

미니밀 코일박스의 권취공정에 대한 유한요소 해석

이호국, 이상로
포항제철 기술연구소 광양압연연구팀

Finite Element Analysis of the Coiling Process of Hot Bar in Coil Box of Mini-Mill

Ho-Kook Lee, Sang-Ro Lee
POSCO Technical Research Laboratories, Kwangyang Rolling Products Research Team

Abstract

The coiling station of ISP coil box is an equipment that winds a hot bar rolled at reduction unit into a coil without mandrel. In the coiling process, the roll gap of the bending unit is a significant one of several factors that influence bar coiling. To obtain a good bar-coil, the roll gap must be set appropriately according to the bar thickness. In this study, with 2-dimensional isothermal elastic-plastic finite element method, authors investigated influence of the change of the roll gap on the initial coiling shapes and the formed inner diameters of coils. Based on finite element analysis, authors proposed the appropriate roll gap according to the bar thickness to be able to wind a hot bar. The inner diameters of coils by results of analysis comparatively agreed with coling operation conducted in plant.

Key Words : Coiling Operation, Roll Gap, Finite Element Analysis

1. 서 론

90년대 철강업의 가장 큰 혁신중의 하나는 고철을 철원으로 사용하는 미니밀 공정의 등장이라 할 수 있다. 미니밀 공정은 고로에 의한 기존의 생산공정과 달리, 전기로-연속주조-열간압연의 생산공정을 직결화하여 열연코일을 제조하며, 공정을 단축시켜 에너지 절감, 제품생산의 유연성 및 전기로 방식의 환경 친화적인 특징을 갖는 신제철 공정이다. 미니밀의 단위공정중에서 ISP형 코일박스 내에 설치된 권취기(coiling station)는 2대의 4단 연속식 압하장치(Reduction Unit)에서 압연된 20~30mm의 바가 2개의 상부롤러와 1개의 하부롤러로 구성된 굽힘장치(bending unit)에 설정된 롤갭을 통과하면서 굽힘력을 받아 초기 곡률을 형성하여 맨드렐없이 코일의 형태로 권취하는 설비이다.

굽힘장치의 롤갭은 바 권취에 영향을 주는 여러 인자들 중에서 권취성을 좌우하는 핵심인자이다. 즉, 양호한 바 코일을 얻기 위해서는 바 두께에 따라 롤갭을 적정하게

설정하여 작업해야 한다. 독일의 MDH (Mannesmann Demag)사에 의해 ISP형 코일박스가 세계 최초로 포항제철(주) 미니밀공장에 설치되어 가동되고 있으나, 실기 운용 경험이나 조업 결과가 전무하고, 바 두께, 온도 등의 조업조건에 따라 굽힘장치의 틀잡을 어느 정도로 설정해야 하는 지에 대한 체계적인 실험이 행해지지 않았으며, 이 공정에 대한 해석적 기법 등이 확립되지 않은 실정이다.

본 연구에서는 2차원 등은 탄소성 유한요소법에 의한 권취공정을 시뮬레이션하여 굽힘장치에서의 틀잡변동이 초기 권취형상이나 형성된 코일 내경에 미치는 영향을 조사하고 권취 가능성을 판단하고자 한다.

2. 고온 유동응력 측정실험

강의 고온 변형거동은 열간압연시 압연력의 예측, 변형중 야금학적 해석 및 연주기 설계 등에 활용되는 중요한 분야로 이에 대한 많은 연구가 진행되었다. 그런데, 고철을 주원료로 사용하는 미니밀 공정에서는 미소한 순환원소(tramp element:제강공정에서 제거가 어려운 구리, 티타늄, 니켈 등의 순환원소)가 함유되어 있어서, 고로로부터 얻은 정련된 강과는 상이한 변형거동을 일으킨다. 일반적으로 강의 고온 변형기구는 온도가 높을수록, 변형속도가 느리거나 응력이 작을수록 크립변형에 지배되며 온도가 낮고 변형속도가 빠르거나 응력이 큰 경우에는 소성변형이 지배적이다. 연속주조된 주편을 압하장치로 1차 압연한 바를 권취할 때의 변형속도(0.1~10/sec)에서는 동적 재결정이 수반되는 소성변형에 지배된다.

따라서, 변형역에서의 변형거동을 정량화하여 권취공정의 유한요소 해석에 이용하고자 미니밀 생산 대표강종인 강관용 열연소재(SPH1)의 고온 유동응력을 측정하였다. 시편의 화학성분은 표1과 같으며, 균질화 열처리후 직경 10mm, 길이 15mm의 봉상으로 가공하였다.

