

주유동의 난류강도가 막냉각홀 주위의 열/물질전달 특성에 미치는 영향

이동호*, 김병기*, 조형희**

Effect of Free Stream Turbulence Intensity on Heat/Mass Transfer Characteristics Around a Film Cooling Hole

D. H. Rhee,* B. G. Kim* and H. H. Cho**

ABSTRACT

The present study investigated local heat transfer characteristics around a film cooling hole with variations of free stream turbulence intensity. The film cooling jet is injected through a single hole inclined at 30° to the surface and laterally at 45° for the blowing rates of 0.5, 1.0 and 2.0. Turbulence generating grids are used at upstream of the film cooling hole to change the turbulence intensity of free stream. Free stream turbulence intensity without grids is 0.5%. Two different turbulence generating grid is installed at different locations upstream of the film cooling hole so that turbulence intensity of free stream varies from 3% to 10%. The naphthalene sublimation technique has been employed to determine local heat/mass transfer coefficients. With low free stream turbulence intensity, heat/mass transfer augmented area by coolant or free stream is distinguished evidently. However, when free stream turbulence intensity is high, heat transfer is enhanced in all region and heat transfer enhanced regions are not clearly divided due to vigorous mixing of coolant and free stream. The peak values of heat/mass coefficients are decreased and the distributions of heat/mass transfer coefficients are more uniform with high turbulence intensity. The effect of turbulence intensity on heat transfer characteristics is more evident as blowing rate is higher.

초 록

본 논문에서는 주유동의 난류강도 변화에 따른 복합각도로 분사되는 단일 막냉각홀 주위에서의 국소 열/물질전달계수 특성을 살펴보기 위하여 실험을 수행하였다. 단일 막냉각홀 시편은 평면에 대하여 30° 의 경사각을 가지고 있으며, 횡방향으로는 주유동에 대해 45° 의 각도로 분사하여 복합각도 분사시 주유동의 난

*연세대학교 대학원 기계공학과(Yonsei University, Graduate School)

**연세대학교 기계공학과(Yonsei University, Dept. of Mechanical Engineering)

류강도 변화에 따른 효과를 살펴보았다. 또한 막냉각제트의 분사율을 0.5에서 2.0까지 변화시켜가며, 주유동의 높은 난류강도조건에서 분사율 변화시 막냉각홀 주위의 열/물질전달특성에 미치는 효과를 살펴보았다. 주유동의 난류강도를 변화시키기 위하여 막냉각홀 상류에 난류발생격자를 설치하였다. 격자를 설치하지 않은 경우, 주유동의 난류강도는 0.5%이며, 난류발생격자의 종류 및 설치위치를 달리하여 난류강도를 3%에서 10%까지 변화시켜가며 실험하였다. 막냉각홀 주위에서 국소적인 열/물질전달계수값을 얻기 위하여 물질전달 실험방법인 나프탈렌 승화법을 사용하였다. 주유동의 난류강도가 낮은 경우 분사홀 주변에서 막냉각제트 혹은 주유동에 의한 열/물질전달 촉진영역이 뚜렷한 경계를 갖지만, 난류강도가 증가하면서 전 영역에 걸쳐 열/물질전달이 촉진되었으며 주유동과 막냉각제트의 활발한 혼합작용으로 인해 영역의 구분이 점차 소멸되었다. 또한 주유동의 높은 난류강도 효과는 막냉각제트의 분사율이 높은 경우 뚜렷이 나타났다.

기 호 설 명

- d : 막냉각홀의 내경
 - dy : 나프탈렌의 승화 두께
 - $d\tau$: 나프탈렌 표면의 유동장 노출 시간
 - D_{naph} : 공기 중에서의 나프탈렌 물질확산계수
 - h_m : 국소 물질전달계수
 - M : 분사율(blowing rate),
 $M = \rho_2 U_2 / \rho_\infty U_\infty$
 - \dot{m} : 단위면적당 질량유속
 - Nu : Nusselt 수, $Nu = hd/k$
 - Nu_0 : 평판유동에서의 Nusselt 수
 - Re_d : Reynolds 수, $Re_d = U_\infty d / \nu$
 - Sh : Sherwood 수, $Sh = h_m d / D_{naph}$
 - Sh_0 : 평판유동에서의 Sherwood 수
 - Tu : 제트를 분사하지 않은 경우
주유동의 난류강도, $Tu = \sqrt{u'^2 / U_\infty^2}$
 - U_2 : 분사유체 속도
 - U_∞ : 주유동 속도
 - x : 주유동 방향 좌표 (Fig. 1)
 - z : 횡방향 좌표 (Fig. 1)
- 그리스 문자
- α : 분사제트의 바닥 면에 대한 상대각(Fig. 1)
 - β : 분사제트의 주유동 방향에 대한 상대각 (Fig. 1)
 - ν : 동점성 계수

