전기로 Simulation User Manual

1 전기로 소개

1.1 기본 개념

오늘날 전기로는 스크랩으로 강을 다시 만드는 가장 일반적인 방법이다. 성분(일반 Carbon steel에서 고합금 공구용강까지)이나 형상(미세한 sheet에서 커다란 빔까지)측면에서 다양한 철 스크랩이 있다. 전극과 전류를 이용해 로내에서 스크랩을 녹여 낡은 제품에서 새로운 실용적인 강이 만들어 질 수 있다. 원료를 사용하는 대신에 기본적인 철과 중요한 합금을 재활용할 수 있으므로, 경제적 환경적인 면에서 도움이 된다.

1.2 Heating과 Melting

스크랩을 녹이는 필요한 열은 로내에서 전극과 스크랩 사이에 전기아크에 의해 발생한다. 보통 전기로 전력은 로의 크기에 따라 50 ~ 120MW 범위에 있다. 스크랩의 용해는 스크랩 성분에 따라 1500 ~ 1550℃ 범위이다.

스크랩이 녹고 나면 온도가 상승해 정련반응이 수행된다. 산소와 탄소가 철과 슬라그상으로 각각 주입되게 된다. 그러나, 반응은 또한 강의 품질에 치명적인 것을 만들 수도 있으므로 조심스럽게 다뤄져야 한다. 그러기 위해, 슬라그가 석회, 돌로마이트, 형석과 같은 Slag forming agents의 도움으로 형성된다. 강보다 밀도가 낮은 슬라그는 보통 용강 상부로 떠오른다. 용강에서 불순물을 흡수할 뿐 아니라 슬라그는 대기로부터 강을 보호한다. 게다가 아크로부터 로벽을 보호하며 전기효율을 높인다. 그러므로 고품질의 슬라그를 가지고 Foaming 특성을 갖도록 하는 것이 아주 중요하다.
일단 스크랩을 녹여 원하는 성분 및 온도로 정련하게 되면, 내용물은 2차 정련과 주조를 위해 Ladle에 부어진다(tapping). Tapping은 spout를 통해서나 로 하부에 있는 taphole을 통해 이뤄진다.

1.3 다른 고려사항

겉으로 보기에 전기로의 기본 과정은 아주 수월해 보인다 – 단순히 스크랩에 열을 가해 녹이기에 충분한 전기에너지를 공급해 주는 것. 그러나 전체 공정은 로 정비와 문제발생시 조치를 복잡하게 만드는 아주 높은 온도에서 일어난다. 예를 들자면 Vessel에 있는 내화물 lining을 보전하기 위해 수냉 파넬이 로벽체에 설치되어 있다. 주의해서 제어하지 않으면, 이것들은 과열이 되고 프로세스 온도가 조정되어야 한다. 전체 프로세스 진행 중에 전력공급을 최대한 이용하기 위해 전기 입력이 균형이 맞아야 하는데, 이는 작업자에 의해 제어된다.

전극은 제한된 기계적 인성으로 조심해서 다뤄야 한다. 로내에 과도하게 많은 Coarse Scrap으로 차 있으면 값비싼 절손을 방지하기 위해 전극을 서서히 조심해서 내려야 한다.

전극은 점차적으로 가열 및 용해 작업 중에 마모되므로 '짧은 전극'이 되지 않도록 해야 한다.

이런 것들은 전기로 과정 중에 발생할 수 있는 많은 Event중의 일부 예를 든 것이다. 그러나 본 Simulation에서는 전기로 Simulation을 관심을 끌로 재미있도록 하기 위해 일부 측면에서는 단순화해야만 했다.

2 Simulation 목적

Simulation 목적은 선택한 강종의 목표성분을 얻기 위해 전기로에서 스크랩을 고르고 녹여 주어진 시간과 온도범위 내에서 Ladle에 넣는 것이다.
전체 작업 Cost를 최소화해야 한다.

3 Simulation 선택

3.1 Simulation Speed

Simulation은 x1과 x32 사이의 speed 범위에서 행해질 수 있다. 속도는 Simulation중에 언제라도 변경할 수 있다. Simulation speed를 올리는 것이 어떤 과정에서는 편리할 수 있다. 그러나 어떤 작업은 조심스럽게 모니터링 할 필요가 있어 주의해서 이런 점들을 이용할 것을 권한다.

3.2 목표강종

Simulation에서는 4개의 다른 강종을 생산할 수 있다.

Construction steel 강종은 상대적으로 손쉬운 강종으로 최소의 프로세스가 요구되므로 초보자들용이다. 주로 할 일은 합금 첨가물의 올바른 Level을 확인하는 것이다.

자동차 Body parts용 Ti Nb ultra-low carbon steel은 성형성을 극대화하기 위해 탄소를 0.0035% 이하여야 한다. 그러므로 먼저 해야 할 일은 이것은 다음 2차 정련에서 제거되어야 하기 때문에 탄소가 상대적으로 적게 들어있는 원료를 선택하는 것이다.

가스 보급용 Line pipe steel은 고강도 및 높은 파괴인성을 얻기 위해 불순물의(S,P,H,O,N) 극저관리가 요구되므로 매우 어려운 강종이다. 좀더 경험이 있는 사용자들이 이 강종을 시도해 볼 것을 권한다.

Engineering steel은 heat-treatable 저합금강이다. 이는 상당량의 Cr과 Mo 첨가물이 있다.

본 Simulation에서 서로 다른 강종에 대한 목표성분은 2차처리 전에 필요한 요구사항에 해당한다. 이들 값은 주조 전 강의 최종성분에 해당하지 않는다.

<Table 4-1> Simulation에서 사용하는 4개 강종의 목표성분

	Construction steel		TiNb ULC steel		Linepipe steel		Engineering steel	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
C	0.10	0.130	0.05	0.10	0.040	0.060	0.30	0.45
Si	0.10	0.50	0.15	0.50	0.10	0.30		0.50
Mn	1.00	1.50	0.65	1.20	0.90	1.30	0.60	1.20
P		0.025	0.055	0.075		0.008		0.035
S		0.10		0.050		0.010		0.080
Cr		0.10		0.050		0.060		1.2
Al				0.055		0.035		0.030
B		0.0005		0.005		0.005		0.005
Cu		0.15		0.080		0.060		0.35
Ni		0.15		0.080		0.050		0.30
Nb		0.050		0.030		0.018		
Ti		0.010		0.035		0.010		
V		0.010				0.010		0.010
Mo		0.040		0.010		0.010		0.30

4 Schedule 작성

Simulation을 시작하기 전에, 미리 계획을 세우는 것이 중요하다. 준비가 잘 될수록, simulation을 수행했을 때 더 나은 결과를 얻을 수 있다. 전기로 Simulation은 3개의 Visual 단계로 구성되어 있다. 처음 두 단계에서 선택한 강종을 만들기 위한 재료를 준비하고 세 번째 단계에서 로내에서 재료를 녹여 목표조건으로 제련한다.

4.1 강종을 선택하고 목표성분에 적당한 스크랩 재료를 선택

4.2 선택한 재료를 Basket에 담는다

4.3 전기로에서 넣고 녹인 후 정련한다.

- 스크랩을 로내에 넣는다.
- 스크랩에 열을 가해 녹인다.
- 합금 첨가물과 Slag 형성제를 넣는다
- Slag를 만들기 위해 탄소와 산소를 주입한다
- 운전설비 제어
- Tapping

5 스크랩 준비

5.1 스크랩 선택

Simulation을 시작할 때, 10 종류의 스크랩 재료가 제공된다. 이것들은 US 기준에 따라 명명된다. 스크랩 분류에 대한 국제적인 기준이 없다. 각각의 재료는 성분, bulk density, form and cost 등의 특성을 가지고 있다. Simulation에서 실제성분은 재료 중 각 원소의 ±5% 정도 변한다.

주의: 어떤 스크랩의 평균탄소함량이 0.1%라면, 실제 함유량은 0.095에서 0.105%일 것이다.

이는 용융된 혼합재료의 실제성분은 처음 단계부터 계산된 성분과 약간 다를 것이라는 것이다.

