

논문 2000-9-2-08

## 저항센서를 이용한 제강용 슬래그 두께측정 방안 연구

김 찬 옥\* · 임 종 인

## A study on the slag-thickness measuring system for steel making foundaries by using a resistivity detector.

Chan Wook Kim and Jong In Im

## 요약

용강 및 고온슬래그의 현저한 저항차를 이용한 제강용 슬래그 두께 측정시스템을 개발하기 위하여 시험용 저항 센서형 검출소자 제작 및 측정시스템을 구성하고 측정실험을 통하여 저항센서형 슬래그 측정시스템의 효율 및 측정정도 측면에 대하여 분석하였다. 분석결과 용강 및 슬래그의 저항차는  $10^3$  order로 확인되었으며 용강 및 슬래그의 이러한 현저한 저항차를 이용하여 고정도로 슬래그 두께를 측정할 수 있음을 보여주었다.

## Abstract

In order to measure the thickness of the slag layer on the molten metal in the melting vessels for steel making foundaries, we manufactured the slag-thickness measuring system consisting of the probe and its driving system, which is based on the principle of detecting the change in the electrical resistivity. Experimental results show that there is a very wide difference of the electrical resistivity by the order of about  $10^3$  between the molten metal and the hot slag and, hence, the air/slag and slag/molten metal interface can be exactly detected with the use of the probe which can be moved toward the melt. Therefore, it can be concluded that the proposed scheme of the slag measurement system in this study is proven to be excellent in its efficiency and accuracy.

## 1. 서론

제강공정에서 슬래그는 용강의 온도저하를 방지하는 단열재로서 작용하는 반면 레들내의 내화물을 열화시키거나 용강내의 반응효율을 저하시키고 또한 복피현상 등 용강의 청정성을 저해시키기 때문에 특히 고급강의 제조시 슬래그 두께 관리는 조업공정상 극히 중요한 위치를 점하고 있음은 주지의 사실이다<sup>1-2)</sup>. 특히 철강중 고부가가치제품인 스테인레스강인 경우는 적정 염기도(2.2~2.4)를 확보하기 위하여 CaO를 투입하며,

탈류 및 게재물을 흡수제거하기위해  $CaF_2$ 를, 또한 슬래그의 산화도를 낮추기위해 Fe-Si, Al 및 Ti등을 투입하는 등 정련작업을 거치나 이들 부원료 투입기준량을 산출하기위해서는 정확한 슬래그 두께에 대한 정보가 필수적이다.

슬래그 두께를 측정하는 데는 용융슬래그 및 용강 고유의 물리적 특성 즉, 밀도 및 비중, 흡음도, 저항치 등을 이용하거나 전자기 센서를 이용한 방법<sup>3)</sup>들이 고안되어 실용화 가능성에 대한 연구가 진행되고 있으며 이중 극히 일부가 개발되어 있다. 국내에서는 현재 슬래그 및 용강의 부력차이를 load cell로 계측하는 시스템이 개발되어 현장에서 시험가동 중에 있으나 감지되

포항산업과학연구원 (Research Institute of Industrial Science & Technology, Pohang)

<접수일자 : 1999년 12월 20일>

는 무게변화 감도가 침지봉의 깊이 및 슬래그의 양에 따라 좌우되며 또한 슬래그 형태에 따른 측정정도의 변동등의 제문제점을 안고 있어 정확한 슬래그/용강 계면판별을 하는 데는 한계가 있으며 제작비가 많이 소요되는 단점이 있다.

따라서 본 연구는 시스템구성이 간단하며 고정도, 고효율의 슬래그 두께측정 시스템 개발을 목적으로 시험용 저항센서형 검출소자를 제작하고 측정시스템을 구성하여 용강 및 슬래그의 현저한 저항차를 이용한 용강/슬래그 계면 판별 및 슬래그 두께측정을 행함과 동시에 그 측정데이터를 분석한 결과를 현장 적용성 측면에서 검토함으로써 저항센서형 슬래그 측정시스템의 개발가능성을 가늠코자 하였다.

