

## 냉간단조 베벨기어의 굽힘피로강도 평가

김재훈\*, 사정우\*\*, 김덕희\*\*, 이상연\*\*

### An Evaluation of Bending Fatigue Strength for Cold Forged Bevel Gear

Jae Hoon Kim\*, Jung Woo Sa\*\*, Duck Hoi Kim\*\* and Sang Youn Lee\*\*

#### ABSTRACT

Gears are the most commonly used parts in automotive and industrial applications. One of most common modes of gear failures is tooth breakage, which is usually produced by the bending fatigue failure. It is important to manufacture the gears which can withstand the applied stresses in view of safety and economic requirement. This paper deals with bending fatigue strength for cold forged bevel gear. Especially, to compare fatigue characteristics for manufacturing processes difference, bending fatigue tests of bevel gears made by three different processes respectively. Results indicate that the fatigue strength of bevel gear is improved by cold forging process. Intergranular fracture is found on fatigue fracture surface, and dimples are observed on final fracture surface. The fatigue failure cannot be considered as a deterministic quantity, but must be characterized statistically. This study proposes a method to estimate bending fatigue life of the bevel gear using the probability-load-life and Weibull analysis.

**Key Words** : Bevel Gear(베벨기어), Hobbing(호빙), Shot-Peening(샷피닝), Cold Forging(냉간단조), Bending Fatigue Test(굽힘피로시험), Load-Life Curve(하중-수명 선도), Weibull Analysis(와이블 해석), Probability-Load-Life(신뢰성-하중-수명)

#### 1. 서론

기어는 자동차, 산업용 기계, 항공기 등의 동력 전달 장치에 많이 사용되고 있으며 성능 향상과 대량 생산에 의한 원가 절감등이 절실히 요구되고 있는 부품이다. 특히 스트레이트 베벨기어는 자동차의 차동 기어등에 사용되는 중요한 부품으

로 우수한 기계적 특성이 요구된다. 차동 기어용 베벨 기어는 반복 하중을 받게 되고, 기어의 손상은 주로 굽힘 피로 하중에 의한 치의 파손의 형태로 발생한다. 따라서 우수한 특성을 지니는 베벨 기어를 개발하기 위해서는 피로 특성에 관한 연구가 선행되어야 한다.

\* 충남대학교 기계설계공학과

\*\* 충남대학교 대학원 기계설계공학과

지금까지 기어에 대한 피로 특성 연구는 주로 평기어에 국한되어 연구되어져 왔고, 치의 경사각을 갖는 베벨기어에 대한 피로 특성 평가는 아직 미흡한 실정이다<sup>(1-4)</sup>.

기어의 제조는 호빙(hobbing)과 같은 절삭가공에 의한 방법과 정밀냉간단조공법과 같은 비절삭가공에 의한 방법이 있다. 절삭 가공에 의한 제조는 가공시간 및 비용이 크게 소요되고 치의 표면정도, 강도 및 피로 특성을 향상시키기 위해서는 침탄 처리 및 샷피닝과 같은 공정이 필요하다. 반면 냉간단조기어는 소재 및 가공 시간이 절감되고 강도 및 피로 특성이 우수하므로 새로운 기어 가공 공법으로 대두되고 있다<sup>(5)</sup>.

따라서 본 연구에서는 호빙기어, 호빙기어를 샷피닝 처리한 샷피닝기어와 침탄 과정은 동일하나 정밀냉간단조공법으로 가공된 냉간 단조 기어를 대상으로 하여 치의 경사각을 고려한 시험치구를 고안 제작하여 굽힘피로강도를 시험 평가하였다.

피로 시험 결과는 통상 시험 데이터의 분산이 상당히 큰 것으로 알려져 있으며, 신뢰성이 있는 피로 수명 및 피로 강도를 평가하기 위해서는 시험 데이터를 이용한 통계적 해석 절차가 수행되어야 한다. 일반적으로 기계설계 시 필요한 일정 수명에 대한 피로 강도의 분포는 시험 결과로부터 직접 구할 수 없으며 수학적 변환 과정을 통하여 얻을 수 있다<sup>(6-8)</sup>. 따라서 본 연구에서는 피로 시험 결과로부터 얻은 하중-수명 선도와 와이블 해석(Weibull analysis)을 이용하여 냉간단조기어의 피로 강도에 대한 신뢰성을 평가하였다.

