

<論 文>

高硬度鋼材의 疲勞舉動과 機構

宋 森 弘*

(1979年 3月 26日 接受)

A Study on the Fatigue Behavior and Mechanism of High Hardened Steel

Sam Hong Song

Abstract

On the basis of optical microscope and electro microscope observation for the fatigue fracture process of medium carbon martensitic structure produced by rapid heat treatment, mainly, the abstracts of the studied results for the morphology of fatigue crack initiation process of high hardened steel are summarized as follows. Fatigue crack initiated from inclusion on the surface or subsurface. Above all the crack which initiated from inclusion exposed on the surface is as follows.

- (1) fatigue crack initiated from the boundary of the matrix and inclusion.
- (2) fatigue crack initiated at surrounding of small pit by drop out of inclusion.

1. 序 論

急熱急冷에 의하여 얻어진 炭素鋼 低말텐사이트 組織이 疲勞破壞를 支配하는 組織적인 因子로서, 宋 등(1-3)은 舊오스테나이트結晶粒 및 粒界 혹은 말텐사이트 플레이트 境界등을 지적하고, 이것들이 疲勞破壞의 起點이 된다는점, 또 이것들을 기점으로하여 發生하는 初期크랙은 어떤 경우라도 剪斷型 크랙이라는 것을 밝힌바있다.

그런데 이상은 주로 비교적 낮은 硬度(Hv≒450)를 가지는 低炭素 말텐사이트組織중에서 얻어진 결과이다 이에비하여 이것보다높은 硬度(Hv>600)를 가지는 말텐사이트組織 예를들면 急熱急冷의 熱處理를 한 中炭素鋼의 경우는 적당한 熱處理조건을 선택함에 따라서 上記와 같은 높은 硬도를 가진 말텐사이트組織을 얻을

*正會員, 高麗大學校 工科大學 機械工學科

수 있다. 따라서 이와같은 材料의 疲勞크랙은 어떠한 舉動을 나타내는가하는 것이다.

이方面에 대한 從來의 研究를 綜合하여 보면(4-10), 比較的 높은 硬度(Hv>600)를 가지는 鋼材에 있어서는 주로 非金屬介在物이 疲勞破壞의 起點이 된다는 사실이 발표되어 있으나 이 경우의 疲勞크랙의 形成機構는 純金屬 및 延性材料의 그것과(12-16) 根本적으로 同一한것인지 아닌지에 대하여는 아직도 명확하지 않다.

이러한 문제에 대한 하나의 見解로서 Thomson(17)은 로크웰 硬度(HcR)가 60정도(Hv≒700 정도)의 高硬度鋼이라하더라도 어떤種類의 反復應力조건하에서는 波形的 變形帶가 발생한다는 Bush(18)등의 研究結果를 重要하게 생각하고 高硬度鋼의 疲勞機構가 延性材料의 그것과 다름이 없다고 주장하고 있어 兩者의 機構가 同一하다고 하는것을 예시하여 주고있다.

그런데 Grosskreutz등(19)의 研究報告에 의하면 알미늄合金에서는 介在物周邊의 슬립變形과는 관계없이 疲勞크랙은 介在物과 基地와의 境界面의 分離現象에 의

하여 발생한다고 주장하고 있다.

따라서 高硬度鋼에 있어서도 마찬가지로의 現象을 기대한다면 上述한 Thomson 등의 見解를 단순히 받아들여서는 그렇게 쉬운일은 아닌것 같다.

이상과같은 結果들을 綜合하여보면 높은 硬度를 가지는 소위 中炭素말텐사이트組織을 가진 材料에 있어서도 일반적으로 延性材料와 마찬가지로인 슬립등과같은 變形發生의 難易가 疲勞크랙發生의 重要한 原因이 되는것인지 아니면 變形과는 직접적으로 關係없는 다른 機構에 의하여 疲勞크랙이 發生되는지를 檢討하는것이 이러한 種類의 문제의 초점이 된다고 생각된다.

따라서 本研究에서는 우선 急熱急冷處理에 의하여 얻어진 中炭素鋼 말텐사이트組織의 疲勞破壞過程에 대한 金屬顯微鏡 및 電子顯微鏡의 觀察을 中心으로 高硬度鋼의 疲勞學動을 考察하였다.

