大韓機械學會論文集 第10卷 第4號, pp. 477~486, 1986.

<論 文>

複合組織鋼의 低 및 高사이클 疲勞特性에 관한 實驗的 硏究(Ⅰ)

——低사이클 疲勞特性——

邕 章 祐*·成 洛 元**

(1986年 2月 18日 接受)

An Empirical Study on Low and High Cycle Fatigue Properties of Dual Phase Steel (Ⅰ)

——Low Cycle Fatigue Properties——

Jang Woo Ong and Rak Won Sung

Key Words: Dual Phase Steel(複合組織鋼), Stress-Strain Curve(應力-變形率曲線), Fatigue Life(疲勞壽命), Grain Size(粒徑)

Abstract

Full reversed push-pull ordinary low cycle fatigue test and multiple step test under strain control of triangular mode have been conducted in air at room temperature on the specimens of SM 20 C and the dual phase steel of the different grain size.

This paper present the low cycle stress-strain behavior, fatigue properties and fatigue life and the effect of grain size of dual phase steel.

The result of this study are as follows.

(1) The SM 20 C has revealed cyclic softening from the initial step while the dual phase steel has shown cyclic hardening followed by long periods of steady state of hysteresis loop.

(2) Cyclic hardening exponent is increased with the decrease of grain size.

(3) Fatigue life of the dual phase steel is increased in comparion with the SM 20 C and have the tendencies of increasing with the decrease of grain size.

1. 序 論

最近 鐵鋼材料의 諸特性을 効率的으로 活用하여 우수한 加工性과 强度를 겸비한 鋼材로 바꾸어 機械構造物의 輕量化 및 材料節減을 위한 方案으로 대두된 것의 하나가 複合組織鋼이다[1,2].

複合組織鋼은 金屬組織上에서 延性을 갖는 페라이트(ferrite)相과 强度를 지배하는 마르텐사이트(martensite)의 2相으로 構成되어 있다. 2相組織鋼은 價格이

* 正會員, 忠南大學校 工科大學 機械設計學科
** 正會員, 東亞大學校 工科大學 機械工學科

저렴한 熱間壓延鋼을 적정온도에서 열처리한 燒入組織鋼으로, 이에 관한 硏究가 최근에 활발히 이루어지고 있다[3]. 또한 複合組織鋼의 마르텐사이트조직의 형태에 따라 機械的 諸特性이 변하는 것이 알려져 있으며, 이에 대한 관심이 증대하고 있다. R.G. Davis 등은 引張試驗을 통하여 페라이트體積率의 증가와 함께 연성이 변하며 引張强度는 페라이트體積率의 變化와 밀접한 관계를 가지며, 또 소성구속효과는 마르텐사이트의 體積率, 두께, 경도에 따른다고 보고하였다[4,5]. 이상의 硏究들은 주로 複合組織鋼의 미시적 파괴기구 및 정적분위기에서의 특성에 관한 것이다. 最近에 들어 신소재에 대한 機械的 强度特性 규명을 위한 硏究와 더불어 複合組織鋼에 관한 硏究가 관심을 끌게 되었다[6].

따라서 本 硏究에서는 SM 20 C 를 母材로 하여 粒徑의 크기가 다른 3種의 複合組織鋼을 製作 同一한 분위기에서 低 및 高사이클 全領域에 걸쳐 疲勞特性을 검토하고져 한다. 第一報는 그 중 低사이클특성에 대한 보고이다. 一般的으로 低사이클 피로현상은 材料가 彈塑性 상태하에서 전위, 미소크랙, 보이드(void) 등의 인자가 복합적으로 作用하여 발생함으로 변형률속도, 制御波形, 溫度, 試驗方法 및 분위기에 따라 많은 영향을 받는다[7,8]. 따라서 本 硏究에서는 두가지 實驗方法을 使用, 應力-變形率거동을 검토 複合組織鋼의 疲勞特性과 粒徑크기가 피로거동 및 强度에 미치는 영향을 비교 고찰하였다.

