

# 자유유동 난류강도와 분사비가 터빈 블레이드 선단 막냉각 특성에 미치는 영향

김성민\* · 김윤제\*\* · 조형희\*\*\*

## Effects of Free-Stream Turbulence Intensity and Blowing Ratio on Film Cooling of Turbine Blade Leading Edge

S.-M. Kim, Youn J. Kim and H.-H. Cho

**Key Words:** Film Cooling (막냉각), Free-Stream Turbulence Intensity (자유유동 난류강도), Blowing Ratio (분사비), Spanwise-Averaged Film Effectiveness (스팬방향 평균 막냉각 효율)

### Abstract

We used a cylindrical model which simulates turbine blade leading edge to investigate the effects of free-stream turbulence intensity and blowing ratio on film cooling of turbine blade leading edge. Tests are carried out in a low-speed wind tunnel on a cylindrical model with three rows of injection holes. Mainstream Reynolds number based on the cylinder diameter was  $7.1 \times 10^4$ . Two types of turbulence grid are used to increase a free-stream turbulence intensity. The effect of coolant blowing ratio was studied for various blowing ratios. For each blowing ratios, wall temperatures around the surface of the test model are measured by thermocouples installed inside the model. Results show that blowing ratios have small effect on spanwise-averaged film effectiveness at high free-stream turbulence intensity. However, an increase in free-stream turbulence intensity enhances significantly spanwise-averaged film effectiveness at low blowing ratio.

#### 기호설명

$B$  : 분사비  
 $D$  : 원봉 모델 직경  
 $d$  : 원통형 분사홀의 직경  
 $L$  : 분사홀의 길이  
 $p$  : 원통형 분사홀의 피치  
 $Re_D$  : 원봉 모델 직경을 기준으로 한 레이놀즈 수  
 $T_{aw}$  : 단열 벽면 온도  
 $T_c$  : 막냉각 유체 온도  
 $T_u$  : 자유유동 난류강도

$T_\infty$  : 주유동 온도  
 $U_c$  : 막냉각 유체 속도  
 $U_\infty$  : 주유동 속도  
 $X$  : 난류 그리드로부터 유동방향 거리  
 그리스문자  
 $\eta_{aw}$  : 단열 막냉각 효율  
 $\bar{\eta}$  : 스펬방향 평균 막냉각 효율  
 $x$  : 정체선으로부터 원봉 모델 표면을 따르는 유동방향 거리  
 $\rho_c$  : 막냉각 유체 밀도  
 $\rho_\infty$  : 주유동 밀도

#### 하첨자

aw : 단열벽  
 c : 막냉각 유체  
 $\infty$  : 주유동

\* 성균관대학교 대학원  
 \*\* 성균관대학교 기계공학부  
 \*\*\* 연세대학교 기계공학부

## 1. 서 론

막냉각(film cooling)은 압축공기가 연소실로 유입되기 전에 뿜내어 블레이드의 표면에 뚫은 분사홀(injection hole)을 통해 블레이드 표면으로 분사시킴으로써 고온의 가스유동으로부터 블레이드 표면을 보호하는 냉각방법이다. 이때 연소실을 통과한 고온의 가스는 매우 강한 난류가 된다. 고효율 가스터빈 엔진의 구현을 위해 가스터빈 엔진의 설계자들은 막냉각 시스템에서 최소한의 냉각공기로 최대한의 냉각효과를 얻기 위해 노력하고 있으며, 이러한 노력의 일환으로 분사홀(shaped injection)과 분사각(injection angle)에 더불어 자유유동 난류강도의 영향에 대한 많은 연구를 수행하고 있다.

