

쇼트피닝에 의한 재료의 특성에 관한 연구

이 승 호*, 김 희 송**, 정 성 균***

Study on the characteristics of shot peened material

Seung-Ho Lee*, Hei-Song Kim**, Seong-Kyun Cheong***

Abstract

The effects of shot peening on the fatigue strength are studied in this paper. Applying the multi-stage shot peening on the material, the relation between the residual stress and fatigue strength compressive is investigated. Observing tensile strength, elongation, reduction of area, hardness, and roughness, the results can be summarized as follows :

1. The change of mechanical properties is small before and after the shot peening is carried out. The change of hardness is also small in high hardness material.
2. The surface roughness does not affect the fatigue strength, but the surface roughness is improved by multi-stage shot peening.
3. The fatigue strength of multi-stage shot peening material is 756MPa and is 1.78 times higher than that of un-peened material.
4. The maximum compressive residual strength of multi-stage shot peening material is -792MPa, the fatigue strength seems to be improved by residual stress

Keywords : Shot Peening(쇼트피닝), Compressive Residual Stress(압축잔류응력), Fatigue Strength(피로강도), Arc Height(아크하이트), Coverage(커버리지)

1. 서론

수송기계류 부품의 경량화 고효율화 고강도화의 실현을 위해서는 높은 피로 강도 특성이 뒤따르게 된다. 이로 인

하여 근간에는 피로 강도를 증가시키는 방법과 장비에 대한 연구가 중요한 문제로 대두되고 있다.

표면경화법에는 침탄법, 질화법, 고주파 열처리법, 쇼트피닝등이 있으며, 특히 쇼트피닝은 피로강도 및 수명향

* 단국대 대학원
 ** 단국대학교
 *** 서울산업대

상에 있어서 대단히 중요하다.⁽¹⁾⁽²⁾

특히, 표면경화법은 재료의 강도를 향상시켜 설계능력을 높일 수 있을 뿐만 아니라, 재료의 중심부에서는 높은 연성을 유지할 수 있으므로 피로하중을 받는 기계구조물 부품의 수명향상에 대단히 유용하다고 할 수 있다.

쇼트피닝에 대한 연구는 1940년대에 자동차 및 항공기 분야에서 시작되어 실용화되기 시작하였으며, 최근에는 신소재 개발과 더불어 피로강도의 최적화라는 관점에서 재료에 가장 적합한 쇼트피닝 조건을 선택하려는 연구가 많이 진행되고 있다.⁽³⁾ 피로수명에 중요한 영향을 미치는 잔류응력은 다양한 쇼트피닝의 실시조건과 부재의 기계적특성 등에 의하여 분포형태가 변화되므로, 기계구조물의 설계능력 및 내구성 향상에 있어서 대단히 중요하다.⁽⁴⁾ 또한 쇼트피닝과 압축잔류응력 분포의 관계에 대한 실험적 데이터가 필요하다.

본 연구에서는 고강도화를 위한 쇼트피닝이 피로강도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 쇼트피닝의 조건을 달리 하는 다단쇼트피닝을 적용하여 압축잔류응력 생성에 따른 피로강도와의 관계를 살펴보고 기계적성질의 변화, 경도, 표면조도 등이 피로강도에 미치는 피로특성에 대하여 고찰하였다.

2. 쇼트피닝 원리

2-1. 쇼트피닝 개념⁽⁵⁾

쇼트피닝은 자동차, 기계, 항공기 부품의 피로 강도를 증진시켜 수명을 연장시키는 표면 경화법으로서 피로나 응력, 부식에 대한 저항성을 개선하기 위하여 차축, 스프링, 기어, 항공기용 착륙장치 및 구조 부품과 같은 복잡한 하중 형태를 반복하여 받는 금속부품의 표면에 쇼트라는 작은 강구를 고속으로 금속 표면에 Fig.1과 같이 투사하여 이 쇼트볼이 금속의 표면을 햄머링하는 냉간가공이다.

