

소결치차의 피로강도에 관한 연구

A Study on the Bending Fatigue Strength of Sintering Spur Gear

류성기*·김경모**
Sung-Ki Lyu·Kyoung-Mo Kim

ABSTRACT

It is very important to have exact informations on the properties and characteristics of the sintering material as a new material of machine elements.

To study the sintering spur gear and the sintering specimen to be consisted of Fe-Cu-C, the constant stress amplitude fatigue test 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 sintering spur gears, the critical notch depth of sintering materials and the effects of flaw depth on the bending fatigue strength.

1. 서 론

치차는 동력전달에 수반되는 기본적인 기계요소로서 고정도, 고강도, 경량화등의 품질개선과 원가절감이 절실히 요구되고 있는 바, 분말치금법에 의한 소결치차의 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

분말치금법^{1,2)}은 평균직경 0.1mm이하의 금속분말뿐만아니라 세라믹, 유기물등의 비금속도 용이하게 혼합시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 이들의 혼합분말은 금형을 이용하여 전자동프레스로

압축성형하는 과정을 거쳐, 비산화성의 터빈식 연속노내에서 소결된다. 소결치차는 소결온도가 용융점온도 이하에 있기 때문에 비교적 고정도이며 에너지소비가 적고 대량생산의 장점을 가지고 있다.

그러나 일반적으로 소결된 금속은 미세한 氣空과 같은 空孔이 많이 존재하고 있다. 이러한 소결재의 성질을 결정하는 가장 기본적인 요인은 소결 밀도라 할 수 있는데, 소결재는 밀도에 따라 크고 작은 空孔이 존재하며 잔류하고 있는 空孔이 소결재의 성질을 결정하는 중요한 요인이므로 이것을 소결밀도와 간접적인 관계로 나타낼 수 있다. 표

* 日本東北大學 精密工學科

** 전북산업대학교 기계공학과

면에 존재하는 공극은 재료의 강도면에서 볼 때 초기결함이 되고 있다.

따라서 본 연구에서는 시험편 표면에 카본저석 커터에 의한 노치를 초기결함으로 준 시험편을 사용, 피로시험을 행하여 피로강도에 미치는 초기결함 크기의 영향을 고찰하고, 소결치차의 피로강도를 구하고자 한다.

2. 시험편 및 실험장치

2.1 시험편의 제원 및 화학성분

본 연구에서 사용한 시험치차는 日立분말치금재의 Fe-Cu-C계 소결재를 이용하였다. 시험치차의 제원 및 화학성분을 각각 Table 1, 2에 나타냈다.

Table 1 Dimension of test gears

Module m [mm]	2.5
Number of teeth	27
Pressure angle [deg]	20
Profile modification coefficient	0
Face width [mm]	7.5±0.01
Tip diameter [mm]	67.5±0.01
Span gauge(4 teeth) [mm]	27.256±0.01
Gear grade	Jis 6
Material	Fe-Cu-C
Density [g/cm ³]	6.8

Table 2 Chemical composition of speimen

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

분압율을 변화시킴에 따라 다른 밀도가 얻어지며 공극조직에 영향을 미치므로, 공극조직과 초기크랙의 관계를 고찰하기 위하여 밀도가 각각 6.6, 6.8, 7.0g/cm³인 3점굽힘시험편을 만들었다. 이 시험편은 Fig. 1과 같이 평면시험편과 U노치를 가진 U노치시험편을 제작하였다.

평면시험편에는 초기결함으로 두께 0.1mm의 카본저석커터를 이용하여 평면시험편의 중앙부에 노치깊이를 임의로 변화시켜가면서 노치를 주었다. 노치의 깊이는 굽힘시험 전후에 광학현미경으로 측정한 결과 노치깊이는 15-1200μm의 분포를 이루고 있었다. U노치시험편에도 평면시험편과 같은 방법으로 U노치의 중앙부에 카본저석커터로 노치를 주었다.

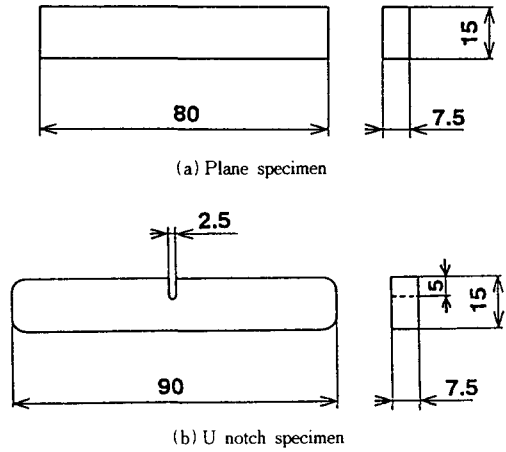


Fig. 1 Shape of specimen

2.2 실험장치

시험치차의 굽힘피로시험에는 전기유압서보 피로시험기(SV 2호기)를 사용하였다. 전기유압서보식 피로시험기의 부하장치 및 기록장치를 각각 Fig. 2, 3에 나타냈다.