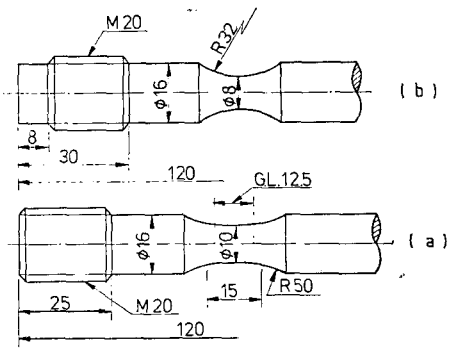


Fig. 1 Demension of fatigue specimen

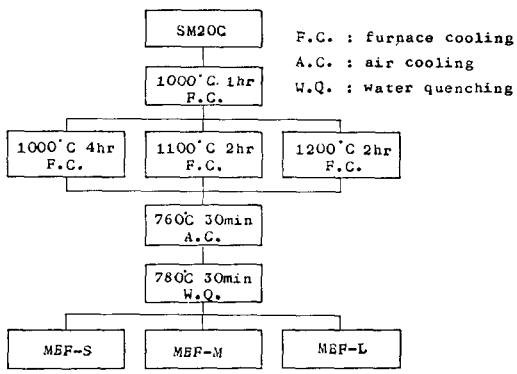


Fig. 2 Process of heat treatment

2. 試驗片 및 實驗方法

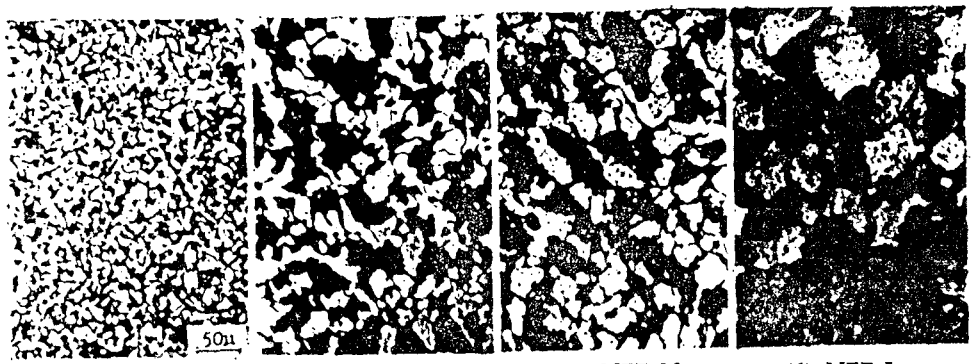
2.1 試驗片

素材는 지름이 20 mm 인 熱間壓延鋼 SM 20 C 이며 이의 化學的 成分은 Table 1 과 같다. 이 素材로부터 引張試驗片(KS 14 A 호) 및 疲勞試驗片(ASTM E 606-80)[8]을 Fig. 1 (a) 및 (b)와 같은 形狀으로 製作한 後 複合組織을 얻기 위하여 製作된 試片을 Fig. 2 와 같은 過程으로 다음과 같이 熱處理하였다.

母材(SM 20 C)의 均質化는 1000°C 에서 1 時間 維持시킨 後 爐冷을 하였다. 複合組織鋼(MEF)의 母相粒徑變化는 1000°C 에서 4 時間 維持한 것(이것을 MEF-S 材라고 칭함), 1100°C 에서 2 時間 維持한 것(이것을 MEF-M 材라고 칭함), 그리고 1200°C 에서 2 時間 維持한 것(이것을 MEF-L 材라고 칭함) 등 3 種으로 分類처리한 후 爐冷시켰다. 열처리는 高溫에서의 脫炭 및 酸化防止를 위해 질소분위기에서 하였다. 다음에 同一한 마르텐사이트 體積率과 硬度를 갖는 連結度를 얻기 위하여 760°C 에서 30 分間 維持시킨 후 담금질하였다. 이 때의 加熱溫度는 비교적 낮은 溫度이므로 脫炭 및 酸化가 적어서 시리콘나이트(siliconite) 電氣爐를 사용하였다. 熱處理 후 殘留應力을 除去하기 위해 200°C 에서 90 분간 템퍼링하였다. 열처리 된 試驗片의 顯微鏡組織은 Fig. 3 과 같으며 서로 母相粒徑이 다른 組織을 나타내고 있다. 이들 複合組織鋼의 結晶粒度, 體積率, 連結度 및 硬度의 測定結果는 Table 2 와 같다. 表에서 第 2 相의 體積率, 各相의 硬度 및 連結度 등이 거의 동일한 값을 나타내고 있어 이를 複合組織鋼은 同一한 塑性拘束效果와 미시적 內部應力을 갖고 母相粒徑만이 다른 複合組織鋼임을 알 수 있다.

Table 1 Chemical composition of SM20C (wt%)

C	Si	Mn	P	S
0.20	0.21	0.40	0.02	0.005



(a) SM 20 C (b) MEF-S (c) MEF-M (d) MEF-L

Fig. 3 Microstructure of MEF steel and SM 20 C

Table 2 Metallurgical properties of MEF specimen

Series	Ferrite grain size (μm)	Martensite volume fraction(%)	Hardness (Hv)			Connectivity (%)
			Martensite	Ferrite	Ratio	
MEF-S	32	53	539	192	2.81	96
MEF-M	48	53	540	192	2.81	97
MEF-L	65	52	541	192	2.80	98

2.2 實驗方法

Table 3은 引張試驗한 結果를 나타내며 이 때의 引張速度는 0.2 mm/min이다. 低사이클 疲勞試驗은 定變形率制御下에서 분당 0.5사이클, 波形은 引張과 壓縮이 같은 正3角波形($R=-1$)을 使用 실시하였으며 實驗結果의 檢證 및 實驗方法間의 영향을 比較하기 위해 實驗은 多數試驗片을 가지고 하는 通常的 方法(companion specimen test ; C.S.T. 라고 略함)과 單一試驗片을 가지고 하는 多段制御試驗(multiple step test ; M.S.T. 라고 略함)의 두가지 방법으로 실시하였다.

Table 4는 사용된 制御條件을 표시한다.