표6-1은 첫 번째 준비단계에서 제공되는 재료 List를 담고 있다.

<표6-1>스크랩 재료

Scrap Material	Average Composition / wt-%	Bulk Density / kg m^{-3}	Form*	Cost / tonne
No1 Heavy	0.025 %C, 0.017 %Si, 0.025 %P, 0.033 %S, 0.2 %Cr, 0.15 %Ni, 0.03 %Mo +Fe bal.	0.85	CS	$160
No2 Heavy	0.03 %C, 0.022 %Si, 0.028 %P, 0.035 %S, 0.26 %Cr, 0.18 %Ni, 0.03 %Mo +Fe bal.	0.75	CS	$140
Internal Low Alloyed	0.17 %C, 0.04 %Si, 0.31 %Mn, 0.013 %P, 0.0014 %S, 0.26 %Cr, 0.4 %Ni, 0.001 %Nb, 0.015 %Ti, 0.005 %V, 0.14 %Mo +Fe bal.	3.0	CS	$240
Plate and Structural	0.25 %C, 0.25 %Si, 1.0 %Mn, 0.025 %P, 0.025 %S, 0.15 %Cr, 0.05 %Mo, 0.15 %Ni, 0.22 %Sn	2.0	CS	$290
Internal Stainless Steel	0.015 %C, 0.33 %Si, 1.64 %Mn, 0.014 %P, 0.002 %S, 18.32 %Cr, 8.08 %Ni, 0.01 %Nb, 0.004 %Ti, 0.01 %V, 1.3 %Mo, 0.16 %N +Fe bal.	3.0	CS	$330
No1 Bundles	0.027 %C, 0.012 %Si, 0.12 %Mn, 0.01 %P, 0.006 %S, 0.032 %Cr, 0.02 %Ni, 0.001 %Ti +Fe bal.	1.2	FS	$180
No2 Bundles	0.04 %C, 0.016 %Si, 0.12 %Mn, 0.014 %P, 0.008 %S, 0.04 %Cr, 0.03 %Ni, 0.0014 %Ti +Fe bal.	1.1	FS	$170
Direct Reduced Iron (DRI)	2.4 %C, 0.1 %P, 0.01 %S, 0.02 %Ti, 0.03 %Nb, 0.02 % +Fe bal.	1.65	FS	$220
Shredded	0.03 %C, 0.015 %Si, 0.02 %P, 0.03 %S, 0.12 %Cr, 0.1 %Ni, 0.02 %Mo +Fe bal.	1.5	VFS	$200
No1 Busheling	0.03 %C, 0.01 %Si, 0.02 %P, 0.02 %S, 0.08 %Cr, 0.06 %Ni, 0.01 %Mo +Fe bal.	1.5	VFS	$210

* CS = Coarse Scrap, FS = Fine Scrap, VFS = Very fine Scrap

표6-1에 제시된 정보를 가지고, 혼합 재료를 모을 수 있고 선택한 강종의 목표성분에 가까워진다. 정확하게 성분을 맞추는 것은 어렵고 불가능하다. 대략적으로 맞춰도 되고 부족한 성분은 이어지는 단계인 다음 Simulation에서 추가될 수 있다.

목표중량은 steel 약 100톤이다. 재료를 선택할 때 로 capacity 제한이 있으므로 중량 및 부피 범위 내에서 이뤄져야 한다.

- 스크랩 중량한계 = 90톤 (나머지 약 10톤의 capacity는 프로세스 진행 중에 첨부물이 추가될 경우에 필요하다.)
- 스크랩 부피한계 = 약 100m3. 실제한계는 사용되는 여러 스크랩의 bulk density와 Basket에 넣을 때 담는 방식에 따라 다르다.

스크랩 재질은 bulk density에 따라 다르며 고려되어야 한다는 점에 주의한다. 'Internal Low Alloyed'와 같은 재질은 좀더 조밀하게 채워져 있어 더 높은 bulk density를 가지고 있어 주어진 중량에 대해 낮은 부피를 갖는다. 'Shredded 스크랩'과 같이 많은 공극과 낮은 bulk density를 가지는 재질은 더 많은 부피를 차지한다.

재료를 선택할 때, 현재 혼합상태의 Cost가 주어진다. 하지만, 실제 cost는 주로 이어지는 단계에서 basket에 얼마나 많은 양이 실려져 있는 가에 달려있다.

Simulation의 목표를 만족하고 생산하기로 한 강종을 만드는데 성공하는 단 하나의 길만 있는 것이 아니라는 점을 기억해라. 프로세스 경로는 무수히 많아서 Simulation 마지막 목표를 향한 개개인의 경로를 찾을 수 있는 넓은 범위의 기회를 제공한다.

원재료 선택이 완료되었을 때, 'Next' 버튼을 눌러 '스크랩 야드'로 이동한다.

5.1.1 User Interface

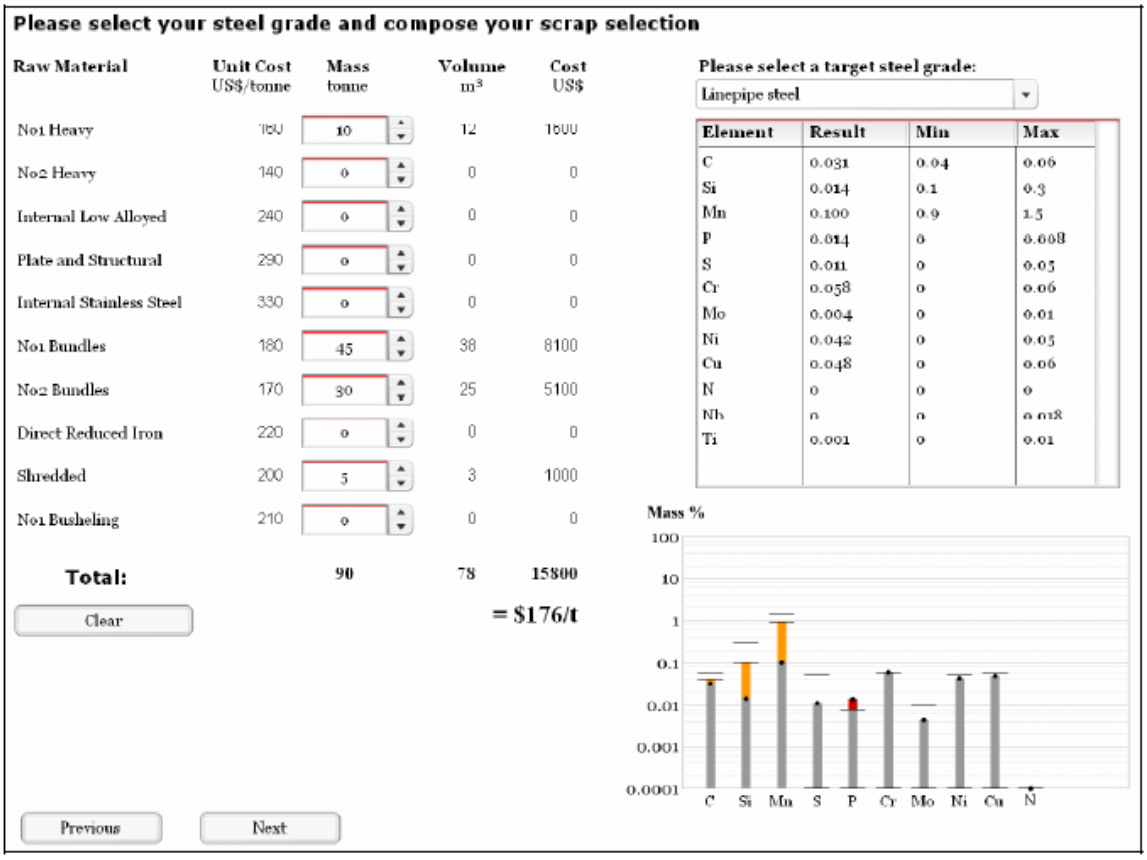
예제에서는 사용자가 'construction steel'을 선택했다. 표에서 계산된 혼합 스크랩의 각 원소의 분율과 함께 각 원소의 목표치가 표시된다. Bar Chart는 누적된 성분을 시각적으로 보여준다. 오렌지와 붉은색 Bar는 특정 원소가 부족하거나 과도한 것을 각각 나타낸다. Y축은 로그 스케일이며 강에서 가장 일반적인 원소를 표시한다.

