

Research Paper

DOI: <https://doi.org/10.6108/KSPE.2020.24.5.043>

가스터빈 블레이드 핀-휀 내부 냉각 유로에 분절핀 설치에 따른 바닥면 유동 및 열전달 특성

최석민^a · 김수원^b · 박희승^c · 김용진^d · 조형희^{c,*}

Effect on the Flow and Heat Transfer of Endwall by Installation of Cut Pin in Front of Pin-fin Array of Turbine Blade Cooling Passage

Seok Min Choi^a · Su Won Kim^b · Hee Seung Park^c · Yong Jin Kim^d · Hyung Hee Cho^{c,*}

^aDepartment of Plant Technology Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials, Korea

^bPower Plant Operation Division, POSCO ENERGY, Korea

^cSchool of Mechanical Engineering, Yonsei University, Korea

^dRepublic of Korea Navy, Korea

*Corresponding author. E-mail: hhcho@yonsei.ac.kr

ABSTRACT

The effect of cutted pin in front of pin-fin array was analyzed for increasing the cooling performance of gas turbine blade. The numerical simulations were conducted to figure out the flow and thermal characteristics. The base case which is staggered pin-fin array, cut pin case 1 which has $X_2/D_p=1.25$ cut pin and cut pin case 2 which has $X_3/D_p=1.75$ cut pin were compared. The results showed that cut pin increases the strength of the horseshoe vortex which occurred at the leading edge of pin-fin array. Furthermore, the wake effect is reduced at the trailing edge of pin-fin array. As a result, the heat transfer distribution on the endwall increases. However, the friction factor increases owing to the installation of cut pin, but the thermal performance factor is increased maximum 23.8% in cut pin case 2. Therefore, installation of cut pin will be helpful for increasing the cooling performance of pin-fin array of gas turbine blade.

초 록

가스터빈 블레이드의 핀-휀 배열의 냉각 성능을 향상시키기 위하여 분절핀을 설치하여 효과를 분석하였다. 분절핀의 위치에 따른 유동 및 열전달 특성 변화를 수치해석을 통해 분석하였다. 분절핀이 설치되지 않은 엇갈림 핀-휀 배열인 기준형상 와 분절핀이 $X_2/D_p=1.25$ 간격 떨어진 분절핀적용형상 1과 $X_3/D_p=1.75$ 간격 떨어진 분절핀적용형상 2 를 비교하였다. 해석 결과 분절핀의 설치로 인해 핀-휀 배열 전단부에서 발생하는 말발굽와류의 세기가 강화되는 것을 확인하였다. 또한 핀-휀 배열 후단부에서 발

Received 17 July 2020 / Revised 19 August 2020 / Accepted 23 August 2020

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

생하는 맴돌이 와류의 세기가 약해지는 것을 확인하였다. 이로 인해 바다면의 열전달 분포가 크게 상승하는 것을 확인 하였다. 반면 분절핀의 설치로 인해 압력손실은 증가하였으나, 열성능계수는 분절핀 적용형상 2 에서 최대 23.8% 가량 증가하는 것을 확인하였다. 이를 통해 향후 가스터빈 핀-휀 냉각 유로 설계 시 분절핀을 설치하면 냉각 성능이 증대 될 것으로 판단된다.

Key Words: Gas Turbine(가스터빈), Internal Cooling(내부 냉각), Cylinder(실린더), Cut Pin(분절핀), Heat Transfer(열전달)

Nomenclature

1. 서 론

D_p	: 핀-휀 지름
d	: 분절핀 지름
f	: 압력 손실 계수
f_0	: 매끈한 관의 압력 손실 계수
H_c/D_p	: 분절핀의 높이
H/D_p	: 유동장 높이
h	: 열전달계수
k	: 열전도도
L/D_p	: 유동장 길이
Nu	: 누셀 수
Nu_0	: 매끈한 관의 누셀 수
Pr	: 프란틀 수
Δp	: 입구와 출구의 압력 차이
Re	: 레이놀드 수
T_w	: 벽면 온도
T_i	: 입구 온도
TPF	: 열성능계수
U_i	: 평균 입구 속도
V	: 유동 속도
W/D_p	: 유동장 폭
X_1/D_p	: X축 방향으로의 핀-휀 배열 간격
X_2/D_p	: X축 방향으로의 분절핀적용형상 1 의 분절핀과 핀-휀 간격
X_3/D_p	: X축 방향으로의 분절핀적용형상 2 의 분절핀과 핀-휀 간격
Y/D_p	: Y축 방향으로의 핀-휀 배열 간격
ρ	: 공기 밀도
μ	: 점성계수

가스터빈 블레이드 내부 냉각에 사용되는 요철, 덤플, 핀-휀, 가이드 베인 등에 관한 연구는 많은 연구자들에 수행되어 왔다. 그들은 많은 실험 및 수치 해석 연구를 통해 내부 냉각 유로의 냉각 성능을 지속적으로 향상시켜 왔다.

Metzger[1-5], VanFossen[6-8], Hwang[9-12], Thole[13-17], Armstrong[18] and Gupta[19] 등은 핀-휀 배열이 설치된 유로의 열전달 및 압력 강하를 측정하기 위하여 많은 실험과 수치해석을 수행하였다. 그들은 핀-휀 배열의 형태, 핀-휀 배열의 간격, 유로의 높이, 채널의 형태, 핀-휀 배열의 기울기 등의 다양한 변수에 관하여 연구를 수행하였다. 이들은 유로의 열전달 분포 및 압력 강하량을 예측하기 위한 관계식을 도출하였다. 또한 핀-휀 배열의 간격이 지름의 2.5배 일 때 최적의 냉각 성능을 보이는 것을 발견하였다.

