

본 연구는 교육부학술연구조성비(기계공학분야)에 의한 연구비(과제번호 ME 96-E-03)지원하에 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

침탄치차의 굽힘강도에 미치는 Shot Peening의 효과에 관한 연구

류성기*, 전형주**, 문봉호***

A Study on the Effect of Shot Peened Treatments on the Strength of Carburized Gears

Sung-Ki LYU*, Hyung-Ju JEON**, Bong-Ho Moon***

ABSTRACT

Hardened layer and compressive residual stress created by carburized treatment effect on bending fatigue strength of gear massively. Also, shot peening treatment improves the strength of carburized gear as it does the hardness and residual stress of surface layer. In these days shot peening techniques are welcomed as one of physical improvement ways around the surface of materials. It is used widely because qualitative analysis of shot peening has become possible and surface treatment can be done with very little costs compared to other surface improvement methods. Therefore this study investigates the effect of shot peening in surface shape and bending fatigue strength after doing many kinds of shot peening treatments, then doing fatigue test and also explained characteristics of shot peening gear.

Key Words : Shot Peening Gear(쇼트피닝기어), Hardened Layer(경화층), Compressive Residual Stress(압축잔류응력), Shot Peening Treatment(쇼트피닝처리), Surface Shape(표면형상), Bending Fatigue Strength(굽힘피로강도), Fatigue Test(피로시험)

1. 서론

동력전달용 치차에 침탄처리 등의 표면경화처리를 실시하면 표면경화층이 형성되고, 압축잔류응력이 생성된다. 표면경화층과 압축잔류응력은 치차의 강도 향상에 유효하며, 이 효과를 정량적으로 구하기 위하여 많은 연구들이 하고 있다. Inoue⁽¹⁾는 SCM420H 침탄치차를 이용하

여 굽힘 피로시험을 하여 PSN 곡선을 구하고, 표면경도, 심부경도 및 이뿌리 위험단면의 압축잔류응력을 함수로 하여 피로강도를 추정하는 실험식을 구하였다. 그 결과 표면의 경도와 압축잔류응력의 증가가 피로강도 향상에 효과가 있다는 것을 명확히 밝힌바 있다. Shot peening(쇼트피닝)처리에 의하여 표면에서의 표면경도와 압축잔류응력이 증가하기 때문에 침탄치차에 쇼트피닝을

* 경상대학교 기계설계학과, 항공기 부품기술연구센터(중신회원)
 ** 순천대학교 기계공학과
 *** 전북대학교 기계공학부

처리함으로써 피로강도가 한층 향상될 것으로 사료된다. Lawerenz⁽²⁾는 쇼트피닝을 실시한 4118 침탄치차의 피로강도가 29% 향상되었다고 보고하고 있다. 久松⁽³⁾은 SCM420H 침탄치차에 쇼트피닝을 실시한 경우 shot 되는 각도에 따라 강도에 미치는 영향이 다르기 때문에 편차가 크지만 파괴확률 10%의 피로강도에서는 48% 향상이 되었다고 보고하고 있다.

본 연구에서는 SCM415 및 쇼트피닝 침탄치차의 표면경도, 압축잔류응력, 표면거칠기, 표면이상층 등을 측정하여 쇼트피닝의 효과를 고찰한다. 그리고 전기·유압 서보 피로시험기로 일정응력진폭의 굽힘 피로시험을 실시하여, S-N곡선을 구함과 동시에 피로강도의 향상에 미치는 쇼트피닝의 효과를 밝히고, 종래 제안된 SCM치차의 피로강도 추정식⁽⁴⁾이 쇼트피닝 침탄치차에도 적용되는지를 고찰하고자 한다.

2. 시험치차의 제특성

2.1 시험 치차

본 연구에 사용한 시험치차의 주요제원을 Table 1에 나타냈다. 이뿌리면에서의 X선 응력측정이 가능하도록 모듈을 $m=5$, 잇수 $z=18$ 을 선택하고, 피로시험기의 부하 능력을 고려하여 이폭은 $b=8\text{mm}$ 를 채택하였다.

