

장대레일 테르밋 용접부의 초기균열 크기 분포 추정

이재연¹ · 박연철² · 김지현^{3*} · 권준혁⁴

¹석사과정, 인하대학교, 토목공학과, ²조교수, 인하대학교, 사회인프라공학과, ³선임연구원, 한국철도기술연구원, ⁴주임, 한국철도공사

Estimating the Initial Crack Size Distribution of Thermite Welds Joint in Continuous Welded Rail

Lee, Jae Yeon¹, Park, Yeun Chul², Kim, Ji Hyeon^{3*}, Kwon, Jun Hyeok⁴

¹Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Inha University, Incheon, 22212, Korea

²Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Inha University, Incheon, 22212, Korea

³Senior Researcher, Railroad Structure Research Department, Korea Railroad Research Institute, Geonggi-do, 16105, Korea

⁴Chief, Dept. of Civil Engineering, Korea Railroad Corporation, Jecheon, 27195, Korea

Abstract - Thermite weld joint in continuous welded rail is constructed on-site and are more likely to have welding defects compared to other welding methods. Therefore, fatigue life is determined by the size of cracks that occur in the weld zone due to repeated loading. In this study, the results of existing fatigue experiments conducted were used to estimate the size of initial cracks in the rail, and the Paris' Law was used as the estimation equation. To estimate the initial crack size, fracture toughness and material constants, which are major factors affecting fatigue life, were analyzed using specimens whose fracture surface was easy to confirm through fatigue experiments. The mean and standard distribution of the initial crack depth were estimated to be respectively 0.6 mm and 0.2 mm through crack growth analysis.

Keywords - Fatigue crack, Thermite weld, Continuous welded rail, LFM, S-N curve, Initial crack size

1. 서론

국내 철도의 장대레일은 최소 길이가 300 m 이상인 레일을 지칭하며, 일반적으로 승차감 향상 및 궤도재료의 손상 감소를 목적으로 이음매부를 현장에서 테르밋 용접을 통해 부설한다^{[1],[2]}.

레일 용접 방법은 대표적으로 플래시버트, 가스압접, 테르밋, 엔드크로스드 용접이 존재한다^[2]. 이 중 테르밋 용접은 현장에서 레일에 형틀을 설치해 접합하는 방식으로 용접설비가 간단하고 전력 설비가 필요 없으며 용접시간이 짧은 장점이 있다. 그러나 작업자의 숙련도에 따라 품질의 편차가 발생할 수 있고 용접부가 주물 상

태로서 강도가 떨어지며 레일 복부 및 저부에 덧살이 많은 단점이 있다. 주물의 강도와 덧살의 존재로 인해 다른 용접방법과 비교 시 피로강도가 낮고, 품질이 작업자에 숙련도에 의해 결정되기 때문에 용접 품질과 용접부 결합 존재 가능성이 높다^{[3],[5]}. 기존 연구^{[3],[6],[7]}에 따르면 테르밋 용접이 장대레일 피로 파괴의 주요 원인으로 알려져 있다. 테르밋 용접부의 덧살 형상으로 인해 응력 집중 영역이 발생하게 되며, 반복되는 차량 하중으로 인해 응력 집중부 또는 용접부 결합에서 피로 균열이 시작되는 것으로 확인되었다^{[3],[6],[7]}.

현재 국내에서 선로유지관리지침에 따른 레일교체 기준은 마모량과 누적통과톤수로 규정된다^[8]. 마모량은 측정에 의한 평가가 가능하고^[8] 누적통과톤수는 동적 운중에 의한 레일 용접부의 휨 피로수명에 의해 결정된다^[9]. 그러나 선로유지관리지침의 경우 일본 기준 및 일본에서 제시한 과거 레일 이음매부에 대한 피로수명을 채택하여 누적통과톤수에 따른 레일 교체주기를 제시하고 있기 때문에 국내 실정을 고려하지 못하였다

Note.-Discussion open until June 30, 2025. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 21, 2024; revised December 06, 2024; approved on December 07, 2024. Copyright © 2024 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-31-460-5254 Fax. +82-31-460-5159

E-mail. jhkim06@krri.re.kr

는 한계점이 있다^[10]. 따라서 장대레일의 합리적인 피로수명 평가를 위해 기존의 레일 피로수명 평가기법을 피로 및 파괴역학적 관점에서 검토하고, 파괴역학에 기반하여 국내실정에 맞는 새로운 레일 피로수명의 평가기법을 제시할 필요가 있다.

파괴역학 기반 피로수명 평가는 균열 형상, 조건 및 재료 특성을 이용하여 피로 수명을 예측하는 방법이다. 용접의 특성상 용접부에는 미세결함이 존재하므로 이를 초기균열로 간주할 경우 파괴역학을 활용한 피로수명 평가가 가능하며 보다 정확한 피로 손상 허용 설계를 제공할 수 있다^[11].

용접부 피로균열은 응력확대계수범위가 한계값을 초과할 때 성장한다. 여기서 균열 성장 여부에 적용되는 한계값은 한계응력확대계수범위로 용접부 내부 또는 모재와 용접재의 경계에 존재하는 균열의 응력확대계수범위가 한계응력확대계수범위보다 작다면 균열이 성장하지 않게 되는데, 이 때 한계응력확대계수범위에 초기균열크기가 사용된다^[12]. 본 연구에서는 장대레일 접합 방식 중 가장 피로에 취약할 것으로 예상되는 테르밋 용접부에서의 초기균열크기를 피로실험 결과와 피로균열의 선형탄성파괴역학적 특징을 활용하여 추정한다.