## 2. 시험편 및 시험방법

### 2.1 기어제원 및 제조공정

본 연구에서 굽힘피로시험을 수행하기 위해 사용한 베벨기어는 3톤급 차동기어로서 치수는 Table 1과 같다. Table 2는 기어 재료로 사용한 SCM 420의 화학적 성분이다. Fig. 1는 냉간단조기어의 생산공정을 나타낸 것이다. 호빙 기어와 샷피닝 기어는 Fig. 1의 침탄 및 뜨임 처리 공정까지는 냉간단조 기어의 생산 공정과 동일하나 절삭 가공 및 샷피닝 공정에 의해 가공하였다.

Table 1 Dimension of straight bevel gear

Tooth profile	Gleason revacycle	Dedendum	7.68mm
Pressure angle	22° 30'	Shaft angle	90°
No. of teeth	16	No. of mating gear teeth	11
Module	6.5	Back lash	0.18 ~ 0.23mm
P.C.D	104mm	Face angle	62° 59'
Whole depth	12.59mm	Pitch angle	55° 29'
Addendum	4.91mm	Root angle	44° 46'

Table 2 Chemical compositions of gear material(Wt %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.18~0.23	0.15~0.35	0.60~0.85	<0.030	<0.030	0.90~1.20	0.15~0.30

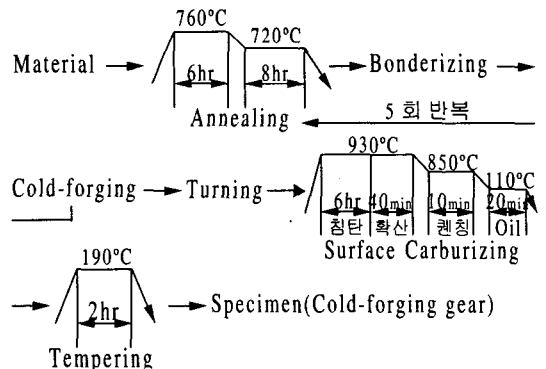


Fig. 1 Manufacturing process of cold forged gear

각각의 제조 공정에 따라 가공한 기어의 경도는 마이크로 비커스 경도 시험기(Mitutoyo Co., Model MVK-H1)를 사용하여 측정하였다. 경도 시험편은 피치원(pitch circle)과 기어의 치가 교차하는 점에 직각이 되도록 절단하여 표면으로부터 일정 간격으로 깊이 방향을 따라 측정하였다.

### 2.2 굽힘피로 시험방법

베벨기어의 굽힘피로시험은 10톤급 전기 유압 식피로시험기(Shimadzu Co., Model EHF-E10)를

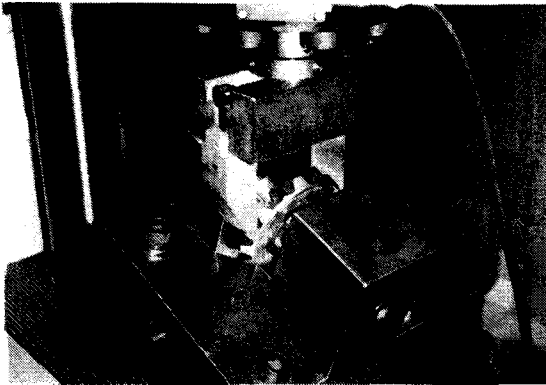


Fig. 2 Configuration of experimental setup

사용하였다. 하중을 부가하기 위한 펀치는 시험기의 피스톤이 편심되지 않고 좌우 치차의 치부에 동일한 하중이 작용될 수 있도록 더블투스(double tooth)치구를 설계 제작하였다. 또한 더블투스와 기어의 이가 면 접촉이 되도록 15° 경사각을 갖는 시험 치구를 고안 제작하였다. Fig. 2는 굽힘피로시험에 사용된 베벨 기어와 시험 치구의 형상을 나타낸 것이다.

