

〈技術論文〉

構造用 低炭素鋼材의 低사이클 疲勞特性에 관한 研究

김영식* · 노재충** · 한명수***

(1988년 8월 25일 접수)

A Study on the Low Cycle Fatigue Characteristics for the Structural Low Carbon Steels

Young-Sik Kim, Jae-Choong Noh and Myoung-Soo Han

Key Words ; Strain Controlled(변형율제어형), Cyclic Softening(반복연화), Strain Ratio(변형율비), Tire Track(타이어트랙), Fully Reversed(완전양진형)

Abstract

In recent years, the fatigue design method by analysis for the mechanical components and the welded structures has much increased, instead of the fatigue design method by rule that has been widely used from the past days. When a fatigue design is conducted by that method, the basic informations, fatigue life curves are mainly obtained from the results of the strain controlled low cycle fatigue test. From these point of views, the low cycle fatigue test is coming to be given a much importance lately. In this paper, the strain controlled low cycle fatigue properties at room temperature in air environment were investigated for the low carbon forged steel, SF45A, and the rolled steel for the welded structure, SM 41B. Throughout the test, strain ratio, R , was maintained constant with the fully reversed condition, -1 . As the experimental results, the cyclic stress-strain behaviours of the test materials were different each other, but the low cycle fatigue life-time of them appeared to show little difference in the region of this test conditions.

1. 序 論

低사이클 疲勞試驗은 機械要素, 構造物 등의 應力 集中部에 있어서 均열발생 수명을 예측하기 위해서 行하여 지고 있다. 應력집중부인 노치底部(root of notch)의 疲勞거동은 그 材料의 平滑試驗片(smooth specimen)을 변형을 제어조건(strain controlled condition)下에서 低사이클피로시험을 行하여 얻은 결과와 相似시킬 수 있다. 즉 피로하중이 작용하는 노치底部의 應력-변형율履歷(stress-

strain history)을 平滑試驗片上에 再現하여 低사이클 疲勞試驗을 行하고, 여기서 얻은 결과를 累積損傷理論(cumulative damage theory)에 적용함으로써 노치底部에서의 微小均열 발생에 근거한 수명을 예측 할 수 있다^(1~2).

이와 같은 목적을 위하여 지금까지 여러 材料들에 대한 低사이클 疲勞特性에 관한 研究가 보고되어 있으며^(3~5,10), 누적 損傷파라미터(parameter)를 이용한 수명추정^(6~9) 등이 行해졌고, 이를 기초로 하여 노치材에서의 均열發生 및 전파수명^(11~13)에 관한 多數의 論文이 보고되어 있다. 그러나, 機械, 構造物用 素材로서 널리 利用되고 있는 軟鋼級 低炭素 鍛造鋼材와 압연 鋼材에 대한 低사이클 疲勞試驗 데이터는 매우 빈약한 편이며, 더욱이 國產의

* 정회원, 한국해양대학 선박기계공학과

** 로이드 선급협회

*** 한국해양대학 대학원

이들 材料에 대한 低사이클 疲勞試驗데이터는 보고 되어 있지 않다.

또한 使用中인 構造用 低炭素鋼의 殘存 疲勞수명을 예측하기 위해서는 疲勞과정中的 硬化 및 軟化 舉動이 매우 중요한 요소이나⁽¹⁴⁾, 鋼材의 加工 工程 또는 負荷變形率의 크기에 따른 반복 硬化 및 반복 軟化 舉動은 밝혀져 있지 않다.

本 研究에서는 鍛造과정을 거친후 노멀라이징 (normalizing) 처리된 SF45A 鋼種과 압연후 자연 냉각시킨 SM41B 鋼種의 두 國產 鋼種에 대해 저 사이클 疲勞試驗을 行하여 低사이클 疲勞特性을 밝히고, 鋼材의 加工工程과 負荷變形率變化에 따른 疲勞과정中的 軟化 및 硬化 거동을 관찰하였다. 그리고 低사이클 疲勞破面의 微視的 考察을 통해서 負荷變形率 크기에 따른 微視的 破面 樣相의 變化를 밝혀 破壞 解析의 기초資料로 提供하였다.

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 SM41B와, 추진축계, 크랭크축, 커플링볼트, 등에 사용되는 SF45A이다. Table 1은 그들의 化學的 性분을 그리고 Table 2는 機械的 性質을 나타낸다.

Fig. 1은 본 實驗에서 사용한 試驗片의 형상 및 치수를 나타내고 있다. 試驗片은 SM41B 경우 25 mm 판두께 중앙에서, SF45A는 단조와 열처리가 완료된 材料의 판두께 중앙에서 각각 압연방향과

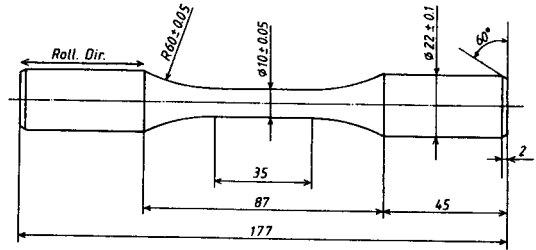


Fig. 1 Configuration & dimensions of specimens

평행하게 채취하였다. 試驗片은 선반가 공후 #1000의 砂布에 의해 원주방향으로 연마되었으며, 평행부와 R부는 酸化크롬으로 버핑(buffing) 연마가공을 행하였다.

