

딴플이 설치된 회전 유로의 높이가 열전달 계수에 미치는 영향에 대한 실험적 연구

김석범* · 이용진** · 최은영* · 전창수*** · 곽재수****†

Effect of channel height on the heat transfer coefficient of a rotation dimpled channel

Seokbeom Kim*, Yong Jin Lee**, Eun Yeong Choi*, Chang Soo Jeon***, Jae Su Kwak****†

Key Words : Dimple(딴플), Rotating channel(회전유로), Transient liquid crystal technique(천이액정법), Coriolis force (코리올리력), Channel height(유로 높이)

ABSTRACT

The detailed heat transfer coefficients on a rotating dimpled channel were measured by the hue detection based the transient liquid crystal technique. The dimples were fabricated on the one side of the channel and the tested channel aspect ratio was 4, 6, and 12 with fixed channel width. Tested Reynolds number based on the channel hydraulic diameter was varied from 21,000 to 47,000. A stationary case and two different rotating conditions were tested so that the dimple fabricated surface became leading or trailing surface. For all rotating conditions, the minimum averaged heat transfer coefficient was measured for the channel aspect ratio of 6. Generally, the highest averaged heat transfer coefficient was observed for the highest aspect ratio cases due to increased dimple induced vortex strength.

1. 서론

가스터빈으로 유입되는 입구유동의 온도를 증가시키는 것은 가스터빈의 열효율 향상을 위한 가장 효과적인 방법 중 하나이다. 이러한 시도로 인해 최근 가스터빈의 입구온도는 터빈내부 구성 소재의 온도 허용한계를 초과하고 있다. 따라서 고온의 입구유동에 의해 발생하는 열부하와 열응력으로 부터 터빈 블레이드의 내구성을 유지하고, 수명을 증가시키기 위한 다양한 냉각방법이 연구되고 있다. 터빈 블레이드 내부의 냉각 방법으로는 립(rib)을 이용한 요철 냉각법과, 충돌 냉각법(impingement cooling), 딴플(dimple)을 이용한 냉각법, 그리고 핀-휀(pin-fin)냉각법 등이 있으며, 냉각효율을 보다 증가시키기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.⁽¹⁾

블레이드 내부 냉각방법 중 딴플 냉각법은 블레이드 내부 유로면에 딴플을 가공하여 유동을 교란시킴으로써 열전달을

증진시키는 방법으로, 립(rib)이나 핀(pin) 등을 이용한 다른 내부 냉각기법들과 유사한 열전달 효과를 제공하면서도 압력손실이 상대적으로 적어 가스터빈 블레이드에 응용하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.

90년대의 연구로는, Belenkiy 등⁽²⁾이 유로 내 시험 표면의 형상과 크기, 디자인을 바꾸어 가며 열전달 실험을 하였고, 구형 홈을 가진 표면이 낮은 압력 손실에, 높은 열전달 효율을 얻을 수 있음을 밝혔다. 2000년대 초반의 연구로, Moon 등⁽³⁾은 레이놀즈수, 유로의 높이(H)를 바꾸어 가며 딴플면의 평균 열전달 계수를 측정하였고, 열전달 계수와 마찰 계수는 딴플 지름대비 높이의 비(H/D)에 큰 영향을 받지 않는다는 결론을 내렸다. Mahmood 등⁽⁴⁾은 한쪽 면이 딴플인 유로에 대해 주유동 온도 변화에 따른 국소, 평균 열전달 계수를 측정하였고, 표면의 온도에 대한 주유동 온도의 비가 감소할수록 평균 열전달 계수는 증가한다는 것을 밝혔다. Moon과 Lau⁽⁵⁾는 레이놀즈수 변화에 따라, 아래로 볼록한 구형의 홈 형상과 실린더 모양의 딴플에 대해 열전달 실험을 하였고, 실린더 모양 딴플의 열성능이 더 좋음을 보였다.

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원 (국방기술품질원)

*** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

† 교신저자, E-mail : jskwak@kau.ac.kr

Griffith 등⁽⁶⁾은 회전 유로내 딴플면의 평균 열전달 계수 측정에 대한 실험을 하였고, 회전수가 큰 경우에 정지상태에 비하여 높은 열전달 효과가 발생한다는 것을 밝혔다. Mahmood와 Ligrani⁽⁷⁾는 표면의 온도에 대한 주유동 온도의 비는 일정하게 둔 상태에서, 레이놀즈수 변화와 딴플 지름 대비 유로의 높이 비(H/D)에 따른 열전달 계수 측정 실험을 하였고, 딴플의 지름에 대해 유로의 높이 비(H/D)가 1보다 작을 경우, 이 비율이 감소함에 따라 주기적으로 생성되는 와류 강도의 증가로 평균열전달 계수가 증가함을 밝혔다. Wang 등⁽⁸⁾은 수치해석 기법을 통해 레이놀즈수 변화에 따른 다중 딴플 표면의 유동에 대하여 해석하였고, 딴플 내부에 쌍와류가 형성되는 것을 보였다. 그리고 이런 수치해석 결과들이 기존의 실험 결과와 유사한 유동특성을 가지는 것을 보였다. 최근의 연구로, Burgees와 Nigrani⁽⁹⁾는 레이놀즈수와, 딴플의 깊이(h) 변화에 따른 열전달 실험을 하였고, 딴플의 깊이가 증가함에 따라 평균 열전달 계수가 증가함을 밝혔다. 이는 딴플의 깊이가 증가함에 따라, 딴플에서 생성되는 와류들과 이차유동의 증가, 그리고 3차원 난류 유동의 생성 및 난류수송의 영향 때문이라 하였다. Khalatov 등⁽¹⁰⁾은 실린더와 구형의 딴플, 유동방향으로 배치한 딴플들에 대해 유동가시화 실험을 하였고, 레이놀즈수, 딴플형상, 근접한 딴플의 존재 여부가 유동 형상을 결정하는데 중요한 영향을 끼침을 밝혔다. Ligrani 등⁽¹¹⁾은 딴플 깊이변화에 따른 열전달 계수를 측정하였고, 유동 방향에 평행, 수직 방향 단면에서의 유동 특성을 보였다. 유로 수직 방향 단면에 대해 상대적으로 큰 쌍와류가 딴플 중심부에서 발생하였고, 스펀 방향의 단면에서 작은 와류의 쌍이 주기적으로 발생함을 보였다. Shin 등⁽¹²⁾은 한쪽 면에 딴플이 있는 유로에 대해 천이액정법을 사용하여 레이놀즈수 변화와 유로 높이의 변화에 따른 열전달 분포를 측정하였고, 유로의 높이가 감소함에 따라 열전달 계수와 열성능 계수가 증가함을 밝혔다.

기존의 실험적 연구들은 주로 정지된 유로에서 딴플의 배치나 형상 등이 열전달 계수에 미치는 영향을 연구하였으며, 대체로 평균 열전달 계수만을 제시하고 있어 딴플을 이용한 터빈 블레이드 내부 냉각법의 최적화를 위한 상세한 열전달 계수 분포에 대한 정보가 부족한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 천이액정법(transient liquid crystal technique)을 이용하여 딴플이 설치된 회전 유로에서 유로 높이의 변화에 따른 열전달 계수 분포를 실험적으로 연구하였다.

2. 실험 장치

Fig. 1은 실험 장치의 대략적인 구성을 나타낸 것이다. 실험 장치는 유동을 공급하는 블로어와 입구유동의 온도 제어를 위한 히터, 데이터 전송을 위한 슬립링, 목적에 따라 유동의 진행방향을 순간적으로 변경할 수 있는 2개의 공압 밸브,

