

高強度化를 위한 쇼트피닝이 疲勞強度에 미치는 영향

Effects of shot peening on fatigue strength for high strength

이승호*, 김희송**, 정성균***, 문혁****

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

* (서울산업대, 단국대 대학원), ** (단국대학교)

*** (서울산업대), **** ((주) 두성 쇼트 플랜트)

Abstract

This paper investigates the effects of shot peening on mechanical properties of SAE 9254, which is a spring steel used for the suspension system of automobiles. Rotary Bending Fatigue test is accomplished and the results are summarized as follows :

1. The tensile strength and the hardness do not change so much.
2. The layer of highly residual stress is obtained by multi-stage shot peening.
3. The fatigue strength seems to be improved by residual stress.
4. The fatigue strength of un-peened and multistage shot peened material are 425 MPa and 756 MPa, respectively.

1. 서 론

최근 자동차, 항공기, 철도차량과 같은 수송기계류의 경량화 고출력화 고강도화를 통하여 배기 가스의 발생을 억제함으로써 대기오염을 방지하고 연료의 절감 대책에도 대응하기 위해 그들에 대한 연구가 가속화되어 가고 있는 추세이다.

자동차 부품의 경량화 고출력화 고강도화의 실현을 위해서는 높은 피로 강도 특성이 뒤따르게 된다. 이로 인하여 근간에는 피로 강도를 증가시키는 방법 및 증가 기구에 대한 연구가 중요한 문제로 대두되고 있다.

설계능력 및 내구성을 향상시키기 위한 고강도

재료의 사용도 중요하지만 무엇보다도 경제성 등의 측면을 고려하지 않을 수 없다. 이러한 관점에서 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. 표면경화법에는 침탄법, 질화법, 고주파 열처리법, 쇼트피닝등이 있으며, 특히 쇼트피닝은 피로강도 및 수명향상에 있어서 대단히 중요하다.⁽¹⁾⁽²⁾

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, 최적의 분포형태를 정량적으로 예측하기란 매우 어렵다. 따라서 쇼트피닝 실시에 따른 압축 잔류응력의 분포형태 및 피로수명과의 관계를 명확히 하는 것은 기계구조물의 설계능력 및 내구성 향상에 있어서 대단히 중요하다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 고강도화를 위한 쇼트피닝이 피로강도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 쇼트피닝의 조건을 달리하는 다단쇼트피닝을 적용하여 기계적 성질과 경도, 압축 잔류응력등을 살펴보고 압축잔류응력 생성에 따른 피로강도와의 관계를 회전 굽힘시험을 통하여 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 shot라는 작은 강구를 고속으로 금속 표면에 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.

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

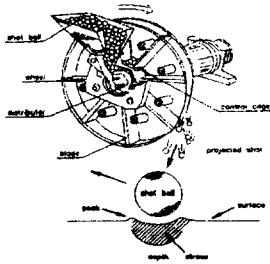


Fig. 2-1 Principle of Controlled Shot Peening

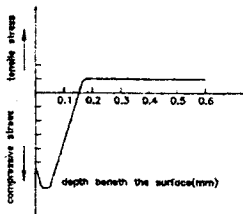


Fig. 2-2 Distribution of Residual Stress on the Surface Layer

2-2. 쇼트기의 구조

쇼트피닝기의 원리는 쇼트볼을 강력하게 투사시켜 이 때 쇼트볼이 가지는 에너지를 이용하는 것으로서 공작물의 표면에 햄머링을 소성변형을 줌으로써 압축잔류응력을 생성하게 하는 것이다.

