

철도차량용 STS304 용접부의 피로특성에 미치는 쇼트피닝의 효과

Effects of shot peening on the fatigue characteristics of STS304 welded joints for rolling stock

전연식*, 구정서**, 정성균***

Jeon, Yeon-Sik, Koo, Jeong-Seo, Cheong, Seong-Kyun

ABSTRACT

Cracks may easily occur at the welded joints of rolling stock which receives the repeated or vibration load. The shot peening process is a well known technique for the improvement of the fatigue characteristics of structures under the repeated load because the induced compressive residual stress makes the structure durable. In this paper, the fatigue characteristics of shot peened welded joints for the rolling stock was investigated. TIG welding process was applied to the STS304 specimens and the specimens were cut by using water jet machine. A number of shot peening conditions were applied to the welded specimen. The optimal shot peening condition and fatigue life diagram were examined by applying a number of shot peening conditions and accomplishing the bending fatigue test for the specimens. Saturation curve, and roughness were also evaluated. The experimental results show that the durability of STS304 welded joints for rolling stock was highly improved by applying shot peening technique. Thus, the light weight of rolling stock can be expected by applying the shot peening technique to improve the fatigue characteristics.

1. 서론

철도차량에 스테인레스강 재질을 적용하여 경량화에 사용된 것은 오래전부터이다. 국내에 서는 92년, 94년 전후동력 새마을동차(DHC)⁽¹⁾, 98년형 무궁화호 특실 객차⁽²⁾, 98년형 국방부 병원차⁽³⁾, 99년형 무궁화호⁽⁴⁾, 2000년형 전후동력형 새마을동차(PMC)⁽⁵⁾ 등의 차체를 스테인레스강으로 제작하여 현재까지 사용하고 있다. 하지만, 부품의 고강도화 및

* 서울산업대학교 철도전문대학원, 학생회원

** 서울산업대학교 철도시스템공학과 교수, 정회원

*** 서울산업대학교 기계공학과 교수, 정회원

경량화에 따른 높은 피로강도를 충족하기 위해 기계 부품의 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.^(6,7) 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.⁽⁷⁾ 또한 이미 피로를 받은 부분에도 쇼트피닝 가공을 하여 피로 수명을 증가 시키고 있다.⁽⁸⁾

일반적으로 구조물이 반복 하중을 받으면 피로파괴를 일으킨다. 더욱이 용접부와 같이 열변형을 받아 취약한 경우에는 피로에 의한 파괴가 더욱 빨리 일어난다. 용접에 의해 차체를 제작하는 스테인레스 철도 차량의 경우 용접에 대한 소재자체의 결함 뿐 아니라 차체가 운행 시 받게 되는 반복 하중에 대한 피로균열이 큰문제가 되고 있다. 대부분의 차체, 출입문 그리고 연결부 스텝(step)은 용접 구조물 이므로 용접 시 필연적으로 발생하는 용접결함, 잔류응력, 용접 지단부의 응력집중 등의 영향으로 인하여 모재에 비하여 크게 저해 될 수밖에 없다.

본 연구에서는 국내 철도 차량용 스테인레스강(STS 304)을 가공하여 용접한 후 부품의 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.⁽⁹⁾

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.⁽¹⁰⁾

한편 용접 현상은 국부적으로 급열, 급랭 과정을 동반하기 때문에 용접가공시 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.⁽¹¹⁾

쇼트 피닝은 용접부를 구면상의 선단을 갖는 특수 해머인 쇼트볼로 연속적으로 타격하여 표면층에 소성변형을 주어 용접부의 잔류 응력을 완화시키며 또한 이외에도 용접 변형의 경

감이나 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 철도차량의 연결부 스텝(step)에 사용되고 있는 스테인레스강인 STS 304 소재로서 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, 2와 같다. 시험편의 제작은 Table 3과 같은 조건으로 Tig 용접 후 워터젯(power jet 480A) 절단기를 사용하여, Fig. 1과 같이 굽힘 피로시험편을 가공하였다.

