

進展하는 疲勞크랙 근방의 降伏스트레인 分布의 變化舉動에 關한 研究

金 永 植

Study on the Plastic Strain Behaviour Near the Propagating Fatigue Crack

Young-Sik Kim

〈目 次〉	
Abstract	
1. 序 論	3.3 塑性域의 形狀 및 그 크기와 應力 擴大 係數 (ΔK)와의 相關性
2. 供試材 및 實驗方法	3.4 塑性域 및 塑性域內의 스트레인 分布와 크랙 傳播機構
3. 實驗結果 및 考察	3.5 試驗片 表面의 스트레인 分布와 内部의 크랙 進展 舉動과의 相關性
3.1 疲勞크랙의 傳播에 同伴하는 塑性域의 變化 舉動	4. 結 論
3.2 疲勞크랙 近傍의 塑性域內의 殘留應力 分布	

Abstract

The plastic zone and the plastic strain behaviour near the propagating fatigue crack for SM41 and HT80 steels were observed continuously on various specimen thicknesses, using the optical interference method. The relationship between the shape or size of the plastic zone and stress intensity factor range (ΔK) was clarified. In addition, the effects of plastic zone size, and the slope of plastic strain distribution on crack propagating rate were investigated on each test steel.

Main results obtained are as follows.

- 1) The necking zone appears periodically ahead of a propagating crack in SM41 steel of which the lower yielding point is clear. The size of necking zone increases with a growth of crack. However, this periodic necking zone is not shown in HT80 steel.
- 2) The relationship between the size of plastic zone (R_Y) and the ratio of $\Delta K/\sigma_Y$, appears as follows in both steels;

$$R_Y = 0.13(\Delta K/\sigma_Y)^{1.67}$$

- 3) The slope of plastic strain distribution ahead of a crack is unvariable during the propagating of the crack.

1. 序 論

疲勞크랙은 그進展에 先行하여 크랙先端에 반드시 局部的인 降伏스트레인을 同伴한다. 따라서 疲勞크랙의 傳播機構를 解明하기 爲해서는 疲勞크랙 先端에서 生기는 塑性域 및 塑性域内の 降伏스트레인 分布의 變化學動을 把握 할 必要가 있다.^{1),2)} 그러므로 從來부터 X線法,³⁾ 腐食法,⁴⁾ 모아레(moire)法⁵⁾ 등에 依해 이러한 疲勞크랙 先端의 스트레인 分布를 把握한 結果가 報告되고 있다.

그러나 이들의 方法은 매우 微小部分, 特殊材料에 限하는 制限性, 또는 測定上의 번잡성 등으로 因해 一般 鐵鋼材料에 있어서 疲勞크랙의 進展에 同伴하는 塑性域 및 降伏스트레인 分布의 變化學動을 把握하기에는 適當치 않다.

筆者는 이미 光干涉法에 依한 스트레인 分布의 測定法을 確立한 바 있으나,^{6),7),8),9),10)} 本 研究에서는 이러한 光干涉法을 利用하여 降伏應力 및 彈一塑性 變形의 遷移學動이 서로 다른 HT80 鋼과 軟鋼材料에 對해서, 疲勞크랙 近傍의 降伏스트레인 分布의 變化學動과 應力擴大係數 및 크랙 傳播 速度와의 相關性을 밝혔다. 또한 疲勞크랙 近傍의 降伏스트레인 分布의 變化學動과 micro的 疲勞크랙 傳播機構와의 相關性에 對해서도 檢討했다.

2. 供試材 및 實驗方法

供試材로는 Table 1의 化學成分 및 機械的 性質을 가진 SM41鋼과 HT80 鋼을 利用했다. 試驗

Table 1. Chemical composition & mechanical properties of test steels

	chemical composition (%)						Y, S (kg/mm ²)	T, S (kg/mm ²)	Elong(%)
	C	Si	Mn	P	S	Others			
SM41A	.14	.23	.62	.012	.018	—	33	47	20
HT80	.15	.25	.99	.013	.006	.26Cu .51Cr .45Mo, .04V	80	85	32

片的 크기 및 形狀을 Fig.1에 보인다. 여기에 先端半徑 0.2mm, 길이 3mm의 機械긋치를 設置했다. 또한 薄板으로 했을 경우, 굽힘荷重에 依한 座屈을 防止하기 爲해 Fig.1의 点線과 같이 0.3mm 두께의 圓形 슬릿(slit)를 加工함으로써 두께를 나누어 實際 試驗片的 두께를 2, 4, 7, 15mm로 變化시켰다. 試驗片은 600°C에서 1時間 應力除去 풀림 處理를 行한 後 表面을 랩핑 研磨했다.

