

## 막냉각 홀의 측면 방향 분사각, 확장각 및 주기가 막냉각 효율에 미치는 영향

김선민\* · 이기돈\* · 김광용\*†

\* 인하대학교 기계공학부

### Effects of Compound Angle, Diffuser Angle, and Hole Pitch on Film-cooling Effectiveness

Sun-min Kim\*, Ki-Don Lee\* and Kwang-Yong Kim\*†

\* Dept. of Mechanical Engineering, Inha Univ.

(Received April 11, 2011 ; Revised July 13, 2011 ; Accepted July 13, 2011)

**Key Words** : Film-cooling(막냉각), Film-cooling Effectiveness(막냉각 효율), Compound Angle(측면 방향 분사각), Numerical Analysis(수치해석)

**초록**: 본 연구에서는 가스터빈 블레이드의 냉각을 위해 사용되는 막냉각 홀을 대상으로 다양한 형상변수들이 막냉각 효율에 미치는 영향을 평가하기 위한 수치적 연구를 수행하였다. 삼차원 압축성 Reynolds-averaged Navier-Stokes 해석을 수행하였으며, 난류모델로는 shear stress transport 모델이 사용되었다. 해석을 통해 홀의 형상, 측면 방향 분사각, 홀의 주기 및 분사율이 막냉각 효율에 미치는 영향이 평가되었다. 해석결과, 원통형 홀의 경우 측면 방향 분사각이 존재할 때 월등히 향상된 막냉각 효율을 보여주었으며, 환형상 홀의 경우 측면 방향 분사각이 20~30°일 때 가장 높은 막냉각 효율을 보여주었다. 또한 홀의 주기의 변화에 따른 성능평가 결과 높은 분사율일 때가 낮은 분사율의 경우보다 홀의 주기에 의존하는 경향을 보였다.

**Abstract**: A numerical study is carried out to analyze the steady three-dimensional turbulent flow through cylindrical and fan-shaped holes and the film cooling of these holes at low and high blowing ratios. Compressible Reynolds-averaged Navier-Stokes equations and the energy equation are solved using a finite-volume-based solver, and a shear-stress transport model is used as the turbulence closure. The effects of the compound angle, pitch to diameter ratio, and lateral expansion angle of the hole on the film-cooling effectiveness are evaluated by the film-cooling effectiveness. It is observed that the compound angle of the hole enhances the film performance for the cylindrical hole, and a small hole pitch induces interactions between the coolants from the adjacent holes, thus reducing the film-cooling performance.

- 기호설명 -

- d : 막냉각 홀 지름
- M : 분사율(=  $\rho_j v_j / \rho_m v_m$ )
- p : 홀과 홀 사이의 거리
- v : 속도
- $\beta$  : 측면 방향 확장각
- $\gamma$  : 측면 방향 분사각

하첨자

- j : 냉각제 유동

- l : 측면 방향 평균
- m : 주 유동
- s : 면적 평균

### 1. 서론

높은 효율 및 성능, 낮은 연료 소모를 위해서 터빈의 온도는 1500°C 이상의 높은 온도에서 작동 되도록 설계되고 있으며 터빈 입구에서의 온도는 해마다 꾸준히 증가되어 설계되고 있는 추세이다. 그러므로 고온의 가스에 노출되어 열적, 기계적 부하가 걸리는 요소 또한 증가하게 되며 이는 효율적인 냉각 방법을 필요로 하게 된다. 따라서 효율적인 냉각을 위해 많은 기술들이 개발되고 있

† Corresponding Author, [kykim@inha.ac.kr](mailto:kykim@inha.ac.kr)  
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

는 추세이다. 그 중 막냉각(film-cooling)은 터빈 블레이드의 온도를 낮추기 위해 가장 많이 사용되는 주된 기술들 중 하나이다. 막냉각은 뜨거운 가스에 노출된 블레이드 표면에 냉각유체를 분사하여 표면에 낮은 온도의 막을 형성시켜 표면을 보호하는 방법이다. 이러한 막냉각의 높은 중요성으로 인해 막냉각 홀에 대한 많은 연구들이 지난 10-15년간 진행되어 왔다.

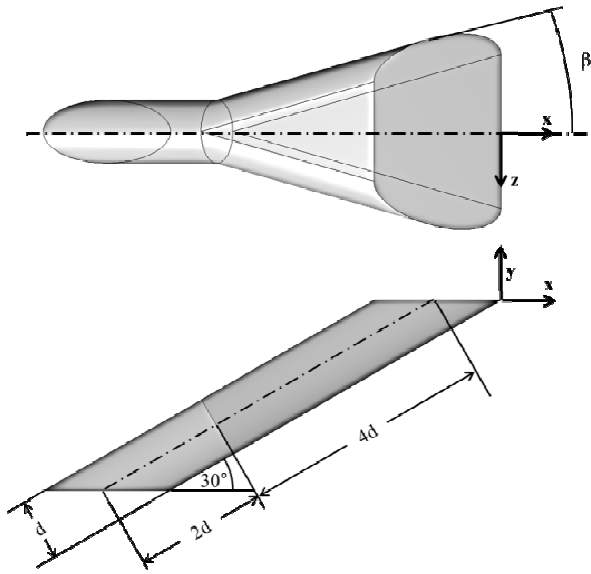
막냉각의 성능을 평가하기 위해 많은 연구자들이 사용하고 있는 막냉각 효율(film-cooling effect-iveness)은 분사율(blowing ratio), 밀도비, 주 유동의 난류강도, 그리고 홀의 분사각(inclination angle), 측면 방향 확장각(diffuser angle), 지름 등과 같은 형상 변수들에 의해 영향을 받는다. 출구 부분을 확장한 팬(fan)형상의 막냉각 홀은 원통형 막냉각 홀과 비교해 향상된 냉각성능을 보인다고 알려져 있다. 더불어 막냉각 홀을 측면 방향으로 분사각(compound angle,  $\gamma$ : Fig. 1 참조)을 두어 막냉각 효율을 향상시키는 방법에 대한 연구도 수행되었다. Jubra 과 Malteh<sup>(4)</sup>은 막냉각 홀을 두 개의 열로 배치하여 각각의 열에 대해 측면 방향 분사각을 두거나 두지 않고 열 내에서 막냉각 홀을 일렬로 배치하거나 엇갈리게 배치하여 측면 방향 분사각( $\gamma$ )의 존재 유무와 막냉각 홀의 배치가 막냉각 효율에 미치는 영향을 평가하였다. 이 연구에서는 고온의 가스와 먼저 접하는 열은 측면 방향 분사각을 두지 않고 나중에 접하게 되는 두 번째 열은 각을 두었을 때 상당한 막냉각 효율의 향상이 있었다고 보고하였다.

