

# 加工 工程이 다른 두종류의 低炭素鋼에 대한 低 사이클 疲勞特性에 관한 研究

A Study on the Low Cycle Fatigue Characteristics for Two Low Carbon Steels of the Different Manufacturing Process.

盧 載 忠

*Jae-Choong Loh*



〈 目 次 〉

Abstract	3.1 反復應力—變形率舉動
記號說明	3.2 單純引張特性斗 反復應力—變形率特 性
1. 序 論	3.3 低사이클 破勞壽命特性
2. 實驗材料 및 實驗方法	3.4 疲勞破斷面의 破面學的 考察
2.1 實驗材料 및 試驗片	4. 結 論
2.2 試驗機 및 實驗方法	參考文獻
3. 實驗結果 및 考察	

A Study on the Low Cycle Fatigue Characteristics for Two  
Low Carbon Steels of the Different Manufacturing Process;

Jae - Choong, Noh

*Dept. of Marine Mechanical Engineering, Graduate School  
Korea Maritime University*

Abstract

In this paper, the strain controlled low cycle fatigue properties at the room temperature in the air environment were investigated for carbon forging steel, SF45A, and rolled steel for welded structure, SM41B. Throughout the test, the strain ratio,  $R_\epsilon$ , was maintained constant with the fully reversed condition, -1.

The main results obtained are as follows;

1. SM41B steel cyclically softened at the total strain amplitude lower than 0.4%, while cyclically hardened at another strain amplitude higher than 0.4%. On the other hand, SF45A steel cyclically hardened at all the test conditions excepting 0.2% strain amplitude.
2. Even if some kinds of steel exhibit the similar monotonic stress-strain behaviors, their cyclic stress-strain behaviors can be quite different with manufacturing process of steels.

3. The low cycle fatigue lifetime of SM41B and SF45A appeared to show little difference in the region of this test conditions.

In addition to, the experimental total strain amplitude -number of cycle to failure relations ( $\epsilon_{ta}-N_f$ ) could be expressed as follows:

SM41B,

$$\epsilon_{ta} = 0.351 \cdot (2N_f)^{-0.498} + 0.00237 \cdot (2N_f)^{-0.06}$$

SF45A,

$$\epsilon_{ta} = 0.279 \cdot (2N_f)^{-0.478} + 0.00342 \cdot (2N_f)^{-0.087}$$

4. The appearance of low cycle fatigue fractographies at the lower strain level were striation pattern, while they were rubbing and tire track pattern at the higher strain levels. The features of the secondary crack was transgranular at the lower strain level, but intergranular at higher strain levels.

## 記 號 說 明

- $\Delta\epsilon_t$  ; 全變形率範圍 (Total Strain Range)  
 $\Delta\epsilon_p$  ; 塑性變形率範圍 (Plastic Strain Range)  
 $\Delta\epsilon_e$  ; 彈性變形率範圍 (Elastic Strain Range)  
 $\Delta\sigma$  ; 應力範圍 (Stress Range)  
 $\epsilon_{ta}$  ; 全變形率振幅 (Total Strain Amplitude)  
 $\epsilon_{ea}$  ; 彈性變形率振幅 (Elastic Strain Amplitude)  
 $\epsilon_{pa}$  ; 塑性變形率振幅 (Plastic Strain Amplitude)  
 $E$  ; 彈性係數 (Modulus of Elasticity)  
 $\epsilon'_f$  ; 疲勞韌性係數 (Fatigue Ductility Coefficient)  
 $a$  ; 疲勞韌性指數 (Fatigue Ductility Exponent)  
 $\sigma'_f$  ; 疲勞強度係數 (Fatigue Strength Coefficient)  
 $b$  ; 疲勞強度指數 (Fatigue Strength Exponent)  
 $\sigma_a$  ; 應力振幅 (Stress Amplitude)  
 $N$  ; 反復數 (Number of Cycle)  
 $N_f$  ; 破斷反復數 (Number of Cycle to Failure)  
 $2N_f$  ; 破斷逆轉數 (Number of Reversal to Failure)  
 $K$  ; 單純引張強度係數 (Monotonic Strength Coefficient)  
 $n$  ; 單純引張 變形率硬化指數 (Monotonic Strain Hardening Exponent)  
 $K'$  ; 反復強度係數 (Cyclic Strength Coefficient)  
 $n'$  ; 反復變形率硬化指數 (Cyclic Strain Hardening Exponent)

加工工程에 따른 중립의 低炭素鋼에 대한 低 사이클 疲勞特性에 관한 研究

$\sigma_u$  ; 引張強度 (Ultimate Tensile Strength)

$\sigma_{ys}$  ; 0.2 % 옴셋 降伏強度 (0.2 % Offset Yield Strength)

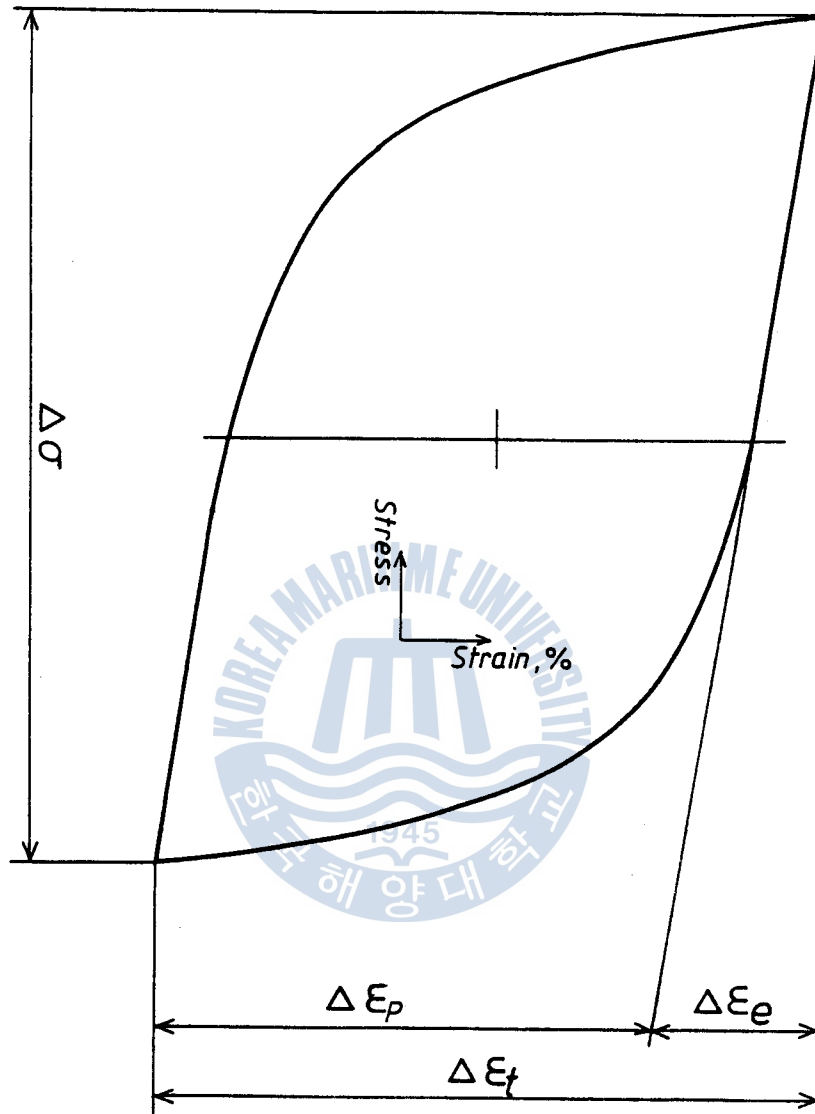
$\sigma_{yc}$  ; 0.2 % 反復 降伏強度 (0.2 % Cyclic Yield Strength)

$\sigma_{Tmax}$  ; Current Tensile Peak Stress

$\sigma_{H-L}$  ; Half Life Tensile Peak Stress

$X$  ; Failure Level





$$\begin{aligned}
 \Delta \epsilon_t &= \text{Total Strain Range} &= 2 \cdot \epsilon_{ta} \\
 \Delta \epsilon_p &= \text{Plastic Strain Range} &= 2 \cdot \epsilon_{pa} \\
 \Delta \epsilon_e &= \text{Elastic Strain Range} &= 2 \cdot \epsilon_{ea} \\
 \Delta \sigma &= \text{Stress Range} &= 2 \cdot \sigma_a
 \end{aligned}$$

Figure†. Parameters of the hysteresis loop.

## 1. 序 論

一般的으로 船舶建造 橋梁, 鐵構造物 등의 設計時 鋼材의 種類와 두께를 決定할때는 彈性限界內에서 降伏點의 2/3 부근을 最大應力으로 하여 채택하고 있다. 그 理由는 安全도와 腐蝕으로 因한 減少, 그리고 疲勞荷重에 의한 破壞와 使用壽命 (life-time) 등의 不確實性 때문이다.

최근에는 安全도는 統計에 의해 많이 修整되고 腐蝕은 눈부신 防蝕의 研究發展에 힘입어 많이 개선되었다. 그러나 복잡한 反復荷重에 의한 疲勞破壞의 壽命推定과 進行狀態의 把握이 어렵다.

