

터빈 블레이드 형상 곡면에서의 막냉각 효율 특성

류원택* · 김동건** · 김대성*** · 김귀순**** · 윤순현†
(2000년 12월 8일 접수, 2001년 12월 17일 심사완료)

The Characteristics of Film-Cooling Effectiveness on a Turbine-Blade-Shaped Surface

Won Taek Ryu, Dong Keon Kim, Dae Seong Kim, Kui Soon Kim and Soon Hyun Yoon

Key Words: Film-Cooling Effectiveness(막냉각 효율), Suction Surface(흡입면), Pressure Surface(압력면), Thermochromic Liquid Crystal(감온성 액정), Blowing Ratio(분사율), Hole Expansion Angle(냉각홀 확장각)

Abstract

The effects of hole expansion angle and the arrangement of nozzles on a film cooling system for a turbine-blade-shaped surface were experimentally investigated. Liquid crystal with hue-temperature correlation and an image processing system were employed to evaluate surface temperature. Distributions of cooling effectiveness were then presented to figure out the change of heat transfer characteristics with different geometric conditions of cooling-holes. It was found that the averaged cooling efficiency on the suction surface was maximum with 10 degree of the cooling hole expansion angle. It was also shown that the averaged cooling efficiency on the pressure surface and the averaged cooling efficiency for dual array case were not affected by the hole expansion angle.

기호설명

D : 홀직경 [mm]

M : 분사율

T : 온도 [°C]

U : 속도 [m/s]

x : 막냉각홀의 유동방향 좌표

z : 막냉각홀의 유동방향의 직각 좌표

ρ : 밀도 [kg/m^3]

θ : 확장각 [°]

η : 막냉각 효율

η_{\max} : 최대 막냉각 효율

η_{mean} : 평균 막냉각 효율

$\eta_{x, \max}$: x 방향의 최대 막냉각 효율

$\eta_{z, \max}$: z 방향의 최대 막냉각 효율

$\eta_{z, \text{mean}}$: z 방향의 평균 막냉각 효율

1. 서론

가스터빈의 열효율 향상을 위해서는 터빈의 온도를 높이는 방법이 흔히 사용되고 있으며 이러한 추세에 따라 최근의 가스터빈 엔진은 높은 입구온도(1400~1500°C)에서 작동되도록 설계되고 있다. 그러나 고온의 유입가스로 인하여 터빈 블

* (주) 한국수력원자력

** 회원, 부산대학교 기계기술연구소

*** 회원, 부산대학교 기계공학부

**** 회원, 부산대학교 항공우주공학과

† 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : yshyoon@pnu.edu

TEL : (051)510-2314 FAX : (051)583-4140

레이드의 흡입면(suction surface), 압력면(pressure surface), 끝벽(end wall)의 온도가 증가됨에 따라 터빈 블레이드의 기계적 수명이 현저히 단축되는 부작용이 생겨난다. 실제로 Metzger와 Mayle⁽¹⁾은 금속의 온도를 15°C 증가시킴에 따라 기계적인 수명이 절반으로 줄어들 수 있다고 보고하였다. 따라서 고효율 터빈설계를 위해서는 열응력에 강한 소재의 개발과 더불어 적절한 냉각기법의 개발이 매우 중요한 요소로 부각되고 있다.

이러한 냉각기법 중에서 막냉각(film cooling)기법은 압축기로부터 공급되는 저온의 유체를 블레이드 표면상의 구멍이나 틈새를 통해 분사하여 고온가스와 블레이드 표면사이에 일종의 단열막을 형성함으로써 고온의 유동으로부터 표면을 보호하는 냉각방법이다. 따라서 막냉각은 매우 효율적인 내열성 증대 방안으로서 프레임 튜브(frame tube), 터빈 블레이드(turbine blade), 애프터버너(after burner)의 냉각설계에 널리 사용되어진다. 막냉각 방법에 있어서 연속적인 슬롯을 통하여 냉각유체를 분사시키는 방법이 가장 효과적인 기법으로 알려져 있으나 강도 등의 공학적 문제로 인하여 실제 응용에 있어서는 한 줄이나 그 이상의 배열로 이루어진 막냉각홀군을 통한 막냉각 방법이 많이 사용되며 이에 관한 선행 연구 사례도 많이 찾아볼 수 있다.

Goldstein 등⁽²⁾은 원형홀 후류의 단열벽면온도에 관한 연구에서 막냉각 홀의 경사각을 30°와 90°로 변화시키고 분사율을 0.1에서 2.0까지 변화시켜

분사율이 0.5정도에서 막냉각 효율이 최대가 됨을 보였다. Eriksen과 Goldstein⁽³⁾은 경사진 원형 튜브를 통한 분사에 따른 열전달과 막냉각에 관해서 연구를 수행하였는데 분사율이 1.5와 2에서 배열에 의한 분사가 단일 분사에 비해 열전달이 크게 나타나고 분사율이 1인 경우는 두가지 모두 비슷하게 나타났으며 분사율이 0.5인 경우는 주유동과 분사된 근접한 제트 사이의 상호작용으로 인해 열전달이 증가된다고 밝혔다. Liess⁽⁴⁾는 가스터빈 블레이드에서의 배열홀을 통해 분사되는 막냉각제트에 관한 실험적 연구를 수행하여 분사율이 0.5일 때 막냉각 효율이 최대값을 보였는데 터빈 블레이드에서의 낮은 속도에 대한 실험은 마하수가 0.9이상에서 그 결과가 유효하다고 주장하였다. Sen 등⁽⁵⁾은 주유동방향에 경사진 냉각홀에서의 막냉각에 관하여 분사율을 변화시키며 원형홀과 확장된 형태의 홀을 비교하였는데 주유동의 방향과 60°경사진 방향의 분사의 경우 높은 분사율에서 열전달률이 크게 나타났다. Gritsch 등⁽⁶⁾은 확장된 출구를 가진 막냉각홀의 단열벽면효과에 대해서 연구를 하였다. 분사율을 0.25에서 2까지 변화시키고 원형홀과 출구가 확장된 두가지 형태의 막냉각홀을 비교하였는데 특히 분사율이 높은 경우 원형홀에 비해 확장된 출구를 가진 막냉각홀에서 막냉각 효율이 더 크게 나타나는 것으로 조사되었다.