Table 1. Chemical composition of STS 304(wt%)

Ni	Cr	Si	Mn	C	P	s
8.0~10.5	18.0~20.0	1.0 이하	2.0이하	0.08 이하	0.045 이하	0.03 이하

Table 2. Mechanical properties of STS 304

Yield Strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation(%)
21	53	40

Table 3. The condition of welding

Welding type	GTAW
Machine	Inverter Tig 300A
Welding rod	Y308, 2.0mm
Shielding gas	100% Ar
Voltage	220V
Ampere	100A
Remark	3Pass

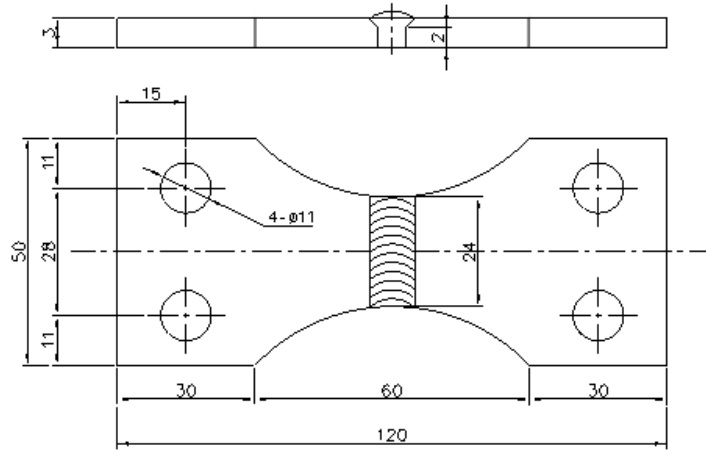


Fig 2. Specimen configuration

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

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 사용하였으며, 쇼트볼의 직경은 0.8mm이고 경도는 약 670Hv이다. 쇼트볼의 화학적 성분은 Table 4에 나타내었다.

쇼트피닝 가공 후 최적의 쇼트피닝 조건을 탐색하기 위하여 쇼트볼의 투사속도를 50m/s로 고정하고 투사시간을 3~13분까지 변화시키며 굽힘 피로시험을 실시하였다. 이 때 적용 응력은 392MPa로 설정하여 피로시험을 실시하였다.

최적 쇼트피닝 가공조건 탐색된 시험편의 조도분포를 측정하기 위하여 표면조도계(Mitutoyo SJ-400)을 이용하여 중심선 평균 거칠기(Ra)와 최대거칠기(Ry), 10점 평균 거칠기(Rz)를 측정하였으며, 신뢰성 있는 데이터를 얻기 위해 각 시험편당 5개의 구간을 측정하여 평균을 내었다. 측정구간은 4mm, 탐촉자의 속도는 4mm/s로 하였다.

최적조건으로 선별된 용접 시험편의 피로특성을 알아보기 위해서 탐색되어진 최적 피닝 강도로 굽힘 피로시험을 실시하여 S-N Curve를 작성하였다. 굽힘 피로시험기는 10kgf.m급 굽힘 피로시험기(J.T TOHSI, FTS-10)를 사용하였으며 변위에 따른 토크의 변화로서 응력의 증감을 조절하였다.

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.

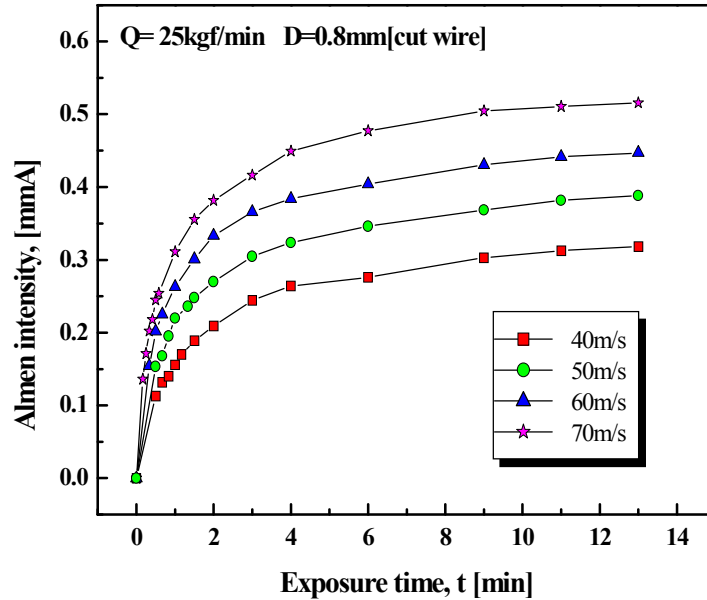


Fig. 2. Relation between arc height and exposure time

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 늘어날수록 피로수명이 증가하다가 쇼트피닝 가공시간이 11분일 때 최대 피로수명을 보였으며, 11분을 초과 하면서 수명이 점차 감소하는 경향이 나타났다. 그러므로 본 연구에서의 최적의 피닝 강도는 50m/s, 11분으로 설정하였다.

