

SM 490 A 재질에 대한 용접 유형에 따른 피로특성 연구

김재훈[†], 구병춘^{**}

A study on the fatigue characteristics of SM 490 A material due to the welding type

Jae-Hoon Kim, BYung-Choon Goo

Key Words: Fatigue(피로), Fatigue characteristics(피로특성), Welding type(용접유형), Stain(변형률)

Abstract

This study investigates the fatigue characteristics of SM 490 A material specimens for the railway vehicle due to the welding type. The more stress ratio decreases, the more strength of fillet welded specimen decreases. At specially, when the stress ratio of TN(Plate with transverse fillet welded rib) specimens decreases 0.5, 0.1, and -0.1, the fatigue limit decreases unifomly. The strength of TN is higher than it of NCN in the compare of fillet welding type, but the strength of NCN(Non load-carrying cruciform fillet welded joint) is higher than it of CN(Load-carrying cruciform fillet welded joint), which these specimens have the rib in the both side. We analysis the strains on the weld positions of the TN specimens during the fatigue test for the investigation of crack initiation and crack growth. In the theses results, we could find the fatigue crack initiation point and time.

다. 이 때문에 피로설계기준이 필요하며, 국내의 철도차량의 피로설계기준에서는 구조재료의 피로 특성 데이터를 제시하고 200만회의 반복하중에 견딜 수 있는 응력조건을 설계응력으로 정하고 있다. 그러나 이러한 설계기준은 실제 상황과 다를 가능성이 있다. 이러한 문제점을 검토하기 위해서 실제 구조물과 동일한 재질, 동일한 용접 방법으로 제작한 시험편을 이용하여 반복하중 하에서의 피로특성을 조사하는 연구가 절실히 필요하다. 따라서 본 연구에서는 대차와 차체에 사용되는 SM 490 A 재질을 이용하여, 실제 철도차량 제작에 사용되는 다양한 용접 유형에 따라 제작한 시험편을 이용하여 피로특성에 관한 연구를 수행하였다.

1. 서론

강의 피로에 관한 외국의 규격으로는 영국의 BS 5400, BS 7608, 일본의 강구조협회의 피로설계지침, 유럽의 ENV 규격, 압력용기, 파이프 및 저장용 탱크에 관한 미국의 API-579 규정 등 많은 규정들이 있으며, 본 연구에서 취급하고 있는 철도분야에서 독일⁽¹⁾, 일본⁽²⁾, 미국⁽³⁾ 등은 피로설계를 위한 자체 규정을 보유하고 있다. 열차의 대차 프레임의 경우 차체와 함께 하중을 지지하는 역할을 하는 주요 구조물로서 25년 이상의 긴 수명을 요구하고 있다. 하지만 대차 프레임은 많은 종류의 용접 이음으로 제작되고 있으며, 이로 인해 대부분의 파손이 용접부에서 발생하고 있

2. 연구방법

2.1 시험 방법

2.1.1 재질 및 시험편

본 연구에서는 철도차량의 대차 프레임에 사용

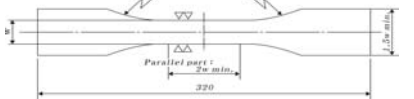
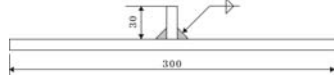
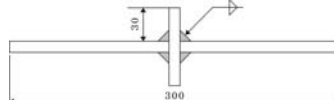
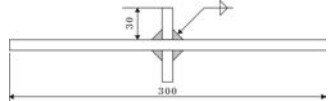
[†] 한국철도기술연구원 차량기계연구본부

E-mail : lapin95@krri.re.kr

TEL : (031)460-5248 FAX : (031)460-5289

* 한국철도기술연구원 차량기계연구본부

Table 1 Fatigue test specimens

Specimens types	Symbol	Size	Specimen shape
Base material	BM	320×25×10t	
Plate with transverse fillet welded rib	TN	300×25×10t, rib length=30, leg length=8	
Load-carrying cruciform fillet welded joint	CN	300×25×10t, rib length=30, leg length=8	
Non load-carrying cruciform fillet welded joint	NCN	300×25×10t, rib length=30, leg length=8	

되는 용접 구조용 압연 강재인 SM 490 A을 사용하였으며 피로시험에 사용된 시편의 종류 및 설명은 Table 1 과 같다.

