

# 소결치차의 성능향상과 신뢰성이 높은 소결치차설계에 관한 연구

## A Study on the Improvement and Reliable Design in Sintered Spur Gear

류 성 기(Sung-ki Lyu)

경상대학교 기계설계학과, 항공기부품기술연구센터

### ABSTRACT

It is very important to have exact informations on the properties and characteristics of the sintered steel as a new material of machine elements. The bending fatigue tests are performed for sintered steel bend specimens and spur gears, which are notched by using a slicing blade. The fatigue test at a constant stress amplitude is performed by using an electrohydraulic servo-controlled pulsating tester.

Consequently, the S-N curves are obtained and the fatigue strength is compared with flaw depth. Accordingly, this study presents the fatigue strength of sintered spur gears, the critical notch depth of sintered steel and the effects of flaw depth on the bending fatigue strength. The enhancement of fatigue strength due to carburized treatment is clarified.

### 1. 서 론

자동차, 산업용기계, 항공기 등의 동력전달장치에 많이 사용되고 있는 치차는 근대공업의 발달과 함께 동력전달의 향상과 원가절감이 절실히 요구되고 있다. 이들의 요구에 부응하기 위하여 대량생산이 가능하고, 금속재료보다 경량인 소결치차 개발에 관한 연구<sup>1,2)</sup>가 활발히 진행되고 있으며, 최근에는 고밀도 고강도 소결 기계부품 개발뿐만 아니라 자동차부품개발까지 급속히 늘어나고 있다.

소결금속재료는 혼합한 금속분말을 금형에 넣어 압축 성형한 후, 소결시켜 제조하기 때문에 끝마무리 기계가공을 최소화하면서 복잡한 형상을 얻을 수가 있기 때문에 제작이 곤란한 재료설계가 가능하다. 이와 같은 분말야금법<sup>2)</sup>으로 만든 소결치차는 소결온도가 용융점이하에 있기 때문에 비교적 고정도이며 에너지 소비가 적고 대량생산의 이점을 가지고 있다.

그러나 소결금속은 미세한 기공과 같은 분말입자간의 공극이 강도저하의 주원인이 되므로 기계설계에 필요한 피로강도의 평가가 필요하다. 이러한 소결재의 성질을 결정하는 가장 기본적인 요인은 소결밀도라 할 수 있는데, 소결재는 밀도에 따라 크고 작은 공극이 존재하며, 잔류하고 있는 공극이 소결재의 성질을 결정하는 중요한 요인이 되므로 이것을 소결밀도와 간접적인 관계로 나타낼 수 있다. 표면에 존재하는 공극은 재료의 강도면에서 볼 때 초기결함이 되고 있으므로 이에 관한 연구가 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 밀도를 변화시켜 굽힘시험편을 제작하여 카본저석커터로 노치의 깊이를 다르게 주어 피로시험을 실시하였다. 이 결과로부터 피로강도에 미치는 초기결함 크기의 영향을 고찰하여 강도에 미치지 않는 크랙길이의 한계값을 구한다. 그리고 소결치차에 침탄처리를 실시하여 소결치차의 성능향상을 평가한 후 침탄처리의 효과와 소결치차의 특성을 밝혀 신뢰성이 높은 소결치차 설계를 위한 기초적인 설계자료를 얻고자 한다.

## 2. 굽힘피로시험

### 2.1 시험편의 제원 및 화학성분

본 연구에 사용한 굽힘시험편과 시험치차는 Fe-Cu-C계 소결재를 이용하였다. 시험치차의 제원과 화학성분을 각각 Table 1, 2에 나타냈다.

Table 1 Dimensions of test gears

Module	$m$	[mm]	2.5
Number of teeth	$z$		27
Pressure angle		[deg]	20
Profile modification coefficient			0
Face width	$b$	[mm]	$7.5 \pm 0.01$
Tip diameter		[mm]	$\phi 67.5 \pm 0.01$
Span gauge(7 teeth)		[mm]	$27.256 \pm 0.01$
Material			Fe-Cu-C
Density		[g/cm <sup>3</sup> ]	6.8

Table 2 Chemical composition of specimen

Fe	Cu	C	etc
Remainder	1 ~ 2 %	0.4~0.7 %	<1 %

분압율을 변화시킴에 따라 다른 밀도가 얻어지며 空孔조직에 영향을 미치므로, 空孔조직과 초기크랙의 관계를 고찰하기 위하여 밀도가 각각 6.6, 6.8, 7.0 g/cm<sup>3</sup>인 평면시험편과 U노치를 가진 U노치시험편을 제작하였다.

