

單純變動荷重을 받는 鎔接構造用鋼의 疲勞龜裂成長

Fatigue Crack Growth of Welded-Structural Steel under Simple-Variable Loading

張	東	—*
Chang,	Dong	Il
朴	鎔	傑**
Bak,	Yong	Gul
李	奉	鶴***
Lee,	Bong	Hak

Abstract

Fatigue tests using a single-peak loading and a two-step loading were carried out to examine the fatigue crack growth behavior and to find the appropriate analysis method. C-T specimens were made using structural steel SWS58 for the tests.

From this, just after a single-peak loading acceleration effect was occurred and after some times retardation effect was found. And eminent retardation effect was found after High-Low two-step loading.

The transition effect of crack growth due to this variable loading was occurred owing to the residual stress and the plastic zone size at the crack tip. And the behaviors of these are well explained by Elber's Crack Closure Model. Also I could find that the Wheeler's Retardation Model is a simple and appropriate theory among analysis methods of fatigue crack growth under the variable loading.

要 旨

本 研究는 單純變動荷重下에서의 疲勞龜裂成長舉動을 考察하고 解析方法을 求하고자, 鎔接構造用鋼 SWS 58을 사용하여 CT 시험편을 제작하고 간단한 하중모형을 設定하여 疲勞實驗을 行했다.

그 결과 單一過荷重作用直後에는 加速效果가 輕微하게 發生하였으며 그후 상당한 遲延效果가 發生했다. 2段重復荷重下에서는 low-high 인 경우 약간의 加速效果가 發生하나 high-low 인 경우는 상당한 遲延效果가 發生했다. 이러한 荷重變化에 따른 龜裂成長率(da/dN)은 龜裂先端의 殘留應力과 塑性領域으로 인한 相互影響때문이며, 이러한 微視的 龜裂成長舉動은 Elber의 crack

* 正會員. 漢陽大學校 工科學 教授

** 正會員. 大田開放大學 專任講師

*** 正會員. 江原大學校 工科學 助教授

closure model로 잘說明될 수 있으나 疲勞龜裂成長解析方法으로는 不充分하다. 반면 變動荷重下에서의 疲勞龜裂成長解析方法中 Wheeler의 retardation model은 간편하면서도 적합한 이론임을 알 수 있었다.

1. 序 論

疲勞龜裂의 發生·成長에 영향을 미치는 因子로는 部材內的 要因과 部材外的 要因으로 大別될 수 있으며⁽¹⁹⁾ 內的 要因으로는 部材自體의 成分이나 特性 또는 部材의 幾何學的 形態 등을 들 수 있고, 外的 要因으로는 部材가 받고 있는 荷重形態와 주위 環境 등을 들 수 있다.

일반적으로 鐵道나 橋梁 등 대부분의 土木構造物들은 매우 복잡한 荷重條件을 받는다. 1960년대 이래 이와 같은 變動荷重下에서 構造部材의 疲勞龜裂成長舉動과 疲勞壽命豫測에 대해 항공^(13,14) 및 기계분야⁽¹⁵⁾에서 많은 연구가 행해졌으며, 그결과 荷重크기의 變化가 構造部材의 疲勞龜裂成長과 疲勞壽命에 현저한 영향을 준다는 것을 알 수 있게 되었다. 그러나 아직도 疲勞龜裂成長舉動과 疲勞壽命에 대한 變動荷重의 영향은 잘 정립되어 있지 않으며 一定振幅荷重에 의해 換算이 가능하다는 前提^(6,10)가 대부분이다.

變動荷重이 作用하는 경우 疲勞龜裂成長解析方法으로는 크게 다음과 같이 나눌 수 있다.

(1) 荷重變化에 따른 相互影響(interaction effect)을 고려하지 않는 경우^(15,16).

(2) 龜裂先端의 殘留應力을 기초로 하여 相互影響을 고려하는 경우^(6,8,14,21).

(3) 等價應力廣大係數(equivalent K-Concept)를 이용하는 경우^(8,9),

(4) 特性應力廣大係數(characteristic K-Concept)를 이용하는 경우^(16,19),

本 研究에서는 構造部材의 疲勞龜裂成長에 영향을 미치는 外的 要因中에서 荷重크기의 變化와 順序에 따른 피로균열 성장거동을 살피고, 그에 따른 적절한 解析方法을 구하고자 鎔接構造用鋼 SWS 58을 사용하여 CT 시험편을 제작하고 變動荷重에 대한 간단한 荷重모형을 設定하여 피로실험을 行하였다. 또한 變動荷重下에서의 疲勞龜裂成長解析方法中 대표적인 Elber의 龜裂닫힘모델⁽⁷⁾(crack closure model)과 Wheeler의 遲延모델⁽²¹⁾(retardation model)을 비교검토하여 鎔接構造用鋼에 적합한 疲勞龜裂 成長解析方法을 밝힘으로써 變動荷重下에서의 構造部材의 疲勞龜裂成長解析의 기초자료로 제시 하고자 한다.

2. 實 驗

2-1. 使用材料 및 實驗方法

本 實驗에 使用한 鋼材는 鎔接構造用鋼 SWS 58이며 機械的 成分 및 化學的 成分은 表 2-1과 같다.

시험편 제작은 ASTM E647-78T에 의해 제작하였으며 試驗片의 형상 및 치수는 그림 2-1과 같다. 그림에서와 같이 Clip gage를 附着시켜 δ_0 에서의 荷重-變位를 기록하고자 ASTM E399-78a의 規定에 의거 試片에 홈을 만들었다. 試片의 두께는 平面變形을 충분히 만족하도록

表 2-1. 鋼材의 機械的 成分 및 化學的 成分

Mechanical Properties								
Yielding Stress (kg/mm ²)		Tension Stress (kg/mm ²)			Elongation (%)			
63		70.8			33			
Chemical Properites (%)								
C	Si	Mn	Mo	Ni	P	S	Al	V
0.14	0.29	1.3	0.15	0.12	0.02	0.007	0.033	0.038

결정하였다. 使用한 機械는 Shimadzu社 EHF-UB2570으로 電氣油壓 Servo式 疲勞試驗機이며 土木構造物에 가장 일반적인 load制御를 行하였다. 使用한 부속장치로는 5 ton用 load cell, knife式 clip gage, 荷重-變位를 기록하기 위한 X-Y recorder(Graphetec社 製作), 龜裂길이를 측정하기 위한 移動式 顯微鏡(travelling microscope; 0.02 mm 까지 측정가능)등이 있다.

