

한국형 고속전철용 기어의 시편 및 실물 피로강도 평가

Bending fatigue strength comparison of specimen and actual gear for Korea High-Speed Train

이동형*, 서정원**, 문경호**, 최경진***

Lee Dong-Hyong, Seo Jung-Won, Moon Kyoung-Ho, Choi Kyung-Jin

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 of gear specimen is performed and compare with actual gear's. From this result, specimen test is useful to infer S-N curve and endurance limit of actual gear that much time and expense are consumed.

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

1. 서론

기어의 굽힘강도는 이뿌리부에 발생하는 응력이 꽤 복잡하고, 또한 표면경화기어에서는 이뿌리 위험단면상의 경도분포가 현저히 다르므로, 이뿌리부에 발생하는 잔류응력이 굽힘피로강도에 현저히 영향을 주고 있다.⁽¹⁾ 기어의 굽힘강도를 정확히 알기 위하여는, 일반적인 재료시험편에 의한 강도시험으로는 불충분하고, 실제의 기어에 대한 실제 작용하는 하중의 변동량, 과대하중 작용량 등을 고려한 강도시험이 필요하다. 국내에서도 최근 G7과제인 한국형 고속전철 개발 사업의 한 부분으로 기어의 실제의 기어 굽힘강도 시험 및 평가 등이 연구되고 있다.⁽²⁾ 그러나, 실제의 기어에 대한 굽힘강도 시험을 실시하기 위하여는 시험용 지그의 설계 및 제작, 고용량의 피로시험기가 필요하며 시험결과를 얻기까지 많은 시간과 비용이 소요된다.

따라서, 본 연구에서는 한국형 고속전철(KHST) 대차용 감속 구동장치의 조립되는 기어의 성능 평가를 위하여 기어 시험편 피로강도시험을 실시하였고, 실제의 기어에 대한 시험결과⁽²⁾와 시험편의 피로강도를 비교하여 연관성을 살펴 보았다.

2. 시험조건 및 시험방법

KHST용 기어 재질은 SCM2로서 SCM420의 재료에 퀴칭을 보증하는 경화능 보증강이고 Ni를 첨가하여 소입성을 좋게 한 침탄용 재질이며, 화학 성분은 표 1. 과 같다. 기어 시험편을 만들기 위하여 실제 사용되는 기어를 시험편으로 가공한 후 실제 기어와 같은 방법으로 침탄열처리를 수행하였다. 시험편의 형상 및 크기는 그림 1.과 같이 직경(d)가 12mm이고 길이(L)은 50mm인 회전 굽힘피로 시험편을 사용하였다. 열처리후 표면경도 시험결과는 표 2. 와 같고, 침탄깊이별 경도의 시험결과는 그림 2. 와 같으며, 유효경화층 HV550까지의 깊이는 약 1.6 mm이었다.

시험편의 시험은 상온 대기 중에서 수행하였으며, 수명은 시험편이 완전히 파단되는 Cycle을 감

* 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 선임연구원, 정희원

** 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 주임연구원, 정희원

*** 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 책임연구원, 정희원

표 1. SCM42 의 화학성분 (wt %)

재질명	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S
SCM42	0.17 ~ 0.23	0.75 ~ 1.10	0.15 ~ 0.40	0.85 ~ 1.20	0.40 ~ 0.80	0.25 ~ 0.45	≤ 0.30	≤ 0.03	≤ 0.030

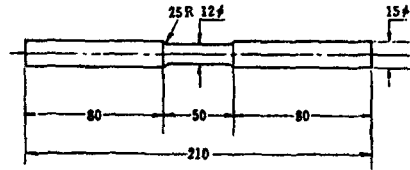


그림 1. 시험편 형상

표 2. 표면경도 시험결과

시험 번호	경도치	시험 번호	경도치
1	59.9	8	60.2
2	58.8	9	60.0
3	58.8	10	58.6
4	59.2	11	59.3
5	59.0	12	57.9
6	59.3	13	59.4
7	58.4	14	58.8

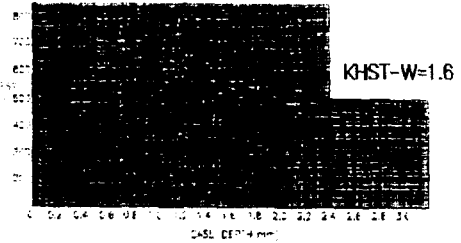


그림 2. 깊이에 따른 경도 측정 결과

지하고 이를 파손으로 간주하여 피로수명으로 정의 하였고, 구체적인 시험조건은 다음과 같다.