疲勞試驗機는 三点 굽힘 試驗機를 利用하여 反復 荷重 速度는 900 C.P.M으로 했다. 最少荷重 (P_{min})은 0으로 하여 應力比($R=P_{min}/P_{max}$)가 0의 경우에 對해서 實驗을 行하였다. 三点 굽힘에 있어서의 應力擴大係數 K_I 의 計算에는 다음 式을 利用했다.¹¹⁾

$$K_I = 3Pl\sqrt{\pi a}/2t(w-a)^2 \{1.09 - 1.735(a/w) + 8.20(a/w)^2 - 14.18(a/w)^3 + 14.57(a/w)^4\}$$

여기서, P 는 荷重, l 은 span의 길이, a 는 크랙길이, t 는 試驗片的 두께, w 는 試驗片的 幅이다. 塑性域 및 크랙길이의 測定은 一定한 反復荷重을 加한 後, 試驗片을 試驗機에서 分離하여 試驗片 表面에 있어서의 光干涉 무늬의 模樣을 2倍로 擴大 撮影하여 그 필름을 30배의 콤파이터 위에 놓

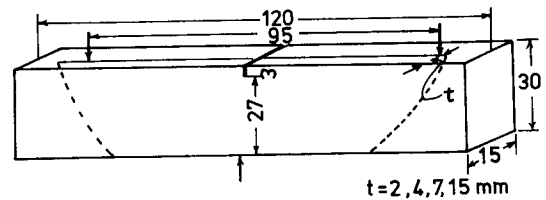


Fig. 1. Specimen shape and dimension.

고 測定하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 疲勞크랙의 傳播에 同伴하는 塑性域의 變化舉動

Fig.2는 SM41鋼과 HT80鋼에 對해서 疲勞크랙 近傍에서 生기는 塑性域 및 降伏스트레인 分布의 模樣을 除荷 狀態에서 光干涉法에 依해 觀察한 것이다. 크랙 近傍의 干涉무늬의 密度가 높게 되어 있는 領域은 塑性域이고,⁹⁾ 그 外側의 干涉무늬가 水平으로 되어 있는 領域은 塑性變形이 生기지 않는 領域이다. 또한 塑性域內의 크랙에 더욱 가까운 領域에 있어서는 干涉무늬의 密度가 매우 낮은 領域이 觀察되고 있다. 따라서 이 領域은 다른 塑性域에 比하여 두께 方向의 變形量의 勾配가 완만하게 되어 있음을 알 수 있다. 即 이 領域은, 負荷時에 있어서는 다른 領域보다 더욱 옹호하게 들이 갔던 것이 破壞 後 다시 올라와 두께 方向의 勾配가 완만하게 될 것으로, 다른 領域보다도 매우 큰 塑性變形이 생긴 곳으로 豫想된다. 그러므로 本論文에서는 이 領域을 強變形領域이라고 부르기로 한다.

一般的으로 疲勞크랙 近傍에는 最大荷重(P_{max})에 依해 生기는 塑性域과 引張과 壓縮의 兩荷重에 依해 生기는 싸이클릭 塑性域(Cyclic plastic zone)이 存在하는 것으로 알려져 있다.^{4),12)} 한편 그림 2의 強變形領域은 크랙이 通過한 後, Shear lip이 突出되어 있는 쪽에 매우 넓게 觀察되고 있다. 따라서 크랙 近傍의 強變形 領域의 形成에는 上述한 싸이클릭 塑性域 外에 이 Shear lip(後述)에 依해서도 크게 影響을 받는다고 豫想된다. 또한, SM 41 鋼에서는 크랙의 進展에 同伴하여 塑性域의 幅도 크게 되지만 그와 함께 干涉무늬의 密度가 集中的으로 높게 되어, 周期的인 波形 模樣을 하고 있는 것이 觀察되고 있다. 이 理由에 對해서는 다음과 같이 考察된다. 即 SM41 鋼과 같이 下部 降伏 現象이 뚜렷한 材料의 경우는, 降伏應力 以上으로 負荷된 크랙 先端 領域에서는 最大 引張方向에 對해서 約 45° 方向으로 塑性 스트레인이 集中하여 Rüdgers Band가 생긴다. 이와 같이 크랙 先端의 兩側에 생긴 Rüdgers Band는 表面에서 부터 内部로 向하여 45° 方向으로 slip을 일으켜, 兩側의 Rüdgers Band에 둘러 싸여진 領域에서는 두께 方向의 收縮을 가져와, Fig.3에 보이는 마와 같은 Necking zone¹³⁾을 形成한다. 이 Necking zone은 처음의 數 싸이클(cycle)인 比較的 短時間에 形成되어, 그 後의 反復荷重에 依한 塑性 스트레인은 이 Necking zone에 集中되면서 크랙의 成長이 이루어진다.

