

Steeluniversity.org

Secondary Steelmaking Simulation, 버전 2 사용자 가이드

목차

목차

- 1 소개 및 disclaimer
- 2 버전 2 에서 바뀐 내용
 - 2.1 사용자 환경과 디자인 변화
 - 2.2 기술적 변화
- 3 2차 정련
- 4 시뮬레이션 목표
- 5 공장 설계 및 설명
- 6 시뮬레이션 옵션
 - 6.1 사용자 레벨
 - 6.1.1 대학생 레벨
 - 6.1.2 철강 산업체 근로자 레벨
 - 6.2 시뮬레이션 속도
 - 6.3 목표 강종
- 7 시뮬레이션 스케줄
 - 7.1 조성
 - 7.2 온도
 - 7.2.1 액상선 계산
- 8 사용자 환경
 - 8.1 래들 수송
 - 8.1.1 래들카
 - 8.1.2 크레인
 - 8.2 컨트롤 패널
 - 8.2.1 합금첨가(A키)
 - 8.2.2 Flushing station(F키)
 - 8.2.3 Recirculating Degasser(D키)
 - 8.2.4 CAS-OB(C키)
 - 8.2.5 Ladle Furnace(L키)
 - 8.2.6 Tank degasser(T키)
 - 8.2.7 화학분석(R키)
 - 8.2.8 수행기록 보기(E키)
 - 8.2.9 시뮬레이션 재시작(X키)
 - 8.3 시뮬레이션 결과
- 9 기본적인 과학적 관계들
 - 9.1 합금첨가량 계산

- 9.1.1 목표 조성에 도달하기 위한 합금첨가량 계산
- 9.2 탈산
 - 9.2.1 Al 첨가량 계산
- 9.3 탈탄
 - 9.3.1 탈탄의 열역학
 - 9.3.2 탈탄의 속도론
- 9.4 탈황
 - 9.4.1 탈황 슬래그 첨가
 - 9.4.2 탈산
 - 9.4.3 Tank Degasser에서의 교반
- 9.5 수소제거
 - 9.5.1 열역학
 - 9.5.2 수소제거의 속도론
- 9.6 래들교반
- 9.7 전기적 재가열
- 9.8 강의 청정도
- 10 참고문헌

1. 소개 및 disclaimer

본 매뉴얼은 2차 정련 시뮬레이션 에 대한 사용자 가이드 매뉴얼로 제작되었으며, <http://www.steeluniversity.org/> 에서 받아보실 수 있습니다. 상호작용 가능한 시뮬레이션은 철강을 공부하는 학생은 물론 철강산업에 종사하는 기업체 근로자 모두를 위한 교육 및 훈련 도구로서 제작되었습니다.

본 매뉴얼과 관련 웹사이트들에 수록되어 있는 정보들은 신뢰성 있게 제공되었지만 어떤 보증이나 대변 또는 주장 혹은 보장을 포함하지는 않으며, 관련된 정보 또는 그와 관련되어 다른 웹사이트로부터 하이퍼텍스트 또는 다른 링크를 통해 연관된 그 어떤 정보(본 웹사이트 또는 다른 어떤 웹사이트에 게재되어 지방법 또는 국가법, 혹은 어떤 규제나 법에 의해 규정된 조건을 만족하는 정보의 사용 혹은 다른 모든 정보를 포함하여)도 역시 포함하지 않습니다. 그리고 보증이나 대변 또는 주장 혹은 법규나 관습이 수반되어 보장된 것은 여기서 특별히 배제되었습니다. 본 매뉴얼에서 모든 정보의 사용은 모두 사용자의 책임하에 있습니다. 어떤 상황에서도 International Iron and Steel Institute 와 The University of Liverpool 또는 그 파트너들은 본 매뉴얼에 수록된 정보의 사용으로 인해서 초래된 그 어떤 비용, 손해, 경비 또는 손실(이익의 손실을 포함하여 직접적 혹은 간접적, 결과로서 일어나는 경우, 특별한 경우, 경제적 또는 재정적인 모든 경우와 상관없이) 에 대해서 책임이 없습니다.

본 매뉴얼에 포함된 어떤 것도 어떤 방식으로든 행동의 결정 여부를 판단하는 기술적 조언이나 재정적 성격으로 간주되지 않을 것입니다.

2. 버전 2 에서 바뀐 내용

본 시뮬레이션은 2002년도 8월에 처음 시작된 이래로 충분히 개선되어 왔습니다.

2.1 사용자 환경과 디자인 변화

- 현재 시뮬레이션 속도는 시작에 앞서 고정값을 선택하지 않고 시뮬레이션 중 어느 때에도 변경이 가능합니다. 이는 중요한 결정의 순간에 시뮬레이션 속도를 늦출 수 있게하며, 다른 때에는 속도를 높일 수 있습니다. 하지만, 장비가 가동 중일 때에는 (BOF tilting, 래들 카, 그레인 이동 등) 시뮬레이션 속도는 자동적으로 디폴트 값인 x8 이 됩니다. 그리고 장비의 가동이 완료된 후에는 원래 사용자가 지정한 값으로 되돌아갑니다. 시뮬레이션 속도는 화면의 좌측 상단 근처의 drop-down 메뉴를 통해서 선택할 수 있습니다.
- The Steel Industry Foreman Level 이 삭제 되었습니다.
- 합금첨가: 문자 영역을 통해서 키보드 입력이 가능해졌습니다.
- “시뮬레이션 재시작” 옵션이 좀 더 잘 실행되도록 개선되었습니다.
- 컨트롤 패널을 키를 통해서 열 수 있게 되었습니다.
- Ar 교반, O₂ 취입, 전기로 전력 설정, 등이 수행기록에 포함되었습니다. 이는 분석, 진단, 시뮬레이션의 반복을 좀더 쉽게 해 줄 것입니다.
- 시뮬레이션의 마지막에서 강의 조성과 온도의 변화 경로를 볼 수 있습니다. – 시뮬레이션 동안 강의 조성과 온도가 시간에 따라서 어떻게 변했는지 알 수 있습니다.
- 데이터 파일을 자신의 컴퓨터 또는 웹서버에 복사하고 수정함으로써 자신만의 강종을 만들 수 있습니다. 물론 일반적이지 않은 강의 조성 등에 대한 결과를 보장하지 않습니다.
- R키를 한번 누르면 가장 최근에 수행한 화학분석 결과를 보여주며, 두 번 누르면 새로운

화학분석을 시작하게 됩니다.

- 경보 표시 상자와 컨트롤 패널간의 충돌이 개선 되었습니다.
- 크레인과 래들카의 디자인이 변경되었습니다.
- 기본적인 가정과 단순화를 표시하는 화면이 제공됩니다.
- 장비의 소리가 추가되었습니다.

2.2 기술적 변화

- Engineering steel grade가 AISI 4140 로 바뀌었습니다.
- TiNb 극저탄소강의 조성이 바뀌었습니다.
- Cu 와 Sn 을 포함한 합금원소를 모든 강종에서 제거함으로써 첨가 합금의 개수를 줄였습니다.
- 블룸과 빌렛 캐스터로 운송되는 강종을 위해서 100톤의 래들이 사용되며, 슬라브 캐스터를 위한 강종에서는 계속해서 250톤 래들을 사용하게 되었습니다.
- 철강산업 근로자 기술 수준을 위해서 캐스터에 필요 운송시간이 바뀔 수 있습니다.
- Thermochemical 모델이 조금 개선되었습니다.
- Ca의 수율이 15%로 감소 되었습니다.

3. 2차 정련

지난 수십년간 제강 실제 공정에 주된 변화가 있었습니다.

전통적인 제강법은 Basic Oxygen Steelmaking(BOS) vessel 또는 Electric Arc Furnace(EAF) 로부터 래들을 거쳐 용강을 잉곳으로 주조하는 주조 틀에 직접 옮기는 작업을 포함하고 있었습니다. 이러한 공정에서는 오직 대략적인 조성과 온도 컨트롤만이 가능 했습니다.

1950년대에 이르러 최초로 vacuum degassing 에 의해 수소를 제거하는 시도가 있었습니다. 좀더 최근에는 vacuum degasser가 탄소함량이 30 ppm (0.003 wt%) 이하인 극저탄소강을 생산하는 데에 사용되고 있습니다. 크게 두 가지 종류의 degasser가 있는데, recirculating 과 non-recirculating입니다. Recirculating 시스템은 RH (Ruhrstahl-Heraeus) degasser 를 포함하고 있으며, 이는 용강의 겔보기 밀도가 낮추기 위한 Ar 상승 가스에 의해 유닛을 통과해 순환하게 됩니다. 반면에 tank-degasser 와 같은 non-recirculating 시스템에서는 Ar 이 교반용 가스로서 사용됩니다.

강의 조성을 조정하거나(또는) 개재물의 성질을 제어하기 위해서 합금이나 플럭스를 첨가하는 방법 또한 cored-wire feeding, powdered addition 등 많이 확장되어 왔습니다. CAS-OB (Composition Adjustment by Sealed argon bubbling with Oxygen Blowing) 공정은 불활성 가스 분위기에서 합금첨가가 용이하도록 하여 강의 청정도와 첨가물의 수율(recovery rate)을 개선하였습니다. 수율은 슬래그나 대기 등에 의해서 손실되지 않고 실제로 강의 조성을 증가시키는 첨가원소의 양을 말합니다.

결과적으로 많은 2차 정련 공정이 용강온도의 측면에서 큰 변화를 낳았고, 이 때문에 공정간이나 또는 주조를 하기 전에 래들의 용강의 재가열이 매우 자주 필요하게 됩니다. 이를 위해서 두가지 방법이 널리 사용되고 있습니다: Ladle arc furnace를 통한 전기적 재가열, 그리고 산소와 알루미늄(또는 실리콘)을 투입시 발생하는 막대한 양의 발열반응을 이용한 화학적 재가열이 있습니다.

표 3-1. 다양한 2차 정련 공정들

공정	탈가스	재가열	정련
----	-----	-----	----

RH degasser	C, O, H, N의 제거 (N은 낮은 O와 S 일때)	Al 과 산소 투입	
Tank Degasser	C, O, H, N의 제거 (N은 낮은 O와 S 일때)		
CAS-OB		Al 과 산소 투입	Ar 불활성 가스 분위기에서 합금첨가
Ladle Arc Furnace		전기적 가열	
Stir station			합성 슬래그와 강한 교반을 통해 탈산된 용강의 탈황

최근에는 2차 정련 설비가 세가지 주된 요인에 의해서 이용되고 있습니다.

- 강종을 좀더 세분화하고 요구조건에 맞게 설계할 수 있습니다.
- CC 에서 매우 빈틈없는 시간계획을 요구하기 때문에 2차 정련과정이 BOS 와 CC 간의 완충 역할을 할 수 있습니다.
- 2차 정련(SS)으로 재정적 이득을 볼 수 있습니다.

본 시뮬레이션은 2차 정련에서의 몇몇 핵심 공정제어를 알기 쉽게 설명하는 것을 목적으로 하고 있습니다.

