

권취 공정 중 열연 강판의 잔류 응력 해석

구진모* · 김흥준** · 이재곤** · 황상무*
(2003 년 5 월 15 일 접수)

Residual Stress Analysis of Hot Rolled Strip in Coiling Process

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

Abstract

Hot rolled strip is cooled by air and water in Run-Out-Table. In this process, phase transformation and shape deformation occurs due to temperature drop. Because of un-ideal cooling condition of ROT, irregular shape deformation and phase transformation arise in the strip, which affect the strip property and lead to the residual stress of strip. And these exert effects on the following processes, coiling process, coil cooling process, and re-coiling process. Through these processes, the residual stress becomes higher and severe. For the prediction of residual stress distribution and shape deformation of final product, Finite element(FE) based model was used. It consists of non-steady state heat transfer analysis, elasto-plastic analysis, thermodynamic analysis and phase transformation kinetics. Successive FEM simulations were applied from ROT process to coil cooling process. In each process simulation, previous process simulation results were used for the next process simulation. The simulation results were matched well with the experimental results.

Key Words : Run-Out-Table, Phase Transformation, Deformation, Residual Stress, Finite Element Model, Non-Steady Heat Transfer, Elasto-Plastic, Simulation.

1. 서 론

ROT 는 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 연관성, 그리고 문제의 3 차원적 속성으로 인하여 이에 대한 정확한 해석을 수행하는 것은 매우 어려운 일이다.⁽¹⁻⁴⁾ 그러나 ROT 구간에서 판의 변형

과 응력의 분포는 후속 공정인 권취 공정과 권취 후 냉각 공정 등 이후 공정에서의 판의 불균일 응력 분포 및 변형에 영향을 미치므로, 이 일련의 과정을 연계 해석하는 것은 매우 의미있는 일이다.

또한 이러한 연속 공정을 거치는 과정에서 각 공정에서의 공정 조건 및 경계조건을 적용하여 변형 및 응력 분포에 대하여 해석하는 것을 통하여 최종 제품의 잔류 응력을 대략적으로 예측해 볼 수 있다.

* 포항공대 기계공학과

** 포스코 기술연구소, 박판 연구 그룹

본 연구에서는 3 차원 유한요소 모델을 기반으로 ROT 과정에서의 냉각, 권취 시의 판의 변형, 권취 후의 냉각 과정을 비정상 상태 열탄소성 변형과 상변태 모델을 통해 판의 온도, 응력, 상변태, 형상 변형 등을 연계 해석하여 최종 판의 잔류 응력을 예측하였다.

2. 이론적 배경

2.1 상변태 및 열역학 모델

상변태에 의한 각 상의 비열과 발열에 관한 상태도를 두개의 부격자 모델을 이용한 Fe-C-Mn 계에 대한 열역학 해석으로부터 구하였다.⁽⁵⁻⁷⁾

상변태 시의 비항온 변태 거동은 다음의 관계를 이용하였다.

$$\frac{X_i}{X_i^c} = 1 - \exp[-m(t' + \Delta t)^n] \quad (2.1)$$

위의 식은 Scheil⁽⁸⁾에 의해 제시되었으며, X_i 는 i 번째 변태된 비율이며, X_i^c 는 주어진 온도와 조성에서 병형 상태도에 의해 결정되는 열역학적으로 안정한 변태상의 비율이고, m 은 온도와 상변태 메커니즘에 관련된 상수, 그리고 n 은 시간 지수로 단일 변태 메커니즘일 때에는 일정한 상수로 가정할 수 있다.

2.2 유한 요소 해석 모델

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

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

위의 식에서 ρ , C_p 와 k 는 각각 밀도, 비열 그리고 열전도 계수를 의미하고, \dot{Q} 은 상변태 동안에 발열하는 잠열을 의미한다.

또한 판의 응력과 변형에 대한 평형 방정식은 다음과 같다.

