

평기어에 대한 가속내구시험의 조건설정에 관한 연구

An Study on the Establishment of the Accelerated Durability Test Condition of the Spur Gear

김철수*, 김정규**, 권여현***, 안승호*

Chul-Su Kim, Jung-Kyu Kim, Yeo-Hyoun Kwon and Seung-Ho An

ABSTRACT

An accelerated life test (ALT) is used to estimate the reliability of machinery parts and system with a design specification as soon as possible. However, accelerated life test results with simple and severe conditions are inconsistent with physical phenomena in real service condition. Therefore, to assure the safety of the machinery system, it is necessary to establish the appropriate test condition of the ALT of machinery element. In this study, fatigue analysis of the spur gear as a part of the gear box system in the rolling stock was performed. Moreover, based on the results, appropriate test condition of the ALT is developed using both the probabilistic model of the linear damage rule and accelerated durability analysis simulation.

1. 서론

차량용 부품 및 시스템에 대한 안정성과 신뢰성을 확보하기 위해서는 내구성시험 기법(durability test method)에 의한 피로수명의 평가가 중요하다. 그러나 대부분 이들 부품 및 시스템의 설계 기준은 장수명을 요구하므로, 실사용 조건에 의한 내구성 시험은 고비용 및 장시간을 소요하여 비경제적이다. 따라서 짧은 시간 내에 이들의 수명을 평가하기 위하여 합리적인 가속수명시험(accelerated life testing, ALT)이 매우 필요하다.

가속수명시험은 사용조건 하에서 발생하는 고장모드(failure mode)를 빠른 시간 내에 동일하게 재현하는 것이다[1,2]. 단순히 가혹한 가속인자의 수준설정에 따른 가속수명시험은 사용조건에 대한 물리적 현상(physical phenomena)에 위배되어 오히려 시험의 유효성(usefulness) 및 효율성(efficiency)을 감소시킬 수 있다. 따라서 실사용 조건하에 부품 및 시스템의 정확한 수명 예측 및 신뢰도를 평가하기 위해서는 가속수명시험에서 가속인자의 수준설정이 중요하다.

차량용 부품 및 시스템의 가속수명시험에 대한 기존의 대표적인 연구[3~7]들을 살펴보면 다음과 같다. 국외에서는 Lesterlin 등[3]이 자동차용 와이퍼 시스템에 대한 가속수명시험기법 개발을 연구하였고, Zhang 등[4]은 가속수명시험모델들을 이용하여, 베어링에 대한 가속수명시험기법을 개발하였다. 또한

* 한국철도대학 교수, 정희원

** 한양대학교 기계공학부 교수, 정희원

*** 현대자동차연구소, 정희원

Su 등[5]은 내구성해석시물레이션을 이용하여 자동차용 와이퍼(wiper) 모터의 리테이너(retainer)에 적합한 가속수명시험기법 개발에 대해 연구하였다. 한편, 국내경우 강창원 등[6]이 가속수명시험에 대한 최적 관측 중단 시간을 구하는 이론으로부터 최소 수준의 시험 용력 및 샘플 할당 비율에 대해 연구하였고, 여창동 등[7]은 캠/태핏 시스템의 마멸에 대한 특성을 가속수명시험으로 연구하였다. 그러나 이상의 연구들은 단순한 가속인자의 최대수준 결정에 의한 내구수명 예측 및 신뢰도 평가에 관한 연구로서, 이는 시스템 및 부품의 수명산출의 정확성을 저하시킨다.

본 연구에서는 차량용 부품에서 널리 사용되는 평기어(spur gear)를 대상으로 내구성 해석시물레이터를 이용한 차량용 부품에 대한 가속내구해석을 수행하고, 이로부터 가속내구성시험의 조건 설정에 대하여 연구하고자 한다.

2. 재료 및 시험방법

2.1 기어 제원 및 재료

기어는 입력속도에 대해 출력속도를 감속하는 인벌류트 치형의 평기어이다. Table 1은 기어의 제원을 정리한 것이며, 이의 설계수명은 파손확률(failure probability, F) 1%에서 수명(B_1 수명)기준의 10^8 cycles이다. 기어의 재질은 Cr-Mo 합금강인 SCM 420강이며, 기어에는 침탄법(carburization)을 적용한 표면부와 모재부로 구성된다. 이들의 화학적 성분은 Table 2와 같으며, 기계적 특성은 Table 3과 같다. 참고로 침탄부의 침탄 깊이는 0.6 mm ~ 1 mm이므로 이의 인장 및 피로시험편은 모재로부터 기어의 열처리 방법과 같은 방법으로 침탄 처리하여 제작되었다. 그리고 각각의 기계적 특성들은 KSB 0801의 규정에 의거하여 수행된 결과이며, 총 5회 인장시험에 대한 평균값들이다.

