

## 표면의 대류열전달계수, 방사율 및 화염 열유속 역해석 연구

윤경범 · 박원희\*†

한국건설생활환경시험연구원, \*한국철도기술연구원

### Inverse Estimation of Convective Heat Transfer Coefficient, Emissivity and Flame Heat Flux on the Surface

Kyung-Beom Yoon · Won-Hee Park\*†

Korea Conformity Laboratories

\*Korea Railroad Research Institute

(Received September 12, 2013; Revised December 6, 2013; Accepted December 6, 2013)

#### 요 약

반발 입자 군집 최적화 알고리즘을 이용하여 시편 표면에서의 대류열전달 계수, 방사율 및 화염에 의한 열유속을 예측하였다. 콘 칼로리미터를 이용하여 여러 열유속 조건 하에서의 방무목 시편의 표면 온도와 질량감소율 및 발화시간을 측정하였다. 본 연구에서 최적화된 대류열전달계수, 방사율 및 화염에 의한 열유속을 이용하여 계산된 표면온도는 실험결과와 각 열유속에 대하여 평균오차가 2% 내로 잘 일치하였다. 본 연구에서 제시한 방법을 이용하여 실험적 방법으로 직접 측정하기 매우 어려운 화염이 발생하는 표면에서 열전달과 관련된 여러 물리량을 구할 수 있다.

#### ABSTRACT

The convective heat transfer coefficient, emissivity, and flame heat flux on the surface of Douglas fir are estimated by using repulsive particle swarm optimization. The surface temperature, mass loss rate, and ignition time are measured for various incident heat fluxes from a cone heater of the cone calorimeter. The calculated surface temperatures obtained by using the optimized convective heat transfer coefficient, emissivity and flame heat flux on the surface in this study match well with those obtained from the test. The maximum error between the predicted and measured surface temperatures for the three different external heat fluxes is within 2% showing reasonable agreements. The methodology proposed in this study can be used to obtain various values related to heat transfer on a flaming surface that are difficult to measure in experiments.

**Keywords :** Flame heat flux, Convective heat transfer coefficient, Emissivity, Repulsive particle swarm optimization

## 1. 서 론

실물 대 화재 시험은 비용 및 규모 등의 문제점이 있기 때문에 실제의 환경에서 화염 확산 및 화재 성장을 예측하기 위한 Computational Fluid Dynamics (CFD) 모델링에 대해 관심이 증대되고 있으며, 이 CFD 모델링은 안전 기술 설계를 위해 잠재적으로 유용하다. 컴퓨터 성능이 발전함에 따라 화재모델링은 화재성장의 실제와 비슷하게 예측하는 것이 가능해졌다. 대표적인 화재모델링 소프트웨어로는 2000년 2월에 National Institute of Standards and Technology (NIST)에서 공개한 Fire Dynamics Simulator (FDS)가 있으며, 발전을 거듭하며 FDS version 4.07에서

수치적 열분해 모델이 묘사되고 실행할 수 있도록 연결되었고 발화 및 화염의 전파를 묘사할 수 있다<sup>(1-4)</sup>. 열분해 해석 모델에 따라 다른 물성값이 요구되기는 하지만 가장 빈번하게 사용되는 NIST의 FDS 모델의 경우 재료별 연료비율, 연소열(heat of combustion), 반응열(heat of reaction), 열전도도(conductivity), 비열(specific heat), 열분해율 결정 상수 등의 물성치가 요구된다. 그러나 실제 사용되는 재료의 경우 문헌에서 얻을 수 있는 물성치는 극히 제한적이므로 화재시뮬레이션 시 적절한 물성치를 입력하기 매우 힘들다. 또한 합성재료 및 신소재에 대한 열물성치 정보는 전무한 상태이다. 이러한 문제점의 해결을 위해 실험실 규모의 콘칼로리미터(cone calorimeter) 실험의 결과

† Corresponding Author, E-Mail: whpark@krii.re.kr  
TEL: +82-31-460-5358, FAX: +82-31-460-5279

