가속내구해석을 이용한 평기어의 신뢰성 평가

An Evaluation of Reliability of the Spur Gear Using the Accelerated Durability Analysis

김철수*, 김정규**, 권여현***
Chul-Su Kim, Jung-Kyu Kim, Yeo-Hyoun Kwon

ABSTRACT

The gear that is used in various mechanical components occurs easily damages due to the repeated torque and the high oil temperature. The main failure mode of the gear is the surface deterioration with the tooth surface fatigue. Therefore, the life evaluation and the failure analysis of the gear were very important since it may cause fatal damage of entire gear box system. In this paper, the failure mechanism and the life of the gear were evaluated using the durability analysis simulator such as MSC.FATIGUE. Moreover, the reliability analysis model of the spur gear with the accelerated life testing technique was proposed.

1. 서론

차량용 시스템의 품질보증 및 안전성 향상을 위하여 실제 운전조건하에서 부품의 내구성시험(durability test)은 매우 중요하다. 그러나 내구성시험은 많은 시간 및 비용을 요구하므로 이러한 문제를 해결하기 위한 선행 작업으로서, 짧은 시간 동안 실제 조건에 준한 내구성 해석시뮬레이션에 의한 수명평가가 필요하다.

차량용 부품의 내구성시험을 수행함에 있어서 합리적인 가속인자 수준의 설정은 동일한 고장메커니즘을 유지하는 범위 내에서 시험함으로써 시간을 단축할 수 있는 장점을 갖는다. 이 때 주의할 점은 너무 가혹한 가속인자의 설정으로 실사용 조건에서의 고장모드와 다른 결과를 초래할 가능성이 있다는 것이다. 따라서 차량 내 다양한 기계시스템의 내구성을 보장하기 위해서는 합리적인 가속인자의 수준설정에 따른 부품에 대한 가속수명시험(accelerated life testing)기법의 개발이 매우 중요하다.

최근에 발표된 차량용 부품의 내구성평가 및 가속수명시험에 관한 국내외의 대표적인 연구경향[2-4]은 다음과 같다. Zhang 등[3]은 시간-가속인자의 관계식인 역승법칙을 사용하여 수명분포와 가속계수 결정에 대해 연구하고 시험적으로 베어링 기계부품요소에 대해 가속수명시험법을 개발하였다. 그리고 민한기 등[4]은 유한요소해석 시뮬레이션을 이용하여 서스펜션 시스템에 대한 가속내구해석 기법을 연구하였다. 이상의 연구들은 정확한 고장분석을 수행하지 않거나 단순한 가속인

* 한국철도대학 차량기계과 교수, 정회원
** 한양대학교 기계공학부 교수, 정회원
*** 한양대학교 기계설계학과 석사과정, 학생회원

자 수준의 신정에 의한 가속수명시험기법에 관한 연구로서, 이는 신뢰적으로 시스템 및 부품의 수명산출의 정확성 및 신뢰성을 저하시킨다. 또한 현재 국내 차량용 부품의 내구성 평가기준은 정확한 근거가 없거나 전무한 실정이며, 이에 따른 부품들의 정량적인 내구수명 예측 및 신뢰성 평가가 매우 어려운 상황이다.

본 연구에서는 차량용 부품에서 널리 사용되는 평기어(spur gear)를 대상으로 내구성 해석시뮬레이터를 이용한 차량용 부품에 대한 가속내구해석을 수행하고, 복합 가속인자 하에서 가속수명시험기법을 제시하고자 한다.

2. 이론적 해석

2.1 기어의 고장모드 및 가속인자의 선정

기어의 주요 고장모드는 기어 이면의 피팅(pitting)과 이뿌리의 파손이다. 피팅은 회전 토크에 의한 치면에서 발생되는 표면피로 파손으로서 국부적으로 치면에 요철을 발생시킨다. 그리고 이뿌리 파손(tooth breakage)은 반복적인 토크에 의한 굽힘응력으로 발생한다. 이로부터 기어 이의 피팅과 이뿌리 파손에 대한 지배적인 인자는 토크이므로 이를 가속인자로 선정할 수 있다. 이와 함께 기어의 수명은 시간에 따른 온도상승에 따른 치면의 열화에 영향을 받는다. 그러므로 기계적 가속인자는 토크가 되며, 온도는 열적 가속인자가 된다[5,6].

