

1. 서론 및 주의문	3
2. 본 1.60 시뮬레이션 버전에 대해서	3
3. 연속주조의 소개	4
4. 시뮬레이션의 목적	6
5. 공정 배치 및 설명	6
5.1 연속주조기의 설계 치수	6
6. 시뮬레이션 실행 선택 사항	8
6.1 시뮬레이션의 운전 방법	8
6.1.1 독립운전방식	8
6.1.2 타공정과 연결된 연계운전방식	8
6.2 사용자 수준	9
6.2.1 대학생 수준	9
6.2.2 철강산업 종사자 수준	9
6.3 강종	10
6.3.1 균열이 용이한 강종	11
6.3.2 Sticker가 용이한 강종	11
6.4 경압하 정도	12
6.5 연속주조 속도 및 2차 냉각률	13
6.6 몰드 진동 설정값	14
6.6.1 설정값	14
6.6.2 진동에 의한 슬래브 표면 자국(oscillation mark)	15
6.7 몰드 파우더	16
6.7.1 중요 변수	17
6.8 레이들 주문	19
6.8.1 시간	19
6.8.2 온도	20
6.8.3 용강 액상선 계산	21
6.9 선택 변수 재검토	21
7. 시뮬레이션 실행	21
7.1 연주의 시작	21
7.2 레이들 교체	22
7.3 용강의 청정도	22

7.4 슬래브 연주기에서의 변형 분석 모델	23
7.4.1 내부 균열의 추정치	24
7.4.2 표면 균열의 추정치	25
7.5 주변파괴의 예방	27
8. 사용자 인터페이스	28
8.1 시뮬레이션 제어기	28
8.1.1 시뮬레이션 실행 속도	28
8.1.2 레이들 터렛 제어	28
8.1.3 레이들	29
8.1.4 턴디쉬	29
8.1.5 주변 가닥(Strand)	29
8.1.6 침지심 교환(산업체 사용자일 경우에만 해당)	29
8.1.7 전자기유도교반(블룸과 빌렛연주기에 해당, 슬래브는 해당 안됨) ..	29
8.1.8 경압하울(슬래브 연주기만 해당)	30
8.2 연주 정보	30
8.2.1 연주중에 일어난 주요 목록 (자판에서 E)	30
8.2.2 연주중에 유체 흐름의 확인 (자판에서 F)	30
8.2.3 연주기 전방의 롤 보기/숨기기 (자판에서 H)	30
8.2.4 용강 높이 보기 (자판에서 L)	30
8.2.5 품질 보기 (자판에서 Q)	30
8.2.6 온도 확인 (자판에서 T)	31
8.2.7 연주실행에 관한 정보대화상자 닫기 (자판에서 X)	31
8.3 시뮬레이션의 결과	31
9. 참고자료	33

1. 서론 및 주의문

본 자료는 연속주조 시뮬레이션 프로그램의 사용자를 위해서 만들어졌으며 <http://www.steeluniversity.org/>에 올려져 있다. 본 시뮬레이션 프로그램은 철강 금속 재료에 관심이 있는 학생과 철강 산업체에서 근무하는 직원들을 위한 교육 및 훈련용으로 설계되었다.

본 자료 및 관련된 웹사이트에 포함된 일련의 정보는 선의로 제공되는 것이었으나 본 자료나 이와 관련된 웹사이트 또는 하이퍼링크된 타 사이트를 통한 모든 정보들(지역 법령 또는 국가 법령 또는 규제당국 또는 법을 집행하는 기관의 기준을 만족하는 보증, 표현, 주장, 또는 이 모든 정보를 통해 착수된 일을 포함한)을 보증하는 것이 아니다. 본 자료의 제공된 정보의 이용은 사용자의 책임이다. 어떠한 경우에도 International Iron and Steel Institute, University of Liverpool 또는 그들의 협력체들이 사용자가 본 자료를 이용하여 받은 비용, 손실, 파손, 경비에 대하여 책임을 지지 않는다.

본 자료에 제공된 정보는 기술적 또는 재무적인 조언이 절대 아님을 강조한다.

2. 본 1.60 시뮬레이션 버전에 대하여

본 1.60 시뮬레이션 버전은 개정 후 대중에게 최초로 제공되는 평가판이다. 연속주조 시뮬레이션 완결판은 2005년 7월 말에 제공될 것이다.

버전 1.51 이후의 변동 사항

- 이제는 등록된 사용자들이 2차 정련에서의 결과 값들을 시뮬레이션에 링크하여 사용할 수가 있다.
- 개정된 시뮬레이션 프로그램은 레이들에서 오는 개제물의 정도를 고려하게 된다. 개제물의 정도가 높으면 연주기의 속도를 줄여서 턴디쉬에서 더 오래 용강을 정체시켜 개제물이 위로 부상할 수 있도록 해야 한다.

버전 1.41 이후의 변동 사항

- 기본적인 모델은 향상되었으며 품질 그래프도 적절하게 변동된다. 몰드 파우더의 가격을 변동시켰다.
- 몰드 파우더 소비량이 과도하게 적을 경우 구리 몰드와 주편 사이의 과도한 마찰에 의해서 주편 파괴가 일어나고 연주 주편 가닥이 멈추게 된다.

- 기본적인 모델이 전자기 교반의 상태가 변했을 때 적절하게 대응하게 된다.
- 연주 중에 경압하 정도가 변화될 수가 있다.

버전 0.36 이후의 변동

- 침지심의 교환은 30초 대신 15초 소비된다.
- 경압하 정도는 연주기 속도, 냉각속도, 그리고 몰드 진동수
- 몰드 파우더의 선택이 이제 생산단가의 영향을 줄 것이며 성공적인 연주에 영향을 줄 것이다.
- 몰드 하단 전방에 있는 롤들을 숨길 수도 있어 롤 안쪽에 있는 주편을 관찰할 수 있을 것이다.

버전 0.23 이후의 변동 사항

- 4가지 강종 모두 연주 가능.
- “철강산업 종사자”와 “대학교 학생” 사용자가 가능해졌다.
- 연주속도가 최적화 되지 않으면 레이들이나 턴디쉬에서의 용강 냉각이 일어날 수가 있다.
- “철강산업 종사자” 사용자의 경우 레이들의 보수 정도, 침지심의 막힘과 2차 정련에서 오는 레이들의 지연 변수들이 추가되었다.

한계

- 각 연주 주편의 가닥들은 동일하나 실제에서는 다를 수가 있다.
- 연주 초기에서의 턴디쉬 자체의 온도는 예열을 모사하는 기초적인 모델에 의존한다.
- 연주 주편 가닥의 표면 온도와 주편 가닥의 두께는 연주속도, 냉각속도와 강종에 조합을 고려하여 FEM에 의해 이미 계산되어 있다.
- 압하 롤들의 배열 상태가 어긋날 경우 연주 중에 조정될 수 있으나 이는 실제 상황에서는 불가능하다.
- 시뮬레이션의 최적화를 위해서는 기본적인 모든 모델들이 순차적으로 실행된다. 그러나 몰드내 용탕면의 높이는 시뮬레이션 실행 속도가 빠르면 낮아지고 시뮬레이션 실행속도가 느리면 높아지기 때문에 몰드내 용탕면의 높이를 적절하게 제어해야 한다.

3. 연속주조 소개

연속주조 공정은 용강이 연속적으로 주편의 가닥으로 응고되는 것을 말한다.

주편의 형상과 치수에 따라 이러한 연주 후에 반제품은 슬래브, 블룸, 또는 빌렛으로 구분된다. 강의 생산성을 높이기 위해서 1950년도에 개발되었으나 연주기의 시초는 Bessemer의 연속 주조기라고 할 수 있다. 이전에는 강의 응고는 주괴 주조로 이루어지고 장점도 있었으나 생산량의 수요를 만족시키지 못하였다. 그 이후로 연속주조 공정은 수율, 품질과 가격경쟁력을 향상시키기 위해서 개발되어져 왔다.

용강은 2차 정련으로부터 연주기로 제공된다. 용강을 담은 레이들은 일반적으로 대형 크레인에 의해 이동되며 레이들의 회전 걸이대(터렛)에 놓이게 되고 연주준비가 되면 레이들을 회전시켜 연주 위치로 이동시킨다. 레이들 하단에 설치된 수평으로 이동하여 용강을 개폐하는 슬라이딩 게이트가 열려 롱노즐을 통해서 턴디쉬 내로 용강의 흐름을 제어하게 된다. 이 턴디쉬는 구리몰드와 레이들 사이의 용강의 양을 제어하는 완충적인 역할을 하게 된다. 턴디쉬가 채워지게 되면 턴디쉬의 마개 역할을 하는 스톱퍼 막대기가 올려지면서 수냉되고 있는 구리 몰드내로 용강을 유입하게 되고 고온의 용강이 보유하고 있는 과열을 제거하고 응고시켜 연주를 수행하게 된다. 응고는 구리몰드에서 시작되며 초기의 응고주편이 더미바에 의해 몰드로부터 당겨서 빼내게 된다. 부분적으로 응고된 주편이 몰드를 빠져나올 때 내부에 존재하는 용강의 정압을 충분히 지탱할 수 있을 정도의 두께를 확보해주어야 한다.

연속주조 전반에 걸쳐, 몰드는 수직 상하로 진동하여 응고된 주편이 구리몰드와 직접적으로 접촉되는 것을 최소화 하려고 한다. 이러한 직접적인 접촉이 일어나지 않도록 추가적으로 몰드 플렉스를 제공하여 윤활제의 역할을 한다.

주편은 몰드 아래 존재하는 다수의 롤회전에 의해 몰드에서부터 강제적으로 당겨지고 빠져나와 수직상태에 있던 주편이 조금씩 구부러지면서 수평이 될 때까지 주편을 유도한다. 이러한 롤들은 적절하게 촘촘히 위치되어 있어야 주편의 팽창이나 더 나아가 주편 파괴를 방지할 수가 있다.

몰드를 빠져 나가는 강 주편의 두께는 얇으며 완전히 응고시키기 위해서는 추가적인 냉각이 필요하다. 이러한 추가적인 냉각은 몰드 아래 2차 냉각 구간에서 이루어지고 본 구간에서는 롤 사이에 설치된 다수의 냉각 분사기에 의해 미세한 물입자들을 주편 표면에 제공해주면 된다. 주편의 가닥은 부분적으로 응고된 쉘과 중앙에 용강을 말한다.

