

〈論 文〉

스프링강의 판압연시 폭확대에 관한 연구

박재석* · 최 운** · 남승의**

A Study on the Width Spread in Flat Rolling of Spring Steel

Jae-Suk Park, Woon Choi and Seung-Eui Nam

Abstract

In this study, the width spreads of spring steels including Mn-Cr steel(SUP 9A), Mn-Cr-V steel(SUP 11A), and Si-Cr steel(SAE 9254) and were investigated under different reduction ratios and thickness-width ratios friction coefficients. The experimental results were compared with the theoretical prediction by the Ekelund equation, Geuze equation, etc. The width spreads of the three spring steels were found to be 10~15% larger than mild steel, and the optimal reduction ratio for the spring steel was found in a range from 20 to 30%. Among the spring steels, the width spread of Mn-Cr-V steel was measured to be the largest followed by those of Si-Cr steel and Mn-Cr steel. It was found that the width spread increased with friction coefficient, width-thickness ratio and reduction ratio as predicted. However, the theoretical predictions revealed smaller width spread than the experimental results. This finding indicates that the coefficients of the width spread of the theoretical models need to be modified in order to predict the actual behavior of the width spreading of the spring steels. In this study, the coefficients of width spread of the Geuze equation were determined from the experimental results.

1. 서 론

스프링 재료의 요구되는 성질은 탄성계수, 형상, 치수 및 정도, 표면성상, 내용성, 기계적 성질⁽¹⁾로 겹판스프링(leaf spring)의 간단한 계산식을 보아도 알 수 있듯이 스프링의 하중특성은 굽힘응력을 받는

겹판 스프링에서는 판 두께의 3승 및 판폭에 영향을 받고⁽²⁾ 스프링의 치짐에도 영향을 주고 있다. 스프링 강의 압연제품은 치수가 스프링 정수에 영향을 주어 일반적으로 압연강재의 정도가 요구되며 평강(flat bar)의 경우 치수오차가 문제가 되고 있다. ⁽³⁾ 압연재를 그대로 사용하는 겹판 스프링에서는 판재의 치수가 스프링의 특성에 큰 영향을 주므로 압연시 치수허용차에 주의할 요하므로 고정도 가공기술이 요구된다. 특

* (주)대원강업 압연과

** 홍익대학교 금속재료공학과

히 스프링의 경량화, 등응력 분포화, 비선형 특성 등을 목적으로 하는 단매물 롱테파 스프링(single long tapered leaf spring), 파라볼릭스프링(parabolic spring)에서는 압연시 치수정도가 더욱더 요구되고 있다. 본 연구는 스프링(spring)강의 열간 평압연(flat rolling)시 폭확대(width spread)에 관한 연구로 망간크롬강(SUP 9A), 망간크롬브롬강(SUP 11A), 실리코크롬강(SAE 9254)의 빌레트(□100)를 압하율, 판폭비, 판두께비, 마찰계수(압연온도) 등에 따른 실험 폭확대율과 Ekelund, Geuze,篠倉식의 이론 폭확대율을 비교하여 적용여부를 검토하였다.

2. 이론

폭확대에 미치는 기하학적인 인자는 판폭비(B_1/h_1), 판두께비(R/h_1), 압하율($\Delta h/h_1$)이며 압연상태 및 기타에 따라 결정되는 인자는 강종류(C함유량 등), 마찰계수(μ), 압연온도(t), 압연속도(v), 스탠드(stand)간장력 등이다.⁽⁴⁾ 폭확대는 일반적으로 마찰계수, 롤(roll)직경, 압하율이 크게 될수록 크고 또한 판폭이 좁을수록 크게 되며, 폭의 확대현상을 적극적으로 이용하고 있는 것이 공형(caliber)압연이다.⁽⁵⁾

폭확대와 신장은 공형설계 및 압연 패스 스케줄(pass schedule) 등에 중요한 의미를 가지고 있으나 폭확대를 구하는 정확한 식은 아직 확립되어 있지 않으며 또한 경험적인 법칙을 벗어나지 못하고 있다.⁽⁶⁾

