

## SM490A 재질 필렛 용접시편의 피로수명과 용접부 피로파단시 스트레인 변화 연구

### A study on the fatigue life and the change of the strain during the fatigue fracture on the fillet welded specimens of SM490A

김재훈<sup>1</sup> · 구병춘<sup>1</sup>

Jae-Hoon Kim · Byung-Choon Goo

#### Abstract

This study investigates the fatigue lives of SM490A material(base metal) specimens and fillet weld specimens, which are made same material and weld method for the railway vehicle. These fatigue lives have a difference, the fatigue lives of weld specimen are shorter than those of base metal. We measured the strains on the weld positions of the specimens during the fatigue test for investigation of crack initiation and crack growth. In these result, we could find the information of the crack initiation position on weld bead and the history of crack growth. Also we knew that the fatigue crack initiation cycles and the changes of the strain which were affected the fractured surface roughness and morphology.

**Keywords** : Fatigue life(피로수명), Weld specimen(용접시편), Strain(변형률), Roughness(거칠기), Morphology(모폴로지)

## 1. 서론

철도차량의 구조물 중 차량의 수명을 결정하는 핵심은 대차 프레임과 차체 언더 프레임이다. 하지만 대부분의 대차 프레임과 차체 언더 프레임 부재는 용접 구조물이므로 철도차량의 잔존수명을 정확하게 평가하기 위해서는 실용적이고 정도 높은 용접 구조물 피로수명 예측 기술 확보가 필수적이다. 하지만 용접 이음부는 용접결함, 잔류응력, 용접 지단부 응력집중 등의 영향으로 피로수명을 예측하기가 쉽지 않는 것이 사실이다. 따라서 본 연구에서 철도차량 용접 구조물의 피로수명 예측을 위한 기초 연구로서 철도차량 제작에 사용되는 것과 동일한 재질과 용접 방법을 이용한 시편의 피로시험을 통해 모재와 용접부의 피로수명 차이와 S-N 선도를 확인하였다. 또한 용접 시편의 피로시험에서 각 시편에 균열이 발생하여 진전 및 파단될 때까지의 변화를 확인하기 위하여, 각 시편의 용접부에 스트레인 게이지를 이용한 스트레인 변화를 측정하였다. 그리고 이

결과를 균열면의 파단 모폴로지와 비교하여 시편의 스트레인 변화와 균열면의 파단 모폴로지 사이의 관계에 대하여 조사하였다.

## 2. 실험 및 해석

### 2.1 재료 및 방법

#### 2.1.1 재료 및 시편

본 연구에서는 철도차량의 대차 프레임에 사용되는 용접 구조용 압연 강재인 SM490A를 사용하였다. SM490A의 기계적 성질은 표 1과 같으며, 시편은 용접을 하지 않은 모재 시편(Base metal)과 그림1과 같은 필렛 용접시편(Plate with transverse fillet welded rib, symbol TN)을 제작하여 사용하였다. 용접 방법은 표 2와 같으며, 실제 철도차량 대차 제작에 사용되는 용접방법과 동일한 방법을 사용하였다.

#### 2.1.2 용접부 및 파단면 형상 측정

용접시편의 용접부 비드형상을 측정하기 위하여 일본 미츠도요(Mitutoyo)사 stylus type의 디지털 형상측정기(CV-

<sup>1</sup> 회원, 한국철도기술연구원

Table 1. Mechanical properties of SM490A steel

항복강도 (kg/mm <sup>2</sup> )	인장강도 (kg/mm <sup>2</sup> )	el.(%)	피로강도	
			모재	용접부
33	50	17이상	11	7

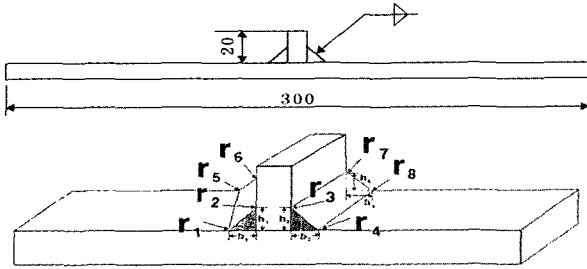


Fig. 1. Profile measurement points

4000 S4)를 이용하여 측정하였다. 측정은 각 시편마다 그림 1에 표시되어 있는 것과 같이 용접 접합부 8곳( $r_1 \sim r_8$ )에 대하여 각각의 위치에 대한 용접 비드에 접하는 원의 반지름  $\rho$ 를 측정하였다. 또한 동일 장비로 파단된 용접부의 파단면을 측정하여 균열발생 및 진전을 분석하였다.