2.1.2 일축 인장 피로 시험

일축 인장 피로 시험은 ASTM E 466에 따라 시험을 실시하였다⁽⁴⁾. 시험 장비로는 dynamic 만능 시험기인 Instron사의 model 8802 (25ton)과 model 8503 (50ton)을 사용하였다. 피로시험에 앞서 하중, 변위 및 변형률에 대한 calibration을 실시하여 시험기의 정밀도를 확인하였으며, 모든 시험의 제어 및 데이터의 처리, 결과 해석은 PC를 통해 수행하였다. 일축 인장 피로시험은 200만 이상의 수명을 갖는 미 파단 시험편이 2개 발생할 때까지 시험을 수행하였으며, 20 Hz, 응력비의 경우 R=0.1을 기본으로 시편에 따라 R=0.5, R=-0.1을 추가하여 시험하였다.

2.1.3 스트레인 및 피로 균열발생 수명 측정

피로시험시 용접부의 스트레인 및 피로 균열발생 수명을 측정하기 위하여 2개의 TN 용접시편(TN02, TN98) 용접부에 스트레인 게이지를 부착하여, 피로시험시 용접부 스트레인 변화를 측정하였다. 측정에는 R=0.1, 20Hz, 320MPa 변동하중, 축 방향 피로시험을 이용하였으며, Sony SIR-1000 레코더와 실시간 시그널 분석 장비인 Dewtron을 사용하여 피로시험 수행 전 과정에 걸

쳐 실시간으로 스트레인을 측정하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 피로시험 결과

모재와 용접시편의 피로시험을 수행하여, S-N 선도와 확률분포 S-N선도 (P-S-N 선도)를 얻어 내었다. Fig. 1 에서 모재 S-N 선도는 본 연구에서 기준이 되는 50 % 파손확률에 대한 SM 490 A 모재시편의 선도이며, Fig. 은 피로수명이 대수 정규분포를 따른다고 가정하고 계산한 SM 490 A 모재의 1 %, 10 %, 90 %, 99 % 파손확률에 대한 P-S-N선도 결과이다. S-N 선도에서 SM 490 A 모재의 피로한도는 무한수명 기준인 200백만 사이클에서 응력진폭 (stress amplitude) 값으로 135.09 MPa이며, 각각의 P-S-N 선도에서의 피로한도는 1 % 에서 68.21 MPa, 10 % 에서 92.81 MPa, 90 % 에서 196.64 MPa, 99 %에서 267.55 MPa 임을 확인하였다. 각각의 시편 경우에도 확률분포 S-N 선도를 얻었으며, 각 용접 시편의 피로한도와 SM 490 A 모재 피로한도를 수치적으로 비교한 결과는 Table 2 와 같다.

또한 SM 490 A 모재의 피로특성 분석 이외에도 각각의 용접 시편간의 S-N선도 비교를 통한 피로특성 연구를 수행하였다. TN, NCN, CN 등 필렛 용접을 한 시편의 경우 응력비(R)와 용접 이음 방법에 따른 피로강도 변화를 비교하였다.

Table 2 Fatigue limits of SM 490 A specimens

	BM	TN	NCN	CN
Fatigue limit	135.09	76.74	48.74	41.27
% increase or decrease w.r.t. BM	-	-43.2	-63.9	-69.4

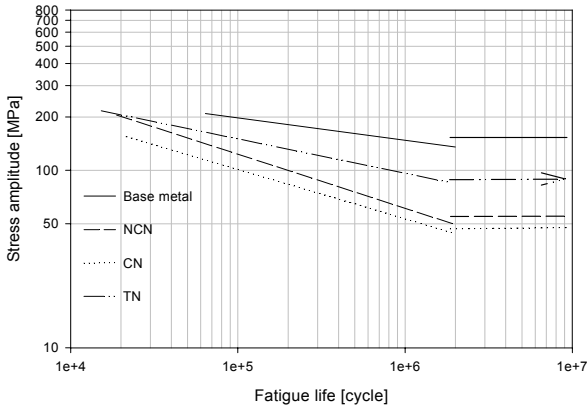


Fig. 1 S-N curves of BM, NCN, CN, and TN

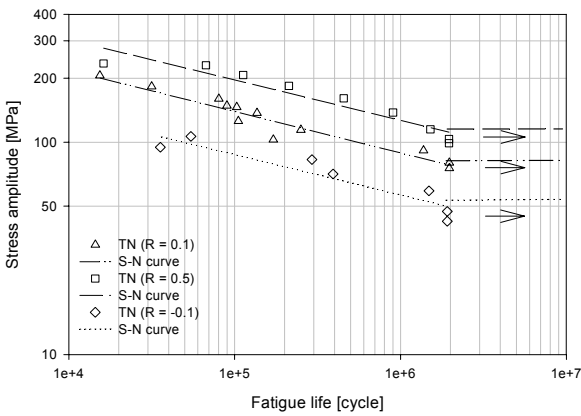


Fig. 2 S-N curves of TN (R=0.5, 0.1, -0.1)