그런데 현재까지의 많은 선행 연구들은 주로 평면에서의 막냉각을 대상으로 하였고 실제 응용

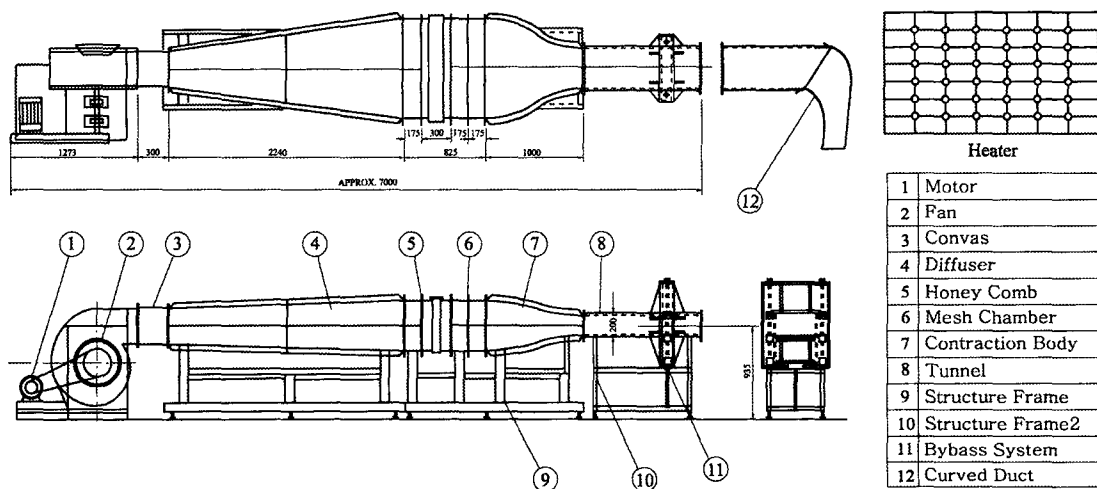


Fig. 1 Schematics diagram of main flow wind tunnel

가치가 높은 터빈 블레이드에서의 막냉각을 조사한 결과는 찾아보기 힘들다. 본 연구에서는 익형의 캠버라인(camberline)을 사용하여 구성된 터빈 블레이드 형상의 곡면에서의 막냉각 현상을 실험적으로 조사하였다. 특히 냉각홀의 기하학적 조건에 따른 막냉각 효율의 변화를 알아보기 위하여 막냉각류의 분사각을 35° 로 고정하고 이차유동의 횡방향 확산각이 각각 0° , 5° , 10° , 15° , 20° 인 노즐에 대하여 막냉각 효율을 측정하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 풍동 및 시험부

본 연구에서 사용된 실험장치 중 풍동부는 주유동을 발생시키는 개회로형 저속풍동과 막냉각홀을 통하여 시험부에 분사하는 2차유동을 발생시키는 개회로형 소형풍동 등 두 개의 풍동으로 구성되었다. 주유동을 발생시키는 풍동은 팬, 확대부, 정류실, 벌집틀, 유동가열부 및 온도조절기, 그리고 축소부로 구성되어 있으며, Fig. 1에 개략도가 나타나 있다. 시험부를 제외한 총 길이는 7 m이며 확대부의 입구는 420×420 mm이고, 출구는 1100×600 mm, 길이는 2440 mm이다. ⑤와 ⑥ 사이에 Fig. 1에서와 같이 1kW의 가열기를 등간격으로 36개 설치하였고, 각 가열기에 공급되는 전압을 변화시키면서 주유동의 온도를 조절할 수 있다. ⑩은 바이패스 장치로서, 36개의 가열기에 의해 데워진 공기가 균일한 온도를 가지기 전에는 경사 덕트를 통하여 윗부분으로 유동이 분출되다가 온도가 균일한 온도 즉, 안정화가 되면 유압장치에 경사덕트는 올라가고 시험부에 유동을 분사하는 장치이다. 시험부는 크기가 400×200 mm이고 액정 색상 촬영을 위해 두께 15 mm의 투과율이 좋은 아크릴로 제작되었다. 주유동을 발생시키는 풍동에 연결된 곡면 덕트(duct)는 Fig. 1의 ⑫에서 나타난 것과 같이 Kiock 등⁽⁷⁾이 연구하였던 터빈 블레이드의 형상에서 캠버라인(camberline)을 토대로 설계하였고, 덕트내의 유동은 2차원성이 유지되도록 하였다. 2차유동을 발생시키는 소형풍동은 삼상교류전동기로 구동되는 개방형 풍동이다. 송풍기의 출구부분은 13개의 홀을 뚫어, 이를 통하여 유동이 나오도록 하였고, 홀에서 나온 유동과 막냉각홀을 연결하기 위하여 내경이 8 mm인 튜브를 사용하였다. 각각의 냉

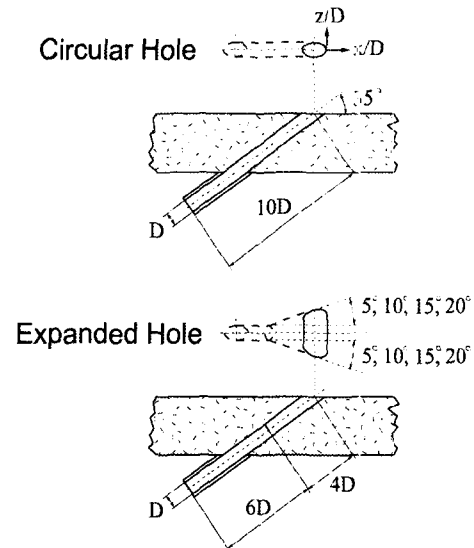


Fig. 2 The shape and dimensions of secondary jet flow nozzles

각홀의 출구속도를 맞추기 위하여 송풍기의 출구홀과 튜브와의 연결부분에 밸브를 설치하였다. 그리고 전체적인 2차풍동의 유속은 주파수 변환기를 사용하여 조절하였다.

