

<기술논문>

## 피로강도 및 수명에 미치는 Shot Peening에 의한 잔류응력의 영향

이 종 규\* · 김 정 규\*\*

(1997년 1월 23일 접수)

### Influence of Residual Stress Due to Shot Peening on Fatigue Strength and Life

Jong-Gyu Lee and Jung-Kyu Kim

**Key Words :** Shot Peening(샷피닝), Distribution of Compressive Residual Stress(압축잔류응력의 분포), Fatigue Strength(피로강도), Fatigue Life Evaluation(피로수명평가)

#### Abstract

Procedures are presented for influence of shot peening on fatigue strength, fatigue life and effects of shot peening are discussed from experiments were taken between shot peened and unpeened SPS5, SM45C specimens. After the residual stress on shot peened specimens was measured by X-ray diffractometer, rotating bending fatigue tests were carried out. In addition, the compressive residual stress profile was obtained by the superposition method of three stresses which is based on Al-Obaid's equation. Predicted fatigue life considering residual stress profile which was obtained by the Al-Obaid's equation and another predicted fatigue life considering residual stress profile which was measured in test were compared. For the purpose of predicting fatigue life, Morrow's equation considering the residual stress and mean stress was used.

#### 1. 서 론

표면경화법은 재료의 강도를 향상시켜 설계능력을 높일수 있을 뿐만 아니라, 재료의 중심부에서는 높은 인성을 유지할 수 있으므로 피로하중을 받는 기계구조물 부품의 수명향상에 대단히 유용하다고 할 수 있다. 표면경화법에는 침탄법, 질화법, 고주파 열처리법, 샷피닝 등이 있으며, 특히 샷피닝은 피로강도 및 수명향상에 있어서 대단히 중요하다.<sup>(1,2)</sup>

샷피닝에 대한 연구는 1940년대에 항공기 및 자동차분야에서 시작되어 실용화되기 시작하였으며, 최

근에는 신소재 개발과 더불어 피로강도의 최적화라는 관점에서 재료에 가장 적합한 샷피닝조건을 선택하려는 연구가 많이 진행되고 있다.<sup>(3,4)</sup> 특히 샷피닝실시에 따라 생성되는 압축잔류응력은 피로수명에 중대한 영향을 미치나 다양한 샷피닝의 실시조건과 부재의 기계적 특성 등에 의하여 분포형태가 변화되므로, 최적의 분포형태를 정량적으로 예측하기란 매우 어렵다.<sup>(5)</sup> 따라서 샷피닝실시에 따른 압축잔류응력의 분포형태 및 피로수명과의 관계를 명확히 하는 것은 기계구조물의 설계능력과 내구성 향상에 있어서 대단히 중요하다.

본 연구에서는 피로강도 및 피로수명에 미치는 샷피닝의 효과를 검토하기 위하여 스프링강(SPS5)과 기계구조용 탄소강(SM45C)에 샷피닝을 행하여

\*회원, 한국엠에스씨

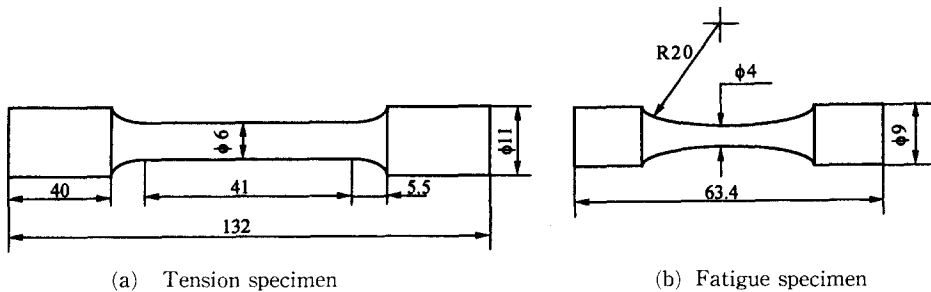
\*\*회원, 한양대학교 기계설계학과

**Table 1** Chemical composition (wt %)

Designation	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
SPS5	0.61	0.27	0.84	0.01	0.01	0.83	0.03	0.12
SM45C	0.44	0.25	0.77	0.02	0.02	0.08	0.01	0.05

**Table 2** Mechanical properties of SPS5, SM45C

Designation	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction in area (%)	Hardness (Hv)
SPS5	936.4	1,033.3	9.9	45.0	330
SM45C	425.5	652.1	20.0	39.4	205



**Fig. 1** Configuration of tension and fatigue specimens (unit : mm)

피로시험을 실시하였다. 또한 피로수명에측은 잔류응력을 고려한 Morrow의 제안식<sup>(6-8)</sup>을 사용하였으며, 이때 잔류응력값은 Al-Obaid의 제안식<sup>(9)</sup>으로부터 산출한 결과와 실험에서 측정된 잔류응력 분포를 이용하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 재료 및 시험편

본 연구에서 사용한 시험편은 현재 스폿피닝경화법에 널리 사용되고 있는 스프링강과 기계구조용 탄소강이다. 이들 재료의 화학성분은 Table 1과 같다. 열처리조건에 있어서 스프링강은 830℃의 온도로 2시간 가열하여 기름에 퀴칭을 실시한 후 500℃의 온도에서 60분 가열하여 템퍼링을 행하였으며, 기계구조용 탄소강은 열처리를 하지 않았다. Table 2는 이들 재료의 기계적 성질을 나타낸 것이다. 피로시험편의 형상은 중앙부의 지름이 4 mm인 봉이며, Fig. 1은 인장시험편과 피로시험편의 형상을 나타낸 것이다.