<예제>

아주 정밀하게 성분을 맞추는 것은 어려울 것이다. 그림 6-1에서 Line pipe steel을 만들기 위한 성분을 얻기 위해 재료가 선택되었다. No.1 Heavy 10톤, No 1 Bundles 45톤, No2 Bundle 30톤, Shredded Scrap 5톤이 선택되었다. 총 선택된 중량은 90톤이고 허용되는 최대중량이다.

예상 강 성분을 보여주는 Bar Chart가 Si와 Mn 성분이 최소 목표치에 미달되어서(오렌지 Bar) 이 두 가지 성분이 프로세스 중에 조정될 것이다. 역으로 인(P) 함량은 너무 높아(붉은색 Bar) 서 탈인 작업이 목표성분을 얻기 위해 수행될 필요가 있다.

<그림6-1> 스크랩 선택화면. Line pipe steel용 재료가 선택되었다.



5.2 Basket에 스크랩 담기

스크랩을 선택하고 다음 단계로 넘어간 후에, 해야 할 일은 스크랩을 주어진 3개의 Basket에 넣는 일이다. 다음에 주의한다.

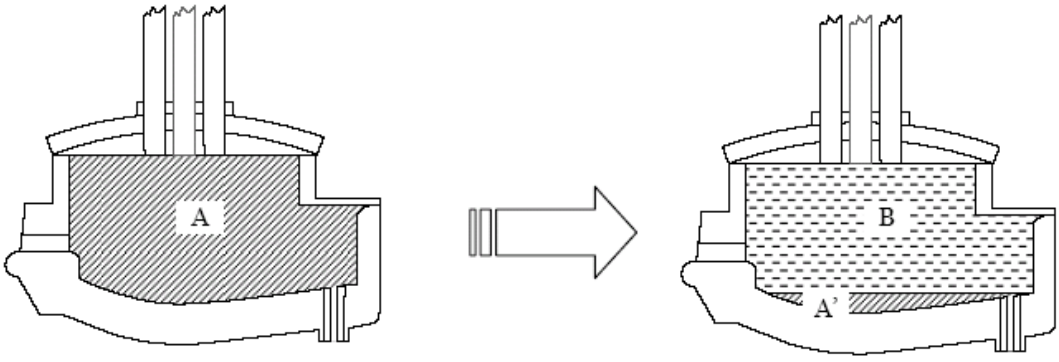
- 로 체적 : 40 m3
- 각 Basket의 내용물은 로 capacity를 최대로 활용하기 위해 하나씩 순서대로 녹여야 한다.

첫 번째 스크랩 Basket의 체적범위는 로의 체적범위로 정해진다(그림6-2의 A). 용강의 밀도는 스크랩 bulk density보다 훨씬 크기 때문에 첫 번째 basket 내용물의 부피는 녹은 후에 상당히 줄어들어 두 번째, 세 번째 basket에서 스크랩을 더 받을 공간이 남게 된다. 일부 로 체적은 첫 번째 basket의 스크랩이 녹아 차지하고 있기 때문에, 2 & 3번 Basket의 체적범위는 로의 net capacity에 의해 정해진다. 즉,[A-A'=B]

재료를 로에 이송하기 위해 얼마나 많은 basket을 사용할 것인지(1 ~ 3 사이) 그리고 어떤 순서로 서로 다른 스크랩을 basket에 담을 것인지는 전적으로 당신에게 달려 있다.

TIP: Coarse 스크랩을 하나의 basket에 과도하게 넣는 것은 전극 절손 가능성이 커지므로 피하시오. 각 basket에 많아도 전체 중량의 30%만 coarse 스크랩으로 구성할 것을 추천한다. 필요하다면, coarse 스크랩을 세 개의 basket에 나누어 넣는다.

<그림6-2> 체적 A가 용해 중에 감소하여, B라는 공간을 생기게 된다.



5.2.1 User Interface

스크랩 basket에는 다음과 같은 순서로 넣는다.

- 스크랩 type을 선택하기 위해 Bin을 클릭한다.
- 디폴트로 재료는 화살표가 가리키는 대로 첫 번째 basket에 넣어진다.
- 이송되는 스크랩 양을 늘이거나 줄이기 위해 'Transfer mass'를 사용한다.
- 재료를 바꾸기 위해서는 다른 스크랩 Bin을 클릭한다. 비어진 스크랩 Bin은 비활성화 된다.

  주의: 일단 스크랩 type을 변경하면, 되돌아가 basket에서 이전의 내용물을 제거할 수 없다.
- Basket에 너무 많이 담게 되면 경고표시를 하게 된다.
- 첫 번째 basket에 담았으면, 두 번째 basket을 클릭하여 계속한다.

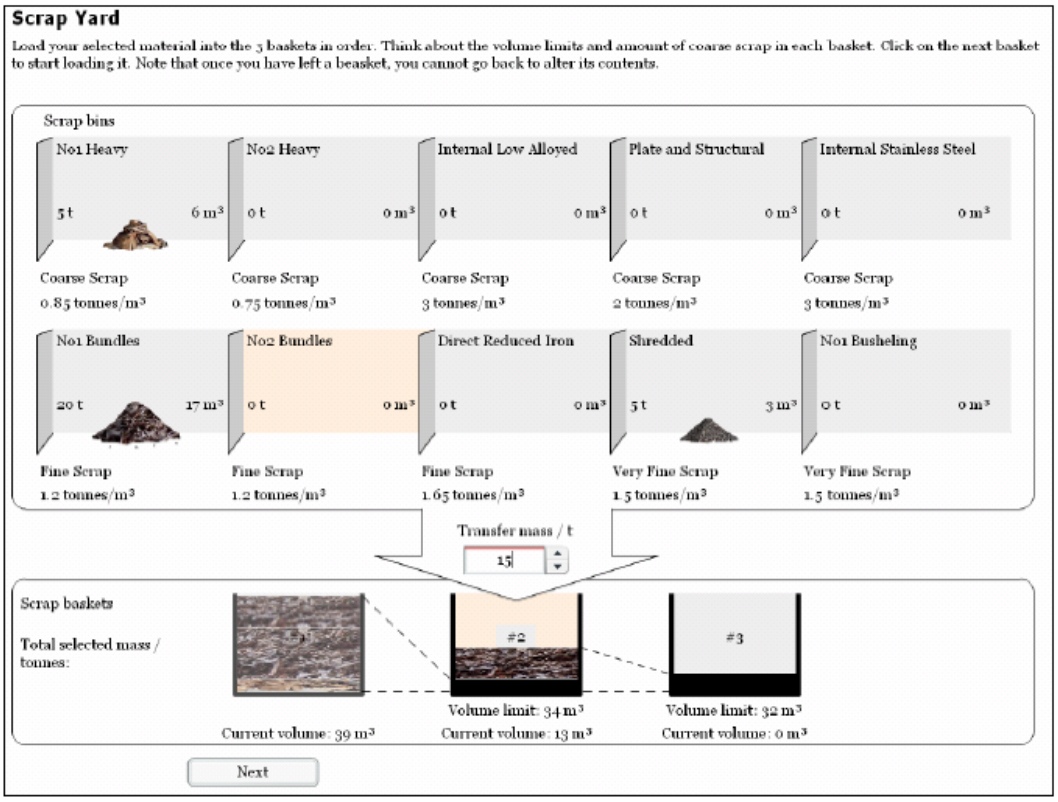
주의: Basket을 일단 바꾸면, 되돌아가서 이전 basket의 내용물을 변경할 수 없다.

■ Basket에 담는 것을 완료하면 'next' 버튼을 클릭한다.