複合組織鋼에 대한 制御方式은 직경방향의 變形을 制御하였으며 SM 20 C 材는 複合組織鋼보다 引張强度가 낮어 挫屈의 영향을 고려하여 길이方向의 변형을 制御하였다. 직경방향의 制御는 크루크(Crook)와 포인터로 된 푸로브(probe)를 使用하였으며 길이방향 制御는 표점거리 12.5 mm의 伸張計(extensometer)를 使用하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 母相粒徑과 反復硬化 擧動

Fig. 4는 SM 20 C 母材와 3種의 複合組織鋼에 Table 4와 같은 변형을 중 低, 中 및 高의 變形率을 加할 때 얻어진 反復數에 따른 應力範圍의 변동상태를 그림으로 표시한 것이다. Fig. 5는 Fig. 4에서 高레벨과 低

Table 3 Mechanical properties of specimens

Specimen	0.2% off set stress (kgf/mm²)	Tensile strength (kgf/mm²)	True fracture stress (kgf/mm²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
SM 20 C	19.5	23.2	34.7	29.5	62.5
MEF-S	36.7	53.9	61.5	19.6	42.7
MEF-M	28.6	41.2	52.7	22.4	48.7
MEF-L	23.5	32.5	45.3	23.4	50.3

Table 4 Total strain range controlled on low cycle fatigue test

Specimen	Total strain range		Direction of control
	*C.S.T.	*M.S.T. **( )	
SM 20 C	0.006, 0.008, 0.010, 0.012, 0.014, 0.016, 0.019, 0.023, 0.028	0.006, 0.015(0.009), 0.022(0.007), 0.027(0.005), 0.030(0.003)	axial total strain
MEF-S	0.008, 0.011, 0.014, 0.017, 0.020, 0.024, 0.028, 0.034, 0.038	0.008, 0.018(0.010), 0.026(0.008), 0.032(0.006), 0.037(0.005)	diametral total strain
MEF-M	0.008, 0.011, 0.014, 0.017, 0.020, 0.023, 0.027, 0.031, 0.035	0.008, 0.018(0.010), 0.026(0.008), 0.032(0.006), 0.037(0.005)	diametral total strain
MEF-L	0.008, 0.011, 0.014, 0.017, 0.020, 0.023, 0.026, 0.029, 0.032	0.008, 0.017(0.009), 0.024(0.007), 0.029(0.005), 0.032(0.003)	diametral total strain

* C.S.T. : Companion specimen test, M.S.T. : Multiple step test
** ( ) : Increasing or decreasing strain range

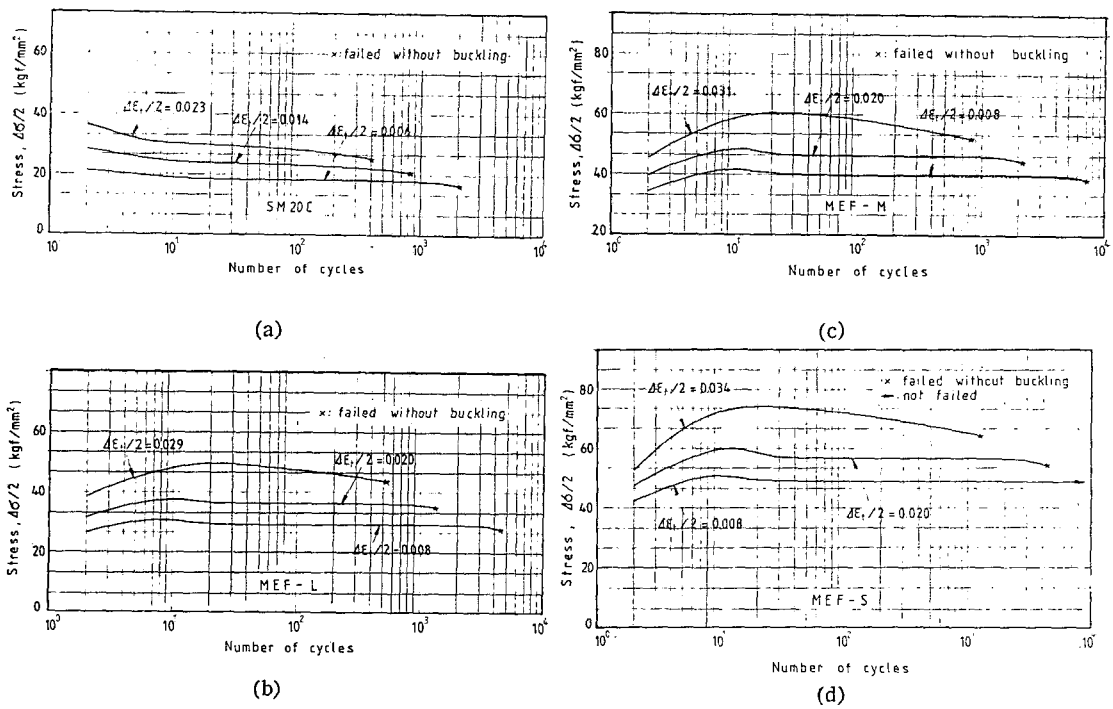
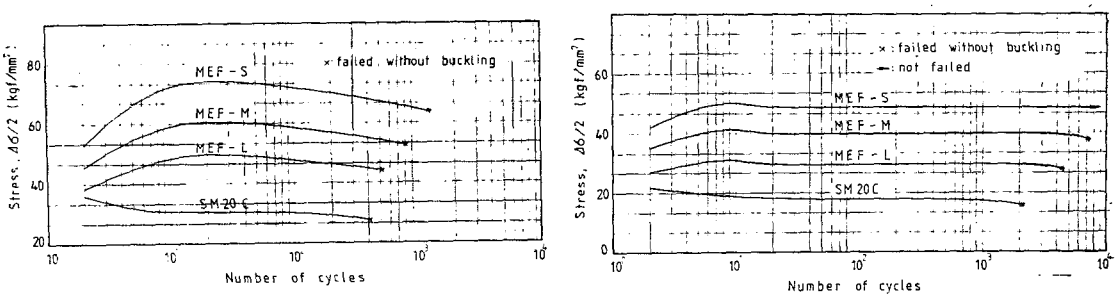


