

철근 공장가공화를 위한 철근 스프링 백에 대한 수치적 연구

최창환¹, 김진호^{1*}, 이성규²
¹영남대학교 기계공학과, ²KL-TECH

A Numerical study on Spring-back Phenomenon of a Rebar for Manufacture

Chang-Hwan Choi¹, Jin-Ho Kim^{1*} and Sung-Kyu Lee²

¹Division of Mechanical Engineering, Yeongnam University, ²KL-TECH

요 약 현재 공사현장에서 사람이 직접 기계로 철근 굽힘 가공을 하고 있다. 하지만 사람이 직접 기계로 가공하기 때문에 정밀성이 떨어지고 시간이 많이 소요된다. 이를 공장가공방식으로 자동화하여 정밀성과 가공성을 높이기 위해서는 스프링 백 현상을 분석해야한다. 이 현상은 굽힘 공정 이후 하중제거에 따른 재료의 복원 능력이 발생하여 원래의 요구하는 형상에서 벗어나게 하며 이는 굽힘 각도, 굽힘 반경, 철근의 직경에 영향을 받는다. 우리는 굽힘 각, 굽힘 반경, 철근의 직경을 스프링 백 현상에 영향을 미치는 인자로 정하고 FEM을 통해 각 인자들이 철근 굽힘 가공에 미치는 영향에 대한 경향성을 분석하였다. 그 결과 굽힘 각도 10°씩 증가함에 따라 약 0.1°씩 스프링 백 현상이 커졌으며 철근 직경은 ϕ 10mm에서 ϕ 16mm로 증가함에 따라 약 0.6° 증가하였다. 반면 굽힘 반경은 30mm에서 40mm로 증가함에 따라 스프링 백 각도가 약 0.2° 줄어드는 현상을 확인할 수 있었다.

Abstract These days, workers in a construction site conduct a rebar bending process with a machine. This bending process has some problems such as long processing time and bad quality of the rebar. In order to manufacture a rebar having precision and machinability, we should study on Spring-back phenomenon. This phenomenon affects a shape of rebar after unloading due to restoration ability of material and it is influenced by bending angle, bending radius and a rebar diameter. The change of spring-back ratio according to the change of the parameters are analyzed by FEM. Consequently, Spring-back increases around 0.1° as bending angle increases 10°. and it also increases around 0.6° as diameter of rebar increases from ϕ 10mm to ϕ 16mm. while we can confirm that it decreases around 0.2° as bending angle increases 10°.

Key Words : Contact analysis, FEM, Plastic working, Rebar bending process, Spring back

1. 서론

철근 공장가공이란 설계 및 구조도면을 근거로 철근 전문가공업체의 전문 가공 설비를 이용하여 공장에서 철근을 가공한 후 가공된 철근을 현장에 반입하는 방식을 말하며, 이와 반대로 현장가공이란 현장에서 설계 및 구조도면을 근거로 필요에 따라 현장 내에서 수작업의 가공기계를 이용하여 가공하는 것을 말한다[1].

철근 가공방식은 1990년대 이전까지는 현장인력으로만 가공 조립이 이루어져왔으나, 이후 현장가공방식이 처음으로 도입이 되었다. 철근가공조립도 작성 작업을 철근 숙련공의 경험에 의존하여 물량을 집계하고 수작업으로 가공도를 작성함에 따라 철근형상을 잘못 가공하는 오류가 자주 발생하기 때문에 자재 LOSS율이 높고 작업하는 사람의 숙련도에 따라 가공 품질이 좌우된다. 또한 장비 부족으로 인한 소규모 생산성과 야외에서 작업을 하기

본 논문은 국토교통과학기술진흥원에서 지원하는 2013년도 첨단도시개발사업(12첨단도시C21)으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Jin-Ho Kim(Yeongnam Univ.)

Tel: +82-53-810-2441 email: Jinho@ynu.ac.kr

Received May 29, 2013

Revised July 12, 2013

Accepted August 7, 2013

때문에 부실한 철근 관리와 기상악화 시 작업이 불가능해진다.

반면, 철근 공장가공은 가공된 철근의 품질이 우수하고, 또한 철근가공 조립도작성을 전산 프로그램을 이용하여 작성하기 때문에 시공 정밀도 향상에 기여할 뿐만 아니라, 현장작업을 줄여줌으로써 공기단축과 현장노동인력의 감소를 가능하게 한다[2].

