



## SCM420기어의 피로강도에 미치는 열처리효과에 관한 연구

### A Study on the Effect of Heat-treatment on the Fatigue Strength of SCM420 Spur Gears

류 성 기\* · 신 용 호\*\*

Sung-Ki Lyu · Yong-Ho Shin

(1999년 5월 7일 접수, 1999년 9월 20일 채택)

#### ABSTRACT

This study deals with effects of heat-treatment on the bending fatigue of SCM420 spur gears. The test gears are heat-treated by two different treatments. After carburization, one group of the test gears is quenched directly, while another group is furnace cooled, reheated then quenched.

The fatigue test at a constant stress amplitude is performed by using an electrohydraulic serve-controlled pulsating tester. The S-N curves are obtained and illustrated. By comparing the estimated strength with the experimental results, the validity of the previous experimental formula, presented by the authors for estimating the fatigue strength of carburized gears, was discussed for these tested gears.

#### 1. 서 론

최근 기어는 근대공업의 발달과 함께 출력향상과 동력전달의 효율을 증가시키기 위하여 소형화, 경량화, 고강도의 기어가 요구되고 있다. 그러나 국내의 기어설계, 제조, 강도평가, 검사 기술은 매우 낮은 수준이며, 고부하능력, 고정밀

화, 저소음화, 저가격면에서도 국제경쟁력이 뒤떨어지고 있다. 따라서 현재 기어 생산기술의 한계를 극복하고, 기어 생산업체의 현장 애로기술을 해결하기 위하여 고경도의 신뢰성이 높은 표면경화처리 기어에 관한 연구가 필요하다.

침탄처리 등의 표면경화처리를 실시하면 표면경화층이 형성되고 압축잔류응력이 생성된다.

\* 경상대학교 항공기계공학부, 항공기부품기술연구센터

\*\* 경문대학 기계과

표면경화층과 압축잔류응력은 기어의 굽힘피로 강도 향상에 크게 영향을 미친다. 이 효과를 정량적으로 구하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. Inoue<sup>1)</sup>는 침탄기어를 이용하여 굽힘피로 시험을 하여 S-N곡선을 구하고 표면경도, 심부경도, 이뿌리위험단면의 압축잔류응력을 함수로 하여 피로강도를 추정하는 실험식을 구하였다. 그 결과 표면경도와 압축잔류응력의 증가가 피로강도 향상에 효과가 있다는 것을 밝힌바 있다.

현재 침탄처리는 AGMA<sup>2)</sup>의 추천으로 자동차, 항공기 등의 동력전달장치용 기어에 많이 사용되는 일반적인 방법이다.

본 연구에서는 기어의 강도에 미치는 열처리법의 영향을 연구하기 위하여 SCM420재료로 가공한 기어에 각각 직접담금질과 재가열담금질을 실시하여, 이러한 열처리법이 기어의 표면경도와 금속조직, 이뿌리위험단면의 압축잔류응력 등에 미치는 영향을 고찰한다. 그리고 피로실험을 실시하여 피로강도를 구한 후 이러한 열처리법이 피로강도에 미치는 영향을 밝혀 기어 생산 기술에 기여하고자 한다. 더 나아가 경도, 압축잔류응력을 사용하여 피로강도를 추정하는 식<sup>1)</sup>에 본 연구에서 사용한 시험기어의 제 특성을 적용하여, 이 추정식이 본 연구의 시험기어에도 유효한가를 고찰하고자 한다.

## 2. 시험기어의 열처리와 표면성상

### 2.1 시험기어의 제원

본 연구에 사용한 시험기어의 주요 제원을 Table 1에 나타냈다. 이뿌리면에서의 X선 잔류응력측정이 가능하도록 모듈을  $m=5$ , 잇수  $Z=18$ 을 선택하였고, 피로시험기의 부하능력을 고려하여 기어의 이폭  $b=8\text{mm}$ 로 제작하였다.