ISSN: 1738-7167  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2013.27.6.015>

를 바탕으로 역문제(inverse problem) 해석을 통한 열물성치를 역추정하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 역문제 해석을 위해 최근에 활용되는 기법은 임의의 해 집단에서 최적 해를 탐색하는 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA), 혼합형 유전 알고리즘(Hybrid Genetic Algorithm, HGA), 반발 입자 군집 최적화(Repulsive Particle Swarm Optimization, RPSO) 알고리즘 등이 있다<sup>(5-8)</sup>. 반발 입자 군집 최적화 알고리즘을 이용한 연구는 각 물성치에 대한 민감도 및 엄밀해와 비교 분석이 진행되었고, 가상의 물성치를 갖는 탄화 재료를 대상으로 반발 입자 군집 최적화 알고리즘이 유전 알고리즘과 비교하여 빠른 시간 내에 정확한 해를 얻을 수 있음을 확인하였다<sup>(9,10)</sup>. 이전의 열분해 물성을 예측한 연구는 경계조건에 해당하는 화염에 의한 열유속, 표면 방사율 및 대류열전달계수에 대하여 화염 발생 유무에 상관없이 일정한 값( $q_{fl}'' = 30 \text{ kW/m}^2$ ,  $\varepsilon = 0.9$ ,  $h = 10 \text{ kW/m}^2$ )을 사용하였다<sup>(8-11)</sup>. 그러나 탄화 재료의 경우 화염에 의해 재료의 물성이 달라지기 때문에 표면에서의 방사율 및 대류열전달계수가 다르게 적용되어야 하며, 시편에 따라 화염에 의해 시편 표면이 받는 열유속이 다르게 적용되어야 한다. 따라서 대류열전달계수, 표면 방사율 및 화염이 시편에 주는 열유속에 대한 연구가 콘 히터의 열유속 및 표면 방사율이 다른 조건에 대하여 진행되었다<sup>(12-15)</sup>.

본 연구에서는 열분해 물성을 예측할 때 화염발생 유무에 상관없이 일정한 값의 표면물성을 입력하는 것<sup>(8-11)</sup>을 개선하기 위해 콘 칼로리미터를 이용한 실험결과와 RPSO 알고리즘을 이용하여 시편의 대류열전달 계수, 표면 방사율 및 표면이 받는 화염의 열유속을 예측하였다. 실험에 사용된 콘 칼로리미터는 ISO 5660<sup>(16)</sup> 기준을 만족시키는 장치이며, 두께 21 mm 미송방부목을 시편으로 총 6개의 콘 히터 열유속(30, 40, 50, 60 70, 80 kW/m<sup>2</sup>)에 대하여 실험을 수행하였다. 측정된 결과들로부터 임계열유속 및 화염이 시편에 영향을 미치는 열유속을 산출하고, 시편 표면에서의 대류열전달계수 및 표면 방사율을 예측하는 프로그램을 개발하였다. 콘 칼로리미터의 방출 열유속이 일정할 때 화염이 발생하는 인화물에 대한 물성들을 개발된 프로그램을 이용하여 예측하고 측정된 표면온도와 예측된 물성들로부터 계산된 시편의 표면온도를 비교분석하였다.

## 2. 반발 입자 군집 최적화

입자 군집 최적화(Particle Swarm Optimization, PSO) 알고리즘은 유전학과 진화원리를 이용한 유전 알고리즘(GA)과 달리 생체군집인 새 떼 및 물고기 떼 등의 사회적 행동양식에 대한 규칙성 증명에 착안하여 Kennedy와 Eberhart<sup>(17)</sup>에 의하여 개발되었다. PSO 알고리즘이 GA에 비하여 문제해결 능력(해의 수렴성, 계산시간 등)이 우수