이렇듯 철근공장가공은 현장가공에 비해 많은 장점을 가지고 있다. 이를 좀 더 효율적으로 적용하기 위한 방법으로 철근의 이송, 절단, 가공, 적재까지 전면 자동화를 해야 하며, 기존의 공장가공 방식의 문제점으로 지적되었던 안전상의 문제 또한 자동화함으로써 해결할 수 있다.

특히 자동화하는 과정에서 중점적으로 연구가 필요한 부분은 굽힘 가공 공정이다. 굽힘 가공은 소성변형에 의한 형상가공이며, 산업 현장에서는 제품 성형 공정과 금형개발과정 등에서 원하는 형상을 얻기 위해서는 수십, 수백번의 시행착오를 통하여 보정하는 것이 일반적이다. 이는 공정 마지막 단계에서 재료에 대한 압력(하중)이 제거 시 순간적으로 탄성회복에 의해 원하는 형상에서 벗어나는 현상 때문이다. 이 현상을 스프링 백 현상이라 하며, 굽힘 각도, 굽힘 반경, 재료의 두께 등에 영향을 받는다.

스프링 백의 특성에 대한 연구는 1940년대부터 현재에 이르기까지 국내외의 많은 학자들에 의하여 행하여져 왔으나, 실험에 관한 경우다 대부분이었다. F.Pourboghra[3] 등은 평면 변형률 상태에서의 스프링 백을 예측하였으며, Kawaguchi[4] 등은 유한요소법에 의하여 외팔보에 대한 스프링백과 잔류 응력을 계산하였다. 특히 Al-Qureshi[5]는 상계법을 이용한 굽힘 반경, 재료의 두께, 재료의 응력-변형률 특성을 고려한 스프링 백 현상을 분석 및 실험을 통해 이를 검증하였다.

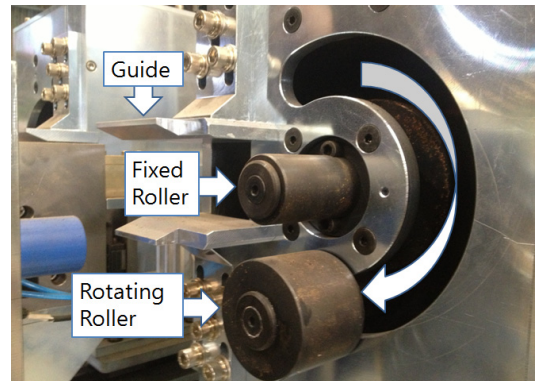
본 논문에서는 굽힘 각도, 굽힘 반경, 철근의 직경에 따른 굽힘 공정을 시뮬레이션하여 성형 후의 스프링 백비를 분석하여 각 인자들이 미치는 영향을 분석하는데 있다. 시뮬레이션은 유한 요소해석 프로그램인 다플을 이용하여 탄소성 해석 및 접촉 해석을 수행하여 철근 굽힘 가공간의 스프링 백 현상의 경향성을 확인하였다.

2. 본론

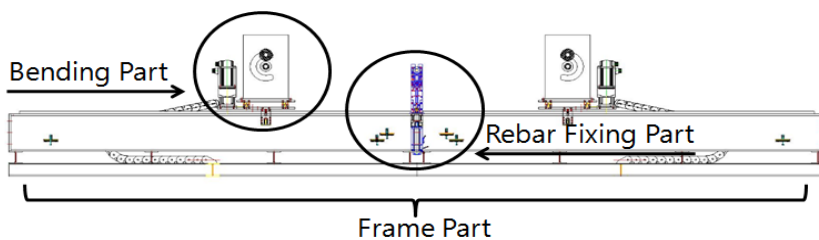
2.1 철근 굽힘 장치

Fig. 1에 나타난 밴딩 머신이 이번 연구에 사용한 굽힘 장치이다. 이 머신은 프레임 부, 밴딩부, 철근 고정부로 구성된다. 프레임 부는 좌우로 이동할 수 있는 밴딩 헤드가 두 개 있으며 철근형상에 따라 두 헤드가 움직이며 절곡을 하게 된다. 또한 중간에는 절곡되는 철근을 지지해주며 철근의 절곡방향에 따라 상하로 이동할 수 있는 구조의 철근고정부가 있다.

