

# 연소기 벽면 막냉각에 주유동의 난류강도가 미치는 영향

오민근\* · 김영봉\* · 이동호\* · 조형희\*\* · 함희철\*\*\* · 배주찬\*\*\*

## Effect of Mainstream Turbulence Intensity on Film Cooling of Combustor

Min Geun Oh\* · Young Bong Kim\* · Dong Ho Rhee\* · Hyung Hee Cho\*\* · Hee-Cheol Hahm\*\*\* · Ju Chan Bae\*\*\*

### ABSTRACT

Experimental study has been conducted to investigate effect of mainstream turbulence intensity on film cooling performance of staggered rows of rectangular holes in combustor. Temperature fields and adiabatic film cooling effectiveness under 10% mainstream turbulence intensity are measured. The results of temperature fields show that overall values are decreased and thicker film of coolant is formed downstream of rows of holes for high mainstream turbulence intensity. The results of film cooling effectiveness show that the values around the holes are smaller than the case of the low mainstream turbulence intensity, however, the difference of film cooling performance is decreased for the further downstream.

### 초 록

연소실 내부에서 주유동의 난류강도가 엇갈린 배열의 사각홀의 막냉각 성능에 미치는 영향에 대하여 실험을 수행하였으며, 주유동의 10% 난류강도 하에서 온도장 및 단열 막냉각 효율이 측정되었다. 온도장의 결과는 주유동의 높은 난류강도에 의해 전체적인 값들이 감소하고, 두터운 냉각유체 막이 형성됨을 보였으며, 홀 인접영역에서 주유동의 높은 난류강도에 의해 낮은 막냉각 효율 값을 보이지만, 하류로 진행함에 따라 냉각성능의 차이가 줄어들음을 보였다.

Key Words: Film cooling(막냉각), Rectangular Hole(사각홀), Turbulence intensity(난류강도)

### 1. 서 론

추진기관의 연소실 내벽은 고온의 연소가스로

부터 큰 열부하를 받고 있다. 이와 같은 높은 연소가스 온도로부터 연소실 내벽을 보호하기 위해서는 적절한 냉각방법의 사용이 요구된다.

벽면의 구멍이나 슬롯(slot)을 통해 분사되는 냉각유체가 요소 표면에 단열막을 형성하여 표면을 보호하는 막냉각(film cooling)은 연소실과 같이 고온 조건에서 사용되는 요소를 보호하기 위하여 사용되는 대표적인 냉각방법이다.[1]

\* 연세대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 연세대학교 기계공학부  
\*\*\* 국방과학연구소  
연락처, E-mail: mgoh@yonsei.ac.kr

일반적으로 연소실 내부에서는 연소를 촉진시키기 위하여 스웰(swirl) 및 난류강도를 증가시키게 되는데, 이러한 높은 난류강도는 연소실 벽면에서의 열전달에 큰 영향을 미치며, 이에 따른 벽면에서의 냉각성능 향상이 필요하다.

1열 또는 2열 이상의 원형 막냉각홀을 적용한 일반적 연소실 막냉각 기법에서 난류강도를 높이는 방법으로는 격자 또는 다공판을 설치하거나 제트를 분사하는 방법, 또는 두 가지 모두를 사용하는 방법 등에 관한 연구가 이루어졌다.[2-7]

하지만 원형의 홀 형상 및 배열은 높은 분사율에서 냉각 유체가 주유동을 뚫고 들어가 고온의 표면을 제대로 보호하지 못하며, 횡방향으로 불균일한 냉각성능을 갖는 단점을 가지고 있으므로, 이에 대한 대안으로 사각홀을 이용한 막냉각에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.[8]

하지만, 사각홀을 이용한 막냉각의 경우에 높은 난류강도가 미치는 영향에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다.

본 연구는 2열 및 3열의 사각홀을 사용한 막냉각에서 높은 난류강도가 막냉각 성능에 미치는 영향에 대하여 이루어졌다. 이를 위하여 열전대 갈퀴(thermocouple rake)를 3차원 이송장치에 부착하여 온도장을 측정하였으며, 감온성 액정(Thermochromic Liquid Crystal)을 이용하여 막냉각효율 값을 측정하였다.

