

## 박슬라브 연주주편 변형 거동해석

배 원병\* 박 해두\*\* 이 호국\*\*

\* 부산대학교 공과대학 기계설계과

\*\* 포항제철 기술연구소 광양압연연구팀

### The Analysis of Deformation Behavior in Thin Slab Caster

Bae, W. B.\*, Park, H. D.\*\*, Lee, H. K.\*\*

\* Dept. of Mechanical Design Engineering, Pusan National University

\*\* Kwangyang Research Labs, Technical Research Laboratories, POSCO

#### Abstract

Recently, to improve the productivity in the continuous casting process, thin slab continuous caster which is one of the new steelmaking technologies by a high speed casting has been introduced. In the process of the thin slab continuous cast, there is more possibility than conventional one that the deformation be occurred by the bulging of solidified shell, since the thickness of solidified shell is very thin as much as 60mm after the casting is finished. In some cases of severe bulging, there might be more breakout.

In this paper, using finite difference method, solification analysis of slab is made as well as the thickness of solidified shell and temperature are calculated. Also, based on the data of the calculated temperature, the deformed behavior of solidified narrow face is analyzed with the MARC which is a package program for finite element analysis.

#### 1. 서 론

박슬라브와 기존의 연주 슬라브 응고시간과 주조속도와의 관계는 기존의 연주 슬라브 주조속도가 1.0m/min일때, 응고 시간이 대략 16분이므로 고상과 액상이 공존하는 슬라브의 길이는 16.0m정도이고, 박슬라브의 경우 주조속도 5.0m/min일때, 응고시간이 대략 2.12분이므로 고상과 액상이 공존하는 슬라브의 길이는 10.64m정도가 된다.

segment 0에서는 몰드로부터 응고된 75mm 두께의 주편이 segment 0의 13번 롤을 통과하면서 60mm로 soft reduction된다. 이 때 주편의 단변부에서 배불림이 일어나는데, 주조속도에 따른 단변부의 배불림량 차이에 따라 주편 폭이 불균일해 지고

이로 인해 내부응고층의 장변부와 단변부가 접하는 코너부위에 크랙의 발생빈도가 증가하여 응고층터짐을 야기시킬 수도 있다.

본 연구에서는 몰드의 탕면으로부터 5번 세그먼트까지 유한차분법에 의한 주편의 응고해석을 수행하고 연주기 위치별 응고셀의 두께와 온도분포를 계산했다. 이러한 전열해석을 통해 수치해석된 위치별 응고셀 두께와 온도분포 데이터를 바탕으로 유한요소 범용·상용 패키지인 MARC를 이용하여 온도의존성 물성치와 철정압과 같은 외부하중의 경계조건을 부여함으로써 주편 응고층의 벌징변형량을 예측하고 응고층 내의 변형률분포를 조사하여 구조조건에 따른 주편의 벌징량, 열응력 등을 명확히 규명하였다. 또한 Soft reduction 영역에서의 슬라브 단부의 변형거동을 해석하여 연주 폭의 변화를 구조속도에 따라 해석했다.

## 2. 박슬라브 응고 해석

응고동안 발열을 고려한 엔탈피로 열평형방정식은 (1)식과 같다.

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \dots\dots\dots(1)$$

여기서, H는 엔탈피, T는 온도,  $\rho$ 는 밀도 그리고 k는 열전도도이다.

주편은  $V_c$ 의 속도로 이동하므로 체인룰을 이용하여 속도항으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$\rho \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{k}{V_c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \dots\dots\dots(2)$$

여기서 x와 z는 두께방향 및 구조방향으로의 직교좌표이다. 엔탈피를 온도의 함수로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$H = [f_s C_s + (1 - f_s) C_1] T + (1 - f_s) L \dots\dots\dots(3)$$