또한 다른 연구자들은 핀-휀의 형태 및 다른 구조물과의 조합에 따른 영향을 분석하였다. Kim 등[20] 은 수치해석을 통해 핀-휀의 다양한 형태를 비교하였다. 그들은 앞으로 기울어진 핀-휀 형상이 압력강하를 줄이는 것을 밝혀내었다. Uzol, O., 과 Camci, C.[21]는 타원형태의 핀-휀의 효과를 분석하였으며, 원형 핀-휀보다 압력 강하량이 줄어드는 것을 확인하였다. Rao, Y. 등 [22] 은 핀-휀이 설치된 유로에 덤플이 설치된 형태에 대하여 실험 및 해석을 수행하였다. 그들은 덤플이 적용된 경우 열전달이 증가하는 것을 밝혀내었다. Chyu, M. K.[23]는 핀-휀에 필렛이 적용되는 경우 압력강하량이 줄어드는 것을 확인하였다. Siw, S. C. 등[24] 은 삼각형 형태의

핀-핀 배열이 원형 핀-핀 배열보다 최대 약 20% 가량 높은 열전달 분포를 보이는 것을 확인하였다. Hwang, J. J., and Lu, C. C.[25]는 좁아지는 유로에서 다양한 핀-핀 형상을 비교하였으며, 사각형의 핀-핀이 원형, 다이아몬드 핀-핀 보다 열전달 분포가 높게 나타나는 것을 확인하였다. Jeng, T. M.[26]은 나란한 배열의 핀핀에서 실험을 수행하였으며, 최적의 핀-핀 간격을 도출하고 열성능계수를 예측 할 수 있는 관계식을 도출하였다. Luo, L. 등[27]은 좁아지는 유로에 덤플과 핀-핀이 설치된 영향을 분석하였으며, 덤플에 의해 핀-핀 배열의 열전달 분포가 증가됨을 밝혀내었다.

이렇듯 많은 연구자들이 다양한 형태의 핀-핀 배열에서 냉각성능을 향상시키고자 하는 연구를 수행하였다. 또한, 그들은 핀-핀에 의해 발생하는 다양한 유동 및 열전달 특성에 대해서도 밝혀내었다. 이에 본 연구에서도 핀-핀의 전단부에 분절핀을 설치하여 핀-핀의 전단부에서 발생하는 말발굽 와류의 세기를 조절해 냉각성능을 높이는 연구를 수행하였다. 두가지 위치의 분절핀의 유동 및 열전달 특성 변화에 대하여 분석하였다. 이를 통해 향후 가스터빈 블레이드 핀-핀 내부 냉각 유로 설계시 유용한 데이터로 쓰일 것으로 판단된다.

2. 연구 방법

2.1 형상 설명

유동 및 열전달해석에 사용한 형상은 Park 등 [28]의 실험 설비를 참고하여 설계 하였다. 유로의 총 길이 (L/D_p)는 30 이며 높이 (H/D_p)는 2 이다. 또한 유로의 폭 (W/D_p)는 12 이다. 또한 핀-핀 배열 및 분절핀의 형상은 Fig. 1 과 같다. 먼저 Fig. 1(a)는 분절핀이 설치되지 않은 일반적인 핀-핀 배열의 형상을 나타내고 있다. 각각의 핀-핀의 지름(D_p)은 6.35 mm 이다. 핀-핀의 배열은 엇갈림 배열로 설치하였으며 가로, 세로 방향의 배열은 각각 $X_1/D_p=2.5$, $Y/D_p=2.5$ 로 설계하였다. 이를 기존형상으로 명명하였다. 다음

Fig. 1(b)는 분절핀이 설치된 경우를 나타낸다. 먼저 분절핀의 지름의 크기(D_c)는 핀-핀의 지름의 절반인 3.175 mm 로 설계하였다. 이때 분절핀과 핀-핀의 간격은 $X_2/D_p=1.25$ 가 되도록 설치하였다. 또한 분절핀의 높이(H_c/D_p)는 핀-핀의 높이의 1/4 의 크기가 되도록 설계하였으며, 바닥면과 윗면에 모두 설치하였다. Fig. 1(c)는 마

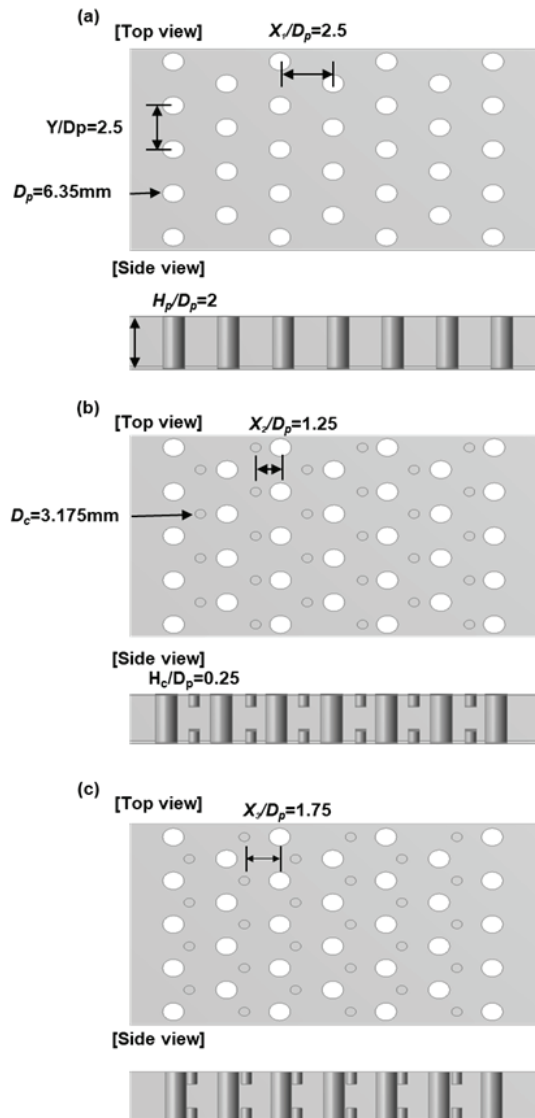


Fig. 1 Geometry of different cut pin and pin-fin array; (a) base case (b) cut pin case 1 and (c) cut pin case 2.

찬가지로 분절핀이 설치된 경우를 나타낸다. 분절핀의 지름, 높이는 Fig. 1(b) 와 같으나 분절핀의 위치가 $X_3/D_p=1.75$ 가 되는 위치에 설치하였다. 또한 분절핀은 첫 번째 핀-휀 배열을 제외한 나머지 두 번째부터 일곱 번째 핀-휀 배열 전단부에 설치하였다. 그리하여 Fig. 1(b) 와 Fig. 1(c) 를 각각 분절핀적용형상 1, 분절핀적용형상 2 로 명명하였다.

