

## 構造用 金屬材料의 展性破壞에 對한 研究\*

金 興 植

材 料 工 學 科

(1980. 6. 10 접수)

### 〈要 約〉

構造用 金屬材料로서 오스테나이트 스테인레스 강판을 壓延方向에 대하여 여러가지 方向으로 引張試驗한 結果 상당한 量의 異方性이 檢出 되었다.

異方性은 變形速度와 引張方向에 따라 달라졌다. 異方性의 尺度인 平面塑性 變形比는 變形速度가 增加함에 따라 어떤 臨界變形速度 이상에서 급격하게 增加하였다. 이것은 塑性變形機構가 臨界變形速度에서 結晶粒果 미끄러짐으로부터 결정 슬립으로 變化되는 것을 의미한다.

넉킹이 시작될 때 확산넉킹 변형율( $\epsilon_f^*$ )과 加工硬化指數( $n^*$ ) 사이에는 아래와 같은 關係가 成立함을 塑性理論에 의하여 誘導 하였고 實驗에 의하여 確認하였다.

$$n^* = \epsilon_f^* + \text{상수}$$

部分的으로 軟化熱處理한 오스테나이트 스테인레스 壓延鋼板의 引張軸에 對한 破面角度는 異方성과 板材 두께가 增加함에 따라 增加하였다.

## Anisotropy of Mechanical Properties in Textured Structural Material\*

Heung Shik Kim

Dept. of Materials Science

(Received June 10, 1980)

### 〈Abstract〉

A reasonably high anisotropy was detected by tension tests with various tensile direction of austenitic stainless steel plate as a structural material.

Anisotropy was a function of strain rate and the degree between load axis and rolling direction of austenitic stainless steel plates. Plastic strain ratio which is reflective of anisotropy increased sharply at some critical strain rate with increasing strain rate. The operative deformation mechanism at this critical strain rate was considered to change from grain boundary sliding to crystallographic multiple slip.

Following expression between diffuse necking strain ( $\epsilon_f^*$ ) and the strain hardening exponent ( $n^*$ ) at plastic instability conditions was derived by the theory of plasticity and confirmed by experiment.

$$n^* = \epsilon_f^* + \text{constant}$$

The degree between load axis and fracture plane of partially softened austenitic stainless steel increased with increasing anisotropy and thickness of plate.

\*이 논문은 1979년도 문교부 학술연구 조성비에 의하여 연구된 것임.

## I. 서 론

소성변형이나 열처리 등으로 인한 금속재료의 우선방향과 기계적인 섬유상조직은 기계적 또는 자기적 성질에 이방성(anisotropy)을 갖게 한다는 사실은 오래전부터 잘 알려져왔고, 여러가지 금속재료에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다.

그러나 이방성에 관한 원인과 관련되는 여러가지 현상은 재료에 따라 그리고 가공도와 가공속도에 따라 그 값이 대단히 다양하게 변화하기 때문에 최근에는 이방성에 관한 정량적인 해석을 위하여 집합조직의 우선방향에 대한 결정방위분포 해석법(C. O. D. F. method)이나, 3차원 Euler 방위공간 해석법(E. O. S. method)<sup>(1,2)</sup> 등이 제시되고 있으며, 결정방위로 부터 기계적성질의 해석을 위한 간단한 방법에 대한 제안<sup>(3)</sup>이 시도되고 있다.

판재시편의 인장특성과 인장축과파 면사이의 각도에 영향을 주는 평면이방성(planar anisotropy)과의 상관관계<sup>(4)</sup>도 제안되고 있고, 이와 관련한 빅킹현상, 가공경화지수 등에 관한 연구<sup>(5)</sup>도 진행되고 있다.

이 방성은 이로운 경우도 있고 해로운 경우도 있다. 이로운 경우의 예로는 변압기에 사용하여 에너지 손실을 적게하는 규소강판의 자기적 이방성과 판재시편의 심교가공(deep drawability)의 향상등이 있으나 대부분의 경우에 있어서 이방성은 공업적으로 불리하다.

판재의 인성과 후관의 성형성을 향상하기 위하여 많은 노력이 경주되고 있는것은 바로 이와같은 이방성이 인성과 성형성에 불리한 영향을 주기 때문이다. 압연판재는 인장방향에 따라 항복강도, 인장강도 및 연신율과 파괴각도가 달라지는 것도 이상과같은 이방성에 그 원인이 있다. 이와같은 평면 이방성은 심교가공시 귀형성거동이 있기 때문에 불리하다.

그러므로 기계적 성질에 대한 이방성의 원인을 밝히는 것은 대단히 중요한 일이고, 이러한 원인으로서는 집합조직의 형성, 기계적 섬유상조직, 소지입자(matrix)에 묻혀있는 산화물이나 석출물 등의 제 2상 조직과 재료 내부결함, 합금원소 및 방향성 응고의 영향<sup>(6,7,8)</sup> 등이 있다. 심교가공에 사용되는 판재는 두께 방향의 강도가 변방향의 강도보다 크고 면에서

는 모든 방향으로 균일하게 쉽게 소성 변형이 일어나는 것이 이상적이다.

이와같은 두께 방향의 강도 비율은 판재시편의 인장시험시 두께 방향의 변형율( $\epsilon_3$ )과 폭방향의 변형율( $\epsilon_2$ )의 비율( $R$ )로써 알수있다.

$$R = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_3} \quad (1)$$

$\epsilon_2$ 와  $\epsilon_3$ 는 각각 인장시편의 폭방향과 두께 방향의 진 변형율(true strain)이다.

