

표준 유닛 장력의 온라인 구축에 의한 조질 압연 평탄도 제어 성능 향상에 관한 연구

나영종
현대제철 열연 2팀

A Study on the Improvement of Control Performance of Skin Pass Rolling Flatness by Online Construction of Standard Unit Tension

Young-Jong Na
Hyundai-Steel Hot Rolling 2 Team

요약 본 논문에서의 연구는 독립식 조질 압연의 표준 유닛 장력의 부재를 연구하여 열연 스트립 압연의 고질적 문제인 웨이브 개선 및 고장력에 의한 국부적인 설비 변형에 따른 파손을 예방하는데 골자를 둔다. 또한 여러 강종의 특성을 고려하여 공통점과 한계점을 아우르는 조건들을 조성하여 조질 압연을 통한 연신율 테스트를 진행하였으며, 가장 이상적인 수치를 기준으로 데이터의 완성도를 더했다. 압연 연구변형의 교정은 전, 후 장력이 없거나 낮은 경우 단순 압연작업으로 웨이브가 없는 짧은 부분을 압연하여 웨이브가 있는 긴 부분의 길이에 맞추면서 웨이브를 없애는 원리이다. 따라서 단순한 압연작업에서 이루어지는 교정은 입측 재료의 후판 프로파일과 평탄도 불량 상황의 웨이브 위치나 크기에 맞춰 압연 조건을 바꾸어야 하며, 특히 얇은 판의 경우 안정적인 평탄도 확보를 위해 소정의 데이터 제공이 필요한 부분이다. 본 논문에서의 요지는 장력 테이블의 부재로 인한 상이한 수동제어로 발생하는 문제점들을 개선하기 위한 연구를 진행하였으며, 완벽한 자동제어는 불가능해도 무분별한 수동 조정을 방지하는 동시에 웨이브 개선을 통한 상품성 보완에 중점을 두었다. 이에 수학적 모델을 기반으로 교정 알고리즘 기술의 설명 및 정형화된 표준 유닛 장력 테이블의 온라인 구축과 제어 기술의 고착화를 통한 새로운 모델을 제시한다.

Abstract This study evaluated the absence of standard unit tension in independent skin pass rolling to improve the wave, which is a chronic problem of hot rolled strip rolling, and prevent damage caused by local equipment deformation due to high tensile strength. In addition, considering the characteristics of various steel types, the elongation test was conducted through skin pass rolling by producing conditions encompassing commonalities and limitations. The completeness of the data was added based on the ideal value. If there is no post-tension or low tension, a short part without a wave is rolled by a simple rolling operation to eliminate the wave while adjusting to the length of the long part with the wave. Therefore, the calibration performed in a simple rolling operation must change the rolling condition according to the position or size of the wave of the plate profile or the flatness defect situation of the entry material. In particular, in the case of the thin plate, it is necessary to provide predetermined data to secure stable flatness. The main point of this paper was to improve the problems caused by the different manual control due to the absence of the tension table. Although perfect automatic control is impossible, it prevents indiscreet manual adjustment and focuses on supplementing marketability through wave improvement. A new model of the tension table based on the mathematical model is presented by describing the calibration algorithm technology, the online construction of the standard unit tension table, and the fixation of the control technology.

Keywords : Calibration, Elongation, Flatness, Skin Pass Rolling, Unit Tension

*Corresponding Author : Young-Jong Na(Hyundai-Steel Hot Rolling 2 Team)

email: nyj328@naver.com

Received January 9, 2024

Accepted April 5, 2024

Revised February 28, 2024

Published April 30, 2024

1. 서론

1.1 조질 압연(SPM : Skin Pass Mill) 목적

조질을 목적으로 하여 특히 판재를 대상으로 이루어지는 판압연. 저탄소강의 항복점 현상을 소멸시키기 위해 하는 압하율 1% 정도의 압연이 대표적인 Skin Pass Rolling 이다. 또한 표면 형상의 개선, 단면 형상의 개선 및 기계적 성질의 변화를 목적으로 하는데, 조질 압연기는 열연 공정 용도의 SPM 과 냉연 공정의 SPM (Temper Mill) 으로 구분된다[1].