<예제>

스크랩 야드에 사용할 수 있는 세 개의 basket이 있다. 각 basket은 40m3의 체적을 가지고 있다. 이전 Example(예)에 이어서, 그림6-3에 Line pipe steel을 만들기 위해 선택된 스크랩이 Basket에 부분적으로 담겨져 있는 것을 보여준다. 첫 번째 Basket은 스크랩으로 가득 차 있고 두 번째 basket은 지금 선택되고 있다. 사용자가 No2 Bundle에서 15Ton을 두 번째 basket에 막 담았다. #2,#3 basket의 검은색 부분은 이전 basket 스크랩이 녹았을 때의 체적을 나타낸다.

<그림6.3 스크랩 야드 화면 예>



6 전기로 운전

이제 전기로까지 왔다. 소개에서 언급한 대로, slag는 중요한 역할을 한다. 그러므로 slag forming agents를 지금 단계에서 첨가해야 한다. 이제 basket은 하나씩 전기로에 비워져 선택된 스크랩을 녹일 수 있다.

6.1 전기로 Loading

크레인으로 basket을 들어 전기로로 이송한다. 먼저 cover를 열어 두도록 한다. Basket이 전기로 상부에 위치하면 basket에 있는 아이콘을 클릭하여 전기로에 내용물을 떨어뜨린다. 크레인과 basket을 제거하고 cover를 닫는다. 다른 basket에서도 동일한 순서로 진행한다.

6.2 전극

전력은 세 개의 전극에 분배되어 스크랩과 전극 사이에 아크를 발생시켜 스크랩을 녹인다. 전원을 켜게 되면 전극은 각각 다른 비율로 점차 마모되어 소모된다. 세 개의 전극이 재료와 접촉할 수 있도록 전극 위치를 조정하여 에너지가 효율적으로 전달될 수 있도록 한다.

전극은 깨지기 쉬운 특성이 있고 개당 $200의 비용이 드는 소모품이다. 전극이 소손될 경우에 전체 cost에 포함되게 되는 점에 주의한다.

TIP: Coarse 스크랩을 하나의 basket에 과도하게 넣는 것은 전극 절손 가능성이 커지므로 피하시오. 각 basket에 많아도 전체 중량의 30%만 coarse 스크랩으로 구성할 것을 추천한다. 필요하다면 coarse 스크랩을 세 개의 basket에 나누어 넣는다.

6.3 Power Tap Setting

전력 setting용 4개의 tap이 있다.

<표 7-1 Tap setting과 각 power level>

Tap setting	Power level
0	0 MW
1	75 MW
2	90 MW
3	105 MW
4	120 MW

요구되는 power에 따라 가열 및 용해 중 각각 선택할 수 있다. 전력비용은 $0.57/Kwh이다. 용해가 완료되면 바로 성분분석용 샘플을 채취하는 편이 좋다. 분석결과로 다음에 합금 첨가, oxygen blowing 계속 여부 등을 결정할 수 있다.

6.4 Water Cooling Panels

가열 중 온도가 점차로 올라가면서 전기로는 굉장한 열에 노출된다. 벽체와 바닥은 특히 overheating의 위험이 커 water cooling panel이 설치되어 있다. 그렇다고 해도 cooling panel의 성능은 아주 높은 온도에서는 제한될 수 있다. 요구하는 강종의 목표조건을 만족하면서 로에 대해 견딜 만한 작업조건을 만들어 주는 것도 중요하다. (즉, tap setting 변경)

Water cooling panel 온도에 대한 정보는 색깔로 알 수 있다.

- 전체 섹션 녹색, T_{water} < 75℃
- 한 개의 오렌지 섹션, T_{water} = 75-90℃
- 한 개의 적색 섹션, T_{water} = 90-105℃
- 전체 섹션 적색, T_{water} > 105℃

NOTE: 온도가 110℃를 넘으면 전력은 자동으로 꺼진다. 온도가 80℃로 낮아지기 전에는 전원을 다시 켤 수 없다

6.5 Additions

용해 및 정련 과정 중 합금원소 함유량을 늘이거나, 탈산, 탈황이나 Slag 질량을 늘이기 위해

재료를 첨가할 수 있다. 첨가물의 전체 리스트는 표7-2에서 볼 수 있다.
어떻게 정확하게 합금량을 계산하는 가에 대해서는 8-3장을 보시오

<표7-2 용해 및 정련 중 사용 가능한 첨가물 리스트>

Additives	Composition	Bulk Density / tonnes m^{-3}	Form	Cost / tonne
Al	99.15 %Al, 0,82 %Fe, 0.03 %Cu	2.4	Pebbles	$1400
Carbon	99.9 %C, 0.011 %S	1	Powder	$280
Cr-carbure	7.82 %C, 0.23 %Si, 0.021 %P, 0.051 %S, 70.11 %Cr, 0.0092 %Ti	3.5	Pebbles	$590
Cr-carbure (low S)	8.12 %C, 0.34 %Si, 0.017 %P, 0.024 %S, 69.92 %Cr	3.5	Pebbles	$660
Dolomite	38.5 %MgO, 2 %SiO_2, 0.005 %P, 0.15 %S + CaO bal.	1	Powder	$120
EAF dust	20.03 %Cr, 11.2 %Ni, 4.44 %Mn, 0.91 %Si, 0.019 %P, 0.003 %Ti, 0.001 %S + Fe bal.	0.9	Powder	$-120
FeMn, HC	76.5 %Mn, 6.7 %C, 1.0 %Si, 0.03 %S, 0.3 %P + Fe bal.	4.0	Pebbles	$350
FeMn, LC	81.5 %Mn, 0.85 %C, 0.5 %Si, 0.1 %S, 0.25 %P + Fe bal.	4.0	Pebbles	$600
FeMo	0.044 %C, 0.14 %Si, 0.044 %P, 0.092 %S, 62.02 %Mo + Fe bal.	6	Pebbles	$16800
FeSi75	0.08 %C, 60.3 %Si, 0.014 %P, 0.002 %S, 1.23 %Al, 0.05 %Ti + Fe bal.	2.5	Pebbles	$700
FeSi75 (low Ti)	0.008 %C, 75.6 %Si, 0.003 %P, 0.024 %Al, 0.014 %Ti + Fe bal.	2.5	Pebbles	$840
FeV	0.25 %C, 0.72 %Si, 0,031 %P, 0.081 %S, 1.23 %Al, 78.82 %V + Fe bal.	3.5	Pebbles	$8400
Fluorspar	20 %CaO, 20 %MgO, 20 %SiO_2, 0.001 %P, 0.06 %S + CaF_2 bal.	1	Powder	$180
Iron Oxide	0.3 %AL_2O_3, 0.5 %CaO, 0.1 %MgO, 0.001 %P + FeO bal.	1.8	Powder	$140
Lime	1.2 %Al_2O_3, 1.8 %MgO, 2.1 %SiO_2, 0.01 %P, 0.01 %S + CaO bal.	1	Powder	$120
Mill scale	0.65 %C, 0.4 %Si, 0.61 %Mn, 0.019 %P, 0.002 %S, 0.2 %Cr, 0.25 %Ni, 0.05 %V, 0.1 %Mo + Fe bal.	1.6	Powder	$0
SiC	30 %C, 70 %Si	1.5	Pebbles	$610
SiCr	1.82 %C, 25.33 %Si, 0.014 %P, 0.015 %S, 38.23 %Cr + Fe bal.	3.5	Pebbles	$940
Turnings	0.03 %P, 0.113 %S, 0.698 %Cr, 0.538 %Mo + Fe bal.	1	VFS	$110

6.6 용해 및 정련

6.6.1 Slag 형성 첨가물

점성, 황 용량, 인 용량 등과 같은 Slag 특성은 성분과 온도에 따라 다르다. 시뮬레이션에서 주된 임무중의 하나가 석회석이나 돌로마이트와/혹은 형석과 같은 Slag 형성제를 첨가하여 Slag 특성을 유지하는 것이다. Slag가 되는 금속산화물 중 일부는 산성을 띠고 있어 염기성 Slag 형성제를 첨가하여 Slag의 염기도를 적정한 레벨로 유지한다. 높은 Slag 염기도(즉, 높은 석회석-실리카비)는 인을 제거하는데 유익하지만 석회석으로 Slag가 포화되지 않도록 주의해야 한다. 왜냐하면 Slag 점성을 높여 Slag 효율을 떨어지게 만들기 때문이다.