2.1.3 피로시험

피로시험은 INSTRON사의 만능 시험기인 model 8802 (25ton)를 이용하여 ASTM E466<sup>[1]</sup> 시험법에 따라 실시하였다. 피로시험은 20Hz, JIS에 정의된 철도차량에서 무한수명의 기준인  $2 \times 10^6$  cycle까지에서 미파단 시편이 발생할 때까지 하중을 변화시켜가며 수행하였다. 특히, 용접시편의 경우  $R=0.1$ , 20Hz 축 방향 피로시험과 굽힘 피로시험을 수행하였다.

2.1.4 용접부 스트레인 측정

피로시험시 용접부의 스트레인 변화를 측정하기 위하여 2개의 필렛 용접시편(TN02, TN98)의 그림 1 위치에 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 걸쳐 실시간으로 스트레인을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 피로시험 결과

철도차량 용접 구조물의 피로수명을 확인하기 위하여 모재와 용접시편을 대상으로 피로시험을 수행하여, 그림 2~4

Table 2. Weld and heat treatment spec

항 목	Spec
용접방법	GMAW
방 식	SEMI-AUTO ROBOT 전류: 270A, 전압: 28V
Wire size	Diameter 1.2
용접재료	Filler metal spec: A5.18 Classification: AWS ER 70S-6
단, 다 층	1 pass
용접방향	Back hand
보호가스	Ar 80% + Co2 20%

와 같은 S-N 선도를 얻었다. 그림 2과 같이 모재 시편과 용접시편의 축 방향 피로시험 결과를 비교하였다. 피로한도 비교시  $2 \times 10^6$  cycle 무한수명에서의 용접시편 피로한도는 76.74MPa로 모재시편의 피로한도 135.09MPa 와 비교하여 약 43%나 작게 나타났으며, 용접에 의해 시편의 피로수명 저감이 현저히 큼을 확인할 수 있다. 또한 그림 3과 같이 용접시편의 축 방향 피로시험과 굽힘 피로시험 S-N 선도를 비교한 결과,  $2 \times 10^6$  cycle 무한수명에서의 용접시편의 굽힘 피로한도는 113.77MPa로, 축 방향 피로시험 피로한도의 값이 굽힘 피로한도의 70%밖에 미치지 못하는 것을 확인하였다. 이는 평행한 축 방향 피로시험의 경우, 고응력에 대한 재료부피(volume of material)가 굽힘 피로시험과 비교하여 상대적으로 크기 때문에 축 방향 피로시험이 굽힘 피로시험에 비해 피로한도가 낮게 나타나는 것으로 볼 수 있다.<sup>[2]</sup> 그러나 주목할 점은 S-N 선도 기울기 비교에 있어서 두 S-N 선도 모두 기울기에는 거의 차이가 없으며, 동일한 시편의 경우에는 피로시험 방법에 상관없이 응력에 따른 피로수명 관계가 일정함을 확인하였다. 하지만 그림 4와 같이 굽힘 피로시험과 모재시편의 피로시험 비교에서는 모재시편의 피로시험 결과가 축 방향 시험 결과이기 때문에 정확한 비교는 할 수 없었으며, 단지 응력과 피로수명 사이의 관계에 있어 용접시편이 모재시편에 비해 그 변화가 큼을 확인하였다.

3.2 용접부 형상 및 피로수명 관계

일축피로시험시 피로균열 발생위치 및 발생수명 연구를 위하여 시편 각 용접부의 스트레인 변화를 실시간으로 측정하였다. 먼저 이전의 연구를 통해 용접부 비드의 형상은 각각의 용접시편마다 서로 다르며[3-5], 각 시편은 비드에 접하는 원의 반지름  $\rho$ 에 의해 피로수명이 달라진다는 사실을 확인하였다. 특히, 용접부 비드에 접하는 원의 반지름  $\rho$ 가 작을수록 응력집중이 커져서 피로수명이 작아지는 것을 확인하였다.[6] 이 결과를 바탕으로 그림 1에 표시된 8곳의 용

