

고속전철용 기어의 굽힘 피로강도 시험 및 평가

Bending fatigue strength test of output gear for Korea High-speed Train

이동형*, 서정원**, 최경진***, 문경호**, 김용기****
Lee Dong-Hyong, Seo Jung-Won, Choi Kyung-Jin, Moon Kyoung-Ho, Kim Young-Gi

ABSTRACT

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. To clarify the strength of gear for Korea High-speed train, a bending fatigue test is performed for the output gear of axle gear reduction unit. This paper reports the reviews of bending fatigue strength test method and the test results of output gear of axle gear reduction unit for high speed train

Keywords : gear(기어), gearbox transmission(감속구동장치), bending fatigue strength(굽힘피로강도)

1. 서론

철도차량용 감속구동장치의 특징은 사용 속도범위가 넓고, 구동 중에 장치에 가해지는 토크가 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 위하여 한국형 고속전철(KHST) 감속구동장치에 조립 될 기어의 성능확인을 목적으로 한다. 일반적으로 기어의 성능평가에는 굽힘강도 시험, 치면강도 시험, 스코어링강도 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 기어의 성능확인을 위한 전단계로 고속전철(KTX)용 기어의 피로강도시험을 실시하였으며⁽²⁾, 여기에서는 한국형 고속전철(KHST)에 조립될 기어의 실물 굽힘 피로강도 관련시험을 중심으로 시험방법 및 시험결과를 검토하였다.

2. 기어 성능시험 및 평가

2.1 시험기어

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

시험에 사용한 KHST용 기어 재질은 SCM2로서 SCM420의 재료에 퀴칭을 보증하는 경화능 보증강이며, 또한 Ni를 첨가하여 소입성을 좋게 한 침탄용 재질이다. 기어의 열처리는 침탄열처리를 수행하였으며, 시험용 기어의 열처리후 치면경도 시험결과는 표 2. 와 같이 HV 747(HRC 61.2) 이었고, 유효경화층 HV550까지의 깊이는 PCD선 상에서 1.4 mm, 이뿌리 부분은 1.14 mm이었다.

* 한국철도기술연구원 차량연구본부 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 차량연구본부 주임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 차량연구본부 책임연구원, 정회원

**** 한국DTS(주) 책임연구원, 비회원

표 1. 굽힘강도 시험용 기어 제원

	KHST용
모듈 (mm)	8
압력각 (°)	20
잇수	46
치폭 (mm)	80
치선원 (mm)	387.154
피치원 (mm)	368.0
치저원 (mm)	351.328
전위계수	0.208

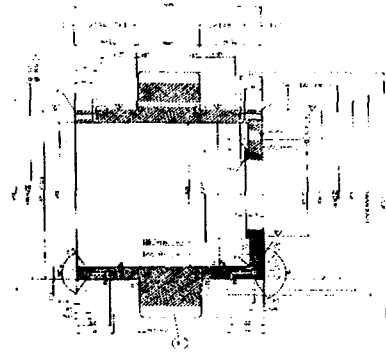


그림 1. 굽힘강도 시험용 기어의 형상 및 치수

표 2. 표면경도 및 열처리 깊이 시험결과

DESCRIPTION		NOMINAL VALUE	ACTUAL VALUE
SURFACE HARDNESS		Hv 650-800	Hv 747 (HRC 61.2)
CORE STRENGTH		REFERENCE	1,163 N/mm ²
P.C.D	EHT	Hv 550 0.9mm	1.4
치 원			1.14

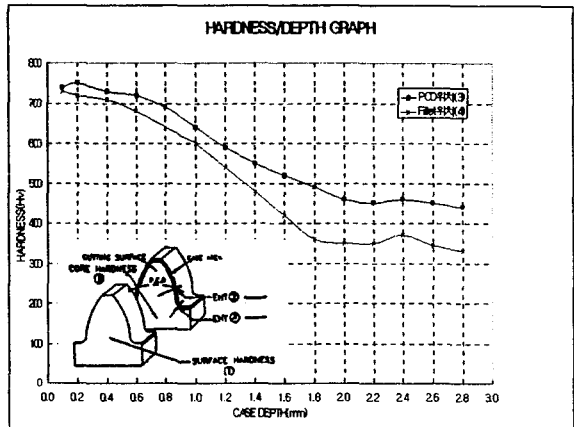


그림 2. 깊이에 따른 경도 분포 시험결과

피치원 및 치원 부분에서의 열처리 깊이에 따른 경도분포 시험결과는 그림 2 와 같다.

