

# 고로미분탄 취입랜스의 연소효율 향상을 위한 노즐 제어의 최적화

최승현\*, 곽남수<sup>+</sup>, 김재열<sup>++</sup>

(논문접수일 2009. 10. 25, 심사완료일 2009. 12. 11)

## Pulverized Coal Injection System Development to Raise Combustion Efficiency of a Blast Furnace

Seung-Hyun Choi\*, Na-Soo Kwak<sup>+</sup>, Jae-Yeol Kim<sup>++</sup>

### Abstract

This paper introduces the automatic fine Bituminous Coal injection lance position control method using flame image process. The fine Coal injection lance is used to supply additional heat into the furnace in Mill plant. It injects fine coal into high pressured air flow and produces very heated and high pressured flame. For the such high temperature and pressure, the fine coal injection lance effects not only efficiency of burner but also furnace abrasion. To keep efficient combustion status and to avoid the abrasion, in this paper, the flame is monitored by computer image process. This paper proposes the flame image process method and lance position control according to calculated result for flame image process.

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

## 1. 서론

최근 고로(Blast Furnace)의 용선 생산량이 증가함에 따라 쇠물의 용해를 위해 사용되는 코크스(Coke)의 소요량이

크게 증가하고 있다. 코크스는 유연탄(Bituminous Coal)을 소결로(Furnace)에 장입하여, 고온으로 가열하여 제조하게 된다. 때문에 코크스를 열원으로 사용하기 위한 제조비용 증가 및 공급불안정에 따른 수요량 대비 코크스의 공급량이

\* 조선대학교 첨단부품소재공학과  
+ 삼우기계(주)  
++ 교신저자, 조선대학교 메카트로닉스공학과 (jykim@chosun.ac.kr)  
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지

부족하게 되었다. 또한 코크스 제조 시에 발생하는 대기 및 수질 오염 물질에 따른 환경문제가 대두되고 있다. 따라서 최근 들어 코크스에 비해 상대적으로 저렴하고, 제조가 쉬운 미분탄(Pulverized Coal)의 사용량이 증가하고 있는 추세이다. PCI 시스템(Pulverized Coal Injection System)은 쇄물의 용해 시 열원으로 사용되는 코크스의 부족분을 미분탄으로 보충하기 위한 미분탄 공급 장치로 일반적으로 1개의 고로에 36~40개가 설치되어 사용되고 있다.

PCI 시스템은 열풍구(Tuyeres), 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 결정되어질 수 있다. 또한 열풍구로부터 열풍(Hot Blast)의 공급이 불안정할 경우, 미분탄의 연소효율이 떨어지거나 점화가 되지 않는 현상이 발생하게 된다. 현재 국내외에서 사용되고 있는 미분탄 취입 랜스의 또 다른 문제점으로, 휴풍(열풍의 공급 중단) 또는 열풍 량의 감소 시 고로 내압(약 5kg/cm<sup>2</sup>)에 의해 미분탄이 열풍구 내부로 역류하여 산소공급 파이프의 끝단에 고착되는 현상이 발생하고 있으며, 조업완료 시 까지 랜스의 교체가 불가능하여 고로 전체의 연소효율 저하로 용선 생산량에 많은 영향을 미치고 있다. 미분탄은 약 400~700℃에서 고착이 발생하며, 랜스 선단을 고온 상태인 고로 내부로 이동시킴으로써 이를 해결 할 수 있다.

본 연구에서는 PCI 시스템의 최적 설계를 위해서 2중관으로 제작된 랜스관 내부의 유동 및 열전달 해석이 수행하였고, 전산 유동 해석에는 범용 적으로 사용되고 있는 상용 코드인 FLUENT를 이용하여 노즐 위치 가변형 랜스의 내부유동 및 열유동 특성을 고찰하였다. 또한 랜스의 해석결과를 바탕으로 화염의 형상을 자동으로 예측하고 이에 반응하여 랜스의 위치를 자동으로 제어할 수 있는 시스템을 개발하여 미분탄의 연소 효율을 높이기 위한 연구를 수행하였다.