재료는 SCM415를 사용하였으며, Table 2에 SCM415의 화학 조성비의 규격값과 드릴을 사용하여 시험치차로부터 채취한 금속칩을 금속재료분석 전문연구소에 의뢰하여 측정된 실측값을 나타냈다. 치차의 가공공정과 열처리 조건을 Fig. 1에 나타냈다. 직경 110 mm의 SCM415환봉에서 치차 블랭크를 만들어 850°C에서 1시간 열처리를 한 다음 기계가공을 하고, 측면에서의 침탄방지를 하기 위하여 약 $20\mu\text{m}$ 의 동도금을 실시한 다음, 호브로 치차를 제작하였다. 유효 침탄 깊이는 AGMA⁽⁴⁾의 추천값을 사용하였다. 실제 측정해 본 결과 유효 침탄깊이는 0.85 mm로 나타났다.

시험치차에 대한 쇼트피닝 조건의 영향을 고찰할 목적으로 0.25, 0.52, $1.02\mu\text{m}$ 의 arc height⁽⁵⁾를 선택하여 쇼트피닝을 실시한 후, 이들을 각각 SP1, SP2, SP3으로 분류하였다. 본 연구에 사용한 쇼트피닝처리조건을 Table 3에 나타냈다. 쇼트피닝에 사용한 강구의 직경은 0.4, 0.8, 1.2 mm, 경도는 $720 \sim 740H_v$, shot 속도는 50 m/sec, 노출시간은 90, 135, 180 sec, coverage⁽⁵⁾는 치차의 복잡한 형상을 고려하여 300%로 실시하였다. 여기에서, coverage 300%란 almen strip 시험편에서 98%의 coverage가 얻어지는 시간의 3배의 시간동안 쇼트피닝을 실시한다는 의미이다.

그리고 침탄처리를 실시할 때 탈탄작용에 의하여 생성되는 표면 이상층은 경도가 낮으며 기계적 성질을 약화시켜 굽힘 피로강도를 다소 저하시킴으로 표면이상층을 제거하기 위하여 약 $20\mu\text{m}$ 의 화학연마와 전해연마를 실시하여 보았다.

Table 1 Dimensions of test gears

Module	m	[mm]	5
Number of teeth	z		18
Pressure angle		[deg]	20
Finish			Hobbed
Gear grade			JIS 5
Profile modification coefficient			0
Face width		[mm]	8.0 ± 0.01
Tip diameter		[mm]	$\phi 100.0 \pm 0.01$
Span gauge(3 teeth)		[mm]	38.16 ± 0.01
Material			SCM415
Heat-treatment			Carburized
Surface-treatment			Shot peened

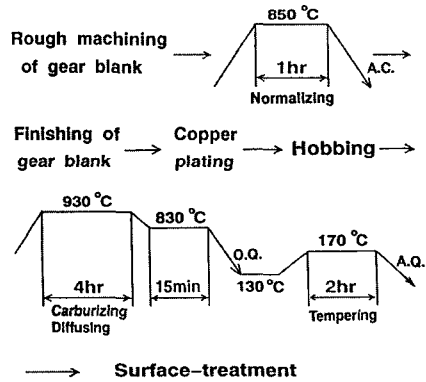


Fig. 1 Machining and heat-treatment process

Table 2 Chemical Compositions of SCM415 [wt. %]

SCM415	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Range	0.13~0.18	0.15~0.35	0.60~0.85	<0.030	<0.030	0.090~1.20	0.15~0.30
Measured	0.165	0.265	0.731	0.0147	0.0172	1.07	0.151

Table 3 Condition of shot peening treatment

Code of gears	Order of treatment	Arc height	Treatment condition
CSP1	C, SP1	0.25 mm	Coverage : 300 %, Diameter : 0.4 mm Hardness : 741 Hv, Shot speed : 50 m/s Exposure times : 90 sec
CSP2	C, SP2	0.52 mm	Coverage : 300 %, Diameter : 0.8 mm Hardness : 720 Hv, Shot speed : 50 m/s Exposure times : 135 sec
CSP3	C, SP3	1.02 mm	Coverage : 300 %, Diameter : 1.2 mm Hardness : 740 Hv, Shot speed : 50 m/s Exposure times : 180 sec

