

쇼트피닝과 후열처리에 의한 전동차용 SS400 용접부 피로강도 개선연구
**A Study on the Fatigue Strength Improvement of Welded Parts of SS400
Using the Shot Peening and PWHT Technique for Subway Cars**

김진현* 김현규** 구병춘*** 정성균****
Kim, Jin-Hern Kim, Hyun-Gyu Goo, Byeong-Choon Cheong, Seong-Kyun

ABSTRACT

Welding is the most commonly used method to produce bogie and carbody of Electrical Multiple Units(EMU), because it increases the strength and lowers the weight of EMU. Since bogies are constantly exposed to repeated reacting load during acceleration and deceleration, it is also true that crack normally occurs at welding parts.

In this study, we have investigated the fatigue strength of SS400 on welded parts in order to find efficiency of treatment after welding by shot peening and Post-Weld heat treatment(PWHT) with butt welded specimens

The results of fatigue test indicate that the measurement of base material specimen is 236MPa, welded specimen is 132MPa and the specimen of PWHT is 107MPa approximately. We concluded that the measurement of welded specimen and PWHT is approximately 44 and 54 percents lower than the base material specimen, respectively. Another finding is that the peened specimen is approximately 23 and 61 percents higher than the base material specimen in terms of the fatigue in strength of specimens.

1. 서 론

우리나라의 철도는 1899년 경인선 철도가 개통된 이후 지속적으로 성장하여 1974년 서울에 지하철이 개통되었고, 2004년 300km/h 고속철도가 운행을 시작하였다. 철도의 시설과 수송에 대한 양적팽창과 함께 유지보수비용도 증가하고 있으며, 무엇보다도 안전운행이 강조되고 있어 수명주기 동안 유지보수비용 절감과 가혹한 운행조건에서도 안전운행을 위해서는 철도차량의 경량화와 안전성을 동시에 추구하여야 한다.

전동차에서 차체의 하중을 지지하며 레일에서 전달되는 진동과 가·감속에 따른 반복하중을 받는 대차는 용접구조물로 제작하고 있으며 운행과정에서 발생하는 대차균열의 대부분은 피로균열로 이 용접부에서 발생되고 있다. 하지만, 부품의 고강도화 및 경량화에 따른 높은 피로강도를 충족하기 위해 기계부품의 성능 및 용도에 적합한 성질을 부여하면서 동시에 경제적, 시간적 비용을 최소화하여 피로강도를 증가시키는 방법으로 기존의 재료를 손쉽게 원하는 성능과 수명을 유지하기 위해서 여러 가지 열처리 및 표면처리 방법이 제시되고 있다(1,2). 이러한 표면처리 기술 중 하나가 쇼트피닝 가공이며, 이 기술은 설계 제작된 기계 및 구조물에서 발생 할 수 있는 예기치 못한 파손을 미연에 방지할 수 있는 특수가공 기술로 잘 알려져 있다(3). 또한 이미 피로를 받은 부분에도 쇼트피닝 가공을 하여 피로수명을 증가 시키고 있다(4).

* 서울산업대학교 철도전문대학원(서울메트로), 철도차량시스템공학과(군자차량사무소), 정회원

E-mail : jinhernk@yahoo.co.kr

TEL : TEL : (02)2216-4580 FAX : (02)2246-8361

** 서울산업대학교 기계공학과

*** 한국철도기술연구원 철도안전시스템연구본부

일반적으로 구조물이 반복 하중을 받으면 피로파괴를 일으킨다. 더욱이 용접부와 같이 열 변형을 받아 취약한 경우에는 피로에 의한 파괴가 더욱 빨리 일어난다. 용접 구조물인 전동차의 차체와 대차는 법적 내구수명 25년간의 운행과정에 지속적인 반복응력을 받게 된다. 특히, 대차는 2차 스프링(Secondary Suspension)에서 진동 및 충격을 흡수하는 체제와는 달리 레일에서 전달되는 진동과 가감 속도에 따른 반복부하를 직접 받게 되어 취약한 구조적 특성을 갖고 있다. 뿐만 아니라 대차 용접부에는 용접 시 필연적으로 발생하는 용접결함, 잔류응력, 용접 지단부의 응력집중 등의 영향으로 인하여 모재에 비하여 크게 저해 될 수밖에 없다.

