

## 자유흐름온도와 대류열전달계수를 동시에 측정할 수 있는 방법에 대한 실험적 연구

송기범<sup>†</sup> · 정기호<sup>\*</sup> · 성영식<sup>\*</sup> · 김귀순<sup>\*\*</sup>  
(2002년 5월 8일 접수, 2002년 7월 25일 심사완료)

### An Experimental Study on a Simultaneous Determination of Reference Free-Stream Temperature and Convective Heat Transfer Coefficients

Kibum Song, Giho Jeong, Youngsik Seong and Kuisoon Kim

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

#### Abstract

This paper deals with the development of a new method that can obtain the heat transfer coefficient and the reference free stream temperature simultaneously. The method is experimentally verified through comparison with results in convective heat transfer experiments of a circular impinging jet using two narrow-band TLCs. The general method described in this paper is highly recommended to many heat transfer models with the unknown or ambiguous free stream temperature.

기호설명	
$erfc$	: 보정에러함수
$h$	: 대류열전달 계수 [ $W/m^2 K$ ]
$n$	: 표면수직방향
$N$	: Nusselt 수
$T_i$	: 초기온도 [K]
$T_{jet}$	: 제트출구온도 [K]
$T_{rec}$	: 단열벽면온도 [K]
$T_\infty$	: 자유흐름온도 [K]
$T_w$	: 벽면온도 [K]

그리스문자  
 $\theta$  : 무차원 온도

#### 1. 서론

대류열전달 계수는 열환경에는 관계가 없고 유동에 따라 좌우되는 것을 전제로 정의되어 사용되고 있으며, 실제로 많은 경우 이 전제는 타당한 것으로 알려져 있다. 그러므로 대류열전달 계수는 주위의 열환경에 관계없는 값이 되어야 그 응용성이 확보될 수 있다. 그러나 이와 같이 대류열전달 계수가 유동만의 함수가 되는 경우는 정확한 냉각 또는 가열 포텐셜 즉, 자유흐름온도와 벽면온도의 차이가 명확하게 제시되는 경우에만 해당된다. 하지만 대류열전달 문제에서 자유흐름온도가 분명하지 않은 경우도 많이 있으며, 대부분의 내부 유동의 경우에는 자유흐름온도를 정의하는 것이 매우 어렵다.

Kim<sup>(1)</sup>은 자유흐름온도로써 제트출구온도와 단

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 부산대학교 대학원 항공우주공학과  
E-mail : blackbum@hanmail.net  
TEL : (051)510-3290 FAX : (051)513-3760  
<sup>\*</sup> 회원, 부산대학교 대학원 항공우주공학과  
<sup>\*\*</sup> 회원, 부산대학교 항공우주공학과

열벽면온도를 적용하여 원형충돌제트 실험의 경우에 대해 그 결과를 비교하고, 제트출구온도를 사용할 때 결과적인 대류열전달 계수에 많은 오차가 수반된다는 사실을 확인하였다. 그리고 단열벽면온도를 자유흐름온도로 사용해야 대류열전달 계수가 유동만의 함수로 나타난다는 사실 또한 확인하였다. 그러나 실제 대류열전달 실험을 수행할 때 이러한 단열벽면온도는 측정하기가 매우 까다롭고 측정 가능한 경우라도 그 작업이 번거롭다는 단점이 있다.

이에 따라 자유흐름온도와 대류열전달 계수를 동시에 구하고자 하는 노력이 진행되고 있는데 Yan and Owen<sup>(2)</sup>은 과도 열전달 실험에서 한 점에서 서로 다른 두 시간에서 각각의 온도 정보를 추출하여 자유흐름온도와 대류열전달 계수를 구하는 방법을 제시하였고, 이 방법에 대한 신뢰도 분석을 하였다. 그러나 Yan and Owen<sup>(2)</sup>의 방법은 단지 2개의 온도 정보만을 사용하는 관계로 자유흐름온도에 관한 측정오차뿐만 아니라 최종적인 대류열전달 계수의 오차가 크다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 정기호 등<sup>(7)</sup>은 다수의 온도 정보를 이용하는 다중회귀방법에 의하여 대류열전달 계수와 자유흐름온도를 동시에 구하는 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 다중회귀 방법을 실제 실험에 적용할 수 있을지 확인하기 위해 원형충돌 제트 실험에 적용하였다. 아울러 기존의 측정 방법과 다중회귀방법을 비교하여 그 정확도를 확인하였다. 실험은 과도실험 조건을 가하여 시간에 따라 열환경이 변화하도록 하였으며 온도측정은 2개의 액정을 동시에 사용하여 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

유동이 일정한 상태에서 열환경이 변하는 경우 측정방법에 따른 대류열전달 계수의 특성을 살펴보기 위해 Fig. 1과 같은 원형충돌제트 실험을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 풍동은 전기히터를 포함한 개방형 열풍동으로서 제트풍속은 10m/sec, 제트출구온도는 90°C 이내에서 조절이 가능하도록 설계되었다. 제트가 분사되는 노즐로는 직경이 70mm, 길이는 800mm인 원형 파이프를 사용하였다.