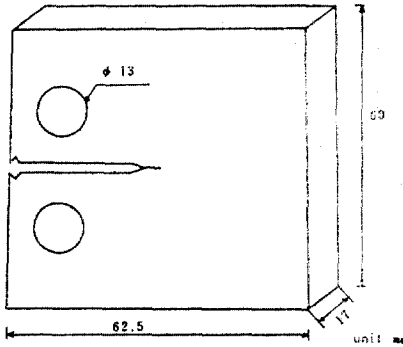


그림 2-1. CT試驗片 形狀 및 值數

實驗은 室溫에서 行하였으며, 波形은 正弦波를 cycles 數는 10~20Hz를 使用했고, 荷重은 실제 構造物에서 많이 發生하는 部分脈動($R > 0$)을 使用하였다. 또한 龜裂은 그림 2-1과 같이 ASTM E647-78T에 따라 人工 Notch를 주었으며 疲勞 豫龜裂은 實驗에서 使用한 荷重보다. 약간 크게 주어 實驗荷重으로 점차 감소시켰으며 그 길이는 $B/10^{(1),(2)}$ 이상으로 하였다. 이때 表面效果를 제거함과 동시에 龜裂길이 측정의 용

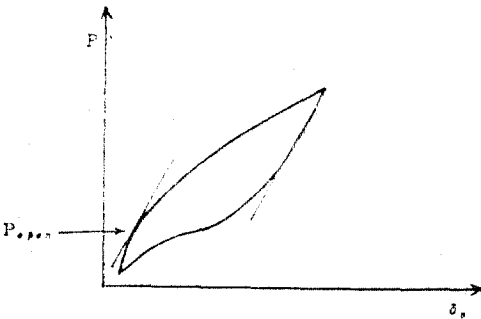


그림 2-2. P-δ 곡선상의 P_{open} 荷重

易함을 위해 試片의 表面을 #1,000 sand paper로 연마했다.

有效應力擴大係數를 計算하기 위한 龜裂단형 현상의 측정은 Elber가 고안한 荷重除荷 compliance法⁽⁷⁾으로 行하였으며 P_{open} 荷重을 찾는 方法은 그림 2-2와 같다.

2-2. 本 研究에 使用한 疲勞龜裂 解析의 理論的 背景

應力擴大係數 K_I , 應力擴大係數 變動幅 ΔK 및 平面變形 狀態의 塑性域 r_y 는 다음과 같이 계산하였다^{(1),(2),(3),(6)}.

$$K_I = \frac{Pa^{1/2}}{Bw} \left\{ 29.6 - 185.5 \left(\frac{a}{w} \right) + 655.7 \left(\frac{a}{w} \right)^2 - 1017 \left(\frac{a}{w} \right)^3 + 638.7 \left(\frac{a}{w} \right)^4 \right\} \quad (2-1)$$

$$\Delta K_I = \frac{\Delta P}{B \sqrt{w}} \left(\frac{2 + \frac{a}{w}}{1 - \frac{a}{w}} \right)^{3/2} \left\{ 0.086 + 4.46 \left(\frac{a}{w} \right) - 13.32 \left(\frac{a}{w} \right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{w} \right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{w} \right)^4 \right\} \quad (2-2)$$

$$r_y = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K}{\sigma_y} \right)^2 \quad (2-3)$$

一定振幅荷重下에서의 疲勞龜裂成長解析은 Paris-Erdogan 식^{(6),(9)}과 Eller 식⁽⁷⁾을 利用하였으며 각각 아래와 같다.

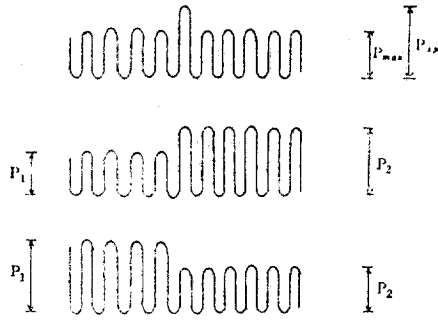
$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (2-4)$$

$$da/dN = C(\Delta K_{eff})^m \quad (2-5)$$

疲勞過程은 龜裂이 發生한 후 이것이 점차 成長하여 最終破斷에 이르는 것이며, 疲勞過程中 變動荷重이 作用하는 時期가 다르면 疲勞壽命 및 龜裂成長舉動에도 큰 影響을 미칠 것이다. 이와 같은 관점에서 變動荷重實驗은 一定振幅荷重 疲勞實驗을 바탕으로 간단한 荷重모델을 設定하고, 이들 變動荷重이 加해지는 時期를 龜裂 길이로써 명확히 制御하였다. 本研究에 使用한 荷重 모델은 그림 2-3과 같다.

荷重크기와 順序의 變化에 따른 疲勞龜裂成長率 變化의 原因은 다음과 같은 理論的 背景을 갖고 있다⁽⁴⁾.

