

<論 文>

SS 41材의 疲勞크랙 傳播速度에 미치는 熔接殘留應力の 影響에 관한 研究

鄭錫柱* · 韓秉基** · 鄭剛***

(1988年 1月 5日 接受)

A Study on the Effect of Residual Stress on Fatigue Crack Propagation Rate of SS41 Material

Suk-Choo Chung, Byeong-Kee Han and Kang Chung

Key Words : Residual Stress(殘留應力), Stress Intensity Factor(應力擴大係數), Fatigue Crack Propagation Rate(疲勞크랙 傳播率), Effective Stress Ratio(有效應力比), Relaxation Factor(弛緩係數)

Abstract

In this study, a method that can realize the effect of residual stresses on fatigue crack propagation has been proposed. This method requires that the relaxation quantities of residual stresses are measured by experimental method according to fatigue cycles and are employed to the experimental results of base materials by introducing the concept of superposition. SS41 material has been analyzed as an example. The results show that the relaxation factor of residual stresses for fatigue cycles is

$$a_i = \frac{1}{0.6903 + 0.0383a_i},$$

the effective stress ratio for fatigue crack propagation length is

$$(R_{eff})_i = \frac{1}{1.1274 + 0.0118a_i},$$

and the fatigue crack propagation rate for relaxation quantities of residual stresses is

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_i = \frac{0.5K_{cf} - \Delta K}{\left\{1 - \frac{1}{1.1274 + 0.0118a_i}\right\}K_{cf} - \Delta K} \left(\frac{da}{dN}\right), \text{ for stress ratio } R=0.5.$$

記 號 說 明

- a : 크랙 半길이 (mm)
- a_i : 사이클수에 따른 傳播 크랙길이 (mm)
- b : 熔接線 中心으로부터 引張殘留應力과 壓縮

殘留應力の 遷移點까지의 거리 (mm)

- c, n : 材料常數
- da/dN : 疲勞크랙 成長率
- $(da/dN)_i$: 熔接殘留應力の 弛緩量에 따른 疲勞크랙 成長率
- K_r : 殘留應力에 의한 應力擴大係數 (kgf/mm^{3/2})
- K_{cf} : 크랙이 不安定하게 傳播될 때의 應力擴大係數 (kgf/mm^{3/2})

*正會員, 서울産業大學 機械設計學科

**正會員, 弘益大學校 工科學 機械工學科

***正會員, 弘益大學校 大學院

- ΔK : 應力擴大係數 幅(kgf/mm^{3/2})
 ΔK_{eff} : 有效應力擴大係數 幅(kgf/mm^{3/2})
 R : 應力比
 $(R_{eff})_i$: 사이클수에 따른 有效應力比
 α_i : 熔接殘留應力 弛緩係數
 σ_r : 殘留應力(kgf/mm²)
 σ_0 : 熔接直後の 最大殘留應力(kgf/mm²)
 $(\sigma_0)_i$: 사이클수에 따른 最大殘留應力(kgf/mm²)
 σ_{xr} : x 方向線上的 임의의 거리에 대한 角 θ 에서
 의 半徑方向의 殘留應力(kgf/mm²)
 $\sigma_{x\theta}$: x 方向線上的 임의의 거리에 대한 角 θ 에서
 의 直角方向의 殘留應力(kgf/mm²)

1. 序 論

一般的으로 熔接法은 다른 接合方法보다 여러면에서 유리하나, 熔着金屬部의 氣泡, 크랙 및 混入 등의 여러 결함을 내포하기 쉬우며, 熔接作業 中 局部的인 熱에 의한 影響으로 殘留應力이 發生하며 뒤틀림이나 크랙 등을 誘發시킬 수 있다. 따라서, 熔接構造物에 대한 設計는 破壞力學的인 側面도 고려함으로써 遂行될 必要가 있고, 特히 熔接部에 크랙이 內在하는 反復荷重狀態의 熔接構造物은 殘留應力 等 影響을 끼칠 수 있는 여러가지 因子들을 고려하여 크랙傳播에 관한 破壞力學的 研究를 행함으로써 設計方法을 改進黨하고 人命被害 및 財産損失을 未然에 방지하여야 한다.

