

複合組織鋼의 第2相 硬度變化가 腐蝕疲勞 크랙傳播에 미치는 影響

吳世旭* · 金雄執**

The Influence on the Corrosion Fatigue Crack Propagation in Changing of the Second Phase Hardness of Dual Phase Steel

S. W. OH*, W. J. Kim**

Key Words : Dual Phase Steel(複合組織鋼), Fatigue Strength(疲勞強度), Initial Fatigue Crack(初期疲勞크랙), Corrosion Pit(腐蝕피트) Fatigue Fracture Behavior(疲勞破壞舉動)

Abstract

The corrosion fatigue fracture behaviour of dual phase steel was investigated in 3% NaCl solution at 302MPa and 137MPa. Fatigue test was conducted by cantilever type of self-made rotary bending fatigue testing machine.

The fatigue strength increased with increasing the hardness of 2nd phase. Corrosion pit originated at the boundary of the 2nd phase. The size and number of corrosion pits were influenced by the 2nd phase hardness, and pits remained constant in size just after they were transited into cracks.

The life of crack initiation was effected by stress level. The shape of relation of ΔK and da/dN has smaller scattering in it in 3% NaCl solution than that in air. The higher the 2nd phase hardness is, the greater the corrosion fatigue life becomes. Corrosion fatigue fracture behaviour was primarily effected by mechanical factor in case of high stress(302MPa), but by electro-chemical reaction in a lower stress(137MPa). As stress level got lower and hardness of the 2nd phase got higher, the roughness of fracture surface increased.

* 정희원, 동아대학교 공과대학 기계공학과

** 정희원, 동아대학교 대학원

1. 序 論

反復荷重에 의한 構造物의 疲勞破壞는 空氣中의 경우, 母相과 제2상 간의 境界에서 슬립이 발생하여 母相으로 進전한 슬립으로 인하여 주크랙이 발생되며 이러한 슬립의 발생은 제2상의 硬度, 體積率, 形態 및 分布 등의 金屬學的인 성질과 應力레벨의 변화에 따른 力學的인 要因으로 塑性拘束性이 변화되므로 靜的¹⁾ 및 疲勞破壞²⁻⁴⁾ 舉動에 많은 影響이 있는 것으로 알려져 왔다.

海洋環境의 경우, 反復應力에 의한 機械力學的인 疲勞現象과 環境효과가 중첩되어 작용하며 높은 應力에서는 機械力學的인 機構에 의해, 낮은 應力에서는 電氣化學的인 腐蝕기구에 의해 疲勞破壞가 일어난다고 보고^{5,6)} 되고 있다.

海洋構造物을 제작할때 機械加工時에 발생하는 熱的인 要因에 의해 材料의 硬度變化가 일어나므로 海洋環境의 측면에서 제2상의 硬度變化에 대한 塑性拘束性이 주목된다. 그러므로 軟質相인 母相과 硬質相인 제2상으로 구성된 複合組織鋼의 경우 제2상의 硬度를 변화시켰을 때 環境要因의 변화인 空氣 및 3% NaCl 水溶液中에서 작용應力레벨의 변화에 의해 疲勞破壞舉動에 많은 차이가 있을 것으로 추측된다.

本 研究에서는 低炭素鋼(SM20C)을 素材로 일련의 熱處理 過程을 거쳐 硬質相인 제2상의 硬度를 변화시킨 連結材 形狀의 複合組織鋼(second phase encapsulated islands of ferrite)을 片持式 反復回轉굽힘 疲勞試驗을 통하여 空氣中 및 3% NaCl 水溶液中에서 高·低應力 레벨의 변화가 初期크랙의 發生過程, 疲勞크랙의 傳播速度와 應力擴大係數 및 크랙의 形成 舉動에 미치는 影響에 대하여 考察하였다.

2. 實驗裝置 및 方法

素材는 熱間壓延材인 構造用鋼(SM20C)으로서 化學成分은 Table 1과 같다.

素材의 熱處理 過程은 Fig. 1에 표시한 바와 같이

Table 1 Chemical composition of material(Wt.%)

C	Si	Mn	P	S
0.21	0.23	0.41	0.02	0.006

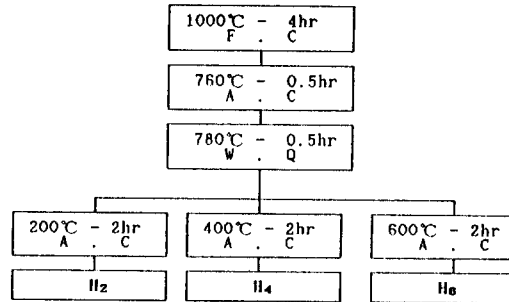


Fig. 1 Process of the heat treatment

組織의 均質化를 위하여 1000°C에서 4시간 유지시킨 후 爐冷하였다. 다음에 硬質相인 제2상이 軟質相인 母相(ferrite)을 둘러싼 連結材 形狀의 複合組織鋼을 얻기 위하여 760°C에서 30분 유지시킨 후 空冷 처리하였으며 다시 780°C에서 30분 가열후 물속에서 담금질 하였다. Fig. 2는 이러한 熱處理 過程에서