평면시험편에는 초기결함으로 두께 0.1mm의 카본저석커터를 사용하여 평면시험편의 중앙부에 노치깊이를 임의로 변화시켜가면서 노치를 주었다. 노치의 깊이는 굽힘시험 전후에 광학현미경으로 측정된 결과 15~1200 $\mu$ m의 분포를 이루고 있었다. U노치시험편에도 평면시험편과 같은 방법으로 U노치의 중앙부에 카본저석커터로 노치를 주었다.

### 2.2 피로시험기

굽힘피로실험에는 전기유압서보 피로시험기를 이용하였다. 전기유압서보식 피로시험기의 부하장치를 Fig. 1에 나타냈다.

부하에 의한 치차 이끝선단이 손상되는 것을 방지하기 위하여 치차 이끝선단으로부터 반경방향으로 약 1.28 mm내측 치면에 부하를 주는 방법으로 피로시험

을 하였다. 또 치차와 로드셀의 분리를 방지하기 위하여 반복하중의 최소값으로 약 5kgf를 주었다. 평면시험편과 U노치시험편은 전기유압서보식 피로시험기를 이용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 시험편의 경도측정

밀도가 다른 3종류의 시험편에 대하여 미소경도계(MVK-E)를 이용하여 마이크로비커스 경도를 측정하였다. 소결재의 경도는  $\text{mm}^3$ 의 존재와 재질 등의 구조적성질로부터 測定荷重에 의한 편차가 크게 나타났다. 따라서, 본 연구의 시험편에서는 가장 편차가 적게 나타난 測定荷重 1kgf, 保持時間 20秒의 測定條件으로 硬度를 측정하였다. 측정결과  $6.6\text{g/cm}^3$ 은 96.3Hv,  $6.8\text{g/cm}^3$ 은 118.2Hv,  $7.0\text{g/cm}^3$ 은 137.5Hv로 소결밀도가 높아짐에 따라 경도가 증가하였다.

밀도  $6.8\text{g/cm}^3$ 인 치차와 소결침탄치차의 경도는 Fig. 2에 도시한 바와 같이 몇 개의 치차이를 카본저석커터로 절단하여 표면을 래핑연마한 후, 이뿌리면의 위험단면에서 화살표방향으로 경도의 깊이방향분포를 측정하여 그결과를 Fig. 2에 나타냈다. Fig. 2에서 소결침탄치차의 경우 최대경도가 약 360Hv 높은 표면경화층이 형성되었음을 알 수 있다.

#### 3.2 시험편표면의 조직관찰

소결재의 표면을 주사전자현미경(SEM-450)을 이용하여 관찰하였다. 밀도 6.6, 6.8,  $7.0\text{g/cm}^3$  시험편표면의 SEM사진을 Fig. 3에 나타냈다. 분말의 입자가 상당히 복잡한 형상을 나타내고 있으며,  $\text{mm}^3$ 의 직경은 30~50 $\mu\text{m}$ 정도로 나타났다. 밀도가 작은 시험편표면에서 작은  $\text{mm}^3$ 이 많이 나타나고, 입자들의 밀착성이 약한 반면, 밀도가 클수록  $\text{mm}^3$ 의 수가 적어지고 입자들의 밀착정도가 강하게 나타났다. 밀도  $7.4\text{g/cm}^3$  이상에서는 거의 폐공상태가 되기 때문에 철의 밀도가  $7.87\text{g/cm}^3$ 인 점을 고려하여 밀도를  $7.4\text{g/cm}^3$ 이상으로 증가시킬 경우 보통재료의 조직과 유사할 것으로 생각된다<sup>2)</sup>.

일반적으로 소결재의 기계부품에 이용되고 있는 밀도는  $6.3\sim 7.2\text{g/cm}^3$  이기 때문에 표면과 내부에  $\text{mm}^3$ 이 존재하고, 표면의  $\text{mm}^3$ 은 표면결함이 되어 강도에 영향을 크게 미칠 것으로 사료된다.

