

냉간 압연된 전기강판의 응력-변형률 곡선 모델

유위경¹, 변상민², 이영석[#]

Modeling of Stress-strain Curve for Cold Rolled Electrical Steel

U. K Yoo, S. M Byon, Y. Lee

(Received March 28, 2008)

Abstract

A constitutive equation of the electrical steel strip used for a raw material of transformer is proposed. The stress-strain behavior of electrical steel strip is quite different from that of common carbon steel and/or alloy steel. A series of tensile tests were performed with the specimens made from cold rolled strip. Several thicknesses of the strip were produced by a two-high (with upper and lower rolls) cold rolling pilot mill as reduction ratio increases from 10% to 90%. Its initial thickness of the strip was 2.5mm. Tensile specimens are cut out from the cold rolled strips. Mechanical properties of the steel are examined through rolling direction. Ramberg-Osgood model and the proposed equation are combined to describe the total behavior of stress-strain including instability region. The stress-strain curves calculated from the present constitutive equation are compared with those from experimentally obtained at each test condition of reduction ratios of specimen. Results show that the predicted stress-strain curves are in overall in a good agreement with measured ones.

Key Words: Constitutive Equation, Electrical Steel, Cold Rolling, Reduction Ratio

1. 서론

외력을 받는 부품 또는 구조물의 설계를 적절하게 하기 위해서는 외력을 받는 부품 또는 구조물의 재료의 기계적 거동(mechanical behavior)에 대한 이해를 필요로 한다. 그리고 기계적 거동은 일반적으로 인장 또는 압축 실험에 의한 응력-변형률 곡선(stress-strain curve)을 통해 이해할 수 있다[1]. 이는 실험에서 얻어진 응력-변형률 곡선으로부터 항복응력, 최대인장응력, 연성, 탄성계수, 파단응력 등의 정보를 얻을 수 있기 때문이다[2].

이러한 정보는 실험을 통해 구해진 응력-변형률 곡선을 모델링하여 구성 관계식(constitutive relation) 또는 응력-변형률 곡선(equation for stress-strain curve)을 만드는데 사용되고, 유한요소 해석

및 구조설계에도 유용하게 사용된다.

본 연구에서는 변압기, 전기모터 등의 제조에 쓰이는 전기강판 재료의 응력-변형률 관계에 대한 연구를 한다. 전기강판(electrical steel)은 전기 및 자기를 이용한 기기에 쓰는 재료로써 전자적 성질이 보증된 강판이며 규소강판(silicon steel) 이라고도 한다. 전기강판은 각종 전자기기 내에서 전기적인 에너지 그 자체의 상태를 변환시키는 전자석용 철심코어로 사용된다. 전기 강판은 뛰어난 전자기적 특성을 가지기 때문에 최근에는 에너지 절약과 환경오염방지를 위한 클린 에너지(clean energy)의 필요성 증가에 따라 그 수요도 커지고 있다. 전기강판은 여러 냉간압연 이력(history)에 따라 다양한 기계적 거동을 보여주고 [3], 응력-변형률 거동 특징이 일반 탄소강의

