

논문

Ti 와이어 피딩에 따른 페라이트계 스테인레스강 제강시 열유동 해석

김민기 · 황동찬 · 최재주 · 신상윤 · 예병준[†] · 김지훈* · 김원배**

경북대학교, *중소기업공단, **기술보증기금

Heat Flow Analysis of Ferritic Stainless Steel Melt during Ti wire feeding

Min-Gi Kim, Dong-Chan Hwang, Jae-Joo Choi, Sang-Yoon Shin, Byung-Joon Ye[†], Ji-Hun Kim*, and Won-Bae Kim**

Department of Metallurgical Engineering Graduate School of Kyungpook National University, Daegu, 702-701, Korea

*Small and Medium Business Corporation, Daegu, 702-712, Korea

**Korean Technology Credit Guarantee Fund, Daegu, 700-782, Korea

Abstracts

Recently an increase in production cost of 300 series stainless steel with a sudden increase in nickel cost has caused a decrease in demand for 300 series stainless steel so that 400 series stainless steel has begun to make a mark. Although 400 series stainless steel has good properties, it has a problem of lack of corrosion resistance. There is Ti in 400 series stainless steel alloys to solve the problem above and it has lower density than the others. For that reason, wire feeding process has been applied for adding Ti alloy in 400 series stainless steel. This paper presents consideration of variation on the depth of wire dissolution by conditions of wire feeding which are wire injection speed, the temperature of molten steel, wire diameter and bubble generation rate. The computer program for solution of conducting wire feeding has been developed in Flow3D.

Key words : Wire feeding, 400 series stainless steel, Fluid flow phenomena, Heat fluid analysis, Flow3D.

(Received December 1, 2009 ; Accepted December 18, 2009)

1. 서 론

최근 비철 금속의 원가 폭등은 국제적인 산업 경제의 큰 변화를 초래하였다. 이로 인해 이미 여러 분야에서 활용되고 있는 전자제품, 산업자재 등의 원가가 상승하고 따라서 그 대체재를 모색하고 있는 실정이다. 이는 한정적인 천연 자원의 공급, 개발도상국의 경제 성장으로 인한 수요 급증 등이 그 원인이다. 특히 2000년 이후 급속도로 발전하는 중국의 수요 급증이 전 세계 공급량에 비해 규모가 비대하여 런던금속거래소(London Metal Exchange)의 재고 수준이 감소하였다[1]. 그 중에서 두드러진 비철 금속으로는 Ni를 들 수 있는데, 최근 5년간 LME에서 결정한 원가의 증가량은 Fig. 1과 같다. 2003년부터 지속적인 원가 상승으로 인하여 영향을 받는 것은 바로 스테인리스강이다.

스테인리스강은 크게 AISI 300계인 Cr-Ni계 스테인리스강과 AISI 400계인 Cr계 스테인리스강으로 분류된다[2]. 또한, 미세조직의 주된 상에 의해 마르텐사이트계, 페라이트계, 오스테나이트계 스테인리스강으로 분류된다. AISI 300계 오스테나이트계 스테인리스강은 기본조성 18Cr-8Ni의 fcc 구조로서 내열성, 내식성이 우수하며 상온과 고온에서 안전하게 존재하여 주로

주방용기, 중화학공업 및 건물 내외장재 등으로 사용된다. 하지만 Ni의 원가비중이 60~80%에 달하여 원가의 상승이 문제시되고 있다. 반면에, 페라이트계 스테인리스강은 bcc 구조로서 오스테나이트계 스테인리스강에 비해 내식성은 다소 떨어지거나 내용력부식 균열성이 우수하고 무엇보다 Ni이 첨가되지 않아

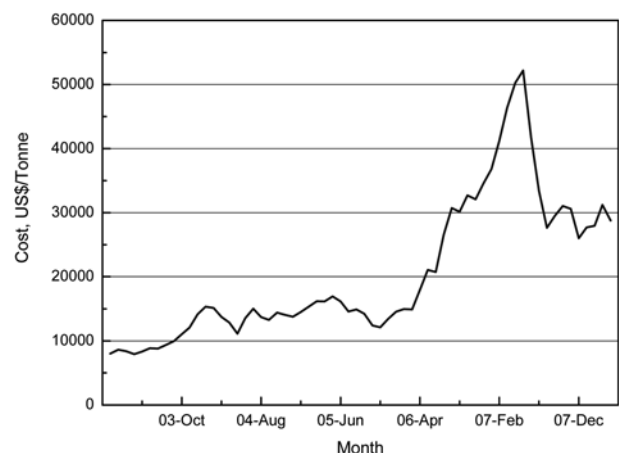


Fig. 1. Fluctuation in the cost of Ni during this 5 years (LME)[1].

[†]E-mail : bjye@knu.ac.kr

경제적으로 저렴하여 자동차 배기계, 전지전자, 건축내외장재, 산업재용 등으로 사용이 증가되고 있다.

앞에서도 언급하였지만, AISI 300계 스테인리스강의 가격이 Ni 가격 상승으로 원가가 대폭 오르면서 사용에 대한 부담으로 인해 400계 스테인리스강이 주목을 받게 되었다. AISI 400계로의 수요 이동은 300계에 비해 결코 뒤지지 않는 우수한 품질력이 뒷받침하고 있다.