## 2 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험 장치에 대한 자세한 사항은 Rhee 등[8]에 제시되어 있다. Fig. 1은 측정 영역과 막냉각홀의 개략도를 보이고 있다.

온도장 측정을 위하여 5 mm 간격의 7개의 J-type 열전대로 구성된 열전대 갈퀴를 사용하였으며, 열전대 갈퀴를 삼차원 이송장치에 부착하여 Fig. 1(a)에 나타난 것과 같이 주유동 방향으로  $x/d=3, 5, 10$  지점에서의 온도장을 측정하였다. Fig. 1(b)에서는 막냉각홀 하류 부분의 측

정판에 TLC(감온성 액정)를 설치하여 막냉각효

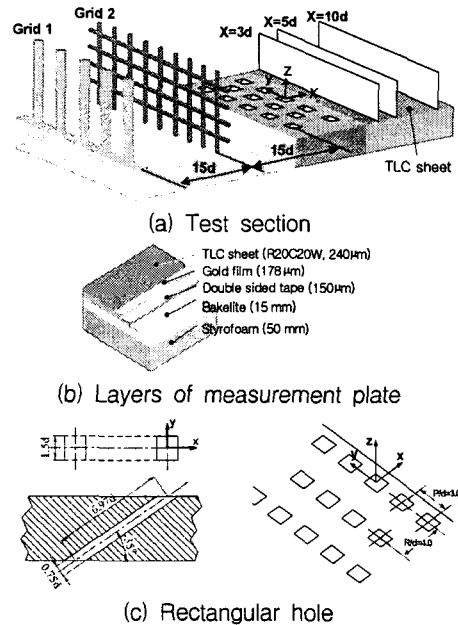


Fig. 1 Schematic diagrams of experimental apparatus

율 값을 구하였다. 측정판은 대역폭이 20~40℃인 TLC(R20C20W, Hallcrest Ltd, 240 µm), 금도금 히터(Aquare-12, Courtaulds, 178 µm), 양면접착 테이프(5 mm), 베이클라이트(Bakelite, 15 mm), 스티로폼(50 mm)으로 된 층으로 구성되어 있으며, 측정판에 수직인 위쪽 방향으로 CCD 카메라와 조명을 설치하여 측정판을 촬영하였다.

실험을 수행 중 주유동의 속도는 10 m/s로 유지하였으며, 격자가 설치되지 않은 경우 난류강도는 0.5%로 유지되었다. 난류강도 변화에 따른 특성을 고찰하기 위하여 Fig. 1(a)에서 도시된 바와 같이 두 개의 격자를 최상류 홀의 중심으로부터 15d, 30d에 설치하였으며, 이 때 주유동의 난류강도는 10%로 나타났다. 실험에 사용된 격자에 대한 자세한 사항은 Kim[9]에 제시되어 있다.

온도장 및 막냉각효율 데이터를 얻기 위하여 이차유동의 온도는 열교환기와 항온조를 이용하여 주유동의 온도(상온)보다 20℃ 높게 유지시켰으며 이때의 밀도비는 0.93이었다. 이 상태에

서 오리피스 유량계와 송풍기를 이용하여 유량을 조절해 주어 분사비를 각각 0.5, 1.0, 2.0으로 변화시켜 가며 실험을 수행하였다.

본 연구에 사용된 막냉각홀 형상 및 배열은. Fig. 1(c)에 나타난 것과 같이 주유동에 대한 분사각은  $35^\circ$ 이며 분사판의 두께는 40 mm로 막냉각홀의 길이는 69.7 mm( $l/d=6.97$ )이다. 막냉각홀의 단면적은 15 mm×7.5 mm로 수력직경은 10 mm이다. 홀 사이 간격은 30 mm, 열과 열 사이의 간격은 40 mm이다. 상류열과 하류열의 홀은 서로 15 mm씩 엇갈리게 배치하였다.

## 2.2 무차원 온도 및 막냉각 효율

막냉각홀 하류의 온도장에 대한 결과는 무차원 온도로 표시하였으며 다음과 같이 정의된다.

$$\Theta = (T_{rake} - T_{\infty}) / (T_2 - T_{\infty}) \quad (1)$$

막냉각 효율은 단열벽면온도를 무차원화한 값으로 정의되며, 유동의 물성치가 일정한 저속 유동의 경우 다음과 같이 표현된다.

