

## Film-Cooling Hole의 유출계수에 관한 수치해석적 연구

김재형\*, 김희동\*\*, 박경암\*\*\*

### A Computational Study for the Discharge Coefficient of a Film-Cooling Hole

Jae-Hyung Kim\*, Heuy-Dong Kim\*\* and Kyung-Am Park\*\*\*

#### ABSTRACT

Computational study using the 2-dimensional, compressible, Navier-Stokes equations is performed to predict the discharge coefficient of air flow through a film-cooling hole. In order to investigate the effect of internal/external flows on discharge coefficient, the present computational results which are obtained for three flow cases, only external flow, only internal flow, and no flow, are compared with experimental ones. It is found that the computational results predict the discharge coefficient of the film-cooling hole in a reasonable accuracy and the external crossflow reduces the discharge coefficient, while the internal crossflow increases the discharge coefficient in a range of momentum flux ratio  $I_{c-jet} > 1$  due to the total pressure loss and boundary layer effect.

#### 초 록

본 연구에서는 2차원 압축성 Navier-Stokes 방정식을 사용하여 30° 경사진 터빈익의 냉각구를 통한 유출계수를 예측하였다. 내/외부 유동이 유출계수에 미치는 영향을 알아보기 위하여 외부유동만 존재하는 경우, 내부유동만 존재하는 경우 그리고 내/외부 유동이 없는 3가지 경우에 대하여 수치해석을 수행하였으며, 실험결과와 비교하였다. 본 연구의 수치해석결과는 유출계수를 잘 예측하였으며, 외부유동은 유출계수를 감소시키고, 내부유동은 냉각구내에서의 전압손실과 경계층의 영향을 감소시켜 특정 구간에서 유출계수를 증가시킨다는 것을 알았다.

Keyword : Film-cooling(막냉각), Discharge coefficient(유출계수), Compressible flow(압축성 유동), Momentum flux ratio(운동량 유속비)

#### 1. 서 론

†2002년 12월 30일 접수~2003년 3월 3일 심사완료

\* 학생회원, 안동대학교 기계공학과 대학원

\*\* 정회원, 안동대학교 기계공학부

\*\*\* 비회원, 한국표준과학연구원 유체유동그룹

연락처, E-mail : kimhd@andong.ac.kr

경북 안동시 송천동 388 안동대학교 기계공학과

최근 산업의 발달과 더불어 각종 산업 기기는 고출력·고압화되는 추세이다. 가스터빈의 경우 터빈 입구의 온도가 높을수록 출력이 증가하게 되므로, 고온의 연소가스 사용이 요구되고 있으나, 일반적으로 터빈익에 작용하는 열적 부하로

인하여 터빈 성능 및 수명을 제한하는 중요한 요인으로 되고 있다.

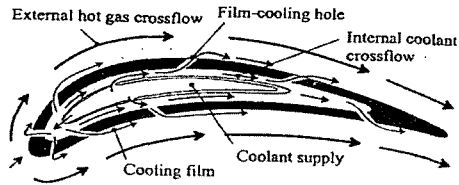


Fig. 1 Flow configuration inside and around a film-cooled nozzle guide vane

종래 터빈에 작용하는 열적 부하를 경감하기 위한 방법으로 주로 convection cooling, impingement cooling, film cooling, transpiration cooling 등의 네 가지 냉각법이 채택되어 왔다<sup>(1)</sup>.

Fig. 1에 개략적으로 나타낸 바와 같이 네 가지 방법 중 film cooling의 경우, 냉각기체가 터빈 벽에 설치된 구멍을 통해서 방출되어 고온의 가스에 접해 있는 블레이드의 벽면에 저온의 얇은 막을 형성하게 됨으로서 고온 가스와의 접촉을 방해하는 동시에 블레이드 내부에서는 convection cooling이 이루어지게 되므로, 터빈의 냉각 효율이 높은 것으로 알려져 있다<sup>(2)</sup>. 그러나 이 방법은 터빈익에 형성된 저온의 기체막이 고온 고속의 연소가스로 인하여 블레이드 벽으로부터 확산 분리되어, 그 냉각기능을 상실하므로 국부적인 냉각밖에 하지 못하는 단점이 있다. 따라서 많은 표면적을 이 방법으로 냉각시키려면 터빈의 표면에 다수의 구멍을 설치해서 저온의 기체막을 지속적으로 형성해 주어야 한다. 이때 film cooling에 큰 영향을 미치는 인자로는 냉각구(cooling hole)를 통과하는 냉각기체의 유출량으로, 터빈의 설계시에 고려되어야 할 필수적인 요소이다. 이러한 냉각기체의 유출계수(discharge coefficient)는 냉각구의 기하학적 형상과 유동의 기체 역학적 조건에 의존하게 되지만 이에 대한 연구사례는 많지 않다.

종래 터빈익의 내/외부 유동의 압력비등과 같은 기체 역학적 조건이 유출계수에 미치는 영향

이 조사된 바 있으며<sup>(3,4)</sup>, 벽면에 설치된 구멍의 기하학적 형상이 유출계수에 미치는 영향에 대한 연구가 수행되어, 냉각구의 형상<sup>(5,6,7)</sup>에 대한 유출계수가 얻어진 바 있다. 그러나 이들 연구는 모두 실험에서 얻은 압력값을 이용하여 유출계수를 산출하였으며, 광범위한 유동조건에 대한 유출계수의 자료는 아직까지 부족한 실정에 있다.

본 연구에서는 30° 경사진 형상의 냉각구(cooling hole)를 통하는 기체유동의 유출계수를 조사하기 위하여 수치계산법을 적용하여 이전의 실험결과<sup>(2)</sup>와 비교하였다. 또 유출계수에 영향을 미치는 기체 역학적 변수들을 상세하게 고찰하였다.

## 2. 수치해석법 및 이론해석

### 2.1 수치해석법

본 연구에서는 Film-cooling hole을 통한 냉각기체의 유동을 조사하기 위하여 상용코드인 Fluent 5코드를 사용하여 수치해석을 수행하였다.

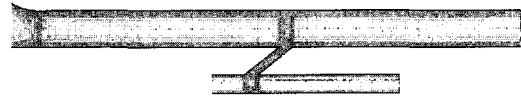


Fig. 2 Typical Computational grid system

수치해석에서는 2차원 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용하였으며, 공간항에 대해서는 풍상차분법, 시간항의 적분은 4단계 Runge-Kutta법을 적용하였다.

Fig. 2는 본 연구에 적용된 정렬 격자계이다. 그림에서 상류 마하수  $M_p$ , 온도  $T_p$  및 압력  $p_p$ 를 가지는 유동은 초음속 노즐을 통하여 가속되며, film-cooling hole부분에서 마하수  $M_p$ 는 0.0~1.2까지 범위에서 변화하였다. 본 연구에서는 이러한 유동을 터빈익의 외부 유동으로 가정하였다. 또 상류 마하수  $M_c$  및 압력  $p_c$ 를 가지는 유동은 일정 단면적을 통하는 유동으로 하였으며, 본 연구에서는 터빈익의 내부유동으로 가정하였다.

본 연구에 적용된 cooling hole의 직경은

$D=10mm$ 이며, 경사각은  $30^\circ$ 이다. 외부유동부의 길이는  $76D$ , 높이는  $4.1D$ 이며, 내부유동부의 길이는  $28D$ , 높이는  $2D$ 로 설정하였다. 상류경계에는 유동의 마하수와 압력 및 온도 등의 상태량을 가정하였으며, 하류의 경계에는 pressure outlet, 벽면에는 단열 no-slip 벽 조건을 적용하였다. 또 난류 유동장을 해석하기 위하여 표준  $k-\epsilon$  난류 모델을 적용하였다. 수치계산에서는 격자점에 대한 예측결과의 의존성을 조사하였으며, 대략 30,000개의 격자점에 대해서 최적의 수치해가 얻어짐을 확인하였다.

표 1에는 본 연구에 적용된 수치해석의 유동조건을 나타내었다. 하첨자  $p$ 는 외부유동,  $c$ 는 내부유동을 의미하며,  $t$ 는 전상태(total condition)을 의미한다. 위에서 적용한 수치계산의 조건은 실험결과와의 비교를 위해서 문헌(2)를 참고 하였다.

표 1 Flow conditions for computational analysis

Condition	Value
Internal Pressure $p_{tc}$ , bar	<2
Internal temperature $T_{tc}$ , K	290
Pressure ratio $p_c / p_p$	1.0, ~ 2.25
Temperature ratio $T_{tc} / T_p$	1
Internal Mach number $M_c$	0.0, ~ 0.4
External Mach number $M_p$	0.0, ~ 1.2
Internal turbulence intensity $Tu_c$ , %	1.0
External turbulence intensity $Tu_p$ , %	<1.5

## 2.2 이론 해석

본 연구에서는 film-cooling hole을 통하는 기체 유동의 유출계수를 정량화하기 위하여 식(1)과 같이 유출계수  $C_D$  (Discharge coefficient)를 정의하였다. 일반적으로 기체유동의 유출계수  $C_D$ 는 1차원 등엔트로피 관계식에 의해 얻어지는 이론유량과 실제유량과의 비로 나타내어진다.

$$C_D = \dot{m} \left/ \left[ p_c \left( \frac{p_p}{p_c} \right)^{(k+1)/2k} \left( \frac{\pi}{4} D^2 \right) \times \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT_{tc}} \left[ \left( \frac{p_c}{p_p} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right]} \right] \right. \quad (1)$$

여기에서  $p_{tc}$ 는 내부유동의 전압,  $p_p$ 는 외부유동의 정압,  $T_c$ 는 내부유동의 전온도 그리고,

$k, R, D$ 는 각각 기체의 비열비, 기체상수, 냉각구의 직경을 의미한다. 또  $\dot{m}$ 는 냉각구를 지나는 질량 유량을 의미한다.

한편 냉각구를 통해 방출되는 냉각기체의 유출량을 운동량 유속(momentum flux)의 관계식으로 나타내면, 냉각구 출구에서 운동량 유속비(momentum flux ratio)는,

$$I_{p-jet} = \frac{(\rho u^2)_{ext}}{(\rho u^2)_p} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 여기에서  $(\rho u^2)_{ext}$ 는 냉각구 출구 위치에서 외부유동의 운동량 유속이며,  $(\rho u^2)_p$ 는 냉각구를 통과하는 유동의 운동량 유속이다.

위의 식(2)는 식(3)과 같이 압력과 마하수들의 함수로 나타낼 수 있다.

$$I_{p-jet} = \frac{(kpM^2)_{ext}}{(kpM^2)_p} \quad (3)$$

여기에서  $M_{ext}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$M_{ext} = \frac{\dot{m}}{(\pi/4)D_{ext}^2} \sqrt{\frac{RT_{ext}}{k}} \quad (4)$$

여기에서  $p_{ext}$ 는 냉각구 출구위치의 정압을 의미한다. 또 cooling hole입구부분에서의 운동량 유속 비는,

$$I_{c-jet} = \frac{(\rho u^2)_{int}}{(\rho u^2)_c} \quad (5)$$

로 정의되며,  $(\rho u^2)_{int}$ 는 냉각구 입구부분을 통과하는 내부유동의 운동량 유속,  $(\rho u^2)_c$ 는 냉각구 입구단면의 운동량 유속이다.

위의 식 (5)는

$$I_{c-jet} = \frac{(kpM^2)_{int}}{(kpM^2)_c} \quad (6)$$

로 주어질 수 있다. 여기서  $M_{int}$ 는 식 (7)과 같이 나타내었다.

$$M_{int} = \frac{\dot{m}}{(\pi/4)D_{int}^2} \sqrt{\frac{RT_{int}}{k}} \quad (7)$$

여기에서  $p_{int}$ 는 냉각구 입구위치에서의 정압을

의미한다.

