

SNC815 기어의 피로강도에 미치는 열처리 효과에 관한 연구

류성기 · 남태현* · 이진이**

경상대학교 수송기계공학부, 항공기부품기술연구센터,

*경상대학교 재료공학부, 항공기부품기술연구센터,

**사이타마대학 기계공학과

A Study on the Effect of Heat-treatment on the Fatigue Strength of SNC815 Spur Gears

Sung-Ki Lyu, Tae-Hyun Nam* and Jin-Yi Lee**

School of Transport Vehicle Eng., Res. Center for Aircraft Parts Tech. Gyeongsang Univ., 660-701, Korea

*Division of Materials Science and Eng. Res. Center for Aircraft Parts Tech. Gyeongsang Univ., 660-701, Korea

**Dept. of Mechanical Eng. Saitama Univ., 338-8570, Japan

Abstract This study deals with effects of heat-treatment on the fatigue strength of SNC815 spur gears. The test gears are heat-treated by two different treatments. After carburization, one group of the test gears is quenched directly, while the other group is furnace cooled, reheated then quenched. 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. By comparing the estimated strength with the experimental results, the validity of the previous experimental formula, presented by the author for estimating the fatigue strength of carburized gears, was discussed on these tested gears.

(Received October 11, 1999)

Keywords: Fatigue strength, Spur gears, Heat-treatment, Carburization, Direct quenching, Reheat quenching, s-n curves, Estimated strength.

1. 서 론

기계요소 중 가장 기본적이며, 동력전달장치에 가장 많이 사용하고 있는 기어는 근대공업의 발달과 함께 출력향상과 동력전달의 효율을 증가시키기 위하여 소형화, 경량화와 고강도가 요구되고 있다. 그러나 우리나라의 기어설계, 제조, 강도평가, 검사기술은 매우 낮은 수준이며, 고부하능력, 고정밀도, 저소음, 저가격면에서 국제경쟁력이 뒤떨어지고 있다. 따라서 현재 기어 생산기술의 한계를 극복하고, 기어 생산업체의 현장 애로기술을 해결하기 위하여 고경도의 신뢰성이 높은 열처리 기어에 관한 연구가 필요하다.

침탄처리 등의 표면경화처리를 실시하면 표면경화층이 형성되고 압축잔류응력이 생성된다. 표면경화층과 압축잔류응력은 기어의 굽힘피로강도 향상에 크게 영향을 미친다. 이 효과를 정량적으로 구하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 저자는[1] 침탄기어를 굽힘피로시험을 하여 S-N곡선을 구하고 표면경도, 심부경도, 이부

리위험단면의 압축잔류응력을 함수로 하여 피로강도를 추정하는 실험식을 구하였다. 그 결과 표면경도와 압축잔류응력의 증가가 피로강도 향상에 효과가 있다는 것을 밝힌바 있다. 그리고 침탄치차의 표면처리가 피로강도에 미치는 영향[2]과 압축잔류응력의 영향을 고려한 응력확대계수를 구하였다[3]. 그 결과 SCM재 침탄치차의 피로강도향상에 대한 경화층의 경도와 압축잔류응력의 영향을 정량화 하는 것이 실현되었다.

현재 SCM재의 침탄처리는 AGMA[4]의 추천으로 자동차, 항공기 등의 동력전달장치용 기어에 많이 적용되는 일반적인 방법이며, 더욱더 큰 굽힘피로강도를 얻기 위하여 SNC재료 사용이 효과적이라고 판단되어 고부하, 고강도 등이 요구되는 헬리콥터 등에 SNC재료의 침탄치차 및 재가열 칭 기어의 사용을 고려하고 있다. 그러나 SNC재료 침탄기어의 굽힘피로강도와 열처리법이 피로강도에 미치는 영향에 관한 연구는 아직 미흡한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 SNC재 기어의 굽힘피로강도에

미치는 열처리의 영향을 연구하기 위하여 SNC815재료로 가공한 기어에 각각 직접퀵칭과 재가열퀵칭을 실시하여, 이러한 열처리법이 기어의 표면경도와 금속조직, 이뿌리위험단면의 압축잔류응력 등에 미치는 영향을 고찰하였다. 그리고 피로실험을 실시하여 피로강도를 구한 후 이러한 열처리법이 피로강도에 미치는 영향을 밝혀 기어 생산기술에 기여하였다. 나아가 경도, 압축잔류응력을 사용하여 피로강도를 추정하는 식(1)에 본 연구에서 사용한 시험기어의 제 특성을 적용하여, 이 추정식이 본 연구의 시험기어에도 유효한가를 검토하였다.