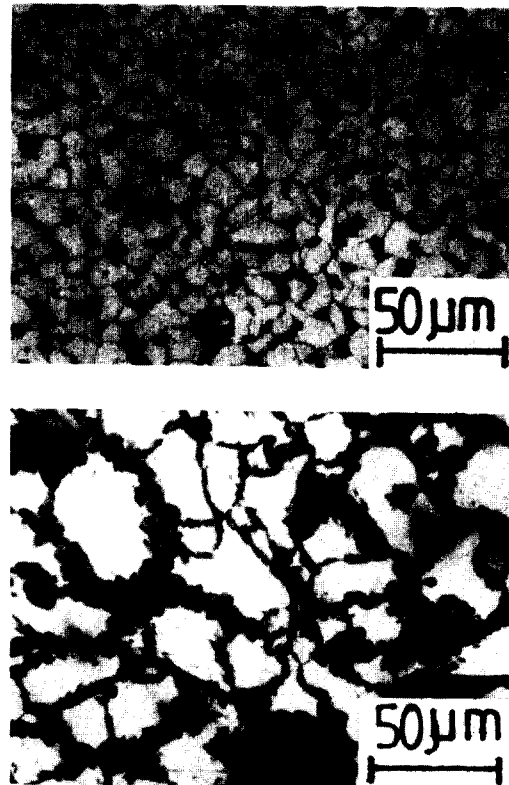


Fig. 2 Microstructure of specimens

언어진 대표적인 連結材형상의 複合組織鋼(M.E.F)과 母材(R)의 金屬顯微鏡 組織寫眞이다.

그리고 제2상의 硬度를 변화시키기 위하여 200°C, 400°C 및 600°C에서 각각 2시간씩 유지시킨 후 空冷한 材料를 H₂, H₄ 및 H₆材라 하였다.

Table 2는 複合組織鋼의 金屬的 性質을 나타내며 Table 3은 母材와 複合組織鋼의 機械的 性質을 나타낸 것이다.

Table 2 Metallurgical properties of dual-phase steel

	ferrite grain size (μm)	2nd phase volume fraction (%)	connectivity (%)	hardness(Hv), 25gf		
				ferrite	2nd phase	ratio
H ₂	31	52	97	231	689	3.0
H ₄	31	52	97	192	370	1.9
H ₆	31	52	97	160	220	1.4

Table 3 Metallurgical properties

series	R	H ₂	H ₄	H ₆
tensile strength(MPa)	466	830	677	529
elongation(%)	30	16	26	36

Fig. 3은 疲勞試驗片 形狀으로써, 疲勞크랙 發生 領域을 局限하고, 크랙의 관찰을 하기 쉽도록 지름 0.5mm, 길이 0.5mm의 橫孔노치로 加工하였다.

疲勞試驗機는 片持式 回轉굽힘 疲勞試驗機(Cantilever type rotated bending fatigue testing machine)로써 空氣中에서는 1500rpm, 3% NaCl 水溶液中에서는 150rpm으로 하였다.

3% NaCl 水溶液의 유량은 약 60CC/min로서 試驗片 중앙부에 流出시켜 2/3이상 침적토록 하였다. 3% NaCl 水溶液의 溫度는 電子感溫장치를 이용하여 25±1°C로 일정하게 유지시켰다.

크랙길이 측정은 일정시간 시험한 후 면봉을 이용하여 腐蝕生成物을 제거 하였으며, 軸에 대하여 直角方向으로 크랙발생곡면을 따라 金屬顯微鏡으로 측정하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 S-N 曲線

S-N 曲線을 얻기 위하여 應力레벨을 100~400 MPa의 범위에서 작용應力레벨을 변화시키면서 破斷사이클 수를 측정하였다. 疲勞 시험편을 3% NaCl 水溶液中 및 空氣中에서 제2상의 硬度를 변화시켜 구한 疲勞強度曲線을 Fig. 4, 5에 나타내었다.

空氣中 및 3% NaCl 水溶液中에서의 疲勞強度는 Table 3에서와 같이 引張強度의 크기에 비례하며 제2상의 硬度가 높을수록 疲勞強度가 증가하였다. 그리고, 空氣中에서는 疲勞限度가 뚜렷하고 疲勞破壞 曲線의 기울기가 적으나, 3% NaCl 水溶液中의 경우 疲勞破壞 曲線의 기울기가 크고, 疲勞壽命이 현저하게 감소하였다. 또한, 同一應力레벨에서 疲勞壽命 변화폭은 空氣中에 비해 3% NaCl 水溶液中의 경우 溫度의 영향이 적게 나타났다.