하다는 장점이 있지만, 해의 탐색공간이 매우 광범위하고 지역 최적값이 매우 복잡한 최적화 문제에 PSO 알고리즘을 적용할 경우 입자들의 군집이 지역 최적값으로 조기 수렴함으로써 전역 최적값을 찾기 어려워질 수 있다는 단점이 있다. 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 PSO 알고리즘의 속도 식에서 전체 군집의 최적 위치 대신에 무작위로 선택한 입자들의 최적 위치를 이용한 다음의 속도 식으로 개선한 방법이 반발 입자 군집 최적화 알고리즘이다<sup>(18)</sup>. 이때 입자의 최적 위치를 갱신하기 위한 속도 식은 다음과 같다.

$$v_{i+1} = wv_i + \alpha r_1 (\hat{x}_i - x_i) + w\beta r_2 (\hat{x}_{hi} - x_i) + w\gamma r_3 \zeta \quad (1)$$

여기서, 각 입자는 역해석 하고자 하는 각 물성을 의미하며, 본 연구에서는 화염발생전후의 대류열전달계수 및 표면 방사율이다.  $v$ 는 입자 속도,  $w$ 는 범위 [0.01, 0.7]의 관성가중치,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 는 상수로 각각 0.5, 0.5, 0.0005이다.  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ 는 [0, 1]범위에서 생성되는 난수,  $\zeta$ 는 입자들의 탐색능을 향상시키기 위해 도입된 임의의 속도 성분,  $x$ 는 입자 위치,  $\hat{x}$ 는 입자의 최적 위치 및  $x_h$ 는 군집 내에서 임의로 선택한 입자의 현재까지의 최적 위치이다. 즉, 자신의 최적 위치뿐만 아니라 다른 입자들의 최적의 위치정보를 공유함으로써 해집단이 지역 최적값으로 조기 수렴을 방지하고 새로운 영역을 탐색할 수 있기 때문에 공간 탐색 능력과 매우 복잡한 최적화 문제의 해결 능력이 PSO 알고리즘에 비해 우수하다는 장점이 있다.  $\omega$ 는 관성가중치(inertia weight)로 global search(전역 탐색, 새로운 영역 탐색)과 local search(국지 탐색, 현재 영역의 미세한 조정)를 조화시키는 역할을 한다.  $\omega$ 가 커질수록 전역적 탐색을 의미한다. 각각의 입자 위치를 평가하는 적합도 함수는 다음과 같이 쓸 수 있으며<sup>(18)</sup>, 적합도  $f$ 를 산출함에 있어 측정된 표면온도 결과를 사용하였다.

$$f^n = \frac{1}{\Phi} \sum_{\phi=1}^{\Phi} \left[ \frac{\sum_{i=1}^{N_i} \{(T_{s,exp,i} - \bar{T}_s)^2 - (T_{s,exp,i} - T_{s,try,o})^2\}}{\sum_{i=1}^{N_i} (T_{s,exp,i} - \bar{T}_s)^2} \right] \quad (2)$$

여기서,  $\Phi$ 는 적합도를 계산하는데 사용된 콘 히터의 열유속 수이며,  $T_s$ 는 표면 온도,  $\bar{T}_s$ 는 실험 시간동안의 평균 표면온도,  $N_i$ 는 주어진 콘 히터의 열유속에서 측정된 표면온도 수를 나타낸다. 하첨자 “exp”와 “try”는 실험 값 및 예측된 표면 물성을 이용하여 계산된 표면 온도 값을 나타낸다. 적합도가 1에 가장 가까운 값을 갖는 표면 물성을 최적의 값으로 판단한다. Figure 1은 RPSO 알고리즘을 이용하여 화염 전후의 대류열전달 계수, 표면 방사율 및 화염에 의한 열유속을 예측하는 과정을 나타내고 있다.