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

위의 비정상 상태 열유동 지배 방정식과 응력 나 변형에 대한 평형 방정식에 각각 열전달 경계 조건과 기계적 경계 조건을 적용하여 변동식을 세우고 이에 대해 Divergence Theorem 을 적용하여

최종식을 구성하면 다음과 같다.⁽⁹⁾

$$\int_{\Omega} \left\{ \rho C_p \frac{DT}{Dt} \omega + k T_{,i} \omega_{,i} - \dot{Q} \omega \right\} d\Omega + \int_{\Gamma_b} \left\{ \sigma \varepsilon (T^4 - T_c^4) + h_c (T - T_c) \right\} \omega d\Gamma + \int_{\Gamma_a} (h_w (T - T_w) \omega) d\Gamma - \int_{\Gamma_q} q \omega d\Gamma = 0 \quad (2.4)$$

$$\int_{\Omega_n} \Delta T_{ij}^{n+1} \omega_{j,i} d\Omega + \int_{\Omega_n} T_{ij}^n \omega_{j,i} d\Omega + \int_{\Omega_n} \rho_n b_j \omega_j d\Omega - \sum_{j=1}^3 \int_{\Gamma_j^n} \bar{t}_j^{n+1} \omega_j d\Gamma = 0 \quad (2.5)$$

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 stress 이며, 다음과 같이 근사화 할 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$\Delta T_{ij}^{n+1} = \Delta \tau_{ij}^{j(n)} - \Delta \varepsilon_{im}^n \tau_{mj}^n - \tau_{im}^n \Delta \varepsilon_{mj}^n + \tau_{im}^n \Delta u_{j,m}^n \quad (2.6a)$$

$$\Delta \tau_{ij}^{j(n)} = 2\mu \left(\Delta \varepsilon_{ij}^n + \Delta \varepsilon_{ij}^{p(n)} \right) + k \left(\Delta \varepsilon_{kk}^n - \Delta \varepsilon_{kk}^{A(k)} \right) \delta_{ij} \quad (2.6b)$$

앞의 식에서 τ_{ij}^j 는 Kirchhoff stress 의 Jauman rate 를 의미하며 $\dot{\varepsilon}_{kk}^A$, $\dot{\varepsilon}_{kk}^p$, $\dot{\varepsilon}_{kk}$, $\dot{\varepsilon}_{kk}^j$ 는 각각 열팽창 및 상변태에 의한 체적 변형률, 소성 체적 변형률, 전체 체적 변형률, 그리고 deviatoric 체적 변형률을 의미한다.

위의 식들과 응력의 항복 조건식의 만족에는 Krieg and Krieg⁽¹¹⁾의 Radial Return algorithm 을 사용하여 판의 응력과 변형에 대한 경계치 문제를 해석하였다.⁽¹²⁾

위의 열역학, 상변태, 열전달, 탄소성 변형 해석 모델을 통합하고, 상호 관계를 적용한 통합 프로그램을 구성하여 실제 ROT 상에서의 판이 변형 및 유효 응력, 유효 변형, 상분포, 온도 분포 등을 시뮬레이션 하고, 그 결과를 권취 해석에 적용하여 연계 해석하여 판의 변형 및 응력의 분포들을 얻었다. 또한 같은 방식으로 권취 후 냉각에 대해서도 이전 공정을 거친 판의 해석 결과를 사용하여 해석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 ROT 시뮬레이션

ROT 의 개략도 Fig. 1 같다. 이 과정에서 판의 온도를 적정 권취 온도에 맞추기 위한 बैं크의 노

를 개방 수는 Table 1 과 같다. Table 1 에서의 숫자는 각 बैं크에서 열려있는 노즐의 수를 의미한다. ROT 는 15 개의 बैं크와 사이의 이송 구간으로 구성된다.

