

유출유동을 가진 정사각유로 내 열전달 향상을 위한 경사진 요철 최적설계

이 현* · 김경민* · 이동현* · 조형희†
(2007년 11월 20일 접수, 2008년 2월 13일 심사완료)

Optimization of Angled Ribs for Heat Transfer Enhancement in a Square Channel with Bleed Flow

Hyun Lee, Kyung Min Kim, Dong Hyun Lee and Hyung Hee Cho

Key Words: Angled Rib(경사진 요철), Bleed Hole(유출홀), Heat Transfer(열전달), Optimization
(최적화), Response Surface Method(반응면 기법)

Abstract

In the present study, the second order response surface method (RSM) is carried out to get optimum thermal design for enhancing heat transfer in a square channel with bleed flow. The RSM is used as an optimization technique. To calculate the heat transfer, RNG k-epsilon model and enhanced wall function are used. To design optimum rib turbulators, two design variables such as attack angle of rib (α) and rib pitch-to-rib height ratio (p/e) are optimized. In these analyses, the channel inlet Reynolds number was fixed at 10,000 in both non-bleeding and bleeding cases. The response surfaces of two design variables are constructed in cases with and without bleed flow. As a result, the optimum (or highest) heat transfer values are almost the same in ranges of two cases with and without bleed flow. However, the friction losses in the case with bleed flow are lower than those without bleed flow.

기호설명

BR_{Hole} : 각 유출홀 당 유출유량 비, $\dot{m}_{hole}/\dot{m}_{inlet}$
 d : 유출홀 직경 (mm)
 D_h : 유로수력직경 (mm)
 e : 요철 높이 (mm)
 H : 덕트 높이 (mm)
 w : 요철 너비 (mm)
 W : 유로의 폭 너비 (mm)
 \dot{m}_{hole} : 유출홀 유출유량 (kg/s)
 \dot{m}_{inlet} : 유입유량 (kg/s)
 p : 요철 간 간격 (mm)

R^2 : 결정계수
 R^2_{adj} : 자유도가 조정된 결정계수
 Re : 수력직경기준 Reynold 수, $D_h u_b / \nu$
 u_b : 주유동 평균속도
 Nu : Nusselt 수
 Nu_o : 요철이 없는 원형관에서의 Nu 수
 f : 마찰 계수
 f_o : 매끈한 원형관에서의 마찰계수
 x : 주유동 방향 거리 (mm)
 y : 덕트 중심으로부터 횡방향 거리 (mm)

그리스문자

μ : 점성계수
 ρ : 밀도
 ν : 동점성계수
 η : 열전달 성능계수, $(Nu/Nu_o)/(f/f_o)^{1/3}$

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학부
 E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr
 TEL : (02)2123-2828 FAX : (02)312-2159
 * 연세대학교 대학원 기계공학과

1. 서론

가스터빈 엔진의 열효율을 향상시키고자 터빈 입구 온도(TIT: Turbine Inlet Temperature)는 매년 높아지고 있다. 이에, 고온으로부터 가스터빈 부품들을 보호하기 위해 다양한 냉각 기술을 사용하고 있다. 대표적인 냉각기술로는 내부관 냉각, 막냉각, 충돌제트 냉각 등이 있으며, 더 높은 냉각효율을 위해 실제 가스터빈에서는 이들 냉각기술을 복합적으로 사용하고 있다.⁽¹⁾ 이와 같은 복합적인 냉각기법의 설계를 위해서는 각각의 인자에 따른 열전달 특성 파악 및 복합적인 영향을 고려한 설계 기법이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 내부유로 내 요철 형상과 막냉각에 따른 유출유동 등의 각각의 인자가 열전달, 압력강하 및 내부유동에 미치는 영향을 파악하기 위해 반응면 기법을 이용한 최적설계 연구를 진행하였다.

