

랜스거동 분석을 이용한 슬로핑 예지기술

임은섭* · 김흥묵* · 손봉호*

Slopping Prediction using Analysis of Lance Behavior in BOF

EunSeop Lim, HeungMook Kim and BoongHo Son

Key Words : Slag Foam (슬래그 폼), Slopping Prediction (슬로핑 예지), BOF (전로)

Abstract

Slopping deteriorates the productivity and the stability of operation in BOF refining process, and hence POSCO has developed methods to predict and prevent slopping. Specific equipment was developed to measure the change of the reacting force to the oxygen-blowing lance against oxygen jet and the force was gathered and analyzed with the flow rate of oxygen and the height of lance. From this study, it was found that the reacting force is strongly correlated to the slag foam height. Currently, the modeling of the relation of the slag foaming level and the vertically acted force to lance is being approached for predicting the slopping

1. 서 론

전로의 용선취련 공정에서 비정상 조업 시 슬래그, 용강의 누출 및 철 가루를 동반한 먼지의 비산이 발생하며 이를 슬로핑 현상이라 한다. 이는 생산성 및 조업의 안정성을 악화시키며, 최근에는 철 가루를 동반한 먼지의 비산 문제가 환경 공해의 사회적 관심사와 더불어 이슈화 되고 있다. 이 슬로핑을 예지하고 억제하기 위하여 첫째로 전로내부의 상태를 정확히 인지하는 것이 중요하다. POSCO 및 제강 공정을 가지는 여타 제철소에서는 슬로핑과 관련하여 전로내의 상태를 알기 위하여 많은 방법들이 조사·시험되어 왔다. 취련공정 중 전로 내부에 발생하는 음향을 측정하는 방법, 랜스의 진동을 측정하는 방법, 용선의 높이를 직접 측정하는 방법 등이 시도되어져 왔으나, 이 방법들은 전로내의 고온, 높은 소음, 용강 및 슬래그 파편등의 열악한 환경적문제와 정확한 전로 내부 상태의 있지의 어려움등에 의하여 실제 적용에 어

려움을 가지고 있다. 따라서, 전로 내부의 상태를 더 정확히 인지할 수 있는 방법으로 랜스의 거동을 측정하고 분석하는 방법을 시도하였다.

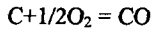
2. 용선취련 공정 및 슬로핑 메커니즘

2.1 용선취련 공정

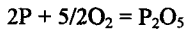
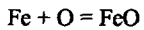
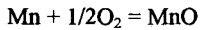
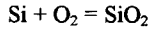
일관제철공정은 크게 철광석을 녹여 용선을 만드는 제선 공정, 용선의 불순물을 제거하고 성분을 조정하여 용강을 만드는 제강 공정, 용강을 고형화 시켜 슬라브나 빌렛을 만드는 연주공정, 이 슬라브나 빌렛을 최종 제품인 후판, 박판등 최종 제품으로 압연하는 압연공정으로 이루어진다. 용선취련 공정은 제강 공정의 한 부속공정으로 전로라는 큰 용기에 용선을 넣고 용선에 산소 가스를 고속으로 불어 용선내부의 불순물을 산화시켜 제거하는 공정이다. 이 때 전로 내에서 발생하는 화학작용은 크게 아래와 같이 발생하며, 이 때 부산물로 가스와 슬래그가 발생한다.

* 포스코 기술연구소 계측제어연구그룹

Gas:



Slag:



용선 내에는 철 원소 외에 탄소, 실리콘, 인, 망간 등의 불순물을 가지며, 이들 중 탄소는 산소와 반응하여 일산화탄소의 기체로 제거된다. 실리콘, 망간, 인 등은 산소와 반응하여 고형화 된 산화물로 발생하는데, 이들은 용강보다 비중이 낮아 용강 위에 부상하게 된다.

2.2 슬로핑 발생 메커니즘

그림.1 에 용선취련공정 중에 있는 전로의 단면도가 보여진다. 랜스라고 하는 설비에 의하여 전로 내부의 용선에 고속으로 산소가 불어진다. 이때, 조업 스케줄에 의하여 랜스 대차에 실린 랜스의 높이와 산소의 유량이 조절되어진다. 고속의 산소 제트가 용선에 닿으면, 그 압력에 의하여 용선에 공동화 현상이 발생하게 되어 옆으로 밀려나게 되어 그림.1 의 전로내부와 같이 된다. 전로내부에 존재하는 용강과 위에서 설명한 화학 반응에 의하여 발생한 슬래그는 비중차이에 의하여 서로 분리되게 되며, 용강과 슬래그 사이에 일산화탄소, 산소 등의 기체가 들어가 슬래그 거품(slag foam)이 발생하게 된다. 이 슬래그 거품의 체적은 로내에서 발생하는 일산화탄소 등 기체의 양, 슬래그 발생량 및 점도 등에 의하여 결정되어진다. 이 슬래그 거품의 비정상적 증가에 의하여 전로내부의 슬래그, 용강 등 내용물들이 전로 외부로 누출되는 현상을 슬로핑(Slopping) 이라 한다. 슬로핑은 그 발생의 급격도에 따라 범람형과 분출형으로 나눈다. 범람형은 슬래그 양과 점도의 증가에 의하여 기체의 배출이 늦어질 때 발생하고, 분출형은 슬래그 층에 존재하는 산화철이 탄소에 의하여 급격히 환원 되어질 때 발생하며 보통 두 가지 원인이 동시에 작용하는 것으로 보고되어진다. 여기에 2.1 절의 내용을 입력한다.

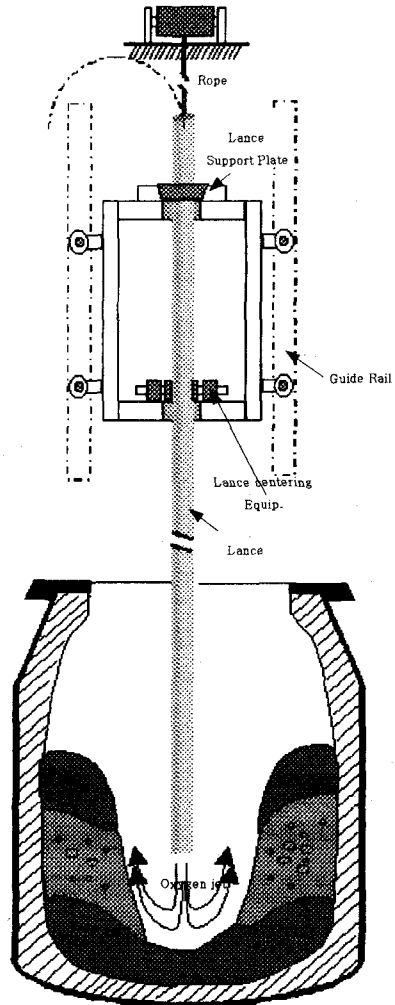


Fig. 1 Cross sectional view of furnace in operation

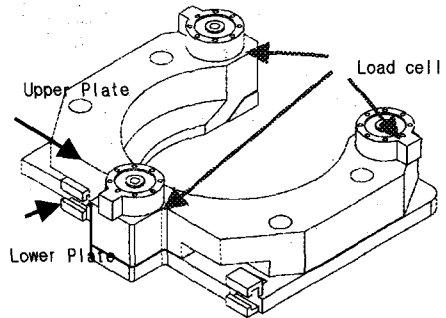


Fig. 2 Schematic diagram of instrument

3. 랜스 거동 측정 방법

3.1 전로내부 상태 감시 방법

위와 같은 슬로핑의 발생을 방지하거나 억제하기 위하여 먼저 용선취련 중 전로내부의 상태를 인지하는 것이 중요하다. 앞의 서론에서 언급한

것과 같이 다양한 방법들이 시도되어져 왔다. 본 연구에서는 그림.1 의 전로설비에서 랜스의 거동을 측정하고 분석하여 전로내부의 상태를 인지하고 감시하려고 시도하였다. 그 이유는 용선에 산소를 취입하기 위하여 전로 깊숙이 놓여지므로

전로내부의 상태가 렌스에 영향을 미칠 것으로 생각되어졌기 때문이다. 먼저 렌스의 거동을 측정하기 위하여 렌스 거동을 측정하기 위한 장치를 설계하고 제작하였다.

3.2 렌스 거동 측정 장치

그림.1 에 보여지는 것처럼 렌스는 렌스 대차의 상부에 있는 렌스 지지 판에 놓여진다. 렌스의 상부가 원뿔대 형태로 되어 있고, 렌스 지지 판은 원뿔대 형태의 렌스가 놓여질 수 있도록 되어 있다. 이 렌스 지지 판을 그림. 2 에 보여지는 것과 같이 상부 판과 하부 판 그리고 3 개의 로드 셀로 구성된 렌스 거동 측정 장치를 제작하여 대체하였다. 렌스 거동 측정 장치에의 로드 셀 취부 원리는 그림.3 의 로드 셀 부위의 단면도에 보여지는 것과 같이 하부 플레이트와 상부 플레이트 사이에 있는 연결 핀과 지지볼트를 통해 상부 플레이트와 하부 플레이트가 연결되어 있고 로드 셀이 로드 셀 고정볼트에 의하여 상부 플레이트에 고정되어 있다. 렌스 하중이 상부 플레이트에 가하여지면 연결 핀과 지지 볼트를 통해 하부 플레이트에 전달되고, 지지 볼트에 걸리는 힘을 로드 셀로 측정할 수 있도록 되어 있는 구조이다.

3.3 렌스 거동 측정 방법

위의 렌스 거동 측정 장치에서 측정되어진 3 개의 로드 셀에 측정되어진 힘 F_1, F_2, F_3 는 그림.4 와 그림.5 에 보여지는 것처럼 아래와 같이 수직력 F_z 와 모멘트 M_x, M_y 로 변환될 수 있다.

$$F_z = F_1 + F_2 + F_3 \quad (1)$$

$$M_x = F_1 \cdot (b + x_c) + F_2 \cdot x_c - F_3 \cdot (c - x_c) \quad (2)$$

$$M_y = (F_2 + F_1) \cdot (a - x_c) - F_3 \cdot x_c \quad (3)$$

로 구하여 진다.

여기서

$$x_c = \{(F_1 + F_3) \cdot c\} / F_z$$

$$y_c = \{F_3 \cdot a - F_1 \cdot b\} / F_z$$

a, b, c 는 각 로드 셀 설치 거리 좌표

x_c, y_c 는 무게중심 좌표

이다.

그리고, 용선취련 작업 시 발생하는 변화 분이 렌스의 거동을 분석하는데 중요하므로 렌스의 교체, 체결시의 편향력과 렌스의 사용에 따른 렌스에 묻는 지금량 등에 따라 변하는 용선취련 작업 전 렌스 하중과 모멘트에 의해 발생하는 값들을 제거한다.

따라서 산소 취련시 발생하는 힘과 모멘트 $\Delta F_z, \Delta M_x, \Delta M_y$ 는 각각

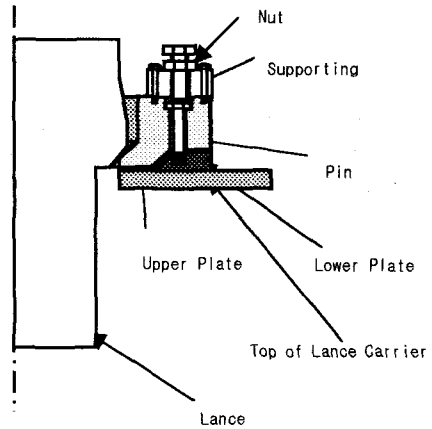


Fig. 3 Cross section of instrument

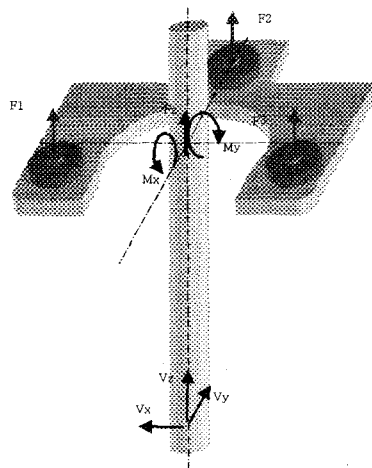


Fig. 4 Method of measuring 3-dimensional lance behavior

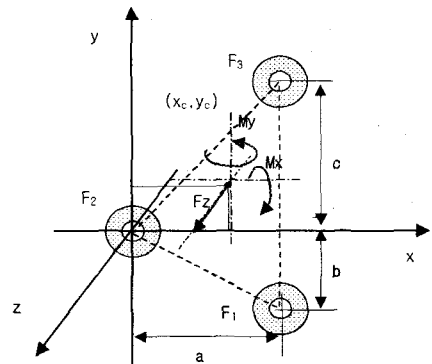
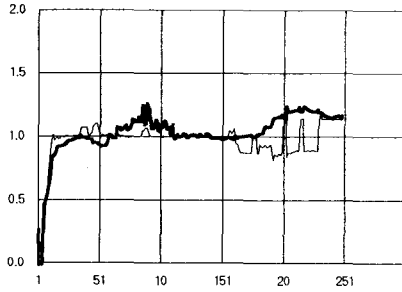
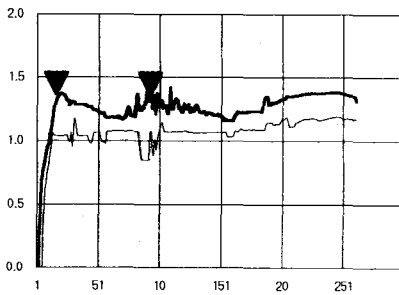


Fig. 5 Principle of force conversion



a. Stable Heat



b. Heat with Slopping

Fig. 6 Vertically acted Force to Lance (Thick Line) vs. Calculated cavity depth (Thin Line)

$$\Delta F_z = F_z - F_{z_0} \quad (4)$$

$$\Delta M_x = M_x - M_{x_0} \quad (5)$$

$$\Delta M_y = M_y - M_{y_0} \quad (6)$$

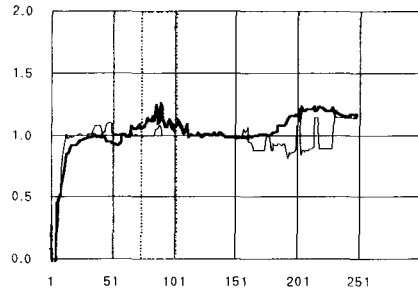
여기서 $F_{z_0}, M_{x_0}, M_{y_0}$ 는 초기값으로 구하여 진다.

4. 신호수집 및 처리

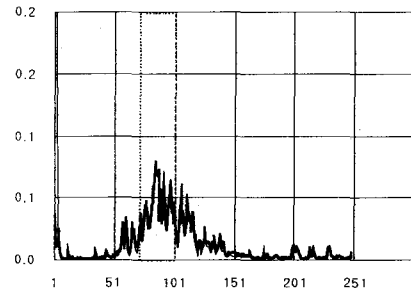
4.1 신호 수집 및 처리

또한 본 장치에 의한 신호와 별도로 조업용 컴퓨터에서 4 초 마다 샘플링 된 산소 유량, 랜스 높이 등의 제어 데이터를 수집하여 본 데이터 수집 시스템에 수집된 신호 데이터들과 함께 신호분석에 이용하였다.

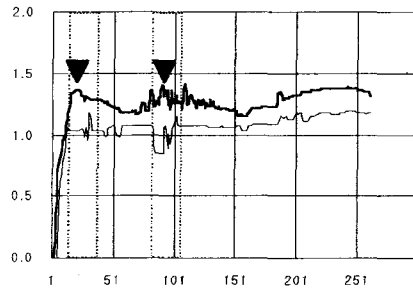
위에서 얻어진 산소 취련 시의 거동 $\Delta F_z, \Delta M_x, \Delta M_y$ 의 측정 신호는 슬로핑과 관련하여 원하는 신호들로 처리되어야 한다. 슬래그 폼 발생에 의하여 수직으로 받는 힘 즉, 수직 작용력을 얻기 위해 ΔF_z 신호에서 진동성분을 제거하고 2 Hz 이하의 신호만을 얻을 수 있도록 필터링을 수행하였다. 전로 내의 슬래그 및 용강의 유동성을 측정하기 위하여 랜스 수평 진동을 구해야 하는데, 위에서 얻은 $\Delta M_x, \Delta M_y$ 에 대하여



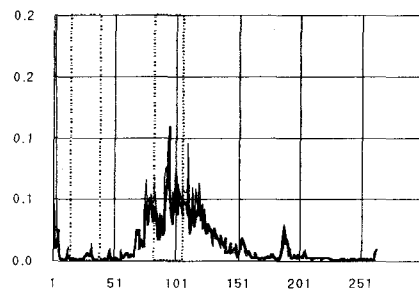
a-1. Vertically acted Force of Stable Heat



a-2. Horizontal Vibrations of Stable Heat



b-1. Vertically acted Force of Heat with slopping



b-2. Horizontal Vibrations of Heat with Slopping

Fig. 7 Vertically acted Force to Lance vs. Horizontal vibrations of Lance

DC 신호를 제거하고, 랜스의 고유 진동인 0.67 Hz 성분만을 얻기 위해 2 Hz 이하로 필터링을 수행하였다.

그리고, 조업용 컴퓨터에서 수집한 조업 및 제어 데이터와 동기시키기 위해 수직 작용력 신호를 4 초 동안 평균하고, 랜스 수평 진동 데이터와 가속도 진동 데이터는 4 초 동안 분산처리 하였다.

5. 데이터 분석

5.1 랜스 수직 작용력

그림.6 은 랜스 수직 작용력 F_z 와 송산 유량과 랜스 높이를 이용하여 계산한 공동 깊이의 시간 영역에 대한 크기의 변화를 보여주고 있다. 랜스 수직 작용력과 공동 깊이를 동시에 보여주는 것은 슬래그 포밍이 발생하지 않을 때 랜스가 수직으로 받는 힘이 송산 유량과 랜스 높이에 의해 발생하는 공동의 깊이에 비례할 것이기 때문이다. 시간 영역은 용선취련 개시부터 용선취련 종료까지이다. 그림들에서 역삼각형 모양의 표식은 슬로핑이 발생한 시점을 나타낸 것이다. 그림.6 의 a 는 안정적으로 작업되어진 강변으로부터 구하여진 그래프이며, 그림.6 의 b 는 슬로핑이 두 번 발생한 강변으로부터 구하여진 것이다. 그림.6 의 b 에서 첫번째 것은 취련 초기에 발생하며 먼지의 비상을 동반하는 분출형이며, 두 번째 것은 먼지의 비상은 발생하지 않으며 전로 내부의 슬래그 등 내용물들을 넘치게 하는 범람형 슬로핑이었다. 위의 두 그림들의 분석은 슬로핑과 송산 유량과 랜스 높이사이의 다음과 같은 관계를 보여준다. 첫째 송산 유량과 랜스 높이에 의한 공동 깊이의 변화가 일정할 때, 슬로핑의 발생시점에서 주변영역의 슬로핑이 발생하지 않은 시점보다 랜스 수직 작용력 F_z 가 더 높다. 둘째, 전체적으로 랜스 수직 작용력의 변화가 송산 유량과 랜스 높이에 의해 계산된 공동 깊이의 변화에 유사한 트렌드를 보인다. 이 결과는 슬래그 포밍 레벨의 추측을 위한 수학적 모델이 만들어 질 수 있음을 보여준다.

5.2 랜스 수직 작용력과 랜스 수평 진동의 비교

그림.7 의 a-1 과 a-2 는 앞에서 보여진 그림.6 의 a 와 같은 강변에 대한 랜스 수직 작용력과 랜스 수평 진동을 보여준 것이다. 그림 7 의 b-1 과 b-2 는 그림.6 의 b 와 같은 강변의 것이다. 이 그래프는 슬로핑과 랜스 수평 진동의 크기가 직접적으로 연관성이 있는지를 보여주고자 하는 것이다.

그림.7 의 a 에 보여지는 강변은 슬로핑이 발생하지 않았으나 그림.7 의 b 에 보여지는 슬로핑이 발생한 강변에서의 발생 시점의 랜스 수평 진동과 크기가 거의 같았다. 이 결과로부터 랜스의 수평 진동의 크기가 슬로핑의 발생과 직접적인 연관성을 가지지 않으며, 이는 슬로핑을 예지하는데 있어 전로내부의 불안정성의 정도를 나타내는 간접적인 인자로 이용할 수밖에 없음을 보여준다. 또한 랜스 수직 작용력만이 슬로핑의 발생을 예지하기 위해 직접적으로 이용할 수 있는 인자임을 보여준다.

6. 결론

본 연구는 슬로핑과 상관성을 보이는 전로내부 상태의 감시인자를 도출하기 위하여 수행되었으며, 랜스 거동 측정장치를 제작하고, 슬로핑 발생과 관련하여 랜스의 거동을 측정,분석 한 결과는 다음과 같다.

슬로핑 발생시 랜스에 작용하는 수직력이 증가하며, 범람형 슬로핑 뿐 아니라 랜스 수평진동 분석에 의해 감지되지 않는 분출형 슬로핑도 검출할 수 있었다.

또한 랜스의 수평진동 분석으로 전로내의 용강 및 슬래그의 유동에 의한 진동을 측정하여 전로 내부 슬래그 거동의 불안정성을 측정할 수 있었으나, 랜스 수평진동은 슬로핑과 직접적인 상관관계를 가지는 감시인자가 아님을 확인할 수 있었다.

향후, 랜스 수직 작용력에 대한 슬래그 레벨 변화를 정량화하여 실시간 전로내부 상태감시 시스템으로 개발하고 슬로핑 발생을 보다 속하고 안정적으로 예지할 수 있는 기술로 발전시키고자 한다.

참고문헌

- (1) 이진호, 1990, "밀폐정련을 위한 Slopping 방지 기술" 산업과학기술연구소 연구결과보고서
- (2) 유병돈, 1991, "Slopping 예지 및 방지기술 개발", 산업과학기술연구소 연구결과보고서
- (3) Kobe Steel, 1991, "Some Trials in the Development of a Slopping Prediction Technique in the BOF at Kakogawa Works", ISIJ International, Vol.31, No.11, pp.1368-1370
- (4) Akio Kimura, 1996, "Development of multi-sensor system for slopping prediction in BOF", CAMP-ISIJ, Vol.9, pp.908-911