

〈論 文〉

자유유동 난류강도가 원형 곡면위의 분사홀 상류에서의 막냉각에 미치는 영향에 대한 연구

서형준* · 국 건* · 이준식** · 이상우***

(1993년 7월 30일 접수)

Effect of Free-Stream Turbulence on Film-Cooling Upstream of Injection Hole on a Cylindrical Surface

Hyeong Joon Seo, Keon Kuk, Joon Sik Lee and Sang Woo Lee

Key Words: Film-Cooling(막냉각), Mass Transfer(물질전달), Naphthalene Sublimation Method(나프탈렌 승화법), Blowing Ratio(분사비), Turbulence Intensity(난류강도), Horseshoe Vortex(말굽형 와류)

Abstract

The leading edge of a turbine blade was simulated as a circular cylindrical surface. The effect of free-stream turbulence on the mass transfer upstream of the injection hole has been investigated experimentally. The effects of injection location, blowing ratio on the Sherwood number distribution were examined as well. The mass transfer coefficients were measured by a naphthalene sublimation technique. The free-stream Reynolds number based on the cylinder diameter is 53,000. Other conditions investigated are: free-stream turbulence intensities of 3.9% and 8.0%, injection locations of 40°, 50°, and 60° from the front stagnation point of the cylinder, and blowing ratios of 0.5 and 1.0. The role of the horseshoe vortex formed upstream edge of the injected jet is discussed in detail. When the blowing ratio is unity, and the coolant jet is injected at 40°, the mass transfer upstream of the jet is not affected by the coolant jet at all. On the other hand, when the injection hole is located beyond 50°, the mass transfer upstream edge of the injection hole suddenly increases due to the formation of the horseshoe vortex, but it decreases as the free-stream turbulence intensity increases because the strength of the horseshoe vortex structure becomes weakened. The role of the horseshoe vortex is clearly evidenced by placing a rigid rod at the injection hole instead of issuing the jet. In the case of the rigid rod, the spanwise Sherwood number upstream of the injection hole is much larger due to the intense influence of the horseshoe vortex.

1. 서 론

가스터빈 사이클 효율을 향상시키기 위하여 터빈

입구 온도는 점차로 증가되어 왔다. 최근에는 블레이드 재질의 허용한계를 초과하는 가스터빈이 개발되고 있으며 이를 위해서는 고온의 가스로부터 터빈 블레이드의 국소적인 열적 부하로 인한 파손 및 손실을 막기 위한 효과적인 냉각 시스템이 필요하다. 열적인 결함에 의한 파손은 국소적으로 발생한다고 보고되어 있으며 블레이드 선단에 최대의 열

*서울대학교 대학원 기계공학과

**정희원, 서울대학교 기계공학과

***정희원, 금오공과대학 기계공학과

부하가 걸리므로 이 부분의 냉각은 대단히 중요하다.

터빈 블레이드의 냉각방법으로 블레이드 내부에서의 내부 대류냉각과 제트충돌냉각이 사용되어 왔으나 고효율 터빈에서는 냉각효과가 높은 막냉각방법이 사용되고 있다. 막냉각에서는 냉각유체가 표면에서 분사되어 표면을 따라가면서 고온의 주유동으로부터 표면을 분리시키고 또, 뜨거운 경계층을 희석시켜서 냉각효과를 얻는다. 지금까지 알려진 막냉각의 효과를 지배하는 주된 변수들은 (1) 익형의 기하학적 형상: 곡률분포, 냉각유체의 분사위치, (2) 냉각유체분사의 기하학적 변수, 분사홀의 형상, 직경 및 간격, 분사각도, 분사홀의 열수(列數), (3) 블레이드 부하: 천이위치, 경계층 상태, 충격파/경계층 상호작용, (4) 자유유동 Reynolds 수, (5) 자유유동 난류강도, (6) 분사비 또는 자유유동과 냉각유체의 질량비, (7) 냉각유체와 자유유동의 온도비 등이다. 전형적인 터빈 블레이드에 있어서 냉각 공기는 선단 부분안의 통로를 통하여 분사홀로 공급된다. 따라서 내부 공기의 속도는 냉각공기가 선단 부분의 분사홀들로 빠져나감에 따라 감소하며 일렬의 각 분사홀들은 각각 다른 조합의 내부속도와 외부속도에 따라 서로 다른 조건들을 갖게 된다. 또한 분사홀로부터 분사된 제트는 매우 복잡한 3차원 유동 형태가 된다. 따라서, 이와 같이 복잡한 막냉각 현상의 정확한 이해를 돕기 위하여 많은 연구가 수행되어 왔다.

