

소결치차의 피로강도평가에 관한 연구

류성기*, 井上克己**

A Study on the Fatigue Strength Evaluation of Sintered Spur Gears

Sung-Ki Lyu*, Katsmi Inoue**

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 the sintered steel bend specimens of various densities 6.6 to 7.0 g/cm³ and the sintered spur gear to be consisted of Fe-Cu-C. 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. The fatigue strength S for fatigue life N of the specimen with the initial length of crack a_i is simulated, and they are shown as N-S-A curves. This study investigate the crack growth characteristics by experiments and present crack growth simulation method for sintered gear

Key Words : Sintered Steel (소결금속), Bending Fatigue Test (굽힘피로시험), Sintered Spur Gear (소결치차), S-N Curve (S-N 곡선), Initial Length of Crack (초기크랙길이), Fatigue Strength (피로강도)

1. 서론

치차는 동력전달장치에서 가장 기본적인 기계요소로서 고정도, 고강도, 경량화 등의 품질 개선과 원가 절감이 절실히 요구됨으로 소결치차에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

분말야금법¹⁾은 평균직경 0.1 mm 이하의 금속분말 뿐만 아니라 세라믹, 유기물 등의 비금속도 용이하게 혼합시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 이들의 혼합분말을 금형에 넣어 전자동프레스로 압축성형 시킨 후, 비산화성 터빈 연속노 내에서 소결시킨다. 소결치차는 용융점온도 이하에서 소결 시킴으로 고정도의 제품생산이 가능하며, 에너지 소비가 적고 대량생산의 장점을 가지고 있다.

그러나 일반적으로 소결금속은 미세한 기공과

같은 공극이 많이 존재하고 있다. 이러한 소결금속의 성질을 결정하는 가장 기본적인 요인은 소결 밀도 할 수 있는데, 소결금속은 밀도에 따라 크고 작은 공극이 존재하며 잔류하고 있는 공극과 입자계면의 접합성에 의하여 강도저하가 예상된다. 표면에 존재하는 공극은 재료의 강도 면에서 볼 때 초기결함이 되고 있다.

Kitagawa²⁾는 피로강도에 대한 재료표면의 초기 크랙길이의 영향을 고찰하여, 피로강도를 초기 크랙선단의 하한계 응력확대계수에 의하여 결정하는 방법을 연구하였는데 세라믹을 대상으로 하여 크랙발생과 재료의 강도에 대한 초기상태의 영향을 중요시하고 있다.

그러나 소결금속의 피로강도 평가에 관한 연구^{2~4)}는 많지 않으며, 소결금속의 크랙발생·

* 경상대학교 기계설계학과, 항공기부품기술연구센터

** 日本東北大學 機械知能工學科

신선의 특징은 밝혀지지 않았다. 저자들은 칩탄 치차의 굽힘 피로강도를 평가하기 위하여 이뿌리 위험단면에서 크랙 진전 특성을 밝혔으며, 피로 수명이 크랙 진전과정에 있다고 가정하여 피로 강도 실험결과로부터 초기 크랙길이를 구하였다⁵⁾.

본 연구에서는 소결치차의 피로강도를 구하고, 파괴역학의 관점에서 소결치차의 피로를 평가하기 위하여 소결금속의 피로크랙 진전 속도를 측정 한 후 소결금속 표면에 초기 크랙을 주어 上記의 해석법을 적용시켜 초기 크랙 이를 계산 하였다. 이 크랙길이는 소결금속 내 공공의 존재와 입자간의 결합력이 낮은것을 파괴역학의 관점으로 부터 설명하기 위한 파라메타이며, 이 크랙길이를 이용하여 소결치차의 피로 강도를 평가하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 굽힘시험편

본 실험에 이용한 소결금속은 Fe-Cu-C 소재이며, 화학조성비는 Table 1.과 같다. 밀도 ρ 는 6.6, 6.8, 7.0 g/cm³의 3종류이며, 3점굽힘 시험편의 형상을 Fig. 1에 나타냈다.

밀도가 다른 3종류의 시험편에 대하여 미소 경도계(MVK-E)를 이용하여 마이크로비커스 경도를 측정하였다. 측정하중 1 kgf, 유지시간 20 초의 측정조건으로 경도를 측정하였다. 밀도가 다른 수개의 3점굽힘시험편 중앙부 단면에서 경도를 측정하여 그 결과를 Fig. 2에 나타냈다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 소결밀도가 높아짐에 따라 경도가 증가하였다.