### 2.2 스폿피닝의 조건

스포팅은 스프링강 SPS5 및 기계구조용 탄소강 SM45C에 대하여 동일한 조건으로 실시하였다. 스폿피닝은 엔진벨브 스프링 제조용 스폿피닝장비 (Apron Type Shot Peening Machine SKA-3)를 사용하였다. 이때 사용한 경구의 재질은 지름이 0.6 mm인 HSW3 경강선재이며, 기타 상세한 스폿피닝의 조건은 Table 3과 같다. 스폿피닝에 의한 압축잔류응력 및 조도측정은 X-ray 잔류응력 측정기(Rigaku MSF-2M)와 조도측정기(Mahrperthen S8P)를 사용하였으며, 경도는 마이크로 비커스경도측정기(Mat suzawa DMH-2)를 이용하였다. Table 4는 X-ray 잔류응력측정기의 측정조건을 나타낸 것이다.

### 2.3 피로시험

피로시험은 상온의 대기중에서 최대굽힘모멘트 30 N·m, 회전수 2850 rpm인 전기모터식 회전굽힘 피로시험기(HI-TECH SCIENTIFIC HSM. 19)를 사용하였다. 본 실험에서의 응력비(R)는 -1이고 작용응력은 파단강도를 기준으로 50 MPa씩 증가

**Table 3** Conditions of shot peening

Content	Shot ball diameter	Shot ball velocity	Impeller angle	Time	Current	Coverage	Arc height (Almen A strip)
Condition	$\phi$ 0.6 mm	56.7 m/sec	120°	14 Min	27 A	90 %	0.38 mm

**Table 4** Measuring conditions of residual stress

X-ray diffraction	Condition	
X-ray source	Target	Cr-V
	Voltage	30 kV
	Current	10 mA
Injection angle	0°, 15°, 30°, 45°	
Calculation method	2 $\theta$ -sin <sup>2</sup> $\Psi$ method	
2 $\theta$	140°~170°	
Detector	Scintillation Counter	

시켜 실시하였다. 또한 피로한도는  $1 \times 10^6$  사이클 이후에도 파단하지 않은 응력으로 하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

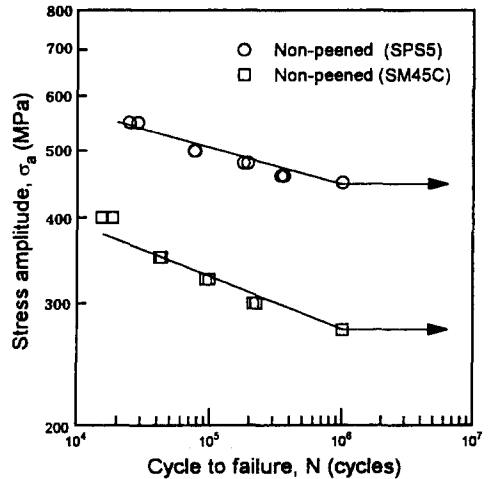
#### 3.1 슷피닝실시 전·후의 S-N 곡선

Fig. 2는 SPS5와 SM45C 시험편의 하중반복수  $N$ 에 대한 응력진폭  $\sigma_a$ 의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 피로강도는 SPS5가 SM45C의 것에 비해 약 1.6배 가량 높으며,  $1 \times 10^6$  사이클에서의 피로한도는 SPS5는 약 450 MPa, SM45C인 경우에는 약 275MPa로 나타났다. Fig. 3의 (a)는 SPS5, (b)에는 SM45C의 피로시험 결과를 원재료와 슷피닝처리재로 비교하여 나타내었다. 먼저 피로강도의 변화에 주목해 보면 슷피닝처리재는 SPS5인 경우 원재료에 비하여 약 1.2배, SM45C는 약 1.6배 가량 증가되었다.

이로부터 강도, 경도가 낮은 SM45C의 시험편이 강도, 경도가 높은 SPS5의 것에 비하여 피로강도에 미치는 슷피닝의 효과가 크다고 할 수 있다.