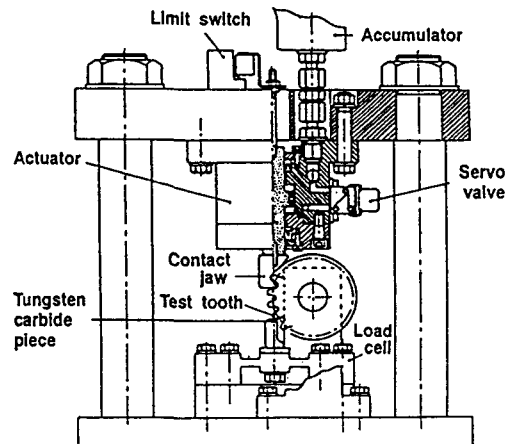


Fig. 2 Loading device of fatigue tester

신호발생기에서 정현파 신호를 발생시켜, 신호 레벨조정기로부터 시험설정전압을 조정하고, 서보앰프로부터 서보신호를 증폭시킨다. 이 신호에 의해 서보밸브가 작동하여 유압을 제어하고 피스톤을 구동한다. 시험치차에 가해지는 하중은 로드

셀에 의하여 검출되어 스트레인앰프에서 증폭된 뒤 피드백되어진다. 시험기의 유온, 유압, 서보전류, 하중, 입력신호 및 편차신호는 각각 전기신호로 변환되어 제어계기판에 나타난다.

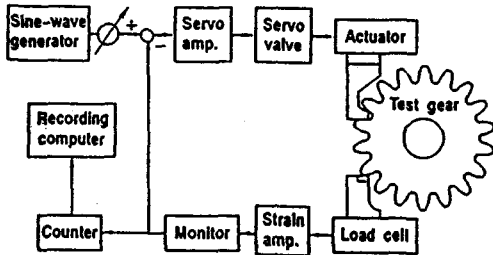


Fig. 3 System of bending fatigue test

시험기에는 자동정지회로가 설치되어 유온, 유압, 서보전류 및 하중이 설정상한치를 넘게 되면 시험치가 과단되고, 피스톤 변위가 크게 되어 시험기가 자동적으로 정지한다. 또 시험중에는 항상 오실로스코프에 의해 하중파형 및 설정하중의 편차가 나타난다.

부하에 의한 치차 이끝선단이 손상되는 것을 방지하기 위하여 치차 이끝선단으로부터 반경방향으로 약 1.282mm 내측의 점을 하중점으로 하였고 부하속도는 15-30Hz로 하였다. 시험에는 일정한 진폭반복하중을 이용하여 최대하중의 변동을 1% 이내가 되도록 조정하였다. 또 치차와 로드셀의 분리를 방지하기 위하여 반복하중의 최소치로서 약 5kgf를 주었다. 3점굽힘시험에는 전기유압서보식 피로시험기(Servopac)를 이용하였다.

실험은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 컴퓨터를 시험기에 접속한 로드셀에 의하여 하중을 피드백하여 제어한다.

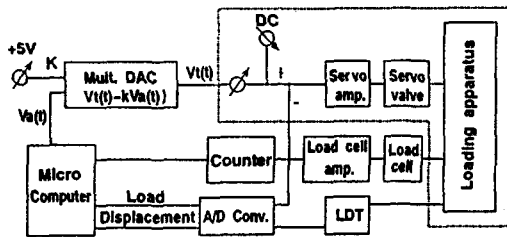


Fig. 4 Controlled system of bending fatigue test

반복하중의 시험은 컴퓨터로부터 일정한 정현파 신호를 시험기에 입력하여 시험기측에서 그 계인을 조절함으로써 반복하중을 제어한다. 하중은 A/D컨버터를 이용하여 디지털신호로 변환시켜 컴퓨터에 기록시킨다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시험편의 경도측정

밀도가 다른 3종류의 시험편에 대하여 미소경도계(MVK-E)를 이용하여 마이크로비커스 경도를 측정하였다. 소결재의 경도는 空孔의 존재와 재질 등의 구조적 성질로부터 측정하중에 의한 편차가 크게 나타난다. 따라서, 본 연구의 시험편에서는 가장 편차가 적게 나타난 측정하중 1kgf, 保持時間 20秒의 측정조건으로 경도를 측정하였다. 각각 밀도가 다른 수개의 3점굽힘시험편 중앙부 단면에서 경도를 측정하여 그 결과를 Fig. 5에 나타냈다. Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 소결밀도가 높아짐에 따라 경도가 증가하였다.