본 연구에서는 5가지의 막냉각 홀 출구형상(기본적인 원형홀과 4가지의 확장된 출구형상의 홀)에 대하여 실험이 수행되었다. 원형홀의 지름과 확장된 형태의 막냉각홀의 입구에서의 지름(D)는 5 mm이다. 모든 홀형상은 길이와 지름의 비가 10이며 분사각은 35° 이다. 출구가 확장된 형태의 홀은 횡방향으로의 확산각이 각각 5° , 10° , 15° , 20° 이고 홀 출구에서 20 mm인 위치에서부터 확장이 시작된다. 막냉각홀의 횡방향의 위치는 5D 간격으로 모두 7개가 설치되어 있고, 4번째 위치한 홀에서 막냉각 효율을 측정하였다. Fig. 2에 자세한 막냉각홀 출구형상이 나타나 있다. 출구가 확장된 형태의 막냉각 홀의 분사율의 계산은 각각의 막냉각 홀의 입구에서의 유량에 근거를 두고 있다. 따라서 동일한 분사율에서는 주유동의 유량이 변하지 않는 한 분사되는 2차유동의 유량은 각각 다른 형태의 막냉각 홀에서 동일하다. 분사율, M 은 주유동과 2차유동의 질량유속비로서 다음과 같이 정의된다.

$$M = \frac{\rho_2 U_2}{\rho_\infty U_\infty} \quad (1)$$

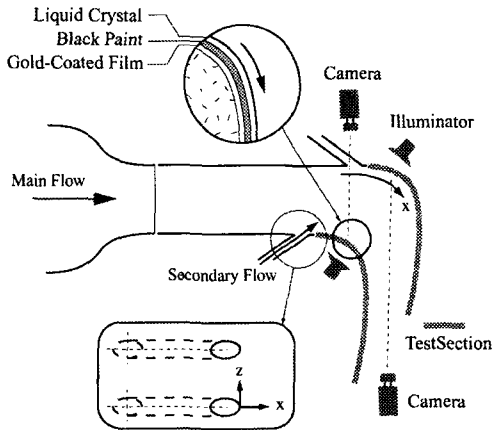


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus

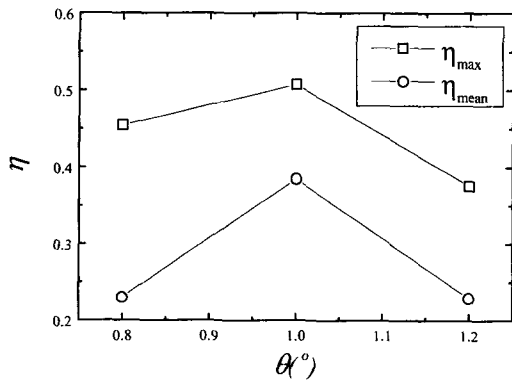


Fig. 4 The effect of blowing ratio on the maximum and the averaged local cooling efficiency on suction surface

여기서 밀도 ρ 및 속도 U 의 하첨자 '2'는 2차유동을, ' ∞ '는 주유동을 나타낸다. 주유동의 속도는 5 m/s이고, 난류강도는 0.8%이다. 그리고 주유동과 2차유동에 대한 밀도비(ρ_2/ρ_∞)는 1.05이다.

본 실험에서는 액정의 색상획득방법을 사용하여 홀 주위의 표면온도를 측정하였다. 곡면 덕트는 액정의 색깔을 잘 관찰할 수 있도록 고투과율의 아크릴로 제작되었고, 아크릴에 의해 전도되는 열을 차단하기 위하여 열전도도가 0.026W/mK인 폴리우레탄을 주성분으로하는 단열재를 1cm 두께로 단열하였다. 액정의 색상은 검은색을 배경으로 할 때 가장 잘 나타내므로, 금박막(gold-coated film)에 검은색 페인트와 액정(R35C3W)을 도포하여 압력면과 흡입면에 각각 부착시켜 온도 측정에 사용하였다.

Fig. 3은 본 연구에서 사용된 실험 장치도이다. 주유동을 발생시키는 풍동으로부터의 유동은 가열기를 통하여 40℃까지 가열되고, 가열된 공기를 보내면 시험부의 액정이 온도변화에 따른 색상을 나타내게 된다. 이것을 촬영하여 색상값을 판별하고 단열벽면온도를 산출한다.

2.2 액정 교정 및 막냉각 효율 측정

액정의 색상을 통하여 온도를 정량적으로 측정하기 위해서는 색상과 온도의 상관관계를 구하는 교정작업이 필요하다. 교정시험시 시험부에 대한 광원과 카메라의 각도를 실제 실험과 동일하게 사각주의 표면에 검정페인트와 액정을 도포하여 액정의 색상을 획득하였다. 열전도도가 높고 표면온도를 측정하도록 열전대(T-type)를 설치하여 온도값을 측정하였다. 사각주 표면에서의 액정의 색상 정보는 화상 처리 장치에 의하여 이산화되어 컴퓨터에 저장된 후 이를 색도 좌표 변환(colorimetric transformation)을 통하여 색상(hue), 채도(saturation), 명암(intensity)으로 변환한다. 교정결과에서 나온 색상 정보를 3차 다항식으로 근사하여 온도-색상의 상관식을 구한다.

