

일정 분사비와 분사각도에서 슬롯출구 형상에 따른 막냉각

노석만 · 손창호 · 이근식
기계·자동차공학부

<요 약>

슬롯출구 상류면을 높이거나 낮추었을 때 슬롯출구 하류면의 막냉각 특성을 밝히기 위하여, 분사비를 1로 하고 분사각도를 30° 로 유지하였을 때 유동장과 온도장을 수치해석 방법을 이용하여 조사하였다. 슬롯출구 상류면의 상승 및 하강폭은 $0.8d$ (d 는 슬롯폭)에서 $2d$ 사이이다. 해석결과에 의하면, $1d$ -상승면의 경우가 가장 막냉각 성능이 우수한 것으로 판명되었다. 이는 $1d$ -상승면이 다른 경우에 비하여 슬롯출구 직후의 속도구배가 감소하여 난류운동에너지 생성이 최소화되며 따라서 냉각제의 혼합이 억제되어 하류 멀리까지 표면을 저온으로 유지하기 때문이다.

Film Cooling Characteristics for the Variation of the Slot Exit Geometry with Fixed Blowing Ratio and Injection Angle

Suk Man Rho · Chang Ho Son · Geun Sik Lee
School of Mechanical & Automotive Engineering

<Abstract>

Film cooling characteristics has been investigated numerically with the aid of FLUENT software for the sunk or the lifted upstream wall from the slot injection exit. In this study, with the fixed blowing ratio of 1 and the fixed coolant injection angle of 30° , the downstream flow field and the downstream temperature field were examined

in terms of velocity vector, turbulent kinetic energy, temperature contours, and downstream wall temperature. Upstream wall was sunk or lifted from $0.8d$ to $2d$ (d = slot width). The result shows that the up- $1d$ upstream wall has the best film cooling performance. This is due to the fact that the up- $1d$ upstream wall configuration reduces mean velocity gradient just enough to minimize the turbulent kinetic energy production which promotes mixing between the mainstream and the coolant just off the slot exit.

1. 서론

가스터빈엔진의 효율 및 출력의 향상을 위해 터빈입구온도를 높이게 된다. 그러나 높은 온도에 견딜 수 있는 재료 개발의 한계성 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 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, 깃의 형상, 냉각제 분사구 형상(1-3), 블레이드 부하, 분사비와 분사각도(4), 주류흐름의 온도에 대한 냉각제의 온도를 포함하는 요소)가 있으나, 본 연구에서는 분사비와 분사각을 일정하게 하고 냉각제 출구 상류면의 상승과 하강에 따른 막냉각의 성능 조사에 초점을 두었다.

막냉각의 개략적인 유동모델이 Fig. 1에 제시되어있다. 냉각제 통로는 주류 방향과 분사각이 30° 로 일정하게 유지하도록 하였고, 슬롯은 슬롯길이의 영향이 배제되도록 길게 하였다. 슬롯 출구의 상하류 벽면을 단열로 가정하였으며, 분사비(Blowing ratio, BR = 냉각제의 운동량/주류의 운동량)는 1로 하고 상류면의 형상 변화에 따른 하류의 유동장과 온도장을 조사한다. 이를 위해 속도 벡터, 난류운동에너지, 주유동과 냉각제유동의 온도분포, 하류벽면온도 분포를 상용 전산열유동해석 소프트웨어인 FLUENT를 이용하여 구한다.

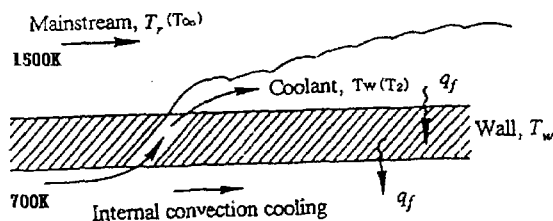


Fig. 1 Typical model for film cooling.

