

## 천이 열전달 측정 실험에서 3차원 전도 효과의 보정

정진영\* · 강영준\* · 박정신\* · 곽재수\*†

### Correction for 3D Conduction Effect in the Transient Heat Transfer Measurement

Jin Young Jeong\*, Young Jun Kang\*, Jung Shin Park\*, Jae Su Kwak\*†

Key Words : Heat Transfer(열전달), Transient Heat Transfer Technique(천이 열전달 기법), 3D Conduction Effect(3차원 전도 효과)

#### ABSTRACT

Accurate heat transfer coefficient measurement of gas turbine component is very important for heat transfer design of components exposed to high temperature. Transient heat transfer measurement method with one-dimensional semi-infinite solid model assumption has been widely applied to gas turbine heat transfer studies for the last decades because it does not require complex boundary conditions. But there are several defects in the technique caused by the 1D heat transfer assumption. In this paper, various analyses were performed to investigate the 3D conduction effect in each technique and introduced a better model which can minimize the 3D conduction effect.

#### 1. 서 론

가스터빈의 효율을 높이기 위해 터빈 입구 온도는 계속해서 증가하는 추세에 있으며, 근래 가스터빈의 터빈은 금속의 용융점을 넘는 온도 환경에서 작동하고 있다. 높은 온도의 연소가스와 복잡한 유동에 의해 발생하는 높은 열응력은 터빈 부품의 수명 단축과 파손을 야기한다. 따라서 터빈의 고온 부품을 보호하기 위해서 막냉각 등의 다양한 냉각기법과 열 차폐 코팅 등이 적용되고 있다. 고온 부품의 냉각설계를 위해서는 정확한 열부하와 열전달계수의 측정이 전제되어야 한다.

가스터빈 열전달 연구에는 다양한 열전달 측정기법이 적용된다.<sup>(1)</sup> 이중 주유동 온도의 급격한 변화를 주고 시간에 따른 표면 온도의 변화를 액정(liquid crystals)이나 IR(Infrared) 카메라를 이용하여 측정하고, 이를 이용하여 열전달계수를 계산하는 천이 열전달 측정기법(transient heat transfer measurement technique)은 복잡한 형상에도 적용이 가능하기 때문에 가스터빈 열전달 연구 분야에 활발히 적용되고 있다. 이 기법에서는 시험부를 대류열전달 경계 조건을 갖는

1차원 반무한 고체로 가정하고 시험부 내의 열전달 또한 1차원적으로만 발생한다고 가정한다. 3차원 열전달 현상을 1차원으로 가정하기 때문에 측정된 열전달계수는 오차를 피할 수 없으며, 특히 모서리나 열전달계수 분포가 불균일한 영역에서 3차원 전도 효과로 인한 오차가 더욱 심각해질 수 있다.

여러 연구자들이 1차원 천이열전달 측정기법의 측정 정확도를 향상시키기 위한 연구를 수행하였다. Lin과 Wang<sup>(2)</sup>은 1차원 가정의 타당성을 점검하기 위해 천이 액정법과 3차원 Alternative Direction Implicit 방법을 사용하여 1차원으로 계산된 열전달계수와 3차원으로 계산된 열전달계수를 비교하였다. Bons<sup>(3)</sup>는 거친 평판으로 인해 발생하는 불균일한 열전달 분포에서 1차원 천이 열전달 기법과 3차원 직접 유한 체적법(direct finite volume method)을 비교하였다. Daryabeigi 등<sup>(4)</sup>은 1차원 천이 열전달 기법과 3차원 직접 유한 체적 방법, 역 유한 체적방법(inverse finite volume method)에 의해 계산된 열전달계수를 비교하였고, 1차원 기법과 3차원 기법은 10% 내외의 차이를 보였다. Xue 등<sup>(5)</sup>은 1차원 열전도 방정식의 차분 방정식을 통해 계산한 열유속의 수치적인 해와 주유동 온도와 벽면 온도의 차를 선형 회귀하여 열전달계

\* 한국항공대학교 항공우주및기계공학부(School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University)

† 교신저자, E-mail : jskwak@kau.ac.kr

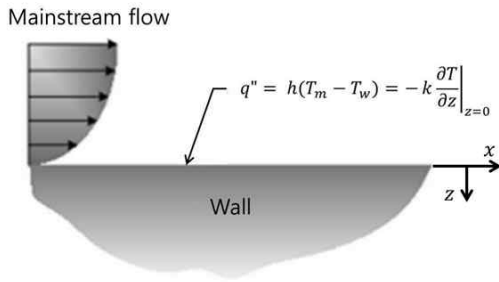


Fig. 1 Schematic diagram of 1D Semi-Infinite solid model

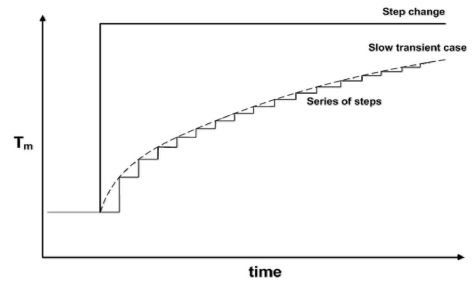


Fig. 2 Change of mainstream temperature

수를 결정하는 기법을 소개하였다.

