틸팅차량용 감속 구동장치 연구개발 성과

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

배찬권* 차수덕** 최진욱*** 신봉주****

Bae, Chan-Kwon Cha, Soo-Deok Choi, Jin-Wook Shin, bong-Joo

ABSTRACT

This study is to establish design method and evaluation technology for drive system appropriate to high speed tilting train. The transmission system of high speed train serves in the severe condition compared with those of KHST(G7), 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 of the design and evaluation method for reduction gearbox of high speed tilting train and discusses various design items and methods about assembly and parts of reduction gearbox.

1. 서 론

철도차량용 감속 구동장치는 전동기에서 발생하는 동력을 차륜에 전달하는 역할을 하며 차량의 주행성능, 안전성, 승차감등에 영향을 미치는 핵심부품이다. 감속 구동장치는 속도범위가 넓고, 구동 중에 장치에 가해지는 토오크가 크기 때문에 사용 속도범위에서 공진을 피하고 충격하중에 대한 강도를 충분히 갖도록 설계해야만 한다. 본 연구는 KHST(G7)차량용(한국형 고속철도) 감속 구동장치의 독자개발 경험과 기술을 기반으로 틸팅차량용 200 km/h 급의 대차용 감속 구동장치 개발에 필요한 품질 및 내구성, 신뢰성을 확보하기 위한 항목 및 설계 방안을 제안하고, 기술검토를 통하여 틸팅차량의 요구 성능에 만족하는 최적화 설계기술을 확보하는 데 그 목적이 있다. 본 연구에서는 감속기 케이스 와 토오크 링크의 구조해석을 통하여 강도 및 진동 해석을 수행하였다. 또한 고속, 고하중에 적합하도록 치형 수정된 기어의 내구성과 강도 및 구동 중 발생하는 열에 대한 냉각 및 윤활방식 등을 검증하였다.

2. 감속구동장치 외력 산출

감속구동장치의 동력 전달시 발생되는 토오크의 반력은 입력 축인 피니언 기어와 휠기어를 통해 감속기케이스에 전달되며, 이감속기 케이스는 토오크-링크를 통하여 대차에 고정된다. 따라서 감속기 케이스, 토오크-링크 및 주요부품 강도 해석 및 평가를 위해서는 우선 전달토크에 의해 발생되는 하중을 산출하여야 한다.

감속구동장치의 구성품에 영향을 미치는 하중은 크게 모터에서 발생하는 전기적 탄력으로 인한 short circuit 토오크와 정적토오크, 차량의 차륜과 레일의 점착력에 의해 발생하는 slip 토오크 구분되며 표1 에 각 토오크값을 산출하였다.

---

* 다이모스(주) 기술연구소 책임연구원, 비회원

** 다이모스(주) 기술연구소 선임연구원, 정회원

*** 다이모스(주) 기술연구소 선임연구원, 비회원

**** 다이모스(주) 기술연구소 연구원, 비회원

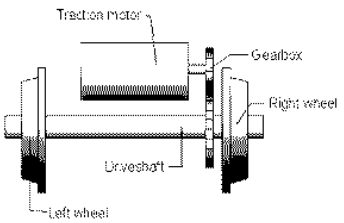

그림 1. 감속구동장치

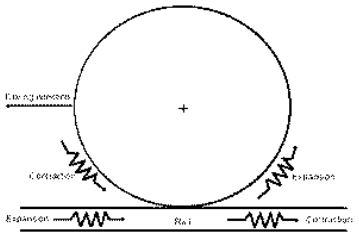

그림 2. 레일과 차륜의 슬립하중

표 1. 감속구동장치 주요 토오크 값

	입력축(N.m)	출력축(N.m)
정격 토오크	1214	5022
Slip 토오크	5379	22250
Short Circuit 토오크	7295	30172

3. 감속구동장치-케이스 구조해석

감속구동장치-케이스는 Cover 와 Housing으로 구성되어 있으며, 이들은 볼트에 체결되어 있다. 감속기 케이스의 기하학적 모델은 CATIA V5 R10을 이용하여 3차원 모델로 구성하였으며 이는 그림3 과 같다. 기하학적 모델은 MSC PATRAN 2003r2으로 넘겨져서 요소분할을 하여 유한요소 모델을 생성하였다. 사용한 요소는 10절점을 갖는 사면체 요소이며, 전체모델은 30,887 Nodes, 85,284 Elements로 구성되어 있다.(그림4)

