ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 66, No. 2, pp. 453~458, 2017
http://doi.org/10.5370/KIEE.2017.66.2.453

강체전차선로 고속화를 위한 설계파라미터 민감도 분석 연구

A Study on a Sensitivity Analysis of Design Parameters for the Speed-up of Overhead Rigid Conductor System

이 기 원† · 조 용 현* · 권 삼 영* · 박 영*
(Kiwon Lee · Yong Hyeon Cho · Sam-Young Kwon · Young Park)

Abstract - R-Bar (Overhead Rigid Conductor system) has been lately used for the speed of over 200 ㎞/h in Europe, while it has been developed and used for the max. speed of 120 ㎞/h in Korea. Because R-Bar has advantages of reduction of tunnel cross sectional area and maintenance, its development for more high-speed is urgent in Korea having many mountain area. Therefore a sensitivity analysis of design parameters for the speed-up of R-Bar has performed in this study. For the analysis, we have developed a program for the prediction of dynamic characteristics between a pantograph and R-Bar. The program was evaluated with the actual test result and a current collection performance according to the parameters such as a distance between brackets, a stiffness of bracket and of R-Bar rail was predicted with the program.

Key Words : Rigid conductor, R-Bar, Overhead line, Speed-up

1. 서 론

전기철도에서 열차에 전기를 공급하는 가공 전차선로는 그림 1 및 그림 2와 같이 커티너리(catenary) 방식과 강체 방식으로 나눌 수 있다. 커티너리 방식은 저속부터 최근 최고운영속도 400 ㎞/h급 전차선로까지 전속도 영역대에 걸쳐서 사용되고 있다[1]. 강체 방식은 R-Bar 또는 T-Bar 방식을 채택하고 있는데[2], 본 연구에서는 R-Bar 방식에 대한 속도향상에 대하여 분석하였다.

R-Bar 방식의 전차선로는 그림 3과 같이 알루미늄 합금 재료의 R-Bar 레일(Conductor rail)이 조가선 역할을 함께 하는 등 구조가 단순하여 커티너리 방식 전차선로와 비교하여 작은 공간에 설치가 가능할 뿐만 아니라 유지보수에 장점이 있다. 따라서 터널 공사비의 약 15% 절감할 수 있기 때문에 터널 혹은 지하구간에 주로 사용하고 있다[3]. 국내에서는 최근 최고속도 120 ㎞/h급 R-Bar를 개발하여[4, 5] 사용하고 있고, 유럽에서는 200 ㎞/h급 이상의 R-Bar를 개발하고 있는 실정이다.

C. Vera 등은 R-Bar 전차선로에 대하여 150 ㎞/h까지 속도향상을 위하여 R-Bar 레일의 강성과 지지점 간격 등에 대하여 연구를 수행하였다[6, 7]. 레일의 수직방향 강성을 올려서 지지점 간격을 늘리고 또한 열차운행속도를 150 ㎞/h까지 올릴 수 있는 방안 등에 대하여상용프로그램인 SIMPACK을 이용하여 연구하였

그림 1 커티너리 방식
Fig. 1 Overhead Catenary System (OCS)

그림 2 강체 방식
Fig. 2 Overhead Rigid Conductor System (R-Bar)

† Corresponding Author : High-Speed Railroad Research Center, Korea Railroad Research Institute, Korea
E-mail : kenlee@krri.re.kr
* High-Speed Railroad Research Center, Korea Railroad Research Institute, Korea
Received : December 8, 2016; Accepted : January 10, 2017

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

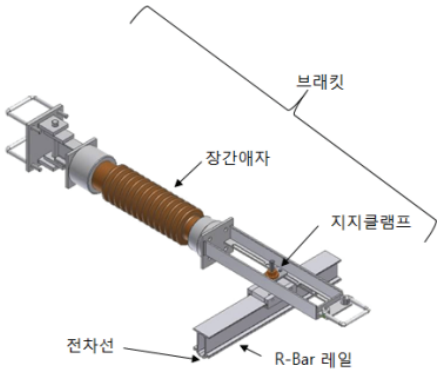

그림 3 R-Bar 시스템 구조
Fig. 3 Structure of R-Bar system

다. 또한 최근에는 최고속도 250 km/h까지 운행을 위한 레일의 강성 및 필요조건 등에 대하여 고찰한바 있다[8].

