

소결치차의 성능향상과 신뢰성이 높은 소결치차설계에 관한 연구

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

류 성 기*

Sung-Ki Lyu

(1998년 6월 12일 접수, 1998년 10월 25일 채택)

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 경량

인 소결치차 개발에 관한 연구^{1,2)}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 마무리 기계가공을 최소화하면서 복잡한 형상

* 경상대학교 기계설계학과, 항공기부품기술연구센터

을 얻을 수가 있기 때문에 제작이 곤란한 재료 설계가 가능하다. 이와 같은 분말야금법^{2,3)}에 의하여 만들어진 소결치차는 소결온도가 용융점 이하에 있기 때문에 비교적 고정도이며 에너지 소비가 적고 대량생산의 장점을 가지고 있다.

그러나 소결금속은 미세한 氣空과 같은 분말 입자간의 空孔이 피로강도에 영향을 미칠 것으로 사료되므로 기계설계에 필요한 피로강도의 평가가 필요하다. 이러한 소결재의 성질을 결정하는 가장 기본적인 요인은 소결밀도라 할 수 있는데, 소결재는 밀도에 따라 크고 작은 空孔이 존재하며 잔류하고 있는 空孔이 소결재의 성질을 결정하는 중요한 요인이 되므로 이것을 소결밀도와 간접적인 관계로 나타낼 수 있다. 표면에 존재하는 空孔은 재료의 강도면에서 불 대 초기결함이 되고 있으므로 이에 관한 연구가 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 밀도가 다른 3종류의 3점굽힘시험편과 시험치차를 제작하여 카본저석 커터로 노치깊이를 다르게 주어 피로시험을 실시하였다. 이 결과로부터 피로강도에 미치는 초기결함 크기의 영향을 고찰하여 강도에 미치지 않는 한계크랙길이를 구하여 밀도의 영향을 고찰하고, 소결금속의 피로강도를 평가한 후 소결치차에 적용시켜 피로강도를 구하고자 한다. 그리고 침탄처리를 실시한 소결치차의 피로강도를 구하여 침탄처리가 소결치차의 피로강도에 미치는 영향과 소결치차의 특성을 밝혀, 신뢰성이 높은 소결치차설계를 위한 자료를 얻고자 한다.

2. 시험편 및 실험장치

2.1 시험편의 제원 및 화학성분

본 연구에서 사용한 3점굽힘시험편과 시험치차는 Fe-Cu-C계 소결재를 이용하였다. 시험치차의 제원과 화학성분을 각각 Table 1, 2에 나타냈다.

분압율을 변화시키에 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/cm³인 3점굽힘시험편을 만들었

Table 1 Dimensions of test gears

Module	<i>m</i>	[mm]	2.5
Number of teeth	<i>z</i>		27
Pressure angle		[deg]	20
Profile modification coefficient			0
Face width	<i>b</i>	[mm]	7.5±0.01
Tip diameter		[mm]	φ 72.5±0.01
Span gauge (7 teeth)		[mm]	27.256±0.01
Material			Fe-Cu-C
Density		[g/cm ³]	6.8

Table 2 Chemical composition of specimen

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

다. 평활재시험편과 U노치를 가진 노치재 3점굽힘 시험편 형상은 Fig. 1과 같다.

평활재시험편에는 초기결함으로 두께 0.1mm의 카본저석커터를 이용하여 평활재시험편 중앙부에 노치깊이를 임의로 변화시켜가면서 노치를 주었다. 노치깊이는 굽힘시험 전후에 광학현미경으로 측정된 결과 15~1200 μm의 분포를 이루고 있었다. U노치시험편에도 평활재시험편과 같은 방법으로 U노치의 중앙부에 카본저석커터로 노치를 주었다.