본 연구에서는 기존 연구자들이 제안한 여러 1차원 천이 열전달 측정기법으로 계산된 열전달계수와 3차원 유한 체적법을 사용하여 계산된 열전달계수를 비교하고, 3차원 유한 체적법과 가장 가까운 해를 보이는 해석 기법으로 제안하고자 한다.

## 2. 해석 모델

### 2.1 주유동 온도의 스텝 변화를 가정한 1차원 반무한 고체 모델, 1D semi-infinite model (1D SI step)

1차원 천이열전달 측정기법의 개념도는 Fig. 1과 같다. 깊이 방향으로의 열전도만을 고려한 1차원 고체의 열전도 방정식은 식 (1)과 같이 공간에 대한 2계, 시간에 대한 1계의 편미분 방정식으로 나타난다. 주유동의 온도가 스텝 함수로 변한다고 가정하면 식 (1)은 식 (2)의 초기조건과 경계조건에서 식 (3)과 같은 해석적인 해를 가진다.

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

$$\begin{cases} at \ t = 0, \ T = T_i \\ at \ z = 0, \ -k \frac{\partial T}{\partial z} = h(T_w - T_m) \\ as \ z \rightarrow \infty, \ T = T_i \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{T_w - T_i}{T_m - T_i} = 1 - \exp\left(-\frac{h^2 \alpha t}{k^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{h \sqrt{\alpha t}}{k}\right) \quad (3)$$

여기서  $t$ 는 천이 실험 시간으로, 초기온도  $T_i$ 에서 측정된 시편의 온도  $T_w$ 까지 변화하는데 소요된 시간을 의미한다.  $T_m$ 은 주유동 온도,  $\alpha$ 는 시편부 열확산계수,  $k$ 는 시편부 열전도도이고  $h$ 는 구하고자하는 대류 열전달계수이다. 시편부의 열확산 계수와 열전도도는 시편부 재질에 따라 정해지는 상수이고, 따라서 실험을 통하여 초기온도  $T_i$ 와 천이 실험 시간  $t$ , 천이 실험 시간 후의 벽면의 온도  $T_w$ 를 측정하여 열

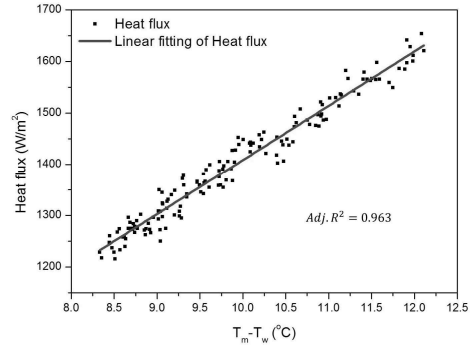


Fig. 3 Linear regression method

전달계수를 측정할 수 있다.

### 2.2 중첩 법을 사용한 1차원 반무한 고체 모델, 1D semi-infinite model (1D SI Superposition)

주유동 온도를 변화시키는 천이 열전달 시험 기법에서는 주유동 온도의 급격한 변화를 야기하기 위해 3방(3-way) 밸브나 메쉬 히터(mesh heater)를 사용하지만, 히터 자체와 시험부의 열 관성으로 인해 실제 실험에서 주유동 온도는 Fig. 2와 같이 천천히 변화한다. 이를 고려하기 위해 많은 연구자들은 주유동 온도 변화를 스텝 변화의 연속으로 가정하고, Duhamel의 중첩 법을 적용하여 식 (4)를 사용하여 열전달계수를 구하는 방법을 적용하였다.<sup>(6)</sup>

$$T_w - T_i = (T_{m,0} - T_i) \times F\left(\frac{h \sqrt{\alpha t}}{k}\right) + \sum_{i=1}^n \left[ F\left(\frac{h \sqrt{\alpha(t - \tau_i)}}{k}\right) \Delta T_m \right] \quad (4)$$

