

열차의 운행패턴과 속도에 따른 한국형 고속전철용 판토타그래프의 접촉력과 가속도 거동의 변화 경향

Variation Trends of the Contact Force between Pantograph-Catenary and Acceleration Behavior According to the Train Running Speed and Driving Pattern in Korean High Speed Train

목진용*¹, 김영국¹, 박춘수¹, 김기환¹

Jin-Yong Mok*, Young-Guk Kim, Choon-Soo Park, Ki-Hwan, Kim

Abstract

The pantograph for Korean High Speed Train was developed and had been evaluating by through "G7-R&D project for home grown high speed train technology". In this study, in mechanical aspect, the variation trend of contact force between pantograph and catenary according to the train running speed and driving pattern is conducted. A measuring system for current collecting performance and mechanical characteristics is used for this study, developed and installed on the prototype Korean High Speed Train, and physical characteristics were measured while the KHST runs on the test track. Through this study, remarkable trends of variation are found and analyzed from measured acceleration and vertical contact force between the pan head in pantograph and contact wire in catenary system according to the driving pattern and the train raised a running speed up to 300km/h.

1. 서론

지난 '96년부터 착수, 추진해 온 G7 고속전철기술개발 사업을 통해 6년 간 자체기술로 개발하여 완성한 한국형 고속전철 시제 개발열차는 현재까지 경부고속철도 고속 시험선에서 최고속도 300km/h 이상의 시운전 시험을 성공적으로 진행 중에 있다. [1] 고속열차의 최고 운행 속도를 결정짓는 핵심 기술은 여러 분야에 다양한 기술이 있으나 그 중 하나가 가선계로부터 집전장치(판토타그래프)를 이용하여 안정된 전력에너지를 공급받는 집전 기술이다. 이 집전 기술은 열차가 목표로 하는 최고속도로 주행할 때까지 열차의 지붕에 탑재된 집전장치가 어떤 속도대역에서도 열차의 진동이나 허용 가능한 기준값 이내의 가선계(전차선) 시설조건 등과 같은 외적인 변수에 관계없이 가선과 안정적으로 접촉, 추종함으로써 이션(loss of contact)을 최소화하면서 전력을 공급받을 수 있도록 구현하는 기술이며, 이런 이유에서 충분한 기술과 경험을 보유한 선진 철도국에서조차 기술이전을

꺼리는 매우 중요한 핵심 기술이다.

G7 고속전철기술개발사업을 통해 이러한 기술확보의 필요성이 큰 집전장치를 국내 연구기관과 산업계의 기술진이 자체 기술로 설계, 개발함으로써 고속철도의 중요한 핵심기술을 보유하게 된 점과, 현재도 개발한 기술의 신뢰성 입증과 안정화된 수준까지 기술완성도를 높이기 위한 시험선에서의 여러 가지 특성시험과 안정화 시험을 통해 기술적 성능개선 연구의 진전을 보고 있음은 매우 고무적인 기술발전 성과로 볼 수 있을 것이다. [2]

한국형 고속전철 시제열차는 동력차 2량과 동력객차 2량, 객차 3량 등 총 7량으로 편성되어 있고, 가선계의 전차선으로부터 열차에 25kV의 고압전원을 공급받는 판토타그래프(pantograph)는 전·후부 동력차 지붕에 각 1조씩 설치되어 있으나, 열차의 운행 때는 진행방향을 기준할 때 후부 동력차에 탑재된 판토타그래프 1조만을 상승시켜 가선에 붙여 집전하는 방식을 적용하고 있다.

