

# 용광로 연소대 관리시스템 개발

## Development of Combustion Zone Monitoring System for a Blast Furnace

최 태 화  
(Tae-Hwa Choi)

**Abstract** : A prototype of combustion zone monitoring system as been developed and installed into tuyeres of the blast furnace. The system consists of CCD(charge coupled device) cameras, sonic flow meters, an image processor and a personal computer. The personal computer collects raceway luminance data and operational data from the image processor that is connected to the color CCD camera from the blast furnace process computer, respectively. In addition, the sonic flow meters supply coal injection rate data to the personal computer. Then, the personal computer evaluates the combustion conditions with the raceway inspection algorithm. This integrated monitoring system allows us to detect abnormal raceway conditions and the clogging status of coal injection pipe. The image processing techniques of the system enable us to effectively monitor unburnt coal sticking to tuyere tip and injection lance wear conditions. Such a developed system ensures rapid and precise raceway inspection. The image processing capability of the system has helped operator to early detect both the unburnt coal sticking problem and the erosion problem of injection lance. Furthermore, the system could control the abnormal raceway condition based the the analysis results obtained from combustion monitoring.

**Keywords** : blast furnace, raceway, coal combustion, combustion monitoring, image processing

### I. 서론

철을 생산하는 제철소에서 용광로공정의 연소대 관리는 조업관리측면에서 중요한 요소 중의 하나이다. 용광로공정은 상부에서 철광석과 코크스가 일정한 시간간격으로 컨베이어벨트에 의해 노내로 교대로 장입이 되고, 하부에서는 고온과 고압의 공기가 보조연료로 사용하는 미분탄과 함께 수십개의 풍구를 통해 로내부로 공급된다. 탄소연료는 연소대에서 연소되어 고열과 일산화탄소나 수소가스등의 환원가스를 생성하여 광석을 환원, 용해하여 쇳물이 생산된다. 용광로의 연소대는 풍구앞의 로내부에 형성된 큰 공간으로 이곳에서 빠른 유속으로 공급되는 공기가 코크스나 미분탄과 만나서 격렬한 연소반응을 하여 고온의 연소가스(CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>등)가 생성되는 곳이어서 항상 세심한 관리가 요구되고 있다[1,2]. 그러나 종래 연소대 감시는 주로 조업자의 육안관찰에 의해 간헐적으로 이루어지고 있어서 미처 용해되지 않은 철광석이 연소대로 낙하하여 풍구가 막힐 경우나 미분탄의 미연소분이 풍구선단을 막을 경우등 돌발적인 연소대 변동을 감지하지 못하거나 즉시 대처하지 못하여 종종 사고가 발생하는 경우가 있어 왔다.

본 연구에서는 이러한 연소대관리의 문제점을 해소하기 위해서 광학센서와 음파유량센서를 활용하여 용광로의 운전실에서 연소대의 관찰이 가능하고, 연소대의 이상상태를 판단 및 제어할 수 있는 온라인 용광로 연소대 관리시스템을 개발하였다.

### II. 연소대 관리시스템의 구성

본 연소대 관리시스템은 그림 1과 같이 34개 풍구부의 연소대 관찰구에 설치한 칼라 전하결합소자 카메라, 미분탄 투입배관에 설치한 음파유량계, 화상해석기가 내장된 전산기 및 모니터, 연소대의 이상시 자동으로 조치를 취하는 분산제어기 및 벨브등으로 구성되어 있다[3]. 카메라에 의한

연소대의 화상데이터와 음파 유량계에 의한 미분탄 투입유량데이터 그리고 연소조건을 좌우하는 송풍량 등의 주요 조업데이터들이 연소대의 이상유무를 판단하는 입력원으로 사용된다. 그림 1에서 모니터 1은 4분할하여 4개소의 연소대 생화면을 동시에 나타내며, 나머지 연소대도 10초간격으로 순차적으로 나타내고, 모니터 2에는 1개의 연소대 이상유무 판단과 화상처리결과를 매1분마다 나타내어 준다. 화상처리하는데 소요되는 시간은 한 연소대화면당 20초이다. 만약 연소대의 이상이 있을 경우에는 경보를 울리고, 해당 연소대의 미분탄 및 산소공급을 중단할 수 있게 구성되어 있다.

