

열차성능해석 결과를 이용한 고속철도 급전계통 해석

이태형, 박춘수, 목진용, 서승일, 김기환
한국철도기술연구원

Analysis of the High Speed Railroad Power Network using Result of Train Performance Simulation

Tae Hyung Lee, Choon Soo Park, Jin Yong Mok, Sung Il Seo, Ki Hwan Kim
Korea Railroad Research Institute

Abstract - Computerized simulation is becoming an indispensable procedure in the stage of planning, design, and operation of railway systems. This paper presents result of simulation technique for describing electrical performance of the power supply system which comprises the substation, catenary, feeder, and rails where multiple trains are running using result of train performance simulation.

1. 서 론

2004년 4월 역사적인 한국의 고속철도 개통과 더불어 한국철도는 프랑스, 일본, 독일, 스페인, 이탈리아 등과 함께 300km/h의 초고속철도시대에 들어서게 된다. 고속철도의 개통은 물리적인 속도향상에 따른 시간단축으로 국민들의 삶의 변혁을 가져올 뿐만 아니라 경제적·사회적·문화적으로 큰 변화를 동반할 것이 틀림없다. 이에 발맞추어 1996년 12월부터 추진되어온 고속전철기술개발 사업에서는 그동안의 연구결과로 7량 1편성의 개발차량을 순수 국내기술로 제작하였고, 경부고속철도 시험선구간에서 시험최고속도 300km/h를 기록하였다. 현재에도 계속하여 시스템의 안정화를 위해 시운전시험 중에 있으며 2007년도에 상용화될 예정이다.

고속철도 선진국에서는 급전계통에서 나타나는 현상을 정확히 분석하기 위해 전기적 특성분석과 함께 열차의 견인력, 운전특성 및 운행 스케줄, 선로상태 등의 열차 운행상황을 고려한 종합적인 해석을 수행하고 있다. 프랑스의 SNCF에서는 EMERALDA라는 소프트웨어 패키지를 사용하여 TGV 시스템의 동적 특성을 포함한 다중열차운행, 추진제어 시스템, 급전계통 전체를 시뮬레이션하고 있다. 영국에서는 VISION/OSLO라는 시뮬레이터를 1987년에 개발하여 사용하고 있고, 스위스에서는 FABEL이라는 소프트웨어를 사용하여 열차운행에 따른 급전계통의 상태를 해석하여 변전소 및 케이블의 용량을 결정하고 있다.[1]

상기 시뮬레이션 소프트웨어의 핵심은 급전계통 해석 기법인데 국외에서는 단권변압기의 전류를 동일한 크기와 위상을 갖는 두 개의 성분으로 분해한 후 회로망기법을 적용하여 해석했다[2]. 국내에서는 단일열차를 부하로 가정하고 급전회로망 해석기법을 활용하여 급전계통을 해석하였고[3], 다단자망을 이용한 회로 모델링 기법을 이용하여 정태해석을 수행하였다[4].

본 논문에서는 기존의 급전계통 해석기법이 간과한 열차운행상황, 즉 열차의 견인력 및 제동력 특성, 운전특성 및 운행 스케줄, 선로상태를 고려하여 급전계통을 해석할 수 있는 기법을 제시하고 그 결과를 검토하기 위해 고속철도기술개발사업의 일환으로 현재 경부고속철도 시험선구간에서 시운전시험 중인 한국형 고속전철 개발차량의 상업운행 차량편성인 20량, 11량으로 열차운행 패턴을 설정하였다. 설정된 운행패턴에 따라 열차가 주행할 때 급전계통에서 나타나는 현상을 해석하고 특히 고속전철 변전소의 부하해석 결과를 제시한다.

2. 본 론

2.1 열차성능해석 시뮬레이션

경부고속철도 시험선 구간에서 시운전시험 중인 개발 차량은 7량 1편성으로 동력차 2량, 동력객차 2량, 객차 3량이며, 20량 편성시의 열차의 특성을 평가할 수 있도록 구성되었다. 표 1은 열차 성능에 관련된 개발차량의 주요 제원이며 그림 1은 시험선 구간 선형, 그림 2와 3은 각각 견인력과 제동력 곡선을 보여주고 있다. 표 1, 그림 1 ~ 3은 열차성능을 지배하는 주요 데이터이며 열차성능해석 시뮬레이션 프로그램에 입력하여 결과를 얻게 된다.

