

유출홀이 설치된 정사각유로 내 열전달 향상을 위한 경사진 요철 최적설계

이현[†]·김경민^{*}·이동현^{*}·조형희^{**}

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

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

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

Abstract

The 2nd order response surface method (RSM) has been carried out to get optimum thermal design for enhanced heat transfer on square channel with bleed holes. The RSM was used as an optimization technique with Reynolds-averaged navier-stokes equation. Turbulence model for heat transfer analysis used RNG k-epsilon model. The wall function used enhanced wall function. Numerical local heat transfer coefficients were similar to the experimental tendency. Two design variables such as attack angle of rib (α), rib pitch-to-rib height ratio (p/e) were chosen. Operation condition considered bleeding ratio per bleed hole (BR_{hole}). A response surface were constructed by the design variables and operation condition. As a result, adjusted R^2 was more than 0.9. Optimization results of various objective function were similar to heat transfer in channel with and without bleed flow. But friction factor was lower than channel without bleed flow.

기호설명

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

w : 설계 가중계수
 Re : 수력직경기준 Reynold 수, $D_h u_b/\nu$
 u_b : 주유동 평균속도
 Nu : Nusselt 수, $D_h h/k$
 Nu_0 : 요철이 없는 원형관에서의 Nu 수
 f : 마찰 계수
 f_0 : 매끈한 원형관에서의 마찰계수
 x : 주유동 방향 거리 (mm)
 y : 덕트 중심으로부터 횡방향 거리 (mm)

그리스 문자

μ : 점성계수
 ρ : 밀도
 ν : 동점성계수, μ/ρ
 η : 성능계수, $(Nu/Nu_0)/(f/f_0)^{1/3}$

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

1. 서 론

고온의 연소 가스로부터 가스 터빈 블레이드를 보호하기 위한 냉각 기술은 내부관 냉각, 막냉각, 충돌제트 냉각 등이 있다.⁽¹⁾ 터빈 엔진의 열효율을 향상시키고자 터빈 입구 온도(TET: Turbine Entry Temperature)가 높아짐에 따라 터빈 블레이드에 발생하는 높은 열부하를 낮추기 위해 실제 가스터빈에서는 내부관 냉각과 막냉각이 동시에 쓰이고 있고, 복합적인 열전달 특성을 고려한 내부관 설계를 할 필요가 있다. 따라서 내부관 냉각과 막냉각을 동시에 고려한 높은 냉각성능을 갖는 터빈 블레이드의 내부관 설계를 위해서는 요철 형상과, 유출홀 등의 각각의 인자가 열전달, 압력강하 및 내부유동에 미치는 영향을 파악하는 것이 필수적이며, 더 나아가 이들의 복합적인 영향을 고려한 최적설계 연구가 필요하다.

내부관 냉각 연구에서 내부관의 형상을 변화시켜가며 최적 조건을 찾기 위한 실험연구는 Han 등⁽²⁾이 요철의 각도 ($\alpha=15^\circ\sim 90^\circ$)와 요철간 거리대 요철의 높이비 ($p/e=10, 20$)가 열전달과 마찰계수에 미치는 영향을 실험하여, 요철의 각도가 60° 근처에서 열전달은 최대값을 가지며, 요철간 간격이 증가할수록 마찰계수의 값은 감소함을 보였다. 복합 냉각 특성 연구로는 Douglas 및 Philip⁽³⁾이 정지한 1차 유로에 요철과 유출을 설치하여 유출 유량을 변화시켜가며 유출이 없을 때보다 유출이 있는 경우 열전달 특성이 높게 나타남을 연구하였다. Park 등⁽⁴⁾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. 수치해석 연구로 Rigby 등⁽⁵⁾과 Stephensem 등⁽⁶⁾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 영향만을 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 한쪽 벽에 유출이

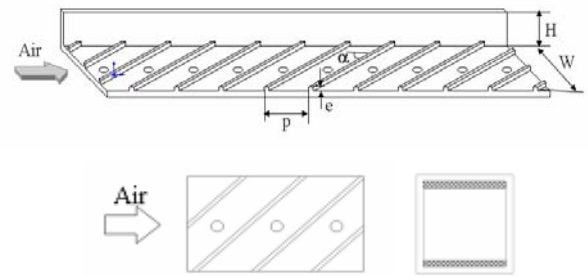


Fig. 1 Design variables and parameters

설치 되어있고, 양쪽 벽면에 요철이 설치된 경우에 대해, 각도 (α)와 요철과 요철의 간격 (p/e)을 설계변수로 선택하였고, 상용 CFD 코드인 Fluent 6.2를 이용하여 수치해석을 통한 3차원 열·유동 해석과 최근 효과적인 최적화 기법으로 알려져 있는 최적화기법 중 하나인 반응면 기법(Response Surface Method)을 결합하여, 설계변수의 최적값을 도출하는 최적설계를 수행하였다.

2. 연구 방법

2.1 수치해석

본 연구에서는 복잡한 3차원 열·유체해석을 위하여 상용 소프트웨어인 Fluent 6.2를 사용하였다. 난류 모델은 RNG k- ϵ 모델⁽⁷⁾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 1내외가 되도록 매우 조밀하게 격자를 구성하였다.

경계조건은 실험결과와 비교할 수 있도록 Park 등⁽⁴⁾의 실험 조건과 동일하게 입구 온도는 $T_{in}=300K$, $Re=10,000$ 으로 주었다. 열전달 계산을 위하여 요철을 제외한 요철사이의 표면에 일정한 온도조건(Constant temperature)을 사용하였고, 난류 강도(Turbulence intensity)는 5%를 주었다.

2.2 최적화 기법 (반응면 기법)

본 연구에서는 여러 설계변수의 영향을 동시에 고려하여 설계변수에 대한 반응표면을 근사 모델링하고 해석하기 위한 최적화 기법인 반응면 기법⁽⁸⁾을 사용하였다. 반응면 기법은 크게 2차 근사 반응 다항식을 생성하기 위한 최소자승법(Least

square method)과 변수선택법(Variable selection method), 근사화된 함수를 평가하기 위한 분산분석(ANOVA), 그리고 반응면을 만들기 위한 반응치를 구하기 위해 설계 공간에 실험점들을 선택하는 실험계획법(Design of Experiment)으로 나누어진다.

근사 반응 함수는 일반적으로 다항식의 형태를 갖고 있으며, 각 항의 미지 상수는 회귀분석을 통하여 구하게 된다. 먼저 주어진 설계 공간상에서 반응면을 구성하는데 필요한 정보를 얻기 위해 정해진 실험점을 대상으로 실험 또는 수치실험이 수행되어야 한다. 본 연구에서는 두 개의 설계변수에 대한 실험점을 얻기 위해 D-optimal 기법⁽⁹⁾을 이용하여 13개의 실험점을 선택하였다.

2.3 설계변수 및 목적함수

설계변수로는 유출홀이 있을 때 높은 열전달 효과를 나타내는 요철의 형상과 요철간 거리의 영향을 알아보기 위하여 Fig. 1과 같이 요철의 각도 (α)와, 요철간 거리 대 요철의 높이비 (p/e)를 설계변수로 선택하였다. 그리고 실제 유출홀에 대한 실험 결과인 Park 등⁽³⁾의 결과와 비교해보기 위하여 실험 모델과 같이 한쪽 벽면에 유출홀이 설치되고, 양쪽 벽에 평행한 요철이 설치된 덕트에서 덕트의 크기 (W/H), 요철의 크기 (w/e)와 유출홀의 크기 (d)를 고정시키고, 유출홀의 위치는 요철과 요철사이 중앙에 위치시켰다. 작동조건으로는 유출홀이 있을 때 각각의 홀마다 $Re=10,000$ 의 유량이 빠져나갈 수 있도록 일정한 유출유량 ($BR_{hole}=0.01$)을 주었다. 설계변수와 설계 범위는 Table 1에 나타내었다.

