

## SS400 용접부의 피로강도에 미치는 쇼트 피닝의 영향 Effect of Shot Peening on the Fatigue of SS400 Weldments

김진현<sup>†</sup> · 구병춘\* · 김현규\*\* · 정성균\*\*\*

Jin-Hern Kim · Byeong-Choon Goo · Hyun-Gyu Kim · Seong-Kyun Cheong

**Abstract** Fatigue fracture of the welded joints of bogie frames is one of unsolved problems. To improve the fatigue strength of the welded joints, various techniques have been applied. In this study, we have investigated the effect of shot peening on the fatigue characteristics of SS400 welded specimens. The fatigue lives of four kinds of welded specimens were examined; welded, PWHT, shot peened, and shot peened after PWHT. The results of the fatigue tests show that the fatigue limit of the shot-peened specimens is higher than that of the welded specimens, and the PWHT specimens have a lower fatigue limit than the welded specimens. It was found that shot peening is a very effective method to improve the fatigue strength of SS400 welded joints.

**Keywords** : SS400, Shot peening, PWHT, Welding, Fatigue

**요 지** 철도 차량 대차 프레임은 주로 용접을 이용하여 제작되고 있는데 용접부에서의 피로파괴는 늘 문제가 되어 왔다. 용접부의 피로강도를 향상시키기 위한 여러 방법 중 본 연구에서는 쇼트 피닝을 적용하였다. 철도 구조물에 많이 사용되는 소재의 하나인 SS400 판재를 이용하여 용접시편을 만들어 쇼트 피닝과 후열처리 유무에 따른 피로특성을 분석하였다. 피로시험결과에 의하면 쇼트 피닝은 피로강도를 향상시키는데 매우 효과적이었고 후열처리는 피로강도를 도리어 저하시키는 것으로 나타났다.

**주 요 어** : S400, 쇼트 피닝, 후열처리, 용접, 피로

### 1. 서 론

전동차에서 차체의 하중을 지지하며 레일에서 전달되는 진동과 가·감속에 따른 반복하중을 받는 대차는 용접구조물로 제작하고 있으며 운행과정에서 발생하는 대차균열의 대부분은 피로균열로 용접부에서 발생되고 있다. 부품의 고 강도화 및 경량화와 함께 높은 피로강도를 충족하기 위해 기계 부품의 성능 및 용도에 적합한 성질을 부여하면서 동시에 경제적, 시간적 비용을 최소화하고 피로강도를 증가시키는 방법으로 여러 가지 열처리 및 표면처리 방법이 제시되고 있다[1-4]. 이러한 표면처리 기술 중의 하나가 피닝 가공이며, 이 기술은 설계 제작된 기계 및 구조물에

서 발생할 수 있는 예기치 못한 파손을 미연에 방지할 수 있는 특수가공 기술로 잘 알려져 있다. 현재 사용 중인 대표적인 피닝 기술로는 쇼트 피닝, 해머 피닝, 니들(Needle) 피닝과 레이저 쇼크 피닝이 있다[3]. 일반적으로 구조물이 반복 동하중을 받으면 인장강도 또는 항복응력보다 낮은 응력에서도 피로파괴를 일으킬 수 있고 용접부와 같이 열 변형을 받아 취약한 경우에는 피로에 의한 파괴가 더욱 빨리 일어날 수 있다. 한정우 등[5]은 일반 구조용 강 SM490B 용접시편을 사용하여 해머 피닝을 적용하여 피로 수명에 미치는 효과를 연구하였는데 피로한도가 65% 증가하였다. 박경동 등[6-8]은 스프링강 SAE5155를 사용하여 쇼트 피닝이 부식과 부식피로에 미치는 영향을 연구하였는데 쇼트 피닝이 부식을 억제하는 효과가 있었고 피로 균열 진전속도를 낮추었다. 피로수명은 부식조건에 따라 다르나 쇼트 피닝에 의해 371~453% 증가하였다. 정석주와 백상도[9]에 의한 스프링강 SPS의 피로에 미치는 쇼트 피닝 연구결과에서는 피로한도가 140% 향상되었다. 스프

<sup>†</sup> 책임저자 : 정희원, 서울메트로, 군차차량사무소, 차장  
E-mail : jinhernk@yahoo.co.kr  
TEL : (02)6110-6201

\* 정희원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 책임

\*\* 서울산업대학교, 기계공학과, 교수

\*\*\* 서울산업대학교, 기계공학과, 교수

링강 SPS5A에 대한 심동석 등[10]의 균열진전에 미치는 쇼트 피닝의 효과에 대한 연구에서는 균열의 진전이 늦어짐을 보여 주고 있다. 신용승 등[11]의 SCM22강에 대한 쇼트 피닝의 효과는 열처리 시편에 비해 쇼트피닝 시편의 피로강도가 130% 증가하였다. 최근에 Laha 등[12]은 ASTM A516 grade 70 탄소강에 대해 금속 아크 용접, MIG 용접 및 TIG 용접을 한 시편에 대해 용접 비드를 1mm 깎아 낸 후 쇼트 피닝 처리를 하고 피로시험을 하였는데 피로한도가 용접시편 기준으로 각각 50%, 63% 및 60% 향상되었다.