TIP: Slag 염기도가 1.2 ~ 2.5일 때 Slag foaming을 돕고 탈황하기에 좋은 특성을 제공한다

6.6.2 탄소와 산소 주입

원료를 녹이는 중 혹은 후에, 일부 화합물과 원소가 서로 반응하기 시작한다. 강 중의 각 원소

의 목표량에 도달하기 위해 랜스를 통해 steel phase에 산소를 주입하여 반응 프로세스를 용이하게 할 수 있다.

산화반응 중 하나는 일산화탄소(CO)를 생성하는데 이것은 Slag 형성에 매우 중요하다. 랜스로 Slag phase에 탄소를 주입하여 산소와의 반응을 통해 CO Bubble을 만든다. 이 Bubble은 Slag를 foam이 되도록 돕는다. Foam 형태의 Slag는 용강이 대기와 반응하는 것을 막고 전극에서 발생하는 아크를 숨기게 되어 전기효율을 높인다. 또한 열효율을 높이고 전기로가 더 높은 온도에서도 로벽이나 Roof에 손상을 주지 않으면서 조업할 수 있도록 한다. 아크를 숨기게 되므로서 질소가 아크에 노출되지 않도록 한다. 노출되면 해리되어 강중에 들어가게 된다.

- 가능한 탄소유량: 50 ~ 150 kg/min
- Cost: $0.28/kg
- 가능한 산소유량: 100 ~ 150 Nm3/min
- Cost: $0.10/Nm3

6.6.3 탈인 및 탈황

안타깝게도, 탈인에 유리한 조건은 탈황에 불리한 조건이 된다. 그러므로 비록 이 원소들이 Slag phase로 옮겨진 후에도 강중으로 되돌아갈 수 있다.

<인>

Slag내에 인 함유량은 용강의 온도와 용강 중 산소거동, 염기도와 Slag중 FeO 함유량에 따라 달라진다. 온도가 높고 낮은 FeO 레벨에서는 인은 Slag에서 용강 중으로 되돌아 간다. 그러므로 탈인은 가열초기 온도가 낮을 때 가능한 빨리 수행된다.

<황>

용강에서 황을 제거하기 위해 칼슘 화합물과 같은 황화물 형성제를 사용할 필요가 있다. 황화물형성 반응은 낮은 산소 레벨, 높은 Slag질량과 높은 온도와 같은 환원분위기에서 촉진된다. 이러한 분위기는 대체로 가열 후반기에 얻어진다.

6.7 Tapping

Tapping은 로체 하부에 있는 회전 버튼을 눌렀을 때 시작된다. 용강을 Ladle에 따르기 시작하는 것으로 Simulation은 효과적으로 종료되게 된다. Tapping이 완료되면, 즉, 로안에 더 이상의 용강이 남아있지 않을 때, Simulation은 자동으로 Summary 화면으로 넘어간다.

6.8 User Interface

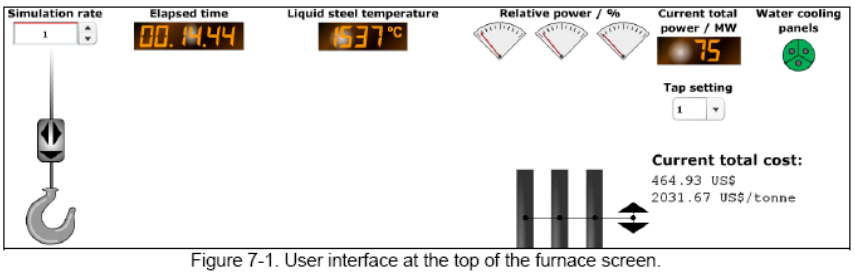


Figure 7-1. User interface at the top of the furnace screen.

화면 상단에 아래와 같은 것들이 사용자에게 제시된다:

- Simulation rate: 여기를 눌러 Simulation 속도를 1~32 사이에서 가감할 수 있다.
- Elapsed time: Simulation이 시작한 이후의 시간을 HH:MM:SS 형식으로 보여준다.
- Liquid steel temperature: ℃로 온도를 보여준다.
- Relative power: 각 전극의 현재 사용하는 전력을 보여준다. 모든 Scrap이 언제 녹게 될지 그리고 더 중요한 것은 전극에서 Scrap이나 용강으로 얼마나 많은 전력이 전달되고 있는지 결정하는데 사용될 수도 있다.
- Current total power: MW 단위로 표시된다
- Tap setting: <표7-1>에서 보듯이 적정 전력레벨을 설정하기 위해 0~4 사이에서 전력 tap setting을 할 수 있다.
- Water cooling panels: 7.4에서와 같이 냉각 시스템에서 냉각수 온도를 표시한다.

화면 상단의 정보와 함께, 전극과 Scrap의 표면온도를 육안으로 볼 수 있도록 하였다. Scrap 색깔을 처음에 회색에서 온도가 상승함에 따라 적색으로 변한다. 한편, 전극은 빠르게 가열되어 전극의 각 위치에서의 표면온도로 변한다.

- Scrap baskets: Hook 위에 작은 제어박스가 있는 크레인으로 이것을 전기로로 옮긴다.
- Furnace roof: 양쪽에 있는 화살표를 눌러 열고 닫는다. Roof를 열기 전에 전극이 충분히 원위치되어야 하는 점에 주의하시오.
- Electrodes: 전기로 오른쪽에 있는 화살표를 눌러 3개 전체를 올리고 내릴 수 있다.
- Nudging individual electrodes: 전극을 개별적으로 상하로 움직일 필요가 있다. 이는 전극 끝 부분의 마모 때문이다. 각 전극의 상하 버튼을 눌러 움직일 수 있다.

탄소와 산소 랜스는 Slag door를 열어 넣고 빼게 된다. Door를 클릭하여 Slag door 개폐한다. 탄소와 산소 랜스가 충분히 삽입되면 탄소와 산소 유량 Controller가 나타나고 유량을 조정할 수 있고 C/O 유량을 차단할 수 있다.

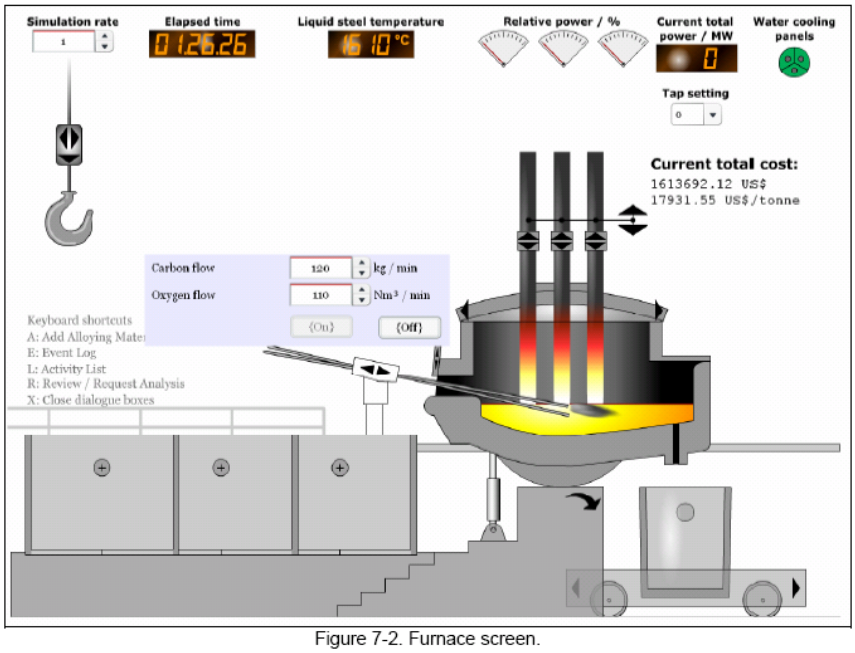


Figure 7-2. Furnace screen.