열연 강판은 냉간 가공에 의해 인성이 감소하고 강도가 증대되는 성질이 있어, 사용에 적합하도록 재질을 조정하여 인성을 늘릴 필요가 있다. 이를 위해 강판에 적정 하중과 연신을 가해 내부 응력을 제거한 후, 결정 입자를 세밀하게 하기위해서 가벼운 냉간 압연을 한다. SPM 은 일반적으로 경 압하를 가해 소정의 연신율로 형상 교정 기능 외에 표면 조도 조정 기능과 항복점 연신을 없애는 재료 및 기계적 성질을 개선하는 등 여러기능을 겸비하고 있다. 또한 장력을 부여한 압연의 경우, 웨이브가 없는 짧은 부분에 높은 장력이 걸리고 웨이브가 있는 긴 부분은 장력이 걸리지 않거나, 걸리더라도 낮은 장력이기 때문에 압연 하중이 판 폭 방향으로 균일하게 가해지면 짧은 부분부터 압연이 되면서 긴 부분과 길이가 같아진다. 따라서 장력을 부여한 SPM 이 압연 영구변형의 원인인 형상 불량률의 교정 효과가 높다[2].

SPM은 약하게 누르면서 하는 압연. 얇은 판을 생산할 때 제품의 완성 단계에서 품질을 높이기 위하여 행한다. 스트립(Strip)의 교정 과정 중 가장 중요시되는 능력은 압연 공정에서 발생하는 이파, 센터 버클, 쿼터 버클 등의 압연 영구변형이다. 그 부분의 핵심은 조건에 맞는 표준 장력이 제공되어야 원하는 압연 제품을 얻을 수 있다. 또한 최근 수요가의 동태는 엄격한 품질 요구와 스트립 평탄도 기준이 높아져 고도의 기술을 필요로 한다. 본 논문에서는 독립식 SPM 공정의 장력 제어 방식의 정형화된 장력 테이블의 부재로 인한 수동 데이터값의 인위적 누적에 기인하여 스트립에 국부적인 웨이브 발생 빈도 증가와 설비 부하로 인한 변형 및 파손에 구심점이 있다. 이에 수동 조정을 최소화하고자 표준 유닛 장력 테이블의 온라인 고착화에 역점을 두고, 수학적 모델을 제시하여 교정 이론 기술의 방향성을 설명한다[3-6].

1.2 SPM 압연기 구분

열연 공정의 SPM 설비는 일반적으로 2가지 유형으로

나뉜다. 복합식과 독립식이 있으며, 텐션 레벨러가 추가적으로 적용된 설비만 복합식 스킨 패스 밀로 구분한다.

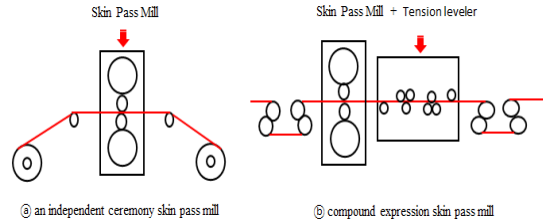


Fig. 1. ① an Independent ceremony Skin Pass Mill
② Compound expression Skin Pass Mill

1.3 SPM 기능

Fig. 2 는 조질 압연에 의한 응력-연신 곡선과 조질 압연 압하율이 기계적 성질에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

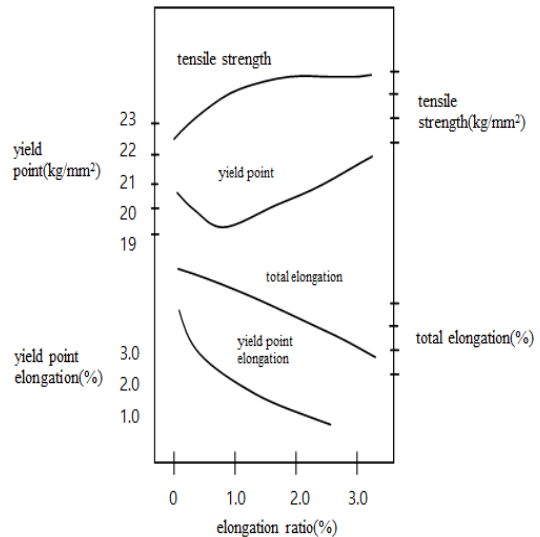


Fig. 2. Mechanical properties, Yield point elongation and Elongation relationship

이 그림에서 알 수 있듯이 SPM 전의 상태에서는 항복점 연신이 심하지만 SPM 후에는 제거된다. 또한 SPM 압하율을 0.1~4.0%의 범위 내에서 증가시키면 압하율에 따라 다음과 같이 기계적 성질이 변화한다. 일반적으로 연신율 증가에 따라 항복점 연신은 감소하지만, 인장강도는 증가하고 연신은 저하하며 연성 자체는 열화되기 때문에 적절한 연신율 관리가 필요하다[7].

