

이차유동의 방향이 막냉각 효율에 미치는 영향

박세진* · 최석민* · 손호성* · 정희윤* · 조형희*†

* 연세대학교 기계공학부

Effect of Secondary Flow Direction on Film Cooling Effectiveness

Sehjin Park*, Seok Min Choi*, Ho-seong Sohn*, Heeyoon Chung* and Hyung Hee Cho*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

(Received January 10, 2013 ; Revised May 5, 2013 ; Accepted May 16, 2013)

Key Words: Double-jet Film Cooling(이중분사 막냉각), Secondary Flow Channel(이차유로), Film Cooling Effectiveness(막냉각 효율), Anti-Kidney Vortex(안티키드니 와류), Numerical Analysis(수치해석)

초록: 막냉각에 관한 많은 연구들은 주유동과 이차유로가 평행한 형태로 연구가 이루어졌다. 하지만 실제 터빈 블레이드에서 이차유로의 방향은 일반적으로 주유동의 방향에 수직인 형태이다. 그래서 본 연구에서는 이차유동의 방향이 이중분사 막냉각의 효율에 미치는 영향을 수치해석을 통해 알아보려고 한다. 분사율은 1, 2이고 횡방향 분사각은 22.5°이다. 분사율이 1일 때 평행 형상에서는 안티키드니 와류가 잘 형성되어 막냉각 효율이 수직 형상의 경우보다 더 높다. 반면에 분사율이 2일 때 수직 형상의 막냉각 효율은 평행 형상보다 향상되었다. 많은 유량의 제트가 서로 반대 방향으로 분사되기 때문에 두 형상 모두 막냉각 효율이 높게 나타난다. 하지만 안티키드니 와류의 영향은 다른 분사율보다 상대적으로 작다.

Abstract: Several studies of film cooling were accomplished with a secondary flow channel parallel to the main flow. In real turbine blades, however, the direction of the secondary flow channel is generally normal to the main flow. Thus, this study performs a numerical analysis to investigate the effects of the direction of secondary flow on the effectiveness of double-jet film cooling. The blowing ratio is 1 and 2, and the lateral injection angle is 22.5°. The parallel channel case creates a well-developed anti-kidney vortex with a blowing ratio of 1, and the laterally averaged film cooling effectiveness of the parallel channel is enhanced compared to the normal channel. The normal channel shows higher performance with a blowing ratio of 2. Both cases show high film cooling effectiveness. These phenomena can be attributed to a high blowing ratio and flow rate rather than an anti-kidney vortex.

- 기호설명 -

α : 홀의 분사각(°)
 β : 횡방향 분사각(°)
 β_1 : 첫 번째 막냉각 홀의 횡방향 분사각(°)
 β_2 : 두 번째 막냉각 홀의 횡방향 분사각(°)
 ρ_2 : 이차유동의 밀도
 ρ_∞ : 주유동의 밀도

κ : 비열 비
 η : 막냉각 효율 ($= (T_{aw} - T_\infty) / (T_2 - T_\infty)$)
 η_l : 횡방향으로 평균 낸 막냉각 효율
 C_D : 유출계수 (discharge coefficient)
 d : 홀의 직경
 L : 홀의 길이
 M : 분사율 ($= (\rho_2 v_2) / (\rho_\infty v_\infty)$)
 \dot{m} : 막냉각 홀 유량
 p : z축 방향으로의 홀 간 간격
 p_m : 주유동의 정압력
 p_{tc} : 이차유동의 전압력
 s : x축 방향으로의 홀 간 간격
 T_2 : 이차유동의 온도

§ 이 논문은 대한기계학회 2012년도 추계학술대회(2012. 11. 7.-9., CECO) 발표논문임

† Corresponding Author, hhcho@yonsei.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

- T_{∞} : 주유동의 온도
 T_{aw} : 단열 표면의 온도
 T_{ic} : 이차유동의 전온도
 v_2 : 홀 출구에서의 제트의 속도
 v_{∞} : 주유동의 속도
 x, y, z : 직교 좌표

1. 서 론

터빈입구온도는 가스터빈의 효율과 출력에 있어서 중요한 요소이다. 하지만 터빈이 수용할 수 있는 최대 입구온도는 터빈을 구성하는 재료의 한계온도로 인해 제한적이다. 이를 극복하고자 가스터빈에는 다양한 냉각방식이 적용되어 있다. 그 중 하나인 막냉각은 온도가 낮은 이차유동으로 블레이드 표면을 덮어 뜨거운 주유동으로부터 직접 표면을 보호하는 냉각방식이다.

막냉각 효율은 분사각(α), 분사율(M), 홀의 모양과 배열, 유동 조건 등 여러 요소들의 영향을 받는다. 원형 홀을 이용한 막냉각에서 주로 발생하는 키드니 와류(kidney vortex)는 막냉각 효율에 좋지 않은 영향을 미친다. 이러한 원형 홀을 이용한 막냉각과 키드니 와류의 특성을 파악하고자 여러 연구들이 이루어졌다. Walters와 Leylek⁽¹⁾은 원형 홀을 이용한 막냉각에서 관찰되는 키드니 와류의 발생 원인과 키드니 와류로 인해 주유동이 제트의 아래 표면으로 유입되어 나타나는 펀칭 현상에 대하여 설명하였다. Rhee 등⁽²⁾은 원형 홀 형태의 막냉각에서 횡방향 분사각(β)이 막냉각 효율과 열전달에 미치는 영향을 알아보고자 실험을 수행하였다. 제트에 대한 주유동의 간섭으로 인해 열전달 계수는 높고 막냉각 효율이 낮은 영역이 나타남을 보였다.

