論文 10-2-17

철도레일의 파괴 및 피로에 대한 안전도평가 및 잔류수명계산

The Evaluation of Safety and Remaining Life on Fracture and Fatigue in Rail Steel

박 용 걸*
Yong-Gul Park

ABSTRACT

The fatigue failure of rail is a principal source of derailment accidents. The reduction of fatigue failures can be achieved by intensive track maintenance and periodic safety assessments for the railway.

For the safety assessments, it is required to have more accurate knowledge for fatigue behavior such as the crack initiation, propagation, crack growth rate and the remaining service life in rail. In this paper, the mean stress effects for the fatigue behavior of rail steel are studied. For this study, the fatigue test is conducted and some equations for fatigue evaluation are applied and compared.

From the results, we can see that the fatigue crack growth rate is the more increased as the mean stress is the more increased, the mean stress effect is represented well by the combination of stress intensity factor range and maximum stress intensity factor and Crooker and Range's equation represented by ΔK, K_{max} is the best fit for fatigue evaluation and safety assessment of rail.

1. 서 론

공용중에 있는 철도 및 지하철에 있어 레일은 여객 및 화물수송의 안전과 신뢰를 확보하는데 가장 중요한 요소중의 하나이다. 근간에 걸쳐 열차의 반복하중에 의한 레일의 파손사고가 빈번히 발생하여 운행에 지장을 초래함으로서 레일의 파손에 대한 원인조사 및 대책강구가 시급히 요망되고 있다. 특히, 현재 추진중인 고속철도의 열차하중을 받는 철도레일은 210-300Km/hr라는 가혹한 환경하에서 운용되어야 하므로 레일 손상에 대한 대책마련이 시급한 실정이다.

레일의 피로손상은 재료상의 결함과 공용중 열차하중에 의한 레일 두부의 전압피로, 용접부, 복

* 서울산업대학교 건설구조공학과

부 및 저부의 피로파괴 그리고 부식피로 등이 있다[15].

레일의 피로파괴거동은 파괴역학을 도입하여 명확히 규명되어야 하며, 특히 피로에 의한 파괴해석시 전체 피로수명에 영향을 주는 다양한 파라미터들을 어떻게 해석에 도입해야 하는가 하는 문제에 귀착된다.

파괴역학에 있어 재료의 파괴특성을 표시하는 대표적인 인자는 응력확대계수이며, 이는 응력, 균열길이 그리고 재료형상 등의 함수로 표시되는데, 같은 재료에 있어서는 주로 응력크기의 함수가 된다. 또한, 피로파괴거동은 반복되는 하중에 의해 발생되므로 응력 대신 응력범위의 함수로 표현되며, 따라서 응력확대계수도 응력확대계수 범위로 표현된다. 그런데 응력크기의 절대값이 고려되지 않은 응력범위값이 도입됨으로 해서 나타날 수 있는 오차를 줄이기 위해서는 이를 표현하는 평균응력, 최대응력 등이 고려되어야 한다.

본 연구에서는 레일강의 피로파괴 특성에 관한 연구의 일환으로 피로시험을 실시하여 피로균열성장거동에 대한 평균응력 및 최대응력확대계수의 효과를 규명하고, 피로균열성장식들의 적합성을 비교, 검토하여 최적의 식을 구하며, 이를 이용하여 피로균열성장속도와 피로수명 등을 계산함으로써 레일의 교체주기 결정 등 피로해석과 안전도평가시스템 개발의 기초자료로 제시코져 한다.

2. 피로해석이론

선형파괴역학에서 균열선단의 응력장 해석은 대부분 응력확대계수에 의해서 표현되며, 일정한 응력범위를 갖는 기본적인 피로균열성장의 상태에서 응력확대계수범위는 식(1)과 같다[10,11].

$$\Delta K=\Delta\sigma\sqrt{\pi a}\cdot F(a) \quad \cdots\cdots (1)$$

여기서, F(a)는 시편의 형상계수이다.

피로균열성장율은 ΔK의 함수로 표현되며 Paris-Erdogan의 식이 가장 많이 이용된다[3].

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

여기서 C, m은 재료상수이다.