주유동에 분사되는 제트유동과 관련하여 Bergeles 등⁽¹⁾은 주유동장에 분사제트가 수직으로 분사될 때 제트 주위의 유동장에 관하여 연구하였다. 그들은 분사비가 매우 작은 경우에도 분사홀 지름의 0.3배 정도의 하류방향으로 역류영역이 존재함을 밝혔다. Bellows와 Mayle⁽²⁾는 선단부가 원형인 2차원 물체 주위의 유동에 대하여 실험적으로 연구하여 운동량 경계층 두께에 대한 Reynolds 수가 작은 유동인 경우 선단에서 작은 박리기포가 존재하며 곧바로 하류에서 재부착하여 난류경계층으로 발달함을 보였다. 최근에 Lee 등^(3,4)은 평판과 아래로 오목한 곡면 위로 흐르는 주유동에 제트가 분사되는 경우에 대하여 3차원 속도분포를 실험적으로 구하고 분사각도와 분사비에 대한 영향에 대하여 고찰하였다.

열 및 물질전달과 관련하여 Bayley와 Priddy⁽⁵⁾는 난류강도 이외에도 난류의 특성주파수에 대하여

블레이드 표면에서의 열전달계수의 변화를 측정하였으며 Goldstein과 Taylor⁽⁶⁾는 주유동 방향으로 35도 경사진 일렬분사에 대해 나프탈렌 승화법을 이용하여 열전달계수를 측정하였다. 그들은 분사홀 주위를 여러 영역으로 나누어 고찰하였는데, 분사홀 측면영역에서 가장 큰 열전달계수의 증가를 보인다고 보고하였다. 또한 Goldstein 등⁽⁷⁾은 원기둥이 평판에 수직으로 부착되어 있을 경우에 나프탈렌 승화법을 이용하여 열전달계수를 측정하였는데, 특히 말굽형화류의 영향을 연구하였다.

Mick과 Mayle⁽⁸⁾는 분사홀의 형태가 막냉각에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 이들은 주유동의 정체점 부근에서 여러 열의 분사홀을 통한 냉각유체의 분사에 대한 막냉각 효율을 구하였다. Camci와 Arts 등⁽⁹⁾은 막냉각되는 블레이드에 대하여 대류열전달에 관한 실험을 하였다. 그들은 냉각공기의 온도를 변화시키며 열전달계수를 측정하였는데 주유동과 냉각공기의 온도비가 열전달계수분포에 상당한 영향을 미침을 밝혔다. Jumper와 Elrod⁽¹⁰⁾은 평판에서의 주유동 방향으로 35° 기울어진 일렬 분사에 대하여 난류강도 및 Reynolds 수의 변화에 따른 열전달계수를 측정하였는데, 주유동의 난류강도가 증가함에 따라 막냉각 효율의 감소가 더 빨라짐을 보였다. Lee 등⁽¹¹⁾은 막냉각되는 원형 실린더 주위에서의 열전달 특성에 대하여 실험적으로 연구하여 분사홀의 위치가 막냉각에 미치는 영향에 대하여 고찰하였는데 분사홀의 위치가 상류정체점으로부터 40도 이하에 위치할 때 분사홀 상류에서의 열전달은 제트의 분사에 전혀 영향을 받지 않았으나 분사홀이 60도에 위치한 경우에는 분사홀 바로 상류에서 열전달이 크게 증가하는 현상이 나타남을 보였다.

지금까지의 연구는 주로 주유동과 제트유동의 난류강도가 낮고 균일한 속도분포를 가지는 이상적인 경우에 대하여 연구가 수행되어 왔다. 그러나, 실제로는 주유동의 난류강도가 대단히 높기 때문에 막냉각에 영향을 미칠 것으로 여겨지며 터빈 블레이드의 설계에 있어서 높은 난류강도가 유체역학 및 대류열전달에 미치는 영향이 주요변수로 인식되고 있다.

