

쇼트피닝 가공조건이 피닝강도에 미치는 영향

정성균*, 이승호**, 정석주†
(2001년 2월 22일 접수, 2001년 7월 23일 심사완료)

Effect of the Peening Intensity by Shot Peening

Cheong Seong-Kyun, Lee Seung-Ho and Chung Suk-Choo

Key Words: Shot Peening(쇼트피닝), Shot Ball(쇼트볼), Intensity(강도), Fatigue Life(피로수명), Residual Stress(잔류응력)

Abstract

The shot peening process is most often used to improve fatigue properties of metal parts. The single most critical parameter of the shot peening process is the shot ball itself. Without the correct quality media, all other shot peening parameters are extraneous and the desired fatigue improvement and consistency of improvement will not be achieved. Shot peening involves modifications of the surface and subsurface condition of a material that can be described by the change of the residual stresses, the hardness, and the surface roughness. This paper presents the shot peening to optimize the shot ball parameters. The effect of shot peening parameter on the surface roughness, surface hardness and residual stress are investigated.

1. 서론

산업사회의 발전으로 기계구조물, 기계부품, 자동차, 항공기 부품, 발전기 터빈 등 재료의 소재는 적은 양과 비용으로 원하는 성능을 발휘하고 안전하도록 설계되어야 한다. 재료의 질감을 위해서 고강도화, 경량화 설계 방법의 도입이 적극 채용되고 있다. 이러한 고강도화 및 경량화 설계 기술 중에 하나가 쇼트피닝 가공(shot peening)이다. 쇼트피닝 가공은 피로수명(fatigue life)을 증가시켜 설계 제작된 기계 및 구조물의 예기치 않은 파괴, 파손을 미연에 방지하고 피로수명을 증가시키는 기술이다.

쇼트피닝 가공에서 균일하고 정확하며, 신뢰성

있는 제품을 만들기 위해서 가장 중요한 것은 쇼트피닝 강도(intensity)를 제어하는 여러 가지 변수들에 대한 최적 상태를 유지하는 일이다. 쇼트피닝 가공의 정도를 나타내는 아크하이트(arc height)가 아무리 높다 해도 재료의 형상이나 재질에 따라서 악영향을 가져다줄 수도 있다. 쇼트볼(shot ball)의 형상이 구형이 아니라 날카로운 모서리를 가진 쇼트볼 상태에서 재료의 표면을 타격할 경우 재료의 표면에 미세한 균열(micro crack)이나 노치(notch)를 형성하게 된다. 이 밖에도 많은 원인들이 있지만 쇼트피닝 가공에서 재료의 표면에 직접적인 에너지 전달 매체인 쇼트볼의 관리는 다른 무엇보다도 중요하다.

쇼트피닝 가공에서 양질의 가공조건을 찾기 위해서 쇼트피닝의 강도를 좌우하는 변수들에 관한 연구들이 많이 수행되었다. Aoki 등⁽¹⁾은 서로 다른 쇼트피닝 조건을 적용하여 피로강도의 효과를 연구하여 쇼트볼의 투사밀도를 높이거나, 투사속도를 높이거나, 쇼트볼의 경도를 증가시키면 피로 강도가 증가함을 확인하였다. 또한, 이 등⁽²⁾의 연구에 의하면 직경 0.8 mm과 0.6 mm의 쇼트

* 회원, 서울산업대학교 기계공학과

** 경기공업대학교 정밀계측과

† 책임저자, 회원, 서울산업대학교 기계설계학과

E-mail : suckjoo@duck.snut.ac.kr

TEL : (02)970-6359 FAX : (02)949-2407

볼로 2단 쇼트피닝 가공(2 step shot peening)으로 극표면부의 압축 잔류응력(residual stress)이 상승하였으며, 피로수명도 증가함을 연구하였다.