폭확대량은 마찰계수 및 투영접촉장 등을 고려하지 않고 압하량만 고려하여 현장적용이 용이하여 많이 이용되는 Geuze식⁽⁷⁾은

$$\begin{aligned} \Delta B &= k\Delta h \\ * k &= 0.35(\text{연강}) \\ \Delta B &= \text{폭확대량}(B_2 - B_1) \\ \Delta h &= \text{압하량} \end{aligned} \quad (1)$$

이다. 폭확대 계산이 어려운 점이 있으나

비교적 평강(flat bar)압연에 정확성이 있고 마찰계수(μ) 및 투영접촉장(L_a) 등을 고려한 Ekelund식⁽⁸⁾은

$$\frac{(B_2^2 - B_1^2)}{2} = 4mL_a\Delta h - 2m(h_1 + h_2)L_a \ln(B_2 - B_1)$$

B_1 : 압연전 판폭

B_2 : 압연후 판폭

h_1 : 압연전두께

h_2 : 압연후두께

m 토오크

$$* m = \frac{1.6\mu L_a - 1.2\Delta h}{h_1 + h_2}$$

$$* L_a = R\sqrt{h_1 - h_2}$$

R : 롤직경

$$* \mu = c(1.05 - 0.0005t)$$

$$* c = 1.0(\text{강롤}) \\ 0.8(\text{주강롤})$$

$$* t = \text{압연온도}(^\circ\text{C}) \quad (2)$$

위 식을 다시 표현하면,

$$\begin{aligned} B_2^2 + 4m(h_1 + h_2)L_a \ln B_2 \\ - B_1^2 - 8mL_a\Delta h \\ - 4m(h_1 + h_2)L_a \ln B_1 = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

이다. 또한 평강압연시 이용되고 공형 압연시 폭확대 계산법으로 비교적 정확성이 있고 거형환산법(equivalent rectangular transformation method)을 이용한篠倉의 식⁽⁹⁾은,

$$\begin{aligned} \frac{\Delta B}{B_1} &= \frac{B_2 - B_1}{B_1} \\ &= \alpha \frac{L_{am}}{B_1 + 0.5H_1} \times \frac{F_H}{F_0} \end{aligned}$$

α : 계수(=0.83)

F_H/F_0 : Fractional reduction of area

H_1 : 압연 후 두께

B_1 : 압연 전 판폭

B_2 : 압연 후 판폭

L_{am} : 평균투영접촉장 (4)

이 된다.

3. 실험방법

본 연구에 사용된 시편은 스프링강인 망간크롬강재(SUP 9A), 망간크롬브롬강재(SUP 11A), 실리콘크롬강재(SAE 9254)로 삼미종합특수강에서 생산되는 빌레트를 사용하였다. 표면을 쇼트 블라스트 작업을 실시하여 녹을 제거한 100각(□100×100) 빌레트 시편을 선반가공한 단조강으로 표면 거칠기는 45~50S인 롤직경 500 mm, 롤길이 1200 mm의 롤을 쓴 120각(□120×120) 빌레트 압연이 가능한 비가역식 3단 조압연기(three high roughing mill)로 압하율 10%, 20%, 30%, 40%, 롤 직경 300 mm, 400 mm, 500 mm, 압연 온도 950°C, 1050°C, 1150°C에서 실험을 4, 5회 실시하였다.

4. 실험결과 및 고찰

스프링강의 압연온도는 1050°C 등에서 실험을 하였으며 압하율, 관폭비, 관두께비, 마찰계수(압연온도)를 실험한 실측치와 이론식의 계산치와 비교하였으며 실측치는 재료의 최대폭과 최소폭의 기하평균치를 사용하였다. 측정부위는 쇼트 블라스트 작업을 실시하였고 압연 후 측면모서리 "R"는 4~5 mm로 일정하여 고려하지 않았다. (KS, JIS의 스프링강재인 평강의 경우 측면 "R"는 규정하고 있지 않다.) 사용된 그래프는 컴퓨터 프로그램 STATGRAF를 사용하여 가장 근접한 모델을 취하였다. 또한 압하율 20%, 40%에서 망간크롬강(SUP 9A)과 실리콘크롬강(SAE 9254)의 현미경 조직과 압연전 시편(billet)의 조직을 관찰하였다.

