

직선슬롯 분사유동에 의한 막냉각의 열유동 특성에 대한 수치적 연구

노석만* · 손창호** · 이근식**

Film Cooling Characteristics with Straight-Slot Coolant Injection by Numerical Study

Suk Man Rho, Chang Ho Son and Geun Sik Lee

Key Words: Film Cooling (막냉각), Straight Slot (직선슬롯), Injection Angle (분사각도), Blowing Ratio (분사비), Sunked or Lifted Downstream Wall (하강 또는 상승하류면), Film Cooling Effectiveness (막냉각 효율)

Abstract

A numerical study has been performed for the 2-dimensional film cooling employed in the cooling of hot components such as gas turbines. The flow and heat transfer characteristics are numerically simulated using FLUENT software. Blowing ratios vary from 0.25 to 5.0 and coolant injection angles vary from 15° to 60° in 15° increment. The result shows that, for all cases, there exists a blowing ratio which maximizes film cooling effect (measured by the distance from the slot exit to the downstream wall location at which temperature increases to 900 K) for a given injection angle. It is also observed that the film cooling effectiveness decreases when downstream wall is sunk or lifted. The simulation has been performed using both constant properties and temperature dependent variable properties. It is found that the cases with constant properties overestimate the film cooling effect considerably.

1. 서 론

가스터빈엔진의 효율 및 출력을 향상시키려면 터빈입구온도를 높여야 한다. 그러나 터빈 입구 온도를 높이려면 고온에 견딜 수 있는 재료의 개발과 냉각기술의 개발이 필수적이다. 새로운 재료의 개발은 어려운 반면에 냉각기술의 개발은 비교적 적은 투자로 큰 효과를 거둘 수 있다. 터빈 냉각기술의 발달로 터빈 입구온도는 현재 1770K로 크게 상승했다. 현재 항공기의 냉각용 공기는 압축기로부터 연소실로 들어가는 공기량의 20%에 육박할 정도로 많은 양이 필요하다. 그

러나 냉각공기는, 냉각공기의 공급에 따른 추가적인 일의 소요와 고온가스와의 작동에 따른 공기 역학적 손실 때문에, 터빈입구온도의 상승에 따른 이점이 상쇄될 수도 있다. 따라서 사용냉각공기의 양을 최소로 하고 공력손실을 줄이기 위한 연구가 계속되고 있다.⁽¹⁾

터빈 블레이드의 냉각은 내부대류냉각, 블레이드 선단의 제트 충돌냉각, 블레이드의 외부표면을 보호하기 위한 막냉각이 도입되고 있다. 이 냉각에 쓰이는 공기는 압축기에서 적절한 압력을 가진 압축공기를 바이패스시켜 사용한다. 가스터빈에서 일반적으로 이용할 수 있는 냉각공기의 공급압력으로는 블레이드를 내부에서 효과적으로 냉각시키는데 한계가 있다. 따라서 이와 같은 한계를 극복하기 위하여 내부대류냉각, 제트충돌냉각과 병행하여 막냉각이 널리 쓰인다. 막냉각

* 울산대학교 대학원 기계공학과

** 울산대학교 기계자동차공학부

은 터빈의 노즐 안내깃(nozzle guide vane), 터빈 블레이드 뿐만 아니라 블레이드 끝 벽에도 적용되고 있다.

막냉각은 고온의 가스유동으로부터 블레이드의 표면을 보호할 목적으로 사용되고 있는 방법으로 그 표면에서 분사된 냉각유체는 블레이드와 고온의 가스 사이에 단열막을 형성하여 블레이드로의 열전달을 억제하며, 아울러 고온의 가스유동과의 혼합에 의하여 블레이드 표면근처에서 고온가스 유동의 온도를 저하시키는 열싱크(heat sink)역할도 한다.⁽²⁾ 막냉각은 지난 20년 동안에 걸쳐 블레이드, 연소기, 후기 연소기, 노즐과 같은 고온 시스템에 실용적으로 적용되므로 가장 널리 연구되는 냉각 방법이다. 여러 가지 조건(예를 들면, 깃의 형상, 냉각제 분사구 형상, 블레이드 부하, 자유흐름 레이놀즈수, 자유흐름 난류강도, 분사비, 주류흐름의 온도에 대한 냉각제의 온도를 포함하는 요소)들이 막냉각에 영향을 주는 것으로 알려져 있다.⁽³⁾ 그러나 위의 주어진 조건들에 대한 가장 적절한 분사비는 의외로 잘 알려져 있지 않다. 분사비를 증가시키면 전체 벽에 대해서는 보호된다. 그러나 분사비가 너무 크면 난류혼합을 증가시키기 때문에 분출지역 가까운 지역에서 열전달량이 증가하는 것으로 알려져 있다. 국내에도 막냉각의 연구가 다소 있으나^(4,5) 체계적인 자료가 충분치 않다.