터빈 블레이드 형상의 설계시 그 선단을 원호의 일부로 채택하기 때문에 본 실험에서는 터빈 블레이드의 선단을 원봉의 표면으로 모사하고 원봉의 표면에 5개의 홀로 이루어진 일렬의 분사홀에서

제트가 분사될 때 분사홀 상류에서의 물질전달계수를 측정하였다. 분사비 즉, 분사제트속도의 자유유동 속도에 대한 비가 0.5, 1.0인 각각의 경우에 대하여 제트가 원봉의 상류정체점으로부터 40도, 50도, 60도의 위치에서 분사될 때 자유유동의 난류강도의 변화가 물질전달계수에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 실험

실험에 사용한 풍동은 출구단면의 크기가 0.4 m × 0.28 m 인 개방형으로 최대 풍속은 16 m/s이며, 난류강도는 0.2% 이하이다. 풍동 출구에 부착된 사각덕트의 실험 단면은 0.397 m × 0.195 m 인 두께 15 mm의 아크릴로 제작하였으며, 총길이는 1.444 m 이고 덕트에 나프탈렌이 주조된 원봉을 끼울 수 있도록 윗면과 아랫면에는 구멍을 내었다.

덕트내의 유동장을 측정하기 위하여 열선유속계(KANOMAX)와 피토티관을 사용하였다. 측정 센서로는 길이 1.5 mm, 직경 5 μm의 형상비가 300인 I형 텅스텐 열선을 사용하였다.

본 실험에서 자유유동속도는 실린더 중심에서 상

류방향으로 실린더 지름의 2배가 되는 지점에서 10 m/s가 되도록 고정하였으며, 이에 따른 실린더 직경을 기준으로 한 Reynolds 수는 53,000 이다. 난류 발생장치로는 그리드를 사용하였으며, 단면이 원형과 사각형인 황동봉으로 가로층과 세로층이 겹쳐진 2종류의 그리드들을 사용하였고, 단면이 원형인 그리드와 사각형인 그리드는 격자망의 크기와 그리드 직경이 서로 같다. 이들로 제작한 스크린의 특성은 주로 공극률과 차단율로 표시하는데 이들의 특성과 제원은 Table 1에 나타내었다.

Fig. 1에 본 실험에서 사용한 실린더의 개략도와 좌표계를 나타내었다. 실험에 사용한 실린더는 지름이 80 mm이며 길이는 240 mm이다. 이 원봉의 표면에는 나프탈렌을 주조할 수 있도록 길이 160 mm, 깊이 5 mm의 홈을 원봉의 둘레에 내었다. 원봉에는 일렬로 된 5개의 분사홀이 있으며 이 분사홀의 내경 d 는 10 mm이며, 분사홀간의 간격은 중심위치를 기준으로 30 mm이다.

분사홀의 중심을 원점으로 하여 원주방향을 x 축으로, 반경방향을 y 축으로, 폭방향을 z 축으로 정하였다. 상류정체점에서부터 분사홀까지의 각도를 θ , 분사홀의 중심에서부터 상류의 임의위치까지의

Table 1 Grid dimensions and configurations

	Mssh size M (mm)	Wire dia. d_w (mm)	Solidity $1 - (1 - d_w/M)^2$	Configuration
Grid 1	25.4	5.0	0.35	Biplanar round rod
Grid 2	25.4	5.0	0.35	Biplanar square rod

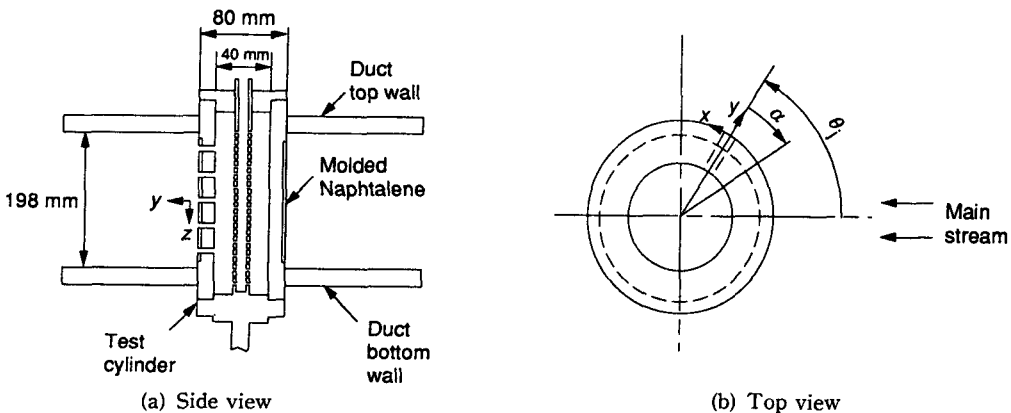


Fig. 1 Test cylinder configuration and coordinate system

각도를 α 로 정의하였다.

