

SCM415 침탄치차의 굽힘피로강도평가에 관한 연구

류 성 기*

A Study on Evaluation of Bending Fatigue Strength in
SCM415 Carburized Spur Gear

S. K. Lyu*

Key words : Carburized Gears(침탄치차), Fatigue Strength(피로강도), Surface Condition Factor (표면상태계수), Strength Evaluation Experimental Formula(강도평가실험식)

Abstract

This paper deals with evaluation of bending fatigue strength in SCM415 carburized spur gears. The constant stress amplitude fatigue test is performed by using an electrohydraulic servo-controlled pulsating tester. The S-N curves are obtained and the enhancement of fatigue strength due to carburized treatment is clarified.

In this study, the improvement of fatigue strength is assumed to be caused by an increase of both hardness and residual stress, and an experimental formula has been proposed for the estimation of bending fatigue strength of carburized gears. The effect of surface conditions on the fatigue strength is evaluated quantitatively, and it is close to the relative surface condition factor used in the ISO strength rating formula.

1. 서 론

공업기술의 근간이 되고 있는 동력전달장치에서 가장 중요한 역할을 하고 있는 치차는 근대 공업의 발달과 함께 출력향상을 위한 동력전달의 향상과节省에너지의 관점으로부터 경량화가 요구되

고 있다. 이들의 요구에 따라 고경도의 신뢰성이 높은 치차설계 및 새로운 강도평가법이 필요하다.

특히, 기계요소중 고부하, 고속의 동력전달장치에 침탄처리 등의 표면처리를 실시하는 치차가 많이 사용되고 있는데 동력전달용 치차에 침탄처리를 실시하면 표면경화층이 형성되고, 압축잔류응

* 경상대학교 기계설계학과, 항공기부품연구센터(원고접수일 : 98년 3월)

력이 발생된다. 표면경화층과 압축잔류응력은 치차의 굽힘피로강도 향상에 유효하며, 이에 관한 연구가 다소 연구되고 있다. Aida¹⁾, Retting²⁾은 여러 종류의 재료에 침탄처리를 실시한 치차를 사용하여 피로강도를 구해 경화층과 잔류응력의 영향을 고찰하였다.

Nishikou³⁾는 침탄치차와 고주파 침탄치차에서 피로강도를 구하여 피로강도추정식을 제안하였다. 그러나 이들은 소수의 실험결과로부터 추정하여 신뢰성이 높지 않았다.

따라서 본 연구에서는 신뢰성이 높은 치차설계를 확립하기 위하여, 여러 종류의 침탄처리조건으로 열처리를 실시한 SCM415 침탄치차 시험편을 대상으로 피로강도에 미치는 잔류응력의 영향을 정량적으로 파악하기 위하여 피로시험전에 X선측정법을 이용하여 본 연구에 사용한 전시험치차의 잔류응력을 측정하였다.

그리고 일정응력진폭 굽힘피로시험을 실시하여 S-N곡선을 구하고, 침탄처리를 실시하지 않는 치차와 여러 종류의 침탄처리를 실시한 치차의 실험결과를 고찰하여 피로강도에 미치는 침탄깊이, 표면경도, 심부경도, 압축잔류응력의 영향을 밝혀 신뢰성이 높은 피로강도추정식을 제안하고자 한다.

2. 치차의 침탄처리와 표면성상

2. 1. 시험치차의 제작 및 침탄처리조건

본 연구에 사용한 시험치차의 주요제원 및 SCM415시험치차의 화학조성비를 Table 1, 2에 나타냈다. 이뿌리면에서 X선 응력측정이 가능하도록 모듈을 $m=5$, 잇수 $z=18$ 을 선택하였고, 피로시험기의 부하능력을 고려하여 이폭 $b=8\text{mm}$ 를 채택하였다.

치차의 가공공정과 열처리조건을 Fig. 1에 나타냈다. 직경 110mm의 SCM415환봉에서 치차 브랭크를 만들어 850℃에서 1시간 열처리를 한 다음 기계가공을 하고, 측면으로부터 침탄을 방지하기 위하여 약 20 μm 의 동도금을 실시한 후, 호브로 치차를 제작하였다.