4.1 압하율($\Delta h/h_1$)의 영향

Fig. 1은 스프링강 빌레트(□100×100)를

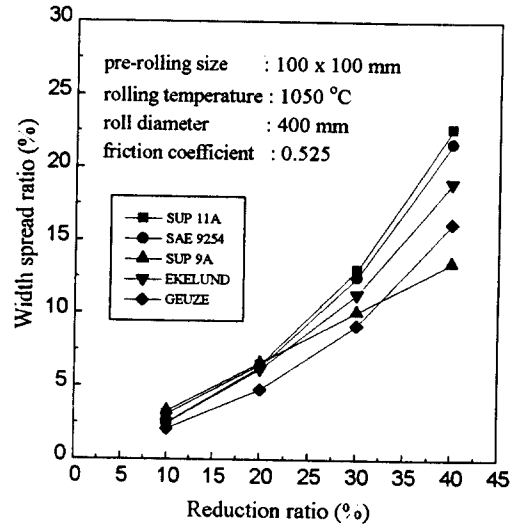


Fig. 1 Effect of width spread on the reduction ratio

롤직경 400 mm, 압연온도 1050°C에서 압하율 10%, 20%, 30%, 40%에서 SUP 9A, SUP 11A, SAE 9254의 실측치의 폭확대율과 Ekelund, Geuze식의 이론 폭확대율값을 나타내고 있다. 압하율 10~20%에서 폭확대율은 SUP 9A, SUP 11A, SAE 9254의 실측치나 Ekelund, Geuze식의 이론치가 근접하나 조압연 사용 압하율인 30~40%에서는 큰 차이를 보여주고 있으며 SUP 11A, SAE 9254, SUP 9A 순으로 폭확대가 작다. 또한 30~40%에서 스프링강은 Ekelund, Geuze의 이론식보다 폭확대율이 높다. 즉 스프링강은 일반 연강보다 폭확대가 10~15% 정도 크다는 것을 알 수 있고 특히 고하율에서 폭확대가 크다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 가공도는 폭확대에 대하여 중요한 인자가 있다. 즉 1회 압연시 압하량이 클 때 폭확대가 큰 것으로 알려져 있으며 스프링강의 실측치도 동일한 경향을 보여주고 있다. 즉 많은 폭확대(폭퍼짐)를 얻고자 할 때는 1회에 많은 압하량(압하율)을 주고 적은 폭확대를 얻고자 할 때는 수 회에 걸쳐서 압연한다. Ekelund식을 적용시 "m" 및 "μ"의 계수 보정과 Geuze식의 압하율별 새

로운 계수(k)의 설정이 요구되는 것을 알 수 있다.

압하율이 크면 압연회수(pass수)가 감소하여 동력, 롤마모 등이 적어 경제적이기는 하지만 지나치게 크면 롤절손 및 재료가 파손될 우려가 있다. 그러므로 압연조건에 따라서 압하율의 한계가 주어진다. 강재의 열간압연의 경우 압하율은 보통 30~45% 정도이다.⁽¹⁰⁾

4.2 판폭비(B_1/h_1)의 영향

Fig. 2에서 롤직경 400 mm, 압연전두께 25 mm, 압연온도 1050°C, 압하율 20%에서 SUP 9A, SUP 11A, SAE 9254의 폭확대 실측치와 Ekelund,篠倉의 식을 비교하였다. 판폭비 1~2에서 폭확대율의 크기는 SUP 11A, SAE 9254, SUP 9A 순으로 보여주고 있으며 판폭비 3~4에서는 근접함을 알 수 있다.

Ekelund식의 이론계산치는 실측치보다 낮게 나타나 보이며篠倉식의 이론계산치는 판폭비 3~4에서 실측치와 근접하여 판폭비가 큰 스프링강 압연시 적용이 가능한 것으로 나타나 평강의 사상압연(finishing rolling)에 적합한 식으로 나타났다. 일반적으로

로 두께가 크고 폭이 좁을수록 폭확대가 많이 발생하는 것은 잘 알려진 사실이다. 스프링강도 일치되는 것을 알 수 있으며 많은 폭확대를 요구할 때는 판폭비를 적게 하는 것이 좋고 적은 폭확대를 요구할 때는 판폭비를 크게 한다.