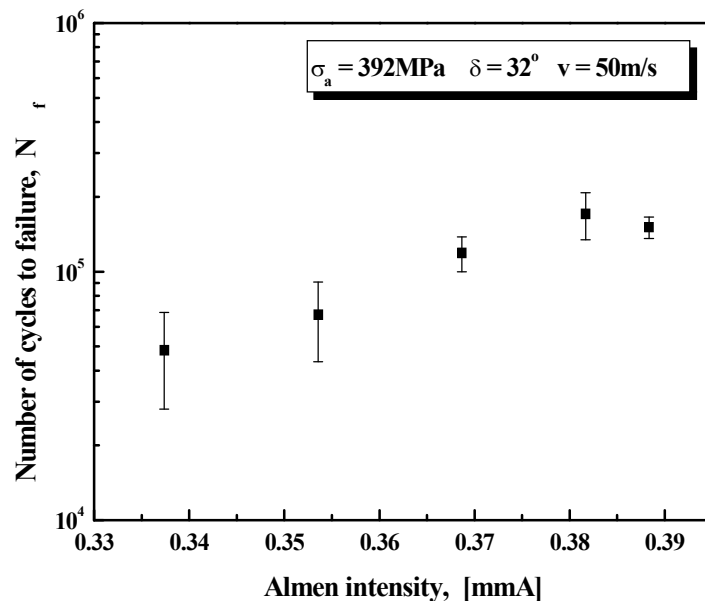


Fig. 3. Optimal peening condition of STS304

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 알멘강도 0.368mmA의 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.

Fig. 4는 쇼트피닝 가공 후 표면 조도를 측정된 결과이다. 표면조도 측정결과 모재의 경우 중심선 평균 거칠기(Ra)는 $0.27\mu\text{m}$, 최대거칠기(Ry)는 $2.53\mu\text{m}$, 10점 평균거칠기(Rz)는 $1.83\mu\text{m}$ 으로 나타났으며, 피닝 가공한 경우 중심선 평균거칠기(Ra)는 $3.58\mu\text{m}$, 최대거칠기(Ry)는 $18.1\mu\text{m}$, 10점 평균거칠기(Rz)는 $13.4\mu\text{m}$ 인 것으로 나타나 모재에 비해 피닝 가공한 경우 조도가 크게 증가하였다.

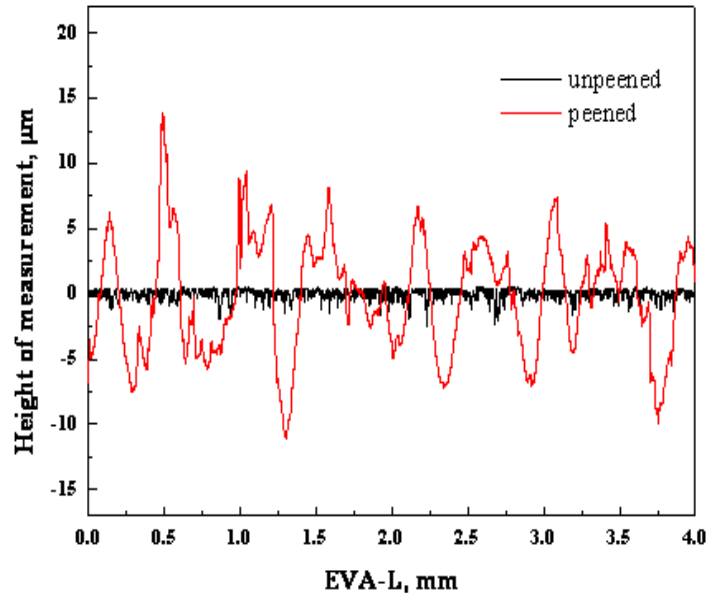


Fig. 4. Roughness of welded specimen

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.