2.2. 實驗方法

實驗에 사용한 試驗機로서는 靜의 最大荷重 250 KN, 動的 最大荷重 ±100KN 용량의 閉루프 서보 油壓式 材料試驗機(Instron社製, 8000 series)이다.

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 반복負荷하는 多數試驗法(companion specimen method)으로 수행되었으며, 負荷되는 變形率의 波形은 삼각파형(triangular wave form)으로 하였다.

試驗片에 반복負荷되는 變形率의 制御 및 檢출은 35mm인 試驗片 평행부 상에 부착한 標點거리 25 mm의 knife edge形 伸張計(extensometer)에 의해 행하였다. 全實驗을 통하여 變形率比(strain ratio; $R\epsilon$)는 -1인 完全兩振으로 하였으며 負荷되는 變形

Table 1 Chemical compositions of test materials

Materials	Chemical composition (wt. %)									
	Desig.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Ceq
SM41B		0.13	0.28	1.0	0.014	0.004	—	—	—	0.308
SF45A		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 (%)
SM41B	200	289.1	426.6	33	
SF45A	70	286.2	487.1	27.5	55.0

率速度는 0.005/sec로 일정하게 하였다. 따라서 반복속도는 全變形率振幅의 大小에 따라 0.104~0.625Hz 범위 內이다. 負荷變形率의 誤差는 最大 ±0.0005 이하다 되도록 하였다.

本 實驗에서 試驗片의 破斷은 임의의 反復數에서의 引張時의 最大應力((σ_{Tm})_N)이 式⁽¹⁾로 주어지는 조건일 때 이루어진 것으로 하여⁽¹⁵⁾, 그때의 반복수를 負荷된 全變形率振幅(이하 ϵ_{ta} 로 表記함)에 대한 破斷반복수(number of cycle to failure; 以下 N_f 로 表記함)로 하였다.

$$(\sigma_{Tm})_N < \frac{1}{2} \cdot \sigma_{H-L} \quad (1)$$

여기서 σ_{H-L} 은 half life average tensile peak stress로서 다음과 같이 나타내어진다.

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

또한 여기서 N ; number of cycles, $i = \frac{N}{2}, \frac{N}{2} + 1, \frac{N}{2} + 2 \dots N - 4$,

本 實驗은 공기중에서 行해졌으며, 實驗結果들은 SI 單位로 정리되었다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 반복응력-변형을 舉動

Fig. 2는 SM41B에 $\epsilon_{ta} = 0.2\%$ 로 반복 疲勞荷重

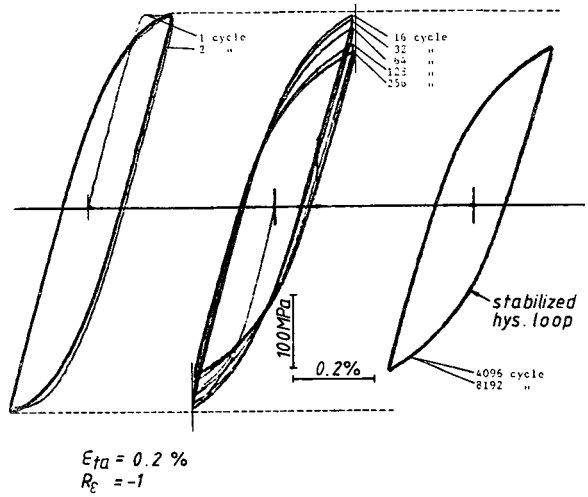


Fig. 2 Variation of cyclic stress-strain hysteresis loops by companion specimen method (SM41B)

을 加하였을 때의 반복응력-變形率 히스테리시스 루프(hysteresis loop) 群을 나타내고 있다. 반복수가 增加함에 따라 일정한 ϵ_{ta} 에 대한 應力應答値가 감소하는 反復軟化(cyclic softening) 현상이 일어나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3은 SM41B에 $\epsilon_{ta} = 0.8\%$ 로 반복 疲勞荷重을 加하였을 때의 히스테리시스 루프群을 나타내고 있다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 $\epsilon_{ta} =$

