

◆특집◆ 정밀계측제어

고로의 연소효율을 높이기 위한 화염영상 정밀 검출 및 화염제어

김재열*, 이승철#, 곽남수**, 한재호***

(* 조선대학교, # 조선이공대학교, ** 조선대학교 일반대학원, *** 송원대학교)

Flame image precise measurement and flame control to raise combustion efficiencies of a blast furnace

Jae-Yeol Kim*, Seung-Chul Lee#, Nam-Su Kwak**, Jae-Ho Han***

(Received 15 December 2014; received in revised form 18 December 2014; accepted 26 December 2014)

ABSTRACT

Pulverized coal (PC) has become an important auxiliary fuel in the iron and steel industry since the technique of pulverized coal injection (PCI) was developed for iron making. The combustion efficiencies of pulverized coal in blowpipes and tuyeres under various operational conditions are numerically predicted to determine the performance levels with regard to different locations of the nozzles in a blast furnace. A variety of parameters, including the pulverized coal quantities, oxygen amounts, inlet temperatures of the tuyeres, and the mass flow rate of coal carrier gas are taken into consideration. Also, in order to develop greater efficiency than those of existing coal injection systems, this study applies a flame measurement system using a charge-coupled device (CCD) camera and a frame grabber. It uses auto sampling algorithms from the flame shape information to determine the device for the optimal location control for PCI. This study finds further improvements of the blast furnace performance via the control of the PCI locations.

Key Words : pulverized coal(미분탄), blow pipes(블로어 파이프), tuyeres(송풍구), Combustion efficiencies(연소효율), blast furnace(고로), Image recognition(영상인식).

1. 서 론

* Mechanical System Engineering, Chosun UNIV.

Corresponding Author :

Applied & Computational Mechanics, Chosun College of Science & Technology

E-mail : cjf9400@est.ac.kr

** Advanced Part & Materials Engineering, Chosun UNIV.

*** Mechanical and Automotive Engineering, Songwon UNIV.

최근 고로 (blast Furnace)의 용선 생산량이 증가함에 따라 쇳물의 용해를 위해 사용되는 코크스(coke)의 소요량이 크게 증가하고 있다. 코크스는 유연탄 (bituminous coal)을 소결로 (furnace)에 장입하여, 고온으로 가열하여 제조 하게 된다. 따라서 코크스를 열원으로 사용하기 위한 제조비용 증가 및 공급 불안정에 따른 수요량 대비 코크스의 공급량이 부족하

게 되었다. 또한 코크스 제조 시에 발생하는 대기 및 수질 오염 물질에 따른 환경문제가 대두되고 있다.^[1-2]

따라서 최근 들어 코크스에 비해 상대적으로 저렴하고, 제조가 쉬운 미분탄(pulverized Coal)의 사용량이 증가하고 있는 추세이다.

PCI 시스템(pulverized coal injection system)은 쇳물의 용해 시 열원으로 사용되는 코크스의 부족분을 미분탄으로 보충하기 위한 미분탄 공급 장치로 일반적으로 1개의 고로에 36~40개가 설치되어 사용되고 있다. PCI 시스템은 열풍구(tuyere), 미분탄 취입 랜스(lance) 등으로 구성되며 열풍구는 미분탄 취입 랜스를 통해 공급된 미분탄과 산소의 혼합물을 고로 내부로 분사 및 점화시키는 역할을 한다. 이때 미분탄의 점화 정도와 화염의 도달거리에 따라 고로 내부의 연소효율이 결정되며, 용선 생산량에 밀접한 영향을 미치게 된다.

여기서, 미분탄의 점화 정도와 화염 도달 거리는 열풍구 선단에서 랜스 위치에 따라 결정되어 질 수 있다. 또한 열풍구로부터 열풍(Hot blast)의 공급이 불안정할 경우, 미분탄의 연소효율이 떨어지거나 점화가 되지 않는 현상이 발생하게 된다. 현재 국내에서 사용되고 있는 미분탄 취입 랜스의 또 다른 문제점으로, 휴풍(열풍의 공급 중단) 또는 열풍량의 감소 시 고로 내압(약 $5kg/cm^2$)에 의해 미분탄이 열풍구 내부로 역류하여 산소공급 파이프의 끝단에 고착되는 현상이 발생하고 있으며, 조업완료까지 랜스의 교체가 불가능하여 고로 전체의 연소효율 저하로 용선 생산량에 많은 영향을 미치고 있다.