하지만 이런 우수한 특성을 가진 페라이트계 스테인리스강에도 문제점은 존재한다. 입계에 존재하는 Cr이 쉽게 탄질화물을 형성하여 그로 인한 Cr 결핍 구간에서의 내식성이 저하된다는 것이다. 이를 보완하기 위해 Cr보다 강력한 반응성을 가진 Ti과 Nb를 첨가하여 Cr의 탄질화물 형성을 억제한다.

따라서 페라이트계 스테인리스강의 주요 첨가원소로서 Ti, Nb 등이 있는데 Ti과 같은 저밀도 합금원소의 경우, 낮은 비중으로 인해 레이들(ladle)내 첨가 시 와이어 피딩(wire feeding) 공법을 사용한다. 이는 고탄소강의 피복 속에 저밀도 합금원소를 분말 형태로 채워 넣어 기계적으로 주입시키는 공법이다. 와이어 피딩시 와이어 주입 속도, 용강 온도, 와이어 직경, 용강 교반 속도 등 여러 요인들이 첨가합금의 실수율 및 물성 등에 영향을 끼친다. 따라서 최적화된 조건을 확립하기 위해서는 여러 조건에서의 실제 실험보다 열유체 해석 프로그램을 이용한 전산 모사 연구가 필요하다. 전산 모사를 통하여 완벽한 조건을 모색한다는 것은 불가능 하지만, 이를 통해 실제 실험에 사용되는 시간과 비용을 절감할 수 있는 장점이 있다.

본 연구는 이러한 AISI 400계 스테인리스강 생산 공정에서 와이어 피딩을 이용한 저밀도 합금원소 첨가 시 최적의 조건을 고찰하기 위해 실제 조업에 사용되고 있는 레이들의 깊이를 고려하여 와이어 피딩 모델을 구성한 후, 3D 열유체 해석 프로그램을 활용하여 와이어 주입 속도, 용강 온도, 와이어 직경 등의 공정 변수 변화에 따른 와이어 용융 깊이 변화 및 아르곤 취입에 의한 용강 교반시 와이어 용융 깊이 변화 고찰을 목표로 한다.

2. 실험방법

2.1 전산모사 모델 설정

본 연구에 사용된 전산 모사 프로그램은 Flow3DTM를 활용하였다[8]. Flow3D는 열유체 해석 프로그램으로서 FDM(finite differential method) 방식과 FVM(finite volume method) 방식을 응용하여 해석 영역을 작은 셀(cell)로 나누고 각 셀에 대해서 비선형 방정식을 해석한다. 또한, VOF(volume of fluid)와 AVOR(fractional area/volume representation) 방법을 활용하여 곡면과 자유 표면 등을 신속하고 정확하게 표현할 수 있어 유동 및 열전달 계산으로 정확성을 확보할 수 있다. 프로그램 내에 다양한 지배방정식이 내재되어 있어 기계, 금속, 토목, 건축 등 여러 분야에서 활용도가 높은 프로그램이다.

와이어 피딩의 전산 모사 모델을 형성하는 과정은 다음과 같다.

1) 레이들을 형성한다. 레이들의 크기는 직경 1.2 m, 높이 3.5 m 이고, 내벽의 두께 0.1 m로 설정하였다. 이는 3D CAD 작업

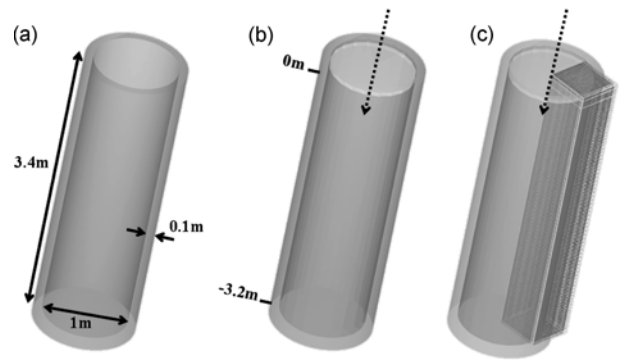


Fig. 2. The schematic diagram of simulation model setting : (a) ladle, (b) liquid steel and wire, (c) mesh domain.

을 통해 형성하여 STL 파일형태로 본 프로그램에 사용하였다. 형성된 레이들은 Fig. 2(a)와 같다.

2) 레이들 내 용강을 설정한다. 용강은 레이들 바닥에서부터 3.2 m가 되도록 설정하고, 용강면을 0m로 설정하여 기준으로 두었다. 그리고 와이어 주입위치를 레이들 중앙으로 설정하였다. 형성된 용강 위치는 Fig. 2(b)와 같다.

3) 형성된 레이들에서 계산이 실행되는 메시 도메인(mesh domain)을 설정하였다. 제한된 메시 개수와 시간적으로 효율적인 시뮬레이션을 위해 대칭성을 활용하여 사분원에 해당하는 부분을 메시 도메인으로 설정하였다. 메시 도메인내의 메시 개수를 설정하고, 각 면에 대한 경계 조건으로 온도를 설정하였다. 형성된 메시 도메인의 위치는 Fig. 2(c)와 같다.

4) 완성된 레이들 모델에 대한 전산 모사에 필요한 식을 선택한다. 와이어 피딩에 관해 열 전달과 응고 모드를 선택한다.

5) 초기 조건을 설정한다. 레이들내 용강의 온도를 1600°C로 설정하고, 와이어주입 속도를 12 m/min으로 설정한다.