- ρ_2 : 분사유체의 밀도
- ρ_∞ : 주유동의 밀도
- ρ_s : 고체 나프탈렌 밀도
- $\rho_{v,w}$: 나프탈렌 표면에서 나프탈렌 증기밀도
- $\rho_{v,\infty}$: 주유동에서의 나프탈렌 증기밀도
($\rho_{v,\infty} = 0$)

1. 서 론

가스터빈엔진에서 막냉각방법은 요소표면상의 구멍이나 슬롯을 통하여 저온의 유체가 분사되어 주유동의 고온가스와 고체표면사이에 일종의 단열막을 형성함으로써 고온의 유동으로부터 연소실 벽면 혹은 터빈 블레이드 표면을 보호하는 방법이다. 현재까지 막냉각에 대한 연구는 주어진 조건에서 주유동방향 분사 혹은 복합각도분사에서의 유동, 열전달 및 막냉각 특성을 연구하는 것에 치중되어 왔다. Honami 등⁽¹⁾은 90°의 횡방향각도로 분사되는 막냉각제트의 유동장 및 온도장의 측정을 통하여 막냉각홀 주변에서의 유동 및 냉각특성을 연구하였으며, 그 결과 제트와 주유동간의 상호작용으로 인하여 대규모의 와류성분이 제트의 한쪽 측면에 존재함을 보여 주었다. Lee 등⁽²⁾은 횡방향각도를 변화시키며 복합각도로 분사되는 막냉각제트의 유동특성 및 공력손실분포를 유막법을 이용한 가시화와 3차원 속도측정을 이용하여 연구하였다. Walters 등⁽³⁾과 McGovern 등⁽⁴⁾은 횡방향 분사각도를 변화시키며 막냉각제트의 유동특성과 열전달특성에 대해 수치해석을 통해 연구하였다. 그 결과

막냉각제트 주변의 와동현상은 주로 막냉각분사홀 내부의 경계층에 의해 발생한 와류에 의해 좌우되며, 이러한 와류가 막냉각효율에 좋지 않은 영향을 끼침을 보여주었다.

하지만 실제 운행되는 가스터빈엔진에서 연소실 및 터빈 블레이드를 통과하는 유동은 높은 난류강도를 갖고 있으며, 연소기 및 상류 익렬에 의하여 형성되는 주유동의 높은 난류성분이 가스터빈 엔진요소들의 열전달 및 막냉각특성 특성에 큰 영향을 끼친다. 그럼에도 불구하고 주유동의 난류강도에 따른 막냉각홀 주위에서의 열전달 및 막냉각 특성을 고려한 연구는 그다지 많지 않다. 또한 전면막냉각(total coverage cooling)과 터빈 블레이드의 전면영역(leading edge)에서의 막냉각과 같이 대부분의 영역이 분사홀로 구성되어 있는 경우는 분사홀 인접영역에서의 열전달계수 및 막냉각효율에 대한 정보가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 주유동의 난류강도에 따른 막냉각홀 주위에서의 열/물질전달특성을 살펴보고자 한다. Kadotani 등^(5,6)은 주유동의 난류강도 변화에 따라 주유동 방향으로 분사되는 일열 막냉각홀 하류에서의 유동 및 막냉각특성을 연구하여, 난류강도의 변화에 따라 유동조건 및 막냉각효율 분포가 크게 달라지는 것을 보여주었다.