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

여기서, 단열벽면온도( $T_{aw}$ )는 TLC를 이용하

여 구하였다.

## 3. 실험 결과 및 토의

본 연구에서는 2열 이상의 엇갈린 사각홀 배열에서의 막냉각 성능에 높은 난류강도가 미치는 영향에 대해 고찰하였으며, 주유동의 난류강도가 낮은 경우 막냉각 열 수 변화에 따른 효과는 Rhee[10] 등에 제시되어 있다.

### 3.1 온도장

2열의 엇갈린 배열의 사각홀 하류에서 분사비가 0.5, 1.0, 2.0인 경우에 대하여 각각 난류강도가 높고 낮은 유동 조건에서의 무차원화된 온도값이 분포하는 형태를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 난류강도가 높아지면 전체적으로 무차원화된 온도값이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 난류강도가 높은 경우에 바닥 면으로부터 더 높은 곳까지 무차원화된 온도값이 분포하고 있음을 확인할 수 있으며, 높은 무차원화된 온도값을 갖는 1열에서 분사된 이차유동의 중심부분(core)이 나타나는 영역이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 낮은 난류강도의 경우에 2열에서 분사된 이차유동이 유지되면서  $x/d = 5.0$ 인 지

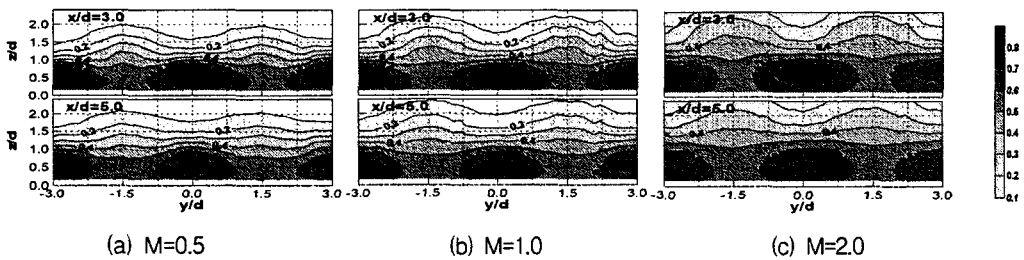


Fig. 2 Contour plot of dimensionless temperature field downstream of two rows for T.I.=10%

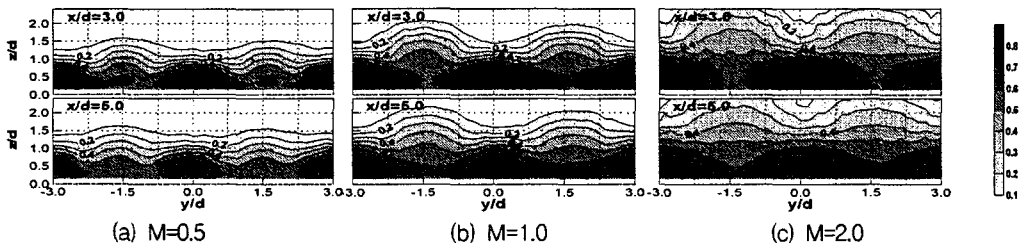
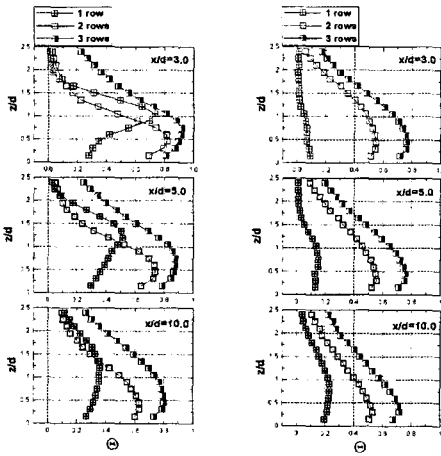


Fig. 3 Contour plot of dimensionless temperature field downstream of two rows for T.I.=0.5%