Goldstein<sup>(1)</sup>은 1971년까지의 막냉각에 관한 연구를 체계적으로 정리하였고, 국내에서는 최근 조형희<sup>(2)</sup>가 막냉각의 유동 및 열전달 특성과 최근의 연구동향에 관해 정리한 바 있다. Burd 등<sup>(3)</sup>은 막냉각 홀 길이-직경 비와 난류강도가 막냉각 효율에 미치는 영향에 관해 연구하였고, Mehendale 등<sup>(4)</sup>은 반원봉 모델을 이용하여 자유유동 난류강도가 선단 막냉각 효율과 열전달 계수에 미치는 영향에 대해 연구했는데, 자유유동 난류강도가 클 때 막냉각 효율은 감소하고 열전달은 촉진됨을 밝혔다. Salcudean 등<sup>(5)</sup>은 막냉각 유체 밀도가 막냉각 성능에 미치는 영향을 연구하였고, 공기 같은 적은 밀도의 유체보다 CO<sub>2</sub> 같은 고밀도 유체를 사용할 경우 분사비가 커질수록 막냉각 효율이 증가함을 밝혔다. Lee 등<sup>(6)</sup>은 자유유동 난류강도가 증가할수록 말굽와류(horseshoe vortex) 효과가 감소됨을 밝혔고, Kohli와 Bogard<sup>(7)</sup>는 평판 모델을 이용하여 매우 강한 난류강도에서 온도장이 어떻게 변하는 지를 연구하였고, Funazaki 등<sup>(8)</sup>은 반원봉 모델을 이용하여 wake와 난류강도가 선단 막냉각 효율에 미치는 영향에 대해 연구하였다. Ekkad 등<sup>(9)</sup>은 원봉 모델을 이용하여 자유유동 난류강도와 막냉각 유체 밀도에 대한 막냉각 특성을 연구하였다. Reiss와 Böls<sup>(10)</sup>는 원봉 모델을 이용하여, 난류강도가 변할 때 원통형 홀과 출구가 확장된 형태의 홀에 관한 막냉각 특성을 연구하였다.

본 연구에서는 Westing House의 137MW급 W501F 가스터빈 블레이드를 개략적으로 모사한

원봉 모델을 가공하여 터빈 블레이드 선단 막냉각을 모사하였다. 분사비를 3가지로 자유유동 난류강도를 3가지로 변화시켜가며 총 9가지 경우에서 분사비와 자유유동 난류강도의 변화가 터빈 블레이드 선단 막냉각 특성에 미치는 영향에 관해 연구하였다.

## 2. 단열 막냉각 효율 및 분사비

단열 막냉각 효율(adiabatic film cooling effectiveness)  $\eta_{aw}$ 는 다음과 같은 무차원 온도분포로부터 구할 수 있다.

$$\eta_{aw} = \frac{T_{aw} - T_{\infty}}{T_c - T_{\infty}} \quad (1)$$

막냉각 효율에 영향을 미치는 중요한 인자 중 하나로 분사비(blowing ratio,  $B$ )를 들 수 있고, 이는 주유동과 막냉각유체간의 질량유속비(mass flux ratio)로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$B = \frac{\rho_c U_c}{\rho_{\infty} U_{\infty}} \quad (2)$$

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 실험장치

전체 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 본 연구에서 사용한 풍동은 개방형 아음속(subsonic) 풍동으로 단면수축비(contraction ratio)는 7:1이며, 균일한 유동을 공급하기 위해 하나의 허니콤(honeycomb)과 4개의 스크린(screen)이 장착되어 있다. 시험부의 단면적은 450×450 mm<sup>2</sup>이며, 유속은 45m/s까지 연속적으로 조절이 가능하다. 난류강도는 약 1.0% 이내이고, 평균속도의 공간 균일도는 경계층 부분을 제외하면 약 ±1.0% 이내이다. 시험부는 아크릴로 제작되었으며 전체길이는 4.3m이다. 막냉각 유체를 공급하기 위한 이차유동 공급장치는 온풍기(heating blower)와 막냉각 유체의 유량을 측정하기 위한 유량계, 원봉 모델로 막냉각 유체를 공급하기 위한 배관으로 구성하였다. 온풍기는 시로코 팬(sirocco fan)과 히터, 그리고 원하는 온도를 일정하게 유지하기 위

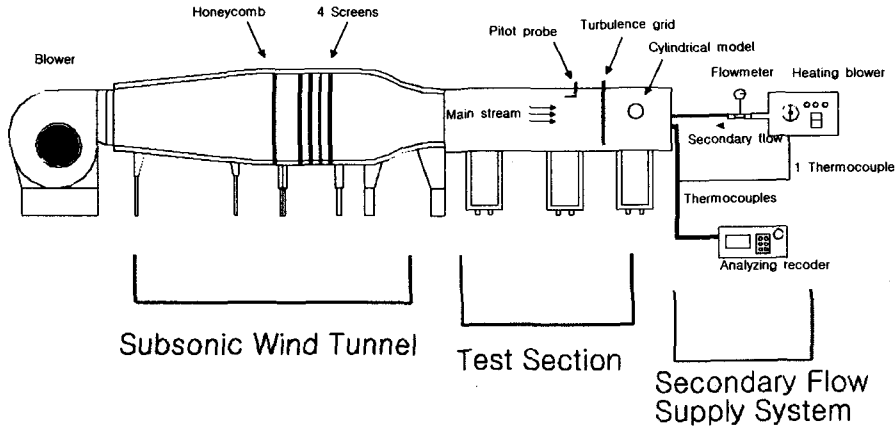


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

한 자동온도조절장치로 이루어져 있다. 공기실 내 분사홀 입구 근처에 T형 열전대(T-type thermocouple)를 설치하여 자동온도조절장치에 연결, 자동제어하게 함으로써 분사유체의 온도를 일정하게 유지할 수 있도록 하였다. 주유동 속도는 열선유속계(hot-wire anemometer)와 피토판을 이용하여 측정하였고, 벽면 온도는 벽면을 따라 부착한 T형 열전대와 열전대용 분석기기인 DR230(Yokogawa)을 이용하여 데이터를 획득하였다. 터빈 블레이드 선단을 모사한 원봉 모델은 Fig. 2에 나타내었다. 전도(conduction)에 의한 영향을 최대한 줄이고 단열벽을 만들기위해 원봉 모델은 열전도율이  $k=0.2\sim 0.4\text{ W/m}\cdot\text{C}$ 로 매우 낮은 폴리아세탈(polyacetal)로 제작하였다. W501F 터빈 블레이드의 선단의 스케일을 4배로 확대해서 원봉으로 모사하고, 원봉의 직경( $D$ )을  $80\text{ mm}$ , 원봉의 두께를  $16\text{ mm}$ , 막냉각 홀 피치( $p$ )를  $10d$  ( $d = 4\text{ mm}$ ), 원봉 모델 길이를  $350\text{ mm}$ 로 가공하였다. 막냉각 홀의 길이-직경비( $L/d$ )는 4.62이고, 막냉각 홀 직경-원봉 직경비( $d/D$ )는 0.05이다. 막냉각 홀은 19개이며 3열이고, 원봉 선단의 정체선으로부터 각각  $0^\circ, \pm 23^\circ$ 에 위치한다. 스펜방향 분사각은 현재 대부분의 터빈 블레이드 처럼 모두  $30^\circ$ 로 하였다. 자유유동 난류강도를 높이기 위해 난류 그리드(turbulence grid)를 원봉 모델 선단에서 상류방향으로  $5D$ 의 위치에 설치하였다. 난류 그리드는 2개를 제작하였고 Grid A는 직경이  $6\text{ mm}$ , 메시폭이  $20\text{ mm}$ 이며, Grid B는 직경이  $10\text{ mm}$ , 메시폭이  $50\text{ mm}$ 이다. 난류강도는 IFA

300(TSI)의 1차원 열선 프로브(hot-wire probe)를 사용하여 측정하였다. 프로브는 자동 이송장치(auto traverse system)를 이용하여 정밀한 위치 제어를 하였고,  $100\text{ kHz}$ 의 sampling rate로 1000개의 신호를 입력받아 평균유속 및 난류강도를 계산하였다<sup>(11)</sup>. Fig. 3은 난류 그리드로부터 원봉 모델까지의 자유유동 난류강도를 나타내고 있고, 약  $5D$ 의 위치에서는 난류강도가 NO Grid에서 0.3%, Grid A에서 1.4%, Grid B에서 5.0%로 거의 균일해짐을 알 수 있다.