여기서,  $F(y) = 1 - \exp(y^2) \operatorname{erfc}(y)$

### 2.3 선형 회귀법, Linear regression method (LRM)

선형 회귀 방법은 Fig. 3과 같이 표면 열유속( $q_w''$ )과 주유동 온도와 벽면 온도의 차이( $T_m - T_w$ )가 비례관계에 있으며, 이때의 비례상수가 열전달계수임을 이용한 방법이다. 따라서 수치해석적인 방법으로 식 (1)에서 표면의 열유속을 계산하고, 주어진 시간에서의 열유속( $q_w''$ )과 온도차( $T_m - T_w$ )를

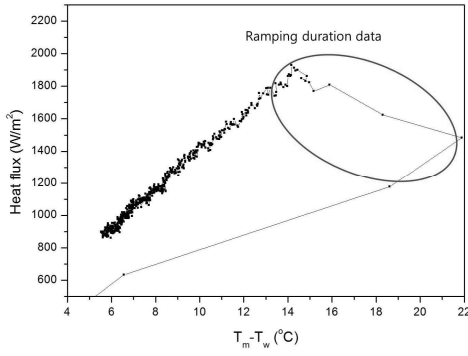


Fig. 4 LRM including the ramping duration data

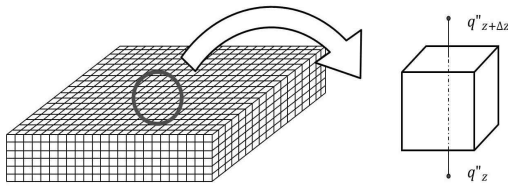


Fig. 5 Control volume of 1D FVM

선형 회귀하여 열전달계수를 계산한다.

Fig. 4는 주유동 온도가 급격히 상승하는 영역을 포함하는 주유동 온도와 벽면온도의 차이에 따른 열유속 그래프이다. 열전달계수는 유동에 매우 민감하게 반응하기 때문에 주유동이 가열된 직후의 열유속 데이터는 불확도가 매우 높다.<sup>(5)</sup> 따라서 선형 회귀를 통한 열전달계수 계산에서는 이 영역의 데이터는 제외되어야 한다. 본 연구에서는 주유동 온도를 가열한 후 5초에서 20초 사이의 열유속을 선형 회귀하여 열전달계수를 계산하였다.

### 2.4 1차원 유한체적 기법, 1D Finite Volume Method (1D FVM)

1D FVM은 시험부를 매우 작은 미소 체적으로 나누고, 각 미소체적에 대해 에너지 보존 방정식을 적용한다. 이때, Fig. 5와 같이 열전달이 깊이 방향으로만 일어난다고 가정하면 에너지 보존 방정식은 식 (5)와 같이 표현된다. 식 (5)의 해석을 위해서는 한 개의 초기 조건과 두 개의 경계조건이 필요하다. 1D SI 기법과 동일한 경계조건을 대입하기 위하여 식 (6)과 같은 경계 조건을 설정하였다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \Delta V = \sum (\dot{q}_{in}) - \sum (\dot{q}_{out}) \quad (5)$$

( $\dot{q}$ : 열 유량,  $V$ : 미소 체적의 부피)

$$\begin{cases} T(x, y, z, 0) = T_i(x, y) \\ T(x, y, 0, t) = T_w(x, y, t) \\ T(x, y, z_{max}, t) = T_i(x, y) \end{cases} \quad (6)$$

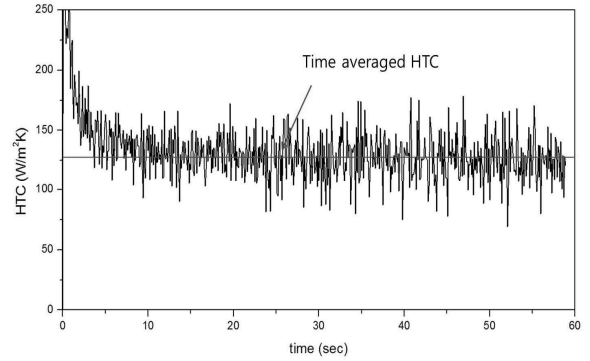


Fig. 6 Heat transfer coefficient (HTC) calculation with 1D FVM

이때 식 (5)에서 있는 편미분된 항들을 식 (7)을 사용하여 차분화하면 식 (8)과 같이 시간에 대하여 1차, 공간에 대하여 2차인 포물선형 편미분 방정식의 차분화식이 유도된다.

$$\dot{q}_z = -k \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k-1}^n}{\Delta z} A_z \quad (7)$$

$$\dot{q}_{z+\Delta z} = -k \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k+1}^n}{\Delta z} A_z$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k}^{n-1}}{\Delta t}$$

$$T_{i,j,k}^{n+1} = Fo T_{i,j,k+1}^n - (1+2Fo) T_{i,j,k}^n + Fo T_{i,j,k-1}^n \quad (8)$$

