

SM490A 용접시편의 초음파 핀 피닝 및 피로수명 평가

구병춘

한국철도기술연구원 차세대철도차량본부

Ultrasonic Pin Peening and Fatigue Life Evaluation of SM490A Welded Specimens

Byeong-Choon Goo

Advanced Railroad Vehicle Division, Korea Railroad Research Institute

요약 용접부는 용접비드의 토우에서 균열이 발생하여 파손되는 경우가 대부분이다. 용접으로 토우 주변에는 미세조직이 변하고 표면이 거칠어져 응력집중이 발생하고 용접에 의한 인장 잔류응력이 작음하므로 구조강도 측면에서 매우 취약하다. 고주파 핀 피닝기술은 용접 토우 주위를 고주파 가진 액추에이터에서 발사된 핀으로 타격하여 소성변형을 발생시켜 표면의 인장 잔류응력을 압축 잔류응력으로 바꾸고, 조직을 미세하게 하며 응력집중을 완화하여 피로강도를 향상하는 기술이다. 본 연구에서는 용접부의 피로강도 향상에 탁월한 효과가 있는 이동형 고주파 피닝장치를 개발하고 성능을 평가하였다. MP Sonic 2020A 발진기와 압전 액추에이터를 바탕으로 피닝장치의 사양을 결정하고 설계하였다. 진동 horn의 형상을 다양하게 변경하면서 고유진동수를 유한요소법으로 해석하고 형상변화와 고유진동수의 관계를 분석한 후 최적의 형상을 선정하여 시제품을 제작하였다. SM 490A 강판으로 맞대기 용접시편과 T형 필렛 용접시편을 제작하고 피닝을 한 후 4점 굽힘 피로시험을 수행하여 피닝이 용접시편의 피로수명에 미치는 효과를 평가하였다. SM 490A 강판 용접시편의 경우 피닝은 용접시편의 피로수명을 500 % 이상 향상하였다. 이러한 결과는 기존의 문헌이나 피닝 관련 자료에서 발표되고 있는 피로수명 향상 효과와 유사한 수준이다.

Abstract The microstructure near the weld toe region changes during welding, and the surface becomes rough. As a result, stress concentration occurs at the toe, and tensile residual stresses are generated on the surface layer. Ultrasonic pin peening strikes the weld toe area with a pin propelled from a high-frequency actuator. It induces plastic deformation and compressive residual stress on the surface layer. It also makes the microstructure fine and smoothens the rough surface to reduce stress concentration. This study developed a portable ultrasonic pinning device. The finite element method analyzed the natural frequency for various horns with different sizes. Butt-welded and T-shaped specimens were manufactured with SM490A steel plate to evaluate the performance of the peening device. Four-point bending fatigue tests were carried out after peening to analyze the effect of peening on the fatigue life of the welding specimen. It turned out that peening improved the fatigue life of the welded specimen by more than 500 %. The results are similar to the effects published in the literature or peening-related data.

Keywords : Fatigue, Residual Stress, Ultrasonic Peening, Vibration Horn, Welding

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업 (철도차량 사고예방을 위한 지능형 고속대차 핵심기술 개발, PK2202B1)의 연구비 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Byeong-Choon Goo(Korea Railroad Research Institute)