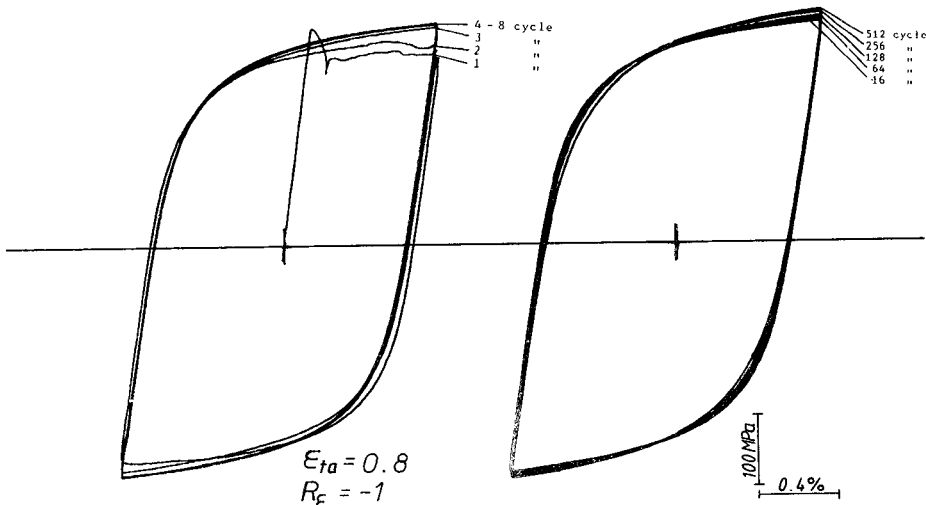


Fig. 3 Variation of cyclic stress-strain hysteresis loops by companion specimen method (SM41B)

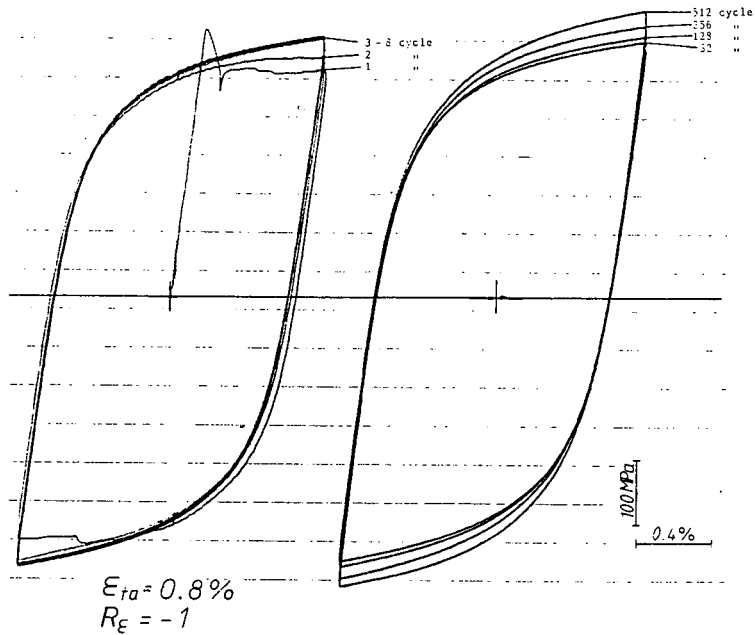


Fig. 4 Variation of cyclic stress-strain hysteresis loops by companion specimen method (SF45A)

0.2%인 경우와는 반대로 반복수의 증가에 따라 應力應答値가 증가하는 反復硬化(cyclic hardening) 현상이 일어나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 SF45A의 $\epsilon_{ta}=0.8\%$ 인 조건하에서의 히스테리시스 루프群을 나타내고 있는데, 이 경우도 SM41B의 同一 荷重條件下에서와 같이 反復硬

화 현상을 보이고 있다.

Fig. 5와 6은 각각 SM41B와 SF45A에 있어서 反復數를 變數로 취했을 때 각 ϵ_{ta} 에 응답하는 應力진폭과 反復數와의 關係를 나타낸 것이다. Fig. 5의 SM41B에서 $\epsilon_{ta}=0.2\%$ 인 경우 反復數의 增加에 따라 약간 硬化後 現저히 軟化하고 있음을 보이

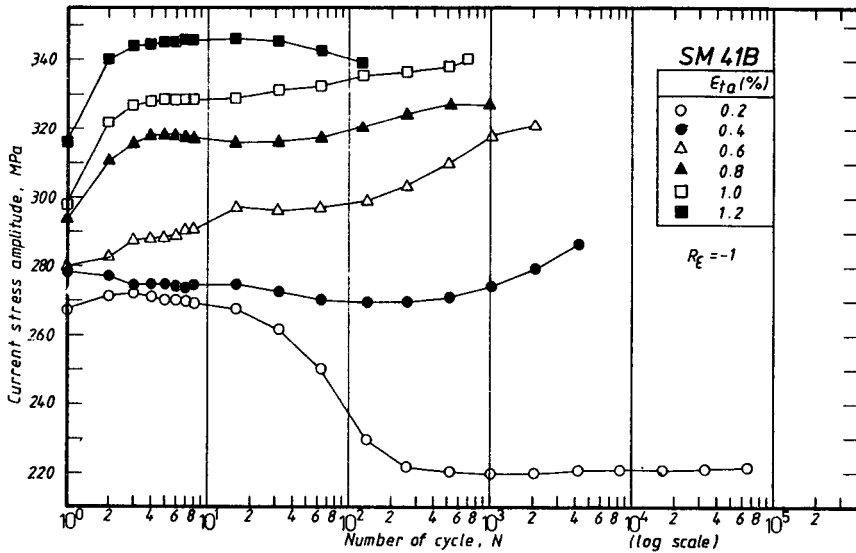


Fig. 5 Variation of cyclic stress amplitude conditions (SM 41B, $R_{\epsilon}=-1$)