시험치차의 유효침탄깊이는 AGMA⁴⁾ 표준값을

사용하여 침탄처리를 하였으며, 침탄온도와 시간을 각각 T_1 , t_1 , 확산시간 t_2 그리고 뜨임온도를 T_2 라하고 Table 3에 나타냈다.

본 연구에서는 시험치차의 유효침탄깊이(550Hv에서의 깊이)의 영향을 고찰하기 위하여 $d_{eff}=0.6\text{mm}, 0.9\text{mm}, 1.3\text{mm}$ 의 치차를 준비하였다. 이들의 치차계열에 대하여 6A, 9A, 13A로 분류하였다. 실험에는 이들 외에 유효침탄깊이가 9A와 같은 9B, 9C계열의 치차, 피로강도에 미치는 경도와 잔류응력의 영향을 고찰할 목적으로 침탄처리를 실시하지 않은 0A계열치차와 불림처리를 실시한 0B계열의 치차를 준비하였다.

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 coef.		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

Table 2 Chemical Compositions of SCM415[wt.%]

SCM415	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Specification	0.13-0.18	0.15-0.35	0.60-0.85	<0.03	<0.03	0.09-1.20	0.15-0.30
Measured	0.165	0.265	0.731	0.015	0.017	1.07	0.151

Table 3 Heat-treatment condition of gears

Code	d_{eff} [mm]	T_1 [°C]	T_2 [°C]	t_1 [hr:min]	t_2 [min]	Note
9A	0.9	930	170	3:40	20	
9B	0.9	930	170	3:40	20	another lot from 9A
9C	0.9	930	150	3:40	20	
6A	0.6	900	170	2:20	20	
13A	1.3	930	170	8:00	30	
0A	-	-	-	-	-	without carb. others are same as 9B
0B	-	-	-	-	-	normalizing

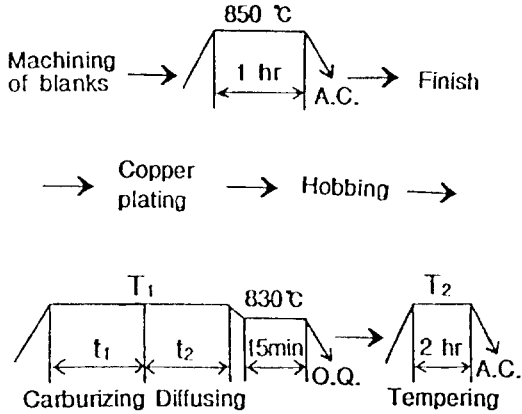


Fig. 1 Machining & heat-treatment process

2. 2. 잔류응력측정

잔류응력측정은 X선 잔류응력 측정장치 SMX-50을 사용하였다. 잔류응력측정은 이뿌리 위험 단면에서의 치형방향 압축잔류응력(σ_{Rt})이 굽힘강도에 크게 영향을 미치므로 치형방향의 압축잔류응력(σ_{Rt})이 요구되지만 측정이 곤란하고, 잔류응력을 측정하기 위하여 주위의 이를 절단하여야 하므로 시험 가능한 잇수를 감소시킨다. 따라서 본 연구에서는 시험치차의 치형방향 압축잔류응력(σ_{Rt})를 치차 본래상태에서 측정이 가능한 이뿌리 이바닥의 이폭방향 압축잔류응력(σ_{Rz})으로 대응하기 위하여 본 연구에 사용한 각계열 시험치차를 sample로 하여 치형방향 압축잔류응력(σ_{Rt})과 이바닥의 이폭방향 압축잔류응력(σ_{Rz})을 측정하여 그 결과를 Fig. 2에 나타냈다. Fig. 2에는 Yanagawa⁵⁾의 측정값도 함께 나타냈는데 근사적으로 $\sigma_{Rt} = \sigma_{Rz}$ 관계가 있음을 알았다. 따라서 본 연구에서는 σ_{Rz} 측정값을 잔류응력 σ_R 로 사용하기로 하였다.

