

맞대기용접 비드 형상이 피로강도에 미치는 영향에 관한 통계적 연구

Statistical study on the effect of butt weld bead profiles

on fatigue behaviour

김 재훈*, 구 병춘*, 서 정원*

* 한국철도기술연구원

1. 서 론

철도차량의 잔존수명 평가기술은 철도차량을 신규로 제작하여 일정기간이 경과한 후 향후 얼마나 더 사용 가능한지를 평가하는 기술이다. 그리고 이러한 철도차량의 구조물 중 차량의 수명을 결정하는 핵심은 대차 프레임과 차체 언더 프레임에 관한 잔존수명 평가 기술이다. 대부분의 대차 프레임과 차체 언더 프레임 부재는 용접구조물이므로 철도차량의 잔존수명을 정확하게 평가하기 위해서는 실용적이고 정도 높은 용접구조물 피로수명예측기술 확보가 필요하다. 용접부의 피로강도는 용접시 필연적으로 발생하는 용접결함, 잔류응력, 용접 지단부 응력집중 등의 영향으로 인하여 모재에 비하여 크게 저하될 수밖에 없다. 하지만 용접결함은 불량 용접에 의한 것으로 정상적으로 용접되었다는 가정 하에서는 배제할 수 있다. 또한 잔류응력은 구조물의 제작과정에서 풀립처리(stress-relief annealing)를 하거나 소성변형을 추가시키는 방법 등을 통해 제거하거나 감소시킬 수 있다. 하지만 비드 노치부 응력집중은 부재를 용접할 경우에는 반드시 존재하여 부재의 피로수명에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 용접된 철도차량 구조물의 정확한 수명 예측을 위하여 용접지단부의 응력집중에 의한 피로수명 변화를 연구하고자 한다. 이를 위하여 용접시편의 비드 형상을 측정하고 이에 해당하는 응력집중계수를 계산함으로써 비드 형상에 의한 S-N 선도 계수의 변화를 연구하였다.

2. 본 론

2.1 재료 및 방법

2.1.1 재료 및 시편

본 연구에서는 철도차량의 대차 프레임에 사용되는 용접구조용 압연강재인 SM490A재질을 사용하였으며, 실제 철도차량의 대차 제작에 사용되는 용접방법과 동일하게 세미오토-로봇용접 방식의 GMAW 용접방법을 이용하여 그림 1의 맞대기 용접시편을 제작하여 사용하였다. 실험에 사용한 시편의 개수는 18개이며, SM490A의 기계적 성질은 표1와 같다.

2.1.2 측정 및 해석

먼저 용접시편의 용접부 비드형상을 측정하기 위하여 일본 미츠도요(Mitutoyo)사의 stylus type의 디지털 형상측정기(CV-4000 S4)를 이용하여 비드형상을 측정하였다. 측정은 각 시편마다 그림1과 같이 모재와 용접 접합부 8곳에서 수행하였으며, 비드의 용접각도 θ 와 비드에 접하는 원의 반지름 ρ 값을 측정하였다.

비드형상 변화에 대한 시편의 응력집중계수(stress concentration factor, Kt)를 구하기 위하여 I-DEAS 8 상용패키지 프로그램을 사용하여 대칭성을 이용한 Solid 요소 3차원 1/4모델 유한요소 해석을 수행하였다. 이때 용접부 해석의 정확성을 높이기 위해 용접부 element의 길이는 두께 $t=10\text{mm}$ 의 1/15인 0.67mm로 정하였으며, 나머지 모재부의 경우에는 element 길이를 4mm로 정하였다.¹⁾

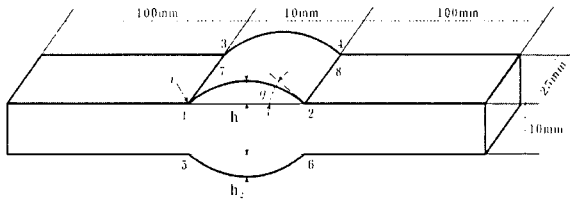


Fig. 1 Shape measurement points

Table 1 Mechanical property

Mechanical Property (모재부)		
σ_y (MPa)	UTS(MPa)	el.(%)
352	514	29

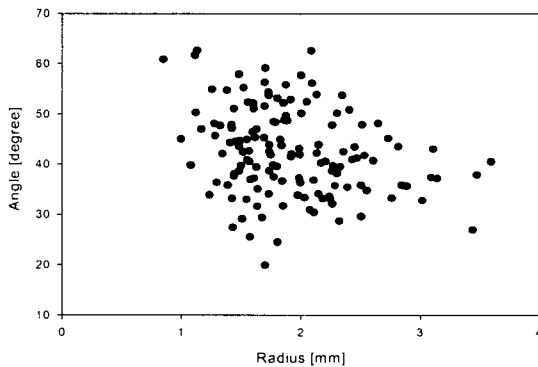


Fig.2 Distribution of data (θ , ρ)