2.2 시험치차의 경도와 압축잔류응력 측정 결과 및 고찰
 다수의 시험치차 이폭 중앙을 저석커터로 절단한 후, 표면을 연마한 다음 표면으로부터 깊이 방향의 경도를 측정하였다. 측정하중은 300 gf, 유지시간을 20초로 하였다. 이뿌리 위험단면에서 측정한 경도 분포의 측정 결과를 Fig. 2에 나타냈다. Fig. 2에는 이의 절단면과 깊이 방향의 측정위치도 함께 도시하였다. 쇼트피닝처리에 의하여 표면의 경도는 침탄치차보다 약 160 Hv 높게 나타났으며 arc height의 변화에 따른 경도의 차는 크게 나타나지 않았다. 경도 측정결과 얻어진 표면경도를 H_s , 최대 경도를 H_{max} , 심부경도를 H_c 라 칭하여 Table 4에 나타냈다. 표면경도는 시험치차의 이를 약 20° 경사로 절단하여 극표면 경도를 측정하여 사용하였다.

압축잔류응력과 잔류오스테나이트 측정은 SMX-50 X선 압축잔류응력 측정장치를 사용하였다. 이뿌리 위험 단면에서의 치형방향 압축잔류응력 (σ_{Ri})이 굽힘강도에 크게 영향을 미치므로 치형방향의 압축잔류응력 (σ_{Ri})이 요구되지만 측정이 곤란하고, 측정하기 위하여는 주위의 이를 절단하여야 하며, 시험 가능한 잇수를 감소시키므로 치차 본래 상태에서 측정이 가능한 이뿌리 이바닥의 이폭 방향 압축잔류응력 (σ_{Rz})을 대응하기 위하여 양자의 상관관계를 측정한 결과, 침탄치차의 경우 $\sigma_{Ri} = \sigma_{Rz}$ ⁽⁶⁾, 쇼트피닝 침탄치차의 경우 $\sigma_{Ri} = 0.74\sigma_{Rz}$ ⁽⁶⁾로 나타났다. 따라서 이뿌리 이바닥의 이폭방향 압축잔류응력을 측정된 후 보정한 압축잔류응력값을 본 연구에서는 사용하였다. 압축 잔류응력 측정결과와 평균 압축잔류응력을 Table 4에 나타냈으며, 측정결과와 예들 Fig. 3에 나타냈다.

Table로부터 표면의 압축잔류응력은 쇼트피닝에 의하여 침탄치차보다 118~208MPa 증가함을 알았다. 쇼트

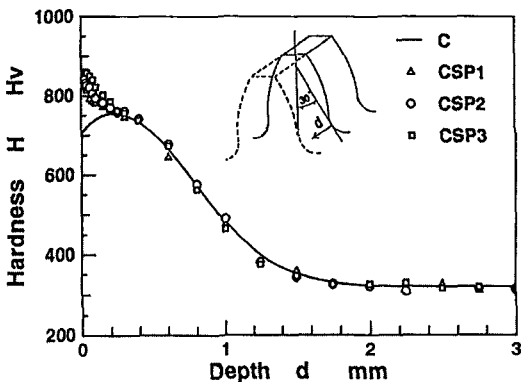


Fig. 2 Hardness distributions along the depth

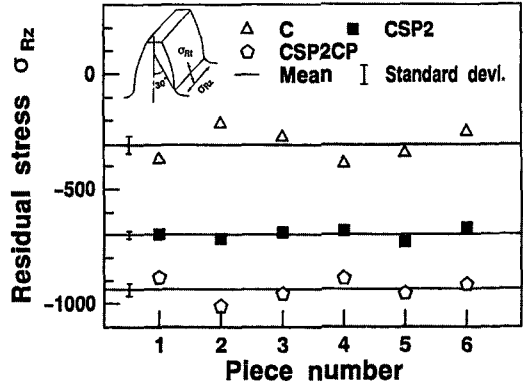


Fig. 3 Residual stress distribution of test gears

Table 4 Surface conditions and fatigue strength

Code of gears	Order of treatment	H_s (Hv)	H_{max} (Hv)	H_c (Hv)	σ_R (MPa)	γ %	R_z μm	σ_w (MPa)
C	C	540	750	320	-308	21	20.3	761
CSP1	C, SP1	765	840	323	-485	1	14.1	1070
CSP2	C, SP2	797	868	321	-516	1	13.6	1176
CSP3	C, SP3	805	873	326	-426	2	12.9	1148
CSP2CP	C, SP2, CP	785	868	324	-694	1	7.5	1318
CSP2EP	C, SP2, EP	788	870	326	-644	1	11.9	1274