1. 중앙대학교 대학원 기계공학부

2. 동아대학교 기계공학부

교신저자: 중앙대학교 기계공학부, E-mail: ysl@cau.ac.kr

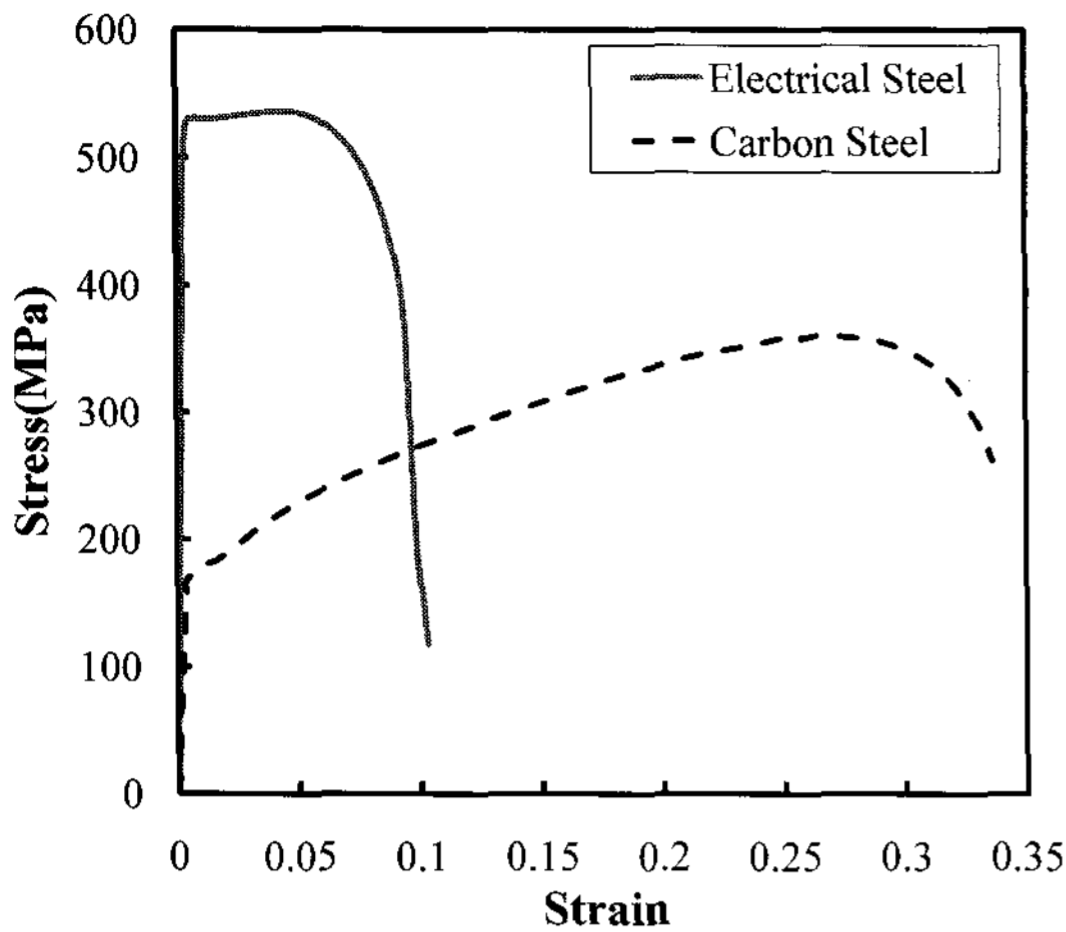


Fig. 1 Typical true stress-true strain curve of carbon steel and electrical steel

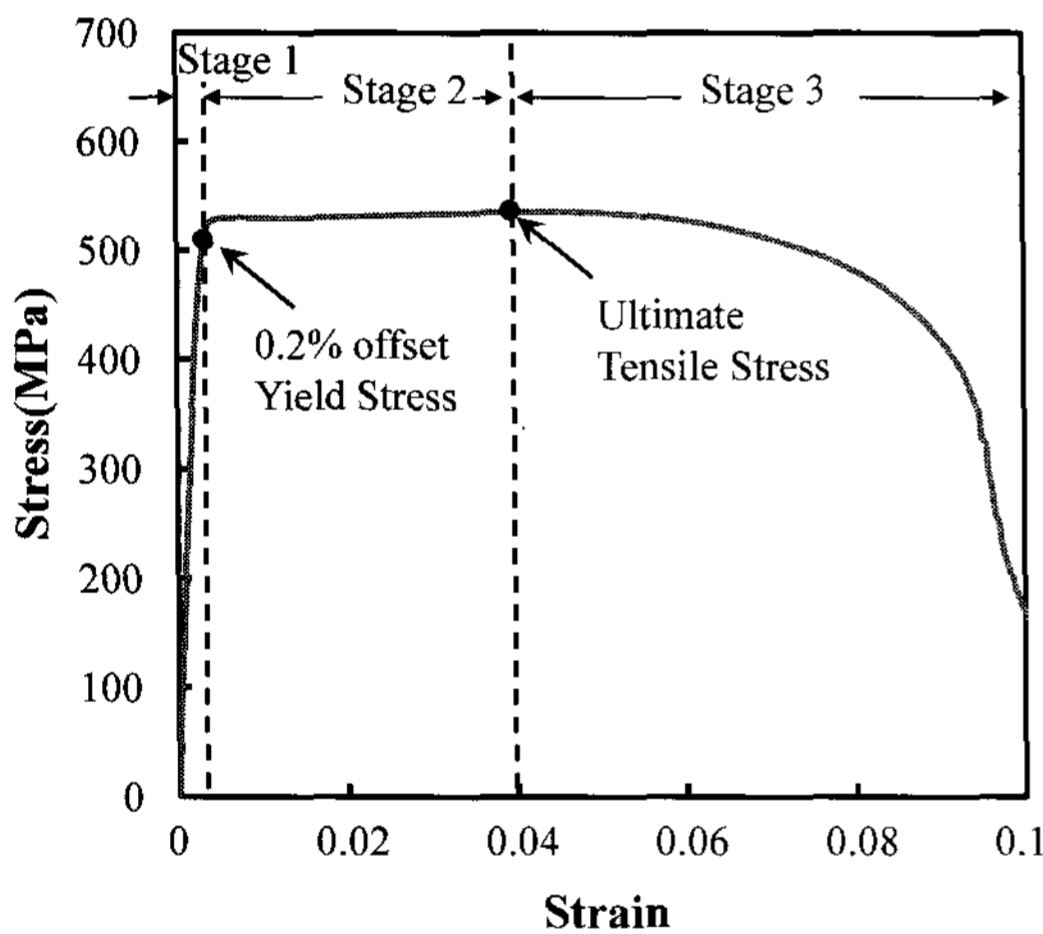


Fig. 2 Stress-strain curve characterizing the deformation stages of the electrical steel

그것과는 매우 다르기 때문에 이에 대한 연구의 필요성이 최근에 크게 증가되었다.

전기강판의 변형거동특징은 Fig. 1 에서와 같이 일반 탄소강의 응력-변형률 거동과는 상이하다. 최대 연신률이 일반 탄소강에 비해서 극히 짧고, 최대 진응력 지점 전후의 변형률 비율이 일반 탄소강과 다르다. 즉, 탄소강은 Fig. 2 에 표시된 구간 3 의 변형률 범위 보다 구간 1, 2 의 변형률 범위가 크다. 그리고 이와는 다르게 전기강판은 구간 3 이 구간 1, 2 보다 크다.