쇼트피닝 가공한 시험편의 피로특성을 알아보기 위해 S-N선도를 구하고자 비틀림 피로 시험으로 피로강도를 평가하였다. Fig. 5는 앞서 탐색한 최적 피닝강도로 쇼트피닝 가공한 시험편과 모재에 대한 S-N곡선이다. 피닝 가공한 시험편의 경우 피로한도가 264MPa이며, 가공하지 않은 시험편의 경우 128MPa로서 피닝 가공 시험편의 피로한도가 약 107% 증가하였으며, 피로수명의 경우 응력 250Mpa을 기준으로 하였을 때 약 730% 증가하였다.

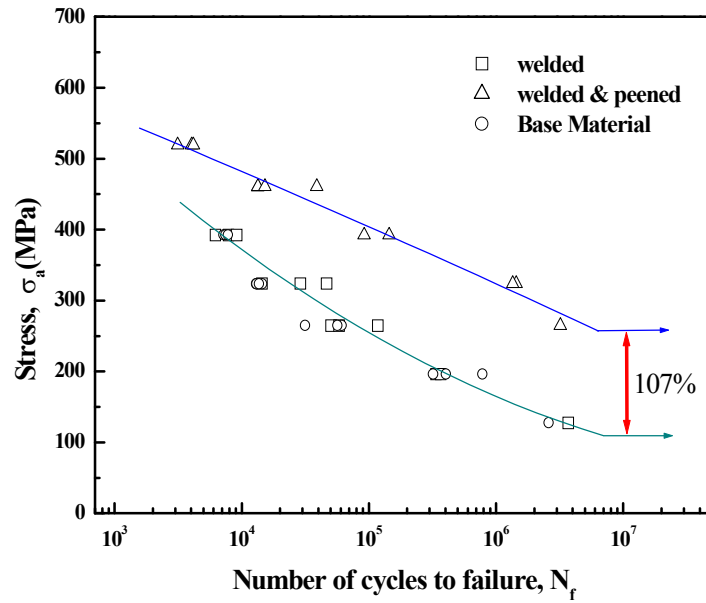


Fig. 5 S-N curves for peened and unpeened specimen.

5. 결론

본 논문에서는 운행 중 반복적인 피로하중을 받는 철도차량용 스테인레스강(STS 304) 소재를 이용한 용접부 피로 특성 평가에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 포화선도에서 투사속도를 40, 50, 60, 70m/s에 대한 아크하이트는 약 4분 정도에서 포화되었다.

(2) 피로수명 극대를 갖는 최적 피닝강도 탐색에서 최적 조건은 알멘강도 0.382mmA, 투사 시간 11분에서 탐색되었다.

(3) 쇼트피닝 가공한 시험편의 경우 피로한도가 264MPa이며 가공하지 않은 시험편의 경우 128MPa로서 피닝 가공 시험편의 피로한도가 약 107% 증가하였으며, 피로수명의 경우 응력 250Mpa를 기준으로 하였을 때 약 730% 증가하였다.

참 고 문 헌

1. 철도청 차량국, “92년,94년 전후동력 새마을동차(DHC) 취급및 정비 지침서, pp. 1.2.1 차체 일반, 1992, 1994.
2. (주)해태중공업, “98년 무궁화호 특실 객차 취급및 정비가침서”, pp. 제2장 차체및 설비, 1998.
3. (주)현대정공, “국방부 병원차 취급및 정비가침서”, pp 제2장 차체및 설비, 1998
4. (주)디자인 리미트, ‘99년도 무궁화 객차 취급및 정비가침서“, pp. 제2장 차체및 설비, 1999.

5. 철도청, “2000년 전후동력형 새마을동차(PMC) 취급및 정비지침서, pp. 제 2-1 차체 일반, 2000.
6. L. Wanger, “Mechanical Surface Treatments on Titanium, Aluminum and Magnesium Alloys”, Materials Science & Engineering A 263., 210., 1999
7. O. Vohringer, “Changes in the State of the Material by Shot Peening”, Shot Peening, DGM, 185., 1987
8. 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.
9. Sharma, M. C. “Assessment of Over Peening by time on Fatigue behavior of Spring Steel”, Proc. of 6th International Fatigue Congress, pp. 1397~1402, 1996.
10. 정성균, 이승호. “쇼트피닝 가공개론”, 세화, pp.14-15, 2001.
11. 윤경근, “Professional Engineer 용접 기술사”, 일진사,2002.
12. 차인석, 박정태. “스테인레스강”, 주식회사 삼미, 1982.