시험편 표면은 주사 전자현미경(S-450)을 사용하여 관찰하였다. 관찰한 금속조직을 Fig. 3에 나타냈다. 밀도가 커짐에 따라 표면의 공공의 수가 감소하는 것을 알 수 있다. 결합이 있는 재료의 강도를 고찰하기 위해 두께 0.1 mm의 카본 저석 커터로 시험편의 중앙에 노치를 주었다. 노치 선단은 반경이 약 30 μ m인 원호로 나타났다.

실험에는 전기·유압 서보식 피로 시험기를 이용하였다. 부하 반복속도는 20 Hz이다. 응력 증감폭을 30 MPa로 하여 스테아케이스법⁶⁾으로 피로 강도를 구하였다.

Table 1 Chemical components of the sintered steel(wt%)

Fe	Cu	C	other
96~98.6	1~2	0.4~0.7	<1

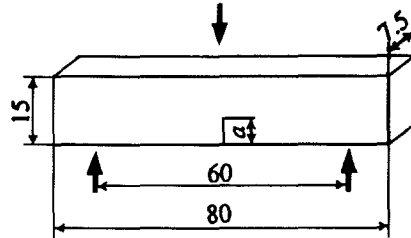


Fig. 1 Shape of bend specimens

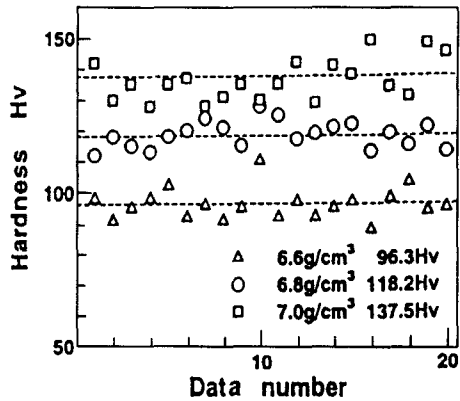


Fig. 2 Hardness distribution of bending specimens

2.2 치차시험편

굽힘 시험편과 같은 화학성분을 가지는 밀도 6.8 g/cm³의 소결치차를 이용하였다. 치차의 제원은 Table 2.와 같다. 이뿌리 위험단면의 위치에 굽힘 시험편과 같은 방법으로 노치를 주었다.

밀도 6.8 g/cm³인 치차의 경도는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 몇 개의 치차이를 카본저석으로 절단하여 표면을 랫평한 후, 이뿌리 위험단면에서 화살 표방향으로 깊이방향의 경도분포를 측정하여 그 결과를 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 소결치차의 경도분포는 깊이방향에 따라 특별한 변화가 나타나지 않았다. 따라서, 소결과정은 표면과 심부의 내부변화를 일으키지 않음을 알 수 있었다. Fig. 4에 표시한 점선은 평균값을 나타내고

있으며 Fig. 2와 4를 비교해 볼 때 시험치차의 경도는 밀도 6.8 g/cm³의 3점 굽힘시험편과 근사한 값으로 나타났다.

피로시험은 전기·유압서보 피로시험기를 이용하였으며 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 이끝으로부터 약 1.3 mm 내측에 속도 20 Hz에서 법선하중을 가하였다. 시험하중과 이뿌리위험단면 응력관계는 시험기에 의하여 부과되는 잇면법선하중을 P_n [kgf], 인장축 최대 이뿌리위험단면의 실응력을 S [MPa]라 나타내어, 이들의 관계를 표준치차에 대하여 유한요소법을 이용하여 구하면, 다음과 같다.⁷⁾

$$S = \frac{P_n}{bm} \left[a_1 \left(\frac{1}{z} \right) + a_2 \left(\frac{1}{z} \right)^3 + 3.5 \right] \times \exp \left[(2.50 \frac{1}{z} - 0.50) \frac{\lambda_p}{m} \right] \quad (1)$$

여기에서,

b : 이폭 [mm]

z : Module [mm]

m : 잇수

λ : 이끝에서 중심점까지의 거리 [mm]

a_1 : 2.50 - 18.00 X_v

a_2 : 2600 exp(-2.75 X_v)

