

# 자유흐름 온도와 대류열전달 계수를 동시에 측정할 수 있는 실험 방법에 대한 연구

정기호<sup>†</sup> · 송기범\* · 김귀순\*\*

(2002년 3월 11일 접수, 2002년 10월 17일 심사완료)

## Simultaneous Determination of Reference Free-Stream Temperature and Convective Heat Transfer Coefficients

Giho Jeong, Kibum Song and Kuisoon Kim

**Key Words:** Free-Stream Temperature(자유흐름온도), Heat Transfer Coefficient(열전달계수), Liquid Crystal(액정), Transient Method(과도방법)

### Abstract

This paper deals with the development of a new method that can obtain heat transfer coefficient and reference free stream temperature simultaneously. The method is based on transient heat transfer experiments using two narrow-band TLCs. The method is validated through error analysis in terms of the random uncertainties in the measured temperatures. It is found that the errors could be reduced more than 2 times less. The general method described in this paper is applicable to many heat transfer models with unknown free stream temperature.

기호설명	
$erfc$	: 보정 에러 함수
$h$	: 대류열전달 계수 [ $W/m^2 K$ ]
$n$	: 벽면에 대한 법선방향
$T_i$	: 초기 온도 [K]
$T_{ref}$	: 자유흐름온도 [K]
$T_w$	: 벽면 온도 [K]
$t$	: 시간 [second]

$\tau$	: 침투시간
$\Gamma$	: 열확산도
$\alpha$	: 무차원 시간

### 하첨자

1	: 첫 번째 반응 액정(TLC-1)
2	: 두 번째 반응 액정(TLC-2)

### 1. 서론

#### 그리스문자

$\Phi$	: 증폭계수
$\Theta$	: 무차원 온도

대류열전달 계수는 주위의 열환경에는 관계가 없고 유동에 따라 좌우되는 것을 전제로 정의되어 사용되고 있으며, 실제로 많은 경우 이 전제는 매우 타당한 것으로 알려져 있다. 그러므로 대류열전달 계수는 열환경에 관계없는 값이 되어야 그 응용성이 확보될 수 있다. 그러나 이와 같이 대류열전달 계수가 유동만의 함수가 되는 경우는 정확한 냉각 또는 가열 포텐셜 즉, 자유흐

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 부산대학교 대학원 항공우주공학과

E-mail : gyogyo@hanmail.net

TEL : (051)510-3290 FAX : (051)513-3760

\* 회원, 부산대학교 대학원 항공우주공학과

\*\* 회원, 부산대학교 항공우주공학과

를 온도와 벽면 온도의 차이가 명확하게 제시되는 경우에만 해당된다. 하지만 대류열전달 문제에서는 자유흐름 온도가 분명하지 않은 경우도 많이 있다. 대부분의 내부 유동의 경우에는 자유흐름 온도를 정의하는 것이 매우 어렵다. 그러므로 자유흐름 온도를 정의하기에 따라 대류열전달 계수는 주위의 열환경에 의해 달라지게 되어 그 응용성 확보에 많은 어려움이 있다. 따라서 몇몇 연구자들이 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법을 제시하였는데, Goldstein<sup>(1)</sup>은 원형충돌제트 실험에서 이러한 자유흐름 온도로 흔히 사용되는 제트 출구온도 대신에 단열 벽면온도(recovery temperature)를 사용할 것을 제안하였다. 그리고, Kim<sup>(2)</sup>은 자유흐름 온도로 제트 출구온도와 단열 벽면온도를 적용하여 원형 충돌제트 실험의 경우에 대해 그 결과를 비교하고, 제트 출구온도를 사용할 때 결과적으로 대류열전달 계수에 많은 오차가 수반된다는 사실을 확인하였다. 그리고 단열 벽면온도를 자유흐름 온도로 사용해야만 대류열전달 계수가 유동만의 함수로 나타난다는 사실 또한 확인하였다. 그러나 실제 대류열전달 실험을 수행할 때 이러한 단열 벽면온도는 측정하기가 매우 까다롭고 측정 가능한 경우라도 그 작업이 번거롭다는 단점이 있다.

이에 따라 자유흐름 온도와 대류열전달 계수를 동시에 구하고자 하는 노력이 최근 몇몇 연구자들에 의해 진행되고 있다. Camci<sup>(3)</sup>는 시행 착오법으로 필름 냉각 실험에서의 단열 벽면효율과 필름냉각 열전달계수를 동시에 구하는 방법을 제시하였다. 그리고, Yan and Owen<sup>(4)</sup>은 과도 열전달 실험을 하여 한 점에서 서로 다른 두 시간에 각각의 온도 정보를 추출하여 자유흐름 온도와 대류열전달 계수를 구하는 방법을 제시하였으며, 그리고 이 방법에 대한 신뢰도 분석을 하였다. 이러한 방법들은 형태상으로 다른 것처럼 보이나 그 적용방법이 다를 뿐 근본적으로는 같은 방법이라고 할 수 있다. 그러나 자유흐름 온도와 대류열전달 계수를 동시에 구하고자 하는 기존의 연구들은 단지 2개의 온도 정보만을 사용하는 관계로 자유흐름 온도에 관한 오차뿐만 아니라 최종적인 대류열전달 계수의 오차가 크다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 다수의 온도 정보를 이용하는 다중 회귀분석 방법으로 대류열전달 계수와 자유흐름 온도를 동시에 구하

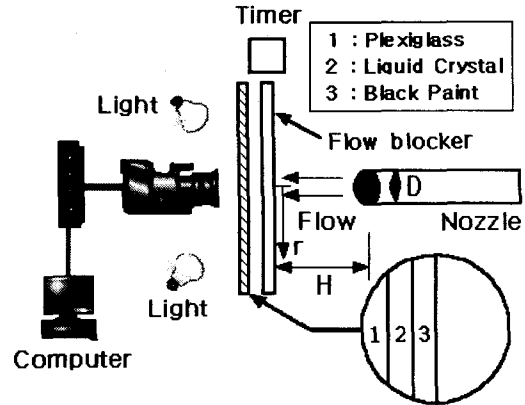


Fig. 1 Experimental setup for transient heat transfer experiment

는 방법을 제시하고자 한다. 또한 신뢰도 분석을 통해 2개의 온도 정보만을 이용하는 기존의 Yan and Owen<sup>(4)</sup>방법과 비교하여 그 정확도를 확인하였다.

## 2. 측정 방법

대류열전달 계수를 측정하는 방법으로는 정상 방법(steady state method)과 과도방법(transient method)이 광범위하게 쓰이고 있다. 이 중 복잡한 형상의 열전달 모델에도 쉽게 적용할 수 있는 과도방법은 비정상 열전달 모델에서 벽면온도와 시간을 측정하여 대류열전달 계수를 구하는 방법이다. 이 방법은 Schultz and Jones<sup>(5)</sup>를 포함한 많은 연구자들에 의해 시도되었고 본 연구에서도 사용되었다. Fig. 1에 본 논문에서 쓰인 실험장치를 나타내었다.

### 2.1 과도 열전달 실험 방법

열전달 모델의 재질로서 열전도도가 아주 낮은 물질(아크릴 등)을 사용할 때, 갑작스런 온도 변화를 주면 순간적으로 벽면 부근 영역에서 벽면에 수직한 방향으로의 온도기울기가 아주 큰 값을 가지게 된다. 이 때 다른 방향으로의 온도기울기는 벽면에 수직한 방향에 비해 무시할 수 있을 정도로 작다. 그러므로 열전달 모델 내에서는 1차원 비정상 전도방정식에 따라 열전달이 이루어진다.

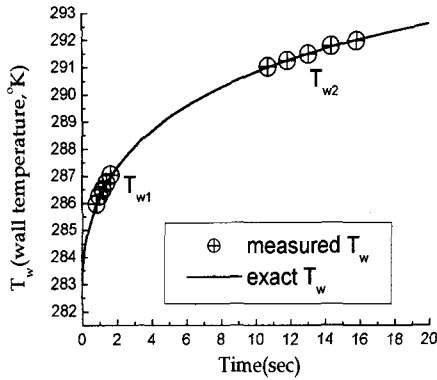


Fig. 2 A sample distribution of exact and measured wall temperature

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

여기서,  $\Gamma$ 는 열확산도이다.

이러한 과도 열전달 실험에서 유동온도가  $T_i$ 에서  $T_{ref}$ 로 갑자기 변한다는 초기조건을 가정하면, 대류열전달 계수는 벽면 온도와 다음과 같은 관계를 가진다.

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

$$\text{여기서, } \alpha = h \sqrt{\left(\frac{t}{\rho c k}\right)} \quad (3)$$

그러므로 과도 방법에서는 시간( $t$ )과 표면온도( $T_w$ )를 측정하여 식 (2)에 대입하면 대류열전달 계수를 얻을 수 있다. 표면 온도는 열전대 등 여러 가지 온도센서를 이용하여 측정이 가능하지만, 액정(TLC)을 이용하여 측정하는 방법이 편리성과 정확성 때문에 최근 널리 사용되고 있다. 물론 이 방법에서 자유흐름 온도( $T_{ref}$ )와 초기온도( $T_i$ )는 측정된 값을 사용한다.

2.2  $T_{ref}$ 와  $h$ 를 동시에 측정하는 방법

앞서 설명한 과도방법은 자유흐름 온도를 미리 알 수 있거나 측정할 수 있는 경우에 사용할 수 있는 방법이다. 그러나 다수의 대류열전달 실험에서 이러한 자유흐름 온도를 정의하기 어렵거나 측정할 수 없는 경우가 있다. 이 경우에는 열전

달 모델 표면의 같은 위치에서, 서로 다른 두 시간대에서 각각 온도를 측정하고 측정된 각각의 온도를 식 (2)에 대입하여 두 개의 식을 얻는다. 이러한 두 개의 식을 이용하여 대류열전달 계수와 자유흐름 온도를 동시에 얻을 수 있다<sup>(3,4)</sup>. 이때 두 온도 정보는 서로 다른 반응 온도를 가지는 두 가지 종류의 액정을 사용하여 얻을 수 있다<sup>(6,7)</sup>. 그러나 이 방법은 최종적인 대류열전달 계수의 오차가 크다는 이유로 아직 실용화되지 못하고 있다.

Fig. 2은 과도 열전달 모델 표면의 한 점에 서로 다른 시간에 따른 벽면온도의 변화를 하나의 예로 나타낸 것이다. 이 그림에서 실선은 1차원 비정상 열전도 방정식의 해석적 결과인 식 (2)를 그래프로 나타낸 것이고, 기호는 오차가 포함된 측정 온도이다. 이와 같은 측정치는 서로 다른 반응 온도를 가지는 두 가지 종류의 액정을 사용하면 얻을 수 있으며, 이 경우 하나의 액정반응영역에서 5개의 온도를 측정하는 경우에 해당된다. 측정된 온도가 실선과 같이 나타나면 정확한 대류열전달 계수를 얻을 수 있다. 그러나 실제로 측정되는 온도는 항상 어느 정도의 오차가 포함되기 때문에 대류열전달 계수에도 오차가 수반 될 수밖에 없다. 이러한 오차를 줄이기 위해 본 연구에서는 다중 회귀분석 방법을 사용하여 자유흐름 온도와 대류열전달 계수를 구하고자 한다. 먼저 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 이론적인 관점에서의 정확한 벽면온도( $T_w$ )에 대한 식을 쓰면 다음과 같다.

$$T_w = T_i - (T_i - T_{ref})Y \quad (4)$$

$$\text{여기서, } Y = 1 - \exp\left(-\frac{h^2 t}{k}\right) \operatorname{erfc}\left(h \sqrt{\frac{t}{k}}\right) \quad (5)$$

본 연구에서 사용한 다중 회귀분석 방법을 설명하면 다음과 같다. 먼저 측정된 온도( $T_{w,p}$ )가 여러 개 있을 경우에 측정된 온도와 이론적인 온도와의 차이 제곱의 합을 식 (6)과 같이 정의한다. 그리고 이러한 온도 차이의 제곱의 합이 최소가 되는 조건의 자유흐름 온도와 대류열전달 계수를 구하면 된다.

$$F(\epsilon) = \sum_{p=1}^N [T_{w,p} - T_w]^2 = \sum_{p=1}^N [T_{w,p} - T_i + (T_i - T_{ref})Y_p]^2 \quad (6)$$

식 (6)의 값이 최소가 되는 조건은  $h$ 와  $T_{ref}$ 에 대한  $F(\epsilon)$ 의 기울기가 모두 영이 되는 조건

이다. 즉,

$$\frac{\partial F(\epsilon)}{\partial h} = \sum_{\beta=1}^N [T_{w,\beta} - T_i + (T_i - T_{ref})Y_{\beta}] \quad (7)$$

$$\ast \left\{ \frac{2ht_{\beta}}{\rho ck} (Y_{\beta} - 1) + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{t_{\beta}}}{\sqrt{\rho ck}} \right\} = 0$$

$$\frac{\partial F(\epsilon)}{\partial T_{ref}} = \sum_{\beta=1}^N [(T_{w,\beta} - T_i)Y_{\beta}] \quad (8)$$

$$+ (T_i - T_{ref}) \sum_{\beta=1}^N Y_{\beta}^2 = 0$$

이러한 식 (7), (8)을 만족하는 자유흐름 온도 ( $T_{ref}$ )와 대류열전달 계수 ( $h$ )를 구하기 위해 반복적인 Newton-Raphson 방법을 사용하는데, 먼저 식 (7)에서 자유흐름 온도를 가정하고 식 (7)을 만족하는 대류열전달 계수를 구한다. 그리고, 식 (7)에서 구한 대류열전달 계수를 식 (8)에 대입하여 자유흐름 온도를 구한다. 그리고 이 과정을 수렴된 해를 얻을 때까지 반복하면 최종적인 대류열전달 계수와 자유흐름 온도를 구할 수 있다.

### 3. 신뢰도 해석 결과 및 고찰

본 연구에서와 같이 한 점에서 초기 온도 및 여러 시간대에서의 벽면 온도를 측정하여 자유흐름 온도와 대류열전달 계수를 구하는 실험의 경우에, 최종적인 대류열전달 계수의 불확실성은 주로 벽면온도의 측정오차 ( $P_T$ )와 초기온도의 측정오차 ( $P_T$ )에 기인한다. 여기서는 편의를 위

하여 두 측정오차가 같은 정도라고 가정하여 두 오차 모두 온도측정 오차 ( $P_T$ )로 표기하기로 한다. 그리고 본 연구에서 사용하는 방법의 정확도는 다음과 같은 증폭계수를 계산하여 비교하였다.

$$\frac{P_h}{h} = \Phi_h \frac{P_T}{T_{ref} - T_i} \quad (9)$$

$$\frac{P_{T_{ref}}}{T_{ref} - T_i} = \Phi_{T_{ref}} \frac{P_T}{T_{ref} - T_i} \quad (10)$$

이 증폭계수의 값은 작을수록 같은 온도 측정 오차에서 대류열전달 계수와 자유흐름 온도의 오차가 작아진다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 몬테카를로 방법을 적용하여 신뢰도를 구하였다. 이 방법은  $h$ ,  $T_{ref}$  그리고  $T_i$ 가 정해진 상태에서 첫 번째 액정 반응영역에서 측정하는 온도 ( $T_{w1}$ ), 두 번째 액정 반응영역에서 측정하는 온도 ( $T_{w2}$ )와 초기온도 ( $T_i$ )에 임의적으로 오차를 부가한 다음, 식 (7)과 식 (8)을 통해 대류열전달 계수와 자유흐름 온도를 구하여 그 결과에 오차가 얼마나 발생하는지를 계산하는 것이다. 각 경우마다 1000번씩 시도하여 대류열전달 계수와 자유흐름 온도의 평균값과 오차를 계산하였다. 이 때 오차로 쓰이는 랜덤수로는 대부분의 공학측정에서 발생하는 오차가 정규 분포를 가지는 관계로 95% 신뢰도를 가지는 정규 분포 랜덤 수를 사용하였다.

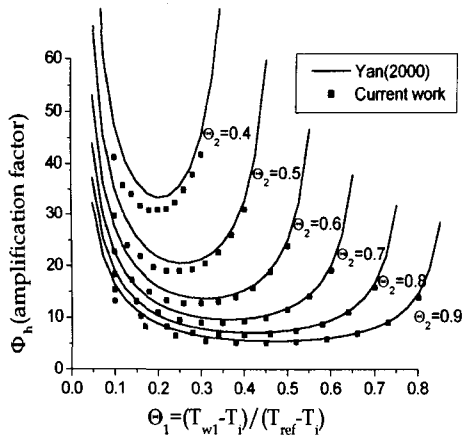


Fig. 3 Comparison of amplification factor,  $\Phi_h$  (1 data point for each TLC)

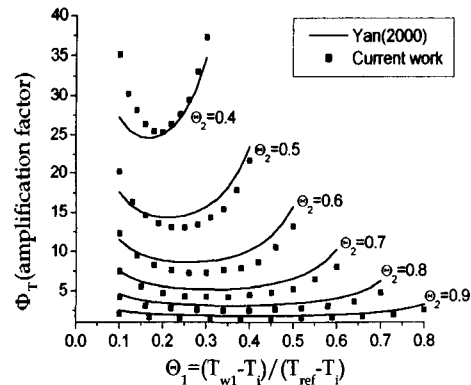


Fig. 4 Comparison of amplification factor,  $\Phi_T$  (1 data point for each TLC)

Fig. 3 및 Fig. 4은 각 액정에서 1개의 온도 즉 총 2개의 온도 정보를 측정하는 경우에 대한 본 연구에서 적용한 다중 회귀분석 방법의 결과를 Yan and Owen<sup>(4)</sup>의 결과와 비교한 그림이다. 이와 같이 측정온도가 총 2개일 경우 측정 방법면에서는 두 방법이 동일하지만 증폭계수를 얻는 방법은 다르다. 즉 본 연구의 결과는 몬테카를로 방법을 사용하여 얻은 결과이고, Yan and Owen<sup>(4)</sup>은 신뢰도 분석을 수행하여 얻은 결과이다.

Fig. 3 및 Fig. 4을 보면 본 연구의 결과가 Yan and Owen<sup>(4)</sup>의 신뢰도 분석결과와 비교할 때, 경향과 크기 면에서 모두 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 본 연구의 몬테카를로 방법에 의해 증폭계수를 구하는 방법이 타당하다는 것을 잘 나타낸다. 그리고 증폭계수는  $\theta_2$ 가 클수록 작은 값을 나타내고 있다. 이것은 최종적인 오차가 작아지는 것을 의미한다. 그러나,  $\theta_2$ 가 크다는 것은 실험시간이 많이 소요된다는 것을 의미하며 이는 1차원 가정이 무너져 오차가 더 크게 발생하게 될 가능성이 있다. 그리고  $\theta_1$ 에 따라서는 증폭계수가 감소하다가 증가하는 경향을 보인다. 또한  $\theta_2$ 가 0.5 정도일 때 오차가 제일 작아지는데, 이것은 다중 다중회귀분석 방법에서  $\theta_2$ 를 0.5 정도로 선택하는 것이 가장 정확한 결과를 구할 수 있는 것을 나타낸다.

Fig. 5와 Fig. 6는  $\theta_1=0.3$ ,  $\theta_2=0.6$ ,  $P_T=0.2K$ 인 조건에서 1000번 테스트를 하여

구한 대류열전달 계수와 자유흐름 온도의 오차분포를 막대그래프로 나타내었다. 이 때 온도정보는 각 액정영역마다 3개씩 얻는 경우이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 주어진 랜덤 온도오차와 마찬가지로 대류열전달 계수와 자유흐름 온도의 오차도 정규 분포의 특성을 가지고 있다. 그리고 대부분의 경우 대류열전달 계수는  $\pm 5\%$ , 자유흐름 온도는  $\pm 0.001 K$ 의 오차범위를 넘지 않는다는 것을 역시 확인할 수 있다.

Fig. 7은 위와 같은 실험을 각 액정당 얻는 온도정보의 개수를 바꾸어가면서 테스트한 결과로서, 대류열전달 계수 오차의 누적분포를 나타내고 있다. 이 그림에서 보면 각 액정당 얻는 온도

정보의 개수가 증가할수록 대류열전달 계수 오차가 작은 경우의 수가 점점 증가하고 있다. 그리고 95%의 신뢰도를 가지는 조건에 해당되는 오차 한계값 또한 온도정보의 개수가 증가할수록 점점 작아지고 있음을 알 수 있다. Fig. 8은 Fig. 7과 같은 조건에서 자유흐름 온도의 오차를 구한 결과로서 대류열전달 계수의 경우와 마찬가지로 온도정보의 개수가 증가하면 오차가 감소하는 경향을 뚜렷하게 보이고 있다. 특히 온도정보의 개수가 1개에서 2개로 증가할 때는 오차의 감소량이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 그러나 온도정보의 개수가 점점 증가할수록 오차가 지속적으로 감소하지만 그 감소율은 점점 둔화되는 것을 볼 수 있는데, 이로써 무한개의 온도정보를 사용한다고 해서 무한히 오차를 줄일 수 있는 것은 아

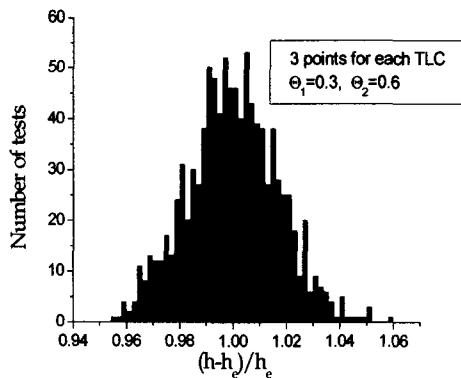


Fig. 5 Test number distribution for  $\delta h/h$  (3 points selected for each TLC)

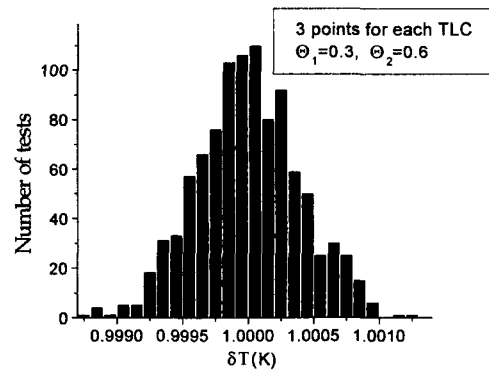


Fig. 6 Test number distribution for  $\delta T$  (3 points selected for each TLC)

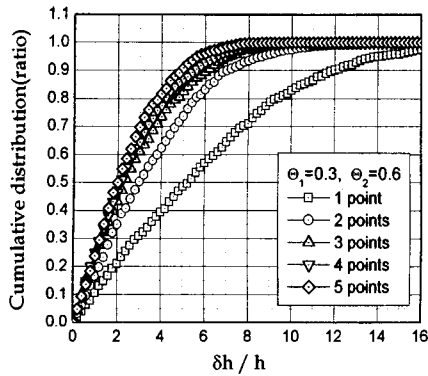


Fig. 7 Cumulative distribution of  $\delta h/h$  for different number of data points

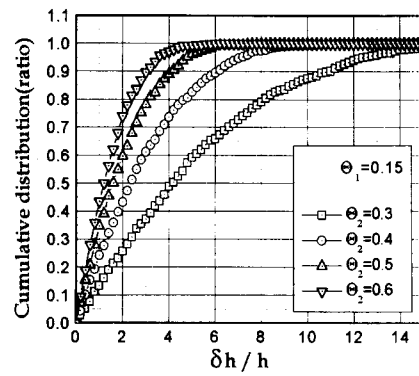


Fig. 9 Cumulative distribution of  $\delta h/h$  with  $\theta_2$  change(3-point Regression)

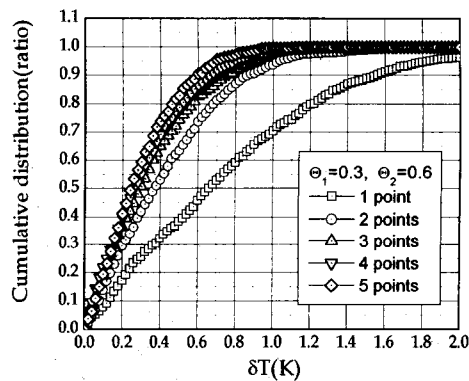


Fig. 8 Cumulative distribution of  $\delta T$  for different number of data points

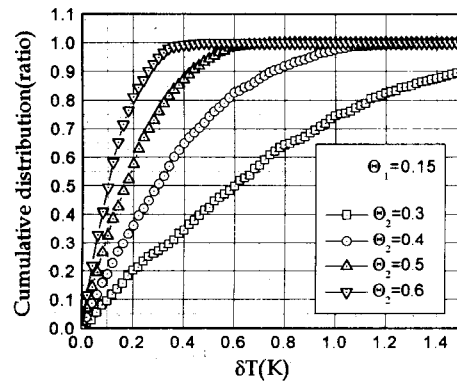


Fig. 10 Cumulative distribution of  $\delta T$  with  $\theta_2$  change(3-point Regression)

니며 적정개수의 온도 정보를 사용하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은  $\theta_1 = 0.15$ 인 조건에서  $\theta_2$ 의 변화에 따른 대류열전달 계수와 자유흐름 온도의 오차누적분포를 나타낸 그림이다.  $\theta_2$ 의 변화는 두 번째로 반응하는 액정의 반응온도를 의미하므로, Fig. 9와 10에서 두 번째 액정의 반응온도가 클수록 대류열전달 계수와 자유흐름 온도의 오차가 작은 경우의 수가 점점 증가한다는 것을 알 수 있다. 그리고 1000번 테스트 중 95%가 차지하는 오차의 한계 또한  $\theta_2$ 가 커질수록 점점 작아지고 있다.

Fig. 11은  $\theta_1$ 을 변화시키면서 같은 테스트를

반복 수행한 결과로서 대류열전달 계수에 대한 증폭계수를 나타내고 있다. 이 그림에서 보면 기존의 방법이라 할 수 있는 온도정보의 개수가 1개인 경우에 비해 2개로 증가할 때는  $\theta_1$ 에 관계없이 증폭계수는 크게 감소함을 알 수 있다. 그리고 온도정보의 개수가 늘어날수록 증폭계수는 계속 감소하지만 그 감소율은 점점 작아지고 있다. 역시 적정개수의 온도정보가 바람직하다는 것을 알 수 있으며, 또한 온도정보의 개수에 관계없이 그 경향은 거의 유사한 특징을 가진다는 것을 알 수 있다.

Fig 12는 Fig. 11과 같은 조건에서 실시한 자유흐름 온도에 대한 증폭계수의 변화를 나타내고 있다. 자유흐름 온도에 대한 증폭계수 또한 대류

열전달 계수에 대한 증폭계수와 유사한 특성을 가지고 있다.

결국 획득하는 온도 정보의 수가 늘어날수록 최종적인 대류열전달 계수와 자유흐름 온도의 정확도는 더 커지지만 3개 이상의 정보를 이용할 경우는 그 이상의 개수를 획득한 경우와 비교할 때 차이가 그다지 크지는 않았다. 반면에 획득하는 온도 정보의 수가 많아지면 영상처리를 통한 데이터 처리가 쉽지 않고, 각 액정이 반응하는 시간이 짧은 경우는 많은 수의 온도정보를 얻는 어려움이 발생 할 수 있다. 이러한 경우는 다음의 식 (11)으로 정의되는 침투시간을 초과할 때 발생하게 되는데, 침투시간이 지나서 계속 온도 정보를 얻는 것은 1차원 열전도 방정식의 가정이

무너지는 것을 의미한다.

$$\tau = 0.1 d^2 \frac{\rho c}{k} \quad (11)$$

여기서  $d$ 는 실험재료의 두께이다. 따라서, 침투시간 내에 과도 열전달실험이 이루어져야 하며 이러한 침투시간은 온도정보를 얻기 위해 사용하는 2가지 액정의 반응영역을 선택하는 기준이 된다.

Fig. 13과 Fig. 14는 각 액정에서 3개의 온도 데이터를 얻을 수 있을 때의 결과를 기존 연구 방법인 1개의 데이터를 얻는 것에 대한 결과와 비교하였다. 이 그림에서 알 수 있듯이 대류열전달 계수와 자유흐름 온도에 대한 증폭계수 모두 3개의 온도정보를 사용한 데이터가 1개의 온도정보

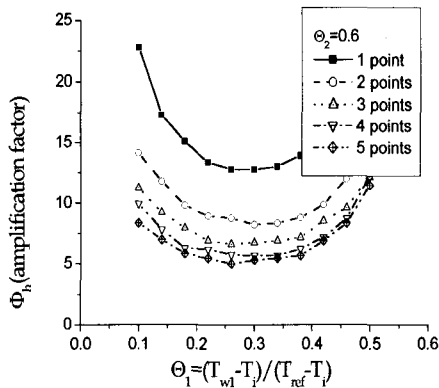


Fig. 11 The effect of the number of data points on  $\Phi_h$

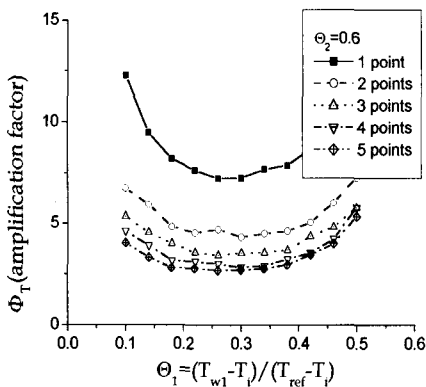


Fig. 12 The effect of the number of data points on  $\Phi_T$

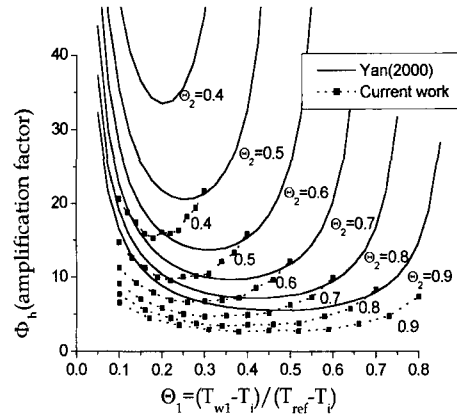


Fig. 13 Comparison of amplification factor,  $\Phi_h$ , with previous results

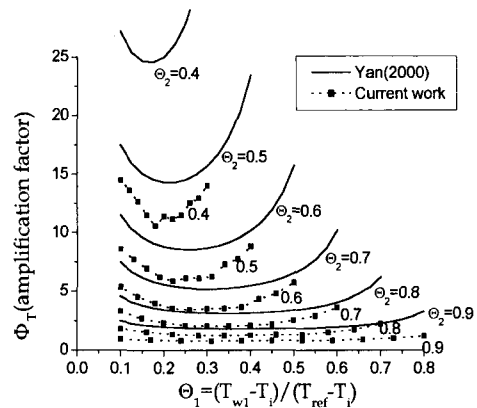


Fig. 14 Comparison of amplification factor,  $\Phi_T$  with previous results

를 사용한 기존 연구 데이터에 비해 모든  $\theta_1$ 와  $\theta_2$  영역에서 아주 작은 결과를 나타내고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 대류 과도 열전달실험에서 자유 흐름 온도와 대류열전달 계수를 동시에 구하는 방법에 대해 기술하였다. 이것들은 반응온도 범위가 좁은 서로 다른 2개의 액정을 사용하여, 시간에 따른 다수의 벽면온도를 측정된 후 다중 회귀분석 방법을 적용하면 구할 수 있다. 이 방법의 신뢰도는 측정온도에 정규 분포를 가지는 랜덤오차를 부가하여 몬테카를로 방법으로 확인되었다. 그리고 본 연구에 의한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 강제 대류 과도 열전달실험에서 최종적인 열전달계수의 정확도에 큰 영향을 미치는 것 중의 하나가 자유흐름 온도이다.

(2) 다중 회귀분석 방법을 이용하면 대류열전달 계수의 오차를 많이 줄일 수는 있지만 가능한 온도정보의 개수에는 제한이 있다.

(3)  $\theta_2$ 는 가능한 범위 내에서 큰 경우 대류열 전달 계수의 측정오차가 작아진다.

(4) 일반적으로 실험이 비교적 많이 이루어지는  $\theta_2=0.6$ 인 경우에는  $\theta_1=0.25$  부근에서의 오차가 최소로 되었다.

#### 참고문헌

(1) Goldstein, R. J. and Behbahani, A.I., 1982,

“Impingement of a Circular Jet with and Without Cross Flow,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 25, pp. 1377~1382.

(2) Kim, K., 1993, “An Experimental Study on the Flow and Heat Transfer Characteristics of an Impinging Jet,” *KSME Journal*, Vol. 7, No. 3, pp. 258~271.

(3) Camci, C., 2000, Implementation of “the Invariant  $h$ ” Method in Liquid Crystal Thermometry Based Heat Transfer Research Including Film Cooling,” *Proceedings of the International Center for Heat and Mass Transfer*, Turbine-2000 Symposium, held in Cesme, Izmir, Turkey.

(4) Yan, Y. and Owen, J. M., 2000, “Uncertainties in Transient Heat Transfer Measurements with Liquid Crystal,” Report No 19/00, University of Bath.

(5) Schultz, D. L. and Jones, T. V., 1973, “Heat Transfer Measurement in Short Duration Hypersonic Facilities,” Agardograph No. 165.

(6) Baughn, J. W. 1995, “Liquid Crystal Methods for Studying Turbulent Heat Transfer,” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 16, pp. 365~375.

(7) Camci, C., Kim, K. and Hippensteele, S.A. 1991, “A New Hue-Capturing Technique for the Quantitative Interpretation of Liquid Crystal Images Used in Convective Heat Transfer Studies,” ASME Paper 91-GT-122.