

低炭素鋼의 表面缺陷의 影響에 의한 疲勞強度의 定量的 評價

윤 명 진*

Quantitative Evaluation of Fatigue Strength using a Surface Defective Low Carbon Steel

Myung jin Yoon

Abstract

It is not clearly known how defects or inclusions of a low carbon steel affect a fatigue strength. We study this issue using SM15C materials. The investigation is carried out by a quantitative evaluation, and experimental findings are: (1) a fatigue limit of A series smooth specimen is 205MPa, and that of B, C, D series is 245MPa, 304MPa and 245MPa, respectively. (2) the fatigue limit varies with respect to the stress distribution in the vicinity of a defects and crack. (3) the micro hole creates a half-circular shape crack, while the hole depth is not critical to the fatigue strength. (4) considering the fatigue strength, the hole diameter is more significant than the hole depth, and (5) Fatigue limit of artificially defected specimen is lower than that of a flawless one (5-10%), however, there exist allowance size and depth of defect which don't get to influence at fatigue limit.

keywords: defects and inclusions, quantitative evaluation, fatigue limit, micro hole, allowance size and depth

1. 序 論

疲勞強度의 定量的 評價를 복잡하게하는 인자는 다양하며, 그 중에서 특히 재료에 포함된 缺陷이 문제가 된다. 機械나 構造物에서 발견되는 결함은 모양과 크기가 다양하고, 재료의 表面과 内部 또는 表面近方 등 존재하는 위치도 다양하다. 또, 缺陷의 모양은 시험편에 도입한 프리크랙과 항상 같은 조건을 가진다고 볼 수는 없다.

非破壞檢査를 통해서 缺陷의 크기, 模樣, 位置 등을 確認할 수 있다는 前提下에서 여러가지 疲勞強度 評價方法이 提案되고 있다. 그러나 이들 因子가 疲勞強度에 미치는 影響과 評價方法이 多樣하여 이제까지의 研究에서는 統一的 評價方法은 確立하지 못하고 있다.(1-4)

疲勞強度의 중요한 評價因子는 疲勞限度와 크랙성장의 하한계 조건인 하한계응력확대계수이다. 그중에서 하한계응력확대계수범위 ΔK_{th} 는 크랙이나 결함이 재료에

* 경북산업대학교 공과대학 기계공학과

발견되었을때 허용할 수 있는 反復應力을 결정하는 유효한 파라미터이다. 그러나 ΔK_{th} 는 일반적으로 크랙길이에 따라서 변화한다. 즉, 크랙길이가 짧으면 ΔK_{th} 도 작은 값이 되는 경향이 있다.(2-4) 이러한 경향은 이제까지의 연구동향을 보면 크랙길이에만 의존한 연구들이 대부분이고(5-6), 크랙이나 결함의 모양에 대한 연구는 명확하지 않다.

한편, 高强度鋼에 존재하는 결함이 疲勞強度에 미치는 영향은 宋(7), 國尾(8), 村上의(9-13) 많은 연구에서 밝혀진 바와같이 재료의 靜的強度의 증가만큼 疲勞強度가 증가하지 못하고 오히려 피로강도가 저하하는 등 민감한 영향을 미친다는 결과가 발표되어 있으나, 中·低炭素鋼에 대해서는 충분한 검토가 이루어지지 않고 있다.

中·低炭素鋼은 다양한 가공조건에 따라서 組織이 不均質하므로 결함주변의 조직다양화에 따른 크랙 발생 성장기구의 복잡성에 의한 피로강도의 변화, 정류크랙길이 등이 다양하여 통일된 견해를 찾기가 어렵다.(14-15)

鐵鋼材料的 피로크랙 발생기점은 高强度鋼의 경우 표면결함에서도 발생하지만 내부결함에서도 발생하여 fish-eye를 형성하며, 中·低炭素鋼은 주로 시험편의 표면결함에서 발생하는 것이 일반적인 경향이다.

따라서 본 실험에 사용한 低炭素鋼의 疲勞強度를 定量的으로 평가하기 위하여 表面缺陷으로 대체한 人工결함의 크기, 깊이, 모양을 변화하여 疲勞限度와 疲勞크랙의 下限界 特性의 변화를 고찰하여 피로강도의 정량적 평가를 하고자 한다.