본 연구에서는 R-Bar시스템에 대하여 최고속도 250 km/h까지 속도향상하기 위하여 설계 파라미터인 R-Bar 레일의 강성, 지지점 간격 및 강성에 대한 민감도를 분석하였다. 자체 개발한 유한요소법(FEM)을 이용한 동특성 예측프로그램을 현장 시험결과와의 비교하여 검증하였고, 그 프로그램을 이용하여 속도향상에 가장 큰 영향을 미치는 설계파라미터를 제시하였다.

2. 설계파라미터 민감도 분석

2.1 동특성 예측 프로그램 검증

2.1.1 정특성

개발한 동특성 예측프로그램은 커티너리 방식의 전차선로/팬터그래프간 동특성 예측 프로그램[12, 13]을 강체 방식의 전차선로를 모델링할 수 있도록 수정하였다. 전차선로 정적처짐에 대한 모델을 설명하면 정적 상태에서 강체 전차선을 유한요소를 이산화하여 얻은 강성 행렬을 K, 유한요소의 절점에 작용하는 하중을 나타내는 힘 벡터를 F, 절점에서의 변위 벡터를 U라 하면, 이들은

$$KU = F \tag{1}$$

의 관계를 가진다. 미지의 변위를 u_1이라 하고, 현장에서 측정한 지지점에서의 변위와 같이 기지의 절점 변위를 $\bar{u}_2$라 표시하면, 유한요소 절점에서의 변위벡터는 미지의 변위 u_1과 기지의 변위 $\bar{u}_2$의 조합, 즉 $U = < u_1 \ \bar{u}_2 >^T$로 표시할 수 있다. 지지점에서의 변위를 $\bar{u}_2$로 식 (1)에 대입하여 오른 편으로 이항하여 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$K_2 u_2 = F - K_1 \bar{u}_1 \tag{2}$$

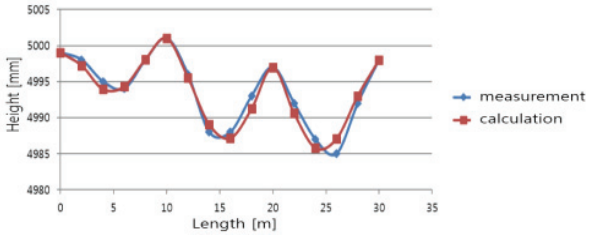

그림 4 정적 상태에서 전차선 높이 비교
Fig. 4 Comparison for contact wire height in a static condition

미지의 변위, 즉 지지점 이외의 절점에서의 변위 u_2는 식 (2)를 풀어 얻을 수 있다.

대불터널 내 일부구간에서 약 2 m 간격으로 전차선의 높이를 레이져 거리 측정기를 이용하여 측정한 결과와 프로그램을 이용하여 전차선 처짐을 계산한 결과는 그림 4와 같다. 지지점의 위치를 나타내는 길이 0, 10, 20, 30m에서는 측정결과와 해석결과가 정확하게 일치하고 있다. 이는 식 (1)의 경계조건으로 지지점에서의 변위를 대입하였기 때문이다. 그림 4에 나와 있는 지지점 이외의 절점에서 변위를 보면 측정결과와 식 (2)를 사용하여 계산한 결과가 거의 일치하였고, 약간의 차이를 보이는 것은 지지점에서 브래킷에 의한 구속조건이 조금 다르고 측정오차로 인한 것으로 판단된다.

2.1.2 동특성

동특성 예측 프로그램을 검증하기 위하여 대불터널에서 수행한 R-Bar와 팬터그래프간 집전성능인 접촉력에 대한 측정결과[9]와 비교하였다. 시험에 사용된 팬터그래프는 그림 5와 같이 차세대 전동차에 적용된 모델로서 EN50137[10]에 따라 접촉력 켈리브레이션을 수행하여 접촉력에 대한 신뢰성을 확보하였다. 그리고 적용된 팬터그래프에 대한 수학적 모델링은 그림 6과 표 1과 같이 제작사에서 제시한 모델을 사용하였다.

