

<論 文>

構造用 高炭素鋼材의 高溫低사이클 疲勞學動에 關한 研究

邕 章 祐* · 金 載 勳**

(1982年 1月 4日 接受)

A Study on Low-Cycle Fatigue Behavior at Elevated Temperature of High Carbon Steel used for Structural Purposes

Jang Woo Ong and Jae Hun Kim

Abstract

This study was undertaken to determine tensile properties and low-cycle fatigue behavior of 0.6%C high carbon steel used for structural purposes at temperatures up to 500°C. In the low-cycle fatigue test the upper limit was decided by elongation(i.e., the total strain range), while the lower limit was defined by the load (i.e., zero load).

The following results were obtained. Both, the ultimate tensile strength and low-cycle fatigue resistance attain the maximum values near 250°C. Above this temperature the values decrease rapidly as the temperature increases. The low-cycle fatigue resistance decreases whenever there is an increase of the total strain range. Because the hardness of cycle fatigued specimen correlates cyclic hardening and cyclic softening, therefore the hardness of cycle fatigued specimen is smaller than that of the nonfatigued specimen at room temperature and 500°C but much larger than the hardness of the nonfatigued specimen near 250°C.

1. 序 論

現在 産業構造物들이 大型化되고 高溫, 高負荷, 高壓의 苛酷한 狀態下에서 輕量化되어 使用됨으로 構造用 材料는 종종 예기치 않던 事故를 發生시키고 있었다.⁽¹⁾ 이와같은 事故의 原因들은 大部分 熱疲勞, 크리이프, 高溫에서의 酸化 등이 主된 影響을 미치고 있었다.⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ 따라서, 最近 高溫低사이클 疲勞에 關한 研究가⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾ 活潑하게 進行되고 있다. 特히 近年에 構造用 高炭素鋼材가 多樣한 産業分野에 使用되고 있어⁽⁸⁾⁽⁹⁾ 이 鋼材에 對한 高溫低사이클 疲勞學動의 研究는 이 材料의 信頼性 및 安全性 向上에 重要性을 지니

고 있다.

低사이클 疲勞領域의 反復引張壓縮試驗에 對한 疲勞學動의 研究는 反復定變形率과 反復定荷重에 依한 實驗方法으로 大別되어 왔고 同一試片을 同一應力 레벨로 試驗을 하였을 경우에 S-N 曲線에 依한 疲勞壽命은 아주 多樣하게 나타나고 있음이 여러 研究者들에 依하여 밝혀졌다.⁽¹⁰⁾

따라서, 本 研究는 市販의 構造用 高炭素鋼材인 0.69%C의 鋼材로 室溫부터 500°C까지의 溫度範圍에서 引張特性을 밝히고 또한 疲勞壽命豫測보다 定變形率과 定荷重을 組合한 條件下에서 溫度變化에 依한 疲勞學動을 10⁴ 사이클 以內의 反復回數內에서 實驗考察하여 構造用 高炭素鋼材의 疲勞學動에 미치는 溫度의 影響을 밝히고자 한다.

* 正會員, 忠南大學校 機械工學科

** 正會員, 忠南大學校 大學院

2. 實驗方法

2.1. 材料 및 試驗片

本 研究에 使用된 材料는 市販 19mmφ의 KSD 3515 (熔接構造用 高炭素) 壓延鋼으로 그 化學的 成分 및 機械的 性質은 Table 1 및 Table 2와 같다. 機械的 性質은 구입한 材料의 性質과 均質性을 알기 위하여 素材와 850°C에서 노오말라이징(normalizing)한 材料를 測定 表示하였다. 試驗片은 ASTM 規格에 따라 形狀 및 치수를 Fig. 1(a) 및 (b)와 같이 製作하고 製作된 試驗片은 殘留應力除去 熱處理를 하였다.

Table 1 Chemical composition. (Wt%)

C	S	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
0.693	0.143	0.51	0.008	0.016	0.44	0.1	0.144
V	Al	Ti	Co	B	W	Pb	Zr
0.012	0.005	0.003	0.039	0.003	0.09	0.12	0.001

Table 2 Mechanical properties of the materials.