Saumweber 와 Schulz<sup>(2)</sup>는 쉘형상의 홀에 대하여 측면 방향 확장각, 분사각, 원통형 부분의 길이 등에 따라 유량계수, 측면 방향 평균 막냉각 효율, 열전달 계수(heat transfer coefficient)에 어떠한 영향을 미치는지를 평가하였다. Yuen 등<sup>(3)</sup>은 분사각이 30, 60, 90°인 원통형 막냉각 홀, 분사각을 30°로 고정하고 측면 방향 분사각이 30, 60°인 원통형 막냉각 홀, 그리고 쉘형상 홀에 대해 배열을 다르게 주었을 때 나타나는 막냉각 효율의 변화 등에 대해 평가하였다. Brauckmann 과 Wolfersdorf<sup>(4)</sup>는 측면 방향 분사각이 0, 30, 45°인 쉘형상 홀에 대해 분사율이 0.5, 1, 1.5, 2 일 때의 막냉각 효율과 열전달계수에 대해 평가하였으며, 측면 방향 분사각이 측면 방향 평균 막냉각 효율에는 작은 영향만을 주었으나 막냉각 표면에서의 열전달은 증가되었다고 보고하였다. Nasir 등<sup>(5)</sup>는 측면 방향 분사각이 0, 60°인 원통형 막냉각 홀에 대해 분사율을 0.5, 1.0, 1.5 로 변화시키며 연구를 수행하였으며, 측면 방향 분사각이 막냉각 효율에 중요

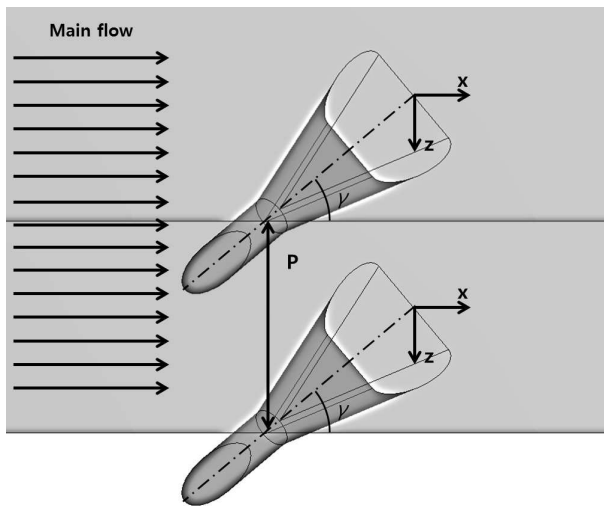
한 변화를 주며 열전달계수를 높인다고 평가하였다. Lee 등<sup>(6)</sup>은 측면 방향 분사각이 0, 30, 60°인 길이 방향으로 확장하는 각(forward angle)을 가진 쉘형상 홀에 대해 분사율을 0.5, 1.0, 2.0 으로 변화시키며 연구를 수행하였으며, 낮은 분사율에서 쉘형상의 홀은 원통형 막냉각홀에 비해 막냉각 효율에 있어서 괄목할 만한 향상을 보이지 않았으나, 높은 분사율에서는 55% 정도의 막냉각 효율 향상이 있었다고 보고하였다.

Cho 와 Rhee<sup>(7)</sup>은 원통형 막냉각 홀과 아래 길이 방향으로 확장하는 쉘형상 홀, 아래 길이 방향으로 확장하는 만큼 위 길이 방향으로 확장하는 쉘형상(conical hole) 홀에 대해 측면 방향 분사각을 0, 45, 90°로 변화시키며 냉각 성능을 평가하였으며, 냉각제의 균일한 분사로 인해 아래 길이 방향으로 확장하는 만큼 위 길이 방향으로 확장하는 쉘형상 홀이 가장 높은 냉각성능을 보였다고 보고하였다. Lee 와 Jung<sup>(8)</sup>은 측면 방향 분사각( $\gamma$ )이 0, 30, 60, 90°인 다섯 개의 원통형 막냉각 홀에 대해 분사율이 0.5, 1.0, 2.0 으로 변화할 때 0, 36 Hz 의 파동을 주어 연구를 하였으며, 측면 방향 분사각( $\gamma$ )에 관계 없이 파동이 존재할 때 막냉각 효율은 감소하였으나 감소하는 정도는 측면 방향 분사각( $\gamma$ )에 영향을 받았다고 보고하였다. Lee 와 Kim<sup>(9)</sup>은 원통형 막냉각 홀을 대상으로 다양한 대리모형을 이용한 수치최적설계를 수행하여 대리모형의 신뢰성을 평가하였다. 또한, Lee 와 Kim<sup>(10)</sup>은 쉘형상 홀의 분사각, 측면 방향 확장각 그리고 홀의 길이와 홀의 지름의 비를 설계변수로 하여 래디얼베이스 신경 회로망(radial basis neural network) 기법을 통한 수치 최적설계를 수행하여, 홀의 분사각, 홀의 측면 방향 확장각( $\beta$ : Fig. 1 참조), 홀 길이에 대한 지름의 비가 각각 42.38°, 19.55°, 7.45 일 때에 최적의 막냉각 효율을 보인다고 보고하였다.

Jia 등<sup>(11)</sup>은 측면 방향 분사각( $\gamma$ )이 0, 45, 90°인 5 개의 원통형 막냉각 홀에 대해 횡측 트렌치(transverse trench)를 넣거나 넣지 않고 분사율을 0.5, 1.0, 1.5 로 바꾸었을 때 막냉각 효율에 미치는 영향에 대해 평가하였고, 트렌치가 존재하는 경우에 분사율은 막냉각 효율에 큰 영향을 주지 않았으며, 트렌치가 있는 측면 방향 분사각( $\gamma$ )이 45°인 홀이 가장 높은 성능을 보였다고 보고하였다. Baheri 등<sup>(12)</sup>은 원통형 막냉각 홀과 길이 방향으로 확장 하는 홀에 트렌치와 측면 방향 분사각( $\gamma$ )이 미치는 영향에 대해 연구하였으며, 트렌치가 있는 길이 방향 확장 홀이 높은 막냉각 효율을 보였고,



(a)



(b)

Fig. 1 Film-cooling hole geometry

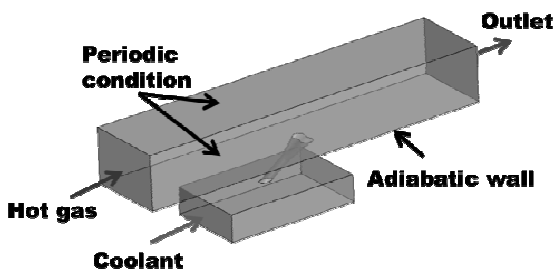


Fig. 2 Computational domain

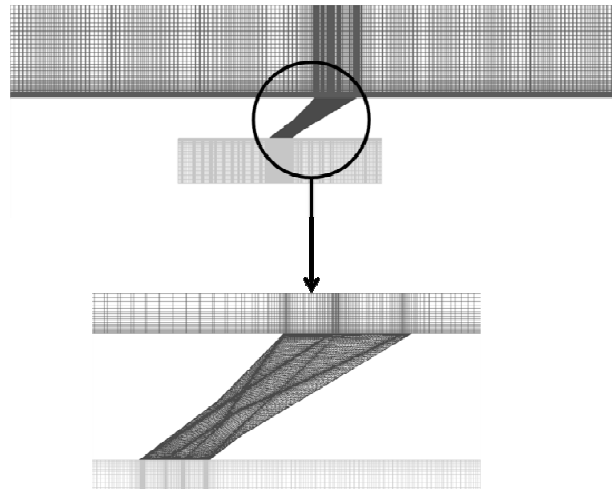
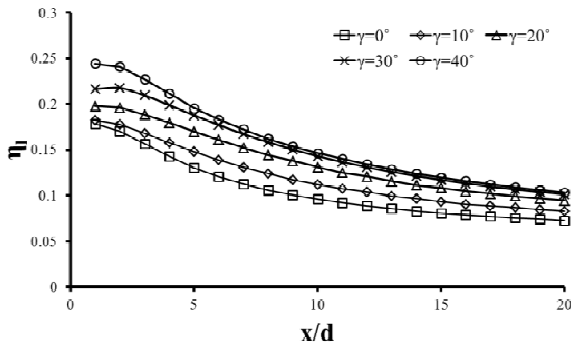


Fig. 3 An example of computational grids

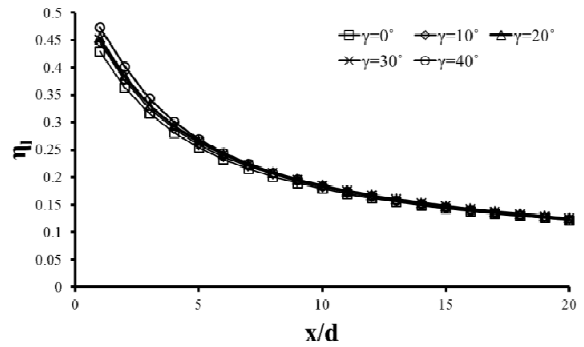
측면 방향 분사각( $\gamma$ )이 있는 트렌치가 있는 길이 방향 확장 홀이 가장 높은 막냉각 효율을 보였다고 보고하였다.

