

피로손상을 받은 SM45C강에 대한 재피닝의 효과

강진식[†] · 서유원* · 김태형** · 정성균*** · 신용승****
(2002년 2월 7일 접수, 2002년 5월 27일 심사완료)

Effects of Re-Peening on the Fatigue Damaged SM45C Steel

Jin-Shik Kang, Yu-Won Seo, Tae-Hyung Kim,
Seong-Kyun Cheong and Yong-Seung Shin

Key Words: Shot-Peening(쇼트피닝), Re-Peening(재피닝), Residual Stress(잔류응력), Fatigue Life(피로수명), Fatigue Damage(피로손상)

Abstract

The effects of re-peening on the fatigue damaged material are studied in this paper. The effects of re-peening process on surface hardness, surface roughness, surface compressive residual stress, and fatigue life are investigated. The results can be summarized in brief as follows: The depth of hardening layer was increased by re-peening process. There is no large variation of the surface roughness by re-peening process. The compressive residual stress of shot-peened specimen decreases under the fatigue loading and then increases again by re-peening process. Re-peening process increases the fatigue life of shot-peened and fatigue damaged specimen. The increase of fatigue life under high stress level is much higher than under low stress level.

1. 서 론

쇼트피닝 가공은 기계부품의 피로강도 및 수명 향상에 있어서 중요한 역할을 하고 있으며,⁽¹⁾ 설계 제작된 기계 및 구조물에서 발생할 수 있는 예기치 않은 파괴, 파손을 미연에 방지하고 피로 수명을 증가시키는 기술로 잘 알려져 있다.

쇼트피닝 가공에 의한 피로수명 향상 요인은 쇼트볼이 재료의 표면을 타격할 때 발생하는 소성변형에 의해 생성되는 압축잔류응력에 있다.⁽²⁾ 그러나, 쇼트피닝에 의해 재료표면에 생성된 압축잔류응력은 외부에서 작용되는 피로 하중 하에

서는 영구적이지 않으며, 선행된 많은 연구에서 압축잔류응력은 불규칙적으로 반복되는 피로하중 하에서 시간이 경과함에 따라 점차적으로 감소된다고 보고되고 있다.⁽³⁻⁶⁾ 압축잔류응력의 감소를 막기 위해서는 추가적으로 사용 중에 쇼트피닝 가공을 다시 하여 압축잔류응력을 재부여 할 수 있다.⁽⁷⁾ 몇몇 연구자들⁽⁸⁾에 의해 피로손상을 받은 금속재료에 대한 쇼트피닝의 효과에 대한 연구가 있었으며, 실제로 사용 중인 항공기나 여러 기계 부품에 쇼트피닝 가공하여 사용시간 누적에 따른 피로손상을 막고 수명을 연장시키기 위해서 재 쇼트피닝 가공을 하였다.⁽⁹⁾ 이와 같이 쇼트피닝 가공된 제품을 사용 중에 수명연장을 목적으로 다시 쇼트피닝을 하는 개념을 재피닝(re-peening)이라 한다.⁽⁷⁾ 그러나 실제로 적용되고 있는 재피닝에 대한 연구는 활발하지 않으며, 일반 쇼트피닝에 비하여 재피닝에 대한 데이터들은 아주 미비한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 쇼트피닝 가공의 효과를 확인하고 재피닝 가공에 의한 표면 변화의 관찰,

[†] 책임저자, 회원, 서울산업대학교 산업대학원

E-mail : kjs1108@netian.com

TEL : (02)970-6330 FAX : (02)974-5008

* 대원강업(주) 기술연구소

** 회원, 서울산업대학교 산업대학원

*** 회원, 서울산업대학교 기계공학과

**** 서울산업대학교 기계공학과

재피닝 가공이 표면 압축잔류응력과 피로수명에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

2. 이 론

2.1 쇼트피닝 가공의 개요

재료의 표면에 발생된 압축잔류응력은 재료에 작용하는 인장응력을 감소시킬 뿐만 아니라 재료의 피로강도를 향상시킨다. 압축잔류응력을 발생시키는 가공방법에는 쇼트피닝, 표면압연, 프리세팅, 국부 열처리방법 등과 같은 많은 처리과정들이 있으며, 또한 워터피닝(water-peening)을 이용한 방법도 연구자들로부터 주목을 받고있다. 그러나 현재 가장 널리 적용되는 방법으로는 쇼트피닝을 들 수 있다. 쇼트피닝 가공이란 금속 부품의 표면에 쇼트볼(shot ball)이라는 강구를 고속으로 투사하여 금속의 표면을 햄머링하는 일종의 냉간 가공이다.

