

가열로에서 TDLAS를 이용한 각대산소농도측정에 관한 연구

김영일* · 김기홍** · 이인범***

A study on measurement of oxygen in a reheating furnace using TDLAS

YoungIl Kim, KiHong Kim and Inbum Lee

ABSTRACT

In this project, we studied more accurate and reliable sensing method for oxygen in reheating furnace, made the empirical model for NOx concentration based on oxygen and evaluate the stability of the Tuneable Diode Laser (Absorption) Spectroscopy(TDL(A)S). The tested oxygen monitoring system is installed at work-field reheating furnace on hot roll at POSCO and compared with the Zr sensor system which shows too sensitive because it measures oxygen concentration on a spot unlike TDLAS sensor which is successfully applied at 13m-width reheating furnace to measures the line average along the Optical Path Line(OPL).

Key Words : Reheating furnace, TDL(A)S, Zr, Oxygen

기 호 설 명

TDL(A)S	Tuneable Diode Laser (Absorption) Spectroscopy	
Zr	Zirconia	YSZ Yttria Stabilized Zirconia
OPL	Optical Path Line	COG Coke Oven Gas
WMS	Wavelength Modulation Spectroscopy	

1. 서 론

파장가변 다이오드 레이저 흡수 분광학(TDLAS: Tuneable Diode Laser Absorption Spectroscopy)을 이용한 센서들이 최근에 실제 산업 현장에서 시범 적용되면서 그 활용 가능성이 시험되고 입증되고 있다. 연소 조건하에서의 흡수분광학과 상은 다이오드레이저를 이용한 온도, H₂O, CO, CO₂, O₂, NO₂등의 측정이 집중적으로 연구되고

있으며, 특히 가열로, 전기로, 알루미늄 용해로등의 열악한 환경에서 TDLAS는 실시간 검출, 조작의 간편성, 비간섭 특성 등의 잇점에 힘입어 기존 Zr를 이용한 가스 샘플링 방식의 농도 측정이나, 열전대를 이용한 온도측정의 여러 가지 약점을 보완 대체하는 기술로 발전하고 있다. 환경규제의 강화와 심각한 국제 경쟁에 직면한 철강업체도 환경오염물질 방출감소를 줄이면서 에너지 효율을 극대화하여야하는 문제에 직면하고 있으며 연소가 동반되는 공정에서 이러한 문제들을 극복하는 가장 합리적인 방법은 환경오염물질(NO_x, SO_x)를 덜 발생시키는 버너의 개발이나 연속식 오염물질 감시 및 이를 능동적으로 제어하는 제어시스템의 개발이 필요하다고 할 것이다. 환경규제 측면에서 오염물의 발단 농도 측정

* 포항산업과학연구원 에너지연구실,POSTECH 화학공학과

† 연락처자, yikim@rist.re.kr

** 포항산업과학연구원, 에너지연구실

*** POSTECH 화학공학과

이 중요하게 관리되어야하고 이에 따라 현재는 TMS(Tele-Monitoring System)이 법에 의해서 강제적으로 설치되도록 하고 있다. 그러한 이러한 TMS설비는 굴뚝의 종말 농도를 측정 감시하는 것으로 연소제어 측면에서는 활용하는데 어려움이 따른다. 특히 제철 산업에서의 가열로는 다 단계의 연결된 연소 구간을 가지는 설비로 단순 종말 농도를 근거로 각 연소 구간을 개별적으로 제어하기 어려운 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 기존에는 각 연소 구간에 가스 샘플링방식의 Zr센서를 이용한 분석 설비를 갖추었으나 유지관리 및 신뢰성 이 낮은 관계로 대부분 활용되지 못하고 있는 실정이다. 이러한 배경에서 TDLS를 이용한 가열로에서의 온도 검출 및 산소농도 측정의 가능성이 연구되었고[1], 극히 낮은 산소농도(O₂ 1%<)를 제외한 연소 영역에서 신뢰할 수 있는 측정결과를 얻을 수 있다는 것이 알려졌다[2,3]. 이러한 산소 농도의 실시간 측정치를 기반으로 피드백 제어 시스템을 구축하면 적정 공연비를 항상 유지할 수 있으며, 이에 따라 에너지원단위 향상이 기대되고, 적정 산소농도 관리에 의해서 우수한 스케일박리(descaling)와 제품 품질을 얻을 수 있을 것이다. 또한 제철소와 같이 부생가스(COG, BFG, LDG)가 발생하는 산업에서 에너지 효율측면에서 이를 혼합한 연소공정이 필요하게 된다. 이 경우 최종 혼합가스 조성의 변동이 심해지고, 연소공정에서 공연비 관리가 더욱 어려워지는 문제가 발생하지만 산소농도를 실시간 측정하는 피드백 제어는 이러한 연료조성 변동에도 능동적으로 대처할 수 있는 이점이 있다. 본 연구에서는 이러한 가능성에 근거하여 실 가열로를 대상으로 먼저 연소반응이 동반되는 유동해석을 통하여 적정 측정위치를 예측하고, 기존의 Zr방식의 측정 시스템과 TDLS측정 시스템을 시범적으로 구축하여 그 적용 가능성을 실증 검토하는 연구를 수행한다.