(1) 龜裂先端의 殘留應力과 塑性域으로 因한 相互影響^{(14),(16)}



(a) 單一週荷重
(b) 2段重複荷重(low-high)
(c) 2段重複荷重(high-low)

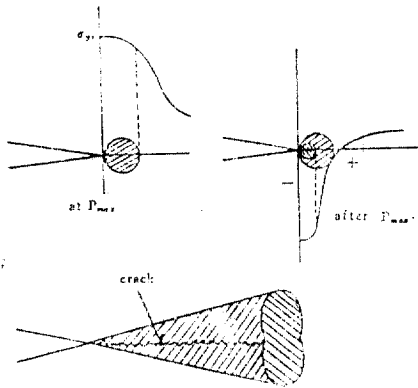
그림 2-3. 設定荷重모델

- (2) crack closure^(5,7,12)
- (3) crack tip blunting
- (4) crack tip Strain hardening

본 논문에서 사용한 變動荷重下의 피로균열성장 해석 방법은 다음과 같다.

(1) Elber의 Crack Closure Model

그림 2-4는 龜裂先端에서 荷重載荷와 除荷에 따른 殘留應력과 塑性力의 變化를 나타낸다.



(a) 殘留應力 分布
(b) 塑性域 包絡線

그림 2-4. 龜裂先端的 殘留應력과 塑性域包絡線

Elber는 그림 2-4(a)와 같이 龜裂先端的 殘留應력이 龜裂이 성장함에 따라 그림 2-4(b)와 같이 疲勞龜裂週圍에 塑性域 包絡線을 형성한다고 했다. 이 塑性域包絡線은 疲勞龜裂 주위에서

clamping 현상을 유발하며, 疲勞龜裂이 成長하기 위해서는 疲勞龜裂이 열려있는 荷重範圍가 有效하다고 하여 有效應力 σ_{eff} 와 有效應力比 U 를 다음과 같이 제안하였다⁽⁷⁾.

$$\sigma_{eff} = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (2-6)$$

$$U = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{open}}{\sigma_{max} - \sigma_{min}} \quad (2-7)$$

이러한 有效應力比를 이용함으로써 一定振幅荷重下에서의 疲勞龜裂成長解析은 자동적으로 應力比의 影響을 고려하게 되었으며 變動荷重下에서의 疲勞龜裂成長解析은 遲延效果나 加速效果를 나타낼 수 있게 되었다.

(2) Wheeler의 Retardation Model

Miner의 直線損傷理論^(14,16)에 의거하여 a_0 의 初期龜裂을 가진 部材가 임의의 하중반복회수 r 회 작용후 疲勞龜裂길이는 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$a_r = a_0 + \sum_{i=1}^r f(\Delta K_i)$$

그러나 變動荷重이 作用하는 경우 荷重크기와 順序에 따라 龜裂成長 거동은 커다란 차이를 보이며, 특히 過荷重 작용후 遲延效果는 상당히 크게 나타나는 것으로 研究 報告되고 있다. Wheeler는 이러한 遲延效果를 疲勞龜裂先端的 塑性域의 變化에 起因한다고 하여, 變動荷重下에서 疲勞龜裂成長을 遲延係數 C_P 를 이용하여 다음과 같이 나타냈다⁽²¹⁾.

$$a_r = a_0 + \sum_{i=1}^r C_{P_i}(\Delta K_i) \quad (2-9)$$

$$C_P = \begin{cases} \frac{1}{\left(\frac{r_y}{a_{SV} + r_{pl}} - a\right)^M} & a + r_y \geq a_{SV} + r_{pl} \\ \frac{1}{\left(\frac{r_y}{a_{SV} + r_{pl}} - a\right)^M} & a + r_y < a_{SV} + r_{pl} \end{cases} \quad (2-10)$$

研究結果에 의하면 Wheeler의 retardation model은 spectrum荷重, 單一週荷重 등에 잘 적용되나 특히 spectrum荷重에 잘 적용되고 spectrum荷重下에서의 鋼材의 $M=1.3$, titanium의 $M=3.4$ 이고, 單一週荷重下에서는 過荷重의 크기에 따라 $M=6.75 \sim 15.5$ 로 研究發表하였다.

3. 實驗結果 및 考察

本 實驗에 사용한 試驗片은 다음과 같이 分類

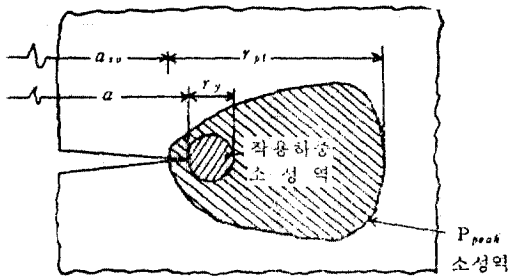


그림 2-5. 龜裂先端的 塑性域

表 3-1. 試驗片 分類

荷重形態	試片分類	P_{max} (kg)	P_{min} (kg)	P_{SP} (kg)	P_1 (kg)	P_2 (kg)
一定荷重	CA1	1,300	100			
	CA2	1,500	100			
	CA3	1,800	100			
單 一 過 荷 重	SP1	1,300	100	1,700		
	SP2	1,300	100	1,700		
	SP3	1,300	100	2,000		
	SP4	1,300	100	2,200		
2 段 重 復 荷 重	LH1		100		1,300	1,800
	LH2		100		1,300	1,500
	HL1		100		1,800	1,300
	HL2		100		1,500	1,300

하였다.

3-1. 一定振幅荷重下에서의 疲勞實驗

一定振幅荷重下에서의 疲勞龜裂成長 解析方法으로는 Paris-Erdogan 식(식 2-4)과 Elber 식(식 2-5)을 이용하였다.

그림 3-1은 각 하중에 따른 da/dN - a 의 관계를 나타낸 것인데 이것을 考察하면 荷重幅이 增加함에 따라 da/dN 이 전체적으로 增加함을 알 수 있다. 또 어느 限界龜裂길이(약 30 mm)까지

는 da/dN 이 거의 一定하다가 갑자기 增加함을 나타내는데 이는 ligament의 감소로 龜裂先端的의 拘束減少를 가져와 龜裂成長을 止하지 못하여 急性脆性破壞 現狀을 나타내는 것으로 疲勞龜裂成長過程中 第3段階 區間に 해당되기 때문이다(10, 25, 26).