하중은 시편의 이끝 선단과 더블투스 펀치가 분리되지 않도록 초기 압축하중을 가하였으며, 하중비를 0.04, 반복 사이클은 5 Hz, 파형은 정현파로 일정 하중 진폭 하에서 피로시험을 수행하였다. 본 시험에 사용한 베벨기어는 3톤 상용차용 부품으로, 하중은 한쪽 치에 3,000 kgf, 3,250 kgf, 3,500 kgf, 3,750 kgf, 4,000 kgf의 하중을 가하였다. 또한 매 시험마다 기어 치의 동일 위치에 하중이 가해지도록 주의하여 실험하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 경도특성

세가지 기어에 대한 경도 측정 결과는 Fig. 3과 같다. 세 종류의 기어가 동일한 침탄공정을 가지므로 표면으로부터 0.6 mm까지는 경도가 거의 비슷하나, 냉간단조기어의 경우 0.6 mm이상 내부로 갈수록 냉간단조공정에 기인한 가공경화로 호빙기어 및 슛피닝기어보다 경도가 높음을 알 수 있다. 또한 호빙기어와 냉간단조기어는 깊이 0.1 mm에서 각각 807 Hv, 788 Hv의 최고 경도값을 가지며 표면으로 갈수록 탈탄현상으로 인해 경도가 감소함을

볼 수 있다<sup>(1)</sup>. 슛피닝기어는 다른 두 종류의 기어와는 달리 슛피닝의 처리를 통하여 기어 치의 표면에 압축잔류응력의 생성과 조직의 미세화로 표면에서 821 Hv의 최고 경도값을 가졌다.

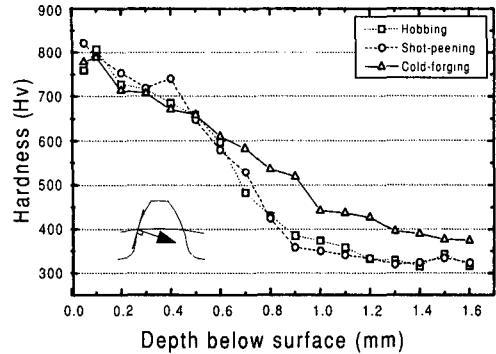
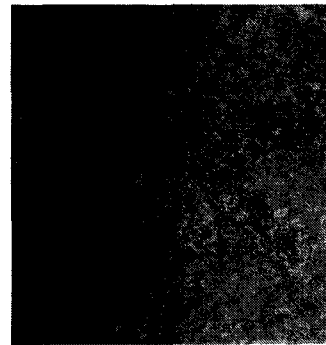
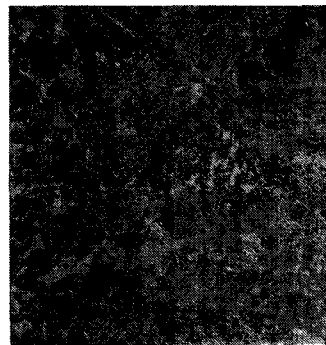


Fig. 3 Hardness distribution of specimen



(a) Surface microstructure



(b) Internal microstructure

Fig. 4 Surface and internal microstructures of cold forged gear

광학현미경으로 관찰한 냉간단조기어 표면조직은 Fig. 4(a)이고, 내부 조직은 Fig. 4(b)와 같다. 내부와 표면조직의 차이는 침탄 과정에 의한 탄소 함유량에서 기인되고 있으며 그로 인하여 표면에서는 조밀하고 내부에서는 표면보다 조대한 조직을 볼 수 있다<sup>(9)</sup>.

### 3.2 굽힘피로강도특성

세가지 종류의 기어에 대한 하중-수명 선도를 Fig. 5에 나타냈다. 여기서 직선은 각 시험 데이터로부터 최소 자승법(least square method)을 이용하여 직선화 한 결과이다. 하중-수명 선도에서 볼 수 있듯이 냉간단조기어가 슷피닝기어나 호빙기어보다 피로 특성이 우수함을 알 수 있다. 피로 하중이 감소함에 따라 냉간단조기어와 슷피닝기어의 피로 수명이 호빙기어의 피로수명과 차이가 약간 커짐을 볼 수 있다. 또한 냉간단조기어와 슷피닝기어는 일정한 피로수명 차이가 있음을 볼 수 있다. 슷피닝기어는 호빙기어에 비하여 슷피닝 공정을 통하여 표면에 압축잔류응력을 생성시키므로 피로 특성이 향상되며<sup>(10)</sup>, 냉간단조기어의 경우 경도 측정 결과에서 예측되듯이 굽힘 강도는 절삭가공에 의한 것보다 크게 나타났다. 이는 냉간단조기어는 소성가공제품으로 단조 공정으로 기인한 단류선 형성, 조직 미세화, 압축잔류응력의 영향 등에 의하여 표면에 압축잔류응력이 형성된 슷피닝 기어에 비하여 피로 강도가 우수한 것으로 판단된다<sup>(5)</sup>. 아래식은 하중-수명 선도로부터 구한 세가지 기어의 하중-수명 관계식이다.

