

저온하에서 레일강의 피로균열진전거동

Fatigue Crack Growth Behavior of Rail Steel at Low temperature

김철수*, 여운기*, 김영균*

Chul-Su Kim, Yoon-Kee Yo, Young-Kyun Kim

ABSTRACT

Among rail defects, the transverse crack, which has been the most dangerous fatigue damage, is developed from shelling near the rail running face and grows perpendicular to the rail surface. Moreover, the crack has occurred frequently fatigue damage during winter. Therefore, to assure the safety of railway vehicles, it is necessary to investigate growth behavior of transverse crack for rail steel. In this study, fatigue crack growth behavior of rail steel and its gas pressure welded part at room and low temperature are performed. The fatigue crack growth rate of the welded part was lower than that of the base part within a lower ΔK region at both room and low temperature, and this difference decreases with increasing the ΔK due to the decrease of the fracture toughness.

1. 서론

최근 궤도차량의 축하중, 운전속도 그리고 운행횟수는 증가하는 추세이며, 이는 기존의 레일에 보다 많은 부하를 받게 하고있다. 이러한 운전 조건들은 차륜의 접촉에 의한 마멸과 반복하중으로 인한 피로손상을 보다 자주 발생시킨다. 레일의 다양한 파손들은 볼트홀 균열(bolt hole crack), 버티컬 스플릿 헤드(vertical split head), 헤드 체크(head check) 그리고 횡방향 균열 등으로서 보고되고 있다[1,2]. 이중에서도 횡방향 균열은 가장 위험한 손상으로서, 차륜의 이동방향의 평행하게 레일헤드의 표면하중에 발생한 셸링(shelling)으로부터 차량의 운행 방향에 수직으로 진전하는 균열이다[1,2]. 따라서 궤도차량의 안정성 확보를 위해 셸링에서 횡방향 균열진전거동에 대한 평가가 중요하다.

철도차량운행과 계절별 온도 변화가 심한 조건에서는 레일에 발생하는 응력 변동이 커서 레일 파손이 자주 발생하고 있는 실정이며, 특히 하절기 보다는 동절기에 손상이 가장 많이 발생하고 있다[3]. 이는 겨울철 기온이 강하함으로써 레일의 인장력이 발생하여 열차하중의 충격에 갑작스럽게 절손되거나 그전에 내부적으로 잠재하고 있는 결함이 인장력을 받아 절손되기 때문이다. 따라서 레일강의 저온에서의 기계적특성 및 피로균열진전거동에 관한 연구는 차량의 안정성 확보를 위해서 매우 필요하다.

* 한국철도대학 차량기계과 교수, 정회원

최근 파괴역학을 적용하여 레일 내 횡방향균열의 진전 수명에 대한 평가에 관심을 기울이고 있다[1,2,4-8]. 몇몇 연구자들은 대부분 모드 I 하중하에서 레일강의 피로 및 파괴거동을 연구하고 있으며[1,2,4-7], 파괴역학해석은 횡방향균열을 간단하게 동전모양형태로 모델링에 이용되고 있다[2,4]. 예를 들어 Journet 등[5,6]은 CT시험편을 사용하여 횡방향 결함에 대한 실험실내 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 Tang 등[7]은 모드 I 스펙트럼하중하에서 횡방향균열의 성장거동을 평가하였다. 그러나 이와 같은 이전에 연구들은 대부분 상온하에서 피로균열진전거동에 관하여 국한되어 수행되어 왔기 때문에 저온하에서 횡방향균열의 진전거동을 보다 정확히 평가할 수 없다.

본 연구에서는 저온하에서 횡방향균열진전거동을 평가하기 위하여 레일강 및 가스압접부의 피로균열진전거동을 실험적으로 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에서 사용한 재료는 한국산 60kg급 레일강이다. 이의 화학성분과 기계적 성질은 각각 Table 1 및 2와 같다. 인장시험은 0.4min/mm속도로 변위제어하에서 수행하였다. 환봉형 인장시험편은 ASTM E8M-97[9]에 따라 L-방향으로 지름 6mm, 최소 단면부의 길이 36mm로 제작되었다.