그림 5 측정용 팬터그래프
Fig. 5 Pantograph for the measurement

표 1 팬터그래프 모델링
Table 1 Modeling of the pantograph

파라미터	값	비고
집전판 질량, m1 [kg]	3.6	집전판 1개
팬헤드 스프링계수, k1 [N/m]	4,500	
팬헤드 스프링 마찰계수, f1 [N]	0	
상부파이프 동적 질량, m2 [kg]	7.3	
상부파이프 강성, k2 [N/m]	18,900	
마찰력, f2 [N]	±5	
하부파이프 동질량, m3 [kg]	12.5	
하부파이프 강성, k3 [N/m]	180 (15)	m3 작음 (m3 큼)
댐퍼 강쇠계수, c3[Ns/m]	50	
마찰력, f3 [N]	±5	
정력압상력, F stat. [N]	70	
양력, F aero. [N]	15@120 ㎞/h	

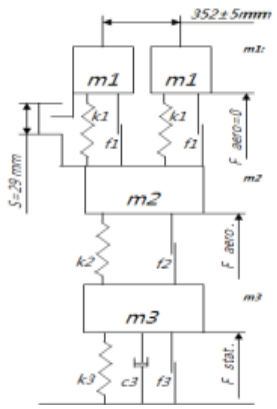

그림 6 집중질량 모델
Fig. 6 Lumped-mass model

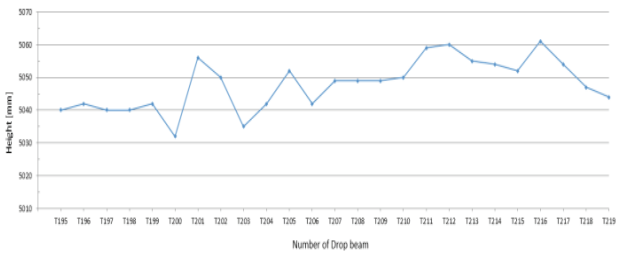

그림 7 지지점 높이 변화
Fig. 7 Height variation of contact wire at bracket

또한 정확한 비교를 위하여 데이터 처리구간에서의 레일상단에서 전차선하부까지의 상하높이인 지지점 높이를 레이져 거리 측정기로 측정하였고, 측정한 지지점의 높이변화는 그림 7과 같다. 측정한 지지점 높이를 적용하여 개발한 프로그램으로 전차선로를 모델링한 결과는 그림 8과 같다. 그림 7의 T195 하수강이 그림 8의 약 315m 지점의 지지점이다.

표 2 시뮬레이션 및 측정 결과 비교
Table 2 Comparison between simulation and measurement result

항목	측정결과 (N)	시뮬레이션 결과 (N)
평균 접촉력	77.9627	77.591
접촉력 표준편차	21.0591	23.8429
통계적 최대 접촉력	141.1401	149.1197
통계적 최소 접촉력	14.7853	6.0622

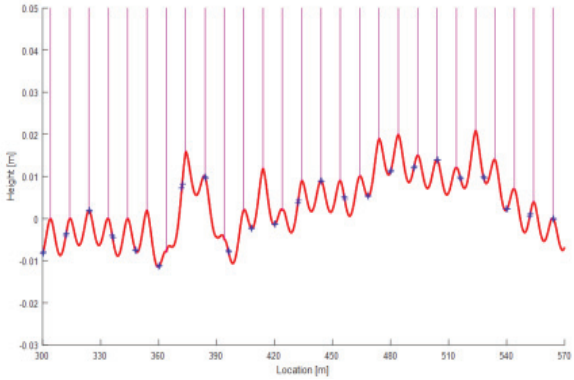

그림 8 전차선로 모델링
Fig. 8 Modeling of the R-Bar

위와 같이 모델링한 R-Bar 전차선로 조건에서 차세대 전동차가 약 89 ㎞/h 속도로 주행 시 시뮬레이션 프로그램을 통한 접촉력 해석 결과와 측정한 결과를 비교하면 표 2와 같다. 접촉력 변동과 관련한 접촉력 표준편차를 보면 시뮬레이션 결과가 약 2.7 N 정도 높았다.