또한 응력비(R)의 영향을 고려한 Forman의 식[4]

$$da/dN=\frac{\Delta K^m}{(1-R)K_c-\Delta K} \quad \cdots\cdots (3)$$

최대응력확대계수(K_{max})를 고려한 Robert-Erdogan의 식[5]

$$da/dN=C\left(K_{max}\cdot\frac{\Delta K}{2}\right)^P \quad \cdots\cdots (4)$$

Crooker-Lange의 식[6]

$$da/dN=C(\Delta K\cdot K_{max})^{m/2} \quad \cdots\cdots (5)$$

河合의 식[7]

$$da/dN=C\left(\frac{\Delta K}{Kc-Km}\right)^m \quad \cdots\cdots (6)$$

응력확대계수하한계(K_{th})를 고려한 Rosenfied-McEvily의 식[12]

$$da/dN=C(\Delta K^2-\Delta K_{th}^2)\left\{1+\frac{(1-R)\Delta K}{(1-R)K_c-\Delta K}\right\} \quad \cdots\cdots (7)$$

등 많은 식들이 제안되어 왔다. 위 (3)~(7)식들은 다양한 방법으로 응력크기의 절대값을 고려한 식들이다.

본 논문에서는 이 식들을 레일강의 피로해석에 적용하고 비교, 검토하여 그 적합성 여부를 판단하고, 이를 철도레일의 피로균열성장율의 계산, 피로수명 예측 등 피로해석 및 안전도평가에 도입한다.

3. 실 험

본 실험의 사용강재는 60Kg급 레일강으로 화학적성분 및 기계적성질은 Table 1, Table 2와 같다[14].

Table 1 Chemical compositions of test rail steel

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Sn	Ti
0.61	0.22	0.76	0.007	0.003	0.006	0.02	0.06	0.003

Table 2 Mechanical properties of test rail steel

Yield strength (Mpa)	Tensile strength (Mpa)	Elongation (%)	Young's modulus (Mpa)	Vicker's hardness
469	890	11.3	272220	24.0

시험편은 ASTM E647-78T 규정에 의한 CT (Compact Tension)시험편으로 레일강 내부의 위치와 방향에 따라 3가지로 채취하였으며(Fig. 2),

그중 LV방향 시편은 종하중 수직균열, VL방향은 수직하중 종균열, SL방향은 횡하중 종균열을 조사하기 위한 것으로 그 형상 및 치수는 Fig. 1과 같다[9].

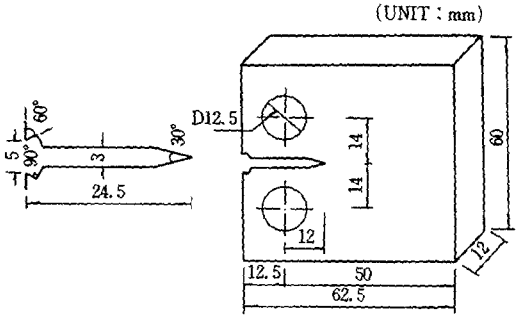

Fig. 1 Compact tension specimen

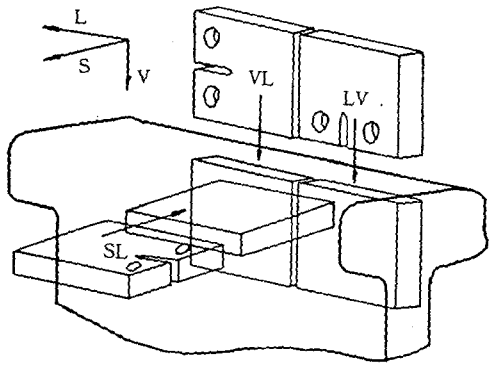

Fig. 2 Orientation of CT specimen

피로실험은 유압식 피로시험기(Schimazu사 EH-F-UB25-70, Cap. 30t)를 이용하였으며, 부속기기는 균열길이를 조사하기 위한 이동식 현미경(Travelling microscope : 0.02mm 측정가능)과 로드셀(5ton, 25ton) 그리고 실험측정 및 데이타 기록을 자동처리하기 위한 Personal computer 등이다.

실험조건으로는 실온(15~20℃)상태 하에서, 제어방법은 하중제어를, 응력파는 정현파를 사용하였으며, 진동수는 균열부위에 따라 10~15Hz로 주었다.

시편균열은 ASTM E647-78T 규정에 따라 잔류응력 등의 영향을 제거하고 실제와 같은 균열상태를 만들기 위해 시편두께의 1/10이상의 예비균열을 주었다. 평균응력은 5.39KN(경우 A), 6.86KN(경우 B) 그리고 8.33KN(경우 C)의 3가지로 실시하였고 최대하중은 공히 P_{max}=9.8KN이다. 각 시험편별 실험조건은 Table 3과 같다.