Paris⁽¹⁾는 反復荷重을 받는 경우 크랙 傳播速度는 크랙 先端에서의 應力擴大係數幅(ΔK)과 관련 있다고 하였으며, Forman⁽²⁾은 Paris 式에 應力比와 크랙이 불안정하게 進展될 時의 應力擴大係數를 고려한 수정식을 제안함으로써, 殘留應力을 내포한 熔接材料에 대해서도 크랙 傳播速度와 應力擴大係數와의 關係를 규명할 수 있게 하였다. Vocikovskiy, Trudeau, Rivard⁽³⁾ 등은 疲勞 크랙의 初期成長에 미치는 殘留應力의 影響에 대해 研究하였으며 Masubuchi⁽⁴⁾는 크랙이 引張殘留應力 領域下에 있을 때, 疲勞 크랙 傳播速度는 빠르고, 壓縮殘留應力 領域下에서는 느리게 된다고 하였다.

그러나, 이러한 熔接殘留應力의 影響은 殘留應力 分布 熔接材의 疲勞實驗에 의해 규명되기는 어렵다. 왜냐하면, 疲勞實驗은 노치를 주고 또한 프리 크랙킹(pre-cracking)을 함으로써 本 實驗에 착수하게 되는데 이때의 殘留應力 分布 熔接材 試片은

크랙에 실제로 影響을 줄 수 있는 크랙위의 殘留應力 分布란 거의 弛緩된 狀態라고 볼 수 있기 때문이다.

그러므로, 本 研究에서는 熔接殘留應力의 影響을 보다 精確하게 糾明할 目的으로 熔接殘留應力의 疲勞反復 사이클 數에 따른 弛緩量을 測定하고, 母材의 實驗 結果에 중첩의 개념을 도입함으로써 熔接殘留應力이 疲勞크랙 傳播에 미치는 影響을 糾明할 수 있는 方法을 제시한다.

하나의 例로서 SS41材를 선택하여 서브머지드 아크 熔接을 한 後, 本 論文의 方法을 適用함으로써 熔接殘留應力의 影響에 對하여 分析하였다.

2. 熔接殘留應力

熔接時 發生하는 殘留應力은 局部的인 加熱 및 冷却에 따른 不均一한 溫度分布로 인하여 發生하는 熱塑性變形이며, 他 部材 등의 拘束을 받게 됨으로써 그 分布는 더욱 커지게 된다. 따라서, 이러한 殘留應力의 分布는 必然的으로 규명되어야 하며 熔接構造物의 設計시 고려되어야 한다.

그 殘留應力 測定法으로서는 應力弛緩法, X-線 회절법, 應力感度를 利用하는 方法, 크랙킹(crack-ing)方法 등이 있다.

本 研究에서는 이들 方法中 部分破壞의 應力弛緩法인 Mather의 穿孔法(hole-drilling method)⁽⁵⁾을 利用하였다. 그 算定方法은 다음과 같다.

먼저, 극좌표상에서의 임의의 거리에 있는 미소 요소의 應力分布는 Kirsch⁽⁶⁾의 풀이에 의하여 다음과 같이 쓸수 있다.

$$\sigma_{r0} = \frac{1}{2}(\sigma_{x0} + \sigma_{y0}) + \frac{1}{2}(\sigma_{x0} - \sigma_{y0})\cos 2\theta + 2\tau_{xy0}\sin 2\theta$$

$$\sigma_{\theta 0} = \frac{1}{2}(\sigma_{x0} + \sigma_{y0}) + \frac{1}{2}(\sigma_{y0} - \sigma_{x0})\cos 2\theta - 2\tau_{xy0}\sin 2\theta$$

$$\tau_{r\theta 0} = \tau_{xy0}\cos 2\theta - \frac{1}{2}(\sigma_{x0} - \sigma_{y0})\sin 2\theta$$

한편, 單軸引張應力下의 平板에 구멍이 있는 경우에 대한 應力狀態는 다음과 같고 같다.

$$\sigma_r = \frac{1}{2}\sigma_{x0}\left[1 - \frac{a^2}{r^2}\right] + \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2}\right)\cos 2\theta \quad (2)$$

$$\sigma_r = \frac{1}{2}\sigma_{x0}\left[1 + \frac{a^2}{r^2}\right] - \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2}\sigma_{x_0}\left[\left(1 - \frac{3a^4}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2}\right)\sin 2\theta\right]$$

여기서 a 는 구멍의 半徑이다.

