

쐐기형 요철이 설치된 사각덕트에서의 열/물질전달 및 압력강하 특성

최 청* · 이동호* · 조형희*
(2002년 3월 15일 접수, 2002년 9월 5일 심사완료)

Heat/Mass Transfer and Pressure Drop in A Square Duct with V-Shaped Ribs

Chung Choi, Dong Ho Rhee and Hyung Hee Cho

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

Abstract

The present study investigates the convective heat/mass transfer characteristics and pressure drop inside the rib-roughened cooling passage of gas turbine blades. The internal cooling passage is simulated using a square duct with \wedge - and V-shaped rectangular ribs which have a 60° attack angle. A naphthalene sublimation technique is employed to determine the detailed local heat/mass 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. The secondary flow patterns and the local heat transfer in the duct are changed significantly according to the rib orientation. A square duct with \wedge - and V-shaped ribs have two pairs of secondary flow due to the rib arrangement. Therefore, the average heat/mass transfer coefficients and pressure drop of \wedge - and V-shaped ribs are higher than those of the continuous ribs with 90° and 60° attack angles. The \wedge -shaped ribs have higher heat/mass transfer coefficients than the V-shaped ribs, and the uniformity of heat/mass transfer coefficient are increased with the discrete ribs due to the flow leakage and acceleration near the surface.

기호설명

D_{naph} : 나프탈렌 확산계수 [m²/s]
 D_h : 유로 수력직경 [m]
 e : 요철 높이 [mm]
 h_m : 물질전달 계수 [m/s], 식 (1)
 L : 가열면의 길이 [m]
 P : 요철과 요철 사이의 거리
 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]

그리스문자

ν : 공기의 동점성계수 [m²/s]
 ρ : 밀도 [kg/m³]
 σ : Sh/Sh_0 분포의 표준편차

하첨자

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

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

1. 서론

가스터빈 엔진의 열효율과 추력의 향상을 위하여 압축기의 압력비, 연소가스의 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 급속 허용온도를 매우 상회하는 1400~1500℃ 이상이며, 이러한 고온의 연소가스로부터 블레이드와 베인을 보호하고 적정 수명을 유지하기 위한 연구가 지속되어왔다. 표면처리 등을 통하여 블레이드 표면의 열적 성능을 높이는 방법과 더불어 고압단 압축기의 고압 유체를 주출하여 막냉각(film cooling), 충돌제트냉각(impingement cooling), 내부관 대류냉각(internal channel convective cooling)등의 요소 외부 및 내부 냉각기술이 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.

Han과 Park⁽¹⁾은 요철과 주유동과의 충돌각을 변화시키면서 덕트의 단면비가 1, 2 그리고 4인 경우에 대해서 열전달 실험을 수행하였다. 정사각 단면을 갖는 덕트에서는 요철사이의 거리가 요철 높이의 8배일 때, 요철과 주유동과의 충돌각이 60°인 경우 가장 높은 열전달 계수 값을 나타내며 압력강하 역시 이 경우 가장 크게 일어나는 것을 확인하였다. Wu 등,^(2,3) Lee와 Cho⁽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 덕트 내의 마찰계수를 측정하여 성능계수를 도출하였다. Hermanson 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 열전달

의 불균일을 야기시킨다. 이러한 결과는 Cho 등⁽⁶⁾과 Taslim 등⁽⁹⁾의 열/물질전달 실험결과에서 확인할 수 있는데 하향류가 존재하는 영역에서는 상향류가 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 악화시키기도 한다. 이때 요철이 양면에 평행하게 배열되어 있는가 엇갈리게 배열되어 있는가에 따라 상이한 이차유동 구조를 형성하고 결과적으로 요철의 배열에 의해 발생하는 이차유동 구조가 열전달의 불균일을 초래하며, 이를 개선하고자 다각적인 노력이 진행되어 왔다. Cho 등,⁽⁶⁾ Taslim 등,⁽⁹⁾ Han과 Zhang⁽¹⁰⁾ 및 Chyu와 Natarajan⁽¹¹⁾은 단락요철을 사용하여 열전달 특성을 고찰하였다. 단락된 요철은 그 사이의 좁은 유로를 통하여 국소적으로 가속되는 유동이 좁은 영역에서의 열전달을 향상시킬 수 있다.

본 연구에서는 덕트 내부에서의 열전달 향상 및 불균일성 감소를 위한 하나의 방법으로 \wedge 형과 V형 요철을 설치한 경우에 대하여 국소 열/물질전달 특성을 고찰하였다. 또한 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 유량계, 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)는 1:1

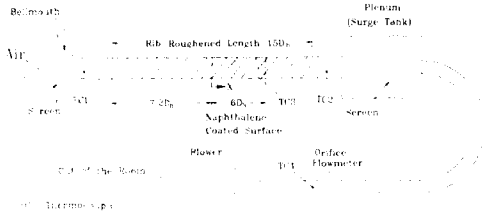


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

이다. 따라서, 이 때의 수력직경(D_h)은 50 mm이다. 시험부 덕트는 아크릴로 제작되었으며 총 길이는 750 mm로 $15D_h$ 가 된다. 출구에는 폴리넴을 설치하여 시험 덕트 하류에서 상류로의 유동 교란이 전파되는 것을 방지하였다. 송풍기는 실험실 내부의 공기를 흡입하게 되며 흡입된 공기는 시험부를 거쳐 오리피스 유량계에서 유량이 측정되고 송풍기를 통해 실외로 배출된다. 본 연구에서는 수력직경을 기준으로 Reynolds 수를 30,000으로 고정하여 실험을 수행하였으며, 이때 주유동의 평균 유속(U)은 약 9.5 m/s이다. 실험 중 주유동의 온도 측정을 위하여 덕트의 입출구 부분에 3개의 J형 열전대(iron-constantan)를 설치하였다.

본 실험에서 사용된 좌표계는 Fig. 2에서 보여 주듯이 주유동 방향을 x , 횡방향을 z , 높이 방향을 y 로 표시하였으며, x 방향으로는 나프탈렌 코팅영역이 시작되는 지점에서부터, z 방향으로는 중간지점을 y 방향으로는 바닥을 원점으로 하였다.

요철은 알루미늄을 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 비(e/H)는 모두 0.08이다. 본 연구에서는 요철과 주유동의 충돌각을 60° 로 설정하였으며, 요철과 요철 사이의 거리(P)는 요철높이의 8배($P/e=8.0$)가 되도록 설정하였다. 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 Λ 형 요철과 V형 요철을 구별하였으며 단락형 요철은 D(discrete)로 표기하였다.

윗면과 밑면에 설치된 요철이 나란히 설치되어

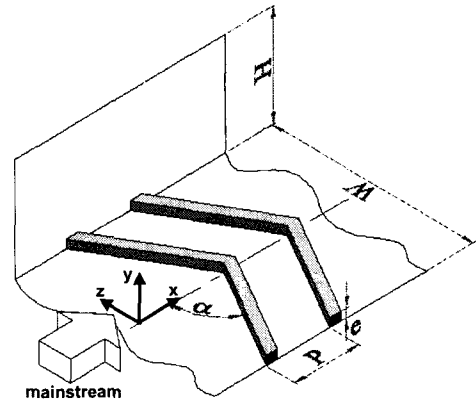


Fig. 2 Schematic of test duct and coordinate

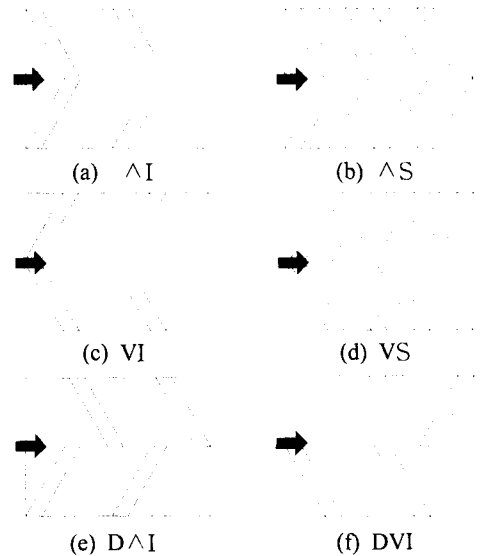


Fig. 3 Schematics of rib arrangements

있으면 I(inline)로, 한 쪽면의 요철이 반 피치 이동되어 있는 경우에는 S(shift)로 표기하였다.

요철이 설치된 덕트 내의 압력강하 특성을 고찰하기 위해서 덕트 측면벽의 중앙지점($y=H/2$)에 정압 측정용 구멍(pressure tap)을 설치하였다. 압력측정을 위해서 정밀 차압계(micro-manometer; FCO12 Kurness controls ltd., bexhill England)를 사용하였으며, 측정 범위 ± 199.9 mmH₂O, ± 19.99 mmH₂O에 따라 각각 분해능 0.1 mmH₂O, 0.01 mmH₂O인 압력계를 사용하여 정밀한 측정이 가능하도록 하였다. 나프탈렌 승화법을 이용한 물질전달계수의 측정을 위해서 나프탈렌의 표면고도를 실험 전· 후에 측정하여 계산하게 된다.

이를 위해 2차원 자동 이송장치로 이송되는 선형 가변차동변환기(LVDT; linear variable differential transformer)를 이용하여 이루어진다. 이 장치의 측정용 팁(tip)의 직경은 1.5 mm이며, 분해능 0.025 μ m, 정밀도 0.3 μ m로 매우 정밀하다.

2.2 실험결과처리

송풍실험 전후 시험관의 나프탈렌 고도차이로부터 국소 나프탈렌 승화량을 구하고 측정 중의 자연대류에 의한 승화량을 보정하여 이로부터 무차원 물질전달계수인 Sherwood 수를 구한다. 이때 구해지는 물질전달계수 h_m 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h_m = \frac{\dot{m}}{\rho_{v,w} - \rho_{v,b}} = \frac{\rho_s (dy/dt)}{\rho_{v,w} - \rho_{v,b}} \quad (2)$$

여기에서 $\dot{m}(\text{kg}/\text{m}^2\text{s})$ 은 나프탈렌 표면의 단위 면적에서 단위시간당 승화량을 나타내며 $\rho_{v,w}$ 는 나프탈렌 벽면에서의 증기밀도를 나타낸다. $\rho_{v,b}$ 는 덕트를 지나는 유동의 나프탈렌 평균 증기밀도를 나타내며 나프탈렌 승화량은 송풍실험 전후의 고도차이와 실험 시간 그리고 고체 나프탈렌의 밀도($\rho_s=1162\text{kg}/\text{m}^3$)로부터 구해진다. 나프탈렌의 증기밀도($\rho_{v,w}$)는 이상기체 상태 방정식에 의해서 다음과 같이 구할 수 있으며 이때 나프탈렌의 포화 증기압은 Ambrose 등⁽¹²⁾에 의해서 제시된 식을 사용하였다.

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

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

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

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

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

여기서 D_{naph} 는 공기 중에서 나프탈렌의 확산계수이다. 여기서 사용되는 물성치는 Goldstein과 Cho⁽¹³⁾에 의하여 제시되어 있다. 이러한 방법에 의해 구하여진 Sherwood수의 불확실성은 Kline과 McClintock⁽¹⁴⁾의 방법에 의해 95% 신뢰수준에서 8.0%의 불확실성을 가진다.

본 실험에서는 국소 물질전달 계수를 요철이 없는 완전 발달한 원형관에서의 물질전달계수로 나누어 그 비로 나타내었다. 완전 발달한 원형관의 물질전달계수는 Dittus와 Boelter⁽¹⁵⁾에 의해서 제시된 식에 열/물질전달의 상사성을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Sh}_0 = 0.023\text{Re}^{0.8}\text{Sc}^{0.4} \quad (5)$$

평균 열전달계수는 국소적으로 얻어진 물질전달계수로부터 면적 평균을 통해 구하였다. 이때 요철이나 분리벽 등에 의해서 나프탈렌이 가려진 영역은 평균 계산에서 제외하였다.

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.

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

본 실험에서의 평균 마찰계수는 Kline과 McClintock⁽¹⁴⁾의 방법에 의해 95%신뢰수준에서 4.9%의 불확실성을 가진다.

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

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

본 논문에서는 다양한 요철 설치에 따른 성능

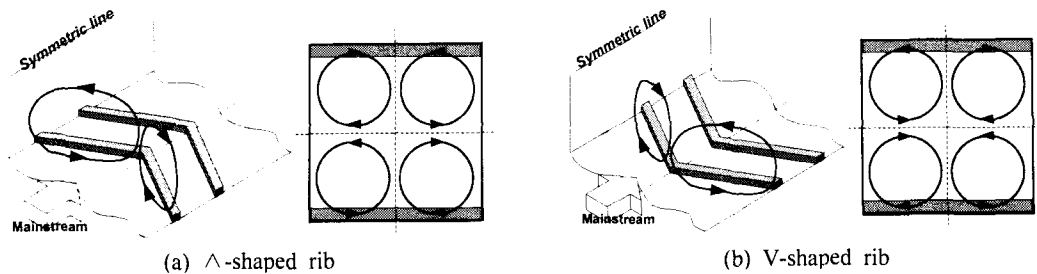


Fig. 4 Schematic views of secondary flow patterns in a duct for different rib configurations

평가 및 비교를 위하여 Han 등⁽¹⁶⁾이 제시한 유체 이송동력이 일정(constant pumping power)할 때의 열전달 정도를 나타내는 성능계수의 개념을 도입하였다. 이때 성능계수는 다음과 같이 표현된다.

$$Thermal\ Performance = (\overline{Sh}/Sh_0) / (\overline{f}/f_0)^{1/3} \quad (8)$$

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

$$Uniformity = 1 - 0.5 \times \sigma \quad (9)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 국소 Sherwood 수 분포

Fig. 4는 Λ 형 및 V형 요철이 설치된 덕트 내에서의 이차유동의 개략도를 나타내는 그림이다. 덕트 내에 Λ 형 혹은 V형 요철이 설치된 경우 4개의 이차유동 셀(cell)이 형성된다. Λ 형 요철이 설치된 경우(Fig. 4(a)), 바닥면을 기준으로 했을 때 요철의 형상을 따라서 덕트의 중앙부($z/e=0.0$)에서는 위로 향하는 상향류(upward flow)가 형성되며, 반대로 옆벽(side wall) 부근($z/e \approx \pm 5.0$)에서 바닥면으로 향하는 하향류(downward flow)가 형성된다. 반면에 V형 요철이 설치된 경우, 옆벽 부분에서는 덕트의 중앙부로 향하는 상향류가, 덕트의 중앙부에서는 바닥면으로 향하는 하향류가 발생하게 된다.

하향류가 형성되는 영역에서는 바닥면으로 향하는 유동의 충돌효과와 덕트 중심부의 공기를 바닥면쪽으로 끌어오기 때문에 열전달이 촉진되

는 현상이 나타난다. 또한, 하향류에 의해 요철을 넘어가는 유동의 재부착이 일찍 발생하도록 하는 효과가 나타난다. 따라서, Λ 형 요철이 설치된 경우 덕트 바닥면의 옆벽부근($z/e \approx \pm 5.0$)에서 높은 열전달이 발생하는 반면, V형 요철이 설치된 경우 바닥면의 중앙부($z/e=0.0$) 부분에서 높은 열전달이 발생하게 된다. 반면에 상향류가 형성되는 영역에서는 유동이 바닥면으로부터 멀어지기 때문에 상대적으로 낮은 열전달계수를 갖게 된다. 따라서, Λ 형 요철이 설치된 경우 중앙부($z/e=0.0$)에서, V형 요철이 설치된 경우 옆벽 부근($z/e \approx \pm 5.0$)부근에서 낮은 열전달 계수를 갖게 된다.

Fig. 5는 주유동에 대해서 요철의 배열 형상이 Λ 형인 경우와 V형인 요철에 대한 Sh/Sh_0 분포를 나타낸다. Figs. 5(a), (c)는 윗면과 아랫면의 요철이 나란하게 배열된 것(ΛI , VI)이고 Figs. 5(b), (d)는 윗면과 아래 면의 요철이 반 피치 이동되어 설치된 경우(ΛS , VS)이다. Fig. 5(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 앞서 설명한 바와 같이 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 이차유동에 의해 상향류가 발생하며, 이로 인해 이 영역에서는 상대적으로 낮은 열/물질전달 계수 분포가 나타난다. 또한 요철 인접 상류영역에서는 요철을 만나면서 박리된 유동과 요철 사이에 부분적으로 나타나는

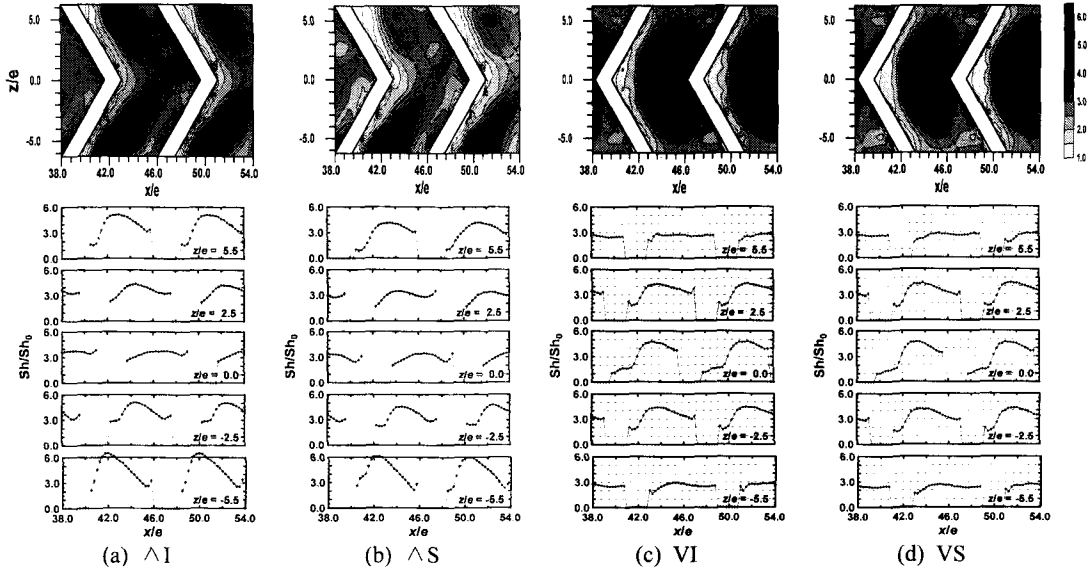


Fig. 5 Contour and local plots of Sh/Sh_0 with \wedge^- and V-shaped ribs at $Re=30,000$

작은 모서리 와류에 의한 영향으로 열/물질전달이 높은 영역이 국소적으로 나타난다.

반대면의 요철을 반 피치 이동시킨 경우 전체적인 열/물질전달의 특성은 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 하지만, 전체적으로 약간 낮은 Sh/Sh_0 의 분포를 가지게 되는데 이는 바닥면과 윗면의 요철이 서로 엇갈리게 설치되기 때문에 덕트 내부에서 발생하는 이차유동의 강도가 약해지기 때문이다.

Fig. 5(a)와 Fig. 5(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 이차유동의 강도가 불균일함에 따라 생기는 결과이며 이는 와류유동의 불안정성(instability)에 기인되는 것으로 사료된다.

Fig. 5(c)와 Fig. 5(d)는 V형 요철의 경우에 대한 Sh/Sh_0 분포를 나타낸다. 이 경우에는 Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)의 결과와는 상반되는 Sh/Sh_0 분포를 가지게 된다. Fig. 4(b)에 제시된 유동 현상에 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 \wedge 형 요철이 설치된 경우

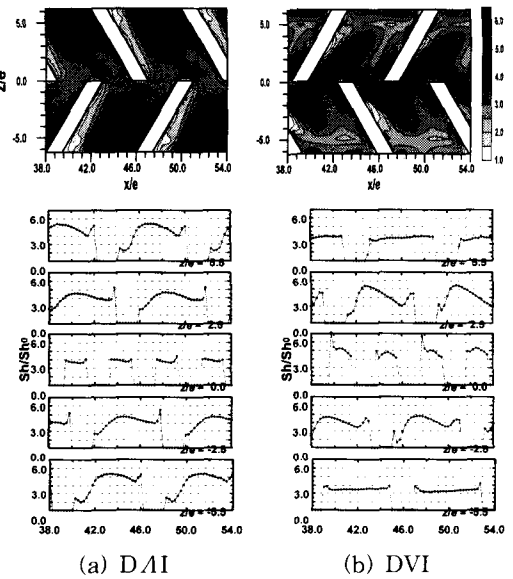


Fig. 6 Contour and local plots of Sh/Sh_0 with \wedge^- and V-shaped discrete ribs at $Re=30,000$

와 마찬가지로 요철 상류영역에서는 주유동이 요철에 의해 박리되고 박리된 유동과 요철 사이에 부분적으로 나타나는 작은 모서리 와류에 의한 영향으로 열/물질전달이 높은 영역이 나타난다. Fig. 5(d)의 열전달 분포는 Fig. 5(c)의 경우와 일치하는 결과를 보이나 앞서 언급한 바와 같이 이차유동의 강도가 약화되기 때문에 전체적으로 낮은 Sh/Sh_0 분포를 갖는다.

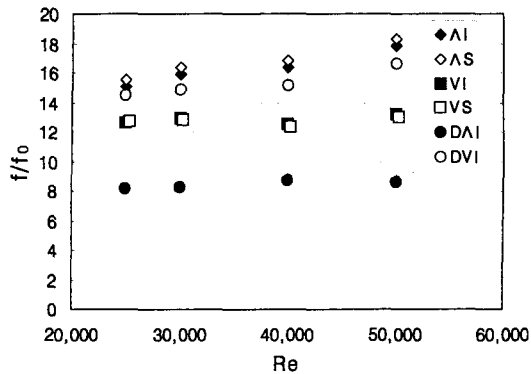


Fig. 7 Friction factor ratios for various rib arrangements

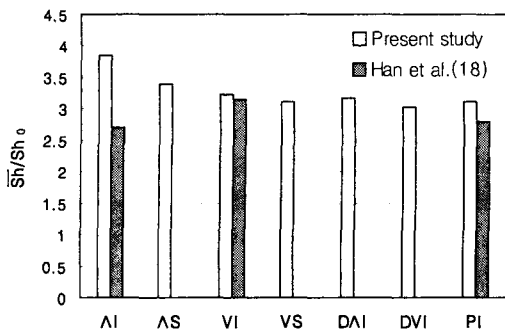


Fig. 8 Average heat/mass transfer ratios for various rib arrangements at Re=30,000

Fig. 6은 중앙부가 단락된 Λ 형과 V형 요철이 설치된 경우의 국소적인 Sh/Sh_0 분포를 나타내는 그림이다. Fig. 6(a)에서 볼 수 있듯이, Λ 형 단락요철의 경우 $z/e \approx \pm 5.0$ 인 영역에서 두 개의 하향류로 인하여 상대적으로 높은 Sh/Sh_0 분포를 가지는 것을 볼 수 있으며, 이러한 경향은 $z/e \approx \pm 3.5$ 인 영역까지 지속되는 것을 알 수 있다. 중앙부에서 요철이 단락되어 있기 때문에 $z/e \approx 0.0$ 영역에서는 상향류의 일부가 유동방향(x방향)으로 누설·가속되는 현상이 발생한다. 따라서, 열벽 근처에서의 열전달계수에 비하여 상대적으로 낮지만 균일한 열전달 특성이 나타나는 것을 관찰할 수 있다.

하지만, V형 단락요철의 경우(Fig. 6(b))에는 하향류가 발생하는 영역에 요철이 단락되어 있기 때문에 중앙부에서의 하향류의 영향이 감소하며, 상향류가 발생하는 영역에서의 열전달계수가 낮기 때문에 Λ 형 단락요철의 경우에 비해 상대적으로 낮은 열전달 특성을 갖는다.

3.2 압력강하

덕트 내에 요철을 설치함으로써 열전달계수를 향상시킬 수 있으나 이에 따라 마찰손실의 증가를 초래하게 된다. 따라서 열/물질전달의 향상과 마찰손실의 증가를 동시에 고려하여 요철을 설계를 하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 압력강하 실험을 통해 요철의 설치에 따른 마찰손실 특성을 고찰하였다.

Fig. 7은 Λ 형 및 V형 요철이 설치된 경우 $25,000 \leq Re \leq 50,000$ 영역에서의 평균 마찰계수비 (\bar{f}/f_0)를 나타낸다. Fig. 7에서 보이는 바와 같이 모든 경우 Reynolds 수에 따라 마찰계수 비는 약간 증가하는 것을 알 수 있다.

요철 형상변화에 따른 결과를 살펴보면, Han 등⁽¹⁷⁾의 연구결과와 마찬가지로 Λ 형 요철의 경우가 V형 요철의 경우에 비해 마찰손실이 약 20~25%정도 더 큰 것으로 나타났다. 하지만, 바닥면과 윗면 요철의 상대적 위치에 따른 마찰손실, 즉 나란한 경우와 반피치 이동된 경우의 마찰손실은 거의 동일한 것으로 나타났으며, 이로부터 췌기형 요철의 경우 두 면에서의 요철배열의 상대적 위치는 마찰손실에 큰 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다. 단락된 요철이 설치된 경우 반대의 결과로써 Λ 형의 단락된 요철(DAI)의 경우에 가장 낮은 압력강하 분포를 보이고 있다. 이것은 요철의 단락에 의해서 V형의 요철(DVI)이 유동을 방해하는 효과가 Λ 형보다 크다는 것을 알 수 있다.

3.3 평균 열전달 계수, 성능계수 및 균일도

Fig. 8은 각각의 요철배열에 따른 평균 \bar{Sh}/Sh_0 를 나타낸다. 여기서 PI는 Lee와 Cho⁽⁴⁾의 60° 경사 요철의 결과이며, Λ 형 및 V형 요철결과에서 빗금쳐진 값은 Han 등⁽¹⁷⁾의 결과이다.

국소 열전달 결과에서 예측할 수 있듯이, 일반적인 60° 경사 요철보다 Λ 형 및 V형 요철이 상대적으로 높은 평균 \bar{Sh}/Sh_0 값을 나타낸다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 하향류에 의해 열전달 촉진되는 영역이 일반적인 경사요철의 경우에 비해 넓어지기 때문이다.

Λ 형 요철 중에서 나란히 배열된 경우(AI)가 제일 높은 평균 열전달계수를 가지며, V형 요철의 경우에 비해 약 15%정도 높은 평균 열전달계수를 갖는 것으로 나타났다. 이는 앞서 언급한

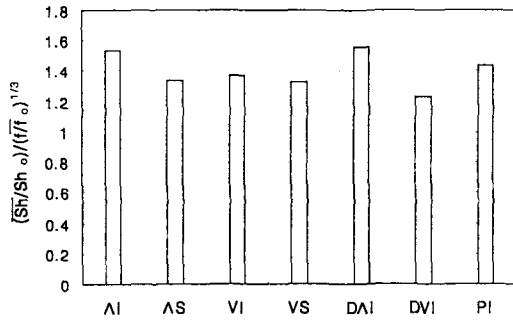


Fig. 9 Thermal Performances for various rib arrangements at Re=30,000

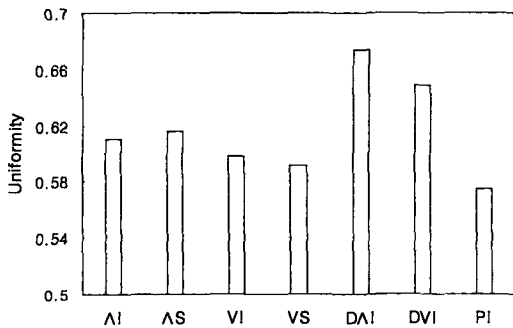


Fig. 10 Uniformity for various rib arrangements at Re=30,000

바와 같이 \wedge 형 요철의 경우 $z/e \approx \pm 5.0$ 인 두 영역에서 하향류로 인한 높은 열전달 분포를 가지게 되나, V형 요철의 경우 $z/e \approx 0.0$ 인 영역에서만 하향류로 인한 높은 열전달 분포를 갖기 때문인 것으로 생각되며, 이러한 경향은 Taslim 등⁽⁹⁾과 Gao와 Sunden⁽¹⁷⁾의 연구결과와 일치한다.

하지만, Fig. 8에 제시된 바와 같이 Han 등,⁽¹⁸⁾ Lau 등,⁽¹⁹⁾ Kukreja 등⁽²⁰⁾의 연구결과에서는 V형 요철의 경우가 \wedge 형 요철의 경우에 비해 평균 열전달계수가 높은 것으로 나타났다. 이는 Gao와 Sunden⁽¹⁷⁾이 언급한 바와 같이 열전달계수 측정방법 및 실험조건 등의 차이에 기인한 것으로 사료되지만, 정확한 해석을 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

바닥면과 윗면 요철의 상대적 배열에 따른 효과를 살펴보면, 반 피치 이동한 경우 덕트 내부에 발생하는 이차유동의 강도가 나란히 배열된 경우에 비해 약하기 때문에 평균 열전달계수가 낮은 것으로 나타났다.

요철을 단락시키는 경우 배열에 따라 국소 열전달계수 분포는 차이가 있지만 평균 열전달계수

에는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 하지만 중앙부에서의 유동의 누설효과 및 하향류 약화로 인하여 단락되지 않은 경우에 비해 약간 작은 값을 갖는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 각각의 요철배열에 따른 성능계수를 나타낸다. 일반적으로 높은 열/물질전달이 일어나면서 낮은 마찰 손실 특성을 나타내는 경우 높은 성능계수를 예상할 수 있다.

AI배열의 경우는 마찰손실이 크지만 열전달 또한 크기 때문에 성능계수가 상대적으로 높게 나타난 반면, \wedge 형 요철이 단락된 경우, 열전달계수는 낮지만 마찰손실이 매우 작기 때문에 가장 높은 성능계수를 갖는 것으로 나타났다.

Fig. 10은 각각의 요철배열에 따른 균일도 분포를 나타낸다. 평균 열/물질전달계수의 증가와 함께 열응력 발생을 억제하기 위해서는 덕트 바닥면에서의 열전달계수 분포의 균일도를 높이는 것이 필요하다. PI배열의 경우 성능계수는 상대적으로 높은 값을 갖지만, 균일도는 가장 낮은 것을 알 수 있다. 또한, \wedge 형 요철 및 V형 요철의 경우 열전달계수는 높지만 횡방향(z방향)으로 불균일한 열전달계수 분포를 갖기 때문에 균일도가 상당히 낮으나, 단락요철(DAI 및 DVI)의 경우에는 바닥면 중앙부에서의 유동의 누설 및 가속효과로 인하여 상대적으로 높은 균일도를 갖는 것을 알 수 있다.

4. 결론

(1) 본 연구의 실험조건에서 요철의 배열이 A형인 경우 양쪽 옆벽 부분에서 하향류에 의한 열전달 촉진영역이 형성되기 때문에 V형 요철의 경우에 비해 약 15% 높은 열전달계수를 갖지만, \wedge 형 요철의 경우가 마찰손실 또한 약 20~25% 더 큰 것으로 나타났다.

(2) 바닥면과 윗면 요철의 위치가 나란한 경우 덕트 내에 발생하는 이차유동의 강도가 반 피치 이동되어 있는 경우에 비해 강하기 때문에 열전달계수는 더 높은 것으로 나타났다. 하지만, 마찰손실은 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

(3) 췁기형 요철형상에 대해서 요철이 중앙부에서 단락되어 있는 경우 열전달 향상에는 기여하지 못하지만, 단락을 통한 유동의 누설 및 가속효과로 인하여 횡방향으로 균일한 열전달계수 분

포를 얻을 수 있었다.

(4) Δ I 배열의 경우 마찰손실이 크지만 열전달 또한 크게 향상되기 때문에 성능계수가 상대적으로 높게 나타났다. 또한, 요철이 단락되는 경우 중에서 D Δ I 배열의 경우 열전달 향상정도는 다른 배열의 경우와 유사하지만 마찰손실이 가장 작기 때문에 성능계수가 가장 높은 것으로 나타났다.

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) Wu, S. J., Kim, W. S. and Cho, H. H., 1998, "Augmented Heat Transfer in a Rectangular Duct with Angled Ribs," *Transactions of the KSME, B*, Vol. 22, No. 4, pp. 530~541.
- (3) Wu, S. J., Kwon, H. J. and Cho, H. H., 1999, "Effects of Rib Cross Section Shapes on Heat Transfer of a Rib-roughened Duct," *Transactions of the KSME, B*, Vol. 23, No. 1, pp. 149~157.
- (4) Lee, S. Y. and Cho, H. H., 2000, "Heat/Mass Transfer and Pressure Drop Characteristics in Internal Passage with Various Rib Arrangements," *Proc. of 1st National Congress on Fluids Engineering*, 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," *Proc. 11th ISTP*, 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., 2001, "Prediction of Pressure Loss and Heat Transfer in Internal Cooling Passages," *Annals of New York Academy Science*, Vol. 934, pp. 448~455.
- (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," *Proc. ASME Winter Annual Meeting*, HTD, pp. 25~31.
- (12) Ambrose, D., Lawrenson, I. J., and Sparke, C. H. S., 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene," *J. Chem. Thermodynam.*, Vol. 7, pp. 1173~1176.
- (13) 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.
- (14) Kline, S. J., and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (15) 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.
- (16) 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.
- (17) Gao, X. and Sunden, B., 2001, "Heat Transfer and Pressure Drop Measurements in Rib-roughened Rectangular Ducts," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 24, pp. 25~34.

- (18) 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.
- (19) Lau, S. C., Kukreja, R. T. and McMillin, R. D., 1991, "Effects of V-shaped Rib Arrays on Turbulent Heat Transfer and Friction of Fully Developed Flow in a Square Channel," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, No. 7, pp. 1605~1616.
- (20) 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. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, No. 8, pp. 2013~2020.