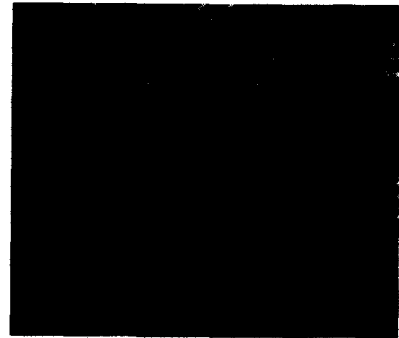
X_v : 전위계수

본 실험에서는 식(1)을 이용하여 시험하중과 이뿌리위험단면의 실응력과의 관계를 구한 결과 다음과 같다.

$$S(MPa) = 62.5 \frac{P_n}{bm} = 4.61 \times P_n \quad (2)$$

Table 2 Dimensions of test gears

Module	m	mm	2.5
Pressure angle		deg	20
Number of teeth			27
Tip diameter		mm	73.8± 0.01
Face width		mm	7.5± 0.01
Material			Fe-Cu-C
Density		g/cm ³	6.8



(a) $\rho = 6.6 \text{ g/cm}^3$



(b) $\rho = 6.8 \text{ g/cm}^3$



(c) $\rho = 7.0 \text{ g/cm}^3$

Fig. 3 Views on test specimen surface

2.3 소결치차의 피로시험

시험치차의 굽힘피로 실험결과를 정리해서 S-N곡선을 Fig. 6에 나타냈다. 일반적으로 ISO 치차강도 설계식⁸⁾에서 열처리치차의 경우에는 수명계수가 반복하중 수 $N \geq 3310^6$ 일 때 1.0, 열처리를 하지 않은 치차의 경우에는 수명계수가 반복하중수 $N \geq 10^7$ 일 때 1.0을 기준으로 하기 때문에 본 시험치차의

경우에는 피로 강도를 $N \geq 10^7$ 일 때 수명계수 1인 것을 고려하여 비파괴 반복하중 수를 $N \geq 10^7$ 으로 하였다.

Fig. 6에 나타낸 바와 같이 11개의 응력레벨에서 피로시험을 실시하였으며, 총시험횟수는 63개를 사용하였다. 피로강도는 다수의 시험이름을 사용하였으므로 Fig. 6으로부터 파괴확률 50%의 피로강도를 구하였는데 약 260MPa이 얻어졌다.

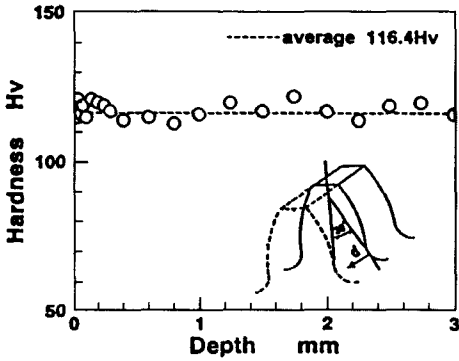


Fig. 4 Hardness distribution of sintered spurs

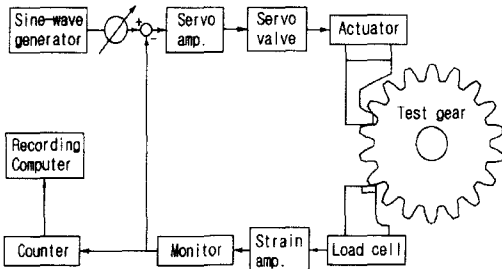


Fig. 5 System of bending fatigue test

3. 소결재의 크랙진전 특성

3.1 크랙진전 속도의 측정

크랙진전에 따라 굽힘강도가 감소하기 때문에 이것을 계측함으로써 크랙길이를 알 수 있다. 3점 굽힘시험에는 전기·유압서보식 피로시험기를 이용하였다. 3점 굽힘시험은 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 컴퓨터를 시험기에 접속한 로드셀에 의하여 하중을 피드백하여 제어한다.

반복하중의 시험은 컴퓨터로부터 일정한 정현파신호

를 시험기에 입력시켜 시험기측에서 게인값을 조절함으로써 반복하중을 제어한다. 하중은 A/D컨버터를 이용하여 디지털신호로 변환시켜 컴퓨터에 기록시킨다. 실험중 10~1000 회의 반복 부하 때마다 강도와 반복수를 기록하였다. 크랙길기와 강성은 선형관계가 있기 때문에 실험개시와 종료시의 크랙길기와 강도를 이용한 1차 보간에 의하여 임의의 반복수에 따라 크랙길이를 산출한다. 크랙진전 속도는 ASTM647-78T에서 추천한 7점 보간법⁹⁾으로 구하였다.

