

냉연 판재의 권취공정에 있어서 장력/열/변형 해석

정영진* · 이규택** · 강충길***

Tension/Heat/Thermal Deformation Analysis of a Cold Coiled Strip in Coiling Process

Y.J. Jung, G.T. Lee, and C.G. Kang

Abstract

A new model for heat transfer and thermal deformation analysis according to strip crown in coiling process has been proposed. Finite difference analyses for heat transfer of cold rolled coil have been carried out under various coiling tensions and strip crown using the equivalent thermal conductivity for the radial direction of cold rolled coil which is a function of strip thickness, surface characteristics and compressive pressure. The compressive pressure is calculated from a equation expressed as a function of hoop stress and coil tension considering strip crown obtained by experiment .

Finite element method for thermal deformation of cold rolled coil has been performed to investigate the effects of the strip crown, the coil tension and temperature.

From these analyses, it is found that the axial inhomogeneity of thermal deformation is increased as the strip crown, compressive pressure, and temperature drop in cold coiled strip increase.

Key Words : Cold Rolling, Heat Transfer Analysis, Thermal Deformation Analysis, Strip Crown, Coiling, Equivalent Thermal Conductivity

1. 서론

다양한 제품에 대한 시장여건과 고 표면 품질을 요구하는 수요자들의 요구가 증가함에 따라 압연 공정에 대한 많은 진보가 이루어지고 있다. 특히 선진국 수준의 고정도 폭 방향 두께 제어와 길이 방향의 두께 편차를 줄이는 생산 공정에 대한 연구가 많이 이루어져 왔다. 그러나 최근 제철업계의 추세는 압연기의 속도를 고속화하려는 경향을 가짐에 따라서 폭 방향 두께 편차의 저감

및 균일한 단면 프로파일을 유지하기가 어렵다. 또한 냉간 압연 후 판의 포로파일과 판의 형상은 후 공정에 크게 영향을 준다. 판 프로파일에서 판 일부분의 두께가 두꺼워지면 양호하지 못한 build-up을 발생시켜 냉연 코일을 풀 때 웨이브를 발생시킬 수도 있다.

특히 판의 장력 제어에 장애를 주기 때문에 후 공정인 연속 소둔 라인에서의 판 파단에 영향을 줄 수도 있다.

연속 냉간 압연 시스템에서 고품질, 고정도의 제품을 생산하기 위해서는 조업조건의 최적화는 물론 조업 중

* Dep. of Precision & Mechanical Eng., Pusan National University

** Technical Research lab, POSCO

*** School of Mechanical Eng., Pusan National University

온도예측과 판재의 변형은 필수적이다. 현재까지 국내 외의 연구 동향은 냉간 압연 중 폭 방향의 두께 변화 등을 주로 해석한 연구결과가 대부분이다.⁽¹⁾

코일의 온도해석을 수행하기 위해서는 냉간 스트립이 주기적으로 감길 때 생기는 반경방향의 열저항을 정확히 예측 할 수 있어야 한다. 감겨진 steel 층 사이의 열저항에 관해서 많은 연구가 진행되어오고 있다.⁽²⁻³⁾

권취시 각 스트립 사이의 표면 특성과 압축 응력을 고려하기 위해서 강의 두께와 공기층의 두께를 고려한 등가 열 전달 계수를 구하는 연구가 많이 수행되었다.⁽⁴⁻⁶⁾

열간 권취시 온도해석과 열 응력 등은 많이 연구되고 있으나, 냉연 권취시 발생하는 주편의 열 응력, 냉각 속도와 주편의 형상이 코일 된 주편에 미치는 영향을 종합적으로 고려한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 냉연 권취시 코일의 온도해석과 코일에 발생하는 열변형 해석 결과로부터 스트립의 형상 불량을 예측하였다. 이때 스트립의 표면 특성과 반경방향의 압축 압력에 대한 등가 열전달 계수를 고려하여 온도를 해석하였고, 온도해석과 반경방향의 권취장력을 고려하여 스트립의 응력 분포와 변형률을 FEM으로 해석하였다.