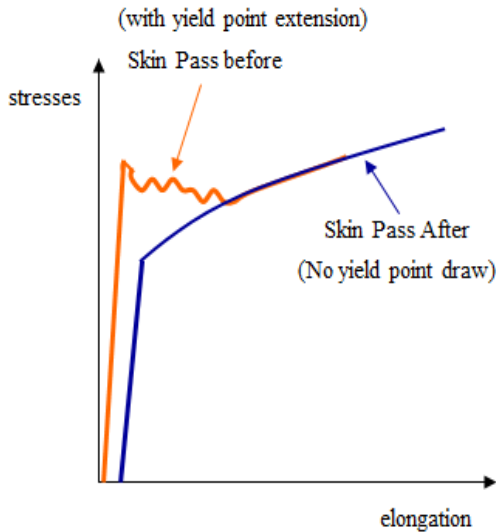


Fig. 3. Before and After Skin Pass Extension curve

- Elongation
(The strip length of the strip length - pre-rolling after rolling)/strip length before rolling
- Reduction rate
(Strip thickness after rolling - strip thickness before rolling)/pre-rolled strip thickness
- The width contraction, and the width extension ignore
- elongation ratio = reduction rate/1-reduction rate
- maximum elongation ratio : 2~3%

1.4 SPM 설비 구성

1) 페이 오프 릴 (POR : Pay Off Reel)

페이 오프 릴은 코일을 되풀어 보내주는 설비이며, 코일을 풀 때 발생하는 곱쇠 (Coil Break)를 방지 하기 위해 맨드릴 (Mandrel) 상부에 통상 P/R(Pressure Roll)을 설치한다.

2) 스트레이너 롤 (STR : Straightener Roll)

스트레이너 롤(STR)은 3개의 하부 롤(3-Bottom Roll)과 3개의 상부 롤(3-Top Roll)로 구성되어 있고, 페이 오프 릴(POR)에서 되풀려진 스트립(Strips)의 스레딩 (Threading)을 용이하게 하기위해 Top, End 부를

거의 평편(Flat) 하게 하는데 목적으로 사용한다.

3) 스킨 패스 압연기 (SPM : Skin Pass Mill)

스킨 패스 압연기에는 상.하 작업 롤로 구성된 2중식(2High Mill) 또는 작업 롤 (Work Roll) 과 받침롤(Back Up Roll)이 상.하 각 2본식 구성 되어있는 (Single Stand) 4중식 (4High-Mill) 이며, 일반적으로 4단 비가역식 (Irreversible mill) 압연기를 사용한다.

4) 시어 (Up Cut Shear)

시어 (Knife)는 코일의 분할 및 선단 그리고 미단, 불건부를 절단 하는데 사용한다.

5) 스크랩 핸들링 시스템

시어에서 절단된 선단 및 미단부의 절단설을 스크랩 버킷 (Scrap Bucket)까지 운반하는 롤러 테이블 형태의 컨베이어이다.

6) 디플렉터 롤 (Deflector Roll)

디플렉터 롤은 상부 롤과 하부 롤로 구성되어 있으며, 모터로 상부 롤을 구동하여 스트립 선단부를 텐션 릴에 안내하며 통판 시에는 롤을 상승시키고, 하부 롤은 모터에 의해 구동을 하지 않고 스트립의 방향만 하향으로 해주는 역할만 한다.

7) 텐션 릴 (TR : Tension Reel)

형상 교정을 완료한 코일은 소정의 장력으로 텐션 릴에 권취한다[8-11].

1.5 SPM 설비 배치

스킨 패스 압연기(Skin Pass Mill)의 일반적인 설비 배치를 큰 단락으로 나누면, 입측 (Entry)부터 코일 삽입 설비인 입측 인입 코일 카(Entry Coil Car), 코일을 다시 풀어 주는 페이-오프 릴 (Pay-Off Reel), 압연기 본체 (Mill Housing), 코일의 Top 및 Tail부를 절단하는 크롭 시어(Crop Shear), 코일을 권취하는 텐션 릴 (Tension Reel) 그리고 권취 코일의 인출 설비인 코일 추출 카 (Delivery Coil Car) 등으로 구성되어 있다. Fig. 4 는 독립식 조질 압연 설비의 Lay-Out 모식 Flowing 이다.