6.9 단축 키

Simulation 아무리 잘 계획하더라도 가열 중 약간의 조치를 취할 필요가 있을 것이다. 이를 위해 몇 가지 단축 키가 있다.

6.9.1 합금 원료 첨가(Key A)

키보드에서 A를 눌러 합금원료를 선택할 수 있다. 주문을 하게 되면 주문한 것에 대한 총비용이 보여진다.

6.9.2 View event log(Key E)

Event log를 보기 위해서는 키보드에서 E를 누른다. Event log는 복사할 수도 있고 마우스 오른쪽 마우스를 눌러 대화상자에서 print를 눌러 직접 인쇄할 수도 있다.

6.9.3 Review analysis(Key R)

R을 눌러 최근의 로내 성분을 볼 수 있다. 이 것을 처음 사용한 후부터는 이전 샘플 분석을 제공받게 되므로 새로운 샘플을 받기 위해서는 'Take a new sample'을 클릭해야 한다. 오렌지색의 숫자는 혼합물에서 원소의 양이 부족하다는 것을 나타내고, 적색 숫자는 양이 과도한 것을 나타내며 녹색 숫자는 강종의 목표범위에 있다는 것을 보여준다.

- 1회 샘플분석 비용: $40

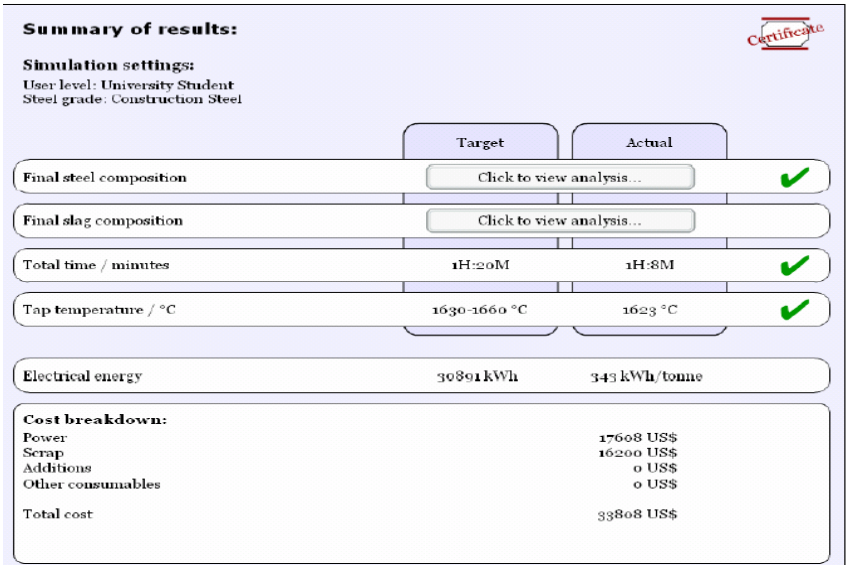
6.9.4 Close dialogue box(Key X)

팝업되어 있는(예: 경고창, 안내창 등) 대화박스를 닫기 위해 키보드에서 X를 누른다.

7 Summary of Results

Summary 화면은 총 조업비용을 US$/Ton으로 보여주는 것을 포함하여 Simulation 결과를 보여준다. 강종의 모든 기준을 통과하면, Steeluniversity.org certificate 아이콘이 오른쪽 상부 코너에서 볼 수 있다. Simulation을 성공한 것에 대한 보상으로 Certificate을 출력할 수 있다. 이를 위해서 Summary를 검토할 때 아이콘을 클릭한다.

Summary 화면에서 키보드 E를 눌러 Event log을 사용할 수 있다. 또한 해당버튼을 누르거나 A를 눌러 강 분석결과를 볼 수도 있고 S를 눌러 Slag 분석결과를 볼 수 있다.



<그림8-1 Summary 화면>

8 이론적 배경

본장에서는 이 Simulation과 관련된 화학과 열역학을 뒷받침하는 몇 가지 좀 더 중요한 과학적 관련을 다룬다.

8.1 온도

아래 식으로 용강온도를 계산하시오

Tliq = 1537-[78%C + 7.6%Si + 4.9%Mn + 34%P + 30%S + 5%Cu + 3.1%Ni + 1.3%Cr]

8.2 중요한 반응들

산소가 Al, 실리콘, 크롬, 탄소, 인, 철과 친화력이 높기 때문에 금속산화물이 쉽게 만들어지고 상대적으로 비중이 낮기 때문에 Slag phase로 떠오르게 된다. 이들 반응은 모두 발열반응이다. 즉, 시스템에 열을 공급하고 Scrap의 용해 및 가열에 추가로 에너지를 공급한다. Simulation에서 열역학 및 운동학적 모델은 가장 낮은 용해산소 함유량을 보이는 반응이 강중에서 용해산소 거동을 제어한다고 가정한다.

아래 반응들은 상당한 발열반응으로 Table9-1에 있는 정보와 추정된 작업온도로 반응에서 나오는 가열에너지 양을 계산할 수 있다.

<Table9-1 발열반응들>

Reaction	$\Delta G^\circ = A + B \times T$	
	A	B
	J mol^{-1}	J mol^{-1} K^{-1}
$2\,\underline{Al} + 3\,\underline{O} = Al_2O_3$	-1243950	395,79
$\underline{C} + \underline{O} = CO\ (g)$	-21790	-39,75
$2\,\underline{Cr} + 3\,\underline{O} = Cr_2O_3$	-823545	360,79
$Fe + \underline{O} = FeO$	-121090	52,5
$\underline{Si} + 2\,\underline{O} = SiO_2$	-571935	225,28

8.3 합금첨가물 계산

첨가물은 다양한 이유로 로내에 첨가된다.

- 최종 강중의 성분조정
- 산소와 반응하거나 Slag로 흡수될 산화물을 형성하여 탈산작업 수행
- 탈황과 탈인에 더 효과적인 Slag를 얻기 위해서 Slag 성분을 조정한다.

8.3.1 목표성분을 맞추기 위해 첨가물 계산

합금원소를 강에 추가하는 대부분의 경우, 첨가원료가 한 가지 원소 이상이다. 2 가지나 그 이상이 혼합되어 있는 첨가물은 때로 master alloy라고 불린다. 그런 첨가물을 사용할 때 master alloy내에 원하는 원소의 양이 원소 회수율(recovery rate)과 함께 고려되어야 한다. 회수율이란 Slag로 손실된 것이 아닌 실제로 강중의 원소의 함유량을 높이는데 사용된 원소량이다.

$$m_{additive} = \frac{100 \times \Delta\%\mathrm{X} \times ladle_mass}{\%\mathrm{X}in_master_alloy \times recovery_rate_of_\mathrm{X}} \text{------(9-2)}$$

<예제>

250톤의 강이 0.12%Mn을 포함하고 있다. 1.4%Mn을 만들기 위해 얼마나 많은 HC FeMn(High Carbon Ferromanganese)가 첨가되야 하는지 계산하시오. 사용된 합금철은 76.5%Mn을 포함하고 있고 Mn 회수율은 95%이다. 이 값들을 교체해보면:

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

다른 원소들의 증가

Master alloy를 첨가할 때 다른 원소들이 전체적으로 강 성분에 미치는 영향을 알고, 필요하다면 계산하는 것이 중요하다. 주어진 원소의 증가량은 9-2 식을 수정하면 아래와 같다.

$$\Delta\%\mathrm{X} = \frac{m_{additive} \times \%\mathrm{X}in_master_alloy \times recovery_rate_of_\mathrm{X}}{100 \times steel_mass} \text{ ------(9-3)}$$

<예제>

이전의 예제로부터, 탄소 증가량(pickup)을 계산하시오. HCFeMn은 95% 회수율을 갖는 6.7%C를 포함하고 있다.

$$\Delta\%C = \frac{4{,}403kg \times 6.7\% \times 95\%}{100\% \times 250{,}000kg} = 0.112\%C$$

이 정도의 탄소량 증가는 저탄이나 극저 탄소강에서는 중요할 수 있다. 그 경우 좀 더 비싼 저탄소나 고순도의 FeMn master alloy를 사용할 필요가 있을 것이다.