막냉각 효율은 단열벽면온도를 써서 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{T_{aw} - T_\infty}{T_2 - T_\infty} \quad (2)$$

여기서 T_{aw} 는 단열벽면온도이고, T_∞ 와 T_2 는 각각 주유동과 2차유동의 제트온도이다. 단열벽면온도를 구하는데는 여러 가지 방법이 있지만, 본 실험에서는 벽면을 단열시키고, 주유동을 가열하고 2차유동은 실내공기를 분사할 때 측정한 벽면 온도를 단열벽면온도로 사용한다. 주유동과 2차유동의 온도는 열전대를 이용하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 흡입면에서의 분사율의 영향

흡입면에서의 막냉각 효율에 분사율이 미치는 영향을 알아보기 위하여 세가지 분사율에 대한 최대 국소 냉각 효율과 측정영역($-2.5 < z/D < 2.5$, $0 < x/D < 15$)을 면적적분하여 얻어진 평균 국소 냉각 효율을 Fig. 4에 각각 나타내었다. 최대 국소 냉각 효율치를 살펴보면 분사율 M 이 1.0의 경우

에서 가장 높았고, 분사율 $M = 0.8$ 에서의 경우가 $M = 1.2$ 의 경우보다는 높게 나타났다. 이것은 주 유동과 동일한 속도로 2차 유동이 분사되는 경우가 냉각 유동이 벽면에 접촉하는 강도가 가장 강하다는 것을 의미하며 평판의 경우에 대해 연구한 Liess⁽⁴⁾의 결과와 잘 일치한다. 그런데 이러한 벽면 접촉 혹은 충돌 강도는 분사되는 2차 유동의 운동량 이외에도 분사각이 지대한 영향을 미칠 것으로 예상되며 본 실험의 경우 2차 유동이 35°의 각도로 상향 분사되었으므로 그 분사각을 변화시킬 경우 다른 결과를 보일 수 있을 것으로 사료된다. 일단 35°상향으로 분사되는 2차 유동에 의한 막냉각 효과는 분사율을 1.0으로 설정하는 것이 가장 효율적이라고 판단할 수 있다. 따라서 이하의 전체 실험에서의 분사율을 1.0으로 고정하고 막냉각 효율에 대한 흡입면에서의 단일배열과 이중배열의 영향과 압력면에서의 단일배열에 대한 영향을 살펴보았다.

3.2 흡입면에서의 막냉각 효율

냉각홀의 형상이 Fig. 2에 보여진 바와 같이 원형 노즐과 각각 5°, 10°, 15° 및 20°의 확산각을 가진 확산형 노즐인 경우 흡입면에서의 막냉각 효율이 어떤 영향을 받는지 알아보기 위하여 식 (2)에서 계산된 국소 막냉각 효율의 분포를 구하여 Fig. 5에 나타내었다. 분지관 형태로 분사된 제트 흐름은 주유동과 혼합되면서 벽면 방향으로 휘어지고 결국 벽면에 충돌하여 국소 냉각 영역을 형성하는데 Fig. 5(a)에 이러한 결과가 잘 보여지고 있다. 국소 냉각 영역에서의 막냉각 효율이 극대값을 보이고 있고, 이 극대값의 위치는 충돌 영역의 시간평균 중심부를 의미하게 된다. 즉, 냉각홀로부터 분사된 제트흐름이 지니고 있던 운동량이 주유동의 운동량과 혼합되는 초기에는 벽면으로부터 멀어지는 방향으로 흐름이 전개되지만 혼합이 가속화되는 동안 그 흐름의 방향이 벽면쪽으로 휘면서 간헐적인 벽면 충돌 현상이 발생하게 되는데 이러한 충돌 현상이 통계학적으로 누적된 곳이 충돌영역으로 나타나고, 그 충돌영역의 중심이 시간평균의 위치가 되는 것이다. 이러한 이유로 극대값에 비해 냉각홀 쪽으로 오히려 가까운 위치에서의 냉각효율이 약간 낮게 나타나게 된다. 노즐 확산각이 5°인 경우의 그림인 Fig. 5(b)를 보면 원형노즐의 경우인 Fig. 5(a)

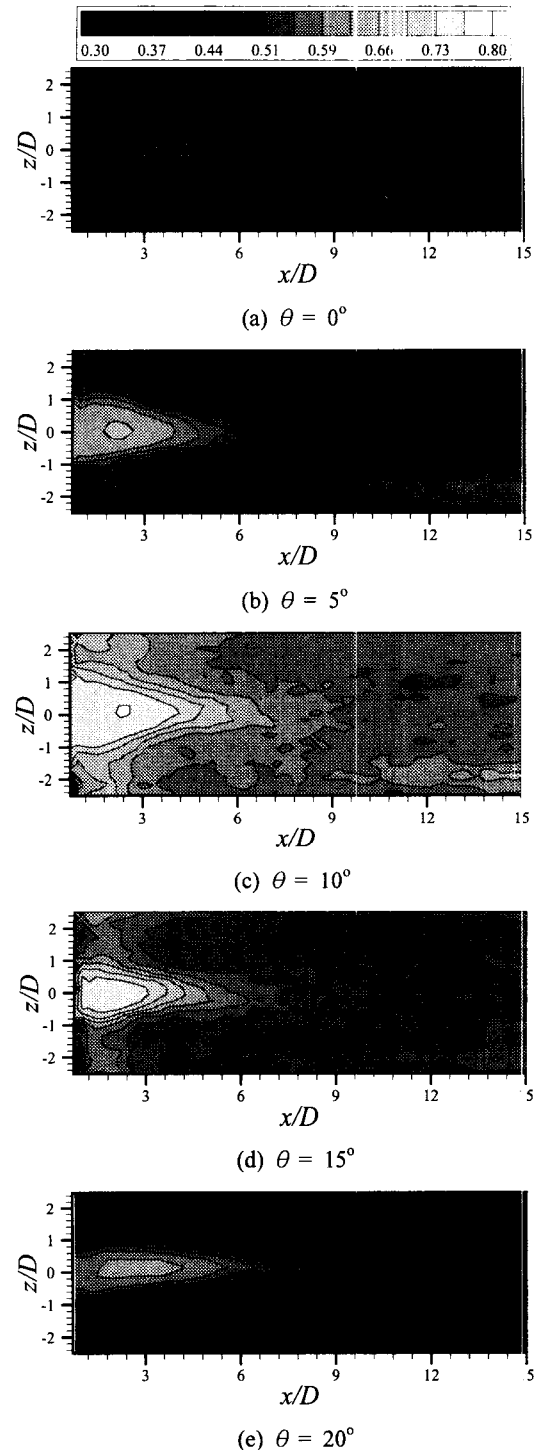


Fig. 5 Local distribution of wall-cooling efficiency on suction surface of various nozzle expansion angles

