

열연 강판의 잔류 응력 해석

구진모*·김홍준**·이재권** 황상무*

Residual Stress Analysis of Hot Rolled Strip

J.M. Koo, H.J. Kim, J.K. Lee and S.M. Hwang

Abstract

Run-Out-Table is the region between FDT and CT. Hot rolled strip is cooled by air and water in ROT. In this procedure, phase transformation and shape deformation occur due to temperature drop. Because of un-ideal cooling condition, deformation of strip and non-uniform phase distribution come into existence. This phenomenon affects the strip property and lead to the existence of residual stress. And it exerts effects on the Coiling process, Coil Cooling process, and Un-coiling process. Through these process, the residual stresses of strip are more larger and unbalance of these stresses become more severe. Finite element (FE) based models for the analyses of non-steady state heat transfer and elastoplastic deformation are described in this investigation. The analyses of thermodynamics and phase transformation kinetics are suggested also. Using the ROT simulation result, Coiling process and Coil Cooling process simulations are carried out.

Key Words : Run-Out-Table, phase transformation, deformation, residual stress, Finite element model, non-steady heat transfer, elastoplastic, simulation.

1. 서론

ROT는 열간 압연 공정 중 마지막 사상 압연기와 권취기 사이의 냉각 공정이다. ROT 구간과 권취기에서는 매우 급격한 냉각이 발생하며 이는 판의 야금학적, 기계적 물성 및 평탄도 등에 큰 영향을 미친다. 그러나 문제의 복잡함과 과정의 연관성으로 인해 이에 대한 정확한 해석을 수행하는 것은 매우 어려운 일이다[1-4].

본 연구에서는 3차원 유한요소 모델을 기반으로 ROT에서의 판의 냉각 과정을 비정상 상태 열탄소성 변형과 상

변태 모델을 통해 판의 온도, 응력, 상변태, 변형 및 형상을 연계 해석하였다.

또한 ROT 시뮬레이션의 결과를 이용하여 이후 진행 과정인 권취 과정을 연계 해석하였다. 그리고 권취 과정 이후 판이 냉각 되어 상온에 도달 되기 까지의 과정 또한 연계 해석하여 최종 판의 잔류 응력을 예측하였다.

2. 이론적 배경

2.1 상변태 및 열역학 모델

* 포항공과 대학교 기계공학과

** 포스코 기술연구소 박판 연구 그룹

상변태 시의 비향은 변태 거동은 다음의 관계를 이용하여 사용하였다.

$$\frac{X_i}{X_i^e} = 1 - \exp[-m(\dot{t} + \Delta t)^n] \quad (2.1)$$

위의 식은 Scheil[5]에 의해 제시되었으며, X_i 는 i 번째 변태된 비율이며 \dot{t} 는 $\dot{t} = [-\frac{1}{m} \ln(1 - \frac{X_i}{X_i^e})]$ 의 관계로부터 구해진다. 여기서 X_i^e 는 주어진 온도와 조성에서 평형 상태도에 의해 결정되는 열역학적으로 안정한 변태상의 비율이며, m 은 온도와 상변태 메커니즘에 관련된 상수, n 은 시간 지수이다.

상변태에 의한 각 상의 비열과 발열에 관한 상태도는 두개의 부격자 모델[6-7]을 이용한 Fe-C-Mn계에 대한 열역학 해석으로부터 구하였다[8].

2.2 유한 요소 해석 모델

온도의 저하에 의한 냉각시의 비정상 상태 열유동 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = (kT_{,i})_{,i} + Q \quad (2.2)$$

또한 판의 응력과 변형에 대한 평형 방정식은 다음과 같다.

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_j = 0 \quad (2.3)$$

여기에서 ρ , C_p 와 k 는 각각 밀도, 비열 그리고 열전도 계수를 의미하고 Q 은 상변태 시에 발생하는 잠열을 의미한다.