나프탈렌 승화법을 사용하여 물질전달계수를 측정하였다. 나프탈렌 승화법에 대한 내용은 이전에 발표된 논문⁽¹²⁾에서 찾아볼 수 있다. 나프탈렌 표면에서의 농도는 온도에 따라 민감하게 변하므로 실험시에는 주유동과 분사제트의 온도를 일정하게 유지하는 것이 중요하다. 따라서 주유동의 온도와 분사공기의 온도를 동일하게 20°C로 유지하고 나프탈렌 표면의 온도를 균일하게 하기 위해서 송풍기에서 나온 공기는 서지탱크를 거쳐 온도조절이 가능한 항온조에 설치된 열교환기를 통과시킨 후에 원봉안의 다공성관을 통하여 분사하였으며 온도편차는 0.2°C 내로 제어하였다. 주조된 나프탈렌은 유동장에 2시간 동안 노출시켰으며 이때 나프탈렌 표면의 승화된 깊이는 3차원 측정기(Merlin 750, Ferranti International)를 이용하여 측정하였다. 측정위치는 폭방향으로 분사홀의 중심을 기준으로 -15 mm부터 +15 mm까지 1 mm 간격으로 31점을 측정하였고, 원주방향으로는 정체점 부근(-3°)부터 180도까지 측정하였다.

3. 결과 및 토의

본 실험에서의 유동조건을 명확히 정의하기 위해 주유동의 평균속도와 난류강도를 측정하였다. Fig. 2는 사각단면의 그리드를 사용하여 난류를 발생시켰을 경우, 시험부내에 실린더를 설치하지 않았을 때와 설치했을 때 그리고 제트가 분사될 때 주유동 방향에 따른 난류강도의 변화를 나타낸 것이다. 실린더를 설치하였을 경우에는 제트분사가 없는 경우와 있는 경우에 있어서 주유동의 난류강도의 변화에 차이가 없음을 알 수 있다. 실린더를 설치하지 않은 경우와 비교하여 보면 실린더 중심으로부터 상류방향으로 실린더 지름의 2배가 되는 지점에서부터 난류강도의 변화에 차이가 나타나기 시작하며 이 지점에서의 난류강도는 3.9%이다. 따라서 본 연구에서는 난류강도의 조건을 이 점에서의 값으로 대표하였으며 난류강도는 3.9%와 8.0% 두 경우에 대하여 실험하였다.

실험의 타당성을 검증하기 위하여 이전의 실험결과들과 비교하였다. 이전의 실험들에서 실린더 표면에서 분사제트가 있는 경우에 대한 결과는 찾을 수 없었으므로 단순 실린더 주위에 대한 결과들과 비교하였다. Fig. 3은 원주방향으로의 Sherwood

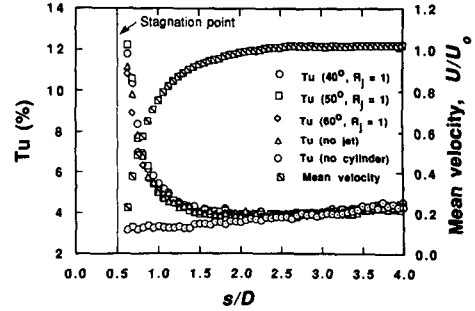


Fig. 2 Mean velocity and turbulence intensity variations along the stagnation line