2. 코일링의 개요

냉간 압연을 하기 위해서는 Hot 코일 소재의 표면 산화층을 제거하기 위해서 산 세척을 한 다음 속도 600 ~ 2000 mpm, 두께 0.2~3.6 mm, 폭 600~1250 mm, 길이 8000m 까지 냉간압연으로 실제 필요한 장판을 만든다. 5~6단 냉간 압연을 거친 스트립은 형상 측정기에서 변형률을 측정된 뒤 슬리브에 감겨진다.

권취된 코일의 변형 예측을 하기 위해서는 코일의 온도해석과 변형 해석을 해야 한다. 이때 코일은 얇은 close 실린더로 가정되었으며 이 실린더가 연속적으로 누적되어 있는 것으로 하였다.

3. 권취 장력을 고려한 반경 방향의 압축 압력

냉간 압연시 스트립의 폭방향 두께가 균일하게 얻을 수 있다면 아주 이상적인 것이다. 그러나 실제 작업에서는 폭방향 두께 변화는 피할 수 없으며 이것을 스트립 크라운(Crown)이라고 부른다. 이런 스트립의 크라운은 코일 장력의 불균일을 유발하며 코일에 작용하는 압축 압력 역시 불균일하게 작용하여 스트립의 특정 부위에 과도한 집중하중을 가하게 된다.

따라서 본 연구에서는 스트립 크라운을 고려하여 스트립에 작용하는 압축 압력을 구했으며 이 힘을 이용하여 온도해석과 변형해석을 수행하여 그 결과로부터 스트립에 작용하는 응력과 변형률을 구하였다.

Fig. 1은 크라운 프로파일을 가지는 스트립이 감길때의 개략적인 모양과 원주방향응력(Hoop stress)을 나타낸 것이다.

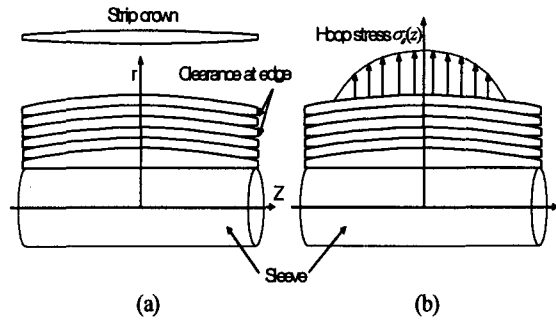


Fig. 1 Schematic diagram of crown strip model for coiling process analysis: (a) Coil shape and edge clearance, (b) Hoop stress

권취 장력을 고려하여 스트립에 작용하는 반경방향의 압축 압력을 구하기 위해서는 원주방향응력(Hoop stress σ_θ)을 구해야 한다. 원주 방향 응력은 다음 식에서 구한다.⁽⁷⁾

$$\bar{r} = \frac{1}{2h} \int_{-h}^h r_i(z) dz$$

$$r_i(z) = r_o + (i-1) \cdot t(z)$$

$$t(z) = t_o [1 - \alpha (|z|/h)^n]$$
(1)

여기서, r_i 는 i 번째 스트립 반경, r_o 과 \bar{r} 는 첫 번째 스트립의 반경과 평균 반경, $h(=500\text{mm})$ 는 스트립의 폭의 반, $t(z)$ 는 z 축 방향에 따른 두께, t_o 는 스트립의 두께, α 와 n 은 크라운율과 크라운 지수.

