최적화기법을 이용한 철도차량 바닥재의 화염 열유속 및 방사율 예측 Estimation of Flame Heat Flux and Surface Emissivity of Railway Vehicle Flooring by Using Optimization Method

박원희* · 윤경범**

Park, Won-Hee* and Yoon, Kyung-Beom**

Abstract

Surface temperatures, ignition times and mass loss rates of the synthetic rubber for railway vehicle flooring are measured for different external heat fluxes by the cone calorimeter. The flame heat flux on the surface can reach the better value by applying the repulsive particle swarm optimization algorithm. During optimization process the critical heat flux and ignition temperature are calculated using measured results. Finally we estimated the optimized flame heat flux. The calculated surface temperatures obtained by using optimized flame heat flux on the surface in this study are matched well with those from the test. The suggested process of determining flame heat flux proposed might be a very useful engineering method for ensuring the validity of a fire simulation for railway vehicles.

Key words : Optimization method, railway vehicle flooring, flame heat flux, cone calorimeter experiment

요 지

철도차량 바닥재로 사용되는 합성 고무를 시편으로 하여 콘 칼로리미터 실험을 수행하고 시편의 표면온도, 발화시간 및 질량감소율을 측정하였다. 측정된 결과를 이용하여 임계열유속 및 발화온도를 산출하고, 반발 입자 군집 최적화 알고리즘을 이용하여 시편 표면에서의 화염에 의한 열유속을 예측하였다. 본 연구에서 최적화된 열유속을 이용하여 계산된 표면온도는 실험에서 측정한 표면 온도와 잘 일치하였다. 본 연구에서 제안한 화염에 의한 열유속을 구하는 방법은 철도차량의 화재 시뮬레이션의 신뢰성 확보에 유용한 도구로 활용될 수 있다.

핵심용어 : 최적화기법, 철도차량 바닥재, 화염열유속, 콘칼로리미터 시험

1. 서 론

실물 대 화재 시험은 비용 및 규모 등의 문제점이 있기 때문에 실제의 환경에서 화염 확산 및 화재 성장을 예측하기 위한 CFD(computational fluid dynamics) 모델링에 대해 관심이 증대되고 있으며, 이 CFD모델링은 안전 기술설계를 위해 잠재적으로 유용하다. 대표적인 화재모델링 소프트웨어로는 2000년 2월에 NIST(national institute of standards and technology)에서 공개한 FDS(fire dynamics simulator)가 있다. McGrattan *et al.*(2004)이 개발한 FDS는 발전을 거듭하며 version 4.07에서 수치적 열분해 모델이 묘사되고 실행할 수

있도록 연결되었고 발화 및 화염의 전파를 묘사가 가능해 졌다(McGrattan *et al.*, 2004, Lautenberger *et al.*, 2005, 2006a, 2007). 열분해 해석 모델에 따라 다른 물성값이 요구되기는 하지만 실제 사용되는 재료의 경우 문헌에서 얻을 수 있는 물성치는 극히 제한적이므로 화재 시뮬레이션 시 적절한 물성치를 입력하기 매우 힘들다. 또한 합성재료 및 신소재에 대한 열물성치 정보는 전무한 상태이다. 이러한 문제점의 해결을 위해 실험실 규모의 열특성 분석기(cone calorimeter) 실험의 결과를 바탕으로 역문제(inverse problem) 해석을 통한 열물성치를 역추정하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 역문제 해석을 위해 최근에 활용되는 기법은 임의의 해 집단에서 최적

*교신저자. 정회원. 한국철도기술연구원 교통환경연구실, 선임연구원(Tel: +82-31-460-5358, Fax: +82-31-460-5379, E-mail: whpark@krii.re.kr)
Corresponding Author: Member, Senior Researcher, Eco-Transport Systems Research Division, Korea Railroad Research Institute

