

3차원 유한요소법을 이용한 연주 Guide Roll의 열탄성 변형 해석

김병영* · 문창호** · 황상무***

The Thermal and Elastic Deformation Analysis of Guide Roll in Continuous Caster by FEM

B. Y. Kim, C. H. Moon, and S. M. Hwang

Abstract

The thermo-elastic deformation of guide roll in continuous slab caster was carried out by three-dimensional finite element method. The guide roll is an intermediately supported trans-axle roller, so called I-STAR roll, which was designed by VAI. The guide roll has been used in POSCO since 1998. Though the number of stoppage in casting has been apparently decreased since then, it has occasionally been failed during operation. The simulations were carried out to find out the status of stress and deformation as well as improvement of the guide roll. The thermal effect is much more dominant than ferro-static pressure or others in stress and deformation of the guide roll. The material of the guide roll is SCM440.

Key Words : Continuous Slab Caster, Thermo-Elastic Deformation, Guide Roll, Finite Element Method

1. 서론

연속주조기에 있어서 가이드 롤은 응고 주변의 지지 역할과 주조 방향으로의 가이드 역할을 하며, 주변 품질 및 생산성에 지대한 영향을 미친다.

베어링 제조기술의 발달로 1980년대 초부터 분할롤이 사용되었고, POSCO는 1988년부터 포항제철소 2연주기에 VAI사가 설계한 I-STAR롤을 사용하여 왔다. 이 롤의 특징으로는 분할형 롤로서, 셸과 액슬이 키박음되어

일체로 회전하고, 베어링 블록이 냉각되는 구조로서, 롤의 베어링 회전불량률을 대폭 감소시켜 생산성을 향상시켰으나, 롤 교체시간이 다소 증가하였고, 롤의 분해시 셸과 액슬의 분리가 곤란하며, 드물게 액슬의 파손에 따른 롤 회전불량이 발생하곤 한다.

연속주조기의 가이드 롤에 대한 연구는 주로 2차 냉각 영역에서 주변의 응고, 벌징 등과 연계한 전열해석 차원에서 수행되어 왔으며, 분할롤 자체에 대한 3차원 해석 결과는 찾아보기 힘들다.

* 포항공과대학교 철강대학원
** 포항공과대학교 대학원 기계공학과
*** 포항공과대학교 기계공학과

본 연구에서는 POSCO 2연주기의 캐스팅 보우의 내부에 설치된 I-STAR 롤에 있어서 3차원 열탄성 변형해석을 유한요소법을 통하여 수행하였고, 공정조건의 변화에 따른 영향을 살펴보았다.

2. 수치해석 모델링

2.1 정상상태 지배방정식

오늘날 대부분의 연주기는 생산성 향상을 위하여 연연주를 하고 있다. 이때 가이드 롤은 인발되는 고온의 슬라브 및 롤 내부 냉각수 등과 접촉되어 일정한 속도로 회전하면서 가열, 냉각이 반복되며, 주조 초기에 정상상태에 이르게 된다. 이때 가이드 롤은 철정압과 고온의 슬라브로부터 열전달과 하중을 받아 열탄성 변형을 하게 되므로

- 열전달 지배방정식

$$\rho c u_i T_{,i} = (k T_{,i})_{,i}$$

- 열탄성 지배방정식

$$\sigma_{ij} + f_i = 0$$

여기서 $\sigma_{ij} = \frac{E}{3(1-2\nu)} u_{k,k} \delta_{ij} + 2 \frac{E}{3(1+\nu)} e'_{ij} - 3ka\Delta T \delta_{ij}$

2.2 경계조건

2.2.1 열전달 경계조건

$$kT_{,n_i} = -h_{lub}(T - T_c) \text{ on } \Gamma_c$$

$$kT_{,n_i} = -h_w(T - T_w) \text{ on } \Gamma_w$$

$$kT_{,n_i} = -\sigma\epsilon(T^4 - T_e^4) - h_e(T - T_e) \text{ on } \Gamma_e$$

슬라브와 롤의 접촉열전달계수(h_{lub})에 관한 연구들([1], [2])에 의하면 3,000~11,000 $w/m^2 \cdot k$ 이며, 설비 특성상 계측이 곤란하므로 본 연구에서는 3,000, 6,000, 10,000 $w/m^2 \cdot k$ 의 각 경우에 대해서 해석하였다.

