

2차원 막냉각의 적정 분사비와 분사각도의 조합에 관한 연구

손창호*·이근식*·원영호*·노석만**·이종천**

A Study on the Combination of Blowing Ratio and Injection Angle in 2-Dimensional Film Cooling

Chang Ho Son, Geun Sik Lee, Young Ho Won,
Suk Man Rho and Jong Chun Lee

Key Words: Film Cooling(막냉각), Blowing Ratio(분사비), Injection Angle(분사각도)

Abstract

To find the effective combinations of blowing ratio and injection angle for a straight slot film cooling, film cooling characteristics was investigated using both flow visualization experiment and numerical simulation. Injection angles from 15° to 50° and blowing ratios from 0.2 to 3.0 were selected for the simulation. Comparison between experimental and numerical results shows a good agreement, for the case of the injection angle of 30° and blowing ratio ranging from 0.55 to 2.0. Film cooling effectiveness was found to be an increasing function of blowing ratio. The effects of injection angle became prominent as the blowing ratio increases. An interesting phenomenon was found for the injection angle of 15° : the lowest film cooling effectiveness for the blowing ratio smaller than 1.0, but the highest film cooling effectiveness for the blowing ratio greater than 2.0 within wide range of downstream region. There exist optimum injection angles corresponding to maximum film cooling effectiveness : injection angle of 25° for the blowing ratio from 0.2 to 2.0, and injection angle of 15° for the blowing ratio of 3.0. Present study provides a design combination among film cooling effectiveness, blowing ratio, and injection angle.

기호설명

V_c : 냉각제의 속도
 V_m : 주류의 속도
 T_c : 냉각제의 정온도
 T_m : 주류의 정온도
 d : 냉각제 유입 슬롯의 폭
 η : 막냉각 효율

1. 서론

막냉각은 주유동과 제트 유동 상호간의 충돌로 인한 난류와 와류등을 동반한 복잡한 유동현상과 열전달 현상 때문에 주로 실험적인 연구가 많이 수행되어왔다. 막냉각에 영향을 주는 인자로는 냉각면의 형상, 냉각제 분사구의 기하학적 형상, 주류 레이놀즈 수, 분사비, 주류난류강도, 주류와 냉각제 온도비 등을 들 수 있다.[1][2]

1990년 이전까지는 2차원 슬롯유동과 3차원 홀 유동이 동시에 연구되었으나 1990년대에 들어와서는 주로 3차원 홀유동이 주를 이루고 있다. 이는 가스터어빈 블레이드에서 실제로 홀 냉각방식이 사용된다는 점과 홀의 3차원적 기하학적 형

* 울산대학교 기계·자동차공학부

** 울산대학교 대학원 기계·자동차공학과

상 및 분사조건이 막냉각의 유동 특성을 지배한다는 점에서 연구에 흥미로운 점들을 제공하였기 때문이다. 그러나 대부분은 유동에 관한 연구이거나 주류와 냉각제의 작은 온도차에 의한 실험으로부터 막냉각 효율을 제시한 연구들이었다. 이는 열전달에 관한 연구에서 1500K 부근의 고온 조건에서 실험하는 것이 그리 용이한 일이 아니기 때문이다. 따라서 수치적 해석방법이 대안으로 제시될 수 있으며 새로운 분사홀의 형상 개발은 궁극적으로는 3차원 유동과 고온열전달에 대한 연구결과로부터 도출되어야 한다. 그러나 고속의 난류유동과 두 유동의 충돌 및 혼합으로 인한 복잡한 열전달 현상을 체계적으로 이해하기 위해서는 우선 2차원으로 단순화한 모형으로부터 출발하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 2차원 슬롯을 사용하는 막냉각에서 분사비와 분사각도에 따른 막냉각 효율의 변화 추이와 적정값의 존재 여부에 관심을 두었다. 본 연구자가 조사한 바에 의하면, 분사비와 분사각도에 대한 막냉각 효율을 명확하게 제시한 문헌은 거의 없었으며 대개의 문헌에서 분사각도를 30° 혹은 35°로 하고 있는 바 이것이 상용적인 모든 분사비에 대하여 적용되는 적절한 분사각도인가를 검증하는 것이 필요하다.

