

한국형 고속전철용 감속구동장치 시운전 시험 및 평가

Measuring and evaluation of reduction gear unit for running test of Korea High Speed Train

이동형*, 서정원**, 문경호**, 최경진***, 최강윤***

Lee Dong-Hyong., Seo Jung-Won, Moon Kyoung-Ho, Choi Kyung-Jin, Choe Kang-Youn

ABSTRACT

The transmission systems 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 capability of reduction gear unit for Korea High Speed Train, torque and temperature, vibration on the reduction gear unit were measured and test data were analyzed. This paper reports test methods and test results that performed to verify reliability of reduction gear unit during running test of Korea High Speed Train. It is confirmed from these results that the performance of reduction gear unit has not any problem.

Keywords : reduction gear unit (감속구동장치), running test(주행시험), railway(철도)

1. 서론

철도차량용 감속구동장치는 최종목표인 견인력을 전달하여 차량을 주행시키기 위한 차량의 핵심부품으로서 기어 및 각 부품의 설계기술 및 제작기술이 매우 중요하고, 제작된 제품의 신뢰성을 파악하고 제품의 성능을 향상하기 위하여 실제 운행상태에서의 성능시험평가와 관련된 기술개발이 필요하다. 기존의 연구^{(1),(2)}는 한국형 고속철도 350 km/h 급의 대차용 감속 구동장치 개발에 필요한 부품단위의 품질 및 내구성, 신뢰성을 검증하기 위한 시험방법 및 시험기준(안)을 제시하였고, 주요부품의 성능시험 및 평가를 수행하였다. 본 연구에서는 시제품이 조립된 시운전 열차에서의 실차시험 및 성능평가를 실시하여 고속철도운행에 적합한 감속구동장치 개발에 필요한 시험·성능평가기술을 확보하고 설계 기준의 재정립 및 기초데이터 확보에 목적이 있다.

한국형 고속전철 감속구동장치의 시운전 성능평가를 위하여 시운전 시험항목으로 성능과 관련된 항목과 개발시 확인항목으로 구분하였다. 성능과 관련된 항목은 이상이 발생하였을 경우, 시험을 중지하거나 다른 조치를 취하여야 하는 항목을 선정하였으며, 간섭 및 작동상태를 확인하는 인터페이스 항목, 누유의 유무를 확인하는 항목, 베어링 및 윤활유의 온도상승(과열)을 확인하는 온도상승 항목으로 구분하였다. 개발시 확인 항목은 설계 및 피로해석, 이상진단 기준 설정 등에 필요한 데이터 획득을 목적으로 하는 항목이며, 감속구동장치 케이스의 진동레벨(이상진동)을 측정하는 진동 항목, 동력전달축의 토오크 항목, 기어 이뿌리 부위 응력, 잇줄방향 응력분포, 기어 피로강도 설정 등에 필요한 기어 굽힘응력 항목, 리엑션암 하중이력, 리엑션암 피로강도 설정에 필요한 리엑션암 응력 항목으로 구분하여 시운전 시험을 수행하였다.

그림 1. 은 시운전 시험항목과 시험차량의 위치별 측정항목이며, 동력차와 동력객차에 필요한 센서를 설치하여 시운전 시험을 수행하였다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
** 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원
*** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

