

SNC 815 침탄치차의 굽힘피로강도에 미치는 열처리법의 영향

류 성 기*

Effects of Heat-treatment on the Bending Fatigue Strength of SNC 815 Carburized Spur Gear

Sung-Ki Lyu*

ABSTRACT

This paper deals with the bending fatigue strength of SNC815 carburized spur gears. The test gears are heat-treated by two different treatments. One is the direct quenching after carburization. The other is treated by reheating and quenching. The fatigue test at a constant stress amplitude is performed by using an electrohydraulic servo-controlled pulsating tester. The S-N curves are obtained and illustrated. The fatigue strength of direct quenched gears is higher than that of reheated quenched gears. The fatigue strength is estimated from the hardness and the residual stress by using the experimental formula proposed by Tobe and Inoue. The estimated strength is close to the test results, and the validity of the formula is confirmed.

Key Words : Heat-treatment(열처리법), Direct Quenching(직접담금질), Reheat Quenching(재가열담금질), Fatigue Strength(피로강도), Carburized Spur Gears(침탄치차), Residual Stress(잔류응력).

1. 서 론

동력전달용치차는 현재보다 소형경량화, 고부하, 고속에서의 사용이 요구되고 있다. 이에 대응하기 위하여 침탄처리등의 표면경화처리를 실시하는 경우가 많다.

침탄처리치차의 경우에는 표면에서 중심부까지의 탄소농도, 경도, 잔류응력, 조직등이 변화하는데, 이들이 강도에 미치는 영향은 매우 크다. Tobe¹⁾은 SCM

420H 침탄치차를 이용하여 굽힘피로시험을 행하여, S-N곡선을 구하고 표면경도, 중심부경도 및 이뿌리면의 잔류응력의 함수로서 피로강도를 추정하는 실험식을 구하였다. 그 뒤 Inoue²⁾는 SCM415침탄 Shot peening치차의 피로 실험결과를 첨가하여 실험식을 수정하였고, 저자는 침탄치차의 표면처리가 피로강도에 미치는 영향³⁾ 및 잔류응력의 영향을 고려한 응력확대계수를 구하였다.⁴⁾ 그 결과, SCM재 침탄치차에 대하여 피로

* 전북대학교 기계설계학과

강도 향상에 대한 경화층의 경도와 잔류응력의 영향을 정량화하는 것이 실현되었다. 더욱더 높은 굽힘강도를 얻기 위하여 SNC재의 사용은 효과적이라고 사료되어, 고부하, 고강도등이 요구되어지는 헬리콥터등에서 SNC 재 칩탄치차 및 재가열담금질치차의 사용을 고려하고 있다. 그러나, SNC재 칩탄치차의 굽힘피로강도에 관한 연구는 아직 미흡한 상태이다.

따라서, 본 연구에서는 SNC815 칩탄치차의 굽힘피로강도를 구하고, 미세한 열처리조각이 얻어지는 재가열담금질열처리가 피로강도에 미치는 영향과 SCM재 치차에서 얻어지고 있는 피로강도 추정식에 본 치차의 적용성등을 검토한다.

2. 시험치차 및 실험장치

2.1 시험치차

시험치차의 주요제원을 Table 1에 나타냈다. 직경 110mm의 SNC815 등근봉을 절단하여 치차 브랭크를 만들어 기계가공으로 끝손질가공을 한다음 호브로 절삭하였다. 지금까지의 연구에 의하면, AGMA의 추천 칩탄 깊이⁵⁾는 굽힘강도를 향상시킬 목적으로 적합하다는 것이 알려졌다⁶⁾ 때문에, 본 시험치차의 유효칩탄깊이도 약 0.9mm로 하였다.

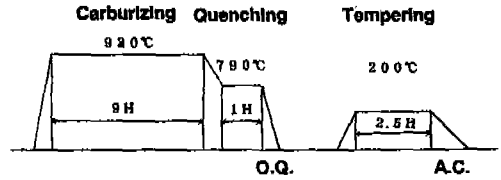
치차의 열처리조건을 Fig. 1에 도시하였다.

