

<論 文>

# 프리카랙과 微小圓孔材의 크랙成長 下限界條件에 관한 研究

宋 森 弘\* · 尹 命 辰\*\*

(1987년 11월 12일 接受)

## A Study on the Threshold Condition of Crack Propagation for Pre-Crack and Micro-Hole Specimens

Sam Hong Song and Myung Jin Yoon

**Key Words :** Spheroidized Cementite(球狀化 시멘타이트), Pre-crack(프리카랙), Micro-hole(미소원공), Critical Pre-crack Length(限界크랙길이), Allowable Micro-hole Size(허용미소원공크기), Tolerant Micro-flaw Size(許容결함크기)

### Abstract

The Critical size of artificially induced micro-holes in 0.17%, 0.36% Carbon steel Specimens with Spheroidized Cementite and in 0.17% carbon steel specimens with martensite structure is compared with annealed pre-crack in order to discuss the physical meaning of the fatigue limit and evaluation of the tolerant micro flaw size at the stress level of the fatigue limit.

Results obtained were summarized as follows ;

- (1) In this study, non-propagating crack length of Smooth specimen and critical pre-crack length ( $l_c$ ) is coincide.
- (2) In the carbon steels with spheroidized cementite structure, critical pre-crack length ( $l_c$ ) and allowable micro-hole size ( $d_c$ ) is coincide each other at the fatigue limit level.
- (3) It has been published that there exists a particular size of micro-hole which has no effect on the fatigue limit. In this study, the micro-hole of critical size can be regarded as equivalent to a tolerant micro flaw which would not reduce the fatigue limit.

### 1. 序 論

크랙의 成長舉動에 대한 研究는 거시크랙의 경우 破壞力學의 도입과 함께 많은 發展을 보여 왔으나 微視크랙의 경우는 材料內部에 存在하는 缺陷이나 負荷條件, 組織敏感性 때문에 크랙成長舉動이 단순

하지 않아서 다양한 研究結果가 發表되고 있다<sup>(1)</sup>.

특히 北川等<sup>(2)</sup>과 田中<sup>(3)</sup>는 크랙成長의 下限界條件을 線型破壞力學의 方法으로 검토한바 巨視크랙은  $\Delta K_{th}$ 와 一致하나 微小크랙은  $\Delta K_{th}$ 보다는 平滑材의 疲勞限度에 접근한다는 結果를 발표한 바 있다. 그래서 微小크랙의 特性을 파악하기 위해서는 疲勞限度의 意味나 疲勞限度에서의 停留크랙의 舉動을 高찰하는 것이 필요하며 이에 대한 重要性이 제기 되어서 많은 研究結果가 발표되었다<sup>(4,5)</sup>.

\* 正會員, 高麗大學校 工科學 機械工學科

\*\* 正會員, 慶北産業大學 機械工學科

炭素鋼의 疲勞限度는 發生한 크랙의 成長限界應力에 의해서 결정되는 것이라고 알려져 있다. 그러나 疲勞限度레벨에서의 정류크랙의 존재 및 길이에 組織, 負荷履歷의 영향이 크게 나타나는 것으로 볼 수 있다<sup>(6,7)</sup>. 이것은 정류크랙의 길이가 材料內에 先在하는 크랙이나 缺陷의 크기와 단순히 비교되기 어려운 것을 意味하며, 평활재의 정류크랙길이 缺陷材의 限界크랙길이와 허용결합크기의 비교도 上記의 조건에 의해서 단순히 比較되기는 어렵다고 생각된다. 金等<sup>(7)</sup>의 研究結果를 보면 高炭素鋼의 경우에는 限界크랙길이와 허용결합크기가 疲勞限度레벨에서는 일치하나 中炭素鋼의 경우에는 퍼얼라이트 體積分率이 낮고 균질한 조직이 되지 못하므로 限界크랙길이와 許容결합크기가 一致되기는 어렵다는 결과가 발표되었다. 이러한 현상은 低炭素鋼의 경우에는 더욱 현저하리라고 예상된다. 이러한 현상을 고려하여서 본 研究에서는 SM15C材와 SM35C材에 퍼얼라이트, 페라이트 조직의 영향을 배제한 비교적 균질한 조직인 球狀化시멘타이트조직과 SM15C材에 실용조직이면서 비교적 균질한 조직인 마르텐사이트 조직을 만들고, 가공하였다. 이들 조직을 가진 시험편을 사용하여 材料內에는 存在하지만 疲勞限度에 영향을 미치지 않는 허용결합크기가 어느정도인가에 대한 평가를 하고, 피로한도가 가지는 의미를 고찰하기 위해서 피로한도레벨에서 허용결합크기를 한계크랙길이와 비교하였다.