용접 구조물인 전동차의 차체와 대차는 법적 사용내구연한 25년간의 운행과정에 지속적인 반복응력을 받게 된다. 특히, 대차는 2차 스프링(Secondary Suspension)에서 진동 및 충격을 흡수하는 차체와 달리 레일에서 전달되는 진동과 가감속에 따른 반복부하를 직접 받게 되어 취약한 구조적 특성을 갖고 있다. 뿐만 아니라 대차 용접부에는 용접시 필연적으로 발생하는 용접결함, 잔류응력, 용접 지단부에서의 응력집중 등의 영향으로 모재에 비하여 피로강도가 크게 낮아질 수밖에 없어 피로강도를 향상시키는 것은 구조 안전성을 확보하는데 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 전동차 대차 프레임뿐만 아니라 차체 제작에도 널리 사용되고 있는 SS400 강재로 맞대기 용접 시험편을 제작하고, 용접 후처리에 따른 피로특성을 알아보기 위하여 여러 가지 방법으로 용접 후처리를 실시한 후 굽힘 피로시험기로 피로시험을 수행하였다. 용접 후처리는 용접 시험편에 대하여 국내 전동차 대차 제작과정에서 적용하는 용접부의 노내 응력 제거방법에 따라[13,14] 실시한 용접후열처리와 피로강도 및 피로수명을 증가시키는 기술로서 잘 알려진 쇼트 피닝 가공을 실시하였다. 또한, 용접후열처리를 실시한 후 쇼트 피닝 가공한 시험편과 아무런 후처리를 실시하지 않은 용접 시험편으로 각각 구분하여 실험하고 비교평가 하였다. 위에서 살펴본 기존의 연구들에서는 쇼트 피닝의 주요 변수들의 변화가 쇼트 피닝의 효과에 미치는 체계적인 조사 없이 임의의 주어진 값에서 쇼트 피닝을 하고 그때의 쇼트 피닝 효과를 분석하였다. 본 연구에서는 우선 쇼트 피닝의 주요 변수인 쇼트 볼의 속도와 투사시간을 변화시켜 가면서 최적으로 쇼트 피닝 효과를 주는 조건을 찾고 이 조건을 적용하여 용접후열처리를 한 시편과 하지 않은 시편을 쇼트 피닝 처리를 하여 모재와 용접상태 시편의 피로강도와 비교하여 쇼트피닝이 피로강도 향상에 미치는 영향을 검토하였다.

## 2. 시편제작 및 시험방법

### 2.1 쇼트 피닝

쇼트 피닝 가공은 Fig. 1과 같이 쇼트 볼이 금속 표면에 고속 충돌할 때 쇼트 볼의 운동에너지가 순간적으로 재료의 표면에 소성변형을 일으키고 표면의 취약부에 압축 잔류응력을 생성하는 가공이다[15,16]. 쇼트 볼의 충돌 후 압축응력이 잔류하게 되는데 응력의 크기는 가공 조건에 따라 약간의 차이는 있으며, 일반적으로 표면에서 깊이 0.1~0.25mm 정도에 분포되고 특수한 경우 0.8mm까지 분포 층을 형성시킬 수도 있다. 쇼트 피닝 가공은 재료의 표면에 압축잔류응력을 남게 함으로써 피로수명 및 피로강도의 증가에 크게 기여하게 된다[16,17].

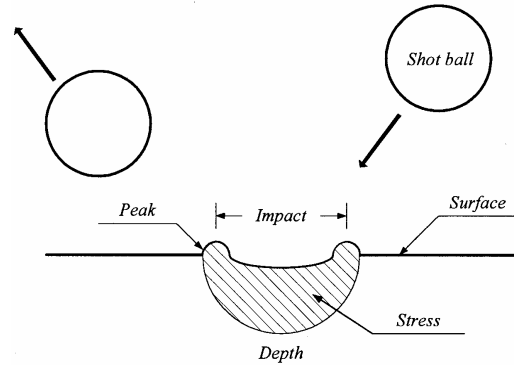


Fig. 1. Principle of shot peening [18]