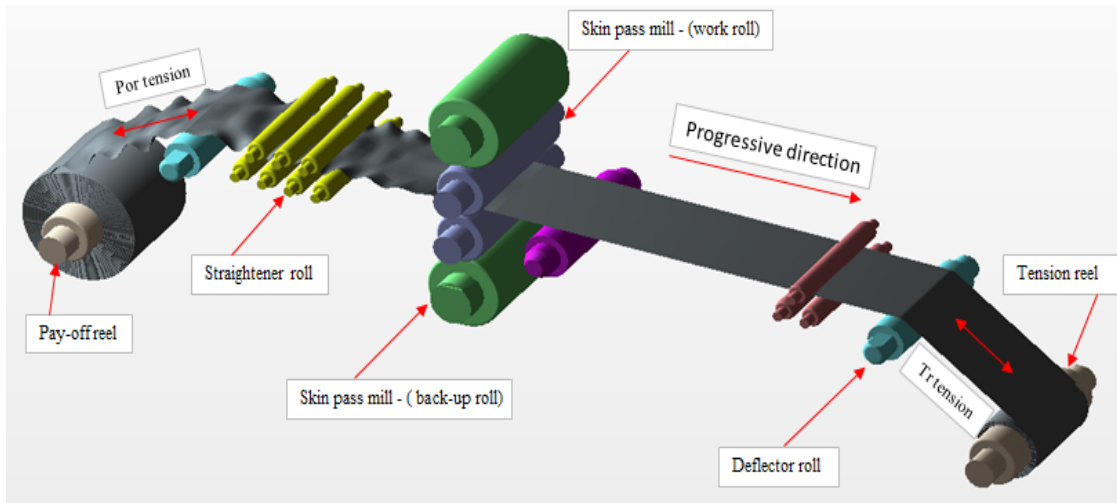


Fig. 4. Schematic Diagram of a Three-dimensional Lay-out of a Standaloe Skin Pass Mill (4Hi-1Std, Dry&Push up Type)

1.6 연구의 필요성

1.6.1 장력 제어 방식의 문제점

SPM 작업 시 보급되는 코일을 보면 정상적인 코일도 있지만, 이상코일 (짱구 및 느슨) 코일도 간헐적으로 보급되며, 이 소재들은 SPM 작업 시 설비에 적지 않은 부담감 및 부하를 가중시키고 있다. 이러한 이상재 코일들의 작업 시에는 변칙적인 장력 값을 적용하여 운용하기 때문에 설비 수명의 단축을 촉진 시키고 있다. SPM 설비는 Mill 기준으로 입측, 출측으로 구분된다. 입측은 Pay-Off Reel에서 Mill까지 Mill에서 Tension Reel 까지는 출측으로 구분한다. 또한 라인 장력 설정 및 배분 방식을 보면 2-Section으로 구분되어 운용된다. 그러나 정형화된 장력 테이블의 부재로 인한 출측 장력은 입측 장력보다 (1.5~2) 배의 인위적으로 값을 적용하여 압연을 하고있으며, 강종 및 인장강도에 따라서 수동 조정이 수시로 이루어 지는게 현실이다. 또한 그에 따른 부작용도 뒤따르고 있으며, 그중에서 가장 많이 발생하는 설비 관련 문제는 Pay Off Reel의 Segment 안쪽에서 확장&축소 기능을 하는 Rotary Cylinder Rod의 Neck 부위에 Crack 발생이 간헐적으로 발생하고 있으며, 품질 관련 문제는 고장력에 의한 길이 방향의 국부적 연신 발생에 기인한 웨이브 불량률이 빈번하게 발생하고 있다.

1.6.2 품질 관련 문제

Fig. 5 는 고장력으로 발생한 스트립 연신 현상이다. 연신에 인한 웨이브 불량은 품질에 치명적이다.

