論文 한국정밀공학회지 제 5 권 제 3 호 1988. 9
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 5, No. 3 Sep., 1988

反復 引張-壓縮荷重을 받는 이온窒化處理한 SM 45C의 疲勞破壞擧動에 關한 硏究

禹 昶基*, 金 熙松**

A Study on the Fatigue Failure Behavior SM45C on Ion-Nitrided under Alternating Tension-Compression Axial Loading

Chang Ki Woo, Hei Song Kim

Key words: Fatigue (疲勞), Carbon Steel (炭素鋼), Surface Crack (表面크랙), Crack Propagation (크랙傳播), Ion-Nitrided (이온窒化處理)

ABSTRACT

This paper dealt with experimentally the effect of N_2 and H_2 gas mixtures ratio in the fatigue characteristics of SM45C on Ion-nitrided.

The specimen were treated water cooling after Ion-nitriding at 500 ℃ and 5 torr. in 80 % N_2 and 50 % N_2 gas mixtures ratio in the atmosphere for 3 hrs.

The hardness distribution and the depth of nitriding layer shows more increase in 80 % N_2 gas mixture ratio than 50% N_2. Ion-nitrided specimen for 80% N_2 gas mixture ratio show more increase in fatigue strenght in the $>1.5\times10^5$ cycles region than 50 % N_2.

In the $<1.5\times10^5$ cycles region, fatigue failure is due to cracking of the brittle nitrided case, and the propergation of the surface cracks into the core. But in the $>1.5\times10^5$ cycles region, it is found that cracks propagate from the non-metallic inclusions in the subsurface.

* 단국대학교 대학원 기계공학과
** 단국대학교 기계공학과

1. 序 論

金屬의 表面은 內部에 비해서 不安定하고 주위의 雰圍氣 物質의 吸着에 의해서 表面에너지가 低下하며 形狀變化는 應力集中을 일으키고 內部보다도 表面에서 發生應力이 높아진다. 그리고 그 材料의 降伏點 이하의 작은 應力에서도 反復되는 荷重이 걸리면 表面에 微小 미끄럼(Slip)을 일으킨다. 이 微小 미끄럼은 Forsyth[1] 가 최초로 관찰한 것과 같이 突出된 凸凹을 형성하고 그것을 起點으로 疲勞龜裂이 발생하여 그 후의 反復應力으로 龜裂은 成長 進前하며 最終 破斷된다. 따라서 耐疲勞性을 向上시키기 위해서는 여러 종류의 表面硬化法이 실용화되고 있다. 그 表面硬化法中의 하나가 窒化法이다. 암모니아 가스에 의한 窒化法은 1923 년에 A. Fry[2] 에 의해서 개발되어 오랜 역사를 가지고 있으나 종래의 가스窒化의 결점인 장시간처리 및 窒化層의 未生成 등을 해결하기 위해서 이온窒化法이 1932 년 독일의 Bernhard Berghaus[3]에 의해 개발된 이후 産業分野에서 널리 이용되고 있다.

疲勞擧動에 대한 窒化處理材의 영향으로 回轉굽힘 疲勞試驗에서는 山中久彦[4] 이 SCM4 의 경우 疲勞限度가 89% 增加한다고 發表하였고, 小川喜代一[5] 은 窒化鋼에서 가스窒化處理材와 이온窒化處理材의 疲勞限度에 대한 比較實驗에서 이온窒化法이 가스窒化法보다 疲勞限度 上昇比가 약 10% 정도 높게 나타났으며 그 외에도 材質, 窒化處理條件 등이 다르지만 寺泥正男,[6~8] 田中眞一,[9] 中村宏[10] 등의 硏究結果에서도 疲勞限度가 向上되고 있음을 發表하였다. 그리고 反復引張一壓縮 疲勞試驗에서도 B.K. Jones와 J.W.Martin[11] 은 이온窒化處理가 疲勞限度의 증가를 가져왔다고 報告하였다.

본 硏究에서는 SM45C의 이온窒化處理時 N_2 :H_2 가스組成比의 변화가 疲勞破壞의 擧動에 미치는 영향을 實驗을 통하여 比較 分析하였다.

