

축소노즐내 슬롯 막냉각에서의 열전달 특성

조용일* · 유만선* · 정학재** · 조형희***

Heat Transfer on Slot Film Cooling for Convergent Nozzle

Yong Il Cho* · Man Sun Yu* · Hak Jae Chung** and Hyung Hee Cho***

ABSTRACT

A study has been conducted to observe the slot film cooling effect on a convergent nozzle wall. The slot film cooling is used to protect the nozzle wall from the hot combusted gas by the coolant injected from the slot around the inner wall of the nozzle. The film cooling effectiveness and the heat transfer to the nozzle wall are influenced significantly by the blowing ratio of the coolant to the main flow and those are also influenced by the shape of the slot and the flow acceleration in the nozzle. In the present study, the heat transfer for the various blowing ratios has been performed by the experimental method and the results are compared with the results computed by the empirical formula. The numerical method has been conducted to compare the film cooling effectiveness of the convergent nozzle with that of the cylinder. For the relatively low blowing ratio, the cooling effectiveness increases sharply as the blowing ratio increases, and the increasing rate slows down for the high blowing ratio.

초 록

고온의 연소가스로부터 노즐 표면을 보호하기 위하여 슬롯을 통하여 냉각 유체를 분사하는 슬롯 막냉각에 대하여 연구하였다. 냉각효율 및 열전달 특성은 주유동과 2차 유동의 분사율에 따라 크게 달라지며, 형상변화 및 유동가속에 의해서도 냉각 효과의 변화를 가져오게 된다. 본 연구에서는 실험을 통하여 축소노즐에서 분사율 변화에 따른 슬롯 막냉각 열전달 특성을 고찰하고, 평판 슬롯 막냉각 경험식의 결과와 비교하였으며, 수치해석을 통하여 축소노즐과 원형관에서의 냉각효율 및 열전달 특성도 비교하였다. 상대적으로 낮은 분사율에서 분사율 증가에 따른 냉각효율의 증가가 크게 나타났으며, 일정 분사율 이상에서는 냉각 효율의 증가가 크게 둔화되었다.

* 연세대학교 대학원(Yonsei University, Graduate School)

**LG정밀(주)연구소(LG Precision Co., Ltd.)

***연세대학교 기계공학과(Yonsei University, Dept. of Mechanical Engineering)

기 호 설 명

D	노즐출구 직경(= 25mm)
L	슬롯으로부터 내부 표면거리
M	분사율
R	노즐 출구 반경
Re_c	Reynolds 수
S	슬롯높이(=1.5mm)
T_c	냉각유체 온도
T_w	벽면온도
T_∞	주유동 온도
U_c	냉각유체 속도
U_∞	주유동 속도
\bar{X}	경계층 매개 변수
η	냉각효율
μ_c	냉각유체 점성계수
μ_∞	주유동 점성계수
ρ_c	냉각 유체 밀도
ρ_∞	주유동 밀도

1. 서 론

고온의 연소가스에 직접 노출되는 로켓 노즐이나 가스터빈 연소실, 분사노즐 등에서 고체 표면을 보호하고 부품의 수명을 연장하기 위하여 많은 연구가 이루어져 왔다. 그 예로서 슬롯을 통하여 주유동의 경계층 내부로 냉각유체를 분사하여 고온의 주유동과 고체 표면 사이에 단열막을 형성하는 슬롯 막냉각(Slot Film-cooling) 방법을 들 수 있다.

슬롯 막냉각 방법에서의 막냉각 효율 향상은 설치되는 슬롯의 형상, 분사방법, 주유동에 대한 분사 속도비 변화 등에 의해 크게 좌우된다. 따라서 슬롯 막냉각에 대한 주요 연구분야는 냉각되는 벽면상의 단열벽면온도(adiabatic wall temperature) 및 열전달 계수(heat transfer coefficient)의 측정, 슬롯 출구 및 하류 부분에서의 복잡한 3차원 속도, 온도장에 대한 정확한 예측 등

이 포함되며 이에 관한 다수의 연구 결과가 보고되었다.

