

# 대차 프레임용 SM490A 용접재의 피로 특성 평가

박재실\*, 석창성#, 구재민\*, 신재호\*\*, 구병춘\*\*\*

## Fatigue Characteristics of SM490A Welded Joints for Bogie Frame

Jae Sil Park\*, Chang Sung Seok#, Jae Mean Koo\*, Jae Ho Shin\*\* and Byeong Choon Goo\*\*\*

### ABSTRACT

We compared the fatigue characteristics of weld metal with those of base metal, and not heat-treated with heat-treated. Also, we examined the influence of bead in a viewpoint of fatigue life.

From the experimental results, it has been seen that the fatigue characteristics of welded specimens grinded the toe of bead are slightly better than not grinded. We have seen that the fatigue life is affected more by the stress concentration on the profile change in the weld toe rather than by residual stress influence, because heat-treated or not had almost no influence on the fatigue characteristics.

**Key Words** : Fatigue(피로), S-N curve(S-N 선도), Base metal(모재), Weld toe(용접지단부), Stress concentration factor(응력집중계수), Weld bead profile(용접비드 형상)

### 1. 서론

철도 차량은 안전성, 정시성, 대량 수송성이 우수하여 수송 수요가 증가하고 있으며, 열차 운행 횟수의 증가와 차량의 고속화로 운행 조건이 가혹해짐에 따라 이에 대한 절대적인 안전성과 높은 신뢰성이 요구되고 있다. 철도 차량과 같이 반복 하중이 연속적으로 작용하는 구조물의 설계에 있어서는 구조물의 사용 환경이나 재료의 피로 특성을 최우선의 고려 사항으로 간주해야 한다.1 실제로 철도차량의 대차 프레임은 용접으로 제작되어 있으며, 용접부에서 파손이 발생하고 있다. 이 때문에

피로 설계 기준에서는 구조 재료의 피로 특성 데이터를 제시하고 200만회의 반복 하중에 견딜 수 있는 응력조건을 설계 응력으로 정하고 있다. 그러나 이러한 설계기준은 건전한 재료의 피로특성을 기본으로 하고, 몇 가지의 정형화된 설계 기준 곡선을 제시하고 있으므로 실제 상황과 다른 평가를 내릴 가능성이 있다. 이러한 문제점을 검토하기 위해서 실제 구조물의 부분 형상을 시험편으로 가공하여 반복하중하에서의 반응을 조사하는 연구가 절실히 필요하며, 보다 정량적인 설계나 기존 구조물의 안전성 확보를 위해서는 보다 많은 구조형상의 피로 거동에 대한 실험적 연구가 요구된다.

접수일: 2004년 2월 23일; 게재승인일: 2004년 9월 9일

\* 성균관대학교 기계공학부

# 교신저자: 성균관대학교 기계공학부

E-mail seok@skku.edu Tel. (031) 290-7446

\*\* 자동차부품연구원

\*\*\* 철도기술연구원

본 연구에서는 대차 프레임 재료인 SM 490A 재료의 모재와 용접재의 열처리 유무가 피로 수명에 미치는 영향과 용접지단부 형상과 피로 수명과의 관계를 피로 시험을 통하여 연구하고자 한다. 또한, 유한요소법에 의한 응력해석을 통해 용접지단부의 형상 및 치수 변화에 따른 응력집중계수를 고찰함으로써 피로 수명에 대한 용접지단부 및 용접비드 형상의 영향을 연구하고자 한다.

## 2. 재료 및 시험방법

### 2.1 시험재료

본 피로 특성 평가 시험에 사용된 재료는 SM490A Steel재료로써, Table 1에 SM490A steel의 화학조성을 나타내었다. 3 Pass GMAW (Gas Metal Arc Welding) 방법을 사용하여 재료를 용접하였고 Table 2에 용접 및 열처리 조건을 나타내었다.

후열처리는 Table 2에 나타낸 바와 같이 철도 차량의 대차 제작에 사용하고 있는 조건에 따라 590℃에서 1시간 동안 유지하였고 가열 및 냉각속도는 시간당 120℃이하로 하였다.