2. 實驗方法 및 試驗片

Table 1. Chemical composition

C	Si	Mn	P	S
0.36	0.27	0.53	0.010	0.011

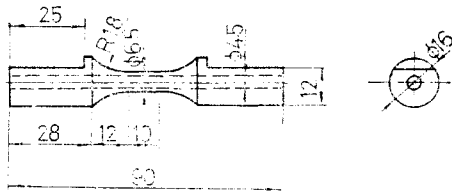
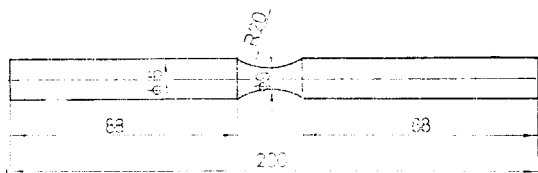


Fig. 1. Specimen geometry

試驗片의 母材로서는 Table 1에 표시한 化學成分을 가진 어니일링한 SM35C 炭素鋼(φ18 丸棒)을 선택하고 그것을 Fig. 1에 표시한 모양 및 치수로 機械加工한후 高周波熱處理를 실시하여 試驗片으로 하였다. 특히 비틀림시험용의 試驗片은 應力의 高低, 殘留應力의

영향등을 除去함과 동시에 시험기의 容量을 고려하여 中空試驗片으로 제작 하였다.

高周波熱處理에서는 完全담금질組織 소위 말텐사이트組織을 얻기위하여 담금질 最高溫度가 1150°C에 달할때까지의 加熱時間을 45秒가 되도록 過熱기분의 조건을 선택하였다.

그결과 試驗片表面의 金屬組織은 電子顯微鏡 관찰(Photo. 1) 및 마이크로 비커스硬度 측정결과(Fig. 2)

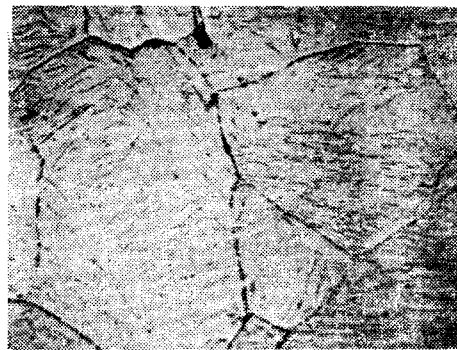


Photo. 1. Medium carbon martensitic structure (2 stage replica method)

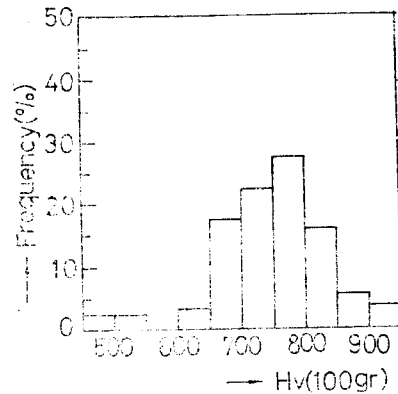


Fig. 2. Distribution of micro vickers hardness

로부터 페라이트가 完全히 除去된 말텐사이트組織임을 확인했다. 마이크로硬度計를 사용하여 表面組織中の 임의의 位置 100個所에서 微小硬度를 測定한 結果를 Fig. 2에 제시했다.

微視金屬組織의 檢出에 대하여는 從來의 Nital부식법 및 新腐蝕法⁽²⁰⁾을 사용하였으며 특히 舊오스테나이트 結晶粒界의 檢出에 있어서는 後者の 方法을 택하였다. 여기서 新腐蝕法이라는 것은 다음과 같은 目的 때문에 本研究者에 의하여 새로 開發된 腐蝕法을 지칭하는 것으로서 그 概要는 대략 다음과 같다. 즉 一連의 系統的인 研究目的을 추구하는 문제와 關連시켜 微

視組織이 疲勞舉動에 미치는 영향을 명확히 할 必要性이 指摘되었고, 이문제해결의 하나로서 담금질하였을 때의 소위 말덴사이트組織을 특징지우는 微視組織의 인 因子의 하나로서 舊오오스테나이트結晶粒界의 檢出方法을 開發하려고 노력하였다. 즉, 一般構造用 炭素鋼의 담금질조직에서의 舊오오스테나이트結晶粒界의 檢出은 從來부터 매우 어려운 문제로 指摘되고 있었다 그래서 이 種類의 鋼種들에 적용시킬수있는 腐蝕法을 檢討한 결과 從來의 腐蝕法에 사용하던 부식용약품에 약간의 特定한 藥品을 첨가한 부식액을 사용함에 따라서 간편하고 명확하게 粒界를 檢出할수있었다. 그것도 腐蝕液用 약품의 混合比와 腐蝕時間과를 調整함으로써 低炭素鋼뿐만 아니라, 中, 高炭素鋼에 대하여도 舊오오스테나이트結晶粒界의 檢出이 가능하였으며 더구나 腐蝕에 의하여 表面 더러워짐이 적으므로 광범위하게 應用할수있는 長點이 있다고 생각된다. 참고로 新腐蝕法에 사용한 試藥과 液의 조절의 一例를 들면 다음과 같다.