설계 목적함수는 반응면 기법을 통해 얻은 열전달 목적함수와 압력강하 목적함수를 최소, 최대값에 따라 코드화 시켜 코드화된 목적 함수에 설계 가중계수(w)를 주어 설계자가 원하는 설계에 따라 열전달과 압력강하 효과를 동시에 고려할 수 있도록 다음과 같이 정의 하였다.

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	

$$C = w_{Nu} C_{Nu} + w_f C_f \quad (1)$$

$$, (0 \leq C_{Nu}, C_f \leq 1, w_{Nu} + w_f = 1)$$

열전달 목적함수 F_{Nu} 는 열전달 효과를 나타내는 향으로 평균 Nusselt 수의 역수로 정의하고, 최대, 최소값에 따라 C_{Nu} 로 코드화하였다.

$$F_{Nu} = \frac{1}{Nu/Nu_0} \quad (2)$$

여기서,

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (3)$$

$$Nu_0 = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (4)$$

여기서, h 는 평균 열전달계수, D_h 는 수력직경을 의미하며, Nu_0 는 매끈한 원형관 내의 완전발달 난류 유동에 대한 Dittus-Boelter 식을 사용하였다. 두 번째 항은 마찰 손실을 나타내는 향으로서 다음과 같이 정의하고, 열전달 함수와 같이 C_f 로 코드화 하였다.

$$F_f = \left(\frac{f}{f_0} \right)^{1/3} \quad (5)$$

$$f = \frac{\Delta P}{4(L/D_h)(0.5\rho v^2)} \quad (6)$$

$$f_0 = 2(2.23\ln Re - 4.639)^{-2} \quad (7)$$

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

설계 가중계수(w)는 열전달과 압력강하의 비중

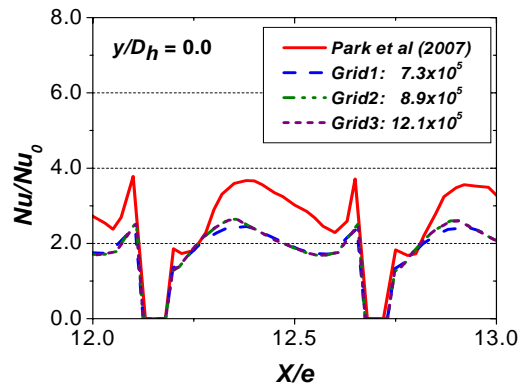


Fig. 4 Grid dependency test and comparison with experiment data without bleed flow

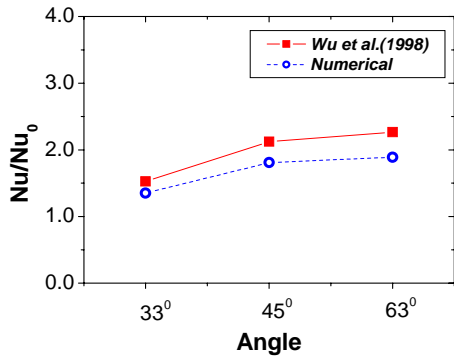


Fig. 5 Average Nusselt number for angles

을 조절하기 위하여 설계자가 임의로 결정해야 할 변수로서 설계자가 원하는 시스템의 특성에 따라 다른 값을 가진다.

4. 최적화 결과 및 검증

4.1 실험 및 수치해석 결과 비교

열전달 해석에 수치해석을 이용하기 위하여 열전달 수치해석의 격자 의존성을 제거하기 위해 45° 요철에 대하여 Fig. 4와 같이 다양한 격자 분포에 따른 격자 의존성 테스트를 수행하였고, 그 결과 약 800,000개 이상에서 격자 의존도가 사라짐을 알 수 있었다. 또한 난류 열전달 해석의 타당성 검증을 위해 Park 등⁽⁴⁾의 국소적인 열전달 값을 비교하였다. 열전달 값은 낮게 나타났지만, 재순환, 재부착 되는 영역에 대한 경향성은 잘 맞는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 5와 Fig. 6에서 Wu 등⁽¹⁰⁾의 각도에 따른 실험결과, Park 등⁽⁴⁾의 유출유량에 따른 45° 경사진 요철에 대한 실험결과를 수치해석 결과와 비교하였다. 그림에서 보듯이 각도에 따른 수치해석 결과와 유출유량에 따른 면 평균 Nusselt 수의 결과를 보면 k-epsilon

