

열간압연시 권취장력 설정기준치의 실험적 검증

공성락* · 강용기* · 김영환** · 문영훈*

(2000년 9월 18일 접수)

Experimental Verification of Set-Up Reference Values for the Determination of Downcoiling Tension in Hot Strip Mill

S. R. Gong, Y. K. Kang, Y. H. Kim and Y. H. Moon

Abstract

Set-up reference values, used in determining the optimum downcoiling tension, are experimentally verified in this study. During the actual downcoiling, the strip suffers both tension and bending force through the rotation of mandrel. Therefore, simulative test which can measure both tension and bending resistance of strip was performed to estimate set-up reference value for strip tension during downcoiling operations. The values obtained from the simulative test were correlated with the yield stress which has conventionally been used as reference values for downcoiling tension. The correlative analysis showed that the yield stress of strip can be a good reference value for downcoiling tension. Furthermore, the bending load also shows strong correlation with simulated values due to the close relationship between yield stress and bending load.

Key Words : Downcoiling Tension, Hot Strip Mill, Yield Stress, Bending Load, Unit Tension

1. 서론

조압연(roughing mill)을 거친 바(bar) 상태의 압연재는 열간사상압연(finishing mill)을 거치면서 최종 목표두께로 압연된 후 주행대(run out table)를 거쳐서 권취기에서 권취된다⁽¹⁻⁶⁾. 열간 압연시 권취(coiling)공정은 열연 후공정 및 정정 실수율등에 큰 영향을 미치는 공정으로서, 사상압연(finishing mill)을 거친 열연 스트립(hot

strip)을 Fig. 1과 같이 코일형상으로 감는 공정이다⁽⁷⁻⁸⁾. 이상적인 권취가 행해지면 텔레스코프(telescope)와 같은 권취형상 불량과 표면 흠이 없는 건전한 코일을 생산할 수 있는 반면, 권취공정이 불안정 할 경우에는 권취형상 불량은 물론, 심할 경우 폭내킹(width necking) 과 느슨 감김(loosened coil)등으로 인해 제선-제강-연주-조압연-사상압연등의 고비용 공정을 거친 스트립의 일부를 절취하여 제거해야 하는 경우도 발생한다. 따라서 열간 압연

* 부산대학교 기계공학부/정밀정형 및 금형가공연구센터

** 부산대학교 금속공학과

에서의 권취공정은 가열로(reheating furnace), 조압연(roughing mill), 사상압연(finishing mill)과 함께 핵심공정으로 분류되며 제철소별로 공정 최적화 노력이 지속되고 있다. 권취공정은 권취설비의 용량과 제어성, 설비운용 프로세스모델의 정밀도, 선행공정의 조업안정성등에 의해 좌우되는데, 특히 고강도 후물재를 비롯한 다양한 제품생산시 조업 불안요인의 완화를 위해 강종별 대응능력이 뛰어난 권취 조업모델의 개발이 활발히 행해지고 있다. 권취기 맨드릴(mandrel)은 장력(tension)과 속도조정을 통해 스트립을 균일하게 권취할 수 있도록 설계되어 있으므로, 권취대상 강종별 열간 유동응력이 다를 경우 이에 적절하게 대응하여야만 최적 권취가 가능하다. 따라서 본 연구에서는 장력설정모델을 통한 강종별 장력 설정시 맨드릴과 핀치롤(pinch roll) 사이의 최적 단위장력(unit tension)의 기준값으로 주로 사용되어온 열간항복응력의 타당성을 검증하고자 한다.

이를 위해 본 연구에서는 권취시 스트립에 걸리게 되는 인장 및 굽힘 상태의 모사가 근사적으로 가능한 시험장치를 고안, 제작하여 권취장력을 실측한 후, 열간 권취시 장력설정 기준값으로 사용되고 있는 열간 항복강도와 굴곡강도간의 상관성을 분석함으로써 그 타당성을 검증하고자 한다⁽⁹⁻¹⁰⁾.