### 2.2 시편 및 시험장치

인장특성의 변화를 관찰하기 위하여 ASTM E8<sup>2</sup>의 인장 시험편 규격에 준하여 시편 두께가 10 mm인 판형 시험편을 제작하였고 형상은 Fig. 1과 같다. 피로 시험을 위해서 ASTM E466<sup>3</sup>의 피로 시험편 규격에 따라 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 피로 시험편을 제작하였다.

Fig. 2(a)에는 용접 시편(welded specimen)의 형상을 나타내었다. 용접 지단부 형상의 영향을 평가하기 위해 지단부가 균일한 곡률 반경을 갖도록 그라인딩 작업을 수행한 것과 하지 않은 것으로 구분하여 두 종류의 시편을 준비하였다. Fig. 2(b)는 용접을 수행한 후 비드를 제거한 시편(cut-offed bead specimen)으로 길이가 320mm인 판형 시편이다.

시험 장비로는 50ton(Instron model 8503) 및 25ton(Instron model 8802) 용량의 전기유압식 재료 시험 시스템을 사용하였으며 인장 시험을 위해 준비된 장비의 모습을 Fig. 3에 나타내었다.

본 시험을 시작하기 전에 하중, 변위 및 변형률에 대한 교정을 실시하여 시험기의 정밀도를 확인하였다.

또한, 용접지단부의 자세한 형상 치수 변화에

따른 응력집중계수의 변화를 정량적으로 평가하기 위해 미츠도요(Mitutoyo)사 stylus type의 디지털 형상측정기 (CV-4000 S4)를 이용하여 용접시편의 용접지단부 비드 형상을 측정하였다.

Table 1 Chemical compositions of SM490A steel (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Fe
~0.20	~0.55	~1.60	~0.035	~0.035	Bal.

Table 2 Welding and heat treatment conditions

Specification	
Welding method	GMAW (Gas Metal Arc Welding)
Welding conditions	Semi-auto ROBOT
	1 Pass 2 Pass 3 Pass
	Current (A) 150 190 180
	Voltage (V) 103 105 105
Speed (cm/min) 29 18 18	
Wire size	Diameter 1.2 mm
Form	1F
Welded material	Filler metal spec. : A5.18 Classification : AWS ER 70S-6
Shielding gas	CO <sub>2</sub> or Ar(85%)+CO <sub>2</sub> (15%) Flow rate : 15-20 l/min
Direction	Backhand
Heat treatment conditions	Holding temperature : 590±20℃ Holding time : 1 Hour Heating and Cooling rate : 120℃/h Maximum temperature : 200 ℃

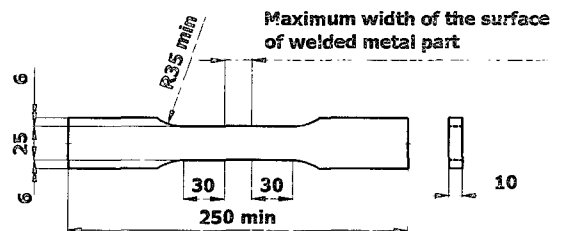
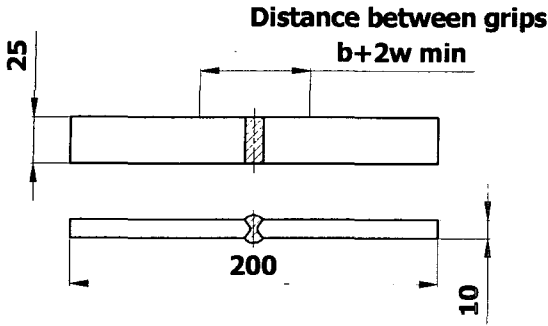
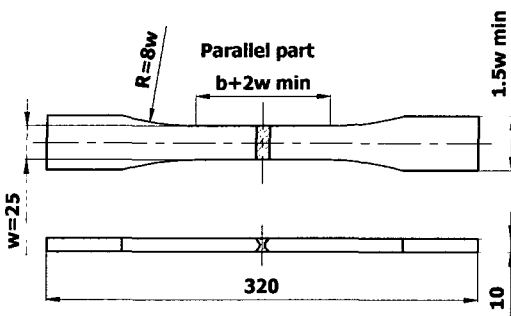


Fig. 1 Tensile test specimen



(a) Fatigue test specimen without cut-offed bead



w : specimen width

b : width of deposited metal

(b) Fatigue test specimen with cut-offed bead

Fig. 2 Fatigue test specimen

### 2.3 인장 시험

SM490A 용접재의 항복 강도, 인장강도 등의 재료 물성치를 획득하기 위하여 ASTM E8<sup>2</sup>에 따라 인장 시험을 수행하였다. 측정된 결과를 피로 시험 해석의 기초 데이터로 사용하였다.