밀도 6.8 g/cm³ 시험편의 크랙진전 속도 측정결과를 Fig.8 에 나타냈다. 응력해대계수 $K[MPa\sqrt{m}]$ 는 다음 식¹⁰⁾을 이용하여 계산한다.

$$K = 0.0316S\sqrt{W} f(\zeta) \tag{3}$$

$$f(\zeta) = \frac{3\zeta^{1/2}(1.99 - \zeta(1 - \zeta))}{2(1 + 2\zeta)} \times \frac{(2.15 - 3.93\zeta + 2.7\zeta^2)}{(1 - \zeta)^{3/2}} \tag{4}$$

$$\zeta = \frac{a}{W} \tag{5}$$

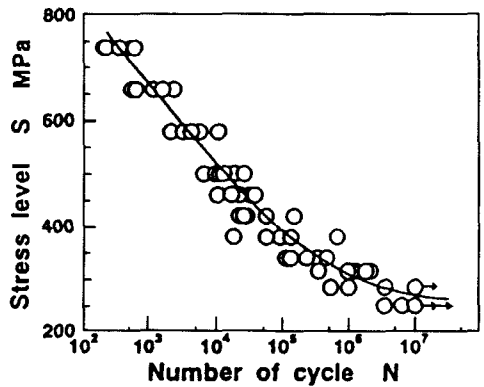


Fig. 6 S-N curve of sintered spur gear

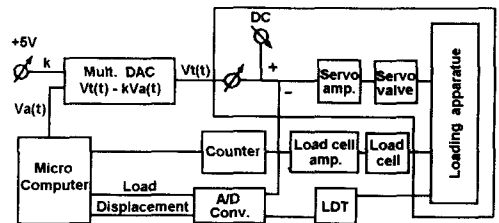


Fig. 7 Controlled system of bending fatigue test

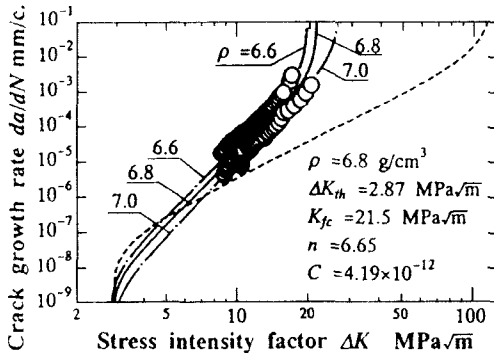


Fig. 8 Crack growth rate of sintered steel ($\rho = 6.8$)

3.2 크랙진전 속도의 표현

Deng¹¹⁾은 탄소강의 크랙진전 속도를 다음 식으로 나타냈다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C}{1-a^n} (\Delta K_n - \Delta K_{th}^n)$$

$$\Delta K_{th} \Delta \leq \Delta K \leq K_c$$

$$\frac{da}{dN} = C(1-a^n) \frac{\Delta K_n K_{fc}^n}{K_{fc}^n - \Delta K_n}$$

$$\Delta K_c < \Delta K < \Delta K_{fc} \quad (6)$$

$$a = \frac{\Delta K_{th}}{K_{fc}} \quad \Delta K_c = (\Delta K_{th} K_{fc})^{1/2}$$

여기에서 ΔK_{th} 는 하한계 응력확대계수, ΔK_{fc} 는 파괴인성, n 은 직선부의 기울기, C 는 크랙진전 특성정수를 나타낸다.

소결금속에서도 식(6)을 적용시킬 수 있다고 가정하여, Fig. 8에 나타낸 크랙진전 속도의 측정결과로부터 n 과 C 를 구하여 파괴인성 ΔK_{fc} 를 시험편의 파단 직전의 크랙길이로부터 산출한다.

하한계응력 확대계수 ΔK_{th} 는 본 실험에서 구할

수 없기 때문에, 탄소강에서 구한 실험식에 본 시험편의 경도를 대입시켜 구하였다. 이와 같이 구한 크랙진전 특성정수를 Fig. 8에 나타냈다. Fig. 8에서 실선은 식(6)에 크랙진전 특성정수를 대입시켜 얻은 크랙진전 속도이다. 그리고 파선은 경도가 같은 탄소강의 크랙진전 속도이다. 실제의 소결금속 내부에는 공공이 존재하여 금속간의 결합을 감소시키고 있다고 생각된다. 또한 굽힘피로 시험편의 파단면을 주사전자현미경을 이용하여 관찰한 결과 다수의 소결입자 표면과 입체로부터 파단면이 나타났다.