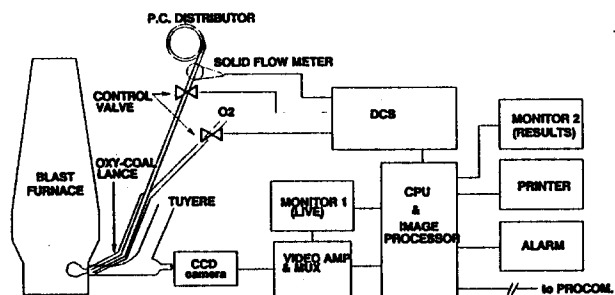


그림 1. 연소관리시스템의 구성도.

Fig. 1. Configuration of combustion monitoring system.

#### 1. 연소대의 화상해석

용광로공정에서 보조연료로 미분탄을 사용하는 경우에 풍구내부에 미연소 석탄등이 부착되거나 장입물 중 용융되지 못한 철광석이 풍구 앞을 막아버리는 경우가 종종 있다. 한편 미분탄 투입렌스의 선단이 마모되어 미분탄 투입을 원활하게 할 수 없는 경우도 있다. 이와같은 초기의 현상은 카메라에 의해 촬영된 원래화상으로는 쉽게 판단하기 힘들다. 따라서 화상처리의 한 방법인 윤곽선 검출방법을 사용하여 이들의 이상유무를 판단 할 수 있다. 일반적인 윤곽선 검출

방법에는 수평적인 화소배열의 휘도구배를 분석하는 수평적인 윤곽검출법, 수직적인 휘도구배를 분석하는 수직적인 윤곽검출법, 수평 및 수직적인 휘도구배를 동시에 고려하는 Sobel filter방법, 대각선 방향의 휘도구배를 고려하는 Roberts filter방법등이 있다[4,5]. 본 연구에서는 수평, 수직, 대각선 방향의 휘도구배를 모두 고려한 다음과 같은 윤곽선 검출방법을 사용하였다. 우선 카메라에 의해 측정된 연소대 단면의 2차원 휘도분포데이터에서 그림 2와 같은 3x3개 화소의 휘도를 생각해 보자. 어떤 임의의 점(x,y)에서 휘도구배는 다음과 같다.

X1	X2	X3
X4	X5	X6
X7	X8	X9

그림 2. 3 x 3 화상영역.  
Fig. 2. 3 x 3 image region.

$$G[F(x,y)] = [Gx^2 + Gy^2 + Gxy^2]^{1/2} \quad (1)$$

여기서 Gx, Gy, Gxy는 각각 수평, 수직, 대각선방향의 화소간 휘도구배이다.

$$Gx = x_6 - x_4 \quad (2)$$

$$Gy = x_8 - x_2 \quad (3)$$

$$Gxy = (x_7 - x_3) + (x_9 - x_1) \quad (4)$$

여기서  $x_i$ 는 i번째 화소의 휘도를 나타낸다. 이와같이 3방향의 휘도변화를 동시에 고려하여 구해진 각 지점의 휘도구배를 이용하여 휘도구배가 크게 나타난 부분을 윤곽선으로 처리하여 풍구나 미분탄 투입렌스 선단부의 이상유무를 선명하게 판단할 수 있게 한다.

2. 연소대 관리방법

연소대의 연소성을 정확히 평가하기 위해서는 연소대의 가스조성 및 온도분포 등을 종합적으로 분석하는 것이 필요하다. 이와같은 연소진단을 하기 위해서 최근에 laser induced fluorescence를 응용하는 방법등이 개발되고 있으나 아직 용광로 연소진단에 적용하기에는 어려움이 많다[6-11].