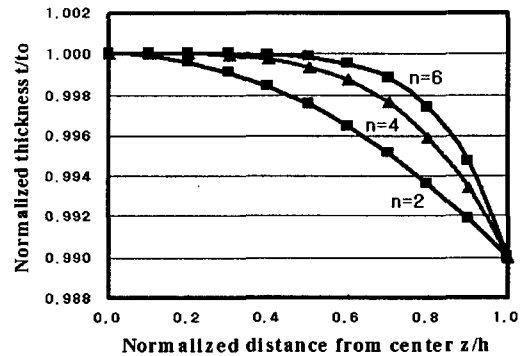


Fig. 2 Profile of strip's thickness, $t(z)$

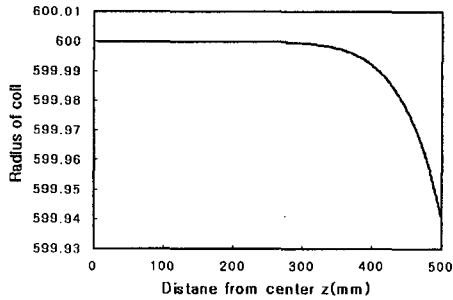


Fig. 3 Profile of strip drawn with experimental data

Fig. 2는 크라운 지수에 따른 스트립의 폭방향 두께 변화를 나타낸 것이다. 크라운 지수가 증가할수록 profile의 기울기는 급격히 감소하며 지수가 작으면 완만하게 profile이 변화하는 것을 알 수 있다. 이때 크라운율은 1%로 하였다.

Fig. 3은 실제 측정 데이터를 가지고 식(1)을 이용하여 스트립의 폭방향 두께 변화를 나타낸 것이다. 이때 크라운율과 지수는 각각 0.01%와 9이다.

식(1)에서 구한 스트립의 평균 반경(\bar{r})을 구한 후 다음 식에서 원주 방향 응력과 변형률을 구할 수 있다.

$$\epsilon_{\theta}(z) = \ln\left(\frac{r_i(z)}{\bar{r}}\right) \quad (2)$$

$$\sigma_{\theta}(z) = \frac{E}{1-\nu} \epsilon_{\theta} \quad (3)$$

여기서, E : Young's modulus, ν : Poisson ratio

식(1)에서 구한 \bar{r} 와 위의식에서 구한 $\epsilon_{\theta}(z)$, $\sigma_{\theta}(z)$ 를 이용하여 다음식을 만족시킬때까지 반복 계산한다.

$$\sigma_T \int_{-h}^h t(z) dz = \int_{-h}^h \sigma_{\theta} \cdot t(z) dz \quad (4)$$

여기서, σ_T : 권취 장력 (coiling tension) 스트립이 감겨짐에 따라서 스트립의 폭방향 양끝단에서 틈새가 발생하고 이곳에서 $\sigma_{\theta}(z)$ 는 음수 값을 가지게 된다. 그러나 실 조업에서는 $\sigma_{\theta}(z)$ 가 음수를 가질 수가 없으므로 본 연구에서는 $\sigma_{\theta}(z)=0$ 로 가정하여 계산을 수행하였다.

식(4)를 만족시키는 $\sigma_{\theta}(z)$ 와 \bar{r} 를 구한 후, 식(5)를 이용하여 스트립에 작용하는 압축 압력을 구할 수 있다.

$$P(z) = \sigma_{\theta}(z) \cdot t(z) / \bar{r} \quad (5)$$

Fig. 4는 식(5)에 의해서 계산되어진 압축 압력을 반경에 따라서 나타내었다. 반경방향이 R=314mm까지는 압축 압력이 증가하지만 그 이후에는 \bar{r} 의 증가량이 $\sigma_{\theta}(z)$

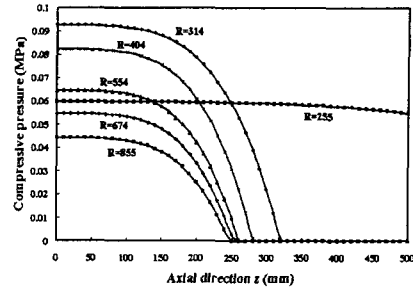


Fig. 4 Distribution of compressive pressure along axial direction(z) according to strip radius

의 증가량보다 크기 때문에 압축 압력은 작아지게 된다.

4. 열전달 해석

2차원 비정상상태 열전달 해석을 위한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} = k_{eq} \nabla^2 T + q \quad (6)$$

여기서, ρ_s : 밀도, c_s : 비열, k_{eq} : 등가열전달 계수, q : 열량.