2.2 고상 분율에 의한 전산 모사 결과 분석

전산 모사에 의한 결과는 고상 분율을 통해 알 수 있다. 고상 분율은 고상선과 액상선 사이를 분율로 나타낸 것이다. 고상인 와이어(고상 분율=1)가 액상인 용강(고상 분율=0) 속으로 주입되어 용융되면, 고상 분율의 변화로써 나타낼 수 있다.

여기서 용융이 되었다고 판단되는 고상 분율을 0.67로 정하였다. 이를 임계 고상 분율(critical solid fraction)이라 한다. 임계 고상 분율이란 고액 영역에서 고상 입자들(solid particles) 간의 상호작용에 의한 고상 특성이 사라지는 임계 고상 분율인 0.67 이하가 되면 액상과 같으므로 레이들 바닥과 부딪쳐도 분산되어 버리게 된다. 따라서 고상 분율이 0.67 이하가 되는 지점을 와이어의 용융 깊이로 정하였다. Fig. 3은 시간 변화에 따른 고상 분율의 결과를 나타낸 것이다. 그 결과를 그래프로 나타내었다.

2.3 아르곤 취입에 의한 전산 모사 모델

다음은 아르곤 취입에 의한 용강 교반시 와이어 피딩 전산 모사 모델을 형성하였다. 이는 앞의 모델을 좀더 현실화하기 위한 방법이다. 현재 조업상 아르곤이 레이들내 취입되어 교반을 형성하고 있고, 이 때 버블 제너레이터(bubble generator)의

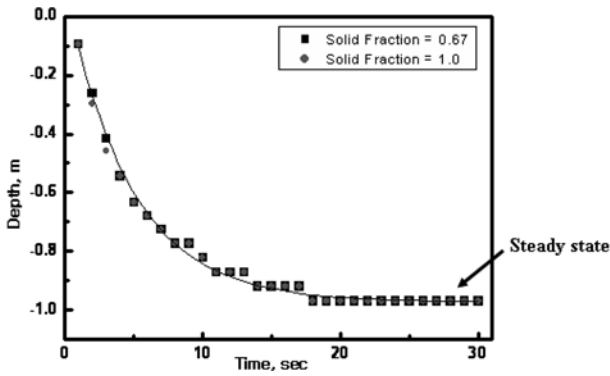


Fig. 3. Variations of depth of wire injection.

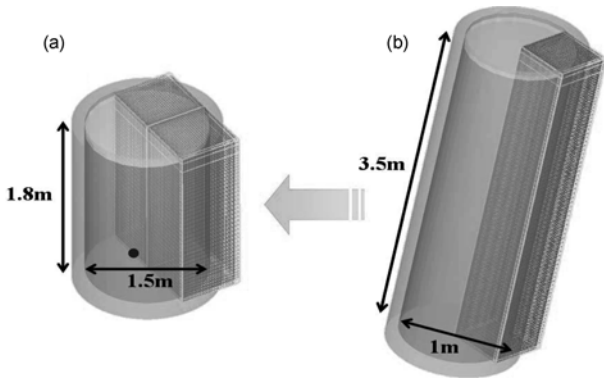


Fig. 4. Modification of mesh domain for Ar gas stirred simulation : (a) modified mesh domain, (b) established mesh domain.

위치는 반지름의 1/4 지점이다. Fig. 6는 용강 교반시 전산 모사 모델을 바닥에서 본 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 전산 모사는 대칭성을 활용한다. 그 이유는 제한된 메시 범위에서 최대한 효율적인 계산을 하기 위해서이다. 레이들 바닥에 위치한 버블 제너레이터가 하나이기 때문에 전산 모사시 메시 도메인의 형태는 기존의 사분원이 아닌 반원을 형성하여 대칭성을 충족시킨다.

메시 도메인의 형태가 바뀐에 따라 전산 모사에 사용된 레이들의 크기도 일부 변경하였다. Fig. 5은 수정된 레이들과 메시 도메인을 나타낸 것이다.

기존 레이들의 크기를 수정하였는데, 우선 레이들의 반경을 1m에서 1.5m로 확장하였다. 이는 아르곤의 용강 교반시 원활한 교반 현상을 구현하기 위해서이다. 그리고 메시 개수 유지를 위해 레이들 깊이를 3.5m에서 1.8m로 축소하였다. 이는 제한된 메시 개수를 유지시키기 위한 것이다. 이로써 레이들의 형태는 크게 바뀌었으나, 전산 모사를 위한 메시 개수는 크게 변하지 않았다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 정상 용융 상태

Fig. 14는 1530°C 용강 내에 직경 14 mm인 와이어를 5 m/min 속도로 주입하였을 때의 결과를 시간이 지남에 따라 고상

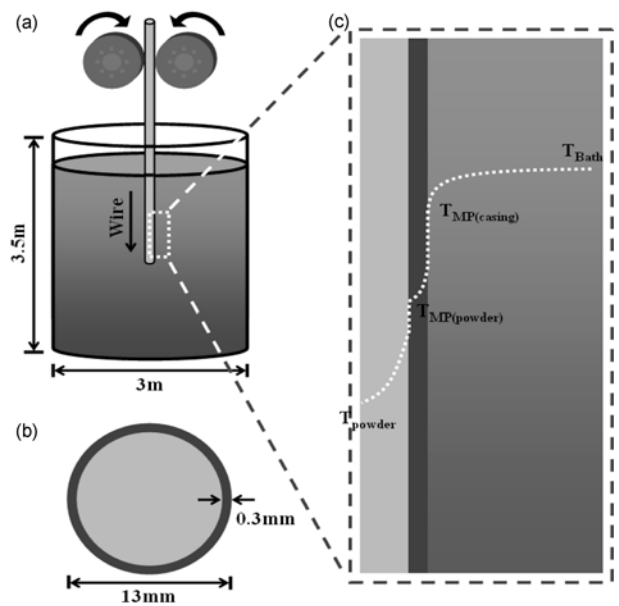


Fig. 5. The Schematic diagram of mathematical model : (a) ladle, (b) section diagram of wire, (c) temperature distribution in the ladle.

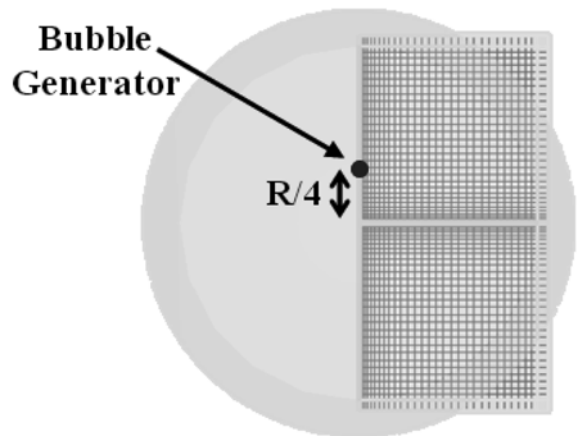


Fig. 6. Bubble generator and modified mesh domain.

분율의 변화를 나타낸 것이다. 초기에는 와이어가 주입 속도에 의해 하강하다가 20초 후에는 그 깊이가 변하지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 앞서 언급한 정상 상태에 돌입한다는 가정을 뒷받침한다. Fig. 7은 와이어 피팅시 와이어의 용융 모식도이다. 점선은 용융 반응이 없을 때 주입 속도에 의한 와이어의 이동 거리이다. 초기 와이어가 레이들 내 주입되는 과정은 다음과 같다.

- 1) 초기 용융 단계 : 초기 상태에서 펀치 롤에 의해 일정한 속도로 와이어가 레이들내 용강으로 주입된다. 주입된 와이어는 일정한 속도로 하강하면서 고온의 용강에 의해 온도가 상승한다.
- 2) 초기 비정상 용융 단계 : 와이어의 온도가 피복을 구성하는 고탄소강의 용점까지 상승하면 피복이 용융되기 시작하고 이어서 첨가합금 분말이 용강속으로 분산되어 용융된다. 하지만 와이어의 용융 속도보다 펀치 롤에 의한 주입속도가 빠르기

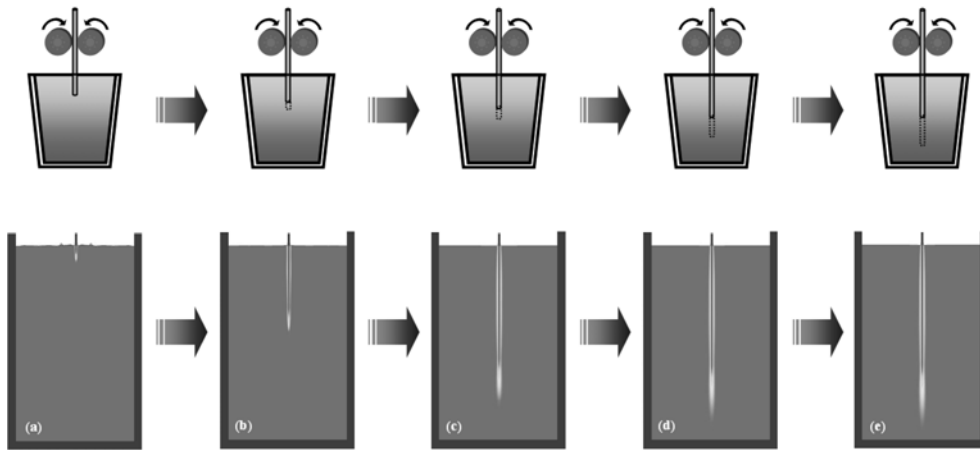


Fig. 7. The schematic diagram of wire dissolution (injection speed : 12 m/min, temperature of liquid steel : 1600°C) (a) 1sec, (b) 5sec, (c) 15sec, (d) 25sec, (e) 30sec.

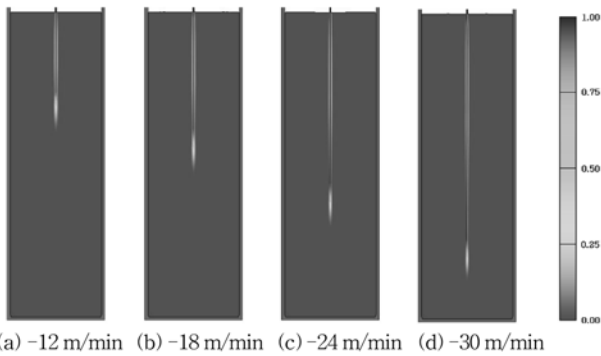


Fig. 8. Results of simulation by variation of injection speed (temperature of liquid steel : 1600°C, simulation time : 30sec).