2.2 가속수명시험모델

기어의 수명평가를 위한 가속인자는 토크와 온도이므로, 수명-가속인자 관계식은 역승법칙 모델과 아레니우스 모델을 동시에 고려한 온도 비-열적 모델(temperature non-thermal model, T-NT model)이며, 이의 수식은 식 (1)과 같다[7~9].

$$L(M,T)=\frac{C}{M^{n}e^{-\frac{B}{T}}} \tag{1}$$

여기서 $L(\ )$은 수명이며 M은 기계적 가속인자, T는 열적 가속인자(unit: Kelvin)이다. 그리고 B, C, n은 실험으로 결정되는 모수들 이다. B가 n보다 큰 경우는 열적 가속인자의 영향을 많이 받으며, 그 반대의 경우는 기계적 가속인자의 영향을 많이 받는다는 것을 의미한다. 식 (1)에서 $L(\ )$의 확률분포가 2-모수 와이블분포(2-parameter Weibull distribution)로 가정하면, T-NT 모델은 복합 가속인자에 대한 가속수명시험모델이다. 이로부터 부품수명의 확률밀도함수(probability density function , $f(\ )$)은 식 (2)과 같다[7~9].

$$f(N,M,T)=\frac{\beta M^{n}e^{-\frac{H}{T}}}{C}\left\{\frac{NM^{n}e^{-\frac{H}{T}}}{C}\right\}^{\beta-1}e^{-\left(\frac{NM^{n}e^{-\frac{B}{T}}}{C}\right)^{\beta}} \tag{2}$$

여기서 N은 사이클 수이고 β는 2-모수 와이블분포의 형상모수이다.

3. 가속내구성해석

3.1 재료 및 가속수명시험

기어의 형상은 입력속도에 대해 출력속도를 감속하는 인벌류트 치형의 평기어로 선택하였다. 기어의 설계조건은 Table 1과 같다.

기어의 재질은 고탄소 Cr-Mo합금강으로서 비교적 강도가 높기 때문에 기어나 볼트 기어 등에 많이 사용되는 SCM 440 강을 선택하였다. 이의 화학적 성분 규격은 Table 2와 같으며, 기계적 특성은 Table 3과 같다. 기어의 규격형상은 Table 1과 같은 설계조건을 바탕으로 최종적으로 Table 4

와 같다[5,6]

3.2 내구성 해석시뮬레이션

Fig.1은 기어의 응력 및 내구성 해석을 위한 유한 요소망(finite element mesh generation)과 경계조건(boundary conditions)을 나타낸 것이다. 요소의 형태는 2차보간법을 이용하여 접촉해석에 적합하다고 알려진 8절점 2차(quadratic) 평면변형률요소(plane strain element)이며[10], 총 요소수 및 절점수는 각각 13,111개 및 41,151개이다. 요소망 모델링은 MSC.PATRAN 및 MSC.MENTAT을 사용하였으며, 응력해석은 MSC.MARC에 의하여 수행되었다. 경계조건은 그림 1에서 보는 바와 같이 피니언 기어 및 휠 기어에 각각 토크와 회전속도를 부여하고, 접촉조건은 강체와 기어들 사이 그리고 피니언 기어(CB1) 및 휠 기어 몸체(CB2)사이에 각각 사용하였다.

Fig. 2는 토크 T = 35 Nm및 회전속도 1000 rpm 하에서 von-Mises 응력분포를 나타낸 것이다. 그림에서 접촉시 치면의 최대von-Mises 응력은 420 MPa이고, 발생지점은 피니언 기어 치면의 피치라인에 가깝다. 그러므로 이는 피치라인근처에서 파손의 가능성을 시사한다. Fig. 3은 Fig. 2의 정적 구조해석결과로부터 상용 내구성 해석시뮬레이터인 MSC. Fatigue를 이용하여 얻어진 피로수명분포이다. 그림에서 기어의 수명은 이빨의 근처보다 피니언 기어 치면의 피치라인 근처에서 가장 짧다. 따라서 이 평기어의 고장모드는 굽힘에 의한 이빨의 파손보다 치면사이의 접촉에 의한 고장발생 가능성이 더욱 크다는 것을 알 수 있다.

3.3 가속인자의 수준결정

Table 5는 토크에 따른 내구성 해석 및 AGMA의 온도계수[6]를 고려하여 결정된 가속인자 수준을 정리한 것이다. 여기서 토크 수준은 3.2절의 내구성 해석시뮬레이션의 결과로부터 수명 10^8 cycles보다 낮지 않도록 토크를 선정하였으며, 실제 예상 설계 하중조건의 100 % 및 110 %이다. 그리고 열 가속인자 수준은 AGMA에서 윤도효과를 적용하는 120℃~150℃사이에서 선택한 것이다.