2. 수치해석 및 방법

주유동에 대한 슬롯분사의 형상과 해석 대상 모델의 제원을 Fig. 2에 나타내었다. 좌표는 분사슬롯출구의 오른쪽 모서리를 원점으로 하고 하류방향을 X-축, 높이 방향을 Y-축으로 설정하였으며, 격자는 슬롯출구주위로 밀집시켰다. 주 유동 통로의 격자는 160 × 70 이고 격자 분포는 위와 아래면에서부터 간격을 1.1배씩 증가하도록 분포시켰으며 수평방향의 간격은 양 끝단으로부터 슬롯 출구를 향하여 0.97의 비율로 감소하도록 형성하였다. 분사 슬롯의 격자분포는 25 × 25로 하였다.

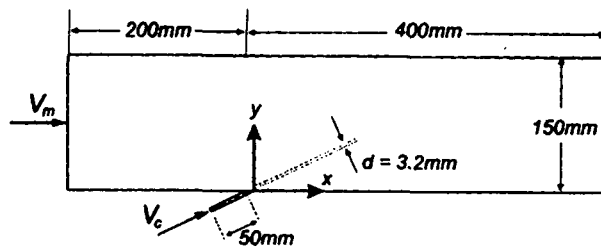


Fig. 2 Geometry and grid for the main- stream and coolant flow. (Origin is attached to the downstream side of the slot exit.)

유동장과 온도장의 해석을 위해 연속, 운동량, 에너지 방정식을 사용하고 난류해석을 위해 $k-\epsilon$ 모델을 수정한 실현가능 $k-\epsilon$ 모델(Realizable $k-\epsilon$ model)(5)을 사용하였다. 이 모형은 제트 유동의 퍼지는 정도를 일반적인 $k-\epsilon$ 모델보다 더 정확히 예측할 수 있는 것으로 알려져 있으며 슬롯에서 주류를 향해 분출하는 막냉각 유동이 제트유동과 유사한 점에서 선택되었다. 벽 주위의 난류처리는 두 유동의 혼합이 벽 가까이에서 이루어지는 점을 고려하여 점성의 영향을 받는 벽근처 영역에 Wolfstein(6)의 1방정식 모형을 사용하는 2단 모형(Two-layer zonal model)을 사용하였다.

해석은 Gambit으로 형상과 격자를 생성한 후 경계조건을 주고 FLUENT-5에서 유동장과 온도장의 해를 구하였다. 모든 계산과정에서 주유동과 슬롯분사 속도는 2 m/s로 일정하게 유지하였다. 유동경계 조건은 고체 표면에서 유체의 속도는 0인 점착조건을 사용하였으며, 온도 경계조건은 주류의 입구온도는 1500K, 슬롯의 냉각제 입구온도는 700K로 하였다.

막냉각 특성을 나타내는 막냉각효율(Film cooling effectiveness) η 은, 0과 1 사이의 값을 가지며 무차원 단열벽면온도를 나타내는 변수로 다음과 같이 정의하였다.

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

위의 식에서 T_{∞} 는 1500K의 고온 주류의 정온도(static temperature)이며, T_2 는 냉각제의 정온도이고, T_{aw} 는 단열벽면온도(adiabatic wall temperature)이다.

3. 결과 및 토의

Fig. 3은 대표적으로 분사비 1, 분사각도 30° 일 때 상류면의 형상변화를 제시하고 있다. II면은 평평면을, I면은 1d-하강면을, III면은 1d-상승면을, IV면은 2d-상승면을 각각 표시한다. 슬롯출구 직후 모서리진 하류면 O점을 기점으로 1d, 2d, 3d 떨어진 지점을 각각 A, B, C 점이라 칭한다.