### 3.2 실험방법

주유동의 속도를  $14\text{ m/s}$ 로 고정시키고, 분사비를 0.5, 0.9, 1.3으로 변화시키며 실험을 수행하였

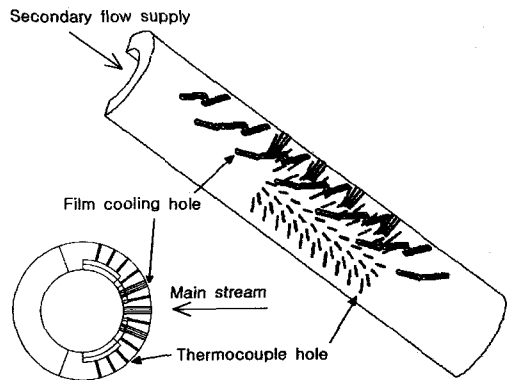


Fig. 2 Cylindrical test model for simulating turbine blade leading edge

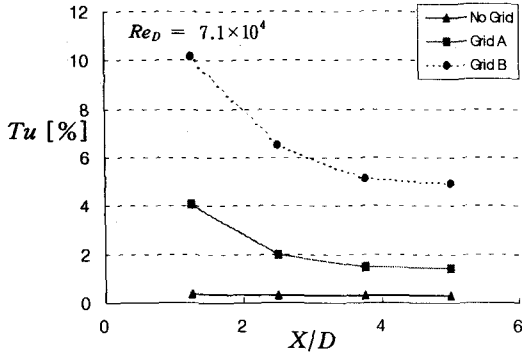


Fig. 3 Distributions of the free-stream turbulence intensity versus streamwise distance

다. 이때, 원봉 모델 선단 직경을 기준으로 한  $Re_D$ 는 약  $7.1 \times 10^4$ 의 값을 갖는다. 본 연구에서는 Funazaki 등<sup>(8)</sup>, Ekkad 등<sup>(9)</sup>, Ou와 Han<sup>(12)</sup> 등의 선행 연구자들과 같이 막냉각 유체의 온도를 주유동보다  $20^\circ\text{C}$  높게 가열하였고, 자동온도조절장치를 이용하여 주유동과 막냉각 유체간의 온도차를 항상 일정하게 유지하도록 하였다. 막냉각 유체를 가열하면 실제 밀도비를 모사할 수 없는 단점이 있지만, 본 연구에서처럼 분사비가 1인 경우,  $Fr$ 는 약 267정도가 되므로 부력은 막냉각 유체의 궤적에 영향을 주지 않는다고 가정하였다<sup>(13)</sup>.

Fig. 4에는 막냉각 홀과 열전대 위치를 도시하였다. 1피치의 막냉각 온도를 측정하기 위해 열

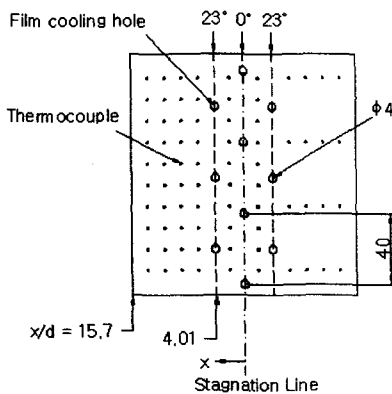


Fig. 4 Layout of the film cooling holes and locations of thermocouples

전대를  $x/d$ 가  $\pm 2.0$ ,  $\pm 6.3$ ,  $\pm 8.6$ ,  $\pm 10.8$ ,  $\pm 13.1$ 인 지점에 모두 76개를 부착하였다. 전도 또는 유동간섭을 줄이기 위해 3피치의 간격에 스펀방향으로 10열, 온도분포의 대칭을 확인하기 위해  $-x$ 인 지점에는 스펀방향으로 4열을 배열하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

난류강도와 분사비 변화가 터빈 블레이드 선단 막냉각 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해, 3가지 난류강도 ( $Tu[\%] = 0.3, 1.4, 5.0$ )와 3가지 분사비 ( $B = 0.5, 0.9, 1.3$ )에 대해 원통형 홀을 갖는 원봉 모델의 온도장 분포를 측정하였다. Fig. 5는 3가지 분사비에서 난류강도에 대한 스펀방향 평균 막냉각 효율을 나타내고 있다. 정체선으로부터  $+x$ 와  $-x$ 인 지점의 스펀방향 평균 막냉각 효율 분포가 차이를 보이는데 이는 분사홀마다 막냉각 유체가 균일하게 분사되지 않거나,  $+x$ 인 지점에서는 10개의 위치,  $-x$ 인 지점에서는 4개의 위치에서 단일 막냉각 효율의 평균값을 구한 영향으로 사료된다.  $-x$ 인 지점은 유동의 대칭을 확인하기 위해 온도 측정을 하였으므로  $+x$ 인 지점에서의 효율 분포에 초점을 맞추기로 한다. 분사비 0.5에서 Grid B를 설치했을 때를 제외하고 최대 효율은 모두 두 번째 분사열 하류에 위치한  $x/d = 6.3$ 인 지점에서 나타났고, 분사홀 하류로 이동할수록 효율이 점차 감소함을 알 수 있다. 그런데 분사비 0.5에서 No Grid일 때와 분사비 0.9일 때는  $x/d = 13.1$ 인 지점에서  $x/d = 10.8$ 인 지점보다 효율이 약간 높아지는데 이는 유동 박리에 의한 영향으로 생각된다. 분사비 0.9와 1.3에 비하여 0.5일 때는  $x/d = 6.3$ 인 지점에서 13.1인 지점까지 난류강도에 대한 막냉각 효과가 크게 차이되며, 분사비 0.5일 때는 자유유동 난류강도가 높아질수록 즉, Grid B를 설치하였을 때 높은 효율 분포를 나타내었다. 분사비 0.9일 때는 3가지 분사비 중 가장 높은 효율 분포를 나타내었으며, Grid A를 설치하였을 때 효율이 가장 높았다. 분사비 1.3일 때는 난류강도가 큰 Grid B에서 높은 효율 분포를 보였으며, 분사비 0.9일 때보다 낮은 효율 분포를 나타내었다. Fig. 6은 3가지 난류강도에서 분사비에 대한 스펀방향 평균 막냉각 효율을 나타내고 있다. Fig.6에 의해 스펀방향 평

균 막냉각 효율 분포는 자유유동 난류강도에 상관없이 모두 분사비 0.9일 때 최대를 나타내었으며, 스펠방향 평균 막냉각 효율( $\bar{\eta}$ )의 최대값은 Grid A를 설치했을 때 30.4% 임을 알 수 있었다. Grid를 설치하였을 때보다 No Grid인 경우, 분사비에 대한 스펠방향 평균 막냉각 효율 분포가 크