Table 1 Conditions of gear design

Design parameter	Condition
Gear type	Spur gear
Input Torque (Nm)	22
Output Torque (Nm)	Max 60
Input rpm	1,800
AGMA Quality Class	10 (KS 2)
Surface Heating	Induction
Surface treatment	Grinding
Duty cycle	10^8 cycles

Table 2 Chemical composition (wt%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SCM 440	0.38 ~ 0.43	0.15 ~ 0.35	0.60 ~ 0.85	< 0.03	< 0.03	0.90 ~ 1.20	0.15 ~ 0.30

Table 3 Mechanical properties for SCM 440

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
SCM 440	773	949	19.2

Table 4 Specification of spur gear

	Pinion	Gear
Module[mm]	2.5	2.5
No. of teeth	21	40
Addendum modification coefficient	0.25	0
Pressure angle [deg]	20	20
Face width [mm]	17.64	17.64
Center distance [mm]	76.86	
Gear ratio	1.9048	

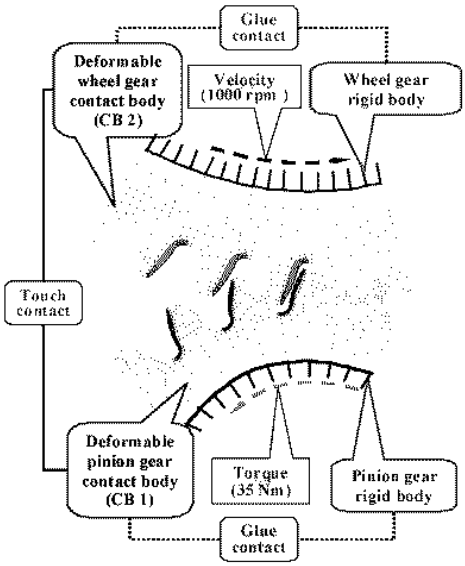

Fig. 1 FEA model and boundary conditions

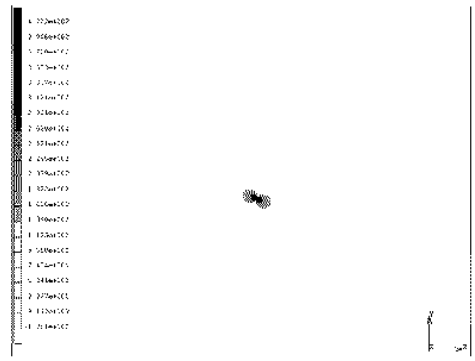

Fig. 2 von-Mises stress contour of the spur gear

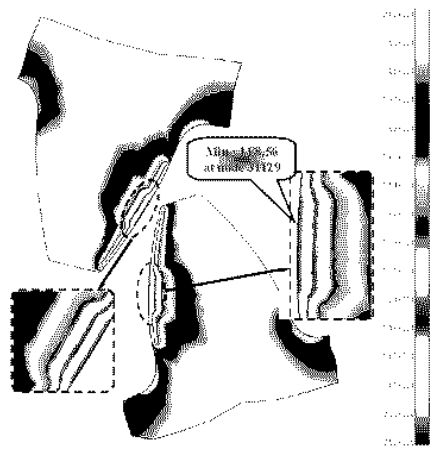

Fig. 3 Fatigue life distribution (log scale)

4. 내구성 시험조건에 의한 적용사례

4.1 가속수명시험 결과 및 가속수명 모델 선정

Table 6은 토크 38 Nm 및 42 Nm 그리고 온도 393 K 및 413 K의 환경조건하에 가속수명시험으로 얻어진 가상의 수명 예측 결과를 정리하여 나타낸 것이다. 참고로 가속수명시험의 모델을 결정하고 신뢰도를 계산하기 위해서는 반드시 실사용 조건이 명시가 되어야 한다. 실사용 온도는 보통의 사용온도인 50℃ (323 K)로 정하였고 운전토크는 설계 토크보다 조금 높은 25 Nm로 하였다.

Fig. 4는 평기어의 수명에 대한 파손확률(probability of failure or unreliability)을 와이블분포용 확률지에 나타낸 것이다. 그림에서 왼쪽 4개선은 각각 4종류의 시험조건에 얻어진 시험자료로부터 최우추정법을 이용하여 얻어진 회귀직선이며, 우측의 실선은 실제 사용조건에서 얻어진 것이다. 또한 4개의 점선은 동일한 기울기인 형상모수를 가지며, 이는 가속수명시험기법의 기본가정(i.e.: common shape parameter)에 의한 것이다. 이로부터 식 T-NT Weibull 가속수명시험모델은 Table 6의 수명데이터로부터 최우량추정법을 이용하여 결정하였으며, 평가된 결과는 Table 7과 같다. Table 7

로부터 운전조건하에서 평기어에 대한 신뢰도는 Fig.5와 같이 평가할 수 있다. 이 그림에 나타낸 바와 같이 설계수명 10^8 cycles 에서 신뢰도는 1에 근접하므로 이 평기어는 설계조건을 만족하며 매우 높은 신뢰도를 가짐을 알 수 있다.