2.2 수치해석 방법

분절핀 배열의 효과를 확인하기 위하여 본 연

구에서는 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 상용 유동 해석 프로그램인 ANSYS CFX (ver.15) 를 사용하였다. 유동의 입구 조건은 핀-휀의 지름과 유속(U_i)을 기준으로 하여 $Re=7,000$ 이 되도록 유량을 설정하였다. 온도는 $25^{\circ}C$ 로 설정하였다. 출구는 대기 조건인 $1 atm$ 을 주었다. 열전달 효과를 확인하기 위하여 바닥면에는 등온 조건을 주었으며 $35^{\circ}C$ 로 설정하였다. 양 옆의 벽은 단열조건으로 설정하였다. 또한 벽면 근처의 경계층에서의 열전달값의 정확도를 높이기 위하여 $y+$ 값은 1이 되도록 격자 크기를 조절하였다. 이때 해석을 위하여 1천 만 개의 격자를 형성하였다. 난류모델은 선행 논문을 참고하여 가장 예측이 잘 되는 SST 난류 모델을 선정하였다. Fig. 2 는 수치해석 결과를 선행 연구 결과와 비교한 논문이다. 먼저 Fig. 2(a) 결과를 살펴보면 평균 열전달 값이 실험 값과 5% 이내의 유사한 값을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 2(b) 의 국소 열전달 분포를 살펴보면 말발굽과

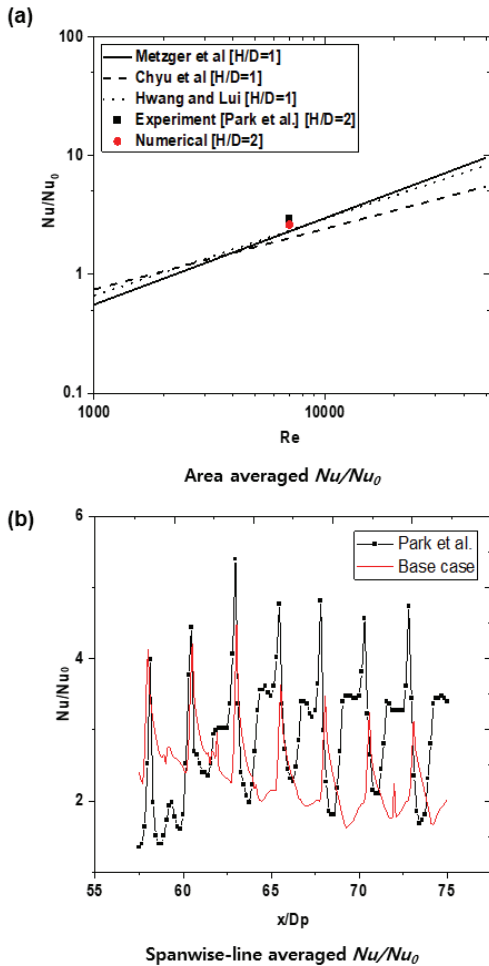


Fig. 2 Validation of numerical simulation; (a) area averaged value Nu/Nu_0 (b) spanwise-line averaged Nu/Nu_0

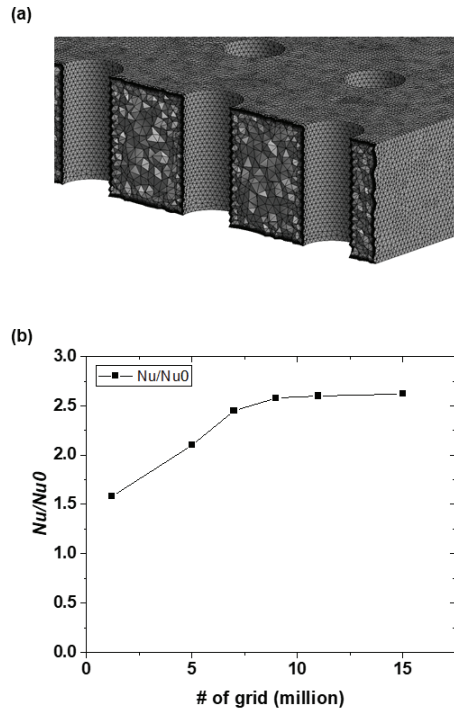


Fig. 3 (a) Schematic of mesh grid (b) Grid independence test.

류에 의해 열전달이 높게 나타나는 영역은 유사하게 나타나지만, 후류로 갈수록 절대값의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구의 결과는 정성적인 결과는 신뢰성이 높으나 정량적인 결과는 실험값과 다소 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

또한 해석에 사용한 격자 형상과 격자 독립성 테스트 결과를 Fig. 3에 제시하였다. 먼저 Fig. 3(a)는 약 1 천 만 개의 격자를 구성한 기존 형상의 단면이다. 삼각형태의 격자로 구성하였으며, 핀-핀의 주변에 프리즘 격자를 구성하였다. 이는 벽면 근처에서의 유동 및 열전달의 해석의 정확도를 높이기 위함이다. Fig. 3(b)는 격자 독립성 분석 결과이다. 분석 결과 약 9~11 백 만 개의 격자에서 열전달 값이 어느정도 수렴하는 경향을 보이는 것을 확인하였다. 이에 본 연구에서는 1 천 만 개의 격자를 구성하여 모든 해석 조건을 비교하였다.

2.3 분석 방법

본 연구에서는 유동 특성 및 열전달 특성을 비교하기 위하여 다음 식을 사용하였다. 먼저 바닥면의 열전달 분포를 비교하기 위하여 누셀 수 (Nu)를 계산하였으며 이는 다음과 같다.

$$Nu = \frac{D_p h}{k} \quad (1)$$

이때, h 는 대류열전달 계수, k 는 유체의 열전도도이다. 이때 대류열전달 계수 h 는 아래와 같은 식으로 계산되었다.

$$h = \frac{q}{T_w - T_i} \quad (2)$$

이때, q 는 벽면에서의 열유속이며, T_w 는 벽면의 온도, T_i 는 입구 유동 평균 온도이다. 또한 아무것도 설치되지 않은 매끈한 유로의 누셀 수(Nu_0)는 다음과 같다.

$$Nu_0 = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (3)$$

이때 Pr 은 프란틀 수이다. 또한 유로 내의 압력 손실을 계산하기 위하여 다음과 같은 압력 손실 계수(f)를 계산하였다.

$$f = \frac{\Delta p}{2\rho u_i^2} \times \frac{D_p}{L} \quad (4)$$

이때, Δp 는 입구와 출구의 압력 차이이며, 이는 평균 입구 속도, ρ 는 공기 밀도, L 은 유로 길이를 나타낸다. 또한 아무것도 설치 되지 않은 매끈한 유로의 압력 손실 계수(f_0)는 다음과 같다.

$$f_0 = (0.079 \ln(Re) - 1.64)^{-2} \quad (5)$$

또한 이러한 열전달 분포와 압력손실계수를 종합적으로 비교할 수 있는 열성능계수(TPF)는 다음과 같다.