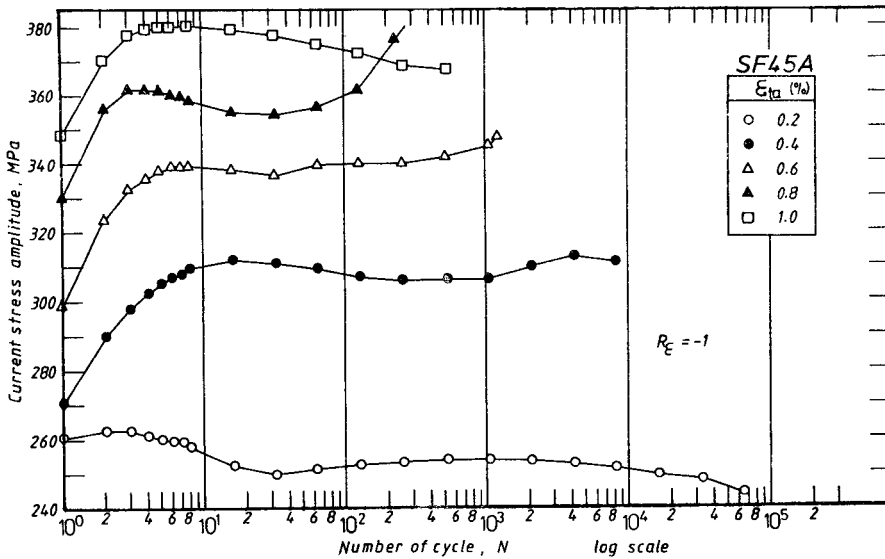


Fig. 6 Variation of cyclic stress amplitude under constant total axial strain amplitude conditions(SF45A)

고 있으며, 變形率 振幅의 增加와 함께 初期의 硬化 정도가 현저하게 됨을 보이고 있다.

한편 SF 45A에서는, Fig. 6에 나타난 바와 같이 $\epsilon_{ta}=0.2\%$ 에서는 약간의 軟化가 발생하지만, 그것은 SM41B에 있어서 보다 극히 적다. ϵ_{ta} 가 0.2% 이상에서 반복初期에 反復硬化 현상을 보이는 것은 SM41B의 경우와 마찬가지로, 그 硬化 정도가 현저히 크게 나타남을 보이고 있다.

이상에서 압연강재에 비해 단조강재의 경우가 反復 初期에 硬化가 현저하게 된다는 事實을 알았으나, 이는 압연강재의 경우가 단조강재에 비해 큰 加工變形率이 殘存되기 때문인 것으로 생각된다.

또한 두 鋼種 모두 10^3 회 內의 低사이클 範圍에서 破斷되는 高變形率 振幅의 조건을 除外하고 初期에 급격한 硬化舉動을 보인 후는 매우 완만하나 破斷에 이르기 까지 대체로 반복硬化되고 있음을 보이고 있다.

3.2 單純引張 特性과 반복응력-변형률 특성

Fig. 7과 Fig. 8는 各各 SM41B와 SF45A의 單純 引張응력-변형률 曲線과 반복응력-變形率 曲線을 함께 나타낸 것이다.

그림에서 반복응력-變形率 曲線上의 各點들은, 各 ϵ_{ta} 에 대하여 거의 안정된 應力-變形率 舉動을 나타내는 $1/2N_f$ 인 反復數에서의 σ_a 와 ϵ_{ta} 의 關係

이다. 本 實驗에서 取한 全 實驗條件에서 塑性變形이 발생하였기 때문에 單純引張應力-變形率 曲線과 반복응력-變形率 曲線에서 各各 다음 式이 成立한

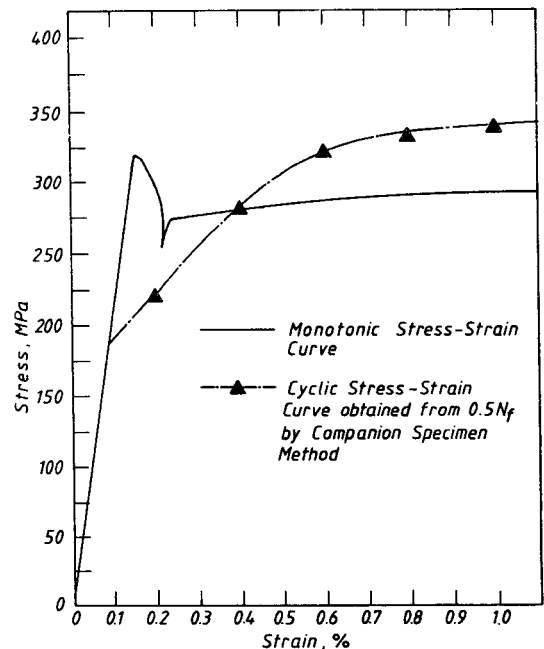


Fig. 7 Comparison of Monotonic & Cyclic stress strain behavior(SM41B)