Table 3 Test conditions for fatigue test
(*Orientation—S : Sideway, L : Longitudinal, V : Vertical)

Specimen No.	Main Test			Loading	Crack
	P_{max}(KN)	P_{min}(KN)	P_{mean}(KN)		
SL1	9.8	0.98	5.39	S	L
SL7	9.8	6.86	8.33		
LV1	9.8	0.98	5.39	L	V
LV4	9.8	3.92	6.86		
LV4	9.8	6.86	8.33		
VL1	9.8	0.98	5.39	V	L
VL7	9.8	6.86	8.33		

균열성장속도 da/dN은 ASTM E647-91의 할선법(Secant method)에 의해서 다음과 같이 구한다[10].

$$(da/dN)_a = \frac{(a_{i+1}-a_i)}{(N_{i+1}-N_i)} \quad \cdots\cdots (8)$$

CT시험편에 대한 ΔK값은 ASTM E647-91로부터 다음과 같다[10].

$$\Delta K = \Delta P \frac{(2+a)}{B\sqrt{W(1-a)^2}}(0.886+4.64\alpha - 13.32\alpha^2+14.723\alpha^3-5.60\alpha^4) \quad \cdots\cdots (9)$$

여기서, $\alpha = a/W$이고 $\alpha > 0.2$에서만 적용할 수 있다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 피로균열성장거동에 대한 평균응력의 효과

레일강의 피로균열 성장거동에 미치는 평균응력의 효과를 규명하기 위해 CT시험편을 제작하여 최대하중을 9.8KN으로 하여 평균응력이 각각 5.39KN(경우 A), 6.86KN(경우 B) 그리고 8.33KN(경우 C)인 경우에 대해 일정진폭피로시험을 실시하여 분석결과를 Table 4에 나타냈다.

대상 레일의 시편채취 방향인 SL방향, LV방향 그리고 VL방향을 갖는 CT시험편에 대한 피로균

열성장속도와 응력확대계수와 관계를 Fig. 3에서 Fig. 5까지 나타냈다.

Table 4 Fatigue test results for mean stresses

Specimen	Case	P_{max}(KN)	P_{mean}(KN)	m	C
SL1	A	9.8	5.39	3.925	1.48E-12
SL7	C		8.33	4.689	3.07E-12
LV1	A	9.8	5.39	4.937	3.19E-14
LV4	B		6.86	4.869	2.05E-13
LV7	C		8.33	4.811	1.36E-12
VL1	A	9.8	5.39	3.546	1.02E-10
VL7	C		8.33	4.573	1.42E-13

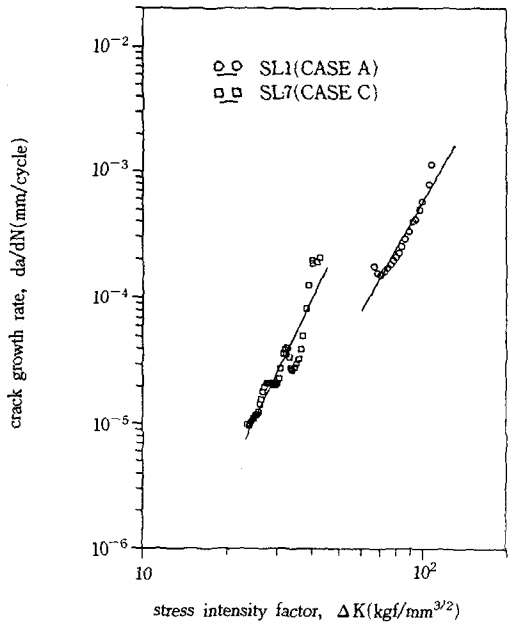

Fig. 3 da/dN-ΔK of CT specimen in VL orientation for mean stresses

Fig. 3에 나타난 SL방향의 피로시험 결과로부터 평균응력이 커질수록 피로균열성장 곡선의 기울기 m 값은 커지는 경향을 나타내고 있으며, Fig. 5에 나타낸 VL방향에 대해서도 동일한 경향을 나타내고 있다. 반면 LV방향에 대한 Fig. 4에서는 평균응력이 커짐에도 불구하고 기울기 m값은 약간 작아지거나 거의 변하지 않고 있고, 그 편