2. 권취장력 모사시험

실제 권취시 스트립은 인장(tension)과 굴곡(bending)응력이 동시에 걸리면서 맨드릴(mandrel)에 감기게 되는데 이때 항복강도 이상의 힘으로 권취가 행해지면 스트립의 폭이 좁아지는 폭네킹(width necking)이 일어나고 권취를 일으킬 수 있는 충분한 힘이 가해지지 않으면 느

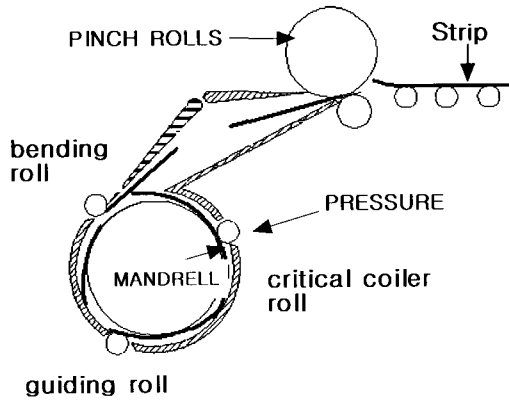


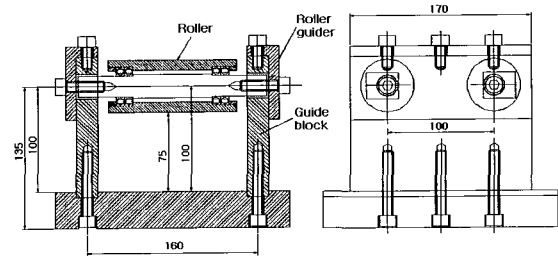
Fig. 1 Schematic drawing of downcoiling operation

슨감김(loosened coil)이 된다.

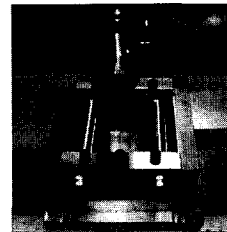
단위장력 선정시 일반적으로 사용되고 있는 단위장력식은 고온항복강도에 근거하여 설정하는데 실제 권취시 거시적인 항복현상이 일어나기보다는 실제로는(특히 고강도, 후물재의 경우) 탄성적으로 굴곡변형(bending deformation)을 한다고 볼 수 있다. 실제 압연에서 스트립에 걸리게 되는 장력은 맨드릴 모터의 토크(torque)등을 통해 간접적으로 유추할 수 있으나 열간 상태에서 다양한 강종의 권취장력을 정확하게 줄 수 있는 값의 선정이 용이하지 않고 재현성이 낮은 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 권취시 실제 걸리게 되는 응력상태와 유사한 인장과 굴곡성분의 실측이 가능한 모사 실험을 통해 단위장력을 분석함으로써 권취장력 설정 기준값의 타당성을 검증하고자 하였다.

본 연구에서 권취장력을 모사하기 위해 시도한 실험장치를 Fig. 2 에 도식적으로 나타내었다. Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 권취시 스트립에 걸리게되는 힘이 인장(tensile)성분과 굴곡(circular bending)성분이므로 이를 모사하기 위해 고안된 본 실험장치는 Fig. 3 에 보인바와 같이 권취시 발생하는 이들 두 가지 응력성분이 포함되도록 함으로써 권취장력의 모사가 가능하도록 하였다.

권취장력 모사시험의 경우는 양끝 단을 지지하기 위해 시험재를 Fig. 4 와 같이 가공하였으며 Fig. 5 에 권취장



(a)



(b)

Fig. 2 Testing apparatus for downcoiling tension measurement (a) schematic drawing (b) photograph

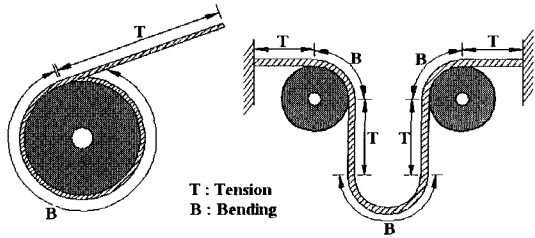


Fig. 3 Schematic comparison of force components
(a) downcoiling (b) simulative test

