

다양한 막냉각 홀 형상에 대한 막냉각 효율의 수치해석

김 선 민,¹ 이 기 돈,² 김 광 용^{*3}

NUMERICAL STUDY ON FILM-COOLING EFFECTIVENESS FOR VARIOUS FILM-COOLING HOLE SCHEMES

S.M. Kim,¹ K.D. Lee² and K.Y. Kim^{*3}

In order to protect the turbine blade from working fluid of high temperature, many cooling techniques such as internal convection cooling, film cooling, impinging jet cooling and thermal barrier coating have been developed. With all other things, film-cooling has been widely used as the important alternative. In the present work, numerical analysis has been performed to investigate and to compare the film-cooling performance of various film-cooling hole schemes such as cylindrical, crescent, louver, and dumbbell holes. To analyze the turbulent flow and the film-cooling mechanism, three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes analysis has been performed with shear stress transport turbulence model. The validation of numerical results has been assessed in comparison with experimental data. The characteristics of fluid flow and the film-cooling performance for each shaped hole have been investigated and evaluated in terms of centerline, laterally averaged and spatially averaged film-cooling effectivenesses. Among the film cooling holes, the dumbbell shaped hole shows better film-cooling effectiveness than the other shaped holes. And the louver and cylindrical shaped hole show the worst film cooling performance, and concentrated flows on near the centerline only.

Key Words : 막냉각(Film-cooling), 수치해석(Numerical Analysis), 전산유체역학(CFD), 막냉각 효율(Film-cooling Effectiveness) RANS방정식(Reynolds-averaged Navier-Stokes Equation),

1. 서 론

가스터빈 엔진은 높은 열효율과 낮은 연료 소모를 위하여 터빈의 입구온도를 지속적으로 높여 왔다. 그 결과 부품에 가해지는 열적 및 기계적 하중도 함께 높아졌고, 이에 따라 효율적인 냉각 방법의 필요성이 절실하게 대두되고 있다.

막냉각(film-cooling)은 터빈의 블레이드를 냉각하는 주요한 기술들 중의 하나이다. 막냉각은 냉각제를 뜨거운 작동기체에 노출된 블레이드 표면에 분출하여 낮은 온도의 냉각 기체가 형성한 막이 금속 표면을 보호하게 되는 기술이다. 이러한 막 냉각의 중요성으로 인해 이에 관한 많은 연구들이 지난 10-15

년간 이루어져 왔다. 막냉각의 성능을 평가하기 위하여 많은 연구자들이 사용하는 척도로 막냉각 효율(film-cooling effectiveness)이 있다. 막냉각 효율은 분사율(blowing ratio), 주유동의 난류 강도, 운동량속의 비(momentum flux ratio), 분사각(injection angle), 측면방향 확장각(diffuser angle), 그리고 막냉각 홀의 지름 등과 같은 형상 변수들에 의해 결정된다. 이렇게 막냉각 효율에 영향을 미치는 많은 요인들이 있지만 막냉각 홀의 형상은 막냉각 효율에 가장 큰 영향을 미치는 요인이다. 이 때문에 많은 연구자들이 막냉각 홀의 형상에 대하여 연구를 수행해 왔다.

Bunker[1]는 다양한 형상의 막냉각 홀에 대하여 비교 검토를 수행하였으며, 막냉각 홀의 개발 방향은 냉각제가 주유동장 내로 솟구치는 현상을 감소시켜 막냉각 효율을 높이고, 냉각제가 냉각 표면으로 넓게 퍼지게 하기 위하여 막냉각 홀의 출구 부분을 확장시키는 데에 있다고 하였다. 이러한 목적을 가지고 Taslim과 Ugarte[2]는 측면 방향으로 분사각(compound angle)을 가지는 원추형 막냉각 홀과 원통형 막냉각 홀의 유

접수일: 2011년 6월 28일, 수정일: 2011년 10월 6일,

게재확정일: 2011년 10월 7일.