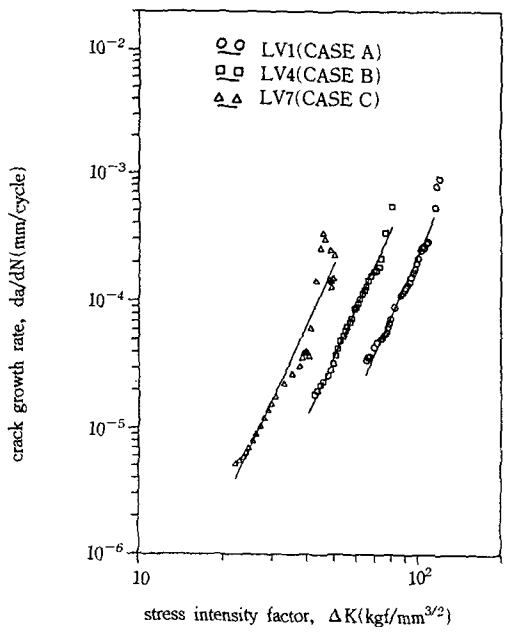

Fig. 4 da/dN-ΔK of CT specimen in SL orientation for mean stresses

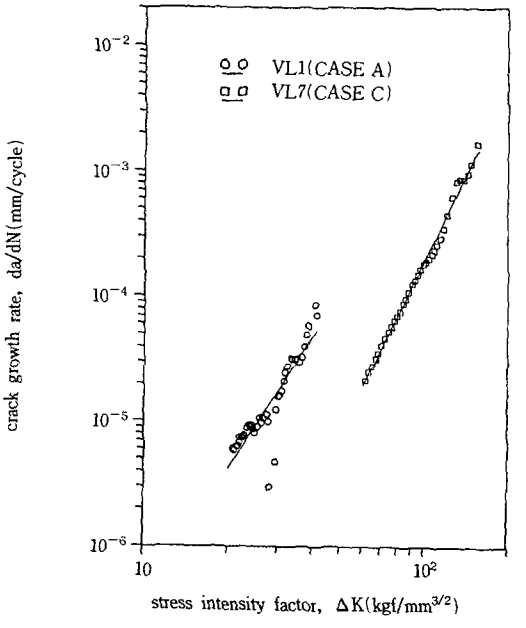

Fig. 5 da/dN-ΔK of CT specimen in LV orientation for mean stresses

차도 대단히 작게 나타나고 있다. 한편, 절편 C값은 SL방향 및 LV방향에서 동일한 경향이 나타나며, 평균응력이 커질수록 C값이 커지는 경향을 나타내고 있다.

VL방향에서는 평균응력 변화에 대한 절편 C값의 편차가 상당히 크게 나타나고 있으며, Case A의 경우 다른 data에 비해 큰차를 보이고 있다. 이는 시편 재료의 내재결함으로 인한 것으로 사료되며, data로서의 신뢰성이 적은 것으로 판단된다.

이상의 결과로 부터 피로균열성장곡선의 기울기 m과 절편 C의 관계는 완전한 일관성을 나타내고 있지는 않으나, 대체적으로 평균응력이 커짐에 따라 피로균열성장율이 빨라짐을 알 수 있다.

결국 피로균열성장율은 피로균열성장곡선의 기울기 m과 절편 C의 조합에 의해 표현되므로 대상 레일의 각 방향에 대한 피로균열성장 data를 취합하여 도식화하면 이와 같은 경향이 더욱 확실해진다(Fig. 6).

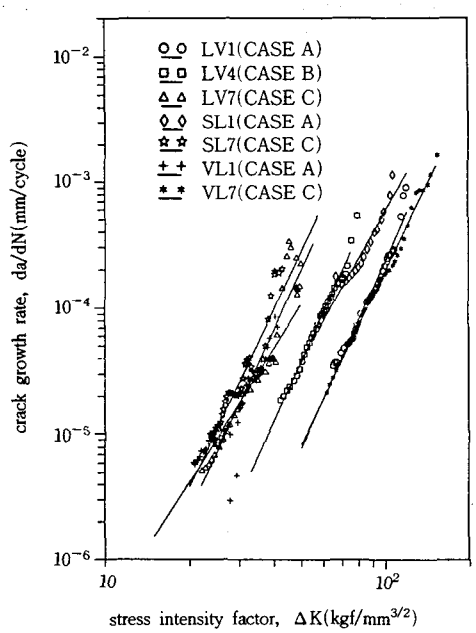

Fig. 6 da/dN-ΔK of CT specimen in all orientation for mean stresses

Fig. 6에서 레일의 재질 및 균열진행 방향에 따라 다소의 차이는 있으나 전반적으로 평균응력의 변화에 대한 기울기 m값의 변화는 거의 없으며, 반면 평균응력이 커짐에 따라 절편 C값은 증가함을 알 수 있다. 결국 파단시까지의 피로균열성장율은 주로 절편 C값에 의해 결정되며, 피로균열성장곡선의 기울기 m과 절편 C의 조합에 의한 결과로부터 평균응력이 증가함에 따라 피로균열성장율이 증가함을 확인할 수 있다.