본 연구에서는 단지 휘도분포에 의한 연소성 평가를 하여 연소대의 이상상태를 판단하였다. 연소대의 관리방법은 그림 3과 같은 순서로 이루어진다. 일반적으로 카메라에 의해 측정된 각 화소별 전기적인 신호값을 상대휘도로 변환함에 있어서 선형적인 비례함수를 사용한다. 본 연구의 연소대 휘도분포는 고휘도에 치우친 휘도분포를 나타내어 그림 4와 같은 비선형 변환함수를 사용하여 256레벨의 상대휘도로 변환한다. 이와같은 비선형 변환함수를 사용하여 구한 상대휘도는 용광로 연소대와 같이 높은휘도영역에 치우친 휘도분포를 보다 세분화된 상대휘도로 변환하여 사용함으로써 연소대 휘도변화에 의한 이상유무판단을 보다 용이하고 정확하게 할 수 있다.

다음에 상기와 같이 구한 상대휘도데이터를 이용하여 연소대의 단면을 구분할 수 있는 휘도레벨을 선정할 후 이 휘

도레벨 이상되는 화소수를 세어 연소대의 단면적(ATi)을 구한다.

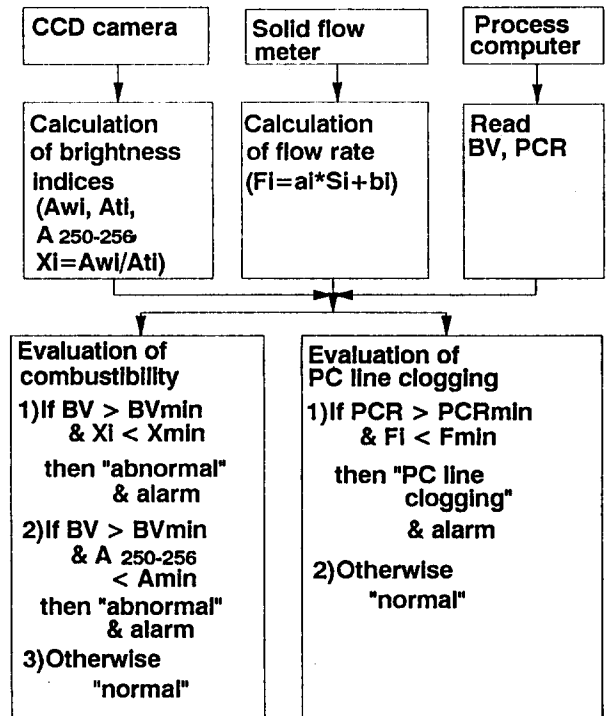


그림 3. 연소관리절차.  
Fig. 3. Procedure for combustion inspection.

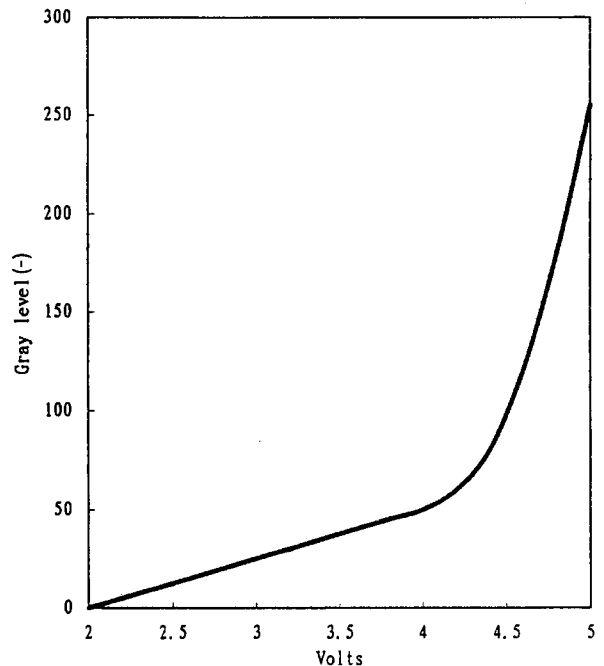


그림 4. 상대휘도 변환함수.  
Fig. 4. Transfer function for gray level.