4.3 판두께비(R/h_1)의 영향

Fig. 3에서 롤직경 300 mm, 400 mm, 500 mm, 압하율 30%, 압연온도 1050°C에서 SUP 9A, SUP 11A, SAE 9254의 실험치와 Ekelund 및篠倉식의 이론계산치를 나타낸다. 판두께비 또한 압하율과 같이 SUP 11A, SAE 9254, SUP 9A, Ekelund식의 이론계산치 순으로 보여주고 있으며 판두께비가 증가하면 폭확대가 크게 나타나고 있는데 이것은 롤직경이 커지면 폭확대가 커진다는 것은 잘 알려진 현상으로 접촉각은 같으나 접촉호의 길이가 증대하고 마찰력이 커져 신장되는 것이 방해되어 폭확대가 커진다. 따라서 본 연구에서는 실측치가 Ekelund식의 이론치보다 폭확대가 큰 것으로 나타났으며, 스프링강에서도 판두께비의 영향이 큰 것으로 보이며 판두께비(R/h_1)가 증가할수록 폭확대율도 비례하여 증가하는

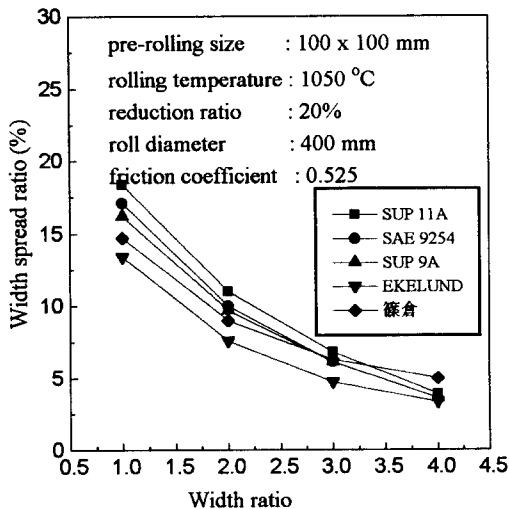


Fig. 2 Effect of width spread on the width ratio

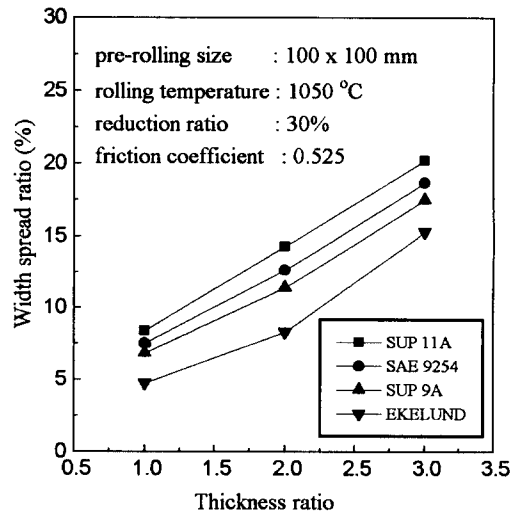


Fig. 3 Effect of thickness ratio on the width spread ratio

것으로 나타났다.

4.4 마찰계수(μ)의 영향

폭확대에서 마찰계수의 영향은 일반적으로 마찰계수가 클수록 폭으로 나타나기 쉬워 폭확대는 크게 나타나는 것이 일반적인 현상이다. 본 연구에서는 Ekelund식을 이용하여 압연온도 850°C, 950°C, 1050°C, 1150°C, 1250°C, 압하율 30%, 롤직경 400 mm에서 실험하였다. Fig. 4에서 마찰계수가 클수록 폭확대가 커지는 것으로 나타났으며 강재의 온도가 높을수록 신장되기 쉬워서 폭확대가 감소된다. Fig. 4에서 Ekelund의 이론 계산치가 마찰계수에 따라 폭확대율이 큰 것으로 나타나며 스프링강은 강종별 큰 차이가 발생함을 알 수 있다.