9A계열치차의 압축잔류응력 측정결과와 평균 압축잔류응력을 Table 4에 나타냈으며, 잔류응력 분포를 Fig. 3에 나타냈다. Fig. 3에 나타낸 측정점은 실제로 피로시험에 제공한 이의 잔류응력 측정값들이다. 이들의 평균값은 약 -240MPa로 나타났다. 다른 계열의 잔류응력 측정결과도 Table 4에 나타냈다.

Table 4 Surface condition & fatigue strength

No	Code	d_{er} mm	H_s Hv	H_m Hv	H_c Hv	σ_R (MPa)	σ_u (MPa)
1	9A	0.89	680	745	330	-240	871
		0.06	33	15	11	80	63
2	9B	0.90	698	740	335	-100	800
		0.04	28	6	10	30	62
3	9C	0.90	708	750	325	-130	800
		0.03	18	10	6	40	66
4	6A	0.60	667	720	350	-150	825
		0.03	32	17	9	30	60
5	13A	1.17	671	730	350	-160	785
		0.05	21	8	13	40	62
6	0A	-	325	325	300	-80	650
		-	41	41	6	20	70
7	0B	-	195	195	195	0	465
		-	4	4	4	-	73

Upper : mean values, Lower : standard deviations.
Symbol '-' means the value is not evaluated.

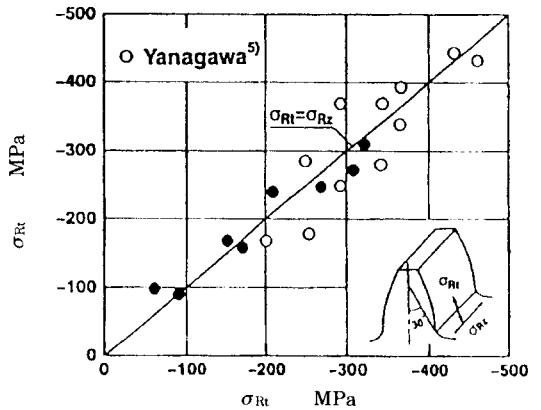


Fig. 2 Relation between fillet residual stress σ_{Rt} and longitudinal residual stress σ_{Rz} of carburized gears

2. 3. 시험치차의 경도

다수의 시험치차 이폭 중앙을 저속커터로 절단한 후, 표면을 연마한 다음 이뿌리 위험단면의 표면으로부터 깊이 방향의 경도를 측정하였다. 측정하중은 300gf, 유지시간을 20초로 하였다. 이뿌리 위험단면에서 측정한 경도분포의 측정결과 예를 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 표면으로부터 0.2~0.25mm의 깊이에서 최대경도값(H_m)은 745Hv로 나타났으며, 심부경도값(H_c)은

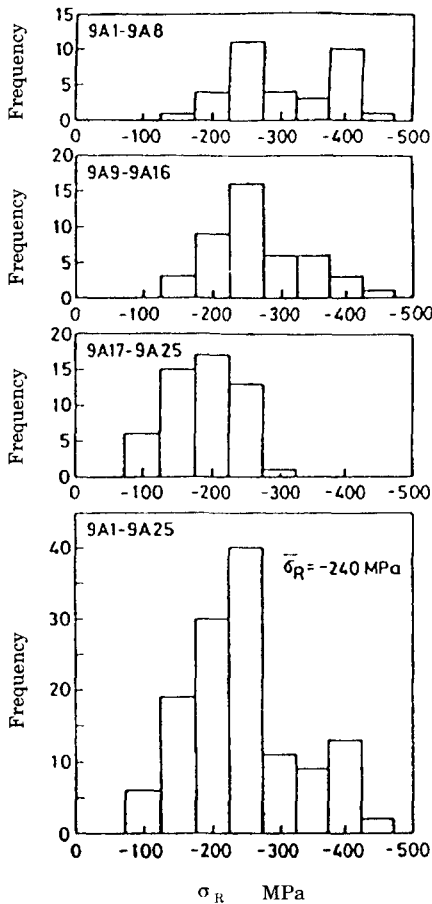


Fig. 3 Residual stress distributions of 9A

330Hv로 나타났다. 1장의 치차내에서 각 이의 경도를 측정해본 결과 다소 차이는 있지만 이 값은 측정오차로 사료되어 각계열 치차의 이를 다수 절단하여 이뿌리 위험단면에서 측정한 경도측정값을 Table 4에 나타냈다.

표면경도(H_s)는 경도분포곡선을 구하여 0점까지 외삽하여 구한 값을 사용하였다. Fig. 4에 나타낸 9A계열치차와 본 연구에 사용한 다른 계열 치차에서 측정된 경도의 평균값 및 표준편차를 Table 4에 나타냈다.

3. 피로시험결과 및 고찰

피로실험에는 전기·유압서보식 피로시험기를

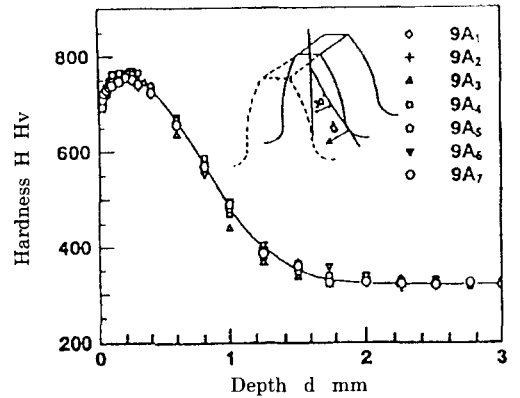


Fig. 4 Hardness distribution along the depth

사용하였다. 굽힘 피로시험 시스템을 Fig. 5에 나타냈다. 정현파 발생기에서 만들어진 신호는 신호 레벨 조정기를 거쳐 서보앰프에서 증폭되어 서보 밸브를 구동시킨다. 시험치차에 가해진 하중은 스트레인 게이지를 부착시킨 로드셀에 의하여 측정되고 설정값에 대하여 서보제어된다. 부하에 의한 이끝의 손상을 방지하기 위하여, 이 끝으로부터 반경방향 0.84mm 내측의 점을 하중점으로 하였다. 시험에는 일정진폭 반복하중을 이용하였고, 그 최대하중의 변동은 1%이내가 되도록 조정하였다.

그리고 치차와 로드셀의 분리를 방지하기 위하여 반복하중의 최소값으로서 약 0.49 N을 주었다. 또한 피로시험에서 하중의 표시는 이뿌리 최대실응력 S (MPa)를 이용하였다. 범선하중 P_n (N)과 이뿌리 최대 실응력의 관계는 2차원 유한요소해석 결과를 이용하여 나타냈다. 본 시험의 경우는 다음 식⁶⁾과 같다.

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

여기에서 b = 이폭(4mm), m = 모듈(4mm)을 나타낸다. 또한, ISO 치차강도 계산식⁷⁾에서는 열처리치차의 수명계수가 $N \geq 3 \times 10^6$ 에서 1.0을 추천함으로 본 시험의 비파괴 반복하중수는 $N = 3 \times 10^6$ 으로 정하였다. 본 연구에서 시험치차의 기초가 되는 침탄치차 9A치차에 대하여 9단계의 응력레벨로 나누어 피로수명 시험을 하였다. 피로시험결과를 Fig. 6에 나타냈다. 총 시험수는 107개를 사용하였

다. Fig. 6으로부터 파괴확률 50%의 피로강도 u 는 871 MPa, 표준편차는 63 MPa이 얻어졌으며, 평균 S-N곡선을 다음 식으로 나타냈다.

$$S = 1.55 \times 10^7 (N + 5.01 \times 10^3)^{-1.06} + 871$$

$$N = \left(\frac{1.55 \times 10^7}{S - 871} \right)^{0.94} - 5.01 \times 10^3 \quad (S \geq 871) \quad (2)$$