2. 국내외 실험 사례 분석

2.1 테르밋 용접부 피로실험 사례 및 결과

다수의 연구에서 테르밋 용접부의 피로성능을 실험적으로 규명하였다. 테르밋 용접부에 대한 피로강도를 실험적으로 규명한 연구는 1990년 일본철도종합기술연구소^[9], 1998년 한국철도기술연구원^[15], 2009년 서울산업대학교^[16], 2016년 서울과학기술대학교^[17]에서 수행한 연구가 있다.

일본철도종합기술연구소^[9]는 레일표면 요철과 레일 휨 피로수명의 상관관계를 분석하기 위하여 테르밋 용접부에 대한 실물 레일 피로시험을 수행하였다. 해당 연구에서는 50N 레일을 대상으로 4점 휨피로시험을 수행하였으며, 그 결과로부터 Fig. 1과 같이 파괴확률 50%, 5%, 1%에 대한 S-N선도를 제시하였다.

한국철도기술연구원^[15]은 50 kgf 레일을 대상으로 3

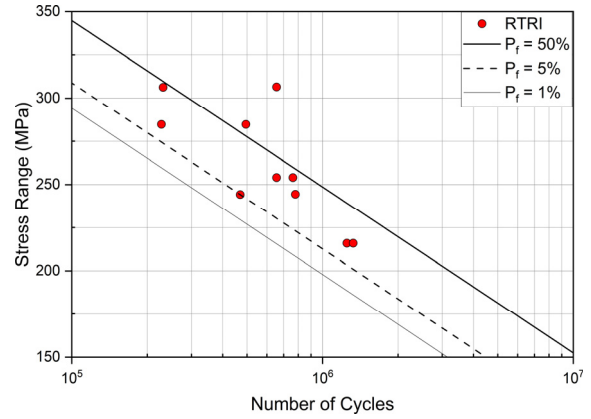


Fig. 1. Fatigue test results and S-N curves conducted by RTRI

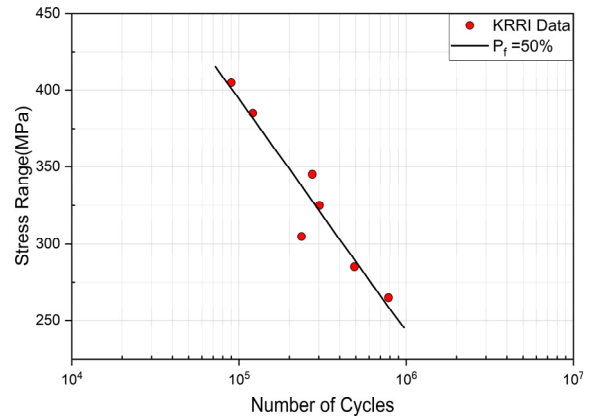


Fig. 2. Fatigue test results and S-N curve conducted by KRRI

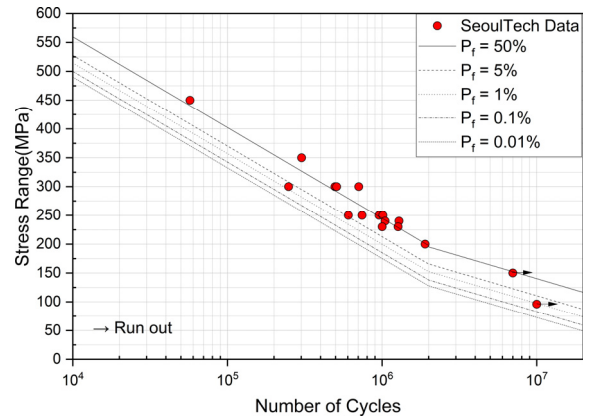


Fig. 3. Fatigue test results and S-N curves conducted by Seoul National University of Science and Technology

점 휨 피로시험을 수행하였으며, 그 결과로부터 Fig. 2와 같이 파괴확률 50%에 대한 S-N선도를 제시하였다. 서울산업대학교^[16]는 열차 통과에 따른 레일 용접부에 충격하중 및 용접부의 물리적 취약성으로 인해 발생

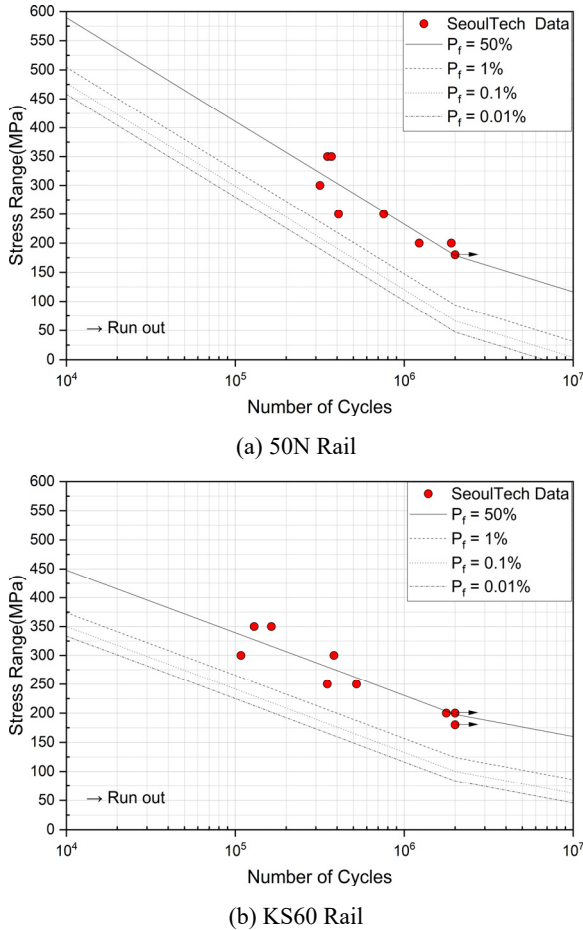


Fig. 4. Fatigue test results and S-N curves conducted by Seoul National University of Science and Technology

하는 요철량과 레일 휨 피로수명의 상관관계를 확인하기 위하여 피로 실험을 수행하였다. 해당 연구에서는 50N 레일을 대상으로 4점 휨 피로시험을 수행하였으며, 그 결과로부터 Fig. 3와 같이 파괴확률 0.01 %, 0.1 %, 1 %, 5 %, 50 %에 대한 S-N선도를 제시하였다.