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

쇼트피닝기의 구조는

- (1) 쇼트볼을 가속하여 운동에너지를 만드는 쇼트투사장치
- (2) 투사되었던 쇼트볼을 다시 사용하기 위한 쇼트순환 장치
- (3) 마모는 파손으로 인한 쇼트볼의 선별을 하는 쇼트분리 장치가 있다.
- (4) 투사로 인한 쇼트볼의 흠어짐 방지와 기능부품이 설치되어 있는 구조물의 캐비넷 투사실이 있고
- (5) 쇼트볼의 부족시 보충을 해주는 보충장치
- (6) 가공물의 쇼트피닝 처리를 위한 이송장치
- (7) 쇼트피닝시 제품의 스케일, 먼지 쇼트볼의 파쇄로 인한 분진을 제거하기 위한 집진장치
- (8) 쇼트기를 구동 및 운전을 하기 위한 전기적인 하드웨어의 컨트롤 판넬
- (9) 쇼트피닝의 효과를 지배하는 생산공정의 공정관리를 제어하고 공정상태의 각종 품질인자의 데이터와 레코딩하는 소프트웨어의 제어장치로 구성되어 있다.

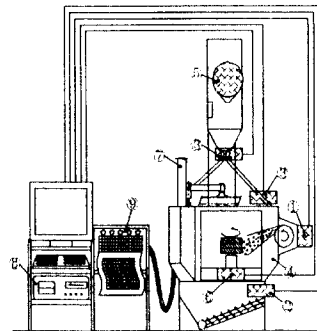


Fig. 2-3 The structure of shot peening machine

2-3. 쇼트피닝 강도 측정⁽⁶⁾

2-3-1. 아크 하이트

강판의 표면에 쇼트피닝 하면 쇼트 투사에 의하여 타격을 받아 가공 경화가 생기며 동시에 강

력한 잔류압축응력을 가지게 되므로 강판이 만곡된다.

강판의 만곡은 표면층 압축응력의 대소에 따라 정하여 지므로 그 만곡의 정도에 따라 쇼트피닝의 강도를 표시할 수 있다. 즉 아크 하이트는 Fig. 2-4 와 같은 알멘 스트립을 표점간 만곡의 높이를 알멘게이지에 의하여 측정한다.

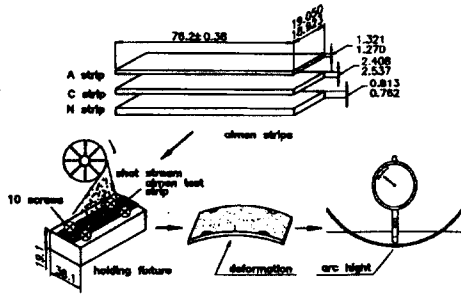


Fig. 2-4 The almen test strip system.

아크 하이트, 커버레지를 측정할 때에는 고정구 위해 알멘 스트립을 4개의 나사를 고정하여 소요 시간 동안 실 제품과 같이 쇼트피닝 작업을 한 후 분리하여 측정한다.

알멘스트립의 재질은 냉간 압연 스프링 강으로서 담금질후 뜨임 하여 청색 표본이 되도록 하며 경도는 HRc 44-50으로 균일하게 하고 평편도는 0.038mm로 유지되어야 한다. 알멘 스트립의 종류는 두께에 따라 강도가 약한 것에는 N형 스트립, 강도가 강한 것에는 A형 또는 C형 스트립을 사용하며, 표점거리는 38.1mm로 하였을 때 만곡의 높이를 표시한다.

일반적으로 아크 하이트와 가공 시간과의 관계를 보면 요구하는 아크 하이트가 A라면 Fig. 2-5 에서 곡선(b)로 표시되는 가공 조건으로는 너무 약하며 (c)의 조건은 너무 강하므로 (a)조건이 바람직하다.⁽⁷⁾

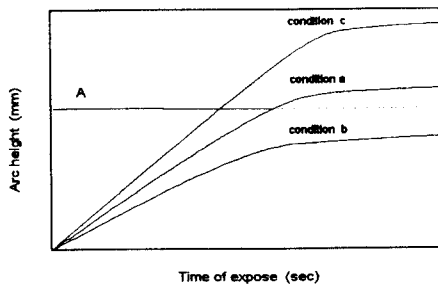


Fig. 2-5 Arc height-exposure curves for pure shot peening condition.

