

썰기형 단락요철이 설치된 덕트의 종횡비가 열/물질 전달에 미치는 영향

이동현* · 이동호* · 조형희**

Effects of Duct Aspect Ratios on Heat/Mass Transfer With Discrete V-Shaped Ribs

Dong Hyun Lee, Dong Ho Rhee and Hyung Hee Cho

Key Words : Gap Flow (틈새 유동), Turbulence Promoter (난류촉진체), Rib Arrangement (요철 배열), Heat/Mass Transfer (열/물질전달), V-shaped Rib (썰기형요철)

ABSTRACT

The present study investigates the effects of rib arrangements and aspect ratios of a rectangular duct simulating the cooling passage of a gas turbine blade. Two different V-shaped rib configurations are tested with the aspect ratios (W/H) of 3 to 6.82. One is the continuous V-shaped rib configuration with 60° attack angle, and the other is the discrete V-shaped rib configuration with 45° attack angle. The square ribs with the pitch to height ratio of 10.0 are installed on the test section in a parallel arrangement for both rib configurations. Reynolds numbers based on the hydraulic diameter are changed from 10,000 to 30,000. A naphthalene sublimation method is used to measure local heat/mass transfer coefficients. For the continuous V-shaped rib configuration, two pairs of counter-rotating vortices are generated in a duct, and high transfer region is formed at the center of the ribbed walls of the duct. However, for the discrete V-shaped rib configuration with 45° attack angle, complex secondary flow patterns are generated in the duct due to its geometric feature, and more uniform heat/mass transfer distributions are obtained for all tested cases

기호설명

AR :	덕트 종횡비, W/H	h :	열전달계수
D_h :	덕트 수력직경	h_m :	물질전달계수
D_{naph} :	공기중 나프탈렌의 확산계수	Nu :	Nusselt 수, hD_w/k
e :	요철의 높이	Pr :	Prandtl 수
f :	마찰계수	p :	요철간 거리
f_0 :	매끈한 파이프에서 완전발달한 난류유동의 마찰계수	Re :	Reynolds 수
		Sc :	Schmidt 수
		Sh :	Sherwood 수
		Sh_0 :	매끈한 파이프에서 완전발달한 난류유동의 Sherwood 수
		\overline{Sh} :	평균 Sherwood 수
		x :	나프탈렌 표면 시작선으로부터의 주유동

* 연세대학교 대학원

** 책임저자, 연세대학교 기계공학과
E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr
TEL : (02)123-1234
FAX : (02)123-1234

방향 거리
 y : 덕트 바닥면으로부터의 높이
 z : 덕트 중심으로부터의 횡방향 거리

그리스 문자

α : 요철 충돌각
 ΔP : 압력강하
 Δt : 송풍시간
 Δy : 나프탈렌 승화깊이
 η : 열/물질전달 성능계수, $(\overline{Sh}/Sh_0)/(ff_0)^{1/3}$

1. 서론

요철이 설치된 내부 유로를 이용한 냉각 기술은 가스 터빈 엔진의 기익과 연소실의 냉각에 지속적으로 사용 되어 왔다. 내부 냉각 유로에 설치된 요철은 유동의 박리와 재부착을 야기하여 결과적으로 유동의 점성저층을 파괴하게 되어 열전달을 촉진시킨다. 또한 경사진 요철이 설치된 경우 이차유동이 형성되어 열전달을 더욱 향상시키게 된다.

요철의 높이, 충돌각, 요철간격 그리고 요철의 배열등 요철의 설계변수들의 최적 조건을 찾아내기 위해 많은 연구들이 수행되었다.

최근, 썩기형이나 단락형 요철에 대한 연구가 많이 진행되었다. Lau 등[9], Kukreja 등[10]은 정사각 덕트에서의 열전달 특성을 썩기형 요철에 대하여 수행하였고, Han 등[11]은 다양한 충돌각을 가지는 V형과 Λ 형 요철에 대하여 연구하여, 단순 경사요철과 비교하였다. Olsson과 sundén[12]은 큰 종횡비를 가지는 덕트에서 요철이 설치되었을 때의 유동특성을 LDV를 이용하여 연구하였다. 그리고 Gau와 sundén[13]은 썩기형 요철이 설치된 종횡비가 큰 덕트에서의 열전달과 압력강하를 연구하였다.

Cho 등[14]에 의해 단순 경사요철의 경우, 단락이 성능계수에 뚜렷한 증가를 보여주지는 못한다는 것으로 알려진 반면, 단락된 썩기형 요철의 경우 더 높고 균일한 냉각성능을 얻을 수 있는 것으로 연구되었다. Han과 Zhang[15]은 정사각 덕트에서 단락된 썩기형 요철의 영향을 연구하여, 단락된 썩기형 요철이 비슷한 압력강하를 일으키는 연속요철에 비해 2~3 배 높은 열전달을 보이는 것을 밝혀내었다. Taslim 등[16]은 경사요철, 썩기형 요철 그리고 단락요철의 형상에 대하여 실험을 수행하여 단락요철이 썩기형 연속요철에 비해 더 높은 성능계수를 갖지만, 썩기형 요철이 더 높은 열전달계수를 갖는다는 것을 밝혔다.

이 연구의 목적은 썩기형 연속요철과 단락요철에 대하여 열/물질전달 특성과 마찰계수, 그리고 성능계수를 조사하는 것이다. 실제 가스터빈 기익은 서로 다른 종횡비를 가지는 몇개의 냉각유로를 가지므로 열/물질전달 특성과 냉각성능을 분석하고 평가하기 위해서는 덕트 종횡비의 영향이 고려되어야 한다. 평균 열전달 특성에 대한 덕트 종횡비의 영향에 대한 연구는 Han과 Park[17] 그리고 Han 등[18]에 의해서 수행되었다.

썩기형 연속요철과 썩기형 단락요철 두가지의 서로 다른 요철배열에 대한 실험이 다양한 덕트 종횡비와 레이놀즈 수에 대하여 수행되었다. 국소적인 자세한 열/물질전달에 대한 정보를 얻기 위해 나프탈렌 승화법을 이용한 물질전달 실험이 이용되었으며, 요철이 설치된 덕트의 압력강하를 측정하여 마찰계수를 구하였다. 그리고 일정동력손실에 기초한 성능계수를 구하여 여러 실험 조건에서 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 실험 장치에 대한 개략도를 보여 주고 있다. 실험에 사용된 덕트의 상류에는 항온조와 연결된 열교환기를 설치하여 유동의 온도를 일정하게 유지시켜 주었으며, 이후 수축부를 지나 덕트로 유입되게 된다. 유동은 플레넘 하류에 설치된 오리피스 유량계를 통하여 유량이 측정된 후 송풍기를 통하여 실외로 배출된다.

시험에 사용된 덕트는 아크릴로 제작되었으며 총 길이는 1275 mm로 종횡비에 따라 $17D_h$ 에서 $33D_h$ 가 된다. 너비(W)는 150mm로 고정되어있고, 덕트의 높이(H)를 변화시키면서 3, 5, 6.82의 3가지 종횡비(AR)에 대하여 실험이 이루어 졌다. 각 경우는 수력직경은 75.0, 50.0, 38.4 mm에 해당한다. 수력직경 기준 레이놀즈 수는 10,000에서 30,000까지 변화시키면서 실험하였다.

본 연구에서는 열전달 실험을 대신하여 나프탈렌승화법을 이용한 물질전달 실험을 수행하였다. 그러므로 2개의 나프탈렌이 코팅된 영역이 실험용 덕트의 위아래 벽면에 설치되어 있다. 덕트로 유입된 유동은 500 mm의 요철이 설치된 영역을 지나 나프탈렌이 코팅된 면에 이르므로 물질전달계수는 완전발달된 난류유동장에서 획득된다. 요철이 설치된 양면은 나프탈렌이 코팅되어 열전달 실험의 등온 가열면 조건에 상사하며, 요철이 설치된 면은 가스 터빈 기익의 압력면과 흡입면을,

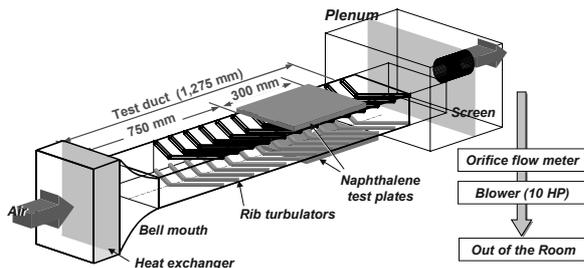
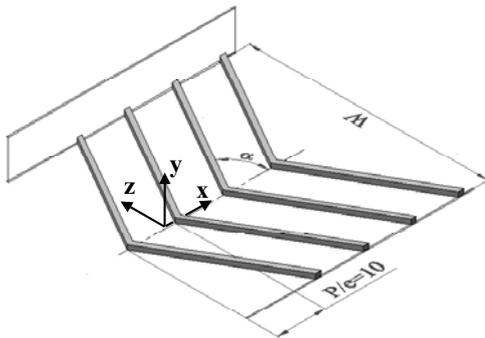
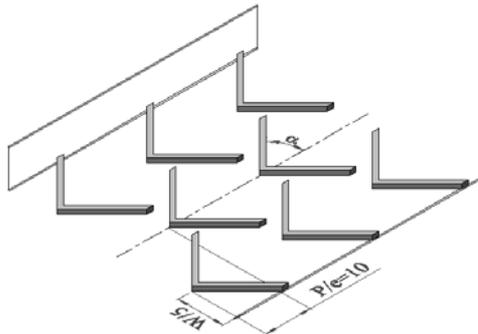


Fig. 1 Schematic view of experimental apparatus.



(a) 60° continuous V-shaped rib (60°V)



(b) 45° discrete V-shaped rib (45°V)

Fig. 2 Schematic diagrams of rib configurations.

나프탈렌이 코팅되지 않은 매끈한 측면벽은 내부 냉각 유로 사이 벽을 모사한 것이다. 나프탈렌의 증기 밀도는 온도에 매우 민감하여 온도가 1°C 변할 때 10%정도 변하므로, 입구에 열교환기를 설치하여 온도를 일정하게 유지시켰으며, 나프탈렌 표면에 J-type 열전대를 설치하여 나프탈렌 표면의 정확한 온도를 측정하였다. 실험중 나프탈렌 표면의 온도 변화는 0.2°C 이내로 유지되었다.

덕트에서의 압력 강하를 측정 하기 위하여 1.0 mm의 직경을 가지는 13개의 압력탭이 덕트 옆벽의 중앙에 위치해 있으며, 압력 홀 사이의 정압 강하의 측정에는 0.01 mmH₂O의 분해능을 가지는 마이크로 마노미터가 사용되었다. 요철의 배치는 Fig. 2에 나와 있다. 본 연구에서는 서로 다른 두 가지 형상의 요철에 대하여 실험을 수행하였다.

한가지는 주유동 방향에 대하여 60°의 충돌각을 가지는 연속된 쉼기형(60°V) 요철이며, 다른 하나는 45°의 충돌각을 가지는 단락된 쉼기형(45°V) 요철이다. 두 경우 모두 요철은 덕트의 위아래면에 평행하게 설치되어 있다.

요철은 3 mm×3 mm의 정사각형 단면을 가지며, 알루미늄으로 만들어 졌다. 요철과 요철간의 간격(p)은 30 mm (p/e=10)가 되도록 연속적으로 설치되어 있으며, 요철 높이와 덕트의 수력직경의 비(e/D_h)는 0.040에서 0.078까지의 값을 가진다.

좌표계는 주유동 방향을 x, 횡방향을 z, 덕트 바닥면에서 높이 방향을 y로 하며, 나프탈렌이 코팅된 영역의 시작위치의 중심을 원점으로 삼는다. 물질전달 계수의 측정은 60.0≤x/e≤90.0 그리고 -25≤y/e≤25의 영역에 대하여 이루어 졌다.

2.2 측정 방법 및 결과 처리

송풍실험 전후 측정 영역의 나프탈렌 고도차이로부터 국소 나프탈렌 승화량을 구하고 측정 전후의 자연대류에 의한 승화량을 보정하여 이로부터 무차원 물질전달계수인 Sherwood 수를 구한다. 이때 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[20]과 Goldstein 과 Cho[21]의 것을 사용하였다. Sherwood 수의 불확실성은 Kline 과 McClintock[19]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 난류유동장에서의 열전달과 물질전달의 상사성 관계식($Nu/Sh = (Pr/Sc)^{0.4}$)에 의해 계산될 수 있다. 매끈한 파이프에서 완전발달 난류유동장에서의 Sherwood 수인 $Sh_0 (= 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}(Sc/Pr)^{0.4})$ 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, 물질전달계수 분포의 반복성이 보장되는 요철간 거리의 2 배 영역인 $70 \leq x/e \leq 90$ 을 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 완전발달한 난류유동장에서의 마찰계수, f_0 ($=2(2.36 \ln \text{Re} - 4.639)^{-2}$)와의 비, f/f_0 의 형태로 제시되었다. 열/물질전달 성능계수는 일정 유체이송동력을 기준으로 다음식과 같이 정의되고, 이는 요철 설치로 인한 열전달 향상과 마찰손실의 증가를 함께 고려한 것이다.

$$\eta = (\overline{\text{Sh}}/\text{Sh}_0)/(f/f_0)^{1/3} \quad (4)$$

3. 결과 및 고찰

60° 쐐기형 요철과 45° 쐐기형 단락 요철에 대하여 국소적인 물질전달 계수와 압력 강하를 측정하여, 다양한 종횡비와 레이놀즈수에 대하여 성능계수를 구하였다. 실험 조건은 Table 1 에 요약되어 있다.

3.1 국소 열 물질 전달 계수

Fig. 3 과 4 에 레이놀즈 수가 20,000 인 경우 다양한 종횡비에 대하여 60° V 형 연속요철과 45° V 형 단락요철에 대한 국소 물질전달 계수비의 분포가 Sh/Sh_0 의 형태로 제시되어 있다. 모든 경우 물질전달계수의 분포는 대칭적으로 나타나기 때문에 여기서는 측정 영역의 절반($-2.5 \leq z/e \leq 2.5$)에 해당하는 물질전달 계수비의 분포만을 도시하였다.

60° V 형 연속요철의 경우 Han 등[11], Olsson 과 Sundén[12] 그리고 Talslim 등[16] 이 언급했듯이 4 개의 이차유동이 형성되며 이는 Fig. 5 에 나타나 있다. 덕트의 중심선($z/e=0.0$) 영역과 측면벽 근처에서 상향류와 하향류가 형성된다. 덕트의 중심부는 나프탈렌 증기의 밀도가 매우 낮고, 하향류는 이런 덕트 중심부의 유체가 나프탈렌 표면에 충돌하도록 하는 역할을 하므로 Fig. 3 에서 볼 수 있

Table 1 Test parameters and operating conditions

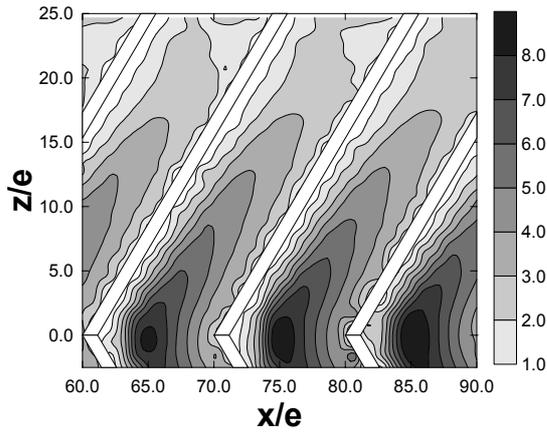
Rib config.	α	W (mm)	H (mm)	AR	D_h (mm)	e/D_h	p/e
60°V	60°	150	22	6.82	38.4	0.078	10.0
45°V	45°		30	5	50	0.06	
			50	3	75	0.04	

듯이 하향류가 형성되는 중심영역의 열/물질전달 계수는 매우 높은 값을 가지는 것이 관찰된다. 이후 나프탈렌 표면 근처의 이차유동은 요철을 따라 흐르면서 열/물질경계층이 발달하게 되고 열/물질전달은 감소하게 된다. 그러므로, Fig. 3 에서 볼 수 있듯이 중심영역에서 물질전달계수비의 최고 값은 요철이 설치되지 않은 덕트에 비해 7-8 배 높은 값을 가지는 것이 관찰된다.

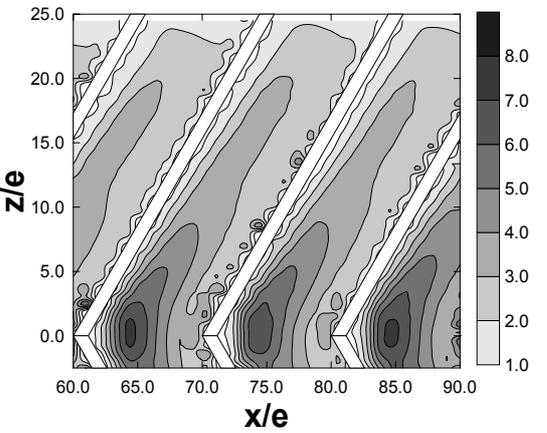
서로 다른 종횡비를 가지는 두 경우를 비교해 볼 때, 전반적인 Sherwood 수는 매우 유사한 분포를 보인다. 하지만, 종횡비가 큰 경우($AR=6.82$)가 종횡비가 작은 경우($AR=3.0$)에 비해 하향류가 충돌하는 중심영역에서의 Sherwood 수가 더 작은 것을 볼 수 있다. 이는 덕트의 높이가 낮아지면서 덕트의 수력직경에 대한 요철의 높이가 높아짐에도 불구하고, 유동의 저항이 커지게 되고, 이로 인한 이차유동의 약화로 인한 결과이다. 이런 경향은 Fig. 6 에 나타나 있는 국소 물질전달 계수비의 분포에 더 명확히 나타난다. 중심영역($z/e=0.0$)에서 $AR=3.0$ 인 경우의 최고값은 $AR=6.82$ 인 경우에 비해 20% 정도 높은 것으로 나타난다.

앞에서도 언급했듯이 이차 유동이 측면벽쪽으로 진행하면서 열전달 계수는 감소한다. 하지만 측면벽 근처 영역에서는 종횡비의 영향이 명확하게 관찰되지 않는다. 예를 들어, $z/e=16.0$ 과 $z/e=24.0$ 에서 국소 물질전달계수는 모든 경우에 대하여 거의 같은 값을 가진다.

45°V 형 단락요철이 설치된 경우 이차유동의 영향으로 Sherwood 수가 큰 영역이 쐐기형으로 형성된다. 또한 유동의 재순환영역이 요철 앞에 형성되어 국소적으로 높은 물질전달계수를 가지는 영역이 형성된다. 이는 60°V 형 요철이 설치된 경우와 매우 유사하다. 하지만, 단락요철인 경우 몇 가지 차이점이 관찰된다. 덕트 중앙에 설치된 요철 뒤의 물질전달이 측면에 설치된 요철 뒤의 물질전달보다 약간 작은 값을 가진다. 또한, 중앙에 설치된 요철뒤의 물질전달계수의 분포는 매우 대칭적으로 나타나는 반면, 측면에 설치된 요철 뒤의 물질전달계수의 분포는 비대칭적이다. 이는 단락요철이 배치된 구조에 의한 것이다. 중심쪽($z/e < 15.0$)에서는, 표면 근처에서 요철을 따라 흐르던 유동이 하류쪽으로 흐를 수 있는 간격이 매우



(a) AR=3.0

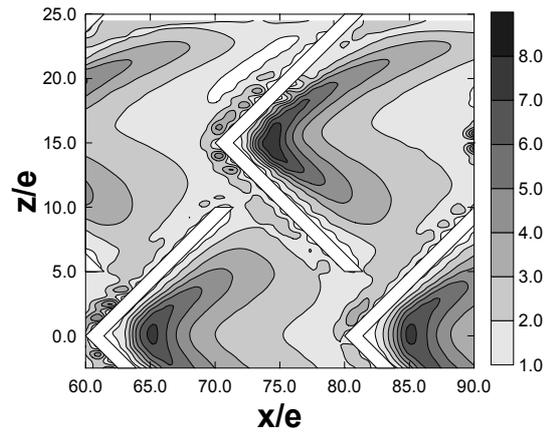


(b) AR=6.82

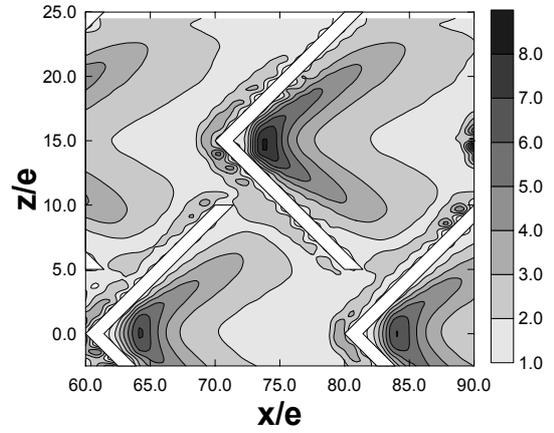
Fig. 3 Contour plots of Sh/Sh_0 for 60° Continuous V-shaped ribs with different aspect ratios at $Re=20,000$.

좁다. 또한 표면을 따라 흐르던 이차 유동이 다음 요철을 만나면서 급격하게 방향이 변하게 된다. 이런 상황은 국소적인 난류강도를 증가시키고 유동을 가속시켜 요철을 따라 높은 열/물질전달이 발생하는 영역을 형성한다. 반면 이는 유동의 저항을 증가시키게 되어 중심부에 형성되는 이차유동을 약화시키게 된다. 반면, 바깥쪽($z/e > 15.0$)의 경우, 주유동이 이차유동과 비슷한 방향을 향하므로 상대적으로 강한 이차 유동이 형성 된다. 그러므로 측면벽 근처의 썩기형 요철 하류에서는 비대칭적인 물질전달계수 분포가 나타나게 된다. 종횡비가 큰 경우($AR=6.82$), 전체적인 분포는 유사하게 나타난다. 하지만 열/물질전달계수는 약간 감소하며, 이차 유동이 전반적으로 약해지기 때문에 측면벽 근처의 물질전달계수 분포는 거의 대칭적으로 나타난다.

45°V 형 요철이 설치된 경우의 국소 물질전달 향상률의 분포는 Fig. 6(b)에 제시되어 있다. 앞에



(a) AR=3.0



(b) AR=6.82

Fig. 4 Contour plots of Sh/Sh_0 for 45° discrete V-shaped ribs with different aspect ratios at $Re=20,000$.

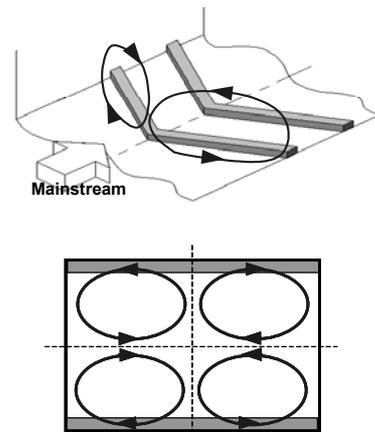


Fig. 5 Schematic diagram of secondary flow structure for the 60° V-shaped rib configuration.

서 설명했듯이, 약한 이차유동 강도의 영향으로 $z/e=0.0$ 에서의 최고값은 $z/e=15.0$ 에서의 최고값에

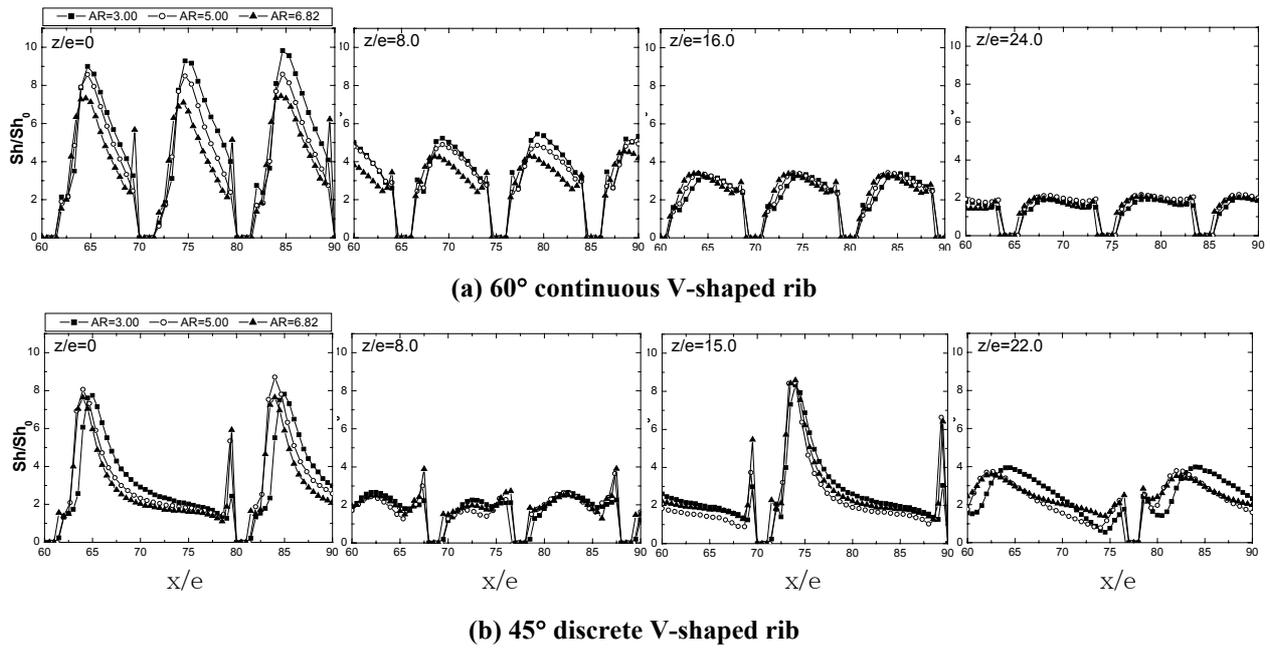


Fig. 6 Local distributions of Sh/Sh_0 for different rib configurations at $Re_{Dh}=20,000$.

비해 10%정도 낮게 나타난다. 게다가 $z/e=22.0$ 에서의 최고값은 $z/e=8.0$ 에서 보다 30%정도 높은 것을 볼 수 있다.

45°V 형 요철의 경우 종횡비의 영향은 뚜렷하게 나타나지 않는다. 이는 짧은요철의 길이에 의해 60°V 형 요철이 설치된 경우보다 상대적으로 작은 크기의 이차유동이 형성되어 덕트 높이의 영향을 적게 받기 때문이다. 반면, 측면벽 근처에서 형성된 모서리 와류의 영향으로 이차유동이 크게 발달해 상대적으로 물질전달 특성이 덕트 종횡비의 영향을 많이 받는다. $z/e=22.0$ 에서 최고값은 덕트의 종횡비가 증가함에 따라 조금 감소하며, 상류쪽으로 약간 이동하는 것을 볼 수 있다.

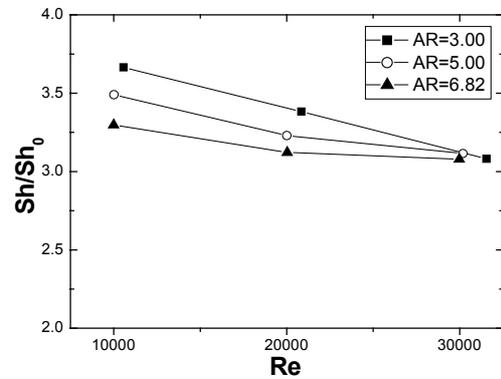
Fig. 7은 평균 Sherwood 수의 비를 나타낸다. 60°V 형 요철의 경우, 국소물질전달계수의 분포에서 예상되듯이, 평균값은 모든 레이놀즈 수에서 덕트의 종횡비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 하지만, 레이놀즈 수가 증가함에 따라 덕트 종횡비의 영향은 감소한다.

45°V 형 요철이 설치된 경우, Fig. 4와 6(b)에서 볼 수 있듯이 벽 근처를 제외하면 전체영역에서 물질전달 분포가 유사하게 나타난다. 그러므로, 평균 물질전달 특성도 덕트의 종횡비에 큰 영향을 받지 않는다. 이는 작은 크기의 이차유동이 형성되기 때문이다.

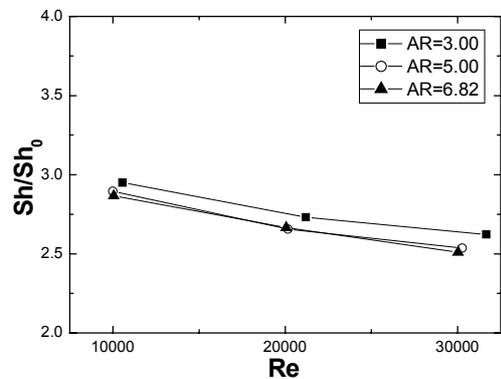
3.2 마찰손실 및 성능계수

덕트 내 압력강하에 의한 마찰손실은 요철 없는 원형관의 경우와의 비교를 위해 마찰손실비,

ff_0 의 형태로 Fig. 8에 제시되었다. 모든 경우에 레이놀즈 수가 증가함에 따라 마찰손실은 증가한다. 60°V 형 요철의 경우 종횡비가 6.82인 경우의

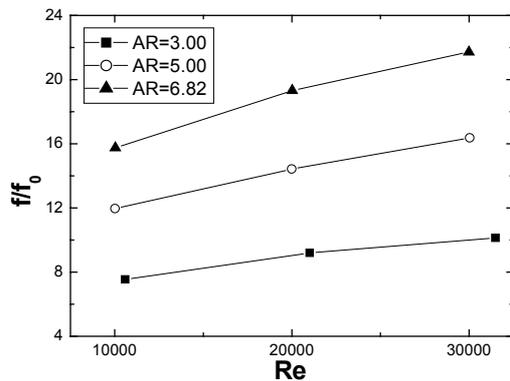


(a) 60° continuous V-shaped rib

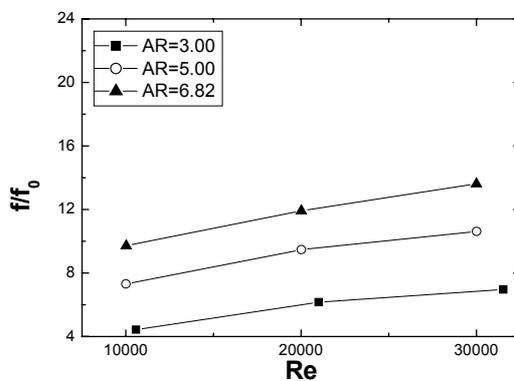


(b) 45° discrete V-shaped rib

Fig. 7 Area-averaged Sh/Sh_0 for different rib configurations with various aspect ratios.



(a) 60° continuous V-shaped rib

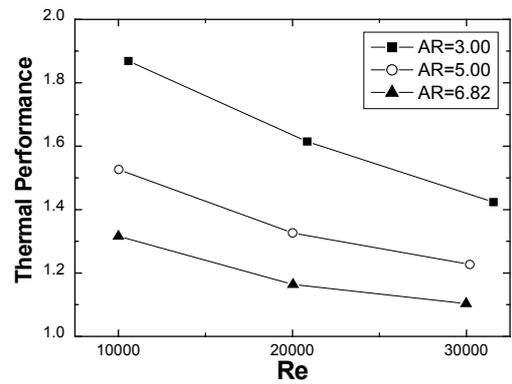


(b) 45° discrete V-shaped rib

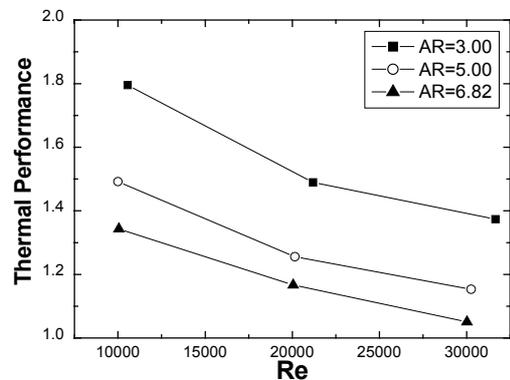
Fig. 8 Friction factor ratios, f/f_0 , for different rib configurations with various aspect ratios.

마찰 손실은 종횡비가 3.0 인 경우에 비해 2 배 이상으로 크다. 45°V 형 요철의 경우 60°V 형 요철에 비해 마찰계수가 훨씬 낮게 나타난다. 이는 서로 다른 이차유동구조에 기인한 것이다. 단락요철의 경우 작은 규모의 이차유동이 형성되는 반면, 연속요철의 경우 상대적으로 큰 규모의 이차유동이 발생한다. 그렇기 때문에 같은 종횡비와 레이놀즈 수에서, 45°V 형 요철의 마찰손실이 60°V 형 요철의 경우보다 50%이상 낮게 나타난다. 또한 작은 충돌각과 넓은 요철간 간격도 낮은 마찰손실의 원인이다.

Fig. 9 는 일정 이송동력 조건하에서의 물질전달 성능계수를 제시한 것으로 60°V 형 요철과 45°V 형 요철의 경우 모두 레이놀즈 수가 증가함에 따라 성능계수가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 물질전달계수는 감소하는 반면, 마찰손실은 증가하기 때문이다. 모든 경우에 60°V 형 요철이 설치된 경우의 성능계수가 45°V 형 요철의 경우보다 높은 것으로 나타났다. 그 이유는 60°V 형 요철의 경우가 높은



(a) 60° continuous V-shaped rib



(b) 45° discrete V-shaped rib

Fig. 9 Thermal performances for different rib configurations with various aspect ratios.

마찰손실에도 불구하고, 높은 물질전달성능을 나타내고 있기 때문이다. 그러나, 45°V 형 요철의 경우 물질전달계수가 덕트 종횡비의 영향을 크게 받지 않기 때문에 덕트 종횡비가 증가함에 따라 두 가지 요철 배열에 따른 차이는 감소한다.

4. 결론

이번 연구에서는 60°V 형 연속요철과 45°V 형 단락요철에 대하여, 레이놀즈 수와 덕트 종횡비에 따른 국소 열/물질전달 특성과 마찰손실에 대한 실험이 수행되었다. 60°V 형 연속요철의 경우, 열/물질전달계수는 요철이 설치된 면 중심에서 최고값을 나타내었으며, 요철을 따라 차츰 감소하는 경향을 보인다. 이는 덕트 내부에 두쌍의 이차유동이 형성되기 때문이다. 최고값은 덕트의 종횡비에 크게 영향을 받으며, 이는 종횡비가 증가함에 따라 하향류가 약해지기 때문이다. 하지만, 측면벽 근처에서는 모든 종횡비에 대해서 비슷한 물질전달계수를 가진다. 평균 열/물질전달계수비는 중심

부의 국소값의 영향으로 종횡비가 증가함에 따라 감소한다. 그러나, 레이놀즈 수가 증가함에 따라 덕트 종횡비의 영향은 감소한다. 마찰손실은 레이놀즈 수와 종횡비가 증가함에 따라 증가한다.

45°V 형 단락요철의 경우, 요철의 배치에 의해 중심부에서는 작은 크기의 이차유동이 형성되는 반면, 벽 근처에서는 상대적으로 큰 이차유동이 형성되게 되므로, 중심부의 최고값은 벽 근처 보다 낮은 값을 가지게 되며 비대칭적인 분포를 보인다. 또한, 국소적인 유동의 혼합과 난류강도의 증가로 인해 상대적으로 균일한 열/물질전달분포를 가진다. 열/물질전달계수는 덕트의 종횡비에 크게 영향을 받지 않는데, 이는 작은 이차유동의 크기 때문이다. 또한 마찰손실은 종횡비의 증가에 따라 증가하지만, 60°V 형 요철에 비해서는 훨씬 낮은 값을 가진다.

두가지 형상의 요철의 성능계수를 비교해 볼때, 45°V 형 단락요철이 설치된 경우가 약한 강도의 이차유동에 의해 더 낮은 성능을 보인다. 하지만, 덕트의 종횡비가 증가함에 따라 두 요철간의 성능계수의 차이는 줄어들고, 종횡비가 6.82 인경우, 두 요철배열의 성능계수는 거의 같은 값을 가진다.

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*, **23**, pp. 1127-1136.
 [2] Han, J. C., 1984, "Heat Transfer and Friction in Channels With Two Opposite Rib-Roughened Walls," *ASME J. of Heat Transfer*, **106**, pp. 774-781.
 [3] 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*, **107**, pp. 628-635.
 [4] Hwang, J. J., 1997, "Heat Transfer-Friction Characteristic Comparison in Rectangular Channel Array of Attached, Detached, and Alternate Attached-Detached Ribs on Two Opposite Walls," *ASME Paper No. 97-GT-488*.
 [5] 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*, **120**, pp. 564-570.
 [6] Cho, H. H., Wu, S. J., and Kim, W. S., 1998, "A Study on Heat Transfer Characteristics in a Rib-roughened Rectangular Duct," *Proceedings of 11th International Symposium on Transport Phenomena*, Paper-No. 61, pp. 364-369.
 [7] 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, **20**, pp. 311-319.

[8] Cho, H. H., Lee, S. Y. and Wu, S. J., 2001, "The Combined Effects of Rib Arrangements and Discrete Ribs on Local Heat/Mass Transfer in a Square Duct," *ASME Paper No. 2001-GT-175*.
 [9] 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*, **34** (7), pp. 1605-1616.
 [10] 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*, **36** (8), pp. 2013-2020.
 [11] 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*, **113**, pp. 590-596.
 [12] Olsson, C.-O. and Sunden, B., 1998, "Experimental Study of Flow and Heat Transfer in Rib-roughened Rectangular Channels," *Experimental Thermal and Fluid Science*, **16**, pp. 349-365.
 [13] Gao, X. and Sunden, B., 2001, "Heat Transfer and Pressure Drop Measurements in Rib-roughened Rectangular Ducts," *Experimental Thermal and Fluid Science*, **24**, pp. 25-34.
 [14] 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*, **122** (3), pp. 579-586.
 [15] 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*, **35**, pp. 513-523.
 [16] 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*, **118**, pp. 20-28.
 [17] Han, J. C. and Park, J. S., 1988, "Developing Heat Transfer in Rectangular Channels With Rib Turbulators," *Int. J. of Heat Mass Transfer*, **31** (1), pp. 183-195.
 [18] 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*, **32** (9), pp. 1619-1630.
 [19] Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, **75**, pp. 3-8.
 [20] Ambrose, D., Lawrenson, I. J., and Sparke, C. H. S., 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene," *J. of Chem. Thermodynam.*, **7**, pp. 1173-1176.
 [21] Goldstein, R. J. and Cho, H. H., 1995, "A Review of Mass Transfer Measurement Using Naphthalene Sublimation," *Experimental Thermal and Fluid Science*, **10**, pp. 416-434.
 [22] McAdams, W. H., 1942, *Heat Transmission*, 2nd ed. McGraw-Hill, New York.
 [23] Petukhov, B. S., 1970, *Advances in Heat Transfer*, **6**, pp. 503-504, Academic Press, New York.