Ekkad 등<sup>(13)</sup>는 측면 방향 분사각( $\gamma$ )이 0, 45, 90°인 원통형 막냉각 홀에 공기와 이산화탄소를 냉각재로 하여, 분사율 0.5, 1.0, 2.0에 대한 막냉각 효율을 평가하였고, 측면 방향 분사각( $\gamma$ )이 존재할 때 존재하지 않을 때 보다 더 높은 막냉각 효율을 보여주었고, 대부분의 경우 높은 분사율은 더 높은 막냉각 효율을 보여주었으나, 측면 방향 분사각( $\gamma$ )이 90°인 경우는 낮은 분사율이 더 높은 막냉각 효율을 보여주었다고 보고하였다. Gritch 등<sup>(14)</sup>은 디퓨저 형상의 막냉각 홀(laidback fan-shaped hole)을 대상으로 홀의 길이, 주기( $p/d$ ), 측면 방향 확장각( $\beta$ ) 및 홀의 입구와 출구의 면적비 등이 막냉각 효율에 끼치는 영향을 평가하였다.

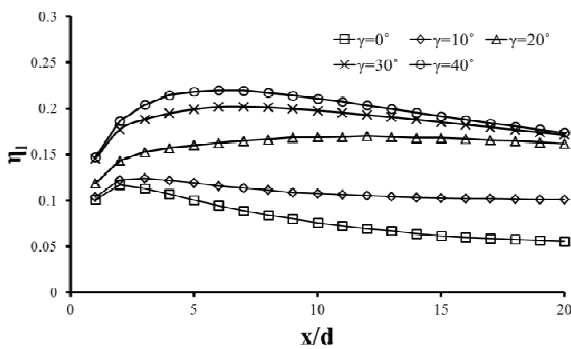
이상과 같이 막냉각 효율에 영향을 끼치는 여러 변수들의 특성에 대한 연구는 다양하게 수행되어 왔지만, 대부분의 연구들은 고정된 측면 방향 확장각내에서 홀의 측면 방향 분사각을 변화한 연구였으며, 아직까지 막냉각 홀의 측면 방향 분사각( $\gamma$ )과 측면 방향 확장각( $\beta$ )이 분사율의 변화에 따라 어떻게 막냉각 효율에 영향을 끼치는가에 대한 연구는 이루어지지 못하였고, 홀의 주기( $p/d$ )까지 함께 고려한 분사율 변화에 따른 막냉각 효율의 변화에 관한 연구는 전무한 실정이다. 그러므로, 본 연구에서는 막냉각 홀의 측면 방향 분사각과 홀의 주기변화에 따른 유동 특성분석 및 막냉각 성능을 삼차원 열유동해석을 통해 평가하였다.



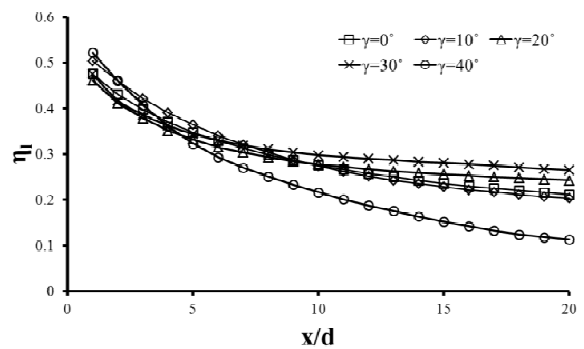
(a) M = 0.5



(a) M = 0.5



(b) M = 1.0



(b) M = 2.0

Fig. 4 Laterally averaged film-cooling effectiveness at  $\beta = 0^\circ$

Fig. 5 Laterally averaged film-cooling effectiveness at  $\beta = 15^\circ$

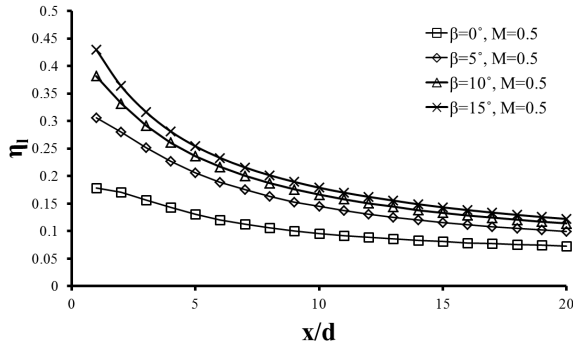
## 2. 수치해석방법

본 연구에서는 Fig. 1 에 나타난 형상에 대해 삼차원 유동 및 열전달의 해석을 위해 정상상태 압축성 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방정식을 이용하여 해석을 수행하였으며, 비정렬 격자계를 사용하는 상용 전산유체역학 코드인 ANSYS CFX 11.0<sup>(15)</sup>를 사용하였다. 이 코드는 지배 방정식을 이산화하기 위해 유한체적법을 사용하여 압축성 RANS 방정식을 수치적으로 계산한다. 난류 모델로는 SST 모델<sup>(16,17)</sup>을 사용하였다. SST 모델은  $k-\epsilon$  모델과  $k-\omega$  모델의 장점만을 취한 모델이다. 벽 근처에서는  $k-\omega$  모델이 사용되고, 그 이외의 영역에서는  $k-\epsilon$  모델이 사용된다. 따라서 SST 모델은 역 압력구배로 인한 유동박리의 예측이 상당히 효과적이고, 난류열전달 해석에도 그 정확성이 뛰어나다고 Bardina 등<sup>(18)</sup>에 의해 보고되었다.

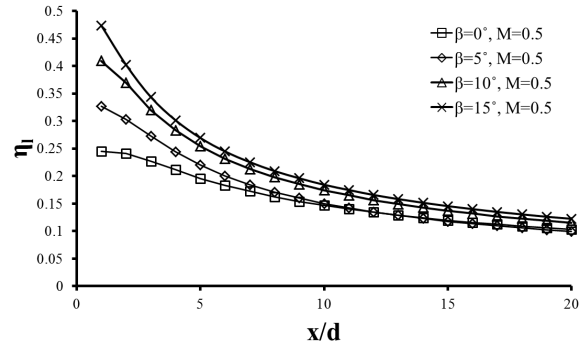
계산영역과 경계조건을 Fig. 2 에 나타내었다. 계산영역은 냉각유체 공급유로, 고온가스가 흐르는 주유로 그리고 막냉각 홀로 구성하였다. 작동유체로는 이상기체(air)가 사용되었으며, 냉각유체 공급

유로의 입구에는 온도 290K, 난류강도 5%의 균일 유속 조건을 부여하였으며, 유량은 분사유에 따라 다르게 설정하였다. 홀과 홀 사이의 상호작용을 고려하기 위하여 주유로의 측면에는 주기조건을 사용하였다. 고온가스가 흐르는 주유로의 입구에는 온도 540K, 난류강도 3.6%, 139m/s 의 속도조건을 주었다. 출구에는 1 atm 의 정압조건을 부여하였으며, 그외 모든 벽면에는 단열조건과 점착 조건을 부여하였다.

