

세이빙기어의 굽힘피로강도 평가에 관한 연구

강창호, 박준철, 임용현*¹, 류성기*²

(한국박용기관학회)

A Study on the Evaluation of Bending Fatigue Strength in Shaving Gears

Chang-Ho KANG, Jun-Cheol PARK, Yong-Hyun Lim*¹ and Sung-Ki LYU*²
(KOSME)

Abstract : This study deals with the evaluation of bending fatigue strength in shaving gears. We manufactured gears using manufacture processes that are currently used in most gears manufacturing companies. The test gears are hobbed, then the tooth surface are treated by a combination of shaving, carbonizing and shot peening. The constant stress amplitude fatigue test is performed by using an electrohydraulic servo-controlled pulsating tester. The S-N curves are obtained and illustrated.

In this study, we investigated the effect of shaving process and shot peening on fatigue strength. The effect of shaving process and shot peening on the fatigue strength is evaluated quantitatively. The enhancement of fatigue strength due to shaving process and shot peening is clarified.

Key Words : Evaluation of Bending Fatigue Strength(굽힘 피로강도 평가), Shaving Gear(세이빙기어), Shot Peening(쇼트피닝)

1. 서 론

자동차, 항공기, 산업기계 등의 동력전달장치에 가장 많이 사용하고 있는 기어는 산업발달과 함께 출력향상을 위한 동력전달 향상, 고강도화, 소형화, 경량화, 고정도의 기어가 더한층 요구되고 있다. 이러한 시대적 요구에 부응하고, 현재 직면하고 있는 기어 생산기술의 한계를 극복하기 위하여 보다 신뢰성이 높은 기어설계가 필요하다. 특히 고부하, 고속의 동력전달장치에는 칩탄처리 등의 표면처리를 실시하는 기어를 많이 사용하고 있는데 기어에 칩탄처리를 하면 표면경화층이 형성되고,

표면과 심부의 냉각속도 차에 의하여 압축잔류응력이 생성된다. 이러한 표면경화층과 압축잔류응력은 기어의 굽힘피로강도 향상에 유효하며, 이 효과를 정량적으로 구하기 위하여 많은 연구들을 하고 있다^{1,2)}.

칩탄처리는 AGMA³⁾의 추천으로 자동차, 항공기, 산업기계 등의 동력전달장치용 기어에 많이 사용되고 있는 일반적인 방법이다.

Aida⁴⁾, Retting⁵⁾은 여러 종류의 재료에 칩탄처리를 실시한 기어의 피로강도를 구하여 경화층과 잔류응력의 영향을 고찰하였다.

Nishikou⁶⁾는 칩탄기어와 고주파칩탄기어에서 피로강도를 구하여 피로강도추정식을 제안하였다. 그러나 이들은 현재 기어가공에

*1 경상대학교 대학원

*2 경상대학교 수송기계공학부, 항공기부품기술연구소

많이 사용하고 있는 세이빙가공을 하지 않는 호브가공기어를 가지고 연구를 하였으며 세이빙기어의 강도평가에 관한 연구는 연구된 바가 없다.

그리고 우리나라에서는 기어피로시험기가 그동안 전무한 상태이기 때문에 기어를 성능평가 하지 않고 사용하여 불필요한 표면처리와 가공공정으로 많은 낭비를 하고 있으며, 부하하중에 알맞지 않는 기어를 사용하는 경우와 과도한 부하상태나 무리한 운전에서 야기되는 사용자 부주의에서 발생하는 문제점들을 생산업체가 책임을 지는 경우가 많다.

따라서 본 연구에서는 현재 기어가공업체가 많이 생산하고 있는 세이빙기어의 성능을 평가하여 적재적소에 사용할 수 있도록 하며, 현재 상용하고 있는 기어 가공공정으로 제작한 기어의 기계적성질을 고찰하여 세이빙가공과 쇼트피닝이 기어의 표면경화층과 이뿌리 위험단면의 압축잔류응력 등에 미치는 영향을 고찰하였다.