표면층은 요철이 발생하고 변형층 바로 아래층은 탄성을 존재하게 되며, 이층은 늘어난 표면층을 늘어나기 전의 상태로 유지하려는 힘이 작용하고 있게 되어 표면은 잔류 압축응력, 내부는 인장 응력을 갖고 평형을 이루게 된다.

Fig.2와 같이 미리 금속의 표면에 큰량의 압축응력을 남게 함으로써 반복 인장이 가해지는 압축응력이 점점 상쇄되어 '0'이 될 때까지 이루어지므로 그만큼 수명이 연장된다.

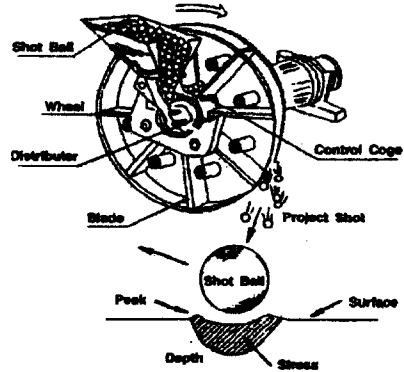


Fig. 1 Principle of Controlled Shot Peening

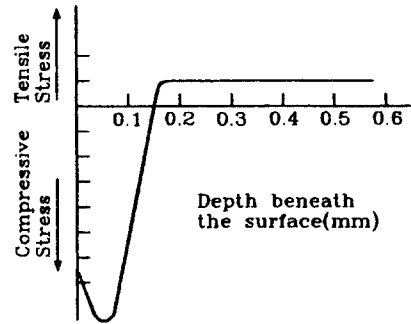


Fig. 2 Distribution of Residual Stress on the Surface Layer

2-2. 쇼트피닝기의 구조

쇼트피닝기는 쇼트볼을 투사시키는 동력원에 따라서 압축공기를 이용하는 공기식과 모터를 회전시켜 임펠러의 원심력을 이용하는 기계식으로 크게 분류할 수 있다.

쇼트피닝기의 구조는 Fig.3과 같이 ① 쇼트볼 투사장치, ② 쇼트볼 순환 장치, ③ 쇼트볼 분리 장치, ④ 투사실, ⑤ 쇼트볼 보충장치, ⑥ 가공물 이송장치, ⑦ 집진장치, ⑧ 컨트롤 패널, ⑨ 레코더로 구성되어있다.

2-3. 쇼트피닝 강도 측정⁽⁶⁾

2-3-1. 아크하이트

강판의 표면에 쇼트피닝 하면 강판이 만곡된다. 강판의 만곡은 표면층 압축응력의 대소에 따라 정하여 지므로 그 만곡의 정도에 따라 쇼트피닝의 강도를 표시할 수 있다. 즉 아크하이트는 Fig. 4와 같은 알멘 스트립을 표점간

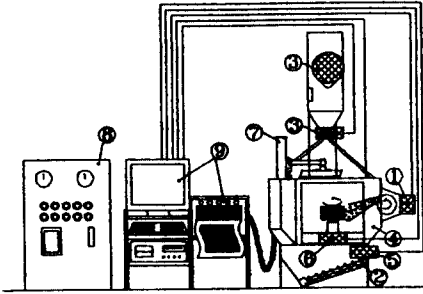


Fig. 3 The structure of shot peening machine

(38.1mm) 만곡의 높이를 알멘게이지에 의하여 측정한다. 아크하이트, 커버레이지를 측정할 때에는 고정구 위에 알멘 스트립을 4개의 나사를 고정하여 소요 시간 동안 실험 제품과 같이 쇼트피닝 작업을 한 후 분리하여 측정한다.

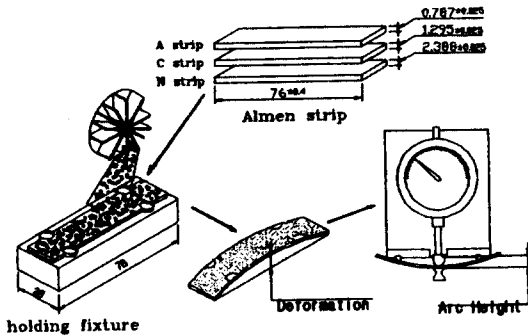


Fig. 4 The almen test strip system.