그러므로 본 연구에서는 전동차 대차 프레임뿐만 아니라 차체 제작에도 널리 사용되고 있는 SS400 강재로 맞대기 용접 시험편을 제작한 후 피로강도 및 피로수명을 증가 시키는 기술로써 잘 알려진 쇼트피닝을 적용하여 이에 따른 피로 특성을 평가하고자 한다.

2. 이론적 배경

쇼트 피닝 가공이란 금속 부품의 표면에 쇼트볼(shot ball)이라는 강구를 고속으로 투사하여 금속의 표면을 해머링(hammering)하는 일종의 냉간가공이다. 쇼트 피닝 가공은 쇼트볼이 금속 표면에 고속 충돌하면서 이 때 쇼트볼의 운동에너지가 순간적으로 재료의 표면에 소성변형(plastic deformation)을 주고 표면에서 이탈한다. 쇼트볼과 충돌 후 표면층은 요철이 발생하며 표면에 얇은 소성 변형층을 형성한다. 이 층에는 늘어난 표면층을 늘어나기 전의 상태로 유지하려는 힘이 작용하게 되어 표면은 압축 잔류 응력, 내부는 인장 응력을 갖고 평형을 이루게 된다(5).

쇼트볼이 충돌 후 압축 응력이 잔류하게 되는데 응력의 크기는 크지만 응력은 가공 조건에 따라 약간의 차이는 있으며, 일반적으로 표면에서 깊이 0.1~0.15mm 정도에 분포되고 특수한 경우 0.8mm까지 분포층을 형성시킬 수도 있다. 이러한 쇼트피닝 가공으로 재료의 표면에 압축 잔류 응력을 남게 함으로써 반복 인장이 작용할 때 압축 잔류 응력은 점점 상쇄되어 압축 잔류 응력이 사라지게 될 때까지 피로 수명을 연장하게 된다(6).

한편 용접 현상은 국부적으로 급열, 급랭 과정을 동반하기 때문에 용접가공 시 용접 변형 및 잔류응력은 피할 수 없다. 용접 변형과 잔류 응력은 서로 상반되는 효과를 나타내며, 용접시의 구속 상태가 작으면 용접 잔류 응력은 작게 되나, 용접 변형은 크게 된다. 반면 용접금속이 자유롭게 수축될 수 없을 정도로 구조물의 구속 상태가 크게 되면, 용접 변형은 작게 되나 잔류 응력은 크게 된다. 용접 잔류 응력은 용접 구조물의 피로강도를 저하시키거나, 취성파괴 및 응력부식 균열의 성장을 용이하게 하며, 용접 변형은 구조물의 외관을 해치거나 국부적으로 스트레인 집중을 초래하여 이 역시 취성파괴의 원인으로 작용하여 구조물의 파괴 사고를 유발할 위험성을 내포하고 있다(7).

쇼트 피닝은 용접부를 구면상의 선단을 갖는 특수 해머인 쇼트볼로 연속적으로 타격하여 표면층에 소성변형을 주어 용접부의 잔류 응력을 완화시키며 또한 이외에도 용접 변형의 경감이나 용착금속의 균열 방지를 위해서도 이용되므로 용접된 구조물에서의 응력부식균열(stress corrosion cracking) 뿐만 아니라 피로 저항력의 실질적인 향상을 가져다주기 위한 가장 효과적인 방법이다.

3. 실험

본 연구에 사용된 시험편의 재료는 전동차 대차 프레임뿐만 아니라 차체 제작에도 널리 사용되고 있는 SS400 강재로서 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, 2와 같다. 시험편의 제작은 Table 3과 같은 조건으로 용접 후 워터젯(SJA - 2030) 절단기를 사용하여, Fig. 1과 같이 급힘 피로시험편을 가공하였다.

쇼트피닝 가공은 임펠러 투사방식인 쇼트피닝 머신(PMI-0608)을 이용하였으며, 굽힘 피로시험편 끝단의 요철 발생을 방지하기 위하여 마스킹 테이프를 감고 시험편의 중앙 부위를 쇼트피닝 가공하였다. 쇼트피닝 가공에 사용된 쇼트볼은 경강선을 일정한 길이로 잘라서 구형화 작업을 통해 만들어진 컷 와이어 라운드 쇼트볼(cut wire rounded ball)을 사용 하였으며, 쇼트볼의 직경은 0.8mm이고 경도는 약 670Hv이다. 쇼트볼의 화학적 성분은 Table 4에 나타내었다.