( $i, j, k, n : x, y, z, t$ 의 차분 첨자)

여기서,  $Fo = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta z)^2}$

식 (8)을 모든 격자점에서 연립하여 풀게 되면 고체 내부 임의의 위치와 임의의 시간에서의 온도를 구할 수 있다. 이때,  $Fo$ 는 미소체적의 푸리에 수이다. 표면의 열유속은 식 (9)와 같이 표면 근처의 온도를 이용하여 계산할 수 있다. 또한 격자의 모든 시간 스텝에서 열전달계수는 식 (9)와 식 (10)을 사용하여 구할 수 있다.

$$\dot{q}_w \approx -k \frac{T_{i,j,1}^n - T_{i,j,2}^n}{\Delta z} A_z \quad (9)$$

$$h = \frac{\dot{q}_w}{(T_m - T_w) A_z} \quad (10)$$

Fig. 6은 시간에 따른 열전달계수를 계산한 예를 나타낸 것으로, 시간에 따라 열유속과 표면 온도가 변하기 때문에 열전달계수도 변하는 것을 볼 수 있다. 본 연구에서 대표 열전달계수는 계산된 열전달계수를 시간 평균된 값으로 정의하였고, 본 연구에서는 LRM과 같은 시간 영역인 5 sec에서 20 sec 사이의 열전달계수를 평균 내어 계산하였다.

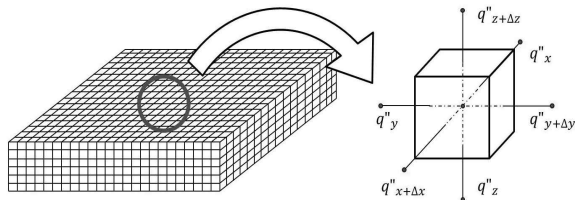


Fig. 7 Control volume of 3D FVM

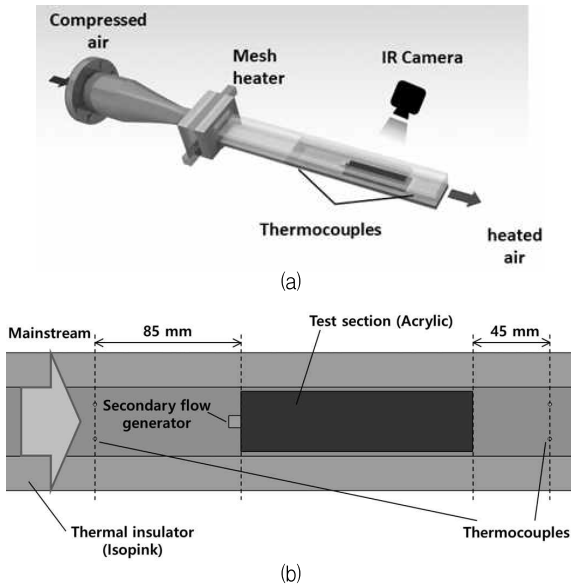


Fig. 8 (a) Test setup and (b) Detailed view of test section

### 2.5 3차원 유한체적법, 3D Finite volume method (3D FVM)

3D FVM은 1D FVM과 동일한 방법으로 고체 내부 미소 검사 체적에 에너지 보존 방정식을 풀어내는 기법이다. 하지만 1D FVM은 깊이 방향으로의 전도만을 고려한 반면, 3D FVM은 Fig. 7과 같이 깊이방향 전도만이 아닌 횡방향의 열전도 효과까지 고려한 방법이다. 식 (11)은 Fig. 7과 같은 검사체적의 에너지 보존 방정식이다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \Delta V = (\dot{q}_x + q_{x+\Delta x} + \dot{q}_y + q_{y+\Delta y} + \dot{q}_z + q_{z+\Delta z}) \quad (11)$$

횡방향의 전도 효과까지 고려하기 위해서는 다수의 경계 조건이 필요하며, 대부분의 실험에서 구현하거나 측정하기 어려운 조건이다. 따라서 3D FVM은 특별한 경우를 제외하면 적용이 불가능한 방법이다. 시험부 주변이 단열된 경우, 경계 조건은 단열조건에 해당하는 식 (12)를 적용할 수 있다.