4. 시뮬레이션 목표

본 시뮬레이션의 목적은 Basic Oxygen Furnace (BOF) 로부터 용강 래들을 받아온 후에 지정된 시간과 조성, 온도 및 개재물 양을 만족시켜 적절한 주조기로 래들을 운반하는 것입니다.

전체 공정을 거치는 동안 비용을 최소화하는 것 또한 중요한 목적입니다.

5. 공장 설계 및 설명

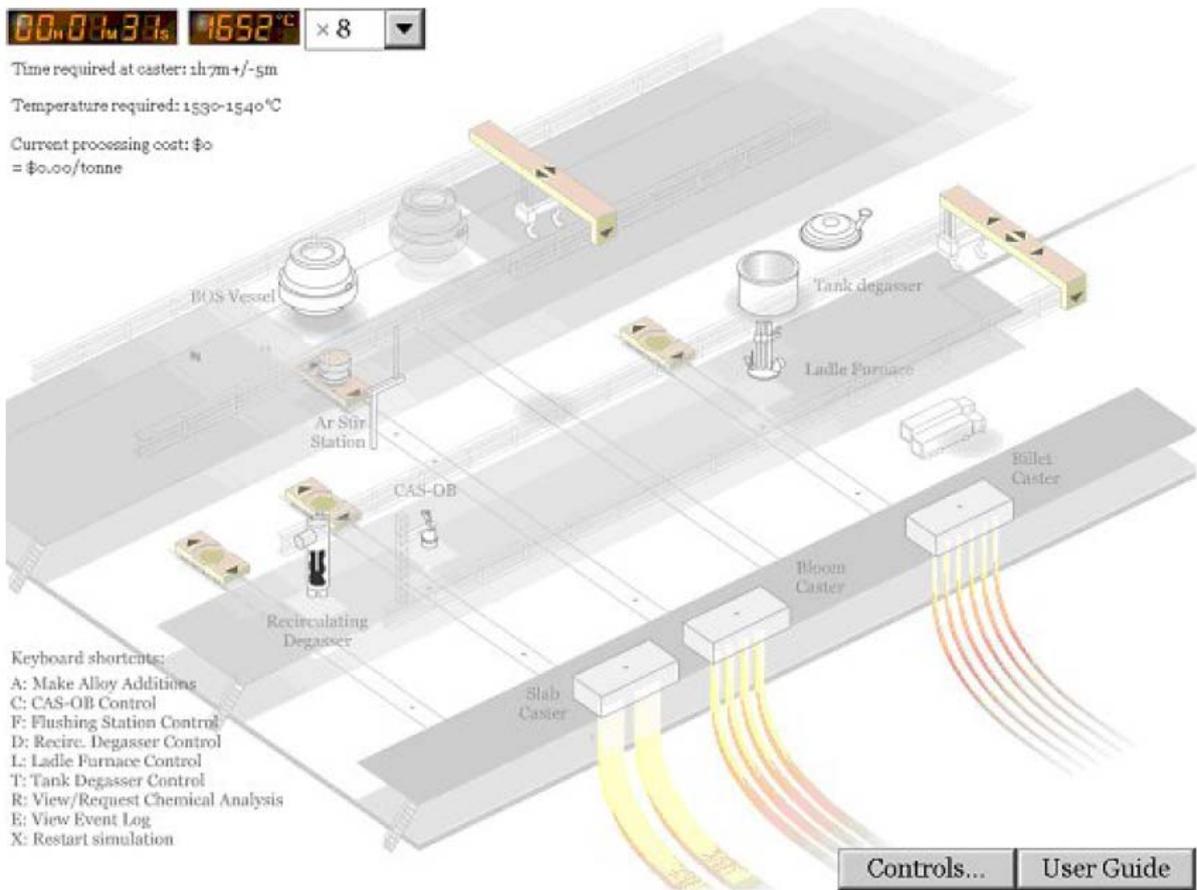


그림 5-1 시뮬레이션에서 사용되는 공장 설계도. 래들 운송차는 BOF로부터 주조실까지 이어진 평행 트랙을 따라서 이동할 수 있습니다. 두대의 크레인은 각 공정실에 따라 한 대씩 있으며, 운송차간에 래들을 이동시키는 데에 쓰입니다.

그림 5-1 과 같이 시뮬레이션 내의 공장이 설계되어 있습니다. 시뮬레이션은 활성화된 basic oxygen furnace, 또는 BOF로부터 래들로 출강하면서 시작됩니다. (다른부분에서 어둡게 처리된 BOF는 비활성화되어 있음)

래들은 BOF로부터 운송차로 옮겨집니다. 첫 정차점은 stir station이며, 이곳에서는 강의 조성과 온도를 균일화 시키기 위해서 래들에 Ar을 취입할 수 있습니다.

Recirculating degasser, CAS-OB 와 ladle arc furnace 는 모두 트랙 위에 위치하고 있어서 래들이 운송차에 얹어진 상태로 설비 아래쪽에 위치할 수 있습니다. 이 때 크레인은 운송차 간에 래들을 옮길 때 필요합니다.

Tank degasser는 크레인1에 의해서 래들을 직접 내려놓아야 활성화 시킬 수 있습니다.

세개의 주조기는 작업장의 앞쪽에 위치하고 있으며, 크레인2를 이용하여 래들은 주조기에 운반할 수 있습니다. 시뮬레이션 조건에 맞는 주조기에 래들을 운송했는지 반드시 확인해야 합니다.

6. 시뮬레이션 옵션

6.1 사용자 레벨

본 시뮬레이션은 두 가지 다른 사용자 그룹의 사용을 위해서 개발되었습니다.

- 금속, 재료공학이나 그 외에 다른 공학적 학습을 하는 대학생

- 철강 산업에 종사하는 근로자 및 기술자

6.1.1 대학생 레벨

이 레벨에서는 사용자가 문제에 대해 다양한 공정의 선택을 위해서 관련된 열역학과 속도론적 이론을 이용하여 과학적으로 접근할 수 있습니다.

예를 들면, 사용자는 합금첨가의 양, 탈가스 시간, 온도 불안정화 등을 계산해야 합니다.

이 레벨에서는 공정상의 문제는 나타나지 않으며 공정 스케줄도 상대적으로 매우 정확합니다.

6.1.2 철강 산업체 근로자 레벨

이 레벨에서도 역시 문제에 대해서 과학적으로 접근해야 합니다. 하지만, 공정 진행 계획을 조정해야 하거나 경험을 이용하여 신속한 결정을 내려야 할 공정상의 문제들 또한 경험 할 것입니다.

공정상의 문제의 전형적인 예를 들면, 주조기에 도달하는데 필요한 시간의 변경이나 제강유닛의 고장 혹은 오작동, 래들 운송차의 고장 혹은 오작동, 화학분석 결과의 지연 등이 있습니다.

6.2 시뮬레이션 속도

시뮬레이션은 x1 과 x64 의 속도 범위 내에서 진행할 수 있습니다. 속도는 시뮬레이션이 진행되는 동안 어느 때에도 변경이 가능합니다. 하지만, 공정설비가 움직이고 있을 때 (BOF 티핑, 크레인, 래들운송차 등등) 시뮬레이션은 자동적으로 디폴트 값인 x8로 진행합니다. 설비가 동작을 마치면 속도는 이전에 설정했던 값으로 되돌아 갈 것입니다.

6.3 목표 강종

시뮬레이션은 서로 다른 공정상의 선택을 쉽게 설명하기 위해서 많은 서로 다른 강종을 포함하고 있습니다.

일반적인 목적의 건축용 강종은 가능한 한 적은 공정을 필요로 하는, 상대적으로 요구조건이 덜 까다로운 강종이기 때문에 미숙련 된 사용자에게 추천합니다. 주요 작업은 정확한 수준의 합금을 첨가하는 것입니다.

자동차의 몸체 부품을 위한 TiNb 극저탄소강은 성형성을 최적화 하기 위해서 0.0035%C 이하의 탄소 함량을 요구합니다. 이는 대략 제강공정 이후에 용강이 포함하는 탄소 양의 1/10 수준입니다. 따라서 가장 먼저 해결해야 할 주요 과제는 과량의 탄소를 효율적으로 제거하기 위해서 적절한 2차 정련 유닛을 선택하고 제어하는 것입니다.

가스 운송을 위한 라인파이프강은 매우 까다로운 강종으로 극히 낮은 불순물(S, P, H, O 그리고 N) 과 개재물의 양을 필요로 하는 높은 강도와 파괴인성의 조합을 요구합니다. 오직 숙련된 사용자만이 이 강종을 시도하기를 추천합니다.

엔지니어링 강은 열처리 가능한 저합금강 입니다. 이는 상당한 양의 Cr과 Mo 첨가를 포함하고 있으며 낮은 수준의 수소 또한 요구됩니다.

표 6-1 본 시뮬레이션에서 가능한 4가지 목표강종의 조성표

원소	건축용 강	자동차용 TiNb 극저탄강	라인파이프강	엔지니어링강
C	0.1450	0.0030	0.0700	0.4150
Si	0.2000	0.2100	0.1800	0.4000
Mn	1.4000	0.7500	1.0500	0.7500
P	<0.0250	0.0650	<0.0150	0.0350
S	<0.0200	<0.0120	<0.0030	0.0350
Cr	<0.1000	<0.0500	<0.0600	1.0500

Al	0.0350	0.0450	0.0300	0.0225
B	<0.0005	0.0030	<0.0050	0.0050
Ni	<0.1500	<0.0800	<0.0500	0.3000
Nb	0.0500	0.0200	0.0150	0.0000
Ti	<0.0100	0.0300	<0.0100	0.0000
V	<0.0100	-	<0.0100	0.0100
Mo	<0.0400	<0.0100	<0.0100	0.2250
As	-	<0.0010	-	0.0000
Ca	-	-	<0.0050	0.0000
N	<0.0050	<0.0040	<0.0045	0.0050
H	<0.0005	<0.0005	<0.0002	0.0002
O	<0.0010	<0.0005	<0.0007	0.0005

