

# 소성모멘트를 이용한 철근 직선화 장치의 하중 분석

## An evaluation of load of the steel bar straightener using plastic moment

이동호<sup>1</sup>, 박수진<sup>2</sup>, 손정현<sup>3</sup>, 유완석<sup>4</sup>

Dong-Ho Lee, Su-Jin Park, Jeong-Hyun Sohn and Wan-Suk Yoo

**Key words** : Steel bar straightener(철근의 직선화 장치), Bauschinger effect(바우싱거 효과), Yield(항복), Plastic region(소성 영역), Plastic moment(소성 모멘트)

### Abstract

In this paper, the straightening process of a steel bar straightener is studied. The straightener carries out the bending and reverse bending process repeatedly. Plastic theory is employed for the analysis of roller-supporting-load, and the residual stress and the axial load of a steel bar are calculated by using the bending moment. The Bauschinger effect and plastic moment are calculated by using the residual stress and Swift's method respectively. It is verified from the experiments that the displacement calculated from theory makes it possible to straighten a steel bar.

### 1. 서론

건축이나 토목 구조물의 대부분은 철근과 콘크리트<sup>(1)</sup>로 이루어진다. 철근은 콘크리트의 응집을 도와 구조물을 보다 단단하게 만들어준다. 하지만 철근은 기둥과 같이 직선 모양만 있는 것이 아니라 수직과 수평을 연결하는 직각 모양이나, 여러 직선을 하나로 묶기 위한 사각의 고리 모양 등 여러 모양이 있다. 다양한 형상의 철근을 기존에는 수작업으로 만들었지만, 건설업이 성장하면서 절단, 절곡, 이송을 한번에 해결 할 수 있는 자동기계<sup>(2)</sup>가 개발되었다. 현재 개발된 기계로는 유럽의 MEP 시스템에서 나온 Concept 91<sup>(3)</sup>과 일본 TOYO 사에서 만든 T-MAX-1 등의 기계

들이 있다. 국내에서는 이런 기계를 생산하지 않기 때문에 비싼 외화를 들여서 수입을 해야 하는 실정이다. 따라서 중소 기업에서 사용 할 수 있는 저가형 기계를 국산화하는 것이 필요하다. 이런 기계들에 있어 가장 큰 핵심 기술은 철근의 직선화<sup>(4-6)</sup>이다. 롤러를 서로 어긋나게 위치시키고 또한 롤러 셋을 서로 기울여서 철근이 롤러 사이를 지나 갈 때 굽힘이 반복적으로 일어남으로써 철근의 항복점을 낮추어 새로운 철근의 모양을 구성할 때 탄성 복원<sup>(7-8)</sup>을 줄여준다. 이에 대한 특허가 개발되고 제품화되었지만 직선화 장치에 대한 체계적인 연구는 부족하다. 본 논문에서는 직선화 장치를 국산화하기 위한 선행 연구로써 철근이 롤러 셋을 지나갈 때 롤러에 걸리는 하중을 구하고자 한다. 2 장에서는 직선화 장치의 개요 및 하중을 구하기 위한 수학적 모델과 유한 요소 모델의 검증을 나타내었으며, 결론은 3장에 나타내었다.

<sup>1</sup> 부산대학교 기계설계공학과 대학원, 석사과정

<sup>2</sup> 부산대학교 기계설계공학과 대학원, 박사과정

<sup>3</sup> 부산대학교 기계기술연구소, 연구원

<sup>4</sup> 부산대학교 기계설계공학과, 교수

## 2. 직선화 장치

### 2.1 철근의 직선화

#### 2.1.1 개요

코일에서 철근을 풀어서 직선화 하는 가공에는 영구적인 굽힘이 남으므로 그대로 가공하여 제품을 만들 때에는 여러 가지 문제가 나타난다. 작은 굽힘을 교정하여 직선화 하려면 이론상 반대방향으로 소성 굽힘을 주면 되지만, 이것이 탄성영역을 넘은 소성영역에서의 가공이며, 탄성복원력이 작용하므로 기술적으로 어렵다. 따라서 방향이 다른 굽힘 변형을 여러 번 되풀이하여 나타나는 바우싱거 효과(Bauschinger effect)<sup>(9-10)</sup>에 의해 항복점을 점차 감소시키는 방법이 고안되었다. 이것이 직선화 장치의 원리이다. Fig. 1은 롤러 셋을 이용한 직선화 장치<sup>(11)</sup>의 작동을 표시한 것이다.