여기서,  $C_1$ 는 액상선 온도에서 비열,  $C_s$ 는 고상선온도에서 비열, L는 응고잠열이다. 질량고상율  $f_s$ 를 액상선 온도에서의 엔탈피( $H_1$ )와 고상선 온도에서의 엔탈피( $H_s$ )로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$\begin{cases} H \leq H_s & : f_s = 1 \\ H_s < H < H_1 & : f_s = \frac{H_1 - H}{H_1 - H_s} \\ H \geq H_1 & : f_s = 0 \end{cases} \dots\dots\dots(4)$$

$$H_s = C_s T_s \dots\dots\dots(5)$$

$$H_1 = C_1 T_1 + L$$

식 (1)~(5)를 이용하여 구조속도, 강종, 주편두께, 냉각패턴에 따른 응고완료

점 위치, 응고 셀 두께, 주변표면 및 중심온도 등이 정량적으로 결정된다.

2차 냉각대 어느위치 i에서 용강정압  $P_{fi}$  은 Meniscus로부터 수직부높이(hv) 응고셀 두께 및 만곡부 곡률반경( $R_i$ )을 이용하여 식 (6)으로 부터 결정된다.

$$P_{fi} = \gamma [h_v + (R_i - S_i) \sin \psi_i] \dots\dots\dots(6)$$

### 3. 전열해석 결과

주변 표면의 온도를 1 차원 응고 해석결과로 부터 주변속도 3 mpm, 4 mpm, 5 mpm으로 하여 계산한 결과 Fig. 1.과 같이 주어진다. Soft reduction 영역에서의 위치는 foot roll에서부터 # 13 번 ROLL까지 2 m 가 되며 1070 °C 부터 1150 °C 정도 가 되며 이후 온도 분포는 주조속도 1 mpm 증가함에 따라 20 - 40 °C 정도 증가되고 있는 것을 보여준다.

주변의 응고 두께를 주변속도 3 mpm, 4 mpm, 5 mpm으로 하여 계산한 결과 Fig. 2.와 같이 주어진다. Soft reduction 영역에서의 위치는 foot roll에서 3mpm일 때 약 10.33 mm가 되며 5mpm 일때 8.92mm 이며 #13 Roll에서는 3mpm 에서21.58mm 와 5 mpm 에서 17.06 mm의 주변응고 두께를 얻었다. Metallurgical length는 3mpm일 때 7.2 m, 4mpm일때 10.03 m, 5mpm일때 12.99 m의 결과를 얻었다.

이상의 결과를 종합하면 주조속도에 따라 응고셀 온도, 부위별 두께를 구했다.

### 4. Soft reduction 해석 및 결과

#### 4.1 MARC package 해석 모델

Soft reduction에서의 해석 Modeling은 #1 roll에서부터 0.625 mm씩 압하되어 #13 번 Roll까지 15 mm 압하된다. 또한 주변의 응고두께가 점점 두꺼워 지므로 이를 고려하여 계산하여야 정확한 주변변형 해를 구할 수 있기 때문에 User program 으로 는 이들 조건을 삽입하여 계산할 수 있지만, MARC package로 해석하는 데는 각 Roll출측의 변형값을 input으로 하여 점점 Volume 증가하는 값을 고려하여 계산하였다. Roll의 접촉길이는 #1- #5 Roll까지는 Roll경이 120 mm이고, # 6 - #13 번 까지는 130 mm 이므로 6.12mm , 6.37 mm 를 고려하여 Roll에의한 변형속도를 3 mpm일때 , #5번 Roll까지 5.2 mm/sec, #6번 Roll이후는 4.8 mm/sec 로 계산하였고, 5mpm일 때는 #5번 Roll까지 8.5 mm/sec, #6번 Roll이후는 8.17 mm/sec 로 계산하였다. 응고 두께 및 철정압은 Table. 1. 과 같이 하여 계산하였다.

