論文

이중 충돌 제트를 갖는 내부 유로의 열전달 계수 측정

곽재수*

Measurement of Heat Transfer Coefficient in a Duct with Double Imingement Jets

Jae Su Kwak*

ABSTRACT

Averaged heat transfer coefficients in the trailing edge model of a turbine blade with double impingements were measured using transient liquid crystals technique and conventional copper plate-thermocouple technique. The detailed distributions of heat transfer coefficients by transient liquid crystals technique were also presented. Results showed that increased heat transfer coefficient due to the inpingements and the averaged heat transfer coefficients increased as Reynolds number increased. Results by transient liquid crystals technique showed that the heat transfer coefficient strongly depended on the main stream temperature used in heat transfer coefficient calculation. The averaged heat transfer coefficients measured by different methods showed similar trend as Reynolds number changed, but the value varied up to 40% depending on the measurement technique.

Key Words : Convective Heat Transfer(대류 열전달), Measurement Technique(측정방법), Transient Liquid Crystals Technique(천이액정법), Impingement Jet(충돌 제트)

Ⅰ. 서 론

최근의 가스터빈은 출력과 시스템 효율을 증가시키기 위해 가스터빈의 입구 온도를 점점 증가시키는 경향이 있어 터빈의 각 부품들이 겪는 열부하도 점점 커지고 있다. 따라서 고온 환경 속에서 작동하는 터빈 블레이드의 수명을 연장하기 위해 여러 가지 냉각 방법이 사용되고 있다. 그림 1은 대표적인 터빈 블레이드의 내부 냉각 방법을 나타낸다. 블레이드 내부의 대표적인 냉각 방법으로는 앞전(leading edge)에서의 충돌 제트를 이용한 냉각법(Impingement cooling), 내부 유로에 요철을 설치하여 유동의 난류 강도를 증가시켜 열전달율을 증가시키는 냉각법(rib

* 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
연락저자, jskwak@hau.ac.kr
경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

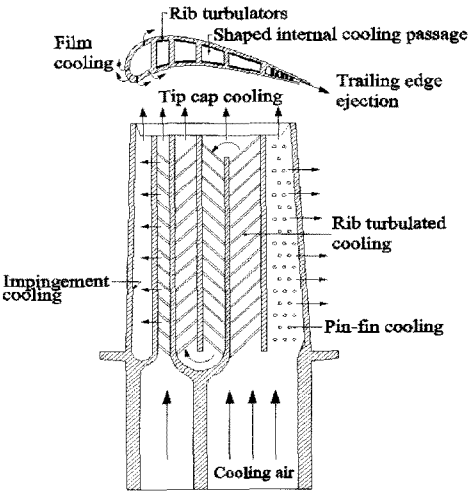


그림 1 현대의 가스터빈 블레이드에 사용되는 내부 냉법 (Kwak등 [1])

turbulated cooling), 그리고 뒷전(trailing edge)에서의 핀(pin)을 사용한 냉각법(pin-fin cooling)등이 사용된다. 자세한 터빈 냉각 기법은 Han등[2]에 설명되었다. 최근에는 블레이드 뒷전에 충돌 제트를 이용한 새로운 냉각 방법이 제안되어 연구되고 있다. Moon등[3]은 정사각형 유로에 구멍이 뚫린 두 개의 구조물을 설치하고 홀의 크기와 구조물의 배치를 변화시키면 구조물 사이에서의 표면 열전달 계수를 정상상태 액정법(steady state liquid crystals technique)으로 측정하였다. 그 결과, 홀을 통과한 유동의 제트에 의한 높은 열전달 계수 영역이 관찰되었고, 구조물이 없는 경우에 비해 구조물을 설치한 경우의 열전달 계수는 현저히 증가하였으나 압력 손실 또한 증가하는 것을 보였다. 그들은 구조물의 배치나 홀의 크기 등에 의해 열전달 계수와 압력 손실 값의 차이가 많이 발생하므로 더 많은 연구가 필요하다는 결론을 얻었다.

본 논문에서는 이중 충돌 제트를 갖는 내부 유로에서의 열전달 계수의 분포를 천이 액정법(transient liquid crystals technique)으로 측정하고, 천이 액정법으로 구해진 평균 열전달 계수를 구리판-열전대 방법으로 구해진 평균 열전달 계수와 비교하였다.