2. 이론 과 장치

2.1 산소농도 측정법

본 연구의 궁극적 목표가 TDLS센서의 현장 활용가능성의 검토이므로 이를 검증하거나 비교할 대상이 있어야하므로 이를 위해서 통상적으로 활용되는 zirconia 센서를 TDLS센서와 같이 설치하는 것으로 한다. 먼저 이들의 측정 원리를 살펴보고 적용대상이 될 가열로의 구조에 대하여 언급한다.

2.1.1 Zr 센서

Zr센서는 지르코니아에 CaO, MgO, Y₂O₃등을 첨가시키면, 첨가산화물의 양이온이 ZrO₂의 Zr이

온을 치환하여 산소 vacancy를 생성하게 되고 이 빈자리를 이용하여 산소이온이 전도되어 고체 전해질이 되는 것을 이용한 센서이다. 다음의 식 (1)는 Y₂O₃가 ZrO₂에 첨가되는 반응을 나타내고, Fig 1는 이러한 치환이 이루어진 Ytria Stabilized Zirconia(YSZ) 결정의 구조를 나타낸 것이다[4].

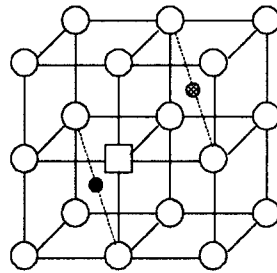
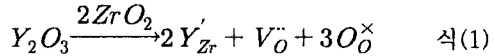


Fig 1 Ytria Stabilized Zirconia(YSZ) Crystalline Structure; ○:O²⁻, ○:Vacancy, ●:Host cation (4+), ○:Dopant cation(3+,2+)

이러한 고체전해질의 특징을 활용한 상업용 산소 센서의 대표적인 예가 Concentration Cell-Type Oxygen Sensor이고 이를 모식화한 것이 Fig 2이다, 그림에서 최외각은 다공질 세라믹 층으로 Pt전극의 활성화와 장시간 사용에 따른 센서의 안정성 향상을 위해서 coating되고, 안쪽으로는 일반적으로 공기 등의 고농도 산소를 공급하며, 이때 측정되는 배 가스의 낮은 산소농도와와의 차이에 의해서 산소이온이 낮은 쪽으로 이동하여 기전력이 발생한다. 또한 동작온도가 낮은 경우에는 산소의 이온화가 활발하지 못하고 너무 높은 경우에는 고체전해질 특성이 열어지므로 이를 방지하기 위해서 heater를 이용하여 일반적으로 400~700℃의 온도 범위를 유지하도록 설계된다.

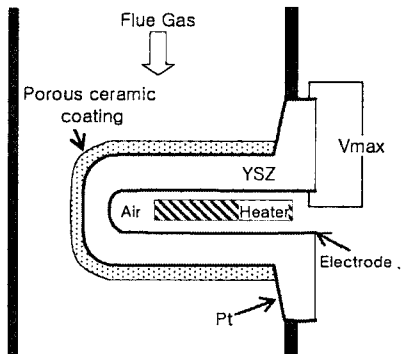


Fig 2. Concentration Cell-type Oxygen Sensor 이때 얻어지는 최대기전력(V_{max})은 다음의

Nernst식으로 얻어진다.

$$V_{max} = \frac{RT}{4F} \ln\left(\frac{P_{O_2air}}{P_{O_2}}\right) \quad \text{식(2)}$$

여기서 $R, T, F, P_{O_2air}, P_{O_2}$ 는 각각 가스 상수, 절대온도, 공기의 산소 분압, 측정가스의 산소분압이다.