Fig. 4 Test result of stress amplitude vs cycles at different strain range

레벨의 實驗結果를 比較한 것이다. Fig 4 및 Fig. 5에서 低變形率制御時 SM 20 C 母材는 反復數가 增加함에 따라 應力値가 약간 減少하여 軟化되는 현상을 보이고 3종류의 複合組織鋼에서는 10~25 사이클까지 점차 硬化된 후 약간 감소하다 안정된 응력치가 되었다. 이와 같은 현상은 中變形率制御時에서도 비슷한 경향을 나타내었다. 그러나 高變形率제어시는 SM 20 C 母材의 경우 약간의 연화후에 안정된 응력을 나타낸 후 파괴에 달하였지만 複合組織鋼의 경우는 硬化現狀 후 安定된 應力레벨이 나타나지 않고 破斷壽命에 도달하였다.

本 低사이클 疲勞試驗에서 破斷壽命 定義는 히스테리시스 곡선의 壓縮部分에서 급격한 荷重變化를 알려주는 變曲點의 發生時點으로 擇하였다.

Abdal Raut[9]는 제 2 단계의 硬化 및 軟化過程이 나타남을 관찰하였다고 하나 本 實驗에서는 찾아볼 수 없었다.



(a) (b)

Fig. 5 Comparion of test results for stress amplitude vs cycles at low and high strain range

3.2 母相粒徑과 硬化指數

Fig. 6 (a), (b), (c), (d)는 SM 20 C 母材와 3種의 複合組織鋼의 4 종류 試驗片으로 각각 C.S.T. 및 M.S.T. 試驗方法에 의하여 實驗한 結果에서 얻은 應力變形率 관계를 도시하고 各 試驗片의 引張試驗結果와 比較한 것이다. 그림상의 C.S.T. 曲線은 9개 試驗片을 가지고 각각 相異한 定 變形率로 制御하여 3回씩 실시安定된 히스테리시스曲線의 頂點(安定 히스테리시스 曲線이 나타나지 않는 경우에는 破斷壽命의 1/2反復數)을 連結한 것이며 M.S.T. 曲線은 정변형율을 점차적으로 증가시켜 얻은 것을 두번 實驗한 結果의 평균한 것

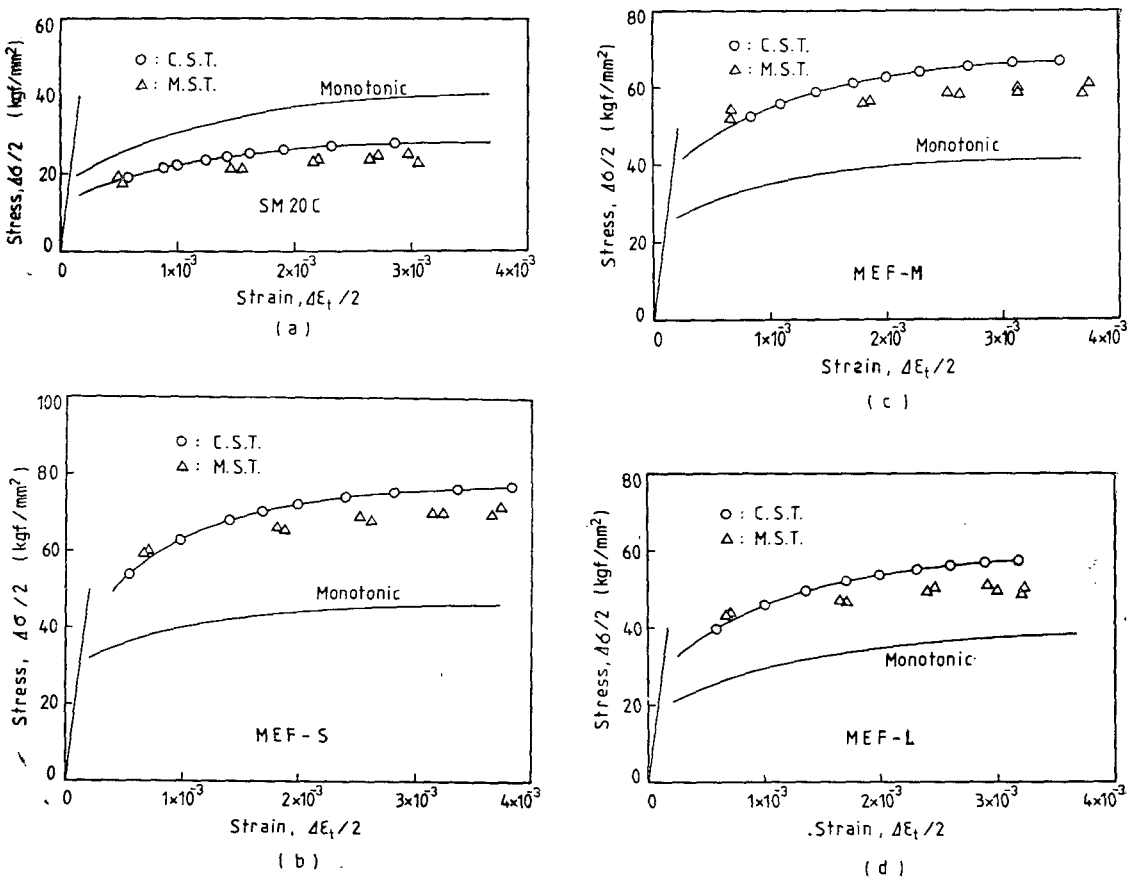


Fig. 6 Cyclic and monotonic stress-strain curves for MEF steel and SM 20 C

이다. 이 때 정변형율을 점차적으로 증가시켜 얻은 結果와 점차적으로 감소시켜 얻은 結果는 안정된 히스테리시스曲線에서 거의 一致하고 있었다.