시험 속도를 1mm/min로 하여 시험을 수행하였고, 게이지 길이가 25mm인 신장계를 부착하여 시험편이 파단될 때까지 변위를 측정하였다. 압축 응력과 굽힘에 민감하므로 시험기와 시험편의 축 정렬과 하중 제어에 주의하였다.

명확하게 항복점 현상이 나타나지 않는 경우에는 0.2% 오프셋법을 사용하여 항복 강도를 결정하였다. ASTM E8<sup>2</sup>에 따라 최대 하중을 단면적으로 나누어 인장 강도를 결정하였으며, 시험에서 얻어진 하중-변위 선도로부터 공칭응력-공칭변형률 선도를 얻었다.

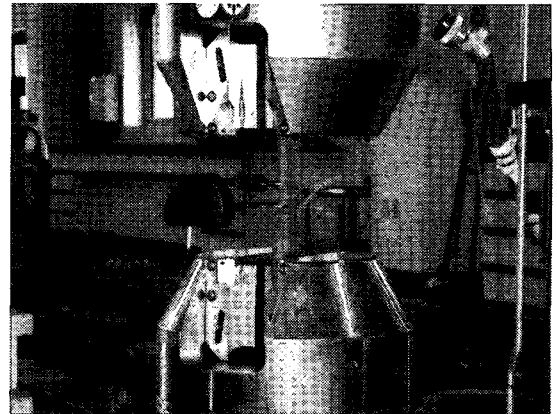


Fig. 3 Electro-hydraulic material testing system

### 2.4 피로 시험

ASTM E466<sup>3</sup>에 따라 피로시험을 실시하였다. 시험 장비로는 인장 시험에 사용된 전기유압식 재료 시험기(Instron model 8802, 25ton)를 사용하였다. 본 시험을 시작하기 전에 하중에 대한 보정을 실시하여 시험기의 정밀도를 확인하였다. 피로 한도를 평가하기 위해 최대  $2 \times 10^6$  cycle에서 미파단 시험편이 발생할 때까지 피로 시험을 수행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 인장시험 결과

SM490A steel 재료의 인장 시험에서 얻은 하중-변위 선도로부터 시험편의 초기 단면적과 게이지 길이를 사용하여 공칭응력-공칭변형률 선도를 구하였으며 항복 강도와 인장 강도를 결정하였다.

인장 시험은 3개의 시험편에 대해 수행되었고, 시험 결과로부터 구한 항복강도, 인장강도 값을 정리한 결과를 Table 3에 나타내었다. Fig. 4는 인장 시험으로부터 얻은 시험편의 공칭응력-공칭변형률 곡선을 나타낸 것이다.

Table 3 Tensile test results of the SM490A steel

Specimen	Base metal-1	Base metal-2	Base metal-3
Yield strength (MPa)	346	348	347
Ultimate strength (MPa)	515	522	519

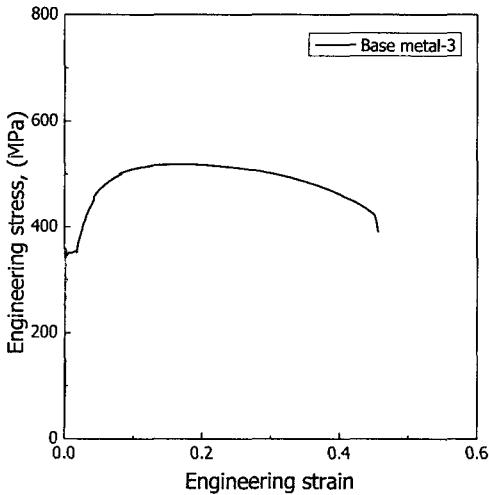


Fig. 4 Nominal stress-nominal strain diagram of base metal

### 3.2 비드 형상에 따른 피로시험 결과

Fig. 5와 Fig. 6에는 모재와 비드 형상에 따른 용접재의 피로 시험 결과를 열처리 전·후로 구분하여 나타내었다.