본 연구에서는 외부유동이 없는 경우 ( $M_p = 0.0$ )와 내부 유동이 없는 경우( $M_c = 0.0$ )에는 운동량 유속비가 마하수의 관계로 표현되어 질 수 없으므로, 식 (8), (9)로 각각 나타내었다.

$$I_{p-jet} = \frac{(bh)_p}{(\pi/4)D^2} \quad (8)$$

$$I_{c-jet} = \frac{(bh)_c}{(\pi/4)D^2} \quad (9)$$

여기에서,  $b$ 와  $h$ 는 문헌(2)에서 적용된 덕트의 폭과 높이이다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 3는  $p_{tc}/p_p = 1.4$ 인 경우에 냉각구의 중심선에서의 전압분포를 나타낸다. 그림의 종축의  $\chi_h/D$ 는 냉각구 입구에서 출구까지의 거리를

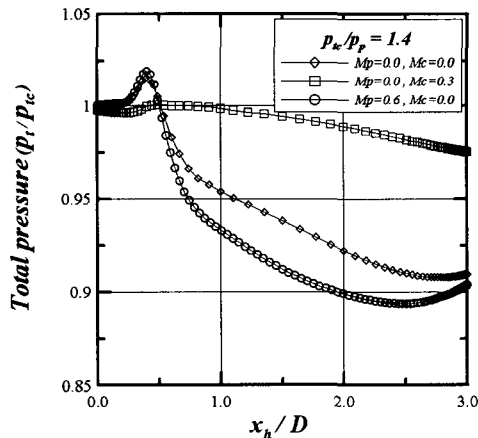


Fig. 3 Total pressure distribution along the centerline of cooling hole

냉각구의 직경으로 무차원한 값으로  $\chi_h/D = 0.0$ 은 냉각구 입구,  $\chi_h/D = 3.0$ 은 냉각구 출구를 나타낸다. 그림에서  $\diamond$ ,  $\circ$ 로 표시된  $M_c = 0.0, M_p = 0.0$ 와  $M_c = 0.0, M_p = 0.6$ 의 두 경우를 살펴보면, 냉각구 입구에서 약간 하류 부분까지는 동일한 전압분포를 나타내지만,  $\chi_h/D$ 가 증가함에 따라  $M_p = 0.6$ 인 경우에 전압

감소가 더 크게 나타난다. 그러나  $M_c = 0.3, M_p = 0.0$ 의 경우에는 전압의 감소가 다른 두 경우에 비해 상당히 완만하게 나타난다. 이것은 내부 유동이 없는 두 경우는 냉각구 입구 쪽에서 박리 영역이 크게 발생하여 와류에 의한 전압손실이 크게 발생하기 때문이다. 즉 내부유동과 외부유동은 film-cooling hole의 유출계수에 서로 다른 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 또 유출계수가 전압의 손실과 직접적인 관계가 있다는 것을 고려해 볼 때, 유출계수를 증가시키기 위해서는 내부유동이 필요함을 알 수 있다.

Fig. 4는  $p_{tc}/p_p = 1.8$ 인 경우에 등마하선도와 속도벡터를 나타낸 그림이다. Fig. 3의 전압분포에서와 같이 내부유동이 없는 (a), (c)의 두 경우는 등마하선도에서 관찰되는 바와 같이 냉각구 약간하류부분에서 최대 마하수 분포가 발생하는 유사한 경향을 보이지만, (b)의 경우는 냉각구 내부에서는 거의 동일한 마하수 분포를 나타낸다. 그리고 속도벡터에서는 (b)의 경우가 이론유량의 산출시 사용되어지는 1차원 유동에 가장 근접한 형태를 나타내고 있다. 내부유동이 없는 경우는 냉각구 내에서의 경계층이 입구부분에 큰 박리 영역이 형성되어 내부유동이 있는 경우보다 큰 비중을 차지한다. 경계층이 증가하게 되면 유출계수는 감소<sup>(8)</sup>하기 때문에 (a), (c)의 경우가 경계층에 의한 전압의 손실이 클 뿐만 아니라 유출계수는 감소할 것으로 예상된다.

