

<論 文>

이온窒化된 SW3 코일 스프링의 疲勞舉動에 관한 研究

廉永夏* · 張星台**

(1983年 3月 15日 接受)

Study on the Fatigue Behavior of Ion-Nitrided SW3 Coil Spring

Yung-Ha Yum and Sung-Tae Chang

Abstract

This paper deals with fatigue behavior of ion-nitrided coil spring. It is found that fatigue limit can be significantly increased by ion-nitriding.

Ion-nitrided specimen which is treated at 550°C for 5 hours improves in the fatigue limit by 30 percent in comparison with that of non-nitrided specimen.

On the other hand, the value of spring constant K has nothing to do with nitriding time and temperature in this experimental range.

Besides fatigue behavior, the following effects are discussed such as compound layer, diffusion layer, hardness distribution and their relations.

1. 緒 論

機械部品에 靜荷重이 作用하면 충분히 安全하게 견딜수 있는 것임에도 불구하고 反復되는 荷重 即 疲勞荷重이 作用하는 경우에는 항복응력보다 낮은 경우라 할지라도 사용 도중에 파괴되 버리는 현상을 많이 볼 수 있다. 이러한 파괴파괴 현상이 기계부품파괴의 약 80% 이상이라는 사실을 주목할때 疲勞現象의 研究는 매우 중요한 과제라고 생각된다.

疲勞壽命 向上法에는 여러가지가 있으나 그 中 窒化法이 오래前부터 使用되어 왔다. 窒化法에도 가스窒化法, 焰焔窒化法 및 이온窒化法이 있다. 그런데 이온窒化法은 作業이 간단하고 公害問題가 없고 經濟的이며 機械의 性質이 우수하여 他 窒化法보다 우수한 方法으로 알려져 있다. 이온窒化法은 西獨의 Bernhard Berg-haus에 의해 처음 소개된 후¹⁾ 安定된 glow discharg를 얻기 어려운 점등의 원인으로 1970年代부터 활발히

研究되고 있는 실정이며 이온窒化處理한 試片에 對한 大모시험²⁾ 굽힘피로試驗³⁾ 등에 대한試驗報告가 있으나 코일스프링에 대한 疲勞試驗 即 비틀림에 대한 報告는 찾아 볼 수 없었다.

本 論文에서는 이온窒化處理한 코일 스프링을 試片으로 使用해서 비틀림 疲勞試驗을 行했으며 이온窒化가 疲勞限度上昇과 어떤 關係를 가지는지를 시험을 通해 연구자 했다.

먼저 窒化時間과 溫度에 따른 窒化層 깊이를 조사하기 위하여 試片을 溫度와 時間을 變化시켜 450°C~550°C, 0.5hr ~5.0hr 로 제작했다. 이렇게 여러 條件으로 만든 試片으로,

첫째;窒化時間과 窒化溫度에 따른 合成層과 擴散層 깊이를 調査 했으며

둘째;이온窒化時間과 溫度에 따른 表面硬度 및 중심부분 硬度를 測定했다.

세째;이온窒化에 의한 스프링常數 K 값의 變化를 調査해서 理論値와 比較 檢討하였다.

네째;各試片에 對한 비틀림 疲勞試驗을 平均應力 50 kg/mm² 振幅應力 35kg/mm²에서 49kg/mm² 까지 step size 2kg/mm²으로 8 단계로 시험을 行해서 이온

* 정희원, 서울대학교 공과대학

** 정희원, 서울대학교 대학원 기계설계학과

窒化處理와 疲勞限度와의 關係를 研究했다.

2. 試驗裝置 및 方法

2.1. 窒化處理

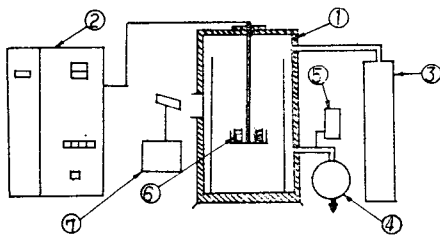
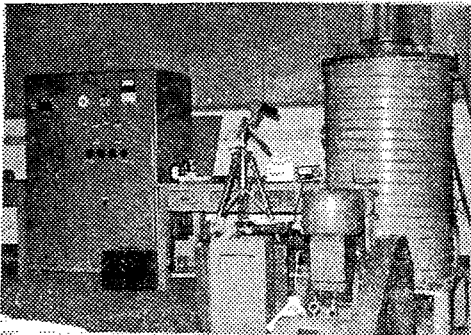
試驗片은 피아노강선(piano wire) KS SW3를 사용했으며 시편의 화학성분과 機械的 性質은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties

Material	Symbol	Chemical composition(%)						Mechanical properties		
		C	Si	Mn	P	S	Cu	σ_s kg/mm ²	G kg/mm ²	Hv
Piano wire	SW3	0.83	0.20	0.48	0.013	0.007	0.10	166	8200	342

SW3線材는 일반적으로 Valve用 코일 스프링으로 사용되는 冷間引拔 鋼線 線材에 Lead patenting 處理를 한후 超硬다이스 혹은 다이아몬드 다이스에서 冷間引拔 伸線하여 加工한 鋼線이다.

試片의 製원은 Table 2와 같다.



- ① vacuum chamber
- ② electric unit
- ③ gas distribution
- ④ vacuum pump
- ⑤ vacuum gage
- ⑥ workpiece
- ⑦ thermo spot sensor

Fig. 1 Overall view of ion-nitriding system

本 試驗에서는 N₂:H₂=80:20로 電流를 2암페어로 一定하게 하고 電壓으로 溫度를 調節했다.

Table 2 Dimension of specimen

Diameter of wire (d)	4.2mm	Effective turns (N _e)	4.25
Mean dia of coil (D)	28.5mm	Total turns (N _t)	6.25
Free height (H _f)	45.85mm	Spring index (c=D/d)	6.8
Closed height (H _c)	25.2mm	Weight (W)	60.48g

원하는 時間 處理가 끝나면 眞空펌프와 연결된 벨브를 통해 급속히 外部 空氣를 넣으므로써 冷却한다.

2.2. 硬度 및 窒化層 測定

이온窒化 處理를 하면 最外殼表面에 Nitric acid로 腐蝕시켜 腐蝕되지 않는 Fe₂₋₃N(ε) 組織으로 알려진 층을 合成層이라고하고 腐蝕되지 않고 회색 나타난다고 하여 백색층 이라고도 한다.

合成層 아래 部分은 窒素가 過飽和 고용되어있는 擴散層이 있다.

試片의 合成層 및 擴散層을 測定하기 위해서 各 處理條件의 試片을 全卷數의 1/2지점을 切斷하여 호마이카로 마운팅(mounting)한 후 에머링페이프(emery paper)로 1200번까지 연마(polishing)한 후 micro-hardness tester로 試片의 直徑 外側에서 內側으로 0.03mm 간격으로 찍었다.

合成層의 두께는 3% Nital로 腐蝕시켜 白色層으로 선명하게 나타났으며 擴散層은 현미경 조직으로 판단할수 없었기 때문에 硬度를 측정해서 중심부분의 硬度보다 더 높은 硬度까지를 擴散層으로 보았다.

2.3. 스프링 常數 K값 測定

荷重과 높이가 數字로 나타나는 스프링常數 測定機 Type-FSP-200BD FUJI SEIKI CO 裝備를 使用해서 KSB 2400-73 圓筒코일스프링의 設計基準에 의해 全體 처짐量의 30% 및 70% 높이에서의 荷重을 測定하여 $K = \Delta p / \delta$ 의 식으로 구했다. 여기서 $\Delta p = p_2 - p_1$ 이며 p_2 는 70%의 처짐量에서 荷重으로 42kg이며 p_1 은 30%의 처짐量에서의 荷重으로 15kg이었다.

試片 自由高의 差異에 의한 오차는 1%미만으로 무시 가능했다.

試驗은 各處理條件에서 各各 4개씩 2회에 걸쳐 시험했다. 스프링常數 K값의 理論値는 아래식을 이용했다.

$$K = \frac{Gd^4}{8N_e D^3} \tag{1}$$

여기서 d=와이어반경 D=코일의 평균반경

N_s = 유효권수 G = 횡탄성계수

式 (1)에 의한 本 試片의 스프링常數 K 는 3.24이다.

2.4. 疲勞試驗

星形 疲勞試驗機를 使用했으며 구조도가 Fig. 2에 나와있다. 1회에 16개씩 同時에 試驗할 수 있게 되어있다.

平均應力은 나사(screw)를 調節하고, 振幅應力은 캠(cam)을 交換하여 調節하도록 되어있다. 平均應力은 50kg/mm²으로 一定하게 하고 振幅應力은 35kg/mm²에서 step size 2kg/mm²으로 49kg/mm²까지 8단계에 걸쳐 시험했다.

여기서 應力 計算은

$$\tau_s = K_s \frac{16PD}{\pi d^3} \quad (2)$$

τ_s : 전단응력 K_s : 왈(Wahl)의 修正係數

P : 荷重 D : 코일의 平均半徑

d : Wire 半徑

왈(Wahl)의 修正係數는 코일스프링에서의 코일의 만곡(彎曲)과 接線 剪斷의 影響에 의하여 코일 內側의 應力이 코일外側의 應力보다 크게되는데 이 效果를 計算한 것으로 아래 식으로 계산한다.

$$K_s = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C} \quad (3)$$

여기서 K_s =왈의 수정계수 C =스프링치수(D/d)

本 試片의 K_s 는 1.22이다.

反復應力의 速度는 1710RPM으로 一定하게 했으며 시험에서 10⁷ 사이클까지 파단이 일어나지 않으면 영구

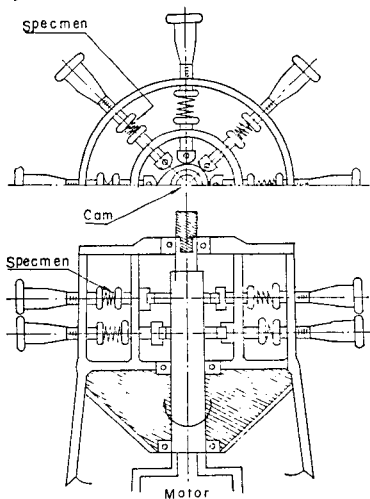


Fig. 2 Mechanism of spring fatigue tester

히 파단이 일어나지 않는 것으로 보았다.

3. 試驗結果 및 考察

3.1. 窒化層 및 表面硬度的 溫度와 時間의 影響

合成層과 擴散層의 깊이를 알기위해 金屬顯微鏡으로 시편表面을 腐蝕시켜 사진으로 찍은것이 Fig. 3에 있다. 表面의 腐蝕되지 않고 白色으로 나타난 부분이 合成層이다.

各 處理 溫度와 時間에 따라 合成層의 깊이가 현저하게 變化하는 것을 觀察할 수 있다. 따라서 이온 窒化法은 질화층을 쉽게 調節할 수 있어 요구되는 機械의 性質을 얻도록 할 수 있다.

白色層으로보아 窒化處理鋼의 耐蝕性이 向上된다는 것을 알 수 있다. Fig. 3(a)에서 550°C-5.0hr 窒化處理한 試片에서 合成層이 16μ정도이며 Fig. 3(e)의 450°C-0.5hr에서 合成層두께 4μ정도이다.

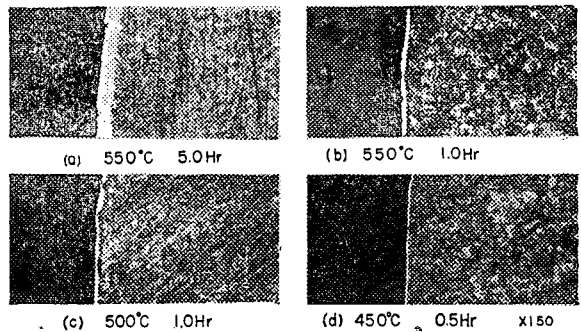


Fig. 3 Microstructure according to nitriding time and temperature

Fig. 4에는 窒化溫度를 450°C로 일정하게 하고 窒化處理 時間을 變化시켜 窒化層이 時間에 따라 어떻게 變하는가를 보여주고 있다. 合成層이나 擴散層 各같이

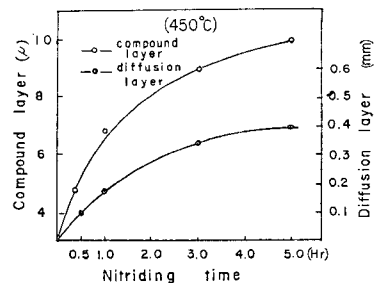


Fig. 4 Compound layer thickness and diffusion layer thickness as a function of nitriding time

시간에 따라 완만한 곡선을 나타내고 있다. 대체로 시간의 1/2승에 비례함을 알 수 있다.

이는 S Terauchi^{2,6)} 등의窒化 깊이는處理時間의 square root에 비례한다는 보고와一致한다. 물론 각각 다른試片이지만曲線은 거의同一한形象을 한다.

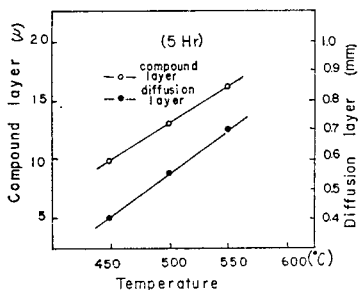


Fig. 5 Compound layer thickness and diffusion layer thickness as a function of nitriding temperature

Fig. 5는窒化處理時間을5時間으로一定하게한 후處理溫度를450°C, 500°C, 550°C로變化시켜溫度의影響을調査한 것으로合成層 및擴散層 모두 거의線形的으로增加함을알 수 있다. 이것은溫度가上昇함에 따라窒素의擴散係數가 커져 합성층 및 확산층 두께가增加하기 때문이다. 이렇게 볼 때窒化層은窒化時間과窒化溫度에 따라共히增加하나窒化時間보다窒化溫度에 큰影響을 받는다. 그러나處理溫度의範圍는窒素의活性化溫度인350°C에서FeN계의변태점인590°C경도까지이며 또한溫度가 너무 높으면窒化物의粗大化가 일어나硬度가 감소하며 재료의機械的性質의變化를 가져온다.

處理時間의限度는15時間으로 보나 보통10時間이후는窒化 깊이의變化가 적다. Fig. 6은450°C로溫度를一定하게 하고處理時間의變化에 따른表面硬度的變化를 보여주고있다. 450°C-5.0hr窒化處理時表面에서最大硬度가664Hv이며3.0時間處理時600Hv로 상당히 증가한다. 반면에 중심부분의硬度는질화時間이 많아짐에 따라 조금씩 감소하는傾向을 보인다. 이는表面에서는合成層에 의해서硬度가 증가하나 중심부분에서는窒化效果는 없으며450°C~550°C사이의溫度에서 뜨임(tempering)效果에 의해서 재질이軟化되기 때문이다.

Fig. 7은窒化處理時間을5時間으로一定하게하고溫度를450°C, 500°C, 550°C로變化시켰을 때表面硬度的變化를 나타내고 있다. 550°C-5.0時間處理試

片에서 최대표면경도725Hv를 얻었고500°C-5.0時間處理試片에서는713Hv이었다. 참고문헌²⁾에 의하면 이온窒化 금속의 경도최대치는 질화처리 시간에 따라 다르며 처리시간의 증가에 따라 저온영역으로 이동된다.

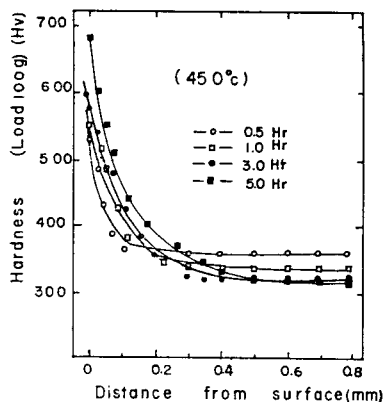


Fig. 6 Hardness distribution curve as a function of depth of below the surface

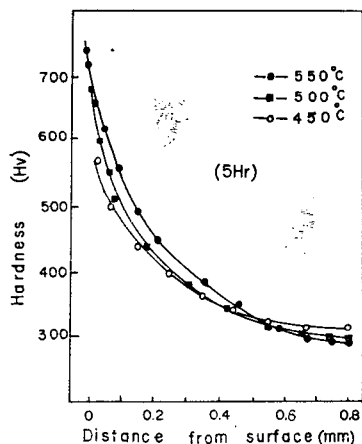


Fig. 7 Hardness distribution curve as a function of depth below the surface

3.2. 이온窒化의 스프링 常數 K 값에 대한 影響

Fig. 8은溫度를450°C로一定하게하고處理時間을變化시켰을 때 스프링常數 K 값의變化를 나타내는데3時間處理試片인 경우 무처리 시편에서의 스프링상수와 일치 하였으며 3時間보다 적은 경우 무처리 시편에서의 스프링상수 보다 다소 높은 값을 얻었다. 그러나5時間處理時 무처리 시편에서의 스프링상수 보다 오히려 낮은 값을 보인다. 即, 3時間處理를基準으로 스프링常數 K 값이 무처리재의 스프링상수와 交

又하는데 이는 表面硬度的 增加와 중심부분의 硬度的 減少에 기인 하는 것으로 Fig. 6에서 보면 450°C-0.5 Hr에서는 중심부분의 硬도가 조금 감소한 상태이다. 따라서 전체적으로 表面硬度的 增加와 중심부분의 硬度的 減少를 比較할 때 表面硬度的 增加가 더 크다는 것을 알 수 있다. 반면 450°C-5.0時間 處理한 試片은 表面硬度的 增加도 상당히 크지만 중심부분의 硬度 減少量이 더 크기 때문에 결과적으로 재료의 靑탄성계수 G값을 적게하여 스프링常數 K값이 줄어 들었다.

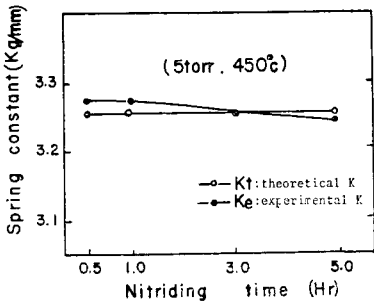


Fig. 8 Spring constant distribution curve as a function of nitriding time

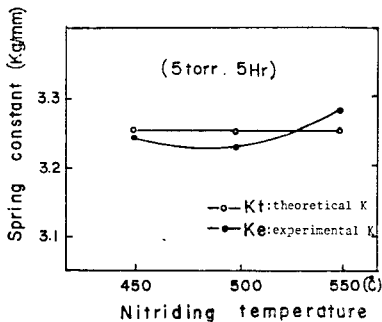


Fig. 9 Spring constant distribution curve as a function of nitriding temperature(5Hr)

Fig. 9는 窒化時間을 5時間으로 一定하게 하고 窒化溫度를 變化시켰을때 스프링常數의 變化를 나타낸 그래프로 450°C, 500°C에서는 무처리재의 스프링상수 보다 적은 값이고 550°C에서는 무처리재의 스프링상수 보다 크다. 이것은 Fig. 7을 觀察하면 550°C-5.0時間 處理試片은 表面硬도는 현저하게 增加 하였으나 중심부분의 硬度 減少가 500°C-5.0時間 處理試片과 거의 같다. 따라서 전체적으로 재질이 強化되었다고 볼 수 있다. 그러므로 G값의 증가에 의해서 스프링常數 K값은 增加 되었다. 그러나 增減量이 全體적으로 보아 1.2% 이내의 誤差로 거의 變化가 없다고 볼 수 있다. 그러므로 本論文에서 고려한 시험조건하에서 이온窒化

處理는 스프링常數 K값에 영향을 주지 않는다. 그 원인은 表面硬도가 上昇하여 재질이 強化되는 반면 중심부분의 硬度的 減少에 따른 材質의 軟化가 서로 調和를 이루워 靑탄성係數 G값의 變化를 가져오지 않는 것으로 생각되며 따라서 스프링常數 K값의 變化가 적게 나타나는 것으로 判斷된다.

3.3. 窒化와 疲勞限度 向上

疲勞強度 強化에는 合成層은 거의 影響을 주지 않으며 擴散層에서의 窒素의 舉動이 현저한 影響을 준다.⁸⁾

또한 이온窒化處理를 하면 金屬表面에 合成層과 擴散層이 생성됨에 따라 硬도가 현저하게 增加하지만 中心部分의 靑도 감소와 더불어 뜨임(tempering)효과가 나타나 재료에 靑성을 주게되어 疲勞限度 上昇의 한가지 原因이되며 가장 중요한 원인은 表面層에 形成된 壓縮殘有應에 의한 全體 合成應力의 均一化이다.

Fig. 10에서 보면 450°C에서 時間을 變化 했을 때 處理時間의 增加에 따라 疲勞限度 上昇이 뚜렷하게 나타난다.

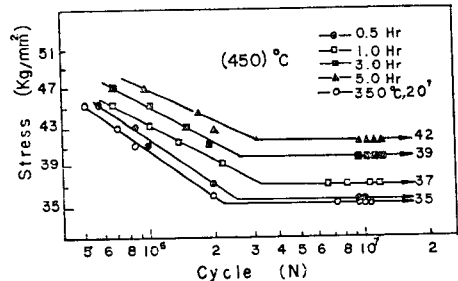


Fig. 10 Variation of S-N diagram with nitriding time

Fig. 10에서 가장 아래선은 350°C에서 20分 부루잉 (blueing)한 후 쇼트피닝(shot peening)한 試片이다. 이 試片에서 平均應力 50kg/mm²과 振幅應力 35kg/mm²에서 4개중 3개는 破斷되지 않았고 1개는 7.24 × 10⁶ cycles에서 破壞 되었다. 반면 450°C-0.5hr 窒

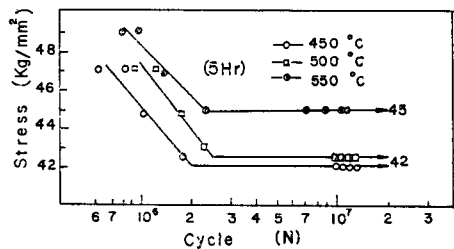


Fig. 11 Variation of S-N diagram with nitriding temperature

化處理한 試片은 振幅應力 35kg/mm^2 에서는 4개 모두 破壞되지 않았으며 高應力, $\sigma_a=41\text{kg/mm}^2$, 45kg/mm^2 에서는 窒化處理하지 않은 試片에 비해 疲勞壽命이 상당히 增加되었다. 또한 窒化時間이 增加함에 따라 疲勞壽命은 더욱 確實히 向上됨을 볼 수 있다. 本試驗에서 10^7 사이클에서 50% 以上 非破壞를 疲勞限도의 基準으로 잡았다.

Fig. 11 은 時間은 5時間으로 一定하게 했을때 溫度에 따른 疲勞限도의 增加를 보여주는 $S-N$ 곡선인데 $550^\circ\text{C}-5.0$ 時間 窒化處理한 경우 50kg/mm^2 의 平均應力과 45kg/mm^2 의 振幅應力에서 5개 試片中 2개는 非破壞 되었고 1개는 8.3×10^6 사이클에서 破壞 되었다. 이는 350°C 에서 20分 부루잉(blueing)한 試片에 비해 30%정도 疲勞限도의 增加를 나타낸다. 완전 무처리재와 비교하면 30%이상 上昇이 기대된다.

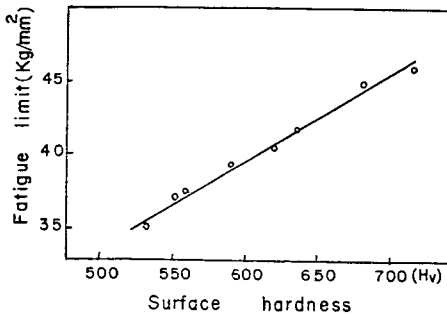


Fig. 12 Fatigue limit as a function of surface hardness

3. 4. 表面硬도와 疲勞限도와의 關係

Fig. 12는 表面硬도와 疲勞限도와의 關係로 表面硬도가 間加함에 따라 疲勞限도가 線形的으로 變化하고 있다. 이것은 疲勞試驗을 하지않고 硬도를 測定해서 疲勞限도를 추정할 수 있으며 이 線을 最小자 승법(least square method)로 fitting 하여 피로한도(σ_w)= $0.0555\text{Hv}+6.1\text{kg/mm}^2$ 의 關係式을 얻었다.

4. 結 論

1. 窒化層은 窒化溫度와 窒化時間에 따라 增加하여 合成層은 $450^\circ\text{C}-0.5\text{hr}$ 에서 4μ 부터 $550^\circ\text{C}-5.0\text{hr}$ 에서 16μ 까지 變化하며 窒化層은 0.1mm에서 0.7mm이며 窒化時間의 1/2승에 비해하며 窒化溫度에 따라서 거의 直線的으로 變化한다.

2. 表面硬도는 窒化溫度와 窒化時間에 따라 크게 增加하나 중심부분의 硬도는 處理 溫度와 時間의 增加에 따라 조금씩 減少하는 傾向을 보인다.

3. 本 실험의 범위 내에서는 스프링常數 K 값은 모든 試片에서 무처리재의 스프링상수와 1.2% 이내의 誤差로 變化가 매우 적다. 원인은 表面의 窒化層 形成에 의한 재질의 強化와 중심부분의 硬度 減少에 따른 재질 軟化가 調和를 이루어 簧탄성계수 G 값의 變化를 나타 내지 않은 것으로 判斷된다.

4. 疲勞限도는 處理時間과 溫度의 增加에 따라 上昇하며 $550^\circ\text{C}-5.0\text{hr}$ 處理한 試片의 경우 $350^\circ\text{C}-20$ 分 부루잉(Blueing) 및 샷트피닝(shot deening)한 試片에 비해 30% 피로한도 上昇을 보인다.

5. 疲勞限도와 表面硬도는 線形的으로 比例하며 疲勞限도(σ_w)= $0.0555\text{Hv}+6.1\text{kg/mm}^2$ 로 表示된다.

參 考 文 獻

- 1) Y.M. Lakhtin., "Nitriding of high strength cast iron in glow discharge" Metal itrem, obrabolta Metal 3 pp.37-44, 1964.
- 2) Kyu Sik Cho., "Carbon effects in ion-nitriding and wear characteristics of ion-nitrided steel", Ph.D. Thesis, KAIS, 1979.
- 3) 李正五, 姜武振., "疲勞強度에 미치는 이온窒化處理의 影響"大韓機械學會論集 第3卷 第3號 pp.88-103, 1979.
- 4) B. Endenhofer, "Physical and Metallurgical Aspects of Ion-nitriding" Heat treatment of metals Oxford, pp.23-28, 1974.
- 5) T.Sone and K. Yamanaka., "On the Ion-nitriding of carbon steels" Journal of the Japan Institute of metals Vol. 41, pp.621-625, 1977.
- 6) S. Terauchi, H. Terauchi, and K. Kamei., "some properties of carburized steels at Higher Temperature" Heat Treatment, 1976.
- 7) 山中久彦., "窒化法" 日刊工業新聞社, 1976.
- 8) C.K. Jones and S.W. Martin., Ion-nitriding. The '73 Heat Treatment, London, The Metals Society, pp.71-77, 1975.
- 9) C. Laird: ASTM, STP, 415 pp.131, 1967.
- 10) Gorge E. Dieter., "Mechanical Metallurgy" second edition Mcgraw-Hill pp.403-419, 1976.
- 11) 大西正男, 小笠原弘行., ばね論文集, 第9號 pp.28-39, 1963.
- 12) T.J. Bewley., "Ion-nitriding" Heat treatment "of metal Vol. 4, No. 1, pp.3-4, 1977.