원형 홀을 이용한 막냉각은 분사율이 높아질수록 모멘텀이 높은 제트가 주유동을 관통(penetration)하거나 키드니 와류에 의한 리프트 오프(lift off) 현상이 발생하여 막냉각 효율이 낮아진다.⁽³⁾ 이러한 문제를 해결하여 막냉각 효율을 높이기 위해 홀의 형상 및 배열에 대한 여러 연구들이 진행되어 왔다. Dittmar 등⁽⁴⁾은 실험을 통해 원형 홀 배열, 분리된 홀(discrete hole) 배열, 확장 홀 배열의 막냉각 효율과 열전달계수를 비교하였다. 또한 복합분사각을 갖는 확장 홀 입구에 냉각유체가 홀과 같은 방향으로(direct), 홀에 반대방향으로(opposing) 유입되도록 조건을 나누

어 실험하였고 그 결과 두 경우의 막냉각 효율과 열전달계수가 다르게 나타남을 보였다. Cho 등⁽⁵⁾은 원형 홀 출구를 원뿔 모양으로 확장시켜서 제트의 모멘텀을 줄이는 방법을 통해 더 향상된 막냉각 효율을 얻었다. Kusterer 등⁽⁶⁾은 복합분사각을 갖는 두 개의 원형 홀을 일정 간격으로 배열한 이중분사 막냉각(double-jet film cooling)을 소개하였다. 이중분사 막냉각은 안티키드니 와류(anti-kidney vortex)를 형성하여 횡방향으로 넓은 막냉각 효과를 갖는다. Han 등⁽⁷⁾은 이중분사 막냉각의 안티키드니 와류가 형성되는 원리를 설명하였다. Ahn 등⁽⁸⁾은 복합분사각을 갖는 두 줄의 원형 홀을 네 가지 방식으로 배열하여 그에 따른 유동의 양상과 막냉각 효율 분포를 측정하고 비교하였다.

본 연구에서는 이중분사 막냉각이 이차유동의 방향에 받는 영향을 수치해석을 통해 알아보고자 한다. 실제 블레이드에서는 이차유동과 주유동의 방향이 서로 수직하다는 점을 고려하였다.

2. 수치해석방법

2.1 해석방법 및 경계조건

본 연구는 상용프로그램인 Ansys CFX 14.0을 사용하였다. RANS 모델 중 실험 결과와 가장 비슷한 결과를 보이는 standard k- ϵ 난류모델을 사용하였고⁽⁹⁾ scalable wall function이 적용되었다. 형상은 약 310만 개의 격자로 구성되고 y^+ 는 0.2~3.5 사이의 값을 갖는다.

작동유체로는 이상기체 공기를 사용하였다. 주유동의 온도는 1,600 K이고 이차유동의 온도는 700 K이다. 주유동과 이차유동 모두 난류강도가 5%이다. 주유로의 출구에 1,210,000 Pa의 정압을 주었고 이차유로 출구의 유량을 조절하여 분사율(M)을 맞추었다. 주유동이 기준일 때의 분사율은 1, 2이고, 이차유로 입구를 기준으로 할 때의 분사율은 각각 약 1.7, 3.3이다. 주유로의 양 측면 벽에 주기조건을 주었고, 그 외의 벽면에는 단열 조건과 점착조건(no-slip condition)이 주어졌다.

2.2 형상

이차유동의 방향이 막냉각 효율에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 1과 같이 이차유동이 주유동의 방향에 수직한 경우와 평행한 경우, 두 가지로 나누었다.

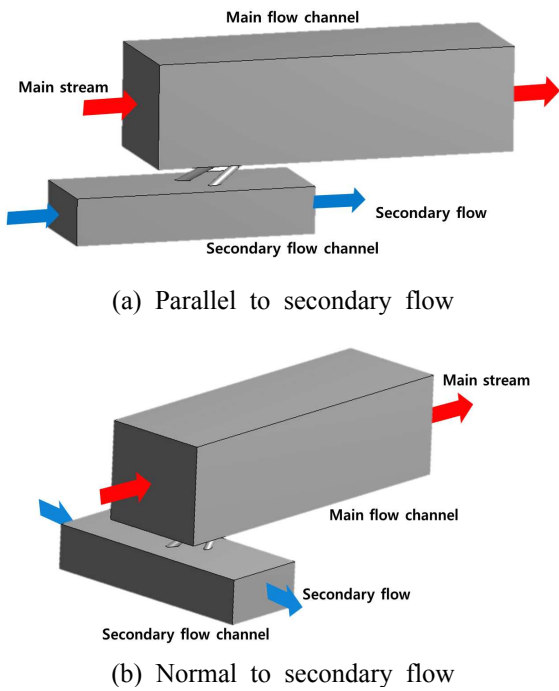


Fig. 1 Two other geometries for comparison of the effect of the secondary flow direction