기호	시 약	液의 조절
A	피크린산(특급)	포화수 용액
B	토메실벤젠산 소오다	5gr를 100cc물에 溶解
C	가정용 비누(粉末) 특급	원액의 10% 수용액
D	염화 제 2 철 液	원액의 10% 수용액
E	濃鹽산(1급)	원액 그대로 사용

腐蝕方法의 一例(SM35C 炭素鋼의 경우)

재 료	열 처 리	부 식 액	부식시간	液溫度
SM35C	高周波담금질 1150°C 15秒	A액 : 20cc B액 : 1.5cc C액 : 1.0cc E액 : 0.2cc	3~5분	상 온
SM35C	어니일링	상 동	3~5	상 온

이상과 같이하여 준비한 試驗片에 반복응력을 加한 후 試驗片表面의 말덴사이트組織중에 발생하는 疲勞크랙의 發生形態를 金屬顯微鏡, 2段 Replica法 및 Scanning法을 사용하는 電子顯微鏡을 이용하여 詳細히 관찰하였다. 試驗機는 10kg-m Ono type 回轉굽힘疲勞試驗機 및 4 kg-m 생크 type 비틀림疲勞試驗機를 사용하였으며 負荷速度는 모두 3000 rpm이다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1. 表面 및 表面直下の 介在物을 起點으로 하는

疲勞크랙舉動

疲勞크랙발생과정을 관찰하는데 앞서서 실시한 中實試驗片에 관한 回轉굽힘 疲勞試驗結果를 Fig. 3에, 中空試驗片을 사용한 반복비틀림 疲勞試驗결과를 Fig. 4에 각각 表示한다. 疲勞限度는 각각 $\sigma_{w0}=90\text{kg/mm}^2$, $\tau_{w0}=37\text{kg/mm}^2$ 이었다.

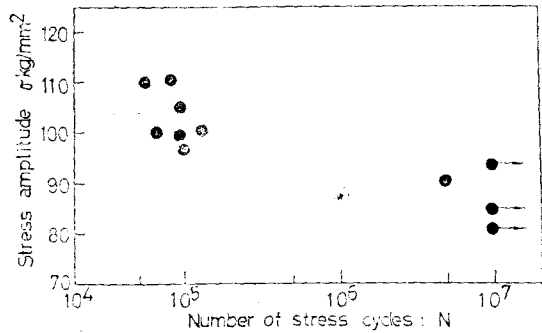


Fig. 3. S-N Curve(Rotating bending test)

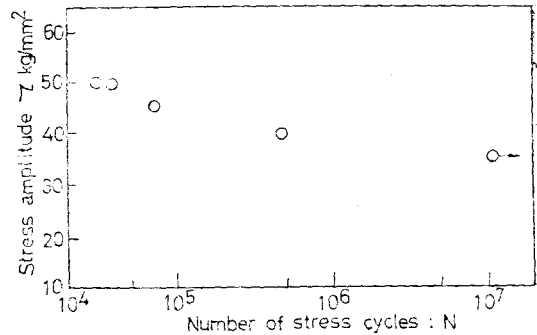


Fig. 4. S-N Curve(Reversed torsion test)

우선 疲勞限度의 120%에 해당하는 回轉굽힘反復應力을 받는 試驗片表面에서 관찰한 疲勞크랙의 一例를 Photo. 2에 표시한다. 사진중에 一표로서 표시된 部分이 소위 介在物로서 疲勞크랙은 슬립등의 變形帶를 동반하지 않고 試驗片軸과 거의 直角方向으로 發生傳播하고 있음을 관찰할 수 있다.

이와같은 크랙은 基地의 組織이 硬한. 말덴사이트기 때문에, 확실히 크랙의 發生初期에는 관찰이 매우 곤란하지만 그것은 수명의 10~20% 경과후에는 이미 發生되어 있고, 따라서 高硬度鋼 말덴사이트組織에 있어서도 보통으로 취급되는 延性材料과 마찬가지로 壽命의 약 80~90%정도가 疲勞크랙의 傳播기간이라는 것이 예상된다.