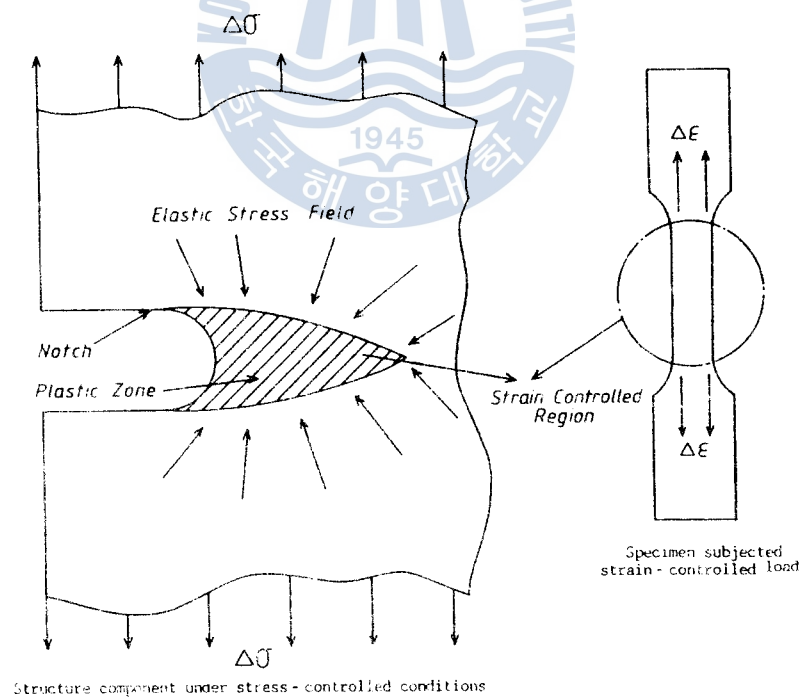


Figure 1 Simulation of test specimen for the structures

저사이클 疲勞 試驗 (Low Cycle Fatigue test) 은 과거에는 고온에서 사용되는 기기들의 熱變形率에 의한 疲勞 破壞現象의 해석을 위해 주로 행해졌으나, 현재에는 室溫에서 사용되는 기계요소, 구조물 등의 應力集中部에 있어서 균열발생 수명을 예측하기 위해 널리 이용되고 있다.<sup>1)</sup> 응력집중부를 가진 요소에 反復荷重이 작용할 경우, 요소의 대부분은 彈性的 舉動의 상태하에 있다 할지라도 응력집중부 근방에서는 塑性變形이 발생할 수 있다. 이때 응력집중부 근방의 塑性 變形舉動은 주위의 탄성응력장 (elastic stress field) 에 의해 제한을 받기 때문에 요소가 荷重 또는 응력에 의해 제어된다 할지라도 소성역 (plastic zone) 은 變形率에 의해 制御된다고 볼 수 있다.<sup>2)</sup> 이와같은 관점으로 부터 노치 底部 (root of notch) 材料의 피로거동은 그 材料의 平滑試驗片 (smooth specimen) 을 變形率 제어조건 (strain control condition) 下에서 저사이클 피로시험을 행하여 얻은 결과와 相似시킬 수 있다. 즉 피로하중이 작용하는 노치 底部의 應力-變形率履歷 (stress-strain history) 을 평활시험편상에 再現하여 저사이클 疲勞試驗을 행하고 여기서 얻은 결과를 累積損傷理論 (cumulative damage theory) 에 적용함으로써 노치저부에서의 微小龜裂 (small crack) 발생에 근거한 壽命을 예측할 수 있다.<sup>3), 4)</sup>

이와같은 목적을 위하여 지금까지 여러 材料들에 대한 저사이클 疲勞特性에 관한 研究가 보고되어 있으며<sup>5)-7), 12)</sup> 누적손상 파라미터 (parameter) 를 이용한 수명추정<sup>8)-11)</sup> 등이 행해졌고 이를 기초로 하여 노치 材에서의 균열발생 및 傳播壽命<sup>3), 13)-15)</sup> 에 관한 다수의 論文이 보고되어 있다. 그러나 加工工程이 다른 同級強度의 鋼種에 있



加工工程이 다른 두종류의 低炭素鋼에 대한 低 싸이클 疲勞特性에 관한 研究  
에서, 低싸이클 疲勞特性에 미치는 加工工程의 影響에 관한 研究는  
이루어 지지 않았다

本 研究는 鍛造過程을 거친후 normalizing 처리를 한 SF45A 강종  
과 壓延을 자연냉각시킨 SM41 B 강종에 대해 저싸이클 疲勞試驗을 行하  
여 두 강종에 대한 저싸이클 피로특성 및 피로과정중의 軟化(softening)  
및 硬化(hardening) 거동의 差異를 밝히고 또한 低싸이클 疲勞破面의  
微觀的 狀態를 통해 피로균열 變화특성 및 破面의 차이점을 究明하  
였다.



## 2. 實驗材料 및 實驗方法

### 2.1 實驗材料 및 試驗片

實驗에 사용한 材料는 일반 熔接構造物 材料로서 널리 利用되고 있는 SM41 B와, 추진축계, 크랭크축, 커플링볼트 등에 사용되는 SF45 A이다. Table 1은 그들의 化學的 成分을 그리고 Table 2는 機械的 性質을 나타낸다.

Table 1. Chemical compositions of test materials.

Materials Desig.	Chemical composition (wt.%)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Ceq
SM 41 B	0.13	0.28	1.0	0.014	0.004	-	-	-	0.308
SF 45 A	0.20	0.24	0.8	0.016	0.008	0.017	0.015	0.006	0.348

Table 2. Mechanical properties of test materials.

Materials	Gauge Length (mm)	Yield Stren. (MPa)	Tensile Stren. (MPa)	Elongation (%)	Red. of Area (%)
SM 41 B	200	289.1	426.6	33	
SF 45 A	70	286.2	487.1	27.5	55.0

Fig.1은 본 實驗에서 사용한 試驗片의 형상 및 치수를 나타내고 있다. 試驗片은 SM41 B의 경우 25 mm 판두께 중앙에서, SF45A는 단조와 열처리가 完了된 材料의 판두께 중앙에서 각각 압연 방향과 평행하게 채취하였다. 試驗片은 선반가공 후 #1000의 砂布에 의해

加工工程이 다른 두종류의 低炭素鋼에 대한 低 사이클 疲勞特性에 대한 研究  
원주방향으로 연마되었으며, 평행부와 R부는 酸化크롬으로 버핑(buff-  
ing) 연마가공을 행하였다.

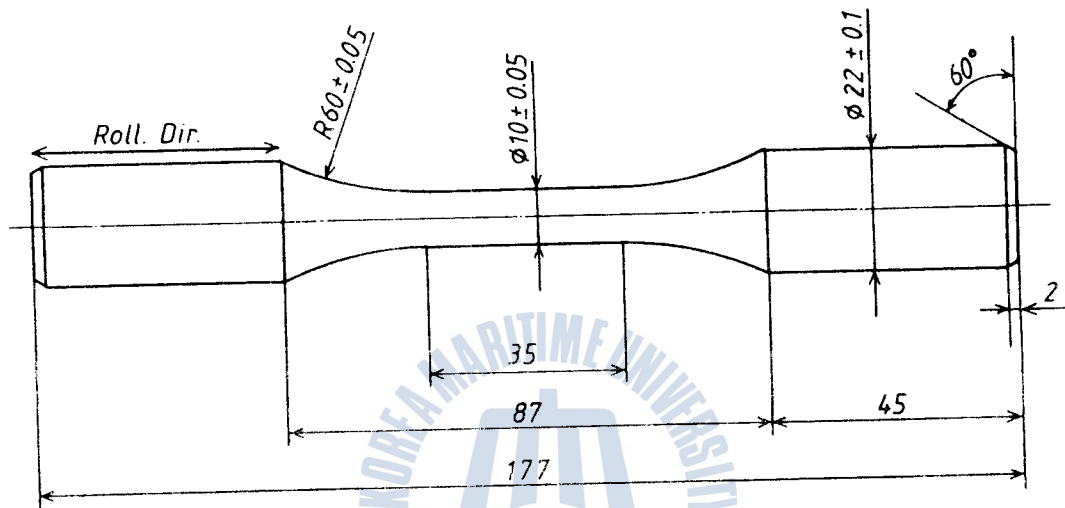
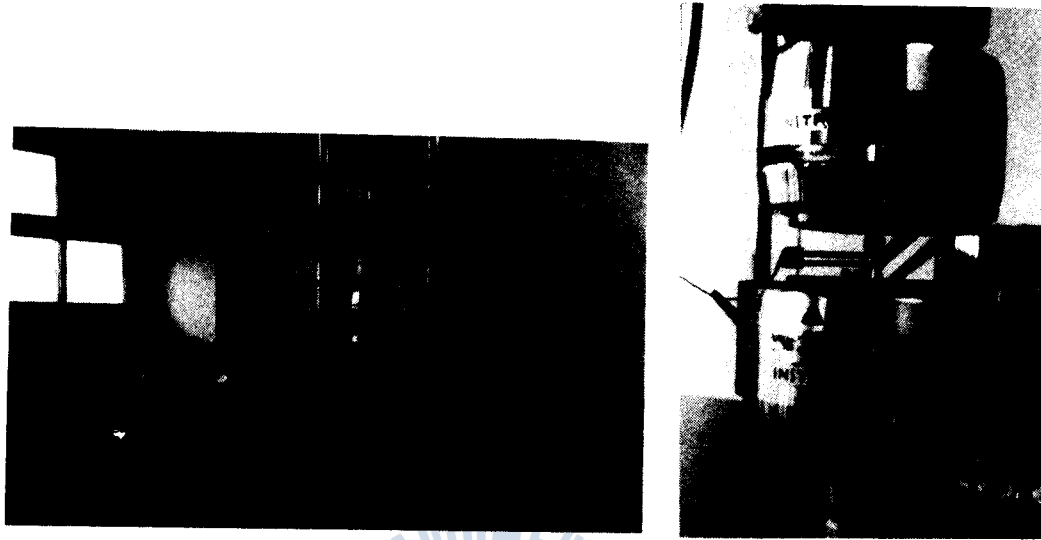


Fig.1. Configuration & dimensions of specimens.

## 2.2 試驗機 및 實驗方法

實驗에 사용한 試驗機로서는 靜的 最大荷重 250 KN, 動的 最大荷重  $\pm 100$  KN 용량의 閉루프 서보 油壓式材料試驗機 (closed loop servo-hydraulic testing system)로서 이 장치의 概略을 Photo.1에 나타내었다.



*Phototo.1. General views of material testing machine.*

試驗은 變形率制御에 의해 한 試驗片에 대하여 試驗片의 軸方向으로 일정한 變形率振幅을 反復附加하는 多數試驗法 (companion specimen method)<sup>16)</sup>으로 수행되었으며, 附加되는 變形率의 波形은 삼각파형 (triangular waveform)으로 하였다. Fig.2는 이와같은 多數試驗法의 荷重附加樣式을 나타낸다.