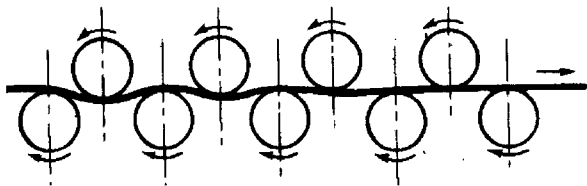
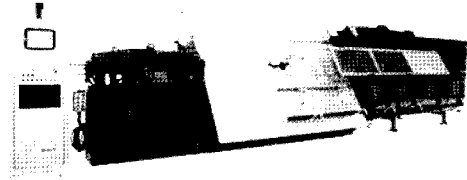


Fig. 1 Straightener of steel bar

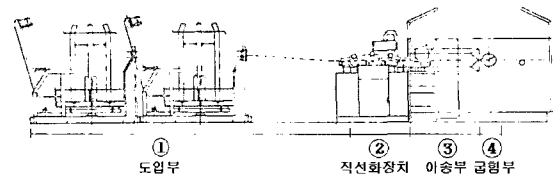
#### 2.1.2 직선화 장치의 예

현재 선진국에서 개발된 첨단 절곡/절단기 중 세계 시장의 60%를 차지하고 있는 기계인 Concept 91을 Fig. 2에 나타내었다. MEP 그룹에서 제작한 이 시스템은 직선화 장치 부분에서 MEP system II라는 명칭으로 국제특허를 가지고 있다. Fig. 2 (b)와 같이 시스템의 전체적 구성은 크게 4부분으로 나누어진다. 도입부는 좁은 공간에서 많은 양의 철근을 적재하기 위해 롤에 갇아서 적재한다. 가공을 하기 위해서는 가이드 롤러를 통해 직선화 롤러에 연결되어진다. 직선화 장치는 주요 핵심 기술이 있는 부분으로 도입부에서 들어오는 철근의 직선화와 철근의 굽힘 작업시 생기는 미끄럼을 방지한다. 이송부는 직선화가 된 철근을 굽힘 장치가 있는 위치까지 이송시키는 롤러가 있는 부분으로 이 곳의 주 기능은 이송방향과 직선화가

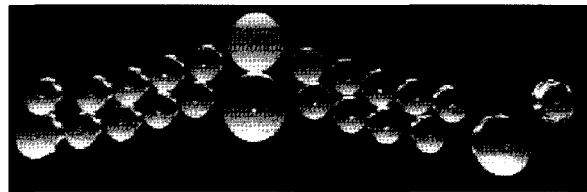
되는 축을 제외한 축을 보정하는 것이다. 굽힘부는 3축으로 직선화가 된 철근이 가공되는 부분으로 굽힘과 절단이 일어나는 부분이다. 굽힘 작업시 생기는 탄성복원 현상을 직선화 부분에서 바우싱거 효과로 최소화 시켜준다.



(a) appearance



(b) System structure



(c) Roller set

Fig. 2 Concept91 of MEP System

본 논문에서는 직선화 부분의 원리만을 고려하여 실험하기 위해 자체적으로 Fig. 3과 같은 작은 기계를 만들어 이론과 실험으로 분석해 보았다. 본 논문에서는 Fig. 3에서 수평으로 위치한 롤러 셋 만을 가지고 이론적인 방법으로 롤러에 가해지는 하중을 구하여 보았다.

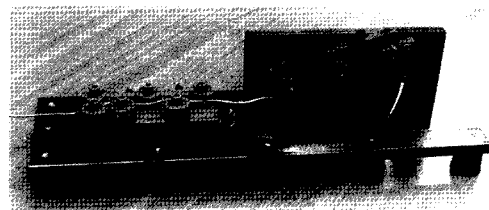


Fig. 3 Experimental set up

2.2 직선화 가공의 이론적 분석

2.2.1 철근의 물성치

직선화 장치에 사용되는 철근의 전단면에 소성이 일어날 수 있는 하중을 구하기 위해 필요한 물성치는 철근의 영계수(young's modulus)와 항복 강도이다. 본 논문에서 사용한 부재는 연강이며, 콘크리트 철근과 연강 철선을 사용하였다. 재료의 물성치를 얻기 위해 Fig. 4의 만능 재료 시험기를 사용하여 철근의 응력-변형을 곡선을 구하였다. 이 때 사용한 부재의 지름은 3.4 mm, 10 mm, 16 mm를 사용하였고, 이 지름은 새로이 제작하는 첩단 절곡/절단기에 사용할 부재의 지름이다. 철근의 길이는 3 개 모두 200 mm를 사용하였다. 3.4 mm 부재는 실험의 검증을 위해 실험실 자체적으로 제작한 롤러 셋에 사용한 부재이다. Fig. 5에 나와 있는 응력-변형을 곡선은 실제 실험에서 측정된 응력-변형을 곡선으로 구조해석에서 사용하기 위해 인장 강도에 의한 극한 응력까지 나타내었다.