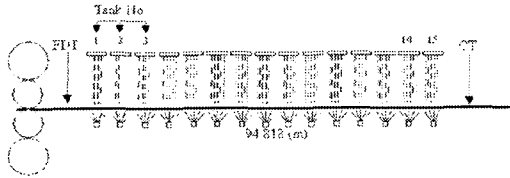


Fig. 1 Processing condition of ROT

Table 1 Processing condition of ROT simulation

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

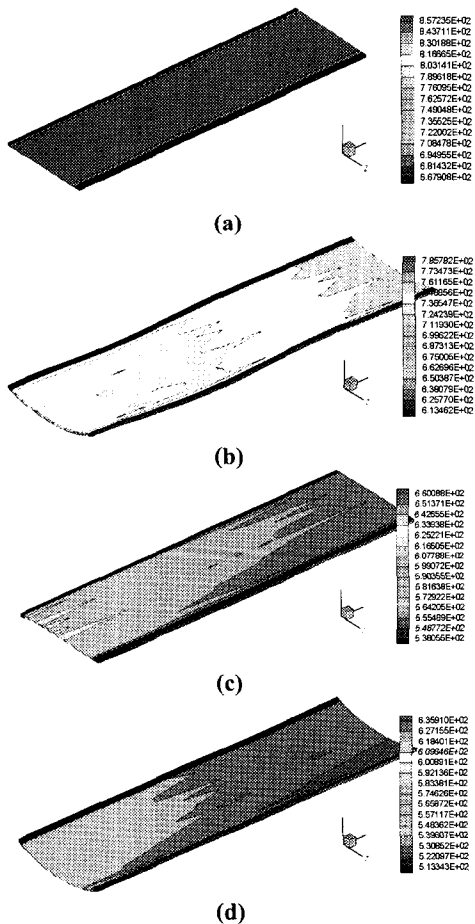


Fig. 2 Temperature distribution in ROT (10 times magnification to y direction)

마지막 बैं크는 15 개, 그 이 외의 बैं크는 12 개의 노즐이 있다. 이러한 경계 조건과 실제의 공정 조건을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

ROT 를 거치면서 판의 이송과 냉각에 의한 온도의 감소에 따른 판의 형상과 온도 분포를 Fig. 2(a), Fig. 2(b), Fig. 2(c), Fig. 2(d)에 도시하였다.

ROT 에 판이 들어 오는 초기의 판의 온도 분포는 Fig. 2(a)와 같다. 그림과 같이 판의 양 끝부분은 중심부보다 낮은 온도 분포를 갖는다. 이후 판이 ROT 를 통과하는 과정에서, 판의 상부면의 냉각 조건이 하부면보다 강하여 판이 공랭에 의해 단순 이송되는 과정에서 상부의 냉각이 하부의 냉각보다 우선한다. 따라서 Fig. 2(b)와 같이 상부의 활발한 체적감소로 인해 판이 미세하게 위쪽으로 변형된다.

이후 냉각이 지속되며 판의 상부가 하부보다 먼저 변태 온도에 도달하게 된다. 한편 오스테나이트 상에서 다른 상으로의 상변태 시에는 순간적으로 체적이 증가한다. 이로 인해 판은 Fig. 2(c)와 같이 하부 방향으로 변형된다.

지속되는 냉각과 이송에 의해 상부의 상변태가 종료되고 하부에서는 상변태가 활발해져 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. 이러한 판의 변형은 이후 공정, 즉 권취 공정이나 권취 후 냉각 공정 및 리코일링 공정에서 불균일한 응력의 분포를 유발하여 최종 제품의 형상 불량이나 잔류 응력에 의한 변형을 야기한다.

3.2 권취 해석

ROT 를 통과한 판은 권취기로 진입하여 펀치롤과 랩퍼롤의 도움으로 맨드릴에 감겨 코일의 형태를 변형 된다. 이에 대한 개략도는 Fig. 3 과 같다.

ROT 를 통과한 판의 형상은 ROT 상에서의 냉각의 불균형으로 인해 완전한 평면을 이루지 못한다. 이로 인해 코일링 과정에서 좀 더 복잡한 유효 변형과 유효 응력을 발생 시킨다. 본 연구에서는 전 단계의 ROT 시뮬레이션 결과와 판의 형상을 코일링 시의 초기값으로 사용하여 3 차원 변형 프로그램을 이용해 시뮬레이션 하였다.