알멘스트립의 재질은 냉간 압연 스프링 강으로서 담금 질후 뜨임 하여 청색 표면이 되도록 하며 경도는 HRC 44-50으로 균일하게 하고 평면도는 0.038mm로 유지되어야 한다. 알멘 스트립의 종류는 N형, A형, C형이 있다.

2-3-2. 쇼트피닝에 의한 스트레인의 계산⁽⁷⁾

쇼트피닝에 의한 스트레인은 다음과 같이 간단하고 근사적으로 추정하여 구할 수 있다. Fig. 5에 알멘스트립(A형)을 도시하였다. 알멘스트립 4개소의 가장자리를 고정구에 나사로 고정하여 구속하고, 쇼트피닝처리를 하면, 표면의 신장이 구속되어 Fig. 6과 같이 최대값 ϵ_0 가 깊이 δ (mm)까지 직선분포하는 압축 스트레인을 생성시킨다고 가정하였다. 그후 구속을 해방하면 시험편은 만곡상태로 되며 그림의 4점 A, B, C, D를 기준으로 하여 E점의 높이가 아크하이트 h (mm)를 의미한다.

시험편이 구면상태로 만곡한다고 가정하면 기하학적 고찰로부터 아크하이트와 곡률반경 ρ (mm)의 관계는 다음 식으로 표시된다.

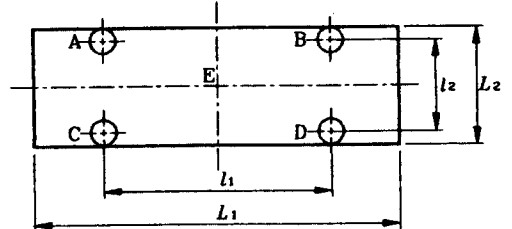


Fig. 5 Shape of almen strip

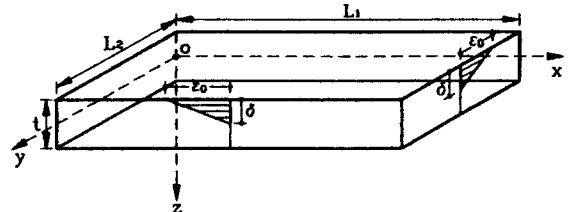


Fig. 6 Strain at the almen strip surface

$$\rho = \frac{1}{2h} \left\{ \left(\frac{l_1}{2} \right)^2 + \left(\frac{l_2}{2} \right)^2 + h^2 \right\} \quad (1)$$

또 구속을 해방함에 따라 x, y 방향의 일정한 스트레인 ϵ_F 와 굽힘스트레인 $\epsilon_M = -z/\rho$ 가 생긴다고 가정하면 x, y 방향의 스트레인 ϵ_x 및 ϵ_y 는 다음식과 같다.

$$\epsilon_x = \begin{cases} \epsilon_F - \frac{z}{\rho} - \frac{\epsilon_0}{\delta} \left(-z - \frac{t}{2} + \delta \right) & z \leq -\frac{t}{2} + \delta \\ \epsilon_F - \frac{z}{\rho} & z \geq -\frac{t}{2} + \delta \end{cases} \quad (2)$$

박판의 이론과 같이 $\sigma_z = 0$ 을 가정하면 응력과 스트레인의 관계식이 얻어진다.

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_x + \nu \epsilon_y) \\ \sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\nu \epsilon_x + \epsilon_y) \end{cases} \quad (3)$$

식(2), (3)로부터 굽힘모멘트가 구하여진다. 이것을 "0"으로 등치시켜 스트레인 ϵ_0 를 구하는 다음식을 얻는다.

$$\epsilon_0 P (-3\delta t + 2\delta^2) + t^3 = 0 \quad (4)$$

깊이 δ 를 쇼트피닝에 의하여 경도가 증가되는 표면층에서의 깊이와 같다고 가정하여 구하기도 한다.