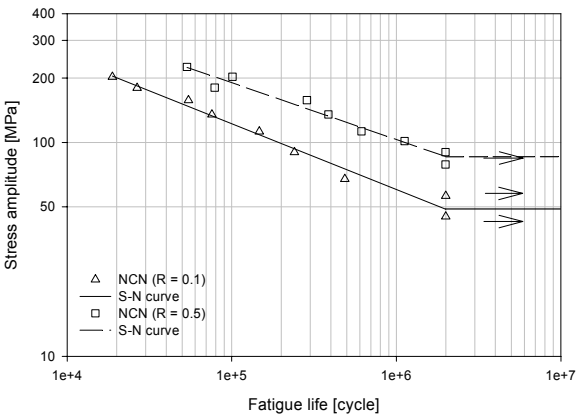


Fig. 3 S-N curves of NCN (R=0.5, 0.1)

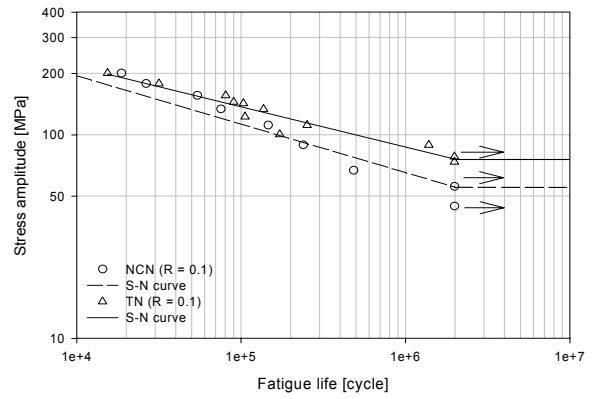


Fig. 4 S-N curves of TN and NCN (R=0.1)

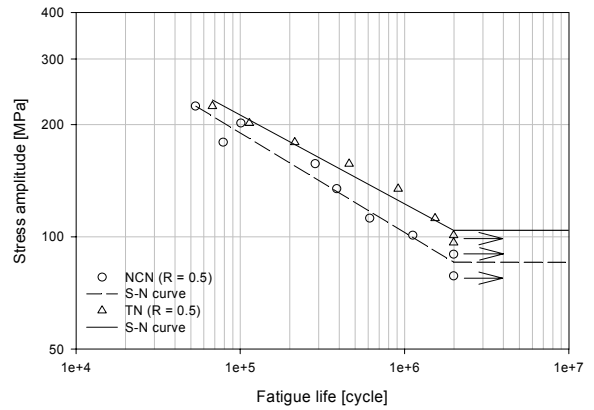


Fig. 5 S-N curves of TN and NCN (R=0.5)

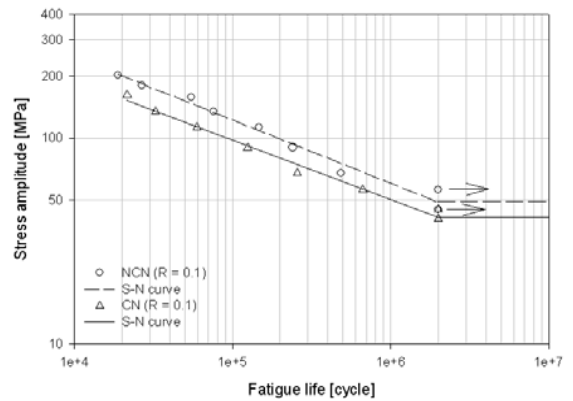


Fig. 6 S-N curve of NCN and CN (R=0.1)