$R$ 이 크면 심교가공능력이 크고  $R$ 이 작으면 심교가공능력이 낮다.

평균 소성변형비( $\bar{R}$ )는 다음 (2)식과 같이 정의되고 이것은 판재의 수직이방성(normal anisotropy)을 나타내는 것으로 심교가공(deep drawing)의 척도로 사용된다.

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (2)$$

$R_0$ ,  $R_{45}$ ,  $R_{90}$ 은 각각 압연방향, 압연방향과 45° 압연방향과 90°되는 방향으로의 소성변형비이다.

평균 소성변형비( $\bar{R}$ )가 클수록 심교가공의 깊이는 증가한다. 판재면 위에서 방향에 따른 소성변형비의 변화는 평면이방성(planar anisotropy)의 척도인  $\Delta R$ 로서 식(3)과 같이 정의되며  $\Delta R$ 값은 판재의 심교가공시 귀형성(earring) 거동을 나타낸다.

$$\Delta R = \frac{R_0 + R_{90} - 2R_{45}}{2} \quad (3)$$

이방성의 척도인 소성변형비( $R$ )와 인장방향과 파괴면 사이의 각도( $\theta$ )사이의 관계는 이방성 재료의 평면응력 항복곡선으로부터 구할수있다.<sup>(4)</sup>

$$\tan(90-\theta) = -\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_2 + \epsilon_3} = \frac{R}{1-R} \quad (4)$$

$$R^* = \frac{\tan(90-\theta)}{1 - \tan(90-\theta)} \quad (5)$$

인장변형시 단면적의 국부적 감소에 의한 변화(softening)가 가공경화율 보다 크게 될 때 빅킹이 시작된다.

초기에는 단면적의 국부적 감소가 시편전체에 걸쳐 균일하게 퍼져 나가지만(diffuse necking), 최후에는 어느 한 부분에 변형이 집중되어 국부적인 빅킹(local necking)이 일어나고 파괴에 도달하게 된다.

확산 빅킹(diffuse necking)이 시작되는 조건은 식(6)과 같고 국부적 빅킹이 시작되는 조건은 식(7)과 같다.

$$\left( \frac{d\sigma}{d\epsilon} = \sigma (\epsilon_I^*) \right) \quad (6)$$

$$\left( \frac{d\sigma}{d\epsilon} = \frac{\sigma}{2} (\epsilon_{II}^*) \right) \quad (7)$$

확산 백킹이 일어나는 신율을  $\epsilon_I^*$ 라 하였고 국부적 백킹이 일어나는 신율을  $\epsilon_{II}^*$ 라 하였다.

가공경화 지수( $n$ )는 식(8)에 의하여 정의되고 응력변형률 곡선을  $\sigma = K\epsilon^n$ 이라고 가정 하였을때 확산 백킹이 일어나는 변형율( $\epsilon_I^*$ )과의 이론적인 관계를 확립 하기위한 연구가 계속 되고있다.

본 실험에서는 변형속도와 인장방향에 따른 이방성과 가공 경화지수 파면각도의 변화를 측정하여 이들의 상호관계를 정량적으로 확립하고자 한다.

## II. 실험

### 1. 실험재료

두께 3.5mm AISI 304 스테인레스 강판을 20단 압연기에서 80% 냉간압연하였다.

냉간압연 후 재료두께는 0.75mm 이었고, 냉간압연후 열처리하는 1070°C 연속소둔로에서 64초동안 유지하고 즉시 공냉하였다.

냉간압연 판재로부터 인장시편을 3가지 방향으로 채취하였고, 열처리된 판재로부터 인장시편을 Table 1과 같이 3가지 방향으로 채취하였으며 편이상 시편에는 Table 1과 같이 번호를 부여하였다.

실험에 사용한 AISI 304 스테인레스 강판의 합금 원소성분은 Table 2와 같다.

Table 1. 시편 채취방향과 시편번호

시편명칭	압연방향	압연방향과 45° 방향	압연방향과 90° 방향
냉간압연시편	11. 12. 13. 14. 15. 16	21. 22. 23. 24. 25. 26	31. 32. 33. 34. 35. 36
연화처리시편	41. 42. 43. 44. 45. 46	51. 52. 53. 54. 55. 56	61. 62. 63. 64. 65. 66

Table 2. AISI 304 스테인레스 강판의 성분

성분	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
함유량 (%)	0.06	0.55	1.10	0.027	0.006	8.67	18.50

### 2. 인장시험

인장 특성과 동시에 소성변형비( $R$ )를 측정하기 위하여 시편 표면에 4mm 정사각형 20개를 그림 1과 같이 전기 화학적 방법으로 그릿드를 만들었다.