2. 이온窒化의 原理

이 方法은 Fig.1의 그림[12]에 表示한 것과 같이 $N_2 + H_2$ 混合가스를 1～10 Torr.의 稀薄雰圍氣의 眞空爐中에서 處理部品을 陰極(-), 爐壁을 陽極(+)으로 數百 V의 直流電壓을 걸어서 電壓電流特性曲線의 異常 Glow放電領域에서 放電을 일으켜 N^+, H^+ 이온 및 NH_i^+ ($i = 1 \sim 5$) 이온을 발생시키고 이러한 이온이 處理部品의 表面에 높은 運動에너지를 가지고 衝突하여 處理溫度까지 加熱하면서 동시에 窒化를 행하는 方法이다. 爐溫의 均一性 및 Glow의 安全을 기하는 目的으로서 處理溫度附近까지 電熱方式에 의해서 豫熱한 後 Glow放電을 일으켜 窒化하는 방법도 이용되고 있다.

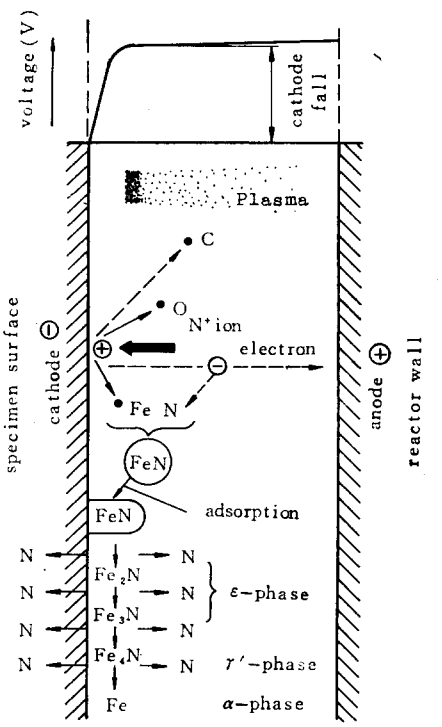


Fig.1 Schematic diagram of specimen surface reactions during ion-nitriding.

이온窒化에 의한 窒化方法은 Fig.1에 表示한 것과 같이 이온衝擊에 의해서 處理部品의 表面으로부터 Fe原子가 分離되면서 이것이 Plasma中에서 高度로 活性化된 N와 결합해서 FeN(N 20.05%)로 되어서 점점 低濃度의 窒化物 $FeN \rightarrow Fe_2N \rightarrow Fe_3N \rightarrow Fe_4N$로 變化를 일으켜 窒化가 進行된다. 이 과정중에서 放電된 N는 處理部品의 表面으로부터 內部로 擴散되고 다른 Plasma中으로 되돌아가 FeN를 生成해서 窒化를 계속하게 된다.

3. 實驗材料

反復 引張-壓縮 疲勞 실험에 사용된 재료는 SM45C로 試片의 化學的 組成은 Table 1과 같고 試驗片規格 KSB 0801 제 4 호의 引張特性은 Table 2와 같다.

Table 1 Chemical composition of SM45C (Wt.-%)

C	Si	Mn	P	S
0.445	0.207	0.674	0.04	0.016

Table 2 Mechanical properties

Yield Strength (kg/mm^2)	Tensile Strength (kg/mm^2)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)
42	60	18	47