내부관 냉각 연구에서 내부관의 형상을 변화시켜가며 최적 조건을 찾기 위한 실험연구는 Han 등⁽²⁾이 요철의 각도($\alpha=15^\circ\sim90^\circ$)와 요철간 거리 대 요철의 높이 비($p/e=10, 20$)가 열전달과 마찰계수에 미치는 영향을 실험하여, 요철의 각도가 60° 근처에서 열전달은 최대값을 가지며, 요철간 간격이 증가할수록 마찰계수의 값은 감소함을 보였다. 또한, Kim과 Kim^(3,4)은 최적화 기법을 통해 요철사이 및 각도들의 최적지점을 찾는 연구를 통해 최적화 기법이 열설계에 적합한 것을 밝혀내었고, 각도가 55.4° 일 때 최적 값을 갖는 것을 찾아내었다.

복합 냉각 특성 연구로는 Douglas 및 Philip⁽⁵⁾이 정지한 1차 유로에 요철과 유출을 설치하여 유출유량을 변화시켜가며 유출이 없을 때 보다 유출이 있는 경우 열전달 특성이 높게 나타남을 밝혀내었다. 또한 Park 등⁽⁶⁾은 $45^\circ, 90^\circ$ 요철과 유출홀을 설치하여 각도와 유출유량에 따른 열전달 특성을 고찰하였고, 그 결과 45° 요철의 경우 유출유량에 따라 열전달이 낮아지지만, 마찰 계수가 더 크게 낮아지면서 성능 계수가 높아짐을 보였다. Rigby 등⁽⁷⁾과 Stephensem 등⁽⁸⁾은 수치해석을 통해 유출홀과 요철이 설치된 유로에서 열전달 특성에 대하여 고찰 하였으며, 유출홀 출구부분에서 복잡한 유동구조를 밝혀냈다. 이와 같은 연구들은 대부분 몇 가지 선택된 형상에 대하여 각각의 설계변수가 열전달 성능 및 압력강하에 미치는 영

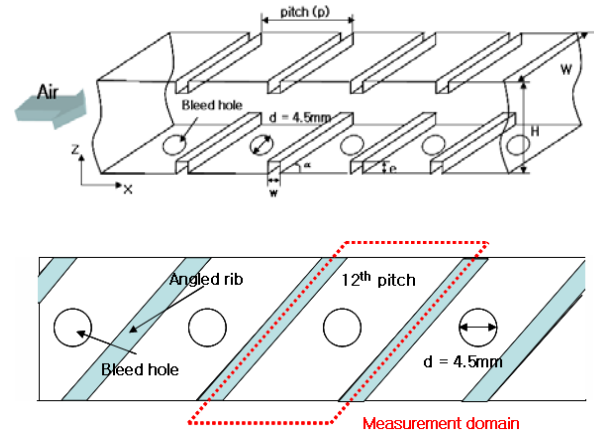


Fig. 1 Design variables and parameters

향만을 연구하였을 뿐, 요철의 형상이나 유출홀 등의 다양한 설계변수의 영향을 동시에 고려하여 열전달 특성이 가장 잘 나타나는 최적 설계변수를 찾아내지는 못하였다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 막냉각을 위하여 한쪽 벽에 유출홀이 설치 되어있고, 내부관 냉각을 위하여 양쪽 벽면에 요철이 설치된 경우에 대해, 각도(α)와 요철과 요철간 거리대 요철의 높이 비(p/e)를 설계변수로 선택하여, 상용 CFD 코드인 Fluent 6.2를 이용해 3차원 열·유동해석과 최근 Kim과 Kim^(3,4)에 의해 효과적인 최적화 기법으로 알려져 있는 최적화 기법 중 하나인 반응면 기법(Response Surface Method)을 결합하여, 설계 범위 내 가장 높은 열전달 및 가장 낮은 압력강하가 나타나는 설계점을 도출하는 최적설계를 수행하였다.

2. 연구방법

2.1 수치해석

본 연구에서는 복잡한 3차원 열·유체해석을 위하여 상용 소프트웨어인 Fluent 6.2를 사용하였다. 난류 모델은 RNG k- ϵ 모델⁽⁸⁾을 사용하였으며, 벽 가까이에서 열전달을 정확히 계산하기 위하여 Enhanced wall function을 사용하였다. 격자계는 비정렬 격자계로 구성하였으며, 벽 근처 속도 구배의 정확한 해석을 위해 벽 근처의 격자는 y^+ 가 1.0 내외가 되도록 매우 조밀하게 격자를 구성하였다. 경계조건은 입구온도가 $T_{in}=300\text{ K}$, 요철을 제외한 벽면 온도가 $T_b=423\text{ K}$, 유량은 $Re=10,000$

으로 주었다. 열전달 계산을 위하여 요철을 제외한 요철사이의 표면에 일정한 벽면 온도 조건 (Constant temperature)을 사용하였고, 난류 강도 (Turbulence intensity)는 5%를 설정하였다. 그리고 열전달 값과 마찰계수의 변화가 2% 미만인 영역의 값을 읽기 위해 12번째 pitch에서의 평균값들을 각 설계조건에서 비교하였다.