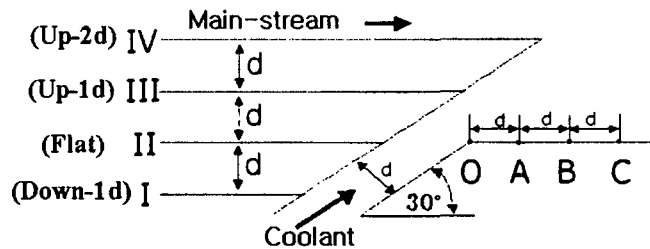


Fig. 3 Wall geometry

3.1 온도장 및 벽면 온도분포

막냉각에서 관심있게 살펴야 할 대상은 온도장과 벽면온도 분포이다. Fig. 4에서 보듯이, 1d-하강면, 평평면, 1d-상승면, 2d-상승면 중에서, 등온선의 분포는 1d-상승면의 경우가 가장 낮은 위치에 밀집되어 있어 냉각제와 주류의 혼합이 적다는 것을 보여주고 있다. 대표로 등온선 900K의 영역을 비교할 때 1d-상승면이 가장 멀리까지 하류로 연장됨을 알 수 있다. 또한 Fig. 5에 제시된 하류벽면의 온도분포에서도 알릴 수 있듯이, 평평면이나 1d-하강면에 비하여 1d-상승면이 냉각거리가 가장 길다.

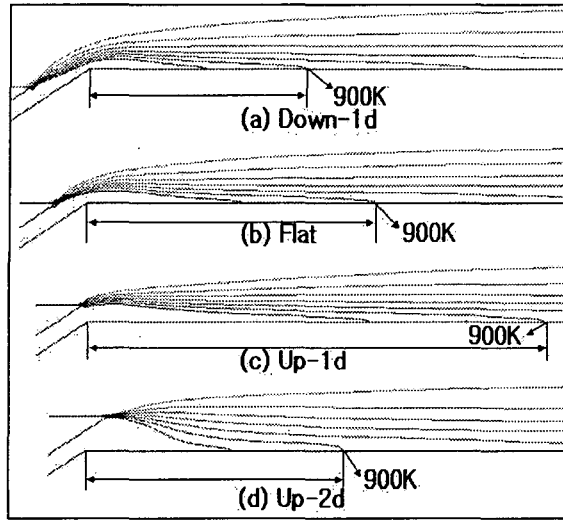


Fig. 4 Static temperature when BR=1

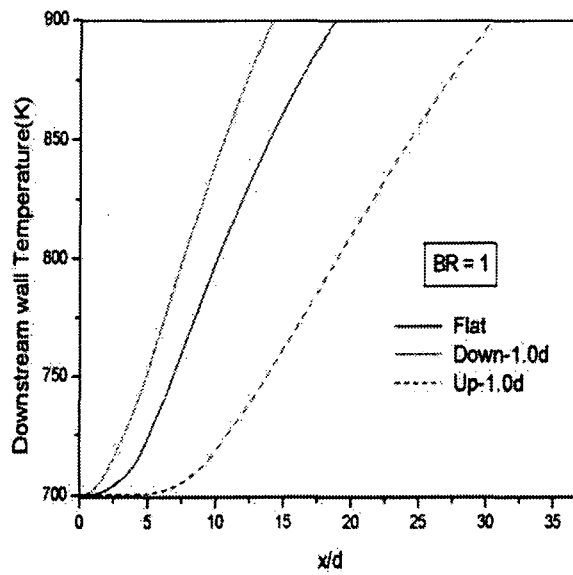


Fig. 5 Downstream wall temperature for various upstream wall geometries ($V_m=2m/s$).

3.2 출구하류면 속도벡터

위의 온도장 특성과 벽면온도 분포는 막냉각의 특성상 유동의 영향을 많이 받기 때문에 유동의 특성을 조사할 필요가 있으며, 특히 분사슬롯 출구에 가까운 곳의 하류의 유동특성을 살필 필요가 있다. 이는 Fig. 6에 제시되어 있다.

