

<論 文>

# Taylor의 加工硬化理論의 立場에서 評價한 軟鋼薄板材의 破壞舉動에 관한 研究

孫 世 元<sup>\*</sup> · 金 相 哲<sup>\*\*</sup>

(1988年 7月 12日 接受)

## A Study on the Fracture Behavior of Mild Steel Plate Evaluated in the Light of Taylor's Work Hardening Theory

Se Won Sohn and Sang Chul Kim

**Key Words :** Prestress(프리應力), Prestrain(프리變形), Yield Strength(降伏強度), Cyclic Tension(反復引張), Strain Hardening Exponent(加工硬化指數), Fatigue Crack Growth Rate(疲勞크랙進展速度)

### Abstract

In this paper, mechanical properties of mild steel plate which was pretreated by prestress and prestrain loading conditions were studied. The variation of the mechanical properties of the test materials is evaluated in the light of Taylor's work hardening theory. Through this experimental study, it is recognized that material showed unstable phenomena after cyclic loading and it will recover its stability after a certain period of time accompanying the increment of hardness and the yield strength of the material. Also, the strength of smooth specimen, the notch strength of notch specimen and propagation behavior of fatigue specimen which were subjected to prestress and prestrain reveal that the optimal conditions may occur in the first, the middle and the later half of stage II of Taylor's work hardening theory, respectively.

### 1. 序 論

最近에 많이 使用되고 있는 構造物 特히 船舶, 壓力容器, 航空機 等에 있어서 薄板材의 使用이 점차 늘어가고 있는 實情이며 앞으로 에너지의 節約, 費用의 節減의 目的으로 薄板材의 使用이 더욱더 널리 利用되어지리라 기대된다. 따라서 平面應力狀態에 있는 薄板構造物의 設計 및 安全의 評價에 있어서 많은 研究가 必要하다. 그러나 이와같은 重要한 사실에도 불구하고 아직도 薄板材의 研究에는

未洽한 점이 많으므로(本 研究에서는 一般의인 構造物에 가장 많이 使用되는 軟鋼薄板材(SM12C)가 反復引張荷重을 받았을 경우, 즉 이 材料가 프리應力과 프리變形을 받았을 때 時間의 經過에 따르는 硬度, 降伏強度 및 加工硬化指數의 變化를 살펴보았다. 이와 같은 實驗을 통하여 材料가 서서히 安定化되어가는 狀態를 確認하였으며 이를 基礎로 하여 레지듀얼強度(residual strength)와 疲勞크랙進展速度의 舉動을 體系의으로 究明하여 이 軟鋼薄板材의 構造物의 安全使用에 기여하도록 하는데 그 目的을 두었다. 아울러 프리應力 및 프리變形을 받았을 때의 軟鋼薄板材의 機械的 性質의 變化를 Taylor의 加工硬化理論<sup>(1)</sup>에 對應시켜 검토하였다.

\*正會員, 建國大學校 工科大學 機械工學科

\*\*正會員, 仁荷大學校 工科大學 機械工學科

2. 實 驗

2.1 試驗片의 材料 및 規格

本 實驗에서 使用된 材料는 機械構造用 탄소강 (SM12C) 薄板材이며 이의 化學的 成分은 Table 1 에 表示하였다. 처음의 材料두께 3.2mm를 壓延하여 2.0mm, 1.5mm, 0.7mm로 加工한 후 電氣爐에서 700°C의 溫度에서 10時間 維持시킨 다음 500°C가 될 때까지 爐冷시키고 다음은 空冷시켰다. 이와 같이 열처리한 재료의 표면 현미경사진을 Fig. 1에 보였다.

열처리한 材料와 열처리안한 材料(壓延率 37.5%)를 가지고 Fig. 2에 보인 標準引張試片(KS B 0801, 第13號 B試驗片)으로 加工하여 引張實驗한 結果를 Table 2에 나타내었다.

또한 double edge notch를 넣은 單純引張試片 및 疲勞試驗片은 Fig. 3에 보였으며 괄호안의 숫자는 疲勞試驗片의 치수<sup>(2)</sup>이다. 이때 노치는 60° milling cutter로 加工하고 면도날을 톱날모양으로 연삭하여 이를 가지고 노치 끝을 加工하였다.