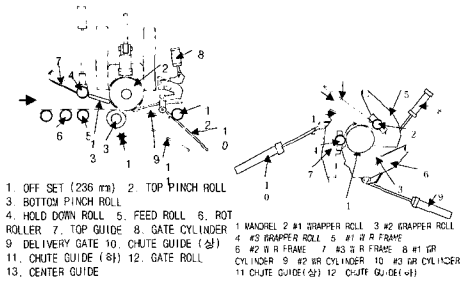


Fig. 3 Schematic diagram of coiling process

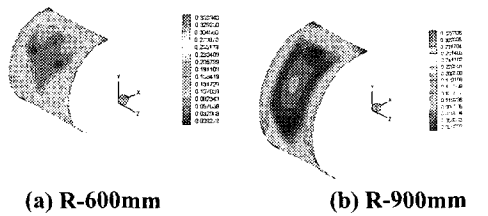


Fig. 4 Effective stress distribution of coil

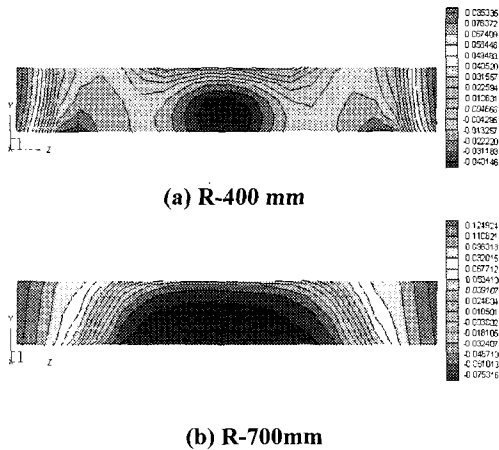


Fig. 5 Hoop stress distribution of coil(100 times magnification to y direction)

Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)는 반경 600mm 와 반경 900mm 에 대한 시뮬레이션 결과를 도시한 것이다. 각각의 반경에 대한 판의 단면의 응력 분포는 Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)에 도시하였다. 이 때 ROT 냉각 구간을 지난 판의 형상 변형에 의해 권취 과정에서 판의 폭방향의 중심부는 양 끝단에 비해 상대적으로 압축력을 받는다. 또한 권취 시에 작용하는 굽힘 모멘트에 의해 판의 상부면에서는 인

장력을, 그리고 판의 하부면에서는 압축력을 받게 되는 것이다.

3.3 권취 후 냉각 해석

ROT의 결과를 기본으로 시행한 코일링 시뮬레이션 결과를 각기 다른 반경에 대하여 반복 시행하였다. 압연 코일의 냉각에 대한 시뮬레이션에 필요한 초기 입력을 얻기 위한 방법으로 이전의 과정에서 집적된 잔류 응력과 변형, 온도, 상분포 등을 각 반경에 대한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 수치적 내삽을 이용하였다. 이는 Fig. 6(a)와 Fig. 6(b), Fig. 6(c)에 도시되어 있다.

이러한 방법을 통해 구해진 초기 값을 이용하고, 실제의 공정 조건을 적용하여 코일의 냉각 시뮬레이션을 수행하였다. 코일이 냉각되는 과정의 온도 분포는 Fig. 7(a), Fig. 7(b), Fig. 7(c), 그리고 Fig. 7(d)에 도시되었다. 코일의 냉각 경계 조건은 상부와 하부면에는 수냉 조건을, 그리고 내부와 외부면에는 공랭 및 복사 냉각 조건을 적용하였다. Fig. 8(b)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 외부의 온도 감소폭에 비해 내부의 온도 감소폭이 훨씬 커지게 된다. 따라서 외부의 부피 감소에 비해 내부의 부피 감소가 활발해짐에 따라 Fig. 8(d)와 같이 내부는 인장력을, 외부는 압축력을 받게 된다. 이 또한 기존의 연구와 잘 일치함을 확인할 수 있었다.^(13~14)

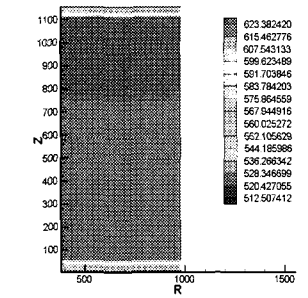
4. 결론

본 연구의 수행을 통해서 ROT 냉각 시뮬레이션, 코일링 시뮬레이션, 코일 냉각 시뮬레이션의 연계 해석 프로그램이 개발되었다.

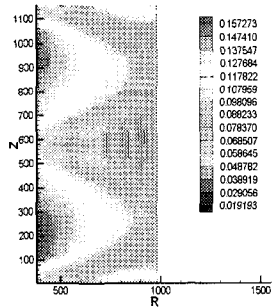
ROT 냉각 시뮬레이션의 경우 판의 3 차원 온도 상변태 거동, 응력 연계 정밀 해석이 이루어졌으며, 코일링 시뮬레이션에서는 ROT 시뮬레이션 결과를 이용한 3 차원 변형, 응력 정밀 해석기술이 적용되었다. 또한 코일 냉각 시뮬레이션에서는 2 차원 축대칭 프로그램을 이용하여 권취 코일의 온도, 응력에 대한 연계해석이 이루어졌다. 각각의 공정 시뮬레이션 결과는 다음 공정 시뮬레이션을 위한 입력으로 사용되는 방식의 연계해석을 수행하였다.