Verpoort와 Gerdes⁽³⁾는 쇼트볼이 재료에 가하는 에너지의 변화에 따른 특성을 관찰하기 위하여 쇼트볼의 질량, 속도, 유량을 바꾸어 가면서 실험을 하였다. 이 결과 쇼트피닝 가공시 에너지가 높은 것만이 좋은 것은 아니며, 적절한 쇼트조건을 가지는 것이 좋다는 결론을 내렸다. 또한 쇼트볼의 투사각도에 따른 잔류응력 분포와 오버피닝(overpeening)시에 발생하는 문제점에 관하여 연구하였다.

일반적으로 현장에서는 재료의 종류나 특성에 대한 자료 없이 쇼트피닝 가공만 하면 재료의 특성이 좋아진다고 알고 있다. 하지만 쇼트피닝 가공에 있어서 최적의 조건을 찾고, 적절한 쇼트피닝 조건의 적용이 얼마나 중요한가를 아직 인식하고 있지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 쇼트볼의 투사속도와 투사시간에 따른 피닝강도의 변화와 쇼트피닝 가공시에 쇼트볼의 직경과 재료 경도가 시험편 표면에 어떠한 영향을 미치는가를 연구하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 쇼트피닝 가공의 개념

쇼트피닝 가공이란 금속 부품의 표면에 쇼트볼이라는 강구를 고속으로 금속의 표면에 투사하여 금속의 표면을 햄머링하는 일종의 냉간 가공이다. 쇼트피닝 가공은 Fig. 1과 같이 쇼트볼이 금속 표면에 고속 충돌하면서 이때 쇼트볼의 운동 에너지가 순간적으로 재료의 표면에 소성변형(plastic deformation)을 주고 표면에서 이탈한다. 쇼트볼과 충돌 후 표면층은 요철(dent)이 발생하며 이때 표면에 얇은 소성 변형층이 형성되어, 탄소층의 경계를 이루게 된다. 이 소성변형층은 변형된 표면층을 변형되기 전의 상태로 복원되려는 힘이 작용하게 되어 표면은 압축잔류응력, 내부는 인장응력을 갖고 평형을 이루게 된다.

일반적인 쇼트피닝 가공에서 나타나는 잔류응력의 형태를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)는 두꺼운 판과 얇은 판에서의 잔류응력 분포를 나타내었다. 얇은 판에서는 쇼트피닝 면이 불룩하게 변형되지만, 두꺼운 판인 경우에는 회복력이 너무 커서 굽어지는 현상을 볼 수 없다.

Fig. 2(b)는 쇼트볼의 경도가 높을수록, 쇼트볼의 속도가 빠를수록 최대압축잔류응력 값이 증가함을 나타낸다. 그림에서 최대 압축잔류응력은 극표면에서 발생하는 것이 아니라 표면층 아래에서 발생하였다.⁽⁴⁻⁶⁾

2.2 쇼트피닝 강도

쇼트피닝의 효과를 최대치로 올리기 위해서는 적절한 쇼트피닝 조건을 찾아 압축잔류응력을 극표면으로 끌어내는 일이다. 이것을 좌우하는 중요한 인자가 바로 쇼트볼이다.

쇼트피닝의 강도의 평가기준은 일반적으로 알멘스트립(almen strip)의 굴곡 정도로 나타내며, 이 굴곡정도를 "아크하이트"라고 한다. 아크하이트가 만들어지는 이유는 얇은 박판에 쇼트볼이 투사될 때 쇼트볼이 충격 되는 부분에서는 표면층이 늘어날려는 성질을 가지고, 쇼트볼이 충격 되지 않은 반대 면에서는 원상태를 유지하고 있으므로 표면과 반대면 간의 인장과 압축력으로 작용하게 되어 굽어지는데 알멘스트립은 쇼트볼 투사면 쪽으로 불룩하게 된다. 이러한 아크하이트의 굴곡