본 연구에서는 물질전달실험방법중의 하나인 나프탈렌 승화법을 이용하여 단일 막냉각유체를 복합각도(compound angle)로 분사하는 경우 주유동의 난류강도 변화에 따른 막냉각홀 인접영역에서의 열/물질전달특성을 고찰하였다. 나프탈렌 승화법은 기존의 열전달실험방법의 적용이 매우 어렵거나 불가능한 복잡한 형상에 응용할 수 있을 뿐만 아니라, 열전달 실험에서 발생하기 쉬운 전도 및 복사에 의한 오차를 배제하면서도 정확한 경계조건의 부여가 가능하다.⁽⁷⁾

2. 실험장치 및 방법

실험에 이용되는 장치는 (1) 풍동, (2) 2차유동 분사장치, (3) 나프탈렌 시험판 등 3가지의 주요부로 구성된다. 실험조건에 따라 시험판을 교체할 수 있도록 분리 및 조립이 가능하게 제작되었으며, 2차유동

분사장치를 통하여 공급되는 공기는 시험판에 천공된 막냉각홀을 통하여 분사되어 풍동 시험부를 통과하여 흐르는 주유동의 경계층 내부로 유입된다. 유동장에 노출된 나프탈렌 시험판으로부터의 승화량은 풍동 실험전후의 표면형상을 선형가변차동변환기(LVDT)로 측정함으로써 구하였다. 실험장치 (1), (2)와 측정장치의 상세한 사양은 김병기 등⁽⁸⁾과 동일하다. 풍동 시험부를 통과하는 주유동의 유속은 20 m/s로 고정하였고, 이 경우 막냉각홀의 직경을 기준으로 했을 때 Reynolds 수는 $Re_d \approx 2.7 \times 10^4$ 이다. 분사제트가 없을 때 주유동의 속도편차는 0.46%이내의 분포를 보였으며, 격자를 설치하지 않은 경우 난류강도는 약 0.5% 이내로 유지되었다. 또한 시험단면의 시작점에는 난류경계층의 발달을 촉진시키기 위하여 직경 3.5 mm의 트립와이어(trip wire)를 설치하였다. 풍동으로 유입된 실내공기는 수축부, 시험단면, 디퓨저를 통과한 뒤 건물외부로 배출되어 풍동으로 재유입되지 않도록 하였다.

2.1 시험시편

Fig. 1에 시험시편의 개략도 및 좌표축이 제시되어 있다. 시험시편은 단일 막냉각홀 시편으로써 원형으로 설계하여 15° 간격으로 횡방향 분사각도를 변경시킬 수 있도록 제작하였다. 이 연구에서는 횡방향 분사각도를 45°로 고정시켜 복합각도분사시의 효과를 관찰하고자 하였다. 홀 직경은 20 mm로 홀 주변

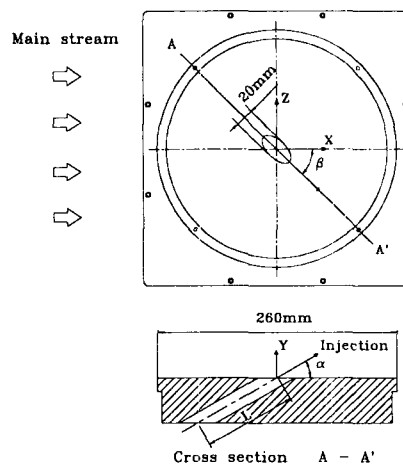


Fig. 1. Schematic view of test plate

에서 국소적으로 많은 열/물질전달계수의 측정을 용이하도록 하였다. 또한 막냉각홀은 표면에 대해서 30°의 경사를 이루고 있으며, 홀 길이 대 직경비(L/d)는 5d로 하여 실제 적용되는 경우와 유사한 기하학적 형상을 갖도록 하였다. 국소 열/물질전달계수를 구하기 위해 표면에 막냉각홀을 중심으로 반경 6d영역에 나프탈렌층이 입혀져 있다. 표면에서의 나프탈렌층은 주조방법을 통해 얻어진다. 시험시편에 표면이 잘 연마된 주조판을 밀착, 조립하여 용융된 나프탈렌을 주입시키고 나프탈렌이 응고된 후, 시편을 주조판으로부터 분리시키면 시편의 표면에 매끈한 나프탈렌층이 형성된다. 실험중 시편의 나프탈렌 표면온도를 정확히 측정하기 위하여 시편에 J-Type 열전대를 부착, 온도를 측정하였다.

