

# 高温下에서의 스프링의 疲勞特性에 관한 研究

A Study on Fatigue Characteristics of Spring under High-Temperature

李 榮 培\*, 廉 永 夏\*, 禹 昌 秀\*\*  
Y. B. Lee, Y. H. Yum, C. S. Woo

## ABSTRACT

The fatigue characteristic study of a Pony Coil spring is performed by considering the tropical service conditions in the range of 50°C through 150°C. The experiment results of the static and dynamic characteristics of the test pieces agreed with the result of the strain analysis by wittricke's method. The strain energy value is increased as temperature rises. An increase is 1.58% at 100°C and 2.26% at 150°C after fatigue tests. The elastic strain is also decreased as temperature rises.

### 1. 緒 論

최근 國產自動車는 수출 다변화에 따라 世界各國에 진출하고 있으며, 環境條件으로서 熱帶性 高温下에서의 國產자동차 스프링의 疲勞破壞特性 연구는 아직 발표된 바 없고, 또한 生産業體와 學界의 共同關心事가 되고 있다.

이에 따라 코일 스프링의 熱帶性 高温下에서의 疲勞強度實驗을 통하여 實驗資料를 분석하여 品質向上을 도모함으로써 輸出施策에 기여하고, 國산공업발전에 이바지 할 수 있는 重要性和 設計資料를 얻는 데 있다.

현재까지 相關연구를 살펴보면, Wahl<sup>1)</sup>, Mottershead<sup>2)</sup>, Shimoseki<sup>3)</sup> 등은 스프링에 대한 일반적인 力學的 解析 및 數值 解析의

方法으로 應力解析한 바 있고, J. K. Wood<sup>4)</sup>, R. P. Shaw<sup>5)</sup> 등은 彈性體의 應력해석에서 온도 및 위치에 대한 Stress relaxation의 영향을 보고하였으며, K. Nakayasu<sup>6)</sup>는 고온상태의 耐 크라이프(Creep) 抵抗性を 永久變形量으로 부터 비교 조사한 결과를 1963년에 발표하였다.

또한, 본 실험시편의 材料인 SAE 9254 鋼의 스프링 특성<sup>7)</sup>에 관해서 Chishima<sup>8)</sup>, Krohm<sup>9)</sup> 등이 발표하였고, Koyama<sup>10)</sup>, Saito<sup>11)</sup>, 등은 스프링 피로특성에 관한 연구로 피로과 피기점부의 特徵과 피로균열傳播特性에 關해 研究를 수행하였으며, Yum<sup>12)</sup>은 코일 스프링 크라이프 온도에 關한 영향에 대해 研究 발표한 바 있고, Shibata<sup>13)</sup>는 부동피치 2段 스프

\* 正회원, 서울대학교 공과대학

\*\* 서울대학교 대학원

링의 썸징(Surging) 防止效果에 대해 연구하였다.

따라서, 본 연구에서는 열대성 고온조건을 고려하여 實驗溫度範圍를 + 50 °C ~ + 150 °C 사이에서 포니 코일 스프링의 靜的 및 피로실험을 시행하여 그것이 高溫疲勞壽命에 미치는 영향과 피로파괴된 시편의 破斷面을 光學顯微鏡을 통한 巨視的 觀察과 走査型 電子顯微鏡으로 微視的 관찰하여 열대성 고온피로 특성을 검토하였다.<sup>14),15),16),17)</sup>

한편, 코일 스프링의 理論的 解析으로 Computer를 통한 應力 解析의 결과와 실제 실험결과를 比較 檢討하였다.

## 2. 코일 스프링의 理論的 解析

코일 스프링에 이용되는 解析法은 많이 발표되고 있으며, 그 중에서도 널리 쓰이고 있는 것은 Wahl의 식이다. 그러나, Wahl은 굽힘 인장의 영향을 무시하거나 혹은 곡률만 고려한 해석을 하고 있다. 그래서, Wittrick<sup>18)</sup> 식을 이용하되, 어느 정도의 精度를 희생하더라도 간단한 해석을 확립하고, 코일 스프링의 平行 압축문제를 等피치 코일 스프링을 중심으로 해석을 시도한다.

### 2-1 理論解析

#### 2-1-1 方程式의 誘導

Wittrick는 하중이 가해졌을 때 와이어(wire) 단면은 평면은 평면으로 남고, 굽힘 곡률(bending curvature)이 작다고 가정하여, 작은 기울기와 와이어 중심선에 따른 늘어남을 무시하고 미소要素 δs에 대한 굽힘 평형을 고려하여 式을 구하였다. 여기에 Frenet<sup>19)</sup>의 공식을 이용하여 Wittrick식을 매트릭스(matrix) 형태로 나타낸후 應力과 延率에 관해서 다음 3成分만 고려하고 나머지 성분은 0으로 본다.