試驗片에 反復附加되는 變形率의 制御 및 檢出은 35 mm인 試驗片 평행부 상에 부착한 表點距離 (gauge length) 25 mm의 knife edge形 伸張計 (extensometer)에 의해 행하였다. 全實驗을 통하여 變形率比 (strain ratio;  $R_s$ )는 -1인 完全兩振 (fully reversed)으로 하였으며 附加되는 變形率速度 (strain rate)는 0.005/sec로 일정하게 하였다. 따라서 反復速度 (cyclic rate)는 全變形率振幅 (total strain amplitude)의 大小에 따라 0.104 ~ 0.625 HZ 범위內이다. 附加變形率의

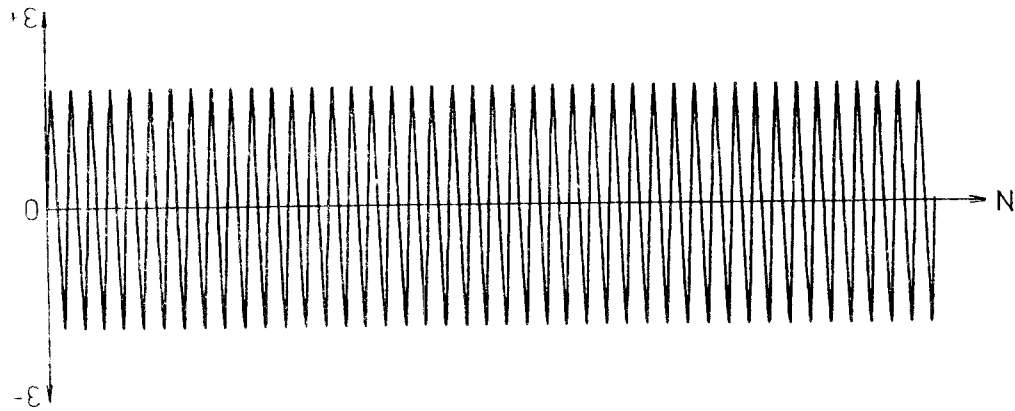


Fig. 2. Type of control condition. (companion specimen method)

誤差는 최대  $\pm 0.0005$  이하가 되도록 하였다.

본 實驗에서 試驗片의 破斷은 임의 反復數에서의 引張時의 최대應력이 (1)式으로 주어지는 조건일 때 이루어진 것으로 하여 그 때의 反復數를 附加된 全變形率振幅 (以下  $\epsilon_{ta}$  로 表記함) 에 대한 破斷反復數 (number of cycle to failure;  $N_f$ ) 로 하였다.

$$\sigma_{Tmax} < \frac{\sigma_{H-L} (100 - X)}{100} \quad (1)$$

$$\sigma_{H-L} = \frac{1}{\left(\frac{N}{2} - 4\right)} \sum_{i=\frac{N}{2}}^{N-4} (\sigma_{Tmax})_i$$

여기서,  $\sigma_{Tmax}$  ; tensile peak stress (매 싸이클에서의 인장시의 최대應力)

$\sigma_{H-L}$  ; half life tensile peak stress ( $N-4$  싸이클에서  $\frac{N}{2}$  싸이클까지의 tensile peak stress 의 평균치)

$N$  ; 反復數

$X$  ; failure level (range; 1 ~ 100 %)

본 實驗에서는  $X$  값을 50%로 취했기 때문에 (1) 式은

$$\sigma_{Tmax} < 0.5 \sigma_{H-L} \quad (2)$$

로 간략화 된다. 즉, 임의 反復數에서의 引張時의 最大應力이  $\sigma_{H-L}$ 의 1/2 보다 작은 조건일 때 破壞가 發生한 것으로 간주했다. 또한, 본 實驗에서는 임의의  $\epsilon_{ta}$ 에 대한 實驗結果 [히스테리시스루프(hysteresis loop), 塑性變形率範圍 (plastic strain range ;  $\Delta\epsilon_p$ ), 應力範圍 (stress range ;  $\Delta\sigma$ )] 들은 1~8 사이클까지는 매 사이클마다, 그 이상의 사이클들에서는 (3) 式에 정의된 사이클들에서 각각 얻어졌다.<sup>17)</sup>

$$N = 2^n \quad (3)$$

$$n = 4.5, 6, 7, \dots$$

또한, 각 試驗片에 대한 彈性係數(E) 값은 제 1 사이클 중의 1/4 사이클 동안에 결정되었다.

본 實驗은 室溫의 空氣中에서 行해졌으며, 實驗結果들은 SI 單位로 정리되었다.

### 3. 實驗結果 및 考察

#### 3. 1 反復應力-變形率舉動 (Cyclic Stress-Strain Behavior)

Fig. 3은 SM41B에  $\epsilon_{ta} = 0.2\%$ 로 反復疲勞荷重을 加하였을 때의 反復應力-變形率 히스테리시스 루프(hysteresis loop)群을 나타내고 있다. 反復數가 증가함에 따라 一定의  $\epsilon_{ta}$ 에 대한 應力應答치가 감소하는 反復軟化(cyclic softening)현상이 발생하고 있음을 알 수 있다.

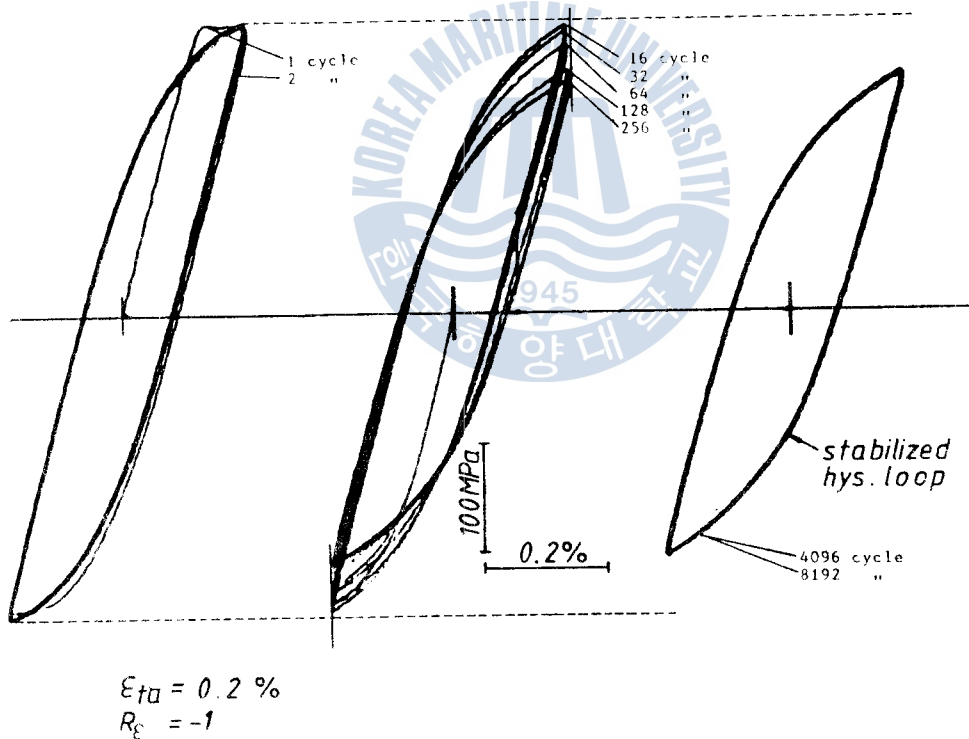


Fig. 3. Variation of cyclic stress-strain hysteresis loops by companion specimen method. (SM 41B)

Fig.4는 SM41B에  $\epsilon_{ta} = 0.8\%$ 로 反復疲勞荷重을 加하였을 때의 反復應力-變形率 히스테리시스 루프群을 나타내고 있다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이  $\epsilon_{ta} = 0.2\%$ 인 경우와는 반대로 反復數의 증가에 따라 應力應答치가 증가하는 反復硬化(cyclic hardening) 현상이 발생하고 있음을 알 수 있다.

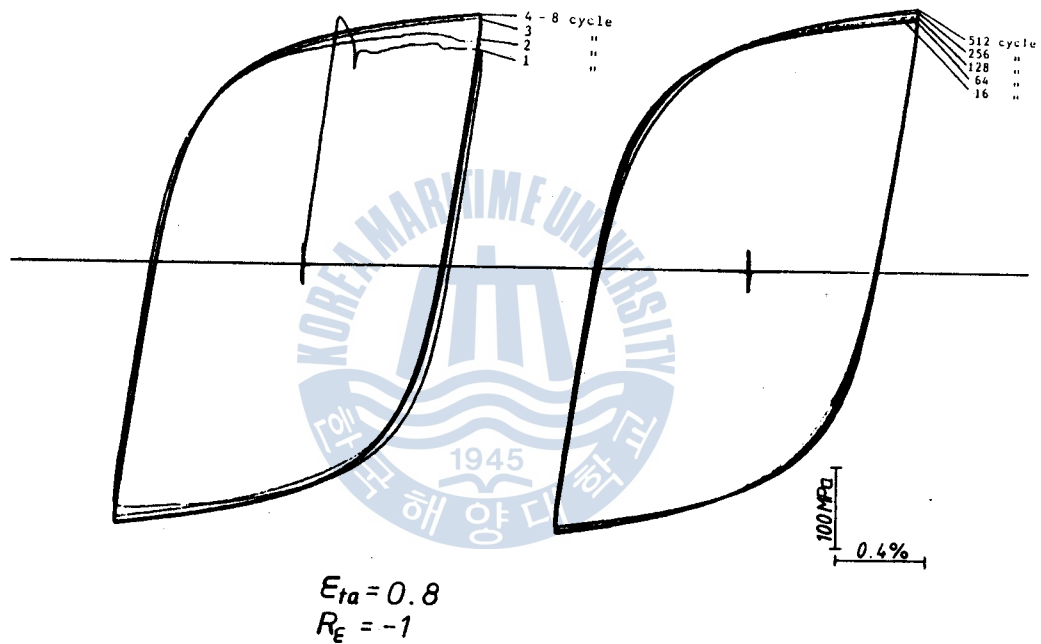


Fig. 4. Variation of cyclic stress-strain hysteresis loops by companion specimen method. (SM41B)

Fig.5는 SF45 A의  $\epsilon_{ta} = 0.8\%$ 인 조건하에서의 히스테리시스 루프群을 나타내고 있다. SF45 A 역시 SM41B의  $\epsilon_{ta} = 0.8\%$ 에서와 마찬가지로 反復硬化現象을 보이고 있다.