$$TPF = \frac{Nu/Nu_0}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (6)$$

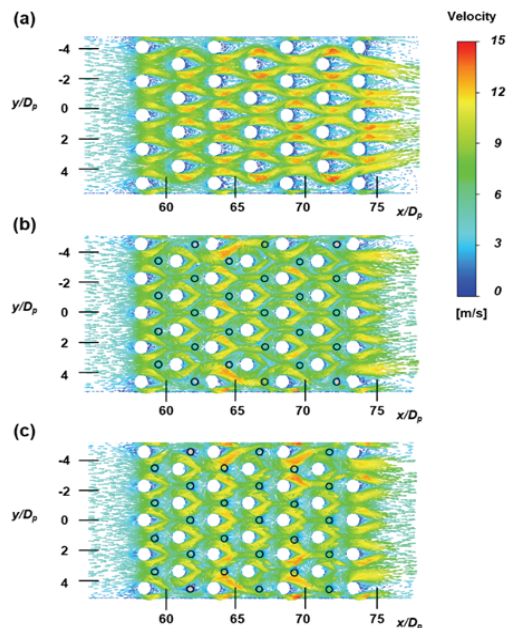


Fig. 4 Flow distributions for different cases; (a) base case (b) cut pin case 1 and (c) cut pin case 2.

위와 같은 관계식을 통해 열전달 상승효과와 압력손실 효과를 종합적으로 판단 할 수 있다.

3. 연구 결과

3.1 핀-핀 배열 유로의 유동 특성

Fig. 4 는 채널의 50% 높이의 단면의 속도 분포를 나타낸다. 먼저 Fig. 4(a) 를 살펴보면 핀-핀 배열의 전단부에서 유속이 느려지는 것을 알 수 있다. 이후 핀-핀 배열 사이로 유동이 가속된다. 유동이 핀-핀의 절반을 지나가게 되면, 핀-핀 주변에 유동박리 현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 핀-핀 배열 후단에서 멤돌이 와류가 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 점차 유동이 발달 됨에 따라 유동 가속 현상이 빨라지는 것을 알 수 있다. 반면 Fig. 4(b) 와 Fig. 4(c) 를 살펴보면 유속이 전체적으로 느려지는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 설치된 분절핀으로 인해 유동의 저항이 커지게 되어 상대적으로 유속이 느려지는 경향을 보이게 된다. 또한 분절핀이 설치된 경우 두 번째 핀-핀 배열 후단에 발생하는 멤돌이 와류를 억제시키는 것을 알 수 있다. 이는 분절핀에 의해 유동이 가속되어 상대적으로 멤돌이 와류의 세기가 작아지는 것을 알 수 있다. 하지만 Fig. 4(c) 의 경우 분절핀 후단에서 작은 크기의 멤돌이 와류가 형성되는 것을 알 수 있다.

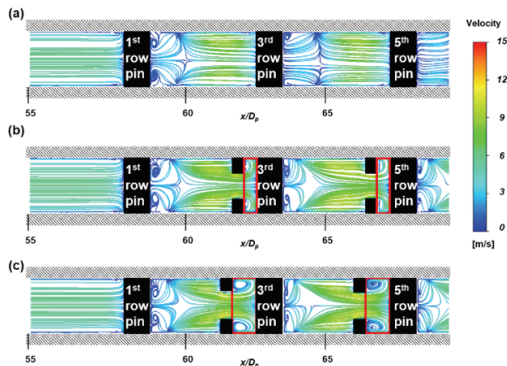


Fig. 5 Flow distributions at $y/D_p=0$ plane; (a) base case (b) cut pin case 1 and (c) cut pin case 2.

이러한 현상을 자세히 살펴보기 위하여 $y/D_p=0$ 평면에서의 속도 분포를 Fig. 5 에 제시하였다. 먼저 Fig. 5(a) 를 살펴보면, 분절핀이 없는 경우 각각의 핀-핀 배열 전단부에 말발굽 와류가 형성되는 것을 알 수 있다. 또한 각각의 핀-핀 배열 후단에 유동 박리현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 반면 Fig. 5(b) 를 살펴보면 첫 번째 핀-핀 배열 후단에서는 기존형상과 유사한 유동 특성이 나타난다. 반면 세 번째 핀-핀 배열 앞에는 분절핀이 설치되어 다른 유동 특성이 나타난다. 붉은색으로 표시된 영역을 살펴보면, 분절핀에 의해 박리된 유동이 분절핀과 핀-핀의 사이의 공간으로 유입되는 것을 알 수 있다. 이로 인해

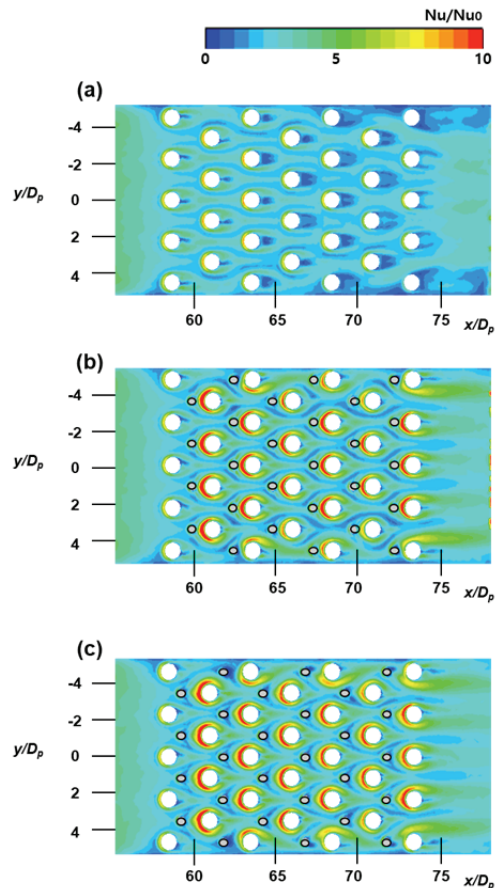


Fig. 6 Heat transfer distributions of the endwall; (a) base case (b) cut pin case 1 and (c) cut pin case 2.