에 비해 극대값 및 전체적인 냉각효율의 크기가 증가한 것을 알 수 있다. 또한 원형노즐의 경우 국소 냉각 영역이 흐름방향으로 길고 좁게 나타난 것에 비하여 확산각이 5°인 경우는 상대적으로 짧지만 횡방향으로 넓게 분포되어 있다. 이것은 노즐의 끝부분이 확산됨에 따라 분기관 제트류의 국소 운동량이 원형노즐에 비해 낮으므로 주유동의 영향을 빨리 받게 되고 이에 따라 충돌 현상이 앞당겨져서 일어나기 때문이다. 또한 제트흐름의 횡방향 폭이 노즐의 단면적 증가에 의해 넓어지게 되어 결국 벽면에서의 국소 냉각 영역도 넓게 나타나게 된 것이다. 이러한 경향은 Fig. 5(c)에서 더욱 강하게 나타나고 있다. 앞서의 두 노즐에 비하여 확산각이 10°인 경우 냉각효율의 극대값이 매우 높게 나타났으며 냉각 영역의 크기도 더욱 넓게 나타났다. 확산각이 5°인 경우보다 더욱 앞당겨진 충돌영역을 보이고 있으며 이에 따라 노즐로부터 분사된 냉각 제트흐름이 분사직후부터 벽면을 냉각시키고 있음을 알 수 있다. 국소 냉각 영역의 폭도 확산각이 5°인 경우보다 더 넓어져서 전체적인 냉각효율이 매우 증대되었음을 짐작할 수 있다. 하지만, 노즐 확산각이 더욱 커져서 15°가 된 Fig. 5(d)를 살펴보면 확산각 10°인 경우보다 냉각영역이 축소되고 극대값도 낮아졌음을 관찰할 수 있다. 이는 Fig. 2에 보여진 노즐의 형상을 살펴봄으로써 이해할 수 있다. 즉, 확산부 이전까지의 노즐은 전형적인 원형 노즐 형상을 갖고 있으며 불과 2cm의 길이내에서 노즐 유로의 확산이 완료되어 결국 지나치게 급격히 확산된 유로를 원형제트로부터 분출되는 흐름이 지나가야 하는 상황이 되는데 급격확산(sudden expansion) 현상에 의해 원형제트흐름이 미처 확산 발달되지 못하게 된다. 따라서 넓게 확산되면서 주유동과 활발히 혼합을 시작하는 확산각 10°에 비하여 오히려 냉각 효과가 감소하게 되는 것이다. 노즐 확산각이 20°인 Fig. 5(e)를 보면 이 경향이 더욱 뚜렷하게 나타난다. 이 경우 확산된 노즐의 단면이 더 이상 원형제트로부터의 경계층을 유지하지 못하고 확산부 초기부터 박리가 되면서 최종적으로는 원형제트의 형태로 분사가 되면서 확산각이 낮은 5°의 경우나 원형제트의 경우로 오히려 회귀하고 있다.

노즐의 확산각이 국소 냉각의 극대값에 미치는 영향을 알아보기 위해 각 확산각에 대하여 최대

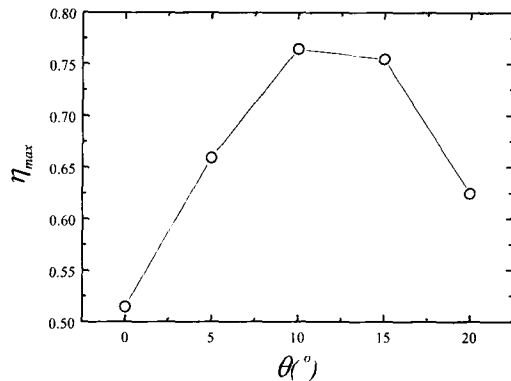


Fig. 6 The maximum of local wall-cooling efficiency on suction surface for various nozzle expansion angles

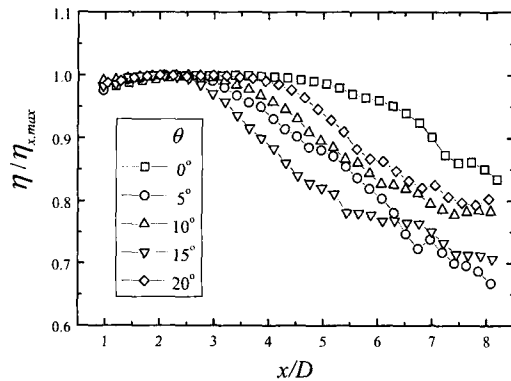


Fig. 7 Streamwise distribution of local wall-cooling efficiency on suction surface for various nozzle expansion angles

국소 냉각 효율값(η_{max})을 Fig. 6에 나타내었다. 확산각이 10°와 15°인 경우에서 최대 국소 냉각효율은 거의 75%에 가까운 값을 보이고 있었고, 확산각이 0°라고 볼 수 있는 원형 제트와 확산각 20°인 경우가 50%를 약간 상회하는 비슷한 값을 나타내었다. 따라서 최대 국소 냉각효율의 측면에서는 노즐 확산각이 10°에서 15°정도인 경우가 가장 좋은 결과를 보인다.