2.2 난류강도 발생장치

난류발생격자의 종류와 설치위치 변화에 따라 주유동의 난류강도를 0.5%에서 10%까지 변화시켜가며 실험을 수행하였다.

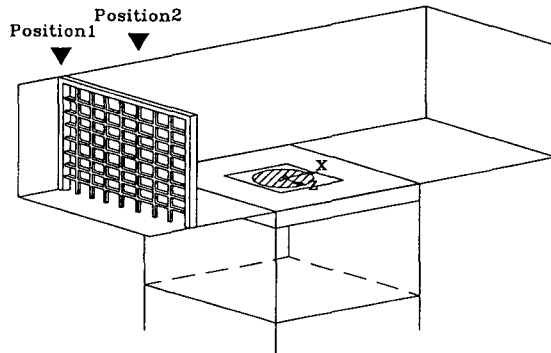


Fig. 2. Schematic view of test section with a turbulence generating grid

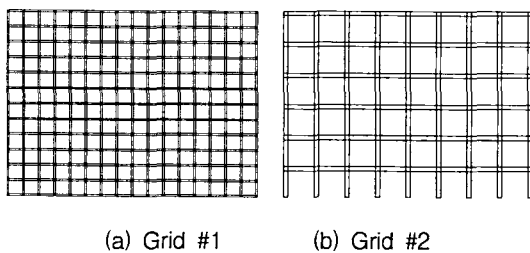


Fig. 3. Shape of turbulence generating grids

Table 1. Geometry of turbulence generating grids

Grid No.	1	2
Material	Wood	Wood
Solidity (σ)	0.241	0.275
Opening Ratio	0.759	0.725
Horizontal Pitch	24.81 mm	49.125 mm
Vertical Pitch	24.75 mm	50 mm
Width of rectangular bar	3 mm	7 mm

Table 2. Free stream turbulence intensity at film cooling hole location

	position 1	position 2
Tu with Grid 1	3%	5%
Tu with Grid 2	8%	10%

position 1 : 15d upstream film cooling hole
 position 2 : 8d upstream film cooling hole

난류발생격자를 풍동 내에 설치한 경우 시험부의 개략도를 Fig. 2에 제시하였다. Fig. 3에 난류발생격자 형상의 개략도를 나타내었다. 또한 격자의 사양 및 위치에 따른 주유동의 난류강도를 Table 1, Table 2에 정리하였다.

2.3 실험방법

본 연구에서는 물질전달 실험방법인 나프탈렌승화법을 이용하였다.

이를 통하여 물질전달계수의 무차원형태인 Sherwood 수를 얻을 수 있는데, 실험단계를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 시험시편에 주조를 통해 나프탈렌표면을 형성시킨다.
- 2) 실험전 시편의 나프탈렌 표면형상을 측정한다.
- 3) 시험시편을 유동장에 노출시켜 실험을 수행한다.
- 4) 실험후 시편의 나프탈렌 표면형상을 재측정한다.
- 5) 측정된 값으로부터 Sherwood 수를 계산한다.

2.4 물질전달계수의 계산

실험 전후에 측정된 시험시편의 나프탈렌 표면고도차로부터 나프탈렌의 승화깊이를 구하여 물질전달계수를 계산한다. 물질전달계수는 다음 식으로 표시된다.

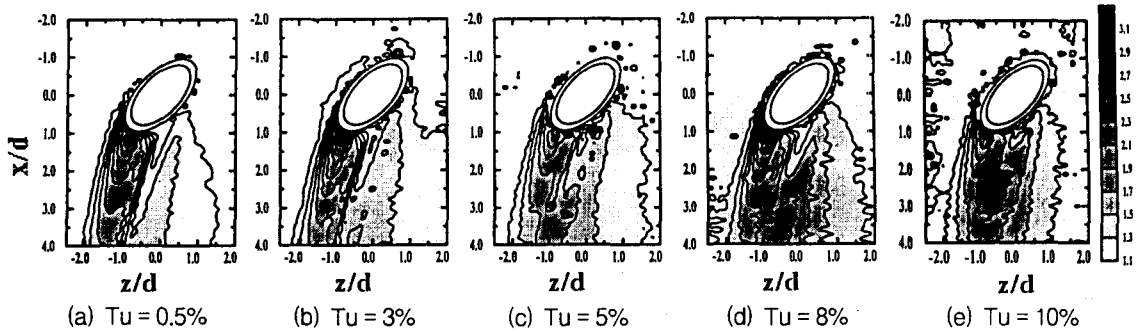


Fig. 4. Contours of normalized Sherwood number for $M = 1.0$ and $\beta = 45^\circ$