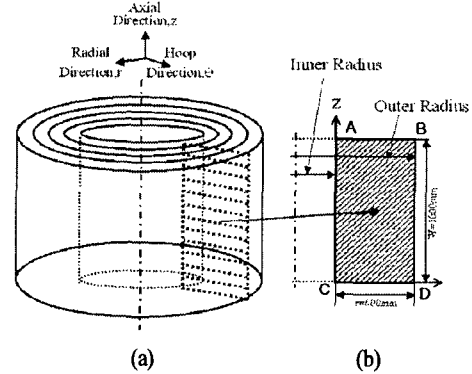


Fig. 5 Schematic diagram and cross section of cold rolled coil

Table 1 Material properties for heat transfer

Properties	Symbol	Unit	Value
Thickness of strip	t_s	mm	0.3
Thermal conductivity of strip	k_s	W/mK	68
Temperature of strip	T_s	°C	100
Density of strip	ρ_s	Kg/m ³	7897
Specific heat of strip	c_s	J/KgK	490.5
Convection heat transfer coef. of air	h_{air}	W/m ² K	17.7

Fig. 5(a)는 열전달과 변형 해석을 하기 위한 모델을 나타내었다. Fig. 5(b)의 단면 ABCD는 공기에 의해서 대류, 복사에 의해서 냉각이 되는 경계조건으로 했다.

$$q = h_{air}(T_{air} - T_s) : \overline{AB}, \overline{BC}, \overline{CD}, \overline{DA} \quad (7)$$

$$q = h_{rad}(T_{air} - T_s) : \overline{AB}, \overline{BC}, \overline{CD}, \overline{DA} \quad (8)$$

여기서, $h_{rad} = \epsilon\sigma(T^2 + T_{air}^2)(T_{air} + T_s)$

열전달 해석은 2차원 유한 차분법(FDM)을 사용하였다. Table 1은 열전달 해석을 위한 물성치를 나타내었다.

4.1 등가 열전달 계수

냉간 코일의 열 전달 해석시 열전달 계수의 정확한 사용이 중요하다. 냉간 코일의 경우 축방향 열전달 계수와 반경 방향의 열 전달 계수가 다르다. 따라서 본 연구에서는 축방향 열 전달 계수는 강의 열전달 계수를 그대로 사용하였고 반경 방향의 경우에는 등가 열전달 개념을 도입하여 반경 방향 열전달 계수를 계산 하였다.

Fig. 6(a)는 코일링이 완료된 코일을 해석하기 위한 단면을 표시했다.

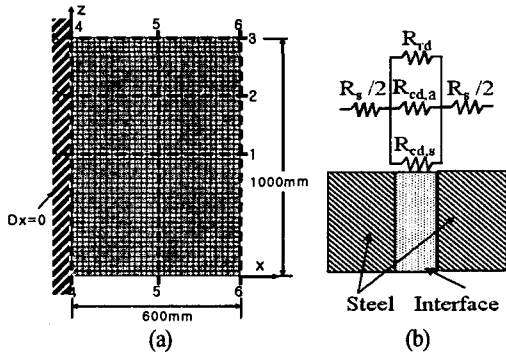


Fig. 6 Model for heat transfer and thermal deformation and schematic diagram for unit layer of layered cold rolled strips

Fig. 6(b)는 등가열전달계수를 구하기 위한 단위 모델을 나타낸 것이다. 코일이 감기면 철과 철 사이에는 Interface가 존재하게 되는데 이것을 단위 층(Unit layer)으로 구성하였다. 단위 층의 열 저항을 고려하여 등가 열전달 계수는 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽⁶⁾.

$$k_{eq} = \frac{t_{unit}}{R_s + \frac{1}{\frac{1}{R_{cd,s}} + \frac{1}{R_{cd,a}} + \frac{1}{R_{rad}}}} \quad (9)$$

여기서, R_s : 강의 열저항, $R_{cd,s}$: 철의 전도를 고려한 열저항, $R_{cd,a}$: 공기의 전도를 고려한 열저항, R_{rad} : 공기

의 복사를 고려한 열저항

반경 방향의 열전달 계수는 재료의 물성치, 접촉면에 수직으로 작용하는 압축 압력, 강의 표면 특성에 따라 달라진다.