미분탄은 약 $400\sim 700^\circ C$ 에서 고착이 발생하며, 랜스 선단을 고온 상태인 고로 내부로 이동시킴으로써 이를 해결 할 수 있다.^[3-4]

본 연구에서는 PCI 시스템의 최적 설계를 위해서 2중관으로 제작된 랜스관 내부의 유동 및 열전달 해석을 수행하였고, 전산 유동 해석에는 범용 적으로 사용되고 있는 상용 코드인 FLUENT를 이용하여 노즐 위치 가변형 랜스의 내부유동 및 열유동 특성을 분석하였다. 또한 랜스의 해석결과를 바탕으로 화염의 형상을 자동으로 예측하고 이에 반응하여 랜스의 위치를 자동으로 제어할 수 있는 시스템을 개

발하여 미분탄의 연소 효율을 높이기 위한 연구를 수행하였다.

2. 열·유동해석

2.1 유동 및 에너지 방정식

PCI 시스템의 내부의 유동장 및 온도장은 연속 방정식, 운동량방정식 그리고 난류모델방정식의 지배를 받는다.

연속방정식 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

운동량 보존 방정식 :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{\rho u_i' v_j'}) + \rho g_i + F_i \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 p 는 정압, ρg_i 와 F_i 는 중력 및 외부 힘, μ 는 점성계수이며, τ_{ij} 는 응력텐서로서 다음과 같다.

$$\tau_{ij} = [\mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (3)$$

$$-\overline{\rho u_i' v_j'} = \quad (4)$$

$$\mu_t(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \frac{2}{3}(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i}) \delta_{ij}$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

난류점성계수 μ_t 를 계산하기 위해 본 연구에서 적용한 난류모델은 Standard $k-\epsilon$ 으로 이는 Reynolds -Averaged Navier-Stokes 방정식으로부터 유도되고 PCI 시스템의 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x} \quad (6)$$

$$= \frac{\partial}{\partial}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_i}] + G_k + G_b - \rho \epsilon$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} [G_k + C_{3\varepsilon} G_b] - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

여기서 G_k 는 난류응력으로 인한 k 의 생성항으로 다음과 같은 식으로 주어진다.^[5]

$$G_k = -\overline{\rho u_i' v_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (8)$$

G_b 는 부력으로 인한 k 의 생성항으로 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (9)$$

Pr_t 는 난류 Prandtl 수이며, β 는 열팽창계수이다. Standard $k-\varepsilon$ 난류모델상수는 다음과 같은 값을 가진다.^[6-7]

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, \quad C_{2\varepsilon} = 1.92, \quad C_{3\varepsilon} = \tanh\left|\frac{u}{v}\right|, \quad C_\mu = 0.99, \\ \sigma_\varepsilon = 1.3, \quad \sigma_k = 1.0, \quad Pr_t = 0.85$$

그리고 에너지 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial (\rho c_p T)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho c_p u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S \quad (10)$$

여기서 c_p 는 유체의 비열을 의미하고, S 는 소거항이다. 위의 (2), (6), (7)식 그리고 (10)식을 체적적분하고 이산화 방정식을 이용하여 유동해석을 수행하는 FVM(Finite Volume Method)을 이용해 PCI 시스템 내부의 유동장 및 화염 전파장을 수치해석 하였다.

2.2 경계조건 및 해석 모델

Fig. 1은 PCI 시스템의 개략 도를 나타내며, 열풍구에는 1473 K의 열풍이 공급되고, 랜스에는 미분탄과 미분탄의 발화를 돕기 위한 산소가 공급된다. Fig. 2(a)는 PCI 시스템의 해석을 위한 모델을 나타내며, Fig. 2(b)는 열풍구와 랜스의 내부유동을,

Fig. 2(c)는 고로내부의 유동장 및 온도장을 해석하기 위해 생성한 격자를 나타낸다. Table 1은 PCI 시스템의 유동해석을 위한 경계조건을 나타내었다