표. 1 열차성능 관련 주요 제원

항목	제원
열차중량 [톤]	340
축 수 [개]	20
총 길이 [m]	147.4
전동기 용량 [kW]	1100
전동기 수량 [대]	12
주행저항[N]	$196.6 + 2.608V + 0.03985V^2$

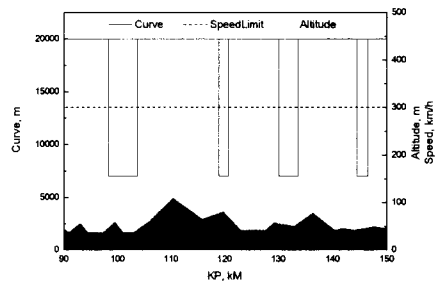


그림. 1 시험선구간 선로선형

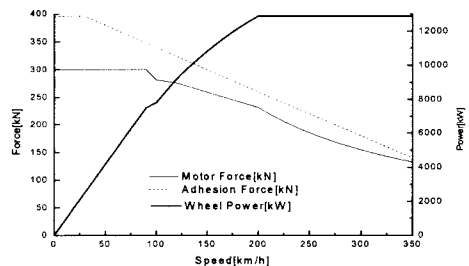


그림. 2 개발차량의 견인력 곡선

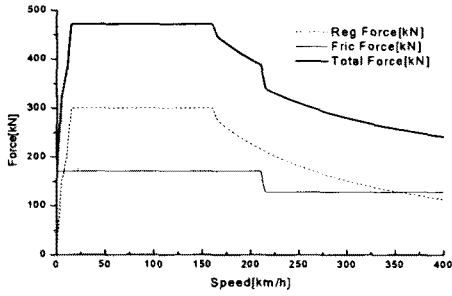


그림. 3 개발차량의 제동력 곡선

현재 개발차량은 51회의 주행시험을 실시하여, 시험최고 속도 300km/h 기록을 달성하였으며 시스템의 안정화를 위해 계속 시운전시험 중에 있다. 51회의 주행시험 중에서 열차성능을 해석할 수 있는 대표적인 주행패턴을 표 2와 같이 선택하여 시험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

표. 2 열차성능해석용 주행패턴

패턴	시험내용	속도	주행구간
A	MB 1대 주행시험	80km/h(통과)	KP137 ~ KP139
B		110km/h	KP137 ~ KP143
C	MB 2대 주행시험	123km/h	KP124 ~ 128.5

주) MB(Motor Block)

패턴 A는 그림 4와 같이 MB 1대를 사용하여 80km/h를 통과하는 주행시험이고 패턴 B는 패턴 A와 연속해서 MB 1대를 사용하여 속도 110km/h까지 주행시험한 것으로 그림 4와 같이 100%의 견인력으로 주행, 약 50km/h까지 80% 제동, 약 30km/h까지 타행, 정지시까지 제동하는 패턴을 보이고 있다. 패턴 C는 MB 2대를 사용하여 속도 123km/h까지 주행시험한 것으로 그림 5와 같이 100%의 견인력으로 주행, 약 30km/h까지 80% 제동, 약 20km/h까지 타행, 정지시까지 제동하는 패턴을 보이고 있다.

그림 6은 주행패턴 A, B에 대한 시뮬레이션과 시운전 시험 결과비교로서 추진하는 부분에서는 상당히 유사한 결과를 보이고 있다. 차이가 발생하는 부분은 제동 부분인데 시뮬레이션에서는 전체 제동력을 사용하여 계산하기 때문이라고 추측되며 향후 100%의 제동시험이 이루어져 데이터가 획득되면 시뮬레이션 결과와 비교할 예정이다.