Papell등1),2)은 냉각유체가 고온의 주유동과 평행하게 분사되는 덕트 모양의 슬롯을 통하여 냉각공기를 분사하여 온도 측정실험을 수행하였다. 특히 슬롯의 폭(1/16,1/8,1/4,1/2in), 분사율 등을 다양하게 변화시키면서 실험을 수행하고, 실험결과를 종합하여 각 인자들에 따른 막냉각 효율 관계식을 산출해 내었다. 하지만 제한된 슬롯폭에서만 적용되는 식이므로 경향만을 나타낸다는 한계점을 지닌다. Seban3)은 슬롯 립의 길이에 따른 하류방향에서의 막냉각 효율을 연구하였다. 슬롯 립의 길이가 짧은 경우에는 2차유동이 불균일한 속도분포를 가지고 분사되어서 주유동과 쉽게 혼합됨에 따라 막냉각 효율이 떨어지게 되며, 긴 경우에는 슬롯내의 압력강하가 커지게 된다. Sivasegaram4)은 립의 두께와 주유동에 대한 분사각도(30°, 60°, 90°)에 대한 유동특성을 고찰하였는데, 립의 두께가 슬롯폭의 0.25배를 초과하면 급격하게 막냉각 효율이 감소한다고 기술하고 있다. Farmer5)등은 2차원 슬롯을 통한 막냉각 적용에 있어서, 35°의 경사각으로 분사되는 덕트모양의 슬롯과 shaping 슬롯에 대하여 연구하였다. 액정(liquid crystal)을 이용한 온도 측정으로 슬롯 출구 부분에서의 온도변화를 가시화하여 나타내었으며, transient method를 사용하여 열전달 계수 및 단열벽면 효율을 측정하였다. Mayle6)등은 슬롯 막냉각에 있어서 발생하는 난류경계층을 수치적으로 해석함으로써 난류경계층의 발달이 단열벽 효율에 미치는 영향을 고찰하였으며, Nina7)등은 13개의 슬롯형상에 대하여 온도차 22°C, 분사율 0.3~2.0범위의 실험조건을 적용하고 유동특성을 연구하였다. Wieghardt8), Eckert9), Tribus10)등은 경계층모델을 기반으로 하여 막냉각 효율에 대한 실험식을 제시하였다. Stollery11)등은 2차유동이 주유동과 평행하게 분사되는 슬롯에서 립의 두께와 주유동의 경계층두께가 막냉각 효율에 미치는 영향에 대해서 연구하고, 경계층모델을 기반으로 하여 막냉각 효율에 대한 수정

된 실험식을 제시하였다. 그러나 경계층 모델 기반의 실험식들이 유동 형상이 경계층 유동과 유사한 슬롯 하류 먼 곳에서는 비교적 잘 맞으나, 벽면온도가 2차 유동의 온도와 같게 계속 유지되는 포텐셜 코어 영역과 wall-jet형태의 유동특성을 보이는 슬롯 출구 가까운 곳에서는 적용이 어려운 단점을 지니고 있다. Kutateladze와 Leont'ev¹²⁾는 슬롯 출구 근처에서도 적용할 수 있는 수정된 실험식을 제시하였다.

슬롯 막냉각에서 냉각 효율 및 열전달 특성은 주유동과 2차유동의 분사율에 따라 크게 달라지며, 형상 변화 및 유동가속에 의해서도 냉각 효과의 변화를 가져 오게 된다. 따라서 본 연구에서는 실험을 통하여 면적비가 16:1 인 축소 노즐에서 압축성 효과를 배제할 수 있는 유동속도 범위 내에서 분사율 변화에 따른 슬롯 막냉각 열전달 특성을 고찰하고, 평판 슬롯 막냉각 실험식의 결과와 비교 하였으며, 수치해석을 통하여 축소노즐과 원형관에서의 냉각 효율 및 열전달 특성을 비교함으로써 이를 검증하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험은 분사율 변화와 유동 가속 및 형상 변화에 따른 슬롯 막냉각 효율 및 열전달 특성 변화를 측정 할 수 있도록 하였으며, 작동유체는 모두 공기로 하였다. Fig. 1은 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 주유동은 송풍기(7.5 kw)를 사용하여 공급하였으며, 히터(Heater)를 통하여 고온의 주유동을 형성하도록 하였고, 오리피스 유량계를 통하여 유량을 측정하였다. 오리피스를 지난 공기는 노즐로 공급되기 전에 공급공기의 습도성분을 줄일 수 있도록 플레넘 챔버(Plenum chamber)를 통과하도록 하였으며, 노즐 내부에는 스크린(Screen) 및 허니콤(Honey-com)을 설치하여 슬롯 상부에서 균일한 유동을 확보하였고, 슬롯 상부에 설치된 2개의 열전대(Thermocouple)를 이용하여 주유동의 온도를

측정하였다.