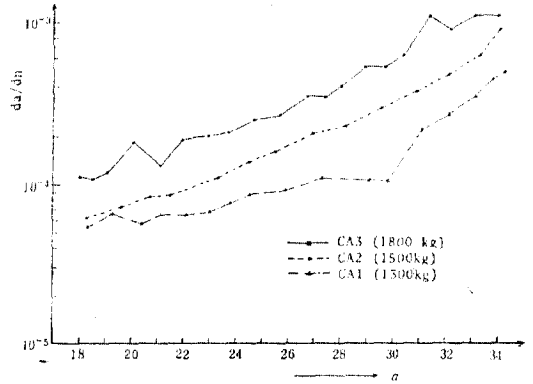


그림 3-1. 一定荷重下에서의 da/dN 변화

一定振幅荷重下에서의 疲勞實驗結果를 Paris-Erdogan 식과 Elber 식에 적용하고 각각 回歸分析하여 나타낸 것이 그림 3-2 이고 각각의 m 및 C 값을 나타낸 것이 表 3-2 이다.

表 3-2 로 부터 Paris-Erdogan 식과 Elber 식에 의해 분석된 結果를 高찰하면 全體적으로 Elber 식에 의한 m 값이 더 작음을 알 수 있다. 이는 Elber 식에 있어서 作用荷重 全部가 龜裂을 成長시키는데 사용된 것이 아니고 crack closure 현상으로 인해 單純 均열을 여는데 使用되고 남은 荷重(ΔP_{eff})이 龜裂을 成長시키는데 사용되었기 故로 사료된다(23, 25).

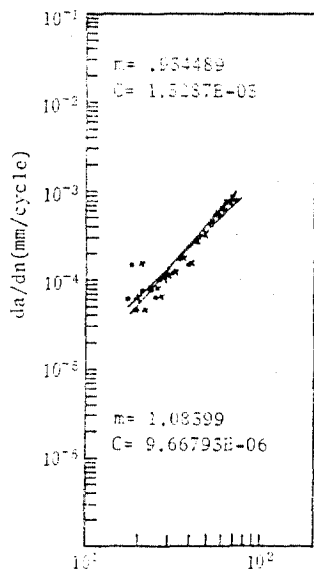
3-2. 單純變動荷重下에서의 疲勞龜裂 成長擧動

(1) 單一過荷重下에서의 疲勞實驗

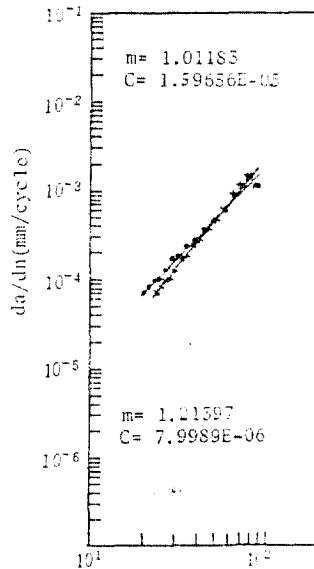
그림 3-3은 單一過荷重下에서의 da/dN 變化

表 3-2. 一定振幅荷重下에서 疲勞實驗 結果

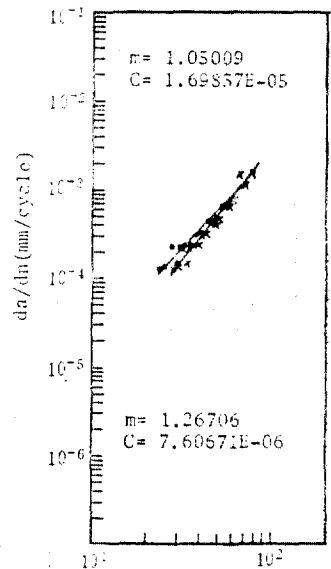
시 験 片	P_{min} / P_{max}	Paris-Erdogan		Elber	
		c	m	c	m
CA1	100/1,300	9.668×10^{-6}	1.084	1.529×10^{-5}	0.934
CA2	100/1,500	7.999×10^{-6}	1.214	1.597×10^{-5}	1.012
CA3	100/1,800	7.807×10^{-6}	1.268	1.698×10^{-5}	1.050



DELTA K & Keff (MPa·mE.5)
(a)



DELTA K & Keff (MPa·mE.5)
(b)



DELTA K & Keff (MPa·mE.5)
(c)

(a) CA1 (b) CA2 (c) CA3

그림 3-2. 一定振幅荷重下에서의 疲労龜裂成長

表 3-3. 單一過荷重 作用後의 da/dN 變化

시 편	a_{SP} (mm)	P_{SP}	$K(\text{kg} \cdot \text{mm}^{\frac{3}{2}})$		$r_p(\text{mm})$		$a^*(\text{mm})$
			K_{max}	K_{SP}	r_{max}	r_{pl}	
SP1	22.03	1700	87.88	114.92	0.103	0.176	0.2
SP2	22.04	1700	87.92	114.98	0.103	0.176	0.15
SP3	22.04	2000	87.92	135.27	0.103	0.244	0.3
SP4	21.99	2200	87.69	148.40	0.103	0.294	0.35

를 나타내는데, 單一過荷重이 作用한 直後 SP2와 SP3 試片에 약간의 加速效果가 나타난후 현저한 遲延效果가 나타났으며, SP1과 SP4 시편에는 過荷重 直後 遲延效果가 나타났다.

表 4-3은 單一過荷重에 의한 加速效果와 遲延效果를 圖表化한 것인데, 고찰하면 K 의 變化($K_{SP} - K_{max}$)의 增加에 따라 遲延效果가 증대함을 알 수 있고 affected zone(a^*) 또한 증가함을 알 수 있다.