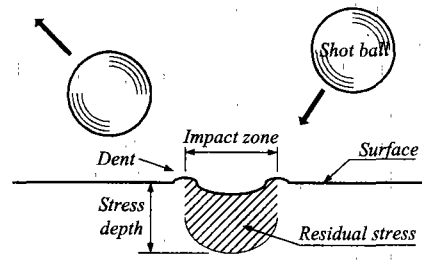


Fig. 1 Principle of shot peening

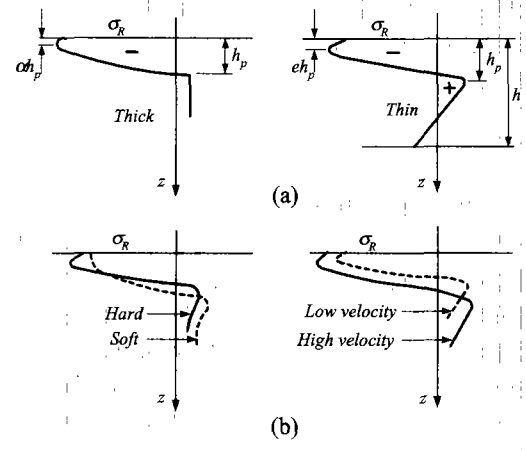


Fig. 2 Typical residual stress distributions

정도로 쇼트피닝 강도를 나타내게 된다

쇼트피닝가공 강도 조절을 위해서는 여러 가지 변수들을 적절히 조절하는 것이 필요하다. 변수들에는 쇼트볼의 속도, 크기, 경도, 형상, 단위시간당의 투사량 그리고 투사각도 등이 있다. 이 모든 것이 적절해야만 최적의 쇼트피닝 가공 강도를 유지할 수 있다.^(1,7)

2.3 쇼트볼 속도

쇼트볼에 의해 행해지는 최대 일량은 운동에너지(kinetic energy, KE)를 초과할 수 없다. 쇼트볼이 투사되어 재료의 표면에 충돌할 때까지의 운동에너지는 $KE = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2$ 이다. 여기서, m 은 쇼트볼의 질량이고, V 는 쇼트볼의 투사속도이다. 운동에너지 방정식에는 두가지의 변수가 존재한다. 그 중에 질량은 재료의 물성치에 의존하며, 쇼트볼 자체의 성질이다. 속도는 휠의 속력, 쇼트볼의 유동율에 의존한다. 또한 쇼트볼의 질량은 밀도와 체적에 의해 결정된다. 밀도는 쇼트볼이 만들어질 때의 재질에 의해 결정되며, 쇼트볼의 부피는 크기와 형상의 함수가 된다. 투사에너지의 변화는 질량과 속도를 변화시킴으로서 조절이 가능하다.⁽⁸⁾

쇼트볼의 질량을 증가시키기 위해서 쇼트볼의 직경을 증가시키면 표면의 조도(roughness)는 더 커지게 되며, 기계 작동상의 문제가 발생할 수도 있다. 쇼트볼의 운동에너지는 속도의 제곱으로 증가하므로 볼의 속도를 증가시키는 것이 높은 변형 에너지를 얻는데 더 유리하다. 하지만 쇼트볼의 투사속도가 증가하면 아크하이트는 커지는 반면에 쇼트볼의 파손율은 높아진다. 그러므로 적절한 쇼트볼의 크기와 투사속도의 선정이 중요하게 된다.⁽³⁾

3. 실험방법

3.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용한 재료는 자동차 현가장치에 적용되고 있는 스프링강(SPS5A)를 사용하였다. 화학적 성분은 Table 1에 표시하였다. Table 2는 기계적 성질을 나타내며, 인장 시험편은 KS B 0801 규격 제4호에 따라 제작하여 실험하였다.

본 연구에 사용된 쇼트볼은 경강선(HSWR)을 일정한 크기로 잘라서 만든 컷트와이어 쇼트볼을 사용하였다.