### 2. 측정시스템의 설계 및 제작

측정시스템은 검출소자, 구동기구 및 제어기로 구성되며 소형이며 치밀한 형태의 시스템설계 방안을 강구하였다. 그림. 1에 측정시스템의 구성도를 나타낸다. 기구적 측면에서는 검출소자의 승하강 높이조절 및 수평이동을 임의로 조절할 수 있도록 하였으며 검출소자의 구동기구는 LM guide 및 ball screw를 이용하여 동작하게 하였다. 기능적 측면에서는 encorder를 이용하여 승하강속도를 임의로 조절할 수 있도록 실제의 승하강거리를 mm단위로 표시하도록 화면표시기가 부착된 구동컨트롤러를 설계·제작하였다. 또한, 검출소자는 용강 등에 침지하여 멀티미터로 측정되는 시그널은 컴퓨터에서 분석하고 측정데이터를 처리함으로써 슬래그 두께를 산출할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 제작한 측정시스템의 구동부에 대한 사양은 슬래그 두께 측정정도가 0.2mm이며 probe의 승하강시의 최대속도가 3.6m/min이다. 또한, probe자체의 최대 왕복가능 거리는 100mm이며 수평 및 승하강 이동가능 거리는 각각 260~400mm 및 300~450mm이다.

### 3. 실험방법 및 결과

슬래그 두께측정 방안의 가능성을 타진하기 위하여 실험은 3단계로 구분하여 실시하였다. 우선 1단계로써 상온시험을 행한 후 시험결과를 분석하여 저항차를 이용하여 매질간의 경계면 판단이 가능한지 여부와 기 제작한 슬래그 두께측정 시스템의 성능을 검토하였다.

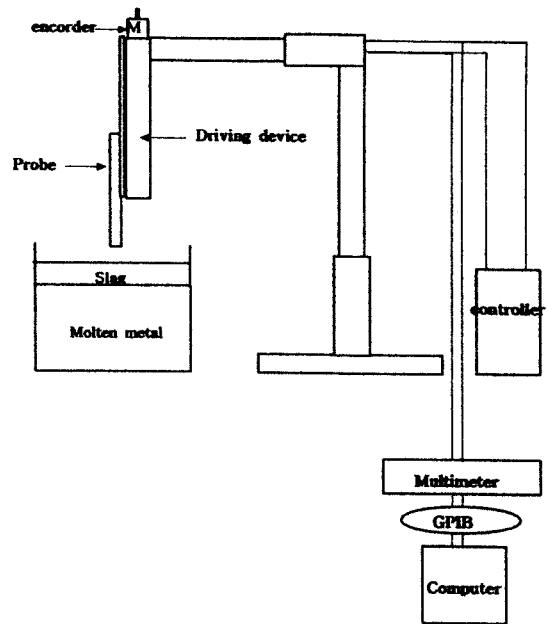


Fig. 1. Schematic view of the slag-thickness measuring system.

2단계로는 유도 용해로를 이용하여 용융슬래그 및 용강의 저항을 측정함과 동시에 슬래그 두께의 측정을 행하였고 최종적으로는 제강공장에서 공기층/슬래그, 슬래그/용강의 계면판별을 행하는 등 일련의 실험을 행함으로써 재료의 저항차를 이용한 측정방법의 효용성에 대하여 검토하였다.

#### 1) 상온시험

##### 1.1) 매질선정

상온시험을 하기위한 매질선정은 상온시험의 성공 여부를 결정하는 중요한 요소로 이는 서로 접촉하고 있는 물질간에 물리적 특성이 현저하여야만 계면판별이 용이하기 때문이다. 매질의 선정조건은 먼저 비중차가 현저하여 상호간 용액층의 분리가 뚜렷하고 상호 용해도가 전혀 없으며 용액간 계면에서의 화학반응을 일으키지 않는 물질, 수용성이 전혀 없으며 취입이 용이한 물질로써 상온에서 액체상태를 유지하며 상호간 전기전도도가  $10^3$ 이상의 차이를 보이는 물질 등으로 하였다. 표 1에 상온시험용으로써의 대상이 되는 매질의 특성<sup>4,6)</sup>을 나타낸다.