$$\nabla T \cdot \hat{n} = 0 \quad (12)$$

1D FVM과 마찬가지로 식 (10)을 이용하여 매 시간 스텝

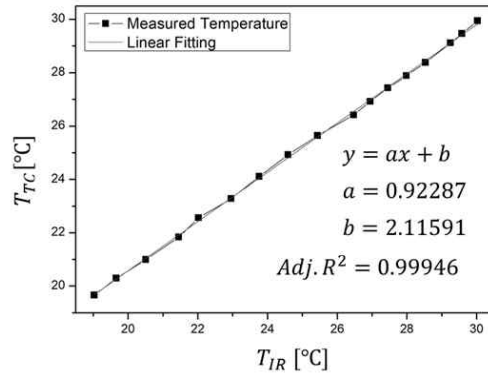


Fig. 9 Calibration Curve of IR camera and thermocouple

마다 열전달계수를 계산할 수 있으며, 시간에 대하여 평균을 내어 최종적으로 열전달계수를 계산할 수 있다.

3D FVM은 3차원적인 전도 효과를 고려한 열전달계수의 계산법이기에 때문에 다른 1차원 기법보다 3차원 열전도에 의한 오차가 적은 기법이라 할 수 있다.

### 3. 실험 장치

Fig. 8은 실험 장치를 나타낸 것으로 시험부의 상류에 유동의 온도를 급격하게 상승시키기 위한 스테인리스 스틸 재료의 메쉬 히터를 설치하였고, 히터를 통과한 유동은 2:1의 종횡비를 가지는 80×40 mm의 유로를 통과하여 열전달 시험부를 통과한다. 열전달 시험부는 135×40 mm, 20T의 아크릴로 제작되었으며 시험부의 옆면에 3D FVM의 단열 경계 조건을 부여하기 위해 단열재를 부착하였다.

3차원 전도 효과는 불균일한 열전달이 일어날 때 더 커지게 된다. 3차원 열전도를 야기하기 위해 Fig. 8(b)와 같이 시험부 상류에 이차유동을 발생시키기 위한 7 mm의 정육면체 구조물을 설치하였다. 실험은 수력직경 기준 레이놀즈수 30,000에서 진행되었다.

시험부 표면 온도는 IR 카메라 (FLIR T650SC)를 사용하여 측정되었다. 실험 전, 온도 컨트롤러를 사용하여 IR카메라에서 측정되는 온도를 열전대에서 측정되는 온도로 보정하여 사용하였다. Fig. 9는 열전대와 IR 카메라의 보정곡선이다. 주유동의 온도는 시험부 상류 85 mm, 하류 45 mm에 각 2개의 T-type 열전대를 설치하여 측정하였으며, 측정 구간 내에서 주유동 온도가 선형적으로 변하는 것으로 가정하여 각 위치에서의 주유동 온도를 계산하였다. Fig. 10은 주유동 온도의 상승량이 20°C일 때 시험부 상류에 위치한 열전대에서 측정된 온도이다.

### 4. 실험 결과

Fig. 13은 동일한 실험 데이터를 앞서 설명한 다양한 해석

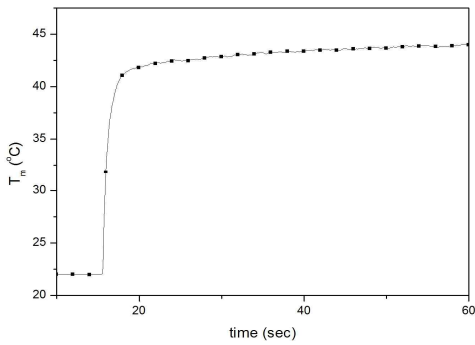


Fig. 10 Mainstream temperature profile

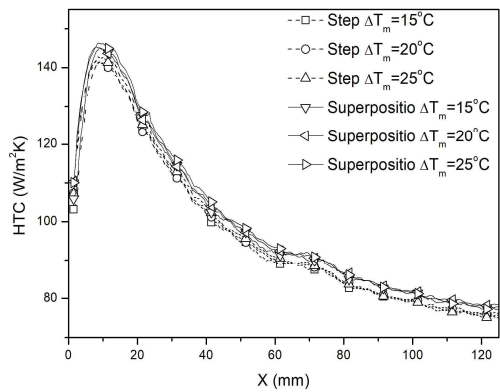
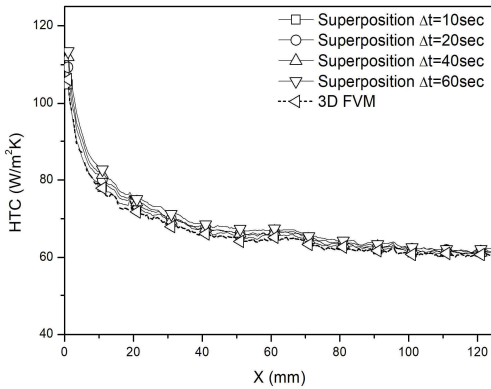
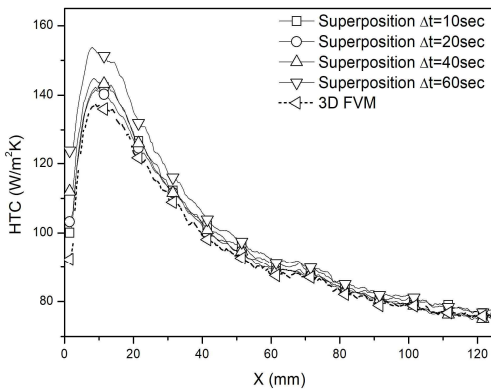