**한국건설생활환경시험연구원, 주임연구원
Assistant Researcher, Korea Conformity Laboratories

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(Kim *et al.*, 2008, Lee *et al.*, 2008, Lautenberger *et al.*, 2006b, Chang *et al.*, 2011a). Chang (2011) 및 Chang *et al.*(2011b)은 RPSO 알고리즘을 이용하여 각 물성치에 대한 민감도 및 엄밀해와 비교 분석을 진행하였고, 가상의 물성치의 탄화 재료를 대상으로 유전 알고리즘으로 예측된 물성치와 비교하여 반발 입자 군집 최적화 알고리즘이 유전 알고리즘과 비교하여 빠른 시간 내에 정확한 해를 얻을 수 있음을 확인하였다(Chang *et al.*, 2011a). Chang (2011) 및 Chang *et al.*(2011b), Lautenberger과 Fernandez-Pello(2006) 등의 이전의 열분해 물성을 예측한 연구는 경계 조건에 해당하는 화염에 의한 열유속 및 표면 방사율에 대하여 화염 발생 유무에 상관없이 일정한 값을 사용하였다. 그러나 탄화 재료의 경우 화염에 의해 재질과 표면 온도가 달라지기 때문에 표면에서의 방사율은 다르게 적용되어야 하며, 시편에 따라 화염에 의해 시편 표면이 받는 열유속이 다르게 적용되어야 한다. Staggs(2008, 2009), Yoon *et al.*(2012) 및 Hopkins(1995) 등의 연구에서 대류 열전달계수, 표면 방사율 및 화염이 시편에 주는 열유속에 대한 연구가 콘 히터의 열유속 및 표면 방사율이 다른 조건에 대하여 진행되었다.

본 연구에서는 콘 칼로리미터를 이용한 실험결과와 RPSO 알고리즘을 이용하여 철도차량 바닥재 시편의 표면 방사율 및 표면이 받는 화염의 열유속을 예측하였다. 실험에 사용된 콘 칼로리미터는 ISO 5660(2003) 기준을 만족 시키는 장치이며, 두께 2.65 mm 합성고무 시편으로 총 4개의 콘 히터 열유속(50, 55, 70, 76 kW/m²)에 대하여 실험을 수행하였다. 측정된 결과를 이용하여 예측된 표면 방사율에 의한 임계열유속 및 화염에 의한 열유속을 산출하였다. 측정된 결과와 예측된 값으로부터 계산된 표면온도를 비교하여 예측된 결과의 타당성을 검증하였다.

2. 화염 열유속을 구하기 위한 수식전개

시편표면이 받는 에너지는 다음과 같은 에너지보존방정식으로 표현할 수 있다.

$$\delta \rho c \frac{dT_s}{dt} = \varepsilon \dot{q}_{ext}'' + h(T_\infty - T_s) + \varepsilon \sigma (T_\infty^4 - T_s^4) + \dot{q}_{fl}'' + K_s(T_s) \quad (1)$$

여기서 δ 는 시편의 두께, ρc 는 열용량, $\dot{q}_{fl}''$ 는 화염에 의한 열유속 및 $K_s(T_s)$ 는 시편 표면에서 전도, 시편의 열분해에 의해 손실되는 열유속 또는 시편의 경계에서 시편홀더로 방출되는 열유속을 포괄한다.

식 (2)에 포함된 최적화하고자 하는 열전도 상수는 Park 및 Yoon(2013)이 제안하였으며, 측정된 온도의 n_k-1 승과 a_k 에

곱으로 아래와 같이 설정하였다.

$$K_s = a_k (T_s)^{n_k-1} \quad (2)$$

즉 반발입자군집 최적화법으로 최적화될 입자는 a_k 및 n_k 이며, 콘 칼로리미터 실험에서 콘 히터의 열유속과 발화 시간의 관계는 다음과 같다(Hopkins, 1995).