최대 국소 냉각효율치를 이용하여 국소 냉각효율을 정규화한 뒤 국소 냉각 영역의 극대값을 정점으로 하는 냉각 영역의 길이방향과 폭방향의 크기를 보인 것이 Fig. 7와 Fig. 8이다. 국소냉각 영역의 길이방향 발달을 살펴기 위한 Fig. 7을 보면 앞서 Fig. 5에서 이미 고찰하였듯이 원형 노즐의 경우가 상대적으로 가장 긴 국소 냉각 영역을

형성하고 있다. 노즐이 확산되는 형상을 가진 경우 동일한 운동량의 횡방향 전파가 증대되어 종방향의 발달이 축소되고 이에 따라 국소 냉각 영역의 상대적인 길이가 짧아지는 것으로 사료된다. Fig. 8은 $x/D=2$ 에서 국소 냉각 영역의 폭을 살펴본 것으로 노즐 확산각 10° 인 경우에서 가장 폭방향으로 넓은 부분을 냉각시키는 특성이 나타났음을 알 수 있다. 그 이외의 확산각은 큰 차이를 보이고 있지 않으나 10° 와 15° 에서의 최대 국소 냉각 효율이 0° 나 20° 에 비해서 높다는 점을 감안할 때 10° 와 15° 에서의 절대 냉각 영역이 넓게 나타난다고 볼 수 있다.

Fig. 9는 측정영역($-2.5 < z/D < 2.5$)을 길이적분하여 폭방향에 대한 평균 냉각효율을 보인 것이다. 노즐 확산각에 따른 냉각효과는 확산각이 10° 인 경우에서 냉각특성이 강하게 일어나는 것을 볼 수 있다. 그리고 x/D 에 따른 냉각효율은 노즐 확장각에 상관없이 $x/D=2$ 인 영역에서 최대 평균효율이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 냉각 홀에서 나온 유동이 주유동에 의해 $x/D=2$ 에서 재부착되기 때문에 냉각 효과가 큰 것으로 사료된다.

확산각을 통하여 분석된 시험부 전체, 즉 Fig. 5 (a), (b), (c), (d) 및 (e)에 대하여 국소 냉각 효율의 측정영역($-2.5 < z/D < 2.5, 0 < x/D < 15$)을 면적적분하여 각 노즐 형상의 확산각에 대하여 나타낸 그림이 Fig. 10이다. 그림에서 확연히 알 수 있듯이 분사율이 1.0인 경우의 흡입면에 대해서는 노즐의 형상이 10° 의 각도를 가지고 확산되는 경우가 다른 어떤 경우에 비해 높은 냉각 효과를 보이고 있다. 노즐의 확산각이 15° 이후부터는 확산부 초기부터 원형제트의 경계층이 박리되면서 오히려 원형제트의 형태로 흐름이 회귀되어 냉각 효과가 감소하고 있다.

3.3 흡입면에서의 단일배열과 이중배열의 비교

막냉각 홀의 배열형태에 따른 막냉각 효과를 살펴보기 위해 Fig. 11에 나타난 바와 같이 단일 배열과 이중(엇갈림)배열로 설치하여 실험을 수행하였다. Fig. 12은 원형노즐과 확장각을 가진 4가지형상의 노즐에 대하여 단일배열일 때와 이중배열일 때의 각각에 따라서 국소 냉각 효율의 전체 면적당 효율을 평균하여 나타낸 그림이다. 단일 배열에 비해 이중배열의 경우가 높은 냉각 효과를 보이고 있다. 단일 제트의 경우 홀의 횡방향

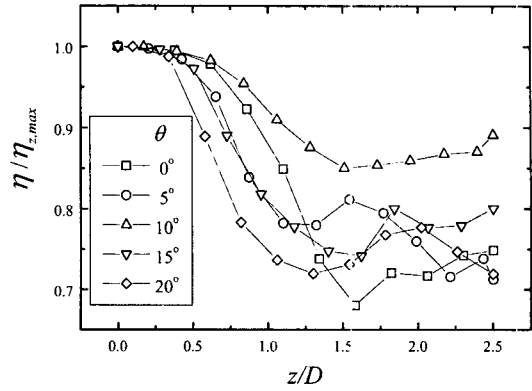


Fig. 8 Lateral distribution of local wall-cooling efficiency on suction surface for various nozzle expansion angles

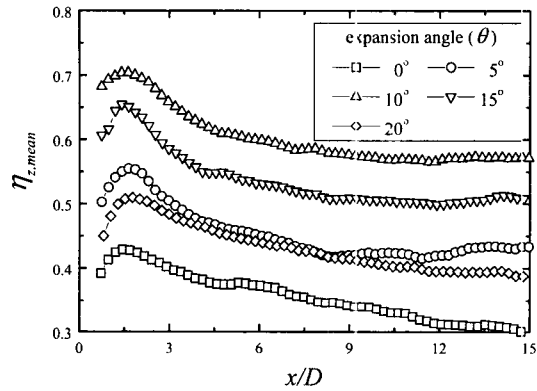


Fig. 9 Streamwise distribution of mean wall-cooling efficiency on suction surface for various nozzle expansion angles

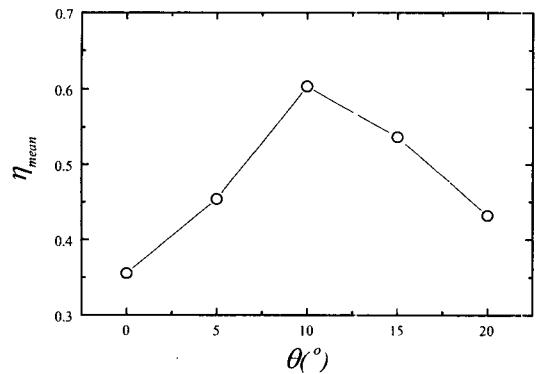


Fig. 10 Averaged local wall-cooling efficiency on suction surface for various nozzle expansion angle to determine optimal angle for best cooling effect