위의 식들에 각각 열전달 경계 조건과 기계적 경계 조건을 적용하여 변동식을 세우고 이에 Divergence Theorem을 적용하여 최종식을 구성하면 다음과 같다.

$$\int_{\Omega} (\rho C_p \frac{DT}{Dt} \omega + kT_{,i} \omega_{,i} - Q\omega) d\Omega + \int_{\Gamma_n} h_w (T - T_w) \omega d\Gamma + \int_{\Gamma_e} \{ \alpha \epsilon (T^A - T^e) + h_e (T - T_e) \} \omega d\Gamma - \int_{\Gamma_q} q \omega d\Gamma = 0 \quad (2.4)$$

$$\int_{\Omega} \Delta T_{ij}^{n+1} \omega_i d\Omega + \int_{\Omega} T_{ij}^n \omega_j d\Omega - \int_{\Omega} \rho_i b_i \omega d\Omega - \sum_{j=1}^3 \int_{\Gamma_n} \bar{t}_j^{*n+1} \omega_j d\Gamma = 0 \quad (2.5)$$

위의 식에서 ω 는 임의의 함수이며, 경계면 중 Γ_n , Γ_b , Γ_e , Γ_q 는 각각 온도 경계조건 면, 대류 열전달 면, 외부에 노출되어 있는 면, 그리고 열유동 경계조건 면이다[9].

위의 식에서 T_{ij}^{n+1} 은 $T_{ij}^{n+1} = T_{ij}^n + \Delta T_{ij}^{n+1}$ 의 관계를 이용하여 구해지는 Piola-Kirchhoff stress이며, 다음과 같이 근사화 할 수 있다[10].

$$\Delta T_{ij}^{n+1} = \Delta t \dot{T}_{ij}^{(n)} - \Delta \epsilon_{ij}^n \tau_{ij}^n - \tau_{ij}^n \Delta \epsilon_{ij}^n + \tau_{ij}^n \Delta u_{i,j}^n \quad (2.6a)$$

$$\Delta \tau_{ij}^{(n)} = 2\mu (\Delta \epsilon_{ij}^n + \Delta \epsilon_{ij}^{Pn}) + k (\Delta \epsilon_{kk}^n - \Delta \epsilon_{kk}^A) \delta_{ij} \quad (2.6b)$$

앞의 식에서 \dot{t}_{ij}^j 는 Kirchhoff stress의 Jauman rate를 의미하며, ϵ_{kk}^A , ϵ_{kk}^P , ϵ_{kk} , ϵ_{kk} 는 각각 열팽창 및 상변태에 의한 체적 변형률, 소성 체적 변형률, 전체 체적 변형률, 그리고 deviatoric 체적 변형률을 의미한다. 항복 조건식의 만족에는 Kreig and Kried[11]의 Radial Return algorithm을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 ROT 시뮬레이션

ROT의 개략도는 Fig.1과 같다. 이 과정에서 판의 온도를 적정 권취 온도에 맞추기 위한 बैं크의 노즐 개방수는 Table.1과 같다. 이러한 경계 조건과 실제의 공정 조건을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

온도의 감소에 따른 판의 형상과 온도 분포를 Fig.2(a), Fig.2(b), Fig.2(c), Fig.2(d)에 도시하였다. 판의 상부면의 냉각 조건이 하부면보다 강한 이유로 인해 판이 공랭에 의해 단순 이송되는 과정에서 상부의 냉각이 하부의 냉각에 우선하여 Fig.2(a)와 같이 상부의 활발한 체적 감소로 인해 판이 미세하게 위쪽으로 변형한다. 이후 냉각이 지속되며 판의 상부가 하부보다 먼저 변태 온도에 도달하게 된다. 한편 오스테나이트상에서 다른 상으로의 상변태 시에는 순간적으로 체적이 증가한다. 이로 인해 판은 Fig.2(b)하부 방향으로 변형된다.

지속되는 냉각에 의해 상부의 상변태가 종료되고 하부에서의 상변태가 활발해져 Fig.2(c)와 같이 판은 다시 위쪽으로 변형하게 되고, 이후 냉각이 지속되면서 권취기에 도달하는 순간까지 판의 상부와 하부의 온도 감소에 의한 체적 감소로 판은 Fig.2(d)와 같은 형상을 갖게 된다. 이와 같은 일련의 판 변형 추이는 실제의 판 변형 경향과 일치한다.

3.2 Coiling 시뮬레이션

ROT를 통과한 판은 권취기로 진입하여 펀치롤과 랩퍼롤의 도움으로 맨드릴에 감겨 코일의 형태로 변형된다. 이에 대한 개략도는 Fig.3과 같다.