結果的으로, 空氣中에서는 Kim¹⁾의 靜的 引張試驗

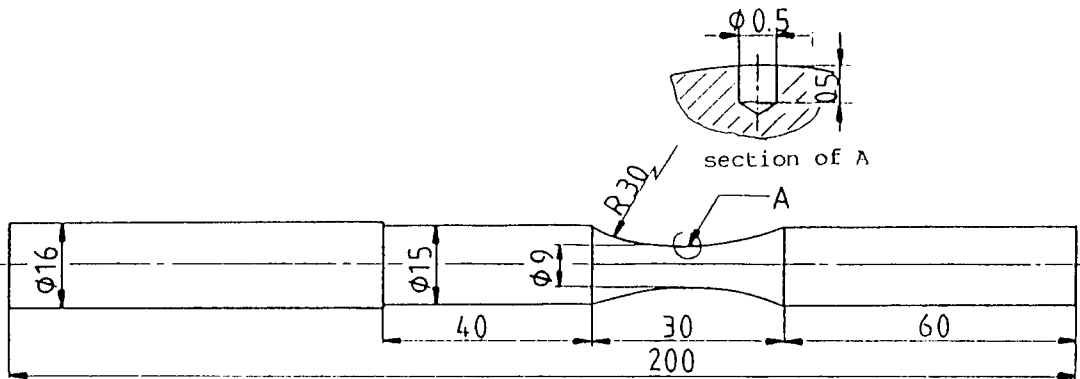


Fig. 3 Geometry of testing specimen

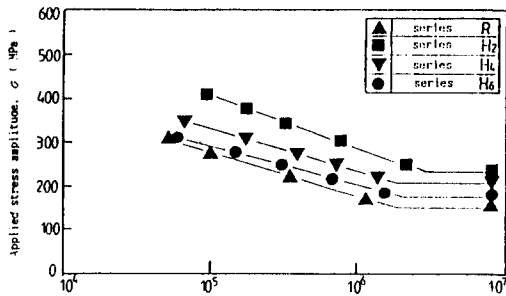


Fig. 4 S-N curves of specimen in air

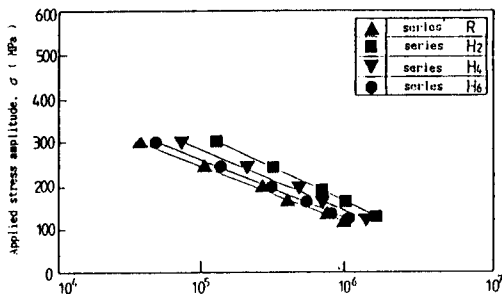


Fig. 5 S-N curves of specimen in 3% NaCl solution

및 OH^{2-} 의 疲勞試驗에서와 마찬가지로 母相에서의 劈開龜裂이 제2상의 塑性拘束力에 의해 저지되므로 제2상의 硬度가 증가할수록 疲勞壽命이 증가하였으나, 3% NaCl 水溶液中에서는 腐蝕溶媒와 金屬間的 電氣化學的作用 및 機械的 疲勞作用의 결과 주로 境界나 그 부근에서 腐蝕의 影響을 많이 받으므로 塑性拘束 효과가 감소되어 空氣中에 비해 현저하게 疲勞壽命이 감소하였다. 또한, 3% NaCl 水溶液中은 周波數의 影響이 크므로 周波數가 낮을수록 크랙선단이 열린상태로 腐蝕환경에 접하는 시간이 길어짐에 따라 腐蝕이 상대적으로 크게 작용하므로 疲勞壽命이 空氣中에 비하여 감소되었다고 생각된다.

3.2. 初期슬립과 腐蝕피트 發生과의 關係

Fig. 6은 H_2 材에서 412MPa의 應力을 작용하였을 때 空氣中과 3% NaCl 水溶液中에서의 初期슬립을 나타낸 것이다.

一般的으로, 反復回轉급힘 疲勞試驗의 경우 작용 應力이 높을수록 粒內에서 많은 슬립이 발생하며 이들 슬립이 어떠한 飽和領域에 도달하면 塑性拘束 효과가 감소되어 주크랙으로 발생한다고 보고²⁾되고



Fig. 6 Initial slip in serie H₂

있다.

實驗結果, 슬립이 모상과 제2상의 境界에서 발생하여 粒內로 傳播하여 境界나 제2상의 벽에서 저지되었고 인접한 結晶粒內에서는 또 다른 슬립이 發生하였다. 空氣中에서는 슬립선이 가늘게 나타나지만, 3% NaCl 水溶液中에서는 슬립에 腐蝕生成物이 부착되어 슬립선이 굵게 나타났다.

Fig. 7은 3% NaCl 水溶液中에서 137MPa와 302MPa의 應力을 작용시켰을 때 腐蝕피트의 발생과 성장과정을 나타낸 것이다. 應力 137MPa인 경우 腐蝕피트의 발생시기는 破斷 壽命의 0.3~0.4% 이었고, 應力 302MPa인 경우는 破斷 壽命의 1~2% 범위에서 腐蝕피트가 발생하였다. 특히, 302MPa에서 H_6 材의 경우 슬립과 피트가 同伴된 樣相을 나타내었으나 H_2