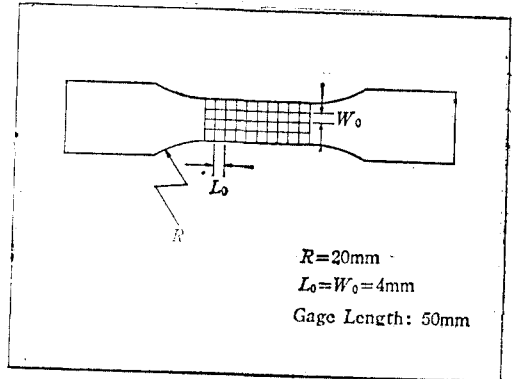


Fig 1. Tensile Specimen for Plastic Strain Ratio Measurement

인장시험은 시편이 파괴에 도달할 때까지 하였으며 냉간 압연 시편의 실험은 시편이 파괴에 도달하기 까지의 연신율이 4%미만이므로 변형속도를  $1.67 \times 10^{-4}/\text{sec}$ ,  $1.67 \times 10^{-3}/\text{sec}$ ,  $1.67 \times 10^{-2}/\text{sec}$ 로 하였으며, 연화처리된 시편의 연신율은 40%이상 이므로 변형속도를  $1.67 \times 10^{-3}/\text{sec}$ ,  $1.67 \times 10^{-2}/\text{sec}$ ,  $1.0 \times 10^{-1}/\text{sec}$ 로하여 실험하였다.

### 3. 실험 결과 분석

진변형율( $\epsilon$ )과 진응력( $\sigma$ )은 공칭변형율( $e$ )과 공칭응력( $s$ )으로부터 다음식에 의하여 구하였다.

$$\epsilon = \ln(e+1) \quad (9)$$

$$\sigma = s(1+e) \quad (10)$$

실제 진변형율과 진응력 곡선은 식(9)와 식(10)에 의하여 하중과 변형량 곡선에 의하여 도해적인 방법으로 구하였다.

가공 경화지수( $n$ )는 식(11)에 의하여 진변형율—진응력 곡선에서 직접 구하였으며 확산백킹( $\epsilon_I^*$ )과 국부백킹( $\epsilon_{II}^*$ )은 식(6)과 식(7)에 의하여 도해적인 방법으로 구하였다.

$$n = (\epsilon/\sigma)(d\sigma/dE) \quad (11)$$

시편의 인장축과 파괴면 사이의 각도( $\theta$ )는 파괴된 시편에서 직접 측정 하였다.

소성 변형비를 측정하기 위한 폭방향 변형과 길이 방향변형은 시편이 파괴된 후 파괴면에서 백킹의 영향을 많이 받지않은 부분의 그릿드 변형을 광학 현미경으로 측정하여 평균값을 취하였다.

소성변형비( $R$ )는 식(12)에 의하여 산출하였다.

$$R = \frac{\ln\left(\frac{W_0}{W_f}\right)}{\ln\left(\frac{L_f}{L_0} \times \frac{W_f}{W_0}\right)} \quad (12)$$

식(12)는 소성변형중 체적 변화가 없다고 가정 한 것으로  $W_0$ 는 실험전 폭방향의 그릿드 길이이고  $L_0$ 는 실험전 길이방향의 그릿드 길이이다.

$W_f$ 와  $L_f$ 는 각각 시편 파괴후 폭방향과 길이방향의 그릿드 길이이다.

### III. 실험 결과

#### 1. 연화 열처리한 압연판재의 실험결과

인장축을 압연방향(시편번호 43), 압연방향과  $45^\circ$ (시편번호 53) 및 압연방향과  $90^\circ$ (시편번호 94) 되게 취한 시편을 변형속도  $1 \times 10^{-1}/\text{sec}$ 로 하여 인장 시험한 결과를 Fig.2에 도시하였다.

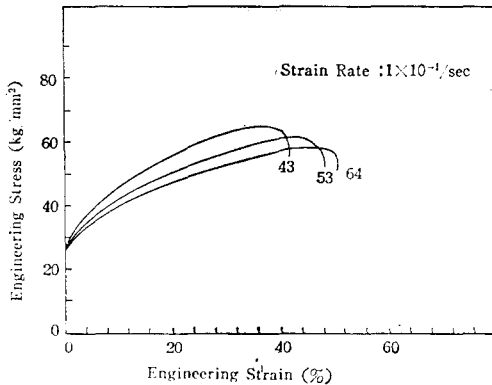


Fig. 2. Engineering Stress-Strain Curves of Softened AISI 304 Stainless Steels.

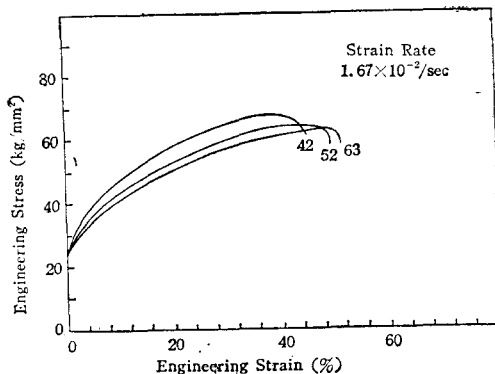


Fig. 3. Engineering Stress-Strain Curves of Softened AISI 304 Stainless Steels.

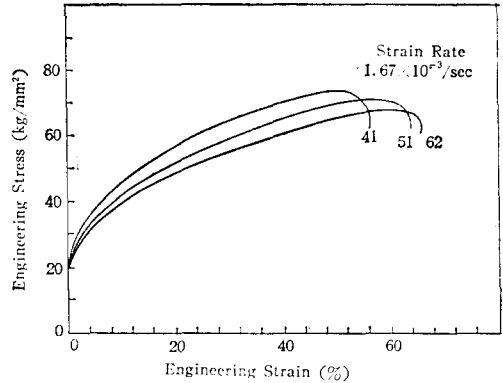


Fig. 4. Engineering Stress-Strain Curves of Softened AISI 304 Stainless Steels.