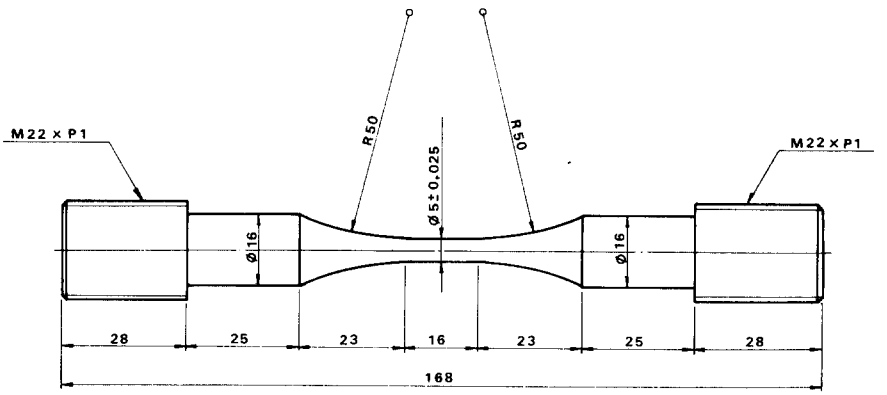


Fig.2 Dimension of specimen

疲勞試片의 規格은 Fig.2와 같다. 直徑은 오차를 0.5% 以內로 하고 그 表面은 흠집이나 Notch의 영향을 減少시키기 위해 Emery paper로 #600부터 차례로 #1200까지 길이방향으로 Papering 하였다. 이온窒化處理는 NIPPON DENSHI KOGYO CO.의 JIN ISS 모델로 하였으며 이온窒化處理 條件은 爐內壓力 5 Torr., 窒化溫度 500℃에서 $N_2:H_2$ 가스組成比를 각각 80:20, 50:50으로 변화시켰으며 窒化時間을 3時間으로 유지시킨후 水中急冷處理를 하였다.

4. 實驗方法

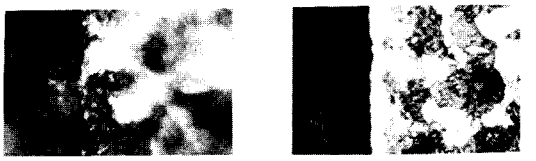
反復 引張-壓縮 疲勞實驗은 SAGINOMIYA의 DYNAMIC SERVO FATIGUE TESTER를 이용하였으며 實溫에서 正弦波形을 사용하여 荷重制御方式으로 荷重比 R = -0.5, 周波數는 30 Hz로 하였다. 試片破斷面의 損傷을 防止하기 위하여 試片이 破斷하면 自動的으로 機械의 作動이 멈추도록하였고, 疲勞限度는 10^6 Cycles 臺에서 求하였다.

그리고 破斷面의 特徵을 살피기 위해 SEM

(Scanning Electron Microscope)촬영과 Microvickers hardness 測定을 하였다.

5. 實驗結果 및 考察

이온窒化時 N_2 : H_2 가스組成比의 變化에 따른 硬度分布는 Fig.3과 같다. N_2 : H_2 가 80:20인 경우의 表面硬度(Hv420)가 N_2 : H_2 가 50:50인 경우의 表面硬度(Hv380) 보다 높았으며 이온窒化處理材가 水冷効果에 의해 試片의 中心部에서도 母材의 硬度(Hv200)보다 全般的으로 약간 높은 경향을 보였다.



(a) N_2 : H_2 (50:50) (b) N_2 : H_2 (80:20)

Photo.1 Microstructure of specimens at the various ion-nitrided SM45C (X800)

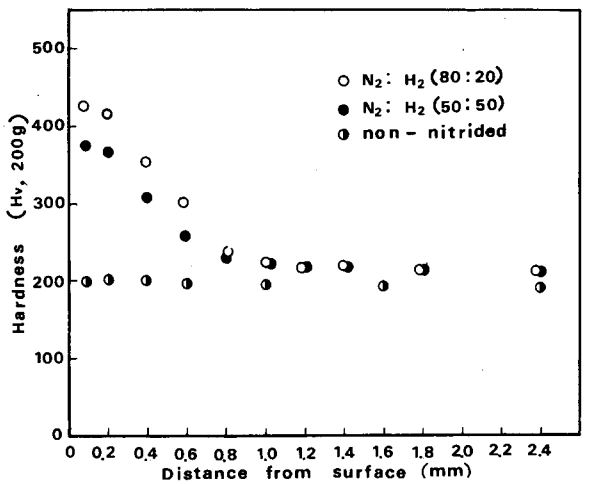


Fig.3 Micro-vickers hardness distribution of the various ion-nitrided SM45C

이온窒化處理된 試驗片의 窒化物層을 X-Ray 回折法으로 分析하면 ε ($Fe_{2-3}N$), γ' (Fe_4N) 및 α-Fe의 三元組織으로 되어있다.[13] 특히 表面層은 주로 ε ($Fe_{2-3}N$) 組織으로 되어 있어 Alcoholic nitric acid etch.로 腐蝕시켜 金屬顯微鏡 組織寫眞을 찍으면 Photo.1에서 보는 바와같이 腐蝕되지 않고 희게 나타남을 알 수 있다. 이 部分을 合成層(Compound layer)이라 부른다. 가스中에 N_2의 量이 많은 경우가 窒素粒子의 擴散으로 合成層이 더 增加되는 것을 Photo.1의 (a), (b)의 비교에서 알 수 있다. ε ($Fe_{2-3}N$)은 硬度가 큰 窒化物이기 때문에 合成層의 두께가 큰쪽이 表面硬度가 더 크게 된다. 擴散層(Difussion layer)은 窒素가 過剩되어 내부의 α-Fe로 擴散되므로 N_2만이 固溶하는 過飽和 固溶體가