쇼트피닝 가공 기본원리는 쇼트볼이 금속 표면에 고속 충돌할 때 쇼트볼의 운동에너지가 순간적으로 재료의 표면에 전이되면서 표면부에 얇은 소성변형층을 형성하고 표면에서 이탈한다. 이때 표면층에는 요철이 발생되며 표면의 소성 변형층을 경계로 하여 탄소층의 경계를 형성하게 된다. 이 소성변형층은 변형전의 상태로 유지하려는 반력이 작용하게 되어 표면에는 압축잔류응력, 내부는 인장응력을 갖고 평형을 이루게 된다.

2.1.1 재피닝의 개념

잔류응력은 피로하중이 반복적으로 작용하게 되면 증가 또는 감소하게 된다. Moore⁽¹⁰⁾는 Fig. 1과 같이 반복 피로하중에 따른 사이클 수와 압축 잔류응력의 변화를 퍼센트로 나타냈다. 여기서 σ_R 은 초기의 압축잔류응력값을 나타내며 σ'_R 는 N 사이클 후의 압축잔류응력값을 나타낸다. 그림에서와 같이 반복 하중의 횟수가 증가할수록 압축잔류응력이 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 이렇게 반복적인 피로하중을 받는 부분에서는 서서히 압축잔류응력이 제거되어 마침내 인장력에 의해 파괴되고 만다.

근래에는 쇼트피닝 가공 후에 피로하중을 받는 비행기의 날개 등과 같은 부분에 일정 시간 운

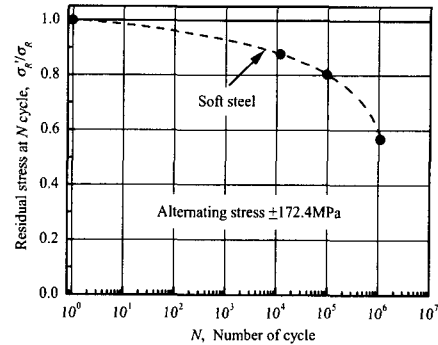


Fig. 1 Cycle-dependent change of residual stresses in soft steel

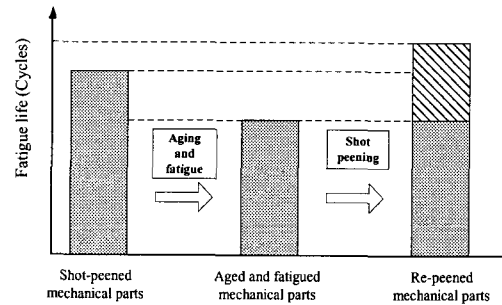


Fig. 2 Concept of re-peening

항 후 잔류응력을 측정하여 압축잔류응력이 어느 한계 이하가 되면 그 부분에 쇼트피닝 가공 처리를 하여 다시 압축잔류응력을 부여함으로써 사용 수명을 연장하기도 한다. 이러한 공법을 재피닝(re-peening)이라고 하며 Fig. 2는 재피닝의 개념을 나타낸다.

3. 실험방법

3.1 시험편

본 실험에서는 기계구조용강재로 많이 사용되는 SM45C강을 사용하였으며, 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 Table 2와 같다. Fig. 3은 본 실험에 사용된 회전굽힘 피로 시험편의 형상으로서 최소직경은 6 mm이다.

시험편의 쇼트피닝 가공은 Table 3의 조건과 같이 $\phi 0.6$ 쇼트볼로 쇼트피닝 가공 후 다시 $\phi 0.4$ 쇼트볼로 쇼트피닝 가공하여 2단 쇼트피닝 가공을 하였다.