국내 일반철도 레일의 열영향부에서 경도의 차이로 인한 요철 발생 때문에 레일 저부 휨 응력이 증가하는 경향을 보이기 때문에, 서울과학기술대학교^[17]에서는 요철량과 레일 휨 피로수명의 상관관계를 분석하기 위하여 피로 실험을 수행하였다. 해당 연구에서는 50N레일과 KS60레일을 대상으로 4점 휨 피로시험을 수행하였으며, 그 결과로부터 Fig. 4와 같이 레일 종류에 따른 결과와 파괴확률 0.01 %, 0.1 %, 1 %, 50 %에 대한 S-N 선도를 제시하였다.

2.2 선형탄성파괴역학을 기반으로한 피로실험 결과 분석

피로균열의 발생, 성장 및 파괴는 균열 첨단부에 발생하는 응력확대계수로 정의할 수 있다^[13]. 응력확대계수는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$K_I = Y(a)S\sqrt{\pi a} \tag{1}$$

여기서 $Y(a)$ 는 보정계수, S 는 응력, a 는 균열의 크기이다. 보정계수의 경우 균열위치, 균열을 포함하는 구조물 형상, 작용하는 하중 등을 고려하여 결정된다. 균열 크기 a 의 경우 응력에 변동이 발생할 때 커지며, 여기서 응력의 변동은 응력범위(stress range, S_r)로 정의된다. 응력확대계수는 식 (2)와 같이 응력확대계수범위(stress intensity factor, ΔK_I)로 정의된다^[13].

$$\Delta K_I = Y(a)S_r\sqrt{\pi a} \tag{2}$$

Barsom과 Rolfe^[13]에 따르면 용접부에 내재되어 있는 미세결함이 초기균열과 같은 역할을 하기 때문에 피로 균열 발생수명이 없고 균열성장수명이 용접부의 피로 수명을 결정한다. 균열의 성장 속도(da/dN)는 Paris and Erdogan^[12]의 연구 결과로부터 응력확대계수범위(ΔK)와 로그스케일에서 식 (3)과 같이 선형관계를 가지는 것으로 알려져 있다.

$$\frac{da}{dN} = C \times (\Delta K)^m \text{ or} \tag{3}$$

$$\log\left(\frac{da}{dN}\right) = \log C + m \times \log(\Delta K)$$

여기서 a 는 균열의 크기, N 은 응력반복횟수, C 와 m 은 재료상수이다. 또한, 응력확대계수범위는 응력범위에 비례하므로 응력범위와 피로수명은 로그스케일에서 선형관계를 가진다. 그러나 기존 국내 및 일본에서 수행한 피로시험^{[9],[15]-[17]} 결과로부터 도출한 S-N선도는 선형 스케일의 응력범위로부터 산정하였으므로 이는 식 (3)에서 정의한 선형탄성파괴역학 기반 균열성장 원칙에 맞지 않는다고 판단된다.

Fig. 5는 일본철도종합기술연구소^[9]의 파괴확률 별 S-N

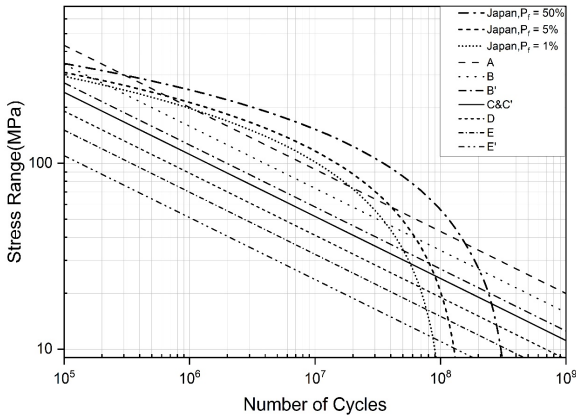


Fig. 5. Comparison of S-N curves proposed by RTRI and AASHTO LRFD Bridge Design Specification

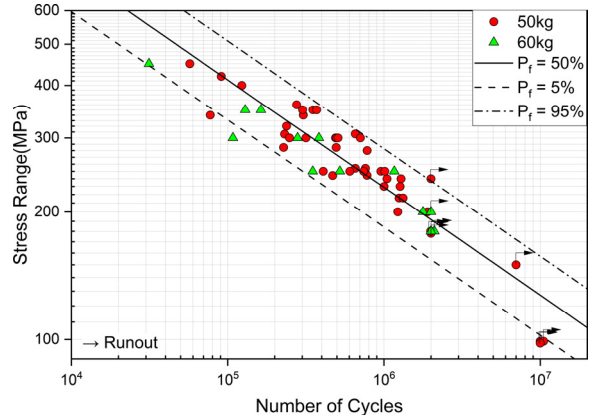
선도와 AASHTO LRFD Bridge Design Specification^[18]에서 제시하는 여러 피로범주에 대한 S-N선도를 로그-로그 스케일로 도시한 것이다. 그림을 보면 알 수 있듯 응력범위를 선형으로 설정할 경우 낮은 응력범위의 구간에서는 피로수명을 심각하게 저평가할 가능성이 있다.