주조중의 온도 조건은 저탄소강의 응고 온도 1515 °C 의 온도로부터 표면의 1000 °C 의 분포를 각 위치별로 온도 조건을 고려하였다. 이때의 강종의 기계적 성질은 온도 함수로 하여 Fig. 3.과 같이 계산하였고, Shell 두께는 3 mpm 일때 Foot roll에서 10.33 mm이고 #13 roll에서는 21.58 mm이며 , 5 mpm 일때 Foot roll에서 8.92 mm, #13 roll에서는 17.06 mm 이다., 철정압은 위치에 Meniscus 로부터 높이에 따라 비례하며, # 13 roll에서 주속에 영향이 없이 0.020697 kg/mm<sup>2</sup> 의 영향을 받는 것으로 계산 했다.

## 4.2 주조속도에 따른 변형 거동 해석 결과

주조속도에 따라 Soft reduction 영역의 변형거동을 해석하여 Corner 부위의 응력 집중 여부를 관찰하고, 또한 Narrow face의 폭거동을 관찰하여 수요가의 요구 폭에 대응한 주조폭을 결정하기위하여 Soft reduction에서의 주편변형을 해석하였다.

Fig. 4.는 5 mpm 주조속도에서 # 3 Roll을 통과한후의 Edge부의 변형량과 등가 변형율을 나타낸 것으로 단부의 중앙에 가장 큰 등가 변형율을 나타내고 있다.

Fig. 5.는 5 mpm 주조속도에서 # 7 Roll을 통과한후의 Edge부의 변형량과 등가 변형율을 나타낸 것으로 역시 단부의 중앙에 가장 큰 등가 변형율을 나타내고 있다.

Fig. 6.은 5 mpm 주조속도에서 # 13 Roll을 통과한후의 Edge부의 변형량과 등가 변형율을 나타낸 것으로 역시 단부의 중앙에 가장 큰 등가 변형율을 나타내고 있다. 최대 퍼짐량은 14.5 mm 이다. 슬라브 반의 계산이므로 29 mm의 폭이 퍼지는 것을 알 수 있다.

Fig. 7.은 3 mpm 주조속도에서 # 13 Roll을 통과한후의 Edge부의 변형량과 등가 변형율을 나타낸 것으로 역시 단부의 중앙에 가장 큰 등가 변형율을 나타내고 있다. 최대 퍼짐량은 12.2 mm 이다. 슬라브 반의 계산이므로 24.4 mm의 폭이 퍼지는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

가. 주편 표면의 온도를 1 차원 응고 해석결과로 부터 주편속도 3 mpm, 4 mpm, 5 mpm으로 하여 계산한 결과 Soft reduction 영역에서의 위치는 foot roll에서부터 # 13 번 ROLL까지 2 m 가 되며 1070 °C 부터 1150 °C 정도가 되며 이후 온도 분포는 주조속도 1 mpm 증가함에 따라 20 - 40 °C 정도 증가되고 있는 것을 보여준다.

나. 주편의 응고 두께를 주편속도 3 mpm, 4 mpm, 5 mpm으로 하여 계산한 결과 Soft reduction 영역에서의 위치는 foot roll에서 3mpm일 때 약 10.33 mm가 되며 5mpm 일때 8.92mm 이며 #13 Roll에서는 3mpm 에서 21.58mm와 5 mpm 에서 17.06 mm의 주편응고 두께를 얻었다. Metallurgical length는 3mpm일때 7.2 m, 4mpm일때 10.03 m, 5mpm일때 12.99 m의 결과를 얻었다.

다. 주조속도에 따라 Soft reduction 영역의 변형거동을 해석한 결과를 5 mpm 주조속도에서 # 3, #7, #13 Roll을 통과한후의 Edge부의 변형량과 등가 변형율을 구했다.

라. 주조속도 5mpm 에서 최대 퍼짐량은 29 mm, 3 mpm 주조속도에서는 24.4 mm의 폭이 퍼지는 것을 알 수 있다.