2.2 實驗方法

引張試片(Fig. 2의 試片)을 行하여 作成한 stress-strain線圖(Fig. 4)에서 降伏點의 70~90% 사이의 反復引張應力(prestress)과 降伏點의 90~110% 反復引張應力(prestrain)을 各 1回, 5回, 10回, 30回 加하였다. 예비실험결과 프리變形時 30回 이상에서는 硬度, 降伏強度의 값이 프리變形時 10回의 경우보다 낮은 값을 갖고 있으므로 本 研究에서는 除外하였다.

이와같이 반복 應力을 加한 後 試片을 常溫에 放

Table 1 Chemical composition(wt %)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Fe
Composition	0.1	0.15	0.30	0.03	0.035	Rest

Table 2 Mechanical properties

	Thickness	Yield strength	Tensile strength	Modulus of elasticity
Rolled materials (after 3 months)	2.0mm	636.6MPa	944MPa	217GPa
Heat-treated materials (Unpreloaded specimen)	0.7, 1.5, 2.0mm	284MPa	462MPa	218GPa

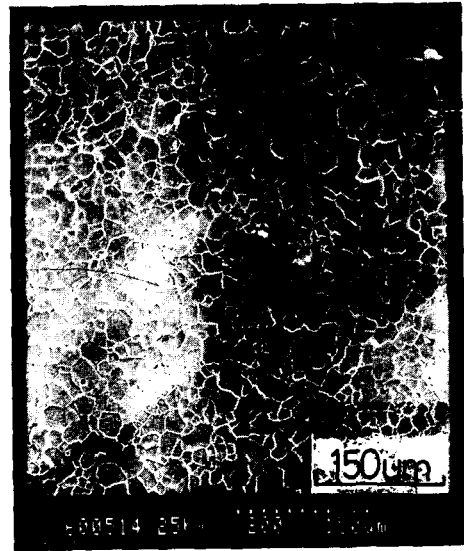


Fig. 1 Micrograph of unpreloaded specimen

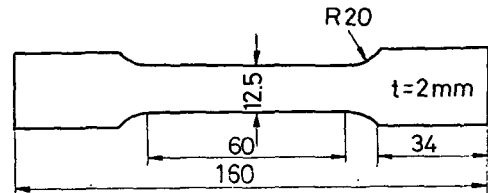
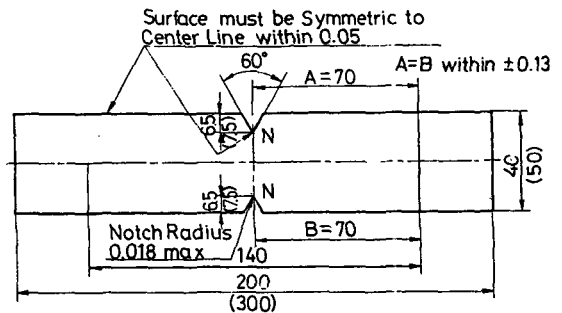


Fig. 2 Tensile test specimen



Unit : mm

Fig. 3 Notched tensile specimen

置하여 時間의 經過에 따른 硬度의 變化를 微小 硬度計를 使用하여 측정하였으며 이때에 使用한 壓子의 重量은 200gf이고 壓入時間은 15秒로 하였다.

아울러 double edge notch試片의 경우는 試片에 노치를 넣지 않은 狀態에서 앞의 標準引張試片에 應力을 가한 것과 같은 方法으로 프리應力(prestress)과 프리變形(prestrain)을 加하였으며 노치를 引張 및 疲勞試驗을 行하기 직전에 加工하였다. 또한 疲勞實驗에 있어서는 最大荷重( $P_{max}$ , 降伏荷重의 約 50%)은 1.5톤, 最小荷重( $P_{min}$ )은 0.9톤, 應力比  $R = \sigma_{min} / \sigma_{max} = 0.6$ 으로, 波形으로는 10Hz의 Sine波를 擇하였다.

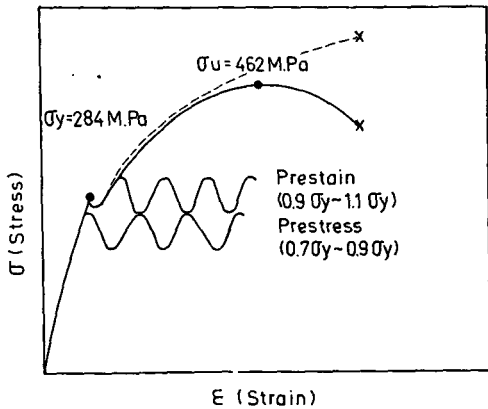


Fig. 4 Stress-strain diagram(mild steel)

