대차용 감속구동장치 시험·평가 기술개발

Development of Test method and Evaluation technology of reduction gearbox for Korea High-speed Train

이동형*, 최경진**, 서정원***, 강부병***, 박순원****

Lee Dong-Hyong., Choi Kyung-Jin, Seo Jung-Won, Kang Bu-Byong, Park Sun-Won

ABSTRACT

This study is to establish test method and evaluation technology of drive system appropriate to high speed train. The transmission system of high speed train serve in the severe condition compared with those of other trains, namely, they have to transmit high power to run with high speed and they have to make maximum use of the limited space. This paper reports the reviews and results for the test and evaluation method of reduction gearbox for high speed train and discusses various test items and methods about assembly and parts of gearbox transmission.

Keywords : gear(기어), gearbox transmission(감속구동장치), fatigue test(피로시험)

1. 서 론

철도차량용 감속구동장치의 특징은 사용 속도범위가 넓고, 구동 중에 장치에 가해지는 토오크가 크기 때문에 사용 속도범위에서 공진을 피하고 충격하중에 대한 강도를 충분히 갖도록 설계해야만 한다.(1) 본 연구는 고속철도 350 km/h 급의 대차용 감속 구동장치 개발에 필요한 품질 및 내구성, 신뢰성을 검증하기 위한 시험방법 및 시험기준을 제안하고, 시제품의 시험 및 성능평가와 운용열차에서의 실차시험 및 성능평가기술을 확립하여 고속철도운행에 적합한 감속 구동장치 개발에 필요한 시험·성능평가기술을 확보하는 데 그 목적이 있다.(2) 여기에서는 한국형 고속전철(KHST) 감속구동장치에 조립 될 기어의 성능확인을 위하여 기어 굽힘강도 관련시험을 중심으로 시험방법 및 시험결과를 검토하였다.

2. 기어 성능시험 및 평가

일반적으로 기어의 성능평가에는 굽힘강도 시험, 치면강도 시험, 스코링강도 시험, 치면의 마모강도 시험 등이 있으며, 기어의 재질, 열처리 등에 따른 재료의 치면 피로한도와 재료의 굽힘 피로한도 결정, S-N 선도 작성, 기어강도에 영향을 미치는 각종계수의 조사 및 연구, 부하운전에 따른 각종손상 상태와 부하용량의 조사 등을 위하여 실시하고 있다. 한국형 고속전철에 조립될 기어를 개발하기 위한 전단계로 고속전철(KTX)용 기어의 피로강도시험을 실시하여, 한국형 고속전철(KHST)에 조립될 기어의 강도 수준을 파악하고 목표를 설정하고자 하였다.

2.1 시험기어

시험용 기어는 시험기의 특성상 평기어인 KTX 차량용의 2차 감속구동장치의 input 기어를 채택하였고, 관련 제원은 표 1, 시험 기어의 형상 및 치수는 그림 1 과 같다.

* 한국철도기술연구원 차량연구본부 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 차량연구본부 책임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 차량연구본부 주임연구원, 정회원

**** 한국DTS(주) 책임연구원, 비회원

표 1. 굽힘강도 시험용 기어 제원

	KTX용
모듈 (mm)	8
압력각 (°)	20
잇수	44
치폭 (mm)	75
치선원 (mm)	371.2
피치원 (mm)	352.0
치저원 (mm)	335.4
전위계수	0.2125

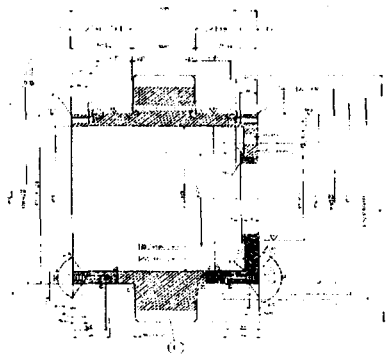

그림 1. 굽힘강도 시험용 기어의 형상 및 치수

KTX용 기어의 제작 정밀도는 NF규격 Class 6(JIS 2급 추정) 이고, 시험에 사용한 기어 재료의 기계적 특성은 표 2 와 같다. 기어의 열처리는 침탄열처리를 수행하였으며, 시험용 기어의 열처리 후 치면경도 시험결과는 HV 701(HRc 59.5) 이었고, 유효경화층 HV550까지의 깊이는 PCD선 상에서 1.48mm, 이뿌리 부분은 1.28mm이었다. 치면경도 및 유효경화층 깊이 시험결과는 그림 2 와 같다.