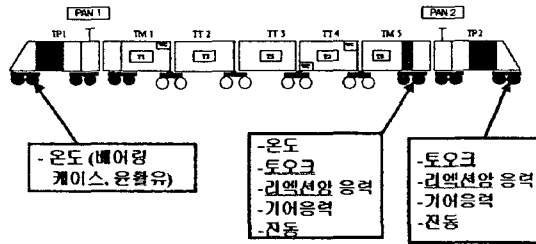


그림 1. 감속구동장치 시운전 시험항목 및 측정위치

2. 계측시스템 구축

2.1 토오크 및 기어응력 계측시스템

토오크 및 기어 응력의 측정위치는 1차 감속구동장치와 2차 감속구동장치의 연결축인 동력전달축(tripod shaft)을 선정하였다. 이 위치는 공간이 협소하여 슬립링의 사용이 불가능하므로 2 채널용 텔레메트리(MICRODAC B2, Optim Electronics Corp.)를 사용하였으며, 텔레메트리 측정시스템의 개념도는 그림 2. 와 같다. 동력전달 축의 토오크를 측정하기 위한 센서는 게이지 저항 350 Ω의 토오크 측정용 스트레인 게이지(CEA-06-187UV-350, MM사)를 사용하였다. 토오크 측정용 센서 부착위치인 동력전달 축(tripod shaft)은 형상이 복잡하고, 원형 부분이 없으며, 중심위치에서 내부 축이 길이 방향으로 ±120mm 가 움직이게 되어 있어, 실제 운행시 동력전달 축이 최소 길이일 때에도 안정적인 출력을 얻을 수 있어야 하므로 이를 고려하여 조립시 2차 감속장치 축의 동력전달축 조립부분에서 가까운 위치를 센서 부착위치로 하였다.

토오크 측정용 센서의 부착 및 결선은 굽힘응력의 영향을 고려하기 위하여 180° 위치에 부착하지만, 동력전달 축은 flexible shaft이므로 굽힘응력에 대한 영향이 없을 것으로 판단되어 그림 3 과 같이 예비용을 포함하여 총4개의 게이지를 부착하였고, 결선은 full bridge 로 결선하였다. 센서 설치 및 결선 후 부품상대에서 비틀림 시험기를 이용하여 교정작업을 수행하였다.

기어 응력의 측정을 위한 계측 및 신호전달 시스템은 토오크 측정시스템의 텔레메트리를 이용하였으며, 기어의 이뿌리 필렛부위의 응력을 측정하기 위하여 게이지 저항 350Ω이고 기어가 맞물려 회전할 때 게이지에 접촉이 일어나지 않을 정도로 소형인 스트레인 게이지(SK-06-030TU-350, MM사)를 사용하였다. 센서 취부 및 결선 방법은 스트레인 출력신호를 (1+ν)배 키우고 내부온도 상승에 의한 온도보상을 위하여 90° tee rosette gage를 이용하여 기어내부에서는 half-bridge 방식으로 하고 외부에서 dummy 저항을 이용하여 full-bridge로 결선하였다.

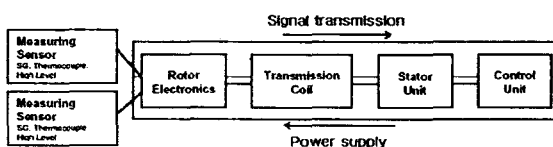


그림 2. 텔레메트리 측정 시스템의 개념도



그림 3. 토오크 측정용 센서 설치 모습

센서를 취부한 후 이끝 하중에 따른 스트레인 출력의 변화를 알기 위하여 이끝 3mm 위치에 정하중 20~100kN 을 가하여 그 때의 스트레인 출력을 측정하였고, 텔레메터에 계인 저항을 설치하고 최종적인 교정을 수행하였다. No. 1 센서에 대하여 텔레메터의 교정 후 게이지의 입력신호에 대한 출력값의 물리적 변화량 관계는 표 2. 와 같다. 그림 4. 는 시운전 차량의 동력전달축에 설치된 토오크 및 기어용력 계측시스템의 모습이다.

표 2. 텔레메트리 교정 결과

구분 항목	동력객차용 (RG82용)	동력차용 (RG101용)
토오크 (kg·m)	$(1000/1.9 \times \text{Voltage} + 7.3) / 0.53$	$(1000/3.5 \times \text{Voltage} - 1.3) / 0.281$
기어용력 (MPa)	$4.545 \times \text{작용하중(kN)} - 8.1$ * 작용하중 (kN) $= (1000/1.5 \times \text{Vol.} + 286.3) / 21.5$	$4.545 \times \text{작용하중(kN)} - 8.1$ * 작용하중 (kN) $= (1000/1.5 \times \text{Vol.} + 221.1) / 20.8$



그림 4. 텔레메트리 설치 모습

2.2 온도 측정 시스템

시운전 시험시 감속구동장치의 윤활 및 작동이 원활하게 되고 있는지를 판단하기 위하여 베어링부분과 기어케이스 내부 윤활유의 온도 측정 시스템을 구축하였다. 측정하고자 하는 부위의 온도는 150℃ 이하이며, 측정부위는 베어링 커버, 기어케이스 내부 및 외부 온도이므로 이를 기준으로 표면온도용(와이어 형) 및 봉형 열전대(T type) 센서를 이용하였다. 열전대를 이용하여 신호를 감지하고 이를 온도측정용 앰프에서 증폭하여 저장장치에 기록하는 형식으로 측정시스템을 구성하였으며, 시운전 차량에 설치된 열전대의 수량은 총 22개이고, 설치된 모습은 그림 5. 와 같다.