- 시험온도 : 상온 대기중
- 하중형식 : 회전굽힘
- 하중파형 : 정현파(Sinewave)
- 하중주파수 : 25Hz (1500 rpm)
- 하중비 : R = -1

시험은 그림 3. 과 같은 Moore식 회전굽힘 피로시험기를 사용하였고 시험편에 발생하는 굽힘응력(σ_b)은 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma_b = \frac{M_b}{Z_b} = \frac{16 \cdot W_b \cdot L}{\pi D^3} = \frac{16 \cdot W_b \cdot 200}{\pi D^3}$$

(M : 굽힘모멘트, Z : 2차모멘트, W : 작용하중, L : 팔길이(200mm), D : 시험직경)

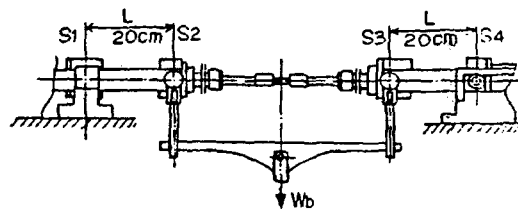


그림 3. Moore 식 피로시험기의 원리

3. 시험결과 및 검토

3.1 시험결과

표 3. 은 열처리된 기어시험편의 피로시험결과이며 그림 4. 는 시험결과를 응력진폭과 피로수명 관계를 양대수(log-log) 좌표계 상에 나타낸 것이다. 그림에서 직선은 양 대수 좌표계 상에서 일차식으로 Curve fitting 결과이고, 파괴확률 50%에 대한 응력진폭과 피로수명관계는 다음과 같다.

$$\sigma_a = 1348.96N_f^{-0.083} \quad (\text{KHST기어의 열처리전 시험결과})$$

여기서, σ_a = Stress Amplitude (MPa)

N_f = Number of cycles to failure

열처리 전 시험편의 비파괴 반복 하중수 $N=1 \times 10^7$ 에 대한 피로한도는 약 383 Mpa이다.

표 4. 는 열처리 후 기어시편의 피로시험결과이며 그림 5. 는 시험결과를 응력진폭과 피로수명 관계를 양대수(log-log) 좌표계 상에 나타낸 것이다. 응력진폭과 피로수명관계는 다음과 같고, 열처리 후 시험편의 비파괴 반복 하중수 $N=1 \times 10^7$ 에 대한 피로한도는 약 591 Mpa이다..

$$\sigma_a = 1364.58N_f^{-0.052} \quad (\text{KHST기어의 열처리후 시험결과})$$

표 3. 열처리전 시험편 피로시험결과

시편번호	응력진폭 (Mpa)	피로수명 (Cycles)	비고
1	585.66	29,200	
2	556.23	73,000	
3	526.80	94,700	
4	491.48	124,900	
5	468.92	213,800	
6	410.06	671,600	
7	405.15	3.0468E6	
8	468.92	936,100	
9	520.91	67,800	
10	578.30	32,700	
11	463.03	263,100	
12	405.15	1.2937E6	
13	361.99	1.29317E7	미파단
14	380.63	1.50823E7	미파단
15	405.15	1.337E7	미파단

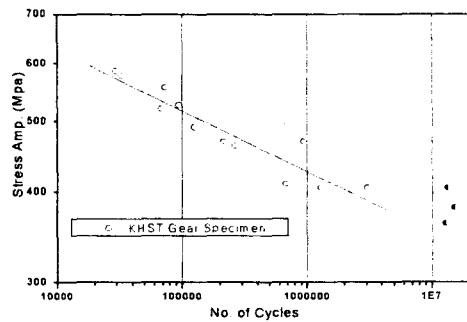


그림 4. 열처리전 시험편 시험결과

표 4. 열처리후 시험편 시험결과

시편번호	응력진폭 (MPa)	피로수명 (Cycles)	비고
1	836.79	21,500	
2	784.80	39,500	
3	725.74	84,200	
4	674.93	964,400	
5	637.65	2.357E6	
6	555.25	1.0583E7	미파단

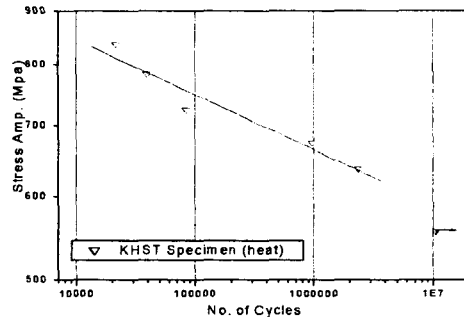


그림 5. 열처리후 시험편 시험결과

3.2 시험결과 검토

그림 5. 는 시험편의 침탄 열처리 전, 후에 대한 피로시험결과를 비교한 것이며, 열처리 후가 열처리 전보다 S-N 선도의 기울기가 약간 작아졌으며 피로강도는 증가하였다.