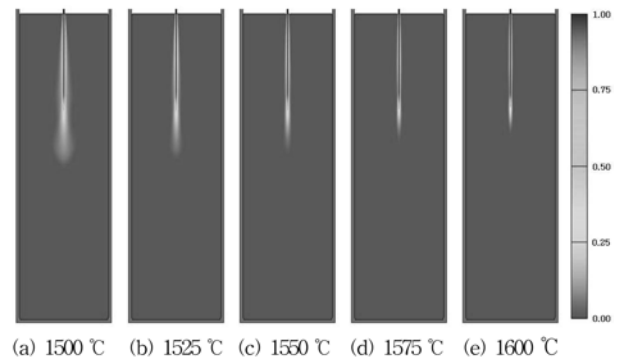


Fig. 10. Results of simulation by variation of temperature of liquid steel (injection speed:-12 m/min, simulation time : 30sec).

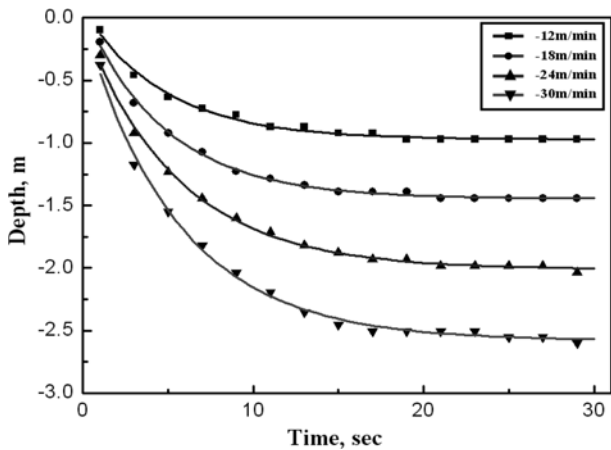


Fig. 9. Effect of injection speed on depth of wire injection.

때문에 와이어는 연속적으로 하강한다.

3) 초기 비정상 용융 단계 : 이 후 와이어 용융 속도는 계속 증가하고 결국은 와이어 주입 속도와 같아진다. 즉, 레이블 내 용강으로 주입되는 와이어의 주입속도와 고온의 용강에 의해 용융되는 와이어 부분이 같아짐으로써 와이어 용융 깊이는 고정된다.

3.2 공정 변수 변화에 따른 와이어 피딩시 용융 깊이의 영향

3.2.1 속도가 용융 깊이에 미치는 영향

와이어 주입 속도는 와이어 용융 깊이에 가장 큰 영향을 주는 인자이다. 앞의 기본 모델에서 와이어 주입 속도를 제외한 용강 및 와이어 온도, 와이어 직경 등은 고정한 후, 와이어 주입속도를 12 m/min~30 m/min 사이 4개의 조건으로 변화시켜 전산 모사를 실시하였다. 아래의 Fig. 8과 Fig. 9은 그 결과를 비교한 것이다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 20초 이후에 모두 정상 상태에 돌입하는 것을 알 수 있다. 또한 와이어 주입 속도가 증가함에 따라 용융 깊이가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 와이어가 용융되는 시간 동안 증가된 주입 속도에 의해 용융 깊이가 증가한 것이다.

3.2.2 용강 온도가 용융 깊이에 미치는 영향

다음으로 앞의 기본 모델에서 용강 온도를 제외한 와이어 주입 속도, 와이어 직경 등은 고정한 후, 용강 온도를 1500°C~1600°C 사이에 25°C 단위로 5개의 조건으로 변화시켜 전산 모사를 실시하였다.

용강 온도에 의한 용융 깊이의 변화를 Fig. 10과 Fig. 11로 나타내었다. 용강 온도가 증가함에 따라 용융 깊이가 1600°C

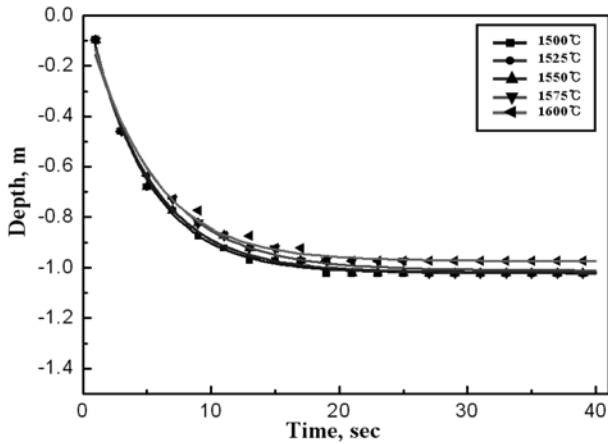


Fig. 11. Effect of temperature of liquid steel on depth of wire injection.

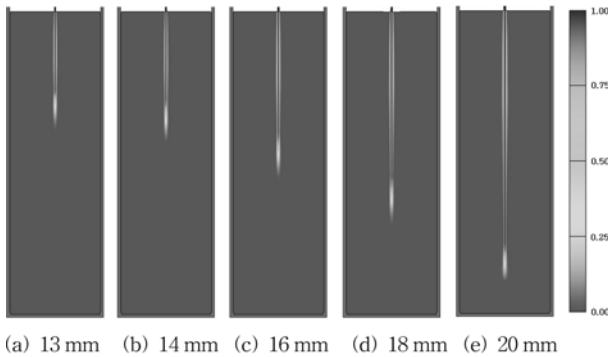


Fig. 12. Results of simulation by variation of wire diameter (injection speed : -12 m/min, temperature of liquid steel : 1600°C).

