

< 論 文 >

17%Cr 웨라이트 스텐레스鋼板의 再結晶集合組織이
Deep-drawability 에 미치는 影響

韓 鳳 熙* · 權 赫 尙**

Effects of Recrystallized Texture of 17% Cr Ferritic Stainless
Steel Sheet on Deep-drawability

B.H. HAHN and H. S. KWON

College of Engineering, Seoul National University

(Received July 25, 1980)

Abstract

For various rolling processes, the effects of recrystallized textures of 17% Cr ferritic stainless steel sheet on deep-drawability were investigated by using 1) Pole figure analysis, 2) plastic strain ratios derived from tensile tests, 3) earing behavior observed from cup-drawing.

For single cold rolling processes, deep-drawability increased with increasing cold reduction. The best combination of high average plastic strain ratio and low planar anisotropy was achieved by 86% cold reduction.

For double cold rolling processes having total reduction of 81%, the maximum average plastic strain ratio was obtained with the distribution of reduction of 50%—62%, and the planar anisotropy decreased with increasing 2nd cold reduction.

(111)[2 $\bar{1}\bar{1}$] recrystallized texture was obtained after the (112)[1 $\bar{1}$ 0] component became the main texture of the cold rolled matrix. (011)[100] texture and (001)[1 $\bar{1}$ 0] texture respectively affected r_{90} and r_0 with a disproportionality to their small volume fraction. With increasing cold reduction, the (111)[2 $\bar{1}\bar{1}$] texture increased in volume fraction while the (011)[100] texture decreased.

The high earing tendency of double cold rolling processed sheets was due to high r_{90} value by development of (011)[100] texture. The formation of six ears on drawing by sheet reduced 86% is the result of both a strong (111)[2 $\bar{1}\bar{1}$] and a weak (112)[1 $\bar{1}$ 0] + (112)[1 $\bar{1}$ 0] \pm 15 ND textures.

초 록

압연공정의 변화에 따른 17%Cr 웨라이트 스텐레스강판의 재결정집합조직이 Deep-drawability에 미치는 영향을 1) 극점도분석(Pole Figure Analysis), 2) 인장시험에 의한 소성변형비측정, 3) 컵

* 서울대·工大·金屬工學科·教授

**서울대 大學院生

드로잉 (Cup Drawing)에 의한 귀거동(Earing Behavior)을 관찰하여 연구하였다. 단일냉간압연공정에서 냉간압연율이 증가함에 따라 Deep-drawability는 증가하고 높은 평균소성변형비와 낮은 평면이방성을 갖는 이상적인 조건은 압연율 86%에서 얻었다. 전체압연율이 81%인 2중냉간압연공정에서 평균소성변형비는 압연율분포, 50%—62%에서 최대이고, 평면이방성은 2차냉간압연율이 증가함에 따라 감소하였다. (112)[110] 성분이 냉간압연집합조직의 주 성분일 때 (111)[211] 성분이 재결정집합조직의 주 성분이 되었다. (011)[100]과 (001)[110] 집합조직성분은 체적분율이 낮아도 각각 γ_{90} 값과 γ_{45} 값에 가장 큰 영향을 미친다. 냉간압연율이 증가함에 따라(111)[211] 성분의 체적분율은 증가하고 (011)[110]성분의 체적분율은 감소하였다. 이중냉간압연공정으로 제조된 판재의 심한 귀형성은 강한 (011)[100] 집합조직성분에 의하여 γ_{90} 값이 증가하기 때문이다. 압연율 86% 판재의 컵드로잉시 6개의 귀형성은 강한(111) [211] 집합 조직과 약한 (112) [110] 및 (112) [110] $\pm 15^\circ$ ND 집합조직의 발달로 γ_{45} 값이 급격히 증가한 결과이다.

1. 서 론

Deep-drawability는 판재의 제조공정에 따라서 발달되는 집합조직에 큰 영향을 받는다. 판재는, 냉간압연시 각 결정들이 압연방향에 대하여 특정한 방향으로 회전하여 냉간압연집합조직이 형성되고 재결정어닐링시 방향성을 갖는 핵의 형성(oriented nucleation mechanism), 또는 핵의 성장 속도의 방향성(oriented growth mechanism)에 따라서 재결정집합조직이 형성된다¹⁾. 판재의 이방성(anisotropy)의 척도를 나타내는 소성변형비(plastic strain ratio: $\bar{\gamma} = \epsilon \text{ width} / \epsilon \text{ thickness}$)는 판재의 집합조직에 따라 달라진다²⁾. 집합조직이 형성된 판재는 소성변형비가 면(plane)의 방향에 따라 변하므로 압연방향에 대하여 0° , 45° , 90° 방향의 소성변형비를 측정하여, 판재의 수직이방성(normal anisotropy)을 나타내는 평균소성변형비 [$\bar{r} = (\gamma_0 + 2\gamma_{45} + \gamma_{90}) / 4$]와 평면이방성(planar anisotropy)을 나타내는 [$\Delta r = (\gamma_0 + \gamma_{90} - 2\gamma_{45}) / 2$]을 계산할 수 있다. 다이프로잉(deep-drawing)시, r 값이 높을수록 드로잉깊이가 증가하고³⁾, 귀형성거동(earing behavior)을 나타내는 Δr 값이 0에 가까울수록 귀의 높이는 낮아진다⁴⁾.

BCC 결정구조를 갖는 철(iron)은 [111]방향으로 강도가 가장 높고 [110], [100]순으로 강도가 낮아진다. 그러므로 {111} 집합조직(cube on corner texture)을 갖는 판재는 소성변형비가 높아 deep-drawability가 양호하고 {100} 집합조직(cube on face texture)을 갖는 판재는 소성변형비가 낮아 deep-drawability가 나쁘다^{4,5)}.

판재의 재결정집합조직은 결정구조, 합금성분, 압연율, 압연온도, 열처리 조건 등에 따라 변하므로 집합조직을 조절(texture control)하여 deep-drawability를 향

상시키는 연구가 저탄소강판(low carbon steel sheet)에 대하여 광범위하게 이루어 졌다^{3,4,6,7,8)}.

본 실험에 사용된 17%Cr 웨라이트 스텐레스강은, 웨라이트(ferrite) 특성을 갖고 가공경화속도가 낮아 저탄소강과 비슷한 가공성(formability)을 갖으며, 내식성과 가공성이 오스테나이트 스텐레스강보다 나쁘지만 값이 저렴하여 용도가 점차 증가하고 있다.

시판용(commercial) 17%Cr 웨라이트 스텐레스 강판의 deep-drawability에 관한 연구는 발표된 문헌이 거의 없고 최근에 실험실적으로 제조된, Ti, Nb, Al, 등의 합금원소를 소량첨가한 저침입형(low interstitial) 17%Cr 웨라이트 스텐레스강(C% < 0.015%, N% < 0.015%)의 deep-drawability를 향상시키는 연구⁹⁻¹²⁾가 보고되었으나 그 실험결과를 C%가 0.07~0.13%인 시판용 17% Cr 웨라이트 스텐레스강에 적용할 수 없었다.

본 실험에서는 압연공정의 변화에 따른 시판용 17% Cr 웨라이트 스텐레스강판의 재결정집합조직이 deep-drawability에 미치는 영향을 극점도분석(X-ray pole figure analysis), 소성변형비 측정 컵드로잉(cup drawing)에 의한 귀형성거동을 관찰하고 소성변형비의 변화와 집합조직과의 관계를 고찰하여 deep-drawability를 향상시키는 적절한 압연공정을 세우는데 실험목적을 두었다.