2.2 결과 및 설명

2.2.1 용접시편 형상 측정 결과

먼저 철도차량 용접 구조물의 피로수명을 예측하기 위하여 용접부 형상에 대한 144개의 측정 결과들을 통계적 방법으로 분석하였다. 로봇용접 방법으로 제작한 용접시편의 경우에도 용접비드와 모재 사이의 용접각도 θ 와 반지름 ρ 값의 분포는 그림2와 같이 산재해 있음을 확인하였다. 용접각도 θ 의 경우에는 $19^\circ 90'$ 에서 $62^\circ 53'$ 사이의 범위에 측정값들이 분포해 있으며, 반지름 ρ 의 경우에는 0.85mm에서 3.595mm 사이에 측정값들이 분포해 있다.

용접각도 θ 와 반지름 ρ 각각에 대하여 표준정규분포 함수를 계산한 결과 용접각도 θ 의 경우에는 평균 $m = 42^\circ 36'$ 와 표준편차 $\sigma = 8^\circ 49'$ 에 대하여 $20^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ 범위 사이에 측정값들의 97.67%가 집중되어 분포하고 있으며, 반지름 ρ 의 경우에도 평균 $m = 1.920$ mm와 표준편차 $\sigma = 0.5186$ mm에 대하여 $1 \leq \rho \leq 3$ 의 범위 사이에 94.28%에 해당하는 측정값들이

Table 2 Stress concentration factor, K_t

	$\theta = 20$	$\theta = 30$	$\theta = 40$	$\theta = 50$	평균	평균 차
$\rho = 1$	1.8373	1.7385	1.6768	1.5458	1.6996	0.2099
$\rho = 2$	1.5435	1.5023	1.4667	1.4463	1.4897	
$\rho = 3$	1.4102	1.3966	1.3627	1.3582	1.3819	
평균	1.5970	1.5458	1.5021	1.4501		0.1080
평균 차	0.0512	0.0437	0.052			

Table 3 Fatigue stress concentration factor, K_f

	$\theta = 20$	$\theta = 30$	$\theta = 40$	$\theta = 50$
$\rho = 1$	1.6677	1.5889	1.5397	1.4352
$\rho = 2$	1.4823	1.4457	1.4141	1.3960
$\rho = 3$	1.3782	1.3657	1.3344	1.3302

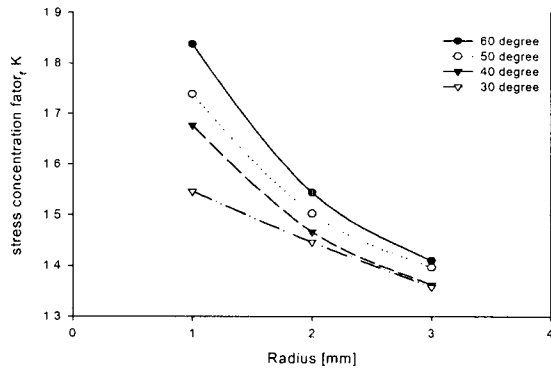


Fig. 3 Graph of stress concentration factor

집중되어 분포하고 있음이 확인되었다. 따라서 이 결과를 바탕으로 해석의 가지 수를 줄이기 위해 용접각도 θ 와 반지름 ρ 는 범위 $20^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ 와 $1 \leq \rho \leq 3$ 에서 12개의 용접형상 가지 수를 조합하여 응력집중계수, K_t 값의 해석을 수행하였다.

2.2.2 용접형상에 따른 용접부 피로수명 변화

철도차량 용접 구조물에 대한 피로수명을 평가하기 위해서는 복잡하고 다양한 용접형상에 대한 피로수명 영향을 적절히 산정하는 것이 무엇보다 중요하다. 본 연구에서는 이를 위하여 재질에는 무관하며, 오직 기하학적 형상과 하중 모드에만 영향을 받는 응력집중계수 K_t 를 실제 용접시편에서 측정된 용접각도 θ 와 반지름 ρ 에 대하여 계산하여 용접형상에 의한 피로수명 변화를 연구하였다.²⁾ 응력집중계수는 해석결과 그림 3과 같이 동일한 용접각도에 대하여 반지름이 증가할 때 작아지는 반비례 관계를 보이고 있으며, 용접