Fig. 5에는 외부유동이 유출계수 변화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 내부유동이 없는  $M_c = 0.0$ 인 경우, 압력비에 따른 유출계수의 변화를 나타내었다. 기호  $\blacksquare, \blacklozenge$  및  $\bullet$ 는 문헌(2)의 실험값을 나타내며, 3개의 선들은 수치해석결과를 나타낸다.  $M_p = 0.0, 0.6, 1.2$ 의 세 경우모두 압력비가 증가함에 따라 유출계수값은 증가한다. 또  $M_p$ 가 증가함에 따라서 동일한 압력비에 대한 유출계수값은 낮아지며,  $M_p = 0.0$ 인 경우에는 압력비에 따른 유출계수의 변화폭이 크지 않다. 한편  $M_p = 0.0$ 인 경우의 유출계수값이 외부유동이 존재하는 경우에 비해 상대적으로 크며 실험

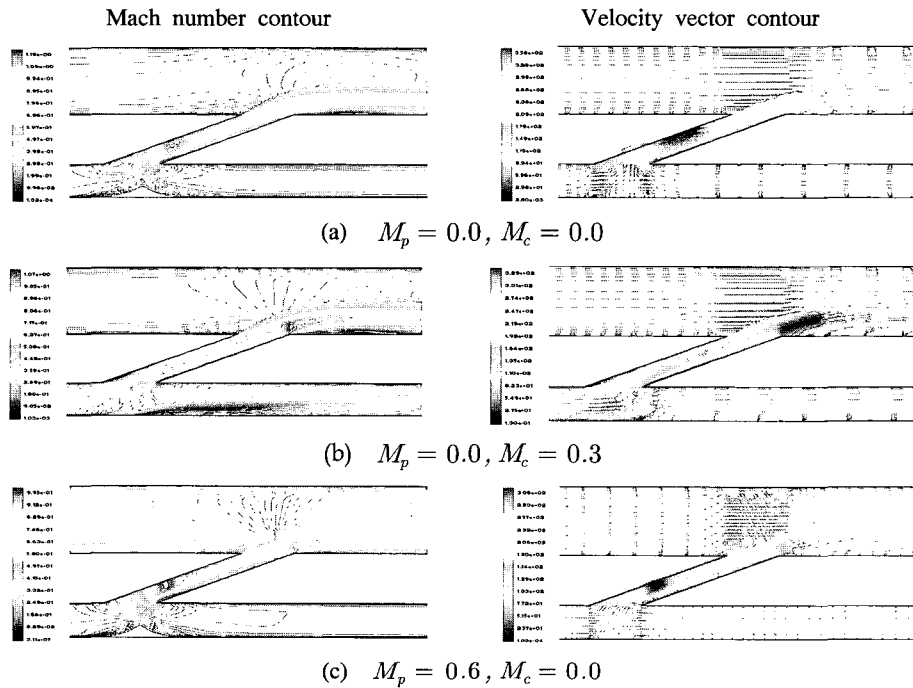


Fig. 4 Mach number contours and velocity vector ( $p_{tc}/p_p = 1.8$ )

결과와 수치해석 결과는 잘 일치한다. 그림으로부터  $p_{tc}/p_p > 2.0$ 인 경우에는 유출계수에 미치는 외부유동의  $M_p$ 의 효과는 크지 않음을 알 수 있다.