Table 5 Stress level for accelerated life test

Accelerated stress	The first level	The second level
Torque	38 Nm	42 Nm
Temperature	120 °C	140 °C

Table 6 Example data for determination of accelerated life test model of the spur gear (unit : cycles to failure)

Torque \ Temperature	120 °C(393 K)	140 °C(413 K)
38 Nm	9.61E+05	3.24E+05
	1.06E+06	4.34E+05
	1.36E+06	4.80E+05
42 Nm	5.25E+05	1.52E+05
	6.85E+05	2.80E+05
	7.05E+05	3.20E+05

Table 7 Temperature-nonthermal Weibull model

Life-stress relationship (: Temperature-nonthermal):	$L(M,T)=\frac{C}{M^n e^{-\frac{B}{T}}}$
Life distribution : Weibull :	$f(N)=\frac{\beta}{\eta}\left(\frac{N}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{N}{\eta}\right)^{\beta}}$
Temperature-nonthermal Weibull Model :	$f(N,M,T)=\frac{\beta M^n e^{-\frac{B}{T}}}{C}\left(\frac{N M^n e^{-\frac{B}{T}}}{C}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{N M^n e^{-\frac{B}{T}}}{C}\right)^{\beta}}$
β	6.3966
B	7508.3140
C	6.0111E+5
N	5.0733
Ea	0.6470

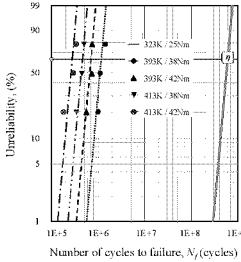

Fig. 4 Probability Weibull plot for the two-stress test case

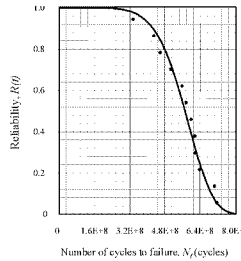

Fig. 5 Reliability vs. life plot

5. 결 론

본 연구에서는 차량용 부품에서 널리 사용되는 평기어(spur gear)를 대상으로 내구성 해석시뮬레이터을 이용한 차량용 부품에 대한 가속내구해석을 수행하였으며, 복합 가속인자 하에서 가속수명시험 기법을 제시하였다.

1.기어의 수명은 이뿌리 근처 보다 피니언 기어 치면의 피치라인 근처에서 가장 짧다. 따라서 이 평기어의 고장모드는 굽힘에 의한 이뿌리 파손보다 치면사이의 접촉에 의한 고장발생 가능성이 더욱 크다는 것을 알 수 있다.

2. 단순히 가혹한 가속인자의 수준설정은 사용조건에서의 고장모드와 달라지는 결과를 초래할 수 있으므로 내구성해석결과로부터 취약부위와 고장모드를 확인하고, 이로부터 가속인자수준을 결정하였다.

3. 온도 비-열적 Weibull 가속수명시험모델로부터 실제 운전조건하에서의 평기어에 대한 신뢰도를 평가하였다. 설계수명 10^8 cycles 에서 신뢰도는 1에 근접하므로 이 평기어는 설계조건을 만족하며 매우 높은 신뢰도를 가짐을 알 수 있었다.

참고문헌

1. S. I. Nishida (1992), *FAILURE ANALYSIS IN ENGINEERING APPLICATIONS*, Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 3~5.
2. R. I. Stephens, P. M. Dindingert and J. E. Gungert (1997), "Fatigue Damage Editing for Accelerated Durability Testing Using Strain Range and SWT Parameter Criteria," *Int. J. Fatigue*, Vol. 19, No. 8~9, pp. 599~606.
3. C. Zhang, I. Chuckpaiwong, S. Y. Liang and B. B. Seth (2002), "Mechanical Component Lifetime Estimation Based on Accelerated Life Testing With Singularity Extrapolation," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 16(4), pp.705~718.
4. H. K. Min, J. A. Jung, I. Y. Yang (2002), "Accelerated Durability Analysis of Suspension System," *Journal of the KSAE*, Vol. 10, No. 5, pp.168~173.
5. D. W. Dudley, Townsend, Dennis P. (1991), *DUDLEY'S GEAR HANDBOOK*, McGraw-Hill, New York, pp.1.1~19.21.
6. Metric Edition of ANSI/AGMA 2001-C95 (1995), *Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Spur and Helical Gear Teeth.*
7. A Division of Reliasoft Corporation (2001), *ReliaSoft's ALTA Version 6 User's Guide*, ReliaSoft Publishing, South Sherwood.
8. W. Nelson (1990), *Accelerated Testing Statistical Models, Test Plans and Data Analysis*, John Willey & Sons, New York.
9. W. B. Nelson (2004), *Applied Life Data Analysis*, John Willey & Sons, New Jersey.
10. D. H. Lee, D. H. Choi, J. K. Lim, G. Y. Yoon (1998), "An Analysis of the Contact Problem between Mating Involute Gear Teeth Using Finite Element Method," *Journal of the KSLE*, Vol. 4, No. 2, pp. 28~35.