2. 實驗方法

2.1 殘留應力이 除去된 프리크랙(Pre-

Crack)과 人工缺陷을 가진 시험편의 준비

本 實驗에 사용한 시험편의 材料는 SM15C와 SM35C의 丸棒으로써 그 化學成分은 Table 1과 같다. 시험편의 모양 및 치수는 최소직경 10mm, 목부분의 반경 R20인 平滑시험편으로 加工하였다. 시험편은 Table 2와 같은 순서로 준비하였다. 특히 所定길이의 疲勞크랙을 球狀化시멘타이트조직중에 프리크랙을 도입할 경우 잔류應력이 해방된 상태로 존재하는 시험편을 준비하는 것이 바람직하다고 생각하였다. Table 2와 같이 球狀化시멘타이트조직을 얻기 위한 열처리 2段階로 나누어서 시행하였다. 第1段階의 退火를 한후 피로크랙을 도입하였으며, 人工缺陷도 마찬가지로

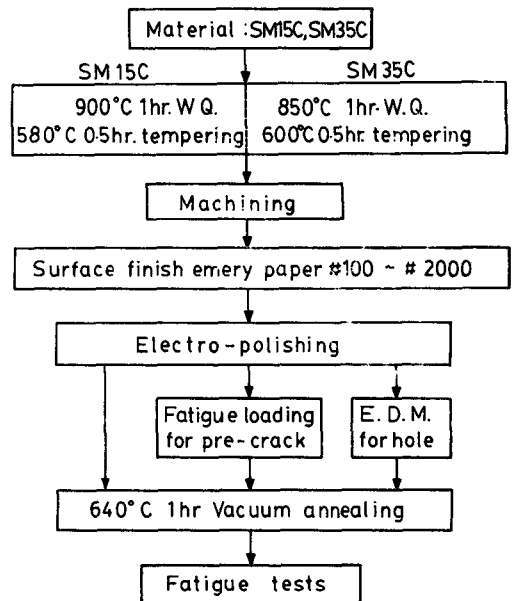
만 疲勞크랙을 도입할 경우 加工時에 誘起되는 加工硬化와 殘留應力の 存在는 그 후의 크랙變動에 큰 영향을 미친다고 생각된다. 이러한 應力 제거와 退火된 조직의 球狀化를 兼해서 第2段階 열처리로서 640°C 1시간 유지의 진공 어닐링을 하여 目的하는 시험편을 준비하였다. 또 疲勞크랙은 가급적 應力履歷의 영향을 최소화하기 위해서 第1段階 열처리후 그 材料의 疲勞限度보다 조금 높은 一定한 應力을 負荷해서 40~200μm의 길이를 가진 시험편마다 길이가 다른 여러가지 프리크랙을 도입하였다.

한편 人工缺陷을 가진 시험편에 대해서도 上記 열처리 과정은 꼭 같으며 人工缺陷의 모양은 平滑材의 微視크랙이, 크랙길이와 크랙깊이의 比가 = 1/3~2/3의 形狀比로서 成長하는 경우가 많다고 보고 되어 있으므로<sup>(2,8,9)</sup>, 이 形狀比에 準해서 人工缺

Table 1 Chemical composition

Material	Wt. %				
	C	Si	Mn	P	S
SM15C	0.17	0.29	0.42	0.09	0.010
SM35C	0.36	0.27	0.53	0.014	0.011

Table 2 Process of specimens preparation



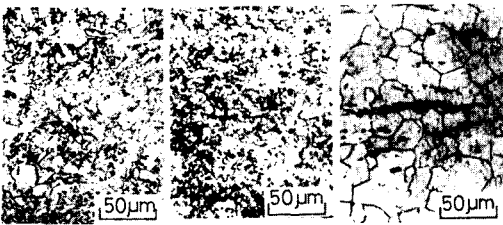
E.D.M. : Electro discharge machining  
W. Q. : Water quenching

陷의 직경( $d$ )와 깊이( $h$ )의 비를  $h/d=2/3$ 로 해서 직경 40~200 $\mu\text{m}$ 의 다양한 크기의 인공결함을 가진 시험편을 加工하였다. 또, 결함은 放電加工機를 사용하여 第1段階 열처리후 加工하고 第2段階의 열처리를 하였다.