2.1.2 TDLS센서

흡수 분광학은 기본적으로 빛(레이저)이 측정 대상을 통과하면서 세기가 약화되는 정도를 측정하는 것으로 파장이 λ 인 빛이 흡수매질을 통과하면 그 세기는 다음의 식(3)인 Beer-Lambert 관계로 표현된다.

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp(-\alpha_\lambda) \quad \text{식(3)}$$

여기서 $I(\lambda), I_0(\lambda)$ 는 각각 파장이 λ 인 빛이 매질을 통과한 후의 세기(Intensity:강도)와 초기 강도이고, α_λ 는 분광흡광도(spectral absorbance)로서 대상시료의 농도, 온도 및 압력에 의존한다. single absorption line(i)에 대해서 이를 표현하면 다음과 같다.

$$\alpha_{\lambda,i} = PXL S_i(T) \phi_i(\lambda - \lambda_0) \quad \text{식(4)}$$

이고, P, X, L 는 압력(atm), 대상시료 물분율, 흡수길이(absorption path length, cm)이고, S_i 는 흡수라인 i 에서의 흡수라인세기로 특정 흡수라인에서 Boltzmann population of the energy states의 원리에 따라 온도와 함께 변화다(부록 1). 일반적으로 흡수라인은 파장과 온도의 함수이다. 즉 Fig 3과 같이 표현된다[1].

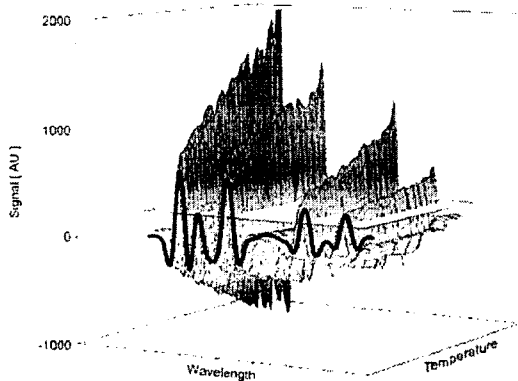


Fig 3. Oxygen spectrum obtained by WMS and 2nd harmonic(2λ) detection

그림에서 알 수 있는 중요한 사실은 파장뿐만 아니라 온도에 따라서도 흡수강도가 달라진다는 것으로 단일 흡수라인만을 이용한 측정의 경우에는 반드시 온도 보상 개념이 있어야 한다. 역으로 만약 두 개의 흡수라인을 검출가능하다고 보

고 그들 각각의 총흡수량(total absorption)의 비율을 생각해 보면

$$R = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \alpha_{\lambda,1} d\lambda}{\int_{-\infty}^{\infty} \alpha_{\lambda,2} d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda,1} d\lambda}{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda,2} d\lambda} \quad \text{식(5-a)}$$

$$= \frac{\int_0^L PXS_1(T(x)) dx}{\int_0^L PXS_2(T(x)) dx} \quad \text{식(5-b)}$$

$$= \frac{\int_0^L S_1(T(x)) dx}{\int_0^L S_2(T(x)) dx} \quad \text{식(5-c)}$$

$$= \frac{S_1(T)}{S_2(T)} \quad \text{식(5-d)}$$

이고, 여기서 식(5-c)는 압력과 분율이 beam path를 따라 일정하다고 가정하여 얻어지고, 식(5-d)는 여기에 beam path를 따라 온도도 일정하다고 가정하여 얻어진다. 만약 식(5-d)로 표현 가능하다면 대상매질의 온도가 두 흡수라인의 흡수비율 값의 함수($T = f(R)$)로 표현 가능하므로 이로부터 온도도 얻을 수 있다[5].

TDLS를 이용하여 혼합가스 혹은 배가스 중 특정 성분의 농도를 측정하는데 있어서 어려움이 따르는 이유는 다양한 성분들이 혼재하게 되고 (Fig 4) 이에 따라 타 성분들이 흡수를 일으키지 않는 파장대를 올바르게 선택하여야 한다는 것이다.