### 3. 實驗結果 및 考察

#### 3.1 프리應力, 프리變形에 따른 軟鋼材의 機械的 性質의 變化

Fig. 5에는 標準引張試片(두께 2mm)에 프리應力과 프리變形을 加했을 때 경과날짜와 微小硬度값과

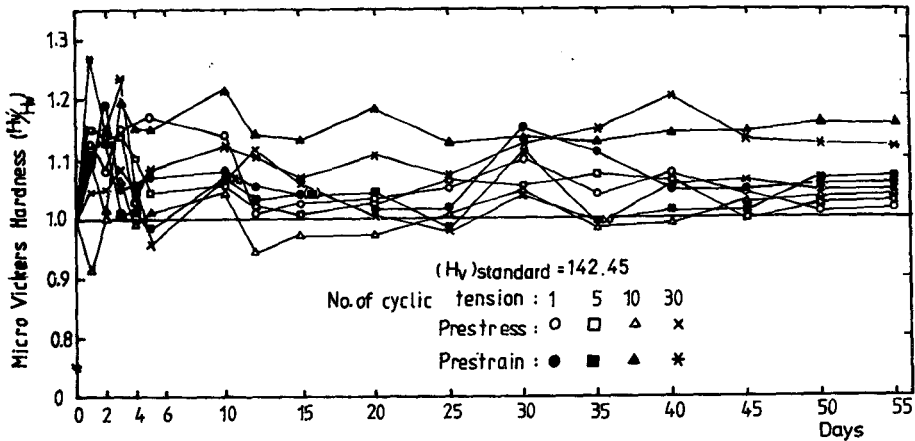


Fig. 5 Micro vickers ( $H_v'/H_v$ ) vs. days(specimen thickness : 2mm)

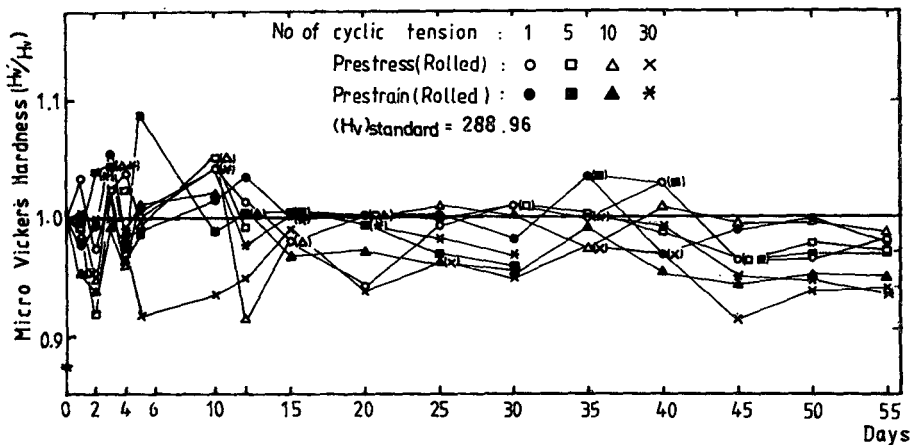


Fig. 6 Micro vickers hardness( $H_v'/H_v$ ) vs. days

의 關係이며 硬度값은 날짜의 經過에 따라 減衰現象을 보이며 점차 安定化하여 50일이 지난 다음에는 원래의 熱處理材보다 높은 어떤 일정한 값에 수렴함을 보이고 있다. Fig. 6는 壓延材에 프리應力

과 프리變形을 加했을 때, 날짜의 經過에 따라 점차 安定化하여 대체로 50일이 지난 다음 원래의 壓延材보다 낮은 어떤 一定한 값에 수렴함을 보이고 있다.

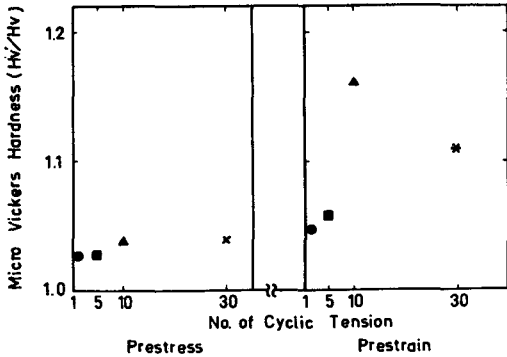


Fig. 7 Variation of micro vickers hardness ( $Hv'/Hv$ ) according to No. of cyclic tension (after 55 days)