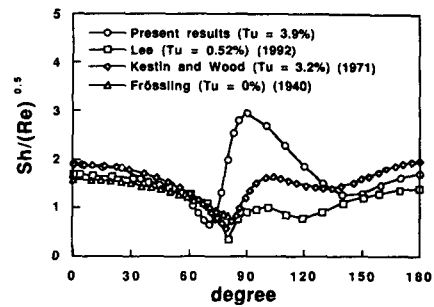
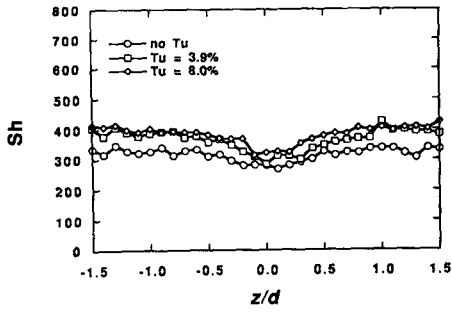


Fig. 3 Comparison with previous results

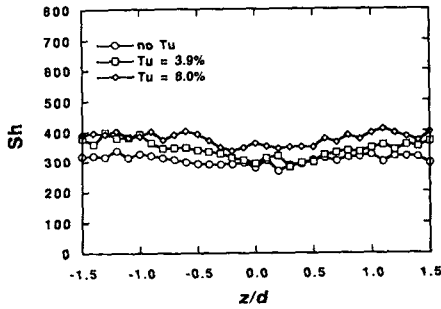
수의 분포를 나타낸다. 본 실험에서는 제트가 분사되므로 직접적인 비교는 할 수 없지만 선단 근처의 결과들은 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 특히 주유동의 난류강도가 비슷한 Kestin과 Wood⁽¹³⁾의 결과와는 아주 잘 일치함을 보이고 있다.

본 실험에서 Sherwood 수에서의 uncertainty는 7.43%였다. 그러나 이러한 uncertainty는 주로 부정확한 나프탈렌 물성치가 주된 원인으로 분석된다. 예를 들면 포화증기압의 uncertainty는 4.62%, 물질확산계수의 uncertainty는 5.1%인 반면, 물질전달실험시 나프탈렌 승화깊이 측정에 의한 uncertainty는 2.57%이다.

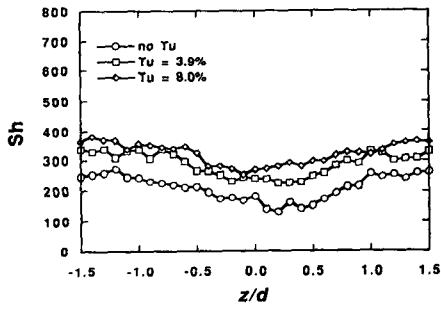
Fig. 4는 분사비가 $R_j=0.5$ 인 경우, 분사홀의 위치가 각각 $\theta_j=40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ 일 때 분사홀의 상류지점인 $\alpha=8^\circ$ 위치에서 폭방향으로의 Sherwood 수의 분포를 나타낸다. 일반적으로 예상할 수 있는 바와 같이 모든 경우에 있어서 난류강도가 증가함에 따라 Sherwood 수가 증가하는 경향을 보인다. 분사제트의 영향은 거의 없으며 단지 분사홀의 중심선상 ($z/d=0$)의 상류영역에서 Sherwood 수가 약간 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 분사제트가



(a) $\theta_i = 40^\circ$



(b) $\theta_i = 50^\circ$

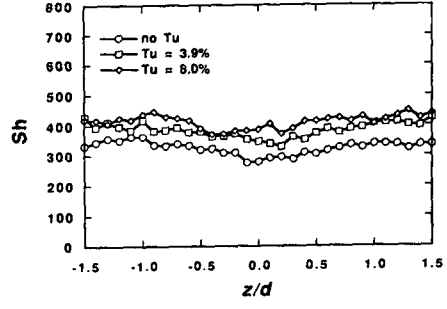


(c) $\theta_i = 60^\circ$

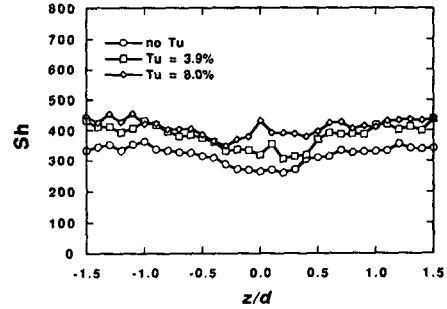
Fig. 4 Spanwise sherwood number distributions at $\alpha = 8^\circ$ for $R_j = 0.5$

자유유동에 대하여 장애물과 같은 역할을 하기 때문에 자유유동이 제트에 접근하면서 감소되어 대류전달이 작게 일어나기 때문이다.