피로균열 진전시험은 상온의 대기 중에서 25ton용 유압서어보식 피로시험기(Instron 1332)에 마이크로컴퓨터를 사용한 제어시스템을 구성하고, 응력비 $R=0.1$ 의 일정진폭하에서 수행하였다. 피로균열진전시험은 CT 시험편을 대상으로 ASTM E647-95[10]의 규정에 따라 행하였다. 피로 시험편은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 CT(Compact Tension)형이며, 이의 채취방향은 횡방향 균열의 방향과 동일한 L-T 방향이다.

Table 1. Chemical composition of material (wt-%)

| C | Mn | P | S | Si | Ni | Cr | Mo |
|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.721 | 0.873 | 0.0124 | 0.005 | 0.256 | 0.032 | 0.053 | 0.011 |

Table 2. Mechanical properties of material

| Yield strength | Tensile strength | Elongation | Hardness | K_c |
|----------------|------------------|------------|-----------|--|
| 481.2(MPa) | 887.1(MPa) | 14.5(%) | 257.5(Hv) | 46.5(MPa ^m ^{1/2}) |

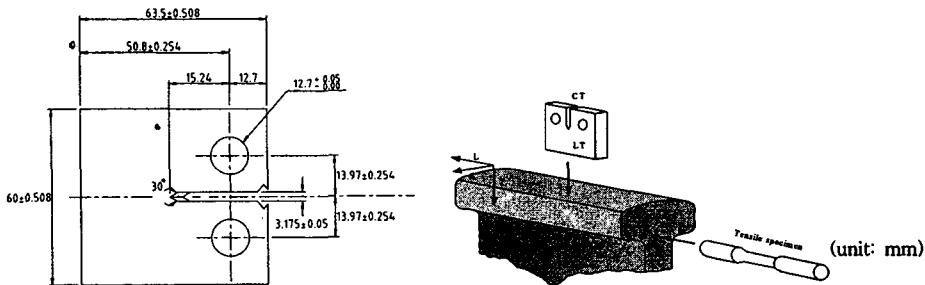


Fig. 1 Configuration of CT specimen(thickness 10mm)

2.2 저온시험

저온실험은 자체 제작한 저온용 용기를 유압식 만능피로시험기에 직접 부착한 후 액체 질소의 주입량을 조절함으로써 저온상태에서 실험을 수행하였다. 챔버 내에 유입된 액체질소는 용기 내에서 기화하면서 온도를 저하시키고, 동시에 순환장치에 의하여 순환된 후 배출된다. 이 액체질소는 온도조절장치와 연결된 솔레노이드 밸브에 의해 유입, 차단되며, 용기내부의 분위기 온도는 설정 온도의 $\pm 1^\circ\text{C}$ 내로 유지되도록 하였다. Fig.2는 이와 같은 저온 실험장치의 모식도를 나타낸 것이다. 각각의 실험은 시험편이 원하는 설정온도로 안정화되고 또한 변위신장계 및 클립-온 게이지의 출력 값이 최소에 이른 후 시작하였다.