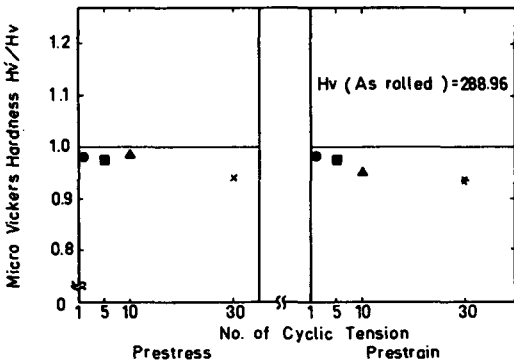


Fig. 8 Variation of micro vickers hardness  $Hv'/Hv$  according to No. of cyclic tension (after 55 days)

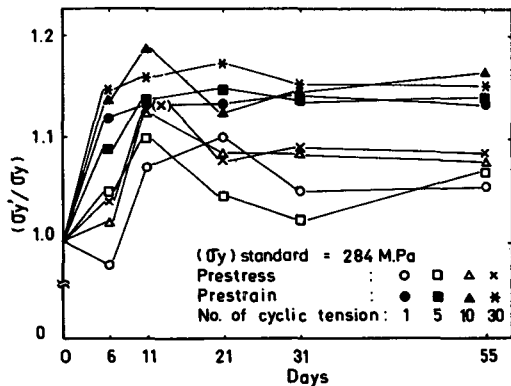


Fig. 9  $(\sigma_y'/\sigma_y)$  vs. days

Fig. 7은 55일이 경과한 다음의 熱處理材에 대한 硬度값을 無負荷材에 對하여 無次元化하여 反復引張數에 따르는 硬度값의 變化를 보였다. 이 그림에서 프리應力の 경우는 硬度의 增加率은 大體로 4% 미만에 머물고 있으나 프리變形의 경우는 反復引張數 1회인 때에는 4.5% 정도 5회인 때에는 5.8%이었다가 10회인 때에는 16%로 硬度값이 增加하였다가 30회인 때에는 減少하여 11%로 됨을 알 수 있다. Fig. 8은 壓延材에 프리應力이나 프리變形을 加한 다음 55일이 경과한 後의 結果를 無負荷材에 對한 比로 나타낸 것으로 여기서 硬度값은 無負荷材보다 낮은 값을 보인다. Fig. 7과 Fig. 8의 結果에 對하여 고찰하면 Fig. 7의 경우는 加工硬化의 程度에 따라서 程度가 增加하다 減少하는 傾向을 보이고 있으나, 반면 Fig. 8은 硬度值가 계속 減少하는데 이는 材料가 冷間壓延에 의하여 심하게 硬化된 材料에 다시 프리應力을 加함으로써 滑走轉位가 cross slip 또는 轉位끼리 相互消滅 등의 기구에 의하여 硬度가 緩和되어가는데 그 原因이 있는 것으로 생각된다<sup>3)</sup>.

熱處理材에 프리應力이나 프리變形을 作用시킨 후 날짜에 따르는 降伏強度의 變化를 無負荷材에 對하여 無次元化시킨 것을 Fig. 9에 보였으며 여기서 降伏強度의 增加는 프리應力狀態보다 프리變形狀態에서 더 큰을 알 수 있다. Fig. 10은 Fig. 9에서 55일이 경과한 後의 降伏強度의 變化를 無負荷材에 對하여 無次元化시켜서 나타낸 것이다. 이