2.2 치원응력 측정

시험기어 치(齒)의 피로 시험중의 하중 조건은, 이끝 3mm 위치에서 이가 실제 접촉상태와 같이 하중이 부과되도록 하중작용선이 기초원에 접하도록 하였다. 이 때를 기준으로 3개의 지지 블록의 크기를 정하였으며, 이 하중조건을 그림으로 나타내면 그림 3 과 같이 된다.

여기에서, r_p : pitch 원 반경

r_g : 기초원 반경

γ : 시험 치(齒)의 중심선 사이각

α : 하중점에서의 압력각

하중작용선은 P 점에서 치면에 수직이므로 인벌류우트 기어의 성질로부터 하중 작용선은 N 점에서 기초원과 접한다. 따라서 치차중심 O로부터 하중작용선과의 중심선의 교점 A까지의 거리는

$$OA = \frac{\gamma r_g}{\cos \gamma} \dots \dots \dots (1)$$

로 표현할 수 있다.

하중점의 위치 h를 위험단면 (유효치원 원상)부터 하

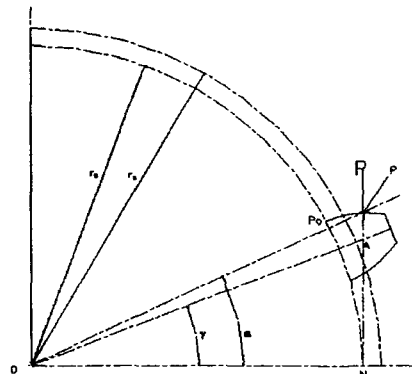


그림 3. 기어의 하중조건

중작용선과 이의 중심선의 교점 A 까지의 거리로 표현하면,

$$h = \frac{r_g}{\cos \gamma} - (r_p - m(1-x)) \cos(\sin^{-1} \frac{S}{2r_p - m(1-x)}) \dots\dots\dots(2)$$

단, S : 위험단면의 이두께, m : 모듈 이 된다

이를 이용하여 계산상으로 구한 KHST용 기어의 하중점에서의 압력각(α)은 24.87°, 위험단면의 이두께(S)는 17.74이며, 하중점 등을 고려하여 피로시험용 지그를 설계하였다.

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

이뿌리 응력의 측정은 전년도에 수행한 KTX용 기어의 굽힘강도 시험과 동일한 방법⁽²⁾으로 진행하였으며, 그림 4는 100kN 하중부과시 이뿌리 응력 (최고점 : 0위치 기준)의 측정결과이다. FEM에 의한 응력해석 결과 이뿌리 부분의 최대응력은 약 424MPa 이었고, 시험결과는 최대 440MPa로서 시험결과가 더 큰 응력값을 나타내고 있으며, 그 이유는 해석에서는 가공물의 protuberance를 고려하지 않았기 때문인 것으로 사료된다. KTX 및 KHST용 기어의 하중에 따른 이뿌리 응력변화의 실험 결과는 그림 5와 같으며, KHST기어가 KTX기어보다 치폭이 5mm 더 크므로 전체적인 최대응력이 KHST기어가 작게 나오고 있다.