2.3 진동 및 리액션 압 응력 측정 시스템

감속구동장치의 상하방향 진동을 측정하기 위하여 1차, 2차 기어케이스에 ICP형 가속도 센서를 설치하였다. 측정시스템의 구성은 가속도 센서에서 신호를 감지하고 이를 Tape Recorder에 기록한 후 소음진동신호분석기에서 분석하는 형식으로 측정시스템의 구성하였으며, 시운전 차량에 센서가 설치된 모습은 그림 6. 과 같다. 시운전 시험시 리액션압에 작용하는 하중이력을 측정하기 위하여 취약부위에 스트레인 게이지를 dummy 게이지와 함께 설치하였다.

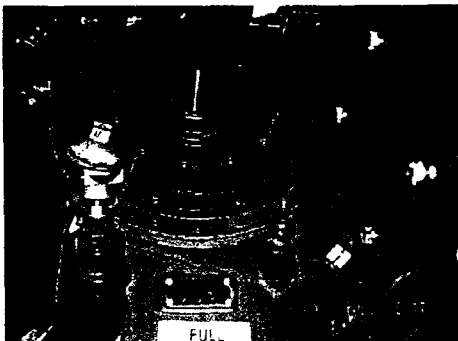


그림 5. 열전대 설치 모습 (1차 감속구동장치)

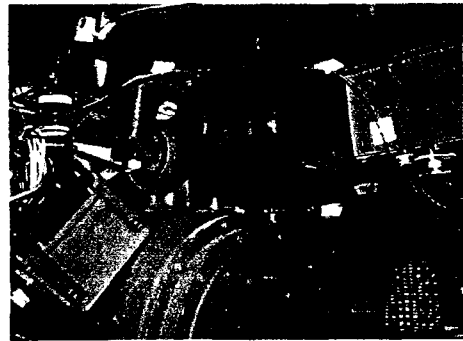


그림 6. 진동센서 설치모습

3. 시험결과

3.1 토오크 및 기어응력 측정 결과 및 분석

그림 7. 은 최고속도 100 km/h 까지 가속할 경우의 동력전달축에서 토오크 측정 결과로써 위 그래프는 속도, 아래는 토오크를 나타낸다. 속도가 증가하면서 토크는 (-) 방향으로 증가하고 있으며, 가속도가 거의 일정할 경우 발생하는 토오크는 거의 일정한 값을 나타내고 있다.

그림 8. 은 최고속도 170km/h 까지 가속시 및 제동시의 토오크 측정결과이며, 제동시 속도가 감소할 경우 발생하는 토오크는 가속시와 반대로 (+) 방향으로 증가하고 있다. 가속시 동력전달 축에 발생하는 최대 토오크는 약 1,220kg.m 이며, 제동시에는 평균 1,043 kg.m 의 토오크가 전달되고 있다. 동력전달축(tripod shaft)의 제작사양에 의하면 과부하에 의한 파손시 토오크(torque at breaking)는 4,400 kg.m 이므로 현재까지의 시험결과에 의하면 동력전달축의 제작사양보다 훨씬 작은 토오크가 작용하고 있으므로 안전에 문제가 없을 것으로 판단된다.

기어응력의 측정은 단품상태에서 설치한 게이지가 시운전 차량에서 결선을 완료하고 측정한 결과 신호가 양호하지 못하였으므로 동력전달축에서 측정한 토오크를 기준으로 기어에 작용하는 응력을 검토하였다. 토오크 측정 및 분석결과에서 100km/h 속도까지 가속시 토오크가 최대 1,124kg.m 이므로 이때 기어에 작용하는 이뿌리 필렛부위의 응력으로 환산하면 255 MPa 이다. 170km/h 속도까지 가속시 동력전달축의 토오크가 평균 1,100kg.m, 감속시 토오크가 1,043kg.m 이므로 이때 기어에 작용하는 이뿌리 필렛부위의 응력은 가속시 249 MPa, 감속시 236MPa 이다. 기어의 실물피로시험 결과는 비파괴 반복하중수 $N=3 \times 10^6$ 의 피로한도(fatigue limit)는 응력전폭 값으로 약 419MPa이므로⁽²⁾ 위 시험결과로 볼 때 피로한도 이하이므로 충분히 안전하다고 할 수 있다.

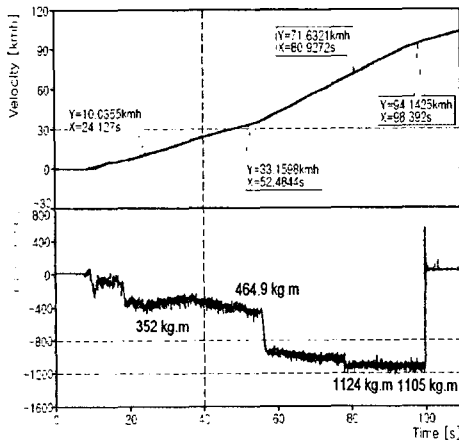


그림 7. 100km/h 가속시 동력전달축의 토오크 측정결과

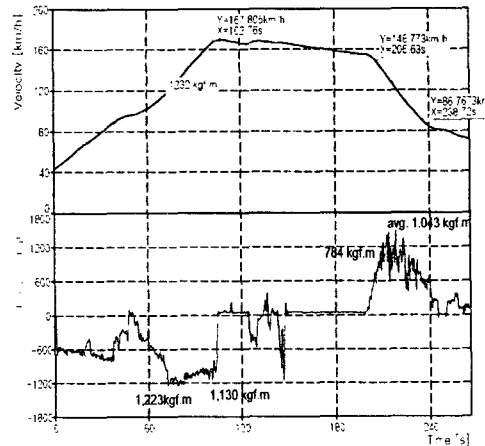


그림 8. 170km/h 가속시 동력전달축의 토오크 측정결과

3.2 리액션암 응력 측정 및 분석

그림 9. 는 130km/h 가속시의 리액션암에 발생한 응력을 나타내고 있으며 그림 10. 은 230km/h 주행시의 리액션암에 발생한 응력을 측정한 결과이다. 그림과 같이 주행중에 감속구동장치 및 대차의 진동에 의해 리액션암의 응력은 거의 발생하지 않지만, 초기 모터의 구동에 의한 토오크 발생시 신호가 정적으로 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 결과로 볼 때 리액션암의 응력은 감속구동

장치에 의해 전달되는 토오크에 비례하며, 진동에 의한 영향은 거의 없음을 알 수 있다.

그림 9. 의 속도 그래프에서 첫번째 신호는 천안방향으로 주행 중 측정된 리액션암의 응력이고 두번째 신호는 오송방향으로 진행시 측정된 리액션암의 응력 신호이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 리액션암에 발생하는 응력은 모터 및 감속구동장치의 회전방향에 따라 인장 혹은 압축응력이 작용함을 알 수 있다. 130, 230km/h 속도시에 발생한 응력의 최대치는 각각 34, 32Mpa 로 유사한 수준을 나타내고 있다. 리액션암에 발생된 신호는 거의 정적인 하중이지만 모터의 정회전과 역회전을 하나의 사이클로 보아 최대 진폭을 34 MPa로 할 경우 리액션암의 피로한도는 152 Mpa 이므로⁽¹⁾ 현재까지의 시험결과로는 안전한 것으로 판단된다.

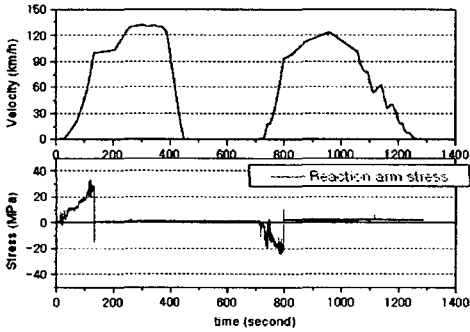


그림 9. 리액션에 작용하는 응력 측정결과 (130km/h)

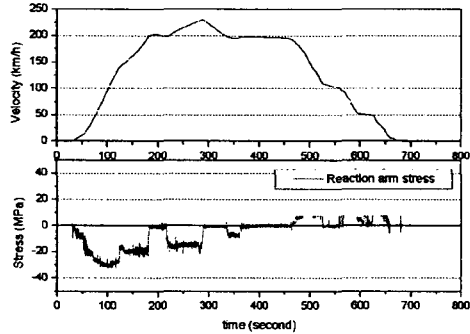


그림 10. 리액션에 작용하는 응력 측정결과 (230km/h)

3.3 온도 측정 및 분석

그림 11. 은 250km/h 주행시 속도변화이며, 그림 12. 는 250 km/h 로 주행시 속도변화에 따른 감속구동장치의 온도변화를 측정된 결과이다. 초기 주위온도(대기온도) 3℃에서 최고온도는 동력차 1차 감속구동장치에서 약 56℃ 로 계측되었으며, 2차 감속구동장치 보다 1차 감속구동장치의 온도상승량이 더 큼을 알 수 있다. 또한, 동력차용 감속구동장치가 동력차채용 감속구동장치보다 온도상승량이 더 크게 나타났다. 현재까지의 온도측정 결과 감속구동장치 각 베어링 및 윤활유 부분의 이상발열에 의한 과도한 온도상승은 발생하지 않았다.

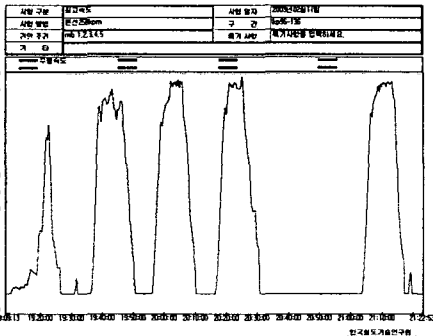


그림 11. 온도측정 시험시(250km/h 주행) 속도변화

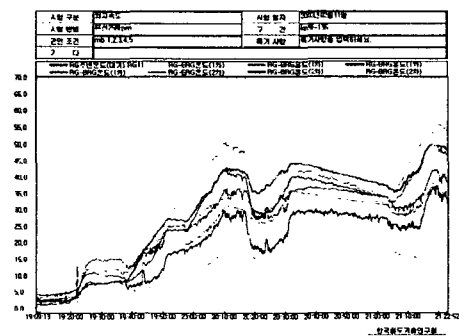


그림 12. 감속구동장치의 온도측정 시험결과 (250km/h 주행)

3.4 진동측정 및 분석

감속구동장치에서 발생할 수 있는 진동성분은 기어의 전체적인 마모, 편심축, 치형오차에 의해 기어의 물림주파수 성분과 기어의 편심, 회전불균형 등에 의한 회전주파수 성분으로 구분할 수 있

다. 그림 13. 은 190km/h 로 차량 운행시 동력차 감속구동장치 의 진동가속도를 계측하여 주파수 분석한 결과이고, 그림 14. 는 동력객차 감속구동장치 의 진동가속도를 주파수 분석한 결과이다. 대체로 2차 감속구동장치 의 진동이 1차 보다 크게 나타나고 있으며, 동력차의 경우 회전주파수 성분 (37Hz)이 진동에 영향을 미치고 있고 동력객차의 경우 100Hz 미만의 진동이 전반적으로 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 진동가속도 데이터를 속도 데이터로 변환하여 표시한 그림이 그림 17., 그림 18. 과 같다. 진동속도 데이터를 보면, 동력차의 경우 무부하 시험기준을 적용하였을 때 기준인 VR8을 만족하는 수준이지만, 동력객차의 경우 100Hz 미만의 진동이 크게 넘어서고 있다. 이와 같은 결과를 볼 때 무부하 시험의 기준을 시운전 차량에 적용하는 것은 무리가 있으며, 지속적인 시험 및 데이터 분석, 축적이 필요하다.

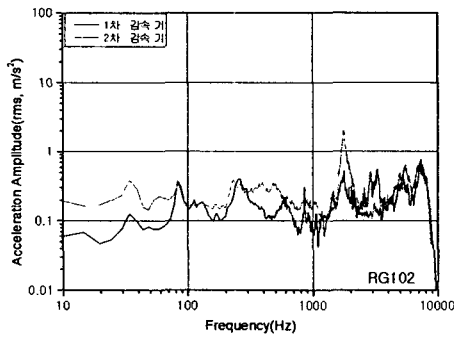


그림 13. 190km/h 운행시 동력차(RG102) 감속구동장치 진동가속도

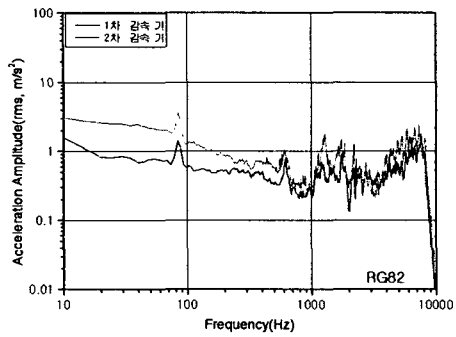


그림 14. 190km/h 운행시 동력객차(RG82) 감속구동장치 진동가속도

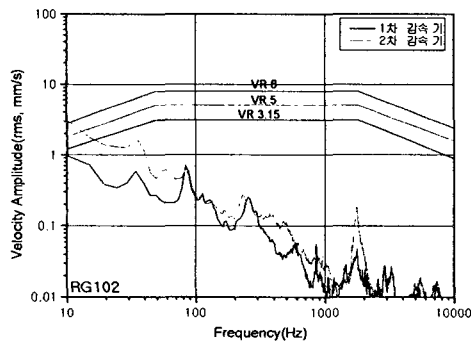


그림 15. 190km/h 운행시 동력차(RG102) 감속구동장치 진동 속도

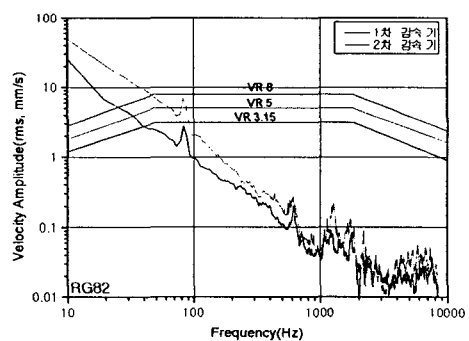


그림 16. 190km/h 운행시 동력객차(RG82) 감속구동장치 진동 속도

4. 결론

최고속도 350km/h의 한국형 고속전철 시운전 시험차량에 조립된 감속구동장치의 성능확인을 위하여 토오크 및 온도, 진동 등의 계측시스템을 구축하였으며, 시운전 시험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 170 km/h 까지 가속시 동력전달 축에 전달되는 토오크 측정결과 최대 1,223kg.m 이며, 동력 전달축(tripod shaft)의 제작사양에 의한 파손시 토오크(torque at breaking) 4,400 kg.m 보다 훨씬

작은 토오크가 작용하고 있으므로 피로수명을 고려하더라도 안전에 문제가 없을 것으로 판단된다. 토오크 측정 결과를 이용하여 기어에 작용하는 이뿌리 필렛부위의 응력을 계산한 결과 최대 249 MPa의 응력이 작용하며, 피로한도 이하이므로 충분히 안전하다.

2) 130, 230km/h 속도시에 측정한 리엑션암의 응력 최대치는 각각 34 MPa이며, 리엑션암의 피로한도는 152 Mpa 이므로 현재까지의 시험결과로는 안전한 것으로 판단된다.

3) 250km/h 주행시 측정한 감속구동장치의 온도상승은 동력차 1차 감속구동장치에서 약 56℃로 계측되었으며, 2차 감속구동장치 보다 1차 감속구동장치의 온도상승량이 더 크고, 동력차용 감속구동장치가 동력객차용 감속구동장치보다 온도상승량이 더 크게 나타났다. 현재까지의 온도측정 결과 감속구동장치 각 베어링 및 윤활유 부분의 이상발열에 의한 과도한 온도상승은 발생하지 않았다.

앞으로 계속적으로 한국형 고속전철(KHST)시운전 차량의 속도향상 및 시운전 시험을 통하여 운행상태에서 감속구동장치에 작용하는 하중이력을 측정하고 피로해석을 통하여 최종적으로 안전성여부를 평가할 계획이다.

후기

본 연구는 2002년도 건설교통부/과학기술부/산업자원부에서 시행한 “고속전철기술개발사업”의 일환으로 수행된 연구결과와 일부이다.

[참고문헌]

1. 대차용 감속구동장치 개발 (2단계 2차년도 연차보고서), 고속전철 기술개발 사업 00-II-2-1-9, 한국DTS(주), 2001. 10
2. 이동형, 서정원, 최경진, 문경호, 김용기, “고속전철용 기어의 굽힘피로강도 시험 및 평가”, 2001년도 철도학회 추계학술대회, 2001.10
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. 金屬材料疲勞強度データ集, 日本材料學會, 1982