Fig. 5에는 열처리를 수행하지 않은 시편의 피로 시험 결과를 나타내었다. 용접재의 피로 수명이 모재 보다 현저히 낮은 것을 확인할 수 있었다. 용접 작업을 수행할 때 국부적으로 작용하는 높은 열에 의한 재료의 팽창과 용접 작업 후 냉각되는 과정에서 발생하는 수축 변형은 용접 부재에 인장 및 압축 잔류응력을 유발시키게 된다. 이러한 잔류응력은 용접 구조물의 파괴 및 피로 강도에 크게 영향을 미치게 된다.<sup>4</sup> 일반적으로 용접재는 원주형 결정으로 구성되어 있고 fusion line 부근의 미세 조직이 거친 결정으로 구성되어 있어 다른 부분보다 좋지 않은 피로 특성을 나타내며, 용접부에 존재하는 미세 결함 또한 피로 강도의 저하를 가져올 수 있다.<sup>5</sup>

또한 Fig. 5에는 용접 후 그라인딩 작업을 수행한 시편과 그렇지 않은 시편의 결과를 비교하여 나타내었다. 용접 후 그라인딩 작업을 수행한 피로 시험편의 피로 수명은 그렇지 않은 시편의 피로 시험 결과와 대체로 비슷한 경향을 나타내었다. 하지만

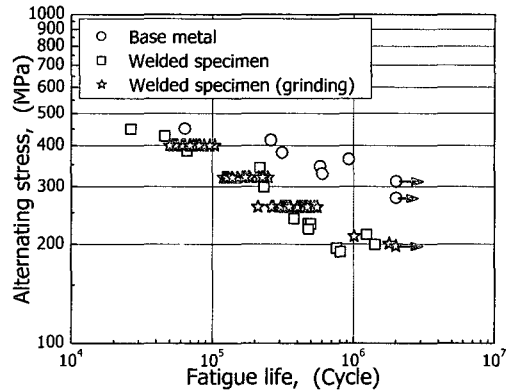


Fig. 5 Comparison between base metal and welded specimen before heat treatment

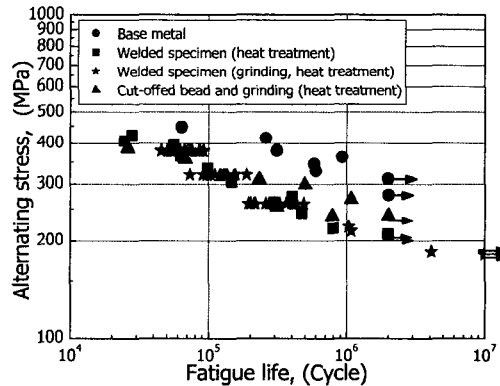


Fig. 6 Comparison between base metal and welded specimen after heat treatment

그라인딩 작업을 하지 않은 시편의 산포를 고려할 경우 그라인딩 작업을 수행한 시편의 시험 결과가 다소 우수한 것으로 판단된다. 용접 후 그라인딩 작업을 수행한 시편의 피로수명 시험 결과의 분포 영역이 그렇지 않은 시편에 비해 다소 높은 이유는 용접지단부의 형상에 의한 응력집중 현상의 완화 때문일 것으로 판단된다. 따라서 용접비드 형상에 따른 피로수명의 영향을 비교해 볼 필요성이 있다.<sup>6-7</sup>

Fig. 6에는 열처리를 수행한 용접재의 결과와

모재의 시험 결과를 비교하여 나타내었다. 용접 비드를 제거한 후 그라인딩 작업을 수행한 용접 시편 (cut-offed bead)의 피로한도가 다른 용접 시편 보다 우수함을 알 수 있다. 그라인딩 작업에 따른 결과는 열처리 전의 결과와 유사하게 나타났다.

### 3.3 열처리에 따른 피로시험 결과

Fig. 7과 Fig. 8에는 열처리에 따른 용접재의 피로 시험 결과를 용접 비드의 형상 별로 구분하여 나타내었다.