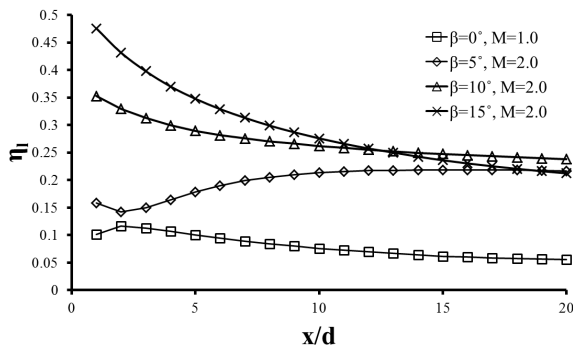
실제 상황에서는 주유동의 감속 또는 가속이 발생하며, 터빈 블레이드의 내부유로 내에서 발생하는 이차유동의 영향이 막냉각 성능에 영향을 미칠 수 있다. 그러나, 본 연구에서는 홀 형상의 변화에 따른 막냉각 효율의 특성을 평가하는 것이 주목적이므로, 이러한 영향들은 고려하지 않고 해석을 수행하였다. ANSYS ICEM CFD-11.0 을 사용하여 만들어진 육면체로 구성된 격자계를 Fig. 3 에 나타냈다. 벽 근처에서의 해석의 정확성을 향상시키기 위해서 벽 근처에서는 조밀하게 격자계를 구성하였으며 벽에서의 첫 번째 격자점은 모든 벽을 평균하여  $y^+ \leq 2$  가 되도록 하여 저레이놀즈 수 SST 모델이 사용되었다. 홀 내부에서는 복잡한 유동



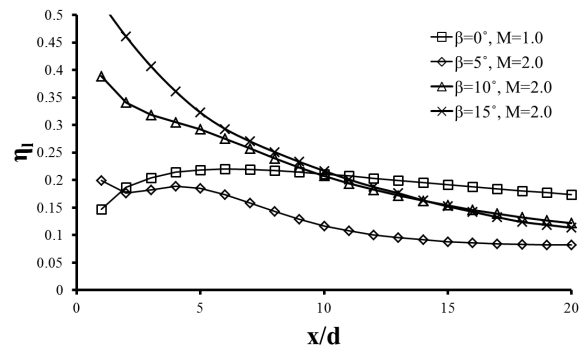
(a) Low blowing ratio



(a) Low blowing ratio



(b) High blowing ratio



(b) High blowing ratio

**Fig. 6** Laterally averaged film-cooling effectiveness at  $\gamma = 0^\circ$

현상이 발생하므로 격자크기를 작게 제한하여 좀 더 정확한 해석을 수행할 수 있게 하였고, O형 격자를 사용하여 격자의 질을 높였다. 또한, 주유로의 아래 부분은 뜨거운 유체와 냉각재가 함께 만나 복잡한 유동을 만들게 되므로 정확한 해석을 위해 격자의 크기를 제한하여 격자를 조밀하게 주고 위로 갈수록 균일한 비를 가지고 증가하게 하였다.

해석의 수렴 판단 여부를 결정하기 위하여, 수렴 조건으로 모든 유동 변수들의 상대 잉여값 (residual value)을  $1.0E-5$  보다 작게 설정하였다. 계산은 Intel Core i7 CPU K 875 @2.93 GHz PC에서 수행되었으며 평균적인 계산시간은 형상에 따라 조금씩 차이를 보였으나 보통 20~25 시간이 소요되었다.

### 3. 결과 및 검토

수치해석의 경제성을 위한 격자의존성 테스트 및 수치해의 신뢰성 검증을 위한 실험치와의 비교는 본 연구와 동일한 격자와 수치해석기법을 사용한 이전 연구들<sup>(9,10)</sup>을 통해 이미 수행된 바 있다.

**Fig. 7** Laterally averaged film-cooling effectiveness at  $\gamma = 40^\circ$

분사각  $30^\circ$ 인 원통형 및 확장각을 가지는 췌형상 막냉각 홀( $\beta=14^\circ, \gamma=0^\circ$ )에 대한 수치해석결과는 실험치와 좋은 일치성을 보여주었다.<sup>(9,10)</sup>

본 연구에서는 유동방향으로  $30^\circ$  기울어진 막냉각 홀을 대상으로 측면 방향 분사각( $\gamma, 0\sim40^\circ$ ), 측면 방향 확장각( $\beta, 0\sim15^\circ$ ) 그리고 홀의 주기( $p/d, 4\sim8$ )의 변화에 따른 유동특성과 막냉각 효율을 평가하였다.

막냉각의 성능을 평가하게 위해 많은 연구자들이 사용하고 있는 막냉각 효율은 다음과 같이 정의된다

$$\eta = (T_{hot} - T_{adiabatic\ wall}) / (T_{hot} - T_{coolant}) \quad (1)$$

여기서  $T_{adiabatic\ wall}$ 는 단열벽면온도를 의미하며,  $T_{hot}$ 와  $T_{coolant}$ 는 각각 주유동과 냉각유체의 분사온도를 나타낸다. 이러한 막냉각 효율은 분사율에 따라 유동특성과 함께 크게 차이를 보인다. 따라서 낮은 분사율과 높은 분사율에서의 영향평가를 위해, 원통형 홀( $\beta=0^\circ$ )의 경우 0.5와 1.0, 췌형상 홀의 경우 0.5와 2.0의 분사율에서 각각 해석을

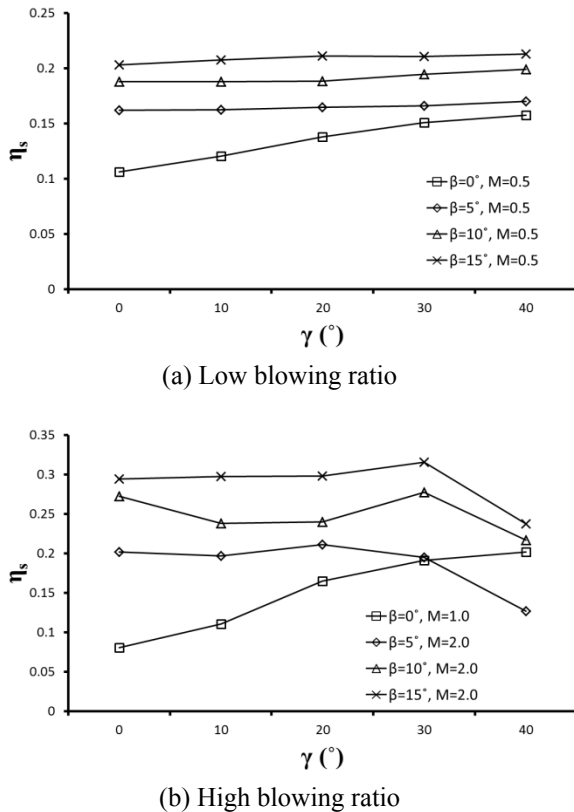


Fig. 8 Spatially averaged film-cooling effectiveness

수행하였다. 또한,  $\beta$  및  $\gamma$ 의 변화에 대한 결과를 보여주는 Fig. 4~11에서는 홀과 홀 사이의 거리( $p$ )가 6d인 경우에 대한 결과들을 제시하고 있다.

Fig. 4는 원통형 막냉각 홀( $\beta=0^\circ$ )의 측면 방향 분사각( $\gamma$ ) 및 분사율( $M$ )의 변화에 따른 측면 방향으로 평균한 막냉각 효율을 나타낸다. 그래프에 나타난 바와 같이, 분사율에 상관없이  $\gamma$ 가 증가함에 따라 막냉각 효율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 분사율에 0.5일 경우 출구 근처에서 높은 효율을 보이다가 홀로부터 멀어질수록 점점 낮은 막냉각 효율을 보이는 것에 반해, 분사율이 1.0일 때는 냉각유체가 강하게 분사됨에 따라 출구 근처에서는 냉각면에서 분리되었다가 주유동에 의해 하류에서 다시 냉각면에 부착되어, 출구 근처에서 하류로 갈수록 막냉각 효율이 높아지다가 다시 낮아지는 경향을 보인다.