그림에서 M.S.T. 結果는 C.S.T. 曲線과 유사한 경향을 보이고 있으나 全般的으로 應力幅이 낮게 나타나 있다. 그러나 低變形率範圍에서는 C.S.T. 曲線보다 큼을 알 수 있다. 또 引張試驗 曲線과 比較할 때 複合組織鋼에 있어서는 3種 共히 약 1.5~2배 정도의 硬化된 값을 취하고 있으나 SM 20 C 母材에 있어서는 일반적인 疲勞의 初期에 생기는 軟化상태를 보이고 있다. 이와같은 SM 20 C 母材의 연화경향은 Fig. 4 (a) 및 Fig. 5 (a), (b)에서도 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6의 C.S.T. 방법으로 얻은 結果를 서로 비교하기 위하여 4종류 시험편의 應力-變形率 關係를 나타낸 것이다. 그림에서 複合組織鋼의 경화도는 SM 20 C 母材보다 크고 또한 3가지 複合組織鋼中에서는 母相粒徑이 가장 미세한 MEF-S 시험편의 硬化度가 MEF-L 材보다 커짐을 알 수 있다. 따라서 적절한 熱處理로 母相粒徑를 制御하면 硬化度를 조정할 수 있는 可能性을 보이고 있다. 또 複合組織鋼에서는 SM 20 C 母材보다 變形率幅이 증가함에 따라 硬化度의 증가율이 크고 있음을 알 수 있다.

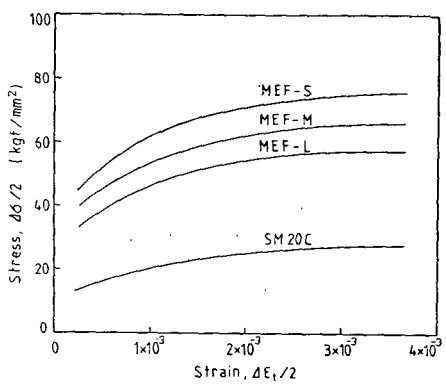


Fig. 7 Comparison of cyclic stress-strain curves for MEF steel and SM 20 C

一般的으로 材料의 硬化 및 軟化擧動은 降伏應力과 引張强度에 直接的으로 關係됨이 알려져 있으며 Manson[10] 등은 引張强度와 0.2% 옵셑 降伏强度의 比가 1.4보다 크면 硬化되고 1.2보다 적으면 軟化된다 하였다. MEF-S 材의 경우는 이 比가 1.59, 粒徑이 가장 큰 MEF-L 材의 경우는 1.19가 됨으로 그와 같은 基準値에 맞는 것으로 分析된다. 硬化指數는 다음 式(1)에 의해서 考察하였다.

$$\sigma = K(\varepsilon_p)^n \tag{1}$$

단, σ는 眞應力, ε_p는 塑性變形率, K는 材料常數이다. 또 反復荷重의 경우 應力-變形率曲線은 다음 式(2)에 의거 考察하였다.

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = K'\left(\frac{\Delta\varepsilon_p}{2}\right)^{n'} \tag{2}$$

$$\Delta\varepsilon_t = \Delta\varepsilon_p + \frac{\Delta\sigma}{E} \tag{3}$$

여기서 $\Delta\sigma$는 眞應力범위 및 $\Delta\varepsilon_p$는 眞塑性率범위, K'는 反復强度係數, n'는 反復硬化指數, E는 탄성계수이다. 上記 式 (3)를 이용하고 式 (1) 및 式 (2)에 상용대수를 취해 Fig. 5 및 Fig. 6의 應力-變形率의 해당값을 代入, 선형회귀선법(ASTM standard E 646-78)에 의거 n, n', K 및 K' 값을 산출한 결과는 Table 5와 같다.

Table 5에서 複合組織鋼에 있어서는 反復硬化指數 n' 값이 0.144에서 0.191 범위에 있으며 SM 20 C 母材의 n' 값보다 크게 나타났다. 强度係數 K' 값도 複合組織鋼에 있어서 硬化되었기 때문에 인장시험결과보다 크게 나타나 있음을 볼 수 있다. 또한 M.S.T. 실험에서 얻은 결과는 C.S.T. 실험 결과와 근소한 차이를 보이고 있어 실용상 많은 시험편이 요구되는 C.S.T. 방법보다는 한개의 시험편으로 여러 영역레벨의 자료를 구할 수 있는 M.S.T. 方法을 應用하여도 좋은 結果를 얻을 수 있다고 본다. 연강에서도 이와 같은 방법으로 안정된 변형률을 얻고 있다[11].