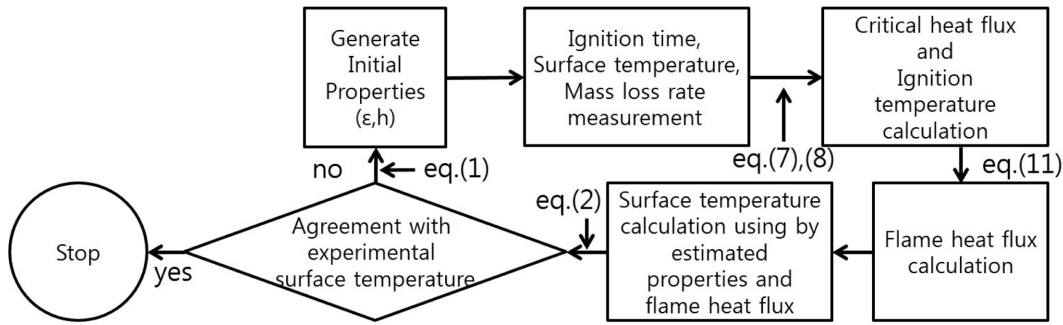


Figure 1. Flowchart for the estimation of properties and flame heat flux.

### 3. 화재환경에서 화염에 의해 시편이 받는 열유속

화염발생 전의 표면(z=0)에서 시편 내부로의 열전달은 전도에 의해 유입되며 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>(15)</sup>.

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \dot{q}'' = \epsilon \dot{q}''_{\text{ext}} - h(T_s - T_\infty) - \epsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (3)$$

여기서, k는 전도계수,  $\dot{q}''_{\text{ext}}$ 는 콘 히터에서 방출되는 열유속, h는 대류열전달계수,  $T_\infty$ 는 대기의 온도,  $\epsilon$ 는 시편 표면의 방사율,  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수 및  $T_s$ 는 시편의 표면온도이다. z =  $\delta$ 인 경우 T =  $T_\infty$ ,  $\partial T / \partial z = 0$ 이므로 다음과 같다.

$$T - T_\infty = \frac{\dot{q}'' \delta}{2k} \left(1 - \frac{z}{\delta}\right)^2 \quad (4)$$

$\dot{q}''$ 가 충분히 큰 경우  $\delta \approx \sqrt{6\alpha t_{\text{ig}}}$ 로 가정할 수 있으며<sup>(15)</sup>, (4)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $\alpha = k/\rho c_p$ 이다. 여기서 아래첨자 ig는 발화를 나타낸다.

$$T_{\text{ig}} - T_\infty = \frac{\dot{q}'' \delta}{2k} = \frac{\dot{q}''}{2k} \sqrt{6\alpha t_{\text{ig}}} \quad (5)$$

발화시간에 대해서 (5)식을 풀면 다음과 같다.

$$t_{\text{ig}} = \frac{2}{3} (k\rho c_p) \frac{(T_{\text{ig}} - T_\infty)^2}{(\dot{q}'')^2} \quad (6)$$

(3)식과 (6)식으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_{\text{ig}}^{-1/2} = \left[ \frac{\epsilon}{\sqrt{\frac{2}{3} k\rho c_p (T_{\text{ig}} - T_\infty)}} \right] \dot{q}''_{\text{ext}} - \left[ \frac{h(T_{\text{ig}} - T_\infty) + \epsilon \sigma (T_{\text{ig}}^4 - T_\infty^4)}{\sqrt{\frac{2}{3} k\rho c_p (T_{\text{ig}} - T_\infty)}} \right] \quad (7)$$

콘 히터로부터 방출되는 열유속에 따른 발화시간을 측

정하여 임계열유속( $\dot{q}''_{\text{cr}}$ )을 구할 수 있으며, 다음 식으로부터 발화온도를 계산한다.

$$\dot{q}''_{\text{ext}} = \frac{1}{\epsilon} [h(T_{\text{ig}} - T_\infty) + \epsilon \sigma T_{\text{ig}}^4] = \dot{q}''_{\text{cr}} \quad (8)$$

기화열(L)은 다음과 같이 정의된다.

$$L = \Delta H_v + c_p(T_v - T_\infty) \quad (9)$$

여기서  $\Delta H_v$  및  $T_v$ 는 각각 heat of volatilization 및 휘발 온도이다. 정상상태의 경우 질량소모율(mass loss rate)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{q}''}{L} \quad (10)$$