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{wu} \\ \sigma_{wv} \\ \sigma_{ww} \end{bmatrix}, \quad \epsilon = \begin{bmatrix} 2 \epsilon_{wu} \\ 2 \epsilon_{wv} \\ \epsilon_{ww} \end{bmatrix} \dots\dots (1)$$

$\sigma, \epsilon$ 을 Wittrick 式을 使用하여 구하여 보면,

$$\sqrt{g}\epsilon = D_1 P + B D_2 M \dots\dots\dots (2)$$

$$\sqrt{g}\sigma = E(D_1 P + B D_2 M) \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{여기서 } B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -n \\ 0 & 0 & \xi \\ n & -\xi & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_1 = \text{diag} \left( \frac{1}{GA_T}, \frac{1}{GA_T}, \frac{1}{EA} \right)$$

$$D_2 = \text{diag} \left( \frac{1}{EJ_u}, \frac{1}{EJ_v}, \frac{1}{GJ_w} \right)$$

$$E = \text{diag} (G, G, E)$$

$$\sqrt{g} = 1 - \kappa \xi \text{ (tensor의 norm)}$$

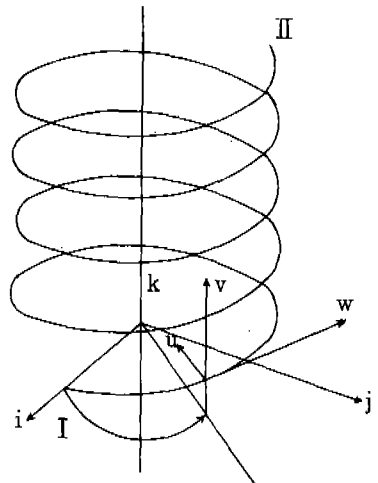


Fig. 1. Relation of Coordinate System

#### 2-1-2 解析의 具體的 概要

Fig. 1.에서 코일 스프링에 관한 식은

$$r(\alpha) = R \cos \alpha \hat{i} + R \sin \alpha \hat{j} + R h \alpha \hat{k} \dots\dots (4)$$

이며,  $h = \frac{He}{2\pi RN}$ 이다. 단 He는 有效部の 자유높이이다.

그러므로, 단부 I에 작용하는 외력을  $P_I^*$ ,  $M_I^*$ 라 하고  $\alpha$ 위치에서의 내력  $P_\alpha^*$ ,  $M_\alpha^*$ 를 구하면 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} P_\alpha^* \\ M_\alpha^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ H_\alpha & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_I^* \\ M_I^* \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

그 결과를  $\hat{u}, \hat{v}, \hat{w}$  좌표계로 변환시켜 式 (2), (3)에 代入하여  $\sigma, \epsilon$ 를 구한다.

2-2 數值 解析

스프링의 座卷部를 제외한 有效卷部에 대한 해석을 실행하였으며, 흐름도는 Fig. 2와 같다.

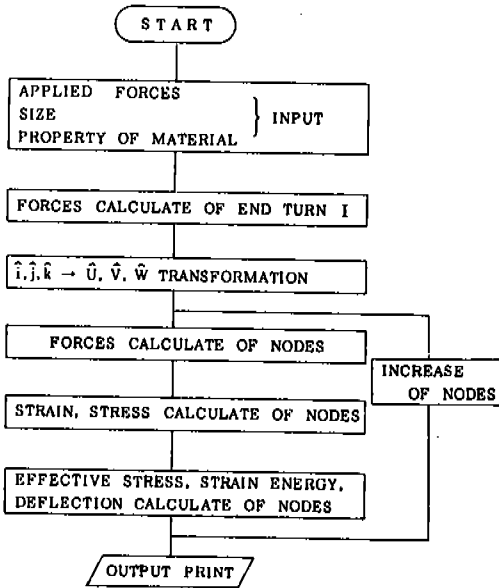


Fig.2. Flow Chart of Computer Analysis

3. 實驗方法

3-1 試片 및 實驗機器

3-1-1 試片

본 실험에 사용한 試片은 SAE 9254 鋼으로

만들어진 자동차 현가용 코일 스프링으로써 두개의 다른 피치角을 갖는 2重피치 코일 스프링이다. 試片의 化學組成은 Table 1과 같고, Fig. 3는 2重 피치 코일 스프링의 형상 치수를 표시한다.

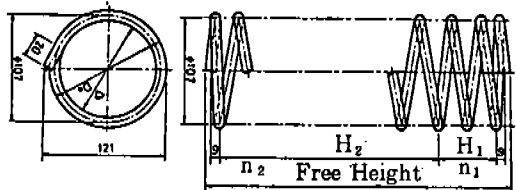


Fig.3. Specimen configuration

Table 1. Chemical composition of material (%)

SAE 9254	C	Si	Mn	P	S
	0.53	1.51	0.7	0.026	0.002
	Cu	Ni	Cr	Mo	
	0.15	0.06	0.71	0.02	

코일 스프링의 열처리는 900℃ 15分間 유지하고, 기름 담금질한 후 400℃에서 1시간 뜨임 유지하여 급냉 처리하였다. 熱處理후의 코일 스프링의 諸元 및 特性을 Table 2에 나타내었다.