i) 호빙기어의 경우

$$L = 18646 N^{-0.1357} \quad (1)$$

ii) 슷피닝기어의 경우

$$L = 16028 N^{-0.1196} \quad (2)$$

iii) 냉간단조기어의 경우

$$L = 15657 N^{-0.1144} \quad (3)$$

여기서  $L$ 은 최대하중이고,  $N$ 은 파단까지의 수명 사이클이다. 이 결과에 의하면  $10^6$  cycles을 피로 한도로 정의하였을 때, 호빙기어는 2,860 kgf, 슷피닝기어는 3,069 kgf, 냉간단조기어는 3,225 kgf를 피로 한도에 대한 한계하중으로 정의할 수 있다.

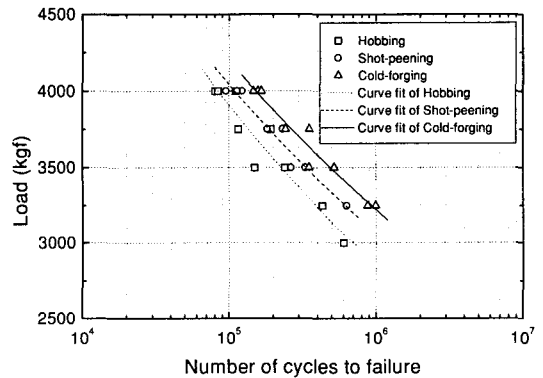
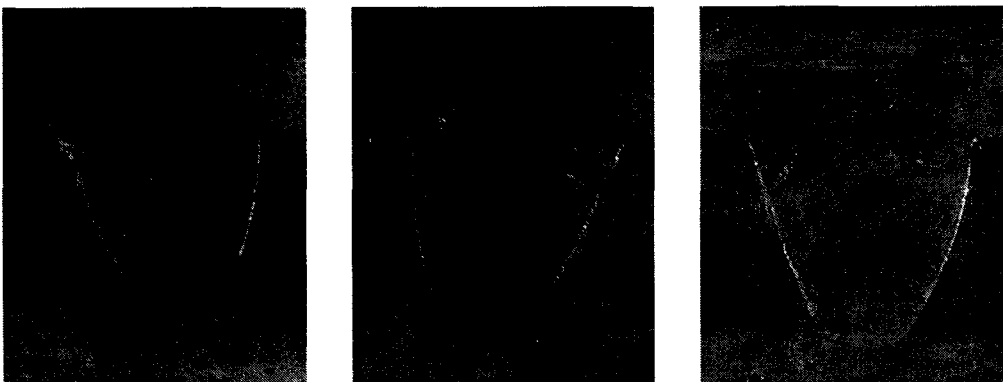


Fig. 5 Load-life curves of specimens



(a) Hobbing gear

(b) Shot peening gear

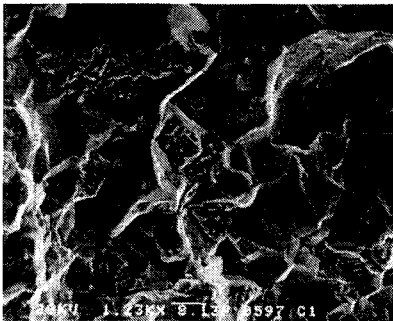
(c) Cold forging gear

Fig. 6 Configuration of failure teeth

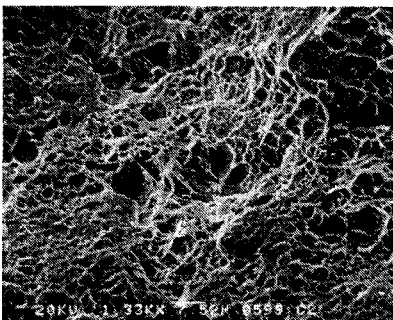
### 3.3 파단면특성

Fig. 6은 피로 시험 후 파단된 치의 형상을 근접 촬영한 사진이다. 응력이 집중되는 이뿌리부위에서 초기 크랙이 발생되리라 예상되었으나 이와는 달리 펀치와 기어의 치가 접촉되는 부위에서 소성변형에 의해 초기크랙이 발생하여 최종파단은 크랙이 이뿌리쪽으로 급격히 성장하여 파단되었다.