그러므로, 구멍이 없는 경우의 스트레인

$$\epsilon_{r_0} = \frac{\sigma_{x_0}}{E}(\cos^2\theta - \nu\sin^2\theta) \quad (3)$$

$$\epsilon_{\theta_0} = \frac{\sigma_{x_0}}{E}(\sin^2\theta - \nu\cos^2\theta)$$

와 같이 쓸 수 있고, 구멍이 있는 경우의 스트레인은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\epsilon_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - \nu\sigma_\theta) \quad (4)$$

$$\epsilon_\theta = \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \nu\sigma_r)$$

결국, 殘留應力은 殘留應力分布 熔接材의 스트레인 量과 殘留應力弛緩狀態의 熔接材 스트레인 量의 差라 할 수 있으므로 式 (3)과 式 (4)에 의하여 x 方向線上的의 임의 거리에 대한 角 θ 에서의 半徑方向의 殘留應力(σ_{xr})과 直角方向의 殘留應力($\sigma_{x\theta}$)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_{xr} = \frac{E\epsilon_r}{C_r} \quad \sigma_{x\theta} = \frac{E\epsilon_\theta}{C_\theta} \quad (5)$$

여기서 C_r, C_θ 는 다음과 같다.

$$C_r = -\frac{(\nu+1)}{8}\lambda^2 - \left[\frac{1}{2}\lambda^2 - \frac{3(\lambda+1)}{32}\lambda^4\right]\cos 2\theta$$

$$C_\theta = -\frac{(\nu+1)}{8}\lambda^2 + \left[\frac{1}{2}\lambda^2 - \frac{3(\lambda+1)}{32}\lambda^4\right]\cos 2\theta$$

d : 드릴 된 구멍의 지름.

r : 구멍중심으로 부터 스트레인 게이지 가지의 거리

$$\lambda = \frac{d}{r} \leq 1.15$$

위와 같은 方法에 의하여 熔接中心線에서의 最大殘留應力(σ_0)과 熔接中心線으로 부터 引張殘留應力과 壓縮殘留應力의 切이점 까지의 거리 (b)를 測定하고, Terada⁽⁷⁾가 제시한 다음 式에 代入함으로써 전반적인 殘留應力分布를 求할 수 있게 된다.

$$\sigma_r(x) = \sigma_0\left\{1 - \left(\frac{x}{b}\right)^2\right\}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{b}\right)^2} \quad (6)$$

3. 殘留應力分布 熔接材의 疲勞크랙 傳播速度와 應力擴大係數와의 關係

一定反復應力下的 疲勞크랙 成長率(da/dN)과 作用應力 및 크랙길이 (a)와의 關係는 다음과 같다.

$$da/dN \propto f(\sigma, a) \quad (7)$$

이러한 關係를 Paris는 다음과 같은 式으로서 疲勞

크랙 傳播速度와 應力擴大係數와의 關係를 제시하였다.

$$da/dN = C(\Delta K)^n \quad (8)$$

여기서, $\Delta K = \Delta\sigma\sqrt{\pi a}$, C, n 은 材料常數이다.

그리고, Farman은 Paris 式을 수정함으로써 應力比(R)에 따른 疲勞크랙 傳播速度를 求할 수 있는 다음과 같은 式을 제시하였다.