과거의 연구에서 이러한 여러 구간에서의 응력-

변형률 관계를 표현하기 위한 여러 모델들이 제시되었다. Holloman[4]은 가공경화를 지수함수 형태로 표현한 n 승 경화 탄소성 재료 모델을 제시한 바 있다. 또 Ludwick, Swift, Krupkowsky [4]는 탄성-소성구간을 나누어 2 개의 식으로 표현한 모델을 제시하였다. Ramberg, Osgood[5] 은 오프셋(offset) 처리된 항복응력을 계산하여 탄성-소성구간을 모두 표현하는 모델을 제안하였다. 특히 Ramberg-Osgood 모델을 사용하면 대부분의 금속재료에서 응력-변형률 관계가 이론과 실험에 근사하게 적용된다고 하였다[4].

하지만 전기강판의 경우 인장변형거동에서 전체 변형률 구간이 극히 짧고, 응력감소 변형률 구간인 구간 3(stage 3)이 Fig. 2 에서와 같이 크다. 따라서 전기강판의 경우에는 재료의 모든 변형률 구간(stage 1, stage 2, stage 3)을 표현하는 응력-변형률 곡선 모델이 제시되어야 한다. 그런데 앞에 제시된 모델만으로 재료의 가공에 따른 거동을 잘 표현할 수 없다. 기존 모델들은 변형률 구간 증음(negative)의 기울기를 가지는 구간 3(stage 3)을 표현하지 못하기 때문이다.

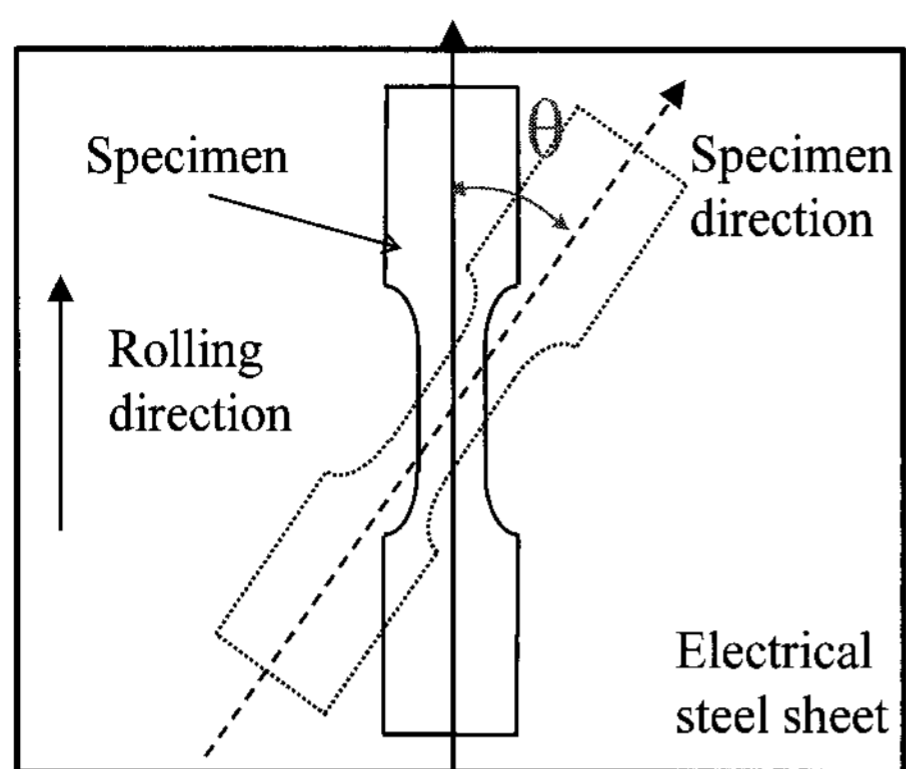
본 연구에서는 Fig. 2 에서와 같이 변형률 구간을 3 구간으로 나누어 모든 변형률 구간의 응력-변형률 곡선 모델을 제시하고자 한다. 또 본 논문에서 제안된 응력-변형률 곡선 모델을 이용하여, 냉간가공에 따른 전기강판재료의 가공효과를 예측할 수 있는 수식을 제시한다. 그리고 전기강판의 인장시험 결과와 예측식으로부터 계산된 결과를 비교하여 제안된 모델의 타당성을 검토하였다.

2. 실험절차 및 방법

2.1 시편의 가공 및 채취

냉간압연에 따른 소재의 기계적 거동의 차이를 조사하기 위해서 선택한 변수는 압하율(r)이다. 여러 압하율에서 인장시험 결과는 각각의 압하율에 따라서 다양한 응력-변형률 관계를 보여준다. 즉, 압하율에 따른 응력-변형률 관계 의 예측이 가능하면, 임의의 압하율에서 소재의 응력-변형률 관계를 예측할 수 있게 된다.

인장시험 시편 제작을 위해 사용된 소재는 규소합금인 전기강판이다. 이 전기강판 소재는 열연강판 코일의 일부에서 채취되었다. 그리고 그 소재는 다시 시험 냉간압연기를 통해 여러 압하율의



**Fig. 3 Rolling direction of the electrical steel sheet
Angle(θ) between the rolling direction and specimen direction**

시편으로 압연되었다. 압하율 범위는 10~90%에 10%의 등 간격으로 하였다. 압하율(r)은 식(1)과 같다.

$$r = \frac{h_0 - h}{h_0} \times 100 (\%) \quad (1)$$

식(1)에서 h_0 는 냉간 압연 전의 소재두께, h 는 냉간 압연 후의 소재두께이다.

