

# 제트홀이 설치된 핀-휀 및 핀-휀/딴플 복합 배열을 사용한 내부유로에서의 열전달 향상

박 준 수\*

한국교통대학교 에너지시스템공학과

## Enhancement of Heat Transfer in Internal Passage using Pin-Fin with Jet Hole and Complex Pin-Fin-Dimple Array

Jun Su Park\*

Department of Energy System Engineering, Korea National University of Transportation,

50 Daehak-ro, Chungju, 380-702, Korea

(Received 2015. 04. 21 / Accepted 2015. 05. 19)

**Abstract :** A Pin-fin array is widely used to enhance the heat transfer in the internal cooling passage. The heat transfer distribution around the pin-fin is varied by the horseshoe vortex and flow separation. The difference of heat transfer coefficient induces the large thermal stress, which is one of the major reasons to break of hot components. So, it is required to enhance the heat transfer on the back side of pin-fin to solve the thermal stress problem. This study suggests the pin-fin with inclined jet hole and complex pin-fin/dimple array to enhance the heat transfer on the back side of pin-fin. The heat transfer coefficient is predicted by the numerical analysis, which is performed by CFX 14.0. The numerical results are obtained at Reynolds number, 10,000. The results show that the heat transfer on the back side of pin-fin is increased in both cases. Beside, the wake, which comes from dimple and jet, helps to develop the horseshoe vortex and increase the heat transfer on the next row pin-fin.

**Key words :** pin-fin, dimple, heat transfer, internal passage cooling

### 1. 서 론

가스터빈의 효율향상을 위해서 지난 반세기동안 터빈 입구온도를 상승시키기 위한 연구가 지속적으로 진행되어 왔다. 현재 운전 중에 있는 최신의 가스터빈의 경우 터빈 입구 온도가 1,600℃까지 상승하였으며, 터빈의 최대 효율은 60% (복합발전 기준)를 상회하고 있다.<sup>1)</sup> 이와 같이 터빈 내부품의 재료가 견딜 수 있는 한계온도 이상으로 터빈 입구온도가 상승하게 됨에 따라 고온의 연소가스로부터 터빈 부품들을 보호하기 위한 냉각기술의 중요성이 부각되어지고 있다.

초기에는 가스터빈 고온부품을 냉각하기 위해서

단순히 원형 및 사각형 형태의 내부냉각유로가 설치되어 사용되었다. 그러나 가스터빈 입구온도가 지속적으로 상승함에 따라 높은 냉각성능이 요구되었으며, 이를 만족시키기 위해서 현재에는 내부냉각유로 내에 요철, 핀-휀 및 딴플 등의 난류 촉진제를 설치하여 냉각성능 향상을 도모하고 있다.<sup>2,3)</sup>

내부냉각유로 내의 냉각성능을 향상시키기 위해 설치하는 여러 난류 촉진제 중 핀-휀의 경우 열전달 성능 향상뿐만 아니라 고온부품의 구조적 안정성을 향상시키는 장점을 가지고 있어 널리 활용되고 있다.

일반적으로 핀-휀은 유로의 양 단면에 연결된 짧은 원형 핀으로 주유동의 수직방향으로 배열되어 있다. 그 결과 핀-휀에 의해 유동이 분리되면서 핀-휀의 전

\*Corresponding author, E-mail: js\_park@ut.ac.kr

면부에서는 말발굽 와류가 발생되고 후면에서는 유동의 박리 및 후류가 발생하게 된다. 이러한 유동특성은 핀-핀의 배열 및 크기 등에 의해 결정되며, 유동특성에 따라 열전달 특성도 따라 결정되게 된다. 유동의 분리에 의해 발생하는 말발굽은 와류는 핀-핀의 전면부에서 대류열전달을 크게 상승시킨다. 반면 핀-핀의 후면부는 유동의 박리 및 후류에 의해 열전달 계수가 상대적으로 낮게 나타나는 현상을 보이고 있다.<sup>4,5)</sup>

핀-핀의 후면부에서 낮은 열전달은 내부냉각유로의 전체적인 냉각성능을 저해할 뿐만 아니라 핀-핀의 전면부와 후면부의 큰 온도차를 발생시켜 열응력이 국소적으로 크게 발생하게 되는 원인이 되기도 한다. 그러므로 핀-핀의 후면부의 열전달을 향상시키는 것은 냉각성능 향상 및 열응력 감소를 위한 근본적인 방법이다. 그래서 본 연구에서는 핀-핀 후면부의 열전달을 향상시키기 위해서 핀-핀에 제트홀을 설치하거나 핀-핀/딴플 복합배열을 이용하여 열전달을 상승시키고자 한다.

