

## 딴플이 설치된 회전 유로에서의 열전달 계수 분포 측정 연구

박승덕\* · 이기선\* · 전창수\*\* · 곽재수\*\*† · 전용민\*\*\*

### Measurement of the Detailed Heat Transfer Coefficient in the Rotating Dimpled Rectangular Channel

Seoung Duck Park\*, Ki Seon Lee\*, Chang Soo Jeon\*\*, Jae Su Kwak\*\*†, Youngmin Jun\*\*\*

*Key Words* : 딴플(dimple), 회전유로(rotating channel), Transient liquid crystal technique(천이액정법), Thermal performance factor(열성능계수), Twin vortex(쌍와류)

#### ABSTRACT

The detailed heat transfer coefficient on a rotating dimpled channel were measured using the transient liquid crystal technique. The channel height to dimple diameter was 2, dimple center distance to dimple diameter was 1.5 and channel aspect ratio was 4. Tested Reynolds number based on the channel hydraulic diameter was varied from 15000 to 35000 and corresponding rotation number was ranged from 0.026 to 0.057. Results showed that the Coriolis force by rotation enhanced the heat transfer coefficient on the trailing surface. As the Reynolds number increased, i.e. rotation number decreased, the heat transfer coefficient increased and the thermal performance factor decreased.

#### 1. 서론

가스터빈의 출력과 효율을 증대시키기 위해 터빈 입구 온도는 증가하는 추세에 있다. 최근 가스터빈의 터빈 입구 온도는 재료의 허용한계온도 이상이며, 이로 인해 발생하는 열부하와 열응력으로부터 터빈 블레이드의 요구수명을 만족시키고 필요한 내구성을 유지하기 위해 오랜 기간에 걸쳐서 여러 가지 냉각기법에 대한 연구가 진행 되어왔다. 터빈 블레이드 내부 냉각 기법으로는 충돌 냉각법(impingement cooling)과 립(rib)등을 이용한 요철 냉각법, 딴플(dimple) 냉각법, 편 내부 냉각기법 중에서 딴플을 이용한 냉각법은 내부

유로 표면에 가공된 딴플이 유동을 교란하여 열전달을 증진시키는 방법으로, 요철 등을 사용한 경우와 비교할 때 낮은 압력손실로 비등한 열전달 증진을 얻을 수 있어 최근 들어 활발한 연구가 진행되고 있다.

Mahmood와 Ligrani<sup>(2)</sup>는 딴플이 설치된 정지 덕트에서 채널의 높이와 입구온도를 변화시켜가며 레이놀즈수에 따른 열전달 증진의 연구를 수행하였다. Moon과 Lau<sup>(3)</sup>는 원형과 실린더 모양의 딴플에 대해 딴플 간격에 대한 지름비, 지름에 대한 딴플의 깊이비에 따른 평균 열전달 계수와 압력 손실을 연구하였다. Moon 등<sup>(4)</sup>은 딴플이 설치된 정지된 유로에서 천이액정법(transient liquid crystal technique)을 이용하여 국부적인 Nusselt수를 제시하였고, 유로의 높이가 딴플이 설치된 유로의 열전달과 압력 손실에 미치는 영향을 연구하였다. 최근 Griffith 등<sup>(5)</sup>은 딴플이 설치된 회전하는 유로에서 회전하는 경우와 정지된 경우에 대한 평균 Nusselt수를 측정하였다. 이들은 회전수를 550rpm

\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 대학원

\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

† 교신저자, E-mail: jskwak@kau.ac.kr

\*\*\* 한국항공우주연구원 KHP 개발실

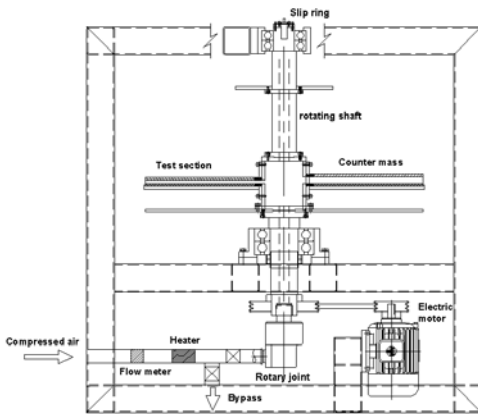


Fig. 1 Schematic of test facility

으로 고정하고, 유로의 상대적인 회전 각도와 레이놀즈수가 평균 Nusselt수에 미치는 영향을 연구하였다.