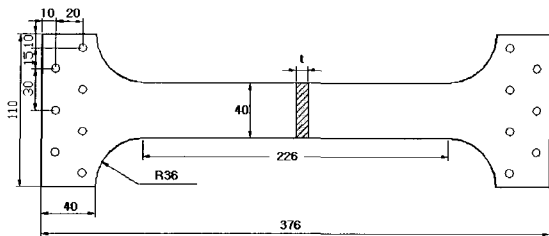


Fig. 4 Schematic drawing of downcoiling tension testing specimen

력 모사시험의 개략도를 나타내었다. 실제 압연에서 권취온도가 약 500-750℃의 고온상태이므로 고온 상태에서 권취장력 모사시험을 실시하는 것이 이상적이다. 그러나 고온상태의 시험시 시료 전체에 걸쳐 균일한 온도의 유지가 선행되지 않을 경우 시험자체의 오차요인을 많이 포함하게 되며 보다 엄밀한 해석을 위한 별도의 인장 및 밴딩시험에도 오차요인이 포함될 수 있다. 본 연구의 경우 주어진 시험모드에서 측정되는 절대값의 측정정보는 응력상태가 단위장력에 미치는 영향도 평가가 주목적이므로 상온상태에서 항복응력값이 30kg/mm²에서 60kg/mm² 사이에서 서로 다른 강도를 갖는 8가지 강종을 선택하여 권취장력 모사시험을 실시하였다. 상온과 고온 상태에서의 마찰조건 및 변형특성차가 존재할 수 있으

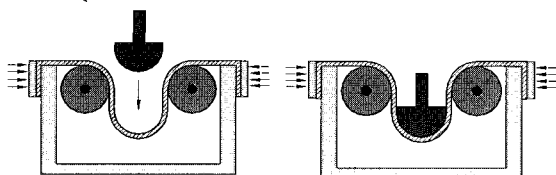


Fig. 5 Schematic drawing of downcoiling tension testing apparatus

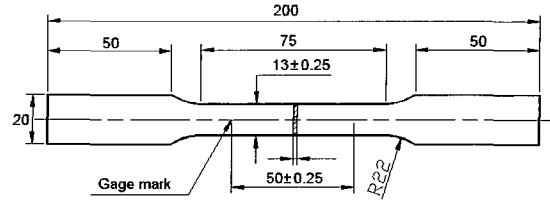


Fig. 6 Schematic drawing of tensile test specimen

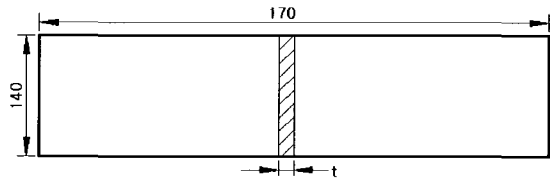


Fig. 7 Schematic drawing of bending test specimen

나, 권취장력의 기준 설정측면에서 볼 때 이러한 상온과 고온의 특성차는 본 연구의 관점에서는 허용가능한 것으로 판단하였다.

시험대상재는 압연방향과 평행하게 절단하여 인장시험재의 경우, Fig. 6에 보인바와 같이 ASTM-E517의 판상(sheet type) 인장시험편을 가공하여 인장시험기(INSTRON)를 이용하여 실시하였다.

굴곡시험은 권취장력 모사시험기를 이용하여 양끝단의 구속이 없는 자유굴곡시험(free bending test)을 실시하였다. Fig. 7에 본 연구에서 사용한 밴딩시험편을 나타내었고 Fig. 8에 밴딩시험의 도식도를 나타내었다.

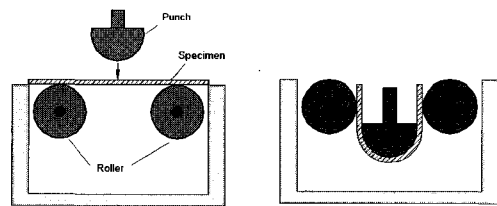


Fig. 8 Schematic drawing of testing apparatus for bending

3. 연구결과

상기 시험재와 시험장치를 이용하여 얻어진 권취장력 모사시험 결과를 S3 강종의 예를 들어 Fig. 9에 나타내었다.