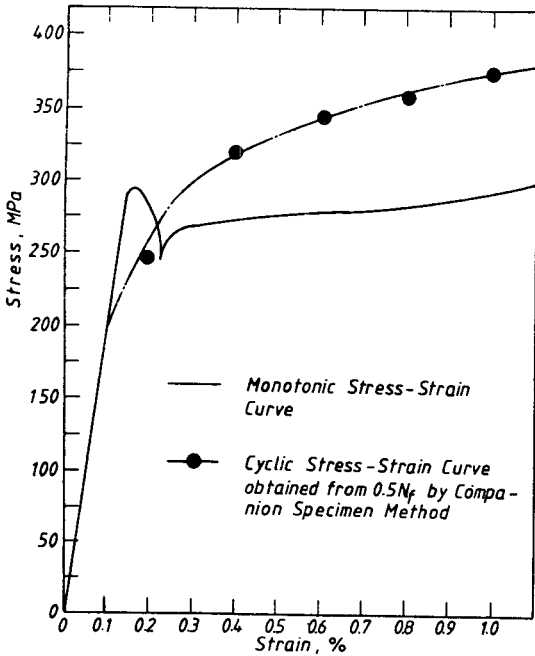


Fig. 8 Comparison of Monotonic & Cyclic stress-strain behavior (SF45A)

다.

單純引張應力-變形率

$$\sigma = K \cdot (\epsilon_p)^n \tag{3}$$

反復應力-變形率

$$\sigma_a = K' \cdot (\epsilon_{pa})^{n'} \tag{4}$$

Table 3 Monotonic and cyclic stress-strain material constants

Material	Monotonic		Cyclic	
	K	n	K'	n'
SM41B	301.4	0.0436	348.9	0.1768
SF45A	335.7	0.0975	394.6	0.1818

여기서

ϵ_p : 단순 인장時의 소성 변형률

ϵ_{pa} : 소성 변형률진폭

n, n' : 단순 및 반복경화율 指數

k, k' : 계수

實驗結果들을 이용하여 k, n, k', n' 를 구하면 Table 3으로 정리된다.

Manson⁽¹⁶⁾ 등은 引張強度 σ_u 와 0.2% offset 降伏強度(0.2% offset yield strength) σ_{ys} 의 비 σ_u/σ_{ys} 가 1.4 보다 큰 材料는 反復硬化한다는 사실을 보고하고 있다. 本 實驗의 實驗材料인 SM41B의 경우 $\sigma_u/\sigma_{ys}=1.48$, SF45A에서는 $\sigma_u/\sigma_{ys}=1.70$ 으로 위에서 언급한 一般의인 事實과 잘 一致함을 알 수 있다.

3.3 低사이클 疲勞수명 特性($\epsilon_{ia}-N_f$ 曲線)