그리고 피로시험을 실시하여 굽힘피로강도를 구하여 세이빙가공과 쇼트피닝이 피로강도에 미치는 영향을 고찰하였다. 그리고 더 나아가 기어피로강도 추정식⁷⁾에 본 연구에서 사용한 시험기어의 제 특성을 적용시켜, 이 추정식이 본 연구의 시험기어에도 유효한가를 고찰하였다.

2. 시험기어의 제특성

2.1 시험기어

본 연구에 사용한 기어의 재료는 KSD 규격의 SCM420을 사용하였으며, 그 화학적 조성비를 Table 1에 나타냈다. 시험기어 재료의 화학성분 분석은 전문업체에 의뢰하여 분석하였다.

시험기어의 주요 제원은 Table 2와 같으며, 이뿌리에서 X선 잔류응력측정이 가능하도록 모듈을 $m = 5$, 잇수 $z = 18$ 을 선택하였고, 피로 시험기의 부하응력을 고려하여 이폭 $b = 8\text{mm}$ 를 채택하였다.

직경 110mm의 SCM420의 환봉을 절단하

여 선반으로 기어 블랭크를 만들어 호빙머신(hobbing machine)과 세이빙머신(shaving machine)으로 기어를 가공하였다. 그리고 측면으로부터 칩탄을 방지하기 위해 측면에 20 μm 의 동도금을 실시한 후 칩탄처리를 실시하였다.

유효칩탄깊이는 AGMA³⁾의 추천값을 참고하여 칩탄처리를 하였으며, 본 연구에 사용한 시험기어의 가공공정과 열처리조건을 각각 Fig. 1, 2에 나타냈다.

또한 쇼트피닝이 기어의 피로강도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 쇼트피닝을 실시하였다. 쇼트피닝은 D기어 전문생산업체에 의뢰하여 실시하였다. 본 연구에 사용한 시험기어는 가공공정에 따라 Table 3과 같이 기호를 각각 부여하였다.

Table 1 Chemical composition of SCM420(wt%)

SCM420	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
Range	0.18 0.23	0.15 0.35	0.60 0.85	≤ 0.3 0	≤ 0.3 0	≤ 0.3 0	≤ 0.2 5	0.90 1.20	0.15 0.30
Measured	0.21	0.26	0.70	0.014	0.015	0.20	0.15	0.95	0.16

Table 2 Dimension of test gear

Module m [mm]	5
Number of teeth z	18
Face width b [mm]	8.0 ± 0.01
Pressure angle [deg]	20
Teeth shape	Involute
Tip diameter [mm]	100
Finish	① Hobbed ② Hob & shaved
Material	SCM 420
Heat - treatment	See Fig. 2

2.2 시험기어의 경도와 압축잔류응력 측정경과 및 고찰

경도측정은 비커스 경도기(FM-7)를 사용하여 측정하였으며, 시험편은 몇 개의 기어를 커터로 절단하여 마운팅한 후 폴리싱(polishing)과 래핑(lapping)을 실시하여 이뿌리 위험단면 부근에서 깊이 방향으로 경도분포를 측정하였다.

측정조건은 측정하중 300 gf, 지속시간 10 초로 하였다. 시험기어의 경도측정결과의 예를 Fig. 3에 나타냈으며, 시험기어 HC, HSC, HSCSP의 최대경도(H_m), 심부경도(H_c), 유효 침탄깊이(d_{eff}) 등을 측정하여 Table 4에 나타냈다.

Table 3 Code of test gear

Code	Surface-treatment process
HC	Hobbing → Carburizing
HSC	Hobbing → Shaving → Carburizing
HSCSP	Hobbing → Shaving → Carburizing → Shot peening

Table 4 Hardness & compress residual stress value of test gears

Code of test gear	H _s (H _v)	H _m (H _v)	H _c (H _v)	d _{eff} (mm)	σ _R (MPa)
HC	551	758	332	0.95	-302
HSC	580	782	334	0.94	-311
HSCSP	780	846	334	0.94	-486

H_s : Hardness of surface,
 H_m : Hardness of maximum,
 H_c : Hardness of core,
 d_{eff} : Depth of effective carburized
 σ_R : Residual stress of surface