Table 2에 SCM420 시험기어의 화학조성비를 나타내었다. 시험기어의 재료성분 분석은 드릴링머신을 사용하여 채취한 재료가공 칩을 성분 분석 전문연구기관에 의뢰하여 분석하였다.

### 2.2 시험기어의 가공공정과 열처리 조건

직경 110mm의 SCM420 환봉을 절단하여 선

Table 1 Dimension of test gear

Module	m [mm]	5
Number of teeth	Z	18
Pressure angle	[deg]	20
Profile modification coefficient		0
Face width	b [mm]	$8.0 \pm 0.01$
Tip diameter	[mm]	$100 \pm 0.01$
Span gage (3 teeth)	[mm]	$36.16 \pm 0.01$
Finish		Hobbed
Material		SCM420
Heat-treatment		see Fig. 2

Table 2 Chemical compositions of SCM420 [wt.%]

SCM420	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Standard	0.18~0.23	0.15~0.35	0.60~0.85	$\leq 0.03$	$\leq 0.03$	0.90~1.20	0.15~0.30
Measured	0.203	0.238	0.832	0.010	0.015	1.080	0.152

반으로 기어브랭크를 만들어 호빙머신을 사용하여 기어를 제작하였다. 또한 기어의 강도향상을 위하여 표면경화처리로써 열처리를 실시하였다. 유효 침탄깊이는 AGMA<sup>2)</sup>의 추천값을 사용하였으며, 본 연구에 사용한 시험기어의 가공공정과 열처리조건을 각각 Fig. 1, 2에 나타냈다. 열처리법이 피로강도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 SCM420 재료로 가공한 기어에 직접담금질(Direct quenching) 후 뜨임(Tempering)처리와 재가열담금질(Reheat quenching) 후 뜨임처리를 실시하였다. 본 연구에서는 직접담금질을 DQ, 재가열담금질을 RQ로 나타냈으며, 시험에 사용한 기어는 다음과 같이 기호를 붙였다.