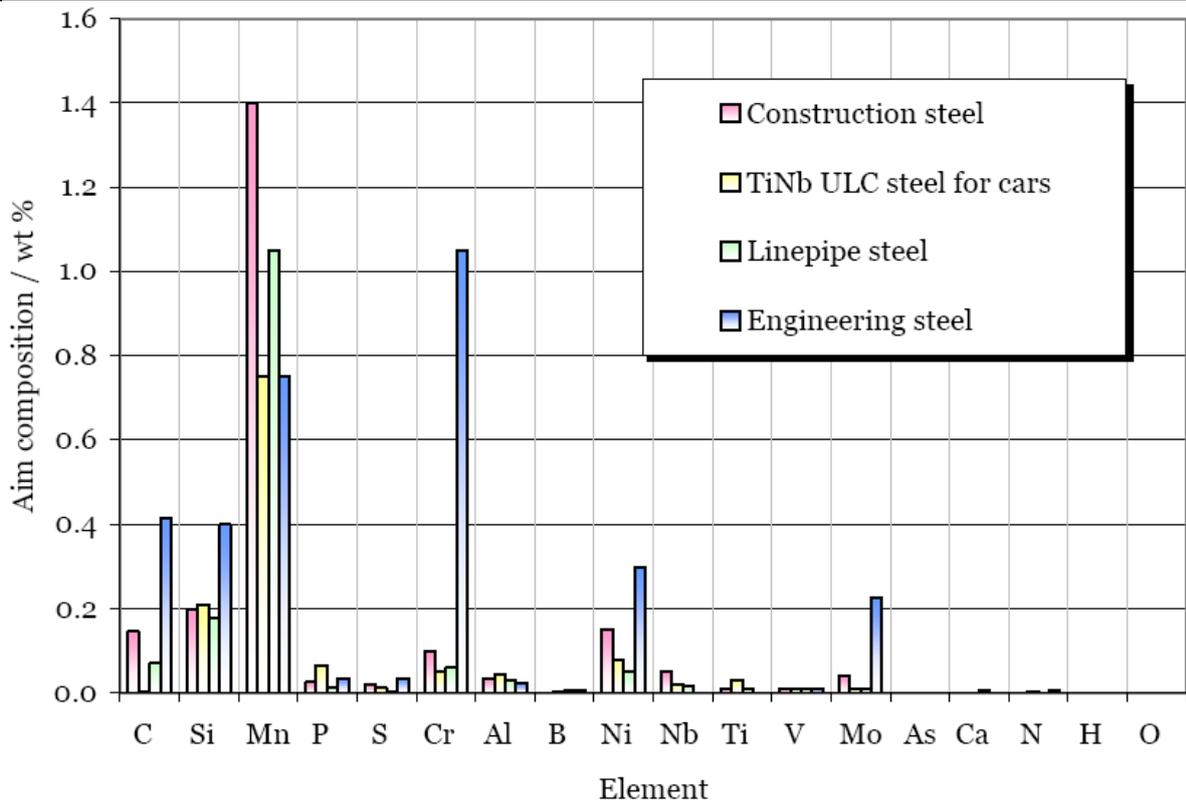


그림6-1 네가지 목표 강종의 조성의 비교 그래프

7. 시뮬레이션 스케줄

시뮬레이션을 시작하기 전에 미리 스케줄을 짜는 것이 중요합니다. 처음에 해야 할 것은 BOF로부터 출강하는 온도와 조성을 주조기에서 요구하는 값과 비교해보는 것입니다. 그 후에 필요로 하는 시간내에 목표값에 어떻게 도달 할 수 있는지 생각해야 합니다.

표 7-1 출강 및 목표 조성. 탄소, 망간, 실리콘 및 알루미늄 조성이 모두 증가되어야 하는 반면에, 산소는 제거되어야 합니다.

원소	출강 조성 / wt%	목표 조성 / wt%	조성차 / wt%
C	0.05	0.145	+0.095
Mn	0.12	1.4	+1.28
Si	0	0.2	+0.2
Al	0	0.035	+0.035

O	0.04	0.001	-0.039
Temperature	1650 °C	1535 °C	-115 °C

7.1 조성

몇몇 원소들은 목표 조성에 도달하기 위해서 첨가해야 할 것입니다. 다음은 꼭 생각해 보아야 할 중요한 질문들입니다.

- 목표조성에 도달하기 위해서 어떠한 합금 첨가물이 사용될 수 있는가?
- 얼마나 많은 양의 합금 첨가물이 필요한가?
- 이 합금첨가물이 다른 원소에도 영향을 미치는가? 만일 그렇다면 얼마나 그러한가?
- 언제 어디서 첨가해야 하는가?
- 합금 첨가물의 첨가가 비용, 온도 및 강의 청정도에 얼마나 영향을 줄것인가?

합금 첨가물 계산을 위해서는 9.1 섹션의 “합금 첨가물 계산”을 보십시오.

표 7-2 조성과 가용한 첨가제의 가격

첨가제	조성	톤당 가격
Recarburizer	98%C + Fe bal.	\$280
High C Ferro-Manganese	76.5%Mn, 6.7%C, 1%Si, 0.03%S, 0.3%P + Fe bal.	\$490
Low C Ferro-Manganese	81.5%Mn, 0.85%C, 0.5%Si, 0.1%S, 0.25%P + Fe bal.	\$840
Ferro-Manganese, high purity	49%Mn + Fe bal.	\$1820
SiMn	60%Mn, 30%Si, 0.5%C, 0.08%P, 0.08%S + Fe bal.	\$560
Ferro-Silicon 75	75%Si, 1.5%Al, 0.15%C, 0.5%Mn, 0.2%Ca + Fe bal.	\$770
Ferro-Silicon 75, high purity	75%Si, 0.06%Al, 0.2%Mn, 0.02%C + Fe bal.	\$840
Ferro-Silicon 45	45%Si, 2%Al, 0.2%C, 1%Mn, 0.5%Cr + Fe bal.	\$630
Aluminum wire	98%Al + Fe bal.	\$2100
Aluminum pebbles	98%Al + Fe bal.	\$1400
Ferro-Boron	20%B, 3%Si, 0.2%P + Fe bal.	\$3780
Ferro-Chrome	66.5%Cr, 6.4%C + Fe bal.	\$1260
Ferro-Molybdenum	70%Mo + Fe bal.	\$16800
Ferro-Niobium	63%Nb, 2%Al, 2%Si, 2%Ti, 0.2%C, 0.2%S, 0.2%P + Fe bal.	\$9800
Ferro-Vanadium	50%V + Fe bal.	\$8400
Ferro-Phosphorus	26%P, 1.5%Si + Fe bal.	\$630
Ferro-Sulphide	28%S + Fe bal.	\$700
Nickel	99%Ni + Fe bal.	\$7000
Titanium	99%Ti + Fe bal.	\$2800
CaSi powder	50%Ca, 50%Si	\$1218
CaSi wire	50%Ca, 50%Si	\$1540

표 7.3 대기중(BOF나 교반 상황)이나 감압 혹은 Ar 분위기(degasser, ladle furnace나 CAS-OB)하에서의 첨가원소들의 전형적인 수율

원소	Degasser, ladle furnace나 CAS-OB에 첨가시의 평균 수율*	BOF나 교반 상황하에서 첨가시의 평균 수율*
C	95%	66%
Mn	95%	66%
Si	98%	69%
S	80%	56%
P	98%	69%
Cr	99%	69%
Al	90%	63%
B	100%	70%

Ni	100%	70%
Nb	100%	70%
Ti	90%	63%
V	100%	70%
Mo	100%	70%
As	100%	70%
Ca	15%	10%
O	100%	70%
N	40%	28%
H	100%	70%
Fe	100%	70%

*이 수치들은 단지 평균적인 수치들이고, 따라 달라 질 수 있음.

TIP: 수율은 진공(degasser)하에서나 Ar 분위기(ladle furnace, CAS-OB) 상황에서 첨가시 높습니다. 따라서, 이러한 상황하에서는 첨가제의 첨가량과 가격을 줄일 수 있습니다. 하지만, 이때 높은 회수율을 얻기 위해서 사용되는 이러한 장비들의 가격이 상충되어야 합니다. 일반적으로, 값비싼 첨가제, 예를 들어 FeNb, FeMo등을 첨가시에 이용됩니다.

탄소, 산소, 황, 수소, 인과 질소와 같은 여타의 원소들은 목표 조성을 충족시키기 위하여 제거되어야 합니다. 이러한 원소들의 제거에 있어서

- 어떠한 처리 혹은 어떠한 처리 과정이 특정 원소의 제거에 가장 효과적인가?
- 무엇이 처리에서의 주요 변수(예를 들어 교반력, 슬래그 조성, 무게, 산소 취입 등)인지 그리고 이러한 변수들이 어떻게 영향을 미치는지
- 현재 용강의 조성, 온도가 속도에 영향을 끼치는지, 만약 그렇다면 어떻게 끼치는지

7.2 온도

래들이 주형에 도착할 때 적절한 온도를 가지기 위하여, 여러 가지 처리들이 래들의 온도에 미치는 영향을 계산하는 것이 중요합니다.

1. 태핑: 태핑 과정 중에 용강의 온도는 약 60°C가량 감소합니다. (이때 시간을 줄이기 위하여 시뮬레이션이 가속됩니다.)
2. 일반적인 상황하, 즉 래들을 정지 혹은 이동하는 동안은 용강의 온도는 분당 0.5°C의 속도로 감소합니다.
3. 대부분의 합금 첨가제의 경우, 1톤 첨가시 6°C의 온도 감소효과가 있습니다.
4. 알루미늄 탈산 반응은 매우 높은 발열반응입니다. 따라서 반응하는 알루미늄¹ 100kg 당 12°C의 온도 상승을 가져옵니다. 또한 알루미늄은 재순환 degasser나 CAS-OB에서 **화학적 재가열**을 위하여 산소 취입과 함께 첨가될 수 있습니다. 다시 한번 말하자면, 산소와 반응하는 알루미늄 100kg당 12°C의 온도를 상승시킵니다.

¹ 첨가된 모든 알루미늄이 반응을 하는 것이 아니므로 계산에 알루미늄의 수율을 고려해야 합니다.

5. 래들내의 용강은 ladle arc furnace에서 **전기적으로 재가열** 될 수 있습니다. 최대 전압의 경우 재가열 속도는 분당 3°C입니다.
6. Ar 버블링에 의한 교반은 온도 감소 속도를 분당 1.5°C로 증가시킵니다.

BOF에서 주형으로까지의 전체시간을 합금 첨가에 따른 온도 감소나 전기적 화학적 재가열에 따른 온도 증가를 고려하여 주의깊게 계산함으로써, 주형에서의 용강의 온도를 계산할 수 있습니다.

7.2.1 액상 온도의 계산

용강의 온도가 액상 온도(액체가 응고를 시작하는 온도) 밑으로 떨어지는 것을 막는 것은 필수적입니다. 액상온도, T_{liq} , 는 용강의 조성에 의존적이고 다음의 식에 의하여 계산될 수 있습니다.

C<0.5% 일 경우:

$T_{liq} = 1537 - 73.1\%C - 4\%Mn - 14\%Si - 45\%S - 30\%P - 1.5\%Cr - 2.5\%Al - 3.5\%Ni - 4\%V - 5\%Mo$	7-1
--	-----

C>0.5% 일 경우 :

$T_{liq} = 1537 - 61.5\%C - 4\%Mn - 14\%Si - 45\%S - 30\%P - 1.5\%Cr - 2.5\%Al - 3.5\%Ni - 4\%V - 5\%Mo$	7-2
--	-----

8 사용자 인터페이스

이 섹션은 시뮬레이션의 기본적인 조작방법에 대하여, 즉 어떻게 래들을 움직이는지, 어떻게 합금을 첨가하는지, 어떻게 여러가지 장비들을 조작하는지에 대하여 설명되어 있습니다.