되면서 단단한 窒化物을 形成하게 된다. 따라서 雰圍氣 가스中 N_2 가스量이 많은 경우가 擴散層 硬度도 增加하게 되는데 Fig.3 에서 보는 바와같이 Core 部分과 硬度의 變化가 확연히 區分되는 지점까지를 擴散層으로 볼 수 있다.

Fig.4 는 反復 引張-壓縮 疲勞實驗을 한 S-N線圖이다. 母材의 疲勞限度는 34.38 kg/mm^2 이고 가스 組成比 N_2 : H_2 가 50:50 인 경우는 42.02 kg/mm^2, N_2 : H_2 가 80:20 인 경우는 43.93 kg/mm^2 로 각각 22.2%, 27.8% 정도 向上되었음을 알 수 있다.

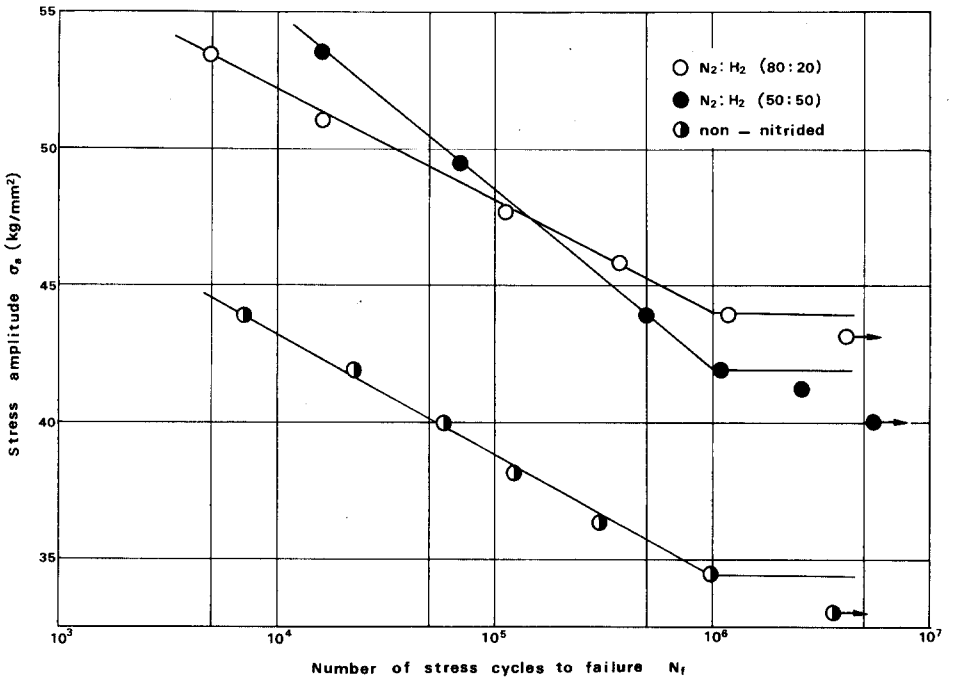


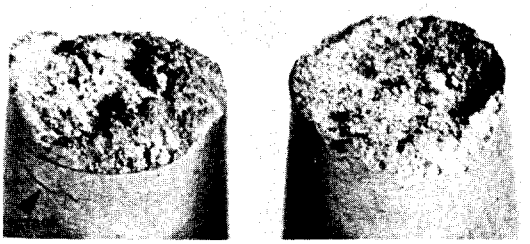
Fig.4 S-N diagram of the various ion-nitrided SM45C

一般的인 表面硬化材의 疲勞强度 增加는 表面層의 材質硬化와 熱處理過程에서 表面層附近에 생긴 壓縮殘留應力의 영향에 원인이 있다고 보고되고 있다.[14]