가공 전차선로와 팬터그래프간 집전성능 예측 프로그램의 검증 방법에 대한 유럽규격인 EN50318[11]에서는 제시한 예제(reference model)를 먼저 검증하고 실제 측정결과와 비교하는 절차로 수행하게 하고 있다. 그러나 EN50318 규격은 가공전차선로에 대한 규격으로서 강체전차선로와 팬터그래프간의 동특성 예측 프로그램에 대한 검증코드는 현재 존재하고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 규격에서 제시하고 있는 집전성능에 가장 큰 영향을 미치는 접촉력 표준편차에 대한 검증파라미터에 국한하여 결과를 비교하였다. 규격에 따르면 측정한 결과와 시뮬레이션한 결과간의 비교에 대한 파라미터를 표 3에서 제시하고 있다. 팬터그래프/전차선간 접촉력 표준편차, 지지점 압상량 및 접촉점에서의 상하 변위 범위를 제시하고 있지만, 강체 전차선로의 특성을 고려하여 접촉력 표준편차를 비교하였다.

규격에서 제시하고 있는 접촉력 표준편차에 대한 정확성을 비교한 결과 약 12 %로 검증 범위 내에 있음을 확인하였다. 이와 같이 상대적으로 저속 구간에서 집전성능 예측 프로그램을 검증

표 3 EN50318에서 제시하고 있는 프로그램 검증 파라미터
Table 3 Parameters for the program validation according to EN50318

파라미터	정확성(%)
접촉력 표준편차	±20
지지점 압상량	±20
접촉점에서의 상하 변위 범위	±20

표 4 KTX-산천 팬터그래프 모델링
Table 4 Modeling of pantograph for KTX-Sanchun

기호	설명	값
m1	팬헤드 질량	5.5 kg
m2	상/하부 파이프 동적 질량	17.5 kg
k1	팬헤드 스프링 계수	6000 N/m
k2	상부파이프 강성	0.5 N/m
kp1	팬헤드 공력계수	0.002304 N·h2/㎞^{2}
kp2	상/하부 파이프 공력계수	0 N·h2/㎞^{2}
cm	하부 댐퍼(상방향)	5 N·s/m
cd	하부 댐퍼(하방향)	200 N·s/m
Fstat.	정적 압상력	70 N

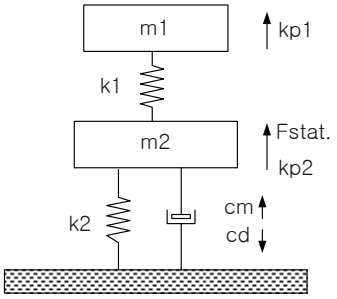

그림 9 팬터그래프 집중질량 모델
Fig. 9 Lumped-mass model for pantograph

한 후 더 높은 속도에 대하여 예측하는 절차는 커티너리 방식 전차선로와 팬터그래프간 동특성 예측 프로그램 개발[12]과 호남 고속철도에서 검증완료한 350 ㎞/h급 및 400 ㎞/h급 전차선로 설계시 등에 사용한 절차이다[1, 12].