Table 5 Comparison of monotonic and cyclic strength coefficient and strain hardening exponent

Specimen	k	k'		n	n'	
		C.S.T.	M.S.T.		C.S.T.	M.S.T.
SM 20 C	39.8	57.3	60.5	0.313	0.121	0.131
MEF-S	82.3	127.8	118.5	0.547	0.191	0.181
MEF-M	78.5	107.4	102.1	0.432	0.185	0.174
MEF-L	74.1	88.4	87.3	0.374	0.144	0.153

3.3 母相粒徑과 疲勞破斷壽命

疲勞壽命 예측은 最近 가장 보편적이라고 認定되고 있는 式(4)에 의거하였다[12,13].

$$\frac{\Delta\varepsilon_t}{2}=\frac{\sigma_f'}{E}(2N)^b+\varepsilon_f'(2N)^c \qquad (4)$$

단, $\Delta\varepsilon_t$는 全變形率범위, σ_f'는 疲勞强度係數, E는 彈性係數, $2N$은 反復數, b는 疲勞强度指數, ε_f'는 疲勞延性係數, c는 疲勞延性指數이다.

SM 20 C 母材 및 3種類의 複合組織鋼에 대한 實驗結果를 上記 式 (4)에 대입하여 표시한 疲勞壽命曲線은 Fig. 8~11 이다. 曲線은 ASTM standard E 739~80에 명시된 선형회귀선법으로 그리고 實驗値의 度數分布値는 와이블(Weibull) 分布函數方法을 사용하여 정리하였다.

Fig. 8~11의 (c)에서 大部分의 영역(短壽命)에서는 M.S.T. 曲線과 C.S.T. 曲線에서 다소 差異가 있으나 10^3의 수명 영역근방에서 극히 미소한 差異를 나타내고 있다.

Fig. 12는 Fig. 8~11의 結果를 비교하기 위하여 疲勞壽命曲線을 동시에 나타낸 것이다. 그림에서 母相粒經이 작은 MEF-S의 경사도가 가장 완만하므로 疲

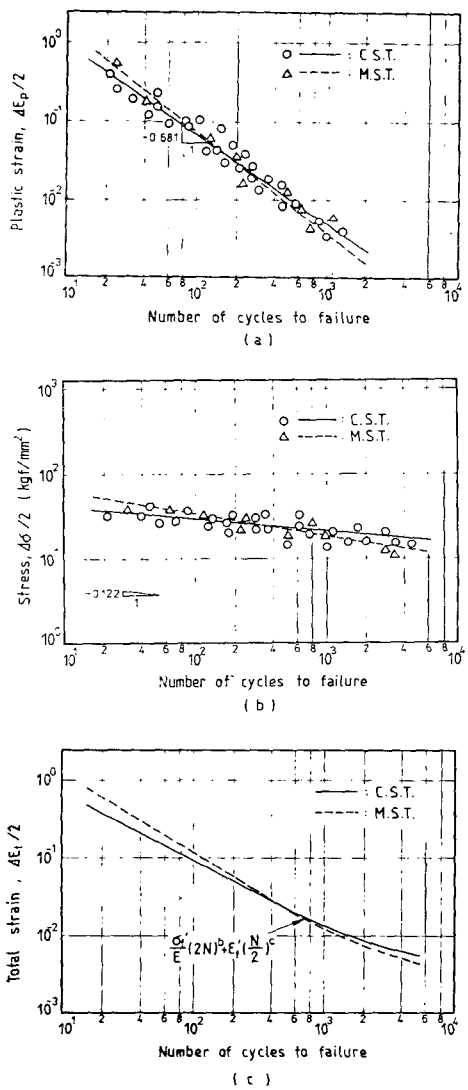


Fig. 8 Strain-life curve for SM20C

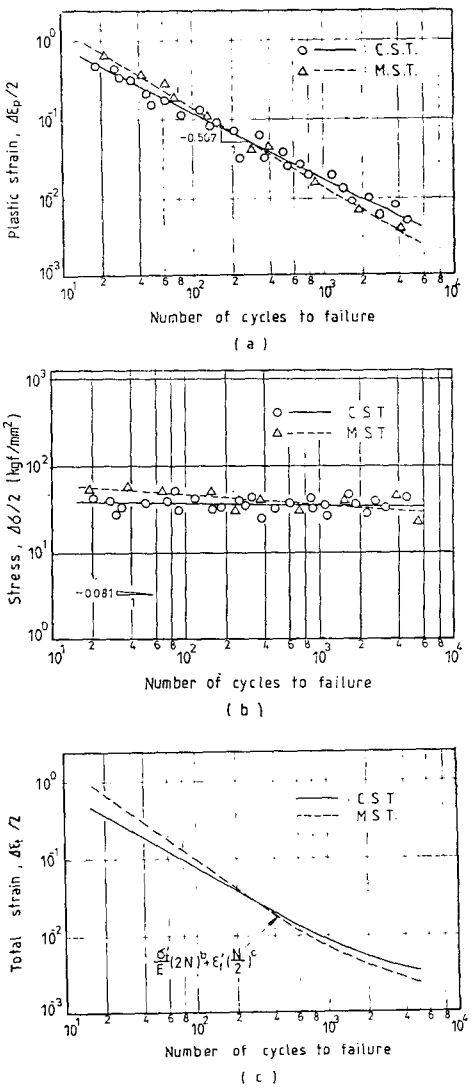


Fig. 9 Strain-life curve for MEF-S

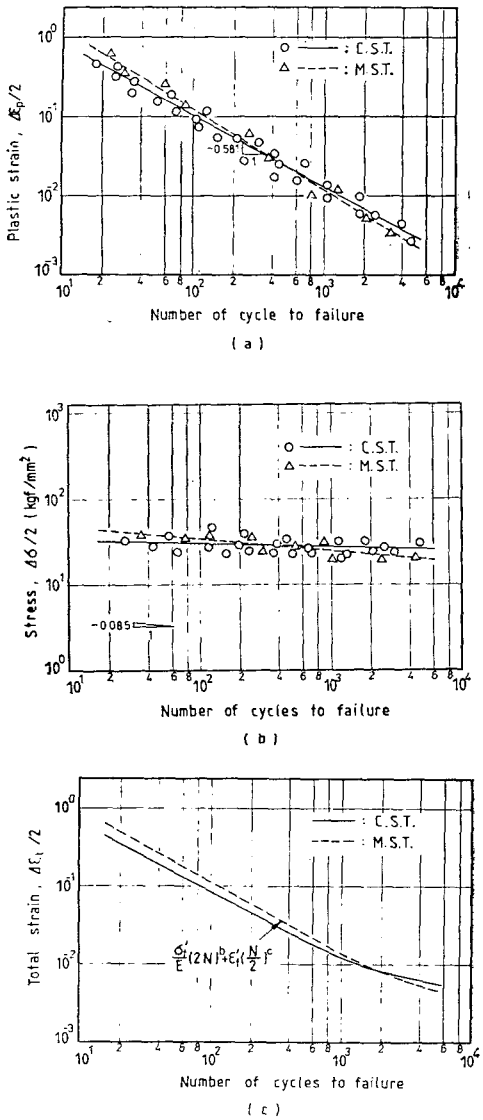


Fig. 10 Strain-life curve for MEF-M

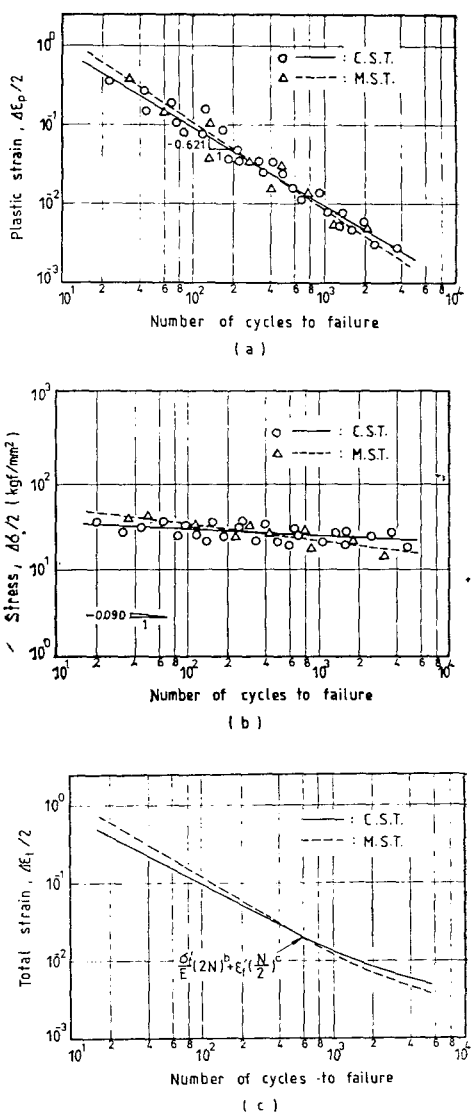


Fig. 11 Strain-life curve for MEF-L

勞壽命이 가장 길고 다음 MEF-M, MEF-L, SM20C 母材순으로 나타나 3종 複合組織鋼의 壽命은 SM 20 C 材보다 크게 향상됨을 알 수 있다. 따라서 母相粒徑을 본 연구와 같이 미세화하면 할수록 疲勞壽命이 延長됨을 알 수 있다. Table 6은 式 (4)을 이용하여 자료로부터 얻은 低사이클 疲勞特性値를 나타낸다.

Table 6을 Table 5와 비교하여 考察할 때 硬化指數 n'가 增加할수록 疲勞延性指數 c는 감소함을 알 수 있다. 한편 疲勞延性係數 ε_f'의 關係는 n'의 증가에 따라 증가하고 있다.

Table 6 Low cycle fatigue properties

Property	SM 20 C	MEF-S	MEF-M	MEF-L
σ_f'	85	154	140	131
b'	−0.122	−0.081	−0.085	−0.090
ε_f'	0.42	0.56	0.54	0.49
c	−0.681	−0.507	−0.581	−0.621

따라서 $2N=(\Delta\varepsilon_p/\varepsilon_f')^{-\frac{1}{c}}$에서 $-\frac{1}{c}$은 結果的으로 커지므로 破斷壽命이 延長됨을 알 수 있다.