시험치차를 2종류의 그룹으로 나누어 같은 조건으로 칩탄처리한후, 한 종류의 그룹은 직접담금질열처리(Direct Quenching, DQ)를 실시하고, 다른종류의 그룹은 미세한 열처리 조각이 얻어지는 재가열담금질열처리(Reheat Quenching, RQ)를 실시하였다. 열처리후 일반적으로 치차의 이끝오차와 치형오차등을 적게

Table 1 Dimension of test gears

Module	m	[mm]	5
Number of teeth			18
Pressure angle		[deg]	20
Profile modification coefficient			0
Face width	b	[mm]	8.0±0.01
Tip diameter		[mm]	100±0.01
Span gauge (3 teeth)		[mm]	36.16±0.01
Gear grade			JIS 5
Material			SNC 815
Heat-treatment			see Fig. 1

(a) Direct Quenching



(b) Reheat Quenching

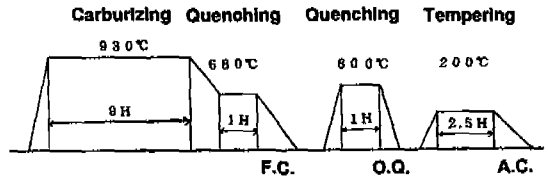


Fig. 1 Condition of heat-treatment

하고, 치차의 이표면을 가공하기 위하여 쇼트 브래스팅(Shot-brasting)을 처리하여 사용하므로, 본시험치차에도 시험치차를 열처리 한후에 쇼트 브래스팅을 처리하였다.

열처리과정에서 탈탄등에 의하여 치차표면에 이상층이 생성되는데, 이상층을 제거함으로써 치차의 굽힘피로강도를 향상 시키는 것이 가능하므로⁷⁾ 본 연구에서는 금속조직검사용 포터블 전해연마장치를 이용하여 표면을 약 20 μm 제거하였다.

Fig. 2에 전해연마의 방법을 나타냈다. 이뿌리면 및 이바다를 연마하기 위하여, 전해액이 침투할 수 있는 숨을 원통형으로 가공하여 음극부에 사용하였다.

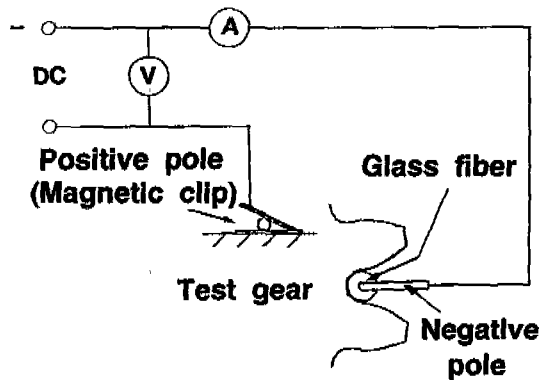


Fig. 2 The apparatus of electrolytic polishing

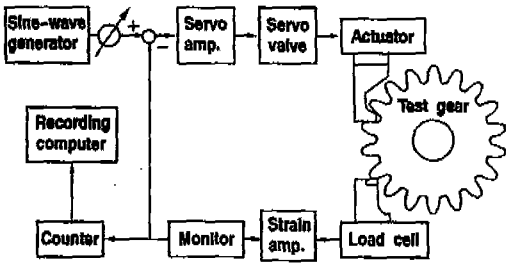


Fig. 3 System of bending fatigue test

2.2 피로시험기

실험에는 전기, 유압서보식 피로 시험기를 사용하였다. 굽힘피로 시험 시스템을 Fig. 3에 나타냈다. 정현파 발생기에서 만들어진 신호는 신호레벨 조정기를 거쳐 서보 앰프에서 증폭되어 서보밸브를 구동시킨다. 시험치차에 가하여진 하중은 스트레인 게이지를 부착시킨 로드셀에 의하여 계측되고 설정값에 대하여 서보제어된다. 부하에 의한 이끝의 손상을 방지하기 위하여, 이끝으로 부터 반경방향에 0.8mm내측의 점을 하중점으로 하였다. 시험에는 일정진폭 반복하중을 이용하였고, 그 최대하중의 변동은 1%이내가 되도록 조정하였다. 또, 치차와 로드셀의 분리를 방지하기 위하여 반복하중의 최소값으로서 약 8.8kgf를 주었다. 또한 피로시험에서 하중의 표시는 이뿌리 최대실용력 S (MPa)를 이용하였다. 법선하중 P_n (kgf)과 이뿌리 최대 실용력의 관계는 2차원 유한요소해석결과⁴⁾를 이용하여 나타냈다. 본 시험의 경우는 다음과 같다.