만약 화염에 의한 열유속이 일정하다면 (10)식은 다음과 같다.

$$\dot{m}'' = \frac{1}{L} \dot{q}''_{\text{ext}} + \frac{\dot{q}''_{\text{fl}} - \epsilon \sigma T_v^4}{L} \quad (11)$$

발화온도( $T_{\text{ig}}$ )와 휘발온도( $T_v$ )가 같다고 가정하고 기화열은 방출되는 열유속에 대한 질량감소율을 측정하여 기울기를 얻으면 (11)식으로부터 화염에 의한 열유속을 구할 수 있다. 질량소모율을 구하기 위해 다음의 식을 이용하였다<sup>(15)</sup>.

$$\dot{m}'' = \frac{7 \sum_{n=i-2}^{i+2} (m_n t_n) - \sum_{n=i-2}^{i+2} (m_n) \sum_{n=i-2}^{i+2} (t_n)}{7 \sum_{n=i-2}^{i+2} (t_n)^2 - \left[ \sum_{n=i-2}^{i+2} (t_n) \right]^2} \quad (12)$$

Figure 2은 시편 표면에서의 총 열유속에 대한 개요를 나타내고 있다. 시편의 표면에서 총 열유속은 다음과 같다.

$$\delta \rho c_p \frac{dT_s}{dt} = \alpha \dot{q}''_{\text{ext}} + h(T_\infty - T_s) + \epsilon \sigma (T_\infty^4 - T_s^4) + \dot{q}''_{\text{fl}} \quad (13)$$

위의 식은 Kirchhoff의 법칙에 의해 다음과 같이 된다.

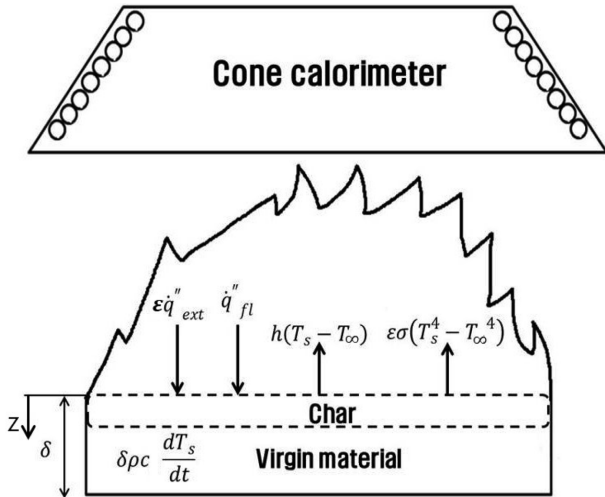


Figure 2. Schematic of the sample surface.

$$\delta \rho c_p \frac{dT_s}{dt} = \epsilon \dot{q}''_{ext} + h(T_\infty - T_s) + \epsilon \sigma (T_\infty^4 - T_s^4) + \dot{q}''_{fl} \quad (14)$$

여기서  $\delta$ 는 시편의 두께,  $\rho c_p$ 는 volumetric heat capacity,  $\epsilon$ 은 시편의 표면 방사율,  $\dot{q}''_{ext}$ 는 콘 히터에서 방사되는 열유속,  $h$ 는 대류열전달계수,  $T_\infty$ 는 대기의 온도,  $T_s$ 는 표면의 온도 및  $\dot{q}''_{fl}$ 는 화염에 의한 열유속이다.