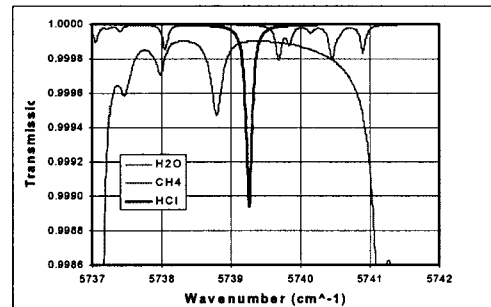


Fig 4. Absorption spectrum along the wavelength in a mixture

2.2 가열로

제철 산업에서 가열로는 거의 필수불가결한 공정으로 연주공정의 slab, bloom등을 재가열하여 물에 의해서 압연이 가능하도록 하는 압연공장의 초기 대상체 가열공정이다. 이러한 가열로는 일

Table 1. Coefficients for combustion reaction

Reaction No	Reaction Rate Factor(A)	Temperature Exponent(a)	Pressure exponent(b)	Ea/R	Concentration exponent		
					f1	f2	f3
R1	1.5x10 ⁻⁹	0	0	15.1	0.3	1.3	-
R2	5.42x10 ⁻⁹	0	0	15.15	1	0.25	0.5
R3	3.31x10 ⁻¹³	0	0	20.63	0.85	1.42	-

반적으로 Fig 5처럼 다단계의 연소구간(통상적으로 3 ZONE: 예열대, 가열대, 균열대)을 가지는 형태로 구성되고, 이들 각 구간은 관리 온도 영역이 상이하고, 이에 따라 설치되는 버너들도 용량이 달리 설계된다. 그리고, 가열하는 장재(slab)의 특성에 따라 각대의 온도 및 산소농도 목표치를 달리한다.

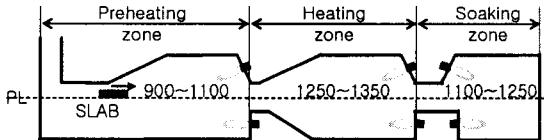


Fig 5. Schematic drawing of reheating furnace

크기는 생산용량(100~300ton/hr)에 달라지며 일반적으로 전체 길이는 25~50m, 폭은 8~12m이며, 높이는 5~6m수준의 다양한 형태가 존재하고, 장입되는 slab는 path line(PL)를 따라 예열, 가열, 균열의 가열 공정을 거치게 되고, 이후 압연공정에서 plate나 coil형태로 가공된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 연소 열유동해석

대략적인 측정위치 선정을 위해서 전산모사를 먼저 수행하였다.

3.1.1 모사 조건

먼저 Fig 6처럼 가열로를 폭방향으로 반으로 나누어 서로대칭이라고 가정하고, slab 운송 및 지지용 skid pipe와 post beam을 고려하여 grid를 생성한다.

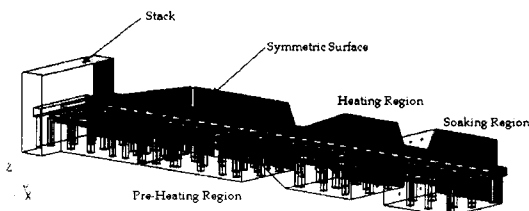
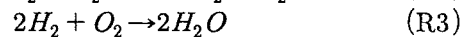
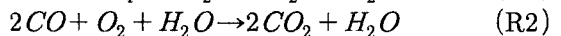
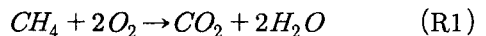


Fig 6. Preprocessing(structure design) for reheating furnace

연료 연소반응을 고려하여야 알고자하는 산소농도 분포를 얻을 수 있으므로 여기서는 COG, BFG의 혼합연료를 사용하는 경우도 살펴보기 위해서 다음의 3가지 1step 연소반응만을 고려하였다.



이들의 반응속도는

$$\omega = AT^a P^b C_{F1}^1 C_{F2}^2 C_{F3}^3 \exp(-E_a/RT) \quad \text{식(6)}$$

이고, 각반응의 계수를 Table 1에 정리하였다. 사용되는 연료는 COG, BFG를 이용한다고 가정하고 COG 조성과 모사에 이용된 조성을 Table 2로 정리한다. C2H4가 적게 존재하므로 모사에서는 CH4로 대체하여 연소반응을 간략화한다.