## 2. 열·유동해석

### 2.1 유동 및 에너지 방정식

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

연속방정식 :

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

운동량 보존 방정식

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{\rho u'_i v'_j}) + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

여기서  $p$ 는 정압,  $\rho g_i$ 와  $F_i$ 는 중력 및 외부 힘,  $\mu$ 는 점성계수이며,  $\tau_{ij}$ 는 응력텐서로서 다음과 같다.

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

$$-\overline{\rho u'_i v'_j} = \mu_t (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \frac{2}{3}(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i}) \delta_{ij} \quad (4)$$

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

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

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_i}] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (6)$$

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

여기서  $G_k$ 는 난류응력으로 인한  $k$ 의 생성항으로 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$G_k = -\overline{\rho u'_i v'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (8)$$

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

**Table 1 Boundary conditions**

	velocity (m/s)	mass flux (kg/s)	pressure (kPa)	Temp. (K)
Coal	57	0.035	441	300
O <sub>2</sub>	33	0.18	882	300
Hot Air	44	3.54	392	1473

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

$Pr_t$ 는 난류 Prandtl 수이며,  $\beta$ 는 열팽창계수이다. Standard  $k-\epsilon$  난류모델상수는 다음과 같은 값을 가진다.

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_{3\epsilon} = \tanh\left|\frac{u}{v}\right|, C_\mu = 0.09, \sigma_\epsilon = 1.3, \sigma_k = 1.0, Pr_t = 0.85$$

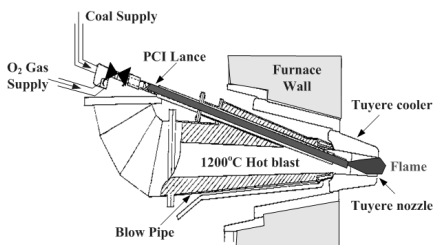
그리고 에너지 방정식은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서  $c_p$ 는 유체의 비열을 의미하고,  $S$ 는 소거 항이다. 위의 (2), (6), (7)식 그리고 (10)식을 체적 적분하고 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 해



**Fig. 1 Composition of PCI System**

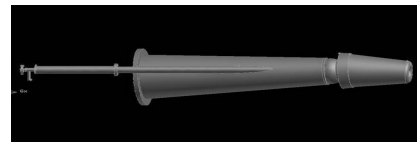
석하기 위해 생성한 격자를 나타낸다. Table 1은 PCI 시스템의 유동해석을 위한 경계조건을 나타내었다.

### 2.3 연소 특성 고찰

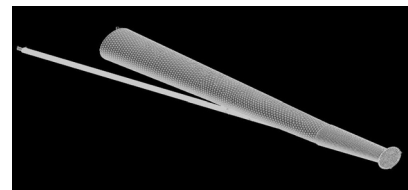
PCI 시스템에서 랜스의 위치에 따른 미분탄의 발화 온도 및 화염의 크기를 알아보기 위해 랜스의 거리를 -50~+150mm 까지 50mm 씩 변화 시키가며 열유동 해석을 수행하였다. Fig. 3은 각 위치별 해석 결과를 나타내며, Table 2에 해석 결과를 나타내었다. 해석 결과, 랜스 노즐의 위치에 따른 5가지 모델 모두 유동특성 및 열전달 특성은 유사한 경향을 보였다.