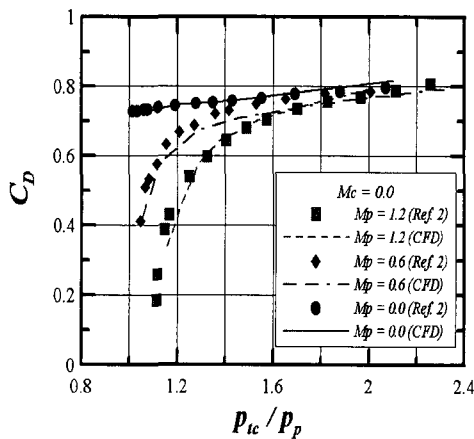


Fig. 5 Discharge coefficient vs pressure ratio

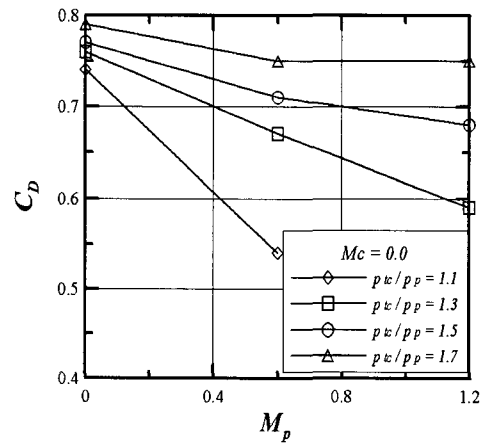


Fig. 6 Discharge coefficient vs external crossflow Mach number

Fig. 6은 내부유동이 없는 경우, 마하수 변화에 따른 유출계수변화를 나타낸다. 동일한 압력비 조건에서 유출계수는 외부유동의 마하수가 증가함에 따라 감소한다. 또 압력비가 낮아지면 유출계수값은 감소하며, 변화의 폭이 상대적으로

커진다. 즉, 외부유동은 유출계수를 감소시키며, 냉각구의 입/출구 압력비가 작을수록 유출계수에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다.

Fig. 7은 냉각구 출구부분의 운동량 유속비  $I_{p-jet}$ 에 따른 유출계수 변화를 나타낸 그림이다. 그림으로부터 유출계수는 운동량 유속비가 증가할수록, 즉 냉각구 출구단면을 지나는 질량유량의 운동량 유속이 상대적으로 증가함에 따라 증가한다.

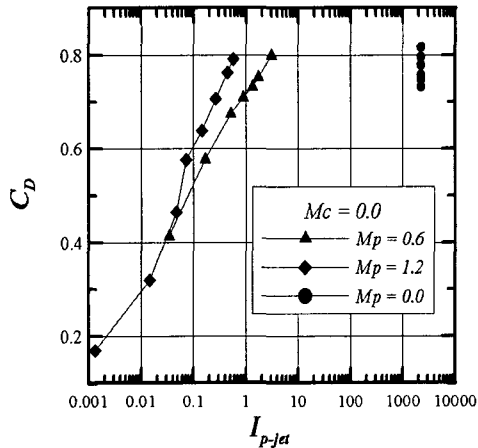


Fig. 7 Discharge coefficient vs jet-to-external crossflow momentum flux ratio

Fig. 8에는 운동량 유속비와 유출계수비의 관계를 나타낸다. 종축의 유출계수비는 동일한 압력비일 때, 내/외부 유동이 없는 경우의 유출계수값으로 무차원한 결과이다. 실선은 문헌(2)의 실험결과이며, 그림으로부터 본 수치계산 결과는 실험결과와 잘 일치한다. 유출계수비는 운동량 유속비가 증가함에 따라 증가하며, 운동량 유속비가 대략 5 이상이 되면 1로 접근하여 더 이상 증가하지 않고 일정한 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이는 냉각구를 통한 냉각기체의 운동량 유속이 외부유동의 운동량 유속값에 비하여 상대적으로 5배 이상이 되면, 외부유동이 냉각구에서의 방출량에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 나타낸다. 이것은 외부유동의 운동량과 냉각기체의 운동량 교환에서 냉각구 출구에서의 운동량이 상대적으로 커지면 외부유동의 운동량이 냉각구 출

구부분의 유동상태량 변화에 크게 기여하지 않기 때문으로 판단된다. 따라서 유출계수는  $I_{p-jet} > 5$ 에서 냉각구 내부에서 유동의 2차원성, 전압손실, 경계층의 영향 등의 인자들에 의해서 영향을 받는다.

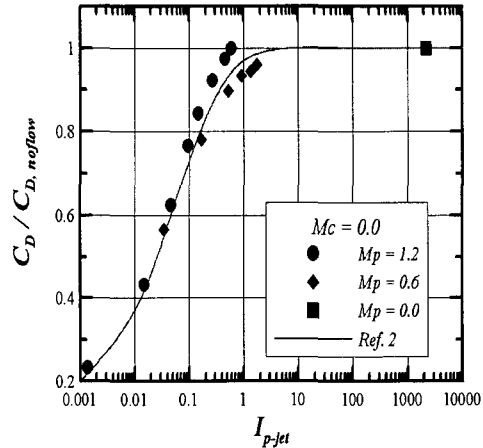


Fig. 8 Normalized discharge coefficient vs jet-to-external crossflow momentum flux ratio