입자의 접촉부는 강도가 낮고, 이것을 분리하는 크랙이 진전한 것이 원인이라고 생각되어지며, 균질한 탄소강과 비교하여 소결금속의 크랙진전 속도는 빠르고, 파괴인성도 낮을 것으로 예상된다. Fig. 8의 결과는 이들에 일치한다.

4. 인공크랙을 가진 소결재의 피로강도

4.1 초기 크랙으로 표현한 결함이 강도에 미치는 영향

피로수명은 크랙 발생수명과 진전수명으로 나눌 수 있는데 크랙 발생과정은 대단히 복잡하여 그 수명을 추정하는 방법은 아직 확립되어 있지 않다. 저자들은 피로수명이 크랙진전 과정의 수명에 있다고 가정하여 파괴역학을 기초로 치차의 피로강도 평가법에 관한 연구를 수행하였다⁹⁾. 앞절에서 고찰한 바와 같이 소결금속의 공공과 입자간의 결합력 크기 등이 소결금속의 크랙진전속도에 영향이 있다는 것은 명확하다. 또한 균질재료에서도 표면의 기계 가공흔, 개재물, 열처리에 의하여 생긴 표면이상층 등이 재료의 강도를 저하시킨다. 이 의미에서 소결금속도 결함을 가지고 있다고 생각하여도 좋다. 저자가 침탄치차의 피로 크랙진전과정에서 계산한 한계크랙길이는 이와 같이 표면 결함의 영향을 크랙길이로써 나타내고 있다¹²⁾.

본 연구에서는 소결금속과 같이 결함이 많은 재료에 대하여 강도에 영향을 미치는 초기 크랙길이를 구하였다. 이 크랙 길이를 결함크랙길이라 하고, 기호 a_i 로 나타냈다.

4.2 소결치차의 N-S-A 곡선과 결함 크랙길이

인공적으로 도입한 노치를 인공 크랙길이라 부르며, 이 크랙길이를 a_c 로 나타냈다. a_c 크랙길이를 가진 재료를 피로시험하는 경우, 피로수명 N 에 대

한 피로강도 S 는 a_i 의 증가와 함께 감소한다.

굽힘시험편에서 크랙길이 a 와 크랙이 없는 경우의 최대굽힘응력 S 를 대입시키면 식 (3)~(5)로부터 응력확대계수가 정해지며, 크랙진전속도는 식(6)으로부터 구할 수가 있다. 밀도 6.8 g/cm^3 의 소결 금속재에서 크랙진전속도를 구하여, 응력레벨 S 의 하한계 응력 확대계수에 대응하는 크랙길이 a_i 로부터 크랙진전을 계산한다. 파괴인성에 도달할 때까지의 수명, 즉 잉여수명 N_R 과 크랙길이 a_i 의 관계를 Fig. 9에 나타냈다. 그림으로부터 각 응력레벨 S 에 대한 수명 $N = N_R$ 이 되는 크랙길이 a_i 를 구할 수 있다.

이뿌리 위험단면위치에 폭 0.13 mm 의 노치를 준 시험편을 이용하여 굽힘 피로시험한 결과를 Fig. 10에 나타냈다. 반복하중 수 $N = 1 \times 10^5$ 에서의 피로강도를 0 으로 표시하고 있다. N-S-A곡선은 밀도 6.8 g/cm^3 의 소결재의 피로크랙진전 특성과 유효요소 해석¹¹⁾에서 구한 응력확대계수를 이용하여 추정하였다. 노치가 없는 치차의 피로강도와 추정 N-S-A곡선으로부터 반복하중 수 $N=1 \times 10^5$ 에 대하여 구한 결함 크랙길이 a_i 는 $163 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 실험결과에 상술의 결함 크랙길이 a_i 를 더하여 보정한 값은 \bullet 로 표시하였다. 상기의 결함크랙길이와 치차의 N-S-A곡선을 이용하여 반복하중수 N 에 대한 피로강도를 추정할 수 있다.

즉 피로수명 $N=1 \times 10^7$ 에 대하여 추정한 치차의 피로강도는 약 270 MPa 로써 Fig. 10에 \diamond 로 나타냈다. 실험에서 구한 피로강도는 약 260 MPa 로써 Fig. 10에 \blacklozenge 로 나타냈다. 추정결과와 실험결과와의 차는 약 4 %로 나타났다.