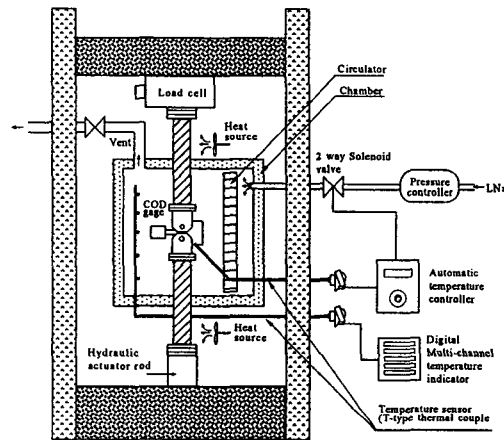


Fig. 2 Schematic diagram of the low temperature experimental apparatus

3. 실험결과 및 고찰

3.1 저온에서의 기계적특성

Fig. 3은 상온 및 저온(-40°C) 상태하에서 얻어진 모재부와 용접부의 응력-변형률 곡선의 대표적인 예이다. 모재부와 용접부의 응력-변형률 거동은 온도의 변화에도 불구하고 유사한 양상을 나타내고 있다. 그러나 용접부의 인장강도는 모재부에 비하여 증가하였으며, 연성은 이와 반대로 감소하는 경향이다. 또한, 온도변화에 대해서도 저온에서의 인장강도는 상온에 비하여 높으나 연성은 저하됨을 보이고 있다. Table 3은 모재부와 용접부에 대한 기계적 특성을 응력-변형률 곡선으로부터 정리한 결과이다. 상온에서의 용접부의 인장강도는 모재부에 비하여 5.5% 증가하였으나, 연신율은 33.4% 감소하였다. 그리고 저온에서 용접부의 인장강도는 모재부에 비하여 11.5% 증가하였고, 연신율은 55.6% 감소하였다. 이와같이 용접부는 저온환경에서 모재부보다 인장강도 증가율과 연신율 감소율이 크므로 온도의 영향에 더 민감하다는 것을 알 수 있다. 또한, 용접부가 모재부보다 연신율의 값이 더 작으므로 모재부에 비하여 상대적으로 취화(relative brittleness) 되었음을 알 수 있다.

Table 3 Mechanical properties of rail steel

| Material | Test temp.($^\circ\text{C}$) | Yield strength(MPa) | Tensile strength(MPa) | Elongation(%) |
|--------------|----------------------------------|---------------------|-----------------------|---------------|
| Base metal | Room Temp.(20°C) | 481.2 | 887.1 | 14.5 |
| | -40 | 483.8 | 910.7 | 13.6 |
| Welded metal | Room Temp.(20°C) | 545.3 | 936.2 | 9.65 |
| | -40 | 593.4 | 1,015.8 | 6.04 |

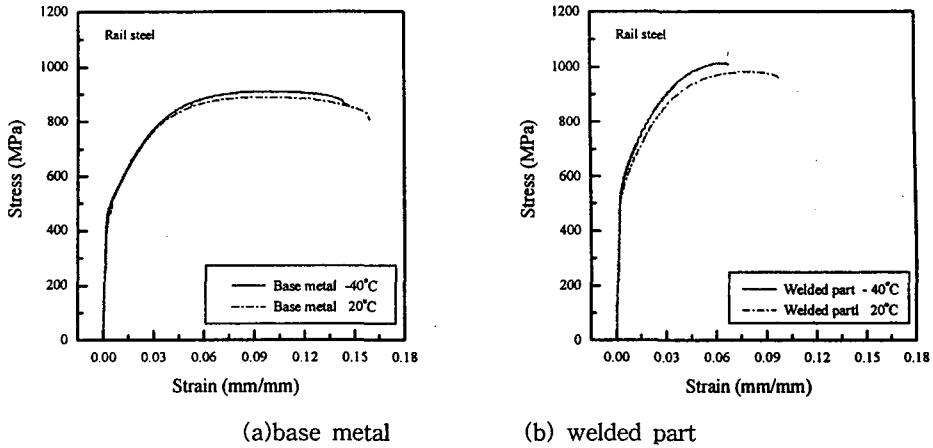


Fig. 3 Stress-strain curves of rail steel at room and low temperature

3.2 피로균열 진전거동

일반적으로 균열을 가진 부재의 피로균열진전거동은 균열진전속도(fatigue crack growth rate, da/dN)와 선형탄성 파괴역학 파라미터인 응력확대계수범위(stress intensity factor range, ΔK)의 상호관계식으로 표현된다. Paris는 식 (1)과 같은 피로균열진전속도와 응력확대계수범위의 관계 [11]를 제안하였다.

$$da/dN = c \Delta K^m \quad (1)$$

여기서 c 와 m 은 재료상수이다.

Fig. 4(a) 및 (b)는 상온 및 저온에서의 모재부와 용접부의 피로균열진전거동을 나타낸 것이다. 용접부의 da/dN 은 낮은 응력확대계수범위 ΔK 영역에서 모재부보다 낮게 나타나지만, ΔK 가 증가할수록 이의 차이는 소멸됨을 보이고 있다. 일반적으로 낮은 ΔK 영역에서의 da/dN 은 미시조직 및 응력비의 영향이 현저하며, 미시조직의 결정립경이 클수록 균열진전에 대한 결정립계의 영향으로 인하여 균열진전이 지연된다. 따라서 레일강의 경우 용접으로 인하여 결정립경이 조대하게 되고 이로 인하여 용접부의 da/dN 이 모재부에 비하여 저하 되었다고 할 수 있다[12]. 그러나, 높은 ΔK 영역에서 da/dN 의 차이가 소멸되는 원인은 불안정균열성장을 가져오는 파괴인성 한계값 K_{IC} 가 모재부에 비하여 용접부가 저하하였기 때문이다. Fig. 4(b)는 -40°C 에 있어서의 모재부와 용접부의 피로균열진전거동의 나타낸 것이다. 저온환경에서도 용접부의 피로균열진전속도는 모재부의 것에 비하여 낮게 평가 되었으나 용접부에서의 m 의 값이 모재부의 것에 비하여 높게 평가되므로 용접부에서의 피로균열진전이 가속화되고 있음을 의미한다.