가이드 롤과 접촉하는 슬라브의 폭방향 온도는 일정하다고 가정하였고, 챔버 내부온도 및 액슬과 접촉하는 베어링의 온도는 80°C, 롤 내부 냉각수의 온도는 43°C로 하였으며, h_w , h_e , ϵ 은 각각 2,171 $w/m^2 \cdot k$, 1.14 $w/m^2 \cdot k$, 0.9 로 하였다.

2.2.2 열탄성 변형 경계조건

$$u_i = \bar{u}_i \text{ on } \Gamma_{u_i}$$

$$\sigma_{ij} n_j = h_i \text{ on } \Gamma_{h_i}$$

열탄성 변형을 하는 가이드 롤은 등방성, 균질한 재료이고 후크의 법칙을 만족한다. 또한 가이드 롤을 지지하는 support frame은 강체로 가정하였다. 가이드 롤을 지지하는 베어링의 구름마찰 저항과 벌징된 슬라브가 가이드 롤을 통과할 때 발생하는 변형에너지에 대한 영향과 롤 자중은 무시하였다.

또한 슬라브 자중 및 철정압에 의한 베어링 반력의 계산을 위해 등온인 롤에 대한 탄성해석결과로부터 구한 베어링별 평균점력, \bar{R}_b , 이 베어링 접촉 단면에서의 포물선형 베어링 반력의 합력, R_b^i , 과 일치되도록 가정하였다.

$$\bar{R}_b = \sum_{i=1}^N R_b^i$$

여기서 N 은 액슬 단면 하부 베어링 접촉부에 위치한 총 점접수이다.

2.3 해석 절차

온도 및 베어링 반력에 따른 경계조건의 계산을 위해 Fig.1 에서 보듯이 열전달 및 등온 탄성 해석을 수행한 후 그 결과로부터 열탄성 변형 해석을 수행하였다.

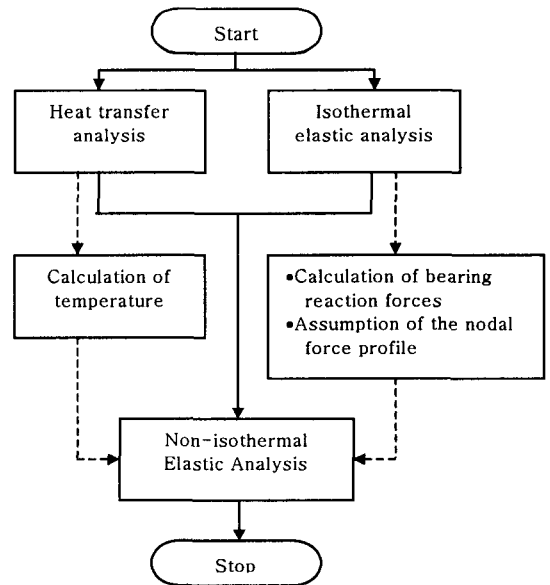


Fig. 1 Flowchart of simulation

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 I-STAR롤의 3차원 열탄성 해석을 위한 모델링을 한 것이고, 외측 가이드 롤의 위치별, 주속별(V_C), 주편폭별(W), 접촉각별(θ), 접촉열전달계수별(h_{lub}), 롤하중별(W_L) 등으로 총 14개의 경우(Table.1)에 대해 시뮬레이션 하였으며, 슬라브 표면온도(T_S)는 실제공정시 슬라브 폭방향 중앙부의 표면온도 측정값을 사용하였다.