첨가물의 양, 각 과정의 변수들 등을 계산하기 위하여 필요한 기반이 되는 과학적 관계(화학, 열역학, 반응속도론, 등)들은 섹션 9에 나와 있습니다.

8.1 래들 운반

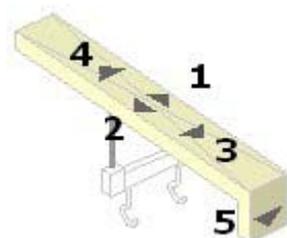
래들은 BOF와 주형 그리고 한쌍의 크레인에 평행하게 설치된 선로를 따라 움직이는 운반차에 의하여 운반됩니다. 이러한 래들의 운반에 따른 비용은 없습니다.

8.1.1 래들 운반차

각각의 래들 운반차는 운반차 앞뒤의 화살표들을 클릭함으로써 이동합니다. 운반차는 각 선로의 정지점에서 자동적으로 정지합니다.

8.1.2 크레인

크레인의 후크가 3차원 공간에서 움직이므로, 성공적인 크레인 조작에는 약간의 연습이 필요합니다. 조작의 편의를 위하여 각각의 크레인은 바로 밑의 바닥에 그림자를 나타냄으로써 정확한 X-Y



위치를 나타냅니다.

크레인에 위치한 화살표들로 크레인을 움직일 수 있습니다.

- 1,2번 화살표를 이용하여 크레인을 화면에서 위,아래로 움직일 수 있습니다. 크레인은 각 선로의 정지점에서 자동적으로 정지합니다.
- 3,4번 화살표는 크레인을 선로를 따라 움직이게 합니다. 이는 크레인을 주형으로 움직일 때 꼭 필요합니다. 화살표는 움직일 때 반대쪽 방향으로부터 사라집니다.
- 5번 화살표는 처음에 후크를 가장 높은 위치에서 중간 위치로 내립니다. 1초동안 클릭하고 있으면 후크를 가장 낮은 위치(래들을 들거나 내릴 수 있는 위치)까지 내립니다. 그리고 자동적으로 중간위치까지 이동합니다.

래들을 움직이기 위해서는 크레인을 정확히 래들 위로 위치시켜야 합니다.

2번 크레인은 래들을 적절한 주형으로 이동시키기 위해 사용됩니다. 래들 운반차로부터 래들을 들어올리기 위하여, 크레인의 후크는 가장 끝 부분에 있어야 합니다. (위의 그림의 4번 버튼을 사용합니다.) 그 후, 3번 버튼을 클릭함으로써 래들을 앞으로 움직이고 주형으로까지 움직일 수 있습니다.

TIP: 시뮬레이션을 하기 전에 래들 운반차와 크레인 조작에 익숙해 질 것을 추천합니다. 약간의 연습이 필요하겠지만, 곧 공장 내에서 래들을 움직이는데 익숙해질 것입니다.

8.2 콘트롤 패널

시뮬레이션이 시작하면, 당신은 각각의 제강 공정을 콘트롤 패널을 이용하여 조작할 수 있습니다.

Controls 버튼을 눌러 메뉴를 열 수 있고 각각의 옵션을 고를 수 있습니다. 좌측하단의 관련버튼을 눌러도 이러한 옵션을 고를 수 있습니다.

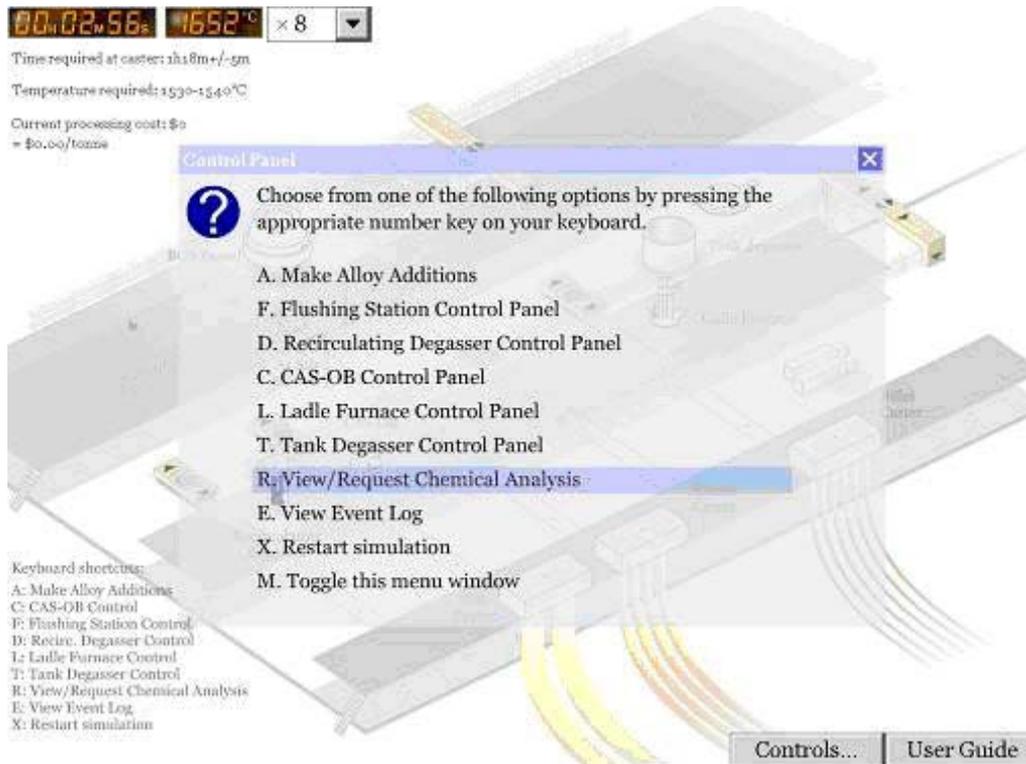


그림 8-1 콘트롤 패널 인터페이스 화면

8.2.1 합금 첨가 (A 키)

합금 첨가 콘솔을 사용하여 각각 다른 첨가물을 래들에 첨가할 수 있습니다. 각각의 첨가물은 첨가량을 조절하기 위한 슬라이더가 있습니다. 디폴트를 하면 모든 슬라이더들이 0으로 맞춰집니다. 각각의 첨가물의 단위 가격이 표시되고, 선택된 첨가물의 총 가격도 함께 표시됩니다.

첨가물은 ‘major’와 ‘micro’로 분류됩니다. Major 첨가물은 페로망간, 페로실리콘을 포함하고 5000kg까지 첨가할 수 있습니다. Micro첨가물은 알루미늄, 크롬, 니켈, 페로나이오비움 등을 포함하고 500kg까지 첨가할 수 있습니다.

TIP: 커서를 첨가물 라벨주위로 움직이면 첨가물의 조성과 전형적인 수율에 관한 정보가 나타납니다.

준비가 되어 Next 버튼을 누르면 당신이 고른 첨가물들의 간략한 정보가 나옵니다. 이때 Finish 버튼을 누르면 첨가를 확인합니다.

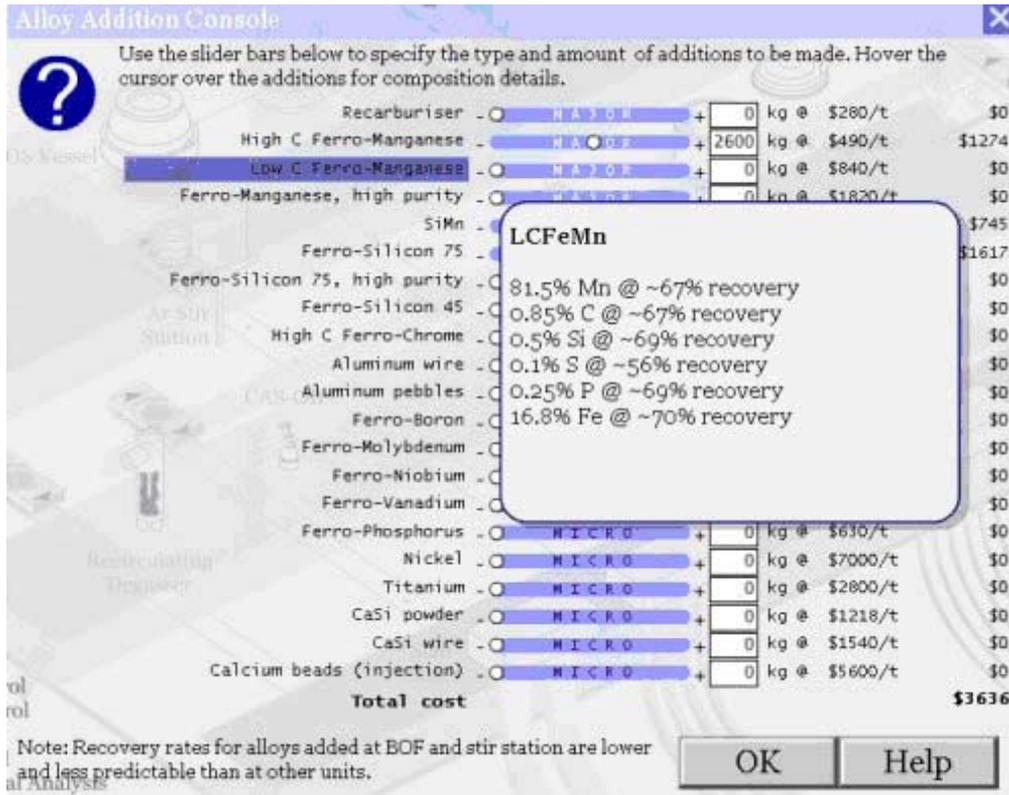


그림 8-2 합금 첨가물 인터페이스 화면

래들에 첨가된 합금 첨가물들은 용강 조성 즉각적으로 변화시키는 것이 아니라, 어느 정도의 시간이 용해에 필요합니다. 시뮬레이션에서 아래와 같은 경향을 관찰함으로써 합금 첨가물들이 충분히 용해되었는지 확인해야 합니다.

- 파우더나 와이어 및 미세입자로 된 첨가물은 상대적으로 큰 pebble이나 봉에 비해 빠르게 용해됩니다.
- Ar 버블링으로 래들 내 용강을 교반시키는 것은 용해 과정을 가속시키고 용강의 조성을 균일화시키는데 필수적입니다.
- 온도가 감소하면 혼합시간은 증가하게 됩니다.

높은 온도에서 잘 교반된 파우더 첨가물이 가장 빠르게 용해되리라 예상할 수 있습니다. 낮은 온도에서 교반 없이 첨가된 pebble은 용해되는데 많은 시간이 걸리고 주형에 도착할 때까지도 용강 내 조성이 균질화 되지 않을 수 있습니다.

8.2.2 Flushing station 조작 패널 (F 키)

래들이 정확한 위치로 오면, 랜스를 클릭하여 장치를 래들로 내려 주십시오. 다이얼로그 박스가 자동적으로 나타나고, Ar 가스의 유속을 조절할 수 있습니다. Flushing station에 관련된 비용은 다음과 같습니다.

- Ar 가스 Nm³당 \$0.60(즉 분당 1.0 Nm³로 1분간 불어줄 경우 비용은 0.60\$)
- 랜스의 침식에 관한 비용은 분당 \$5.70

예상되는 온도감소 속도는 분당 1.5°C까지 증가합니다. 공정을 끝내기 위해서는 랜스를 한번 더 클릭해 주십시오.

8.2.3 재순환 degasser 조작 패널 (D 키)

래들이 위치에 오면, degassing 장치를 클릭하여 장치를 래들로 내려 주십시오. Degassing은 자동적으로 시작됩니다. 다이얼로그 박스가 자동적으로 나타나고, 산소 취입을 시작 및 중지(디폴트로써 중지) 시킬 수 있습니다. Degasser를 사용하는데 드는 비용은 분당 \$7.75이고 용강 온도 감소 속도는 분당 1.0°C입니다. 공정을 끝내기 위해서는 Degasser를 한번 더 클릭해 주십시오.

8.2.4 CAS-OB 콘트롤 패널 (C 키)

래들이 위치에 오면, CAS-OB장치를 클릭하여 장치를 래들로 내려 주십시오. 다이얼로그 박스가 자동적으로 나타나고, 슬라이더를 조작함으로써 Ar 가스 유속을 조절할 수 있습니다. CAS-OB와 관련된 비용은 아래와 같습니다.

- 침식과 다른 소모품들에 관한 비용은 분당 \$30
- Ar 가스 Nm³당 \$0.60(즉 분당 1.0 Nm³로 1분간 불어줄 경우 비용은 0.60\$)

예상되는 온도감소 속도는 분당 1.5°C입니다. 공정을 끝내기 위해서는 장치를 한번 더 클릭해 주십시오.

8.2.5 Ladle furnace 콘트롤 패널 (L 키)

래들이 위치에 오면 Ladle furnace의 리드를 클릭하여 장치를 래들 위로 내려 주십시오. 다이얼로그 박스가 자동적으로 나타나고, 두 개의 슬라이더를 조작함으로써 전압과 Ar 가스 유속을 조절할 수 있습니다. Ladle furnace와 관련된 비용은 아래와 같습니다.

- 20MW의 최대전압에서의 전기 사용에 관한 비용은 분당 \$16.60 (낮은 전압은 비례적으로 낮은 비용을 사용)
- 최대전압에서의 전극침식에 따른 비용은 분당 \$5.90 (낮은 전압은 비례적으로 낮은 비용을 사용)
- Ar 가스 Nm³당 \$0.60(즉 분당 1.0 Nm³로 1분간 불어줄 경우 비용은 0.60\$)

공정을 끝내기 위해서는 장치를 한번 더 클릭해 주십시오.

8.2.6 Tank degasser 콘트롤 패널 (T 키)

래들 운반차 위에서 가능한 다른 2차 정련 장치와 다르게 래들은 1번 크레인으로부터 Tank degasser 내부로 이동되어야 합니다. 래들을 옮기기 전에 리드를 클릭함으로써 리드를 제거해야 합니다. 래들이 degasser내부에 위치하면, 리드를 다시 한번 클릭함으로써 Tank를 닫아 주십시오. 다이얼로그 박스가 자동적으로 나타나고, 두 개의 슬라이더를 조작함으로써 필요로 하는 진공도와 Ar 가스 유속을 조절할 수 있습니다. Tank degasser와 관련된 비용은 아래와 같습니다.

- 진공, refractory 침식 및 다른 소모품에 관한 비용은 분당 \$10
- Ar 가스 Nm³당 \$0.60(즉 분당 1.0 Nm³로 1분간 불어줄 경우 비용은 0.60\$)

예상되는 온도감소 속도는 분당 1.0°C입니다. 공정을 끝내기 위해서는 장치를 한번 더 클릭해 주십시오.

8.2.7 화학 분석 요구 (R 키)

R키를 누르거나 콘트롤 패널에서 View/Request Analysis를 선택함으로써 언제고 가장 최신의 화학 분석을 할 수 있습니다. 이에 따른 비용은 없습니다.

물론 가장 최근에 분석을 한 이후로 용강의 조성은 변할 수 있습니다. 새로운 분석을 시작하기 위해서는 Get new 버튼을 누르십시오. 분석은 \$40을 소요하며 결과는 나타나기까지 3분의 시뮬레이션 시간을 필요로 합니다. (즉, 시뮬레이션 속도가 8배일 경우, 22초의 실제시간이 소요됩니다.)

샘플이 채취된 시간은 다이얼로그 박스의 상단에 나타납니다. 하지만, 샘플이 채취된 이후 용강의 조성이 변화될 수 있음을 항상 유의해야 합니다.

8.2.8 View event log (E 키)

이벤트 로그는 합금 첨가를 포함한 모든 공정 과정을 시간적으로 기록합니다. 이것은 시뮬레이션 중에 지금까지 무엇을 하였는지 아는데 유용합니다. 또한 로그는 종종 당신이 여러 다른 기준을 왜 통과하거나 실패하였는지에 관한 단서가 되므로, 시뮬레이션의 종료 시 당신의 결과를 분석하는데 유용합니다.

8.2.9 시뮬레이션 재시작 (X 키)

만약 시뮬레이션을 다시 시작하고 싶을 시에는, 이 옵션을 선택하십시오. 선택 시 당신의 결정에 대해서 확인을 물을 것입니다.

8.3 시뮬레이션 결과

어떠한 주형에 래들을 내려놓는 순간, 시뮬레이션은 종료되고 톤당 \$로써 표현되는 총 비용을 포함한 시뮬레이션의 결과가 표현될 것입니다.

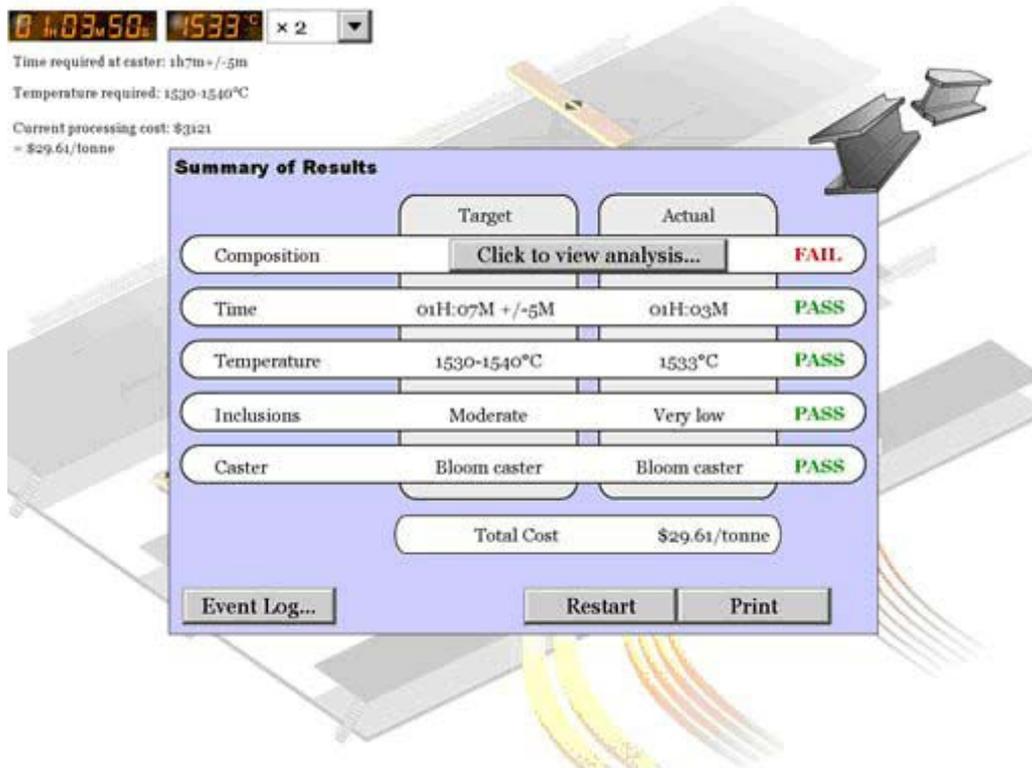


그림 8-3 성공을 위한 5가지 기준을 포함한 최종 결과 화면.
Event log버튼을 누르면 당신의 결과를 분석할 수 있습니다.

9 기반이 되는 과학적 관계

이 섹션은 시뮬레이션을 성공적으로 계산하기 위한 기반이 되는 과학적 이론들과 관계들에 대한 열쇠를 제공합니다. 이 부분은 제강에 대한 이론과 실전의 처리에 대하여 포괄적으로 구성되어 있습니다. 이를 위해 사용자는 다른 훌륭한 출판물의 지도를 받습니다.

9.1 합금 첨가물의 계산

첨가물들은 다양한 이유에 의하여 래들에 첨가됩니다.

- 최종 철강 조성을 맞추기 위하여
- 산소와 반응하여 슬래그에 용해될 산화물을 형성하는 방식으로 탈산을 하기 위하여
- 철강 내에 존재하는 개재물을 변화시키기 위하여

9.1.1 목표 조성을 한 첨가물의 계산

9.1.1.1 원소 첨가

순수 원소가 래들에 첨가되는 가장 간단한 경우의 요구되는 첨가물의 양, m_{additive} 는 간단히 다음과 같이 주어진다.

$$m_{\text{additive}} = \frac{\Delta\%X \times \text{ladle mass}}{100\%}$$

$\Delta\%X$ 는 $w\%X$ 에서 요구되는 증가량(즉, $\%X_{aim}-\%X_{current}$)

예제)

지금 래들에 있는 250,000kg의 용강에 0.01%의 니켈이 있다고 가정하자. 그러면 니켈 조성이 1.0%에 도달하려면 얼마의 니켈이 첨가되어야 할까?

$$m_{\text{첨가량}} = \frac{(1.0 - 0.01)\% \times 250,000\text{kg}}{100\%} = 2,475\text{kg}$$

9.1.1.2 모합금 첨가

많은 경우에 있어서, 첨가물을 만들 때 순수한 원소보다 모합금을 이용하는 것이 실용적이고 경제적이다. (모합금이란 2가지 또는 그 이상의 구성요소로 이루어진 혼합물이다)

이러한 경우, 모합금에서 요구되는 원소의 양이 계산되어야 한다.

“수율 (recovery rate)” – 슬래그에 의해 잃는 것을 제외하고 용강의 조성을 증가시키는 원소의 양 – 이것도 계산에 포함되어야 한다.

$m_{\text{첨가량}} = \frac{100 \times \Delta\%X \times \text{레이들의 질량}}{\text{모합금에서의 } \%X \times X\text{의 수율}}$	9-2
--	-----

예제)

250톤의 용강에 0.12%의 망간이 포함되어 있다. 망간 조성이 1.4%에 도달하기 위해서 얼마의 HCFeMn(high carbon ferromanganese)가 첨가되어야 하는지 계산하라.