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 SNC815 시험기어의 화학조성을 나타냈다.

2.2. 시험기어의 가공공정과 열처리 조건

직경 110 mm의 SNC815를 절단하여 선반으로 기어 브랭크를 만들어 호빙머시인을 기어를 제작하였다. 또한 기어의 강동향상을 위하여 표면정화처리로서 열처리를

실시하였다. 유효 침탄깊이는 AGMA[4]의 추천값을 사용하였으며, 본 연구에 사용한 시험기어의 가공공정을 Fig. 1에 나타냈다. 열처리법이 피로강도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 SNC815 재료로 가공한 기어에 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 직접 칭(direct quenching) 후 템퍼링(tempering)처리와 재가열 칭(reheat quenching) 후 뜨임처리를 실시하였다. 본 연구에서는 직접 칭을 DQ, 재가열 칭을 RQ로 나타냈으며, 시험에 사용한 기어는 다음과 같이 3개를 붙였다.

켄

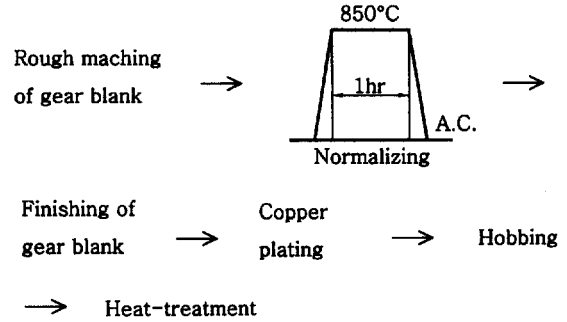


Fig. 1. Machining process of test gears.

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 ± 0.01
Tip diameter [mm]	100 ± 0.01
Span gage(3 teeth) [mm]	36.16 ± 0.01
Finish	Hobbed
Material	SNC815
Heat-treatment	see Fig. 2

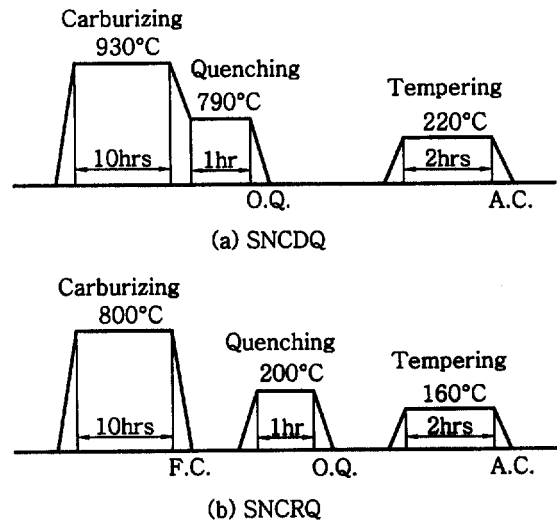


Fig. 2. Heat-treatment process of SNC gears.

Table 2. Chemical compositions of SNC815(wt.%)

SNC815	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
Standard	0.12~0.18	0.15~0.35	0.35~0.65	≤ 0.03	≤ 0.03	3.00~3.50	0.70~1.00
Measured	0.130	0.238	0.532	0.011	0.015	3.240	0.910

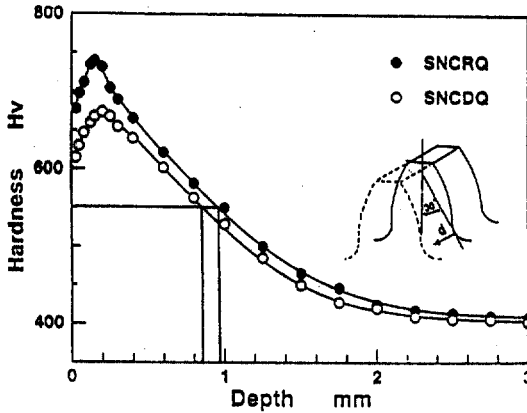


Fig. 3. Hardness distribution of SNCDDQ and SNCRQ gears.