Figs. 5, 6과 7은 분사비가 $R_j = 1$ 인 경우의 폭방향 Sherwood 수의 분포를 보여준다. 분사위치가 $\theta_i = 40^\circ$ 일 때는 $R_j = 0.5$ 인 경우와 비교하여 Sherwood 수의 분포에 있어서 별다른 차이를 나타내지 않는다. (Fig. 5) 그러나, Fig. 6(b)에서 볼 수 있듯이 분사위치가 $\theta_i = 50^\circ$ 일 때는 분사홀의 바로 앞쪽 상류지점 ($\alpha = 8^\circ$)에서 자유유동이 난류를 포함하고 있지 않을 때 Sherwood 수가 급격히 증가하였

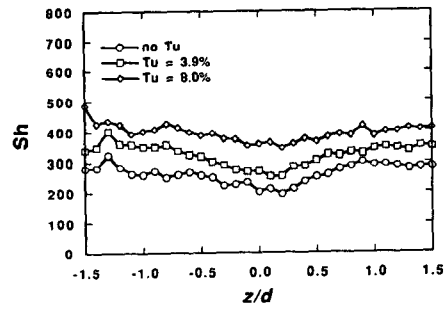


(a) $\alpha = 9^\circ$

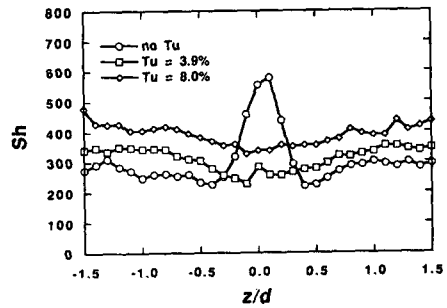


(b) $\alpha = 8^\circ$

Fig. 5 Spanwise sherwood number distributions for $\theta_i = 40^\circ$ and $R_j = 1.0$



(a) $\alpha = 9^\circ$



(b) $\alpha = 8^\circ$

Fig. 6 Spanwise sherwood number distributions for $\theta_i = 50^\circ$ and $R_j = 1.0$

으나 난류강도가 3.9%와 8.0% 인 두 경우에는 별 다른 변화가 없음을 알 수 있다.

Fig. 7은 분사위치가 $\theta_1=60^\circ$ 일 때의 결과이다. 분사위치가 $\theta_1=50^\circ$ 일 때 (Fig. 6)와 비교하여 조금 더 상류지점 ($\alpha=9^\circ$)에서부터 Sherwood 수가 급격히 증가함을 보여준다. 또한 $\alpha=10^\circ$ 인 지점에서는 제트의 영향이 별로 나타나지 않지만 분사홀에 근접할수록 그 영향이 나타나기 시작하여 $\alpha=9^\circ$ 인 지점에서는 주유동의 난류강도가 8.0%인 경우를 제외하고는 분사홀의 앞에서 Sherwood 수가 증가함을 알 수 있다. 그런데, 난류강도가 없을 때

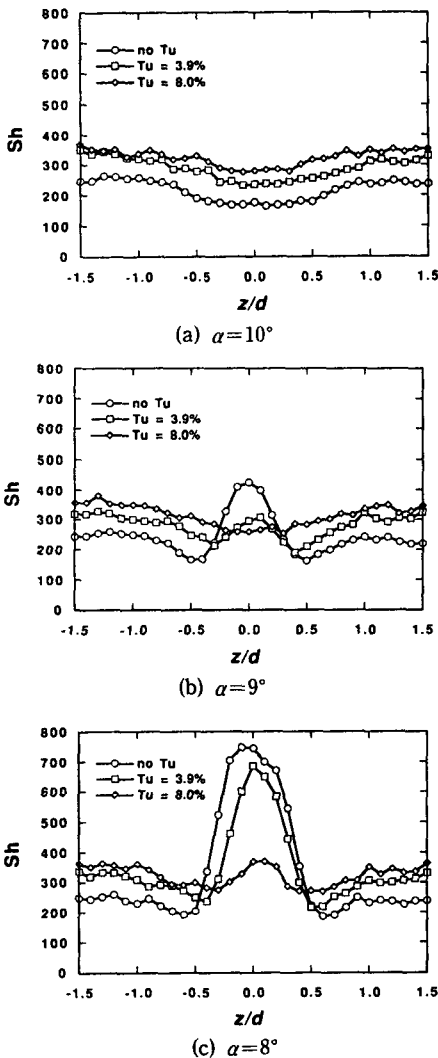


Fig. 7 Spanwise sherwood number distributions for $\theta_1=60^\circ$ and $Re=1.0$