또 表 3-3에서 遲延效果가 나타난 affected zone(a^*)과 過荷重에 의한 塑性域의 크기(r_{pl})

가 거의 일치함을 알 수 있는데, 이로부터 遲延效果는 過荷重에 의한 龜裂先端의 殘留應力과 塑性域으로 인한 相互影響 때문인 것을 알 수 있다.

單一過荷重 作用直後 SP2와 SP3 試驗片에서의 加速效果는 單一過荷重의 作用으로 그림 3-4와 같이 hysteresis를 有發시켜 P_{open} 荷重의 減少를 가져온 結果이다. 또 da/dN 의 遲延效果는 加速效果後 나타났는데, 이는 過荷重 作用後 龜裂先端이 過荷重에 의한 塑性域(r_{pl})을 어느 정도 통과해야 그 영향을 받기 때문인 것으로

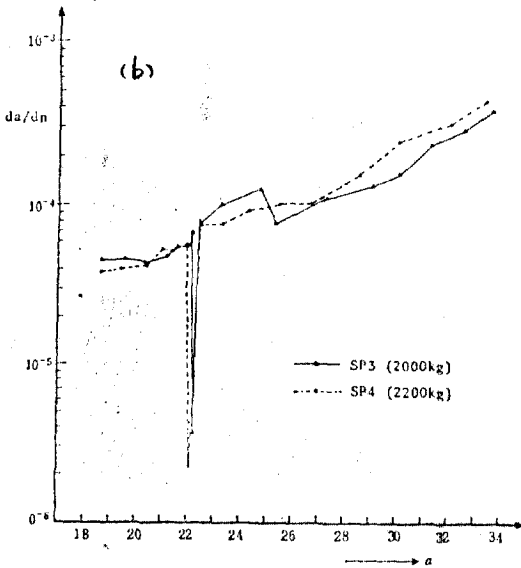
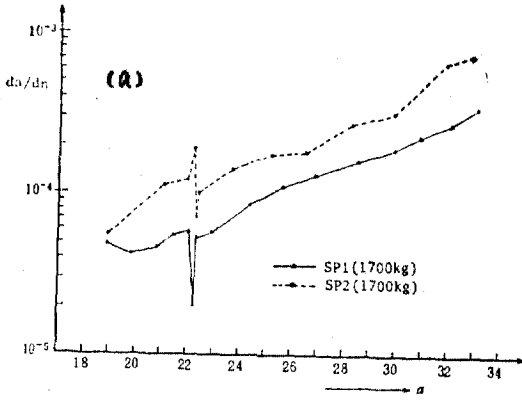


그림 3-3. 單一過荷重下에서의 da/dN 변화

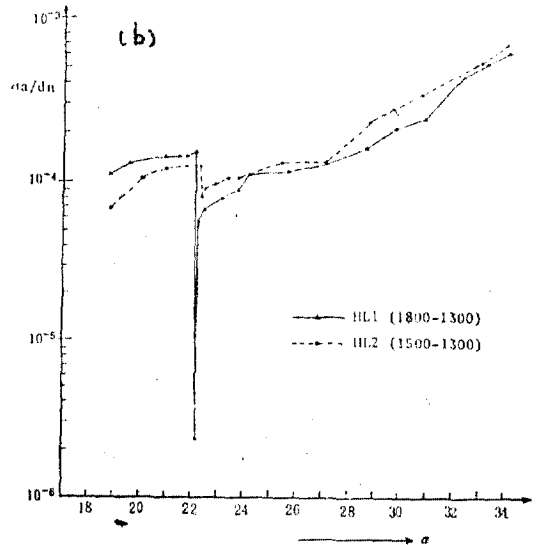
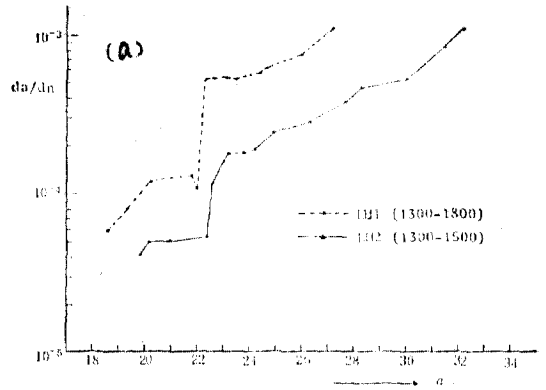


그림 3-5. 2段重復荷重下에서의 da/dN 변화

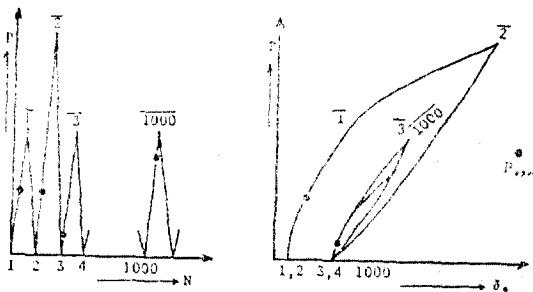


그림 3-4. 單一過荷重作用後 P_{open} 변화

사료된다.

(2) 2段重復荷重下에서의 疲勞實驗

그림 3-5는 2段重復 low-high 와 high-low 荷重下에서의 da/dN 變化를 나타낸 것이요 表 3-4

는 荷重變化 直後의 影響을 圖表化한 것이다.

그림 3-5의 low-high 荷重 下에서의 da/dN 은 荷重變化後 全體的인 增加를 가져왔는데, 이는 荷重의 增加로 인한 ΔK 의 增加를 가져온 결과이다. da/dN 증가량을 분석해보면 LH1 試片이 LH2 試片에 비해서 變動荷重幅이 크므로 da/dN 증가량도 커짐을 알 수 있다. 또 high-low 荷重下에서 da/dN 變化는 荷重變化 直後變化 幅이 커짐에 따라 遲延效果가 현저히 크게 나타남을 알 수 있다.