Fig. 5는 측면 방향 확장각( $\beta$ )이 15°인 쉘 형상 막냉각 홀의 측면 방향 분사각의 변화에 따른 막냉각 효율( $\eta_s$ )을 나타낸다. 분사율이 0.5일 경우, 측면 방향 분사각에 따라 막냉각 효율이 미세하게 증가하는 경향을 보였으나 원통형 홀( $\beta=0^\circ$ )의 경우(Fig. 4)와는 달리 큰 차이는 발견할 수 없었다.

반면에, 분사율이 높은 경우( $M=2.0$ ), 측면 방향 분사각( $\gamma$ )이 30°까지 증가함에 따라 막냉각 효율은 증가하지만 낮은 분사율의 경우와 마찬가지로 증가하는 정도가 원통형 막냉각 홀에 비하여 작았으며,  $\gamma=40^\circ$ 에서는 오히려 감소하는 경향을 보였다. 전체적으로, 20~30° 정도의 측면 방향 분사각( $\gamma$ )을 가진 막냉각 홀이 가장 높은 효율을 보여주었다.

측면 방향 분사각( $\gamma$ )이 존재할 때와 존재하지 않을 때, 막냉각 홀의 측면 방향 확장각( $\beta$ )의 변화에 따른 측면 방향으로 평균한 막냉각 효율을 Fig. 6과 7에 나타내었다. Fig. 6(a)와 Fig. 7(a)에 나타낸 낮은 분사율의 결과를 보면, 두 경우 모두 측면 방향 확장각( $\beta$ )이 증가함에 따라 측면 방향으로 평균한 막냉각 효율이 증가하는 경향을 보여주었다. 측면 방향 분사각( $\gamma$ )이 있는, 분사율이 높은 경우, 홀 입구 주변에서는 낮은 분사율과 마찬가지로 측면 방향으로 평균한 막냉각 효율이 증가하였지만, 출구에서 떨어진  $x/d > 13$  근처의 영역에서는 측면 방향 확장각( $\beta$ )이 15°일 때 보다 5°, 10°의 효율이 더 높았으며, 이러한 현상은 측면 방향 분사각( $\gamma$ )이 40°인 Fig. 7(b)에서도, 홀의 출구에서 떨어진 정도는 차이가 있지만, 측면 방향으로 많이 확장된 홀 보다 적게 확장된 홀이 더 높은 효율을 보이는 현상이 관찰되었다. 이는 측면 방향 확장각( $\beta$ )과 측면 방향으로 평균한 효율이 비례적으로 증가하지는 않다는 것을 보여준다.

Fig. 8은 측면 방향 확장각( $\beta$ )과 측면 방향 분사각( $\gamma$ )의 변화에 따른 막냉각 면에서 평균한 막냉각 효율 분포를 보여준다. 막냉각 면은 이하 모두 홀 출구로부터  $x$  방향으로 20d, 측면 방향으로 홀 출구를 중심으로 하여 한 피치( $p$ )에 해당하는 면의 막냉각 효율을 평균하였다. Fig. 8(a)에 나타낸 분사율 0.5의 경우, 원통형 홀( $\beta=0^\circ$ )은 측면 방향 분사각이 증가함에 따라 효율이 증가하는 경향을 보였으며 측면 방향 확장각이 존재하는 경우엔  $\gamma$ 가 면적평균한 효율에 큰 영향을 끼치지 못하였다. 반면 (b)의 경우 측면 방향 확장각( $\beta$ ) 0°에서는 측면 방향 분사각( $\gamma$ )에 따라 면적 평균 막냉각 효율이 뚜렷하게 증가하는 경향을 보였으나 다른 측면 방향 확장각( $\beta$ )에서는 일정한 경향을 보이지 않으며 측면 방향 분사각( $\gamma$ ) 40°에서는 오히려 크게 감소하는 경향을 보여주었다. 또한,  $\gamma > 30^\circ$ 에서  $\beta=5^\circ$ 보다  $\beta=0^\circ$ 의 막냉각 효율이 더 증가하였는데, 이는  $\beta=5^\circ$ 의 막냉각 홀에서 두 갈래로 나오는 냉각제가 측면 방향 분사각( $\gamma$ )을 가지고 하