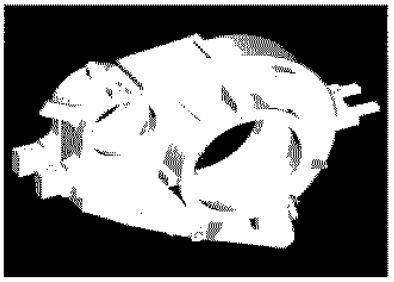

그림 3. TTX 차량용 감속구동장치
기하학적 모델

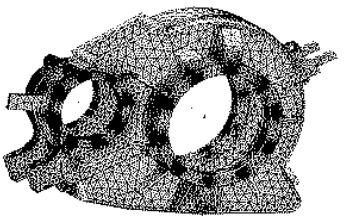

그림 4. TTX 차량용
감속구동장치 유한요소 모델링

해석은 응력해석과 진동모드해석 두 가지에 대해 수행하였다. 응력해석에 있어서 고려한 하중조건은 베어링 반력에 의한 하중이며 MSC NASTRAN 2004로 계산을 수행하였다. 베어링 반력에 의한 하중은 그림5, 6에 나타나있다.

표 2. 소재 물성치

	Young's Modulus	Shear Modulus	Poisson's Ratio	Tensile Strength, Ultimate	Tensile Strength, Yield	Fatigue Strength for infin.
FCD400-15	16300 kgf/mm²	6269 kgf/mm²	0.3	40.8 kgf/mm²	23.5 kgf/mm²	19.4 kgf/mm²

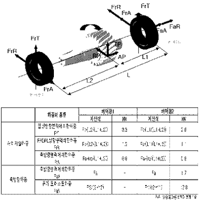

그림 5. 피니언축 베어링 반력

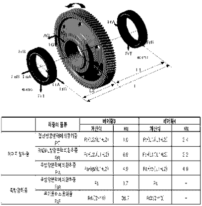

그림 6. 휠기어축 베어링 반력

해석의 결과는 표3에 나타내었으며 표2의 소재 물성치에 대해 최대하중 및 안전율을 반족한다.

표 3. 구조 해석 결과

[kgf/mm²]

Condition		최대 응력 Von-M. Stress	최대 응력 Maj. Stress	허용 응력 [Yld.]	무한 수명 응력 [Fat.]	안전율 [Yld./Von.M]	피로 안전율 [Fat./Maj.]	판정
Max. Slip Torque	정회전	22.9	13.3	23.5	19.4	1.03	1.46	안전
	역회전	16.0	15.9			1.47	1.22	안전
Inertial Force	50 g down	9.8	2.24			2.40	8.66	안전
	13 g Fore	0.44	0.48			+High	+High	안전
	13 g Aft	0.41	0.25			+High	+High	안전
	7 g Out	0.58	0.64			+High	+High	안전
	7 g - in	0.90	1.06			+High	+High	안전

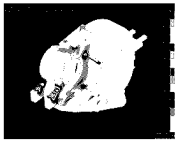

그림 7. Von_Mises Stress 분포
@ Max. Slip Torque, 정회전

그림 8. Major Stress 분포
@ Max. Slip Torque, 정회전

그림 9. Von-Mises Stress 분포
@ Inertial Force of 13g, Fore

4. 토오크 링크 구조해석

토오크 링크는 감속구동장치를 대차에 장착되어 지지하며 감속구동장치에서 발생하는 모든 하중을 견뎌야 한다. 기하학적 모델은 CATIA V5 R10 Mechanical Design을 이용하여 3차원 모델로 구성하였으며 이는 그림10과 같다. 기하학적 모델과 해석은 CATIA V5 R10 Analysis & Simulation으로 넘겨져서 요소분할을 하여 유한 요소 모델을 생성하였다. 사용한 요소는 10절점을 갖는 사면체 요소이며, 전체모델은 12,449 Nodes, 3,257 Elements로 구성되어 있다.(그림11)

그림 10. 토오크 링크형상

그림 11. 토오크 링크 유한 요소 모델

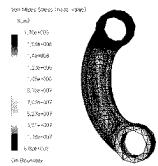

그림 12. 토오크 링크 해석 결과

응력해석에 있어서 고려한 하중조건은 STATIC SAFETY는 Short circuit 토오크를 적용하였으며 FATIGUE SAFETY는 Slip 토오크에 의한 결과(그림13, 표 4) 안전율 1.4이상으로 안전하다.