다음에 보다 높은 휘도를 나타내는 화염의 단면적(AWi)을 구한다. 화염의 단면적은 그림 5와 같이 동일한 면적을 갖는다고 하더라도 평균적으로 휘도레벨이 높은 (b)의 경우가 (a)에 비해 고온이어서 연소가 더욱 활발히 일어난다. 따라서 화염의 단면적을 구함에 있어서 다음과 같이 휘도레벨별 가중치를 고려한다.

$$AWi = \sum \epsilon_i D_i \quad (5)$$

여기서,

$\epsilon_j$  : j회도레벨의 가중치

$$\epsilon_j = (Y_j - Y_{Lower}) / (Y_{Upper} - Y_{Lower})$$

$Y_j$  : j회도레벨 ( $Y_{Lower} \leq Y_j \leq Y_{Upper}$ )

$Y_{Lower}$  : 화염의 상대휘도 하한치

$Y_{Upper}$  : 화염의 상대휘도 상한치

$D_j$  : j회도레벨의 화소수

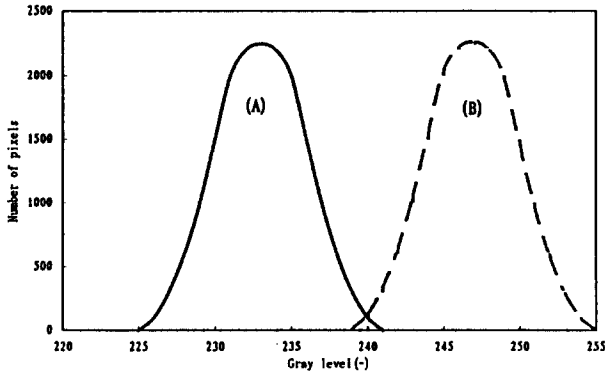


그림 5. 화염단면의 휘도분포.

Fig. 5. Luminance distribution of flame sectional area.

화염의 상대휘도 상,하한치는 화염의 형태를 나타내는 상대휘도의 범위로 연소대 단면의 화상분석을 통해 선정한다. 다음에 연소대 단면적에 대한 화염의 단면적비( $X_i$ )를 구한다.

$$X_i = A_{Wi} / A_{Ti} \quad (6)$$

다음에  $X_i$ 를 이용하여 다음과 같이 연소대의 이상유무를 판정한다.

If  $X_i < X_{min}$  and  $BV > BV_{min}$   
then "Abnormal conditions"

여기서  $BV$ 는 용광로에 공급되는 송풍유량으로 용광로 조업이 정상상태에 있는지 유무를 판단하는 인자로 사용한다.  $X_{min}$ 는 휘도분포 면적비의 하한치이며,  $BV_{min}$ 는 정상조업시 송풍량의 하한치이다.

용광로에서 미분탄은 주연료로 사용하는 코크스의 보조연료로 사용한다. 광산에서 들여 온 석탄을 연소가 잘되게 하기 위해 미세하게 파쇄하여 용광로의 각 연소대에 투입하는 미분탄은 종종 취입배관을 막아 용광로 조업에 지장을 준다. 본 연구에서는 미분탄 취입배관에 설치한 음파측정센서로 미분탄의 취입유량(PCR)을 측정하여 배관의 막힘을 감시한다. 배관막힘은 연소대의 이상유무 판단과 동일한 방법으로 다음과 같이 판정한다.

If  $PCR < PCR_{min}$  and  $F > F_{min}$   
then "Pipe clogging"

여기서  $F$ 는 용광로에 공급되는 미분탄의 총유량으로 미분탄 공급설비가 정상적으로 가동중인지 여부를 판단하는 인자로 사용된다.  $F_{min}$ 는 정상조업시 공급되는 미분탄의 최소 총유량,  $PCR_{min}$ 는 연소대별로 취입되는 미분탄의 하한유량이다.

이와같은 방법으로 연소대의 이상유무를 판단하여 만약 이상이 발생하면 미분탄 및 산소공급이 중지되고 대신 공기가 공급되게 한다.