$$da/dN = \frac{C(\Delta K)^n}{(1-R)K_{cf} - \Delta K_e} \quad (9)$$

여기서, K_{cf} 는 크랙이 불안정하게 傳播될때의 應力擴大係數이다. 한편, 殘留應力分布 熔接材의 경우에 대한 疲勞크랙 傳播速度는 중첩법의 개념을 도입함으로써 求할 수 있으므로, 式(9)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} (da/dN) &= \frac{C(\Delta K_{eff})^n}{(1-R_{eff})K_{cf} - \Delta K_{eff}} \\ &= \frac{C(\Delta K)^n}{(1-R_{eff})K_{cf} - \Delta K} \quad (10) \end{aligned}$$

$$\Delta K_{eff} = (K_{max} + K_r) - (K_{min} + K_r) = \Delta K$$

$$R_{eff} = (K_{min} + K_r) / (K_{max} + K_r)$$

여기서, K_r 은 殘留應力에 依한 應力擴大係數

R_{eff} 는 有效應力比

K_{eff} 는 有效應力擴大係數幅.

그러나, 熔接殘留應力은 疲勞反復 사이클에 따라 이완되므로 式 (10)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$(da/dN)_i = \frac{C(\Delta K)^n}{\{1 - (R_{eff})_i\}K_{cf} - \Delta K} \quad (11)$$

여기서, $(da/dN)_i$: 熔接殘留應力의 弛緩量에 따른 疲勞크랙 傳播速度

$$(R_{eff})_i = \frac{K_{min} + (K_r)_i}{K_{max} + (K_r)_i}$$

$$\{K_r(x)\}_i = \frac{2\sqrt{\pi a}}{\pi} \int_0^a \frac{\{\sigma_r(x)\}_i}{\sqrt{a^2 - x^2}} dx$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (12)$$

$$\{\sigma_r(x)\}_i = \alpha_i \sigma_0 \left\{1 - \left(\frac{x}{b}\right)^2\right\} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{b}\right)^2}$$

α_i : 熔接殘留應力弛緩係數

결국, 式 (9)와 (11)에 依하여 殘留應力分布 熔接材의 疲勞크랙 傳播速度는 아래와 같다.

$$(da/dN)_i = \frac{(1-R)K_{cf} - \Delta K}{\{1 - (R_{eff})_i\}K_{cf} - \Delta K} (da/dN) \quad (13)$$

4. 實 驗

4.1 試驗片

本 研究의 實驗에 使用된 試片은 두께 3mm인

Table 1 Chemical composition of the base metal(Wt %)

Material	C	Si	Mn	P	S
SS41	0.018	0.19	0.61	0.014	0.011

Table 2 Mechanical properties of the base metal

Material	Tensile stress, σ_u (kgf/mm ²)	Yielding stress, σ_y (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Impact value (kgf/mm ²)
SS41	41.61	34.7	31	45

Table 3 Chemical composition of the welding wire(Wt %)

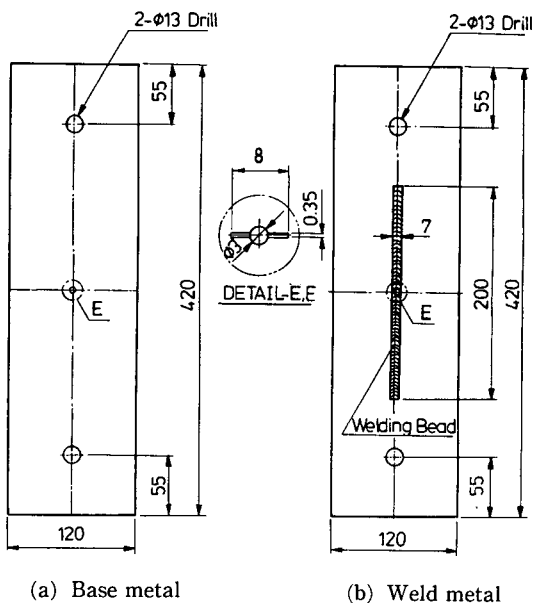
Material	C	Si	Mn	S	P
L8	0.07-0.08	0.518-0.65	1.15-1.42	0.011-0.012	0.018-0.019

Table 4 Mechanical properties of the welding wire

Material	Tensile stress, σ_u (kgf/mm ²)	Yielding stress, σ_y (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Impact value (kgf/mm ²)
L8	57-63	48-55	30-32	25

Table 5 Condition of submerged arc welding

ϕ (mm)	Pass	Current (A)	Voltage (V)	Speed (m/min)	Flux	Remark
2.4	1	277	27.5	1.33	S-777	.