접부에 대한 비드 형상을 측정하여 표 3과 같이 각각의 위치에 대한 비드 형상을 확인하였다. 이 결과 TN02 용접시편의 경우에는 7번 용접부에서, TN98 용접시편의 경우에는 5번 용접부에서 비드의 반지름이 가장 작은 것으로 확인되었으며,

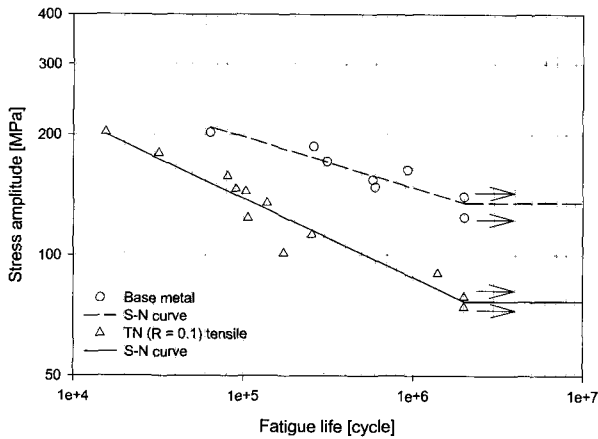


Fig. 2. S-N curve of base metal & weld spec. (axial)

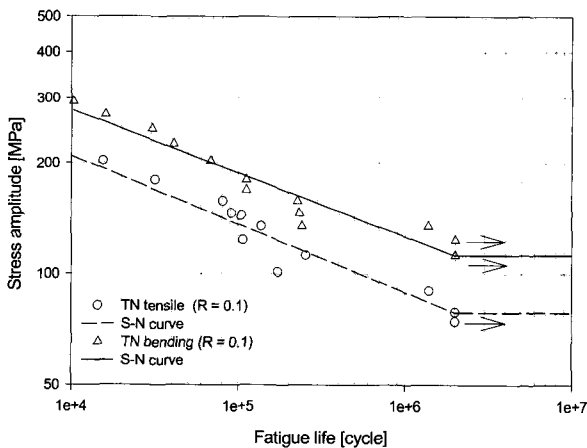


Fig. 3. S-N curve of weld spec. (axial v.s. bending)

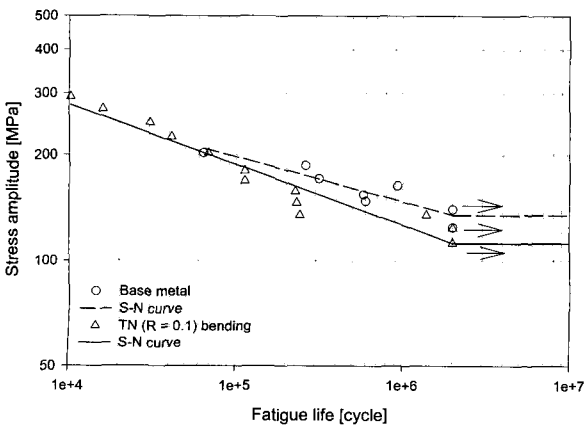


Fig. 4. S-N curve of base metal & weld spec. (bending)

이에 따라 축 방향 피로시험시 TN02 시편은 7번 위치에서, TN98 시편은 5번 위치에서 파단이 발생할 것으로 예상되었다.

측정결과 변동하중 325MPa, 20Hz, R=0.1로 시험한 TN02 시편의 경우에는 스트레인 값이 그림 5에서 보는 바와 같이 파단이 예상된 r7(position 7) 용접부에서 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 시편의 균열 생성 및 진전에 관한 히스토리 정보를 알려 주며, TN02번 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 발생된 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 피로시험 초기 인장으로 인해 뒤뉘었던 수평이 맞춰지면서 스트레인이 증가된 것으로 판단된다. 하지만 변동하중 320MPa, 20Hz, R=0.1로 시험한 TN98번 시편의 경우 TN02번 시편의 스트레인 변화와는 다른 양상이 나타났다. 그림 6에서 보는 바와 같이 TN98번 시편은 파단이 예상된 r5 용접부와 r7 용접부에서 거의 동시에 스트레인 값이 증가하기 시작하여 최종 파단시에도 r5 과 r7 용접부의 스트레인이 동시에 일정한 값으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 이 결과를 통해 TN98 용접시편의 경우 r5과 r7 용접부에서 동시에 균열이 발생하여 최종 파단까지도 동시에 균열이 진행된 것을 알 수 있다. 이것은 TN98 용접시편의 경우 r5와 r7 위치의 반지름 크기가 유사하여, 응력집중 값도 유사하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 이러한 두 시편의 피로시험 결과를 통해 용접비드 형상 측정으로 인한 파단부 예측과 스트레인 게이지를 이용한 스트레인 변화 측정이 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. 90,806 cycle 에서 최종 파단된 TN02번 시편의 경우에는 그림 5에서 보는 것과 같이 피로시험이 시작되어 48분 24초 지난 58,080 cycle에서

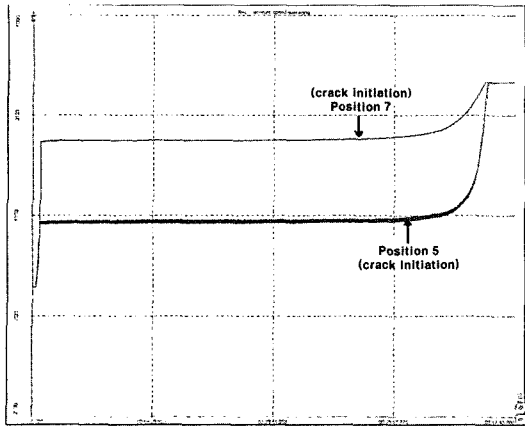


Fig. 5. Ave. strains of weld positions on TN02 spec.

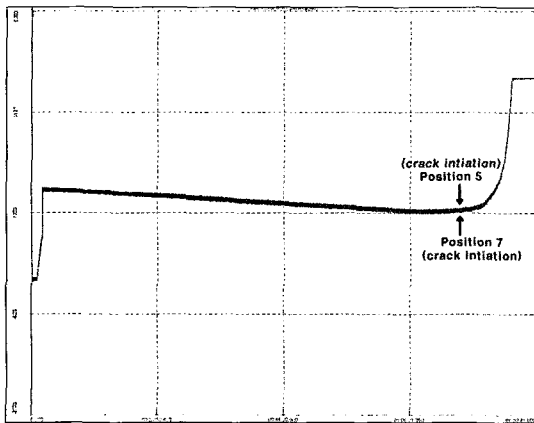


Fig. 6. Ave. strains of weld positions on TN98 spec.

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 TN98번 시편의 경우에도 그림 6에서 보는 바와 같이 피로시험 시작 1시간 11 초 경과한 85,520 cycle에서 r7 과 r5 용접부에서 동시에 스트레인이 미소하게 증가하기 시작하여, 전체수명의 82%에 해당되는 시점이 피로균열발생 수명임을 알 수 있다. 그리고 두 용접시편 피로시험 결과의 객관성을 확인하기 위하여 앞서 수행한 S-N 선도와 비교한 결과, TN02 용접시편은 90,806 cycle, TN98 용접시편은 103,908 cycle에서 파단되어 두 시편 모두 앞서 수행한 동일 용접시편의 S-N선도 상에 있음을 확인하였다. 이밖에도 스트레인 측정 결과를 바탕으로 TN02 시편과 TN98시편의 스트레인 변화에 의한 파단면 영향을 조사였다.

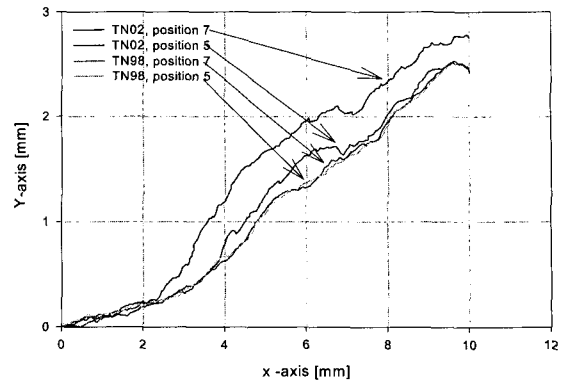


Fig. 7. Crack profiles of specimen(TN02 & TN98)

Table 3. Weld baed radius

TN02		TN98	
position	Radius(mm)	position	Radius(mm)
1	0.275	1	0.235
2	2.220	2	2.308
3	0.418	3	0.081
4	1.130	4	3.103
5	0.139	5	0.020
6	0.912	6	1.335
7	0.101	7	0.029
8	1.503	8	1.134

