

고속철도차량용 감속기의 기어 성능 영향 인자에 대한 고찰

강지성*, 김상현*, 박진규*, 이재원*, 최성수**
 *한국산업기술시험원
 **한국철도공사
 e-mail: jisung58@ktl.re.kr

Consideration on the Critical Factors defining Performance of a Driving gear for High Speed Trains

Jisung Kang*, Sanghun Kim*, Jinkyu Park*, Jaewon Lee*, Sungsoo Choi**
 *Korea Testing Laboratory
 **Korea Railroad

요약

고속철도차량용 감속기에 적용되는 헬리컬 기어는 재질, 가공품질, 형상 등에 따라 동력전달 성능, 소음진동, 수명 등에 차이가 발생한다. 이러한 기어의 품질, 형상, 동적 특성 등은 계수화 되어 기어 설계에 반영이 되고 있다. 본 논문은 헬리컬 기어의 대표적 고장 사례인 면압에 의한 피팅(pitting), 이 뿌리 파손을 방지하기 위해 허용접촉응력 계산에 사용되는 주요 인자에 대해 고찰하고 동력분산식 고속철도차량에 적용되는 감속기 기어의 강건 설계를 도모하고자 한다.

1. 서론

고속철도차량에 탑재되는 감속기는 견인전동기의 동력을 차륜으로 전달하는 장치로 차량의 주행안전성 확보에 있어 중요한 장치 중 하나이다. 향후 도입 예정인 동력분산식 고속철도차량은 국내 운영선로의 환경적, 기하학적 특성에 적합한 동력계통을 탑재해야 한다. 감속기의 사양 결정을 위해 인용되는 주변요인은 다음의 표와 같다.

[표 1] 감속기 주변 환경조건

구분	조건	
기후조건	온도 (°C)	-35 ~ 45
	상대습도 (%)	5 ~ 100
	최대강수량(cm/h)	12
	최대강설량(cm/h)	12.5
선로조건	궤간(mm)	1,435
	최대구배(‰)	35
	최소곡선반경(m)	125
차량조건	최고운행속도(km/h)	260
	최고설계속도(km/h)	286
	최대전인력(kN)	226 이상
	가속도(km/h/s)	2.0 이상
	차륜경(mm)	860(신조) 780(마모)
	축 당 중량(ton)	최대 17.2

가속, 등속 운전, 감속 등)에서 견인전동기에서 입력되는 동력을 차축으로 전달해야 하고 이 때 동력 입력측의 소치차와 차축으로 동력을 전달하는 대치차는 반복되는 하중과 예외적인 하중에서 변형이나 파손이 발생하지 않도록 강건하게 설계되어야 한다. 본 논문에서는 감속기가 처하게 되는 다양한 상황을 기어 설계에 반영하기 위해 어떠한 물리적 계수(factor)가 적용되어야 하는지 살펴보고 ISO 6336에 따라 기어의 허용접촉응력(σ_{HP})을 찾고자 한다.

2. 기어의 주요 성능 영향인자 정의 및 계산

2.1 동하중 계수(K_V) 정의 및 계산

동하중 계수(K_V)는 기어의 회전속도와 하중에 관련된 계수로 기어 이의 정밀도 등급에 따른 편차를 보정하기 위해 사용된다. 정밀도가 낮은 기어에서는 고정밀 기어보다 상대적으로 높은 값을 사용한다. 동하중에 영향을 미치는 파라미터는 설계단계에서 피치선 속도, 치면하중, 회전요소의 관성과 강성 설계 등이 있으며 제작단계에서 피치 편차, 베어링 끼워맞춤과 예압, 부품의 밸런스 등이 고려되어야 한다. 또한 운전시 발생하는 전달오차(transmission error), 동적 응답(dynamic response), 시스템 공진 등이 동하중 계수에 영향을 미친다. 동하중 계수는 식(1)과 같이 구할 수 있다.

$$K_V = NK + 1 \dots\dots\dots (1)$$

감속기는 차량이 놓이게 되는 여러 상황(경사로 출발, 최대

식(1)에서 N 은 공진속도에 대한 소치차(drive gear)의 속도 비이며 K는 기어의 피치편차, 치형편차 및 물림 강성의 주기적 변동 효과를 고려한 무차원 수이다.