Sherwood 수가 더 크게 증가한다. $\alpha=8^\circ$ 인 지점에서는 모든 난류강도의 경우에 분사홀 앞에서 Sherwood 수가 증가한다. 그러나, 분사홀의 폭방향으로의 주변에서는 주유동의 난류강도가 클수록 Sherwood 수가 크지만 분사홀의 상류지점에서는 이와는 반대로 난류강도가 클수록 그 증가의 정도가 작음을 알 수 있다.

이상의 실험결과에 대한 분석으로부터 Sherwood 수 분포의 변화에 대한 주요인은 분사제트 앞에서 형성되는 말굽형와류라는 판단을 내리고 이를 확인하기 위하여 분사홀에서 제트를 분사하는 대신에 길이가 2 cm이고, 지름이 분사홀과 같은 단면이 원형인 막대를 끼우고 물질전달계수를 측정하여 제트 분사시의 값과 비교하였다. 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 막대를 끼웠을 경우의 분사홀 상류에서의 Sherwood 수가 제트를 분사한 경우의 값보다 4배 가까이 큰 값을 보인다. 이는 막대를 끼웠을 경우에 막대의 바로 앞에서 분사제트의 경우보다 훨씬 강하고 뚜렷한 말굽형와류가 형성되어 Sherwood 수가 크게 증가되었음을 시사한다.

앞에서의 결과들을 말굽형와류의 관점에서 해석해보면 다음과 같이 요약할 수 있다. 분사비가 0.5인 경우는 제트의 운동량이 작아서 분사되는 즉시 실린더 표면을 따른 주유동의 경계층 내로 휘어지기 때문에 말발굽형와류가 형성되지 못하여 Sherwood 수의 변화가 거의 없다. 그러나, 분사비가 충분히 큰 경우는 제트가 주유동의 경계층을 뚫고 상승하다가 주유동방향으로 휘어지므로 주유동은 마치 장애물을 만난 것처럼 제트 주위로 선회하게 되고 말굽형와류가 형성되어 Sherwood 수가 급격히 증가한다.

분사비가 1일 때라도 분사위치가 40° 인 경우에

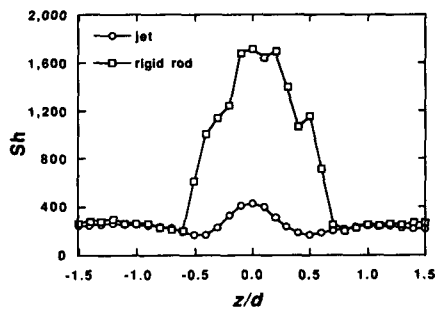


Fig. 8 Comparison of spanwise sherwood number distributions at $\alpha=9^\circ$ when $\theta_1=60^\circ$ and $Re=1.0$

는 말굽형와류가 형성되지 않는 것으로 파악된다. 이에 대한 요인은 여러가지로 추정할 수 있는데 경계층 두께, 압력구배, 곡률, 주유동방향과 분사제트의 방향이 이루는 각도 동일 것으로 생각된다. 또한 난류강도가 커짐에 따라 분사홀 앞에서의 Sherwood 수가 감소하는 것은 난류강도가 커질수록 말굽형와류의 구조가 약화되기 때문으로 이해된다. 이상에서 살펴본 바와 같이 분사제트 앞에서 형성되는 말굽형와류는 물질전달에 영향을 크게 미치며 말굽형와류의 형성과 관계되는 인자로는 분사비, 분사위치, 주유동의 난류강도, 표면의 곡률, 압력구배, 경계층의 두께, 주유동 방향과 제트의 분사방향이 이루는 각도 등이라고 추정되며 이에 대한 보다 확실한 이해를 위해서는 면밀한 유체역학적 고찰이 이루어져야 할 것이다.

4. 결 론

막냉각되는 터빈 블레이드의 선단을 원형 실린더로 모사하고 나프탈렌 승화법으로 분사홀 상류지점에서의 물질전달특성에 대해 실험적으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 분사홀 바로 상류에서의 물질전달은 말굽형와류에 의해 크게 영향을 받는다.
- (2) 분사비가 작은 경우 ($R_f=0.5$) 분사홀 상류에서의 물질전달은 분사제트에 의해 거의 영향을 받지 않는다.
- (3) 분사비가 크고 ($R_f=1.0$) 분사위치가 상류정체점에서 충분히 떨어진 경우 ($\theta_f > 40^\circ$)에는 주유동의 난류강도가 거의 없을 때 분사홀 바로 상류에서 물질전달계수가 급격히 증가한다.
- (4) 주유동의 난류강도가 증가할수록 분사제트 앞에서 형성되는 말굽형와류의 구조가 약화되어 물질전달계수가 감소한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지원 터보동력기계연구센터의 연구비로 이루어졌으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Bergeles, G., Gosman, A. D. and Launder, B.

E., 1976, "The Near-Field Character of a Jet Discharged Normal to a Main Stream," *ASME J. of Heat Transfer*, pp. 373~378.

(2) Bellows, W. J. and Mayle, R. E., 1986, "Heat Transfer Downstream of a Leading Edge Separation Bubble," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 108, pp. 131~136.

(3) Lee, S. W., Lee, J. S. and Ro, S. T., 1992, "Experimental Study on the Flow Characteristics of Streamwise Inclined Injection Jets in Crossflow on Flat Plate," *ASME Paper 92-GT-181 (also to appear in ASME J. Turbomachinery)*.

(4) Lee, S. W., Lee, J. S. and Lee, T. S., 1992, "Flow Characteristics of a 35 degree Inclined Turbulent Jet in a Crossflow on a Concave Surface," *ASME Paper 92-GT-247*.

(5) Bayley, F. J. and Priddy, W. J., 1981, "Effects of Free-Stream Turbulence Intensity and Frequency on Heat Transfer to Turbine Blade," *ASME J. of Engineering for Power*, Vol. 103, pp. 60~64.

(6) Goldstein, R. J. and Taylor, J. R., 1982, "Mass Transfer in the Neighborhood of Jets Entering a Crossflow," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 715~721.

(7) Goldstein, R. J., Chyu, M. K. and Hain, R. C., 1985, "Measurement of Local Mass Transfer on a Surface in the Region of the Base of a Protruding Cylinder with a Computer-Controlled Data Acquisition System," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 28, pp. 977~985.

(8) Mick, W. J. and Mayle, R. E., 1988, "Stagnation Film Cooling and Heat Transfer, Including Its Effect within the Hole Pattern," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 110, pp. 66~72.

(9) Camci, C. and Arts, T., 1990, "An Experimental Convective Heat Transfer Investigation Around a Film-Cooled Gas Turbine Blade," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 112, pp. 497~503.

(10) Jumper, G. W., Elrod, W. C. and Rivir, R. B., 1991, "Film Cooling Effectiveness in High-Turbulence Flow," *ASME J. of Turbomachinery*,

- Vol. 113, pp. 479~483.
- (11) Lee, T. S., Lee, J. S., Lee, S. W. and Kim, K., 1992, "Effect of Injection Hole Position and Blowing Rate on Mass Transfer about a Film-Cooled Cylinder", *Transport Phenomena in Heat & Mass Transfer*, Vol. 1, J. A. Reizes eds., Elsevier, pp. 363~372.
- (12) 이상우, 이준식, 이택식, 1991, "막냉각되는 원봉표면에서의 물질전달에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집 제15권 제5호, pp. 1756~1762.
- (13) Kestin, J. and Wood, R. T., 1971, "The Influence of Turbulence on Mass Transfer from Cylinders," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 93, pp. 321~327.
- (14) Frössling, N., 1940, "Verdunstung, Wärmeübertragung und Geschwindigkeitsverteilung bei Zweidimensionaler und Rotationssymmetrischer Grenzschichtströmung," *lunds Univ. Arssk. N.F. Avd. 2*, Vol. 36, pp. 25~35.