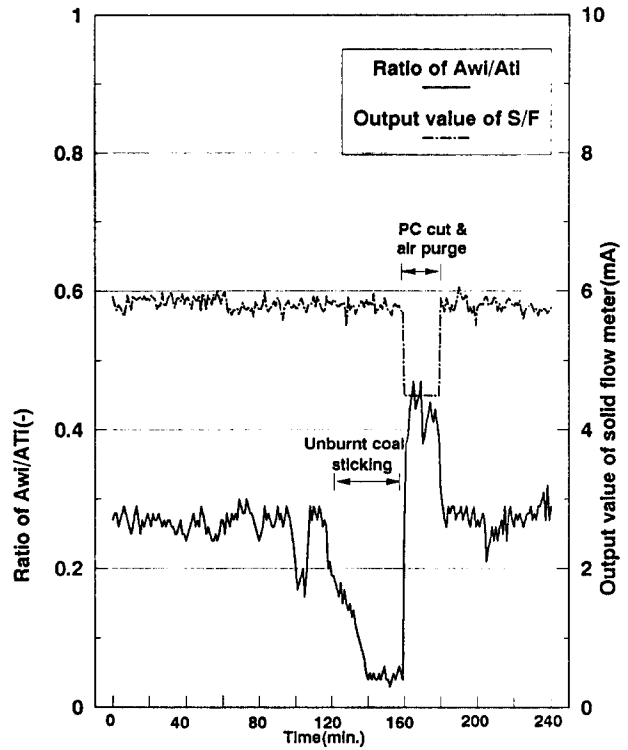
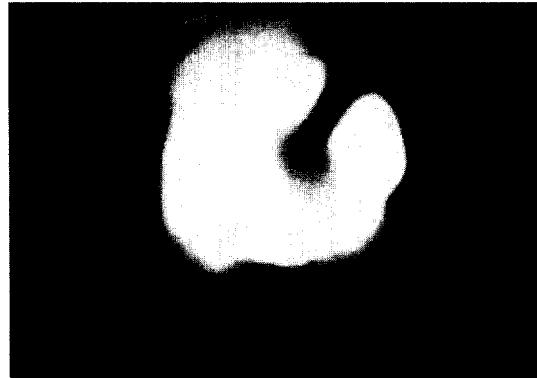
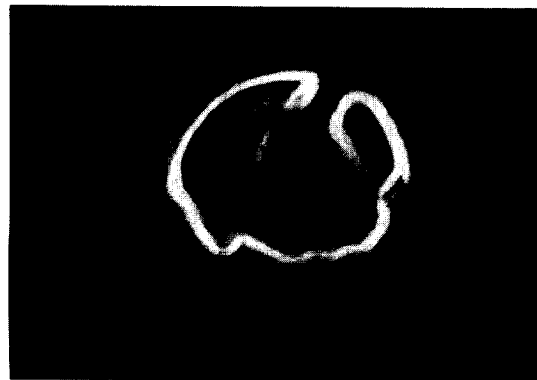


그림 6. AWi/ATi 비에 대한 풍구선단에 부착된 미연소 석탄의 영향.

Fig. 6. Effect of unburnt coal sticking at tuyer tip on the ratio of  $A_{Wi}/A_{Ti}$ .



(a)



(b)

그림 7. 풍구선단에 미연소 석탄이 부착된 모습. (a) 원래영상, (b) 윤곽선 검출영상.

Fig. 7. Tuyere tip status with unburnt coal. (a) original image, (b) edge detection image.