2.2 치면하중계수(K_{Hβ}) 정의 및 계산

치면하중계수(K_{Hβ})는 기어 치폭방향으로 분산되는 불균일한 하중분포가 접촉응력에 미치는 영향을 고려한 계수로 기어 이의 제작정밀도, 기어가 물리는 시스템(차축, 베어링, 케이스 등)의 탄성변형 등이 치면에 불균일한 하중 분포를 야기한다. 치면하중계수는 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$K_{H\beta} = 1 + \frac{F_{\beta y} c_{\gamma\beta}}{2F_m/b} \dots\dots\dots (2)$$

2.3 치면접촉응력(σ_H) 계산

치면접촉응력(σ_H)은 기준 원통상의 접선력을 피치 원통상의 법선력으로 변환하기 위한 영역계수(Z_H)와 재료의 물성값을 고려한 탄성정수계수(Z_E), 유효접촉선 길이를 고려한 물림률계수(Z_ε), 접촉선에 기인한 하중의 변화를 고려한 비틀림각계수(Z_β)를 고려해 식(3), (4)와 같이 계산한다.

$$\sigma_{H0} = Z_H Z_E Z_\epsilon Z_\beta \sqrt{\frac{F_t}{d_1 b} \frac{u+1}{u}} \dots\dots\dots (3)$$

$$\sigma_{H1,2} = \sigma_{H0} \sqrt{K_A K_V K_{H\beta} K_{H\alpha}} \dots\dots\dots (4)$$

2.4 허용접촉응력(σ_{HP}) 계산

허용접촉응력(σ_{HP})은 하중 반복에 따른 접촉응력 수명 계수(Z_{NT}), 윤활제 점도의 영향을 고려한 윤활제 계수(Z_L), 표면거칠기의 영향을 고려한 거칠기 계수(Z_R), 피치선 속도의 영향을 고려한 속도계수(Z_V), 가공정화에 따른 기어 물림 효과를 고려한 경화계수(Z_W), 기어 이의 치수(크기)를 고려한 치수효과계수(Z_X)를 고려해 식(5)와 같이 계산한다.

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{Hlim} Z_{NT}}{S_{Hlim}} Z_L Z_V Z_R Z_W Z_X \dots\dots\dots (5)$$

최대허용응력값(σ_{Hlim})은 ISO 6336-5에 제시된 제품의 재질 Eh(침탄연강)의 품질등급 MQ를 적용해 계산에 참고했다.

2.5 계산 결과

기어 성능에 영향을 미치는 여러 설계 인자를 고려해 계산된 치면접촉응력(σ_H), 허용접촉응력(σ_{HP}) 및 면압강도안전계수(S_H)는 다음과 같다.

[표 2] 기어 접촉하중에 따른 면압강도 계산 결과

구분	계산 결과	단위
σ _{H0}	1075.02	N/mm ²
σ _{H1} (소치차)	1113.96	N/mm ²
σ _{H2} (대치차)	1113.96	N/mm ²
σ _{HP1} (소치차)	1297.40	N/mm ²
σ _{HP2} (대치차)	1343.80	N/mm ²
S _{H1} (소치차)	1.162	-
S _{H2} (대치차)	1.211	-

3. 결론

본 논문에서는 고속철도차량 감속기에 적용되는 헬리컬 기어 치면 면압 강도에 대한 기본설계를 통해 설계에 적용된 기어의 재질, 형상, 윤활 등이 적합한지 안전계수를 도출함으로써 입증했다. 도출된 치면 허용접촉응력에 대한 안전계수는 소치차(drive gear) 1.162, 대치차(driven gear) 1.211로 ISO 6336에서 정하는 최소안전계수(S_{Hmin} = 1.0)보다 큰 것을 확인했다. 향후 기어의 수명계수 산출을 위한 duty cycle, 가공품질(ISO grade 선정), 정확한 운영조건(정격 토크 및 회전수 등)이 도출된다면 더 정확한 계산을 기대할 수 있다.

후 기

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 일환으로 국토교통과학기술진흥원의 연구비 지원(20RTRP-B148867-03)으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] ISO 6336-1:2006 “CALCULATION OF LOAD CAPACITY OF SPUR AND HELICAL GEARS – PART 1: BASIC PRINCIPLES, INTRODUCTION AND GENERAL INFLUENCE FACTORS”
 [2] ISO 6336-2:2006 “CALCULATION OF LOAD CAPACITY OF SPUR AND HELICAL GEARS – PART 2: CALCULATION OF SURFACE DURABILITY (PITTING)”
 [3] ISO 6336-5:2016 “CALCULATION OF LOAD CAPACITY OF SPUR AND HELICAL GEARS – PART 5: STRENGTH AND QUALITY OF MATERIALS”