따라서 본 논문에서는 분사각도와 분사비 그리고 하류벽면의 형상변화에 대하여 체계적으로 연구를 수행하고자 한다. 막냉각의 개략적인 유동모델이 Fig. 1에 제시되어 있다. 냉각제 통로는 주류 방향과 적절한 각을 유지하도록 하였고, 슬롯은 길게 늘어뜨렸다. 편의상 슬롯 출구의 상하류 벽면을 단열로 가정하였으며, 냉각제 분사 후 블레이드 표면의 온도가 900K에 도달할 때를 기준으로 하여 냉각특성을 비교한다. 분사비에 따른 연구에서는 15°, 30°, 45°, 60°의 분사각도에 대해 각각의 분사비가 0.25-5까지 변화할 때까지의 하류의 유동과 온도분포를 고찰한다. 분사각에 따른 연구에서는 주류의 유동은 2m/s로 일정하게 하고 분사비 1과 2에 대해 각도는 15°, 30°, 45°, 60°로 변화시켜 하류의 유동과 벽면 온도 분포를 고찰한다. 냉각제 출구 하류면을 5d만큼 상승 및 하강 시켰을 경우, 또 물성치의 변화를 고려하였을 경우 각각에 대한 유동장과 온도장의 변

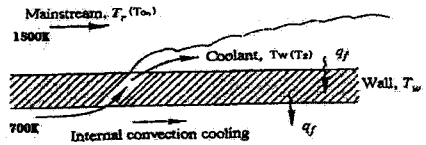


Fig.1 Typical model for film cooling.

화를 고찰한다. 이를 위해 압력 분포, 속도 벡터, 유선(streamline), 난류운동에너지, 주유동과 냉각제 유동의 온도분포, 하류벽면온도 분포를 FLUENT 상용코드를 이용하여 구한다.

2. 수치해석

냉각제와 주유동에 대한 기하학적형상 및 격자 망은 Fig. 2와 같다. 슬롯의 폭은 3.2mm이고 높이는 5cm이다. 주유동은 높이가 15cm이고 길이가 76cm인 2차원 통로를 흐르며, 냉각제 유동과 적절한 각도를 가지면서 입구로부터 하류방향으로 16cm인 지점에서 만나서 상호작용한다. Fig. 2의 좌표는 분사슬롯출구의 오른쪽 모서리를 원점으로 하고 하류방향을 X-축, 높이 방향을 Y-축으로 설정하였으며, 격자는 화살표 방향으로 밀집시켰다. 격자분포는 150 × 40이고 위와 아래의 격자분포는 위가 1.05 아래가 1.1의 분포를 가지며 수평으로의 간격은 0.97의 비를 가지고 형성하였다. 분사 슬롯의 격자분포는 10 × 25로 하였다.

유동장과 온도장의 해석을 위해 연속, 운동량, 에너지 방정식을 사용하고 난류해석을 위해 RNG k-ε 모델을 사용하였다. 벽면함수는 표준 벽함수를 사용하였다.⁽⁶⁾

해석에 사용된 도구는 Gambit으로 형상과 격자를 생성한 후 경계조건을 주고 FLUENT5에서 유동장과 온도장의 결과를 구하였다. 모든 계산과정에서 주유동의 속도는 2m/s로 일정하게 유지하였으며 분사슬롯속도는 0.5-10m/s로 변화시켰다. 유동경계 조건은 고체 표면에서 유체의 속도는 0인 점착조건을 사용하였으며, 온도 경계조건은 주류의 입구온도는 1500K, 냉각제 입구온도는 700K로 하였다. 물성치는 일정하게 가정한 경우(300K에서의 물성치)와 온도의 함수로 가정한 경우 2가지에 대하여 계산을 수행하였다.