표 1.에서 보는 바와 같이 전술한 매질선정조건에 부합되는 물질로는 cetyl alcohol, methyl sulfide, diethyl

sulfate, tetra chloroethylene, petroleum chemicals 등이 있으며 이들 매질을 무기물인 전해질과 조합을 이루어 세팅하므로써 비중차에 의해 두 매질을 분리할 수 있어 원하는 실험이 가능하다. 그러나 이들 매질중 cetyl alcohol은 용점이 50℃로 상온에서 실험하기에는 부적합하며 methyl sulfide는 인화성이 강한 물질로써 실험중 불활성분위기에서 실험해야하는 제약조건이 존재하고 diethyl sulfate 및 tetra chloroethylene는 독극물로 취급이 용이하지 않는 단점이 있다. 따라서 본 실험에서는 실험매질로써 입수가 용이한 petroleum chemicals(비중:0.9, 절연체)과 전해질인 CuCl<sub>2</sub>(비중:1.5)를 선정하여 실험을 행하였다. 무기물 전해질로써 CuCl<sub>2</sub>를 선택한 것은 직접 제조가 용이하며 용액색깔이 초록빛을 띄므로 매질간 경계면을 육안으로도 식별이 가능하기 때문이다.

Table 1. Specific gravity and solubility of various substances for cold test

Substances	Specific gravity	Solubility in water	remarks	
organic	ethyl ether	0.719	soluble	-
	acete aldehyde	0.784	freely soluble	-
	acetone	0.791	freely soluble	-
	metyl ethyl ketone	0.808	soluble	-
	cetyl alcohol	0.818	insoluble	m.p:50℃
	methyl sulfide	0.845	insoluble	flammable
	toluene	0.872	soluble	toxic
	petroleum chemicals	0.9	insoluble	insulator
	stylene	0.907	soluble	-
	Tetra chloroethylene	1.623	insoluble	toxic
	Methyl bromide	1.732	soluble	-
	diethyl sulfate	1.837	insoluble	toxic
	methyl ether	2.091	soluble	-
inorganic	AgNO <sub>3</sub>	1.067	soluble	electrolyte
	BaCl <sub>2</sub>	1.087	soluble	electrolyte
	KCl	1.016	soluble	electrolyte
	NaNO <sub>3</sub>	1.024	soluble	electrolyte
	CuCl <sub>2</sub>	1.501	soluble	electrolyte
	NiCl <sub>2</sub>	1.429	soluble	electrolyte
	CS <sub>2</sub>	1.261	soluble	toxic

1.2) 실험결과

상온시험용 검출소자는 유기 피복된 Cu도선을 사용하여 제작하였으며 몸체 재질은 내화학성이 우수하며 기계적 강도가 우수한 엔지니어링 플라스틱(POM)을 사용하여 100mm(L)×20mm(W)×10mm(t)의 크기로

가공하여 제작하였다. 계면 판별은 그림1에서 보는 바와 같이 용기상부에 위치한 검출소자가 일정한 속도로 하강하여 저항치가 현저하게 다른 매질계면을 접촉하는 순간에 저항치가 크게 변동되는 상황으로 계면식별 및 매질의 두께의 측정이 가능하도록 되어 있다. 본 실험결과를 그림 2에 나타내었다. 그림2에서 보는 바와 같이 매질간 경계면이 뚜렷하게 구분되는 것을 알 수 있다. 본 실험 결과에서는 liquid1(petroleum chemicals)층의 두께가 7.8 mm로 나타났으며 이는 실측결과와 ±0.2mm이내에서 일치하였다.