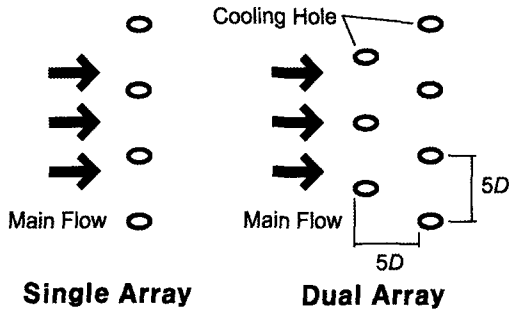


Fig. 11 Schematic diagram of two types of hole array

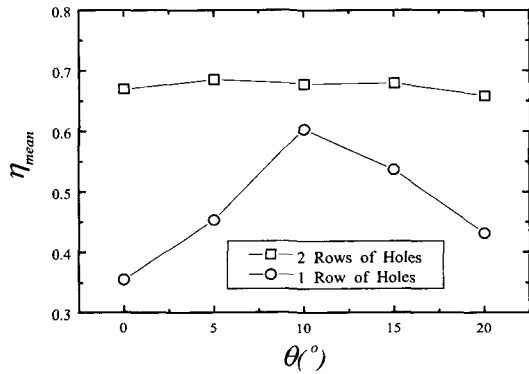
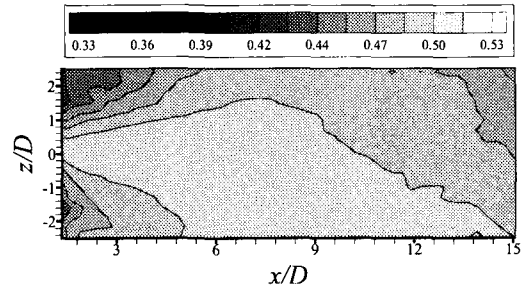


Fig. 12 Averaged local wall-cooling efficiency of two types of hole array on suction surface for various nozzle expansion angles

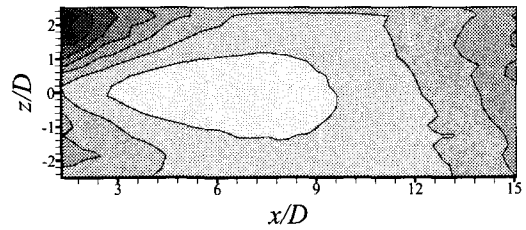
에 대한 막냉각 효율이 작게 나타나지만 엇갈린 이중배열에서는 횡방향에 대한 막냉각 효과가 크기 때문에 전체적인 막냉각 효과가 더 크게 나타난 것이라 판단된다. 또한 단일배열의 경우는 확산각에 따라 냉각효과의 차이가 뚜렷한데 비해 이중배열의 경우는 그 차이가 거의 나타나지 않음을 볼 수 있다.

3.4 압력면에서의 막냉각효율

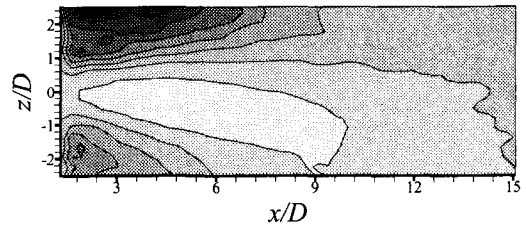
압력면에서의 국소 막냉각 효율을 앞 절에서와 마찬가지로 다섯가지의 노즐 확산각에 대하여 나타낸 그림이 Fig. 13이다. Fig. 5의 흡입면의 경우와는 냉각 효율의 분포 경향이 상당히 다른 것을 알 수 있는데 가장 큰 차이점은 흡입면의 경우 국소 냉각 효율이 노즐에 가까운 쪽으로 급격하고 하류방향으로 갈수록 완만해지는 구배를 가지는데 반하여 압력면에서의 국소 냉각 효율은 전 구간에서 걸쳐서 완만하고 넓은 모양을 형성한다는



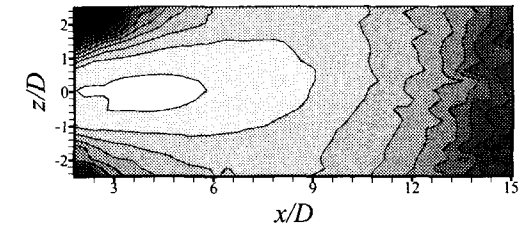
(a) θ = 0°



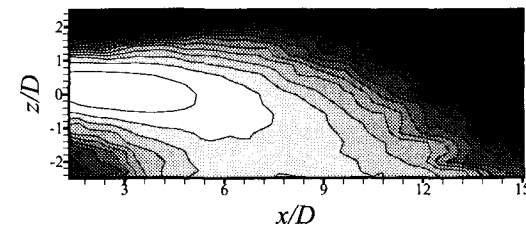
(b) θ = 5°



(c) θ = 10°



(d) θ = 15°



(e) θ = 20°

Fig. 13 Local distribution of wall-cooling efficiency on pressure surface for various nozzle expansion angles

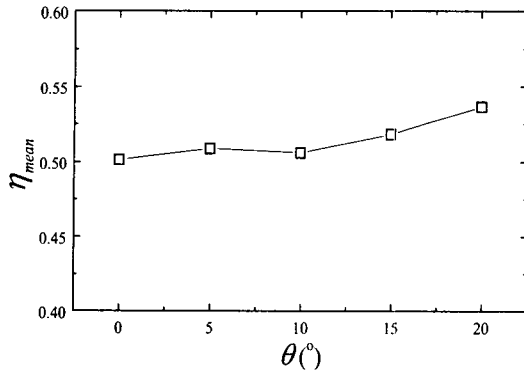


Fig. 14 Averaged local wall-cooling efficiency on pressure surface for nozzle expansion angle to determine optimal angle for best cooling effect