1 정희원, 인하대학교 대학원 기계공학과

2 인하대학교 대학원 기계공학과

3 정희원, 인하대학교 기계공학과

* Corresponding author, E-mail: kykim@inha.ac.kr

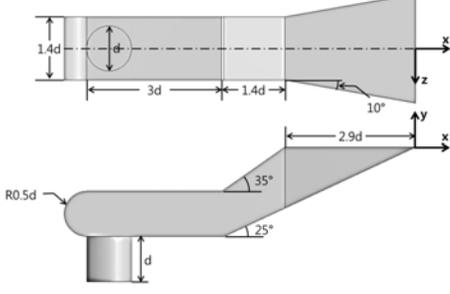
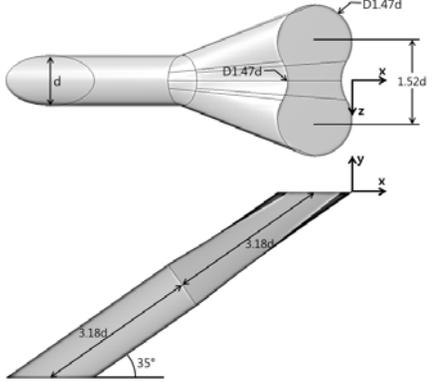
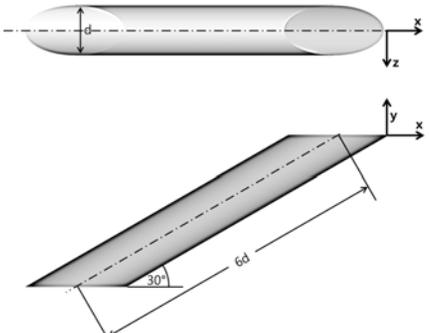
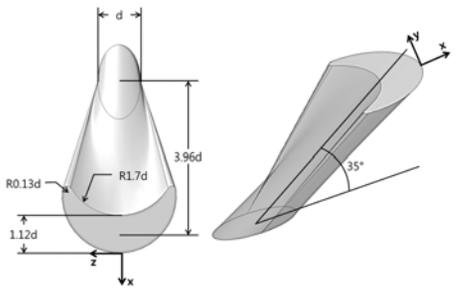
량계수에 대한 연구를 하였다. 이 연구에서 원추형 막냉각 홀은 원통형 막냉각 홀에 비하여 훨씬 더 높은 유량계수를 보여주었으며 두 형상 모두 주유동과 냉각재 유동의 방향이 일치할 때에 각각 가장 높은 유량계수를 보여주었음을 보고하였다. Lu[3]는 크레센트(crescent), 슬릿(slot), 트렌치(trench), 크레이터(crater) 및 쉘(fan) 막냉각 홀의 열유속, 열전달 계수 그리고 막냉각 효율을 평가하기 위하여 실험과 수치해석을 수행하였다. 크레센트는 슬릿에 비해 높은 막냉각 효율을 보였으며 원통형 막냉각 홀에 비해서는 매우 높은 막냉각 효율을 보였다. 그리고 크레이터 막냉각 홀은 쉘 막냉각 홀에 비해 더 낮은 막냉각 효율을 보였다. Saumweber 등[4]은 원통형과 두 개의 각각 다른 형상을 가진 막냉각 홀에 대하여 난류 강도와 분사 각도의 변화에 따른 막냉각 성능의 변화에 대하여 보고하였다.

향상된 막냉각 효율을 얻기 위해 많은 연구자들에 의해 다양한 형상을 가진 막냉각 홀들이 개발되었다. 덤벨(dumbbell)과 빈(bean)이라고 명명된 막냉각 홀이 Liu 등[5]에 의해 개발되었다. 새로운 형상의 막냉각 홀에 대한 성능 평가는 원통형

과 쉘 막냉각 홀과 함께 비교되었으며 그 결과 덤벨 막냉각 홀은 전체적으로 쉘, 원통형 및 빈 막냉각 홀에 비해 좋은 막냉각 효율을 보였다. Yu 등[6]은 원통형, 전면확대(forward diffused)와 전면 및 측면확대(forward and laterally diffused) 막냉각 홀에 대해 막냉각 효율, 열전달 계수, 그리고 열유속을 측정하고 비교하였다. Ghorab 등[7]은 원통형, 쉘 및 혼합형 막냉각 홀에 대해서 냉각 표면에서의 열유속 감소, Frossling 수와 막냉각 효율 등을 비교 분석 하였다. Zhang과 Hassan[8]은 새로운 막냉각 홀인 루버(louver) 막냉각 홀을 원통형 및 콘솔(console) 막냉각 홀과 막냉각 효율을 비교하였다. 루버 막냉각 홀은 막냉각 홀의 출구부분에서는 콘솔 막냉각 홀보다 높은 막냉각 효율을 보였지만 출구부분에서 먼 부분에서는 낮은 막냉각 효율을 보였다.

Sargison 등[9]은 원통형, 쉘, 슬릿, 및 콘솔 막냉각 홀에 대해 열전달 계수, 공력손실, 그리고 막냉각 효율에 대해 연구를 하였다. 이 연구에서 슬릿과 콘솔 막냉각 홀은 원통형이나 쉘 막냉각 홀에 비해 향상된 막냉각 효율과 열전달 계수를 갖는다고 보고하였다. Nasir 등[10]은 삼각형 탭(tab)의 방향이

Table 1 Selected shapes of film-cooling hole

Name	Reference and Shape	Name	Reference and Shape
Louver	Zhang and Hassan[8] 	Dumbbell	Liu et al.[5] 
	Saumweber et al.[4] 		Lu[3] 
Cylindrical		Crescent	