#### 3.3 소결치차의 피로시험

시험치차의 굽힘피로 실험결과를 정리해서 S-N곡선을 구하여 Fig. 4에 도시하였다. 본 연구에서는 ISO 치차강도 설계식<sup>4)</sup>을 고려하여 열처리치차의 경우 수명계수를 반복하중수  $N \geq 3 \times 10^6$ 일 때 1.0, 열처리를 하지 않은 치차의 경우 수명계수를 반복하중수  $N \geq 10^7$ 일 때 수명계수 1.0으로 하였다.

Fig. 4에 도시한 바와 같이 8~10개의 응력레벨에서 피로시험을 하였으며, 소결침탄치차의 경우 S-N 14점법<sup>5)</sup>을 사용하여 피로시험을 하였다. 주어진 반복하중수에 대한 피로강도의 평균값은 S-N곡선을 추정하는 스테이스케이스법<sup>6)</sup>을 이용하여 피로강도를 추정하였다. 소결치차는 약 260MPa, 소결침탄치차는 약 451MPa이 얻어졌다. 침탄처리에 의하여 약 73%향상되었음을 알 수 있다.

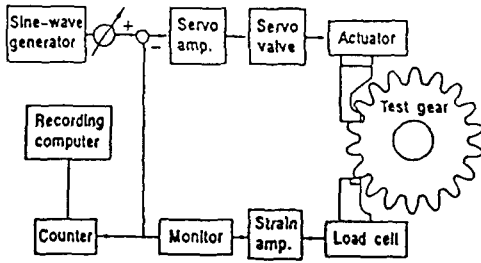


Fig. 1 Loading device of fatigue tester

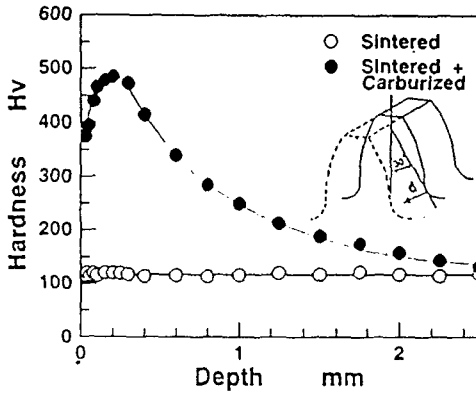


Fig. 2 Hardness distribution of test gear

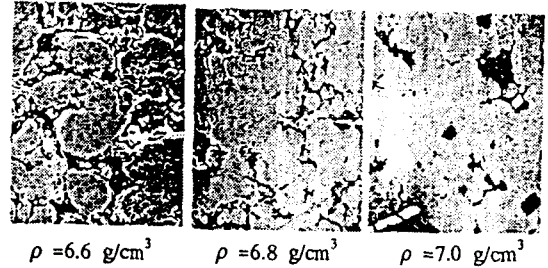


Fig. 3 Photo. of specimens(SEM)