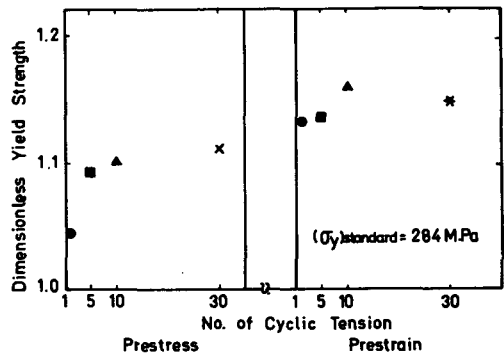


Fig. 10 Dimensionless yield strength vs. No. of cyclic tension

그림에서 降伏強度의 變化率은 프리應力狀態에서 反復引張數 1回인 때 4.3%, 5回인 때 9.2%, 10回인 때 9.9%, 30回인 때 11.1%의 增加를 보였으며 프리變形狀態에서는 反復引張數 1回인 때 13.3%, 5回인 때 13.6%, 10回인 때 15.9%, 그리고 30回인 때 14.9%의 增加率을 보이고 있다. 이 때 프리變形狀態에서 反復引張數 10回인 때의 降伏強度가 30回인 때의 降伏強度보다 큰 값을 취하며 이러한 現象은 硬度값의 反復引張數에 따르는 變化의 양상과 극히 유사하다. Taylor의 加工硬化理論에 依하면 一般적으로 金屬이 外力을 받으면 加工硬化를 同伴하게 되며 이 때 加工硬化區域을 Stage I, II, III으로 區分하는 데 이를 Fig. 11에 보였다<sup>(3)</sup>. 즉 Stage I은 硬化率이 아주 적어 容易滑走領域(easy glide region)이라고 하며 Stage II는 硬化率이 가장 커 直線硬化領域(linear-hardening region)이라고 하며 Stage III는 Stage II에서 심하게 硬化된 領域의 內部應力이 緩和되어 가는 단계이다<sup>(4-6)</sup>.

本 實驗의 結果를 Taylor의 加工硬化理論에 對應시켜 考察하여 보면 대체로 프리應力 및 프리變形을 받은 材料의 反復引張數에 따르는 硬度 및 降伏強度의 變化하는 傾向은 서로 유사하며 이들 값의 變化하는 양상은 크게 나누어 3區域으로 區分할 수 있음을 示唆하여 준다. 다음의 Fig. 12는 熱處理材에 前述한 바와 같이 프리應力과 프리變形을 加한 후 55日이 經過한 다음에 加工硬化指數값을 反復引張數에 따라서 圖示한 것이다. 여기서 프리應力時 加工硬化指數는 대체로 0.3程度의 값을 취하며 프리變形時는 反復引張數 1回, 5回, 10回의 경우는 0.275, 30回의 경우는 約 0.23의 낮은 값을 취하고 있다. 이 結果로부터 加工硬化指數도 3區域으로 區分됨을 알 수 있는데 이에 대하여 檢討를 加하면 다음과 같다. 지금 眞應力을  $\sigma_T$ , 眞變形率을  $\epsilon_T$ 로 놓을 때 加工硬化指數에는  $n = \ln \sigma_T / \ln \epsilon_T$ 로 정의된다. 이는  $\ln \sigma_T$ 와  $\ln \epsilon_T$ 의 그래프상에서 기울기의 값  $n$ 을 표시하며 이들 구간을 線으로 표시하면 Fig. 13과 같다. 以上の 實驗結果를 綜合적으로 檢討하여 볼 때 熱處理材를 包含하여 프리應力時 反復引張數30回까지 Taylor의 加工硬化理論의 Stage I에, 또 프리變形時 反復引張數 1回부터 10回까지는 Stage II에, 壓延材에 프리應力과 프리變形을 加한 경우와 熱處理材에 프리變形 10回에서부터 30回까지 加한 材料는 Stage III에 對應하

고 있다고 思料된다.

### 3.2 Double Edge Notch 試片의 單純引張, 疲勞實驗結果 및 考察

本 實驗에서는 Fig. 3에 보인 試片에 프리應力과 프리變形을 加한 후 常溫에 放置한 다음 55日이 經過後 노치를 加工하고 單純引張 및 疲勞實驗을 行하였다.