### 3.3 스트레인 변화와 파단면 사이의 관계 조사

그림 7과 같이 형상측정기를 이용하여 두 시편의 파단면 모폴로지(morphology) 형상을 측정하였다. TN02 시편의 경우에는 두 균열발생 점으로부터 시작된 시편 균열이 서로간의 시간차이를 두고 시편 좌우에서 독립적으로 이루어 서로 다른 스트레인 변화가 발생하였으며, 이러한 스트레인이 변화는 파단 모폴지에 직접적인 영향을 주어, 서로 다른 파단 모폴로지가 확인되었다. 조사결과 TN02 시편에서 스트레인이 서서히 증가된 5번 용접부 보다는 스트레인이 급격히 증가된 7번 용접부의 파단 모폴로지가 더 큰 변화를 나타내고 있음이 확인되었다. 하지만 TN98시편의 경우에는 앞에서 확인한 것과 같이 5번과 7번 용접부에서 거의 동시에 균열이 발생하여 파단이 진행되었기 때문에 서로간의 스트레인 변화에는 차이가 없으며, 이로 인해 그림 6과 같이 TN98 시편 5번과 7번 용접부의 파단면 모폴로지에는 거의 차이가 없음을 확인하였다.

그리고 이러한 결과를 보다 정확하게 확인하기 위하여 표 4와 같이 rms(root-mean-square) 방법을 이용하여 수치적으로 표면 거칠기를 계산하였다.<sup>[7]</sup> 계산 결과 수치적인 비교에

Table 4. rms roughness of crack profiles

TN02			TN98		
position	5	7	position	5	7
rms	1.3949	1.6042	rms	1.3489	1.3682

있어서도 그림 6과 동일한 결과가 나타나, TN02 용접시편의 경우에는 7번 용접부의 rms 표면 거칠기 값이 5번 용접부의 rms 표면 거칠기 값 보다 더 큰 것을 확인할 수 있으며, TN98의 경우에는 두 파단면의 rms 표면 거칠기 값이 거의 같은 것을 알 수 있다. 이를 통해 스트레인 변화는 시편의 파단면에 직접적인 영향을 주는 것으로 확인되었다.

#### 4. 결론

- (1) 피로한도 비교시  $2 \times 10^6$  cycle 무한수명에서의 용접시편 피로한도는 76.74MPa로 모재시편의 피로한도 135.09MPa와 비교하여 약 43%나 작게 나타났으며, 용접에 의해 시편의 피로수명 저감이 현저히 큼을 확인할 수 있다.
- (2) 용접시편의 축 방향과 굽힘 피로시험을 비교한 결과 용접시편의 축 방향 피로한도는 굽힘 피로시험 피로한도의 70%밖에 미치지 못하는 것을 확인하였다. 그러나 S-N 선도 기울기의 비교에 있어서 두 선도 모두 기울기에는 거의 차이가 없어, 동일한 시편의 경우에는 피로시험 방법에 상관없이 S-N 관계가 일정함을 확인하였다.
- (3) 스트레인 게이지를 이용한 스트레인 측정을 통해 피로 시험시 시편의 균열 발생과 진전에 대한 정보를 얻을 수 있음을 확인하였다. 또한 이러한 스트레인 변화 측정시험은 피로시험시 가장 알기 힘든 미세한 균열 발생으로 인한 피로균열발생 수명에 대해서도 정확하게 계산할 수 있다.

- (4) 스트레인 변화와 파단면을 비교한 결과 스트레인 변화는 파단면의 형상 및 표면 거칠기 등 파단 모폴로지에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

#### 후 기

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

#### 참 고 문 헌

1. ASTM E466, standard test method for conducting constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials, ASTM, 1991.
2. Julie A. B, Fundamentals of metal fatigue analysis, p.13, Printice Hall, 1990.
3. Susumu Y, Michio I, Masao K, Etsuo S, "Effect of size and frequency on fatigue properties of SM50B butt welded joint," 日本容接學會誌, Vol.47, No.9, 1978.
4. Kang, S. W, "Study on Stress Concentration Factor at Fillet Welded Joint," SNAK Papers, Vol.33, No.3, 1996.
5. Peterson. R. E, Stress concentration factors, John Wiley & Sons, Inc, 1974.
6. Jae-hoon K, Byeong-choon G, KSAE Fall-conference proceeding, Vol.2, pp.1618-1623, KSAE, 2003.
7. Jean M. B, Introduction to surface roughness and scattering,, pp. 38-56, Optical society of america, 1991.