쇼트 피닝의 효과는 쇼트 볼의 속도, 경도, 크기, 투사각, 무게 등에 따라 변하며, 아크하이트(arc height)와 커버리지(coverage)로 표시한다. 일반적으로 100% 커버리지에서의 아크하이트를 쇼트 피닝 강도로 나타낸다[18]. 쇼트 피닝 가공의 충격에너지를 측정하고 조절하기 위하여 Almen은 SAE 1070 스프링강 시편(Almen strip)을 이용하여 측정하는 방법을 제시하였다. 이 방법은 쇼트 피닝 가공하지 않은 알멘 스트립을 금속 블록에 고정하고 주어진 시간 동안 쇼트 피닝 가공처리를 한다. 블록에서 알멘 스트립을 제거하면 쇼트 피닝의 충격에 의한 압축잔류응력과 표면 소성변형으로 인해 알멘 스트립은 쇼트 피닝 가공된 표면으로 볼록하게 된다. 이 곡면의 높이를 알멘 게이지(Almen gauge)로 측정하여 아크하이트라 한다[19]. 커버리지는 쇼트 볼이 투사되어 물체의 표면을 타격한 밀도이다. 커버리지는 쇼트 볼에 노출시킨 시간과 관계될 뿐이며, 아크하이트와 반드시 비례하지는 않는다. Fig. 2는 알멘 시험법의 개념도이다.

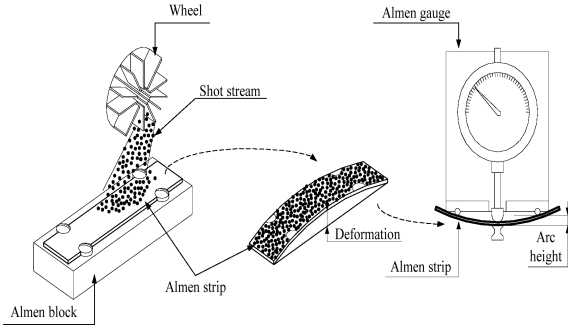


Fig. 2. Almen test strip[18]

## 2.2 시편 제작

시험편의 재료는 전동차 대차 프레임뿐만 아니라 차체 제작에도 널리 사용되고 있는 SS400 강재이다. 인장시험편은 ASTM E8[20]에 따라 제작하였다. 모재에 대한 인장시험 결과 항복강도는 359MPa, 인장강도는 417MPa, 파단연신률은 38%였다. 쇼트 피닝 시험편은 모재, 용접후열처리한 시편 그리고 후열처리를 하지 않은 시편으로 구분하였다. 용접후열처리는 국내 전동차 대차 제작공정에 적용하는 방법과 같이 KS B 0883[21]에 따라 실시하였다. 시편제작에 사용된 용접 와이어는 YFW-A50DR 1.2Φ, 전류는 170A, 전압은 20V, 용접속도는 50cm/min, 실딩 가스는 80% Ar+20% CO<sub>2</sub>를 적용하였고 2 패스 용접을 하였다. 시편의 형상은 Fig. 3과 같이 판재이며 두께는 3mm이다.

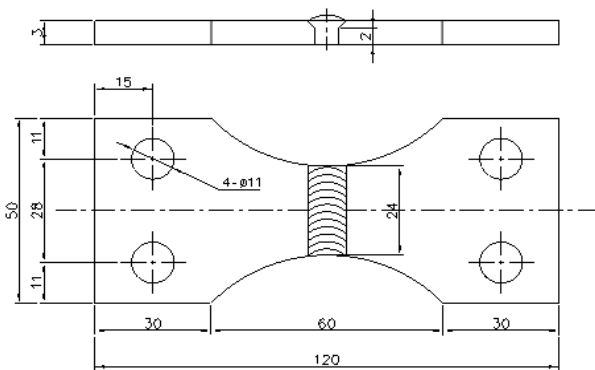


Fig. 3. Configuration of the specimen

## 2.3 쇼트 피닝 시험

임펠러 투사 방식인 쇼트 피닝 머신(PMI-0608)을 이용하여 쇼트 피닝을 실시하였다(Fig. 4). 시험편의 끝단의 요철 발생을 방지하기 위하여 마스킹 테이프를 감고 시험편의 중앙 부위를 쇼트 피닝 가공하였다. 사용된 쇼트 볼은 경강선을 일정한 길이로 잘라서 구형화 작업을 통해 만들어진 컷 와이어 라운드 쇼트 볼(cut wire rounded shot ball)을 사용하였으며, 쇼트 볼의 직경은 0.8mm이고 경도는 약 670

Hv이다. 쇼트 피닝 장비의 임펠러 직경은 250mm, 쇼트 볼의 속도는 60m/s를 적용하였다.