Fig. 9에는 유출계수에 미치는 내부유동의 영향을 조사하기 위해 외부유동이 없는 경우 압력비변화에 대한 유출계수의 변화를 나타내었다.  $M_c = 0.2, 0.3, 0.4$ 인 경우에는 압력비가 증가하면 유출계수는 증가하며, 상대적으로 낮은 압력비에서 유출계수의 변화폭이 큰 경향을 나타내고 있다. 또 Fig. 5의 결과와 비교해 보면, 특정한 압력비 이상에서 내부유동이 존재하는 경우의 유출계수값은 실선으로 나타낸 내/외부 유동이 없는 경우의 유출계수값보다 더 큰 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 이러한 영역의 시작점은  $M_c$ 가 작아질수록 낮은 압력비에서 발생하고 있다.

Fig. 10에는 내부유동 마하수에 따른 유출계수 변화를 나타내었다.  $p_{tc}/p_p = 2.0$ 인 경우, 유출계수값은 마하수 증가에 따라 커지며, 특정 마하수에서 최대값을 가진 후, 다시 감소하고 있다. 이러한 경향은 다른 압력비의 조건에서도 유사하게 나타나고 있으며, 압력비가 낮아질수록 유출계수

값은 감소하고 있다.

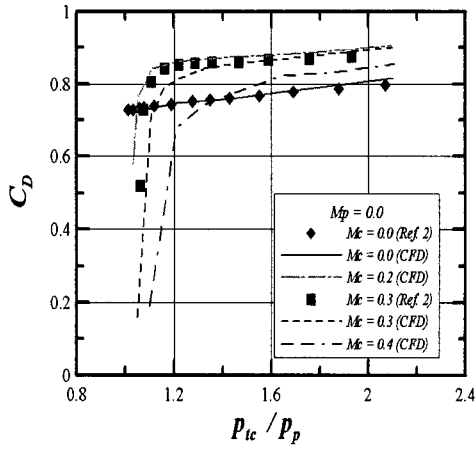


Fig. 9 Discharge coefficient vs pressure ratio

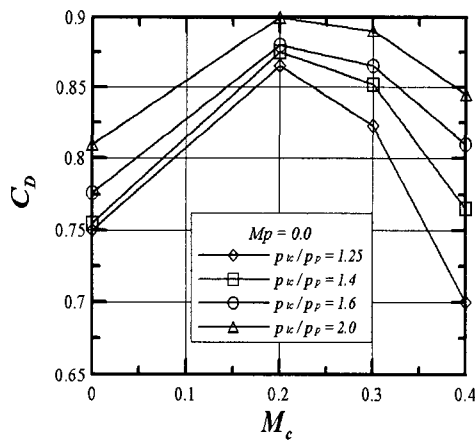


Fig. 10 Discharge coefficient vs internal crossflow Mach number

Fig. 11에는 유출계수의 변화와 냉각구 입구 부분의 운동량 유속비의 관계를 나타내었다.  $I_{c-jet}$ 은 식(6)에서 주어졌다. 그림으로부터 유출계수는 냉각구 입구부분의 운동량 유속비가 증가함에 따라 증가한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 12에는 냉각구 입구부분의 운동량이 유출계수에 미치는 영향을 나타내었다. 그림으로부터 운동량비가 증가함에 따라 유출계수비는 증가하며,  $1 < I_{c-jet} < 10$ 의 구간에서 최대값을 가진

후 다시 감소한다. 또 유출계수비가 1이상이 되는 특정한 운동량 유속비 값이 존재하고 있다. 이것은 내부 유동이 없는 경우에 냉각구 입구 하류부분에 크게 발생하는 박리 영역이 감소하여, 냉각구 내부의 경계층의 두께가 감소하기 때문이다. 즉 냉각구 입/출구의 유동상태량이 결정되어 지면 유출계수를 최대로 증가시킬 수 있는 최적의 조건을 운동량 유속비의 관계로 나타낼 수 있다는 것을 의미한다.

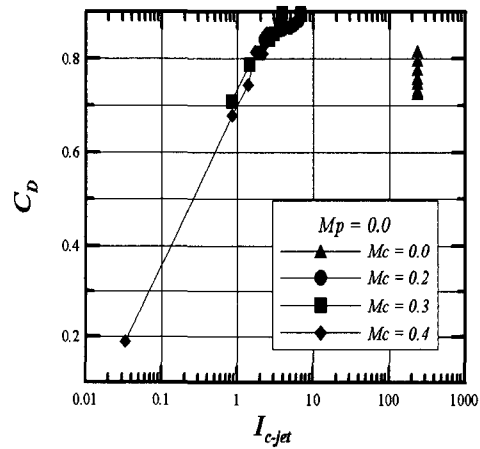


Fig. 11 Discharge coefficient vs jet-to-internal crossflow momentum flux ratio

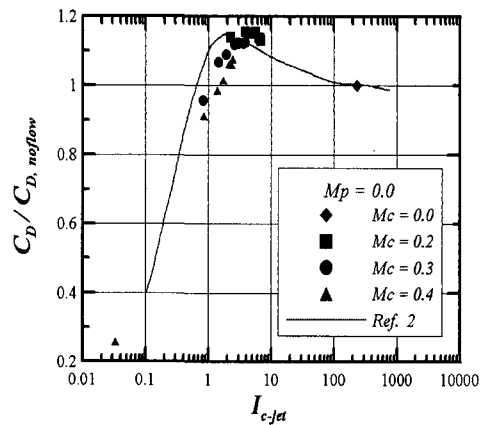


Fig. 12 Normalized discharge coefficient vs jet-to-internal crossflow momentum flux ratio

#### 4. 결 론

본 연구에서 얻어진 중요한 결론들은 다음과 같다.

- (1) 수치해석 결과는 film-cooling hole의 유출계수를 잘 예측하였다.
- (2)  $M_c = 0.0$ 인 경우, 유출계수는  $M_p$ 가 증가함에 따라 감소한다.
- (3)  $M_p = 0.0$ 인 경우, 특정  $M_c$ 에서 최대 유출계수값이 존재한다.
- (4) 외부유동의 운동량 유속은 유출계수를 감소시키며, 내부 유동의 운동량 유속은 특정 구간에서 유출계수를 증가시킨다.

#### 후 기

본 연구는 2003년도 두뇌한국 21사업으로 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

1. Mee, D. J., Ireland, P. T., Bather, S., 1999, "Measurement of the Temperature Field Downstream of Simulated Leading-Edge," Vol. 27, pp.273-283.
2. Michael, G., Achmed, S., and Sigmar, W., 1998, "Method for Correlating Discharge Coefficients of Film-Cooling Holes," AIAA Journal, Vol. 36, No. 6. pp. 976-980.
3. Hay, N., Lampard, D. and Benmansour, S., 1983, "Effect of Crossflows on the Discharge Coefficient Film Cooling Holes," Journal of Engineering for Power, Vol. 105, No. 2, pp.243-248.
4. Thole, K. A., Gritsch, M. Schulz, A. and Wittg, S., 1997, "Effect of a Crossflow at Entrance to a Film-Cooling Hole," Journal of Fluids Engineering, Vol. 119, No. 3, pp. 533-541.
5. Hay, N., Henshell, S. E. and Manning, A., 1994, "Discharge Coefficients of Holes Angled to the Flow Direction," Journal of Turbomachinery, Vol. 116, No. 1, pp. 92-96.
6. Hay, N., Lampard, D. and Khaldi, A., 1994, "The Coefficient of Discharge of 30° Inclined Film Cooling Holes with Rounded Entries of Exits," ASME Paper 94-GT-180.
7. Hay, N. and Lampard, D., 1995, "The Discharge Coefficient of Flared Film Cooling Holes," ASME Paper 95-GT-15.
8. Kim, J. H., Woo, S. H. and Kim, H. D., 2001, "A CFD Prediction of a Micro Critical Nozzle Flow," 대한기계학회 추계발표논문집 (B), pp. 652-657.