기어의 피로강도에 미치는 열처리효과에 관한 연구

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

류성기(S. K. LYU)*, 신용호(Y. H. SHIN)**

경상대학교 항공기계공학부, 항공기부품기술연구센터*, 경문대학**

ABSTRACT

This study deals with effects of heat-treatment on the bending fatigue of 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.

1. 서 론

최근 기어는 근대공업의 발달과 함께 출력향상과 동력전달의 효율을 증가시키기 위하여 소형화, 경량화, 고강도의 기어가 요구되고 있다. 그러나 국내의 기어 설계, 제조, 강도평가, 검사기술은 매우 낮은 수준이며, 고부하능력, 고정밀화, 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.

침탄처리등의 표면경화처리를 실시하면 표면경화층이 형성되고 압축잔류응력이 생성된다. 표면경화층과 압축잔류응력은 기어의 굽힘피로강도 향상에 크게 영향을 미친다. 이 효과를 정량적으로 구하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다.

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 생산기술에 기여하고자 한다. 더 나아가 경도, 압축잔류응력을 사용하여 피로강도를 추정하는 식[1]에 본 연구에서 사용한 시험기어의 제 특성을 적용하여, 이 추정식이 본 연구의 시험기어에도 유효한가를 고찰하고자 한다.

2. 시험기어의 열처리와 표면성상

2.1 시험기어의 가공공정과 열처리 조건

본 연구에 사용한 시험기어는 이뿌리면에서의 X선 잔류응력측정이 가능하도록 모듀울 m=5, 잇수 Z=18을 선택하였고, 피로시험기의 부하능력을 고려하여 기어의 이폭 b=8mm로 설계하였다.

직경 110mm의 SCM420 환봉을 절단하여 선반으로 기어브랭크를 만들어 호빙머시인을 사용하여 기어를 제작하였다. 또한 기어의 강도향상을 위하여 표면경화처리로서 열처리를 실시하였다. 유효 침탄깊이는 AGMA[2]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 SCMDQ, SCMRQ의 기호를 붙였다.

2.2 시험기어의 경도

시험기어의 경도는 마이크로 비커스경도기(MVK-E)를 사용하여 측정하였으며, Fig. 3에 SCM계열 시험기어의 깊이방향 경도분포를 나타냈다. 재가열담금질기어의 최대경도는 직접담금질기어의 최대경도보다 높게 나타났으며, 표면층의 경도저하가 크게 나타났다. 그리고 극 표면에서 경도측정이 곤란하므로 표면경도는 기어를 경사지게 절단하여 측정한 깊이방향 분포로부터 외삽법으로 구하였다. 표면층내의 경도분포를 Fig. 4에 나타냈다. 표면층내의 경도는 Fig. 4에 도시한 바와 같이 약 20^0의 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 경도가 550Hv가 되는 지점의 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 1에 나타냈다.

Table 1 Hardness, residual stress of test gears

Code of test gears		Hs	Hm	Hc	d_{eff}	σ_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

2.3 시험기어의 금속조직

2.3 시험기어의 금속조직

시험기어의 금속조직 관찰은 주사전자현미경(S450)을 사용하였다. 시험기어의 금속조직은 몇 개의 이를 절단한 후 마운팅하여 연마를 한 다음 5㎖의 질산과 100㎖의 에틸알콜 혼합액 속에 넣어 부식을 시킨 후 흐르는 물에 깨끗이 세척하여 얼룩이 생기지 않도록 드라이로 건조시켜 전자현미경을 이용하여 관찰하였다. 금속조직의 관찰위치는 이뿌리위험단면 부근이며, 각 시험기어의 금속조직 사진에서 SCMDQ 시험기어의 표면에는 검게 부식된 침상의 마르텐사이트조직과 오스테나이트조직이 관찰되었다.

또한 SCMRQ 시험기어의 표면에서는 재가열담금질에 의한 미세한 마르텐사이트조직이 관찰되었다. 이것은 침탄처리 과정에서 생성된 오스테나이트조직이 재가열시에 분해된 것으로 사료된다. 심부는 직접담금질과 재가열담금질 모두 저탄소 마르텐사이트조직이 관찰되었다.

결정입도의 측정결과 SCMDQ는 8.2로 나타났으며, SCMRQ는 8.3으로 나타났다. 재가열담금질기어의 경우 직접담금질기어에 비하여 결정입이 미세하기 때문에 결정입도 번호가 높게 나타났다. 잔류오스테나이트양은 SCMDQ와 SCMRQ는 각각 18.6%와 2.9%로 측정되었다. 따라서 재가열담금질기어는 직접담금질기어에 비하여 미세한 담금질조직이 나타나는 것을 알 수 있었다.

2.4 시험기어의 압축잔류응력

압축잔류응력은 이뿌리위험단면 부근의 치형방향 압축잔류응력(σ_{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(σ_{Rz})으로 대용하기 위하여 양자의 상관관계를 측정한 결과, 침탄기어의 경우 $\sigma_{Rt} = \sigma_{Rz}$[3]로 나타났다. 따라서 이뿌리 이바닥의 이폭방향 압축잔류응력을 측정한 후 보정한 압축잔류응력값을 본 연구에서는 사용하였다.

본 시험기어의 잔류응력 측정결과 SCMRQ는 SCMDQ에 비해 97MPa 높게 나타났다.

3. 굽힘피로시험결과 및 고찰

3.1 굽힘피로시험장치

피로실험에는 전기·유압서보식 피로 시험기를 사용하였다. 굽힘피로 시험 시스템을 Fig. 5에 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 이끝의 손상을 방지하기 위하여, 이 끝으로부터 반경방향에 0.8 ㎜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 최대실응력 S(㎫)를 이용하였다. 법선하중 P_n(kgf)과 이뿌리 최대 실응력의 관계는 2차원 유한요소해석결과를 이용하여 나타냈다. 본 시험의 경우는 다음식[4]과 같다.

$$S = 3.86\frac{P_n}{bm} = 9.65\times10^{-2}\ P_n \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

여기에서 b=치차폭(㎜), m=모듀울(㎜)을 나타낸다.

3.2 시험기어의 피로시험결과

SCM420 시험기어의 피로강도는 Fig. 5에 나타낸 고속형 전기·유압식 피로시험기를 사용하여 굽힘피로강도 시험을 하였으며, 굽힘피로강도 시험결과를 정리하여 S-N 곡선[5]의 경사부와 수평부를 구하였다. 그 결과를 Fig. 6에 나타냈다.

SCMDQ, SCMRQ계열의 시험기어 피로강도는 스테아케이스(staircase)방법[6,7] ($\sigma_u = S_o + \Delta d$)을 이용 5회 반복실험하여 평균값으로 구하였다. 여기에서 S_o는 시험을 시작할 때의 응력레벨값이며, d는 응력레벨값의 간격을 나타내고 있다. 계수 Δ는 피로시험결과 응력레벨값의 간격(d)과 피로강도 표준편차(σ)의 비로서 계산된다.

SCM420 시험기어의 피로강도는 직접담금질기어 경우 731MPa, 재가열담금질기어 경우 818MPa이 얻어졌다. 본 시험의 결과 SCM420 재료의 재가열담금질기어는 직접담금질기어에 비하여 피로강도가 약 12% 높게 나타났다.

4. 피로강도 추정식에 의한 피로강도 추정

피로강도 σ_u[MPa]는 심부경도 H_c[MPa], 표면경도 H_s[MPa], 표면압축잔류응력 σ_R[MPa]와 관계가 있는 것으로 가정하여 다음과 같이 나타냈다.[1]

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

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

피로강도에 미치는 열처리법의 영향을 고찰하기 위하여 σ_{usc}와 σ_{uR}을 구하여 Fig. 7에 나타냈다. 열처리법에 의한 피로강도의 증가 메카니즘은 Fig. 7에 나

타난 바와 같이 σ_{usc}와 σ_{uR}의 증가로 설명할 수 있다. σ_{usc}와 σ_{uR}의 증가는 열처리를 함으로써 표면경화층과 압축잔류응력이 생성되어 표면의 경도와 압축잔류응력이 향상된 효과라고 볼 수 있다. 그리고 위의 추정식에 Table 1에 나타낸 경도와 압축잔류응력의 측정결과를 대입하여 얻은 피로강도 추정값과 시험결과의 비교를 Fig. 8에 나타냈다. 또한 Fig. 8에 침탄처리 후 화학연마, 전해연마한 기어와 쇼트피닝기어의 데이터[3]도 함께 나타냈다. 추정값은 시험값에 근사한 값으로 나타났으며, 추정오차는 3~10%로 나타났다. 따라서 위의 식(2)는 직접담금질과 재가열담금질을 실시한 시험기어에 대하여 유효하다는 것을 알았다.

5. 결 론

본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 경도 및 압축잔류응력은 재가열담금질한 기어가 직접담금질한 기어보다 높게 나타났다.
2. 재가열담금질에 의하여 미세한 마르텐사이트 조직이 얻어졌다.
3. 재가열담금질한 기어가 직접담금질한 기어에 비해 12% 높은 피로강도가 얻어졌다.
4. 피로강도 추정식은 본 시험기어에 대하여도 적용할 수 있으며, 추정오차는 3~10%로 나타났다.

6. 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. JSME S002, Standard Method of Statistical Fatigue Testing, pp. 7-20, 1981.
6. Little, R. E. Probabilistic Aspects of Fatigue, ASME Spec. Tech. Pull, Vol. 5, No. 11, pp. 54-56, 1972.
7. Dixon, W. J., Moodm A. M., Estimation of Fatigue Strength, Journal of STNA., Vol. 43, pp. 109-122, 1978.

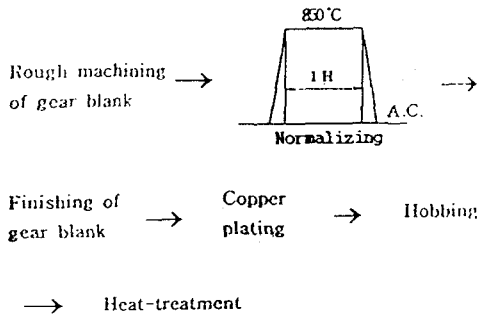

Fig. 1 Machining processes of test gears

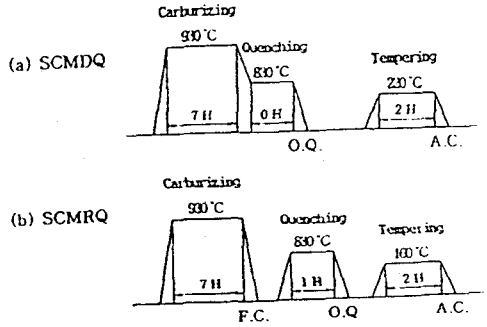

Fig. 2 Heat-treatment process of test gears

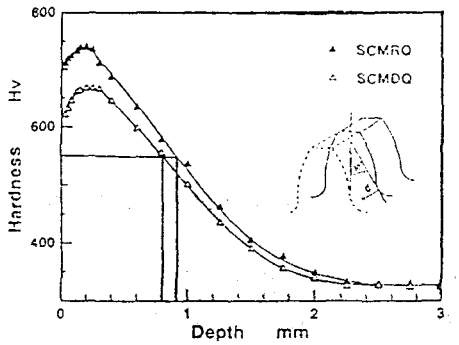

Fig. 3 Hardness distribution of SCMDQ and SCMRQ

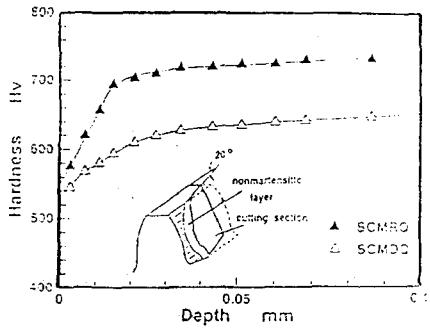

Fig. 4 Hardness distribution of non-martensitic layer in SCMDQ and SCMRQ

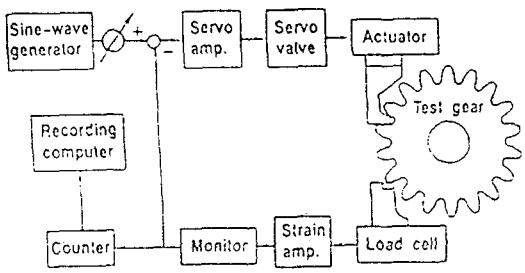

Fig. 5 System of bending fatigue tester

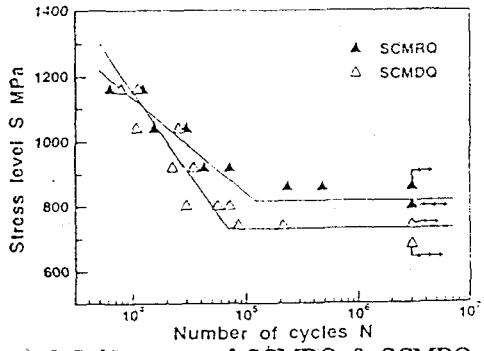

Fig. 6 S-N curves of SCMDQ & SCMRQ

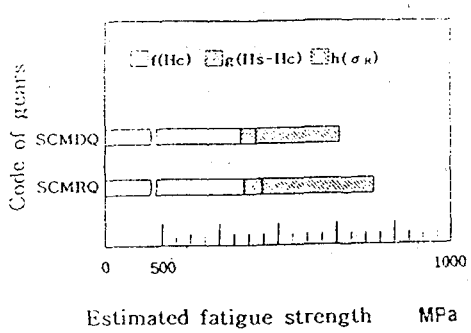

Fig. 7 Contributions of hardened layer & residual stress to fatigue strength

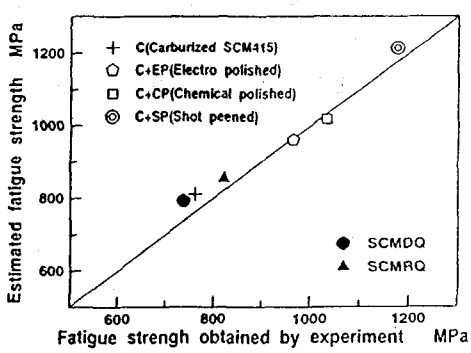

Fig. 8 Comparison between the estimated fatigue strength with experimental results