침탄열처리에 의한 피로강도변화는 화학성분 및 소재, 열처리 조건에 따라 피로강도가 변화하며, 표 5. 는 SNCM420의 열처리 조건에 따른 피로강도의 변화를 나타낸 것이다⁽³⁾. 열처리는 93 0℃에서 침탄처리를 한 것이며 열처리 조건으로는 열처리 시간을 10 - 150 분까지 조건을 주어서 하였다. 표에서와 같이 경화깊이는 열처리 시간이 증가함에 따라 증가하고 있으며 표면의 경도는

이에 비해하지 않고 열처리 조건이 850℃일 경우 800 으로 가장 크고 이후에는 다시 경도가 낮아 지며 피로강도 역시 표면경도가 가장 큰 조건에서 가장 크다. 따라서 침탄의 경우에는 최적의 유효경화층 깊이가 존재하며 이를 그림으로 나타내면 그림 6. 과 같다. 그림 6. 의 경우는 회전굽힘 피로강도 시험을 경화층 깊이에 따라 시험한 결과로서 유효경화층 깊이/ 직경의 비가 약 0.1~0.12 일 경우에 최대가 발생한다. 본 실험 시편의 경우에 유효침탄깊이 (Hv=550 지점)는 1.51 - 1.62 mm이다. 따라서 유효침탄 깊이/직경(KHST=12)의 비가 0.13 - 0.14 이며, 이는 최대경화층 깊이가 부근에 있음을 알 수 있다.

일반적으로 침탄 및 질화 등과 같은 표면 열처리의 차이에 따른 피로수명은 결정립의 크기가 지배적이라 알려져있다. 즉 결정립이 작으면 전위(Dislocation)의 움직임이 힘들어져 강도가 높아 지고 피로수명이 향상된다. 침탄처리를 할 경우에 소재보다 결정립의 크기가 작아지므로 피로수명이 높아지는 것으로 알려져 있으므로 KHST의 시험편 파단면을 SEM 사진을 찍어 이를 평가하였다. 그림 7. 은 1000배의 SEM 사진 결과이며, KHST의 조직사진에서 취성파괴에서 볼 수 있는 덩플 크기가 KTX 보다 더 크게 나타나며 결정립의 크기 역시 크기 때문에 열처리에 따른 피로수명이 KTX보다 낮은 것으로 판단되며, 상세한 검토를 위하여는 열처리 조건을 변화 시키면서 좀 더 많은 실험 및 검토가 필요하다.

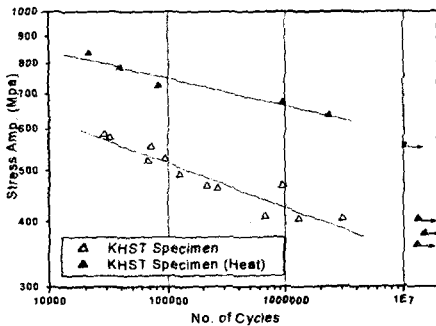


그림 5. 열처리 전후 시험편 시험결과 비교

표 5. SNCM420 열처리 조건에 따른 피로강도 변화

시편 번호	열처리 조건	경도 (표면/중심) HV	경화 깊이 (mm)	피로 강도 (MPa)	열처리소재에 대한 비	비고
1		280		343	1	열처리전
2	10분	550/410	0.23	647	1.89	930℃ 침탄 (850℃ 20min OQ) 160℃ 1h T
3	20분	660/410	0.29	686	2.00	
4	35분	700/380	0.36	608	1.77	
5	50분	770/400	0.37	637	1.86	
6	85분	800/410	0.48	726	2.17	
7	150분	650/410	0.50	677	1.97	