#### 3.2 조도 및 경도의 영향

피로강도 및 피로수명에 미치는 시험편 표면의 조도 및 경도변화는 대단히 중요하다. 먼저 슷피닝 실시후 원재료에 대한 슷피닝처리재의 표면조도변



**Fig. 2** S-N curves of SPS5, SM45C specimens

화를 살펴보기 위해 시험편의 표면을 길이방향으로 800  $\mu$ m구간 설정하여 굴곡의 최대값(Rmax)과 굴곡의 중심선 산술평균값(Ra)을 측정하였다. Table 5는 조도측정의 결과를 나타낸 것으로 Rmax, Ra는 두재질 모두 슷피닝실시후 증가되었음을 알 수 있다. 이는 경구가 부재와 부딪히면서 생성되는 표면층에서의 소성변형 결과라 판단되나 이 정도의 조도변화는 피로수명에 거의 영향을 미치지 못한다고 할 수 있다.<sup>(10)</sup>

한편 슷피닝실시는 시험편의 표면층만을 경화시키고 내부의 기계적 특성은 그대로 유지되므로 시험편 반지름방향으로 경도구배를 구하였다. 이를 위하여 시험편을 적당한 크기로 절단하여 프레스 마운팅하여 연마한 후, 표면에서부터 중심부로 약 500  $\mu$ m 구간까지 50  $\mu$ m 간격으로 경도를 측정하였다. Fig. 4는 이들 시험편의 경도분포결과를 나타낸 것이다.

경도는 표면층에서 최대값을 나타내고 그 이후에는 시험편의 깊이방향에 따라 저하하여 원재료와 같은 값을 나타낸다. SPS5인 경우에는 약 300 $\mu$ m 깊이에서, SM45C는 약 500  $\mu$ m깊이에서 일정한 경도분포를 나타내었다. 표면부에서는 SPS5의 경우, 원재료와 슷피닝처리재는 경도값이 거의 같으나

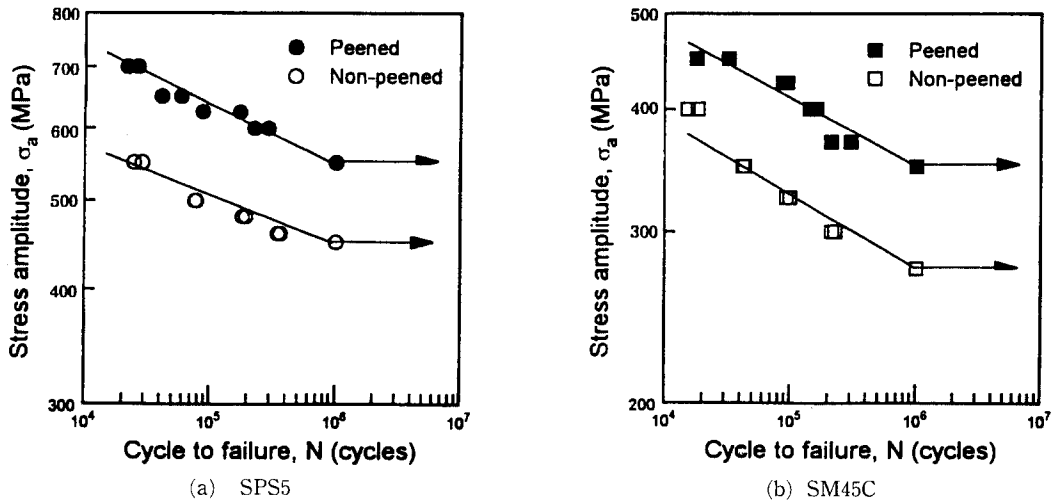


Fig. 3 S-N curves between shot peened and unpeened specimens

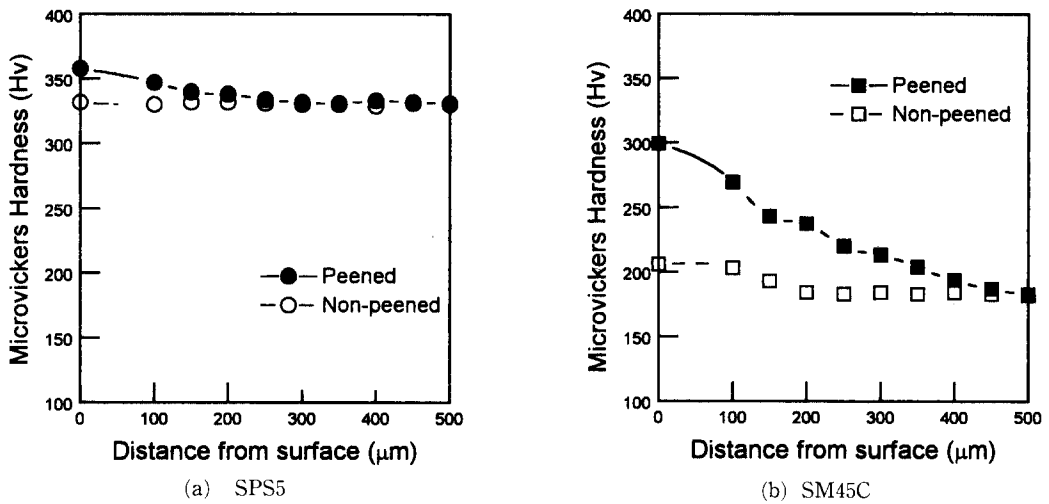


Fig. 4 Microvickers hardness distribution of shot peened and unpeened specimens

Table 5 Roughness pattern between shot peened and unpeened SPS5, SM45C specimens

Designation	Unpeened		Shot peened	
	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rmax ( $\mu\text{m}$ )	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rmax ( $\mu\text{m}$ )
SPS5	3.8	20.5	4.4	28.1
SM45C	4.4	21.9	5.1	29.0