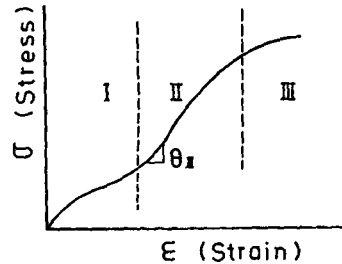


Fig. 11 Stress-strain diagram

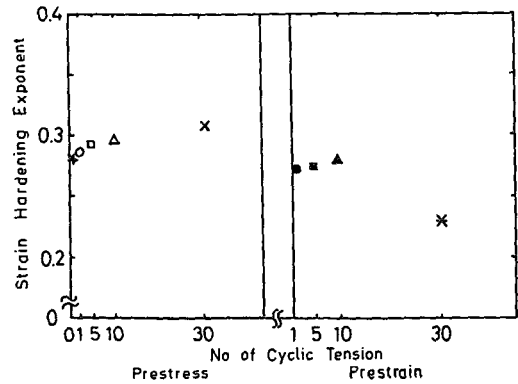


Fig. 12 Strain hardening exponent vs. No. of cyclic tension

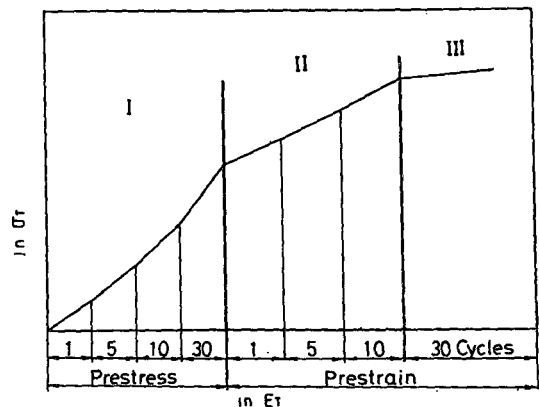


Fig. 13  $\ln \sigma_T$  vs.  $\ln \epsilon_T$

Fig. 14는 두께 1.5mm의 試片에서 試片幅  $W$ 에 대한 크랙길이의 비에 따르는 크랙先端에서 레지듀얼強度(residual strength)를 圖示한 것으로 無負荷材에 比하여 프리應力を 加한 後의 試片은 레지듀얼強度는 增加하며 프리變形을 받은 材料는 더욱 增加함을 알 수 있다. 이때 레지듀얼強度는 노치 끝에서 균열이 發生하여 일정거리를 進진할 때마다 引張試驗機의 maker로 표시하여 이를 계산하였다.

Fig. 15는 두께 0.7mm 시편의 實驗結果로서 이

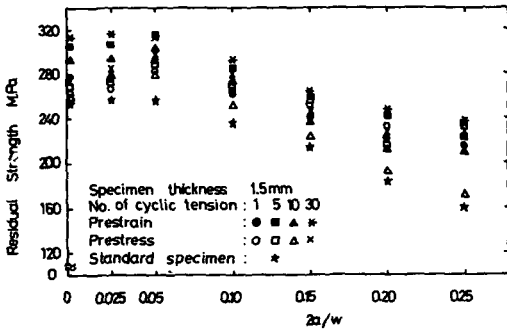


Fig. 14 Residual strength vs. crack length ( $2a/w$ )

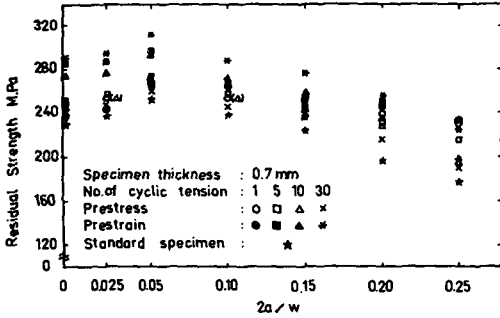


Fig. 15 Residual strength vs. crack length ( $2a/w$ )

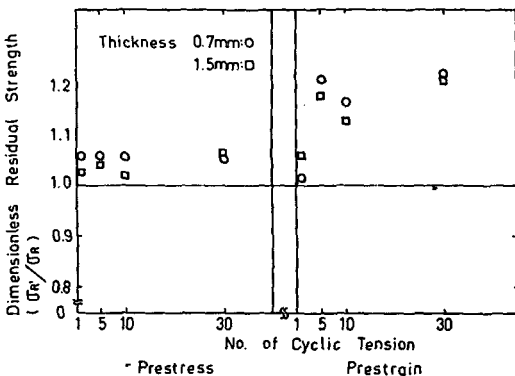


Fig. 16 Dimensionless residual strength vs. No. of cyclic tension. (at the notch tip)

경우에도 두께 1.5mm의 결과와 유사하며 無負荷材의 레지듀얼強度의 값은 제일 작다. 노치로부터 크랙이 發生할 때의 레지듀얼強度를 各各의 두께의 無負荷材에 對하여 無次元시킨 것이 Fig. 16이다. 이 그림에서 보면 프리應力を 받은 材料에 있어서는 無負荷材에 比하여 레지듀얼強度는 約 5% 程度 增加하고 있으나, 프리變形을 받은 材料에 있어서는 反復引張數 5 回 이상인 때에는 레지듀얼強度의 無負荷材에 對한 增加率は 15% 程度에 이르고 있다. 다음의 Fig. 17은 無負荷材 및 프리應力 프리變形을 加한 材料의 두께 2mm의 疲勞實驗結果(平