email: bcbgo@krii.re.kr

Received January 12, 2022

Revised February 4, 2022

Accepted April 1, 2022

Published April 30, 2022

1. 서론

용접구조물은 대부분 용접 토우에서 균열이 발생하여 성장하고 어느 크기에 도달하여 구조물이 작용하중을 더는 지탱하지 못하게 되면 파손에 이르게 된다. 용접부의 용접금속과 모재의 열영향부가 만나는 부위는 용접열에 의해 미세조직이 변하고 용접비드의 표면에 요철이 생겨 응력집중이 발생하기 쉽고, 표면층에는 용접으로 인장 잔류응력이 작용하므로 피로강도 측면에서 매우 취약하다. 용접부의 피로강도를 향상하기 위해 용접 토우 주위를 고주파 가진 액추에이터를 진동시켜 충격 핀이 용접 토우 부위를 타격하면 소성변형이 발생하여 인장 잔류응력이 압축 잔류응력으로 변한다. 그리고 피닝은 조직을 미세하게 하고, 거친 표면을 매끄럽게 하여 응력집중을 완화해 피로강도를 향상한다. 해외에서는 항공, 철도, 자동차, 조선, 교량, 증공업 등에서 용접부 표면처리의 표준공정으로 적용하는 것이 추세이다. 현재의 초음파 피닝장치와 동작 원리가 유사한 특허가 이미 1940년대 미국에서 등록되었다[1]. 그때의 장치는 공압으로 핀을 발사하여 표면을 타격하는 방식이고 장치의 사용 목적은 용접부의 피로수명 향상이 아니고 용접부나 페인트가 칠해진 표면의 먼지, 녹 등을 벗겨내는 데 주로 활용되었다. 공압으로 작동되는 좀 더 진보된 또 하나의 특허가 1960년대에 등록되었다[2]. 용접구조물의 피로수명 향상을 위해 초음파 액추에이터를 활용한 피닝장치는 1960~1970년대 러시아연방에서 많은 연구가 되어 실용화되었다[3]. Kudryavtsev와 Kleiman[4]의 연구에 의하면 용접 상태로 일정 기간 피로하중을 받은 항복강도 360 MPa 강판 용접시편의 토우 부위를 피닝하는 경우 피닝하지 않은 시편에 비해 피로수명이 크게 연장되었다. 그리고 피에조 액추에이터가 자기변형 액추에이터보다 피로수명 향상에 더 효율적이었다. Trufyakov 등[5]은 항복강도 200 MPa 정도의 저탄소강 용접시편에 대해 자기변형 액추에이터를 사용한 피로시험에서 피닝이 피로수명을 4~5배 향상하는 효과가 있음을 보여 주었다. Stanikov 등[6]은 고장력강 용접시편에 샌드블라스트, 저 변태점 용접봉 용접, 초음파 피닝 처리한 시편의 피로수명을 비교한 결과 초음파 피닝의 피로수명 향상 효과가 가장 좋았다. Pedersen 등[7]은 고장력강 용접시편의 용접 토우에 그라인딩, TIG 드레싱, 초음파 피닝을 하고 S-N 선도를 비교하였다. 피로수명이 백만 사이클 이상인 영역에서 초음파 피닝이 피로수명 연장에 가장 효과적이었다. Roy 등[8]은 ASTM A588-97B Grade 50W 플랜

지 빔의 용접부에 초음파 피닝을 하여 피로강도 향상에 유용하다는 것을 보여 주었다. Günther 등[9]은 EN10025-4 S460M 강판 용접시편으로 피로수명의 75~90 % 정도까지 피로하중을 가한 시점에서 시험을 중단하고 초음파 피닝을 한 후 다시 파단될 때까지 피로 시험을 했는데, 이 경우 피닝을 안 한 시편에 비해 피로수명이 많이 증가하는 것을 확인하여 초음파 피닝이 사용 중인 용접구조물의 수명 연장에도 효과가 있음을 밝혔다. Liu 등[10]의 연구와 Zhang 등[11]의 연구에서도 유사한 결과를 볼 수 있다. Liu 등[10]은 맞대기 28 패스 용접의 중간마다 초음파 피닝을 하여 경도와 입자 모양의 변화를 조사하였다. 모재와 용접금속의 경계에서 피닝을 한 경우는 등축 입자가 생성되고, 안 한 경우는 원기둥 형상의 입자가 생성되었으며 경도는 상대적으로 낮았다. Zheng 등[12]과 Yuan과 Sumi[13]는 유한요소법으로 용접공정을 해석하여 구한 잔류응력을 초기조건으로 하고 충격 핀과 피닝 물체간의 충돌을 해석하여 용접과 피닝에 의한 잔류응력의 변화를 예측하였다. Tang 등[14]은 스테인레스 304L 시편의 용접과 피닝 공정을 해석하여 잔류응력을 구한 후, 이 시편에 초기균열을 삽입하여 파괴역학적 방법으로 균열진전을 해석하여 피로수명을 예측하였다[14].