## 7. 참고문헌

- 1) A Grill, K,Schwerdfeger; Ironmaking and Steel making, 6 (1978),68

- 2) 相澤達彦, 矢川元基 ; 連続鑄造における力學的舉動(1985), p.134
- 3) 王, 志剛, 井上達雄 ; 日本機械學會 論文集(A編),53(1987), p.1739
- 4) 中田 等, 宮崎 純 ; 連続鑄造における力學的舉動(1985), p.139
- 5) M. Uehara, I. Samarasekera ; Ironmaking Steelmaking, 13(1986), p138
- 6) W. D. Bennon and F. P.Incopera, Numerical Heat transfer, 13, pp.277-296(1988)
- 7) S.S Danial ; Ironmaking and Steelmaking, 9(1982), 16
- 8) H.E Wiemer and H.J Ehrenberg ; SEAISE Osaka Seminar, (1989)
- 9) K. Wunnenberg ; Stahl und Eisen, 98(1978), 254

**Table. 1. Modeling condition for deformed analysis of soft reduction region.**

Roll No	Metallurgical elevation (mm)	Ferro press (kg/mm <sup>2</sup> )	3mpm		5 mpm	
			thick ( mm )	sur. temp ( oC )	thick ( mm )	sur. temp ( oC )
foot roll	900.00	.006816	10.33	1110.40	8.92	1043.90
1	1020.00	.007242	10.94	1103.90	9.52	1061.00
2	1175.00	.008342	11.99	1080.50	10.39	1073.60
3	1330.00	.009443	13.31	1135.60	11.20	1134.10
4	1485.00	.010544	14.22	1141.20	11.95	1150.50
5	1640.00	.011644	15.33	1139.10	12.66	1157.70
6	1800.00	.012780	16.20	1133.30	13.34	1160.00
7	1960.00	.013915	17.02	1125.50	13.99	1159.30
8	2120.00	.015050	17.81	1119.80	14.59	1159.20
9	2280.00	.016183	18.59	1111.60	14.96	1156.30
10	2440.00	.017315	19.35	1102.80	15.57	1152.20
11	2600.00	.018446	20.10	1093.80	16.15	1147.50
12	2760.00	.019573	20.85	1084.70	16.48	1142.40
13	2920.00	.020697	21.58	1075.60	17.06	1136.90

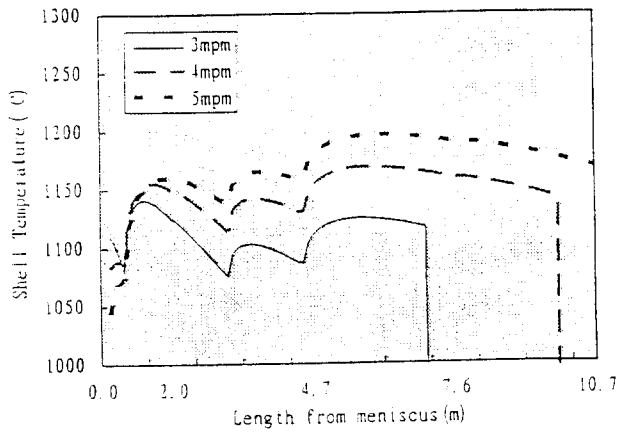


Fig. 1 Calculation of surface temperature for thin slab according to casting speed.

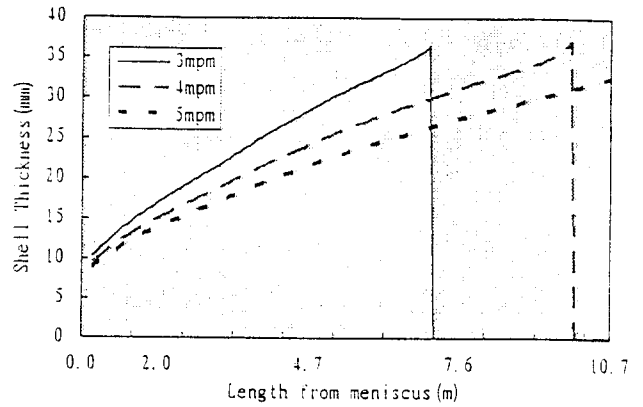


Fig. 2 Calculation of shell thickness for thin slab according to casting speed.

