

교류 급전시스템 해석을 위한 윈도우즈 기반 시뮬레이터 개발 Development of Simulator for AC Traction Power Supply System

김주락† 이장무* 창상훈** 김정훈***

Kim, Joorak Lee, Chang-Mu Chang, Sang-Hoon Kim, Jung-Hoon

ABSTRACT

This paper describes the development of integrated simulator for traction power supply system with GUI(Graphic User Interface). This simulator consists of a lot of calculation modules such as TPS, time table, line constant, and power supply system analysis. Each module has input and output structure respectively. The proposed simulator is tested on both high speed railway line and metropolitan subway line. The test has confirmed the function of the developed simulator.

1. 서 론

급전시스템의 설계에 있어서 열차의 주행 성능과 관련하여 상세히 검토해야 할 사항은 급전계통의 전압강하이다. 열차가 주행하는 데에 충분한 성능을 보장하기 위하여 전차선의 전압이 적정하게 유지되어야 하지만 여러 대의 열차가 운행하는 상황에서는 전압의 변동이 심하게 나타나기 때문에 시뮬레이션을 통하여 변전소의 위치 및 용량, 급전선로의 용량 등의 설계 시에 이를 반영하여야 한다. 또한 열차운행 계획의 변경 시에도 급전계통 측면에서 전력 수요가 용량 범위 내에 있는지, 전압 유지가 가능한지 검토해 보아야 한다. 시뮬레이션은 우선 검토 대상 선로에 투입될 열차의 종류 및 그 운행 패턴을 설정하여 각각에 대한 열차주행 시뮬레이션 (TPS)을 수행하면 시각별 위치, 속도, 전력소비량 등이 계산되며, 열차 운전곡선을 열차운행 계획에 따라 배열하면 매 순간마다 모든 열차의 위치 및 소비전력이 결정되므로 이를 추출하여 각 변전소마다 공급 구간 내에 있는 열차의 소비전력을 합산하여 변전소 부하를 계산할 수 있고 각 열차 위치에서의 전압을 계산할 수 있다.

이러한 해석을 계산식에 의한 수작업으로 시행할 경우 많은 시간이 소요되고 그 정확성에도 한계가 있었다. 이에 따라 본 연구에서는 급전계통 시뮬레이션을 위한 모든 계산 과정을 통합한 GUI 환경의 통합 소프트웨어를 개발하였다. 본 시뮬레이터는 TPS, 운행다이아 및 급전시뮬레이션을 수행할 수 있도록 각각의 계산 모듈을 통합하여 개발하였으며, 운행다이아의 경우 그래픽적인 수정 과정이 가능하도록 개발하여 기존의 수작업에 의존하던 방식을 크게 개선하였다. 또한, 급전시뮬레이션의 경우 2000년 이후 본 연구진에서 개발한 단자망 모델을 이용하여 개발하였다. 참고문헌에서 볼 수 있듯이 단자망 모델은 현장 측정값과의 비교를 통하여 결과의 우수성이 이미 검증되었으며, 계산 단계마다 해석을 위한 회로의 구성이 용이하여 빠른 계산 결과를 보일 수 있다.

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 집전전력연구실, 선임연구원
E-mail : jrkim@krii.re.kr

TEL : (031)460-5411 FAX : (031)460-5459

* 정회원, 한국철도기술연구원, 차세대전동차연구단, 선임연구원

** 정회원, 한국철도기술연구원, 집전전력연구실, 수석연구원

*** 정회원, 홍익대학교, 전자전기공학부, 교수

2. 본 론

2.1 시뮬레이터 모듈 구성

교류 전기철도 급전시스템은 한국전력의 3상 전력을 수전받아 스코트 변압기를 통하여 2개의 단상 55kV 전력으로 변환한 후 단권변압기를 통하여 27.5kV의 전력을 열차에 공급한다. 따라서 교류 급전시스템의 전기량 해석을 위해서는 전력공급에 기여하는 고정설비들 즉, 3상전원설비, 스코트 변압기, 전차선로 및 단권변압기 등의 회로 모델과 공급된 전력을 소비하는 열차의 회로 모델이 필요하고, 구성된 회로 모델들은 각각의 수리 모델의 통합으로 해를 구하는 과정을 통해 급전시스템의 전기량 해석이 수행된다. 이때, 전력을 공급하거나 전송하는 고정설비 들은 전압원과 임피던스를 이용하여 회로 모델을 얻을 수 있지만 전력을 소비하는 열차의 경우 열차의 위치와 소비하는 전력이 시변 특성을 가지므로 열차의 이동에 따른 위치와 소비 전력을 TPS(Train Performance Simulation)를 사용하여 미리 계산하여 정 전력 모델을 사용하게 된다. 본 연구에서 급전시스템의 전기량 해석을 위해 개발한 통합형 시뮬레이터는 열차 위치 및 소비전력 해석을 위한 TPS 모듈, 열차 운행다이아 구성 모듈, 급전시뮬레이션 모듈 등으로 구성된다. 그림 1은 통합 시뮬레이션의 각 모듈간의 계산 절차를 보여준다.

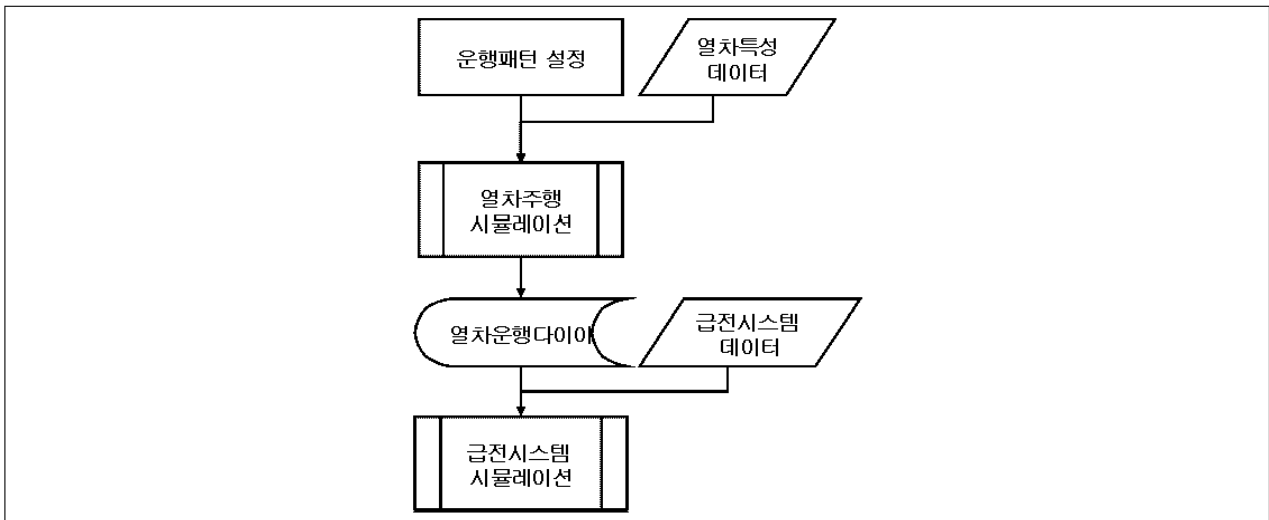


그림 1. 통합형 시뮬레이터의 계산 절차

2.1.1 TPS

열차운행시뮬레이션 TPS는 시뮬레이션 대상 구간에서 해당 열차가 운행하는 속도, 위치 및 소비전력 등을 계산한다. 앞서도 기술했듯이 TPS 계산을 통해 열차의 시간(혹은 위치)에 따른 소비 전력을 구해야 급전시뮬레이션을 실행할 수 있다. TPS의 계산은 열차와 선로에 관련된 자료 입력으로 해당 구간의 선로조건에 따른 제한속도를 계산하고, 이에 따른 열차의 운행 모드를 결정한 후에 각 계산 단계에서의 위치, 속도, 전력을 계산하는 순서로 진행된다.

2.1.2 운행 다이아

TPS의 실행으로 대상선로에 운행되는 다양한 열차 운행 특성(위치, 속도, 소비전력)이 구해지면 열차 운행 계획에 기초하여 열차다리아를 생성해야 한다. 그림 3은 열차다리아의 일례를 보인 것이다. 그림의 왼편은 1일 24시간 동안의 다리아를 보인 것이고 오른편 그림은 시간을 확대하여 보인 것이다. 선로에 따라 단일 열차가 운행될 수도 있고 여러 종류의 열차가 운행될 수도 있다. 그림 2의 경우 2종류의 열차가 운행되는 선로에서의 운행다리아이다. 여러 종류의 열차가 동일 선로에서 운행될 때는 열차 종류에 따라 다른 속도 때문에 운행다리아 상에서 속도가 다른 두 열차의 교점이 생길 가능성이 있다. 이 교점은 두 열차가 같은 선로에서

동일 시점에 동일한 위치에 있는 것으로 실제 상황에서는 불가능한 경우이다. 또, 이러한 교점이 생길 경우 급전시스템에서 두 열차의 부하 크기가 합해져 대용량의 집중부하가 되어 전압 강하 등에 악영향을 끼친다.

본 연구에서 개발한 통합 시뮬레이터의 열차다이나 모뎀은 선로에서 운행하는 모든 종류의 열차의 운행 시작 및 종료 시간과 시격을 입력하여 운행다이나를 생성하고 두 열차간의 교점을 검색하여 교점 부분의 두 열차를 조정해주는 것으로 열차다이나가 최종적으로 결정된다.

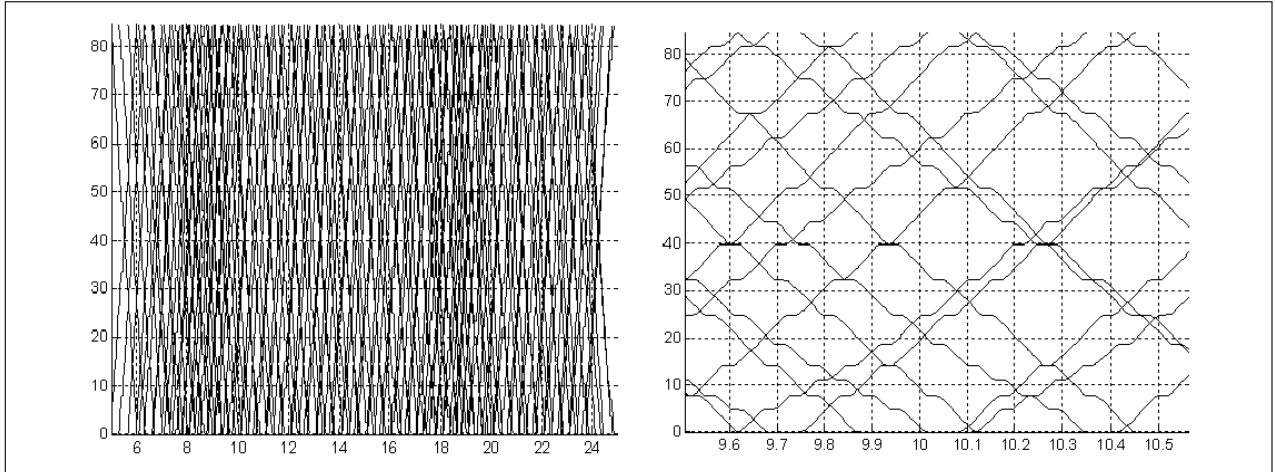


그림 2. 열차다이나 예시

2.1.3 급전시뮬레이션

급전시뮬레이션은 앞서 설명하였듯이 급전시스템을 구성하는 모든 전지설비들의 회로 모델로 매 계산 단계마다 회로를 구성하고 반복계산을 통하여 시스템의 전압, 전류 등을 계산한다. 그림 3은 급전시스템을 구성하는 각 설비들과 그 설비들의 회로모델들을 보여준다. 앞서 설명 했듯이 각 설비의 회로모델은 단자망 이론을 이용하여 구성되며, 최종적으로 모든 설비의 회로 모델을 조합하여 계산하게 된다.[1-2]

2.2 시뮬레이터 개발

2.2.1 개발 및 사용 환경

본 연구에서 개발한 통합 시뮬레이터는 다음 도표 1과 같은 개발환경에서 개발하였으며, 프로그램을 사용하기 위해서는 32bit O/S 환경(Windows XP 추천)과 MS .Net FrameWork 2.0 이 필수적으로 구비되어야 한다.

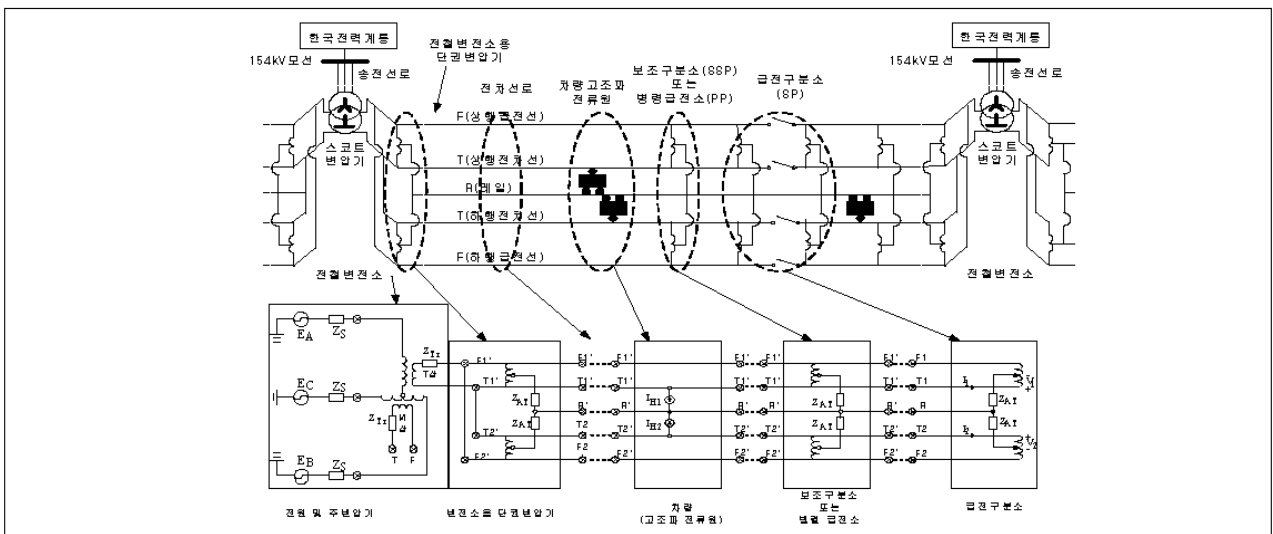


그림 3. 급전시스템 구성 및 회로모델

도표1. 시뮬레이터 개발환경

항 목	내 용	비 고
O/S	MS Windows XP	필수사용환경
Frame Work	MS .Net FrameWork 2.0	필수사용환경
IDE	MS Visual Studio 2008	
Language	MS C# 9.0	
N. Analysis	Matlab 2007b	
Grid Com.	Spread for Win Forms V4.0	
Chart Com.	ChartFx7 Win Forms	

2.2.2 프로그램 메뉴

개발한 시뮬레이터의 전체적인 메뉴 구조는 그림 4와 같다. 메뉴는 크게 프로젝트를 관리하는 부분과 계산을 위한 자료 입력 부분, 그리고 시뮬레이션 실행과 관련된 부분으로 구분된다. 그리고 자료 입력부의 경우 TPS 자료 입력부와 급전계통 입력부로 나뉘며 TPS의 경우 선로와 열차 자료를 입력하고 급전계통의 경우 계통구성, 임피던스, 선로정수 등을 입력하여 시뮬레이션의 TPS, 운행다이어, 급전계통 등의 메뉴를 통해 순차적으로 실행할 수 있다.

2.2.3 프로그램 실행

개발한 시뮬레이터를 실행하면 그림 5와 같은 창이 활성화 된다. 시뮬레이터의 메인 창에는 그림 4에서 설명한 모든 메뉴가 포함되어 모든 자료의 입력, 시뮬레이션 명령, 그리고 시뮬레이션 결과를 볼 수 있는 모든 항목을 메인 창에서 실행시킨다.

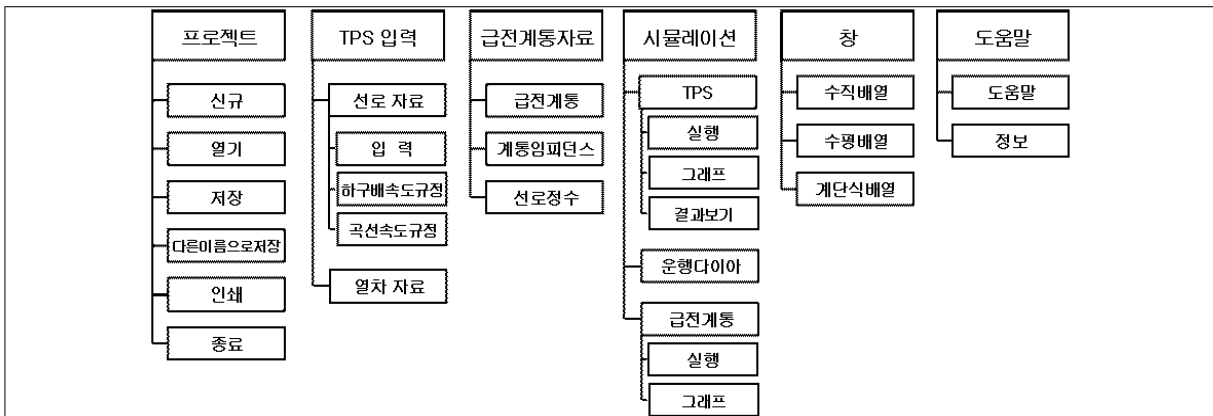


그림 4. 개발한 시뮬레이터의 메뉴 구성

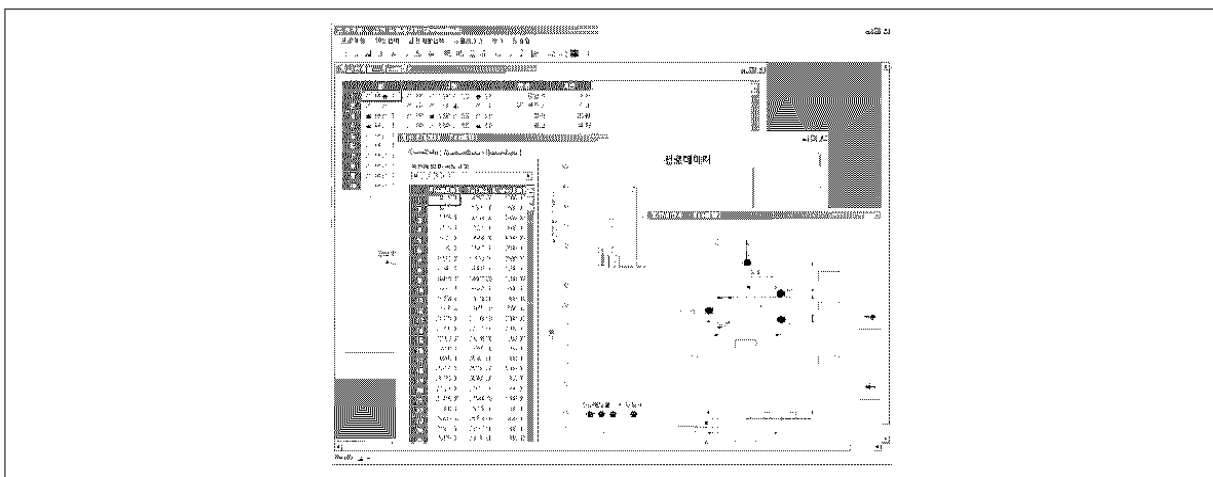


그림 5. 시뮬레이터 실행 창

2.3 사례연구

본 사례연구에서는 전동차 1종류의 열차만 운행하는 선로를 대상으로 TPS부터 급전시물레이션 까지 개발한 통합 시뮬레이터의 모든 기능을 사용하여 해당 급전구간의 전압, 전류, 전력 등을 검토한다.

2.3.1 대상 계통

사례 연구 대상으로 선택한 계통은 6량의 전동차가 운행하는 구간으로서 TPS 및 급전계통의 입력 자료는 다음 표 와 같다. 도표 2에서 제시한 데이터 외에도 여러 가지 특성 데이터가 요구되지만 특정 선로를 알 수 있는 데이터이므로 본 논문에서 직접적인 언급은 피하기로 한다.

그림 6은 TPS 계산에 필요한 열차 및 선로 데이터를 입력하는 창과 본 사례 연구의 대상 계통의 데이터를 입력한 것을 보여준다. 그림의 좌측이 열차 데이터를 입력하는 창으로 여러 종류의 열차 운행 선로에 대한 시뮬레이션 시 각 열차에 적정한 데이터를 입력 할 수 있도록 구성되어 있다. 그림의 우측은 열차가 운행하는 선로의 곡선반경, 구배, 정차역 등을 입력하는 창으로서 입력한 데이터의 확인을 위해 그래프가 표시된다.

Table 2. Environment

TPS		급전계통	
항 목	데이터	항목	데이터
운행차량	3M+3T	변전소 전원 임피던스 100[MVA] 기준	0.6+j0.4 [%]
차량무게	332 [ton]		
가속도	3 [km/h/s]	송전선로 임피던스 100[MVA] 기준	0.0425+0.0981[%]
감속도	3.5 [km/h/s]		
최대속도	110 [km/h]	주변압기 용량	45MVA
정차시간	30초	주변압기 임피던스	10[%]
운행모드	최대 가속 모드	주변압기 X/R	23

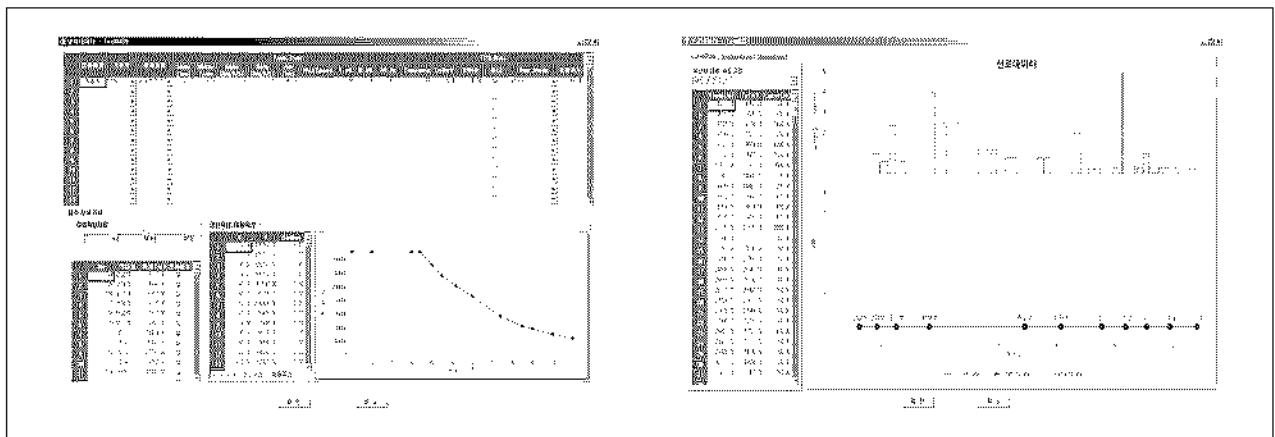


그림 6. 열차 및 선로 데이터 입력창

그림 7은 TPS 해석 결과를 이용하여 급전시물레이션을 하기 위한 입력창들로서 좌측은 S/S, SSP(혹은 PP), SP 등의 위치와 이름을 입력하는 창이며, 우측 그림은 전차선로의 임피던스 계산을 위해 선종 및 좌표를 입력하는 창이다.

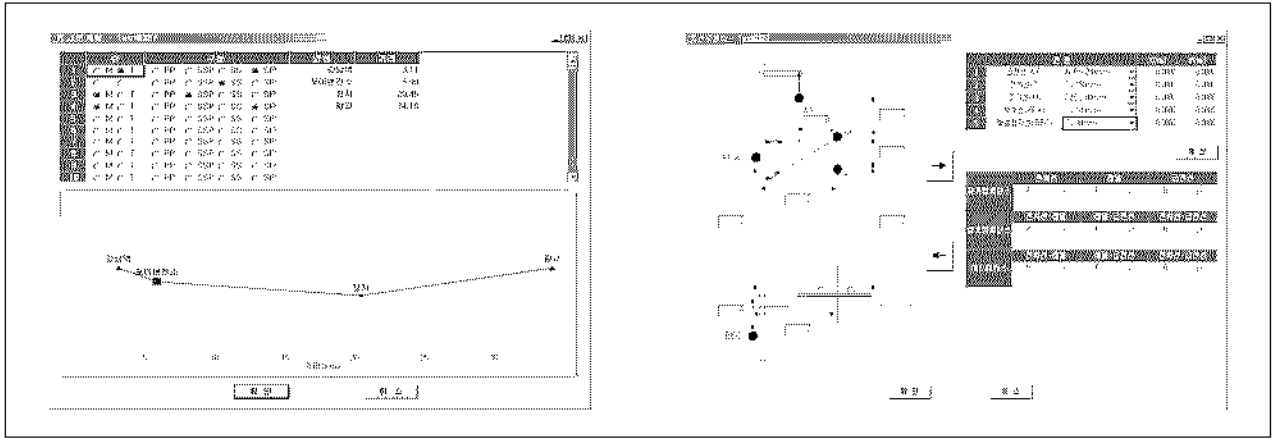


그림 7. 급전시시뮬레이션 입력창

2.3.2 시뮬레이션 결과

앞서와 같은 특성을 가진 선로를 대상으로 TPS를 실행한 결과는 그림 8과 같다. 그림의 좌측 그래프는 단일 열차의 운행 속도를 보여주며, 우측 그래프는 열차가 운행하며 소비한 전력을 나타낸다. 속도의 경우 붉은 색의 속도 제한에 적정하게 운행되었음을 보여준다.

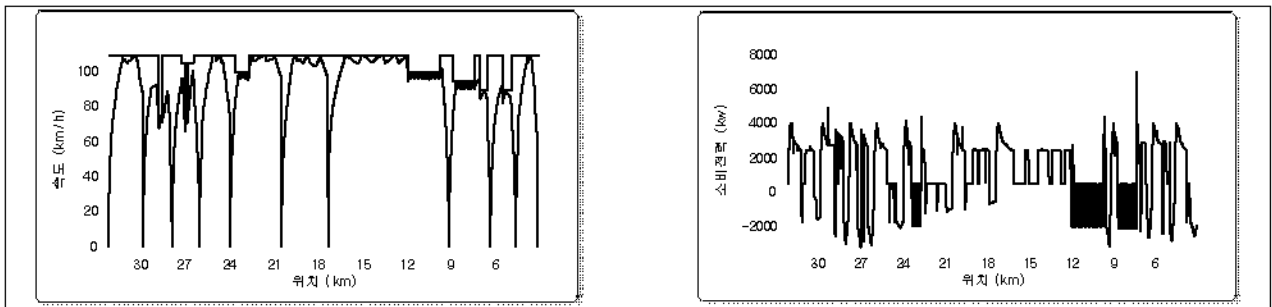


그림 8. Example of Train schedule diagram

TPS 실행 결과를 이용하여 열차 다이어그램을 생성한 결과는 그림 9에서 보여준다. 그림의 결과는 단일 전동차가 7분 시격으로 운행한 결과이다. 그림 10은 TPS 및 운행다이어그램을 기준으로 실행한 급전시시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림에서는 M상과 T상의 전압을 보여주고 있으며, 탭 선택으로 전류, 전력, 최소전압, 불평형, 차량전압 등의 그래프와 함께 결과의 요약 정보도 확인할 수 있다.