실제 레일강의 경우 하중 및 균열의 방향은 대부분 종하중 수직균열(LV)의 상태이고, Fig. 6로 부터 LV방향의 피로시험 데이타의 편차가 적으므로 LV방향의 피로시험결과가 레일강의 피로균열성장거동에 대한 평균응력의 영향을 잘 나타내는 것으로 판단된다.

4.2 피로균열성장거동에 대한 최대응력확대계수의 영향

평균응력의 변화에 따른 피로균열성장거동을 최대응력확대계수 K_{max}를 고려하여 평가하였다. 피로시험시 평균응력이 피로균열성장에 미치는 효과를 적절히 나타낸 LV방향의 결과를 이용하여 da/dN-K_{max}곡선을 Fig. 7에 나타냈다.

이를 Fig. 6과 비교하면 평균응력이 A인 경우와 B인 경우, 거의 겹치는 경향이 나타나고 있어 피로균열성장곡선의 절편 C값이 근사적으로 일치하고 있으며 평균응력이 제일 큰 C의 경우엔 더 낮은 균열진전속도를 나타내고 있다. 한편 응력확대계수범위 ΔK를 최대응력확대계수 K_{max}로 나타내면 평균응력이 변화함에 따라 응력확대계수범위가 작아지며, 피로균열성장곡선의 기울기 m값은 변하지 않음을 알 수 있다. 따라서 평균응력의 변화에 따른 피로균열성장곡선의 절편 C값의 편차는 적어지고 평균응력이 커짐에 따라 최대응력확대계수 K_{max}는 피로균열성장곡선에 강하게 영향을 주고 있어 피로균열성장속도에 대한 평균응력의 효과는 ΔK와 K_{max}의 조합된 함수로 나타냄이 타당하다고 판단된다.

4.3 ΔK 및 K_{max}를 고려한 피로균열성장의 평가

평균응력의 효과가 적절하게 고려된 LV방향의 분석결과를 기제안된 피로균열성장식에 적용하여

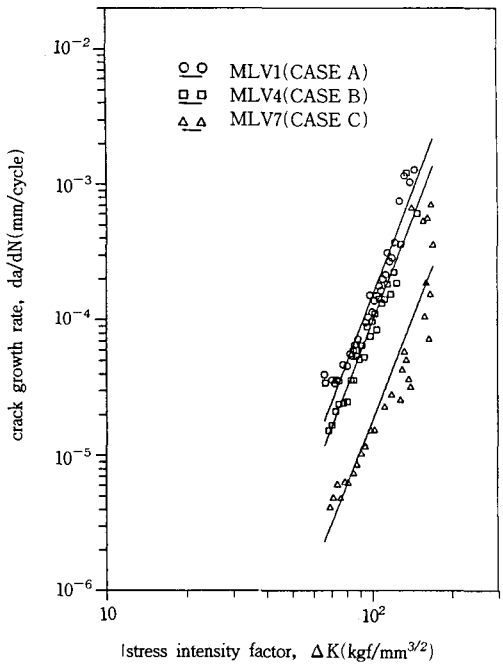

Fig. 7 da/dN-K_{max} for mean stresses

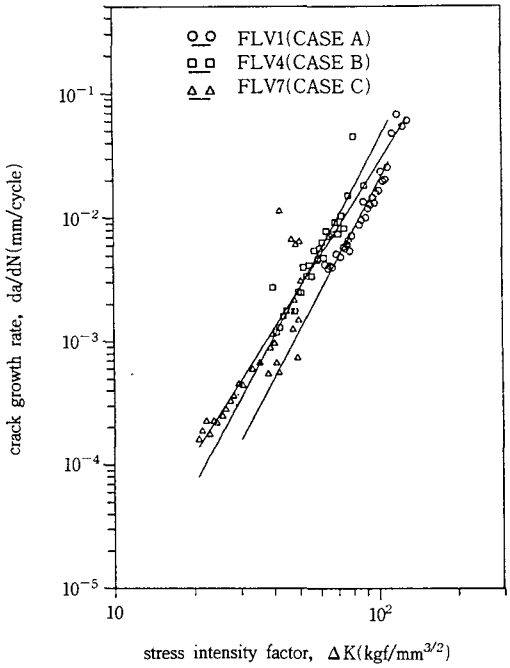

Fig. 8 da/dN-ΔK proposed by forman

그 결과를 Table 5와 Fig. 8에서 Fig. 11까지 나타냈으며, 각 제안식에 의한 분석결과로부터 재료상수인 기울기 m과 절편 C의 표준편차를 구하여 Table 6에 나타냈다.

Table 5 m and C for each case

	Case	da/dN	m	C
Test Data	A	Secant method	4.937	3.19E-14
	B		4.869	2.05E-13
	C		4.811	1.36E-12
Paris-Erdogan	A	$C(\Delta K)^m$	5.053	1.10E-14
	B		5.002	9.72E-15
	C		4.939	2.46E-15
Forman	A	$\frac{\Delta K^m}{(1-R)K_c-\Delta K}$	3.996	1.98E-10
	B		3.971	4.76E-10
	C		3.349	5.46E-9
Robert-Erdogan	A	$C\left(K_{max}\cdot\frac{\Delta K}{2}\right)$	2.526	8.99E-14
	B		2.501	1.98E-13
	C		2.469	2.66E-13
河 合	A	$C\left(\frac{\Delta K}{K_c-K_m}\right)^m$	3.673	7.92E-7
	B		3.264	1.08E-6
	C		2.440	3.95E-7
Crooker-Lange	A	$C(\Delta K\cdot K_{max})^{m/2}$	5.070	5.56E-14
	B		4.990	5.49E-14
	C		4.400	4.80E-14

Fig. 8은 Forman이 제안한 식(3)에 의한 피로균열성장곡선으로 Table 5, 6으로 부터 절편 C값과 기울기 m값이 피로실험결과와 다소 차이를 나타내며 실험 data의 편차도 다소 큰 편이다.

Fig. 9는 Robert & Erdogan의 식(4)에 의한 피로균열성장곡선으로 $K_{max}(\Delta K/2)$의 log함수로 표

Table 6 Standard deviation of C and m values

	da/dN	m	S_m	C	S_C
Test Data	–	4.872	0.063	5.323E-13	7.22E-13
Paris-Erdogan	$C(\Delta K)^m$	4.998	0.057	7.73E-15	4.61E-15
–	$C(K_{max})^m$	5.002	0.054	2.84E-15	1.47E-15
Forman	$\frac{\Delta K^m}{(1-R)K_c-\Delta K}$	3.772	0.367	2.04E-9	3.00E-9
Robert-Erdogan	$C\left(K_{max}\cdot\frac{\Delta K}{2}\right)$	2.499	0.029	1.85E-13	8.88E-14
河 合	$C\left(\frac{\Delta K}{K_c-K_m}\right)^m$	3.126	0.628	7.55E-7	3.44E-7
Crooker-Lange	$C(\Delta K\cdot K_{max})^{m/2}$	4.820	0.366	5.28E-14	4.20E-15