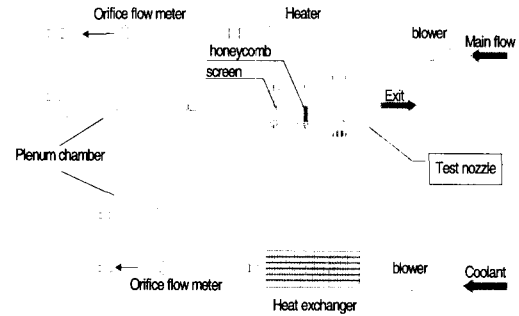


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

송풍기(3.7 kw)를 통하여 공급된 냉각 유체는 열 교환기를 통과시켜 주위 온도와 균일하게 유지하였고, 오리피스 유량계를 통하여 유량을 측정하였으며, 슬롯 상류에 원주 방향으로 설치되어 있는 6개의 구멍을 통하여 슬롯에 유입되어 주유동과 평행하게 분사되도록 하였으며 유입구에 설치된 2개의 열전대(Thermocouple)를 이용하여 냉각유체 온도를 측정하였다. 노즐은 16:1의 면적 수축비를 가지며, 노즐 면을 따라 설치되어 있는 12개의 열전대(Thermocouple) 및 압력탭을 통하여 벽면 온도 및 압력을 측정하였으며, 열전도계수가 낮은 12mm두께의 아크릴을 이용하여 제작하였고, 외부에 유리섬유로 단열하여 단열벽면 조건을 형성하였다. Fig. 2는 노즐내부 측정 단면을 보여 주고 있다. 주유동은 슬롯 상부에서 4 m/s, 355K의 속도와 온도를 유지하였으며, 이때 노즐 출구에서의 속도는 64m/s이다.

주유동 분사 후 노즐내부 벽면온도가 주유동의 온도가 같게되면 냉각 유체를 분사하였으며, 냉각 유체는 296K의 온도를 유지하였고, 분사율 변화에 따라 유량을 변화시켰다. 분사율은 다음의 식과 같이 정의된다.

$$M = \frac{\rho_c U_c}{\rho_\infty U_\infty} \quad (1)$$

노즐 벽면에서의 냉각 효율(η)은 노즐 내부 벽면온도가 주유동온도(T_∞)와 같게된 후 냉각 유체를 분사하여 냉각유체온도(T_c) 및 벽면온도(T_w)를 측정함으로써 계산하였으며 계산식은 다음과 같다.

$$\eta = \frac{T_\infty - T_w}{T_\infty - T_c} \quad (2)$$

여기서 계산된 막냉각 효율은 Kutateladze와 Leont'ev(12)가 제시한 평판에서의 슬롯 막냉각 효율에 관한 식과 결과를 비교하였다. Kutateladze와 Leont'ev(12)가 제시한 식은 다음과 같다.

$$\eta = \frac{1}{1 + 0.249 \bar{X}^{0.8}} \quad (3)$$

여기서 \bar{X} 는 경계층 매개변수(boundary layer correlation parameter)로서 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{X} = \frac{L}{Ms} (Re_c \frac{\mu_c}{\mu_\infty})^{-0.25} \quad (4)$$

실험결과에 대한 오차해석은 Kline과 McClintock이 제시한 방법(13)을 이용하여 수행하였다. 표면에서의 열전달계수 불확실성(uncertainty) 해석결과 95% 신뢰도에서 상대오차는 4.8%로 계산되었다.

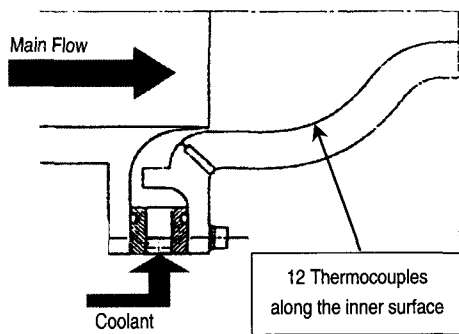
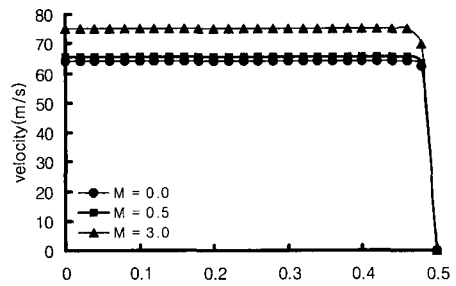


Fig. 2. Schematic diagram of test section

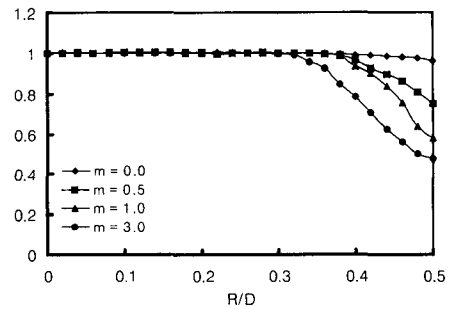
3. 결과 및 고찰

3.1 실험 결과

먼저 노즐 출구에서의 속도 및 온도를 측정하여 유동 및 온도분포 특성 파악하였다. Fig.3은 노즐 출구에서의 속도 및 온도분포를 나타내고 있다. Fig.3(a)에서 노즐 출구의 유동은 분사유에 관계없이 충분히 발달된 유동형태를 나타내고 있으며, 유동가속에 의하여 얇은 경계층을 가짐을 알 수 있다. 그러나 Fig.3(b)에서 열경계층은 분사율 증가에 따라 두께가 크게 두꺼워지며, 벽면 근처에서의 냉각효율이 증가됨을 볼 수 있다.



(a) Velocity distribution in a nozzle exit



(b) Temperature distribution in a nozzle exit

Fig. 3. Velocity / temperature distribution in a nozzle exit

Fig. 4는 분사율 변화에 따른 노즐 내부 벽면에서의 냉각 효율을 나타내고 있다. 상대적으로 낮은 분사율(M = 0.5, 1.0)에서 분사율 증가에

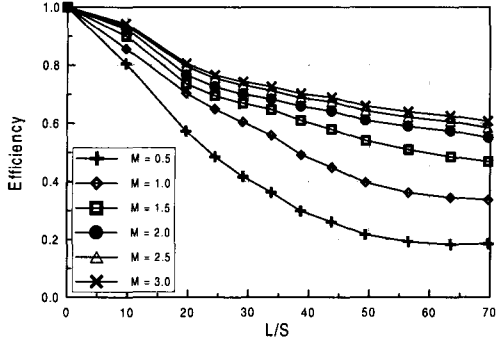


Fig. 4. Film cooling effectiveness on the convergent nozzle wall

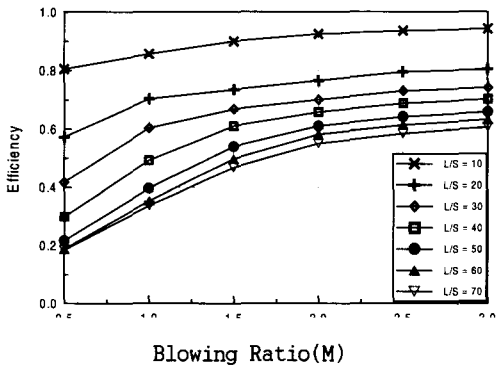


Fig. 5. Film cooling effectiveness for various blowing ratios

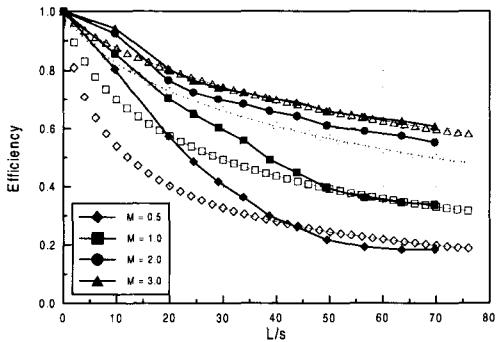
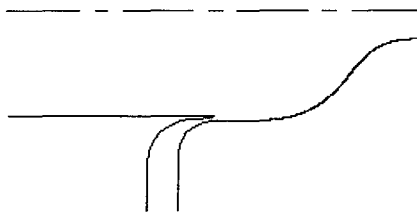


Fig. 6. Comparison of the present results (solid symbol) with Kutateladze's results on the flat plate(open symbol)

따른 냉각효율의 증가가 크게 나타남을 볼 수 있으며, 분사율이 높아짐($M \geq 2.0$)에 따라 냉각효율의 증가 폭이 점점 감소하고, 일정 분사율 이상에서는 냉각효율의 증가가 크게 둔화됨을 볼 수 있다. 이러한 경향은 Fig.5에 나타난 결과를 살펴보면 확연히 알 수 있으며, 또한 슬롯에서 하류로 갈수록 분사율 변화에 따른 냉각효율의 변화폭이 큼을 알 수 있다. Fig. 6는 본 연구에서의 노즐 슬롯 막냉각 실험 결과와 Kutateladze¹²⁾등이 제시한 평판 슬롯 막냉각 경험식 결과와 비교하였다. 노즐 슬롯 막냉각의 냉각 효율은 상대적으로 분사율이 낮을 경우 평판 슬롯 막냉각 경험식으로 주어진 결과보다 상류에서는 높으나 하류로 진행할수록 비슷한 냉각효율을 보였고, 분사율이 높은 경우 평판보다 전 범위에서 약간 높은 냉각 효율을 나타냄을 알 수 있다.



(a) Cylindrical type



(b) Nozzle type

Fig. 7. Geometry of numerical analysis

3.2 수치해석결과

본 연구의 실험결과 검증 및 유동장 해석을 위하여 상용 열/유동 해석 프로그램인 FLUENT를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석에 필요한 유입공기의 속도 및 온도 등은 실험조건과 동일하게 하였다. 형상조건도 3차원으로 실제와 같게 하였고, 유동 가속 및 형상효과를 보기 위하여 원형관내에서의 슬롯막냉각 효율에 관한 수치해석을 동일한 조건으로 병행하였다.

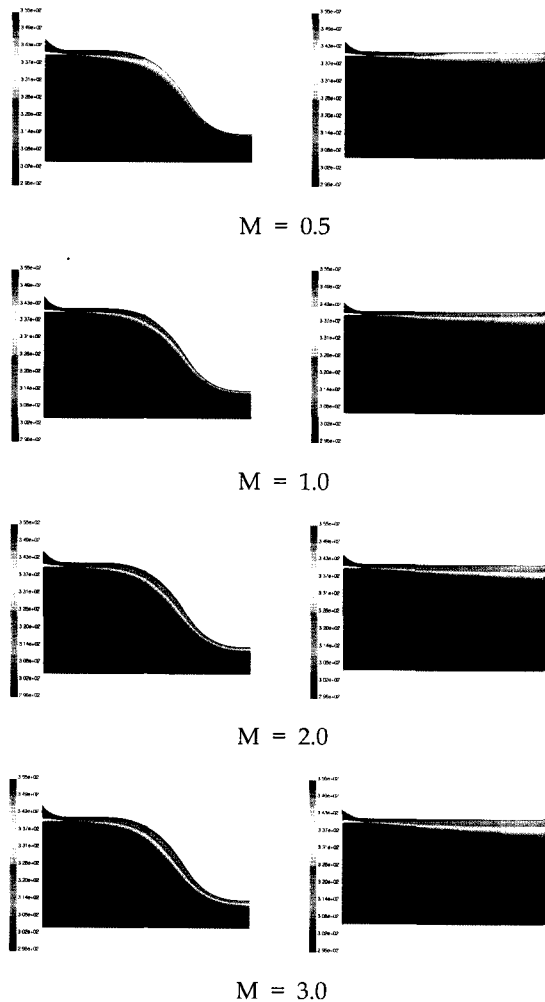


Fig. 8. Temperature distribution of numerical results

계산된 모델은 비압축성 유동의 정상상태로 가정하였으며 RSM 난류모델(14)을 적용하였다. Fig.7은 수치해석에 적용된 노즐과 원형관 내에서의 슬롯막냉각 수치해석을 위한 형상을 나타내고 있다. Fig.8은 축소노즐 및 원형관 내부 온도분포에 대한 수치해석 결과를 나타낸 그림이다. 원형관의 경우 슬롯을 통해 분사된 냉각유체는 하류로 갈수록 고온의 주유동과 혼합되어 벽면온도가 증가하고 열경계층 두께가 두꺼워지는 경향을 보이거나 축소노즐의 경우 벽면온도는 증가하나 유로면적 감소로 인한 유동가속의 효과로 하류로 갈수록 열경계층이 얇아지는 경향을 나타낸다. 또한 분사율이 높아질수록 열경계층의 두께가 두꺼워짐을 알 수 있다. Fig.9는 축소노즐과 원형관의 냉각효율 분포를 나타낸다. 분사율이 낮은 경우 축소노즐의 냉각효율이 원형관에서의 냉각효율보다 낮거나 비슷하게 나타나며, 분사율이 높아짐에 따라 축소노즐에서의 냉각효율이 오히려 높아지는 경향을 나타낸다. 이는 분사율이 낮은 경우 상대적으로 큰 운동량을 지닌 고온의 주유동이 노즐의 곡면효과에 의하여 비교적 쉽게 노즐 벽으로 접근할 수 있기 때문으로 사료된다. 그러나 분사율이 큰 경우 냉각유체의 운동량이 크고 노즐곡률변화에 따른 유동가속에 의하여 얇아진 경계층의 냉각유체가 잘 확산되지 않고 고온의 주유동이 노즐 벽으로 침투하는 것을 효과적으로 방지할 수 있기 때문일 것이다. 이러한 경향은 Fig.10의 슬롯립(slot lip)하류에서의 유동특성에서 확인할 수 있다. 분사율이 낮은 경우 립(lip)하류에서의 유동은 전반적으로 분사방향에 평행하게 진행되는 것이다. 그러나 분사율이 높은 경우 냉각유체가 주유동 쪽으로 편향되는 경향을 나타내고 있다. Fig.11은 실험결과와 수치해석 결과를 비교한 그림으로서 분사율이 낮은 경우 슬롯가까이 상류를 제외하고는 비교적 잘 맞고 있으나, 분사율이 높은 경우 오차가 다소 크게 나타남을 볼 수 있다. 이는 수치해석의 난류모델이 적합하지 않기 때문으로 사료되며, 향후 실험 결과를 바탕으로 난류모델 개선이 요구된다.

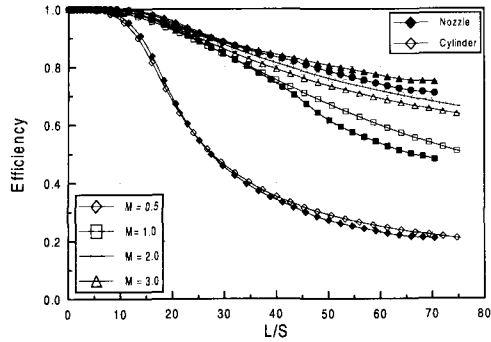


Fig. 9. Comparison of the nozzle results with the cylinder results

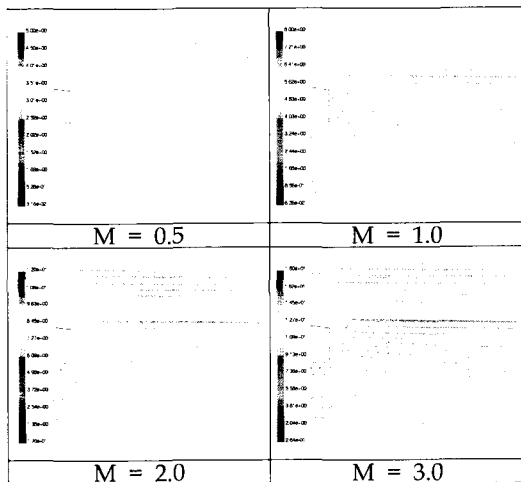


Fig. 10. Velocity vector plot around the slot lip

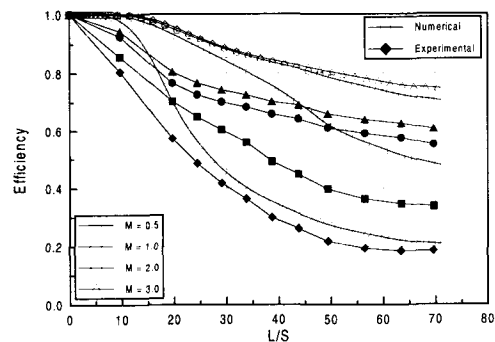


Fig. 11. Comparison of the experimental results with the numerical results

4. 결론

(1) 상대적으로 낮은 분사율(M = 0.5, 1.0)에서 분사율 증가에 따른 냉각효율의 증가가 크게 나타났으며, 분사율이 높아짐에 따라 냉각효율의 증가 폭이 크게 감소하고, 일정 분사율 이상에서는 냉각효율의 증가가 크게 둔화 되었다.

(2) 분사율이 낮을 경우 평판슬롯 막냉각 경험식으로 주어진 결과보다 상류에서는 높으나 하류로 진행하면 비슷한 냉각효율을 보였고, 분사율이 높은 경우 평판보다 전 범위에서 약간 높은 냉각 효율을 나타냈다.

(3) 수치해석 결과에서는 분사율이 낮을 경우 축소노즐의 냉각효율이 원형관에서 냉각효율보다 낮거나 비슷하게 나타났으며, 분사율이 높아짐에 따라 축소노즐에서의 냉각효율이 오히려 높아지는 것으로 나타났다.

후기

본 연구는 과학기술부 국가지정 연구실 사업 지원의 결과이며 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

- Papell, S. S., and Trout, A. M., 1959, "Experimental investigation of air film cooling applied to an adiabatic wall by means of an axially discharging slot," National Aeronautics and Space Administration Technical Note D-9.
- Papell, S. S., 1960, "Effect on gaseous film cooling of coolant injection through angled slot and normal holes," NASA Technical Note D-299.
- Seban, R. A., 1960, "Heat transfer and effectiveness for a turbulent boundary layer with tangential fluid injection," ASME J. of Heat Transfer, pp. 303-312.
- Sivasegaram, S., 1969, "Film cooling slot : the

- importance of lip thickness and injection angle," *Journal of Mechanical engineering science*, Vol. 11, No. 1, pp. 22~27.
5. Farmer, J. P., Seager, D. J. and Liburdy, J. A., 1997, "The effect of slot shaping inclined slot on film cooling effectiveness and heat transfer coefficient," ASME Paper No. 97-GT-339.
 6. Mayle, R. E. and Kopper, F. C., 1976, "Adiabatic wall effectiveness of a turbulent boundary layer with slot injection," ASME J. of Heat Transfer, Vol. 98, No. 2, pp. 240~244.
 7. Nina, M. N. R. and Whitelaw, J. H., 1971, "The effectiveness of film cooling with three-dimensional slot geometries," *Int. J. Heat Transfer*, p. 425~430.
 8. Wieghardt, K., 1944, "On the blowing of warm air for de-icing devices", F. B. 1900. Reports and Translations No. 315.
 9. Hammett, J. P., Birkebak, R. C. and Eckert, E. R. G., 1961, "Velocity distribution, temperature distributions, effectiveness and heat transfer for air injected through a tangential slot into a turbulent boundary layer," *J. Heat Transfer, Trans. ASME Series C*, 83, pp. 293~306.
 10. Klein, J. and Tribus, M., 1953, "Forced convection from non-isothermal surface," *Heat transfer, a symposium*, University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan.
 11. Burns, W. K. and Stollery, J. L., 1969, "The influence of foreign gas injection and slot geometry on film cooling effectiveness," *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 12, pp. 935~951.
 12. Kutateladze, S. S. and Leont'ev, A. I., 1971, "Film cooling", *Advances in heat transfer*, R.J. Goldstein, Academic Press, Vol. 7, pp. 224.
 13. Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single-sample experiments", *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
 14. FLUENT incorporated, 1998, "FLUENT 5 User's Guide", Vol. 2, 9-9.