막냉각 특성을 나타내는 무차원 변수로는 2가

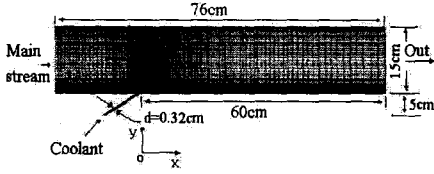


Fig. 2 Geometry and grid for the main-stream and coolant flow. (Origin is attached to the downstream side of the slot exit.)

지가 있다. 첫 번째는 막냉각 효율(Film cooling effectiveness) η 로서, 0과 1 사이의 값을 가지며 무차원 단열벽면온도를 나타내는 변수이다.

$$\eta = \frac{T_{aw} - T_r}{T_{u2} - T_r} \quad (1a)$$

$$\eta = \frac{T_{aw} - T_\infty}{T_2 - T_\infty} \quad (1b)$$

여기서 식 (1a)는 고속유동에서 막냉각 효율을 표시하는식으로, T_r 은 주유동회복온도(mainstream recovery temperature)이며, T_{u2} 는 2차 냉각제 유동의 회복온도이다. 만일 주유동의 속도가 낮아서 압축성효과가 무시되면, 식 (1a)는 식 (1b)로 된다. 식 (1b)에서 T_∞ 는 주유동의 정온도(static temperature)이며, T_2 는 2차 냉각제의 정온도이다.

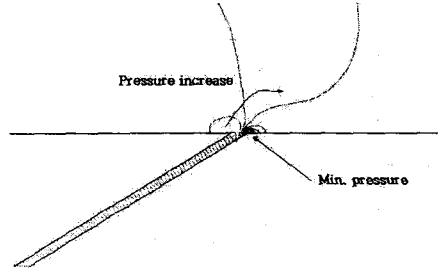
두 번째는 무차원 온도 Θ 로서, 상하류 전체 온도장의 냉각제 농도를 표시하는 변수이다.

$$\Theta = \frac{T - T_r}{T_{u2} - T_r} \quad (2a)$$

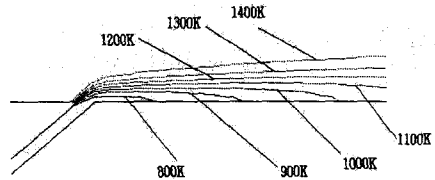
$$\Theta = \frac{T - T_\infty}{T_2 - T_\infty} \quad (2b)$$

본 연구에서는 주류속도가 비압축성으로 가정할 수 있는 2 m/s로 일정하게 유지하여 해석하였으므로, 막냉각 효율은 식 (1b)를 사용하며, 무차원 온도는 식 (2b)를 적용한다.

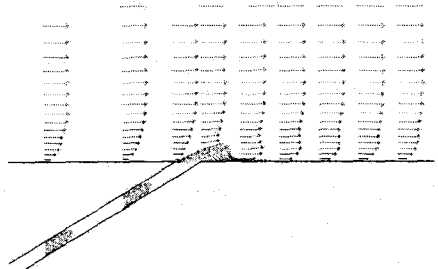
3. 결과 및 검토



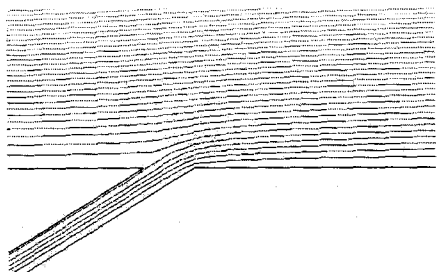
(a) Static pressure



(b) Static temperature



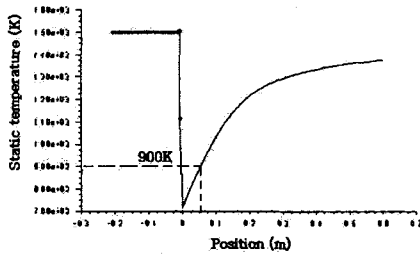
(c) Velocity vector



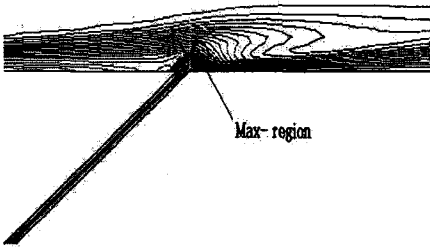
(d) Streamline

3.1. 분사각도의 변화에 따른 막냉각 특성

Fig. 3에 대표적으로 분사비 1, 분사각도 30°일 때 유동장, 온도장, 벽면온도 분포등을 제시하고 있다. 분사슬롯을 빠져나온 공기는 주류와 부딪쳐 서로를 크게 변형시키고, 하류로 이동함에 따



(e) Downstream wall temperature



(f) Turbulent kinetic energy

Fig.3 Flow and temperature field for the $V_c/V_m=2$ $/2(m/s)=1$ and the injection angle of 30° .