Table 2. Chemical mass vol% of fuel gas

Species	Real COG	Model COG	Mix-Gas
CH4	39.97	45.90	13.80
H2	10.55	10.57	3.40
CO	22.09	22.14	20.80
N2	12.81	12.84	37.10
CO2	7.63	7.60	24.60
C2H4	6.05	-	-
O2	0.90	0.90	0.30

다음으로 Table 3에 모사할 연소 조건들은 6가지 경우로 정리하였고, 그 결과를 분석하였다.

Table 3. Case Studies

CASE	Fuel Type	Fuel Quantity	exO2
1	COG	Normal	1.2
2	MIX	Normal	1.2
3	COG	+10%	1.2
4	COG	-10%	1.2
5	COG	Normal	1.0
6	COG	Normal	1.4

표에서 연료량은 통상유량(Normal)과 통상기준 ±10%의 3가지를 살펴보고, 과잉산소는 COG연료에 대하여 1.0, 1.2, 1.4의 3가지를 살펴보았다. 모사의 편의를 위하여 장입/추출도어를 통한 침입 공기의 영향은 없다고 가정하였다.

3.1.2 모사 결과

앞의 조건들을 이용하여 상용코드 CFD-ACE를 활용하여 전산모사를 수행하였고, 다음의 결과들을 얻을 수 있었다. 먼저 Fig 7에는 CASE 1의 결과로서 각대 특정위치에서의 산소 농도를 노폭 단면에 대하여 도시하였다. 그림에서 확인되는 사항은 미미하지만 로 폭방향 센터가 벽체측보다 높은 농도(vol%가 아닌 mass fraction)를 나타낸다는 것이 확인된다. 이로 부터 안전하고 효율적인 가열로의 운전 및 관리를 위해서는 만약 Zr센서를 이용한다면 로의 폭 방향으로 센터에 위치하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

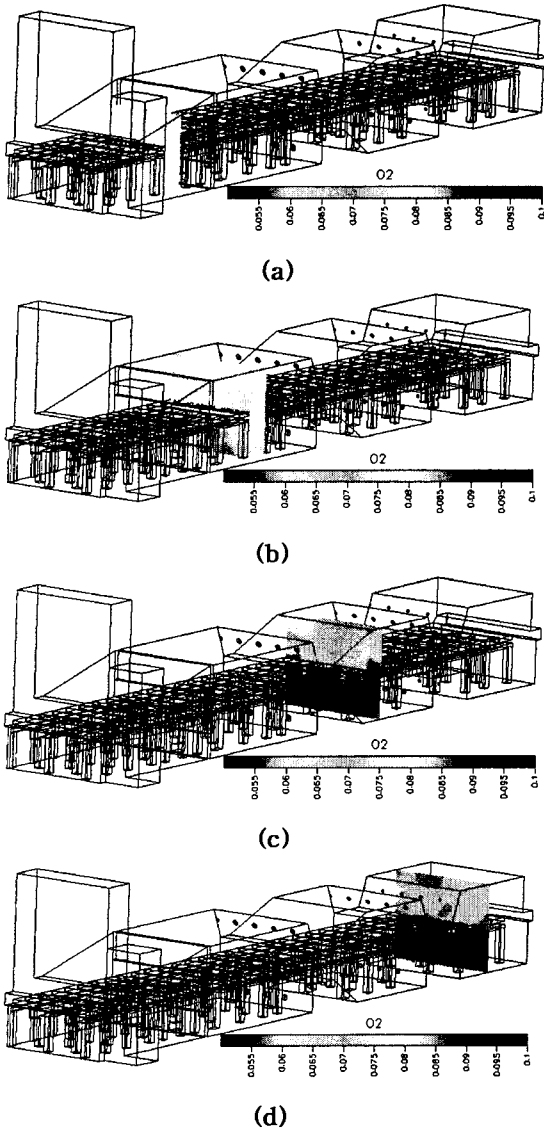


Fig 7. O2 concentration sectional view for CASE 1

Fig 8는 마찬가지로 CASE 1에 대하여 산소농도를 폭 센터에서 1m지점에서 노 길이방향 산소농도 profile를 도시한 것으로 각 대의 상/하 섹션에서 산소농도는 버너에서 멀어질수록 균일화되는 것이 확인된다. 즉, 길이 방향으로 버너에서 먼 위치에 설치하여야 변동이 심하지 않는 측정이 가능하리라는 것을 알 수 있다.