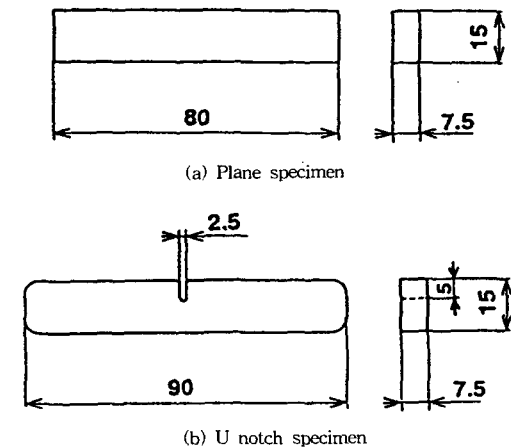


Fig. 1 Shape of bending specimen and test gear

2.2 실험장치

시험치차의 굽힘피로시험에는 전기유압서보 피로시험기를 사용하였다. 전기유압서보식 피로 시험기의 부하장치 및 기록장치를 Fig. 2에 나타냈다. 신호발생기에서 정현과 신호를 발생시켜, 신호레벨조정기로부터 시험설정전압을 조정하고, 서보앰프로부터 서보신호를 증폭시킨다. 이 신호에 의해 서보밸브가 작동하여 유압을 제어하고 피스톤을 구동시킨다. 시험치차에 가해지는 하중은 로드셀에 의하여 검출되어 스트레인 앰프로 증폭된 뒤 피드백 되어진다. 시험기의 유온, 유압, 서보전류, 하중, 입력신호는 각각 전 기신호로 변환되어 제어계기판에 나타난다.

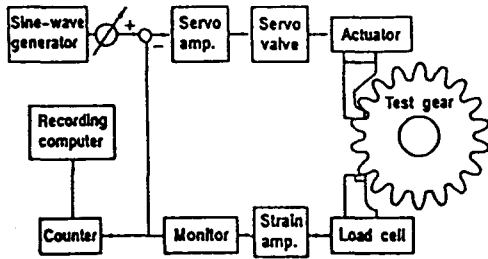


Fig. 2 System of bending fatigue test

시험기에는 자동정지회로가 설치되어 유온, 유압, 서보전류 및 하중이 설정상한값을 넘거나, 시험치차가 파단되어 피스톤 변위가 커지게 되면 시험기가 자동적으로 정지된다. 또 시험중에는 항상 오실로스코프에 의해 하중파형 및 설정 하중의 편차가 나타난다.

부하에 의한 치차 이끝선단이 손상되는 것을 방지하기 위하여 치차 이끝선단으로부터 반경방향으로 약 1.28 mm 내측 치면에 부하를 주는 방법으로 피로시험을 실시하였다. 그리고 치차와 로드셀의 분리를 방지하기 위하여 반복하중의 최소값으로 약 5 kgf를 주었다.

3점굽힘시험에는 전기유압서보식 피로시험기를 이용하였다. 3점굽힘 실험은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 컴퓨터를 시험기에 접속한 로드셀에 의하여 하중을 피드백하여 제어한다.

반복하중의 시험은 컴퓨터로부터 일정한 정현파신호를 시험기에 입력하여 시험기측에서 계인값을 조절함으로써 반복하중을 제어한다. 하중은 A/D컨버터를 이용하여 디지털신호로 변환

시켜 컴퓨터에 기록시킨다.

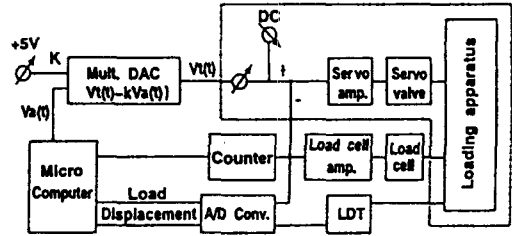


Fig. 3 Controlled system of bending fatigue test

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시험편의 경도측정

밀도가 다른 3종류의 시험편에 대하여 미소 경도계(MVK-E)를 이용하여 마이크로비커스 경도를 측정하였다. 소결재의 경도는 공극의 존재와 재질 등의 구조적 성질로부터 측정하중에 의한 편차가 크게 나타났다. 따라서, 본 연구의 시험편에서는 가장 편차가 적게 나타난 측정하중 1 kgf, 유지시간 20초의 측정조건으로 경도를 측정하였다. 각각 밀도가 다른 수개의 3점굽힘시험편 중앙부 단면에서 경도를 측정하여 그 결과를 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 소결밀도가 높아짐에 따라 경도가 증가하였다.