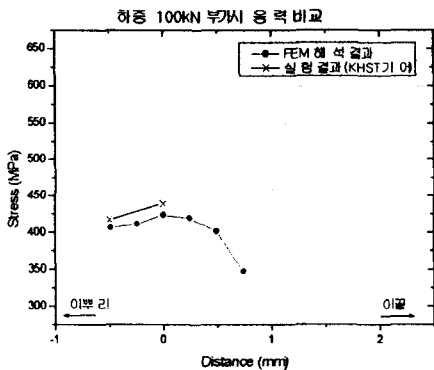


그림 4. KHST 기어의 정적 굽힘강도 시험결과 및 해석결과 비교

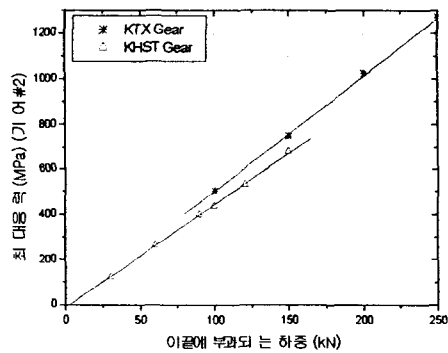


그림 5. 부가 하중에 따른 이뿌리 응력 변화 (KTX 및 KHST용 기어 실험)

2.3 기어 굽힘피로 강도시험

기어의 굽힘 피로강도 시험에는 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 설계하였다.

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 실용력으로 표시하였고, 법선하중 $P_n(N)$ 과 최대 이뿌리실용력과의 관계는 2차원 유효요소해석 결과를 이용하였다. 이 끝에 하중이 작용할 때의 유효요소 해석결과 그림 6 과 같이 이 끝에 하중 1,250N/mm(100kN/80mm)가 작용할 때 인장축의 응력은 424 MPa 이므로, 치폭 $b=80mm$ 를 고려하여 계산한 이뿌리 실용력은 다음과 같다.

$$\sigma_t = 0.339 \frac{P_n}{b} = 4.24 \times 10^{-3} P_n$$

또 ISO 기어강도계산식에 열처리기어의 수명계수가 $N \geq 3 \times 10^6$ 일 때 1 을 적용⁽³⁾하므로, 이를 고려하여 본 시험의 비파괴 반복하중수는 $N=3 \times 10^6$ 으로 정하였으며, 시험중 하중의 반복속도는 시험기어의 변형량 및 하중조건을 고려하여 2~10Hz사이에서 설정하였다. 그림 7 은 설계 제작된 지그를 이용하여 기어를 조립하고 피로시험기에 취부하여 시험을 실시중인 장면이다.

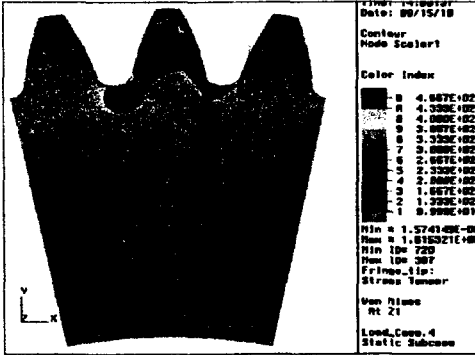


그림 6 KHST용 기어의 유한요소해석 결과 (이괄하중작용시)



그림 7. 실물 기어피로시험 장면

2.4 피로시험 결과 및 검토

표 4 는 KHST용 기어의 피로시험 결과이며, 여기에서 런아웃(runout)은 해당 사이클 수 만큼 수행 후 파손이 발생하지 않아 시험을 종료한 경우를 나타낸다.

그림 8 은 피로파손된 기어의 파단 단면형상이며, 피로균열이 응력집중부위인 이뿌리 필렛부위에서 시작되어, 압축측으로 진전되어 최종파단되는 현상을 보였다. 그림 9 는 시험결과를 기어 이뿌리 응력 진폭 값으로 정리한 S-N 선도이다. 시험결과를 기반으로 구한 KHST 2차 감속구동장치 input 기어의 이뿌리 굽힘응력(σ_a)과 수명(N_f)과의 관계식은 다음과 같다.

$$\sigma_a = 951.3N_f^{-0.055}$$

이 결과로부터, KHST 2차 감속구동장치 input 기어의 S-N 선도 경사부의 기울기(Slope b1)는 -0.055이고, 비파괴 반복하중수 $N=3 \times 10^6$ 의 피로한도(fatigue limit)는 응력진폭(amplitude) 값으로 약 419MPa 정도 임을 추정할 수 있다.

표 4. KHST용 기어 굽힘피로강도 시험결과

시험 번호	부과하중 (kN)			이뿌리응력 (MPa)		피로수명 (Cycles)	비고
	Preload	Amplitude	Freq. (Hz)	σ_{max}	σ_a		
1	-127	125	2	1,069	530	40,588	
2	-102	100	4	857	424	3,004,452	runout
3	-132	130	4	1,111	551	31,495	
4	-119	117	4	1,001	496	160,512	
5	-114	112	4	958	475	153,249	

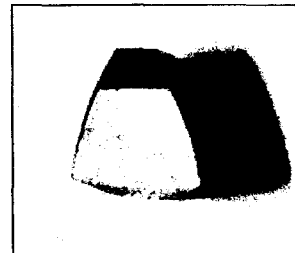


그림 8 피로파손된 기어시편 측면 형상 (KHST 기어)

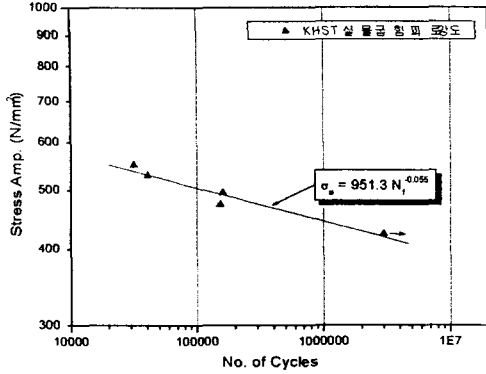


그림 9. KHST 기어 피로시험 결과
(이뿌리응력 : amplitude)

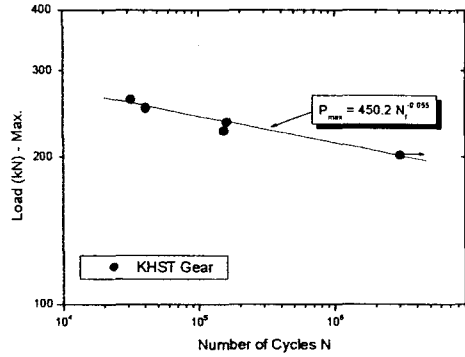


그림 10. 하중에 따른 기어실물 피로시험 결과
(KHST 기어)

그림 10 은 시험결과를 기어에 부과되는 최대 하중값으로 정리한 수명과의 시험결과이며, KHST 2차 감속구동장치 input 기어의 최대하중(Pmax)과 수명(N_f)과의 관계식은 다음과 같다.

$$P_{max} = 450.2 N_f^{0.055}$$

KHST 2차 감속구동장치 input 기어의 최대하중에 대한 비파괴 반복하중수 $N=3 \times 10^6$ 의 피로 한도(fatigue limit)는 약 200kN 으로 추정된다.

KHST기어의 굽힘 피로강도를 향상시키기 위한 방법으로 KHST 기어를 표 5 와 같은 조건으로 shot peening을 실시하였고 shot peening 기어에 대한 굽힘피로강도 시험 결과는 표 6 과 같다. 많은 시험을 통하여 피로한도를 정확하게 구해야 하겠지만, 현재 상태에서 shot peening의 효과가 어느 정도인지를 파악하기 위해 최소한의 시험을 수행한 결과이다.

그림 11 은 KHST shot peening 기어의 시험결과를 기어 이뿌리 응력 진폭 값으로 정리한 S-N 선도이며, 그림 12 는 기어에 부과되는 최대 하중값으로 정리한 수명과의 시험결과이다.

일반적으로 shot peening이 적절하게 수행되었을 경우 shot peening 하지 않은 상태보다 피로한도가 20~30% 정도 증가된다고 알려져 있다. 시험 결과 데이터가 많지 않아 정확하지는 않지만, 같은 파단 cycle 측면에서 살펴보면 응력진폭값은 약 2~11% 정도 증가 됨을 알 수 있다.

shot peening을 과도하게 하거나 부족하게 수행하여도 최적의 shot peening 상태보다 피로한도가 10~20% 정도 감소하므로 KHST 기어에 적당한 최적의 shot peening 조건을 찾기 위하여는 많은 실험 및 검토를 통한 연구가 필요하다.

