

가스 터빈 블레이드 냉각 성능 향상을 위한 경사요철의 단락 효과

우성제* · 이세영* · 조형희**

An Investigation of Angled Discrete Rib-Turbulators for Cooling Enhancement of Gas Turbine Blades

Seong Je Wu, Sei Young Lee and Hyung Hee Cho

Key Words : Discrete Rib(단락 요철), Gap Flow(틈새 유동), Turbulence Promoter(난류촉진체), Rib Arrangement(요철 배열), Heat/Mass Transfer Augmentation(열/물질전달 향상).

Abstract

Local heat/mass transfer and friction loss in a square duct roughened with various types of continuous and discrete rib turbulators are investigated. The combined effects of the gap flows of the discrete ribs and the secondary flows are examined for the purpose of the reduction of thermally weak regions and the promotion of the uniformity of heat/mass transfer distributions as well as the augmentation of average heat/mass transfer. The rib-to-rib pitch to the rib height ratio (p/e) of 8 and the rib angles of 90 and 60 deg are selected with $e/D_h=0.08$. The vortical structure of the secondary flows induced by the parallel angled arrays are quite distinct from that induced by the cross angled arrays. This distinction influences on heat/mass transfer and friction loss in all the tested cases. The gap flows of the discrete ribs reduce the strength of the secondary flows but promote local turbulence and flow mixing. As a result, the fairly uniform heat/mass transfer distributions are obtained with two row gaps.

기호설명

- e : 요철의 높이
- f : 마찰계수
- f_0 : 매끈한 파이프에서 완전발달한 난류유동의 마찰계수
- p : 요철간 거리
- Re : Reynolds 수
- Sh : Sherwood 수
- Sh₀ : 매끈한 파이프에서 완전발달한 난류유동의 Sherwood 수
- \overline{Sh} : 평균 Sherwood 수
- x : 나프탈렌 표면 시작선으로부터의 주유동 방향 거리
- y : 덕트 바닥면으로부터의 높이
- z : 덕트 중심으로부터의 횡방향 거리

- α : 요철 충돌각
- η : 열/물질전달 성능계수, $(\overline{Sh}/Sh_0)/(ff_0)^{1/3}$

1. 서론

난류촉진체인 요철의 설치는 사각 덕트 내에서 열전달을 크게 향상시키며, 가스 터빈의 블레이드의 냉각에 지속적으로 채용되어져 왔다. 1980 년 이후로 요철의 높이, 충돌각, 요철 사이의 간격과 배열 등 다양한 요철의 설계 변수에 대한 최적 조건을 찾기 위한 많은 연구들이 수행되어 왔으며 대표적인 연구로 Gee 와 Webb⁽¹⁾, Han 등⁽²⁾, Hwang⁽³⁾, Taslim 과 Spring⁽⁴⁾, Bonhoff 등⁽⁵⁾이 있다. 많은 기존 연구들이 평균적인 열전달 향상과 마찰손실에 중점을 두어 왔지만, 국소적인 열전달에 관한 연구 또한 몇몇 연구자를 중심으로 수행되어 왔다⁽⁶⁻¹⁰⁾. 국소 열전달 분포에 대한 자료는 열전달 향상에

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 회원, *연세대학교 기계공학과

E-mail: hhcho@yonsei.ac.kr

Tel: (02)2123-2828 Fax: (02)312-2159

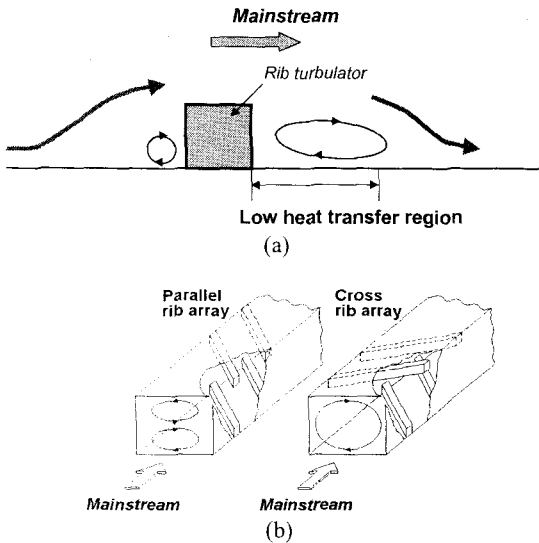


Fig. 1 Schematic flow patterns in ribbed ducts: (a) flow recirculation around a rib; (b) strong secondary flows induced by angled ribs.

대한 현상적인 이해와 열응력을 감소시키기 위한 요철의 설계에 필요하다. 다양한 요철 조건에서 평균 열전달이 뚜렷한 증가를 나타냄에도 불구하고, 상당한 면적을 차지하는 열전달이 취약한 부분에 대한 결정적인 해결책은 아직 제시되지 않은 채로 남아 있다. Fig. 1(a)에서와 같이 요철 근접 하류에 형성되는 유동의 재순환 영역은 대부분의 형태의 요철에서 나타나며, 이 영역은 열점(hot spot)과 같이 열적으로 취약한 부분이 되기 쉽다. 요철이 주유동에 대하여 각도를 이루며 기울어져 설치되어 있는 경우에는 횡방향으로 상당한 열전달 구배를 가지며, 이는 열응력을 발생시킨다. 이러한 문제들을 해결하기 위해서는 국소적인 열전달에 관한 정보가 고려되어야 하며, 열전달의 균일성에 대한 적절한 지표의 마련이 필요하다.

요철을 두 개 이상으로 나누어 단락시키는 것은 처음엔 보다 향상된 열전달 계수를 얻기 위함이었으며, 이는 Lau 등⁽¹¹⁾, Han과 Zhang⁽¹²⁾, Taslim 등⁽¹³⁾, Ekkad와 Han⁽¹⁴⁾ 등에 의해 연구 되어 왔다. 단락 요철에 대한 권혁진 등⁽¹⁵⁾과 조형희 등⁽¹⁶⁾의 몇몇 연구는 열전달 분포의 균일성을 향상시키고 열적으로 취약한 영역이 차지하는 면적을 감소시키는 데 응용될 수 있음을 보여주고 있다.

본 연구에서는 요철 폭 정도의 좁은 틈새를 가지는 단락요철을 이용하여 덕트 벽면 열전달과 균일성을 향상시키기 위한 실험을 수행하였다. 요철의 충돌각은 60~75°에서 열전달이 최대로 알려져 있어^(2, 9) 60°로 선택되었다. 요철은 마주보는 양쪽

벽면에 배열로 설치되며, 마주보는 요철 배열간의 상대적 위치가 주유동 방향에 있어서 동일한 일치 배열(in-lined rib array)과 어긋나 있는 이격배열(shifted rib array), 그리고 Fig. 1(b)와 같이 각 요철 배열이 충돌각에 있어서 동일한 평행배열(parallel rib array)과 교차배열(cross rib array)을 서로 비교하여 실험하였다. 경사지게 설치된 요철의 경우 요철을 따라 유도되는 회전하는 이차유동이 생성되는데, Fig. 1(b)에서 예로서 나타나 있듯이 요철 배열의 상대적 위치에 따라 서로 다른 이차유동 양상을 보이게 된다. 이러한 차이는 열전달과 마찰손실에 영향을 미치며 연속요철에 대해서는 Han 등⁽¹⁷⁾에 설명되어 있다. 본 연구에서는 좁은 틈새를 가지는 단락요철의 영향을 조사하는데 있어서 위와 같은 요철 배열간의 상대위치의 변화의 영향을 함께 고찰하였다. 결과 제시에 있어서 열/물질 전달 계수의 자세한 국소분포와 함께, 평균 열/물질 전달 계수 및 일정이송동력 조건 하에서의 열/물질 전달 성능계수를 제시하였으며, 열/물질 전달 균일성을 평가하기 위해 열전달계수의 면적가중에 의한 표준편차를 제시하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 2는 실험장치에 대한 개념도를 보여주고 있다. 한 변의 길이와 수력직경(D_h)이 50 mm인 정사각 덕트가 사용되었으며, $15D_h$ 의 길이에 걸쳐 요철이 반복되어 설치되었다. 유량측정은 플레넌 하류의 오리피스 유량계로 이루어 졌으며, 물질 전달 실험 중의 덕트 내의 평균속도는 약 9.5 m/s로 수력직경기준 Reynolds 수는 30,000이다. 요철의 높이(e)와 폭(w)은 각각 4 mm와 5 mm로 장방형이며 덕트 높이에 대한 요철 높이의 비(e/D_h)는

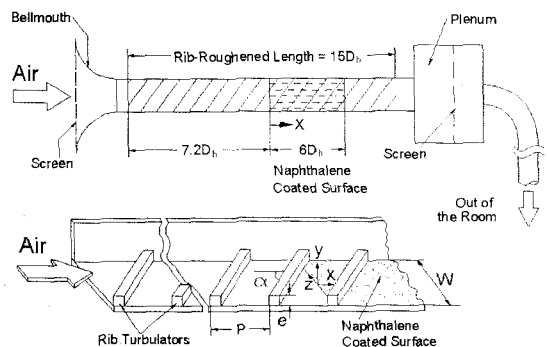


Fig. 2 Schematic of the experimental apparatus.

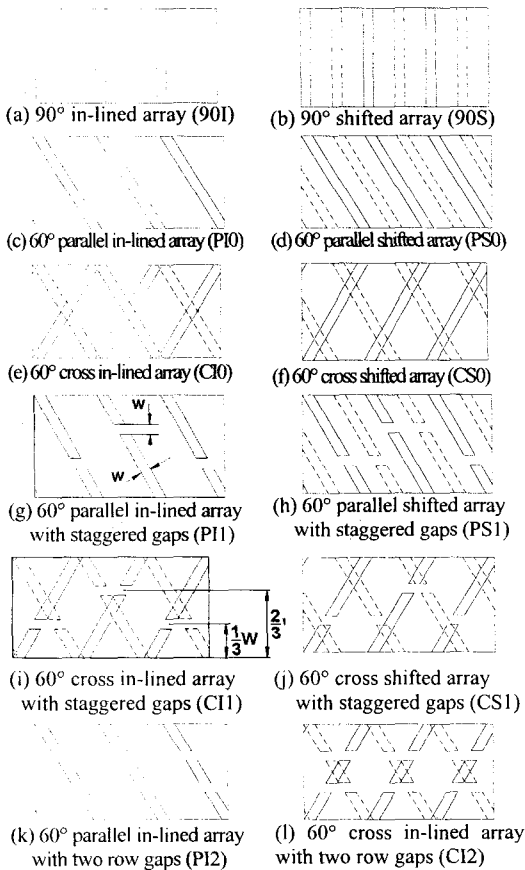


Fig. 3 Schematic diagrams of rib arrangement.

0.08 이다. 요철은 마주 보는 양면인 바닥면과 윗면에 요철 간격(p)이 32 mm ($p/e=8$)가 되도록 반복적으로 설치되었다. 요철 위치의 오차는 ± 1 mm (0.25 c) 미만으로 요철 간격(p) 오차는 3% 미만이다. 상세한 요철의 조건은 Fig. 3 에 12 가지 경우로 설명되어 있다. Fig. 3(c)~(l)의 경사진 요철의 경우 충돌각은 60°로 고정되며, 기준 데이터로 사용하기 위하여 Fig. 3(a)~(b)의 충돌각 90°에 대한 실험을 함께 수행하였다. 연속 요철과 단락 요철 각각에 대하여 4 가지 배열 조건을 고려하였으며, 단락 요철은 Fig. 3(g), 3(i)에 표시된 바와 같이 요철의 폭(w)과 동일한 폭의 틈새를 각 요철마다 요철 길이의 3 분 위치에 1 개 혹은 2 개를 가진다. Fig. 3 에서 실선은 물질전달계수 측정이 이루어진 바닥면에서의 요철 위치를 나타내고, 파선은 마주 보는 윗면에서의 요철 위치를 나타낸다. Fig. 3(c)~(l)의 10 가지 경사진 요철의 경우, (1) 마주보는 양면의 요철 배열이 서로 평행하게 놓여 있는가(parallel), 교차형으로 놓여 있는가(cross)와, (2) 마주보는 양면의 요철 배열이 주유동 방향 위치에

있어서 서로 동일한 위치인가(In-lined), 요철 사이 간격의 절반($p/2$) 만큼 서로 이격되어 있는가(shifted), 그리고 (3) 요철에 틈새가 몇 개 인가의 3 가지 기준에 따라 분류된다. 그러므로 각 경사 요철은 P (parallel) 또는 C (cross), I (in-lined) 또는 S (shifted), 그리고 0 또는 1 또는 2 (틈새의 개수)의 3 가지 기호를 가진다. 따라서 PI0, PS0, PI1, PS1, PI2 는 평행배열(parallel)을, CI0, CS0, CI1, CS1, CI2 는 교차배열(cross)을 나타낸다. 마찬가지로 PI0, CI0, PI1, CI1, PI2, CI2 는 일치배열(in-lined)을, PS0, CS0, PS1, CS1 는 이격배열(shifted)을 의미한다. 마지막 숫자 0, 1, 2 는 요철 틈새의 개수를 나타내므로 숫자 0 은 연속요철에, 1 과 2 는 단락요철에 부여된다. 충돌각 90°에 대해서는 연속요철만을 고려하였고, 일치배열인가 이격배열인가에 따라 90I 와 90S 로 표시하였다(Fig. 3(a)~(b)).

본 연구에서는 열전달 실험을 대신하여 나프탈렌승화법을 이용한 물질전달 실험을 수행하였으며, 물질전달계수 측정을 위해 나프탈렌을 코팅한 영역은 Fig. 2 에 표시되어 있다. 덕트로 유입된 유동은 요철이 설치된 7.2 D_h 거리를 지나 나프탈렌이 코팅된 면에 이르므로 물질전달계수는 완전발달된 난류유동장에서 획득된다. 요철이 설치된 양면은 나프탈렌이 코팅되어 열전달 실험의 가열면 조건에 상사하므로, 요철이 설치된 면은 가스 터빈 블레이드의 압력면과 흡입면을, 나프탈렌이 코팅되지 않은 매끈한 측벽은 내부 냉각 유로 사이 벽을 모사한 것이다. 요철은 나프탈렌이 코팅되어 있지 않으며, 이로 인한 경계조건의 왜곡은 요철 사이의 열/물질전달계수의 분포와 평균 열/물질전달의 평가에 큰 영향을 미치지 않으며⁽³⁾, 이에 대해서는 권혁진 등⁽¹⁵⁾에서 자세히 토의된 바 있다. 좌표계는 주유동 방향을 x , 횡방향을 z , 덕트 바닥면에서 높이 방향을 y 로 하며, 나프탈렌이 코팅된 면의 시작선의 중심을 원점으로 삼는다. 나프탈렌 승화량의 측정은 선형가변차동변환기(LVDT; Linear Variable Differential Transformer)로 이루어지며, 우성제 등⁽⁹⁾에 자세히 기술되어 있다. 덕트의 측면을 따라 덕트 높이의 중간 위치에 10 개의 압력탭이 위치하며, 압력탭 사이 거리는 50 mm 이다. 압력탭 사이의 차압은 정밀도가 0.01 mmH₂O 인 마이크로 차압계를 이용하여 $Re=25,000\sim 60,000$ 의 범위에서 측정하였다.

2.2 결과처리 방법

나프탈렌 표면의 국소 승화량으로부터 계산되는 물질전달계수는 다음과 같다.

$$h_m = \frac{\dot{m}}{\rho_{v,w} - \rho_{v,b}} = \frac{\rho_s (dy/d\tau)}{\rho_{v,w} - \rho_{v,b}} \quad (1)$$

여기서 \dot{m} 는 단위면적당 국소 물질전달률이며, $\rho_{v,w}$ 는 나프탈렌 표면에서의 증기밀도, $\rho_{v,b}$ 는 혼합평균 나프탈렌 증기밀도이다. 또한 dt 와 dy 는 각각 나프탈렌 표면의 유동장 노출시간과 승화 깊이이다. 물질전달계수의 무차원수인 Sherwood 수는 다음과 같이 정의된다.

$$Sh = h_m D_h / D_{naph} \quad (2)$$

여기서 D_{naph} 는 공기 중에서의 나프탈렌의 확산계수이며, D_h 는 덕트의 수력직경이다. 나프탈렌의 물성치는 Ambrose 등⁽¹⁸⁾과 Goldstein과 Cho⁽¹⁹⁾의 것을 사용하였다. Sherwood 수의 불확실성은 Kline과 McClintock⁽²⁰⁾의 기술방법에 의해 95%의 신뢰수준에서 7.1% 이내였으며, 이 중 나프탈렌 증기밀도와 확산계수의 불확실성이 각각 4.7%와 5.1%로 많은 부분을 차지하는 반면 나프탈렌 승화량 측정의 오차는 1% 이내이다. Nusselt 수는 열전달과 물질전달의 상사성 관계식 (난류유동장에서 $Nu/Sh = (Pr/Sc)^{0.4}$)에 의해 계산될 수 있다. 매끈한 파이프에서 완전발달한 난류유동장에서의 Sherwood 수인 $Sh_0 (=0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}(Sc/Pr)^{0.4})$ ⁽²¹⁾는 물질전달계수를 Sh/Sh_0 와 같이 비로 나타내기 위해 사용되었으며, 이는 요철 설치에 따른 열/물질전달 향상률을 의미한다.

평균 Sherwood 수는 국소 Sherwood 수의 면적 평균에 의해 계산되며, 모든 요철의 조건에 있어서 물질전달계수 분포의 반복성이 보장되는 요철 간 거리의 2배 영역인 $38 \leq x/e \leq 54$ 를 선택하였다.

평균압력강하($\Delta P/\Delta L$)는 국소 차압측정 데이터의 선형맞춤에 의해 계산되고, 이를 이용하여 계산되는 마찰계수는 다음과 같이 정의된다.

$$f = \Delta P / [4(\Delta L / D_h)(1/2)\rho V^2] \quad (3)$$

덕트를 통과하는 공기의 질량유량과 Reynolds 수의 불확실성은 각각 1%와 1.4%이며, 평균압력강하($\Delta P/\Delta L$)와 마찰계수의 불확실성은 각각 4.7%와 4.9%이다. 마찰계수도 매끈한 파이프에서 완전발

달한 난류유동장에서의 마찰계수, $f_0 (=2(2.236 \ln Re - 4.639)^{-2})$ ⁽²²⁾와의 비, ff_0 의 형태로 제시되었다. 열/물질전달 성능계수는 일정 유체이송동력 (constant pumping power)을 기준으로 다음식과 같이 정의되고, 이는 요철 설치로 인한 열전달 향상을 뒤따르는 마찰손실의 증가를 함께 고려한 것이다.

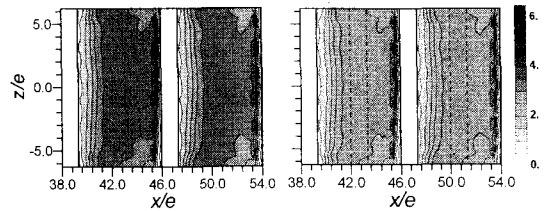
$$\eta = (\overline{Sh}/Sh_0)/(f/f_0)^{1/3} \quad (4)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 국소 열전달

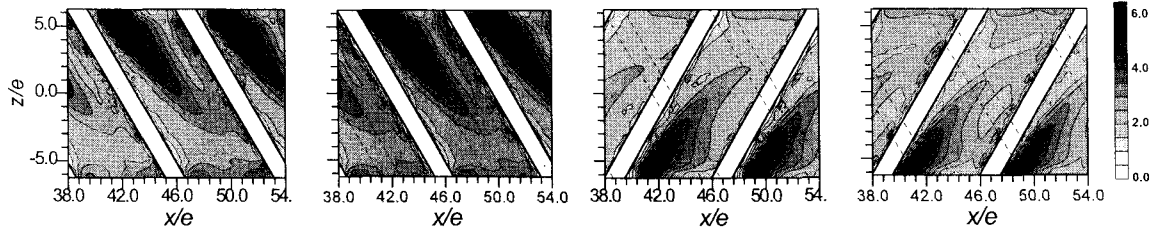
3.1.1 연속 요철

결과의 비교를 위한 기초 자료로 삼기 위해 90°의 충돌각을 가지는 연속 요철에 대한 실험을 수행하였으며, Fig. 4에 국소 물질전달 분포가 Sh/Sh_0 의 형태로 제시되어 있다. 물질전달계수는 각 요철 사이 영역에서 반복적으로 나타나며, 높은 물질전달 분포가 요철사이 중앙 영역인 $41 < x/e < 44$ 과 $49 < x/e < 52$ 에서 관찰된다. 이는 요철에 의해 박리된 유동의 재부착에 의한 것이며, 요철의 하류면에서 재부착 영역에 이르는 곳에 생성되는 재순환 유동에 의해 낮은 물질전달 분포를 볼 수 있다. 이러한 유동 양식은 Fig. 1(a)에 도식적으로 제시된 바와 일치하는 것으로 우성제 등⁽⁹⁾에서 자세하게 다루었다. 90P와 90S는 큰 차이가 없는 물질전달



(a) in-lined array (90I) (b) shifted array (90S)

Fig. 4 Contour plots of Sh/Sh_0 for 90° continuous ribs



(a) parallel in-lined array (PI0) (b) parallel shifted array (PS0) (c) cross in-lined array (CI0) (d) cross shifted array (CS0)

Fig. 5 Contour plots of Sh/Sh_0 for 60° continuous ribs.

분포를 보여주고 있으며, 일치배열인 90P의 경우가 이격배열인 90S보다 약간 큰 값을 가진다.

경사진 연속 요철에 대한 결과는 Fig. 5에 나타나 있으며, 네 가지 경우 모두 기본적으로는 비슷한 물질전달 분포를 보인다. 요철이 경사지게 설치되면 요철을 따라 벽 근처 유동이 편향되면서 Fig. 1(b)에서와 같이 한 개 또는 두 개의 회전하는 이차유동이 형성되며, 이것이 요철 사이 영역의 물질전달 분포를 결정짓는다. 요철의 배열 변화로 이러한 이차유동을 변화시킬 수 있으며, 본 실험에서는 네 가지 배열로 이차유동의 물질전달에 미치는 영향을 고찰하려 하였다. 이차유동은 평행배열인 P10과 PS0에 대하여 $z/e=6.25$ 의 측벽 근처에, 교차배열인 C10과 CS0에 대해서는 $z/e=-6.25$ 의 측벽 근처에 하향류를 형성하게 되며, 마주보는 벽 근처에는 상향류를 형성하게 된다. 하향류 영역에는 덕트 중심에서 유입된 나프탈렌 증기가 거의 없는 유동이 충돌하고, 요철의 길이 방향을 따라 상향류 영역 쪽으로 이동하므로, 하향류에서는 요철이 없는 경우에 비해 물질전달이 6~7 배 향상되며, 상향류 영역에 가까워 질수록 점점 낮은 물질전달을 나타내고 있음을 알 수 있다. 평행배열로 경사진 연속 요철에 있어서 전술한 이차유동과 물질전달계수 분포와의 관계는 우성제 등⁽⁹⁾에서 자세히 다루고 있다.

평행배열인 P10과 PS0의 물질전달계수 분포가 교차배열인 C10과 CS0보다 전체적으로 높은 값을 가지는데, 이는 Fig. 1(b)에 도시한 이차유동의 차이 때문이다. 평행배열의 경우 이차유동이 덕트 상하 대칭을 이루어 한 쌍의 반대로 회전하는 와류구조를 가지는 반면, 교차배열의 경우 단일 회전구조만을 가지게 된다. 따라서 평행배열의 경우 덕트 중심부의 나프탈렌 증기가 거의 없는 유체를 요철이 설치된 벽면으로 효과적으로 유입시키지만, 교차배열의 경우 기본적으로 바닥면에서 멀어지는 이차유동이 측벽을 따라 윗면으로 향하게 된다. 또한 한 쌍의 반대로 회전하는 유동구조는 단일 회전 유동구조보다 와류구조를 더욱 강화시키게

된다. 이로 인해 평행배열이 교차배열보다 더욱 활발한 유동의 혼합과 난류강도 증가를 가능하게 함으로써 보다 높은 열/물질전달 향상을 보이게 된다.

평행배열에 있어서는 일치배열 P10와 이격배열 PS0의 차이가 거의 나타나지 않지만, 교차배열에 있어서는 일치배열 C10보다 이격배열 CS0가 좀 더 높은 물질전달 분포를 보이고 있다. 교차배열에서는 전술한 바와 같이 단일 회전 구조의 이차유동이 요철이 설치된 바닥면과 윗면의 요철 배열을 차례로 따라 흐르게 되므로, 각 면의 요철을 따라 이동하다가 덕트 중심에 이르고 다시 원래의 요철면으로 돌아가는 이차유동 구조를 가지는 평행배열보다 한 면의 요철 배열이 마주보는 요철 배열에 의해 더 많은 영향을 받게 된다. 따라서 본 실험에서의 교차배열에 있어서, 요철의 끝단이 주유동 방향으로 서로 일치하는 C10보다는 약간 이격되어 있는 CS0가 이차유동의 나선 구조 강화에 좀 더 유리하고, 이것이 좀 더 높은 물질전달을 일으키는 것으로 사료된다.

3.1.2 단락 요철

단락에 의한 틈새가 각 요철 당 한 개이고 틈새가 서로 엇갈려 있는 단락 요철의 배열을 네 가지로 변화시키면서 실험한 결과가 Fig. 6에 제시되어 있다. 연속 요철의 경우와 달리 물질전달계수의 분포는 요철 사이 간격의 두 배(2p)의 거리마다 반복적으로 나타난다.

물질전달계수 분포는 단락된 틈새를 지나는 유동에 의해 더욱 복잡하게 나타난다. 요철 상, 하류의 압력차이는 틈새를 통해 유동을 가속하고, 틈새 유동은 부가적인 와류 발생 등으로 국소적으로 난류를 증가시킨다. 그러므로 틈새 주변에 높은 물질전달을 발생시키며, 틈새 유동이 요철 근접하류에 생성된 재순환 유동 영역에 유입되어 낮은 물질전달 영역의 면적을 감소 시킨다.

경사진 요철 설치에 의해 유도되는 회전하는 이차유동은 여전히 유력하게 작용하여 물질전달계

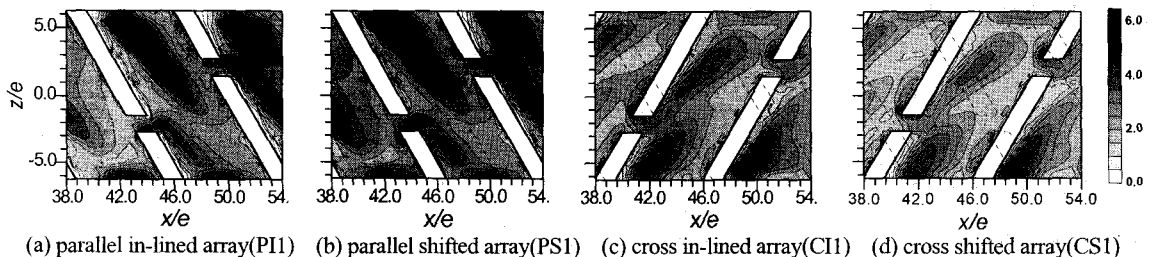
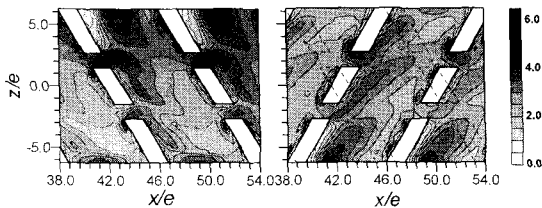


Fig. 6 Contour plots of Sh/Sh_0 for discrete ribs with staggered gaps.

수의 횡방향 구배를 결정 짓는다. 이차유동에 의한 상향류와 하향류의 위치는 앞서 설명한 경사진 연속 요철의 경우와 동일하며, 여전히 하향류 영역에서 높은 물질전달이 일어남을 알 수 있다. 하향류 영역의 최대 물질전달에 있어서, 하향류 영역에 틈새가 있는 경우 하향류의 영향이 약화되어, 틈새가 상향류 영역에 있는 경우 보다 다소 낮은 값을 나타낸다. 이와 더불어 하향류 영역에 있는 틈새를 통과한 유동은 횡방향 성분을 가지는 회전하는 이차유동에 끌려 상향류 영역으로 이동하므로, 상향류 영역에 있는 틈새를 통과한 유동보다 더 넓은 영역에 영향을 미치게 된다. 상대적으로 낮은 물질전달 분포를 보이는 상향류 영역은 그 영역에 존재하는 틈새 유동에 의해 물질전달 향상된다. 이와 같이 경사진 연속 요철에서 낮은 물질전달을 나타내는 영역을 축소하거나, 최대 물질전달이 관찰되는 하향류 영역의 물질전달계수를 다소 감소시키는 등, 요철이 단락된 틈새의 적절한 조절은 물질전달계수 분포의 균일성을 향상시키는 데 사용될 수 있음을 알 수 있다.

평행배열인 PI1 과 PS1 이 교차배열인 CI1 과 CS1 보다 전체적으로 높은 물질전달을 나타내는 것은 앞선 경사진 연속 요철의 경우와 같다. 이것은 틈새 유동이 물질전달계수 분포를 상당히 변화시켰음에도, 평행배열과 교차배열에 있어서 회전하는 이차유동의 구조 차이가 여전히 지배적임을 의미한다. 일치배열과 이격배열 사이의 차이는 평행배열일 때와 교차배열일 때 모두 별차이를 보이지 않아 PI1 는 PS1 와, CI1 은 CS1 과 거의 같은 분포를 나타냈다.

Fig. 7 에는 2 열의 나란한 틈새가 있는 단락 요철에 대한 물질전달계수 분포가 제시되어 있다. 틈새의 개수가 두 배로 증가한 추가적인 교란 요인으로 인해 국소적인 난류증가와 유동 혼합이 증진 된다. 회전하는 이차유동의 영향은 여전히 물질전달계수 분포의 횡방향 구배를 확연히 만들고 있지만, 증가된 틈새 유동으로 그 영향이 약화되고 틈새 유동의 영향 받는 영역이 확장됨에 따라



(a) parallel in-lined array (PI2) (b) cross in-lined array (CI2)

Fig. 7 Contour plots of Sh/Sh_0 for discrete ribs with two

낮은 물질전달 영역이 더욱 축소 되고, 하향류 영역의 최대 물질전달도 좀 더 낮아져 물질전달계수의 전체적인 균일도는 한 층 증가한다. 그러나 전체적인 물질전달이 그다지 줄어 들지 않은 것을 알 수 있다. 평행배열과 교차배열의 차이는 이 경우에도 계속 유지되어, 회전하는 이차유동의 상당한 약화에도 기본적인 구조의 차이는 지속되는 것을 알 수 있다. 각 요철 당 한 개의 틈새를 가지는 단락 요철에서 일치배열과 이격배열의 차이가 근소하므로, 두 줄의 틈새에서도 그 차이는 미미할 것으로 예상된다.

3.2 마찰 손실

덕트 내 압력강하에 의한 마찰손실은 요철 없는 원형관의 경우와의 비교를 위해 마찰손실비, ff_0 의 형태로 Fig. 8 에 제시되었다. 충돌각 90° 의 경우가 거의 모든 경사진 요철보다 낮은 마찰손실을 보이고 있다. 이는 경사진 요철에서 유도되는 회전하는 이차유동에 의한 부가적 압력손실 때문이다. 마찰손실은 평행배열이 전체적으로 교차배열보다 높은 값을 가지며, 이는 전술한 회전하는 이차유동의 유동양식의 차이 때문이다. 평행배열의 이차유동은 서로 반대로 회전하는 와류 성분이 덕트 중심에서 충돌하여 한 쌍을 이루므로 유동혼합은 더욱 활발하지만 압력손실은 증가하게 된다. 연속 요철에 대해서는 Fig. 8 에 함께 제시된 Han 등⁽¹⁷⁾의 결과와 본 연구의 결과가 정성적으로 잘 일치함을 알 수 있다. Han 등⁽¹⁷⁾은 실험에서 $e/D_n=0.0625$, $p/e=10$ 으로 본 실험보다 낮은 요철을 상대적으로 적게 사용하여, 전체적으로 본 실험보다 낮은 마찰손실을 가진다. 대부분의 경사진 요철에 있어서 다른 조건이 동일하다면 마찰손실은 일치배열과 이격배열에 있어서 별로 다르지 않다. 이는 교차 배열을 가지는 연속 요철의 경우인 CI0 와 CS0 에서는 물질전달이 다소 차이를 보였던 것

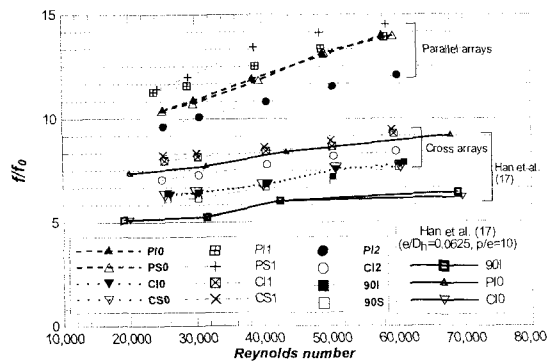


Fig. 8 Friction factor ratios, ff_0 .

과 대비된다.

평행배열(혹은 교차배열)을 가지는 요철군 내에서 한 개의 엇갈린 틈새를 가지는 단락 요철이 가장 높은 마찰손실을 보이고 있으며, 이는 틈새 유동에 의한 추가적인 유동 교란 증가에 기인한다. 그러나 2 열의 틈새를 가지는 단락 요철인 PI2와 CI2의 경우에는 엇갈린 틈새를 가지는 단락 요철에 비해 낮은 마찰손실을 보이며, 평행배열에 있어서는 연속 요철보다도 낮아 최소값을 보인다. 이러한 마찰손실의 감소는 틈새 유동의 증가에 의한 회전하는 이차유동의 약화로 인한 것으로 사료된다. 회전하는 이차유동은 덕트 유동장 전체에 영향을 미치는 반면, 틈새 유동은 기본적으로 요철이 설치된 벽면에 가까운 곳의 유동으로 그 영향이 한정되기 때문에, 틈새 유동의 증가로 인한 국소적인 마찰손실의 증가에도 불구하고 회전하는 이차유동의 감쇠가 전체 마찰손실의 감소를 가져온 것으로 사료된다.

3.3 평균 열/물질전달 및 열/물질전달 성능계수

평균 물질전달계수는 국소값의 면적평균으로부터 계산되며, Fig. 9에 균일도를 표시하기 위한 면적가중 표준편차와 함께 제시되었다. 비교를 위해 Han 등⁽¹⁷⁾의 결과를 함께 도시하였는데, 보다 낮은 요철의 높이와 상대적으로 적은 요철의 사용으로 본 실험보다 낮은 값을 보이는 것 외에 정성적으로는 본 실험과 잘 일치한다. 마찰손실의 결과와 마찬가지로 평행배열은 교차배열에 비하여 상당히 높은 평균 물질전달계수를 나타내고 있으며, 이는 회전하는 이차유동의 양식 차이에 기인한다. 단락 요철의 틈새 유동은 추가적인 유동교란으로 평균 물질전달을 증가시키며, 이러한 현상은 회전하는 이차유동이 상대적으로 약한 CI0와 CI1의 경우 두드러져, CI0에 엇갈린 틈새를 형성하여 만들어진 CI1가 CI0보다 상당히 증가된 평균 물질전달계수를 가진다. 틈새가 2열로 증가하면서 회전하는 이차유동이 더욱 약화되고, 틈새 유동에 의한 물질전달 향상이 이차유동에 약화에 의한 감소를 상쇄하지 못하여, 2열의 틈새의 단락 요철은 엇갈린 틈새의 단락 요철보다 다소 작은 평균 물질전달계수를 보인다. 일직배열과 이격배열의 차이는 교차배열을 가지는 연속 요철 CI0와 CS0를 제외하고는 거의 나타나지 않는다. 틈새 유동에 의한 물질전달계수 분포의 균일성 향상은 2열의 틈새를 가지는 단락 요철에서 두드러진다. 표준편차의 최대 차이는 6.4%이며, 이는 요철의 배열과 단락의 변화로 열/물질전달의 균일성을 조절할 수

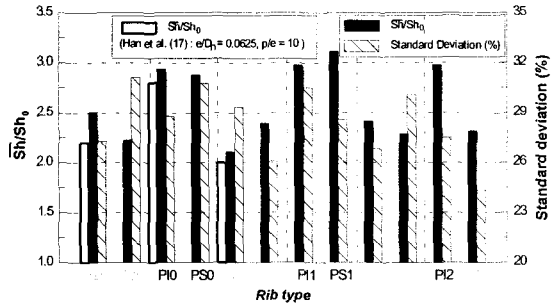


Fig. 9 Average Sherwood number ratios, \overline{Sh}/Sh_0 and standard deviations (%).

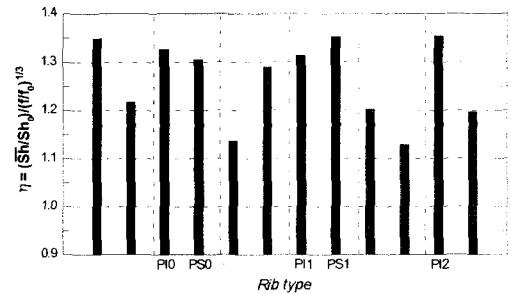


Fig. 10 Heat/mass transfer performances, η .

있는 가능성을 보여준다. 실험한 경우 중, 높은 평균 열/물질전달과 양호한 균일성을 고려하면 PS1과 PI2의 단락 요철이 좋은 결과를 보이고 있으며, CI2의 단락 요철이 가장 높은 열/물질전달 균일성을 나타내고 있다.

Fig. 10은 일정 이송동력조건 하에서의 열/물질전달 성능계수를 제시한 것으로, 평행배열이 교차배열보다 높은 성능계수를 보인다. 높은 성능계수는 대부분 높은 평균 열/물질전달에 의한 것이나, 매우 높은 마찰손실은 평균 열/물질전달 결과와 다르게 CS1를 가장 낮은 성능계수를 가지도록 하였다. 가장 높은 성능계수는 평행배열인 PS1과 PI2에서 나타났다.

4. 결론

12가지의 연속 및 단락 요철에 대하여 실험을 수행하였으며, 이를 통해 경사 요철에 의해 유도되는 이차유동과 단락 요철의 틈새 유동의 효과를 고찰하였다. 틈새 유동을 가지는 단락 유동은 회전하는 이차유동을 충분히 고려한다면 열적 취약점이 될 수 있는 영역을 축소하고 열/물질전달의 균일성을 증가시키는데 이용할 수 있었다. 평행배열과 교차배열은 평균 열/물질전달에 있어서 상당한 차이를 보였지만, 국소적인

열/물질전달 분포는 같은 양상을 띠었다. 일차배열과 이격배열은, 교차배열을 가지는 연속 요철인 CIO와 CSO의 경우 외에는 열/물질전달 및 압력강하에 별다른 영향을 주지 못했다. 틸새 유동의 증가는 회전하는 이차유동을 약화시키지만, 전체적인 횡방향 열/물질전달 분포는 실험된 모든 경우 이차유동이 지배적인 영향을 받았다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Gee, D. L. and Webb, R. L., 1980, "Forced Convection Heat Transfer In Helically Rib-Roughened Tubes," *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 3, pp. 1127-1136.
- (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) Hwang, J. J., 1998, "Heat Transfer-Friction Characteristic Comparison in Rectangular Ducts With Slit and Solid Ribs Mounted on One Wall," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 120, pp.709-716.
- (4) Taslim, M. E., Li, T. and Spring, S. D., 1998, "Measurements of Heat Transfer Coefficients and Friction Factors in Passages Rib-Roughened on All Walls," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 120, pp. 564-570.
- (5) Bonhoff, B., Parneix, S., Leusch, J., Johnson, B. V., Schabacker, J., Bolcs, A., 1999, "Experimental and Numerical Study of Developed Flow and Heat Transfer in Coolant Channels with 45 deg Ribs," *Int. J. of Heat and Fluid Flows*, Vol. 20, pp. 311-319.
- (6) Kukreja, R. T., Lau, S. C. and McMillin, R. D., 1993, "Local Heat/Mass Transfer Distribution in a Square Channel with Full and V-shaped Ribs," *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 2013-2020.
- (7) Acharya, S., Myrum, T., Qiu, X. and Sinha, S., 1997, "Developing and Periodically Developed Flow, Temperature and Heat Transfer in a Ribbed Duct," *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 461-479.
- (8) Aliaga, D. A., 1994, "Convective Heat Transfer Distributions over Plates with Square Ribs from Infrared Thermography Measurements," *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 36(3), pp. 363-374.
- (9) 우성제, 김완식, 조형희, 1998, "사각 덕트내 요철의 각도 변화에 따른 열전달 특성", 대한기계학회논문집 B, 제 22 권, 제 4 호, pp. 530-541.
- (10) 우성제, 권혁진, 조형희, 1999, "터빈 기어 내부관 열전달 증대를 위해 설치된 요철의 형상 효과", 대한기계학회논문집 B, 제 23 권, 제 1 호, pp. 149-157.
- (11) Lau, S. C., McMillin, R. D. and Han, J. C., 1991, "Turbulent Heat Transfer and Friction in a Square Channel with Discrete Rib Turbulators," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 113, pp. 360-366.
- (12) Han, J. C. and Zhang, Y. M., 1992, "High Performance Heat Transfer Ducts with Parallel Broken and V-shaped broken ribs," *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 35, pp. 513-523.
- (13) Taslim, M. E., Li, T. and Kercher, D. M., 1996, "Experimental Heat Transfer and Friction in Channels Roughened With Angled, V-Shaped, and Discrete Ribs on Two Opposite Walls," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 118, pp. 20-28.
- (14) Ekkad, S. V. and Han, J. C., 1997, "Detailed Heat Transfer Distributions in Two-pass Square Channels with Rib Turbulators," *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 40(11), pp. 2525-2537.
- (15) 권혁진, 우성제, 조형희, 2000, "사각 덕트 내부 열전달 향상을 위한 요철의 단락 효과", 대한기계학회논문집 B, 제 24 권, 제 5 호, pp. 744-752.
- (16) Cho, H. H., Wu, S. J., Kwon, H. J., 2000, "Local Heat/Mass Transfer Measurements in a Rectangular Duct with Discrete Ribs," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 122, pp. 579-586.
- (17) Han, J. C., Zhang, Y. M. and Lee, C. P., 1991, "Augmented Heat Transfer in Square Channels with Parallel, Crossed, and V-shaped Angled Ribs," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 590-596.
- (18) Ambrose, D., Lawrenson, I. J., and Sparke, C. H. S., 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene," *J. of Chem. Thermodynam.*, Vol. 7, pp. 1173-1176.
- (19) Goldstein, R. J. and Cho, H. H., 1995, "A Review of Mass Transfer Measurement Using Naphthalene Sublimation," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 10, pp. 416-434.
- (20) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3-8.
- (21) McAdams, W. H., 1942, *Heat Transmission*, 2nd ed. McGraw-Hill, New York.
- (22) Petukhov, B. S., 1970, *Advances in Heat Transfer*, Vol. 6, pp. 503-504, Academic Press, New York.