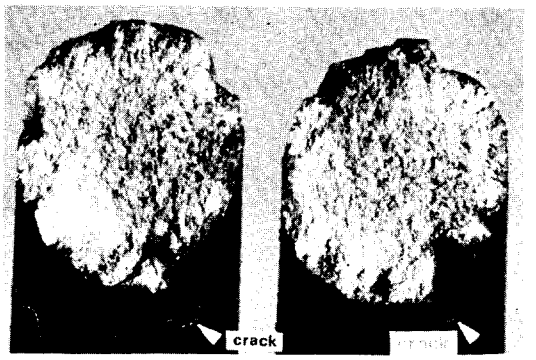
이온窒化處理材도 窒素의 固溶과 熱變形에 의해 表面硬化層 部分은 壓縮殘留應力이 걸리고 Core 부분에서는 引張殘留應力이 發生되는데[15] 表面에 존재하는 壓縮殘留應力으로 말미암아 反復應力中 龜裂의 成長과 傳播를 일으키는 引張應力을 감소시켜 龜裂의 傳播를 制御시키기 때문에 疲勞限度가 向上되는 원인으로 볼 수 있다.[14] 그러나 1.5×10^5 Cycles 을 기준으로 하여 그 以下의 部分에서는 이온窒化處理時 N_2 가스량이 많은 경우가 오히려 破壞壽命이 減少하는 경향을 보이고 있는데 이는 N_2 가스량이 많은 경우가 작은 경우보다 Core 부분에서의 引張殘留應力이 더 높아 이것이 反復應力(R=-0.5)中 引張應力과 합해져서 높은 應力을 받는데 그 원인이 있는 것으로 思料된다.

Photo.2는 非處理材의 破斷面을 나타내고

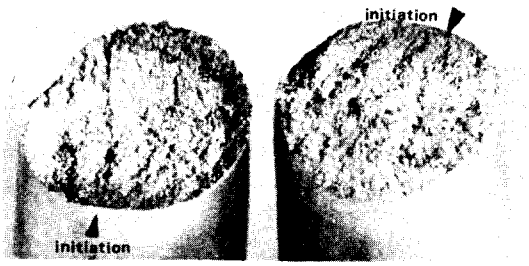
Photo.3 은 이온窒化處理材의 가스組成比 N_2 : H_2가 50:50인 경우의 破斷面을 나타낸다. 非處理材의 경우 (a) 比較的 낮은 反復回數($< 5\times10^3$) 領域에서는 表面으로 부터 龜裂進展에 의한 破壞와 局部收縮에 의한 Cup and cone 形式의 破壞가 共存하지만 큰 反復荷重으로 인한 Cup and cone 形式의 지배를 더 받고 있고, (b) 中間程度의 反復回數(5×10^3 ~1.5×10^5) 領域에서는 表面의 起點으로부터 龜裂進展에 의한 破壞의 영향을 더 받는다. 그리고 (c) 比較的 높은 反復回數($>1.5\times10^5$)領域에서는 表面의 起點으로부터 충분히 龜裂이 進展된 後 Shear lip을 남기는 形態의 破壞를 보인다. 이온窒化處理材의 경우 (a) 比較的 낮은 反復回數 領域에서는 反復應力中 큰 引張應力의 영향과 表面層 硬化에 의한 脆性의 영향으로 表面의 여러 곳에서 Transverse crack 이 형성되면서 Slant 形態의 破壞를 보이고 (b) 中間程度의 反復回數 領域에서는 역시 反復應力의 영향으로 表面의 疲勞起點으로부터 龜裂이 전파되다 荷重方向과 45°를 이루는 最大剪斷應力 方向으로 Shear lip 을 남기는 破壞形態를 나타낸다. 그리고 (c) 比較的 높은 反復回數 領域에서는 反復應力中 引張應力의 크기가 中間程度나 比較的 낮은 反復回數 보다는 작아 表面의 壓縮殘留應力의 영향을 크게 받아 Case cracking 을 일으킬 만큼 크지 못하기 때문에 表面硬化層 밑의 非金屬 Inclusion 에 의한 Fish eye 로 부터 龜裂이 傳播되어 荷重方向에 直角을 이루는 Flat 한 破斷面을 이룬다.