2. 실험 방법

2.1 실험재료

본 실험에서는 두께 3.7mm의 시판용 AISI 430 열간압연판재를 냉간압연 및 재결정어닐링하여 실험재료로 사용하였으며 성분은 Table 1과 같다.

냉간압연 및 열처리는 단일냉간압연공정(single cold rolling process)으로 압연율 60%, 75%, 81%, 86%,

Table 1. Chemical Analysis wt %

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.08	0.56	0.35	0.026	0.09	16.8

90%로 냉간압연 후 830°C에서 3 min. 동안 salt bath에서 등온어닐링하여 공냉하였고, 이중냉간압연 공정(double cold rolling process)으로 1차압연율 40%, 50%, 60%, 70%로 냉간압연한 후 전체압연율이 81%가 되도록 2차압연율을 각각 69%, 62%, 53%, 36%로 냉간압연하였다. 1차압연과 2차압연 사이의 중간어닐링은 830°C에서 5 min.간, 2차압연 후의 최종어닐링은 830°C에서 3 min.간 salt bath에서 등온어닐링 후 공냉하였다.

냉간압연은 직경 127mm 실험용 압연기에서 하였고, 판재의 표면부와 중심부의 집합조직이 균일하도록 압연시 윤활제를 충분히 사용하였으며⁸⁾, 매 패스(pass)마다 압연방향을 반대로 하였다(reverse rolling).

냉간압연율 60%, 73%, 81%, 86%, 90%의 단일냉간압연공정으로 제조된 판재를 각각 S₁, S₂, S₃, S₄, S₅로 정하고 압연율 분포가 70%~36%, 60%~53%, 50%~62%, 40%~69%의 2중압연공정으로 제조된 판재를 각각 D₁, D₂, D₃, D₄로 정한다.

2.2 극점도

극점도는 극점도 측정장치를 부착한 RIGAKU의 3 kw 디프랙토미터(diffractometer)와 MoK α (35kV—15mA)를 사용하여, Shultz 반사법¹³⁾과 Decker 투과법¹⁴⁾으로 (200)면에 대하여 측정하였으며, 일부는 반사법($\alpha=20\text{deg}-90\text{deg}$) 만으로 측정하였다.

판면에 평행한 {110}, {200}, {112}, {222} 성분(component)의 적분강도(integrated intensity)는 디프랙토미터를 사용하여, 역극점도 측정법¹⁵⁾으로 측정하였다.

2.2.1 극점도측정용 시편

각 판재에서 떼어낸 시편을 (45% H₂O, 35% HNO₃, 15% HCl, 10% HF) 용액에서 화학연마한후, 시편면이 평탄하도록 No. 400~No. 1000 연마지에서 연마하고 최종적으로 (60% H₃PO₄—40% H₂SO₄) 용액에서 전해연타를 하여 두께 0.05~0.13mm로 만들었다.

그러므로 측정된 회절강도는 시편의 중심부위(mid-thickness)에서 측정되었다.

2.2.2 표준 시편

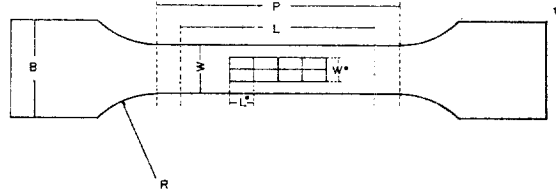
시료와 같은 재료를 출질(filing)로 200 mesh 이하의 분말을 만들고 이를 630°C에서 1시간동안 Ar 분위기어닐링을 하여 방향성이 없는 표준시편을 만들

었다.

극점도측정용 시편에서 측정된 회절강도는 표준시편의 회절강도에 대한 비율로서 극점도에 기록하였다.

2.3 소성변형비 측정

각 판재에서 압연방향에 대하여 0°, 45°, 90° 방향으로 Fig.1과 같은 인장시편을 만들어, 표점거리



$$L=50\text{mm} \quad P=60\text{mm} \quad W=12.5\text{mm}$$

$$R=20\text{mm} \quad B=20-30\text{mm} \quad L^{\circ}=W^{\circ}=5\text{mm}$$

Fig.1 Tensile specimen for plastic strain ratio measurement.

(gauge length)내에 한변이 5 mm인 사각형 4 개를 표시하였다.

인장시험은 25 ton Instron에서 1 mm/min의 변형속도로 (cross head speed) 연신을 18%가한 후 중단하여 균일한 변형(homogeneous yielding)을 주었다. 인장시험 전후의 시편에 표시한 사각형의 길이와 폭은, 1/1,000mm까지 측정할 수 있는 배율 50배의 광학 측정기로 측정하였다.

소형변형비는 (1)식으로 계산하였다.

$$r = I_{\star}(W_0/W_f) / I_{\star}(L_f \times W_f / L_0 \times W_0) \quad (1)$$

:W₀와 L₀는 인장시험 전의 사각형의 폭과 길이이고, W_f와 L_f는 인장시험 후 사각형의 폭과 길이이다.

2.4 컵 드로잉

Erichsen 만능성형시험기를 사용하여 직경 10cm원판을 직경 5 cm펀치(punch)로 드로잉 하였으며 펀치 속도는 150 mm/min로 하였고 윤활제는 그리스(grease)를 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 소성이방성

830°C에서 3 min.간 어닐링한 각 판재는 ASTM 인도 번호 7~8의 완전 재결정조직이 되었다.

단일냉간압연공정에서 냉간압연율이 소성이방성에 미치는 영향을 Fig.2와 Fig.3에 나타냈다. 냉간압연율이 증가함에 따라 r₄₅ 값은 서서히 증가하여 압연율

80% 이상에서 급격히 증가되었다.

다이프로밍의 척도인 r 값은 압연율 60%에서 0.94로부터 90%에서 1.16까지 소폭 증가하였다. 증가폭이 작은 이유는 r_{90} 값이 냉간압연율이 증가함에 따라 감소하기 때문이다.

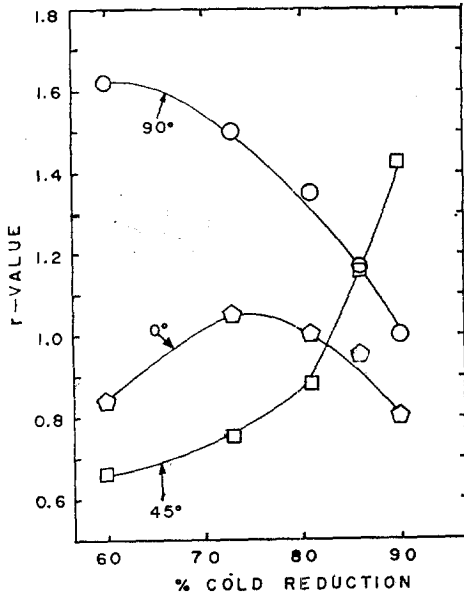


Fig. 2 Effect of cold reduction on the individual r -values of commercial 17%Cr ferritic stainless steel for single cold rolling process.