라 두 난류유동은 매우 활발하게 혼합된다. 제트 출구 상류로부터 하류방향으로 흘러오던 주류는 분사슬롯 출구 바로 상류 영역으로부터 제트류에 의해 윗 쪽으로 이동하면서 가속된다. 경계층 부근의 주류는 하류로 조금 이동하다가 압력강하가 큰 분사슬롯 하류로 빨려 들어감을 볼 수 있다 (Fig. 3 (a), (c), (d), (f)). (c)의 속도 벡터를 살펴보면 하류의 짧은 영역에서 제트 유동 특성을 유지하며 나머지 모든 곳에 경계층 유동이 형성됨을 확인할 수 있다. 이런 제트유동과 주류의 상호 작용에 의한 유동과 열전달특성으로 막냉각에서의 전형적인 온도분포는 (b)의 경우로 표시되며, 벽면온도 분포는 (e)와 같이 표시됨을 알 수 있다.

Fig. 4 에서는 분사각도에 따른 막냉각 성능(분사 출구 하류 벽면의 온도가 900K까지 도달할 때의 거리)을 보여주고 있다. 분사비가 1과 2일 때를 대표적으로 도시하였다. 분사비 2의 경우 분사각도 15° - 45° 에서는 냉각거리가 크게 차이 나지 않으나, 분사각도 60° 일 때는 냉각거리가 현저히 감소함을 볼 수 있다. 이는 큰 분사각의 경

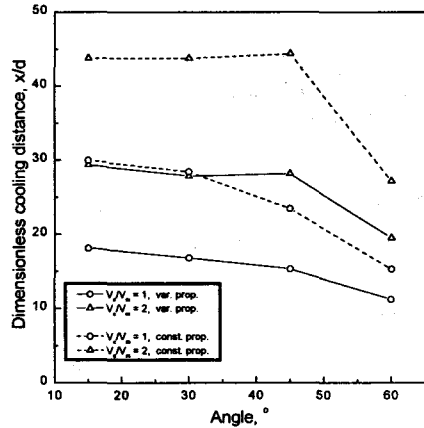


Fig.4 Dimensionless cooling distance vs. injection angle when the downstream surface temperature reaches 900K ($V_m=2m/s$).

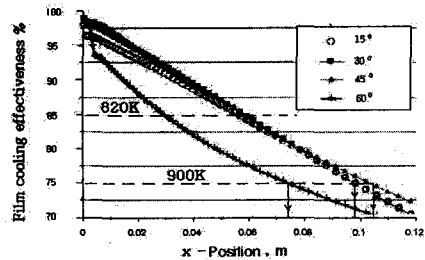


Fig.5 Film cooling effectiveness as a function of downstream distance for various injection angles, when the blowing ratio is 3.

우 냉각제가 하류벽면으로부터 분리됨에 기인한다고 볼 수 있다.⁽⁶⁾ 분사비가 1일 경우보다 분사비가 2인 경우가 냉각거리가 길며, 일정물성치가 정한 경우보다 물성치가 온도의 함수일 때 열확산과 운동량확산이 크므로 냉각거리가 짧게 평가됨을 알 수 있다. 분사비 1에서는 15° 에서 막냉각 성능이 제일 좋지만(벽면온도 900K까지 도달거리가 제일 크지만) 분사비가 2일 때는 45° 가 제일 높게 나옴을 알 수 있다.