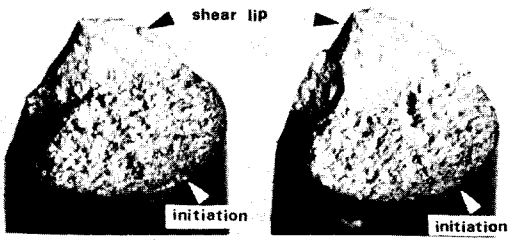
(a) $N_f = 2.3\times10^3$



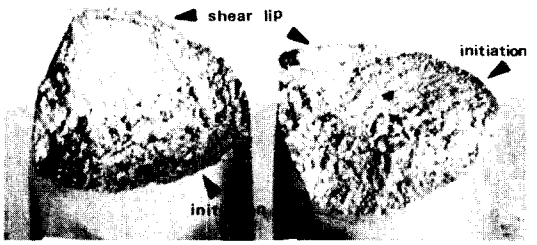
(a) $N_f = 3.0\times10^3$



(b) $N_f = 4.3\times10^4$

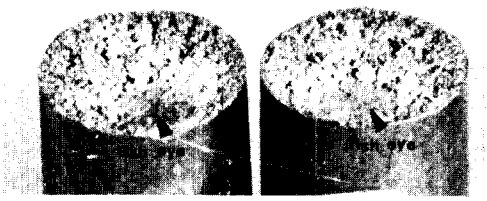


(b) $N_f = 4.6\times10^4$



(c) $N_f = 1.1 \times 10^5$

Photo.2 Optical fractograph of the SM 45C with non-nitrided



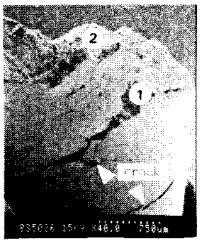
(c) $N_f = 2.6 \times 10^6$

Photo.3 Optical fractograph of the ion-nitrided SM45C ($N_2 : H_2 = 50:50$)

Photo.4는 $N_2 : H_2$가 50:50인 이온窒化處理材의 疲勞壽命 $N_f = 8.5 \times 10^2$인 경우의 破斷面을 SEM으로 찍은 것이다. (a)에서 보는 바와같이 試片 表面周圍의 여러 곳에 Transverse crack이 形成되어 있는데 이는 表面硬化層의 脆性이 큰 反復應力의 영향을 받아서 나타난 것으로 思料되며 (b)는 表面硬化層을 擴大시킨 사진으로 粒界脆性破壞(Intergranular brittle fracture)를 나타내고 (c)는 試片中心部로 이온窒化處理가 表面層만 硬化시키고 中心部의 延性은 크게 변화시키지 않기 때문에 크고 작은 Dimple이 보인다.

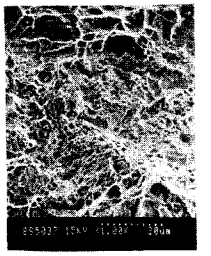
Photo.5는 $N_2 : H_2$가 50:50이고 $N_f = 2.6 \times 10^4$인 경우의 破斷面 SEM사진이다. (a)는 ①의 첫번째 起點으로부터 龜裂이 傳播되어 나오다 後에 생긴 起點의 龜裂傳播에 의해 急速破斷面 ④를 形成하는 形態를 보이고 있다. ⑤는 2nd initiation에 인접한 부분이다. (b)와 (f)는 粒界脆性破壞를 나타내고 첫번째 起點에 인접한 부분 (c)는 疲勞荷重으로 인해 粒界에 연해서 Striation이 나타나는 粒界疲勞破壞(Integranual fatigue fracture)을 보인다. (d)는 中心部 ③으로 Striation과 Dimple이 같이 나타나고 (e)는 急速破斷面으로 混合된 형태의 破斷面을 나타낸다.

