

◆ 특집 ◆ 가스터빈 블레이드 설계 기술 II

크리프 수명 향상을 위한 연소기 내부 요철 최적 설계

Optimal Design of Rib Turbulators in a Combustion Liner for Creep Lifetime Enhancement

김경민<sup>1</sup>, 윤남건<sup>1</sup>, 전운홍<sup>1</sup>, 조형희<sup>1,✉</sup>, 김문영<sup>2</sup>  
Kyung Min Kim<sup>1</sup>, Namegeon Yun<sup>1</sup>, Yun Heung Jeon<sup>1</sup>, Hyung Hee Cho<sup>1,✉</sup> and Moon Young Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 연세대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Yonsei University)

<sup>2</sup> 한전 KPS㈜ GT 정비기술센터 (Gas Turbine Technology Service Center, KPS)

✉ Corresponding author: hhcho@yonsei.ac.kr, Tel: 02-2123-2828

Key Words: Gas Turbine (가스터빈), Combustion Liner (연소기), Heat Transfer (열전달), Rib Turbulator (난류촉진기)

기호설명

- $D_h$  = hydraulic diameter (m)
- $e$  = rib height (m)
- $f$  = friction factor
- $h$  = heat transfer coefficient ( $W m^{-2} K^{-1}$ )
- $H$  = channel height (m)
- $l$  = rib-to-rib length (m)
- $k_c$  = conductivity of air
- $Nu$  = Nusselt number,  $hD_h/k_c$
- $p$  = rib-to-rib pitch,  $l+w$
- $Pr$  = Prandtl number,  $\mu C_p/k_c$
- $R^2$  = determine R square
- $R^2_{adj}$  = adjusted determine R square
- $Re$  = Reynolds number,  $D_h u_b/\nu$
- $R_{LT}$  = lifetime ratio of new case to original case
- $t$  = time (Hr)
- $T_w$  = wall temperature (K)
- $u_b$  = passage inlet averaged bulk velocity ( $m s^{-1}$ )
- $w$  = rib width (m)
- $W$  = channel width (m)
- $x_i$  = design variable
- $\mu$  = dynamic viscosity ( $kg m^{-1} s^{-1}$ )
- $\rho$  = air density
- $\nu$  = kinematic viscosity ( $m^2 s^{-1}$ )

- $\sigma$  = stress
- $\sigma_r$  = rupture stress

1. 서론

에너지 기기 중 가스터빈은 터빈 입구 온도가 상승하면 에너지 효율이 증가하기 때문에 입구온도를 꾸준히 상승시키고 있다. 하지만, 연소실의 온도를 상승시키게 되면 NOx 와 같은 공해물질이 발생하기 때문에 연소가스 온도를 낮추면서 터빈 입구 온도를 상승시키는 연구가 활발히 진행 중이다. 즉, 기존 연소실에서는 높은 연소 가스 온도를 낮추고 재질을 보호하기 위해 막냉각을 이용하여 표면을 냉각유체로 보호하는 방법을 주로 사용하였으나, 현재는 환경문제로 인해 막냉각 대신 내부유로냉각과 충돌제트냉각을 이용하여 냉각으로 인한 연소가스의 온도 저하를 최대로 낮추면서 연소에 대한 재질의 수명을 연장시키는 연구를 활발히 진행하고 있다.

막냉각과 다르게 내부유로냉각과 충돌제트 냉각은 고온의 연소가스에 연소기 재질이 직접 노출되기 때문에 고온 부식 및 파괴, 즉 크리프(Creep)에 의한 영향이 커지고 있다. 따라서 본 연구에서는 요철을 사용한 내부유로냉각 설계시 재질의 크리프(Creep) 특성을 고려하여 최적의 냉각유로 설

계를 제시하고자 한다.