Fig.2에서 Fig.4에 도시한 실험치로부터 인장특성은 변형속도와 시편 채취방법에 따라 달라진다는 것을 알 수 있다.

연신율(elongation)은 변형속도가 증가할수록 감소하고 시편 채취각도가 증가할수록 증가하였다. 항복강도( $\sigma_0$ )는 큰 차이가 보이지 않았으나 인장강도는 변형속도가 증가할수록 그리고 시편 채취각도가 증가할수록 증가하였다. 이방성의 척도인 소성변형비( $R$ )와 파괴각도( $\theta$ )를 시편채취각도와 변형속도에 따라 Table 3에 표기하였다.

소성 변형비( $R$ )는 시편 채취각도가  $45^\circ$ 일때 가장 높았고  $90^\circ$ 일때 가장 낮았으며 변형속도가 증가할수록 증가하였다.

시편 파괴각도( $\theta$ )는 변형속도가  $1.67 \times 10^{-2}/\text{sec}$ 일때 가장 컸으며 시편 채취각도가 증가할수록 증가하는 경향이였다. Table 4에는 부분적으로 연화처리한 시편의 두께와 파괴각도( $\theta$ )와의 관계를 표기한 것으로 파괴각도( $\theta$ )는 두께가 증가할수록 컸다.

$R'$ 는  $\theta$ 값으로부터 식(5)를 이용하여 구한 소성 변형비이다.

Fig.5와 Fig.6에는 식(9), (10), (11)을 이용하여 구한 가공 경화지수( $n$ )를 도시 하였다. 가공 경화지수는 변형율에 따라 가장 민감하게 변화하였고, 변형율 25%까지는 시편 채취방향에 따른 변화는 없었다.

확산 벡킹( $\epsilon_{I^*}$ )과 국부벡킹( $\epsilon_{II^*}$ )은 식(6)과 (7)에 의하여 도해적인 방법으로 구한 것이고 가공경화지수  $n^*$ 은 확산벡킹( $\epsilon_{I^*}$ )을 이용하여 Fig.5와 Fig.6에서 얻은 값으로 식(8)과는 일치하지 않음을 보여준다.

Table 3. 연화 열처리한 재료의 인장 실험결과

실험 방법			측 정 치					계 산 치			
시편채취 각도(deg)	시편 번호	변형속도( $\epsilon^{-1}$ ) ( $\text{sec}^{-1}$ )	연신율 (%)	0.2% 항복 강도 ( $\text{kg/mm}^2$ )	인장강도 ( $\text{kg/mm}^2$ )	R	$\theta$	$R^*$	$n^*$	$\epsilon_f^*$ (%)	$\epsilon_B^*$ (%)
0	41	$1.67 \times 10^{-3}$	44.2	28.5	77.0	0.89	60.0	1.37	0.46	41.9	43.1
	42	$1.67 \times 10^{-2}$	36.5	28.9	70.0	0.90	62.2	1.12	0.36	33.6	35.1
	43	$1 \times 10^{-1}$	34.1	31.1	69.0	1.17	61.5	1.19	0.32	31.4	32.8
45	51	$1.67 \times 10^{-3}$	48.1	28.1	74.0	1.09	60.2	1.34	—	—	—
	52	$1.67 \times 10^{-2}$	39.5	28.5	68.0	1.09	62.5	1.09	0.45	36.4	38.3
	53	$1 \times 10^{-1}$	38.8	30.9	67.0	1.42	60.0	1.37	—	—	—
90	62	$1.67 \times 10^{-3}$	50.0	27.9	72.0	0.72	62.0	1.14	—	—	—
	63	$1.67 \times 10^{-2}$	40.9	28.2	66.0	0.69	66.0	0.80	0.41	39.0	40.6
	64	$1 \times 10^{-1}$	40.4	30.6	66.0	0.86	61.5	1.19	—	—	—

Table 4. 재료의 두께와 파괴각도

재료두께 (mm)	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.5	2.0	2.2	2.5
파괴각도 (deg)	60.6	61.3	62.2	62.5	63.9	64.5	64.9	66.4	68.8	71.4	90	90	90

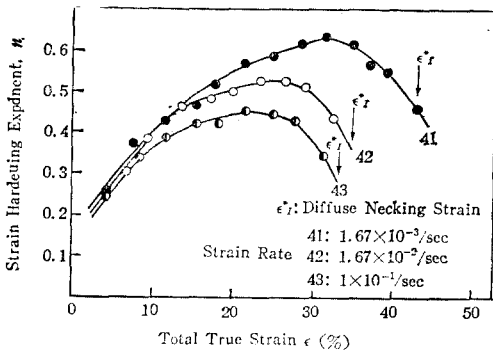


Fig 5. Strain Hardening Exponent  $n$  vs. True Strain as a Function of Strain Rate

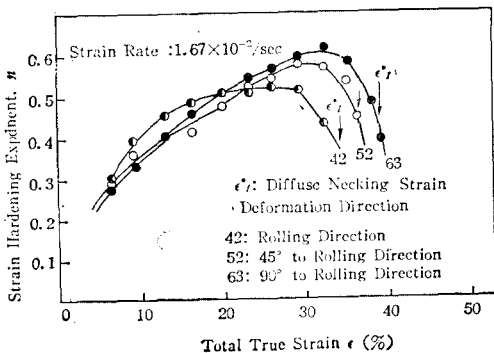


Fig 6. Strain Hardening Exponent  $n$  vs. True Strain as a Function of Deformation Direction.