(정상운행 모드 시, Fig. 1 참조)

¹ 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단

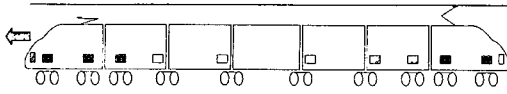


Fig. 1 Pantograph Arrangement in Train Set of KHST

따라서 열차를 운행할 때, 여러 조의 판토틀라프를 동시에 가선에 붙여 집전하는 전동차나 분산식 고속전철 시스템에 적용되는 판토틀라프에 비해, G7 열차의 판토틀라프는 상대적으로 훨씬 높은 신뢰도와 안정적인 가선 추종성이 요구되며, 이러한 시스템 요구 수준까지 집전 성능을 향상시키기 위해서는 열차운행 중 판토틀라프가 가선계와 상호 작용하며 가지는 동적 거동에 대한 다양한 관점의 실험적 특성평가와 이에 기초한 성능변수의 최적화 연구가 필연적으로 수반되어야 한다.

본 연구에서는 이러한 관점에서 본선 시운전시험을 통해 획득한 한국형 고속전철 시제열차의 운행패턴에 따라 변화하는 집전장치의 거동특성 측정결과를 보이고 그 경향을 분석함으로써 고속철도용 집전장치의 설계 및 성능변수 최적화와 접촉력 해석 및 안정화 연구에 유용한 기초 자료로 활용될 수 있도록 하고자 한다.

2. 집전장치-가선 간 접촉력과 동적 거동

2.1 집전장치-가선 간 접촉 운동

열차가 주행할 때 25kV의 전력을 공급하는 가선계 전차선(Catenary)과 열차에 탑재된 판토틀라프의 구조는 Fig. 2, 3과 같으며 열차 운행 중 전차선과 판토틀라프 집전판(Pan head) 사이의 미끄럼 마찰을 유도 작용하는 접촉력을 가장 안정적으로 유지함으로써 가선 추종성을 향상하는 기술이 앞에서 언급한 집전 기술의 핵심이다.

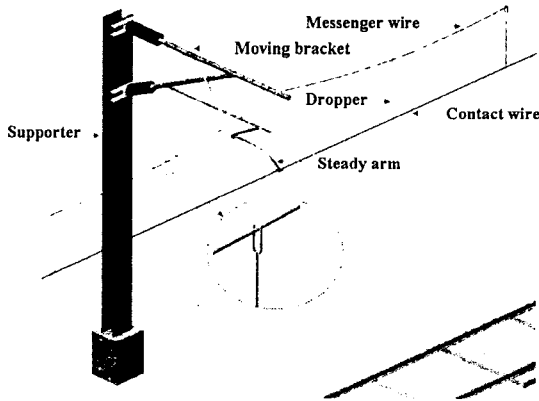


Fig. 2 Schematic View of Catenary System in High-Speed Line

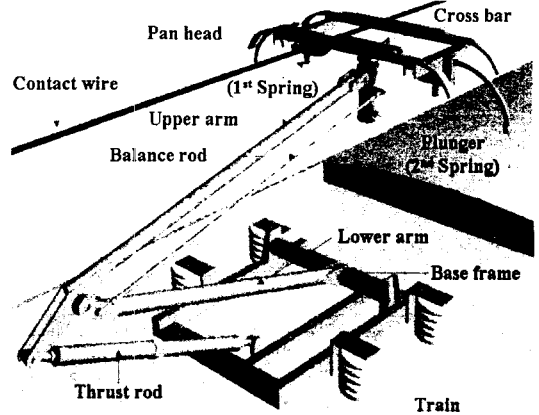


Fig. 3 Schematic View of Pantograph in KHST

2.2 집전장치-가선 간 접촉력 측정 방법

전차선과 판토틀라프 집전판(Pan Head) 사이의 접촉력은 Fig. 3의 평형상태도에서 보이는 작용력들에 대해 아래 (1), (2)의 평형식에서 표현되는 $F_{c(mean)}$ 값을 측정하여 구할 수 있으며 측정은 접촉력 특성 분석에 필요한 좌·우뒀 전단력과 가속도 등 물리량 신호를 13개 채널로 분류, 수집할 수 있도록 구축된 한국형 고속전철 시제열차의 집전성능 계측시스템을 활용하였다. [3],[4]