Fig. 4. Shot peening machine

## 2.4 피로시험

Fig. 5는 시험에 사용된 굽힘 피로시험기의 개략도이다. 작용 응력은 부착된 토크 앵글 게이지의 변위량을 조절하여 얻는다. 피로수명은 시편이 완전히 파단될 때의 회전수이다.

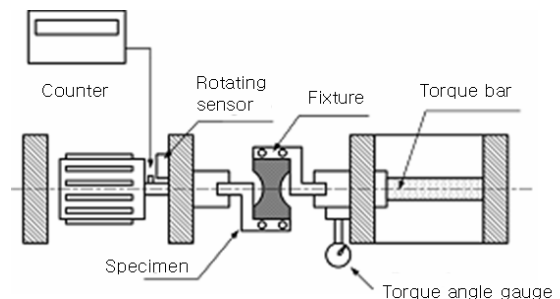


Fig. 5. Bending fatigue test machine

## 3. 시험결과

### 3.1 경도분포

시험편 종류별 경도측정 결과는 Fig. 6과 같다. 경도는 용접 라인의 중심에서 용접 라인에 수직인 방향으로 즉, 시편의 길이방향으로 따라가면서 표면에서 측정하였다. 시험편 모두 용접부 중앙으로부터 멀어질수록 경도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 각 시험편의 경도측정 결과 용접후열처리를 실시한 시험편은 최대경도가 218Hv, 용접후열처리를 실시하지 않은 용접시험편은 최대 경도가 253Hv, 용접후열처리 실시 후 쇼트 피닝 가공 한 시험편의 최대 경도는 283Hv 그리고 용접후열처리를 실시하지 않은 상태로 쇼트

피닝 가공한 시험편의 최대경도는 317Hv로 측정되었다. 이와 같이 각 시험편의 경도측정 결과 용접후열처리 실시한 시험편이 용접후열처리를 실시하지 않은 용접시험편보다 최대경도가 약 13.84% 가량 감소하였으며, 용접후열처리 실시 후 쇼트 피닝 가공한 시험편과 용접후열처리를 실시하지 않고 쇼트 피닝 가공한 시험편의 최대경도는 용접후열처리 및 쇼트 피닝 가공을 하지 않은 용접시험편 보다 최대경도가 각각 11.9%, 22.6% 가량 증가하였다. 일반적으로 쇼트 피닝 가공후 시험편의 압축잔류응력은 표면 및 깊이별 경도와 깊은 상관관계를 가지고 있다. 그러므로 각 시험편의 경도 측정 결과로부터 각 시험편의 피로특성을 유추할 수 있으며, 용접후열처리 한 시험편의 경우 오스테나이트 상태의 시험편을 어닐링하여 잔류응력이 감소하였을 뿐만 아니라 시험편 표면의 경도 또한 감소한 것으로 판단된다.

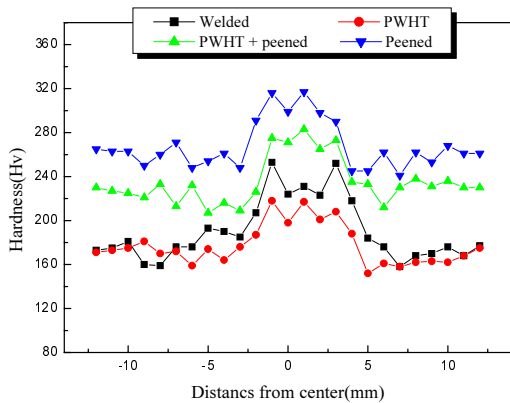


Fig. 6. Hardness of the welded specimens

### 3.2 쇼트 피닝 최적 조건

Fig. 7은 포화선도(saturation curve)로서 쇼트 피닝 가공 공정의 기준이 되는 기초자료로 이용된다. Almen strip 'A'에 쇼트 볼의 투사속도를 40, 50, 60, 70m/s, 투사시간을 0.5분~16분까지 변화시켜 가며 아크하이트를 측정하여 도시한 것이다. 약 4분 정도까지는 급격한 증가를 보이다가 이후 서서히 증가하는 경향을 보였으며, 최소 0.078mmA로부터 0.525mmA의 다양한 아크하이트를 얻었다.