시편은 냉간 압연된 시험판재에서 시편채취방향(θ)을 0° 로 하여 채취되었다. 시편채취방향과 압연방향과의 관계는 Fig. 3에 나타나 있다. 인장시편의 치수는 ASTM A370의 규격에 기초로 제작하였다. 게이지 길이(gage length)는 50mm이다.

2.2 인장시험

제작된 시편은 인장시험기에서 분당 10mm의 균일한 인장속도로 당겨졌다. 인장시험을 통해 나온 반력과 변형길이는 공칭응력, 공칭 변형률로 먼저 계산되어 진응력, 진변형률로 환산하였다.

3. 응력-변형률 곡선 모델

본 연구에서는 인장시험에서의 진응력-진변형률의 관계를 Fig. 2에서와 같이 3개의 구간으로 나누었다. 3개의 구간은 변형률 0에서 항복까지 구간(stage 1), 항복에서 최대 진응력점까지 구간(stage 2), 그리고 최대 진응력점 이후 구간(stage 3)이다.

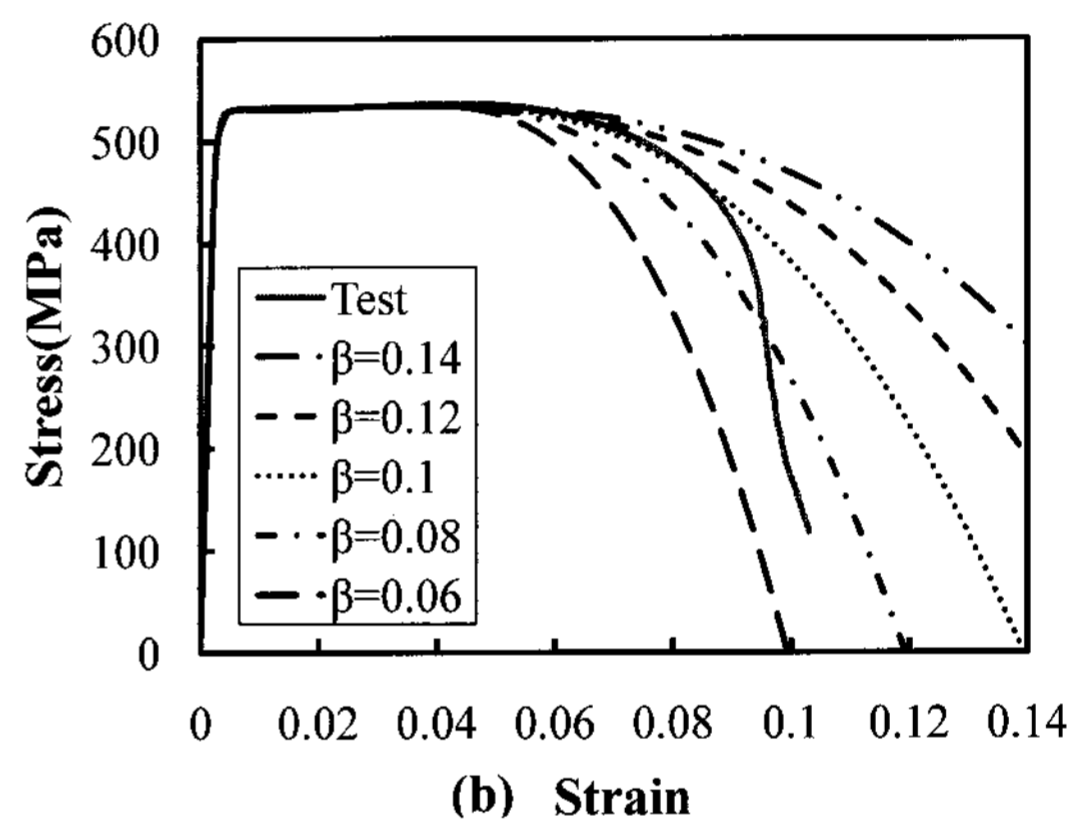
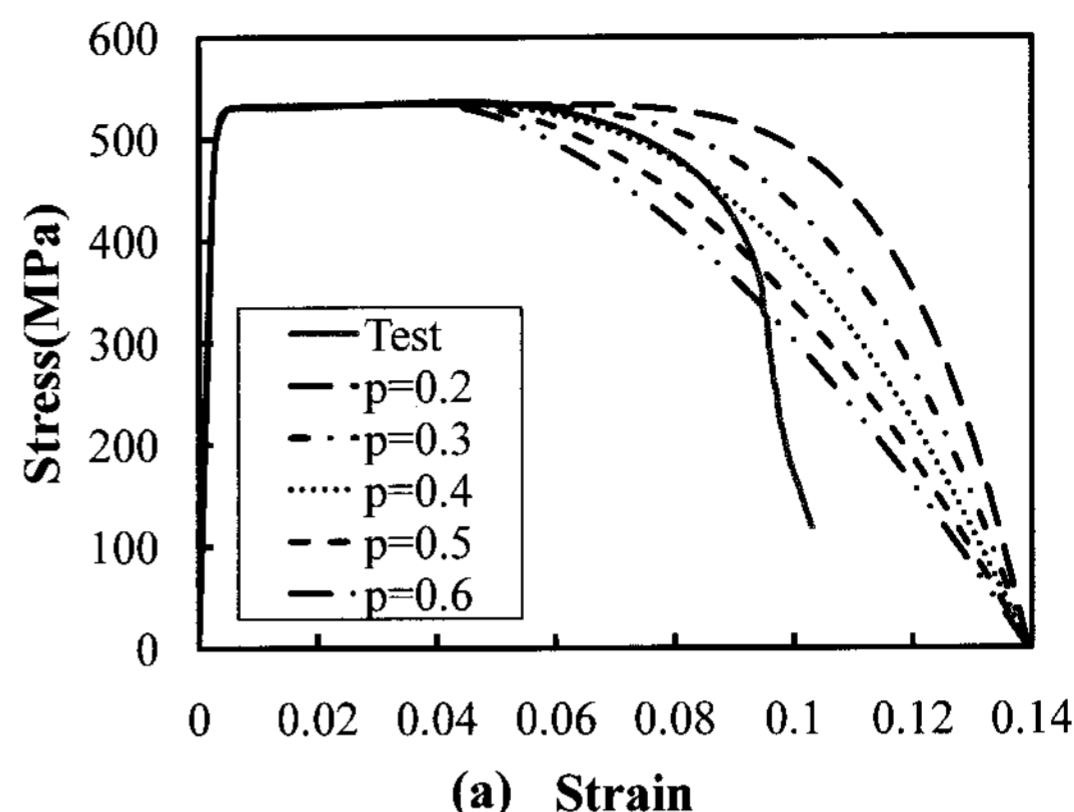


Fig. 4 (a) effect of parameter p on stresses($\beta=0.1$ constant) (b) effect of parameter β on stresses ($p=0.4$ constant) when reduction ration is 10%

3.1 Ramberg-Osgood 모델

먼저 구간 1, 2(stage1, stage2)를 표현하기 위해서 Ramberg-Osgood[5] 모델을 사용하였다. 일반적으로 금속재료의 응력-변형률 관계를 모사하기 위해서 사용하는 Holloman[4] 모델의 경우 냉간 가공하지 않은 재료의 0.04 이상의 변형률에서 잘 맞는다고 한다. 본 실험에서 사용한 전기강판은 인장시험 전에 10%~90%로 먼저 냉간압연 되었다. 또 전체 구간의 변형률 최대범위가 0.04 이하이기 때문에 Holloman 모델은 적합하지 않다. 이와 비슷한 Swift[4] 모델은 탄소성 천이영역을 매끄럽게 표현 못하기 때문에 제외되었다.

Ramberg-Osgood 모델은 주 시험재료로 판재(Sheet material)를 사용하여 연구되었다[5]. 또 Ramussen[6]에 따르면 Ramberg-Osgood 이 알루미늄 합금을 바탕으로 개발되었으나 스테인레스 강

을 포함한 다른 여러 합금에서도 적용 가능하다고 한다. 따라서 얇은 판재로 가공된 전기강판이 실험재료인 본 연구에서는 Ramberg-Osgood 모델이 적합하다. 따라서 1, 2 구간(stage1, stage2)에서 사용된 Ramberg-Osgood 모델은 식(2)와 같다.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (\varepsilon \leq \varepsilon_{0.2}) \quad (2)$$

이 식에서 $\sigma_{0.2}$ 는 0.2% 오프셋 방법에 의한 항복강도이다. 그리고 E_0 는 Young's modulus, n 은 재료에 따른 상수이다. E_0 는 일반적인 철에서와 같이 210GPa 을 상수로 사용하였다. 그리고 n 값은 식(2)가 1, 2 구간에서 다양한 압하율 및 시편 채취 각도에 대해 응력-변형률 실험결과를 가장 잘 예측할 수 있도록 최적화된 파라미터로 20 으로 설정되었다.

3.2 제안된 모델

Ramberg-Osgood 식은 구간 1, 2 에서 냉간 소재의 가공경화에 의해 응력수준이 증가하는 거동을 기술한다. 이에 반해 구간 3 에서는 응력 불안정 연화(softening)를 기술할 수 있는 식이 제안되어야 한다. 본 연구에서는 Ramberg-Osgood 식이 포함하고 있는 응력-변형률 관계를 유지하면서 변형률 변화가 최대응력에서 연화되는 양만큼 차감시킨 양에 비례한다는 관찰에 기초한 식 (3)과 같은 지수식 형태를 제안하였다.

$$\varepsilon = \varepsilon_u + \beta \left(\frac{\sigma_u - \sigma}{\sigma_u} \right)^p \quad (\varepsilon_u \leq \varepsilon) \quad (3)$$

이 식에서 σ_u 은 진응력-진변형률 그래프에서 최대응력이다. 그리고 파라미터 β 와 p 는 재료의 물성에 따라 달라지는 상수이다. 파라미터 β 는 식(3)과 비슷하게 압하율에 따라 지수승으로 감소하는 함수이고, 파라미터 p 값은 압하율이 40% 정도에서 최대가 되는 2 차함수의 형태이다. 따라서 냉간 압연된 전기강판의 인장시험에서 압하율의 변화에 따른 파라미터 β 및 p 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\beta = 0.12 \left(\frac{105-r}{100} \right)^{1.6} \quad (4)$$

$$p = -0.0001(r+5)(r-90) + 0.1 \quad (5)$$

그리고 예측식은 구간 3(stage3)에서 다음과 같은 조건을 만족하도록 제안되었다.

