

액정을 이용한 대류 열전달 측정 방법의 비교 연구

정기호* · 송기범* · 고기탁* · 김귀순**

A Comparative Study on the Convective Heat Transfer Measurement Technique based on Liquid Crystal

Giho Jeong, Kibum Song, Kitak Ko, Kuisoon Kim

ABSTRACT

There have been numerous experimental studies for heat transfer measurement technique. This study investigates optical methods for measuring local heat transfer coefficient using thermochromic liquid crystal. Transient and steady methods have been utilized to measure local heat transfer coefficient on a cylinder with a cross flow. The steady method is based on the heat-coating technique and two transient methods adopt by-pass technique and insertion technique, respectively. Both techniques of transient method employ heating technique in which the flow is heated by using the electric heater and cooling technique which cools the preheated cylinder. Experimental results indicate that each methods have nearly similar results. Detailed discussions have been made for its own advantages and disadvantages.

초 록

지금까지 많은 열전달 계수의 측정에 관한 연구가 수행되고 있다. 본 논문에서는 액정을 이용하여 국소 열전달 계수를 측정하는 방법을 다루고 있다. 과도방법과 정상방법을 사용하여 실린더 표면의 지역적인 열전달 계수를 측정하였다. 정상상태일 때는 금박막 필름으로 실린더를 코팅하여 실험하였고, 과도방법일 때는 삽입기법과 바이패스 기법으로 각각 실험하였으며, 두 경우 모두 열 풍동을 이용하여 실린더를 가열시키는 방법과 냉각시키는 방법으로 각각 실험하였다. 이와 같은 실험으로 과도방법과 정상방법을 이용하여 실린더표면에서의 대류열전달계수의 측정실험을 수행하고, 각 방법들에 대한 비교분석을 통해 액정을 이용한 열전달 측정방법의 특징들을 살펴보았다.

Key Words : Liquid Crystal (액정), Convective Heat Transfer (대류열전달), Cylinder (실린더)

●2002년 7월 28일 접수 ~ 2002년 9월 30일 심사완료

* 정희원, 부산대학교 항공우주공학과 대학원(Pusan National University, Dept. of Aerospace Eng.)
주연락자, E-mail= gvogyo@hanmail.net 부산시 금정구 장전동 부산대 항공우주공학과

** 정희원, 부산대학교 항공우주공학과(Pusan National University, Dept. of Aerospace Eng.)

기 호 설 명

D	: 실린더 직경 [mm]
$erfc$: 보정에러함수, $1 - erf$
Fr	: Froessling 수, $Nu/Re^{0.5}$
h	: 열전달계수 [W/m ² K]
H	: 실린더 높이 [mm]
n	: 수직방향 [mm]
Nu	: Nusselt 수, hL/k
\ddot{q}_w	: 단위면적당 열플럭스 [W/m ²]
Re	: Reynolds 수, UL/ν
t	: 시간 [sec]
T	: 온도 [K]

그 리 스 문 자

α	: 열확산도, $k/\rho c_p$
β	: 무차원시간, $h\sqrt{(t/k)}$
ν	: 동점성 계수, μ/ρ

하 첨 자

i	: 초기 조건
ref	: 기준 조건
w	: 벽면 조건

1. 서 론

물체 표면에서의 정확한 온도와 열전달 계수의 측정은 대류 열전달 연구의 물리적인 이해에 있어 필수적이며 열전달 계수의 분포에 대한 상세하고 정확한 지식은 높은 온도 범위에서 작동하는 새로운 기계 시스템의 개발이나 설계에 있어 매우 중요한 역할을 하게 된다. 따라서 현재까지 이와 관련된 많은 연구가 진행되고 있다.

이러한 연구들은 일반적으로 과도방법과 정상방법을 이용하여 수행되는데, 과도방법은 비정상 열전달 모델을 설정하는 방법으로 바이패스 기법과 삽입기법이 있다.

바이패스기법을 이용한 연구로는 Clifford et al.(1)이 터빈깃과 베인 냉각유로에서의 열전달 현상을 고찰하였고, Jones and Hippensteele(2)은 가열된 곡면을 냉각하여 열전달계수를 측정하였다.

삽입기법을 이용한 연구로는 Baughn and Yan(3)이 덕트를 삽입하여 덕트내의 열전달계수를 고찰하였으며, Hoffs et al.(4)는 액정나프탈렌 승화법과 thin film gage방법을 이용하여 선형익렬풍동내에서 터빈익렬의 열전달계수의 측정과 수치해석을 시도하였다.