Table 1. Chemical components of the specimen

성분(wt%)	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	Al
SPHT1	0.04	0.3	0.015	0.016	0.014	0.08	0.04	0.04	0.04	0.04

고온 유동응력을 얻기 위한 고온 압축시험은 통전 가열방식의 글리블시험기를 이용하여 일정 행정을 모드하에서 실시하였다. 온도측정 및 제어는 Pt/Rd형 열전대를 이용하고 변형율은 시편 길이방향 중심 표면에 C-스트레인 게이지를 부착하여 변형중 지름의 변화를 측정하여 진변형률로 변환하였고, 변형중 하중 및 지름의 변화도 측정하였다. 이와 같은 고온 압축시험으로 얻은 변형률-유동응력 곡선은 Fig.1과 같으며, 유동응력 곡선들 중에서 1050℃의 유동응력 곡선만을 해석에 사용하였다.

3. 유한요소 모델링

3.1 모델링 및 기하학적 관계

권취공정을 유한요소 해석하는 데 있어서, 각 설비간 기하학적 관계가 복잡하고 바의 진행속도나 틀갭 등의 작업상황에 대한 해석적 모사가 어렵고 여러 물체와의 접촉 처리에 소요되는 시간 및 수렴시간이 과다하게 소요되는 문제가 있다. 그러나 본 연구에서는 권취기에서의 초기 권취현상을 잘 모사할 수 있도록 Fig.2와 같이 전처리하였고, 이에 대한 각 롤러간 기하학적 관계를 도식하였다. 모델링에서 각 롤러와 에이프런은 강체로 정의하고 바 두께대 폭의 비가 매우 작으므로 평면변형을 가정한 2차원문제 로 단순화하고 바의 열손실을 무시한 등온조건의 탄소성 해석을 하였다. 또한 변형속도 및 크립의 영향은 무시할 수 있다는 가정을 두고 소재의 변형은 일정온도에서 비선형적 소성곡선을 따르며 Von-Mises항복조건에 의한 등방성 경화법칙을 적용하였다. 해석용 소프트웨어로 상용 유한요소 프로그램인 MARC K6.1⁽¹⁾을 사용하였다.

3.2 해석조건 및 굽힘장치에서의 틀갭

굽힘장치의 틀갭 변동에 따른 권취형상의 영향을 해석하기 위하여 표2의 작업조건에 따라 해석을 수행하였다.

Table 2. Analysis conditions for analyzing coiling process

Thickness	Temperature	Threading Speed	Roll Gap
20mm	1050℃	12mpm	45mm
			47mm
			50mm
30mm	1050℃	10mpm	52mm
			56mm
			60mm

굽힘장치에서 2개의 상부롤러들은 유압실린더의 행정이 변함에 따른 메인프레임의 각도변동에 의해 하부롤러와 간격을 형성한다. 권취기에서, 굽힘장치의 상부롤러들과 이들 사이의 에이프런(apron)을 제외한 단위설비들은 그 위치가 고정되어 기하학적 관계가 명확하지만 상부롤러들은 유압실린더의 행정에 따라 위치가 가변적이다. 따라서, 해석을 위한 메인프레임의 각도변동에 따른 상부롤러들의 중심위치는 다음과 같이 구한다.

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1 - x_0 \\ y_1 - y_0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

여기서, (x_0, y_0) 는 메인프레임의 회전중심, (x_1, y_1) 는 굽힘롤러들의 초기 중심이며

(x_2, y_2) 는 회전 이동한 굽힘롤러들의 새로운 위치이다.

4. 유한요소 해석결과

4.1 권취과정

해석은 바의 선단부가 핀치롤러(pinch roller)에 도달하는 시점부터 시작하였다. 핀치롤러를 통과한 바는 입측롤러(entry roller)를 기준으로 13.3° 로 경사진 전면테이블과 20.1° 로 경사진 후면테이블을 지나 굽힘장치로 진입하면서 3점 굽힘작용에 의해 코일 형태로 권취되도록 초기 곡률이 형성된다. 굽힘장치를 통과하여 곡률이 형성된 바의 선단부는 하부 굽힘롤러와 코일형성롤러(coil forming roller)사이에 위치한 에이프런에 접촉하여 미끄러지며 코일형성롤러와의 접촉에 의해 곡률이 약간 확대된다. 그러다가 바 선단부가 코일형성롤러를 따라 미끄러져 최종적인 권취형상(coil eye)은 코일형성롤러와 받침롤러(cradle roller)사이에서 형성된다. 이러한 권취과정을 Fig.3에 나타내었다.