ROT를 통과한 판의 형상은 ROT 상에서의 냉각의 불균형으로 인해 완전한 평면을 이루지 못한다. 이로 인해 코일링 과정에서 좀 더 복잡한 유효 변형과 유효 응력을 발생시킨다. 본 연구에서는 전 단계의 ROT 시뮬레이션

결과와 판의 형상을 코일링 시의 초기 값으로 사용하여 3차원 변형 프로그램을 작성하여 시뮬레이션 하였다. Fig.4(a)와 Fig.4(b)는 반경 400mm 와 700mm 에 대한 시뮬레이션 결과를 도시한 것이다. 각각의 반경에 대한 판의 단면의 응력 분포는 Fig.5(a)와 Fig.5(b)에 도시하였다.

3.3 Coil Cooling 시뮬레이션

ROT의 결과를 기본으로 시행한 코일링 시뮬레이션 결과를 각기 다른 반경에 대하여 반복 시행하였다. 압연 코일의 냉각에 대한 시뮬레이션에 초기치로 필요한 이전의 과정에서 집적된 잔류 응력과 변형, 온도, 상분포 등을 각 반경에 대한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 수치적 내삽을 이용하여 추정하였다. 이는 Fig.6(a)과 Fig.6(b)에 도시되어있다.

초기 값을 이용하여 실제의 공정 조건을 이용하여 coil의 냉각 시뮬레이션을 수행하였다. 코일이 냉각되는 과정의 온도 분포는 Fig.7(a)과 Fig.7(b)에 도시되었다.

코일의 냉각 경계 조건은 상부와 하부면에는 수냉 조건을, 그리고 내부와 외부면에는 공랭 및 복사 냉각 조건을 적용하였다. Fig.8(a)에서 볼 수 있듯이, 초기에는 코일의 외부에서의 온도 감소가 급격하므로 외부에서의 체적 감소가 내부보다 커서, 외부는 인장의 힘을 받으며 내부는 압축의 힘을 받게 된다. 그러나 시간이 지나감에 따라 내부의 부피 감소가 활발해 짐에 따라 Fig.8(b)와 같이 내부는 인장력을, 외부는 압축력을 받게 된다. 이 또한 기존의 연구와 잘 일치함을 확인할 수 있었다[12].

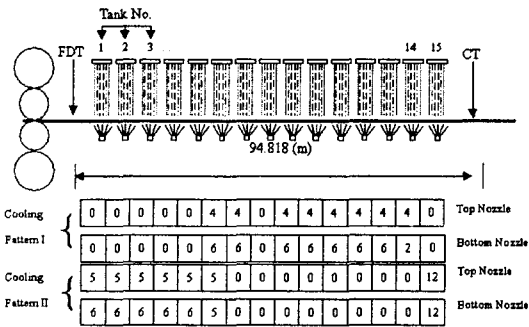


Fig. 1. Processing Condition of ROT

Bank	Up	0	0	0	0	0	4	4	0	4	4	4	4	4	0	0	
Condition	Down	0	0	0	0	0	6	6	0	6	6	6	6	6	2	0	0

Table 1. Processing Condition of ROT Simulation

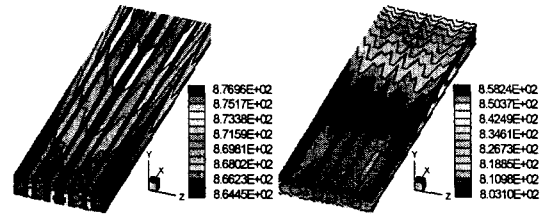


Fig.2.(a)

Fig.2.(b)

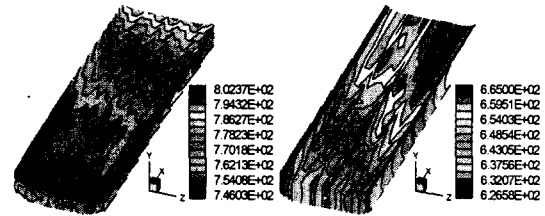


Fig.2.(c)

Fig.2.(d)

Fig. 2. Temperature distribution in ROT (100 times magnification to y direction)