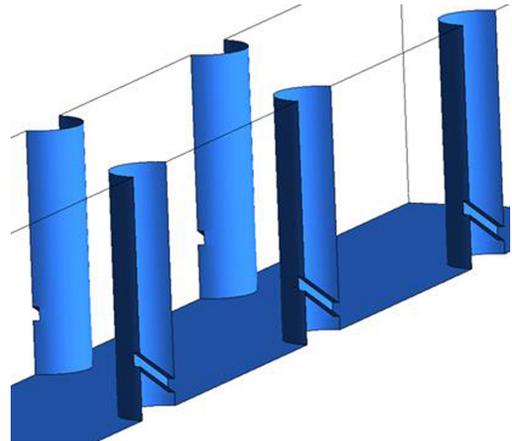
## 2. 연구 방법

### 2.1 해석 모델

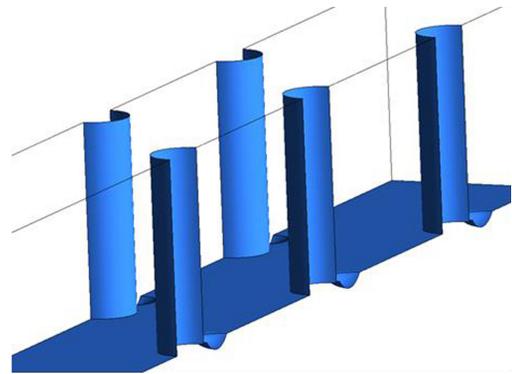
Fig. 1 은 해석에 사용할 변형 핀-핀 배열의 형상들을 보여주고 있다. Fig. 1(a)는 핀의 중앙부에 구멍을 관통시켜 주유동의 일부가 제트 형태로 핀-핀의 후면부에 충돌하도록 설계한 제트홀 핀-핀 구조이다. 제트홀이 바닥면과 핀-핀의 전면부 사이에서 발생하는 말발굽와류에 영향을 주지 않기 위해서 제트홀의 위치( $h_{jet}$ )는 바닥면으로부터 2.0D 만큼 떨어진 지점에 위치하게 된다. 제트홀의 직경( $d_{jet}$ )은 0.30D이며, 핀-핀의 후면부에 강한 충돌제트 효과를 가하기 위해서 45도 경사홀을 설치하였다.

Fig. 1(b)는 핀-핀의 후면부에 딴플을 설치한 딴플 핀-핀 복합구조의 형상을 보여주고 있다. 딴플은 핀-핀 후면부에서 0.50D 떨어져 있으며, 딴플의 직경( $d_{dim}$ ) 및 깊이( $h_{dim}$ )은 각각 0.50D 와 0.25D 이다. 딴플은 핀-핀의 후면부 바로 뒤에 위치하여 핀-핀의 후면부의 유동을 교란시키는 역할을 하게 된다.

두 모델 공통적으로 덕트의 종횡비 ( $W/H$ )는 4이며, 횡 방향 및 종 방향으로의 핀-핀 간 간격 ( $x/P$ )은 2.5D 이다. 앞 열과 뒷 열의 핀-핀은 서로 엇갈리도록 배치하였다. 전산해석 시 계산시간 단축을 위해 symmetric



(a) Pin-fin with inclined jet hole



(b) Pin-fin with dimple

Fig. 1 Complex pin-fin array

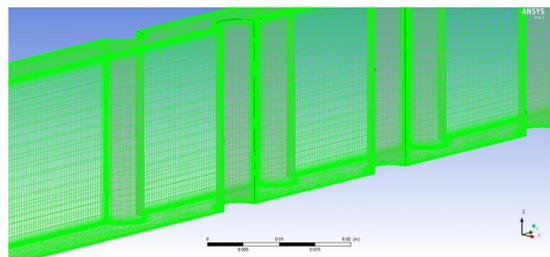


Fig. 2 Grid system for numerical analysis

조건으로 해석하였으며, 이를 위하여 그림에서 보이는 바와 같이 두 모델 모두 1개의 핀-핀 유로만을 가지는 대칭 형태 모델로 구성하였다. 더불어 기존의 핀-핀의 열전달 분포를 예측하기 위하여 핀-핀 배열의 기본적인 형태는 동일하나 제트홀 및 딴플이 없는 기본 모델도 생성하여 해석을 수행하였다.