스프링강은 마찰계수가 적을수록(압연온도가 높을수록) 폭확대율은 근사하며, 마찰계수가 증가하면(압연온도가 낮으면) 폭확대율도 크게 나타나 압연온도의 영향이 크다는 것을 알 수 있다. SAE 9254는 압연온도 1050°C(마찰계수 0.525)에서 폭확대가 950°C(마찰계수 0.575)보다 큰 것은 SUP 11A와 SUP 9A(실리콘 0.25%)의 경우에

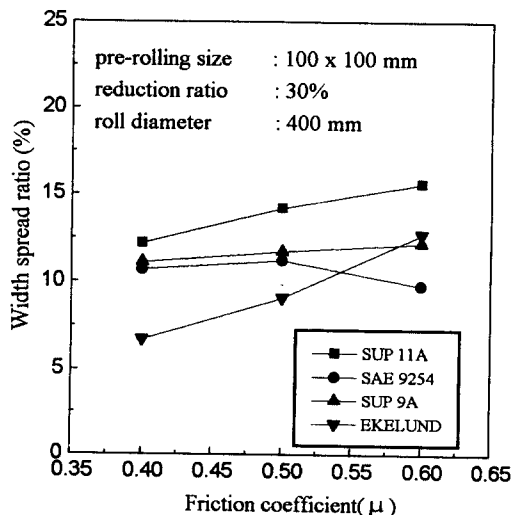


Fig. 4 Effect of width spread on the friction coefficient

서는 950°C 이상에서는 γ -Fe(FCC)영역인 반면 SAE 9254(실리콘 1.42%)에서는 950°C에서는 α -Fe(BCC)영역이며, 1050°C에서는 $\alpha + \gamma$ 로 상변태를 하게 된다. 따라서 BCC보다 많은 슬립계를 가지고 있는 FCC로 변태되기 때문에 높은 마찰계수를 갖지만 폭확대율의 감소는 실리콘의 영향인 것으로 사료된다.

본 실험에서는 마찰계수를 압연온도 및 롤재질을 고려한 Ekelund식으로 실험하였으나 롤표면 거칠기와 밀접한 관계가 있다. 롤의 표면이 평활할 경우 표면이 거친 경우보다 압연하중이 작다. 이것은 전자가 후자보다 마찰력이 작기 때문이다. 즉 마찰력이 크게 되면 압연하중이 증가하여 폭확대가 증대된다.⁽¹¹⁾

4.5 마찰계수(압연온도)와 압하율관계

압연온도 1050°C, 롤직경 400 mm, 롤표면조도 45~50S에서 압연온도가 100°C 증가하면 Ekelund식에서 마찰계수 0.05가 감소하고 압하량은 5~6 mm가 감소한다. 동일한 압연조건에서 실험한 결과 온도가 100°C 상승하면 마찰력 부족으로 재료가 롤에 물리지 않는 것으로 나타나 정확한 폭확대량과 압하율을 찾기 위해서는 압연온도 관리가 중요한 것으로 나타났고 또한 1200°C 이상에서는 마찰력이 급격히 떨어지는 것으로 나타났다. 열간압연이 이루어지는 800~1100°C의 온도범위에서 1°C 온도편차는 소재의 유동응력에 최대 10% 정도의 영향을 준다는 보고가 있다.⁽¹²⁾

접관스프링용 평강재 압연시 정확한 폭확대량과 정확한 치수를 얻기 위해 압하율은 20~30% 정도 적용하는 것이 최적작업조건으로 나타났다.

4.6 현미경 조직관찰

망간크롬강(SUP 9A) 및 실리콘크롬강(SAE 9254)을 압연전 상태(billet)와 압연온

도 950°C, 롤직경 400 mm, 압하율 20%, 40%에서 결정입도(grain size)와 내부조직을 주사전자현미경(SEM: HITACHI사 S-2300)으로 관찰하였다.