주편의 가닥이 수직상태에서 수평으로 완전하게 놓이고 응고가 완료될 때 지정

된 길이만큼 아세틸렌 토치로 잘라지게 된다. 잘라진 주편은 창고나 압연공정으로 보내지게 된다.

표 3-1. 연속주조 공정에서 각 구성품 및 그 역할

구성품	주된 역할	부수적인 역할
Ladle	용강을 이동시키고 담는 역할	개제물 제거를 도움
Ladle Turret (터렛)	턴디쉬 위로 용강이 가득찬 레이들을 위치시키고 비어있는 레이들을 턴디쉬로부터 제거함.	크레인의 활동을 줄여 생산성을 증가시킴.
Tundish (턴디쉬)	레이들과 몰드사이의 완충 역할	개제물 제거를 도움
Mold	용강의 온도를 떨어뜨려 응고시킴.	
Strand System	주편을 더욱더 냉각시키고 수직 상태의 주편을 수평상태로 만들어 준다.	

4. 시뮬레이션의 목적

시뮬레이션의 목적은 용강으로 채워진 3개의 레이들을 지정된 표면 품질, 내부 품질과 개제물 정도 등의 조건들을 만족시키면서 연속적으로 주조하는 것이다.

뿐만 아니라 공정 전체의 생산단가를 최소화해야 한다.

5. 공정 배치 및 설명

시뮬레이션 상에서의 공정은 그림 5-1처럼 배치되어 있다. 시뮬레이션 실행 초기에는 턴디쉬 위로 이미 1개의 가득찬 레이들이 주어진다.

5.1 연속주조기의 설계치수

연속주조 시뮬레이션 프로그램은 4가지 강종의 연주를 할 수 있는 3개의 서로 다른 연주기들이 있다. 그 연주기들은 슬래브, 블룸과 빌렛이 있다. 서로 다른 연주기들의 특성들이 표 5-1에 주어졌다.

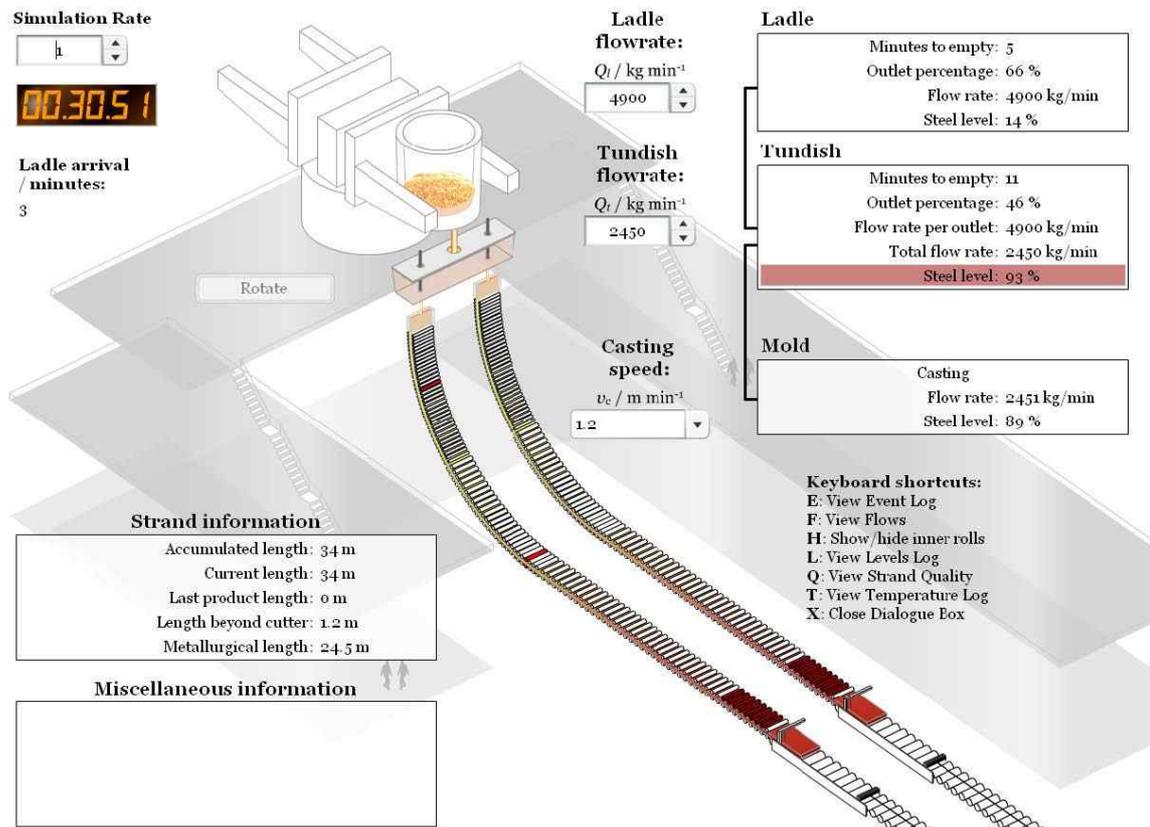


Figure 5-1 시뮬레이션에서 공정 배치를 나타냄. 두개의 레이들이 레이들 터렛에 놓이고 턴디쉬 위로 위치하게 된다.

표 5-1 Table of casting machine properties

Type	Slab	Bloom	Billet
Steel grade(s)	Linepipe steel ULC steel	Construction steel	Engineering steel
Ladle size / metric ton	250	100	100
Radius / m	9	12	8
Number of strands	2	5	6
Casting speed / m min ⁻¹	1.0-2.0	1.2 - 1.8	3 - 5
Cross section dimension / mm	1200 × 230	250 × 250	130 × 130
Typical use	flat products, i.e. plate, sheet, coils	long products, i.e. bars, beams, pilings	long products, i.e. bars, channels, wires
Roll spacing, section I / mm	202 (35 rolls in 45°)		
Roll spacing, section II / mm	283 (25 rolls in 45°)		
Radii at bending/straightening / m	R56=9, R57=11.3, R58=15, R59=22.6, R60=45.2		

6. 시뮬레이션 실행 선택 사항

시뮬레이션을 실행하기에 앞서 계획하는 것이 매우 중요하다. 맨 처음에 할 일은 선택된 용강의 종류에 따라 모든 품질 조건들이 만족되는 연속주조의 속도를 결정하는 일이다. 두 번째로는 표면 품질을 보장해주는 몰드 진동수를 설정하는 것이다. 마지막으로 용강의 온도와 2번 및 3번 레이들이 연주기에 도착해야 하는 시기를 적절하게 제어해야 한다.

다음 부분에서는 시뮬레이션의 성공적인 실행을 위해서 알아야 하는 기초적인 과학적 근거, 이론 및 변수들 간의 상호 관계를 소개시켜 준다. 이 부분에서 제공되는 기초적인 정보는 연속주조의 이론이나 실제 응용을 위한 포괄적이고 종합적인 지식을 전달하지 못하기 때문에 사용자는 연속주조 공정의 자세한 정보를 얻기 위해서는 다른 훌륭한 자료들을 참고하기 바란다.

6.1 시뮬레이션의 운전 방법

본 시뮬레이션 프로그램은 2가지의 운전 방법으로 실행될 수가 있다.

- 독립운전방식
- 연계운전방식

6.1.1 독립운전 방식

본 운전 방식에서는 사용자의 등급, 강종과 레이들의 도착 시간과 온도를 포함한 모든 연주 변수들을 정할 수가 있다. 초기 시뮬레이션 변수들인 조성, 레이들의 양, 개제물의 정도는 프로그램 내의 기본값으로 설정되어 있다.

6.1.2 타공정과 연결된 연계 운전 방식

본 운전 방식에서는 사용자의 등급, 강종, 레이들내 강의 조성, 온도, 질량, 개제물 정도 등의 각종 변수들은 2차 정련의 결과들로부터 연계된다. 드롭 다운 메뉴에서부터 연주 가능한 결과 값들을 보고 (CAST ID)을 선택한다; 2차 정련에서 성공적으로 실행했던 CAST ID의 결과값들을 아래 그림 6-1과 같이 나타날 것이다. 개제물의 정도는 비레치로 나타냈다. 연계 운전 방식을 위해서는 사이트에 등록되어 있어야 하고 로그인되어야 한다.

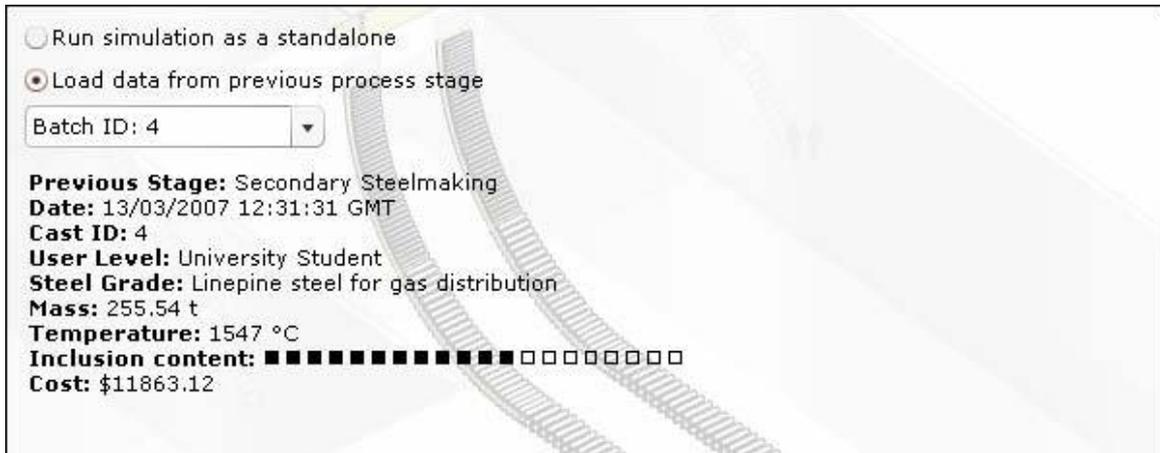


그림 6-1. 전 공정 단계에서 가져온 운전 데이터.

6.2 사용자 수준

본 연주기 시뮬레이션 프로그램은 2 가지의 다른 사용자 수준에 맞추어 있다.

- 금속공학, 재료공학, 그리고 다른 공학 전공을 하는 대학생에 해당됨.
- 철강산업에 종사하는 직원
-

6.2.1 대학생 수준

본 사용자 수준에서는 문제를 과학적으로 접근하고 공정제어 조건에 대한 결정을 하기 위해서 열역학 및 재료 반응 속도론의 기본 이론을 사용하게 된다.

예를 들어, 대학교 사용자는 좋은 품질의 주편 가닥을 얻기 위해서 연주속도와 냉각속도의 적절한 조합을 결정해야 한다.

본 사용자 수준에서는 공정 상에서 일어나는 운전 중에 실제 문제들이 일어나지 않아 복잡하지 않을 것이다.

6.2.2 철강산업 종사자 수준

본 수준에서는 문제를 과학적으로 접근할 것이라 기대된다. 뿐만 아니라 공정 상에서 실제 일어날 수 있는 다양한 문제들이 일어나고 계획을 적절하게 수정할 수 있어야 하며 경험을 이용하여 적절하고 빠르게 대응해야 할 것이다.

공정상에서 일어나는 일반적인 문제들은 레이들 도착 시간의 지연, 침지심의 막힘 현상, 그리고 레이들의 보수 상태에 의한 온도의 급하강.

레이들의 기계적 손상을 모사하기 위해서 3 가지의 보수상태로 구분되어진다; 좋음, 양호, 그리고 불량. 용강의 냉각속도는 이러한 보수 상태에 의해 영향 받으며 각각 0.5, 0.75, 1.00°C/min이다.

레이들의 지연은 최대 10분이 될 수 있다. 주문한 레이들의 도착 시간과 실제 연주기에 도착 예정시간을 비교하는 것을 잊지 말아라. 이 정보는 시뮬레이션이

시작되고 나서 레이들 회전 받침대 (튜렛)위에 표시가 될 것이다.

또한 침지심의 상태를 계속 주시하여 “침지심 막힘 현상”이 심할 경우 교환해야 하는 시기를 결정해야 한다. 침지심의 막힘 현상은 연주 중에 계속적인 개제물의 흡착과 지속적인 성장에 의해서 일어난다. 침지심이 막히면 턴디쉬에서 몰드내로 유입되는 용강량을 감소시키고 결과적으로 교환되어야 하는 것이다. 침지심의 막히는 속도를 줄이려면 턴디쉬에서의 용강 높이를 항상 높게 유지시켜준다 (개제물이 표면위로 부상할 수 있는 충분한 시간을 제공한다). 침지심의 막히는 정도는 턴디쉬에서 제공되는 용강량의 변화를 주시하는 수 밖에 없다. 연주 속도에 따라 몰드내의 용강 높이의 유지가 힘들어지면 침지심이 교환되어야 한다. 침지심을 교환하는 순서는 다음과 같다.

- 연주속도를 줄인다.
- 턴디쉬에서 몰드내로 들어오는 용강을 스톱퍼 막대기를 통해서 잠시 닫는다.
- “Change SEN” 단추를 누른다. 각 주편 가닥 당 \$200 비용이 소요되며 교환하는데 15초 소요된다.
- 구리몰드내 용강을 적당한 높이까지 채우기 위해서 턴디쉬의 스톱퍼 막대기를 올려서 용강을 몰드내로 유입시킨다.
- 몰드내 용강 높이가 적절하게 올라오면 연속주조 속도를 높여서 원하는 연주속도로 맞춘다.

주의사항: 침지심을 교환할 때 몰드내의 용강 높이가 완전히 떨어지지 않도록 주의해야 한다. 몰드내 용강의 높이가 너무 낮아질 경우에는 연주기 속도를 추가적으로 감소시킬 필요가 있다.

6.3 강종

연주기 시뮬레이션 프로그램은 다양한 강종을 다양한 공정 운전 방식을 할 수 있도록 되어 있다.

다목적 건축용 강종은 균열에 민감한 강종으로서 초보자에 적합한 비교적 일반적이고 부담스럽지않은 강종이다. 건축용 강종은 250mm 폭에 250 mm 두께의 블룸 연주기로 주조해야 한다. 개제물의 정도는 품질에 큰 영향을 주지 않은 중간 정도로 맞추면 될것이다.

TiNb 극저탄소강은 구리몰드와 직접적으로 접촉되어서 윤활이 잘 안되는 강종중에 하나이며 자동차 구조재료로 사용되고 성형성을 최적화하기 위해서 탄소가

약 0.0035% 함유되어 있다. 본 강종은 슬래브 연주기에서 1200*230mm의 치수로 주조가 된다. 이 강종의 특성상 강내의 청결도는 높으며 개제물의 정도를 최소화시켜야 한다.

가스생산공정에 사용되는 파이프 강종 (linepipe steel)은 요구되는 특성이 매우 까다로우며 강도와 인성이 동시에 강하기 위해서 강내 이물질 (S,P,H,O,와 N)이 극도로 낮아야 하고 개제물 정도도 최소화시켜야 한다. 극저탄소강과 마찬가지로 가스생산 설비에 사용되는 파이프 강종은 개제물의 정도를 가장 낮게 유지되어야 하고 1200*230mm 의 치수로 슬래브 연주기에서 주조되어야 한다. 조성에 따라 가스 파이프 강종은 균열이 용이(포정강종)하거나 구리몰드와 접착이 쉬울 (sticking) 수가 있다.

엔지니어링 강종은 열처리가 가능한 저합금강으로서 130*130mm 의 치수로 빌렛 연주기에서 고속으로 주조된다.

6.3.1 균열이 용이한 강종

연주기에서의 강종은 2가지의 소그룹으로 구분되어 진다. 균열이 용이한 강종 또는 sticker가 용이한 강종으로 나누어진다.

균열(면세로 균열)은 중탄소강 (0.06-0.18%탄소) 등에서는 매우 심각한 문제이다. 용강이 고온 체심입방형 (bcc) delta 페라이트이나 면심입방형 (fcc) 오스테나이트으로 응고될 때 수축이 상이하여 약 4%정도의 차이가 난다. 이러한 특성 때문에 포정반응 근처를 갖는 조성의 강은 부분적으로 응고된 주편에서 응력이 발생하여 표면에 면세로 균열을 통해 이러한 응력을 해소시키게 된다. 이러한 응력을 최소화시키기 위해서는 가장 널리 사용되는 해결책으로 부분적으로 응고된 주편의 두께를 최소화시켜 응력을 줄이는 것이다. 두께를 최소화시키기 위해서는 결정화가 잘되고 몰드에 부착된 몰드 플렉스의 두께를 증가시켜 수평방향으로의 열전달을 줄이는 것이다.

6.3.2 Sticker가 용이한 강종

균열이 용이한 강종에 비해 스티커가 용이한 강종의 경우에는 주편의 쉘이 충분히 두껍지 않을 경우 쉘내부에 존재하는 용강이 정압을 작용하여 과도할 경우 쉘을 파손하고 용강이 분출되어 연주기 구성품을 파손하게 된다. 따라서 수평방향으로의 열전달을 증가시키고 주편의 쉘이 충분히 두꺼울 수 있도록 구리 몰드와 주편 사이의 몰드 플렉스를 비정질이 많도록 몰드 파우더를 선택해야 한다.

표 6-1. 시뮬레이션에서 가능한 강종의 조성

Construction steel		TiNb ULC steel for car bodies	Linepipe steel	Engineering steel
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	<0.0120	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

6.4 경압하 정도

경압하는 슬래브 연주 운전시 가능하며 용질의 중심 편석을 줄이기 위해서 작동된다. 경압하가 효과를 거두기 위해서는 연주 속도와 2차 냉각율을 적절하게 제어하여 마지막 응고점이 경압하가 이루어지는 구간에 있도록 설정해야 하며 이때 초기응고직이 일어나는 시점부터 마지막 응고점까지의 주편의 길이를 금속학적 응고길이 (metallurgical length)라고 한다.

경압하의 개략도가 그림 6-2에 주어졌다. 경압하는 각각의 길이가 400 mm인 2개의 롤 segment 구간에서 이루어진다. 각 롤 segment은 5개의 롤로 이루어졌으며 롤 사이의 거리 (pitch)는 약 400 mm이다. 일반적으로 가스 파이프 강종일 경우 경압하 구간은 주편 길이 약 27에서 31m 정도가 되며 극저 탄소강은 경압하 구간이 약 21에서 24 m 사이이다.

시뮬레이션 실행시 3가지의 다른 경압하를 선택할 수가 있다. 약한, 중간, 강한 압하율을 선택할 수 있으며 각각 2.4 mm, 6.0mm, 10.8mm의 주편 감소율을 가져온다. 극저탄소강 (ULC)이나 가스강관강종 (LPS) 모두 같은 압하율을 얻는

다. 경압하 구간이 변동될 수가 없기 때문에 최적의 경압하 조건을 위해서는 몇 가지의 제한된 연속주조 속도와 2차 냉각률 조합으로만 가능할 것이다.

경압하는 슬래브 연주가 가능한 강종에 경우에만 해당된다.

6.5 연속주조 속도 및 2차 냉각률

적절한 연주속도와 2차 냉각률을 선택하는 것이 매우 중요하다. 연주중에 이러한 연주속도와 냉각률의 선택은 다른 연주기 변수들에 지대한 영향을 미치며 품질이 양호한 제품을 얻는데 핵심적인 역할을 하게 된다. 금속학적 응고 길이 (metallurgical length) 이는 특히 이러한 변수들에 영향을 받으며 금속학적 응고 길이는 전술한 바와 같이 초기 응고 조직에서부터 완전히 고상이 되는 시점까지의 주편 길이를 말한다.

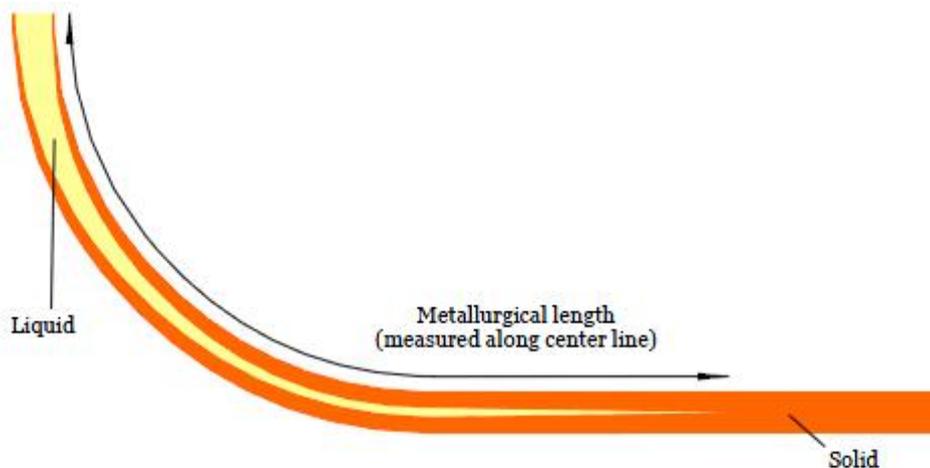


Figure 6-3 Diagram illustrating metallurgical length

금속학적 응고 길이는 강종의 조성, 연주 속도, 냉각 속도, 주편 치수의 상호 관계식에 의해 계산될 수 있으며 본 자료와 시뮬레이션 프로그램의 수준을 벗어난다. 연주 변수들을 적절하게 선택할 수 있도록 아래 표를 참고하면 될 것으로 판단된다.