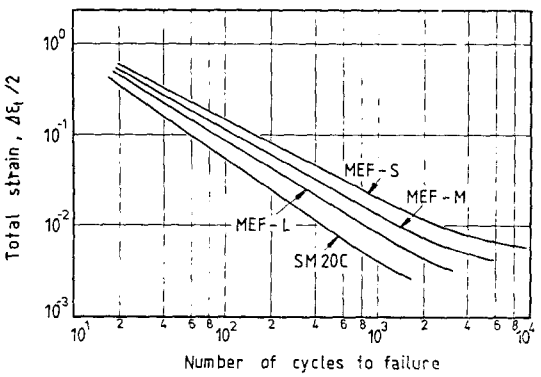


Fig. 12 Comparison of strain-life curve of SM20C and MEF specimens

疲勞强度指數 b와 疲勞延性指數 c의 關係에 대하여 Morrow[14]는 $b=-n/(1+5n')$ 및 $c=-1/(1+5n')$, Tomkins[15]는 $b=-n'/(1+2n')$ 및 $c=-1/(1+2n)$의 關係가 있음을 제시하였으나 本 硏究에서는 SM 20 C 母材의 경우 b는 Tomkins의 式에 近似하고 c는 Morrow의 式에 근사하고 있다. 또 3가지의 複合組織鋼에서는 母相粒徑에 관계없이 b 및 c는 Morrow의 式에 가깝게 나타났다. 以上에서 b의 값들이 c의 값(경사값)에 比하여 매우 적어 低사이클 범위에서는 彈性變形率 성분에 의한 疲勞壽命의 영향은 거의 無視할 수 있을 정도임을 알 수 있다.

本 實驗범위 내에서 MEF-S 材의 경우 疲勞强度指數 $b=-0.081$, 疲勞延性指數 $c=-0.507$로서 수명이 가장 길게 나타났으나 最大壽命을 갖는 複合組織鋼의 母相粒徑에 대한 定量的인 硏究는 앞으로 追加的인 硏究의 余地가 있다.

4. 結 論

SM 20 C를 母材로 하여 열처리방법을 달리하여 얻은 3種類의 複合組織鋼 試驗片을 가지고 低사이클 疲勞試驗을 실시하여 應力-變形率擧動, 破斷壽命, 疲勞强度에 미치는 母相粒徑 크기의 영향 등을 母材의 경우와 比較 考察하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) SM 20 C 材는 피로과정의 初期에는 軟化過程을 나타내고 3종류의 複合組織鋼은 初期段階에서 약간 硬化過程을 나타낸 後 상당기간의 安定된 상태를 지속하다가 破斷壽命에 도달한다.

(2) 反復硬化指數는 複合組織鋼의 경우 SM 20 C 母材보다 크고 粒徑크기가 감소할수록 증가하였다.

(3) 低사이클 피로범위에서 複合組織鋼의 疲勞壽命은 SM 20 C 母材보다 向上되고 母相粒徑이 미세할수록 疲勞壽命이 增加되는 경향을 나타내었다.

(4) 多段疲勞試驗方法(M.S.T.)으로부터 얻은 應力-變形率曲線은 多數의 試驗片에 의한 通常的인 低사이클疲勞試驗方法(C.S.T.)에 依한 結果와 아주 近似하였으므로 疲勞壽命豫測에 간편한 方法으로 유용하다.

參 考 文 獻

(1) 丸山, "自動車が輕くなる複合組織鋼", Nikkei Mechanical, Vol. 4, pp. 42~46, 1979

(2) 中川良一, "自動工業의 展望", 日本機械學會誌, 第83卷, 第734號, pp. 45~50, 1980

(3) T. Kunio, K. Yamada, and M. Shimizu, "An Effect of the Second Phase Morphology on the Tensile Fracture Characteristics of Carbon Steel", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 7, pp. 411~417, 1975

(4) R.G. Davis, "Influence of the Martensite Composition and Content on the Properties of Dual Phase Steels", Met. Trans, Vol. 9 A, pp. 671~679, 1978

(5) 金楨圭, "複合組織鋼의 破壞擧動에 미치는 微視組織 크기의 影響", 大韓機械學會論文集, 第5卷, 第3號, pp. 223~229, 1981

(6) J. Polak and M. Klesnil, "The Hysteresis Loop 1", A Statistical Theory, Fatigue Engng. Mater. Struct. 5, pp. 19~38, 1982

(7) Maria Ronay, Fatigue of High-strength Materials, Fracture, Vol. 3, Engineering Fundamentals and Environmental Effects, Academic Press pp. 431~482

(8) ASTM Standards, Designation, E 606~80, "Standard Recommended Practice for Constant Amplitude Low cycle Fatigue Testing", pp. 652~669, 1983

(9) H. Abdel Raut, A. Plumtree and T.H. Topper, "Effects of Temperature and Deformation Rate on Cyclic Strength and Fracture of Low Carbon Steel", ASTM STP 519, pp. 28~57, 1973

(10) R.W. Smith, M.H. Hirschberg and S.S. Manson, "Fatigue Behavior of Materials Intermediate Life Range", NASA TN-D-1574; April, 1963

(11) H. Kitagawa, C.M. Sih, Y. Nakasone, and S. Takahashi, "Mechanical and Non-Mechanical Categories in Fatigue Study: A Point of View for Small Surface Crack Problems", ASME, Mechanics of Fatigue, AMD Vol. 47, pp. 167~184, 1981

(12) R.W. Landgraf, "The Resistance of Metals and Alloy", ASTM STP 467, p. 3, 1970

(13) S.S. Manson, "Fatigue; A complex Subject-Some Simple Approximations", Exp. Mech., Vol. 5, No. 7, p. 183, 1965

(14) J. Morrow, "Cyclic Plastic strain Energy and Fatigue of Metals", Internal Friction, Damping, and Cyclic Plasticity, ASTM STP 378, p. 45, 1965

(15) R.W. Landgraf, J. Morrow and T. Endo, "Determination of the Cyclic Stress-Strain Curve", J. Mater., Vol. 4, No. 1, p. 176, 1969