해당 영역에서 재순환(recirculation) 효과가 발생하여 말발굽와류의 세기를 강화시키는 것을 알

수 있다. 또한 세 번째 핀-핀 배열 후단에서 발생하는 유동 박리의 크기가 기존형상에 비하여

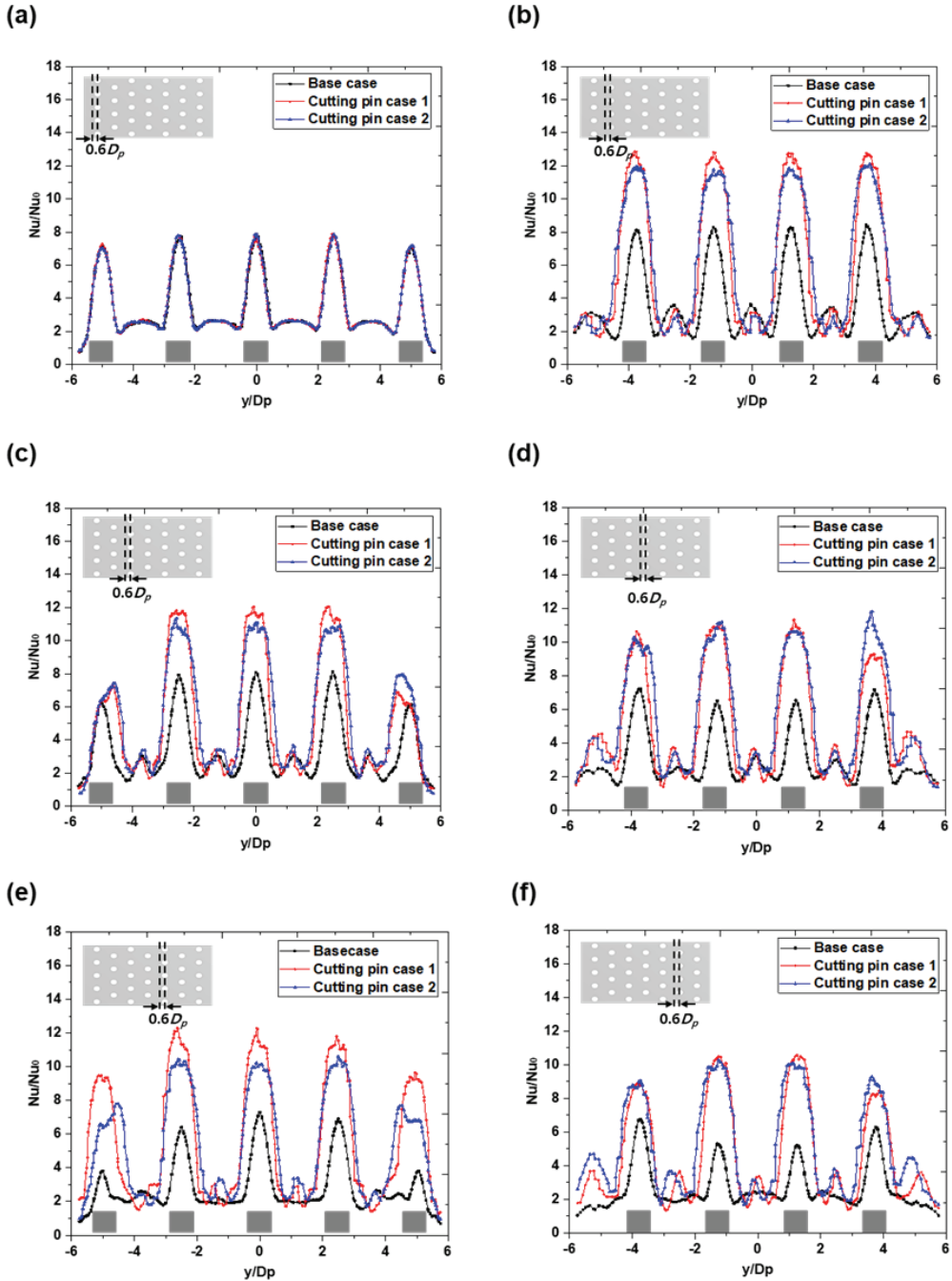


Fig. 7 Local heat transfer distributions at $0.6D_p$ ahead of each row; (a) 1st row, (b) 2nd row, (c) 3rd row, (d) 4th row, (e) 5th row, (f) 6th row and (g) 7th row.