$$t_{ig}^{-1/2} = \left[\frac{\varepsilon}{\sqrt{\frac{2}{3}} k \rho c (T_{ig} - T_0)} \right] \dot{q}_{ext}'' - \left[\frac{h(T_{ig} - T_0) + \varepsilon \sigma (T_{ig}^4 - T_\infty^4)}{\sqrt{\frac{2}{3}} k \rho c (T_{ig} - T_0)} \right] \quad (3)$$

여기서, k 는 전도 열전달계수, $\dot{q}_{ext}''$ 는 콘 히터에서 방출되는 열유속, h 는 대류 열전달계수, T_∞ 는 대기의 온도, ε 는 시편 표면의 방사율, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수, 발화시간 t_{ig} 및 T_s 는 시편의 표면온도이다. 콘 히터로부터 방출되는 열유속에 따른 발화시간을 측정하여 임계 열유속($\dot{q}_{cr}''$)을 구할 수 있으며, 다음 식으로부터 발화온도를 계산한다.

$$\dot{q}_{ext}'' = \frac{1}{\varepsilon} [h(T_{ig} - T_0) + \varepsilon \sigma T_{ig}^4] = \dot{q}_{cr}'' \quad (4)$$

만약 화염에 의한 열유속이 일정하다면 질량감소율은 다음과 같다(Hopkins, 1995).

$$m'' = \frac{1}{L} \dot{q}_{ext}'' + \frac{(\dot{q}_{fl}'' - \varepsilon \sigma T_v^4)}{L} \quad (5)$$

발화온도(T_{ig})와 휘발온도(T_v)가 같다고 가정하고 heat of gasification은 방출되는 열유속에 대한 질량감소율을 측정하여 기화기를 얻으면 (5)식으로부터 화염에 의한 열유속을 구할 수 있다. 화염에 의한 열유속과 관련된 자세한 공식은 Yoon과 Park(2013)의 논문에 자세히 설명되어 있다.

3. 최적화기법

생체군집인 새 떼 및 물고기 떼 등의 사회적 행동양식에 대한 규칙성 증명에 착안하여 Kennedy와 Eberhart(1995)에 의하여 개발된 입자군집최적화particle swarm optimization, PSO 알고리즘은 유전자기법에 비하여 문제해결 능력이 우수하지만, 매우 복잡한 최적화 문제에 PSO알고리즘을 적용할 경우 입자들의 군집이 지역 최적값으로 조기 수렴함으로써 전역 최적값을 찾기 어려워질 수 있다는 단점이 있다. 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 반발입자최적화 알고리즘이다(Lee *et al.*, 2008). 본 연구에서 예측된 표면 방사율 및 화염에 의한 열유속의 타당성을 평가하는 적합도 함수는 다음과 같다.

$$f^n = \frac{1}{\Phi} \sum_{\phi=1}^{\Phi} \left[\frac{\sum_{i=1}^{N_i} \left\{ (T_{s,exp,i} - \bar{T}_s)^2 - (T_{s,exp,i} - T_{s,try,i})^2 \right\}}{\sum_{i=1}^{N_i} (T_{s,exp,i} - \bar{T}_s)^2} \right] \quad (6)$$

여기서, Φ 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 실험값 및 예측된 표면 물성을 이용하여 계산된 표면 온도값을 나타낸다. 실험값과 계산된 결과가 가장 잘 일치하는 경우 최적의 예측 결과로 판단한다. 본 논문에서 적용한 RPSO법에 대해서는 기존 문헌 (Yoon, 2012)를 참고하길 바란다.

4. 시험 및 예측결과

Fig. 1은 ISO 5660을 만족하는 콘칼로리미터이다. 본 시험을 위하여서 시편의 온도가 불균일해지는 것을 방지하기 위한 시편 홀더를 이용하였으며(Chang *et al.*, 2011a) 총 4개 (50, 55, 70 및 76 kW/m²)의 콘 히터의 열유속에 대한 실험을 진행하였고, 결과는 각 열유속에 대하여 3회 이상 반복실험을 수행하였다.

Fig. 2는 콘 히터의 열유속에 대한 각 시편의 발화시간 및

Fig. 1. Modified Cone Calorimeter for the Study.