가장 긴 피로수명을 주는 쇼트 피닝 강도의 최적조건을 실험적으로 탐색하기 위해 쇼트 피닝 강도에 따른 굽힘 피로수명의 변화를 평가하였다. Fig. 8은 쇼트 피닝 가공 시간에 따른 피로수명의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 7의 결과를 바탕으로 투사속도는 60m/s인 경우만 피로시험을 하여 최적조건을 찾았다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 쇼트 피닝 가공시간이 증가할수록 피로수명이 증가하다가 쇼트 피닝 가공시간이 24분일 때 최대 피로수명을 보였으며, 24분을 초과하면서 수명이 점차 감소하는 경향이 나

타났다. 그러므로 본 연구에서의 최적의 쇼트 피닝 조건으로 쇼트 볼의 투사속도는 60m/s, 투사시간은 24분으로 설정하였다.

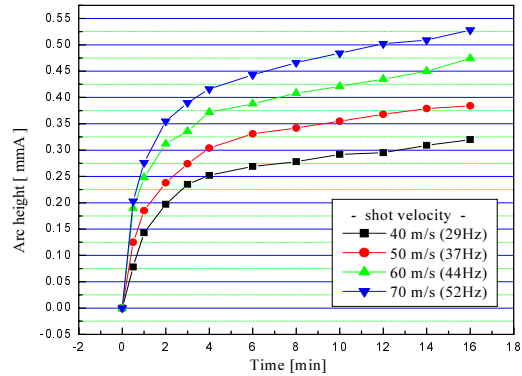


Fig. 7. Relation between arc height and exposure time

일반적으로 쇼트 피닝은 최적 피닝 강도에 미치지 못하는 언더피닝 (under peening), 수명의 극대를 갖는 최적피닝 (optimal peening), 피닝강도는 높으나 수명이 이에 미치지 못하는 오버피닝(over peening)로 나뉘어 진다. 쇼트 피닝 가공을 할 경우 항상 수명이 증가되는 것은 아니다. Fig. 8과 같은 결과가 나오는 이유는 투사 시간 18분의 경우 재료에 미치는 압축잔류응력의 영향이 최적 피닝보다 다소 부족했기 때문으로 보이며, 오버피닝의 경우는 쇼트 피닝 가공에 의한 과도한 소성변형으로 인하여 표면 부의 심한 요철과 함께 미세한 균열(micro crack)이 발생하고 피로 하중에 의한 균열의 성장 속도가 수명에 더 큰 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

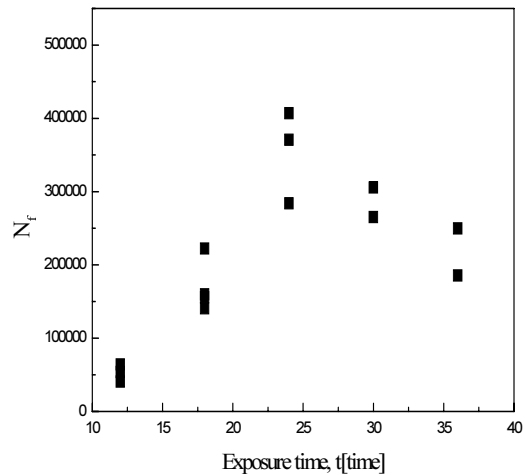


Fig. 8. Fatigue life vs. expose time

### 3.3. 피로시험 결과

전동차 대차 프레임 및 차체 제작에 널리 사용되고 있는

SS400강의 피로특성을 평가하기 위하여 Fig. 9와 같이 모재, 용접시험편, 그리고 용접시험편에 대하여 실제 대차프레임 제작공정에서 적용하는 방법인 용접후열처리를 실시하여 피로특성을 평가하였다. 또한, 쇼트 피닝 가공효과를 알아보기 위하여 용접시험편에 대하여 용접후열처리 후 쇼트 피닝 가공한 시험편과 용접후열처리 실시하지 않고 쇼트 피닝 가공한 시험편의 피로특성도 평가하였다. 일반적으로 철강재의 S-N 곡선이 휘어지는 지점인 한계반복수에 대한 한계응력을 내구한도(endurance limit)라 하고, 그 이상에서는 수평이 되는 응력으로 표현하여 피로한도(fatigue limit)한다. 피로한도보다 높은 반복응력에서 지정된 횟수의 반복에 견디는 응력의 상한을 시간강도라 부르며, 피로한도나 시간강도의 총칭을 피로강도라 한다. 철강재나 제한된 금속에서는  $10^6$ 에서  $10^7$ 회의 반복횟수에서 피로한도를 구하는데 본 논문에서는  $2 \times 10^6$ 회의 반복횟수를 피로한도로 정하였다.