2. 80% 냉간 압연한 판재의 실험결과

시편 채취방향 및 변형속도에 따른 80% 압연판재의 인장 시험 결과를 Fig.7에 도시 하였다.

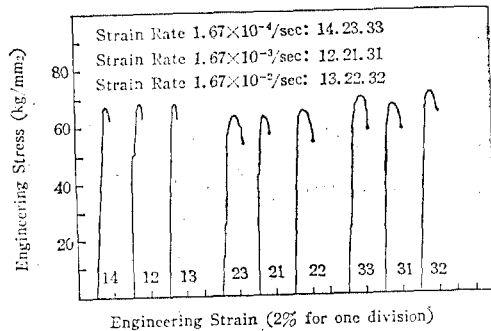


Fig 7. Engineering Stress-Strain Curves of Cold Rolled (80%) AISI 304 Stainless Steels.

연신율은 변형속도에 거의 영향을 받지않았고, 시편 채취각도가 증가할수록 약간 증가하였다.

인장 강도는 시편 채취각도 45°에서 가장 낮았다. 파괴각도는 시편 채취각도가 증가 할수록 감소 되었으나 시편 채취각도 90°에서 파괴각도가 90°로 되면서 취성파괴(brittle fracture)를 일으켰다.

시편 채취각도가 90°인 경우 시편이 파괴되기 전에 파면 근처에 벡킹마크( $\theta'$ )가 발생하였다.

이 벡킹마크( $\theta'$ )는 약 56도 정도이었다.

Table 5. 80% 냉간압연판재의 실험결과

실험 방법		측 정 치				
시편채취 각도(deg)	시편 번호	$\epsilon^{\circ}(\text{sec}^{-1})$	$\theta'(\text{deg})$	$\theta(\text{deg})$	Elongation (%)	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )
0	14	$1.67 \times 10^{-4}$	—	63.7	1.4	72.7
	12	$1.67 \times 10^{-3}$	—	61.5	1.4	73.0
	13	$1.67 \times 10^{-2}$	—	61.7	1.4	73.4
45	23	$1.67 \times 10^{-4}$	—	58.5	2.8	68.1
	21	$1.67 \times 10^{-3}$	—	58.5	1.8	67.4
	22	$1.67 \times 10^{-2}$	—	58.5	2.4	69.1
90	33	$1.67 \times 10^{-4}$	57.0	90	2.4	75.0
	31	$1.67 \times 10^{-3}$	55.7	90	2.2	71.3
	32	$1.67 \times 10^{-2}$	57.7	90	2.0	74.0

#### IV. 결 토

##### 1. 연화 열처리한 압연판재의 인장특성

변형속도가 느릴수록 신장율과 인장강도가 높다는 것을 Fig. 8과 Fig. 9에 도시 하였다. 특히 변형속도  $1.67 \times 10^{-3}/\text{sec}$  이상에서 신장율과 인장강도가 급격하게 감소함을 볼수있다.

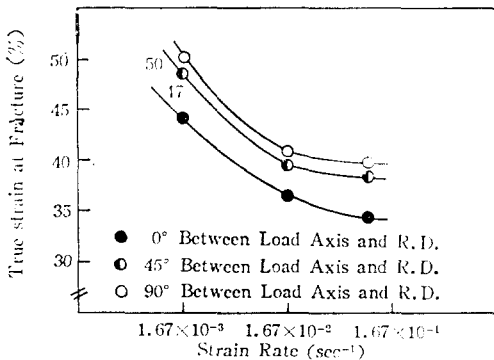


Fig 8. Elongation ( $\epsilon$ ) as a Function of Initial Strain Rate of Partially Softened AISI 304 Stainless Steel.

변형속도  $1.67 \times 10^{-3}/\text{sec}$ 에서 신장율과 인장강도가 높은 것은 이 변형속도 영역에서 동적인 변형시효(dynamic strain aging)의 효과로는 생각되지 않는다. 이것은 실험온도가 상온이기 때문이며 변형속도  $1.67 \times 10^{-3}/\text{sec}$  이상에서 신장율과 인장강도가 급격히 떨어지는 것은 오스테나이트, 스텐레스강이

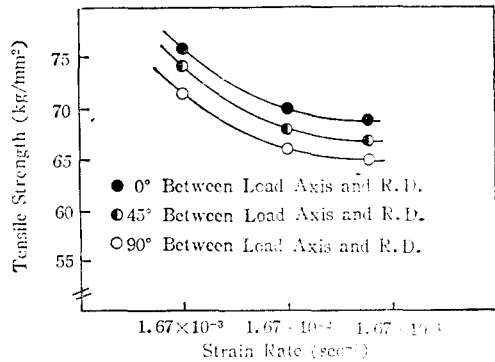


Fig 9. Tensile Strength as a Function of Initial Strain Rate of Partially Softened AISI 304 Stainless steel.

가공경화가 잘되는 재료이기 때문이다. 즉, 변형속도가 높을 경우에는 재료의 소성유동(plastic flow)이 어려워 재료내부에 전위집적으로 인해서 발생한 미소 파괴핵이 소멸(crack healing)이 잘 되지 않고 그대로 성장함으로써 재료가 쉽게 파괴되고, 변형속도가 느릴 경우에는 가공경화가 국부적으로 집중되어 발생한 파괴핵(micro-crack)이 충분한 소성유동(plastic flow)에 의하여 소멸되는 일이 커짐으로써 신장율이 높아지고 변형경화(strain induced hardening)에 의하여 인장강도가 높아지는 것으로 해석할수 있겠다.

시편 채취각도에 따른 신장율과 인장강도는 Fig. 8과 Fig. 9에 보여주는 바와 같이 신장율은 시편 채

취각도가 90°일때 가장 높고 인장강도는 0°일때 가장 높다. 인장강도가 시편 채취각도 0°일때 가장 높은것은 이 재료의 기계적인 이방성(mechanical fibering)과 관계가 있는것 같고 신장율이 시편 채취각도 90°일때 가장 높은것은 이 재료의 소성특성과 관련이 깊은 것으로 사료된다.

시편 채취각도가 0°인 시편은 기계적인 이방성을 주는 섬유상의 방향이 인장방향에 일치하고, 연화처리로 인하여 완전히 제거되지 못한 가공경화가 섬유상 방향과 일치하며 결정경계 미끄러짐에 의한 경화현상까지 합세하여 인장강도를 높인것으로 생각된다.

신장율이 시편 채취각도 90°에서 가장 높은것은 연화처리로 인한 가공효과와 제거가 충분치 못하여 결정내부에 결정 이방성이 남아있고 섬유상으로 인한 기계적 이방성이 재료에 남아있기 때문이다.

가공경화 지수( $n$ )는  $\sigma = k\epsilon^n$ 에서  $n$ 이 상수일때  $n^* = \epsilon_1^*$ 가 되지만 Fig. 5와 Fig. 6에서 보여주는 바와 같이 가공 경화지수( $n$ )는 변형율( $\epsilon$ )에 따라 달라지고 확산네킹( $\epsilon_1^*$ ) 및 국부네킹( $\epsilon_{II}^*$ )에서 변형율이 일정하므로 네킹이 일어나는 조건에서 가공경화지수( $n^*$ )는 다음식과 같이 정의 할수있겠다.

$$n^* = \epsilon_1^* + c_1 \quad (13)$$

식(13)은 다음과같이 유추할 수 있다.

네킹 바로 직전까지 시편 전 길이에 대한 하중변화는 없다. 따라서 하중을  $p = \sigma A$ 라 하면

$$\delta p = \sigma \delta A + A \delta \sigma = 0 \quad (14)$$

단약 응력( $\sigma$ )의 변화를 식(15)와 같이 가정한다면 네킹점에서의 가공 경화지수( $n^*$ )는 식(19)과 같이 되어 식(13)과 같은 결과를 얻는다.

$$\delta \sigma = \left( \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon} \right)_{\epsilon} \times \delta \epsilon + \left( \frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\epsilon}} \right) \times \delta \dot{\epsilon} \quad (15)$$

$$n^* = \epsilon_1^* + m^* \cdot \left[ \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln \epsilon} \right]_{\epsilon_1^*} \quad (16)$$

$$m^* = \left[ \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right]_{\epsilon_1^*}$$

$$\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln \epsilon} \leq 0$$

Fig. 10은 네킹 스트레인 ( $\epsilon_1^*$ )과 네킹점에서의 가공경화지수( $n^*$ )와의 관계를 도시한 것으로 식(13)과 오차범위에서 일치함을 보여주고 있다. 이때  $C$ 의 값은 0.06이다.  $C$ 의 값은 초기 변형속도나 시편 채취방향에 무관한것 같으며 재료시편시 고려하여야 할 여러가지 요소가 있을수 있으므로 식(17)과

는 일치하지는 않을것으로 생각된다.

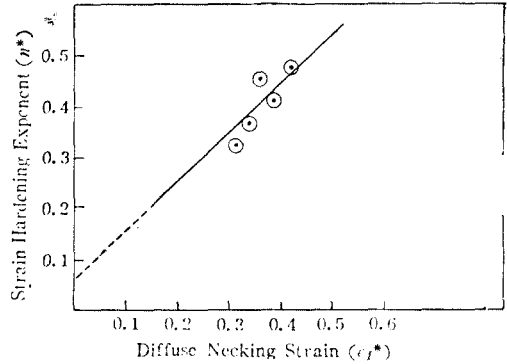


Fig. 10. Strain Hardening Exponent as a Function of Diffuse Necking Strain of Partially Softened AISI 304 Stainless Steel.

$$C = m^* \times \left[ \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln \epsilon} \right]_{\epsilon_1^*} \quad (17)$$

오스테나이트 스테인레스강의 유동곡선은  $\sigma = k\epsilon^n$  식을 사용하였을때, 가공경화지수가 일정하지 않으므로 가공 경화지수를 일정한 값으로 하여주기 위하여 많은 연구(9,10,11)가 시행되었지만 가공 경화지수를 일정하게 하기위한 완전한 식은 아직 없는 것 같다.

## 2. 연화 열처리한 압연판재의 이방성

슬립에 의한 결정방위 변화로 인한 이방성을 결정 이방성이라 하고 결정경계 미끄러짐에 의한 기계적 섬유상(mechanical fibering)을 기계적 이방성이라 한다.

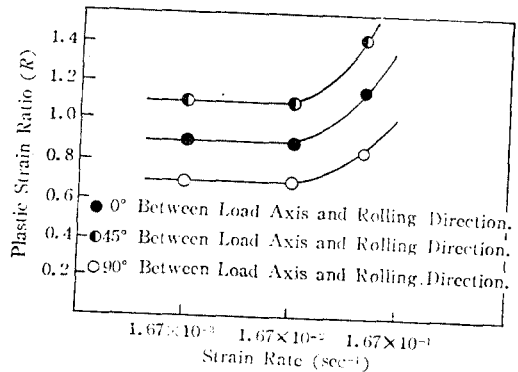


Fig. 11. Measured Plastic Strain Ratio ( $R$ ) as a Function of Initial Strain Rate of Softened AISI 304 Stainless Steel.