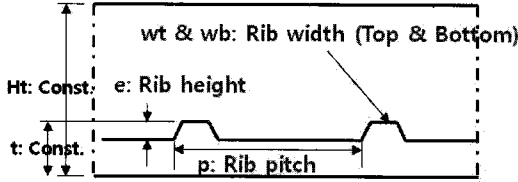


Fig. 1 Geometries of the circular cooling passage

Table 1 Ranges of design variables

Design Variables		Lower	Upper
$x_1$	$p/e$	3.0	12.0
$x_2$	$wt/e$	0.5	5.0
$x_3$	$e/H$	0.01	0.06
$x_4$	$wb/wt$	1	3

최적의 냉각효율을 찾기 위한 연구는 오래전부터 많은 연구자들<sup>1-3</sup>로부터 꾸준히 연구되어 왔다. 대부분의 연구는 몇 가지 선택된 형상에 대하여 각각의 설계변수가 열전달 성능 및 압력강하에 미치는 영향만을 연구하였을 뿐, 재료의 특성을 고려한 연구는 진행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 열·유동해석과 최근 Kim<sup>4,5</sup>에 의해 연구된 최적화 기법인 반응면 기법(Response Surface Method)을 이용하여, 설계 범위 내 가장 높은 열전달 및 냉각 특성, 그리고 크리프(Creep)에 의한 수명을 향상시킬 수 있는 요철 형상을 알아보는 연구를 수행하였다.

## 2. 연구 방법

본 연구에서는 유로 높이(H)가 44.1mm 인 원형 관에서의 열·유체해석을 위한 상용 소프트웨어인 Fluent 6.3 을 사용하여 2 차원 주기조건을 이용한 해석을 수행하였다. 난류 모델은 RNG k-ε 모델<sup>6</sup>을 사용하였으며, 벽 가까이에서 열전달을 정확히 계산하기 위하여 Enhanced wall function 을 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 700K, 고온가스에 의한 열전달 및 유동 조건은  $2,000W/m^2$  와

1,723K 으로 주었고, 유량은  $Re=552,000$  으로 주었으며, 주유동의 난류 강도(Turbulence intensity)는 5%를 설정하였다.

또한, 열응력 해석을 위해 상용 소프트웨어인 ANSYS 11.0 을 사용하여 3 차원 해석을 수행하였다. 여기서 사용된 경계조건으로는 앞서 수행된 열/유동해석에서의 온도값을 사용하여 열응력을 해석하였으며, 해석된 열응력과 온도로부터 열응력을 해석하였으며, 열응력과 온도값으로부터 수명을 예측하였다. 여기서 사용된 재료는 실제 연소기 재료로 사용중인 Nimonic 263<sup>7</sup>을 사용하였다.

본 연구에서는 여러 설계변수의 영향을 동시에 고려하면서 반응표면을 근사 모델링하고 해석하기 위한 최적화 기법인 반응면 기법<sup>8</sup>을 사용하였다. 반응면 기법의 생성물인 2 차 근사 반응 함수는 일반적으로 2 차 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 세 개의 설계변수에 대한 실험점을 얻기 위해 D-optimal 기법<sup>9</sup>을 이용하여 요철에 열유속이 있는 경우와 없는 경우에 대해 20 개의 실험점들을 선택하였다.

설계변수로는 Fig. 1 과 같이 내부관 냉각에서 중요한 설계 변수인 요철높이(e)와 요철간격(p)을 동시에 고려한 최적설계를 수행하였으며, 여기서 유로 높이(H)를 44.1mm 로 고정하였다. 그리고 각 변수의 범위는 Table 1 과 같이 설정하였다.

열/유동 해석으로부터 구해진 각 요소의 온도와 구속조건으로부터 상용코드, ANSYS 를 사용하여 열응력을 구하였으며, 각 요소의 온도와 열응력값과 Creep-Rupture 실험 으로부터 구해진 식(1)로부터 수명을 해석하였다.

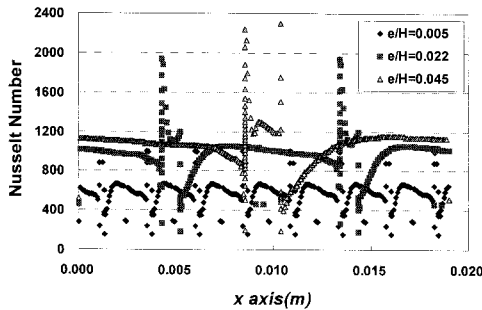
$$\log(t) = 10^3 \times f(\sigma_r) / T_w - 20 \quad (1)$$

$$\text{where } f(\sigma_r) = a(\sigma_r)^3 + b(\sigma_r)^2 + c\sigma_r + d$$

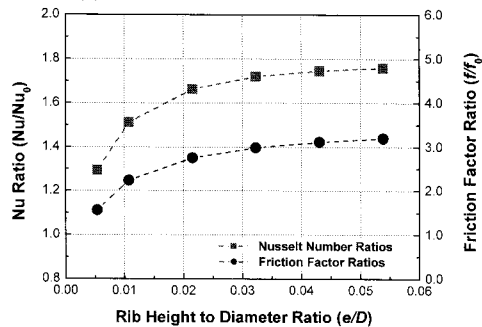
## 3. 결과 및 토의

Figure 2 는 여러가지 설계 요소 중 요철 높이에 의한 국소열전달, 평균열전달 및 평균 마찰 계수의 특성을 나타내는 그림이다. Fig. 2(a)는 요철의

높이가 작을 때 요철사이 간격이 좁아지게 되고 낮은 열전달로 반복적인 열전달 분포가 나타나고 있으며, 요철의 높이가 높을 때는 큰 와류로 인해 높은 열전달이 넓은 범위에서 나타나는 것을 볼 수 있다. 평균 열전달과 압력은 Fig. 2(b)에서 보듯이, 요철 높이가 증가함에 따라 열전달 계수와 마찰계수 크게 증가함을 볼 수 있다. 즉, 요철 높이가 증가함에 따라 요철 사이에서 주유동이 가속되는 효과와 요철에서 유동이 박리되고 재부착 될 때 큰 와류가 생성되기 때문이다.



(a) Local heat transfer distributions



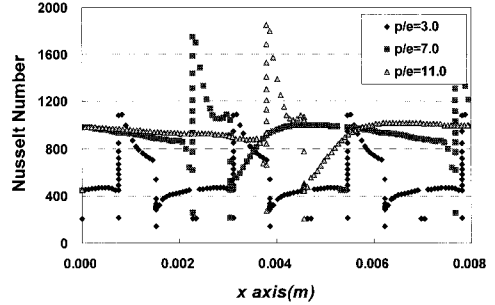
(b) Avg. heat transfer and friction loss

Fig. 2 Effect of rib height on flow and heat transfer

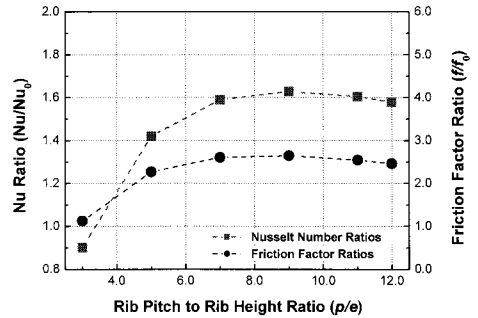
Figure 3 으로부터 요철 사이 간격에 따른 영향으로 요철 사이 간격이 작을 때는 열전달 및 마찰 계수가 작았으나, 어느 정도 이상의 간격에서는 높은 열전달 및 마찰계수를 유지하는 것을 알 수 있다. 즉, 요철 사이 간격이 작을 때는 요철사이에서 순환 유동(cavity flow)으로 열전달과 마찰계수가 낮았으나, 어느 이상의 간격에서는 박리와 재부착, 그리고 유동이 발달되는 과정으로 인해 높은 열전달 및 마찰계수를 나타내었다.

각 설계변수 특성을 기반으로 복합적인 특성을 알아보기 위해 반응면 기법을 이용하여 반응면(합

수)을 생성하였다.



(a) Local heat transfer distributions



(b) Avg. heat transfer and friction loss

Fig. 3 Effect of rib pitch on flow and heat transfer

Fig. 4 은 Lifetime 의 분포를 나타낸 그림이다. 이 결과에서 보듯이, 요철 사이 거리( $P/e$ )와 요철 위쪽의 길이( $wt/e$ )가 작을수록 수명이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 요철의 위쪽과 아래쪽의 비가 2.0 일 때 가장 수명이 긴 것으로 나타났다. 이와 같은 수명의 분포는 열전달에 의해 크게 좌우된다. 크리프(Creep) 수명의 경우 온도에 의해 크게 좌우되기 때문이며, 대부분의 응력이 높은 온도로 인한 열팽창으로 생기는 열응력이기 때문이다. 따라서 열전달이 높게 나타나는  $p/e$ 의 지점과  $wt/e$ 의 비율 그리고 요철 상하부의 비와 크게 관련된 것을 볼 수 있다. 따라서 최적화된 설계를 위해서는 재료의 개발뿐 아니라 그 재료의 가장 적합한 냉각방법이 사용되어야 한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 반응면 기법을 이용하여 연소기 내부 요철 형상에 대한 최적화를 연구하여 열전달, 마찰계수, 재료의 수명에 대한 2 차 반응면을 생성

하였다. 최적 설계 변수로는 요철높이( $e$ ), 요철너비( $w$ ), 요철간격( $p$ ), 요철상하비( $w_t/w_b$ )를 선택하였으며 유로 높이( $H$ )는 44.1mm 로 유량은  $Re=552,000$  으로 고정하였다. 결과적으로, 열전달에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 요철 높이와 요철 간격으로 나타났다. 즉, 요철 높이가 증가함에 따라 열전달과 마찰계수가 가장 크게 증가하였다. 요철 간격에 따른 영향으로는 요철 높이 및 요철 너비에 따라 다소 차이는 있었지만, 요철 사이 거리가 8.0에서 10.0 사이에서 가장 높은 값이 나타났다. 이는 요철로 인한 재부착과 유동발달이 가장 활발히 일어나기 때문이다.

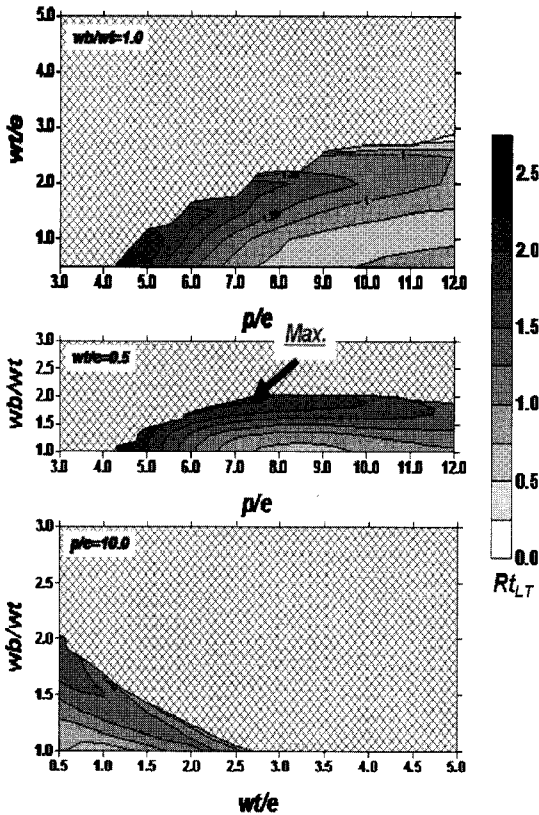


Fig. 4 Contour plot of lifetime by each variable

후 기

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

참고문헌

1. Dipprey, D. F. and Sabersky, R. H., "Heat and Momentum Transfer in Smooth and Rough Tubes at Various Prandtl Numbers," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 6, pp. 329-353, 1963.
2. Webb, R. L., Eckert, E. R. G. and Goldstein, R. J., "Generalized Heat Transfer and Friction Correlations for Tubes with Repeated-rib Roughness," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 15, pp. 180-184, 1972.
3. Morris, W. D. and Rahmat-abadi, K. F., "Convective Heat Transfer in Rotating Ribbed Tubes," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 39, pp. 2253-2266, 1996.
4. Kim, K. M., "Optimal Design of Heat Transfer Systems for Enhancing Thermal Performance and Preventing Thermal Damage," Mechanical Eng., Ph.D. Thesis, Yonsei University, 2008.
5. Kim, K. M., Lee, D. H., Cho, H. H. and Kim, M. Y., "Heat Transfer in a Ribbed Circular Passage of a Gas Turbine Blade," 2008 KSME Spring Annual Meeting, pp. 203-206, 2008.
6. Fluent Inc., "Fluent 6.2 User's Guide," Fluent Inc., 2003.
7. Special Metals, "Product handbook of high-performance alloys," Special Metals Corporation, Publication No. SMC-054, 2004.
8. Myers, R. H. and Montgomery, C. C., "Response Surface Methodology: Progress and Product Optimization Using Designed Experiments," John Wiley & Sons, 2002.
9. Mitchell, T. J., "An Algorithm for the Construction of D-Optimal Experimental Designs," Technometrics, Vol. 16, No. 2, pp. 203-210, 1973.