한편, 마르텐사이트 조직을 가진 SM15C材는 第1段階에서 마르텐사이트 조직을 얻기 위해 1150 $^{\circ}\text{C}$ , 20초를 유지하는 고주파열처리를 하여 조직을 확인하고, 表面을 전해연마해서 疲勞크랙과 人工결함을 도입한 후 第2段階 열처리인 600 $^{\circ}\text{C}$ , 1시간의 應力除去 진공어닐링을 하였다.

2.2 實驗方法 및 試驗機

前節에서와 같은 方法으로 加工해서 얻어진 각 시험편의 기계적성질은 Table 3과 같고, 그들의 조직형태는 Fig. 1과 같다. (a)와 (b)는 球狀化조직이고 (c)는 마르텐사이트조직이다. 피로시험기는 10kg-m, 2850r.p.m.의 回轉굽힘疲勞試驗機를 사용하여 실험하였다.



(a) SM15C (b) SM35C (c) SM15C  
 (a) Spheroidized (b) Cementite (c) Marten site  
 Fig. 1 Surface microstructure of specimens

Table 3 Mechanical properties

Specimen	Sphroidized cementite		Marten -site
	SM15C	SM35C	SM15C
Micro vickers hardness(100gr. 50points)	174	229	215
0.2% proof stress (MPa)	440	500	472
UTS (MPa)	550	620	585
Endurance limit (MPa)	245	325	305

3. 實驗結果 및 考察

3.1 平滑材의 停留크랙舉動

疲勞크랙이나 人工缺陷을 도입하지 않은 試驗片에 대해서도 二段階의 열처리를 실시해서 얻은 최종적 組織은 크랙이나 缺陷의 有無에 관계없이 同等하도록 조정하였다. 이렇게 해서 준비된 시험편에 대해서 平滑材의 疲勞限度와 정류크랙길이를 구하기 위해서 피로시험을 하였다. 이들 시험편의 疲勞試驗結果는 Fig. 2와 같다. Fig. 2로부터 각각의 조직을 가진 平滑材의 疲勞限度는 球狀化材의 경우 SM15C材가 245MPa이고, SM35C材는 325MPa이다. 또, SM15C 마르텐사이트材의 疲勞限度는 305MPa이다. 疲勞限度에서 破斷하지 않은 시험편의 表面에는 球狀化材의 경우 45~50 $\mu\text{m}$ 의 정류크랙이 존재하였다. 平滑材의 정류크랙은 Fig. 3과 같이 시험편表面의 20~30 $\mu\text{m}$  정도의 先材缺陷에서 발생하여 정류한 것이다. 물론 결함에서 발생한 크랙 주변에는 많은 슬립밴드가 발생하여 있었다. 炭素鋼의 경우 정류크랙은 페라이트 結晶粒徑에 따라서 길이가 變化한다는 研究가<sup>(10)</sup> 있고 球狀化 시멘타이트조직과 같이 結晶粒이 아주 미세하고 비교적 균질한 조직에서는 정류크랙길이가 짧고 材料表面의 非金屬介在物에서 발생한 것으로 보아서 缺陷의 영향이 큰 것으로 생각된다. 이러한 경향은 SM15C, SM35C材 모두 같은 현상이었다.