Fig. 7은 그라인딩 작업을 수행하지 않은 용접재의 열처리 유·무에 따른 결과를 비교한 것으로 열처리 전 시편의 피로특성과 큰 차이가 나타나지 않았으나 고수명 영역에서 열처리를 수행한 시편의 경우가 다소 긴 수명을 보이고 있다.

Fig. 8은 용접 후 그라인딩 작업을 수행한 시편의 열처리 유·무에 따른 피로 시험 결과를 비교한 것으로, 그라인딩 작업을 수행하지 않은 시편의 결과와 마찬가지로 차이가 나타나지 않았다.

일반적으로 용접 구조물의 금속 조직과 경도 분포의 불균일성을 없애고, 인장 잔류응력에 의한 피로 강도의 저하 및 치수 변화(변형) 등을 최소화하기 위하여 용접 후 열처리(post weld heat treatment, PWHT) 또는 기계적 응력 완화 처리(mechanical stress relieving treatment, MSRT)를 수행하고 있다. 하지만, 최근의 연구 결과를 살펴보면 용접 후 열처리를 수행하지 않은 대차의 경우 장시간 사용하여도 피로수명에 크게 영향을 미치지 않았다는 보고가 있다.<sup>8</sup> 이러한 결과로 볼 때 피로시험 중에 가해지는 응력에 의해 잔류응력이 완화되어 큰 차이가 나타나지 않은 것으로 판단된다.

## 4. 용접비드 형상의 영향 분석

### 4.1 유한요소해석 모델

요소망 모델링은 상용 프로그램인 PATRAN 2001을 이용하였으며, ABAQUS ver. 5.8을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석 모델은 용접재 피로 시편의 1/4 모델로, 해석에 사용된 요소는 8절점 3차원 solid 요소(C3D8, 8-node brick)이다. 절점의 개수는 약 35000개, 요소의 개수는 약 32,000개이며 탄성 해석을 수행하였다.

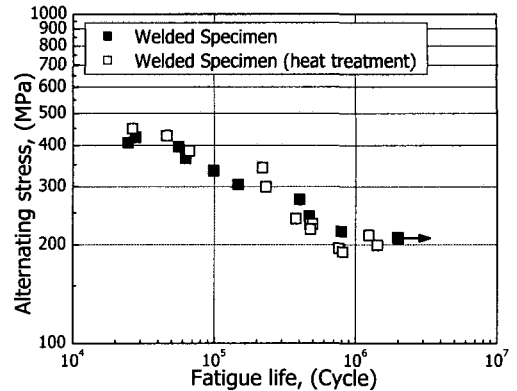


Fig. 7 Comparison of test results according to heat treatment for welded specimens

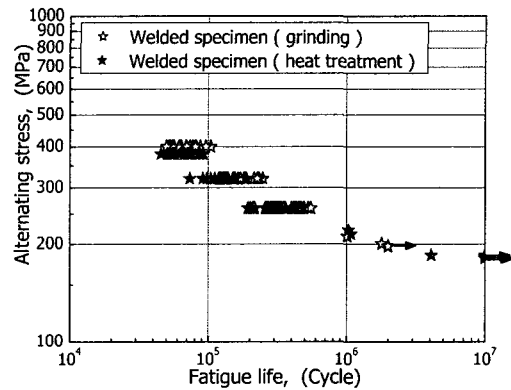


Fig. 8 Comparison of test results according to heat treatment for welded specimen with grinding

### 4.2 해석 방법 및 조건

용접 구조물에 대한 피로수명을 평가하기 위해서는 복잡하고 다양한 용접형상에 대한 피로수명 영향을 적절히 산정하는 것이 무엇보다 중요하다.

따라서 맞대기 용접에 있어서 용접지단부의 곡률반경( $\rho$ ), 접선각( $\theta$ ), 비드의 높이( $h$ )의 조건을 일정하게 변화시켜 가면서 유한요소 해석을 수행하였다. 해석 결과로부터 응력집중계수를 계산하고 경향을 분석하여 각 요소들이 용접부에 미치는 영향을 분석하였다.