크랙이 어느 程度의 크기로 成長하면 다시 새로운 Rüdgers Band가 前의 Necking zone의 前方에 생겨서, 다시 새로운 Necking zone을 形成한다. 크랙의 進展에 同伴하여 應力擴大係數의 範圍(ΔK)가 增加하기 때문에 그림3에 보이는 마와같이 새로이 생긴 Necking zone은 前의 그것 보다도

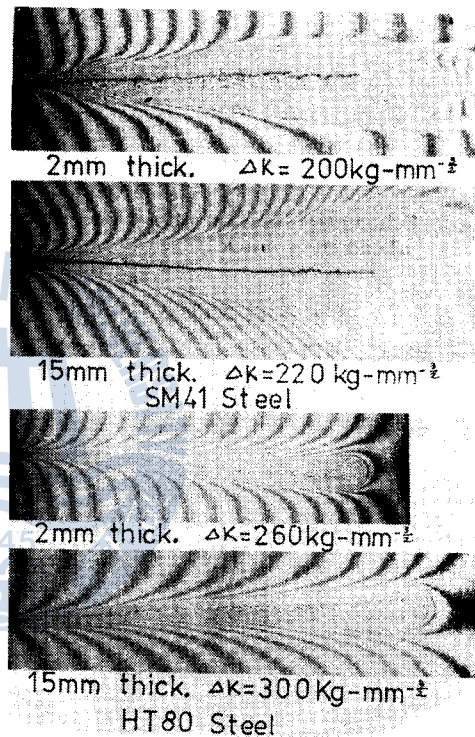


Fig. 2. Plastic zone behaviour near the propagating crack.

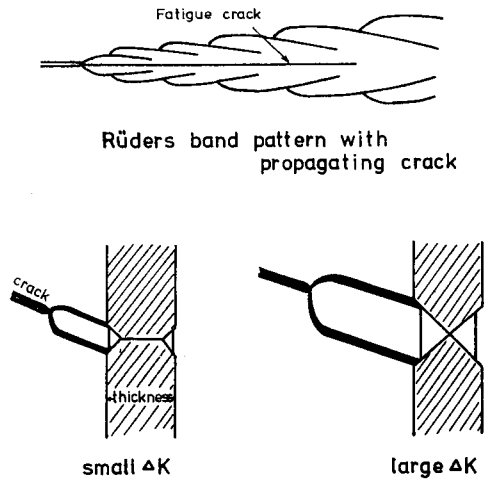


Fig. 3. Schematic diagram of necking zone ahead of a crack.

80鋼의 경우는, 이와 같은 Rüders Band가 생기지 않기 때문에, 두께에 의한影響은 SM41鋼 만큼確實하지 않다고 생각된다.

3.2 疲勞크랙 近傍의 塑性域內의 殘留應力 分布

熔接部の 殘留應力 分布를 光干涉法에 依해 測定하는 原理¹⁰⁾와 같은 方法으로 疲勞크랙 近傍의 塑性域 内部의 殘留應力 分布가 光干涉法에 依해 定性的으로 把握될 수 있다.

Fig. 4는 HT80 鋼에 對해서 塑性域內의 殘留應力 分布를 光干涉法에 依해 觀察한 것이다. Fig. 4

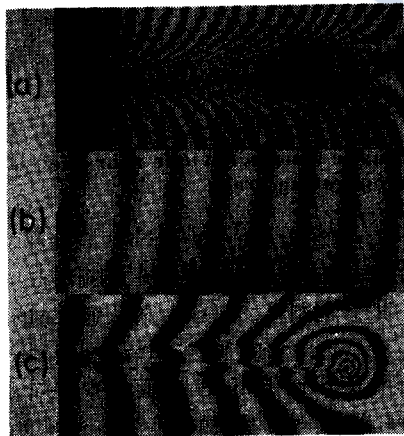


Fig. 4. Residual strain distribution near the fatigue crack observed by optical interference method.