$$\lim_{\sigma \rightarrow \sigma_u} \varepsilon = \lim_{\sigma \rightarrow \sigma_u} \left[\varepsilon_u + \beta \left(\frac{\sigma_u - \sigma}{\sigma_u} \right)^p \right] = \varepsilon_u \quad (6)$$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{\sigma=\sigma_u} = \left(\frac{-\sigma_u^p (\sigma_u - \sigma)^{1-p}}{p\beta} \right)_{\sigma=\sigma_u} = 0 \quad (7)$$

우선 응력이 σ_u 인 지점에서 변형률 ε_u 가 식(6)에서와 같이 계산된다. 또 구간 3(stage3)에서는 변형률 ε_u , 응력 σ_u 인 지점에서 응력 최대 값을 가지게 된다. 따라서 최대 진응력점에서 응력-변형률 그래프의 기울기는 식(7)과 같이 영(zero)이 된다.

제안된 식에서 파라미터 β 와 p 의 변화에 따른 특성은 다음과 같다. Fig. 4(a)는 p 값이 증가함에 따라서 응력이 0 이 되는 지점(변형률이 $\varepsilon_u + \beta$ 인 지점)이 변하지 않고 그래프곡선이 점점 완만해지는 것을 보여준다. Fig. 4(b)는 β 값이 증가함에 따라서 응력이 0 이 되는 지점의 변형률이 점점 커지는 것을 보여준다.

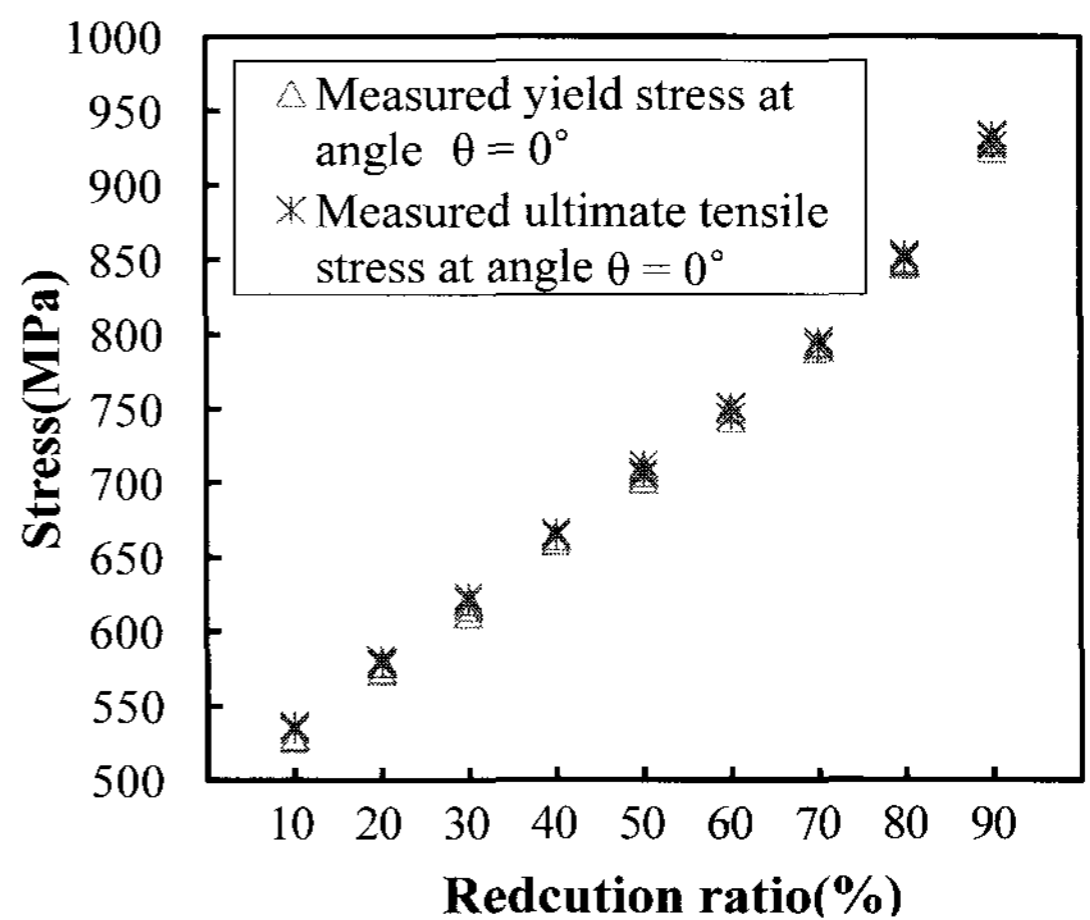


Fig. 5 Effect of reduction ration on yield stress, ultimate stress and strain

3.3 항복응력과 최대 진응력

압하율(r)에 따른 항복응력과 최대진응력은 Fig. 5 에서와 같이 전체 압하율 구간에서 값이 거의 같다. 또 최대진응력은 압하율이 증가함에 따라서 모두 선형에 근사하게 증가한다. 또 전체 압하율 구간에서 항복응력과 최대진응력시 변형률은 차이가 적다. 이와 같은 고찰에 의해 항복응력과 최대진응력을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\sigma_{0.2} = \sigma_u, \epsilon_{0.2} = \epsilon_u \quad (8)$$

$$\sigma_u = 4565734.02r + 491130212.76 \text{ (Pa)} \quad (9)$$

4. 결과 및 토의

Ramberg-Osgood 모델인 식(2)와 본 논문에서 제안한 모델인 식(3)을 사용하여, 압하율(r)에 따른 응력-변형률 관계를 계산하였다. 그리고 압하율과 시편 채취방향의 변화에 따라 2~3 회 실시된 인장시험 데이터를 제안한 모델인 식(3)을 사용하여 압하율(r)에 따른 식 (4), (5)를 계산하였다. 그리고 압하율과 시편 채취방향의 변화에 따라 2~3 회 실시된 인장시험 데이터를 계산된 응력-변형률 관계와 비교하였다.