2-3-2. 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 특징은 알멘 스트립 또는 제품을 쇼트피닝 한 후에 그 표면상태를 표준 사진과 비교 측정한다. 커버레지의 표준 사진은 50%, 65%, 80%, 90% 등의 단계로 되어 있다. 커버레지는 쇼트에 노출시킨 시간과 관계될 뿐이며, 아크 하이트와 반드시 비례하지는 않는다. 일반적으로 쇼트볼의 크기와 투사 속도는 아크 하이트에 지대한 영향을 준다.

2-3-3. 아크 하이트와 커버레지

아크 하이트와 커버레지의 관계에서 투사 시간의 산출식은 다음 식과 같다.

$$C = 1 - (1 - C_1)^n \dots \dots$$

C : n회 통과 후 커버레지(%)

C₁ : 1회 통과 후 커버레지(%)

n : 통과 횟수

커버레지가 부족하면 쇼트피닝을 하여도 충분한 피로 수명 효과를 얻을 수 없다. Fig. 2-6에서와 같이 쇼트 입자가 크면 아크 하이트의 크기는 커진다. 작은 입자가 50% 이상인 경우, 입자수가 많으므로 커버레지 빨리 달성되나 피닝 강도는 낮아진다. 또한 작은 입자가 50% 이하일 때는 커버레지 달성 시간이 늦어진다.⁽⁷⁾ 그러므로 쇼트피닝시에는 쇼트볼 크기의 균일성, 쇼트볼 품질의 균일성, 쇼트볼 속도의 균일성, 쇼트볼 투사각도 등의 조건을 충분히 고려하여야 한다.

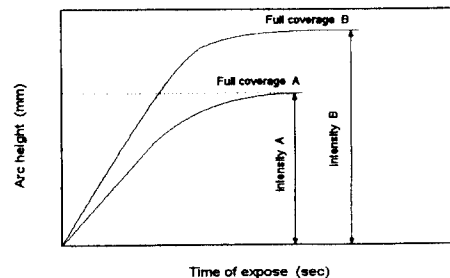


Fig. 2-6 Arc height-exposure curves for two pure shot peening.

3. 실험 방법

3-1. 재료 및 시험편

자동차의 코일 스프링에 사용되는 SAE 9254를 선택하였으며 시험편의 재료는 CNC 가공하고 열처리 후 연마하였다. 열처리는 880℃에서 30분간 가열한 후 유중에 담금질 하였으며, 이 시험편을 다시 뜨임로에서 420℃로 110분 뜨임하였다.

Table. 3-1 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

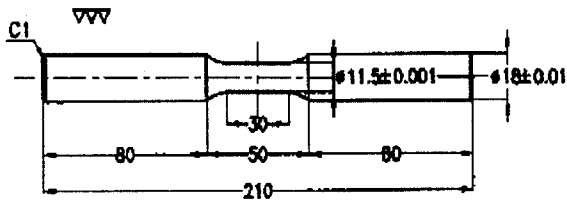


Fig. 3-1 Dimensions of specimen.

3-2. 쇼트피닝 가공

시험편 표면 전체에 균일한 쇼트피닝의 가공면을 얻기 위해 쇼트피닝은 시험편의 양단에 Rubber Masking을 하고 치구에 고정된 후 그 치구를 2개의 자전 로울러 위에 올려놓고 쇼트볼을 투사 하였으며, 다단쇼트피닝의 경우는 텀블링 바렐식 쇼트피닝기에서 쇼트피닝 가공하였다.

알멘스트립 A형을 사용하여 측정하였고, 쇼트피닝의 경우 0.8mm쇼트볼을 사용하여 0.375 mm의 아크 하이트를 얻었으며, 다단쇼트피닝에서는 쇼트볼 0.6mm를 사용하여 0.305mm의 아크 하이트를 얻었다. 또한 커버레지는 쇼트피닝에서는 80%, 다단쇼트피닝에서는 90%로 나타났다.