표 5. shot peening 조건

arc height	0.4-0.6 mm
강구 직경	0.8 mm
강구 경도	HRC 52-56
shot 속도	80 m/sec 이상
노출시간	cw 1 min., ccw 1 min.
coverage	200% 이상

표 6. shot peening 기어의 굽힘피로강도
시험결과

시험 번호	부과하중 (kN)		Freq. (Hz)	이뿌리응력 (MPa)		피로수명 (Cycles)
	Preload	Amplitude		σ_{max}	σ_a	
1	-127	125	4	1,069	530	62,176
2	-132	130	2	1,111	551	46,374
3	-119	117	2	1,001	496	918,253

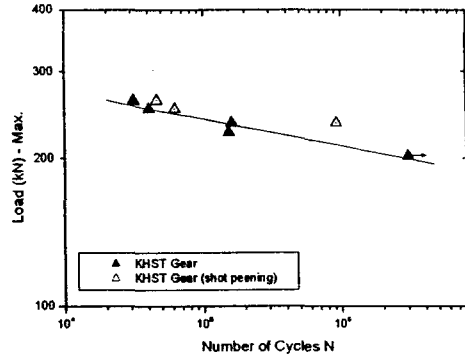
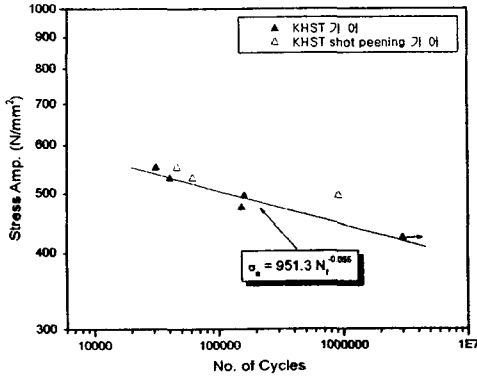


그림 11. KHST shot peening기어 피로시험 결과 그림 12. 하중에 따른 shot peening기어의 실물 피로시험 결과 (이뿌리응력 : amplitude)

3. 결론

최고속도 350km/h의 한국형 고속전철 시운전 시험에 조립될 기어의 성능확인을 위하여 실물에 대한 굽힘피로강도시험을 실시하여, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 유한요소 해석결과, KHST용 기어의 이 끝 3mm 위치에 하중이 작용할 때 하중과 이뿌리 실 응력과의 관계는 $\sigma_t = 0.339 \frac{P_n}{b} = 4.24 \times 10^{-3} P_n$ 이며, 100kN 하중부과시 이뿌리 응력의 실험결과는 최대 440MPa이다.

2) KHST용 실물 기어의 굽힘피로강도 시험결과, 비파괴 반복하중수 $N=3 \times 10^6$ 의 피로한도 (fatigue limit)는 응력진폭(amplitude) 값으로 약 419MPa이며, 이뿌리 굽힘응력(σ_a)과 수명(N_f)과의 관계는 $\sigma_a = 951.3 N_f^{-0.055}$ 이다.

앞으로 한국형 고속전철(KHST)시운전 차량의 시운전 시험을 통하여 운행상태에서 기어에 작용하는 하중이력을 측정하여 기어의 피로해석을 통한 최종적인 굽힘피로강도에 대한 안전성여부를 평가할 필요가 있다.

후기

본 연구는 2000년도 과학기술처/건설교통부/통상산업부 선도기술사업인 "고속전철기술개발사업"의 일환으로 수행된 연구결과물의 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 (2단계 1차년도 연차보고서), 고속전철 기술개발 사업 99-II2-1-9, 한국DTS(주), 2000. 10
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. 金屬材料疲れ強度データ集, 日本材料學會, 1982