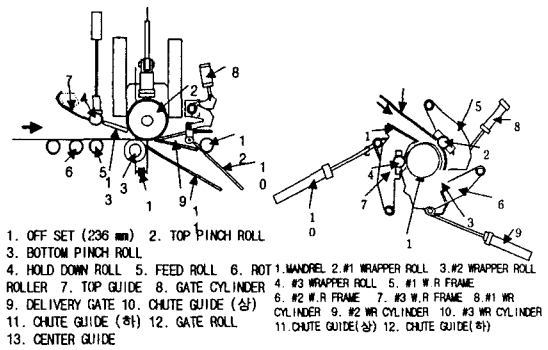


Fig. 3. Schematic Diagram of Coiling

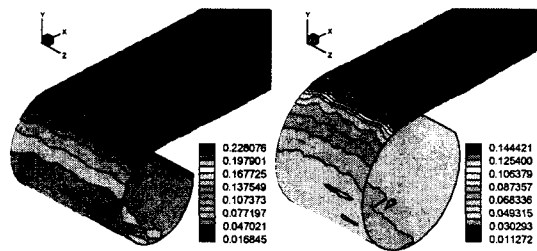


Fig.4.(a) R-400mm

Fig.4.(b) R-700mm

Fig. 4. Effective Stress Distribution of Coil

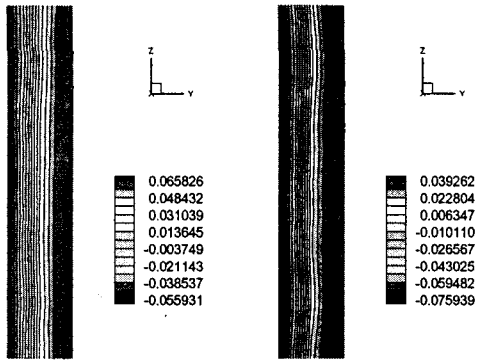


Fig. 5. Hoop Stress Distribution of Coil (100 times magnification to z direction)

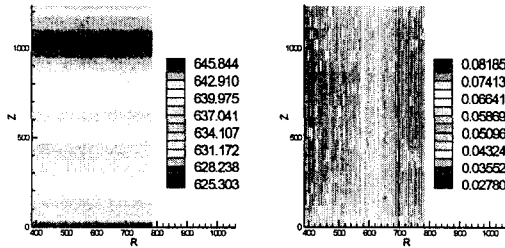


Fig. 6. Initial State of Coil (2 times magnification to r direction)

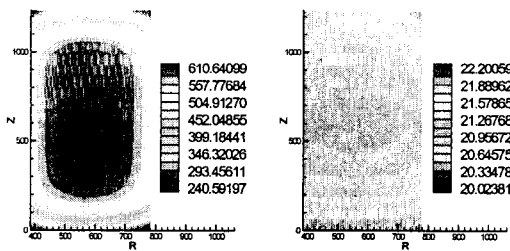


Fig. 7. Temperature distribution of Coil (2 times magnification to r direction)

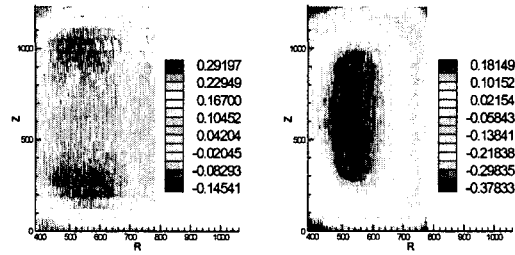


Fig. 8. Hoop Stress distribution of Coil (2 times magnification to r direction)

참 고 문 헌

- (1) M.Suehiro, T.Senuma, H. Yada and K. Sato, 1992, ISIJ International, Vol. 32, p. 433
- (2) H.N. Han and S.H. Park and O. Kwon, 1999, Modelling of Metal Rolling Processes 3, London, England, p. 22
- (3) H.N. Han and J.K. Lee, 2000, Metals and Materials, Vol. 6, No. 5, p. 401
- (4) H.N. Han and S.K. Park, 2001, Materials Science and Technology, Vol. 17, p. 721
- (5) E. Scheil, 1935, Arch. Eisenhüttenwes, Vol. 8, p. 565
- (6) K.J. Lee, J.K. Lee, K.B. Kang and O. Kwon 1992, ISIJ International, Vol. 32, P.326
- (7) B.J. Lee and D.N. Lee, 1989, CALPHAD, Vol. 13, P.335
- (8) J. Miettinen, 1995, Helsinki University of Technology, Report TKK-V-B113, p. 15
- (9) C.G. Sun, C.S. Yun, J.S. Chung and S.M. Hwang, 1998, Metall. Mater. Trans. A, Vol. 29A, p. 2407
- (10) S.I. Oh, T. Altan and S. Kobayashi, 1989, "Metal Forming and The Finite-Element Method", Oxford University Press.
- (11) R.D. Kreig, D.B. Krieg, 1977, J. Pressure Vessel Technology, November, p. 510
- (12) S.J. Park, B.H. Hong, 1998, ISIJ International, Vol. 38, pp. 1262-1269