3-3. 실험 및 장치

인장시험은 만능 유압 시험기(용량 50ton)를 사용하였으며, 평활재 시험편의 인장강도와 연신율 등의 기계적 성질을 측정하였고, 경도시험은 쇼트피닝에 의한 시험편의 경도변화를 알아보기 위하여 시험편을 채취하여 열경화성 수지에 고정

하고 사포의 조도는 #1200까지 연마한 후 다이아몬드 페이스트(3μ)로 폴리싱 하였다. 경도계는 마이크로 비커스 경도계(micro vicker, MOK-E3)를 사용하였다. 시험편 표면의 잔류응력 분포를 알아보기 위해 X-선 잔류응력 측정기(RIGAKU-MSF2M)를 사용하였으며, 측정은 전해 연마기로 시험편의 측정 부위를 10-20μm 단위로 연마해 가면서 Table. 3-1과 같은 X-선 측정 조건으로 잔류응력을 측정하였다. 그리고, 쇼트피닝, 다단쇼트피닝 가공한 시험편의 피로파괴 거동을 비교검토하기 위하여 오노식 회전 굽힘 피로시험기를 사용하였다.

Table. 3-1 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	

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 쇼트피닝 가공의 기계적 성질 변화

쇼트피닝, 다단쇼트피닝 가공 시험편의 기계적인 성질을 측정한 결과 Table과 같이 변화가 경미하였다.

Table. 4-1 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

4-2. 경도

경도를 측정한 결과 쇼트피닝에 의한 표면의 가공 경화를 기대 하였으나 실험결과는 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.⁽⁸⁾

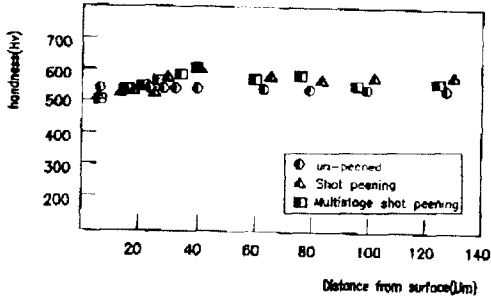


Fig. 4-1 Hardness distribution produced by shot peening.

4-3. 잔류응력의 변화

시험편의 표면에 쇼트피닝하여 표면에 형성된 압축 잔류응력을 측정하였다.

쇼트피닝된 시료의 압축잔류응력의 최대값인 -737 MPa이 0.1 mm에서 분포되었고, 다단쇼트피닝된 시험편에서 압축잔류응력 최대값이 -792 MPa로 상승되었고, 형성된 압축잔류응력 최대값은 0.13mm로 깊어져 압축응력의 형성층이 넓게 증가되었다.

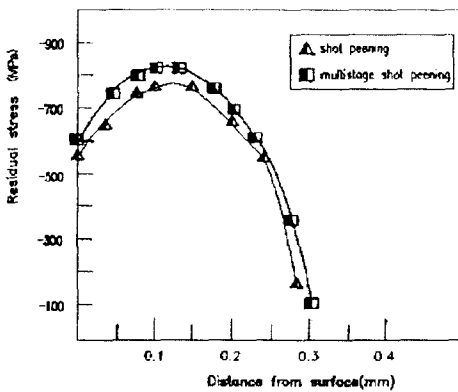


Fig. 4-2 Residual stress distribution produced shot peening.

4-4. 쇼트피닝에 따른 피로강도

본 실험에서 쇼트피닝 시험편에 대한 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 425MPa으로 나타났고, Fig. 4-3과 같다. 쇼트피닝한 시험편에서는 739MPa로 나타났으며, 다단피닝한 시험편에서는 756MPa로 나타났고, Fig. 4-4,4-5와 같다. 본 실험에서의 피로한도 곡선은 시험편의 기율기 [응력(σ)/반복수(N)]는 거의 일정하고 곡선의 형태도 직선적 기율을 갖고 있는 것으로 나타났다. Fig. 4-6 과 같이 쇼트피닝 전의 시험편의 피로한도(σ_L)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 피로강도와 피로한도를 가지게 되므로 수송기계류 부품의 고강도화로 소재의 크기 및 중량을 줄일 수 있으므로 고강도화를 통하여 경량화 할 수 있다.