한편, 단순하게 表面上에 發生된 크랙의 관찰로 부대



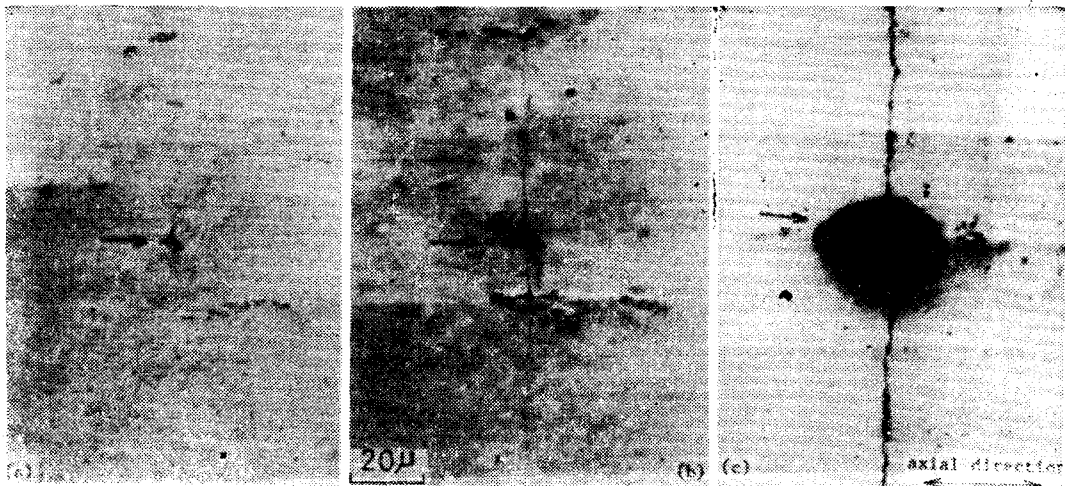
Photo. 2. A characteristic feature of crack initiation at the inclusion.
 $\sigma=110\text{kg/mm}^2$, $N=2.5 \times 10^4$ 70% of the fatigue life has been expended.

다지 말렌사이트基地中에 介在物과는 關係없이 疲勞크랙이 발생하여 있는것을 관찰할 경우도 있다. 예를들면 Photo. 3은 그 일례이다. 疲勞크랙은 매우 관찰이 곤란하나 확실히 介在物과 關係없이 發生하고 있고 드슬립등의 變形帶를 동반하지않고 基地의 組織中에 발생된다고 있다(Photo.3(a)).

그러나 이경우에 있어서도 詳細히 觀察하여보면 疲勞크랙은 介在物과 關係없는것이 아니다. 同 Photo. (a), (b), (c)에서 觀察되는 一連의 寫眞으로부터도 알 수 있는 것처럼 그것은 表面直下의 介在物을 起點으로써 發生하고 있음을 알 수 있다. 이경우 表面直下에 存在하는 介在物의 확인은 다음과 같은 방법으로 하였다. 즉, 크랙이 起點이 된 個所에 대하여 5~10 μ 정도의 가벼운 電解研磨를 실시함에 따라서 그 表面層을 약간씩 단계적으로 除去시킨 결과 자연히 介在物을 表面層을 增加하여 가는 것이 觀察되었다. 따라서 크랙 發生의 起點으로서는 단순히 表面에 노출되어 있는 介在物의 크기만을 측정하여도 별로 意味가없음을 알 수 있다. 이상과같은 結果는 同一硬度레벨을 가지는 노치 시험편에 대해서도 마찬가지로의 結果가 얻어진다. (1)

3.2. 介在物 周邊의 基地의 狀態와 크랙發生의 특징

前節의 觀察로부터 介在物은 高硬度鋼 말렌사이트組



(a) The crack appeared to be initiated independently from the inclusion. No appreciable deformation are observed near the crack path. $\sigma=110\text{kg/mm}^2$, $N=2.5 \times 10^4$
 (b) A surface elimination about 5 μ of the same place as in the (a) reveals the existence of inclusion at the origin of the crack.
 (c) A further elimination of the surface layer about 10 μ reveals more clear evidence of inclusion at the origin of the crack.

Photo. 3. A characteristic feature of the crack initiation at the inclusion under surface.

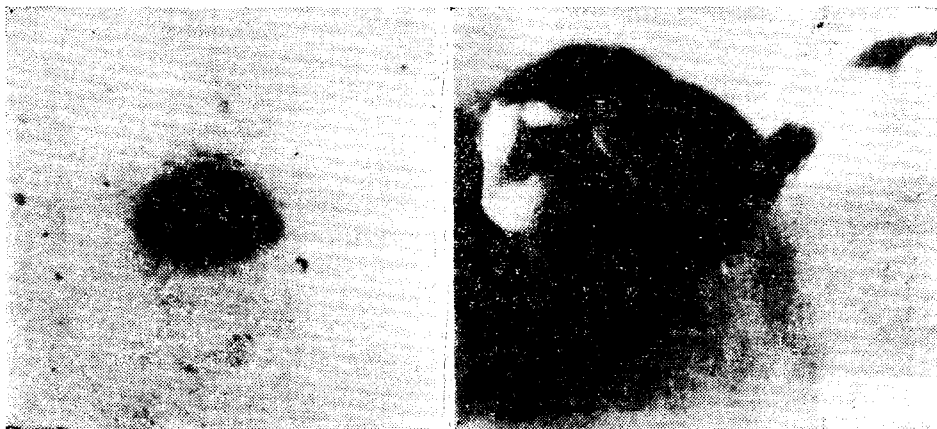
織中에 發生하는 疲勞크랙의 起點이 됨을 지적하였으나 이 문제에 대한 보다 깊은 理解를 도우기 위해서는 介在物의 集中效果 및 介在物이 母相에서 異質物로서 存在하기 때문에 發生하는 相互效果 또는 疲勞크랙發生과의 關係를 明確하게 할 필요가 있다. 따라서 本節에서는 介在物을 起點으로 하는 疲勞크랙에 대한 電子顯微鏡觀察을 基礎로, 介在物 주변의 微視領域에 있어서의 基地의 狀態와 疲勞크랙발생과의 關係를 考察하였다. 그결과 表面에 露出되어 있다고 생각되는 介在物로부터의 疲勞크랙發生은 大別하면

(1) 基地와 介在物과의 境界로부터 크랙이 發生하는

경우

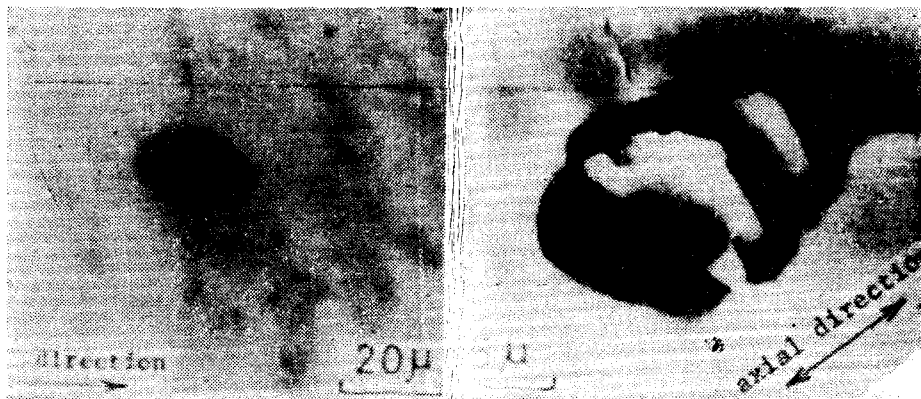
(2) 介在物의 脫落에 의하여 發生한 小孔의 주변에서 크랙이 發生할 경우의 2形態로 分類할 수 있다. 이러한 2形態중에 (1)의 形態는 本實驗의 경우 2~3개정도 관찰되고 대부분은 (2)의 形態가 관찰되었다. 따라서 本實驗에 있어서 疲勞破壞를 支配하는 것은 주로 (2)의 形態임을 알았다. 다음에 이들 2形態의 疲勞크랙發生 과정에 대하여 詳細히 記述하겠다.

3.2.1. 基地와 介在物과의 境界로부터 크랙이 發生할 경우



(a) Optical micrograph
 $\sigma=0, N=0$

(b) Scanning electron micrograph
 $\sigma=0, N=0$



(a) Optical micrograph fatigue crack from inclusion, $\sigma=115\text{kg/mm}^2$, $N=1.1 \times 10^4$

(b) Scanning electron micrograph

(B)

Photo. 4. Existence of a space between the inclusion and matrix should be noticed (a) and (b) are same place

Photo. 4. (B)(b)는 우연하게 관찰된 소위 基地와 介在物과의 境界에 발생한 疲勞크랙의 走査型 電子顯微鏡寫眞의 일예이다.

同 Photo. 4. (A)는 反復應力을 받지않는 경우의 試驗片表面(電解研磨후)에 露出된 介在物 주변의 狀態를 나타낸 光學顯微鏡寫眞(Photo. 4. (A)(a)) 및 走査 電子顯微鏡寫眞 (Photo. 4. (A)(b))이고, Photo 4. (B)는 疲勞限度의 120%에 해당하는 應力 $\sigma=115\text{kg/mm}^2$, $N=1.1 \times 10^4$ (豫想壽命의 약 20%)를 받는 狀態에서의 소위 疲勞크랙發生起點부근(介在物포함)의 狀態를 나타낸 光學顯微鏡寫眞(Photo. 4. (B)(a)) 및 走査顯微鏡寫眞(Photo. 4. (B)(b))이다. Photo. 4의 (A), (B)로부터 알수있듯이 介在物은 基地의 小孔에 묻혀있고 또한 介在物과 基地와의 사이에는 틈새가 存在하더 疲勞크랙은 應力負荷以前부터 存在하는 基地의 小孔의 주변에서 發生하고 있음을 알았다.

