a) Up-1d

(b) Flat

Fig. 7 Contour plots for flow and temperature field (br=0.5, $\theta=30^\circ$)

된다.

4.3 분사각에 따른 막냉각 특성

Fig. 8에 3d-상승면이고 분사비가 3일 때 분사각에 따른 막냉각 효율이 제시되어 있다. 분사각이 작을수록 막냉각효율이 높음을 볼 수 있다. 분사각 15도의 경우 $x=12d$ 까지 막냉각 효율의 강하 현상이 없으며, 다른 분사각에 비해 매우 높은 막냉각 효율을 보여주고 있다. 이는 Fig. 9에서 살펴볼 수 있듯이 15도 분사각의 경우 45도 분사각의 경우에 비해 슬롯출구 하류모서리를 통

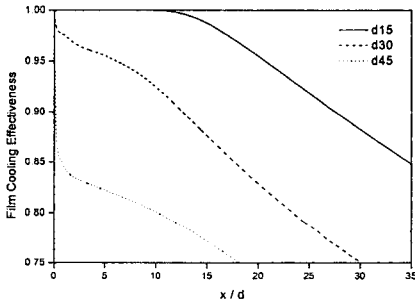
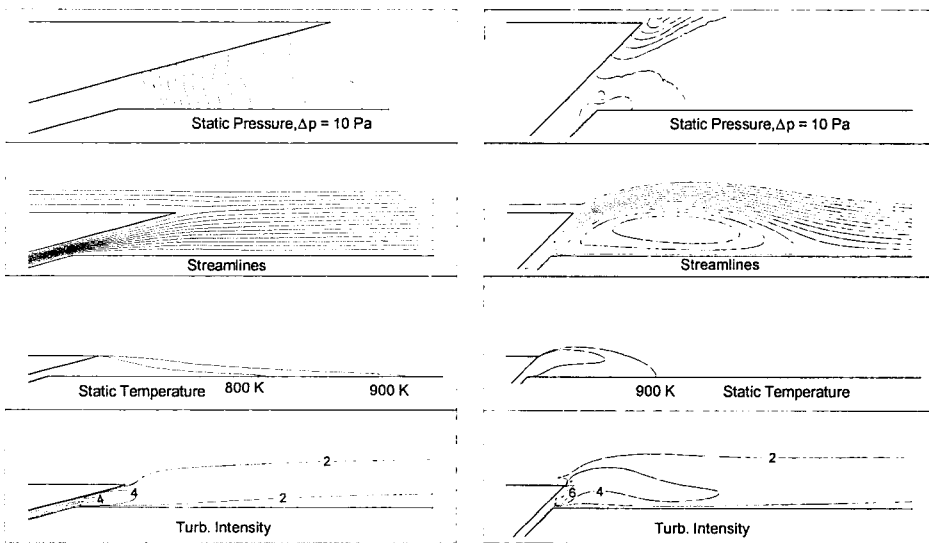


Fig. 8 Film cooling effectiveness for various injection angles (br=3, up=3d)

과한 냉각제가 유동단면적의 점진적 증가와 정렬된 압력분포로 인하여 하류방향으로 점진적으로 속도가 감소하다가 슬롯출구 상류 모서리를 통과한 후에는 적절히 감소된 속도를 유지하는 안정된 하류유동 특성을 보여주고 있다. 이러한 냉각제의 속도분포 및 유동특성이 주류와 만나는 지점의 난류운동에너지 생성을 최소화하게 되며, 다른 분사각의 경우보다 월등하게 높은 막냉각 효율을 보여주게 됨을 알 수 있다.

한편, 분사각 45도의 경우 슬롯출구 하류 모서리 지점을 통과한 냉각제는 진행방향의 오른쪽에는 역압력구배와 유동단면적의 급격한 확대로 인하여 박리-재부착 과정을 겪고 있다. 이러한 재순환 영역의 존재로 인하여 냉각제의 유효유동단면적은 감소하게 되므로 냉각제는 거의 감속되지 않은 상태로 슬롯출구 상류 모서리를 지나는 느린 속도의 주류를 만나게 되어 넓은 영역에 걸쳐 큰 난류운동에너지를 생성하게 된다. 슬롯출구 상류면 모서리 부근에서 발생한 주유동과 냉각제의 강한 난류혼합이 인접한 재순환 영역에 열전달을 촉진하게 되며 이 열은 벽 근처의 역류를 따라 이동하여 슬롯출구 부근의 하류벽면온도를 상승시킨다. 따라서 $x=2d$ 부근의 막냉각효율을 현저히 낮추게 됨을 Fig. 8과 Fig. 9에서 살펴볼 수 있다.



