

## 반복된 제트 충돌을 갖는 내부 유로의 평균 열전달 계수 측정

박승덕\* · 이기선\* · 김석범\* · 조용화\* · 전창수\*\* · 곽재수\*\*\* · 허재성\*\*\*\*

### Heat transfer coefficient measurement in the Blockage channel with Repeated Jet Impingement

Seoung Duck Park\* · Ki Seon Lee\* · Sug Bum Kim · Yong Hwa Jo · Chang Soo Jeon ·  
Jea Su Kwak\*\*\* · Jae-Sung Huh\*\*\*\*

#### ABSTRACT

Averaged heat transfer coefficients were measured in a turbine blade internal cooling passage model with three blockage walls. Each blockage wall was equipped with 9 staggered holes or slots in order to create different shaper of repeated jet impingement. The effect of jet shape on the averaged heat transfer coefficient was studied by the copper-thermocouple method and three Reynolds number of 10,000, 20,000, and 30,000 were tested. Results showed that the repeated stagger jets could increase the averaged heat transfer coefficient by at least 9 times compared to the smooth channel cases. Due to the large pressure drop induced by the repeated jet impingement, the thermal performance was less than 1 for all cases and decreased as the Reynolds number increased. Among the tested cases, the widest slot showed the best thermal performance. The measurement results showed that the thermal performance of the heat transfer augmentation by repeated stagger jets could be improved by altering the jet shape, and other shape of impingement jet will be studied in near future.

Key Words : Staggered jet, Blade Cooling, Thermal Performance Factor

#### 기호설명

$C_d$  : 토출 계수

$\beta$  : 벤추리관 지름과 목 지름의 비

$\epsilon$  : 팽창 계수

$d$  : 벤추리관 목의 지름 [m]

$\Delta p$  : 벤추리 목에서의 압력 강하 [Pa]

$\rho$  : 유체의 밀도 [ $kg/m^3$ ]

$P$  : 히터에 공급되는 열량 [W]

$V$  : 히터에 공급되는 직류 전압 [V]

$A$  : 히터에 공급되는 전류 [A]

$q''$  : 단위면적당 히터에 공급되는 열량 [ $W/m^2$ ]

$\bar{h}$  : 평균 열전달 계수 [ $W/m^2 \cdot K$ ]

$T_m$  : 주유동의 온도 [K]

$T_w$  : 열전대 온도의 평균 값 [K]

\* 학생회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

\*\* 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

\*\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

연락처, E-mail: [jkwak@kau.ac.kr](mailto:jkwak@kau.ac.kr)

\*\*\*\* 한국항공우주연구원 KHP 개발실

$TP$  : 열 성능 계수

$\overline{Nu}_{D_h}$  : 측정된 Nusselt 수

$Nu_{D_{h,0}}$  : 측정된 위치와 같은 수력 지름을 갖는  
매끄러운 관에서 완전 발달한 난류  
유동의 Nusselt 수

$f$  : 측정된 압력강하에 따른 마찰계수

$f_0$  : 매끄러운 관에서 완전 발달한 난류 유동의  
마찰 계수

$D_h$  : 수력 지름 [m]

$Re_{D_h}$  : 수력 지름에 대한 Reynold 수

$\rho_m$  : 주유동의 밀도 [ $kg/m^3$ ]

$\bar{u}$  : 주유동의 평균 유속 [m/s]

$k_m$  : 유동의 열전도율 [ $W/m \cdot K$ ]

Pr : Prandtl 수

## 1. 서 론

고온의 연소 가스로부터 터빈 내의 부품을 보호하기 위해 여러 가지 냉각기법이 사용되고 있다. 최근 가스터빈의 출력과 효율을 증가시키기 위해 입구 온도를 높이려는 경향이 있고 이로 인해 가스터빈 부품의 열부하가 증가되어 터빈 내의 부품 및 열 설계 및 냉각기법은 중요하다. 가스터빈 내의 블레이드 외부에서는 표면에 홀을 가공하고 냉각 유체를 분사하여 고온의 가스로부터 표면을 보호하는 막냉각이 사용되고 있으며 블레이드 내부에서는 rib 냉각법과 Pin-fin 냉각법, 층돌 냉각법 등을 이용하여 열을 제거 한다. Fig. 1은 일반적으로 사용되는 터빈블레이드에서의 내부 냉각기법이다. 냉각기법에 따른 블레이드 내부에서의 정확한 열전달 계수 산출은 터빈 블레이드의 열부하 계산에 필수적인 정보로, 내부 열전달 계수 측정은 가스터빈 블레이드의 설계에 매우 중요한 과정이다.[1]