주유로의 너비는 45 mm, 높이는 40 mm이고 이차유로의 너비는 36 mm, 높이는 18 mm이다. 주유로와 이차유로의 유동 방향이 서로 평행한 형상을 평행 형상(parallel)이라 하였고, 서로 수직인 형상을 수직 형상(normal)이라 하였다. 막냉각 홀은 직경(d)이 3 mm인 원형 홀이고 홀의 길이(L)는 $7d$ 이다. 두 개의 이중분사 홀 중 주유로의 입구에 가까이 위치하는 홀을 홀1, 그 뒤에 위치하는 홀을 홀2라 하였다. 두 홀 모두 분사각(α)이 30° 로 같고 횡방향 분사각(β_1, β_2)은 22.5° 이지만 서로 반대 방향을 갖는다($\beta_1 = -22.5^\circ, \beta_2 = 22.5^\circ$). Kusterer 등이 이중분사 막냉각의 분사율(M)이 1일 때 $p/d = 1, s/d = 3$ 에서 가장 높은 막냉각 효율을 얻을 수 있다⁽³⁾고 제시한 결과를 바탕으로 본 연구에서는 이 조건을 따랐다. Fig. 2는 각 기호들이 해당하는 부분을 나타내고 있다. 두 형상의 효율 차이를 비교하고자 홀1의 후류 부분을 영역1, 홀2의 후류 부분을 영역2라 하였고 그 가운데 부분을 영역3이라 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 이차유동의 방향에 따른 막냉각 효율 비교

이중분사 막냉각은 서로 반대 방향의 횡방향

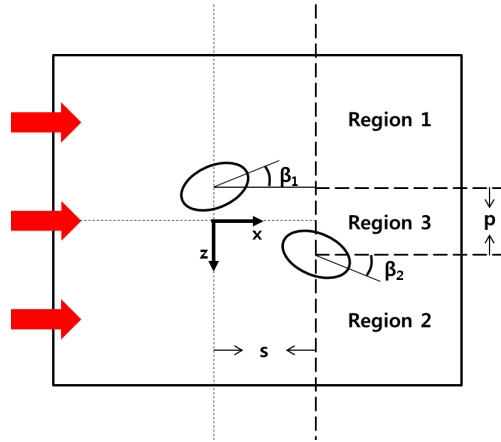


Fig. 2 Lateral injection angle(β), hole pitch(p) and hole spacing(s)

분사각을 갖는 두 원형 홀을 일정 간격으로 배열한 형태이다. 원형 홀을 이용한 막냉각에서는 한 쌍의 와류로 구성된 키드니 와류가 발생하는데, 이 와류로 인해 주유동이 제트의 아래 표면으로 유입된다. 횡방향 분사각을 갖는 원형 홀의 키드니 와류는 강한 한 쪽 와류와 약한 반대쪽 와류로 이루어져 있다. 이중분사 막냉각의 안티키드니 와류는 두 쌍의 키드니 와류가 결합한 형태이다. 두 홀의 간격이 너무 멀거나 가까우면 안티키드니 와류가 형성되지 않거나 그 효과가 약화된다.^(6,7) 이중분사 막냉각은 안티키드니 와류로 인해 횡방향으로 넓은 막냉각 효과를 갖지만, 와류의 방향 때문에 두 제트의 사이로 주유동이 유입한다. 이로 인해 영역3의 막냉각 효율이 영역1, 2보다 낮아져서 V자 형태의 막냉각 효율 분포를 갖는다.

Figure 3은 분사율(M)이 1, 2일 때의 이차유동의 방향에 따른 막냉각 효율 분포이다. 분사율이 1일 때, 평행 형상에서는 이중분사 막냉각의 특징이 잘 나타난다. 하지만 수직 형상의 막냉각 효율 분포는 평행 형상의 분포와 다른 양상을 보인다. 평행 형상에서와 같은 V자 형태의 효율 분포가 나타나지 않고 영역1 쪽으로 치우친 효율 분포를 갖는다. 즉, 막냉각이 이루어지는 영역은 영역2보다 영역1에서 더 넓다. 또한 분사율이 1일 때 수직 형상은 평행 형상보다 전반적으로 낮은 막냉각 효율을 갖는다. 이와 반대로 분사율이 2일 때는 수직 형상이 평행 형상보다 더 높은 막냉각 효율을 갖는다. 분사율이 높아질수록 제트의 냉각유량이 많아지고 모멘텀 또한 높아지기 때문에 더 넓은 횡방향 냉각 효과를 갖는다.