**Table 2 Results of Analysis**

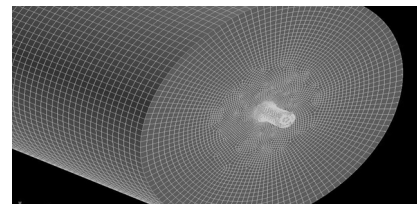
position	max temp.(K)	Flame size
-50	3190	2
0	3100	1
50	2800	3
100	2920	4
150	3170	5



**(a) Analysis Model of PCI System**

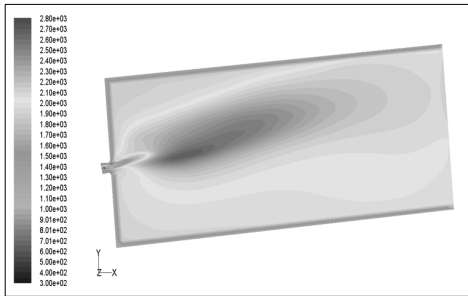


**(b) Inner Meshing**

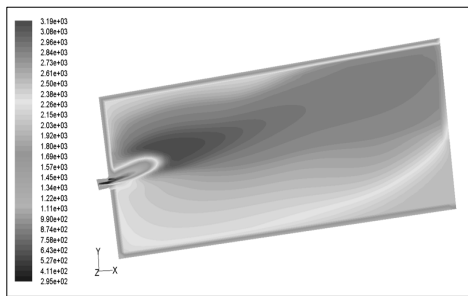


**(c) Detail of Inner Meshing**

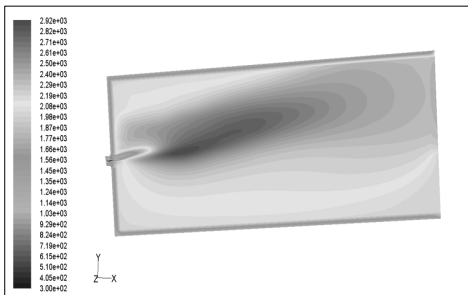
**Fig. 2 Fluid Analysis Model**



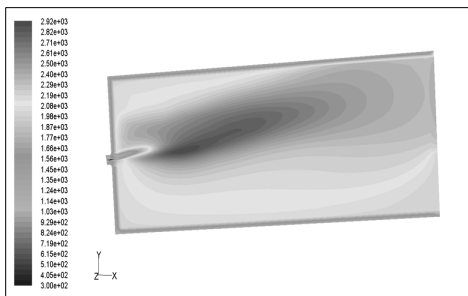
(a) Position of Lance Nozzle(-50mm)



(b) Position of Lance Nozzle(0mm)



(c) Position of Lance Nozzle(+50mm)



(d) Position of Lance Nozzle(+100mm)

Fig. 3 Flame Analysis of Lance Nozzle

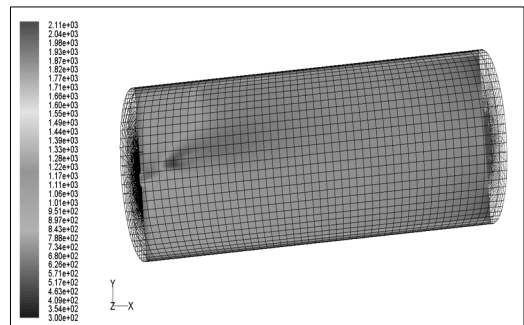
하지만 화염장의 온도 변화는 위치 0mm를 기준으로 -50mm의 경우 화염의 최고 온도는 증가하고 +50~+150mm로 전진할 경우 온도는 상승하지만 화염의 분포는 작아짐을 알 수 있다.

### 2.4 화염전파 분석

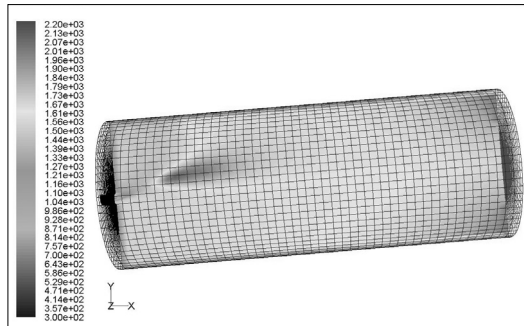
연소특성 고찰을 통하여 랜스 노즐(Lance Nozzle) -50mm 위치에서 최적의 연소조건을 보였다. Lance Nozzle 제어시스템의 유무에 따라 화염전파 특성을 고찰하기 위하여 랜스 노즐(Lance Nozzle)의 최적위치인 -50mm와 연소효율이 가장 낮은 +100mm구간에 대한 화염전파 분석을 수행하였다.