$$h_m = \frac{\dot{m}}{\rho_{v,w} - \rho_{v,\infty}} = \frac{\rho_s(dy/d\tau)}{\rho_{v,w}} \quad (1)$$

여기서, 시험부를 통과하는 공기는 나프탈렌을 포함하고 있지 않으므로 $\rho_{v,\infty} = 0$ 이다. 결국 나프탈렌의 승화깊이, 즉 실험전과 실험후의 표면고도차(dy)와 실험시간($d\tau$), 고체 나프탈렌의 밀도와 표면에서 포화증기밀도($\rho_{v,u}$)에 의해서 물질전달계수는 결정된다. 위의 물질전달계수는 무차원화된 값인 Sherwood수로 나타낼 수 있다.

$$Sh = \frac{h_m d}{D_{naph}} \quad (2)$$

여기서 d 는 분사홀의 직경이고, D_{naph} 는 공기 중에서 나프탈렌의 확산계수이다. 여기에 사용되는 물성치는 Goldstein과 Cho⁽⁷⁾에 제시되어 있다. 이와 같은 계산과정을 통하여 얻어진 물질전달계수는 물질전달과 열전달 사이의 유사성에 의하여 열전달계수로 변환할 수 있으며 상관관계식은 아래와 같다.

$$\frac{Nu}{Sh} = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^n \quad (3)$$

우변의 지수는 유동조건에 따라 변하며, 보통 난류 유동에서는 $n = 0.4$, 층류유동에서는 $n = 1/3$ 으로 사용되고 있다.

3. 실험결과 및 고찰

실험에서 얻어진 Sh 수는 제트를 분사하지 않은

평판에 대하여 동일한 유동조건에서 얻어진 Sh 수인 Sh_o 에 대한 비로 제시하였다. 이를 통해 부정확한 물성치(나프탈렌의 포화증기압, 확산계수 등)의 오차를 배제할 수 있으며, 열전달 문제에 직접 적용가능한 이점이 있다.⁽⁹⁾

$$\left(\frac{Nu}{Nu_o} = \frac{Sh}{Sh_o} \right)$$

3.1 주유동 난류강도 변화시의 효과

횡방향 분사각도가 45° 이고 분사율이 1.0인 경우 막냉각제트 주위에서의 열/물질전달특성을 주유동의 난류강도(Tu)를 0.5%에서 10%까지 변화시켜가며 살펴보았다.

Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이, $Tu=0.5\%$ 인 경우 막냉각제트 주위에서의 열전달 촉진영역은 크게 두 영역으로 나뉜다. $z < 0$ 인 영역에서는 막냉각제트에 의한 열/물질전달 촉진영역이 나타난다. $z > 0$ 인 영역에서는 막냉각제트에 의해 주유동이 교란되어 하나의 큰 와류가 형성되고, 이 와류에 의한 열/물질전달 촉진영역이 나타난다. 또한 이러한 두 곳의 열/물질전달 촉진영역사이에 정체영역이 형성되는 것을 알 수 있다. 난류강도가 증가하면서 이러한 정체영역의 크기가 감소하며, 열/물질전달 촉진영역의 구분이 불명확해진다. 이는 난류강도의 증가로 인하여 전반적으로 열/물질전달이 향상될 뿐만 아니라, 주유동과 막냉각제트사이에서 활발한 혼합작용이 일어나 상대적으로 정체영역이 감소하기 때문이다. 이와 더불어 난류강도가 증가하면서 막냉각제트의 궤적이 $z < 0$ 인 쪽으로 편향되는 정도가 약화되어 유동방향 쪽으로 이동하는 것을 알 수 있는데, 이는 막냉각제트와 주유동사

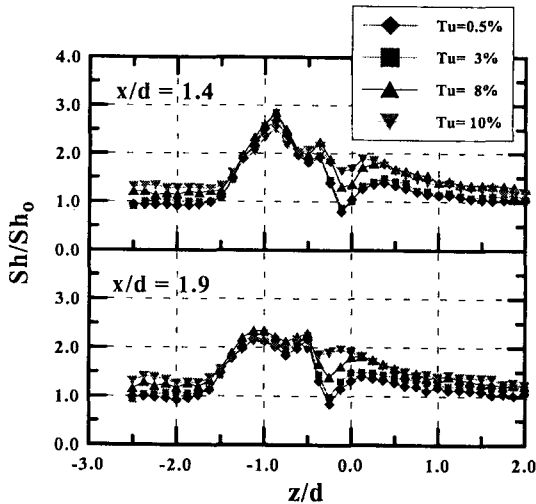


Fig. 5. Lateral distributions of normalized herwood number for $M=1.0$ and $\beta=45^\circ$

이의 혼합작용으로 인해 막냉각제트 자체의 운동량이 감소하기 때문인 것으로 사료된다. 특히 $Tu \geq 8\%$ 인 경우 모든 영역에서 열/물질전달이 20%이상 촉진되며, 주유동의 난류강도가 낮은 경우에 비해 막냉각제트 궤적이 훨씬 더 교란되고, $z > 0$ 인 방향으로 편향되며 열/물질전달 촉진영역의 영역구분이 완전히 없어지게 된다. 위에서 언급한 현상은 Fig. 5를 보면 명확히 알 수 있다. Fig. 5는 막냉각홀 하류 두 지점에서의 물질전달계수의 분포를 횡방향으로 나타낸 그림이다. $z/d > 1.0$, $z/d < -2.0$ 과 같이 제트의 영향을 받지 않는 영역에서는 주유동의 난류강도가 증가할수록 열/물질전달이 촉진되는 현상을 확인할 수 있다. 또한 제트에 의해 영향을 받는 영역과 주유동에 의한 열/물질전달 촉진영역사이의 극소점은 난류강도 증가에 따라 커지는 것을 볼 수 있다. $Tu=10\%$ 인 경우, 주유동과 막냉각제트사이의 활발한 혼합작용으로 인해 정체영역 및 열/물질전달 촉진영역의 구분이 없어지는 것을 확인할 수 있다. 또한 주유동의 난류성분에 의한 주유동과 제트간의 활발한 혼합작용으로 인해 제트의 운동량이 감소되기 때문에 난류강도가 낮은 경우에 비해 $z/d \approx -1.0$ 부근에서 관찰되는 극대점의 크기가 작아지며 전반적으로 보다 더 균일한 열/물질전달계수의 분포를 나타내는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 횡방향으로 평균된 물질전달계수를 주유

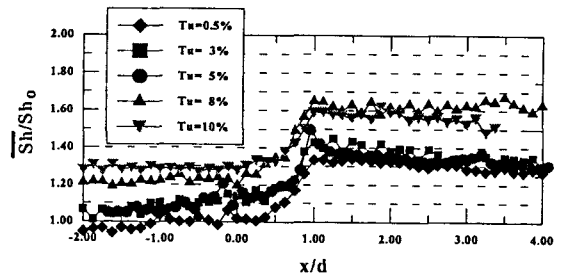


Fig. 6. Streamwise distributions of spanwise averaged Sherwood number for $M=1.0$ and $\beta=45^\circ$

동방향에 대해서 나타낸 그림이다. 이 그림에서와 같이 주유동의 난류강도가 증가할수록 전반적인 열/물질전달계수가 증가하는 것을 관찰할 수 있다. $Tu=10\%$ 인 경우 제트 운동량의 감소로 인하여 $x/d > 1.0$ 인 영역에서는 $Tu=8\%$ 인 경우에 비해 좀 더 균일한 분포를 보이지만(Fig. 5) 평균적으로는 더 낮은 열/물질전달계수 분포를 보이고 있다.

3.2 분사율 변화시의 열전달 특성

주유동의 난류강도가 0.5%, 8%인 경우, 막냉각홀의 횡방향 분사각도 45° , 분사율 0.5, 2.0인 경우에 대하여 막냉각홀 주위에서의 열/물질전달특성을 살펴 보았다.

Fig. 7과 Fig. 8은 주유동의 난류강도가 0.5%, 8%인 경우에 대해서 $M=0.5, 2.0$ 일 때의 막냉각홀 주위에서의 물질전달계수의 분포를 나타낸 그림이다. Fig. 7과 Fig. 8을 살펴보면, 난류강도가 증가하면서 전반적인 열/물질전달의 촉진이 관찰된다. $Tu=8\%$

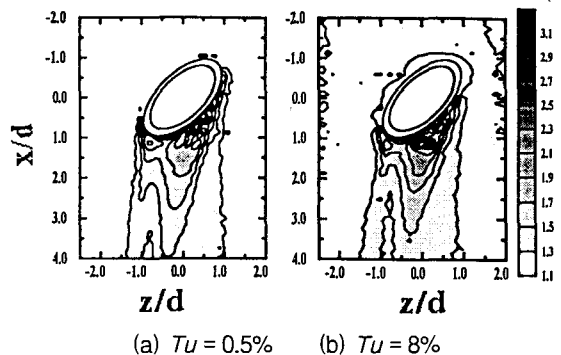


Fig. 7. Contours of normalized Sherwood number for $M=0.5$ and $\beta=45^\circ$

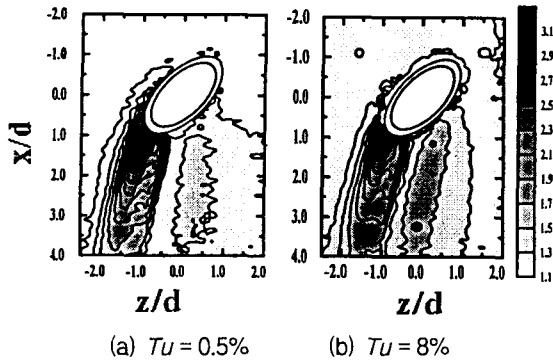


Fig. 8. Contours of normalized Sherwood number for $M=2.0$ and $\beta=45^\circ$

일 때에도 $Tu = 0.5\%$ 인 경우와 마찬가지로 분사율이 낮은 경우 제트의 운동량이 작기 때문에 복합각도로 분사하더라도 제트의 궤적이 유동방향으로 분포하지만, 분사율이 증가할수록 제트의 궤적이 $z < 0$ 인 쪽으로 편향되며, 이 영역에서 높은 열/물질전달계수분포를 보이고 있다. Fig. 7을 살펴보면, $M=0.5$ 인 경우 전반적인 열/물질전달의 상승을 제외하고는 주유동의 난류강도 변화에 따른 막냉각률 부근에서의 열/물질전달계수의 분포는 큰 변화는 관찰되지 않았다. 막냉각제트의 운동량이 작기 때문에 제트의 영향이 하류까지 전달되지 않는 것을 알 수 있고, 난류강도가 증가되는 경우 제트의 영향이 약간 감소한 것을 알 수 있다. Fig. 8에서 보면 알 수 있듯이, M

$= 2.0$ 인 경우 막냉각제트의 운동량이 크기 때문에 $M = 1.0$ 인 경우와 다르게 $Tu = 8\%$ 인 경우에도 하류까지 정체영역이 지속되었다.

Fig. 9는 $M = 0.5, 2.0$ 에 대한 막냉각률 하류의 특정 4지점에서의 난류강도 변화시의 물질전달계수의 횡방향 분포를 나타낸 그림이다. $M = 0.5$ 인 경우 열/물질전달계수의 전반적인 상승을 제외하고는 유사한 분포를 나타내고 있다. $M = 2.0$ 인 경우 열/물질전달계수의 최대값은 약간 감소하였으나, 정체영역의 폭이 약간 감소하고, 좀더 균일한 열/물질전달계수분포를 보여주었다.

4. 결 론

주유동의 난류강도를 변화시키는 경우 복합각도로 분사되는 막냉각제트 주위의 열/물질전달특성을 나프탈렌 승화법을 이용하여 측정하였으며, 이를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 분사율이 1.0, 횡방향 분사각도가 45° 인 경우, 주유동의 난류강도 변화시의 열/물질전달 특성을 살펴보았다. 주유동의 난류강도가 증가할수록 전 영역에서의 열/물질전달이 촉진되었다. 또한 난류강도의 증가가 주유동과 막냉각제트 사이의 혼합작용을 증진시켜서 홀 하류에서 정체영역이 감소하였고, 물질전달계수의 극대값의 크기가 감소하였으며, 보다 균일한 열/물질전달계수 분포를 나타내었다.
- (2) 낮은 난류강도($Tu = 0.5\%$)에서의 경우와 마찬가지로 주유동의 난류강도가 높은 경우에도 분사율이 높을수록 제트의 궤적이 편향되었으며, 높은 열/물질전달분포를 나타내었다. 분사율이 낮은 경우 전반적인 열/물질전달의 촉진현상을 제외하고는 주유동의 난류강도변화에 따른 열/물질전달특성은 관찰되지 않았다. 분사율이 높은 경우 주유동의 난류강도가 증가하면서 열/물질전달계수의 최대값이 약간 감소하였으며 정체영역이 감소하여 보다 균일한 계수의 분포를 나타냈다.

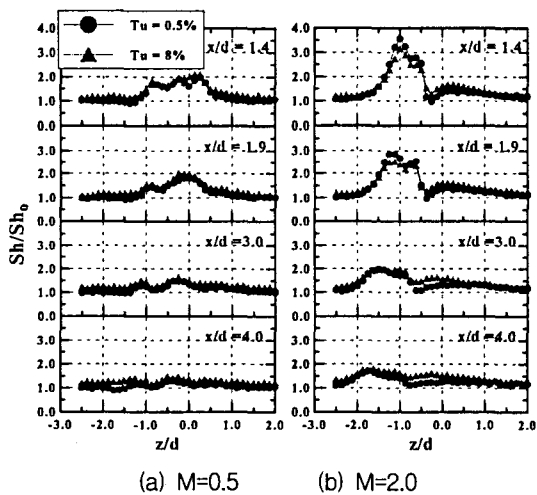


Fig. 9. Lateral distributions of Normalized Sherwood number for $\beta=45^\circ$

후 기

본 연구(과제관리번호: 95-64)는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Honami, S., Shizawa, T. and Uchiyama, A., "Behavior of the laterally injected jet in film cooling: Measurements of surface temperature and velocity/temperature field within the jet," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 116, 1994, pp.106~112.
- Lee, S. W., Kim, Y. B. and Lee, J. S., "Flow characteristics and aerodynamic losses of film-cooling jets with compound angle orientations," *ASME J. of Turbomachinery*, vol. 119, 1997, pp. 310-319.
- Walters, D. K. and Leylek, J. H., "A Detailed Analysis of Film-Cooling Physics Part I: Streamwise Injection with Cylindrical Holes," 1997, *ASME Paper* No. 97-GT-269.
- McGovern, K. T. and Leylek, J. H., "A Detailed Analysis of Film-Cooling Physics Part II: Compound-Angle Injection with Cylindrical Holes," 1997, *ASME Paper* No. 97-GT-270.
- Kadotani, K. and Goldstein, R. J., "On the Nature of Jets Entering A Turbulent Flow Part A-Jet-Mainstream Interaction," *ASME J. of Engineering for Power*, Vol. 101, 1979, pp.459~465
- Kadotani, K. and Goldstein, R. J., "On the Nature of Jets Entering A Turbulent Flow Part B-Film Cooling Performance," *ASME J. of Engineering for Power*, Vol. 101, 1979, pp.466~470
- Goldstein, R. J. and Cho, H. H., "A review of mass transfer measurement using naphthalene sublimation," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 10, 1995, pp.416~434.
- 김병기, 우성제, 조형희, "막냉각홀 주위와 원형돌출봉 주위에서의 열(물질)전달의 측정과 해석," 대한기계학회논문집(B) 제21권 제11호, 1997, pp.1485~1495
- 김병기, "복합각도로 분사되는 막냉각제트의 열전달 특성," 연세대학교 기계공학과 석사학위논문, 1997