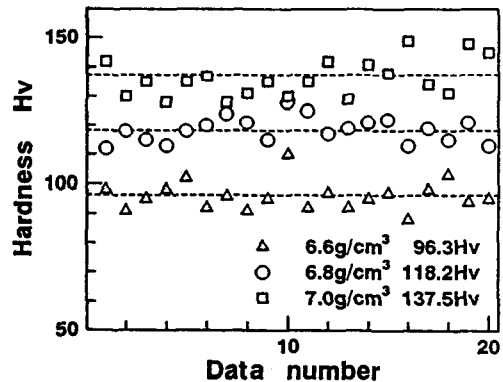


Fig. 5 Hardness distribution of specimen

밀도 6.8g/cm³인 치차의 경도는 Fig. 6의 하단부에 도시한 바와 같이 몇개의 치차이를 카본저석으로 절단하여 표면을 랫핑연마후, 이뿌리면의 위험단면에서 화살표방향으로 경도의 깊이방향분포를 측정하여 그결과를 Fig. 6에 나타냈다. Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이 치차의 경도분포는 깊이방향에 대하여 특별한 변화가 나타나지 않았다. 따라서, 소결과정은 표면과 심부의 내부변화를 일으키지 않음을 알 수 있었다. Fig. 6에 표시한 점

선은 평균값을 나타내고 있으며 Fig. 5, 6을 비교해 볼때 시험치차의 경도는 밀도 $6.8g/cm^3$ 의 3점 굽힘시험편과 근사한 값을 보여주고 있다.

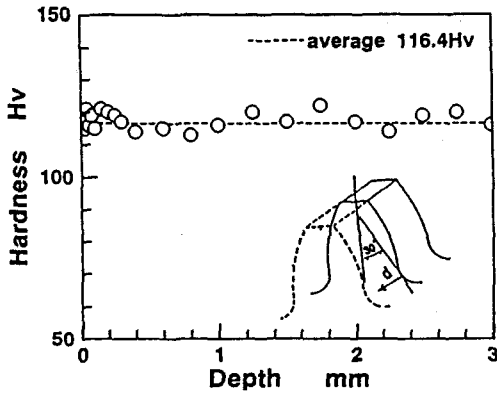


Fig. 6 Hardness distribution of sintering spur gear

3.2 시험편표면의 조직관찰

소결재의 표면을 주사전자현미경(S-450)을 이용하여 관찰하였다. 밀도 $6.6, 6.8, 7.0g/cm^3$ 의 시험편표면의 SEM사진을 Fig. 7에 나타냈다. 분말의 입자가 상당히 복잡한 형상을 이루고 있었고, 각 시험편 공극의 직경은 약 $30-50\mu m$ 정도로 나타났다. 밀도가 작은 표면에서는 작은 공극이 많이 나타나 있고 입자들의 밀착성이 약한 반면, 밀도가 크게 될수록 공극이 적어지고 입자들의 밀착정도가 강하게 나타났다.

밀도 $7.4g/cm^3$ 이상에서는 거의 폐공상태가 되기 때문에 철의 밀도가 $7.87g/cm^3$ 인 것을 고려하면 밀도를 $7.4g/cm^3$ 보다 증가시킬 경우 보통재의 조직에 가깝게 되리라고 생각된다²⁾.



(a) $6.6g/cm^3$



(b) $6.8g/cm^3$



(c) $7.0g/cm^3$

Fig. 7 Photo. of specimens(SEM)

일반적으로 소결재의 기체부품에 이용되고 있는 밀도는 $6.3-7.2g/cm^3$ 이기 때문에 그 표면 및 내부에서 공극이 존재하고, 표면의 공극은 표면결함이 되어 강도에 지대한 영향을 미치고 있다고 생각된다.