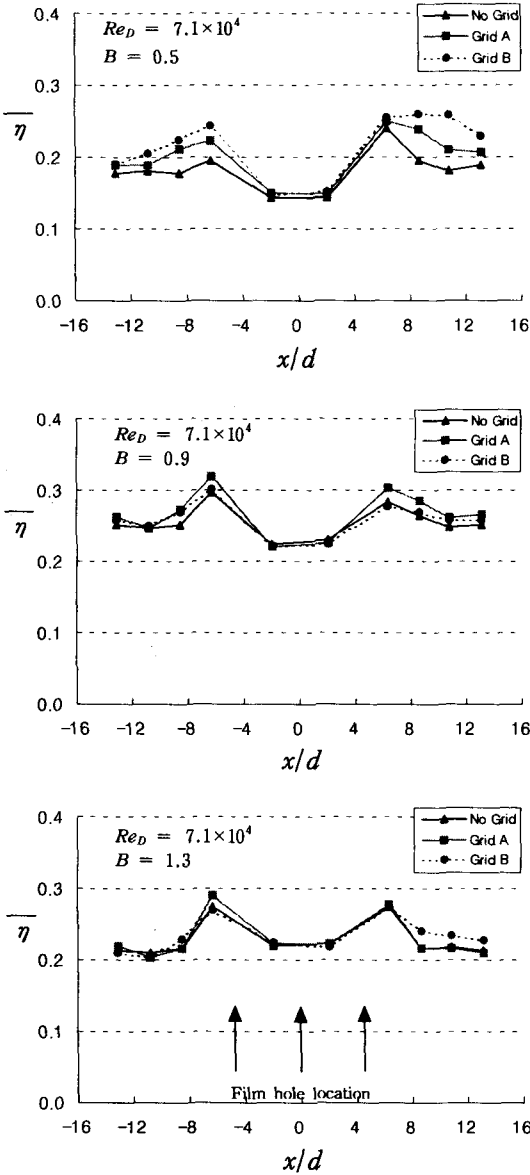


Fig. 5 Effect of blowing ratios on the spanwise-averaged film effectiveness for free-stream turbulence

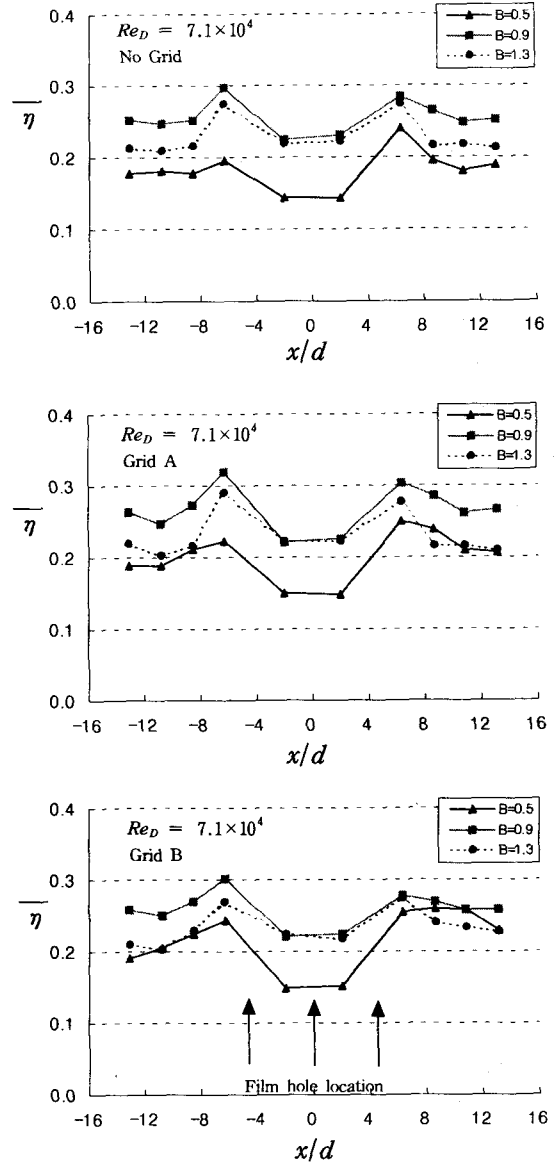


Fig. 6 Effect of free-stream turbulence on the spanwise-averaged film effectiveness for blowing ratios

게 변화였고, 분사비 1.3일 때보다 0.9에서 더 높은 효율 분포를 나타내었다. 한편 난류강도가 가장 큰 Grid B를 설치하였을 때 분사비가 효율 분포에 미치는 영향은 더 적음을 알 수 있었다.