피닝 침탄치차의 표면경도와 표면 압축잔류응력이 향상되는 것은 쇼트피닝을 처리함으로써 표면경도증과 압축잔류응력이 생성되기 때문이다. 본 연구의 범위에서는 SP2의 조건에서 압축잔류응력이 가장 증가하였다. 그리고 쇼트피닝 침탄치차의 표면을 연마해 가면서 표면으로부터 깊이 방향의 압축잔류응력을 측정해 본 결과 30~50 μm 에서 최대 압축잔류응력이 발생되었으며, CSP2CP의 경우 압축잔류응력이 높게 나타난 것은 표면을 연마함으로써 표면보다 높은 압축잔류응력이 이뿌리 위험 단면에 나타난 것으로 사료된다. 잔류오스테나이트는 시험치차의 임의의 1개소 이뿌리면에서 깊이 방향으로 표면을 전해연마해가면서 측정하여 Fig. 4에 나타냈다. 그리고 각 계열 시험치차 표면의 잔류오스테나이트를 측정하여 Table 4에 나타냈다. Fig. 4에서 침탄치차의 경우에는 표면에서 약 21%의 잔류오스테나이트가 나타났지만 쇼트피닝을 실시함으로써 arc height와 무관하게 거의 1%로 감소하는 것을 알 수 있었다.

시험치차의 거칠기는 이뿌리면의 위험단면 이폭을 6등분하여 좌측, 중심부, 우측의 3개소의 치형방향, 이끝방향으로 측정하였다. 측정기준길이는 2.5 cm, 측정속도는 0.3 m/sec로 하였다. 표면처리 시험치차 중 측정 결과의

예를 Fig. 5에 나타냈다. 그리고 Table 4에 각 계열치차의 10점평균거칠기의 평균값을 나타냈다. 쇼트피닝에 의하여 10점평균거칠기가 31~36% 향상되었다.

그리고 시험치차의 이를 절단하여 연마한 후 3% 소산에탄올로 부식시켜 주사전자현미경(SEM)으로 금속조직을 관찰해 보았다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 C, CSP계열치차의 이뿌리 위험 단면 부근에서는 두께 13~16 μm 의

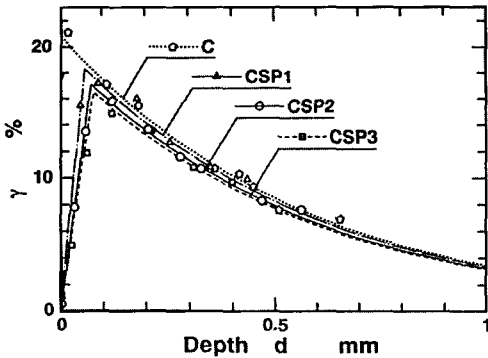


Fig. 4 Retained austenite distribution of carburized and shot peened gears

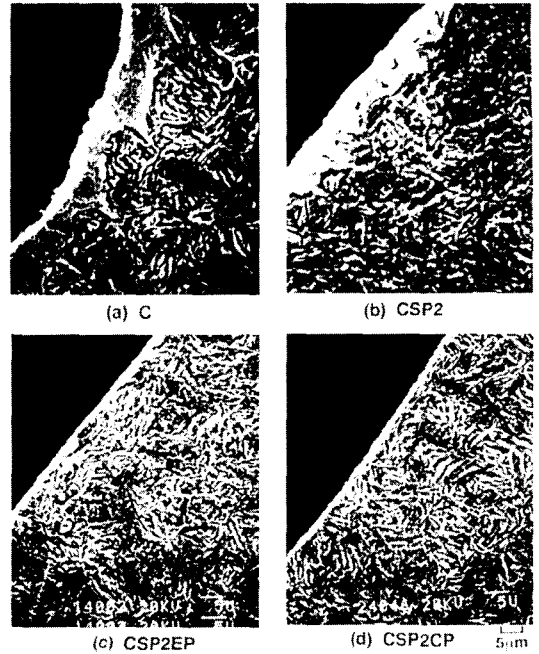


Fig. 6 Metallographic observation by SEM

표면이상층이 나타났으나, 약 20 μm 이상 화학연마 또는 전해연마를 실시함으로써 거의 제거되었다.