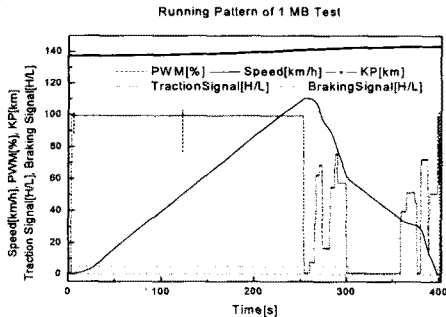


그림. 4 주행패턴 A, B

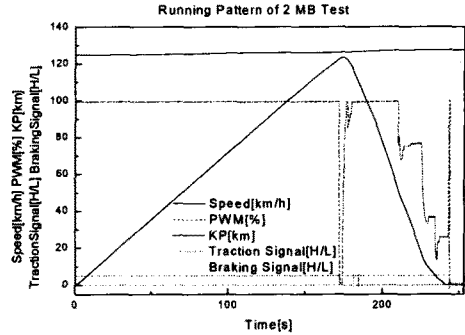


그림. 5 주행패턴 C

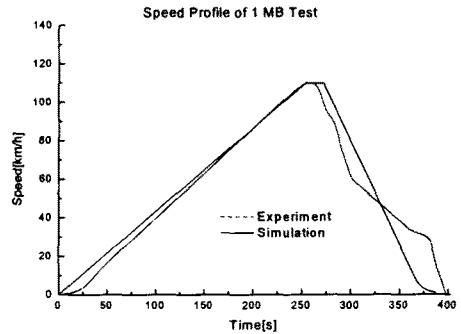


그림. 6 주행패턴 A, B 결과 비교

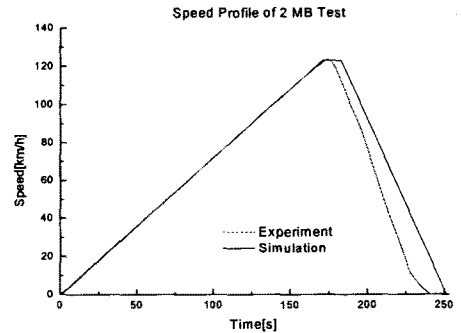


그림. 7 주행패턴 C 결과 비교

그림 7은 주행패턴 C에 대한 시뮬레이션과 시운전시험 결과비교로서 추진하는 부분의 오차가 그림 6의 추진하는 부분보다 더 작은 것을 볼 수 있다. 이런 차이는 각 MB의 견인제어특성과 견인시스템의 효율, 역률 등의 효과라고 추측된다.

표 3은 주행패턴에 대한 시뮬레이션과 시운전시험 결과를 비교한 것으로 시뮬레이션의 결과가 실제 시운전시험결과보다 작은 것으로 나타났다.

표. 3 주행패턴별 시뮬레이션과 시운전시험 결과 비교

주행 패턴	주행시간[s]		평균속도[km/h]	
	시운전시험	시뮬레이션	시운전시험	시뮬레이션
A	186.5	185.0	-	-
B	397.0	387.1	53.5	54.2
C	252.8	251.4	64.1	64.5

2.2 급전계통해석 기법

전기철도는 급전계통에서 일어나는 전기적인 현상과 열차에서 일어나는 기계적인 현상이 서로 연계되어 매우 복잡한 시스템을 형성하고 있다. 그림 8은 급전계통 해석기법의 구성을 나타낸다.

TRAIN DYNAMICS 모듈은 열차의 주행특성을 미분방정식으로 모델링하고 선로 상태 및 전후 열차와의 상호관계까지 고려한 시뮬레이션을 수행한다.

TRACTION CONTROL SYSTEM 모듈은 견인전동기와 추진제어 시스템의 특성을 모의하는데 열차의 주행상태와 팬터그래프 전압을 받아들이어 견인력과 전력소비를 결과로 내놓는다.

POWER NETWORK OPERATION 모듈은 열차의 현재 위치 및 소비전력을 받아들이어 변전소 및 급전선에서 전력을 공급하는 상태를 모의한다.

이와 같은 해석을 통하여 변전소별 부하, 급전선 용량, 열차별 팬터그래프 전압 등 실제로 변전소 및 급전계통 설계에 필요한 해석 결과를 얻을 수 있다.

기존의 해석기법은 그림 8의 세 모듈을 종합적으로 고려하지 못하고 POWER NETWORK OPERATION 모듈에만 치우쳐 열차의 위치와 소비전력이 운행패턴에 따라 변한다는 점을 고려하지 못하거나 TRAIN DYNAMICS 나 TRACTION CONTROL SYSTEM만 강조해서 판토그래프 전압이 일정하다고 가정하게 된다.

본 논문에서는 상기의 단점을 극복하기 위하여 열차의 위치와 소비전력을 TPS(Train Performance Simulation)로부터 입력받고, 급전계통의 전압강하 계산 결과를 반환하는 알고리즘을 계산에 추가하였다.