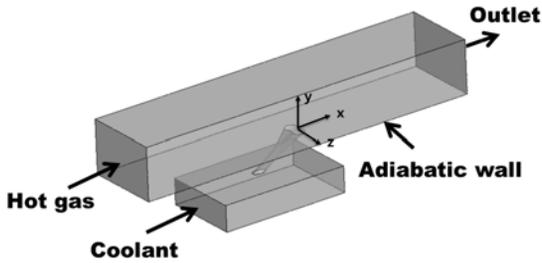


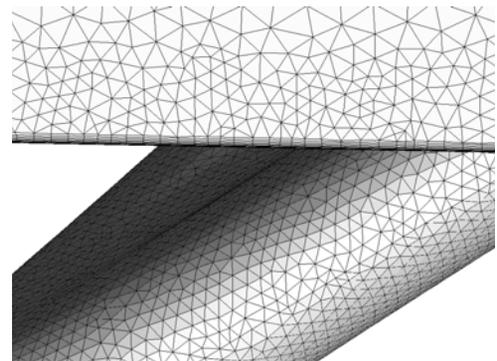
Fig. 1 Computational domain

막냉각 효율에 미치는 영향에 대해 보고하였다. 탭이 설치된 막냉각 홀은 냉각제에 의한 콩팥 모양의 소용돌이(kidney vortex)에 대해 반대방향의 소용돌이를 만드는 효과가 있어 높은 막냉각 효율을 보여주었다. Lu 등[11]은 트렌치가 설치된 원통형 막냉각 홀과 설치되지 않은 쉘 막냉각 홀에 대해 트렌치의 깊이와 너비의 변화가 막냉각 효율에 미치는 영향에 대한 평가를 하였다. 그들은 트렌치가 설치된 원통형 막냉각 홀이 쉘 막냉각 홀에 비해 낮은 막냉각 효율을 보인다고 보고하였지만 이 결과는 단지 원통형 막냉각 홀에 설치된 트렌치의 결과이므로 다른 막냉각 홀과 트렌치의 결합은 가능하다.

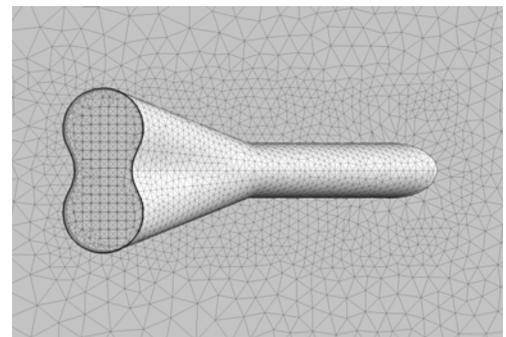
위에서 언급했듯이 다양한 막냉각 홀들이 있고 대부분 막냉각 홀의 아래 부분의 모양은 원통형 막냉각 홀의 형태를 하고 있다. 하지만 다양한 형상에 대한 막냉각 성능과 유동 메커니즘에 대한 연구는 많지 않다. 그러므로 본 연구에서는 높은 막냉각 효율을 보여준다고 알려진 막냉각 홀들에 대한 막냉각 성능평가 및 유동 특성을 분석하였다. 트렌치나 탭과 같은 부가적으로 다른 막냉각 홀에 설치할 수 있는 것들은 고려하지 않았으며, 결과적으로, 위에서 언급하였던 선행 연구들을 바탕으로 루버, 원통형, 크레센트 그리고 덤벨 막냉각 홀을 비교 대상으로 하였다.

2. 수치 해석

삼차원 유동 및 열전달의 해석을 위해 압축성 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방정식을 이용하여 해석을 수행하였으며, 비정렬 격자계를 사용하는 상용 전산유체역학 코드인 ANSYS CFX 11.0[12]를 사용하였다. 이 코드는 지배 방정식을 이산화하기 위해 유한 체적법을 사용하여 압축성 RANS 방정식을 수치적으로 계산한다. 난류 모델로는 SST 모델[13, 14]을 사용하였다. SST 모델은 k-ε 모델과 k-ω 모델의 장점만을 취한 모델이다. 벽 근처에서는 k-ω 모델이 사용되고, 그 이외의 영역에서는 k-ε 모델이 사용된다. 따라서 SST



(a)



(b)

Fig. 2 An example of computational grids

모델은 역압력구배로 인한 유동박리의 예측에 상당히 효과적이고, 난류 열전달 해석에도 그 정확성이 뛰어나다고 Bardina 등[15]에 의해 보고되었고 Lee와 Kim[16, 17]은 막냉각에 대한 연구에서 SST모델을 사용한 RANS 해석의 결과가 실험 결과와 좋은 일치를 보여준다고 보고하였다.

본 연구에서 비교검토 대상이 되는 막냉각 홀들을 Table 1에 나타내었다. 이 막냉각 홀들의 크기를 통일하기 위해 다양한 막냉각 홀들의 원통형 부분을 같은 지름(D=5mm)으로 설정하였고, 주유동 채널, 냉각제 채널 등의 크기를 통일하였다.

계산 영역과 경계조건을 Fig. 1에 나타내었다. 작동유체로는 공기를 사용하였으며 냉각제의 입구 조건으로 온도 290 K, 난류강도 1%, 유량 0.0033 kg/s를 사용하였고 주유동의 입구 조건으로 온도 540 K, 난류강도 5%, 속도 139 m/s를 사용하였다. 출구에서는 일정한 압력 1 atm을 경계조건으로 사용하였으며 모든 벽에 점착(no-slip)조건과 단열조건을 사용하였다.