Table 1 Chemical composition of specimen

(wt%)	C	Si	Mn	P	S
SPS 5A	0.61	0.27	0.84	0.01	0.010

Table 2 Mechanical properties of specimen

	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
SPS 5A	820	1230	15.1	350
	1350	1700	10.0	500

Table 3 Chemical composition of shot ball

(wt%)	C	Si	Mn	P	S
HSWR67	0.71	0.19	0.47	0.013	0.006

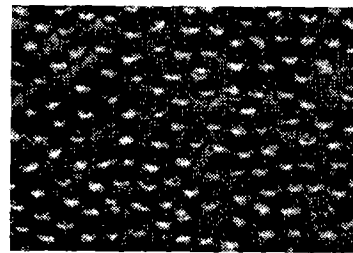


Fig. 3 Photography of shot ball.

Table 4 Measuring condition of residual stress

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

Table 5 Shot peening condition

Content	Shot peening
Shot ball diameter	0.4 mm, 0.6 mm
Impeller diameter	360 mm
Exposure time	8 min
Coverage	98%

사용된 쇼트볼의 지름은 0.4mm와 0.6mm이며, 화학적 성분은 Table 3에 표시하였다. Fig. 3은 실험에 사용된 쇼트볼 확대 사진이다.

3.2 잔류응력, 경도 및 조도측정

잔류응력의 측정은 X선 회절법(X-ray diffraction)을 이용하여 표면에서 깊이방향으로 분포하는 잔류응력을 측정하였으며, 측정조건은 Table 4와 같

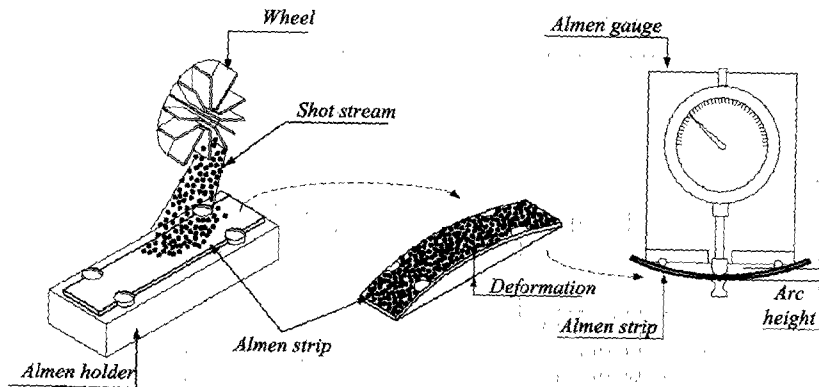


Fig. 4 Almen strip system

다. 경도의 측정에는 마이크로 비커스 경도기(MOK-E3)를 사용하여 표면부에서 시험편의 중심부 방향으로 측정하였다. 또한 표면부 조도의 변화를 관찰하기 위하여 표면조도계(KOSAKA,SEF-30D)로 측정하였다.

3.3 쇼트볼의 투사속도와 투사시간에 따른 쇼트피닝 강도 평가

쇼트피닝 가공시의 강도 평가를 위해서 알멘스트립 "A"형을 사용하여 쇼트볼의 투사속도와 투사시간에 따른 강도를 평가하였다.

3.4 쇼트볼 직경과 재료 경도에 따른 쇼트피닝 강도 평가

재료의 경도가 350 Hv와 500 Hv인 스프링강(SPS5A)에 직경이 0.4 mm와 0.6 mm인 컷트와이어 쇼트볼을 사용하여 Table 5와 같은 동일 조건 하에서 쇼트피닝 가공을 하였다. 재료의 경도 변화에 따른 압축잔류응력과 관계와 쇼트볼의 직경 변화에 따른 압축잔류응력과 관계를 평가하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 쇼트볼 투사속도와 투사시간에 따른 쇼트피닝 강도변화

Fig. 5는 쇼트볼의 투사속도와 투사시간에 따른 아크하이트와의 관계를 나타내었다. 그림에서 투사시간이 4분인 경우에 투사속도가 28 m/sec에서 70 m/sec로 증가할 때 아크하이트가 0.262 mm에서 0.55 mm로 110%의 증가를 나타내었다. 또한 70 m/sec의 투사속도에서 투사시간이 1분에서 6분까지 증가할 때 아크하이트가 0.442 mm에서