II. 실험 방법

2.1 천이액정법

액정(liquid crystals)은 온도 변화에 따라 그 분자 배열을 달리하며 색깔을 변화하는데, 이 색깔 변화는 가역적이고 반복적이므로 표면 온도 측정이나 대류 열전달 계수 측정에 많이 사용되고 있다. 액정을 이용한 표면 대류 열전달 계수의 측정법은 측정면 전체의 열전달 계수나 온도를 한꺼번에 측정할 수 있으므로 전통적인 열전대를 이용한 방법에 비해 공간 해상도가 높다는 장점이 있다. Baughn[4], Ireland등[5], Ekkad등[6]등은 액정을 이용하여 대류 열전달 계수를 측정하는 다양한 방법과 그 예를 보여주고 있다. 액정을 이용한 열전달 계수의 측정 방법에는 크게 정상상태 액정법(steady state liquid crystals method)과 천이 액정법 (transient liquid crystals method)로 나눌 수 있다. 정상상태 액정법(steady state method)은 액정이 코팅된 시험부에 일정한 열유속을 가하고 그 때의 표면 온도를 액정을 이용하여 측정해서 식(1)을 이용하여 열전달 계수를 측정하는 방법이다.

$$q'' = h(T_m - T_w) \tag{1}$$

정상상태 액정법에서는 시험부 표면에 일정한 열유속이 공급되어야 하기 때문에 일정유속을 공급할 수 있는 평판형 히터가 사용된다. 이때, 시험 표면 반대쪽으로의 열 손실을 정확히 고려하여야 하고, 평판이 아닌 형상에 대해서는 일정 열유속 조건을 얻기 힘들다는 단점이 있다. 천이 액정법은 시험부 표면을 일차원 반무한 고체(one dimensional semi-infinite solid model)로 가정한 후, 주유동 온도의 급격한 변화나 주유동 자체의 급격한 변화를 주어 열전달 계수를 구한다. 따라서 일정 열유속 조건을 필요로 하지 않기 때문에 곡면을 갖는 표면 등의 열전달 계수 측정 실험에 많이 사용되고 있다. 천이액정법을 이용한 대류 열전달에 측정에 사용되는 기본방정식, 초기조건, 경계조건은 다음과 같다

$$k\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \tag{2}$$

$$at\ t = 0,\ T = T_i \tag{3}$$

$$at\ x = 0,\ -k\frac{\partial T}{\partial x} = h(T_w - T_m) \tag{4}$$

$$as\ x \to \infty,\ T = T_i \tag{5}$$

표면($x = 0$)에서 위 식의 해는 다음과 같다.

$$\frac{T_w - T_i}{T_m - T_i} = 1 - \exp\left(\frac{h^2 \alpha t}{k^2}\right) erfc\left(\frac{h\sqrt{\alpha t}}{k}\right) \tag{6}$$

만약 주유동의 온도가 시간에 따라 변한다면 그 변화를 스텝 변화로 가정하고 Duhamel의 중첩이론(Superposition Theorem)을 사용하여 식(6)을 다음과 표현할 수 있다.

$$T_w - T_i = (T_m - T_i) \times F\left(\frac{h\sqrt{\alpha t}}{k}\right) + \sum_{i=1}^{n}\left[F\left(\frac{h\sqrt{\alpha(t-\tau_i)}}{k}\right)\Delta T_{m,i}\right] \tag{7}$$

여기서, $F(x) = 1 - \exp(x^2) erfc(x)$

ΔT_m = 주유동 온도의 스텝 변화

식 (6)과 (7)에서 표면의 초기온도(Ti), 일정 시간

(t) 경과 후의 표면 온도(Tw), 주유동 온도(Tm), 그리고 시험부의 물성치(α, k)등을 알면 대류 열전달 계수(h)를 계산할 수 있다. 액정의 색깔은 초기 온도 조건(Ti)에서 미리 정해진 색상(hue)에 해당하는 온도(Tw)까지 시간 t 동안 변하게 된다. 천이 액정법은 시험부를 1차원 반무한 고체로 가정하므로, 시험부의 재질은 열전도도가 낮은 아크릴이나 폴리카보네이트 등이 주로 사용된다. 주유동의 급격한 변화는 그림 2에 나타난 바와 같이 미리 예열되어 바이패스 되는 주유동 유체를 밸브 조작을 통해 시험부로 순간적으로 유입시킴으로써 얻을 수 있다. 따라서 주유동의 속도는 영에서 미리 정해진 값으로 급격하게 변화하게 된다. 본 논문에서는 예열된 주유동 공기가 시험부로 유입되면서 주유동의 온도가 시간에 따라 변화하게 되므로 식(7)을 사용하여 대류 열전달 계수를 구하였다.

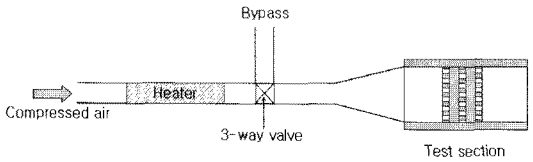


그림 26 시험부의 구성

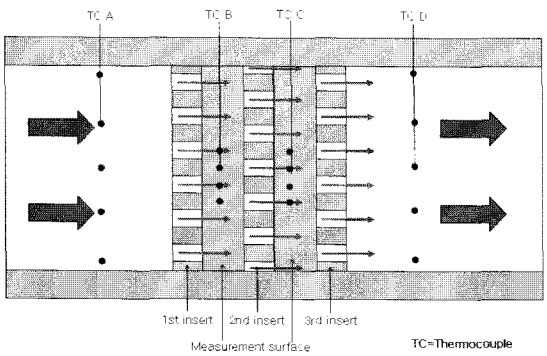


그림 27 천이 액정법을 위한 시험부 (상면도)

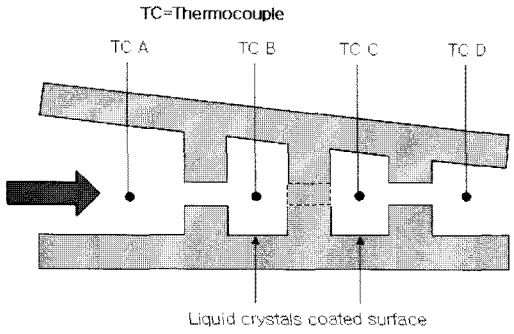


fig. 28 천이 액정법을 위한 시험부 (측면도)

그림 3과 4는 천이 액정법을 위한 실험 장치의 구성을 나타낸다. 시험부는 열전도도가 낮은 아크릴로 제작되었다. 그림 3과 4에서 볼 수 있듯이 시험부는 서로 엇갈려 충돌하는 두 열의 충돌 제트로 구성되어 있다. 상류의 충돌 제트는 하류 제트와 제트 사이에 충돌하게 된다. 실험 과정에서 제트와 제트 사이, 그리고 제트 하류의 온도가 다르게 측정되어 기준이 되는 주유동 온도를 결정하기 위해 여러 위치에서 주유동의 온도를 측정하였다. Chyu등[7]은 천이 액정법을 사용하여 기준 주유동 온도에 따른 열전달 계수의 차이를 연구하였는데, 기준 주유동 온도의 선택에 따라 열전달 계수가 최고 40%까지 차이 날 수 있음을 보였다. 따라서 본 연구에서는 열전달 계수 계산에 필요한 주유동 온도를 측정하기 위해 총 16개의 T 타입 열전대를 상류, 하류, 그리고 각 측정부의 제트 하류 및 제트와 제트 사이에 설치하였다.

그림 3과 4에서 열전대 A와 D는 시험부 상하류의 온도를 측정하고, 열전대 B와 C는 제트 사이의 온도와 제트의 온도를 측정한다. 식(7)에 사용될 주유동 온도는 식(8)과 (9)와 같이 정의하였다. Case 1은 각 시험부에서 측정된 평균 온도를, case 2는 두 시험부 모두 시험부 입출구의 평균온도를 이용하여 열전달 계수를 계산하였다.

$$\text{Case 1}: \quad T_{m1} = T_{B.average}, \text{ 첫 번째 시험부}$$
$$T_{m2} = T_{C.average}, \text{ 두 번째 시험부} \qquad (8)$$

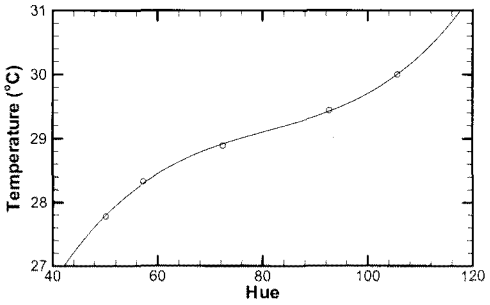
$$\text{Case 2}: \quad T_m = \frac{T_{A.average} + T_{D.average}}{2},$$
첫 번째와 두 번째 시험부 (9)

본 연구에서 열전달 계수 측정을 위해 사용된 액정은 4℃ 온도범위(bandwidth) 액정(R29C4W, Hallcrest)이다. 그림 5는 실험에 사용된 액정의 색상(hue)과 온도의 관계를 나타낸 것이다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 온도와 색상은 단순한(monotonous) 관계를 가지므로 액정의 색상을 측정하면 그림 5의 관계를 이용하여 표면의 온도를 계산할 수 있다. 이 관계는 동일한 액정을 사용하더라도 실험에 사용된 CCD 카메라, 조명의 종류, 조명의 위치 등에 따라 변화하게 된다. 본 연구에는 온도와 색상의 관계를 다음과 같은 다항식으로 나타내어 사용하였다.

$$T = 16.045 + 0.43876H - 5.1344 \times 10^{-3}H^2 + 2.1126 \times 10^{-5}H^3 \quad (10)$$

여기서 H는 액정의 색상, T는 H를 이용하여 계산된 표면온도이다.

액정을 시험부에 살포하기 전에 무광택 검정 페인트(BB-G1, Hallcrest)를 살포하였고 그 위에 액정을 살포하였다. 액정이 충분히 건조된 후, 미리 정해진 양의 압축 공기를 히터를 통해 가열하고 외부로 바이패스 시키게 된다. 공기의 온도가



<그림 29> 액정의 색상과 온도의 관계

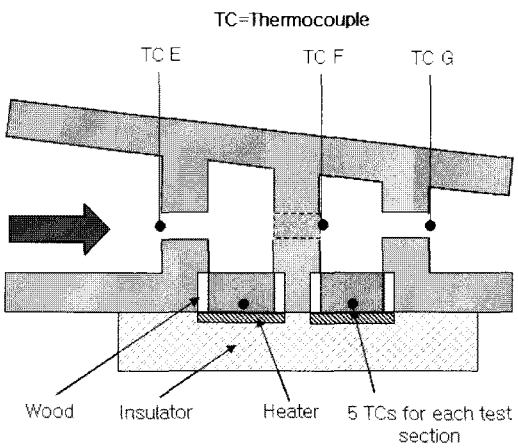


그림 30 구리판-열전대법을 위한 시험부 (측면도)

정상상태가 되면 그림 2에서 나타낸 3방 밸브의 작동을 통해 시험부로 가열된 공기가 갑자기 흐르게 하였다. 이 때의 액정 색깔 변화를 시험부 상부에 설치된 CCD 카메라를 이용, 컴퓨터에 초당 30프레임의 속도로 저장하였다. 컴퓨터에 저장된 모든 이미지 프레임의 각 픽셀에서 색상을 계산하고, 이를 이용하여 초기 온도 조건에서 주어진 색상 값(105)에 해당하는 온도(30℃)까지 변화하는데 걸리는 시간(t)을 계산한 후, 식(7)에 대입하여 각 픽셀에서의 대류 열전달 계수 h를 계산하였다.

2.2 구리-열전대 기법

그림 6은 구리판과 열전대를 이용하여 평균 열전달 계수를 구하기 위한 시험부의 구성을 나타낸다. 평균 열전달 계수 측정을 위해 시험 표면을 열전도도가 높은 구리판으로 제작하였고 구리판 주위는 열전도도가 낮은 나무로 단열하여 주변으로의 열전달을 방지하였다. 구리판 내부에 각 5개의 T 타입 열전대를 설치하여 구리판의 평균 온도를 측정하였다. 구리판 아래에는 포일 히터를 설치하여 구리판을 가열할 수 있도록 하였고, 히터 아래쪽으로의 열손실을 막기 위해 단열재를 설치하였다. 각 시험부에서의 평균 입출구 온도를 측정하기 위하여 첫 번째 제트열 입구와 두 번째 제트열 출구, 그리고 세 번째 제트열 출구에 열전대를 설치하였다.

시험부에서의 평균 열전달 계수는 다음과 같은 식으로 구해진다.

$$\bar{h} = \frac{VI}{A_s(T_w - T_b)} \quad (11)$$

식(11)에서 V와 I는 각각 히터에 공급되는 전압과 전류이고, Tw은 구리판 내의 열전대에 의해 측정된 평균 온도, Tb는 각 시험부 입출구에서 측정된 혼합 평균 온도 (bulk temperature)이다. 시험에서 첫 번째 시험부의 출구 온도와 두 번째 시험부의 입구 온도는 같다고 가정하였다.

III. 실험 결과

그림 7은 천이액정법에 의해 측정된 열전달 계수의 분포를 나타낸다. 앞서 언급한 바와 같이 Case 1은 각 시험부의 평균 온도, case 2는 전체 시험부의 입출구 온도의 평균을 주유동 온도로 하여 식(7)을 이용하여 열전달 계수를 계산하였다. 레이놀즈 수는 제트 홀에서의 속도와 홀의 직경을 이용하여 계산하였다.

그림 7에서 두 경우 모두 제트가 하류의 제트와 제트사이에 충돌된 결과로 나타나는 높은 열전달 계수 영역을 볼 수 있고, 제트의 하류 영역에서 제트와 제트 사이의 영역보다 높은 열전달 계수가 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한, 그림 4

에서 볼 수 있듯이 첫 번째 시험부에서 두 번째 시험부로 갈수록 유로가 좁아짐에 따라 유속이 빨라지기 때문에 이에 의해 두 번째 시험부에서의 열전달 계수가 높은 것을 볼 수 있다. 또한, 두 번째 시험부에서는 첫 번째 시험부에서의 제트 충돌에 의한 난류 강도의 증가도 예상할 수 있으므로, 이에 의해 열전달 계수가 증가 될 것을 예상할 수 있다.

Case 1과 case 2를 비교할 때, 첫 번째 측정면

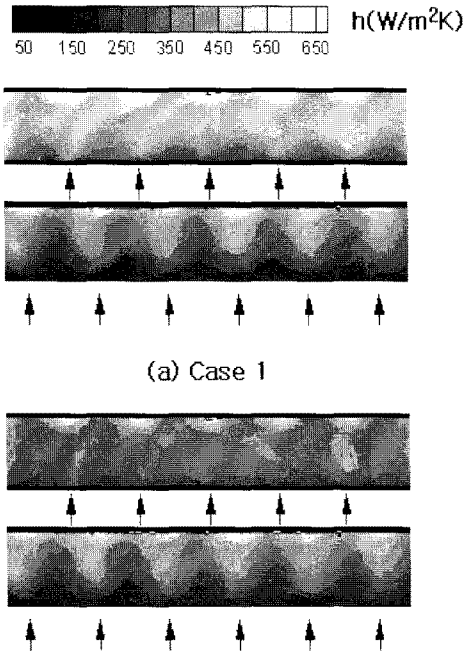


그림 31 열전달 계수의 분포 (Re=30,000)

에서의 열전달 계수의 차이는 크지 않지만 두 번째 측정 평면에서의 열전달 계수 값은 최고 2배 이상 나는 것을 볼 수 있다. 이것은 case 1의 경우에는 주유동의 온도를 각 측정부에서 측정된 평균 온도를 사용하였지만 case 2는 시험부 전체의 입출구에서 측정된 평균 온도를 사용하였으므로 두 번째 시험부에서의 주유동 온도를 case 1보다 과대 평가하여 낮은 열전달 계수를 얻게 된 것이다. 이러한 결과는 천이 액정법을 이용한 열전달 계수 측정은 열전달 계수의 분포를 높은 해상도를 가지고 측정할 수는 있지만, 본 연구와 같이 주유동 온도의 정의를 명확하게 하기 힘들 경우에는 측정된 열전달 계수에 많은 오차가 발생할 수 있음을 보여준다. 이러한 천이 액정법의 약점을 극복하기 위해 상대적으로 실험이 간단하고 오차의 가능성이 낮은 구리판과 열전대를 이용한 시험을 수행하였다. 이 방법은 자세한 열전달 계수의 분포를 알 수 없지만 열전도도가 높은 구리를 사용함으로써 시험부 평면에서의 평균 열전달 계수 값을 구할 수 있다. 이 방법에서도 가열되는 구리판에 의해 주유동이 가열되지만, 구리판에서 공급되는 열량이 많지 않으므로 천이 액정법에 비해서는 주유동 온도의 편차가 심하지

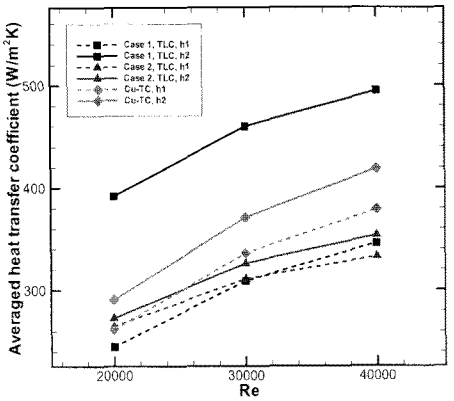


그림 32 레이놀즈수와 각 측정방법에 따른 평균 열전달 계수의 관계

않았다.

그림 8은 천이 액정법과 구리판-열전대 기법으로 측정된 평균 열전달 계수를 나타낸다. 그림 8에서 TLC는 천이 액정법을, Cu-TC는 구리판-열전대 기법을 이용하여 측정된 열전달 계수를 나타내고, h1은 첫 번째 측정부, h2는 두 번째 측정부를 나타낸다. 두 실험 방법 모두 레이놀즈수가 증가할수록 평균 열전달 계수도 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 시험부의 단면적이 하류로 갈수록 작아지고, 첫 번째 시험부에서의 제트 충돌로 인해 증가된 난류강도에 의해 두 번째 시험부의 평균 열전달 계수가 첫 번째 시험부보다 큰 것을 볼 수 있다. 각 측정 방법에 따른 열전달 계수의 차이는 첫 번째 측정부보다 두 번째 측정부가 더 큰 것을 볼 수 있고, 그 차이는 대체로 레이놀즈수가 증가할수록 커지는 것을 볼 수 있다. 또한 case 1의 첫 번째 측정부를 제외한다면 구리판-열전대 기법의 결과에 비해 case 1은 큰 값을, case 2는 작은 열전달 계수를 나타내는 것을 볼 수 있다.

Ⅳ. 결론

본 논문에서는 천이 액정법과 구리판-열전대 기법을 사용하여 이중 충돌 제트를 갖는 내부 유로에서의 대류 열전달 계수를 측정하였다. 실험 결과, 상류의 제트는 하류의 제트와 제트 사이에 충돌하면서 그 주위의 열전달 계수를 증가시켰고, 하류로 갈수록 좁아지는 유로와 증가된 난류 강도로 인해 열전달 계수가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 또한 레이놀즈 수가 증가할수록 열전달 계수의 크기가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 천이 액정법의 결과는 기준이 되는 주유동 온도에 따라 열전달 계수 값이 국부적으로 2배 이상의 차이가 나타날 수 있음을 보여주었다. 따라서 천이 액정법을 사용하여 본 논문과 같이 복잡한 유동 구조를 가져 주유동 온도의 공간적인 편차가 심한 경우에는 기준이 되는 주유동 온도를 결정하는데 주의하여야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1) Kwak, J. S. and Han, J. S., Heat transfer coefficients and film cooling effectiveness on the squealer tip of a gas turbine blade", Transactions of ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 125, 2003, pp.648-657

2) Han, J. C., Dutta, S. and Ekkad, S. V., "Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology", 1999, Taylor & Francis, New York, USA

3) Moon, S. W. and Lau, S. C., "Heat transfer between blockages with holes in a rectangular channel", ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 125, 2003, pp.587-594

4) Baughn, J. W., "Liquid crystal methods for studying turbulent heat transfer", Internatoinal Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 16, 1995, pp. 365~375.

5) Ireland, P. T., Andrew, J. N., Gillespie, D. R. H., Robertson, A. J., "Turbulent heat transfer measurements using liquid crystals", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 20, 1999, pp. 355~367

6) Ekkad, S. V. and Han, J. C., "A transient liquid crystal thermography technique for gas turbine heat transfer measurement", Measurement Science & Technology, v.11 no.7, 2000, pp. 957~968

7) Chyu, M. K., Ding, H., Downs, J. P., Soechting, F. O., "Determination of local heat transfer coefficient based on bulk mean temperature using a transient liquid crystals technique", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 18, 1998, pp. 142-149