Fig. 12 Effect of mainstream temperature increment on the HTC



(a)



(b)

Fig. 11 Centerline HTC graphs with different test duration time at (a) uniform HTC condition and (b) non-uniform HTC condition

기법을 이용해 계산한 열전달계수 분포를 나타낸 것이다. 구조물의 하류에서 구조물에 의한 이차 유동의 영향으로 열전달계수가 크게 증가하는 것을 볼 수 있고, 하류로 갈수록 열전달계수가 작아지는 것을 볼 수 있다. 정량적인 비교를 위해 시험부 중앙에서 폭의 10% 영역의 열전달계수 평균을 도사하였다.

이론적으로 열전달계수는 주유동 온도 상승량( $T_m - T_{m,i}$ )과 천이 실험 시간( $t$ )에 대한 의존성이 없어야한다. Fig. 11은 중첩법을 적용한 1차원 반무한 고체 기법 (1D SI,

Superposition)에서 서로 다른 천이 실험 시간을 적용하였을 때의 결과를 3차원 FVM 결과와 비교한 것이다. Fig. 11(a)와 (b)는 각각 시험부 상류에 이차유동을 발생시키는 구조물이 없을 때와 있을 때의 결과를 나타낸 것이다. 두 경우 모두 열전달계수가 크지 않은  $x=100$  mm 영역에서는 천이 실험 시간이 계산된 열전달계수에 미치는 영향이 미미하였다. 하지만 구조물이 설치되어 열전달계수의 구배가 큰  $x=10$  mm 영역에서는 천이 실험 시간에 따라 열전달계수가 최대 14%의 차이가 나타났다. 따라서 열전달계수가 불균일한 상황에서는 1D SI Superposition 기법으로 계산된 열전달계수가 천이 실험 시간에 크게 영향을 받는 것을 확인하였다.

Fig. 12는 천이 실험 시간이 10 sec일 때 주유동 온도의 상승량에 따른 1D SI 기법들의 열전달계수 분포이다. 열전달계수의 분포가 상대적으로 균일한 하류 영역에서는 1D SI Superposition 기법보다 1D SI Step 기법으로 계산된 열전달계수가 작게 계산되는 경향을 보였지만,  $x=10$  mm 근방의 불균일한 열전달계수 분포 영역에서는 주유동 온도 상승량에 따라 계산되는 열전달계수가 크게 변화하는 것을 볼 수 있다.

천이 열전달 실험에서 각 측정 인자들의 불확도가 계산되는 열전달계수에 미치는 영향을 살펴보기 위한 불확도 해석을 수행하였다. 식(13), 식(14)를 사용하면 여러 측정 오차에 대한 열전달계수의 불확도를 계산할 수 있다.<sup>(7)</sup>

$$\Delta h = \sqrt{\left(\frac{\partial h}{\partial T_i} \Delta T_{IR}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial T_w} \Delta T_{IR}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial T_m} \Delta T_{TC}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial M} \Delta M\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial t} \Delta t\right)^2} \quad (13)$$

$$u = \Delta h/h \quad (14)$$

여기서  $u$ 는 불확도를 뜻하며,  $\Delta T_{IR}$ 은 IR 카메라의 측정 오차로 매뉴얼에 표시된  $0.3^\circ\text{C}$ 를 사용하였다.  $\Delta T_{TC}$ 는 주유동 온도를 측정하는 열전대의 측정오차로  $0.5^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t$ 는 카메