試驗機는 Fig. 4와 같은 코일 스프링전용 피로 시험기를 사용하였고, 試驗機의 諸元은 Table 3과 같다. 본 실험에 사용된 熱帶性 高溫用 電氣爐는 3kw 용량의 Ni-Cr用 電氣爐

Table 2. Characteristics of specimen

Item	Unit	Value	Item	Unit	Value
Spring constant	(kg/mm)	1.93~3.64	Direction of helix	Right	
Free height	mm	314	Total Na of coil	Na	7.91
H <sub>1</sub>	mm	87.3	Na of active coil	Na	6.41
H <sub>2</sub>	mm	197.5	n <sub>1</sub>	Na	3.01
Dia. of wire	mm	11.2	n <sub>2</sub>	Na	3.40
Outside dia. of coil	mm	118.2	Na of end turns	Na	3/4
Inside dia. of coil	mm	95.8	Weight	kg	2.05

로서 上部에 끼워져 있는 熱電對를 통해 溫度調節장치와 연결되어 願하는 溫度를 유지하게 만들어 사용하였다. 또 溫度制御範圍는 0℃~400℃이며, 制御能力은 基準溫度 ±5℃정도 유지하여 주었다.



Fig. 4. Spring fatigue testing machine

Table 3. Characteristics of testing machine

Capacity	50 TON
Maximum load	1.5 TON
Stroke	max : 200 mm
	min : 50 mm
Magnitude of table	1,300 mm × 300 mm
Motor	5.5 kw × 4 P
Frequency	80 CPM

3-1-2 實驗方法

본 實驗에 사용된 熱帶性 高溫 疲勞試驗機는, Fig. 4에 表示한 피로시험기이며, 疲勞試驗은 常溫 및 熱帶性 高溫인 +50℃, +100℃, +150℃에서 荷重條件을 Fig. 5과 같이  $\tau_{mean} = 65 \text{ kg/mm}^2$  ( $\tau_{max} = 110 \text{ kg/mm}^2$ ,  $\tau_{min} = 20 \text{ kg/mm}^2$ )로, 荷重의 振動數는 1.3 Hz로 하여 靜的 및 動的 實驗을 실시하였다.

3-1-3 破斷面 組織觀察

疲勞 實驗후 각 破斷面을 光學현미경을 통한 巨視的 觀察과 走査型 電子현미경을 사용하여 微視的으로 破斷面을 觀察하였다.

3-1-4 理論값과 實驗값의 比較

코일 스프링의 應力解析으로, Program을

통하여 얻은 理論結果와 疲勞實驗結果와의 값을 比較해 보았다.

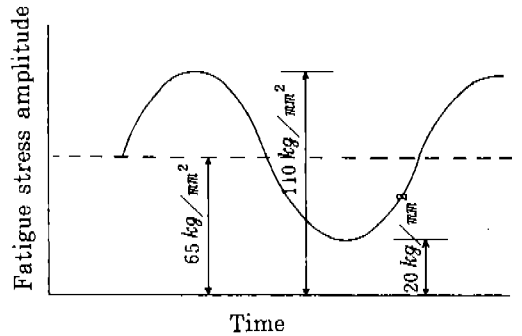


Fig. 5. Fatigue cyclic diagram

4. 結果 및 考察

4-1 熱帶性 高溫에 따른 疲勞의 影響

4-1-1 高溫에 따른 靜的 및 動的 疲勞의 影響

試片 코일 스프링(SAE 9254)은 2重 피치 스프링으로서, 荷重의 증가와 더불어 索線間의 接着, 혹은 索線을 座面에 接着시켜 有效 卷數를 可變시키므로 荷重과 변위량 관계는 하중의 증가와 함께 스프링 상수가  $K_1(1.8987)$ 에서  $K_2(3.5714)$ 로 增加하게 된다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 溫度가 올라 갈수록 변위량이 많아져 스프링 상수와 스트레인 에너지량에 영향을 미침을 알 수 있다.

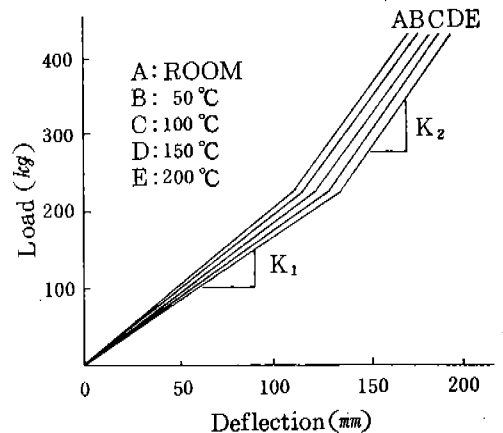
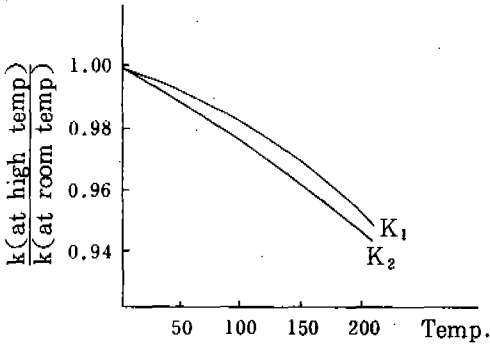
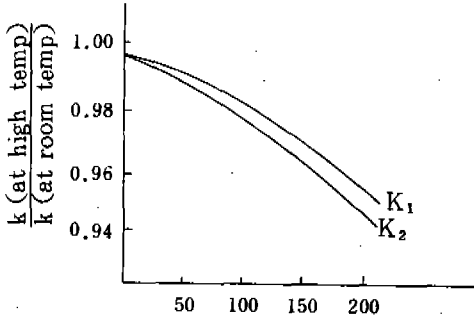