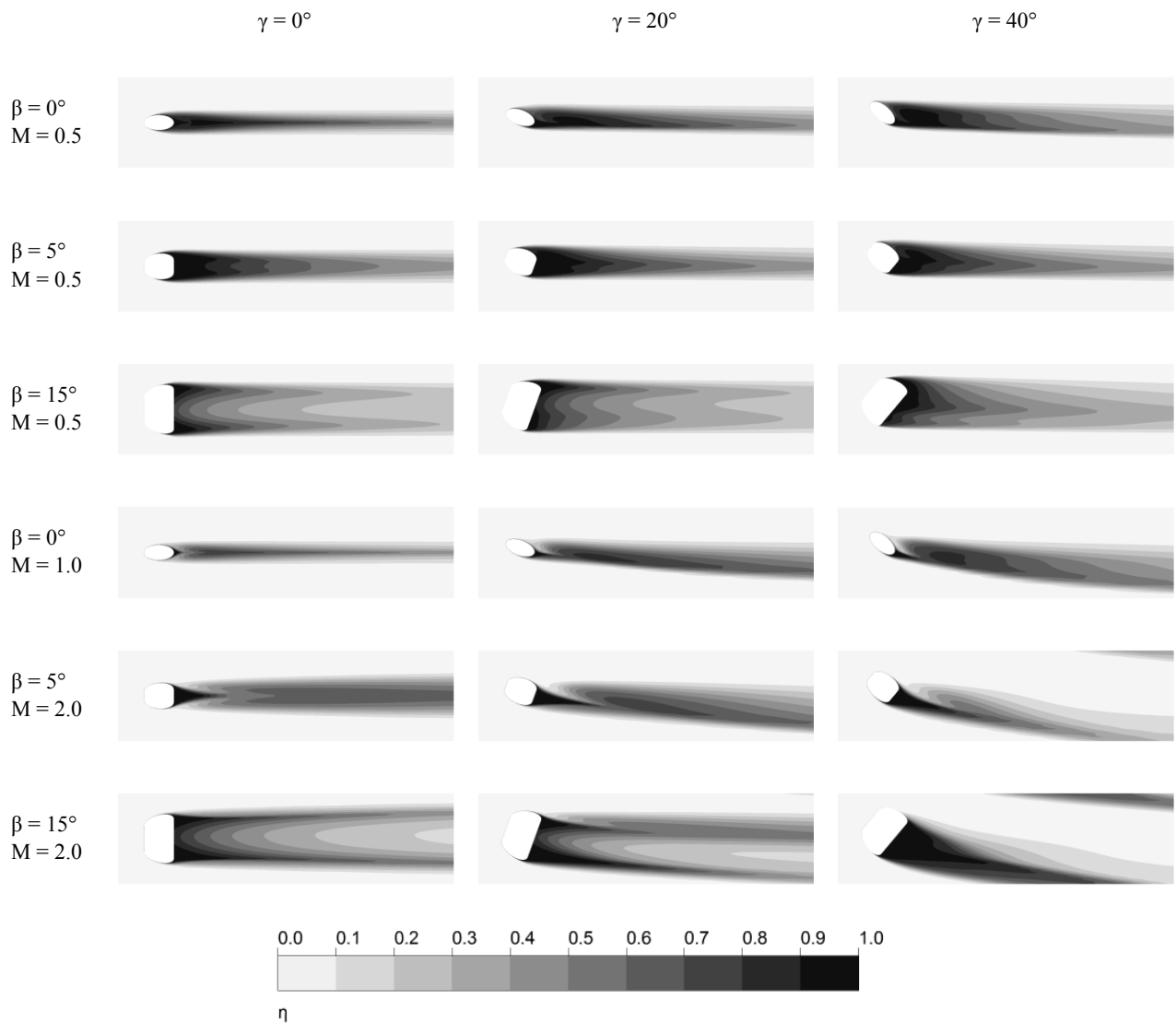


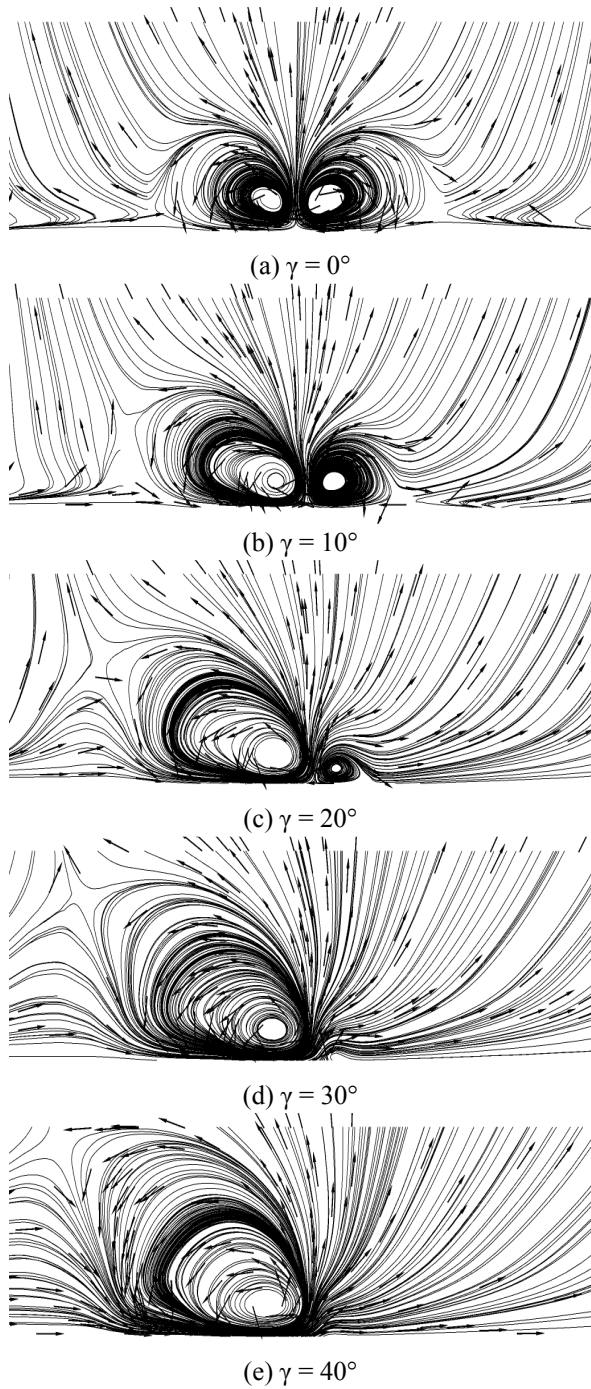
Fig. 9 Film-cooling effectiveness contours with various M,  $\beta$  and  $\gamma$

나로 합쳐지며 상대적으로 작은 영역에 분포하기 때문이다.  $\beta=10^\circ$  이상의 막냉각 홀 또한 냉각제가 두 갈래로 나오다가 측면 방향 분사각( $\gamma$ )이 커짐에 따라 한 갈래로 합쳐지지만 디퓨저의 영향으로 넓은 영역에 퍼져 있고, 주기적으로 위치한 다른 홀에서 나온 냉각제가 대상 냉각 표면에 분포 되기 때문에  $\gamma=30^\circ$ 까지 상대적으로 높은 막냉각 효율을 보여 주었다.

Fig. 9는  $\beta$ ,  $\gamma$  및 M의 변화에 따른 막냉각 면에서의 막냉각 효율 분포를 나타낸다. 원통형 홀의 경우엔  $\gamma$ 가 존재함에 따라 냉각유체가 더 넓은 영역에 분포하여 높은 효율을 보였으며,  $\beta$ 가  $5^\circ$  및  $15^\circ$ 인 경우엔  $\gamma$ 에 따라 막냉각 효율 분포의 차이는 보였으나 효율이나 냉각유체의 분포영역

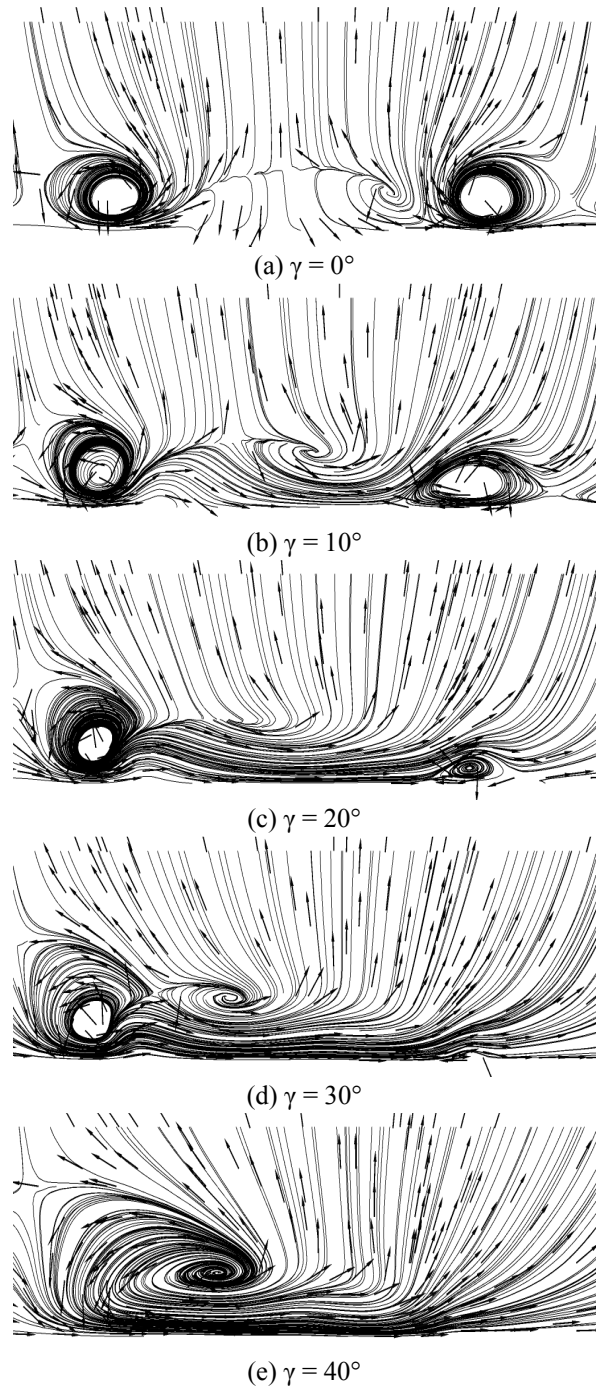
측면에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 전체적으로 모든 홀에서, 분사율이 낮을 경우엔 측면 방향 분사각( $\gamma$ )이 존재할 때에도, 냉각제의 운동량이 주 유동에 비해 낮으므로, 냉각유체가 주 유동과 같은 방향으로 흐르며 분포한다. 반면에, 높은 분사율의 경우, 주 유동에 비해 높은 운동량으로 인해 냉각유체가  $\gamma$ 의 방향에 따라 분포하게 된다. 또한 원통형 홀의 경우  $\gamma$ 가 존재함에 따라 주 유동방향으로 투영된 출구 면적이 커지게 되어 냉각제가 넓게 분포하여 높은 효율을 보이지만,  $\beta$ 가 존재하는 막냉각 홀은 투영된 면적이 크게 달라지지 않아 분포 영역 측면에서 큰 차이를 보이지 않는다.