쇼트피닝 가공 후 최적의 쇼트피닝 조건을 탐색하기 위하여 쇼트볼의 투사속도를 60m/s로 고정하고 투사시간을 12~36분까지 변화시키며 굽힘 피로시험을 실시하였다. 이 때 적용응력은 420MPa로 설정하여 피로시험을 실시하였다.

Table 1. Chemical composition of the testing material(wt%)

C	S	Mn	P	S
0.062	0.013	1.27	0.010	0.004

Table 2. Mechanical properties of the testing specimen

Yield strength (N/mm ²)	ultimate strength (N/mm ²)	Elongation percentage (%)
367	442	40

Table 3. The condition of welding

Welding wire	Welding current	Arc voltage	Welding speed	Shielding gas	Pass
YFW-A50DR, 1.2 ϕ	170A	20 V	50cm/min	80%Ar+20%CO ₂	2 Pass

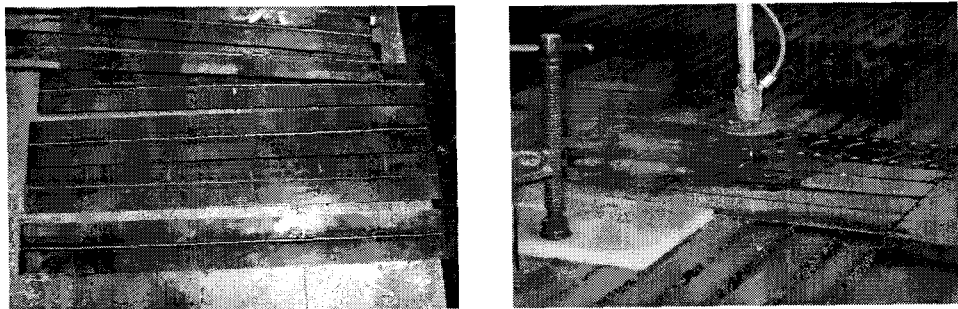


Photo. 1. Making specimen of the welded base material

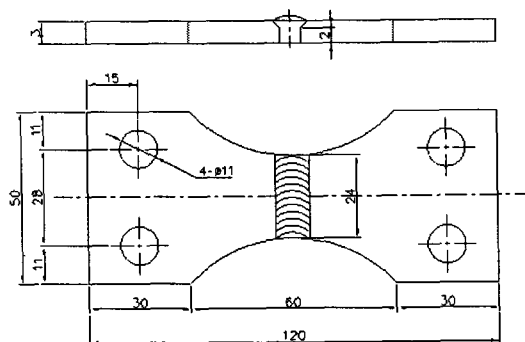


Fig. 1. Specimen configuration

Table 4. Chemical composition of cut wire(wt%)

Composition	C	Si	Mn	P	S
SWRH 72A	0.69~0.76	0.15~0.35	0.03~0.90	0.03이하	0.03이하

최적조건으로 선별된 용접 시험편의 피로특성을 알아보기 위해서 탐색되어진 최적 피닝 강도로 굽힘 피로시험을 실시하여 S-N Curve를 작성하였다. 피로시험기는 굽힘시험기(J.T TOHSI, FTS-10)를 사용하였으며 변위에 따른 토크의 변화로서 응력의 증감을 조절하였으며 비틀림응력(τ)의 증감은 비틀림각을 조절하여 실험하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 포화선도(saturation curve)로서 쇼트피닝 가공 공정의 기준이 되는 기초자료로 이용된다. 투사속도를 40, 50, 60, 70m/s, 투사시간을 0.5분~13분까지 변화시켜가며 아크하이트를 Fig. 2와 같이 측정하였다. 약 4분 정도까지는 급격한 증가를 보이다가 서서히 소량 증가를 보였으며, 최소 0.078mmA로부터 0.525mmA의 다양한 아크하이트를 얻었다.

피로수명의 극대 값을 갖는 쇼트피닝 강도의 최적조건을 실험적으로 탐색하기 위해 쇼트피닝 강도에 따른 피로수명의 변화를 평가하였다. Fig. 3은 쇼트피닝 가공 시간에 따른 강도별 피로수명의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 3에서와 같이 쇼트피닝 가공시간이 늘어날 수록 피로수명이 증가하다가 쇼트피닝 가공시간이 24분일 때 최대 피로수명을 보였으며, 24분을 초과 하면서 수명이 점차 감소하는 경향이 나타났다. 그러므로 본 연구에서의 최적의 피닝 강도는 쇼트볼의 투사속도 60m/s, 투사시간 24분으로 설정하였다.