2.3 테르밋 용접부 S-N선도

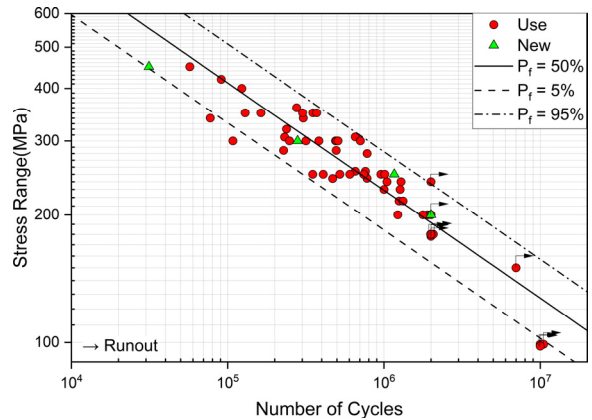
기존 연구에서 구한 테르밋 용접부의 피로수명으로부터 로그-로그 스케일로 S-N선도를 재정립하였다. Fig. 6는 기존의 모든 피로시험 결과를 각각 레일종류와 레일 사용 여부에 따라 구분하여 도시하고 파괴확률 50% 및 5%에 대한 S-N선도를 보여준다. 파괴확률 50%는 평균피로수명을 의미하며, 파괴확률 5%는 국내외 설계기준에서 제시하는 피로설계 S-N선도의 파괴확률이다.

레일 종류 및 레일 사용여부에 따른 피로수명은 서로 다른 경향성을 나타내지 않는다. 따라서 레일 종류에 따라 또는 사용 여부에 따라 각각의 S-N선도를 사용할 필요가 없을 것으로 보인다. 비록 신품 레일의 실험 결과가 4개 밖에 없기는 하지만 신품 레일의 피로수명과 사용한 레일의 피로수명이 유의미한 차이가 없는 것으로 보아 실제 공용 중 레일이 받는 피로응력범위는 피로한계 이하일 것으로 예상된다.

선형회귀분석을 통해 파괴확률 5%, 50%와 95%에 대한 S-N선도를 구하였고, 각각의 식은 다음과 같다.



(a) Fatigue test results categorized by rail type



(b) Fatigue test results categorized by usage status

Fig. 6. Proposed S-N curves for 5%, 50% and 95% probability of failure

$$\text{파괴확률 5\% : } \log N = 14.88 - 3.92 \log S_r \quad (4)$$

$$\text{파괴확률 50\% : } \log N = 15.25 - 3.92 \log S_r \quad (5)$$

$$\text{파괴확률 95\% : } \log N = 15.61 - 3.92 \log S_r \quad (6)$$

3. 테르밋용접부 초기 균열크기 추정

Fig. 6에서 볼 수 있듯 피로수명은 응력범위에 따라 결정론적인 값으로 산정되지 않고 일정한 범위로 분포되는 특징을 보인다. 이는 용접부의 초기균열 크기와 용접부를 구성하는 재료의 특성의 불확실성에 기인한다. 따라서 테르밋 용접부의 피로수명을 추정하기 위해서는 초기균열 크기와 식 (3)의 재료상수인 m 과 C 의 분포 특성을 파악해야 한다. 그러나 테르밋용접부를 구성하는 모재, 용접재 및 열영향부의 재료상수가 문헌에 따라 매우 편차가 크기 때문에 본 연구에서는 재료의

불확실성은 고려하지 않고 초기균열크기의 불확실성만 고려하여 Fig. 6에서 나타내는 피로수명 분포와 동일한 분포를 제공하는 초기균열 크기의 분포 특성을 파악하였다.

식 (3)을 초기균열부터 파단 시 균열크기까지 적분하면 균열의 성장과 파괴까지 해석적으로 피로수명을 계산할 수 있으며, 이를 균열성장해석이라고 한다.

$$N_f = \int_{a_0}^{a_f} \frac{1}{C(\Delta K_I)^m} da \quad (7)$$

여기서 a_0 와 a_f 는 각각 초기균열과 파단 발생 시 균열의 크기이며, N_f 는 피로수명이다.

위 식을 이용하여 초기균열 크기를 구하기 위해서는 식을 구성하는 각각의 인자들을 구해야 한다. 피로수명은 실험 결과로부터 구할 수 있고, 파단 시 균열 크기는 식 (1)의 응력확대계수가 파괴인성이 될 때의 균열크기로부터 구할 수 있다. 따라서 재료상수 m 과 C 값을 알아야하고, 파단 발생 시의 파괴인성 K_{Ic} 값이 필요하다.

3.1 재료상수 m 과 C

재료상수 m 과 C 는 Fig. 7에서 Phase II의 기울기와 절편값을 의미한다^[12]. 국내외 여러 연구에서 레일의 모재 및 용접재의 재료상수값을 제시하지만 연구자에 따라 값의 편차가 매우 크다^{[15],[19]-[23]}. 또한, 피로균열의 진행 방향 형상을 보면^[17]용접재 덧살의 지단부에서 시작하여 모재 또는 용접재를 통과(Fig. 8)하는 형상을 보이므로 균열형상에 따라 다른 재료상수를 적용해야 하므로 해석이 용이하지 않다. 따라서 기존 실험 결과로부터 재료상수의 값을 준용하는 것은 의미가 없다고 판단된다.

본 연구에서 재료상수 m 은 피로실험으로 구한 S-N 선도의 기울기를 사용했다. S-N선도의 기울기는 응력 범위에 따른 피로수명을 결정하는 매개변수이며 Fig. 7의 Phase II의 기울기와 크기는 같고 부호가 반대이다. 일반적으로 구조용 강을 적용한 강구조물의 경우 S-N 선도의 기울기는 -3.0이며 강재의 균열성장속도식인 식 (3)의 기울기 m 은 3.0이다. Fig. 7에서 수평축이 응력확대계수범위이고 수직축이 균열성장속도인데 응력확대계수범위는 식 (1)에 따라 응력범위의 함수이고 균

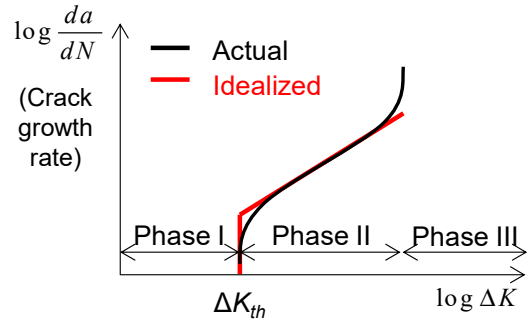


Fig. 7. Relationship between stress intensity factor range (ΔK) and crack growth rate^[12]

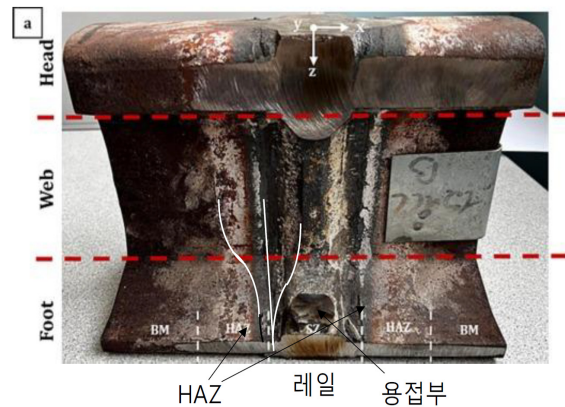


Fig. 8. Predicted location and direction of thermite weld fatigue cracks^[24]

열성장속도는 피로수명과 직접적인 상관관계가 있으므로 Fig. 7의 수직-수평축을 뒤집으면 S-N선도와 동일하게 된다. 이러한 상관관계를 이용하여 테르밋용접부의 균열성장속도식의 기울기를 실험으로 구한 S-N 선도의 기울기로부터 준용하였다. S-N선도를 도출한 피로실험 결과는 피로균열이 모재와 용접재를 통과한 모든 경우를 포함하고 있으므로 다양한 균열진행방향을 모두 포괄하여 간주하는 것으로 판단된다. 이에 따라 균열성장해석에 사용한 기울기 m 은 S-N선도의 기울기인 3.92를 적용하였다.

재료상수 C 는 m 과 마찬가지로 연구자에 따라 편차가 매우 크지만 S-N선도로부터 구할 수 없기 때문에 한국철도기술연구원의 실험결과값인 7.10×10^{-17} 을 사용하였다^[15].

3.2 파괴인성

파괴인성은 피로균열이 성장하여 취성파괴에 이르

Table 1. Fracture toughness of base material

Country	K_{IC} (MPa√mm)	
	Rail Head	Rail Web
Domestic Studies	1429~1572	1398
Overseas Studies	1012~1644	1227~1335



Fig. 9. Photographs of the fracture surface used for verification^[17]

는 시점을 결정한다. 국내외 연구자들이 레일 강재의 두부와 복부에서 파괴인성을 측정된 결과값을 Table 1에 정리하였다^{[1],[15],[20],[23],[25]-[28]}. 흥미로운 점은 국내 실험 결과는 대부분 파괴인성이 1400 MPa√mm 이상이고 국외 실험 결과는 대부분 1000 MPa√mm 이상의 값을 보인다. 이에 본 연구에서는 파괴인성을 국내 실험 결과 중 가장 작은 값인 1400 MPa√mm을 적용하였다.

3.3 초기 균열 크기 추정

균열성장해석을 통한 피로수명 추정에 필요한 재료상수와 파괴인성의 불확실성이 크기 때문에 실제 피로 실험 사례와 동일한 균열성장해석을 수행하여 앞서 결정한 값들의 타당성을 검증하였다. 기존 실험 결과 중 서울과학기술대학교^[17]에서 수행한 실험 결과 중 피로 균열의 형상이 명확하게 제시되어 있는 결과를 활용하였다. Fig. 9은 레일 저부의 하면에서 균열이 발생한 시험체의 피로파단면을 보여준다. 이 시험체의 피로실험 정보는 Table 2와 같다.