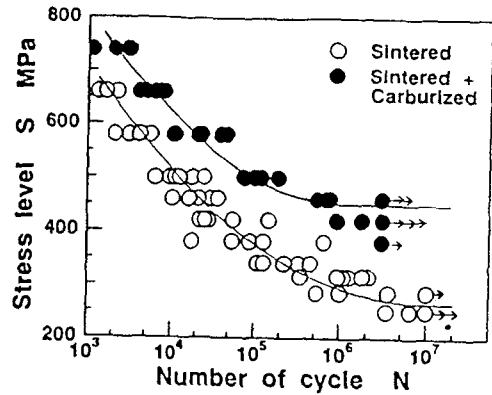


Fig. 4 S-N curve of sintered spur gear

### 3.4 피로강도에 미치는 초기결함의 영향

#### 3.4.1 평면시험편의 강도

두께 0.1mm의 저속커터를 이용하여 평면시험편의 중앙에 노치를 주어 스테이스법<sup>1)</sup>에 의해 피로시험을 하여, 반복하중수  $N = 10^5$ 에서 피로강도를 구하여 Fig. 5에 나타냈다. Fig. 5에서  $N=1$ 은 1분간 일정부하를 주었을 때 절손되지 않는 경우 부하를 증가시키는 방법으로 실험한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 밀도가 큰시험편의 강도가 높게 나타났고, 노치깊이가  $100\mu\text{m}$ 를 넘으면 강도가 현저하게 저하하고 있는 것을 알 수 있다. Kitakawa<sup>7)</sup>는 피로강도에 대한 초기 크랙길이의 영향을 고찰하여 재료표면의 조도와 초기결함 때문에 크랙이 짧은 영역에서 하한계 응력확대계수가 저하하는 것을 모식적으로 Fig. 6에 나타냈다. 응력확대계수  $K$ 가 하한계 응력확대계수  $K_{th}$ 에 일치하는 직선과 피로강도  $\sigma_{a0}$ 의 교점에서 얻어진 크랙길이  $a_0$ 를 하한계 크랙길이라 한다. 시간 강도역에서 시간 강도  $\sigma_{a1}$ 과 실험점을 지나는  $K=K_f$  직선의 교점에서 한계 크랙길이  $a_1$ 이 구해진다. 소결금속의 경우 재료표면에 공정이 한계 크랙길이에 영향을 미칠 것으로 생각된다.

본 실험에서는 명확한 초기 크랙을 주지 않는 상태에서 실험을 시작하였기 때문에 크랙길이는 불명하다. 그러나 비교적 짧은 시간에 크랙이 성장한다고 가정하면 크랙으로 보여지는 크랙길이  $a$ 의 위치에 Fig. 5의 결과를 플롯트 하는 것

이 가능하다. 이 가정을 기초로 평면시험편의 경우 Fig. 7, 8에 나타냈다. 그림에서 가장 큰 크랙길이의 실험점을 지나는 응력확대계수의 직선을 함께 도시하였다. Fig. 7로부터 반복하중수가 클수록 한계크랙길이는 작게 나타남을 알 수 있다. Fig. 8로부터 한계 크랙길이  $a_1$ 은 밀도에 관계없이 약  $160\mu\text{m}$ 로 나타났다.

### 3.4.2 U노치시험편의 강도

평면시험편과 같은 방법으로 U노치저면에 저석커터로 노치를 준 시험편을 사용하여 실험한 결과를 Fig. 9에 나타냈다. Fig. 9에서도 한계 크랙길이  $a_1$ 은 밀도에 관계없이 약  $160\mu\text{m}$ 로 나타났다.

### 3.4.3 치차시험편의 강도

피로시험을 하기 전에 치차의 이뿌리위험단면부근의 크랙길이를 관찰한 후 그 위치에 노치를 주어 피로시험을 하였다. 그 결과를 Fig. 10에 나타냈다. 한계크랙길이는 약  $180\mu\text{m}$ 로 나타났다. 이 값은 같은 밀도 평면시험편의 한계크랙길이와 근사한 값이다.

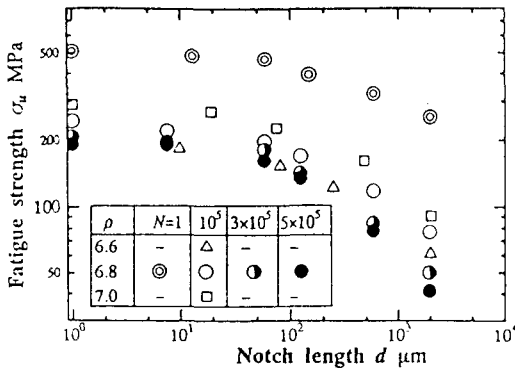


Fig. 5 Fatigue strength(Plane specimen)

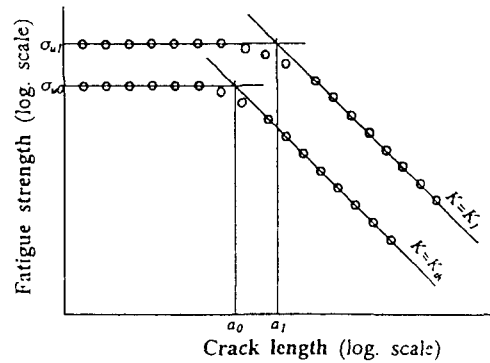


Fig. 6 Fatigue strength against crack length

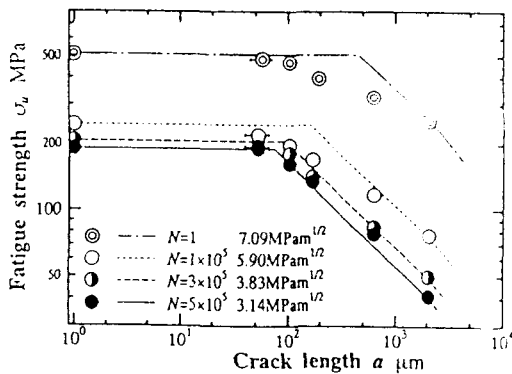


Fig. 7 Crack length effects on fatigue strength( $\rho=6.8$ )