SM45C는 원재료의 경도값에 비하여 슛피닝처리재는 약 1.5배가량 증가되었다. SM45C의 시험편이 SPS5인 경우보다 경도증가량이 큰 이유는 강도, 경도가 낮은 재질이 슛피닝에 의한 소성변형이 더

크기 때문이라 판단된다. 이상의 결과로부터 슛피닝에 의한 피로강도의 변화와 시험편의 조도 및 경도와의 관계는 다음과 같이 설명된다. 즉 SPS5의 경우, 슛피닝에 의한 피로강도의 변화는 조도와 경

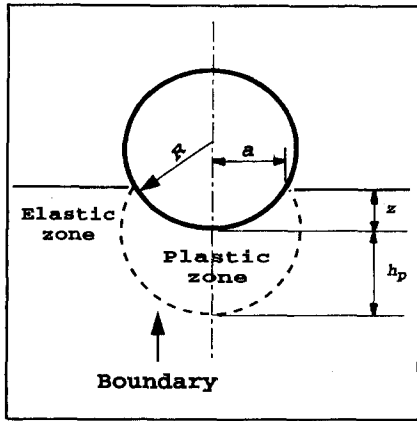


Fig. 5 Configuration of elastic-plastic boundary below the contact zone

도에 무관하나 SM45C의 경우에는 종래의 연구결과<sup>(11)</sup>와 같이 피로강도에 경도의 영향이 있다고 할 수 있다.

3.3 압축잔류응력의 분포예측

Al-Obaid,<sup>(9)</sup> Yoshihiro<sup>(11)</sup> 등은 Herzt의 접촉이론<sup>(12)</sup>에서 발전시킨 동적인 슛피닝의 조건과 잔류응력분포의 이론식을 제안하였다. Al-Obaid의 제안식은 크게 슛피닝에 의한 소성영역의 깊이를 예측식과 잔류응력의 분포 예측식으로 구분할 수 있는데, 먼저 소성영역의 깊이를 예측식은 다음과 같이 정의된다. Fig. 5에 나타난 것처럼 경구가 정적으로 부재에 접촉할 때 경구의 압입깊이  $z$ , 경구의 압입에 의한 소성영역의 깊이  $h_p$ 와 경구의 반지름  $R$ , 경구의 밀도  $\rho$ , 경구의 충돌직전 초속도  $v$ , 부재의 평균압력  $\bar{p}$ , 정수  $k_1$  사이에는 다음의 관계식이 성립된다.

$$\frac{h_p}{R} = k_1 \left( \frac{\rho v^2}{\bar{p}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

또한 Al-Obaid는 부재의 압축잔류응력의 분포를 구하기 위하여 다음과 같은 개념을 도입하였다. 부재에 슛피닝을 실시할 때, Fig. 6에 나타난 바와 같이 휨(deflection)이 생긴다. 이 변형된 판을 원래의 상태로 돌릴때에 필요한 응력이 변형하지 않은 부재에 생기는 압축응력이라 가정하였다. 즉, 변형된 판을 평판으로 하기위한 굽힘모멘트  $M$ (굽힘응력  $\sigma_b(z)$ )을 가하면서 재료의 축방향으로 인장응력  $\sigma_{ax}(z)$ 를 작용시킨다. 그러나 이 상태에서

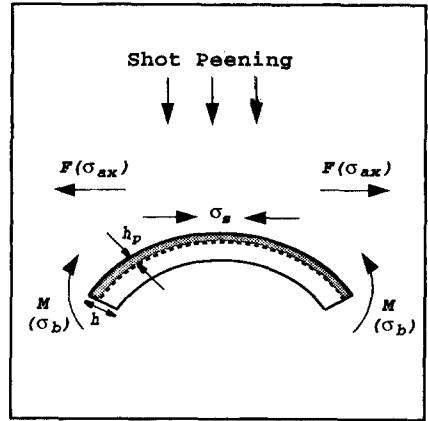


Fig. 6 Configuration of three simple stresses in introducing equations

는 재료 축방향의 변형에 의해서 판이 신장된 상태에 있으므로, 역으로 이 축방향의 변형에 상응하는 응력  $\sigma_s(z)$ 를 반대 방향으로 주는 것이 필요하다.

그러므로 압축잔류응력  $\sigma_R(z)$ 는 굽힘응력  $\sigma_b(z)$ 와 축방향에 발생한 소성변형응력  $\sigma_s(z)$  및 축방향의 인장응력  $\sigma_{ax}(z)$ 의 합으로 표시된다.

$$\sigma_R(z) = \sigma_b(z) + \sigma_s(z) + \sigma_{ax}(z) \quad (2)$$

여기서,  $z$ 는 재료의 표면에서의 깊이이다.

식 (2)에 있어서 굽힘응력 및 소성변형응력은 시험편 축에 대하여 압축방향으로 작용하고, 축방향의 응력은 양(+)<sup>1)</sup>의 값이다. 이들 응력은 각각 다음과 같이 나타낸다.