ANSYS ICEM CFD-11.0을 사용하여 만들어진 사면체 격자계를 Fig. 2에 나타내었다. 벽 근처에서의 해석을 향상시키기 위하여 막냉각 홀과 냉각 표면에 프리즘 격자가 사용되었다. 홀 내부에서 발생하는 매우 복잡한 유동 현상의 자세한 해석

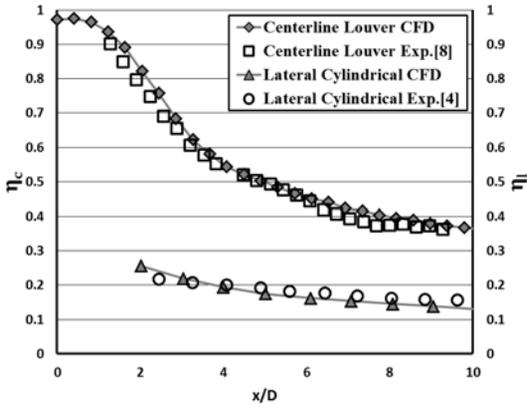


Fig. 3 Validation of computational results for film-cooling effectiveness(M=0.5)

을 위하여 많은 수의 격자를 밀집시켰으며 격자의 크기를 제한하는 기법이 사용되었다. 주유동 채널의 바닥 근처에는 냉각제유동과 주유동이 혼합되어 복잡한 유동을 만들기 때문에 격자 크기를 제한하였으나, 이 경우 위로 갈수록 일정한 비로 격자의 크기가 증가되도록 하였다.

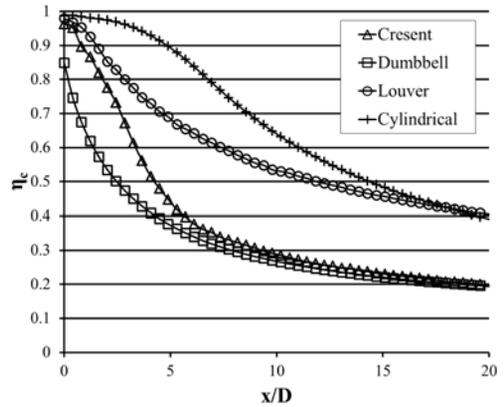
수렴 조건을 위하여 RMS relative residual 값을 모든 변수에 대하여 1.0E-5로 설정하였으며 계산은 Intel Core i7 K 875 @2.93 GHz PC를 사용하였다. 단일 계산에 약 20-25시간이 걸렸으나 계산시간은 계산의 복잡성과 막냉각 홀의 형상 그리고 격자의 질과 수 등에 의해 약간의 차이를 보였다.

3. 결과 및 고찰

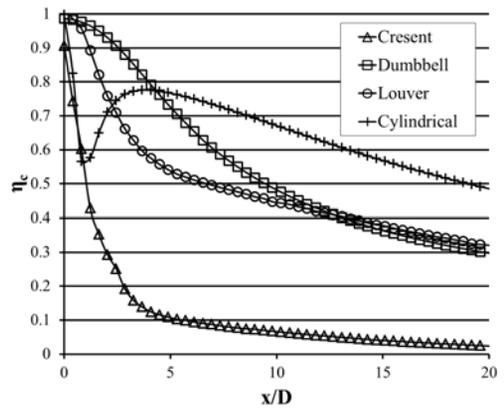
해석의 타당성을 검증하기 위해 루버와 원통형 막냉각 홀에 대해 같은 경계조건에서의 수치해석 결과와 실험 결과[4, 8]를 비교하였다. 루버 막냉각 홀을 사용한 냉각 표면의 중심선에서의 막냉각 효율과 원통형 막냉각 홀을 사용한 냉각 표면의 측면 방향으로 평균한 막냉각 효율의 실험값과 수치해석 결과를 비교하였으며 이를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 본 연구의 수치해석 결과는 전반적으로 실험값과 좋은 일치성을 보여주고 있다.

본 연구에서는 높은 막냉각 효율을 보인다고 알려진 세 가지 형상의 막냉각 홀(크레센트, 덤벨, 루버)의 냉각성을 원통형 막냉각 홀과 비교하기 위한 수치해석을 수행하였으며, 각 막냉각 홀의 유동특성을 분석하였다.