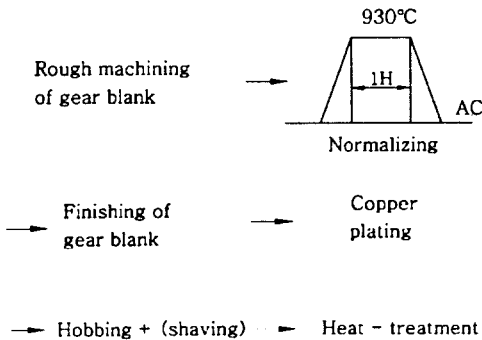


Fig. 1 Machining process of test gears

유효침탄깊이(d_{eff})는 경도가 550 Hv가 되는 지점의 깊이를 말하며, 일반적으로 AGMA³⁾의 추천값을 참고하여 열처리를 하고 있다. 본 연구에 사용한 시험기어의 경우, 유효침탄깊이는 약 0.94~0.95 mm로 나타났다.

표면층 내의 표면경도(H_s)는 Fig. 4에 도시한 바와 같이 약 20°의 각도로 시험기어를 경사지게 절단하여 그 절단면에서 측정하였다. 그 결과 HC계열기어의 경우 이뿌리위험단면의 표면경도가 551 Hv까지 저하하는 것을 알 수 있었다. 그리고 시험결과 위험단면의 극표면에서 HSC계열기어가 HC계열기어보다 다소 높게 나타났다. 표면경도(H_s)는 Fig. 4에 도시한 바와 같이 측정값을 외삽하여 구한 값을 사용하였다.