3. 피로 시험결과 및 고찰

3.1 피로시험기

피로실험에는 전기·유압서보식 피로 시험기를 사용하였다. 굽힘피로 시험 시스템을 Fig. 7에 나타냈다. 정현파 발생기에서 만들어진 신호는 신호레벨 조정기를 거쳐 서보앰프에서 증폭되어 서보밸브를 구동시킨다. 시험치차에 가하여진 하중은 스트레인 게이지를 부착시킨 로드셀에 의하여 계측되고 설정값에 대하여 서보제어된다. 부하에 의한 이끄는 손상을 방지하기 위하여, 이 끝으로부터 반경방향에 0.8 mm 내측의 점을 하중점으로 하였다.

시험에는 일정진폭 반복하중을 이용하였고, 그 최대하중의 변동은 1%이내가 되도록 조정하였다. 또, 치차와 로드셀의 분리를 방지하기 위하여 반복하중의 최소값으로서 약 8.8 kgf를 주었다. 또한 피로시험에서 하중의 표시는 이뿌리 최대실용력 $S(\text{MPa})$ 를 이용하였다. 법선하중 $P_n(\text{kgf})$ 과 이뿌리 최대 실용력의 관계는 2차원 유한요소해석결과를 이용하여 나타냈다. 본 시험의 경우는 다음

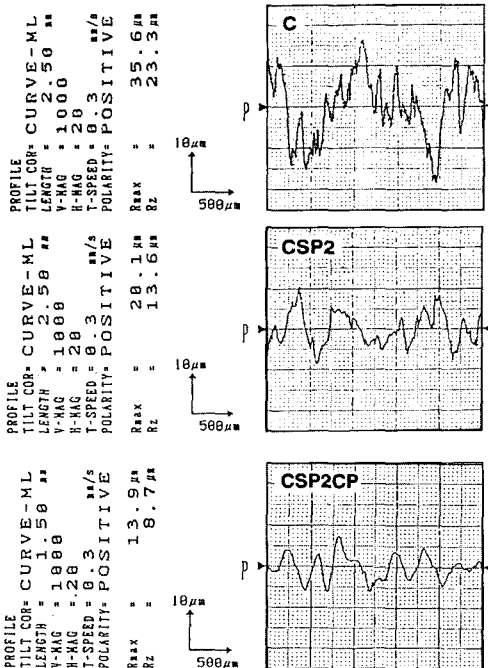


Fig. 5 Roughness of test gears

식⁽⁷⁾과 같다.

$$S = 3.86 \frac{P_n}{bm} = 9.65 \times 10^{-2} P_n \quad (1)$$

여기에서

b = 이 폭(mm), m = 모듈(mm)을 나타낸다.

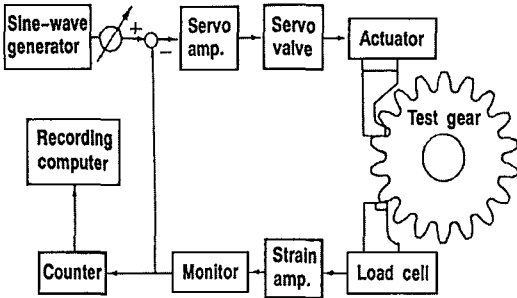


Fig. 7 System of bending fatigue test

또한, ISO 치차강도 계산식⁽⁸⁾에서는 열처리치차의 수명 계수가 $N \geq 3 \times 10^6$ 에서 1.0 이다는 것을 고려하여 본 시험의 비파괴 반복하중수는 $N = 3 \times 10^6$ 으로 정하였다. 본 연구 시험치차의 기초가 되는 침탄치차 C에 대하여 9단계의 응력레벨로 나누어 피로수명 시험을 하였다. 결과를 Fig. 8에 나타냈다. 총 시험수는 107개를 사용하였다. Fig. 8로부터 파괴확률 50%의 피로강도 σ_u 는 761MPa, 표준편차는 63MPa 얻어졌으며, 평균 S-N곡선을 다음 식으로 나타냈다.

$$S = 1.55 \times 10^7 (N + 5.01 \times 10^3)^{-1.06} + 761$$

또는

$$N = \left(\frac{1.55 \times 10^7}{S - 761} \right)^{0.94} - 5.01 \times 10^3 \quad (S \geq 761) \quad (2)$$

Fig. 8에는 이 평균 S-N곡선과 강도분포로부터 구한 파괴확률 $P=10\%$ 와 90% 의 S-N곡선도 함께 나타냈다. C계열 이외의 각 계열 치차에 대하여는 일본기계학회 표준의 14점법⁽⁹⁾을 기초로 굽힘 피로강도 실험결과를 정리하여 S-N곡선의 경사부와 수평부를 구하였다. 실험결과의 예를 Fig. 9에 나타냈으며, 모든 피로 시험결과를 정리하여 Fig. 10에 나타냈다. Fig. 9, 10에서 수평부는 Table 5에 나타낸 바와 같이 스테이케이스법(Little 방법)⁽¹⁰⁾을 이용하여 피로강도를 추정하였다. 피로강도는 $\sigma_0 = S_0 + \Delta d$ 로 산출한다.

여기에서 S_0 는 실험을 시작할 때의 응력레벨이며, d 는 응력레벨의 차를 나타내고 있다. 계수 Δ 는 피로시험결과, 응력레벨의 차(d)와 피로강도의 표준편차(σ)의 비로써 계산되는데 스테이케이스 표^(6,10)를 사용하였다.

피로시험에서 얻은 각 계열 시험치차의 피로강도는 Table 4에 나타냈다. 쇼트피닝 침탄치차의 피로강도는 쇼트피닝에 의하여 침탄치차 피로강도보다 40~54% 향상되었다. 이것은 쇼트피닝에 의하여 표면의 압축잔류응력과 경도가 향상되고 표면 상태가 개선된 결과라고 생각된다.

본 실험결과 arc height 0.52 mm의 경우 피로강도가 가장 향상됨을 알 수 있었다. 표면이상층을 제거하기 위하여 쇼트피닝후에 화학연마와 전해연마를 실시한 CSP2CP와 CSP2EP 계열의 피로강도는 CSP 계열 보다 7~15% 향상되었다.

Table 5 Estimations of fatigue strength by Stair case method

Code of gears	S_0 MPa d MPa	Experimental results	Fatigue strength σ_u (MPa)
CSP1	$S_0 = 1100$	—X—X—X—	$\Delta = -0.70$
	$d = 60$	—○—○—○—	$\sigma_u = 1058$
CSP2	$S_0 = 1220$	—X—X—X—	$\Delta = -0.31$
	$d = 60$	—○—○—○—	$\sigma_u = 1201$
CSP3	$S_0 = 1160$	—X—X—X—	$\Delta = -0.31$
	$d = 60$	—○—○—○—	$\sigma_u = 1141$