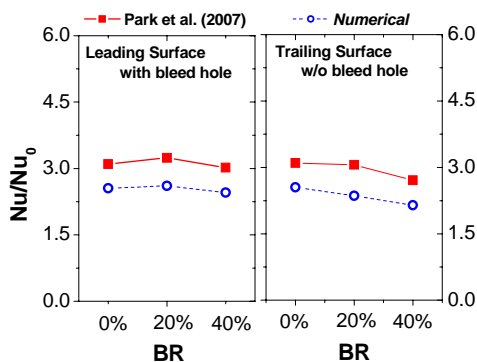


Fig. 6 Average Nusselt number for bleed rate

Table 2 Regression analysis

Objective Function	R	R ²	R ² _{adj}
C _{Nu} (x)	0.997677	0.995359	0.9920461
C _f (x)	0.991644	0.983357	0.9714719
C(x)	0.996665	0.993341	0.9885872

난류 모델의 한계로 인해 대체적으로 실험값에 비해 25%정도 작게 예측 되고 있으나, 정성적인 경향은 잘 일치하고 있다.

4.2 최적 설계 결과

반응면 기법에 의해 추정된 반응면의 신뢰성을 검증하기 위하여 회귀분석과 분산분석을 통해 반응면의 신뢰성을 검증하였다. 반응면 기법에 의해 얻어진 반응값이 정확히 예측된 경우 $0.9 \leq R_{adj}^2 \leq 1.0$ 을 갖는다고 알려져 있다.⁽⁸⁾

Table 2에서 보듯이 회귀분석에 의한 R²_{adj} 값에 대해 만족할 만한 결과를 얻었다. 따라서 본 연구에서 형성된 반응면과 설계변수의 최적 설계 값은 신뢰할 만한 것으로 판단할 수 있다.

다음은 유출홀에 의한 유출이 있을 때 반응면 기법에 의해 추정된 각각의 목적함수에 따른 근사 2차 반응면 다항식이다.

$$C_{Nu} = 1.0504 - 0.050541x_1 + 0.036036x_2 + 0.00046449x_1^2 - 0.00096333x_2^2 - 0.00050511x_1x_2 \quad (8)$$

$$C_f = -3.1185 + 0.10218x_1 + 0.22711x_2 - 0.00088654x_1^2 - 0.0086326x_2^2 - 0.00045912x_1x_2 \quad (9)$$

앞의 열전달 및 마찰계수 목적함수를 통하여 설계자의 목적에 따라 각각의 함수를 코드화시켜 각 함수에 설계 가중계수를 준 설계 목적 함수에 대한 근사 2차 반응면 다항식은 다음과 같다.

$$C = (1.0504w_1 - 3.1185w_2) + (-0.050541w_1 + 0.10218w_2)x_1 + (0.036036w_1 + 0.22711w_2)x_2 + (0.00046449w_1 - 0.00088654w_2)x_1^2 + (-0.00096333w_1 - 0.008632w_2)x_2^2 + (0.00050511w_1 - 0.00045912w_2)x_1x_2 \quad (11)$$

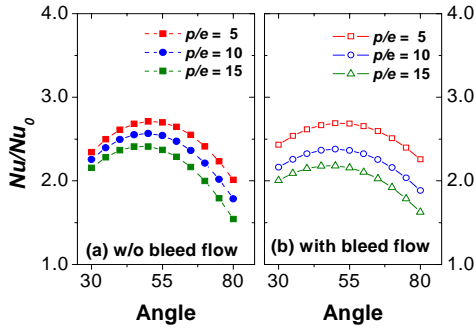


Fig. 7 Effect of α for Avg. Nusselt number

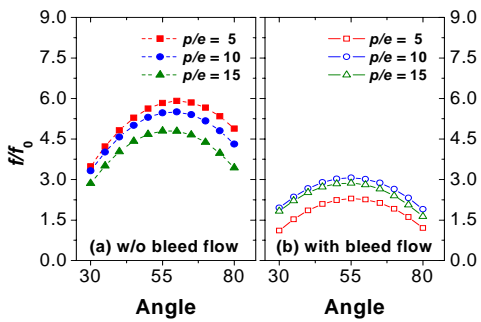


Fig. 8 Effect of α for Friction factor

4.3 결과 분석

Fig. 7은 유출홀이 없는 덕트와 유출홀이 설치된 덕트에 대해 각도에 따른 평균 열전달 값을 나타낸 그림이다. 유출홀에 의한 유출유량과 상관없이 요철 간 거리 대 요철의 높이비 (p/e)가 줄어들수록 높은 열전달이 나타나는 요철의 각도가 조금씩 커지는 것을 볼 수 있으며, 요철의 각이 45° 와 55° 사이에서 가장 높은 열전달이 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 8은 각도에 따른 마찰 계수를 나타낸 그림이다. 각도에 상관없이 Fig. 8(b)가 Fig. 8(a)보다 마찰 계수가 낮게 나타났는데 특히 유출홀이 있는 경우 $p/e=5$ 일 때 유출홀이 요철에 매우 가까워지면서 유출에 따른 영향이 다른 p/e 보다 더 커져 낮게 나오는 것으로 생각된다.

Fig. 9는 유출홀의 유무에 따라 여러 각도에 대해 p/e 가 변할 때 열전달 값이 변하는 것을 나타낸 그림이다. 유출홀 유무에 상관없이 p/e 와 는 상관없이 요철의 각도가 45° 와 60° 사이에서 높은 열전달 값이 나타나는 것을 볼 수 있다. 특히, 30° 요철의 경우 p/e 가 커짐에 따라 다른 각도에 비해 열전달의 변화 폭이 매우 적은 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 p/e 에 따른 마찰 계수를 본 그림이다.

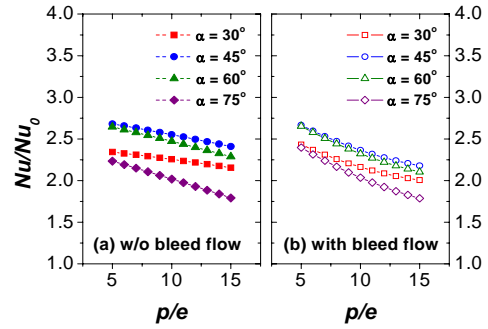


Fig. 9 Effect of p/e for Avg. Nusselt Number

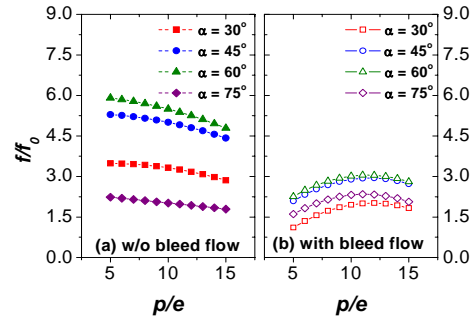


Fig. 10 Effect of p/e for Friction factor

Fig. 10(a)을 보면 p/e 가 작아질수록 마찰 계수가 커지는 것을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 10(b)는 각도에 상관없이 p/e 가 작아질수록 마찰 계수가 작아지는 것을 볼 수 있는데 요철간 거리가 작아지면서 재부착이 잘 되지 않고, 유출홀의 영향이 크게 나타나기 때문인 것으로 생각된다. 특히 $p/e=12$ 내외에서 각도에 상관없이 가장 높은 마찰 계수가 나타나는 것을 볼 수 있다.

Table 3~5는 유출홀 유무에 따른 열전달과 마찰계수 그리고 설계자에 의해 설계 가중계수가 주어진 목적함수들에 대한 최적 설계 결과이다. Table 3과 4는 설계 목적함수에서 열전달 ($w_{Nu} = 1, w_f = 0$)과 마찰계수 ($w_{Nu} = 0, w_f = 1$)를 최적화한 결과로서, 열전달의 경우 유출홀의 유무에 상관없이 p/e 의 영향보다 각도에 의한 영향이 크게 작용하는 것을 알 수 있고, 마찰 계수의 경우 유출홀로 인해 각도 보다는 p/e 의 영향

Table 3 Optimization of heat transfer.

	α	p/e	Nu/Nu_0	$ff_0^{1/3}$	Perf.
without bleed hole	50.78	5	2.712	1.786	1.518
with bleed hole	51.69	5	2.690	1.307	2.058

Table 4 Optimization of friction factor

	α	p/e	Nu/Nu_0	$ff_0^{1/3}$	$Perf.$
without bleed hole	30	15	2.439	1.438	1.500
with bleed hole	30	5	2.433	1.071	2.225

Table 5 Optimal design by designer

	α	p/e	Nu/Nu_0	$ff_0^{1/3}$	$Perf.$
without bleed hole	45.65	5	2.688	1.746	1.540
with bleed hole	47.44	5	2.680	1.287	2.082

$(w_{Nu} = 0.8, w_f = 0.2)$

이 크게 작용하는 것을 알 수 있다. Table 5는 설계자가 각각의 설계 함수들에 임의의 설계 가중 계수를 주어 최적화를 수행한 결과이다.

5. 결 론

본 연구에서는 한쪽 벽면에 유출홀이 있고 양 쪽 벽면에 평행하게 요철이 설치된 사각 덕트에 대하여 높은 열전달 성능을 얻을 수 있는 최적 설계를 수행하였다. 먼저 실험과 수치해석의 결과 비교를 통하여 신뢰할 만한 정확성을 보였고, 여러 형상의 실험점들을 계산하여 최적화를 수행하였다. 목적함수는 각각의 열전달과 마찰계수에 대한 최적화를 수행해 나온 다항식을 코드화하여 선형 결합하고 두 함수에 대해 설계자가 보고자 하는 열전달과 마찰계수의 비중을 조절하기 위하여 설계 가중계수를 도입 하였다. 그 결과 열전달의 경우 유출홀이 없을 때 보다 있을 때, 약 2.5%정도 열전달이 향상하였고, 마찰 계수는 26% 정도 감소하였다. 그리고 설계 가중계수를 0.8, 0.2로 주었을 땐 열전달 효과는 비슷했지만, 마찰 계수와 성능계수에서 25%이상의 성능 향상을 얻을 수 있었다. 여기에 결론을 입력하시오

후 기

본 연구는 전력기반조성사업센터 주관 전력산업기술개발사업의 지원에 의한 결과이며, 이에

감사드립니다.

참고문헌

- (1) J. C. Han, S. Dutta and S. V. Ekkad, 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 Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 107, pp 628~635.
- (3) 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.
- (4) S. H. Park, Y. H. Jeon, K. M. Kim, D. H. Lee, and H. H. Cho, 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.
- (5) Rigby, D. L., Steinthorsson, E. and Ameri, A. A., 1997, "Numerical Prediction of Heat Transfer in a Channel with Ribs and Bleed," ASME Paper No. 96-GT-431.
- (6) 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.
- (7) Fluent Inc., 2003, Fluent 6.2 User's Guide.
- (8) Myers, R. H. and Montgomery, C. C., 2002, Response Surface Methodology: Progress and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley & Sons.
- (9) Toby J. Mitchell, 1973, "An Algorithm for the Construction of D-Optimal Experimental Designs," Technometrics, Vol. 16, No. 2, pp. 203-210.
- (10) S. J. Wu, W. S. Kim and H. H. Cho, 1998, "Augmented Heat Transfer in a Rectangular Duct with Angled Ribs," Trans. of KSME(B), Vol. 22, No. 4, pp 530~541.