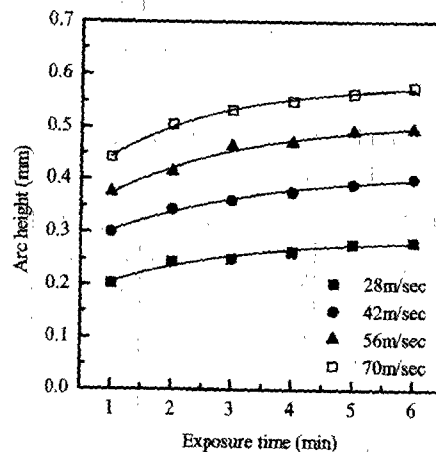


Fig. 5 Relation between arc height and exposure time

0.594 mm로 34%의 증가를 나타내었다. 쇼트볼 투사속도와 투사시간이 증가할수록 알멘스트립의 변형량(아크하이트)은 증가하며, 쇼트볼의 투사속도가 증가하면 재료에 전이되는 에너지량이 많아 지므로 아크하이트는 증가하게 된다. 아크하이트의 증가는 초기 2분 동안은 급격한 증가를 보였으며, 시간이 지남에 따라 증가량이 줄어들다가 5분을 경과하면서 서서히 포화(saturation)되는 경향을 나타내었다.

그러므로 쇼트볼의 투사시간보다 쇼트볼의 투사속도가 증가함에 따라서 쇼트피닝 강도인 아크하이트 값의 변화가 더 높음을 알 수 있었다. 이는 투사속도의 증가로 인해 많은 변형에너지를 전이시켜주는 역할을 하게 된다고 할 수 있다. 또한 어느 일정한 투사시간 이후에는 아크하이트 값의 증가량이 점차적으로 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

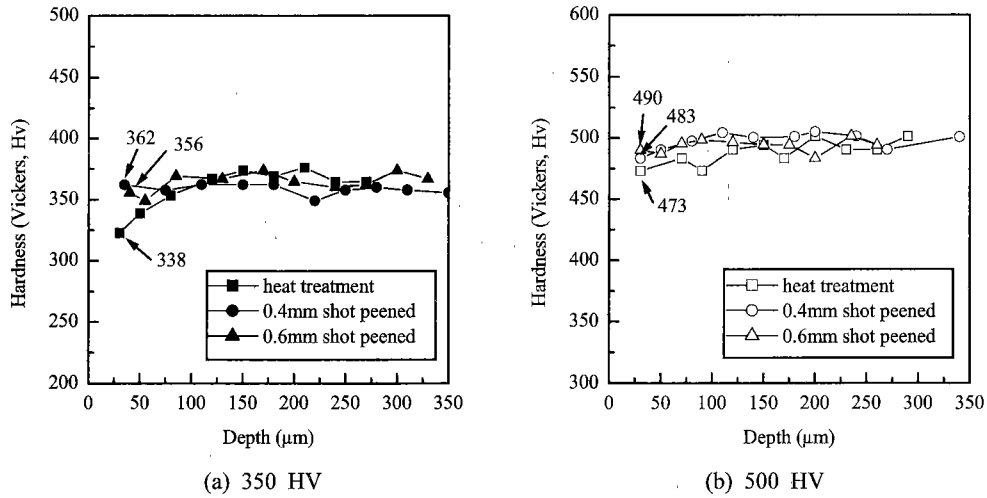


Fig. 6 Hardness distribution

Table 6 Relation between roughness and hardness, shot ball diameter

Condition	Hardness	R _a (μ m)	R _{max} (μ m)	R _z (μ m)
Unpeened	350 HV	0.4	6.3	4.0
	500 HV	0.3	4.5	3.0
ϕ 0.4 mm Peened	350 HV	2.4	16.0	14.5
	500 HV	1.8	14.0	12.0
ϕ 0.6 mm Peened	350 HV	4.9	40.5	27.3
	500 HV	2.8	21	17.8

원하는 쇼트피닝 강도를 갖기 위해서는 속도로 조절할 수도 있고, 투사시간으로도 조절할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 투사시간이 짧아지면 재료의 표면을 100% 전부 타격할 수 없으므로 안정된 쇼트피닝 효과를 얻기 어려우므로 적절한 조건을 찾아내는 것이 중요한 문제이다.