(a) $\theta=15^\circ$

(b) $\theta=45^\circ$

Fig. 9 Contour plots for flow and temperature field (br=3, up=3d)

상류하강면 슬롯의 경우는 평평면 혹은 상승면의 경우보다 막냉각효율이 현저히 낮음을 볼 수 있다. 대표적인 예로서 Fig. 10에 분사비가 0.5이고 1d-하강면의 경우 분사각에 따른 막냉각 효율이 제시되어 있다. 앞의 경우와 달리 분사각 15도의 막냉각 효율이 가장 낮은 것은, 냉각제가 분사출구에서 주류와 접촉하는 면적이 가장 넓을 뿐만 아니라 슬롯출구 상류로부터 하류로 진행되는 주류가 국소 유동단면적의 점차적인 축소로 인하여 가속됨으로써 냉각제와 혼합이 촉진되는

영역이 넓기 때문으로 볼 수 있다. 분사각 30도의 경우 가장 높은 막냉각 효율을 보여주는 것은 냉각제 유동단면의 상류측(왼쪽)은 주류와의 혼합을 적절히 막아주며 유동단면의 하류측(오른쪽)은 큰 운동량의 주류에 제약되어 벽에 깔리는 효과가 나타나는 분사비-분사각도-슬롯출구 높낮이의 적정조합으로 이루어져 있음을 유추할 수 있다.

4.4 막냉각 특성 맵

Fig. 11은 막냉각 효율을 75%로 설정하였을 때 하류냉각거리를 슬롯출구 상류면 높낮이, 분사비와 분사각에 따라 표시한 일종의 설계 맵을 제시하고 있다. 분사비를 일정하게 유지하면서 슬롯출구의 상류면을 높여갈 때 분사각 30도와 45도의 경우, 분사비 1이하에서는 평평면 부근에서 최대냉각거리가 존재하며, 분사비 2 이상에서는 1d-상승면 부근에서 최대냉각거리가 존재함을 볼 수 있다. 분사각 15도의 경우는 2 이상의 고분사비에서는 슬롯출구 상류면을 높여가더라도 하류냉각거리가 계속적으로 증가하는 독특한 경향을 볼 수 있는데, 이는 분사출구 단면적의 점진적인 확대로 냉각제의 속도가 점진적으로 감소하여 출구상류면 모서리 부근에서 주류와 만날 때 두 유동간의 속도 및 운동량 차이가 최소화되어 난류에너지 생성을 최소화하기 때문으로 추정된다.

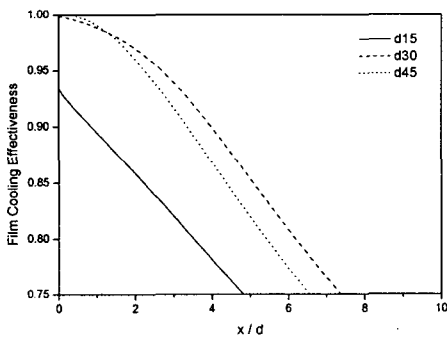


Fig. 10 Film cooling effectiveness for various injection angles (br=0.5, down-1d)

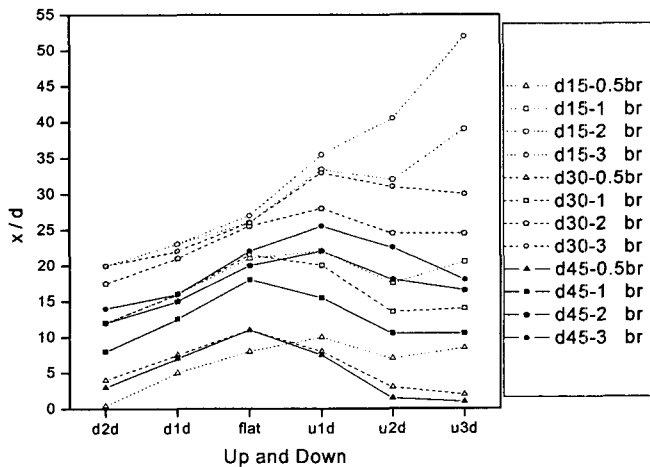


Fig. 11 Downstream cooling distance at $\eta = 0.75$ for various upstream walls, blowing ratios, and injection angles

본 그래프의 모든 점들은 설계치를 표시하고 있으므로 설계에 적용할 수 있다. 만일 냉각면의 온도를 900 K(막냉각 효율을 75%)로 설정한다면, 분사비, 분사각도, 슬롯높낮이, 하류냉각거리 중 어느 2가지 이상을 설정하면 나머지 변수들을 정할 수 있다. 한 예로, 슬롯상류면 높이가 1d이고 슬롯출구 냉각거리를 20d 이상으로 하려면 분사각도 분사비의 조합형태는 분사각도 45도에 분사비 2, 분사각도 45도에 분사비 3, 분사각도 30도에 분사비 2, 분사각도 30도에 분사비 3, 분사각도 15도에 분사비 2, 분사각도 15도에 분사비 3 중에서 설계조건에 합당한 것을 선정할 수 있다. 다른 예로는 분사각도와 분사비, 슬롯높낮이가 각각 30도, 2, 평평면이고 막냉각 효율을 75%로 설정한다면, d30-2br-flat의 조합에 의해 하류냉각거리는 25d임을 알 수 있다.