표 7-2로부터 HCFeMn은 76.5%의 망간을 함유하고 있는 것을 알 수 있다. 일반적으로 망간의 수율은 95%이다(표 9-3). 위의 값들을 치환하면 다음과 같다.

$$m_{\text{HCFeMn}} = \frac{100\% \times (1.4 - 0.12)\% \times 250,000\text{kg}}{76.5\% \times 95\%} = 4,403\text{kg}$$

9.1.1.3 다른 원소들의 증가량

모합금을 첨가할 때, 전반적인 철의 조성에 있어서 다른 구성 성분의 효과에 대해 아는 것 또한 중요하다. 주어진 원소의 증가량은 9-2 등식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\Delta\%X = \frac{m_{\text{첨가량}} \times \text{모합금에서의 } \%X \times X\text{의 수율}}{100 \times \text{레이들의 질량}}$$
9-3

예제)

앞의 예제에서 탄소의 증가량을 계산하라.

HCFeMn은 6.7%의 탄소를 함유하고 있고 (표 7-2) 수율은 95%이다. (표 7-3)

$$\Delta\%C = \frac{4.403\text{kg} \times 0.7\% \times 95\%}{100\% \times 250,000\text{kg}} = 0.112\%C$$

이러한 탄소의 증가는 어떤 저탄소강이나 극저탄소강에 있어서 위험하다. 이러한 경우, 더 비싼 저탄소 또는 높은 순도의 페로망간 모합금을 사용하는 것이 필요하다.

9.1.1.4 혼합 시간

래들에서 합금 첨가물은 철의 성분 조성을 즉시 변화시키지 않고 용해하기 위해서 일정한 시간이 필요하다.

이 시뮬레이션에서 합금 첨가물을 용해하는데 충분한 시간을 주어야 한다.

- 파우더, 와이어 그리고 미세한 입자 첨가물이 굵은 입자나 막대 모양의 첨가물보다 빨리 용해된다.
- 휘젓는 래들(예를 들어 아르곤 가스 버블링)은 용해과정을 가속시키고, 용강의 성분 조성을 균질화 하는데 있어서 필수적이다.
- 온도가 낮아짐에 따라서 혼합 시간은 증가한다.

높은 온도에서 잘 섞인 파우더 첨가물이 가장 빠르게 용해시킬 수 있다고 예상할 수 있다. 뒤섞임 없이 낮은 온도에서 막대 모양의 첨가물은 용해하는데 많은 시간이 걸리고 주조과정에 도달할 때까지 용강이 균질화 되어지지 않는다.

9.1.1.5 첨가물 생성

래들의 첨가물은 탭, 그리고 각각의 2차 정련 설비에서 만들어진다. (flushing station, degassers, CAS-OB, ladle furnace)

일반적으로 부피가 큰 첨가물은 탭에서 만들어지고 다듬어진 첨가물은 그 다음 단계에서 만들어진다.

극히 중요한 것은 첨가물이 만들어지는 시점이 탈산 전인지 탈산 후인지 이다.

9.1.1.6 첨가물의 냉각 효과

대부분의 래들 첨가물은 철의 온도를 감소시킨다. 이 시뮬레이션에서는 1000kg의 첨가물이 6°C 만큼 온도를 내린다고 가정한다. (실제로는 열용량과 다양한 종류의 용질이 녹아있는 용액의 열에 의존한다)

하나의 중요한 예외는 알루미늄이다. 이는 존재하는 산소(용강 속에 녹아있는 산소나 랜스로부터 주입되는 산소)와 발열 반응하여 용강에 열을 공급한다. 7.2의 "온도" 부분을 보아라.

9.2 탈산

알루미늄은 매우 강력한 탈산 작용제이고 아래의 화학반응을 통해 용강속에서 산소의 액티비티

(activity)를 조절할 수 있다.



평형 상수는 다음과 같다.

$$K_{\text{Al-O}} = \frac{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{a_{\text{O}}^3 \cdot a_{\text{Al}}^2} \quad 9-5$$

$$\log K_{\text{Al-O}} = \frac{62,780}{T[\text{K}]} - 20.5 \quad 9-6$$

등식 9-5를 산소의 액티비티에 관하여 정리하면 다음과 같다.

$$a_{\text{O}} = \sqrt[3]{\frac{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{a_{\text{Al}}^2 \cdot K_{\text{Al-O}}}} \quad 9-7$$

그림 9-1은 세 종류의 다른 온도에서 a_{O} 와 a_{Al} 의 관계를 나타낸다. 이것으로부터 우리는 알루미늄을 이용한 탈산은 낮은 온도에서 더 효과적이라는 것을 알 수 있다.

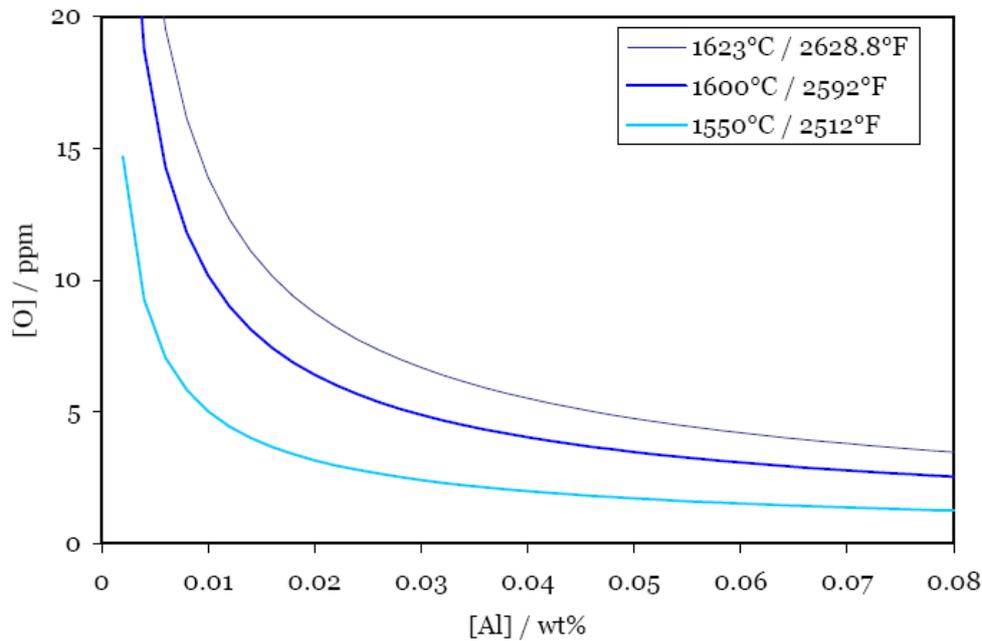


그림 9-1 세 종류의 온도에서 Al-O 평형 곡선

9.2.1 알루미늄 첨가량 계산

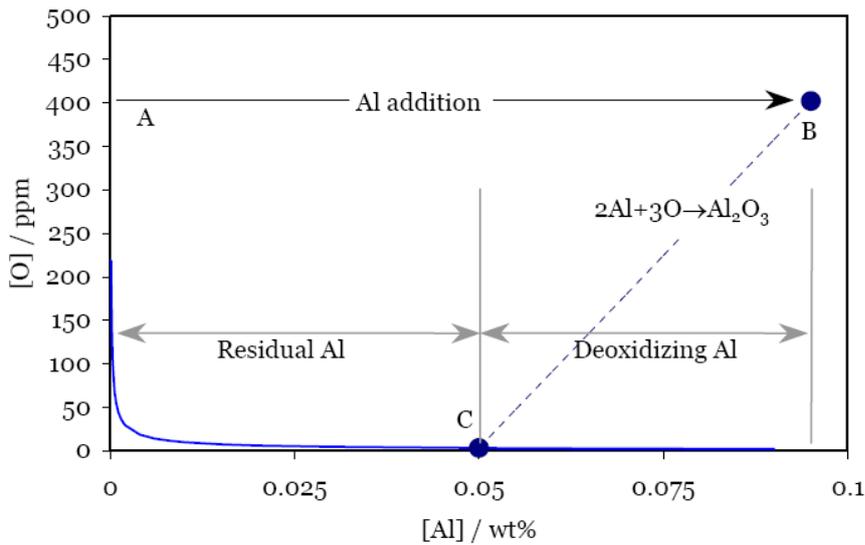


그림 9-2 요구되는 알루미늄 첨가량 계산

시작하는 산소의 조성은 400ppm이고 알루미늄은 존재하지 않는다고 가정하자. 이는 위의 그림에서 점 A로 표현된다.

약 0.095%의 알루미늄의 첨가는 점 B로 표현된다. 이처럼 Al-O 평형 곡선을 따라 알루미늄과 산소가 반응하여 Al_2O_3 가 생성된다. 화학량론을 통하여 2개의 알루미늄 원자(=54 질량 단위)가 3개의 산소 원자(=48 질량 단위)와 반응한다고 생각하면 그것에 의해서 점 C가 평형 조성임을 알 수 있다. 탈산을 위해 요구되는 알루미늄의 무게 백분율은 다음과 같다.

$$\%Al_{deox} \approx \frac{54}{48} [\%O]_{initial} \quad 9-8$$

요구되는 총 알루미늄의 첨가량을 계산할 때, 목표의(또는 잔여의) 알루미늄 조성에 이 값을 더해 주어야만 한다.

예제)

산소 농도 450ppm이 녹아있는 250톤의 용강이 알루미늄을 이용하여 탈산이 이루어진다고 하자. 이 때 알루미늄 수율은 60%이고 목표 알루미늄 조성은 0.04%라고 하면, 요구되는 98% 알루미늄 합금의 양을 계산하라.

$$\begin{aligned} & \text{탈산을 위한 알루미늄(등식 9-8)} && (54/48) \times 0.045\% = 0.051\% \\ & + \text{목표 알루미늄} && = 0.040\% \\ & = \text{총 요구되는 알루미늄의 양} && = 0.091\% \end{aligned}$$

등식 9-2를 이용해서 첨가되는 알루미늄 합금의 양을 계산해보면,

$$m_{Al} = \frac{100\% \times 0.091\% \times 250,000\text{kg}}{98\% \times 60\%} = 386\text{kg}$$

조언 : 탈산 후에 용강이 냉각될 때, 알루미늄-산소의 '용해도' 또한 감소한다는 것을 기억하라. 이 의미는 매우 미세한 Al_2O_3 입자 생성 가능성과 함께 알루미늄과 산소가 계속 반응한다는 것이다. 이들이 위로 떠오르는 시간을 가지지 않는 한, 이들은 최종 생성물에 잡혀 있을 것이다.

Al_2O_3 개재물의 형성과 제거에 관한 더 많은 정보는 9.8 부분의 “Steel Cleaness”에 나와있다.

9.3 탈탄

9.3.1 탈탄과정에서의 열역학

Vacuum degassing 과정에서 용해된 탄소의 제거는 다음 반응식을 통해 일어난다.