Table 3 Results of Analysis

	Air Vel. (m/s)	O <sub>2</sub> Vel. (m/s)	Coal Vel. (m/s)	Max. Temp. (K)
Case1	157.3	60.5	68	2050
Case2	171.6	66	75	2200



(a) Results of Flame Spreading Analysis(-50mm)



(b) Results of Flame Spreading Analysis(+100mm)

Fig. 4 Flame Spreading Analysis of Lance Nozzle

Fig. 4(a)는 Case 1의 화염구조(온도장)를 나타내고 있으며, 노즐 입구 열풍부에서 공기가 1473 [K], O2와 Premixture coal 은 300 [K]로 공급된다. 랜스 경사각을 따라 연소챔버 입구에서 화염이 형성되며, 화염의 최고온도는 2050 [K]이며 화염대의 평균온도는 약 1800 [K]이다. Case 1과 비교하여 화염형상(화염길이)이 작아졌으며, 화염온도 역시 전반적으로 낮아짐을 알 수 있다.

Fig. 4(b)는 Case 2의 화염구조(온도장)를 나타내고 있으며, 노즐 입구에서 공기가 1473 [K], O2와 Premixture coal 은 300 [K]로 공급된다. 화염의 최고 온도는 2200 [K]이며 화염대의 평균온도는 약 2000 [K]이다. Case 2에 비하여 연소챔버 입구로부터 더 떨어진 위치에서 화염이 형성됨을 확인할 수 있으며, 전반적으로 온도가 증가한다는 것을 확인할 수 있다.

### 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, 화염영역 검출 등을 통해 랜스 제어기 연동하도록 시스템을 구성하였다. Fig. 5는 화염영상을 이용한 위치제어 순서도를 나타내며, Fig. 6는 알고리즘을 나타낸다. CCD 카메라로부터 획득된 영상은 RGB로 분리된 후 흑백 이미지로 변환되고 화염영역을 계산한 후 기준이 되는 화염과 비교하여 랜스 구동 부를 전·후진함으로써 최적의 화염이 형성되도록 제어된다.

영상 획득 부분은 단일 CCD 카메라와 NI-1405 frame

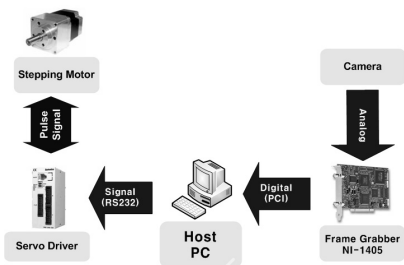


Fig. 5 Composition of Flame Image Controller

grabber를 사용하여 국내 제강사의 사용 제품 규격과 연계를 고려하여 선택하였다. 현재 고로에 부착되어 중앙 관제실에 화염 영상을 전송하는 카메라 장치와 호환성을 가지도록 카메라를 선정하여 향후 개발 장치의 시설 접목을 용이토록 하였으며, frame grabber는 화염 영상의 색 정보를 이용하기 위하여 칼라 영상 획득이 가능한 알고리즘으로 구성하였다.