① 굽힘응력  $\sigma_b(z)$

$$\sigma_b(z) = \frac{6E\epsilon_m\lambda}{(1-\nu^2)h} \left( \frac{h}{2} - z \right) c_1 \quad (3)$$

여기서,  $\lambda = \frac{h_p}{h}$

$$c_1 = \frac{1}{2} c_2 - \frac{1}{2} \lambda + \frac{(1-\alpha)^2}{\pi^2} \lambda \left( 1 + \cos \frac{\alpha}{1-\alpha} \pi \right)$$

$$c_2 = 1 + \frac{1-\alpha}{\pi} \sin \frac{\alpha}{1-\alpha} \pi$$

이다.

식 (3)에서  $\epsilon_m$ 은 최대 변형이고  $z > h_p$ 일 때 이 함수는 정의되지 않으며,  $h$ 는 부재의 두께,  $E$ 는 재료의 탄성계수,  $\nu$ 는 Poisson 비,  $\alpha$ 는 최대잔류응력의 깊이에 대한 소성영역 깊이의 비이다.

② 축방향에 발생한 소성변형응력  $\sigma_s(z)$

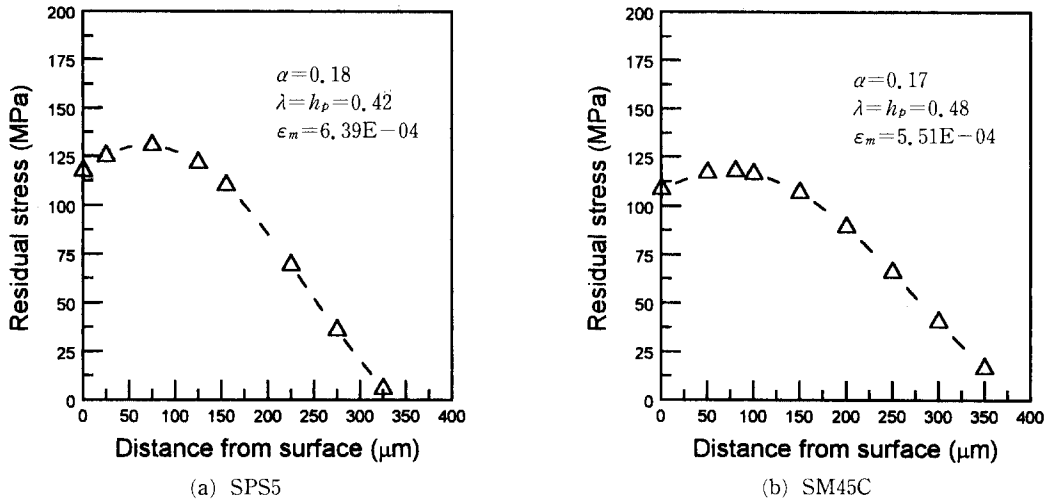


Fig. 7 Results of predicted residual stress distribution using Al-Obaid equation

$$\sigma_s(z) = \frac{E\varepsilon_m}{2(1-\nu^2)} \left( \cos \frac{z - \alpha h_p}{(1-\alpha)h_p} \pi + 1 \right) \quad (4)$$

③ 축방향의 인장응력  $\sigma_{ax}(z)$

$$\sigma_{ax}(z) = \frac{E\varepsilon_m \lambda}{2(1-\nu^2)} c_2 \quad (5)$$

식 (2)는 식 (3)~(5)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_R = \frac{E\varepsilon_m}{1-\nu^2} \left[ -\frac{6\lambda}{h} \left( \frac{h}{2} - z \right) c_1 + \frac{\lambda}{2} c_2 - \frac{1}{2} \left( \cos \frac{z - \alpha h_p}{(1-\alpha)h_p} \pi + 1 \right) \right] \quad (6)$$

본 예측식의 적용범위는 슛피닝의 효과로서 압축잔류응력의 값이 0인 깊이까지이다.

두께  $h_1$ , 길이  $L$ 의 판에 슛피닝을 행하여 이때 발생하는 판의 휨  $\delta$ 를 고려함으로써 최대변형율이 결정되고, 이 관계는 식 (7)과 같다.

$$\varepsilon_m = \frac{4(1-\nu^2)h_p \delta}{3L^2 \lambda_1 c'_1} \quad (7)$$

여기서,  $\lambda_1 = \frac{h_p}{h_1}$

$$c'_1 = \frac{1}{2} c_2 - \frac{1}{2} \lambda_1 + \frac{(1-\alpha)^2}{\pi^2} \lambda_1 \left( 1 + \cos \frac{\alpha}{1-\alpha} \pi \right)$$

이다.

식 (7)에 있어서 휨  $\delta$ 는 아크하이트(arc height)<sup>(13,14)</sup>로서 투사속도  $V$ , 경구의 반지름  $R$ , 투사시간  $T$ , 판의 두께  $h_1$ 에 의해서 결정된다.

$$\delta = f(V, R, T, h_1) \quad (8)$$

또한 이  $\delta$ 와 식 (7)의  $h_p$ 의 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.<sup>(15)</sup>

$$\delta \approx 2.5 \times h_p \times \left( \frac{HV}{500} \right) \quad (9)$$

여기서, HV는 비커스경도이다.