그리고 평형 상수는 다음과 같이 표현된다.

$$K_{C-O} = \frac{p_{CO}}{a_C a_O} \quad 9-10$$

낮은 농도 하에서 탄소와 산소의 액티비티는 이들의 농도와 동등하다고 할 수 있다.

$$K_{C-O} = \frac{p_{CO}}{[\%C] \cdot [\%O]} \quad 9-11$$

$$\log K_{C-O} = \frac{1,168}{T[K]} + 2.07 \quad 9-12$$

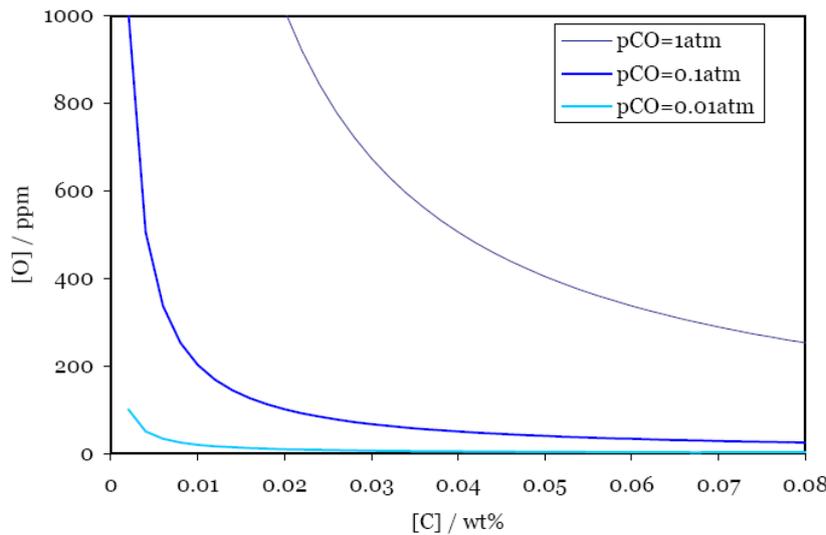


그림 9-3 다른 농도하에서 탄소와 산소 농도의 평형

9.3.2 탈탄과정에서의 동역학

탈탄의 속도는 다음 관계식으로 표현할 수 있다.

$$\ln \left\{ \frac{[\%C]_f - [\%C]_{equ}}{[\%C]_i - [\%C]_{equ}} \right\} = -k_c t \quad 9-13$$

$[\%C]_f$ = t 시간 후에 탄소 농도

$[\%C]_i$ = 초기 탄소 농도

$[\%C]_{equ}$ = 평형 탄소 농도

k_c = 탈탄시 속도 상수, min^{-1}

등식 9-13을 최종 탄소 농도에 관하여 정리하면 다음과 같다

$$[\%C]_f = [\%C]_{\text{equ}} + ([\%C]_i - [\%C]_{\text{equ}}) \exp(-k_c t) \quad 9-14$$

$[\%C]_i$ 와 $[\%C]_f$ 는 탈산 전과 후의 탄소 농도이고 $[\%C]_{\text{equ}}$ 는 평형 탄소 농도이다. 그리고 k_c 는 탈산 과정에서 속도 상수이다. RH degassers에서 속도 상수는 다음과 같은 관계로 표현된다.

$$k_c = \frac{Q}{V_b \rho} \frac{q}{\frac{Q}{\rho} + q} \quad 9-15$$

Q = 용강에서의 순환 속도, kg min^{-1}

V_b = 래들에서 steel bath의 부피, m^3

ρ = 용강의 밀도, $\sim 7200 \text{kg m}^{-3}$

q = 탄산에서의 질량 이동 계수, $\text{m}^3 \text{min}^{-1}$

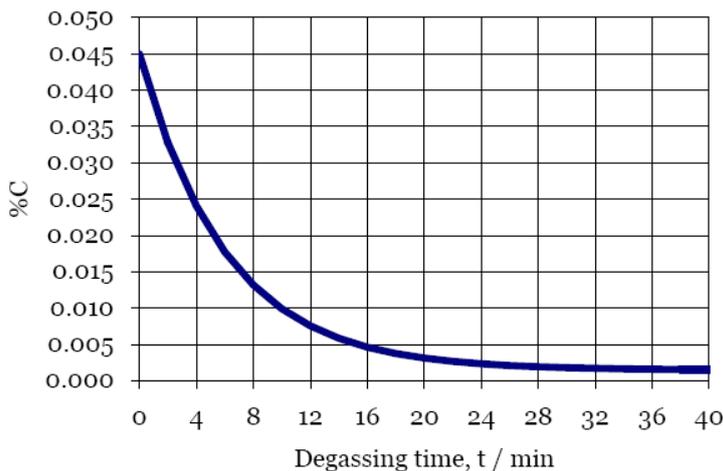
이 시뮬레이션에서 우리는 전형적인 값들을 선택하였다. ($Q = 80,000 \text{kg min}^{-1}$, V_b = 용강의 질량 / 밀도 = $250,000/7,200 = 34.7 \text{m}^3$, $q = 18 \text{min}^{-1}$). 이러한 값들을 앞의 식에 치환하면,

$$K_c = \frac{80,000}{34.7 \times 7,200} \frac{18}{\frac{80,000}{7,200} + 18} = 0.164 \text{min}^{-1}$$

예제)

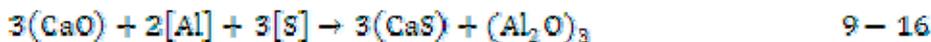
탈산을 통해서 0.045%의 탄소농도를 0.002%로 내리려면 얼마의 시간이 걸리는가? 평형 탄소 농도 $[\%C]_{\text{equ}}$ 는 0.0015로 가정한다.

$$t = -\frac{1}{k_c} \ln \left\{ \frac{[\%C]_f - [\%C]_{\text{equ}}}{[\%C]_i - [\%C]_{\text{equ}}} \right\} = -\frac{1}{0.164} \ln \left\{ \frac{0.002 - 0.0015}{0.045 - 0.0015} \right\} \approx 27 \text{min}$$



9.4 탈황

가스나 석유의 파이프라인 등에서 사용되는 강철은 매우 낮은 농도의 황을 포함하고 있어야 한다. 래들에서 탈황과정은 다음과 같은 반응식에 의해 일어난다.



실제로 다음과 같은 과정에 의해 일어난다.

- Vessel tapping에서 탈황 슬래그를 기초로 한 합성된 CaO을 첨가한다.
- 알루미늄을 이용한 탈산과정은 산소의 액티비티가 매우 낮아질 때 까지 일어난다(다른 말로 알루미늄은 우선적으로 산소와 반응한다)
- Tank degasser에서 용강과 슬래그 완전히 섞어주기 위해서 격렬히 휘저어 준다.

지금부터 이러한 각각의 단계에서의 공정제어를 설명하도록 한다.

9.4.1 탈황 슬래그의 첨가

우리는 시뮬레이션 처음 단계에서 합성된 CaO를 넣을 수 있는 선택을 할 수 있다.

- 첨가되는 슬래그의 질량을 기입한다. 슬래그를 넣으면 넣을수록 더 많은 황을 제거할 수 있으나, 슬래그의 비용이 증가할 것이다.
- CaO와 사이의 비율에 관한 슬래그 조성을 기입한다. 높은 CaO 농도를 가지고 있는 슬래그 일수록 높은 탈황 분율 ()을 가지는 경향이 있고, 따라서 황을 제거하는데 더욱 효과적이다. 그러나, 충분히 높은 온도를 유지하지 않으면, 슬래그가 응고되어지는 위험이 생길 수 있다.

이론적으로 평형 황 농도 ($[\%S]_{\text{equ}}$)는 다음과 같이 나타난다.

$$[\%S]_{\text{equ}} = [\%S]_0 \frac{\frac{1}{L_s} \frac{W_m}{W_s}}{1 + \frac{1}{L_s} \frac{W_m}{W_s}} \quad 9-17$$

$[\%S]_0$ = 초기상태의 황 농도, wt%

L_s = 탈황 분율, (%S)/[%S]

W_s = 슬래그의 무게, kg

W_m = 용강의 무게, kg

어떤 구체적인 황의 농도에 도달하기 위해서 9-17 등식을 슬래그의 양에 관하여 정리해보면 다음과 같다. ($[\%S]_{\text{aim}} = [\%S]_{\text{equ}}$)

$$W_s = \left(\frac{W_m}{L_s} \right) \left(\frac{[\%S]_0 - [\%S]_{\text{aim}}}{[\%S]_{\text{aim}}} \right) \quad 9-18$$

탈황분율은 슬래그 조성, 녹아있는 알루미늄의 양, 온도 등의 복잡한 함수입니다. 확실하게, 슬래그 탈황 비용을 최소화하기 위해서는 높은 탈황분율값이 필요합니다. CaO:Al₂O₃ 비율을 약 1.2 정도 선택하고, 용강을 Al로 완전하게 탈산하고, 탈황온도를 1600 도 이상에서 함으로서 500 이상의 탈황분율을 얻을 수 있습니다.

예제)

Steel 안의 황의 탭 농도가 0.008wt%이고, 탈황분율값이 500 이라고 가정했을 때, 250 톤의 용강 안에 황의 양이 0.002wt%가 되기 위해서 최소한으로 필요한 탈황 슬래그 양은 얼마입니까?

식 9-18 을 이용하면

$$W_s = \left(\frac{250}{500} \right) \left(\frac{0.008\% - 0.002\%}{0.002\%} \right) = 1.5 \text{ tonnes}$$

9.4.2 탈산

Tank degasser 의 교반전에, 용강은 알루미늄으로 완전히 탈산되어야 합니다.(참고, 9.2(Deoxidation))

9.4.3 Tank degasser 안에서의 교반

탈황반응은 액상에서의 물질전달에 의해서 컨트롤됩니다. 빠른 탈황을 이루기 위해서는 용강과 슬래그간의 좋은 교반이 필수적입니다. 이것은 Tank degasser 안에서 높은 수준의 진공하에서 Ar 가스를 불어넣어줌으로써 가능합니다.

Stirring power density, ϵ 는 식 9-26 에서와 같이 Ar 가스 분출속도와 탱크압력의 함수입니다.