4.2 쇼트볼의 직경과 재료의 경도에 따른 조도 분포

일반적으로 쇼트피닝가공을 하면 쇼트볼의 자극으로 인해 표면에 요철이 발생한다. 이러한 요철의 발생량은 쇼트볼의 직경과 재료의 경도에 영향을 받는다. Table 6과 같은 열처리된 스프링강을 직경 0.4 mm와 0.6 mm인 쇼트볼로 쇼트피닝 가공한 결과이다.

결과에서 경도가 증가할수록 쇼트볼에 의한 조도값이 작게 나타나 시험편 표면의 요철 깊이가 줄어들어 표면 조도가 더 양호하였다. 경도값이 같은 재료에 대해서 쇼트볼의 직경을 달리할 때

Table 7 Relation between residual stress and hardness, shot ball diameter

	0.4 mm			0.6 mm		
	350HV	500HV	Diff.	350HV	500HV	Diff.
Surface (MPa)	-531	-657	24%	-467	-631	35%
Max.stress (MPa)	-531	-718	35%	-543	-771	42%
Max.Depth (mm)	0.00	0.02	-	0.07	0.03	133. %
Zero stress (mm)	0.20	0.15	33%	0.28	0.21	33%

직경이 더 작은 쇼트볼로 쇼트피닝 가공한 것이 표면의 조도가 더 양호함을 알 수 있었다.

4.3 쇼트볼의 직경과 재료의 경도에 따른 경도 분포

쇼트피닝 가공을 하면 극표면부에서 경도가 변화하며 시험편의 경도가 높은 재료보다는 경도가 상대적으로 낮은 재료에서 더 높은 경도 변화가 발생하였다. Fig. 6은 각각의 시험편 경도와 쇼트볼 크기에 따른 시험편 내부경도의 변화를 그래프로 나타낸 것이다.

Fig. 6에서 보면 표면부에서 큰 경도의 변화는 없었지만 경도가 500 HV인 것에 비해서 350 HV인 재료가 쇼트피닝 가공한 극표면부의 경도 증가량이 더 높았으며, 쇼트볼의 크기 변화에는 큰 영향이 없었다.

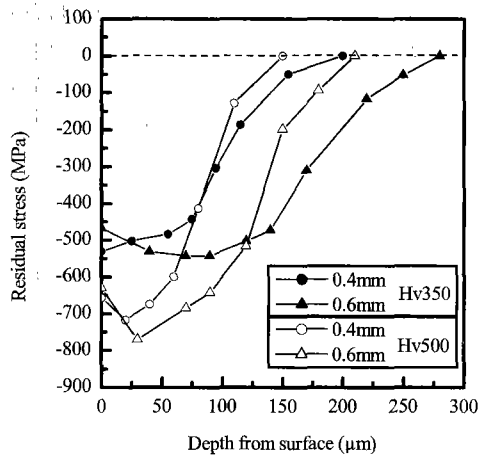


Fig. 7 Residual stress distribution

4.4 쇼트볼 직경과 재료 경도에 따른 압축잔류응력의 분포

Fig. 7은 직경이 0.4 mm와 0.6 mm인 쇼트볼로 경도가 350 HV과 500 HV인 스프링강에 쇼트피닝 가공한 후의 압축잔류응력의 분포를 나타내었으며, Table 7은 표면 잔류응력 값을 나타낸 것이다.