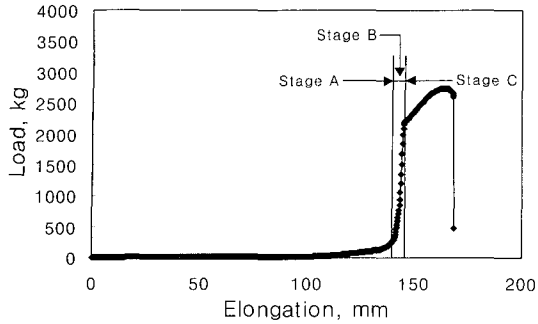


Fig. 9 Load-displacement curve of S3 obtained from simulative test for downcoiling tension

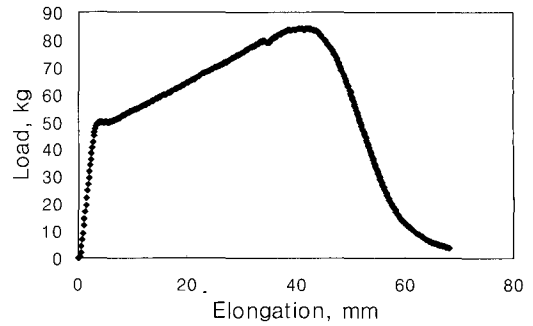


Fig. 11 Load-displacement curve of S3 obtained from free bend test

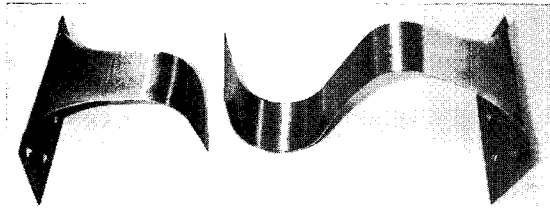


Fig. 10 Photograph of fractured specimen

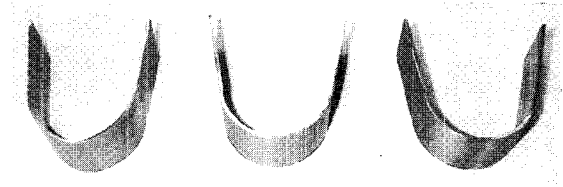


Fig. 12 Photograph of bent specimens

Fig. 9 에 나타난 바와 같이 권취장력 모사시험 결과 얻어진 하중(load)-거리(displacement)곡선은 전 시험과정에서 유사한 모양을 보였으며 세가지 단계를 거치면서 파단되었다.

편치가 하강하기 시작하여 스트립이 편편하게 퍼져서 탄성변형이 시작되기 이전단계를 의미하는 A-단계, 굴곡변형과 인장변형이 가해져서 소성변형이 일어나기까지

의 탄성변형영역을 의미하는 B-단계, 그리고 가시적인 소성변형이 일어나는 C-단계로 구별되었다. 실험 결과 파단된 시험편을 Fig. 10 에 나타내었으며 Table 1 에 B 단계 와 C-단계의 최대값을 나타내었다.

이상적인 권취는 어떠한 형태의 국부적 항복현상도 일으키지 않고 압연직후의 스트립의 두께와 폭을 그대로 유지하는 것이므로 Fig. 9 의 그림으로 볼 때 권취장력

Table 1 Maximum Load of Stage-B and Stage-C

Specimen	Stage-B, kg	Stage-C, kg
S1	3960	5000
S2	2790	3600
S3	2200	2750
S4	3380	5400
S5	2340	2750
S6	3020	3800
S7	2800	3640
S8	2870	4050

Table 2 Tensile Properties

Specimen	Yield stress (kg/mm ²)	Tensile stress (kg/mm ²)	uniform el.	total el.
S1	58.5	65.0	0.140	0.223
S2	42.0	52.5	0.145	0.235
S3	34.0	40.0	0.255	0.365
S4	52.1	78.5	0.130	0.180
S5	35.0	40.2	0.265	0.380
S6	45.0	52.5	0.220	0.285
S7	41.5	50.1	0.190	0.280
S8	46.5	59.5	0.180	0.245

은 B-단계에 놓여야 한다. 따라서 본 연구에서는 B-단계의 최대치를 최적 장력치의 기준치로 가정한 후 인장시험 및 단순 굴곡시험의 결과와 상호 비교해 봄으로써 권취장력 선정의 타당성을 검증하고자 한다.