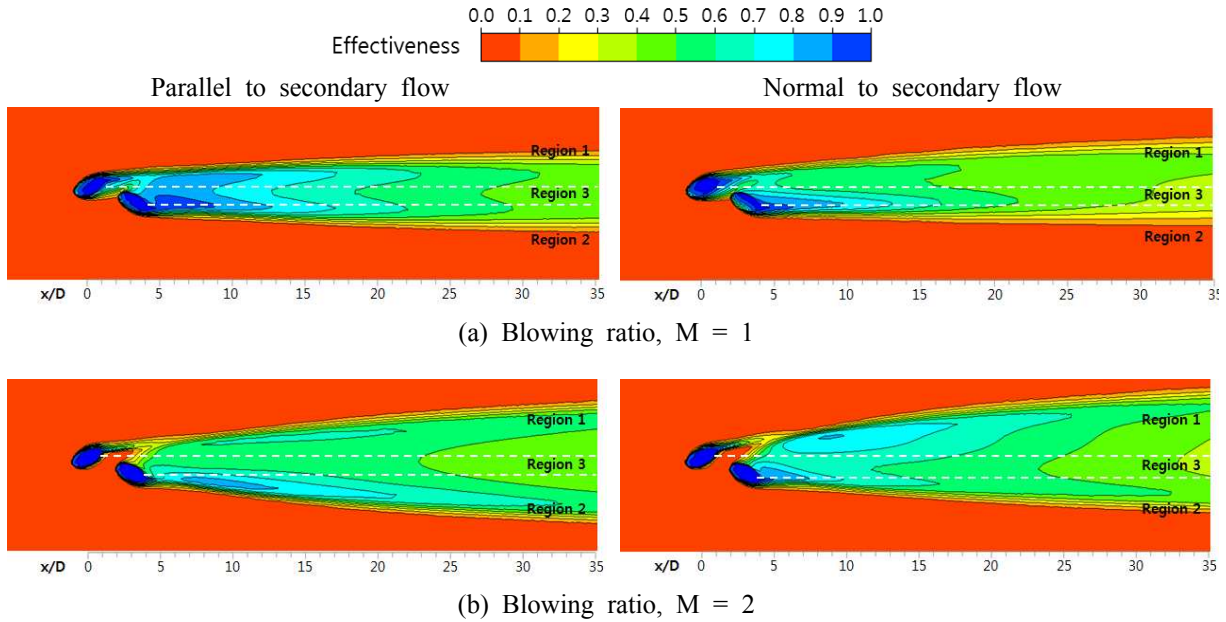


Fig. 3 Film cooling effectiveness(η) contour on the direction of secondary flow channel

Figure 4는 분사율에 따른 막냉각 효율을 횡방향으로 평균을 내어 형상별로 비교한 그래프이다. 평행 형상은 분사율이 증가함에 따라 홀 부근의 효율이 낮아진다. 하지만 후류로 갈수록 많은 냉각유량이 횡방향으로 넓게 표면에 부착되면서 높은 막냉각 효율을 갖는다. 수직 형상은 분사율이 증가함에 따라 전반적인 효율의 증가를 보인다.

Figure 5는 Fig. 4의 효율을 분사율별로 비교한 그래프이다. 그래프 상의 x표시는 안티키드니 와류의 형성으로 제트의 리프트 오프 현상이 완화되는 지점이다. 분사율이 1인 경우, x표시를 기점으로 안티키드니 와류로 인해 높은 막냉각 효율을 얻거나 효율의 급격한 감소가 완화됨을 효율 분포도(Fig. 3(a))와 그래프(Fig. 5(a))를 통해 확인할 수 있다. 또한 평행 형상이 수직 형상보다 전반적으로 더 높은 막냉각 효율을 갖는다. 분사율이 2인 경우 평행 형상에서는 $x/d = 5$ 부터 리프트 오프된 두 제트가 안티키드니 와류에 의해 표면으로 재부착하면서 효율이 향상된다(Fig. 3(b), Fig. 5(b)). 특히 홀1의 제트는 주유동을 관통하려 했으나 홀2의 분사 후에 안티키드니 와류가 형성되면서 표면으로 재부착된다. 반면에 수직 형상은 두 제트의 비대칭적인 분사로 인해 홀1의 제트만 표면으로 재부착된다. 이는 영역2의 막냉각 효율이 영역1보다 훨씬 낮은 것을 통해 확인할

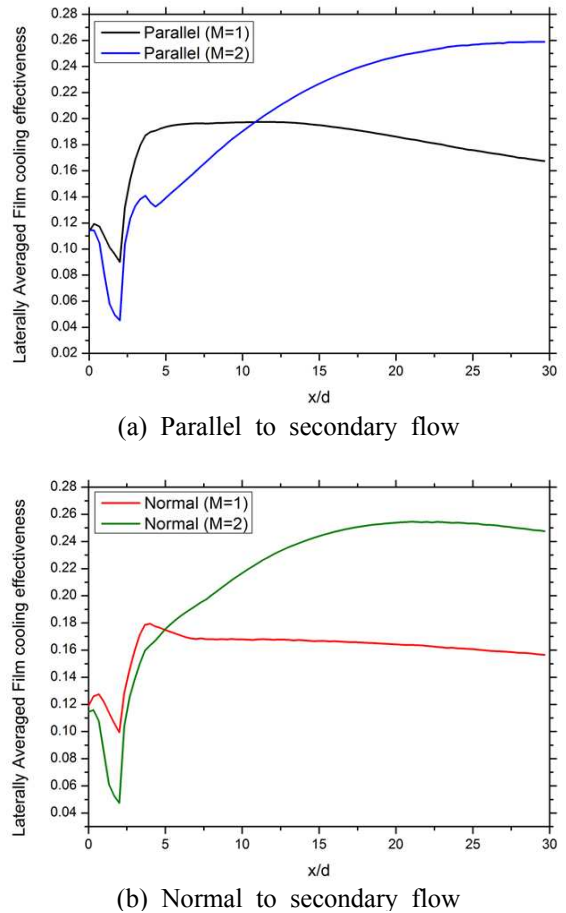
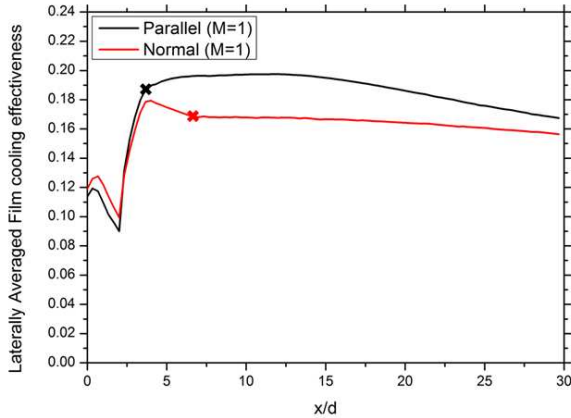
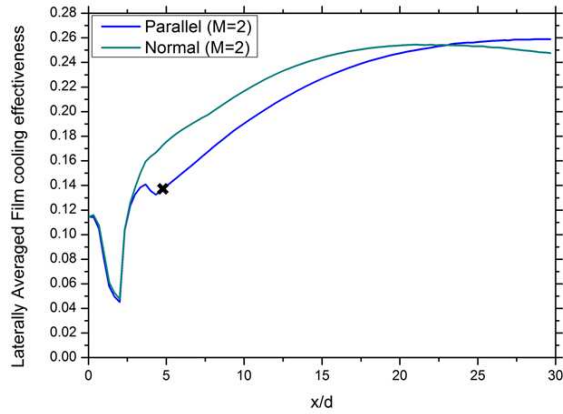