국내의 경우 아직 국산 피닝 장비가 개발되지 않고 관련 이론과 기술도 널리 보급되지 않아 본 연구에서는 독자적으로 초음파 피닝 장비를 개발하고, SM490A 강판으로 맞대기 용접시편과 T형 필렛 용접시편을 제작하고 용접 토우에 피닝을 한 후 4점 굽힘 피로시험으로 피닝이 용접부의 피로강도에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 피닝장치 설계 및 제작

Fig. 1은 피닝장치의 구성도를 보여 준다. 장치는 전원 공급장치, 손잡이, 피에조 액추에이터, 공진 혼, 충격 핀 고정부, 충격 핀, 그리고 케이스로 구성된다. 고주파 피닝 장치에 사용할 전원 공급장치와 PZT 액추에이터로는 MP Sonic 2020A 모델을 선정하였다. 입력 전원은 AC 220 V, 60 Hz이고, 출력은 2,000 W, 20 kHz이다. 액추에이터에 결합되어 진동을 증폭하는 역할을 하는 공진 혼의 재질은 티타늄 합금이다. 액추에이터의 진동수 20 kHz에서 공진 모드를 가져야 하므로 유한요소 해석을 통하여 공진 혼을 설계하였다. 충격 핀은 충격 핀 고정부에 끼워져 있으며 공진 혼과 일체로 결합되지 않고

혼이 진동할 때 접촉에 의한 충격력으로 튕겨 나가 피닝 대상체의 표면에 충격을 가해 피닝을 하는 방식이다.

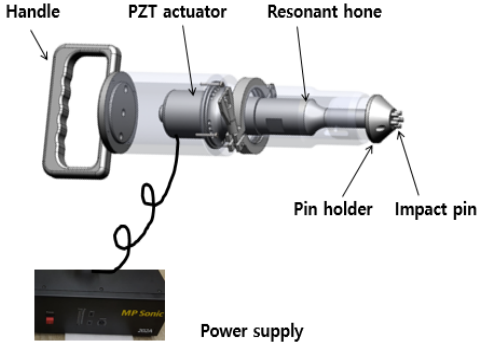


Fig. 1. Configuration diagram of the peening device.

피닝 장치의 성능은 공진 혼의 진동 특성과 깊은 관계가 있다. 공진 혼의 고유진동 특성을 파악하기 위해 공진 혼의 치수를 변경하면서 상용 소프트웨어 ABAQUS로 유한요소 해석을 수행하였다. Fig. 2는 원통형 공진 혼의 단면도를 보여 준다. 형상을 결정하는 변수는 ϕ_a , ϕ_b , R , L_1 , L_2 및 L 이다. 20 kHz 근처의 공진 모드를 얻기 위해 각 변수의 치수를 변경하면서 고유진동 모드해석을 하였다. 해석에 사용된 티타늄 합금 Ti6Al4V의 탄성계수는 110 GPa, 비중은 4.42이다. Fig. 3은 고유진동수 20,566 Hz일 때의 진동 형상을 보여 준다. Fig. 4는 실물 공진 혼의 사진이다. Fig. 5는 본 연구에서 개발한 피닝 장비를 보여 준다. 개발품의 성능을 평가하기 위해 변위 측정용 샘플링 주파수 40 kHz 광센서를 사용하여 변위 측정 장치를 제작하여 2000 W 전원 공급장치의 출력을 10%(200 W)부터 10%씩 올리면서 공진 혼 끝단의 변위를 측정하였다. Fig. 6은 변위 측정 결과의 한 예를 보여 준다. 변위는 20.06 kHz의 주파수를 가지며 0점을 기준으로 대칭을 이루고 있음을 볼 수 있다. 공급 전력과 혼 끝단 변위의 관계는 Fig. 7과같이 완전한 선형 비례 관계가 있음을 확인하였다.

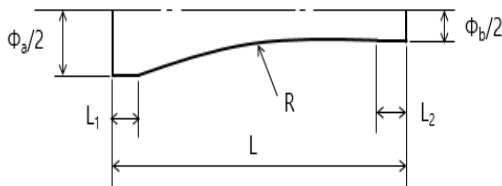


Fig. 2. Section view of the resonant horn.

