

사각 덕트 내부 열전달 향상을 위한 요철의 단락 효과

권혁진* · 우성제* · 조형희**
(1999년 12월 16일 접수)

Effects of Discrete Rib-Turbulators on Heat/Mass Transfer Augmentation in a Rectangular Duct

Hyuk Jin Kwon, Seong Je Wu and Hyung Hee Cho

Key Words : Rib Turbulator(요철), Discrete Rib(단락 요철), Heat/Mass Transfer Augmentation(열/물질전달 촉진), Thermal Performance(성능계수), Duct Flow(덕트 유동)

Abstract

The influence of arrangement and length of discrete ribs on heat/mass transfer and friction loss is investigated. Mass transfer experiments are conducted to obtain the detailed local heat/mass transfer information on the ribbed wall. The aspect ratio (width/height) of the duct is 2.04 and the rib height is one tenth of the duct height, such that the ratio of the rib height to hydraulic diameter is 0.0743. The ratio of rib-to-rib distance to rib height is 10. The discrete ribs were made by dividing each continuous rib into 2, 3 or 5 pieces and attached periodically to the top and the bottom walls of the duct with a parallel orientation. The combined effects of rib angle and length of the discrete ribs on heat/mass transfer are considered for the rib angles (α) of 90° and 45° . As the number of the discrete ribs increases, the uniformity of the heat/mass transfer distributions increases. For $\alpha=90^\circ$, the heat/mass transfer enhancement with the discrete ribs is remarkable, while the heat/mass transfer performances are slightly higher than that of the transverse continuous ribs due to the accompanied high friction loss penalty. For $\alpha=45^\circ$, the average heat/mass transfer coefficients and the heat/mass transfer performances decrease slightly with the discrete ribs compared to the case of the angled continuous ribs.

기호설명

AR : 덕트 종횡비, W/H
 D_h : 덕트 수력직경
 e : 요철 높이
 f : 마찰계수
 f_0 : 매끈한 파이프에서 완전발달한 난류유동의 마찰계수
 H : 덕트 높이
 h : 열전달계수
 h_m : 물질전달계수
 l : 단락 요철의 길이
 Nu : Nusselt 수, hD_h/k
 Pr : Prandtl 수

p : 요철간 거리
 Re : Reynolds 수, $D_h V/\nu$
 Sc : Schmidt 수
 Sh : Sherwood 수, $h_m D_h / D_{naph}$
 Sh_0 : 매끈한 파이프에서 완전발달한 난류유동의 Sherwood 수
 \bar{Sh} : 평균 Sherwood 수
 V : 평균 속도
 W : 덕트 폭
 x : 나프탈렌 표면 시작선으로부터의 주유동 방향 거리
 y : 덕트 바닥면으로부터의 높이
 z : 덕트 중심으로부터의 횡방향 거리
 α : 요철 충돌각
 ΔP : 압력강하
 η : 열/물질전달 성능계수, $(\bar{Sh}/Sh_0)/(ff_0)^{1/3}$

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hhcho@bubble.yonsei.ac.kr

TEL : (02)361-2828 FAX : (02)312-2159

1. 서론

요철은 터빈 기익의 내부냉각유로에 난류촉진체(turbulence promoter)로 설치되어 열전달을 높이는데 사용된다. 내부냉각유로는 사각 단면의 덕트로 묘사되며, 요철은 덕트 내부 유동을 교란하여 유동의 혼합과 난류강도를 증진시킴으로써 뛰어난 열전달 촉진효과를 나타낸다. 반복적인 난류촉진체가 설치된 거친 표면에서의 열전달에 의한 연구는 1950년대 말로 거슬러 올라 가지만 사각 덕트에서 다양한 요철의 설계 조건에 따른 본격적인 연구는 1980대 중반부터 활발해지기 시작하여, 많은 연구들이 있어왔다.⁽¹⁻⁸⁾ 최근 관심 연구 분야 중 하나가 요철을 단락시켜 재배열함으로써 더욱 향상된 열전달 효과를 얻는 것이다. Lau 등⁽⁹⁻¹¹⁾은 단락 요철의 충돌각이 정사각 덕트의 평균 열전달에 미치는 영향을 넓은 Reynolds 수 영역에서 실험적으로 연구하여, 5단 단락 요철에 대해서는 충돌각 60°에서 2단 단락 요철에 대해서는 충돌각 90°에서 최대 열전달 향상이 나타남을 기술하였다. Taslim 등⁽¹²⁾과 Ekkad와 Han⁽¹³⁾은 액정을 이용한 열전달 실험을 단락 요철이 설치된 덕트에 대해서 수행하였다. 이 외에도 매우 좁은 유로에서 2단 단락 요철을 이용한 실험⁽¹⁴⁾과 줄어드는 단면을 가지는 덕트에서 7단 단락 요철을 이용한 실험⁽¹⁵⁾ 등이 있어 왔다.

이와 같은 기존 연구들의 결과로부터 적절히 배열된 단락 요철은 단락되기 전의 연속 요철에 비해서 더 높은 열전달 향상 효과를 가진다는 것을 알 수 있다. 그러나 요철을 단락시키는 방법이나 단락 개수에 대한 체계적인 연구는 수행되지 않았다. 더불어 단락 요철의 배열 방법은 유동장에 지대한 영향을 끼친다. 그러므로 본 연구에서는 요철의 단락 개수, 즉 단락 요철의 높이에 대한 길이비(l/e)가 열전달에 미치는 효과를 요철 충돌각 효과와 복합적으로 고려하였다. 국소 열전달 현상을 파악하기 위해 수치해석을 통해 유동장을 예측하고 열전달 실험을 대신한 물질전달 실험을 수행하여 자세한 국소 열/물질전달계수를 얻었다.

2. 수치해석 및 실험 방법

2.1 수치해석 조건

상용 수치해석 코드인 FLUENT 4.3을 이용하여 2단 단락 요철에 대해서 유동장을 해석하였다. 충돌각은 90°와 45°를 적용하였으며, 계산영역의 형

상은 덕트 종횡비가 $AR=2$ 로 실험($AR=2.04$)과 거의 동일하다. 요철조건과 좌표계도 실험 조건과 동일하다. 상하 대칭조건을 적용하여 덕트의 절반만을 계산영역으로 하였다. 계산영역의 입출구 조건은 주기조건(cyclic condition)을 택하여 반복되는 요철 배열 중 한 구간(pitch)을 관심의 대상으로 하였으므로 계산결과는 완전발달된 상태에서 얻어진다. 충돌각 90°에 대해서는 $102 \times 32 \times 82$ 개 (총 267648 개), 45°에 대해서는 $94 \times 42 \times 82$ 개 (총 323736 개)의 격자를 각각 x, y, z 방향으로 형성하였다. 난류모델로는 RNG $k-\epsilon$ 모델을 적용하였으며, 벽 근처에서는 표준 벽함수를 사용하였다. 작동유체는 공기로 대기압하에서 계산되었으며, 기준 Reynolds 수는 30,000이다.

2.2 실험장치 설명

Fig. 1에 실험장치의 개념도가 나타나 있다. 덕트의 단면은 $W \times H = 102 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 로 종횡비(AR)가 2.04이다. 덕트의 수력직경(D_h)은 67.3 mm이고 요철이 설치된 구간은 1m로 $15D_h$ 에 해당한다. 덕트는 흡입형으로 나프탈렌이 포함되지 않은 공기가 덕트 입구를 통해 유입되어 덕트 출구의 플리넘(plenum)을 통해 배출되며, 플리넘과 이어지는 송풍기 사이에 유량측정을 위한 오리피스 유량계(orifice flowmeter)가 설치되어 있다. 물질전달 실험에서 덕트 내의 평균 유속은 7 m/s로 덕트 수력직경을 기준으로 하는 Reynolds 수는 30,000이다.

요철은 황동과 아크릴로 제작되었고, 사각단면을 가지며 높이는 덕트 높이의 1/10인 5 mm이다. 그러므로 요철 높이와 수력직경 비(e/D_h)는 0.0743이다. 요철은 덕트의 위, 아래면에 반복적으로 설치되며 요철간 거리는 요철 높이의 10배이다

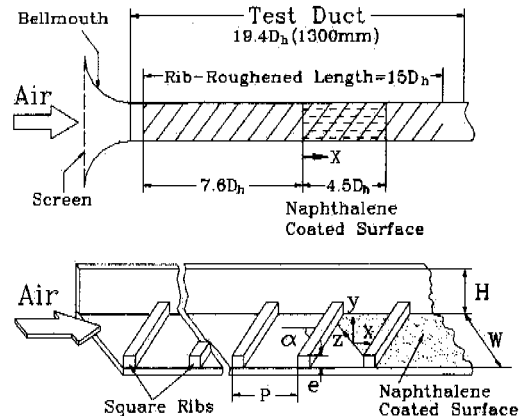


Fig. 1 Schematic diagram of the test duct

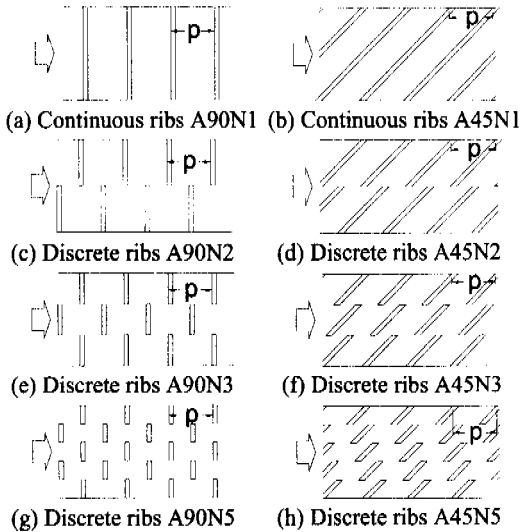


Fig. 2 Types of rib arrangements

($p/e=10$). 요철의 충돌각은 연속 요철의 충돌각에 대한 저자의 기존연구⁽⁷⁾를 바탕으로 90°와 45° 두 가지 만을 선택하였다. 단락 요철은 기존의 연속 요철을 2 단, 3 단, 5 단의 세 가지로 나누어 제작하였으며, 나누어진 요철의 몇 줄을 요철간 간격(p)의 절반만큼($p/2$) 이동시켜 요철의 각 줄이 서로 엇갈리게 배열되도록 하였다. 자세한 요철의 단락 및 배열 방법은 Fig. 2에 나타나 있으며, 같은 충돌각에 대해서 요철이 차지하는 면적은 동일하다. 다양하게 단락된 요철을 구별하기 위해서 별도의 기호를 사용하였는데, “A”에 이어서 요철 충돌각을, “N”에 이어서 요철의 단락 개수를 기입하였다. 예를 들어 “A45N3”은 충돌각 45°를 가지는 3 단 단락 요철을 의미한다. 이에 따라 연속 요철은 Fig. 2(a), (b)와 같이 “N1”으로 표시된다. 요철을 덕트 벽에 설치 할 때 각 요철별로 제작된 설치틀을 사용하므로 요철 설치 위치 오차는 ± 1 mm (0.2%) 이내이며 요철의 간격 변화도 2% 이내이다.

본 실험에서는 열전달 실험을 대신하여 나프탈렌승화법을 이용한 물질전달 실험을 수행하였다. 나프탈렌은 요철 설치 구간의 시작지점에서 $7.6D_h$ 떨어진 하류위치에서부터, 주유동방향으로 $4.5D_h$ 구간에 걸쳐서 코팅되어 있으므로, 물질전달 경계층은 유동적으로 완전발달된 구간에서 발달하기 시작한다. 나프탈렌 코팅면의 경계조건은 열전달 실험의 동온조건에 해당한다. 나프탈렌 표면에 설치된 요철은 나프탈렌이 코팅되어 있지 않으므로 경계조건에 왜곡을 초래한다. 그러나 많은 연구자들에 의해 이러한 왜곡은 결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 받아 들여지고 있다.^(1,2,5,6,13) 이는 요

철간 간격이 $p/e=10$ 으로 충분히 멀어 덕트 벽면에 비해 상대적으로 작은 면적을 차지하고 유동적으로 심한 섭동과 활발한 혼합이 동반되기 때문이다. 반면 요철의 충돌각이 매우 작아 표면적에서 요철이 차지하는 면적(요철이 차지하는 표면적은 요철의 옆면을 포함) 비율이 커지는 경우에는 전술한 왜곡의 정도가 증가하는 것 또한 사실이다. 그러나 Taslim과 Spring⁽⁶⁾은 그들의 절연 요철을 이용한 열전달 실험에서 난류유동에 의한 열전달 계수는 열경계조건에 크게 좌우되지 않는다고 기술하였으며, Liou와 Hwang⁽⁵⁾은 요철사이 영역에서의 평균 열전달계수는 요철을 고려한 전체 영역에서의 평균 열전달계수와 정량적으로 비슷함을 보였다. 이와 더불어 Han 등,⁽²⁾ Chandra 등,⁽¹⁾ Ekkad와 Han⁽¹³⁾이 제시한 결과에 따르면 열경계조건을 만족시키는 요철과 그렇지 않은 요철을 사용한 열/물질전달계수 비교에서 그 차이는 10%이하였다. 더욱이 본 연구는 자세한 국소적인 측정을 통하여 단락 요철이 설치된 덕트 내의 열/물질전달에 대한 현상학적인 이해를 마련하는데 중점을 두고 있으므로, 본 실험방법은 연구목적에 부합한다. 한 개의 요철사이 영역에서 얻은 국소 물질전달계수는 최대 1000 개에 이른다.

결과 제시에 사용된 좌표계에서 주유동방향이 x , 요철이 설치된 바닥면에서 높이 방향이 y , 횡방향이 z 로 설정되며, 원점은 나프탈렌 표면이 시작하는 곳의 바닥면 중심이다. 그러므로, 나프탈렌 코팅면은 주유동방향으로 $0 \leq x/e \leq 60$ (길이 $4.5D_h$), 횡방향으로 $-10.2 \leq z/e \leq 10.2$ 에 해당한다.

나프탈렌 표면은 매끈하게 경면가공된 주조틀을 사용하여 생성된다. 나프탈렌의 국소 승화량은 유동장 노출 전후에 측정된 나프탈렌 표면의 고도 차이로부터, 측정시간 등 자연대류에 의한 승화량을 보정하여 얻는다. 고도 측정은 자동이송장치에 의해 이송되는 선형가변차동변환기(LVDT, Linear Variable Differential Transformer)에 의해 이루어지며, 이 장비의 측정팁 직경은 1.588 mm 이고 정밀도는 $0.025 \mu\text{m}$ 이다. 평균 승화량은 0.0762 mm (3 mil)로 조정되므로 이에 대한 측정오차는 1% 이내이다.

압력측정을 위해 덕트 옆면에 직경 1.3 mm의 압력탭을 요철간 간격과 동일한 50 mm의 간격으로 가공하였다. 정밀도가 0.01 mmH₂O 인 마이크로차압계를 이용하여 Reynolds 수 25,000~70,000의 영역에서 압력강하를 측정하였다.

2.3 실험결과 처리 방법

나프탈렌 표면의 국소 승화량으로부터 계산되

는 물질전달계수는 다음과 같다.

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

여기서 \dot{m} 은 단위면적당 국소 물질전달률이며, $\rho_{v,w}$ 는 나프탈렌 표면에서의 증기밀도, $\rho_{v,b}$ 는 혼합 평균 나프탈렌 증기밀도이다. 덕트 출구에서 $\rho_{v,b}$ 는 $\rho_{v,w}$ 의 0.9% 이하로 충분히 작으므로, 위 식(1)에서 분모를 $\rho_{v,w} - \rho_{v,b} \approx \rho_{v,w}$ 로 나타낼 수 있으며, \dot{m} 은 고체 나프탈렌의 밀도(ρ_s), 유동장 노출시간($d\tau$), 나프탈렌 표면 승화깊이(dy)로부터 계산된다. 위의 국소 물질전달계수로부터 Sherwood 수를 다음과 같이 구한다.

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

여기서 D_{naph} 는 공기 중에서의 나프탈렌의 확산계수이다. 나프탈렌 확산계수의 5.1% 오차와 나프탈렌 증기밀도의 4.7% 오차 등 나프탈렌 물성치^(16,17) 오차가 많은 부분을 차지하는 Sherwood 수의 불확실성(uncertainty)은 95%의 신뢰수준에서 7.1% 이내였다.⁽¹⁸⁾ Sherwood 수는 열/물질전달 상사성 관계식($Nu/Sh = (Pr/Sc)^{0.4}$)에 의해 Nusselt 수로 변환될 수 있다. 물질전달 실험결과는 물질전달계수비인 $Sh/Sh_0 (= Sh/[0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} (Sc/Pr)^{0.4}])$ 의 형태로 제시되었으며, Sh_0 는 McAdams⁽¹⁹⁾에 의해 제시된 요철이 없는 매끈한 원형 파이프에서 완전발달한 난류유동의 Sherwood 수이다. 따라서 이는 물질전달계수의 향상률을 의미하며, 동시에 열전달계수의 향상률을 의미하므로 요철에 의한 전달계수의 증가를 효과적으로 나타낸다. 본 실험장치를 이용한 매끈한 덕트 유동에서의 Sherwood 수는 나프탈렌 표면 시작선에서 급격히 감소하여 $x/e=25$ 를 지나서는 거의 일정해진다. 이 평탄해진 곳의 Sherwood 수는 위의 McAdams의 관계식과 같이 $Re^{0.8}$ 에 비례하지만 관계식보다 12% 정도 높으며, 이는 덕트의 사각 형상 효과와 경제조건의 차이에 의한 것이라 사료된다. 그러나 본 실험장치에서의 기준 Sherwood 수가 주유동 위치에 따라 점진적으로 변화하며, 요철에 의한 난류의 강한 촉진으로 매끈한 덕트와 달리 $x/e=10$ 이후에서 요철사이 영역의 물질전달계수 분포가 거의 같은 값을 가지며 반복되므로, 기준 Sherwood 수로 McAdams의 관계식을 사용하였다.

평균 Sherwood 수 (\overline{Sh})는 국소 Sherwood 수를 면

적평균하여 계산하였으며, 나프탈렌 표면 하류영역의 $35 \leq x/e \leq 55$ 에 해당하는 2개의 요철사이 구간을 사용하였다. 이 구간에서의 측정점은 매우 조밀하여 측정점간 거리는 0.2e이다.

마찰계수는 국소 압력강하 데이터의 선형맞춤에 의한 평균 압력강하로부터 계산되며 다음과 같이 표시된다.

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

마찰계수의 불확실성은 4.4% 이내이며, 마찰계수 결과도 요철에 의한 마찰계수 증가를 나타내기 위해 마찰계수비인 $f/f_0 (= f / [2(2.236 \ln Re - 4.639)^{-2}])$ 의 형태로 표시되었다. 여기서 f_0 는 매끈한 파이프에서 완전발달한 난류유동의 마찰계수로, Kármán-Nikuradse 관계식을 $10^4 < Re < 5 \times 10^6$ 의 범위에서 잘 맞도록 제시된 Petukhov⁽²⁰⁾의 경험식이다. 이 경험식과 본 실험장치에서의 기준 마찰계수의 차이는 $25,000 < Re < 70,000$ 에서 5% 이내이다.

열/물질전달 향상과 추가적인 마찰손실을 동시에 평가하기 위하여, 일정 유체이송동력(constant pumping power)을 기준으로 하는 열/물질전달 성능계수 η 를 제시하였으며, 다음과 같이 표시된다.

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

3. 결과 및 고찰

3.1 실험 결과의 타당성 검증

기존의 연구와 평균 열/물질전달 및 성능계수 결과를 비교함으로써 본 실험 결과의 타당성을 검증하였다. Fig. 3에 덕트 종횡비가 $AR=0.5, 1, 2, 4$ 를 가지는 덕트에 대한 Han과 Park,⁽⁴⁾ Han 등⁽³⁾의 실험결과를 본 실험장치를 사용한 우성제 등⁽⁷⁾의 실험결과와 함께 도시하였다. 평균 열/물질전달계수 비교에 있어서 덕트의 종횡비가 결과에 상당한 영향을 미침을 알 수 있다. 이는 일반적으로 요철의 높이를 비교할 때 사용하는 무차원의 덕트 수력직경에 대한 요철 높이의 비(e/D_h)가 같은 경우에도, 덕트 종횡비에 따라 덕트 단면적에 대하여 요철이 차지하는 실제 면적의 비율은 다르기 때문이라 사료된다. 또한 덕트의 종횡비 차이는 내부 유동 패턴을 변화시키고, 예로서 경사요철에 의해 유도되는 회전하는 이차유동⁽⁷⁾의 변화를 야기한다. 같은 덕트 종횡비 $AR=2$ 를 가지는 Han과 Park⁽⁴⁾의 실험결과와 우성제 등⁽⁷⁾의 결과는 e/D_h 의 차이에도 서

로 비교적 잘 일치한다. 성능계수 비교에 있어서 본 실험장치의 큰 e/D_h 에 의한 마찰계수의 증가로 값의 차이는 15%에 이르지만 같은 덕트 종횡비에 대한 결과는 정성적으로 동일한 경향을 보인다. 총돌각 60°, 45°의 경사진 요철을 사용한 경우, 덕트를 가로질러 놓인 총돌각 90°의 요철을 사용한 경우보다 더 좋은 결과를 보이는데, 이러한 차이는 $AR=1, 0.5$ 의 정사각 혹은 폭이 좁은 덕트에서 $AR=2$ 인 본 실험장치에서보다 더욱 뚜렷하다.

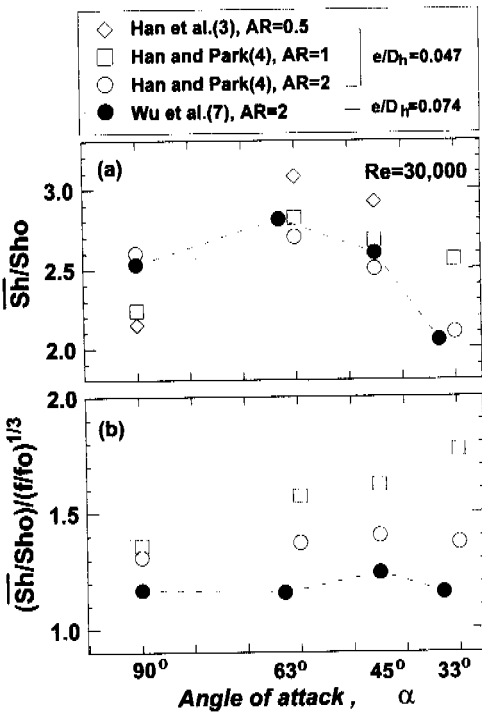


Fig. 3 Comparison of the results of cotinuous rib tests

- (a) Average Sherwood number ratios, \overline{Sh}/Sh_0
- (b) Heat/mass transfer performance, η

3.2 수치해석 결과

단락 요철 A90N2와 A45N2에 대하여 수치해석으로 얻어진 속도벡터가 Fig. 4에 제시되어 있다. Fig. 4(a), (b)는 요철이 설치된 표면에 근접한 $y/e=0.1$ 에서의 속도벡터이며, Fig. 4(c), (d)는 요철과 나란한 덕트 단면에서의 이차유동을 나타내고 있다. 총돌각 90°의 경우에 있어서는, Fig. 4(a)에서와 같이, 요철이 단락된 곳에서의 유동이 요철 뒤에 유동의 재순환으로 형성되는 낮은 압력 영역(LP로 표시)의 존재로 인해 요철 끝단 사이로 유도되어 가속된다. 이로 인해 요철 끝단 주변에서 요철 상류면으로의 유동 총돌에 의한 정체점이 존재하여 높은 압력 영역이 형성된다(HP로 표시). 따라서 요철의 상류면을 따라 요철 설치 표면의 중심에서 측면벽 방향으로 흐르는 이차유동이 발생한다. 이와 같이 요철이 단락된 곳에서의 유동의 국소 가속과, 요철 끝단에서의 추가적인 유동박리와 부가적인 이차유동 발생으로 인한 난류성분 증가로 요철 단락부에는 난류강도가 높게 나타난다.

총돌각 45°에 있어서는 요철이 단락되었음에도 Fig. 4(d)에서와 같이 연속 요철에서 발생하는 회전하는 이차유동(Fig. 4(c); 우성제 등⁷⁾)이 여전히 뚜렷이 나타난다. Fig. 4(b)에서 볼 수 있듯이 이차유동의 하향류 영역(DN로 표시)에 유동의 총돌과 요철에 의해 박리되었다가 재부착되는 유동 현상의 강화로 높은 정압 및 난류강도 영역이 형성되고, 반면 이차유동의 상향류 영역(UP으로 표시) 상대적으로 낮은 정압 및 난류강도 영역이 형성된다. 이러한 정압의 차이로 이차유동이 요철을 따라 흐르며 가속되기는 하지만 급격한 방향전환이 동반되지 않아, 요철이 단락된 곳에서도 국소 가속과 추가적 난류증가는 미약하다.

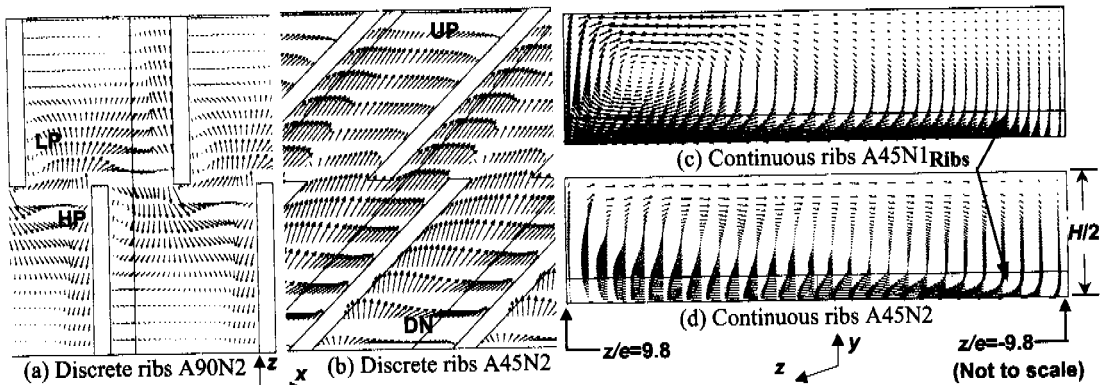


Fig. 4 Calculated velocity vectors: (a) and (b) xz -plane at $y/e=0.1$; (c) and (d) cross section parallel to the ribs

3.3 국소 열/물질전달 결과

국소 물질전달계수비가 충돌각 90° 에 대해서는 Fig. 5에, 충돌각 45° 에 대해서는 Fig. 6에 나타나 있다. 충돌각 90° 의 경우에는 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 요철이 단락된 곳에서 물질전달계수가 매우 급격히 변화하며 복잡한 분포를 보인다. 그러나 단락된 곳에서 멀리 떨어진 $z/e=-9.0$ 와 같은 곳에서는 물질전달계수가 연속 요철의 경우⁽⁷⁾와 비슷한 분포를 보인다. 단락 요철 A90N2와 A90N3의

경우 Fig. 5(a), (b), (d), (e)와 같이 요철이 단락된 곳을 중심으로 넓은 영역에서 매우 높은 물질전달계수가 관찰된다. 이는 수치해석 결과에서 기술된 바와 같이 요철 단락 사이로 유동이 가속되며, 요철의 끝단에서의 부가적인 유동교란에 의해 난류 성분이 증가하고 유동 혼합이 증진되기 때문이다. 그러나 단락 요철 A90N5의 경우 Fig. 5(c), (f)에서와 같이 요철이 단락된 곳에서도 비교적 물질전달 계수의 축진이 크지 않다. 이는 단락 요철 A90N5

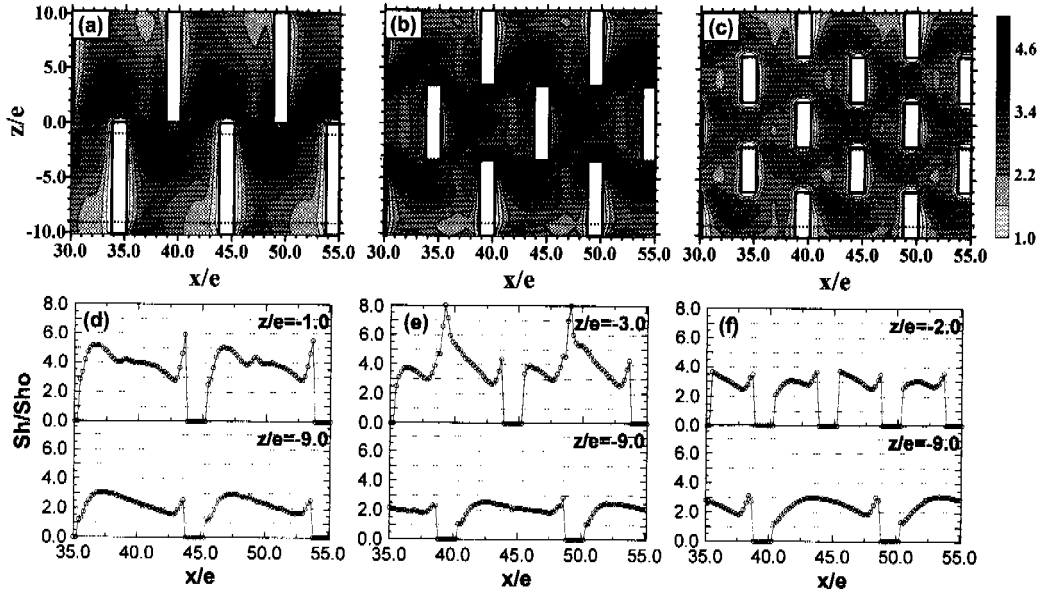


Fig. 5 Sh/Sh_0 distributions for $\alpha=90^\circ$: (a) and (d) A90N2; (b) and (e) A90N3; (c) and (f) A90N5

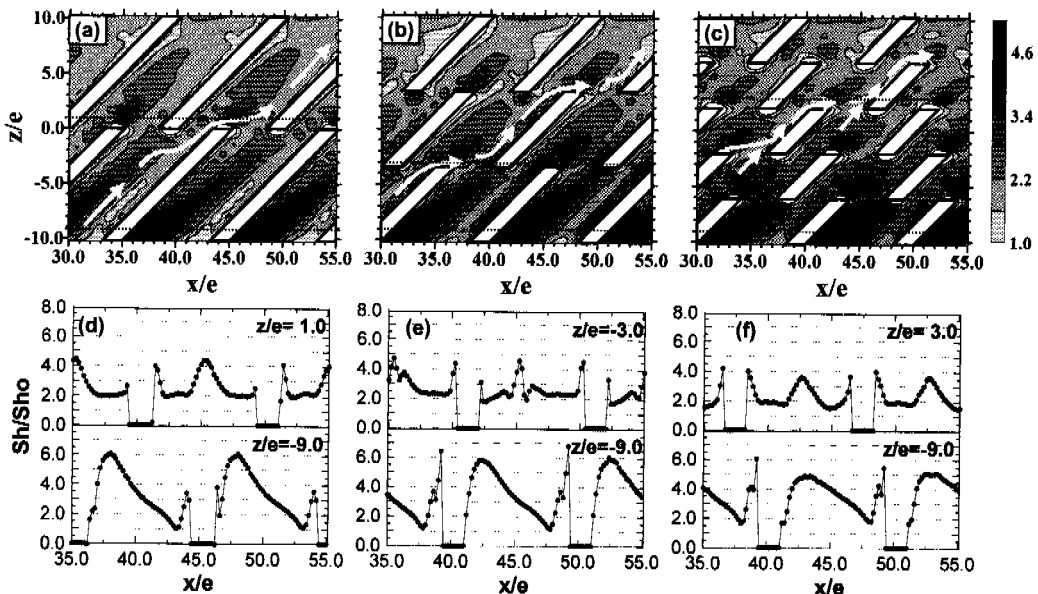


Fig. 6 Sh/Sh_0 distributions for $\alpha=45^\circ$: (a) and (d) A45N2; (b) and (e) A45N3; (c) and (f) A45N5

의 길이가 $l/e=4.1$ 로 요철 끝단간의 간격($5e$)과 비슷한 정도로 짧기 때문이다. 이에 비해 A90N2의 경우 $l/e=10.2$ 이고, A90N3의 경우 $l/e=6.8$ 이다. 이와 같이 짧은 요철 길이로 인해 단락 요철 A90N5의 경우 요철 뒤에 낮은 정압 영역이 요철 끝단을 돌아 유동이 유입됨에 따라 작게 축소되고, 유동이 요철 끝단 사이에서 급격한 경로 변화를 겪지 않으므로, 요철이 단락된 곳의 유동은 국소적으로 급격하게 가속되지도 않으며 요철 끝단에서 심하게 교란되지도 않게 된다. 그러므로 같은 총돌각을 가지는 나머지 단락 요철과는 달리 물질전달을 크게 향상시키지는 못한다. 그러나 낮은 물질전달 계수 영역을 축소시키며 상당히 균일한 물질전달 계수 분포를 보였으며, 이에 따른 잠재적인 열점 방지나 열응력 감소 등의 효과를 기대할 수 있다.

총돌각 45° 의 경우에 있어서는 Fig. 6에서 알 수 있듯이 요철의 단락 개수가 증가할수록 물질전달 계수 분포의 균일성이 증가하며, 이는 총돌각 90° 를 가지는 요철의 경향과 같다. 그러나 요철이 단락된 곳에서의 높은 물질전달 향상은 요철의 하류편 끝단에 매우 좁은 영역에 한정된다. 이는 수치해석 결과에서 논의된 바 있는 경사진 요철을 따라 흐르는 이차유동의 영향 때문이다. 요철이 설치된 표면의 유동은 전술한 이차유동의 지배적인 영향으로 Fig. 6(a)~(c)에 도시된 흰색 화살표와 같이 유동방향의 급격한 전환 없이 요철의 단락 영역을 지나므로, 부가적인 유동교란과 국소 유동 가속이 적다. 이와 함께 요철 끝단에서의 추가적인 유동 박리는 요철의 하류편 끝단에서만 일어나므로 요철의 단락 부근에서의 높은 물질전달 향상은 이 영역에만 한정된다. 한편 이차유동의 하향류 영역에 넓게 존재하는 높은 물질전달 계수 분포는 요철 길이가 가장 짧은 경우인 A45N5에 있어서도 확연히 나타난다. 더불어 모든 단락수의 경사진 단락 요철에 있어서 전체적인 물질전달 계수 분포는 경사진 연속 요철의 경우⁽⁷⁾와 크게 다르지 않은 공통점을 보인다. 이러한 사실들 또한 경사진 회전하는 이차유동이 요철의 단락에도 불구하고 요철 설치 표면 근처의 유동에 지배적인 영향을 미칠 정도로 강하게 유도되기 때문이며, 이로 인해 경사진 요철에서의 요철 단락 효과는 총돌각 90° 의 경우에 비하여 미약하다.

3.4 압력 손실 결과

압력 손실 결과는 마찰계수비(ff_0)의 형태로 Fig. 7에 나타나 있다. 모든 경우에 있어서 요철의 설치로 인한 압력 손실의 증가는 요철이 없는 경우

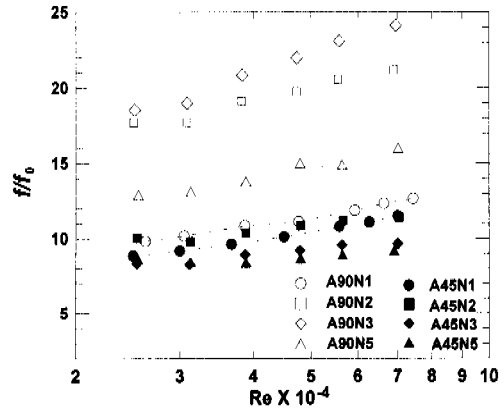


Fig. 7 Friction factor ratios, ff_0

에 비하여 최소 8 배 이상으로 나타난다. 모든 단락 개수에 있어서 총돌각 90° 의 요철이 총돌각 45° 의 요철에 비하여 매우 높은 마찰계수를 가진다. 총돌각 90° 의 경우 단락 요철 A90N2와 A90N3이 두드러지는 마찰손실의 증가를 나타내어 마찰계수가 연속 요철 A90N1의 두 배에 이르며, 이는 물질전달 향상이 비교적 적었던 A90N5의 상대적으로 작은 마찰계수와 대비된다. 총돌각 45° 의 경우 A45N2를 제외하고는 단락에 의해 마찰손실이 연속 요철보다 다소 감소하며, 단락 개수가 증가할수록 마찰계수는 작게 나타났다. 요철이 설치된 덕트에서의 마찰계수는 Reynolds 수가 증가함에 따라 거의 변화하지 않거나 약간 감소하지만, 마찰계수비에 있어서는 어느 정도 증가하는 경향이 있으며, 이러한 증가는 단락 요철 A90N2와 A90N3의 경우에 다소 높다.

3.5 평균 열/물질전달 및 성능계수 결과

Fig. 8(a)에서 볼 수 있듯이, 국소 물질전달 결과에서와 마찬가지로 평균 물질전달에 있어서도 총돌각 90° 의 A90N2와 A90N3가 가장 높은 향상을 나타내어 연속 요철 A90N1에 비하여 약 27% 높은 평균 물질전달 계수를 얻을 수 있었다. 단락 요철 A90N5의 경우에는 연속 요철 보다 약간 증가된 값을 나타낸다. 그러나, Fig. 8(b)에 나타나 있듯이, 물질전달 성능계수에 있어서는 단락 요철 A90N2와 A90N3의 높은 마찰손실로 인해 연속 요철 A90N1에 비하여 3~5% 증가에 그쳤다.

총돌각 45° 의 경우에 있어서는 단락 요철 A45N2의 물질전달 성능계수가 다소 낮은 것을 제외하고는 평균 물질전달과 성능계수에 있어서 모든 경우에 대체로 결과의 차이가 크지 않다.

총돌각 90° 의 결과가 대체로 Chandra 등⁽¹⁾과

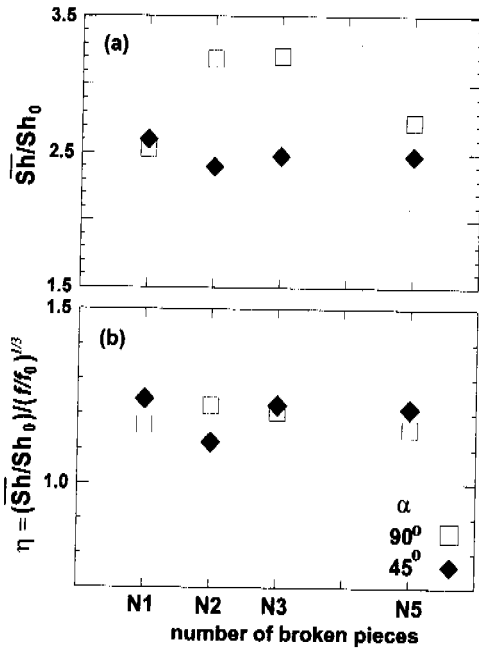


Fig. 8 Average heat/mass transfer and performance

- (a) Average Sherwood number ratios, \overline{Sh}/Sh_0
- (b) Heat/mass transfer performance, η

Taslim 등⁽¹²⁾의 다른 연구자들의 결과와 정성적으로 일치하는데 반해, 총돌각 45°의 결과는 Lau 등,^(9,10) Han과 Zhang⁽²¹⁾ 등의 결과와 차이를 보인다. 본 실험에서는 전술한 연구자들이 $AR=1$ 의 정사각 덕트를 사용한 것에 반해 $AR=2.04$ 의 넓은 덕트를 사용하였고, 덕트 수력직경에 대한 요철 높이비 (e/D_h)는 본 실험과 다른 연구들이 비슷하지만 덕트의 종횡비 차이로 인해 덕트 높이에 대한 요철 높이 비(e/H)는 본 실험의 경우가 다른 연구에 비해 약 60% 높다. 이러한 이유로 경사진 요철의 경우 요철을 따라 유동이 편향됨에 따라 유도되는 이차유동이 본 실험에 있어서 상대적으로 강하게 요철 설치 표면에 영향을 미치게 된다. 이러한 이차유동의 지배적 효과는, 국소 물질전달 결과에서 서술했듯이, 경사요철의 단락 효과를 완화시키게 된다. 따라서 전술한 실험조건의 차이는 총돌각 90°의 경우에 있어서는 정성적으로 결과에 영향을 미치지 않지만, 이차유동의 역할이 중요한 총돌각 45°의 경우에는 결과의 불일치를 초래했다고 사료된다. 더불어 덕트의 종횡비의 차이 자체에 대한 영향 또한 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 상당한 영향을 미친다.

총돌각의 영향을 고려함에 있어서는, 단락 요철의 경우 총돌각 90°의 요철이 총돌각 45°의 요철보다 상당히 높은 평균 물질전달 향상을 나타내지

만, 물질전달 성능계수는 총돌각 45°의 요철이, A45N2의 낮은 값을 제외하고는, 모든 경우에 있어서 총돌각 90°의 요철보다 다소 높다.

4. 결론

여러 종류의 단락 형태를 가지는 요철이 설치된 사각 덕트에서의 열/물질전달 및 압력손실 특성에 대하여 수치해석 및 실험을 수행하였으며, 결과를 기존의 연속 요철의 경우와 비교하여 제시하였다. 이에 대한 결론은 다음과 같다.

(1) 총돌각 90°의 경우에는 단락 요철 A90N2와 A90N3가 요철이 단락된 곳에서 열/물질전달을 크게 향상시켰으며, A90N5는 요철의 길이가 요철이 단락된 곳의 요철 끝단 간격과 비슷한 정도로 짧아 열/물질전달 향상은 상대적으로 적었다.

(2) 총돌각 45°의 경우에는 경사진 요철을 따라 흐르는 이차유동의 지배적인 영향으로, 요철의 단락 개수와 상관없이 열/물질전달계수의 분포가 유사하게 나타났다.

(3) 단락 요철 A90N2와 A90N3의 마찰계수가 총돌각 90°의 연속 요철 A90N1에 비하여 두 배에 이를 정도로 매우 크게 나타났다. 총돌각 45°의 경우 단락의 개수가 증가할수록 압력 손실은 점차 감소하였으며, 모든 경우 총돌각 90°의 요철이 총돌각 45°의 요철보다 높은 마찰계수를 나타내었다.

(4) 단락 요철 A90N2와 A90N3로 최대 평균 열/물질전달계수를 얻었으나, 성능계수는 총돌각 90°의 연속 요철보다 약간 높는데 그쳤다. 평균 열/물질전달 및 성능계수에 있어서 총돌각 45°의 요철의 단락 효과는 크게 나타나지 않았으며, 이러한 경사요철에서의 단락 효과는 요철의 높이와 덕트의 종횡비에 따라 상당히 영향 받을 것으로 예상된다.

참고문헌

- (1) Chandra, P. R., Han, J. C. and Lau, S. C., 1988, "Effect of Rib Angle on Local Heat/Mass Transfer Distribution in a Two-Pass Rib-Roughened Channel," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 110, pp. 233~241.
- (2) Han, J. C., Chandra, P. R. and Lau, S. C., 1988, "Local Heat/Mass Transfer Distributions Around Sharp 180 deg. Turns in Two-Pass Smooth and Rib-Roughened Channels," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 91~98.
- (3) Han, J. C., Ou, S., Park, J. S. and Lei, C. K., 1989.

- “Augmented Heat Transfer in Rectangular Channels of Narrow Aspect Ratios with Rib Turbulators,” *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 32, No. 9, pp. 1619~1630.
- (4) Han, J. C. and Park, J. S., 1988, “Developing Heat Transfer in Rectangular Channels With Rib Turbulators,” *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 31, No. 1, pp. 183~195.
- (5) Liou, T. M. and Hwang, J. J., 1993, “Effect of Ridge Shapes on Turbulent Heat Transfer and Friction in a Rectangular Channel,” *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 36, No. 4, pp. 931~940.
- (6) Taslim, M. E. and Spring, S. D., 1994, “Effects of Turbulator Profile and Spacing on Heat Transfer and Friction in a Channel,” *J. of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 8, No. 3, pp. 555~562.
- (7) 우성제, 김완식, 조형희, 1998, “사각 덕트내 요철의 각도 변화에 따른 열전달 특성”, 대한기계학회논문집 B, 제 22 권, 제 4 호, pp. 530~541.
- (8) 우성제, 권혁진, 조형희, 1999, “터빈 기익 내부관 열전달 증대를 위해 설치된 요철의 형상 효과”, 대한기계학회논문집 B, 제 23 권, 제 1 호, pp. 149~157.
- (9) Lau, S. C., McMillin, R. D. and Han, J. C., 1991b, “Turbulent Heat Transfer and Friction in a Square Channel with Discrete Rib Turbulators,” *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 113, pp. 360~366.
- (10) Lau, S. C., McMillin, R. D. and Han, J. C., 1991c, “Heat Transfer Characteristics of Turbulent Flow in a Square Channel with Angled Discrete Ribs,” *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 113, pp. 367~374.
- (11) Lau, S. C., Kukreja, R. T. and McMillin, R. D., 1992, “Turbulent Heat Transfer in a Square Channel with Staggered Discrete Ribs,” *J. of Thermophysics Heat Transfer*, Vol. 6, No. 1, pp. 171~173.
- (12) 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.
- (13) 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, No. 11, pp. 2525~2537.
- (14) Chyu, M. K. and Natarajan, V., 1989, “Local Heat Transfer on a Flat Surface Roughened with Broken Ribs,” *ASME Winter Annual Meeting, San Francisco, CA, ASME-HTD*, pp. 25~31.
- (15) Hu, Z. and Shen, J., 1996, “Heat Transfer Enhancement in a Converging Passage with Discrete ribs,” *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 39, No. 8, pp. 1719~1727.
- (16) 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.
- (17) 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.
- (18) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, “Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments,” *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (19) McAdams, W. H., 1942, *Heat Transmission*, 2nd ed. McGraw-Hill, New York.
- (20) Petukhov, B. S., 1970, *Advances in Heat Transfer*, Vol. 6, Academic Press, New York, pp. 503~504.
- (21) 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.