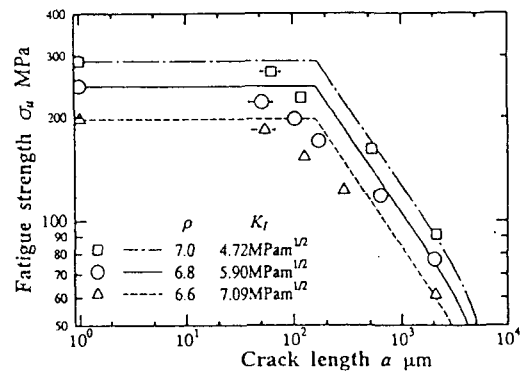


Fig. 8 Fatigue strength( $N=10^5$ )

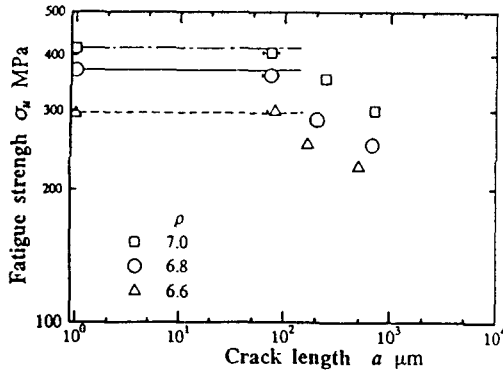


Fig. 9 Fatigue strength(U Notch specimen)

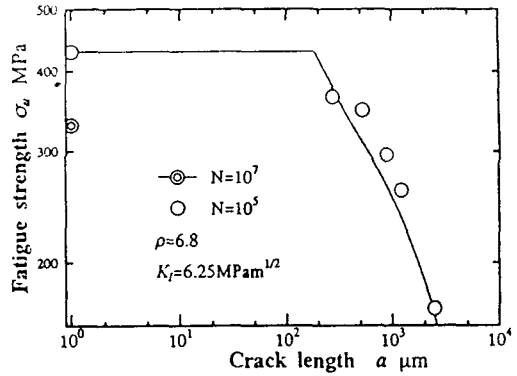


Fig. 10 Fatigue strength for test gears

#### 4. 결 론

본 연구에서는 밀도를 변화시켜 굽힘시험편을 제작하여 카본저석커터로 노치의 깊이를 다르게 주어 피로강도에 미치는 초기결함 크기의 영향을 고찰한 결과 한계크랙길이는 밀도에 관계없이 약  $160\mu\text{m}$ 로 나타났다.

그리고 소결치차의 성능을 향상시키기 위하여 침탄처리를 실시한 후 피로강도를 구해본 결과 소결치차와 소결침탄치차의 피로강도는 각각  $260\text{MPa}$ ,  $451\text{MPa}$ 으로 나타났다. 침탄처리에 의해 강도가 약 73% 향상되었다.

본 연구는 한국학술진흥재단 신진교수과제 연구비 지원하에 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

#### 参 考 文 献

1. 仙北谷名夫, 素材物性學會誌, 2-1, pp. 144-150, 1989.
2. 日立製作所技術改善委員會, 燒結齒車設計便覽, 1666號, pp. 12-20, 1975.
3. 日本粉末冶金工業會, 燒結機械部品, pp. 159-189, 1990.
4. ISO/DP, Principles for the Calculation of Tooth Strength of Spur and Helical Gears, 6336/III, pp. 78-96, 1980.
5. 日本機械學會, 統計的疲勞試驗方法, JSME-S-002, pp. 32-44, 1981.
6. Little, R.E., "Probabilistic Aspects of Fatigue", ASME Spec. Tech. Publ., Vol.5, No.11, pp. 29-35, 1972.
7. H. Kitakawa and S. Takahashi, Proc. 2nd Int. Conf. Mech. Behave. Mater, Boston, pp. 627-639, 1976.