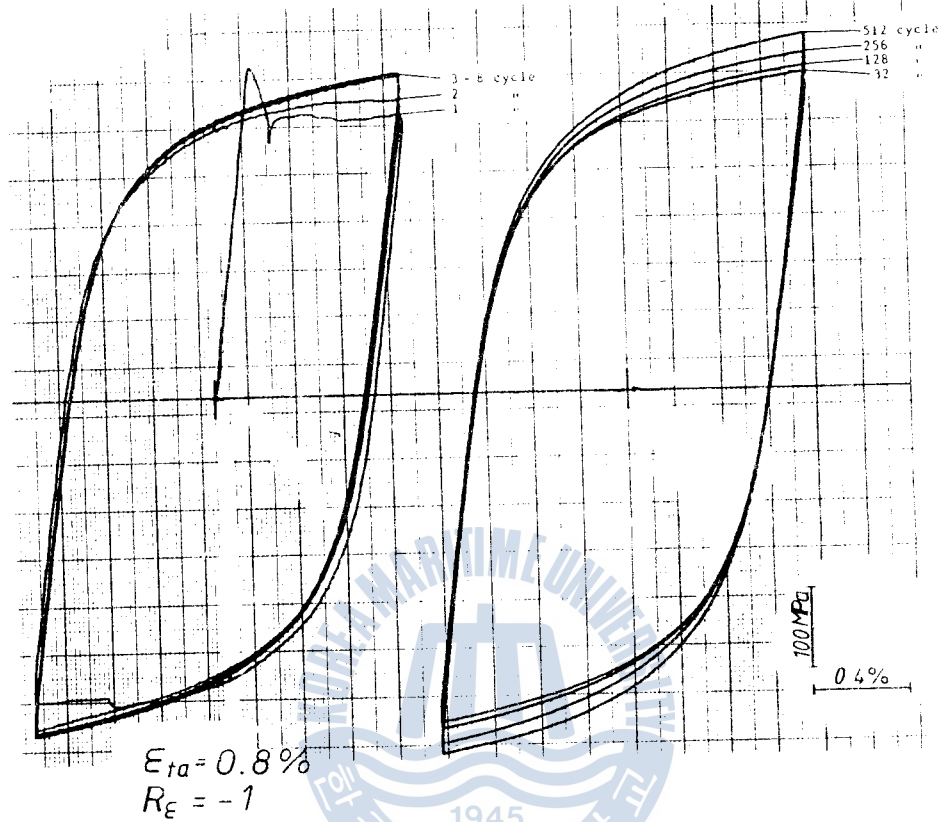


Fig. 5. Variation of cyclic stress-strain hysteresis loops by companion specimen method. (SF45A)

Fig.6 과 Fig.7 은 각각 SM41B 와 SF45A 에 있어서 反復數를 變數로 취하였을 때, 각  $\epsilon_{ta}$  에 應答하는 應力振幅과 反復數와의 關係를 나타낸 것이다. SM41B에서  $\epsilon_{ta} = 0.2\%$ 인 경우 앞서 히스테리시스 루프로 부터 고찰한 바와 같이 현저히 軟化함을 알 수 있다. 한편  $\epsilon_{ta} = 0.4\%$ 에서는 약간의 硬化현상이 발생하나, 그 變化量은  $\epsilon_{ta} = 0.2\%$ 에서 보다는 현저하게 줄어들고 全壽命에 걸쳐 거의 일정한 應力振幅이 나타나고 있다.  $\epsilon_{ta} = 0.4\%$  이상의 경우들에 있어서는 전부 反復硬化함을 알 수 있다.

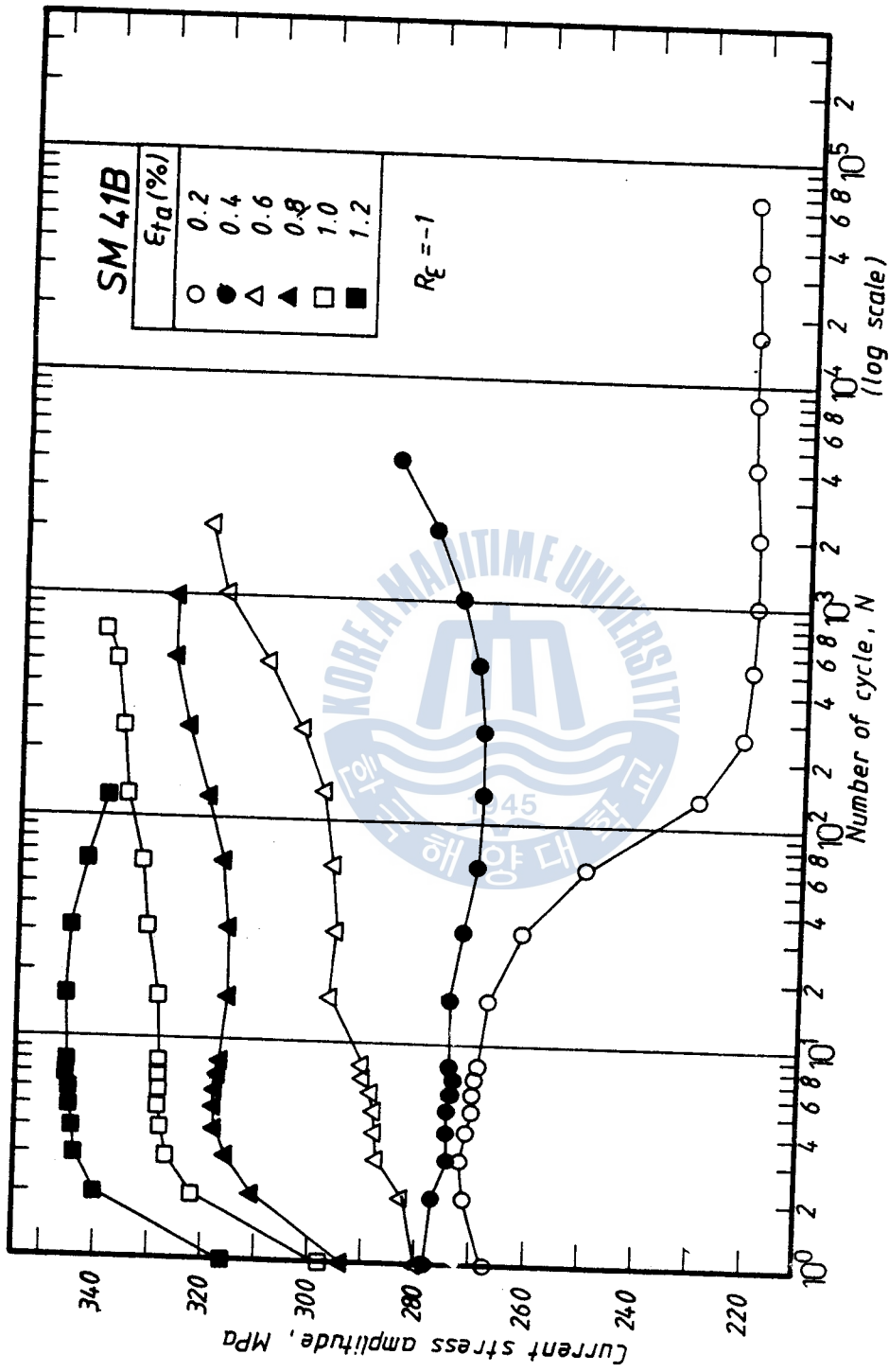


Fig. 6. Variations of cyclic stress amplitude under constant total axial strain amplitude conditions. (SM41B,  $R_{\xi} = -1$ )

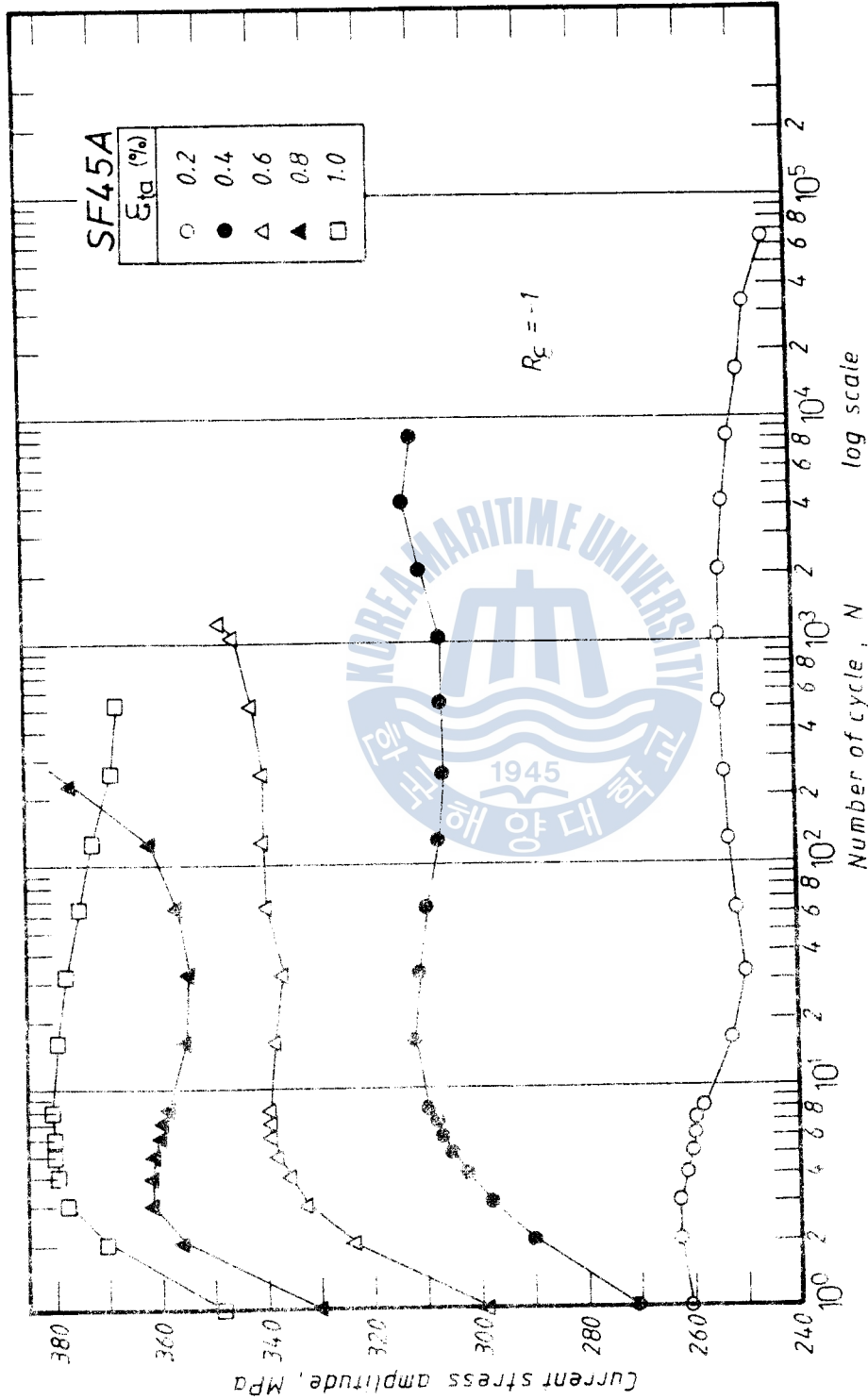


Fig.7. Variation of cyclic stress amplitude under constant total axial strain amplitude conditions. (SF 45A)

한편 SF45A에서는 Fig.7에 나타낸 바와같이  $\epsilon_{ia} = 0.2\%$ 에서는 약간의 軟化가 발생하지만, 그것은 SM41B에 있어서보다는 극히 적다.  $\epsilon_{ia}$ 가 0.2%보다 커지면, 反復硬化하는 경향은 SM41B에서와 같으나, 應力振幅의 變化量에 있어서, SM41B에 비하여 큼을 알 수 있다.