3.3 소결치차의 피로시험

시험치차의 굽힘피로 실험결과를 정리해서 S-N 곡선을 구하여 Fig. 8에 도시하였다. 일반적으로 ISO 치차강도 설계식³⁾에서 열처리치차의 경우는 수명계수가 반복하중수 $N \geq 3 \times 10^6$ 일 때 1.0, 열처리를 하지 않은 치차의 경우는 수명계수가 반복하중수 $N \geq 10^7$ 일 때 1.0을 기준으로 하기 때문에 본 시험치차의 경우에는 피로강도를 $N \geq 10^7$ 일 때 수명계수 1인 것을 고려하여 비파괴 반복하중수를 $N \geq 10^7$ 으로 하였다.

Fig. 8에 도시한 바와 같이 9개의 응력레벨에서 수명시험을 행하였으며, 총시험수는 58개를 사용하였다. 피로강도는 Fig. 8로부터 파괴확률 50%의 피로강도를 구하였는데 약 260MPa이 얻어졌다.

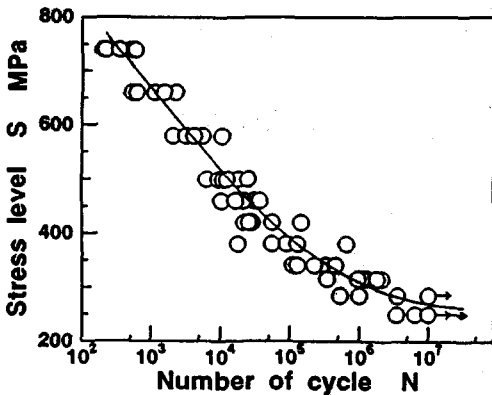


Fig. 8 S-N curve of sintering spur gear

Table 3 Estimations of fatigue strength by staircase method

Gear Number	S_0 MPa d MPa	Experimental Results	Fatigue Strength σ_u (MPa)
SG 7	$S_0=250$ $d=35$		$\Delta=0.50$ $\sigma_u=268$
SG 8	$S_0=285$ $d=35$		$\Delta=-0.81$ $\sigma_u=257$

또한, 주어진 반복회전수에 대한 피로강도의 평균값 S-N곡선을 추정하는 스테아케이스법(Little Method)^{4,5)}을 이용하여 Table 3에 나타난 바와 같이 피로강도를 추정하였다. 여기에서 S_0 는 시험을 시작할때의 응력레벨, d 는 응력레벨의 차를 나타낸다. 피로강도 $\sigma_u=S_0+\Delta d$ 로 산출되는데, 계수 Δ 는 시험결과 및 d 와 피로강도의 표준편차 σ 의 비에 대응하여 계산되고 소결치차의 실험결과 약 260MPa의 피로강도가 얻어졌다.

파괴확률 50%의 피로강도와 스테아케이스법에 의해 구한 피로강도를 비교해보면 거의 일치하고 있었다.

3.4 피로강도에 미치는 초기결함의 영향

3.4.1 평면시험편에 의한 피로시험

피로강도에 대한 초기결함의 영향을 알아보기 위하여 카본저석커터에 의한 초기결함으로서 노치를 주어 스테아케이스법⁴⁾에 의해 피로시험을 하여, 반복회전수 $N=10^5$ 에서의 피로강도를 구하여 Fig. 9에 도시하였다. Fig. 9의 종축에 플로트한 3점은 노치를 주지않은 평면시험편의 피로강도를 나타낸 것이다.

한계노치깊이는 Fig. 9에 도시한 예와 같이 측정결과에 대한 접선의 교점을 찾아 구한 결과 약 $30\mu m$ 가 얻어졌다. Fig. 9로부터 한계노치깊이가 약 $30\mu m$ 이하에서는 피로강도가 저하하지 않는 것으로 나타났다. 그리고, 피로시험의 파면부분을 광학현미경으로 관찰한 결과 노치깊이 약 $30\mu m$ 이상을 준 시험편에서는 대부분 노치부분에서 파단이 일어났고 노치깊이 약 $30\mu m$ 이하에서는 노치와 관계없이 파단되었다. 이러한 현상은 시험편 표면에 약 $30\mu m$ 이하의 노치가 존재하여도 시험편표면의 공극에서 크랙이 진전되기 때문이라고 생각된다.

3.4.2 U노치시험편에 의한 피로시험

반복회전수 $N=10^5$ 에서 스테아케이스법에 의한 실험의 결과 초기결함이 피로강도에 미치는 영향을 정리하여 Fig. 9에 도시하였다.