2-3-3. 커버레지

강판의 표면에 쇼트피닝을 하면 쇼트 투사에 의하여 타격을 받아 강판에 쇼트가 투사된 자국이 생긴다. 즉 일정면적에 대한 쇼트자국 면적과의 비를 백분율로 표시 한 것이 커버레지이다. 그러나, 사용 쇼트의 종류, 크기, 가공물의 재질, 형상 등에 따라 투사 자국이 달라질 수 있다.

커버레지의 측정은 알멘 스트립 또는 제품을 쇼트피닝한 후에 그 표면상태를 표준 사진과 비교 측정한다. 커버레지의 표준 사진은 50%, 65%, 80%, 90% 등의 단계로 되어 있다.

3. 압축 잔류응력

3-1. 압축잔류응력 측정⁽⁸⁾

금속재료는 작은 결정립의 집합체이며, 각 결정립은 규칙적으로 배열된 원자로 구성되어 있으나 각각의 결정립은 불규칙한 방향을 갖고 있어 재료에 응력이 가해지면 그 재료의 탄성한계내에서 응력의 크기에 배열하여 결정의 원자간 거리가 균일하게 멀어지거나 줄어들다. 여기에 X-선을 입사시켜 회절 되어 나오는 결정면 폭을 측정하여 응력을 산출하는 것이 X-선 잔류응력측정이다. 응력이 인장인 경우 힘방향의 결정면간의 폭은 줄어들고 반대로 직각방향의 결정면간의 폭은 줄어들고 그 중간 각도의 결정면은 그 각도에 따라서 변화하며 Fig. 7에 표시하였다.

X-선 응력규정에서는 시료면 법선에 수직을 이루는 선과 결정격자면 법선에 수직을 이루는 선이 이루는 각(ψ)과 결정면간의 폭 d 의 변화가 주요변수로 연관되어 있고, 응력이 커질수록 ψ 와 d 의 변화는 현저하게 되며 이 변화를 측정하여 응력을 구하는 것이다.

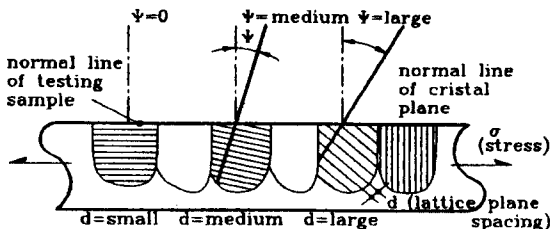


Fig. 7 The measuring principle of residual stress by X-ray

X-선은 결정면에서 회절하여 그 때 결정면간의 폭 d 반사각 θ 에는 Bragg법칙으로 파장이 일정한 경우 d 가 변

화하며 θ 가 변화한다. Fig. 8과 같이 하나의 회절조건을 만족하게 되므로 여러 가지 ψ 각도와 결정면에서의 회절 각 θ 가 존재함을 알 수 있다.

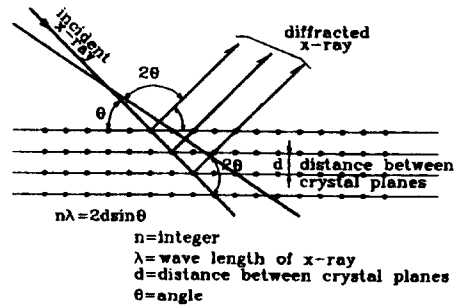


Fig.8 The diffraction of x-ray

압축잔류응력측정은 X-선 잔류응력 측정기를 사용하였으며 이 때 계산방법은 $2\theta - \sin^2\psi$ 법을 이용 하였다. Fig. 9와 같이 시료면을 고정시키고, ψ 각을 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 로 변화시켜주면서 이에 따라 발생하는 회절 X-선은 검출기가 $140^\circ \sim 170^\circ$ 범위에서 주사하면서 ψ 방향의 회절각을 측정하였으며 측정은

- ① 잔류응력을 측정하고자 하는 부위의 두께를 측정하고
- ② 두께가 측정된 부위에서 표면층의 잔류응력을 측정 한 후
- ③ 전해연마를 실시하며 반복하여 표면에서 중심부로 0.3~0.4 mm까지 측정하였다.

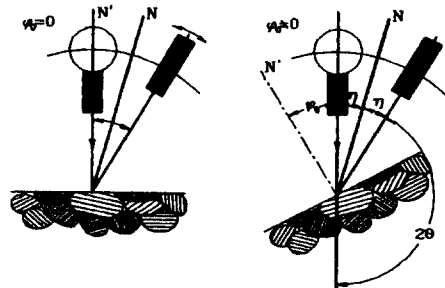


Fig. 9 The typical measuring method of residual stress by x-ray

4. 실험 방법

4-1. 재료 및 시험편

시험편의 재질은 자동차용 코일 스프링에 사용되는 SAE

9254를 선택하였으며 화학성분은 Table. 1과 같다. Fig.10과 같이 시편은 CNC선반으로 가공하고 열처리 하였다. 열처리는 880℃에서 30분간 가열한 후 유중에 담금질 하였으며, 이 시편편을 다시 뜨임로에서 420℃로 110분 뜨임하였다.

Table. 1 Chemical Composition of Specimen.

Material	Chemical Compositions (Wt %)					
	C	Si	Mn	P	S	Cr
SAE 9254	0.55	1.36	0.7	0.01	0.02	0.68

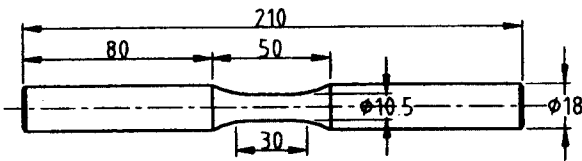


Fig. 10 Dimensions of specimen.

4-2. 쇼트피닝 가공

시편편 표면 전체에 균일한 쇼트피닝의 가공면을 얻기 위해 쇼트피닝은 시편편의 양단을 치구에 고정한 후 그 치구를 2개의 자전 로울러 위에 올려놓고 쇼트볼을 투사 하였으며, 다단쇼트피닝은 쇼트피닝처리 후 텀블링 바렐식 쇼트피닝기에서 쇼트볼의 크기와 투사속도, 투사시간을 변화시켜서 2단계로 처리하는 것이다. 가공 조건은 Table. 2와 같다.

알렌스트립 A형을 사용하여 측정하였고, 쇼트피닝의 경우 0.375 mm의 아크하이트를 얻었으며, 다단쇼트피닝에서는 0.305 mm의 아크하이트를 얻었다. 또한 커버레지는 쇼트피닝에서는 80 %, 다단쇼트피닝에서는 90 %로 나타났다.

Table. 2 Conditions of shot peening

	Shot peening	Multistage shot peening
Shot ball	cut wire (HSW 3)	cut wire (HSW 3)
Diameter	0.8 mm	0.6 mm
Impeller diameter	490 mm	360 mm
rpm	2200 rpm	3,000 rpm
Time	24 sec	600 sec

4-3. 실험 및 장치

인장시험은 만능 유압 시험기(용량 50ton)를 사용하였으며, 평활재 시편편의 인장강도와 연신율 등의 기계적 성질을 측정하였고, 경도시험은 쇼트피닝에 의한 시편편의 경도변화를 알아보기 위하여 시편편을 채취하여 열경화성 수지에 고정하고 사포의 조도는 #1200까지 연마한 후 다이아몬드 페이스트(3μ)로 포리싱 하였고 경도계는 마이크로 비커스 경도계(micro vicker, MOK-E3)를 사용하였다.

표면의 요철상태를 조사하기 위하여 표면조도계(KOSAKA LABORATORY Ltd Surforder SEF-300)를 사용하였으며 시편편 표면의 잔류응력 분포를 알아보기 위해 X-선 잔류응력 측정기(RIGAKU -MSF2M)를 사용하였으며, Table.3과 같은 X-선 측정 조건으로 잔류응력을 측정하였다. 그리고, 쇼트피닝, 다단쇼트피닝 가공한 시편편의 피로파괴 거동을 비교검토하기 위하여 오노식 회전 굽힘 피로시험기를 사용하였다.

Table. 3 Measuring condition of residual stress

X-Ray diffraction	Condition	
X-Ray source	Target	cr-v
	Voltage	30 KV
	Current	10 mA
ψ	0° , 15° , 30° , 45°	
2θ	140° ~ 170°	
Diffraction	Scintillation counter	

5. 실험결과 및 고찰

5-1. 쇼트피닝 가공의 기계적 성질 변화

쇼트피닝, 다단쇼트피닝 가공 시편편의 기계적인 성질을 측정한 결과 Table.4와 같이 변화가 경미하였다.

Table. 4 Mechanical Properties of Specimen.

Specimen	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
Un-peened	1729	9.4	36
Shot peening	1736	10.1	37
Multistage shot peening	1743	9.2	36

5-2. 경도

경도를 측정된 결과 Fig.11과 같이 나타났다. 쇼트피닝에 의한 표면의 가공 경화를 기대 하였으나 실험결과와는 열처리된 스프링강에 있어서 표면 경도의 변화는 없었다. 경도가 낮은 표면에서는 쇼트피닝에 의한 표면의 경도 증가가 이루어져 현격한 차이를 나타내나, 경도가 높은 강에서는 경도의 변화가 크지 않다는 연구보고와 일치하였다.⁽⁹⁾

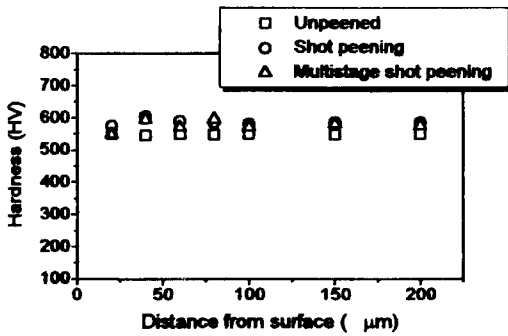


Fig. 11 Hardness distribution produced by shot peening.

5-3. 표면 조도

쇼트피닝에 따른 표면 조도의 변화를 측정하기 위하여 시험편의 길이 방향으로 250 μm 구간의 측정값을 굴곡의 최대값(R_{max})과 굴곡의 중심선 산술 평균값(Ra)를 측정하였다

쇼트피닝전의 원재료 표면의 Ra는 3.60 μm, R_{max}은 18.5 μm로 측정되었고, 쇼트피닝 후의 Ra는 1.80 μm로 분포되고 R_{max}은 13.00 μm로 되었다. 다만쇼트피닝에서는 Ra는 1.34 μm, R_{max}은 11.2로 분포되었다. 다만쇼트피닝한 것이 쇼트피닝한 시험편 보다 표면조도의 상태가 개선되었으며, 조도에 민감한 부품인 경우에는 다만 쇼트피닝을 적용하면 표면의 거칠기를 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

실제 현장 적용에서는 열처리후의 탈탄층 및 산화 스케일 등을 제거해줌으로써 표면조도의 개선에도 효과가 있음을 추정할 수 있다.