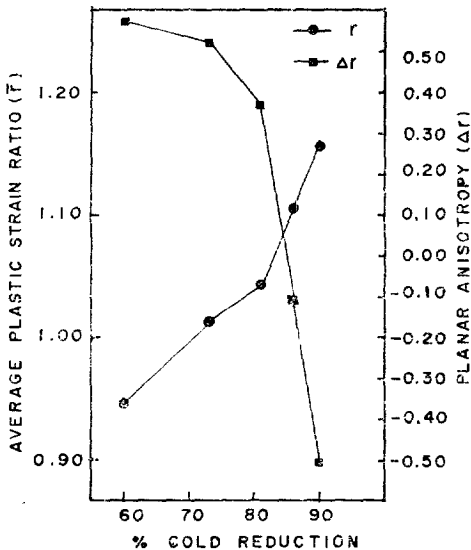


Fig. 3 Effect of cold reduction on the average plastic strain ratio and the planar anisotropy of commercial 17%Cr ferritic stainless steel for single cold rolling process.

귀형성거동을 결정하는 Δr 값은 냉간압연율이 증가함에 따라 60%에서 0.57로 부터 90%에서 -0.51로 급격히 감소하여 약 84%에서 0이 되었다.

컵드로밍에 의하여 관찰된 귀형성거동을 Fig. 4와 Table 2.에 나타냈다.

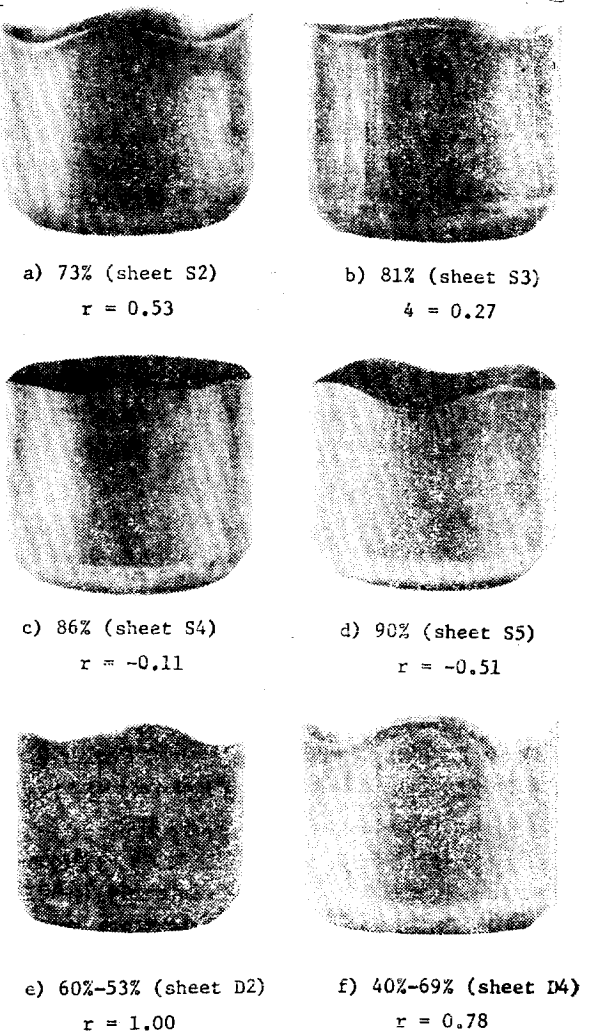


Fig. 4 Demonstration of effect of cold reduction on earing behavior of commercial 17%Cr ferritic stainless steel.

r_{45} 값이 r_{90} 값과 r_0 값 보다 낮은 판재 S_1, S_2, S_3 는 압연방향에 대하여 0° 와 90° 방향으로 4개의 귀가 형성되었으며 $r_{45} \approx r_{90} > r_0$ 인 판재 S_4 는 $0^\circ, 56^\circ, 130^\circ$ 방향에 6개의 대단히 작은 귀가 형성되었고 r_{45} 값이 r_{90} 과 r_0 보다 큰 판재 S_5 는 50° 와 133° 방향으로 4개의 귀가 형성되었다. 소성변형비가 클수록 다이프로밍시 컵의 벽에서 두꺼워지는 데 대한 저항력이 크므로 보통 r 값

Table 2 Summary of Deepdrawability Parameters

Sheet	Cold Reduction, %	γ	Δr	Earing Behavior			
				No.	Direction, deg	Height (mm)	
					Max.	Avg.	
S ₁	60	0.94	0.55	4	0.90	4.5	3.8
S ₂	73	1.01	0.53	4	0.90	4.3	3.7
S ₃	81	1.04	0.27	4	0.90	2.7	1.8
S ₄	86	1.11	-0.11	6	0.56, 130	2.0	1.5
S ₅	90	1.16	-0.51	4	50, 133	4.0	3.6
D ₁	70-35	1.24	0.86	4	0.90	5.0	4.1
D ₂	60-53	1.27	1.00	4	0.90	5.2	4.2
D ₃	50-62	1.30	0.97	4	0.90	5.0	4.1
D ₄	40-69	1.24	0.78	4	0.90	4.8	4.0

이 큰 방향으로 귀가 형성된다. 저탄소 강판에서 $\Delta r > 0$ 일때 ($0^\circ, 90^\circ$ 방향에, $\Delta r < 0$ 일때는 45° 방향에 4개의 귀가 형성된다고 알려졌다⁴⁾.

Godenow와 Held¹⁶⁾는 Ti를 첨가한 저탄소 강판에 대한 귀형성거동을 냉간압연율에 따른 재결정집합조직의 변화와 관련시켜 $0^\circ, 90^\circ$ 방향에 4개의 귀형성은 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 성분에서 기인하고 압연율 88%에서 $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ 방향의 6개의 귀형성은 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 성분

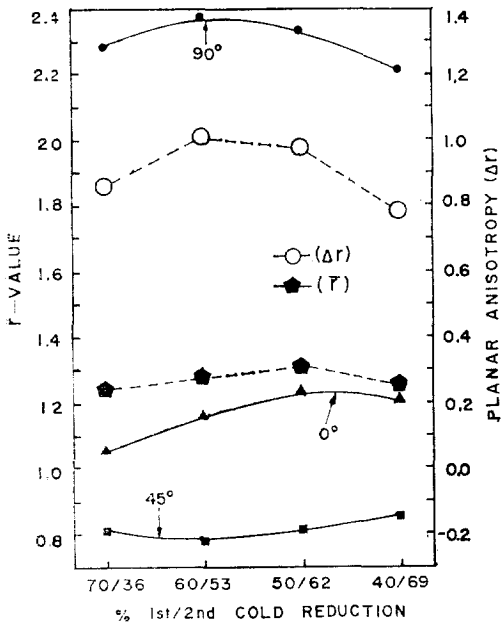


Fig. 5 Effect of the distribution of cold reduction between 1st and 2nd stages on the r value, γ and Δr value of commercial 17% Cr Ferritic Stainless steel for double cold rolling process.

이 $\{111\} \langle 123 \rangle$ 성분에서 의하여 부분적으로 대체될과 관계가 있다고 보고하였다. R. M. Davidson은 저철입형 18Cr-2Mo 화이트 스테리스강의 가공성에 관한 연구⁹⁾에서 냉간압연율 85% ($\Delta r = -0.02$)에서 $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ 방향의 6개의 귀형성은 강한 $\{111\} [2\bar{1}1]$ 성분과 약한 $\{112\} [1\bar{1}0]$ 성분에서 기인한다고 설명하였다. 본 실험결과에 대한 고찰은 뒤에 집합조직과 관련시켜서 하기로 한다.