#### 4. 시편의 표면온도 및 질량소모율

Figure 3는 콘칼로리미터를 이용하여 측정된 미송방부목 (Douglas fir) 시편의 표면온도분포이다. 각각 총 6개 (30, 40, 50, 60, 70, 및 80 kW/m<sup>2</sup>)의 열유속에 대한 실험을 진행하였고, 결과는 각 열유속에 대하여 3회 이상 반복실험을 수행한 평균 표면온도이다. 실험결과와 평균값과의 평균 표준편차는 27.6 °C 미만이다. Table 1은 각 열유속에 대한 발화시간 및 질량감소율을 나타내고 있다. 각 열유속

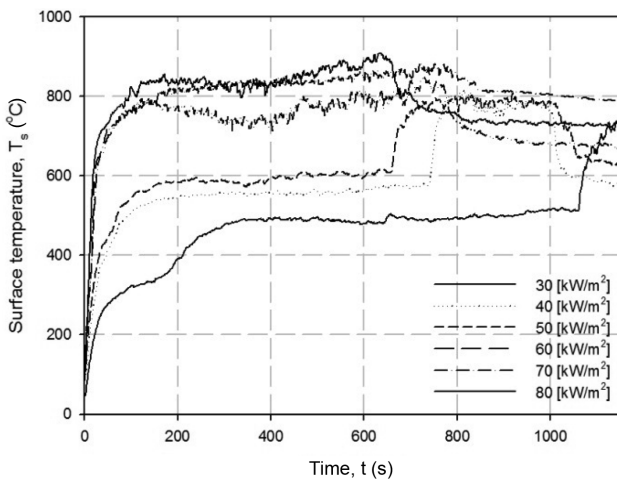


Figure 3. Surface temperature comparisons of Douglas fir for the external heat fluxes.

Table 1. Ignition Times and Mass Loss Rates for External Heat Fluxes

$\dot{q}''_{ext}$ (kW/m <sup>2</sup> )	30	40	50	60	70	80
$t_{ig}$ (s)	1061	749	660	17	15	7
$\dot{m}''$ (g/m <sup>2</sup> )	4.2	4.6	5.3	7.1	6.7	9.4

에 따른 발화시간으로부터 식(7), (8)에 부합하는 임계열유속을 찾을 수 있으며, 각 열유속의 질량소모율로부터 식(11)의 기울기를 찾아 화염의 열유속을 산출하는데 이용할 수 있다.

#### 5. 콘칼로리미터 실험 결과를 이용한 시편 표면의 열물성 및 화염에 의한 열유속 예측

RPSO 알고리즘을 이용하여 열물성을 예측하는 개발된 프로그램을 이용하여 미송방부목의 열물성을 예측하였다. 예측한 열물성은 화염 전후의 표면 방사율, 대류열전달계수 및 화염에 의한 열유속이다. 열유속에 따른 발화시간을 이용하여 임계열유속을 구하고 (8)식과 예측된 물성들을 이용하여 Newton-Raphson 법으로 발화온도를 계산한다. 콘히터 열유속에 따른 질량소모율의 선형회귀선을 통해 기울기와 y절편을 구하고, (11)식을 이용하여 화염에 의한

Table 2. Estimated Properties of Douglas Fir for Different External Heat Fluxes

Properties	Previous studies <sup>(8-11)</sup>		The present study	
	Before fire	After fire	Before fire	After fire
$\epsilon$	0.9		0.59	0.72
$h$ (W/m <sup>2</sup> K)	10		5.17	15.04
$\dot{q}''_{fl}$ (kW/m <sup>2</sup> )	30		32.15	

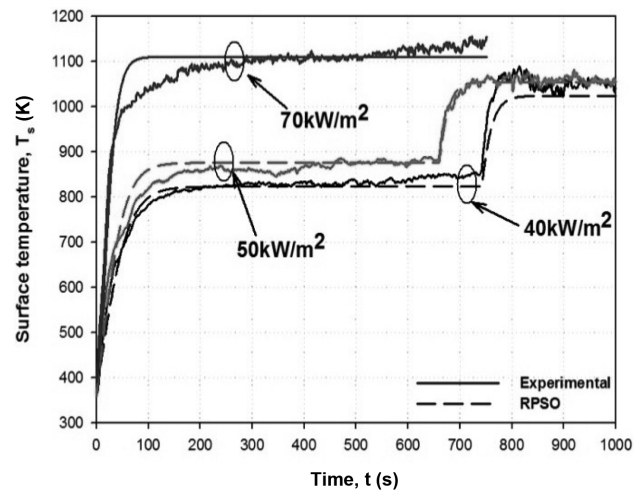


Figure 4. Comparison of the transient surface temperatures of Douglas fir between experimental observations and numerically predicted solutions for different external heat fluxes.