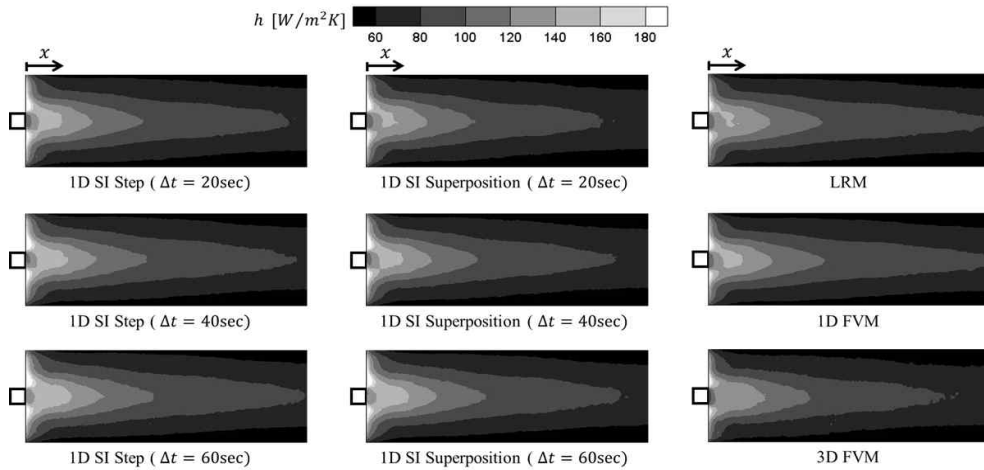


Fig. 13 HTC contours of each analysis model

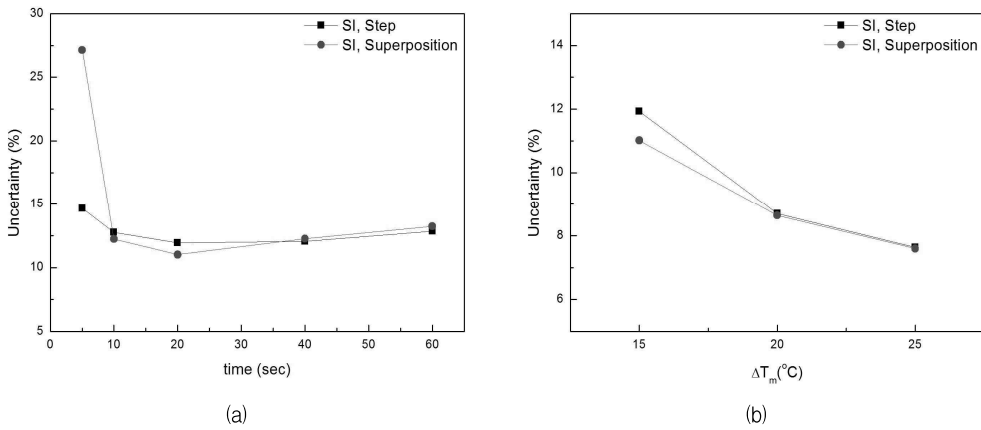


Fig. 14 Uncertainty of 1D SI techniques by (a) transient time and (b) mainstream temperature increment

라 초당 촬영수의 역수이며 촬영 주기를 뜻한다. 본 실험에서 사용한 IR 카메라의 초당 촬영 수는 30 프레임이므로  $\Delta t$ 에 1/30 sec를 사용하였다.  $\Delta M$ 은 시험부 물성치(열전도도와 열확산도)의 불확도이며, 5%로 가정하였다.

천이 실험 시간이 짧으면 IR 카메라의 온도 측정 오차로 인해 불확도가 높은 결과가 계산되며, 천이 실험 시간이 과도하게 길어지면 3차원 열전도가 증가하여 1차원적 열전달 가정에 위배되는 정도가 커지게 된다. Fig. 14(a)는 1D SI Step 기법과 Superposition 기법의 천이 실험 시간에 따른 불확도를 나타내며, 두 기법 모두 천이 실험 시간이 20초 때 최소의 불확도를 보였다. Fig. 14(b)는 천이 실험 시간이 20초일 때 주유동 온도 상승량에 따른 1D SI 기법의 불확도 분석으로, 주유동 온도 상승량이 높을수록 불확도가 감소하는 경향을 보인다. 식(3)에서 좌변은 벽면 온도의 상승량( $T_w - T_i$ )과 주유동 온도 상승량( $T_m - T_i$ )의 비율로 정의되는데 분모인 주유동 온도 상승량이 클수록 각 인자들의 오차에 대한 좌변 전체의 변동이 작아지기 때문에 주유동 온도 상승량이 클수록 불확도가 감소하는 현상을 보인다.