Table 1 Chemical composition of SM45C (wt%)

	C	Si	Mn	P	S
SM45C	0.42 -0.48	0.15 -0.35	0.60 -0.90	0.03	0.035

Table 2 Mechanical properties of SM45C

	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Fracture strength (MPa)	Elongation (%)
SM45C	400.7	689.7	588.3	24.3

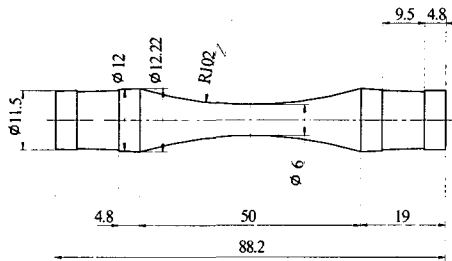


Fig. 3 Rotary bending fatigue test specimen

Table 3 Condition of shot-peening

Content	Condition	
Shot ball diameter	0.6 mm	0.4 mm
Time	7 min	
Impeller velocity	56.7 m/sec	
Arc height(A strip)	0.36 mm	

3.2 경도 및 표면조도 측정

쇼트피닝 전과 쇼트피닝 후, 그리고 재피닝에 의한 표면 경도 분포 및 표면조도의 변화를 관찰하였다. 표면 경도 분포는 측정을 위하여 시험편의 중앙부를 다이아몬드 커터기로 절단, 채취한 후 절단면을 연마하였으며, 마이크로 비커스 경도계(MOK-E3)를 사용하여 시험편의 표면에서부터 깊이 방향으로 1000 μm까지 측정하였다.

표면조도는 표면조도계(Mitutoyo SV-624)를 이용하여 측정하였으며 굴곡의 중심선 산술 평균값(Ra)과 굴곡의 최대값(Rmax), 10점 평균 거칠기(Rz)를 측정하였다.

Table 4 Measuring condition of residual stress

X-Ray diffraction	Condition	
X-Ray source	Target	Cr-V
	Voltage	30 kV
	Current	10 mA
φ	0°, 15°, 30°, 45°	
2θ	140° ~ 170°	
Diffraction	Scintillation counter	

Table 5 Pre-fatigued cycles before re-peening

Stress Level	σ _a (MPa)	N _f (cycles)	N/N _f (%)	N (cycles)
High stress	451	8.7 × 10 ⁴	25	2.2 × 10 ⁴
			50	4.3 × 10 ⁴
			75	6.5 × 10 ⁴
Low stress	387	6.08 × 10 ⁵	25	1.52 × 10 ⁵
			50	3.04 × 10 ⁵
			75	4.56 × 10 ⁵

3.3 잔류응력 측정

잔류응력의 측정은 X선 회절법(X-ray diffraction)을 이용하여 측정하였다. 표면에서 깊이 방향으로 쇼트피닝 가공에 따른 압축잔류응력 분포를 알아보기 위하여 20 μm씩 전해연마하면서 측정하였다. 잔류응력의 측정조건은 Table 4와 같다.

3.4 재피닝 가공

고응력(저사이클) 상태에서의 피로손상에 대한 재피닝 효과와 저응력(고사이클) 상태에서의 피로손상에 대한 재피닝 효과를 비교 분석하기 위하여 피로시험을 통하여 얻은 쇼트피닝 가공한 시험편의 S-N 선도를 바탕으로 적용 응력을 결정하였다. 적용응력(σ_a)은 451 MPa (N_f ≈ 8.7 × 10⁴cycles)와 387 MPa (N_f ≈ 6.08 × 10⁵cycles)로 하였다.

쇼트피닝 가공한 시험편의 피로손상 정도를 달리 하기 위해 파단 피로수명(N_f)에 대한 피로시험 사이클 수(N)를 피로손상 비(N/N_f)로 정의하였다. 쇼트피닝 가공된 시험편을 위의 두 가지 응력 상

태에 대하여 각각 피로손상 비 25%, 50%, 75%까지 피로시험을 하여 Table 5와 같이 시험편에 피로손상을 주었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 쇼트피닝

4.1.1 쇼트피닝 가공에 의한 압축잔류응력 분포

쇼트피닝에 의한 압축잔류응력의 분포를 알아보기 위하여 SM45C 소재 시험편에 쇼트피닝 가공을 한 후에 표면에서부터 깊이 방향으로 잔류응력을 측정하였다. Fig. 4는 깊이별 잔류응력의 분포를 나타낸 것이다. 표면에서의 압축잔류응력은 176.5 MPa로 나타났고, 최대 압축잔류응력은 표면에서부터 70 μm 깊이에서 300 MPa로 나타났다.