Fig. 7은 주사식 전자 현미경을 이용하여 냉간 단조기어의 피로 개시 영역과 최종 파단부를 나타낸 것이다. Fig. 7(a)는 피로 파단 개시 영역으로 입계를 따라 균열이 진전한 취성 파괴를 보이고 있다. Fig. 7(b)는 최종 파단 영역으로 덩플의 연성 파면을 나타내고 있다. 이는 Fig. 3의 경도 특성에서 알 수 있듯이 재료의 침탄 처리 및 냉간 단조 공정에 의하여 표면에서 높은 경도를 나타내어 강도 및 경도가 향상되고 있으며, 내부의 경도는 낮아 높은 인성과 연성을 가지므로 피로 파단 개시영역과 최종 파단 영역의 파괴기구가 다른 것으로 사료된다.



(a) Crack initiation region



(b) Final fracture region

Fig. 7 Fracture of cold forged gear

### 3.4 신뢰성평가

본 연구에서 수행한 굽힘 피로 시험 방법은 동시에 두개의 치에 하중을 가하여 두개의 치 중 한 개가 파손되면 시험이 중단되도록 시험하였다. 그러므로 피로 수명의 신뢰성을 평가할 때에는 파손되지 않은 치의 피로 수명도 고려되어야 한다. 피로 수명의 신뢰성 평가는 와이블 해석을 이용하였으며, 이 해석을 통하여 2개의 치중1개가 파손될 확률은 29.3%이다<sup>(8)</sup>. 와이블 해석에 의한 생존 확률(S)과 수명(N)과의 관계는 아래식과 같이 주어진다.<sup>(7,10)</sup>.

$$S = \exp(- (N/N_r)^\beta) \quad (4)$$

$$\ln N = \frac{1}{\beta} \ln \left( \ln \frac{1}{S} \right) + \ln N_r \quad (5)$$

여기서 상수  $N_r$ 은 와이블 분포특성수명이며,  $\beta$ 는 와이블 기울기이다.

Fig. 8은 최대 하중 4,000 kgf에서 냉간단조기어의 피로 수명에 대한 와이블 해석 선도이다. 와이블 해석에 의한 최대 하중 4,000 kgf에서 B10 수명은 116,820 cycles이고, B90 수명은 168,290 cycles이다. 여기서 주어진 하중 범위내에서 와이블 기울기가 일정하다면 식 (6)의 신뢰도-하중-수명의 관계식을 이용하여 신뢰성을 고려한 기어 설계에 이용할 수 있다<sup>(11)</sup>.

$$\frac{N}{N_r} \left( \frac{L}{L_r} \right)^{-\frac{1}{m}} = \left( \frac{\ln S}{\ln 0.368} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (6)$$

여기서  $m$ 은 하중-수명 선도의 기울기,  $L_r$ 은 피로 시험을 수행한 특정 하중값이다. 식(3)과 와이블 해석을 이용하여 구한 최대 하중 4,000 kgf에서 냉간 단조 기어의 신뢰도-하중-수명 관계식은 아래와 같다.

$$\frac{N}{152470} \left( \frac{L}{4000} \right)^{8.74} = \left( \frac{\ln S}{\ln 0.368} \right)^{0.12} \quad (7)$$

Fig. 9는 식 (7)을 이용한 냉간단조기어에 대한 신뢰도-하중-수명 선도를 보여주고 있다.