Table 2 Estimations of fatigue strength by Staircase method

Gear Number	S_0 MPa	d MPa	Experimental Results	Fatigue Strength σ_v (MPa)
DQ8	$S_0 = 1100$		S_0 \times \times \circ	$\Delta = -0.08$ $d/\sigma = 1$ $\sigma_u = 1095$
		$d = 60$	\circ \circ	
RQ8	$S_0 = 920$		\times \times \circ \times	$\Delta = -0.31$ $d/\sigma = 1$ $\sigma_u = 901$
		$d = 60$	\circ	

(\times ; Break before $N = 3 \times 10^6$,
 \circ ; Not break at $N = 3 \times 10^6$)

$$S = 37.8 \frac{P_n}{bm} = 0.945 P_n \quad (1)$$

여기에서 b = 치차폭(mm), m = 모듈(mm)을 나타낸다.

피로강도는 Table 2에 나타낸 예와 같이 스테이케이스법(Little 방법⁷⁾)을 이용하여 구하였다. 여기에서 S_0 는 실험을 시작 할때에의 응력레벨, d 는 응력레벨의 차이다. 피로강도는 $\sigma_0 = S_0 + \Delta d$ 로 산출한다. 계수 Δ 는 피로시험결과, 응력레벨의차(d)와 피로강도의 표준편차(σ)의 비에 대응하여 계산된다. Δ 를 얻기위하여는 σ 를 알 필요가 있는데, 본 시험결과만으로는 이값을 얻기가 어렵기 때문에 치차의 재원이 같은 과거의 시험결과³⁾를 참고로하여 $\sigma = 60\text{MPa}$ 로 가정하였다.

3. 피로시험결과

3.1 시험치차의 제특성

몇개의 치차를 저속커터로 절단하여 표면을 래핑한다음, 이뿌리위험단면의 깊이 방향에 대하여 경도분포를 측정하였다. 측정조건은 측정하중을 300gf, 유지시간을 20초로 하였다. 또 표면 이상층의 경도를 측정할 때에는 치차를 경사지게 절단하여 측정하중을 50gf, 유지시간을 15초로 하여 측정하였다.

이뿌리위험단면에서 깊이 방향의 경도분포를 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 4에는 치차의 절단면과 깊이 방향의 측정위치도 함께 도시하였다. 재가열담금질치차의 최대경도는 직접담금질치차의 최대경도보다 높고, 표면층의

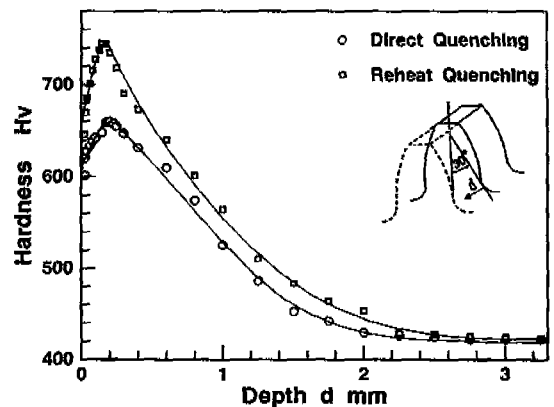


Fig. 4 Hardness distribution of D.Q. and R.Q.

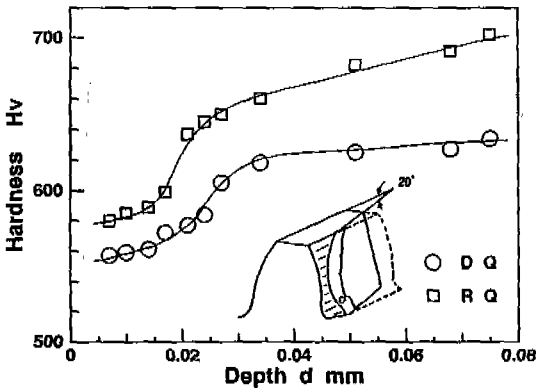


Fig. 5 Hardness distribution of non-martensitic layer

경도저하가 크게 나타나고 있었다.

표면층내의 경도분포를 Fig. 5에 나타냈다. 표면층내의 경도는 Fig. 5에 도시한 바와 같이 약 20°의 각도에서 시험치차를 경사지게 절단하여 그 절단면을 측정하는 경도이다. 그 결과, 이뿌리위험단면의 표면경도가 약 560Hv까지 저하하는 것을 알 수 있었다. 재가열담금질의 경우, 표면경도는 직접담금질의 경우보다 높지만, 양자의 차는 그다지 크지 않았다.

이하의 고찰에 사용하는 표면경도는 Fig. 5에 도시한 바와 같이 측정값을 외삽하여 구한 값이다.

치차의 경도측정결과로부터 얻어진 표면경도(Hs), 최대경도(Hm), 중심부경도(Hc), 유효침탄깊이(deff) 및 뒤에 논하는 잔류응력(σ_R)의 평균값과 표준편차를 Table 3에 나타냈다.

유효침탄깊이는 Fig. 4에 도시한 바와 같이 경도가 550Hv가 되는 깊이를 말하며, 일반적으로 AGMA의

Table 3 Hardness, residual stress of test gears

		Hs	Hm	Hc	deff	σ_R
DQ	Mean	555	660	421	0.92	-831
	S.D.	7	9	3	0.06	82
RQ	Mean	578	748	425	1.02	-335
	S.D.	6	8	2	0.02	37
DQ+EP	Mean	563	669	422	0.92	-1188
	S.D.	9	10	3	0.06	44
PQ+EP	Mean	586	754	426	1.10	-598
	S.D.	10	13	3	0.02	26

Note) S.d. : Standard Deviation

추천값을 참고하여 열처리를 하고 있다. 본시험치차의 유효침탄깊이는 Fig. 4와 Table 3으로부터 직접담금질 치차의 경우 0.92mm, 재가열담금질치차의 경우 1.02mm 임을 알았다. 또한 Table 3에는 표면을 전해연마한 치차의 경우(DQ+EP, RQ+EP)의 값도 나타내고 있다. 잔류응력의 측정에는 X선응력측정장치(SMX-50)를 사용하였다.

본 연구에서는, Discriminator의 출력과 Goniometer의 각도위치신호를 마이크로 컴퓨터에 연결하여 포물선 근사법을 적용하여 데이터 처리등의 자동화를 이용 측정하였다.

잔류응력의 측정에 있어서, 이뿌리위험단면 근방의 齒削方向의 잔류응력 σ_{Rt} 가 굽힘강도에 영향을 크게 미친다고 생각됨으로 본 실험에서도 그 잔류응력을 측정하는 것이 바람직하지만, 본 시험치차에서는 인접치차를 절단하지 않으면 그 응력의 측정이 곤란하고, 절단을 할 경우 시험 가능한 치차의 수가 감소되기 때문에 절단을 피해 이바닥에서 이나비방향의 잔류응력 σ_{Rz} 으로 대응하는 것을 착안하여 양자의 상관관계를 측정하는 결과, Fig. 6을 얻었다. 이 결과로 부터 양자사이에는 거의 $\sigma_{Rt} = \sigma_{Rz}$ 의 관계를 알았다.

이것은, SCM재료부터 얻은 값과 근사하였다. 그래서 본 연구에서도 σ_{Rz} 측정값을 잔류응력 σ_R 로서 사용하기로 한다.

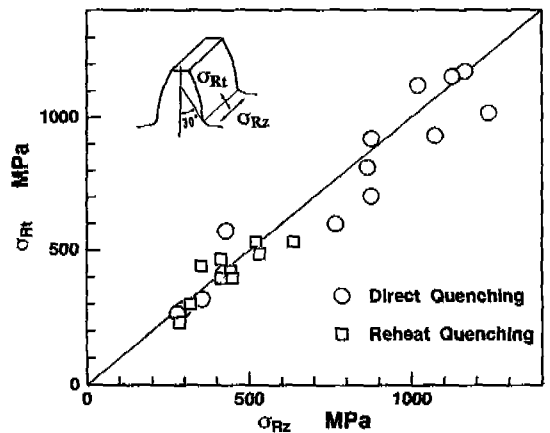


Fig. 6 Relation between fillet residual stress in the direction of tooth height σ_{Rt} and longitudinal residual stress at the root σ_{Rz} of test gear

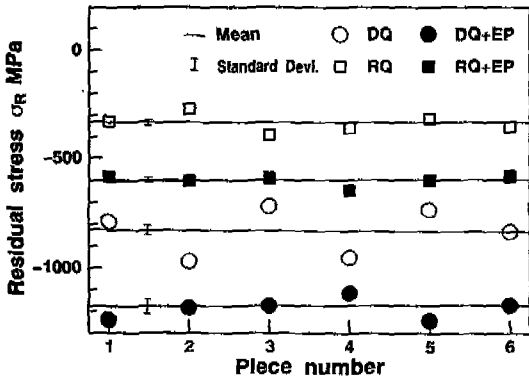


Fig. 7 Residual stresses distribution of test gears

6개의 치차이바닥의 이나비방향(σ_{R2})에 대하여 측정 한 잔류응력을 Fig. 7에 나타냈다. 각 치차의 편차는 크지않았다. 직접담금질치차와 재가열담금질치차의 잔류응력평균치는 각각 -831, -335MPa이 얻어졌다. 압축잔류응력이 다소 높은 이유는 열처리후 쇼트 브래스팅을 처리한 영향이라고 사료된다.

또한 표면을 약 20 μm 전해연마한 경우에 잔류응력은 약 -300MPa정도 증가하였다. 시험치차의 이바닥에서 측정한 잔류응력의 깊이방향 분포측정예를 Fig. 8에 나타냈다.

양자 모두가 깊이 약 30 μm 에서 최대값이 나타났다. 표면 부근의 열처리조직을 Fig. 9에 나타냈다. 직접담금질의 경우에는 잔류오스테나이트가 감소한 층이 보여졌고, 재가열치차의 경우에는 잔류 오스테나이트가 분

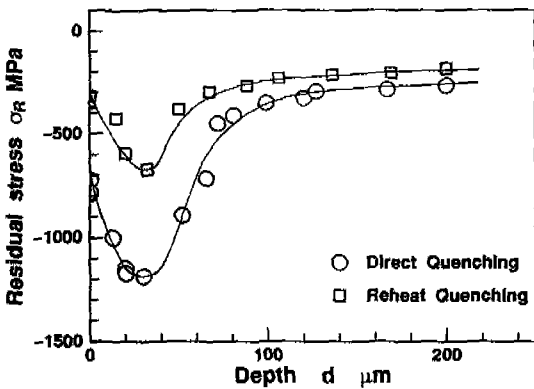


Fig. 8 Residual stress of test gears measured by X-ray side inclination method

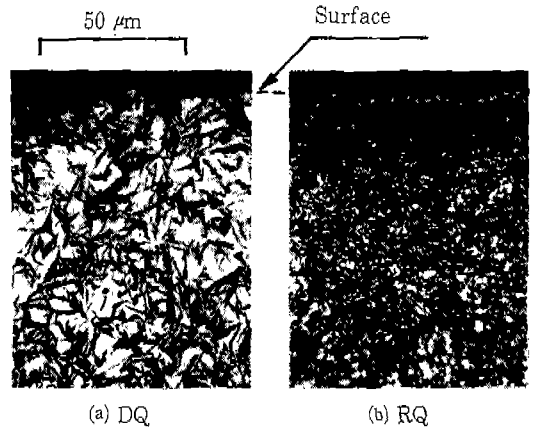


Fig. 9 Microstructure of test gears

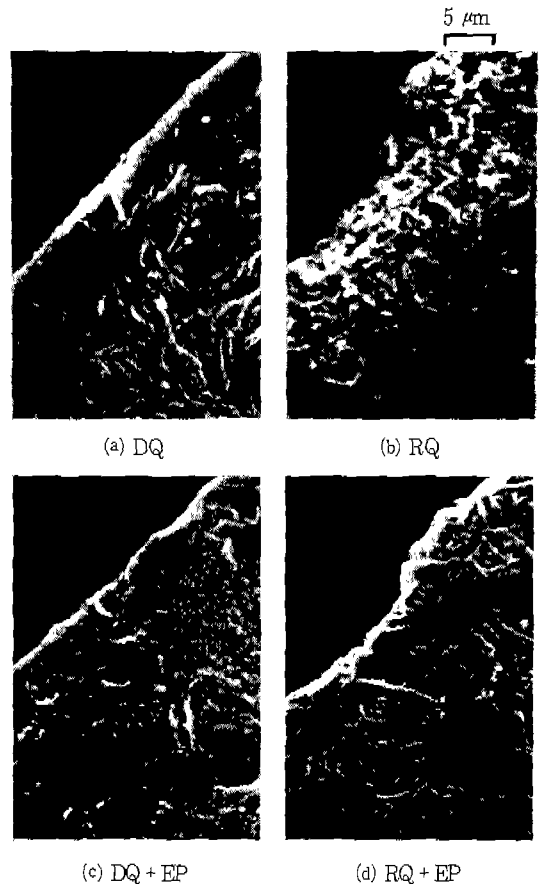


Fig.10 Metallography of non-martensitic layer

해되고 있는듯한 미세한 조적이 존재하고 있는 것을 알았다. Fig. 9로 부터, 직접담금질치차의 심부의 결정입도는 약 8.2(입자수는 약2300), 재가열열처리치차의 입도는 약 8.6(입자수는 약3100)이 얻어졌다.

그리고, 시험치차의 이뿌리위험단면의 齒形方向의 10점평균조도를 측정 한 결과, 직접담금질치차의 경우 7.12 μm, 재가열담금질치차의 경우 10.05 μm가 얻어졌다.

치차를 절단하여 래핑을 한다음 3%의 소산에탄올에 부식시켜 이뿌리위험단면 부근을 주사전자현미경으로 관찰하여 Fig. 10에 나타냈다.

Fig. 10을 보면 열처리조직과 다른 표면층이 존재하고, 층내에는 재가열담금질치차의 경우, Fig. 10(b)에 나타낸 바와 같이 많은 공공(空孔)이 나타났다. 이것은 이상층으로 사료되며 그 깊이는 약 15 μm였다. 치차이뿌리 표면을 약 20 μm로 전해연마하면 표면이상층은 완전히 제거되었으며, 이뿌리위험단면의 표면조도도 약 10-20%향상되었다.

3.2 피로시험

일본 ISO치차강도 설계⁹⁾ 및 일본 기계학회규준의 14점법¹⁰⁾을 이용하여 굽힘피로강도실험결과를 정리하여 S-N곡선의 경사부와 수평부를 구하였다. 그 결과를 Fig. 11에 나타냈다. ISO치차강도 설계식⁹⁾에서 열처리치차의 수명계수가 $N \geq 3 \times 10^6$ 에서 1.0인것을 고려하여 본 시험의 비파괴 반복하중수는 $N=3 \times 10^6$ 으로 하였다.

피로강도는 Table 2의 예와 같이 스테이케이스법⁴⁾을

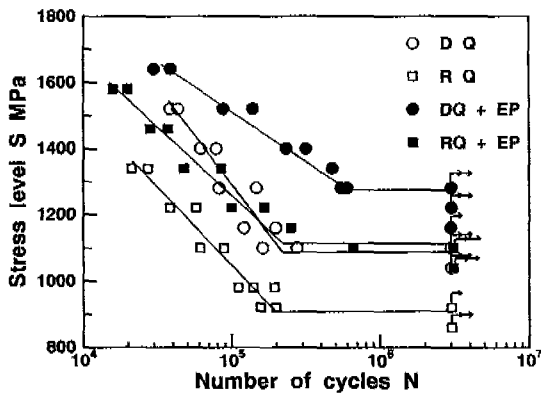


Fig. 11 S-N curves of test gears

이용 3-4회 반복실험하여 구하였으며, 평균값으로 정하였다. 직접담금질치차와 재가열담금질치차의 평균피로강도는 각각 1091, 902MPa이 얻어졌다. 피로강도가 800~950MPa인 SCM415, SCM420H침탄치차와 비교하면 SNC815의 직접담금질에서는 15~36%높은 강도가 얻어졌다. 전해연마를 실시한 시험치차를 사용한 실험결과도 Fig. 11에 함께 나타내고 있다. 전해연마에 의해 피로수명이 증가하고 직접담금질치차와 재가열담금질치차의 피로강도는 각각 약 1274, 1101MPa까지 향상되었다.

3.3 강도 추정식에 의한 피로강도의 추정

SCM415및 SCM420H침탄치차의 굽힘피로실험결과를 정리하여 아래와 같이 피로강도 σ_u (MPa)을 추정하는 실험식을 얻었다²⁾.

$$\begin{aligned} \sigma_u &= \sigma_{uc} + \sigma_{usc} + \sigma_{uR} \\ &= f(Hc) + g(Hs - Hc) + h(\sigma_R) \\ &= (257 + 1.17Hc) \\ &\quad + 3.1 \exp[0.0097(Hs - Hc)] - 0.5\sigma_R \end{aligned} \quad (2)$$

단, Hc(Hv):중심부경도, Hs(Hv):표면경도, σ_R (MPa):이뿌리표면의 잔류응력이다.

또한, $\sigma_{uc} = f(Hc)$, $\sigma_{usc} = g(Hs - Hc)$, $\sigma_{uR} = h(\sigma_R)$ 은 각각 침탄전 母材의 피로강도, 표면경화층에 의한 피로강도의 증가, 잔류응력에 의한 피로강도의 증가를 나타낸다. Table 3에 나타낸 경도와 잔류응력을 평균식(2)에 대입하여 추정한 피로강도는 직접담금질치차와 재가열담금질치차의 경우, 각각 1166, 923MPa이고, 전해연마를 실시한 시험치차의 경우는 각각 약 1346, 1056MPa이 얻어졌다. 피로강도의 추정값과 실험값의 비교를 Fig. 12에 나타냈다.

Fig. 12에는 SCM415침탄치차(C)와 침탄처리후 Shot peening을 처리한 치차(C + SP)의 강도도 함께 나타내고 있다. 재가열담금질치차의 경우에는 강도 추정식에 의한 값과 근사하고, 직접담금질치차의 경우는 추정값이 다소 크게 나타났다. 따라서, 본실험결과에 대한 식(2)에 의한 추정은 설계자료를 얻을 목적으로는 위험측에 있지만, 오차는 2~6%이므로 이점에 유의한 다면 SNC815재 치차에 대하여도 강도추정식은 적용될 수 있다고 사료된다.

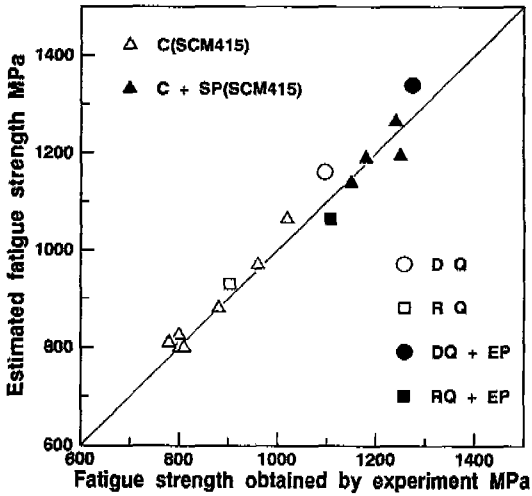


Fig.12 Comparison between the estimated fatigue strength with experimental results

4. 실험결과와 고찰

재가열담금질 시험치차의 경도를 직접담금질의 경도와 비교해보면 최대경도는 약 100Hv높게 나타났다.

그리고 前節에서 설명한 바와 같이 결정입도 측정결과로부터 재가열담금질에 의한 미세한 열처리조직이 얻어지고 있었다. 따라서 재가열담금질치차의 피로강도는 직접담금질치차의 피로강도보다 높게 나타날 것으로 예상하였지만 실험결과는 역으로 나타났다. 以下는 본 실험결과에 대한 고찰을 설명하고자 한다. ISO의 강도계산식⁹⁾에 시험치차의 이뿌리면의 10점평균조도(Rz)를 대입하여 표면상태계수(Y_{RrelT})의 값을 구하여 Table 4에 나타냈다. 상대표면상태계수는 굽힘피로강도를 보정하여 허용응력을 얻기위한 계수이고, 10 μ m의 조도의 시험치차에 대하여 1.0이라고 정하고 있다.

上記係數를 고려하는 방법을 참고하면 조도가 같을 경우 강도는 σ_u/Y_{RrelT} 이라고 생각해도 좋다고 사료된다. 이 보정을 행한 값도 Table 4에 나타내고 있다. 본 시험결과에 미치는 조도의 영향은 비교적 작고, 이 보정을 행하여도 재가열담금질치차의 피로강도는 직접담금질치차보다 낮다.

또한, 空孔과 같은 이상층이 존재하는 것이 피로강도에 영향을 준다고 사료된다. 그래서 양 열처리치차로부터 시료를 작성하여 EPMA를 이용하여 분포를 측정하

Table 4 Roughness & fatigue strength of test gears

	D.Q.	R.Q.
Rz(μ m)	7.12	10.05
σ_u (MPa)	1091	902
ISO YRrelT	1.04	1.0
$\sigma_u/YRrelT$ (MPa)	1049	902

였다. 측정결과와 출력차트 그림은 생략하지만 직접담금질치차의 가장자리표면에서 탄소가 많이 검출되는 것에 비하여, 재가열담금질치차의 경우 표면으로부터 약 10 μ m깊이의 범위에서 上記의 모든 원소가 강하게 편석되어 있는것으로 나타났다.