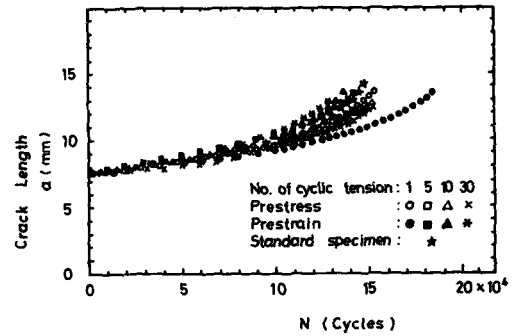


Fig. 17 Crack length vs. cycles

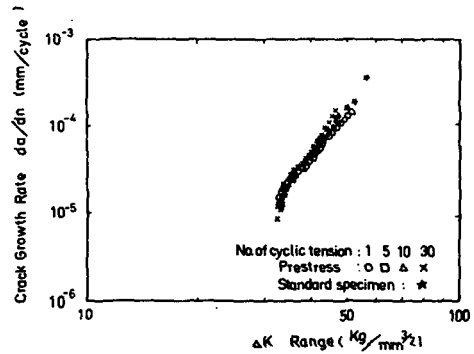


Fig. 18 Crack length vs. range of S.I.F

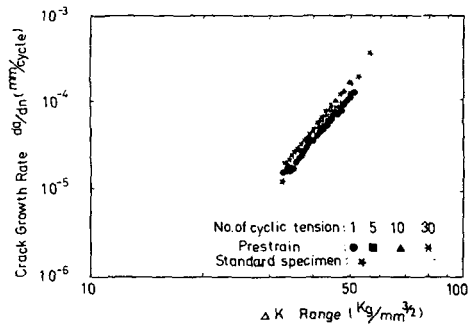


Fig. 19 Crack length vs. range of S.I.F

面應力狀態)를 나타내고 있으며 여기서 가로축은 사이클數, 세로축은 크랙進展길이를 표시하며 無負荷材에 比하여 프리應力을 加한 材料의 疲勞壽命이 더 길게 나타나 있음을 알 수 있었다. 또 프리變形을 가한 材料의 疲勞舉動은 프리變形時 反復引張數 1회인 때 疲勞壽命은 제일 길고 반면 프리變形時 反復引張數 30회의 경우는 疲勞壽命이 제일 짧게 나타나고 있다. Fig. 17의 結果를 基礎로 크랙進展率(crack growth rate)과 應力擴大係數(stress intensity factor,  $\Delta K$ )과의 關係를 Paris의 식<sup>(7)</sup> 즉  $da/dN = C(\Delta K)^m$ 을 使用하여 log-log스케일로 나타낸 것이 Fig. 18(프리應力狀態), Fig. 19(프리變形狀態)이다. 크랙의 길이가 12mm까지 進展하는데 加해진 사이클수를 圖示한 것이 Fig. 20이며 프리應力時 反復引張數가 增加함에 따라 크랙傳播速度가 낮으며 다시 말하면 같은 크랙길이를 進展하는데 사이클수가 많아지는 傾向이 있음을 알 수 있다. Fig. 21은 크랙길이 12mm까지 傳播하는데 필요한 사이클수를 無負荷材에 對하여 무차원화시켜 보였다.

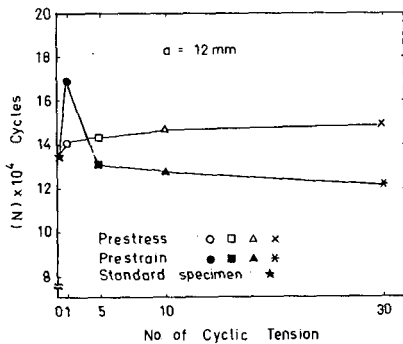


Fig. 20 Cycles vs. No. of cyclic tension

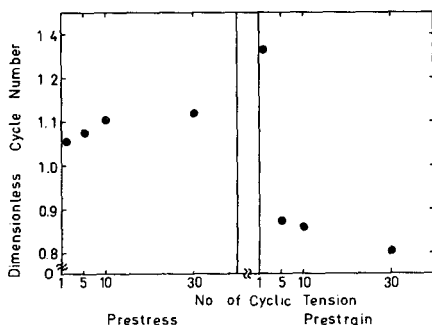


Fig. 21 Dimensionless cycle number vs. No. of cyclic tension (crack length: 12mm)