### 2.2 해석 조건

복합 핀-휀 배열이 설치된 덕트 내의 열전달 계수를 예측하기 위하여 상용전산해석 프로그램인 ANSYS CFX 14.0을 이용하였다. 5,000,000 ~ 6,000,000 개의 정렬격자를 해석 모델에 맞춰 생성하였다. 특히 벽면 근처에서의 열 경계층 예측이 대류 열전달 계수 예측에 매우 중요한 요소이므로 전 영역에서  $y^+ < 1.0$  이하가 되도록 격자를 생성하였다. 전산해석 시 사용한 난류 모델은 유동의 천이 및 박리 예측 시 많이 사용되는 SST (Shear Stress Transportation) 천이모델을 사용하였다.

주유동 속도 및 온도는 각각 2.95 m/s와 300K이며, Reynolds 수는 덕트의 입구 수력직경 기준으로 10,000이다. 핀-휀 표면 및 덕트의 양 바닥면은 대류 열전달 계수를 계산하기 위하여  $10,000 \text{ W/m}^2$ 의 일정 열유속 조건으로 설정하였다. 덕트의 양 옆면은 대칭조건으로 해석을 하여 해석시간을 단축시키고자 하였다.

본 연구에서는 벽면의 대류열전달 계수( $h$ )를 통하여 덕트 내의 열전달 성능을 평가하였다. 대류 열전달 계수는 다음과 같이 정의된다.

$$h = \frac{\dot{q}}{(T_{wall} - T_{\infty})} = \frac{10,000 \text{ W/m}^2}{(T_{wall} - 300[\text{k}])} \quad (1)$$

### 3. 결과 및 검토

Fig.3 은 핀-휀이 설치된 덕트 바닥면에서의 대류 열전달 계수 분포를 보여주고 있다. 앞서 서론에서 설명한 바와 같이 핀-휀의 전면부에서는 말발굽 와류가 형성되어 매우 높은 열전달 계수 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다. 말발굽 와류에 의한 대류 열전달 상승효

과는 후열에 위치한 핀-휀으로 갈수록 증가 되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 기존의 연구결과와 일치하는 것으로 말발굽 와류에 의한 대류열전달 값은 3열 또는 4열의 핀-휀에서 최댓값에 도달하는 것으로 알려져 있다. 반면에 핀-휀의 후면부에서는 주유동의 박리에 의해 매우 낮은 대류 열전달 계수를 보이고 있다. 핀-휀을 중심으로 발생하는 대류 열전달 계수의 큰 차이는 덕트 바닥면에 국소적으로 큰 온도 차이를 발생시켜 열응력을 상승시키는 주요원인으로 꼽히고 있다.

### 3.1 경사제트 홀이 설치된 핀-휀 배열

핀-휀 후면부에서 낮은 대류 열전달 문제를 해결하기 위해 핀-휀 중심부에 경사 제트 홀을 설치했을 때의 대류 열전달 계수 분포를 Fig.4에서 보이고 있다. 핀-휀의 전면부에 있는 제트홀의 입구를 통해 주유동의 일부가 핀-휀의 후면부의 유동 박리 영역에 직접적으로 충돌하여 핀-휀 후면부의 바닥면에서의 대류 열전달 계수를 크게 상승시키는 것을 확인할 수 있다. 또한 제트가 바닥면에 충돌한 후 주유동을 따라 다음 열의 핀-휀에 도달하게 된다. 그 결과 핀-휀의 전면부에서 말발굽 와류를 형성하는 유동의 유량을 증가시키게 된다. 그 결과 두 번째 및 세 번째 핀-휀의 전면부에서 제트홀이 없을 때와 비교하여 대류 열전달 계수가 약 15% 이상 상승하는 것을 확인할 수 있다.