표 4. 소재 물성치

	Young's Modules	Poisson's Ratio	Tensile Strength, Yield	Fatigue Strength for infin.
FCD400-15	210,000 N/mm²	0.3	650 N/mm²	260 N/mm²

표 5. 해석결과

	STATIC SAFETY AT SHORT CIRCUIT TORQUE		FATIGUE SAFETY AT SLIP TORQUE	
	Tensile Stress	Compressive stress	Tensile Stress	Compressive stress
해석값	238N/mm²	239N/mm²	176N/mm²	177N/mm²
안전율	2.71		1.46	

5. 감속구동장치 윤활 및 냉각

철도차량에서 치차와 베어링의 가장 일반적인 윤활방법인 유욕윤활을 도시한 것으로, 대치차가 회저어 올린 윤활유는 대소치차 맞물림부 상부에 설치된 기름저장소에 저장되고, 그 후 치차 및 베어링으로 급유되는 방법이다(그림 13). 도면 중의 기름안내는 큰 치차가 윤활유를 휘저어 올리는 일종의 펌프작용을 유효하게 하는 원뿌의 케이싱 역할을 맡고 있다. 철도차량에서는 고장부품을 적게 하고 또 보수점검이 용이한 것을 목표로 치차장치의 윤활방법은 이 유욕윤활방식을 채용하고 있지만, 치차의 대형화, 고속화에 따라서 윤활상태는 나빠진다. 그림 14는 치차의 피치원 원주속도 및 윤심가속도의 2개의 척도로 유욕윤활의 한계를 도시한 것이다. 도면 중에 산간선의 값이 표시되어 있는데, 이것은 기름 안내의 형상, 기름저장소 등의 부설에 의해 유욕윤활의 한계를 초래하는 사용조건하에도 불구하고 양호한 윤활상태로 유지할 수 있음을 나타내는 에이버 TTX차량 감속구동장치에도 유욕 윤활을 적용하였다.

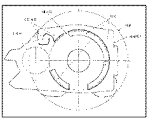

그림 13. 유욕윤활의 예

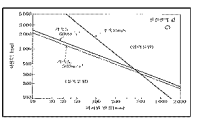

그림 14. 치차장치의 윤활 조건

감속구동장치의 적정유량은 구동장치에서 발생하는 손실이 모두 열로 변한다는 가정 하에 검토하였다.

$$Q = 632 \cdot (1-\eta) \cdot H$$
$$= Q_m + Q_b + Q_c$$

H : 일력마력(ps)
η : 기어효율
Q_c : Gear Mesh loss
Q_b : Bearing Friction Loss
Q_c : Gear Churning Loss

그리고 발생된 열은 감속구동장치의 강제 대류로 방열하고 남은 잔류열량만큼 함유하고 있는 유량과 유욕윤활을 하기위한 최소의 유량의 합을 최적유량(3.3ℓ)으로 선정하였다.

6. 기어 내구성 검토

기어 강도 검토는 굽힘강도(Bending Strength), 면압강도(Pitting Resistance)를 고려하고, 강도계산에 영향을 미치는 제 인자들을 고려한다. 그 계산식으로서는 가장 널리 사용되며, 강도평가를 위한 각종 계수와 평가방법, 실험 결과 등이 잘 반영되어 있다고 평가되는 AGMA규격 DIN 규격을 토대로 하여 Romax s/w, Hexagon s/w로 검증하였다.

	피니언기어	휠 기어
모듈	6.33	
압력각	20	
중심거리(mm)	370	
잇수	22	91
치폭(mm)	80	
이끝원지름(mm)	162.0	603.0
피치원지름(mm)	144.172	596.350
이뿌리지름(mm)	129.771	571.012
전위계수(mm)	0.394	-0.436
표면경도	HRC 60 ~ 62	
심부경도	HRC 20이상	

표 6. 기어제원

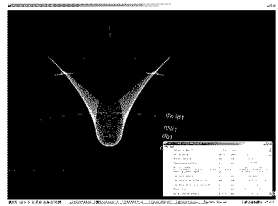

그림 15. 기어창성

그림 16. 치합상태

그림 17. 해석 결과 그래프

전달 접선력에 의한 계산 응력과 허용 응력과의 비를 안전율이라 할 때 기어의 설계 안전율은 표 6 과 같다.

