

췘기형 요철이 설치된 사각덕트에서의 열전달 및 압력강하 특성

최 칭* · 이동호* · 조형희†

Heat/Mass Transfer and Pressure Drop of Square Duct with V-shape Ribs

Chung Choi, Dong Ho Rhee and Hyung Hee Cho

Key Words: Turbine internal passage(터빈내부 이차유로), Turbulator(요철), Duct Flow(덕트유동), Heat/Mass Transfer(열/물질전달), Pressure Drop(압력강하)

Abstract

The present study investigates convective heat/mass transfer and flow characteristics inside the rib-roughened cooling passage of the gas turbine blades. A square duct with rectangular ribs is used and Λ - and V-shape ribs with 60° attack angle are installed on the test plate surfaces. Naphthalene sublimation technique is employed to determine the detailed local heat transfer coefficients using the heat and mass transfer analogy. The ribs disturb the main flow resulting in the recirculation and secondary flows near the ribbed wall and the vortices near the side-wall. The local heat transfer and the secondary flow in the duct are changed largely according to the rib orientation. A square duct with Λ and V-shape ribs has two pairs of secondary flow because of the rib arrangement. So, the duct has complex heat/mass transfer distribution. The average heat/mass transfer coefficient and pressure drop of Λ - and V-shape ribs are higher than those with 90° and 60° attack angles. The average heat/mass transfer coefficient on the Λ -shape ribs is higher than that on the V-shape ribs. Also, the uniformity of heat/mass transfer coefficient on discrete ribs is higher than that on continuous rib.

기호설명

D_{naph} = 나프탈렌 확산계수 [m^2/s]
 D_h = 유로 수력직경 [m]
 h_m = 물질전달 계수 [m/s], 식 (1)
 L = 가열면의 길이 [m]
 Re = Reynold 수, $D_h U / \nu$
 Sh = Sherwood 수, $h_m D_h / D_{naph}$
 U = 주유동 속도 [m/s]
 W = 벽두께 [m]
 x, z = 주유동, 폭 방향 좌표 [m]
 e = 요철 높이(mm)

그리스문자

ν = 공기의 동점성계수 [m^2/s]
 ρ = 밀도 [kg/m^3]
 σ = Sh/Sh_0 분포의 표준편차

하첨자

b = 주유동 혼합 평균
 o = 완전발달 난류영역 원형단면직관
 v = 증기
 w = 벽

* 연세대학교 대학원

† 책임저자, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

TEL. : +82-2-2123-2828

FAX : +82-2-312-2159

1. 서론

가스터빈 엔진의 열효율과 추력의 향상을 위하여 압축기의 압력비, 터빈 정격회전수의 향상, 연

소가스의 터빈입구온도(TIT; Turbine inlet temperature)의 향상은 필수적이다. 그러나 이는 터빈 블레이드(blade)와 베인(vane)에 열부하를 가중시키고 이로 인해 부품의 수명 단축시키게 된다. 최근 고성능의 터빈 입구온도는 금속 허용온도를 상회하는 1400~1500°C 이상이며, 이러한 고온의 연소가스로부터 블레이드(blade)와 베인(vane)을 보호하고 적정수명을 유지하기 위한 연구가 수년간 지속되어왔다. 표면처리 등을 통하여 블레이드 표면의 열적 성능을 높이는 방법과 더불어 고단 압축기의 고압 유체를 추출하여 막냉각(film cooling), 충돌제트냉각(impingement cooling), 내부관 대류냉각(internal channel convective cooling) 등의 외부, 내부 냉각기술(external, internal cooling technique)이 복합적으로 적용되고 있다. 이 중에서 내부관 대류냉각은 블레이드 내부유로를 통해 냉각시키는 방법이다. 내부유로에서의 냉각성능 향상을 위하여 요철(rib turbulator)을 설치하는 방법이 주로 적용되고 있으며, 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

Han 과 Park⁽¹⁾은 요철과 주유동과의 충돌각을 변화시키면서 덕트의 단면비가 1, 2 그리고 4인 경우에 대해서 열전달 실험을 수행하였다. 정사각 단면을 갖는 덕트에서는 요철사이의 거리가 10일 때 요철과 주유동과의 충돌각이 60°인 경우 가장 높은 열전달 계수 값을 나타내며 압력강하 역시 이 경우 가장 크게 일어나는 것을 확인하였다. 우성제 등^(2~3), 이세영과 조형희⁽⁴⁾와 Cho 등⁽⁵⁾은 단면비가 1과 2인 경우에 덕트 내부의 요철의 각도, 형상 및 배열변화에 따른 국소적인 열전달계수 및 성능계수를 도출하였으며, Cho 등⁽⁶⁾은 단면비가 2인 경우에 나프탈렌 승화법을 이용하여 덕트내 요철의 충돌각 및 단락을 변화시키면서 국소적인 열전달계수 및 덕트내의 마찰계수를 측정하여 성능계수를 도출하였다. Herman-son 등⁽⁷⁾과 Bonhoff 등⁽⁸⁾은 여러 가지 난류 모델을 적용시켜 가면서 요철과 주유동과의 충돌각이 45°인 경우 덕트 내부에 발생하는 유동현상을 고찰하였다. 요철에 의하여 편향된 유동은 압력차이에 의해서 발생하는 이차유동구조를 갖게 되고 이러한 이차유동은 덕트 좌우의 열전달의 불균일을 야기시킨다. 이러한 결과는 Cho 등⁽⁶⁾과 Taslim 등⁽⁹⁾의 열/물질전달 실험결과에서 확인할 수 있는데 하향류가 존재하는 영역에서는 상향류