질량감소율을 나타내고 있으며, Table 1에 정리하였다. 화염 열유속 및 표면의 방사율을 구하기 위한 절차는 아래와 같다. 시험한 4개의 콘히터 열유속에 따른 발화시간을 이용하여 임계열유속을 구하고 (4)식과 초기의 가정되거나 RPSO로 예측된 물성값들을 이용하여 Newton-Raphson 법으로 발화온도 및 열유량(정압비열과 밀도의 곱)을 추출한다. 콘히터 열유속에 따른 질량감소율을 선형화하여 기울기와 y절편을 구하고, (5)식을 이용하여 화염에 의한 열유속을 구한다. 예측한 화염 전후의 표면 방사율 및 전도계수와 화염에 의한 열유속을 (1)식에 대입하여 시간에 따른 시편의 표면온도 분포를 최적화 기법인 RPSO를 이용하기 위한 값으로 활용한다. 최적화된

(a) Ignition times

(b) Mass loss rates

Fig. 2. Ignition Times and Mass Loss Rates of Synthetic Rubber for Different External Heat Fluxes.

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

q''_{exi} (kW/m ²)	50	55	70	76
T_{ig} (sec)	48	35	19	15
Mass loss rate (g/m ² s)	16.3	17.4	20.4	21.6

Table 2. Estimated Emissivity and Flame Heat Flux of Synthetic Rubber on the Surface

Properties	Before fire	After fire
ε	0.929	0.636
$\dot{q}_f''$ (kW/m ²)	33.09

Fig. 3. Comparison of the Transient Surface Temperatures of Synthetic Rubber Between Experimental Observation and Numerically Predicted Solution for Different External Heat Fluxes.

결과를 이용하여 구한 시간에 따른 시편의 표면 온도들과 실험에서 측정된 온도 분포를 비교한 적합도함수 식(6)을 이용하여 예측한 결과의 적합성을 평가한다.

예측한 방사율과 화염열유속의 적합성을 평가 하기 위하여 2가지의 콘 히터 열유속(50, 70 kW/m²)에 대한 시간에 따른 표면온도 분포를 이용하였다. Table 2에 예측한 표면방사율 및 화염에 의한 열유속을 나타내었다. Fig. 3은 예측된 값을 이용하여 계산된 표면온도와 콘 칼로리미터를 이용하여 측정 한 표면온도의 분포를 비교하여 보여주고 있으며, 콘 히터 열 유속에 대하여 표면온도의 평균오차의 최대값이 2.0%로 매우 잘 일치하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 반발입자 군집 최적화(Repulsive Particle Swarm Optimization, RPSO) 알고리즘을 이용하여 콘 칼로리 미터 실험을 통해 얻을 수 있는 결과로부터 철도차량 바닥재 로 사용되는 합성고무의 표면 방사율 및 화염에 의한 열유속 을 예측하였다. 콘 히터의 여러 방출 열유속에 대한 실험을 진행하였으며, 시편의 표면온도, 질량감소를 및 발화시간을 측정하였다. 시편이 받는 화염에 의한 열유속을 산출하기 위 하여 콘 칼로리미터의 실험결과를 이용하였다. 예측한 표면 방사율 및 화염에 의한 열유속을 이용하여 계산된 표면온도 분포와 측정된 표면온도 분포의 평균오차의 최대값이 2.0%로

매우 잘 일치하여 발화가 일어나는 합성고무에 대한 표면 방 사율 및 화염에 의한 열유속을 예측할 수 있음을 확인하였다. 위의 결과는 화재 CFD의 수행함에 있어 실재 사용되는 재료 에 대한 타당한 열물성을 획득할 수 있는 매우 유용한 공학적 도구가 될 수 있다. 또한 본 연구에서 산출한 화재시의 표면 에서의 방사율과 화염열유속을 이용하여 화재시의 보다 정확 한 화재물성을 산출할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청 재난안전기술개발기반구축사업의 (NEMA-기반-2013-103) 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- Chang, H.C. (2011) Study on Inverse Property Estimation for Thermal Pyrolysis and Radiation by Using the RPSO Method, *Doctoral thesis, Chung-Ang University, Korea.*
- Chang, H.C., Park, W.-H., Yoon, K.B., Kim, T.K., Lee D.H., and Jung, W.S. (2011a) 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.
- Chang, H.C., Park, W.-H., Yoon, K.B., and Kim, T.K. (2011b) Estimation of the Properties for Charring Material Using the RPSO Algorithm, *Journal of Fluid Machinery (Korean)*, Vol. 14, No. 1, pp. 34-41.
- Hopkins, D. Jr. (1995) *Predicting the ignition time and burning rate of thermoplastics in the cone calorimeter*, NIST-GCR-95-6770.
- ISO 5660-1 (2003) *Reaction-to-fire tests-Heat release, smoke production, mass loss rate- Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method).*
- Kennedy, J. and Eberhart, R.C. (1995) Particle swarm optimization, In: *proceedings of the 1995 International Conference on Neural Networks 4*, IEEE Press, Piscataway, NJ, 1942-1948.
- Kim, K.W., Baek, S.W., Shin, B.S., Kil, K.J., and Yeo, K.G. (2005) Comparison of regularization techniques for an inverse radiation boundary analysis, *Tran. KSME(B)*, Vol. 29, No. 8, pp. 903-910.
- Lautenberger, C., Zhou, Y.Y., and Fernandez-Pello, C. (2005) Numerical modeling of convective effects on piloted ignition of composite materials, *Combustion Science and Technology* 177: 1231-1252.
- Lautenberger, C., and Fernandez-Pello, C. (2006) *A Generalized Pyrolysis Model for Simulating Charring, Intumescent, Smoldering and Noncharring Gasification*, *Fire Science, Combustion Processes Laboratories, UC Berkeley*, 08-27-2006.
- Lautenberger, C., McAllister S., Rich, D., and C. Fernandez-Pello (2006a) 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 18-20.
- Lautenberger, C., Rein, G., and Fernandez-Pello, C. (2006b) The

- application of a genetic algorithm to estimate material properties for fire modeling from bench-scale fire test data, *Fire Safety Journal* 41, pp.204-214.
- Lautenberger, C., McAllister, S., Rich, D., and Fernandez-Pello, C. (2007) Effect of environmental variables on flame spread rates in microgravity, *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, NV, January, AIAA Paper 2007-383.
- Lee, K.H., Baek, S.W., and Kim, K.W. (2008) Inverse radiation analysis using repulsive particle swarm optimization algorithm", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51, 2772-2783.
- McGrattan, K. (2004) *Fire Dynamics Simulator (Version 4) technical reference guide*, NIST Special Publication 1018-4.
- Park W-H and Yoon K.-B. (2013) Measurement of radiative heat flux by plate thermometer, *Tran. KSME(B)*, Vol. 37, No. 1, pp. 95-98.
- Staggs, J.E.J. and Phylaktou, H.N. (2008) The effect of emissivity on the performance of steel in furnace tests, *Fire Safety Journal* 43, 1-10.
- Staggs, J.E.J. (2009) Convection heat transfer in the cone calorimeter, *Fire Safety Journal*, 44, 469-474.
- Yoon, K.B., Park, W.-H., and Kim, T.K. (2012) Estimations of convection heat transfer coefficient and surface emissivity of the specimen in cone calorimeter using RPSO, *ISFMFE2012 Conference*, REF-1067.
- Yoon K.-B. and Park W.-H. (2013) Inverse estimation of convective heat transfer coefficient, emissivity and flame heat flux on the surface, *Fire Science and Engineering (Korean)*, Vol. 26, No. 1, pp. 10-15.

Received	May 8, 2014
Revised	May 12, 2014
Accepted	May 21, 2014