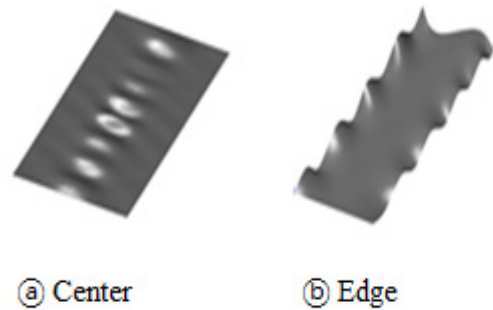


Fig. 5. ① The wave generated to the Center portion extension
② Waves generated by Stretching Both edges

1.6.3 설비 관련 문제

Fig. 6 을 보면 Pay Off Reel의 확장된 모습이며, 4개의 Segment로 이루어져 있다. 일반적으로 모터의 구동축을 기준으로 Drive Side (d/s) 조업자가 일하는 부분을 Work Side(w/s)로 명시한다. 로터리 실린더의 전체 모양은 안쪽에 설치되어 있어 볼 수 없으며, 실린더 로드 넥 부위를 4개의 Segment가 지지하고 있다. Reverse (d/s) 동작 시 확장, Forward (w/s) 동작 시에는 축소하는 기능을 하고 있다.

Rotary Cylinder Rod Crack (Figure 5. ①참조) 발생에는 확장&축소 기능을 하지 못해 Cylinder 교체작업을 해야 된다[12-14].

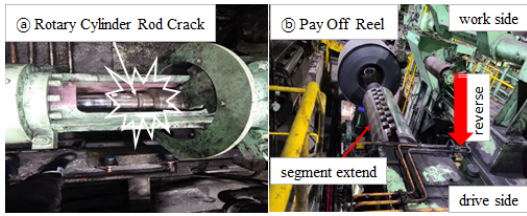


Fig. 6. (a) Rotary Cylinder Rod crack
(b) Pay-off reel Extended state

2. 연구 방법

2.1 모터의 제원 및 보상 장력 계산

Table 1. Motor capacity of Test Equipment

Facility name	Motor	
	Capacitance	Base RPM
Pay off reel	1150	746
Straightener roll	690	993
Mill (upper)	690	993
Mill (lower)	690	993
Tension reel	1850	746

Table 2. Top part Tension Compensation Calculation Formula

initial tension (ton)	13.00
compensation factor	-0.03
velocities1(vn)	10
velocities2(vn+1)	250
postcompensation tension (ton)	11.08
compensatory tension	-1.92

Table 3. TR MAX. Tension Calculation Formula

motor max. output p (kw)	motor specification	1,150
torque constant (k)		9,550
motor base rpm	motor specification	746
motor torque t1 (Nm)	output p × torque constant(k)/number of rotation(rpm)	14,722
gear reduction ratio	decelerator specification	18.7
TR torque t2 (Nm)	motor torque (t1) × reduction ratio	274,857
coil max. external diameter D (mm)	coil specification	2,100
TR tension (KN)	TR torque (t2)/(D/2)	261,77
TR tension (ton)	unit conversion (KN/9.8)	26,71

2.2 구동 모터의 출력과 토크

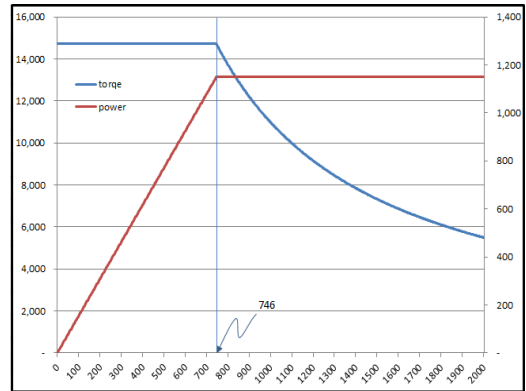


Fig. 7. Calculation of Torque of Drive motor

2.3 권취 장력과 모터 구동과의 관계

- ① Motor torque = tension x external diameter
- ② The maximum torque of the motor has already been determined by the motor specification.
- ③ The motor maximum torque = torque of the tension reel
- ④ Motor maximum torque = torque of tension reel = tension × coil external diameter/2

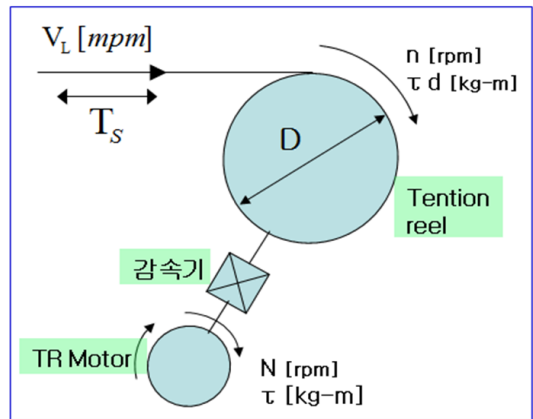


Fig. 8. Relation between Tension and Motor drive

여기에서 최대 장력이라는 것은 코일 외경이 최대일 때 모터가 줄 수 있는 장력이다. 코일 외경이 작을 때는 장력을 크게 가져갈 수가 있으나, 코일 외경이 커지면 모터의 최대 토크는 일정하기 때문에 코일 외경이 커지면 판에 걸리는 장력은 작아진다[15].