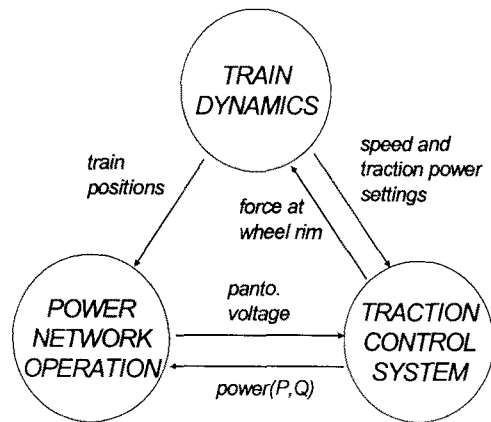
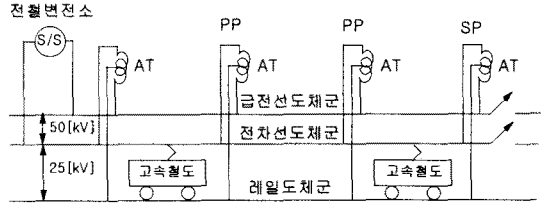


그림. 8 급전계통 해석 모듈 구조



AT: 단권변압기(Auto Transformer)
PP: 병렬급전소(Parallel Post), 상행선 연결개폐기, 상시 on
SP: 급전구분소(Section Post), 변전소간 연결개폐기, 상시 off

그림. 9 2x25kV AT 급전계통의 구성

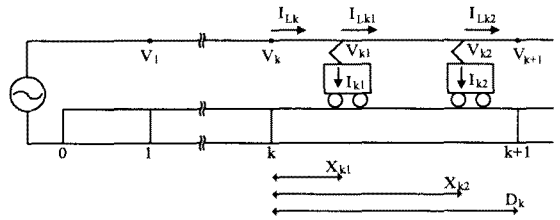


그림. 10 급전계통 간략화 모델

그림 9는 고속철도 급전계통에 사용되는 2x25kV AT 급전계통 구성도이며, 그림 10은 해석을 위해 간략화한 모델이다. 그림 10에서와 같이 단권변압기로 구분되는 구간을 첩자 k로 나타내고 동일 구간내 열차가 2대 이상 존재하는 경우 첩자 k1, k2로 표시하면 단권변압기 및 열차 위치에서의 전압은 다음과 같이 유도된다.

- 1) 열차가 존재하지 않는 구간
k 구간 시작점의 전압이 V_k 이고 그 구간의 전차선에 흐르는 전류가 I_{Lk} 이면 k+1 구간 시작점의 전압은 다음 식(1)로 주어진다.

$$V_{k+1} = V_k - Z_L D_k I_{Lk} \tag{1}$$

- 2) 열차가 1대 존재하는 구간의 열차전압은

$$V_{k1} = V_k - Z_L X_{k1} I_{Lk} - Z_L^2 X_{k1} \left(1 - \frac{X_{k1}}{D_k}\right) I_{k1} \tag{2}$$

$$V_{k+1} = V_k - Z_L [X_{k1} I_{Lk} + (D_k - X_{k1}) I_{Lk1}] \tag{3}$$

- 3) 열차가 2대 존재하는 구간의 열차전압은

$$V_{k1} = V_k - Z_L X_{k1} I_{Lk} - Z_L^2 X_{k1} \left(1 - \frac{X_{k1}}{D_k}\right) I_{k1} \tag{4}$$

$$V_{k2} = V_k - Z_L (X_{k2} - X_{k1}) I_{Lk} - Z_L^2 [(X_{k2} - X_{k1}) \left(1 - \frac{X_{k2}}{D_k}\right) I_{k2} - \frac{X_{k1} I_{k1}}{D_k}] \tag{5}$$

$$V_{k+1} = V_k - Z_L [X_{k1} I_{Lk} + X_{k2} I_{Lk1} + (D_k - X_{k2}) I_{Lk2}] \quad (6)$$

여기서, Z_L 은 전차선, 레일, 피아더로 구성되는 회로의

단위길이 당 등가 임피던스를 의미하고, Z_L^s 는 한 구간 내에서 열차의 위치에 따라 변화하는 전류 분포를 반영하기 위한 등가 임피던스이다.

2.3 사례검토

결과를 검토하기 위해 아래 표 4와 같은 한국형 고속전철 개발차량(KHST)의 20량과 11량 편성을 대상으로 그림 11과 같이 운행시격을 2004년 서울~대전 구간 피크(2h) 시 시격인 8분으로 하는 경우와 2010년 피크(2h) 시 시격인 4분으로 하는 두 가지 경우를 가정하였다. 정차패턴은 대전, 대구역에 각각 90초씩 정차하는 것으로 하였다. 또한 급전계통을 구성하는 변전소, 병렬급전소, 급전구분소의 데이터도 그림 11에 표시하여 특정 시간의 열차위치와 변전소 공급범위에 존재하는 열차의 수를 파악할 수 있도록 하였으며 전철 변전소의 전압은 27.5kV로 가정하였다.

표. 4 KHST 주요 제원

열차편성	20량	11량
차량수	20	11
열차중량(만차시) [ton]	780	458
총 길이 [m]	393.5	218.9
좌석수	930	460
전동기수	16	12
출력/1대[kW]	1,100	1,100
총출력 [kW]	17,600	13,200
최고운행속도[km/h]	350	350
최고속도에서	at 350 km/h	
견인력[kN]	176.5	132.4
주행저항[kN]	131.4	81.6
가속여력[m/s ²]	0.056	0.107
균형속도[km/h]	389.2	416.1

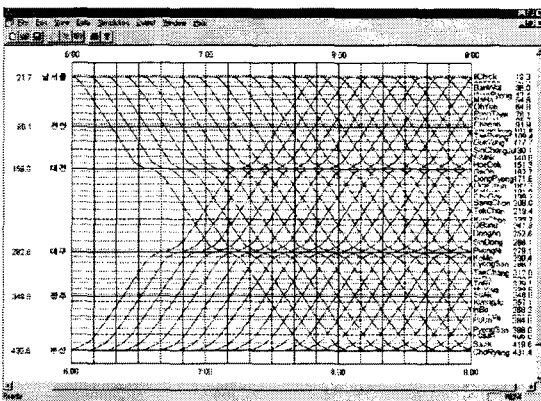


그림 11 열차운행 계획

그림 12는 KHST11 열차를 이용하여 상하행선 두 개 역에 정차하는 열차운행계획으로 운전시격 4분을 사용하였을 때 특정 열차(9030호)에 나타나는 열차전압이다. 특정열차는 시물레이션 시간(09:00 - 10:00) 동안 경산변전소 공급구간(266.10km

- 329.10km)을 주행하게 되는데 공급구간 남쪽말단으로 갈수록 타 열차의 영향으로 전압이 강하되는 것을 확인할 수 있으며 열차출발시간의 불확실성과 상하연계급전을 하지 않는 경우 전압강하가 더 커짐을 볼 수 있었다. 그림 13은 KHST20 열차를 이용하여 상하행선 두 개 역에 정차하는 열차운행계획으로 운전시격 4분을 사용하였을 때 특정열차(9030호)에 나타나는 열차전압이다. 특정열차는 시물레이션 시간(09:00 - 10:00) 동안 경산변전소 공급구간(266.10km - 329.10km)을 주행하고 있음을 그림을 통해 알 수 있는데 KHST11량보다 전압강하가 더 큰 폭으로 발생됨을 알 수 있다.

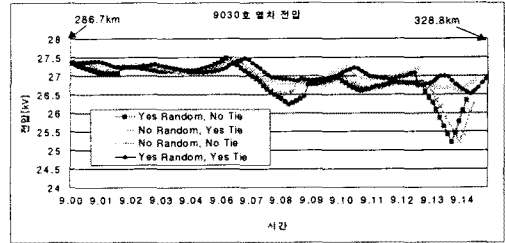


그림 12 열차전압(시격 4분, KHST 11량)

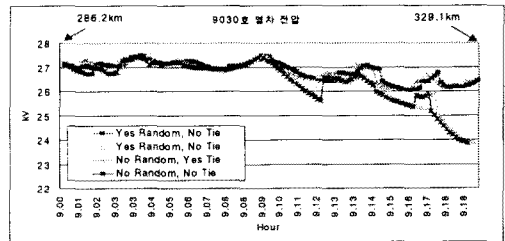


그림 13 열차전압(시격 4분, KHST 20량)

그림 14 ~ 17은 각 운행패턴에 따른 경산변전소와 신청주변전소의 부하를 표현한 것인데 운전시격에 반비례하는 것을 볼 수 있으며 부하패턴도 상이하게 나타나는 것을 알 수 있다.