(a) Base metal

(b) Weld metal

Fig. 1 Configuration of fatigue test specimens

炭素鋼(SS41)으로서 材料의 롤링(rolling) 方向을 길이 方向으로 하여 420×120mm가 되도록 機械加工하였고 可能한 한 一定하고 높은 熔接殘留應力이 分布하도록 完全拘束下에 같은 熔接條件으로 서브머지드 아크 熔接을 行하였다.

이와 같이 機械加工된 試片은 中央에 3mm의 구멍을 뚫고 0.35mm 두께의 실톱으로 양쪽 4mm씩 全 길이가 8mm가 되도록 노치加工한 疲勞試驗片(C.C.T 試片; center cracked tension specimen)과 殘留應力測定 試驗片으로 利用된다.

Table 1~5는 各各 SS41 鋼材의 化學的 成分 및 機械的 性質, 熔接와이어의 化學的 成分 및 機械的 性質, 그리고 熔接條件이며, Fig. 1은 疲勞試驗片의 規格을 나타낸 것이다.

4.2 實驗方法

(1) 熔接殘留應力 分布의 測定

本 研究에서는 熔接殘留應力分布의 測定을 爲하 여 應力弛緩法中的 하나인 Mathar의 홀 드릴링

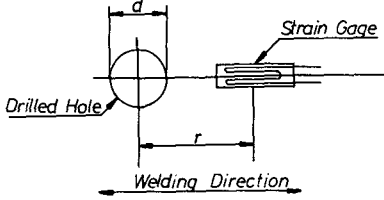


Fig. 2 Strain gauge and drilled hole

(hole-drilling) 方法을 利用하였다.

즉, 熔接殘留應力分布는 熔接方向과 直角方向으로 熔接中心線을 基準으로 하여 10mm간격으로 스트레인 게이지(strain gauge)를 附着하고 구멍을 뚫기 前과 뚫은 後의 스트레인 量을 測定함으로써 式 (5)에 代入하여 算定한다.

本 研究에서는 Fig. 2와 같이 $\theta=0$ 인 狀態에서 다음 式에 代入함으로써 殘留應力分布를 測定하였다. 즉,

$$\sigma_r(x) = \frac{E\epsilon R_r}{C_r}$$

여기서 $\epsilon R_r = \epsilon_r - \epsilon_{r0}$

$$C_r = -\frac{(\nu+1)}{8}\lambda^2 - \left[\frac{1}{2}\lambda^2 - \frac{3(\nu+1)}{32}\lambda^4 \right]$$

$$\lambda = \frac{d}{r} (\leq 1.15)$$

Fig. 3은 스트레인 게이지를 附着시킨 殘留應力 測定用 試驗片과 實驗裝置를 나타낸 것이다.

(2) 疲勞크랙 傳播速度의 測定

本 研究의 疲勞實驗에 使用된 實驗機械는 25톤容量의 電氣流壓式 UTM(Instron社 1332 series)이다.

疲勞크랙 傳播實驗은 本 實驗機種의 기능중 하나인 Fig. 4와 같은 사인 波(Sine-wave)形을 使用했으며, 사이클 數는 17Hz로 하고 應力比 R를 0.5로 行하였으며 荷重條件은 最大 4200kgf, 最小 2100kgf로 하였다.

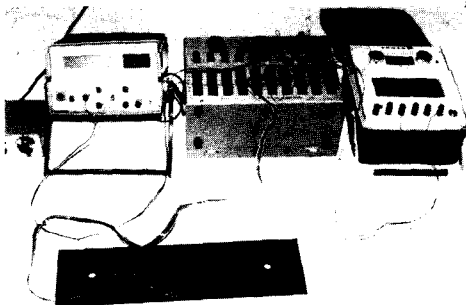


Fig. 3 Measuring apparatus for residual stress

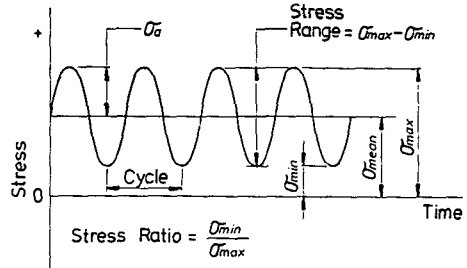


Fig. 4 Wave of cyclic loading condition

크랙길이의 測定은 비율이 20倍인 이동현미경을 使用하였으며, 人工노치로 부터 各各 2mm씩 프리크랙(pre-crack)을 내어 크랙길이 2a가 12mm일때 부터 疲勞크랙 成長을 測定하였다.

5. 結果 및 考察

5.1 사이클 수에 따른 熔接殘留應力 弛緩量

熔接殘留應力의 弛緩量은 두께 3mm, 폭 120mm, 길이 420mm의 서브머지드 아크 熔接 SS41 鋼 試片을 疲勞크랙 傳播速度 측정용 母材試片과 똑 같은 條件의 一定反復應力 및 應力比 0.5인 狀態에서 一定의 사이클反復을 行한 後, Mathar의 홀 드릴링(hole-drilling) 方法에 의하여 σ_0 와 b 를 求하고 式 (6)에 代入해서 算定하였다.

이때의 殘留應力 弛緩量은 사이클 수 35×10^4 , 65×10^4 , 95×10^4 , 1.25×10^5 , 1.45×10^5 등에 따른 弛緩程度이고, 그 反復사이클 수가 增加함에 따라 熔接殘留應力은 현저히 減少함을 알 수 있다.

그 結果는 Fig. 5와 같다.

이 結果, 殘留應力의 사이클 수에 따른 弛緩率 α_i 는 다음과 같은 式으로 나타낼수 있다.

$$\alpha_i = \frac{(\sigma_0)_i}{\sigma_0} = \frac{1}{k_0 + k_1 \alpha_i} \quad (i=1, 2, 3 \dots n) \quad (14)$$

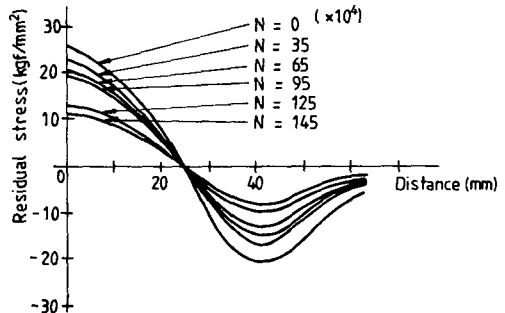


Fig. 5 Residual stress relaxation for cycle numbers

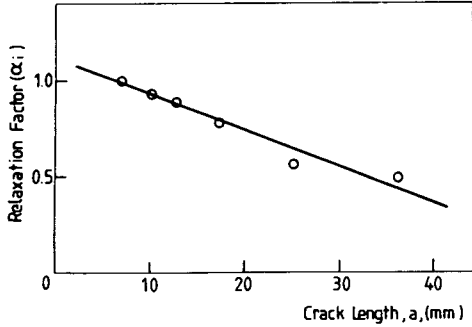


Fig. 6 Relaxation factor vs. crack length

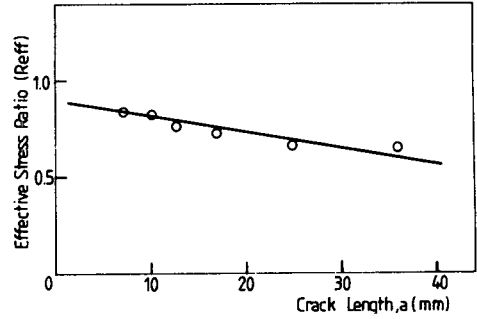


Fig. 7 Effective stress rate vs. crack length

여기서, $(\sigma_0)_i$: 사이클 수에 따른 最大殘留應力
 σ_0 : 熔接직후의 最大殘留應力
 a_i : 사이클 수에 따른 傳播크랙 길이
 k_0 : 0.6903
 k_1 : 0.0383

그 결과는 Fig. 6과 같다.