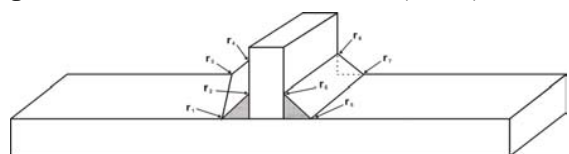


Fig. 7 Locations of the strain gages on the TN specimen

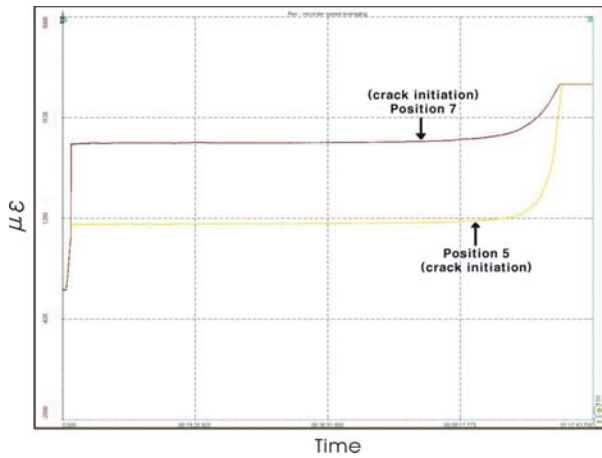


Fig. 8 Strains of TN 02 on fatigue test

먼저 Fig. 2 - Fig. 3 과 같이 TN, NCN을 이용하여 응력비에 따른 피로강도 변화를 확인하였다. 피로시험 결과 모든 필렛 용접시편의 피로강도는 응력비가 작을수록 감소하는 것을 확인하였다. 특히, Fig. 2 같이 TN을 이용하여 $R=0.5, 0.1, -0.1$ 로 응력비를 변경하여 피로시험을 수행한 결과, 일정한 응력비 감소에 따라 피로한도 또한 일정하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 필렛 용접 이음 방법에 따른 피로강도 비교에 있어서도, Fig. 4 - Fig. 5 같이 필렛 용접방법 차이에 따라 TN의 피로강도가 NCN의 피로강도보다 높음을 알 수 있다. 이는 NCN의 경우 리브가 양쪽에 존재하여 용접에 의한 영향이 더 크며, 취약부 또한 더 많이 존재하기 때문에 TN에 비해 상대적으로 더 쉽게 균열이 발생할 수 있기 때문으로 판단된다. 하지만 양쪽 모두에 리브가 존재하는 NCN과 CN의 S-N 선도 비교 경우에는 Fig. 6 과 같이 하중을 지지하지 않는 NCN의 십자형 용접 이음이 하중을 지지하는 CN 용접 이음보다 피로강도에 있어 약간 더 높음을 알 수 있다. 하지만 이 경우에도 낮은 피로수명 구간에 대해서는 두 경우 모두 피로한도에 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

3.2 피로균열 발생 위치 및 발생 수명 연구

일측 피로시험 시 피로균열 발생 위치 및 발생 수명 연구를 위하여 Fig. 7 과 같이 TN 시편 각 용접부의 스트레인 변화를 실시간으로 측정하였다. 변동하중 325 MPa, 20 Hz, $R=0.1$ 로 시험한 TN 02번 시편의 경우에는 스트레인 값이 Fig. 8 에서 보는 바와 같이 r7 (position 7) 용접부에서

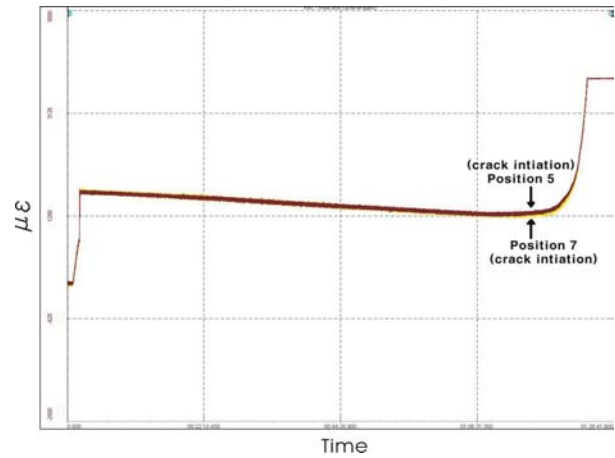


Fig. 9 Strains of TN 98 on fatigue test

가장 먼저 증가하며, 시간이 경과함에 따라 r5 (position 5) 용접부의 스트레인 값도 증가하여, 최종적으로 용접부 파단과 동시에 r7과 r5 용접부의 스트레인이 서로 같아짐을 알 수 있다. 이러한 스트레인 변화는 피로시험시 TN 시편의 균열 생성 및 진전에 관한 히스토리 정보를 알려 주며, TN 02번 시편의 경우 r7 용접부에서 균열이 가장 먼저 발생하여 증가한 후 뒤따라 r5 용접부에서도 균열이 발생하여 파단된 것으로 판단된다. 하지만 r7 과 r5 용접부의 균열 발생 시간차에 의해, 스트레인 증가 양상은 서로 다르다. 1차 균열이 발생한 r7 용접부의 경우 균열 증가에 따라 서서히 스트레인 값이 증가하고 있으나, r5 용접부의 경우에는 r7 용접부보다 균열 발생이 늦게 시작되었지만 짧은 시간에 급격히 스트레인이 증가한 것으로 보아 갑작스러운 균열 진전이 진행되며, 최종적으로 r7 과 r5 위치에서 동시에 파단된 것을 알 수 있다. 여기서 참고할 것은 초기 피로시험 시작시 r7 용접부의 스트레인 값이 상대적으로 크게 나타난 것은 시편 좌우간에 제작시 단차가 발생하여 응력이 한쪽에 많이 걸려 피로시험시 초기 인장으로 인해 뒤틀렸던 수평이 맞춰지면서 스트레인이 증가된 것으로 판단된다. 하지만 변동하중 320 MPa, 20 Hz, $R=0.1$ 로 시험한 TN 98번 시편의 경우 TN 02번 시편의 스트레인 변화와는 다른 양상이 나타났다. Fig. 9 에서 보는 바와 같이 TN 98번 시편은 r7 과 r5 용접부에서 동시에 스트레인 값이 증가하기 시작하여 최종 파단시에도 r7 과 r5 용접부의 스트레인이 동시에 일정한 값으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 이 결과를 통해 TN 98 용접시편의 경우 r7과