블레이드의 내부 뒷전 냉각에는 Pin을 설치하는 Pin-fin 냉각기법이 주로 사용되고 있으나, 최근에는 여러 연구자들에 의해서 반복되는 제

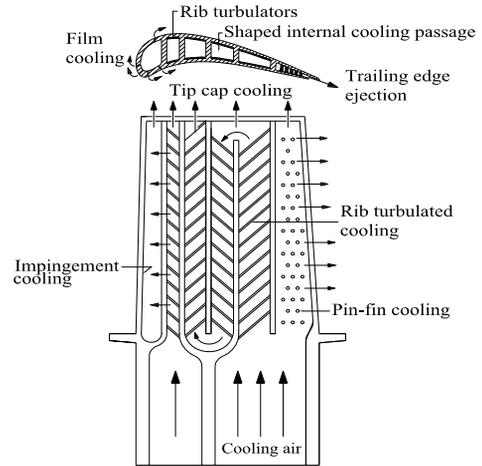


Fig. 1 Cooling technique used in a modern gas turbine blade

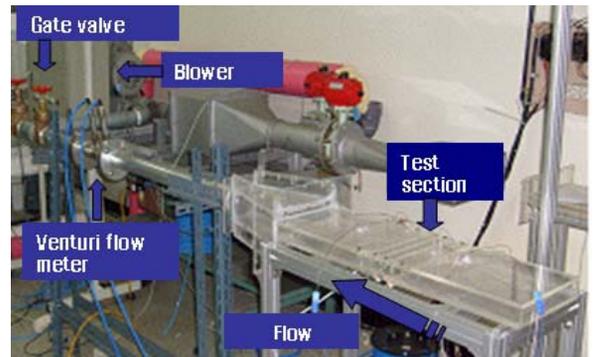


Fig. 2 Schematic of test facility

트를 이용하여 내부 열전달 계수를 증가시키기 위한 연구가 진행되고 있다.

Moon 과 Lau[2]는 구멍이 있는 벽을 사각 유로에 설치하고 액정을 이용하여 열전달 계수를 측정하였다. 그들은 반복된 제트에 의해 열전달 계수도 증가하지만 압력강하도 증가하는 것을 보였다. Lau등[3]은 엇갈린 구멍이 있는 벽을 이 설치된 유로에서의 열전달과 압력강하에 관한 연구를 수행하였다. 그들은 나프탈렌 승화법을 이용하여 원형과 사각형 모양의 반복된 제트가 열전달과 압력강하에 미치는 영향을 비교하였으며, 열성능비를 높이기 위해 모양과 크기가

최적화 되어야 한다는 결론을 얻었다. Shin등 [4]은 천이액정법을 사용하여 다양한 형상의 구멍이 가공된 구조물이 설치된 유로에서 반복된 충돌 제트가 열전달 계수에 미치는 영향을 천이액정법을 이용하여 측정하였다. 그들은 원형의 홀보다 가로로 긴 구멍이 더 좋은 열성능계수를 나타냄을 보였다.

본 연구에서는 Shin등[4]이 사용한 구조물과 유사한 구멍 형상을 갖는 구조물을 이용하고 측정이 용이한 구리-열전대 기법을 이용하여 반복되는 충돌 제트를 갖는 내부 유로의 평균 열전달 계수를 측정하였다. 구멍의 형상은 원형, 가로로 긴 형상, 세로로 긴 형상 등 세가지 모양을 사용하였고, 각 구조물의 유동 면적은 동일하게 유지하였다.