Fig. 4 Effect of blowing ratio on laterally averaged film cooling effectiveness, η_l



(a) M = 1



(b) M = 2

Fig. 5 Effect of different secondary flow direction on laterally averaged film cooling effectiveness, η_l

수 있다(Fig. 3(b)). 안티키드니 와류의 영향이 명확하지 않지만 막냉각 효율은 평행 형상보다 더 높다.

Figure 6은 각 분사율에 따른 유출계수(discharge coefficient, C_D)이다. 유출계수는 막냉각 홀에 유입되는 실제 유량과 이상적인 유량의 비를 의미한다. Gritsch 등⁽¹⁰⁾은 그 식을 다음과 같이 제시하였다.

$$C_D = \frac{\dot{m}}{p_{tc} \left(\frac{p_m}{p_{tc}} \right)^{(\kappa+1)/2\kappa} \sqrt{\frac{2\kappa}{(\kappa-1)RT_{tc}} \left(\left(\frac{p_{tc}}{p_m} \right)^{(\kappa-1)/\kappa} - 1 \right)}} \frac{\pi}{4} d^2$$

분사율이 증가함에 따라 유출계수가 증가하는 동시에 수직 형상과 평행 형상의 유출계수 차이는 작아지는 경향을 확인할 수 있다.

3.2 이차유동의 방향에 따른 유동 특성 변화

두 형상의 막냉각 효율 분포가 차이를 보이는

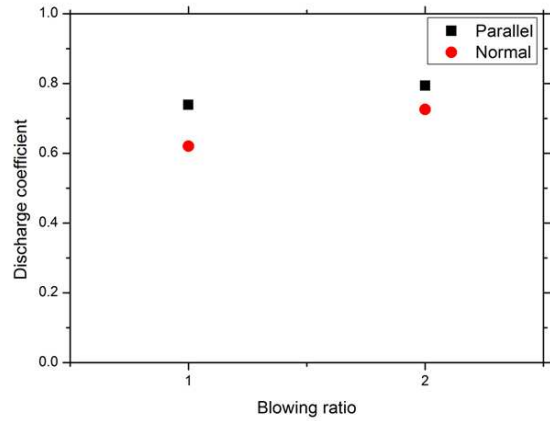


Fig. 6 Discharge coefficient of two geometries at blowing ratios of 1 and 2

원인으로 크게 두 가지를 들 수 있다. 첫 번째 원인은 이차유동과 홀의 방향 차이로 인한 홀 내부 유동의 특성 차이이고, 두 번째 원인은 안티키드니 와류 형성의 차이이다.

3.2.1 홀 내부 제트의 유동 특성 차이

Figure 7는 분사율이 1일 때 각 홀에서의 유선과 홀 단면의 속도 분포이다. 평행 형상에서는 이차유동과 홀의 방향 변화가 작기 때문에 이차유동이 큰 영향을 받지 않는다. 두 홀 모두 제팅 효과(jetting effect)로 인해 L.E(선단, leading edge)에서 모멘텀이 높은 유동이, T.E(후연, trailing edge)에서는 모멘텀이 낮은 유동이 분사된다(Fig. 6(a)). 이와 달리 수직 형상의 각각의 홀에서는 모멘텀이 높은 유동이 1, 2에서, 모멘텀이 낮은 유동이 1', 2'에서 분사된다(Fig. 6(a)). 홀2의 모멘텀이 낮은 유동은 영역2, 3에 걸쳐 횡방향으로 넓게 분사되는데, 홀1에서는 모멘텀이 높은 유동이 영역1로 분사되면서 두 유동이 맞닿지 못한다. 이는 수직 형상의 이차유동과 홀의 방향이 수직하여 유동의 방향이 급격히 변하기 때문에 일어나는 현상이다. 평행 형상에서는 이차유동이 홀로 유입될 때 횡방향으로 22.5°의 방향 변화가 있지만, 수직 형상에서는 횡방향으로 홀1에서 67.5°, 홀2에서는 112.5°의 상대적으로 큰 방향 변화를 갖는다. 이로 인해 수직 형상에서 안티키드니 와류가 평행 형상에서 보다 상대적으로 후류에서 형성된다. 이와 같은 제트 분사의 양상과 안티키드니 와류의 늦은 발달이 수직 형상의 막냉각 효율을 평행 형상의 효율보다 더 낮게 만든