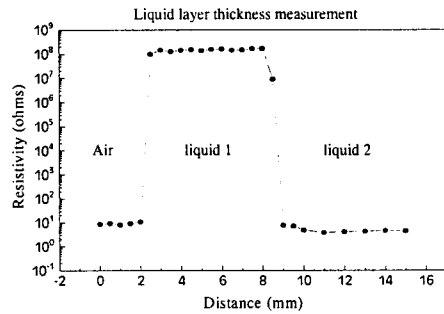


Fig. 2. Changes of electrical resistivity with the travelling distance of the probe in cold test.

2) 고온실험

2.1) 검출소자의 제작

고온실험용 검출소자는 상온실험용 검출소자와 달리 용융슬래그 및 용강중에 직접 침지되므로 내열성 및 고온부식성이 우수한 재질을 사용한 검출소자를 제작하여야 하므로 검출코일은 고온내부식성이 우수한 고융점 금속으로 직경이 1mm인 Pt도선을 선정하였다. 검출소자 보호관으로는 내열충격성 및 wetting성을 검토하기 위해 2가닥의 검출도선이 관통할 수 있도록 two hole형태의 알루미늄 재질의 보빈(길이:25cm, 직경:7mm)을 성형, 조립하여 검출소자를 제작하였다.

2.2) 실험결과

슬래그두께 측정실험을 행하기 전에 유도용해로 (3KHz, 125KW급:용량100kg, 도가니직경 200mm)를 이용하여 예비실험으로 슬래그의 용융상태를 점검하였다. 슬래그는 제강슬래그 및 제선슬래그 2종류를 준비하여 용해실험을 한 결과 제강슬래그 및 제선슬래그는 각각 약 1400℃ 및 1650℃에서 용해되었으며 특히 제강슬래그는 용점이 높은 관계로 슬래그층 표면이 고화되지 않고 용융상태를 유지하기 위해서는 항상 고전류를 두

입해야하므로 유도용해로에 과부하 발생가능성이 높아 본 실험에서는 비교적 용점이 낮은 제선슬래그(CaO40-SiO<sub>2</sub>40-MgO8-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>10)를 선정하여 실험을 행하였다. 고온시험 검출소자를 이용하여 용강 및 슬래그의 저항을 측정된 결과 각각 1~3 kΩ cm 및 약 1 Ω cm로 측정되었으며 이는 고온에서의 슬래그 종류에 따른 전도도 측정 결과(그림3 참조<sup>[7-8]</sup>)와 비교해보면 본 실험에서 사용한 슬래그 조성과 유사한 슬래그 조성(CaO40-SiO<sub>2</sub>45-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>14)의 경우, 선철과의 전도도차이가 약 10<sup>4</sup>으로 두 결과가 거의 일치함을 알 수 있었다.

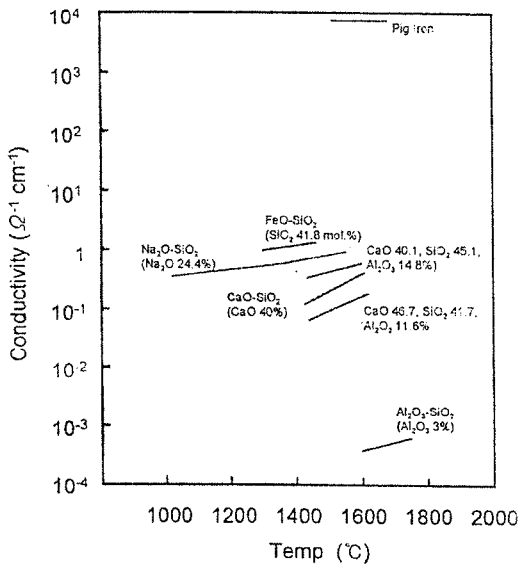


Fig. 3. Conductivity of various slags on high temperature.