이와같은 사실은 Fig.4와 Fig.5를 비교하여 보아도 알 수 있다. 따라서 SF45A는 SM41B에 비하여 高變形率에서 더 큰 反復硬化特性을 가지는 것으로 思料된다.

이와 같이, 反復變形率 附加에 따른 反復軟化 또는 硬化舉動은 鋼種에 따라, 또한  $\epsilon_{ia}$ 의 大小에 따라 달라짐을 알 수 있다.<sup>11), 15)</sup>

### 3.2 單純引張特性과 反復應力-變形率特性

Fig.8과 Fig.9는 각각 SM41B와 SF45A의 單純引張應力-變形率曲線과 反復應力-變形率曲線을 함께 나타낸 것이다.

그림에서 一點鎖線으로 나타낸 것이 反復應力-變形率曲線이고 ▲ 및 ●로 표시된 점들은 각  $\epsilon_{ia}$ 에 대하여 거의 안정된 應力-變形率舉動을 주는  $1/2 N_f$ 인 反復數에서의  $\sigma_a$ 와  $\epsilon_{ia}$ 의 관계이다.<sup>5), 6)</sup> 본 實驗에서 취한 全實驗條件에서 脆性變形이 발생하였기 때문에 單純引張應力-變形率曲線인 實線과 反復應力-變形率曲線인 一點鎖線은 각각 아래의 (5a)식과 (5b)식으로 표현할 수 있다.

單純引張應力-變形率

$$\begin{aligned}\sigma &= K \cdot (\epsilon_p)^n \\ &= \sigma_y (\epsilon_p / \epsilon_y)^n\end{aligned}\tag{5a}$$

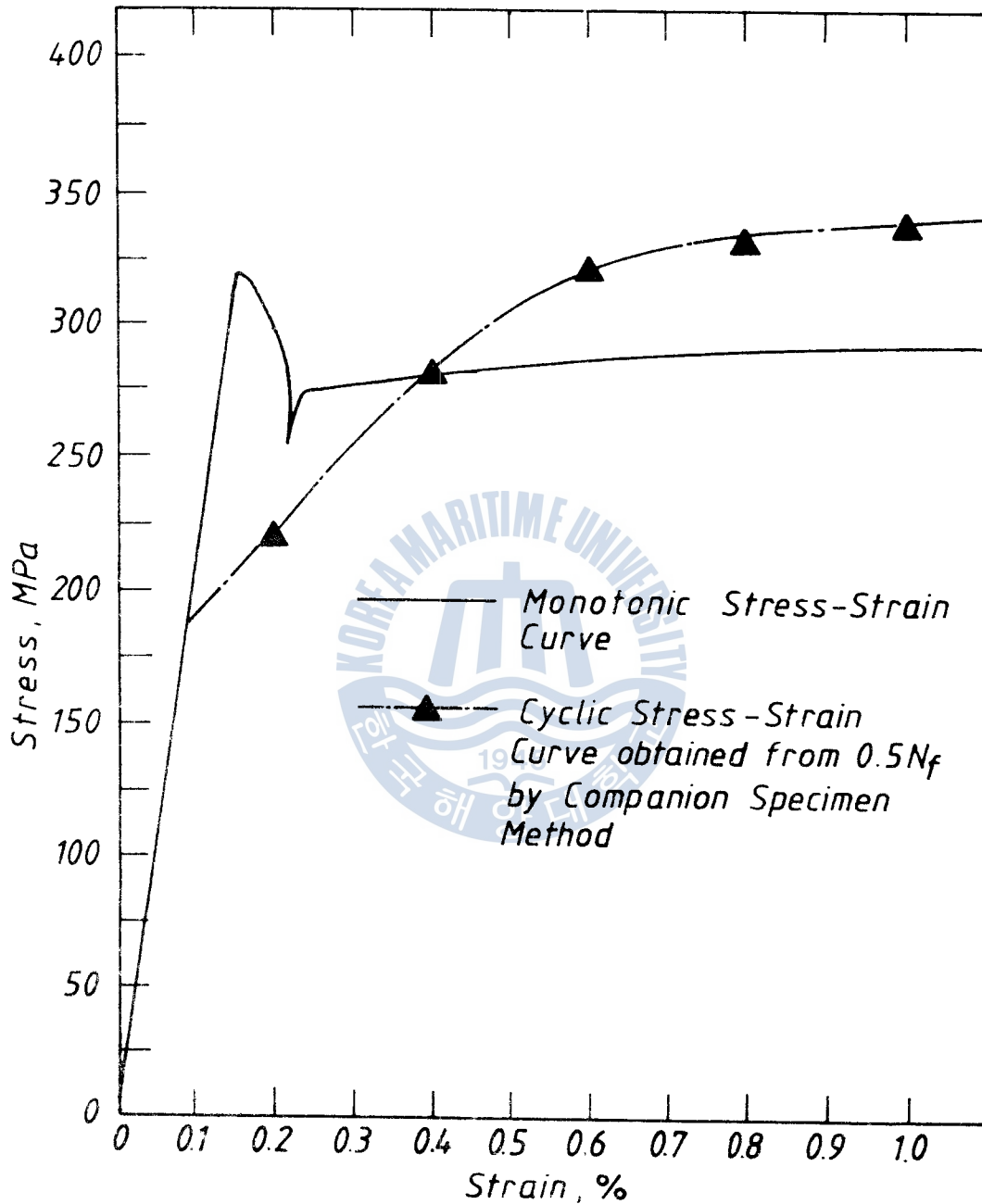
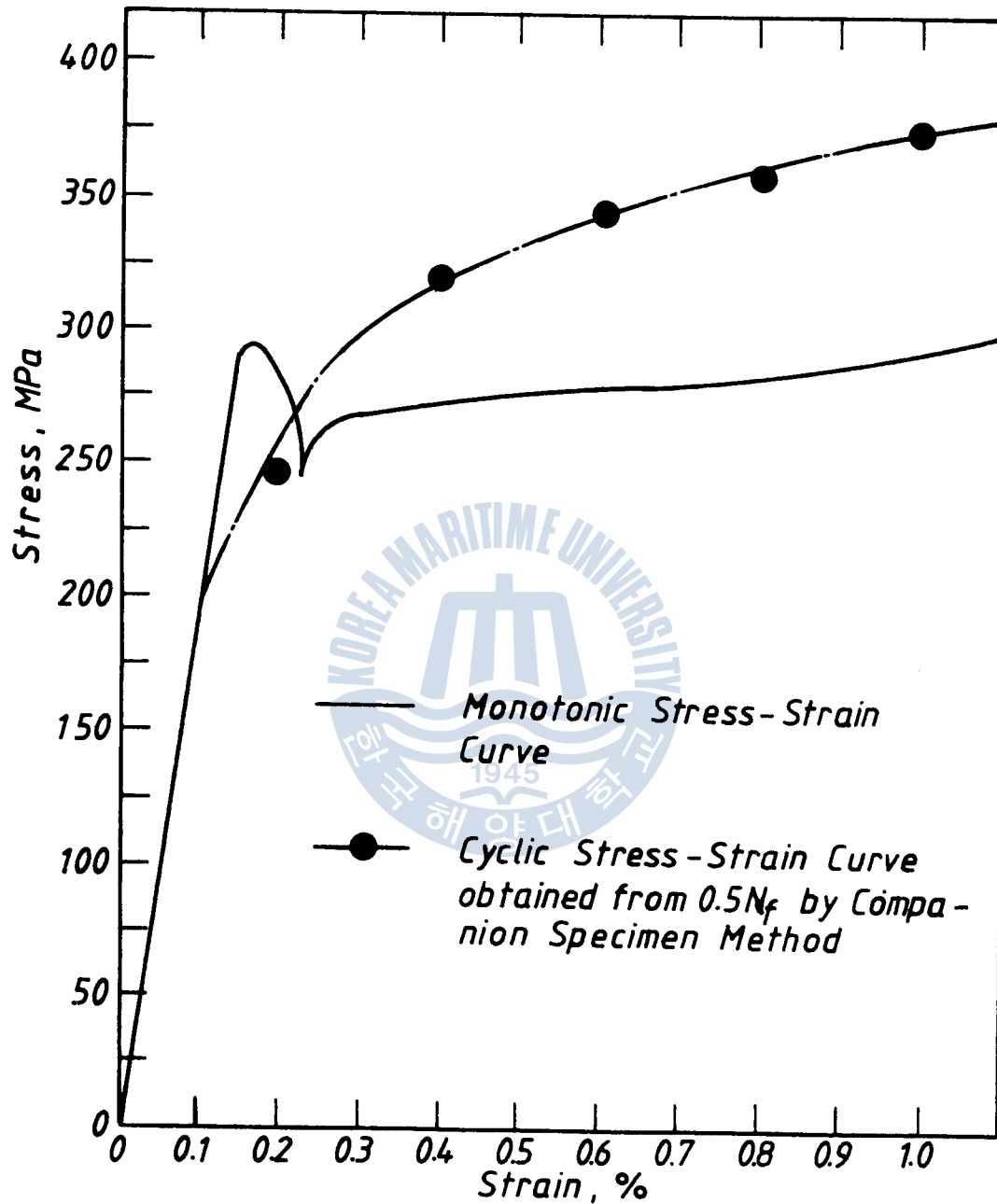


Fig. 8. Comparison of Monotonic & Cyclic stress-strain behavior. (SM41B)



**Fig. 9. Comparison of Monotonic & Cyclic stress - strain behavior (SF45A)**

加工工程의 다른 가공공정의 低炭素鋼에 대한 低 싸이클 疲勞特性에 관한 研究  
反復應力-變形率

$$\begin{aligned}\sigma_a &= K' \cdot (\epsilon_{pa})^{n'} \\ &= \sigma_{yc} \left( \epsilon_{pa} / \epsilon_{yc} \right)^{n'}\end{aligned}\quad (5b)$$

實驗結果들을 이용하여  $K, n, \sigma_y, K', n', \sigma_{yc}$  를 구하면 Table 3 으로 정리된다. (단,  $\sigma_y$  및  $\sigma_{yc}$  값은  $\epsilon_y = \epsilon_{yc} = 0.2\%$ 로 취했을 때의 값이다.)