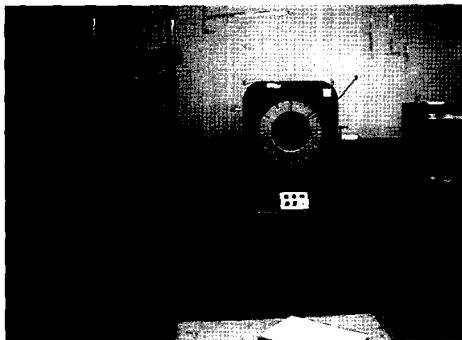


Fig. 4 Universal testing M/C

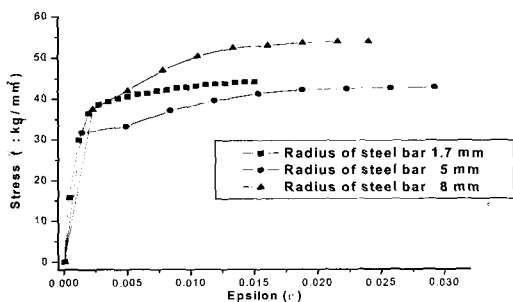


Fig. 5 Yield curve of each steel bar

2.2.2 소성모멘트와 하중

롤러에 걸리는 하중을 구하기 위해 소성모멘트를 사용하였으며, 이 때 사용된 소성모멘트에 필요한 물성치는 2.2.1에서 구하였다. 소성모멘트는 대개 탄성영역이 적을 경우에는 탄성영역을 무시하고 계산하는 멱경화법칙(power law of hardening)<sup>(12)</sup>을 적용한다. 하지만 본 논문에서는 탄성영역을 함께 고려하였다. 소성영역에서는 부재에 가공경화가 일어나므로 가공경화지수와 가공경화계수를 사용하여 소성모멘트를 구하였다. 본 연구에서 사용한 재료는 연강<sup>(13)</sup>이므로 가공경화지수 n은 0.25, 가공경화계수 F는 70 kg<sub>f</sub>/mm<sup>2</sup>을 사용하였다. 소성모멘트는 축 응력이 항복점을 지나 단면에 소성이 증가하는 것을 수식으로 나타내기 위해 사용한 것이다. 이 때 단면의 탄성영역은 식(1)을 사용하였으며, 소성영역부분은 식(2)을 사용하였다. 소성모멘트는 식(3)를 이용하여 구하였으며, 식(4)는 단면에 소성을 일으키고 있는 하중 값이 된다.

$$\sigma_e = E \cdot \epsilon_e \tag{1}$$

$$\sigma = Y + F \cdot (\epsilon - \epsilon_e)^n \tag{2}$$

$$M = \int_0^y \sigma \cdot \pi \cdot y^2 \cdot dy$$

$$= \int_0^y Y \cdot \frac{y}{y} \cdot \pi \cdot y^2 \cdot dy$$

$$+ \int_y^r (Y + F \cdot (\epsilon - \epsilon_e)^n) \cdot \pi \cdot y^2 \cdot dy \tag{3}$$

$$P = \frac{2M}{l} \tag{4}$$

여기서,  $\sigma_e$ 는 탄성영역 응력이고,  $\sigma$ 는 소성영역 응력이다. Y는 항복 응력을, y는 단면의 위치를 나타낸다. 식(3)에서 y의 위치가 r일 때는 소성이 발생하기 시작하는 위치로써, 모멘트가 탄성영역의 최고 모멘트가 되기도 한다. y의 위치가 0이면 단면의 전영역이 소성영역으로 된다. 철선 지름 3.4 mm에 롤러 반지름 19.85 mm를 적용하였으며, 그 외 철근은 롤러 반지름 45 mm를 적용하였다. 직선화 장치에서 항복점의 감소를 나타내기 위해 잔류 응력(residual stress)을 적용하였다. 식(5)은 소성변형에서 탄성복원을 제외하고 남은 잔류 응력 부분을 수식화 한 것이다.

$$\sigma_r = \sigma - \sigma_e \tag{5}$$

잔류 응력  $\sigma_r$ 은 단면의 위치에 따라 달라진다. Fig. 6은 재료 3개의 항복점 감소를 계산에 의해 나타낸 것으로 단면에서 항복점의 변화가 두드러지게 나타나는 철근의 표면을 선택하였을 때의 응력을 나타낸 것이다.