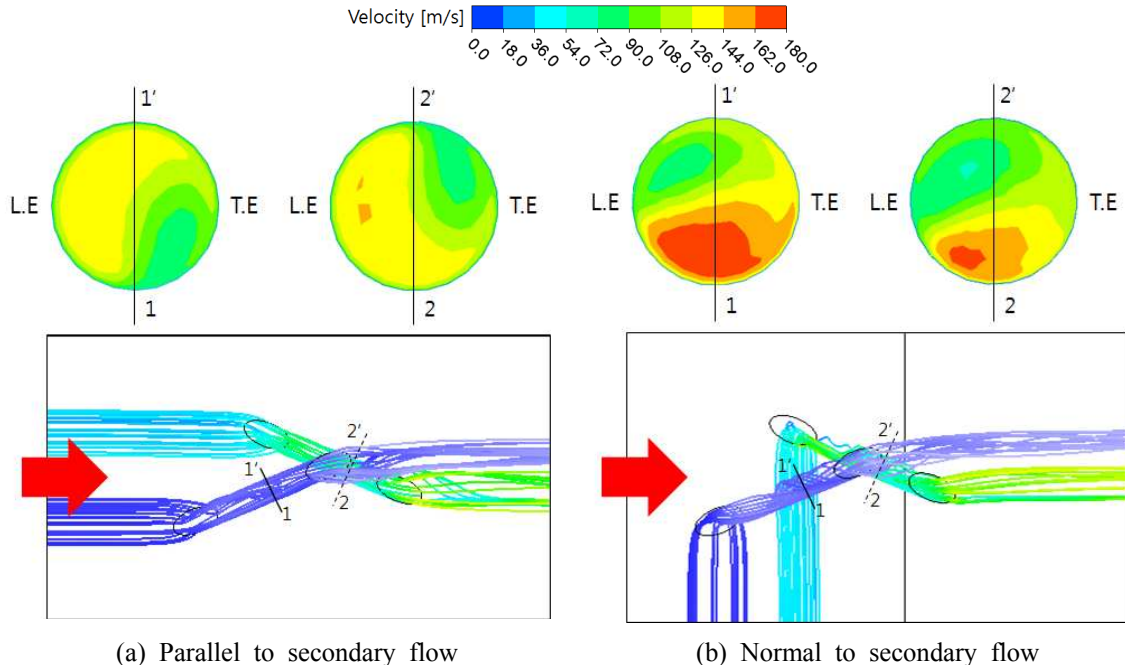


Fig. 7 Streamlines passing through each holes and velocity contour on cross-section of each holes (M = 1)

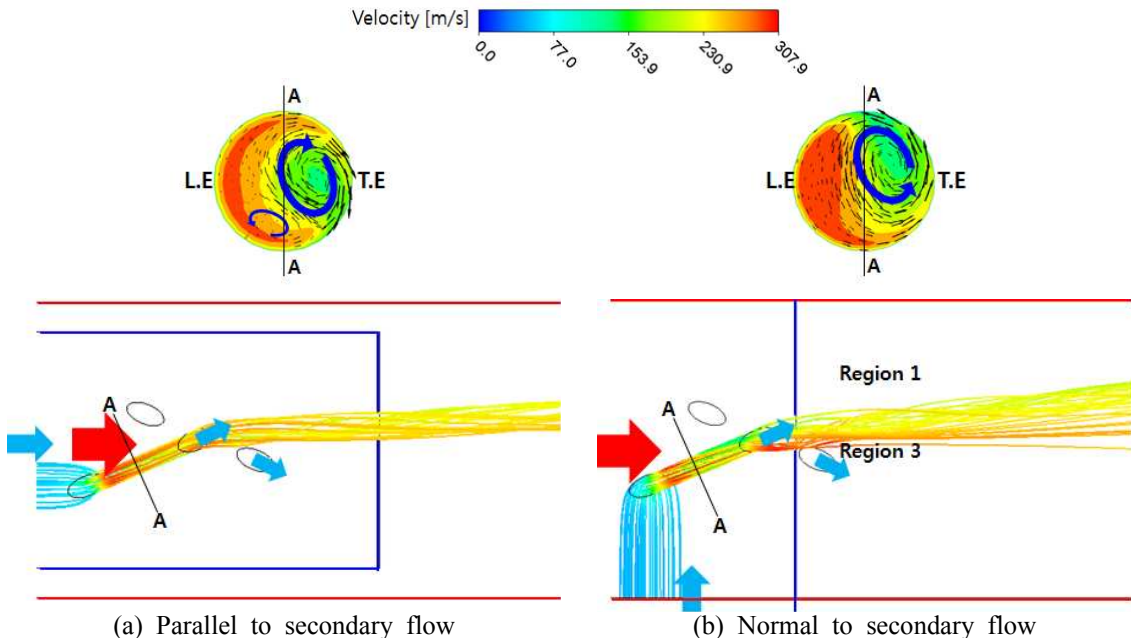


Fig. 8 Comparison of streamlines and velocity contour of hole1 (M = 2)

것이다.

분사율이 2인 경우, 수직 형상의 영역1의 막냉각 효율은 평행 형상의 막냉각 효율보다 높다. Fig. 8은 그 이유를 설명하기 위한 홀1 제트의 유선과 홀1 단면의 속도 분포이다. 분사율 1에서와

마찬가지로, 평행 형상에서는 홀의 선단에서 모멘텀이 높은 유동이, 후연에서는 모멘텀이 낮은 유동이 분사된다(Fig. 8(a)). 반면에 수직 형상에서는 이차유로와 홀의 방향 차이로 인해 모멘텀이 높은 유동이 영역3으로, 낮은 유동이 영역1로 분

사된다. 이처럼 수직 형상의 홀1의 제트는 평행 형상의 제트보다 횡방향으로 더 넓게 분사되기 때문에 수직 형상의 영역1의 막냉각 효율은 평행 형상의 것보다 더 높다.

Table 1은 이중분사를 구성하는 두 홀의 분사율을 비교한 표이다. 평행 형상에서는 홀2의 분사율이 홀1의 분사율보다 높고, 그와 반대로 수직 형상에서는 홀1의 분사율이 홀2보다 더 높다. 평행 형상에서는 차단효과(blockage effect)에 의해 홀2의 분사율이 더 높다.⁽³⁾ 하지만 수직 형상에서는 앞에서 언급한 이차유동과 홀의 방향 차이로 인해 유동의 유입이 상대적으로 더 어려운 홀2의 분사율이 홀1의 분사율보다 더 낮다.