Table 3 Monotonic & Cyclic stress-strain constants.

Material	Monotonic			Cyclic		
	K	$\sigma_y$ (MPa)	n	K'	$\sigma_{yc}$ (MPa)	n'
SM 41 B	301.4	280	0.0436	348.9	262.5	0.1768
SF 45 A	335.7	287	0.0975	394.6	294.5	0.1818

Manson<sup>16)</sup> 등은 引張強度,  $\sigma_u$ , 와 0.2% 옴셋 降伏強度 (0.2% offset yield strength),  $\sigma_{ys}$ , 의 비,  $\sigma_u / \sigma_{ys}$ , 가 1.4 보다 큰 材料는 反復硬化한다는 사실을 보고하고 있다. 본 實驗의 實驗材料인 SM41B의 경우  $\sigma_u / \sigma_{ys} = 1.48$ , SF45A에 있어서는  $\sigma_u / \sigma_{ys} = 1.70$  으로 위에서 언급한 일반적인 사실과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

### 3.3 低싸이클 疲勞壽命特性 ( $\epsilon_p - 2N_f$ 曲線)

Fig.10과 Fig.11은 각각 SM41B와 SF45A의 低싸이클 疲勞壽命曲線인  $\epsilon_p - 2N_f$  曲線을 나타내고 있다.

여기서  $2N_f$ 는 變換각도의 逆轉數 (number of reversal)를 나타낸다. Fig.6과 Fig.7에서 알 수 있는 바와 같이 임의의  $\epsilon_{pa}$ 에

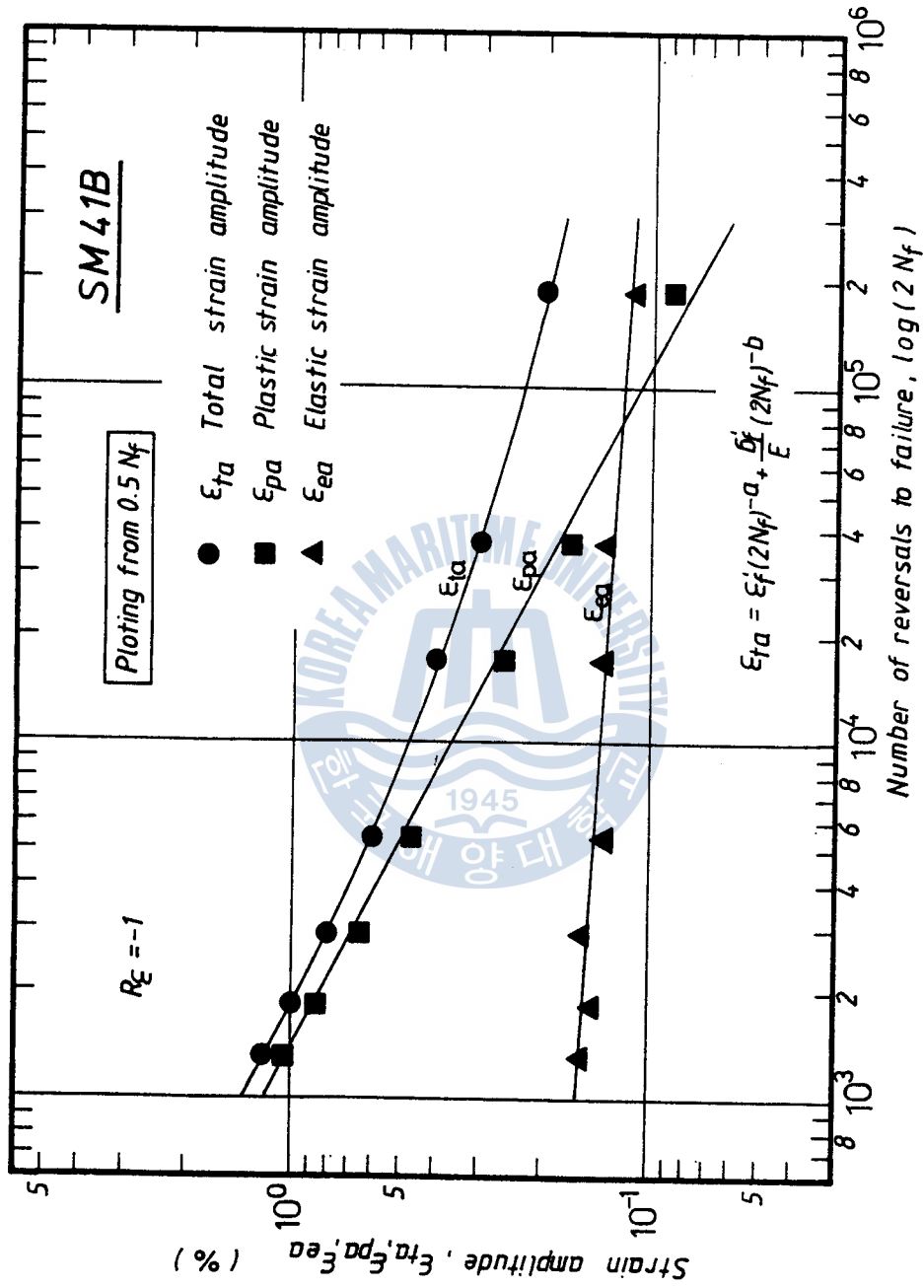


Fig.10 . Low cycle fatigue strain-life curve ( SM41B,  $R_{\epsilon} = -1$  )



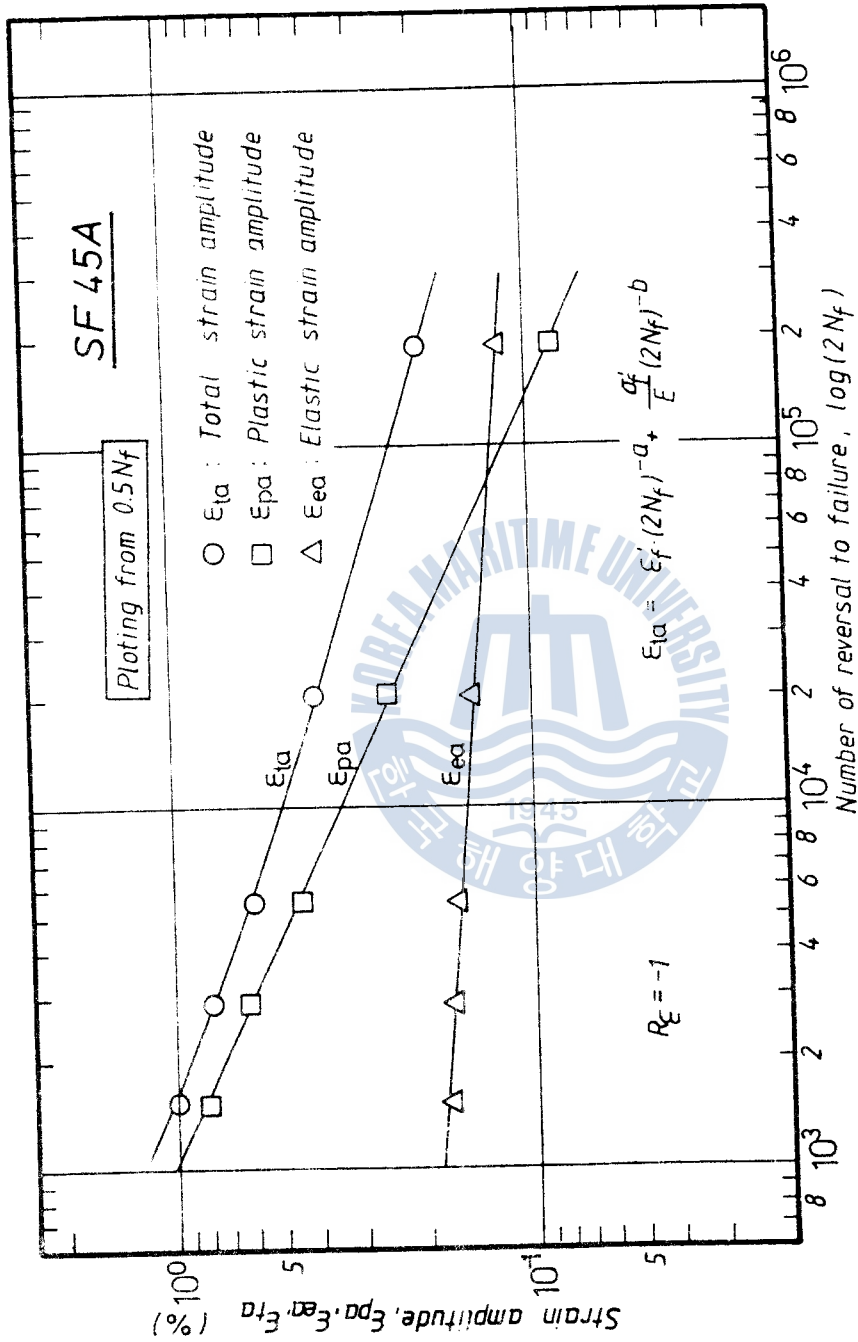


Fig.11. Low cycle fatigue strain - life curve (SF45A,  $R_\sigma = -1$ )

대한 應力應答치는  $1/2 \cdot N_f$  부근에서 거의 안정화되기 때문에,  $\epsilon_{ta}$  는  $1/2 \cdot N_f$  에서의 應力-變形率 히스테리시스 루프로 부터 彈性變形率成分 ( $\epsilon_{ea}$ ) 과 塑性變形率成分 ( $\epsilon_{pa}$ )으로 나뉘어 진다. 따라서 주어진 壽命  $2N_f$  에서 全變形率振幅,  $\epsilon_{ta}$ 는 彈性變形率과 塑性變形率의 합이다. 이것을 數式化하면 (6)式으로 나타내어 진다.

$$\begin{aligned}\epsilon_{ta} &= \epsilon_{pa} + \epsilon_{ea} \\ &= \epsilon_{pa} + \frac{\sigma_a}{E}\end{aligned}\quad (6)$$

여기서  $\epsilon_{ea} - 2 \cdot N_f$  관계는 Basquin's Eq.인 (7)式으로 나타낼 수 있다.<sup>4)</sup>

$$\epsilon_{ea} = \frac{\sigma_f'}{E} \cdot (2N_f)^{-b}\quad (7)$$

또한,  $\epsilon_{pa} - 2 \cdot N_f$  관계는 Manson-Coffin 式인 (8)式으로 나타낼 수 있다.<sup>4)</sup>

$$\epsilon_{pa} = \epsilon_f' \cdot (2N_f)^{-a}\quad (8)$$

그림에서 보여지고 있는 바와 같이  $\epsilon_{ea} - (2N_f)$  와  $\epsilon_{pa} - (2N_f)$ 는 兩對數(log-log) 좌표상에서 양호한 직선관계를 나타낸다.<sup>1), 4), 7)</sup> 實驗結果들을 이용하여 각 직선을 最小自乘法 (least square method)에 의해 근사하고 각각의 계수 및 지수,  $\epsilon_f'$ ,  $a$ ,  $\sigma_f'/E$ ,  $b$ 를 정리하면 Table 4와 같다.

여기서  $\epsilon_{ta}$ 와  $N_f$ 와의 관계는 (6), (7), (8)式으로 부터

$$\epsilon_{ta} = \epsilon_f' (2N_f)^{-a} + \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^{-b}\quad (9)$$

加工工程이 다른 두 종류의 低炭素鋼에 대한 低 싸이클 疲勞特性에 대한 研究

Table 4. Coefficients & exponents of L.C.F Eq.

Material	$\epsilon_f'$	$a$	$\sigma_f'/E$	$b$
SM41B	0.351	0.498	0.00237	0.06
SF45A	0.279	0.478	0.00342	0.087

로 나타낼 수 있다. 그림에 보여지는 바와같이 鋼種에 따른 低싸이클 疲勞壽命曲線의 차이는 거의 나타나지 않고 있다. 이는 SM 41 B 와 SF 45A의 軟性 및 機械的 特性치가 거의 같다고 하는 사실에 기인하리라 思料된다.<sup>(4)-7)</sup>

#### 3. 4 低싸이클 疲勞 破斷面의 微視的 考察

Photo. 2 및 Photo. 3은 각각 SM41B와 SF45A의  $\epsilon_{ta} = 0.2, 0.4,$  그리고 1.0 %에서 破斷된 破面의 巨視的 (macroscopic)인 形狀을 나타내고 있다.

그림에서 보여지는 바와 같이  $\epsilon_{ta}$ 가 커질수록 破斷面은 더욱 커짐에 따라, 破斷面에 나타나는 2次龜裂 (secondary crack)의 크기도 커짐을 알 수 있다. 이는  $\epsilon_{ta}$ 가 커질수록 試片에는 더 큰 塑性變形이 發生함을 推用하기 때문이다 思料된다. 그리고, 破面上에는 試片表面 여러 부분에서 發生된 龜裂들이 階梯狀인 階段 (step) 등이 다 수 관찰되어 지고 있다.<sup>18)</sup>

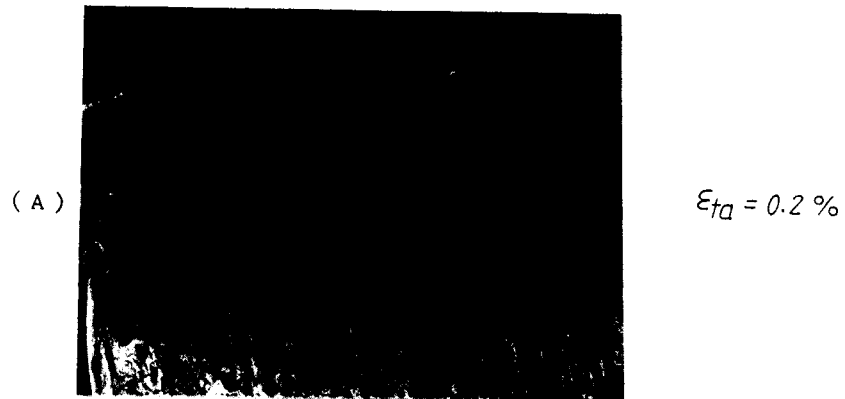
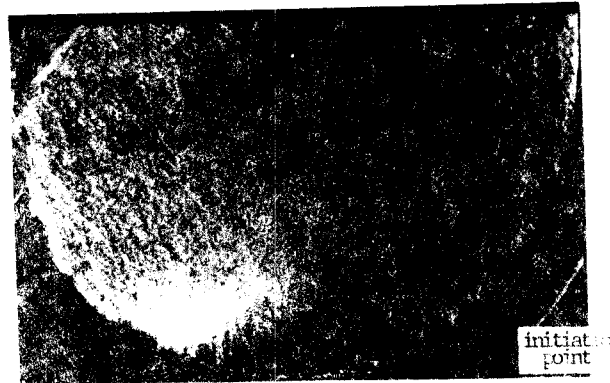
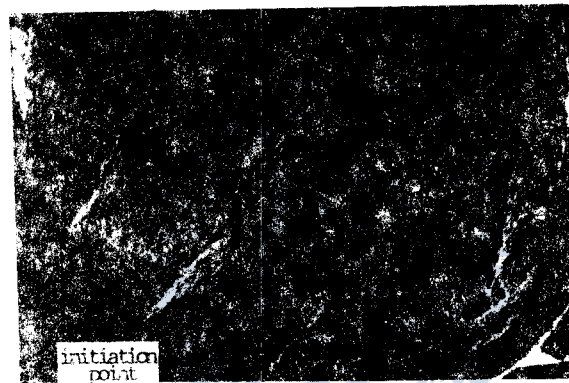


Photo. 2 . Macroscopic fractographies of the Low Cycle Fatigue fracture surface. ( SM41 B )

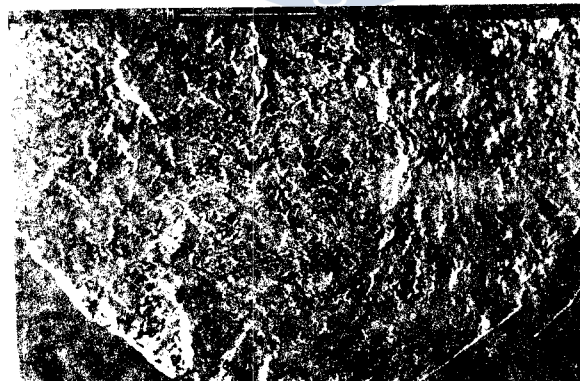
加工工程이 다른 두 종류의 低炭素鋼에 대한 低 사이클 疲勞特性에 관한 研究



$\epsilon_{70} = 0.2\%$



$\epsilon_{70} = 0.4\%$



$\epsilon_{70} = 1.0\%$

Photo. 3. Macroscopic fractographies of the Low Cycle Fatigue fracture surface. ( SF45 A )

Photo.4 의 (A)와 (B)는 각 鋼材에 대해  $\epsilon_{t,a} = 0.2, 1.0\%$  조건하에서 反復荷重을 附加하여 破斷시킨 破面들의 微視的 (microscopic) 形狀을 나타낸 것이다. 그림으로 부터 알 수 있는 바와 같이 低變形率 附加時에는 疲勞破面の 特徵인 스트라이에이션 (striation)이 뚜렷하게 나타난다. 반면, 高變形率 附加時에는 龜裂面の 上部와 下部가 壓縮時 摩擦됨에 의해 龜裂面の 摩滅 (rubbing)이 發生하여<sup>20)</sup> 破面の 뚜렷한 形狀을 觀察할 수는 없었지만, 破面全般에 걸쳐 Striation 보다는 tire track이 形成되어져 있음을 확인할 수 있다.

Photo.5는 附加되는  $\epsilon_{t,a}$ 의 大小에 따른 破面上的의 差異를 考察하기 위해  $\epsilon_{t,a} = 0.2, 0.4, 1.0\%$ 에서 破斷된 破面들의 代表的인 部分을 확대하여 나타낸 것이다.

그림으로 부터 알 수 있는 바와 같이 低變形率 附加 ( $\epsilon_{t,a} = 0.2\%$ ) 時의 破面에서는 스트라이에이션의 形成이 지배적인 반면, 高變形率이 될수록 破面상에 스트라이에이션은 줄어들고, rubbing 部와 tire track의 形成이 지배적이 됨을 알 수 있다.<sup>20)</sup> 또한 破面상에 나타나는 2次龜裂은 低變形率에서는 粒內的 (transgranular)인 반면, 高變形率에서는 粒界的 (intergranular)이었고, 이와같은 사실은 photo.4 에서도 확인할 수 있다.<sup>21)</sup>

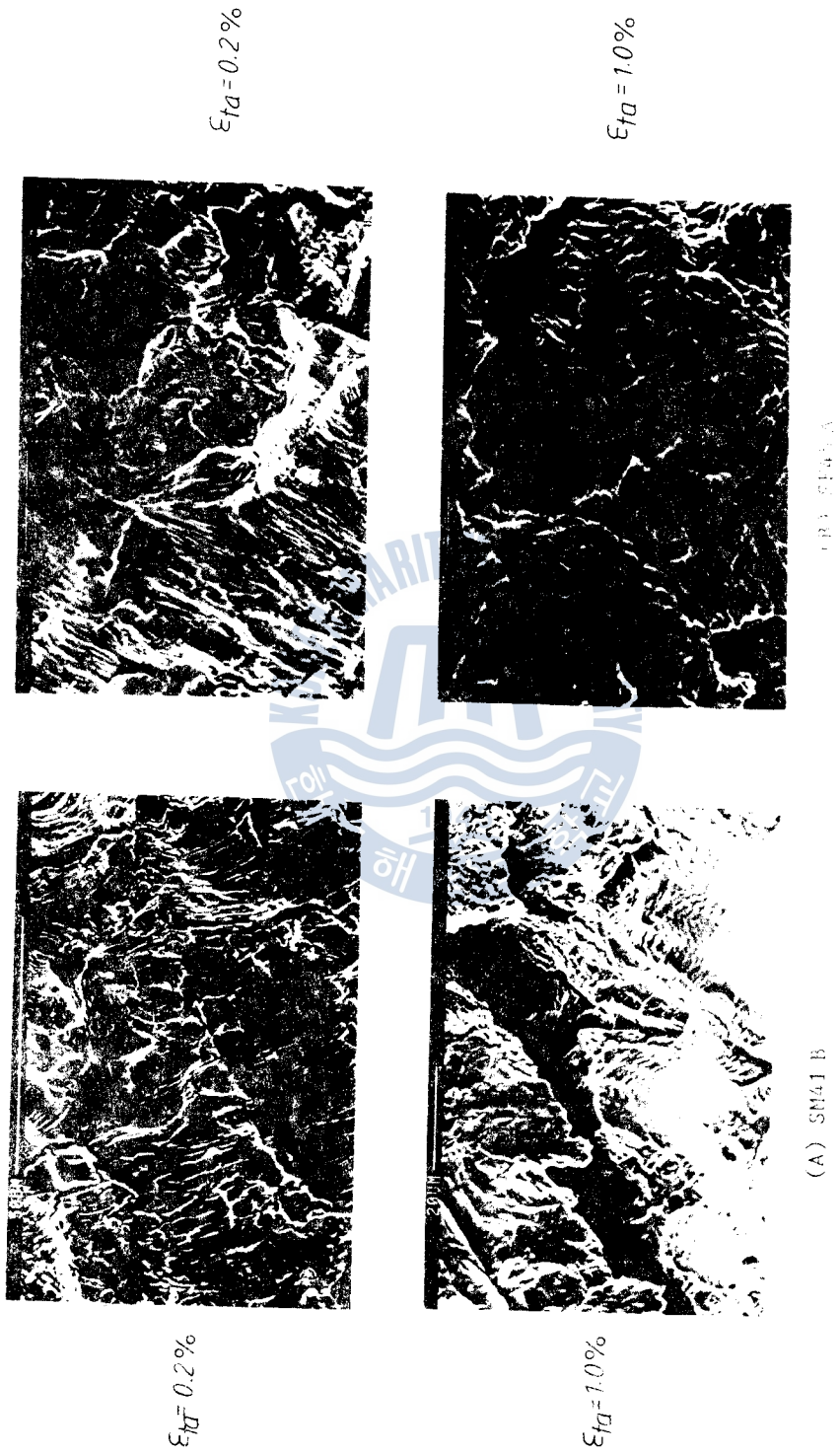


Photo. 4 . Microscopic fractographies of low cycle Fatigue fracture surface of test materials

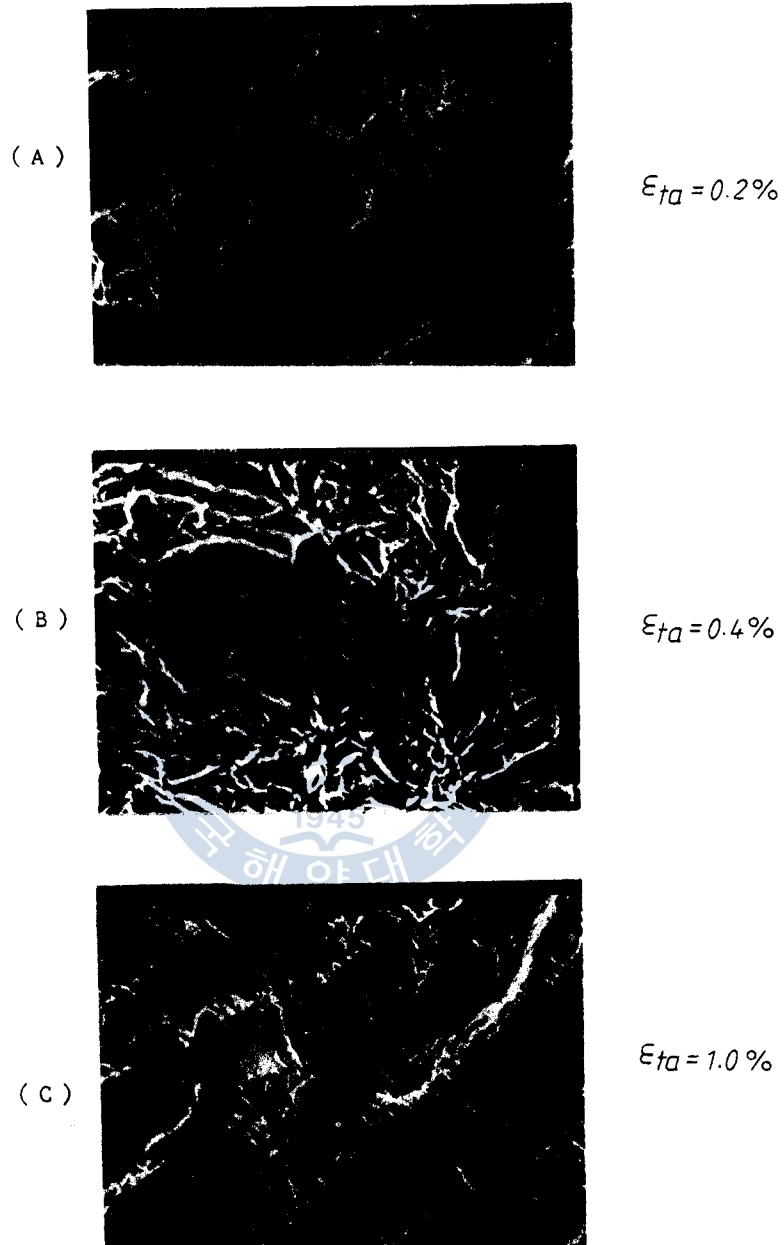


Photo. 5 . Variations of the Low Cycle Fatigue fracture surface with changing the loading condition



## 4. 結 論

加工工程의 不同 SM41B와 SF45A 鋼種에 對하여 室溫의 空氣 中에 對한 低歪이클 疲勞試驗을 經한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. SM41B 鋼材의 場合 低變形率振幅 ( $\epsilon_{ta} < 0.4\%$ ) 에서는 反復軟化가 起한 反復硬化한다. 한편, SF45A 鋼材는  $\epsilon_{ta} = 0.2\%$ 를 除外한 모든 變形率振幅 ( $0.2\% < \epsilon_{ta} \leq 1.0\%$ ) 에 對한 反復硬化한다.
2. 單純引張應力-變形率舉動이 비슷한 鋼들이라 한지라도, 反復應力-變形率舉動에 있어서는 큰 차이를 나타낸다.
3. SM41B와 SF45A 鋼材의 低歪이클 疲勞壽命은 本 實驗範圍 ( $\epsilon_{ta} = 0.2\% \sim 1.2\%$ ) 內에서 거의 同一하였다.

$\epsilon_{ta} - N_f$ 의 關係는 SM41B 鋼材의 경우

$$\epsilon_{ta} = 0.351 \cdot (2N_f)^{-0.498} + 0.00237 \cdot (2N_f)^{-0.06}$$

SF45A 鋼材의 경우

$$\epsilon_{ta} = 0.279 \cdot (2N_f)^{-0.478} + 0.00342 \cdot (2N_f)^{-0.087}$$

으로 나타낼 수 있다.

4. 低歪이클 疲勞 破斷面은 低變形率에서는 스트라이에이션 양상으로,

高變形率에서는 rubbing 과 tire track 양상으로 된다. 한편, 低變形率域에서 2次龜裂은 粒內的이지만, 高變形率에서는 粒界的이었다.



## 參 考 文 獻

1. 幡中, 金屬材料の繰返し應力-ひずみ特性と低サイクル疲勞壽命, 日本機械學會論文集(A編), 50-453, pp.831 ~ 838 (昭59)
2. Rolfe, Barsom, Fracture and Fatigue Control in Structures, Prentice-Hall, Inc., pp.213-214, (1982).
3. Truchon M., Application of Low Cycle Fatigue Test Results to Crack Initiation from Notches, ASTM STP 770, pp.254-268, (1982).
4. H.O. Fuchs, R.I. Stephens, Metal Fatigue in Engineering, A Wiley Interscience Pub., pp.56-57, (1980).
5. 西島, 松岡, 外3人, JIS機械構造用鋼の軸荷重疲勞特性, 日本機械學會論文集(A編), 50-453, pp.1011 ~ 1018 (昭59)
6. 西島, 田中, 外3人, JIS機械構造用炭素鋼なりびに Cr 及び Cr-Mo鋼の軸荷重疲勞特性, 日本機械學會論文集(A編), 46-412, pp.1314 ~ 1328 (昭55)
7. 松岡, 外2人, 高強度鋼の低サイクル疲勞特性, 日本機械學會論文集(A編), 52-480, pp.1831 ~ 1837 (昭61)
8. Landgraf R.W., Cumulative Fatigue Damage under Complex Strain Histories, ASTM STP 519, pp.213-228, (1973).
9. Koibuchi K., Kotani S., The Role of Cyclic Stress-Strain Behavior on Fatigue Damage under Varying Load, ASTM STP 519, pp.229-245, (1973).
10. 二瓶, 外2人, ヒステリシスエネルギー論による曲げ疲勞強度の豫測 日本

造船學會論文集, 156, pp.458 ~ 468 (昭60)

11. 飯田, 外3人, 歪制御低サイクル疲労におけるヒステリシスループの解析と壽命推定, 日本造船學會論文集, 150, pp.471 ~ 481 (昭57)
12. D'Haeyer R., Simon P., Low Cycle Fatigue Behavior of Thick High Strength Steel Plates for Pressure Vessels, ASTM STP 770, pp.296-310, (1982).
13. Nowack H., Hanschman D., Forth J., Lütjering G., Jacoby G., Prediction Capability and Improvements of the Numerical Notch Analysis for Fatigue Loaded Aircraft and Automotive Components, ASTM STP 770, pp.269-295, (1982).
14. 山田, 星出, 外2人, 中炭素鋼の平滑材塑性疲労における表面き裂の傳ば解析に基づく壽命則の検討, 日本機械學會論文集(A編), 49-440, pp.441 ~ 451 (昭58)
15. 趙相明, 切欠き材における疲労き裂の初期傳播特性に関する研究, 日本大阪大學博士論文(昭62)
16. Crews J.H., Hardrath H.F., Experimental Mechanics, Vol.23, pp.313-320, (1966).
17. Instron, Ltd., Handbook for Materials Testing Machine, (1982).
18. R.W. Smith, M.H. Hirschberg, and S.S. Manson, Fatigue Behavior of Materials under Strain Cycling in Low and Intermediate Life Range, NASA TN D-1574, (1963).
19. D. Broek, Elementary engineering fracture mechanics, Martinus Nijhoff pub., pp.24-42, (1982).

加工工程이 다른 두종류의 低炭素鋼에 대한 低 사이클 疲勞特性에 대한 研究

20. T. Hotta, T. Ishiguro, N. Ishil, S. Sekiguchi, Fractographic Studies on the Low Cycle Fatigue of Steels, Cracking and Fracture in Welds, Pro. of 7st Int. Sym., (1971).
21. ASM, Metal Handbook, Fractography and atlas of fractographs, 8ed., (1974).