r5 용접부에서 동시에 균열이 발생하여 최종 파단까지도 동시에 균열이 진행된 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 두 시편의 피로시험 결과를 통해 스트레인 게이지를 이용한 스트레인 변화 측정은 피로 시험시 시편의 균열 발생과 진전 연구에 유용함을 확인하였다.

또한 이러한 스트레인 변화 측정시험은 피로 시험시 가장 알기 힘든 미세한 균열 발생으로 인한 피로균열발생 수명에 대해서도 정확하게 계산할 수 있다. 90,806 cycle 에서 최종 파단된 TN 02번 시편의 경우에는 Fig. 8 에서 보는 것과 같이 피로시험이 시작되어 48분 24초 지난 58,080 cycle 에서 r7 용접부의 스트레인이 미소하게 증가하기 시작하는 것으로 보아 전체 수명의 64%에 해당되는 시점이 피로균열발생 수명임을 알 수 있다. 또한 103,908 cycle 에서 최종 파단된 TN 98번 시편의 경우에도 Fig. 9 에서 보는 바와 같이 피로시험 시작 1시간 11초 경과한 85,520 cycle에서 r7 과 r5 용접부에서 동시에 스트레인이 미소하게 증가하기 시작하여, 전체수명의 82%에 해당되는 시점이 피로균열발생 수명임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 다양한 용접 유형의 SM 490 A 재질 시편을 이용한 피로특성 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) S-N 선도에서 SM 490 A 모재의 피로한도는 무한수명 기준인 200백만 사이클에서 응력진폭 (stress amplitude) 값으로 135.09 MPa이며, 각각의 P-S-N 선도에서의 피로한도는 1 % 에서 68.21 MPa, 10 % 에서 92.81 MPa, 90 %에서 196.64 MPa, 99 %에서 267.55 MPa 임을 확인하였다.

2) 피로시험 결과 모든 필렛 용접시편의 피로강도는 응력비가 작을수록 감소하는 것을 확인하였다. 특히, TN을 이용하여 R=0.5, 0.1, -0.1로 응력비를 변경하여 피로시험을 수행한 결과, 일정한 응력비 감소에 따라 피로한도 또한 일정하게 감소하는 것을 확인할 수 있다.

3) 필렛 용접 이음 방법에 따른 피로강도 비교에 있어 TN의 피로강도가 NCN 의 피로강도보다 높음을 알 수 있다.

4) 양쪽 모두에 리브가 존재하는 NCN과 CN의 S-N 선도 비교 경우에는 하중을 지지하지 않는

NCN의 십자형 용접 이음이 하중을 지지하는 CN 용접 이음보다 피로강도에 있어 약간 더 높음을 알 수 있다. 하지만 이 경우에도 낮은 피로수명 구간에 대해서는 두 경우 모두 피로한도에 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

5) 스트레인 게이지를 이용한 스트레인 변화 측정은 피로 시험시 시편의 균열 발생과 진전 연구에 유용함을 확인하였다. 또한 이러한 스트레인 변화 측정시험은 피로시험시 가장 알기 힘든 미세한 균열 발생으로 인한 피로균열발생 수명에 대해서도 정확하게 계산할 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업(NRL)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) DV 952, 1977, Vorschrift fur das Schwei ben metallischer Werkstoffe in Privatwerken..
- (2) JIS E 4207-1992, Truck Frames for Railway Rolling Stock-General rules for Design.
- (3) P. Przybylinski, S. Halcomb, 1977, "Interim AAR Guidelines for Fatigue analysis of Freight Cars," Association of american Railroads.
- (4) ASTM E 466, Standard Test Method for Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials.