

랜스 거동 분석을 이용한 전로 내부 상태 감시

0임은섭 · 김홍목* · 김승곤**

Condition Monitoring of Internal State of Oxygen Converter Chamber Using Lance Behavior Analysis

Eun-Seop Lim · Heung-Mook Kim · Seong-Gon Kim

ABSTRACT

Slopping phenomena deteriorate the productivity and the stability of operation in oxygen converter process. To predict and prevent that, it needs reliable perception of the internal state of the oxygen converter chamber. Equipment was developed to measure the dynamic and static behavior of the oxygen-blowing lance 3-dimensionally and the measured signal is analyzed in relation to slopping phenomena. It was found that the behavior of the lance is strongly correlated to the change of slag foam height and the instability of molten steel behavior. So slopping phenomena can be predicted by simultaneously analyzing the measured behavior of the lance and the control factors such as the flow rate of oxygen and the height of lance.

1. 서 론

제강 공정에서 전로 내 용강의 산소 취련 작업 중 전로 내부 상태가 불안정하게 되어 고온의 슬래그 및 용강이 노외로 분출하는 현상을 슬로핑(Slopping)이라 한다. 이는 출강실수율을 저하시키고 슬래그 조성변화 및 열손실 등을 초래하여 작업 불안요인이 되고 있다. 또한 산소 취련 작업 초기에 발생하는 슬로핑은 슬래그 및 용강의 분출뿐만 아니라, 제강 플랜트 외부로 산화철 가루를 동반한 먼지(dust)의 비산을 가져와 최근에 크게 이슈화되고 있는 환경공해 문제를 유발시키고 있다.

슬로핑을 예지하기 위해서는 먼저 슬로핑 현상과 관련하여 전로내부 상태를 나타내는 인자들을 찾고 이를 감시하는 것이 필수적이다. 지금까지 연구된 슬로핑과 관련한 전로 내부 상태를 추정할 수 있는 인자들은 크게 세 가지로 나눌 수 있는데 전로 내부의 슬래그 레벨, 슬래그 거동의 불안정성 그리고 배가스 온도 및 성분 등이 있다.

전로 내의 슬래그 레벨을 측정하는 방법들은 직

접적인 방법으로서 마이크로웨이브 레벨계를 이용한 방법과^{(1),(2)} 광섬유를 이용하여 로내 상태를 직접 관찰하는 방법이⁽²⁾ 있고, 간접적인 방법으로서 슬래그 포밍 레벨의 변화에 따라 공동(Cavity)의 형상이 변하며 이 공동(Cavity)의 형상에 따라 소음 발생의 정도가 다른 물리적 현상을 이용한 노내음향 측정법⁽³⁾ 등이 연구되어져 왔다. 그러나, 전로 내부 상태는 고열이며, 전로 주위로 비산되는 먼지, 슬래그, 화염 및 전로 주변과 산소 취련시 발생하는 심한 소음 진동 등에 노출되어 있어 측정된 신호의 신뢰성이 낮을 뿐 아니라 장착된 센서나 센서기구부들이 쉽게 열화되는 문제점들이 있어 지속적인 감시가 어렵다.

둘째 전로 내 슬래그 거동의 불안정성을 측정하는 방법들로서 취련중 전로 내부에 깊숙이 놓여져 있는 랜스의 진동을 측정하는 방법들⁽³⁾이 시도되었으며 로드셀을 랜스에 수평으로 부착하여 랜스의 1차 고유진동수 부근의 저주파 진동을 측정하는 방법과 랜스관에 가속도계를 부착하여 고주파 진동을 측정하는 방법들에 관한 연구가 수행되어졌다. 랜스의 저주파 진동측정을 통해 전로 내 슬래그 거동의 불안정 정도를 인지할 수 있으나 슬로핑과의 상관성이 낮고, 가속도계를 이용한 고주

* 포항제철 기술연구소

** 포항제철 제강부

과 측정은 주위의 외란에 민감하여 신호자체의 신뢰성이 떨어진다.

셋째 배가스 온도 및 배가스 성분 분석을 이용한 방법들이 연구되어져 왔으나 이 또한 뚜렷한 슬로핑과의 상관성을 얻지 못하였다.

본 연구에서는 전로내부 상태감시를 위해 산소 취련 중 랜스의 3차원 정적·동적 거동을 측정 및 분석하여 슬로핑과의 상관성을 밝힘으로써 슬로핑 예지의 가능성 및 향후 수행하여야 할 연구의 방향을 제시하고자 하였다.

2. 본 론

본 장에서는 제강 공정에서 발생하는 슬로핑 발생의 메커니즘과 이를 감시하기 위한 랜스 3차원 거동 측정장치 및 신호분석 방법에 대하여 설명하였다.

2.1 산소 취련 작업과 슬로핑 발생 메커니즘⁽¹⁾

제강 공정의 전로 산소 취련 작업은 용강 내의 불순물을 제거하고 성분을 조정하기 위한 공정으로서, 전로 내부에서는 여러 원소들간의 반응이 복합적으로 일어나는데, 주요 반응으로서 전로 용강 내의 불순물들 중 탄소[C]는 산소와 반응하여 일산화탄소[CO]로 만들어져 빠져 나가고, 실리콘[Si], 인[P], 망간[Mn], 철[Fe] 등은 산소와 반응하여 산화물을 발생시켜 용강 위에 부유하게 된다. 이 용강 위의 부유물들을 슬래그(Slag)라 하고 이는 용강보다 밀도가 낮기 때문에 용강 위에 부유하게 된다.

Fig. 1은 산소 취련 작업 중의 전로상태를 나타내는 개략도이다. 조업 조건에 의하여 설정된 높이의 랜스로부터 고속으로 취입되는 산소 젯(jet)에 의하여 용강이 옆으로 밀리며 공동(Cavity)을 형성하게 된다. 이 때 전로내부의 가장 위 부분은 초기에 장입되어 있는 슬래그와 새로 생성된 산화물들이 부유되어 슬래그 폼(Slag Foam)을 이루고 있으며, 가장 아래에 있는 용강(Liquid Metal)과 슬래그 폼 사이에는 슬래그와 용강 그리고 가스 버블 등이 혼합된 유상액(Emulsion) 상태로 되어 있다.

산소 취련 작업중 전로 내부 반응에 의하여 산화물들에 의한 슬래그와 일산화 탄소가 생성되어 슬래그 레벨이 높아지게 되는데, 이 슬래그 포밍의 정도는 용강 내의 탄소 함량, 슬래그 볼륨, 슬래그 성분 조성 및 점도 등에 따라 달라진다. 슬로핑은 이 슬래그 레벨이 비정상적으로 높아져서 노외로 분출되는 경우를 말한다. 슬로핑은 슬래그 포움 노외 분출의 급격도에 따라 분출(Ejection)형과 범람(Overflow)형으로 분류되어지고 있으며, 분출형은 슬래그 중의 산화철(FeO)이 철립

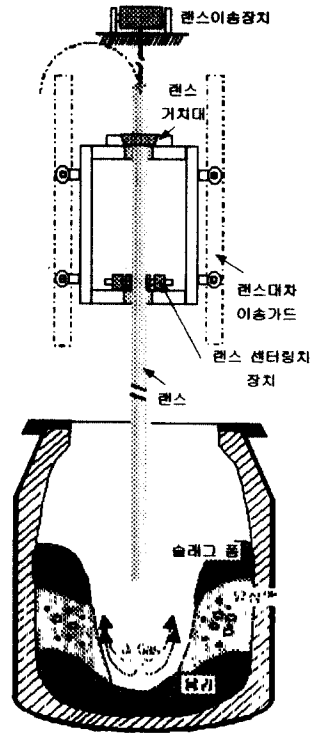


Fig. 1 Schematic Diagram of Converter Facility

중의 탄소에 의하여 급격히 환원되며 일산화탄소의 급격한 발생으로 일어나는 경우이며, 범람형은 슬래그 점도가 높아져 일산화탄소의 발생속도에 비하여 슬래그 폼 층에서의 가스 배출속도가 낮아 슬래그가 부풀어 노구로 넘치게 되는 경우이다.

2.2 랜스거동 측정장치

위의 Fig. 1에 보이는 바와 같이 산소 취련 중 랜스의 끝단이 전로 깊숙이 놓여지므로 랜스의 거동은 전로내부 상태를 추정하여 슬로핑을 예지하는데 중요한 인자가 될 수 있다. 본 연구에서는 랜스의 3차원 거동을 측정·분석하여 슬로핑 발생과의 상관관계를 갖는 인자를 추출하고자 하였다.

취련 중 랜스의 거동은 수평과 수직 3방향으로 발생하게 되는데, 그 작용력은 동적 거동(진동)과 슬래그 포밍 레벨의 증가 또는 전로내의 슬래그 분포의 불균일성에 의한 정적 거동이 발생할 수 있다고 판단되어 이들을 측정하기 위해 랜스 거동 측정 장치를 제작하였다.

Fig. 1의 랜스 거치대는 랜스대차에 랜스를 올려놓는 판으로 단면이 오목하여 랜스 들출부와 맞닿아 있으며 랜스의 하중이 모두 가하여지도록 되어 있다. 따라서 이 랜스 거치대를 랜스 거동을

측정할 수 있는 장치로 개조하였다.

렌스 3차원 거동 측정장치의 제작도와 단면도가 각각 Fig. 2와 Fig. 3에 보여진다. Fig.3의 로드셀 부위의 단면도에 보여지는 것과 같이 하부 플레이트와 상부 플레이트 사이에 있는 연결핀과 지지볼트를 통해 상부 플레이트와 하부 플레이트가 연결되어 있고 로드셀이 로드셀 고정볼트에 의하여 상부 플레이트에 고정되어 있다. 렌스 하중이 상부 플레이트에 가하여지면 연결핀과 지지 볼트를 통해 하부 플레이트에 전달되고, 지지 볼트에 걸리는 힘을 로드셀로 측정할 수 있도록 되어 있는 구조이다. 지지 볼트에 걸린 너트를 돌려 나사의 높이를 조정함으로써 상부 플레이트와 하부 플레이트 사이의 거리를 조정할 수 있도록 하였다.

렌스 거동의 측정원리는 Fig. 4에 보여지고 있다. 전로 내부에서 용강과 슬래그의 유동에 의하여 렌스가 V_x, V_y, V_z 의 거동을 보일 때 렌스 거동 측정장치에 설치된 3개의 로드셀은 각각 F_1, F_2, F_3 의 힘을 받는다. 이 힘 F_1, F_2, F_3 를 방향별로 렌스의 중심에 대한 하중(F_z)과 모멘트(M_x, M_y)로 변환시켜 렌스의 3차원 거동을 알 수 있다.

Fig. 5에 보여지는 것과 같이 수직으로 작용하는 힘 F_z 는

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

무게 중심에 대한 모멘트의 변화 M_x, M_y 는

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

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

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 로드셀 설치 거리 좌표

x_c, y_c 는 무게중심 좌표

이다.

이 때, 렌스의 교체, 체결시의 초기 편향력과 렌스의 사용에 따른 렌스에 묻는 지금량 등에 따라 초기하중이 변동하므로 이 양은 산소 취련시 발생하는 F_z, M_x, M_y 에서 제거해 주어야 한다.

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

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

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

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

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

이 $\Delta F_z, \Delta M_x, \Delta M_y$ 에 대하여 외란 제거, 주파수 영역 설정 등의 신호 처리를 통해 전로내부 상태와의 상관관계를 가지는 물리량을 추출할 수 있다.

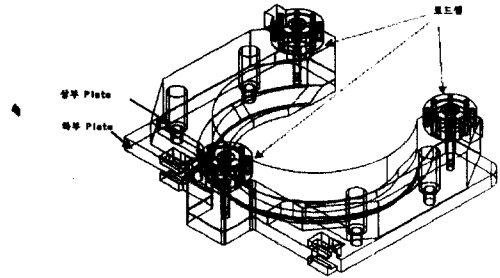


Fig. 2 Schematic diagram of instrument

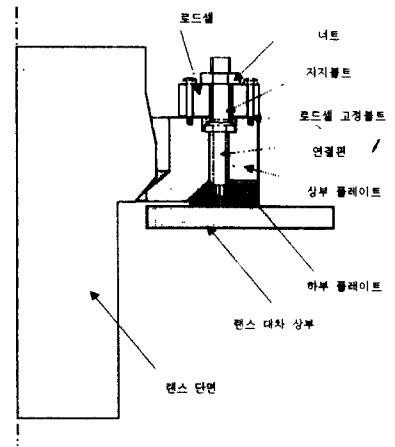


Fig. 3 Cross section of instrument

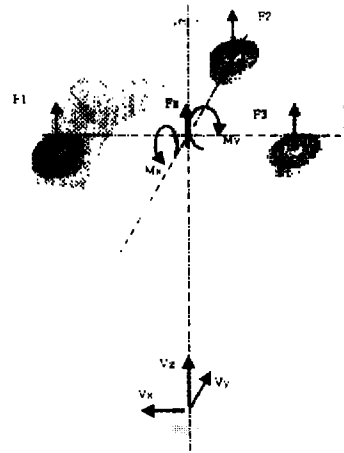


Fig. 4 Method of measuring 3-dimensional lance behavior

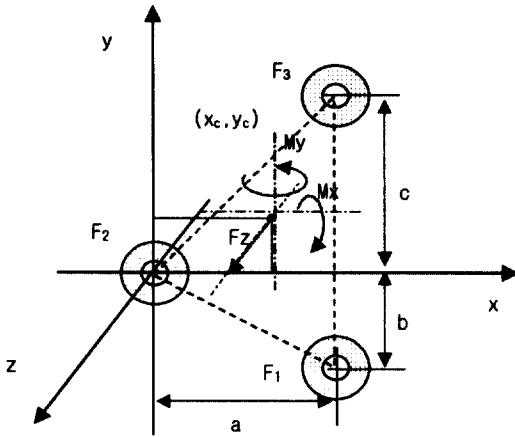


Fig. 5 Principle of force conversion

2.3 신호 수집 및 처리 방법

신호 수집시 일관성 있는 데이터 수집을 위하여 렌스 센터링 후 그 상태를 유지하며 렌스 거동 측정 장치가 수직력을 제대로 받을 수 있도록 렌스 센터링 장치의 유압을 제거하였다. 또한 본 장치에 의한 신호와 별도로 조업용 컴퓨터에서 4 초마다 샘플링된 상취 산소 유량, 렌스 높이 등의 제어 데이터를 수집하여 본 데이터 수집 시스템에 수집된 신호 데이터들과 함께 신호분석에 이용하였다.

위에서 얻어진 산소 취련시의 거동 ΔFz , ΔMx , ΔMy 의 측정 신호는 슬로핑과 관련하여 원하는 신호들로 처리되어야 한다. 슬래그 폼 발생에 의하여 수직으로 받는 힘 즉, 수직 작용력을 얻기 위해 ΔFz 신호에서 진동성분을 제거하고 2 Hz 이하의 신호만을 얻을 수 있도록 필터링을 수행하였다. 전로 내의 슬래그 및 용강의 유동성을 측정하기 위하여 렌스 수평 진동을 구해야 하는데, 위에서 얻은 ΔMx , ΔMy 에 대하여 DC 신호를 제거하고, 렌스의 고유진동인 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, 렌스 수평 진동 데이터와 가속도 진동 데이터는 4 초 동안 분산처리 하였다.

3. 결과 분석

본 결과분석에서 보여지는 데이터는 각 강변의 취련 시작 시점부터 취련 종료 시점까지의 신호들을 위의 2장과 같이 신호처리를 수행하여 나타낸

것이다. 그리고 산소 취련중 데이터의 수집과 병행하여 전로 상부를 관찰하며 슬로핑 발생유무와 시점을 확인하여 그 지점을 데이터에 표시하였다.

3.1 슬로핑 발생과 수직 작용력

Fig.6은 용강의 산소 취련시 슬로핑이 발생하지 않은 경우, 슬로핑이 발생한 경우에 대하여 렌스에 대한 수직 작용력과 산소유량과 렌스 높이 조정에 의한 용강의 공동(Cavity) 깊이 계산값을 나타낸 것이며 슬로핑이 발생한 경우 발생 시점이 표시되어져 있다. 공동 깊이 계산값은 산소 취련시 제어상태를 알 수 있도록 한 것이다.

Fig.6의 a에 보여지는 강변은 슬로핑이 발생하지 않은 강변으로, 용강 내에 실리콘 성분이 적어 슬래그 포밍이 거의 발생하지 않았다. Fig.6의 b는 초기와 중기에 슬로핑이 발생한 강변으로 첫번째 발생한 슬로핑은 가장 문제가 되는 산화철의 비산을 동반한 분출형의 슬로핑이었고, 두번째 발생한 슬로핑은 범람형 슬로핑이었다. 이 그림에서 슬로핑 발생시점 전에 슬로핑 형태에 관계없이 수직 작용력이 증가함을 볼 수 있다. Fig. 6 c는 초기와 말기에 연속으로 슬로핑이 발생한 강변으로 슬래그 누출이 강하게 일어났으며, Fig. 6 d는 중기에 두 번 슬로핑이 발생한 강변이었다.

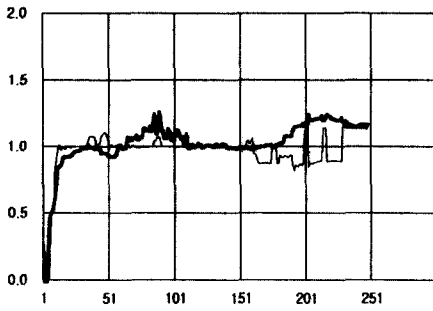
이 강변을 비교기준으로 슬로핑이 발생한 그림 Fig.6 b, c, d 에 나타나는 슬로핑 발생 시의 수직 작용력의 변화를 분석하였다. 수직 작용력과 슬로핑 발생과의 상관관계를 보면 초기, 중기, 말기에 상관없이 극부적으로 슬로핑 발생시 모든 강변에서 수직 작용력이 슬로핑이 발생하지 않은 지점들보다 크게 나타남을 알 수 있으며 슬로핑 발생강변의 수직 작용력이 슬로핑이 발생하지 않은 경우의 수직 작용력보다 크게 나타나고 있다. 그러나, Fig. 6의 c,d의 뒤쪽 부분의 렌스 수직력이 슬로핑이 발생하지 않았음에도 슬로핑이 발생한 지점과 유사한 크기를 가지고 있다. 이는 수직력의 변화가 산소유량과 렌스 높이 등 제어인자의 변화와도 관계됨을 알 수 있다.

이를 수식으로 표현하면 한 강변에 대하여,

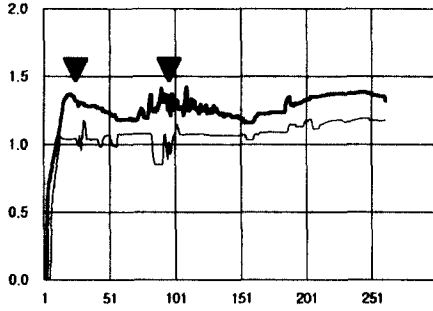
$$\begin{aligned} \text{수직 작용력} &= \text{슬래그 폼 레벨 변화에 의한 힘} \\ &+ \text{제어인자에 의한 힘} \\ &+ \text{조업인자에 의한 힘} \end{aligned}$$

로 나타낼 수 있다.

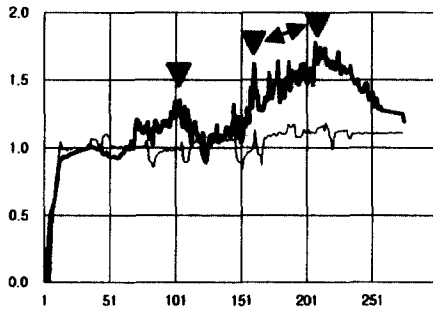
위의 식을 나타내는 수학적 모형이 개발되지 않았으나, 향후 슬로핑을 감시하거나 예지하기 위하여 데이터 수집과 분석을 수행하여 제어인자 및 조업인자와 수직 작용력의 관계를 구하여 슬래그 폼 레벨 변화와 수직력 중 슬래그 레벨 변화에 의한 힘의 관계를 정량화하고자 한다.



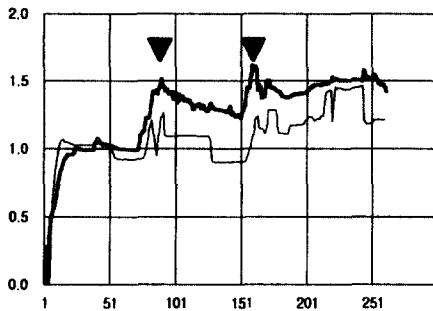
a. 슬로핑 발생없음



b. 슬로핑 발생강변 1

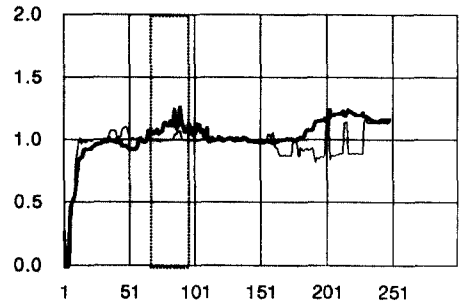


c. 슬로핑 발생강변 2

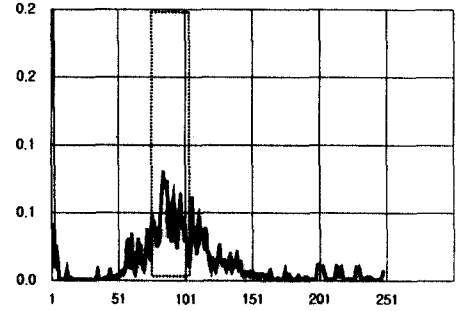


d. 슬로핑 발생강변 3

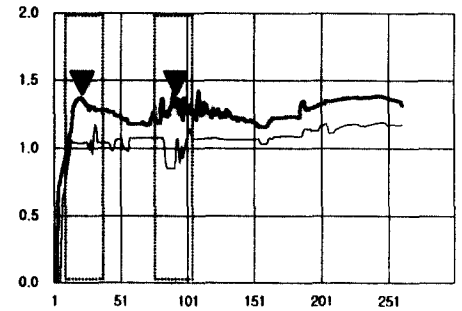
Fig.6 Calculated cavity depth (Thin Line) vs. Lance vertical force (Thick Line)



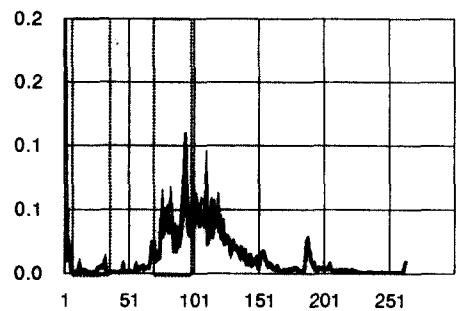
a-1 랜스 수직력



a-2 랜스 수평진동



b-1 랜스 수직력



b-2 랜스 수평진동

Fig.7 Lance vertical force vs. Horizontal vibration

3.2 슬로핑 발생시 수직 작용력과 수평진동

Fig. 7의 a-1, b-1은 Fig. 6의 a, b에 보인 강변의 수직력이며, Fig. 7의 a-2, b-2는 이 강변들의 수평 진동 ($\Delta M_x, \Delta M_y$)을 나타낸 그래프이다.

Fig. 7의 b-1, b-2 에서 첫번째와 두번째 발생한 슬로핑 을 비교해 보면, 첫번째 슬로핑에서는 수직 작용력이 증가하였지만 랜스의 수평 진동이 거의 발생하지 않았고, 두번째 발생된 슬로핑에서는 수직 작용력이 증가함과 동시에 랜스의 수평 진동이 커짐을 볼 수 있다. Fig. 7 a-1, a-2 에서는 슬로핑이 발생하지 않았으나 취련 중기에 수직 작용력은 증가 하지 않았고, 수평 진동은 Fig. 7의 b-1, 의 슬로핑 발생 시점에서의 진동 크기와 비슷한 정도의 진동을 나타내었다.

위의 결과로서 분출형의 슬로핑 발생시 랜스 진동이 증가하지 않고 랜스 수직 작용력만 증가하며, 범람형 슬로핑에서는 랜스 수직 작용력과 수평진동이 동시에 증가함을 알 수 있었다. 그러나 슬로핑이 랜스 수평진동과 충분 조건으로서의 상관관계를 가지지 않음을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 슬로핑과 상관성을 보이는 전로내부 상태의 감시인자를 도출하기 위하여 수행되었으며, 랜스 3차원 거동 측정장치를 제작하고, 슬로핑 발

생과 관련하여 랜스의 3차원 거동을 측정,분석 한 결과는 다음과 같다.

슬로핑 발생시 랜스에 작용하는 수직력이 증가하며, 범람형 슬로핑 뿐 아니라 랜스 수평진동 분석에 의해 감시되지 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, "밀폐정련을 위한 Slopping 방지기술" 산업과학기술연구소 연구결과보고서, 1990
- (2) 유병돈, "Slopping 예지 및 방지기술 개발", 산업과학기술연구소 연구결과보고서, 1991
- (3) Akio Kimura 외 2명, "Development of multi-sensor system for slopping prediction in BOF", CAMP-ISIJ, Vol.9, 1996, 908-911