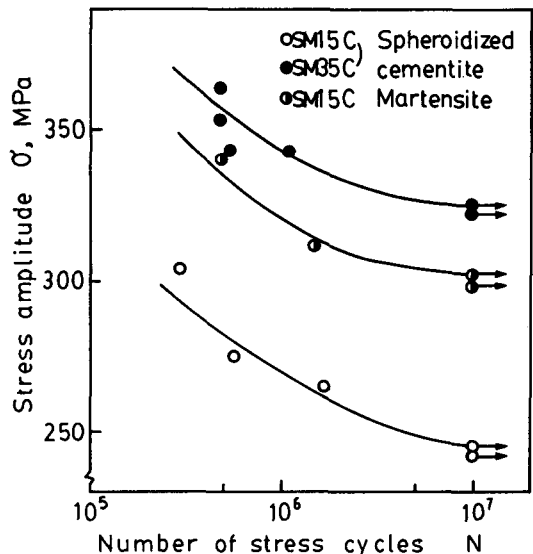


Fig. 2 S-N curve of smooth specimens

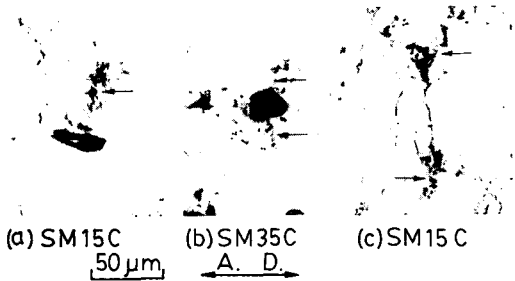
한편 SM15C 마르텐사이트 조직에서는 Fig. 3(c)와 같이 球狀化材에 비해서 다소 정류크랙길이 가 긴 125 $\mu$ m정도 이었다. 특히 마르텐사이트 조직에서는 疲勞強度에 대한 중요한 因子가 硬度和 旧-오스테나이트粒徑으로 알려져 있으며<sup>(11)</sup> 이러한 因子의 變化에 따라서 停留크랙길이도 變化할 것으로 생각되나 本 實驗에서의 旧-오스테나이트粒徑은 약 55 $\mu$ m이었다.

이러한 정류크랙의 거동은 材料內에 先在하는 크랙이나 缺陷과도 직접 관련을 가질것으로 예상되며 다양한 길이를 가진 프리크랙중 疲勞限度를 저하시키지 않는 프리크랙의 최대치 즉 限界크랙길이를 구해서 이들 정류크랙길이와 比較하기 위해서 다음과 같은 실험을 하였다.

3.2 疲勞限度레벨에서의 限界크랙길이

平滑材의 정류크랙길이를 토대로 40~200 $\mu$ m의 프리크랙材를 준비하고 應力除去 열처리를 하여 前述한 疲勞限度레벨의 低下를 일으키지 않는 限度크랙길이를 구하기 위해서 各材의 平滑材 疲勞限度의 應力を 加해서 疲勞試驗을 하였다. 여기서 限界크랙길이는 一定한 應力條件下에서 10<sup>7</sup>回 反復후에도 파단하지 않은 최대 프리크랙길이를 구해서 決定하였다. 여러가지 길이를 가진 프리크랙재에 대해 실험을 한후 크랙길이와 反復數에 대해서 정리한 결과 S-N선도와 유사한 프리크랙길이에 따른 疲勞壽命曲線을 얻을 수 있었다. 준비된 각각 다른 길이를 가진 프리크랙재의 크랙을 확인하여 本 결과 材料內에 先在하는 缺陷에서 발생한 크랙임을 확인하였다.

Fig. 4는 SM15C 球狀化材에 대한 결과이며 疲勞限度의 應力下에서 50 $\mu$ m 이상의 균열재는 모두 破斷되고 50 $\mu$ m의 프리크랙은 10<sup>7</sup>回 反復후에도 破斷



(a), (b) Spheroidized cementite (c) Martensite  
Fig. 3 Non-propagating crack of smooth specimens

하지 않고 Fig. 5와 같이 20 $\mu$ m의 결함에서 발생한 프리크랙에 약 10 $\mu$ m정도 성장해서 정류한 것이다. 그래서 프리크랙길이 50 $\mu$ m을 本材의 限界크랙길이 (*lc*)로 결정하였다.

SM35C 球狀化材에서도 Fig. 6과 Fig. 7에서와 같이 SM15C材의 경우와 마찬가지로 球狀化粒徑의 變化가 거의 없으므로 *lc*는 50 $\mu$ m으로서 같은 값이

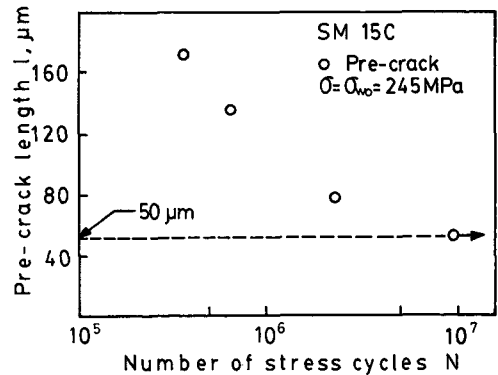


Fig. 4 An evaluation of the critical length of pre-crack at the fatigue limit of spheroidized SM15C structure

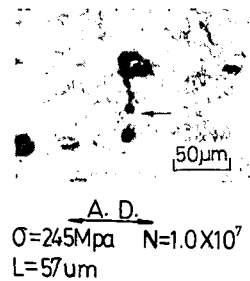


Fig. 5 Non-propagating crack of pre-crack specimen (SM15C)

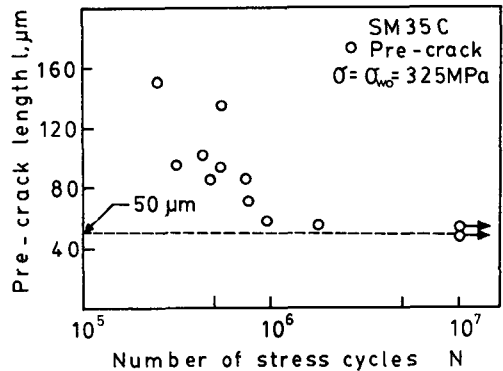


Fig. 6 An evaluation of the critical length of pre-crack at the fatigue limit of spheroidized SM35C structure

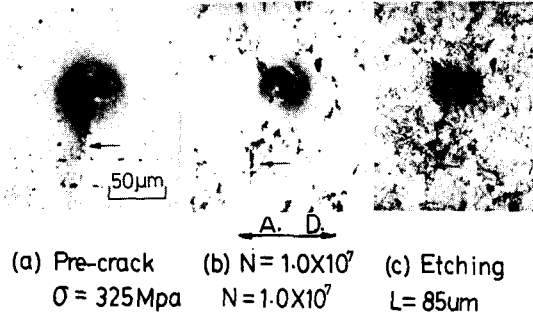


Fig. 7 Non-propagating crack of pre-crack specimen (SM35C)

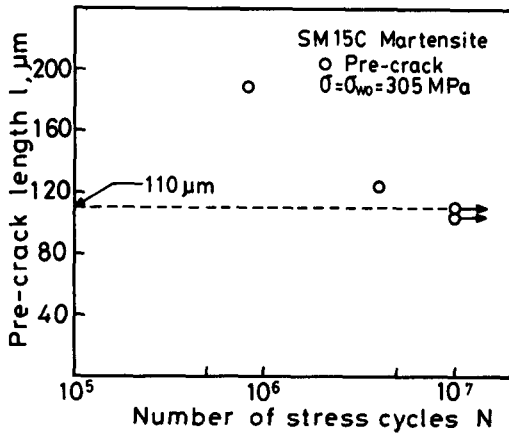


Fig. 8 An evaluation of the critical length of pre-crack at the fatigue limit of martensite SM15C structure

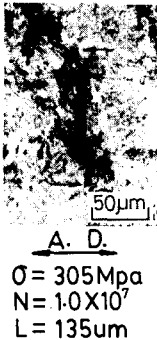


Fig. 9 Non-propagating crack of pre-crack specimen (SM15C Martensite)

었다. Fig. 7의 (a)는 20 $\mu$ m의 결함에서 발생한 프리크랙으로서 길이가 50 $\mu$ m인 프리크랙을 확인한 후에 실험을 하였다. (b)는 10<sup>7</sup>반복 후에 약 35 $\mu$ m 정도 크랙이 진전하다가 정류한 것이며 (c)는 이것을 부식한 것이다.

한편 SM15C 마르텐사이트材의 한계크랙길이는 球狀化材의 한계크랙길이에 비해서 조금 긴 110 $\mu$ m이었다. Fig. 8과 Fig. 9는 그 결과를 정리한 것이다.

이들 시험편의 限界크랙길이는 前節에서 확인한 平滑材의 정류크랙길이와도 일치하고 있다. 이것은 組織의 영향이 배제되고 프리크랙재도 平滑材와 같은 應力除去 열처리를 하여 동일한 조건에서 실험 하였으므로 그러한 결과가 나타난 것으로 볼 수 있다.

그런데 本 실험에 사용한 球狀化材 시험편에서는 크랙이 발생해서 정류하는 限界크랙은 材料表面에 存在하는 결함에서 發生한 크랙이다. 이와같은 현상은 缺陷이 材料의 強度에 중요한 영향을 미치는 것이라고 알려져 있는 사실과<sup>(12,13)</sup> 일치하며 이들 결함의 크기에 따라서 材料의 疲勞強度가 변화할 것이 예상된다. 또, 마르텐사이트 조직의 경우에는 限界크랙이 缺陷에서 발생한 것은 아니지만 마르텐사이트 조직과 같은 高硬度鋼일수록 피로강도에 미치는 결함의 영향은 중요한 것으로 보고 되어 있다<sup>(14)</sup>. 따라서 이와같은 缺陷의 存在 및 결함의 크기가 材料의 強度 즉, 疲勞限度의 低下에 영향을 미치는 결함의 크기가 실제의 크랙길이와 어떤 관련이 있는가에 대해 검토하기 위해서 다음과 같은 실험을 하였다.

### 3.3 限界크랙길이와 許容缺陷크기의 관련에 대해서

電解研磨한 平滑材의 表面에 放電加工에 의해서 여러가지 크기를 가진 미소원공을 加工하였다. 미소人工缺陷材도 프리크랙재와 같은 조건으로 실험하기 위해서 放電加工時에 誘起되는 殘留應力을 除去하는 열처리를 하였다. 一定한 疲勞限度의 應力下에서 10<sup>7</sup>회 反復후에 破斷하지 않은 미소원공의 최대크기를 許容缺陷크기(dc)로 決定하였다. 人工缺陷의 크기와 反復數를 기준으로 해서 정리하였으며 SM15C 球狀化材는 Fig. 10에 表示한 바와같이 許容缺陷크기 dc $\approx$ 50 $\mu$ m이었고 그 이상의 크기를 가진 人工缺陷材는 모두 破斷되었다. 여기서 前節의 결과와 比較하기 위해서 프리크랙재의 결과를 일점쇄선으로 함께 表示하였다.

양 시험편 모두 크랙길이와 결함의 크기가 증가하면 피로수명은 감소하고, 한계크랙길이 lc $\approx$ 50 $\mu$ m은 허용결함 크기와 좋은 일치를 보이고 있다.

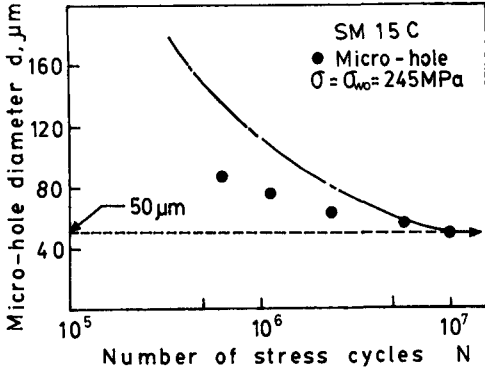


Fig. 10 An evaluation of the allowable size of micro-hole at the fatigue limit of spheroidized SM15C structure

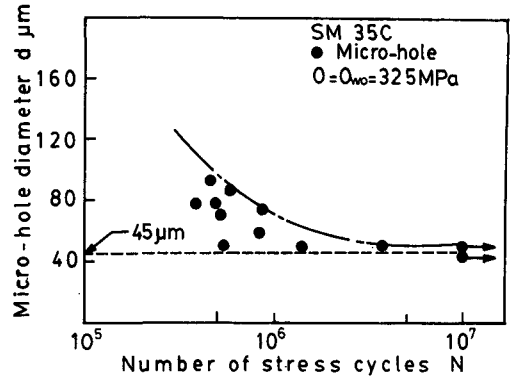


Fig. 12 An evaluation of the allowable size of micro-hole at the fatigue limit of spheroidized SM35C structure

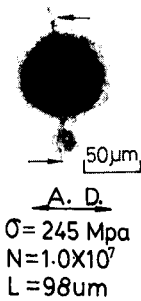


Fig. 11 Non-propagating crack of micro-hole specimen (SM15C)

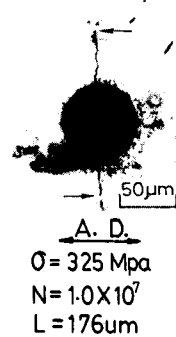


Fig. 13 Non-propagating crack of micro-hole specimen (SM35C)

Fig. 11은 허용결함크기  $50\mu\text{m}$ 의 원공에서 발생한 크랙이 계속해서 진전하지 못하고 정류하여 있는 것이다. 이상과 같은 방법으로 SM35C材에 대한 결과도 Fig. 12와 Fig. 13에서와 같이  $dc \approx 45\mu\text{m}$ 으로써 프리크랙재의 한계크랙길이  $50\mu\text{m}$ 과 일치해 보였으나 SM15C 마르텐사이트材는 Fig. 14와 Fig. 15에서와 같이  $dc \approx 80\mu\text{m}$ 으로써  $lc$ 와 일치하지 않았다. 이러한 현상은 球狀化材의 경우는 鋼의 炭素量이 감소하면 미소원공 주변에서 크랙진전을 억제하는 퍼얼라이트의 감소에 의해서 疲勞限度에서의 크랙정류기구에 차이가 있을 수 있으나 이러한 영향을 배제한 균질화 시멘타이트 조직에서는 人工缺陷의 기지조직이 동일하므로 크랙의 정류기구도 일정하다고 볼수 있다. 따라서 균질한 조직내에 미소결함은 疲勞限度레벨에서는 크랙과 同等한 역할을 한다고 말할 수 있다.

한편, 마르텐사이트 조직에서는 疲勞强度和 밀접한 관계를 가지고 있는 11-오스테나이트粒徑의 크기에 따라서 크랙의 진전을 억제하여 정류시키는

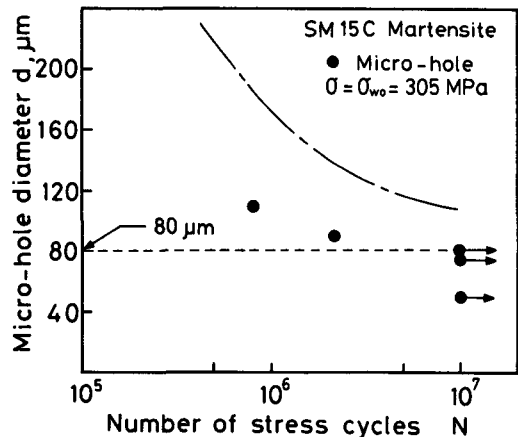


Fig. 14 An evaluation of the allowable size of micro-hole at the fatigue limit of martensite SM15C structure

舉動이 다른 것으로 예상되며, 本 시험편의 11-오스테나이트 平均粒徑은  $55\mu\text{m}$ 이었으나 시험편 表面 전체의 粒徑에는 차이가 있으므로 크랙과 미소원공

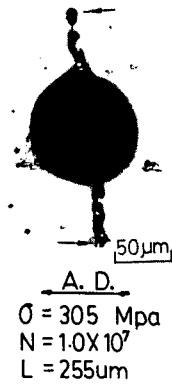


Fig. 15 Non-propagating crack of micro-hole specimen (SM15C Martensite)

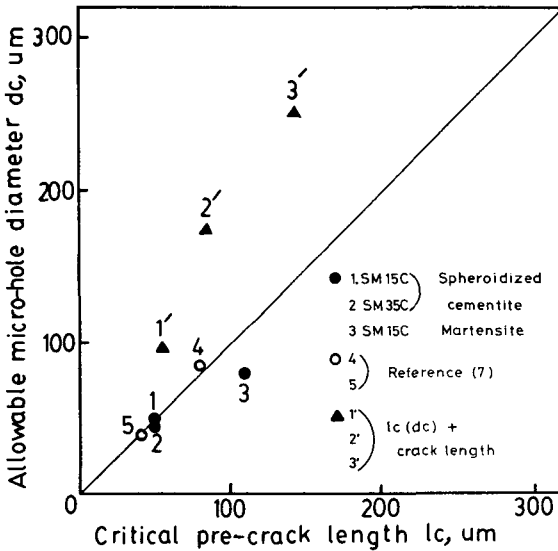


Fig. 16 Relationship between the critical pre-crack length and allowable micro-hole diameter

주변의 조직변화에 기인한 크랙정류거동에 차이가 있는 것으로 볼 수 있다.

이상의 결과를 한계크랙길리와 허용결합크기를 耐久限度레벨에서 比較한 것이 Fig. 16이다. 그림 상의 기호 ●의 1은 SM15C 球狀化材이고, 2는 SM35C材의 결과이다. 이들은 한계크랙길리와 허용결합크기의 45°線上에 일치하고 있다. 따라서 조직의 영향을 배제한 경우에는 미소缺陷은 크랙과 같은 것으로 볼 수 있다.

또 기호 ○의 4와 5는 金等<sup>(7)</sup>의 高炭素鋼의 결과를 본 실험의 결과와 比較하기 위해서 함께 정리한 것이다.

그런데 실용재료중에서 均質조직에 가장 가까운 마르텐사이트 조직의 예는 기호 ●의 3이며 이것은 缺陷쪽이 크랙에 비해서 다소 위험측에 있는 것으로 판단 할 수 있다.

또 기호 ▲의 1', 2', 3'은 한계크랙길리와 허용결합크기에서 10<sup>7</sup>回 反復후 成長해서 정류한 크랙 길이를 포함해서 정리한 결과이다. 전체크랙길리의 立場에서 보면 人工缺陷의 크랙이 좀더 진전하여 정류한 상태이나, 이론적인 면에서 보면 크랙先端이 缺陷보다 훨씬 예리하므로 應力集中이 클것으로 예상되며 이것은 逆의 결과를 보이고 있다. 이러한 현상은 크랙이나 缺陷의 2次元的 性質만으로 해석될 수 없고 결함의 깊이와도 깊은 관련을 가지는 것으로 생각되며 이에 대한 定量的 檢討가 要求된다.

#### 4. 結 論

低炭素鋼 및 中炭素鋼材의 球狀化 시멘타이트 조직과 마르텐사이트 조직을 가진 시험편에 프리크랙 및 미소人工缺陷을 도입해서 疲勞限度레벨에서 材料內에 先在하는 미소결함의 한계치 즉, 허용결합크기를 평가하고, 疲勞限度의 意味를 고찰하기 위해서 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서의 平滑材의 정류크랙길리와 疲勞限度를 低下시키지 않는 限界크랙길리(lc)는 좋은 일치를 보였다.

(2) 크랙과 결함은 형상의 차이가 있으나 疲勞限度레벨에서의 限界크랙길리(lc)와 허용결합크기(dc)는 球狀化 시멘타이트 조직에서는 一致하였다.

(3) 균질화 조직에서는 크랙정류에 의해서 疲勞限度를 低下시키지 않는 缺陷의 限界値가 존재하며, 이 결함의 한계치는 疲勞強度에 영향을 미치지 않는 허용결함의 크기로 평가될 수 있다.

(4) 마르텐사이트 조직에서의 限界크랙길리(lc)와 허용결합크기(dc)는 결함이 크랙에 비해서 다소 위험측에 있다.

#### 후 기

본 연구는 文教部 “教授海外研修계획”에 의해서 진행된 것으로 문교부 당국에 감사드리고, 본 연구의 수행중 많은 지도와 토의를 해주신 日本 慶應義

塾大學理工學部 國尾 武教授, 山田 邦博教授께 감사드립니다.

### 參 考 文 獻

- (1) Edited by K. J. Miller and E. R. de los Rios, 1986, "The Behavior of Short Fatigue Cracks," Mechanical Engineering pub, London
- (2) 北川英夫, 高橋進, 1979, "微小な疲労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.
- (3) 田中啓介, 1984, "微小疲労き裂の傳ば", 材料, 第33卷, 第370號, pp. 961~972.
- (4) Kunio, T. and Yamada, K., 1979, Microstructural Aspects of the Threshold Condition for Non-propagating Fatigue Cracks in Martensitic-Ferritic Structures", ASTM STP675, pp. 342~370.
- (5) 山田邦博, 國尾武, 1979, "平滑材의 停留き裂舉動を支配する微視組織因子について", 日本機械學會論文集, 第45卷, 第393號, pp. 440~445.
- (6) 金敏健, 山田邦博, 國尾武, 1985, "炭素鋼平滑材の疲労き裂停留條件にていて", 日本機械學會論文集, 第51卷, 第461號, pp. 10~16.
- (7) 金敏健, 山田邦博, 國尾武, 1986, "炭素鋼における限界停留き裂村法と許容缺陷寸法との關連", 日本機械學會論文集, 第52卷, 第475號, pp. 587~592.
- (8) 西谷弘信 皮籠石紀雄, 1984, "Fe-3% Si合金における疲労き裂傳ば則と塑性域の關係", 日本機械學會論文集, 第50卷, 第450號, pp. 277~282.
- (9) 徐昌敏, 權五憲, 李正州, 1987, "작은 表面缺陷에서 發生·成長하는 表面疲労균열의 成長特性에 관한 연구", 大韓機械學會論文集, 第11卷, 第2號, pp. 191~197.
- (10) 山田勇, 山田邦博, 國尾武, 1986, "鋼の耐久限度に及ぼす限界停留き裂寸法と結晶粒徑の影響について", 日本機械學會論文集, 第52卷, 第474號, pp. 412~416.
- (11) 宋森弘, 山田邦博, 清水真佐男, 國尾武, 1973, 低炭素マルテンサイト組織の疲労舉動に及ぼす旧オーステナイト結晶粒徑の影響", 日本機械學會論文集, 第39卷, 第324號, pp. 2291~2298.
- (12) Murakami, Y. and Endo, M., 1983, "Quantitative Evaluation of Fatigue Strength of Metals Containing Various Small Defects or Cracks, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 17, No. 1, pp. 1~15.
- (13) 西谷弘信, 皮籠石紀雄, 1983, "小さい疲労き裂の傳ば則とその疲労壽命評價への應用", 日本機械學會論文集, 第49卷, 第440號, pp. 431~440.
- (14) 横堀武夫, 栗林久雄, 川岸正武, 竹内直記, 1971, "低炭素マルテンサイト高張力鋼の疲労き裂の發生と傳播", 日本金屬學會誌, 第35卷, 第1號, pp. 70~77.