본 연구는 가스터빈 연구의 기본을 이루는 터빈의 막냉각 연구에 관한 것으로 주유동과 냉각 유동의 충돌 특성 규명 및 분사비-분사각도의 효율적인 조합을 규명하는 연구이다. 주된 내용은 직선 슬롯에서 주어진 분사각도에 대해, 분사비에 따른 유동의 구조와 특성으로부터 막 냉각 성능을 조사하고, 각 슬롯 형상에서 분사비와 분사각도에 대한 막냉각성능의 상관관계를 제시하는 것이다. 이에 대한 접근 방법으로 유동의 가시화 실험과 수치해석 수행한다.

유동의 가시화 실험은 정성적인 유동의 구조와 특성을 파악하고 수치해석의 적정성을 검증하기 위하여 행한다. 수치해석은 상용코드 FLUENT를 사용하였으며 분사각도의 범위 15°-50°를 5°간격으로 변화시키며 각각에 대하여 분사비 0.2-3.0으로 변화시키며 계산하였다.

2. 실험

2.1 실험장치 및 방법

Fig. 1에 실험장치의 개략도를 나타내었다. 풍동의 단면은 150 x 150 mm이고, 가시화 부분은 레이저 시트광의 투사와 막유동을 촬영하기 위한 투명창이 설치되어 있다. 풍동내 공기의 유속은 2.0 ~ 3.0 m/s로 조정 가능하며 피토포관에 의하여 측정된다. 스모크 발생기는 공기중의 수분이 $TiCl_4$ 와 접촉할 때 생기는 TiO_2 입자의 흰색 스모크를 발생시킨다. 스모크는 150 x 150 x 150 mm의 스모크 박스에 모아진 후 슬롯을 통해 풍동내로 분출된다. 풍동과 스모크 박스가 접하는 면에 교환 가능한 슬롯이 설치되어 있다. 스모크의 유량은 로타미터로 측정되며, 압축공기 공급 밸브에 의하여 조절된다.

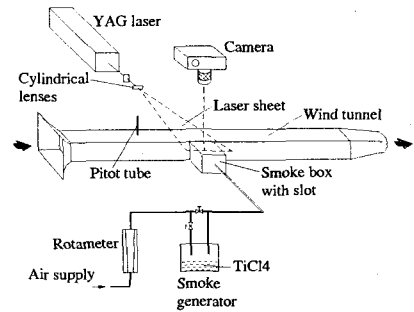


Fig. 1 Experimental Setup

가시화용 조명은 펄스 Nd:YAG 레이저의 제2고조파(파장 532 nm)를 사용하였다. 레이저 펄스의 발진기간은 10 ns이며, 주파수는 10 Hz이다. 레이저광은 원통렌즈를 통과하면서 두께 0.3 mm의 얇은 시트광이 되어 풍동내 가시화 단면을 통과한다. 스모크에 의한 산란광은 레이저 입사광과 수직에서 Nikon 35 mm 스틸카메라로 촬영된다. 이 때 촬영된 유동이 수치계산된 난류의 평균유동과 비교할 수 있도록 셔터 속도는 1초로 하였다. 현상된 필름은 필름스캐너를 사용하여 디지털로 변환된 후, 포토샵으로 화상처리 하였다.

2.2 실험조건

슬롯의 분사각도는 30° 이며 분사비(V_c/V_m)는 0.55, 1.0, 1.5, 2.0 에서 실험하였다. 풍동 유속 V_m 은 풍동의 단면 중심에 설치한 2공 피토관에서 측정된 값이며, 슬롯 분사속도, V_c 는 로타미터에서 측정된 유량을 슬롯 분출면적으로 나눈 값이다. 슬롯 분출공기는 가열하지 않았다.