이와같은 事實은 同一硬度레벨을 가진 노치試驗片에 있어서도 마찬가지로 관찰된다.⁽¹¹⁾

Grosskreutz 등⁽¹⁹⁾에 의하면 疲勞크랙은 介在物과 母相과의 분리現象으로부터 發生한다고 보고하고 있으나, 本實驗인 경우에는 그와같은 분리現象과는 다르고 확실히 疲勞크랙은 應力負荷以前부터 존재하는 介在物을 포함한 小孔의 주변에서 發生하는 것이 그 特徵이라고 볼수있다. 따라서 介在物로부터의 疲勞크랙발생은 단순한것이 아님을 예측할 수 있다.

한편 基地의 小孔에 묻혀져 있는 介在物을, X-線分析裝置로 조사한 결과, 그것은 變形하기 어려운 酸化物系統의 介在物 즉 Al_2O_3 임을 확인하였다(Photo. 5). 同寫眞(a), (b), (c)(d)는 同一場所로서 (a)는 疲勞크랙이며, (b)는 (a)에 탄소를 分析한 결과이고, (c)는 O_2 를 分析한 결과이며 (d)는 Al을 分析한 결과이다.

이상과 같은 관찰결과로부터 介在物의 存在가 疲勞크랙발생의 主된 要因이 아니고 介在物을 포함한 基地의 小孔自體가 應力集中源이 되고 그결과 疲勞크랙은 小孔의 自由주변의 선택된 장소에서 우선적으로 發生하게 된다고 생각된다.

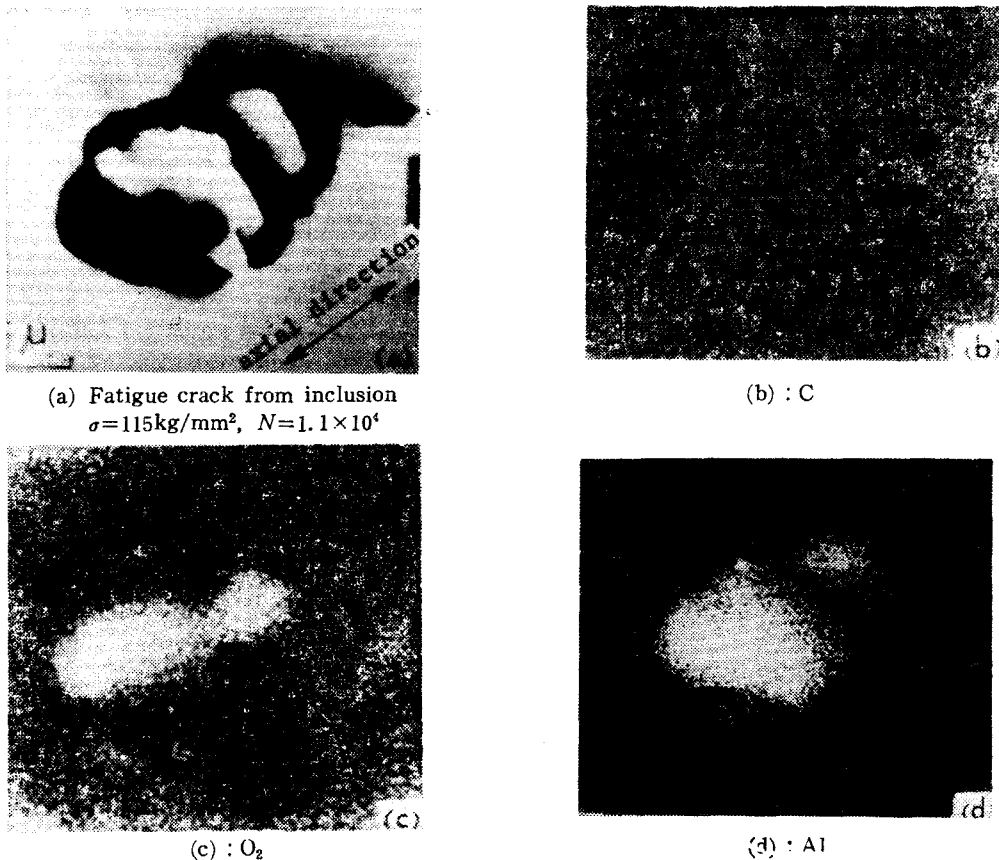
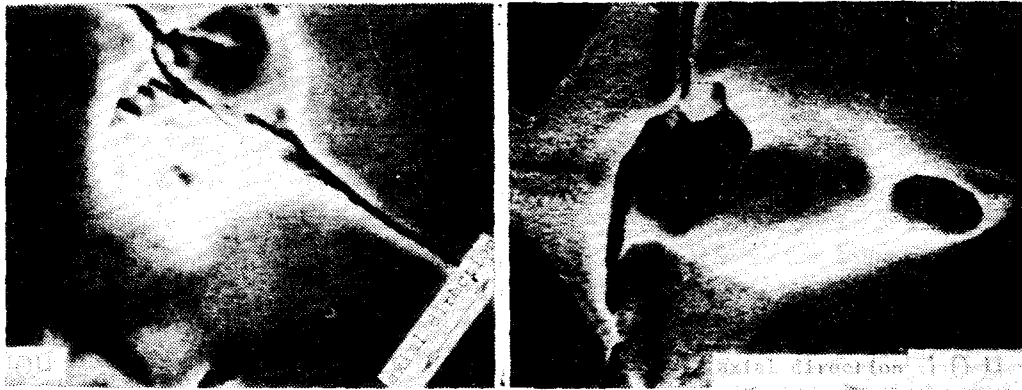