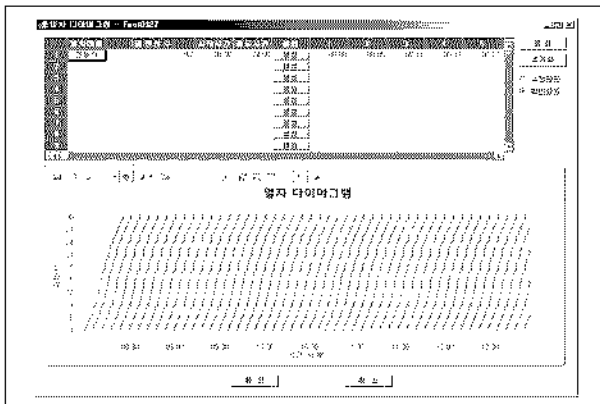


그림 9. Example of Train schedule diagram

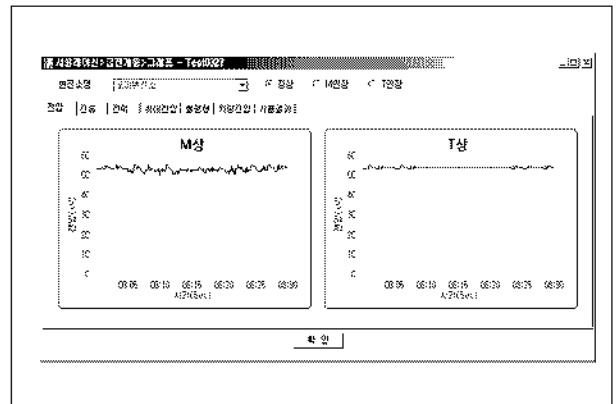


그림 10. Example of Train schedule diagram

3. 결 론

본 논문에서는 교류 급전시스템의 전기적 해석을 위해 개발한 통합형 시뮬레이터에 대하여 설명하였다. 개발한 통합형 시뮬레이터는 사용자 편의를 도모한 GUI형태를 갖추고 있어 그동안 국내 급전시뮬레이션 수행에 있었던 어려움을 해소하는데 기여할 것으로 판단된다.

개발한 시뮬레이터는 열차의 운행 속도, 위치, 소비전력 등을 계산하는 TPS, 해당 선로의 영업 시작 및 종료 시점, 시격 등으로 열차 다이어그램을 생성하는 모듈, 선로정수 계산 모듈, 그리고 급전시스템의 load flow를 실행하는 모듈 등으로 구성되어 있다. 각 모듈은 서로 유기적인 관계를 가지고 순차적으로 실행하여 최종적으로 급전시스템의 전기량을 구할 수 있으며, 단독으로 실행하여 각 모듈의 결과를 얻을 수도 있다.

본 시뮬레이터의 개발은 향후 급전시스템의 설계, 열차 다이어그램의 변동으로 인한 시스템 해석 등에 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 창상훈 외 (2000), '고속전철 서울-대전구간 고조파 전압불평형 역률 예측계산 및 대책설계', 한국철도기술연구원.
2. 창상훈 (2001), "전기철도 급전시스템의 다단자망 모델링, 정태해석과 전력품질 평가", 박사학위논문, 홍익대학교.
3. Albolrous, Sam A. (1997), "Learn C#", Natl Book Network.
4. Kalechman, Misza (2008), "Practical Matlab Applications for Engineers ", Taylor & Francis.
5. Joong-Rin Shin, (1999), "A Windows-based Interactive and Graphic Package for the Education and Training of Power Analysis and Operation ", IEEE Transactions on Power Systems.