Fig. 5, 6은 시편(billet)인 SUP 9A 및 SAE 9254의 압연전 결정입도와 내부조직을 나타낸 것으로 결정입도는 #7과 #7.5로 스프링강의 기준치 #6을 만족하고 있으며 내부조직도 정상 퍼얼라이트와 페라이트의 혼합

조직을 나타내고 있다.

Fig. 7, 8은 압하율 20%에서 SUP 9A, SAE 9254의 압연시 결정입도와 내부조직을 나타낸 것으로 결정입도는 #8로 스프링강의 기준치 #6 이상을 만족하고 있으며 내부조직도 정상 퍼얼라이트와 페라이트 혼합조직을 나타내고 있다. 내부조직은 시편시보다 양호한 것을 알 수 있다. Fig. 9, 10은 압하율 40%에서 압연시 결정입도와 내부조직을

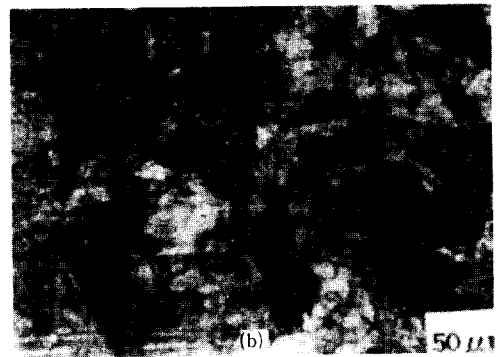
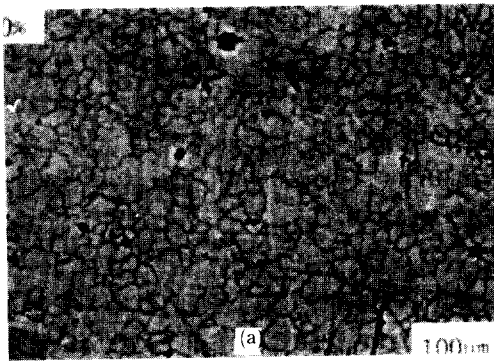


Fig. 5 Grain size (a) and microstructure (b) of SUP 9A(billet)

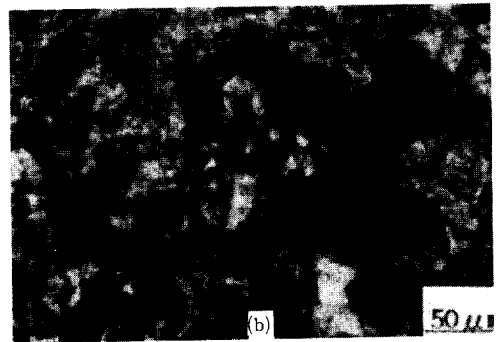
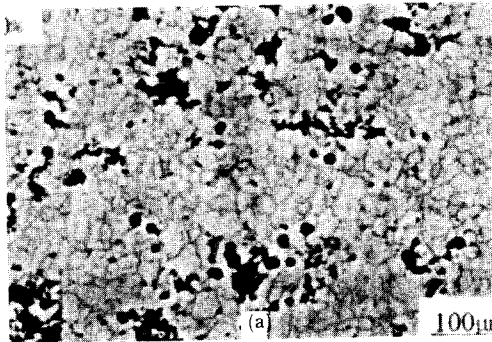


Fig. 6 Grain size (a) and microstructure (b) of SAE 9254(billet)

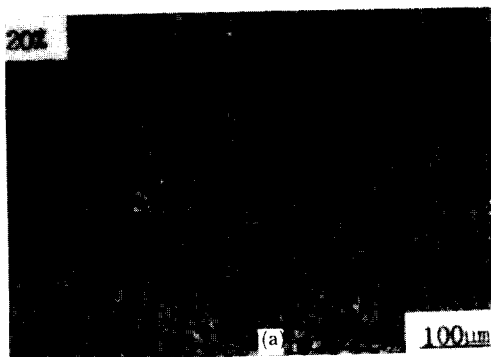


Fig. 7 Grain size (a) and microstructure (b) of SUP 9A(20% reduction ratio)