2.2 동특성 예측을 통한 설계파라미터 민감도 분석

최고속도 250㎞/h까지 속도향상을 위한 동특성 예측에 사용한 팬터그래프는 KTX-산천 팬터그래프이다. 현재 국내에서 250㎞/h까지 상용화된 열차는 KTX-산천이 유일하기 때문에 KTX-산천에 적용한 팬터그래프를 고려하였다. 그림 9와 표 4는 사용한 팬터그래프에 대한 수학적 모델링이다. KTX-산천 팬터그래프의 경우 집전판 1개가 장착된 모델로 팬헤드 질량이 상대적으로 가볍고, 상하부 파이프를 같은 동적 질량으로 보는 2차원 모델로서

표 5 시뮬레이션 조건
Table 5 Simulation condition

파라미터		-20%	기준	+20%
지지간격(L)		6 m	8 m	10 m
R-Bar 프로파일	단면2차 모멘트(I)	267*104 ㎜^{4}	334*104 ㎜^{4}	400*104 ㎜^{4}
	탄성계수(E)	69,000 N/㎟	69,000 N/㎟	69,000 N/㎟
지지점 강성(K)		40,833 N/m	49,000 N/m	61,250 N/m

표 6 시뮬레이션 결과
Table 6 Simulation result

파라미터 변경	Fm [N]	σ [N]	σ/Fm [%]
기준	144.2	24.7	17.1
K*1.2	144.0	25.3	17.6
K*-1.2	144.0	24.6	17.1
EI*1.2	142.6	21.2	14.9
EI*-1.2	160.0	36.7	22.9
L*1.2	171.2	45.7	26.7
L*-1.2	130.4	6.1	4.7

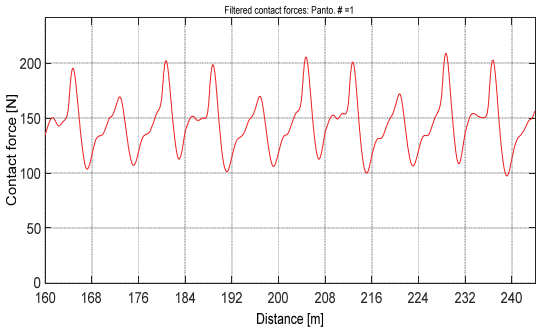

그림 10 기준조건에서 접촉력 파형
Fig. 10 Contact force variation at baseline

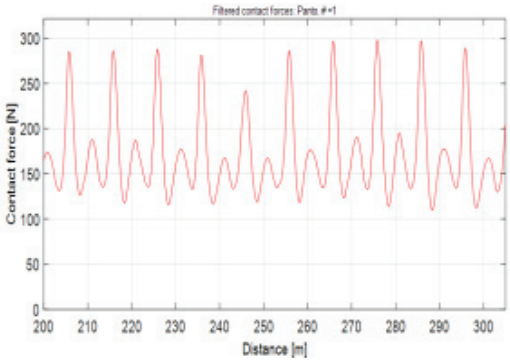

그림 11 L*1.2 조건에서 접촉력 파형
Fig. 11 Contact force variation at the condition of L*1.2

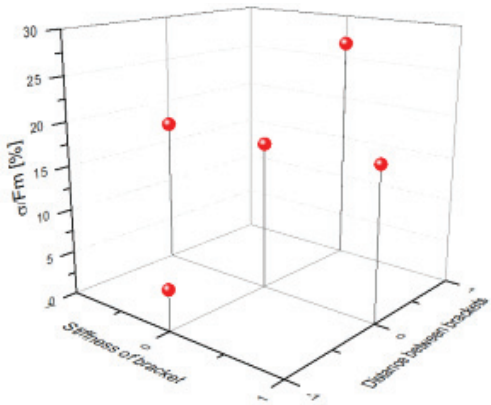

그림 12 지지점 강성 및 지지간격에 따른 집전성능
Fig. 12 Current collection performance according to stiffness of bracket vs. distance between brackets

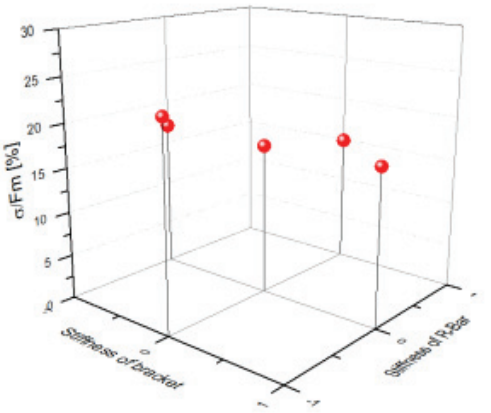

그림 13 지지점 강성 vs R-Bar 강성
Fig. 13 Current collection performance according to stiffness of bracket vs. stiffness of R-Bar rail

모델링에 사용한 파라미터는 제작사에서 제시한 파라미터를 적용하였다.