2.2 최적화 기법 (반응면 기법)

본 연구에서는 여러 설계변수의 영향을 동시에 고려하여 설계변수에 대한 반응표면을 근사 모델링하고 해석하기 위한 최적화 기법인 반응면 기법⁽¹⁰⁾을 사용하였다. 반응면 기법은 크게 2차 근사 반응 다항식을 생성하기 위한 최소자승법 (Least square method)과 변수선택법 (Variable selection method), 회귀분석 (Regression analysis), 근사화된 함수를 평가하기 위한 분산분석 (ANOVA), 그리고 반응면을 만들기 위한 반응치를 구하기 위해 설계 공간에 통계적으로 실험점들을 선택하는 실험계획법 (Design of Experiments)으로 나누어진다.

2차 근사 반응 함수는 일반적으로 2차식 다항식의 형태를 갖고 있으며, 각 항의 미지 상수들은 회귀분석을 통하여 구하게 된다. 먼저 주어진 설계 공간상에서 반응면을 구성하는데 필요한 정보를 얻기 위해 실험계획법으로부터 구성된 정해진 실험점들을 대상으로 실험 또는 수치해석이 수행되어야 한다. 본 연구에서는 두 개의 설계변수에 대한 실험점을 얻기 위해 D-optimal 기법⁽¹¹⁾을 이용하여 유출유동이 없는 경우와 유출유동이 있는 경우 각각 23개와 12개의 실험점들을 선택하였다.

2.3 설계변수 및 목적함수

설계변수로는 내부관 냉각과 막냉각을 고려한 복합냉각에 대한 연구를 수행하기 위하여 막냉각을 위한 유출홀 유무에 따라 경사진 요철 (α)과 요철 간 거리 대 요철의 높이 비 (p/e)를 동시에 고려한 최적설계를 수행하였다. 그리고 Fig. 1과 Table 1과 같이 요철의 각도 (α)와, 요철간 거리 대 요철의 높이비 (p/e)를 설계변수로 선택하였다. 또한 실제 유출홀에 대한 실험 결과인 Park 등⁽⁶⁾의 결과와 비교해보기 위하여 실험 모델과 같이 한쪽 벽면에 유출홀이 설치되고, 양쪽 벽에 평행

Table 1 Design variables and design space

Design variable	Lower bound	Upper bound
α	30°	80°
p/e	5	15
BR _{hole}	0.0, 0.01	

한 요철이 설치된 덕트에서 덕트 종횡비 (W/H), 요철의 크기 (w/e)와 유출홀의 크기 (d)를 고정시키고, 유출홀의 위치는 요철과 요철사이 중앙에 위치시켰다. 작동조건으로는 덕트 입구에서 Reynolds 수가 10,000이 되도록 고정하였고, 유출유동이 있을 경우, 각 홀에서 입구유동의 1%의 유동 (BR_{hole}=0.01)을 유출시켰다.

설계 목적함수는 열전달과 마찰계수에 대한 최적설계를 수행하기 위하여 열전달계수와 마찰계수를 목적함수로 정의하였고, 다음과 같이 나타냈다. 열전달 목적함수 $F_{Nusselt}$ 는 열전달 효과를 나타내는 향으로 무차원 열전달 계수로 나타내었다.

$$F_{Nusselt} = \frac{Nu}{Nu_0} \quad (1)$$

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (2)$$

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

이때, h 는 평균 열전달계수, D_h 는 수력직경을 의미하며, Nu_0 은 매끈한 원형관 내의 완전발달 난류 유동에 대한 열전달식이다.