표 8 피니언기어/휠기어 안전율

	면압강도 안전율	굽힘강도 안전율
Pinion Gear	1.16	2.59
Wheel Gear	1.26	2.46

7. 베어링 수명

감속 구동장치의 베어링은 주로 원통로울러 베어링과 테이퍼로울러 베어링이 사용된다.
원통로울러의 경우 주로 반경방향의 하중만이 주로 작용될 때 사용되며 설치 해체가 용이하고 베어링내부륜 상세히 점검할 수 있어 보수도 용이하다. 또한 온도변화에 의한 신축, 설치오차에 대한 축과 하우징의 축방향 위치 어긋남 등에 의한 무리한 하중을 피할 수 있다. 테이퍼 로울러 베어링의 경우 축하중과 반경방향의 하중이 동시에 작용할 때 많이 사용된다. 또한 베어링의 주변의 구조가 간결하고 내외륜을 쉽게 분리할 수 있어 궤도면의 점검이 용이하나 클리어런스(clearance)의 조정이 필요하다. TTX 차량용 감속구동장치에는 테이퍼 롤러베어링이 적용 되었으며 적용하중은 2장에서 표현 하였다.
베어링의 피로 수명은 7,000,000km (900km/일 x 26일/월 x 12월/년 x 25년) 이상 사용할 수 있

도록 검토 선정하였다.

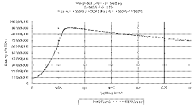

그림 18. 피니언측 베어링
예측수명

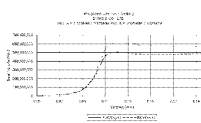

그림 19. 피니언측 베어링 예측수명

8. 결론

틸팅차량용 감속구동장치를 개발하기 위한 중요구성품들에 대해 본문내용과 같이 구조해석 등을 통하여 상세 설계과정을 완료하였다.

1. 하중은 정격 토오크 외에 Slip 토오크와 Short Circuit 토오크를 주요 하중으로 고려하였다.
2. 감속구동장치-케이스 구조해석 결과, Slip 토오크 및 과성 하중에 대해 응력 값 및 피로 한도 모두에 있어서 안전한 것으로 계산되었다.
3. 토오크 링크 해석 결과, Short circuit 토오크에 대해 응력 값 및 피로 한도 모두에 있어서 안전한 결과를 보였다.
4. 감속구동장치 윤활 및 냉각 설계는 발열량과 방열량를 고려하여 최적유량(3.3ℓ)으로 선정하였다
5. 기어의 설계 안전율은 굽힘강도(Bending Strength), 면압강도(Pitting Resistance)를 고려하여 AGMA규격 DIN규격을 토대로 계산한 결과 안전율 1.0이상으로 안전한 것으로 계산되었다.
6. 베어링의 피로 수명은 7,000,000km 이상 사용할 수 있도록 선정하였다.

이상과 같이 이론 및 각종 해석 프로그램들을 통해 고속용 틸팅차량에 적합하도록 안전성 및 신뢰성을 검증하였으며 현재 진행 중인 리그테스트 결과와의 비교 검토가 수행될 계획이다.

후기

본 연구는 2003년 철도청/철도연구원/기존선 속도향상 사업인 "주요부품 설용 기술개발"의 일환으로 수행된 연구결과의 일부이다.

참고문헌

1. C.E. Shellman, "Transmission Case",
Design Practices Passenger Car Automatic Transmission, SAE,1994
2. S.Timoshenko외 1명, "Elements of Strength of Materials", John Weiley & Sons
3. "TIMKEN베어링 지침서", Timkwn Bearing사
4. 최호선外, "공차론", 성안당, 1997

5. "ROMAX DESIGNER MANUAL", 한국화상기술, 1998
6. R. E. Peterson, "Stress Concentration Factors", John Weiley & Sons
7. 木山頌樹, "鐵道車輛用驅動裝置の輕量化をめぐる技術動向"
8. 宮西孟一・井山和夫, "車輛用動力傳達裝置とその性能把握
9. "피로강도의 설계자료", 일본기계학회編, 김종학譯, 1995
10. "機械設計 岡表便覽", 丸光書林(일본), 1986
11. "철강편람(Ⅲ)", 일본기계학회編, 현영창譯, 도서출판 세화, 1991
12. S. Suresh, "Fatigue of materials", Cambridge University Press, 1991
13. HANDBOOK OF PRACTICAL GEAR DESING, Darle W. Dudley
14. Heat Transfer; A Practical approach , Yunus a. Cengel
18. AGMA 2101-C95 "Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth"