

〈논 문〉

홀 형상이 막 냉각 유동에 미치는 효과에 대한 수치 해석적 연구

이 정 희* · 최 영 기**

(1996년 7월 6일 접수)

A Numerical Simulation on the Effect of Hole Geometry for Film Cooling Flow

JungHee Lee and YoungKi Choi

Key Words : Discharge Coefficient(유출 계수), Finite Volume Method(유한 체적법), Chamfering Ratio, Radiusing Ratio

Abstract

In this study, the effect of hole geometry of the cooling system on the flow and temperature field was numerically calculated. The finite volume method was employed to discretize the governing equation based on the non-orthogonal coordinate with non-staggered variable arrangement. The standard k-ε turbulence model was used and also the predicted results were compared with the experimental data to validate numerical modeling. The predicted results showed good agreement in all cases. To analyze the effect of the discharge coefficient for slots of different length to width, the inlet chamfering and radiusing holes were considered. The discharge coefficient was increased with increment of the chamfering ratio, radiusing ratio and slot length to width and also the effect of radiusing showed better result than chamfering in all cases. In order to analyze the difference between the predicted results with plenum region and without plenum region, the velocity profiles of jet exit region for a various flow conditions were calculated. The normal velocity components of jet exit showed big difference for the low slot length to width and high blowing rate cases. To analyze the flow phenomena injected from a row of inclined holes in a real turbine blade, three dimensional flow and temperature distribution of the region including plenum, hole and cross-stream with flow conditions were numerically calculated. The results have shown three-dimensional flow characteristics, such as the development of counterrotating vortices, jetting effect and low momentum region within the hole in addition to counterrotating vortex structure in the cross-stream.

기호설명	C_{d1} : 유출 계수 (Gartshore의 정의)
C_d : 유출 계수 $\left(= \frac{U_s}{[2(P_p - P_\infty) / \rho_s]^{1/2}} \right)$	$\left(= \frac{P_p - P_1}{\frac{1}{2} \rho_s U_s^2} \right)$

*회원, 중앙대학교 대학원
**회원, 중앙대학교 기계공학과

S : 슬롯 폭, m

D	: 홀 직경, m
k	: 난류 운동 에너지
L	: 슬롯 길이, 홀 길이, m
L _c	: 특성 길이
M	: 분사 비 $\left(= \frac{\rho_j U_{jet}}{\rho_\infty U_\infty} \right)$
P _k	: 난류 운동 에너지의 생성항
P _p	: 프리넘 영역의 정체 압력, Pa
P _∞	: 주 유동 영역의 정체 압력, Pa
Pr, Pr _t	: 층류, 난류 프란틀 수
Re _s	: 슬롯 폭을 기준으로 한 레이놀즈수 $\left(= \frac{\rho_s U_s S}{\mu_s} \right)$
Re _D	: 홀 직경을 기준으로 한 레이놀즈수 $\left(= \frac{\rho_j U_j D}{\mu_j} \right)$
T _{int}	: 난류 강도
U _s , T _s	: 슬롯 출구의 속도, m/s와 온도, K
U _{jet} , T _j	: 홀 출구의 속도, m/s와 온도, K
U _∞ , T _∞	: 주유동의 입구 속도, m/s와 온도, K
U _{in} , T _i	: 프리넘 영역의 입구 속도, m/s와 온도, K

그리스문자

α_m^j	: Contravariant 기본 벡터의 Cartesian 성분
δ	: 경계층 두께
δ_n	: 벽으로 부터의 수직거리, m
ϵ	: 소멸률
x	: Von-Karman 상수
μ, μ_t	: 층류, 난류 점성 계수, kg/(m·s)
ρ	: 유체의 밀도, kg/m ³
Γ	: 확산 계수, kg/(m·s)

1. 서론

고온의 환경하에서 작동되고 있는 터빈을 효과적으로 냉각할 수 있는 냉각 방법으로 막 냉각과 층돌 냉각이 널리 이용되고 있다. 이 두가지 냉각 방법은 홀에서 분사되는 냉각 유체의 양과 유동 특성에 의해 크게 영향을 받으며 이것들은 작동 조건과 냉각 유체가 분사되는 홀 형상에 의해 큰 차이를 보이고 있다. 터빈을 냉각시키는 주된 방식은 압축기를 통과한 냉각 유체를 연소실을 통하지 않고 우회시켜 냉각 유체로 사용하는 방법을 사용하고 있

는데 여기에는 압축기를 구동시키기 위한 추가적인 일이 소요되고 냉각 유체가 고온의 작동 유체와 혼합되면 공기 역학적인 손실을 가져오기 때문에 냉각 유체의 양을 최소화하는 것이 냉각 효율을 개선시키는 방법이다. 따라서 터빈의 효율을 증가시키기 위한 높은 냉각 효과를 얻어내기 위해서는 압축기를 작동시키는데 소요되는 에너지를 최대한 줄이면서 냉각에 필요한 유량을 얻는 것이다. 특히 압축기로부터 채널을 통해 전달되는 과정에서 홀을 통과할 때 많은 유량 손실이 일어나고 있기 때문에 이에 대한 연구가 냉각 시스템을 효과적으로 작동시키는데 필수적이다. 따라서 분사 홀로부터 분사되는 냉각 유체의 양을 비교 측정할 수 있는 유출 계수가 막 냉각에서 중요한 변수가 되며 이것은 홀 입구와 출구 영역의 압력차에 의해 홀러간 실제 유량과 마찰이 없는 이상적인 상태에서 홀러간 유량비에 의해 정의된다. 홀 형상과 유동 조건에 따른 유출 계수에 관한 연구가 1960년대 이후로 꾸준히 진행되어 왔으나 대부분 실험적 연구였다.

Deckker와 Chang⁽¹⁾은 좁은 오리피스를 통과하는 압축성 유체에 대해 실험적으로 연구하였다. 홀 길이/직경 비(L/D)가 0.0, 0.5, 1.0과 2.0인 경우에 대해 유동 조건을 변화시키면서 유출 계수(C_d)의 변화를 측정했다. 길이/직경 비는 분사 유동의 홀 입구 부근에서의 재부착 여부를 결정짓는 중요한 변수로서 유출 계수에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다. Benmansour⁽²⁾는 분사각 30°, 60°, 90°인 경우와 길이/직경 비의 변화에 대해 유출 계수 값을 실험에 의해 측정하였다. L/D < 2인 경우에는 L/D의 효과가 크게 나타났으나 L/D > 2인 경우에는 L/D의 효과가 미미하였다. Hay 등⁽³⁾은 프리넘(plenum)영역에서 주 유동 방향에 대해 평행한 방향과 수직인 방향으로 유체 유동이 있는 경우에 1열의 분사 홀을 통해 분사되는 제트 유동에서 압력비(0~2), 분사각(30°, 60°, 90°), 마하수(0~4)의 변화에 따른 유출 계수의 변화를 실험을 통해 얻었다. Khadi⁽⁴⁾는 Benmansour⁽²⁾와 같은 영역에서 실험하였고 홀의 곡률 효과를 추가하여 연구하였다. 곡률 효과는 유출 계수의 증가를 가져왔으며 직교류의 경우에 덜 민감함을 알 수 있었다. 이것은 Hay⁽⁵⁾에 의해 발표된 결과와 일치하였다. Hay 등⁽⁶⁾은 가스 터빈 냉각 시스템의 케이싱, 디스크나 케이싱에 있는 홀 형상이 유출 계수에 미치는 효과에 대해 연구하였다. 홀 입구의 예리한 부분을 모

서리(chamfering) 지게 하거나 곡률을 주었을 때 길이/직경 비와 압력 비의 변화가 유출 계수에 미치는 효과에 대해 실험하였다. 홀을 모서리지게 하거나 곡률을 주었을 때 유출 계수가 급격히 증가함을 알 수 있었고 압력 비와 길이/직경 비가 증가할 수록 유출 계수가 또한 증가함을 알 수 있었다. Hay⁽⁷⁾ 등은 유동 방향과 홀 방향이 일치하지 않는 로터 블레이드의 선단에서 일어나는 막 냉각 현상을 해석하기 위해 분사각 30° 이고 $L/D=6$ 일 때 홀이 유동 방향에 대해 0° 에서 180° 로 회전하는 경우와 곡률을 준 경우에 압력 비의 변화에 대한 유출 계수를 측정 한 바 있다. 1.4이하의 낮은 압력 비에서는 유출 계수가 급격히 증가하였고 압력 비 1.4 이상에서는 거의 일정함을 보였다.

실제 터빈 블레이드의 냉각 홀은 제작상의 난점과 열 응력의 집중에 따른 구조적 문제로 인해 일정한 간격으로 배열한다. 이에 따라 홀 내부와 홀 인접 영역은 복잡한 3차원 유동 특성을 나타내고 있다. 따라서 냉각 시스템을 효율적으로 설계하기 위해서는 홀 인접 영역의 유동 현상을 잘 이해하는 것이 선행되어야 한다. 이에 따라 홀 인접 영역의 유동 특성에 관한 많은 연구 논문들이 발표되었으나 대부분이 실험적 연구 방법에 의해 이루어져 왔다.

Crabb⁽¹⁰⁾ 등은 직교류에 대해 수직으로 분사되는 제트 유동에서 분사율이 1.15와 2.3이며 홀 길이/직경 비가 30인 경우에 대해 제트 인접 영역의 유동 특성을 연구하였다. 주 유동과 분사 제트의 압력차와 홀 속에서 발생하는 한 쌍의 와동에 의해 주 유동으로 유입된 제트 유동의 속도 분포가 크게 변화됨을 보였다. 이와 같이 대부분의 기존 연구가 홀 길이/직경 비가 10이상인 긴 경우에 대해 이루어져 왔으나 실제 터빈에 사용되는 분사 홀은 짧은 경우가 대부분이며 이에 따라 홀 인접 영역의 유동 현상은 홀 길이/직경 비가 큰 경우와는 큰 차이를 보이고 있어 실제에 보다 가까운 유동 해석을 위해서는 홀 길이/직경 비가 작은 경우에 대한 연구가 필수적이다. Sinha⁽¹¹⁾ 등은 1열의 분사 홀로부터 분사되는 제트 유동에서 밀도 비, 분사 비와 홀 간격에 따른 유동과 열전달 특성을 연구하였다. 이 연구가 기존 연구와 다른 점은 홀 길이/직경 비가 작은 경우($L/D=1.75$)에 대해 이루어졌다는 점이다. 최근 들어 컴퓨터의 성능 향상과 수치 해석 방법의 발달과 더불어 몇몇 수치 해석적 연구 논문이

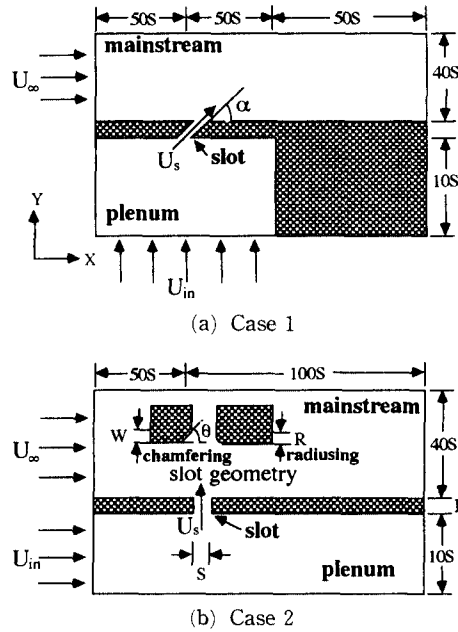


Fig. 1 Schematic diagram of test geometry for the 2-D slot injection.

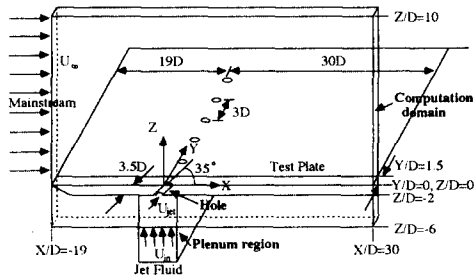


Fig. 2 Schematic diagram of test geometry for the 3-D hole injection.

발표되고 있다.

Leylek⁽¹²⁾ 등은 1열의 분사 홀로부터 분사되는 제트 유동을 프리넘, 홀, 주 유동 영역을 모두 계산영역에 포함시켜 계산하였으며 홀 내부와 홀 인접 영역의 유동 특성과 열전달 특성을 알아내기 위해 상용 프로그램인 PHOENICS 코드를 이용하여 수치 해석하였다. 홀 안에서의 대칭 면의 속도 분포 결과를 보면 프리넘 영역으로부터 경사진 홀 안으로 유체가 유입되면서 한 쌍의 와동이 형성됨을 볼 수 있고 홀 중심선의 우측 벽면에서는 낮은 운동량 영역이 존재하고 좌측 벽면에서는 제팅(jetting) 효과가 나타남을 볼 수 있으며 홀 인접

영역에서는 주 유동과의 혼합으로 인해 복잡한 3차원 기동을 나타냄을 보여 주었다.

그러나 국내에서는 아직 홀 형상에 관한 수치 해석적 연구가 미비한 실정이며 보다 효율적인 냉각 시스템을 개발하기 위해서는 이에 대한 연구가 필수적이다. 본 연구에서는 주유동 방향에 대해 프리덤 영역에서의 유동이 수직 및 평행한 경우에 2차원 슬롯을 통하여 분사되는 유동 시스템의 개략도를 나타낸 Fig. 1의 형상에서 분사 각도, 유동 조건(분사비, 압력비), 분사 홀의 형상(chamfering, radiusing)과 슬롯 길이/폭에 따른 슬롯 근처에서의 유동 변화와 이에 따른 유출 계수에 미치는 효과를 예측한다. 또한 주유동에 대해 35°로 경사진 1열의 홀로부터 분사되는 제트 유동 시스템의 개략도를 나타낸 Fig. 2의 형상에서 발생하는 복잡한 3차원 유동 특성을 비직교 좌표계를 이용한 프로그램을 이용하여 수치 해석하고 분사 비에 따른 변화를 고찰 하고자 한다.

2. 지배 방정식

2.1 비직교 좌표계

Fig. 3은 Cartesian 좌표계 y^m 과 비직교 좌표계 x^i 를 그린 그림이다. Cartesian 좌표계에서는 수직 단위 벡터 i_m 으로 기본 벡터를 정의하고 비직교 좌표계에서는 covariant나 contravariant를 기본 벡터로 정의한다. covariant 기본 벡터 e_i 는 좌표축 x^i 에 접선 방향의 기본 벡터이고 contravariant 기본 벡터 e^i 는 일정한 x^i 평면에 수직인 방향의 기본 벡터이며 다음과 같다.

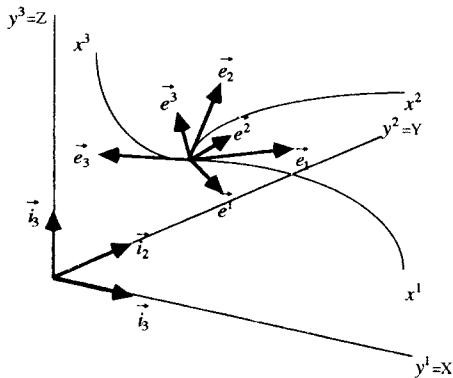


Fig. 3 Nonorthogonal coordinate system (x^i) and Cartesian coordinate system (y^m)

$$\vec{e}_i = \frac{\partial \vec{r}}{\partial x^i} \tag{1}$$

$$\vec{e}^i = \nabla x^i \tag{2}$$

$$\text{여기서 } \vec{r} = y^1 \vec{i}_1 + y^2 \vec{i}_2 + y^3 \vec{i}_3$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial y^1} \vec{i}_1 + \frac{\partial}{\partial y^2} \vec{i}_2 + \frac{\partial}{\partial y^3} \vec{i}_3$$

2.2 기본 방정식

뉴턴 유체의 정상 유동에 대해 비직교 좌표계상에서 Cartesian 속도 성분을 사용하여 시간 평균된 비압축성 난류 유동의 지배 방정식을 텐서 형식으로 나타내면 다음과 같다.

연속 방정식 :

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^j} [J a_m^i (\rho U_m)] = 0 \tag{3}$$

운동량 방정식 :

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^j} [J a_m^i (\rho U_m U_i - \tau_{mi} + P \delta_m^i)] = 0 \tag{4}$$

여기서 U_i 는 Cartesian 속도 성분이고 J는 비직교 좌표계의 변환에 따른 Jacobian을 나타낸다. a_m^i 는 비직교 좌표계의 Contravariant 기본 벡터 e^i 와 Cartesian 단위 벡터 i_m 의 내적을 나타낸다. 또한 τ_{mi} 는 점성 응력 및 레이놀즈 응력을 모두 포함한 것으로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_{mi} = & \mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x^n} a_m^n + \frac{\partial U_m}{\partial x^i} a_i^n \right. \\ & \left. - \frac{2}{3} \delta_m^i \frac{\partial U_k}{\partial y^k} \right) - \frac{2}{3} \delta_m^i \rho k \end{aligned} \tag{5}$$

난류 에너지 수송 방정식 :

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^j} \left[J a_m^i \left(\rho U_m k - \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x^n} a_m^n \right) \right] = P_k - \rho \epsilon \tag{6}$$

난류 점성계수 μ_t 는 다음과 같다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \tag{7}$$

난류 에너지 소멸률 방정식 :

$$\begin{aligned} & \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^j} \left[J a_m^i \left(\rho U_m \epsilon - \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x^n} a_m^n \right) \right] \\ & = \frac{\epsilon}{k} (C_1 P_k - C_2 \rho \epsilon) \end{aligned} \tag{8}$$

위 식에서 P_k 는 난류 에너지 생성항으로 다음과 같이 주어진다.

Table 1 $k-\epsilon$ turbulence model constant

Constants	σ_k	σ_ϵ	C_μ	C_1	C_2
Values	1.0	1.3	0.09	1.44	1.92

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x^n} \alpha_i^n + \frac{\partial U_j}{\partial x^m} \alpha_j^m \right) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x^n} \alpha_i^n \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial U_k}{\partial y^k} \right) \left(\frac{\partial U_k}{\partial y^k} \right) \quad (9)$$

에너지 방정식 :

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^j} \left[J \alpha_m^i \left(\rho U_m T - \Gamma_{eff} \frac{\partial T}{\partial x^n} \alpha_m^n \right) \right] = 0 \quad (10)$$

위의 식 (10)에서 Γ_{eff} 는 분자에 의한 열확산을 포함하는 유효 열확산 계수이며 다음과 같이 정의 된다.

$$\Gamma_{eff} = \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \quad (11)$$

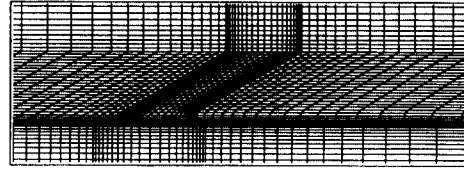
공기의 층류 점성 계수 μ 와 밀도는 온도에 대한 함수로 계산하였다.

위에서 σ_k 와 σ_ϵ 는 각각 k 와 ϵ 에 대한 확산 난류 프란틀 수이고, C_μ , C_1 , C_2 는 난류 모델 상수이며 Table 1에 주어졌다.

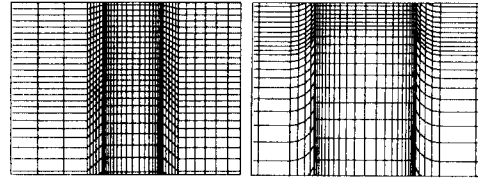
3. 수치 해석

3.1 격자제

본 연구에서는 2차원 슬롯과 3차원 원형 홀로부터 평판에 분사되는 제트 유동에서 실제로 가까운 분사 홀 인접 영역의 유동 특성을 해석하기 위하여 프리넘(plenum), 홀, 주 유동 영역을 모두 계산



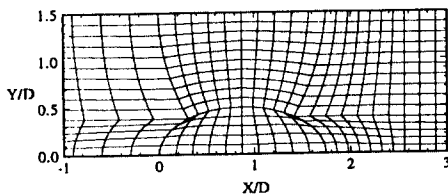
(a)



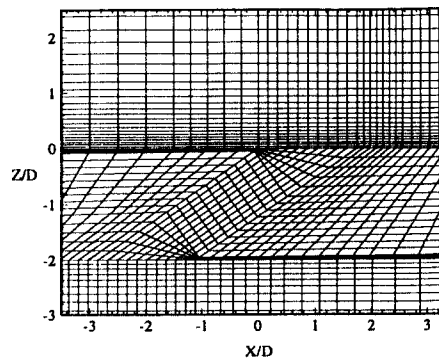
(b)

Fig. 4 Grid arrangement within the slot (a) $\alpha=30^\circ$ and $R/S=0.25$ (Case 1) (b) $\alpha=90^\circ$ $W/S=0.25$ ($\theta=45^\circ$) and $R/S=0.25$ (Case 2)

영역에 포함시켰으며 2차원 슬롯인 경우에는 x^1 과 x^2 방향으로 138×101 의 비직교 격자계를 형성하였고 3차원 홀인 경우에는 x^1 , x^2 와 x^3 방향으로 $97 \times 16 \times 75$ 의 비직교 격자계를 형성하였다. Fig. 4(a)는 분사각이 30° 이고 곡률진 비가 0.25인 경우에 슬롯과 그 부근에 형성된 격자계를 나타내며 Fig. 4(b)는 분사각이 90° 이고 모서리지고 곡률진 경우에 슬롯과 그 부근에 형성된 격자계를 나타낸 그림이며 Fig. 5는 분사각이 35° 인 대칭 홀의 제트 출구 면과 막 냉각 홀안의 격자계를 나타낸 것으로 홀 형상, 홀의 경사진 부분과 슬롯 입구를 모서리지게 하거나 곡률을 준 부분을 직교 좌표계에서 처럼 계단 모양의 격자계를 형성시키지 않고 경사면이나 곡선부분을 따라 형성시켜 경계 조건을 물리



jet exit plane



within film hole

Fig. 5 Grid arrangements for the 3-D hole injection at the injection angle $\alpha=35^\circ$

적으로 타당하고 보다 쉽게 적용할 수 있었다. 또한 비균일 격자계를 사용하여 벽 근처나 분사 제트에 인접한 영역에 격자를 집중시킴으로써 효율적으로 계산하였다.

3.2 지배 방정식의 차분화

앞 장에서 나타낸 비직교 좌표계에 대한 지배 방정식을 검사 체적에 대해 체적 적분을 하여 이산화시키는 유한 체적법을 사용하여 대수 방정식을 얻는다. 대류항에 대해서는 선형 상류 차분법을 사용하였고 확산항에 대해 중심 차분법을 사용하여 차분화시켜 지배 방정식을 이산화하였다.

3.3 해석 방법

앞 절에서 이산화한 방정식은 주 격자점 (P, N, S, E, W)에 유동 변수만 저장하여 암시적 (implicit)인 처리를 하고 나머지 격자점 (NW, NE, SW, SE)에서의 변수 값들은 명시적 (explicit)인 처리를 하여 전 단계의 값들을 사용, 변수 처리시 계산 용량을 줄였다. 최종적으로 5개의 대각 행렬이 만들어 지고 이를 SIP (Strongly Implicit Procedure) 방법으로 풀어 각각의 변수 값들을 구해낸다. 비엇갈림 변수 배열을 사용하여 모든 변수를 체적의 중심에 위치하도록 하여 물리적으로 타당하도록 하였으나 1차 미분항인 대류항을 선형 보간법을 사용하여 중심 격자점 (P)에서의 속도를 구하면 P점에서의 압력이 계산 영역에 포함되지 않아 압력과 속도가 연결되지 않는 문제가 발생되는데 본 연구에서는 계산 절점에 대한 차분화된 운동량 방정식을 제어 표면에서의 속도 구배에 대한 보간식으로 사용함으로써 압력 구배를 계산 절점에서의 값으로 나타내어 압력과 속도를 연결시킬 수 있는 Rhie⁽⁹⁾가 제시한 방법을 이용하였다. 비압축성 유동에서는 압력에 관한 식이 없어 연속 방정식과 운동량 방정식을 이용하여 압력 보정 방정식을 유도하고 해를 구하여 그 결과를 제어 체적면의 질량 보존 법칙에 따라 압력과 속도를 연결시키는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다.

3.4 경계 조건

2차원인 경우에 입구 경계에서의 주 유동 속도 U_∞ 는 실험치와 근접한 $\delta/S=2$ 인 경계층이 형성된 경우에 대한 속도 분포로 주었으며 프리넘 영역에서는 면에 수직한 방향으로 균일한 속도 U_m 으로 주었고 주 유동 온도 T_∞ 와 프리넘 영역의 온도 T_1 는 각각 균일한 온도인 300 K로 주었다. 또한 3차

원인 경우에 주 유동과 프리넘 영역의 속도 (U 와 U_m)는 면에 수직한 방향으로 각각 균일한 분포로 주었고 주유동과 프리넘 영역의 온도 (T_∞ 와 T_1)는 각각 302 K와 153 K로 주었다. 그리고 난류 운동 에너지와 난류 에너지 소산율의 입구 조건은 실험 값으로부터 다음과 같이 주었다.

$$k_{in} = (T_{in} \cdot U)^2 \quad (12)$$

$$\epsilon_{in} = \frac{C_\mu k_{in}^{3/2}}{0.1 L_c} \quad (13)$$

여기서 U 는 입구 조건이 적용되는 면의 입구 속도이며 L_c 는 특성 길이를 나타내며 하첨자 in 은 입구를 의미한다.

대칭 경계면에 수직한 방향으로 모든 종속 변수 값의 구배가 0이라는 다음과 같은 조건으로 처리하였다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (14)$$

여기서 ϕ 는 u, v, w, p, k, ϵ 과 T 를 대표하는 변수이며 n 은 대칭면에 수직 방향의 거리를 의미한다.

벽면 경계 조건은 점착 조건을 사용하여 운동량 방정식과 에너지 방정식에서 대류항을 소거시켰으며 확산항은 첫번째 격자점에서 벽 마찰 응력 τ_w 를 사용하여 다음과 같이 처리된다.

$$(a_p + \tau_w \delta A) U_{ip} = \sum a_m U_{im} + S_u \quad (15)$$

여기서 아래첨자 m 은 경계면을 제외한 이웃 격자점들이고 δA 는 제어면의 전단 면적을 나타내고 a_p 와 S_u 는 계산점의 이산화계수와 생성항을 나타내며 U_{ip} 는 계산점에서 새로 계산될 속도를 의미한다. 본 계산에서는 2층 모델 (two layer model)을 사용하므로 위의 식에서 전단응력 τ_w 는 아래와 같다.

$$\tau_w = \frac{\mu}{\delta_n}, \quad y_p \leq 11.63 \quad (16)$$

$$\tau_w = \frac{\rho_p C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} \chi}{\ln(E y_p^+)}, \quad y_p \geq 11.63 \quad (17)$$

윗 식에서 벽면에서의 수직거리 δ_n , 난류에너지 k_p , Von-Karman 상수 χ 그리고 적분상수 E 를 사용하여 벽면으로부터 무차원 수직거리 y_p^+ 를 나타내면 다음과 같다.

$$y_p^+ = \frac{\rho_p C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} \delta_n}{\mu} \quad (18)$$

난류 에너지에 대한 경계 조건으로 벽면에서 $k=0$ 이며, 난류 에너지 소멸률에 대한 경계 조건은

벽면으로부터 첫 번째 계산점에 적용하며 다음과 같다.

$$\epsilon_P = \frac{C_M^{3/4} K_P^{3/2}}{\chi \delta_x} \quad (19)$$

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 2차원 슬롯으로부터 평판에 분사되는 제트 유동에 대한 유동 특성과 열전달 특성을 이해하고자 분사 비, 압력 비와 슬롯 입구의 형상(모서리지게한 경우와 곡률을 준 경우)의 변화에 따른 슬롯(Fig. 1에서 주유동 입구로부터 거리가 50 S이고 프리넘 입구로부터 거리가 10 S인 부분) 인접 영역의 속도 분포와 유출 계수를 수치 해석 방법을 이용하여 계산하였다. 또한 실제 터빈 블레이드의 홀 형상에서의 유동 현상을 이해하기 위해 경사진 1열의 분사 홀로부터 평판에 분사되는 제트 유동에 대해 유동 조건에 따른 속도 분포와 난류

강도를 계산하여 홀(Fig. 2에서 주유동 입구로부터 거리가 19 D이고 프리넘 입구로부터 거리가 6 D인 부분) 내부와 홀 인접 영역의 복잡한 3차원 유동 특성을 해석하였다.

본 연구에 사용된 유출 계수와 분사 비의 정의는 다음과 같다.

$$C_d = \frac{U_s}{[2(P_p - P_\infty)/\rho_s]^{1/2}} \quad (20)$$

여기서 C_d 는 유출 계수이며 슬롯을 통과할 때 유량 손실이 전혀 없는 이상적인 경우와 유량 손실이 있는 실제 경우와의 비로써 정의한다. U_s 와 ρ_s 는 슬롯의 평균 출구 속도와 밀도이고 P_p 와 P_∞ 는 프리넘과 주 유동 영역의 정체 압력을 나타낸다.

$$M = \frac{\rho_j U_{jet}}{\rho_\infty U_\infty} \quad (21)$$

여기서 M 은 분사 비이고 U_∞ 와 ρ_∞ 는 주유동의 속도와 밀도이며 U_{jet} 와 ρ_j 는 홀 출구의 평균 속도

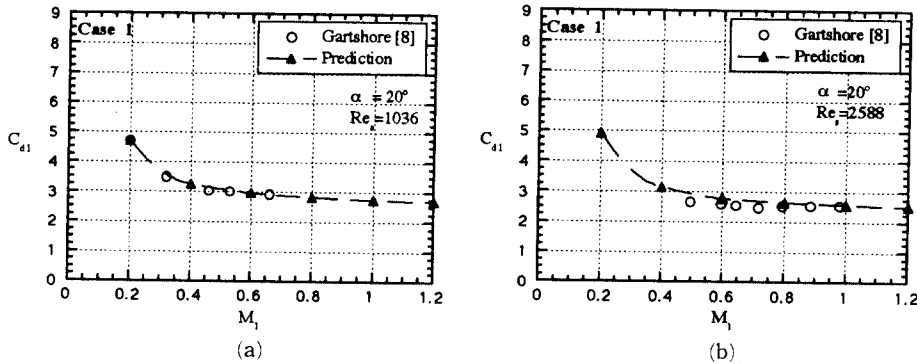


Fig. 6 Discharge coefficient compared with the experimental results at the injection angle $\alpha = 20^\circ$ with Reynolds number (a) $Re_s = 1036$ (b) $Re_s = 2588$ (Case 1)

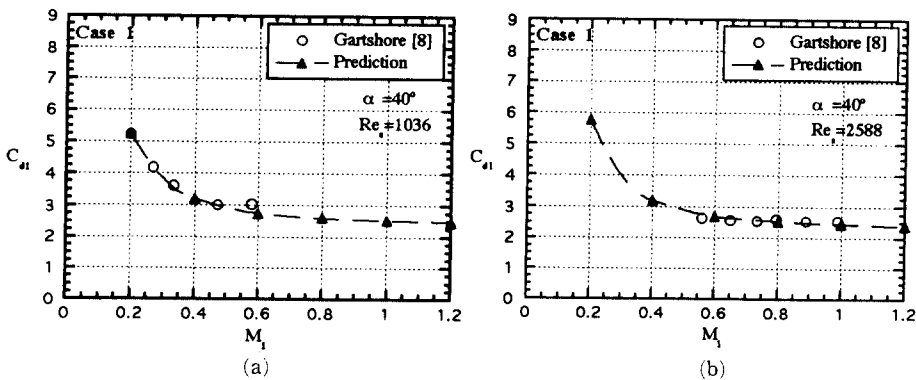


Fig. 7 Discharge coefficient compared with the experimental results at the injection angle $\alpha = 40^\circ$ with Reynolds number (a) $Re_s = 1036$ (b) $Re_s = 2588$ (Case 1)

와 밀도를 나타낸다.

4.1 기존 실험치와의 비교

본 연구에서는 2차원 해석 프로그램 결과의 타당성을 검증하기 위해 Fig. 4(a)와 같이 프리넵 영역을 포함한 수평 평판에 분사되는 제트 유동에 대하여 유동장을 해석하였으며 이 결과를 검증하기 위하여 Gartshore⁽⁶⁾가 실험한 결과와 비교 분석하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 Gartshore⁽⁶⁾ 등이 실험한 결과와 같은 조건하에서 비교하기 위하여 Fig. 1(a)의 형상에서 일정한 분사각(20°, 40°)과 레이놀즈수(1036, 2588)에 대해 분사비가 증가에 따라 변화되는 유출 계수를 계산한 결과이다. Fig. 6은 분사각이 20°인 경우이고 Fig. 7은 분사각이 40°인 경우를 나타낸다. 각 경우 모두 전 영역에서 실험치와 잘 일치하고 있어 본 연구에 사용된 프로그램의 타당성을 확인할 수 있었다. Fig. 6과 Fig. 7에서 보듯이 각 경우 모두 분사율 M이 대략 0.6에 도달할 때까지 유출 계수는 급격히 감소하는 경향을 보이다가 0.6 이상에서는 분사율이 증가함에 따라 약간씩 감소함을 알 수 있다. 그리고 분사각과 레이놀즈수가 증가함에 따라 유출 계수는 분사율이 낮은 영역(M=0.2~0.4)에서는 조금 증가함을 보이고 있고 높은 영역에서는 거의 비슷함을 보이고 있다.

4.2 유동 조건과 슬롯 형상에 따른 유출 계수의 변화

본 연구에서는 2차원 제트유동에서 프리넵 영역을 계산 영역에 포함시켜 프리넵 영역으로부터 슬롯 입구에 유입되는 유동 현상을 이해하고 보다 효과적인 냉각 방법을 얻기 위해 슬롯 형상(모서리지게한 경우, 곡률을 준 경우) 및 슬롯길이와 유동조

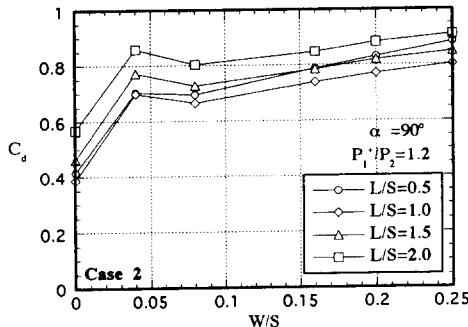


Fig. 8 Effect of slot length to width and chamfering ratio on discharge coefficient at the injection angle $\alpha=90^\circ$ and pressure ratio $P_1^+/P_2=1.2$ (Case 2)

건(분사비와 압력비)에 따른 유동 분포와 유출 계수를 계산하여 그 특성을 해석하였다.

Fig. 8은 분사각(α)이 90°이고 주유동과 분사 유동의 압력비(P_1^+/P_2)가 1.2이며 모서리진 각(θ)이 45°일 때 슬롯의 길이/폭(L/S)이 0.5, 1.0, 1.5와 2.0인 각각의 경우에 대해 모서리진 부분의 두께/슬롯 폭(W/S)이 0.00~0.25로 증가할 때 유출 계수(C_d)의 변화를 나타낸 그림이다. 압력비에 사용된 P_1^+ 는 프리넵 영역의 평균 정체 압력을 나타내며 P_2 는 주 유동 영역의 평균 정압력을 나타낸다. 유출 계수는 각각의 슬롯 길이/폭에 대해 모서리진 부분의 두께/슬롯 폭이 0.08인 경우를 제외하면 모서리진 부분의 두께/슬롯 폭이 증가함에 따라 증가함을 알 수 있고 또한 슬롯 길이/폭이 0.5인 경우를 제외하고는 슬롯 길이/폭이 증가함에 따라 유출 계수가 증가함을 알 수 있다. 이것은 슬롯 길이/폭이 각각 0.5와 2.0인 경우에 대해 모서리진 부분의 두께/슬롯 폭(W/S)이 0.00~0.25로 변화에 따른 속도 분포를 그린 Fig. 9과 Fig. 10을 비교함으로써 그 유동 특성을 이해할 수 있다. Fig. 10(a)의 경우에는 냉각 유체가 슬롯 입구로 유입되면서 예리한 슬롯 입구의 형상에 의해 박리 현상이 일어나며

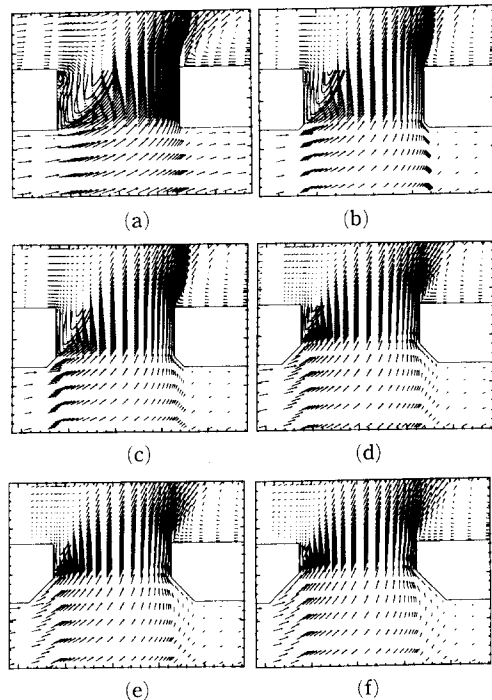


Fig. 9 Velocity distribution at the L/S=0.5 with chamfering ratio (a) W/S=0.00, (b) W/S=0.04, (c) W/S=0.08, (d) W/S=0.16, (Case 2)

슬롯에 유입되는 유동의 운동량에 의해 재부착된다. 이 경우에는 L/S가 충분히 커서 재부착되는 영역이 슬롯 길이보다 작아 재순환 영역으로 인한 압력 강하가 슬롯 출구에서 충분히 회복될 수 있다. 그리고 모서리진 부분의 두께를 증가시킴에 따라 재순환 영역이 줄어들게 되고 이로 인해 유출 계수는 조금씩 증가하게 된다. 하지만 Fig. 9(a)에서와 같이 L/S가 작은 경우에는 슬롯 길이가 짧아 재부착되기 전에 외부 영역으로 유입되기 때문에 이 영역의 압력 강하로 인해 주 유동의 유체가 상대적으로 압력이 낮은 이 영역으로 유입되는 유동 분포를 나타내고 있어 유출 계수가 L/S=2.0에 비해 현저히 떨어지게 된다. 그러나 모서리진 부분의 두께를 증가시킴에 따라 유동이 벽면을 따라 흘러가므로 유입되는 유체의 양이 현저히 줄어들어 유출 계수의 증가 폭이 L/S=2.0인 경우에 비해 훨씬 커짐을 알 수 있다. Fig. 11은 $\alpha=90^\circ$, $P_1^+/P_2=1.2$ 에서 L/S=0.5, 1.0, 1.5와 2.0인 각각의 경우에 대해 곡률 반경/슬롯 폭 (R/S)=0.00~0.25로 변할 때 C_d 의 변화를 나타낸 것이다. R/S가 0.08인 경우를 제외하면 R/S가 증가함에 따라 C_d 값이 증가함을 알 수 있고 또한 L/S=0.5인 경우를 제

외하고는 L/S가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있어 모서리진 경우의 결과와 비슷한 경향을 나타내고 있다. 이것은 Hay⁽⁶⁾ 등의 실험결과와 같은 경향을 보이고 있으며 유출 계수의 증가는 슬롯을 통과할 때 유량 손실이 감소함을 의미한다. Fig. 12는 $\alpha=90^\circ$, $P_1^+/P_2=1.2$, $\theta=45^\circ$, L/S=0.5, 1.0, 1.5와 2.0인 각각의 경우에 대해 R/S, W/S가 각각 0.00~0.25로 변할 때 C_d 의 변화를 나타낸 그림이다. 전범위에서 곡률을 준 경우가 모서리지게 한 경우에 비해 높은 C_d 값을 예측하고 있음을 알 수 있고 C_d 값의 변화폭이 곡률을 준 경우가 모서리지게 한 경우보다 약간 큼을 알 수 있다.

4.3 냉각 제트 출구 영역에서의 유동 현상

대부분의 막 냉각이나 제트가 분사되는 유동에 관한 실험이 실제 현상과는 달리 긴 튜브로부터 분사되는 경우에 대해 이루어져 왔다. 하지만 실제 제트가 분사되는 유동은 홀 길이/직경 비가 작은

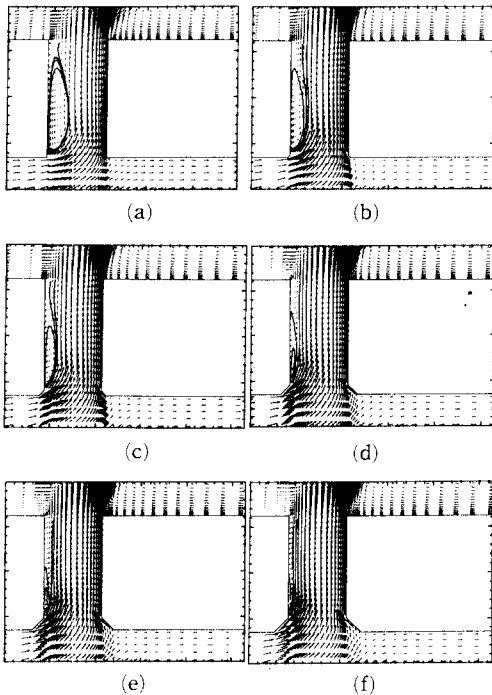


Fig. 10 Velocity distribution at the L/S=2.0 with chamfering ratio (a) W/S=0.00, (b) W/S=0.04, (c) W/S=0.08, (d) W/S=0.16 (Case 2)

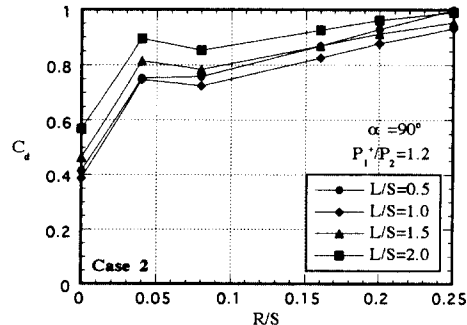


Fig. 11 Effect of slot length to width and radiusing ratio on discharge coefficient at the injection angle $\alpha=90^\circ$ and pressure ratio $P_1^+/P_2=1.2$ (Case 2)

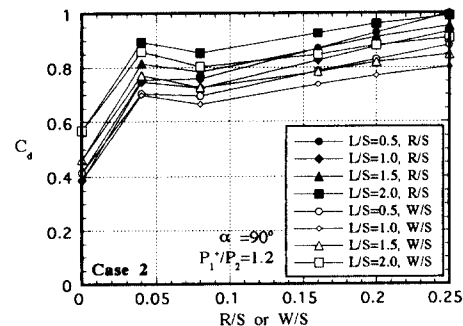


Fig. 12 Effect of slot length to width, chamfering and radiusing ratio on discharge coefficient at the injection angle $\alpha=90^\circ$ and pressure ratio $P_1^+/P_2=1.2$ (Case 2)

경우가 대부분이며 이 경우에 홀 출구의 유동 특성은 홀길이/직경 비가 큰 경우와는 큰 차이를 보이고 있다. 제트가 분사되는 유동은 직교류의 상대적 크기와 냉각 제트의 분사 비에 의해 좌우되며 이는 제트 출구에서의 속도 분포에 크게 영향을 미칠 뿐만 아니라 제트 출구 인접 영역의 유동 변화에 있어 중요한 변수가 된다.

Fig. 13(a)와 (b)는 $L/S=1.0$ 인 경우에 분사비가 각각 0.5, 4.0일 때 슬롯내에서의 속도 분포를 나타낸 그림이다. 분사 비가 0.5인 경우에는 예리한 슬롯을 지나면서 유동이 중심선으로 집중되는 현상이 보이지만 슬롯 입구에서 재순환 영역이 나타나지 않음을 알 수 있다. 하지만 분사비가 4.0인 경우에는 큰 운동량을 가진 유동에 의해 슬롯 입구의 벽면에서 재순환 영역이 나타남을 볼 수 있다. Fig. 14는 $L/S=1.0$ 일 때 프리넘 영역을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우에 대해 각각 균일한 속도 분포를 주었을 때 분사 비의 변화에 따른 제트 출구에서의 수직 방향 속도 성분을 그린 것이다. 프리넘 영역을 포함할 때 분사 비가 0.5인 경우에는 상대적으로 운동량이 큰 직교류에 의해 우측 상향의 선형적 속도 분포를 보이고 있으며 분사 비가 4

인 경우에는 분사 비 0.5인 경우와는 달리 상대적으로 운동량이 큰 제트 유동에 의해 마치 직교류가 없는 채널 유동처럼 중심선에 대칭이고 중심선 부근에서 가장 높은 속도 분포를 나타내고 있으며 가장자리로 갈수록 급격히 속도가 작아지는 유동 형태를 보이고 있다. 이것은 냉각 유체가 프리넘 영역으로부터 슬롯으로 유입될 때 슬롯 입구의 예리한 모서리로 인해 중심선으로 집중되는 현상을 보이게 되고 이 속도 분포가 작은 길이/슬롯 폭으로 인해 완전히 발달되지 못했기 때문이다. 슬롯 입구에서 균일한 속도 분포를 주었을 때 분사 비가 0.5인 경우에는 프리넘 영역을 포함한 결과에서와 같이 직교류에 의해 슬롯 입구에서의 속도 분포에 관계없이 비슷한 형태를 나타내고 있지만 분사 비가 4인 경우에는 분사 비가 0.5인 경우와는 달리 슬롯 출구의 속도 분포에 큰 차이가 있음을 보여주고 있다. 이것은 분사 비가 0.5인 Fig. 13에서 처럼 슬롯 출구의 속도 분포가 직교류에 의해 크게 영향을 받기 때문에 슬롯 입구의 속도 분포에 크게 영향을 받지 않지만 분사 비가 4인 경우에는 직교류에 비해 냉각 제트의 유동이 슬롯 출구의 속도 분포에 큰 영향을 주기 때문에 슬롯 입구의 속도 분포가 슬롯 길이/폭이 작은 경우에는 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. Fig. 14는 $L/S=2.0$ 인 경우에 프리넘 영역을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우에 대해 각각 균일한 속도 분포를 주었을 때 분사 비가 0.5, 4.0로 증가함에 따라 제트 출구에서 수직 방향의 속도 성분의 변화를 나타낸 그림이다. 분사 비가 0.5인 경우에는 Fig. 14의 결과와 유사함을 알 수 있으나 분사 비가 4인 경우에는 분사 비가 0.5인 Fig. 14의 경우보다 훨씬 더 발달된 유동 형태를 보이고 있다. Fig. 16은 슬롯 길이/폭이 큰 경우인 $L/S=6$ 일 때 프리넘 영역을 포함한 경

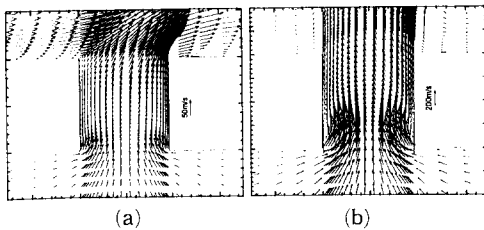


Fig. 13 Velocity distribution at the $L/S=1.0$ for different blowing ratios (a) $M=0.5$ (b) $M=4.0$ (Case 1)

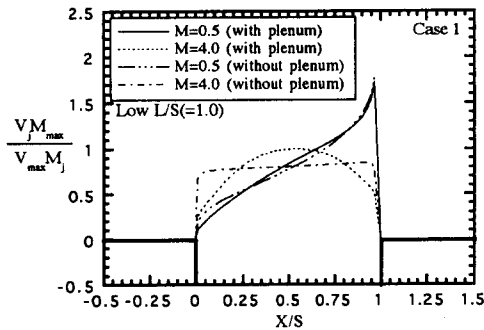


Fig. 14 Normal velocity profiles near jet exit for $L/S=1.0$ (Case 1)

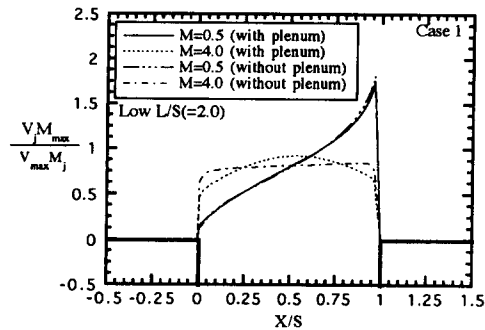


Fig. 15 Normal velocity profiles near jet exit for $L/S=2.0$ (Case 1)

우와 포함하지 않은 경우에 대해 각각 균일한 속도 분포를 주었을 때 슬롯 출구에 수직인 속도 성분을 나타내고 있다. 분사 비가 각각 0.5와 1.0인 Fig. 14와 Fig. 15의 경우와는 달리 분사 비가 4인 경우에도 프리넘 영역을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우에 슬롯 출구 속도 분포가 거의 유사함을 나타내고 있다. 이것은 슬롯 입구의 속도 분포의 차이가 슬롯을 지나면서 완전 발달되기 때문에 슬롯 입구의 유동이 슬롯 출구 영역에 거의 영향을 못 미치기 때문이다.

4.4 3차원 유동 해석

본 연구에서는 실제 터빈에서 발생하는 분사 홀 인접 영역의 복잡한 3차원 유동 현상을 해석하기 위하여 프리넘 영역, 홀과 주 유동 영역을 계산 영역에 포함시켰으며 홀 길이/직경비(L/D)가 3.5이고 분사각이 35°인 경우에 대해 유동 조건에 따른 유동장과 온도장을 계산하였다. Fig. 17~Fig. 22는 분사 비가 0.5이며 밀도비가 2일 때 홀 내부와 홀 인접 영역의 속도 분포, 난류 강도와 온도 분포를

계산한 결과이다. Fig. 17은 홀의 대칭면(Y/D=0)에서 X-Z 평면상의 속도 분포를 나타낸 것이다. 분사 홀 중심선의 우측 면에서는 낮은 운동량을 나타내는 영역을 볼 수 있으며 좌측에는 제팅 효과가 나타남을 알 수 있다. 이것은 분사 제트의 주 유동 방향에 대해 수직으로 절단된 면(Fig. 17의 A-A 단면)에서의 유동 분포를 나타내는 Fig. 18과 같이 냉각 유체는 프리넘 영역에서 작은 홀 입구로 유입되면서 급격한 방향의 전환과 경사진 홀 입구의 형상에 의해 상대적으로 낮은 압력을 나타내는 홀 중심선의 우측 영역으로 이동함에 따라 홀안에서의 유체 유동은 한 쌍의 와동을 형성하게 되고 홀의 우측 벽면에서는 이 와동에 의하여 측면 방향(Y방향)의 운동량이 커지게 되고 X와 Z방향의 운동량을 감소시키게 되어 낮은 운동량을 나타내는 영역을 형성하게 된다. 이에 반해 홀의 좌측 영역은 이 와동에 의해 측면 방향의 운동량은 감소되고 X와 Z방향의 운동량은 증가되어 제팅 효과가 나타남을 알 수 있다. 이 결과는 Leylek⁽¹²⁾ 등이 상용 코드 PHOENICS를 사용하여 수치 해석한 결과와 같은 유동 형태를 보이고 있다. Fig. 19는 홀의 대칭면에서 X-Z 평면상의 난류 강도 분포를 나타낸 것인

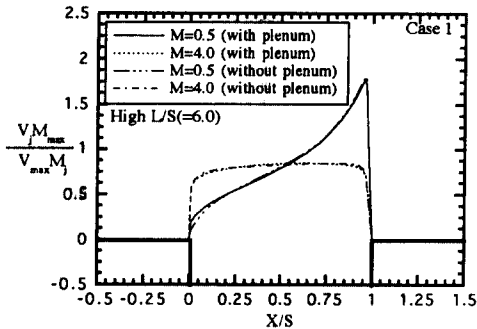


Fig. 16 Normal velocity profiles near jet exit for L/S =6.0 (Case 1)

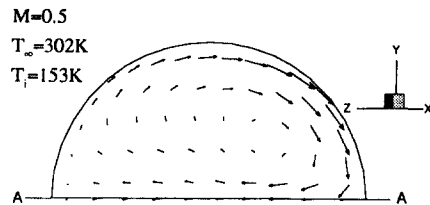


Fig. 18 Velocity distributions within the film hole on a plane perpendicular to the main flow direction (A-A section area of Fig. 16)

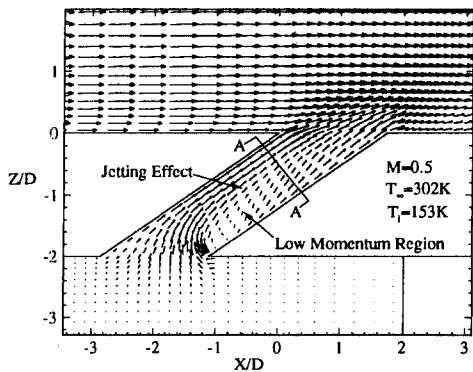


Fig. 17 Velocity distributions within film hole on the centerline plane

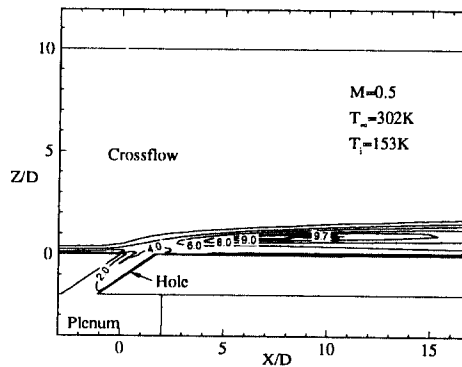


Fig. 19 Turbulent intensity contours on the centerline plane

데 그림에서 보는 바와 같이 주 유동 영역인 $X/D=7$ 인 지점에서 최대 난류 강도값을 나타내고 있음을 볼 수 있어 주 유동 영역에서 제트 유동과의 혼합으로 인한 난류 생성항이 홀 인접 영역의 유동을 지배하는 중요한 생성항이 됨을 알 수 있다. 이 결과는 분사 비가 작은 경우($M=0.5$)에 Leylek⁽¹²⁾ 등이 수치 해석한 결과와 같은 경향을 보이고 있다. Fig. 20은 주 유동 방향으로 진행됨에 따라 변해가는 Y-Z 평면상의 속도 분포를 나타내고 있다. 홀 속에서 형성된 한 쌍의 와동은 직교류에 의해

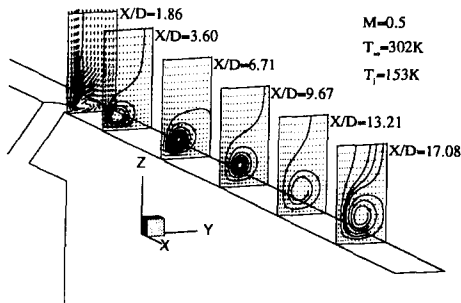


Fig. 20 Velocity distributions on Y-Z plane along the axial direction

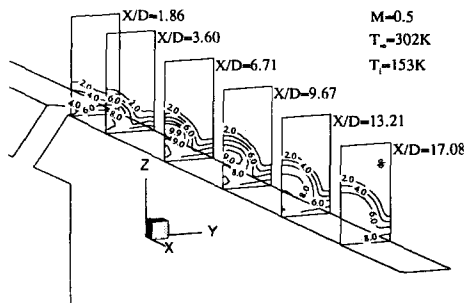


Fig. 21 Turbulence intensity contours on Y-Z plane along the axial direction

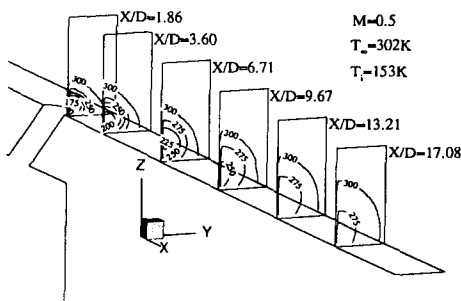


Fig. 22 Isothermal contours on Y-Z plane along the axial direction

주 유동 방향으로 휘어지게 되고 직교류는 홀 근처에서 제트유동에 의해 측면 방향으로 조금 이동하다가 주 유동 방향으로 진행됨에 따라 상대적으로 압력이 낮은 벽면 근처로 유입됨에 따라 한 쌍의 콩팥 모양의 와동을 형성하게 됨을 볼 수 있고 계속 진행됨에 따라 주위 유동과의 혼합으로 인해 서서히 확산됨을 볼 수 있다. Fig. 21은 주 유동 방향으로 진행됨에 따라 변해가는 Y-Z 평면상의 난류 강도 분포를 나타내고 있다. 주 유동에 유입된 제트 유동은 주 유동의 유입에 따라 속도 차이에 의한 전단층이 생기게 되고 이 유동의 불안정성으로 인해 난류 강도가 증가하게 되며 $X/D=6.71$ 인 영역에서 주 유동과의 혼합 정도가 최대가 되어 유동의 불안정성의 급격한 증가로 난류 강도는 최대값을 나타내게 된다. 계속 진행됨에 따라 주위 유동으로 확산되어 난류 강도는 조금씩 감소함을 알 수 있다. Fig. 22는 주 유동 방향으로 진행됨에 따라 변해가는 Y-Z 평면상의 온도분포를 나타내고 있다. 주유동방향으로 진행함에 따라 주위 유동의 유입으로 인해 대칭면의 온도는 급격히 올라가게 되고 계속 진행함에 따라 주위 유동과의 혼합으로 인해 벽면 온도는 조금씩 상승됨을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 2차원 슬롯으로 부터 평판에 분사되는 제트 유동에 대해 분사 홀의 형상(chamfering, radiusing), 분사 각도와 유동 조건(분사비, 압력비)의 변화에 따른 유동 특성과 유출 계수의 변화를 계산하고 또한 3차원 홀로부터 평판에 분사되는 제트 유동에 대한 유동 특성을 수치 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유출 계수는 모서리진 부분의 두께와 곡률 반경의 증가에 따라 증가함을 알 수 있고 곡률을 지게한 경우가 모서리지게한 경우보다 큰 값을 예측하여 유량 손실이 줄이는데 더 좋은 효과를 나타냄을 알 수 있다.

(2) 유출 계수는 슬롯 길이/폭 비의 증가에 따라 증가함을 보였다. 하지만 $L/S=0.5$ 에서는 $L/S=1.0, 1.5, 2.0$ 에서와는 달리 주 유동 유체의 유입으로 인해 예리한 슬롯에서는 4가지 경우 중 가장 작은 유출 계수값을 가지게되나 곡률 반경이나 모서리진 부분의 두께를 증가시키기에 따라 다른 3가지 경우에 비해 증가 폭이 훨씬 커져 $L/S=1.0, 1.5$ 경우보다 커지게 됨을 알 수 있다. 따라서 길이 대 직경 비가 0.5인 경우에 곡률을 지게 하거나 모서

리지게 하는 것이 유량 손실을 줄이는데 가장 효과적임을 알 수 있다.

(3) 슬롯 길이/폭 비가 작고 분사 비가 작은 경우에는 직교류의 영향에 의해 슬롯 입구의 속도 분포에 관계없이 우측 상향의 선형적 유동 형태를 나타내지만 분사 비가 큰 경우에는 제트 유동의 영향이 커져 슬롯 입구의 속도 분포가 출구의 유동에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 하지만 슬롯 길이/폭 비가 큰 경우에는 슬롯 출구의 속도 분포는 분사 비에 무관함을 알 수 있다. 따라서 슬롯 길이/폭이 작고 분사 비가 큰 경우에는 슬롯 입구의 속도를 균일한 속도로 주는 것은 타당하지 않으며 프리넘 영역을 포함해서 유동해석을 하는 것이 보다 실제 현상에 근접한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

(4) 실제 터빈 블레이드의 홀은 제작상의 난점과 열응력의 집중등과 같은 구조적 문제로 인하여 홀을 일정한 간격으로 배열함에 따라 복잡한 3차원 유동을 형성하게 되며 이로 인해 프리넘 영역, 홀과 주 유동 영역이 모두 유동 현상과 직접적으로 관련이 있음을 확인 할 수 있었다. 따라서 이 영역을 모두 계산 영역에 포함시키는 것이 타당하다.

(5) 1열의 분사 홀에서의 유동해석 결과, 홀 속에서는 한 쌍의 와동에 의한 제팅 효과와 낮은 운동량 영역이 존재함을 알 수 있고 홀 인접 영역에서는 주 유동과의 혼합으로 인하여 한 쌍의 와동 현상이 일어나는 복잡한 3차원 거동을 보이고 있어 이에 대한 3차원적 연구가 이루어져야함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 터보 동력 기계 연구 센터(TPMRC)의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Deckker, B. E. L. and Chang, U. F., 1965/1966, "An Investigation of Steady Compressible Flow through Thick Orifices," *Proc. IMechE*, Vol. 180, part 3J.
- (2) Benmansour, S., 1981, "Discharge Coefficients of Film Cooling Holes," Ph. D. Thesis, University of Nottingham, United Kingdom.
- (3) Hay, N., Lampard, D. and Benmansour, S., 1983, "Effects of Crossflows on the Discharge Coefficient of Film Cooling Holes," *ASME J. of Engineering for Power*, Vol. 105, pp. 243~248.
- (4) Khaldi, A., 1987, "Discharge Coefficient of Film Cooling Holes with Rounded Entries or Exits," Ph. D. Thesis, University of Nottingham, United Kingdom.
- (5) Hay, N., Khaldi, A. and Lampard, D., 1987, "Effects of Crossflows on the Discharge Coefficient of Film Cooling Holes with Rounded Entries and Exits," *Proc. 2nd ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*, Honolulu, HI, Vol. 3, pp. 369~374.
- (6) Hay, N. and Spencer, A., 1992, "Discharge Coefficients of Cooling Holes with Radiused and Camfered Inlets," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 114, pp. 701~706.
- (7) Hay, N., Henshall, S. E. and Manning, A., "Discharge Coefficients of Holes Angled to the Flow Direction," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 116, pp. 92~96.
- (8) Gartshore, I., Salcudean, M. Riahi, A. and Djilali, N., 1991, "Measured and Calculated Values of Discharge Coefficients from Flush Inclined Holes: Application to the Film Cooling of Turbine Blades," *C. A. S. I. J.*, Vol. 37, pp. 9~15.
- (9) Rhie, C. M., 1981, "A Numerical Study of the Flow past an Isolated Airfoil with Separation," Ph. D. Thesis, Dept. of Mech., University of Illinois at Urbana-Champagn.
- (10) Crabb, D., Durao, D. F. G. and Whitelaw, J. H., 1981, "A Round Jet Normal to a Crossflow," *ASME J. of Fluids Engineering*, Vol. 103, pp. 142~152.
- (11) Sinha, A. K., Bogard, D. G. and Crawford, M. E., 1991, "Film Cooling Effectiveness Downstream of a Single Row of Holes with Variable Density Ratio," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 113, pp. 442~449.
- (12) Leylek, J. H. and Zerkle, R. D., 1994, "Discrete-Jet Film Cooling: A Comparison of Computational Results with Experiments," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 116, pp. 358~368.