Fig. 7은 식 (6)에 의해서 구한 SPS5와 SM45C의 압축잔류응력의 예측값을 시험편 표면으로부터의 깊이에 대해 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 두 재질 모두 압축잔류응력의 분포 양상은 표면층으로부터 약 80  $\mu\text{m}$  깊이에서 최대값을 나타낸후 차츰 감소하여, 약 350  $\mu\text{m}$  깊이에서는 인장응력의 영역으로 전이된다. 또한 예측된 압축잔류응력값은 강도, 경도가 높은 SPS5가 SM45C에 비하여 다소 높게 평가되었다.

### 3.4 잔류응력과 피로수명과와의 관계

스�피닝실시에 따라 부재의 표면층에 생성되는 압축잔류응력은 주로 고사이클영역에서 피로수명의 증대라는 효과로 나타난다.<sup>(16,17)</sup> 그러므로 평균응력과 잔류응력을 고려하여 제안한 Morrow의 피로수명 예측식<sup>(6-8)</sup> (10)을 이용하여 슛피닝처리재의 피로수명을 평가하였다.

$$2N_f = \left( \frac{\sigma_a}{\sigma'_f - \sigma_m - \sigma_r} \right)^b \quad (10)$$

여기서,  $\sigma'_f$ ,  $b$ 는 재질의 피로특성치이며,  $\sigma_a$ ,  $\sigma_m$ 은 외부의 하중으로부터 발생된 응력이고,  $\sigma_r$ 은 슛피닝에 의해 생성된 부재의 표면층에서의 압축잔류

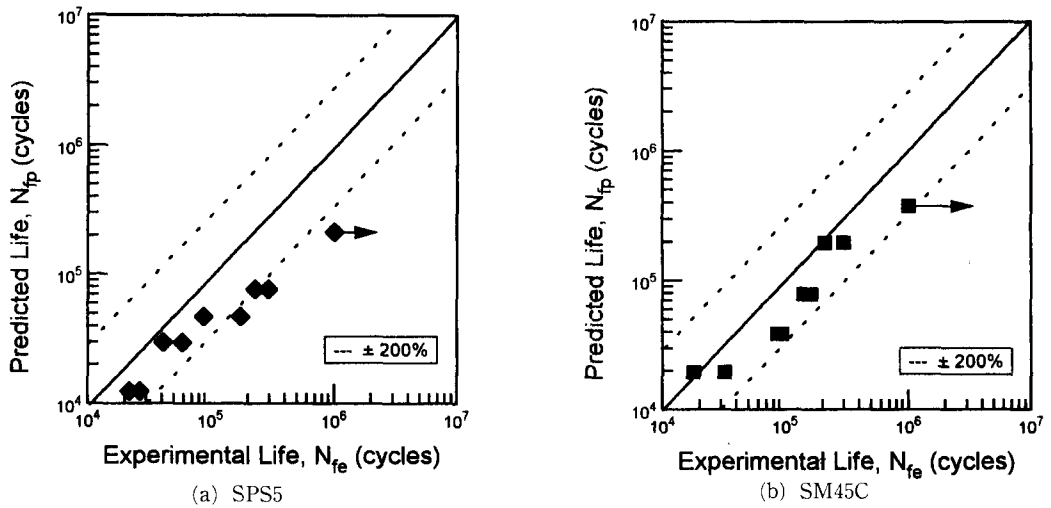


Fig. 8 Comparison of S-N curves between the test results and the predicted ones using predicted residual stress distribution

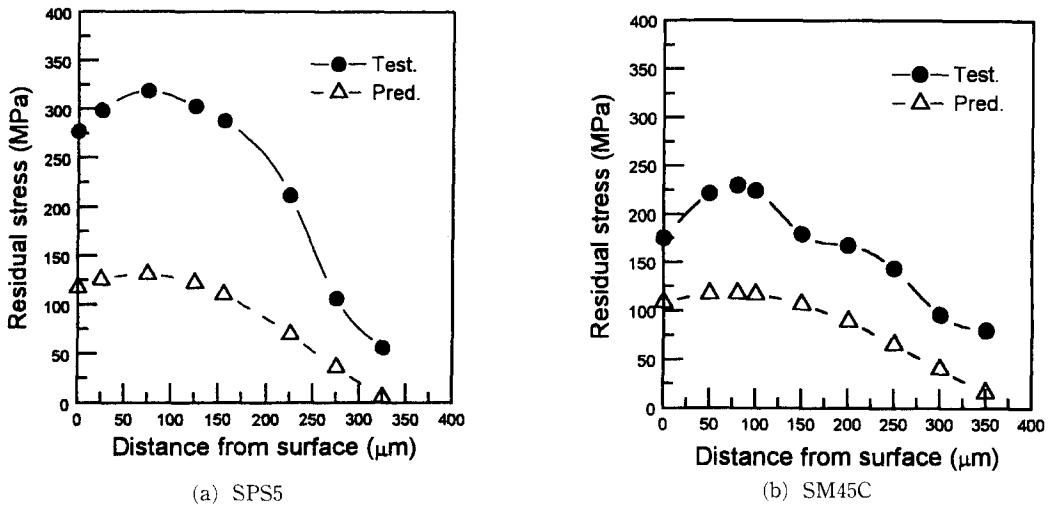


Fig. 9 Comparison of residual stress distribution between the test results and the predicted ones