3. 수치해석

수치해석은 결과의 적합성을 검증하기 위하여 실험과 동일한 형상과 조건에서 수치모사를 수행한 부분과 분사각도 및 분사비에 따른 막냉각 효율의 특성을 관찰하기 위한 부분으로 나누어 수행하였다. 유한체적법을 구현한 상용 해석도구인 FLUENT를 사용하였으며 두 부분에 공통적으로 사용된 계산 조건은 Table 2와 같다.

Table 1. Numerical Calculation Summary

Grid		Structured
Turbulent Model		Realizable $k-\epsilon$ model
Disc. Method	Pressure	2-nd order
	Momentum	2-nd order upwind
	Pressure-Vel.	SIMPLE
	Temperature	2-nd order upwind
	Turb. Energy	2-nd order upwind
	Turb. Dissip.	2-nd order upwind
Near Wall Treatment		Two-layer zonal model

난류모형은 물리적인 제한조건을 충족시킬 수 있도록 $k-\epsilon$ 모형을 변형시킨 실현가능 $k-\epsilon$ 모형(realizable $k-\epsilon$ model)[3]을 사용하였다. 이 모형은 제트 유동의 퍼지는 정도를 일반적인 $k-\epsilon$ 모형보다 더 정확히 예측할 수 있는 것으로 알려져 있으며, 슬롯에서 주류를 향해 분출하는 막냉각 유동이 제트유동과 유사한 점에서 선택되었다. 벽 주위에서의 난류 처리는 두 유동의 혼합

이 벽 가까이에서 이루어지는 점을 고려하여, 벽 함수를 사용하지 않고 점성의 영향을 받는 벽 근처 영역에 Wolfstein[4]의 1 방정식 모형을 사용하는 2단 모형을 선택하였다.

3.1 실험과의 비교를 위한 수치해석

계산영역은 폭 150 mm, 길이 600 mm의 주유동 영역과 폭 150 mm, 길이 150 mm인 스모크박스, 그리고 그들을 연결하는 폭 $d = 3.2$ mm, 수직높이 80 mm의 슬롯으로 구성하였다. 격자는 주유동 영역을 70×165 개, 스모크박스를 75×75 개, 그리고 슬롯을 15×20 개로 구성하였고 벽면에 가까울수록 조밀하게 배치하였다. 벽면에 접하는 첫 번째 격자의 크기는 0.5 mm이며, 계산 결과에서 이 값은 $y^+ (= u_* y/\nu)$ 가 약 2 이하로 유지되어 난류 점성저층 안에 충분히 포함됨을 확인할 수 있었다. 경계조건에서 주류 입구속도 V_m 과 슬롯유동의 입구속도 V_c 는 실험조건과 같은 값들을 사용하였고, 주유동과 스모크박스의 입구온도는 그 차이가 100K가 되도록 주었으며 주유동의 출구에서는 압력을 제외한 모든 변수의 변화율을 0 으로 주었다. 실제 공기의 온도는 일정한 반면에(실험 조건), 계산에서는 공기의 온도가 스모크의 농도에 대응하므로 공기 온도에 따른 물성의 변화가 없는 것으로 처리하고 계산하였다. 따라서 이 경우 분사비(blowing ratio, 이후 BR로 표기함)는 V_c/V_m 이 된다.

3.2 본 수치해석

주유동의 영역은 폭 150 mm, 길이 600 mm로 위와 동일하며, 슬롯의 폭 $d = 3.2$ mm인 반면 길이는 50 mm로 길게 정하여 슬롯 길이에 따른 막냉각 특성의 변화를 제거할 수 있도록 하였고 스모크박스에 해당하는 부분은 계산영역에 포함하지 않았다. 주유동 영역은 70×172 개, 슬롯 부분은 12×40 개로 격자를 구성하였고 벽면에 접하는 첫 번째 격자의 크기는 0.4 mm로 하였다. 주류의 입구온도 $T_m = 1500K$, 입구속도는 $V_m = 20$ m/s의 균일한 값으로 고정하였고 슬롯