Fig. 6에는 이 평균 S-N곡선과 강도분포로부터 구한 파괴확률 $P=10\%$ 와 90% 의 S-N곡선도 함께 나타냈다. 9A계열 이외의 각 계열 치차에 대하여는 14점S-N시험법⁸⁾의 스테아케이스법(Little 방법)⁹⁾을 기초로 굽힘 피로강도 실험을 하여 피로강도를 추정하였다. 스테아케이스법의 응력레벨간격은 본 연구에서 구한 표준편차를 참고하여 60MPa을 취하였다. 스테아케이스법의 피로강도 추정은 $\sigma_0 = S_0 + \Delta d$ 로 산출하였다.

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 스테아케이스 표⁹⁾를 사용하였다.

피로시험을 실시한 각계열의 평균S-N곡선을 Fig. 7에 나타냈다. 9A계열이외의 침탄치차의 피로강도는 약 800MPa로 나타났으며, 본 실험에서는 침탄깊이의 영향은 크게 나타나지 않았다. 그리고 0A계열의 피로강도는 침탄치차보다 150~200MPa 낮게 나타났다. 0B계열의 피로강도는 0A계열보다 약200MPa 낮게 나타났다. 피로시험에서 얻은 각 계열 시험치차의 피로강도를 Table 4에 나타냈다.

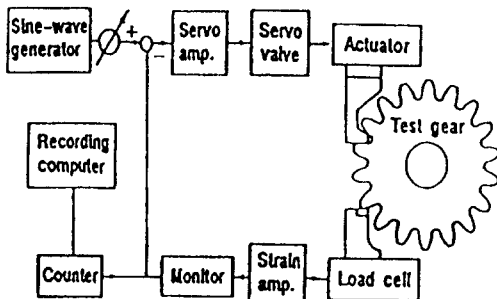


Fig. 5 System of bending fatigue test

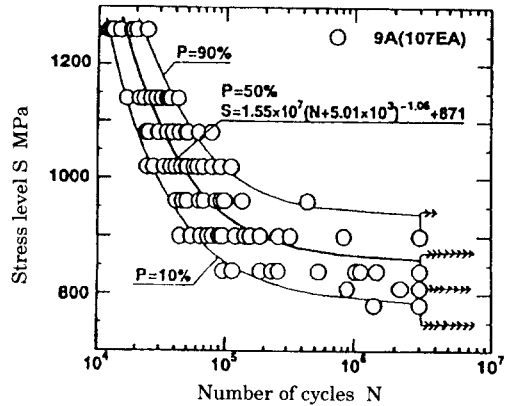


Fig. 6 Fatigue lives and S-N curves for 9A

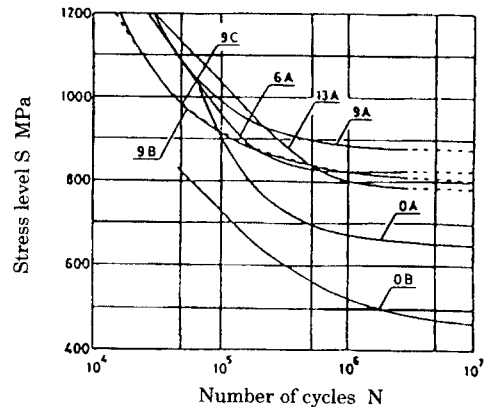


Fig. 7 Mean S-N curves of all test gears

4. 굽힘강도 추정을 위한 강도평가추정식

피로시험에서 얻은 피로강도를 고찰해본 결과 피로강도 σ_u [MPa]는 심부경도 H_c [MPa], 표면경도 H_s [MPa], 표면잔류응력 σ_R [MPa]의 관계가 있는 것으로 고찰되어 다음과 같이 나타냈다.