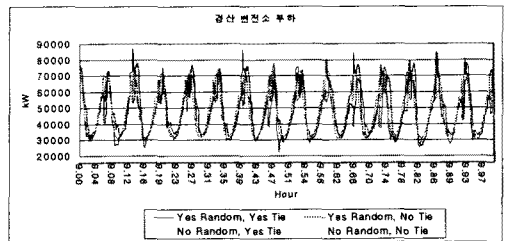


그림 14 경산변전소 부하(시격 4분, KHST 11량)

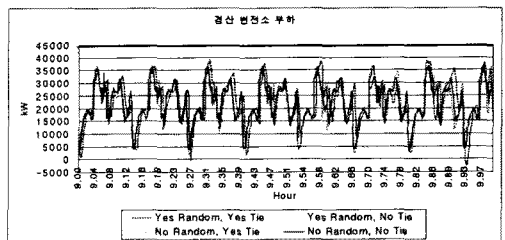


그림 15 경산변전소 부하(시격 8분, KHST 11량)

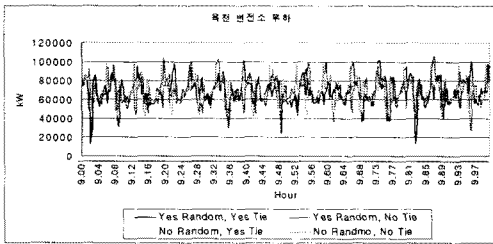


그림. 16 육천변전소 부하(시격 4분, KHST 20량)

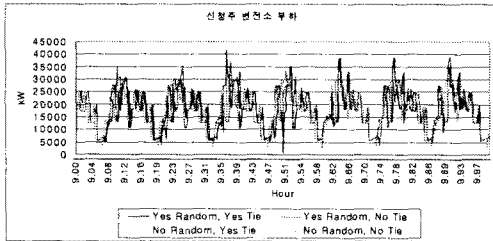


그림. 17 신창주변전소 부하(시격 8분, KHST 20량)

3. 결 론

열차성능해석 결과를 이용하여 기존의 급전계통 해석 기법이 간과한 열차운행상황, 즉 열차의 견인력 및 제동력 특성, 운전특성 및 운행 스케줄, 선로상태를 고려하여 급전계통을 해석할 수 있는 기법을 제시하였다. 그 결과를 검토하기 위해 고속철도기술개발사업의 일환으로 현재 경부고속철도 시험선구간에서 시운전시행 중인 한국형 고속전철 개발차량의 상업운행 차량편성인 20량, 11량을 대상으로 열차운행 패턴을 설정하였다. 설정된 운행패턴에 따라 열차가 주행할 때 급전계통에서 나타나는 현상을 해석하고 특히 고속전철 변전소의 부하해석 결과를 제시하였으며 다음과 결과를 얻을 수 있었다.

- 급전계통해석 수행시 각 열차의 소비전력을 제공하는 열차성능해석의 결과가 실제 시험데이터와 유사함을 확인하였다.
- 전철변전소의 부하는 시격에 반비례하고 시격에 따라 부하패턴도 상이하였으며 변전소 말단으로 갈수록 전압강하 현상이 두드러졌다.
- 열차운행시각의 불확실성을 고려하면서 상하연계급전을 운용하지 않는 경우 부하가 정상적인 경우보다 증가되는 틱을 알 수 있었다.
- 향후 회생전력에 대한 조류계산기법 개발과 비정상적인 운용상태에 대한 검토가 이루어져야할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 신흥섭 외, "다중열차 운영을 고려한 급전계통 시뮬레이션", 한국고속철도건설공단 보고서 1995
- [2] Pao-Hsiang Hsi et al., "Simulating On-Line Dynamic Voltages of Multiple Trains under Real Operation Conditions for AC Railways", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 2, May 1999
- [3] 윤재영 외, "급전회로망 해석기법을 활용한 고속전철 조류해석 기법", Trans. KIEE Vol. 49A, DEC. 2000
- [4] 장상훈 외, "전기철도 교류급전 시스템의 회로 모델링 및 해석기법 연구", 한국철도학회논문집 제3권제4호 2000년
- [5] C.J.Goodman, "Train Performance and simulation", The Institution of Electrical Engineers, 1997
- [6] Paul Martin, "Train Performance and simulation", Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, 1999
- [7] Paul Martin, "Train Performance and simulation", The Institution of Electrical Engineers, 1997
- [8] 이태형, 박춘수, 신종린 "한국형 고속전철 열차성능해석프로그램", 한국철도학회논문지 제6권제2호 2003

[후 기]

본 연구는 건설교통부 고속철도기술연구개발사업으로 지원된 "고속철도시스템 신뢰성 및 운영 효율화 기술개발"과제의 연구결과 중 일부입니다.