본 연구에서는 열간 압연후 권취시의 온도해석을 수행한 개념을 도입하여 냉간 압연 후 권취시의 온도를 해석하였다. 열간 압연에서는 산화층을 고려하였으나 냉간 압연에서는 산화층을 무시하였다.

4.2 열전달 해석 결과

코일의 열전달 해석시 권취 장력의 선택이 아주 중요하다. 일반적으로 실 조업에서 사용되어지는 권취 장력은 50~60MPa이지만 스트립의 두께나 속도 등 여러 가지조건에 따라서 권취 장력은 다양하게 사용되고 있다. 그러나 이에 관한 정확한 정보를 구할 수가 없어서, 본 연구에서는 권취 장력을 10, 30, 50MPa로 변화시켜 그 영향을 조사하였다.

Fig. 7은 Fig. 6(a)의 단면 1-1과 단면 5-5의 온도분포를 나타낸 것이다. 권취 장력이 클수록 온도가 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 반경방향 등가 열전달 계수가 압축 응력에 크게 의존하기 때문에 권취 장력이 높을수록 빨리 냉각되어진다.

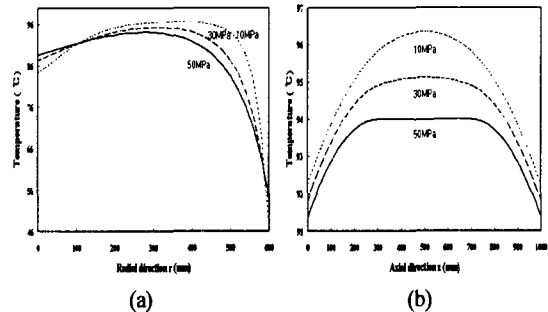


Fig.7 Temperature difference according to coil tensions in cold rolled coil after 2 hours : (a) 1-1 section, (b) 5-5section

5. 열 변형해석

코일의 변형을 예측하기 위해 코일의 열전달해석에서 구한 온도값과 식(5)에서 구한 압축 압력을 외력해서 FEM 변형해석을 수행하였다. 이때 요소와 노드 수는 각각 1421, 1500개로 하였다.

Fig. 6(a)는 변형해석을 하기 위한 모델을 나타낸 것이다. 단면 4-4는 sleeve에 의해 지지를 받는 곳으로 이곳의 노드를 x방향으로 고정된 것으로 하였다. Table 2는 변형해석 필요한 물성치를 나타낸 것이다.

Table 2 Material properties for thermal deformation⁽⁶⁾

Properties	Symbol	Unit	Value
Young's Modulus	E	MPa	0.3
Poisson's Ratio			68
Thermal Expansion Coef.	α	1/°C	100

5.1 해석 결과

Fig. 8은 권취 장력이 10MPa일때 2시간, 42시간 후의 상당응력을 나타낸 것이다. 최대 상당응력은 114MPa이다. 2시간 후의 상당응력을 보면 단면 6-6과 단면 4-4의 중간 부위에서 응력값이 큰 것을 알 수 있다. 단면 6-6의 경우엔 압축 압력은 작으나 온도가 급격히 떨어짐으로써 상당응력이 크게 나타난다. 42시간 후에는 온도 영향이 감소함으로써 상당응력이 반으로 감소하였다.

Fig. 9는 권취 장력 50MPa일때 2, 42시간 지났을때의 상당응력을 나타낸 것이다. 최대 상당응력은 177MPa이다. 상당 응력의 분포는 Fig. 8과 비슷한 양상을 나타내는 것을 알 수 있다.