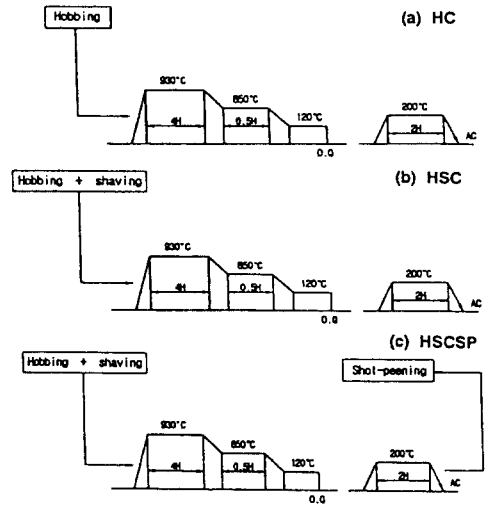


Fig. 2 Heat-treatment process of test gears

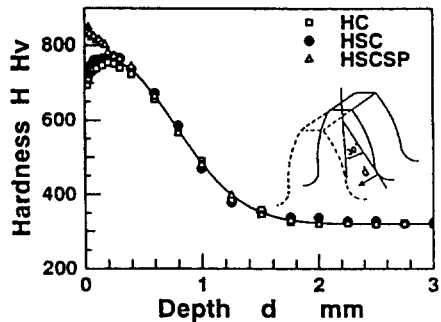


Fig. 3 Hardness distribution of test gears

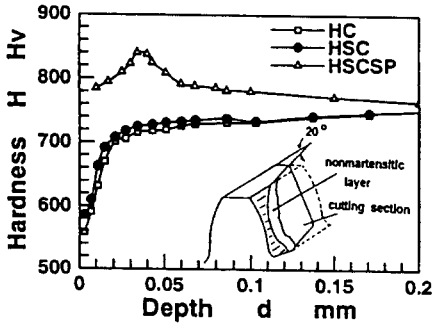


Fig. 4 Hardness distribution of non-martensitic layer in test gears

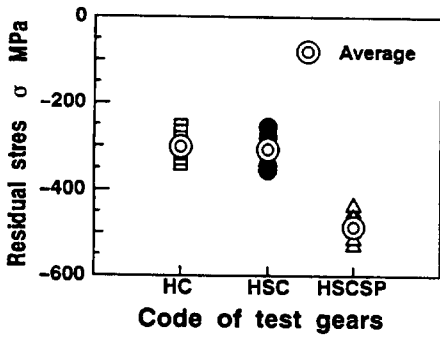


Fig. 5 Residual stress of test gear

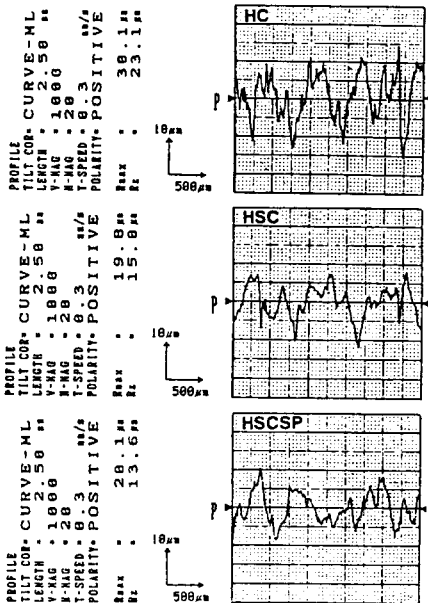
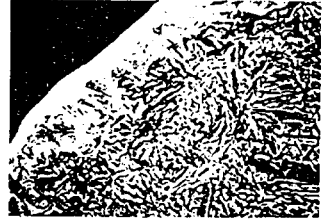


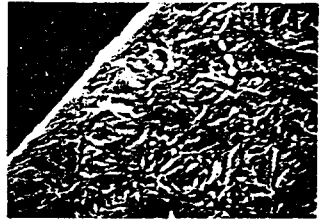
Fig. 6 Comparison of the surface roughness on test gears



(a) HC



(b) HSC



(c) HSCSP

Fig. 7 Photograph of test gears by SEM

2.3 시험기어의 표면 거칠기와 금속 조직 고찰

시험기어의 거칠기 측정은 표면거칠기 측정기(Surfcome 570A)를 사용하였다. 그리고 각 시험기어 HC 및 HSC계열기어에 대한 치형 방향의 10점 평균거칠기(Rz) 및 최대높이(Rmax) 측정 결과의 예를 Fig. 6에 나타냈다.

Fig. 6에서 알 수 있듯이 호빙가공 후 세이빙 가공한 기어가 호빙가공기어보다 Rmax와 Rz이 약 30~35% 향상됨을 알 수 있었다.

그리고 시험기어의 이를 절단하여 연마한 후 3%소산에탄올로 에칭하여 주사전자현미경(SEM)으로 금속조직을 관찰하였다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 기어의 이뿌리 위험단면 부근에서 두께 11~16μm의 표면이상층이 발견되었고, 세이빙기어의 경우 호브기어보다 표면상태가 양호하다는 것을 알 수 있다.

3. 굽힘 피로시험

3.1 굽힘 피로시험 장치

굽힘피로시험에는 정적정격하중 2,500 kgf, 운전주파수 40Hz, 공급유압은 210 kgf/cm²의 고속형 전기·유압서보식 피로 시험기를 사용하였으며 피로시험기의 시스템구성은 Fig. 8과 같다.

시험기의 원리는 신호발생기에서 정현파 신호를 발생시켜 신호레벨 조정기에 의해 실험설정전압을 조정한다. 서보앰프에 의해 서보신호로 증폭되며, 이 신호에 의해 서보밸브가 작동하여 유압을 제어하는 피스톤을 구동한다. 시험기어의 이에 가해지는 하중은 로드셀에 의해 검출되어, 스트레인앰프에서 증폭된 후 피드백 된다. 시험기의 유온, 유압, 서보전류, 하중, 입력신호 및 편차신호는 각각 전기신호로 변환되어 제어판에서 모니터 된다. 시험기에는 자동정지회로가 설치되어 유온, 유압, 서보전류 및 하중이 설정상한 값을 초과하거나, 시험기어의 이빨이 절손되어 피스톤의 변위가 크게 되면, 피로시험기가 자동적으로 정지된다.