이와 같이 제트홀이 설치된 핀-휀의 경우 후면부에서의 대류 열전달을 상승시키는 효과뿐만 아니라 말발굽 와류에 의한 핀-휀 전면부에서의 대류 열전달 계수를 증가시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 일반적으로 말발굽 와류에 의해 발생하는 이차와류의 크기는

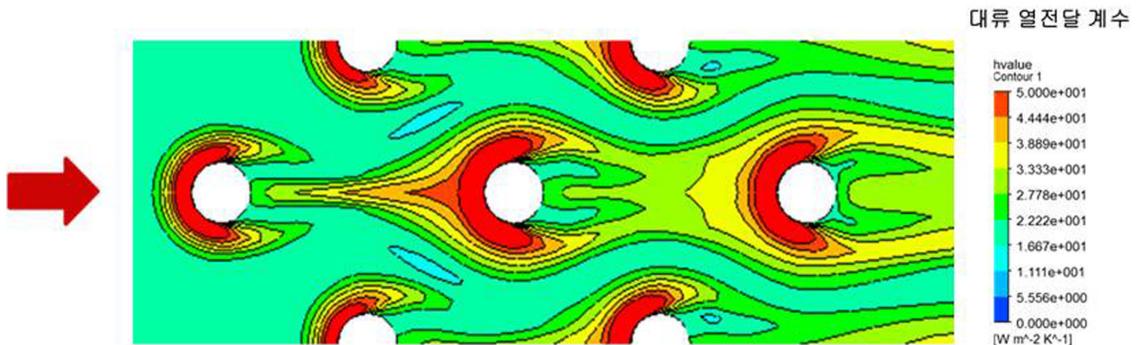


Fig. 3 Heat transfer coefficient distribution on duct wall with pin-fin

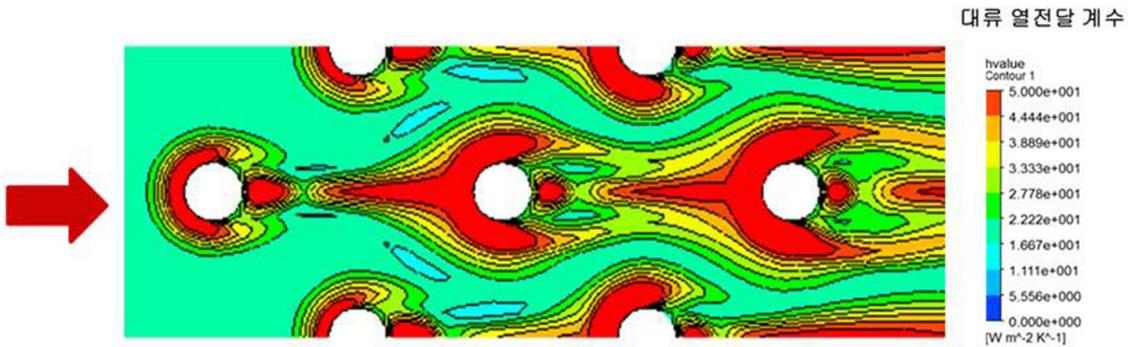


Fig. 4 Heat transfer coefficient distribution on duct wall with pin-fin with jet hole

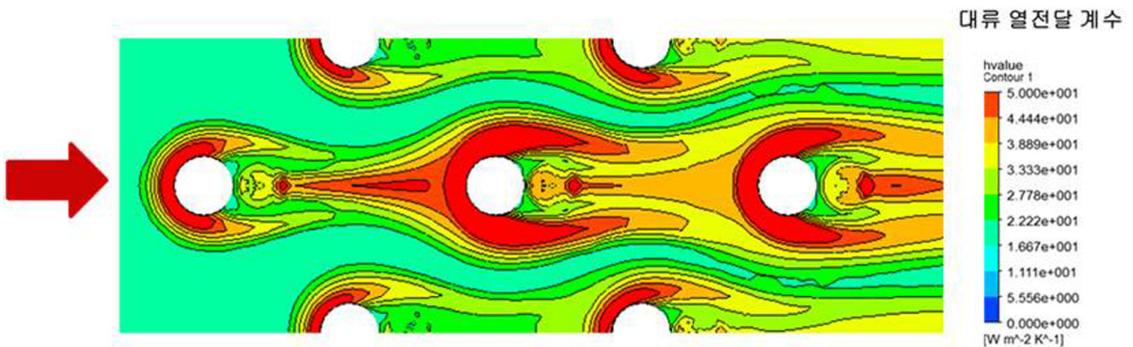


Fig. 5 Heat transfer coefficient distribution on duct wall with pin-fin and dimple array

핀-핀의 전면부에서 1.5D ~ 2.0D 정도가 된다고 널리 알려져 있다. 만약 제트홀이 말발굽 와류의 크기보다 낮은 곳에 위치하며 말발굽 와류의 형성을 방해하게 되어 핀-핀 전면부에서의 대류 열전달 계수가 낮아지게 된다. 그러므로 제트홀에 의해 핀-핀 전면부에서의 대류 열전달 계수 감소현상을 방지하고자 제트홀의 입구가 덕트의 바닥면에서 2.0D 이상에 위치하도록 설계하는 것이 중요하다.