Fig. 2는 실제 밴딩 머신의 밴딩부의 사진이다. 아래에 사진과 같이 밴딩기는 회전 롤러, 고정롤러, 가이드로 이루어져 있다. 가이드는 밴딩 공정에서 철근이 위로 밀리는 현상을 막기 위해 설치하였다. 이 머신의 특징은 간소하면서도 원하는 모션을 만들 수 있다. 아래로 절곡할 때는 회전 롤러가 고정롤러의 상단에서 하단으로 절곡하며 위로 절곡할 때는 고정롤러가 철근을 잡은 상태에서 밴딩 헤드가 뒤로 빠졌다가 철근이 아래로 위치하면 회전 롤러가 고정롤러 아래로 위치한 뒤 밴딩 헤드가 앞으로 나와서 철근을 굽힘 가공을 한다.



[Fig. 2] Bending part of Rebar bending machine

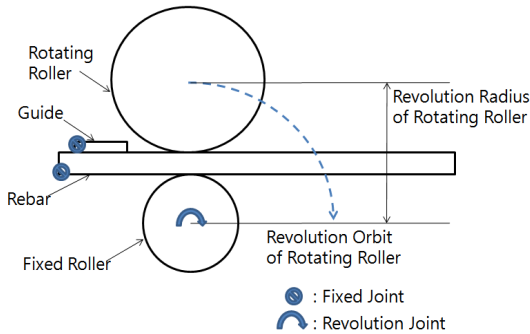


[Fig. 1] Rebar bending machine

2.2 유한 요소 모델링

2.2.1 유한 요소 모델링 시스템

Fig. 3은 철근 밴딩기의 유한요소 모델이다. 실제 철근 밴딩기의 회전 롤러, 고정 롤러, 가이드는 모두 칩탄 열처리한 SCM415을 사용하였다. 이 재질은 굽힘 소재인 철근보다 높은 강성을 가지기 때문에 변형일 일어나지 않는다고 가정하여 강체(Rigid body)로 모델을 정의하였다.



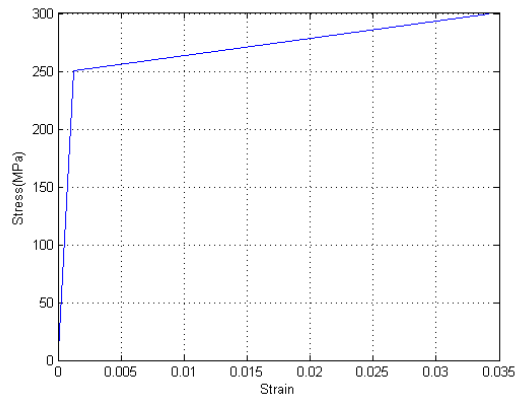
[Fig. 3] schematic diagram of FEM Modeling

두 롤러와 철근 사이에는 접촉조건을 접촉강성(10000N/m), 마찰계수(0.3)으로 주어 기계적 거동이 이루어지도록 하였다. 이 모델링의 구속 조건은 현재 진행 중인 밴딩기의 철근고정부 대신에 철근 끝부분의 노드와 가이드의 한쪽 모서리에 고정조인트(fixed joint)를 주어 고정하였다. 회전 롤러의 운동경로는 고정롤러를 중심으로 공전할 수 있게 하기 위해 회전조인트(revolution joint)을 주어 굽힘 공정이 일어나도록 하였다. 또한 스프링-백을 측정하기 위해 회전 롤러가 원하는 각도만큼 공전하여 가공이 마친 뒤 회전 롤러에 주어진 회전조인트와 철근과 회전 롤러의 접촉을 해지시켜 하중을 제거하여 스프링 백을 발생하도록 하였다.

2.2.2 유한요소해석에 사용한 재질의 특성

해석에 사용된 철근은 일반적인 구조용강의 물성치를 적용하여 유한요소 해석을 수행하였다.