Fig. 9과 Fig. 10은 각각 SM41B와 SF45A의 低 사이클 疲勞수명곡선인 $\epsilon_{ia}-N_f$ 曲線을 나타내고

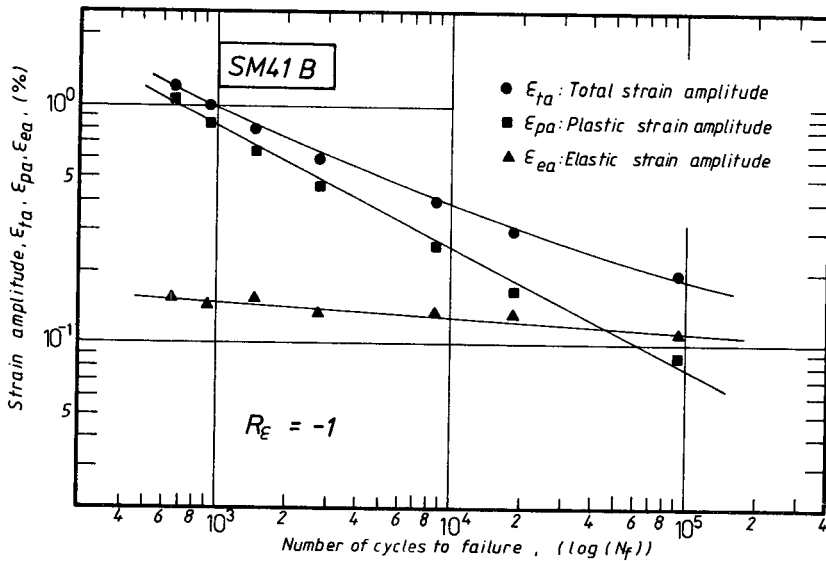


Fig. 9 Low cycle fatigue strain-life curve

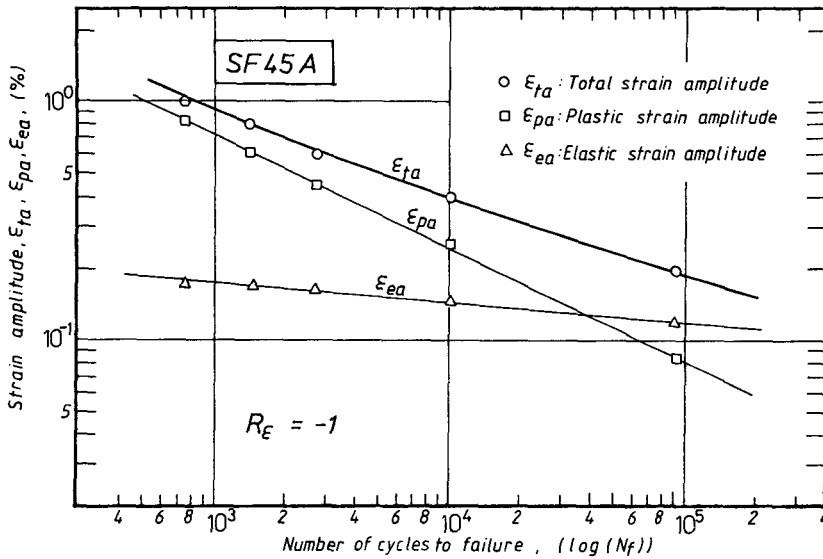


Fig. 10 Low cycle fatigue strain-life curve

있다. 여기서 N_f 는 破斷까지의 反復數(number of cycle to failure)를 나타낸다⁽²⁾.

Fig. 5와 Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이 임의의 ϵ_{ia} 에 대한 응력응답치는 $\frac{1}{2} \cdot N_f$ 부근에서 거의 안정화 되기 때문에, ϵ_{ia} 는 $\frac{1}{2} N_f$ 에서의 應力-變形率 히스테리시스 루프로부터 彈性變形率性分(ϵ_{ea})과 塑性變形率性分(ϵ_{pa})으로 나뉘어 진다. 따라서 주어진 壽命 N_f 에서 全變形率振幅 ϵ_{ia} 는 彈性變形率과 塑性變形率의 합이다. 이것을 數式化하면 式 (5)로 나타내어 진다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{ia} &= \epsilon_{pa} + \epsilon_{ea} \\ &= \epsilon_{pa} + \frac{\sigma_a}{E} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $\epsilon_{ea} - N_f$ 관계 및 $\epsilon_{pa} - N_f$ 관계는 各各 Basquin's 式 및 Manson Coffin 式인 다음의 式 (6)과 式 (7)로 나타 낼 수 있다⁽²⁾.

$$\epsilon_{ea} = \frac{\sigma_f'}{E} \cdot (N_f)^{-b} \quad (6)$$

$$\epsilon_{pa} = \epsilon_f' \cdot (N_f)^{-a} \quad (7)$$

여기서, σ_f'/E 와 ϵ_f' 는 각각 피로강도계수 (fatigue strength coefficient) 및 피로연성계수 (fatigue ductility coefficient)이며 a 및 b 는 각각 疲勞延性指數 (fatigue ductility exponent) 및 疲勞強度指數 (fatigue strength exponent)이다.

Fig. 9와 Fig. 10에서 보여지고 있는 바와 같이 $\epsilon_{ea} - N_f$ 와 $\epsilon_{pa} - N_f$ 관계는 兩對數좌표상에서 양호한 直線관계를 나타낸다.

實驗結果들을 이용하여 각 직선을 最小자승법에 의해 근사하고 각각의 계수 및 지수 ϵ_f' , a , σ_f'/E , b 를 정리하면 Table 4와 같다.

여기서 ϵ_{ia} 와 N_f 와의 관계는 式 (5), (6), (7)으로 부터

$$\epsilon_{ia} = \epsilon_f' (N_f)^{-a} + \frac{\sigma_f'}{E} (N_f)^{-b} \quad (8)$$

로 나타낼 수 있다. 그림에서 보여지는 바와 같이 鋼種에 따른 低사이클 疲勞壽命曲線의 차이는 거의 나타나지 않고 있다.

Table 4 The coefficients and exponents of the low cycle fatigue curves

Material	ϵ_f'	a	σ_f'/E	b
SM41B	0.2485	0.498	0.00227	0.06
SF45A	0.2	0.478	0.00322	0.087

3.4 低사이클 疲勞 破斷面의 微視的 考察

Fig. 11은 SM41B 鋼에 대해 $\epsilon_{ia} = 0.2, 0.4$ 및 1.0%에서 破斷된 破面의 巨視的인 形狀을 나타내고 있다.