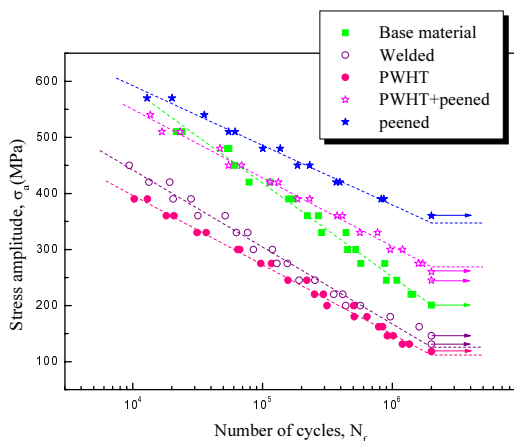


Fig. 9. S-N curves of SS400 steel

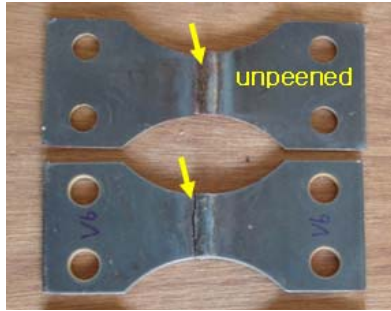
실험결과를 요약하면 모재의 경우 피로한도가 200.8MPa로 측정되었으며, 용접시험편은 125.9MPa 그리고 용접후열처리를 실시한 시험편은 111.6MPa로 측정되어 모재에 비하여 각각 37.3%, 44.4% 가량 감소하였다. 이와 같이 용접후열처리 가공을 실시하였을 경우 오스테나이트 상태로 된 시험편을 냉각하여 어닐링 상태로 하면 피로강도는 낮아진다고 보고되고 있다. 이것은 결정립이 약간 크게 되는 것과 가공에 의한 경화 효과가 소멸되기 때문이다. 냉간 가공재 등에서는 압축잔류응력이 없어지는 영향도 있을 것으로 판단된다. 기존의 연구결과에 의하면 실물크기의 용접구조물에서도 용접후열처리를 한 경우의 피로강도가 용접후열처리 하지 않은 경우보다 약간 작았다[22]. 용접후열처리 후 쇼트 피닝 가공한 시험편과 용접후열처리 공정 없이 쇼트 피닝 가공한 시험편의 피로한도가 각각 268.9, 347.2

MPa로 측정되어 모재에 비하여 약 33.9%, 72.9% 가량 증가한 것을 알 수 있다. 쇼트 피닝 가공으로 인하여 시험편의 표면에 상당한 크기의 압축잔류응력이 생성되었으며 이로 인하여 피로한도가 크게 증가한 것으로 판단된다.

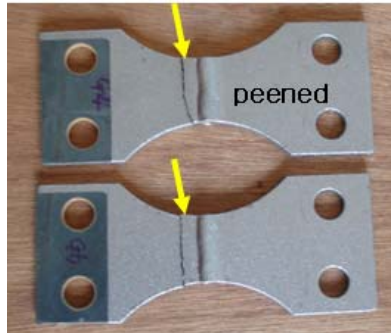
### 3.4 피로시험 파단부 관찰

피로파괴는 표면부의 크랙 발생과 진전에 의해 생긴다. 그러나 쇼트 피닝 가공에 의한 경도의 증가와 압축잔류응력의 생성은 크랙 진전을 억제하는 효과가 있어 크랙의 생성이 표면이 아닌 내부에 생기는 이른바 Fish eye가 생기는 경우도 있다고 보고되고 있다[23]. 그러나 본 연구에서 사용된 SS400 소재의 피로시험 결과 내부에서의 크랙은 관찰되지 않았으며 시험편 모두 표면으로부터 크랙이 전파해나아가는 형상을 띄고 있다. 크랙 생성 위치에 있어서 쇼트 피닝 가공한 시험편과 쇼트 피닝 가공하지 않은 시험편간에 차이점이 있었는데, Fig. 10에서는 쇼트 피닝 가공한 시험편과 가공하지 않은 일반 시험편의 크랙 생성 위치를 보여주고 있다. 쇼트 피닝 가공을 하지 않은 경우 크랙의 생성이 용접 비드 바로 옆에 생성된 것을 알 수 있다. 쇼트 피닝 가공한 경우는 용접부와 모재의 경계면으로부터 최대 5mm 정도 떨어진 곳에서부터 용접부와 모재의 경계면까지 다양한 위치에서 크랙이 생성되었다. 용접부와 모재의 경계면으로부터 약 5mm 위치에서 크랙이 생성된 시험편은 쇼트 피닝 가공한 35개의 시험편중 2개로 나타났다. 쇼트 피닝에 의해 용접지단부의 곡률반경이 변화했는지 알아보기 위해서 Mitutoyo CV-3000S4 형상측정기를 이용하여 피닝을 한 시험편과 하지 않은 시험편에 대해 임의로 10곳에서 용접지단부의 곡률반경을 측정하였다. Fig. 11은 용접 비드를 측정된 모양과 비드의 끝에서 곡률반경을 측정된 모양을 보여준다. Table 1은 측정된 곡률반경의 값이다. 피닝을 한 시험편과 하지 않은 시험편의 용접 지단부의 곡률반경 분포에 큰 차이가 없으며 10개 값의 평균은 동일하게 0.60mm이다. 따라서 쇼트 피닝에 의한 용접 지단부의 곡률반경 변화는 크지 않다고 할 수 있으므로 쇼트 피닝에 의한 피로수명의 증가는 주로 피닝에 의한 압축잔류응력에 기인하는 것으로 판단된다. 압축잔류응력은 X-ray 회절을 이용하는 TEC4000을 이용하여 용접 비드와 모재의 경계부에서 시험편의 폭 방향으로 용접 비드를 따라 가면서 4곳에서 측정하였다. Table 2는 측정된 잔류응력의 값으로 시험편의 길이 방향의 성분이다. 용접상태의 시험편은 전형적인 용접부의 응력분포와 같이 시험편의 양쪽 가장자리 부근에서는 압축잔류응력이 중심부에서는 인장잔류응력이 작용하고 있다. 쇼트 피닝 후 전체 폭에 걸쳐 압축응력이 작용하고 압축응력의 크기는 80~265MPa 정도로 상당히 크다.