III. 현장적용결과 및 고찰

본 시스템을 실제 용광로공정에 적용하여 여러가지 연소대 이상상태를 관찰할 수 있었다. 미분탄 연소시 미연탄(char)에 의해 풍구가 막힐 경우 그림 6에서 보는 바와 같이 단면적비(Xi)가 수시간 전부터 점점 낮아졌다. 따라서 본 연소대 관리시스템에 의해 풍구가 막히는 것을 조기에 감지하여 적절한 조치를 취할 수 있었다. 그림 7은 풍구안쪽에 미연소 석탄이 부착할 때 원래영상과 윤곽선 검출법에 의한 화상처리결과를 비교한 것으로 원래영상에서는 부착물의 존재여부를 정확히 알 수 없으나 윤곽선 검출방법을 통해 부착물이 생성되어 있는 것을 선명하게 판단할 수 있었다. 그림 8은 본 연구에서 고안한 윤곽선 검출방법에 의한 화상처리결과를 종래의 방법들과 비교한 것으로 본 연구의 결과가 미분탄의 분사상태등의 입체적인 윤곽을 선명하게 나타내고 있다. 이와같은 화상처리결과는 풍구선단의 이물질 부착여부 및 미분탄 취입렌스의 마모상태 등을 판단하는데 실제 용광로조업에서 유용하게 사용하고 있다.

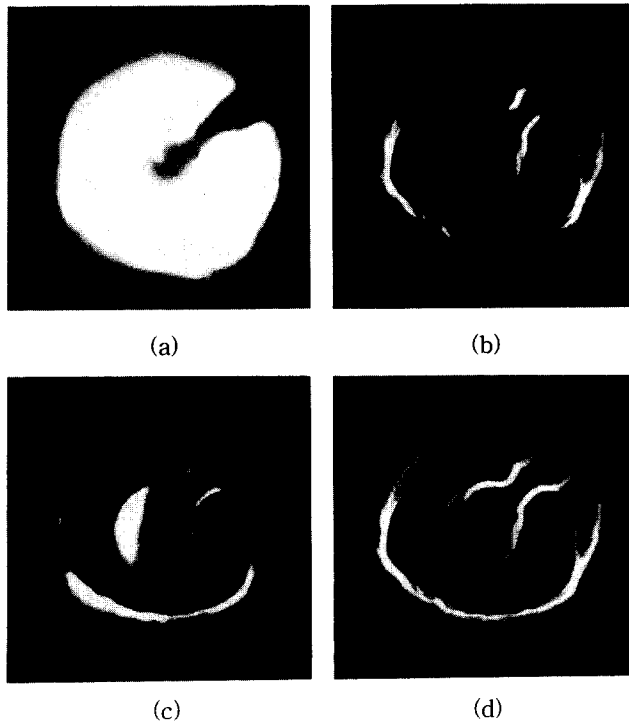


그림 8. 여러 가지 윤곽선 검출결과의 비교. (a) 원래 영상, (b) by sobel filter, (c) by Roberts filter, (d) by this study.

Fig. 8. Comparison of edge detection methods. (a) original image, (b) by Sobel filter, (c) by Roberts filter, (d) by this study.

예비실험을 통한 미분탄의 취입유량(F;Kg/Hr)과 음파유량계의 출력치(S;mA)와의 상관성은 다음과 같이 나타났다.

$$F = 511.3 S - 2592 \quad (r^2 = 0.85) \quad (7)$$

따라서 음파유량계에 의한 미분탄의 취입유량측정은 정확히 측정할 수는 없었으나 미분탄의 취입배관이 완전히 막힐 경우에는 유량계의 출력신호가 최저치로 수렴하여 막힘유무를 정확히 판단할 수 있었다. 음파유량계는 고가의 laser 고체 유량계보다 설치가 간편하고 가격이 싸서 미분탄의 취입배관의 막힘유무를 판단하는데 실용성이 있었다. 특히 미분탄 취입배관의 막힘현상은 그림 9와 같이 사전에 일시적으로 큰 유량변화가 반복되다가 완전히 막히는 경우가 대부분이

어서 배관막힘여부를 조기에 판단할 수 있었다.