Table 1 Specifications of spur gears

	Pinion	Wheel
Module (mm)	2.5	
No. of teeth (EA)	21	40
Addendum modification coefficient	0.25	0
Gear shaft diameter (mm)	34	74
Pressure angle (degree)	20	
Center distance (mm)	76.857	
Face width (mm)	30	
Desired life(B_1 , cycles)	10^8	
Heat treatment	Carburizing	

Table 2 Chemical composition (wt%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Non-carburized	0.20	0.28	0.75	0.014	0.011	1.04	0.20
Carburized	0.80	0.27	0.79	0.018	0.009	1.06	0.19

Table 3 Mechanical properties

Material	Yield strength*(MPa)	Tensile strength(MPa)	Elongation(%)	Hardness(HRC)
Non-carburized	573	824	15.1	32
Carburized	1351	1637	1.65	55

(* : 0.2 % proof stress)

2.2 피로시험

피로시험은 상온의 대기 중에서 최대굽힘모멘트 30 N·m, 회전수 2870 rpm인 전기모터식 회전 굽힘 피로시험기를 사용하여 수행되었고, 이 때의 응력비 (stress ratio, R)는 -1이다. 또한 피로수명의 변동성을 고려하기 위하여 시험편은 유한수명영역의 4가지 응력단계에서 각각 5개를 이용하여 총 20개를 사용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

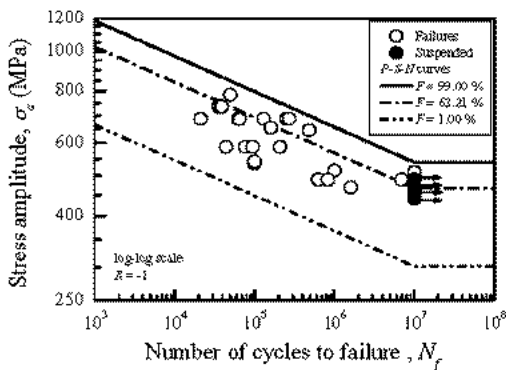
3.1 재료의 피로특성

Fig. 1(a) 및 (b)은 각각 모재와 침탄재에 대한 회전굽힘 피로시험 결과를 나타낸 것이다. 여기서 중공점은 파손데이터이고 중실점은 미파손데이터이며, 이때의 피로한도 기준은 10^7 cycles이다. 각각 재질에 대한 파손확률에 따른 응력-수명 관계식 또는 가속수명시험모델[8]은 식 (1)과 같다.

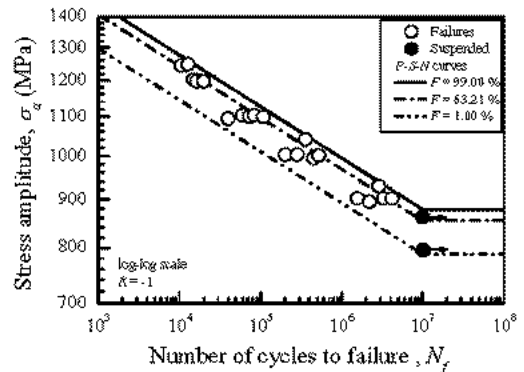
$$\text{모재: } F(N, \sigma_a(N)) = 1 - \exp \left(- \left[\int_0^N \left(\frac{\sigma_a(N)}{1850.91} \right)^{11.76} dN \right]^{0.90} \right)$$

$$\text{침탄재: } F(N, \sigma_a(N)) = 1 - \exp \left(- \left[\int_0^N \left(\frac{\sigma_a(N)}{2047.06} \right)^{12.45} dN \right]^{3.06} \right) \quad (1)$$

여기서 $F(N, \sigma_a(N))$ 은 2모수 와이블분포에 따른 파손확률이다. Fig. 1에서 이전채선, 일점채선 및 실선은 각각 $F(N, \sigma_a(N)) = 1.00\%$, 63.21% 및 99.00% 이다.



(a) non-carburized SCM420



(b) carburized SCM420

Fig. 1 P-S-N curves with the rotating bending fatigue test

3.2 유한요소해석

Fig. 2는 회전속도 2π rad/s 및 토크 90 Nm하에서 피니언 회전각도에 따른 von-Mises응력과 접촉 수직응력의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 $7^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 및 $25^{\circ}\sim 34^{\circ}$ 영역은 3번째 접촉 이쌍이 인접 이쌍과 동시에 접촉하는 경우이고, $16^{\circ}\sim 24^{\circ}$ 영역은 한 쌍의 기어만이 접촉할 때이다. 참고로 3번째 이쌍이 접촉하기 시작하는 회전각도는 약 6.5° 이고 접촉이 끝나는 각도는 34.3° 이다. 그리고 Fig. 2은 회전각도에 따른 피니언의 입력토크에 대한 기어의 출력토크의 변화를 나타낸 것이다. 이로부터 얻어진 입력 토크에 대한 출력 토크의 비는 약 1.9로서 Table 1에서 기어비 (피니언의 잇수 비에 대한 기어의 잇수 비) 1.905와 유사하므로, 본 연구의 유한요소해석이 합리적임을 시사한다. 그리고 Fig. 2의 입출력 토크 이력은 내구성 해석시물레이션의 하중이력(load history)으로 사용된다.

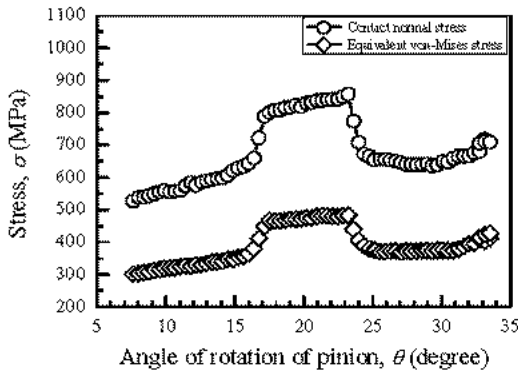


Fig. 2 von-Mises and contact normal stress

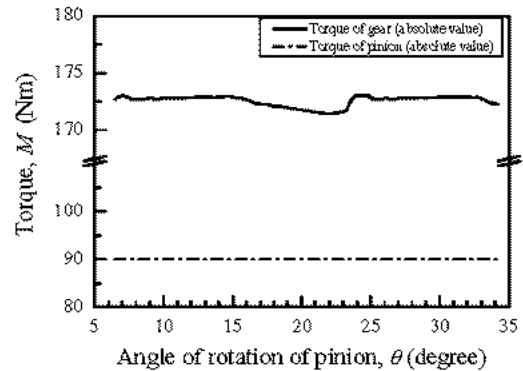


Fig. 3 Input torque vs. output torque

3.3 가속내구성시험의 조건 설정

Fig. 4 (a) 및 (b)는 파손확률 $F=50\%$ 에서 토크수준 250Nm 및 275Nm하에 피니언의 내구해석결과를 나타낸 것이다. 가속내구성해석의 요소망 및 경계조건은 이전 연구[8]에 준하여 수행되었으며, 상용소프트웨어는 MSC.FATIGUE 및 MSC.MARC이다. Fig. 4 (a)에서 취약부위는 피치라인 근처 치면이지만 Fig. 4 (b)에서 취약부위는 이끝(tooth tip)이다. 이로부터 과도한 토크수준하에서 스퍼기어의 고장모드는 변화됨을 알 수 있다.

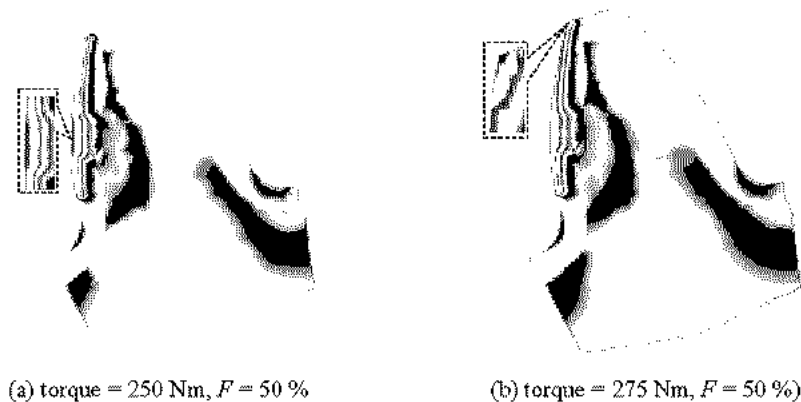


Fig. 4 Comparison of failure mode with torque levels

Fig. 5는 파손확률에 따른 주어진 토크에서 피니언 수명의 변동성을 나타낸 것이다. 각 토크 수준에서 피니언에서 발생하는 고장모드 유형을 정리하면 Table 4와 같다. 참고로 가속성이 성립하는 최대 가속토크는 물리적으로 실제 운영조건하에 동일한 고장모드로서, Fig. 5에서 토크-수명선도의 기울기가 일정하게 유지되는 수준이다[1,2]. 따라서 최대토크는 Fig. 5 및 Table 4에서 보는 바와 같이 고장모드 및 기울기가 일정한 토크 250Nm이다.

Table 4 Failure modes of pinion with torque levels and the failure probability

		Failure mode (F.T.F : failure of tooth flank, F.T.T : failure of tooth tip)				
Failure probability (F)		12.96 %	31.48 %	50.00 %	68.52 %	87.04 %
	Torque level (Nm)					
	100,150, 175, 200, 225, 250	F.T.F	F.T.F	F.T.F	F.T.F	F.T.F
	275, 300, 325	F.T.T	F.T.T	F.T.T	F.T.T	F.T.T

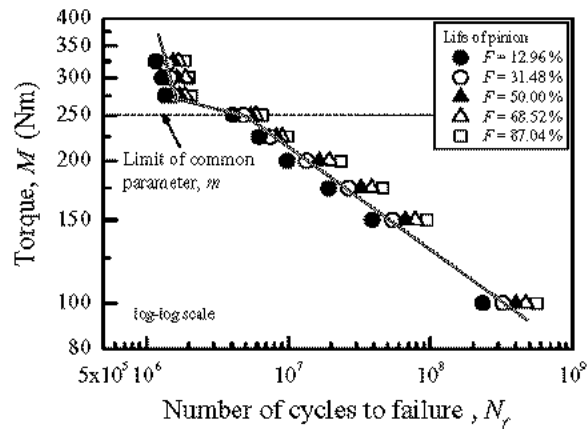


Fig. 5 Results of accelerated durability analysis with input torque levels

4. 결론

본 연구에서는 차량용 부품에서 널리 사용되는 평기어(spur gear)를 대상으로 내구성 해석시물레이터를 이용한 차량용 부품에 대한 가속내구해석을 수행하였으며, 가속내구성시험 조건을 설정하였다.

1. 평기어에 사용되는 모재 및 칩탄재에 대한 파손확률에 따른 응력-수명 관계식은 아래와 같다.

모재:
$$F(N, \sigma_a(N)) = 1 - \exp\left(-\left[\int_0^N \left(\frac{\sigma_a(N)}{1850.91}\right)^{11.70} dN\right]^{0.90}\right)$$

침탄재:
$$F(N, \sigma_a(N)) = 1 - \exp\left(-\left[\int_0^N \left(\frac{\sigma_a(N)}{2047.06}\right)^{18.45} dN\right]^{1.06}\right)$$

2. 기어의 출력토크 및 최대 응력은 유한요소 해석을 이용하여 회전각도에 따른 이들의 변화를 평가하였고, 설계규격의 기어비와 함께 검토하여 유한요소해석 결과를 검증하였다.
3. 단순히 가혹한 가속인자의 수준설정은 사용조건에서의 고장모드와 달라지는 결과를 초래할 수 있으므로 내구성해석결과로부터 취약부위와 고장모드를 확인하고, 이로부터 가속인자수준을 결정하였다. 본 연구에서 평기어의 최대토크수준은 고장모드 및 기울기가 일정한 토크 250 Nm이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지정 한양대학교 신뢰성분석연구센터의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. W. B. Nelson (2004), Applied Life Data Analysis, John Wiley & Sons, New Jersey.
2. W. Nelson (1990), Accelerated Testing Statistical Models, Test Plans and Data Analysis, John Wiley & Sons, New York.
3. Lesterlin and F. Surdel (2001), "An Accelerated Test Method for Automotive Wiper Systems," SAE trans. 2001-01-0779.
4. 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.
5. H. Su, M. Ma and D. Olson, 2004, "Accelerated Tests of Wiper Motor Retainers Using CAE Durability and Reliability Techniques," SAE trans. 2004-01-1644.
6. C. Won. Kang and C. Wook Kang, 1996, "Accelerated Life Test Plans with Optimum Censoring Time," Society of KISE, Vol. 19, No. 40, pp. 179~186.
7. C. D. Yeo and D. E. Kim, 1999, "Tribological Characteristics of Cam/Tappet System Assessed by Accelerated Testing Method," Trans. of the KSAE, Vol. 7, No. 3, pp. 155~167.
8. C.S. Kim, Y.H. Kwon, J.H. Kim and J.K. Kim (2004), "Reliability Analysis of the Spur Gear with Accelerated Testing Model", KSME conference in autumn, pp.136~141.