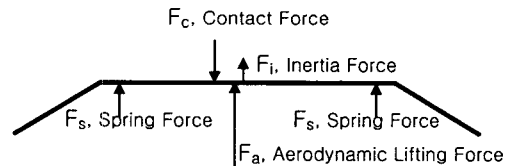


Fig. 4 Equilibrium condition between Pan Head and Catenary

$$F_i = -F_c + F_a + F_s \quad (1)$$

F_i = 관성력(inertia force)

F_c = 접촉력(contact force)

F_a = 양력(lifting force)

F_s = 스프링 반력(spring force) 압상력

식 (1)에서 판토틀라프 집전판의 가속도 운동에 따른 관성력 F_i 는 평형 위치를 기준으로 상·하 변화하므로 평균값은 "0"으로 간주할 때, (1)식은 평균 접촉력 항에 대하여 다음 식과 같이 표현할 수 있다. [5],[6]

$$F_{c(mean)} = F_a + F_s \quad (2)$$

여기서, $F_{c(mean)}$ = 집전판과 가선의 평균 접촉력

3. 집전장치-가선 간 접촉력 측정 결과

3.1 열차 주행 중 집전장치-가선 간 접촉력 경향

한국형 고속전철 차량이 고속선로를 최고속도 250~300km/h의 속도까지 주행할 때, 앞 절에 설명한 방법을 적용하여 판토품그래프(집전장치)가 가선계의 전차선을 따라 접촉하면서 집전하는 경우, 주행시간과 열차속도 변화에 따른 실시간 평균접촉력과 변화경향을 계측한 결과, 대표적으로 아래 Fig. 4의 (a)~(d)에서 보는 측정 결과들을 얻을 수 있었다.

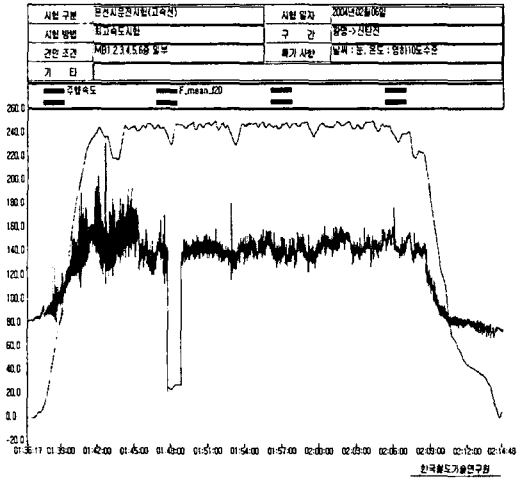


Fig. 5 (a) Overall Contact Force up to 250 km/h

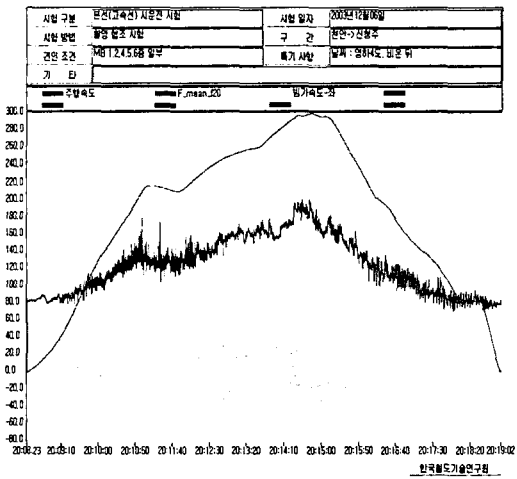


Fig. 5 (b) Overall Contact Force up to 300 km/h (I)