3. 결과 및 고찰

3.1 연구용 재료 및 SPM 제원

Table 4. Material and Equipment Specifications

Clause	Test Strip size	
width (mm)	min 800	max 2100
thickness (t)	min 1.2	max 6.6
Mill Speed	Average 190mpm	
Bender force	0~10t	
Elongation ratio	0.6~1.0%	

3.2 SPM 속도와 연신율 관계 테스트

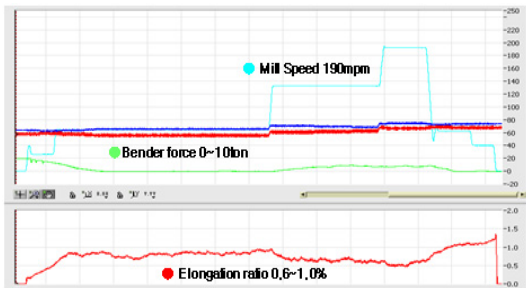


Fig. 9. Relationship between Speed and Elongation

▷Top, Tail부 웨이브 발생과 대응

- ①연신율은 속도와 반비례 관계
- ②Top, Tail부 저속구간→연신율이 높다.
- ③압하력/장력 조정 필요(수동 조정)

3.3 결과

표준 유닛 장력의 데이터 결과는 아래와 같다.

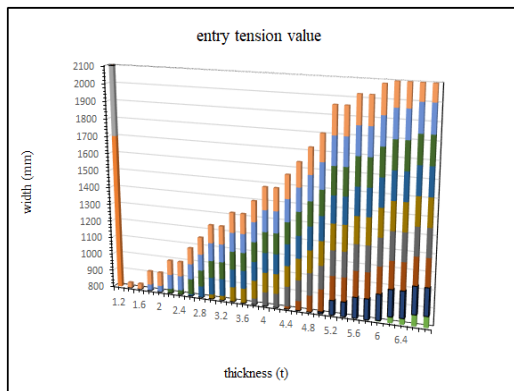


Fig. 10. Pay-off reel Entry Tension graph

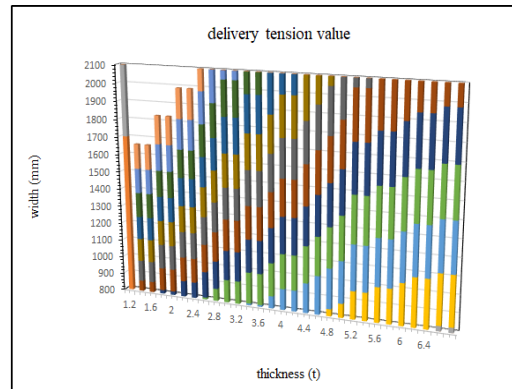


Fig. 11. Tension reel Delivery Tension graph

3.4 고찰

상기 단위 장력은 웨이브가 없는 판에서 텐션이 주어졌을 때 판의 단면적에 텐션이 고루 작용한 경우라고 할 수 있다. 하지만 웨이브가 있는 판의 경우의 단위 장력은 (단면적 - 웨이브 면적)에 작용하게 되므로 Area가 실제 단면적에 비해 작게 된다. 이는 웨이브가 클수록 작아진다. 즉, 실제 단면적은 웨이브 발생 면적과 반비례하게 된다.

4. 결론 및 제언

본 논문에서의 연구는 종래의 정형화된 장력 테이블의 부재를 조질 압연을 통한 다양한 연신율 테스트를 거쳐 최적의 수학적 모델을 기반으로 유닛 장력의 기본값을 산출할 수 있었고, 이 데이터를 기반으로 온라인 시스템인 HMI (Human Machine Interfaces)에 구축하여 최소한의 수동 조정과 제어 기술의 평준화 고착을 목적으로 하였다. 하지만 독립식 SPM 설비는 장력에 의한 교정 메커니즘의 한계점도 분명하게 존재한다. 설비 사양에 따른 제한적인 연신율 제어와 열연 스트립의 다양성을 완벽하게 해결하기에는 심도 있는 연구가 필요하다.