Fig. 10은 측면 방향 확장각( $\beta$ )이  $0^\circ$ 인 막냉각 홀의 출구에서 x 방향으로 2d 만큼 떨어진 곳에서,



**Fig. 10** Streamlines and velocity vectors on the y-z plane at  $x/d = 2$  ( $\beta = 0^\circ$ )

측면 방향 분사각( $\gamma$ )이 변함에 따라 변하는 유선(streamline)과 속도 벡터를 나타낸다. 냉각유체가 홀을 따라 분사될 때 주 유동을 뚫고 들어가게 되는데, 이때에 냉각제의 분사형태는 좌우가 대칭형인 콩팥 모양의 소용돌이(kidney vortex)를 형성하게 된다. 그림처럼 측면 방향 분사각( $\gamma$ )이 증가함에 따라 좌우 대칭이



**Fig. 11** Streamlines and velocity vectors on the y-z plane at  $x/d = 2$  ( $\beta = 15^\circ$ )

있던 소용돌이 중 분사되는 반대쪽의 소용돌이의 세기가 작아지고 아래쪽으로 치우쳐서 발생하는 것을 볼 수 있으며, 분사되는 쪽의 소용돌이는 영역이 타원형으로 넓게 확장되며 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 측면 방향 분사각( $\gamma$ )이 존재할 때에 원통형 홀의 막냉각 효율을 높이게 되는 원인이 된다.



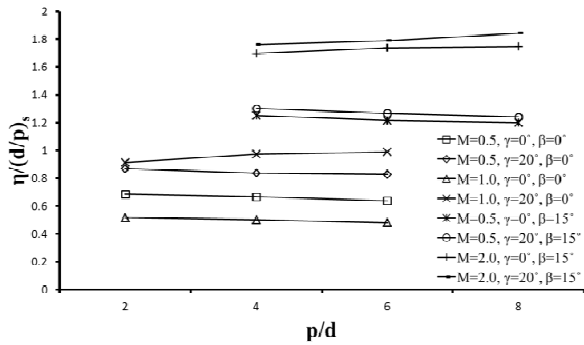
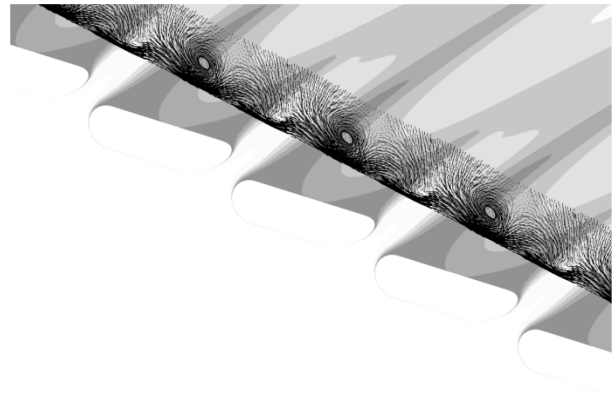


Fig. 12 Spatially averaged  $\eta/(d/p)$  at  $\beta = 15^\circ$



(a) p/d = 4



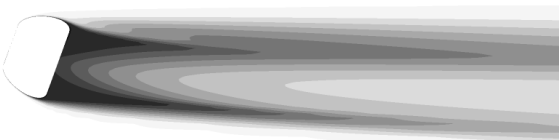
(a) p/d = 2,  $\beta = 0^\circ$ , M = 1.0



(b) p/d = 4,  $\beta = 0^\circ$ , M = 1.0



(c) p/d = 4,  $\beta = 15^\circ$ , M = 2.0



(d) p/d = 8,  $\beta = 15^\circ$ , M = 2.0

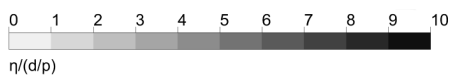
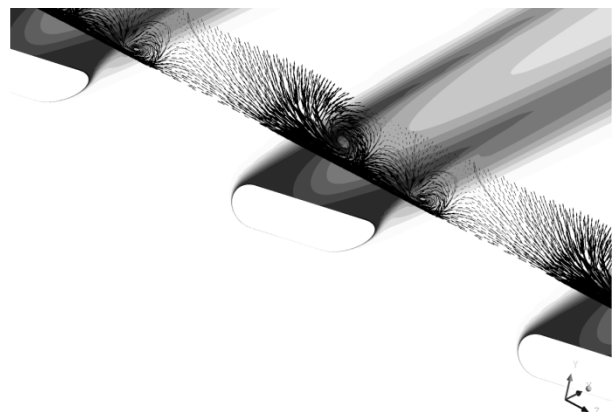


Fig. 13  $\eta/(d/p)$  contours with various M, p/d and  $\beta$  at  $\gamma = 20^\circ$



(b) p/d = 8

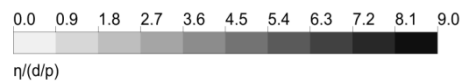


Fig. 14 Streamlines and  $\eta/(d/p)$  at  $\beta = 15^\circ$

Fig. 11 은 측면 방향 확장각( $\beta$ )이  $15^\circ$ 인 막냉각 홀의 출구에서 x 방향으로  $2d$  만큼 떨어진 곳에서, 측면 방향 분사각( $\gamma$ )이 변함에 따라 변하는 유선(streamline)과 속도 벡터를 나타낸다. 측면 방향 확장각( $\beta$ )이 존재하는 막냉각 홀은 원통형 홀에 비해 홀 출구의 면적 증가로 인한 운동량의 감소로 인해 냉각제가 분사되는 영역이 낮고 넓게 분포한다. 때문에, 일반적으로 측면 방향 확장각( $\beta$ )이 존재하면 원통형 막냉각 홀에 비해 높은 막냉각 효율을 보이게 된다. 측면 방향 확장각( $\beta$ )이 존재하면 원통

형 막냉각 홀에 비해 소용돌이도 낮고 넓게 분리되어 분포하게 되는데 Fig. 11(a)는 이러한 모습을 잘 보여준다. 분사되는 방향의 반대쪽 소용돌이는 낮은 측면 방향 분사각( $\gamma$ )에도 불구하고 쉽

게 사라지고 반대로 분사되는 쪽의 소용돌이는 더욱 넓은 영역에 분포하게 된다.

막냉각은 하나의 막냉각 홀을 사용하는 것이 아니고 여러 막냉각 홀을 열로 배치하여 냉각 효과를 얻는 것이므로 홀과 홀 사이의 거리(pitch)에 따른 상호작용도 함께 고려되어야 한다. 따라서 본 연구에서는  $\beta=0^\circ$ 와  $15^\circ$ 인 막냉각 홀을 대상으로 측면 방향 분사각의 유무의 경우에 대한 P/d의 영향을 평가하였다. 원통형 홀의 경우 2~6,  $\beta$ 가  $15^\circ$ 인 경우엔 4~8 까지 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 또한, 같은 분사율에서 홀과 홀 사이의 거리가 짧다는 것은 길 때와 비교하여 더 많은 양의 냉각재를 사용한다는 의미이므로 더 높은 냉각 성능을 보이는 것은 자명한 일이다. 따라서 냉각유체의 효율성 측면에서 막냉각 성능을 평가하기 위하여, 막냉각 효율을 p/d의 역수로 나누는 방법( $\eta/(d/p)$ )을 사용하였다. Gritch 등<sup>(14)</sup>도 같은 방법으로 홀의 주기에 대한 영향을 평가한바 있다. Fig. 12는  $\beta$ 가  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ 인 막냉각 홀의 주기(p/d)의 변화에 따른 면적 평균한 막냉각 효율( $\eta/(d/p)$ ) 분포를 나타낸다.  $\beta=0^\circ$ 인 경우에 대한 결과에서는 분사율 및 측면상향 분사각의 유무에 상관없이 큰 차이를 보이지 않았으나, M이 1.0이고  $\gamma$ 가  $20^\circ$ 인 경우엔 주기가 증가하면서 미세하게 효율이 증가하는 경향을 보여주었다. 이는 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 원통형 홀의 경우 냉각유체가 넓게 퍼지지 않고 좁게 분포하여 인접한 홀을 통해 분사되는 냉각유체가 서로 영향을 끼치지 않기 때문이다. 측면 방향 확장각이 존재하는 홀( $\beta=15^\circ$ )의 결과도 역시 전체적으로 큰 차이를 보이지 않고 분사율이 높고 측면 방향 확장각이 존재할 경우(M=2.0,  $\gamma=20^\circ$ )에 주기가 커질 수록 효율이 증가하는 경향을 보여주었다.