Fig. 9에 표시되어 있는 것과 같이 모재와 용접

접합부 사이의 용접 지단부의 8지점 각각에 대하여 비드의 접선각, 비드에 접하는 곡률반경을 변화시켜가며 해석을 수행하였고 또한 비드의 높이를 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 곡률 반경값은 0.25, 1.75, 3.25mm의 세가지로 나누었고, 접선각은 25°, 45°, 55°, 비드의 높이는 1.5, 2.25, 3.0mm로 총 27개의 형상을 모델링하여 응력집중계수( $K_t$ )를 계산하였다.

### 4.3 해석 결과

Fig. 10은 유한요소해석 결과로써 von Mises 응력 상태를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 용접시편의 용접지단부에서 최대응력이 발생하였다.

Table 4는 27개의 용접부의 형상과 치수 변화에 따른 그라인딩 작업을 수행한 시편 용접 지단부의 응력집중계수를 유한요소해석을 통해 계산한 결과를 나타내었다. 그 결과 용접형상의 치수 변화에 따라 최대 응력값의 변화가 나타나는 것을 알 수 있었다.

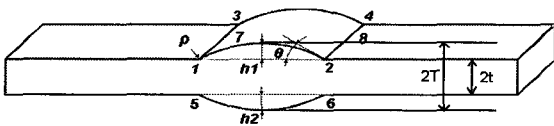


Fig. 9 Schematic of the specimen

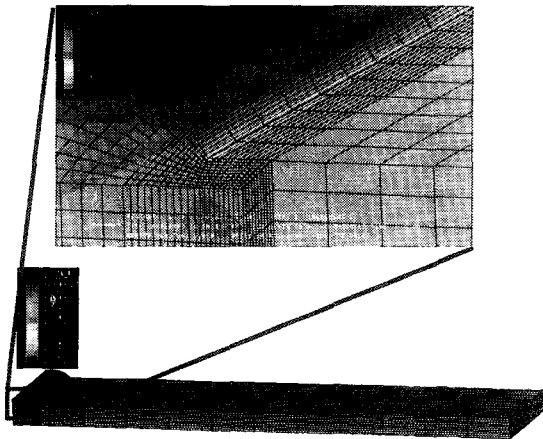


Fig. 10 3D von Mises stress distribution

Fig. 11은 응력집중계수와 비드 높이를 비교한 그래프로 곡률 반경이 작을수록 응력집중계수가 크게 나타나며, 또한 곡률 반경이 작을수록 비드 높이의 영향도 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12는 응력집중계수와 접선각의 관계를 나타낸 그래프로, 접선각이 클수록 응력집중계수가 증가하는 것을 알 수 있었다.

### 4.4 고찰

지금까지의 결과를 종합해 보면 비드의 높이가 높을수록 접선각이 클수록 곡률 반경이 작을수록 응력집중이 커지는 경향을 확인 할 수 있었다.

Table 4 Stress concentration factor(von-Mises)

Height, $h$ (mm)	Tangential Angle, $\theta$ (°)	Weld toe radius, $\rho$ (mm)			
		0	0.25	1.75	3.25
1.5	25		1.83	1.32	1.22
	45		1.99	1.38	1.26
	55	2.76	2.22	1.44	1.31
2.25	25		1.92	1.33	1.22
	45		2.00	1.41	1.28
	55	2.77	2.22	1.49	1.34
3.0	25		2.21	1.35	1.22
	45		2.15	1.43	1.28
	55	3.28	2.39	1.51	1.34

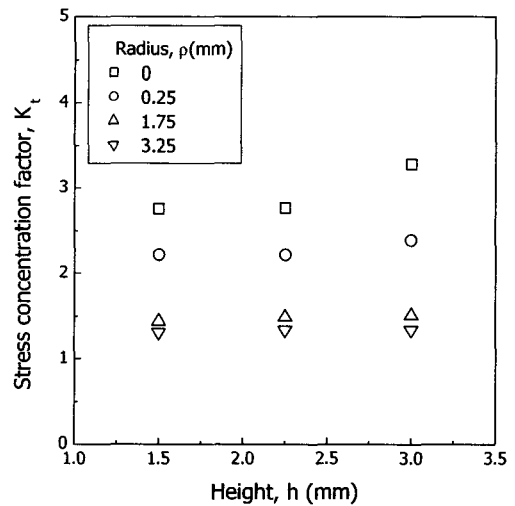


Fig. 11 Stress concentration factor vs height variation

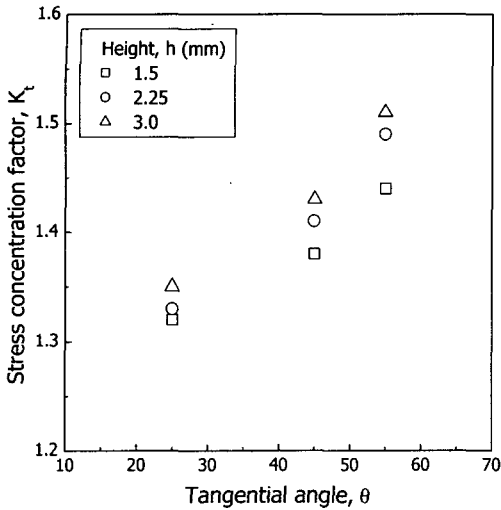


Fig. 12 Stress concentration factor vs angle variation

이러한 결과를 실제 피로 시험의 경우와 비교하기 위해 디지털 형상 측정기로 측정된 시험편의 형상 측정 결과로부터 응력 집중 계수를 산출하였다. 재질에는 무관하며, 오직 기하학적 형상에만 영향을 받는 응력집중계수를 산출하고자 아래의 식 (1)<sup>9</sup>을 사용하였으며, 식 (1)내의 기호들은 Fig. 9에서 정의된 바와 같다.

$$K_t = 1 + \left[ \frac{1 - \exp(-0.9\sqrt{T/h} \cdot (\pi - \theta))}{1 - \exp(-0.9\sqrt{T/h} \cdot \pi/2)} \right] \cdot \left( \frac{1}{2.8T/t - 2} \cdot \frac{h}{\rho} \right)^{0.65} \quad (1)$$

Table 5는 용접 지단부의 형상에 따른 응력집중 계수를 계산한 결과이다. 실제 피로시험을 통한 초기 균열 발생 위치와 응력집중계수의 최대 지점이 일치하였고, 용접지단부의 곡률반경이 작을수록, 비드 접선각이 클수록, 비드 높이가 높을수록 응력 집중계수가 크게 계산되었다. Fig 13은 5개의 AAY 시험편의 해석결과를 종합한 결과로 AAY-3 시험편의 경우를 제외하고 각각의 시험편에서 최대 응력 집중 계수가 계산된 지점에서 시험편의 파단이 시작됨을 알 수 있다. AAY-3 시험편의 경우에는 8지점 중에서

Table 5 Results of  $K_t$  and bead profile data

Specimen number	Fracture position	Toe radius, $\rho$ (mm)	Angle, $\theta$ ( $^\circ$ )	Height, $h$ (mm)	$K_t$
AAY-1	4	0.64	47.00	1.86	2.35
AAY-2	8	1.67	38.88	1.78	1.71
AAY-3	5	0.18	40.59	1.72	3.95
AAY-4	8	0.38	38.27	1.92	2.89
AAY-5	4	0.34	44.28	1.95	3.06
AAY-6	8	0.22	59.89	2.16	3.76
AAY-7	4	1.29	57.84	1.87	1.85
AAY-8	8	0.16	39.73	1.85	4.24
AAY-9	6	0.25	50.83	2.78	3.73
AAY-10	3	0.38	37.77	1.50	2.77