3.3 피로균열진전속도에 미치는 온도의 영향

Fig. 5(a) 및 (b)은 Fig. 4(a) 및 (b)로부터 상온과 저온(-40°C)하에서 피로균열진전거동을 재정리하여 나타낸 것이다. 이들 재료의 $da/dN - \Delta K$ 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{모재부:} & \quad \text{상온 } da/dN = 4.38 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.15}, \text{ 저온 } da/dN = 1.26 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.53} \\ \text{용접부:} & \quad \text{상온 } da/dN = 1.37 \times 10^{-10} (\Delta K)^{4.01}, \text{ 저온 } da/dN = 1.23 \times 10^{-11} (\Delta K)^{4.73} \end{aligned} \quad (2)$$

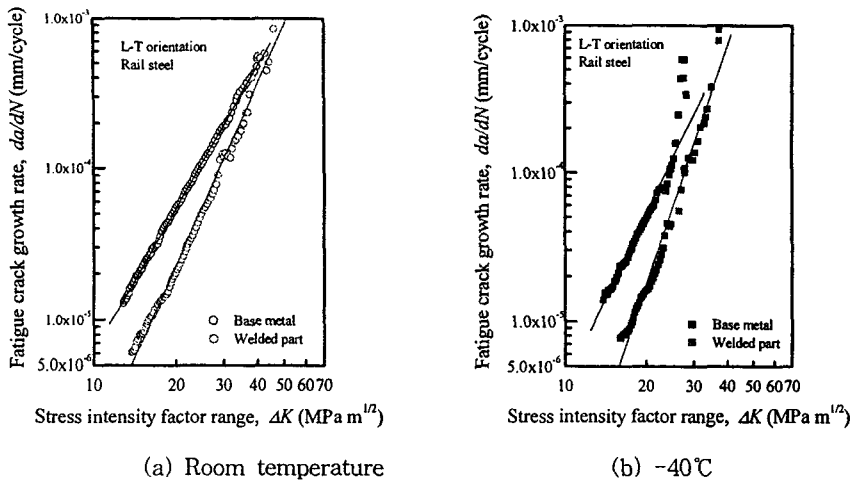


Fig. 4 $da/dN - \Delta K$ curves

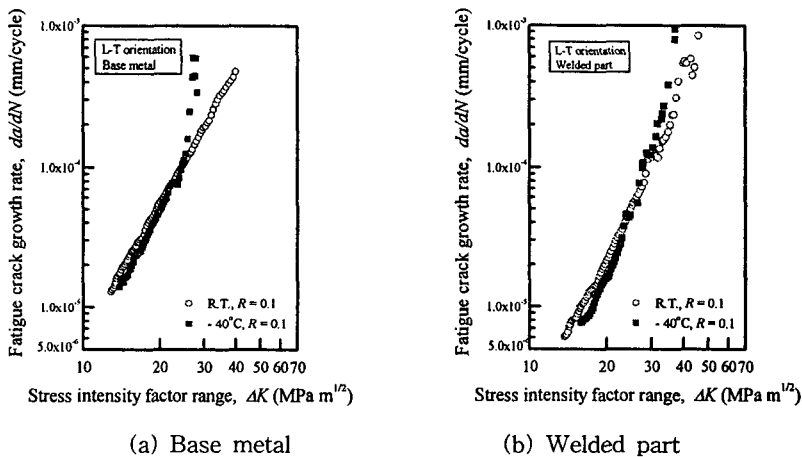


Fig. 5 Fatigue crack growth behavior of rail steel

낮은 ΔK 영역에서 저온의 da/dN 은 상온보다 느리게 평가되지만, 모재부의 $\Delta K \geq 25 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 와 용접부의 $\Delta K \geq 22 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 영역에서는 저온의 da/dN 이 상온의 것보다 빠르게 평가되고 있다. 이의 원인은 Paris 법칙에서의 지수 m 값의 변화에 기인한다. Fig. 6은 상온과 저온에서의 m 값의 변화를 나타낸 것이다. Fig.3에서 나타낸 바와 같이 저온에서 모재부 및 용접부의 인장강도는 상온보다 증가하였으며, 이러한 특성은 피로균열진전특성에도 영향을 미치리라 사료된다.