또 그림 3-3(b)와 그림 3-5(b)의 SP1 과 HL1 을 비교 검토해 볼 때 變動荷重幅이 SP1 의 경우가 더 큼에도 불구하고 HL1 에서 遲延效果가 더 크게 나타남을 알 수 있는데 이는 그림 2-4(b)

表 3-4. 2 段重復荷重 作用後の da/dN 變化

시	편	a_{SP} (mm)	P (kg)		K (kg·mm ^{-3/2})		r_j (mm)		a^* (mm)
			P_1	P_2	K_1	K_2	r_{P1}	r_{P2}	
LH1		22.00	1300	1800	87.74	121.48	0.103	0.197	—
LH2		22.54	1300	1500	90.30	104.20	0.108	0.145	—
HL1		22.10	1800	1300	122.13	88.20	0.199	0.104	0.3
HL2		22.25	1500	1300	105.59	88.91	0.141	0.105	0.1

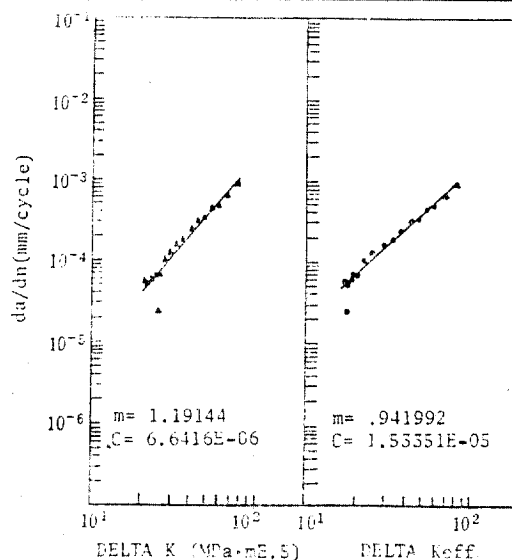
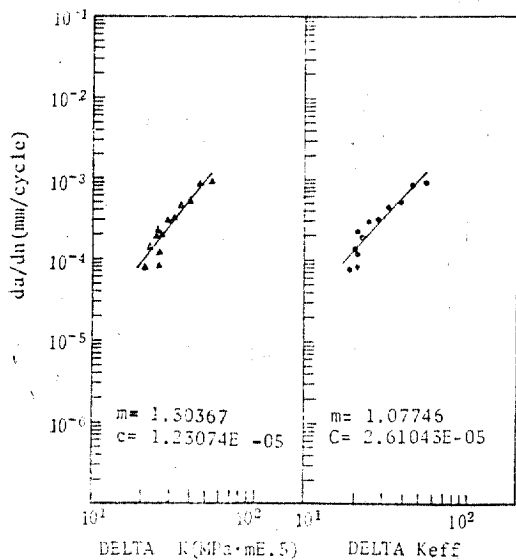


그림 3-6. 單一過荷重下에서 疲勞龜裂成長

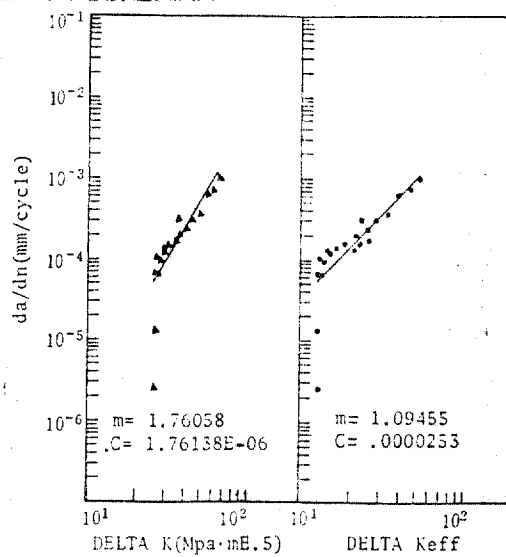
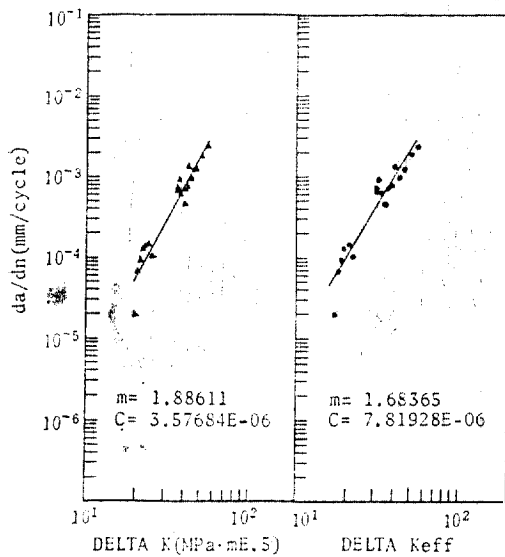


그림 3-7. 2 段重復荷重下에서 疲勞龜裂成長

로 해석될 수 있다. 즉, high-low 荷重은 荷重變化前까지 커다란 荷重으로 인한 큰 塑性域形成을 가져와 全體的인 塑性域 包絡線이 크게 形成되어 Crack Closure 效果가 單一過荷重의 것보다 더 크기 때문이다.

이 사실로부터 荷重變化에 따른 遲延效果는 龜裂先端的 塑性域에 의한 영향中 Crack Closure 現象 때문인 것을 알 수 있다.

3-3. 單純變動荷重下에서의 疲勞龜裂 成長解析

(1) Elber의 Crack Closure Model

그림 3-4는 單一過荷重 作用後 P_{open} 荷重變化의 한 예이다.