## 2. 실험장치

Figure. 2는 실험 장치를 나타낸 것으로 ब्ल로어( $P_{\max} = 4800\text{mmH}_2\text{O}$ ,  $Q_{\max} = 9.8\text{m}^3/\text{min}$ ), 벤츄리 유량계, 데이터 측정 장치 (Agilent, 34970A), 그리고 유량 제어를 위한 두 개의 게이트 밸브로 구성되어 있다. 벤츄리 유량계에서 Eq. (1)을 적용하여 유량을 계산 할 수 있다.

$$Q = \frac{C_d}{\sqrt{1-\beta^4}} \epsilon \frac{1}{4} \pi d^4 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

시험부의 벽면 단면의 형태는 Fig. 3과 같이 9개의 원형과 폭이 각각 가로로 좁은 형, 폭이 넓은 형으로 구멍의 면적은 모두 동일하게 제작되었다. 구멍이 설치된 구조물 사이의 하부 벽면은 구리판과 각 4개의 열전대, 포일 히터가 설치되어 일정한 열유속을 가할 수 있도록 하였고, 히터 아래에는 보온재를 설치하여 시험부 반대면으로의 열손실을 방지하였다. 시험부 상하류에는 주유동의 온도와 압력을 측정하기 위한 열전대와 압력탭을 설치하였다. 각각의 포일 히터에는 개별 전원 공급 장치가 연결되어 동일한 열유속이 공급될 수 있도록 전압 조절이 가

능하게 하였다. 시험 중에는 구리판에 장착된 열전대와 주유동 온도 측정을 위한 열전달, 차압계로 측정된 시험부 상하류의 압력 차이가 데이터 측정 장치를 통해 기록되었다.

## 3. 열전달 계수 측정 방법

사각 유로 내의 시험부 표면인 구리판에 일정한 열유속이 공급되도록 전원 공급 장치의 전압을 조정하였고, 벤츄리 유량계로 측정된 유량을 이용하여 계산된 레이놀즈수는 두 개의 게이트 밸브로 조정하였다. 표면의 온도가 정상상태된 후 온도와 차압을 측정하였다. 구리판에 공급되는 열유속은 Eq. (2)와 (3)을 통해 계산하였고, 여기서  $V$ 와  $A$ 는 각각 히터에 공급되는 직류 전압과 전류이다. 구리판에 부착된 4개의 열전대 평균값으로  $T_w$ 를 구하였고, 주유동의 온도  $T_m$ 도 4개의 열전달의 측정값을 평균하여 구하였다. 평균 열전달 계수  $h$ 는 Eq. (4)를 이용하여 구하였다.

$$P = V \times A \quad (2)$$

$$q'' = (P/A) \quad (3)$$

$$q'' = h(T_w - T_m) \quad (4)$$

엇갈린 제트 충돌은 열전달 계수 증가 뿐만 아니라 압력 강하도 동반한다. 따라서 열전달 증가와 압력 강하를 함께 고려하기 위해 Eq. (5)로 정의되는 열성능계수를 이용하여 열전달 계수 증가량 대비 압력강하증가량을 비교하였다.

$$TP = \frac{\overline{Nu}_{D_h}/N_{D_{h,0}}}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (5)$$

여기서  $f_0$ 는 매끈한 관에서 완전 발달한 난류

유동에서의 마찰계수 이며  $f$ 는 측정된 압력강하에 따른 마찰계수이다.  $Nu_{D_h,0}$ 는 같은 수력지름을 갖는 매끄러운 관에서의 완전 발달한 난류 유동 Nusselt 수이며  $Nu_{D_h}$ 는 측정된 Nusselt 수이다.  $f_0$ 는 Eq. (6)를 이용하여 계산하였고  $f$ 는 주유동이 흐르는 시험부 상단과 하단 사이의 압력 탭을 이용한 압력강하를 이용하여 Eq. (7)를 사용하여 계산되었다.

$$f_0 = [0.79 \ln(Re_{D_h}) - 1.64]^{-2} \quad (6)$$

$$\text{for } 3000 < Re_{D_h} < 5 \times 10^6$$

$$f = \frac{-(\Delta p / \Delta x) D_h}{\rho_m u^2 / 2} \quad (7)$$

표면의 평균 Nusselt 수는 Eq. (8)과 같이 정의되고  $Nu_{D_h,0}$ 는 Eq. (9)로 계산된다.

$$\overline{N}_{D_h} = \frac{\overline{h} D_h}{k_m} \quad (8)$$

$$N_{D_h,0} = \frac{(f_0/8)(Re_{D_h} - 1000)Pr}{[1 + 12.7(f_0/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)]} \quad (9)$$

#### 4. 실험 결과

유동 면적이 동일한 서로 다른 형상의 구멍이 가공된 벽이 설치된 유로에서 덕트 수력 직경과 덕트내 평균 유동 속도로 계산한 레이놀즈수를 10000과 20000, 30000으로 변화하며 열전달 계수 및 압력강하 측정을 수행하였다.

Figure 5는 첫 번째 측정부에서 3가지 구멍 형상에 대한 평균 Nusselt수의 비를 나타낸 것이다. 모든 경우에서 레이놀즈수가 증가할수록 Nusselt 수 비는 감소하는 경향을 보였고, 같은

레이놀즈수에서는 원형 구멍의 경우가 가장 큰 열전달 계수 증가를 나타내었다.

Figure 6은 두 번째 측정부에서의 평균 Nusselt 수 비를 나타낸 것이다. 첫 번째 시험부와 같이 레이놀즈수가 증가할수록 평균 Nusselt 수는 감소하는 경향을 보였다. 하지만 두 번째 시험부에서는 폭이 좁은 구멍의 경우가 가장 높은 열전달 계수 증가를 보였다. 첫 번째 시험부와 두 번째 시험부 비교하면 낮은 레이놀즈수의 경우에는 두 번째 시험부의 열전달 계수가 높게 나타났으나 레이놀즈수가 커질수록 첫 번째 시험부의 열전달 계수가 높게 나타났다. 이는 레이놀즈수에 따라 난류 혼합 정도가 달리 나타나기 때문에 일어나는 현상으로 판단된다.

Figure 7은 동일한 수력 직경을 갖는 매끈한 관과 시험부에서 측정된 압력 강하로 계산된 마찰 손실 계수를 비교한 것으로, 반복된 충돌은 매우 큰 압력 손실을 가져옴을 볼 수 있다.

Figure 8은 유동이 벽을 통과하면서 발생한 압력손실과 측정면 전체의 평균 열전달 계수를 이용하여 계산된 열성능계수를 나타낸 것이다. 세가지 경우 모두 레이놀즈수가 증가할수록 열성능계수는 감소하는 경향을 보였으며, 모든 레이놀즈수에 대해 1보다 작은 열성능계수를 나타내었다. 세가지 구멍 형상에 대해서 대체로 가로로 넓은 형의 구멍이 가장 좋은 열성능계수를 보였고 원형의 경우가 가장 낮은 열성능계수를 나타내었다. 따라서, 반복된 충돌 체트를 이용한 열전달 증진법은 높은 열전달 계수 증가를 얻을 수 있지만 높은 압력 손실로 인해 대체로 낮은 열성능계수를 갖는 것을 볼 수 있다. 또한 동일한 유동 면적을 갖는 반복된 충돌 체트라도 제트의 형상, 즉 구조물에 설치된 구멍의 형상에 따라 다른 열전달 계수 증가와 압력 손실 특성을 나타내므로, 형상이 최적화된다면 보다 높은 열성능계수를 가질 수 있으리라 기대된다.