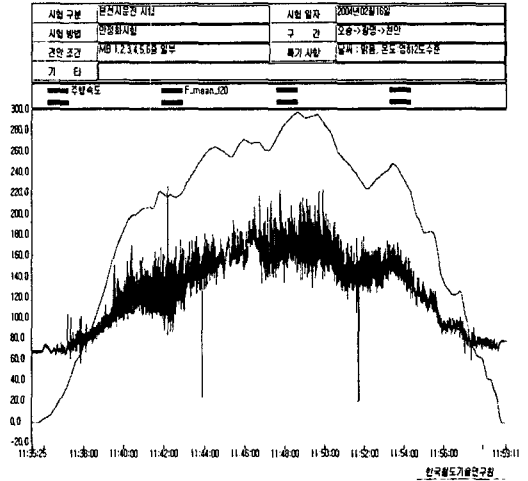


Fig. 5 (c) Overall Contact Force up to 300 km/h (II)

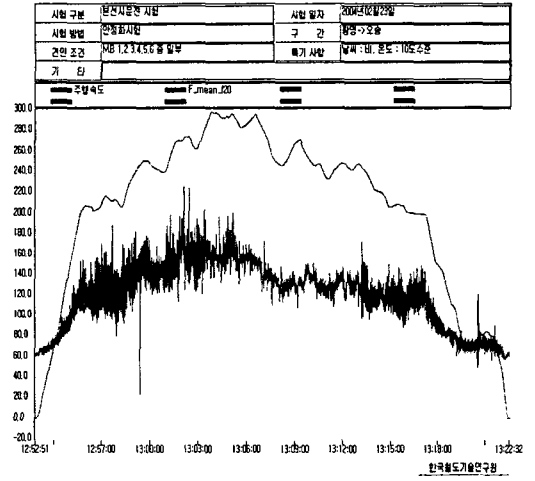


Fig. 5 (d) Overall Contact Force up to 300 km/h (III)

위의 Fig. (a)~(d)에 보여진 4회의 가선계 전차선과 집전장치간 접촉력 계측 결과를 통해 각각의 시험결과에 공통적으로 나타난 2가지 경향에 주목하여 보았다. 그 첫째는 열차가 속도(Red; 주행속도)를 높여가며 가속(Powering)하는 운행구간과 속도를 줄여 감속(Braking)하는 운행패턴 구간을 비교할 때 집전장치가 가선과 접촉하는 접촉력의 변화 폭이 크게 차이를 보인다는 점이었으며, 또 다른 경향 하나는 열차속도가 급격하게 증가하는 패턴 즉, 급가속(full Powering) 운행패턴 구간에 비해서 정속 또는 타행(Coasting) 운행패턴으로 운행하는 구간에서는 상대적으로 접촉력 변화 폭이 훨씬 작아져 안정적이며 정속한 거동을 보인다는 점이였다.

이는 다음의 구간별 특성분석으로 재확인 할 수 있었다.

3.2 주행패턴 별 집전장치의 접촉력 변화 경향

(1) 가속(Powering)/감속(Braking) 운행패턴 구간별 비교

열차의 가속(Powering) 운전 시와 감속(Braking) 운전 시 가선에 대한 집전장치의 접촉력 변동폭을 비교한 결과 Fig. 6, 7에 보이는 대조적인 결과를 얻었으며, 이 결과로부터 열차가 가속 운행 시 집전장치는 감속 운행 시보다 시속 150km/h 이상 고속대역에서 약 8.5배 이상의 접촉력 변동폭을 갖는 경향을 파악할 수 있었다.