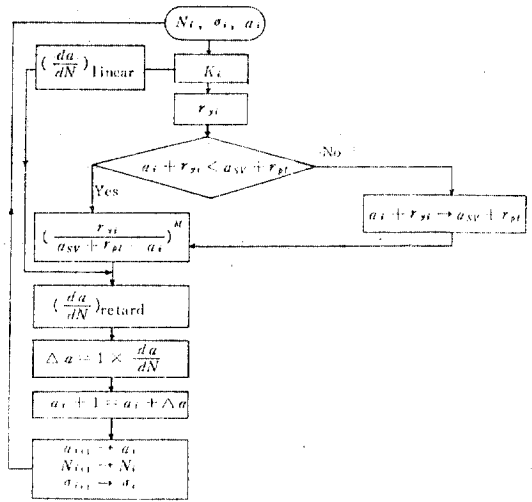


그림 3-10. 遲延係數의 계산과정

表 3-5. Wheeler의 retardation model에 의한 疲勞龜裂 成長 解析結果

試片	C_p	M
SP1	0.203	3.82
SP2	0.152	4.63
SP3	0.109	5.10
SP4	0.041	6.46
HL1	0.0016	12.07
HL2	0.228	2.01

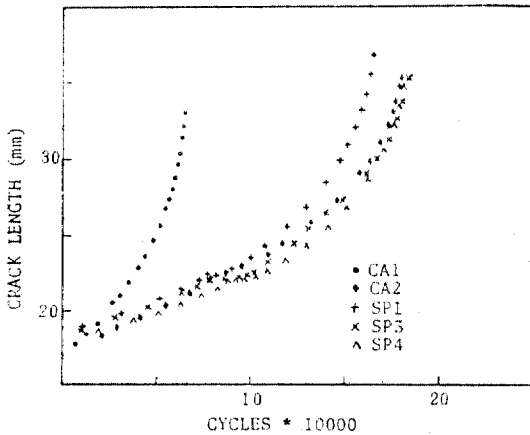


그림 3-8. 單一過荷重에 의한 遲延效果

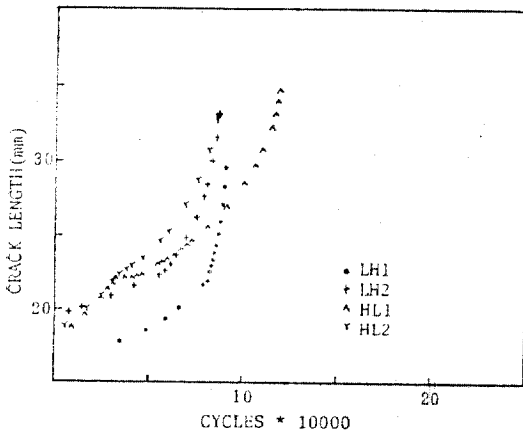


그림 3-9. 2段重複荷重下에서 遲延效果

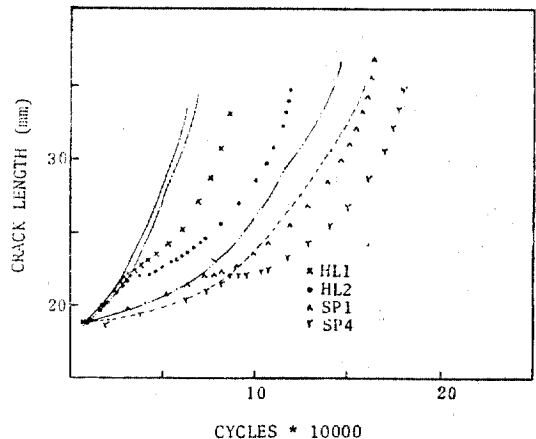


그림 3-11. Miner의 直線損傷理論과 遲延效果

그림과 같이 龜裂先端의 塑性域의 變化로 인한 P_{open} 荷重의 變化는 有效應力係數 U 의 變化를 초래해 결국 變動荷重下에서의 疲勞龜裂成長率(da/dN)變化를 나타낼 수 있다.

그림 3-6 과 3-7 은 單一過荷重과 2 段重復荷重下에서 疲勞龜裂成長을 $da/dN-\Delta K$ 와 $da/dN-\Delta K_{eff}$ 로 나타낸 것이다.

이를 고찰하면 荷重變化에 의한 疲勞龜裂成長舉動(특히 遲延效果)은 Elber 의 crack closure model로 잘 나타 낼 수 있지만 때로는 그 분산이 상당히 큼을 알 수 있다. 이는 變動荷重作用後 P_{open} 荷重의 定量的 測定이 어렵기 때문이다.

따라서 變動荷重下에서의 疲勞龜裂成長解析을 Elber 의 crack closure model로 이용하려 한다면 變動荷重作用後의 P_{open} 荷重 變化를 定量的으로 測定할 수 있는 方法이나 式의 개발이 必要하다고 하겠다.

(2) Wheeler 의 Retardation Model

그림 3-8 은 一定振幅荷重과 單一過荷重下에서의 疲勞龜裂成長過程을 나타낸 것이다. 이를 고찰하면 過荷重의 크기에 따라 遲延效果가 增大함을 알 수 있는데 이는 前節(3-2(1))에서 고찰한 바와 잘 一致한다. 또한 그림 3-9 는 2 段重復荷重下에서의 疲勞龜裂成長舉動을 나타내는 것으로 high-low 荷重作用時에도 遲延效果가 나타난다. 이러한 遲延效果를 遲延係數 C_P 를 이용해서 나타낼 수 있는데 그 解析過程은 그림 3-10 과 같다.

表 3-5 는 單一過荷重과 2 段重復 high-low 荷重의 疲勞實驗結果를 그림 3-10 의 계산과정을 이용해 해석한 결과이다.

또한 그림 3-11 은 表 3-5 의 結果를 이용해 Miner 의 直線損傷理論에 따라 遲延效果가 發生치 않았을 경우의 疲勞龜裂成長過程을 계산하여 나타낸 것이다.

計算된 結果와 實驗值와의 비교 고찰 결과 동일한 荷重變化에 대해 單一過荷重의 경우보다 2 段重復 high-low 荷重作用時 더 큰 遲延效果를 나타내는데 이 또한 前節에서 고찰한 바와 잘 一致 한다.