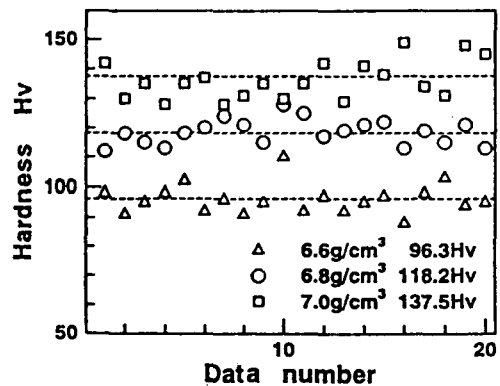


Fig. 4 Hardness distribution of specimen

밀도 6.8 g/cm³인 소결치차와 소결치차에 침탄처리를 실시한 소결침탄치차의 경도는 Fig. 5에 도시한 바와 같이 몇 개의 치차이를 카본저

석으로 절단하여 표면을 래핑 연마한 후, 이뿌리면의 위험단면에서 화살표방향으로 경도의 깊이방향분포를 측정하여 그 결과를 Fig. 5에 나타냈다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 침탄처리를 실시하지 않는 소결치차의 경도분포는 깊이방향에 대하여 일정한 값으로 나타났으며, 시험치차의 경도는 Fig. 4의 밀도가 6.8 g/cm^3 인 3점굽힘시험편과 근사한 값으로 나타났다. 따라서, 소결과정은 표면과 심부의 내부변화를 일으키지 않음을 알 수 있었다. 그러나 소결침탄치차의 경우 최대경도가 약 360 Hv 높은 표면경화층이 형성됨을 알 수 있었다.

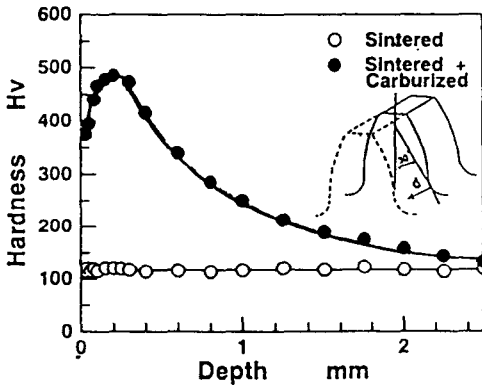


Fig. 5 Hardness distribution of sintered spur gear

3.2 시험편표면의 조직관찰

소결재의 표면을 주사전자현미경(S-450)을 이용하여 관찰하였다. 밀도 $6.6, 6.8, 7.0 \text{ g/cm}^3$ 의 시험편표면의 SEM사진을 Fig. 6에 나타냈다. 분말의 입자가 상당히 복잡한 형상으로 이루어져 있으며, 空隙 의 직경은 $30 \sim 50 \mu\text{m}$ 정도로 나타났다. 밀도가 작은 표면에서는 작은 空隙 이 많이 나타났으며 입자들의 밀착성이 약한 반면, 밀도가 커질수록 空隙 의 수가 적게 나타났으며 입자들의 밀착정도가 강하게 나타났다.

밀도 7.4 g/cm^3 이상에서는 거의 폐공상태로 되기 때문에 철의 밀도가 7.87 g/cm^3 인 점을 고려하면 밀도를 7.4 g/cm^3 보다 증가시킬 경우 보통재질의 조직에 가깝게 될 것으로 생각된다⁵⁾.

일반적으로 소결재의 기계부품에 이용되고 있

는 밀도는 $6.3 \sim 7.2 \text{ g/cm}^3$ 이기 때문에 표면과 내부에 空隙 이 존재하며, 표면의 空隙 은 표면결함이 되어 강도에 영향을 미칠 것으로 사료된다.