4.2 해석조건별 권취성

바의 권취성을 좌우하는 주요 영향인자는 굽힘장치의 틀갭이다. 만약 틀갭이 너무 크면 바의 초기 굽힘곡률이 너무 커져 권취내경을 형성하지 못하고, 반면에 너무 작으면 굽힘기구에서 바의 변형에 소요되는 에너지가 핀치를 전면이나 입측테이블에서 바의 변형에너지보다 훨씬 크게 작용하여 굽힘장치에서 바의 변형에너지를 극복하지 못해 좌굴(buckling)과 같은 현상이 발생할 수도 있고, 초기 굽힘곡률이 작게 형성되어 원하는 권취내경을 얻을 수 없게 된다. 또한, 동일 틀갭에서 굽힘기구로 인입되는 바 온도가 낮으면 바의 변형에너지가 크게 작용하여 굽힘기구의 설비적 안정성에 영향을 미칠 뿐만아니라 코일형성롤러와 받침롤러사이에서 형성되어야 할 초기 권취형상이 불완전하여 권취되지 않을 수도 있다.

틀갭의 변화가 초기 권취형상이나 형성된 코일 직경에 미치는 영향을 조사하여 코일박스 조업에서의 작업조건에 따른 권취 가능성을 판단하고 적절한 틀갭을 제시하기 위하여, 초기 권취시 형성되는 코일내경과 권취성을 결정하여 표3에 나타내었다.

해석결과를 토대로 바 두께에 따라 변형모드가 달라지기 때문에 (틀갭)/(바 두께)와 의 비를 확률적으로 결정할 수 없음을 알 수 있다. 예를 들어, 바 두께 20mm의 경우에는 틀갭을 두께의 250%이상 설정하고, 바 두께 30mm의 경우에는 틀갭을 두께의 200%이상 설정하여 권취하게 되면 굽힘곡률이 크게 형성되어 코일형성롤러와 받침롤러사이에서 원만하게 권취되지 않고 바 진행방향으로 밀려나게 된다. 따라서 굽힘장치의 틀갭은 바 두께에 따라 달리 설정되어야 한다.

Table 3. Inner diameter of bar coil

Thickness(mm)	Temperature(°C)	Roll Gap(mm)	Inner Dia. of Coil(mm)
20mm	1050°C	45mm	625
		47mm	636
		50mm	Impossible
30mm	1050°C	52mm	570
		56mm	577
		60mm	Impossible

두께 30mm에 대한 권취 가능한 롤갭 범위는 52mm~56mm에서 결정할 수 있다고 판단되는데, 만약 온도가 낮아지면 권취가 가능하다 할지라도, 굽힘장치에 작용하는 굽힘반력이 커져 설비의 안정성에 악영향을 끼치며 바 선단의 굽힘이 원활하지 않기 때문에, 유도가열로(inductive heater) 출측의 온도를 1050°C 이상 확보하는 것이 더 유리하다. 또한 롤갭이 작으면 굽힘변형에 필요한 에너지가 증가하여 굽힘장치에 장기적인 피로손상을 줄 수 있으므로 작은 롤갭은 피하는 것이 좋다. 따라서, 바 두께 30mm에 대한 현장 롤갭 설정치인 56mm는 적정하다고 판단되는 바이다. 바 두께 20mm의 경우, 온도가 1050°C 이상 확보되면 현재 설정된 47mm의 롤갭에서 안정적으로 권취할 수 있다고 판단되지만, 이 두께에서는 권취성이 불안정하고 권취중에 코일쏠림현상(telescope)이 발생하기도 하기 때문에 권취시험과 해석을 병행하여 적정한 작업조건을 설정하여야 한다.

5. 결론

미니밀 코일박스 조업의 권취공정에서 롤갭변동이 초기 권취형상 및 내경 형성에 미치는 영향을 해석적으로 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기하학적 구조가 복잡하고 여러 물체와의 접촉문제를 처리할 수 있는 해석기술을 확립함으로써 코일박스의 권취공정을 성공적으로 모사할 수 있는 해석기반을 구축하였다.
2. 굽힘변형을 받는 상태로 진행하는 바 선단부가 코일형성롤러에 접촉할 만큼 바 두께 대비 롤갭이 크게 설정되면, 초기 권취형상이 불완전하여 권취되지 않는다.
3. 코일박스 조업에서 초기 권취시 형성되는 코일내경과 권취성을 결정하여, 작업조건에 따른 권취 가능성을 판단하고 적정한 롤갭을 제시하였다.
4. 해석결과와 권취 실험결과를 비교한 결과, 권취내경은 해석결과가 두께 20mm의 경우 7.3%, 두께 30mm의 경우 4.2%로 크게 예측되지만 실험결과와 비교적 잘 일치한다.
5. 향후, 바 두께 및 온도조건 등의 많은 작업조건에 따른 해석을 수행하고 권취실험을 통해 그 적합성을 확인함으로써 바 두께에 따른 롤갭 설정치를 미세조정해야 한다.