$$\sigma_u = \sigma_{uc} + \sigma_{usc} + \sigma_{uR}$$

$$= f(H_c) + g(H_s - H_c) + h(\sigma_R) \quad (3)$$

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

9A 계열치차의 잔류응력은 Fig. 3에서 알 수 있듯이 상당히 넓은 범위에 분포하고 있었다. 따라

서 약 100MPa 간격으로 나눈 A, B, C, D그룹의 피로강도와 시험치차의 수를 Fig. 8에 나타냈다. 같은 계열의 치차이므로 잔류응력 이외의 다른 성질들을 같다고 가정하면, 피로강도의 향상과 잔류응력의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{uR} = -0.5\sigma_R \quad (4)$$

또한, 심부경도와 피로강도의 관계를 Fig. 9에 나타냈다. Fig. 9로부터 심부경도의 영향은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{uc} = 1.17 H_c + 257 \quad (5)$$

침탄치차의 피로강도에서 σ_{uR} 과 σ_{uc} 를 제외한 값과 표면경화층의 영향을 Fig. 10에 나타냈다. Fig. 10에는 shot peening치차의 데이터와 SNC815 침탄치차의 데이터¹⁰⁾도 포함하고 있다. Fig. 10으로부터 σ_{usc} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{usc} = 3.1 \exp[0.0097 (H_s - H_c)] \quad (6)$$

따라서, 식(4)~(6)를 식(3)에 대입함으로써 피로강도의 추정식(7)은 다음과 같다.

$$\sigma_u = 1.17 H_c + 257 + 3.1 \exp[0.0097(H_s - H_c)] - 0.5 \sigma_R \quad (7)$$

식(5)에 의하여 추정한 피로강도와 실험에서 얻은 피로강도의 비교를 Fig. 11에 나타냈다. Fig. 11에서 1, 2, 3 ... 7은 Table 4에서 시험편 No를 의미한다. 추정 오차는 약5%이내로 나타났다.

또한, 종래 본인이 구한 표면처리 치차의 피로 시험 결과¹⁰⁾와 식(7)에 의하여 추정한 피로강도의 비교를 Fig. 12에 나타냈는데 추정 오차는 약 2~6%로 나타났다. Fig. 12를 자세히 고찰하여 보면 표면을 연마한 치차의 피로강도는 추정값보다 다소 높게 나타났으며, 연마하지 않은 시험치차는 추정값보다 다소 낮게 나타났다. Fig. 12에 나타낸 시험치차 기호중 C는 침탄처리, SP는 쇼트피닝, CP는 화학연마, EP는 전해연마를 의미하며 연마량은 10, 20, 30 μ m로 각각 1, 2, 3으로 나타났다.

이것은 피로강도에 표면상태의 영향을 고려하지 않았기 때문이다. 각 계열 시험치차의 표면이

상층, 표면거칠기 등의 표면상태는 같지 않으며 경도와 잔류응력도 다르므로 실험결과와 추정값의 오차는 표면상태의 영향으로 나타낼 수 있다.

실험에 의하여 얻어진 피로강도와 추정값의 비를 표면상태계수라 칭하고, 본 연구에서는 $Y_{R\delta}$ 로 나타냈다. 각 계열 시험치차의 표면상태계수를 계산하여 Fig. 13에 나타냈다. 이 값들은 2그룹으로 나누어지며, 각각 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Y_{R\delta 1} &= 1.40 \times 0.29 R_z^{0.13} \\ Y_{R\delta 2} &= 1.22 \times 0.12 R_z^{0.27} \end{aligned} \quad (8)$$

여기에서 $Y_{R\delta 1}$, $Y_{R\delta 2}$ 는 각각 연마를 한 시험치차와 연마를 하지 않은 시험치차의 표면상태계수를 나타낸다.

Fig. 13에서 ISO의 상대표면상태계수¹⁰⁾ Y_{RrelT} 와 비교해 보면 10점평균거칠기에 대한 $Y_{R\delta}$ 의 값과 Y_{RrelT} 의 값이 근사하다는 것을 알 수 있다. 만약 Fig. 13에서 연마하지 않은 시험치차의 값을 표면이상층(SEM으로 관찰한 연약한 탈탄층)의 값만큼 이동시키면 연마한 치차의 선에 일치한다.