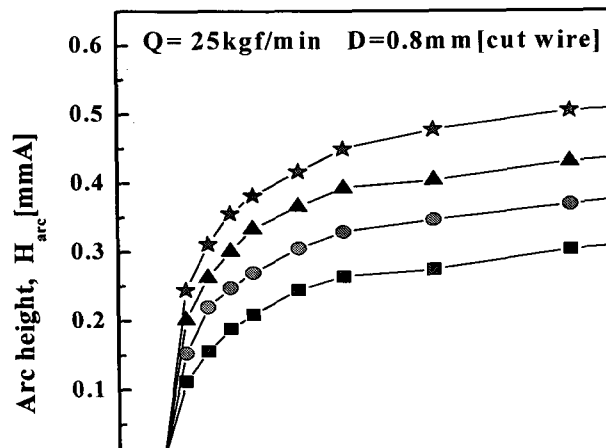


Fig. 2. Relation between arc height and exposure time

일반적으로 쇼트피닝은 최적피닝 강도에 미치지 못하는 언더피닝(under peening), 수명의 극대를 갖는 최적피닝(optimal peening), 피닝강도는 높으나 수명이 이에 미치지 못하는 오버피닝(over peening)으로 나뉘어 진다. 쇼트피닝 가공을 할 경우 항상 수명이 증가되는 것은 아니며, Fig. 3과 같은 결과가 나오는 이유는 투사 시간 18분의 경우 재료에 미치는 압축잔류응력의 영향이 최적피닝 보다 다소 부족했기 때문으로 사료되며, 오버피닝의 경우는 쇼트피닝 가공에 의한 과도한 소성변형으로 인하여 표면부의 심한 요철과 함께 미세한 균열(micro crack)이 발생하고, 피로하중에 의한 균열의 성장속도가 더 큰 영향을 미치기 때문으로 사료된다.

전동차 대차 프레임 및 차체 제작에 널리 사용되고 있는 SS400강의 피로특성을 평가하기 위하여 Fig. 4와 같이 모재, 용접 시험편 그리고 실제 대차 프레임 제작공정인 용접 후 열처리 시험편에 대한 피로 특성을 평가하였다. 또한, 쇼트피닝 가공한 시험편의 피로특성을 알아보기 위해 열처리 후 쇼트피닝 가공한 시험편과 용접 후 쇼트피닝 가공한 시험편에 대한 피로특성을 평가하였다.