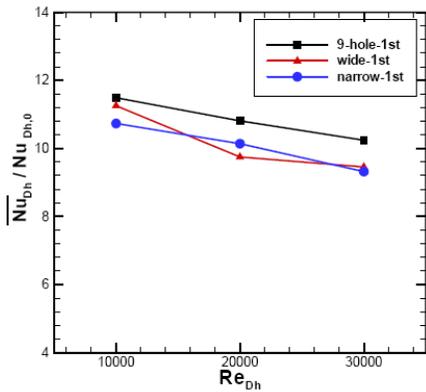


Fig. 5 Averaged Nusselt number ratio (1st-plane)

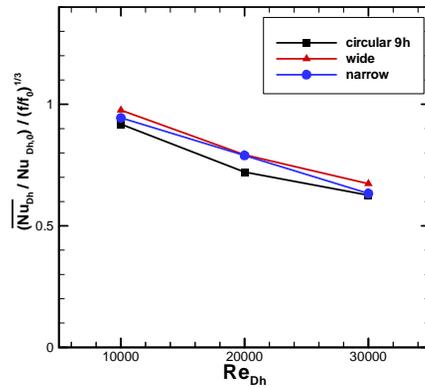


Fig. 8 Thermal performance factor

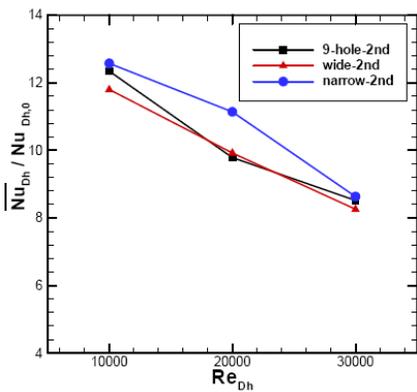


Fig. 6 Averaged Nusselt number ratio (2nd-plane)

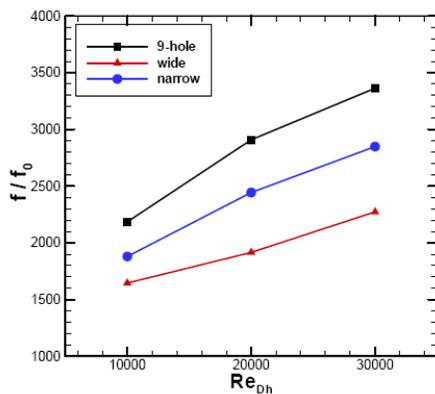


Fig. 7 Friction factor ratio

### 5. 결론

이 논문에서는 모양이 다른 엇갈린 충돌 제트를 갖는 내부 유로에서의 평균 열전달 계수와 압력 강하를 측정하였다. 세 경우 모두 동일한 유동 면적을 가지며, 덕트 수력 직경으로 계산한 레이놀즈수는 10000, 20000, 30000이었다. 모든 경우에 대해 레이놀즈수가 증가할수록 평균 Nusselt수 비는 감소하였고 마찰손실계수비는 증가하였다. 모든 경우에 대해 열성능계수는 1보다 작은 값을 보였으며 레이놀즈수가 증가할수록 열성능계수는 감소함을 보였다. 홀의 형상이 가로로 긴 경우가 가장 좋은 열성능비를 보였고 원형의 경우가 가장 낮은 열성능비를 보였다. 구멍의 형상에 따라 열전달 계수 증가와 압력 손실이 달라지므로, 구멍 형상과 배치를 최적화한다면 보다 높은 열성능계수를 얻을 수 있으리라 기대된다.

### 후 기

이 연구는 지식경제부 한국형헬기 민군겸용구성품 개발사업 (KARI주관) 위탁 연구 결과 중 일부임.

### 참고 문헌

- [1] Han, J. C., Dutta, S., and Ekkad, S. V., 2000, Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology, Taylor & Francis, New York.
- [2] Moon, S. W., and Lau, S. C., 2003, "Heat transfer between blockage With holes in s rectangular channel," J. of heat transfer, vol. 125, pp.587~594
- [3] Lau, S. C., Cervantes, J., Han, J C., Rudolph, R . J., and Flannery, K., 2003, "Measurement of wall heat (mass) transfer for flow through blockage with round and square holes in a wide rectangular channel," International J. of heat and mass transfer, Vol. 46., pp. 3991~4001.
- [4] 신소민, 이기선, 박승덕, 곽재수, 차봉준, 2007, "Heat Transfer Measurement in a Rectangular Duct with impingement jets : Effect of Hole Shape and Number of Hole." 대한기계학회 추계학술대회논문집 pp.2273-2278.