Fig. 5에서는 분사비가 3일 때 여러 분사각도에 따라 냉각효율을 분사출구로부터 거리의 함수로 표시하였다.⁽⁷⁾ 하류벽면온도가 900K일 때의 거리는 냉각 효율이 75%인 경우로서 각 분사각도

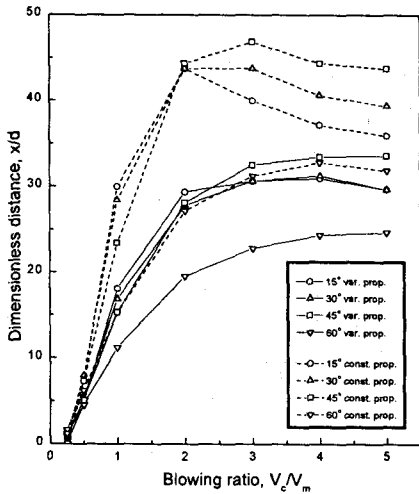


Fig.6 Dimensionless cooling distance vs. blowing ratio when downstream wall temperature reaches 900K($V_m = 2\text{m/s}$).

에 대해 읽을 수 있으며, Fig. 4의 분사비 2일 때의 경향과 유사하다. 그러나 원하는 냉각 효율을 달성하려면 냉각거리를 최대화 하는 분사각도가 달라질 수 있다. 예를 들면 냉각효율을 85%(하류벽면온도 820K까지 도달거리에 대응함)로 잡으면 가장 긴 냉각거리는 분사각도 30°일 때이다.

3.2. 분사비 변화에 따른 막냉각 특성

일반적으로 분사비가 너무 크면, 유동방향 분사제트의 궤적은 막냉각면으로부터 크게 분리되어 막냉각 성능이 감소되며, 분사비가 너무 작을 경우에도 분사제트의 운동량이 너무 작으므로 막냉각 효과 역시 떨어진다. 따라서 적절한 분사비와 분사각도의 조합을 찾는 것이 매우 중요하다. Fig. 6은 주류속도가 2 m/s일 때의 분사비(0.25-5)에 대한 냉각거리(하류벽면온도 900 K까지 도달거리를) 여러 분사각도에 대해 보여주고 있다. 물성치가 온도의 함수인 경우 저분사비(약 2.5이하)에서는 분사비가 증가함에 따라 막냉각 성능이 증가함을 볼 수 있다. 일정물성치로 가정한 경우가 물성치를 온도의 함수로 표시한 경우보다 과대 평가되어 더 긴 냉각거리로 표시되었다. 동일 분사각도에 대한 냉각특성을 살펴보면 분사비가 2.5이상일 때는 냉각거리의 증감이 현저히 둔해짐을 알 수 있다. 따라서 이 이상의 분사비는 오

히려 냉각공기의 증대로 인한 가스터빈의 성능저하만 초래하게 된다.⁽⁸⁾ 또한 어느 각도든지 최대 냉각거리를 갖는 분사비가 존재함을 알 수 있다. 분사비가 2일 때는 냉각거리가 각도에 관계없이 비슷하며(분사각도 60°는 제외), 분사비가 1부근에서는 분사각도 15°일 때가, 분사비가 1.6부근에서는 분사각도 30°일 때가, 분사비 2.5이상일 때는 분사각도 45°일 때가 하류벽면온도 900K까지의 냉각거리가 가장 큼을 알 수 있다.

3.3 분사출구 하류면의 상승 또는 하강시의 막냉각 특성

Fig. 7-9는 분사비가 2이고 분사각도가 30°일 때 분사출구 하류면의 상승 또는 하강시 유동장과 온도장 또 벽면온도 분포를 제시하고 있다. 비교를 위해 분사각도 30°의 하류평평면을 함께 제시하였다. 정압 분포는 그림에서 제시되지는 않았지만 일반적으로 냉각공기 출구 바로 상류 영역에서 높은 정압이, 반면에 슬롯의 출구 바로 하류영역에서 낮은 정압이 나타나며, 슬롯 출구의 바로 하류 가까이에 강한 역압구배가 관찰된다. 이는 이 지역에서 박리점이 생기게 되는 가능성을 암시하고 더 높은 속도에서는 제트유동은 벽으로부터 떨어지는 가능성을 암시한다. 또한 슬롯출구에서 바로 상류 영역, 바로 하류 영역 위쪽의 제트와 같은 유동은 주유동과 상호작용에 의해 난류를 발생하며 출구 바로 하류벽면 영역에서의 유동은 국소 혼합을 야기시킴을 암시한다. 이것은 Fig. 7과 난류운동에너지 분포에서도 확인 되었다.

냉각제 출구의 하류 벽측의 높은 속도는 주류와의 모멘텀 교환 때문에 속도분포를 찌그러뜨리며, Fig. 7에서 처럼 슬롯출구의 상류에 강한 주유동의 이끌림 효과(entrainment effects)를 주게된다. 이와 관련하여 Fig. 7에서는 제트가 주류와 상호작용함으로써, 슬롯 유동출구의 거의 직선 속도분포는 하류의 그리 멀지 않는 거리에서 전형적인 제트유동 특성을 유도함을 보여주고 있다. 하류속도 분포는 슬롯유동과 주류의 상호작용에 의한 벽면부근의 불룩한 형상과 굴곡점을 갖는 특이한 모양을 갖는다. 이런 모양은 하류로 이동함에 따라 제트의 영향이 감소하게되어, 유동의 형태는 경계층 유동으로 되돌아감을 볼 수 있다.

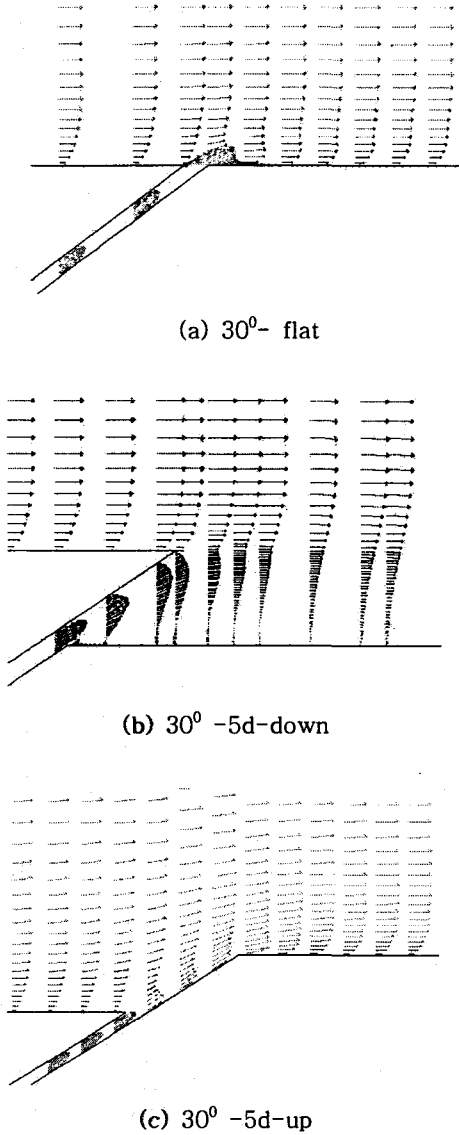


Fig.7 Velocity vector when $V_c/V_m = 4/2 = 2$.

Fig. 8에서는 온도장을 보여주고 있다. Fig. 7의 30° 평평면의 경우와 같이 전형적인 하류속도분포는 열경계층 내의 유동을 안정되게 하고 온도의 성층화를 유발하여 막냉각을 향상시킨다. 이러한 이유로 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 30°평평면이 냉각성능이 가장 좋음을 알 수 있다. 이로부터 막냉각의 슬롯과 이웃슬롯 사이의 간격을 추정할 수 있다. 예를 들면 700K의 냉각제를 사용하여 터빈블레이드 하류벽면온도를 900K로 유지

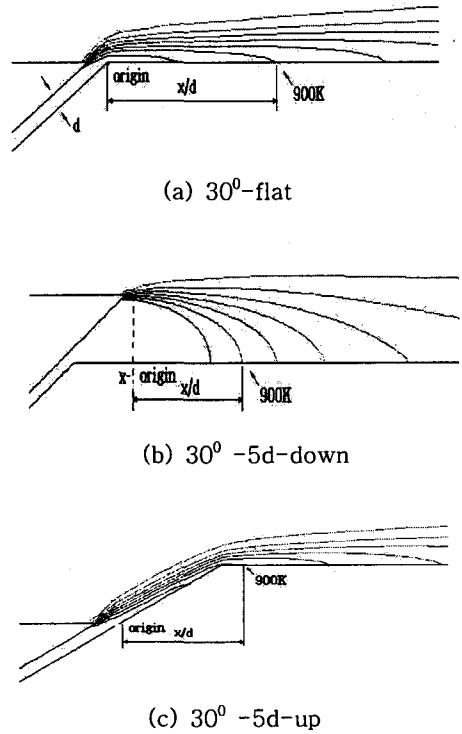


Fig.8 Static temperature when $V_c/V_m = 4/2 = 2$.

시킬 때 필요한 거리를 산출할 수 있다.

난류 운동에너지는 다음의 영역에서 높은 값을 가짐이 관찰되었다. 냉각제출구의 바로 상류영역인 이끌림 영역(entrainment region), 냉각제출구의 바로 하류영역, 그리고 제트 유동특성을 갖는 하류영역이다. 이 영역들에서 큰 속도차와 높은 압력구배는 이끌림 효과(entrainment effects)와 난류혼합을 야기하였기 때문으로 추정된다.

Fig. 9은 분사각도 30°일 때 하류형상(5d만큼 상승과 하강)에 따른 냉각특성을 보여준다. 물성치를 일정하게 가정한 경우가 온도의 함수로 가정한 경우보다 냉각성능(벽면온도 900K까지 유지거리)이 과대 평가됨을 알 수 있다. 5d-상승면과 5d-하강면은 평평면 보다 냉각성능이 떨어지며, 30°평평면, 30°상승면, 30° 하강면 순으로 냉각효율이 좋음을 알 수 있다. 분사비가 0.7-5범위에서는 평평면, 상승면, 하강면의 냉각성능 차가 다소 크며 평평면이 다소 큼을 알 수 있다. 분사비

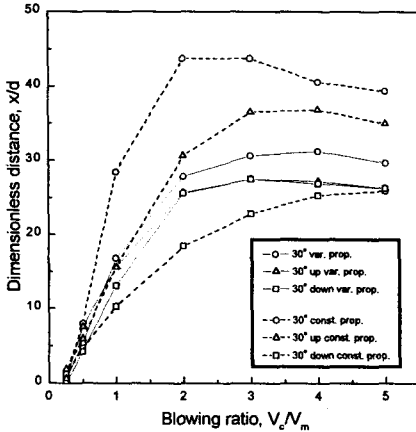


Fig.9 Dimensionless distance vs. blowing ratio for various downstream geometries at the injection angle of 30° and $V_m=2\text{m/s}$ when downstream wall temperature reaches 900K.

가 5이상 일 때는 하류면의 형상에 무관할 것으로 예측된다. 분사비가 0.37부근이하에서는 30°하강면의 성능이 다른것에 비해 다소 높음을 볼 수 있고, 모든 하류형상들은 냉각성능을 최대로 하는 최적의 분사비가 존재함을 확인 할 수 있다.

4. 결론

분사 슬롯으로부터 분사되는 냉각제에 의한 막냉각 특성을 연구하기 위하여 주류(2 m/s로 유지)와 냉각제의 유동장과 온도장을 FLUENT5 상용코드를 사용하여 조사하였다. 막냉각에 의한 단열벽 온도분포는 분사비 뿐만 아니라 분사각도와 하류형상에 의해 서로 좌우된다. 막냉각 성능은 슬롯 출구에서 하류구역의 벽 가까운곳의 유동특성에 많이 의존하며, 특히 슬롯 출구에서 선형적인 속도분포가 냉각성능을 좋게한다. 슬롯 출구의 상류측에서의 큰 이끌림(entainment)효과, 슬롯출구에서의 큰 제트와 유사한 혼합, 슬롯출구의 하류측에서의 가장 낮은 정압, 난류혼합이 일어나는 영역이 막냉각 성능에 영향을 준다. 그러나 본 2차원 모델은 바운드 와류(bound vortex), 말굽와류(horseshoe vortex)등의 3차원적 2차유동을 무시하게 되므로 실제 적용되는 3차원 분사홀보다 더 높은 막냉각 효과를 예측하게 된다. 제

산된 하류 벽면의 온도를 이용하여 냉각 효율을 구해본 결과 냉각효율은 분사각도와 분사비에 큰 영향을 받음을 알 수 있었고 최적의 분사비와 분사각의 조합을 얻을 수 있었다.

(1) 각도에 따른 최적의 분사각은 분사비에 많이 의존하며 분사비 2를 전후로 하여 최적의 분사각도는 분사비 2 이전에는 15°가 제일 좋게 나왔고 분사비 2 이후에는 45°가 가장 좋게 나왔다. 냉각효율면(하류벽면온도 900K까지의 냉각거리)에서 보면 45°, 30°, 15°, 60°순으로 나타났다. 그러나 이것은 벽면온도 900K를 기준으로 하였을 때의 결과이며, 냉각벽면의 설정온도를 다르게 하면 또 다른 결과가 도출될 수 있다.

(2) 최적의 분사비는 냉각거리(900K까지 도달 거리를) 비교하여 나타내었고 어느 각도이든지 최대 냉각거리를 갖는 분사비가 존재하였다. 45°와 30°는 분사비 4 일때, 15°는 분사비 3 일 때 최대 냉각거리를 가지며, 60°는 분사비 5 부근이지만 냉각거리면에서는 다른 각도에 비해 짧아짐을 알 수 있었다.

(3) 분사비에 따른 최적의 분사각이 밝혀졌다. 분사비가 2일 때는 냉각거리가 각도에 관계없이 비슷하며(분사각도 60°는 제외), 분사비가 1부근에서는 분사각도 15°일 때가, 분사비가 1.6부근에서는 분사각도 30°일 때가, 분사비 2.5이상일 때는 분사각도 45°일 때가 하류벽면온도 900K까지의 냉각거리가 가장 큼을 알 수 있다.

(4) 하류형상에 따른 냉각 효율면에서는, 900K까지의 무차원화 거리비로 비교하여 본 결과, 30°평면, 30°상승면, 30°하강면순으로 나타남을 알 수 있었다. 그러나 원하는 냉각벽면 온도 혹은 상승 및 하강폭을 다르게 잡으면 또 다른 결과를 얻을 수 있다. 또한 분사비 5이상 일 때는 하류면의 형상에 무관한 것으로 예측되었다.

(5) 물성치를 온도의 함수로 가정한 경우와 일정하게 가정한 경우를 비교한 결과, 일정하게 가정한 경우가 물성치를 온도의 함수로 가정한 경우보다 막냉각 성능이 과대 평가됨을 알 수 있었다.

(6) 최적의 분사각과 분사비의 조합을 도출함에 있어서 본 연구는 다소 거친 결과이며, 좀더 상세한 분사각도 구간과 온도의 함수로 된 밀도를 고려함이 필요하다. 상승면과 하강면의 상세한 해석이 보완되고 실험적인 확인이 보완될 필요가 있다.

참고문헌

- (1) Andreopoulos, J., 1982, Measurements in a Jet-Pipe Flow Issuing Perpendicularly Into a Crossstream, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 104, pp. 493 - 499.
- (2) Chen, K. C., Inada, T., and Akiyan, M., 1985, Flow Visualization Studies of Secondary Flow Patterns and Centrifugal Instability in Curved Circular and Semicircular Pipes, in FLOW VISUALIZATION III, ed. W. J. Yang, pp. 531 - 536, Hemisphere Pub, Co, Washington.
- (3) Goldstein, R. J., Eckert, E. R. G., and Ramsey, J. W., 1968, Film Cooling with Injection through Holes adiabatic Wall Temperatures Downstream of a Circular Hole, ASME Journal of Engineering for Power, Vol. 89, pp. 384 - 395.
- (4) 이동호, 김병기, 조형희, 1998, 분사각도변화에 따른 단일 막냉각홀 주위에서의 열/물질전달 및 막냉각효율 특성, 대한기계학회논문집 제 22권, 제10호, pp 1433 - 1444.
- (5) 이상우, 신세현, 이택식, 이준식, 1988, 막냉각되는 평판에서의 열전달 특성에 관한 실험적 연구, 대한기계학회논문집 제 6권, 제3호, pp 1415 - 1427.
- (6) G. S. Lee., W. J. Yang., and C. H. Kuo., 1998, Thermal Stratification and Flow Stability in Film Cooling with Curved Coolant Injection, The 11th IHTC, Heat Transfer 1998, Vol. 6, pp. 547 - 551.
- (7) Sinha, A. K., Bogard, D. G., and Crawford, M. E., 1991, Film Cooling Effectiveness Down-stream of a Single Row of Holes with Variable Density Ratio, ASME J. of Turbomachinery, Vol. 113, pp. 442 -449.
- (8) Leiss, C., 1975, Experimental Investigation of Film Cooling with Ejection from a Row of Holes for an Application to Gas Turbine Blades, ASME Journal of Engineering for Power. Vol. 97, pp. 21 - 27.