상대적으로 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 다섯 번째 핀-핀 배열에서도 유사하

게 나타나는 것을 알 수 있다. 이와 유사하게 Fig. 5(c) 를 살펴보면 첫 번째 핀-핀 배열 후단

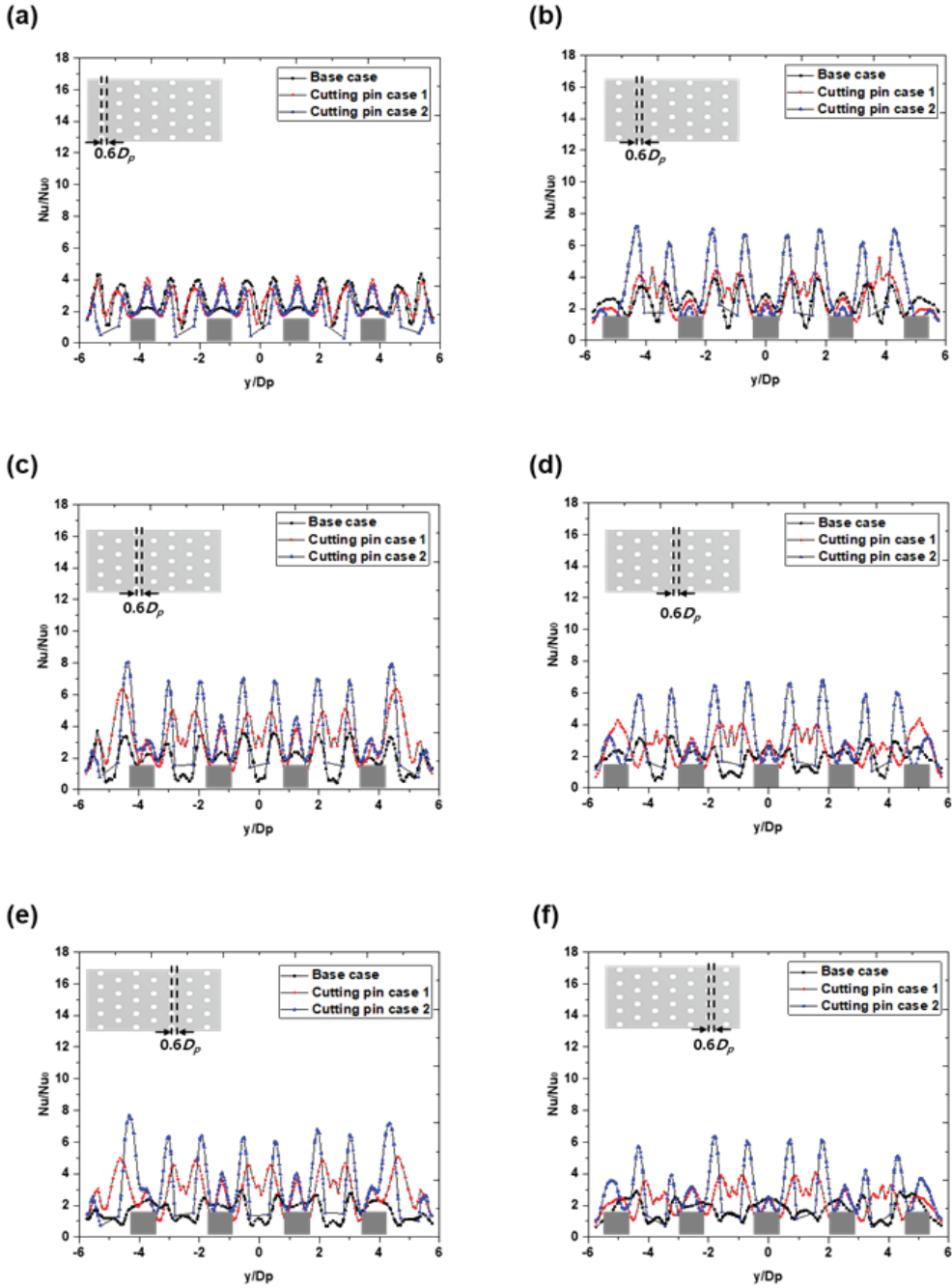


Fig. 8 Local heat transfer distributions at $0.6D_p$ behind of each row:

(a) 1st row, (b) 2nd row, (c) 3rd row, (d) 4th row, (e) 5th row, (f) 6th row and (g) 7th row.

의 유동분포는 기존형상 와 유사하다. 반면 세 번째 핀-휠 배열 앞에는 분절핀의 위치가 달라짐에 따라 다른 형태의 유동 특성이 나타난다. 분절핀적용형상 1 과 달리 분절핀과 핀-휠 배열 사이의 간격이 상대적으로 넓어 붉은색으로 표시된 영역에서의 재순환(recirculation) 효과가 더 크게 나타난다. 이는 다섯 번째 핀-휠 배열에서도 유사하게 나타난다. 따라서 이와 같은 유동 특성은 바닥면의 열전달 분포에 영향을 미치게 된다.

3.2 핀-휠 배열 유로의 열전달 특성

Fig. 6은 바닥면의 열전달 분포를 나타낸다. 먼저 Fig. 6(a) 를 살펴보면 핀-휠 배열의 전단부에서 높은 열전달 분포가 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 말발굽와류가 발생하기 때문이다. 또한 핀-휠 배열 주변에 높은 열전달 분포를 보인다. 반면 핀-휠 배열 후단에서는 멤돌이 와류의 발생으로 인해 낮은 열전달 분포가 나타나게 된다. 이러한 경향은 핀-휠 배열 전체에서 유사하게 나타난다. 또한 유동이 발달함에 따라 점차 열전달 분포의 크기가 작아지는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 반면 Fig. 6(b) 를 살펴보면 첫 번째 배열의 열전달 분포는 기존형상과 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 반면 분절핀이 설치된 두 번째 배열에서는 기존형상과 다른 열전달 분포가 나타나는 것을 알 수 있다. 두 번째 배열의 핀-휠 전단부에서 높은 열전달 분포가 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 분절핀에 의해 발생한 재순환(recirculation) 효과가 말발굽와류의 세기를 강화시키기 때문이다. 이러한 경향은 나머지 배열의 핀-휠 에서도 유사하게 나타난다. 또한 핀-휠 배열 후단의 열전달도 상승하는 경향을 보인다. 이는 분절핀에 의해 멤돌이 와류의 세기가 작아지게 되기 때문이다. 이러한 경향은 Fig. 6(c) 에서도 유사하게 나타난다. 분절핀적용형상 1 과 마찬가지로 두 번째 핀-휠 배열의 전단부에서 발생하는 말발굽와류의 세기가 강해져 높은 열전달 분포가 나타난다. 특히 분절핀적용형상 2의 경우 말발굽와류가 영향을 미치는 범위가 분절핀적용형상 1 보다 상대

적으로 넓게 나타난다. 이러한 경향은 나머지 핀-휠 배열에서도 모두 유사하게 나타난다. 또한 분절핀적용형상 2 에서도 분절핀에 의해 핀-휠 배열 후단의 멤돌이 와류의 세기가 작게 나타나게 되어 열전달 분포가 증가하게 된다. 반면 분절핀에 의해 유동이 박리되어 일부 열전달이 감소하는 영역이 발생한다. 이러한 효과를 정량적으로 자세히 분석하여 Fig. 7 에 제시하였다.

Fig. 7은 각 핀-휠 배열로부터 $0.6D_p$ 거리만큼 떨어진 전단 위치에서의 y축 방향으로의 국소 열전달 분포를 나타낸다. 먼저 Fig. 7(a) 를 살펴보면 기존형상, 분절핀적용형상 1, 분절핀적용형상 2 의 국소 열전달 분포가 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 해당 영역은 분절핀의 영향을 받지 않기 때문에 유사한 열전달 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 반면 Fig. 7(b) 를 살펴보면 분절핀적용형상 1 과 분절핀적용형상 2 의 열전달 분포가 기존형상 에 비해 크게 상승하는 것을 알 수 있다. 이는 해당 영역에서의 말발굽와류의 세기가 강화되어 열전달 분포가 크게 증가하는 경향을 보인다. 또한 분절핀적용형상 1 의 증가량이 분절핀적용형상 2 보다 큰 것을 알 수 있다. 또한 이러한 경향은 Fig. 7(c)-(f)까지 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 다만 유동이 점차 발달함에 따라 전체적으로 열전달 분포는 감소하는 경향을 보인다. 또한 벽면 근처의 열전달 분포는 가운데 유로의 열전달 분포보다 작게 나타나는 것을 알 수 있는데 이는 벽면의 경계층이 발달하는 벽효과 때문이다.

또한 Fig. 8 은 핀-휠 배열로부터 $0.6D_p$ 거리만큼 떨어진 후단 위치에서의 y축 방향으로의 국소 열전달 분포를 나타낸다. 먼저 Fig. 8(a) 의 국소 열전달 분포를 살펴보면 Fig. 7(a) 에 비해 전체적으로 열전달 분포가 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 해당 영역에서 멤돌이 와류의 발생으로 인하여 전체적으로 낮은 열전달 분포를 보이기 때문이다. 반면 Fig. 8(b) 를 살펴보면 분절핀이 설치된 분절핀적용형상 1 과 분절핀적용형상 2의 경우 기존형상 에 비하여 열전달 분포가 상승하는 경향을 보인다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 분절핀에 의해 유동이 가속되어 멤돌

이 와류의 세기가 작아지기 때문이다. 이러한 효과는 분절핀적용형상 2 가 분절핀적용형상 1 보다 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이로 인해 분절핀적용형상 1 에서 가장 큰 열전달 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 8(c)-(f) 에서도 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 유동이 점차 발달됨에 따라 전체적으로 열전달 분포가 감소하는 경향을 보이며, 벽효과로 인해 벽면의 열전달 분포가 가운데 영역의 열전달 분포보다 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만 분절핀적용형상 2 의 경우 분절핀적용형상 1 보다 상당히 큰 열전달 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 이는 분절핀적용형상 2 의 분절핀이 더욱 효과적으로 멤돌이 와류의 세기를 줄이는 것으로 판단된다.