모사시험과 동일한 소재를 이용하여 얻어진 인장시험결과를 아래 Table 2 에 나타내었다. 권취시 단위장력의 기준이 되는 항복강도의 경우 S1-S4-S8-S6-S2-S7-S5-S3의 순을 보였으며 인장강도의 경우도 대체로 유사한 경향을 보였다.

전술한 시험제와 시험장치를 이용한 굴곡시험을 통해 얻어진 하중-변위(load-displacement)곡선을 Fig.11 에 나타내었으며, 굴곡시험결과 얻어진 시험편의 사진을 Fig. 12 에 나타내었다.

굴곡시험을 통해 얻은 하중-변위곡선의 경우, 탄성변형을 거쳐 소성변형을 일으키기 시작하는 항복단계(bend-yield stage)를 거쳐 소성변형을 일으킨다. 소성변형역에서 가공경화에 의해 최대굴곡하중(maximum bend load)영역을 거친 후 굴곡이 종료되는 과정을 거친다. 굴곡시험장치의 양쪽 지지점이 회전 롤로 되어 있고 편치의 형상이 반원형태를 갖추고 있으므로 본 연구의 굴곡시험값은 마찰효과가 배제된 재료의 굴곡저항력 평가에 적절한 시험이라 할 수 있다. Table 3 에 굴곡시험을 통해 얻어진 결과를 나타내었다.

권취장력 모사시험 결과 얻어진 권취응력 시험결과를 인장 및 굴곡시험결과와 비교하기 위해 무차원화(normalize)하여 비교하였는데, 시험을 통해 얻어진 값들을 강도값이 상대적으로 가장 낮은 S3 재료의 값에 대한 비율로 무차원화시켜 Table 4 에 나타내었다.

Table 3 Bending Properties

Specimen	Bend-yielding load,	Max. bending load,
	kg	kg
S1	94	158
S2	65	106
S3	50	85
S4	77	141
S5	55	90
S6	74	120
S7	66	110
S8	62	112

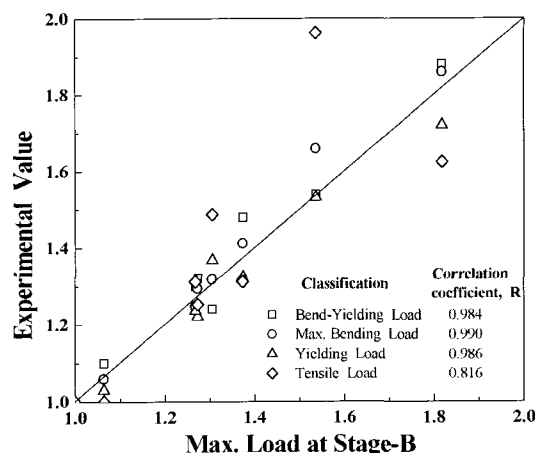


Fig. 13 Correlation analysis of maximum load at Stage-B with other tensile and bending properties

권취과정에서 소성변형을 야기하지 않으면서 가장 치밀하게 권취할 수 있는 바람직한 권취장력의 기준은 권취장력 모사시험의 Stage-B 의 최대응력으로 볼 수 있다. 따라서 Stage-B 의 최대응력과 높은 상관관계를 보일수록 권취장력 설정기준값으로 타당하다고 판단하였다. 본 연구의 실험을 통해 얻어진 굴곡하중과 인장물성간의 상관관계를 Fig. 13 에 나타내었다.