의 냉각제 입구온도 $T_c = 700K$, 입구속도 V_c 는 분사비에 맞도록 정하였다. 유체는 주류와 냉각제 모두 공기로 설정하였고, 큰 온도차에 따른 물성의 변화를 고려하여 점성계수, 열전도율, 정압비열을 모두 온도의 함수로 주었으며 밀도는 비교적 느린 유동속도를 고려하여 비압축성 이상기체 상태방정식(압력은 대기압으로 일정하게 취급하고 온도에 따른 밀도의 변화만을 고려)을 사용하였다. 따라서 분사비 BR은 $\rho_c V_c / \rho_m V_m$ 로 정의하였으며 여기에서 ρ_c 와 ρ_m 은 각각 냉각제와 주류의 입구에서의 밀도이다. 수치계산은 분사각(슬롯과 수평면이 이루는 각도)을 15° 에서 50° 까지 5° 간격으로, 그리고 분사비는 각 분사각에 대하여 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0의 값으로 총 48가지 경우에 대하여 수행하였다. 수치해석 결과는 슬롯 하류면에서의 막냉각 효율(film cooling effectiveness)을 계산하는데 사용되었다. 비압축성 유동을 다룬 본 연구에서는 막냉각 효율 η 는 다음의 식으로 정의된다.

$$\eta = \frac{T_m - T_{aw}}{T_m - T_c}$$

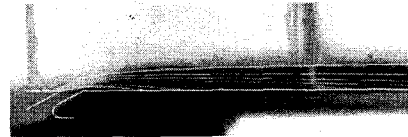
T_m 은 주류의 정온도(static temperature), T_c 는 냉각제의 정온도이며 T_{aw} 는 단열 벽면온도(adiabatic wall temperature)이다.

4. 결과 및 토의

4.1 가시화 실험결과와 수치결과의 비교

수치해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여, 대표적으로 분사각도 30° 의 경우에 분사비 0.55, 1.0, 1.5, 2.0에 따른 수치해석 결과의 등온선과 가시화 실험결과의 스모크의 농도를 Fig. 2에서 서로 중첩하여 비교 제시하였다. 난류에 의한 확산이 분자확산에 비해 지배적이므로 열확산과 질량확산은 서로 유사성이 성립하며 같은 지배방정식에 의하여 온도 또는 농도가 결정된다. 즉, 무차원화된 등온선과 등농도선은 서로 일치해야 한

다. Fig. 4에서 흰색선은 무차원 등온선으로 맨 아래쪽 선이 무차원 농도 0.9에 해당하며, 윗 방향으로 무차원 농도가 0.1 간격으로 감소하여 맨 위쪽이 무차원 농도 0.1에 해당하는 선이다. 본 실험에서는 사진으로부터 정량적인 농도를 측정할 수 없었으나, 중첩된 그림들에서 실험과 계산 결과가 정성적으로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.



(a) BR = 0.55



(b) BR = 1.0



(c) BR = 1.5



(d) BR = 2.0

Fig. 2 Comparison between experimental and numerical results. (injection angle 30°)

4.2 분사비와 분사각도에 따른 막냉각 효율

Fig. 3에 무차원 하류거리에 따른 막냉각 특성을 살필 수 있다. 여기에서, 좌표계의 원점은 분

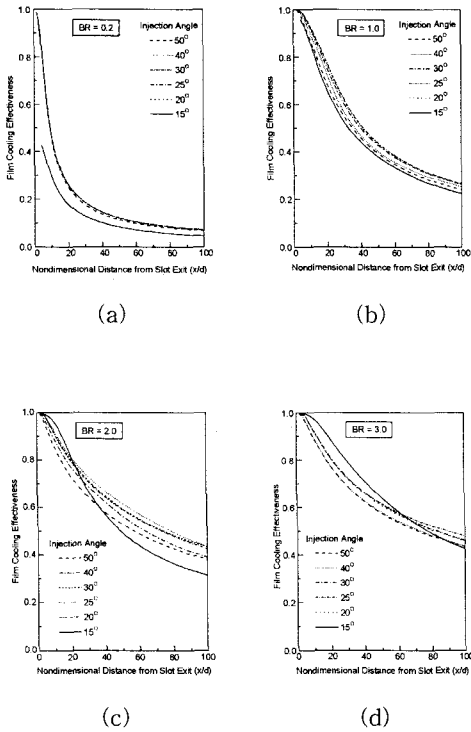


Fig. 3 Film cooling effectiveness at a blowing ratio along the downstream wall for various injection angles