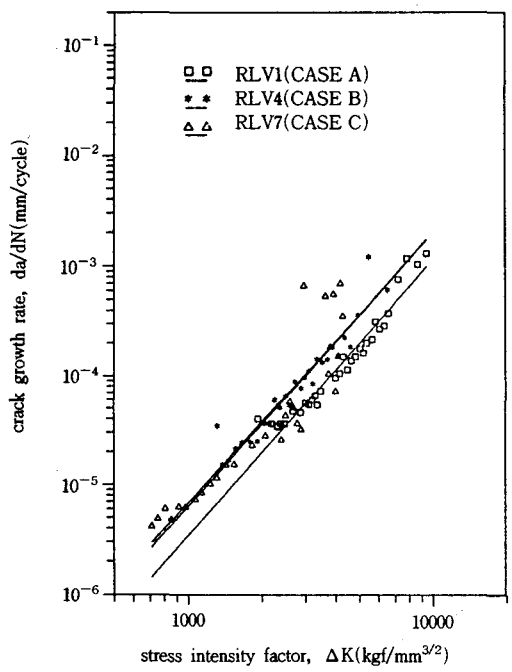

Fig. 9 da/dN-ΔK proposed by roberts & erdogan

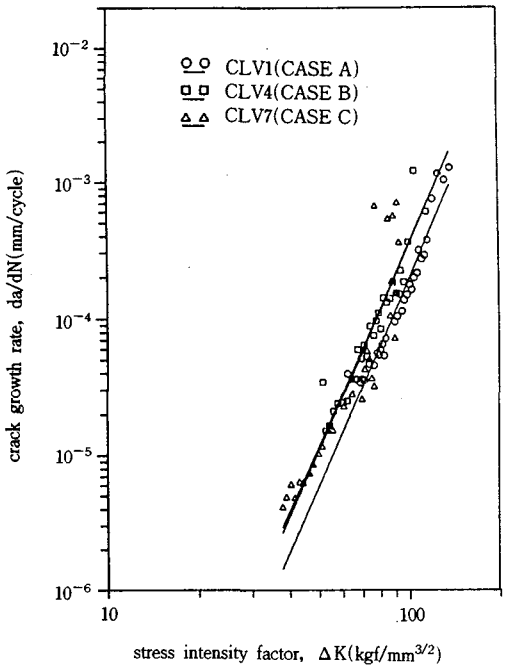

Fig. 11 da/dN-ΔK proposed by crooker & lange

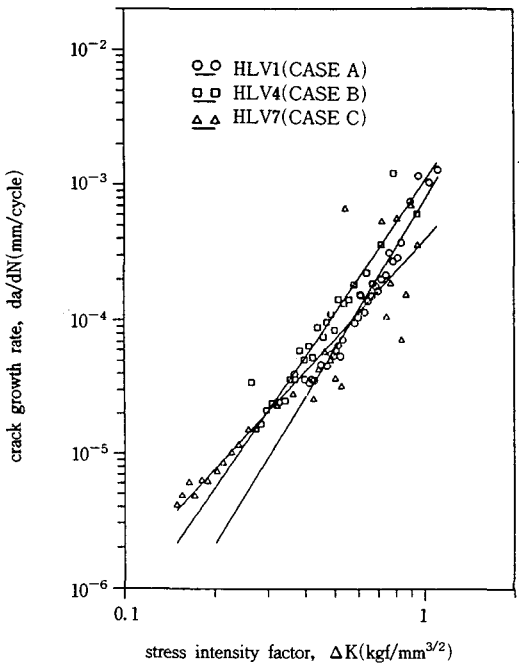

Fig. 10 da/dN-ΔK proposed by 河合

현됨으로 인해 응력확대계수의 영향이 크게 확대되고 있으며, Table 5와 6으로 부터 절편 C의 값은 피로실험결과와 상당히 근사한 값을 가지나, 기울기 m값은 큰 차이를 보인다.

Fig. 10은 하합의 식(6)에 의한 피로균열성장곡선으로 Table 5, 6으로 부터 절편 C의 값과 기울기 m의 값이 피로시험결과와 상당한 차이를 나타내며, 기울기 m값과 절편 C값의 data에 대한 편차도 상당히 크다.

Fig. 11은 Crooker와 Lange의 식(5)에 의한 피로균열성장곡선으로 Table 5, 6으로 부터 기울기 m의 값은 피로시험결과와 가장 근사한 값을 보이며, 절편 C의 값도 근사한 값을 나타낸다.

이상의 결과로 부터, 레일강의 피로시험결과에 대해 Paris-Erdogan의 최대응력확대계수를 고려한 식과 Crooker-Lange의 식이 잘 부합됨을 알 수 있으며, 이중 Crooker-Lange의 식이 좀더 근사한 값을 나타내므로 레일강의 피로균열성장거동의 해석에 유용하게 적용할 수 있다.

4.4 피로수명 예측

피로수명은 주로 적용응력범위의 함수로 표현되며 본 논문에서는 레일강의 피로에 대한 평균응력의 영향을 가장 적절하게 고려한 Crooker와 Lange의 균열성장식을 적분하여 초기균열길이에서 파단시까지의 균열성장에 필요한 하중반복횟수, 즉 피로수명을 다음과 같이 계산한다.

$$da/dN=C(\Delta K\cdot K_{max})^{m/2}$$
$$=C(\Delta\sigma\cdot\sqrt{\pi a}\cdot K_{max})^{m/2} \quad \cdots\cdots (10)$$

$$N_f=\int_{ao}^{ac} A^{-1}a^{-m/4}da$$
$$=\frac{4(a_c^{1-m/4}-a_0^{1-m/4})}{(4-m)\cdot C(K_{max}\cdot\Delta\sigma\cdot\pi^{1/2})^{m/2}} \quad \cdots\cdots (11)$$

여기서 A는 $C(\Delta\sigma\cdot\sqrt{\pi}\cdot K_{max})^{m/2}$이고, 이 관계식은 m≠4일 때 성립하며, Table 4로부터 m≠4이므로 윗식은 성립한다. 이로부터 기지의 값을 이용하여 응력범위와 피로수명에 대한 함수관계(S-N)가 구해지며, 피로시험으로부터도 각 응력범위값에 대한 피로수명 관계가 Fig. 12와 같이 구해진다.