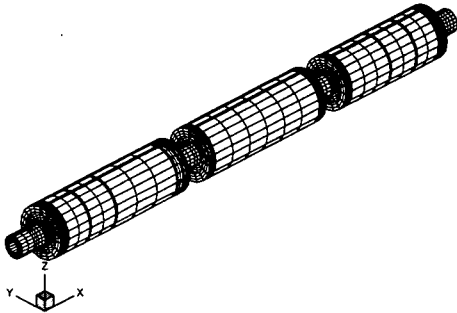


Fig. 2 3D Modelling of I-STAR roll

Table. 1 Simulation Cases of I-STAR roll

Case No	Roll No	V_C (m/min)	W (mm)	θ (°)	h_{lub} (w/m ² ·k)	T_S (°C)	W_L (kN)	σ_{Max} (kN/mm ²)	δ_{Ma} x (mm)
1	2	0.95	1,880	6	3,000	897	139	0.316	0.333
2	15	0.95	1,880	6	3,000	841	243	0.294	0.459
3	23	0.95	1,880	6	3,000	811	298	0.282	0.536
4	40	0.95	1,880	6	3,000	805	374	0.280	0.650
5	47	0.95	1,880	6	3,000	773	389	0.268	0.683
6	47	0.95	1,880	6	6,000	773	389	0.430	0.740
7	47	0.95	1,880	6	10,000	773	389	0.570	0.818
8	47	0.95	1,880	3	3,000	773	389	0.154	0.696
9	47	0.95	1,880	3	6,000	773	389	0.265	0.728
10	47	0.95	1,880	3	10,000	773	389	0.378	0.728
11	47	0.95	2,150	6	10,000	773	454	0.583	0.577
12	47	1.15	1,588	6	10,000	773	325	0.576	0.577
13	47	1.15	1,880	6	10,000	773	395	0.576	0.840
14	47	1.15	1,880	6	10,000	773	399	0.581	0.855

Fig.3는 Case1의 응력 분포를 나타낸 것으로서 롤의 외측면에서는 압축응력이, 내측면에는 인장응력이 걸리며, 최대응력은 쉘의 길이방향 중앙부에서 액슬이 냉각수와 접촉하는 내측면에서 발생함을 알 수 있다.

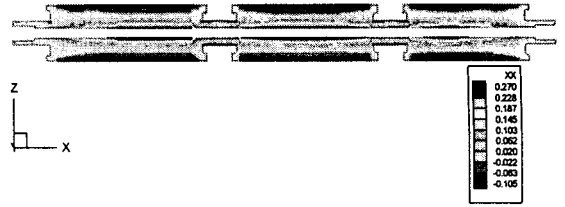


Fig. 3 σ_{xx} distribution at $y=0$

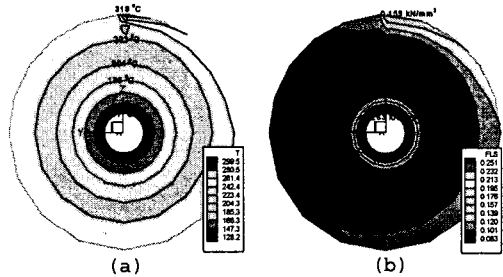


Fig. 4 (a) Temperature distribution at $x=1,357$ mm
(b) Effective stress distribution at $x=1,357$ mm

Fig.4 (a)는 최대응력(σ_{Max})이 작용하는 $X = 1,357$ mm에서의 단면부 온도분포를 나타낸 것으로서, 롤의 회전으로 인해 온도 분포가 비대칭적인 contour line으로 나타남을 알 수 있다. 또한 Fig.4 (b)는 롤 단면부의 유효응력 분포를 나타낸 것으로, 최대 0.317 kN/mm²의 Von-Mises 응력값을 가지며, 물재료(SCM440)의 허용인장응력 0.556 kN/mm²대비 1.75의 안전율을 보이고 있다.

가이드 롤 위치에 따른 영향(Case1~Case5)은 Table.1에서 보듯이 가이드 롤의 위치가 몰드 탕면에 가까울수록 롤에 작용하는 응력값은 증가하며 변형량은 감소함을 알 수 있다. 즉, 롤의 응력은 고온 슬라브로부터의 열전달로 인한 열 변형이 주 요인이며, 철판압은 상대적으로 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 또한 최대응력값을 가진 Case1에 있어서 노치부에서의 최대응력값이 0.095 kN/mm²에 불과하므로 조업중 이 부분에서 발생한 철손사고의 원인은 정상조업 외적인 요인(가이드 롤 제작 및 조립불량, 외부의 비정상적인 충격 등)에 기인된 것으로 추정된다.