네 가지 형상의 막냉각 홀에 대해 냉각 표면의 중심선에서의 막냉각 효율을 Fig. 4에 나타내었다. 중심선에서의 막냉각 효율은 블레이드 표면을 보호하는 냉각재의 벽면 접촉성을 나타낸다. M=0.5에서, 원통과 루버 형상의 막냉각 홀은 덤벨



(a) M=0.5

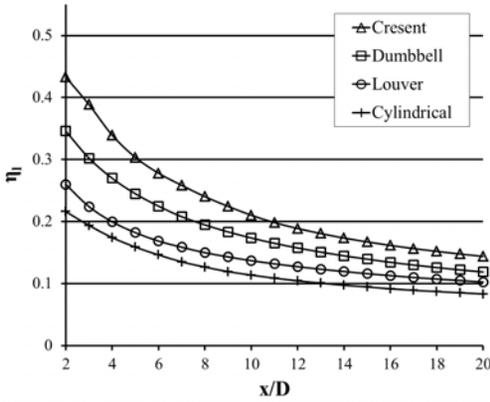


(b) M=1.5

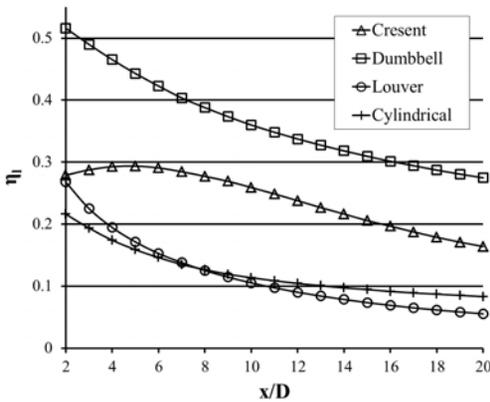
Fig. 4 Centerline film-cooling effectiveness for four shaped holes

이나 크레센트 형상의 막냉각 홀보다 중심선에서의 높은 막냉각 효율을 보여주었으며, M=1.5에서는 덤벨과 원통형 막냉각 홀이 다른 막냉각 홀에 비해 중심선에서의 높은 막냉각 효율을 보여주었다. M=1.5에서의 크레센트 막냉각 홀은 x/D가 증가할수록 빠르게 떨어지는 막냉각 효율을 보여주었으며 네 가지의 막냉각 홀 중에서 현저하게 낮은 막냉각 효율을 보여주었다.

네 가지 형상의 막냉각 홀에 대한 측면 방향으로 평균한 막냉각 효율을 Fig. 5에 나타내었다. M=0.5에서는 크레센트 막냉각 홀이 가장 높은 효율을 보였으며 M=1.5에서는 덤벨 막냉각 홀이 유동 방향으로 가장 높은 막냉각 효율을 보여주었다. 중심선에서 높은 효율을 보였던 루버나 원통형 막냉각 홀은 측면 방향으로 평균한 막냉각 효율에서는 두 가지 분사 윗에서 모두 가장 낮은 막냉각 효율을 보였다. 이는 냉각재가 넓게 퍼지지 않고 중심선에 집중됨을 뜻한다. 크레센트 막냉



(a) M=0.5



(b) M=1.5

Fig. 5 Laterally averaged film-cooling effectiveness for four shaped holes

각 홀은 다른 막냉각 효과는 달리 홀 출구에서의 막냉각 효율이 좀 더 유지되는 경향을 보여주었으며 점차 감소하는 경향을 보였다.

네 가지 형상의 막냉각 홀의 막냉각 면에 대해 평균한 막냉각 효율을 Fig. 6에 나타내었다. 이 값들은 냉각 영역인 가로 6D 세로 20D의 넓이에 대해 평균한 값들이다. 네 가지의 막냉각 홀 중 가장 높은 막냉각 효율을 보인 것은 덤벨 막냉각 홀이었으며 루버와 원통형 막냉각 홀이 가장 낮은 막냉각 효율을 보여주었다. 결과적으로, 국부적으로나 전체적으로나 덤벨 막냉각 홀이 본 연구에서 비교한 네 가지의 막냉각 홀들 중 가장 높은 막냉각 효율을 보여주었으며 특히 분사율이 증가함에 따라서 막냉각 효율도 다른 막냉각 홀에 비해 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타났다.

M=0.5와 1.5에서 네 가지 막냉각 홀들의 막냉각 효율을 국소적인 2차원 분포를 통해 Fig. 7에 나타내었다. 그림은 막냉

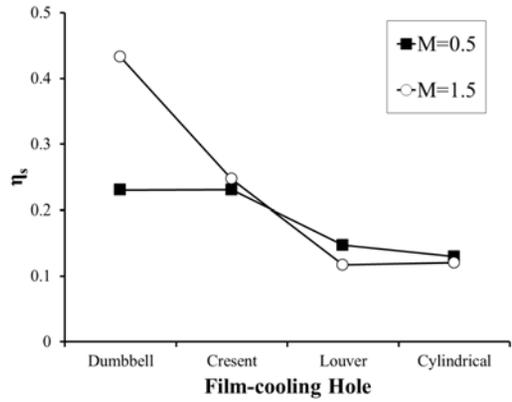


Fig. 6 Spatially averaged film-cooling effectiveness for shaped holes

각 홀의 모양에 따라 냉각 표면에서의 냉각재가 분포하는 경향이 다르다는 것을 보여준다. 원통형 막냉각 홀은 전형적인 한 개의 가지를 가지는 막냉각 효율 분포를 나타내었다. 특히 M=1.5에서 Fig. 4에서 원통형의 중심선에서의 막냉각 효율이 $x/D < 5$ 에서 감소하였다 증가하는 현상을 보여주고 있으며, 이는 냉각재가 주유동으로 솟구쳤다가 다시 가라앉는 현상으로 인해 생긴다. 루버 막냉각 홀은 세 갈래로 갈라지는 막냉각 효율 분포를 나타내었으며 원통형 막냉각 홀과 함께 중심선에 치우쳐서 냉각재가 분포하는 것을 보여준다. 크레센트 막냉각 홀은 복잡한 막냉각 효율 분포를 보였으며 다른 형상의 막냉각 홀들에 비해 가장 측면 방향으로 넓게 퍼지는 분포를 보였다. 덤벨 막냉각 홀은 많은 부분의 냉각 영역에서 높은 막냉각 효율을 보이는 분포를 보였다.

Fig. 8에 홀 내부에서의 냉각재의 유선을 나타내었고, Fig. 9에서는 홀 출구를 지난 냉각재의 분포를 나타내었다. Fig. 8에 나타난 냉각재의 유선은 홀 내부에서 냉각재가 어떠한 유동을 보이는 지를 나타내며, Fig. 9에 나타난 유선은 홀을 지난 냉각재의 유동이 어떻게 분포하게 되는지를 보여준다. 루버 막냉각 홀은 홀 내부의 위쪽 벽에 수직으로 부딪침으로 홀 내부의 위쪽에 빠른 유속을 만들고 이는 홀 출구를 나와 주유동으로 솟구쳐 소용돌이를 만들게 되며 이는 뒤쪽까지 지속된다. 원통형과 덤벨 막냉각 홀은 홀의 원통형 영역 내부에서 비슷한 유동을 보이나 덤벨 막냉각 홀의 옆으로 확장하는 형상 특성으로 인해 홀 출구 부분에서 원통형 막냉각 홀에 비해 측면 방향으로 퍼지려는 경향이 보이며 덤벨 막냉각 홀의 경우 중심선에 위치하는 냉각재가 있어 Fig. 7에서도 볼 수 있듯이 M=1.5에서 세 갈래로 퍼지는 분포를 만든다. 위에서 언급 했듯이 루버와 원통형 막냉각 홀은 다른 막냉각 홀에 비해 중심선에서 솟구치는 경향이 강함을 보여주며 이