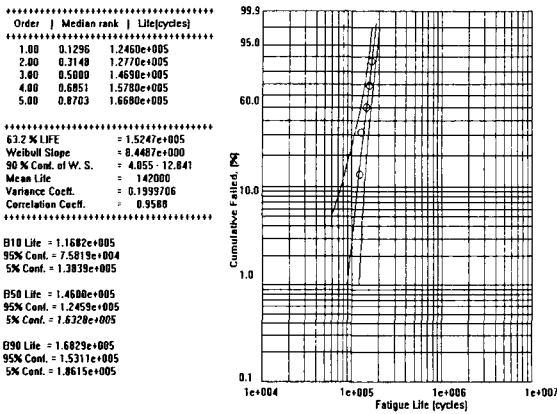


Fig. 8 Weibull plot of cold forged gear under maximum load 4,000kgf

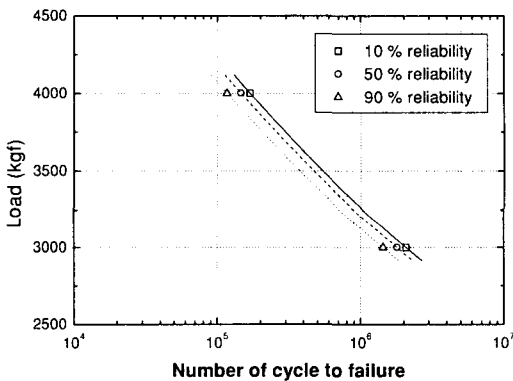


Fig. 9 Probability-load-life curves for cold forged gear

신뢰도 하중 수명 선도에서 볼 수 있듯이 최대 하중 4,000 kgf에서 10% 신뢰성이 있는 피로수명은 168,526 cycles, 50% 신뢰성이 있는 피로수명은 145,915 cycles, 90% 신뢰성이 있는 피로수명은 116,391 cycles이다.

#### 4. 결론

제조공정이 다른 스트레이트 베벨기어에 대하여 굽힘피로시험을 수행하여 얻은 피로강도와 파단면의 형상을 통해 각 시험편의 제조공정의 차이로 인한 피로강도에 미치는 영향을 평가하고 와이블 해석에 의한 냉간단조기어의 신뢰성을 평가하여 아래

의 결론을 얻었다.

- 1) 냉간단조기어는 다른 기어들과 동일한 침탄 과정을 가지므로 표면으로부터 깊이 0.6 mm 이하에서는 거의 비슷한 경도값을 가지나 0.6 mm 이상부터는 단조공정으로 인한 조직의 가공경화로 인해 경도값이 호빙기어나 숏피닝기어보다 크다.
- 2) 냉간단조기어의 굽힘피로강도는 단조공정으로 기인한 단류선 형성, 조직미세화, 압축잔류응력의 영향때문에 호빙기어와 숏피닝기어에 비하여 우수하다.
- 3) 세 종류의 시험편에서 공허 크랙 개시점의 피로 파단면에서는 입계파면이고 최종파단 영역에서는 연성파괴시 발생하는 덩플 파면이다.
- 4) 냉간단조기어의 신뢰도-하중-수명 관계식을 구하여 신뢰성을 고려한 기어의 피로 설계에 이용할 수 있다.

#### 참고문헌

1. S. K. Lyu, K. Inoue, M. Kato, M. Onisi and K. Shimoda, "Effects of Surface Treatment on the Bending Fatigue Strength of Carburized Spur Gear," JSME International Journal, Series C, Vol. 39, No. 1, pp. 108~114, 1996.
2. 김완두, 최병익, 한승우, 김정훈, "침탄 및 고주파 열처리한 치차의 굽힘 피로 강도 평가," 한국자동차공학회논문집, 제2권, 제6호, pp. 1~8, 1994.
3. 류성기, 김경모, "소결치차의 피로강도에 관한 연구," 한국산업안전학회지, 제9권, 제3호, pp. 28~33, 1994.
4. S. Y. Martowibowo, "Bending Fatigue Life Estimation of Carburized Steel Gear," The Ninth International Pacific Conference of Automotive Engineering, pp. 549~553, 1997.
5. 중소기업연수원, 냉간단조가공의 실제, 중소기업진흥공단, 1993.
6. 김종하, 금속재료 피로강도의 설계자료, 기전연구사, 1995.
7. 일본기계학회, 통계적 피로시험 방법, JSME S

002, 1981.

3. K. C. Kapur, L. R. Lamberson, Reliability in Engineering Design, John Wiley & Sons, pp.291 ~ 332, 1977.
9. 김재훈, 사정우, 이상연, 김덕희, “냉간단조 베벨기어의 굽힘피로강도 평가,” 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp. 1076~1079, 1998.
10. J. A. Bannantine, J. J. Comer and J. L. Handrock, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall, pp. 1~39, 1990.
11. V. A. Avakov, R. G. Shomperlen, “Fatigue Reliability Functions,” Trans. of ASME, J. of Vib., Acou., Stress, and Reliability in Design, Vol. 111, No. 4, pp. 443~455, 1989.