

# 자유흐름온도와 대류열전달계수를 동시에 측정할 수 있는 실험 방법에 대한 연구

정기호\* · 송기범\* · 김귀순\*\*

## 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 shown how the uncertainties in heat transfer coefficient and free stream temperature can be reduced. The general method described in this paper is applicable to many heat transfer models with unknown free stream temperature.

### 1. 서론

대류열전달계수는 열환경에는 관계가 없고 유동에 따라 좌우되는 것으로 알려져 있으며, 열환경에 관계없는 값이 되어야 그 응용성이 확보될 수 있다. 이와 같이 대류열전달계수가 유동의 함수만으로 정의되기 위해서는 먼저 정확한 냉각 또는 가열 포텐셜 즉, 자유흐름온도와 벽면온도의 차이가 명확하게 제시되어야 한다. 하지만 자유흐름온도가 분명하지 않은 경우도 많이 있다. 대부분의 내부 유동은 자유흐름온도를 정의하는 것이 매우 어렵다. 이러한 경우 열전달계수는 열환

경에 따라서도 달라진다.

Goldstein<sup>(1)</sup>은 원형충돌제트 실험에서 자유흐름온도로 제트출구온도 대신 단열벽면온도를 사용할 것을 제안하였다. Kim<sup>(2)</sup>은 원형충돌제트 실험에서 자유흐름온도로 제트출구온도와 단열벽면온도를 적용한 결과를 비교하였으며, 제트출구온도를 사용할 때 많은 오차가 수반된다는 사실을 확인하였다. 그리고 단열벽면온도를 자유흐름온도로 사용해야 대류열전달계수가 유동만의 함수로 나타난다는 사실을 확인하였다. 그러나 단열벽면온도는 측정하기가 매우 까다롭고 번거롭다는 단점이 있다.

이에 따라 자유흐름온도와 대류열전달계수를 동시에 구하고자 하는 노력이 최근 몇몇 연구자들에 의해 진행되고 있다. Camci<sup>(3)</sup>는 시행 착오법으로 필름 냉각 실험에서의 단열 벽면 효율과 필름 냉각 열전달계수를 동시에 구하는 방법을 제시하였다. Yan and Owen<sup>(4)</sup>은 과도 열전달 실험에서

\* 부산대학교 항공우주공학과 대학원

\*\* 부산대학교 항공우주공학과

한 점에서 서로 다른 두 시간에서 각각의 온도 정보를 추출하여 자유흐름온도와 대류열전달계수를 구하는 방법을 제시하였으며, 이 방법에 대한 신뢰도 분석을 하였다. 위 두 방법들은 형태상으로 다른 것처럼 보이나 근본적으로는 같은 방법이라고 볼 수 있으며, 두 개의 온도 정보만을 사용하는 관계로 측정 오차가 크다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 다수의 온도 정보를 이용하는 multiple regression 방법에 의하여 대류열전달계수와 자유흐름온도를 동시에 구하는 방법을 제시하고자 한다. 또한 신뢰도 분석을 통해 2개의 온도 정보만을 이용하는 기존의 Yan and Owen<sup>(4)</sup>방법과 비교하여 그 정확도를 확인해 본다.

## 2. 측정 방법

대류열전달계수를 측정하는 방법으로는 정상방법(steady state method)과 과도방법(transient method)이 널리 쓰이고 있다. 이 중 복잡한 형상의 열전달 모델에도 쉽게 적용할 수 있는 과도방법은 비정상 열전달 모델에서 벽면온도와 시간을 측정하여 대류열전달계수를 구하는 방법으로서, Schultz and Jones<sup>(5)</sup>를 포함한 많은 연구자들에 의해 시도되었다.

### 2.1 과도 열전달 실험 방법

열전달 모델로 열전도도가 아주 낮은 물질을 사용할 때 갑작스런 온도 변화를 주면 순간적으로 벽면 부근에서 벽면에 수직인 방향으로의 온도기울기는 아주 큰 값을 가지게 된다. 이 때 다른 방향으로의 온도기울기는 수직인 방향에 비해 무시할 수 있을 정도로 작다. 그러므로 열전달 모델 내에서는 1차원 비정상 전도방정식에 따라 열전달이 이루어진다.

이러한 과도 열전달 실험에서 유동온도가  $T_i$ 에서  $T_{ref}$ 로 갑자기 변할 때 대류열전달계수는 벽면온도와 다음과 같은 관계를 가진다.

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

$$\text{여기서, } \alpha = h\sqrt{\left(\frac{t}{k}\right)} \quad (2)$$

그러므로 과도 방법에서는 시간 ( $t$ )과 표면온도 ( $T_w$ )를 측정하여 식(1)에 대입하면 대류열전달계수를 얻을 수 있다. 표면온도는 보통 액정을 이용하여 측정하는 방법이 편리성 때문에 널리 사용되고 있다. 물론 이 방법에서 자유흐름온도 ( $T_{ref}$ )와 초기온도( $T_i$ ) 또한 측정된 값을 사용한다.

### 2.2 $T_{ref}$ 와 $h$ 를 동시에 측정하는 방법

앞서 설명한 과도방법은 자유흐름온도를 미리 알 수 있거나 측정할 수 있는 경우에 사용할 수 있는 방법이다. 그러나 자유흐름온도가 애매모호하거나 측정할 수 없는 경우도 흔히 있다. 이 경우에는 같은 위치에서 서로 다른 두 시간대에서 각각 온도를 측정하여 식(1)에 대입하면 두 개의 식을 얻을 수 있고, 결과적으로 대류열전달계수와 자유흐름온도를 동시에 얻을 수 있다[3,4]. 이때 두 온도 정보는 서로 다른 반응 온도를 가지는 두 가지 종류의 액정을 사용하여 얻을 수 있다[6,7]. 그러나 이 방법은 오차가 크다는 이유로 아직 실용화 되지 못하고 있다.

Fig. 1은 어떤 과도 열전달 모델 표면의 한 점에서 시간에 따른 온도변화를 하나의 예로 나타낸 것이다. 이 그림에서 실선은 1차원 전도 방정식의 해석적인 결과인 식(1)을 그래프로 나타낸 결과이고, 기호는 오차가 포함된 측정온도를 나타낸다. 이와 같은 측정치는 서로 다른 반응온도를 가지는 두 가지 종류의 액정을 사용하면 얻을 수 있으며, 하나의 액정으로 5개의 온도를 측정하는 경우에 해당된다. 측정된 온도가 실선과 같이 나타나면 정확한 대류열전달계수를 얻을 수 있다. 그러나 실제로 측정되는 온도는 언제나 어느 정도의 오차가 포함되어 있기 마련이므로 대류열전달계수에도 오차가 수반 될 수밖에 없다. 이러한 오차를 줄이기 위해 본 연구에서는 multiple regression 방법을 사용하여 자유흐름온도와 대류열전달계수를 구한다. 먼저 식(1)과 (2)로부터 이론적인 관점에서 정확한 벽면온도 ( $T_w$ )에 대한 식을 쓰면 다음과 같다.

$$T_w = T_i - (T_i - T_{ref})Y \quad (3)$$

$$\text{여기서, } Y = 1 - \exp\left(-\frac{h^2 t}{k}\right) \operatorname{erfc}\left(h\sqrt{\frac{t}{k}}\right) \quad (4)$$

이 방법은 측정한 온도 ( $T_{w,p}$ )가 여러 개 있을 경우 다음과 같은 식으로 표현되는 측정된 온도와 이론적인 온도의 차이의 제곱의 합이 최소가 되는 조건의 자유흐름온도와 대류열전달계수를 구하는 것이다.

$$\begin{aligned} F(\epsilon) &= \sum_{p=1}^N [T_{w,p} - T_w]^2 \\ &= \sum_{p=1}^N [T_{w,p} - T_i + (T_i - T_{ref})Y_p]^2 \end{aligned} \quad (5)$$

위의 값이 최소가 되는 조건은  $h$ 와  $T_{ref}$ 에 대한  $F(\epsilon)$ 의 기울기가 모두 영이 되는 조건이다. 즉,

$$\frac{\partial F(\epsilon)}{\partial h} = \sum_{p=1}^N [T_{w,p} - T_i + (T_i - T_{ref})Y_p] \cdot \left\{ \frac{2ht_p}{\rho ck} (Y_p - 1) + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{t_p}}{\sqrt{\rho ck}} \right\} = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(\epsilon)}{\partial T_{ref}} &= \sum_{p=1}^N [(T_{w,p} - T_i)Y_p] \\ &+ (T_i - T_{ref}) \sum_{p=1}^N Y_p^2 = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

이 식(6), (7)을 만족하는 자유흐름온도 ( $T_{ref}$ )와 대류열전달계수 ( $h$ )는 Newton-Raphson 반복법을 통해 구할 수 있다.

### 3. 신뢰도 해석 결과 및 고찰

본 연구에서와 같이 한 점에서 초기온도와 여러 시간대에서의 벽면온도를 측정하여 자유흐름온도와 대류열전달계수를 구하는 실험에서 불확실성은 주로 벽면온도의 측정오차 ( $P_T$ )와 초기온도의 측정오차 ( $P_{T_i}$ )에 기인한다. 여기서는 편의를 위하여 두 측정오차가 같은 정도라고 가정하여 둘 다 온도측정오차 ( $P_T$ )로 표시한다. 그리고 본 연구에서 사용하는 방법의 정확도는 다음과 같은 증폭계수를 계산하여 비교한다.

$$\frac{P_h}{h} = \Phi_h \frac{P_T}{T_{ref} - T_i} \quad (8)$$

$$\frac{P_{T_{ref}}}{T_{ref} - T_i} = \Phi_{T_{ref}} \frac{P_T}{T_{ref} - T_i} \quad (9)$$

이 증폭계수는 작을수록 주어진 온도 측정오차에서 대류열전달계수와 자유흐름온도의 오차가 작아진다.

본 연구에서는 몬테카를로 방법을 적용하여 신뢰도를 구하는 데, 첫 번째 액정으로 측정하는 온도 ( $T_{w1}$ ), 두번째 액정으로 측정하는 온도 ( $T_{w2}$ ), 초기온도 ( $T_i$ )에 랜덤하게 오차를 부가한 다음 식(6)과 식(7)을 통해 대류열전달계수와 자유흐름온도를 구하여 그 결과에 오차가 얼마나 발생하는지를 구한다. 각 경우마다 1000번씩 시도하여 대류열전달계수와 자유흐름온도의 평균값과 오차를 계산한다. 이 때 오차로 쓰이는 랜덤 수로는 대부분의 공학측정에서 발생하는 오차는 normal 분포를 가지므로 95% 신뢰도를 가지는 normal 분포 랜덤 수를 사용한다.

Fig. 2, 3은 각 액정에서 1개의 온도 측 총 2개의 온도 정보를 측정하는 경우에 대한 본 연구에서 적용한 regression 방법의 결과를 Yan and Owen<sup>(5)</sup>의 결과와 비교한 그림이다. 이와같이 측정온도가 총 2개일 경우 측정방법면에서는 두 방법은 동일하지만 증폭계수를 얻는 방법은 다르다. 즉 본 연구에서는 몬테카를로 방법을, Yan and Owen<sup>(5)</sup>은 신뢰도 분석을 수행한 결과이다.

Fig. 2, 3을 보면 본 연구의 결과가 신뢰도 분석 결과와 경향과 크기 면에서 모두 잘 일치하고 있다. 이는 본 연구의 몬테카를로 방법에 의해 증폭계수를 구하는 것이 타당하다는 것을 잘 나타낸다. 그리고 증폭계수는  $\Theta_2$ 가 클수록 작은 값을 나타낸다. 그러나  $\Theta_2$ 가 크다는 것은 시간이 많이 소요된다는 것을 의미하므로 1차원 가정이 무너지 오차가 발생하게 된다. 그리고  $\Theta_1$ 에 따라서는 증폭계수가 감소하다가 증가하는 경향을 보인다.

Fig. 4는  $\Theta_1 = 0.3, \Theta_2 = 0.6, P_T = 0.2^\circ K$ 인 조건에서 1000번의 테스트를 하여 구한 대류열전달계수의 오차분포를 막대그래프로 나타내었다. 이 때 온도정보는 각 액정 마다 3개씩 얻는 경우이다. 이 그림에서 보면 주어진 온도오차와 마찬가지로

지로 대류열전달계수의 오차도 normal 분포의 특성을 가진다. 그리고 대부분의 경우 대류열전달계수는  $\pm 5\%$ 의 오차범위를 넘지 않는다.

Fig. 5는 위와 같은 실험을 각 액정당 얻는 온도정보의 개수를 바꾸어가면서 테스트한 결과로서, 대류열전달계수 오차의 누적분포를 나타내고 있다. 이 그림에서 보면 각 액정당 얻는 온도정보의 개수가 증가할수록 대류열전달계수의 오차가 작은 경우의 수가 점점 증가한다. 그리고 95%가 차지하는 오차의 한계 또한 온도정보의 개수가 증가할수록 점점 작아진다. Fig. 6은 Fig 5와 같은 조건에서 자유흐름온도의 오차를 구한 결과로서 온도정보의 개수가 증가하면 오차가 감소하는 경향을 뚜렷하게 보이고 있다. 특히 온도정보의 개수가 1개에서 2개로 증가할 때는 오차의 감소량이 매우 크다. 그러나 온도정보의 개수가 점점 증가할수록 오차가 감소하기는 하지만 감소율은 둔화된다. Fig. 7에 같은 테스트를  $\theta_1$ 을 변화시키면서 반복수행한 결과로서 대류열전달계수에 대한 증폭계수를 나타내 보았다. 이 그림에서 보면 기존의 방법이라 할 수 있는 온도정보의 개수가 1개인 경우에 비해 2개로 증가할 때는  $\theta_1$ 에 관계없이 증폭계수는 크게 감소한다. 그리고 온도정보의 개수가 늘어날수록 증폭계수는 계속 감소하지만 그 변화율은 점점 둔화된다. 그리고 온도정보의 개수에 관계없이 그 경향은 거의 유사한 특징을 가지고 있다.

Fig 8은 Fig. 7과 같은 조건에서 얻은 자유흐름온도에 대한 증폭계수의 변화를 나타내고 있다. 자유흐름온도에 대한 증폭계수 또한 대류열전달계수에 대한 증폭계수와 유사한 특성을 가진다.

결국 획득하는 온도 정보의 수가 늘어날수록 최종적인 대류열전달계수와 자유흐름온도의 정확도는 더 커지지만 3개 이상의 정보를 이용할 경우는 그 이상의 개수를 획득한 경우와 비교할 때 차이가 그다지 크지는 않다. 반면에 획득하는 온도 정보의 수가 많아지면 영상처리를 통한 데이터 처리가 번거로우며, 각 액정이 반응하는 시간이 짧은 경우는 많은 수의 온도정보를 얻는 것이 쉽지 않을 경우도 발생한다.

Fig. 9와 10은 각 액정에서 3개의 온도 데이터를 얻을 수 있을 때의 결과를 기존 연구 방법의 결과인 1개의 데이터에 대한 결과와 비교하였다. 이들 그림에서 보면 대류열전달계수와 자유흐름온도에 대한 증폭계수 모두 3개의 데이터를 사용한 결과가 모든  $\theta_1$ 과  $\theta_2$  영역에서 아주 작은 결과를 나타내고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 대류 과도 열전달 실험에서 자유흐름온도와 대류열전달계수를 동시에 구하는 방법에 대해 기술하였다. 이들은 반응온도 범위가 좁은 2개의 액정을 사용하여 시간에 따른 다수의 온도를 측정하여 multiple regression 방법을 적용하면 구할 수 있다. 이 방법의 신뢰도는 측정온도에 normal 분포를 가지는 랜덤오차를 부가하여 몬테카를로 방법으로 확인하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 강제 대류 과도 열전달 실험에서 최종적인 열전달계수의 정확도에 큰 영향을 미치는 것 중 하나가 자유흐름온도이다.
2. 다수의 온도 정보를 이용하면 대류열전달계수의 오차를 많이 줄일 수 있다.
3.  $\theta_2$ 는 가능한 범위 내에서 큰 경우 대류열전달계수의 측정오차가 작아진다.
4.  $\theta_2=0.6$ 인 경우  $\theta_1=0.25$  부근에서 오차가 최소가 된다.

#### 참고문헌

- (1) Goldstein, R. J. and Behbahani, A.I., 1982, Impingement of a circular jet with and without cross flow, Int. J. 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 J., 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 Int. 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, *Int. J. 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

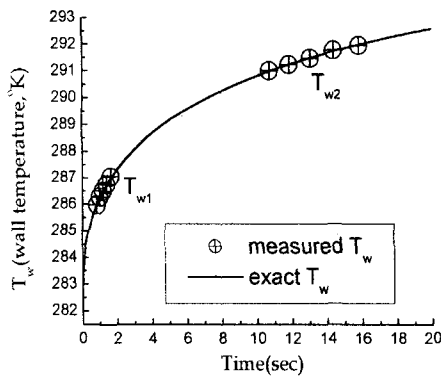


Fig. 1 A sample distribution of exact and measured wall temperature.

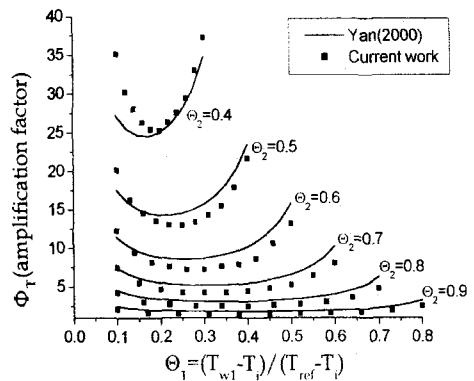


Fig. 3 Comparison of amplification factor,  $\Phi_1$  (1 point for each TLC).

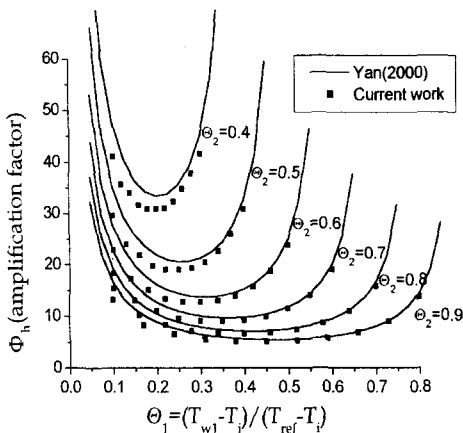


Fig 2 Comparison of amplification factor,  $\Phi_h$  (1 point for each TLC).

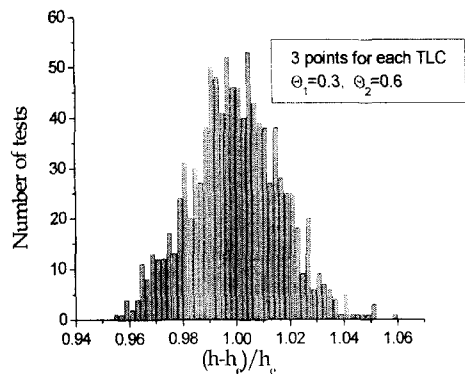


Fig. 4 Test number distribution for  $\delta h/h$  (3 points selected for each TLC).

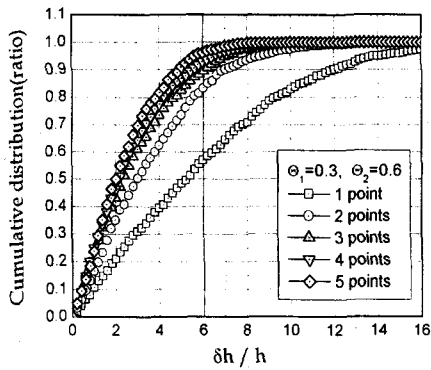


Fig. 5 Cumulative distribution of  $\delta h/h$  for different number of data points.

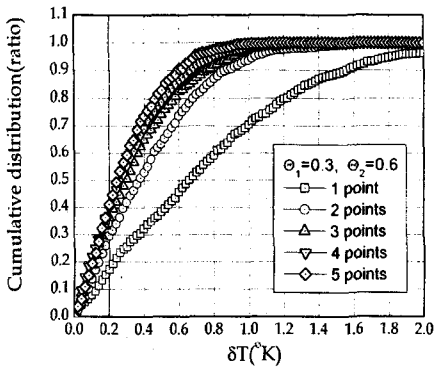


Fig. 6 Cumulative distribution of  $\delta T$  for different number of data points.

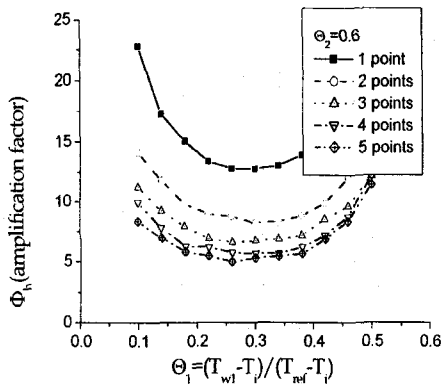


Fig. 7 The effect of the number of data points on  $\Phi_h$ .

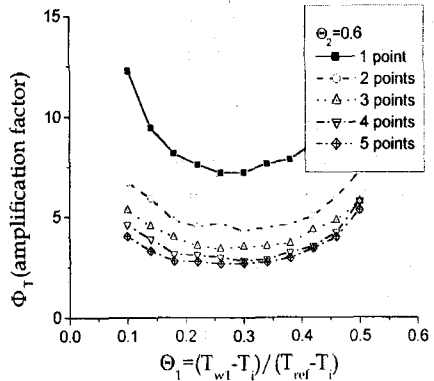


Fig. 8 The effect of the number of data points on  $\Phi_T$ .

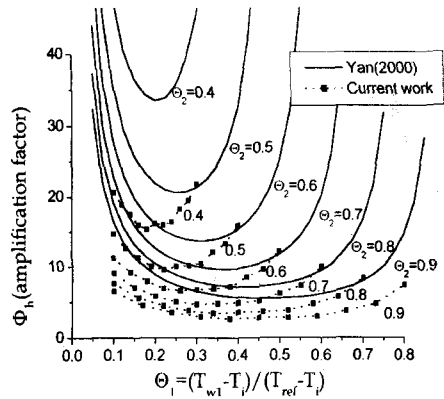


Fig. 9 Comparison of amplification factor,  $\Phi_h$ , with previous results.

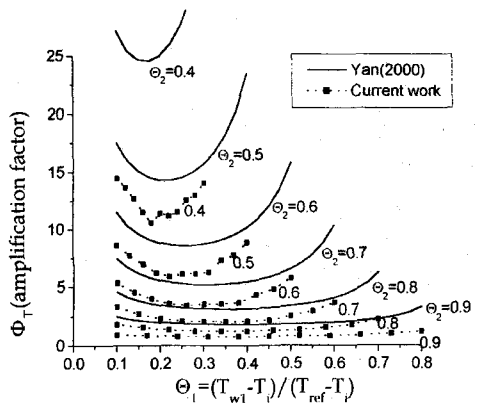


Fig. 10 Comparison of amplification factor,  $\Phi_T$ , with previous results.