Fig. 13에는 위에서 언급한 주기의 변화에 따라 효율의 변화를 보이는 두 경우에 대한 막냉각면에서의 막냉각 효율,  $\eta/(d/p)$  분포를 나타내었다. Fig. 13(a), (c)에서는 홀과 홀 사이의 상호작용이 눈에 띄게 나타나지만 Fig. 13(b), (d)에서는 나타나지 않는 것을 확인 할 수 있다. 이를 통해 이웃한 홀을 통해 분사되는 냉각유체의 충돌 및 상호작용이 냉각효율을 저하시킴에 따라 홀의 주기가 충분한 거리를 가질 때 더 효율적인 냉각효과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

측면 방향 확장각  $15^\circ$ 를 가지는 막냉각 홀에 대해 홀과 홀 사이의 거리의 변화에 따른 막냉각 효율 및 홀 근처에서의 유동분포를 Fig. 14에 나타

내었다. 홀과 홀 사이의 거리가 4d 일 때는 오른쪽 쪽 홀로 인해 밀려난 뜨거운 유체가 왼쪽으로 이동하면서 왼쪽 홀에서의 소용돌이의 아래쪽으로 말려 들어가는 것을 볼 수 있다. 이로 인해 홀과 홀 사이의 거리는 짧지만 분사율에 비해 적은 막냉각 효율을 얻게 됨을 알 수 있다. 홀과 홀 사이의 거리가 8d 일 때는 마찬가지로 오른쪽 홀의 영향으로 뜨거운 유체가 왼쪽으로 밀려나지만 어느 정도 이동 후 주 유동을 따라 흘러가게 되어 왼쪽 홀에 영향을 주지 않게 됨을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 막냉각 홀의 측면 방향 분사각, 측면 방향 확장각, 분사율 및 홀의 주기가 막냉각 효율에 미치는 영향을 평가하기 위한 수치적 연구를 수행하였다. 측면 방향 분사각의 영향을 살펴보면, 측면 방향으로 확장되지 않는 원통형 홀의 경우 측면 방향 분사각이 존재할 때, 그렇지 않은 경우와 비교해 월등히 향상된 막냉각 효율을 보임을 알 수 있다. 또한 분사율이 낮을 때 보다, 분사율이 높을 경우에 이러한 경향이 더 크게 나타났다. 측면 방향 확장각을 가지는 뿔형상 홀의 경우엔 전체적으로 큰 차이를 보이지 않았으며, 측면 방향 확장각이  $30^\circ$  이상일 경우엔 오히려 크게 감소하였다. 또한 홀의 주기의 경우 전체적으로 큰 차이를 보이지는 않았지만, 이웃한 홀을 통해 분사되는 냉각유체와의 상호작용이 발생할 경우 막냉각 효율이 저하되기 때문에, 주기가 클 경우엔 보다 더 효율적인 냉각효과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었다.

#### 후 기

이 논문은 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받은 ‘다중현상 CFD 연구센터(ERC)’의 과제로 수행된 연구임을 밝힌다. (No. 2009-0083510)

#### 참고문헌

- (1) Jubran, B. A. and Maitech, B. Y., 1999, "Film Cooling and Heat Transfer from a Combination of Two Rows of Simple and/or Compound Angle Holes in Inline and/or Staggered Configuration," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, pp. 495~502.
- (2) Saumweber, C. and Schulz, A., 2008, "Effect of Geometry Variations on the Cooling Performance of

- Fan-shaped Cooling Holes," *Proceedings of ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air*, 9-13 June, 2008, Berlin, Germany.
- (3) Yuen, C. H. N., Martinez-Botas, R. F. and Whitelaw, J. H., 2001, "Film Cooling Effectiveness Downstream of Compound and Fan-shaped Holes," *Proceedings of ASME Turbo Expo 2001*, 4-7 June, 2001, New Orleans, Louisiana.
- (4) Brauckmann, D. and Wolfersdorf, J., 2005, "Influence of Compound Angle on Adiabatic Film Cooling Effectiveness and Heat Transfer Coefficient for a Row of Shaped Film Cooling Holes," *Proceedings of GT2005 ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea and Air*, 6-9 June, 2005, Reno-Tahoe, Nevada, USA.
- (5) Nasir, H., Ekkad, S. V. and Acharya, S., 2001, "Effect of Compound Angle Injection of Flat Surface Film Cooling with Large Streamwise Injection Angle," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 25, pp. 23~29.
- (6) Lee, H. W., Park, J. J. and Lee, J. S., 2002, "Flow Visualization and Film Cooling Effectiveness Measurements Around Shaped Holes with Compound Angle Orientations," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 145~156.
- (7) 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. 1, 2001, pp. 99~110.
- (8) Lee, J. S. and Jung, I. S., 2002, "Effect of Bulk Flow Pulsations on Film Cooling with Compound Angle Holes," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 113~123.
- (9) Lee, K. D. and Kim, K. Y., 2008, "Design Optimization of a Cylindrical Film-Cooling Hole Using Neural Network Techniques," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 32, No. 12, pp. 954~962.
- (10) Lee, K. D. and Kim, K. Y., 2009, "Design Optimization of a Fan-Shaped Film-Cooling Hole Using a Radial Basis Neural Network Technique," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 12, No. 4, pp. 44~53.
- (11) Jia, L., Jing, R. and Hongde, J., 2010, "Film Cooling Performance of the Embedded Holes in Trenches with Compound Angles," *Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air*, GT2010, 14-18 June, 2010, Glasgow, UK.
- (12) Baheri, S., Alavi Tabrizi, S. P. and Jubran, B. A., 2008, "Film Cooling Effectiveness from Trenched Shaped and Compound Holes," *Heat Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 989~998.
- (13) Ekkad, S. V., Zapata D. and Han, J. C., 1997, "Film Effectiveness Over a Flat Surface With Air and CO<sub>2</sub> Injection Through Compound Angle Holes Using a Transient Liquid Crystal Image Method," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 119, pp. 587~593.
- (14) Gritsch, M., Will Colbanl, W., Heinz Schär, H. and Döbbling, K., 2005, "Effect of Hole Geometry on the Thermal Performance of Fan-Shaped Film Cooling Holes," *Transactions of the ASME*, Vol. 127, pp. 718~725.
- (15) CFX-11.0 Solver Theory, Ansys inc., 2006.
- (16) Menter, F. and Esch, T., 2001, "Elements of Industrial Heat Transfer Prediction," *16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM)*, UberlandiaBrazil.
- (17) Wilcox, D. D., 1986, "Multiscale Model for Turbulent Flows," *In AIAA 24th Aerospace Science Meeting. American Institute of Aeronautics and Astronautics*.
- (18) Bardina, J. E., Huang, P. G. and Coakley, T., 1997, "Turbulence Modeling Validation," *Fluid Dynamics Conference 28th*, AIAA Paper 1997-2121.