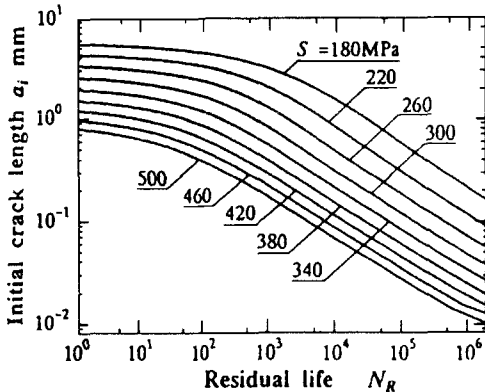


Fig. 9 Residual fatigue life of sintered steel ($\rho = 6.8$)

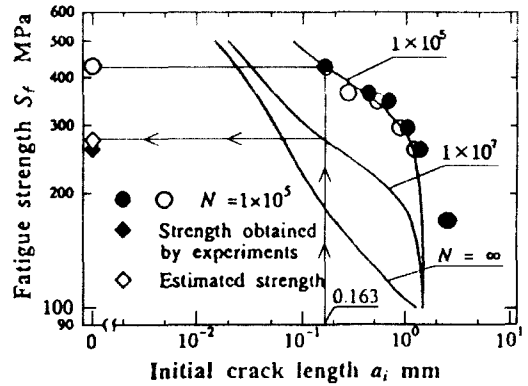


Fig. 10 Fatigue test results and N-S-A curves of sintered gears

5. 결론

본 연구에서 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

1. 소결치차 ($m = 2.5, \rho = 6.8$)의 피로시험결과 260 Mpa 의 피로강도가 얻어졌다.
2. 소결금속의 크랙 진전속도를 측정하였다. 같은 정도의 탄소강에 비하여 소결재의 크랙 진전 속도가 빠르고 파괴인성이 낮다는 것을 알았다.
3. N-S-A곡선과 피로 시험결과로부터 굽힘강도 평가의 지표가 되는 결함 크랙길이 a_i 를 구하였다. 소결치차 ($m = 2.5, \rho = 6.8$)의 경우 결함 크랙길이는 $a_i = 163 \mu\text{m}$ 가 얻어졌다.

후기

본 연구는 1997년도 한국학술진흥재단 신진교수 과제 연구비 지원하에 수행된 연구의 일부이며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 日本粉末冶金工業會, "燒結機械部品," pp. 1-55, 1992.
2. H. Kitagawa and S. Takahashi, Proc. 2nd Int. Conf. Mech. Behav. Mater., Boston, pp. 627-633, 1976.
3. 仙北谷名夫, "粉末冶金法に關する研究," 素材物性學會誌, 2-1, pp. 144-150, 1989.
4. 류성기, "소결치차의 성능향상과 신뢰성이 높

- 은 소결치차실세에 관한 연구," 韓國産業安全學會誌, Vol. 12, No. 4, pp.34-40, 1998.
5. Sung-Ki Lyu, Inoue, K., Deng G. and Kato. M., "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.
 6. R. E. Little, "Probabilistic Aspects of Fatigue," AS-ME Spec. Tech. Publ., Vol. 5, No. 11 pp. 29-35, 1972.
 7. Tobe, T., Kato. M. and Inoue, K., "True Stress and Stiffness of Spur Gear Tooth," Processings of the Fifth World Congress on Theory of Machines and Mechanisms, Vol. 2, pp. 1105-1111, 1979., 日本機械學會誌, 第87卷713號, pp. 47-53, 1979.
 8. ISO/DP, "Principles for the Calculation of Tooth Strength of Spur and Helical Gears," 6336/III, pp. 78-88, 1980.
 9. Fatigue Crack Growth Measurement and Data Analysis, ASTM STP738, pp. 321-327, 1981.
 10. 日本機械學會, "彈塑性破壞靱性 J_{IC} 試驗方法," JSME S001, pp. 19-45, 1992.
 11. Deng G., , Inoue, K., and Kato., "Evaluation of the Strength of Carburized Spur Gear Teeth Based on the Fracture Mechanics, 2nd report : Characteristics of Crack Growth Rate in the Carburized Layer," JSME, Vol. 57-535, pp. 903-909, 1991.
 12. Sung-Ki Lyu, Inoue, K., Deng G. and Kato. M., "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.