Fig. 6. Load-Deflection diagram at various temperature



(a) specimen A



(b) specimen B

Fig. 7. Temperature effect on spring constant(K)

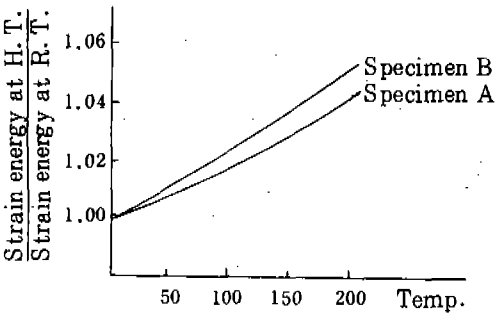
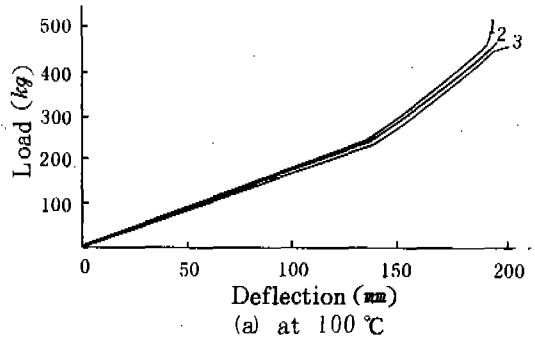


Fig. 8. Temperature effect on total strain energy

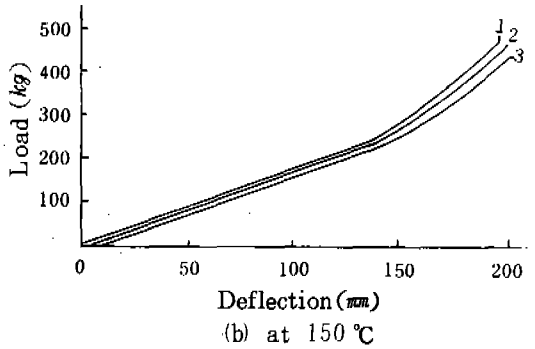
靜的 試驗의 경우는 Fig. 7, Fig. 8에서 보는 바와 같이 溫度가 올라 갈수록 材料의 彈性係數가 감소하여 스프링 상수(K)가 試片 "A"에서  $K_1 = 4.8\%$ ,  $K_2 = 5.4\%$ , 試片"B"에서  $K_1 = 4.7\%$ ,  $K_2 = 5.26\%$  감소됨을 보여 주고 있다.

또 전체 스트레인 에너지량에 대한 溫度의 영향으로 溫度가 올라 갈수록 試片 "A"에서 4.2%, 試片 "B"에서 약 6%정도 증가 함을 알았다. 일반적으로 피로 균열의 발생은 材料가 받은 손상량에 관련이 있으므로 전체 스트레인 에너지량의 증가는 高溫에서 疲勞壽命이 감소됨을 예측할 수 있다.

動的 實驗의 경우도 靜的 實驗과 같은 試片으로 스프링 전용 피로 시험기를 사용하여 각 溫度의 疲勞實驗前과  $5 \times 10^4$  사이클,  $10 \times 10^4$  사이클後의 하중-변위량과의 關係를 Fig. 9 (a), (b)에 나타내었다.



(a) at 100 °C



(b) at 150 °C

Fig. 9. Load- Deflection diagram of dynamic test

Fig. 9 (a), (b)에서 보는 바와같이 1은 피로 시험전, 2는  $5 \times 10^4$  사이클후, 3은  $10 \times 10^4$  사이클후의 하중-변위량 곡선이다.

疲勞實驗 結果로 +100 °C에서 疲勞實驗前과  $10 \times 10^4$  사이클후를 比較해보면 하중 제거시 (0 kg)에서는 2mm, 480kg의 하중을 가했을

경우에는 6 mm의 永久變形이 생겼고, +150°C에서는 하중제거시(0 kg)에서는 8 mm, 480 kg의 하중을 가했을 경우에는 13 mm의 永久變形이 생겼다. 그러므로 疲勞實驗前보다  $5 \times 10^4$  사이클,  $10 \times 10^4$  사이클후의 변위량이 증가하였고 100°C보다 150°C에서의 변위량이 많아졌다.

이와같은 現象은 長時間 高溫下에 있는 試片이 常溫에 비해 보다 活性化된 狀態에 있고 荷重이 加하여져 있기 때문에 스트레인 時効 및 析出, 再結晶, 變態 등의 金屬學的 變化에 起因된 것으로 생각된다.

Fig. 10 (a), (b)는 +100°C, +150°C에서 코일 스프링의 스프링상수와 하중-변위량 곡선으로부터 얻은 스트레인 에너지량을 圖示한 것이다.

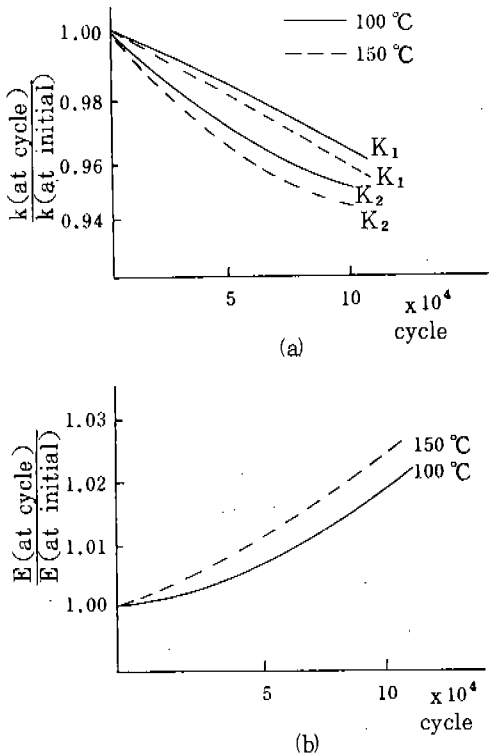


Fig. 10. (a) Relation of spring constant ratio-cycle number  
(b) Relation of strain energy-cycle number

그림에서 보는 바와같이 高溫에서 疲勞實驗 후 +100°C에서,  $10 \times 10^4$  사이클후 스프링상수는  $K_1 = 3.84\%$ ,  $K_2 = 5.16\%$  감소하고, 스트레인 에너지량은 1.58% 增加하였고, +150°C에서  $10 \times 10^4$  사이클후 스프링 상수는  $K_1 = 4.29\%$ ,  $K_2 = 5.55\%$  감소하고 스트레인 에너지량은 2.26% 增加하였다.

이러한 現象은 常溫으로부터 溫度가 增加함에 따라 彈性 變形率은 低下된다. 이것은 降伏點, 塑性流動應力, 引張力이 떨어지는 것과 같은 傾向이고, 熱搖動의 影響에서 오는 것으로 생각된다.

4-1-2 스트레인-스트레스에 미치는 溫도의 影響

各 溫度에 대한 스트레인-스트레스값을 測定하기 위해 2重피치 코일 스프링을 試片으로 하여 測定部位로써 2卷, 3卷, 4卷, 6卷의 안쪽면과 바깥쪽면에 스트레인 게이지 (strain gauge)를 부착하여 荷重範圍를 0~400 kg까지 하고 常溫, +50°C, +75°C, +100°C로 溫度를 變化시켰을때 하중과 應力과의 關係, 應力-권수와의 關係는 Fig. 11, 12에 나타내었다.

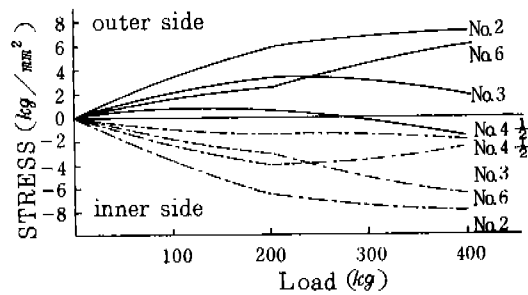


Fig. 11. Relation of load-stress

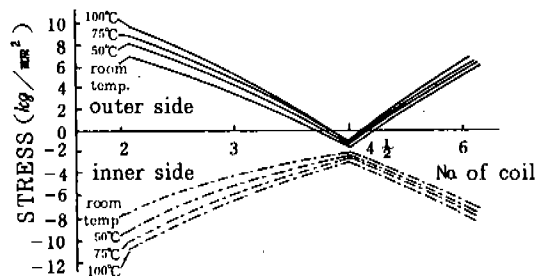


Fig. 12. Relation of maximum stress-Na of coil

Fig. 11과 Fig. 12에서 보는 바와 같이 코일의 바깥쪽면은 引張, 안쪽면은 壓縮應力을 받고 있으며, 바깥쪽면 보다 안쪽면의 應力값이 더 크게 나타났다. 이것은 코일 스프링 設計理論式에 의해 안쪽면이 바깥쪽면 보다 더 큰 應力이 걸리는 것과 일치함을 보여 주었다.

또 最大應力이 걸리는 곳은 2卷部位로 疲勞實驗時 많이 破損되는 部位와 같음을 알 수 있었다. 이와같은 現象으로 應力은 溫度가 올라 갈수록 조금씩 커짐을 나타내어 熱帶性 高溫疲勞壽命에 影響이 미침을 알 수 있었다.