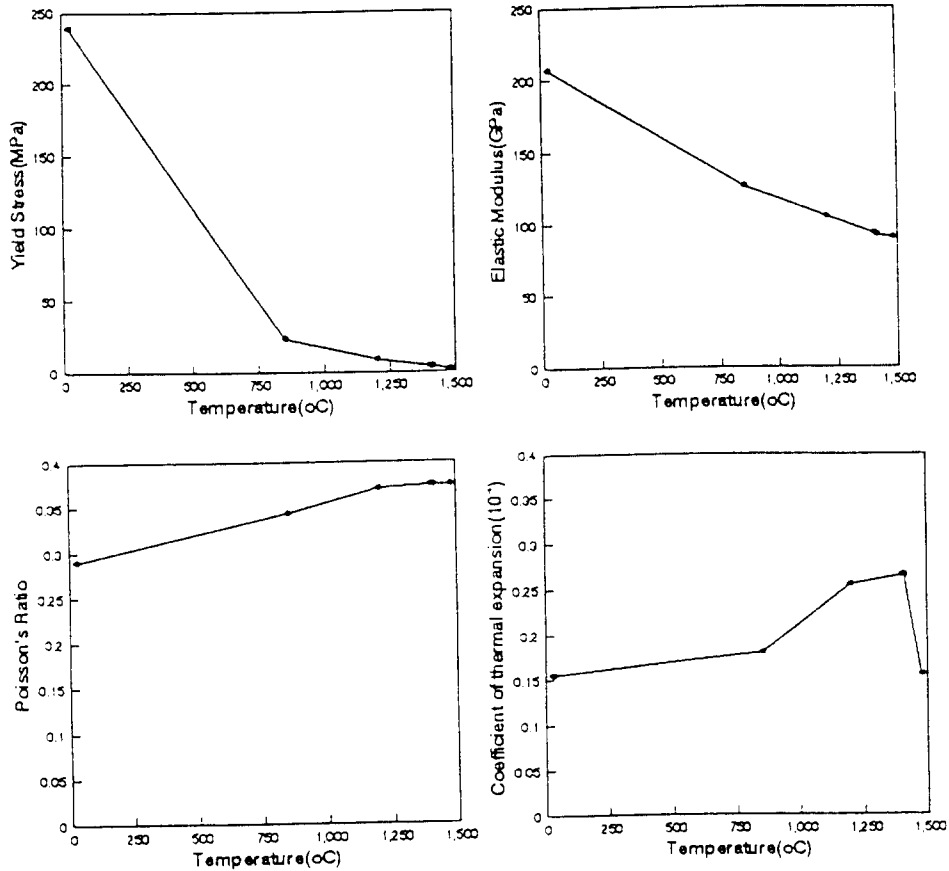


Fig. 3 Mechanical properties according to temperature.

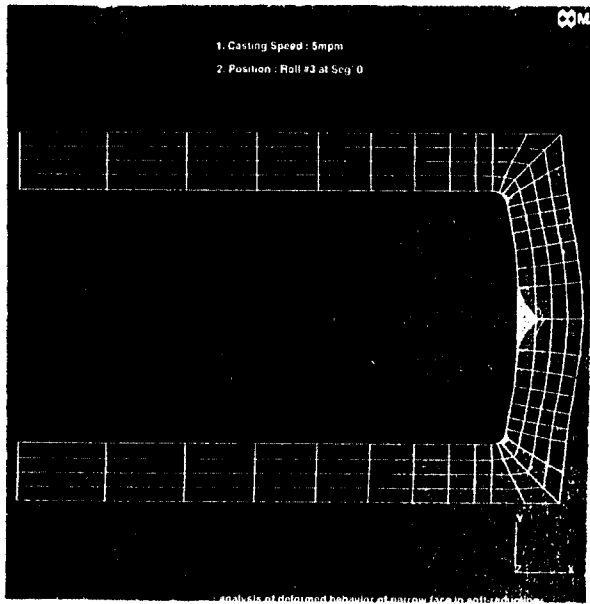


Fig. 4 The equivalent strain and deformed shape of narrow face in soft reduction (casting speed : 5 mpm, roll position : # 3 at segment 0 )

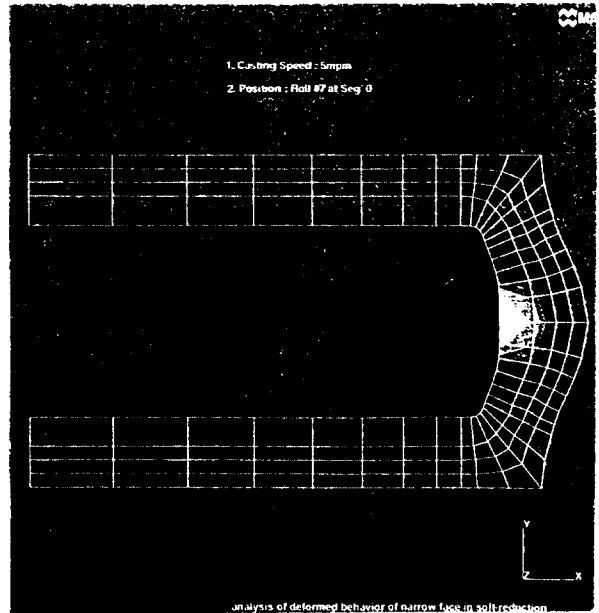


Fig. 5 The equivalent strain and deformed shape of narrow face in soft reduction (casting speed : 5 mpm, roll position : # 7 at segment 0 )

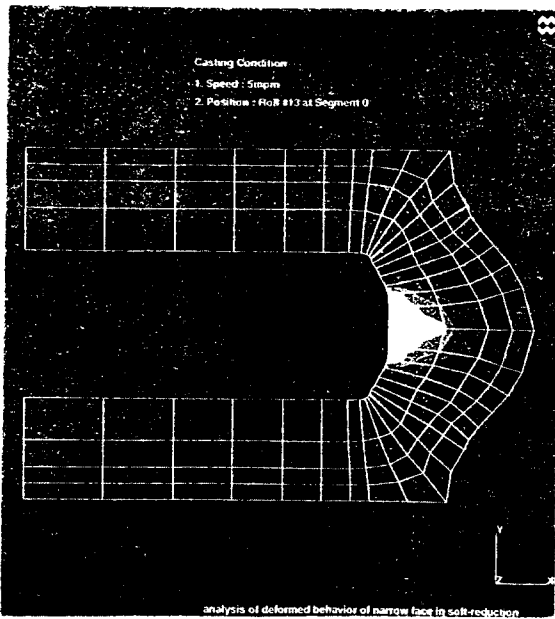


Fig. 6 The equivalent strain and deformed shape of narrow face in soft reduction (casting speed : 5 mpm, roll position : # 13 at segment 0 )

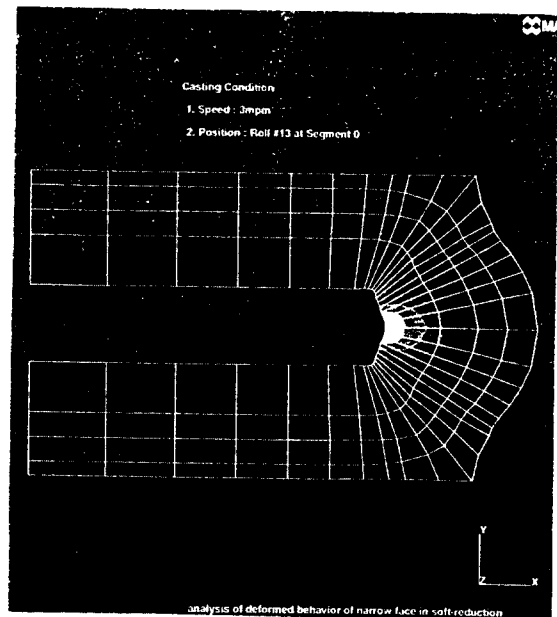


Fig. 7 The equivalent strain and deformed shape of narrow face in soft reduction (casting speed : 3 mpm, roll position : # 13 at segment 0 )