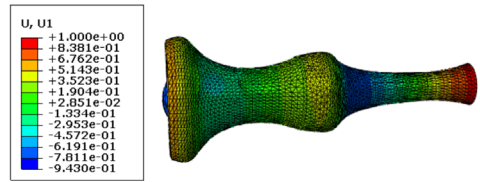


Fig. 3. Natural vibration mode of the resonant horn at 20,566 Hz



Fig. 4. Resonant horn



Fig. 5. Developed peening device

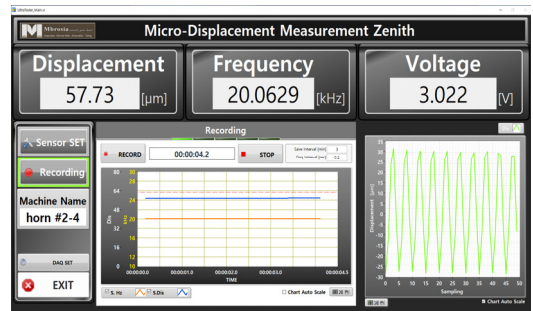


Fig. 6. Measurement of the displacement of the horn end

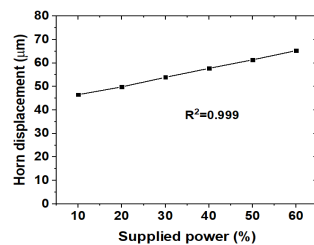


Fig. 7. Relation between supplied power and horn end displacement

3. 피닝 성능평가

피닝이 용접부의 피로수명에 미치는 영향을 평가하기 위해 SM 490A 강판으로 맞대기 용접시편과 T형 필렛 용접시편을 제작하고 용접 토우 부위를 피닝한 후 4점 굽힘 피로시험을 실시하여 피닝이 피로수명에 미치는 영향을 검토하였다.

3.1 피로시편 제작

피로시편 제작에 사용한 소재는 자동차, 철도차량 대차, 차체의 언더프레임, 기타 구조물 등에 많이 사용되는 내후성강 SM490A이다. 10.0T×150L×300W 두 개의 판을 용접한 후 와이어 절단을 10.0T×300L×30W 크기의 최종 시편을 제작하였다. GMAW 로봇 용접은 실제로 철도차량 대차프레임을 제작할 때와 유사한 조건으로 하였다. Ø1.2 SM-70 (AWS ER-70S6) 용접 와이어와 Ar(80%)+O₂(20%) 보호가스를 사용하였다. 맞대기 용접은 Fig. 8(a)에서 보여 주는 순서로 4 패스를 전류 200 A, 전압 26 V, 용접봉 이송 속도 38.1 cm/min로 하였고, 필렛 용접은 전류 284 A, 전압 34.5 V, 용접봉 이송 속도 30 cm/min으로 각 필렛에 한 패스를 적용하였다. Fig. 9는 용접 토우 피닝 전과 후 시편의 형상을 보여 준다. 피닝의 폭은 약 4 mm, 깊이는 0.2~0.4mm 정도이다. 피닝 깊이는 충격 핀의 크기와 충격 핀이 시편을 타격하는 충격에너지와 관계가 있다. 충격에너지는 공진 혼의 변위와 전원 공급장치의 출력에 비례한다. 너무 과도한 충격량은 시편 표면에 상처를 내어 도리어 피로수명을 단축할 수도 있으므로 각 인자를 적절히 설정하여 피닝장치를 최적화하는 것이 필요하다. 피닝 폭은 피닝장치를 옮겨가며 원하는 폭만큼 할 수 있지만, 수작업으로 하는 경우 숙련된 작업자라도 균일한 품질을 확보하기가 어려우므로 엄격한 품질관리를 해야 하는 경우 피닝장치를 로봇에 연결하여 작업하는 것이 최신의 기술 동향이다.

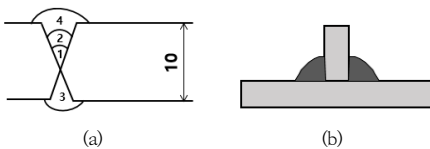


Fig. 8. Specimen welding detail
(a) Butt weld (b) T-shape fillet weld

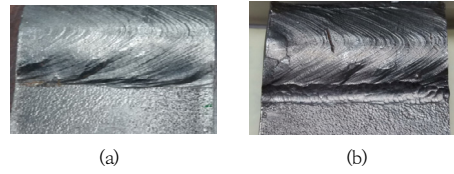


Fig. 9. Weld toe peening
(a) Before peening (b) After peening

3.2 잔류응력 측정

용접시편에 대해 X-ray 잔류응력 측정 장비와 컨투어 방법(Contour method)[15,16]을 적용하여 용접부의 잔류응력을 평가하였다.