SNC815 침탄+DQ+템퍼링 (220°C) SNCDDQ
 SNC815 침탄+RQ+템퍼링 (160°C) SNCRQ

2.3. 시험기어의 경도

시험기어의 경도는 측정하중 300 gf, 지속시간은 20 sec로 마이크로 비커스경도기(MVK-E)를 사용하여 측정하였다. Fig. 3에 SNC계열 시험기어의 깊이방향 경도 분포와 기어의 절단면과 깊이방향의 측정위치를 나타냈다. 재가열퀵칭기어의 최대경도는 직접퀵칭기어의 최대 경도보다 높게 나타났으며, 표면층의 경도저하가 크게 나타났다. 그리고 극 표면에서 경도측정이 곤란하므로 표면경도는 기어를 경사지게 절단하여 측정하중을 50 gf, 지속시간을 15 sec로 하여 측정된 깊이방향 분포로부터 외삽법으로 구하였다. 표면층내의 경도분포를 Fig. 4에 나타냈다. 표면층내의 경도는 Fig. 4에 도시한 바와 같이 약 200의 각도로 시험기어를 경사지게 절단하여 그 절단면을 측정된 경도이다. 그 결과 이뿌리위험단면의 표면경도가 약 550 Hv까지 저하하는 것을 알 수 있다. 재가열퀵칭의 경우 표면경도는 직접퀵칭의 경우보다 높게 나타났지만 양자의 차이는 그다지 크게 나타

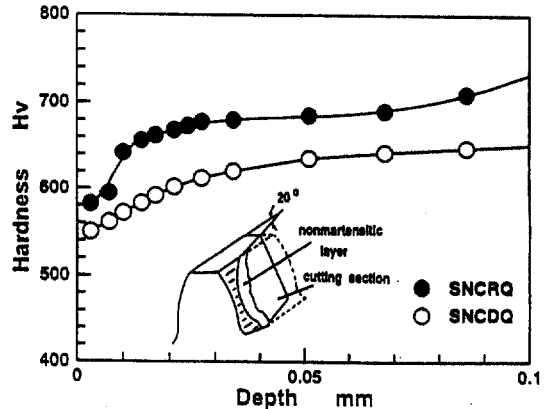


Fig. 4. Hardness distribution of non-martensitic layer in SNCDDQ and SNCRQ gears.

나지 않았다. 이하의 고찰에 사용하는 표면경도는 Fig. 4에 도시한 바와 같이 측정값을 외삽하여 구한 값이다.

유효침탄깊이는 Fig. 3에 도시한 바와 같이 경도가 550 Hv가 되는 지점의 깊이를 말하며, 일반적으로 AGMA[4]의 추천값을 참고하여 열처리를 하고 있다. 본 연구에 사용한 시험기어의 경우 유효침탄깊이는 SNCDDQ가 약 0.85 mm, SNCRQ가 약 0.95 mm로 나타났다.

기어의 경도측정 결과로부터 얻은 표면경도(Hs), 최대 경도(Hm), 심부경도(Hc), 유효침탄깊이(d_{eff}, mm), 잔류 응력(σ_R, MPa)의 평균값과 표준편차를 Table 3에 나타냈다.

2.4. 시험기어의 금속조직

시험기어의 금속조직은 몇 개의 이물 절단한 후 마운팅하여 연마를 한 다음 5 ml의 질산과 100 ml의 에틸알콜 혼합액으로 부식을 시킨 후 흐르는 물에 깨끗이 세척하여 얼룩이 생기지 않도록 드라이어로 건조시켜 광학현미경으로 관찰하였다.

조직의 관찰위치는 이뿌리위험단면 부근이며, 각 시험

Table 3. Hardness, residual stress of test gears

Code of test gears		Hs	Hm	Hc	d _{eff}	σ _R
SNCDDQ	Mean values	550	678	402	0.85	-304
	Standard deviation	7	10	4	0.05	31
SNCRQ	Mean values	582	742	408	0.95	-408
	Standard deviation	6	9	4	0.03	51

Hs : Hardness of surface, Hm : Hardness of maximum, Hc : Hardness of core, d_{eff} : Depth of effective carburized σ_R : Residual stress of surface

Fig. 5. Metallograph of SNCDQ(near surface).

기어의 광학현미경조직 사진을 Fig. 5, 6에 나타냈다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 SNCDQ 시험기어의 표면에는 검게 부식된 침상의 마르텐사이트조직과 오스테나이트조직이 관찰되었다.

또한 Fig. 6에서와 같이 SNCRQ 시험기어의 표면에서는 재가열 퀴칭에 의한 미세한 마르텐사이트조직이 관찰되었다. 이것은 침탄처리 과정에서 생성된 오스테나이트조직이 재가열시에 마르텐사이트조직으로 분해된 것으로 판단된다.

결정입도의 측정결과 SNCDQ는 8.1로 나타났으며, SNCRQ는 각각 8.4로서 재가열퀴칭기어의 경우가 직접 퀴칭기어에 비하여 결정입이 미세하게 나타났다. 잔류오스테나이트양은 SNCDQ 23.0%, SNCRQ는 1.8 %로 측정되었다. 따라서 재가열퀴칭기어는 직접퀴칭기어에 비하여 미세한 퀴칭조직이 나타나는 것을 알 수 있다.

2.5. 시험기어의 압축잔류응력

압축잔류응력은 이뿌리위험단면 부근의 이높이방향 압축잔류응력(σ_R)이 굽힘강도에 영향을 크게 미치므로 치형방향의 압축잔류응력이 요구되지만 측정이 곤란하여 기어 본래 상태에서 측정이 가능한 이뿌리 이바닥의 이폭방향 압축잔류응력(σ_{Rt})으로 대응하였다. 양자의 상관관계는[5] 침탄기어의 경우 $\sigma_{Rt} = \sigma_R$ 로 나타나 본 논문에서 이 결과를 이용하였다. 본 시험기어의 압축잔류응력 측정결과를 Fig. 7에 나타냈으며, SNCDQ는 304 MPa, SNCRQ는 408 MPa이 얻어졌다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 SNCRQ는 SNCDQ에 비해 102 MPa 높게 나타났다.

3. 굽힘피로시험결과 및 고찰

Fig. 6. Metallograph of SNCRQ(near surface).

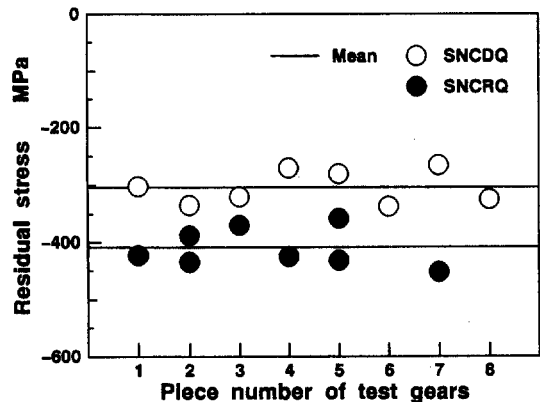


Fig. 7. Residual stresses of test gears.

3.1. 굽힘피로시험장치

피로시험에는 Fig. 8에 나타난 전기·유압서보식 피로 시험기를 사용하였다. 정현파 발생기에서 만들어진 신호는 신호레벨 조정기를 거쳐 서보앰프에서 증폭되어 서보밸브를 구동시킨다. 시험치차에 가하여진 하중은 스트레인 게이지를 부착시킨 로드셀에 의하여 측정되고 설정값에 대하여 서보제어된다. 부하에 의한 이끝의 손상을 방지하기 위하여, 이 끝에서 반경방향으로 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 최대 실용력 S (MPa)를 이용하였다. 법선하중 P_n (kgf)과 이뿌리 최대 실용력의 관계는 2차원 유한요소해석결과를 이용하여 다음 식[6]과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기에서 b =치차폭(mm), m =모듈(mm)을 나타낸다.

3.2. 시험기어의 피로시험결과

ISO 기어강도 설계식[7]에서 열처리 시험기어의 수명 계수가 $N \geq 3 \times 10^6$ 에서 1.0인 것을 고려하여 비파괴 반복하중수 $N=3 \times 10^6$ 으로 하였다. 굽힘피로강도 시험결과를 정리하여 S-N 곡선[8]의 경사부와 수평부를 구한 결과는 Fig. 9와 같다.

시험기어 피로강도는 스테이케이스(staircase)방법[9] ($\sigma_u = S_0 + \Delta \cdot d$)을 이용 5회 반복실험하여 평균값으로 구하였으며 결과를 Table 4에 나타냈다. 여기에서 S_0 는 시험을 시작할 때의 응력레벨값이며, d 는 응력레벨값의 간격을 나타내고 있다. 계수 Δ 는 피로시험결과 응력레벨값의 간격(d)과 피로강도 표준편차(σ)의 비로서 계산된다.

스테이케이스방법을 이용하여 5회 반복실험한 결과의 평균값 즉 시험기어의 피로강도는 SNC815 직접켄칭기어(SNCDQ)는 814 MPa, 재가열 켄칭기어(SNCRQ)는 927 MPa로서 재가열 켄칭기어는 직접 켄칭기어에 비하여 피로강도가 약 14%높게 나타났다.

4. 피로강도 추정식에 의한 피로강도 추정

피로강도 σ_u [MPa]는 심부경도 H_c [MPa], 표면경도 H_s [MPa] 및 표면압축잔류응력 σ_{R} [MPa]은 다음과 같은 관계가 있다 [1].

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

여기에서, σ_{uc} 는 침탄처리를 하지 않은 기어의 피로강도를 의미하며, σ_{usc} 와 σ_{ur} 은 표면경화층과 압축잔류응

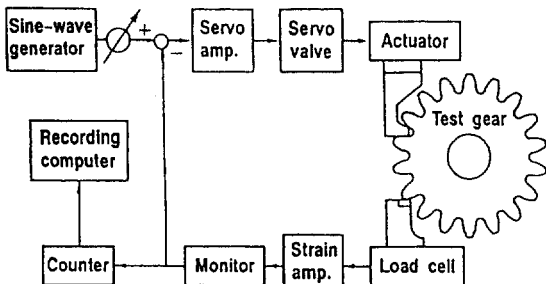


Fig. 8. System of bending fatigue tester.

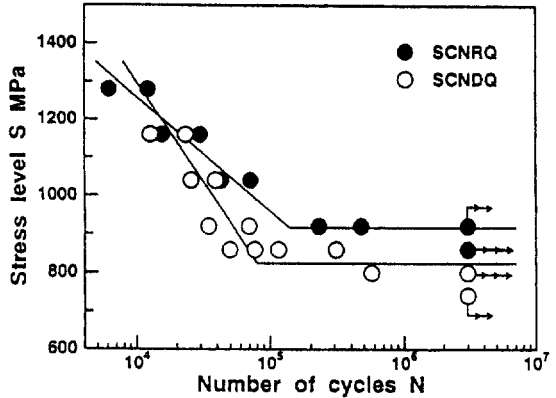


Fig. 9. S-N curves of SNCDQ and SNCRQ gears.

Table 4. Estimation of fatigue strength by staircase method[9]

Code of gears	S_0 MPa d MPa	Experimental results	Fatigue strength σ_u (MPa)
SNCDQ	$S_0 = 740$ $d = 60$	○ ○ × ○ ×	$\Delta = 1.17$ $\sigma_u = 810$
SNCRQ	$S_0 = 920$ $d = 60$	○ ○ × ○ ×	$\Delta = 0.08$ $\sigma_u = 925$

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

력에서 야기된 강도의 증가를 의미한다.

피로강도에 미치는 열처리의 영향을 고찰하기 위하여 σ_{usc} 와 σ_{ur} 을 구하여 Fig. 10에 나타냈다. 열처리에 의한 피로강도의 증가는 Fig. 10에 나타난 바와 같이 σ_{usc} 와 σ_{ur} 의 증가로 설명할 수 있다. 즉 열처리를 함으로써 표면경화층과 압축잔류응력이 생성되어 표면경도와 압축잔류응력이 향상된 효과라고 볼 수 있다. 그리고 위의 추정식에 Table 3에 나타난 경도와 압축잔류응력의 측정결과를 대입하여 얻은 피로강도 추정값과 시험결과를 Fig. 11에 나타냈다. 또한 저자가 그동안 실험한 침탄처리 후 화학연마, 전해연마한 기어와 쇼트피닝기어의 데이터[3]도 함께 Fig. 11에 나타냈다. 추정값은 시험값에 근사한 값으로 나타났으며, 추정오차는 3~10%로 나타났다. 따라서 위의 식(2)는 직접켄칭과 재가열 켄칭을 실시한 시험기어에도 유효하다는 것을 알았다.

5. 후 기

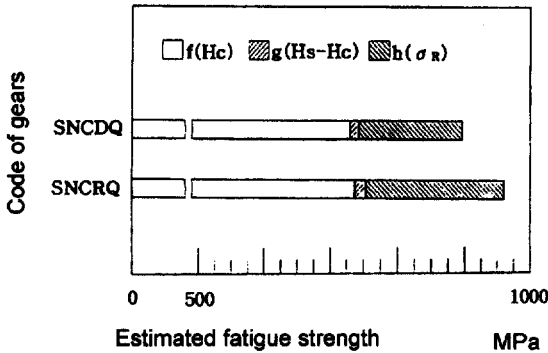


Fig. 10. Contributions of hardness layer and residual stress to fatigue strength.

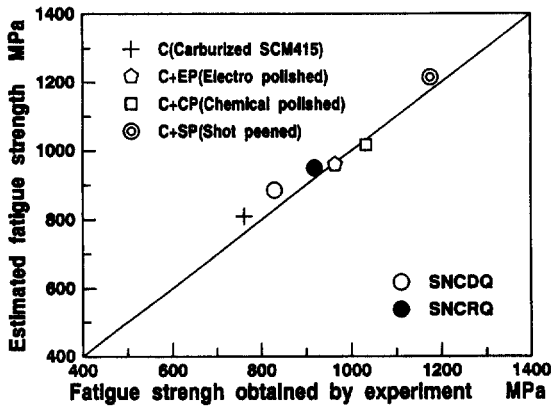


Fig. 11. Comparison between the estimated fatigue strength with the experimental result.

본 연구는 경상대학교 항공기부품기술연구센터의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

6. 결 론

본 연구에서는 SNC815의 직접켄칭기어와 재가열켄칭

기어의 표면경도, 압축잔류응력, 표면조도 등을 측정하여 열처리의 영향을 고찰하였다. 그리고 굽힘피로시험을 실시하여 굽힘피로강도에 미치는 열처리의 영향을 고찰하고, 종래 제안된 피로강도 추정식(1)을 (2)에 본 연구에서 사용한 시험기어의 재특성을 적용시켜 보았다.

본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 경도와 압축잔류응력은 재가열켄칭을 처리한 기어가 직접켄칭을 처리한 기어보다 높게 나타났다.
2. SNC재료의 재가열켄칭 시험기어의 표면에서는 재가열켄칭에 의한 미세한 마르텐사이트조직이 관찰되었다. 이것은 침탄처리 과정에서 생성된 오스테나이트조직이 재가열시에 분해된 것으로 사료된다.
3. SNC재료의 재가열켄칭한 기어가 직접켄칭한 기어에 비해 14% 높은 피로강도가 얻어졌다.
4. 피로강도 추정식은 본 시험기어에 대하여도 적용할 수 있으며, 추정오차는 3~10%로 나타났다.

참고문헌

1. S. K. Lyu : Journal of the Korean Society of Marine Engineers, 22(6), (1998) 35.
2. 柳晟基, 井上克己, 加藤正名, 鄧綱 : 日本機械學會, 60-572(C), (1994) 1391.
3. 柳晟基, 井上克己, 加藤正名, 鄧綱 : 日本機械學會, 60-578(C), (1994) 3504.
4. AGMA Standard, Practice for Carburized Aerospace Gearing, American Gear : Manufacturers Association, 246.02A, (1983) 11.
5. Sung-ki Lyu, K. Inoue, M. Kato, K. Deng : JSME International Journal, 39-1(C), (1996) 108.
6. T. Tobe, M. Kato, and K. Inoue : ASME, 2 (1979) 1105 .
7. ISO/DP 6335/III, Calculation of Load Capacity of Spur and Helical Gears : Part 3, (1980) 79.
8. 김창주 : 재료시험, 동명사, (1993) 299.
9. R. E. Little : Probabilistic Aspects of Fatigue; ASME Spec. Tech. Pull, 5(11), (1972) 54.