(a) Unpeened welding specimens



(b) Peened welding specimens

Fig. 10. Fracture locations

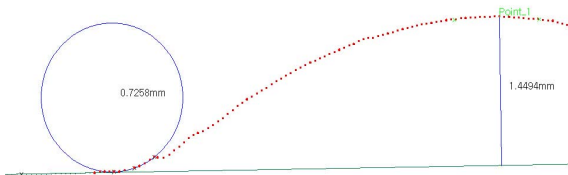


Fig. 11. Measurement of weld bead profile

Table 1. Radius of curvature at weld bead toe

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Mean
Non peening	0.58	0.67	0.58	0.61	0.83	0.89	0.25	0.73	0.62	0.21	0.60
Peening (mm)	0.57	0.66	0.43	0.31	0.42	0.56	1.51	0.33	0.37	0.86	0.60

Table 2. Measured residual stress

Specimen	Measuring points	Residual stress (MPa)
As-welded	1	- 31.0
	2	+ 16.9
	3	+ 14.7
	4	- 45.1
Welding and Shot peening	1	- 265.4
	2	- 221.2
	3	- 80.6
	4	- 172.7

## 4. 결론

본 논문에서는 전동차 대차 프레임 및 차체 제작에 널리 사용되고 있는 SS400강의 용접부 피로강도에 미치는 쇼트 피닝의 영향을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 피로수명이 가장 긴 최적의 쇼트 피닝 조건은 쇼트 볼의 투사속도 60m/sec, 투사시간 24분으로 확인되었다.
2. 피로특성평가 결과 모재에 비하여 용접시험편과 용접후 열처리 한 시험편에서는 피로한도가 각각 37.3%, 44.4% 가량 감소하였다. 용접후열처리를 실시한 시험편의 경우 인장강도가 낮아지고 가공에 의한 경화가 소멸되기 때문으로 판단된다.
3. 쇼트 피닝 가공한 시험편의 피로특성 평가결과 용접후 열처리 실시한 시험편의 경우 모재에 비하여 피로한도가 약 33.9% 가량 증가하였으며, 용접후열처리를 실시하지 않고 쇼트 피닝 가공한 시험편의 경우 피로한도는 약 72.9% 증가하였다. 따라서 쇼트 피닝 가공은 금속의 용접부 혹은 취약부의 피로강도를 향상시킬 수 있는 매우 유익한 방법이라 할 수 있다.
4. 쇼트 피닝에 의한 용접 지단부의 곡률반경의 변화는 미미하였다.
5. 쇼트 피닝에 의한 압축잔류응력의 크기는 -80~265MPa 정도로 피로수명 증가의 주된 원인으로 판단된다.
6. 국내 전동차 대차 프레임의 용접잔류응력 완화를 위하여 적용하는 용접후열처리 기법은 본 연구결과에서 보는 바와 같이 용접후열처리에 의하여 피로수명이 더 낮아지는 현상을 볼 수도 있으므로[22] 용접후열처리에 앞서 그에 따른 피로강도가 설계요구에 적합한지 여부를 사전에 실험 등을 통하여 충분히 검토한 후 적용하여야 할 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