따라서, 표면거칠기와 이상층의 영향을 물리적인 의미를 포함하여 앞으로 검토하지 않으면 안되지만 표면상태의 영향을 고찰하는 평가법에서는 새로운 지표가 될 것으로 사료된다.

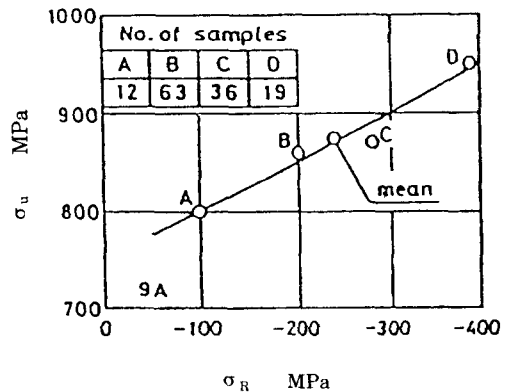


Fig. 8 Effect of residual stress on σ_u

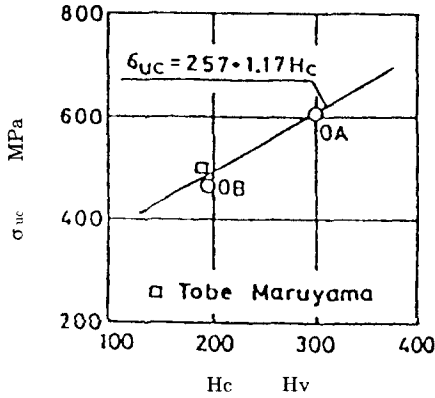


Fig. 9 Effect of core hardness on σ_{uc}

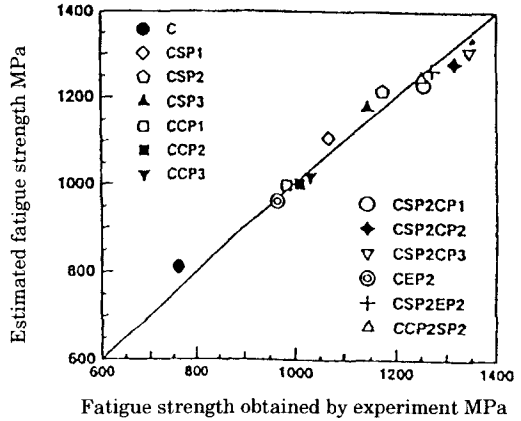


Fig. 12 Estimation of fatigue strength in surface-treatment gear

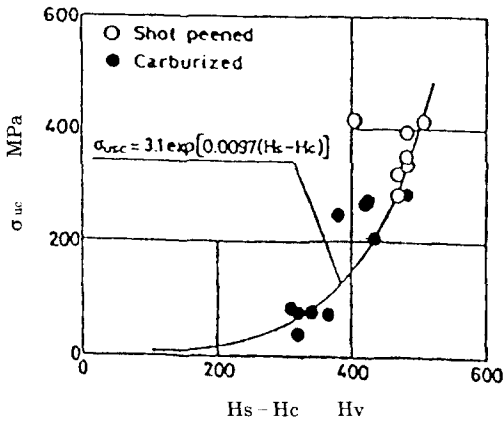


Fig. 10 Effect of hardness layer on σ_{uc}

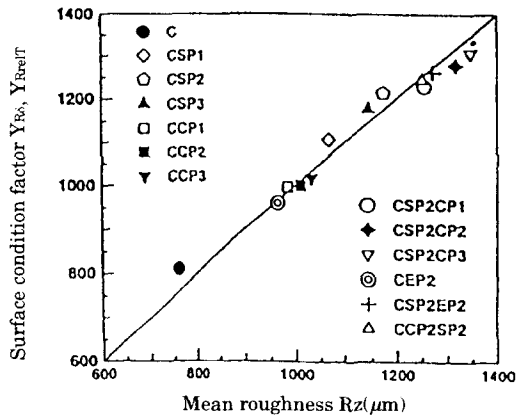


Fig. 13 Surface condition factor

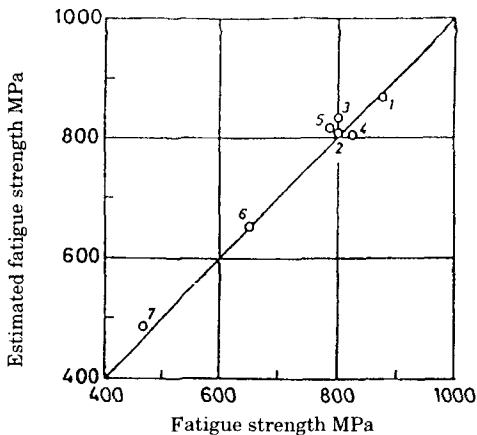


Fig. 11 Comparison of estimated fatigue strength with experimental results

5. 결 론

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 유효칩탄깊이가 9mm인 SCM415 칩탄치차의 피로강도가 800~871MPa로 나타났다.
2. 여러 종류의 칩탄처리를 실시한 치차의 피로 실험결과를 고찰하여 피로강도에 미치는 표면경도, 심부경도, 압축잔류응력의 영향을 밝혀 신뢰성이 높은 피로강도평가 추정식(7)을 제안하였다.
3. 피로강도추정식을 기초로 표면상태의 영향을 고찰하여, 표면 상태계수(식(8))를 구하였다. 이 값은 ISO치차강도계산식의 상대표면상태계수와 근사한 값으로 나타났다.

후 기

본 연구는 경상대학교 항공기부품연구센터, 금영정공(주)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Aida, T., Oda, S., Kusano, K. and Ito, Y., Bender, Fatigue Strength of Gears, Trans. JSME(in japanese), Vol.26, Vol.33, pp. 1314-1320, 1967.
- 2) Retting, H., Einsatzgehartete Zahnrad, VDI-Z, Vol. 111, pp. 274-284, 1969.