열유속을 구한다. 예측한 표면 방사율, 대류열전달계수 및 화염에 의한 열유속을 (14)식에 대입하여 시간에 따른 시편의 표면온도 분포와 실험에서 측정된 온도 분포 결과를 비교하여 적합도를 평가하였다. 적합도 평가를 위해 사용된 표면온도 분포는 총 3가지의 콘 히터 열유속(40, 50, 70 kW/m<sup>2</sup>)에 대한 실험결과이다. 화염이 발생하기 전 미송방부목 밀도는 240 kg/m<sup>3</sup>이며, 각 열유속(40, 50, 70 kW/m<sup>2</sup>)에 대하여 각각 749, 660, 15초 경과 후 화염이 발생하였다. Table 2는 예측한 열물성들을 나타내고 있다. Figure 4는 예측된 열물성들을 이용하여 계산된 표면온도와 콘칼로리미터를 이용하여 측정된 표면온도의 분포를 비교하여 보여주고 있으며, 각 콘 히터 열유속에 대하여 최대 평균오차가 1.98%로 매우 잘 일치하였다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 반발입자 군집 최적화 알고리즘을 이용하여 콘 칼로리미터 실험을 통해 얻을 수 있는 결과로부터 미송방부목의 열물성들을 예측하였다. 콘칼로리미터를 이용하여 미송방부목 시편에 대하여 여러 콘 히터 방출열유속에 대한 실험을 진행하였으며, 시편의 표면온도, 질량감소율 및 발화시간을 측정하였다. 시편이 받는 화염에 의한 열유속을 산출하기 위하여 콘칼로리미터의 실험결과를 이용하였으며, 이때 발화 전후의 표면 방사율, 대류열전달계수 및 화염에 의한 열유속을 예측하였다. 예측한 물성들로부터 계산된 표면온도 분포와 측정된 표면온도 분포의 최대 평균오차가 1.98%로 매우 잘 일치하였다. 본 연구에서는 반발입자 군집 최적화 알고리즘과 콘칼로리미터를 이용한 실험을 이용하여 표면 방사율, 대류열전달계수, 전도계수 및 화염에 의한 열유속에 대한 타당한 물성들을 예측할 수 있음을 확인하였다. 위의 결과는 화재시뮬레이션을 수행함에 있어 실제 사용되는 재료에 대한 타당한 열물성을 획득할 수 있는 매우 유용한 공학적 도구가 될 수 있다.

## Nomenclatures

$v$	particle velocity
$\omega$	inertia weight
$r$	random number
$\zeta$	random velocity vector
$x$	particle position
$f$	fitness
$\Phi$	the number of external heat
$T_s$	surface temperature
$\bar{T}_s$	average surface temperature
$N_i$	the number of measured surface
$\dot{m}''$	mass loss rate
$\delta$	thickness of specimen

exp	experimental data
try	calculated result
$k$	thermal conductivity
$\rho$	density
$c_p$	capacity
$\dot{q}''$	net heat flux
$\dot{q}''_{\text{ext}}$	external heat flux from cone heater
$h$	convective heat transfer coefficient
$T_\infty$	ambient temperature
$\epsilon$	surface emissivity
$\sigma$	Stefan-Boltzmann constant
$t_{\text{ig}}$	ignition time
$\dot{q}''_{\text{cr}}$	critical heat flux
$T_{\text{ig}}$	ignition temperature
$T_v$	volatilization temperature
$\dot{q}''_{\text{fl}}$	flame heat flux

## 후 기

본 연구는 소방방재청 재난안전기술개발기반구축사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

1. K. McGrattan, "Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide", NIST Special Publication 1018-4 (2004).
2. C. Lautenberger, Y. Y. Zhou and A. C. Fernandez-Pello, "Numerical Modeling of Convective Effects on Piloted Ignition of Composite Materials", *Combustion Science and Technology*, Vol. 177, pp. 1231-1252 (2005).
3. C. Lautenberger, S. McAllister, D. Rich and C. Fernandez-Pello, "Modeling the Effect of Environmental Variables on Opposed-Flow Flame Spread Rates with FDS", *Fire Safety in Tall Buildings International Congress*, University of Cantabria, Santander Spain, October, pp. 18-20 (2006).
4. C. Lautenberger, S. McAllister, D. Rich and C. Fernandez-Pello, "Effect of Environmental Variables on Flame Spread Rates in Microgravity", *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, NV, January, AIAA Paper 2007-383 (2007).
5. K. W. Kim, S. W. Baek, B. S. Shin, K. J. Kil and K. G. Yeo, "Comparison of Regularization Techniques for an Inverse Radiation Boundary Analysis", *Tran. KSME(B)*, Vol. 29, No. 8, pp. 903-910 (2005).
6. K. H. Lee, S. W. Baek and K. W. Kim, "Inverse Radiation Analysis using Repulsive Particle Swarm Optimization Algorithm", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, pp. 2772-2783 (2008).

7. C. Lautenberger, G. Rein and C. Fernandez-Pello, "The Application of a Genetic Algorithm to Estimate Material Properties for Fire Modeling from Bench-Scale Fire Test Data", *Fire Safety Journal*, Vol. 41, pp. 204-214 (2006).
8. H. C. Chang, W. H. Park, K. B. Yoon, T. K. Kim, D. H. Lee and W. S. Jung, "Inverse Estimation of Properties for Charring Material using a Hybrid Genetic Algorithm", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, No. 6, pp. 1429-1437 (2011).
9. H. C. Chang, "Study on Inverse Property Estimation for Thermal Pyrolysis and Radiation by Using the RPSO Method", Doctoral thesis, Chung-Ang University, Korea (2011).
10. H. C. Chang, W. H. Park, K. B. Yoon and T. K. Kim, "Estimation of the Properties for Charring Material Using the RPSO Algorithm", *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 14, No. 1, pp. 34-41 (2011).
11. C. Lautenberger and C. Fernandez-Pello, "A Generalized Pyrolysis Model for Simulating Charring, Intumescent, Smoldering and Noncharring Gasification", *Fire Science, Combustion Processes Laboratories, UC Berkeley*, 08-27-2006 (2006).
12. J. E. J. Staggs and H. N. Phylaktou, "The Effect of Emissivity on the Performance of Steel in Furnace Tests", *Fire Safety Journal*, Vol. 43, pp. 1-10 (2008).
13. J. E. J. Staggs, "Convection Heat Transfer in the Cone Calorimeter", *Fire Safety Journal*, Vol. 44, pp. 469-474 (2009).
14. K. B. Yoon, W. H. Park and T. K. Kim, "Estimations of Convection Heat Transfer Coefficient and Surface Emissivity of the Specimen in Cone Calorimeter using RPSO", *ISFMFE2012 Conference, REF-1067* (2012).
15. D. Hopkins, Jr., "Predicting the Ignition Time and Burning Rate of Thermoplastics in the Cone Calorimeter", *NIST-GCR-95-677* (1995).
16. ISO 5660-1, "Reaction-to-Fire Tests-Heat Release, Smoke Production, Mass Loss Rate- Part 1: Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method)" (2003).
17. J. Kennedy and R. C. Eberhart, "Particle Swarm Optimization", In: *Proceedings of the 1995 International Conference on Neural Networks*, Vol. 4, IEEE Press, Piscataway, NJ, pp. 1942-1948 (1995).
18. K. H. Lee, S. W. Baek and K. W. Kim, "Inverse Radiation Analysis using Repulsive Particle Swarm Optimization Algorithm", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, pp. 2772-2783 (2008).