4. 결론

본 논문에서는 국산 레일강의 모재와 용접부의 저온에서의 기계적 특성과 피로균열진전거동을 평가하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 상온에서의 용접부의 인장강도는 모재부에 비하여 5.5% 증가, 연신율은 33.4% 감소하였으나 저온에서의 용접부의 인장강도는 모재부에 비하여 11.5% 증가, 연신율은 55.6% 감소하였다.
- 2) 상온 및 저온환경에서 용접부의 피로균열진전속도는 모재부에 비해 낮게 평가 되었으나, m 의 값이 모재부의 것에 비해 높으므로 피로균열진전이 가속화되고 있다.
- 3) 낮은 ΔK 영역에서 저온의 da/dN 은 상온보다 느리게 평가되지만, 모재부의 $\Delta K \geq$

25MPa \sqrt{m} 와 용접부의 $\Delta K \geq 22\text{MPa}\sqrt{m}$ 영역에서는 저온의 da/dN 이 상온의 것보다 빠르게 평가되었다. 이의 원인은 Paris 법칙에서의 지수 m 값의 변화에 기인한다.

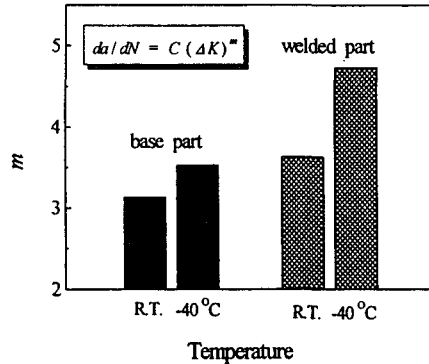


Fig. 6 m vs. temperature for rail steel

참고문헌

- Orringer, O. and Morris, J. M.(1984), "Applied Research on Rail Fatigue and Fracture in the United States," Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 1, pp. 23~49.
- Orringer, O., Morris, J. M. and Jeong, D. Y.(1986), "Detail Fracture Growth in Rails Test Results," Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 5, pp. 63~95.
- Sampath, S. G., Johns, T. G., McGuire, P. M. and Davies, K. B.(1978), "Stress Around Transverse Fissure Flaws in Rails due to Service Loads," ASTM STP 644, pp. 330~341.
- Journet, B. G. and Pelloux, R. M.(1987), "A Direct Method for Laboratory Spectrum Crack Growth Testing," Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 7, pp. 19~22.
- Journet, B. G. and Pelloux, R. M.(1987), "A Methodology for Studying Fatigue Crack Propagation under Spectrum Loading: Application to Rail Steel," Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 8, pp. 117~123.
- Tang, Y. H., Perlman, A. B., Orringer, O. and Jablonski, D. A.(1991), "Comparison of two crack growth rate models with laboratory spectrum and field tests on rail steel," Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol.15, pp. 1~9.
- Jung-Kyu Kim and Chul-Su Kim(2002), "Fatigue Crack Growth Behavior of Rail Steel Under Mode I and Mixed Mode Loadings," Materials Science & Engineering A, Vol. 338, pp.191~201.
- 철도기술연구원(1997), "레일 용접부의 특성에 관한 연구", 철도청, 12월호. pp. 63~73.
- Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials, 1995, *Annual Book of ASTM Standards*, E647-95a.
- "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates"(1995), *ASTM E647-95a*.
- Paris, P. C. and Erdogan, F.(1960), *Journal of Basic Engineering*, Vol. 85, pp. 257~270.
- 김정규, 강기원, 이종선, 최린(1999), "가스압접법에 의한 레일 용접부의 피로균열진전거동, 춘계학술대회논문집(A), pp. 697~702.