Photo.6은 $N_2 : H_2$가 80:20이고 $N_f = 2.6 \times 10^6$인 경우의 破斷面 SEM 사진이다. (a)에서 보는 바와같이 反復應力과 試片의 殘留應力의 合이 表面硬化層에 龜裂을 일으킬 만큼 충분히 크지 못하고, 窒素의 擴散이 작아져서 中心部의 硬度와 거의 같아지는 地點의 非金屬介在物이 그 부분을 强度的으로 대단히 약하게 하기 때문에 Subsurface 부근의 介在物에서 龜裂이 發生되어 Fish eye를 일으키고 이것을 起點으로 龜裂이 傳播되어 나가는 것으로 생각된다. (b)에서 보면 Fish eye①의 疲勞核으로부터 잘 發達된 放射狀 破面이 보인다. (c)는 Fish eye ②의 疲勞核部分을 擴大한 것으로 B.K.Jones과 J.W.Martin[11]의 論文 結果와 같이 Inclusion과 Matrix사이의 Void로부터 龜裂이 發生되고 있음을 보여주고 있다. (d)는 試片의 中心部分 ③의 擴大寫眞으로 크고작은 Dimple과 一部에 Striation이 나타난다. (e)는 急速破斷部 ④의 擴大寫眞으로 擬壁開(Quasi-cleavage) 破壞와 작은 Dimple이 混在되어 있는 형태이고, (f)는 表面硬化層 ⑤의 部分으로 粒界破壞形態를 보이는데 가장자리의 흰 光澤이 나는 부분이 合成層이다.



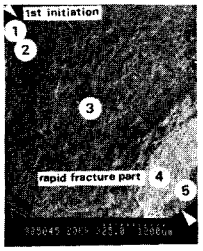
(a) Macrofractograph

(b) Area ①

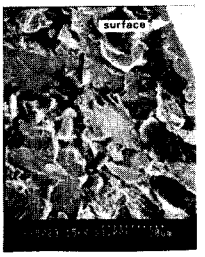


(c) Area ② (center region)

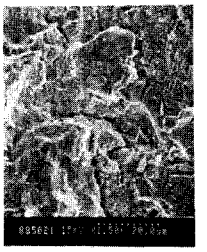
Photo.4 SEM fractograph of the ion-nitrided SM45C
($N_2 : H_2 = 50:50$, $N_f = 8.5 \times 10^2$)



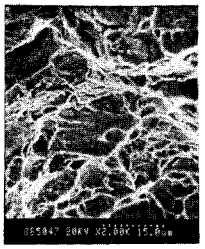
(a) Macrofractograph



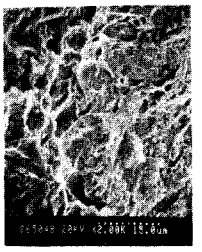
(b) Area ①



(c) Area ②



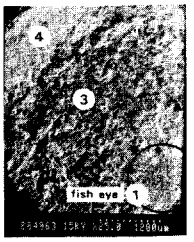
(d) Area ③



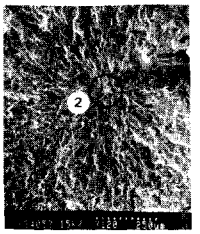
(e) Area ④

(f) Area ⑤

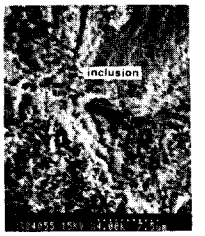
Photo.5 SEM fractograph of the ion-nitrided SM45C
($N_2 : H_2 = 50:50$, $N_f = 2.6 \times 10^4$)



(a) Macrofractograph



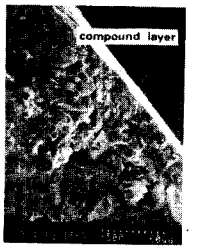
(b) Area ①



(c) Area ②

(d) Area ③

(e) Area ④



(f) Area ⑤

Photo.6 SEM fractograph of the ion-nitrided SM45C
($N_2 : H_2 = 80:20$, $N_f = 2.6 \times 10^6$)

6. 結 論

SM45C의 이온窒化處理時 $N_2 : H_2$ 가스組成比의 變化가 反復 引張-壓縮 荷重을 받는 경우의 疲勞破壞擧動에 미치는 영향을 實驗을 통하여 考察한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 이온窒化處理時 N_2 가스량을 크게한 경우가 合成層, 擴散層 및 硬化層의 硬度가 增加되었으며, 이온窒化處理材가 非處理材보다 全般的으로 疲勞限度가 向上되었다.