이중냉간압연공정에서 압연율분포에 따른 소성이방성의 변화는 Fig.5와 같다. 이중냉간 압연공정으로 제조된 판재는 γ_{90} 값이 매우 높아, 전체압연율이 같은 판재 S₃ 보다 γ 값이 높지만, Δr 값이 크게 증가하여 "귀"가 매우 높았다. 평균소성변형비는 압연율분포 50%~62%에서 최대이고, 2차 냉간압연율이 증가함에 따라, γ_{90} 값은 감소하고 γ_{45} 값이 증가하여, Δr 값은 감소하였다.

3.2 집합조직

단일냉간압연공정에서 각판재의 냉간압연집합조직을 Fig. 6에 (200)극점으로 나타내었다. 냉간압연율 60% 일때 (001)[1 $\bar{1}0$] 성분이 강하게 형성되고 $\{111\} [2\bar{1}1]$ 성분이 $\{111\} [1\bar{1}0]$ 및 $\{112\} [1\bar{1}0]$ 성분을 향하여 퍼지며 형성되었다. 냉간압연율 73%일때 $\{111\} [2\bar{1}1]$ 성분은 매우 약해지고 $\{112\} [1\bar{1}0]$ 성분이 강해졌다. 냉간압연율 90%에서 $\{112\} [1\bar{1}0]$ 성분이 더욱 증강되어 $\{112\} [1\bar{1}0]$ 과 $\{111\} [1\bar{1}0]$, (001)[1 $\bar{1}0$]을 주성분으로 하는 RD// $\langle 110 \rangle$ 축 판재를 갖는 섬유집합조직 (fiber texture)이 형성되었다. Bennowitz¹⁷⁾은 BCC 결정구조를 갖는 열간압연판재를 냉간압연 하였을 때 낮은 냉간압연율에서 $\{111\} [2\bar{1}1]$ 집합조직이 형성되고 냉간압연율이 증가함에 따라 $\{111\} [2\bar{1}1]$ 성분이 $\{111\} [1\bar{1}0]$ 및 $\{112\} [1\bar{1}0]$ 성분으로 회전됨을 관찰하여 본 실험결과와 일치하였다.

판재, S₁, S₂, S₃, S₄, S₅의 재결정집합조직을 Fig.7에 (200)극점으로 나타내었고, 판면에 $\{111\}, \{110\}, \{100\}, \{112\}$ 성분의 냉간압연율에 따른 변화를 신속하고 정량적으로 관찰하기 위하여 역극점도 측정법으로 측정하고 결과를 Fig.8에 나타내었다.

판재 S₁의 재결정집합조직은 (001)[1 $\bar{1}0$]이 주성분으로, $\{111\} [2\bar{1}1]$ 과 (011)[100]성분이 부성분으로 구성되었고 냉간압연집합조직 (Fig.6 (a))에 비하여 (001)[1 $\bar{1}0$] 성분이 감소하였다. 냉간압연율 73%인 판재 S₂의 재결정집합조직은 (001)[1 $\bar{1}0$] 성분이 약간 감소하였고 $\{112\} [1\bar{1}0]$ 과 (011)[100] 성분이 $\{111\} [2\bar{1}1]$ 성분으로 회전하여 $\{111\} [2\bar{1}1]$ 성분이 주 성분으로 되었

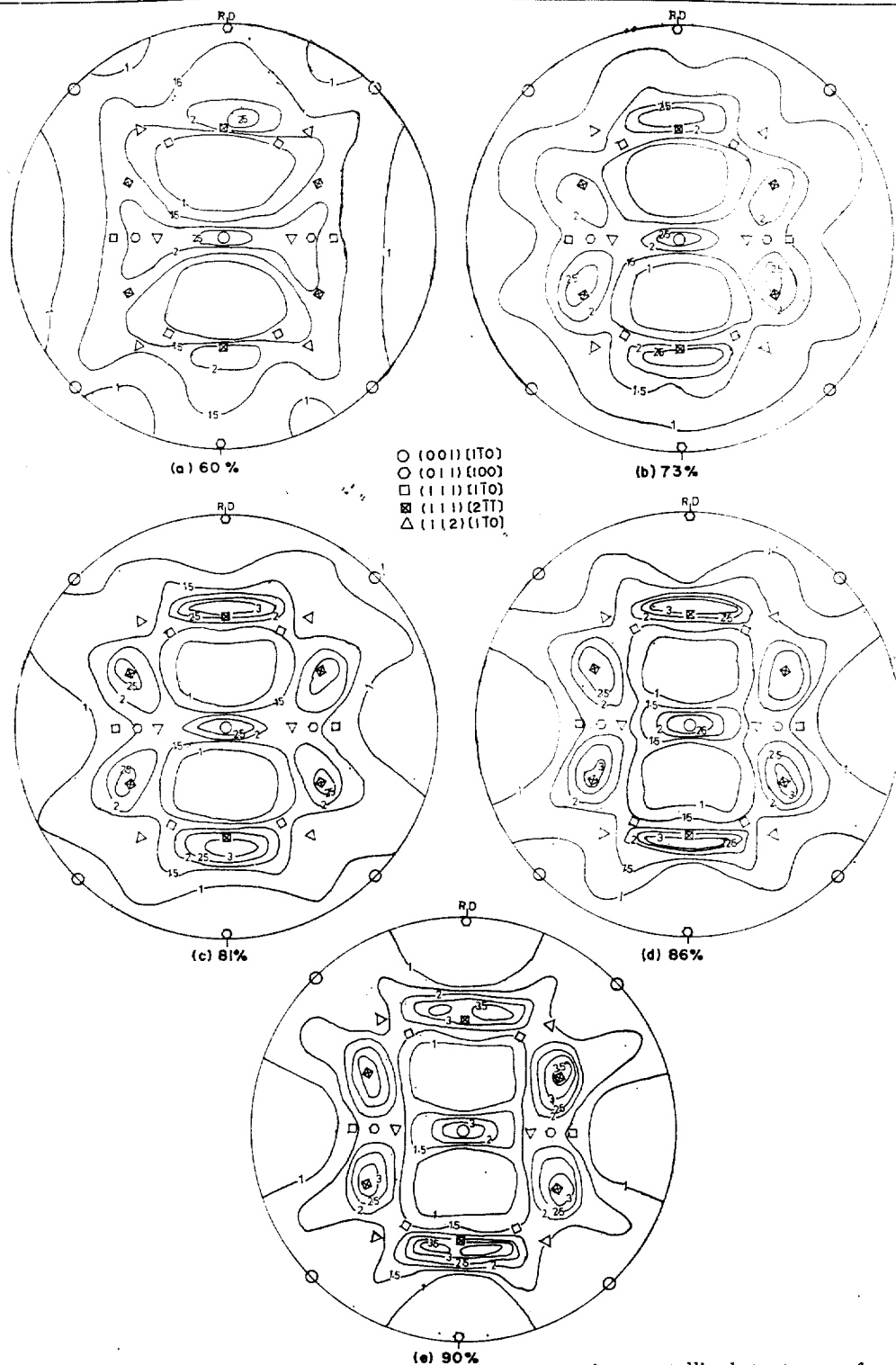
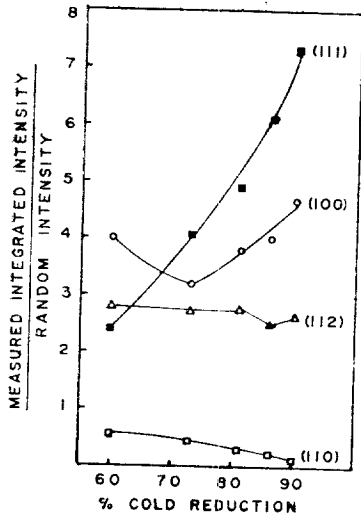


Fig. 7 Effect of cold reduction on the (200) pole figures of recrystallized textures of commercial 17%Cr ferritic stainless steel. (a) Sheet S₁; (b) Sheet S₂; (c) Sheet S₃; (d) Sheet S₄; (e) Sheet S₅.



발달되므로, (112)[110] 성분이 냉간압연집합조직의 주성분일때 (111)[211] 성분이 재결정집합조직의 주성분이 됨을 설명할 수 있다.

2중냉간압연공정에서 각 판재의 2차냉간압연집합조직을 (200)극점으로 Fig. 9에 나타냈다. 2차 압연을 36% 판재 D₁의 냉간압연집합조직은 1차 냉간압연을 이 비슷한 판재 S₂의 재결정 집합조직과 비교하여 (111)[211] 성분이 증가하였다. 이는 "낮은 냉간압연율에서 (111)[211] 성분이 냉연집합조직의 주성분이 된다"는 Bennewitz의 관찰과 잘 일치된다. 2차냉간압연율이 증가함에 따라 (111)[211] 성분이 (111)[110] 및 (112)

←Fig. 8 Effect of cold reduction on the relative intensity of various components of recrystallized texture in the commercial 17%Cr Ferritic Stainless Steel for single cold rolling process.

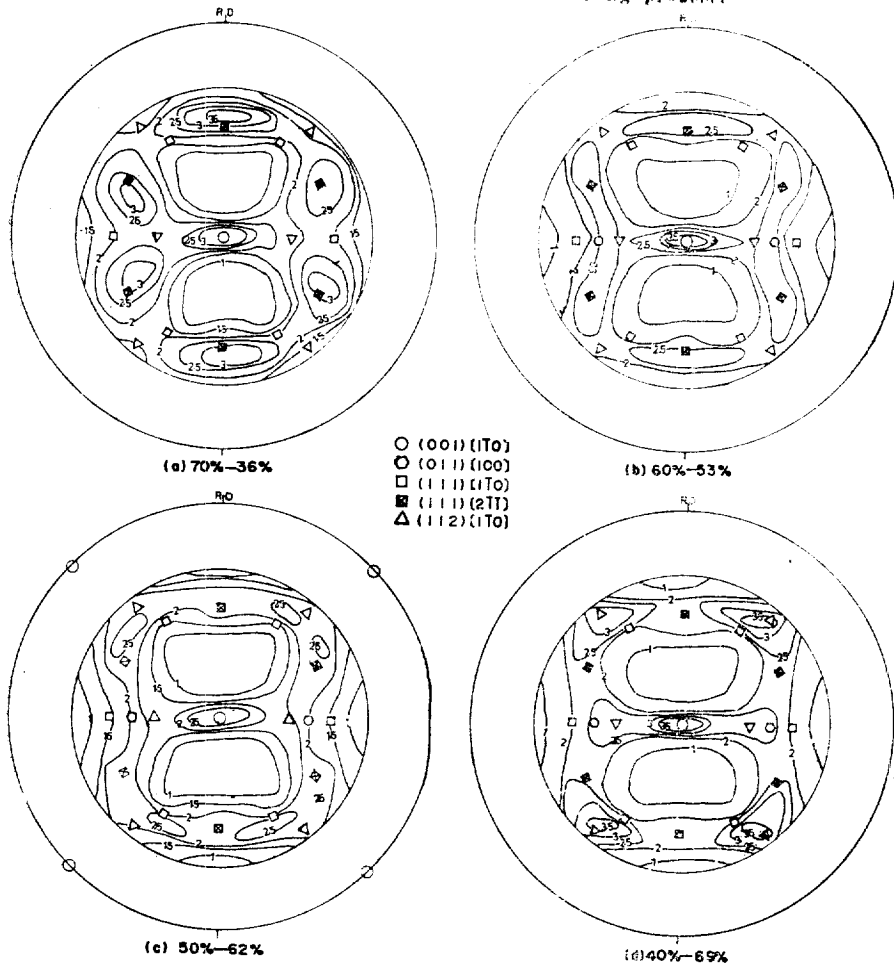


Fig. 9 Effect of the distribution of reduction between 1st and 2nd stages on the (200) pole figures of 2nd cold rolled textures of commercial 17%Cr ferritic stainless steel (a) Sheet D₁; (b) Sheet D₂; (c) Sheet D₃; (d) Sheet D₄.