5.2 熔接殘留應力の 弛緩量에 따른 疲勞크랙 傳播速度

熔接殘留應力 弛緩量에 따른 疲勞크랙 傳播速度 $(da/dN)_i$ 는 먼저 사이클 수에 따른 殘留應力 弛緩量을 고려한 應力比 $(R_{eff})_i$ 를 求함으로써 算定될 수 있다. 그러나, 사이클 수에 따른 殘留應力の 弛緩量 算定은 限定되어 있기 때문에 傳播크랙 길이 全 領域에 걸친 疲勞크랙 傳播率을 求하기 위하여는 最小乘數法 (least square method)을 도입함으로써 有效應力比 $(R_{eff})_i$ 가 算定되어야 한다.

이 경우, 本 論文의 適用모델에 대한 傳播크랙 길이 (a_i) 와 應力比 $(R_{eff})_i$ 와의 關係는 다음과 같다.

$$(R_{eff})_i = \frac{1}{C_1 + C_3 a_i} \tag{15}$$

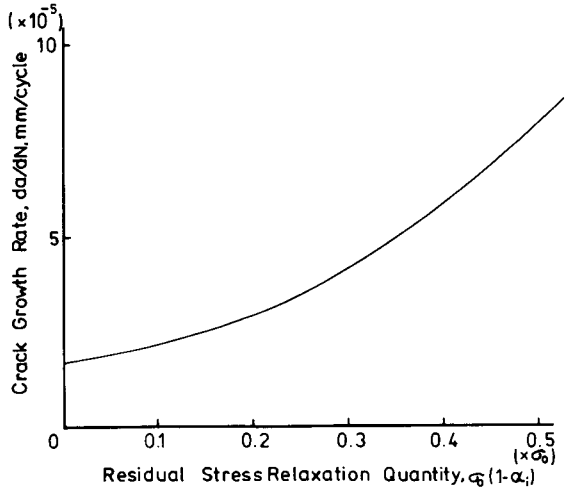


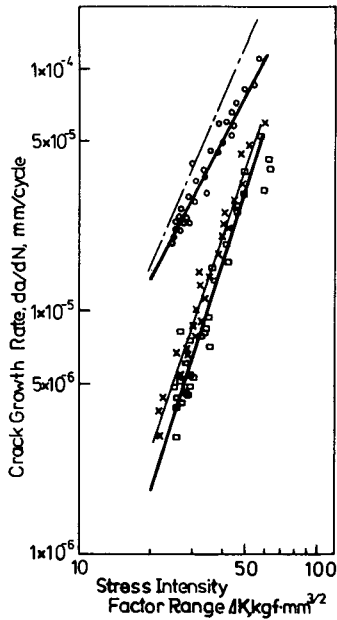
Fig. 8 Crack growth rate vs. residual stress relaxation quantities

$$C_1 = 1.1274 \quad C_2 = 0.0118$$

따라서, 熔接殘留應力 弛緩量에 따른 疲勞크랙 傳播速度는 式 (13)에 依하여 求할 수 있다. 이때의 $(da/dN)_i$ 와 母材의 疲勞크랙 傳播速度 (da/dN) 와의 關係는 다음 式으로 表示할 수 있다.

Table 6 Crack growth rate for relaxation residual stress

i	Crack length (a), mm	(da/aN)	$(R_{eff})_i$	$(da/dN)_i$	ΔK
1	7.75	5.0×10^{-6}	0.8281	1.7×10^{-5}	28.78
2	10.00	7.5×10^{-6}	0.8046	2.3×10^{-5}	32.69
3	12.50	8.3×10^{-6}	0.7864	2.8×10^{-5}	36.55
4	17.00	1.5×10^{-5}	0.7485	3.5×10^{-5}	42.63
5	25.75	2.9×10^{-5}	0.6834	5.9×10^{-5}	52.47
6	36.00	5.1×10^{-5}	0.6533	8.2×10^{-5}	62.04



— · — : Results by Eq.(10) of initial residual stress
 × : Welded metal specimen
 □ Base metal specimen
 ○ Results by Eq.(16)
Fig. 9 Crack growth rate vs. stress intensity factor range($R=0.5$)

$$\begin{aligned} & (da/dN)_i \\ &= \frac{0.5K_{cf} - \Delta K}{\left\{1 - \frac{1}{1.1274 + 0.0118a_i}\right\} K_{cf} - \Delta K} (da/dN) \end{aligned} \quad (16)$$