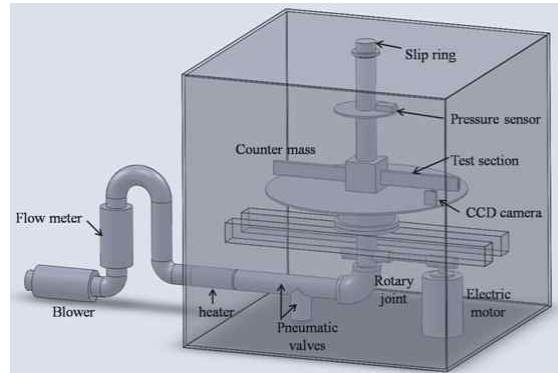


Fig. 1 Schematic of the test facility

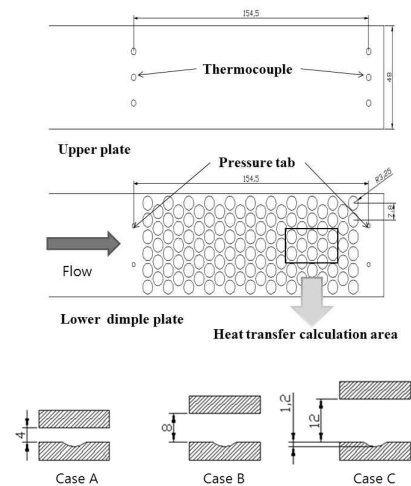


Fig. 2 Configurations of the test section

유량계, 전기 모터 등으로 구성되었다

Fig. 2는 시험부의 형상 및 유로의 단면을 나타낸 그림이다. 시험부의 한쪽 면에는 딴플을 가공하였고, 반대쪽 면에는 시각성 확보를 위해 가공을 하지 않은 투명한 판을 사용하였다. 딴플 면의 시작부와 끝부분에 정압 공을 설치하여 압력손실을 측정하였고, 반대편의 투명한 면에는 주유동의 온도를 측정하기 위하여 삽입한 총 6개의 열전대(T-type thermocouple)가 유로의 중앙에 위치하도록 설치하였다. 유로는 총 3종을 제작하였으며, 주요 사양은 Table 1과 같다. 딴플은 총 21열을 설치하였으며, 주기적인 완전발달(periodic fully developed) 유동의 열전달 계수 분포를 얻기 위해 상류로부터 15번째 딴플 열과 19번째 딴플 열 사이의 영역에 대해 측정하였다.

레이놀즈수의 변화가 열전달 계수에 미치는 영향을 살펴보기 위해 유로의 수력직경을 기준으로 한 레이놀즈수를 21,000에서 47,000으로 변화시키며 실험을 진행하였다. 유로의 회전 속도는 500rpm으로 일정하게 유지하였으며, 식 (1)로 정의된 회전수(rotation number, R_o)는 Table 2에서와 같이 레이놀즈수와 수력직경의 변화에 따라 0.0042에서

Table 1 Specification of the dimple plates

	Case A	Case B	Case C
딴플의 지름(D)	6.5 mm	6.5 mm	6.5 mm
딴플의 깊이(h)	1.2 mm	1.2 mm	1.2 mm
딴플 중심간 거리(S)	7.8 mm	7.8 mm	7.8 mm
유로의 높이(H)	4 mm	8 mm	12 mm
유로의 너비(L)	48 mm	48 mm	48 mm
H/D	0.62	1.23	1.85
S/D	1.2	1.2	1.2
수력직경(D_h)	7.38mm	13.71mm	19.20mm
h/D	0.185	0.185	0.185
중형비(L/H)	12	6	4

Table 2 Rotation number(Ro) to variation of Re

Reynolds number	Rotation number		
	Case A	Case B	Case C
21000	0.0093	0.014	0.027
33000	0.0056	0.019	0.038
47000	0.0042	0.032	0.063

0.063까지 변화한다. 여기서, ω 는 각속도, D_h 는 유로의 수력 직경, 그리고 V 는 유동의 평균 속도이다.

$$Ro = \frac{\omega D_h}{V} \quad (1)$$

유로의 회전방향은 딴플 설치면이 뒷면(trailing surface)이 되는 경우를 시계방향(CW), 앞면(leading surface)이 되는 경우를 반시계방향(CCW)으로 정의하였으며, 레이놀즈수와 유로의 높이를 변화시키면서 시계방향, 반시계방향, 정지 상태(STOP)의 3가지 회전 조건에 대해 실험을 수행하였다.

천이액정법을 활용하기 위해 압축 공기를 히터로 가열하였으며, 유동이 원하는 온도가 될 때까지 외부로 바이패스(bypass) 시킨 후, 충분히 가열되면 2개의 공압 밸브를 작동시켜 가열된 유동이 시험부로 유입되도록 하였다.

딴플이 설치된 시험면에는 열전달 계수 측정을 위해 흑색 페인트를 도포한 후, 그 위에 액정(35C1W, Hallcrest)을 도포하였다. 액정의 색상 변화는 회전하는 시험부 내에 설치된 디지털 CCD 카메라를 통해 컴퓨터에 저장되며, 주유동의 온도는 데이터 획득장치를 통해 컴퓨터로 저장된다. 천이액정법을 이용한 열전달 계수 측정 방법은 Shin 등⁽¹²⁾의 연구에서 상세하게 제시되었다.