이와 같이 각 공정들의 제반 인자를 고려하여

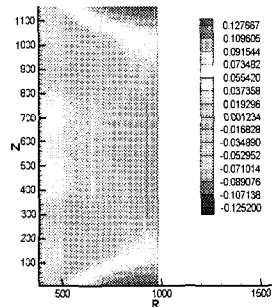
시뮬레이션을 수행하고 향후에 이후 공정인 리코 일링 공정과 절단 공정에 대한 연계해석이 이루어질 경우 최종 제품의 잔류 응력 및 절단 후의 판의 변형 예측이 가능해 질 것으로 기대된다. 또한 시뮬레이션을 통해 각 공정 인자의 영향성을 고려하여 좀 더 개선된 공정 조건을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.



(a) Temperature distribution

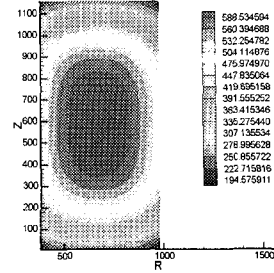


(b) Effective stress distribution

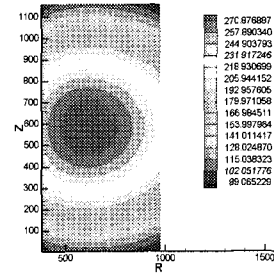


(c) Hoop stress distribution

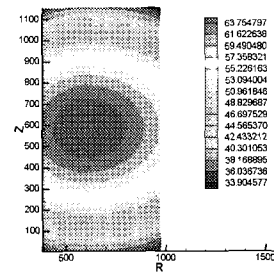
Fig. 6 Initial state of coil cooling simulation



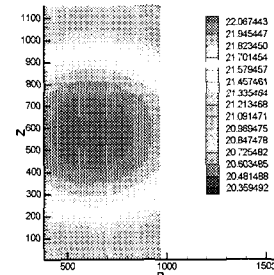
(a) 0.52 hour passed



(b) 2.78 hour passed

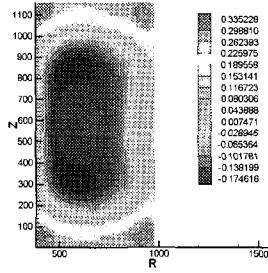


(c) 5.56 hour passed

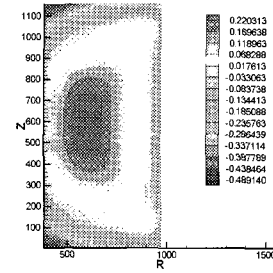


(d) 9.72 hour passed

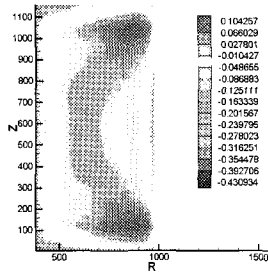
Fig. 7 Temperature distribution of coil



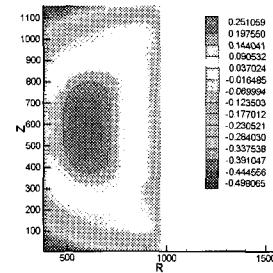
(a) 0.52 hour passed



(c) 5.56 hour passed



(b) 2.78 hour passed



(d) 9.72 hour passed

Fig. 8 Hoop stress distribution of coil

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) Lee, J.K. Lee, K.B. Kang and O. Kwon 1992, ISIJ international, Vol. 32, P. 326.
- 6) Lee and D.N. Lee, 1989, CALPHAD, Vol. 13, P.335.
- 7) J. Miettinen, 1995, Helsinki University of Technol-ogy, Report TKK-V-B113, p. 15.

- (8) E. Scheil, 1935, Arch. Eisenhttenwes, Vol. 8, p. 565
- (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) Manabe.K, Hwang.Z and Ueda.K, 1996, Journal-Japan Society for Precision Engineering, Vol. 62, p. 1151.
- (13) S.J. Park, B.H. Hong, 1998, ISIJ International, Vol. 38, pp. 1262~1269.
- (14) Y.J. Jung, C.S. Jung, G.T. Lee and C.G. Kang, 2001, "제 4 회 압연심포지엄", pp. 181~188.