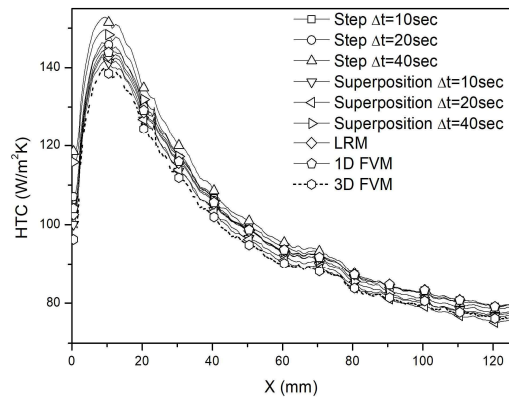


Fig. 15 Centerline HTC for each method

Fig. 15는 주유동 온도의 상승량이 25°C일 때, 각 해석모델을 통해 계산된 열전달계수를 나타낸 것이다. 대부분의 기법들은 비슷한 수준의 열전달계수를 나타냈지만 3D FVM이 다른 기법에 비해 3차원 열전도 현상을 보다 현실적으로 반영한다고 가정하면, 1D SI Step 기법은 열전달계수를 과소

Table 1 Deviation of HTC with 3D FVM

		1D SI step	1D SI Superposition	LRM	1D FVM
$\Delta t$	10 sec	4.322	1.336	3.65	3.89
	20 sec	3.461	0.734		
	40 sec	6.108	3.607		
	60 sec	6.73	4.149		

단위 : %

Table 2 Deviation of HTC by 1D SI superposition with 3D FVM at various test condition

		$\Delta t$			
		10 sec	20 sec	40 sec	60 sec
$\Delta T$	15°C	2.985	1.547	2.193	5.98
	20°C	0.147	0.807	2.552	4.48
	25°C	1.336	0.734	3.607	4.15

단위 : %

평가하는 경향을 보이고, 1D FVM으로 계산된 열전달계수의 오차가 가장 크게 나타났다.

Table 1은 주유동 온도의 상승량이 25°C일 때 3D FVM으로 계산된 열전달계수에 대한 여러 실험기법들의 전체 면적 평균 오차를 나타낸다. 1D SI Superposition 기법, 천이 실험 시간 20초일 때의 열전달계수가 모든 기법 중 3D FVM에 가장 잘 일치하는 것을 확인하였다.

Table 2는 주유동 온도의 상승량과 천이 실험 시간에 따른 1D SI Superposition 기법의 3D FVM에 대한 오차를 나타낸 것이다. 천이 실험 시간은 10초에서 20초 사이에서 3D FVM에 대하여 최소 오차를 보였다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 단순한 직사각형 유로의 열전달계수 측정 실험에서, 여러 가지 천이 열전달 실험 기법을 적용하여 열전달계수를 계산하였다. 정확한 열전달계수 측정을 위해서는 가능하다면 3차원적인 전도 효과가 고려되어야 하지만, 본 실험과 같이 단순한 모델이 아니라면 3차원 열전도 방정식에 대한 경계조건을 확보하기 어렵다. 본 연구에서 고려된 열전달 실험에서 1D SI Superposition 기법의 천이 실험 시간

20초이고 주유동 온도상승량이 높을 경우가 최소의 불확도와 3D FVM에 대한 최소의 오차율을 보였다.

## 후 기

이 논문은 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(No. NRF-2015R1A2A101002636)과 방위사업청, 국방과학 연구소의 기초연구 ‘플라즈마 작동기와 Coanda 효과를 이용한 막냉각 효율 향상’ 과제의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

- (1) Han, J. C., Dutta, S. and Ekkad, S., "Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology," CRC Press. pp. 68 9~761.
- (2) Lin, M. and Wang, T., "A Transient Liquid Crystal Method using a 3-D Inverse Transient Conduction Scheme," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 45, pp. 3491~3501.
- (3) Bons, J., 2009, "Transient Method for Convective Heat Transfer Measurement With Lateral Conduction-Part I: Application to a Deposit-Roughened Gas Turbine Surface." Journal of Heat Transfer, Vol. 131, 011301, January.
- (4) Daryabeigi, K., Berry, S. A., Horvath, T. J., Nowak, R. J., 2006, "Finite Volume Numerical Methods for Aeroheating Rate Calculations from Infrared Thermographic Data," Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 43, No. 1, pp. 54~62, February.
- (5) Xue, S., Roy, A., Ng, W. F. and Ekkad, S. V., 2015, "A Novel Transient Technique to Determine Recovery Temperature, Heat Transfer Coefficient, and Film Cooling Effectiveness Simultaneously in a Transonic Turbine Cascade," Journal of Thermal Science and Engineering Applications, Vol. 7, No. 1, 011016, March.
- (6) Kwak, J. S., 2008, "Comparison of Analytical and Superposition Solutions of the Transient Liquid Crystal Technique," Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 22, No. 2, pp. 290~295, April-June.
- (7) Kline, S. J., The Purposes of Uncertainty Analysis. J. Fluids Eng.-Trans. ASME 1985, 107, 153~160.