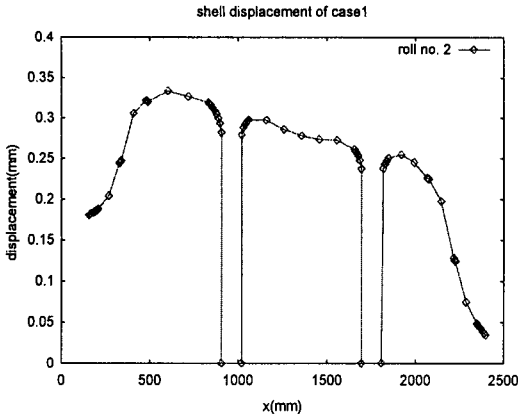


Fig. 5 Deformation of shell surface(Case1)

Fig.5는 Case1의 공정 조건에서 롤의 길이 방향에 따른 셸 반경방향 변형량(δ_{Max}) Profile을 보여주고 있다. 즉, 3분할롤에 있어서 롤의 길이방향 중심점에서 보면 비대칭적으로 반경방향의 변형이 발생하며, 셸의 길이가 긴 쪽의 셸에서 최대변형량이 나타난다.

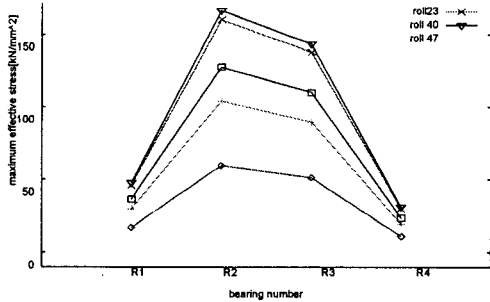


Fig. 6 Bearing reaction forces

Fig.6은 가이드 롤의 축 방향으로 베어링 별 반력 크기를 나타낸 것으로 가장 긴 셸 쪽의 내측 베어링에서 최대 부하가 걸리고 있다. 또한 베어링 반력의 크기는 하부로 갈수록 증가함을 알 수 있다. 이는 철정압 및 주편 자중의 증가에 기인한다.

4. 결론

(1) 가이드 롤에 걸리는 응력은 고온의 슬라브로부터의 열전달이 주 영향이며, 철정압이나 슬라브 자중은 큰 영향을 끼치지 못한다.

(2) 고온의 슬라브와 접촉하는 가이드 롤의 셸 표면과 상대적으로 저온인 냉각수와 접촉하는 액슬 내부의 온도 차에 기인한 열변형으로 인하여 롤의 외부는 압축응력이, 롤 내부는 인장응력이 작용한다.

(3) 최대 응력의 작용점은 각 셸의 중앙부에 위치한 액슬의 내부 표면이다.

(4) 곡률이 일정한 캐스팅 보우에 있어서 가이드 롤에 걸리는 응력은 접촉되는 슬라브의 표면온도의 영향이 지배적이므로 하부보다는 상부 측에서 더 큰 값을 보인다.

(5) 주조속도는 가이드 롤의 응력 변화에 별 영향을 끼치지 못한다.

(6) 가이드 롤의 길이 방향에 따른 셸 표면의 반경 방향 변형량 및 베어링 반력 등은 비대칭적으로 나타난다.

후 기

연속주조 공정에서 보다 실질적이고 정량적인 해석 결과를 얻기 위해서는 고온의 슬라브와 가이드 롤 간의 접촉열전달계수 및 접촉각의 산출을 위한 계측이 필요하다.

참 고 문 헌

- (1) A. Perkins, M.G. Brooks, and R.S. Haleem, 1985, "Roll performance in continuous slab casting machines." *Ironmaking and Steelmaking*, pp. 276~283
- (2) Barzelay, M.E., Tong, K.N. and Holloway, C.F., 1955, "Effect of Pressure on Thermal Conductance of Contact Joints," NACA Tech. Note 3295