(a)  $y/d = 0.0$  (b)  $y/d = -1.5$

Fig. 4 Vertical distributions of dimensionless temperature at  $y/d=0.0$  and  $-1.5$  ( $Tu=10\%$  and  $M=1.0$  for all cases)

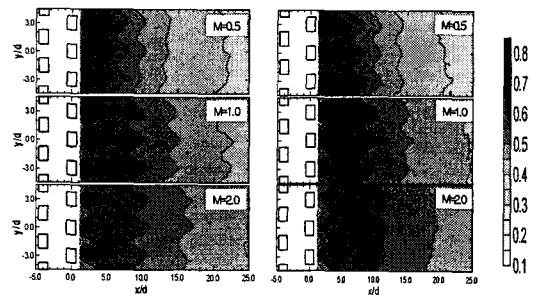
점까지 굴곡진 형태의 무차원화된 온도값 분포를 나타내고 있는 반면 난류강도가 높아지면서 평평하게 분포하게 됨을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 난류의 섞임 현상으로 설명할 수 있다. 난류강도가 높아지면서 주유동과 이차유동간에 섞이는 현상이 더욱 활발해졌기 때문에 전체적으로 무차원화된 온도값이 더 넓고 균일하게 분포하게 되며 이로 인하여 낮은 난류강도의 경우에 비해 높은 무차원화된 온도값이 나타나는 영역은 상대적으로 감소한 것이다. 분사비가 낮은 경우( $M=0.5$ ), 난류강도가 낮은 경우와 마찬가지로 분사된 냉각유체의 운동량이 작기 때문에 표면에 잘 깔리고 표면에서 상대적으로 높은 값을 갖지만, 하류로 가면서 값이 크게 감소하는 경향을 나타냈다. 분사율이 증가함에 따라, 냉각유체의 중심이 표면에서 멀어지며, 냉각유체가 영향을 주는 영역이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 높은 난류강도의 실험에서 얻어진 무차원화된 온도값을 각각 홀의 중심( $y/d = 0.0$ )에서의 위치와 홀과 홀 사이( $y/d = -1.5$ )의 중심 지점에서 수직방향으로 도시한 그림이다. 난류강도가 낮은 경우 일반적으로 막냉각홀의 열 수가 1열에서 2열 이상으로 증가하게 되면

누름 효과(pushing effect)와 방어 효과(blocking effect)가 나타나면서 더욱 높고 고른 막냉각 성능을 얻을 수 있게 된다.[9] 실험 결과에서 확인할 수 있듯 난류강도가 높아져도 누름 효과와 방어 효과의 영향으로 열 수가 증가하면서 막냉각 성능이 향상되는 효과를 확인할 수 있다. 특히 홀과 홀 사이의 경우, 1열에서 2열 또는 3열로 열 수가 늘어나게 되면 상류홀에서 분사된 이차유동의 영향으로 인하여 무차원화된 온도값이 매우 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 막냉각 효율

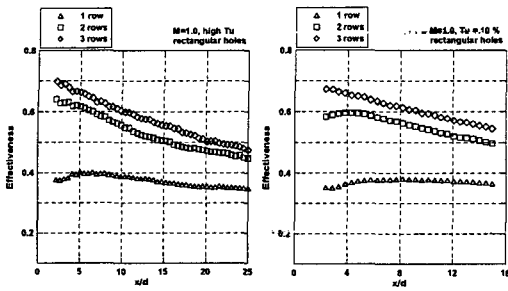
막냉각 효율( $\eta$ )은 단일 벽면온도( $T_{aw}$ )를 무차원화한 형태이다. 막냉각 성능을 평가하기 위해서는 단일 벽면온도값의 분포 형태를 확인하여야 한다. Fig. 5는 2열의 엇갈린 홀 배열에서 난류강도와 분사율 변화에 따른 막냉각 효율 값의 분포 형태를 나타내고 있다. 2열의 사각홀에서는 이차유동이 바닥 면으로 부착하려는 성질이 증가하는 코안다 효과(Coanda effect)와 누름 효과와 방어효과에 의하여 난류강도의 변화에 대한 영향이 크지는 않지만, 난류의 섞임현상에 의해 전체적으로 무차원 온도값의 감소로 홀 인접 영역은 낮은 막냉각 효율을 보이지만, 하류로 진행함에 따라 냉각성능의 차이가 줄어들게 됨을 확인하였다. 분사비가 증가할 경우, 이차유동의 절대 유량이 증가하기 때문에 분사홀에서 먼 하류에서도 분사비가 낮은 경우에 비하여 높



(a)  $Tu=0.5\%$  (b)  $Tu=10\%$

Fig. 5 Contour plots of film cooling effectiveness of two rows of holes for high and low turbulent intensities.