대체적으로 모든 압하율과 시편 채취방향에서 제시된 식으로 예측된 결과와 실험으로부터 얻은 데이터는 비슷한 경향을 보여주고 있다. 그러나 많은 데이터를 단일식으로 모델링 했기때문에 발생하는 부분적인 오차로 인해 상대적으로 정확도가 떨어지는 부분도 존재한다.

시편채취방향($\theta=0^\circ$)에서 비교결과인 Fig. 6 을 보면 압하율(r) 중 20%~40%에서 예측결과가 변형률 증가에 따라 응력이 1, 2 구간에서는 증가하고, 3 구간에서는 감소하는 실험결과 값과 잘 일치하고 있다. 하지만 압하율 10%에서는 예측결과 중 제 3 구간에서 변형률에 따른 응력감소가 실험결과의 그것보다 많다. 이것은 $\epsilon_{0.2}$ 와 ϵ_u 의 변형률 차이가 식(8)에 의해 무시되어, 원래 3 구간의 예측결과 그래프가 무시된 변형률 구간 크기만큼 왼쪽으로 이동했기 때문이다. 압하율(r)이 50%~70% 그리고 90%인 경우는 예측된 응력 값이 전체 변형률 범위에서 실험값보다 크다. 이것은 최대진응력이 식(9)으로 근사되어 나타나는 최대 진응력 예측값의 오차에 의한 것이다. 압하율 80%의 경우는 예측결과와 실험결과가 거의 일치한다.

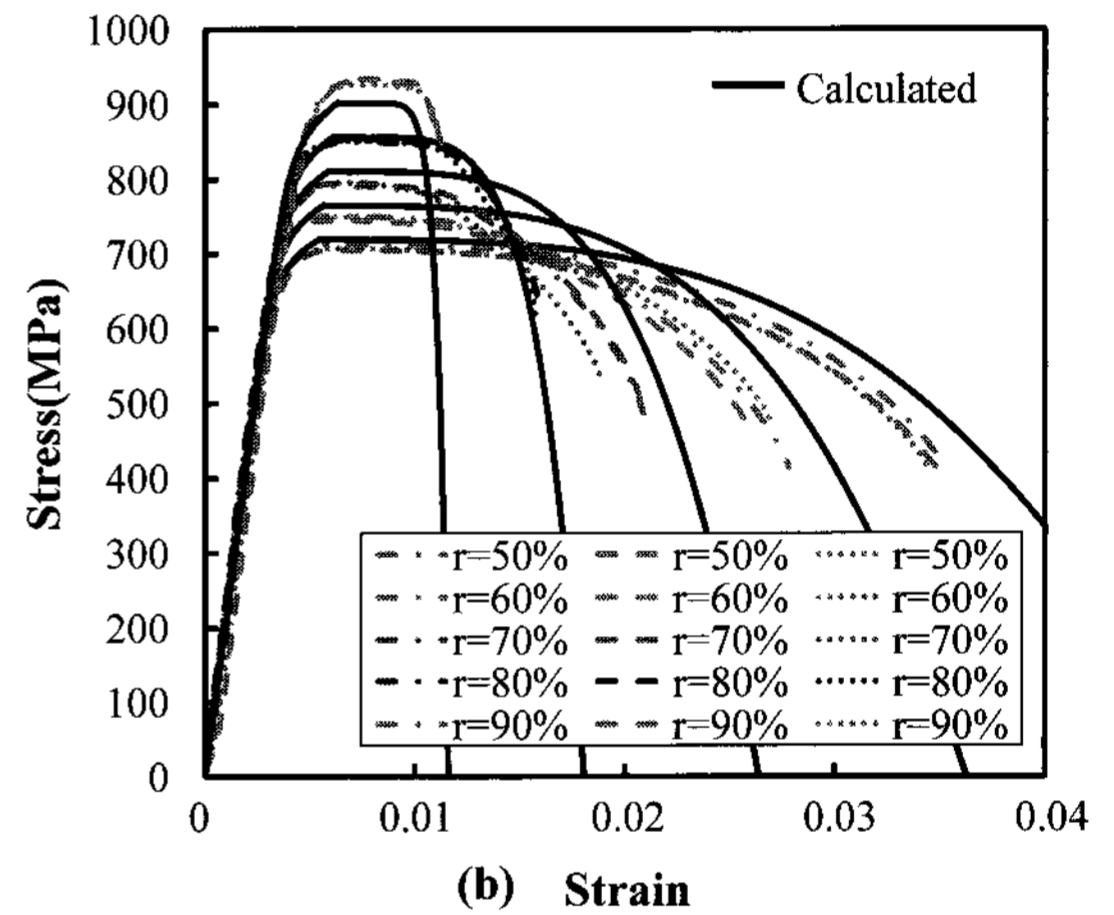
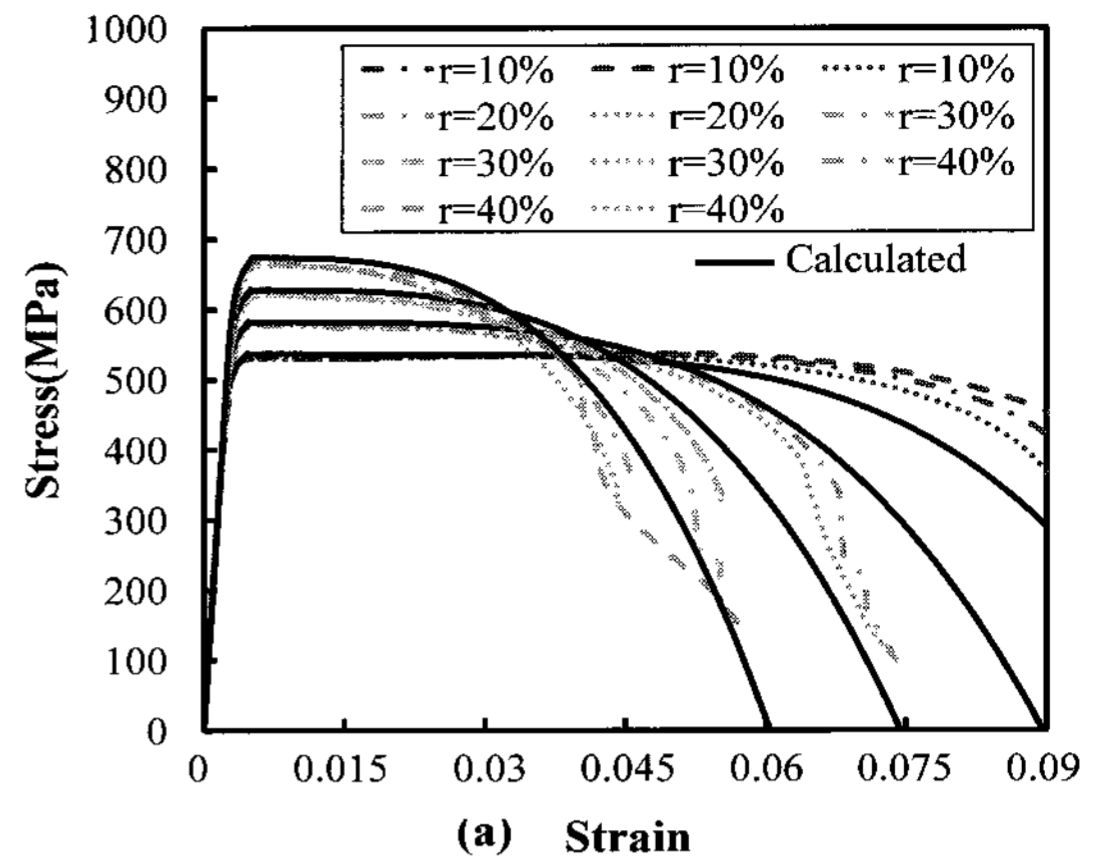


Fig. 6 Stress-strain curves for different reduction ratio when the angle (θ) specimen taken is 0°

5. 결론

본 연구에서는 전기강판시편을 압하율(r)의 변화(10~90%)를 주면서 압연하고 또한 전기강판 압연방향($\theta=0^\circ$)에서 시편을 채취하여 인장시험을 하였다. 그리고 전체 변형률 구간에 관하여 압하율(r)에 따른 응력-변형률 모델을 제안하고, 계산결과를 실험결과와 비교하였다. 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 제안한 응력-변형률 관계 모델에서 계산된 응력-변형률은 측정된 응력-변형률과 일부분을 제외하고 전반적으로 일치하는 경향을 보여주었다.

(2) 인장시험 시 최대 진응력 이후의 응력-변형률 관계는 식(3)의 모델로 근사화하여 표현할 수 있고, 재료의 특성에 의존하는 파라미터 β 값과

p 값을 조정하여 나타낼 수 있다.

(3) 압하율에 따른 응력-변형률 예측의 정확도는 항복응력과 최대진응력점의 예측정확도에 의해서 결정된다.

후 기

이 논문은 2007 년도 중앙대학교 우수연구자연구비 지원에 의한 것임.

참 고 문 헌

- [1] J. M. Gere, S. P. Timoshenko, 1997, Mechanics of materials 4th, PWS publishing company. pp. 9~12.
- [2] C. Moosbrugger, 2002, Atlas of stress-strain curves 2nd, ASM International, p. 1.
- [3] J. S. Chung, S. M. Byon, H. J. Kim, and S. M. Hwang, 1997, Process design of electric steel by a multiple objective optimization, The Autumn Conference Proceedings of the Korean Society for Technology of Plasticity, pp. 153~157.
- [4] Y. S. Kim, 2003, Engineering plasticity, sigma press, pp. 48~55.
- [5] W. Ramberg, W. R. Osgood, 1943, Description of stress-strain curves by three parameters, NACA Technical Note, No. 902, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington DC.
- [6] K. J. R. Rasmussen, 2003, Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 59, pp. 47~61.