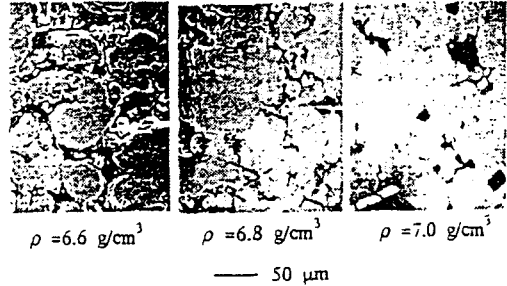


Fig. 6 Photo of specimens(SEM)

3.3 피로강도에 미치는 초기결함의 영향

3.3.1 평활재시험편의 강도

두께 0.1 mm 의 저속커터를 이용하여 평활재시험편 중앙에 노치를 주어 피로시험을 실시하여, 반복하중수 $N=105$ 에서 스테이케이시브법⁶⁾으로 피로강도를 구하여 Fig. 7에 나타냈다. Fig. 7에서 $N=1$ 은 1분간 일정부하를 주었을 때 절손되지 않는 경우 부하를 증가시키는 방법으로 실험한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 밀도가 큰 시험편의 강도가 높게 나타났고, 노치깊이가 $100 \mu\text{m}$ 를 넘으면 강도가 현저하게 저하하고 있는 것을 알 수 있다. Kitakawa⁷⁾는 피로강도에 대한 초기 크랙길이의 영향을 고찰하여 재료표면거칠기와 초기결함 때문에 크랙이 짧은 영역에서 하한계 응력확대계수가 저하하는 것을 도식적으로 Fig. 8에 나타냈다. 응력확대계수 K 가 하한계 응력확대계수 K_{th} 에 일치하는 직선과 피로강도 σ_{u0} 의 교점에서 얻어진 크랙길이 a_0 를 하한계 크랙길이라 한다⁸⁻¹⁰⁾. 시간 강도역에서 시간 강도 σ_{u1} 과 실험점을 지나는 $K=K_1$ 직선의 교점에서 한계크랙길이 a_1 이 구해지며, 소결금속의 경우 재료표면의 공공이 한계크랙길이에 영향을 미칠 것으로 생각된다.

본 연구에서는 명확한 초기크랙을 주지 않는 상태에서 시험을 시작하였기 때문에 크랙길이는 불분명하다. 그러나 비교적 짧은 시간에 크랙이 성장한다고 가정하면 크랙으로 보여지는 크랙길

이 a의 위치에 Fig. 7의 결과를 플롯 할 수 있다. 이 가정을 기초로 평활재시험편의 결과를 Fig. 9, 10에 나타냈다. 그림에서 가장 큰 크랙길이 실험점을 지나는 응력확대계수의 직선을 함께 도시하였다. Fig. 9로부터 반복하중수가 클수록 한계크랙길이는 작게 나타남을 알 수 있다. 그리고 Fig. 10으로부터 한계크랙길이 a_1 은 밀도에 따라 다소 차이가 나타났지만 약 160 μm 로 나타났다.

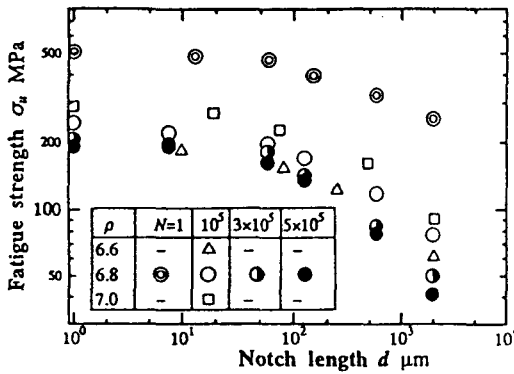


Fig. 7 Fatigue strength of plane specimen

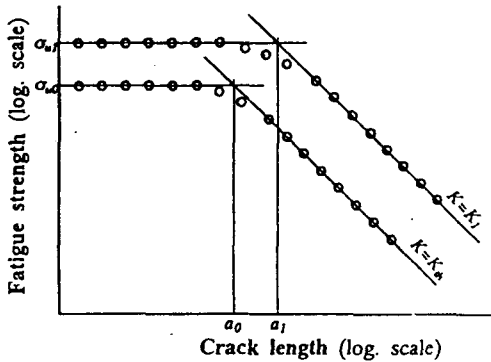


Fig. 8 Fatigue strength against crack length

3.3.2 U노치시험편의 강도

평활재시험편과 같은 방법으로 U노치저면에 저석커터로 노치를 준 시험편을 사용하여 실험한 결과를 Fig. 11에 나타냈다. Fig. 11에서도 한계크랙길이 a_1 은 밀도에 따라 다소 차이가 나타났지만 약 160 μm 로 나타났다.