2. 實驗方法

本實驗에 使用한 實驗材料는 機械構造用 低炭素鋼인 SM15C를 使用하였으며, 이 材料의 化學成分은 Table 2-1과 같다.

이 材料를 Table 2-2와 같은 과정으로 熱處理하여 人工결함인 프리크랙과 미소원공을 導入하였고, 각 시험편의 名稱을 편의상 A-D Series로 칭한다.

이상과 같은 과정에 의하여 가공한 시험편의 機械的性質은 Table 2-3과 같다.

Table 2-2에서와 같이 프리크랙과 미소원공을 도입하면 加工硬化 및 殘留應力이 존재하므로 이를 제거하기

위하여 熱處理를 2단계로 나누어 실시하였다.

즉, 프리크랙은 1단계 熱處理 후 疲勞荷重을 부하하여 다양한 길이의 크랙을 도입하였고, 미소원공은 放電加工機에서 텅스텐 와이어를 사용하여 가공하였다. 결함도입을 마친 시험편은 2단계 진공어닐링 熱處理를 하여 加工硬化 및 殘留應力을 제거하였다.

한편, 크기와 깊이로 表現되는 缺陷의 모양은 평활재 시험편에서 미소크랙의 形狀比가 0.3 - 0.7의 比로 성장하는 경우가 많다고 報告되어 있으나, 본 실험에서 사용한 미소원공은 표면결함과 표면근방의 결함의 영향을 모두 고찰하기 위하여 직경(d)와 깊이(h)의 比를 $h/d=0.5 - 1.5$ 되게 하여 다양한 크기의 人工缺陷을 가공하였다.

시험편의 표면은 機械加工 後 Sand paper를 利用하여 表面研磨하고 다시 電解研磨를 하였다.

Fig. 2-1에는 프리크랙과 미소원공을 導入한 시험편의 模樣과 치수를 表示하였고, 프리크랙과 미소원공의 단면형상을 표시한 것이다.

本實驗에 使用한 回轉굽힘 疲勞 試驗機는 Ono's type로서 負荷方法은 2點 지지 1點 垂直중추식 均-굽힘모멘트형이고, 試驗機 容量은 10Kgf·m, 3600rpm이다. Fig. 2-2에는 피로하중 부하 개략도를 나타낸다.

Table 2 - 1 Chemical composition Wt. (%)

Material	C	Si	Mn	P	S
SM15C	0.17	0.29	0.42	0.09	0.010

Table 2 - 2 Heat treatment condition

Specimens	Heat treatment condition	Micro-structure
A series	-	Pearlite and Ferrite
B series	950°C 13sec. Induction heat treatment → pre-crack, micro-hole → 600°C 1hr. Vacuum annealing	Martensite and Ferrite
C series	1150°C 20sec. Induction heat treatment → pre-crack, micro-hole → 600°C 1hr. Vacuum annealing	Martensite
D series	900°C 1hr. Water quenching → 580°C 0.5hr. Tempering → pre-crack, micro-hole → 640°C 1hr. Vacuum annealing	Spheroidized cementite

Table 2-3 Mechanical properties of specimens

Mechanical Properties	Micro-vickers hardness (100gr.50 Points)	0.2% Proof Stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
A Series	172	314	486	37.6
B Series	167	353	527	29.5
C Series	215	472	585	26
D Series	174	440	550	28