가 존재하는 영역에서보다 훨씬 높은 열전달 계수 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 경사진 요철은 덕트 내에서 회전하는 이차유동을 발생시킨다. 이렇게 회전하는 이차유동에 의해 하향류가 발생하는 부분에서는 유동의 충돌효과(impingement effect)에 의해서 국소적으로 높은 열전달이 일어나게 된다. 반면 상향류가 존재하는 영역에서는 유동의 재부착이나 충돌효과가 적어지게 되어 상대적으로 열전달이 감소하는 특징을 나타낸다. 이와 같이 요철에 의한 유동 현상은 요철이 설치된 면의 열전달 특성을 결정짓는 중요한 인자가 되고 이때 발생하는 열전달의 차이는 냉각의 불균일을 초래함으로써 블레이드의 열적 특성을 약화시키기도 한다. 이때 요철이 양면에 평행하게 배열되어 있는가 엇갈리게 배열되어 있는가에 따라 상이한 이차유동 패턴을 나타낸다. 결과적으로 요철의 배열에 의해 발생하는 이차유동 구조가 열전달의 불균일을 초래하며, 이를 개선하고자 다각적인 노력이 진행되어 왔다. Cho⁽⁶⁾ 등, Taslim 등⁽⁹⁾, Han 과 Zhang⁽¹⁰⁾, Chyu와 Natarajan⁽¹¹⁾ 및 Lau 등⁽¹²⁾은 단락요철을 사용하여 열전달 특성을 고찰하였다. 단락된 요철은 그 사이의 좁은 유로를 통하여 국소적으로 가속되는 유동이 좁은 영역에서의 열전달을 향상시킬 수 있으며 가스터빈 이차유로내에서 이를 응용하고 있다.

본 연구에서는 덕트 내부에서의 열전달 향상 및 불균일성 감소를 위한 하나의 방법으로 V자형 요철을 설치한 경우에 대하여 국소 열/물질전달 특성을 고찰하였다.

본 연구에서는 물질전달실험방법 중의 하나인 나프탈렌 승화법을 이용하였으며, 이 방법은 열전달 실험에서 발생하는 전도, 복사의 오차를 제거할 수 있고, 국소적인 전달계수의 측정이 가능하다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1에 제시된 바와 같이 실험 장치는 크게 수축부, 시험부, 플리넘, 오리피스 파이프, 송풍기 등으로 이루어져 있다. 수축부는 6:1의 면적비를 가지며, 시험부 덕트는 단면적(W×H)은 50 mm×50 mm이므로 종횡비(aspect ratio, AR=W:H)

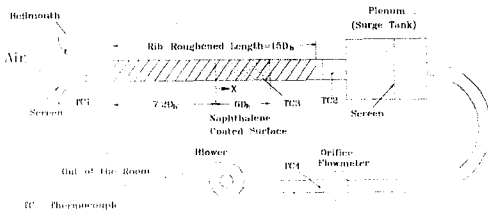


Fig. 1 Schematic diagram of experimental rig

는 1:1이다. 이 때의 수력직경(D_h)은 50mm이다. 시험부 덕트는 아크릴로 제작되었으며 총 길이는 750 mm로 $15D_h$ 가 된다. 출구에는 플리넘을 설치하여 시험 덕트 하류에서 상류로의 유동교란이 전파되는 것을 방지하였다. 송풍기는 실험실 내부의 공기를 흡입하게 되며 흡입된 공기는 시험부를 거쳐 오리피스 유량계에서 유량이 측정되고 송풍기를 통해 실외로 배출된다. 본 실험에서는 온도 측정을 위하여 3개의 J형 열전대(iron-constantan)를 사용하였으며, 평균속도는 약 9.5 m/s로 수력직경기준 Reynolds 수는 약 30,000이다. 본 실험에서 사용된 좌표계는 Fig. 2에서 보여주듯이 주유동 방향을 x, 횡방향을 y, 높이 방향을 z로 표시하였으며, x방향으로는 나프탈렌 코팅영역이 시작되는 지점에서부터, y방향으로는 중간지점을 z방향으로는 바닥을 원점으로 하였다.

요철은 아크릴과 황동을 이용하여 제작하였다. 요철은 4 mm × 5 mm의 직사각형의 단면을 갖는 요철을 사용하였다. 따라서 요철의 높이와 덕트 수력직경과의 비(e/D_h)와 요철의 높이와 덕트 높이와의 비는 모두 0.08이다. 실제 가스터빈에서는 열전달의 향상을 위해서 $60^\circ \sim 70^\circ$ 정도의 충돌각을 많이 이용하고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 결과를 토대로 요철과 주유동의 충돌각을 60° 로 제작한 V형 요철을 사용하여 실험을 수행하였다. Fig. 3에는 본 연구에서 사용된 요철배열의 개념도가 나타나 있다. 그림에서 실선은 측정면의 요철을 나타내며 점선은 반대면의 요철을 나타낸다. 요철은 한 면당 23개씩 설치되었으며 나프탈렌 표면에 이르기 전에 약 10여 개의 요철을 통과하여 유동이 완전 발달한 상태에서 열/물질전달 경계층이 생성된다. 유동방향을 기준으로 요철의 배열 형상에 의하여 A형 요철과 V형 요철을 구별하였으며 단락형 요철은 D로

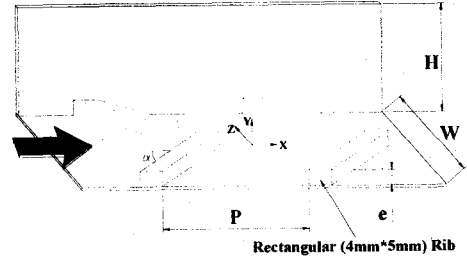


Fig. 2 Schematic of test duct and coordinate

표기하였다. 윗면과 밑면에 설치된 요철이 나란히 설치되어 있으면 I(inline)로, 한 측면의 요철이 반파치 이동되어 있는 경우에는 S(staggered)로 표기하였다. 또한 요철이 설치된 덕트내 압력강하 특성을 고찰하기 위해서 덕트의 측면벽의 중앙지점($y=H/2$)에 정압 측정용 홀(pressure tap)을 만들었다. 압력측정을 위해서 정밀 차압계(micro-manometer; FCO12 Kurness controls ltd., bexhill England)를 사용하였으며 측정 범위에 따라 각각 분해능 0.1 mmH₂O, 0.01 mmH₂O, 측정 범위 ± 199.9 mmH₂O, ± 19.99 mmH₂O인 압력계를 사용하여 정밀한 측정이 가능하도록 하였다. 나프탈렌 승화법을 이용한 물질전달계수의 측정을 위해서 나프탈렌의 표면고도를 실험 전·후에 측정하여 계산하게 된다. 이를 위해 2차원 자동이송장치로 이송되는 선형가변차동변환기(LVDT; linear variable differential transformer)를 이용하여 이루어진다. 이 장치의 정밀도는 0.025 μ m로 매우 정밀하며, LVDT의 측정오차는 평균나프탈렌의 승화깊이(3.5mil)의 1%이내이다.

2.2 실험결과처리

송풍실험 전후 시험판의 나프탈렌 고도차이로부터 국소 나프탈렌 승화량을 구하고 측정 전후의 자연대류에 의한 승화량을 보정하여 이로부터 무차원 물질전달계수인 Sherwood 수를 구한다. 이 때 구해지는 물질전달계수 h_m 은 다음과 같이 구할 수 있다.

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

여기에서 $\dot{m}(\text{kg/m}^2\text{s})$ 은 나프탈렌 표면의 단위 면적에서 단위시간당 승화량을 나타내며 $\rho_{v,w}$ 는