Mixing times

Ladle에 합금원소를 첨가해도 즉각적으로 강 성분이 변하는 것이 아니라 일정한 용해시간이 소요된 다는 점을 아는 것이 중요하다. Simulation에서는 다음과 같은 트렌드를 관찰하여 합금첨가물이 용해하는데 충분한 시간을 주어야 한다:

- 파우더와 미세한 입자첨가물이 조대한 입자나 Pebble보다 빨리 용해된다.
- Mixing times은 온도가 내려갈수록 증가한다.

8.4 탈산

Al은 강력한 탈산제이며 화학반응에 의해 용강내에서의 산소거동을 제어한다:

$$2[Al]+3[O] \rightarrow (Al_2O_3)+\text{열에너지} \text{ ----------(9-4)}$$

이에 대해 평형계수는 아래와 같이 주어진다:

$$K_{Al-O} = \frac{a_{Al_2O_3}}{a_O^3 \cdot a_{Al}^2} \text{ ----------(9-5)}$$

여기에서

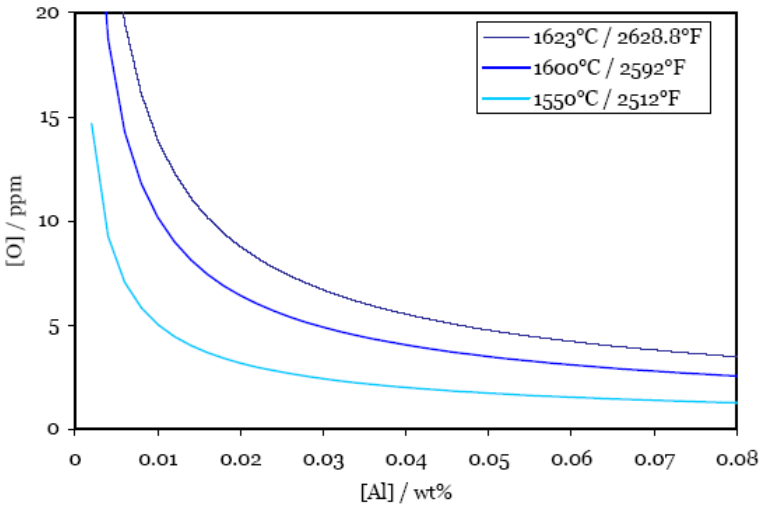
$$\log K_{Al-O} = \frac{62{,}780}{T[K]} - 20.5 \text{ ----------(9-6)}$$

9-5식을 산소거동으로 재정리하면:

$$a_O = \sqrt[3]{\frac{a_{Al_2O_3}}{a_{Al}^2 \cdot K_{Al-O}}} \text{ ----------(9-7)}$$

그림 9-1에서 세 가지 서로 다른 온도에 대해 a_O와 a_{Al}간의 관계를 그래프에 그렸다. 이로부터 Al에 의한 탈산은 낮은 온도에서 더 효율적인 것을 볼 수 있다.

<그림9-1 세 가지 다른 온도에서의 Al-O 평형커브>



비록 Al이 가장 강력한 탈산제중의 하나이지만, 용해산소는 다른 원소로도 제어될 수 있다는 것을 잊지 마시오. 따라서 다른 원소가 환원될 동안 어떤 원소가 산소와 반응하여 산화물을 형성할 것인지 결정하기 위해 다른 원소(9-2 부분을 보시오)에 대한 평형상수를 계산하는 것은 중요하다.

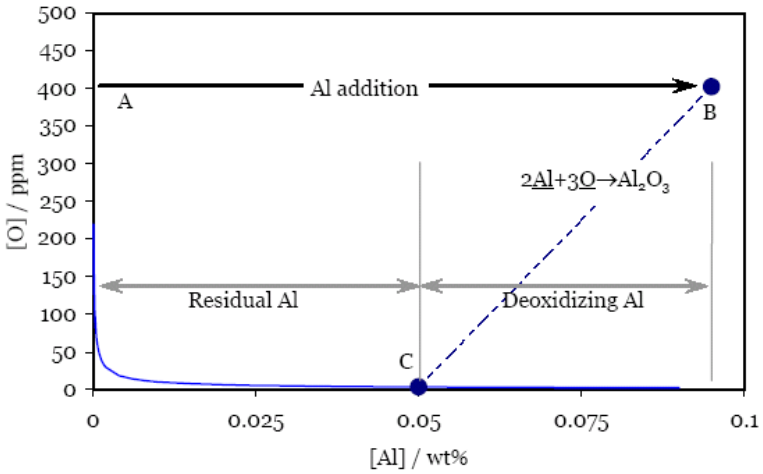
- Al,C,Cr,Fe,Si에 대한 반응식의 열역학적 평형에 기초한 산소거동을 계산한다.

$$x \cdot Me + y \cdot O \leftrightarrow Me_x O_y$$

- 어떤 반응이 가장 낮은 산소거동을 보이는지 확인한다.

8.4.1 Al 첨가량 계산

<그림9-2 산소거동 시작점으로부터 필요한 Al량 계산>



표에서 점 A로 나타낸 곳이 400ppm의 산소와 Al이 없는 초기 성분이라고 하자.

약 0.095%의 Al 첨가는 점 B로 나타난다. 이는 Al-O 평형곡선의 상당히 위에 위치하기 때문에 Al과 산소는 Al_2O_3를 만들도록 반응한다. 화학량론적으로 Al 2원자(54 mass unit)이 산소 3 원자(48 mass unit)과 반응하므로 점 C까지-이 온도에서 평형성분- 선을 따라 간다

탈산에 필요한 Al의 wt%는 그러므로 아래와 같다.

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

필요한 총 Al 첨가량 계산시, 이 값이 강중의 목표(또는 잔류) Al량에 더해져야 한다.

<예제>

450ppm의 산소를 가진 250톤의 강이 Al 탈산을 하고자 한다. Al 회수율이 60%이고 목표 Al 성분이 0.04%일 때, 98% Al 합금첨가제의 소요량을 계산하시오.

	9-8식으로부터 탈산용 Al	(58/48) × 0.045% = 0.051%
+	목표 Al	0.040%
=	총 소요 Al	0.091%

이제 9-2식을 이용해 합금첨가량 질량을 계산한다.

$$m_{Al} = \frac{100\% \times 0.091\% \times 250{,}000kg}{98\% \times 60\%} = 386kg \text{ ----------(9-9)}$$

8.5 Foaming Slag

Steel phase에 탄소를 Slag phase에 산소를 주입하여 CO Bubble을 만들어 foaming slag를 생성한다. 아래와 같은 식으로 반응한다:

$$\underline{C} + \underline{O} \leftrightarrow CO(g) \text{ ----------(9-10)}$$

이에 대해 평형상수는 아래와 같이 주어진다:

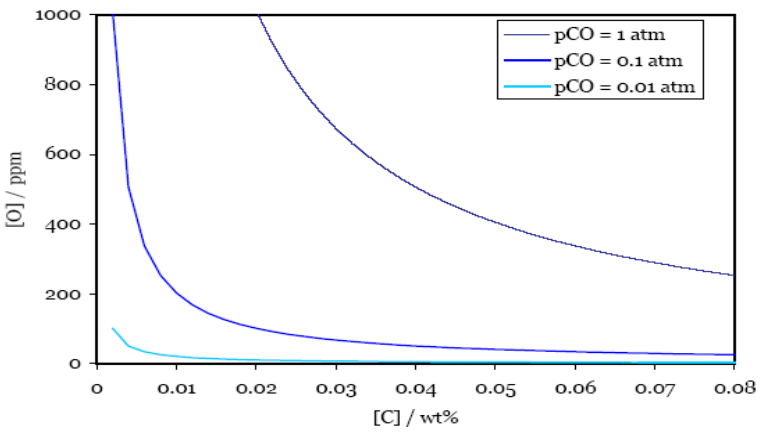
$$K_{C-O} = \frac{p_{CO}}{a_C \cdot a_O} \text{ ----------(9-11)}$$

낮은 농도를 위해 C와 O의 거동은 각각의 농도에 상응한다. 그러므로:

$$K_{C-O} = \frac{p_{CO}}{[\%C]\cdot[\%O]} \text{ ----------(9-12)}$$

$$\log K_{C-O} = \frac{1{,}168}{T[K]} + 1.07 \text{ ----------(9-13)}$$

<그림9-3 서로 다른 압력에서 [C]와 [O]의 평형농도>



Foaming slag 생성을 용이하게 하기 위해 Slag 염기도를 1.2 ~ 2.5 사이로 유지하는 것 또한 중요하다. 다른 제약사항으로는 너무 많은 고체(최대 5톤)나 너무 적은 액체(최소한 50톤)를 가질 수 없다는 점이다.

염기도는 아래 식으로 계산된다:

$$Basicity = \frac{\%CaO}{\%SiO_2}$$

8.6 탈황

가스나 오일 파이프와 같은 용도의 특정 강종은 더 나은 용접성과 성형성을 갖기 위해 매우 낮은 수준의 황을 요구한다. 탈황은 용강과 Slag 사이에 황을 교환하여 이뤄진다. 반응은 용강중의 Al과 황의 함유량과 Slag중의 석회석, 알루미나 황화칼슘의 함유량에 의해 지배된다. 일반적으로 아래와 같은 식으로 표현된다:

$3(CaO) + 2[Al] + 3[S] \rightarrow 3(CaS) + (Al_2O_3)$ ----------(9-15)

실제로, 전기로에서 탈황은 다음에 의해 이뤄진다:

- Vessel tapping시 탈황 Slag에 기초한 합성 CaO을 첨가;
- 강을 매우 낮은 산소거동으로 탈산하는 Al(그러지 않으면 Al은 우선적으로 O와 반응할 것이다);

석회, 돌로마이트나 형석은 Simulation중 어느 때에는 첨가될 수 있다. 키보드 A를 눌러 '합금원소 첨가 대화상자를 열어 원료를 선택할 수 있다.

- 첨가될 첨가제량을 기술한다. 더 많은 Slag 첨가량을 넣으면 황을 더 많이 제거할 수 있다. 하지만 비용을 고려해 정해져야 한다.
- Slag 성분분석은 시간이 매우 오래걸리므로 Slag 성분이 추정되야 한다. 하지만 Slag 분석은 Simulation summary에서 사용할 수 있다. 높은 CaO 농도를 가진 Slag는 높은 황분포율,Ls,를 가지는 경향이 있어 탈황에 더 효과적이므로 Al_2O_3에 대해 높은 CaO를 유지하는 것이 중요하다.

이론적으로 주어진 Slag에 대한 평형 황농도$[\%S]_{equ}$는 다음과 같이 주어진다:

$$[\%S]_{equ} = [\%S]_O \frac{\left(\frac{1}{L_S}\frac{W_m}{W_S}\right)}{1+\left(\frac{1}{L_S}\frac{W_m}{W_S}\right)} \text{----------(9-16)}$$

여기서

$[\%S]_O$ = 초기 황농도 (wt%)

W_S = Slag 중량(kg)

W_m = 금속 중량(kg)

L_S = Slag와 강 사이의 황분포

<그림9-4 Al_2O_3-CaO-SiO_2 3원 시스템에 대한 L_S 값, 1600℃에서>

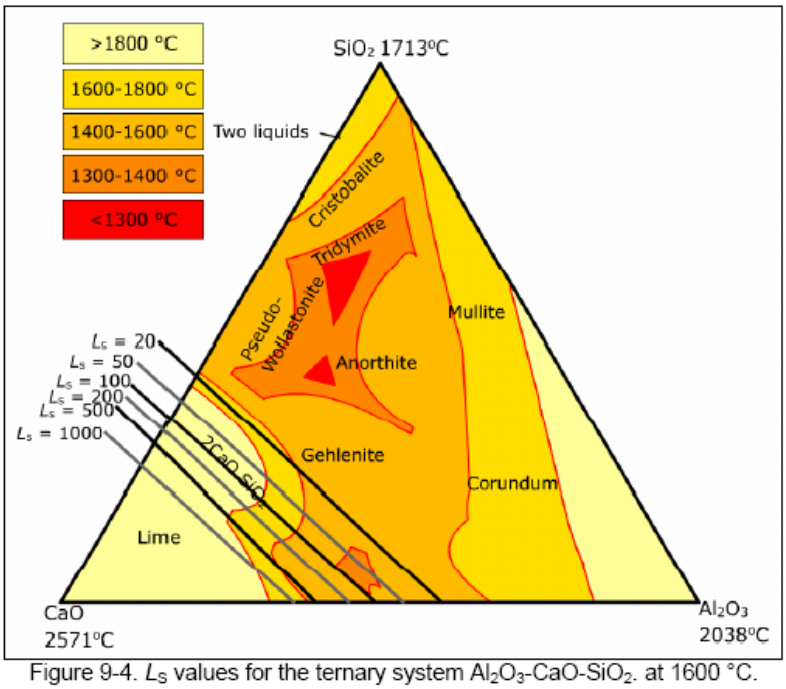


Figure 9-4. L_S values for the ternary system Al_2O_3-CaO-SiO_2. at 1600 °C.

Ls값은 Slag성분, 강중에 용해된 Al과 산소 함량의 복합 기능에 의해 결정된다. 확실히 사용된 Slag 첨가제의 비용과 양을 최소로 하기 위해, 높은 Ls값이 요구된다. 일반적으로 온도가 1600℃이상일 뿐 아니라 낮은 용해산소함량이 필요하다. 목표 Slag 성분을 결정하기 위해 Ls값이 표시된 유용한 3원 Slag diagram이 그림 9-4에 제시되어 있다.

$$W_S = \left(\frac{W_m}{L_S}\right)\left(\frac{[\%S]_O - [\%S]_{aim}}{[\%S]_{aim}}\right) \text{----------(9-17)}$$

<예제>

황 농도가 0.008 wt%이고 황 분포율, Ls가 500이라고 가정하면, S 레벨을 0.002 wt%로 만들기 위해 250톤의 강중에 첨가되야 하는 탈황 Slag의 최소량은 얼마인가?

식9-17을 이용하면:

$$W_S = \left(\frac{250}{500}\right)\left(\frac{0.008\% - 0.002\%}{0.002\%}\right) = 1.5 tonnes \text{ ---------(9-18)}$$

주의: 탈황 동력학적으로 0.002wt% 황의 평형레벨은 실질적으로 무한대의 Stirring time후 도달 가능하다.

8.7 탈인

제품중의 인은 불량한 기계적 특성, inter-granular cracking, 고형화중 micro-segregation과 관련이 있다. 일부 특수강종에서는 0.001wt% 이하를 요구하기도 하지만 대부분의 강종에서는 0.015wt% 이하가 요구된다.

Slag에서 인을 보유하는 것은 용강의 온도 Slag 염기도, Slag중의 석회,마그네시아, 산화철 함

유량에 달려있다. 낮은 FeO 함유량이나 높은 온도에서 인은 강중으로 되돌아간다. 반대로, 높은 염기도는 탈인에 유리하지만 석회로 Slag를 포화시키지 않도록 주의해야 한다. Slag에서 석회 함유량이 증가하면 점성이 증가하고 결과 극도로 액상선 온도를 높여 고체 Slag로 만들게 된다. 형석은 Slag를 유동성을 부여하기 위해 첨가된다. 즉 녹는점을 낮춘다.
인 분포율은 아래와 같이 표현된다:

$$L_P = \frac{(\%P)_{eq}}{[\%P]_{eq}} \text{----------} (9\text{-}19)$$

일반적으로 매우 낮은 인 레벨이 요구되면, 전기로에서는 극히 제한된 탈인 방법 만이 있으므로 용해 후에 낮은 레벨을 얻기 위해 중고 scrap을 이용하는 것이 보통이다. 전기로 Slag는 대게 인 분포율이 5~15 사이이며 이는 강 중의 인 함유량의 기껏해야 20 ~ 50%만이 제거될 수 있다는 것을 의미한다.