한편, 熔接材의 疲勞實驗結果는 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 母材의 結果와 큰 差異를 나타내지 않으므로써 앞서 언급한 바와같이 實驗에 의하여 殘留應力의 影響을 完全糾明하기란 어려운 것으로 사료되고, 기존의 式 (10)에 의한 初期殘留應力만을 고려한 結果와 式 (16)에 의한 結果를 比較해 보면 初期疲勞舉動은 어느 程度 一致하면서 크랙길이 가 점점 傳播해 감에 따라 差異가 남을 알 수 있다.

이는 殘留應力이 사이클 수에 따라 弛緩됨으로써 그 影響이 점점 적어지는 것으로 생각할 수 있다.

Table 6은 實驗에 의하여 決定된 da/dN , ΔK 에 따른 $(R_{eff})_i$, $(da/dN)_i$ 를 나타낸 것이고, Fig. 7은 傳播크랙 길이 a_i 에 따른 $(R_{eff})_i$, Fig. 8은 殘留應力 弛緩量 $\sigma_0(1-\alpha_i)$ 에 따른 疲勞크랙 傳播速度를 나타낸 것이다.

6. 結 論

本 研究는 疲勞反復 사이클 수에 따른 熔接殘留應力의 弛緩量을 測定하고, 母材의 實驗結果에 중첩법의 개념을 도입함으로써, 熔接殘留應力의 疲勞크랙 傳播에 미치는 影響을 糾明할 수 있는 方法을 제시하였다. 그 結果, 應力比 0.5인 狀態에서의 SS41鋼材를 選擇하여 本 研究의 方法을 도입함으로써 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 反復 사이클이 增加함에 따라 熔接殘留應力은 현저히 감소한다. 즉, 疲勞破壞舉動에 미치는 熔接殘留應力의 影響은 反復사이클 수의 增加와 더불어 점차 감소한다.

(2) 疲勞反復 사이클 수에 따른 熔接殘留應力의 弛緩係數는

$$\alpha_i = \frac{1}{0.6903 + 0.0383 a_i}$$

이고, 傳播크랙길이와 有效應力比의 關係는

$$(R_{eff})_i = \frac{1}{1.1274 + 0.0118 a_i}$$

이며, 熔接殘留應力 弛緩量에 따른 疲勞크랙 傳播速度는

$$\begin{aligned} & (da/dN)_i \\ &= \frac{0.5K_{cf} - \Delta K}{\left\{1 - \frac{1}{1.1274 + 0.0118a_i}\right\} K_{cf} - \Delta K} (da/dN) \end{aligned}$$

이다.

참 고 문 헌

- (1) Paris, P.C., 1964, "Fatigue an Interdisciplinary Approach", Syracuse University Press, Syracuse, p. 107.
- (2) Froman, R.G., Kearney, V.E. and Engle, R.M., 1967, "Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic-Loaded Structures", J. Basic Eng., Trnas. ASME, Vol.89, No.3, pp.459~465.
- (3) Vosikousky, O., Trudeau, L.P. and Rivard, A., 1980, "Effect of Residual Stress on Fatigue Crack Growth Threshold", Int. Journ. of Fracture, Vol.16, pp.187~190.
- (4) Masubuchi, K., 1980, "Analysis of Welded Structure", Pergamon Press, pp.466~468.
- (5) Nawwar, A.M., Mclachlan, K. and Shewchuk, J.,

- 1976, "A Modified Hole-Drilling Technique for Determining Residual Stresses in Thin Plates", *Experimental Mechanics*, Vol.33, pp.226~232.
- (6) Timoshenko, S.P. and Goodier, J.K., 1970, "Theory of Elasticity", 3rd Ed., McGraw-Hill, p.91.
- (7) Terada, H., 1976, "An Analysis of the Stress Intensity Factor of a Crack Perpendicular to the Welding Bead", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.8, pp. 441~444.