4. 結 論

單一過荷重과 2 段重復荷重을 받는 鉚接構造用鋼 SWS 58 의 疲勞龜裂成長을 考察한 바 다음과 같은 結果를 얻을 수 있었다.

(1) 荷重變化에 따른 龜裂成長率(da/dN)變化는 龜裂先端의 殘留應력과 塑性力으로 인한 相互影響때문인 것을 알 수 있었다.

(2) 單一過荷重作用後 遲延效果가 發生하며 過荷重의 크기가 커짐에 따라 遲延效果는 增大함을 알 수 있었다.

(3) 2 段重復 low-high 荷重作用後 da/dN 는 相互影響을 받지 않으나 high-low 荷重作用後 da/dN 은 상호영향으로 현저한 遲延效果가 發生한다.

(4) Elber 의 crack closure 모델은 變動荷重作用後 疲勞龜裂成長舉動을 밝히는데 적합한 이론이나, 全體의인 疲勞龜裂成長解析을 위해서는 變動荷重作用後 P_{open} 荷重의 變化를 定量的으로 나타낼 수 있는 方法이나 式의 개발이 필요하다고 하겠다.

(5) 반면, Wheel 의 retardation model 은 變動荷重作用後 疲勞龜裂成長解析을 함에 있어서 간편하면서도 적합한 이론임을 알 수 있었다.

感謝의 말

본 연구를 수행하는데 있어, 시편제작에 도움을 주신 대전계방대 박종현 교수님과 철도전문대 이종득 교수님, 그리고 실험수행에 도움을 주신 강원대 박제선, 정영화 교수님께 감사드립니다.

參 考 文 獻

1. ASTM (American Society for Testing and Materials), "Standard Test Method for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Material", *ASTM E399-78a*, pp. 580~601.
2. ASTM (American Society for Testing and Materials), "Tentative Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates above 10^{-8} m/cycles", *ASTM E647-78T*, pp. 747~761.

3. Barsom, J.M., "Fatigue Crack Growth under Variable-Amplitude Loading in Variations Bridge Steels", *ASTM STP 595*, 1975, pp. 217~235.
4. Bernard, P.J., Lindley, T.C., and Richards, C.E., "Mechanism of Overload Retardation During Fatigue Crack Growth", *ASTM STP 595*, 1975, pp. 78~100.
5. Chanani, G.R. and Mays, B.J., "Observation of Crack-Closure Behavior after Single Overload Cycles in 7075-T6 Single-Edge-Notched Specimens", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 9, pp. 65~73, 1977.
6. David Broek, "*Elementary Engineering Fracture Mechanics*", Martinus Nijhoff Pub., pp. 250~453, 1982.
7. Elber, W., "The Significance of Fatigue Crack Closure", *ASTM STP 486*, pp. 230~242, 1971.
8. Elber, W., "Equivalent Constant-Amplitude Concept for Crack Growth under Spectrum Loading", *ASTM STP 595*, pp. 236~250, 1975.
9. Erdogan, F., "Crack Propagation Theories", *NASA CR-901*.
10. Fuchs, H.O., and Stephens, R.L., "*Metal Fatigue in Engineering*", John Wiley & Sons, pp. 56~216, 1980.
11. Kenturo Yamada, "Fatigue Crack Growth Rates of Structural Steel under Constant and Variable Amplitude Block Loading", *Proc. of JSCE Structural Engr.*, Vol. 2, No. 2, 1985.
12. Kurihara, M., Katoh, A., and Kahawara, M., "Effect of Stress Ratio and Step Loading on Fatigue Crack Propagation Rate", *JSMS (Japan Society of Materials Science)*, Materials Research Series Vol. 1, pp. 217~233, 1985.
13. Liu, H.W., and Corten, H.T., "Fatigue Damage under Varying Stress Amplitudes", *NASA TND-647*, 1960.
14. Manson, S.S., Freche, J.C., and Ensign, C.R., Series Vol. 1, 217~233, 1985.
15. Mirko Klesnil, "*Fatigue of Metallic Materials*", Elsevier Scientific Pub., pp. 110~226, 1980.
16. Osgood, Carl C., "*Fatigue Design*", Wiley, pp. 45~169, 1970.
17. Rolfe, S.T., and Barsom, J.M., "*Fracture and Fatigue Control in Structures*", Prentic Hall, pp. 268~291, 1977.
18. Schijve, J., "Four Lecture on Fatigue Crack Growth", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 11, pp. 167~221, 1979.
19. Schijve, J., "Some Formulas for the Crack Opening Stress Level", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 14, pp. 461~465, 1981.
20. Schijve, J., "Observation on the Prediction of Fatigue Crack Growth Propagation under Variable-Amplitude Loading", *ASTM STP 595*, pp. 3~26, 1975.
21. Wheeler, O.E., "Spectrum Loading and Crack Growth" *Tran. of ASME. Jour. of Basic Engineering*, pp. 181~186, 1972.
22. 朴濟善, 鄭榮和, 張東一, "鋼構造物の 鋼構造物の 銲接連結部の 疲勞強度에 관한 研究(II)", 대한토목학회논문집, 제 6 권 제 1 호, 1986. 3.
23. 張東一, "실동하중의 작용을 받는 구조용강재의 피로강도(I)", 대한토목학회지, 제 22 권 제 2 호, 1974. 6.
24. 張東一, "실동하중의 작용을 받는 구조용강재의 피로강도(II)", 대한토목학회지, 제 25 권 제 2 호, 1977. 6.
25. 張東一, 朴鎔杰, 慶甲秀, "鐵道軌條의 銲接連結部에 대한 疲勞龜裂成長", 대한토목학회논문집, 제 6 권 제 3 호, 1986. 9.
26. 張東一, 李鍾得, 鄭榮和, "鋼鐵道橋의 等價疲勞被害에 관한 研究", 대한토목학회논문집, 제 2 권 제 4 호, 1982, 12.

(接受 : 1987. 8. 31)