Note) X : Break before $N = 3 \times 10^6$,
O : Not break at $N = 3 \times 10^6$

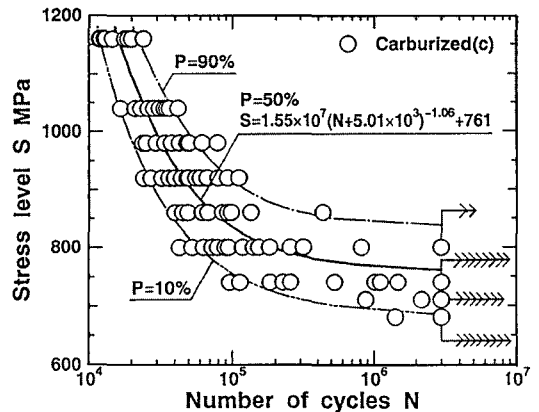


Fig. 8 Fatigue lives and S-N curves for carburized gears

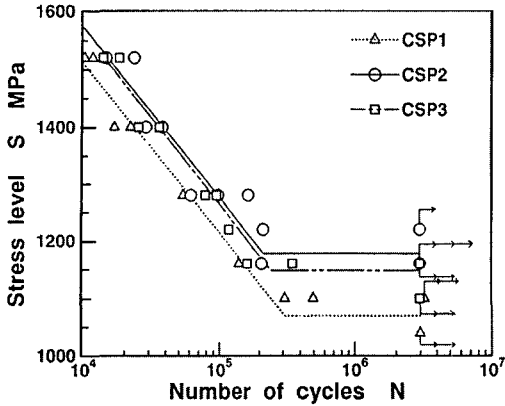


Fig. 9 S-N curves for shot peened gears

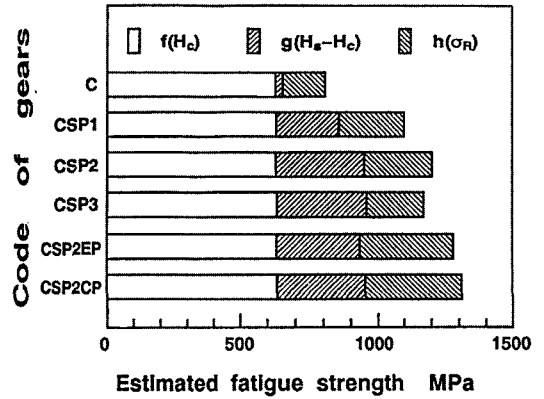


Fig. 11 Contributions of hardened layer and residual stress to fatigue strength

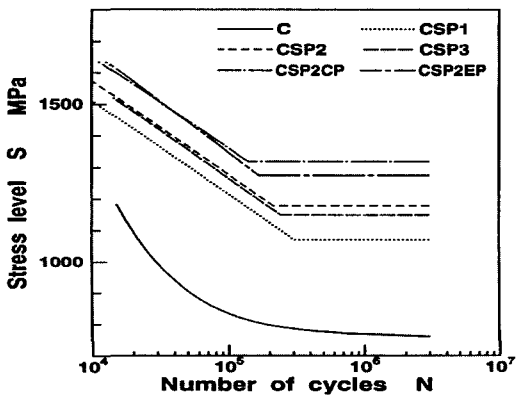


Fig. 10 Mean S-N curves of all test gears

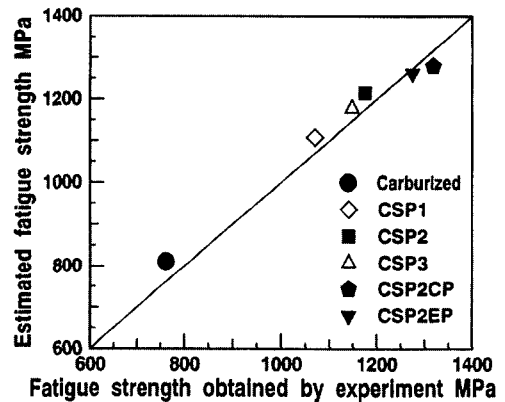


Fig. 12 Comparison between the fatigue strength estimated and the experimental results

이것은 연마함으로써 이뿌리 위험 단면 표면에 압축잔류 응력이 크게 나타남과 동시에 표면상태가 개선되었기 때문으로 사료된다.

따라서 본 실험의 범위에서는 arc height 0.52 mm의 쇼트피닝 후에 표면을 20~30 μm 연마하는 방법이 강도 향상에 최대의 효과로 나타났다.

4. 피로강도 추정식에 의한 피로강도 추정

피로강도 σ_u [MPa]는 심부경도 H_C [MPa], 표면경도 H_S [MPa], 표면 압축잔류응력 σ_R [MPa]의 관계가 있는 것으로 가정하여 다음과 같이 나타냈다^(1,6).

$$\begin{aligned} \sigma_u &= \sigma_{uc} + \sigma_{usc} + \sigma_{uR} \\ &= f(H_C) + g(H_S - H_C) + h(\sigma_R) \\ &= (257 + 1.17H_C) \\ &\quad + 3.1\exp[0.0097(H_S - H_C)] - 0.5\sigma_R \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서, σ_{uc} [MPa]는 침탄처리를 하지 않은 치차의 피로강도를 의미하며, σ_{usc} [MPa]와 σ_{uR} [MPa]은 표면 경화층과 압축잔류응력에서 야기된 강도의 증가를 의미한다.