SCM420 침탄+DQ+Tempering ..... SCMDQ  
 SCM420 침탄+RQ+Tempering ..... SCMRQ

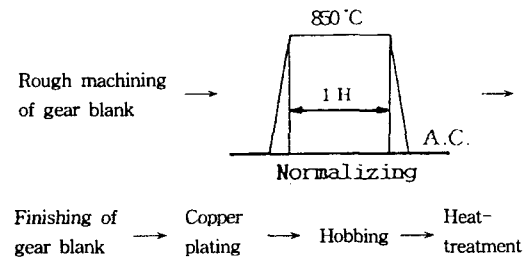


Fig. 1 Machining process of test gears

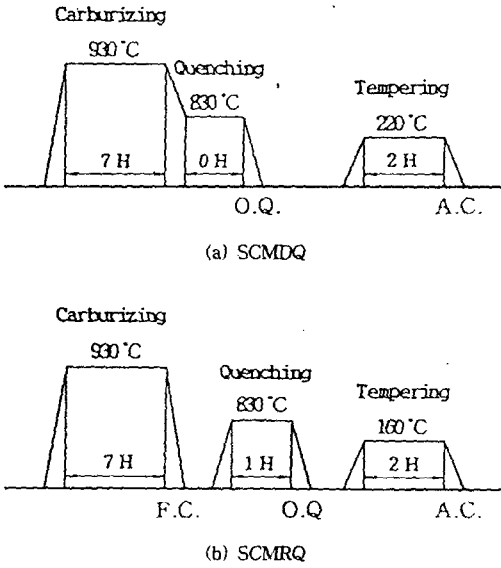


Fig. 2 Heat-treatment process of test gears

### 2.3 시험기어의 경도

시험기어의 이뿌리위험단면에 대한 마이크로 비커스 경도를 깊이방향으로 측정하여 Fig. 3에 나타냈다. Fig. 3에는 기어의 절단면과 깊이방향의 측정위치도 함께 도시하였다. 재가열 담금질 기어의 최대경도는 직접담금질기어의 최대경도보다 높게 나타났으며, 특히 재가열 담금질기어의 경우 표면층의 경도저하가 크게 나타났다. 그리고 극 표면에서 경도측정이 곤란하므로 표면경도는 기어를 경사지게 절단하여 측정하중을 50gf, 지속시간을 15초로 하여 측정한 깊이방향 분포로부터 외삽법으로 구하였다. 표면층내의 경도분포를 Fig. 4에 나타냈다. 표면층내의 경도는 Fig. 4에 도시한 바와 같이 약 20°의 각도로 시험기어를 경사지게 절단하여 그 절단면에서 경도를 측정하였다. 그 결과 이뿌리위험단면의 표면경도가 약 550Hv까지 저하하는 것을 알 수 있다. 재가열담금질의 경우 표면경도는 직접담금질의 경우보다 높게 나타났지만 양자의 차이는 그다지 크게 나타나지 않았다. 이하의 고찰에 사용하는 표면경도는 Fig. 4에 도시한 바와 같이 측정값을 외삽하여 구한 값이다.

유효침탄깊이는 Fig. 3에 도시한 바와 같이 경

도가 550Hv가 되는 지점까지의 깊이이며, 본 연구에 사용한 시험기어의 경우 유효침탄깊이는 SCMDQ가 약 0.8mm, SCMRQ가 약 0.9mm로 나타났다.

기어의 경도측정 결과로부터 얻은 표면경도(Hs), 최대경도(Hm), 심부경도(Hc), 유효침탄깊이( $d_{eff}$ )의 평균값과 표준편차를 Table 3에 나타

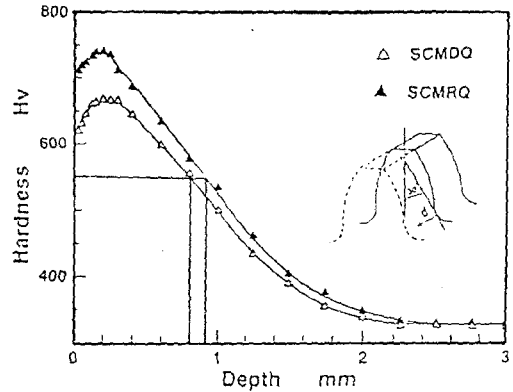


Fig. 3 Hardness distribution of SCMDQ and SCMRQ

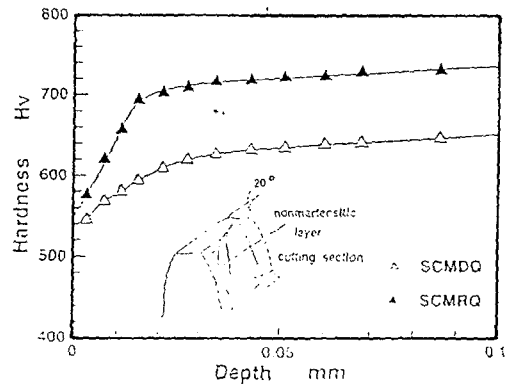


Fig. 4 Hardness distribution of non-martensitic layer in SCMDQ and SCMRQ

Table 3 Hardness, residual stress of test gears

Code of test gears	Hs	Hm	Hc	$d_{eff}$	$\sigma_R$	
SCMDQ	Mean	540	667	322	0.80	-284
	Standard deviation	8	9	3	0.05	19
SCMRQ	Mean	564	735	327	0.90	-381
	Standard deviation	10	11	4	0.04	24

냈다.

#### 2.4 시험기어의 금속조직

시험기어의 이뿌리위험단면에 대한 금속조직을 Fig. 5, 6에 나타냈다. Fig. 5, 6에서 알 수 있듯이 SCMDQ 시험기어의 표면에는 검게 부식된 침상의 마르텐사이트조직과 흰색의 오스테나이트조직이 관찰되었다.

또한 Fig. 6의 SCMRQ 시험기어 표면에서는 재가열담금질에 의한 미세한 마르텐사이트조직이 관찰되었다. 이것은 침탄처리 과정에서 생성된 오스테나이트조직이 재가열 시에 분해된 것으로 사료된다. 심부는 직접담금질과 재가열담금질 모두 저탄소 마르텐사이트조직이 관찰되었다.