응력이다. 그런데 본 실험에서는 하중 형태가 동일한 진폭의 양진하중이므로  $\sigma_m=0$  이 되어 식 (10)은 아래와 같이 정리된다.

$$2N_f = \left( \frac{\sigma_a}{\sigma'_f - \sigma_r} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (11)$$

먼저 앞절에서 언급한대로 Al-Oibaid의 제안식을 사용하여 예측한 압축잔류응력값을 이용하여 피로수명을 예측하였다. 계산식에 사용한 재료특성은 SPS5인 경우 피로강도계수  $\sigma'_f=1538.6$  MPa, 피로강도지수  $b=0.085$ , 표면부의 압축잔류응력  $\sigma_r$

$=119$  MPa이며, SM45C는  $\sigma'_f=997.1$  MPa,  $b=-0.085$ ,  $\sigma_r=107$  MPa이다. Fig. 8은 슛피닝처리재의 피로수명의 실험결과와 압축잔류응력을 고려한 피로수명의 예측결과를  $\pm 200\%$ 의 보조영역선을 이용하여 나타낸 것이다. 이들 그림에서 알수 있듯이 피로수명의 예측값은 실험값에 비하여 두재질 모두 과소평가되었다. 이는 예측된 압축잔류응력값이 실제값과 상당한 차이가 있기 때문이라 판단되며, 따라서 실험으로부터 압축잔류응력의 분포를 측정할 필요가 있다.

압축잔류응력의 분포측정은 X-ray 잔류응력측정

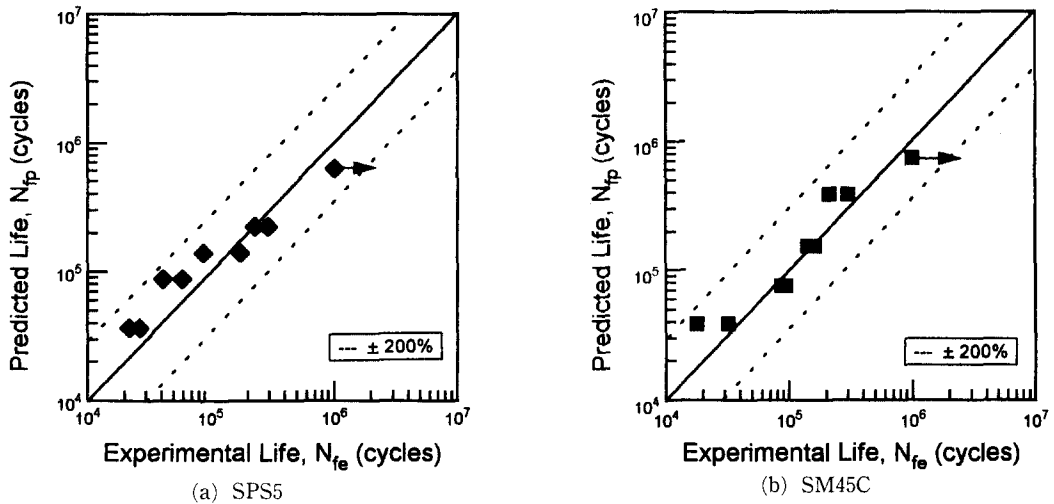


Fig. 10 Comparison of S-N curves between the test results and the predicted results using residual stress distribution by measurement

기를 사용하였으며, 이때 계산방법은  $2\theta - \sin^2\psi$ 법<sup>(18)</sup>을 이용하였다. 잔류응력의 분포측정방법은 먼저 시험편 표면층의 응력값을 측정 한 후, 전해연마를 실시하여 표면으로부터 중심부로 30~50  $\mu\text{m}$ 가량 연마하면서 X-ray를 0, 15, 30° 및 45° 각도로 투사하였다. 각 포인트에서의 회절각에 대한 반응값을 최소자승법을 이용해 잔류응력값을 산출하였으며, 측정깊이는 압축잔류응력 범위가 소멸되는 약 350  $\mu\text{m}$ 까지로 하였다. 이때 전해연마시 제거된 응력층의 영향은 고려하지 않았다.

샷피닝실시에 따라 생성된 압축잔류응력의 예측값과 실험값과의 관계는 Fig. 9와 같으며, 그림에서 표시 ●는 실험값을, 표시 △는 예측값을 나타낸 것이다. 이들 그림으로부터 압축잔류응력의 분포는 예측값과 실험값이 표면으로부터 깊이에 따라 동일한 양상을 나타내지만, 예측값은 실험값에 비하여 SPS5인 경우에는 약 57%, SM45C는 약 35% 가량 과소평가됨을 알 수 있다. 이는 식 (6)으로부터 압축잔류응력에 미치는 최대변형률  $\epsilon_m$ 값의 과소평가에 원인이 있다고 생각된다.