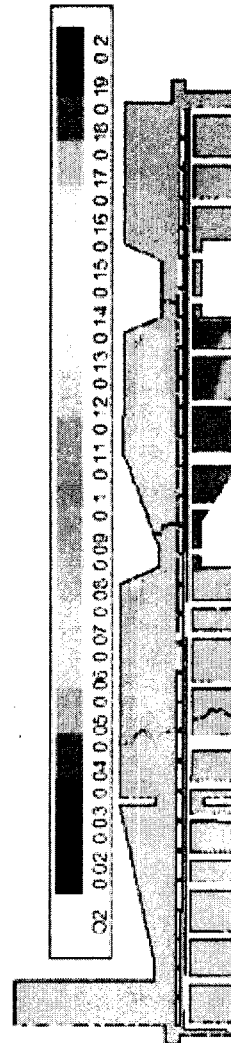


Fig 8. Oxygen concentration profile along the furnace length direction at width center point for CASE 1

3.2 센서의 설치 및 측정 결과

앞 절의 모사 결과를 근거로 적절한 센서위치가 선택되고, 이곳에 센서를 설치하여 측정하고 비교 분석하였다.

3.2.1 센서 설치

Zr센서는 앞 절의 결과에 근거하여 노폭방향으로 센터위치에 길이방향으로는 버너에서 먼 곳을 선정하여, Fig 9처럼 노상부에 설치하였고, TDLS센서는 노폭을 가로질러 설치되므로 버너에서 먼곳에 위치하는 것으로 충분하여 길이방향으로는 Zr센서 위치가 선정되었으나 실 설치단계에서는 외부 지지 beam의 간섭을 피하기 위해서 선정점 근방(130cm)에 설치하였다. TDLS센서의 높이방향 위치는 slab 주변의 산소농도가 어떠한지 알고자하여 slab의 최대 두께를 300mm로 보고 working beam 전진시 120mm의 위치 상승을 고려하여 안전하게 600mm의 slab의 직상부의 농도를 측정할 수 있는 위치가 선정되었다. Zr센서는 그림의 표기 위치들에 각 위치에 모두 3기 설치하였으나 TDLS센서는 1기만을 측정하고자 하는 대상 가열 영역에 옮겨다니며 사용하도록 구성하였다.

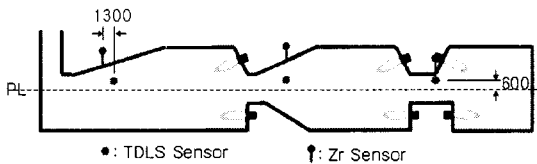
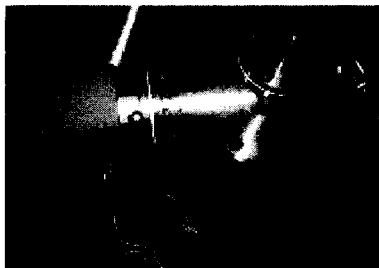
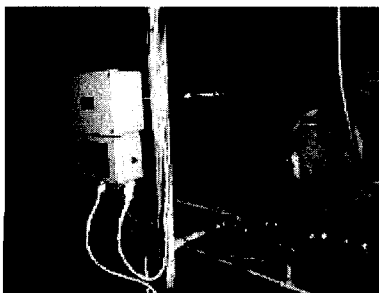


Fig 9. Schematic drawing of Sensor positions

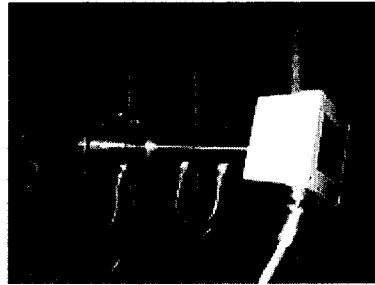
Fig 10에는 이렇게 선정된 위치에 실제로 설치되는 센서들의 설치 모습이다. 본 연구에서는 2종의 상업용 TDLS센서를 시험 적용하였고, 사진의 기종은 NEO monitors as사의 LaserGas II라는 Single Path용이고, 기기냉각을 위해서 Air를 사용하며 Quartz의 오염방지를 위해서는 질소가 이용되었다.