4-1-3 熱帶性 高溫에서의 疲勞壽命

Fig. 13에서 보는 바와 같이 常溫 실험에서의 피로수명은 약  $45 \times 10^4$  사이클인데 비해 +50 °C에서의 피로수명은 약  $43 \times 10^4$  사이클, +100 °C에서는  $17 \times 10^4$  사이클, +150 °C에서는  $15 \times 10^4$  사이클 정도임을 알 수 있다.

+50 °C 부근까지는 상온과 별다른 차이가 없으나, 다시 온도증가와 함께 急激히 減少를 나타내고 있다.

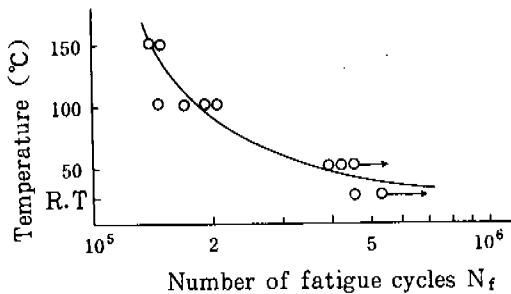


Fig. 13. Fatigue life diagram at various temperature

이와 같은 현상은 시편이 상온보다 장시간 고온하에서 스프링 表面에 酸化 雰圍氣 狀態下에 놓여 있어 結晶粒度는 粗大化로 因해서 피로강도는 저하되고 반복 열피로때문에 상온에 비해 피로수명이 현저히 감소된 것으로 생각된다.

4-1-4 硬度에 대한 온도의 영향

각 온도(+50 °C, +100 °C, +150 °C)에서 반복피로실험을 하여 고온에서 상온까지 冷却시

킨후 疲勞破壞된 시편을 中心部の 硬度를 測定한 결과의 값을 Fig. 14에 表示하였다.

Fig. 14에서와 같이 상온(실험전)에서 Hv 500 정도이며, +50 °C ( $43 \times 10^4$  사이클)에서는 硬度가 Hv 508, +100 °C ( $20 \times 10^4$  사이클)에서는 Hv 530, +150 °C ( $15 \times 10^4$  사이클)에서는 Hv 541로 경도가 점차 증가됨을 볼 수 있다.

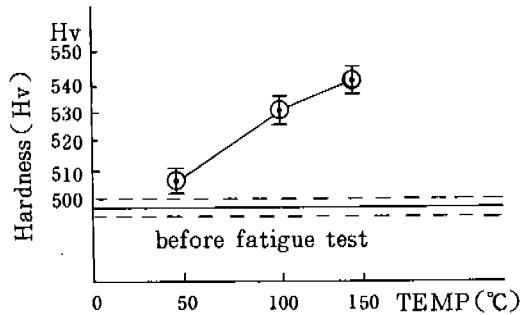


Fig. 14. Temperature effect on hardness

이와 같은 원인은 壓縮상태에 있는 스프링 시편이 반복열피로로 인해 결정조직 및 기계적 성질의 변화, 특히 시효경화에 있는 것으로 思慮된다.

4-2 코일 스프링 응력해석

2절에서 說明한 코일 스프링의 이론적 해석을 근거로 Table 4와 같은 체원을 가진 등피치 코일 스프링에 대한 구체적인 자료를 정리해 보면 Fig. 15, 16와 같다.

코일 스프링의 1권당 20개의 노우드(Node)로 나누었을 때, 매 1권당 같은 결과를 얻을 수 있으므로 처음 노우드 1~20 까지만의 결과를 구분하여 檢査하면

1)  $\sigma_{eff}$ 가 최대인 곳에서 스트레인 에너지가 가장 크며, 비틀림 모우멘트에 의한 영향임을 알 수 있다.

2) 피로실험을 한 결과  $N=1.5$  권에서 가장 많이 파괴되었으며, 理論解析에서도 좌권부의 권수를 고려하면  $N=1.5$  권에서 최대의 응력이 생기므로 이 부근에서 파괴가 일어날 것으로 생각된다.

위와 같은 결과들은 비틀림 모멘트의 영향으로 최대의 응력이 걸리는  $N=1.5$  권 부근에서 파괴가 일어날 것으로 예상되어, 피로실험결과와 이론적 해석의 결과는 거의 일치함을 알았다.

Table 4. Characteristics of Spring

Item	Dimension
Dia. of wire	10.3 mm
Free height	278.6 mm
Radius	53.5 mm
Total no. of coil	6.08
Na of active coil	4.58

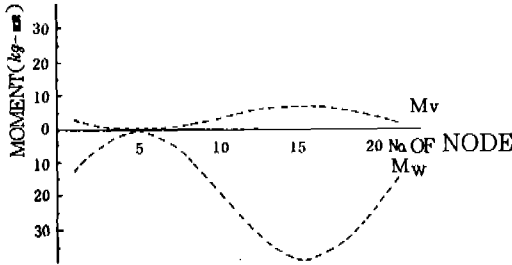


Fig. 15. Moment distribution at various node

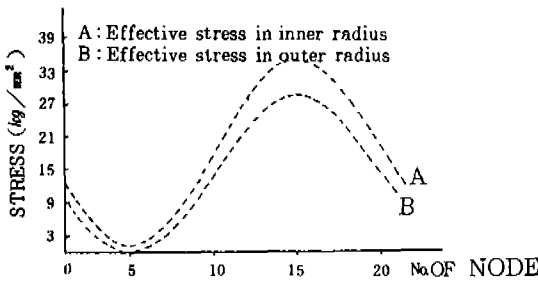
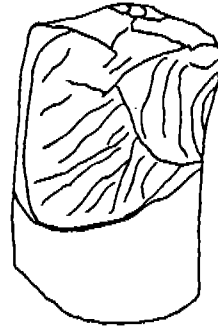


Fig. 16. Effective stress at various node

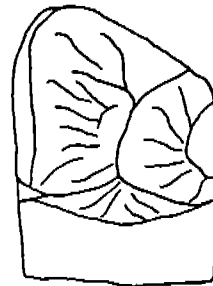
4-3 熱帶性 高温疲勞 破斷面の 觀察

Fig. 17 에는 열대성 고온 분위기에서 파단된 코일 스프링의 거시적 파단 양상을 나타내었다.

Fig. 17 (a) 는 +50 °C 에서 파단된 코일 스프



(b) 100 °C



(c) 150 °C

Fig. 17. Fracture feature of coil spring

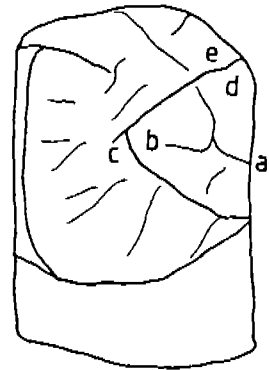


Fig. 18. Fracture surface of spring

링으로 軸에 45° 경사진 방향으로 파단된 樣相을 띠며, 内部의 非金屬介在物을 기점으로



파단된 파면이다.

Fig. 17 (b), (c)는 +100 °C, +150 °C에서 순수전단응력방향으로 파단된 것으로, 표면의 흠집이나, 表面部位의 비금속개재물 등에 의해 파단의 원인이 되고 있다.

Fig. 18 (Fig. 17 (b) 參照)은 +100 °C에서  $20 \times 10^4$  사이클의 반복피로하중을 받았을 때, 표면의 흠이 원인이 되어 파괴된 破面例를 表示한다.

비교적 높은 온도(+100 °C)와 반복응력하에서 크리프 균열은 大部分 表面의 結晶粒界에서 우선적으로 發生하게 되고, 이 균열지역이 酸化 腐蝕環境에 놓이게 되면 酸化물이 크리프 균열이 일어나고, 피복층이 파괴되면서, 외부의 산화가스가 浸透, 形成되어 이 지역에서부터 균열이 성장, 傳播되어 스프링이 파괴됨을 알 수 있다.

Fig. 19는 Fig. 18에 표시한 各部位(a~e)에서 SEM을 이용한 파단면이다.

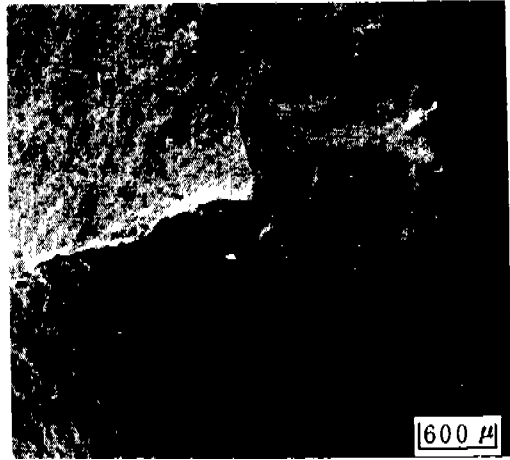
Fig. 19 (a)는 피복층과 모상사이에 발생하는 피로파괴의 起點部를 보여주고 있다. 피복층에서 균열이 生成되어 모상으로 전파하여 최대 압축-굽힘 또는 비틀림 응력과 수직으로 진전하는 균열선의 위치를 나타낸다.

Fig. 19 (b)는 기점부에서 약간 진전된 부근에 연속적인 줄무늬(fatigue striation)가 명백하게 나타내는 것을 보여주고 있다. 줄무늬 形狀은 균열진전방향에 수직하며, 각각의 줄무늬는 서로 교차하지 않는다. 또 줄무늬는 한 번의 load application에 의해 형성되므로 그 간격으로  $da/dN$  값을 얻을 수 있는데 피로줄무늬의 간격이 比較的 넓은 것으로 보아 빠른 균열 진전을 나타낸 것으로 생각된다.

Fig. 19 (c)의 부위에서는 空洞破裂(dimple rupture)과 유사한 酸化된 균열 形狀을 보여주고 있다.

Fig. 19 (d)는 微少空洞(micro-void)이 發生, 成長 및 合體에 依하여 일어나는 形態로 炭化物로 보이는 粒子주위에 수 많은 微少空洞이 形成되어 있음을 볼 수 있다.

Fig. 19 (e)에 나타난 것처럼 延性破壞의 特



(a) point a.  $\times 20$



(b) point b.  $\times 2,000$



(c) point c.  $\times 400$

(d) point d.  $\times 1,000$ (e) point e.  $\times 1,000$ 

Fig. 19. Fractographic analysis by SEM

微인 粒界形狀을 보이고 있다.

코일 스프링의 파괴는 위에서 설명한 마와 같이 고온산화가스가 스프링의 피복층을 損傷시켜 모상의 境界面에서 균열이 생성되어 입계면을 따라 성장하다가 피로파괴지점에 이르게 되면 찢어져가는 형상을 나타내고 있다.

## 5. 結 論

본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 온도가 올라갈수록 상온에 비해 활성화된 상태가 되어 스프링 상수(k)가 비선형적으로 감소되고, 기계적 성질변화, 시효경화로 cyclic hardening의 경향을 보여 경도가 증가됨을 알 수 있다.

2. 전체 스트레인 에너지량에 대한 온도 영향은 온도가 올라갈수록 증가하였고, 그 증가율은 피로실험후  $+100^{\circ}\text{C}$ 에서는 1.58%,  $+150^{\circ}\text{C}$ 에서는 2.26%로 나타났다.

3. 코일 스프링의 熱帶性 高溫疲勞壽命은 장시간 고온하에서 스프링 표면에 산화분위기 작용과 반복열피로때문에 상온에 비해 피로수명이 현저히 감소했다.

4. 二重 피치 코일 스프링은 내경의 응력이 외경보다 더 크게 나타났으며 2권부위에 최대응력이 걸리고, 온도가 올라갈수록 응력은 조금씩 커져 열대성 고온피로수명에 영향을 미침을 알 수 있었다.

5. 코일 스프링의 파괴양상은  $+50^{\circ}\text{C}$ 에서는 축에  $45^{\circ}$ 경사진 방향으로 내부의 비금속 개재물을 기점으로 파단되었으며,  $+100^{\circ}\text{C}$ 와  $+150^{\circ}\text{C}$ 에서는 스프링 축에 수직방향으로 표면의 흠이나 표면부위의 비금속개재물에 의해 파단되었다.

## 後 記

본 연구는 産學協同 財團 및 大圓鋼業(株)의 1985年度 産學協同 財團 研究 支援費에 의하여 연구되었으며, 財團 및 大圓鋼業 關係者 여러분에게 심심한 사의를 표합니다.

## REFERENCES

1. A.M. Wahl, "Mechanical Springs", McGraw-Hill, 1963.
2. J.E. Mottershead, "Finite elements for dynamic analysis of helical rods", Int. J. Mech. Sci. Vol. 22, p. 267-283.
3. 下關正義, 早坂善廣, "コイルばねの應力解析," ばね論文集, 第29號

4. J.K. Wood, ASME Trans. Vol. 51, 195-203 1929.
5. R.P. Shaw, ASME Trans. Vol. 51, 47-50, 1971.
6. K. Nakayasu, ばね論文集 No. 9, 78~84 1963.
7. 李榮培, 申孝澈, 李東郁, 廉永夏, "Coil spring의 寒冷低溫下에서의 疲勞破壞舉動에 관한 研究", 서울대학교 공대연구 보고, 제 18 권
8. 千島和夫, 大原三男, "SAE 9524 鋼のばね特性について", ばね論文集 第 26 號
9. Warren Krohn, Kenneth Campbell. "Evaluation of Torsional Fatigue in Automotive Suspension Coil Spring Steel", SAE. Tech. Paper. Ser. No. 850061, 1985.
10. 小山 博, 比材 朗, "ばね鋼の疲勞き裂傳播特性について", ばね論文集 第 29 號
11. 小泉 義明, 齊藤 鐵夫, "線ばねの疲勞破壞起點部の特徴について", ばね論文集 第 28 號
12. 廉 永夏, "Study on creep Temper of Coil Spring", 機械學會誌 第 13 卷, 1973.
13. M. Shibata, "ピッチ 2 段ばねのサージング防止効果", ばね論文集
14. J.E. Keck, T. Nicholas, "High Temperature Viscoplastic Fatigue behavior of Compact Tension Specimen", Eng. Fracture Mech. Vol. 22, No. 1, 77-91, 1985.
15. D. McIntyre, "Fractographic analysis of Fatigue Failures", Transaction of the ASME. 1975.
16. P.J.E. Forsyth, "A unified description of micro and macroscopic fatigue crack behavior", Int. J. Fatigue. January 1983.
17. R.C. Bates, W.G. Clark, "Fractography and Fracture mechanics", Transaction of the ASME, Vol. 62, 1969.
18. Wittrick W.H., Int. J. Mech. Sci. 8, 25, 1965.
19. E. Kreyszing, "Advanced Engineering Mathematics", Wiley. New York, 1972.