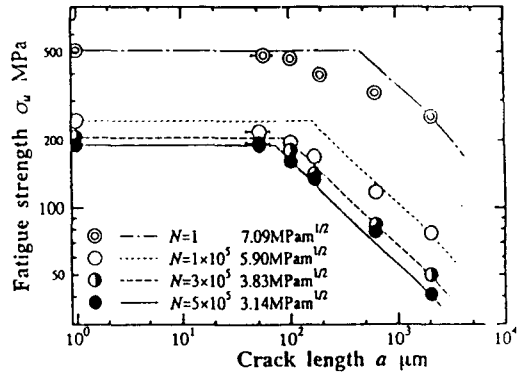


Fig. 9 Crack length effects on fatigue strength($\rho=6.8$)

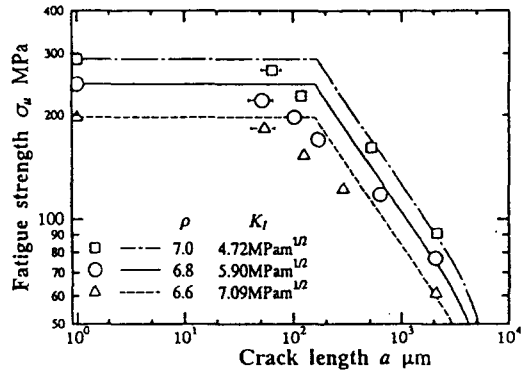


Fig. 10 Fatigue strength in $N=10^5$

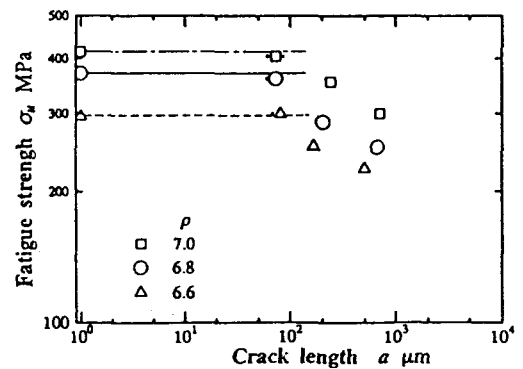


Fig. 11 Fatigue strength of U notch specimen

3.3.3 치차시험편의 강도

피로시험을 하기 전에 치차의 이뿌리위험단면부근의 크랙길이를 관찰한 후 그 위치에 노치

를 주어 피로시험을 실시하였다. 그 결과를 Fig. 12에 나타냈다. 한계크랙길이는 약 180 μm 로 나타났다. 이 값은 같은 밀도 평활재시험편의 한계크랙길이와 근사한 값이다.

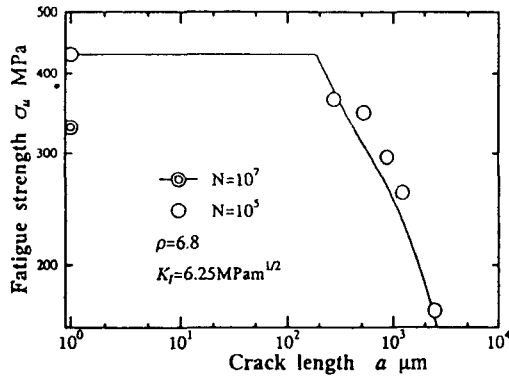


Fig. 12 Fatigue strength for test gears

3.4 소결치차의 피로시험

시험치차의 굽힘피로 실험결과를 정리해서 S-N곡선을 구하여 Fig. 13에 도시하였다. 본 연구에서는 ISO 치차강도 설계식¹¹⁾을 참고하여 열처리치차의 경우 수명계수가 반복하중수 $N \geq 3 \times 10^6$ 일 때 1.0, 열처리를 하지 않은 치차의 경우 수명계수가 반복하중수 $N \geq 10^7$ 일 때 1.0으로 하였다.