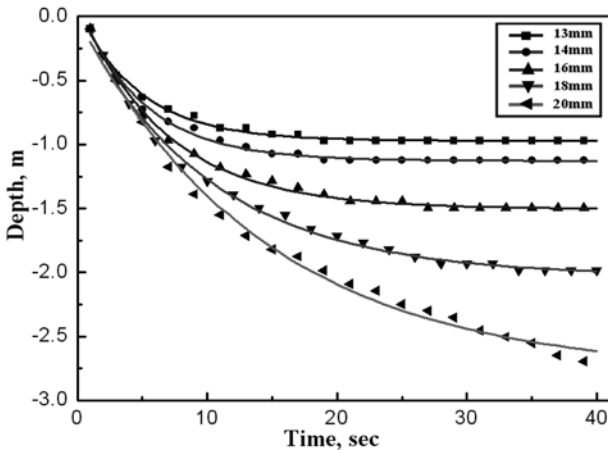


Fig. 13. Effect of wire diameter on depth of wire injection.

일때 0.971 m인 것을 제외하고는 모두 1.022 m로 그 변화의 차이가 주입 속도 변화에 비해 적다. 용융 깊이의 변화는 적지만, 용강 온도 변화에 따라 고액 영역의 분포는 두드러지게 나타난다. 즉, 용강온도가 높을수록 고액 영역의 분포가 작을 것을 볼 수 있다. 이를 통해 고액 영역은 온도의 변화에 민감하게 반응한다는 것을 알 수 있다.

3.2.3 와이어 직경이 용융 깊이에 미치는 영향

마지막으로 앞의 기본 모델에서 와이어 직경을 제외한 와이어

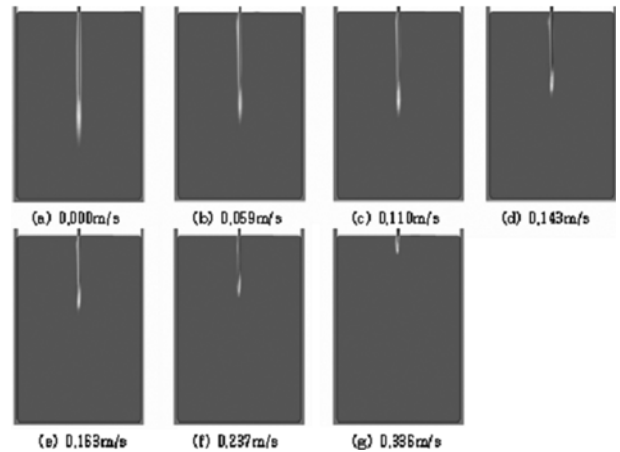


Fig. 14. Results of simulation by variation of stirred velocity by Ar gas (injection speed : -10 m/min, temperature of liquid steel : 1600°C).

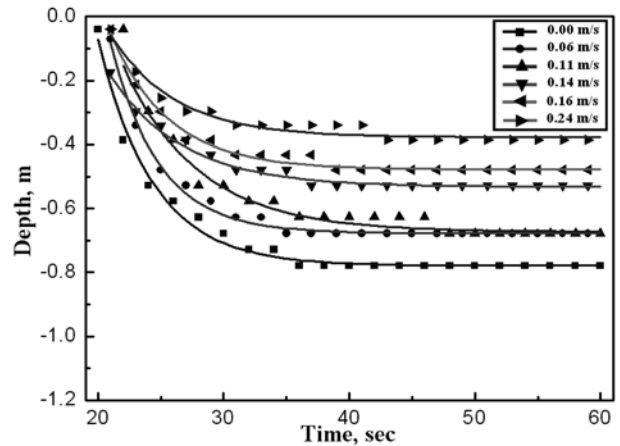


Fig. 15. Effect of stirred velocity by Ar gas on depth of wire injection.

주입 속도, 용강 및 와이어 온도 등은 고정한 후, 와이어 직경을 13 mm~20 mm 사이 5가지 조건으로 변화시켜 전산 모사를 실시하였다. 와이어 직경에 의한 용융 깊이의 변화를 Fig. 12 와 Fig. 13으로 나타내었다. 와이어 직경을 증가할수록 용융 깊이가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 와이어 직경이 증가하면 두 가지 영향을 받기 때문이다. 첫째, 와이어 직경이 증가하면 단면과 용강의 접촉면이 증가하여 임의의 시간에 용강으로부터 받아들이는 열에너지가 증가하는 것이다. 둘째, 와이어 직경이 증가하면 단면의 질량이 증가하여 용융을 위한 열 에너지가 증가하는 것이다. 와이어 직경 증가에 따른 접촉면 증가보다 질량 증가에 의한 열에너지가 더 필요하기 때문에 용융되는데 걸리는 시간이 늘어 용융 깊이는 증가한다.