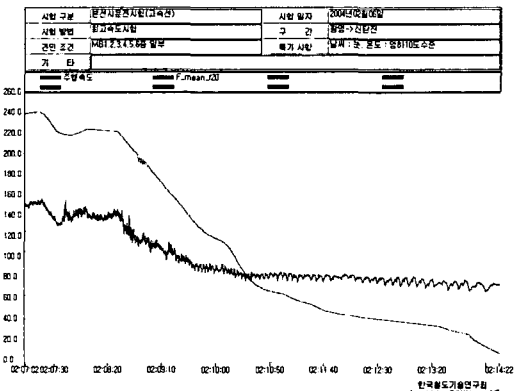
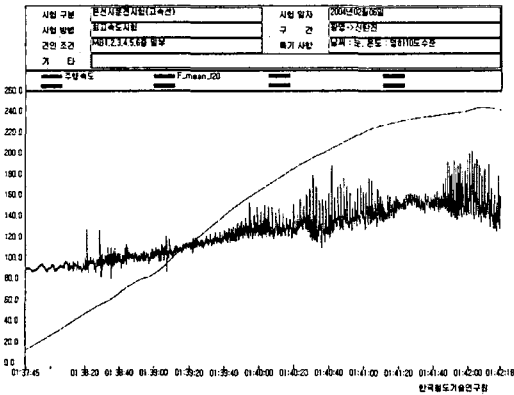


Fig. 6 Measured Contact Force in Powering (Upper) vs. Braking (Lower) Mode (I)

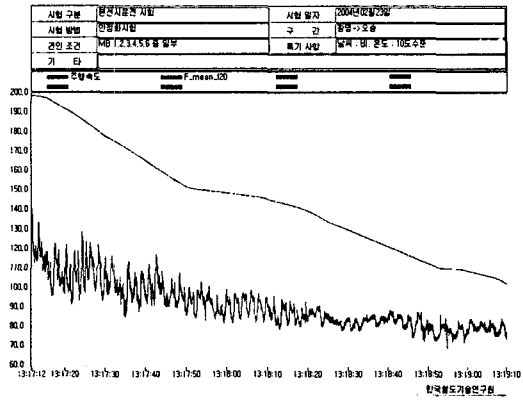
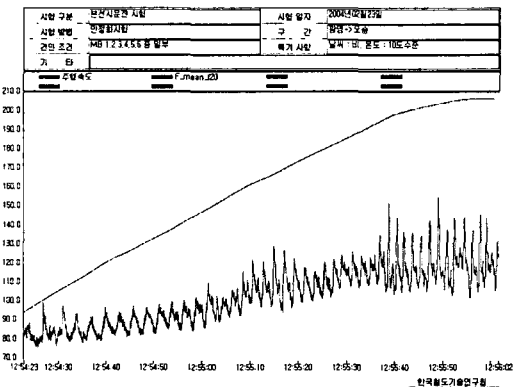


Fig. 7 Measured Contact Force in Powering (Upper) vs. Braking (Lower) Mode (II)

(2) 가속(Powering)/정속(Coasting) 운행패턴 구간별 비교

열차의 가속(Powering) 구간과 정속(Coasting) 운행패턴 구간에서 접촉력 변화를 비교한 결과 아래 Fig. 8과 같았으며, 이를 통해 집전장치는 열차가 가속 운행시 정속운행 시에 비해서 시속 150~300 km/h 구간에서 약 6배 이상 큰 접촉력 변동폭의 차이를 가지는 경향을 알 수 있었다.

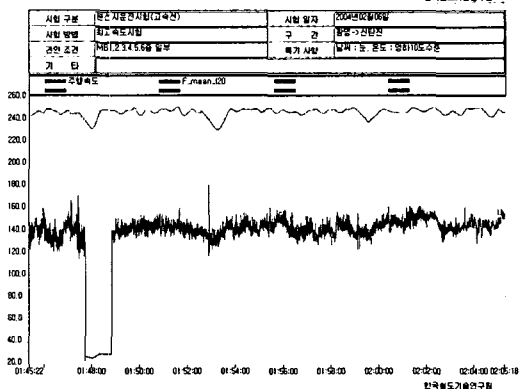
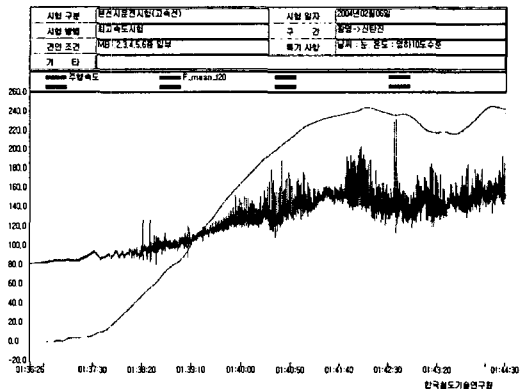