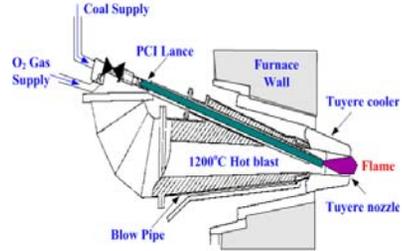
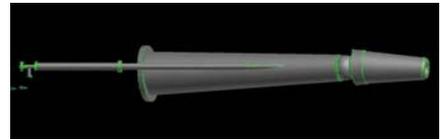
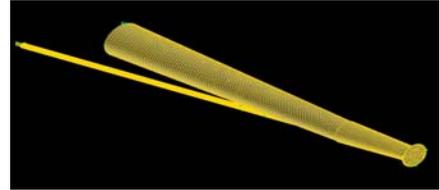


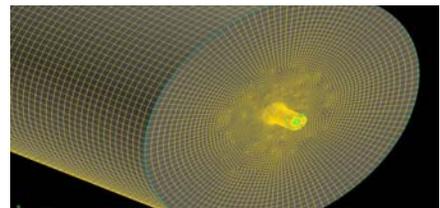
Fig. 1 Schematic of PCI system



(a) Analysis model of PCI system



(b) Internal meshing of Hot-Winded part and lance



(c) Internal meshing of Blast Furnace

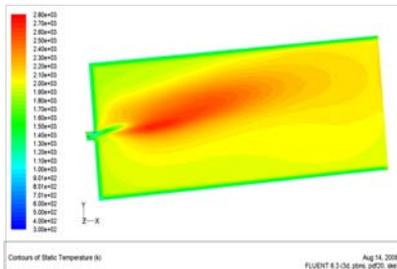
Fig. 2 Flow analysis of PCI system

Table 1 Boundary conditions

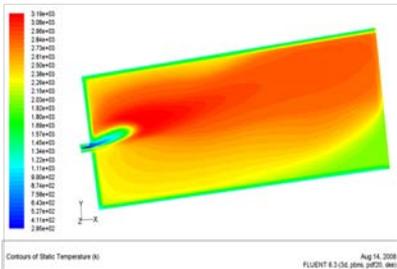
	velocity (m/s)	mass flux (kg/s)	pressure (kPa)	Temp. (K)
Coal	57	0.035	441	300
O2	33	0.18	882	300
Hot Air	44	3.54	392	1473

2.3 연소 특성 고찰

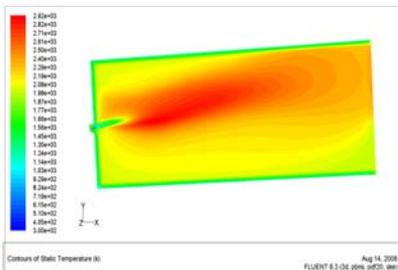
PCI 시스템에서 랜스의 위치에 따른 미분탄의 발화 온도 및 화염의 크기를 알아보기 위해 랜스의 거리를 -50~+150mm 까지 50mm씩 변화 시켜 열유동 해석을 수행하였다. Fig. 3은 각 위치별 해석 결과를 나타내며, Table 2에 해석 결과를 나타내었다. 해석 결과, 랜스 노즐의 위치에 따른 5가지 모델 모두 유동특성 및 열전달 특성은 유사한 경향을 보였다. 하지만 화염장의 온도 변화는 위치 0mm를 기준으로 -50mm의 경우 화염의 최고 온도는 증가하고 +50 ~ +150mm로 전진할 경우 온도는 상승하지만 화염의 분포는 작아짐을 알 수 있다.



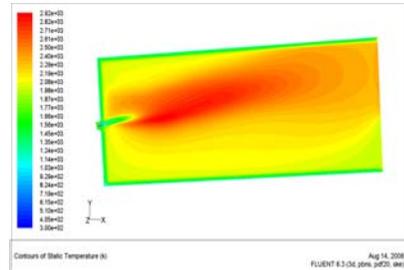
(a) -50mm



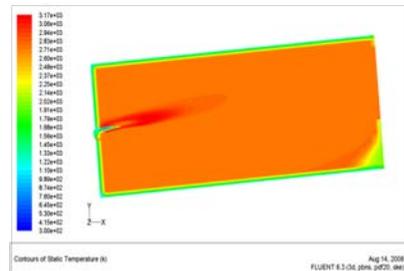
(b) 0mm



(c) +50mm



(d) +100mm



(e) +150mm

Fig. 3 Flame analysis according to the position of the lance

Table 2 Results of Analysis

position	max temp.(K)	Flame size
-50	3190	2
0	3100	1
50	2800	3
100	2920	4
150	3170	5