앞서 언급한 기존의 연구는 대부분 딴플이 설치된 정지된 유로에서 딴플의 배치나 형상 등이 열전달 계수에 미치는 영향을 연구하였다. 회전하는 터빈 로터 블레이드 내부 냉각에 딴플을 적용하기 위해서는 딴플이 설치된 회전 유로에서의 상세한 열전달 계수 분포 정보가 필요하다. 하지만 문헌에 공개된 실험 데이터는 평균 열전달 계수만을 제시하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 친이액정법(transient liquid crystal technique)을 이용하여 딴플이 설치된 회전 유로에서의 상세한 열전달 계수 분포를 측정하였다. 이를 위해 딴플이 설치된 유로를 500 rpm으로 회전시키며 레이놀즈수를 변화시켜서 여러 가지 회전수(rotation number)에 대한 열전달 계수 분포를 측정하였다.

## 2. 실험 장치

Fig. 1은 실험 장치의 개략도를 나타낸 것으로 실험 장치는 블로어, 공기 히터, 신호 전송을 위한 슬립링, 유동 방향 전환을 위한 2개의 솔레노이드 밸브, 전기 모터, 유량계 등으로 구성되어 있다. Fig. 2는 시험부를 나타낸 것으로 유로의 한 면(뒷면, trailing surface)에만 딴플을 제작하였고 반대면(앞면, leading surface)에는 압력 손실과 주유동 온도 측정용 센서를 위한 홀을 제작하였다. 주기적으로 완전 발달된 유동에서 딴플의 열전달 증진 효과를 연구하기 위해 총 16 열의 딴플을 설치하였으며, 열전달 계수 측정은 Fig. 2에 나

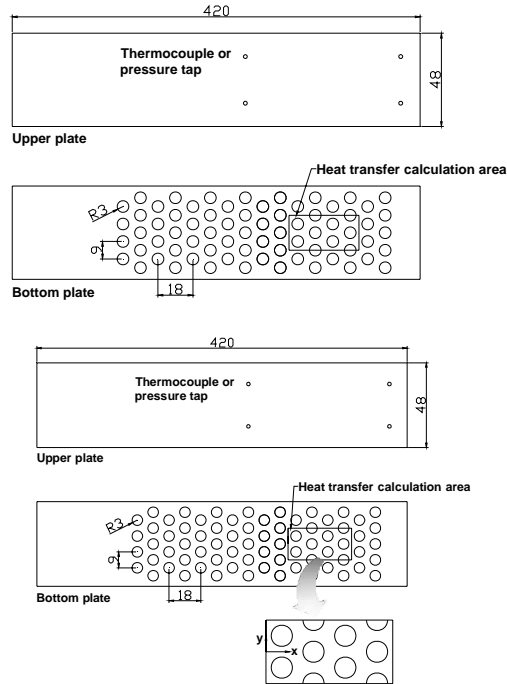


Fig. 2 Configuration of test section

타난 것처럼 11 번째와 14 번째 딴플 열 사이에서 측정하였다.

시험부는 10 mm 두께의 투명 폴리카보네이트로 제작되었다. 딴플의 직경은 6 mm, 깊이는 2 mm이며 유로의 높이는 12 mm, 폭은 48 mm로 유로의 종횡비는 4, 딴플 깊이 대 직경 비는 0.33, 유로 높이 대 딴플 직경 비는 2이다. 유로 수력 직경에 대한 레이놀즈수를 15,000에서 35,000으로 변화시키며 실험을 수행하였으며, 각 레이놀즈수에 해당하는 식 (1)로 정의되는 회전수(rotation number),  $R_o$ 는 0.057에서 0.026으로 변화되었다.

$$R_o = \frac{\omega D}{V} \quad (1)$$

여기서,  $\omega$ 는 각속도,  $D$ 는 유로의 수력직경이다. 유로는 딴플이 설치된 면이 뒷면(trailing surface)이 되도록 회전시키며 실험을 수행하였다. 본 연구에서의 회전수는 실험 장치의 제한에 의해 실제보다 낮은 회전수에서 실험되었고, 실제 가스터빈 블레이드 냉각 유체의 회전수는 대략 0.05에서 2의 범위를 가진다.