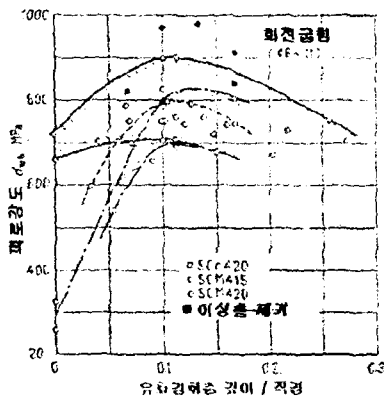


그림 6. 회전굽힘 피로강도와 유효경화층 깊이와의 관계

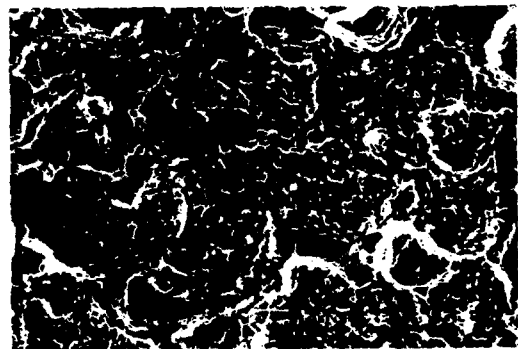


그림 7. 열처리 시험편 파단면의 SEM 사진 (×1000)

3.3 실제 기어 시험결과와의 비교 검토

하중비 R=-1인 기어 시험편의 피로시험 결과를 수정 Goodman식 및 Gerber식을 사용하여 평균 응력을 고려한 실물시험 결과로 변환하였다. 또한, 시험편 및 실물기어의 피로시험 결과 차이는 시험편과 실물기어의 크기 차이에서 발생하는 치수효과가 있으므로 실물기어의 경우 위험단면의 길이를 이용하여 다음 식으로 고려하였다.⁽⁴⁾

$$C_{size} = 1.189 d^{-0.097} \quad (8 \leq d \leq 250mm)$$

그리고, 응력집중에 의한 노치효과는 실물기어에서 실응력을 측정하여 S-N curve 에 반영하였으므로 고려하지 않았고, 표면처리 및 표면상태는 거의 동일한 것으로 간주하였다.

그림 8. 은 시험편 시험 결과를 평균응력과 치수효과를 고려한 수정된 등가응력과 피로수명 관계를 실제시험 결과와 비교하였다. 비교결과 평균응력을 Gerber식으로 고려한 경우가 높은 반복수가 될수록 실제시험 결과보다 수명이 더 길게 나타났고, Goodman 식으로 고려한 경우는 높은 반복수가 될수록 실제시험과 근사한 결과를 나타내고 있으며, 전반적인 경향 및 3×10^6 사이클의 내구한도는 Goodman식을 이용한 평균응력을 고려한 경우가 더 잘 일치 하였다. 이 결과를 볼 때 많은 시간과 비용이 소모되는 실제시험보다는 시험편 시험을 실시하여 S-N curve의 경향 및 내구한도는 어느 정도 추정이 가능하다고 판단된다.

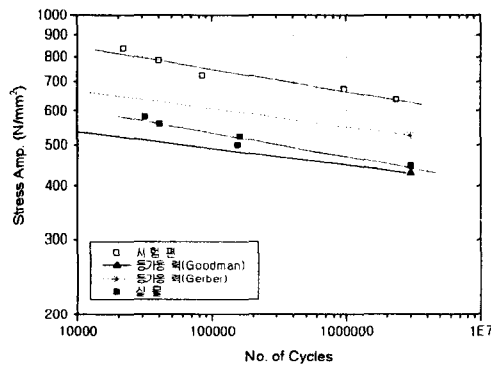


그림 8. 등가응력-피로수명 관계

4. 결론

최고속도 350km/h의 한국형 고속전철 시운전 시험에 조립될 기어의 성능확인을 위하여 시험편에 대한 피로강도시험을 실시하였다. 실제 기어의 시험결과와 시험편의 시험결과를 비교하면 Goodman식을 이용한 평균응력의 효과와 치수효과를 고려하였을 때 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 이상의 결과에서 기어 시험편의 소재를 이용하여 기어의 실물 피로수명을 예측하는 것은 타당하며, 이를 이용하면 피로시험에 대한 많은 경비와 시간을 절감할 수 있을 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 2001년도 건설교통부/통상산업부/과학기술부 선도기술사업인 "G7고속전철기술개발사업"의 일환으로 수행된 연구결과와 일부이다.

[참고문헌]

1. 日本機械學會, "齒車強さ設計資料", 日本機械學會, 1991
2. "대차용 감속구동장치 개발(2단계1차년도 보고서)", 고속전철 기술개발 사업 99-II2-1-9, 한국DTS(주), 2000. 10
3. 日本機械學會, "金属材料疲勞強度の設計資料", 日本機械學會, 1992
4. J.Barnantine, J.Comer and J.Handrock, "Fundamental of Metal Fatigue Analysis", Prentice Hall, 1990