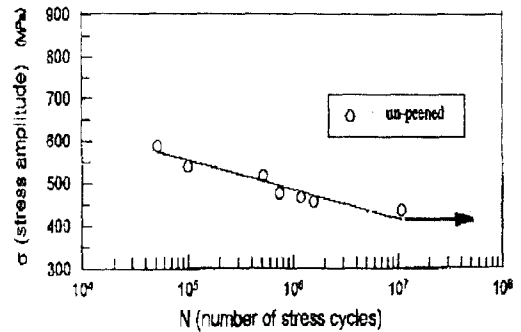


Fig. 4-3 S-N diagram of un-peened specimen.

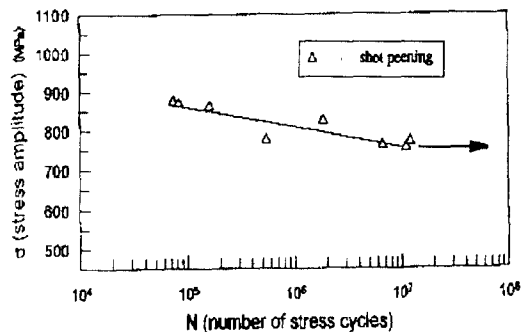


Fig. 4-4 S-N diagram of shot peening specimen.

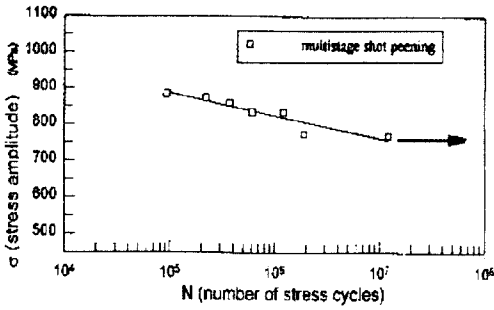


Fig. 4-5 S-N diagram of multistage shot peening specimen.

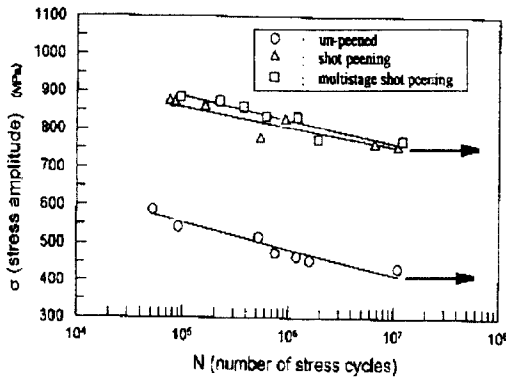


Fig. 4-6 S-N diagrams of specimens.

5. 결론

본 연구에서는 자동차용 스프링강 SAE 9254를 회전굽힘 피로시험을 통하여 고강도화를 위한 쇼트피닝에 따른 기계적 성질의 변화와 경도, 압축 잔류응력의 변화, 피로한도에 대하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론은 얻었다.

1. 기계적 성질은 쇼트피닝 전후에도 큰 변화가 없었으며 경도가 높은 강에서는 경도의 변화가 경미하였다.
2. 다단쇼트피닝으로 높은 압축 잔류응력의 형성층이 분포되었다.
3. 쇼트피닝에 의한 피로강도 향상은 압축 잔류응력의 생성으로 기인됨을 알 수 있었다.
4. 피로한도는 un-peened재에서 425MPa, 다단쇼트피닝에서 756MPa로 나타나 1.78배 향상되었다.

참고문헌

- [1] Xenophon J. Koinis., 1989, "Shot Peening Viable Method to Extending Component Life," SAE Technical Paper Series 891932, pp. 1~8.
- [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, June, pp.65-69, 1943.
- [7] Mark, Lawrenz. and Imants, Ekis., "Creating an In-House Shot Peening Specification for Gears," Heat Treating, Vol. 2, pp. 22~29, 1992.
- [8] 신 용승, 이 승호., "현가장치 스프링강(50 Cr V4)의 피로강도에 미치는 쇼트피닝의 효과," 서울산업대학교 논문집, 제 40권, pp. 47~62, 1994.