Fig. 13 의 Stage-B 의 최대하중과 항복강도간의 상관성은 상관계수가 0.986 으로 역시 높은 상관관계를 보인다. 반면 인장강도간의 상관성은 상관계수가 0.816 으로 상대적으로 낮았다. Stage-B 의 최대하중과 굴곡시 항복하중 간의 상관성은 상관계수가 0.984 로 상관관계가 아주 높았으며, 최대굴곡하중간의 상관성 또한 상관계수

Table 4 Correlation of simulative test results with tension and bending tests (normalized by S3)

Specimen	Simulative test at Stage-B	Bending load, kg		Tensile stress, kg/mm ²	
		Yield	Max.	Yield	UTS
S1	1.818	1.88	1.859	1.7206	1.6250
S2	1.268	1.30	1.247	1.2353	1.3125
S3	1.000	1.00	1.000	1.0000	1.0000
S4	1.536	1.54	1.659	1.5320	1.9625
S5	1.064	1.10	1.059	1.0294	1.0000
S6	1.373	1.48	1.412	1.3235	1.3125
S7	1.273	1.32	1.294	1.2206	1.2525
S8	1.305	1.24	1.318	1.3676	1.4875

가 0.99로 높은 상관관계를 보였다.

따라서 굴곡시 항복하중과 최대굴곡하중, 그리고 항복강도 등은 열연권취장력의 기준으로 타당한 것으로 판단되며 별도의 굴곡하중의 보상이나 항복강도의 보상도 필요하지 않음을 알 수 있다. 이는 기존의 항복강도를 이용한 권취장력 설정방법이 합리적 기준이 될 수 있음을 의미하며 굴곡하중을 이용한 권취장력 설정방법 또한 항복강도와 대등한 효과를 갖는 설정기준으로 사용가능 함을 보여주고 있다. 따라서 항복강도 또는 굴곡강도에 기준한 장력설정을 하되 재현성 높은 시험을 통해 기준값을 정확하게 구하는 것이 정확한 권취장력을 위해 중요함을 알 수 있다.

4. 결론

열간 압연시 강종별 권취장력 설정기준의 타당성 검증을 위한 실험적 연구결과 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 열연권취장력의 모사를 위한 기준값을 얻기 위해 제작된 모사시험장치는 권취시 작용하는 응력상태인 인장과 굴곡응력상태를 잘 모사해 줌으로써 권취장력 기준값을 용이하게 제공해 주었다.
- (2) 권취장력 설정의 기준으로 적용되어 온 항복강도는 권취장력 모사시험결과와 높은 상관관계를 보였으며 이는 항복강도를 이용한 기존의 권취장력 설정방법이 타당한 것임을 의미한다.
- (3) 굴곡하중과 권취장력 모사시험 결과간의 상관성 분석결과 굴곡하중도 권취장력 설정 기준으로 적용 가능한 것으로 판단되었으며 이는 굴곡하중과 항복강도의 높은 상관성에 기인한다.
- (4) 정확한 권취장력의 설정을 위해서는 항복강도 또는 굴곡강도에 기준한 설정을 하되 재현성 높은 강종별 대표값을 정확하게 구하는 것이 중요하다.

후 기

본 연구는 포항종합제철(주)의 철강분야 대학연구비지원에 의해 수행되었으며 이에 대해 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

- (1) 志田 茂, 1969, 塑性 と 加工, vol.10, p.610
- (2) Y.Oike et al, 1993, "Development of high accuracy set-up technology in hot strip mill", 鐵と鋼, vol.79, p.113
- (3) M. Saito et al, 1991, "Development of high accuracy control system for hot strip mill", NKK Technical Review, vol.61, p.10
- (4) V.B. Ginzburg, 1993, "High Quality Steel Rolling", Marcel Dekker Inc., New York
- (5) V.B. Ginzburg, 1989, "Steel Rolling Technology", Marcel Dekker Inc., New York
- (6) W.L. Roberts, 1987, "Flat Processing of Steel", Marcel Dekker Inc., New York
- (7) D.T. Blazevic, "Hot Strip Mill Operations", Unpublished Documents
- (8) D.T. Blazevic, "Hot Strip Mill Coiling", Unpublished References
- (9) C. Lipson, N.J. Sheth, 1973, "Statistical Design and Analysis of Engineering Experiments", McGraw-Hill
- (10) R.E. Walpole, R.H. Myers, 1978, "Probability and Statistics for Engineers and Scientists", 2nd Ed., MacMillian Publishing Co.