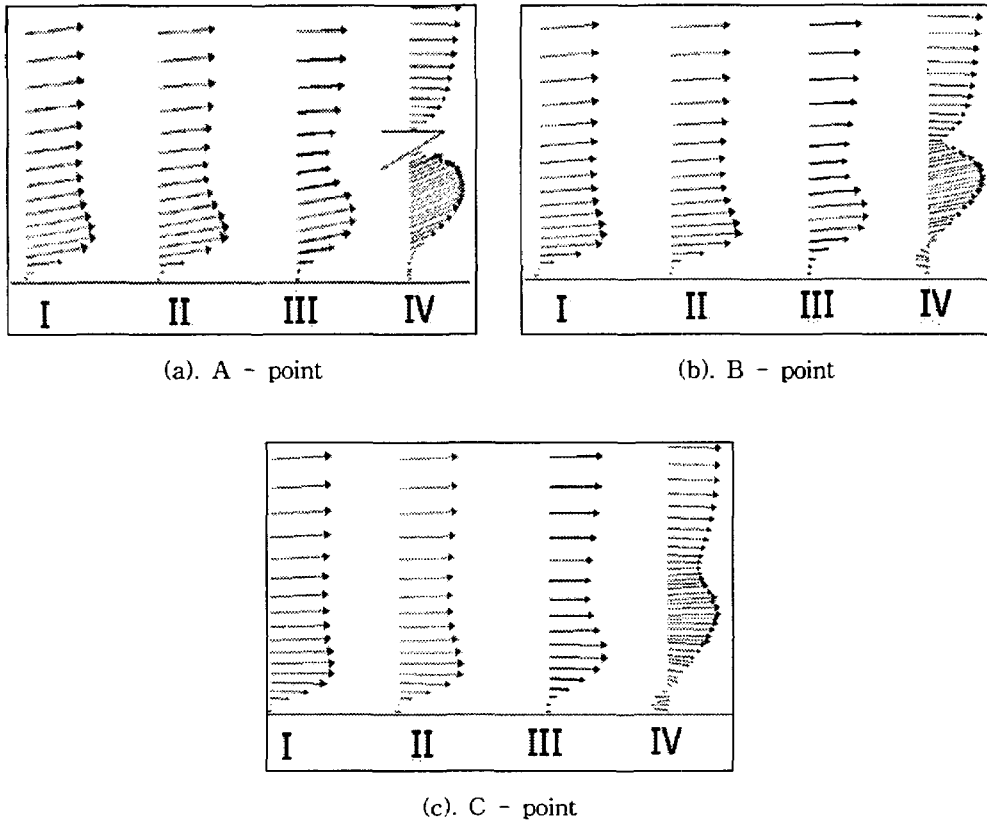


Fig. 6 Velocity vectors for various upstream wall geometries

제트 출구 상류로부터 하류방향으로 흘러오던 주류는 분사슬롯 출구 바로 상류 영역으로부터 제트류에 의해 뒷쪽으로 이동하면서 가속된다. 한편 분사슬롯을 빠져나온 공기는 주류와 상호작용 함으로써 두 유동은 활발하게 혼합된다. 모든 경우 하류로 갈수록 제트유동의 특성이 점차 사라지고 경계층 유동으로 되돌아가게 되나, III면과 IV면은 상승된 상류면이 냉각제를 계속 안내할 뿐 아니라 주류와의 혼합을 늦추어 주기 때문에 I면과 II면에 비해 더 먼 하류영역까지 제트유동의 특성을 유지함을 보여주고 있다. 1d-상승면(III면)의 경우, 벽면 가까운 곳의 속도구배가 작고 역류의 발생이 거의 없으므로 다른 면에 비해 제트류가 하류 멀리까지 지속함을 예측할 수 있다.

3.3 난류 운동에너지 분포

분사슬롯 출구 근처 하류의 유동특성이 난류혼합에 큰 영향을 주게되므로, 상승면과 하강면에 대하여 난류 운동에너지분포를 조사할 필요가 있다.