사진에서 보여지는 바와 같이 ϵ_{ia} 가 커질 수록 破斷面은 더욱 거칠어 지며 破面上에 나타나는 2차

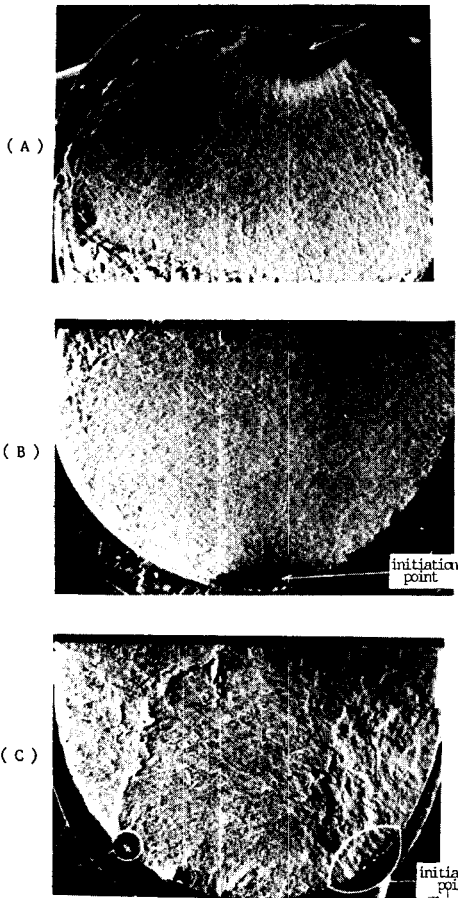


Fig. 11 Macroscopic fractographies of the low cycle fatigue fracture surface(SM41B)

균열(secondary crack)의 크기도 커짐을 알 수 있다. 이는 ϵ_{fa} 가 커질수록 시험편에는 더 큰 塑性變形이 반복하여 作用하기 때문이라 思料된다. 그리고 破面上에는 시험片 表面 여러부분에서 發生된 균열들이 합쳐되어 생긴 段(step)들이 다수 관찰되어 지고 있다.

Fig. 12는 SM41B 鋼에 대해 ϵ_{fa} 의 大小에 따른 破面上的의 差異를 考察하기 위해 $\epsilon_{fa}=0.2, 0.4, 1.0\%$ 에서 破斷된 波面の micro-fractograph을 나타낸 것이다. 이로부터 알 수 있는 바와 같이 低變形率 負荷($\epsilon_{fa}=0.2\%$)時의 破面에서는 疲勞破面의 特征인 스트라이에이션(striation)이 뚜렷이 나타난다. 반면, 高度變形 負荷時는 均열面의 上部와 下部가 압축時 마찰됨에 의해 均열面의 마멸(rubbing)이 발생하여⁽¹⁷⁾ 破面의 뚜렷한 形狀을 관찰할 수 없지만, 破面全般에 걸쳐 스트라이에이션보다는

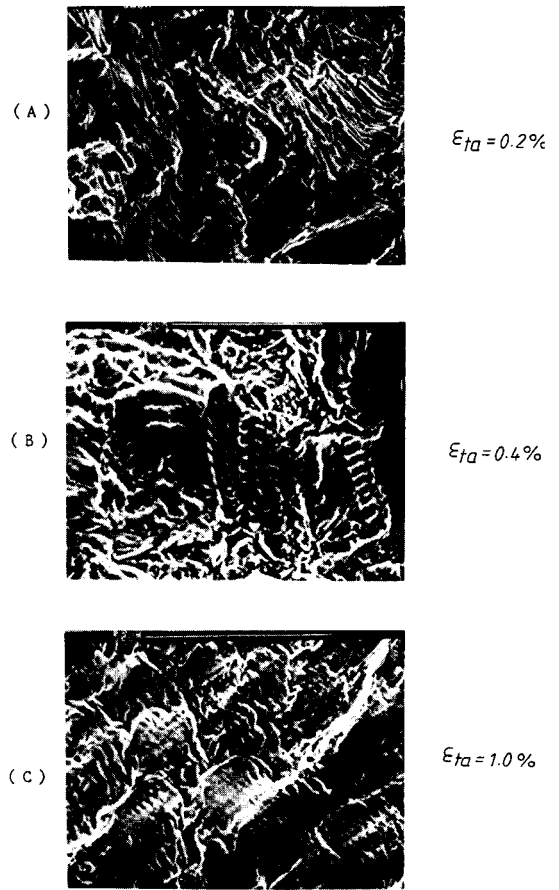


Fig. 12 Variations of the low cycle fatigue fracture surface with changing the loading condition

타이어 트랙(tire track)이 形成되어져 있음을 알 수 있다.

以上과 같은 破面樣相은 SM41B와 SF45A 鋼種에서 뚜렷하 차이점을 發見할 수 없었다.