탈황속도 상수, k_s 는 낮은 ϵ 값의 예에서는 상당히 천천히 증가되지만, 70 W tonne⁻¹ 이상에서는 급격하게 증가합니다. 이것은 아마도 슬래그와 용강을 서로 유화시키기 위해서는 critical stirring power density 가 필요하다고 설명됩니다. 이번 시뮬레이션에서는 다음과 같이 가정을 합니다.

$$k_s = 0.031\epsilon^{0.25} \quad \text{for } \epsilon < \sim 70 \text{ W tonne}^{-1} \quad \mathbf{9-19}$$

그리고

$$k_s = 8 \times 10^{-6} \epsilon^{2.1} \quad \text{for } \epsilon > \sim 70 \text{ W tonne}^{-1} \quad \mathbf{9-20}$$

$$t = \frac{\ln \left[\frac{[\%S]_t}{[\%S]_0} \left\{ 1 + \frac{1}{L_s} \left(\frac{W_m}{W_s} \right) - \frac{1}{L_s} \left(\frac{W_m}{W_s} \right) \right\} \right]}{-k_s \left[1 + \frac{1}{L_s} \left(\frac{W_m}{W_s} \right) \right]} \quad \mathbf{9-21}$$

예제)

0.01%의 황을 포함하는 250 톤의 용강이 탈황분율 500 을 가진 탈황슬래그 2 톤으로 덮여있다. 탈산 반응 후, 100 W tonne⁻¹ 정도의 를 가진 Ar 를 투입시켰다. 0.003%S 를 달성하기 위해서 필요한 시간을 계산하시오.

먼저, $\epsilon = 100 \text{ W tonne}^{-1}$ 에 해당하는 k_s 값을 식 9-20 을 이용해서 계산한다.

$$k_s = 8 \times 10^{-6} \times 100^{2.1} = 0.127 \text{ min}^{-1}$$

이제 이 값을 식 9-21 에 대입함으로써

$$t = \frac{\ln \left[\frac{[0.003\%]}{[0.010\%]} \left\{ 1 + \frac{1}{500} \left(\frac{250}{2} \right) - \frac{1}{500} \left(\frac{250}{2} \right) \right\} \right]}{-0.127 \left[1 + \frac{1}{500} \left(\frac{250}{2} \right) \right]} \approx 13 \text{ min s}$$

매우 낮은 압력에서의 Ar 가스 버블링은 슬래그 거품을 만들고 래들에서 슬래그가 넘치게 한다. 실제로, 이런 현상을 막기 위해서 진공 레벨과 Ar 가스 속도는 교반중에 정교하게 제어되어야 한다. 따라서 ε 와 k_s 값은 탈황 처리 과정 동안 변동되고, 식 9-21 은 더 이상 정상상태가 아니다.

9.5 수소 제거

9.5.1 열역학

용해 되어진 수소는 2 분자의 H₂ 가스를 형성함으로써 용강에서 제거되어 진다.



여기서

$$\log \frac{[\text{ppm H}]}{(P_{H_2})^{1/2}} = -\frac{1,900}{T} + 2.423 \quad 9-23$$

표 9-1 1600C 에서 용해된 수소와 수소 분압 간의 관계

p_{H_2}	ppm H
1.0	25.6
0.1	8.10
0.01	2.56
0.001	0.81

실제로 현대 degasser 들은 약 0.001 atm 까지 압력을 낮출 수 있다. 따라서 최적의 공정조건에서, 1ppm 이하의 수소레벨의 용강이 만들어질 수 있다.

9.5.2 수소제거의 속도론

확실히, 앞에서 언급한 극저 압력은 용강이 진공에 노출되어 있을 때 오직 용강 표면에서만 달성된다. 래들의 바닥부분은 약 5apm 의 압력이고, 식 9-23 에 의하면 약 1600C 에서 평형 수소 레벨은 57ppm 이다. 따라서 높은 Ar 교반과 접촉된 높은 용강순환속도가 요구된다.

따라서 수소제거의 속도론은 용강의 물질전달에 의해 지배되고, 속도식은 다음과 같다.

$$\ln \left(\frac{[H]_f - [H]_{equ}}{[H]_i - [H]_{equ}} \right) = -k_H t \quad 9-24$$

여기서

$[H]_f$ = the hydrogen concentration in mass ppm after time t

$[H]_i$ = the initial hydrogen concentration, in mass ppm

$[H]_{equ}$ = the equilibrium hydrogen concentration, in mass ppm

k_H = the rate constant for hydrogen removal, min⁻¹

$[H]_f$ = 시간 t 이후의 수소 농도, ppm

$[H]_i$ = 처음의 수소 농도, ppm

$[H]_{equ}$ = 평형 수소 농도, ppm

k_H = 수소제거를 위한 속도상수, min⁻¹

식 9-24 를 최종 수소 농도로 다시 정의하면 다음과 같다.

$$[H]_f = [H]_{equ} + ([H]_i - [H]_{equ}) \exp(-k_H t) \quad 9-25$$

Tank degass 내에서, 속도 상수 k_H 는 Ar 교반 속도에 의해 크게 결정되어진다. 이번 시뮬레이션에서는 다음의 관계식을 가정한다.

Plant	k_H / min^{-1}
Tank degasser	$0.0576\dot{V} + 0.02$ where \dot{V} is the argon gas flow rate, in $\text{N m}^3 \text{min}^{-1}$.
Recirculating degasser	0.13

9.6 래들 교반

Ar 버블링에 의한 용탕안의 온도와 조성의 균일화는 투입가스의 부력 에너지의 소산에 의해 이루어진다. 다음과 같은 식이 교반 파워를 계산하는데 이용된다.

$$\varepsilon = 14.23 \left(\frac{VT}{M} \right) \log \left(\frac{1+H}{1.48P_0} \right) \quad 9-26$$

여기서

ε = 교반파워, W tonne-1

V = 가스 흐름속도, $\text{N m}^3 \text{min}^{-1}$

T = 용탕 온도, K

M = 용탕 무게, tonnes

H = 가스투입 깊이, m

P_0 = 용탕 표면에서의 가스압력(i.e. = 1 atm, 용강이 공기중에 노출되었을때)

9.7 전기적인 재가열

100% 효율성을 가정했을 때, 용탕의 온도를 dT 까지 올리는데 필요한 에너지 E 는 다음과 같다.

$$E = mC_p \Delta T \quad 9-27$$

여기서 m 은 용탕의 무게, C_p 는 등압 열용량이다.

이론적인 온도상승은 다음과 같이 다시 정의 되어진다.

$$\Delta T_{th} = \frac{E}{mC_p} \quad 9-28$$

따라서 이론적인 가열속도는 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\left(\frac{dT}{dt} \right)_{th} = \frac{dE}{dT} \cdot \frac{1}{mC_p} = \frac{P}{mC_p} \quad 9-29$$

여기서 P 는 가열파워이다. 따라서 dt 동안 온도 상승은 다음과 같다.

$$\Delta T_{th} = \frac{P \Delta t}{mC_p} \quad 9-30$$

물론 electrode, 대기 그리고 래들 내화물로의 열손실에 의해서 가열은 100% 효율성을 가지지 않는다. electrode 효율성, η 는 실제가열과 이론적 가열의 비율로 정의된다.

$$\eta = \frac{\Delta T_{act}}{\Delta T_{th}} \quad 9-31$$

$$\Delta T_{act} = \frac{\eta P \Delta t}{m C_p} \quad 9-32$$

필요한 온도상승을 위한 가열시간은 다음과 같이 표현된다..

$$\Delta t = \frac{m C_p \Delta T_{req}}{\eta P} \quad 9-33$$

예제)

열용량, C_p 는 약 $0.22 \text{ kWh tonne}^{-1} \text{ C}^{-1}$ 이다. 만약 래들 아크 퍼니스의 파워, P 가 20 MW 일때, 250 ton 용탕을 15 C 올리는데 필요한 시간을 계산하시오. electrode efficiency 는 55% 로 가정한다.

$$\Delta t = \frac{250 \text{ tonne} \times 0.22 \text{ kWh tonne}^{-1} \text{ C}^{-1} \times 15 \text{ C}}{0.55 \times 20,000 \text{ kW}} = 0.075 \text{ h} = 4.5 \text{ min}$$

9.8 Steel cleanness

섹션 9.2 는 어떻게 알루미늄 탈산이 용강 안에서 Al_2O_3 입자를 생성하는지 보여준다. 만약 이것들이 주조 전에 슬래그 안으로 떠오르지 않으면, 이 입자들은 최종 제품 안에서 개재물로 존재한다. 많은 경우, 적당량의 Al_2O_3 개재물은 물성에 심각한 영향을 주지는 않는다. 하지만 오일과 가스를 전달하기 위한 라인파이프와 같은 경우 고정정강이 요구된다. 즉 매우 낮은 수준의 산화물과 황화물 개재물이 요구되는데 이것은 크랙 발생의 초기부분으로 작용한다. 산화물과 황화물의 생성과 2 차정련 중에서 개재물 제거를 위한 화학이론은 매우 복잡하고 현재도 진행중인 연구이다. 따라서 종합적인 개재물 처리는 이번 시뮬레이션 범위 밖에 있다. 하지만 Al_2O_3 형성에서의 탈산의 영향을 고려해야 하고, Al_2O_3 입자가 떠오르는데 필요한 충분한 시간을 허락해야 한다. 이 공정은 래들의 정적인 교반에 의해서 가속화 될 수 있다. 알루미늄 탈산동안, Al_2O_3 입자는 식 9-4 에 의해서 형성된다. 평균 입자 반경(그리고 입자상승속도)는 초기 산소 농도에 의해서 지배를 받는다.

- 높은 초기 용해 산소 농도(약 200 ppm , 또는 0.02% 이상)에서는 큰 Al_2O_3 입자가 형성되고, Stokes' law(아래참조)에 의해서 슬래그 표면으로 빠르게 떠오른다.
- 낮은 초기 용해 산소 농도는 작은 Al_2O_3 입자를 만들고 입자를 떠오르게 하는데 많은 시간을 필요로 한다.

Stokes law 는 다음과 같이 구입자(혹은 버블) 상승의 종단속도, u 가 입자의 반지름의 제곱에 비례한다고 서술한다.

$$u = \frac{g d^2 \Delta \rho}{18 \eta} \quad 9-34$$

여기서

$$g = 9.82 \text{ ms}^{-2}$$

$\Delta \rho$ = 입자와 용강간의 밀도차이

η = 용강의 점성도($\sim 6.1 \times 10^{-3} \text{ N s M}^{-2}$ at 1600 C)

이번 시뮬레이션에서 유저는 한번 투입으로 탄산을 위한 정확한 Al 양을 계산하는 것이 요구된다. 만약 유저가 추가적인 Al 투입을 해야 하는 경우, 낮은 산소 분압은 매우 작은 Al₂O₃ 입자를 형성하게 되고, 용강에서 제거를 어렵게 한다. 유저는 선택된 용강 조성 grade 에 따라서 moderate, low 혹은 very low 레벨의 개재물을 목표로 하게 된다.

표 9-2 매우 낮은 레벨의 개재물을 달성하기 위한 초기 용해 산소량과 교반의 영향. 낮은 레벨을 위해서는 시간이 약 20% 줄어들고, 중간레벨은 약 40% 줄어든다.

Initial dissolved O / ppm	No stirring	Stirring
600	14 min	5 min
100	47 min	15 min
30	108 min	36 min

10. 참고문헌

- AISE, *The Making, Shaping and Treating of Steel, Steelmaking and Refining Volume*, AISE, 1998, ISBN 0-930767-02-0.
- Turkdogan, ET, *Fundamentals of Steelmaking*, The Institute of Materials, 1996, ISBN 1 86125 004 5.