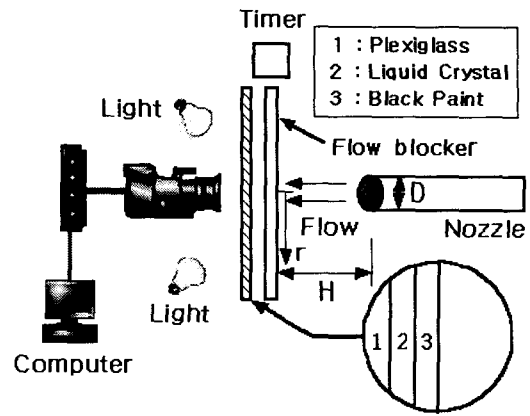


Fig. 1 Experimental setup for circular impinging jet

열환경의 변화를 위해서는 제트를 충돌평판에 갑자기 분사시키는 방법으로 평판의 벽면온도가 시간에 따라 변화하도록 유도한다. 이를 위해 제트의 온도가 정상상태에 도달할 때까지 유동전환막을 사용하여 제트의 방향을 전환시킨다. 제트온도가 정상상태에 도달하면 실내온도로 유지된 충돌평판을 정해진 곳에 위치시킨 다음 전환막을 제거하면 제트가 충돌평판으로 분출된다. 이 순간부터 충돌 평판의 온도가 상승하면서 열환경이 변하게 된다. 물론 유동 또한 갑작스런 분출로 순간적으로는 비정상이나 짧은 시간내에 정상상태로 회복된다. 보통 열전달 계수를 측정하는 시간이 전환막을 제거한 이후 10초 이후에서 수행되는데, 그 시간대의 유동은 완전히 정상상태에 도달하고 난 이후가 되므로 유동은 일정한 상태라 보아도 무방하다.

충돌평판은 낮은 열전도도를 가지는 아크릴 평판으로 제작되었는데, 두께가 20.0mm, 크기가 530(W)×530(H)이다. 평판 표면의 온도측정을 위해 평판의 중심에서 시작하여  $r/D=0.3$  간격으로 8개의 K-type 열전대를 설치하였다. 또한 평면 전체의 온도분포 측정을 위해 평판 표면에는 혼합된 2종류의 액정(R35C1W/R46C1W)과 블랙페인트를 차례로 도포하였다.

전환막을 제거하면서 실험이 시작되면 타이머와 비디오 카메라가 동시에 작동되고 비디오 카메라가 35도와 46도의 액정의 색상과 타이머의 시간정보를 포함한 영상을 기록한다. 각 시간대에서 액정의 영상들은 영상처리장치를 통해 온도

정보로 변환된다. 제트출구온도와 충돌평판의 초기 온도의 측정은 열전대(K-Type)와 온도지시계(Omega, DP41-TC)를 사용하여 측정하였다. 유속은 시험부에서 피토투브(pitot tube)와 디지털 마노미터(FCO12)를 이용하여 측정하였다.

이와 같은 과도실험을 통해 대류열전달 계수를 측정할 수 있는데, 같은 실험에서도 대류열전달 계수를 구하는 과정에 따라 결과가 많이 달라질 수 있다. 여기서는 세가지 방법을 적용하여 대류열전달 계수를 구한 다음 그 결과를 비교해 보기로 한다.

2.2 과도 방법1 (  $T_{\infty} = T_{jet}$  )

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

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

여기서,  $\Gamma$ 는 열확산도이다.

이러한 과도열전달 실험에서 유동온도가 초기 온도에서 자유흐름온도로 갑자기 변할 때 대류열전달 계수는 벽면온도와 다음과 같은 관계를 가진다.

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

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

그러므로 초기온도(  $T_i$  ), 자유흐름온도(  $T_{jet}$  ), 벽면온도(  $T_w$  ) 및 시간(  $t$  )을 측정하여 식 (2)와 식 (3)에 대입하면 대류열전달 계수(  $h$  )와 그에 해당되는 Nusselt 수(  $N$  )를 구할 수 있다. 여기서 초기온도는 K-type 열전대로, 벽면온도는 액정영상으로, 시간(  $t$  )은 타이머로 측정된 값을 사용하고, 자유흐름온도로는 K-type 열전대로 측정된 제트출구온도(  $T_{jet}$  )를 사용한다. 이 방법은 기존의 방법으로서 흔히 사용되고 있는 방법이다.

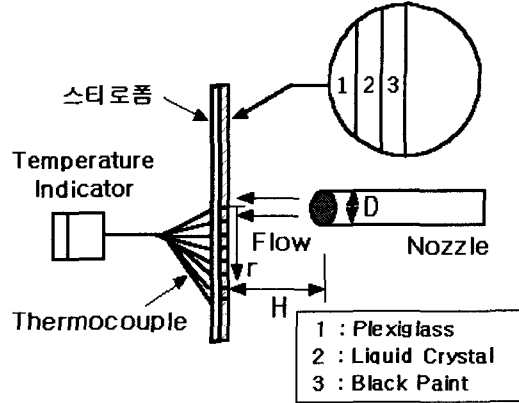


Fig. 2 Experimental setup for adiabatic wall temperature

2.3 과도 방법2 (  $T_{\infty} = T_{rec}$  )

이 방법은 자유흐름온도로 제트출구온도(  $T_{jet}$  ) 대신 단열벽면온도(  $T_{rec}$  )를 사용한다는 점을 제외하면 모든 면에서 기존의 과도방법1과 동일하다. 단열벽면온도는 충돌평판을 완전히 단열시킨 상태에서 얻게 되는 온도인데, 이 온도를 측정하기 위한 개념도는 Fig. 2에 나타나 있다. 평판을 단열시키기 위하여 제트 반대편에 두꺼운 스티로폼을 아크릴평판에 틈이 생기지 않도록 부착한다. 이것으로 완전히 단열이 되었다고 보기는 힘들지만, 충분한 시간(보통 5~6시간) 동안 계속 가열된 제트를 평판에 충돌시키면 평판이 가열되어 판에 수직인 방향으로의 온도가 거의 균일한 상태, 즉 단열상태에 도달하게 된다. 본 연구에서는 이 때 열전대가 설치된 평판에서의 벽면온도를 측정하여 그 위치의 단열벽면온도로 처리한다.

2.4 다중회귀방법

과도실험시에 적용될 수 있는 식 (2)와 식 (3)을 이용하면 이론적인 관점에서의 벽면온도에 대한 식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

앞서 수행한 원형충돌제트 실험에서 측정된 온도 ( $T_{w,p}$ )가 여러 개 있을 경우에 측정된 온도와 이론적인 온도와의 차이의 제곱의 합을 식 (6)과 같이 정의한다. 다중회귀방법은 이러한 온도 차이의 제곱의 합이 최소가 되는 조건의 자유흐름 온도와 대류열전달 계수를 구하는 것이다.

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

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

식 (6)의 값이 최소가 되는 조건은 대류열전달 계수와 자유흐름온도에 대한  $F(\epsilon)$ 의 기울기가 모두 영이 되는 것이다. 즉,

$$\frac{\partial F(\epsilon)}{\partial h} = \sum_{p=1}^N [T_{w,p} - T_i + (T_i - T_{ref})Y_p] * \left\{ \frac{2ht_p}{\rho ck} (Y_p - 1) + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{t_p}}{\sqrt{\rho ck}} \right\} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial F(\epsilon)}{\partial T_{ref}} = \sum_{p=1}^N [(T_{w,p} - T_i)Y_p] + (T_i - T_{ref}) \sum_{p=1}^N Y_p^2 = 0 \quad (8)$$

이러한 식 (7)과 식 (8)을 만족하는 자유흐름온도와 대류열전달 계수를 구하기 위해 반복적인 Newton-Raphson 방법을 사용하는데, 먼저 식 (7)에서 자유흐름온도를 가정하고 식 (7)을 만족하는 대류열전달 계수를 구한다. 그리고, 식 (7)에서 구한 대류열전달 계수를 식 (8)에 대입하여 자유흐

름온도를 구한다. 그리고 이 과정을 수렴된 해를 얻을 때까지 반복하면 최종적인 대류열전달 계수와 자유흐름온도를 동시에 구할 수 있다. 이 방법은 자유흐름온도를 측정하지 않고 구하는 방법이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 과도방법1 ( $T_{\infty} = T_{jet}$ )의 결과

반응온도 범위가 좁고 서로 다른 온도에서 반응하는 2개의 액정을 사용한 원형충돌제트 실험에서  $H/D=6$ 이고 자유흐름온도가  $82.6^{\circ}C$ 인 제트 출구온도를 사용했을 때 35도와 46도 액정영상으로부터 구한 Nu 분포가 Fig. 3에 나타나 있다. 이 결과에서 보면 전 영역에서 두 결과는 서로 다른 값을 나타내고 있으며, 특히 정체점에서 멀어질수록 그 차이는 뚜렷해진다. 이 두 값이 구해진 조건을 비교해보면 유동조건은 변화가 없는 상태에서 벽면온도가 서로 다른 조건이다. 즉 열환경이 서로 다른 조건이 된다. 이는 결국 자유흐름온도로서 제트출구온도를 사용하면 유동조건이 같더라도 열환경의 변화에 따라 열전달 계수도 다른 결과를 나타낸다.

#### 3.2 과도방법2 ( $T_{\infty} = T_{rec}$ )의 결과

Fig. 4에는 단열벽면온도를 자유흐름온도로 사용해서 구한 Nu 분포를 제트출구온도를 사용해서

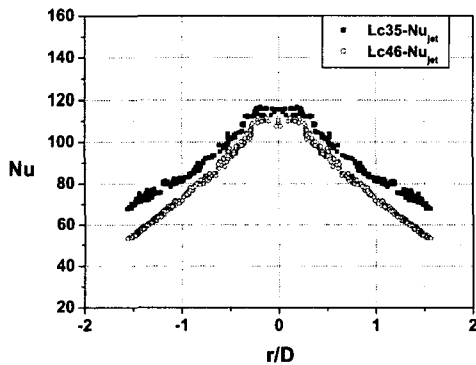


Fig. 3 The Nu distribution when  $T_{\infty} = T_{jet}$  ( $H/D=6$ ,  $Re=50,000$ )

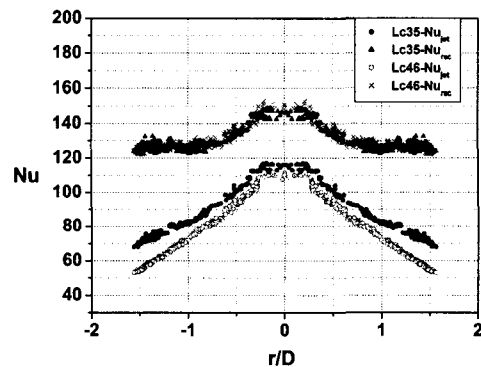


Fig. 4 The Nu distribution when  $T_{\infty} = T_{jet}$  and  $T_{\infty} = T_{rec}$  ( $H/D=6$ ,  $Re=50,000$ )

서 구한 Nu 분포와 비교해서 나타내 보았다. 제트출구온도를 사용하였을 경우에는 두 액정영상에서 구한 Nu가 서로 다른 값을 나타내는 데 반해, 단열벽면온도를 사용해 구한 Nu는 액정의 반응온도에 관계없이 유사한 값을 나타내고 있다. 이는 열환경에 관계없는 대류열전달 계수값을 구하려면 자유흐름온도로서 제트출구온도 대신 단열벽면온도를 사용하여야 한다는 것을 나타낸다. 또한 단열벽면온도에 의한 Nu값이 정체점인  $r/D=0$ 에서 약 150 정도의 값을 가지기 때문에 제트출구온도에 의한 Nu값인 약 110 정도보다 훨씬 높게 나타나는 것을 알 수 있고, 이러한 값의 차이는 정체점에서 멀어질수록 더 커지는 것을

볼 수 있다. 그 이유는 가열 포텐셜이 정체점에서 멀어질수록 감소하기 때문이다.

3.3 다중회귀방법(Multiple Regression)의 결과

여기서는 각각의 위치에서 35℃ 액정으로부터 2쌍이상의 온도와 시간, 46℃ 액정으로부터 2쌍이상의 온도와 시간 정보를 측정할 다음, 다중회귀방법을 적용하여 자유흐름온도와 대류열전달 계수를 구하였다.

Fig. 5에는  $r/D=0.38, 0.78, 1.05, 1.32, 1.54$ 인 5곳의 위치에서 다중회귀방법을 통해 구한 자유흐름온도의 분포와 실험으로 측정된 단열벽면온도의 분포를 비교해 보았다. 그 결과를 보면 두 온도분포가 반경방향의 위치에 관계없이 거의 유사한 값을 가진다는 것을 확인할 수 있다.

이는 단열벽면온도의 측정이 아주 번거롭다는 측면을 고려해 볼 때 다중회귀방법이 매우 효과적이라는 점을 나타낸다. 즉 다중회귀방법이 정확도를 보장하면서 편리한 방법이라는 것이다. Fig. 6은  $r/D=0.36$ 인 위치에서 다중회귀방법을 통해 구한 Nu를 과도방법1과 과도방법2을 통해 구한 Nu와 비교해 나타내었다. 그 결과를 보면 다중회귀방법의 결과는 단열벽면온도를 자유흐름온도로 사용하는 과도방법2의 결과와 유사하지만 과도방법1 보다는 더 큰 값을 가진다. 그리고 과도방법1의 결과는 시간이 지나면서 벽면온도가 높아질 때 즉 열환경이 바뀌면서 Nu가 감소하지만 다중회귀방법과 과도방법2는 시간에 따라 열환경의 변화에 관계없이 일정한 값을 유지하고 있다.

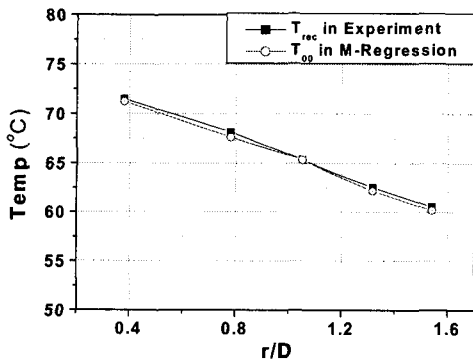


Fig. 5 Comparison of  $T_{\infty}$  obtained in multiple regression with  $T_{rec}$  ( $H/D=6, Re=50,000$ )

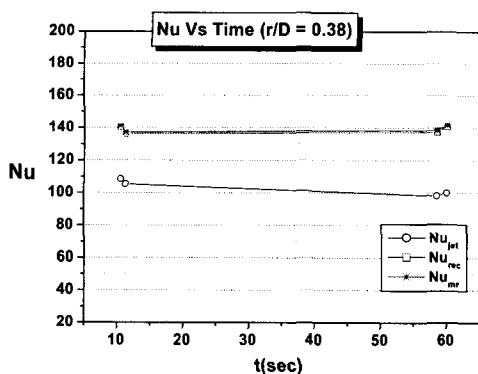


Fig. 6 Comparison of Nu at  $r/D=0.38$  ( $H/D=6, Re=50,000$ )

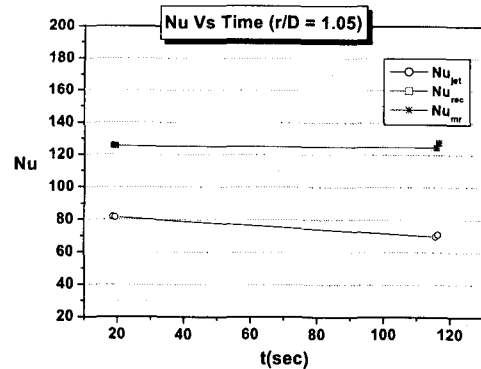


Fig. 7 Comparison of Nu at  $r/D=1.05$  ( $H/D=6, Re=50,000$ )

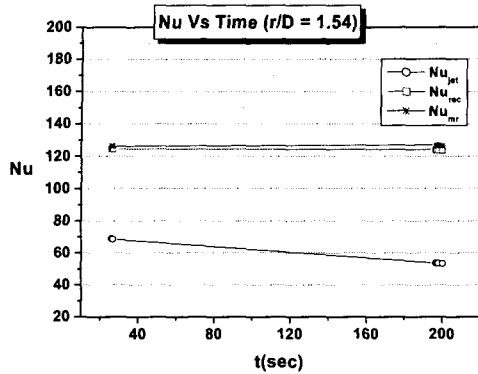


Fig. 8 Comparison of Nu at  $r/D=1.54$   
( $H/D=6$ ,  $Re=50,000$ )

Fig. 7과 Fig. 8은 각각  $r/D=1.05$ ,  $1.54$ 인 위치에서 Nu를 비교하여 나타낸 그림이다. 두 그림 모두 Fig. 6과 같이 다중회귀방법과 과도 방법2의 결과가 서로 잘 일치하고 시간에 따라 일정한 값을 보이는 반면에 과도방법1은 시간에 따라 변하는 특성을 보이고 있다.

특히 과도방법1의 결과에서  $r/D$ 이 커질수록 시간에 따른 Nu의 감소가 뚜렷해지고 있다. 원형충돌제트에서 제트중심에서 반경방향으로 나갈수록 외부 찬 공기의 유입으로 가열 포텐셜이 감소하는데 과도방법1은 자유흐름온도로 제트출구온도를 사용하여 가열포텐셜 감소효과를 보상해주지 못하기 때문에 나타나는 현상이다. 이와는 달리 다중회귀방법과 자유흐름온도로 단열벽면온도를 사용하는 과도방법2는 가열포텐셜 감소효과를 잘 반영하기 때문에 열환경의 변화에 관계없이 일정한 Nu를 얻게 된다고 말할 수 있다.

Fig. 9는 위의 결과를 종합하여 과도방법1, 과도방법2, 그리고 다중회귀방법을 사용하여 구한 Nu분포를 비교해 나타낸 것이다. 이 그림에서도 제트출구온도를 사용해서 구한 Nu는 액정반응온도에 따라 서로 다른 값을 나타내고 있다. 반면에 단열벽면온도와 다중회귀방법을 사용해서 구한 Nu는 서로 유사한 값을 나타내고 있으며, 액정반응온도에 관계없이 일정한 값을 나타내고 있다. 이는 단열벽면온도를 사용하는 경우와 다중회귀방법을 사용하면 열환경에 관계없는 대류열전달 계수를 구할 수 있다는 것을 잘 나타낸다. 단열벽면온도는 측정이 용이하지 않다는 점을 고

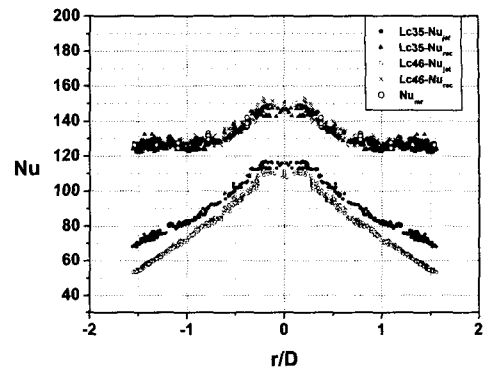


Fig. 9 The Nu distribution of  $T_{jet}$ ,  $T_{rec}$  and  $T_{\infty}$  in multiple regression method

려하면 열환경에 관계없이 일정한 대류열전달 계수를 얻는 방법으로 다중회귀방법이 타당한 방법이라 말할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 대류 열전달실험에서 자유흐름온도와 대류열전달 계수를 동시에 구하는 다중회귀방법(Multiple regression)의 실제 대류열전달 계수 측정에 대한 적용 가능성과 타당성을 확인하였다. 이를 위해 다중회귀방법을 원형충돌제트 실험에 적용하여 그 결과를 기존 방법의 결과와 비교하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 강제대류 과도 열전달실험에서 최종적인 대류열전달 계수의 정확도에 큰 영향을 미치는 것 중 하나가 자유흐름온도이다.
- (2) 다중회귀방법과 단열벽면온도를 사용하는 과도방법2는  $T_{\infty}$ 와  $h$ 의 정확도가 비슷하며 열환경의 변화에 관계없다.
- (3) 다중회귀방법이 단열벽면온도를 사용하는 과도방법2보다 편리하며 적용성이 우수하다.

#### 참고문헌

- (1) 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.

- (2) Yan, Y. and Owen, J. M., 2000, *Uncertainties in Transient Heat Transfer Measurements with Liquid Crystal*, Report No 19/00, University of Bath.
- (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) Schultz, D. L. and Jones, T. V, 1973, Heat Transfer Measurement in Short Duration Hypersonic Facilities, Agardograph No. 165.
- (5) Baughn, J. W. 1995, *Liquid Crystal Methods for Studying Turbulent Heat Transfer*, Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 16, pp. 365~375.
- (6) 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
- (7) Jeong, G., Song, K. and Kim, K. 2001, Simultaneous Determination of Reference Free-Stream Temperature and Convective Heat Transfer Coefficients, KSME, Proceedings of the KSME 2001 Spring Annual Meeting D. pp. 419~424