3.2.2 안티키드니 와류 형성의 차이

Figure 9은 분사율이 1일 때 $x/d = 1.5, 5, 12.5$

Table 1 Comparison of each hole's blowing ratios(M) of 1 and 2

| Hole | Parallel | | Normal | |
|---------------|----------|------|--------|------|
| | 1 | 2 | 1 | 2 |
| M (average 1) | 0.98 | 1.01 | 1.08 | 0.91 |
| M (average 2) | 1.99 | 2.00 | 2.04 | 1.95 |

에서의 온도 분포도와 유동 벡터이다. 평행 형상은 홀2에서 제트가 분사된 직후 안티키드니 와류가 형성되어 홀1 제트의 리프트 오프 현상을 막기 때문에 높은 막냉각 효율을 갖는다. 하지만 수직 형상에서는 홀1 제트의 더 강한 와류로 인해 두 제트 사이로 유입된 주유동이 홀1 제트를 표면에서 떨어지게 한다. 이는 홀2의 제트가 분사한 직후인 $x/d = 5$ 의 온도 분포 및 벡터를 통해 확인할 수 있다. 이러한 주유동의 유입으로 인해 수직 형상이 평행 형상보다 더 낮은 막냉각 효율을 갖는다. 하지만 약 $7d$ 에서 안티키드니 와류가 형성되고 비대칭적으로 분사된 제트가 횡방향으로 넓게 퍼지면서 횡방향 평균 막냉각 효율이 일정하게 유지된다(Fig. 5(b)).

Figure 10은 분사율이 2일 때의 $x/d = 1.5, 5, 12.5$ 에서의 온도 분포도와 유동 벡터이다. 평행 형상에서는 $x/d = 5$ 에서 두 제트 모두 안티키드니 와류로 인해 표면에 재부착한다. 하지만 수직 형상에서는 두 제트가 비대칭적으로 분사되기 때문에 두 제트는 서로 다른 단면 모양과 와류 강도를 갖는다. 홀1의 제트는 Fig. 8(b)와 같이 횡방향으로 넓게 분사되면서 표면에 부착하지만 홀2의 제트는 리프트 오프 된다.

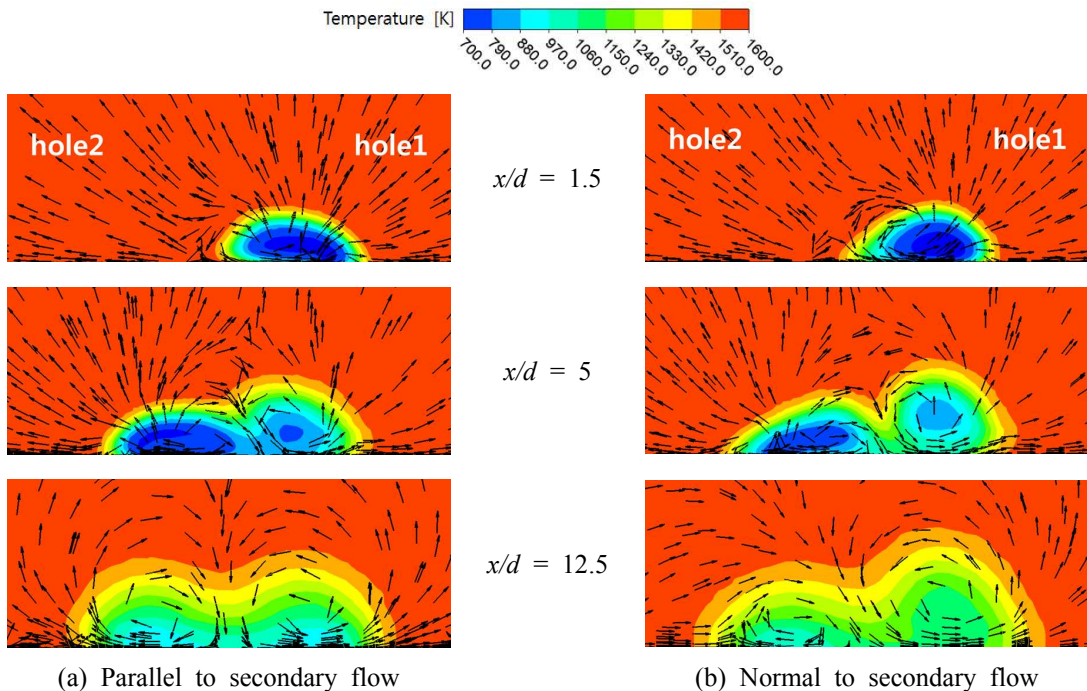


Fig. 9 Temperature contours and flow vector on constant x plane (M = 1)