Photo. 5. Characteristic X-ray image of inclusion. (a), (b), (c) and (d) is same place.



(a) $\sigma=110\text{kg/mm}^2$, $N=8 \times 10^4$
crack length : 500μ

(b) $\sigma=110\text{kg/mm}^2$, $N=7.7 \times 10^4$
crack length : 300μ

Photo. 6. Fatigue crack initiation at the surface periphery of pit by the dropping out of non-metallic inclusion (scanning).

3.2.2. 介在物 脫落에 의한 小孔의 自由 주변으로 부터 크랙이 發生할 경우

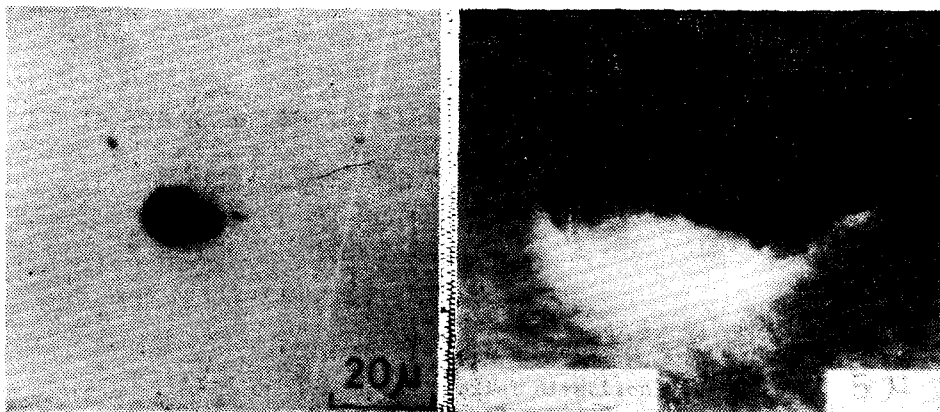
여기에서는 介在物의 脫落에 의하여 發生한 小孔의 주변에서 크랙이 發生할 경우에 대하여 記述하겠다.

우선 疲勞限度의 120%에 해당하는 應力을 받는 試驗片表面(電解研磨한 表面)에 관찰되는 크랙 소위 光學顯微鏡倍率에서는 介在物이라고 생각되는 장소에서 發生된 疲勞크랙의 走査型 電子顯微鏡 寫眞의 일례를 Photo. 6에 나타낸다.

同 Photo.에서 疲勞크랙은 介在物을 起點으로 하여 發生되어 있는것이 아니고 介在物의 脫落되어 버린 小

孔의 주변에서 發生되어 있음을 관찰할 수 있다. 이와 같은 小孔이 介在物脫落에 의하여 發生한 것이라는 確認은 上述한 X-ray分析結果 및 同寫眞중에 관찰되는 介在物이 脫落된 흔적으로부터도 충분히 識別할수있다

그러면 同寫眞에 表示한것과같은 小孔은 疲勞과정 중에서 發生한것인가 혹은 疲勞과정과는 관계없이 맨 처음의 表面處理(예를들면 電解研磨)에 의하여 發生한 것인가에 대하여는 확실하지 않으나 應力을 負荷하기 이전에 다른 試驗片(同一조건)의 電解研磨表面에 관찰되는 그러한 것 즉 光學顯微鏡에서는 介在物이라고 생각되는것의 走査型 電子顯微鏡寫眞(Photo. 7)으로부터 豫測하여 보면; 前述한 疲勞크랙의 起點이된 小孔은



(a) Optical micrograph
($\sigma=0$, $N=0$)

(b) Scanning electron micrograph
($\sigma=0$, $N=0$)

Photo. 7. Morphology of pit by the dropping out of non-metallic inclusion. (a) and (b) is same place.

疲勞過程중에서 介在物의 脫落에 의하여 發生한 것이 아니고 表面處理중에 介在物의 脫落에 의하여 發生한 것이라고 생각할 수 있다. 이와같은 결과는 Photo. 4와 Photo. 7과를 비교하여 보면 확실하게 알 수 있다. 즉, Photo. 4(A)는 介在物이 존재하고 있는 상태이고 Photo. 7은 介在物이 존재하고 있지 않는 상태이다.

따라서 이경우의 疲勞크랙은 확실히 介在物의 脫落된 小孔의 주변에서 發生하고 있음을 알 수 있다.

이상 (1)과 (2)의 形態에 대한 觀察 및 檢討結果를 綜合하여 보면 今後에 疲勞크랙의 起點이 되는 小孔의 주변에 있는 微視領域에서의 疲勞微視크랙 發生過程에 대하여 微視組織學的인 諸因子의 영향 및 應力狀態로부터의 檢討가 要求된다.

따라서 이경우의 疲勞破壞의 應力조건과 이것에 관여하는 微視組織的인 因子의 役割 및 檢討에 대하여는 다음에 記述하겠다.

4. 結 言

急熱處理에 의하여 얻어진 中炭素말텐사이트 組織의 疲勞破壞過程에 대한 金屬 및 電子顯微鏡觀察을 基礎로, 주로 高硬度鋼材料의 疲勞크랙 發生過程의 形態를 詳細히 檢討하였다.

얻어진 結果를 要約하면 다음과 같다. 疲勞크랙은 表面 혹은 表面直下の 介在物을 起點으로하여 發生하며 특히 表面에 露出된 介在物로부터 發生하는 크랙은 2種類로 大別할 수 있다.

(a) 基地와 介在物과의 境界로부터 發生하는 경우; 이 경우의 介在物은 變形하기 어려운 酸化物系統의 Al_2O_3 이며 이 介在物의 存在가 疲勞크랙의 主된 原因이 아니고 介在物을 포함한 基地의 小孔이 應力集中源이 되고 그결과 疲勞크랙은 小孔의 주변에서 發生한다

(b) 처음부터 介在物의 脫落에 의한 小孔의 주변에서 크랙이 發生하는 경우이다.

後 記

本研究를 遂行하는데 實驗 Data 整理에 積極的으로 協助하여준 慶熙大學校 大學院 吳煥燮氏에게 感謝하는 바이다.

參 考 文 獻

- 1) 宋森弘, 成煥泰, 大韓機械學會論文集, 15-3(1976), 275.
- 2) S.H. Song, et al. Int. Conf. on the Mech. Behavi. of Mat. Kyoto, Japan, Vol. 2(1972), 143.
- 3) 宋森弘, 大韓機械學會論文集, 1-1, (1977), 2.
- 4) H.N. Cumming et al, *Trans. ASM*, 49 (1957), 482.
- 5) 川田, 中澤, 兒玉, 日本 機械學會論文集, 29-206 (1963), 1674.
- 6) R.F. Thomson, *Trans. ASM*, 56 (1963), 802.
- 7) 藤原, 福井, 日本電氣製鋼, 35 (1964), 170.
- 8) T. Yokobori, M. Nambu, *Proc. 1st, ICF, Sendai, Japan*, (1965), 1529.
- 9) 角田 外 2名, 日本 金屬材料技術研究所 報告, 12 (1969), 149.
- 10) 大內田 外 2名, 日本機械學會論文集, 36 (1970), 898.
- 11) 宋森弘, 國尾武 外 2名, 日本材料科學會誌, 8-3 (1971), 20.
- 12) 石橋, 金屬の疲勞と防止, 養賢堂, (1954).
- 13) J.C. Humfrey, J.A. Ewing, *Phil. Trans.*, 200 (1903), 241.
- 14) H.J. Gough, H.L. Cox, *J. Inst. Met.*, 45(1931), 71.
- 15) N. Thomson, *Fracture*, Tech. Press of MIT and John wiley & Sons, New York, (1959), 354.
- 16) A.H. Cottrell, D. Hull, *Proc. Roy. Soc.*, A242 (1957), 211.
- 17) R.F. Thomson, *Trans. ASM*, 56 (1963), 803.
- 18) J.J. Bush et al, *Trans ASM*, 54 (1961), 390.
- 19) J.G. GrossKreutz et al, *Proc. 2nd. ICF, Chapman & Hall*, (1969), 620.
- 20) 宋森弘, 櫻本雅己, 日本機械學會論文集, 40-330 (1975), 407.