×400

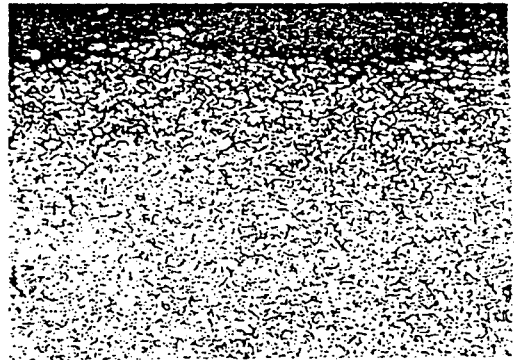
(a) Metallography of surface



×400

(b) Metallography of center

Fig. 5 Metallography of SCMDQ



×400

(a) Metallography of surface



×400

(b) Metallography of center

Fig. 6 Metallography of SCMRQ

결정입도의 측정결과 SCMDQ는 8.2로 나타났으며, SCMRQ는 8.35로 나타났다. 재가열담금질기어의 결정입도번호가 높게 나타난 것으로 보아 직접담금질기어보다 결정입이 미세하다는 것을 알 수 있다.

그리고 잔류응력측정기(SHIMATU)를 이용하여 잔류오스테나이트양을 측정한 결과 SCMDQ와 SCMRQ의 잔류오스테나이트양은 각각 18.6%와 2.9%로 측정되었다. 이것은 오스테나이트조직이 재가열 시에 분해된 것으로 사료된다. 따라서 재가열담금질기어는 직접담금질기어에 보다 미세한 담금질조직이 나타나는 것을 알 수 있다.

#### 2.5 시험기어의 압축잔류응력

압축잔류응력은 X선압축잔류응력 측정기(SMX-50)를 이용하여 측정하였으며, 이뿌리위험단면 부근의 이높이방향 압축잔류응력( $\sigma_{Rt}$ )이 굽힘강도에 영향을 크게 미치므로 치형방향의 압축잔류응력이 요구되지만 측정이 곤란하고, 측정하기 위해서는 주위의 기어이를 절단하여야 하는데, 기어이를 절단하면 시험 가능한 잇수를 감소시키므로 기어 본래 상태에서 측정이 가능한 이뿌리 이바닥의 이폭방향 압축잔류응력( $\sigma_{Rz}$ )으로 대응하였다. 양자의 상관관계를 저자가 고찰한 결과 침탄기어의 경우  $\sigma_{Rt} = \sigma_{Rz}$ <sup>3)</sup>로 나타나 본 논문에서 이결과를 이용하였다. 따라서 이뿌리 이폭방향 압축잔류응력을 측정 후 이값을 압축잔류응력값으로 본 연구에서는 사용하였다.

본 시험기어의 압축잔류응력 측정결과를 Fig. 7에 나타냈다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 SCMRQ의 압축잔류응력이 SCMDQ의 압축잔류응력 보다 97MPa 높게 나타났다.

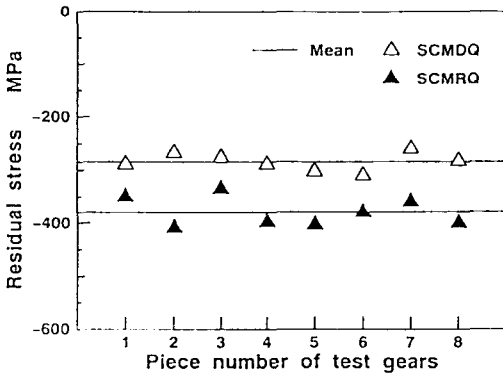


Fig. 7 Residual stresses of test gears

### 3. 굽힘피로시험결과 및 고찰

#### 3.1 굽힘피로시험장치

피로실험에는 전기·유압서보식 피로 시험기를 사용하였다. 굽힘피로 시험 시스템을 Fig. 8에 나타냈다. 정현파 발생기에서 만들어진 신호는 신호레벨 조정기를 거쳐 서보앰프에서 증폭되어 서보밸브를 구동시킨다. 시험치차에 가하여진 하중은 스트레인 게이지를 부착시킨 로드셀에 의하여 계측되고 설정값에 대하여 서보제