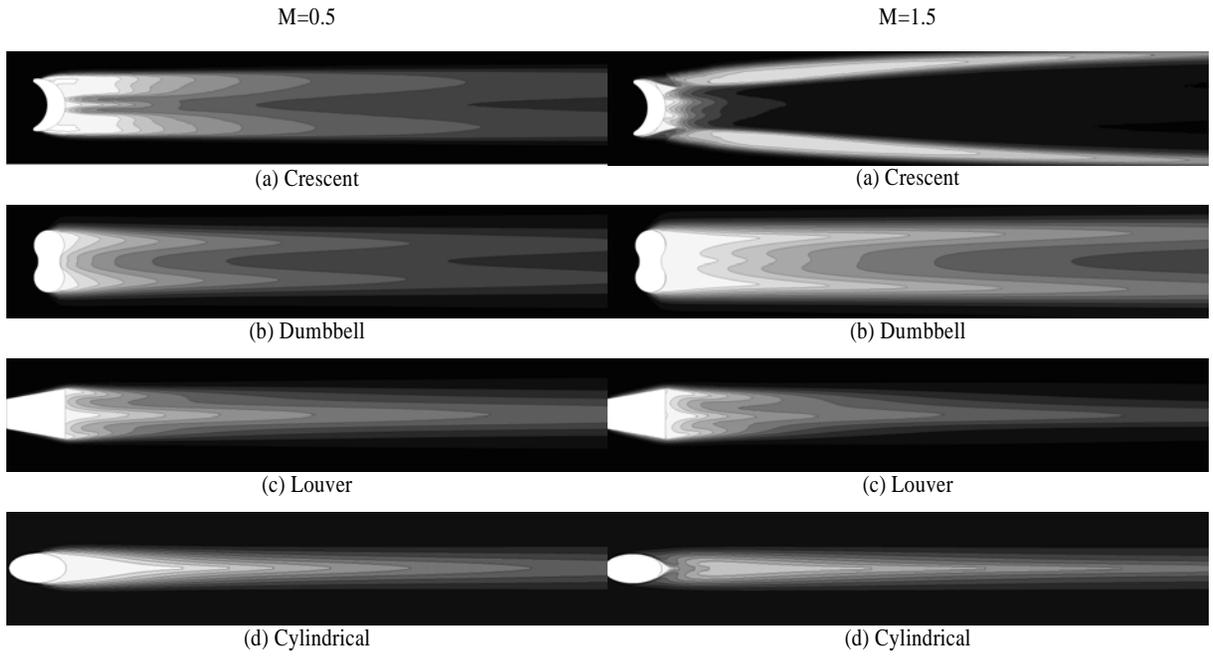


Fig. 7 Local film-cooling effectiveness for shaped holes

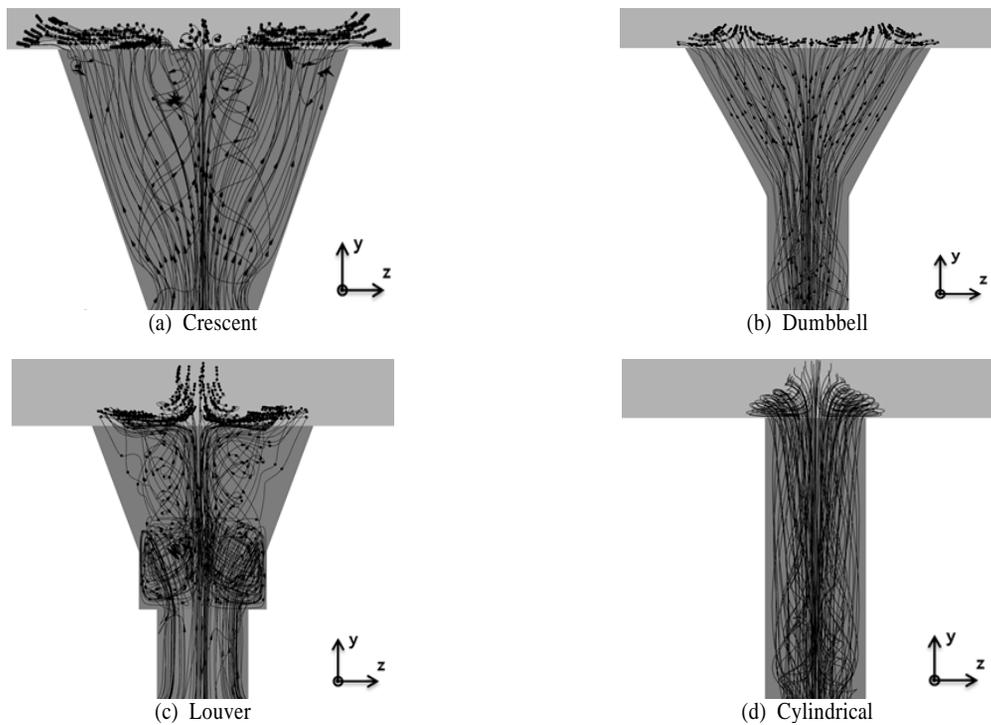


Fig. 8 Streamlines of coolant inside the hole

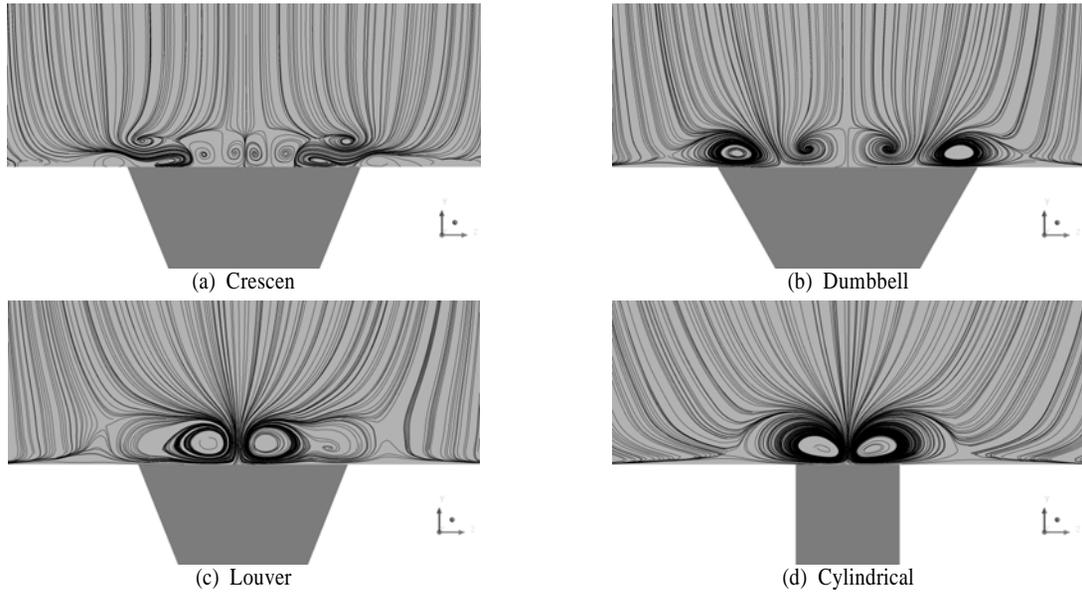


Fig. 9 Film-cooling effectiveness and streamlines

는 중심선에 치우친 막냉각 효율을 유발한다. 크레센트 막냉각 홀은 홀 내부에서 형상을 따라 중심선에서는 냉각재가 거의 분포하지 않고 양 끝으로 냉각재가 넓게 퍼지며 다른 막냉각 홀들에 비해 낮은 위치에서 찌그러진 형태의 소용돌이를 만들게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 크레센트, 덤벨, 루버, 그리고 원통형 등 네 가지 형상의 막냉각 홀에 대한 난류유동과 막냉각 효율을 비교 평가하였다. 막냉각 효율에 대한 수치해석 결과는 실험 결과와 좋은 일치성을 보여주었다. 주어진 경계 조건과 분사율에서, 루버와 원통형 막냉각 홀은 중앙선 근처에서는 높은 막냉각 효율을 보였으나, 냉각유체가 넓게 퍼지지 못하여 결과적으로 가장 낮은 막냉각 효율을 보였다. 크레센트 홀의 경우, 냉각유체가 냉각표면에 가장 넓게 분포하는 경향을 보였으나, 중앙부근에 냉각유체가 거의 분포하지 않으며, 전체적으로 높은 효율은 보여주지 못하였다. 반면에, 덤벨 막냉각 홀은 냉각유체가 막냉각표면 전체에 고르게 분포하면서 본 연구에서 해석한 막냉각 홀들 중 가장 뛰어난 막냉각 성능을 보여주었다.

후 기

이 논문은 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구

재단의 지원을 받은 ‘다중현상 CFD연구센터(ERC)’의 과제로 수행된 연구임을 밝힌다(No. 2009-0083510).

참고문헌

- [1] 2005, Bunker, R.S., "A Review of Shaped Hole Turbine Film-Cooling Technology," *Journal of Heat Transfer*, Vol.127, pp. 441-453.
- [2] 2004, Taslim, M.E. and Ugarte, S., "Discharge Coefficient Measurements for Flow through Compound-Angle Conical Holes with Cross-Flow," *The International Journal of Rotating Machinery*, Vol.10, No.2, pp.145-153.
- [3] 2007, Lu, Y., "Effect of Hole Configurations on Film Cooling from Cylindrical Inclined Holes for the Application to Gas Turbine Blades," *Ph. D Thesis*, Louisiana State University.
- [4] 2003, Saumweber, C., Schulz, A. and Wittig, S., "Free-Stream Turbulence Effects on Film Cooling With Shaped Holes," *Journal of Turbomachinery*, Vol.125, pp.65-73
- [5] 2010, Liu, J.S., Malak, M.F., Tapia L.A., Crites, D.C., Ramachandran, D., Srinivasan, B., Muthiah, G. and Venkaramanan, J., "Enhanced Film Cooling Effectiveness with New Shaped Holes," *Proceedings of ASME Turbo Expo 2010*, GT2010-22774.

- [6] 2002, Yu, Y., Yen, C. -H., Shih, T. I. -P., Chyu, M. K. and Gogineni, S., "Film Cooling Effectiveness and Heat Transfer Coefficient Distributions Around Diffusion Shaped Holes," *Journal of Heat Transfer*, Vol.124, No.5, pp.820-827.