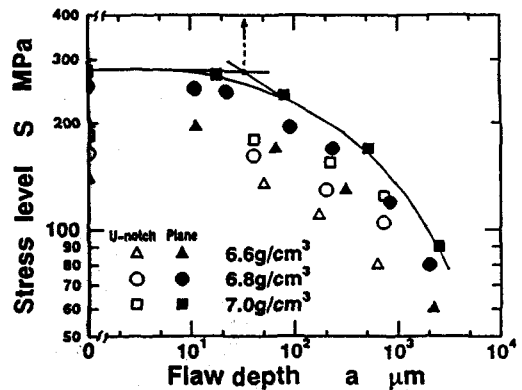


Fig. 9 Relation between stress level and flaw depth

Fig. 9로부터 알 수 있는 바와 같이 U노치시험편의 경우, 강도가 저하하지 않은 한계노치깊이는 약 $100\mu\text{m}$ 이며 밀도에 의한 한계노치깊이의 차이는 크지 않았다. U노치시험편을 사용한 실험결과를 평면시험편을 사용한 실험결과와 비교하면 한계노치깊이의 차가 현저히 나타났다. 이는 시험편의 형상과 응력구배가 서로 다르기 때문인 것으로 생각된다. 소결재의 한계노치깊이는 소결밀도에 의하여 결정되는 것이 아니라 형상에 따라 결정된다고 볼 수 있다.

3.5 초기결함의 크기와 반복하중수의 관계

밀도 6.8g/cm^3 의 시험편을 사용하여, $N=1 \times 10^5$, 3×10^5 , 5×10^5 에서 피로시험을 행하여 반복하중의 수에 따른 초기결함과 피로강도에 미치는 영향을 고찰하였다. 피로강도의 추정은 스테이키스법에 의해 구하였으며, 초기결함과 피로강도의 관계를 Fig. 10에 나타냈다. Fig. 10으로부터 반복하중수가 초기결함크기와 피로강도의 관계에 미치는 영향이 크지 않음을 알았다.

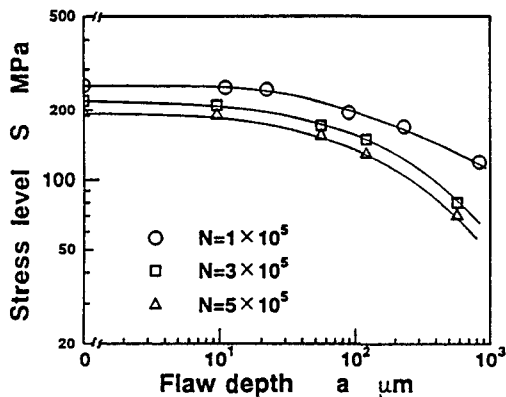


Fig. 10 Relation between stress level and flaw depth(Number of cycles)

4. 결 론

소결치차를 사용한 피로시험을 행하여 피로강도를 구하고, 시험편 표면에 카본저석커터에 의한 노치를 초기결함으로 준 시험편을 사용하여 피로강도에 미치는 초기결함 크기의 영향을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 소결치차의 피로시험결과 260MPa의 피로강도가 얻어졌다.
2. 평면시험편의 경우, 반복하중수 $N=10^5$ 에서 약 $30\mu\text{m}$ 의 한계노치깊이가 얻어졌고, $30\mu\text{m}$ 이상의 노치깊이에서는 노치부분에서 파단이 발생한 반면, $30\mu\text{m}$ 이하의 노치깊이에서는 노치와 무관하게 파단이 발생하였다.
3. U노치시험편의 경우, 반복하중수 $N=10^5$ 에서 약 $100\mu\text{m}$ 의 한계노치깊이가 얻어졌으며, 소결재의 한계노치깊이는 소결밀도에 의하여 결정되는 것이 아니라 형상에 따라 결정된다고 볼 수 있다.
4. 반복하중수가 초기결함의 크기와 피로강도의 관계에는 영향을 미치지 않았다.

참 고 문 헌

1. 仙北谷名夫, 粉末冶金法に関する研究, 素材物性學會誌, Vol. 2, No. 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. ISO/DP, Principles for the Calculation of Tooth Strength of Spur and Helical Gears, 6336/III, pp.78-105, 1980.
4. R. E. Little, Probabilistic Aspects of Fatigue, ASME Spec. Tech. Publ., Vol. 5, No. 11, pp.29-35, 1972.
5. 日本機械學會, 統計的疲勞試驗方法, JSME-S-002, pp.32-44, 1981.