슬래그 두께측정실험은 유도용해로를 이용하여 약 60kg의 철스크랩을 먼저 용해시킨 후 제선슬래그 약 3.5kg를 투입하여 슬래그 두께측정실험을 준비하였다. 슬래그 두께측정은 슬래그측정 시스템을 유도용해로 측면에 설치한 후 검출소자를 하강시키면서 검출되는 저항치를 모니터하였다. 실험결과 예비실험에서 알 수 있듯이 용융슬래그 및 용융금속과의 상호 저항차는 10<sup>3</sup>으로써 뚜렷한 슬래그/용강 계면판별이 가능하였다. 그 측정결과를 그림4에 나타낸다. 그림4에서 알 수 있는 바와 같이 본 실험의 경우 슬래그 두께는 약 15mm로 저항차를 이용함으로써 용이하게 슬래그 측정이 가능함을 확인할 수 있었다. 이 결과는 슬래그 및 용강의 부력차이를 이용한 측정시스템<sup>[9]</sup>의 시험결과인 침지봉

의 깊이에 따른 무게변화 특성(그림5 참조)과 비교하면 본 측정시스템이 계면판별 성능측면에서 보다 우수함을 알 수 있었다. 즉, 부력을 이용한 슬래그 두께 측정 시스템은 그림5에서 보는 바와 같이 무게변화 특성으로는 공기/슬래그 계면(a) 및 슬래그/용강 계면(b)이 뚜렷하게 구별이 되지않아 회귀분석법 등의 데이터 해석 처리를 행함으로써 계면판별을 하고 있어 측정방법상 슬래그 양 및 종류에 크게 의존하는 경향이 강하여 저항차를 이용하는 본 측정시스템이 보다 효율적이며 고정도의 측정방법으로 판단된다.

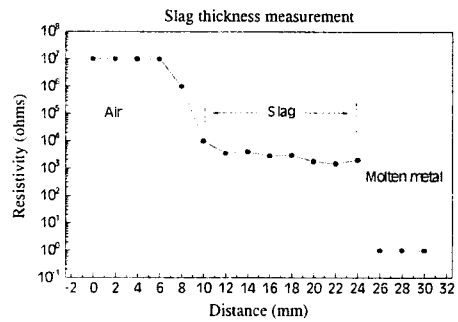


Fig. 4. Changes of electrical resistivity with the travelling distance of the probe in hot test.

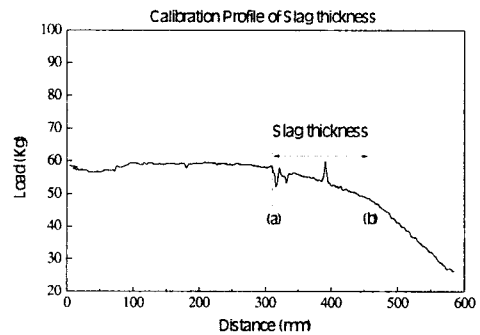


Fig. 5. Profile of load change obtained in load-cell typed measuring system: (a) air/slag interface and (b) slag/molten metal interface

또한 침지실험직후 슬래그 검출소자의 보호관을 관찰한 결과, 검출소자 단부에 알루미늄 재질의 보호관에 슬래그가 단단하게 고착되어 있었으며 균열이 발생하는 등 내열충격성 측면에서도 취약한 특성을 보여 향후 wetting성능 및 내열충격성을 고려한 재질개선이 이루어져야할 것으로 판단되었다.

3) 현장 시험

현장시험용 검출소자는 고온시험용 검출소자와 동일한 재질로 제작하였으며 현장상황을 고려하여 길이 1m, 직경 8mm 사양의 검출소자를 제작하였다. 현장시험은 접근이 용이한 연속주조 공장의 T/D(Tundish)에서 알루미늄 재질의 보호관의 검출소자를 고정할수 있는 길이 2m의 검출소자 홀더를 제작하여 그 단부에 검출소자를 고정시켜 수동으로 T/D에 천천히 침지하면서 저항치를 모니터하였다. 실험결과 예측한 대로 공기/슬래그 및 슬래그/용강 계면에서 저항치가 10~30 kΩ cm에서 1~5 Ω cm로 급변됨을 확인할 수 있었으며 슬래그/용강 계면 도달직후 침지된 검출소자를 T/D에서 취출하여 검출소자의 보호관 표면에 고착된 슬래그 흔적으로 판단한 결과 슬래그 두께는 약 30mm정도였다. 그러나 이 수치는 수동으로 측정된 결과로써 측정정도의 차이는 있으나 본 실험결과는 저항센서형의 슬래그 두께측정방법으로 슬래그/용강 계면판별이 가능함을 극명하게 보여준 실험 결과로 평가되었다. 따라서 저항치를 이용한 슬래그 두께측정 방안은 현장에 적용가능성이 매우 높으며 기 제작한 시스템을 응용하는 경우 실제로 고정도의 슬래그 두께측정이 가능할 것으로 판단되었다.

4. 결 론

저항차를 이용한 고정도, 고효율의 슬래그 두께측정 시스템 개발 및 현장적용성여부를 가늠하기위한 목적으로 시험용 저항센서 검출소자 및 측정시스템을 제작하여 슬래그 두께측정 실험을 행한 결과, 용강 및 용융 슬래그의 상호 저항차가 10<sup>3</sup>으로 확인되었으며 용강 및 슬래그의 이러한 현저한 저항차를 이용한 공기/슬래그

여 고정도로 슬래그 두께를 측정할 수 있음을 보여주었다. 향후 저항센서를 이용한 슬래그 두께측정시스템을 실용화하기 위해서는 검출소자보호관의 내열 충격성의 개선, 검출도선의 고온거동 등 재질적 측면의 연구와 더불어 시그널 응답속도의 실시간화 실현 등 데이터 해석처리에 관한 연구가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

- [1] J. Bygden, T. DebRoy, and S. Seetharaman, "Dissolution of MgO in stagnant CaO-FeO-SiO<sub>2</sub> slags", *Ironmaking and Seelmaking*, vol.21, no.4, pp.318-323, 1994.
- [2] 新谷宏隆, "鐵鋼用耐火物の侵蝕機構", 内田老鶴圃, pp.7-29, 1998.
- [3] P. Hauptmann, *Sensors*, Carl Hanser Verlag, pp.5-7, 1991.
- [4] H. S. Nalwa, *Handbook of organic conductive molecules and polymers Vol.1*, John Wiley & Sons, New York, pp.728-780, 1997.
- [5] V. M. Lobo, *Handbook of electrolyte solutions Part A*, Elsevier, Tokyo, pp.854-856, 1965.
- [6] V. Stepina and V. Vesely, *Lubricants and special fluids*, Elsevier, Tokyo, pp.623-631, 1992.
- [7] 柳ヶ瀬 勉, 杉之原 幸夫, "熔融スラグの物性と構造", *鐵と鋼*, vol.57, no.1., pp.142-157, 1971
- [8] 森 一美, "CaO-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>系の電氣傳導と度酸化チタンの舉動", *鐵と鋼*, vol.46, no.2., pp.26-32, 1971
- [9] 금창훈, "On-line 두께측정 시스템연구", RIST 연구보고서, pp.27-32, 1995.

著 者 紹 介



**김 찬 옥**  
 전공 : 자성박막, 전자기재료 및 응용  
 학력 및 경력 : 공학박사(1993. 2)  
 한국기계연구원 및 동경대학 생산  
 기술연구소 연구원 역임, 현 포항  
 산업과학연구원 근무 ('95 ~ 현재)  
 및 슬래그/용강 계면판별이 가능하



**임 종 인**  
 전공 : 센서 및 액츄에이터, MEMS,  
 전자재료 및 응용  
 학력 및 경력 : 공학박사(1998. 12)  
 (미)Penn. State Univ. 객원연구원  
 (1991) 역임, 현 포항산업과학연구  
 원 근무('89 ~ 현재)