## 5. 결 론

원봉 모델을 이용하여 자유유동 난류강도와 분사비의 변화가 터빈 블레이드 선단 막냉각 특성에 미치는 영향에 대해 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 스펜방향 평균 막냉각 효율은 분사홀 하단에서 최대값을 나타내고, 하류로 이동할수록 점차 감소하였다.
2. 분사비가 낮을 때는 난류강도에 의한 효율 분포가 크게 변하지만, 분사비가 높을 때는 난류강도에 의한 영향이 줄어들었다.
3. 3가지 난류강도에서 모두 분사비 0.9일 때 가장 높은 효율 분포를 나타내었다.
4. 난류강도가 낮을 때는 분사비에 의한 효율 분포가 크게 변하지만, 난류강도가 높을 때는 분사비에 의한 영향이 줄어들었다.

## 참고문헌

- (1) Goldstein, R. J., 1971, "Film Cooling," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 7, pp. 321-379.
- (2) 조형희, "막냉각에서의 유동 및 열전달 특성," 2000, 대한기계학회 2000년도 유체공학부문 학술강연회 강연집, pp. 61-79.
- (3) Burd, S. W., Kaszeta, R. W. and Simon, T. W., 1998, "Measurements in Film Cooling Flows: Hole L/D and Turbulence Intensity Effects," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 120, pp. 791-798.
- (4) Mehendale, A. B. and Han, J. C., 1992, "Influence of High Mainstream Turbulence on Leading Edge Film Cooling Heat Transfer," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 114, pp. 707-715.
- (5) Salcudean, M., Gartshore, I., Zhang, K. and Barnea, Y., 1994, "Leading Edge Film Cooling of a Turbine Blade Model Through Single and Double Row Injection: Effects of Coolant Density," *ASME Paper No. 94-GT-2*.
- (6) Lee, J. S., Ro, S. T. and Seo, H. J., 1994, "Mass Transfer Effects of Free-stream Turbulence and Horseshoe Vortex Formed at the Upstream Edge of Film Cooling Jets About a Cylindrical Surface," *ASME Paper No. 94-GT-18*.
- (7) Kohli, A. and Bogard, D. G., 1998, "Effects of Very High Free-Stream Turbulence on the Jet-Mainstream Interaction in a Film Cooling Flow," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 120, pp. 785-790.
- (8) Funazaki, K., Koyabu, E. and Yamawaki, S., 1998, "Effect of Periodic Wake Passing on Film Effectiveness of Inclined Discrete Cooling Holes Around the Leading Edge of a Blunt Body," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 120, pp. 70-78.
- (9) Ekkad, S. V., Han, J. C. and Du, H., 1998, "Detailed Film Cooling Measurements on a Cylindrical Leading Edge Model: Effect of Free-Stream Turbulence and Coolant Density," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 120, pp. 799-807.
- (10) Reiss, H. and Bölc, A., 2000, "Experimental Study of Showerhead Cooling on a Cylinder Comparing Several Configurations Using Cylindrical and Shaped Holes," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 122, pp. 161-169.
- (11) TSI, 1997, *IFA 300 Constant Temperature Anemometer System - Instruction Manual*, TSI Incorporated.
- (12) Ou, S. and Han, J. C., 1994, "Leading Edge Film Cooling Heat Transfer Through One Row of Inclined Film Slots and Holes Including Mainstream Turbulence Effects," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 116, pp. 561-569.
- (13) 안 준, 1999, "반대 방향의 방향각을 갖는 2열 분사 구조의 막냉각 특성," 서울대학교 대학원 석사학위 논문.