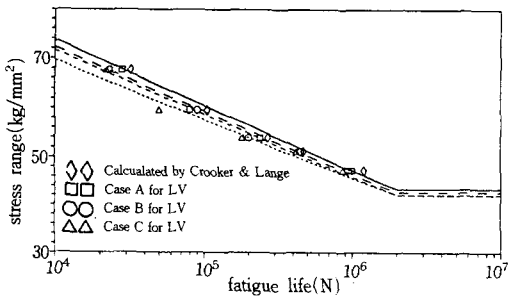

Fig. 12 S-N curves for mean stresses

위 그림으로부터 식(10)에 의해 구해진 곡선과 실험에 의한 곡선은 평행하나 Crooker와 Lange의 식에 의한 피로수명이 실험에 의한 것보다 다소 긴 것으로 나타나며, 응력의 최대값이 일정할 때 평균응력의 값이 클수록 피로수명이 짧아진다는 것을 알 수 있다. 이는 본 논문에서 고려한 평균응력과 최대응력확대계수의 영향 이외에 또다른 요인에 의한 것으로 추정되며, 추후 이러한 영향의 원인이 밝혀져야 할 것이다. 또한, 시험에 의한 피로수명 값과 식(10)에 의해 산정된 값이 근사적으로 잘 부합하며, 따라서 Crooker와 Lange의 식이 피로균열성장률 및 피로수명의 산정에 적합한 수단으로써 레일강의 피로해석 및 안전도평가에 유용한 것으로 판단된다.

5. 결 론

철도레일의 파괴 및 피로해석과 안전도평가를 위하여 레일강에 대한 피로시험을 실시하고, 평균응력, 최대응력확대계수 등의 영향을 고려한 몇가지 피로균열성장식을 적용, 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 철도레일의 피로거동에서 평균응력이 커짐에 따라 피로균열성장율이 증가하며, 이는 주로 피로균열성장곡선의 기울기 m값 보다는 절편 C값에 의해 결정된다.
2) 평균응력의 효과는 응력확대계수범위(ΔK)와 최대응력확대계수(K_{max})와의 조합에 의해 표현되는 것이 적합하며, 레일강의 피로시험결과로부터 ΔK와 K_{max}의 조합에 의해 표현된 Crooker와 Lange의 식이 평균응력의 효과를 고려하여 레일강의 피로균열성장 거동을 적절히 표현함을 알 수 있다.
3) Crooker와 Lange식에 의한 피로수명계산은 평균응력의 크기가 작을때 잘 부합되며, 따라서 과응력상태가 아닌 경우 이식에 의한 피로해석 및 안전도평가는 적합한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1) Coenraad Esvald, Modern railway track, NS Permanent Way Dept., pp. 133-206, 1989.
2) S. L. Grassie, Mechanics and Fatigue in Wheel/Rail contact, Elsevier, pp. 329-384, 1990.
3) P. C. Paris, F. Erdogan, A critical analysis of crack propagation laws, J. Basic Engr. Trans. ASME 85, p. 528, 1963.
4) R. G. Forman, V. E. Keareny, R. M. Engle, Numerical analysis of crack propagation in cyclic loaded structure, J. Basic Engr. Trans. ASME 89, p. 459, 1967.
5) R. Roberts, F. Erdogan, The effect of mean

stress on fatigue crack propagation in plate under extension and bending, J. Basic Engr. Trans. ASEM 89, p. 885, 1967.
6) T. W. Crooker, E. A. Lange, Fatigue crack propagation in a high-strength steel under constant cyclic load with variable mean loads, Naval Research Lab, Rep. 6805, 1968.
7) 河合, 末男, 疲勞き裂の傳は擧動に及ほ平均應力および應力履歷の影響, 材料, 弟43卷, pp. 1157-1165, 1977.
8) P. R. V. Evans, N. B. Owen, B. E. Mopkins, Fatigue crack growth and sudden fracture in rail steel, J. Iron Steel Inst. 208, p. 560, 1970.
9) ASTM, Standard test method for plane strain fracture toughness of metallic material, ASTM E399-78a, pp. 580-601.
10) S. T. Rolfe, J. M. Barsom, Fracture and fatigue control in structures, Prentice Hall, pp. 268-291, 1977.
11) D. Broek, Elementary Engineering Fracture Mechanics, Martinus Nijhoff, pp. 250-453, 1982.
12) 박용걸, 철도궤도의 용접연결부에 대한 피로균열성장, 대한토목학회논문집 Vol. 6, No. 3, 1986.
13) 장동일 외, 강철도교의 등가피로피해에 관한 연구, 대한토목학회지 Vol. 22, No. 4, 1974.
14) 철도교 표준시방서, 철도청.
15) 이종득, 철도공학, 노해출판사, pp. 82-97, 1989.