3. 화염영상을 이용한 위치제어

3.1 화염에 대한 형상 정보 자동추출 알고리즘

PCI 시스템의 연소 특성 고찰 결과 랜스의 위치를 조정함으로써 미분탄의 발화 온도 및 화염의 크기를 변경함으로써 연소효율을 높일 수 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 PCI 시스템의 연소 특성 해석 결과를 바탕으로 CCD 카메라로부터 획득된 영상으로부터 밝기분포특성 분석, 노이즈 제거 필터링, 화염 영역 검출 등을 통해 랜스 제어기 연동하도록 시스템을 구성하였다.

Fig. 4는 화염영상을 이용한 위치제어 순서도를 나타내며, Fig. 5는 알고리즘을 나타낸다. CCD 카메라로부터 획득된 영상은 RGB로 분리된 후 흑백 이미지로 변환되고 화염영역을 계산한 후 기준이 되는 화염과 비교하여 랜스 구동부를 전·후진함으로써 최적의 화염이 형성되도록 제어된다.

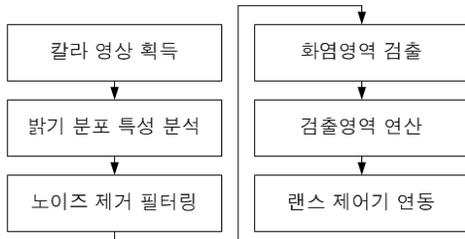


Fig. 4 Position control with flame image

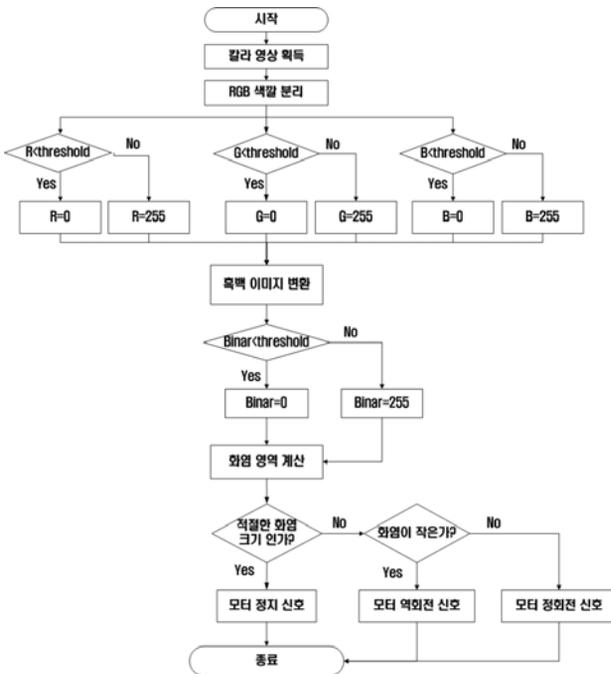


Fig. 5 Position control algorithm using a flame image

3.2 PCI 시스템의 제어

Fig. 6은 PCI 시스템의 제어부 구성도를 나타내며, Fig 7은 PCI 시스템의 연소효율을 높이기 위해 개발된 제어 부의 구성을 나타낸다. 제어 부는 CCD 카메라, 영상획득을 위한 프레임 그라버(frame grabber), 워기어로 구성된 드라이빙 유니트, 워기어의 구동을 위한 스텝핑 모터(steping motor), 스텝모터 구동 드라이버 등으로 구성 된다. 고로 내부에서 미분탄에 의한 화염 생성과정에서 약 $5\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 이상의 역압력이 발생한다. 본 연구에서는 이를 고려하여 랜스의 전·후진을 위해 워기어를 적용하였고 고부하에서 구동이 가능하도록 1/5의 감속비를 가지는 Stepping Motor(A140K- M599-G5, Autonics)와 모터 드라이(MD5-MF14), 모션 컨트롤(PMC-1HS-U SB)를 사용 제어시스템을 구성하였다.

Fig. 8은 화염 영상으로부터 랜스의 위치 제어를 위한 GUI(graphic user interface)를 나타낸다. Fig. 8(a)는 고속의 화염영상을 획득 후 영상처리 알고리즘을 거쳐 계산된 화염의 영역을 백분율로 나타낸다.