초기균열의 크기를 추정하기 위한 응력확대계수범위는 Newman과 Raju가 제안한 반타원형 균열에 대한 보정계수를 적용했으며 식 (8)과 같다^[29]. 보정계수 $Y(a)$ 의 매개변수들은 식 (9) - 식 (15)와 같다. 여기서 a

Table 2. Test piece information for initial crack size estimation

Specimen Number	Stress Range (MPa)	Number of Cycle at Failure
#7	200	1,901,109
Crack Depth (mm)	Crack Width (mm)	$K_{I,max}$ (MPa√mm)
17.6	54.0	1423

와 $2c$ 는 반타원형인 균열의 깊이와 폭, T 와 b 는 각각 레일의 높이와 폭 그리고 ϕ 는 균열 첨단부에서의 위치를 의미한다.

$$K = Y(a)S\sqrt{\pi a}$$

$$= \left[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{T} \right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{T} \right)^4 \right] f_\phi g f_w S \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (8)$$

$$Q = 1 + 1.464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1.65} \quad (9)$$

$$M_1 = 1.13 - 0.09 \left(\frac{a}{c} \right) \quad (10)$$

$$M_2 = -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + \left(\frac{a}{c} \right)} \quad (11)$$

$$M_3 = 0.5 - \frac{1}{0.65 + \left(\frac{a}{c} \right)} + 14 \left(1.0 - \frac{a}{c} \right)^{24} \quad (12)$$

$$g = 1 + \left[0.1 + 0.35 \left(\frac{a}{T} \right)^2 \right] (1 - \sin \phi)^2 \quad (13)$$

$$f_\phi = \left[\left(\frac{a}{c} \right)^2 \cos^2 \phi + \sin^2 \phi \right]^{\frac{1}{4}} \quad (14)$$

$$f_w = \sqrt{\sec \left(\frac{\pi c}{2b} \sqrt{\frac{a}{T}} \right)} \quad (15)$$

검증에 사용한 시험체의 파단 시 균열크기로 부터 구한 최대응력확대계수는 1423 MPa√mm으로 본 연구에서 설정한 최소파괴인성값인 1400 MPa√mm보다 큰 것을 확인했으며 식 (7)로부터 추정된 초기균열크기는 $a_o=0.51$ mm, $c_o=22.5$ mm이다. 이러한 초기균열 크기

는 일반적으로 알려진 용접부의 초기균열 크기와 유사하다^[30]. 따라서 균열성장해석에 적용한 파괴인성과 재료상수가 타당성을 가지는 것을 확인하였다.

검증에 사용한 시험체의 피로수명은 Fig. 6에서 파괴확률 5% - 50% 사이의 구간에 위치한다. Fig. 6에서 파괴확률 5% - 95% 구간을 예측할 수 있는 초기피로균열의 크기를 추정하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 수행했다. 초기균열의 형상을 타 원형으로 가정하는 경우 초기균열크기의 분포특성은 균열 깊이 a 와 균열의 폭 깊이 비인 a/c 값으로 구분할 수 있다. 먼저 균열 깊이와 폭 깊이 비의 변동성이 피로수명에 미치는 영향을 파악하기 위해 응력범위 200 MPa에서 민감도 분석을 수행하였다.

민감도 분석에는 검증에 활용한 시험체로부터 구한 초기균열크기를 준용하여 초기균열 깊이 및 폭 깊이 비의 평균을 각각 0.5 mm와 23/1000으로 정하고 변동계수(Coefficient of variation, COV)가 0.5일 때의 피로수명 분포를 확인하였다. Fig. 10과 Fig. 11에는 각각 초기균열 깊이 및 폭 깊이 비에 대한 피로수명 분포가 도시되어 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 피로수명은 폭 깊이 비보다 초기균열의 깊이에 매우 민감한 것을 볼 수 있다. 이에 폭 깊이 비를 23/1000으로 고정하고 피로실험결과와 동일한 피로수명 분포를 나타내는 초기균열 깊이의 분포를 몬테카를로 시뮬레이션으로 추정하였다.

초기균열크기의 분포특성은 두 단계로 확인하였다. 먼저 응력범위 200 MPa에서 식 (5)와 동일한 피로수명을 나타내는 균열 깊이를 찾아 이를 균열깊이의 평균으로 설정하였다. 피로실험결과와 동일한 피로수명분포를 나타낼 수 있는 피로균열깊이의 표준편차를 표준편차를 바꿔가면서 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 확인하였다. 이 과정을 통해 초기균열의 폭 깊이 비 $a/c=23/1000$ 에서 균열 깊이의 평균 및 표준편차가 각각 0.6 mm 그리고 0.2 mm일 때 피로실험과 동일한 피로수명분포를 나타내는 것을 확인하였다. 이러한 균열 깊이 분포가 다른 응력범위에서도 동일한 결과를 나타내는지 확인했으며 Fig. 12와 같이 응력범위 200 MPa 및 300 MPa에서 동일한 결과를 나타내는 것을 확인하였다.

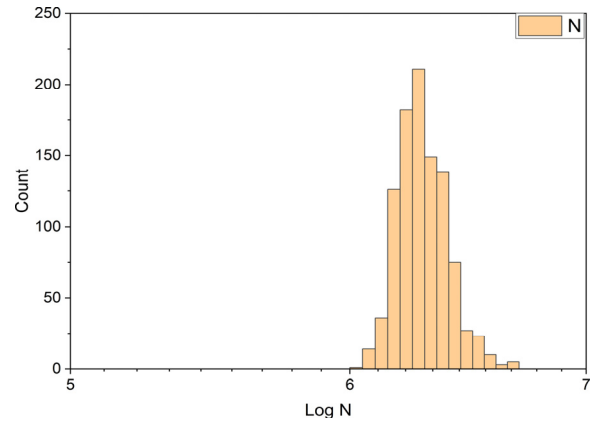


Fig. 10. Distribution of fatigue life when the mean and COV of the crack depth are 0.5 mm and 0.5, respectively

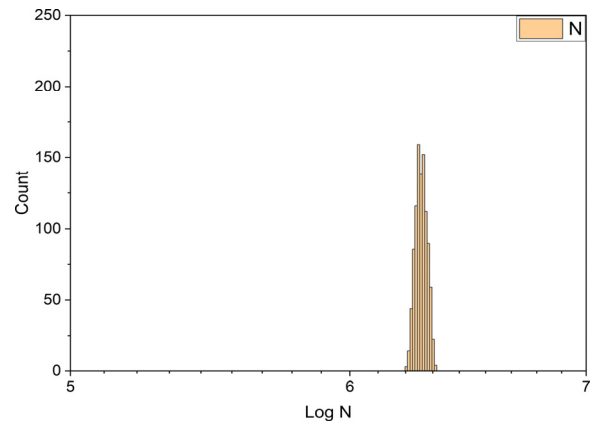


Fig. 11. Distribution of fatigue life when the mean and COV of the crack width-depth ratio a/c are 23/1000 and 0.5, respectively

4. 결론

본 연구에서는 기존에 수행한 피로실험 결과를 분석하고 테르밋 용접부의 피로수명을 추정하기 위해 필요한 초기균열크기 분포를 선형탄성파괴역학 기반으로 추정하였다. 본 연구를 통해 도출한 결론은 다음과 같다.

- (1) 기존에 수행한 피로실험 결과를 바탕으로 도출한 S-N선도는 응력범위를 선형스케일로 가정하여 선형탄성파괴역학의 기본 원칙에 위배되는 가정을 사용하였으며 응력범위를 로그스케일로 가정할 경우 파괴확률 5%에 대한 피로수명은 다음과 같다.

$$\log N = 14.88 - 3.92 \log S_f$$

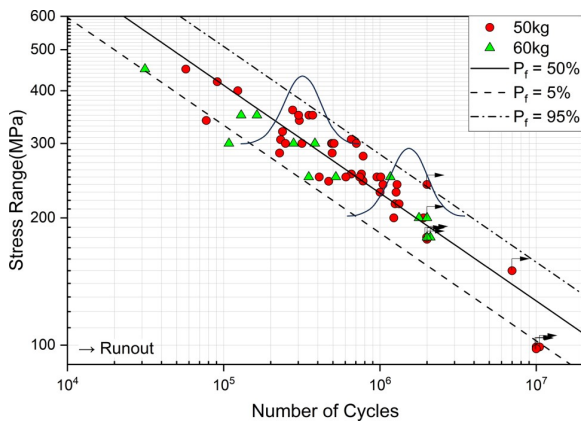


Fig. 12. Fatigue life distribution at the stress ranges of 200 and 300 MPa for the mean and standard deviation of the crack depth of 0.6 and 0.2 mm respectively

- (2) 레일의 테르밋 용접부 저부 하단에서 발생하는 피로균열의 형상을 반타원형으로 가정할 경우 피로수명에 초기균열 깊이와 폭 깊이 비 중 무엇이 더 영향을 미치는지 확인하기 위해 기존 선형 연구의 실험 데이터를 바탕으로 깊이 및 폭 깊이 비의 평균을 설정하여 변동계수가 0.5일 때의 피로수명 분포를 확인하였다. 이와 같은 과정을 통해 피로수명은 초기균열의 폭 깊이 비보다 균열의 깊이에 더 민감한 것을 확인하였다.
- (3) 피로파단면으로부터 확인한 피로균열의 크기와 파괴확률에 대한 피로수명 분포를 고려하여 테르밋용접부의 초기균열 깊이의 평균 및 표준편차를 각각 0.6 mm와 0.2 mm로 추정하였다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 기본사업(장대레일 성능기반 유지관리 체계 구축, PK2403A1)의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌(References)

[1] Esveld, C. (2018) *Modern Railway Track*, MRT Productions, Germany.
 [2] Korean National Railway (2021) *Continuous Welded Rail*,

KR C-14050, Rev.4, KR (in Korean).

[3] Mutton, P.J., and Alvarez, E.F. (2004) Failure Modes in Aluminothermic Rail Welds Under High Axle Load Conditions, *Engineering Failure Analysis*, Elsevier, Vol.11, No.2, pp.151-166.
 [4] Chen, Y., Lawrence, F.V., Barkan, C.P., and Dantzig, J.A. (2006) Weld Defect Formation in Rail Thermite Welds, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Sage, Vol.220, No.4, pp.373-384.
 [5] Sung, D.Y. (2021) *Research Service on Establishment of Railroad Facility Maintenance Standards including Rail Life*, The Final Report, The Korean Society for Railway (in Korean).
 [6] Lawrence, F.V., Ross, E.T., and Barkan, C.P.L. (2004) *Reliability of Improved Thermite Welds*, Final Report for High-Speed Rail IDEA Project 41, Transportation Research Board, USA.
 [7] Terashita, Y., and Tatsumi, M. (2003) Analysis of Damaged Rail Weld, *Quarterly Report of RTRI*, Railway Technical Research Institute, Vol.44, No.2, pp.59-64.
 [8] Korean National Railway (2024) Guidelines for Track Maintenance, KR (in Korean).
 [9] Ishida, M., and Abe, N. (1990) Relationship between Rail Surface Irregularity and Bending Fatigue of Welded Part in Long Rails, *RTRI Report*, Railway Technical Research Institute, Vol.4, No.7, pp.8-15.
 [10] Park, Y.-G., Suh, S.-K., and Choi, J.-Y. (2008) Logicality Estimate for Domestic the Periodic Replacement Criteria of CWR based on Accumulated Passing Tonnage, *Journal of the Korean Society for Railway*, KSR, Vol.11, No.3, pp.326-333 (in Korean).
 [11] Liu, Y. (2021) *Structural Integrity Assessment of Rail Steel Failure Modes and Mechanism*, Ph.D. Dissertation, Nanyang Technological University, Singapore.
 [12] Paris, P., and Erdogan, F. (1963) A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, *Journal of Basic Engineering*, American Society of Mechanical Engineers, Vol.85, No.4, pp.528-533.
 [13] Barsom, J.M., and Rolfe, S.T. (1999) *Fracture and Fatigue Control in Structures: Applications of Fracture Mechanics*, ASTM International, USA.
 [14] ASTM (2022) *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*, ASTM E1820-22, American Society for Testing and Materials, USA.