4.1.2 쇼트피닝 가공에 의한 피로특성 평가

쇼트피닝 가공에 따른 피로특성의 분석을 위해 회전굽힘 피로시험으로 피로강도를 평가하였다. Fig. 5는 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편과 쇼트피닝 가공한 시험편에 대한 응력-수명(S-N) 곡선이다. 1×10^6 사이클을 기준으로 하여 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편과 쇼트피닝한 시험편을 비교하여 보면, 피로강도 측면에서 각각 333 MPa과 376 MPa로 약 13%증가된 것으로 나타났다. 피로수명 측면에서는 응력 350 MPa을 기준으로 할 때

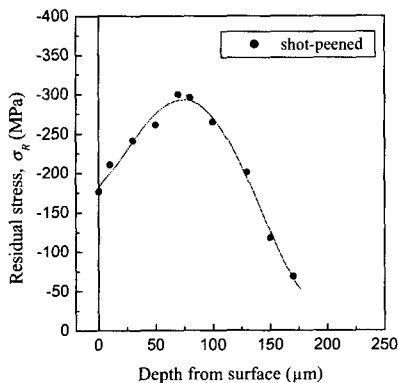


Fig. 4 Residual stress distribution of shot-peening specimen

쇼트피닝한 시험편이 쇼트피닝하지 않은 시험편보다 약 490% 증가를 나타내어 쇼트피닝 가공한 시험편은 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편보다 피로강도 및 피로수명 모두 향상되었다. 이는 쇼트피닝 가공에 의하여 생성된 압축잔류응력이 시험편에 가해지는 인장응력을 완화시키기 때문이다.

4.2 재피닝

4.2.1 경도분포

Fig. 6은 시험편의 표면에서부터 깊이별 경도분포를 나타낸 그래프이다.

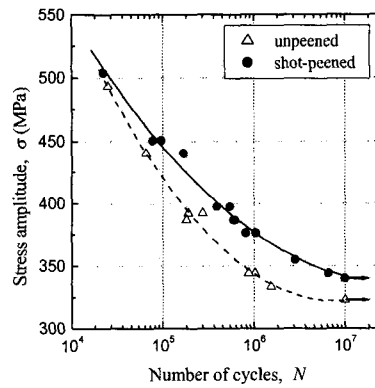


Fig. 5 S-N curve for unpeened specimen and shot-peened specimen

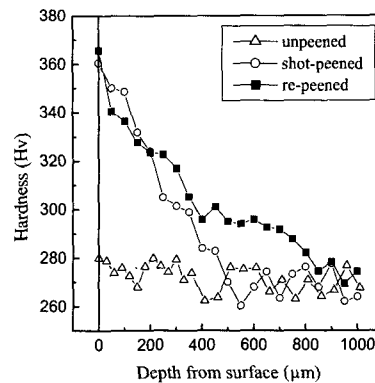


Fig. 6 Hardness distribution of specimens

쇼트피닝 가공을 하지 않은 시험편의 표면 경도값은 280Hv로 나타났다. 쇼트피닝 가공한 시험편과 재피닝 가공한 시험편의 표면 경도값은 360Hv와 365Hv로 나타나 쇼트피닝 가공을 하지 않은 시험편에 비하여 각각 28.5%, 30.4%의 증가를 나타내었다. 재피닝 가공된 시험편에서 표면부의 경도값은 쇼트피닝 가공한 시험편과 비슷하였으나 경도값의 분포를 살펴보면, 쇼트피닝 가공한 시험편보다 더 깊은 곳까지 경도가 증가한 것으로 나타났다. 이것은 재피닝 가공에 의해 쇼트피닝 가공에서 발생된 표면경화층(소성변형층)의 깊이가 더 깊어졌기 때문으로 판단된다.

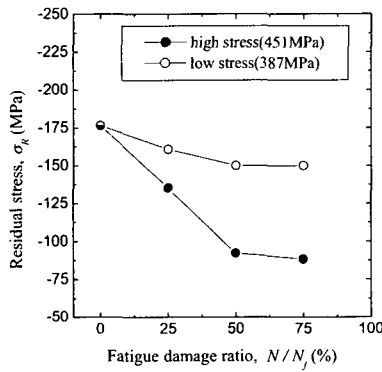


Fig. 7 Variation of compressive residual stress due to fatigue loading for high and low stress level

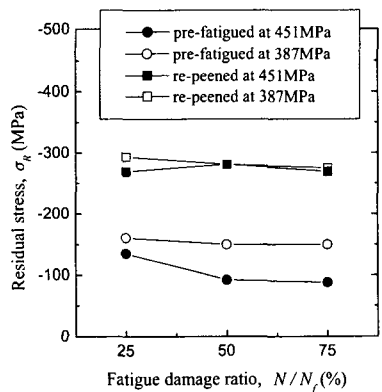


Fig. 8 Variation of compressive residual stress by re-peening for high and low stress level

4.2.2 표면조도

Table 6은 시험편의 표면조도의 변화를 알아보기 위하여 시험편의 표면부를 측정된 결과이다.

재피닝 가공한 시험편의 경우는 쇼트피닝 가공한 시험편에 비하여 중심선 산술 평균값은 약 2.2% 감소하였으며 굴곡의 최대값은 12% 감소하였고 10점 평균 거칠기는 5.4% 증가하였다. 전반적으로 조도의 변화가 크지 않았으며, 재피닝 가공이 쇼트피닝 가공된 시험편의 표면 조도에는 영향을 미치지 않았다.

4.2.3 피로에 의한 표면 압축잔류응력의 변화

쇼트피닝 가공한 시험편에 반복 피로하중을 가하여 표면부에 존재하는 압축잔류응력의 변화를 관찰하였다. 적용응력을 인장강도의 65%인 고응력(451 MPa)과 인장강도의 56%인 저응력(387 MPa)으로 구분하였다.

각각 쇼트피닝된 시험편은 파단 피로수명(N_f)의 25%, 50%, 75%의 사이클 수까지 회전굽힘 피로 시험기로 미리 시험편에 피로를 가한 후에 시험편 표면의 압축잔류응력을 측정하였다. Fig. 7은 측정결과를 나타낸 것이다.

4.2.4 재피닝 가공에 의한 표면 압축잔류응력의 변화

Fig. 8는 고응력(451 MPa)과 저응력(387 MPa) 피로상태에서 피로손상을 받은 쇼트피닝 가공한 시험편과 피로손상 후에 재피닝 가공한 시험편의 표면 압축잔류응력을 측정된 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 전반적으로 재피닝 가공에 의하여 압축잔류응력값이 증가한 것으로 나타났다.

고응력 피로상태의 압축잔류응력의 증가를 비교하여 보면 쇼트피닝 가공된 시험편의 피로손상비(N/N_f) 25%에서 재피닝한 시험편이 98.6%, 피로손상비 50%에서 재피닝 가공한 시험편이

Table 6 Roughness of specimens

	Unpeened	Shot-peened	Re-peened
Ra (μm)	0.25	4.28	4.19
$Rmax$ (μm)	2.73	22.20	19.55
Rz (μm)	1.41	12.15	12.81

204.2% 증가하였으며, 피로손상 비 75%에서는 204.3%의 증가를 보였다. 피로손상 비 25%에서 재피닝 가공한 시험편 보다 피로손상 비 50%, 70%에서 재피닝 가공한 시험편에서 상당한 증가가 있었다.

저응력 상태의 압축잔류응력의 증가를 보면, 쇼트피닝 가공된 시험편의 피로손상 비 25%에서 재피닝 가공한 시험편이 82.5%, 피로손상 비 50%에서 재피닝 가공한 시험편이 87%, 피로손상 비 75%에서는 83.1% 증가하였으나, 피로손상 비에 따른 차이는 별로 없는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 재피닝 가공에 의한 표면 압축잔류응력의 증가량을 막대그래프로 표현한 것이다.

4.2.5 재피닝 가공에 의한 피로수명 변화

고응력 피로상태에 대한 재피닝 가공 효과에 대한 결과는 Fig. 10에 나타내었다. 쇼트피닝 가공된 시험편에서 파단 피로수명의 25%로 피로를 미리 가한 시험편 즉, 피로손상 비가 25%인 시험편에 재피닝 가공을 한 경우 총 파단 피로수명 (N_T)이 쇼트피닝 가공된 시험편의 파단 피로수명에 비하여 9.2% 증가하였다. 피로손상 비 50%와 75%까지 미리 피로를 가한 후 재피닝 가공을 한 시험편의 경우 총 파단 피로수명이 쇼트피닝 가공된 시험편의 파단 피로수명에 비하여 약 57.5%와 28.7%의 피로수명 증가를 나타내었다.

저응력 피로상태에 대한 재피닝 가공의 결과는 Fig. 11에 나타내었다. 피로손상 비 25%까지 피로

를 가한 후에 쇼트피닝 가공한 재피닝 시험편의 경우 총 파단 피로수명(N_T)이 쇼트피닝 가공된 시험편의 파단 피로수명(N_f)에 비하여 6.8% 정도 증가하였고, 피로손상 비 50%까지 피로를 가한 후에 쇼트피닝 가공한 재피닝 시험편의 경우 총 파단 피로수명이 쇼트피닝 가공된 시험편의 파단 피로수명에 비하여 약 12% 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 피로손상 비 75%까지 피로를 가한 후에 쇼트피닝 가공한 재피닝 시험편에서의 수명증가는 약 0.8%로 큰 효과를 나타내지 않았다.

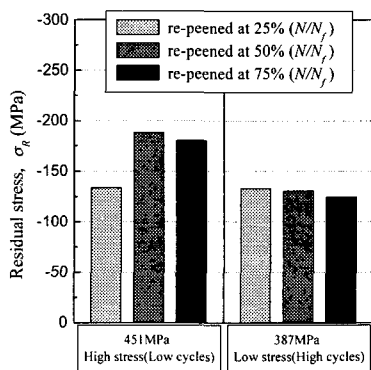


Fig. 9 Amount of increase in compressive residual stress by re-peening

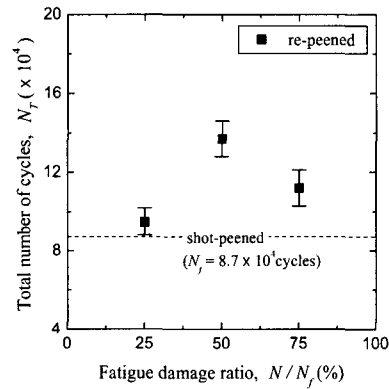


Fig. 10 Total fatigue life of re-peened specimen vs. fatigue damage ratio for high stress level

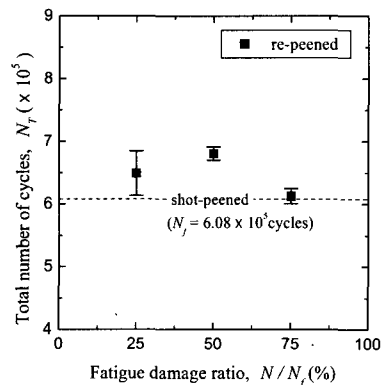


Fig. 11 Total fatigue life of re-peened specimen vs. fatigue damage ratio for low stress level

재피닝 가공에 의한 피로수명의 증가 효과를 보면 두 응력 상태 모두에서 피로손상 비 50%에서 재피닝 가공하였을 때 가장 높게 나왔으며 특히, 고응력 상태에서 그 효과가 탁월하였다. 또한 전반적으로 저응력 피로상태에서 보다는 고응력 피로상태에서 재피닝 가공의 효과가 큰 것으로 나타났다. 이는 피로에 의한 표면 압축잔류응력의 변화와 재피닝 가공에 의한 표면 압축잔류응력의 변화에 대한 결과들로서 설명될 수 있다.

고응력 피로상태에서 특히, 쇼트피닝 가공 후 파단 피로수명의 50%와 70%까지 피로손상을 가한 경우 재피닝 가공에 의한 압축잔류응력의 증가가 가장 컸으며 이로 인하여 재피닝 가공에 의한 피로수명의 증가 효과가 가장 크게 나타나는 것으로 생각된다. 피로손상 비(N/N_0) 25%에서 재피닝 가공한 시험편이 피로손상 비 50%와 75%에서 재피닝 가공한 시험편에 비하여 재피닝 가공에 의한 압축잔류응력의 증가가 상대적으로 적기 때문에 재피닝 가공에 의한 피로수명 증가 효과가 적은 것으로 판단된다. 또한 피로손상 비 75%에서 재피닝 가공한 시험편이 50% 지점에서 재피닝 가공한 시험편 보다 피로수명이 적은 것은 이미 시험편에 피로로 인한 미세한 균열이나 손상 등에 의한 영향 때문인 것으로 추측된다. 그러므로 재피닝 가공은 파단 피로수명의 50% 근방에서 하는 것이 효과적이며, 일정 수명이상에서는 영향이 없음을 알 수 있었다.

저응력 피로상태의 경우, 고응력 피로상태와는 달리 피로손상에 의한 압축잔류응력의 감소가 상대적으로 적었으며 피로손상 비에 따른 반복 피로 하중에 의한 압축잔류응력의 감소, 재피닝 가공에 의한 압축잔류응력의 증가의 차이가 크지 않았다. 이로 인하여 고응력 피로상태에 비하여 재피닝에 의한 피로수명의 증가 효과가 그다지 높지 않은 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 쇼트피닝 가공의 효과를 확인하고, 재피닝 가공이 쇼트피닝 가공 후 피로손상을 받은 재료에 미치는 영향을 살펴보았으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 쇼트피닝 가공에 의해 SM45C 소재의 표면 근처에 압축잔류응력이 생성되었으며 피로강도와 피로수명이 각각 13%, 490% 증가하였다.

(2) 시험편의 경도분포와 표면조도를 측정한 결과 쇼트피닝 가공에 의해 소재의 표면부의 경도는 28.5% 증가하였다. 쇼트피닝 가공에 대한 재피닝 가공의 변화는 표면 경도값과 표면조도의 변화는 미비하였으나, 재피닝 가공에 의하여 경도값의 증가 깊이가 깊어졌다.

(3) 표면 압축잔류응력은 사이클 수가 증가함에 따라 감소하였으며, 재피닝 가공에 의하여 증가하였다.

(4) 쇼트피닝 가공 후 피로손상을 받은 재료의 재피닝 가공에 의한 피로수명의 증가는 쇼트피닝 가공된 시험편의 피로손상 비 50%에서 재피닝 가공된 시험편의 피로수명 증가가 가장 컸으며, 재피닝 가공에 의한 피로수명의 증가는 재피닝 가공에 의한 압축잔류응력의 증가에 의한 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Cheong Seong-Kyun, Lee Seung-Ho, Chung Suk-Choo, 2001, "Effect of the Peening Intensity by Shot Peening," *Transactions of the KSME A*, Vol. 25, No. 10, pp. 1590~1596.
- (2) Almen, J. O., and Black, J. H., 1963, *Residual Stresses and Fatigue in Metals*, Mc Graw, pp. 42~80.
- (3) Bergstron, J., and Ericsson, T., 1984, "Relaxation of Shot Peening Induced Compressive Stress During Fatigue of Notched Steel Samples," *Proc. of the 2nd International Conference on Shot Peening*, Chicago, pp. 241~248.
- (4) Kirt, D., and Jarrett, M., 1984, "Influence of Shot Peening on Fatigue and Corrosion-Fatigue Behavior of Structural Steel," *Proc. of the 2th International Conference on Shot Peening*, Chicago, pp. 133~142.
- (5) Holzapfel, H., Schulze, V., Vohringer, O. and Macherach, E., 1998, "Residual Stress Relaxation in an ANSI 4140 Steel due to Quasistatic and Cyclic Loading at High Temperatures," *Materials*

- Science and Engineering* A248, pp. 9~18.
- (6) JoDean Morrow, Ross, A. S. and Sinclair, G. M., 1960, "Relaxation of Residual Stresses due to Fatigue Loading," *SAE Transactions*, Vol. 68, pp. 40~48.
- (7) Hammond, D. W. and Meguid, S. A., 1990, "Crack Propagation in the Presence of Shot-Peening Residual Stress," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 37, No. 2, pp. 373~387.
- (8) Oshida, Y. and Daly, J., 1990, "Effects of Shot Peening on Fatigue-Damaged High Strength Aluminum Alloy," *Proc. of the 4th International Conference on Shot Peening*, Tokyo, pp. 317~326.
- (9) John S. Eckersley, 1989, "Shot Peening Plays a Vital Roll in rejuvenation of Aging Aircraft," *Shot Peening Theory and Application, Institute for Industrial Technology Transfer International*, France, pp. 241~255.
- (10) Moore, H. F., 1944, "Study of Residual Stresses and Size Effect and Study of Effect of Repeated Stresses on Residual Stress due to Shot Peening of Two Steel," *Proceedings of Experimental Stress Analysis*, Vol. 2, No. 1, pp. 170~177.