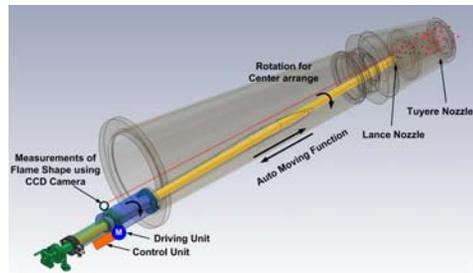


Fig. 6 PCI system configuration of the controller



Fig. 7 Controller for PCI systems



Fig. 8 GUI for the position control from the flame image

Fig. 8(b)는 획득된 화염영상을 RGB로 분리하는 단계를 나타내며, Fig. 8(c)는 화염과 배경을 분리시켜 화염 영역만 추출된 결과를 나타낸다. Fig. 8(d)는 추출된 화염 영역을 일정 시간동안 이동평균을 이용하여 연산 후 백분율로 나타내도록 GUI를 구성하였다. PCI 시스템의 특성상 화염의 형상 변화가 심하기 때문에 급격한 랜스의 전·후진을 할 경우 고로 내부의 화염 생성 및 유동에 심각한 문제를 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 일정 시간동안 계속된 화염의 영역을 이동평균을 이용하여 연산한 후 특정 시간 단위로 구동명령을 수행하도록 제어 알고리즘을 구성하였다. 이러한 일련의 과정은 연소효율이 가장 높은 화염의 기준 영역 값과 획득된 영상의 연속적인 비교를 통해 이뤄진다.

4. 결론

본 연구에서는 고로의 연소효율을 높이기 위해 상용코드인 Fluent를 이용하여 PCI 시스템의 연소 특성을 고찰 하였고, 연소 효율을 높이기 위한 방법으로 화염영상을 이용한 위치제어 시스템을 개발하였다.

(1) PCI 시스템의 연소특성 고찰을 위한 랜스 노즐의 위치에 따른 5가지 모델의 해석 결과 유사한 유동 특성 및 열전달 특성을 나타내었다.

(2) 화염장의 온도변화는 위치 0mm를 기준으로

-50mm의 경우 화염의 초고온도는 증가하고 +50mm~+150mm로 전진할 경우 온도는 상승하지만 화염의 분포는 작게 나타났다.

(3) 화염 영상을 이용한 PCI 시스템의 위치제어를 위한 알고리즘을 개발하였고, 화염으로부터 데이터를 획득하기 위해 칼라 영상으로부터 RGB로 분리하고 화염영역과 배경영역을 분리하여 화염영역 값에 대한 신뢰성을 확보할 수 있었다.

(4) 급격한 랜스의 전·후진 시 고로 내부의 화염 생성 및 유동에 심각한 문제를 유발할 수 있으므로, 안정된 화염이 생성되도록 이동평균을 이용하여 연산한 후 특정 시간단위로 구동명령을 수행하도록 제어알고리즘을 구성하였다.

REFERENCES

- (1) Shan-Wen Du, Wei-Hsin Chen and Jhon Lucas, "Performances of pulverized coal injection in blowpipe and tuyere at various operational conditions," Energy conversion & management, Vol. 48, pp. 2069~2076, 2007.
- (2) John G. Mathieson, Jhon S. Truelove and Harold Rogers, "Toward an understanding of coal combustion in blast furnace tuyere injection," Fuel, Vol. 84, pp. 1229~1237, 2005.
- (3) Ching-Wen Chen, "Numerical analysis for the multi-phase flow of pulverized coal injection inside blast furnace tuyere," Applied Mathematical Modeling, Vol. 29, pp. 871~884, 2005.
- (4) Shan-Wen Du and Wei-Hsin Chen, "Numerical prediction and practical improvement of pulverized coal combustion in blast furnace," International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 33, pp. 327~334, 2006.
- (5) Jamaluddin AS, Wall TF and Truelove JS, "Modeling of high intensity combustion of pulverized coal in a tubular combustor," Combust Sci Technol, Vol. 55, pp. 89-113, 1987.

- (6) Monson JR and Gathergood DS, "Review of injection of coal into blast furnace tuyeres," Ironmaking Steelmaking, Vol. 8, No. 5, pp. 101~103, 1981.
- (7) Lu, G., Yan, Y. and Colechin, M., "A Digital Imaging BAsed Multifunctional Flame Monitoring System," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.53, NO.4, pp.1152~1158, 2004.