R-Bar 시스템의 주요 설계 파라미터인 지지간격, R-Bar 레일의 강성 및 지지점 강성이 집전성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 각각의 파라미터를 ±20 %로 변경하면서 시뮬레이션을 수행하였다. 기준 파라미터는 해외의 고속용 R-Bar 시스템에서 적용하는 파라미터를 참조하였고, 주요 설계 파라미터를 변경한 시뮬레이션 조건은 표 5와 같다.

위와 같은 R-Bar 전차선로 조건에서 KTX-산천 열차가 250 km/h 속도로 운영될 때 R-Bar 전차선로/팬터그래프간 동특성 시뮬레이션을 수행하였다. 전체 모델링중 양단의 고정점의 영향 등을 배제하기 위하여 가운데 10경간에 대한 데이터를 유효데이터로 하였고 그 결과는 표 6과 같다(여기서, Fm은 평균접촉력이고, σ는 접촉력 표준편차이다). 그림 10과 그림 11의 접촉력 파형을 보면 지지간격이 넓어지면 접촉력 변동이 커지고 표준편차가 올라가는 가는 것을 알 수 있다.

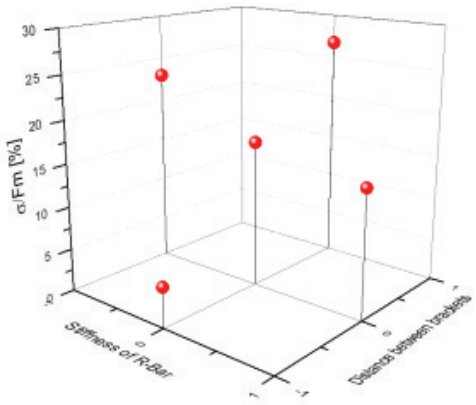

그림 14 R-Bar 강성 vs 지지간격
Fig. 14 Current collection performance according to stiffness of R-Bar rail vs. distance between brackets

설계 파라미터 변화에 따른 집전성능의 차이를 아래 그림에서 그래프로 제시하였다. 그림 12와 그림 13을 보면 지지점의 강성은 R-Bar프로파일의 강성 및 지지점 간격에 비하여 상대적으로 영향이 작다는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 12와 그림 14에서 고려한 설계 파라미터 중에 지지점 간격이 가장 큰 영향을 주는 파라미터임을 확인할 수 있다. 또한 기준에 비하여 지지점 간격을 줄였을 때 접촉력의 변동이 가장 작아서 집전성능에 가장 유리한 것을 확인할 수 있다.

3. 결 론

강체전차선로 시스템인 R-Bar 시스템은 국내에서는 120 km/h까지 개발하여 사용하고 있지만, 유럽에서는 최근 200 km/h 이상의 속도까지 운영가능한 R-Bar 시스템을 개발하여 사용하고 있다. R-Bar 시스템은 터널이나 지하구간의 터널 단면적을 줄일 수 있고 유지보수에 장점이 있어서 우리나라와 같이 산악지역이 많은 선로에서 열차의 고속화를 위하여 고속용 강체전차선로 개발이 시급한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 최고속도 250 km/h급 R-Bar시스템 개발을 위하여 설계 파라미터인 R-Bar 레일의 강성, 지지점 간격 및 강성에 대한 민감도를 자체 개발한 동특성 예측프로그램을 이용하여 분석하였다. 동특성 예측프로그램의 검증은 대불터널에서 측정한 접촉력 시험결과와의 비교를 통하여 수행하였다. 검증된 프로그램을 이용하여 속도향상에 가장 큰 영향을 미치는 설계파라미터를 제시하였다. 동특성 예측결과 고려한 설계 파라미터 중에 지지점 간격이 가장 큰 영향을 주는 파라미터임을 확인할 수 있었다. 지지점 간격을 줄였을 때 접촉력의 변동이 가장 작아서 집전성능에 가장 유리한 것을 확인할 수 있었고, 연구의 결과를 보면 지지간격을 8m 정도로 정하는 것 타당하지만 각각의 파라미터에 대한 최적화 연구가 추가적으로 필요하다. 지지점의 수를 늘리면 건설비가 증가되기 때문에 향후 속도에 적합한 최적화된 지지간격을 제시할 필요가 있다. 따라서 향후 고려한 설계 파라

미터 등을 최적화한다면 250 ㎞/h급 R-Bar시스템 개발을 추진할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 논문은 국토교통부 철도기술연구사업, 철도 핵심 부품/장치 기술개발 2단계 연구단 과제의 제2세부 과제인 250 km/h급 강체전차선로 개발의 일환으로 수행된 연구임을 밝히며 이에 감사를 드립니다.

References

[1] "*Development of overhead contact line system for speed enhancement*," Korea Railroad Research Institute, 2015. 05.

[2] "Design of Rigid Catenary R-Bar System(KR E-03170)," Korea Rail Network Authority, 2012. 12.

[3] "Deveolpment of core design technology for high-dpeed turnout and Overhead Rigid-Bar," Korea Railroad Research Institute, 2012. 12.

[4] Kwang-Dong Jang, Sang-Joon Bae, Do-Hyun Park, "Development of Overhead Conductor Rail (Rigid BAR) System," The proceedings of The Korean Institute of Electrical Engineers, 1900-1901, 2013. 7.

[5] "Rigid Catenary R-Bar System (KRSA-3072)," Standard for Korea Rail Network Authority, 2014. 06.

[6] C. Vera et al., "Simulation model for the study of overhead rail current collector systems dynamics, focused on the design of a new conductor rail," Vehicle System Dynamics, Vol. 44, No. 8, 595-614, 2006. 8.

[7] J. Paulin, J. D. Sanz, A. Garcia, C. Vera, "Development of New High-Performance Overhead Conductor Rail Using Simulation Models, and their Validation through Field Testing," the proceeding of 7th WCRR, 2006

[8] Sang-Joon Bae, Kwang-Dong Jang, Ki-Won Lee, Youn-Cheol Park, "A Study on Characteristics of Overhead Rigid Conductor System for Developing the High-speed System up to 250km/h," The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, 64(3), 492-497, 2015. 3.

[9] "*Current collection performance test for Overhead Rigid Bar in Deabul Tunnel*," Korea Railroad Research Institute, 2013. 6.

[10] "Railway applications - Current collection systems - Requirements for and validation of measurements od the dynamics interaction between pantograph and overhead contact line," The European Standard EN50137, 2002.

[11] "Railway applications - Current collection systems - Validation of simulation of dynamic interaction between pantograph and overhead contact line," The European Standard EN50318, 2002.

[12] Yong Hyeon Cho, "Numerical simulation of the dynamic responses of railway overhead contact lines to a moving pantograph, considering a nonlinear dropper," Journal of Sound and Vibration, Vol. 315, Issue 3, 2008

[13] Yong Hyeon Cho, Kiwon Lee, Young Park, Bubyoung Kang, and Ki-nam Kim, "Influence of contact wire pre-sag on the dynamics of pantograph-railway catenary," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 52, Issue 11, 2010

저 자 소 개

이 기 원 (Kiwon Lee)

1997년 RIT(미) 기계공학과 졸업(공학석사), 2009년 성균관대 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국철도기술연구원 책임연구원

조 용 현 (Yong Hyeon Cho)

1992년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사), 2008년 서울대 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국철도기술연구원 수석연구원

권 삼 영 (Sam-Young Kwon)

1997년 한양대학교 전기공학과 졸업(공학석사), 2007년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국철도기술연구원 수석연구원

박 영 (Young Park)

2000년 성균관대 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학석사), 2004년 동대학원 동학과 졸업(공학박사), 현재 한국철도기술연구원 책임연구원