(a)



(b)



(c)

Fig 10. Installation picture of (a) Zr Sensor, (b) Transmitter of TDLS, (c) Receiver of TDLS at heating zone of a furnace

공기를 이용할 수도 있지만 이 경우 보호용 공기에 존재하는 산소를 보정해야하는 부가적인 작업이 필요하고, 만약 측정대상 path line(즉, 가열로 내부)의 산소농도가 낮다면 보호용 공기에 의한 영향이 크게 작용하여 의미있는 데이터를 얻기 어려워진다. 부록2에는 Single Path 방식의 기기 구조도를 첨부하였다.

3.2.2 측정 결과

Fig 11에는 가열대에서의 TDLS센서와 Zr센서의 측정 결과를 도시하였다.

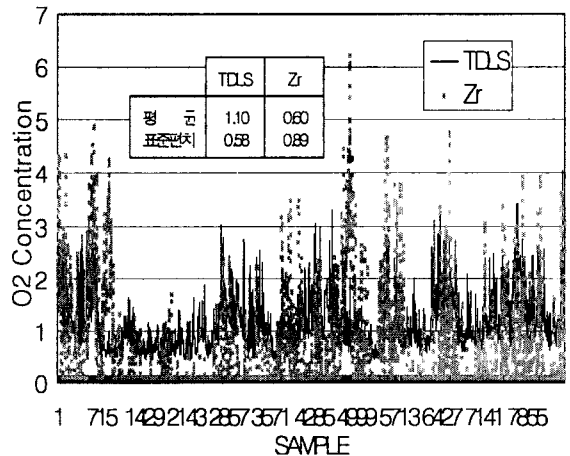


Fig 11. Measured results from heating zone
 그림에서 알 수 있듯이 Zr방식은 센서의 고온으로부터의 보호 및 측정 방식의 특성상 측정대상 가스를 흡기하여 분석하므로 엄밀하게는 가열로의 특정점(상부벽면 설치 위치점)의 가스에 대한 정보만을 제공한다. 즉 한 점의 가스 성분을 분석한다고 볼 수 있으므로 결과에서 볼 수 있듯이 변동이 심하고 특히 산소농도가 zero로 검출되는 경우가 너무 많이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결점이 Zr센서를 가열로처럼 다단계연소 구간을 가지고 넓은 연소 공간을 가지는 시스템에서 제어용으로 활용되는 것을 어렵게하는 중요한

요인으로 작동하고, 운전자의 기기 및 검출치에 대한 신뢰성이 낮아 주요원인이다. 이에 반해서 시험 적용한 TDLS방식은 가열로를 폭방향으로 가로질러 이루어지는 path line의 산소농도 평균치를 얻을 수 있는 방식이므로 그림에서 나타나는 것처럼 항상 안정적인 검출을 나타내는 것을 볼 수 있다. 특히 평균치 개념으로 동작하므로 변동 폭도 Zr대비 낮은 것을 확인할 수 있다. 이론에서도 언급하였듯이 TDLS는 온도에 따라 흡수 강도가 달라진다는 것이 반드시 고려되어야 하는데 이를 확인할 수 있는 그림이 Fig 12이다. Fig 12에서는 온도보정을 하지 않고 기기의 온도값을 고정값(1250℃)으로 하여 측정한 결과이다. 검출값은 Zr과 동일 방향으로 움직이지만 그 변동 폭이 매우 낮아서 거의 변화하지 않는 것처럼 검출되어 만약 이 값을 신뢰한다면 제어에 거의 필요하지 않은 것처럼 보일 수 있다.

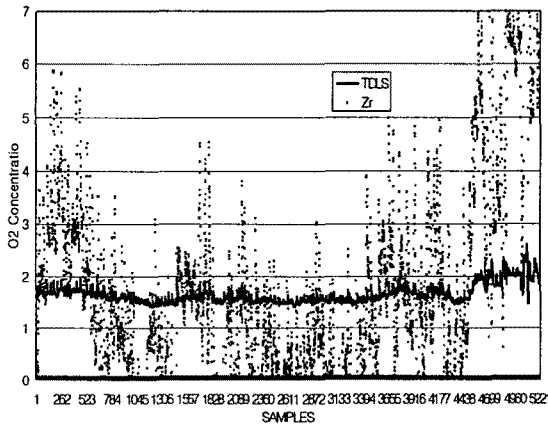


Fig 12. Measured result without temperature calibration for TDLS

4. 결론

본 연구에서는 기존에는 측정 환경이 열악하지 않은 곳(낮은 주변온도, 간섭물질이 적은 대상체)에 주로 활용되던 TDLS센서를 가열로의 혹독한 조건에서 적용 가능성을 검증하기 위한 실 가열로를 대상으로 상업용 기기를 대상으로 성능을 시험하는 것으로 이루졌으며 다음의 결론들을 얻을 수 있었다.

- 1) Zr센서를 이용하여 가열로의 공연비를 자동 제어하는 것은 한점의 성분들에 대한 측정이 이루어지는 기기의 동작 방식의 특성에 기인하여 zero값을 빈번히 발생하므로 어려울 것으로 판단되고, 반면에
- 2) TDLS방식은 디플트로 온도보정이 기기에서

이루어지므로 안정적이고, 신뢰할 수 있는 측정 결과를 항상 얻을 수 있을 것으로 본다. 또한 Zr 방식 대비 정비(Quartz 청소)도 간단하며, 그 주기(~1회/6개월)도 길어서 조업자의 입장에서 용이하고, 응답속도도 3sec미만에서 이루어지므로 피드백 자동제어 시스템을 구축하기도 용이할 것으로 본다.

또한 이러한 검출 결과를 이용하는 자동제어 시스템을 구축하는 연구가 지속적으로 이루어지면 품질향상 및 에너지 저감에 기여할 것으로 기대한다.

후 기

이 연구는 POSCO에서 수탁하여 이루어진 것으로 수행 과정에서 도움을 주신 현장 조업자 분들과 POSCO에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- [1] Lars Sandström, Donald Malmberg, "On-line and in situ monitoring of oxygen concentration and gas temperature in a reheating furnace utilizing tunable diode-laser spectroscopy," *Spectrochimica Acta Part A* 58, 2002, pp. 2449-2455
- [2] Donald Malmberg, John Niska, "Laser diode gas analysis for reheating furnace," *MEFOSnews April*, 2001, MEFOS
- [3] Sarah W. Allendorf, David K. Ottesen, et al, "Optical Sensors for Post Combustion Control in Electric Arc Furnace Steelmaking," *AISI/DOE Technology Roadmap Program*, 2003
- [4] A.J.Moulson and J.M. Herbert, "Electroceramics: materials Properties Application", 2edition, 2003, John Wiley & Sons
- [5] J.L. Bergmans, T.P. Jenkins, C.E. Baukal, "Accuracy of a Tunable Diode Laser Sensor inLarge Scale Furnace: Initial Test Results," *AFRC Fall Symposium*, 2005, pp.1-15
- [6] John Niska, "Temperature measurement techniques for rolling mill furnaces," *Research Report*, 2003, MEFOS
- [7] Jason J. Nikkari, Joanna M. Di Iorio, and Murray J. Thomson, "In situ combustion measurements CO, H2O, and Temperature with 1.58- μm diode laser and two-tone frequency modulation," *Applied Optics* 41, 3, 2002, pp. 446-452

[8] M.J. Thomson, E.J. Evenson, M.J. Kempe, and H.D. Goodfellow, "Control of greenhouse gas emissions from EAF steelmake: evaluation from electric arc furnace steelmaking," *Ironmaking Steelmaking* 27, 2000, pp. 273-279

부 록

부록1: 흡수라인세기(S_i)

$$S_i(T) = S_{i,0} \frac{Q_0}{Q(T)} \exp\left[-\frac{hcE_i''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \times \left[\frac{1 - \exp(-hcE_i''/kT)}{1 - \exp(-hcE_i''/kT_0)}\right]$$

T_0 : reference temperature

$S_{i,0}$: T_0 에서의 linestrength

E_i'' : lower state energy

$Q(T)$: total internal energy partition function

Q_0 : T_0 에서의 $Q(T)$

부록2: Single Path TDLS Sensor