천이액정법을 이용한 열전달 실험에서는 압축 공기가 히터에 의해 원하는 온도로 가열될 때까지 외부로 바이패스 시키고, 공기가 충분히 가열되면 솔레노이드 밸브를 작동시켜 시험부로 유입되도록 하였다. 열전달 계수 측정을 위해 검은색 페인트와 액정(35C1W, Hallcrest)을 딴플이 제작된 면에 도포하였고, 액정의 색상 변화와 주유동의 온도 변화는 시험부와 같이 회전하는 디지털 CCD 카메라와 데이터 획득 장치를 통해 컴퓨터에 저장되었다. 영상처리 절차와 천이액정법으로 열전달 계수를 계산하는 방법은 Shin 등<sup>(6)</sup>에 자세하게 설명되었다.

### 3. 열전달 계수 측정 이론

천이액정법은 시험부 표면을 1차원 반무한 고체로 가정하고 주유동의 속도나 온도에 급격한 변화를 주어 표면 온도가 초기 온도에서 정해진 표면 온도까지 변하는데 걸린 시간을 이용하여 열전달 계수를 계산한다. 1차원 열전도 방정식, 초기조건과 경계조건은 다음과 같다.

$$k_w \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho_w c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

$$\text{at } t=0, T=T_i \quad (3)$$

$$\text{at } x=0, -k_w \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_m) \quad (4)$$

$$\text{as } x \rightarrow \infty, T=T_i \quad (5)$$

주유동의 온도가 시간에 따라 변할 경우, 변화를 식 (6)과 같이 n차 다항식으로 나타낼 수 있다.

$$\theta_m = T_m - T_i = \sum_{n=1}^N a_n \frac{t^{n-1}}{\Gamma(n)} \quad (6)$$

여기서  $N=n+1$

$n$ : 다항식의 차수

$\Gamma(n)$ : 감마 함수

$a_n$ : n차 다항식의 계수

표면(x=0)에서 시간에 따른 온도의 엄밀해는 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(7)</sup>

$$\begin{aligned} \theta_m &= T_m - T \\ &= \sum_{n=1}^N a_n \left[ \sum_{m=1}^n \frac{1}{\beta_p^{2(m-1)}} \frac{t^{n-m}}{(n-m)!} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\beta_p^{2(n-1)}} e^{t\beta_p^2} \text{erfc}(\beta_p \sqrt{t}) \right] \\ &\quad - \sum_{m=1}^n \frac{1}{\beta_p^{2(m-1)}} \frac{t^{n-m}}{(n-m)!} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{여기서, } \beta_p = \frac{h\sqrt{\alpha}}{k}$$

$\alpha$ : 시험부의 열확산도

$k$ : 시험부의 열전도도

$t$ : 천이 시간

$h$ : 열전달 계수

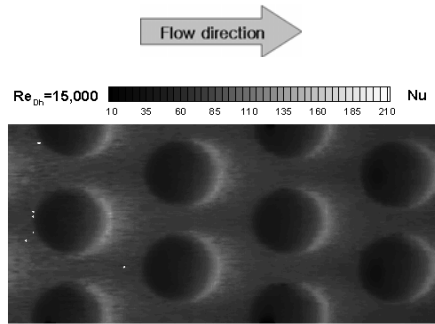
시험부 표면에 도포된 액정의 색상 변화를 이용하여 초기온도( $T_i$ )부터 미리 정한 온도( $T_w$ )가 될 때까지 걸린 시간을 이미지 프로세싱 기법으로 구하면 식 (7)로 열전달 계수를 계산할 수 있다. 주유동의 온도( $T_m$ )는 Fig. 2에 나타난 위치에 설치된 총 4개의 T-타입 열전대로 측정하였고, 측정된 온도는 식(6)을 이용하여 다항식으로 커브 피팅되었다.

본 연구에서 사용된 천이액정법은 시험부를 1차원 반무한 고체로 가정한 후에 열전달 계수를 구하는데, 딴플의 테두리와 같은 모서리 부근에서는 2차원 열전달로 인해 측정 오차가 발생할 것으로 판단된다.

