

KS50N Rail 용접부의 피로균열 성장거동

A Study for Fatigue Crack Propagation Behavior of KS50N Rail Steel under Welding Line

* 박 제 용 Park Jae Yong

*지 용 찬 Jee Yong Chan

** 김 진 성 Kim Jin Sung

***정 경 회 Chung Kung Hee

ABSTRACT

This thesis studied to evaluate the fatigue behavior and propagation of rail steel under welding line.

Test of crack growth was performed by all member of rail under constant amplitude loading at the structures laboratory in Hongik University. The effect of the following parameters with initiated crack length on the bottom edge of rail were studied. Here, fracture mechanics mode is opening mode. and Testing Material is KS50N Rail. From analysis and experimented result on the three point bending in the lab, This paper presented a effect of crack growth , shape and remaining service life. Further more, according to the variable crack length , variable section and the ratio of section the fatigue behavior and propagation were studied.

* 홍익대학교 대학원(석사)

** 인덕대학 토목환경과 교수

*** 한국철도대학 시설토목과 교수

1. 서 론

현 철도의 레일은 노후화 되어 파손되는 현상이 나타나고 있으며 국철뿐만 아니라 지하철의 레일에서 열차의 반복하중에 의한 파단 사고가 일어나고 있어 레일의 유지 관리에 대한 문제점이 제시되고 있다.

특히 레일의 피로균열은 열차 탈선의 주요한 원인이 되므로 이러한 사고를 방지하기 위해서는 레일강의 피로균열 진전 거동의 자료에 근거한 최적의 피로균열이 검사기관을 결정할 수 있는 레일의 파손모델을 개발하는 것이 필요하다.

또한 레일의 수명을 평가 할 수 있는 정량적인 평가 방법이 요구되어지고 있으며 안전한 선로설계 및 체계적인 철도 운행체계를 설정하는 것이 필요하여 그 동안 많은 연구가 시행되어져 왔다. 따라서 정량적으로 실전 레일의 수명을 분석함에 있어 날카로운 균열이나 결함에 대한 피로수명의 대부분이 피로 균열의 성장에 소요되고 있어 레일강의 거동에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다.

실제 구조물 설계에 적용함에 있어서는 여러 가지의 복잡하고 다양한 인자들이 피로수명에 영향을 미치므로 실질적인 피로특성의 평가나 분석이 이루어지지 않고 있다. 특히 대형구조물에서도 피로 파손에 대한 파괴 역학적 거동이 명확하게 규명되어 있지 않고 또한 피로 거동에 대한 자료의 부족으로 인해 신뢰도가 높은 잔존 수명 예측이나 설계가 이루어지지 않음에 원인이 있다.

뿐만 아니라 현장의 궤도 레일에서 균열을 육안으로 발견하기란 매우 어렵다 따라서 사고위험을 안고 있다. 본 연구는 국내에서 사용되고 있는 KS50N-Rail을 공시재료로 사용하여 피로 파괴 인성과 거동을 평가하고, 균열을 지닌 실물 레일의 균열특성을 분석하였다. 특히 레일저부의 모서리에서 균열이 이미 존재하였을 경우 단면

형상에 따른 균열성장 과정을 분석하고 초기 균열길이와 단면의 특성에 따른 레일의 수명을 분석하고자 한다.

뿐만 아니라 철도 산업이 현대화되면서 철도궤도는 장대 레일화 되어 졌기 때문에 레일의 용접부위가 생기면서 용접부위에 취약성으로 인해 레일의 수명이 단축되어진다. 본 논문에서는 레일의 용접부에 정량을 평가하고 특히 실제 구조물 인 레일을 실험 분석하여 수명을 분석함으로써 사고를 사전에 예방할 수 있도록 하여 사회에 이바지할 수 있도록 함에 있다.

레일강에 휨의 반복하중이 작용할 경우 재질의 성질은 변화되고 그리고 임의 한도까지 피로가 진행되면 부재는 파단을 일으킨다. 또 부재는 완전무결한 것은 없으며 다소 내부결함, 또는 원자배열의 난점,(불균질성)을 내포하고 있다, 더욱이 레일 용접부에서 요철이 발생 되었을 때는 열차 이동하중에 의해 피로파괴가 초래되어 피로수명은 단축된다.

레일 용접부의 수명은 휨 응력과 하중의 반복회수의 관계를 구하기 종축에 응력 진폭(최대응력)S를 취하고 횡축에는 피로 파단 하기까지의 반복횟수 N를 취하여 S-N 선도를 실험에 구하였다. 최종적으로 국내운영실정(운행속도, 년 평균 주행횟수, 주행속도)에 알맞는 사용 년 수 및 안정성 단면에 따른 균열의 특성을 분석하고자 한다.

2. 피로균열성장이론

피로균열 선단에서 응력은 아래 식과 같이 표현되어진다

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad \text{---- [1]}$$

여기서 σ_{ij} 는 임의방향의 응력이다

$$(i=x,y,z \quad j=x,y,z)$$

r, θ 는 균열 선단에서의 극좌표 이고

$f_{ij}(\theta)$ 는 미지의 함수이다.

균열선단에서 응력장은 응력확대계수 K 로 표현 할 수 있으며 함수 $f_{ij}(\theta)$ 을 제외하고는 모든 하중모드에 적용된다 이때 응력확대계수 K 는 다음과 같이 표현된다.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right) \quad \text{---- [2]}$$

여기서 a : 균열길이, σ 는 고칭응력이고 함수 $f\left(\frac{a}{w}\right)$ 는 단면의 형상을 나타낸다 피로하중의 일회 반복당 균열 성장비는 아래와 같이 도함수로 표현된다

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K) \quad \text{--- [4]}$$

여기서 ΔK 는 응력확대계수폭이며 $\Delta \sigma$ 을 윗 식 [2] 에 대입하여 얻을 수 있다. 또 이를 log-log 함수로 표현하면 이는 직선으로 나타내지며 아래와 같이 나타내진다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad \text{--- [5]}$$

여기서 C, m 은 재료상수이다.

윗 식은 피로균열성장을 나타내는데 응력비R의 영향을 고려하고 있지 않다. 일반적으로 피로균열성장은 $\left(\frac{da}{dN}\right)$

일회 반복주기에 있어 최대응력, 응력비(R)에 좌우되기 때문에(문헌 1,2) K 값이 임계치(K_c)에 접근시 파손됨을 감안하여 응력비R을 고려하면 식은 아래와 같다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R)K_c - \Delta K} = C \frac{\Delta K^m}{K_c - K_{max}} \quad \text{----- [6]}$$

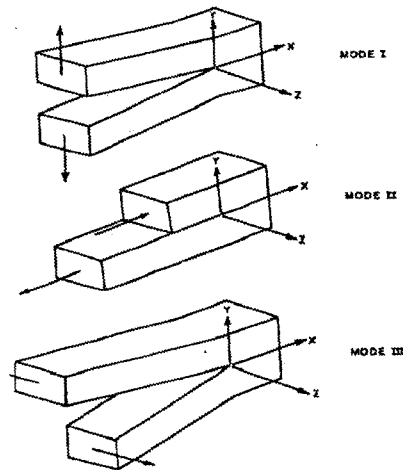
따라서 피로균열성장비는 응력강도 K_{max} 이 K_c 와 같게될 때 무한대로됨을 의미한다.

또한 응력강도 하한계 K_{th} 이하일 때 균열 성장비는 0에 접근함을 나타낸다.

여기서 제시하고자 하는 것은 작용시킨 반복하중의 진폭과 초기균열의 길이와 깊이, 방향에 따라 a-N선도들을 다양하게 얻을 수 있으며 또 이들의 변수를 고려하여 균열성장을 고찰하고자 하는 것이다.

3. 모드 I, II 에서 응력 및 변위

Irwin은 아래그림3.1과 같이 3 가지 주 하중 방식인 기본적 변형 형식에 모드 I, 모드 II, 모드 III 에 따라 균열첨단 응력 분포의 해를 제시하였다.



THE THREE BASIC MODES OF CRACK-SURFACE DISPLACEMENTS

그림 3.1 기본변형모드

각 모드의 응력분포 및 변위는 다음과 같다.

모드 I

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$

----- [7]

모드 II

$$\sigma_x = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$\sigma_y = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right]$$

$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$

----- [8]

모드 III

$$\tau_{xy} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \left[-\sin \frac{\theta}{2} \right]$$

$\cdot \left[-\sin \frac{\theta}{2} \right]$ --- [9]

4. 실험실 시험

4.1 공시재료의 성질

실험실에 사용된 재료는 1980년도에 제작되어 한국철도 연구소의 협조 하에 피로 실험실에서 진행 되어져 왔다. 실험재료인 레일강은 경부선 철도에 사용되고 있는 50kg급 50N-RAIL로서 국내에서 현재 사용하고 레일을 실험 대상 공시재료로 하였다. 사용된 공시재료의 화학적 성분 및 기계적 성질은 표 4.1, 4.2와 같다.

한편 대상 레일로부터 기계적 성질을 파악하고 피로시험을 위한 시험편을 제작함에 있어 레일의 실물을 시편으로하여 그림 4.2와 같다.

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
Thermi t-Weld	0.668	0.246	0.827	0.006	0.0103	0.002	0.026
Gas-P ressure Weld	0.678	0.261	0.784	0.004	0.0118	0.006	0.103

표4.1 레일강 용접부의 화학적성질(%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
Thermi t-Weld	0.668	0.246	0.827	0.006	0.0103	0.002	0.026
Gas-P ressure Weld	0.678	0.261	0.784	0.004	0.0118	0.006	0.103

표4.2 레일강 용접부의 기계적 성질

4.2 레일의 정적 휨 시험

레일의 구조해석의 결과의 확인과 실제의 레일부재에 대한 취약부위인 용접부의 응력 분포를 파악하기 위하여 일본 철도총련에서는 각각의 용접방법에 따라 휨강도, 휨량, 피로강도등 시험을 시행, 시험부재로 50KgN 레일을 선정하였고 그림 4.1 와 같이 실시, 시험하중은 레일 중심축에 수직으로 Welding Line 을따라 하중을 가하였다

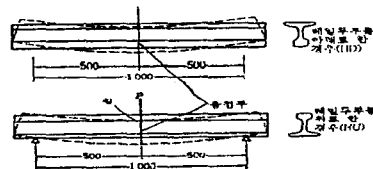


그림4.1 레일 강도시험

시험시행 결과 표4.3과 같이 결과를

발표 하였다

표4.3 KS50N Rail의 강도비교

	모재	가스 압접	테르 미트
휨강도	135kg/cm ²	127 t	126 t
휨량	80 mm	56 mm	39mm
인장강도	91kg/cm ²	86kg/cm ²	75kg/cm ²
피로강도	36kg/cm ²	32kg/cm ²	28kg/cm ²

4.3 실물 용접부레일의 시험시편의
제원과 특성

본 시험은 실제궤도 구조물의레일을 실험하여 레일의 특성을 분석 하고자 한다 레일은 그림4.2와 같이50N-Rail을 용접부(테르미트, 가스압접)와 모재를 구분 하여 용접부의폭은 25 ± 1mm로 하였다 또한 그림4.1과 같이 재하의span은 100cm 이다 하중은 중앙에 작용하였고, 초기균열의깊이도 다음과같이 변수로 하여 실험 하여, 균열의방향, 속도, 전진과정, 균열의 특성을 분석 하고자 한다.

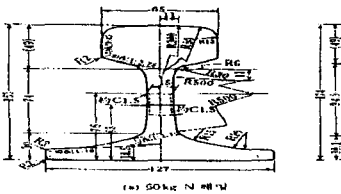
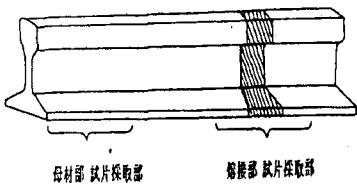


그림4.2 시편의 단면형상

4.4 피로실험장치 및 방법

본 실험에서 사용한 피로시험기는 Instron사에서 제작한 형식번호 100t급 유압 서머식 시험기로써 피로시험뿐만 아니라 정적인장시험도 가능한 기능을 갖고 있다. 본 시험기기는 stress제어, strain제어, 그리고 stroke(±50)제어가 가능하며, 본 실험에서는 피로시험시 많이 사용되고 있는 stress제어를 사용하였다.

레일 실제의 시험편에 의한 피로균열 성장 시험에서 균열길이의 측정은20배율의 Travelling Microscope 에 의한 육안 측정방법으로 균열길이를 측정하였다.

최기 균열크기 및 하중은 다음과 같다.

재하 하중크기 : 30t

재하 하중형태 :정규 반복하중

초기균열길이;a1=6.17mm

a2=10.17mm

a3=10.33mm

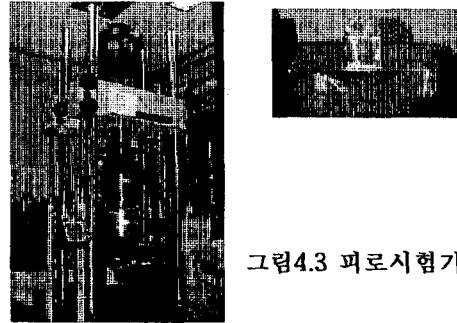


그림4.3 피로시험기기

4.5 피로강도시험 (S-N 선도)

하중이나 응력또는 변위가 반복함으로써 부재의 손상이나 파괴가 일어나는현상으로서 구조물 부재가 피로로 인하여 파괴될 때까지 작용응력, 하중 의 반복회수를 피로수명 이라고 또한 이 관계를 나타낸 곡선이 S-N 선도 이며 종축에는 최대응력범위(크기)가 표시되며 횡축에는 반복회수를 나타낸다 본 시험에서 테르미트, 가스 압접 용접부의 경우를 고려하고자 한다

관계식은 $S = CN^{-m}$ 이고 C, m 는 재료상수로써 시험치에서 찾을 수 있다

- * a - N 선도
- * 균열의 방향
- * 균열면의 파면 형태

6. 결론.

실험결과 분석 및 고찰

① KS50N 레일강에서 테르미트용접부의 S-N 선도 및 피로강도를 도출 하였다

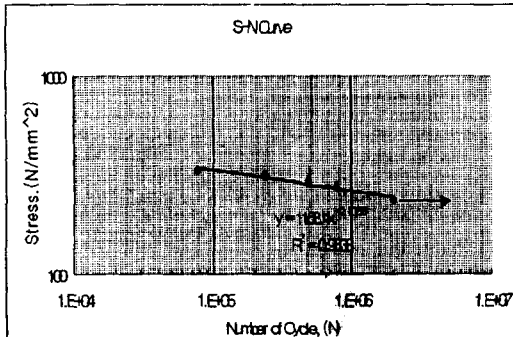
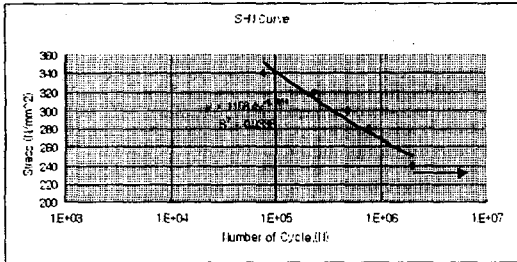


그림 S - N 선도
(테르미트 용접부)

윗 도면에서 보면 피로강도는 240 N/mm^2 이다.

② 가스압접 용접부 레일강의 S-N 선도 시험

③ 용접방법에 의한 정적 휨 강도와 피로강도 비교분석

④ 초기 균열크기에 따른 균열의 성장

$$* \frac{d_n}{d_N} = \Delta K \text{ 관계}$$

참고문헌

(1) J.M. Barsom and E.J. Imhof, Jr(3.1978) "Fatigue and Fracture Behavior of Rail" Re-No301, Vol5, pp15 ~ 27

(2) L.F. Coffin and J.F. Tavernelli, " Cycle Straining and Fatigue of Met" John Wiley & sons, chs.5 ~ 6, 1980.

(3) H. Neuber, " Translation Theory of Notch Stresses " , U.S. office of Technical Service, 1961.

(4) G.R. Irwin, " Analysis of Stress and Strains Near the end of Crack Tracversing a Plate", Tranasaction of ASME, J. of Applied Mech., Vol.24, PP.595, 1957.

(5) P. Paris & F. Erdogan, " A Critical Analysis on Crack Propagation Laws", J.of Basic Eng., Trans. of the ASME, Series D, pp.528 ~ 534, 1963

(6) R.C. Rice, B.N. Leis & M.E. Tuttle, An Examination of the Influence of Residual Stress effects in fatigue and Fracture of Railroad Rail", Residual Stress effects in Fatigue, ASTM STP 776, pp 132 ~ 157, 1982.

(7) P. Lujas & N. Klesnil, " Effect of stress Cycle Asymmetry of Fatigue Crack Growth ", Mater. Sci., Engineering, Vol 9, pp.231 ~ 249, 1972

(8) 배성민저(1998), 파괴역학실험법 pp74~99

(9) 양신추외10(1997.8), 레일 용접부 특성에 관한 연구(한국철도연구소), pp74~86

(10)J.A. Begley and J.D. Landers(1972),Fracture Toughness, ASTM STP514, pp1~20

(11)P.M. Besuner," Fracture Mechanics Analysis of Rail with Shell-Initiated Transverse Cracks", ASTM STP647,pp303 ~ 324