5-4. 잔류응력의 변화

쇼트피닝에 의한 압축 잔류응력의 변화는 Fig. 12와

같이 나타낼 수 있으며 부품에 쇼트볼을 투사하면 쇼트볼 크기, 속도등에 따라서 만곡의 변형이 생기며 이 변형된 판을 원래의 상태로 돌릴 때 필요한 응력이 변형하지 않는 부품에 생기는 압축응력이라 가정할 것이다. 즉, 압축잔류응력 $\sigma_R(z)$ 는 굽힘응력 $\sigma_b(z)$ 와 축방향에 발생한 소성 변형응력 $\sigma_s(z)$ 및 축방향의 인장응력 $\sigma_{ax}(z)$ 의 합으로 표시된다.⁽¹⁰⁾

$$\sigma_R(z) = \sigma_b(z) + \sigma_s(z) + \sigma_{ax}(z)$$

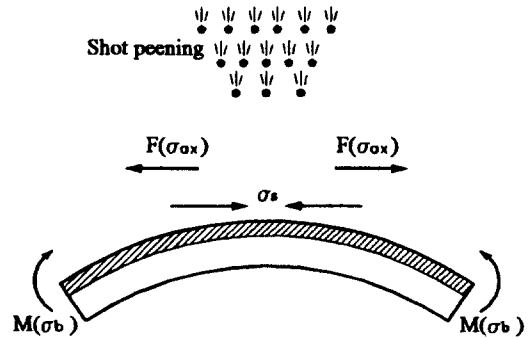


Fig.12. Mechanism condition of residual stress

그러므로, 쇼트볼의 표면에 투사하여 표면층에는 압축 잔류응력이 생성되며 중심부에는 인장 잔류응력을 갖고 있어 시험편 전체로 평형상태가 된다.

시험편의 표면에 쇼트피닝하여 표면에 형성된 압축 잔류응력을 측정하였으며 Fig.13과 같은 분포로 나타났다.

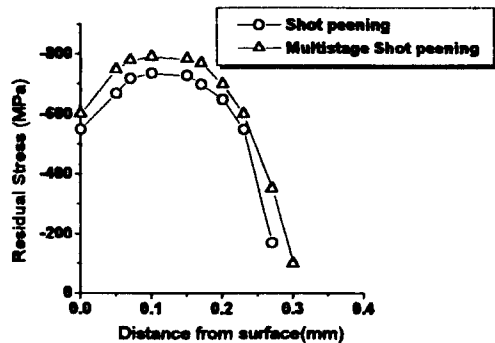


Fig. 13 Residual stress distribution produced by shot peening.

쇼트피닝된 시료의 압축잔류응력의 최대값인 -737

MPa이 0.1 mm에서 분포되었고, 다단쇼트 피닝된 시험편에서 압축잔류응력 최대값이 -792MPa로 상승되었고, 형성된 압축잔류응력 최대값은 0.13 mm로 깊어져 압축응력의 형성층이 넓게 증가되었다. 0.3 mm이상으로 들어갈수록 현격히 감소되므로 쇼트피닝에 의한 압축 잔류응력은 표면층에만 형성됨을 알 수 있었다.

5-5. 쇼트피닝에 따른 피로강도

본 실험에서 쇼트피닝 시험편에 대하여 압축잔류응력 생성에 따른 피로거동을 관찰하기 위하여 자동차용 스프링강을 동적 하중에서 응력 레벨에 따라 피로거동을 관찰하였다. 응력은 증가 또는 감소시켜 회전굽힘응력으로 피로한도 10^7 까지 측정하였다.

각각의 응력하에서 un-peened에서는 피로한도가 425MPa로 나타났다. 쇼트피닝하여 압축잔류응력 최대값이 -737MPa인 시험편에서는 739MPa로 나타났으며, 다단 쇼트피닝하여 압축잔류응력의 최대값이 -792MPa인 시험편에서는 756MPa로 나타났고, Fig. 14와 같다. 본 실험에서의 피로한도 곡선은 시험편의 기울기[응력(σ)/반복수(N)]는 거의 일정하고 곡선의 형태도 직선적 기울기를 갖고 있는 것으로 나타났다. 쇼트피닝 전의 시험편의 피로한도(σ_f)는 425 MPa, 다단쇼트피닝은 756MPa로 1.78배 향상되었다.