處理에 依한 應力解放에 依해 다른 部分보다도 凸로 된 것이다.¹⁰⁾ 따라서 (c)圖로 부터 크랙이 通過한 後, 크랙의 兩側에는 上記方向의 壓縮殘留 應力이 存在하고 있으며, 또한 그 값은 크랙 先端에서 가장 큰 것을 알 수 있다.

幅 및 길이가 커진다. 또한 그림2에 依하면 같은 應力擴大係數의 範圍(ΔK)下에서는 試驗片의 두께가 두꺼울 수록 Necking zone의 幅은 크게 되고 길이는 작아짐을 알 수 있다.

한편 그림2에 있어서 HT80鋼의 경우는 SM41鋼에 있어서의 上述한 바와같은 幅이 넓은 Necking 現象은 觀察되지 않는다. 또한 試驗片의 두께에 依한 影響은 매우 작고, 塑性域의 形狀 및 크기는 거의 一定하다.

以上과 같은 塑性域의 形狀에 있어, 試驗片 두께에 依해 생기는 差는, 主로 Rüders Band의 生成機構에 依存하는 것으로 생각된다. 即 SM41 鋼에 있어서, 試驗片의 두께가 얇은 경우는 Rüders Band의 生成傳播가 쉽게된다. 그러나 두께가 커지면 크랙 先端領域은 拘束狀態가 強하게 되기 때문에 Rüders Band의 傳播는 抑制된다. 한편 HT

以上の 事實로 부터 光干涉法에 依해 試驗片 内部의 塑性域 및 그 領域内部의 定性的인 殘留應力 分布가 把握 될 수 있다.

3.3 塑性域의 形狀 및 그 크기와 應力擴大係數(ΔK)와의 相關性

Fig. 2에 있어서 크랙先端으로 부터의 塑性域의 長이를 R_x , 그것과 直角方向의 塑性域의 幅의 半分을 R_y 로 한다. Fig. 5에는 R_x/R_y 와 降伏應力(σ_Y)에 對한 應力擴大係數의 範圍(ΔK)의 比, $\Delta K/\sigma_Y$

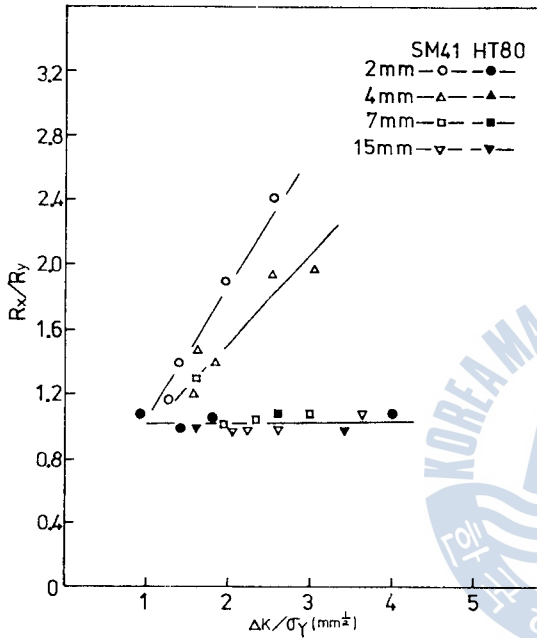


Fig. 5. R_x/R_y vs. $\Delta K/\sigma_Y$.

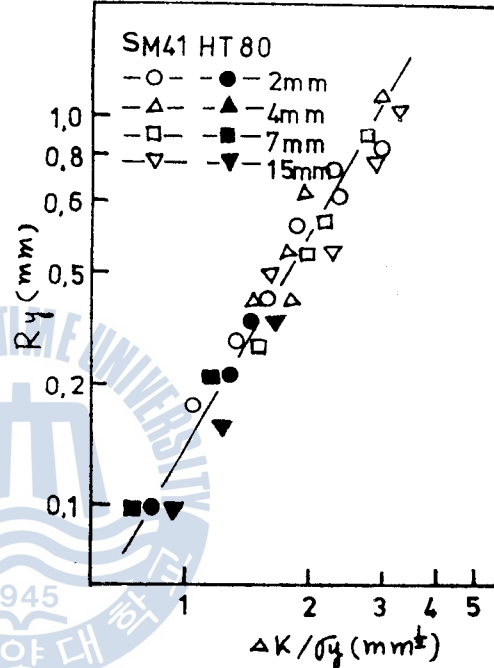


Fig. 6. Plastic zone size(R_y) vs. $\Delta K/\sigma_Y$.