3.2.1 X-ray 잔류응력 측정

맞대기 용접시편과 T형 필렛 용접시편에 대해 피닝을 한 시편과 하지 않은 시편을 대상으로 Pulstec μ-X360 X-ray 잔류응력 측정장비를 사용하여 용접 토우를 따라 Fig. 10에 표시한 세 점 (L, C, R)에서 길이방향 잔류응력을 측정하였다. 피닝을 한 시편과 하지 않은 시편 모두에서 압축 잔류응력이 측정되었고 잔류응력의 크기는 큰 차이가 없었다. 측정된 잔류응력의 크기는 -287~-379 MPa 범위이다(Table 1). 이는 용접 후 시편 표면에 붙은 스파트(Spatter)를 제거하기 위해 표면을 그라인딩 한 것이 원인이라고 판단된다. 표면으로부터 깊이에 따라 잔류응력의 변화를 측정하기 위해 피닝을 하지 않은 맞대기 용접시편의 표면을 전해연마 한 후 잔류응력을 측정하였다. 표면에서 -375 MPa이던 잔류응력은 160 μm 전해연마 후에는 -100 MPa로 크게 줄어들었다. 이로 부터 그라인딩이나 피닝으로 생성된 압축잔류응력은 시편의 표면부위에 국한되어 분포함을 알 수 있었다.

Table 1. Residual stress on the surface

Specimen type	Locations	Residual stress (MPa)
No peening, butt weld	C	-379
	L	-347
	R	-207
Peening, butt weld	C	-354
	L	-287
	R	-337
No peening, fillet welding	C	-343
	L	-342
	R	-371
Peening, fillet welding	C	-374
	L	-213
	R	-221

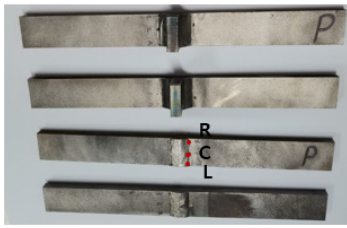


Fig. 10. Measuring locations of residual stress

3.2.2 컨투어 방법에 따른 잔류응력 측정

X-ray는 시편 표면에서의 잔류응력 측정은 가능하나 내부의 잔류응력은 측정이 어렵다. 시편의 절단면에 작용하는 잔류응력을 평가하는 하나의 방법으로 Prime[15]은 컨투어 방법 (contour method)[15,16]을 제안하였다. 이 방법은 시편을 절단하여 절단면의 변위를 측정하고 이 변위를 절단된 시편의 유한요소 해석 모델의 경계조건으로 입력하여 3차원 잔류응력 분포를 구하는 것이다. 용접시편의 용접 토우 근처의 단면에 수직으로 작용하는 잔류응력을 평가하기 위해 피닝부에서 시편의 길이 방향에 수직이 되게 와이어 방전가공으로 시편을 절단하고 두 절단면의 수직방향 변위를 0.01 μm 의 고해상도를 갖는 정밀 변위 측정장비(Model SPSM-10, Fusion ENG., Korea)를 사용하여 절단면에 표시된 0.1 mm 간격의 격자점에서 측정하였다. 두 절단면에서 측정된 변위의 평균값이 기준면이 된다. 측정된 수직변위는 이웃 격자점에서 물리적으로 가능한 응력변화가 발생하도록 Fourier 급수를 이용한 곡선 적합 (curve matching)[16]을 한 후 유한요소 해석의 입력으로 사용된다. 수직변위는 절단 때문에 잔류응력이 이완되어 생긴 것이므로 유한요소 해석에서는 측정값의 음의 값이 경계조건으로 사용된다. Fig. 11은 와이어 방전가공으로 피닝부 중심선을 따라 절단된 시편을 보여 준다. Fig. 12는 절단면에 수직인 변위를 2차원과 3차원으로 보여 준다. 절단된 오른쪽 반쪽 시편에 대해 유한요소 해석으로 구한 3차원 응력분포는 Fig. 13과 같다. 유한요소 해석에서 탄성계수 $E=210 \text{ GPa}$, 포아송비 $\nu=0.3$ 을 적용하였고, 경계조건으로 시편의 오른쪽 가장자리 면의 변위를 고정하였다. Fig. 13(a)는 최대 주응력을, Fig. 13(b)는 절단면에 수직인 응력 성분의 분포를 나타낸다. 수직방향의 응력은 $-400 \text{ MPa} \sim +400 \text{ MPa}$ 범위에 있고, 최대 인장응력의 위치는 시편의 양쪽 가장자리와 내부에서 발생하고 있다. Prime의[15,16] 연구에 의하면, 와이어 방전가공과 컨투어 방법은 절단면의 가장자리에서 실

제보다 좀 더 큰 잔류응력을 예측하는 것으로 알려져 있다. 동일한 절차를 적용한 피닝을 하지 않은 시편에 관한 결과[17]와 비교할 때 변위와 응력은 상당한 차이가 있었다. 절단면에서의 변위와 응력은 시편의 용접상태, 절단 위치, 초기응력상태 등에 따라 달라질 수 있으므로 향후 더 많은 시편을 대상으로 관련 데이터를 확보할 필요가 있다고 판단된다.