이상층이라고 생각되는 표면층이 이 원소의 편석과 관련시키는 것은 확인됐지만 이상층의 생성원인을 명확히 밝히지는 못하였다. 고강도 치차를 얻기 위해서는 이상층이 발생되지않도록 열처리조건외의 관리가 중요하다고 생각된다.

재가열담금질치차의 압축잔류응력이 직접담금질치차보다 작다는 것이 Fig. 7에 나타나 있으며, 그 영향은 추정식(2)에 나타난 바와 같다.

전해연마치차의 강도가 향상된 원인은 이상층이 제거됨으로서 표면조도가 향상되고, 표면에 높은 압축응력이 나타나기 때문이라고 생각된다. 그러나 Fig. 11에 도시한 바와 같이 전해연마후의 피로강도도 직접담금질치차 쪽이 크게 나타났으며, 양자의 차는 전해연마전의 피로강도차보다 다소 작은 정도였다. 이상의 고찰로부터 본실험결과에 한해서 볼때, SNC815침탄치차의 강도에 대한 잔류응력의 영향이 가장 크다는 것은 타당하다고 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 SNC815침탄치차를 사용하여 굽힘피로시험을 행하여 굽힘피로강도를 구하고, 피로강도에 미치는 열처리법의 영향을 고찰하였다. 또한 上記치차의 피로강도 추정에 지금까지의 연구에서 얻어지고 있는 추정식을 적용하여 그 타당성을 검토하였다.

얻어진 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 직접담금질치차와 재가열담금질치차의 피로강도는 각각 1091, 902MPa이 얻어졌다. 이들은 SCM415, SCM420H의 평균피로강도보다 3~25% 높다.
2. 재가열담금질에 의하여 보다 미세한 열처리조직이

얻어졌지만, 氣空과 같은 空孔이 表面에 生成되어 疲로 강도에 영향을 미치므로 고강도치차를 얻기 위해서는 이 상층이 발생되지 않도록 열처리조건의 관리가 중요하다고 생각된다.

3. 전해연마를 실시한 시험치차의 경우 직접담금질치차와 재가열담금질치차의 피로강도는 각각 약 1274, 1101MPa이고, 전해연마전보다 17~22%상승되었다. 표면층을 제거함으로써 표면상태가 향상되고, 높은 잔류응력을 表面에 출현시킨것이 원인이라고 생각된다.

4. SCM침탄치차에서 얻어진 피로강도 추정식(2)은 본 시험치차에 대하여도 적용할 수 있고, 추정오차는 2~6%이었다.

참고문헌

1. Tobe, T., Kato, M., Inoue, K., Takatsu, N. and Morita, I., Bending Strength of Carburized SCM420H Spur Gear Teeth, JSME, Vol. 29, pp. 273-280, 1986
2. Inoue, K., Kato, M. and Yamanaka, M., Fatigue Strength and Crack Growth of Carburized and Shot Peened Spur Gears, ASME, PTG-89, Vol. 2, pp. 663-668, 1989
3. 柳晟基 外4人, 浸炭齒車の曲げ疲勞強度に及ぼす表

- 面處理の影響, 日本機械學會, Vol. 60-572(C), pp. 1391-1396, 1994
4. 柳晟基 外3人, Shot Peened 浸炭齒車の殘留應力推定及び應力擴大係數に對する影響, Vol. 60-578(C), pp. 3504-3509, 1994
5. AGMA, Practice for Carburized Aerospace Gearing, 246. 0A, pp. 11-14, 1983
6. Tobe, T., Kato, M. and Inoue, K., True Stress and Stiffness of Spur Gear Teeth, Proceedings of the Fifth World Congress on Theory of Machines and Mechanisms., Vol. 2, pp. 1105-1108, 1979
7. Little, R. E. Probabilistic Aspects of Fatigue, ASME Spec. Tech. Publ, Vol. 5, No. 11, pp. 29-42, 1972
8. 柳晟基, 浸炭齒車の表面處理による曲げ疲勞強度向上に關する研究, 日本東北大學博士學位論文, pp. 54-56, 1994
9. ISO/DP, Principles for the Calculation of Tooth Strength of Spur and Helical Gears, 6336/III, pp. 78-105, 1980
10. 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