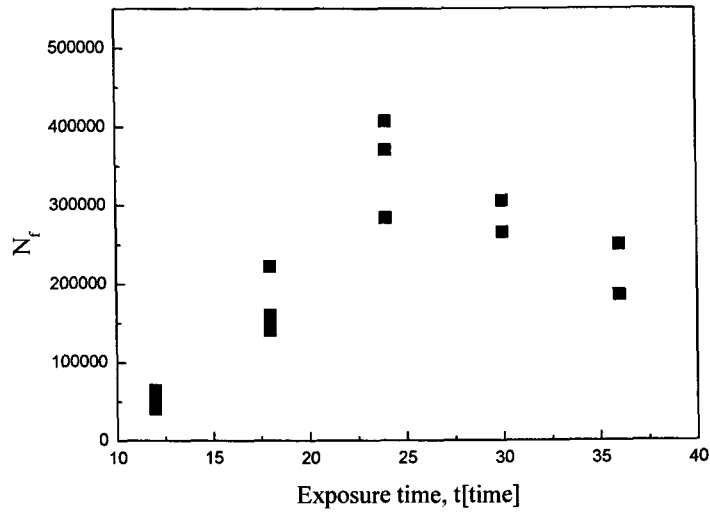


Fig. 3. Optimal shot peening condition of SS400 steel

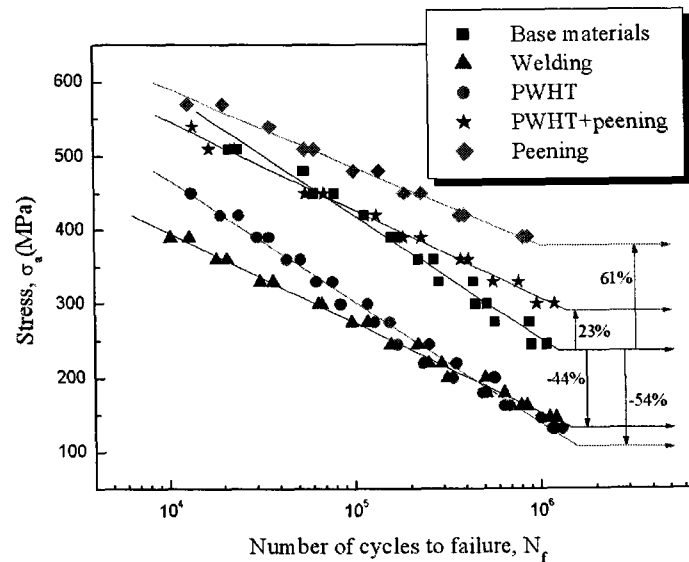


Fig. 4. S-N curve of SS400steel

실험결과 모재의 경우 피로한도가 약 236MPa로 측정되었으며, 용접 시험편은 약 132MPa 그리고 용접 후 열처리를 실시한 시험편은 약 107MPa로 측정되어 모재에 비하여 각각 약 44%, 54%가량 감소하였다. 이와 같이 용접 후 열처리 가공을 실시하였을 경우 오스테나이트 상태로 한 시험편을 냉각하여 어닐링 상태로 하면 피로강도는 낮아진다(8). 이것은 결정립이 약간 크게 되는 것과 가공에 의하였던 경화가 소멸되기 때문이다. 냉간 가공재 등에서는 압축잔류응력이 없어지는 영향도 있을 것으로 사료된다. 또한 열처리 후 쇼트피닝 가공한 시험편과 후열처리 공정 없이 쇼트피닝 가공한 시험편은 모재에 비하여 피로한도가 약 23%, 61% 가량 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 쇼트피닝 가공으로 인하여 시험편의 표면에 압축잔류응력이 생성되었으며 이로 인하여 피로한도가 증가한 것으로 사료된다.

5. 결론

본 논문에서는 전동차 대차 프레임 및 차체 제작에 널리 사용되고 있는 SS400강의 용접부 피로특성 평가를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 피로수명이 극대를 갖는 최적의 쇼트피닝 조건은 쇼트볼의 투사속도 60m/sec, 투사시간 24분으로 탐색되었다.

(2) 피로특성평가 결과 모재에 비하여 용접시험편과 용접 후 열처리한 시험편의 경우 피로한도가 각각 44%, 54%가량 감소하였으며, 용접 후 열처리 실시한 시험편의 경우 결정립이 약간 크게 되는 것과 가공에 의하였던 경화가 소멸되기 때문이다. 냉간 가공재 등에서는 압축잔류응력이 없어지는 영향도 있을 것으로 사료된다.

(3) 쇼트피닝 가공한 시험편의 피로특성 평가결과 용접 후 열처리 가공한 시험편의 경우 모재에 비하여 피로한도가 약 44%가량 증가하였으며, 용접 후 쇼트피닝 가공한 시험편의 경우 피로한도는 약 61%가 증가하였다. 이는 쇼트피닝 가공을 통해 시험편의 표면에 생성된 압축잔류응력으로 인하여 피로한도가 증가한 것으로 사료된다.

(4) 국내 전동차 대차 프레임의 용접잔류응력 완화를 위하여 적용하는 용접부 후열처리 기법은 본 연구결과와 같이 열처리 방법에 따라 피로수명이 더 낮아지는 현상을 볼 수도 있으므로 용접부 후열처리에 앞서 후열처리에 따른 피로강도가 설계요구에 적합한지 여부를 사전에 실험 등을 통하여 충분히 검토한 후 적용하여야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. L. Wanger, "Mechanical Surface Treatments on Titanium, Aluminum and Magnesium Alloys", Materials Science & Engineering A 263., 210., 1999
2. O. Vohringer, "Changes in the State of the Material by Shot Peening", Shot Peening, DGM, 185., 1987
3. D. W. Hammond and S. A. Meguid, "Crack Propagation in the Presence of Shot-Peening Residual Stress", Engineering Fracture Mechanics Vol. 37, No. 2, pp. 373~387, 1990.
4. Sharma, M. C. "Assesment of Over Peening by time on Fatigue behavior of Spring Steel", Proc. of 6th International Fatigue Congress, pp. 1397~1402, 1996.
5. 정성균, 이승호. "쇼트피닝 가공개론", 세화, pp.14-15, 2001.
6. 윤경근, "Professional Engineer 용접 기술사", 일진사, 2002.
7. 차인석, 박정태. "스테인레스강", 주식회사 삼미, 1982.
8. 김동환, "탄소강 SS41과 SM25C의 피로한도 변화에 관한 연구", 금오공과대학교, 2003.