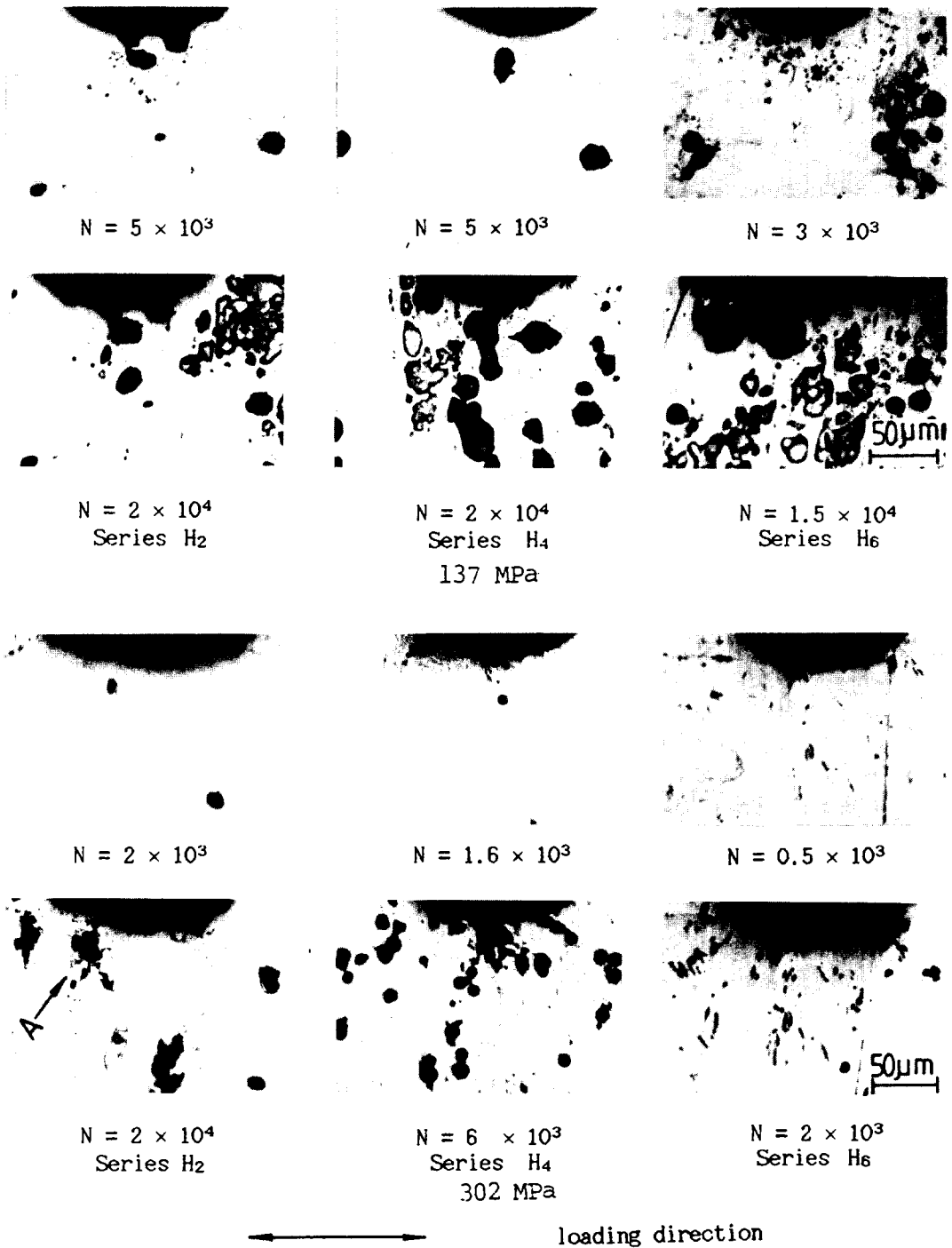


Fig. 7 Initiation and growth process of corrosion pits in 3% NaCl solution

材의 경우 $N_p = 2 \times 10^4$ 사이클에서 高·低應力의 차이가 적으며 高應力의 경우 A부분의 피트에서 微視 크랙이 發生되었다.

S45C材에 대한 Nisitani⁷⁾의 보고에서 작용 應力이 상대적으로 큰 경우 高密度의 腐蝕피트가 슬립대에 우선적으로 發生하고 피트크기가 적고 수가 많으며 작용 應力이 상대적으로 낮은 경우 슬립대와는 관계없이 高應力에 비해 피트크기가 크고 수도 적게 發生한다고 하였다.

本 實驗에 있어서도 腐蝕피트는 작용 應力 및 反復回數의 影響을 많이 받으며 初期에 腐蝕피트가 發生되었다. 이러한 腐蝕피트는 302MPa의 경우 피트의 크기가 적고 피트의 수는 많이 發生되며, 137MPa의 경우 피트의 크기가 크고 피트의 수는 감소하였다. 따라서, 이들 腐蝕피트는 작용 應力이 높은 경우 슬립의 影響을 받으며 피트와 피트간의 合體 및 슬립이 溶解되어 피트를 加速化시키는 現象등으로 나타나지만, 低應力에서는 슬립의 發生은 인식되지 않고 反復사이클의 影響을 받음을 알 수 있으며 피트 주변의 電氣化學的 因子가 강하게 작용하는 것으로 생각된다.

結果的으로, Endo⁸⁾의 보고와 마찬가지로 腐蝕작용의 增大에 의해 加速된 金屬溶解의 陽極(anode)反應은 腐蝕疲勞피트의 發生과 함께 鋼中の 水素흡수를 용이하게 하므로 노치材의 腐蝕피트가 應力 집중원으로 되어 反復사이클의 증가와 함께 疲勞크랙이 發生하는 것으로 고려된다.

3.3. 初期크랙의 發生과 反復사이클과의 關係

Table 4는 空氣中과 3% NaCl 水溶液中에서의 初期크랙 發生 사이클수(N_i)와 疲勞壽命(N_f)과의 關係를 나타낸 것으로 初期크랙의 길이는 0.05mm를 기준으로 하였다. 이러한 初期크랙은 材料, 應力레벨, 試驗條件 등의 변화에 따라 다르게 나타난다.

Table 4 Ratio of crack initiation and fracture number of cycles(N_i/N_f)

series		R	H ₂	H ₄	H ₆
Ni/N _f					
NaCl	302MPa	0.174	0.103	0.127	0.105
	137MPa	0.198	0.152	0.158	0.126
air	302MPa	0.123	0.108	0.088	0.082

Oh²⁾는 空氣中에서 複合組織鋼의 反復回轉급립 疲勞試驗에서 微視組織의 변화에 관계없이 疲勞限度의 1.5배인 高應力에서는 全破斷 壽命의 4~9%, 疲勞限度의 1.1배인 低應力에서는 7~13%에서 初期크랙이 發生한다고 하였다.

本 實驗의 경우 空氣中에서는 제2상의 硬度가 증가할수록 初期크랙의 發生이 지연되며 모든 材料가 全破斷壽命의 8.2~12.3%에서 初期크랙이 發生하였다. 3% NaCl 水溶液中에서는 高應力(302MPa)의 경우 低應力(137MPa)에 비해 初期 크랙이 早期에 發生하였으며 高應力에서는 全破斷壽命의 10.3~17.4%에서, 低應力에서는 12.6~19.8%에서 初期크랙이 發生하였다.

高應力레벨에서 3% NaCl 水溶液中에서의 初期크랙 發生시기가 空氣中에 비해 늦게 發生한 이유는 空氣中에서는 노치(notch)에서 主크랙이 發生되지 만, 3% NaCl 水溶液中에서는 破斷壽命의 감소와 Fig. 7의 腐蝕피트성장 과정에서의 같이 腐蝕피트의 影響으로 노치와 노치부근의 피트에서 微視크랙이 發生되어 노치에서의 主크랙과 합체화되므로 初期크랙이 지연되었다고 볼 수 있다. 특히, H₄材의 경우 腐蝕피트의 影響이 크므로 初期크랙의 發生이 지연되었다고 볼 수 있다.