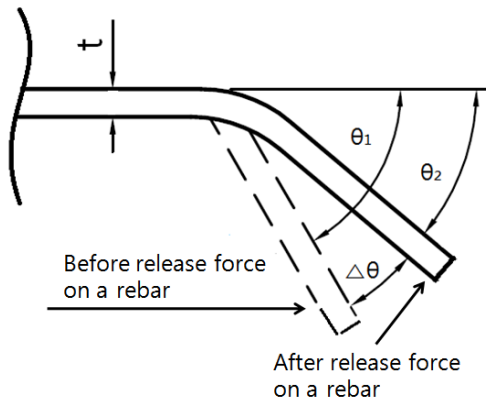
이번 해석에 사용한 상용 동역학 해석 프로그램인 DAFUL에서 소성재질의 물성치를 나타내는 응력 변형률 선도를 bi-linear 타입으로 입력하였다. bi-linear로 나타낸 응력 변형률선도(Fig.4)는 초기 항복응력(0.25GPa)을 중심으로 2개의 직선으로, 탄성구간의 영률(200GPa)과 소성구간의 영률(1.45GPa)을 나타낸 그래프이다.



[Fig. 4] Stress strain curve of structural curve

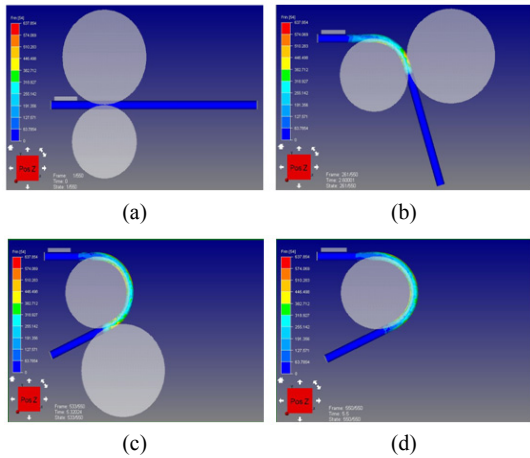
2.3 굽힘 가공에 따른 스프링-백 해석

철근 굽힘 가공에서 굽힘 각도를 10°씩 90°~180°, 굽힘 반경을 30mm, 40mm, 철근의 직경 $\phi 10\text{mm}$, $\phi 16\text{mm}$ 로 나누어 유한요소 해석을 각각 수행하였다. Fig.5는 굽힘 공정 간의 측정 되어야 하는 각도를 표기한 그림이다. θ_1 은 입력각도에 따라 회전 롤러에 의해 재료가 가공된 각도이며, θ_2 은 재료에 대한 하중이 제거되어 스프링 백 현상이 발생한 이후의 각도를 나타낸다. 이 두 개의 각도를 이용하여 스프링 백 비를 θ_1/θ_2 로 정의하였다.[6] 스프링 백 비는 스프링 백 현상을 고려한 가공에서 필요한 각도를 좀 더 간편하게 구하기 위해 정의하였다.



- t : diameter of a rebar
- θ_1 : angle before release force
- θ_2 : angle after release force
- $\Delta\theta$: spring back angle

[Fig. 5] Definition of Spring back ratio



[Fig. 6] (a).Before bending (b).Halfway of the bending (c).Before release force on rebar (d).After release force on rebar

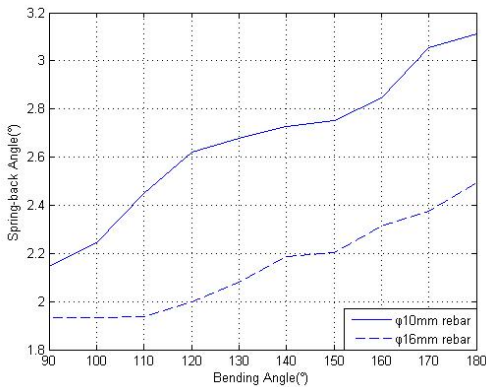
Fig. 6는 밴딩 과정과 철근에 가해지는 응력 및 공정

과정을 보여주는 그림이다. (a)는 밴딩이 시작되는 전, (b)는 중간 과정, (c)는 굽힘 공정이 끝난 후 하중이 제거되기 전, (d)는 하중이 제거되어 스프링 백 현상이 발생한 모습을 보여준다. 우리는 하중 제거 전 (c)에서의 굽힘 각도 θ_1 와 하중제거 후 (d)에서의 굽힘 각도 θ_2 를 이용하여 스프링 백 비를 측정하였다.

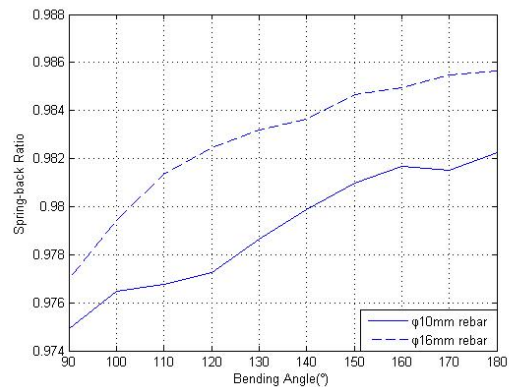
2.4 스프링 백 해석 결과

2.4.1 굽힘 각도의 스프링 백에 대한 영향

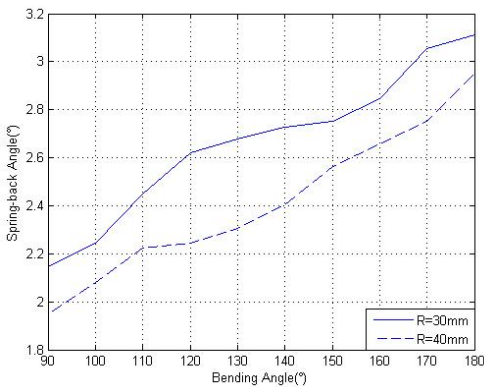
직경이 $\phi 10\text{mm}$ 와 $\phi 16\text{mm}$ 인 철근을 반경 30mm 가진 고정롤러에서 가공할 경우를 해석하여 그 결과를 굽힘 각도에 따라 하였다. Fig. 7~10 그래프는 직경 $\phi 10\text{mm}$, $\phi 16\text{mm}$ 의 철근을 굽힘 해석 했을 때, 굽힘 각도에 따른 스프링-백 각도와 스프링-백 비를 나타내고 있다. 그래프에 의하면 굽힘 각도에 따라 스프링 백 각도와 스프링-백 비는 증가하는 것으로 보인다.



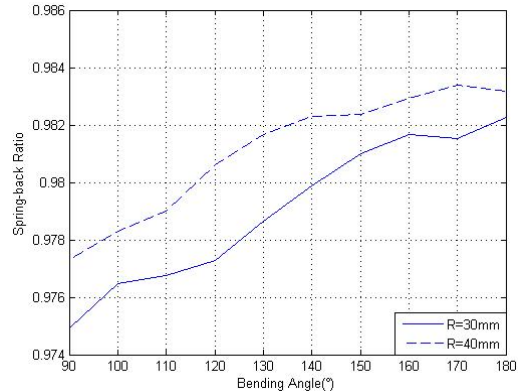
[Fig. 7] Spring-back angle according to diameter of rebar



[Fig. 8] Spring-back Ratio according to diameter of rebar



[Fig. 9] Spring-back angle according to bending radius with $\phi 10\text{mm}$ rebar



[Fig. 10] Spring-back Ratio according to bending radius with $\phi 10\text{mm}$ rebar

2.4.2 철근의 직경에 따른 스프링 백에 대한 영향

굽힘 반경 30mm로 설정 후 직경 $\phi 10\text{mm}$, $\phi 16\text{mm}$ 의 철근을 이용하여 굽힘 해석을 하였다. Fig. 7은 직경이 다른 두 철근의 굽힘 해석에 따른 스프링-백 각도를 보여준다. $\phi 16\text{mm}$ 인 경우 $\phi 10\text{mm}$ 의 철근보다 스프링-백에 대한 영향을 덜 받는 것을 확인할 수 있었다. 90° , 100° 를 제외한 나머지 구간에서는 $\phi 10\text{mm}$, $\phi 16\text{mm}$ 의 스프링-백 각도는 약 0.6° 정도의 차이를 보였다. 이 결과는 굽힘 반경보다 재료의 직경이 스프링-백 현상에 크게 작용하는 것을 알 수 있었다.

2.4.3 굽힘 반경에 따른 스프링 백에 대한 영향

직경이 $\phi 10\text{mm}$ 인 철근을 가지고 굽힘 반경을 달리 하여 굽힘 해석을 수행하였다.

고정물로의 반경은 30mm, 40mm 2가지의 경우를 사용하였다. Fig. 9는 반경에 따른 스프링-백 각도를 나타내었다. 각도 변화량을 보면 굽힘 반경이 작을수록 스프링-백 각도가 크게 나타나며, 굽힘 각도가 180° 일 경우 30mm와 40mm를 비교했을 때 약 0.2° 의 차이가 나타났다.

Fig. 10은 반경에 따른 스프링-백 비를 나타낸 그래프이다. 스프링-백 각도와 달리 굽힘 반경이 작을수록 스프링-백 비는 작게 나타났다. 이는 굽힘 각도의 증가비보다 스프링-백 각도의 증가비가 작게 나타남에 따라 이런 그래프가 나왔다.

3. 결론

본 논문에서는 굽힘 가공에 영향을 미치는 인자에 따른 스프링-백 현상이 어떻게 나타나는지에 대한 경향성을 분석 하였다. 이를 위해 유한요소 모델링을 제시하고 굽힘 각도, 굽힘 반경, 철근의 직경을 달리하여 해석을 수행 하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 굽힘 각도가 증가함에 따라 스프링-백 현상이 크게 나타나는 반면 굽힘 반경과 철근의 직경은 굽힘 각도와는 반대의 결과를 보여주었다.
2. 철근의 직경이 굽힘 반경보다 스프링 백 현상에 미치는 영향이 크다는 것을 확인할 수 있었다.
3. 자동화된 철근밴딩기를 위해서는 각 변수 조건에 따른 관계식을 만들 필요성이 있다.

References

- [1] D.J Kim, O.J Kim "Application Method of Re-bar Factory Manufacturing for Practical Use" Architectural Institute of Korea, Vol.25, No.1, pp423-426, 2004
- [2] H.H Jo, W.Y Park, T.G Kang, H.Y Park and S.H Yun "Analysis of re-bar manufacturing system in plant and its facilitate method". KACEPMA. Vol. 8, No.1 2007
- [3] F. Pourboghrat, E. Chu "Prediction of spring-back and side-wall curl in 2-D draw bending", Journal of Materials Processing Technology Vol.50, pp361-374, 1995
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)01398-K](http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136(94)01398-K)
- [4] T. Kawaguchi, S. Imatani and, K. Yamaguchi "An Elasto-Viscoplastic Finite Element Analysis of Sheet Metal Bending Process" J.JSTP Vol.35 pp 125-130, 1994
- [5] Al-Qureshi, H.A "Elastic-plastic analysis of tube bending," International Journal of machine Tools & Manufacture, Vol. 39 pp. 87~104 1999.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(98\)00012-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(98)00012-1)
- [6] H.J Kim and C.M Lee "A study on the Bending Process for Precision Pipe Forming". Jorunal of the Korean Society For Precision Engineering, Vol. 24, No.6 June 2007

김진호(Jin-Ho Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 한양대학교 공학사 (기계설계전공)
- 2002년 5월 : 미) U.C. Berkeley 공학 석사 (기계공학전공)
- 2002년 9월 ~ 2005년 9월 : 미) U.C. Berkeley Ph.D. (기계공학전공)
- 2007년 9월 ~ 현재 : 영남대학교 기계공학부 조교수

<관심분야>

초정밀 모터 및 액츄에이터 설계

최 창 환(Chang-Hawn Choi)

[준회원]



- 2005년 3월 ~ 2013년 2월 : 영남대학교 기계공학부 (첨단기계 전공)
- 2013년 3월~ 현재 : 영남대학교 기계공학과 석사 (기계공학 전공)

<관심분야>

초정밀 모터 및 액츄에이터 설계

이 성 규(Sung-Kyu Lee)

[정회원]



- 1997년 2월 : 영남대학교 금속공학과 (금속공학과 학사)
- 2000년 8월 : 영남대학교 기계공학과 (기계공학과 석사)
- 2002년 7월 ~ 현재 : KL-TECH 대표

<관심분야>

로봇공학, 재활의료, 자동화기계 및 설비