여러 종류의 연주기들은 다양한 연주 속도와 냉각속도로 제어될 수 있으며 이에 따른 금속학적 응고 길이 (metallurgical length)를 아래 표를 통해서 알 수 있을 것이다.

Table 6-2 Metallurgical lengths for construction steel cast in the bloom caster, 250 × 250 mm.

Cooling Rate / kg water per kg steel	Casting Speed / m min ⁻¹			
	1.2	1.4	1.6	1.8
0.3	22.48	26.55	30.43	34.65
0.4	21.78	25.57	29.10	33.12
0.5	20.96	24.43	27.55	31.26
0.6	20.04	23.17	25.57	29.22

Table 6-3 Metallurgical lengths for ultra-low carbon steel cast in the slab caster, 1200 × 230 mm.

Cooling Rate / kg water per kg steel	Casting Speed / m min ⁻¹					
	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
0.4	19.03	23.06	27.23	31.55	36.06	40.73
0.5	18.30	22.16	26.16	30.30	34.62	39.10
0.6	17.67	21.38	25.23	29.22	33.36	37.70
0.7	17.11	20.70	24.43	28.30	32.28	36.47
0.8	16.63	20.10	23.70	27.46	31.35	35.40

Table 6-4 Metallurgical lengths for linepipe steel cast in the slab caster, 1200 × 230 mm.

Cooling Rate / kg water per kg steel	Casting Speed / m min ⁻¹					
	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
0.4	20.17	24.50	28.98	33.65	38.55	43.56
0.5	19.40	23.56	27.86	32.35	37.02	41.87
0.6	18.75	22.74	26.88	31.20	35.70	40.37
0.7	18.17	22.02	26.04	30.21	34.56	39.10
0.8	17.65	21.40	25.30	29.33	33.57	37.97

Table 6-5 Metallurgical lengths for engineering steel cast in the billet caster, 130 × 130 mm.

Cooling Rate / kg water per kg steel	Casting Speed / m min ⁻¹		
	3.0	4.0	5.0
0.8	17.20	22.40	28.00
0.9	16.70	21.53	26.83
1.0	16.20	20.73	25.66
1.1	15.70	19.86	24.42
1.2	15.20	19.06	23.33

6.6 몰드 진동 설정값

몰드가 진동함으로서 구리 몰드 표면과 주편과의 마찰을 줄일 수가 있다. 진동에 작용에 의해 주편과 구리몰드 표면 사이의 몰드 파우더가 침투하게 되며 윤활제의 역할을 도와주게 한다.

6.6.1 설정값

진폭 (스트록, S(mm)) : 보편적으로 진폭은 3에서 10mm 사이이다. 진폭을 증가시키면 진동하는 구리 몰드가 아래방향으로 이동하는 시간인 negative strip 시간이 비례적으로 증가하게 될 것이다. 즉, 주편의 진동 흔적인 oscillation mark의 깊이와 몰드 파우더의 소모가 증가하게 될 것이다.

진동수, f (min^{-1}): 유압 몰드 진동기들은 100에서 250 Hz가 가능하다. 진동수를 증가시킬 경우 negative strip 시간이 감소하고 oscillation mark의 깊이와 몰드 파우더의 소모가 감소할 것이다.

Negative strip 시간, t_N [s]: negative strip 시간은 구리몰드가 진동하는 동안 주편의 이동 속도보다 구리몰드가 더 빠른 속도로 아래 방향으로 이동하는 시간을 말한다.

$$t_N = \frac{60}{\pi f} \arccos \frac{1000 v_{\text{cast}}}{\pi f S} \quad [s] \quad 6-1$$

f = 진동수, min^{-1}

S = 진폭, mm

v_{cast} = 연주속도, m/min

Oscillation mark 깊이, d (mm): 구리몰드를 진동시키는 것이 필요하지만 oscillation mark에 의해 표면 품질이 떨어진다. 연속주조로 얻은 주편 표면은 초기응고가 일어나는 meniscus의 주기적 상하 이동에 의해 일어난다. Oscillation mark은 가로 균열을 야기시킬 수 있기 때문에 표면 품질에 매우 중요한 역할을 하게 된다.

Oscillation mark의 깊이는 몰드 파우더의 종류, 진폭, 진동수, 연주 속도에 의해 제어된다. 참고문헌들을 통해 값들을 회귀한 결과 다음을 얻었다.

$$d = 0.065 \cdot 1.145^S \cdot (200 \cdot 0.9^S)^{t_N} \quad [\text{mm}] \quad 6-2$$

t_N = negative strip time, s

6.6.2 진동에 의한 슬래브 표면 자국 (Oscillation Marks)

그림 6-4에서는 oscillation mark가 일어나는 기구를 보여준다. 상단 그림은 시간에 따른 몰드의 위치를 보여준다. 그림 하단에는 oscillation mark가 형성되는 기구를 설명해 주고 있다. Negative strip 시간(빛금 친 부분)은 oscillation mark가 형성되는 가장 핵심적인 요소이다. Negative strip 시간을 증가시키면 oscillation mark의 깊이가 증가하게 된다.

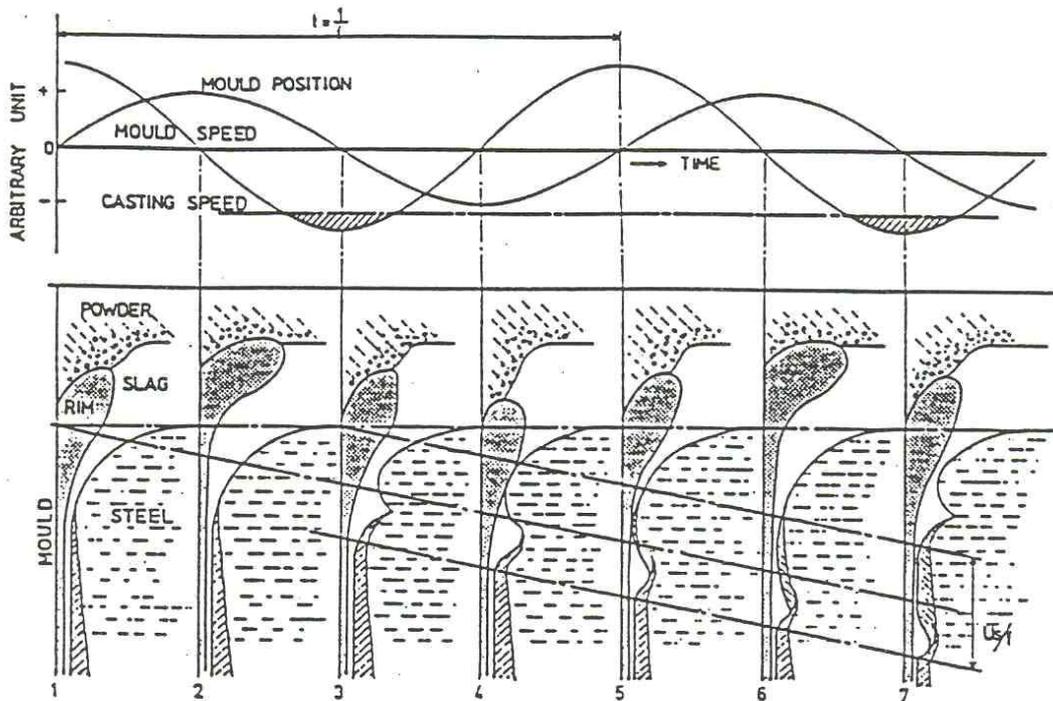


그림 6-4. Oscillation mark의 형성

Oscillation mark의 깊이를 최소화시키기 위해서는 진동의 설정값이 적절하게 최적화되어야 한다. Negative strip시간은 0.11 s에 근접할수록 바람직하며 진폭은 oscillation mark깊이가 최소가 될 수 있도록 적절하게 조정되어야 할 것이다.

극저탄소강에 경우 oscillation mark 깊이는 최대 0.25 mm로 다른 탄소강에 경우에는 최대 0.6mm가 된다.

6.7 몰드 파우더

몰드 파우더는 합성 슬래그로서 연주중 용강 위에 계속적으로 공급된다. 몰드 파우더는 용융되면서 구리몰드 표면과 주편 사이에 흘러내려간다. 적절한 몰드 파우더를 선택하는 것이 적절한 주편 표면 품질을 얻는데 핵심적인 역할을 한다. 몰드 파우더에 따라 oscillation mark 깊이는 영향을 받으며 몰드 파우더 소모에도 영향을 준다.

- 몰드 연주 파우더의 역할은 다음과 같다.
- 주편과 몰드 사이의 윤활제의 역할을 한다.
- 주편으로부터 구리몰드로의 열전달을 제어하게 된다.
- 용강의 상부 대기로의 복사열 방출을 억제하여 열보온을 도와준다.

- 대기로부터의 재산화를 억제한다.
- 용강 표면으로 올라온 개제물의 흡착

그림 6-5에서는 연주기에서 사용되는 몰드 파우더의 일반적인 거동 및 역할을 보여준다. 몰드 파우더는 용강 표면 위에서 공급된다. 파우더는 용융되고 초기 응고가 일어나는 meniscus에서 구리몰드와 주편 사이로 침투하게 된다. 구리몰드와 주편 사이에 균일하고 연속적으로 용융 몰드 파우더가 공급되어지면서 충분한 윤활 및 균질한 열전달이 일어나게 된다.

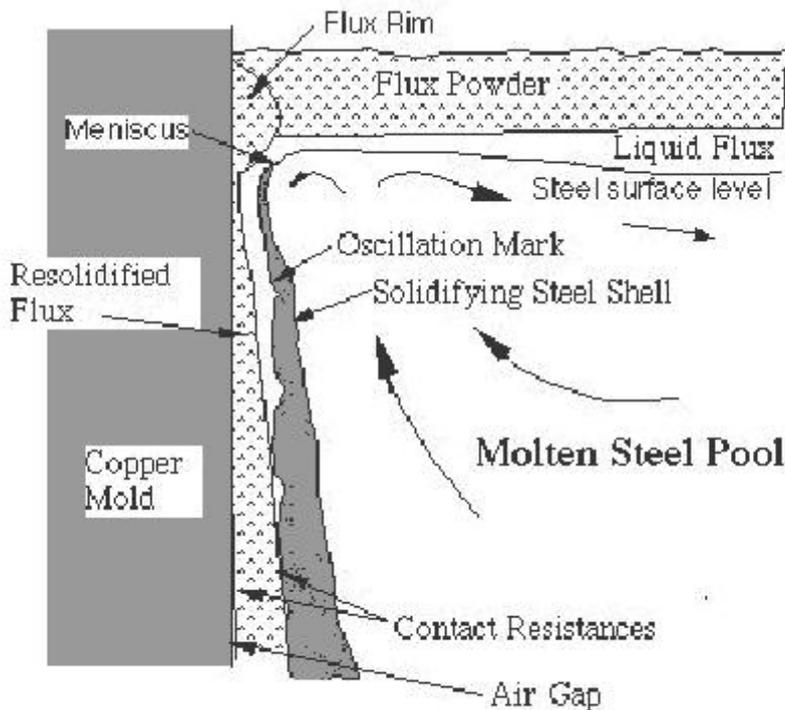


Figure 6-5 Function of mold powder [3]

6.7.1 중요 변수

몰드 파우더의 소모는 몰드 파우더의 종류에 따라 변할 뿐만 아니라 진동 및 연주 속도에 따라 달라진다. 소모는 주편의 단위 표면적당 질량, kg/m^2 , 으로 측정된다. 용융 몰드 파우더가 주편과 구리 몰드 사이로 주입되기 위해서는 구리몰드의 진동이 결정하기 때문에 몰드 파우더의 소모는 진동 설정값에 의해 결정된다.

몰드 파우더 소모와 운전변수들과의 관계식에 관해서 다양한 의견들이 제시되어왔다. 본 시뮬레이션 프로그램은 다음 상호 관계식을 통해서 몰드 파우더 소모량을 계산하였다.

$$Q = \frac{1.7 \times t_N}{\sqrt{\eta \times v_c}} \text{ [kg m}^{-2}\text{]}$$

6-3

Q = 단위 면적당 몰드 파우더 소모량, kg/m²

t_N = negative strip time, s

η = 몰드 파우더 점성, Pa s

v_c = 연주 속도, m/min

몰드 파우더 소모량이 부족할 경우 주편과 구리몰드간의 직접적인 접촉이 일어나서 소위 sticking이 일어나며 주편파괴로 이어질 수가 있다. 이를 막기위해서 몰드 파우더 소모량은 최소 0.3 kg/m²으로 유지되어야 하고 엔지니어링 강종에 경우 0.15 kg/m² 정도이면 적절할 것이다.

몰드 파우더의 가장 중요한 인자중에 하나는 한계 온도 (break temperature)이다. 한계온도는 파우더의 점성이 급격하게 변하게 되는 온도로서 용융몰드 파우더가 윤활에 역할이 불가능해지는 온도가 되는 것이다.

그림 6-6은 연주 속도에 따른 한계온도의 값을 나타내고 있다. 균열이 잘 일어나는 강종일 경우 몰드 파우더중 A와 B를 사용하는 것이 바람직하며 sticking이 잘 일어나는 강종은 몰드 파우더 중 C와 D를 이용하는 것이 바람직하다.

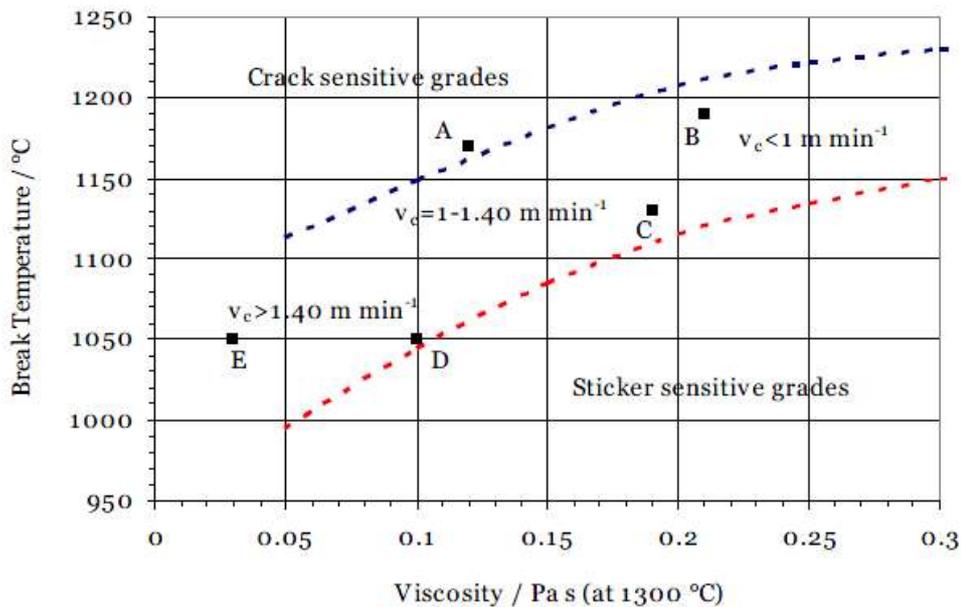


Figure 6-6 Break temperature and viscosity of the mold powder in relation to casting speed [4]

Table 6-6 Material properties of available mold powders.

Powder	Viscosity / Pa s	Break temperature / °C	Cost / \$ per kg	Purpose
A	0.12	1170	0.40	Used for crack sensitive grades
B	0.21	1190	0.35	
C	0.19	1130	0.45	Used for sticker sensitive grades
D	0.10	1050	0.50	
E	0.03	1050	0.55	Used for high speed casting

6.8 레이들 주문

시뮬레이션의 목적은 용강이 들어 있는 3개의 레이들을 연속적으로 주조하는 것이다. 시뮬레이션 시작 초기에는 첫번째 레이들은 이미 턴디쉬 위에 놓여 있으며 그 뒤에 주문되는 두번째 및 세번째 레이들은 향후 연주공정 쪽으로 도착하게 된다. 3개의 레이들이 연주기에 도착할 때 주문되는 용강 온도와 도착 시간을 설정할 수 있다. 주문된 도착 시간 보다 연주기에 레이들이 실제 도착 할 수 있는 시간은 연계된 운전 방식에 경우 (6.1.2절) 2 차 정련의 성과에 따라 결정되어진다. 2 차 정련에서 목표한 공정 운전 시간에 부합할수록 연주기에 레이들이 실제 도착하는 시간이 주문한 시간과 일치할 것이다. 이에 따라 구리 몰드내의 최적 연주 조건을 얻는데 시간과 온도를 적절하게 맞출 수 있는 시간적인 여유가 있을 것이다.

예정된 도착시간은 시뮬레이션이 시작된 시점으로부터 몇 분후에 도착하게 할 것인가를 입력하게 되고 예정된 도착 온도는 섭씨로 입력하게 되는 것이다.

열손실에 의해 용강은 온도가 하강함을 이해해야 할 것이다. 레이들에서 용강의 온도 하강율은 0.5°C/min.

6.8.1 시간

레이들을 비우는데 필요한 시간은 다음 레이들이 준비가 되어야 하는 시간적 여유를 말해주며 레이들 1번이 완전히 비워질 때 레이들 2번이 도착하도록 시간을 조정해야 한다. 레이들을 비우는데 몰드의 연주 폭, 주편 가닥의 개수, 연속주조 속도 등이 결정하게 되는 것이다.

주편 가닥당 주조가 되는 부피는 다음 식으로 구해진다.

$$\dot{V} = w \cdot t \cdot v_c \quad [m^3 \text{ min}^{-1}] \quad 6-4$$

W : 연주 폭

t : 주편의 두께

v_c : 연주 속도

따라서 턴디쉬 내로 유입되어야 하는 용강의 양은

$$\dot{M}_T = n \cdot \rho_{liq} \cdot w \cdot t \cdot v_c \quad [\text{kg min}^{-1}] \quad 6-5$$

n : 주편 가닥수

ρ_{liq} : 용강의 밀도, 7400 kg/m³

정상상태의 연주 조건에서는 (연주속도 일정) 희망하는 용강 높이에 따라 레이들이 비워지는 시간은

$$\tau = \frac{m_{ladle}}{\dot{M}_T} = \frac{m_{ladle}}{n \cdot \rho_{liq} \cdot w \cdot t \cdot v_c} \quad [\text{min}] \quad 6-6$$

m_{ladle} : 레이들에서 빠져 나와야 하는 용강 질량, kg. 슬라이드 게이트에서 슬래그가 감지되면 자동적으로 레이들로부터 턴디쉬로의 용강 공급이 차단되며 보편적으로 레이들에서의 용강 높이가 5%가 되면 슬라이드 게이트가 닫힌다.

[Example]

가스강관 강종을 연주하게 되며 1.5m 폭에 0.2 m 두께의 슬래브 연주기를 운전하고 있다. 연주 속도는 1.8 m/min이며 200 톤의 레이들을 사용하고 있다. 용강으로 가득찬 레이들을 턴디쉬내로 용강을 공급하기 시작하고 정상상태에서 계속 공급을 한다고 가정할 때 레이들 내의 용강 높이가 5%에 도달할 때까지의 시간을 계산하여라.

$$\tau = \frac{m_{ladle}}{\dot{M}_T} = \frac{m_{ladle}}{\eta \times \rho_{liq} \times w \times t \times v_c} = \frac{200,000 \times 0.95}{2 \times 7400 \times 1.5 \times 0.2 \times 1.8} = 23.8 [\text{min}]$$

6.8.2 온도

구리몰드내의 용강의 온도가 최적 조건이 되도록 앞서 레이들 냉의 용강 온도를 적절하게 주문해야 할 것이다. 대학생 사용자에게 경우에는 용강의 냉각속도는 0.5 °C/min이나 산업체 종사자일 경우 냉각속도는 0.5-1.0 °C/min 까지 변한다.

시뮬레이션이 시작하는 시점부터 레이들이 비워질때까지의 전반적인 시간을 계산하면 용강이 떨어지는 온도를 계산할 수 있을 것이다. 결과적으로 용강 도착시 필요한 용강 온도가 결정되어 진다.

6.8.3 용강 액상선 계산

용강의 온도가 용강 조성에 따른 액상선 (용강이 응고가 되는 온도) 아래로 절대 떨어지면 안될 것이다. 액상선 (T_{liq})은 조성에 따라 변동되며 식 [5]를 이용하여 예측될 수 있다.

$$T_{liq}=1537-78\%C-7.6\%Si-4.9\%Mn-34.4\%P-38\%S$$

실공정에서는 용강이 비균질한 온도 분포 (모서리와 끝단에는 일반적으로 온도가 낮다)를 갖고 있기 때문에 용강의 온도를 액상선보다 약간 위에 놓이도록 주문해야 한다. 액상선과 실제 용강의 온도 차이를 과열이라고 한다. 과열이 액상선의 온도보다 100°C 이상이 되도록 조정해서 몰드 위에서 응고가 되지 않도록 주의해야 한다.

과열 정도가 너무 높으면 추가적인 열에너지를 구리 몰드로부터 제거해야 하기 때문에 주편의 셸 두께가 더욱 얇게 되어 진다. 주편의 두께가 너무 얇아서 용강의 정압을 받쳐주지 못하면 주편 파괴가 일어날 것이다. 최대 과열정도는 슬래브 연주기일 경우에는 500°C이며 블룸이나 빌렛 연주기는 600°C가 한계이다.

6.9 선택 변수 재검토

시뮬레이션이 시작되기 전에 사용자가 선택한 모든 운전 변수들이 정리되어 있다. ‘다음’을 누르면 시뮬레이션은 시작되고 프로그램을 처음부터 다시 시작하지 않고서는 시뮬레이션 실행 중에는 변수들을 변경할 수 없다.

7. 시뮬레이션 실행

연속주조를 위한 변수들을 설정하면 시뮬레이션을 실행할 시간이다. 레이들에 있는 용강을 턴디쉬에 공급하고 몰드내 용강의 높이를 적절하게 제어해서 선택한 연속주조 속도가 유지되고 양호한 주편 품질을 얻어야 할 것이다. 레이들을 교환하고 압하 롤들의 과도한 이탈을 확인하고 주편을 적절한 크기의 반제품으로 만들어야 한다.

7.1 연주의 시작

용강 출강을 위해서 레이들 문을 개방해야 할 것이다. 레이들에서 턴디쉬로 용강의 공급량을 증가시키기 위해서 슬라이딩 게이트를 열어야 한다. “레이들 유량 (Ladle flowrate)”이라고 표시된 유량제어기의 윗방향 화살표나 아래방향 화살표

를 누르거나 숫자를 직접 입력할 수도 있다.

적당한 용강 높이가 턴디쉬에서 확보되면 턴디쉬에서 구리몰드내로 용강유입량을 증가시키기 위해서는 스톱퍼 막대기를 올린다. “턴디쉬 유량 (Tundish flowrate)”으로 표시된 유량제어기의 윗방향 화살표나 아래방향 화살표를 누르거나 숫자를 직접 입력할 수도 있다.

구리몰드 내의 용강 높이가 적절히 높으면 (70% 이상), 적절한 연주속도를 지정함으로써 연주를 시작하여야 한다.

각각의 연주 구성품들의 용강 높이가 적절히 높도록 레이들, 턴디쉬, 그리고 구리 몰드내의 용강량을 적절하게 조절해야 한다. 턴디쉬 (7.3 절 참조)와 구리몰드 (주편 파괴를 방지하기 위해, 7.5 절 참조)의 높이를 약 80에서 90%으로 유지해야 한다. 그러나 과도하게 용강량을 증가시켜 넘치는 현상이 일어나지 않도록 조정해야 한다.

7.2 레이들 교체

차기 레이들은 레이들 받침대 (터렛)에 자동적으로 올려진다. 산업체 사용자일 경우에는 차기 레이들의 지연이 최대 10분 정도 일어날 수 있사오니 적절하게 대응해야 할 것이다.

새로운 레이들을 터렛에서 회전시키기 전에 기존에 있었던 레이들의 흐름을 멈추어야 할 것이다.

레이들을 교환하는 동안에는 당연히 턴디쉬의 용강 높이가 감소할 것이며 이에 대비하기 위해 터렛을 회전하기 전에 턴디쉬의 용강 높이를 임시적으로 증가시켜야 한다. 터렛 회전이 완료되고 턴디쉬의 최적 용강 높이를 빨리 확보하기 위해서는 새로운 레이들의 유량을 높이 조절하여 용강의 공급 속도를 증가시켜야 할 것이다.

7.3 용강의 청정도

가스 또는 원유 송유관과 같은 특정 강종은 청정도가 높은 강을 요구한다 - 즉, 균열을 용이하게할 수 있는 산화물과 황화물의 개제물의 양이 매우 낮아야 한다. 2 차 정련에서 일어나는 황화물과 산화물의 화학적 거동들은 매우 복잡하고 현재에도 연구되고 있는 분야이다. 자세한 정보를 필요할 경우 논문이나 서적들을 참고하길 바란다.

시뮬레이션을 실행하면 강종에 따라 개제물 정도를 ‘중간 (moderate)’, ‘낮은 (low)’, 와 ‘매우 낮은 (very low)’으로 제어될 수가 있다. 최종 개제물의 정도는 많은 운전 변수들이 작용하게 된다. 연주기로 도착하는 용강은 강종에 따라 적절한 수준의 청정도를 가진 것으로 간주한다. 예를 들어, 엔지니어링 강종에 경우 개제물의 정도가 “매우 낮은” 수준일 필요는 없으며 개제물 정도가 “낮은” 수준으로만 만들어주면 레이들 안의 용강은 엔지니어링 강의 청정도를 만족한다. 그러나 청정도가 성공적인 주조로 이어질지는 미지수이다.

완충역할을 하는 턴디쉬를 이용하여 개제물의 정도를 유지하거나 낮출 수도 있다. 턴디쉬내 용강의 흐름을 적절하게 제어하여 턴디쉬내의 슬래그 층과 흡수될 수 있도록 제어하는 것이다. 용강의 청정도를 높이기 위해서는 턴디쉬 내의 용강의 정체시간을 증가시킬수록 효과적이다. 레이들내 과도한 개제물이 존재할 경우 연주 속도를 낮추어서 턴디쉬 내의 용강의 정체 시간을 늘려 개제물이 턴디쉬 슬래그 층에 흡수되도록 유도해야 할 것이다. 연계된 시뮬레이션 운전 방식에 경우에는 (6.1 절을 참조) 개제물의 정도는 2차 정련에서의 결과와 연결될 것이다.

7.4 슬래브 연주기에서의 변형 분석 모델

극저탄소강과 가스송유관 강종의 주조를 위해서는 동일한 기계적 특성들을 갖는 연주기를 사용한다고 가정한다. 완곡형 구리몰드와 압하롤 세그먼트들의 곡률을 지나 주편을 수평으로 교정해줌으로서 주편 가닥은 완곡하게 구부러진다. 연주기 전체 곡률은 크게 35개 롤과 25개 롤로 구분된 2개 구간으로 나누어진다.

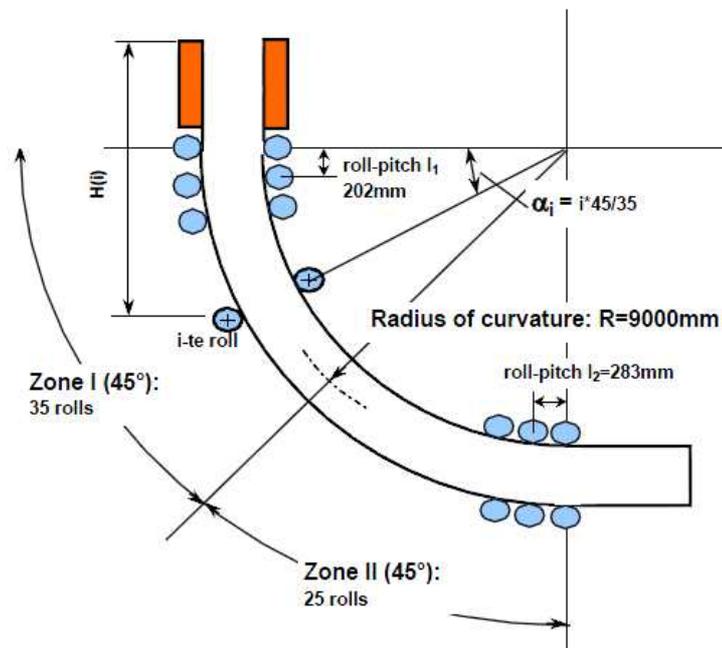


Figure 7-1 Schematic drawing of the slab caster

다음 장에서는 내부 균열과 표면 균열이 일어나는 기본 이론과 시뮬레이션을 위한 관계식들에 대해서 서술하겠다.

7.4.1 내부 균열의 추정치

내부 균열의 확률을 예측하기 위해서 응고 경계면에서의 변형률이 임계변형률과 비교 되어진다. 따라서 각 압할률에 따른 응고 경계면에서의 변형률이 계산될 수가 있다. [6-8]

셸의 팽창, 굽힘, 교정기를 지난 압축, 받침롤들의 정렬 불량 등에 의해 응고 경계면에서 발생하는 인장변형률이 다음 경험식을 이용해서 계산될 수가 있을 것이다. 굽힘과 수평교정에 의해 발생하는 변형률은 다음과 같다.

$$\varepsilon_{BS} = 100 \cdot \left(\frac{d}{2} - S \right) \cdot \left| \frac{1}{R_{n-1}} - \frac{1}{R_n} \right| \quad 7-1$$

d : 슬래브의 두께, mm

S : 주변 셸 두께, mm

R_{n-1}와 R_n : 롤 n-1과 n의 곡률반경, mm

굽힘과 교정은 다중 위치 굽힘과 교정 (다섯 곳) 방법에 의해 이루어져 있다. 그림 7-2은 가정된 곡률반경을 이용하여 다섯 곳 교정방법을 보여주고 있다. 굽힘 방법과 교정방법은 같으며 동일 곡률반경 값을 이용한다.

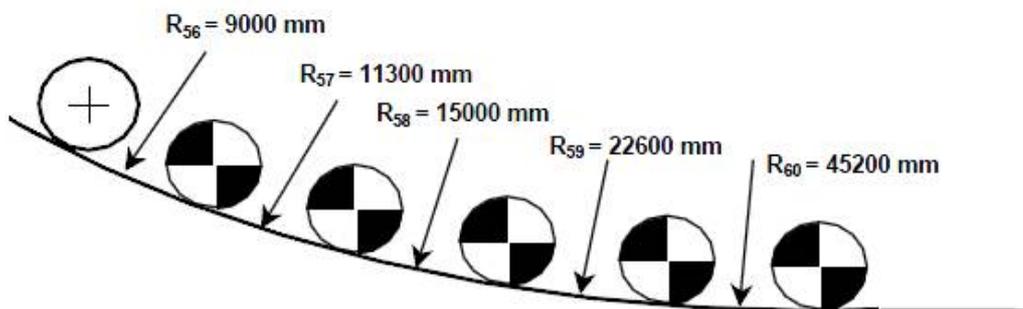


Figure 7-2 Five point straightening method

팽창 변형률 (ϵ_B)은 계산하기 위해서는 다음과 같은 보편적인 경험식을 이용할 수가 있다.

$$\epsilon_B = \frac{0.101972 \cdot P \cdot l^3}{3800 \cdot S^3} \cdot 100 \quad 7-2$$

S : 응고된 주편 두께, mm

P : 용강의 정압, N/mm²

l : 롤간의 거리, mm

롤들의 정렬불량으로 나타나는 변형률 (ϵ_M)은 다음 관계식으로 예측할 수 있다.

$$\epsilon_M = 1.15 \cdot \frac{3 \cdot S \cdot \delta_M}{l^2} \cdot 100 \quad 7-3$$

δ_M : 정렬불량 정도, mm

마지막으로 연속주조중 응고 경계면에서 일어나는 총 변형률(ϵ_{intern})은 굽힘/교정, 팽창과 롤간의 정렬불량 등에 일어나는 변형률을 더한 값이다.

$$\epsilon_{intern} = \epsilon_{BS} + \epsilon_B + \epsilon_M \quad 7-4$$

총 변형률이 임계변형률을 초과하면 내부 균열이 생길 것이다. 임계변형률은 강의 조성과 변형률속도에 의해 결정될 것이다 [8]. 토목용 및 엔지니어링 강에 경우 임계변형률은 약 1%이고 가스관 강종이나 극저탄소강에 경우 임계변형률이 약 2%이다.

연속주조의 속도에 경우 내부 균열 형성이 제한 요소로 작용할 것이다. 가스강 종과 극저탄소강에 경우 내부 결함이 불합격일 때 슬래브의 제품이 강등된다.

7.4.2 표면 균열의 추정치

슬래브 연주 중에 극저탄소강과 가스관 강종의 표면 균열의 예측에 경우 가로 균열만 일어나는 것으로 가정한다 [9]. 연속주조 중에 표면 변형률 (ϵ_{surf})은 굽힘/교정 변형률(ϵ_{BS}), 롤 정렬불량 변형률 (ϵ_M), 응고되고 있는 주편 쉘의 팽창 변형

롤 (ϵ_B)과 열적 수축 변형률(ϵ_{th})의 총합으로 주어진다.

$$\epsilon_{surf} = \epsilon_{BS} + \epsilon_M + \epsilon_B + \epsilon_{th} \quad 7-5$$

표면에서 발생하는 굽힘/교정에 의한 변형률은 다음 관계식으로 예측될 수가 있다.

$$\epsilon_{BS} = 100 \cdot \frac{d}{2} \cdot \left| \frac{1}{R_{n-1}} - \frac{1}{R_n} \right| \quad 7-6$$

- d : 슬래브의 두께, mm
- R : 주변 바닥의 곡률 반경, m
- n : 롤 번호

전술한 바와 같이 (그림 7-2) 굽힘과 교정은 다섯 점 방법에 의해서 이루어진다. 롤의 정렬불량에 의해 일어나는 변형률은 정위치로부터 이탈된 정도로부터 예측될 수가 있을 것이다.

$$\epsilon_M = 100 \cdot \frac{d}{2} \cdot \left| \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_d} \right| \quad 7-7$$

- R_0 = 정위치에서의 곡률반경, mm
- R_d = 롤의 이탈된 후에 곡률반경, mm

응고된 주변 쉘의 팽창으로 발생되는 표면 변형률은 응고경계면의 팽창에 의한 변형률과 동일하며 식 (7-2)와 식 (7-3)으로 계산될 수가 있다. 열적 변형률은 열 팽창계수 α 와 온도 구배 ΔT 의 곱으로 주어진다.

$$\epsilon_{th} = \alpha \cdot \Delta T \cdot 100 \quad 7-8$$

팽창에 의한 표면 변형률은 응고경계면에서 발생하는 변형률인 식 (7-2)을 사용할 수 있다.

전체 연속주조에서 주편 표면의 단위요소가 이동하게 되며 표면에서의 전체 변형률 (ϵ_{surf}^{tot})이 계산되어야 하며 n은 롤의 수를 말한다.

$$\epsilon_{surf}^{tot} = \sum_i^n \epsilon_{surf}(i) \quad 7-9$$

전체 표면 변형률이 임계변형률을 초과하면 표면 균열이 생성될 것이다. 임계 변형률은 강종의 조성, oscillation mark의 깊이, 교정기 (straightener)에서의 표면 온도[9]. Nb 함유된 강종 (가스관 강종과 토목용 강종)은 표면 균열이 용이하게 일어난다. 가스관 강종에 경우 온도는 1050°C 아래로 하강하면 안되며 토목용 강종에 경우 1100°C 아래로 떨어지면 안된다. 또한 oscillation mark의 깊이는 얇을수록 좋다. 0.2mm 미만일 경우 임계변형률은 증가하게 될 것이다. 표면 균열이 존재하는 슬래브나 블룸에 경우 표면 후처리를 함으로서 생산단가를 높게 된다. 주편 표피 제거작업은 전체 생산 단가의 3%을 차지한다. 표면 균열이 있는 극저탄소강에 경우 표피 제거 작업이 이루어지고 표면 품질에 조건 때문에 제품이 강등될 것이다.

7.5 주편 파괴의 예방

주편의 쉘 강도보다 용강의 정압이 클 경우 주편 쉘 밖으로 용강이 누출되는 주편 파괴가 일어난다. 주편 파괴가 일어나지 않도록 주편의 모든 부분에서 충분히 적절한 두께가 확보되어 용강의 하중을 받쳐줄 수 있도록 해야 한다.

주편의 두께가 얇을수록 주편 파괴가 일어날 수 있는 확률이 높아지기 때문에 몰드내의 용강 높이가 높을수록 용강의 과열이 낮을수록 주편 파괴를 저지하는데 유리하다. 주편이 구리몰드를 뺄 때 충분한 두께를 가질 수 있도록 해준다. 용강의 정압하에 얇은 쉘일 경우에 주편이 파괴가 될 수 있기 때문에 oscillation mark은 얇을수록 좋다.

정확한 조성에 의존하지만 가스관 강종에 경우에는 포정 또는 아포정 조성이 다. 포정 조성은 균열이 용이하게 일어날 수 있으며 연주할 경우 균열이 전파하여 주편파괴가 일어나지 않도록 주의가 요하는 강종 조성이다.

다른 탄소 당량식을 이용하여 강종이 포정인지 아닌지를 결정할 수 있다. 포정 조성일 경우 탄소당량이 0.1 wt%을 초과한다.

$$C_{eq} = \%C - 0.1\%Si + 0.04\%Mn - 0.04\%Cr + 0.1\%Ni - 0.1\%Mo \quad 7-10$$

적절한 몰드 파우더를 사용하는 것이 매우 중요한 인자 중에 하나이다. 강종에 적절하지 않은 몰드 파우더를 사용할 경우 주편 파괴가 일어날 확률이 커진다. 주편과 구리몰드 사이의 윤활이 연속적으로 균일하게 이루어지기 위해서는 충분한 양의 몰드 파우더를 용강 위에 공급해 주어야 한다.

종합적으로 주편 파괴를 방지하기 위해서는

- 구리몰드에서의 용강 높이는 80-90%를 유지.
- 낮은 과열
- 얇은 oscillation mark
- 적절한 몰드 파우더

8. 사용자 인터페이스

이 장에서는 시뮬레이션 프로그램을 실행하는 기본 방법에 대한 설명이다. 레이들을 움직이는 방법, 합금을 첨가하는 방법, 각 연주기의 구성품들을 제어하는 방법이 설명되어 있다.

8.1 시뮬레이션 제어기

8.1.1 시뮬레이션 실행 속도

시뮬레이션의 실행 속도는 실시간 및 32 배 빠르기로 다양한 속도로 제어될 수 있다. 운전중에 실행 속도를 언제든지 변경될 수가 있다. 추천되는 가장 빠른 속도는 16배속이다. 화살표를 이용하여 시뮬레이션 실행속도를 1배씩 증가하거나 감소시킬 수가 있다. 다른 방법은 속도 칸 안에 마우스를 두 번 눌러서 현재 설정값을 지우고 새로운 설정값을 직접 입력하고 “Enter”를 누르는 것이다.

8.1.2 레이들 터렛 제어

레이들 터렛은 “Rotate (회전)”을 누르면 실행된다. 레이들이 없을 경우나 이미 회전하고 있을 경우 터렛은 회전 할 수 없다. 레이들의 슬라이드 게이트가 열려

있을 때에도 회전이 불가능하다. 레이들 회전이 안될 경우 전술한 세가지의 조건들을 확인하여라.

8.1.3 레이들

“Ladle flowrate (레이들 유량)”이라는 라벨 옆으로 설정 값을 변동시킬 수 있는 단추들이 있으며 레이들에서 턴디쉬 내로 공급되는 용강량을 제어할 수가 있다. 레이들 유량 설정값 단추들이 시뮬레이션 실행 속도 제어기와 유사하게 작동된다. 레이들에서 턴디쉬로의 용강량은 100kg/min의 간격으로 설정될 수 있다.

8.1.4 턴디쉬

턴디쉬에서 구리몰드로의 용강량 공급은 “Tundish flowrate (턴디쉬 유량)”이라는 라벨 옆 단추들로 제어할 수가 있다. 턴디쉬 유량 설정값 단추들이 시뮬레이션 실행 속도 제어기와 유사하게 작동된다. 레이들에서 턴디쉬로의 용강량은 25 kg/min의 간격으로 설정될 수 있다.

8.1.5 주편가닥

연주속도는 “연주속도”라고 표시된 목록상자에서 지정된 속도를 선택하면 된다. 연주 속도 목록중에는 ‘*’으로 표시된 숫자들이 있으며 이는 연주 시작 초기에 사용되는 속도이다. 제품의 품질이 적절한 수준으로 생산되는 것은 ‘*’으로 표시된 속도 이상의 연주속도로 실행되어야만 가능함을 인지하길 바란다.

정렬불량인 롤들은 프로그램상에서 다른 색깔로 변하게 된다. 이탈된 정도가 얼마가 되었는지는 정비가격이 얼마인지를 확인하기 위해서 마우스를 색깔이 상이한 롤위에 올려 놓으면 된다. 롤들의 이탈을 수정하기 위해서, 즉 고치기 위해서, 롤을 마우스로 누르면 된다. 전체 운전 비용에 수리비용이 추가 될 것이다.

연주기의 롤 이탈은 연주 중에 불가능하며 정비 Shutdown을 해야만 한다.

8.1.6 침지심의 교환 (산업체 근무자 사용자에 경우에만 해당)

“Change SEN (침지심 교환)”이라는 단추를 누르면 침지심은 교환될 수가 있다. 침지심은 턴디쉬에서 용강 공급이 중지되었을 경우에만 가능하다. 침지심을 교환하는데 15 초 가량 소요되고 주편 가닥당 전체 운전비용에 \$200가 추가된다.

8.1.7 전자기 유도 교반 (EMS : 빌렛이나 블룸 연주기에 경우만 해당)

전자기유도 교반 (EMS)은 빌렛이나 블룸 연주기 운전시에 해당된다. EMS은 주편

내의 편석을 감소시키고, 내부품질을 증가시키게 된다. 편석 품질을 만족시키지 못할 경우 EMS를 작동시켜 보도록 하라. “EMS” 단추를 누르면 현재 상태에 따라 EMS가 on/off가 될 수가 있다. EMS가 작동하고 있으며 단추 주위로 밝게 비추어질 것이다.

8.1.8 경압하울 (슬래브 연주기에 해당)

연주중에 경압하울 정도는 “Soft reduction (경압하울)”이라는 목록단추를 누르면 선택 리스트가 보일 것이며 이를 통해 제어될 수 있다. 경압하울 “없음”, “낮음”, “중간”, “높음” 으로 선택할 수 있다.

8.2 연주 정보

연주중이나 연주가 완료된 이후에 연주와 관련된 상세한 정보를 확인 할 수가 있다. 적절한 자판 단추를 누르면 다음과 같은 정보를 확인할 수가 있다.

8.2.1 연주 중에 일어난 중요 목록 (자판에서 E)

연주 중에 시뮬레이션의 설정 값들 그리고 이에 따른 중요 사항들이 순차적으로 나열될 것이다. 이는 지금까지 하고 있는 사용자의 활동과 이에 따른 결과들을 정리하는데 유용하다. 시뮬레이션이 끝나면 결과를 확인하고 이 목록들이 시뮬레이션이 성공했던 또는 실패했던 원인 분석에 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

8.2.2 유체의 흐름 확인 (자판 F)

“F”를 누르면 레이들에서 턴디쉬 턴디쉬에서 구리몰드내로 공급되는 용강의 흐름을 그래프로 나타낸다.

8.2.3 연주기 전방의 롤 보기/숨기기 (자판 H)

“H”을 누르면 전방에 롤들을 볼수도 숨길 수도 있다. 극저탄소강이나 가스관 강종의 전체 주변을 관찰하는데 중요한 역할을 하게 된다.

8.2.4 용강 높이 보기 (자판 L)

“L”을 누르면 레이들이나 턴디쉬의 용강 높이를 확인할 수 있다.

8.2.5 품질 보기 (자판 Q)

“Q”을 누르면 연주 반제품의 품질을 그래프화 될 것이다. 양호하고 불량인 부분이 표시되고 주변의 핵심적인 이슈들에 대해서 나타낼 것이다. 시뮬레이션이 종결되면 확인할 수 있는 상황이다.

8.2.6 온도 확인 (자판 T)

“T”를 누르면 레이들과 턴디쉬에서의 시간에 따른 온도의 변화를 확인할 수 있다. 시뮬레이션이 종결되면 확인할 수 있는 사항이다.

8.2.7 시뮬레이션을 통한 연주 실행에 관한 정보 대화 상자 닫기 (자판에서 X)

“X”를 누르면 정보 대화상자가 닫힌다.

8.3 시뮬레이션의 결과

용강에 마지막 부분이 연주되고 주편이 연주기에서 빠져 나오면 시뮬레이션은 종결되고 연주의 결과가 보여질 것이다. 4개의 핵심적인 결과들이 관찰될 것이며 성공적이든 실패했든 연주는 더 자세한 정보를 알기 위해서 추가적으로 5개의 추가적인 정보중에 한가지를 추가적으로 선택해서 관찰할 수 있다. 4개의 핵심적인 그림들은 다음과 같다.

총 연주길이 : m으로 표시된다.

품질 조건을 만족하는 연주 길이 : m와 %으로 표시된다.

전체 생산 가격 : \$으로 표시되며 시간당 생산단가와 정렬불량을 수정하기 위한 추가 비용, 온도 측정에 필요한 비용 등이 포함되어 있다.

톤당 생산단가 : 전체생산가격을 품질조건을 만족하는 연주량으로 나눈 값이다.

추가적인 상세 정보에는 온도, 용강 높이, 레이들 및 턴디쉬에서의 용강 흐름 변화 그리고 event 목록과 품질 목록이 관찰될 것이다. 이 정보들은 연주의 운전 중 문제들을 분석하는데 도움이 될 것이며 향상된 다음 번의 시뮬레이션에 도움이 될 것이다.

품질 목록에는 주편의 품질의 변동을 보여준다. 초기 응고 부분은 그림에서 $x=0$ 인 부분이며 최종 응고 부분은 오른쪽 끝에 있다. 주편의 불합격은 크게 다섯 가지 부분에서 평가된다.

- 내부 균열
- 표면 균열
- 중심편석
- 개제물의 정도
- Oscillation mark

그림은 이러한 5가지의 조건을 이용하여 주편의 품질을 평가해 준다. 빗금친 부분이 품질이 불합격한 부분이다. 강종에 따라 결함들의 역할이 다르다. 어떤 표면 결함은 표피 제거작업에 의해 처리될 수 있으나 어떤 결함은 제품 품질을 강등시킬 수가 있고 최악에 경우 주편을 사용할 수 없어 고철장 신세가 되기도 한다. 결함이 없는 반제품의 경우 품질이 목적에 부합하는 수준이라고 가정하는 것이다. 표 8-1은 강종내 결함 종류에 따라 어떠한 대응책이 있는지를 보여준다.

표8-1. 품질문제에 대한 대응책.

Table 8-1 Quality defects and their countermeasures.

Steel	Scarfe	Downgrade	Scrap
CON	Surface cracking	Any two defects	More than two defects
ULC	Surface cracking or Oscillation marks	Any defect	More than two defects
LPS	Surface cracking or Oscillation marks	Internal cracking or Center segregation or Inclusion content	More than two defects
ENG	-	Any two defects	More than two defects

제품의 품질을 강등시키면 이익을 20% 감소시킬 것이고 고철로 처리하면 80%의 이익 손실이 발생한다. 표피 제거작업은 강종 생산가격의 2.5%정도 차지하게 된다. 따라서 가격경쟁력을 향상시키기 위해서는 결함이 없는 주편을 생산하는 것이 매우 중요하다.

내부 균열과 표면 균열이 응고중 주편 내의 응력과 변형에 의해 발생된다. 균열이 생성되는 것을 억제하기 위해서는 몰드 파우더 및 진동이 최적화 되어야 하며 oscillation mark 깊이는 0.2 mm 이하로 확보하고 롤의 이탈을 사전에 막을 수 있는 준비를 철저히 해야 한다.

중심편석은 연주속도와 2차 냉각 제어에 의해 조정될 수 있으며 최종 응고점이 경압하가 이루어지는 구간에 놓이도록 제어해야 한다. 위치가 적절히 최적화되었으면 경압하율을 제어함으로써 압하율을 증가시킬 수가 있다.

개제물 정도는 턴디쉬에서의 용강 정체시간을 증가시키면 감소될 수가 있다. 정체시간을 늘리기 위해서는 턴디쉬내의 용강 높이를 높게 유지하고 연주속도를 늦추는 방법이다.

Oscillation mark은 연주 시뮬레이션이 시작되기 전에 진동 설정 값으로 제어된다. Oscillation mark 불량은 이러한 진동 설정값들을 미리 최적화해야 한다는 것이다.

9. 참고문헌

- [1]. E Schürmann et al.: Einfluss der Kokillenoszillation auf die Oberflächenqualität von Stranggussbrammen, Stahl und Eisen, 1986, vol. 106, pp. 1196-1201.
- [2]. H Tomono: Elements of oscillation mark formation and their effect on transverse fine cracks in continuous casting of steel, Doctor Thesis, EPF Lausanne, 1979
- [3]. AISE, The Making, Shaping and Treating of Steel, Casting Volume CD, AISE, 2003
- [4]. Normanton et al: VAI's 8th Continuous Casting Conference, 2000, Linz, Austria
- [5]. T Kawawa: Report of 6th Meeting on Solidification of Steel, No. 6-III-9, Japan 1973
- [6]. Y Morita et al.: Strain analysis on internal cracks in continuously cast steel slab, The Sumitomo Search, 1985, vol. 30, pp. 19-30
- [7]. Z K Han and B Liu: Prediction and Analysis of Internal Cracks in Continuous Cast Slabs by Mathematical Models, ISIJ International, 2001, vol. 41, pp. 1473-1480
- [8]. Y M Won et al.: A New Criterion for Internal Crack Formation in Continuously Cast Steels, Met. Mat. Trans B, 31B (2000), 779-794
- [9]. M Suzuki et al.: Simulation of transverse crack formation on continuously cast peritectic medium carbon steels slabs, Steel Research, 1999, no. 70, pp. 412-419
- [10]. M Wolf: Initial Solidification and Strand Surface Quality of Peritectic Steels in Continuous Casting vol. 9, Iron- and Steel Society, Warrendale, USA, 1997
- [11]. G Arth et al.: Mould powder consumption in continuous casting of steel, Bachelor Thesis, Department of Metallurgy, University of Leoben, 2004
- [12]. H Steinrück et al : Modeling for fluid flow in continuous casting, Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Austria, Leoben, 1996, vol. 141, no. 9, pp. 399-403, ISSN: 0005-8912