Fig. 7과 Table 7에서 쇼트볼의 직경이 증가함에 따라서 표면의 압축잔류응력값은 350 HV과 500 HV에서 14 %와 4 %의 증가를 나타내었으며 직경 0.4 mm인 쇼트볼로 쇼트피닝 가공한 시험편에서 시험편의 경도가 350 HV과 500 HV로 변화함에 따라 24 %의 압축잔류응력의 증가를 나타내었으며 직경 0.6 mm의 쇼트볼로 쇼트피닝 가공한 경우에 35 %의 증가를 나타내었다. 또한 최대 압축잔류응력 값도 쇼트볼 직경과 재료경도가 증가함에 따라서 쇼트볼의 직경이 0.4 mm에서 35 %와 직경이 0.6 mm에서 42 %의 증가를 나타내었다. 압축잔류응력 생성 깊이도 쇼트볼 직경과 재료 경도가 증가에 따라 33 %의 증가를 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 쇼트피닝 가공 변수들 중에서 쇼트볼 속도, 투사시간, 쇼트볼의 크기, 재료의 경도에 따른 재료 거동에 미치는 영향을 분석하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 쇼트볼의 속도가 증가할수록 아크하이트가 110 % 증가되었으며, 투사시간이 증가할수록 아

크하이트가 34% 증가하는 경향을 나타내었다.

(2) 쇼트볼의 직경이 0.4mm인 것과 직경이 0.6mm인 것으로, 쇼트피닝 가공시에 350 HV인 시험편에서 Ra 2.4 μm와 Ra 4.9 μm로, 조도가 향상되었으며, 500 HV인 시험편에도 Ra 1.8 μm와 Ra 2.8로 향상되었다.

(3) 쇼트피닝 가공에 의해 재료의 극표면부의 정도값은 약간의 변화가 있었고 정도가 높은 재료보다는 낮은 재료에서 더 큰 정도변화를 나타내었다.

(4) 쇼트볼의 직경이 증가하면 극표면의 압축잔류응력 값은 큰 변화가 없었으나, 최대압축잔류응력 값과 잔류응력 층의 깊이, 압축잔류응력의 영역은 증가하였다.

참고문헌

- (1) Aoki, H., Nagashima, E., and Miura, T., 1990, "Effect of Shot Peening Conditions on Fatigue Strength of Carburized Steel," *Proc. of the 4th International Conference on Shot Peening*, Tokyo, pp. 513~518.
- (2) 이승호, 김희송, 1999, "스프링강의 피로거동에 미치는 2단 쇼트피닝의 효과," 대한기계학회 논문집 A권, 제23권, 제1호, pp. 140~147.
- (3) Verpoort, C. M., and Gerdes, C., 1989, "Influence of Shot Peening on Material Properties of Turbine Blades," *Shot Peening Theory and Application, Institute for Industrial Technology Transfer International*, France, pp. 11~70.
- (4) Ebenau, A., Lohe, D., Vohringer, O., and Macherauch, E., 1990, "Influence Shot Peening on the Microstructure and the Bending Fatigue Strength of Bainitic-Austenitic Nodular Cast Iron," *Proc. of the 4th International Conference on Shot Peening*, Tokyo, pp. 389~398.
- (5) Wohlfahrt, H., 1984, "The Influence of Peening Conditions on the Resulting Distribution of Residual Stress," *Proc. of the 2nd International Conference on Shot Peening*, Chicago, pp. 316~331.
- (6) Al-Obiad, Y. F., 1990, "A Rudimentary Analysis of Improving Fatigue Life of Metal by Shot Peening," *J. of Applied Mechanics*, Vol. 57, pp. 307~312.

- (7) Al-Hassani, S. T. S., 1990, "Mechanical Aspects of Residual Stress Development in Shot Peening," *Proc. of the 4th International Conference on Shot Peening*, Tokyo, pp. 583~602.
- (8) Gillespie, R. D., 1993, "Its Effect on Process Consistency and Resultant Improvement in Fatigue Characteristics," *Proc. of the 5th International Conference on Shot Peening*, Oxford, pp. 81~90.