Fig. 8 Measured Contact Force in Powering (Upper) vs. Coasting (Lower) Mode

3.3 주행패턴 별 집전장치의 가속도 변화 경향

(1) 가속/감속 및 정속 운행패턴별 가속도 변화

집전장치의 가속도 거동에 대하여는 앞 3.2절 Fig. 6에 보인 가/감속 운행패턴별 접촉력 변화 경향과 대비, 같은 조건에서 비교하기 위해 동일 구간의 가/감속 및 정속 운행패턴별 가속도 거동을 비교한 결과, 아래 Fig. 9와 같이 가속도 거동은 열차 운행패턴에는 전혀 무관하고 열차 속도에 따라서만 변화함을 알 수 있었다.

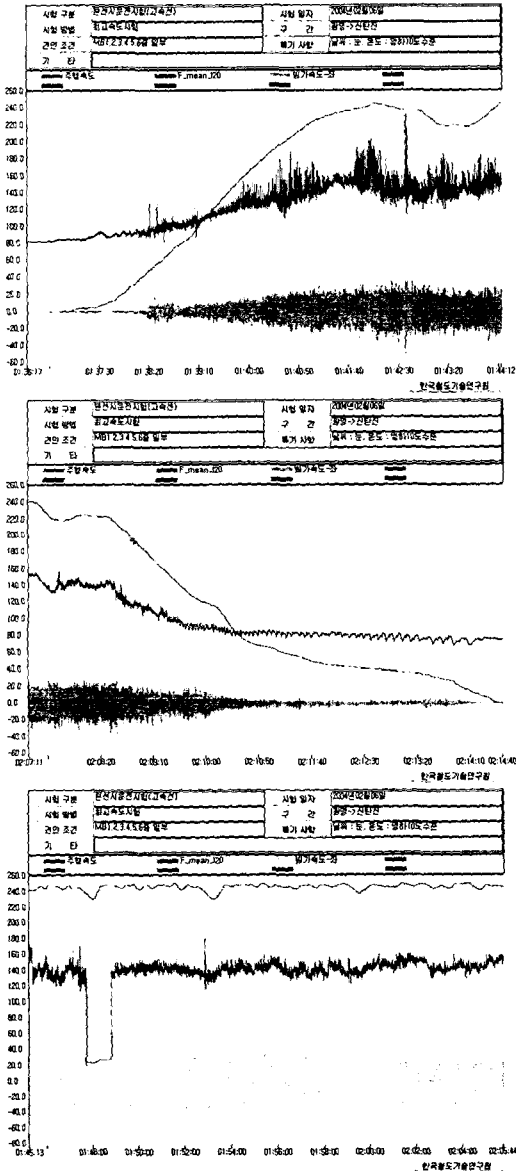


Fig. 9 Measured Acceleration of Pantograph in Powering (Upper), Braking (Intermediate) and Coasting Mode (Below)

4. 결론

위에서 논한 바와 같이 본 연구에서는 고속열차의 운행패턴에 따른 판토티그래프의 접촉력 변화와 가속도 거동의 경향을 파악하기 위하여 한국형 고속전철 시제 열차의 본선 시운전시험을 통해서 열차 운행패턴을 가속 (Powering), 감속(Braking) 및 정속운행으로 구분하여 각 경우 열차 주행속도에 따른 판토티그래프의 접촉력 변화와 가속도 거동에 대한 측정 결과를 얻었으며, 그 경향과 특성의 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 가속/감속 운행패턴 별 집전장치의 접촉력

고속열차가 최고속도 300 km/h까지 운행할 때 집전장치의 가선에 대한 접촉력은 열차의 가속, 감속 운행패턴에 따라 그 변동폭이 크게 다르며, 가속운행 시에 감속운행 시보다 시속 150km/h 이상에서 약 8.5배 이상 큰 폭으로 접촉력 변동 폭이 커지며 가(감)속도와 상관 관계를 가진다.

(2) 가속/정속 운행패턴 별 집전장치의 접촉력

고속열차가 최고속도 300 km/h까지 운행할 때 집전장치의 가선에 대한 접촉력은 열차의 가속/정속 운행패턴에 따라 큰 폭으로 변화하며, 시속 150~300 km/h 구간에서 가속 운행 시 정속운행 시에 비해 약 6배 이상 큰 폭의 접촉력 변동폭을 가지며 열차 가속도의 영향을 받는다

(3) 가속/감속 및 정속 운행패턴별 집전장치의 가속도

한국형 고속전철 판토티그래프의 가속도 거동은 열차의 가/감속 운행패턴이 바뀌어도 전혀 영향을 받지 않으며, 다만 열차의 주행속도의 증가(감소)에 따라서만 선형적으로 증가(감소)하는 특성을 가지고 있다.

이러한 경향들은 케이블처럼 유연한 연속체 특성을 갖는 가선계 전차선(Contact wire)과 판토티그래프 집전판(Pan head)이 연속적으로 미끄럼 접촉할 때 전차선의 대변형 특성을 고려하여 열차의 가속운동과 이에 대항하는 가선의 저항력과의 관계를 동역학적으로 해석하고 원인을 규명하는 접근이 필요할 것으로 보인다.

그러나 현재까지 연구된 집전장치의 동특성 해석방법들은 주로 가선계와 집전시스템을 단순화 또는 선형화한 근사 해법을 이용하거나 가선계를 집중질량으로 연결해 동역학적으로 해석하는 방법을 이용해 왔으며, 열차 운행패턴에 따른 접촉력 변화 특성 등을 고려한 실제 해를 구하는 면에서는 한계를 가진 것으로 보인다. [7],[8]

따라서, 앞으로도 고속열차용 집전장치의 설계 및 성능 파라미터 최적화 연구와 실제에 더 근접한 성능 예측을 구현하는 동역학적 해석기법에 대한 연구가 지속적으로 필요할 것으로 보며, 그 연구에는 열차 운행패턴과 속도에 상관 관계를 갖는 판토티그래프의 접촉력과 가속도 변화 경향을 주요 거동특성으로 고려하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 건설교통부 고속철도기술개발사업의 일환으로 수행되었으며, 연구에 도움을 주신 관계자 여러분들의 지원에 감사 드립니다.

참고 문헌

1. "G7 고속전철 열차시험 및 성능평가 기술개발(I,II)" 최종보고서 (01-II-1-0-1), 한국철도기술연구원, 2002.
2. "고속전철 판토틀라프 개발" 2단계 2차년도 연차보고서 (00-II-2-1-10), 한국생산기술연구원, 2001.
3. "한국형 고속전철용 판토틀라프의 거동특성과 열차속도와의 상관관계와 경향" 목진용 외, 소음진동공학회 추계학술대회 논문집, 2003.
4. "고속전철 집전장치의 성능계측 결과 및 분석" 서승일 / 목진용 외, 철도학회 춘계학술대회 논문집", 2003.
5. "Study on the Method of Measuring the Contact Force between Pantograph and Contact Wire", M. Ikeda and T. Usuda, , RTRI Report Vol. 14, No. 6, 2000.
6. "Qualification Test Procedure Train-set Pantograph Test", Korea High Speed Rail, 2001.
7. "High-Speed Contact Performance of a Catenary-Pantograph System", Katsushi Manabe, JSME Int' l Journal, Vol. 32, No. 2, pp.31-40, 1989.
8. "Gasendo-S2 Manual", RTRL, 1994