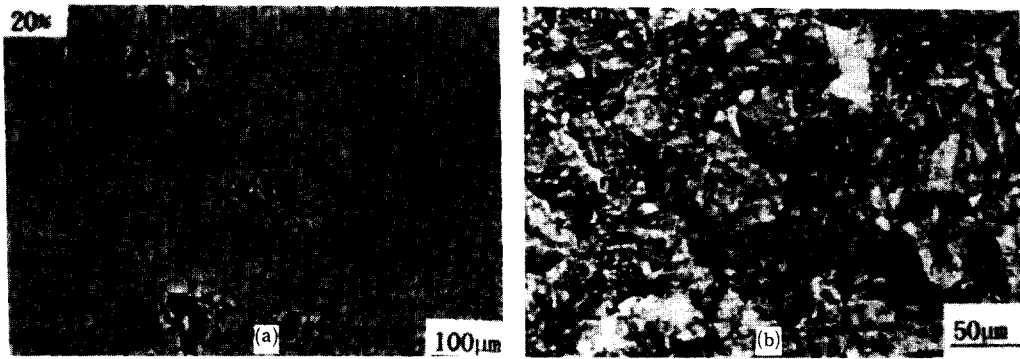


Fig. 8 Grain size (a) and microstructure (b) of SAE 9254(20% reduction ratio)

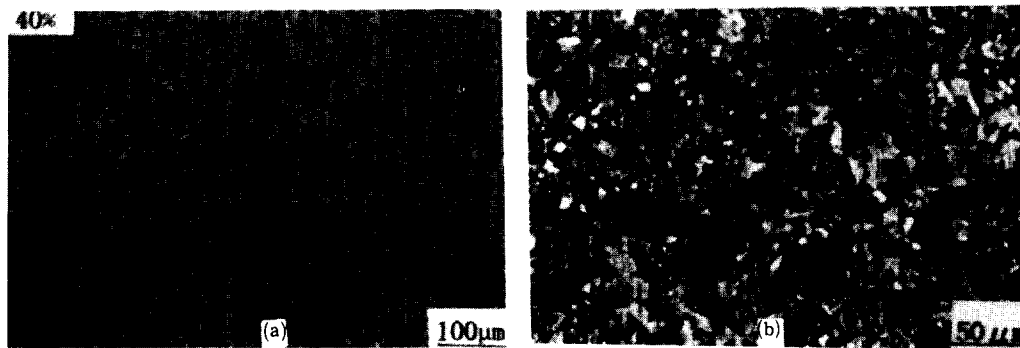


Fig. 9 Grain size (a) and microstructure (b) of SUP 9A(40% reduction ratio)

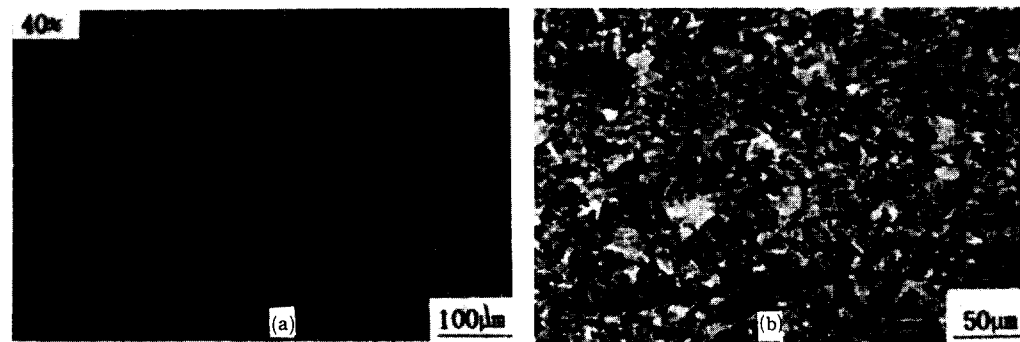


Fig. 10 Grain size (a) and microstructure (b) of SAE 9254(40% reduction ratio)

나타낸 것으로 결정입도는 #8로 기준치 #6을 만족하고 있고 내부조직도 정상 퍼얼라이트와 페라이트의 혼합조직을 나타내고 있다. 시편(billet)이나 20%압연시 조직보다 더욱더 치밀하고 균일한 조직을 보이고 있다. 압연 감면율이 클수록(압연회수가 많을수록) 재질이 향상되는 것을 알 수 있다. 열간작업에 있어서 최종입도를 결정하는 인자

는 변형이 완료되는 이 온도로부터 냉각속도이므로 압하율에 따른 변화는 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

폭확대에 영향을 주는 인자는 이상 검토한 것 외에도 압연속도, 스탠드간 압연장

력, 재료종류 등도 고찰해야 된다. 본 실험에서 실험한 결과를 몇 가지로 요약할 수 있다.