5. 결 론

경사진 계단형상의 슬롯출구에서 막냉각 특성을 수치해석 방법을 이용하여 조사하였다. 상류면의 높이, 분사비와 분사각의 서로 다른 조합은 슬롯출구 부근의 유동장 형상을 강하게 지배하며, 이로 인하여 하류의 막냉각 성능이 크게 달라짐을 알 수 있었다. 이는 주류와 냉각제의 속도 및 운동량의 차이에 의한 난류운동에너지 생성 크기 및 분포 영역의 차이와 분사비와 분사각 및 슬롯출구 기하학적 형상에 의한 재순환영역의 크기와 형상에 크게 기인함을 알 수 있었다. 이로부터 다음의 결론이 도출되었다.

(1) 일정 분사비와 분사각에 대하여, 슬롯출구 상류면 높이를 변화시켰을 때, 막냉각 성능을 최대로 하는 최적의 슬롯출구 상류면 높이가 존재하였다.

(2) 일정 분사각에 대하여, 분사비를 변화시켰을 때, 각각의 분사비에서 막냉각 효율을 최대로 하는 최적의 슬롯출구 상류면 높이가 존재하였다. 분사비의 증가에 대한 막냉각 효율의 상승은 저분사비에서는 현저하였으나, 고분사비에서는 둔화되었다. 따라서 어느 정도 이상의 분사비는 비효율적이다. 고 분사각(30도와 45도)일 때, 고분사비(2 이상)의 경우 슬롯출구 상류면을 1d정도 높여주는 것이, 저분사비(1 이하)의 경우 평평면으로 유지하는 것이 막냉각 효율면에서 바람직하

다.

(3) 일정 분사비와 슬롯출구 상류면 높이에 대하여, 분사각을 변화시켰을 때, 막냉각 효율의 차이는 고분사비에서는 현저하나, 저분사비에서는 작았다. 고분사비(1 이상)와 상승상류면(1d 이상)의 경우 저 분사각(15도)으로 하는 것이 바람직하며, 저분사비(1 이하)와 평평면 이하의 하강상류면의 경우 적정 분사각(30도)을 선정하는 것이 바람직하다.

(4) 막냉각 효율을 일정하게(75%) 설정하였을 때 하류냉각거리를 슬롯출구 상류면 높낮이, 분사비와 분사각에 따라 표시한 일종의 설계 맵을 제공하였다. 이 변수들을 적절히 조합하면 막냉각의 설계 기초자료로 활용할 수 있다.

후 기

본 연구는 울산대학교 2002년도 교내연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Goldstein, R. J., 1971, "Film Cooling," *Advances in Heat Transfer*, pp. 321~379.
- (2) Cho, H. H., 2000, "Flow and Heat Transfer Characteristics in Film Cooling," *KSME Spring Annual Meeting 2000 on Fluid Engineering*, pp. 61~79.
- (3) Lee, H.-W., Park, J. J. and Lee, J. S., 2000, "Flow Visualization and Film Cooling Effectiveness Measurement Around Shaped Holes with Compound Angle," *Recent Advances in Transport Phenomena (12th ISTP)*, Elsevier, pp. 45~50.
- (4) Son, C. H., Lee, G. S., Won, Y. H., Rho, S. M. and Lee, J. C., 2001, "A Study on the Combination of Blowing Ratio and Injection Angle in 2-Dimensional Film Cooling," *Proc. KSME 2001 Spring Annual Meeting (D)*, Jeju, Korea, pp. 553~558.
- (5) Rhee, D. H., Kim, B. and Cho, H. H., 1999, "Characteristics of Heat/Mass Transfer Around a Shaped Film Cooling Hole," *Trans. of the KSME*

- (B), Vol. 23, No. 5, pp. 577~586.
- (6) Kim, Y. B., Rhee, D. H., Lee, Y. S. and Cho, H. H., 2004, "The Effects of Staggered Rows of Rectangular Shaped Holes on Film Cooling," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 28, No. 3, pp. 304 ~ 314.
- (7) Rho, S. M., Son, C. H. and Lee, G. S., 2001, "Film Cooling Characteristics with Sunk or Lifted Upstream Wall," *Proc. KSME 2001 Spring Annual Meeting (D)*, Jeju, Korea, pp. 377~381.
- (8) Shih, T.-H., Liou, W. W., Shabbir, A. and Zhu, J., 1995, "A New $k-\epsilon$ Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation," *Computers Fluids*, Vol. 24, No. 3, pp. 227~238.
- (9) Yang, H. C., Ryou, H. S. and Lim, J. H., 1997, "A Study of Applicability of a RNG $k-\epsilon$ Model," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 21, No. 21, pp. 1149~1164.
- (10) Kim, J., Kline, S. J. and Johnston, J. P., 1980, "Investigation of a Reattaching Turbulent Shear Layer : Flow over a Backward-Facing Step," *ASME J. of Fluids Engineering*, Vol. 102, pp. 302~308, September.
- (11) Mikhail, R., Chu, V. H. and Savage, S. B., 1975, "The Reattachment of a Two-Dimensional Turbulent Jet in a Confined Cross Flow," *Pro. 16th IAHR Congress*, Sao Paulo, Vol. 3, pp. 414~419.
- (12) Rodi, W., 1984, *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics*, pp. 66~67.