Fig. 11에서 보는바와 같이 시편 채취각도가 90° 일 때 이방성이 가장크고 시편 채취각도가 0°와 45° 일때 이방성이 가장작다. 시편 채취각도에 따라 소성변형비가 차이가 나는것은 작동되는 변형 이방성의 차이를 보이는 것으로 이것은 기계적인 섬유상 조직에 의한 이방성과 결정학적 방위(texture)에 의한 이방성의 함수가 된다.

결정학적 이방성은 극점도 사진으로부터 결정방위 분포 해석법(CODF method)으로 구할 수있다<sup>(1)</sup> 따라서 측정된 이방성으로부터 결정학적 이방성과 기계적인 이방성을 분리하여 측정할 수 있다.

변형속도가 1×10<sup>-1</sup>/sec 이상이 될때 소성변형비가 급격하게 증가한다. 이것은 변형속도가 느릴때에는 길경경계 미끄러짐(G. B. sliding)에 의한 기계적 이방성이 변형의 작동기구(operative mechanism)가 되고 변형속도가 커지게 되면 복합슬립(multiple slip)에 의한 방위(texture)변화가 변형의 작동기구(operative mechanism)가 됨을 시사 하는 것이다.

평균 소성변형비( $\bar{R}$ )를 측정하여 귀형성거동( $\Delta R$ )에 관하여 고찰하여보면 Table 6과 같다. 변형속도가 증가할수록 귀형성거동이 심하다는 것을 Table 6으로부터 알 수 있다.

Table 6. 변형속도와 귀형성 거동

변형속도(sec <sup>-1</sup> )	$\bar{R}$	$\Delta R$
1.67×10 <sup>-3</sup>	0.95	-0.29
1.67×10 <sup>-2</sup>	0.94	-0.30
1.00×10 <sup>-1</sup>	1.22	-0.40

3. 80% 냉간압연재의 인장특성

Fig. 7에서 보는바와 같이 80% 냉간 압연재의 신장율은 대단히 적어 항복강도와 인장강도가 거의 일치한다.

신장율은 압연방향 시편이 가장 낮고 인장강도는 45°에서 가장 낮다. 이것은 결정학적 이방성이 대단히 강력하다는 것을 시사한다. 채취각도는 시편 채취각도 90°에서 가장 낮다. 시편 채취각도 90°인 시편의 파괴는 파괴각도 90°에서 일어난것으로 이것은 취성파괴(brittle fracture)를 반영한 것이다. 파괴가 일어나기 전에 재료는 시편 표면에 백킹선(56°)이 명백하게 나타났다.

단약 취성파괴(brittle fracture)가 일어나지 않았더라면 시편 채취각도 90°인 시편의 인장강도는

측정치보다 약간더 높은 것으로 생각된다. 면심입방정(FCC) 재료의 우선방향(preferred orientation)은 (112)[111], (112)[112], (110)[001] 등이다. 재료의 항복강도 (60)는 식(18)과 같으므로 항복강도는 슬립계(slip system)의 평균 Taylor factor( $\bar{M}$ )에 의하여 결정된다.

$$\sigma_0 = \bar{M} \cdot K \tag{18}$$

$K$ : 입체 전단강도

$\bar{M}$ : 평균 Taylor factor

면심 입방정 재료의 우선방위(preferred orientation)에 대한 Taylor factor는 Table 7과 같다.

우선방위(preferred orientation)의 체적비율(Vo-

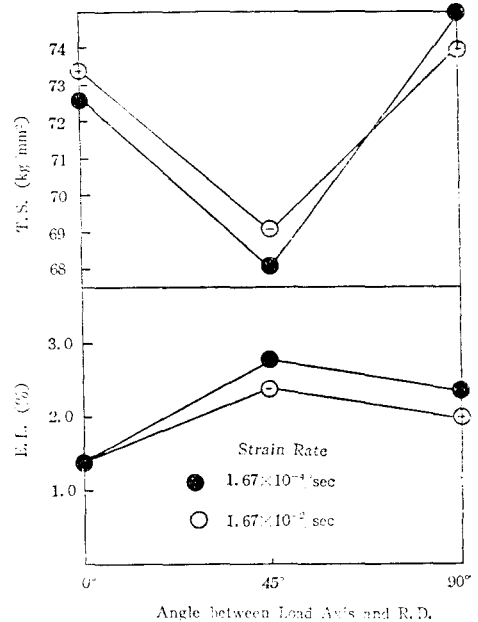


Fig. 12. Result of Tension Test of 80% Cold Rolled AISI 304 Stainless Steel.

Table 7. 면심 입방정 재료의 우선방위에 대한  $\bar{M}$

		평균 Taylor factor ( $\bar{M}$ )				
시편채취 각도		0°	22.5°	45°	67.5°	90°
우선방위	(100) [001]	3.6742	4.0825	7.3484	4.0825	3.6742
	(112) [ $\bar{1}\bar{1}1$ ]	7.3486	5.4147	4.0825	3.9918	7.3484
	(110) [ $\bar{1}\bar{1}2$ ]	5.5114	7.3486	6.0124	7.3486	7.3486
	(110) [001]	3.6742	5.5114	7.3486	6.0124	7.3486



lume fraction)을 (112)[ $\bar{1}\bar{1}2$ ]가 0.5, (110)[ $\bar{1}12$ ]가 0.4, (110)[001]이 0.1이라 하여 시편 채취각도 별로  $\bar{M}$ 를 계산하여 도시하면 Fig. 12의 경우 인장강도 값과 거의 일치한다.

4. 시편의 두께와 파면각도

재료의 모든 조건이 평면변형 조건을 만족시키는 경우에 백킹선은 55°를 이루어야 한다.

80% 냉간압연하고 시편 채취각도가 90°인 경우 백킹선이 56°에서 나타났다는 것은 평면변형(plane strain) 조건은 잘 만족시키는 예가 되겠다. 그러나 완전소둔한 재료는 재료가 비교적 얇을지라도 백킹이 일어나는 백킹선주위의 응력 상태가 곧 3차원 응력상태가 되어 파괴는 거의 90°에서 일어났다. 또한 재료의 이방성이 비교적 클 때에도 재료의 파괴는 55°근처에서 일어나지 않는다.

Table 4는 80% 가공 경화재료를 약간 연화처리(partial softening)하였을때, 두께에 따라 파면의 각도가 변화되고 있음을 보여준다.

두께 0.3mm 시편의 파면각도가 55°에서 풀기된 것은 이 재료의 이방성과 백킹이 발생한 후 3차원 응력상태로 인한 것이다.

재료가 점차 두꺼워짐에 따라 파면각도가 증가하는 것은 3차원 응력상태의 영향에 의한 것으로 두께 2.0mm 이상에서는 파면각도가 90°가되고 완전한 전단변형에 의하여 파괴가 일어났다.

시편 폭의 양쪽에서 백킹에 의한 파괴가 시작되고 이때 파괴방향의 각도는 약 61°정도가 되고 최후에는 시편폭의 중앙에서 파면이 90°가되는 brittle fracture를 일으켰다. 그러나 두께 2.0 이상에서는 파면각도( $\theta$ )는 90°이고 전단변형이 두께방향으로 45°되게 일어나 전단파괴 되거나 cup-and-cone 파괴가 되었다.

V. 결 론

오스테나이트 스테인레스강의 인장특성과 이방성을 조사한 결과 변형속도가 느릴 때 신장율과 인장강도가 높았고 소성변형비는 낮았다.

변형속도가 증가하면 귀형성거동이 증가하였으며 또한 시편 채취각도에 따라 신장율과 인장강도가 달라졌으며 변형속도에는 무관하게 시편 채취각도에 따라 일정한 소성 변형비( $R$ )의 차이가 있었다.

80% 냉간 가공재는 시편 채취각도가 90°일때 신장율과 인장강도가 가장 높았다. 이상과 같은 현상을 분석하여 몇가지 중요한 결론을 정리하면 다음과 같다.

① 확산백킹(diffuse necking)이 일어나는 조건에서 변형율( $\epsilon_1^*$ )과 가공 경화지수( $n^*$ ) 사이에는 다음과 같은 관계가 성립하였다.

$$n^* = \epsilon_1^* + \text{상수}$$

② 결정경계의 미끄러짐에 의한 기계적 이방성은 변형속도가 느릴 때 작동되고 슬립(slip)에 의한 결정학적 이방성은 변형속도가 클 때 작동된다.

③ 변형속도가 증가하면 귀형성(earing)거동이 증가하였고 시편 채취각도에 따라 일정한 소성변형비의 차이가 있었다.

이 소성변형비의 차이는 기계적 이방성과 결정학적 이방성의 함수이다.

④ Taylor factor ( $\bar{M}$ )를 이용하여 냉간 가공재의 인장강도를 계산한 값은 실험치와 거의 일치하였다.

⑤ 시편의 파괴각도는 재료의 이방성과 두께방향의 소성능력에 의하여 결정되는 것으로서 시편의 두께가 증가하면 시편의 파괴각도가 증가하였다.

< 후 기 >

본 논문은 문교부 연구비 지원에 의하여 수행 되었다.

참 고 문 헌

1. R.H.Bricknell and J.W.Edington: Acta Metallurgica, Vol.27, p.1303—1311(1979).
2. J.Pospiech and K.Lücke: Acta Metallurgica, Vol.26, p.1709—1719(1978).
3. Dong Nyung Lee and Joung Soo Kim: Journal of the Korean Institute of Metals, Vol.18, No.2, p.151(45)—158(52) (1980).
4. Backofen: Deformation Processing, p.45—46 and p.207—208(197).
5. H.Conrad et al: Acta Metallurgica, Vol.27, p.301—313(1979).
6. Hsun Hu: Met. Trans. A, Vol.8A, p.1567—1575(1977).

7. K.D. Sheffler et al: Met. Trans. A, Vol.8  
A, p.83—89(1977).
8. Daeyong Lee: Met. Trans. A, Vol.9A, p.  
1477—1481(1978).
9. D.C. Ludwigson: Metall. Trans., Vol.2, p.  
2825—2828(1971).
10. H.J. Kleemola and M.A.Nieminen: Metall.  
Trans. Vol.5, p.1863—1866(1974).
11. C.Adams and J.G. Beese: Trans. ASME,  
Ser. H, Vol.96, p.123—126(1974).