1. Y. Hua, C. Gong, Z. Yao, and J. Hu(2009), "Investigation on the non-homogeneity of residual stress field induced by laser shock peening," Surface and Coatings Technology, Vol. 203, Issue 23, pp.3503-3508.
2. X. Cheng, J. W. Fishera, H. J. Prask, T. Gnäupel-Heroldc, B. T. Yena, and S. Royb(2003), "Residual stress modification by post-weld treatment and its beneficial effect on fatigue strength of welded structures," Int. J. of Fatigue, Vol. 25, Issues 9-11, pp.1259-1269.
3. K. J. Kirkhopea, R. Bellb, L. Caronc, R. I. Basud, and K.-T. Ma(1999), "Weld detail fatigue life improvement techniques. Part 1: review," Marine Structures, Vol. 12, Issue 6, pp. 447-474.

4. K. J. Kirkhopea, R. Bellb, L. Caronc, R. I. Basud, and K.-T. Ma(1999), "Weld detail fatigue life improvement techniques. Part 2: application to ship structures," *Marine Structures*, Vol. 12, Issue 6, pp.477-496.
  5. 한정우, 한승호(2009), "공압식 헤머피닝을 이용한 용접부 피로 수명 연장기술 연구," *대한기계학회논문집 A*, Vol. 33, No. 8, pp.842-848.
  6. 박경동, 안재필(2006), "현가장치재의 부식피로균열진전에 미치는 쇼트피닝의 영향," *한국자동차공학회논문집*, Vol. 14, No. 3, pp.88-94.
  7. 박경동, 신영진, 김동욱(2006), "SAE 5155강에서 쇼트피닝이 부식과 피로균열특성에 미치는 영향," *한국마린엔지니어링학회지*, Vol. 30, No. 6, pp.731-739.
  8. 박경동, 안재필(2005), "3.5% NaCl 수용액에서 SAE 5155의 부식거동에 미치는 쇼트피닝의 영향," *한국마린엔지니어링학회지*, Vol. 29, No. 6, pp.692-700.
  9. 정석주, 백상도(1998), "스프링 강의 피로특성에 미치는 쇼트피닝의 영향," *대한기계학회논문집 A*, Vol. 22, No. 6, pp.1009-1015.
  10. 심동석, 이승호, 이명호(2004), "균열진전에 대한 쇼트피닝 효과," *한국해양공학회지*, Vol. 18, No. 6, pp.91-95.
  11. 신용승, 정성교, 서유원(1998), "쇼트 피닝한 SCM22강의 피로 특성," *한국공작기계학회지*, Vol. 7, No. 6, pp.126-131.
  12. N. A. C. Laha, A. Alia, N. Ismaila, L. P. Chaib, and A. A. Mohamed(2009), "The effect of controlled shot peening on fusion welded joints," *Materials & Design*, doi:10.1016/j.matdes. 2009.06.027.
  13. 서울메트로(2005), "서울메트로 2호선 전동차 VVVF(54량) 준공도면," 제 7권 대차.
  14. 한국기계연구원(1999), "지하철 전동차 대차 수명관리방안 연구", pp.2-56.
  15. D. W. Hammond and S. A. Meguid(1990), "Crack propagation in the presence of shot-peening residual stress", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 37, No. 2, pp.373-387.
  16. M. C. Sharma(1996), "Assesment of over peening by time on fatigue behavior of spring steel," *Proc. of 6th International Fatigue Congress*, pp.1397-1402.
  17. Iida, K.(1984), "Dent and affected layer produced by shot peening," *Proc. of the 2nd International Conference on Shot Peening*, Chicago, pp.283-292.
  18. S. K. Cheong, S. H. Lee, and S. C. Chung(2001), "Effect of the peening intensity by shot peening," *Transactions of the KSME A*, Vol. 25, No. 10, pp.1590-1596.
  19. Wheelabrator Corporation(1965), *Shot Peening*, Indiana.
  20. 산업표준심의회(1977), "용접부의 노내 응력 제거 방법," KS B0883.
  21. ASTM E8(2004), "Standards test methods for tension testing of metallic materials".
  22. B. C. Goo et al.(2004), "Development of remaining life estimation techniques for rolling stock structures," *Ministry of Science and Technology*, Report No. M1-0203-00-0104, pp. 135-144.
  23. I. Marines-Garcia, P. C. Paris, H. Tada, C. Bathias, and D. Lados(2008), "Fatigue crack growth from small to large cracks on very high cycle fatigue with fish-eye failure," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, Issue 6, pp.1657-1665.
- 접수일(2009년 7월 20일), 수정일(2009년 8월 11일),  
게재확정일(2009년 10월 23일)