반면 정상방법은 정상상태의 열전달 모델을 설정하여 열전달계수를 측정하는 방법으로서, Mckillop and Baughn(5)은 실린더 표면에서 레이놀즈 수에 따른 열전달 특성을 고찰하였다.

그러나 이러한 기존의 연구들은 표면에서의 국소열전달계수의 측정에만 치중하였으며, 여러 가지 실험방법들을 적용하고 비교하는 논의나 연구는 부족하였다. 따라서, 본 연구에서는 여러 가지의 과도방법과 정상방법을 이용하여 실린더 표면에서의 대류열전달계수의 측정실험을 수행하고, 각 방법들에 대한 비교분석을 통해 액정을 이용한 열전달 측정방법의 특징들을 살펴보았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장비 및 측정

본 연구에 사용된 풍동은 개방형 열풍동으로서, 시험부의 제원은 400(W)×200(H)×1200(L)이고 최대풍속은 30 m/sec이며 시험부의 가로세로비가 작으므로 실린더를 수직으로 설치하였다.

난류강도는 열선풍속계(IFA100, TSI)를 사용하여 측정하였으며, 본 연구에서 수행한 실험의 속도범위에서 0.65~0.83%의변화를 보였다. 시험부에서 피토투브와 디지털 마노미터(FCO12)로 측정된 유속은 벽면근처를 제외한 유동의 전체 단면적에서 균일한 값을 보였다. 열전달 모델은 아크릴로 만들어진 직경 60 mm, 높이 200

mm의 원형 실린더에 액정(R35C1W, Hallcrest)을 도포하여 제작하였다. 실험 종료 후 기록된 액정영상을 미리 정립해 둔 색상과 온도와의 관계를 이용하여 벽면 온도정보로 변환한다. Fig. 1에 본 연구에서 사용된 액정의 색상과 온도와의 관계를 나타내었다.

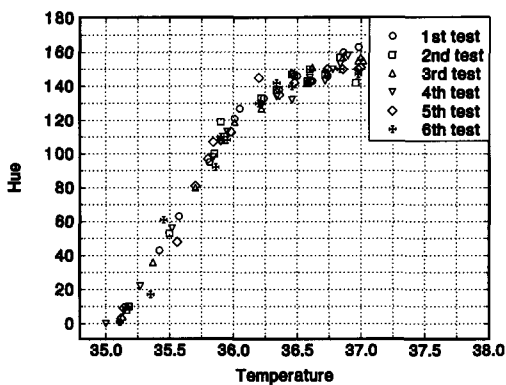


Fig. 1 Hue vs temperature relation.

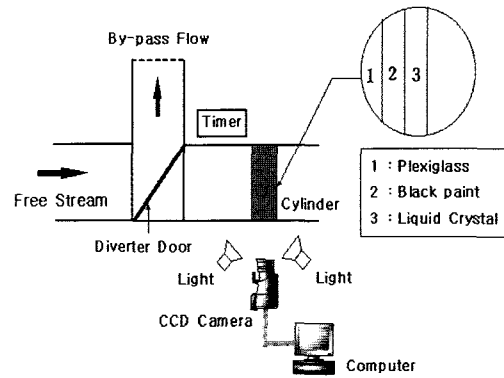
2.2 과도(transient)방법

열전도도가 낮은 물질을 열전달모델로 사용할 때 갑작스런 온도변화를 주면, 순간적으로 벽면에 수직한 방향으로의 온도기울기가 아주 커지며 다른 방향으로의 온도기울기는 상대적으로 무시할 수 있다. 그러므로 열전달모델 내에서는 식(1)의 1차원 비정상 전도방정식에 따라 열전달이 이루어진다.

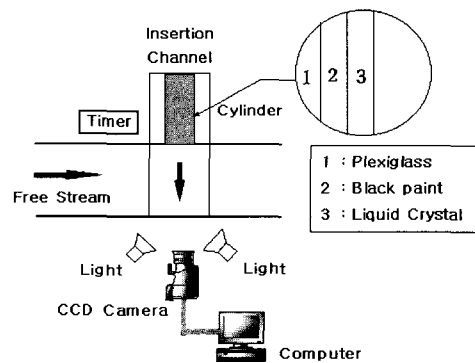
$$\frac{\partial^2 T}{\partial n^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, α 는 열확산도이다.

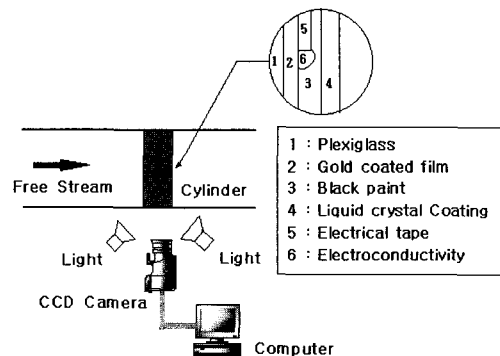
이러한 과도열전달실험에서 유동온도가 T_i 에서 T_{ref} 로 갑자기 변할 때 대류열전달 계수는 벽면온도와 다음과 같은 관계를 가진다.



(a) Transient by-pass method



(b) Transient insertion method



(c) Steady method

Fig. 2 Schematic of the experimental setup.

$$\Theta = \frac{T_w - T_i}{T_{ref} - T_i} = 1 - \exp(-\beta^2) \operatorname{erfc}(\beta) \quad (2)$$

여기서, β 는 무차원 시간이다.

그러므로 과도방법에서는 시간(t)과 표면 온도(T_w)를 측정하면 대류열전달계수를 얻을 수 있으며, 이러한 과도방법에는 바이패스기법과 삽입기법이 있다.

2.2.1 바이패스기법

바이패스기법은 유동의 방향전환을 이용하여 유동온도를 계단형태로 만드는 방법이다. 본 연구에서는 가열된 유동으로 실린더를 가열하는 방법과 가열된 실린더를 대기온도의 유동으로 냉각하는 방법을 사용하였다.

바이패스기법을 위한 실험 구성은 Fig. 2(a)와 같다

2.2.2 삽입기법

삽입기법은 충분히 발달된 자유유동에 실린더를 순간적으로 삽입하여 유동온도를 계단 형태로 만드는 방법이다. 삽입기법에서도 가열과 냉각방법으로 실험을 수행하였다. 삽입기법을 위한 실험구성은 Fig. 2(b)와 같다.

2.3 정상(steady)방법

정상방법은 식(3)으로 정의되는 대류열전달 계수를 구하기 위해 균일한 열플럭스, 벽면온도와 유동온도를 이용하는 방법으로서, 본 연구에서는 균일한 열플럭스를 위해 금박막 필름(gold coated film)을 이용하였다. 열플럭스는 액정영상이 정상상태에 도달했을 때의 공급전압과 전류의 곱이며, 표면온도와 유동온도를 식(3)에 대입하여 대류열전달계수를 구한다. 정상방법을 위한 실험 구성은 과도방법 중 냉각방법의 실험 구성과 동일하며 Fig. 2(c)와 같다.

$$h = \frac{\ddot{q}_w}{T_w - T_{ref}} \quad (3)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기존 연구 결과들과의 비교

레이놀즈 수가 34000일 때, 기존연구자들의 연구와 본 연구에서 수행한 바이패스기법과 삽입기법 그리고 정상방법과의 비교 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 정체점에서부터 박리가 발생하는 $\theta = 90^\circ$ 근방까지는 기존의 연구결과들과 비슷한 결과를 나타내므로 본 연구의 실험결과를 신뢰할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 역압력 구배에 의해 발생한 박리점 이후의 경계층박리의 영향으로 인한 후류의 생성으로 실험 결과들이 일정하지 않고 각기 다른 값을 나타낸다.

3.2 레이놀즈 수의 변화에 따른 비교

Fig. 4는 레이놀즈 수에 따른 바이패스 기법의 결과를 보여주는데 각각의 레이놀즈 수에 대해서도 거의 유사한 결과를 얻었다. 이는 알려진 대로 열전달 현상이 열환경과 유동의 특성에 무관하다는 것을 보여주고 있다. 90° 이후에는 박리점 이후에서 발생한 박리현상에 의한 불규칙한 후류에 의한 실험 결과의 차이 때문에 레이놀즈 수가 34,000인 경우에만 90° 이후의 결과를 표시하였다.

3.3 실험 방법에 따른 비교

Fig. 5는 본 연구에서 수행한 5가지 실험 방법의 결과들을 비교한 것이다. 실험결과를 이용하여 각각의 방법들을 서로 비교하면 다음과 같다.

3.3.1 바이패스기법과 삽입기법의 비교

본 연구에서 사용한 바이패스기법에서는 열풍동의 유동의 방향을 전환할 때 생기는 초기유동의 불균일성에 의해 그리고, 삽입기법에서는 열전달 모델을 열풍동의 시험부 내부로 삽입할 때 발생하는 접선방향의 속도성분에 의해 불균일성이 생긴다. 그러나, 이러한 불균일 유동이 다시 완전발달되기까지의 시간은 실험 시간에 비해 짧으므로 초기유동의 불균일성에 의한 오차는

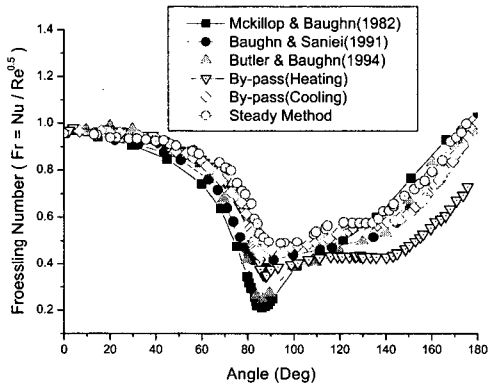
작다고 생각된다.

3.3.2 냉각방법과 가열방법의 비교

바이패스기법과 삽입기법을 적용하기 위해 사용한 2가지 방법중에서 냉각방법의 결과가 가열방법의 결과보다 더 높게 나타난다. 이는 다음과 같은 열 경계조건의 차이에 의한 것으로 생각된다. 냉각방법의 경우에 열전달 모델을 시험부에 장착하여 실험을 시작하기 전까지 열전달

모델의 온도가 하강하게 된다.

본 연구에서는 항온조에서 가열된 열전달 모델을 실험시작 전 까지 단열상자에 보관하여 온도 하강에 의한 오차를 최소화하고자 하였으며 이러한 지연시간은 10초 이내이고 단열을 고려하면 온도하강에 의한 오차는 0.2℃이하이다. 그리고 가열방법의 경우에는 가열포텐셜이 시험부의 벽면에 의해 감소하는 효과가 발생하므로 냉각방법에 비해 열전달 계수가 작게 나타난다.



(a) by-pass and steady method($Re = 34000$)

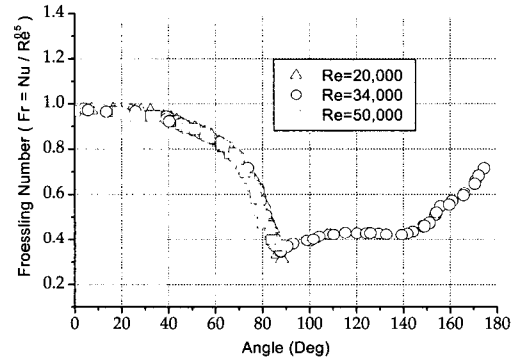
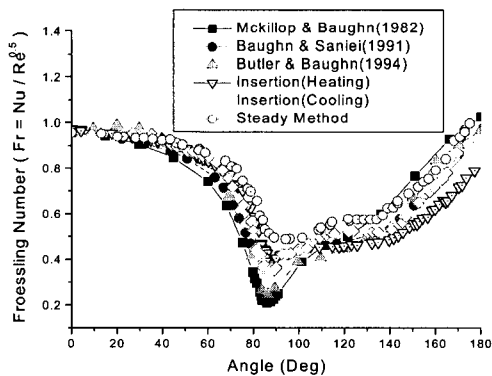


Fig. 4 Comparison of Fr distribution for the various Reynolds number(by-pass method).



(b) insertion and steady method($Re = 34000$)

Fig.3 Comparison of Fr distribution with the previous work.

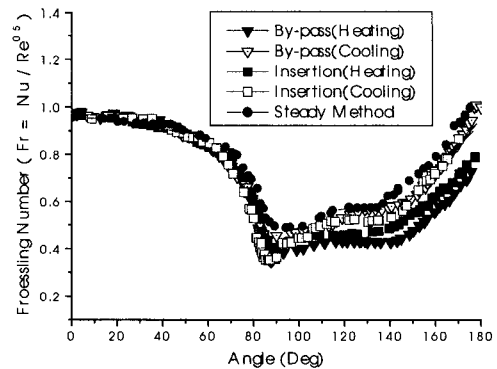


Fig. 5 Comparison of Fr distribution for the various technique($Re = 34000$).

4. 결 론

본 연구에서는 실린더 표면에서의 대류 열전달특성을 과도방법과 정상방법을 이용하여 실험적으로 고찰하고 비교 분석하여 액정을 이용한 열전달 연구의 적용사례로서 참고가 될 수 있도록 하였다. 본 연구에 의한 결론은 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 수행한 5가지 실험방법은 모두 유사한 결과를 보여주고 있으므로 실험 조건과 모델 형상에 알맞은 방법을 선택하는 것이 중요하다.

(2) 과도방법 중에서 가열에 의한 방법은 제트 단면적의 온도가 균일하지 않을 가능성과 시험부내에서의 가열포텐셜 감소의 가능성이 있다. 그러므로 모델 전체의 열전달 계수를 측정할 경우에는 냉각방법을 이용하는 것이 적합하다.

(3) 바이패스기법에서 전환막을 이용하여 자유흐름을 전환시킬 경우에는 가열된 유동이 외부로 빠져나갈 수 있도록 충분한 유로가 확보되어야 하고, 전환막 자체의 단열문제를 고려해야 한다.

(4) 바이패스기법과 삼입기법은 각각의 경우에서 유동을 전환할 때와 실린더를 초기에 삼입할 때 유동의 불균일성이 발생하지만, 유동의 완전 발달시간이 전체 열적 발달시간에 비해 짧으므로 결과에 큰 영향은 미치지 않는다.

본 논문에서의 불확실도는 95%의 신뢰도에서 측정 최대 오차가 다음과 같고, 열전달계수, Nusselt 수, Froessling 수는 오차들의 조합이다. 오차조합 원리는 Kline과 McClintock (1953)에 의해 제안된 원리를 사용하였다.

Table 1과 2는 각각 과도 방법과 정상 방법에 대하여 측정 최대오차와 이 오차들의 조합에 의한 Foessling 수의 불확정성을 표로 나타내고 있다.

Table 1 Uncertainty analysis of transient test

Transient test	
$\delta(T_{ref} - T_i)/(T_{ref} - T_i)$	0.78%
$\delta(T_w - T_i)/(T_w - T_i)$	1.77%
$\delta\sqrt{\rho ck}/\sqrt{\rho ck}$	5.00%
$\delta D/D$	0.08%
$\delta k/k$	0.10%
$\delta\nu/\nu$	0.10%
$\delta U/U$	0.68%
$\delta t/t$	0.05%
$\delta\theta/\theta$	1.93%
$\frac{\delta\beta}{\beta} = \frac{1}{\beta} \frac{\partial\beta}{\partial\theta} \delta\theta$	3.15%
$\delta h/h$	5.92%
$\delta N_u/N_u$	5.92%
$\delta Fr/Fr$	5.96%

Table 2 Uncertainty analysis of steady test

Steady test	
$\delta I/I$	0.70%
$\delta V/V$	0.60%
$\delta A/A$	0.30%
$\delta D/D$	0.08%
$\delta k/k$	0.10%
$\delta\nu/\nu$	0.10%
$\delta U/U$	0.78%
$\delta(T_w - T_{ref})/(T_w - T_{ref})$	1.38%
$\delta f/f$	2.00%
$\delta h/h$	2.62%
$\delta N_u/N_u$	2.62%
$\delta Fr/Fr$	2.74%

참 고 문 헌

1. Clifford, R. J., and Jones, T. V., and Duncn, S. T., 1983, Techniques for obtaining detailed heat transfer coefficient measurements within gas turbine blade and vane cooling passages, ASME Paper 83-GT-58.

2. Jones, T. V., and Hippensteele, S. A., 1987, High resolution heat transfer coefficient maps applicable to compound surfaces using liquid crystals in transient wind tunnels, 24th ASME/AIChE National Heat Transfer Conference, ASME HTD, Vol. 71, pp. 1-9.
3. Baughn, J. W., and Yan, X., 1991, An insertion technique using the transient method with liquid crystals for heat transfer measurements in ducts, ASME HTD, Vol. 164, pp. 77-83.
4. Hoffs, A., and Bolcs, A., and Harasgame, S. P., 1997, Transient heat transfer experiments in a linear cascade via an insertion mechanism using the liquid crystal technique, Journal of Turbomachinery, Vol. 199, No. 1, pp 9-13.
5. Baughn, J. W., and Elferkin, M. J., and Mckillop, A. A., 1986, Heat transfer from a single cylinder, cylinders in tandem, and cylinders in the entrance region of a tube bank with a uniform heat flux, Journal of Heat Transfer, Vol. 108, pp. 386-391.
6. Kraabel, J. S., and Mckillop, A. A., and Baughn, J. W., 1982, Heat transfer to air from a yawed cylinder, Journal of Heat Transfer, Vol. 25, pp. 409-418.
7. Baughn, J. W., and Saniei, N., 1991, The Effect of Thermal Boundary Conditions on Heat Transfer from a Cylinder in Crossflow, ASME Journal of Heat Transfer, pp. 1020-1024.
8. Butler, R. J., and Baughn, J. W., 1994, Validation of an in-situ heated transient technique with local heat transfer measurements on a cylinder in crossflow, AIAA/ASME 6th Thermophysics and Heat Transfer Conference, Paper #94-2009.