(2) 이온窒化處理時 N_2의 가스량을 크게 하면 적은 경우보다 疲勞限度가 增加되며, 比較的 높은 反復回數인 1.5×10^5 cylces 이하의 영역에서는 N_2 가스량이 큰 경우가 적은 경우보다 疲勞破壞壽命이 減少된다.

(3) 非處理材의 破斷面은 比較的 낮은 反復回數($< 5 \times 10^3$)에서는 表面으로부터의 龜裂進展과 Cup and cone 形式의 破壞가 共存하지만 주로 Cup and cone 形式의 破壞에 支配되며, 中間程度의 反復回數($5 \times 10^3 \sim 1.5 \times 10^5$) 領域에서는 表面 起點으로 부터 龜裂進展에 의한 破壞의 영향을 더 받았다. 그리고 比較的 높은 反復回數($> 1.5 \times 10^5$) 領域에서는 表面의 起點으로부터 충분히 龜裂이 進展된 後 Shear lip을 發生시키는 破壞形態를 보인다.

(4) 이온窒化處理材의 破斷面은 比較的 낮은 反復回數 領域에서는 表面의 여러 곳에서 Transverse crack 이 形成되면서 Slant 形態의 破壞를 보이고, 中間 程度의 反復回數 領域에서는 表面 몇 곳의 起點으로부터 龜裂이 進展된 後 Shear lip이 發生되는 破壞가 나타나고, 比較的 높은 反復回數 領域에서는 Subsurface 의 非金屬介在物에 의한 Fish eye로부터 龜裂이 傳播되어 荷重方向과 直角을 이루는 Flat 형태의 破壞를 보인다.

〔參 考 文 獻〕

1) P.J.E.Forsyth, 1969, The Physical Basis of Metal Fatigue, American Elsevier Publishing Co., New York.

2) A.Fry, 1923, Stahl u.Eison, 43, P. 1271.

3) B.Edenhofer, 1977, Production Ion-nitriding, Source Book on Nitriding. ASM, pp.181-185.

4) 山中久彦, 1976, イオン窒化法, 日刊工業新聞社.

5) 小川喜代一, 1978, 鋼の 耐疲勞性に 關連する 熱處理法の 問題點, 機械の 硏究,

Vol.30, No.11, pp.1288-1294.

6) 寺泥正男, 吉岡靖夫, 淺見克敏, 1967, タフトライド 處理鋼の 疲勞破壞に 關する研究(殘留應力の 擧動に ついて), 材料, Vol. 16, No.171, pp. 991-996.

7) 寺泥正男, 吉岡靖夫, 淺見克敏, 1968,タフトライド 處理鋼の 疲勞破壞に 關する 研究(組織および 殘留應力の 變化に ついて), 材料, Vol.17, No.183, pp.1114-1119.

8) 寺泥正男, 吉岡靖夫, 淺見克敏, 1972,タフトライド處理鋼の 疲勞破壞に 關する 研究(切欠き 材の 疲れに ついて, その1), 日本機械學會論文集, 38卷, 301號, pp. 1142-1153.

9) 田中眞一, 初野耕三, 夏井由郎, 中村宏, 1969, タフトライド處理鋼の 疲勞强度, 材料, Vol.18, No.194, pp.970-975.

10) 中村宏, 岡崎章三, 堀川武, 松田昭三, 草野兵衛, 1972, タフトライド 處理材の 疲勞强度, 川崎技報, 47號, pp.1-10.

11) B.K.Jones, J.W.Martin, 1978, Fatigue Failure Mechanisms in a Nitrided En41B Steel, Metals Technology, July, pp.217-221.

12) B.Edenhoffer, 1974, Härterei-Techn. Mitt., 29, p.105.

13) 康明順, 尹種學, 李源平, 1987, 炭素鋼의 機械的 性質을 改善하기 위한 이온窒化處理의 應用에 關한 研究, 自動車工學會誌, Vol.9, No.2, pp.28-33.

14) L. Magnusson, 1973, Low Cycle Behavior of Case Hardened Steel, Mechanisms of Deformation and Fracture, P.105-110.

15) B.K.Jones, J.W.Martin, 1977, Residual Stress Distribution in Nitrided En41B Steel as Function of Case Depth, Metals Technology, November, pp.520-523.