- [7] 2010, Ghorab, M., Hassan, I. and Lucas T., "An Experimental Investigation of a New Hybrid Film Cooling Scheme," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.53, No.21-22, pp.4994-5007.
- [8] 2006, Zhang, X.Z. and Hassan, I., "Film Cooling Effectiveness of an Advanced-Louver Cooling Scheme for Gas Turbines," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol.20, No.4, pp.754-763.
- [9] 2002, Sargison, J.E., Guo, S.M., Oldfield, M.L.G., Lock, G. D. and Rawlinson, A. J., "A Converging Slot-Hole Film-Cooling Geometry - Part 1: Low-Speed Flat-Plate Heat Transfer and Loss," *Journal of Turbomachinery-Transactions of the ASME*, Vol.124, No.3, pp.453-460.
- [10] 2003, Nasir, H., Acharya, S., and Ekkad, S., "Improved film cooling from cylindrical angled holes with triangular tabs_effect of tab orientations," *International Journal of heat and fluid flow*, Vol.24, No.5, pp.657-668.
- [11] 2009, Lu, Y., Dhungel, A., Ekkad, S.V. and Bunker, R.S., "Effect of Trench Width and Depth on Film Cooling from Cylindrical Holes Embedded in Trenches," *Journal of Turbomachinery*, Vol.131, No.1, pp.1-13.
- [12] 2006, CFX-11.0 Solver Theory, ANSYS Inc.
- [13] 2001, Menter, F. and Esch, T., "Elements of industrial heat transfer prediction," *16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM)*, Uberlandia Brazil
- [14] 1986, Wilcox, D. D., "Multiscale model for turbulent flows," *AIAA 24th Aerospace Science Meeting, American Institute of Aeronautics and Astronautics*.
- [15] 1997, Bardina, J.E., Huang, P.G. and Coakley, T., "Turbulence Modeling Validation," *Fluid Dynamics Conference 28th*, AIAA pp. 1997-2121.
- [16] 2010, Lee, K.D. and Kim, K.Y., "Shape Optimization of Fan-Shaped Hole to Enhance Film-Cooling Effectiveness," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.53, No. 15-16, pp.2996-3005.
- [17] 2011, Lee, K.D. and Kim, K.Y., "Surrogate Based on Optimization of a Laidback Fan-Shaped Hole for Film-Cooling," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.32, No.1, pp.226-238.