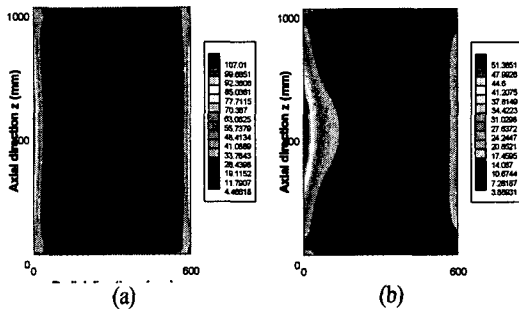


Fig. 8 Equivalent stress distributions of cold rolled coil for coil tension 10MPa : (a)2 hours, (b) 4 hours

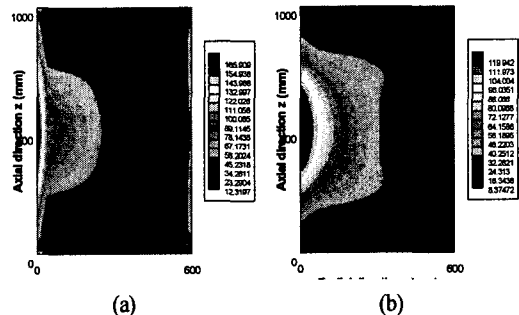


Fig. 9 Equivalent stress distributions of cold rolled coil for coil tension 50MPa : (a)2 hours, (b)42 hours

이상의 결과에서 권취 장력이 클수록 상당응력 값 또 한 큰 값을 나타내었다. 두 상당응력은 스트립의 항복응

력(200MPa)값보다 작으므로 스트립이 권취될 때 소성변형은 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

6. 결론

냉간 코일에 대한 열전달 해석과 열변형 해석을 통해서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 권취 장력에 따라 열전달 해석을 수행하였는데 권취 장력이 10MPa, 50MPa일때 상온으로 떨어질때까지의 시간은 각각 48시간, 30시간으로 권취 장력이 증가 열전달계수에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

(2) 열 변형해석을 통하여 권취 장력에 따라 상당 응력을 평가하였으나 스트립의 상당응력이 항복응력보다 작아 탄성 변형을 하는 것을 알 수 있었다.

(3) 스트립의 크라운 형태에 따라서 열전달과 변형해석을 할 수 있는 모델을 개발하였다.

참고 문헌

- (1) H. D. Park, 1999, "Technology of Profile and Shape Control in the 6-high Tandem Cold Rolling Mill", Third Rolling Sym., RIST, August 20~21, Edited by S. M. Hwang, J. J. Lee, pp.142~149.
- (2) C. V. Madhusudna, L. S. Fletcher, 1986, "Contact Heat Transfer-The Last Decade", AIAA J. Vol. 24, No.3, pp. 510~523.
- (3) J. A. Greenwood, J. B. P. Williamson, 1966, "Contact of Nominally Flat Surface", Proc. R. Soc.(London), 295A, pp. 300~319.
- (4) V. L. Mazur, V. V. Kostyakov, Z. P. Karetnyi, V. F. Kornienko, A. V. Chuiko, 1989, "Efficient Schedules for Forced Rapid Cooling of Coils of Hot Rolled Strip", Steel USSR, 19, pp. 162~165.
- (5) E. G. Gasho, V. I. Prokhorov, A. T. Moroz, L. I. Frantsenyuk, 1987, "Cooling Conditions of Hot Rolled Steel Coils", Steel USSR,17, pp. 86~87.
- (6) Seong-Jun Park, Byung-Hee Hong, Seung-Chul Baik, Kyu Hwan Oh, 1998 "Finite Element Analysis of Hot Rolled Coil Cooling", ISIJ Int., Vol.38, pp. 1262~1269.
- (7) S. Yanagi, S. Hattori, Y. Maeda, 1998-1, "Analysis Model for Deformation of Coil of Thin Strip under Coiling Process", J. of the JSTP, Vol. 39, No. 444, pp. 51~55.