쇼트피닝 가공한 재료가 쇼트피닝 가공하지 않은 재료에 비하여 피로한도가 높은 것은 쇼트피닝 가공에 의하여 재료의 표면에 압축 잔류응력이 부여되어 표면균열의 전파속도를 지연시킴으로써 피로수명을 연장시키는 효과가 있기 때문이라 판단된다.

또한, 쇼트피닝으로 un-peened재보다 높은 피로강도

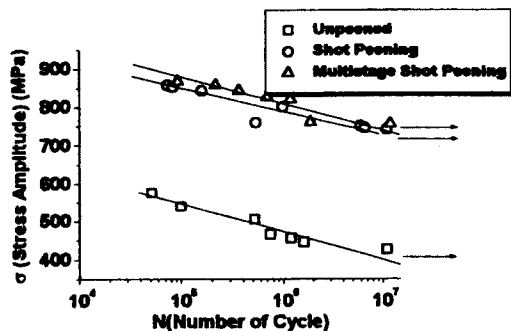


Fig. 14 S-N diagrams of specimens.

와 피로한도를 가지게 되므로 수송기계류 부품의 고강도화로 소재의 크기 및 중량을 줄일 수 있으므로 고강도화를 통하여 경량화 할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 자동차용 스프링강 SAE 9254를 회전굽힘 피로시험을 통하여 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력의 생성에 따른 피로강도와 기계적 성질의 변화, 경도, 표면조도에 대하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기계적 성질은 쇼트피닝 전후에도 변화가 미소하였으며 경도가 높은 강에서 경도의 변화는 경미하였다.
2. 쇼트피닝에 의한 표면 조도는 피로강도에는 큰 영향이 없었으나 다단쇼트피닝으로 표면조도는 향상되었다.
3. 피로한도는 un-peened재에서 425MPa, 다단쇼트피닝에서 756MPa로 나타나 1.78배 향상되었다.
4. 다단쇼트피닝으로 압축잔류응력이 -792MPa로 형성층이 분포되었고, 피로강도 향상은 압축 잔류응력의 생성으로 기인됨을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. Xenophon J. K., "Shot Peening Viable Method to Extending Component Life," SAE Technical Paper Series 891932, pp. 1~8, 1989.
2. 社団法人 日本ばね工業會 ばね技術研究會., "Study on the Shot Peening Small Springs Relation between Processing Condition and Improvement of Fatigue Strength," ばね論文集, 제 27호, pp. 73~108, 1982.
3. Yozo, K., Shinzaburo, T. and Masaki, K., "Effect of Shot Peening on Fatigue Strength of Ti-6Al-4V Alloy at Elevated Temperatures," Journal of The Society of Materials Science in Japanese, Vol. 45, No. 1, pp. 43~47, 1996.
4. 이종규, 김정규, 김주성, "피로강도에 미치는 Shot Peening의 효과," 대한기계학회 추계학술대회논문집, A권, pp. 1~6, 1996.
5. Plaster, H. J., "Blast Cleaning and Allied Processes", Industrial News papers Limited,

- Vol 2, pp12-30 pp.154-297, 1973.
6. Almen, J. O. "Improving Fatigue Strength of Machine Parts", Iron Age, pp.65-69, June, 1943.
 7. 류성기, 정인성, "침탄 치차의 쇼트피닝처리가 크랙진 전억제에 미치는 영향," 대한기계학회논문집, 제 18권, 제 12호, pp. 3227~3235, 1994.
 8. 강병진, "X-선 응력측정 기술 및 그 응용," 대원기술보, NO. 7, pp. 50~57, 1988.
 9. 신용승, 이승호, "현가장치 스프링강(50 Cr V4)의 피로강도에 미치는 쇼트피닝의 효과," 서울산업대학교 논문집, 제 40권, pp. 47~62, 1994.
 10. Al-Obaid, Y. F., "A Rudimentary Analysis of Improving Fatigue Life of Metals by Shot Peening," Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME, Vol. 57, pp. 307~312, 1990.