어된다. 부하에 의한 이끝의 손상을 방지하기 위하여, 이 끝에서 반경방향으로 0.8mm 내측의 점을 하중점으로 하였다. 시험에는 일정진폭 반복하중을 이용하였고, 그 최대하중의 변동은 1% 이내가 되도록 조정하였다. 또, 치차와 로드셀의 분리를 방지하기 위하여 반복하중의 최소값으로서 약 8.8kgf를 주었다. 또한 피로시험에서 하중의 표시는 이뿌리 최대실용력 S(MPa)를 이용하였다. 법선하중  $P_n$ (kgf)과 이뿌리 최대 실용력의 관계는 2차원 유한요소해석결과를 이용하여 나타났다. 본 시험의 경우는 다음식<sup>4)</sup>과 같다.

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

여기에서 b=치차폭(mm), m=모듈(mm)을 나타낸다.

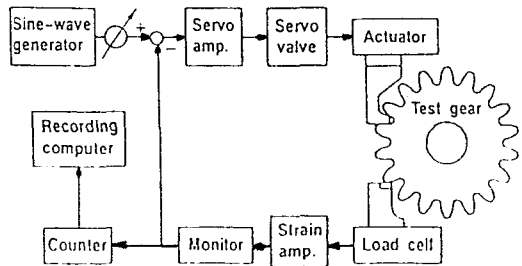


Fig. 8 System of bending fatigue tester

#### 3.2 시험기어의 피로시험결과

ISO 기어강도 설계식<sup>5)</sup>에서 열처리 시험기어의 수명계수가  $N \geq 3 \times 10^6$ 에서 1.0인 것을 고려하여 비파괴 반복하중수  $N = 3 \times 10^6$ 으로 하였다.

SCMDQ와 SCMRQ 시험기어의 피로강도는 Fig. 8에 나타난 고속형 전기·유압식 피로시험기를 사용하여 굽힘피로강도 시험을 하였으며, 굽힘피로강도 시험결과를 정리하여 JSME S002기준으로 S-N 곡선<sup>6)</sup>의 경사부와 수평부를 구하였다. 그 결과를 Fig. 9에 나타냈다.

SCMDQ, SCMRQ계열의 시험기어 피로강도는 스테이케이스(staircase)방법<sup>7)</sup>( $\sigma_u = S_0 + \Delta \cdot d$ )을 이용 5회 반복실험하여 평균값으로 구하였으며 결과를 Table 4에 나타냈다. 여기에서  $S_0$ 는 시험을 시작할 때의 응력레벨값이며, d는 응력레벨값의 간격을 나타내고 있다. 계수 Δ는 피로

시험결과 응력레벨값의 간격(d)와 피로강도 표준편차( $\sigma$ )의 비로서 계산된다.