마찰 손실을 나타내는 향은 다음과 같이 정의하였다.

$$F_{friction} = \left(\frac{f}{f_0} \right) \quad (4)$$

$$f = \frac{\Delta P}{4(L/D_h)(0.5\rho v^2)} \quad (5)$$

$$f_0 = 2(2.23\ln Re - 4.639)^{-2} \quad (6)$$

여기서, f_0 는 매끈한 관에서 완전 발달된 유동에 대한 마찰계수이다.

또한 각 유로에서의 열전달 성능계수를 다음식

과 같이 정의하였다.

$$n = (\text{Nu}/\text{Nu}_0)/(f/f_0)^{1/3} \quad (7)$$

4. 결과 및 검증

4.1 수치해석 검증

열전달 해석에 수치해석을 이용하기 위하여 실제 실험 결과와 비교를 통한 검증을 하였다. 먼저 열전달 수치해석의 격자 의존성을 제거하기 위해 45° 요철에 대하여 Fig. 2와 같이 다양한 격자 분포에 따른 격자 의존성 테스트를 수행하였고, 그 결과 약 900,000개 이상에서 격자 의존도가 사라짐을 알 수 있었다. 또한 수치해석을 이용한 난류 열전달 해석의 타당성 검증을 위해 Fig. 2와 같이 Park 등⁽⁶⁾의 국소적인 열전달 값을 비교하였다. 비록 수치해석 값이 실험값과 완전히 일치하지는 않았지만 요철에 의한 재순환, 재부착 되는 영역에 대한 경향성은 잘 맞는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 3에서는 Han 등^(12,13), Wu 등⁽¹⁴⁾에 각도에 따른 다양한 실험 결과와 현재 수행된 수치해석 결과와 비교하였다. 비록 정량적인 차이는 나타났지만 그 경향성은 매우 유사하였다.

Fig. 4에서는 Park 등⁽⁶⁾의 유출유량에 따른 45° 경사진 요철에 대한 실험결과를 수치해석 결과와 비교하였다. 비록 실험에서는 각 홀당 유량이 최대 3%정도 차이와 수치모델 등의 이유로 수치해석 결과가 실험값과 정확하게 일치하지는 않았지만 그 경향성은 매우 유사하였다.

4.2 최적 설계 결과 및 분석

반응면 기법에 의해 추정된 반응면의 신뢰성을 검증하기 위하여 회귀분석과 분산분석을 통해 반응면의 신뢰성을 검증하였다.

Table 2와 3은 유출홀이 없을 때와 있을 때에 대한 회귀분석 결과이다. 반응면 기법에 의해 얻어진 반응값이 정확히 예측된 경우 결정계수 (R_{adj}^2)가 1에 가까워진다. 반응면의 결정계수가 $0.9 \leq R_{adj}^2 \leq 1.0$ 일 때 2차 근사 반응면 다항식의 미지수항들이 적합한 것으로 알려져 있으며,⁽¹⁰⁾ 이 결과들에서 보듯이 현재 만들어진 반응면 모두 이 조건에 충족하였다.

따라서 본 연구에서 형성된 반응면과 설계변수의 최적 설계 값은 신뢰할 만한 것으로 판단할 수 있으며, 반응면이 잘 모사되었다고 할 수 있다.

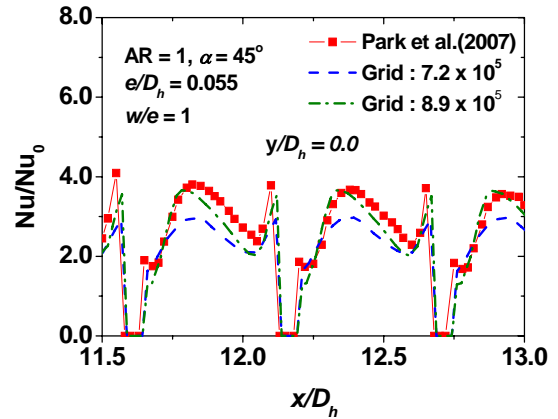


Fig. 2 Grid dependency test and comparison with experiment data

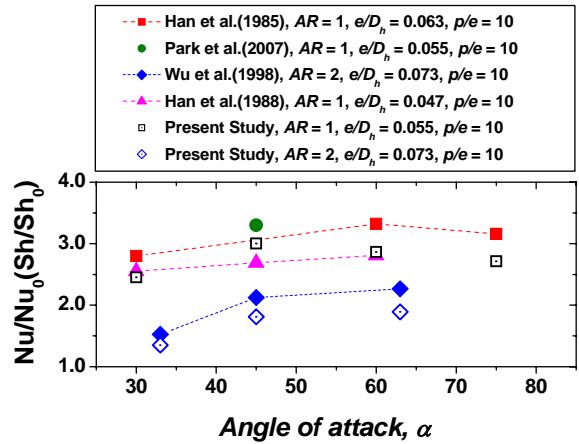


Fig. 3 Averaged Nusselt number ratios for angles

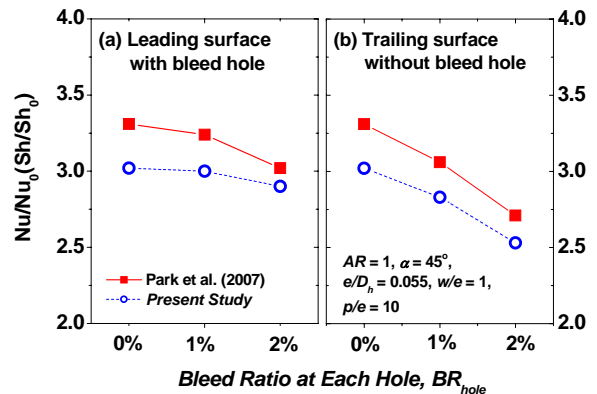


Fig. 4 Averaged Nusselt number ratios for bleed rate

다음은 유출홀이 없을 때에 반응면 기법에 의해 추정된 각각의 목적함수에 따른 근사 2차 반응면 다항식을 식 (8), (9)에 나타내었으며, 유출홀이 있을 때의 반응면 식은 식 (10), (11)에 나타내었다.

유출홀 없을 때

$$F_{Nusselt} = 0.3516 + 0.08714(\alpha) + 0.02498(p/e) - 0.000796513(\alpha)^2 - 0.00066957(p/e)^2 - 0.00077154(\alpha)(p/e) \quad (8)$$

$$F_{Friction} = -0.4214 + 0.2884(\alpha) - 0.3169(p/e) - 0.002461(\alpha)^2 + 0.0094212(p/e)^2 - 0.00062537(\alpha)(p/e) \quad (9)$$

Subject to:

$$30^\circ \leq \alpha \leq 80^\circ, 5 \leq p/e \leq 15$$

유출홀 있을 때

$$F_{Nusselt} = 1.5552 + 0.05837(\alpha) - 0.07596(p/e) - 0.0005443(\alpha)^2 + 0.002269(p/e)^2 - 0.00040462(\alpha)(p/e) \quad (10)$$

$$F_{Friction} = -5.2172 + 0.2053(\alpha) + 0.4749(p/e) - 0.0018221(\alpha)^2 - 0.019254(p/e)^2 - 0.00058844(\alpha)(p/e) \quad (11)$$

Subject to:

$$30^\circ \leq \alpha \leq 80^\circ, 5 \leq p/e \leq 15$$

유출홀이 없을 때와 유출홀이 있을 때에 각 변수에 따른 높은 평균 열전달 값과 낮은 구간 마찰계수 값을 도출하는 2차 근사 반응면 다항식은 식 (8)~(11)과 같다. 이와 같은 반응식으로부터 각각의 인자에 의한 영향을 알아보기 위해 Fig. 5~8과 같이 나머지 변수들을 고정시키고, 각도 및

Table 2 Regression analysis in case without bleed flow

Objective Function	R	R ²	R ² _{adj}
F _{Nusselt} (X)	0.988192	0.976524	0.9700032
F _{friction} (X)	0.976467	0.953488	0.9405691

Table 3 Regression analysis in case with bleed flow

Objective Function	R	R ²	R ² _{adj}
F _{Nusselt} (X)	0.997677	0.995359	0.9920461
F _{friction} (X)	0.991644	0.983357	0.9714719

요철간격이 열전달과 마찰계수에 미치는 영향을 관찰하였다.

Fig. 5는 유출홀이 없는 덕트와 유출홀이 설치된 덕트에 대해 각도에 따른 평균 열전달 값을 나타낸 그림이다. 유출이 있는 경우와 없는 경우 모두, 요철의 각이 45°와 55°사이에서 가장 높은 열전달이 나타나는 것을 볼 수 있었는데 이는 이 각도 사이에서 요철로 인한 이차유동의 세기가 가장 커지기 때문이다. 또한, 요철 간 거리 대 요철의 높이 비(p/e)가 감소함에 따라 가장 높은 열전달 값이 나타나는 요철의 각도가 조금씩 증가하였다. 이와 같은 결과로부터 요철간격이 작을 경우, 최적 요철각도보다 작은 요철각도에서 이차유동간의 간섭이 증가하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 6은 각도에 따른 마찰 계수를 나타낸 그림이다. 각도에 상관없이 유출유동이 있는 경우[Fig. 6(b)]가 유출유동이 없는 경우[Fig. 6(a)]보다 마찰

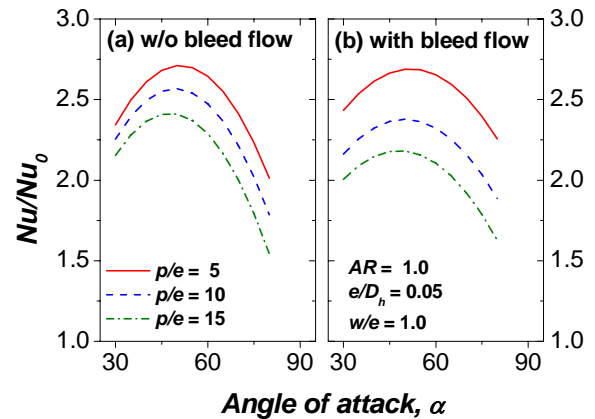


Fig. 5 Effects of Rib angles on heat transfer with and without bleed flow

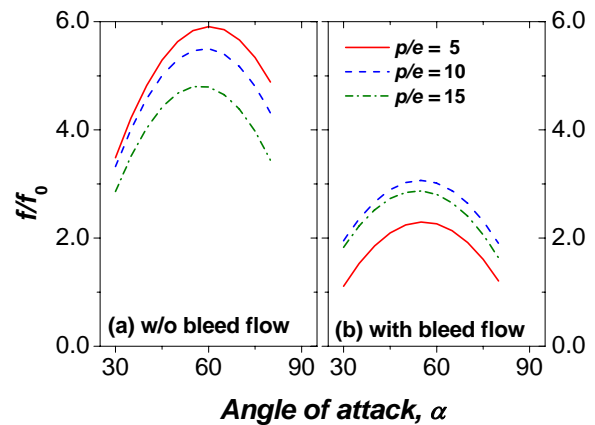


Fig. 6 Effects of Rib angles on friction loss with and without bleed flow

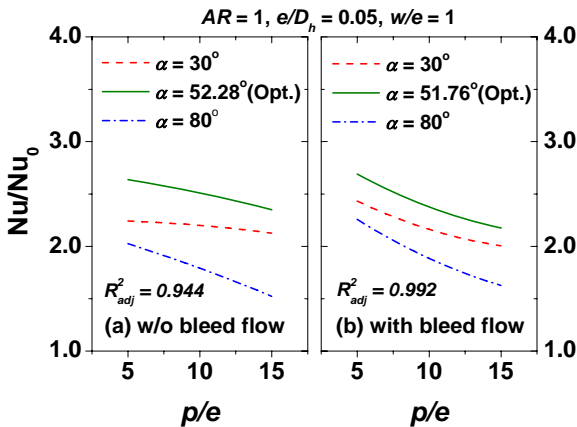


Fig. 7 Effects of rib-to-rib pitch on heat transfer

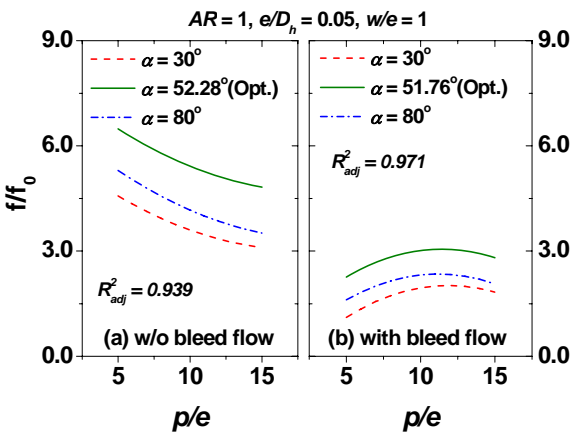


Fig. 8 Effects of rib-to-rib pitch on friction loss

계수가 낮게 나타났다. 이는 Park 등⁽⁶⁾에 의해 밝혀졌듯이, 유출홀 만큼의 마찰면 감소와 각 홀로의 유량 감소 때문이다. 또한, 유출유동이 있는 경우, 요철간 간격(p/e)이 5일 때 유출홀이 요철에 매우 가까워지면서 요철로 인한 재부착보다 유출홀로 빠져 나가는 유출량의 영향이 매우 커짐에 따라 덕트 내부의 압력차가 줄어들어 마찰계수가 매우 낮게 나타났다.

Fig. 7은 유출유동의 유무에 따라 요철 각도에 대해 요철간 거리(p/e)가 변할 때 열전달 값이 변하는 것을 나타낸 그림이다. 유출유동의 유무와 상관없이 요철간 거리가 증가함에 따라 열전달은 감소하였는데, 이는 각도진 요철에서는 각도진 요철에 의한 이차유동이 요철의 개수가 많아질수록 그 강도가 더욱 증가하기 때문이다. 또한, 본 결과에서 30도 요철이 설치된 덕트 내에서 p/e 가 커짐에 따라 다른 각도에 비해 열전달 변화 폭이 매우 적은 것을 볼 수 있었는데, 이는 각도가 작아질수록 각도진 요철에 의한 이차유동의 생성이

Table 4 Optimization of heat transfer

	α	p/e	Nu/Nu_0	ff_0	η
without bleed hole	52.28°	5	2.637	6.416	1.419
with bleed hole	51.76°	5	2.690	2.271	2.047

Table 5 Optimization of friction factor

	α	p/e	Nu/Nu_0	ff_0	η
without bleed hole	30°	15	2.126	3.010	1.458
with bleed hole	30°	5	2.433	1.108	2.351

감소하기 때문이다.

Fig. 8은 요철간 거리(p/e)에 따른 마찰 계수 분포이다. Fig. 8(a)을 보면 p/e 가 증가할수록 마찰 계수가 감소하였으나, Fig. 8(b)은 요철간 거리가 증가할수록 점차 증가하다 감소하였다. 이는 유출유동이 없는 경우, 일정공간에서 요철의 개수가 감소하기 때문이다. 또한, 유출유동이 있는 경우, 요철간격이 작을 때는 유출유동이 재부착 현상보다 크게 나타나기 때문에 크게 감소하였다가 요철간격이 커지면서, 점차 재부착으로 인한 영향이 커지면서 마찰계수가 증가하였고, 더욱 요철간격이 커지면 유출이 없는 경우와 마찬가지로 일정공간에서의 요철 개수가 감소하기 때문이다.

Table 4와 같이 열전달에 대한 최적 설계점이 나타났으며, 여기서 최적 각도 설계점은 Kim과 Kim⁽⁴⁾에 연구결과와 유사하였다. 또한, 본 연구결과에서 유출유동이 없을 때 보다 있을 때 조금 더 열전달이 향상되었으나, 유출유동이 열전달을 크게 향상 시키지는 못하였다.