따라서 압축잔류응력의 분포양상뿐만 아니라 크기까지도 정확히 예측하기 위해서는 사용한 샷피닝의 실시조건을 고려한 최대변형률의 특성식이 필요하다. Fig. 10은 압축잔류응력의 실험값으로부터 평가한 피로수명예측 결과와 실험결과를 역시 보조영역선을 이용하여 나타낸 것으로 샷피닝에 의한 피로수명의 향상은 부재에 존재하는 압축잔류응력

의 대소에 의해 잘 설명될 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 스포링강 SPS5와 기계구조용 탄소강 SM45C에 대하여 샷피닝을 행하고, 피로강도 및 피로수명에 미치는 샷피닝의 효과를 검토하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 샷피닝을 실시함에 따라 강도, 경도가 높은 SPS5인 경우 피로강도는 약 1.2배, 강도, 경도가 낮은 SM45C는 약 1.6배 가량 증가하였다.

(2) 샷피닝에 의하여 생성된 압축잔류응력의 분포는 두재료 모두 표면층으로부터 약 80 $\mu\text{m}$  깊이에서 최대값을 나타낸 이후 급격히 감소하며, 약 350  $\mu\text{m}$  깊이에서는 인장응력의 영역으로 전이되었다. 또한 Al-Obaid에 의해 제안된 압축잔류응력의 예측값은 실험결과에 비하여 과소평가되었다.

(3) 샷피닝에 의한 피로강도의 상승은 원재료의 강도, 경도가 낮을수록 효과적이다. 또한 잔류응력을 고려한 Morrow의 피로수명예측값은 실험결과와 잘 일치하였으며, 이 식은 잔류응력을 고려한 피로수명예측에 유효하였다.

#### 후 기

본 연구수행에 있어서 잔류응력 측정에 협조하여 주신 대원강업(주)의 중앙기술연구소와 부평공장



관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

- (1) Xenophon J. Koinis., 1989, "Shot Peening A 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, 1982, "Study on the Shot Peening Small Springs -Relation between Processing Condition and Improvement of Fatigue Strength," *ばね論文集*, 제27호, pp. 73~108.
- (3) 社団法人 日本ばね工業會 ばね技術研究會, 1988, *最近ばね技術論文集*, pp. 85~91.
- (4) Yozo, K., Shinzaburo, T. and Masaki, K., 1996, "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.
- (5) 한국기계연구소, 1988, "기계부품 시험기술개발(III)," pp. 71~81.
- (6) Morrow, J., Ross, A. S. and Sinclair, G. M., 1960, "Relaxation of Residual Stresses due to Fatigue Loading," *SAE Transactions*, Vol. 68, pp. 40~49.
- (7) Landgraf, R. W. and Chernenkoff, R. A., 1988, "Residual Stress Effects on Fatigue of Surface Processed Steels," *ASTM, STP1004*, pp. 1~12.
- (8) Landgraf, R. W. and Francis, R. C., 1979, "Material and Processing Effects on Fatigue Performance of Leaf Springs," *SAE Technical Paper Series* 790407, pp. 1485~1494.
- (9) Al-Obaid, Y. F., 1990, "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.
- (10) 이세희, 1980, "Shot Peening 공법," 대한기계학회지, 제20권, 제3호, pp. 194~200.
- (11) Yoshihiro, W., Norihiko, H. and Yoshikazu, M., 1995, "Simulation of Residual Stress Distribution on Shot Peening," *Journal of The Society of Materials Science in Japanese*, Vol. 44, No. 496, pp. 110~115.
- (12) Wohlfahrt, H., 1981, *Shot Peening and Residual Stresses*, Pienum Press, Bundesrepublik, pp. 78~79.
- (13) Kenneth, N. Burrell, 1985, "Controlled Shot Peening of Automotive Components," *SAE Technical Paper Series* 850365 pp. 3.44~3.51.
- (14) Michael M. Woelfel., 1984, "Experimental Determination of Fatigue Strength as Related to Peening Intensity and Specimen Thickness," *Journal of Society of American Shot Peening*, pp. 365~368.
- (15) Yoshihiro, W., Norihiko, H. and Yoshikazu, M., 1995, "Simulation of Residual Stress Distribution on Shot Peening," *Journal of The Society of Materials Science in Japanese*, Vol. 44, No. 496, pp. 110~115.
- (16) SAE Fatigue Design and Evaluation Technical Committee, 1988, *Fatigue Design Handbook AE-10*, Second Edition, Society of Automotive Engineers, Warrendale, pp. 75~77, 243~245.
- (17) Yoshio, K., Masazumi, T. and Etsuji, Y., 1994, "Effect of Shot Peening on Fatigue Strength of Ti-6Al-4V," *Journal of The Society of Materials Science in Japanese*, Vol. 43, No. 489, pp. 666~671.
- (18) X-ray Stress Analyrizer Manual, 1991, Riraku, pp. 9~17.