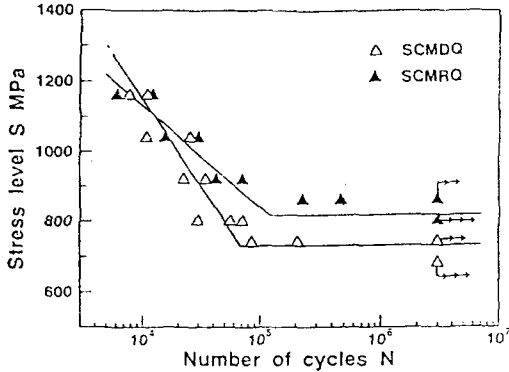


Fig. 9 S-N curves of SCMDQ and SCMRQ

Table 4 Estimation of fatigue strength by staircase method<sup>7)</sup>

Code of gears	S <sub>0</sub> MPa d MPa	Experimental results	Fatigue strength σ <sub>n</sub> (MPa)						
SCMDQ1	S <sub>0</sub> =680 d=60	<table style="border: none; text-align: center;"> <tr><td>x</td><td>x</td></tr> <tr><td>○</td><td>○</td></tr> </table>	x	x	○	○	Δ=0.70 σ <sub>n</sub> =722		
x	x								
○	○								
SCMDQ2	S <sub>0</sub> =680 d=60	<table style="border: none; text-align: center;"> <tr><td>x</td></tr> <tr><td>○</td><td>x</td><td>x</td></tr> <tr><td>○</td><td>○</td></tr> </table>	x	○	x	x	○	○	Δ=0.83 σ <sub>n</sub> =730
x									
○	x	x							
○	○								
SCMRQ1	S <sub>0</sub> =740 d=60	<table style="border: none; text-align: center;"> <tr><td>x</td></tr> <tr><td>○</td><td>x</td><td>○</td></tr> <tr><td>○</td><td>○</td></tr> </table>	x	○	x	○	○	○	Δ=1.37 σ <sub>n</sub> =822
x									
○	x	○							
○	○								
SCMRQ2	S <sub>0</sub> =800 d=60	<table style="border: none; text-align: center;"> <tr><td>x</td></tr> <tr><td>○</td><td>x</td><td>○</td></tr> <tr><td>○</td><td>○</td></tr> </table>	x	○	x	○	○	○	Δ=0.31 σ <sub>n</sub> =818
x									
○	x	○							
○	○								

Note) x : Break before N=3×10<sup>6</sup>,  
○ : Not break at N=3×10<sup>6</sup>

스테이케이즈(staircase)방법<sup>7)</sup>을 이용하여 5회 반복실험한 결과의 평균값 즉 시험기어의 피로강도는 직접담금질기어 경우 731MPa, 재가열담금질기어 경우 818MPa이 얻어졌다.

본 시험의 결과 SCM420 재료의 재가열담금질기어(SCMRQ)는 직접담금질기어(SCMDQ) 보다 피로강도가 약 12% 높게 나타났다.

#### 4. 피로강도 추정식에 의한 피로강도 추정

피로강도  $\sigma_u$  [MPa]는 심부경도  $H_c$  [MPa], 표면경도  $H_s$  [MPa], 표면압축잔류응력  $\sigma_R$  [MPa]과의 관계가 있으며, 다음 식과 같다<sup>1)</sup>.

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

여기에서,  $\sigma_{uc}$  [MPa]는 침탄처리를 하지 않은 기어의 피로강도를 의미하며,  $\sigma_{usc}$  [MPa]와  $\sigma_{ur}$  [MPa]은 표면경화층과 압축잔류응력에서 야기된 강도의 증가를 의미한다.

피로강도에 미치는 열처리법의 영향을 고찰하기 위하여  $\sigma_{usc}$  와  $\sigma_{ur}$  을 구하여 Fig. 10에 나타냈다. 열처리법에 의한 피로강도의 증가는 Fig. 10에 나타난 바와 같이  $\sigma_{usc}$  와  $\sigma_{ur}$  의 증가로 설명할 수 있다.  $\sigma_{usc}$  와  $\sigma_{ur}$  의 증가는 열처리를 함으로써 표면경화층과 압축잔류응력이 생성되어 표면의 경도와 압축잔류응력이 향상된 효과라고 볼 수 있다. 그리고 위의 추정식에 Table 3에 나타난 경도와 압축잔류응력의 측정결과를 대입하여 얻은 피로강도 추정값과 시험결과와의 비교를 Fig. 11에 나타냈다. 또한 저자가 그동안 실험한 침탄처리 후 화학연마, 전해연마한 기어와 쇼트 피닝기어의 데이터<sup>3)</sup>도 함께 Fig. 11에 나타냈다. 추정값은 시험값에 근사한 값으로 나타났으며, 추정오차는 3~10%로 나타났다. 따라서 위의 식 (2)는 직접담금질과 재가열담금질을 실시한 시험기어에 대하여 유효하다는 것을 알았다.