이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 프리應力時 反復引張數 1회부터 30회까지는 같은 크랙길이(12 mm)를 傳播하는데 加해진 사이클數는 無負荷材에 比하여 많으며 프리變形 1회인 때는 가장 많은 사이클數가 소요되며 프리變形時 5회에 이르러서 사이클數는 無負荷材에 比하여 約 15% 程度 減少하고 그 後는 프리變形時의 反復引張數의 增加에 따라 소요되는 사이클數는 完滿하게 감소하고 있다. 이는 T.S. Kang과 H.W. Liu<sup>(8)</sup>나 J. Schijve의 論文<sup>(9)</sup>에서 Al 2024 T3에 프리變形을 加했을 때 크랙傳播速度가 2倍 이상 빨라진다고 한 結果와 本實驗의 結果와는 많은 차이를 보이고 있다. 그 이유는 J. Schijve가 Al 2024 T3의 材料에 프리變形을 加한 後 時間의 經過없이 직접 疲勞實驗을 行한 것이 主要原因이라고 생각되며 또 Al 合金과 軟鋼과는 材料가 다르기 때문이라고 思料된다.

#### 4. 結 論

軟鋼薄板이 反復引張荷重을 받았을 때 그 破壞舉動을 Taylor의 加工硬化理論에 對應시켜 본 結果를 要約하면 다음과 같다.

(1) 프리應力이나 프리變形의 引張荷重을 받은 材料는 날짜의 經過에 따라 機械的 性質(硬度, 降伏強度, 加工硬化指數)의 變動이 보이나 約 30일이 지난 후에는 安定化되어간다. 즉, 프리應力을 加했을 때 無負荷材에 對한 硬度의 增加率은 平均 3.3%, 프리變形時에 9.3%이었고 降伏強度의 增加率은 프리應力時 8.6%, 프리變形時에는 14.4%이었으며 加工硬化指數의 變化는 프리應力時 平均 2.3% 增加, 프리變形時 6.9%의 減少率을 보인다.

(2) 反復引張을 받은 材料의 機械的 性質은 荷重條件 및 回數에 따라 大體的으로 3段階로 區分할 수 있다. 本實驗에 使用한 0.1%C 軟鋼에 對해서는 프리應力時 反復引張數 1회부터 30회까지는 Taylor의 加工硬化理論의 Stage I에 對應하고 프리變形時 反復引張數 1회부터 10회까지는 Stage II, 또 10회를 초과하여부터 30회까지는 Stage III에 對應됨을 알 수 있었다.

(3) 降伏點의 70~90%, 90~110%의 프리應力 및 프리變形을 反復荷重으로 받은 平滑材의 降伏強度, 노치材의 노치強度 및 疲勞크랙傳播舉動의 傾向을 考察한 結果 平滑材에서는 Stage II의 後半, 노치材에서는 Stage II의 中間, 疲勞에서는 Stage II의

前半部에서 最適條件이 됨을 究明할 수 있었다.

(4) 本 研究에서 제시한 바와 같은 荷重條件으로 廣範圍한 實驗을 行하면 安全設計를 위한 材料의 選擇은 勿論, 低사이클 프리應力, 프리變形時 反復 引張에 對應하는 크랙進展의 機構도 究明할 수 있을 것으로 思料된다.

#### 참 고 문 헌

- (1) A Seeger, 1957, "Dislocation and Mechanical Properties of Crystals", J.C. Fisher, ed. Johnwiley, New York.
- (2) ASTM Bullentin, "Fracture Testing of High Strength Sheet Materials", A Report of Special ASTM Committee.
- (3) R.E. Smallman, 1965, "Modern Physical Metallurgy", London, Butterworths. pp. 206~226.
- (4) Richard W Herzburg, 1976, "Deformation and Fracture Mechanics of Engeering Materials", 2ed John Wiley & Sons.
- (5) H.K. Haidy, 1954, "Report on Precipitation", Progress in Metal Physics.
- (6) George E. Dieter, 1976, "Material Science and Engeering Series", Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill Book Co.
- (7) Paris & F. Erdogan, 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Low Trans", ASME, D8594, pp. 528~534.
- (8) T.S. Kang, H.W. Liu, 1974, "The Effect of Prestress Cycles on Fatigue Crack Growth-An Analysis of Crack Growth Mechanism", Eng. Fracture Mechanics, Vol. 6, pp. 636~638.
- (9) J. Schijve, 1976, "The Effect of Prestrain on Fatigue Crack Growth and Crack Closure", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 8, pp. 575~581, Pergamon Press.