Table 5는 마찰 계수에 따른 최적 설계점을 나타내었다. 앞서 그림에서 보았듯이 마찰 계수의 경우 각각의 최적 설계점에서 막냉각을 위해 설치된 유출홀의 영향이 설치되지 않았을 때보다 매우 크게 영향을 미치고 있는 것을 알 수 있다. 특히 요철간 거리가 유출홀에 가까워질수록 유출유동에 의한 영향이 크게 나타났다. 따라서 마찰 계수의 경우 유출유동이 주요 인자로 작용하여 유출유동이 있을 때 마찰계수 값이 유출홀이 없을 때보다 2배 이상 낮게 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 유출홀이 없을 때 경사진 각도와 요철간 거리에 대한 열전달과 마찰계수에 대한 최적설계와 한쪽 벽면에 유출홀이 있고 양쪽 벽면에 평행하게 요철이 설치된 사각 덕트에 대하여 높은 열전달 성능과 낮은 마찰계수를 얻을 수 있는 최적 설계를 수행하였다. 먼저 실험과 수치해석의 결과 비교를 통하여 신뢰할 만한 정확성을 보였고, 여러 형상의 실험점들을 계산하여 최적화를 수행하였다. 목적함수는 열전달과 마찰계수의 영향을 알아보고 최적설계를 수행하기 위하여 실험에서 사용되는 계산식들을 사용하였다. 최적설계 결과는 열전달의 경우 각각의 최적 설계점에서 유출이 없을 때 보다 각 유출홀에서 주유동의 1%가 유출 될 때, 열전달은 약 2.5%정도 향상되었고, 마찰 계수는 유출홀 만큼의 마찰면 감소와 각 유출홀에서의 유량 감소로 인해 유출홀이 없을 때보다 있을 때 2배 이상 마찰 계수가 감소하였다. 이와 같은 결과를 통해 블레이드 내부의 덕트에 막냉각을 위해 설치된 유출홀은 열전달에는 크게 영향을 미치지 않지만 마찰계수에는 큰 영향을 미치는 인자라는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 전력기반조성사업센터 주관 전력산업기술개발사업의 지원에 의한 결과이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Han, J. C., Dutta, S. and Ekkad, S. V., 2000, *Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology*, Taylor & Francis.
- (2) Han, J. C., Park, J. S. and Lei, C. K., 1985, "Heat Transfer Enhancement in Channels with Turbulence Promoters," *ASME J. of Eng. for Gas Turbines and Power*, Vol. 107, pp. 628~635.
- (3) Kim, H. M. and Kim, K. Y., 2004, "Design Optimization of Rib-roughened Channel to Enhance Turbulent Heat Transfer," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 5159~5168.
- (4) Kim, H. M. and Kim, K. Y., 2006, "Shape Optimization of Three-dimensional Channel Roughened by Angled Ribs with RANS Analysis of Turbulent Heat Transfer," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 4013~4022.
- (5) Douglas, T. and Philip, P., 2000, "Experimental Heat Transfer and Bulk Air Temperature Measurements for a Multipass Internal Cooling Model with Ribs and Bleed," ASME Paper No. 2000-GT-233.
- (6) Park, S. H., Jeon, Y. H., Kim, K. M., Lee, D. H. and Cho, H. H., 2007, "Effects of Bleed Flow and Angled Ribs on Heat Transfer Distributions in a Rotating Square Channel," *Trans. of KSME(B)*, Vol. 31, No. 1, pp. 76~82.
- (7) Rigby, D. L., Steinhilber, E. and Ameri, A. A., 1997, "Numerical Prediction of Heat Transfer in a Channel with Ribs and Bleed," ASME Paper No. 96-GT-431.
- (8) Stephens, M. A., Shih, T. I. and Civinskas, K. C., 1995, "Computation of Flow and Heat Transfer in a Rectangular Channel with Ribs," AIAA Paper No. 95-0180.
- (9) Fluent Inc., 2003, *Fluent 6.2 User's Guide*.
- (10) Myers, R. H. and Montgomery, C. C., 2002, *Response Surface Methodology: Progress and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons.
- (11) Toby, J. Mitchell., 1973, "An Algorithm for the Construction of D-Optimal Experimental Designs," *Technometrics*, Vol. 16, No. 2, pp. 203~210.
- (12) Han, J. C., Park, J. S. and Lei, C. K., 1985, "Heat Transfer Enhancement in Channels With Turbulence Promoters," *ASME J. of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol 107, pp. 628~635
- (13) Han, J. C. and Park, J. S., 1988, "Developing Heat Transfer in Rectangular Channels with Rib Turbulators," *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 31, pp. 183~195.
- (14) Wu, S. J., Kim, W. S. and Cho, H. H., 1998, "Augmented Heat Transfer in a Rectangular Duct with Angled Ribs," *Trans. of KSME(B)*, Vol. 22, No. 4, pp 530~541.