사 출구면과 하류벽면의 교차점이다. 전체적인 특징은 분사비가 증가할수록 막냉각 효율이 증가하며 각도에 따른 막냉각 효율의 차이가 현저해지는 것이다. 이것은 분사비가 작을 때 냉각제의 운동량이 작기 때문에 분사각도로 주어지는 냉각제의 방향성이 급히 소멸되는 것으로 설명할 수 있다. 여기에서 흥미로운 점은 분사각도 15° 인 경우의 거동이다. 분사비가 1.0보다 작을 때는 15° 분사의 경우가 막냉각 효율이 가장 낮으나, 분사비가 증가하여 2.0보다 클 때는 어느 하류거리 범위 내에서(분사비가 2.0인 경우 $x < 20d$ 영역에서, 분사비가 3.0인 경우 $x < 60d$ 영역에서) 15° 분사의 경우가 막냉각 효율이 가장 크다. 분사비를 일정하게 유지하였을 때 어느 특정 하류지점에서 분사각도에 따른 막냉각 효율의 변화를 Fig. 4에서 살펴볼 수 있다. 여기에서 막냉각 효

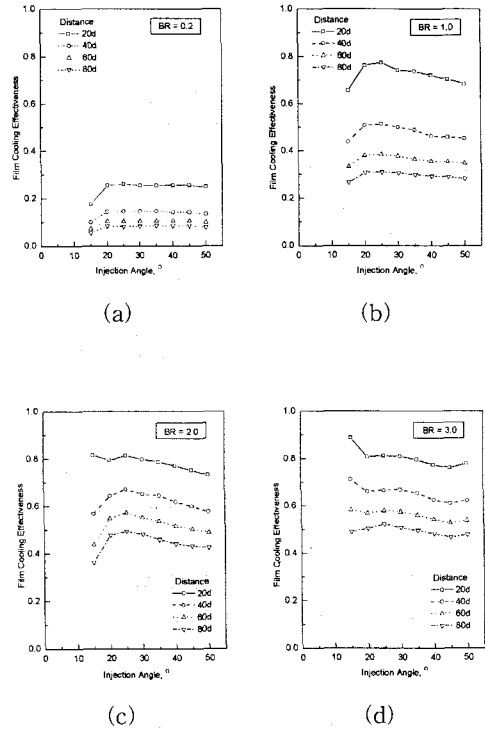


Fig. 4 Film cooling effectiveness at a blowing ratio vs. injection angles for various downstream locations

율을 최대화 하는 최적의 분사각도가 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 분사비 3.0 인 경우를 제외하면, 최적의 분사각도는 약 25° 이다. 분사비가 가장 큰 3.0 인 경우 특이한 현상을 관찰할 수 있는데, 분사출구와 가까운 하류지점(20d, 40d)에서 분사각도 15° 일 때 막냉각 효율이 최대로 된다는 점이다. 이 분사비에서 출구 근처의 유동특성을 관찰한 결과 분사각이 커짐에 따라 큰 난류운동에너지를 가진 영역이 점점 확대되는 현상을 관찰할 수 있었다. 출구 근처의 큰 난류운동에너지는 초기에 냉각제와 주류의 혼합을 주도함으로써 전반적인 막냉각효율의 저하를 일으키는 것으로 생각된다. 위의 사실을 일반화한다면 분사비가 매우 클 경우에는 최적의 분사각도가 위의 결과(약 25°)보다 훨씬 작아질 것으로 예상할 수 있다.