표 2. KTX용 기어 재료의 기계적 특성
(Ref. ST13-223-120~122)

Test Type	Quality Index
인장강도 (Tensile Strength, Rm)	1,000 N/mm²
항복강도 (Yield Strength, Re)	800 N/mm²
연신율 (elongation, A%)	8
충격강도 (Impact test, KCU)	6 daJ/cm²
경도 (hardness)	열처리전: min 330HBS

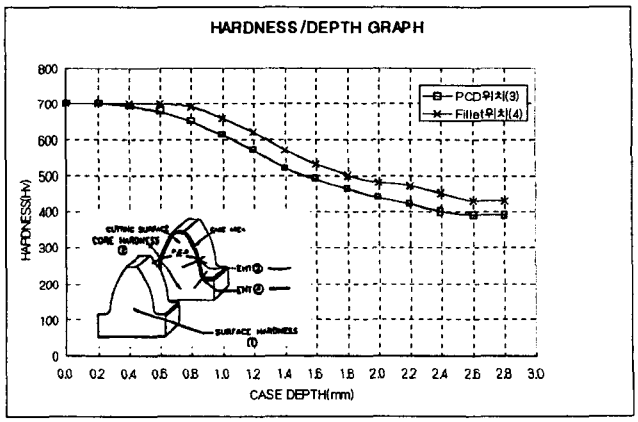

그림 2. 깊이에 따른 경도 분포 시험결과

2.2 치원응력 측정

기어의 굽힘강도시험을 위하여 시험 기어를 지그에 고정한 후 피로시험기로 가압하여 하중에 따른 이뿌리 응력을 측정하였고, 피로시험용 지그 세팅 및 하중 작용점 등을 세팅하였다.

이뿌리 응력의 측정은 정확하게 위험단면위치에 게이지를 부착하기가 힘드므로 예상되는 위험단면 위치를 중심으로 게이지 길이 0.15mm, 피치 0.5 mm의 응력집중용 스트레인 게이지를 사용하여 이 높이 방향으로 5개 위치의 응력을 측정하였다. 예상되는 위험단면의 위치는 기어 이(齒)의 중심선과 이뿌리 필렛곡선이 30° 로 접하게 되는 Hofer의 30° 접선법으로 구한 결과를 이용하였고 스트레인게이지 부착은 그림 3 과 같이 치폭방향으로 5mm 안쪽, 좌우 위치의 인장측에 게이지를 부착하였으며, 이높이 방향을 포함하여 총 10여곳의 응력을 측정하였다.

부하위치는 이뿌리 부분에서 응력이 가장 많이 걸리는 위치이고, 피로시험시 하중작용점으로 선정하려고 하는 이끝 부분 약 3mm 위치로 하였다.

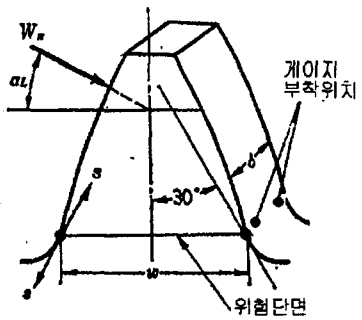

그림 3. 이뿌리응력 측정을 위한
스트레인 게이지 부착위치

피로시험용 지그 및 하중 작용점 세팅을 위하여 100kN 하중이 작용할 때 하중각도 변화에 따른 응력변화를 유한요소해석법으로 해석하였다. 그 결과는 그림 4. 와 같이 피로시험기 및 지그에 기어세팅시 발생할 수 있는 하중 1 ° 각도의 세팅 차이(이끝 위치 3.3mm)에 인장 11Mpa, 압축 5MPa 차이 발생함을 알 수 있었고, 위험단면의 위치는 하중각도의 변화에 따라 변하지 않음을 알 수 있었다. 이 결과를 이용하여 피로시험용 지그에 하중위치를 표시하여 하중 작용점을 25±1 ° 각도 이하(이끝 기준)로 세팅하였다. 또한, 좌우 위치의 응력 측정 결과를 이용하여 좌우방향 응력 편차가 최소로 하게 하여 치폭방향의 하중불균일을 최소화 하였다.

앞에서와 같이 시험기 및 지그를 세팅하고, 법선하중 Pn(N) 에 따른 이뿌리 응력을 측정하였다. 그림 5 는 100kN 하중부과시 이뿌리 응력 (최고점 : 0위치 기준)의 측정결과이다. 응력해석결과 이뿌리 부분의 최대 응력은 약 550MPa이었고, 기어 #1의 응력 시험결과는 이뿌리에서 최대 640MPa이었으며 기어 #2의 시험결과는 최대 520Mpa이었다. 기어 #1에서 이뿌리 응력이 크게 나타나는 이유를 조사해 본 결과, 이뿌리 부분의 가공상의 문제점이 있었던 것으로 밝혀졌다. 정식 제품인 기어 #2의 실험결과와 해석결과의 차이는 약 6% 이내이고, 스트레인 게이지에 의한 측정결과가 게이지 길이의 평균값을 나타내므로 계산결과와 어느정도 일치한다고 할 수 있으므로 이와 같이 세팅하여 피로시험을 실시하였다.

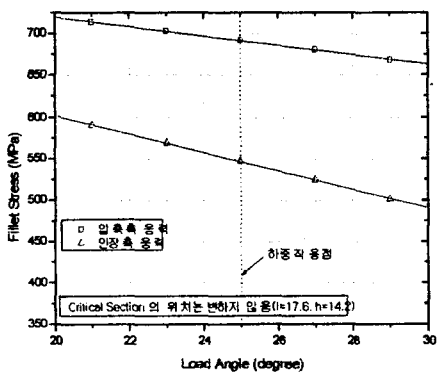

그림 4. 하중각도에 따른 이뿌리응력 변화
해석결과

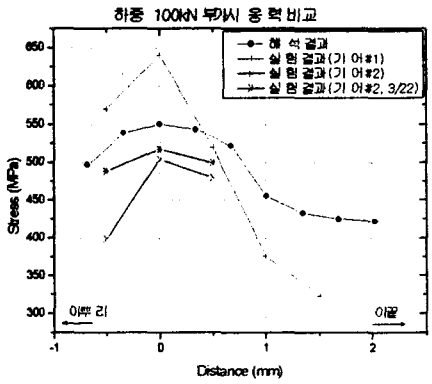

그림 5. KTX 기어의 정적 굽힘강도 시험결과 및
해석결과 비교

2.3 기어피로시험

기어의 굽힘 피로강도 시험에는 그림 6 과 같이 동적하중 +/- 500kN을 부과할 수 있는 ESH의 유압식 굽힘피로시험기를 이용하였다. 기어의 고정은 기어 림부의 내부에 축을 이용하여 기어전체를 볼트로 고정하고, 시험 기어의 이 3개가 동시에 접촉하도록 하여 변형량을 최소화 되도록 지그를 설계하였으며, 지그의 형상은 그림 7 과 같다.

기어의 피로시험시 하중의 작용 위치는 피로시험기의 손상 및 부하에 의한 기어의 이끝 손상을 방지하기 위하여 이끝으로부터 반경방향 약 3mm 내측의 점을 하중점으로 하였다. 시험에는 일정 진폭 반복하중을 이용하였고, 그 최대하중의 변동은 1% 이내가 되도록 조정하였다. 또 하중비 ($R=\frac{P_n\min}{P_n\max}$)가 1% 이하가 되도록 반복하중의 최소값을 선정하였다.

피로시험에 사용한 하중의 표시는 최대 이뿌리 실응력으로 표시하였고, 법선하중 Pn(N)과 최대 이뿌리실응력과의 관계는 2차원 유한요소해석 결과를 이용하였다. 이 끝에 하중이 작용할 때의 유한요소 해석결과 그림 8 과 같이 KTX용 기어의 경우 하중이 1333.3 N/mm (100kN/75mm)가 작용할 때 인장측의 최대응력은 551.3 MPa 이므로, 치폭 b=75mm를 고려하여 계산한 이뿌리 실응력은 다음과 같다.

$$\sigma_t = 0.4135\frac{P_n}{b} = 5.51\times10^{-3}P_n$$

또 ISO 기어강도계산식에 열처리기어의 수명계수가 $N\geq3\times10^6$ 일 때 1 을 적용[3]하므로, 이를 고려하여 본 시험의 비파괴 반복하중수는 $N=3\times10^6$ 으로 정하였다.

S-N곡선을 구하기 위한 피로시험은 일본기계학회 규격의 14점법[4]을 기초로 S-N곡선의 경사부와 수평부를 시험하였으며, 당해연도에는 KTX용 기어의 S-N곡선 경사부와 수평부를 구하기 위한 피로시험을 실시하였다. 그림 9. 는 설계 제작된 지그를 이용하여 기어를 조립하고 피로시험기에 취부하여 시험을 실시중인 장면이다.

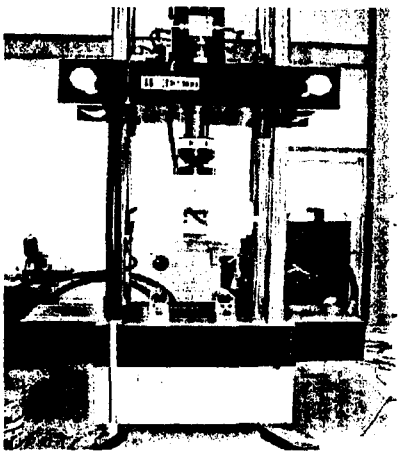

그림 6. 피로시험기

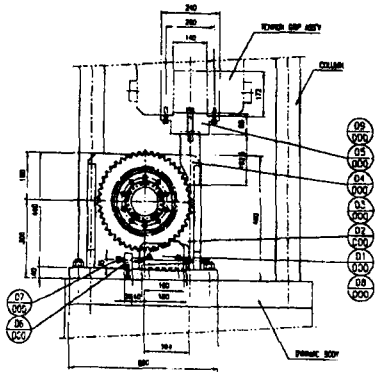

그림 7. 기어굽힘강도 시험용 지그

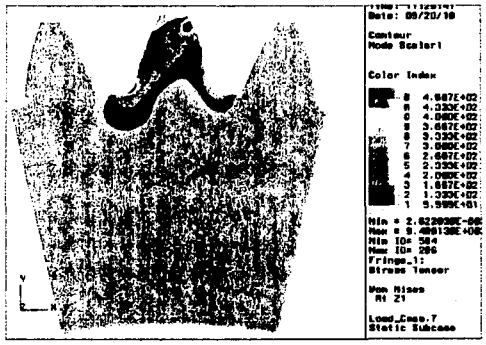

그림 8. KTX용 기어의 유한요소해석 결과(이끝하중작용시)

그림 9. 실물 기어피로시험 장면

2.4 피로시험 결과 및 검토

표 3 은 현재까지 진행된 KTX용 기어의 피로시험 결과를 보여준다. 여기에서 런아웃(runout)은 해당 사이클 수 만큼 수행 후 파손이 발생하지 않아 시험을 종료한 경우를 나타낸다.

그림 10 은 피로파손된 기어의 파단면형상이며, 피로균열이 응력집중부위인 이뿌리 필렛부위에서 시작되어, 압축측으로 진전되어 최종파단되는 현상을 보였다.

그림 11 은 현재까지 진행된 시험결과를 기어 이뿌리 응력 진폭 값으로 정리한 S-N 선도이며, 그림 12 는 하중에 따른 S-N선도를 나타낸다. 현재까지 시험결과를 기반으로 구한 KTX 2차 감속구동장치 input 기어의 이뿌리 굽힘응력(σ_a)과 수명(N_f)과의 관계식은 다음과 같다.

$$\sigma_a = 1312.2 N_f^{-0.048}$$

그러므로 KTX 2차 감속구동장치 input 기어의 S-N 선도 경사부의 기울기(Slope b1)는 -0.048 이고, 피로한도(Fatigue limit)는 응력진폭(amplitude) 값으로 약 641MPa 이다.

KHST용으로 제작하게 될 기어의 재질은 SNCM420H 이고, 표 4 와 같이 기어소재 2가지 종류에 대하여 참고문헌에 의한 시편 피로시험결과[5]는 그림 13 과 같다. 소재명은 JIS SNCM420(Hot Rolled)이고, 상온에서 회전굽힘시험(Rotating Bending (1500 CPM))결과는 그림과 같이 경도가 높은 재질의 S-N 선도가 위에 있으며 피로한도 역시 HB311이 52 kg/㎟이고, HB327은 56 kg/㎟으로 HB327이 더 높게 나타남을 알 수 있다.

표 3. KTX 기어 굽힘피로강도 시험결과

시험 번호	부과하중 (kN)		이뿌리응력 (MPa)		피로수명 (Cycles)	비고
	Preload	Amplitude	σ max	σ a		
1	-153	150	1,549	767	164,000	세팅 및 시험
2	-153	150	1,549	767	44,345	
3	-142	140	1,442	716	177,577	
4	-127	125	1,288.5	639	2,252,150	
5	-122	120	1237.3	613.6	3,007,567 (runout)	
6	-134.5	132.5	1,365.2	677.5	2,931,355 (runout)	
7	-153	150	1,549	767	107,128	
8	-142	140	1,442	716	-	진행중

그림 10. 피로파손된 기어시편 측면 형상

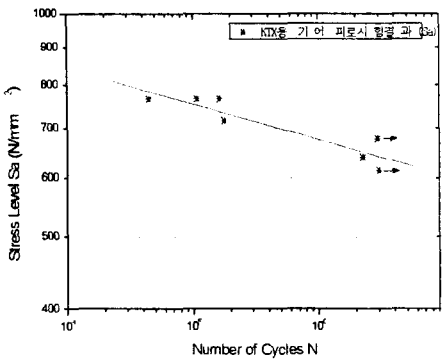

그림 11. KTX 기어 피로시험 결과
(이뿌리응력: Amplitude)

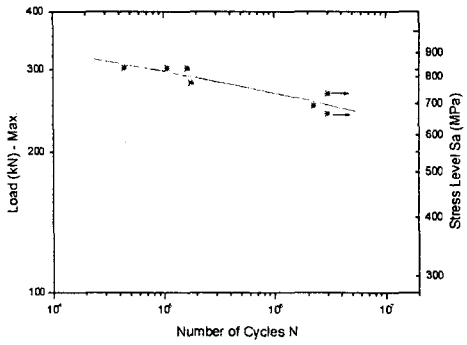

그림 12. KTX 기어의 하중에 따른
피로시험 결과

표 2.4 시험편 종류

시험편 종류	열처리조건			경도 (HB)	항복강도 (kg/㎟)	인장강도 (kg/㎟)
	조건	1nd	2nd			
HB311	온도	800	150	311	90.0	110.0
	시간(hr)	0.7	0.7			
	냉각	Oil	Air			
HB327	온도	850	150	327	109.0	131.0
	시간(hr)	0.7	0.7			
	냉각	Oil	Air			

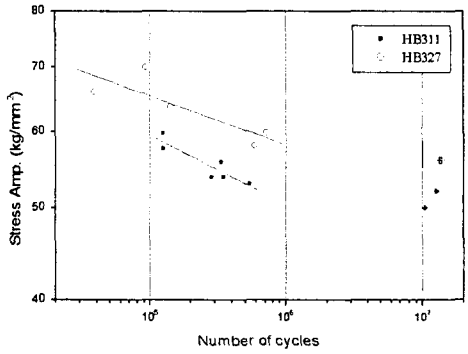

그림 13. SNCM420 소재의 회전굽힘피로특성

열처리 조건과 시험방법 등의 차이가 있어 직접적으로 비교하기 어렵지만, SNCM420의 피로한도가 KTX용 재질의 피로한도보다 약 17% 정도 낮으므로, 앞으로 제작하게 될 KHST용 기어의 피로한도 목표치는 641MPa 보다도 높도록 열처리 조건 등 제작에 반영 하여야 할 것이며, 추후 제작될 KHST용 기어의 실물 피로시험을 통하여 이를 검증할 예정이다.

3. 결론

최고속도 350km/h의 한국형 고속전철에 조립될 기어를 개발하기 위한 전단계로 고속전철(KTX)용 기어의 피로강도시험을 실시하여, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 유한요소 해석결과, KTX용 기어의 이 끝 3mm 위치에 하중이 작용할 때 하중과 이뿌리 실응력과의 관계는 $\sigma_t = 0.4135\frac{P_n}{b} = 5.51\times10^{-3}P_n$ 이며, 실물 기어의 시험결과와의 차이는 약 6% 이다.

2) KTX용 실물 기어의 굽힘피로강도 시험결과, 피로한도는 응력진폭(amplitude) 값으로 약 641MPa이며, 이뿌리 굽힘응력(σ_a)과 수명(N_f)과의 관계는 $\sigma_a(\mathrm{Mpa}) = 1312.2N_f^{-0.048}$ 이다.

앞으로 KTX용 및 KHST용 기어 시편의 회전굽힘 피로시험과 실물피로시험을 통하여 한국형 고속전철(KHST)에 조립될 기어의 성능평가를 실시하고, 시운전 시험을 통하여 운행상태에서 기어에 작용하는 하중이력을 측정하여 기어의 피로해석을 통한 최종적인 안전성여부를 평가할 예정이다.

후기

본 연구는 1999년도 과학기술처/건설교통부/통상산업부 선도기술사업인 "고속전철기술개발사업의 일환으로 수행된 연구결과의 일부이다.

[참고문헌]

1. 宮西希一・井山和夫, "車輛用動力傳達裝置とその性能は握",電氣車の科學, Vol.30, No.2, pp.14-19, Feb. 1990.

2. 대차용 감속구동장치 개발 (1단계 연구보고서), 고속전철 기술개발 사업 98-2-1-10, 현대우주항공(주), 1999

3. ISO 6336/3 (1983), "Calculation of load capacity of spur and helical gears - Part3: Principles for the Calculation of Tooth Strength of Spur and Helical Gears"

4. JSME S 002 (1994), "統計的疲勞試驗方法", 日本機械學會

5. 金屬材料疲れ强度デ-タ集, 日本材料學會, 1982

6. JGMA 4101-01(1994), "圓筒齒車の强さ試驗方法", 日本齒車工業會

7. JGMA 4102-01(1995), "圓筒齒車の强さ試驗の判定と評價方法", 日本齒車工業會

8. Earle Buckingham, "Analytical Mechanics of Gears", Dover Publications, Inc., 1949

9. JSME S 002 (1994), "統計的疲勞試驗方法", 日本機械學會