Materials	Original	Normalizing
Yield strength(kg/mm ²)	47.83	51.47
Ultimate tensile strength(kg/mm ²)	91.76	97.67
Fracture strength (kg/mm ²)	87.14	91.36
Elongation (%)	14.78	14.11
Reduction of area(%)	22.74	22.44
Micro vickers hardness (Hv)	274	275

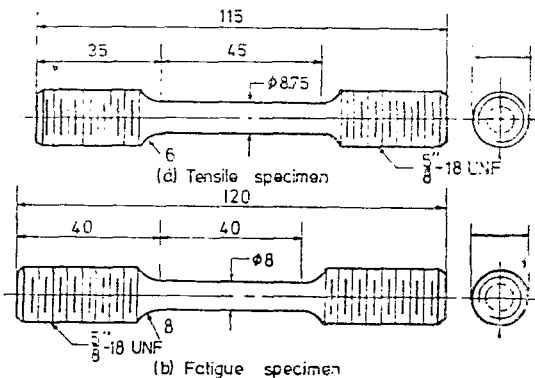


Fig. 1 Specimen configuration.

2.2. 實驗裝置 및 方法

本 實驗에서 引張試驗과 高溫低사이클 疲勞試驗은 SCR式 速度制御方式을 採用한 UTM을 使用하였으며 高溫度霧固氣는 電氣抵抗加熱에 依한 高溫恒溫爐內에서 誤差 ±3°C範圍內에서 實驗을 遂行하였다. 모든 實驗은 試驗片 全體溫度가 實驗溫度에 均一하게 到達된 것을 確認한 後 遂行하였다. 引張試驗은 10ton Load Cell을 使用하고 實驗速度 1mm/min, 차아트 스피드 200mm/min로 固定하였다. 高溫低사이클 疲勞試驗은 10ton의 Load Cell을 使用하고 應力振幅의 上限値는 定變形率로 下限値는 定荷重인 $\sigma=0$ 狀態로 Setting 하여 實驗速度 30mm/min로 한 荷重狀態로 하였다. 모든 實驗値는 3反復 結果의 算術平均値를 取하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1. 引張強度에 미치는 溫度의 影響

各 溫度에서의 引張試驗에 依한 應力-變形率線圖는 Fig.2와 같다.

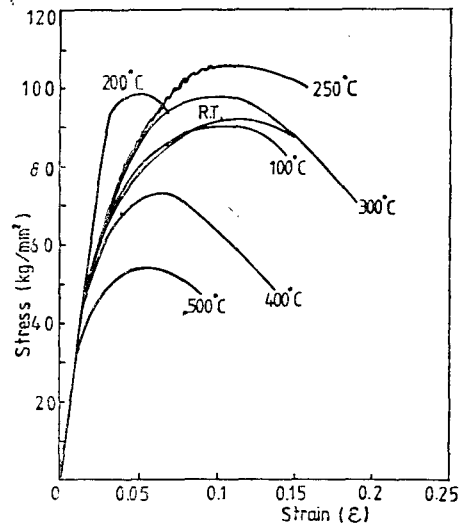


Fig. 2 Tensile stress-strain curves as a function of temperature.

實驗結果에서 引張強度, 破斷強度, 降伏限強度, 斷面收縮率, 延伸率, 引張強度까지의 延伸率 등에 미치는 溫度의 影響은 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에서 引張強度는 250°C 부근에서 最大값이 된 後 300°C부터 溫度의 增加에 따라 현저히 減少되었다. 破斷強度는 引張強度의 現象과 大略 比例하고 있