3.3 아르곤 취입에 의한 용강 교반시 교반 속도에 의한 용융 깊이의 영향

와이어 주입 속도를 -10 m/min으로 설정하였다. Fig. 14와 Fig. 15는 전산 모사시 60초의 고상 분율 분포를 나타낸 것이다. Fig. 14(a)는 아르곤 취입이 없는 조건에서의 전산 모사 결과이다. 이때 정상 상태에서의 와이어 용융 깊이는 약 0.971 m

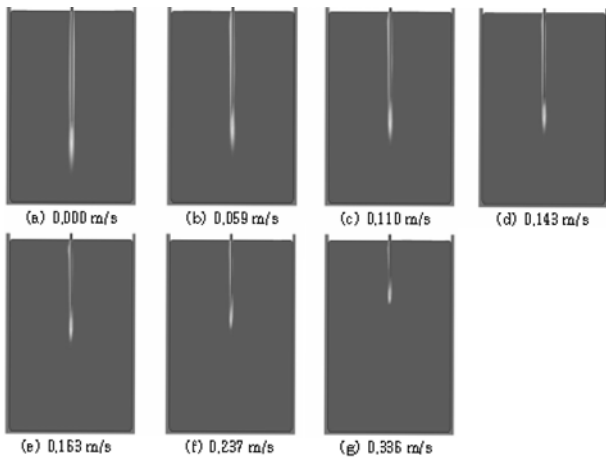


Fig. 16. Results of simulation by variation of stirred velocity by Ar gas (injection speed : -12 m/min, temperature of liquid steel : 1600°C).

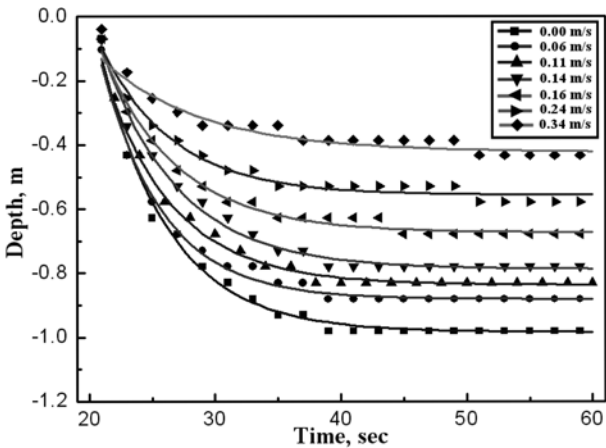


Fig. 17. Effect of stirred velocity by Ar gas on depth of wire injection.

이다. 용강 교반 대표 속도가 증가함에 따라 와이어의 용융 깊이는 점차 감소한다. Fig. 14(g)는 7가지의 용강 교반 속도 조건에서 가장 빠른 속도일 때의 결과이다. Fig. 14(f)에 비해 용융 깊이가 크게 감소하였다. 이는 용강 교반 속도가 와이어 주입 속도에 비해 상대적으로 매우 커서 나타나는 현상이다. 그 외의 결과를 보아 아르곤 취입에 의한 용강 교반 속도가 증가함에 따라 와이어의 용융 깊이가 감소하는 것을 알 수 있다. 다음은 위의 교반 속도 조건과 동일한 상황에서 와이어 주입 속도를 12 m/min로 설정하여 전산 모사를 실시하였다. Fig. 16과 Fig. 17은 전산 모사 결과를 나타낸 것이다. 용강 교반 대표 속도가 증가함에 따라 와이어의 용융 깊이는 역시 감소한다. 이전 주입 속도가 10 m/min일 때의 전산 모사결과 보다 전체적인 와이어의 용융 깊이가 증가한 것을 제외하고는 똑같은 경향을 볼 수 있다. 다음은 아르곤 취입에 의한 용강 교반시 교반 속도에 의한 와이어 용융 깊이의 영향에 대한 분석이다. 우선, 용강 교반 유무에 따른 와이어 용융 깊이의 변화를 분석하였다. Fig. 18은 용강 교반시 와이어 피딩의 모식도이다. 버블 제너레이터로부터 취입된 아르곤은 부력에 의해

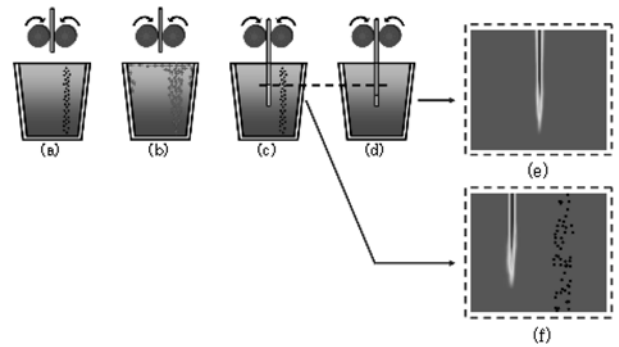


Fig. 18. The schematic diagram of wire feeding of stirred liquid steel by Ar gas : (a) blowing in Ar gas, (b) Bubble Plume, (c) wire feeding with Ar gas, (d) wire feeding without Ar gas, (e) wire front without Ar gas, (f) wire front with Ar gas.

용강면으로 이동을 하면서 용강 내에 강제대류를 형성한다. 이는 마치 깃털과 같은 형상으로 z축 속도가 분포하기 때문에 버블 플럼이 형성된다. Fig. 18(e)와 Fig. 18(f)는 용강 교반시 유무시의 와이어 끝을 확대한 그림이다. 교반이 없는 상황에서는 고액 영역의 분포가 좌우대칭을 이루고 있으나, 교반이 있는 상황에서는 좌우 비대칭을 형성하고 있는 것을 볼 수 있다. 아르곤과 가까운 고액 영역이 반대편 고액 영역에 비해 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 고온의 용강에 의해 형성된 고액 영역 내 고상 입자들 간의 상호작용이 버블 플럼에 의해 분산되어진 것으로 판단된다. 이로 인해 용강 교반이 없을 때는 고상이 주로 분포된 고액 영역에 대한 전도의 열전달이 형성되고, 용강 교반이 있을 때는 고액 경계면에 대한 대류의 열전달이 형성된다. 따라서 용강 교반에 의한 와이어 피딩시 와이어 용융 깊이가 용강 교반이 없을 때의 와이어 용융 깊이에 비해 감소하게 된다.