(1) 폭확대의 크기는 망간크롬브론강재(SUP 11A), 실리콘크롬강재(SAE 9254), 망간 크롬 강재(SUP 9A) 순으로 나타났다.

(2) SAE 9254는 압연온도 1050°C에서 950°C, 1150°C보다 폭확대가 큰 것은 실리콘(Si)의 영향으로 보인다.

(3) SUP 11A는 SUP 9A와 성분이 유사(보론 첨가)하나 압연온도, 압하율에 관계없이 SUP 9A보다 폭확대가 약 15% 정도 크게 나타났다.

(4) Geuze, Ekelund 식은 압하율 10~20%에서는 근접하나 30~40%에서는 적용이 난이하며 실험결과 Geuze식의 압하율별 폭확대계수(k)를 설정하면 다음과 같다. (롤직경 400 mm, 압연온도 1150°C 기준)

강종/압하율	10%	20%	30%	40%
SAE 9254	0.24	0.30	0.40	0.45
SUP 11A	0.32	0.37	0.46	0.52
SUP 9A	0.21	0.25	0.38	0.43

(5) 스프링강도 압하율, 마찰계수, 판두께비가 클수록 폭확대가 증가하여 폭확대의 일반 원칙과 일치하였다.

(6) 스프링강은 합금강으로 일반연강보다 폭확대율이 10~15% 정도 큰 것으로 나타났다.

(7) 스프링강의 압하율은 압연온도(마찰계수)의 영향이 크므로 작업온도관리가 중요하며 압하율은 20~30%가 최적인 것으로 나타났다.

(8) 스프링강의 폭확대계수가 결정되어 압연 가능최대폭(B_{MAX})을 예상할 수 있다.

B_{MAX} = 비레트각(폭) + [(비레트각(폭) - 제 품두께)] × k (폭확대계수)

(9) 스프링강의 결정입도는 압연전과 압연후 모두 기준치인 #6 이상의 결정입도를 갖는 것으로 나타났으며, 내부조직도 정상 퍼얼라이트와 페라이트의 혼합조직으로 나타났다.

후 기

본 연구는 1994년도 홍익대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 日本ばね工業會, 最新ばね技術, 新樹社, 1988, p. 15.
- (2) 金天旭, 1980, 最新機械設計, 文運堂, pp. 456~457.
- (3) ばね技術研究會, ばね(第3券), 丸善株式會社, 1982, p. 24.
- (4) 日本鐵鋼協會, 鐵鋼便覽 第3卷(1), 丸善株式會社, 1986, p. 393.
- (5) 日本鐵鋼協會, 鐵鋼便覽 第3卷(1), 丸善株式會社, 1986, p. 40.
- (6) 日本鐵鋼協會, 鐵鋼便覽 第3卷(1), 丸善株式會社, 1986, pp. 40~52.
- (7) 日本鐵鋼協會, 鐵鋼便覽 第3卷(1), 丸善株式會社, 1986, p. 394.
- (8) 日本鐵鋼協會, 鐵鋼製造法(第2分冊), 丸善株式會社, 1972, p. 40.
- (9) 篠倉恒樹外, 鐵と鋼(第72年) 第14號, 1986, p. 68.
- (10) 元尙伯, 1981, 塑性加工學, 螢雪出版社, p. 278.
- (11) 李東寧, 1993, 塑性加工學, 文運堂, p. 326.
- (12) 김낙수, 1993, 韓國塑性加工學會誌(第2券, 第3號) 通券 第4號, p. 65.