슬롯 출구로부터 짧은 거리를 냉각하고자 할 경우에는 고분사비에 작은 분사각을 사용하는 것이 유리함을 알 수 있지만 실제로는 고분사비에 따른 동력의 소모를 감안하고 분사비 1.0 에서 3.0 사이에서 막냉각효율의 차이가 비교적 크지 않은 사실에 비추어 볼 때 분사비 1.0 에 분사각 25° 정도가 적절한 값으로 생각된다. 한 편 먼 거리 까지 냉각을 하기 위해서는 분사비를 증가시키고 분사각을 너무 크지 않은 범위(15°)에서 선택하여야 할 것이다. 전반적으로 막냉각 효율은 분사비가 커질수록 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 2차원 막냉각의 특성으로 3차원 홀을 사용한 막냉각의 경우와는 다르다. 즉, 3차원 홀 막냉각에서는 분사비가 너무 커지면 진행방향 측면 주위의 뜨거운 유체가 유입(entrainment) 혼합되어 막냉각 효율을 저하시킬 수 있지만 2차원 슬롯 막냉각에서는 이와같은 현상이 일어나지 않으므로 분사비 증가에 따라 막냉각 효율이 증가하는 것으로 생각된다.

본 연구의 결과는 슬롯을 사용하는 막냉각 장치의 설계에 사용할 수 있을 것이다. 예를 들어 막냉각 효율을 0.6(벽면온도 1020K에 해당)으로 설정한다면, 다음 냉각제를 분사할 위치는 적어도 60d 이하가 되어야 함을 알 수 있다. 만일 다음 분사위치를 40d로 선정하였다면, 분사비는 1.5-3.0의 범위이며, 이 때의 분사각도는 20° - 35° 임을 알 수 있다.

5. 결론

2차원 슬롯 막냉각의 분사비-분사각도의 효율적인 조합을 규명하기 위하여 분사각도와 분사비에 따른 유동의 구조와 특성 및 막냉각 성능을 유동의 가시화 실험과 수치해석 방법을 이용하여 조사하였다. 조사한 분사각도의 범위는 15° - 50°이며, 분사비의 범위는 0.2 - 3.0 이다. 이로부터 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 실험결과와 수치결과(분사각도 30°의 경우에 분사비 0.55 - 2.0에 따른 수치해석 결과의 등온선과 실험결과의 연기의 질량확산)를 서로 비교한 결과 정성적으로 잘 일치하므로 본 수

치해석이 타당성을 간접적으로 확인하였다.

- (2) 분사비가 증가할수록 막냉각 효율이 증가하며 각도에 따른 막냉각 효율의 차이가 현저해진다.
- (3) 정해진 분사비에서 일정한 영역의 막냉각 효율을 최대로 하는 최적의 분사각도가 존재하며, 분사비 3.0 인 경우를 제외하면, 최적의 분사각도는 약 25° 이다.
- (4) 분사비 3.0 인 경우는 하류지점 60d 이하에서 막냉각 효율을 최대로 하는 분사각도는 15° 이다.

막냉각 설계를 위해 막냉각 효율을 원하는 값으로 설정한다면, 다음 냉각제를 분사할 위치와 분사비, 이 때의 분사각도를 선정하는데 본 결과를 적용할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Lee, J.S. and Ro, S.T., 1992, "Recent Research in Gas Turbine Blade Cooling" Proc. Colloquium on Turbomachinery, Sep. 27-Oct. 3, pp. 345-380.
2. Lee, G. S., Yang, W.-J., and Kuo, C.-H., 1998, "Thermal Stratification and Flow Stability in Film Cooling with Curved Coolant Injection" Heat Transfer, Proceedings of 11th IHTC, Vol.6, August 23-28, Kyongju, Korea, pp. 547-552.
3. T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, and J. Zhu, 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
4. M. Wolfstein, 1969, "The Velocity and Temperature Distribution of One-Dimensional Flow with Turbulence Augmentation and Pressure Gradient" Int. J. Heat Mass Transfer Vol.12, pp. 301-318