結果的으로 空氣中에서는 제2상의 硬度가 증가할수록 塑性拘束性이 증가되어 微視크랙이 제2상의 벽이나 境界에서 저지되므로 初期크랙의 發生이 지연되었다고 볼 수 있다. 3% NaCl 水溶液中에서는 應力레벨이 높은 경우 電氣化學的인 작용에 의한 腐蝕피트 이외에도 機械力學的인 疲勞작용에 의해 微視크랙이 작용하므로 이들 腐蝕피트와 微視크랙이 合體가 되어 初期크랙이 早期에 發生되었다고 볼 수 있다. 그러나 應力레벨이 낮은 경우 機械力學的인 疲勞작용보다 電氣化學的인 작용에 의해 腐蝕溶解되므로 初期크랙의 發生이 지연되었다고 할 수 있다.

3.4. 疲勞크랙 傳播길이와 反復回轉數와의 關係

Fig. 8, 9는 疲勞크랙 傳播길이와 反復回轉數와의 關係를 나타낸 것으로서, Fig. 8은 空氣中에서 302MPa의 應力을, Fig. 9는 3% NaCl 水溶液中에서 302MPa와 137MPa의 應力을 작용시켰을 때 나타난 결과이다. 空氣中の 경우 제2상 硬度변화에 따라서

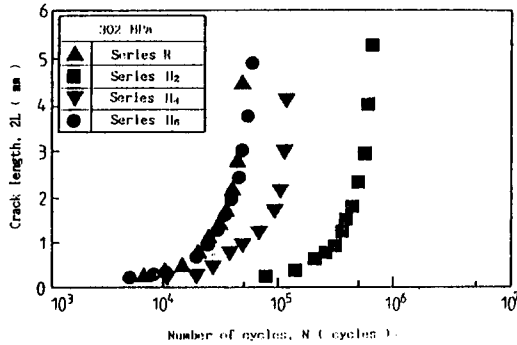


Fig. 8 Crack length vs. number of cycles in air

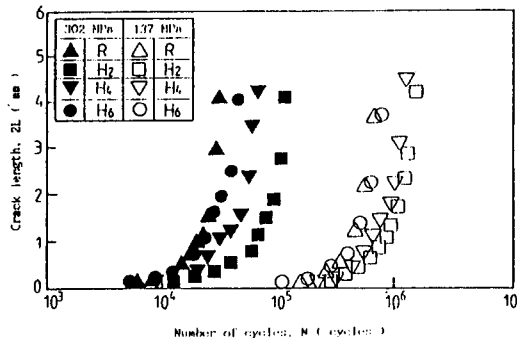


Fig. 9 Crack length vs. number of cycles in 3% NaCl solution

初期크랙 발생 시기의 차이가 크며 크랙길이 1mm 미만에서는 크랙傳播가 느리지만 1mm 이상에서는 빠르게傳播됨을 알 수 있다. 그리고, 각 材料간의 크랙傳播 과정의 차이는 인식되지 않았다.

특히, H₆材의 경우 크랙傳播 과정이 母材(R)와 거의 同一한 경향이므로 H₆材는 모상과 제2상의 硬度차이가 母材와 같이 거의 均質材에 가까운 組織임을 알 수 있다.

Ishihara³⁾는 疲勞크랙의 母相選擇性的인 요인은 제2상에 의해 母相이 塑性拘束力을 받으므로 塑性拘束性이 낮은 경우 母相에서 쉽게 슬립이 일어나며 슬립變形性에 의해 제2상에서도 용이하게傳播된다고 하였다.

結果적으로 제2상 硬度가 낮을수록 初期크랙 발생시기가 빠르므로 疲勞壽命이 짧음을 알 수 있다. 3% NaCl 水溶液中の 경우 제2상 硬度변화에 따라서는 初期크랙 발생시기의 차이가 그다지 나타나지 않았으나, 작용 應力레벨의 변화에 따라서 初期크랙 발생시기의 차이가 크게 나타났다. 크랙傳播과정은

거의 曲線으로 진행되며 제2상 硬度가 클수록 傳播壽命을 점하는 비율이 증가하였다. 따라서, 空氣中보다 3% NaCl 水溶液中の 경우 크랙 傳播壽命을 점하는 비율이 큰 이유로서 Kondo⁹⁾는 腐蝕피트가 臨界피트에 도달하면 腐蝕피트가 應力 집중원이 되어 크랙이 발생한다고 하였으며, Nisitani⁷⁾는 腐蝕피트가 발생하면 腐蝕피트는 쐐기(wedge)작용을 하며, 크랙면의 크랙 先端部에서는 腐蝕反應에 의한 溶解작용을 받으므로 크랙 傳播速度가 加速化된다고 하였다. 또한, 腐蝕피트에서 발생한 微視크랙들이 合體 또는 干涉의 영향을 받으므로 空氣中에서 보다 크랙傳播가 빠르게 진행되므로 傳播壽命이 감소되었다고 생각된다.

結果적으로, 空氣中에서 슬립은 제2상의 拘束性에 영향을 많이 받으므로 壽命이 증가하지만, 3% NaCl 水溶液中에서는 제2상의 境界나 그 부근에서 腐蝕이 발생되므로 모상에서의 微視크랙은 제2상의 塑性拘束力의 弱化로 크랙 傳播壽命이 감소되었으며 初期크랙 發生은 硬度변화에 관계없이 應力레벨에 의존하였다.