피로강도에 미치는 쇼트피닝의 영향을 고찰하기 위하여 σ_{usc} 와 σ_{uR} 을 구하여 Fig. 11에 나타냈다. 쇼트피닝에 의한 피로강도의 증가 메카니즘을 Fig. 11에 나타난 바

와 같이 σ_{usc} 와 σ_{uR} 의 증가로 설명할 수 있다. σ_{usc} 와 σ_{uR} 의 증가는 쇼트피닝을 처리함으로써 표면경화층과 압축잔류응력이 생성되어 표면의 경도와 압축잔류응력이 향상된 효과라고 볼 수 있다. 그리고 위의 추정식에 Table 4에 나타난 경도와 압축잔류응력의 측정결과를 대입하여 얻은 피로강도 추정값과 실험결과의 비교를 Fig. 12에 나타냈다.

추정값은 실험값에 근사한 값으로 나타났으며, 오차는 3% 이내로 나타났다. 따라서 위의 식은 쇼트피닝을 실시한 침탄치차에 대하여 유효하다는 것을 알았다

5. 결론

본 연구에서는 SCM415 및 쇼트피닝 침탄치차의 표면경도, 압축잔류응력, 표면거칠기, 표면이상층을 측정하여 쇼트피닝의 효과를 고찰하였다. 또한, 굽힘피로시험을 하여 굽힘 피로강도에 미치는 쇼트피닝의 영향을 고찰하고, 종래 제안된 피로강도 추정식에 본 연구에 사용한 시험치차를 적용시켜 보았다.

본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 쇼트피닝에 의하여 표면경도는 42~49%, 압축잔류응력은 33~61%, 표면조도는 31~36% 향상되었다.
2. 쇼트피닝에 의하여 피로강도는 40~52% 향상되었으며 본 연구의 범위에서는 arc height 0.52 mm의 경우 피로강도가 가장 높게 나타났다. 또한 쇼트피닝후 표면을 약 20~30 μ m 화학연마 또는 전해연마를 실시함으로써 가장 효과적이라는 것을 알았다.
3. SCM 침탄치차에서 얻어진 피로강도 추정식을 본 시험치차에 대하여도 적용할 수 있으며, 추정오차는 6% 이내로 나타났다.
4. 피로강도에는 쇼트피닝에 의한 표면경도와 압축잔류응력이 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. Inoue, K., Kato, M. and Yamanaka, M., "Fatigue Strength and Crack Growth of Carburized and Shot Peened Gears", ASME, PTG-89, Vol. 2, pp. 663-668, 1989.
2. Lawerenz M. D., SAE Paper, 841096, pp. 1156-1262, 1985.
3. 久松, "浸炭齒車のショットピーニングによる強度向上", 自動車技術, Vol. 41-7, pp. 722-728, 1987.
4. AGMA, Practice for Carburized Aerospace Gearing, 246. OA, pp. 11~14, 1983.
5. SAE Standard, "Test Strip, Holder and Gauge for Shot Peening", SAE J443.
6. 柳晟基, 井上, 加藤, 浸炭齒車の曲げ疲労強度に及ぼす表面処理の影響, 日本機械學會論文集, 60-572(C), 1391-1396, 1994.
7. Tobe, T., Kato, M., and Inoue, K., "True Stress and Stiffness of Spur Gear Teeth", Pro. of the 5th World Congress on Theory of Mechanics and Mechanisms, Vol., 2, pp. 29-42, 1972.
8. ISO/DP, "Principles for the Calculation of Tooth Strength of Spur and Helical Gears, 6336/III", pp.78-105, 1980.
9. 日本機械學會編, 日本機械學會規準 S002 統計的疲労試験方法, pp. 7-20, 1981.
10. Little, R. E. "Probabilistic Aspects of Fatigue", ASME Spec. Tech. Pull, Vol. 5, No. 11, pp. 54-56, 1972.