근래 SPM 동향은 입측 형상이나 압연 하중, 속도 등에 따라 평탄도 조정 설정의 변경 때문에 최근에는 평탄도 계를 설치하여 그 계측 결과를 SPM 형상 제어 액추에이터로 피드백하기도 한다. 이에 일반적인 연신율 제어는 온라인으로 측정하고, 압연 하중을 조정하는 일이 많다. 이 제어 방법은 압연 하중이 변하지 않아서 비교적 평탄도 달성 효과가 높다. 따라서 최적의 제어 파라미터 구현을 위해 지속적인 연구를 요한다.

References

- [1] J. H. Heo, B. Y. You and J. W. Kim. "Tension Control of a Winding Machine using Time-delay Estimation" Journal of Drive and Control, Vol.15 No.3 pp.21-28 Sep. 2018 DOI: <https://doi.org/10.7839/ksfc.2018.15.3.021>
- [2] S. H. Lee, H. B. Park and C. J. Park "Design of LTBC Controller for Tension Control in Down Coiler Process of Hot Strip Mills" Journal of Institute of Control, Robotics and Systems Vol.21 No.9 pp.869-874, 2015 DOI: <https://doi.org/10.5302/I.ICROS.2015.15.0113>
- [3] S. C. Choi, D. B. Lee and H. Y. You, "Tension Control using Adaptive PID Controller in the Two-drum Winder Web Transport System," Journal of Control, Automation and System Engineering, vol.6, no.9, 2000
- [4] C. J. Park and I. C. Hwang, "New tension control at the head of strip in hot strip finishing mill," Journal of Materials Processing Technology, vol. 206, pp. 69-77, 2008
- [5] Grimble, M.J., A Roll-Force Model for Tinplate Rolling, GECJ. Of Science & Tech., Vol.43, No.1, 1976, pp3-12.
- [6] T. Hesketh, Y. Jiang, D. Clements, D. Butler, and R. Laan, "Controller design for hot strip finishing mills," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 6, no. 2, pp. 208-219, 1998.
- [7] J.C.Kim, K.H.Lee, and T.D.Jeon, co-authored by G.R.Kim NCS Rolled Engineering, p.340, Samwon Books, 2017, pp.131
- [8] S.A. Domanti, W.J.Edwards, P.J. Thomas and I.L. Chefneux, Application of Foil Rolling Models to Thin Steel Strip and Temper Rolling. Proc. 6th International rolling Conference, Duesseldorf, Germany, June 20-22, 1994, 422-429.
- [9] Jortner, D., Osterle, J.F., and Zorowski, C.F., An Analysis of Cold Strip Rolling. Int.J.Mech.Sci. 1960, Vol.2, 179-194.
- [10] Y. Tanaka, K. Omori, and T. Miyake, "Camber control techniques in plate rolling," Kawasaki Steel Technical Report, no.16, pp.12-20, 1987.
- [11] Co-authored by S.Y.Jo, H.k.Moon, W.A.Jeon, and H.G.Kim, Hot rolling engineering, p.320, Gu resident, 2018, pp.141~145
- [12] H. Matsumoto and A. Ishii, "Three-dimensional simulation of snake motion in a tandem cold mill," MWSP Conference Proceeding, vol. XL, pp. 25-36, 2002.
- [13] Study on LSDC Design for Coiling Shape Control of Hot Strip Mills vol.21, pp.9, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5302/I.ICROS.2015.15.0113>
- [14] N. A. Fleck, K. L. Johnson, M. E. Mear, L. C. Zhang, 1992, Cold Rolling of Foil, Proc. Inst. Mech. Engr., Vol. 206, pp. 119~131.
- [15] S. Kido, M. Akaji, and M. Murata, "Hydraulic wrapper roll in hot strip downcoiler," Iron and Steel Engineer, vol. 9, pp. 43-48, 1982.

나 영 종(Young-Jong Na)

[정회원]



- 2023년 8월 : 한양대학교 공학대학원 신소재 공학과 (공학석사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 현대제철 열연 2팀 재직 중

〈관심분야〉

소성가공, 금속재료