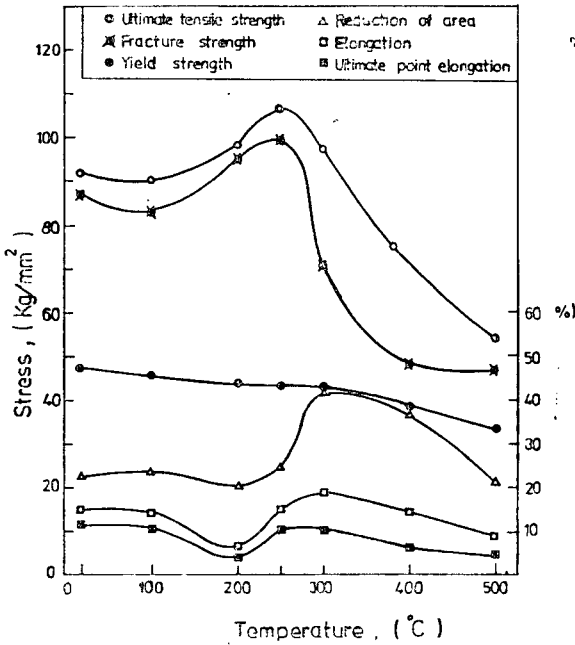


Fig. 3 Influence of temperature on the tensile properties.

있다. 降伏強度는 매우 완만하게 減少하고 斷面收縮率 延伸率, 引張強度까지의 延伸率 等은 300°C 부근에서 最大값이 되었다. 200°C와 500°C의 溫度에서는 넉킹 現象이 거의 없는 狀態가 觀察되었다. 200°C와 250°C 부근에서 最小 延伸率 및 引張強度가 나타난 것은 blue-brittle 現象의 鋼에서 炭素와 窒素를 포함하는 dynamic strainaging에 起因된 것으로 이는 Baird의 實驗報告⁽¹¹⁾와 一致된 現象이었다. 500°C에서 強度 및 斷面收縮率, 延伸率 等의 減少는 高溫 크리이프와 酸化의 影響으로 強度가 減少되고 temper aging brittleness 領域 (450°C~525°C)에서 結晶粒界(grain boundary)에 炭化物, 인화물, 窒化物 等이 析出發生하여 起因된 것으로 解析된다.

3.2. 疲勞強度에 미치는 溫度의 影響

本 疲勞試驗을 定變形率 $\epsilon t = 0.04$ 의 上限値와 定荷重을 零으로 한 下限値로한 塑性領域의 應力振幅內에서 사이클數를 10^4 以內로 實驗하여 一定 사이클數마다 히스테리시스 루우프(Hysteresis loop)를 점점하여 얻은 實驗結果는 Fig. 4, 5, 6, 과 같다.

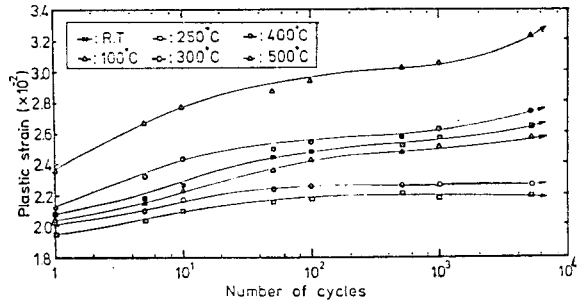


Fig. 4 Relation between the plastic strain and the number of cycles on each temperature.

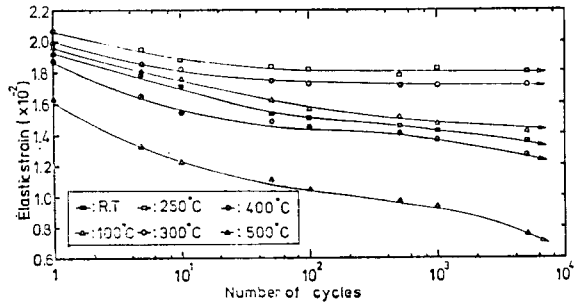


Fig. 5 Relation between the elastic and the number of cycles on each temperature.

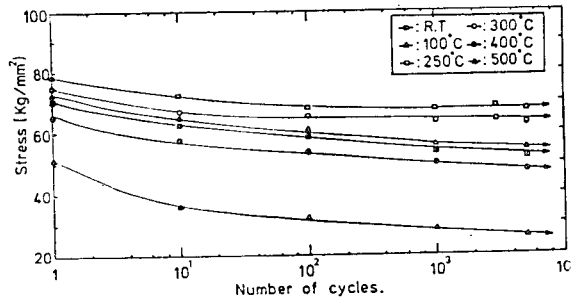


Fig. 6 Relation between the stress and the number of cycles on each temperature.

3.2.1. 塑性變形率에 미치는 溫度의 影響

Fig. 4에서 모든 溫度에서 사이클數의 增加에 따라 塑性變形率의 變化는 50 사이클까지 비교적 急激한 增加를 한 後 서서히 增加되었다. 또 250°C와 300°C에서는 50 사이클 이후 거의 直線的으로 一定한 安定값이 형성되고 가장 적은 값은 항상 250°C에서 가장 적은 값이 항상 나타나고 있었다. 이는 사이클反復에 의한 dynamic strain-aging에 起因된다고 Jaske의 報告⁽¹²⁾에 밝혀지고 있다. 500°C에서 塑性變形率의 增加가 민감하게 나타난 것은 高溫度 霧潤氣의 酸化와 크리이프의 影響으로 본다. Coffin의 報告⁽¹³⁾에서도 高溫

雰圍氣條件下에서는 疲勞抵抗에 미치는 酸化와 크리이프 影響이 지대함을 지적하고 있었다. Fig. 7은 溫度와 塑性變形率과의 관계를 Fig. 4로부터 求하여 圖示한 것이다.

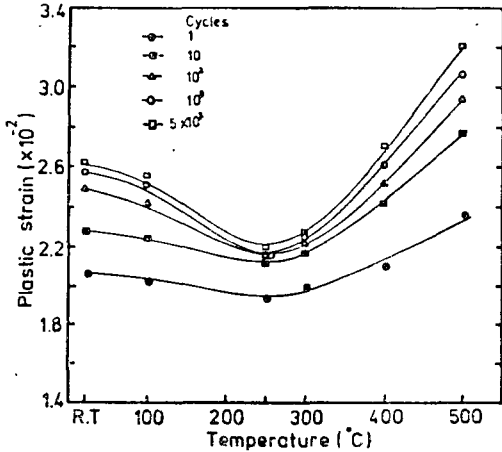


Fig. 7 Influence of temperature on the plastic strain.

Fig. 7에서 塑性變形率은 250°C 부근에서 最小値가 되고 다시 溫度增加에 따라 急增加하고 있다. 250°C 부근에서는 50 사이클정도 이상이 되면 塑性變形率의 變化는 거의 없다. 이 塑性變形率의 減少 現象은 dynamic strain-aging에 依하여 주기적 硬化現象이 發生하여 疲勞抵抗이 增加되고 있음을 나타내는 것으로 解析된다.

3.2.2. 彈性變形率에 미치는 溫度의 影響

Fig. 8은 溫度와 彈性變形率과의 관계를 Fig. 5로부터 求하여 圖示한 것이다.

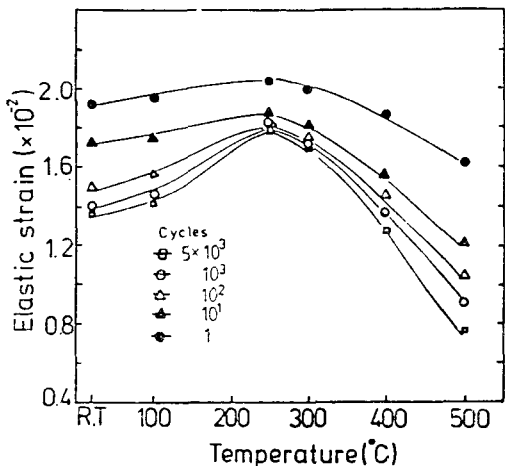


Fig. 8 Influence of temperature on the elastic strain.

Fig.8에서 彈性變形率의 變化는 Fig.7에서 나타났던 塑性變形率의 變化와 반대의 傾向을 보이면서 反復回數에 관계없이 250°C에서 最大값이 되고 溫度의 增加에 따라 急激히 減少하고 있다. 250°C 부근에서는 50 사이클정도 이상이 되면 彈性變形率의 變化가 거의 없다. 彈性變形率의 增加는 주기적 硬化 現象에 依해 塑性變形率의 減少를 갖어 옴으로 疲勞抵抗이 增加되고 있다고 解析된다.

3.2.3. 應力에 미치는 溫度의 影響

Fig.9는 溫度와 應力과의 關係를 Fig.6 으로부터 求하여 圖示한 것이다.

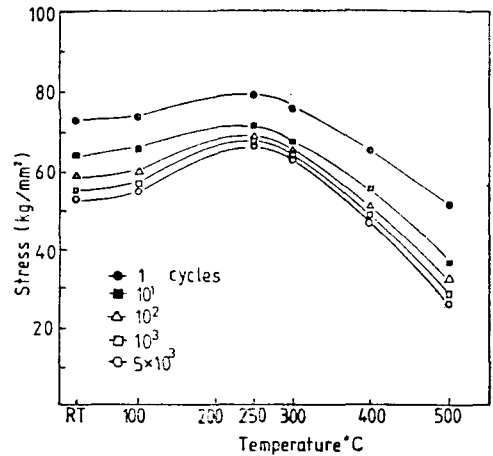


Fig. 9 Influence of temperature on the stress.

溫度의 變化에 對한 應力의 變化는 反復回數에 관계없이 250°C 부근에서 最大應力값을 나타냈다. 室溫에서 250°C 정도까지 應力이 점진적으로 增加하고 있음은 주기적 硬化現象이 점진적으로 일어나고 있음을 나타내고 250°C 以上에서 應力이 急激히 減少함은 주기적 軟化現象이 크게 나타나고 있음을 명백히 表示하고 있다. 이는 3.2.1 및 3.2.2의 考察을 뒷받침하고 있다.

3.2.4. 上限變形率이 溫度變化에 따라 疲勞抵抗에 미치는 影響

주기적 硬化와 주기적 軟化 現象을 상세히 考察하여 疲勞抵抗에 미치는 溫度의 影響을 淸明하고저 溫度 및 上限變形率을 變化因子로 하여 反復回數에 對한 應力 變化를 實驗觀察한 結果는 Fig.10의 (a)(b)(c)(d) 및 Fig.11의 (a)(b)(c)(d)(e)로 表示된다.

Fig.10 및 Fig.11에서 塑性變形領域內에서 應力에 對한 溫度의 影響은 室溫에서 250°C 程度까지 점진적으로 應力이 增加하여 250°C 程度에서 最大값이 되고 그

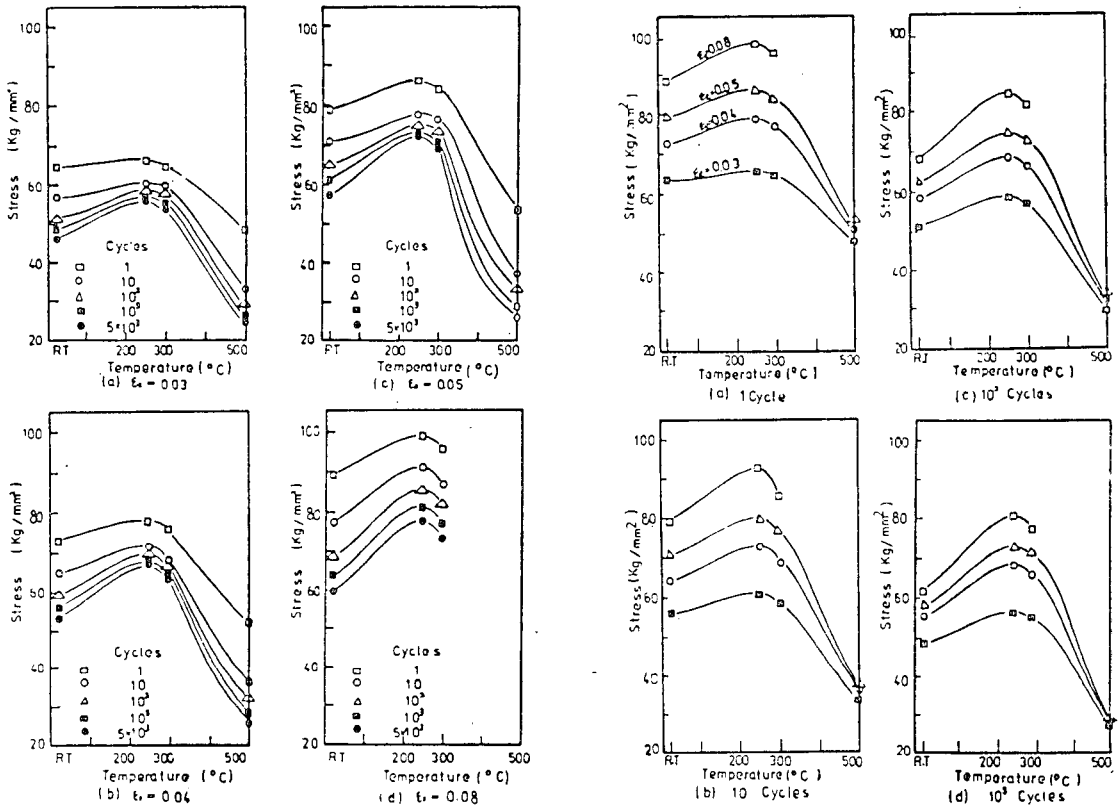


Fig. 10 Influence of temperature on the stress at each total strain.

以上の 溫度에서는 急激히 減少함을 보이고 있다. 특히 Fig.10에서 上限變形率 $\epsilon_t=0.03\sim 0.05$ 範圍에서 反復回數의 增加에 對한 應力의 低下는 初期엔 急激한 變化를 하다가 점진적으로 減少되었다. 上限變形率 $\epsilon_t=0.08$ 에서는 各 溫度에서 反復回數에 關係없이 一定한 比率로 減少되고 있다. Fig.11에서 上限變形率의 增加에 對한 應力의 變化는 反復回數의 增加에 따라 初期에는 急進的으로 後期에는 완만하게 減少하고 있다. 以上에서 塑性變形率 範圍內的 모든 定變形率에서 疲勞抵抗은 定變形率의 增加에 따라 初期에는 빠르게 反復回數가 增加함에 따라 완만하게 低下됨을 알 수 있다.

3.2.5. 疲勞材의 硬度에 對한 溫度의 影響

주기적 硬化와 주기적 軟化現象을 說明하고자 各 溫度下에서 定變形率 $\epsilon_t=0.04$, 定荷重 $\sigma=0$, 사이클數 5×10^3 으로 反復疲勞試驗을 하여 大氣中에서 室溫까지 냉각시킨 後 試驗片의 中心部 硬度값을 測定한 結果는 Fig.12와 같다.

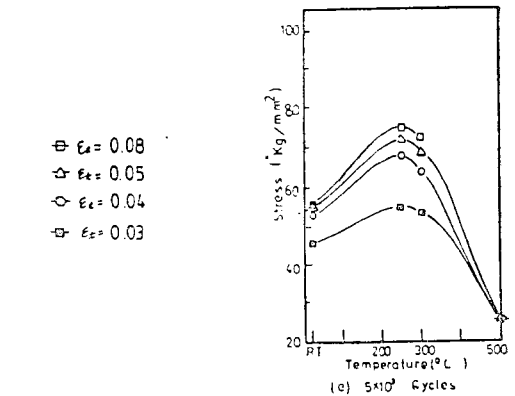


Fig. 11 Influence of temperature on the stress at given cycles.

Fig. 12에서 R.T.와 500°C에서 硬度가 試驗前보다 작게 나타났으므로 주기적 軟化現象이 일어난 것으로 解析되며 250°C에서는 硬度가 試驗前보다 상당히 크게 나타났으므로 주기적 硬化現象이 일어난 것으로 解析된다. 따라서 疲勞材의 硬度는 주기적 軟化現象 및 주기적 硬化現象과 相關關係를 가지고 있는 것으로 解析된다.

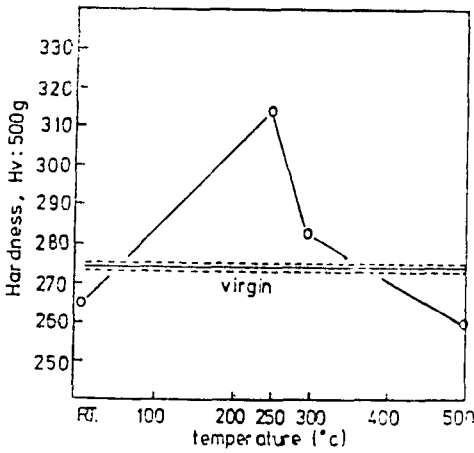


Fig. 12 Room temperature hardness of fatigue specimens at high temperature.

4. 結 論

室溫에서 500°C까지의 溫度範圍에서 0.69%의 構造用 高炭素鋼材에 對한 引張試驗 및 定變形率一定荷重(零) 低사이클 疲勞試驗을 한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

- 1) 引張試驗에서 引張強度는 250°C에서 最大값이 되고 延伸率 및 斷面收縮率은 200°C에서 最小가 되며 500°C에서는 強度의 減少와 함께 延伸率 및 斷面收縮率이 減少된다.
- 2) 塑性變形率과 彈性變形率은 250°C 內外에서 각각 最小 및 最大값을 갖는다.
- 3) 疲勞應力은 250°C 內外에서 最大값을 보여주고 그 以上の 溫度에서는 急激히 減少한다.
- 4) 疲勞抵抗은 定變形率값의 增加에 따라 急激히 減少되고 反復回數의 增加에는 初期에는 빨리 10² 사이클 以上에서는 徐徐히 減少한다.
- 5) 疲勞抵抗에 미치는 溫度의 影響은 250° 內外에서 最大값이 되고 그 以上の 溫度에서 急進的으로 減少된다.
- 6) 疲勞材의 硬度는 주기적 硬化現象 및 주기적 軟化現象과 相關關係를 갖이고 있어 室溫 및 500°C에서 試驗前보다 硬度가 작고 250°C 內外에서 가장 큰 것으로 나타난다.

참 고 문 헌

1. A.S. Tetelman, A.J. McEvily, "Fracture of

Structure Materials." John Willy & Sons. Inc., p. 24, 1967.

2. S.S. Manson, "Thermal Stress and Low-Cycle Fatigue." Mc-GRAW-Hill Inc., 1966.

3. Rychido Ide, et, "Cyclic Behavior and Unstable Fracture under True-Stress Controlled Cyclic Condition." Bull of JSME, Vol.21, No. 161, pp. 1576—1582, 1976.

4. M. Ohnami etc, "A Study on Metallic Creep-Fatigue Interaction at Elevated Temperature." Bull of JSME, Vol. 21, No. 157, July, pp.1057-1063, 1978.

5. P.S. Maiya etc, "Elevated-Temperature Low-Cycle Fatigue Behavior or Different Heats of Type 304 Stainless Steel." Metallurgical Transactions, Vol. 8A, November, 1977.

6. C.R. Brinkman, "Strain Fatigue and Tensile Behavior of Inconel 718 from Room Temperature to 650°C." Journal of Testing Evaluation JIEVA, Vol.2, No.4, July, pp.249—259, 1974.

7. K. Kanazawa, "Evaluated-Temperature Fatigue Properties of Engineering Materials." Trans of National Research Inst for Metals, Vol. 20, No. 6, 1978.

8. C.E. Jaske, "Thermal-Mechanical Low-Cycle Fatigue of AISI 1010 Steel." to be published in forthcoming ASTM STP on Thermal Fatigue by American Society for Testing and Materials.

9. C.E. Jaske and T.L. Porfilio, "Thermal-Mechanical Low-Cycle Fatigue." Report to American Gas Association Inc., Catalog, No. H54375, Battell's Columbus Laboratories, Columbus, Ohio, February 14, 1975.

10. 宋 森 弘, "疲勞強度의 變動에 對하여" 大韓機械學會誌, 第 17 卷, 第 2 號. pp.77—80, 1977.

11. J.D. Baird, Strain Aging of Steel-A Critical Review." Iron and Steel, Vol. 36, pp.186—192, 1963.

12. C.E. Jaske, "Low-Cycle Fatigue of AIAI 1010 Steel at Temperature up to 1200°F." Jour of Pressure Vessel Technology Trans Augst, pp. 432—443, 1977.

13. L.F. Coffin, "The Effect of High Vacuum on the Low-Cycle Fatigue Law." Meta. Trans. Vol. 3, pp.1777—1789, 1972.