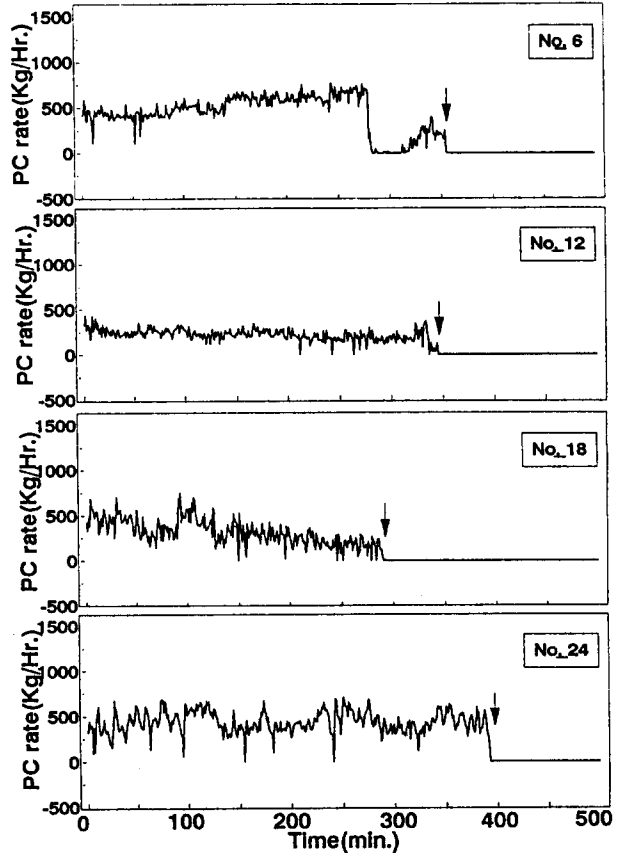


그림 9. 미분탄 취입배관막힘의 증상 (↓ : 배관막힘).

Fig. 9. Symptom of complete clogging of coal transport pipe (↓ : pipe was clogged).

IV. 결론

본 연구를 통해 종래 조업자의 간헐적인 육안관찰에 의한 용광로 연소대 관리상의 문제점을 해결하였다. 본 시스템은 연소대 단면의 화상해석에 의해 용광로 풍구막힘여부, 미분탄 취입배관막힘여부, 미분탄 연소성 평가, 미분탄 취입렌스 마모상태의 평가가 가능하며, 연소대의 이상이 발생시 자동으로 조치를 취할 수 있는 기능을 가지고 있다. 본 시스템은 현재 포항종합제철(주) 포항 3고로에 설치되어 조업에 유용하게 사용되고 있다.

참고문헌

- [1] The Iron and Steel Institute of Japan, *Transport Phenomena in the Lower part of Blast Furnace*, Committee on Transport Phenomena in Gas-Solid-Liquid Packed Bed, 1992.
- [2] 포항종합제철(주), 미분탄 취입기술 Working Group 활동집, 포항종합제철(주), 1991.
- [3] M. J. Wargo, A. F. Witt, *J. of Crystal Growth*, no. 116, pp. 213-216, 1992.
- [4] R. C. Gonzalez, P. Wintz, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley Publishing Co., Massachusetts, 1990.
- [5] W. K. Pratt, *Digital Image Processing*, Los Angeles, 1990.
- [6] K. Kohse-Holtinghaus, *Appl. Phys. B50*, pp. 455-461, 1990.

- [7] M. J. Cottureau, F. Grisch and J. J. Marie, *Appl. Phys.* B51, pp. 63-66, 1990.
- [8] M. Woyde and W. Stricker, *Appl. Phys.* B50, pp. 519-525, 1990.
- [9] B. Attal-Tretout, P. Bouchardy, P. Bouchardy, P. Magre, M. Pealat and J. P. Taran, *Appl. Phys.* B51, pp. 17-24, 1990.
- [10] A. C. Eckbreth, *Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species*, Abacus Press, Cambridge, MA, 1988.
- [11] L. Huwel, H. Schluter, H. Voges, G. Meijer and P. Andresen, *J. of Chem. Phys.*, 89, pp. 1929-1935, 1988.



**최 태 화**

1979년 건국대 공업화학과 졸업. 1981년 서울대 대학원 화공과 석사. 1991년 서울대 대학원 화공과 박사. 현재 포항 종합제철 기술연구소 책임연구원. 관심 분야는 공정 자동화, 공정이상진단, 지능시스템등.