참고문헌

- 1.MARC User's Manual, *Program Input*, Vol.A, B, C
- 2.Mannesmann Demag Huttentechnik, *Development of a simulation program for the behivoir of steel strips during winding in a coil box*; technical report. Feb. 1995
- 3.C.C.Chen and S.Kobayashi, *Rigid-plastic finite element analysis of ring compression*, Application of numerical methods to forming process, ASME, AMD, 28, 1978, pp.163-174
- 4.Tai-Ran Hsu, 1986, *The Finite Element Method in Thermo-dynamics*, Boston; Allen & Unwin
- 5.S.Kobayashi, S.I.Oh & T.Altan, *Metal forming and the finite-element method*; Oxford University Press, Inc
- 6.O.C.Zienkiewicz & R.L.Taylor, *The Finite-Element Method; Vol.1 Basic Formulation and Linear Problems*, McGraw-Hill, New York

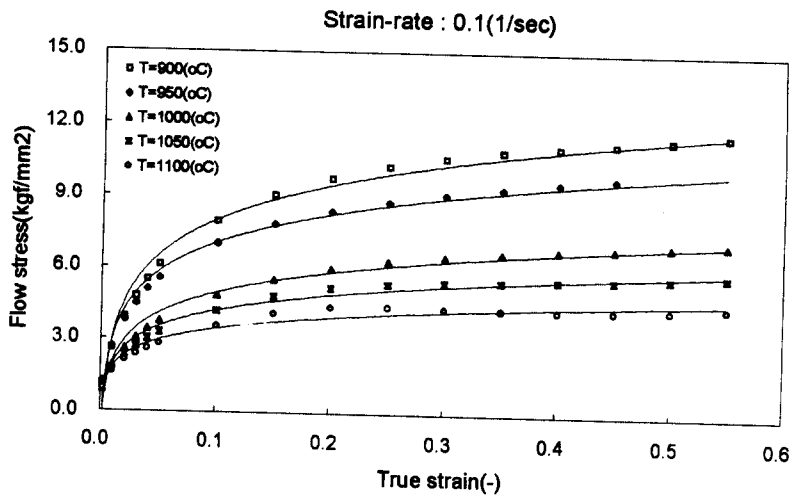


Fig.1 true strain-flow stress curve of SPH1

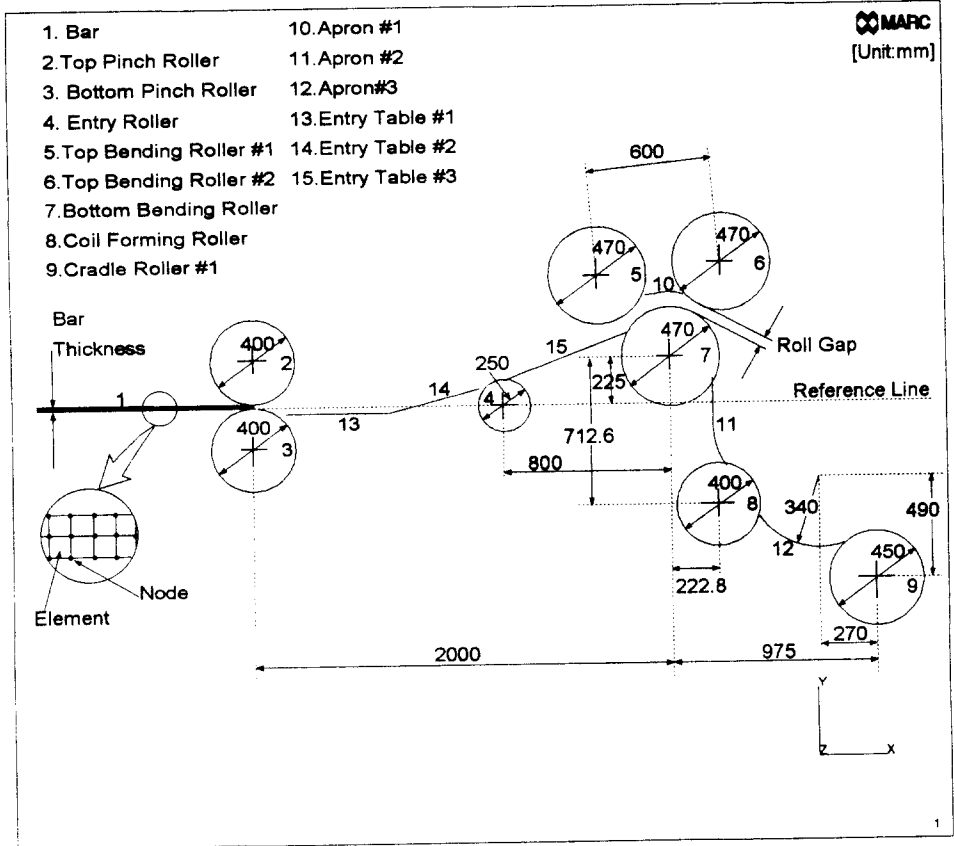


Fig.2 Finite-element modelling and geometric relationship

✱ Analysis conditions

- 1.Bar temperature : 1050℃
- 2.Roll gap of bending unit : 52mm
- 3.Bar thickness : 30mm
- 4.Line Speed : 10mpm
- 5.Isothermal elastic-plastic material

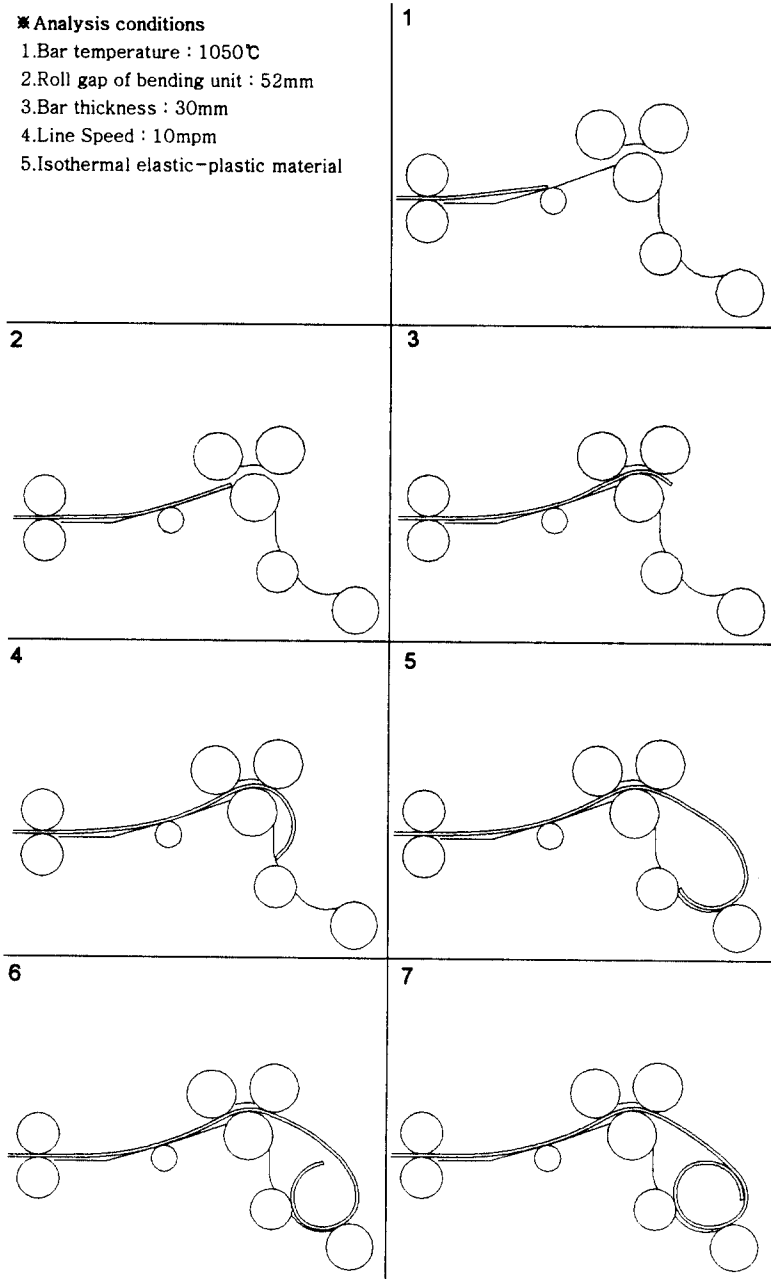


Fig.3 Finite element analysis of coiling process in coiling station