Fig. 11. Specimen cut by wire electrical discharge machining.

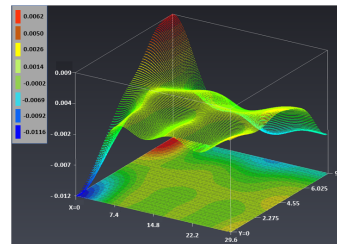


Fig. 12. Measured displacement normal to the cut surface. 2-dimensional (lower) and 3-dimensional (upper) graphs.

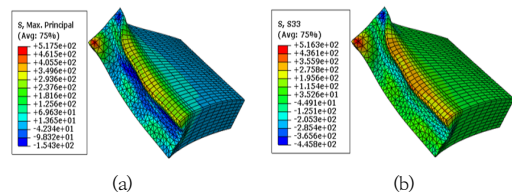


Fig. 13. Residual stress distribution in the right part of the specimen shown in Fig. 9.
(a) Max principal stress
(b) Normal stress to the cut surface.

3.3 4점 굽힘피로시험

Instron 25톤 피로시험기에서 맞대기 용접시편과 T형 필렛 용접시편에 대해 용접 토우에 피닝을 한 시편과 하지 않은 시편으로 굽힘피로시험을 수행하여 피닝이 피로수명에 미치는 영향을 평가하였다. 피로시험은 4점 굽힘시험이며 응력비(최소하중/최대하중) 0.1, 초당 3사이클로 하였다. Fig. 14와 15는 맞대기 용접시편과 필렛 용접시편의 피로시험 장면이다. Fig. 16과 17은 피로시

험 결과를 응력진폭과 파단 시의 사이클 수의 상용로그 값으로 도시한 S-N 선도이다. 맞대기 용접시편의 경우 425 MPa에서의 피로수명을 비교하면 피닝을 안 한 시편은 108,273 사이클, 피닝을 한 시편은 741,187 사이클로 안 한 시편의 6.8배이다. 필렛 용접시편의 경우 350 MPa에서의 피로수명을 비교하면 피닝을 안 한 시편은 161,714 사이클, 피닝을 한 시편은 835,775 사이클로 안 한 시편의 5.2배이다. Fig. 18은 시편의 파단면을 보여 준다. 모든 시편은 용접 토우에서 균열이 발생하고 진전하였다. 피닝이 피로수명을 향상하는 원인으로서는 피닝으로 용접 토우 주위에 생성된 압축잔류응력, 피닝이 토우부의 요철을 평탄하게 하여 응력집중부 완화, 조직의 미세화 등이 거론되고 있다. 본 연구에서 시편 표면세 점에서 측정한 X-선 잔류응력 측정값은 모두 압축응력으로 피닝의 유무에 따른 차이를 판별하기에는 데이터가 충분하지 않았다. Fig. 18에서 파단면을 보면 균열은 시편의 폭 방향으로 토우부를 잇는 선의 한 점에서 발생하여 진전하다가 파단되는데 균열발생 위치에서 피닝에 의해 잔류응력이 어떻게 변했는지 정확히 알아야 잔류응력이 미치는 효과를 정량화 할 수 있을 것이다.