4. 結 論

軟鋼級 低炭素 鍛造鋼인 SF45A와 압연鋼材인 SM41B 鋼種에 대해 室溫의 공기中에서 低사이클 疲勞試驗을 行한 결과 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 두 鋼種 모두 0.2%의 低變形率 振幅에서는 반복 軟化 舉動을 보이나, 그 以上の 變形率 振幅에서는 初期에 급격한 硬化舉動을 보인 후 안정된 상태로 되어 破斷에까지 이른다. 이러한 반복 初期의 硬化舉動은 鍛造鋼材의 경우가 더욱 뚜렷하다.

(2) 반복 塑性變形率 振幅(ϵ_{pa})과 응답응력진폭

(σ_a)의 關係는 두 鋼種에서 각각 다음과 같이 나타난다.

SF45A의 鍛造鋼의 경우

$$\sigma_a = 394.6(\epsilon_{pa})^{0.1818}$$

SM41B의 압연 鋼의 경우

$$\sigma_a = 348.9(\epsilon_{pa})^{0.176}$$

(3) 全變形振幅(ϵ_{ta})와 破斷수명(N_f)와의 關係는 두 鋼種에서 各各 다음과 같이 나타난다.

SF45A의 鍛造鋼의 경우

$$\epsilon_{ta} = 0.2 \cdot (N_f)^{-0.478} + 0.00322 \cdot (N_f)^{-0.087}$$

SM41B의 압연 鋼의 경우

$$\epsilon_{ta} = 0.2485(N_f)^{-0.498} + 0.00227 \cdot (N_f)^{-0.06}$$

(4) 低사이클 疲勞 破面은 低變形率에서는 스트라이에이션 양상으로, 高變形率에서는 rubbing과 tire track 樣相으로 된다.

參 考 文 獻

- (1) Truchon, M., 1982, "Application of Low Cycle Fatigue Test Results to Crack Initiation from Notches", ASTM STP 770, pp. 254~268.
- (2) Fuchs, H. O., Stephens, R. I., 1980, "Metal Fatigue in Engineering", A Wiley Interscience Pub., pp. 56~57.
- (3) 西島, 松岡, 外3人, 1984, "JIS 機械構造用強鋼의 軸荷重疲勞特性", 日本機械學會論文集(A編), 第50卷, 第453號, pp. 1011~1018.
- (4) 西島, 由中, 外3人, 1980, "JIS 機械構造用炭素鋼ならびにCr及びCr-Mo鋼의 軸荷中疲勞特性", 日本機械學會論文集(A編) 第46卷, 412號, pp. 1314~1328.
- (5) 松岡, 外2人, 1986, "高強度鋼의 低사이클疲勞特性", 日本機械學會論文集(A編), 第52卷, 第480號, pp. 1831~1837.
- (6) Landgraph, R.W., 1973, "Cumulative Fatigue Damage under Complex Strain Histories", ASTM STP 519, pp. 213~228.
- (7) Koibuchi, K., Kotani, S. 1973, "The Role of Cyclic Stress—Strain Behavior on Fatigue Damage under Varying Load", ASTM STP 519, pp. 229~245.
- (8) 二瓶, 外2人, 1985, "ヒステリシスエネルギー論による曲げ疲勞強度의 豫測", 日本造船學會論文集, 第156號, pp. 458~468.
- (9) 飯田, 外3人, 1982, "歪制御 低사이클疲勞におけるヒステリシスループ의 解釋と壽命推定", 日本造船學會論文集, 第150號, pp. 471~481.
- (10) D'Haeyer, R., Simon, P., 1982, "Low Cycle Fatigue Behavior of Thick High Strength Steel Plates for Pressure Vessels", ASTM STP 770, pp. 296~310.
- (11) Nowack, H., Hanschman, D., et al. 1982, "Prediction Capability and Improvements of the Numerical Notch Analysis for Fatigue Loaded Aircraft and Automotive Components", ASTM STP 770, pp. 269~295.
- (12) 山田, 星出, 外2人, 1983 "中炭素鋼의 平滑材塑性疲勞における表面き裂의 傳ば解釋に基づく壽命則의 檢討", 日本機械學會論文集(A編), 第49卷~第440號, pp. 441~451.
- (13) 趙相明, 1988, "切欠き材における疲勞き裂의 初期傳播特性に関する研究", 日本大阪大學博士論文.
- (14) 尾野, 仁瓶, 外2人, 1987, "疲勞損傷의 非破壞的診斷と殘存壽命豫測法", 日本溶接學會誌, 第56卷 第7號, pp. 417~421.
- (15) Instron, 1982, Instron Series 8000 "Application Program for Low Cycle Fatigue Test", Instron Manual.
- (16) Smith, R.W., Hirschberg, M.H, and Manson, s. s., 1963, "Fatigue Behavior of Materials under Strain Cycling in Low and Intermediate Life Range", NASA TN D-1574.
- (17) Hotta, T., Ishiguro, t., et al. 1971. "Fractographic Studies on the Low Cycle Fatigue of Steels", Cracking and Fracture in welds, Pro. of 1st Int. Sym. of the JWS.