이러한 열전달 분포를 종합적으로 판단하기 위하여 선평균 과 면적평균 열전달 분포를 Fig.

8에 제시하였다. 먼저 Fig. 9(a) 의 y축 방향으로의 평균 열전달 분포를 살펴보면, 분절핀적용형상 1과 2 모두 기존형상 에 비해 향상된 열전달 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 특히 유동이 발달함에 따라 분절핀에 의한 열전달 분포 증가 효과는 더욱 증대됨을 알 수 있다. 또한 Fig. 9(b) 는 전체 면적평균 열전달 분포를 나타낸다. 결과를 살펴보면 분절핀적용형상 2 가 기존형상 에 비해 약 32.6% 가량 향상된 열전달 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 이는 분절핀적용형상 2 가 핀-핀 배열의 전단부 뿐 만 아니라 후단부의 열전달도 효과적으로 증가시키기 때문이다.

마지막으로 Fig. 10 과 Fig. 11 은 압력손실계수와 열성능계수를 나타낸다. 먼저 Fig. 10의 압력손실계수를 살펴보면 기존형상 에 비해 분절핀적용형상 1과 분절핀적용형상 2 가 각각 16.7%, 23.1% 가량 증가한 것을 알 수 있다. 이

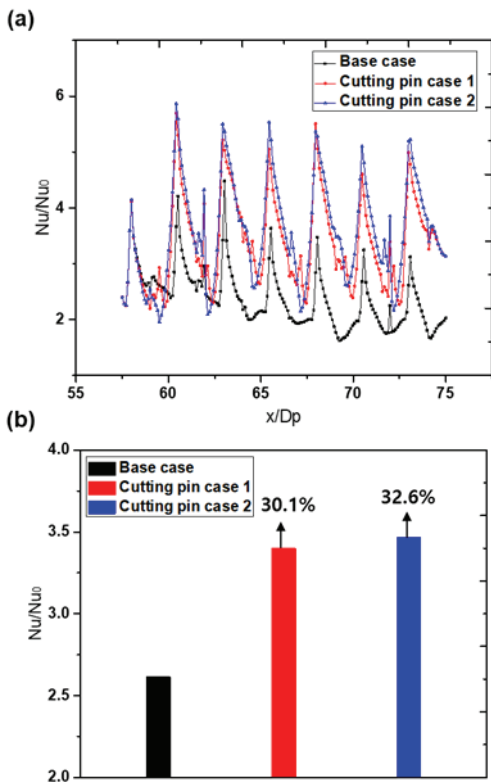


Fig. 9 (a) vertically averaged heat transfer distribution (b) area averaged heat transfer distribution.

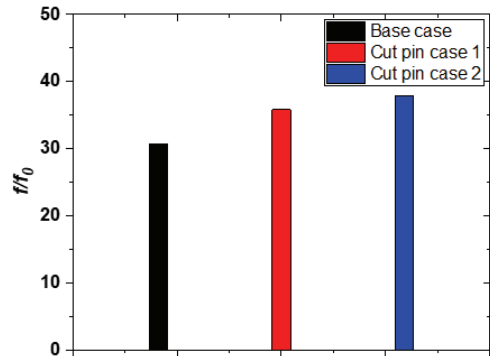


Fig. 10 Friction factor ratio

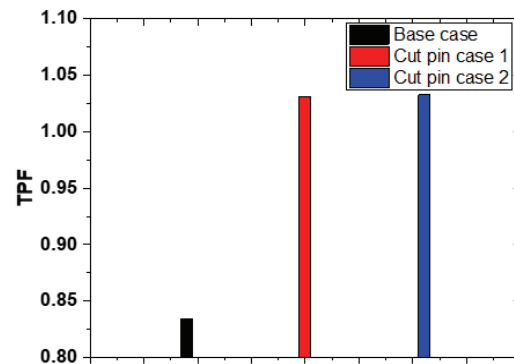


Fig. 11 Thermal performance factor.

는 분절핀의 설치로 인해 유동의 저항이 증가되기 때문이다. 이를 통해 Fig. 11의 열성능계수를 계산한 결과를 살펴보면, 기존형상에 비해 분절핀적용형상 1과 분절핀적용형상 2가 각각 23.6%, 23.8% 가량 증가한 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과를 통해 분절핀을 설치하는 경우 압력손실계수가 증가하지만 열전달 분포의 증가량이 더 크기 때문에 열성능계수는 증가하는 것을 알 수 있다. 이를 통해 향후 가스터빈 핀-핀 냉각 유로 설계 시 분절핀을 적용한다면 냉각 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 다만 최적의 냉각 성능을 보일 수 있는 분절핀의 크기와 위치를 찾는 연구는 추가적으로 수행되어야 한다. 또한 본 연구의 해석 조건의 경우 실제 운전하는 가스터빈의 온도와는 다르므로 향후 추가적인 검증이 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 핀-핀 배열 전단부에 설치된 분절핀 효과를 수치해석을 통해 비교 분석하였다. 분절핀을 핀-핀 배열 전단부에 설치하는 경우 재순환(recirculation) 효과가 증가되어 말발굽 와류의 세기가 강화되었다. 또한 핀-핀 배열 후단의 맴돌이 와류의 세기도 약해지는 경향을 보였다. 이로 인해 바닥면의 열전달 분포가 크게 상승되는 경향을 보였다. 따라서 기존형상에 비해 분절핀적용형상 2의 열성능계수가 최대 23.8% 가량 증가하는 것을 확인하였다. 이를 통해 가스터빈 내부 냉각 유로 설계 시 분절핀을 핀-핀 배열 전단부에 설치한다면 냉각 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2020년도 산업통상부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 인력양성사업 연구 과제(No.20204030200110)의 연구입니다. 또한, 2019년도 정부(산업통상자

원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구이며(20193310100030, 3D 프린팅 공정 제어 및 설계 최적화 기법(DfAM) 적용을 통한 F급 이상의 고효율 냉각터빈 고온부품 기술 개발), 이에 감사드립니다.