- [15] Korea Railroad Research Institute (1998) *A Study on the Characteristics of Welded Rail*, The Final Report, Korean National Railroad (in Korean).
- [16] Park, Y.G. (2009) *Evaluation of Fatigue Damage and Manitenance Plan for Aged Rails*, The Final Report, Seoul Metro (in Korean).
- [17] Park, Y.G. et al. (2016) *General Railroad Rail Replacement and Maintenance Standards*, The Final Report, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (in Korean).
- [18] AASHTO (2020) *LRFD Bridge Design Specifications* (9th Ed.), American Association of State Highway and Transportation Officials, USA.
- [19] Jun, H.-K., Seo, J.-W., Jeon, I.-S., Lee, S.-H., and Chang, Y.-S. (2016) Fracture and Fatigue Crack Growth Analyses on a Weld-Repaired Railway Rail, *Engineering Failure Analysis*, Elsevier, Vol.59, pp.478-492.
- [20] Demofonti, G., Budano, S., Viglialoro, C., and Jöller, A. (2001) *Role of Residual Stresses and Microstructure on Fatigue Initiation and Crack Growth in Welded Rails*, EUR 19988 EN, Office for Official Publication of the European Communities, Luxemburg.
- [21] Pugno, N., Ciavarella, M., Cornetti, P., and Carpinteri, A. (2006) A Generalized Paris' Law for Fatigue Crack Growth, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Elsevier, Vol.54, No.7, pp.1333-1349.
- [22] Liu, Y., Tsang, K.S., Zhi'En, E.T., Subramaniam, N.A., and Pang, J.H.L. (2021) Investigation on Material Characteristics and Fatigue Crack Behavior of Thermite Welded Rail Joint, *Construction and Building Materials*, Elsevier, Vol.276, 122249.
- [23] Liu, Y., Tsang, K.S., Hoh, H.J., Shi, X., and Pang, J.H.L. (2020) Structural Fatigue Investigation of Transverse Surface Crack Growth in Rail Steels and Thermite Welds Subjected to In-Plane and Out-of-Plane Loading, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.204, 110076.
- [24] Lesage, T., Avettand-Fènoël, M.N., Masquelier, M., Danoix, F., and Kamgaing, L. (2023) Consequences of Thermite Welding on the Microstructure of the Heat Affected Zone of a Carbide-Free Bainitic Steel Rail, *Journal of Manufacturing Processes*, Elsevier, Vol.108, pp.746-763.
- [25] Lee, J., Kang, K., Choi, R., and Kim, J.K. (1999) Behavior of the Crack Initiation, Transition and Fatigue Crack Growth of Rail Steel, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.11, No.1, pp.33-42 (in Korean).
- [26] Kim, J.-K., Lee, J.-S., and Kim, C.-S. (1999) Fracture Criterion and Fatigue Crack Growth Behavior of Rail Steel Under Mode I & Mixed Mode Loading, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, KSME, Vol.23, No.6, pp.1039-1047 (in Korean).
- [27] Kim, C.-S., Sang, J.-Y., and Kim, J.-K. (2001) Fatigue Crack Growth Behavior in Rail Steel Under Mixed Mode Loading, *Proceedings of 2001 2nd Conference on Materials and Destruction of the Korean Society of Mechanical Engineers*, KSME, pp.224-229 (in Korean).
- [28] Seo, J.W., Kwon, S.J., Jun, H.K., and Lee, D.H. (2017) Evaluation of Fatigue and Fracture Characteristics of High-Speed Rail Material, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, KSPE, Vol.34, No.12, pp.861-866 (in Korean).
- [29] Newman, J.C., Jr., and Raju, I.S. (1984) *Stress-Intensity Factor Equations for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies Subjected to Tension and Bending Loads*, NASA TM-85793, National Aeronautics and Space Administration, USA.
- [30] Park, J.Y. (2019) *Fatigue Reliability Assessment Considering Multiple Crack Coalescence*, Ph.D. Dissertation, Seoul National University.

요약: 장대레일의 테르밋 용접부는 현장에서 시공되기 때문에 다른 용접 방식에 비해 용접 결함이 발생할 가능성이 높다. 따라서 반복적인 하중으로 인해 용접부에 발생하는 균열의 크기에 따라 피로수명이 결정된다. 본 연구에서는 레일 초기 균열의 크기 분포를 추정하기 위해 국내외에서 수행된 기존 피로 실험 결과를 활용하였고, Paris' law를 사용하였다. 초기 균열 크기 분포를 추정하기 위해 파괴면을 확인하기 쉬운 시편을 이용하여 피로 수명에 영향을 미치는 주요 요인인 파괴 인성 및 재료 상수를 분석하였으며, 균열성장해석을 통해 초기균열 깊이의 평균 및 표준편차를 각각 0.6 mm와 0.2 mm로 추정하였다.

핵심용어: 피로균열, 테르밋 용접, 장대레일, 선형탄성파괴역학, S-N 선도, 초기균열 크기