Fig. 14. Fatigue test of butt weld specimens



Fig. 15. Fatigue test of fillet weld specimens

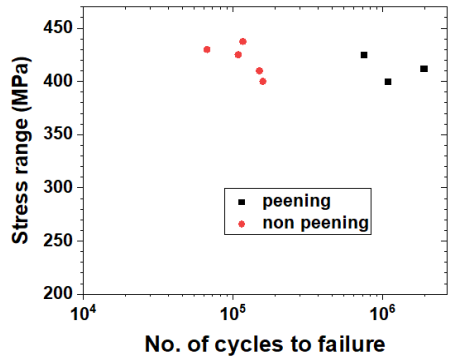


Fig. 16. S-N diagram of butt-weld specimens

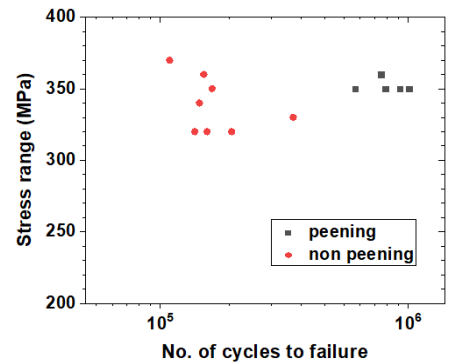


Fig. 17. S-N diagram of T-shape fillet weld specimens

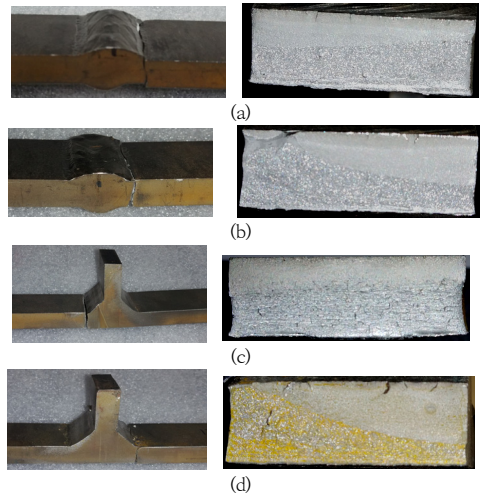


Fig. 18. Fracture surface of the specimens
 (a) $\Delta S= 425$ MPa, 108,273 cycles, non-peened (b) $\Delta S= 412.5$ MPa, 1,873,249 cycles, peened (c) $\Delta S=330$ MPa, 343,288 cycles, non-peened (d) $\Delta S= 350$ MPa, 807,836 cycles, peened

4. 결론

본 연구에서는 용접부의 피로강도 향상에 탁월한 효과가 있어 외국에서는 이미 널리 활용되고 있는 이동형 고주파 피닝장치를 개발하고, SM490A 용접시편을 대상으로 피닝 효과를 평가하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 20 kHz 압전소자와 20,566 Hz의 공진주파수를 갖는 공진 혼으로 제작한 초음파 피닝장치로 용접 토우 피닝을 쉽게 할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 피닝장치로 SM490A 용접 토우 주위를 피닝하면 폭 약 0.4 mm, 깊이 0.2~0.4 mm 정도의 소성변형을 쉽게 유발할 수 있었다.
- 3) X-선 잔류응력 측정장비로 측정된 용접 토우 잔류응력의 크기는 피닝 유무와 관계없이 압축응력으로 맞대기 용접시편의 경우 -287~-379 MPa, T형 필렛시편의 경우 -220~-374 MPa 범위에 있었다.
- 4) 표면에서 -375 MPa이던 잔류응력은 160 μ m 전 해연마 후 -100 MPa로 크게 줄어들었다. 이로부터 그라인딩이나 피닝에 의한 잔류응력은 표면 근처에 국부적으로 형성됨을 알 수 있었다.
- 5) 동일한 크기의 하중에서 용접 토우에 피닝을 한 시편의 굽힘피로수명은 피닝을 하지 않은 시편에 비해 5배 (500%) 이상이어서 피닝이 용접구조물의 피로수명을 연장하는 데 큰 효과가 있음을 알 수 있었다. 피닝의 효과로 거론되는 피닝부 압축잔류응력 생성, 요철의 평탄화에 의한 응력집중완화, 조직의 미세화 등 각 항목이 피로수명 향상에 미치는 정량적 효과는 추가 연구에서 수행될 예정이다.

References

- [1] R. D. Grey, J. R. Denison, "Scaling tool," Patent of USA No. 2,356,314, 1944.
<https://www.shotpeener.com/library/pdf/1942004.pdf>
- [2] J. F. Niedzwiecki, "Descaling tool," Patent of USA No. 3,349,461A, 1967.
<https://patents.google.com/patent/US3349461>
- [3] U. F. Kudryavtsev, "Fatigue improvement of welded elements by ultrasonic impact treatment," IIW Document XIII-2803-19, International Institute of Welding, pp. 1-18, 2019.
http://www.cciw.ca/sites/cciw.ca/files/articles/iw_doc_xiii-2803-19_uit_sintec_v_kudryavtsev.pdf
- [4] Y. Kudryavtsev, J. Kleiman, "Fatigue improvement of welded elements and structures by ultrasonic peening," Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference PVP2013-97185, pp. 1-9, 2013.
<https://doi.org/10.1115/PVP2013-97185>
- [5] V. I. Trufiyakov, P. P. Mikheev, Y. F. Kudryavtsev, D. N. Reznik, "Fatigue endurance of welded joints, residual stresses and fatigue improvement treatments," The Society of Naval Architects and Marine Engineers and the Ship Structure Committee, pp. 1-14, 1993.
<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.584.6490&rep=rep1&type=pdf>
- [6] E. S. Stanikov, V. O. Muktepavel, A. Blomqvist, "Comparison of ultrasonic impact treatment (UIT) and other fatigue life improvement methods," Welding in the World, vol. 46, pp. 20-32, 2002.
<https://link.springer.com/article/10.1007/BF03266368>
- [7] M. M. Pedersen, O. Ø. Mouritsen, M. R. Hansen, J. G. Andersen, J. Wenderby "Comparison of postweld treatment of high strength steel welded joints in medium cycle fatigue," welding in the world, 54, pp. R208-R217, 2010.
<https://www.semanticscholar.org/paper/Comparison-of-Post-Weld-Treatment-of-High-Strength-Pedersen-Mouritsen/6497e510432b652c2ac5fdb66a48a631a9b8a6cc>
- [8] S. Roy, J. W. Fisher, B. T. Yen, "Fatigue resistance of welded details enhanced by ultrasonic impact treatment (UIT)," International Journal of Fatigue, 25, pp. 1239-1247, 2003.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(03\)00151-8](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(03)00151-8)
- [9] H. P. Günther, U. Kuhlmann, A. Dürr, "Rehabilitation of welded joints by ultrasonic impact treatment (UIT)," IABSE SYMPOSIUM LISBON, 2005,
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.67.6287&rep=rep1&type=pdf>
- [10] Y. Liu, D. Wang, C. Deng, L. Xia, L. Huo, L. Wang, B. Gong, "Influence of re-ultrasonic impact treatment on fatigue behaviors of S690QL welded joints," International Journal of Fatigue, 66, pp. 155-160, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.03.024>
- [11] H. Zhang, D. Wang, L. Xia, Z. Lei, Y. Li, "Effects of ultrasonic impact treatment on pre-fatigue loaded high-strength steel welded joints," International Journal of Fatigue, 80, pp. 278-287, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.06.017>
- [12] H. Zheng, A. Ince, L. Tang, "Modeling and simulation of weld residual stresses and ultrasonic impact treatment of welded joints," Procedia Engineering 213, pp. 36-47, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.02.005>
- [13] K. Yuan, Y. Sumi, "Simulation of residual stress and fatigue strength of welded joints under the effects of ultrasonic impact treatment (UIT)," International Journal of Fatigue, 92, pp. 321-332, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.07.018>

- [14] L. Tang, A. Ince, J. Zheng, "Numerical modeling of residual stresses and fatigue damage assessment of ultrasonic impact treated 304L stainless steel welded joints," *Engineering Failure Analysis*, 108, 104277, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104277>
- [15] M. B. Prime, "Cross-sectional mapping of residual Stresses by measuring the surface contour after a cut," *J. Eng. Mater. Technol.*, 123(2), 162-168, 2001.
<https://asmedigitalcollection.asme.org/materialstechnology/article-abstract/123/2/162/443871/Cross-Sectional-Mapping-of-Residual-Stresses-by>
- [16] M. B. Prime, A. L. Kastengren, "The contour method cutting assumption: error minimization and correction," *Exp. Appl. Mech.*, 6, pp. 233-250, 2011.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4419-9792-0_40
- [17] B. C. Goo, "Effect of post-weld heat treatment on the fatigue behavior of medium-strength carbon steel weldments," *Metals* 2021, 11, 1700.
DOI: <https://doi.org/10.3390/met11111700>

구 병 춘(Byeong-Choon Goo)

[정회원]



- 1987년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학석사)
- 1995년 12월 : Uni. of Franche Comté, France (공학박사)
- 1987년 2월 ~ 1992년 8월 : 쌍용자동차 연구원
- 1996년 5월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 수석연구원

<관심분야>

신소재, 철도차량 제동장치, 피로파괴, 용접, 마찰·마모