와의 關係를 보인다. 이에 依하면 SM41 鋼에 있어서 試驗片의 두께가 2mm와 4mm의 경우는 $\Delta K/\sigma_Y$ 의 값이 增加함에 따라 R_x/R_y 는 1에서 부터 크게 增加하지만, 7mm 以上에 있어서는 $\Delta K/\sigma_Y$ 의 값에 關係없이 $R_x \approx R_y$ 의 關係에 있다. 한편 HT80 鋼에 있어서는 試驗片의 두께 및 $\Delta K/\sigma_Y$ 의 값에 거의 關係없이 $R_x \approx R_y$ 의 關係에 있다.

Fig. 6에는 R_y 와 $\Delta K/\sigma_Y$ 와의 關係를 보인 것이다. 試驗片의 두께에 따라 약간의 變化를 보이고 있으나 SM41, HT80 鋼, 共히 다음의 關係式에 依해 整理된다.

$$R_y = 0.13(\Delta K/\sigma_Y)^{1.07}$$

3.4 塑性域 및 塑性域內의 스트레인 分布와 크랙傳播機構

Fig. 2에 있어서 塑性域內의 光干涉 무늬의 分布는, 두께方向의 平均스트레인 ϵ_z 의 分布를 나타내고 있다.⁹⁾ 여기서, 試驗片의 두께가 2mm와 같이 얇은 경우는 두께方向의 平均스트레인 ϵ_z 의 分布는 平面上에서의 最大스트레인 ϵ_y 의 分布와 거의 一致한다.⁹⁾

Fig. 7은 Fig. 2에 있어서 두께 2mm의 試驗片에 對해서 塑性域內의 두께方向의 스트레인 分布, 即 塑性域內의 平面上에서의 最大스트레인 分布의 $\Delta K/\sigma_Y$ 에 對한 變化를 보이고 있다. 이 그림에 依하면 塑性域內의 스트레인 分布의 勾配는 同 - 材料인 試驗片의 경우는 $\Delta K/\sigma_Y$ 의 값에 關係없이 거의 一定하다. 또한 HT80 鋼은 SM41 鋼 보다도 $\Delta K/\sigma_Y$ 의 값에 對해서 塑性域內의 스트레인 分布

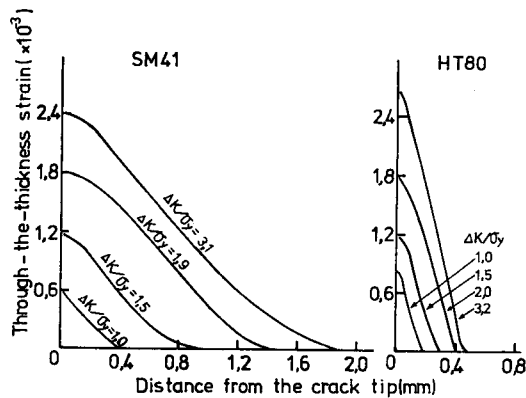


Fig. 7. Through-the-thickness Strain distribution in plastic zone (Specimen thickness; 2mm)

의 勾配가 매우 급하게 되어있는 것을 알 수 있다

Fig. 8은 塑性域의 크기(R_x) 및 Fig. 7에 있어서 스트레인 分布의 勾配(δ/R_x , 여기서 δ 는 크랙 先端의 두께 方向의 最大 스트레인) 인 2개의 因子와 크랙 傳播 速度와의 相關性을 評價한 것이다. 이 그림에 依하면, 크랙 傳播 速度는 塑性域의 크기와 比例하지만, 塑性域內의 스트레인 分布의 勾配와는 關係가 不明瞭하다.

또한, HT80 鋼의 경우, 크랙 傳播 速度에 對한 塑性域의 增加는 SM41 鋼에 比하여 매우 완만하다. 이것은 SM41 鋼은 應力 擴大 係數의 範圍(ΔK)가 커지면, 크랙 先端의 兩側에 hinge型 塑性流動이 생기기 쉬워서, 塑性域 또한 커지지만, HT80 鋼은 Hinge型 塑性流動이 생기기 어렵기 때문에 應力 擴大 係數範圍의 增加에 對해서 塑性域의 크기는 그만큼 현저하게 커지지 않기 때문이다. 兩種의 鋼材에 있어서 疲勞破面을 走査 電子顯微鏡에 依해 調査한 結果를 Fig. 9에 보인다. 兩種의 鋼材 共히 그 破面에는 Striation이 規則的으로 나타나 Plastic blunting 機構¹⁴⁾에 依한 疲勞 크

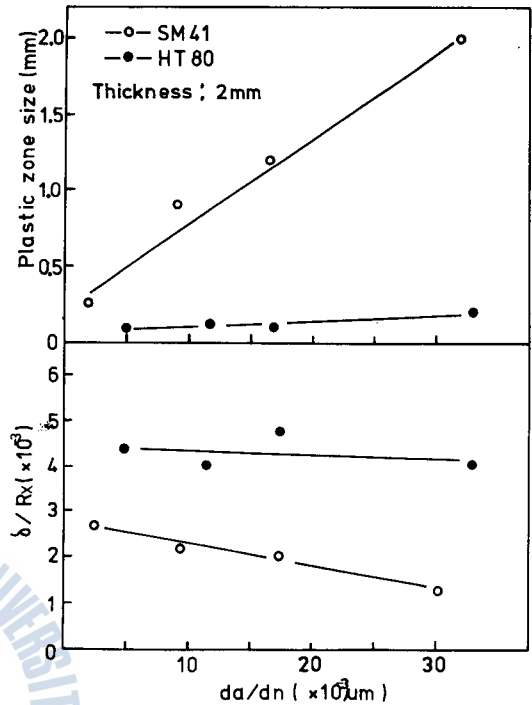


Fig. 8. Plastic zone size and the slope of strain distribution in plastic zone (δ/R_x) vs. crack growth rate (da/dn).

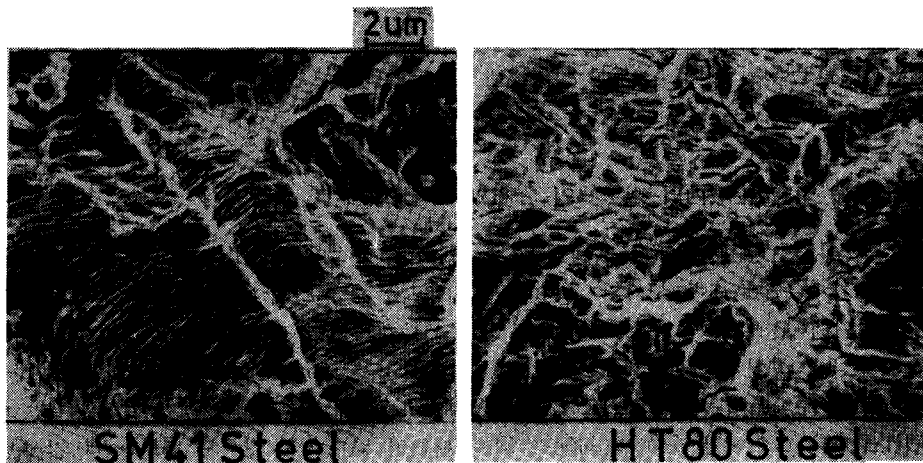


Fig. 9. Fractograph of SM41 and HT80 steel specimens.

크랙의 進展이 認定되나, HT80 鋼의 경우는 SM41 鋼에 比하여 Striation의 模樣이 不明瞭하고, 크랙의 進展方向에 對해서 直角方向으로 많은 微小크랙이 觀察되고 있다.

以上과 같은 Fracto-graph的 觀察과 Fig.7 및 8의 結果로부터 一定한 크랙 傳播速度에 있어서의 塑性域의 크기가 작고, 塑性域內의 스트레인 分布의 勾配가 急한 材料의 경우는, 그 破面에 微小크랙의 發生을 촉진하는 傾向이 있음을 알 수 있다.

3.5 試驗片 表面의 스트레인 分布와 內部的 크랙 進展 舉動과의 相關性

Fig.10은 두꺼운 試驗片과 얇은 試驗片에 對해서 進展中의 크랙 斷面을 보인 것이다. 이 그림에서, 크랙先端의 塑性域에 있어서의 두께方向의 變形을 特히 強調해서 보인 것이다. 그림의 A-A' 斷面에 보이는 마와 같이 表面 근방의 平面應力 狀態에 가까운 部分에서는 45°方向의 Shear lip이 생긴다. 이 때문에 크랙이 通過한 後, 試驗片 表面에 나타나는 塑性域은 크랙을 中心으로 하여 非對稱으로 되어 있다. 또한 크랙을 中心으로 하는 兩側의 두께方向의 스트레인 分布의 勾配는 한쪽은 急한 경사를 보이고 있는 것에 對해, 한쪽은 완만하게 되어 있다. 이 傾向은 SM41鋼 보다도 HT80 鋼 쪽이, 또한 크랙 길이가 길어져서 負荷應力이 커 질 수록 確實히 나타난다(Fig.2 參照) Fig.11은 SM41 鋼에 있어서 두께 10mm의 試驗片에 對해서, 크랙의 進展에 同伴되는 試驗片 表面의 塑性域의 變化와 그 破面에 나타나는 疲勞 크랙의 進展 模樣을 보인 것이다. 破面에 觀察되는 검은 線은 크랙이 一時 停止한 痕跡으로 크랙의 길이가 커짐에 따라 그 彎曲度는 작아지고 그에 따라 表面에 나타나는 塑性域도 커지고 있다.

以上の 事實로부터 疲勞크랙이 進展하여 그 先端에서 생긴 塑性域의 크기가 커지면, 튜넬(Tunnel)型 크랙은 直線型으로 되는 것을 알 수 있다

4. 結 論

應力比(P_{min}/P_{max})가 0인 三點 굽힘疲勞試驗의 경우에 對해서, 크랙 進展에 同伴되는 크랙 근방의 塑性域 및 스트레인 分布의 變化舉動을 光干涉法을 利用하여 連續적으로 觀察했다. 試驗은 下部 降伏現象이 뚜렷한 SM41鋼과 그것이 確實하지 않은 HT80 鋼에 對해서 行하였다.

그 結果로부터 크랙進展에 同伴되는 塑性域 및

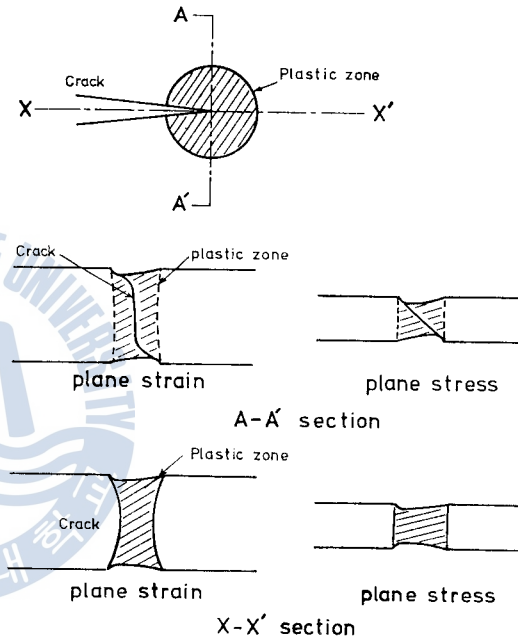


Fig.10. Plastic zone and through-the-thickness deformation shape near the propagating crack.

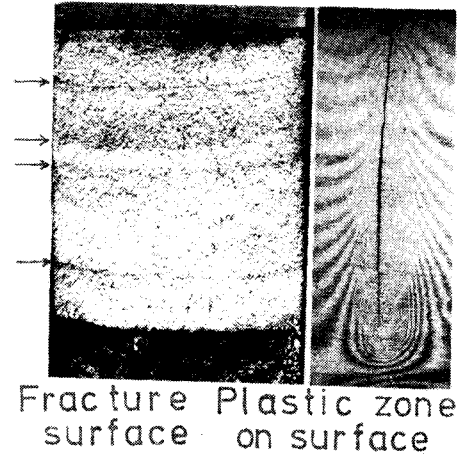


Fig.11. Relationship between the plastic zone size on specimen surface and the curvature of the crack.

塑性域内の 스트레인 分布의 變化舉動을 밝히고, 또한 이들의 舉動과 micro的인 疲勞크랙 傳播機構와의 相關性에 對해서 檢討했다. 그리고 試驗片内部의 塑性域 및 殘留應力 分布를 定性的으로 把握하는 方法을 提示했다. 그 위에 試驗片 表面과 内部의 크랙進展 舉動과 試驗片 表面에 나타나는 스트레인 分布의 變化舉動과의 相關性을 밝혔다.

主된 結果를 정리하면 다음과 같다.

(1) 下部 降伏 現象이 確實히 나타나는 SM41 鋼은 크랙 先端에 Necking zone을 周期的으로 形成하면서 크랙 傳播가 이루어지며 (Fig.3), 새로운 Necking zone의 形成에 맞추어 크랙 傳播 速度도 變化한다. 그러나 HT80 鋼의 경우는 이 現象이 나타나지 않는다.

(2) 試驗片의 두께가 4mm 以上인 경우에 있어서는 크랙 先端의 塑性域의 길이 R_X 와 그 幅의 半分 R_Y 와는 兩種의 鋼材 共히 $\Delta K/\sigma_Y$ 의 값에 關係없이 $R_Y \approx R_X$ 의 關係에 있다.

(3) 塑性域의 크기 R_Y 는 應力擴大係數의 範圍 ΔK 에 對해 鋼種에 關係없이 다음의 關係를 갖는다.

$$R_Y = 0.13 (\Delta K / \sigma_Y)^{1.07}, \text{ 여기서 } \sigma_Y \text{는 降伏應力}$$

(4) 同一 크랙 傳播 速度에 있어서, 塑性域의 크기는 SM41 鋼이 HT80 鋼보다도 매우 크다. 또한 塑性域内の 스트레인 分布의 勾配, 即 스트레인 集中率은 HT80 鋼이 SM41 鋼보다도 매우 높다. 이와 같이 스트레인 集中率이 높은 材料의 경우는 그 破面에 Striation 보다도 微小 크랙을 多數 發生시킨다.

參 考 文 獻

- 1) R. M. Pelloux, Proc. Air Force conf. on Fatigue and Fracture of Air Craft Struct's and Matl's, AFF DL-ITR-70-144, (1970) p.409
- 2) H.W et al, Mechanical Model for Fatigue Crack Propagation, Proc. of 2nd Int. Conf. on Fract Brighton, April(1969)P.812
- 3) T.Yokobori, et al, Res. Inst. Str. Fract. Mat., Tohoku univ. Sendai, Japan, 6(1970)P.49
- 4) G. T. Hahn, et al, Local Yielding Attending Fatigue Crack Growth, Metal Trans. Vol.3 May (1972) P.1189
- 5) A. Ohta, et al, Measurement of Strain Distribution by the Moire Fringe Multiplication Method at a Tip of Propagation Fatigue Crack, Inst. J. of Fract, 13 (1977) p.289
- 6) 金, 加藤, 田村, 光干涉法による切欠先端のひずみ分布の測定, 溶接學會誌. Vol. 47. No.7(1978) p.446
- 7) Kim, Kato, Tamura, Observation of Plastic Flow Process near the Notch Front in Steel in Low Temperature Range by Optical Interference Method, Trans. Japan Weld. Soc., Vol 9. No.2 (1978) p.112
- 8) 金, 加藤, 田村, 光干涉法による 鋼材 切欠先端의 塑性流動의 低溫域における觀察, 溶接學會誌, Vol 47 No.11 (1978) p.766
- 9) 金, 加藤, 田村, 光干涉法による 鋼材 切欠先端의 彈-塑性ひずみ分布におよぼす試驗片形狀の影響, 溶接學會誌, Vol 48 No.5 (1979) p.31
- 10) 金, 光干涉法을 利用한 스트레인 分布의 測定, 大韓機械學會誌, Vol. 19, No.3 (1979) p.182
- 11) 岡村, 線形破壞力學入門, 培風館, 昭51年, p.218
- 12) C. Bathias, et al, Rep. in MIT(U.S.A) (1972)
- 13) B. J. Schaeffer, et al, Deformation and the Strip Necking Zone in a Cracked Steel Sheet, Ex. Mech.(1971) p.172
- 14) C. Laird, Fatigue Crack Propagation, ASTM. STP, 415 (1967) p.139