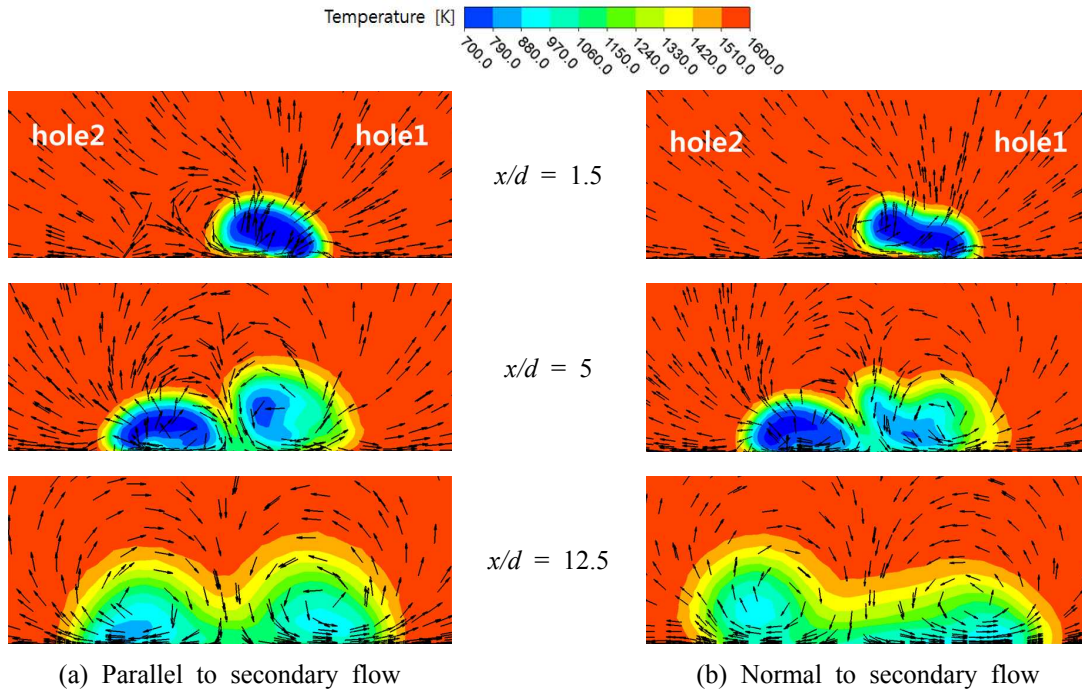


Fig. 10 Temperature contours and flow vector on constant x plane (M = 2)

4. 결 론

본 연구에서는 이차유동의 방향이 막냉각 효율에 미치는 영향을 알아보기로 수치해석을 수행하였다. 이를 위해 이차유로가 주유동과 서로 평행한 형상과 수직인 형상에서의 막냉각 효율을 비교하였다. 분사율이 1인 경우, 평행 형상에서는 두 제트의 분사 직후 안티키드니 와류가 형성된다. 하지만 수직 형상에서는 이차유로와 홀의 방향 차이로 인해 평행 형상보다 후류에서 안티키드니 와류가 형성된다. 분사율 1일 때의 막냉각 효율은 전반적으로 평행 형상이 수직 형상보다 더 높지만, 분사율이 2일 때는 수직 형상이 평행 형상보다 더 높은 막냉각 효율을 갖는다. 이와 같이 이중분사 막냉각의 경우 이차유동의 방향에 따라 서로 다른 양상과 결과가 나타나므로, 이차유동의 방향이 막냉각 효율에 영향을 미친다는 점을 고려하여 연구를 수행해야 할 것이다.

후 기

본 연구는 전력기반조성사업센터 주관 전력산업기술개발 사업(2011T100200223)의 지원에 의한 결과이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Walters, D. K. and Lylek, J. H., 2000, "A Detailed Analysis of Film-Cooling Physics: Part I-Streamwise Injection with Cylindrical Holes," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 122, No. 1, pp. 102~112.
- (2) Rhee, D. H., Kim, B. K. and Cho, H. H., 1998, "Characteristics of Heat/Mass Transfer and Film Cooling Effectiveness Around a Single Film Cooling Hole with Compound Injection Angles," *Trans. Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 22, No. 10, pp. 1433~1444.
- (3) Lylek, J. H. and Zerkle, R. D., 1994, "Discrete-Jet Film Cooling: A Comparison of Computational Results with Experiments," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 116, No. 3, pp. 358~368.
- (4) Dittmar, J., Schulz, A. and Wittig, S., 2003, "Assessment of Various Film-Cooling Configurations Including Shaped and Compound Angle Holes Based on Large-Scale Experiments," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 125, No. 1, pp. 57~64.
- (5) Cho, H. H., Rhee, D. H. and Kim, B. G., 2001, "Enhancement of Film Cooling Performance

- Using a Shaped Film Cooling Hole with Compound Angle Injection," *JSME International Journal, Series. B*, Vol. 44, No. 10, pp. 99~110.
- (6) Kusterer, K., Elyas, A., Bohn, D., Sugimoto, T. and Tanaka, R., 2008, "Double-Jet Film-Cooling for Highly Efficient Film-Cooling with Low Blowing Ratios," *Proceedings of ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air*, Berlin, Germany.
- (7) Han, C., Ren, J. and Jiang, H., 2012, "Multi-Parameter Influence on Combined-Hole Film Cooling System," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 4232~4240.
- (8) Ahn, J., Jung, I. S., and Lee, J. S., 2003, "Film Cooling from Two Rows of Holes with Opposite Orientation Angles: Injectant Behavior and Adiabatic Film Cooling Effectiveness," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 24, No. 1, pp. 91~99.
- (9) Oguntade, H. I., Andrews, G. E., Burns, A., Ingham, D., and Pourkashanian, M., 2010, "CFD Predictions of Single Row Film Cooling with Inclined Holes: Influence of Hole Outlet Geometry," *Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air*, Glasgow, UK.
- (10) Gritsch, M., Schulz, A. and Wittig, S., 1998, "Discharge Coefficient Measurements of Film-Cooling Holes with Expanded Exits," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 120, No. 3, pp. 557~563.