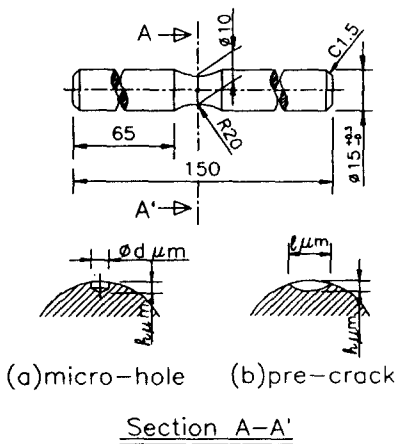


Fig. 2-1 Geometries of fatigue test specimen

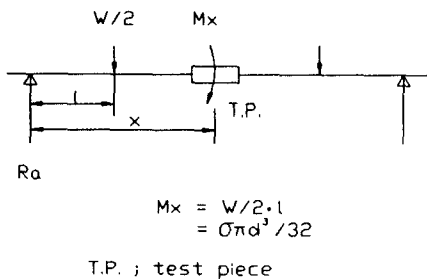


Fig. 2-2 Loading condition in rotary-bending fatigue tester

3. 實驗結果 및 考察

3 - 1 低炭素鋼材의 疲勞限度에 미치는 缺陷의 影響

人工缺陷을 도입하지 않은 평활재 시험편도 인공결합재와 같은 熱處理를 하여 동일한 組織을 가진 시험편으로 疲勞試驗을 하였다. 각 시험편의 피로시험 결과는 Fig.3-1과 같다. 평활재의 疲勞限度는 A재가 205 MPa, B재가 245 MPa, C재가 304 MPa이고 D재가 245MPa이다. 본 실험에 사용한 시험편 중에서는 마르텐사이트조직을 가진 C재의 피로한도가 높고, 마르텐사이트와 페라이트의 複合組織인 B재와 球狀化시멘타이트조직인 D재의 피로한도는 같다.

高强度鋼의 疲勞強度에 미치는 缺陷의 影響은 宋(7), 國尾(8), 村上의(9-13) 많은 연구에서 밝혀진 바와같이 재료의 靜的強度의 증가만큼 疲勞強度가 증가하지 못하고 오히려 피로강도가 저하하는 등 민감한 영향을 미친다는 결과가 발표되어 있으나, 中·低炭素鋼에 대해서는 충분한 검토가 이루어지지 않고 있다. 본 연구에서 사용한 低炭素鋼의 평활재 피로시험에서도 피로한도에 도달하여 停留크랙이 발생한 시험편의 표면크랙은 결합에서 발생한 크랙이다. 전해연마한 시험편의 표면에는 20-30 μm 크기의 표면결함이 先在하였고, 停留크랙은 표면 결

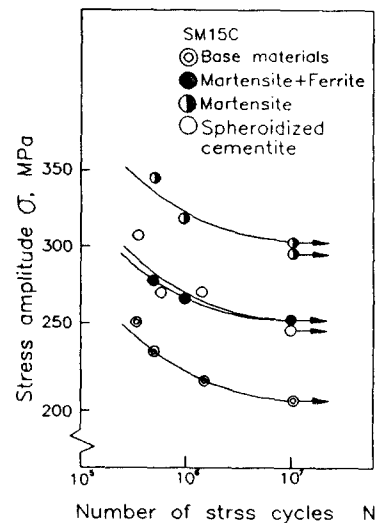


Fig. 3-1 S-N curve of smooth specimens

합중에서 가장 큰 결함에서 발생하였다. 즉, 재료에 포함되어 있는 선재결합은 低炭素鋼에서도 피로크랙의 발생점이 된다. 또, 평활재와 인공결합재의 피로한도를 이미 발표된 자료를 통하여 比較하여보면 인공결합의 크기에 따라서 피로한도가 낮아지며 많은 차이가 있다. 低炭素鋼의 人工缺陷材의 疲勞限度는 宋등의(16-18) 연구결과와 같이 피로한도레벨에서도 파괴를 일으키지 않는 許容缺陷크기는 존재하지만, 그 이상의 결함의 크기에 따라서 평활재의 피로한도보다 낮다. 따라서 低炭素鋼에서도 피로강도에 미치는 결함의 영향은 명확하며, 定量的인 데이터를 얻기 위해서 다음과 같은 실험을 하였다.

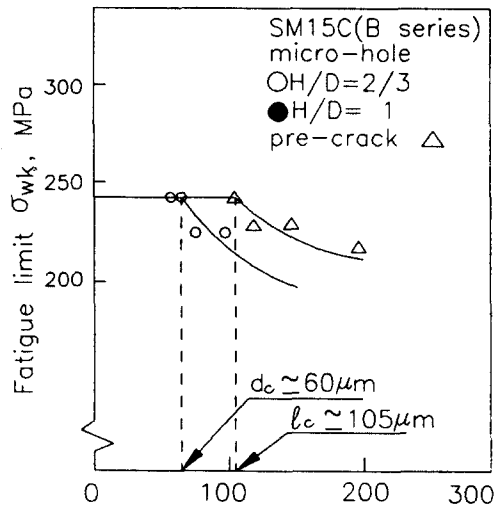
3 - 2 人工缺陷의 크기와 疲勞强度

鐵鋼材料的 疲勞限度 및 크랙성장의 下限界 條件인 下限界應力擴大係數 등은 미소크랙의 성장거동과 깊은 관계가 있으며, 미소크랙의 成長舉動은 材料的 微視組織에 따라서 성장속도의 변화가 크다. 따라서, 결함에서 발생하는 微小크랙의 組織 依存性和 조직 변화에 따른 피로한도의 定量的 변화를 함께 고찰하기 위해서 본 실험에 사용한 人工缺陷은 프리크랙과 미소원공이며, 이 결함은 低炭素鋼의 4종류의 組織으로 나누어 각 각 도입하였다.

한편, 크기와 깊이로 表現되는 缺陷의 모양은 평활재 시험편에서 미소크랙의 形狀比가 0.3 - 0.7의 比로 성장하는 경우가 많다고 報告되어 있으므로, 본 실험에서 사용한 미소원공은 직경(d)와 깊이(h)의 比가 $h/d = 0.7$ 인 원공결합을 사용하였다. 특히, C재의 경우는 微小크랙의 成長舉動의 차이를 考察하기 위하여 形狀比가 0.7과 1의 두 종류의 시험편을 사용하였다. 미소원공결합의 직경과 깊이의 구체적인 수치는 그림의 횡축이 직경이므로 이 수치의 0.7이 깊이이다.

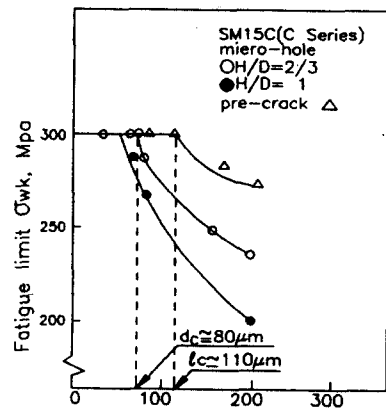
Fig.3-2, 3-3, 3-4는 미소원공의 직경과 프리크랙의 길이에 따른 疲勞限度의 변화를 재질에 따라 정리한 실험결과이다. 프리크랙과 미소원공의 크기에 따라서 疲勞限度는 低下한다. 그러나 각 組織에 따라 피로한도를 저하시키지 않는 限界缺陷크기(d_c, l_c)는 존재하므로 그림에 표시한 限界缺陷크기 이하의 결함은 존재하더라도 피로강도에 영향을 미치지 않는다. B,C재의 경우는 피로한도 레벨에서 프리크랙과 미소원공의 限界缺陷크기의

차이가 있으나, D재의 경우는 피로한도 레벨에서 한계 결함크기가 일치한다. 이러한 원인은 前報(19-21)에서 밝힌바와 같이 피로한도는 停留크랙의 成長舉動과 밀접한 관계가 있고, B,C재의 複合組織과 D재의 均質組織에 따른 피로크랙 先端의 微視組織에 의한 成長舉動의 차이라고 볼 수 있다.



Annealed micro-hole diameter and pre-crack length $d, l \mu\text{m}$

Fig.3-2 Fatigue limit according to the defect size



Annealed micro hole diameter and pre-crack length $d, l \mu\text{m}$

Fig.3-3 Fatigue limit according to the defect size

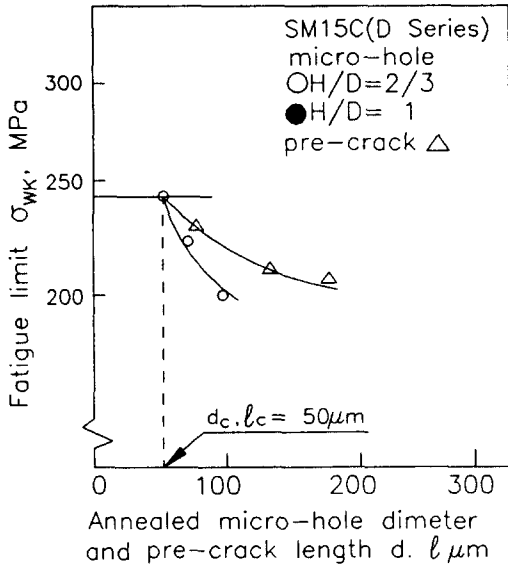


Fig.3-4 Fatigue limit according to the defect size

또 B,C,D재 모두 프리크랙 보다 미소원공 결함을 가진 시험편의 피로한도의 減少幅이 크다. 이러한 경향은 C재의 형상비를 1로 가공한 시험편에서 현저하다. 따라서 결함의 깊이에 따른 피로크랙의 발생과 성장에 대한 특성을 고찰하기 위하여 다음과 같은 실험을 하였다.

3-3. 微小圓孔 결함의 깊이에 따른 疲勞크랙거동

疲勞強度에 影響을 미치는 介在物의 影響因子는 여러가지가 있으나, 그 중에서 결함의 크기에 따른 影響에 대하여 전 절에서 고찰한 바와 같다. 또, 實用材料의 결함은 材料表面 혹은 内部에 多樣한 形態로 存在하고 있으므로 表面결함은 물론 표면부근결함에 대해서도 同一한 基準으로 疲勞強度를 예측할 수 있는 方法이 人工결함의 깊이를 變化시키는 것이라고 생각된다. 따라서 本節에서는 自然결함의 模樣으로 代替할 수 있다고 判斷되는 微小圓孔을 導入하고, 人工결함의 形상비를 變化하여 疲勞限度와의 關係를 考察하고자 한다.

본 절에서는 결함의 形狀비가 0.5에서 1.5의 다양한 범위의 시험편을 사용하여 실험하였다.

실험결과인 Fig.3-5에서 미소원공의 깊이에 따른 疲勞限度의 현저한 변화는 없으나 특이한 사항은 材質에 따라서 차이가 크다. A, B, D재는 큰 변화가 없으나, 특히 마르텐사이트조직을 가진 C재의 경우는 결함形狀比에 따라 疲勞限度의 변화가 크다.

본 실험에서 疲勞壽命에 對한 時間強度의 觀點에서 보면, 微小圓孔결함의 깊이에 關係없이 Scattering이 나타났으며 결함 形狀比에 따른 疲勞限度의 변화는 緩慢한 직선으로 形成되어 있다. C재의 경우는 局部的인 微視組織의 影響이 큰 것으로 생각된다. 이러한 결과는 人工결함의 깊이에 따라서 初期크랙의 形成과 成長過程의 差異가 있는 것으로 볼 수 있다. 그러나 疲勞限度의 應力레벨에서는 各各 다른 크랙의 發生, 成長過程을 거쳐서 形成된 크랙이 停留한 狀態이므로 人工결함의 깊이에 關係없이 緩慢한 傾斜를 가지는 것으로 判斷된다. 따라서, 疲勞壽命의 Scattering이 적은 疲勞限度의 應力레벨에서 疲勞크랙 舉動은 人工결함의 깊이에 따른 疲勞壽命의 差異가 크지 않음을 나타낸다. 이러한 결과는 A, B, C, D材 모두 疲勞限度레벨에서의 크랙舉動은 人工결함 先端에 停留크랙이 存在하는 것에서 알 수 있다. A, B, C, D材 모두 人工결함 先端에 결함의 直徑보다 큰 정도의 크랙이 主應力方向에 直角으로 發生, 成長하고, 크랙이 停留한 狀態에서 疲勞限度가 決定된다.

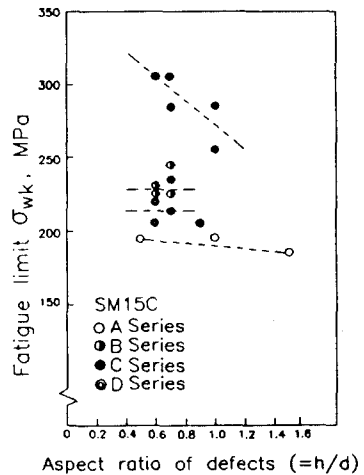


Fig.3-5 Relation between fatigue limit and Aspect ratio of defects

결합재의 크랙은 缺陷 内部先端에서 發生하는 것이 일반적이나 回轉굽힘 疲勞荷重에 대한 應力 구배가 表面이 最大가 되므로 결합 형상비가 커서 表面에서 内部로 깊게 들어갈수록 應力은 急激히 減少하므로 缺陷表面 先端에서 發生하여 내부 크랙면을 형성한 후 표면 크랙이 성장하여 停留하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 缺陷先端的 微視組織과도 密接한 關係가 있어서 停留크랙舉動의 差異가 나타난다. 특히 微視組織中에서 炭素鋼의 페라이트 結晶粒徑에 따른 影響이 크다.(16)

따라서 缺陷의 問題를 노치係數로서 定理하기 어렵고, 周邊組織과도 깊은 관계를 가지고 있다. 본 연구에서 사용한 인공결합재의 피로한도는 평활재의 피로한도에 비해서 5-10% 減少하였다.

3-4. 人工缺陷材의 疲勞크랙 成長 下限界特性

피로 크랙의 성장 하한계특성을 고찰하기 위하여 疲勞限度의 30%와 40% 높은 應力에서 發生 成長한 크랙을 대상으로 人工缺陷 깊이에 따라 初期 表面크랙으로 형성된 크랙에 대하여 크랙 성장과정을 조사하였다. 그 결과 人工缺陷 깊이와 最小表面크랙길이와는 1:1의 對應이 이루어지지 않고 있다. 이러한 現象은 人工缺陷 先端的 微視組織因子 內에서 發生한 크랙이 内部缺陷 先端的 크랙면을 形成한 後 表面 크랙으로 나타나므로 表面에서 크랙길이의 一時的인 減少 현상이 나타난다. 이때까지는 内部에서 半圓形的 크랙면을 形成하는 遷移點이 됨을 알 수 있다.

人工缺陷 先端에서 發生한 主크랙은 半圓狀의 크랙면을 形成할 때까지 複雜한 微視組織 사이에서 크랙이 成長한다. 따라서 表面에서의 크랙의 성장속도 da/dN 最小値가 發生한다. 이 過程에서 缺陷이 처음부터 半圓형인 境遇나 内部缺陷인 境遇는 da/dN 의 最小値가 發生하지 않을것으로 推定된다.

그러나 缺陷의 깊이가 깊은 境遇에는 缺陷의 깊이 모두를 包含하지 않더라도 半圓형의 크랙이 形成되면 da/dN 이 增加하게 된다. 특히 内部缺陷인 경우나 缺陷의 깊이가 깊은 缺陷에 對해서는 半圓형으로 發生된 크랙면의 形成段階까지 크랙成長에 影響을 미치나 그 以後는 크랙의 成長 혹은 停留에 의해서 下限界條件이 決定된다.

크랙은 缺陷 先端을 中心으로 하여 硬度가 낮은 組織 內에서 發生한다. 缺陷 中心軸을 通하는 荷重方向과 垂直을 이루는 平面의 여러곳에서 發生하고, 이들 크랙이 連結, 合體되어 半圓形 크랙을 形成한다.

그 後 크랙의 成長과 함께 半圓形에서 表面크랙을 長軸으로 하는 半橢圓形 크랙으로 成長한다. 특히 丸奉材의 피로크랙은 貫通크랙이 存在할 수 없고, 内部缺陷 先端的 크랙과 表面에서의 크랙의 發生 成長에 의해서 疲勞壽命이 決定되고, 이때 成長하여 停留한 크랙에 의해서 疲勞限度가 決定된다. 따라서 疲勞強度의 下限界條件인 疲勞限度의 變化를 圓孔깊이에 따라서 整理한 Fig. 3-5에서 보는바와 같이 人工微小缺陷의 깊이의 차이가 있음에도 불구하고 C재를 除外하고는 疲勞限度의 큰 差異가 없다. 이러한 結果는 上記한 바와 같이 疲勞크랙의 發生 成長過程에서 결합깊이는 크랙發生 段階를 지나서 半圓形的의 크랙면을 形成할 때 까지 寄與한 後 그 以後의 크랙成長過程에서는 큰 影響을 미치지 못하는 것으로 推定할 수 있다. 이러한 内部에서의 크랙의 成長모델은 北川等の 研究에서(22,23) 이미 發表된 바가 있고, 본 研究에서도 類似한 傾向을 나타내고 있다.

以上の 結果에서 결합의 크기와 疲勞限度의 關係를 考察하여 보면, 人工缺陷의 형상비에 따라 缺陷材의 疲勞限度는 平滑材의 疲勞限度와 比較해서 5~10% 程度의 低下를 보이고 있으므로 이에 對應한 疲勞強度設計가 經濟的인 方法이라고 할 수 있다. 그 이유는 現在의 技術程度로서 缺陷의 크기를 制御하는 것은 대단히 어려운 問題이고, 主조과정에서 결합을 완전히 제거할 수 없고, 수 μm 의 결합크기를 줄이기 위해 많은 경비가 소요되므로 公업분야에 많이 사용되는 鐵鋼材料에서는 여러가지 缺陷의 存在를 정확히 평가하고 設計하는 것이 安全하며 경제적이라고 생각된다.

4. 結 論

實用材料인 機械 構造用 低炭素鋼을 使用하여 微小人工缺陷이 疲勞強度에 미치는 影響을 定量的으로 평가하였다. 특히 人工缺陷을 自然狀態로 도입하기 위해서 眞空어닐링하고, 프리크랙과 미소원공의 크기와 깊이를 變化하여 缺陷先端에서의 疲勞限度 및 크랙成長下限界

특성을考察한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

- 1) 本 實驗에 使用한 평활재의 피로한도는 SM15C材 소재인 A재가 205 MPa이고, 시험편의 微視組織을 變化한 B, C, D材의 疲勞限度는 245MPa, 304MPa, 245MPa이다.
- 2) 人工결합의 크기와 깊이에 따라서 疲勞限度는 低下하나, 결합주변의 應力구배에 따라서 크랙發生과 成長기구가 다르므로 피로한도에 미치는 영향이 다르다.
- 3) 人工缺陷의 깊이와 表面部의 最小크랙길이의 對應에서, 缺陷의 깊이는 缺陷先端에서 半圓상의 初期크랙形成에 큰 影響을 미치고, 그 以後는 반복하중의 크기에 따라서 크랙의 성장 혹은 停留에 의하여 피로수명이 결정되므로 피로강도에 影響을 미치지 못한다.
- 4) 缺陷이 疲勞強度에 미치는 영향은 缺陷의 깊이 보다 表面에서의 크기에 따라서 疲勞限度의 低下幅이 크다.
- 5) 本 實驗에 사용한 缺陷材의 疲勞限度는 平滑材의 疲勞限度에 비해서 5~10% 低下하였고, 疲勞限度에 影響을 미치지않는 許容缺陷 크기 및 깊이는 존재한다.

後 記

본 연구는 1995년도 교내 학술연구 조성비 지원에 의하여 연구한 것입니다. 이에 관계자에게 감사드립니다.

參 考 文 獻

- 1) Edited by M. Meshi, Fatigue and Micro Structure, American Society for Metal, 1979.
- 2) J. Lankford and F. N. Kusenerger, Initiation of Fatigue Crack in 4340 Steel, Metallurgical Trans., Vol. 4, pp. 553 - 559, 1973.
- 3) 村上敬宣, 清水眞佐男, 疲勞強度に及ぼす介在物, 微小缺陷, 微小き裂の影響, 日本機械學會論文集, 第 54 卷, 第 499 號, pp.413 - 425, 1988

- 4) K. Yamada, M. G. Kim and T. Kunio, Tolerant Microflow size and Non-propagating Crack Behavior, The Behavior of Short Fatigue Cracks, EGP Pub., Edited by K.J. Miller and E.R. de los Rios, pp. 261 - 274, 1986.
- 5) A. F. Grantd, Jr, Introduction to Damage Tolerance Analysis Methodology, ASTM STP 842, pp. 3 - 24, 1984.
- 6) 村上敬宣, 松田健次, 7:3黃銅の微小き裂き裂進展下限界値におよぼすき裂寸法の影響について, 日本機械學會論文集, 第 56 卷, 第 525 號, pp.1123 -1132, 1990-5.
- 7) 宋森弘, 國尾武, 高硬度鋼のミクロ領域における疲勞き裂生成過程, 日本機械學會論文集, 第 40 卷, 第 334 號, pp. 1503 - 1510, 1974.
- 8) T.Kunio, M.Shimizu, K.Yamada, K. Sakura, T.Yamamoto, The Early Stage of Fatigue Crack Growth in Martensitic Steel, Int. J. of Fracture, Vol.17, No.2, pp.111-119, 1981
- 9) 村上敬宣, 宇宿尙史, 介在物寸法の統計的評價とそれに基づく高硬度鋼の疲勞限度の豫測, 日本機械學會論文集, 第 56 卷, 第 510 號, pp.213 -221, 1989-2.
- 10) 村上敬宣, 遠藤正浩, 疲勞強度におよぼす微小缺陷の影響評價法, 日本機械學會論文集, 第 49 卷, 第 438 號, pp. 127 - 136, 1983.
- 11) 村上敬宣, 遠藤正浩, S45C 焼なまし材のねじり疲勞に およぼす人工微小缺陷の影響, 日本機械學會論文集, 第 47 卷, 第 415 號, pp. 249 - 256, 1981.
- 12) Y. Murakami and M. Endo, Quantitative Evaluation of Fatigue Strength of Metals Containing Various Small Defects or Cracks, Eng. Fract. Mech., Vol. 17, No. 1, pp. 1 - 15, 1983.
- 13) 烏山壽之, 村上敬宣, 牧野泰三, 非金屬介在物のデータベース作成と高强度鋼の疲勞強度 推定法の標準化, 材料, 第 40 卷, 第 458 號, pp. 1497 - 1503, 1991.

- 14) 西谷弘信外 3人, 球狀黑鉛鑄鐵切缺材の疲勞強度, 日本機械學會論文集, 第 58 卷, 第 556 號, pp.2280-2286, 1992.
- 15) 遠藤正浩, 王羽兵, 最近の球狀黑鉛鑄鐵の疲勞強度およびす 黒鉛と人工微小缺陷の影響, 材料, Vol.43, No.493, pp.1245-1250, 1994
- 16) 宋森弘, 吳煥燮, 微小圓孔材の疲勞크랙舉動과 페 라이트 結晶粒度, 大韓機械學會論文集, 第 9 卷, 第 4 號, pp.421 - 429, 1985
- 17) 尹命辰, 宋森弘, 미소원공 및 미소슬릿재의 피로크랙 전파거동, 대한기계학회논문집, 제10권, 제1호, pp. 78-85, 1986
- 18) 尹命辰, 宋森弘, 프리크랙과 미소원공재의 크랙성장 하한계조건에 관한 연구, 대한기계학회논문집, 제12권, 제2호, pp.278-285, 1988
- 19) 尹命辰, 山田邦博, 國尾武, 中, 低炭素均質化組織の耐久限度における許容缺陷寸法の推定, 材料, 第 38 卷, 第 426 號, pp. 275 - 279, 1989.
- 20) 尹命辰, 철강재료의 피로수명에 미치는 미소결합의 영향에 관한연구, 동일문화논총, 제2집, pp. 171-188, 1993
- 21) 尹命辰, 金昌洙, 탄소강의 하한계 피로크랙 성장에 미치는 결함깊이의 영향, 산업기술연구소논문집, 제 5집, pp.5-10, 1995-2
- 22) H. Kitagawa, S. Takahashi, C. M. Suh and S. Miyashita, Quantitative Analysis of Fatigue Process Micro cracks and Slip Lines Under Cyclic Loading, ASTM STP 675 , pp . 420 - 449 , 1979.
- 23) 北川, 高橋, 微小な疲勞き裂の成長とその下限界條件に關する破壊力學的研究, 日本機械學會論文集, 第 45 卷, 第 399 號, pp. 1289 - 1303 , 1979.