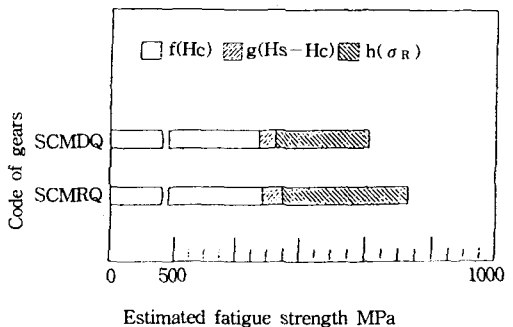


Fig. 10 Contributions of hardness layer and residual stress to fatigue strength

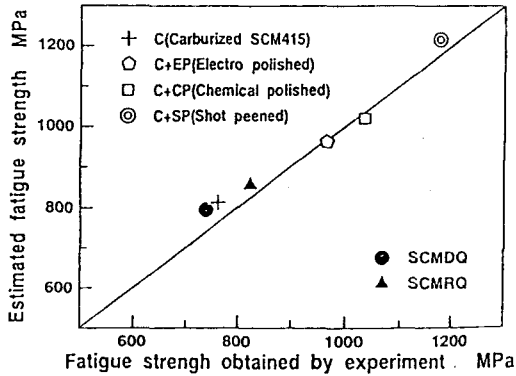


Fig. 11 Comparison between the estimated fatigue strength with the experimental result

### 5. 결 론

본 연구에서는 SCM420의 직접담금질기어와 재가열담금질기어의 표면경도, 압축잔류응력, 표면조직 등을 측정하여 열처리의 영향을 고찰하였다. 그리고 굽힘피로시험을 실시하여 굽힘피로강도에 미치는 열처리의 영향을 고찰하고, 종래 제안된 피로강도 추정식(2)으로 본 연구에서 사용한 시험기어의 피로강도를 추정하였다.

본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 경도와 압축잔류응력은 재가열담금질 처리한 기어가 직접담금질 처리한 기어보다 높게 나타났다.
- 2) 재가열담금질 시험기어의 표면에서는 재가열담금질에 의한 미세한 마르텐사이트조직이 관찰되었다. 이것은 침탄처리 과정에서 생성된 오스테나이트조직이 재가열시에 분해된 것으로 사료된다.
- 3) 재가열담금질 시험기어가 직접담금질 시험기

어 보다 12% 높은 피로강도가 얻어졌다.

- 4) 피로강도 추정식은 본 시험기어에 대하여도 적용할 수 있으며, 추정오차는 3~10%로 나타났다.

### 참 고 문 헌

- 1) S.K. Lyu, "A Study on Evaluation of Bending Fatigue Strength in SCM415 Carburized Spur Gear", *Journal of the Korean Society of Marine Engineers*, Vol. 22, No. 6, pp. 35~42, 1998.
- 2) AGMA Standard, Practice for Carburized Aerospace Gearing, American Gear Manufacturers Association, 246.02A. pp. 11~14, 1983.
- 3) Sung-ki Lyu, etc, Effects of Surface Treatment on the Bending Fatigue Strength of Carburized Spur Gears, *JSME International Journal Series C*, Vol. 39, No. 1, pp. 108~114, 1996.
- 4) Tobe, T., Kato, M., and Inoue, K., True Stress and Stiffness of Spur Gear Tooth, *ASME*, Vol. 2, pp. 1105~1121, 1979.
- 5) ISO/DP 6335/III, Calculation of Load Capacity of Spur and Helical Gears, Part 3, pp. 78~105, 1980.
- 6) JSME S002, Standard Method of Statistical Fatigue Testing, pp. 7~20, 1981.
- 7) Little, R.E. Probabilistic Aspects of Fatigue, *ASME Spec. Tech. Pull*, Vol. 5, No. 11, pp. 54~56, 1972.