References

1. Metzger, D. E., Fan, C. S., and Haley, S. W., "Effects of pin shape and array orientation on heat transfer and pressure loss in pin fin arrays" *Journal of Engineering and Gas Turbine Power*, Vol. 106, No. 1, pp. 252-257, 1984.
2. Metzger, D. E., Berry, R. A., and Bronson, J. P., "Developing heat transfer in rectangular ducts with staggered arrays of short pin fins" *Journal of Heat Transfer*, Vol. 104, No. 4, pp. 700-706, 1982.
3. Metzger, D. E., Florschuetz, L. W., Takeuchi, D. I., Behee, R. D., and Berry, R. A., "Heat transfer characteristics for inline and staggered arrays of circular jets with crossflow of spent air" *Journal of Heat Transfer*, Vol. 101, No. 3, pp. 526-531, 1979.
4. Florschuetz, L. W., Berry, R. A., and Metzger, D. E., "Periodic streamwise variations of heat transfer coefficients for inline and staggered arrays of circular jets with crossflow of spent air" *Journal of Heat Transfer*, Vol. 102, No. 1, pp. 132-137, 1980.
5. Metzger, D. E., and Haley, S. W., 1982, "Heat transfer experiments and flow visualization for arrays of short pin fins" *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 79597, p. V004T09A007, 1982.
6. VanFossen, G. J., "Heat-transfer coefficients for staggered arrays of short pin fins" *Journal of Engineering and Power*, Vol. 104, No. 2, pp. 268-274, 1982.

7. Simoneau, R. J., and VanFossen, G. J., "Effect of location in an array on heat transfer to a short cylinder in crossflow" *Journal of Heat Transfer*, Vol. 106, No. 1, pp. 42-48, 1984.
8. Brigham, B. A., and VanFossen, G. J. "Length to diameter ratio and row number effects in short pin fin heat transfer" *Journal of Engineering and Gas Turbine Power*, Vol. 106, No. 1, pp. 241-244, 1984.
9. Hwang, J. J., Lai, D. Y., and Tsia, Y. P., "Heat transfer and pressure drop in pin-fin trapezoidal ducts" *Journal of Turbomachinery*, Vol. 121, No. 2, pp. 264-271, 1999.
10. Hwang, J. J., and Lui, C. C., "Detailed heat transfer characteristic comparison in straight and 90-deg turned trapezoidal ducts with pin-fin arrays" *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 42, No. 21, pp. 4005-4016, 1999.
11. Hwang, J. J., and Lui, C. C., "Measurement of endwall heat transfer and pressure drop in a pin-fin wedge duct" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, No. 4, pp. 877-889, 2002.
12. Hwang, J. J., and Lu, C. C., "Detailed Heat Transfer Distribution on the Endwall of a Trapezoidal Duct with an In-Line Pin Array" *International Journal of Rotating Machinery*, Vol.8., No.9, 2002.
13. Lyall, M. E., Thrift, A. A., Thole, K. A., and Kohli, A., "Heat transfer from low aspect ratio pin fins" *Journal of Turbomachinery*, Vol. 133, No. 1, 2012
14. Lawson, S. A., Thrift, A. A., Thole, K. A., and Kohli, A., "Heat transfer from multiple row arrays of low aspect ratio pin fins" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, No. 17-18, pp. 4099-4109, 2011.
15. Kirsch, K. L., and Thole, K. A., "Pressure loss and heat transfer performance for additively and conventionally manufactured pin fin arrays" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 108, pp. 2502-2513, 2017.
16. Ostanek, J. K., and Thole, K. A., "Effects of varying streamwise and spanwise spacing in pin-fin arrays" *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 44700, pp. 45-57, 2012.
17. Kirsch, K. L., Ostanek, J. K., Thole, K. A., and Kaufman, E., "Row Removal Heat Transfer Study for Pin Fin Arrays" *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 45714, p. V05AT12A006, 2014.
18. Armstrong, J. E. F. F. R. E. Y., and Winstanley, D. A. V. I. D., "A review of staggered array pin fin heat transfer for turbine cooling applications" *Journal of Turbomachinery*, Vol. 110, No. 1, pp. 94-103, 1988.
19. Gupta, S., Chaube, A., and Verma, P., "Review on Heat Transfer Augmentation Techniques: Application in Gas Turbine Blade Internal Cooling" *Journal of Engineering Science & Technology Review*, Vol. 5, No. 1, 2012.
20. Kim, M., Ha, M. Y., and Min, J. K., "A numerical study on various pin - fin shaped surface air - oil heat exchangers for an aero gas-turbine engine" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 93, pp. 637-652, 2016.
21. Uzol, O., and Camci, C., "Elliptical Pin Fins as an Alternative to Circular Pin Fins for Gas Turbine Blade Cooling Applications: Part 1—Endwall Heat Transfer and Total Pressure Loss Characteristics" *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 78521, p.V003T01A056, 2001.

22. Rao, Y., Xu, Y., and Wan, C., "An experimental and numerical study of flow and heat transfer in channels with pin fin-dimple and pin fin arrays" *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 38, pp. 237-247, 2012.
23. Chyu, M. K., "Heat transfer and pressure drop for short pin-fin arrays with pin-endwall fillet" *Journal of Heat Transfer*, Vol. 112, No. 4, pp. 926-932, 1990.
24. Siw, S. C., Chyu, M. K., and Alvin, M. A., "Heat transfer enhancement of internal cooling passage with triangular and semi-circular shaped pin-fin arrays" *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 44700, pp. 493-503, 2012.
25. Hwang, J. J., and Lu, C. C., "Lateral-flow effect on endwall heat transfer and pressure drop in a pin-fin trapezoidal duct of various pin shapes" *Journal of Turbomachinery*, Vol. 123, No. 1, pp. 133-139, 2001.
26. Jeng, T. M., "Thermal performance of in-line diamond-shaped pin fins in a rectangular duct" *International communications in heat and mass transfer*, Vol. 33, No. 9, pp. 1139-1146, 2006.
27. Luo, L., Wang, C., Wang, L., Sundén, B., and Wang, S., "Heat transfer and friction factor performance in a pin fin wedge duct with different dimple arrangements" *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, Vol. 69, No. 2, pp. 209-226, 2016.
28. Park, J. S., Kim, K. M., Lee, D. H., Cho, H. H., and Chyu, M. K., "Heat transfer on rotating channel with various heights of pin-fin" *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 43147, pp. 727-734, 2008.