- 3) Nishioka, K., Nishino, A., Hirakawa, K. and Komatsu, H., Effect of Residual Stress on Bending Fatigue Strength of Case Hardened Gears, Report of Sumitomo Metals Industry Ltd. (in japanese), Vol. 26, pp. 448-457, 1974.
- 4) AGMA, Practice for Carburized Aero-space Gearing, 246. OA, pp. 11-14, 1983.
- 5) Yanagawa, S., Effect of Residual Stress on the Bending Strength of Carburized Gear Teeth, Master's Thesis, Tohoku Univ., 1981.
- 6) 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.
- 7) ISO/DP, Principles for the Calculation of Tooth Strength of Spur and Helical Gears, 6336/Ⅲ, pp. 78-105, 1980.
- 8) 日本機械學會編, 日本機械學會規準 S002 統計的疲勞試驗方法, pp. 7-20, 1981.
- 9) Little, R. E. Probabilistic Aspects of Fatigue, ASME Spec. Tech. Pull, Vol. 5, No. 11, pp. 54-56, 1972.
- 10) S.K. Lyu, K. Inoue, etc, Effects of surface condition on the bending strength of carburized gear teeth, 1994 Int. Gearing Conf., pp. 183-188, 1994.
- 11) ISO/DP, Calculation of load capacity of spur and helical gears, 6336/Ⅲ, pp. 123-135, 1980.
- 12) Tobe, T., Maruyama, N., International Power Transmission and Gearing Conference, Gear Case Shape and Rib Distribution for Reducing Automobile Transmission Gear Noise, 43-48, 1992.

저 자 소 개



류성기(柳晟基)

1961년 3월생. 1987년 전북대학교 정밀기계공학과 졸업. 1989년 동대학원 기계공학과 졸업(석사). 1994년 일본 도우호쿠대학(東北大學) 대학원 정밀공학과 졸업(박사). 1996년~현재 경상대학교 기계설계학과 조교수. 당학회 회원.