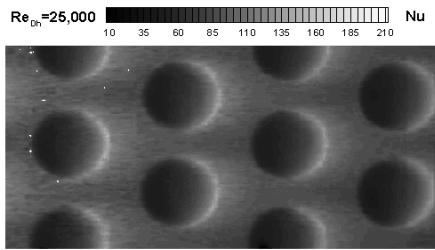
요철이나 딴플과 같이 유동 교란을 이용한 열전달 증진법은 압력 손실을 동반하게 된다. 열전달 증가와 압력 손실을 동시에 고려하여 열전달 증진법의 상대적인 효율을 비교하기 위한 열성능 계수는 식 (8)과 같이 정의되었다.

$$TP = \frac{\overline{Nu_{D_p}} / Nu_{D_p0}}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (8)$$

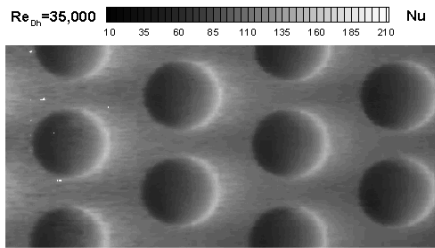
식 (8)에서  $f_0$ 는 매끈한 관에서 완전 발달한 난류 유동에 대한 마찰 계수 이고  $f$ 는 측정된 압력차를 이용하여 구한 Darcy 마찰 계수이다.  $Nu_{D_p0}$ 는 같은 수력 지름을 갖는 매끈한 관에서의 완전 발달한 난류 유동이 Nusselt 수이고,  $Nu_{D_p}$ 는 측정된 Nusselt 수이다. 딴플이 설치된 유로에서의 압력 손실은 Fig. 2에 나타난 위치에서 총 4개의 압력 탭에서 측정되었고, 식 (9)를



(a)  $Re_{Dh} = 15000, Ro = 0.057$

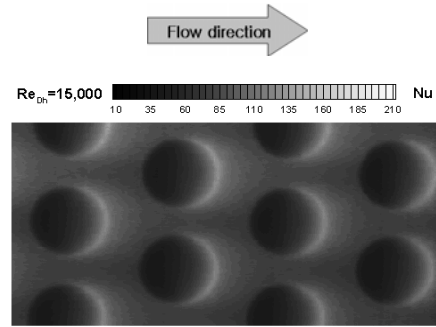


(b)  $Re_{Dh} = 25000, Ro = 0.036$

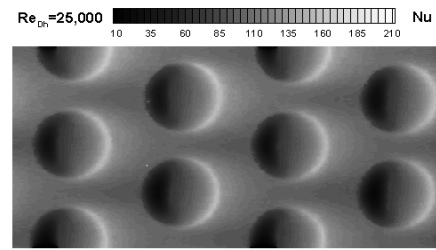


(c)  $Re_{Dh} = 35000, Ro = 0.026$

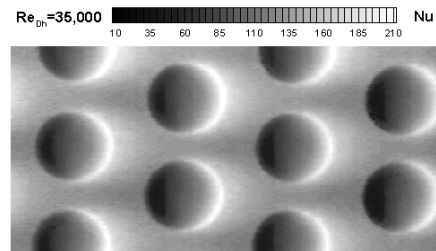
Fig. 3 Nusselt number distribution (stationary)



(a)  $Re_{Dh} = 15000, Ro = 0.057$



(b)  $Re_{Dh} = 25000, Ro = 0.036$



(c)  $Re_{Dh} = 35000, Ro = 0.026$

Fig. 4 Nusselt number distribution (rotation, trailing surface)

이용하여 마찰계수,  $f$ 를 계산하였다.  $f_0$ 는 식 (10)으로 계산하였다.<sup>(8)</sup>

$$f = \frac{-(\Delta p / \Delta x) D_h}{\rho_m u^2 / 2} \quad (9)$$

$$f_0 = [0.79 \ln(Re_{D_h}) - 1.64]^{-2} \quad (10)$$

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

평균 Nusselt 수는 식 (11)과 같이 정의 되고  $Nu_{D_h,0}$ 는 식 (12)로 계산되었다.<sup>(8)</sup>

$$\overline{Nu}_{D_h} = \frac{\overline{h} D_h}{k_m} \quad (11)$$

$$Nu_{D_h,0} = \frac{(f_0/8)(Re_{D_h} - 1000)Pr}{[1 + 12.7(f_0/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)]} \quad (12)$$

for  $0.5 < Pr < 2000$   
 $3000 < Re_{D_h} < 5 \times 10^6$

#### 4. 실험결과

Fig. 3은 정지 유로에서 레이놀즈수에 변화에 따른 딴플과 그 주변의 Nusselt수 분포를 나타낸 것으로, 레이놀즈수가 증가할수록 전체적인 열전달 계수는 증가하는 경향을 보였다.

딴플 내부의 상류에서는 재순환 영역의 생성으로 인해 낮은 열전달을 보였으며 딴플의 외부의 하류에서는 유동의 재부착과 쌍와류(Twin vortex)의 영향으로 상대적으로 높은 열전달 계수가 관찰되었다.

Fig. 4는 회전하는 경우 딴플이 설치된 뒷면(trailing surface)의 열전달 계수 분포를 나타낸 것으로, 유동의 재순환과 재부착에 의해 나타나는 낮고 높은 열전달 계수 분포를 잘 나타내고 있다. Fig. 3과 비교할 때, 동일한 레이놀즈수에서 회전하는 경우가 정지된 유로에 비해 큰 열전달 계수를 가지며, 이는 유로가 회전함에 따라 발생하는 코리올리력(Coriolis force)과 원심부력(rotational buoyancy force)의해 발생한다. 본 연구에서 코리올리력은 딴플이 설치된 뒷면으로 유동을 치우치게 하고, 이에 의해 딴플이 설치된 면의 열전달 계수가 증가하게 된다. 또한 증가된 열전달 계수는 딴플이 설치된 면의 유동 온도를 앞면(leading surface) 근처 유동에 비해 낮게 만들고, 이에 의해 뒷면 근처의 공기 밀도가 커지게 된다. 큰 밀도의 유동은 원심력에 의해 더 빨리 반경 방향으로 가속되기 때문에 뒷면 근처의 유동은 더욱 가속된다. 따라서 본 연구에서는 코리올리력과 원심부력이 딴플이 설치된 뒷면의 열전달 계수를 증가시키는 효과를 나타낸다. 본 연구의 경우, 유동의 온도가 실제보다 매우 낮은 범위 (60 ℃ 이하)이므로 원심부력보다는 코리올리력에 의한 영향이 보다 클 것으로 예상된다.

Fig. 5는 딴플의 중심을 따라 거리에 따른 유동 방향의 Nusselt수 분포를 나타낸 것이다. 모든 경우에서 유동의 재순환과 재부착에 의해 열전달 계수의 주기적인 증감을 볼 수 있으며, 최소 열전달 계수는 딴플 내부의 상류에 위치하는 재순환 영역에서 발생하고 최대 열전달 계수는 딴플 하류의 재부착 영역에서 발생한다. 딴플 내에서는 재순환 영역의 열전달 계수에 비해 재부착에 의해 증가된 열전달 계수가 6배 이상의 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 정지된 유로와 회전 유로 모두 레이놀즈수가 증가할수록 열전달 계수는 증가하고 있으며, 각 레이놀즈수에 대해 회전하는 경우가 정지된 유로에 비해 높은 열전달 계수 값을 나타낸다.

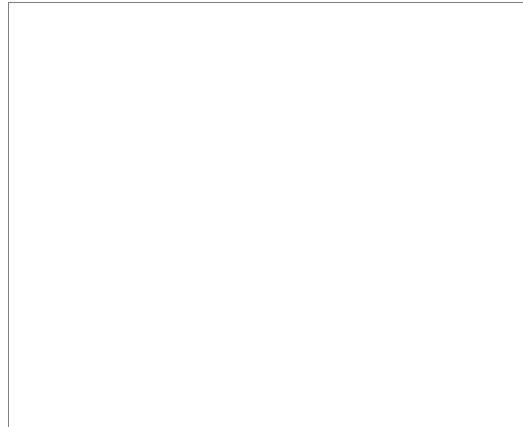


Fig. 5 Local Nusselt number distribution along the center line of dimple

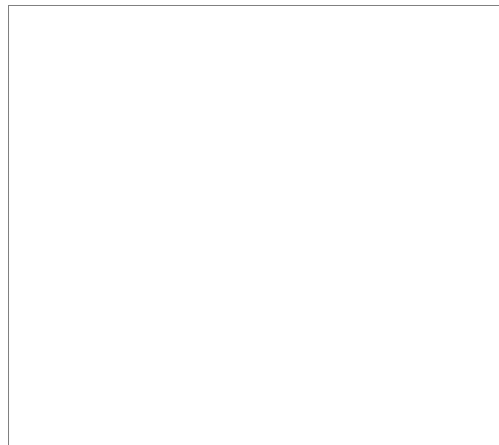


Fig. 6 Average Nusselt number ratio

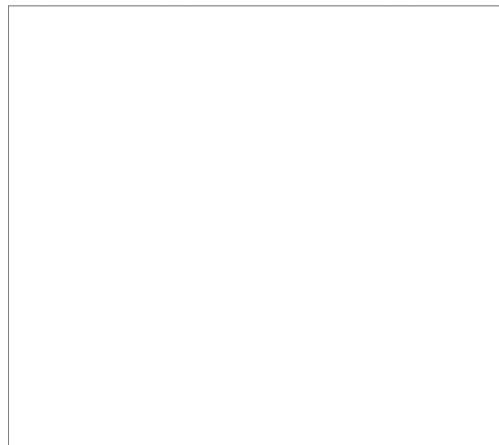


Fig. 7 Thermal performance factor

Fig. 6은 식(12)에 의해 계산된 매끈한 유로에서의 열전달 계수와 실험으로 측정된 딴플 유로의 Nusselt 수 비를 나타낸 것이다. 정지된 경우, Nusselt 수 비는 레이놀즈수가 증가할수록 감소하는 경향을 보였지만, 회전하는 유로에서는 레이놀즈수의 영향을 크게 받지 않았다. 이는 레이놀즈수 증가에 따른 유속의 증가로 코리올리력과 원심부력의 크기가 커지게 되고, 이에 의해 딴플이 설치된 뒷면에서의 열전달 계수가 증가하기 때문이다.

Fig. 7은 식(8)로 계산된 열성능 계수를 나타낸 것으로, 두 경우 모두 1보다 큰 값을 가지며 레이놀즈수가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 또한 회전하는 경우가 정지된 경우보다 높은 열전달 계수로 인해 보다 높은 열성능 계수를 보였다.

## 5. 결론

이 논문에서는 천이액정법을 이용하여 딴플이 설치된 회전하는 유로에서 열전달 계수를 측정하였다. 실험은 회전수를 500 rpm으로 고정하고 레이놀즈수를 15,000, 25,000 그리고 35,000로 변화시키며 수행하였다. 각 경우에서 열전달 계수와 압력손실 측정을 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 정지된 유로와 회전하는 유로 모두에서 레이놀즈수가 증가함에 따라 열전달 계수는 증가하였다.
- 2) 같은 레이놀즈수에서 회전하는 유로의 뒷면에서의 열전달 계수는 정지된 유로에 비해 높게 나타났으며, 이는 코리올리력과 원심부력에 의한 것이다.
- 3) 압력강하와 열전달 계수를 통해 산출한 열성능 계수는 모두 1보다 크게 나타났으며 회전하는 유로가 정지된 유로보다 높은 경향을 보였다.

본 연구에서는 하나의 딴플 형상과 배치, 깊이, 유로 종횡비에 대한 연구를 수행하였고, 회전의 유무가 딴플이 설치된 뒷면에서의 열전달 계수와 열성능 계수에 큰 영향을 끼치는 것을 확인하였다. 추후 다양한 실험 조건에서의 연구를 통해 딴플의 형상이나 배치를 최적화한다면 보다 높은 열성능 계수를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술 연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2007-331-D00068) 및 지식경제부 한국형헬기 민군겸용구성품 개발사업 (KARI주관)의 지원으로 수행된 연구 결과의 일부입니다.

## 참고문헌

- (1) Han, J. C., Dutta, S., and Ekkad, S. V., 2000, *Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology*, Taylor & Francis, New York.
- (2) Mahmood, G. I. and Ligrani, P. M., 2002, "Heat transfer in a dimpled channel: combined influences of aspect ratio, temperature ratio, Reynolds number, and flow structure," *International journal of heat and mass transfer*, pp. 2011~2020.
- (3) Moon, S. W. and Lau, S. C., 2002, "Turbulent heat transfer measurements on a wall with concave and cylindrical dimples in a square channel," *ASME paper GT-2002-30208*.
- (4) Moon, H. K., O'Connell, T. and Glezer, B., 2000, "Channel height effect on heat transfer and friction in a dimpled passage," *Journal of engineering for gas turbines and power*, Vol. 122, pp. 307~313.
- (5) Griffith, T. S., Hadhrami, L. A., Han, J. C., 2002 "Heat transfer in rotating rectangular cooling channels (AR=4) with dimple," *ASME paper GT-2002-30220*.
- (6) Shin, S. M., Jeon, C. S., Kwak, J. S., and Jung Y. W., 2007, "Improvement of accuracy in evaluating hue change time in the hue detection based transient liquid crystals technique," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 31, no. 11 pp. 918~915.
- (7) Kwak, J. S., 2008, "Comparison of Analytical and Superposition Solutions of the Transient Liquid Crystal Technique," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 22, no. 2, pp. 290~295.
- (8) F. P. Incropera and D. P. DeWitt, 2001, *Heat and mass transfer*, 5th edition, John Wiley & Sons, INC.