3. 1 열전달 계수 측정 이론

천이액정법은 시험면을 1차원 반무한 고체로 가정하고 주유동의 온도를 급격히 변화시키거나 주유동의 온도는 일정

하게 유지하면서 유동 자체에 급격한 변화를 주어 열전달 계수를 측정하는 방법이다. 천이액정법에서 1차원 반무한 고체에 대한 시간과 표면 온도의 변화는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{T_w - T_i}{T_m - T_i} = 1 - \exp\left(-\frac{h^2 \alpha t}{k^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{h \sqrt{\alpha t}}{k}\right) \quad (2)$$

이상적으로는 유동의 온도를 순간적으로 급격히 변화시켜야 하나, 이를 실험적으로 구현하는 것은 매우 어렵다. 즉, 시험부로 유입되는 유동의 온도를 요구되는 온도에 도달시키는 데는 일정 시간이 소요된다. 이러한 시간에 따른 온도의 변화를 고려하여 식 (2)에 Duhamel의 중첩법을 적용하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_w - T_i = (T_{m,0} - T_i) \times F\left(\frac{h \sqrt{\alpha t}}{k}\right) + \sum_{i=1}^n \left[F\left(\frac{h \sqrt{\alpha(t - \tau_i)}}{k}\right) \Delta T_{m,i} \right] \quad (3)$$

여기서, $F(x) = 1 - \exp(x^2) \operatorname{erfc}(x)$

α : 시험부의 열확산도

k : 시험부의 열전도도

t : 천이 시간

h : 열전달 계수

주유동의 온도(T_m)와 표면의 초기 온도(T_i)를 측정하고, 시험면에 도포된 액정의 색상 변화를 이용하여 초기 온도에서 표면 온도(T_w)까지 경과된 시간 t 를 측정하면 식 (3)을 통해 액정이 도포된 표면의 대류 열전달계수(h)를 계산할 수 있다.

딴플과 같이 유동을 교란시켜 열전달을 증진시키는 방법들에는 반드시 압력손실이 동반된다. 딴플에 의한 열전달 증가 효과와 압력손실을 동시에 고려하기 위해 식 (4)와 같이 열성능계수(Thermal performance factor, TP)를 정의하였다.

$$TP = \frac{\overline{Nu_{D_h}} / Nu_{D_h,0}}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (4)$$

식 (4)에서 f 는 Darcy 마찰계수이며, 식 (5)로 계산하였다. 이때 압력손실(Δp)은 Fig. 2에서와 같이 시험면 상-하류에 설치한 압력공에서 측정하였다. f_0 는 매끈한 관의 완전 발달한 난류유동의 마찰계수로서 식 (6)으로부터 계산할 수 있다. $Nu_{D_h,0}$ 는 완전 발달된 난류유동에 대해서 매끈한 관의 수력직경을 대표 길이로 한 평균 Nusselt수이고, $\overline{Nu_{D_h}}$ 는 실험으로 측정된 열전달계수의 평균값으로 계산한 평균

Nusselt수로써 각각 식 (7)과 식(8)에 의해 계산된다.⁽¹³⁾

$$f = \frac{-(\Delta p / \Delta x) D_h}{\rho_m \bar{u}^2 / 2} \quad (5)$$

$$f_0 = [0.79 \ln(Re_{D_h}) - 1.64]^{-2} \quad (6)$$

for $3,000 < Re_{D_h} < 5 \times 10^6$

$$Nu_{D_h,0} = \frac{(f_0/8)(Re_{D_h} - 1000)Pr}{[1 + 12.7(f_0/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)]} \quad (7)$$

for $0.5 < Pr < 2000$

$3000 < Re_{D_h} < 5 \times 10^6$

$$\frac{\bar{h}}{k_m} = \frac{\bar{h} D_h}{k_m} \quad (8)$$

천이액정법은 시험부를 1차원 반무한 고체로 가정하기 때문에, 실험을 마친 후에도 딴플면 반대의 온도가 여전히 초기온도로 변화가 없어야 한다. 이런 이유로 실험 시간에 제한을 두게 되는데, Wagner 등⁽¹⁴⁾은 식 (9)와 같은 기준을 제시하였다.

$$\frac{\alpha t_{test\ duration}}{thickness^2} < \frac{1}{4} \quad (9)$$

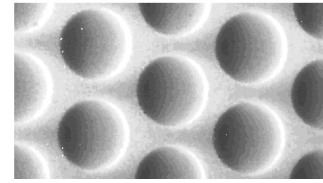
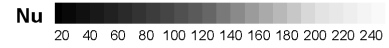
실험 모델을 기반으로 한 기준시간($t_{test\ duration}$)은 180초이며, 모든 실험은 90초 이내에 완료하였다.

본 연구에서 실험 결과의 불확도(Uncertainty)는 식 (3)을 이용하여 수치적인 방법으로 구하였다. 측정된 열전달계수(h)의 불확도는 7.3%, Nusselt수(Nu)의 불확도는 8.5%이다. 또한 압력계수(friction factor)의 불확도는 6.5%이다.⁽¹⁵⁾

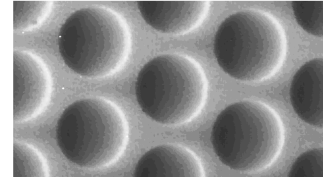
4. 실험 결과

Fig. 3은 Case C(CW)인 경우에 대해 레이놀즈수의 변화에 따른 Nusselt수(Nu) 분포를 나타낸 것이다. 레이놀즈수의 증가에 따른 유속의 증가로 인해 Nusselt수가 전체적으로 증가되는 것이 관찰되었다.

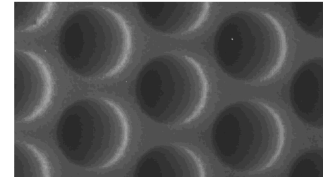
딴플 내부의 경우, 상류에서는 Nusselt수가 작게 측정되었고 하류에서는 높은 Nusselt수가 측정되었다. 이는 딴플 상류의 경계층이 박리되어 생성된 재순환 영역과 딴플 하류에서 발생하는 유동의 재부착 및 쌍와류(Twin vortex)의 영향 때문인 것으로 판단된다.^{(8),(10)}



(a) Re = 47,000, H/D = 1.85

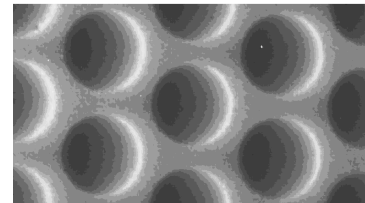
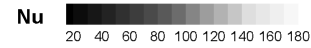


(b) Re = 33,000, H/D = 1.85

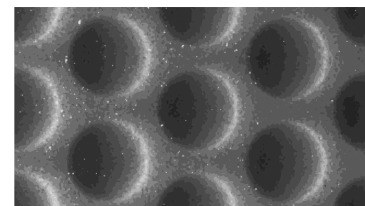


(c) Re = 21,000, H/D = 1.85

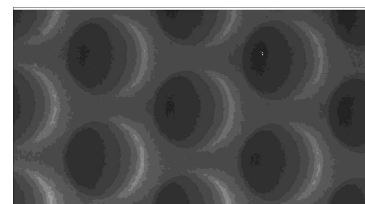
Fig. 3 Nusselt number distribution (Case C, CW)



(a) CW, H/D = 1.85

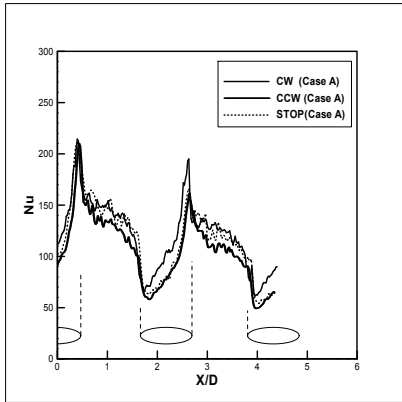


(b) STOP, H/D = 1.85

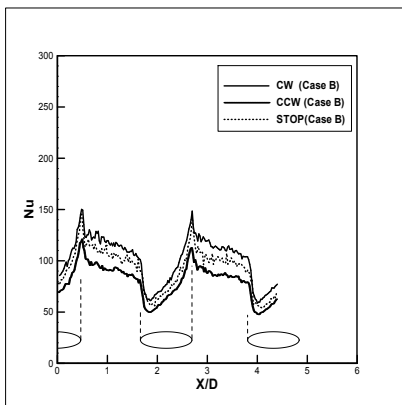


(c) CCW, H/D = 1.85

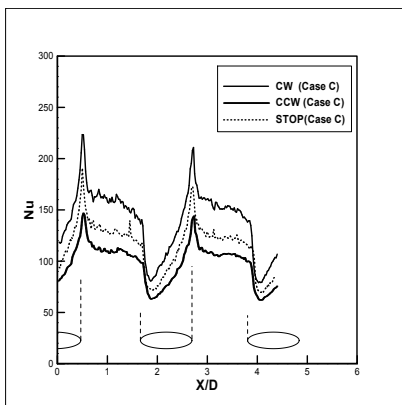
Fig. 4 Nusselt number distribution (Case C, Re = 21,000)



(a) Case A



(b) Case B



(c) Case C

Fig. 5 Nusselt number distribution along the centerline (Re = 33,000)

Fig. 4는 Case C(Re=21,000)에 대해서 회전 방향에 따른 Nusselt수의 분포를 나타낸 것이다. 유로가 시계방향으로 회전하는 경우는 정지 유로에 비해 덤플면에서의 Nusselt수가 증가되었으며, 이는 유로가 회전함에 따라 발생하는 코리올리력(Coriolis force)과 원심부력(rotational buoyancy force)의 영향으로 인한 것이다. 즉, 유로가 시계방향으로 회전하는 경우 코리올리력으로 인해 덤플이 설치된 면으로 유

동이 치우치게 되고, 이에 따라 덤플이 설치된 면에서의 대류 열전달은 덤플이 설치되지 않은 반대쪽 면에 비해 증가되어 Nusselt수가 증가한다. 이로 인해 발생하는 유동의 온도 차이는 유동의 밀도 차이를 유발하고, 상대적으로 온도가 낮은 덤플 면 유동의 큰 밀도로 인해 원심력이 커지며, 반경 방향으로 가속이 된다. 이러한 원심부력의 영향은 또다시 덤플 면의 열전달을 촉진시키는 요인으로 작용하게 된다.

반면에, 반시계방향으로 회전하는(CCW) 유로의 경우는 정지 유로에 비해 Nusselt수가 낮게 측정되었다. 이는 시계방향으로 회전할 때와는 달리 코리올리력과 원심부력의 효과가 역으로 작용하여 열전달효과가 감소하기 때문이다.

Fig. 5는 유로 폭의 중앙에서 유동방향(X/D)으로의 Nusselt수(Re=33,000) 분포를 나타낸 것이다. 회전방향, 유로의 높이에 관계없이 모든 경우에서 Nusselt수의 극소점인 재순환 영역(덤플 상류)과 Nusselt수의 극대점인 재부착 영역(덤플 하류)을 확인할 수 있으며, 이런 현상이 주기적으로 반복되는 것을 확인할 수 있다. 각각의 유로 높이에 대해 Nusselt수의 크기는 시계방향 회전의 경우에서 가장 크게, 반시계방향 회전의 경우에서 가장 작게 측정되었다.

Fig. 6은 유로의 높이 비(H/D)의 변화에 따른 평균 Nusselt수를 나타낸 것이다. 모든 회전방향, 레이놀즈수에 대해 유로의 높이비가 1.23에서 0.615로 감소할 때 평균 Nusselt수는 증가하였다. 이는 Mahmood와 Ligrani⁽⁷⁾의 연구에서와 같이 유로 높이비가 1보다 작을 경우, 유로의 높이가 작아질수록 주기적으로 발생하는 와류의 강도가 증가하여 열전달 효과가 커지기 때문인 것으로 보인다. 또한 유로의 높이비가 1.23에서 1.85로 증가할 때, 시계방향회전(CW)인 경우의 평균 Nusselt수 비 역시 증가하는 경향을 보이는데, 이는 유로의 높이비가 큰 경우가 수력직경의 증가와 유로 속도의 감소로 인해 회전수(Ro)가 크고, 코리올리력의 영향을 더 많이 받기 때문이다. 이러한 경향은 회전수(Ro)가 큰 영역, 즉, 레이놀즈수가 작은 영역에서 더 확연하게 나타났다.

Fig. 7은 식 (7)에 의해 계산된 매끈한 유로에서의 평균

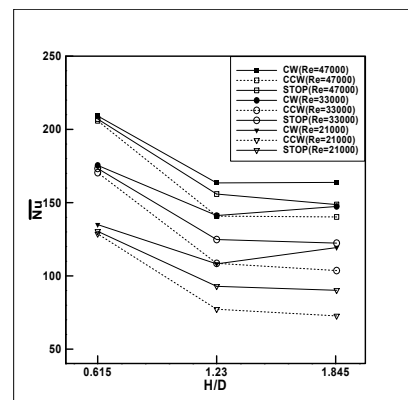


Fig. 6 Average Nusselt number to channel height

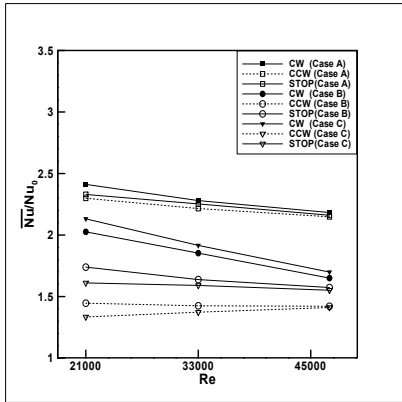


Fig. 7 Average Nusselt number ratio to Reynolds number

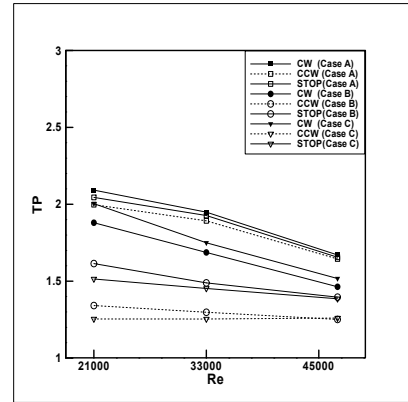


Fig. 9 Thermal performance factor

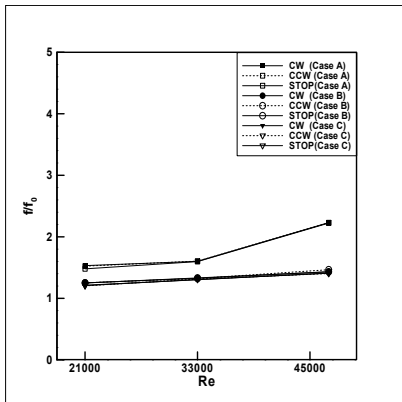


Fig. 8 friction factor ratio

Nusselt수와 실험에서 측정된 딴플면의 평균 Nusselt수의 비를 나타낸 것으로, 유로 높이가 가장 큰 경우(Case C)의 반시계방향 회전인 경우를 제외하고는 레이놀즈수가 증가함에 따라 평균 Nusselt수의 비가 감소하였다. 이러한 평균 Nusselt수의 비의 감소는 유로가 시계방향으로 회전하는 경우에 더욱 크게 나타났다. 이는 레이놀즈수가 증가함에 따라 회전수(Ro)가 감소하여, 코리올리력의 영향에 의한 열전달 증진 효과가 감소하기 때문이다. 반면에 반시계방향으로 회전하는 경우는 코리올리력의 영향이 반대로 작용하여 평균 Nusselt수 비가 감소하는 폭이 작았고, 특히 수력직경이 가장 큰, 즉, 회전수(Ro)가 가장 큰 경우(Case C)에는 평균 Nusselt수 비의 기울기가 역전되는 현상을 보였다. 또한 평균 Nusselt수 비의 크기는 유로 높이의 영향이나 회전 방향의 영향에는 관계없이, 유로내 유동의 속도가 가장 빠른 Case A의 경우가 가장 높게 측정되었다.

Fig. 8은 식 (5)와 (6)으로 계산된 평균 마찰계수의 비를 나타낸 것이다. 마찰계수는 동일한 레이놀즈수에 대해 회전수의 영향보다는 유로의 높이, 즉 유동 속도의 영향을 많이 받는 것을 확인할 수 있다. 또한 모든 경우에서 레이놀즈수가 증가함에 따라 마찰계수도 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9은 식 (4)로 계산된 열성능계수(TP)를 나타낸 것으로, 모든 레이놀즈수에 대해 시계방향으로 회전하는 경우 열성능계수가 가장 크고, 정지 및 반시계방향으로 회전함에 따라 점차 감소하는 경향을 보였다. 이는 앞에서 기술한 바와 같이 유로의 회전에 따른 코리올리력과 원심부력의 영향으로 인한 것이다. 전체적으로 유로의 높이비가 가장 작은 Case A의 경우 열성능계수가 가장 크게 나타났지만, 시계방향 회전상태의 경우 회전수(Ro)가 가장 큰 경우(Case C, $Re=21,000$)에서는 코리올리력의 영향으로 인해 다소 높은 열성능계수를 나타냈다.

5. 결론

본 연구에서는 각각 시계방향, 정지, 반시계방향으로 회전하는 유로 내에 설치된 딴플 표면에 대한 Nusselt수 분포를 전이액정법을 이용하여 측정하였다. 이를 위해 시험부의 회전수는 500 rpm으로 일정하게 유지하고, 유로의 높이가 서로 다른 세 가지 경우에 대해 레이놀즈수를 21,000에서 47,000으로 변화시키며 실험을 수행하였다. 유로의 회전방향 및 레이놀즈수, 유로 높이에 대한 Nusselt수와 열성능계수를 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 레이놀즈수가 증가함에 따른 유속의 증가로 인해 Nusselt수는 증가하였다.
- 2) 동일한 레이놀즈수에서 Nusselt수는 유로가 시계방향으로 회전하는 경우가 정지 또는 반시계방향으로 회전하는 경우에 비해 높게 측정되었으며, 이는 코리올리력과 원심부력의 효과에 의한 것이다.
- 3) 전반적으로 유로 높이비가 1.23인 경우가 가장 낮은 Nusselt수를 보였고, 유로 높이비가 0.62인 경우에는 딴플에 의해 발생된 강한 와류의 영향으로 가장 높은 Nusselt수를 보였다.
- 4) 유로가 시계방향으로 회전하는 경우에는 유로의 높이

가 증가함에 따른 회전수(Ro)의 증가로 인해 열성능 계수가 증가하는 경향이 나타났다. 반면에 반시계방향으로 회전하는 경우에는 반대의 경향이 나타났다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (2008T100100161)주관으로 수행한 과제임.

참고문헌

- (1) Han, J. C., Dutta, S. and Ekkad, S. V., 2000, "Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology", Taylor & Francis, New York.
- (2) Belen'kiy, M. Y., Gotovskiy, M. A., Lekakh, B. M., Fokin, B. S. and Dolgushin, K. S., 1993 "Heat Transfer Augmentation Using Surfaces Formed by a System of Spherical Cavities," UDC 539.1.08, Heat Transfer Research, Bol. 25, No. 2, pp. 196-203.
- (3) Moon, H. K., O'Connell, T. and Glezer, B., 2000, "Channel Height Effect on Heat Transfer and Friction in a Dimpled Passage," American Society of Mechanical Engineers (ASME), International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, Indianapolis, Indiana, 99-GT-163.
- (4) Mahmood, G. I., Hill, M. L., Nelson, D. L. and Ligrani, P. M., 2000, "Local Heat Transfer and Flow Structure on and above a Dimpled Surface in a Channel," American Society of Mechanical Engineers (ASME), Proceedings of ASME TURBO EXPO 2000, Munich, Germany, 2000- GT-230.
- (5) Moon, S. W. and Lau, S. C., 2002, "Turbulent Heat Transfer Measurements on a Wall with Concave and Cylindrical Dimples in a Square Channel," American Society of Mechanical Engineers (ASME), Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002, Amsterdam, Netherlands, GT-2002-30208.
- (6) Griffith, T. S., Luai Al-Hadhrami, and Han, J. C., 2002, "Heat Transfer in Rotating Rectangular Cooling Channels (AR=4) with Dimples," American Society of Mechanical Engineers (ASME), Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002, Amsterdam, Netherlands, GT-2002-30220.
- (7) Mahmood, G. I. and Ligrani, P. I., 2002, "Heat Transfer in a Dimpled Channel: Combined Influences of Aspect Ratio, Temperature Ratio, Reynolds Number, and Flow Structure," Elsevier Science Ltd, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.45, pp. 2011-2020.
- (8) Wang, Z., Yeo, K. S. and Khoo, B. C., 2003, "Numerical Simulation of Laminar Channel Flow over Dimpled Surface," 16th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference 23-26 June 2003, Orlando, Florida, AIAA 2003-3964, pp. 1-11.
- (9) Burgees, N. K. and Nigrani, P. M., 2004 "Effects of Dimple Depth on Nusselt Numbers and Friction Factors for Internal Cooling in a Channel," American Society of Mechanical Engineers (ASME), Proceedings of ASME TURBO EXPO 2004, Vienna, Austria, GT-2004-54232.
- (10) Khalatov, A., Byerley, A., Ochoa, D. and Min, S. K., 2004, "Flow Characteristics within and Downstream of Spherical and Cylindrical Dimple on a Flat Plate at Low Reynolds 2004 Power for land, Sea, and Air, June 14-17, Vienna, Austria, GT2004-53656, pp. 1-6
- (11) Ligrani, P. M., Burgess, N. K. and Won, S. Y., 2004, "Nusselt Numbers and Flow Structure on and above a Shallow Dimpled Surface Within a channel Including Effects of Inlet Turbulence Intensity Level," Proceedings of ASME Turbo Expo 2004 Power for Land, Sea, and Air June 14-17, Vienna, Austria, GT2004-54231, pp. 1-13.
- (12) Shin, S., Lee, K. S., Park, S. D. and Kwak, J. S., 2009, "Measurement of the heat transfer coefficient in the dimpled channel: effects of dimple arrangement and channel height," Journal of Mechanical Science and Technology, 23 pp. 624-630.
- (13) F. P. Incropera and D. P. DeWitt, 2001, Heat and mass transfer, 5th edition, John Wiley & Sons, INC.
- (14) S. Wagner, M. Kotulla, P. Ott, B. Weigand, and V. von Wolfersdorf, 2005, "The transient liquid crystal technique: Influence of surface curvature and finite wall thickness", Journal of Turbomachinery, 127 pp. 175-182
- (15) Moffat. R. J, 1988, "Describing the Uncertainties in Experimental Results". Journal of Experimental Thermal and Fluid Science, 1, pp. 3-17.