## 참고문헌



(a)  $y/d = 0.0$  (b) Spanwise averaged

Fig. 6 Film cooling effectiveness distributions for various number of row(s) at  $M=1.0$  and  $Tu = 10\%$ .

은 막냉각 성능이 나타나는것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 열 수의 변화에 따른 막냉각 효율값의 분포를 나타낸 그림이다. 1열의 홀 배열에서 2열로 열 수가 증가하게 되면 누름 효과와 방어 효과에 의한 영향으로 인하여 막냉각 성능이 매우 크게 향상하지만 2열에서 3열로 증가할 경우에는 이미 누름 효과와 방어 효과가 존재하고 있는 상태에서 최 상류홀에서 분사된 이차유동에 의하여 그 정도가 약간 강해지는 정도이기 때문에 성능 향상의 정도가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구는 주유동의 난류강도 변화 시 엇갈린 배열의 사각 막냉각홀 하류에서의 무차원 온도장 분포 및 막냉각 효율 특성에 대하여 연구하였다. 그 결과, 주유동의 난류강도가 증가하는 경우, 주유동과 냉각유체간의 혼합이 증대되어, 난류강도가 낮은 경우에 비해 전체적으로 무차원 온도값이 감소하며, 두터운 단열막을 형성함을 보였으며 홀 인접영역에서 막냉각 효율값은 난류강도가 낮은 경우에 비해 낮지만, 하류로 진행함에 따라 냉각성능의 차이가 줄어들었다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 주관 국가지정연구실 사업 및 국방과학 연구소 지원에 의한 결과이며, 이에 감사드립니다.

1. Goldstein, R. J., 1974, "Film Cooling", Advances Heat Transfer, Academic Press, Vol. 7, pp. 321~379
2. Baines, W. D. and Peterson E. G., 1951, "An Investigation of Flow Through Screens," Trans. ASME, Vol. 73, pp.4 67-480.
3. Thole, K. A., Bogard D. G., and Whan-Tong, J. L., 1994, "Generating High Freestream Turbulence Levels," Experiments in Fluids Vol. 17, pp. 375-380.
4. Ames, F. E., 1997, "The Influence of Large Scale High Intensity Turbulence on Vane Heat Transfer," ASME Journal Of Turbo Machinery, Vol. 119, pp. 23-30.
5. Kadotani, K. and Goldstein, R. J., 1979, "On The Nature of Jets Entering a Turbulent Flow Part A-Jet-Mainstream Injection," Journal of Engineering for Power, Vol. 101, pp. 459-465.
6. Olson, S. J., 1999, "Effects of high turbulence and wakes on mass transfer from gas turbine blade," Ph.D. dissertation, University of Minnesota, Minneapolis, MN.
7. Cutbirth, J. M., 2000, "Turbulence and three-dimensional effects on a film cooled turbine vane," Ph.D. dissertation, The University of Texas at Austin.
8. Rhee, D. H., Lee, Y. S. and Cho, H. H., 2002, "Film Cooling Effectiveness and Heat Transfer of Rectangular-Shaped Film Cooling Holes," ASME Paper No. 2002-GT-30168.
9. Kim, Y. B., 2004, "Effect of Mainstream Turbulence Intensity on Film Cooling Performance Downstream of Staggered Rows of Rectangular Holes", Master, thesis, Yonsei University.
10. Rhee, D. H., Lee, Y. S. Kim, Y. B., and Cho, H. H., 2003, "Film Cooling and Thermal Field Measurements for Staggered Rows of Rectangular- Shaped Film Cooling holes," ASME Paper No. GT2003-38608.