#### 3.2 PCI 시스템의 제어

Fig. 7은 PCI 시스템의 제어 부 구성도를 나타내며, Fig. 8은 PCI 시스템의 연소효율을 높이기 위해 개발된 제어 부

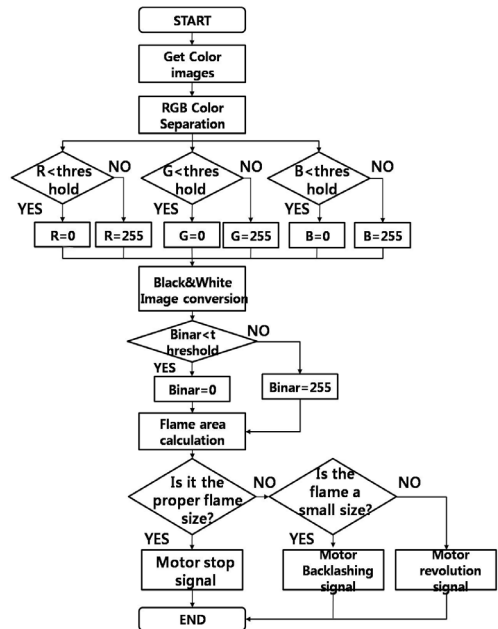


Fig. 6 Control Algorithm of Flame Image for Positioning

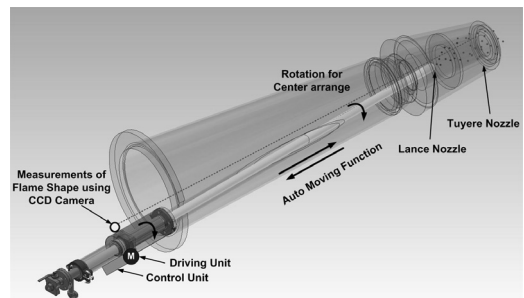


Fig. 7 Positioning Controller composition of PCI System

의 구성을 나타낸다. 제어 부는 CCD 카메라, 영상획득을 위한 프레임 그래버(Frame Grabber), 워기어로 구성된 드라이브 유닛, 워기어의 구동을 위한 스텝핑 모터(Stepping 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 렌스의 전후진을 위해 워기어를 적용하였고 고부하에서 구동이 가능하도록 1/5의 감속비를 가지는 Stepping Motor(A140K-M599-G5, Autronics)와 모터 드라이버(MD5-MF14), 모션 컨트롤(PMC-1HS-U SB)를 사용 제어시스템을 구성하였다. Fig. 9는 화염 영상으로부터 렌스의 위치 제어를 위한 GUI(graphic user interface)를 나타낸다. Fig. 9(a)는 고속의 화염영상을 획득 후 영상처리 알고리즘을 거쳐 계산된 화염의 영역을 백분율로 나타낸다.

Fig. 9(b)는 획득된 화염영상을 RGB로 분리하는 단계를 나타내며, Fig. 9(c)는 화염과 배경을 분리시켜 화염 영역만 추출된 결과를 나타낸다. Fig. 9(d)는 추출된 화염 영역을 일

정 시간동안 이동평균을 이용하여 연산 후 백분율로 나타내도록 GUI를 구성하였다. PCI 시스템의 특성상 화염의 형상 변화가 심하기 때문에 급격한 렌스의 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 연속 적인 비교를 통해 이뤄진다.

### 3.3 화염영역 계산 및 화염크기 조절

고로에 사용되는 화염 영상은 연소에 따른 고에너지의 광량이 CCD에 입사되기 때문에 명도가 매우 높은 영상을 입력받게 된다. 그래서 색조의 구분에 앞서 칼라 영상을 입력받더라도 흑백 영상에 가깝게 화면을 얻게 된다. 하지만 본 연구에서는 정확한 화염 영역을 추출하기 위해 색분배 과정을 거치도록 하였다. 따라서 단일 명암 모드 보다 좀더 세밀하게 3색분배 칼라 영상에서 화염 영역의 설정 조정 자유도를 높여 정밀도를 높였다. 개발된 프로그램에서는 초기 설정 부분에서 사용자가 입사 영상중 화염 영상만 추출하도록 임계값을 조절하는 기능을 추가하였다.

임계치 이후 이진화된으로 재구성 영상에 가우시안 필터를 구현하여 폭발 반응에 따른 고주파 노이즈를 제거하여 화염 거동만을 추출하고, 결과 영상에서 최종적으로 화염과 배경을 과정을 거친다. 추출된 화염 영역의 면적 계산을 통해 화염 영역의 퍼센트 분포도를 계산한다. 얻어진 화염 영역 분포도에 따라 입력된 사용자의 설정에 맞도록 렌스 구동 모터에 정/역회전, 정지 명령을 전송하도록 한다. 만약 화염 크기가 설정보다 작게 되면 모터는 렌스가 진입되도록 정회전 구동 명령을 전송하며, 결과적으로 유동장에 미분탄 접촉 면적을 넓혀 화염 생성을 높이도록 한다. 만약 화염 크기가 크거나 고로 벽면으로 분사 발생이 나타나면, 렌스를 후퇴시키도록 모터를 역회전 구동 명령을 전송하도록 한다.

고로내 장착 구동 실험을 하기에 앞서 프로토타입의 시스템을 구성하고 화염 영상도 임의의 발화장치를 장착하여 화염을 생성하여 화염에 따른 시스템 구동 실험을 실시하였다.

Fig. 9(a)는 가스화염 내에 발화성 물질을 투입하여 고속의 화염영상을 생성한 모습과 영상 획득후 영상 처리 알고리즘을 거쳐 계산된 화염 영역의 백분율을 화면 상단에 나타낸 화염영상을 나타냈었다. Fig. 9(b), (c)는 화염과 배경이 분리되어 화염 영역만 추출된 결과 영상을 보이고 있다. 이렇게 계산된 결과는 미리 입력된 기준 값과 비교하여 모터를

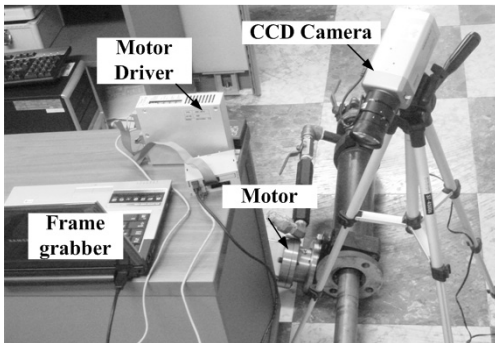


Fig. 8 Positioning Controller of PCI System



Fig. 9 GUI of Positioning Control

제어하게 되고 설정된 기준값이 계속 유지되도록 연속적으로 획득 및 계산이 되어 진다.

#### 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 유동특성 및 열전달 특성을 나타내었다.
- (2) 화염장의 온도변화는 위치 0mm를 기준으로 -50mm의 경우 화염의 최고온도는 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 시간 단위로 구동명령을 수행하도록 제어알고리즘을 구성하였다.

#### 후 기

“이 논문은 2009학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음”.

#### 참 고 문 헌

- (1) Du S. W., Chen W. H. and Jhon L., 2007, “*Performances of pulverized coal injection in blowpipe and tuyere at various operational conditions,*” Energy conversion & management, Vol. 48, pp. 2069~2076.
- (2) John G. M., Jhon S. T. and Harold R., 2005, “*Toward an understanding of coal combustion in blast furnace tuyere injection,*” Fuel, Vol. 84, pp. 1229~1237.
- (3) Chen C. W., 2005, “*Numerical analysis for the multi-phase flow of pulverized coal injection inside blast furnace tuyere,*” Applied Mathematical Modeling, Vol. 29, pp. 871~884.
- (4) Du S. W. and Chen W. H., 2006, “*Numerical prediction and practical improvement of pulverized coal combustion in blast furnace,*” International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 33, pp. 327~334.
- (5) Jamaluddin A.S., Wall T.F. and Truelove J.S., 1987, “*Modeling of high intensity combustion of pulverized coal in a tubular combustor,*” Combust Sci Technol, Vol. 55, pp. 89~113.
- (6) Monson J.R. and Gathergood D.S., 1981, “*Review of injection of coal into blast furnace tuyeres,*” Ironmaking Steelmaking, Vol. 8, No. 5, pp. 101~103.
- (7) Lu, G., Yan. Y. and Colechin. M., 2004, “*A Digital Imaging Based Multifunctional Flame Monitoring System,*” IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 53, No. 4, pp. 1152~1158.