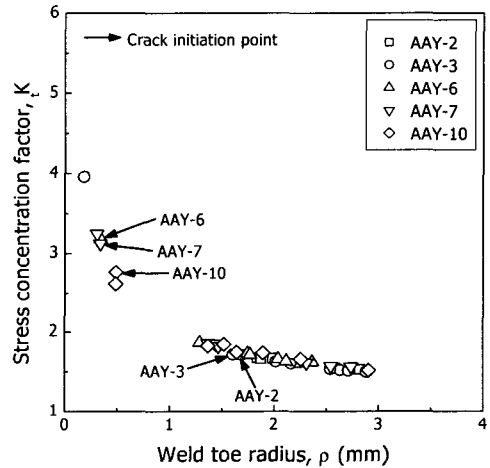


Fig. 13 Results of  $K_t$  and bead profile data

한 지점이 다른 지점에 비해 곡률 반경이 매우 작게 측정이 되었다. 따라서 응력집중에 의해 소성 변형이 발생하고 이에 따라 응력집중계수가 변화하게 된다. 이러한 이유로 응력집중계수의 최대점에서 파단이 시작되지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 14는 피로시험 결과 발생한 파단면을 나타낸 것으로서 균열이 응력집중계수가 최대인 부분에서 발생한 것을 알 수 있다. 또한 최근 유사한 다른 연구에서도 응력집중계수가 피로수명에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다.<sup>4,6-7</sup> 이러한 결과로 볼 때 용접부의 형상에 따른 응력집중계수가 피로수명에 영향을 미치는 것을 다시 한번 확인할 수 있다.

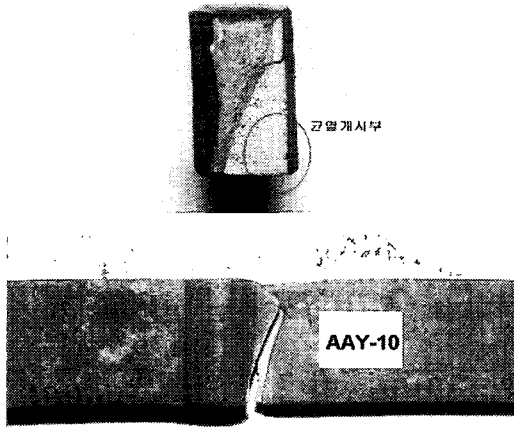


Fig. 14 Fracture surface of a welded specimen

## 5. 결론

본 연구에서는 철도차량용 대차 프레임 재료인 SM490A 재료의 인장시험을 통해 모재의 인장 물성치를 측정하였다. 또한 모재, 용접 후 처리방법에 따른 용접재, 그라인딩, 비드 제거 후 그라인딩 처리한 3가지 조건의 용접재에 대하여 열처리 유·무에 따라 피로 시험을 수행함으로써, 대차 프레임 재료의 피로 하중 조건에 대한 피로 특성 차이를 고찰하였다. 또한, 용접 비드의 형상 및 치수가 피로수명에 미치는 영향을 평가하였으며 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 열처리 유·무에 따른 피로특성의 비교 결과 큰 차이가 발생하지 않았으며, 용접 지단부의 형상 및 치수 변화가 피로 수명에 영향을 주는 것을 시험 결과로부터 확인하였다.
- (2) 유한요소해석결과 곡률반경이 작을수록, 접선 각이 클수록, 비드의 높이가 높을수록 응력집중계수 값이 커지는 경향이 나타났다.
- (3) 피로시험결과, 용접재의 초기균열발생 위치는 응력집중계수가 최대인 위치와 일치하였다.

## 후 기

이 논문은 BK21 사업과 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터(SAFE)에 의하여 지원되었음.

## 참고문헌

1. Park, B. N., Kim, K. H. and Kim, H. K., "An Evaluation Method of Fatigue Strength and Reliability in a Railway Wheel with an Application of Strength-Stress Interference Model," KSR, Vol. 5, No. 2, pp. 118-124, 2002.
2. ASTM, E8-01 "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," 2001.
3. ASTM, E466-96 "Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials," 2002.
4. Kang, S. W., "Study on Stress Concentration Factor at Fillet Welded Joint," SNAK Papers, Vol. 33, No. 3, 1996.
5. Stephens, R. I., Metal fatigue in engineering, John wiley & sons, inc, pp. 196-199, 2001.
6. Terasaki, T., "Effect of welding residual stress on fatigue strength of welded joint," Material, Vol. 36, No. 410, pp. 1246-1252, 1987.
7. Youn, J. G. and Kim, H. J., "A Study on the Fatigue Characteristics of Accelerated Cooled TMCP Steel's Welded Joint with High Heat Input," Journal of the Korean Welding Society, Vol. 6, No. 1, pp. 28-34, 1988.
8. Lee, H. W., Kim, J. H and Kim, H. J., "The Static Overload Effect Estimations on Fatigue Strength by the Measurement of Local Strain Variation at the Weldment Toe," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 6, pp. 59-66, 2001.
9. Nishida, M., Stress Concentration, Morikita Ink., 1971.