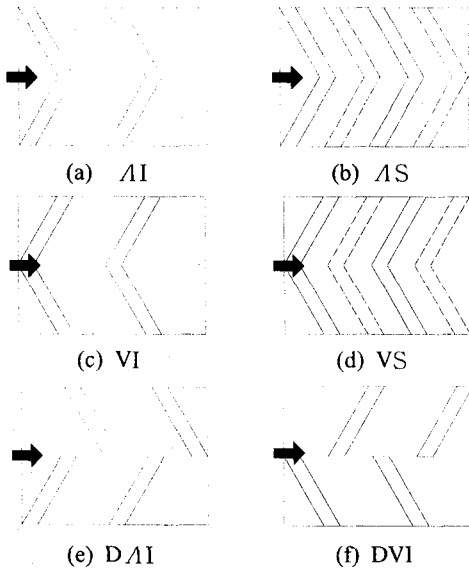


Fig. 3 Schematics of rib arrangements

나프탈렌 벽면에서의 증기밀도를 나타낸다. $\rho_{v,b}$ 는 덕트를 지나가는 유동의 나프탈렌 평균 증기밀도를 나타내며 나프탈렌 승화량은 송풍실험 전후의 고도차이와 실험 시간 그리고 고체 나프탈렌의 밀도($\rho_s=1162\text{kg/m}^3$)로부터 구해진다. 나프탈렌의 증기밀도($\rho_{v,w}$)는 이상기체 상태 방정식에 의해서 다음과 같이 구할 수 있으며 이때 나프탈렌의 포화 증기압은 Ambrose 등⁽¹³⁾에 의해서 제시된 식을 사용하였다.

$$\rho_{v,w} = \frac{P_{naph}}{R_{naph}T_w} \quad (2)$$

유동의 평균 나프탈렌 증기밀도($\rho_{v,b}$)는 나프탈렌 표면 시작점부터 선형적으로 증가한다는 가정하에 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_{v,b}(x) = \frac{\rho_{air}\rho_s}{m_{air}} \int_0^x \int_0^W (dz dx) \rho dx \quad (3)$$

위의 물질전달계수(h_m)는 무차원수인 Sherwood 수로 나타낼 수 있으며 다음같이 표시된다.

$$Sh = \frac{h_m D_h}{D_{naph}} \quad (4)$$

여기서 D_{naph} 는 공기 중에서 나프탈렌의 확산계

수이다. 여기서 사용되는 물성치는 Goldstein과 Cho⁽¹⁴⁾에 의하여 제시되어 있으며 주요 물성치의 관계식은 다음과 같다. 본 실험에서의 Sherwood 수는 Kline과 McClintock⁽¹⁵⁾의 방법에 의해 95% 신뢰수준에서 7.8%의 불확실성을 가진다.

본 실험에서는 국소 물질전달 계수를 요철이 없는 완전 발달한 원형관에서의 물질전달계수로 나누어 그 비로 나타내었다. 완전 발달한 원형관의 물질전달계수는 Dittus와 Boelter⁽¹⁶⁾에 의해서 제시된 식에 열/물질전달의 유사성을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Sh_0 = 0.023 Re^{0.8} Sc^{0.4} \quad (5)$$

압력강하 실험은 입구부근의 기준 정압과 임의의 위치에서의 차압을 측정함으로써 얻어진다. 유동이 충분히 발달된 상태에서 압력은 선형적으로 감소한다. 따라서 전체 측정구간 중에서 열/물질전달 실험이 수행되는 구간을 중심으로 하여 곡선맞춤(curve fitting)을 통해 주유동 방향으로의 평균 압력강하(dP/dx)를 구하고 이를 이용하여 다음 식으로부터 평균 마찰계수를 구하였다.

$$\bar{f} = \frac{\Delta P}{4(L/D_h)(1/2)\rho V^2} \quad (6)$$

본 실험에서의 평균 마찰계수는 Kline과 McClintock⁽¹⁵⁾의 방법에 의해 95%신뢰수준에서 4.9%의 불확실성을 가진다.

요철이 설치되지 않은 경우 덕트내 평균 마찰계수는 요철이 없는 원형관에서의 마찰계수 상관 관계식으로 나누어서 표현하였다. 완전 발달 원형관에서의 마찰계수는 Petukov가 Karman - Nikuradse 방정식에 맞도록 $10^4 < Re < 5 \times 10^6$ 범위에서 제안한 식을 사용하여 다음과 같이 표시된다.

$$f_0 = 2(2.236 \ln Re - 4.369)^{-2} \quad (7)$$

국소적으로 얻어진 물질 전달계수로부터 면적 평균을 구하였다. 이때 요철이나 분리벽 등에 의해서 나프탈렌이 가려진 영역은 평균 계산에서 제외하였다.

물질전달 실험과 동시에 요철의 배열에 따른 압력강하 실험을 수행함으로써 요철설치에 따른

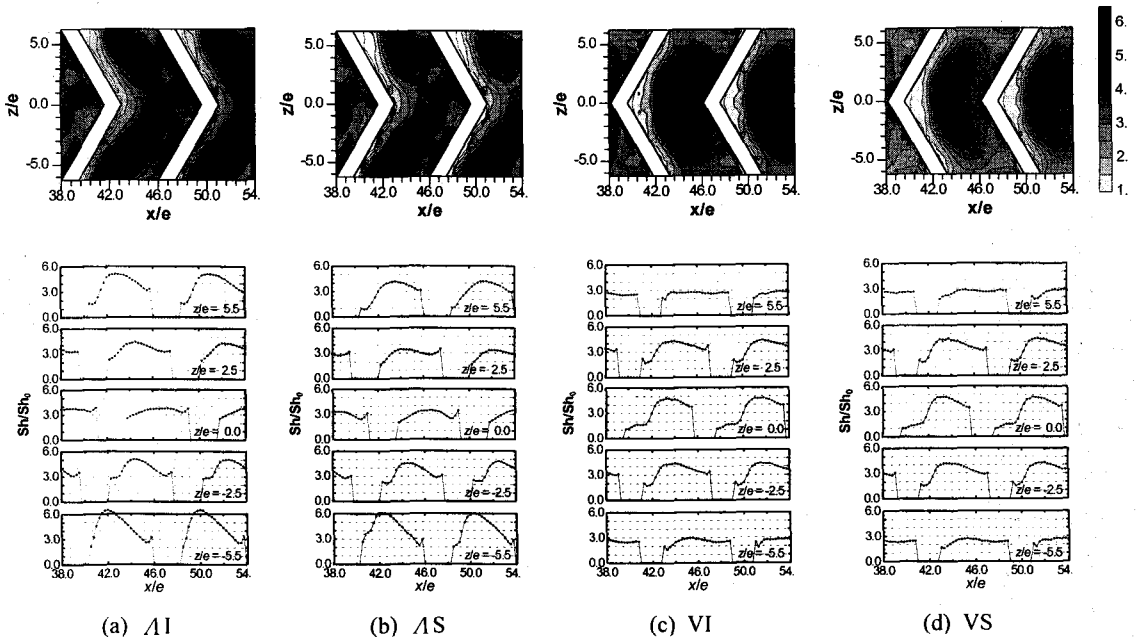


Fig. 4 Contour and local plots of Sh/Sh_0 with Δ and V-shape ribs

마찰계수의 증가를 동시에 고려하여 유체 이송동력이 일정(constant pumping power)할 때의 열전달 정도를 나타내는 성능계수의 개념을 도입하였다. 이때 성능계수는 다음과 같이 표현된다.

$$Thermal\ Performance = (\overline{Sh}Sh_0) / (ff_0)^{1/3}$$

요철에 대한 Sh/Sh_0 의 균일도를 나타내고자 측정면의 면적평균 Sh/Sh_0 값을 구하고 각 측정점의 표준편차(σ , standard deviation)을 구하여 다음과 같이 표현하였다.

$$Uniformity = 1 - 0.5 \times \sigma$$

3. 결과 및 고찰

3.1 국소 Sherwood 수 분포

Fig. 4는 주유동에 대해서 요철의 배열 형상이 Δ 형인 경우와 V형인 연속요철에 대한 Sh/Sh_0 분포를 나타낸다. Figs. 4(a), (c)는 윗면과 아랫면의 요철이 나란하게 배열된 것(AI, VI)이고 Figs. 4(b), (d)는 위면과 아랫면의 요철이 반 피치 이동되어 설치된 경우(AS, VS)이다. Fig. 4(a)의

경우 요철의 충돌각으로 인해서 발생하는 이차유동의 하향류에 해당하는 $z/e \approx \pm 5.0$ 영역에서는 국소적으로 매우 높은 Sh/Sh_0 값이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 이차유동의 하향류 영향에 의한 충돌효과와 더불어 요철을 지나 요철의 하류에서 박리된 유동이 하향류에 의해 눌러져 발생하는 재부착의 효과가 동시에 일어나면서 열/물질전달이 향상되는 것이다. 이와 같이 유동의 재부착은 열/물질전달 결과에서 보면 횡방향으로 $z/e \approx \pm 2.0$ 영역까지 지속되는 것으로 보인다. 이후 $z/e \approx 0.0$ 영역에서 쌍으로 회전하는 두 개의 이차유동이 상향류를 이루게 된다. 이로 인해 $z/e \approx 0.0$ 의 영역에서는 상향류에 의해 상대적으로 낮은 열/물질전달 계수 분포를 나타낸다. 또한 요철 인접 상류영역에서는 요철을 만나면서 박리된 유동과 요철 사이에 부분적으로 나타나는 작은 모서리 와류에 의한 영향으로 열/물질전달이 높은 영역이 국소적으로 나타난다. 이러한 유동 및 열/물질전달의 특성은 한 쪽면의 요철을 반 피치 이동시키는 것에는 크게 영향을 받는 것으로 보이지 않는다. 다만 전체적으로 낮은 Sh/Sh_0 의 분포를 가지게 되는데 이는 2차유동의 강도가 작아짐에 따른 영향으로 보여진다. 또한 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)의 결과에서 보여주듯이 두 개의 하향류가 발생하는 영역($z/e \approx \pm 5.0$)에서의 Sh/Sh_0

의 값에 차이가 생기는 것을 볼 수 있는데, 이는 요철 배열 형상에 따른 결과로써 두 개의 2차유동의 강도가 불일치함에 따라 생기는 결과이며 이는 자연적이거나 입구조건에 의한 영향으로써 실험상 일치하게 만드는 것은 불가능 할 것으로 판단된다.

Fig. 4(c)와 Fig. 4(d)는 V형 요철의 경우에 대한 Sh/Sh_0 분포를 나타낸다. 이 경우에는 Fig. 4(a)와 (b)의 결과와는 상반되는 Sh/Sh_0 분포를 가지게 된다. Fig. 4(c)의 경우에서와 같이 $z/e \approx 0.0$ 인 영역에서 요철의 배열 형상에 의해 하향류가 발생되고 $z/e \geq 5.0$, $z/e \leq -5.0$ 인 영역에서 상향류가 발생한다. 이러한 유동 형상에 의하여 하향류가 발생하는 영역($z/e \approx 0.0$)에서는 상대적으로 높은 Sh/Sh_0 분포를 가지게 되며 이는 $z/e \approx \pm 3.0$ 인 영역까지 영향을 미치게 된다. 이후 상향류가 발생하는 영역($z/e \geq 5.0$, $z/e \leq -5.0$)에서는 상대적으로 낮은 Sh/Sh_0 분포를 가지게 되는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)의 경우와 마찬가지로 Fig. 4(c)와 Fig. 4(d)의 경우에서도 요철 상류 영역에서는 주유동이 요철에 의해 박리되고 박리된 유동과 요철 사이에 부분적으로 나타나는 작은 모서리 와류에 의한 영향으로 열/물질전달이 높은 영역이 국소적으로 나타난다. Fig. 4(d)의 열전달 분포는 Fig. 4(c)의 경우와 일치하는 결과를 보이나 전체적으로 낮은 Sh/Sh_0 분포를 가지는데 이는 Figs. 4(a), (b)의 경우와 같은 이유로 인한 결과이다.

Fig. 4에서 A형 요철의 Sh/Sh_0 평균값이 V형 요철의 Sh/Sh_0 평균값보다 약 14% 높은 값을 가지게 되는데 이는 A형 요철의 경우 $z/e \sim \pm 5$ 인 두 영역에서 하향류로 인한 높은 열전달 분포를 가지게 되나, V형 요철의 경우 $z/e \sim 0$ 인 영역에서만 하향류로 인한 높은 열전달 분포를 가지게 됨에 따라 차이가 나게 된다.

Fig. 5는 단락된 A형과 V형 요철의 국소적인 Sh/Sh_0 분포의 결과이다. Fig. 5(a)에서는 $z/e \approx \pm 5$ 인 영역에서 두 개의 하향류로 인한 상대적으로 높은 Sh/Sh_0 분포를 가지는 것을 볼 수 있으며, 이는 $z/e \approx 3.5$ 인 영역까지만 영향을 주고있음을 알 수 있다. 이후 $z/e \approx 0.0$ 인 영역의 단락된 부분에서 유동의 가속이 이루어져야 하나 서로 반대 방향에서 진행되는 유동에 따라 가속되지 못하고 상향류로 진행되어진다. 이에 따라 이 영역에

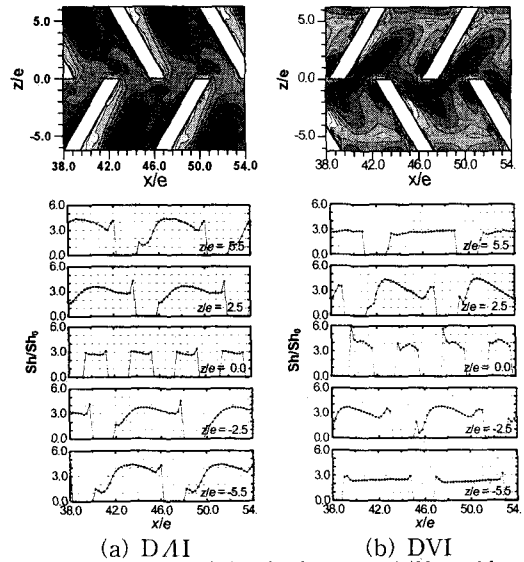


Fig. 5 Contour and local plots of Sh/Sh_0 with A and V-shape discrete ribs.

서는 낮은 Sh/Sh_0 분포를 가지게 된다. 반면에 Fig. 5(b)의 경우는 $z/e \approx 0.0$ 영역에서 하향류가 생성되고 이후 $z/e \approx \pm 4.0$ 인 영역까지 하향류와 유동의 가속에 의한 열전달 효과가 보여진다. 하지만 유동의 가속에 의한 효과보다 하향류에 의한 효과에 의해 Fig. 5(a)의 경우가 (b)의 경우보다 약 4.5% 높은 Sh/Sh_0 평균값을 가지게 된다.

3.2 압력강하 및 평균 열전달계수

요철에 의한 열전달 향상 방법은 이에 따른 마찰계수의 증가를 초래하게 된다. 따라서 열/물질전달의 향상과 마찰의 증가를 동시에 고려하여 요철을 설계하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 압력강하 실험을 통해 요철의 설치에 따른 마찰계수의 증가를 고려하였다.

Fig. 6은 주유동과 요철의 배열에 따라 $25,000 \leq Re \leq 50,000$ 영역에서 압력강하 실험으로부터 얻은 평균 마찰계수비(\bar{f}/f_0)를 나타낸다. Fig. 6에서 보이는 바와 같이 모든 경우 Reynolds 수에 따른 마찰계수 비는 증가한다. A형 요철이나 V형 요철의 경우 윗판과 밑판의 요철이 일치하는 경우(AI, VI)와 요철을 반파치 이동시킨 경우(AS, VS)의 Reynolds 수에 따른 압력강하 분포가 거의 일치하는 것을 볼 수 있는데 이는 요철을 반파치 이동시켜도 압력강하에는 영향이 없음

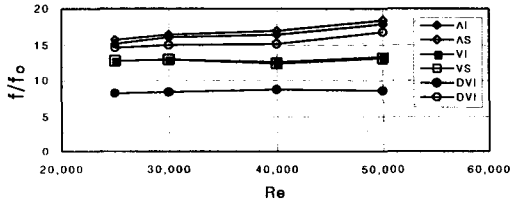


Fig. 6 Friction factor ratio

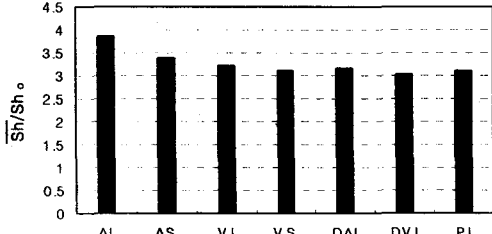


Fig. 7 Average heat/mass transfer ratio

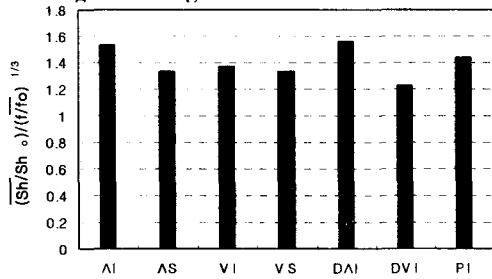


Fig. 8 Thermal Performance

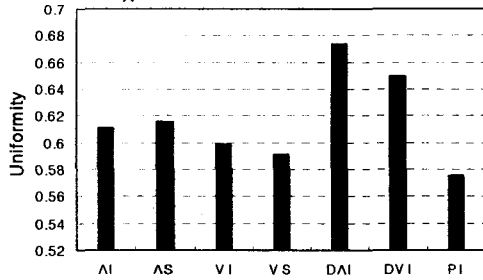


Fig. 9 Uniformity

알 수 있다. 그리고 Δ 형 요철이 V형 요철에 비해 높은 압력강하를 나타내고 있는데, 요철에 배열에 따라 유동을 방해하는 효과가 Δ 형이 크다는 것을 알 수 있다. 그러나 단락된 요철의 경우에는 반대의 결과로써 Δ 형의 단락된 요철(DAI)의 경우에 가장 낮은 압력강하 분포를 보이고 있다. 이것은 요철의 단락에 의해서 V형의 요철이 유동을 방해하는 효과가 Δ 형보다 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 각각의 요철배열에 따른 평균 Sh/Sh_0 를 나타낸다. 여기서 PI는 이세영과 조형희⁽⁴⁾의 60° 경사 요철의 결과이다. 결과에서 보여지듯이 일반적으로 60° 경사 요철보다 Δ , V형 요철

이 상대적으로 높은 평균 Sh/Sh_0 값을 나타낸다. 열전달 효과가 가장 우수한 요철의 배열은 결과에서 보여지듯이 Δ 의 경우가 가장 높은 Sh/Sh_0 값을 가지며 요철의 배열이 반피치 이동한 경우에는 윗판과 밑판의 요철이 일치한 경우에 비해서 낮은 값을 가지는 것을 알 수 있다. 또한 단락된 V형 요철의 경우(DVI)에 가장 낮은 Sh/Sh_0 값을 가지는데 이는 하향류에 생성될 높은 Sh/Sh_0 분포(VI요철의 경우)를 요철의 단락에 의해 생성된 유동의 가속효과가 방해하여 낮은 값을 가짐에 따라 평균 열전달 수가 낮아짐을 알 수 있다.

3.3 성능계수 및 균일도

Fig. 8은 각각의 요철배열에 따른 성능계수 분포를 나타낸다. 일반적으로 높은 열/물질전달이 일어나면서 낮은 마찰 손실 특성을 나타내는 경우 높은 성능계수를 예상할 수 있다. PI 요철에 비해 Δ 와 DAI요철의 경우 보다 좋은 성능을 나타냄을 볼 수 있다. 본 연구의 경우 여러 요철 배열 중에서 Δ 와 DAI요철의 경우에 좋은 성능계수를 가지는데 Δ 의 경우는 비록 높은 압력강하가 생기지만 높은 열전달로 인해 타 요철 배열에 비해 높은 성능계수를 가지고, DAI의 경우에는 열전달수는 낮지만 가장 낮은 압력강하로 인해 가장 좋은 성능계수를 나타내고 있다.

Fig. 9는 각각의 요철배열에 따른 균일도 분포를 나타낸다. PI 요철의 경우 성능계수면에서 높은 값을 가지고 있었으나 균일도면에서 가장 낮은 값을 가지는 것을 알 수 있다. 앞서 가장 좋은 성능계수를 가지는 DAI요철의 경우가 좋은 균일도를 가지고 있음을 나타내고 있으며, VS경우에 가장 좋지 않은 균일도를 나타내고 있다.

4. 결론

(1) 요철의 배열이 Δ 형인 경우에 가장 높은 열전달과 압력강하가 나타난다. V형 요철에 비해 약 14% 높은 열전달 수를 가지며 압력강하는 약 25%정도 높은 값을 가진다.

(2) 나란한 요철배열과 반피치 이동한 요철의 경우 열전달 및 압력강하에는 큰 영향을 주지 않

는다.

(3) 성능계수는 열/물질전달과 마찰계수가 연계되어 ΔI , $D\Delta I$ 요철배열의 경우에 상대적으로 높은 성능계수 값을 가졌다.

(4) Λ , V형 요철에서 단락이 열전달에 미치는 영향은 좋지 않았지만 균일도 면에서 좋은 성능을 나타내고 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정 연구실 사업 지원의 결과이며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Han, J. C., and Park, J. S., 1988, "Developing heat transfer in rectangular channels with rib turbulators," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, No. 1, pp. 183-195.
- (2) 우성재, 김완식, 조형희, 1998, "사각 덕트내 요철의 각도 변화에 따른 열전달 특성," 1998 대한기계학회논문집B, 제22권, 제4호, pp. 530-541.
- (3) 우성재, 권혁진, 조형희, 1999, "터빈 기익 내부관 열전달 증대를 위해 설치된 요철의 형상 효과," 1999 대한기계학회논문집B, 제23권, 제1호, pp. 149-157.
- (4) 이세영, 조형희, 2000, "요철의 배열 변화에 따른 사각덕트에서의 열/물질전달 및 압력강하 특성," 2000 유체공학 학술대회 논문집, pp. 23-26.
- (5) Cho, H. H., Wu, S. J., and Kim, W. S., 1998, "A Study on Heat Transfer Characteristics in a Rib-roughened Rectangular Duct," *Proceeding of 11th International Symposium on Transport Phenomena*, Hsinchu, Taiwan, Paper-No. 61, pp. 364-369.
- (6) Cho, H. H., Wu, S. J., and 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.
- (7) Hermanson, K., Parneix, S., Wofersdorf Von, J., and Semmler, K., 2000, "Prediction of pressure loss and heat transfer in internal cooling passages," *ICHMT, Turbine 2000*.
- (8) Bonhoff, B., Parneix, S., Leusch, J., Johnson, B. V., Schabacker, J., and Bolcs, A., 1999, "Experimental and numerical study of developed flow and heat transfer in coolant channels with 45 degree ribs," *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol. 20, pp. 311-319.
- (9) 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.
- (10) Han, J. C., and Zhang, Y. M., 1992, "High performance heat transfer ducts with parallel broken and V-shaped broken ribs," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 35, No. 2, pp. 513-523.
- (11) Chyu, M. K., and Natarajan, V., 1989, "Local heat transfer on a falt surface roughened ith broken ribs," 1989 ASME Winter Annual Meeting San Fransisco, CA, ASME, HTD, pp. 25-31.
- (12) 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.
- (13) Ambrose, D., Lawrenson, I. J., and Sparke, C. H. S., 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene," *J. Chem. Thermodynam.*, 7, pp. 1173-1176.
- (14) 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.
- (15) Kline, S. J., and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3-8.
- (16) Dittus, P. W., Boelter, L. M. K., 1930, *Univ. Cal. Pebl. Engng*, Vol. 2, No. 13, pp. 443-461; 1985 reprinted in *Int. Commun. Heat Transfer*, Vol. 12, pp. 3-22.