4. 결 론

스테인리스 용강 내 Ti와 같은 저밀도 합금 첨가를 위한 와이어 피딩 공법을 활용한다. 기존의 단순한 용강 내 와이어 주입에 관한 연구에서 현실적인 구현을 위해 레이들을 설정하고 3D 열유체 해석 프로그램을 통해 전산 모사를 실시하였다. 합금의 실수율과 직접적인 연관이 있는 와이어 용융 깊이에 영향을 주는 요인으로 와이어 주입 속도, 용강 온도, 와이어 직경 등을 달리하여 여러 와이어 공정 변수 변화시 용융 깊이의 영향을 고찰하였다. 좀 더 현실적인 구현을 위해 레이들 내 아르곤을 취입하여 용강 교반을 구현한 후 교반 속도에 따른 용융 깊이의 영향을 고찰하였다. 이상과 같은 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 와이어 피딩 공법에 관한 연구에서 현실성 부여를 위해 레이들을 설정한 후 3D 열 유체 해석 프로그램을 통한 전산 모사를 실시한 결과, 고온의 용강에 상온의 와이어 주입이 시작되는 시점에 일정 시간 후에 용융 깊이가 고정되는 정상 용융 상태에 돌입하는 것을 관찰하였다. 이는 와이어 주입속도, 용강 온도, 와이어 직경 등의 요인에 의해 변화할 것이라 가정하였다.

2) 와이어 주입 속도에 따른 용융 깊이의 변화를 관찰하기 위해 와이어 주입속도를 증가시켜 전산 모사를 실시한 결과, 정상 용융 깊이가 증가하는 것을 관찰하였다. 이는 용융 깊이 변화에 와이어 주입 속도가 직접적인 영향을 준다는 것을 의미한다.

3) 레이들 용강 온도에 따른 용융 깊이의 변화를 관찰하기 위해 용강 온도를 증가시켜 전산 모사를 실시한 결과, 정상 용융 깊이가 1600°C일때 0.971 m인 것을 제외하고는 모두 1.022 m였다. 이는 레이들 용강 온도가 용융 깊이의 변화에 큰 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다. 하지만 고액 영역은 온도의 변화에 민감하게 반응한다는 것을 알 수 있다.

4) 와이어 직경에 따른 용융 깊이의 변화를 관찰하기 위해 와이어 직경을 증가시켜 전산 모사를 실시한 결과, 정상 용융 깊이가 증가하는 것을 관찰하였다. 이는 레이들 용강 온도가 용융 깊이의 변화에 큰 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다. 이는 와이어 직경 증가에 따른 접촉면 증가보다 질량증가에 의한 열에너지가 더 필요하기 때문에 용융되는데 걸리는 시간이 늘어 용융 깊이가 증가한다는 것을 의미한다.

5) 레이들의 현실성 구현을 위해 레이들의 중심에서 4/r인 지점에서 아르곤 취입하여 용강 교반을 형성으로 인한 용강 교반 속도에 따른 용융 깊이의 변화를 관찰하기 위해 아르곤 취입에 의한 용강 교반 속도를 증가시켜 전산모사를 실시한 결과, 와이어 주입 속도가 10 m/min인 경우정상 용융 깊이가 감소하는 것을 관찰하였다. 이는 아르곤 취입에 의한 용강 교

반이 형성될 경우 와이어 주입 방향과 반대로 작용하기 때문에 상대적인 속도 증가로 열전달계수 증가에 의해 용강과 와이어간의 열저항이 감소하여 열전달이 원활하다는 것을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] London Metal Exchange, www.lme.co.uk, (2008)
- [2] Y. Kato, T. Ujio, K. Yamato and K. Abiko: Colloque C7, supplment au Journal de Physique 111, "Influence of Carbon and Nitrogen on Corrosion Resistance of High Purity Fe-50mass % Cr Alloy", Vol. 5 (1995) C7-403
- [3] Y. E. Lee: Proc. of Conf. on "Development of Ladle Steelmaking and Continuous Casting", The Metallurgical Society of the Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Canada, (1990) 154
- [4] M. Rebiere, Y. Fautrelle and Y. D. Terrail: Proc. of 6th Int. Conf. on Refining Processes- Scaninject VI, MEFOS, Lulea, (1992) 267
- [5] N. Bannenberg, K. Harste and O Bode: Proc. of 6th Int. Conf. on Refining Processes- Scaninject VI, MEFOS, Lulea, (1992) 247
- [6] J. Schade, S. A. Argyropoulos and A. McLean: Can. Metall. Q., "Assimilation and recovery characteristics of innovative cored wire additions for steelmaking" 30 (1991) 213
- [7] Q. Jiao and N. J. Themelis: Can. Metall. Q., "Mathematical modelling of heat transfer during the melting of solid particles in a liquid slag or metal bath," 33 (1993) 75
- [8] FLOW-3D Manual Version 9.2 (2007)