Fig. 13에 나타난 바와 같이 8~10개의 응력 레벨에서 피로시험을 실시하였으며, 소결침탄치차의 경우 S-N 14점법¹²⁾을 사용하여 피로시험을 하였다. 주어진 반복하중수에 대한 피로강도의 평균값은 S-N곡선을 추정하는 스테이케이시법⁶⁾을 이용하여 피로강도를 추정하였다. 소결치차는 약 260 MPa, 소결침탄치차는 약 451 MPa이 얻어졌다. 따라서 침탄처리를 실시함으로써 피로강도가 약 73% 향상되었다.

4. 결론

본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 평활시험편, U노치시험편, 치차시험편에 카본저석커터로 노치깊이를 주어 피로강도에 미치는 초기크랙길이의 영향을 밝혔다.

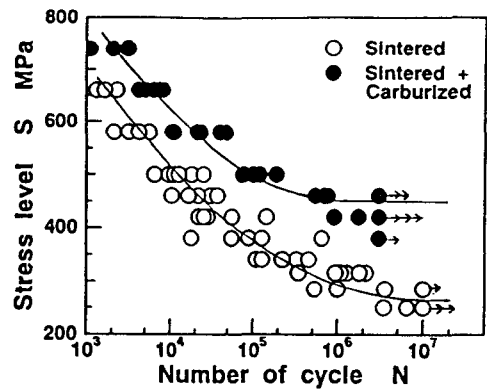


Fig. 13 S-N curve of sintered and carburized spur gear

- 2) 피로강도를 저하시키는 한계크랙길이를 구하였다. 한계크랙길이는 밀도에 따라 다소 차이가 나타났지만 약 160 μm 로 나타났다.
- 3) 소결치차와 소결침탄치차의 피로강도는 각각 260 MPa, 451 MPa이 얻어졌다. 침탄처리를 실시함으로써 피로강도가 약 73% 향상되었다. 소결치차는 경량이면서 대량생산이 가능하므로, 사용목적에 따라 표면처리를 실시하면 피로강도가 향상되므로 본 연구에서 고찰한 소결치차의 제특성은 앞으로 소결치차를 설계하는데 많은 활용이 있을 것으로 사료된다.

본 연구는 한국학술진흥재단 신진교수과제 연구비 지원 하에 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

- 1) 仙北谷名夫, 粉末冶金法に関する研究, 素材物性學會誌, 2-1, pp. 144~150, 1989.
- 2) 柳晟基 外 1名, 燒結齒車의 性能向上과 強度評價에 關한 研究, 韓國産業安全學會誌, Vol. 11, No. 3, pp. 53~58, 1996.
- 3) 日本粉末冶金工業會, 燒結機械部品, pp. 1~55, 1992.
- 4) 日本粉末冶金工業會, 燒結機械部品, pp. 159~189, 1990.
- 5) 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.

- 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.
 - 8) 柳晟基 外 1名, 칩탄치차의 쇼트피닝처리가 크랙진전억제에 미치는 영향, 대한기계학회, Vol. 18, No. 12, pp. 3227~3235, 1994.
 - 9) Sung-Ki Lyu, etc, Evaluation of Effect of Surface Treatments on the Strength of Carburized Gears Based on Fracture Mechanics, JSME, Vol.62, No. 593 pp. 306~312, 1996.
 - 10) Sung-Ki Lyu, etc, Effect of Surface Treatments on the Strength of carburized Gears -An Application of Fracture Mechanics-, KSME International Journal Vol. 12, No. 2, pp. 206~214, 1998.
 - 11) ISO/DP, Principles for the Calculation of Tooth Strength of Spur and Helical Gears, 6336/III, pp. 78~96, 1980.
 - 12) 日本機械學會, 統計的疲勞試驗方法, JSME-S-002, pp. 32~44, 1981.
-