높은 난류운동에너지 영역(편의상 $0.9 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 보다 큰 영역)은 Fig. 7에 제시되어 있다. 전체적으로, 주류와 분사제트가 처음으로 만나게 되어 이끌림(entrainment)효과가 발생하는 슬롯출구 상류부분, 가장 낮은 정압이 발생하는 슬롯출구의 하류쪽 모서리진 지점과 가까운 곳으로 역압력구배가 걸리는 하류 벽면 근처를 포함한 영역이 강한 난류혼합이 발생하는 부분임을 알 수 있다. 1d-상승면의 경우에 높은 난류운동에너지를 포함하는 영역이 가장 좁아서 난류혼합이 가장 적게 일어남을 알 수 있다.

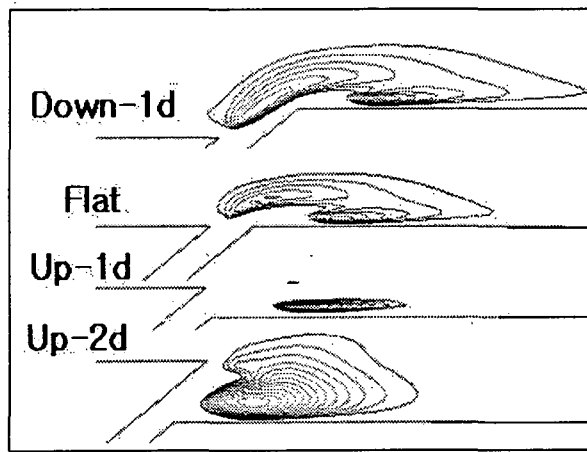


Fig. 7 Turbulent kinetic energy region greater than $0.9 \text{ m}^2/\text{s}^2$ for various upstream wall geometries (Blowing ratio=1.0)

3.4 최적 상승면 높이

Fig. 8에서는 상류면을 1d-상승면을 기준으로 여러 높이로 상승시켰을 때 온도장을 조사하기 위하여 대표적으로 900K의 등온선을 비교하여 제시하였다. 1d-상승면이 평평면이나 다른 높이의 상승면 보다 훨씬 더 길고 넓은 영역을 점하고 있어 막냉각 효과가 가장 크다.

이는 Fig. 9의 막냉각 효율 그래프에서도 확인할 수 있다. 그 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다. 상류면을 서서히 높이면, 슬롯출구 하류면에서는 벽면 가까운 곳의 속도구배가 작아져서 유동이 안정화되면서 주류와 냉각제의 혼합이 적어지게 된다. 그러나 어느 높이 이상으로 상류면을 높이면, 하류면에 역압력구배가 발생하기 시작하여 벽근처의 속도구배가 점점 작아지다가 결국에는 역류가 발생하여 재순환영역이 생기게 된다. 더구나 상류면을 너무 높이면, 주류는 계단모양의 유동특성과 유사하게 하류 직후에 역류가 발생하고 큰 역압력구배를 가지는 재순환영역을 가지게 된다. 이 때 분사제트의 벽면근처

운동량이 충분하지 못하면 위의 재순환영역 때문에 분사제트가 멀리가지 못하므로 막냉각 성능이 감소하게 된다. 따라서 역류가 발생하지 않으면서 벽면 근처의 속도구배를 최소화 하는 상승면의 높이가 존재함을 예상할 수 있다. 즉, 역류가 발생하기 직전까지 상류면을 높인다면 벽면 속도구배는 가장 작은 상태가 되며 난류운동에너지의 생성이 작아지므로 난류로 인한 주류와 냉각제의 혼합이 최소화된다. 따라서 0.8d-상승면이나 1.2d-상승면에 비해, 1d-상승면에서는 위의 물리적인 이유로 난류혼합이 최소화되며, 그 결과 온도를 성층화하게 된다.

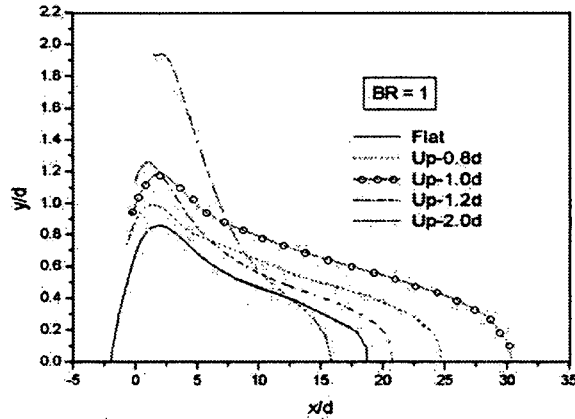


Fig. 8 Constant temperature contours of 900K for various upstream walls at BR=1.0

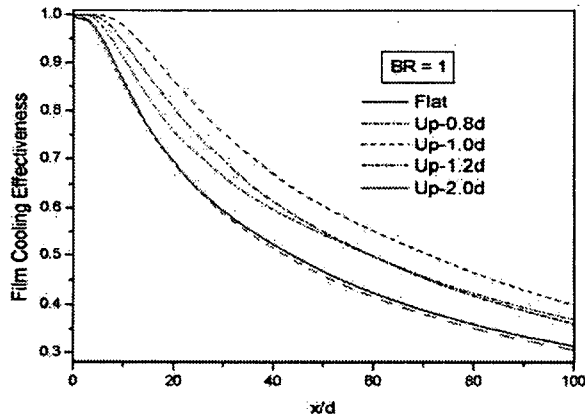


Fig. 9 Film cooling effectiveness as a function of downstream distance, when the blowing ratio is 1 and the injection angle is 30°

4. 결론

슬롯분사 막냉각에서 주류속도를 2 m/s, 분사비를 1로 하고 분사각을 30° 로 일정하게 유지하였을 때, 상류면의 형상변화가 막냉각 유동 및 열전달에 미치는 영향을 조사하기 위하여 수치해석 방법을 이용하였다. 상류면이 상승 또는 하강함에 따라, 슬롯 출구 근처에서의 속도분포와 이로부터 발생하는 난류 운동에너지의 양이 달라짐으로 인해 난류혼합의 강도와 발생하는 영역의 크기와 위치가 바뀌게 되어 막냉각 성능이 달라짐을 알 수 있었다. 이로부터 다음의 결론이 도출되었다.

(1) 분사출구 상류면을 평평면에서 슬롯폭(1d) 만큼 상승 또는 하강시켰을 때, 상류하강면은 평평면보다 막냉각 성능이 떨어지며, 상류상승면은 평평면보다 막냉각 성능이 높다.

(2) 상류면을 1d-상승면을 기준으로 여러 높이(0.5d - 2d)로 상승시켰을 때, 막냉각 효율을 최대로 하는 상류면은 1d-상승면이다.

(3) 분사비와 분사각도를 달리하면 막냉각 효율을 최대로 하는 상류면의 높이는 달라질 수 있다.

참고문헌

1. R. J. Goldstein, "Film cooling", *Advances in Heat Transfer*, 1971, pp. 321-379.
2. 조형희, "막냉각에서 유동 및 열전달 특성", 대한기계학회 2000년도 유체공학부문 학술강연회 강연집, 2000, pp. 61-79.
3. H-W, Lee, J. J. Park, and J. S. Lee, "Flow visualization and film cooling effectiveness measurement around shaped holes with compound angle", *Recent Advances in Transport Phenomena(12th ISTP)*, Elsevier, 2000, pp. 45-50.
4. 손창호, 이근식, 원영호, 노석만, 이종천, "2차원 막냉각의 적정분사비와 분사각도의 조합에 관한 연구", 대한기계학회 2001년도 춘계학술대회 논문집, 2001, pp. 553-558.
5. T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, and J. Zhu, "A New $k-\epsilon$ Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation, *Computers Fluids*" Vol. 24, No. 3, 1995, pp. 227-238.
6. M. Wolfstein, "The Velocity and Temperature Distribution of One- Dimensional Flow with Turbulence Augmentation and Pressure Gradient" *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 12, 1969, pp. 301-318.