것이다. 즉, Fig. 13의 모든 노즐 확장각의 경우에 대하여 흡입면의 경우와는 달리 2차 유동의 초기 부분부터 하류방향으로 길게 확산하는 냉각 영역의 형상을 갖추게 됨을 알 수 있다. 또한, 흡입면의 경우 2차 유동의 초기 형태, 즉 노즐의 형상에 큰 영향을 받았던 것에 비해 압력면의 경우 분사 직후부터 가해진 주유동의 영향으로 인하여 노즐 형상에는 크게 무관하게 유사한 형태로 국소 냉각 영역이 발달하는 것으로 나타났다. 그리고, 극대값을 보이는 국소 냉각 영역에서와 하류방향에서의 냉각 효율이 크게 차이를 보이는 흡입면의 경우와는 달리 압력면의 경우에는 국소 냉각 영역과 비 냉각 영역을 구별할 수 있을 만큼 뚜렷한 냉각 효율의 차이를 보이지 않았다. 이렇게 두 벽면에 대하여 발생하는 큰 차이는 다음과 같은 이유 때문으로 생각된다. 흡입면의 경우 분사된 2차 유동이 분사 직후는 원래 가지고 있던 운동량의 영향으로 주유동과 혼합되기 전까지 상향 전진하다가 주유동을 만나면서 방향을 전환하여 벽쪽으로 휘게 되고 접촉 영역을 형성한다. 이렇게 형성된 접촉 영역은 국소 냉각이 활발하게 일어나는 냉각 영역에 해당되는데 경계층쪽 하부로 갈수록 유로가 넓어지면서 압력이 회복되고 경우에 따라서는 유동 박리 현상이 발생하기도 한다. 이러한 과정을 거치면서 흡입면에서의 막냉각은 상부는 급격하고 하부는 완만한 국소 냉각 영역을 가지는 형태로 진행되게 된다. 이에 반하여 압력면의 경우 분사된 2차 유동은 그 직후부터 경계층의 상부방향으로 급혀진 벽면의 영향으로 인하여 띠 형태로 발달되면서 벽면

을 따라 길게 진행하게 된다. 따라서 냉각 영역도 흡입면과 같은 뚜렷한 타원 형태의 국소 영역을 형성하지 않고 길이방향으로 길게 발달하는 경향을 보이게 된다.

Fig. 14에서는 Fig. 13의 압력면에서의 국소 냉각 효율을 평균하여 각 노즐 형상의 확산각에 대하여 나타낸 그림이다. Fig. 10의 흡입면의 경우와 같은 뚜렷한 정점은 보이지 않고 전체 확산각에 대하여 거의 비슷한 평균냉각 효율을 보이고 있다. 이는 압력면의 경우 하류방향 냉각 효율이 약간 낮게 나온 확산각 20°인 경우를 제외한 모든 실험 조건에 대하여 냉각 효율이 거의 일정하게 유지되는 것을 알 수 있는데 이러한 현상은 압력면의 경우 2차 유동의 발달 형태가 얇은 경계층을 따라 전개되기 때문이다. 따라서, 흡입면의 경우 노즐의 확산각을 최적화하면 냉각 효율을 증대시킬 수 있으나, 압력면에서는 노즐의 형상은 냉각 효율의 증감에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

4. 결론

터빈블레이드 형상의 곡면시험부에서의 막냉각 효과에 관하여 실험적으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 흡입면의 경우 막냉각효를 통해 분사되는 2차 유동의 분사율이 1.0인 경우가 냉각 효율의 측면에서 최적의 분사율로 나타났다.
- (2) 흡입면에서의 막냉각은 타원형의 국소 냉각 영역을 가지는 형태로 발생하였다.
- (3) 흡입면에서는 모든 실험 조건에 대해서 2차 유동 노즐의 확산각이 10°일 때 가장 좋은 평균 냉각 효율을 얻을 수 있었다.
- (4) 흡입면에서는 엇갈린 이중병렬배열의 막냉각 효과가 단일배열에 비해서 더 크게 나타났다. 하지만 이중배열에서는 냉각효의 확산각은 냉각 효율에 영향을 주지 않았다.
- (5) 압력면에서의 막냉각은 완만하고 넓은 모양으로 발생하였으며 노즐확산각의 영향이 크게 나타나지 않았다.

후 기

본 연구는 한국전력공사의 지원(과제번호: 99-017)에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Metzger, D. E. and Mayle, R. E., 1983, "Gas Turbine Engines," *Mechanical Engineering*, Vol. 105, pp. 41~48.
- (2) 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, Int. Engineering Power*, pp. 384~395.
- (3) Eriksen, V. L. and Goldstein, R. J., 1974, "Heat Transfer and Film Cooling Following Injection Through Inclined Circular Tubes," *ASME, J. Heat Transfer*, pp. 239~245.
- (4) Liess, C., 1975, "Experimental Investigation of Film Cooling With Ejection From a Row of Holes for The Application to Gas Turbine Blades," *ASME, J. Engineering for Power*, pp. 21~27.
- (5) Sen, B., Schmidt, D. L. and Bogard, D. G., 1996, "Film Cooling With Compound Angle Holes: Heat Transfer," *ASME, J. Turbomachinery*, Vol. 118, pp. 800~806.
- (6) Gritsch, M., Schulz, A. and Wiittig S., 1998, "Adiabatic Wall Effectiveness Measurements of Film-Cooling Holes With Expanded Exits," *ASME, J. Turbomachinery*, Vol. 120, pp. 549~556.
- (7) Kiock, R., Lehthaus, F., Baines, N. C. and Sieverding, C. H., 1986, "The Transonic Flow Through a Plane Turbine Cascade as Measured in Four European Wind Tunnels," *ASME, J. Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 108, pp. 277~284.