### 3.2 핀-핀/딴플 복합 배열

핀-핀/딴플 복합 배열은 핀-핀의 후면부에서 대류 열전달을 향상시키기 위해서 핀-핀 후면부에 딴플을 설치하는 것이다. Fig. 5에서 보이는 바와 같이 딴플에 의해 핀-핀의 후면부 뿐만 아니라 다음 열의 핀-핀 전면부에서도 대류 열전달을 크게 상승하는 것을 확인할 수 있다.

딴플은 주변의 유동을 딴플 내부로 끌어당겨 대류 열전달을 상승시키는 역할을 하게 된다. 또한 끌어당겨진 유동은 딴플을 지나게 되면서 후류를 발생시키

게 되는데, 이는 다음 열에 위치한 핀-핀에서 발생하는 말발굽 와류의 발달 및 난류강도를 상승시키는데 도움을 주게 된다. 그 결과 제트홀이 설치된 핀-핀의 경우와 비슷하게 다음 열에 위치한 핀-핀의 전면부에서 대류 열전달이 크게 상승하는 것을 확인할 수 있다.

또한 딴플에서 발생한 후류는 제트 홀의 경우보다 넓은 영역에서 대류 열전달 계수를 상승시킨다. 그 결과 핀-핀/딴플 복합배열은 기본형상 및 제트홀이 설치된 핀-핀의 경우보다 대류 열전달 계수의 분포가 균일해지는 결과를 보여준다. 이는 대류 열전달 계수의 차이에 의해 발생하는 국소적 온도차를 줄여주게 되어 열응력을 감소시키는 효과를 가져 올 것으로 예상된다.

## 4. 결론

핀-핀 후면부에서 발생하는 낮은 대류 열전달 현상을 극복하고자 본 연구에서는 경사 제트홀을 설치한 핀-핀 및 핀-핀/딴플 복합 배열에서의 대류 열전달 특

성을 전산해석을 통해 연구하였다. 경사 제트홀 및 핀-휀/딴플 복합배열 모두 핀-휀 후면부에서 대류 열전달 계수를 크게 상승시키는 효과를 가져왔다. 더불어 제트 및 딴플에 의해 발생한 후류는 다음 열에 위치한 핀-휀 근처에서 말발굽 와류의 난류강도 및 덕트 바닥 면의 대류 열전달 계수가 크게 상승시켰다. 특히 핀-휀/딴플 복합 배열은 덕트 바닥면의 넓은 영역에서 대류 열전달 계수 향상을 도모하였을 뿐만 아니라 대류 열전달 계수의 국소적 차이가 크게 줄었다. 핀-휀/딴플 복합 배열을 설치한 덕트의 경우 기존의 핀-휀이 설치된 덕트에서 발생하는 국소적 온도 차에 의한 열응력이 크게 감소될 것으로 기대된다.

## References

- 1) Saravanamuttoo. H.I.H., Rogers. G.F.C. and Cohen. H., Gas Turbine Theory, Prentice Hall, Harlow, 2001.
- 2) Han, J.C., Dutta, S., and Ekkad, S.V., Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology, Taylor and Francis, New York, 2000.
- 3) Kim, K.M., Park, S.H., Jeon, Y.H., Lee, D.H. and Cho, H.H., "Heat/Mass Transfer Characteristics in Angled Ribbed Channels with Various Bleed Ratios and Rotation Numbers", Journal of Turbomachinery, 130, No.031021, 2008
- 4) Park, J. S., Kim, K. M., Lee, D. H., Cho, H. H., and Chyu, M. K., "Heat Transfer Coefficient on Rotating Channel with Various Heights of Pin-Fin", ASME paper No. 2008-GT-50783, 2008.
- 5) Park, J. S., Kim, K. M., Lee, D. H., Cho, H. H., and Chyu, M. K., "Heat Transfer in Rotating Channel With Inclined Pin-Fins", Journal of Turbomachinery, Vol. 133, Issue 2, pp. 021003-1-021003-8, 2011.