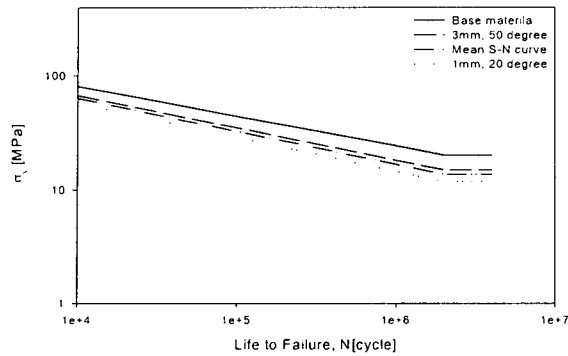


Fig. 4 S-N curve due to weld bead profiles

각도 θ 가 변화할 경우에는 용접각도 θ 의 값이 클수록, 용접 반지름 ρ 값이 작을수록, 응력집중계수 K_t 가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만 표2과 같이 각각의 응력집중계수 평균의 차이를 이용하여 용접각도와 반지름에 대한 응력집중계수 변화 민감도를 조사한 결과 응력집중계수는 용접각도의 변화보다는 반지름의 변화에 더 큰 영향을 받는다는 사실을 확인하였다. 그리고 이러한 용접형상에 따른 응력집중계수 K_t 는 식 (1)을 이용하여

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{(1 + \frac{a}{r})} \dots\dots\dots\text{식(1)}$$

피로 응력집중계수 K_f 로 변환하여 용접형상에 의한 피로수명 변화를 고찰하였다. (a는 풀림처리된 스틸로 가정하여 0.254mm 값을 적용, r은 용접부 반지름 ρ)³⁾ 계산 결과 피로 응력집중계수 K_f 는 표3과 같이 나타나며 응력집중계수와 마찬가지로 용접각도 $\theta = 20^\circ$, 반지름 $\rho = 1\text{mm}$ 일 때 가장 크게, 용접각도 $\theta = 50^\circ$, 반지름 $\rho = 3\text{mm}$ 일 때 가장 작게 나타났다. 그리고 이 결과를 이용하여 그림 4와 같이 $20^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ 와 $1 \leq \rho \leq 3$ 범위에서 용접형상에 대한 S-N 선도를 계산한 결과 로봇 용접을 이용하여 용접한 동일한 용접구조물의 경우에도 용접형상에 따라 피로수명은 차이가 나타났다. 즉, 그림4에서 무한수명 기준인 2×10^6 사이클 기준의 피로한도(모재의 피로한도 19.99MPa)를 비교할 경우, 피로한도는 11.69MPa(용접각도 $\theta = 20^\circ$, 반지름 $\rho = 1\text{mm}$)에서 14.82MPa(용접각도 $\theta = 50^\circ$, 반지름 $\rho = 3\text{mm}$) 범위에서 변화하며, 이에 따라 용접구조물의 경우에 피로수명은 용접형상에 의한 피로

수명 범위로 나타난다. 이러한 결과를 바탕으로 용접구조물의 피로수명을 예측할 때에는 다양한 용접형상을 고려한 피로수명 범위를 예측해야 하며, 피로수명은 그 범위 안에 존재하게 된다.

4. 결 론

철도차량 용접 구조물의 피로수명을 예측하기 위하여 용접부 형상을 측정하여, 그 형상에 따른 응력집중계수 K_f 를 계산하여, 용접구조물의 S-N 선도를 비교하였다.

1) 동일한 로봇 용접 방법을 사용하여 제작한 용접시편의 경우에도 용접부 형상은 차이가 나타나며, 본 용접시편의 경우에는 용접부의 용접각도 θ 는 $19^\circ 90' \sim 62^\circ 53'$ 사이, 반지름 ρ 의 경우에는 0.85mm ~ 3.595mm 사이의 범위에 측정값들이 분포해 있다.

2) 응력집중계수는 동일한 용접각도일 경우 반지름의 변화에 대하여 반비례 관계를 보이고 있으며, 용접각도 θ 의 값이 클수록, 용접 반지름 ρ 의 값이 작을수록 크게 나타남을 알 수 있다. 하지만 용접각도와 반지름의 응력집중계수 변화 민감도를 조사한 경우에는 반지름의 변화가 용접각도의 변화보다 응력집중계수에 더 큰 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

3) 피로 응력집중계수 K_f 를 이용한 피로수명 변화를 확인한 결과 $20^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ 와 $1 < \rho \leq 3$ 범위에서 용접형상에 대한 S-N 선도는 피로한도 기준으로 14.39MPa에서 18.04MPa 범위 사이에서 변화하며, 이에 따라 용접구조물의 경우에 피로수명은 용접형상에 의한 피로수명 범위로 나타난다

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kang.S. W. "Study on Stress Concentration Factor at Fillet Welded Joint," SNAK Papers , 33, 3, 1996.
2. Collins. J. A. "Failure of materials in mechanical design," John wiley & sons, p.207, 1993.
3. Bannantine, J. A., "Fundamentals of metal fatigue analysis," Prentice-hall, p.124, 1990.