또한, 시험 중에는 항상 오실로스코프에 의해 하중파형 및 설정하중과의 편차를 모니터 한다. 부하에 의한 이빨의 손상을 방지하기 위하여 이 끝부터 반경방향으로 0.8 mm 내측의 점을 하중점으로 하였으며, 부하속도는 20~40 Hz로 하였다. 시험에는 일정진폭을 반복한 하중을 사용하였으며, 그 최대하중의 변동은 1% 이내가 되도록 조정하였다. 그리고 로드셀의 분리를 방지하기 위해 반복하중의 최소 값으로서 약 8.8 kgf를 설정하였다.

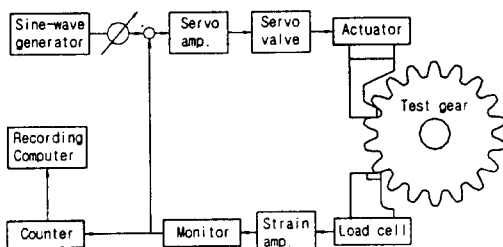


Fig. 8 System of bending fatigue tester

3.2 시험하중과 이뿌리위험단면의 실응력과의 관계

피로시험의 하중표시는 최대 이뿌리실응력 S(MPa)를 사용하는 것으로 한다. 시험기에 의해 부하된 잇면 법선하중을 P_n(kgf), 인장최대 이뿌리실응력을 S(MPa)라고 하면, 표준 래크(rack)형 공구에서 기어 이빨이 절손된 기어에 대해서 2차원 유한요소해석 결과에 의해 식(1)이 얻어 졌다.⁷⁾

$$S = \frac{1}{0.102} \frac{P_n}{bm} \left[a_1 \left(\frac{1}{z} \right) + a_2 \left(\frac{1}{z} \right)^3 + 3.50 \right] \exp \left[\left\{ 2.50 \left(\frac{1}{z} \right) - 0.50 \right\} \frac{\lambda_p}{m} \right] \dots \dots \dots (1)$$

여기에서, b : 이폭, m : 묘두율, z : 잇수, λ_p : 치형 중심선에서 이 끝으로부터 하중점까지의 거리(mm), a₁ : 2.50, a₂ : 2600을 나타낸다.

본 연구에 사용한 시험기어의 제원, m=5, z=18, b=8 mm, λ_p=0.8 mm를 식(1)에 대입하면, 다음 식(2)와 같다.

$$S(MPa) = 37.8 \frac{P_n}{bm} = 0.945 P_n \dots \dots (2)$$

본 연구에서는 식(2)을 사용하여 시험하중과 이뿌리위험단면의 실응력과의 관계를 구하였다.

4. 피로시험결과 및 고찰

ISO⁸⁾ 기어 강도계산식을 참고로 하여, 본 연구에서는 열처리 시험기어의 수명계수가 N ≥ 3 × 10⁶에서 1.0인 것을 고려하여 비파괴 반복하중수는 N=3 × 10⁶으로 하였다. 전기·유압서보식 피로시험기를 사용하여 HC, HSC, HSCSP계열기어의 피로시험을 하였으며, 그 시험결과를 정리하여 S-N곡선의 경사부와 수평부를 구하여, Fig. 9에 나타냈다.

HC, HSC, HSCSP계열 시험기어 피로강도는 스테아케이스(staircase)법⁹⁾의 σ_u=S₀+Δd를

이용하여 구하였으며, S_0 는 시험을 시작할 때 응력레벨값이며, d 는 응력레벨값의 간격을 나타내고 있다. 계수 Δ 는 피로 시험결과 응력레벨값의 간격(d)과 피로강도, 표준편차(σ)의 비로써 계산된다. 각 계열 시험기어의 피로강도는 Table 5의 예와 같이 5회 반복실험한 값의 평균값으로 구하였으며, HC계열기어는 776 MPa, HSC계열기어는 835 MPa이 얻어졌다. 본 시험결과 HSC계열기어는 HC계열기어보다 피로강도가 약 8% 높게 나타났다. 피로강도가 향상된 이유는 세이빙 가공을 함으로서 표면경도, 표면거칠기 등 표면성상이 향상되어 피로강도가 증가된 것으로 사료된다.