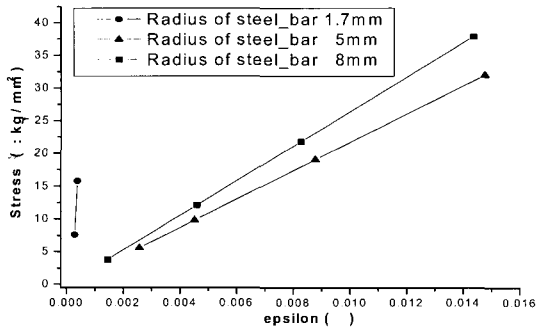


Fig. 6 Residual stress vs strain

Fig. 7과 Fig. 8은 Fig. 6에서 나타낸 항복점의 감소에 따른 모멘트와 하중의 감소를 보여주고 있다. 모멘트와 하중은 철근의 전단면에 대해 소성이 일어나기 위한 것이다. 검증에 위해 상용유한요소 해석 프로그램 (ANSYS)을 사용하였고, 변위 구속으로 해석을 하여 하중을 구하였다. 이 때 구해진 하중 결과와 계산에 의해 나온 결과의 오차가 10% 이내로 설정하였다.

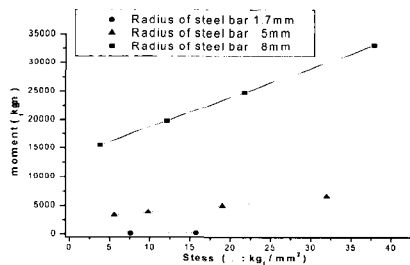


Fig. 7 Plastic moment of steel bars

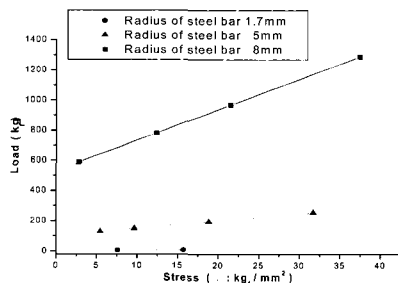


Fig. 8 Load of each steel bar

## 2.3 유한 요소 해석

### 2.3.1 유한요소 모델

ANSYS 해석을 위해 Fig. 9에서 철근은 2차원 소성 Beam 요소<sup>(14)</sup>(Beam 23)로 나타내었으며, 롤러는 철근에 비해 변형이 무시할 정도로 작아 강체로 설정하였다. Beam 23은 가공 경화의 운동학적 경화에 있어 자주 사용되는 요소이며, 철근의 지름에 따라 롤러에 접촉되는 점의 위치가 달라지기 때문에 이를 함축적으로 나타내기 위해 사용하였다. 영 계수, 포와송비 그리고 항복곡선과 같은 물성치는 2.2.1에서 구한 실험 데이터를 사용하였으며, 항복곡선은 다구간선형경화 (multilineer kinematic hardening)를 사용하였다. 롤러와 철근의 접촉은 접촉쌍(contact pair)을 사용하여 면대면 접촉(surface - surface contact)을 사용하였다. 롤러의 변위 구속은 롤러 축에서 작용하는 하중의 효과를 내기 위해 구속을 각 롤러의 중심 위치에 있는 노드에 주었으며, 철근이 이송되면서 반복적인 굽힘을 받는 것을 나타내기 위해 Fig. 9의 가운데 상하 롤러에 반복적인 변위 구속을 주어서 히스테리시스 곡선을 얻고자 하였다. 히스테리시스 곡선은 철근을 눌렀을 때의 철근의 축 방향 응력 변화에 대한 결과이다.

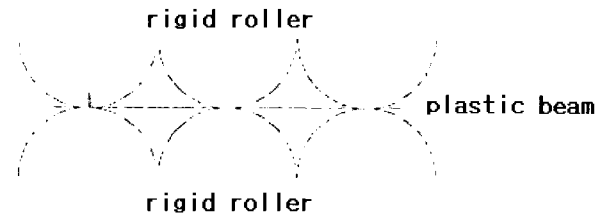


Fig. 9 analysis model of steel bar straightener

### 2.3.2 유한요소 해석결과 검증

해석 결과의 신뢰성을 나타내기 위해 Fig. 10과 같은 롤러 셋을 가지고 철선 3.4 mm에 대해 정적 상태에서의 하중을 구하였다. 실험은 롤러 3 번에 무게 추를 달아서 변위에 따른 무게를 측정하였으며, 롤러의 치짐을 1~10 mm까지 설정하여 측정을 하였다. Fig. 11은 해석과 실험의 결과 값을 비교한 것이다. 이 때 발생하는 오차 범위는 10%이내였으며 이는 철선의 경화 상태와 실험하는 사용자에 의해 발생할 수 있는

오차를 감안하였을 때 발생할 수 있는 범위라고 사료된다. 따라서 상용 유한 요소 프로그램(ANSYS)의 결과에 대해 신뢰할 수 가 있다. 구해진 롤러 변위량을 가지고 롤러 셋에 적용하였을 때 철근의 직선화가 가능하였다.

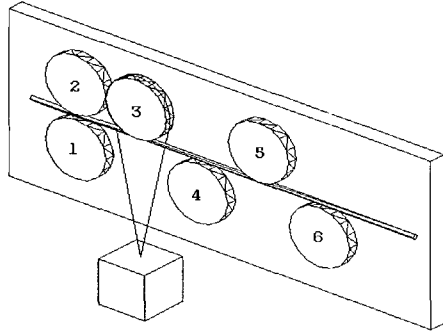


Fig. 10 Experiment for measuring the load

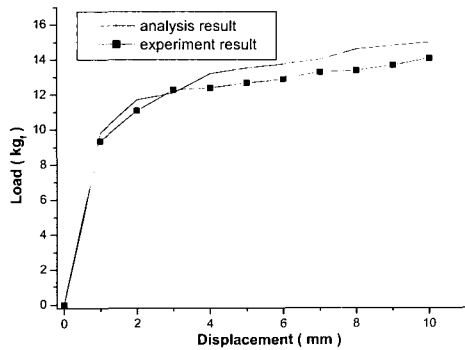


Fig. 11 Comparison of the load

### 3. 결론

철근 직선화 장치의 롤러 하중을 구하기 위해 소성 모멘트를 이용하여 이론적으로 접근을 하였으며, ANSYS를 이용하여 그 신뢰성을 확인하였고 실험을 통해 검증하였다. 수식적 모델에 의한 롤러의 하중 값과 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용한 결과를 비교 검증하여 두 가지 접근 방법의 신뢰성을 확인하였다. 이론적으로 구한 변위를 자체적으로 구축한 실험 장치에 적용하여 철근의 직선화가 이루어짐을 확인하였다.

### 후 기

본 논문은 과학기술부 국가지정연구실 사업 ( 과제 번호 M10203000017 - 02J0000 - 00910 )과 부산테크노파크 부산대 분소의 지원으로 이루어졌습니다.

### 참 고 문 헌

- [1] 최석환, "반복하중을 받는 철근 콘크리트 요소," 번역기사, 전산구조공학, 제 11권, 제 2호, 1998.
- [2] 태연기계(주), "한국 철근 가공의 현주소", 1998.
- [3] Concept91, MEP SYSTEM, OPERATION AND MAINTENANCE MANUAL.
- [4] G. Schleinzler and F. D. Fischer, "Residual stress formation during the roller straightening of railway rails," International Journal of Mechanical Sciences 43, pp 2281-2295, 2001.
- [5] B. J. Wu, L. C. Chan, T. C. Lee and L. W. Ao, "A study on the precision modeling of the bars produced in two cross - roll straightening," Journal of Materials Processing Technology 99, pp 202-206, 2000.
- [6] M. Nastran and K. Kuzman, "Stabilisation of mechanical properties of the wire by roller straightening," Journal of Materials Processing Technology 5984, pp 1-9, 2002.
- [7] Takeshi Uemori, Tatsuo Okada and Fusahito Yoshida, "Simulation of Springback in V-bending Process by Elasto - Plastic Finite Element Method with Consideration of Bauschinger Effect," METALS AND MATERIALS, Vol. 4, No. 3, pp 311-314, 1998.
- [8] Zhong Hu, "Elasto-plastic solutions for spring - back angle of pipe bending using local induction heating," Journal of Materials Processing Technology 102, pp 103-108, 2000.
- [9] 김홍건, "단섬유 금속복합체에서의 소성역 전개과정 및 바우신지 효과에 관한 연구," 한국공작기계학회지, 제7권, 제1호, pp 22-32, 1998.
- [10] K.T. Kim and Y.S. Kwon, "Elastic-Plastic Response of Sintered Porous Iron under Uniaxial Strain Cycling," 대한기계학회논문집, 제15권, 제4호, pp 1204-1214, 1991.
- [11] 강명순, "소성가공학, 신성문화사, 1975.
- [12] 金東垣, 塑性學, 清文閣, 1998.
- [13] 이종국, 이병영, 유승원, 이준기, 소성가공, 원창출판사, 1998.
- [14] (주)태성에스엔이, 비선형 해석 with ANSYS 5.5, 2002.