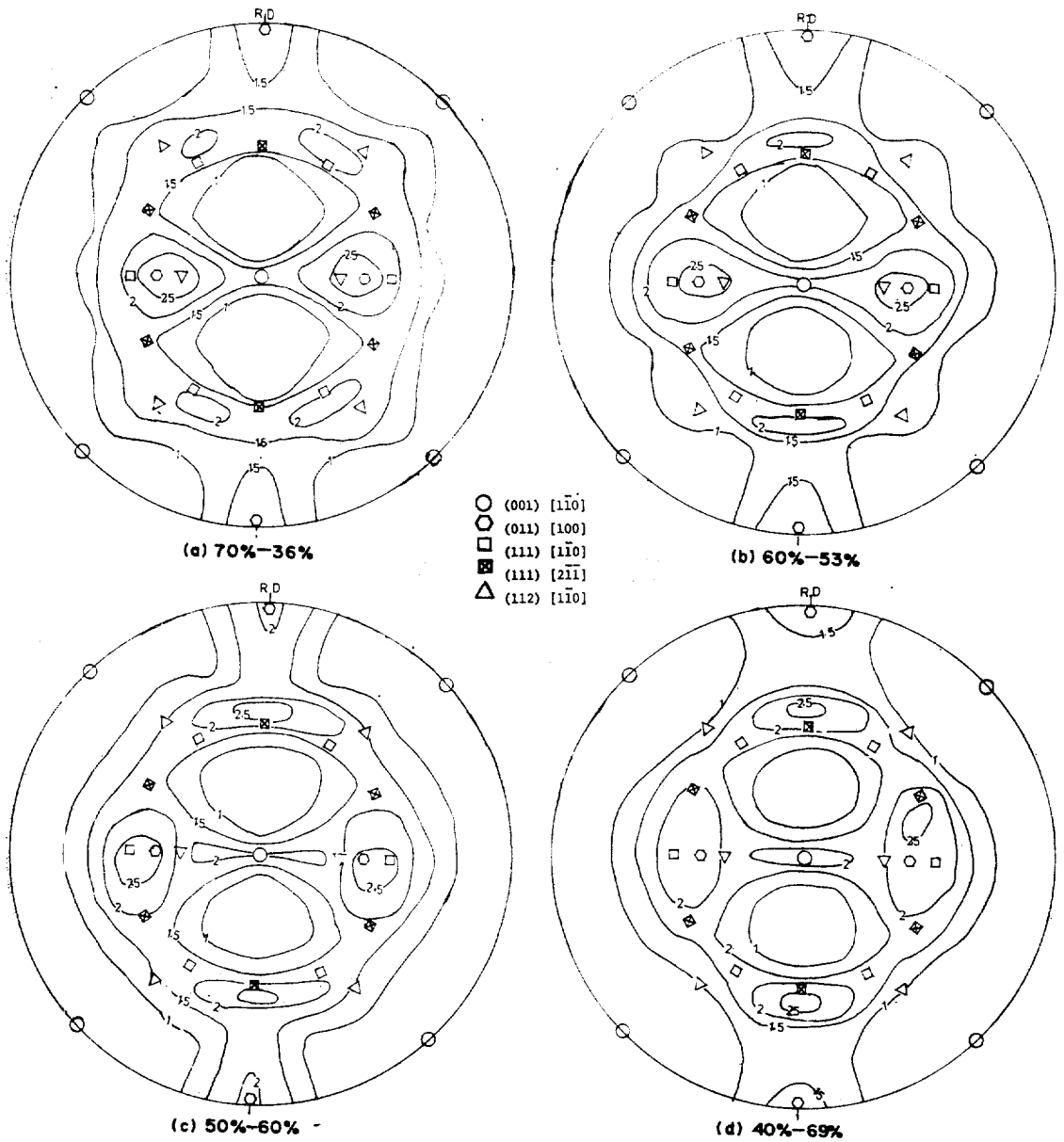


Fig. 10 Effect of the distribution of reduction between 1st and 2nd stages on the (200) pole figures of recrystallized textures of commercial 17%Cr ferritic stainless steel for double cold rolling process. (a) Sheet D₁; (b) Sheet D₂; (c) Sheet D₃; (d) Sheet D₄.

$[1\bar{1}0]$ 성분으로 회전하고 (001) $[1\bar{1}0]$ 성분이 서서히 증가하여 2차냉간압연을 69%인 판재 D₄의 냉연집합 조직은 (112) $[1\bar{1}0]$ 과 (001) $[1\bar{1}0]$ 을 주성분으로 하는 RD// $\langle 110 \rangle$ 축 판재를 갖는 섬유집합조직이 되었다.

이중냉간압연공정으로 제조된 각 판재의 재결정집합 조직을 (200)극점으로 Fig.10에 나타내었고 판재면에

평행한 {111}, {100}, {110}, {112} 성분의 압연율분포에 따른 변화를 Fig.11에 나타내었다.

2차냉간압연집합조직이, 강한 (111) $[2\bar{1}\bar{1}]$ 성분과 (001) $[1\bar{1}0]$ 성분으로 형성된 판재 D₁은 재결정어닐링 후 (001) $[1\bar{1}0]$ 성분은 감소하고 (011) $[100]$ 성분이 강하게 형성되었고, (111) $[1\bar{1}0]$ 및 (112) $[1\bar{1}0]$ 성분이 주 성분으

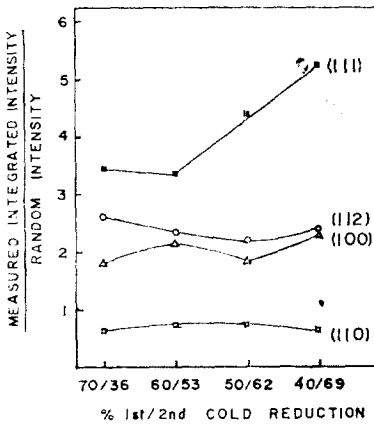


Fig. 11 Effect of the distribution of reduction between 1st and 2nd stages on the relative intensity of various components of recrystallized texture in the commercial 17%Cr Ferritic Stainless Steel for double cold rolling process.

로 형성되었다. 이는 (011)[100] 성분이 <110> 축 주위로 35° 회전한 위치에 있는 (111) [211] 성분으로부터 재결정되기 때문이다¹⁹⁾. 2차냉간압연율이 증가함에 따라 (111)[110]과 (112)[110] 성분이 (111)[211] 성분을 향하여 퍼지면서 감소하였고 (111)[211] 성분은 증가하였다. 전체 냉간압연율이 같은 판재 S₃의 재결정 집합조직과 비교하면 이중냉간압연공정으로 제조된 판재의 재결정집합조직은 (001)[110] 및 (111)[211] 성분이 감소하고 (011)[100] 성분이 강하게 형성됨을 알 수 있다.

냉간압연집합조직에 비하여 저결정집합조직이 {100} 성분이 감소하고 {111} 성분이 증가하는 원인은 {111} 결정입이 {100} 결정입보다 저축에너지(stored energy)가 높기 때문에 어닐링시 {111} 결정입이 {100} 결정입보다 쉽게 subgrain을 형성하여 결정입이 성장함에 따라 {111} 결정입이 {100} 결정입은 침식하기 때문이다⁴⁾.

3.3 소성이방성과 집합조직과의 관계

집합조직을 갖는 다결정체의 물리적 및 기계적 성질은 이상적인 집합조직을 갖는 단결정으로부터 얻은 실험결과를 다결정체에 적용하여 연구되었다.

Vieth와 Whiteley²⁰⁾는 Schmid 법칙에 기초를 두고, BCC 단결정에서 펜슬글라이드(pencil glide)와 제한된 슬립(restricted slip)을 고려하여 집합조직과 ... 집합조직을 갖는 다결정체의 물리적 및 기계적 성질

Backofen과 Hosford²²⁾는 Taylor 이론²³⁾ (least shear hypothesis)에 근거하여 γ 값을 판재의 집합조직의 함수로서 예측하는 방법을 제안하였다.

R.M. Davidson은 슬립계(slip system)를 {110} <111>계에 제한하고, Vieth와 Whiteley가 이상적인 집합조직에 대하여 계산한 γ 값과, 간략한 model을 세워, 집합조직과 γ 값의 관계를 설명하였다⁹⁾.

본 논문에서는 집합조직과 γ 값의 관계에 대한 Fukuda의 접근방법²¹⁾과, R.M Davidson이 제안한 model⁹⁾을 참조하여 집합조직과 γ 값의 관계를 설명하기로 한다.

BCC 금속의 슬립계를 {110}<111>계에 제한된 것으로 가정하여, 인장방향과 슬립면법선 및 슬립방향과 이루는 각을 각각 ϕ, λ , 라고 하면, 인장응력 σ 가 슬립계에 가해질 때, Schmid 법칙에 따라,

$$\tau = \sigma \cos\lambda \cos\phi \tag{2}$$

전단응력 τ 가 임계값에 도달될 때 슬립계가 작용하므로 12개의 {110}<111> 슬립계 중에서 Schmid 인자, $|\cos\lambda \cos\phi|$ 가 큰 슬립계가 작용할 확률이 가장 높다. Fukuda는 일축인장시험시 작용하는 슬립계의 전단변형율을 인장시편의 인장, 폭, 두께, 방향으로 구성된 3축 좌표로 변환(transformation)하여 (3)식을 유도하였다²¹⁾.

소성변형비 :

$$\gamma = \cos\phi_{1p} \cos\phi_{2p} / \cos\phi_{1d} \cos\phi_{2d} \tag{3}$$

: ϕ_{1p} 와 ϕ_{2p} 는 각각 슬립면의 법선과 인장시편의 폭 방향 및 두께 방향과 이루는 각이고 ϕ_{1d} 와 ϕ_{2d} 는 각각 슬립 방향과 인장시편의 폭 방향 및 두께 방향과 이루는 각이다.

판재의 집합조직은 서로 다른 체적분율(volume fraction)을 갖고, 독립적으로 작용하는 이상적인 집합조직들로 구성되었다고 가정하면, 집합조직성분 a, b, ...로 구성되는 판재의 γ 값은 (4)식으로 표현된다.

$$\gamma = \gamma_a f_a + \gamma_b f_b + \dots \tag{4}$$

: f_a 와 f_b 는 각각 a, b 성분의 체적분율이다.

17%Cr 웨라이트 스텐레스강판의 재결정집합조직을 구성하는 이상적인 집합조직성분에 대하여, 인장방향을 결정학적 방향으로 표현하고, 12개의 {110}<111> 슬립계에 대한 Schmid 인자와 크기가 같은 Schmid 인자를 갖는 슬립계의 개수를 계산하여 Table 3에 나타내었다.

이상적인 집합조직의 γ 값을 (3)식으로 계산하여 Table 4에 나타내었다.

이것이 이 값으로부터 기계의 γ 값이 가 이상적인 값을 결정학적 방향으로 표현하고, 12개의 {110}<111>

립계에 대한 각 집합조직 성분의, 슬립용이도를 나타내는 Schmid 인자의 크기와 작용할 수 있는 슬립계의 개수의 함수이다.

3.3.1 γ_{90} 과 집합조직과의 관계

Table 3에서 90° 인장방향에 대하여 (001)[100], (111)[2 $\bar{1}\bar{1}$], (011)[1 $\bar{1}0$] 성분이 최대 Schmid 인자 (0.41)을 갖는 4개의 {110}< $\bar{1}\bar{1}$ > 슬립계를 갖고 있다. Table 4에서 (001)[1 $\bar{1}0$]성분의 $\gamma_{90}=0$, (111)[2 $\bar{1}\bar{1}$] 성분의 $\gamma_{90}=2$, (011)[100] 성분의 $\gamma_{90}=\infty$ 이므로, (011)[100] 성분이 γ_{90} 증가에 크게 영향을 줄 것으로 예측할 수 있다.

Fig. 7의 단일냉간압연공정으로 제조된 판재의 재결정집합조직에서 냉간압연율이 증가함에 따라 (011)[100] 성분이 감소함을 관찰할 수 있고, 그 정량적인 양은 Fig. 8에서 {110} 성분의 변화로부터 간접적으로 알 수 있다. 그러므로 냉간압연율이 증가할수록 γ_{90} 값은 감소할 것으로 예측되어 Fig. 2의 실험결과와 잘 일치된다.

Fig. 8에서 {110}성분의 체적분율이 낮음에도 {011}

Table 3 Schmid Factors for {110}< $\bar{1}\bar{1}$ > Slip Systems in Several Ideal Textures

Angle of test specimen to Rolling direction	Schmid factor	No. of Ideal texture slip systems	
0 deg	0.41	(001) [1 $\bar{1}0$] 4	
		(111) [2 $\bar{1}\bar{1}$] 2	
		(011) [100] 8	
	0.27	(111) [2 $\bar{1}\bar{1}$] 4	
		0.50	(112) [1 $\bar{1}0$] 4
			(112) [1 $\bar{1}0$] 1
45 deg	0.47	(111) [2 $\bar{1}\bar{1}$] 1	
		(112) [1 $\bar{1}0$] 1	
	0.41	(001) [1 $\bar{1}0$] 8	
		0.37	(111) [2 $\bar{1}\bar{1}$] 2
		0.35	(011) [100] 2
		0.32	(112) [1 $\bar{1}0$] 1
0.29	(011) [100] 2		
	(112) [1 $\bar{1}0$] 1		
90 deg	0.41	(001) [1 $\bar{1}0$] 4	
		(111) [2 $\bar{1}\bar{1}$] 4	
		(011) [100] 4	
	0.27	(112) [1 $\bar{1}0$] 6	

Table 4 γ -Values of Various Ideal Textures

Ideal textures	γ_0	γ_{45}	γ_{90}
(001) [1 $\bar{1}0$]	0	1	0
(011) [100]	1	-0.15	∞
(111) [1 $\bar{1}0$]	2	∞	∞
(111) [2 $\bar{1}\bar{1}$]	∞	∞	2
(112) [1 $\bar{1}0$]	0.5	∞	1

[100] 성분은 γ_{90} 값에 크게 영향을 미침을 알 수 있다.

냉간압연율이 증가하였을 때 (111)[2 $\bar{1}\bar{1}$] 성분의 체적분율의 증가가 γ_{90} 값의 증가에 기여하는 영향은 γ_{90} 값을 감소시키려는 (001)[1 $\bar{1}0$] 성분의 체적분율 증가로 상쇄될 것으로 예측된다.

이중 냉간압연공정으로 제조된 판재의 γ_{90} 값이 높아 Δr 값이 크고 귀형성이 심한 것은 (011) [100] 성분이 재결정집합조직의 주성분이기 때문이다. (Fig. 10)

Fig. 5의 γ_{90} 변화와 Fig. 11의 {110} 성분의 변화 모양이 비슷함을 관찰할 수 있다. 이중냉간압연공정으로 제조된 판재는 단일 냉간압연공정으로 제조된 판재보다 (001)[1 $\bar{1}0$] 성분이 감소하여 더욱 높은 γ_{90} 값을 나타낼 것으로 예측되어 실험과 잘 일치된다.

3.3.2 γ_{45} 와 집합조직과의 관계

Table 3에서 45° 인장방향에 대하여 (112)[1 $\bar{1}0$], (111)[2 $\bar{1}\bar{1}$], (001)[1 $\bar{1}0$] 성분 순으로 Schmid 인자가 감소하지만 (001)[1 $\bar{1}0$] 성분이, 작용할 수 있는 슬립계가 8개이므로, γ_{45} 값에 큰 영향을 줄 것이다. Table 4에서 (112)[1 $\bar{1}0$]과 (111)[2 $\bar{1}\bar{1}$] 성분의 $\gamma_{45}=8$, (001)[1 $\bar{1}0$] 성분의 $\gamma_{45}=1$ 이다.

Fig. 2에서 냉간압연율이 증가함에 따라 γ_{45} 가 증가하는 것은 (111)[2 $\bar{1}\bar{1}$] 성분의 체적분율이 냉간압연율 증가에 따라 증가하기 때문이다(Fig. 10, Fig.11). 그리고 냉간압연율 80% 이상에서 γ_{45} 값이 급격히 증가하는 것은 (111)[2 $\bar{1}\bar{1}$] 성분의 증가뿐만 아니라, 판재 S₄와 S₅의 재결정집합조직에서 관찰된 약한 (112)[1 $\bar{1}0$] 및 (112)[1 $\bar{1}0$] $\pm 15^\circ$ ND 성분이 γ_{45} 증가에 기여하기 때문이다.

그러므로 γ_{45} 값의 급격한 증가로 인한 판재 S₄의 6개의 귀형성과 판재 S₅의 50° , 133° 방향의 4개의 귀형성은 강한 (111)[2 $\bar{1}\bar{1}$] 성분과 약한 (112)[1 $\bar{1}0$] 및 (112) [1 $\bar{1}0$] $\pm 15^\circ$ ND 성분에 기인한다.

판재 S₁과 S₂의 γ_{45} 값이 1보다 낮은 것은 (011)[100] 성분에 기인한다고 생각된다. (011)[100] 성분은 45° 인장방향에 대하여 Schmid 인자는 0.35지만 $\gamma_{45}=-0.15$ 이므로 γ_{45} 값을 낮추는데 크게 기여할 것으로 예

측되고, 압연율이 감소함에 따라, (011)[100] 성분이 증가한다.

이중냉간압연공정으로 제조된 판재의 r_{45} 값이 전체 압연율이 같은 판재 S_3 의 r_{45} 값보다 낮은 것은, (111)[2 $\bar{1}\bar{1}$] 성분의 체적분율이 판재 S_3 보다 작고, 비록(112)[$\bar{1}\bar{1}0$] 성분에 의한 r_{45} 값의 증가를 기대할 수 있으나 r_{45} 값을 낮추는 (011)[100] 성분이 재결정집합조직의 주성분임을 고려하여 이해될 수 있다(Fig.10).

Fig. 5의 r_{45} 변화와 Fig.11의 {111} 성분의 변화모양이 비슷함을 관찰할 수 있다.

3.3.3 r_0 와 집합조직과의 관계

Table 3과 Table 4에서 0° 방향에 대한 Schmid 인자와 r_0 값을 고려하면, (111)[2 $\bar{1}\bar{1}$] 성분은 r_0 값을 1보다 증가시키는데 기여하고 (001)[$\bar{1}\bar{1}0$] 성분은 r_0 값을 감소하는 데 기여함을 알 수 있다.

{110} <111> 슬립계에 대한 슬립의 용이 도는, 작용할 수 있는 슬립계의 개수가 (001)[$\bar{1}\bar{1}0$] 성분이 4개, (111)[2 $\bar{1}\bar{1}$] 성분이 2개이므로 r_0 값에 (001)[$\bar{1}\bar{1}0$] 성분이 크게 영향을 줄 것으로 예측된다.

Hoford와 Backofen은 {100} 성분의 r 값을 낮추는 영향은 {111} 성분의 r 값을 증가시키는 영향보다 4~5배 큰 것을 밝혔다²⁵⁾.

단일냉간압연공정으로 제조된 판재의 (001)[$\bar{1}\bar{1}0$] 성분의 체적분율의 크기는 $S_3 > S_1 > S_4 > S_3 > S_2$ 이므로 (Fig. 8 참조) r_0 값은 $S_2 > S_3 > S_4 > S_1 > S_5$ 로 예측되어 실험결과 (Fig. 2)와 잘 일치된다.

판재 S_4 와 S_5 에서 (111)[2 $\bar{1}\bar{1}$] 성분의 증가에 의한 r_0 의 증가는 (112)[$\bar{1}\bar{1}0$] 및 (112)[$\bar{1}\bar{1}0$]±15°ND 성분에 의하여 어느정도 상쇄될 것으로 예측된다.

이중냉간압연공정으로 제조된 판재의 r_0 값이 전체 압연율이 같은 판재 S_3 의 r_0 값보다 큰 것은 이중냉간압연공정으로 제조된 판재의 재결정집합조직에서 (001)[$\bar{1}\bar{1}0$] 성분이 약하기 때문이다.

이중냉간압연공정으로 제조된 판재의 집합조직에서 (011)[100] 성분의 체적분율이 크고, (011)[100] 성분의 $r_0=1$, 작용할 수 있는 슬립계가 8개임을 고려하면, (011)[100] 성분이 r_0 값에 큰 영향을 줄 것으로 예측된다.

4. 결 론

압연공정의 변화에 따른 17%Cr 웨라이트 스텐레스 강판의 재결정집합조직이 deep-drawability에 미치는 영향을 조사한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1) 단일냉간압연공정에서 냉간압연율이 증가함에 따라 평균소성변형비는 증가하고 평면이방성은 급격히 감소하여 냉간압연율 86%에서 높은 평균소성변형비와 낮은 평면이방성을 갖는 이상적인 압연조건을 얻었다.

2) 전체압연율이 81%인 이중냉간압연공정에서 평균소성변형비는 압연율분포 50%~62%에서 최대이고 평면이방성은 이차냉간압연율이 증가함에 따라 감소하였다.

3) (011)[100]과 (001)[$\bar{1}\bar{1}0$]집합조직성분은 체적분율이 낮아도 각각 r_{90} 값과 r_0 값에 가장 큰 영향을 미친다.

4) 냉간압연율에 따른 냉간압연집합조직의 변화는 Bennewitz 관찰과 일치하였다.

5) (112)[$\bar{1}\bar{1}0$] 성분이 냉간압연집합조직의 주성분일때 (111)[2 $\bar{1}\bar{1}$] 성분이 재결정집합조직의 주성분이 되었다.

6) 냉간압연율이 증가함에 따라 (111)[2 $\bar{1}\bar{1}$] 성분의 체적분율은 증가하고, (011)[$\bar{1}\bar{1}0$] 성분의 체적분율은 감소하였다.

7) 2중냉간압연공정으로 제조된 판재의 컵드로잉시 발생하는 심한 귀형성은 강한 (011)[100] 집합조직성분에 의하여 r_{90} 값이 증가하기 때문이다.

8) 냉간압연율 86%판재의 컵드로잉시 6개의 귀형성은 강한 (111)[2 $\bar{1}\bar{1}$] 집합조직과 약한 (112)[$\bar{1}\bar{1}0$] + (112)[$\bar{1}\bar{1}0$]±15°ND 집합조직의 발달로 r_{45} 값이 급격히 증가한 결과이다.

후 기

이 연구는 1979년도 과학재단 연구비의 보조를 받아서 수행하였다.

참 고 문 헌

- (1) Hsun Hu, R.S. Cline, and S.R. Goodman: Recrystallization, Grain Growth and Textures, ASM (1966) 295
- (2) R.S. Burns and R.H. Heyer: Sheet Met. Ind., **35** (1958)261
- (3) R.L. Whiteley : Trans. ASM, **52** (1960)154
- (4) D.J. Blickede : Trans. ASM, **61**(1968), 653
- (5) Hsun Hu:Texture, **1** (1974), 252
- (6) R.L. Whiteley and D.E. Wise : Flat Rolled Products, (1962), 47, Interscience, New York
- (7) R.M.S.B. Horta et al:JISI, **209** (1971), 169

-
- (8) J.F. Held : Trans. ASM, **239**(1976) 573
(9) R.M. Davidson : Met. Trans., **5** (1974), 2287
(10) R.M. Davidson : Met. Trans., **6A** (1975), 2243
(11) T. Swatani, et al : Trans. JISI, **18** (1978) 676
(12) T. Swatani, et al : Tetsu-to-Hagane, **63** (1977), 843
(13) L.G. Shultz : J. Appl. Phys., **20** (1949), 1030
(14) B.D. Cullity : Elements of X-ray Diffraction 1967, Addison-Wesley Pub. Co.,
(15) Hiroshi Takechi, et al : Trans. TMS-AIME, **242**(1968), 56
(16) R.H. Goodenow and J.F. Held : Met. Trans. **1**(1970), 2507
(17) J. Bennewitz : Arch.Eisenhuettenw.,**33**(1962), 393
(18) O. Akisue : J. Japan Inst. Metals, **40** (1976) 206
(19) H. Abe : Tetsu-to-Hagane, **52** (1966), 882
(20) R.W. Vieth and R.L. Whiteley : IDDRG Colloquim, 1964, London, Inst. Sheet Met. Eng.
(21) M. Fukuda : Trans. JISI, **8** (1968), 68
(22) W.F. Hosford, Jr. and W. A. Backofen : Fundamentals of Deformation Processing, Proceedings of the 9th Sagamore Conference, Syracuse Press, (1964) 259
(23) G.I. Taylor : Proc. Colloq. Deformation and Flow of Solids, Madrid (1955), 3-12
-