그리고 HSCSP계열기어는 1,098 MPa 값이 얻어졌다. 피로시험결과 쇼트피닝을 처리하지 않은 시험기어 즉, HC 및 HSC계열기어보다 쇼트피닝을 처리한 기어(HSCSP)가 평균 약 32~41% 피로강도가 향상된 것으로 나타났다.

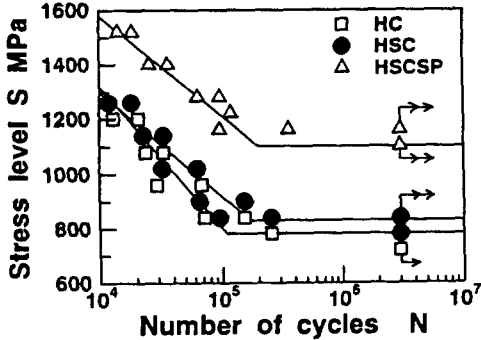


Fig. 9 S-N curve of test gears

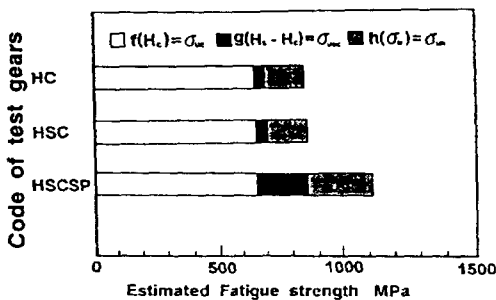


Fig. 10 Contributions of hardened layer and residual stress to fatigue strength

Table 5 Estimation example of fatigue strength by staircase method

Code of gear	S_0 MPa d MPa	Experimental results	Fatigue strength σ_u (MPa)
HC	$S_0 = 780$ $d = 60$	× × ○ ○ ○	$\Delta = -0.08$ $\sigma_u = 775$
HSC	$S_0 = 780$ $d = 60$	× ○ × ○ ○	$\Delta = 1.12$ $\sigma_u = 847$
HSCSP	$S_0 = 1,080$ $d = 60$	○ × ○ ○ ○	$\Delta = 0.31$ $\sigma_u = 1,099$
Note) × : Break before $N = 3 \times 10^6$ ○ : Not break at $N = 3 \times 10^6$			

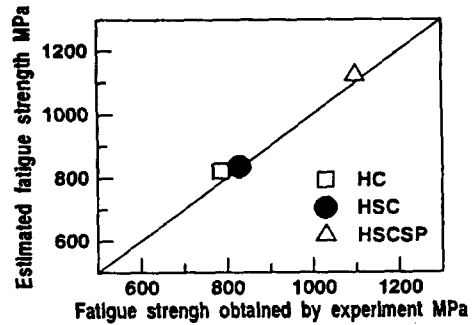


Fig. 11 Comparison between estimated fatigue strength with experimental results

5. 피로강도 추정식에 의한 강도추정

SCM420의 침탄기어의 굽힘 피로시험결과로부터 얻은 피로강도 σ_u (MPa)를 추정하는 식은 다음과 같다¹⁰⁾.

$$\begin{aligned} \sigma_u &= \sigma_{uc} + \sigma_{usc} + \sigma_{uR} = f(H_c) + g(H_s - H_c) + h(\sigma_R) \\ &= (257 + 1.17H_c) + 3.1 \exp[0.0097(H_s - H_c)] - 0.5 \sigma_R \end{aligned} \quad \dots (3)$$

여기에서, H_c (H_v)는 심부경도, H_s (H_v)는 표면경도, σ_R (MPa)은 이뿌리 표면의 압축잔류응력이다. 또한, $\sigma_{uc} = f(H_c)$, $\sigma_{usc} = g(H_s - H_c)$, $\sigma_{uR} = h(\sigma_R)$ 은 침탄전 소재의 피로강도, 표면경도증가에 의한 피로강도의 증가, 압축잔류응력에 의한 피로강도의 증가를 나타낸다. 피로강도에 미치는 기어가공법과 표면처리법의 영향을 고찰하기 위하여 σ_{uc} 와 σ_{uR} 을 구하여 Fig. 10에 나타냈다. 기어