3.5. 疲勞크랙 傳播速度와 應力擴大係數와의 關係

疲勞크랙 傳播速度(da/dN)와 크랙 先端의 局部的인 應力分布를 나타내는 Parameter인 應力擴大係數범위(ΔK)에 대한 관계는 Paris법칙을 일반적으로 사용하고 있다.

回轉굽힘 疲勞試驗에 있어서 應力擴大係數의 관계식은 Oh¹⁰⁾에 의하면 환봉 表面에서의 圓孔노치의 주변 應力 및 크랙 先端의 應力분포는 無限평판 中央에 있는 圓孔노치 또는 크랙이 引張應力을 받을 때와 유사하다고 하였다. 따라서 應力擴大係數(K)式을 다음과 같이 簡便式으로 사용할 것을 제안하였다. $K = \sqrt{\sigma a}$. 疲勞크랙 傳播速度(da/dN)와 應力擴大係數(ΔK)의 관계를 Paris법칙으로 표시하면 다음과 같다. $da/dn = C(\Delta K)^m$ 이다.(여기서, σ; 굽힘 應力, a; 圓孔노치에서 발생한 크랙길이의 1/2, c와 m은 상수이다) 그후 Tokaji¹¹⁾ 등은 負荷應力이 降狀強度와 비교하여 작을 경우 回轉굽힘 負荷狀態하의 疲勞크랙 傳播특성은 上式에 의해 평가될 수 있다고 보고하였다. 本 實驗에서는 上式을 이용하여 ΔK를 계산하였다.

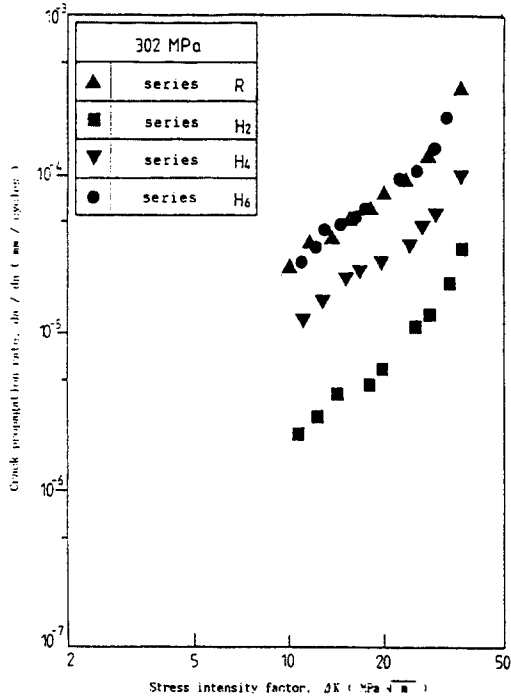


Fig. 10 Crack propagation rate vs. stress intensity factor in air

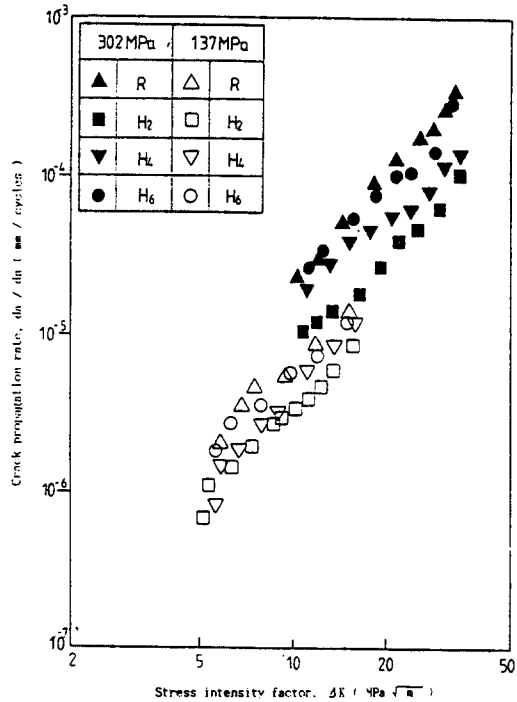


Fig. 11 Crack propagation rate vs. stress intensity factor in 3% NaCl solution

Fig. 10은 空氣中에서 302MPa의 應力을, Fig. 11은 3% NaCl 水溶液中에서 302MPa와 137MPa의 應力을 작용시켰을 때의 疲勞크랙 傳播速度(da/dN)와 應力擴大係數範圍(ΔK)의 關係를 표시한 것이다.

空氣中에서 기울기(m)의 범위는 1.61~2.00로서 제2상의 硬度가 저하할 수 있도록 m이 크고 크랙 傳播速度가 빠르다는 것을 알 수 있으며 제2상 경도변화에 대한 크랙 傳播速度의 차이가 인식되었다.

3% NaCl 水溶液中에서 302MPa의 경우 m의 범위는 1.45~2.57이며, 137MPa의 경우 m의 범위는 1.52~2.21로서 高·低應力 레벨에 따라서 차이가 크게 없으나 동일 ΔK 영역에서는 크랙 傳播速度의 차이가 인식되었다. 특히, R, H4, H6材는 작용 應力레벨이 302 MPa인 경우 3% NaCl 水溶液中과 空氣中에서의 應力擴大係數範圍에 대한 크랙 傳播速度의 차이가 적으나, H2材는 그 차이가 큰 것으로 보아 H2材가 腐蝕에 접하는 시간이 길므로 環境에 대한 敏感性과 空氣中の 實驗에 비하여 反復速度의 영향이 크다고 생각된다.

한편, 137MPa의 應力레벨일때 302MPa의 경우에

비해 크랙傳播速度와 ΔK의 범위가 좁아졌으며, 各材料에서 應力擴大係數範圍에 대한 크랙 傳播速度의 폭도 감소하였다.

Kobayashi⁵⁾ 등의 腐蝕疲勞試驗에서 下限界 應力擴大係數는 3% NaCl 水溶液中의 경우 空氣中보다도 저하하지만 材料組織 의존성은 空氣中과 동일한 경우로 되었다.

이상의 결과, 應力擴大係數의 범위는 작용應力의 레벨에 따라 변화되며, 空氣中에서의 크랙 傳播速度는 제2상 硬度변화에 차이가 크지만, 3% NaCl 水溶液中에서는 제2상 硬度변화의 차이가 적게 나타나고 應力레벨의 범위에 따라서 차이가 확인되었다.

3.6. 疲勞크랙 傳播特性

Fig. 12는 3% NaCl 水溶液中에서 H2材에 대해서 302MPa와 137MPa의 應力을 負荷 하였을때 電子顯微鏡에 의해 크랙 傳播말기를 확대관찰한 것으로 高應力에서는 空氣中과 같이 力學的인 작용을 주로

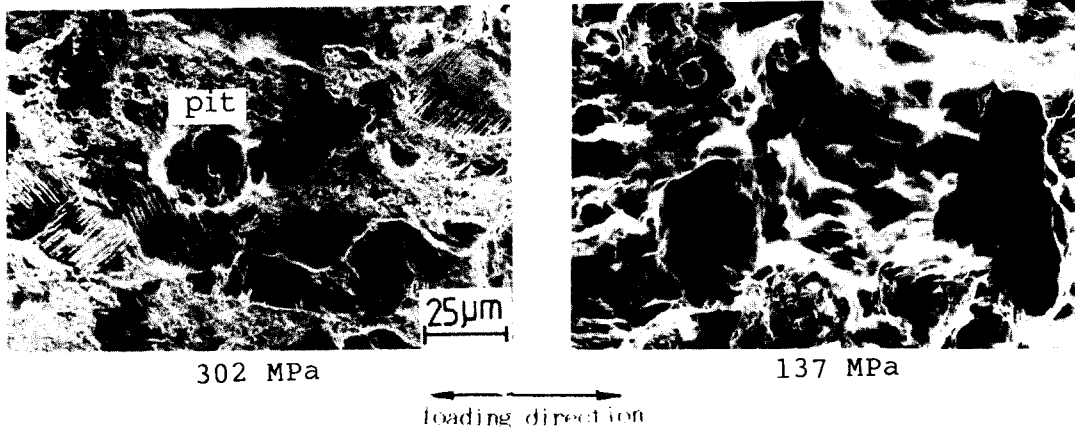


Fig. 12 S.E.M. fractography on pit, slip and micro crack in series H₆

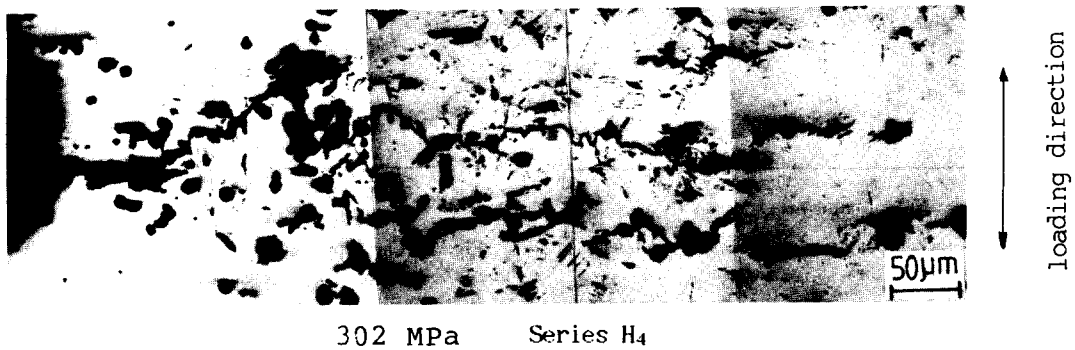


Fig. 13 Crack propagation in 3% NaCl solution

받으므로 피트와 슬립이 공존하여 크랙이 傳播하며 크랙先端에서는 제2상 硬度가 저하할수록 腐蝕의 영향보다는 슬립에 의해 크랙이 발생 傳播함을 알 수 있다.

低應力에서는 電氣化學的인 작용에 의해 全面이 腐蝕溶解되었으며 主크랙외에 피트에서도 크랙이 발생 및 성장하였다.

따라서, 제2상의 硬度가 저하할수록 그리고, 작용 應力の 레벨이 낮을 수록 腐蝕의 영향을 많이 받으므로 疲勞傳播壽命이 감소됨을 알 수 있다.

Fig. 13은 3% NaCl 水溶液中에서 H₄材에 대해서 302MPa의 應力을 負荷한 것으로 크랙길이 1mm일때 알루미늄나 파우더로 研磨하여 金屬顯微鏡으로 관찰한 것이다. 피트에서 발생한 微視크랙은 反復回數의 증가에 의해 인접한 피트에서 발생한 微視크랙과 合體하는 현상이 일어났다. 또한, 이들 피트는 주로 제2상의 경계에서 발생하여 페라이트상으로 微視크랙이

확산되어 塑性拘束力이 감소되므로 더욱 쉽게 크랙이 발생 傳播됨을 알 수 있었다.

Fig. 14는 3% NaCl 水溶液中에서의 巨視的인 破斷面形狀으로 高應力에서는 合體현상이 비교적 적으므로 低應力에 비해 평탄하게 나타나지만, 低應力에서는 제2상 硬度변화에 차이가 있으며, 특히, H₂材의 경우 主크랙외에 피트에서 발생한 여러개의 크랙이 결국 破斷직전에 중앙에서 合體되어 破斷되므로 중앙부분은 空氣中の 引張破斷面 形狀으로 나타났다. 따라서 低應力에서는 腐蝕의 영향을 많이 받으므로 제2상 硬度가 클수록 破斷面이 거칠고 段이 증가된 形狀으로 破斷되었다.

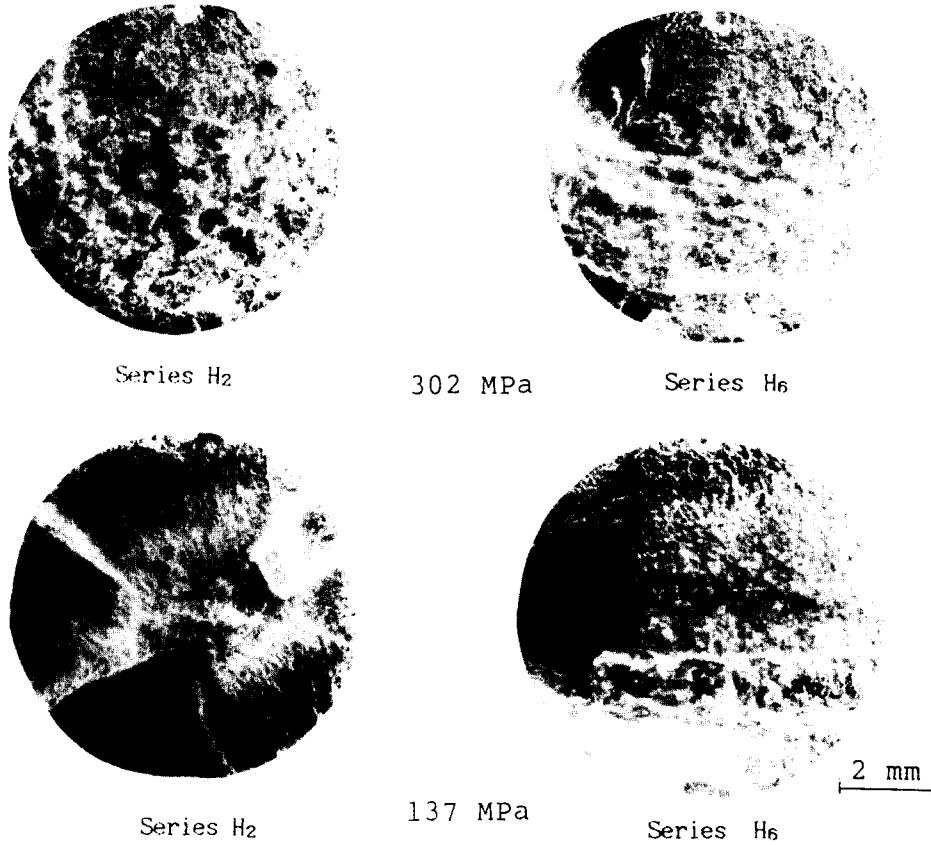


Fig. 14 Macro fatigue fracture surface in 3% NaCl solution

參考文獻

- 1) 金楨圭：複合組織鋼의 破斷延性에 미치는 塑性拘束에 의한 内部應力의 影響, 大韓機械學會論文集, 第7卷 第2號, (1983), pp. 123~129
- 2) 吳世旭, 金雄執：複合組織鋼의 微視組織 變化가 疲勞破壞傳播에 미치는 影響, 韓國海洋工學會誌, 第5卷, 第2號(1991), pp. 58~66
- 3) 石原 豪：2相鋼の高平均應力における下波勞龜 裂の組織選擇性, 日本金屬學會論文集, 第47卷, 第1號, (1993), pp. 67~72
- 4) 皮籠石 紀雄, 西谷弘信, 豊廣利信：DP鋼の微小疲勞き裂の傳は特性に及は ず微視組織の影響, 日本機械學會論文集(A編), 第7卷, 第544號, (1991), pp. 2866~2872
- 5) 小林英男, 石崎哲行, 高鴻茂：高强度鋼の海洋環境腐蝕疲勞き裂進展下限界特性の評價, 日本機械學會論文集(A編), 第52卷, 第480號, (1986), pp. 1778~1785.
- 6) 増田千利, 西島 敏, 阿部孝行, 住吉英志：S45C, SCM435鋼の回轉曲げ腐蝕疲勞破壞機構, 日本機械學會論文集(A編), 第50卷, 第453號, (1984), pp. 1019~1025
- 7) 後藤眞宏, 福島, 茂, 西谷弘信, 三浦篤義：3%食鹽水中におけるS45C 調質材の疲勞過程, 日本機械學會論文集(A編), 第57卷, 第542號(1991), pp. 2313~2320
- 8) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, 今城信雄：高强度鋼の疲勞き裂發生と進展に及は ず環境效果, 日本機械學會論文集(第1部), 第42卷, 第361號, (1976), p.

265

- 9) Y. Kondo : Prediction of Fatigue Crack Initiation Life Based on Pit Growth, *Corrosion*, Vol. 45, No. 1, (1989), PP. 7~11
- 10) 吳世旭, 廉永夏 : 回轉굽힘을 받는 스프링鋼의 疲勞限度와 龜裂傳播에 관한 研究(第1報), *大韓機械學會誌*, 第14卷, 第2號, (1974), pp. 149~

161

- 11) Tokaji, K., T. OgaWa, Y. Harada and Z. Ando, : Limitation of Linear Elastic Fracture Mechanics for Grawing Small Fatigue Cracks and Its Dependence on Microstructure, *Metal*, Vol. 34, No. 385, (1985), pp. 1160~1166