가공법과 표면처리법에 의한 피로강도의 메커니즘은 Fig. 10에 나타난 바와 같이 σ_{usc} 와 σ_{uR} 의 증가로 설명할 수 있다. σ_{usc} 와 σ_{uR} 의 증가는 표면처리를 함으로써 표면경화층과 압축잔류응력이 생성되어 표면의 경도와 압축잔류응력이 향상된 효과라고 볼 수 있다. 그리고 위의 추정식에 Table 4에 나타난 경도와 압축잔류응력의 측정결과를 대입하여 얻은 피로강도 추정값과 시험결과의 비교를 Fig. 11에 나타냈다. 추정값은 시험값에 근사한 값으로 나타났으며, 추정오차는 2~6%로 나타났다. 따라서 위의 식(3)은 본 연구에 사용한 시험기어에 대하여 유효하다는 것을 알았다.

6. 결 론

본 연구에서는 산업현장에서 많이 생산하고 있는 기어의 세이빙가공과 쇼트피닝의 영향을 연구하기 위하여 상용하고 있는 기어의 표면경도, 표면거칠기, 압축잔류응력 등을 고찰하였다.

그리고 굽힘피로시험을 실시하여 기어의 세이빙가공법과 쇼트피닝이 피로강도에 미치는 영향을 고찰하였으며, 피로강도 추정식에 본 시험기어의 제 특성을 적용시켜 보았다.

본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 표면거칠기(Rmax, Rz)는 세이빙기어(HSC)가 세이빙 가공을 하지 않는 기어(HC)보다 약 30~35% 향상되었다.
2. 쇼트피닝을 처리한 HSCSP계열기어가 HC, HSC계열기어보다 표면경도는 약 34~41%, 압축잔류응력은 약 56~60% 높게 나타났다. 따라서 쇼트피닝처리에 의해 표면경화층이 형성됨을 알 수 있다.
3. 피로강도는 HSC계열기어가 HC계열기어보다 약 8% 높게 나타났으며, 쇼트피닝을 처리한 기어(HSCSP)는 HC, HSC계열기어보다 약 32~41% 향상되었다.
4. 피로강도 추정식은 본 시험기어에 대하여도 적용할 수 있으며, 추정오차는 2~6%로 나타났다.

参 考 文 献

- 1) Lyu, S., Inoue, K., Kato, M., Deng, G., "Estimation of Residual Stress Due to Shot Peening in Carburized Gears and Its Effect on the Stress Intensity Factor", *JSME*, Vol. 60, C, pp. 3505-3509, 1994.
- 2) 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.
- 3) AGMA Standard, "Practice for carburized aerospace gearing", 246.0A, pp. 11-14, 1979.
- 4) Aida, T., Oda, S., Kusano, K. and Ito, Y., Bender, "Fatigue Strength of Gears", *Trans. JSME*, Vol. 26, No. 33, pp. 1314-1320, 1967.
- 5) Retting, H., *Einsatzgehartete Zahnrad*, VDI-Z, Vol. 111, pp. 274-284, 1969.
- 6) 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., Vol. 26, pp. 448-457, 1974.
- 7) Tobe, T., Kato, M., and Inoue, K., "True Stress and Stiffness of Spur Gear Tooth", *ASME*, Vol., 2, pp. 105-1121, 1979.
- 8) ISO/DP 6335/111, "Calculation of Load Capacity of Spur and Helical Gears", part 3, pp. 78~105, 1980.
- 9) Little, R. E. "Probabilistic Aspects of Fatigue", *ASME Spec. Tech. Pull*, Vol. 5, No. 11, pp. 54-56, 1972.
- 10) Sung-Ki LYU, "A Study on Evaluation of Bending Fatigue Strength in SCM415 Carburized Spur Gear", *Journal of the Korean Society of Marine Engineers*, Vol. 22, pp. 763-770, 1998.