

추진 장치 성능 시험을 위한 열차 운행 모의 성능 분석 연구

김영찬, 서영거, 배창한*, 이병송*, 홍순찬, 고종선
 단국대학교, *한국철도 기술연구원

A study of Train Running Simulation for Propulsion Performance Analysis

Young-Chan Kim, Young-Ger Seo, Chang-Han Bae*, Byung-Song Lee*, Soon-Chan Hong,
 Jung-Sun Ko
 Dankook Univ. *Korea Railroad Research Institute

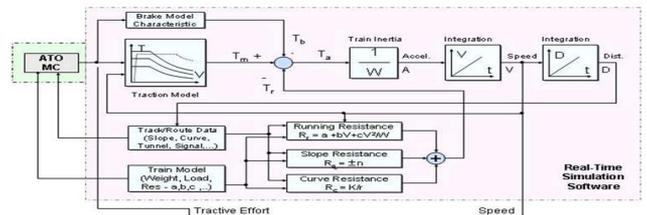
ABSTRACT

본 논문에서는 열차의 실제 노선 운행을 모의하여 구동 장치의 특성을 평가하고 에너지 절약에 대한 연구를 하였다. 이에 대하여 열차의 구동 에너지를 절약하기 위한 모터의 제어 방식과 제너레이터의 회생 에너지에 관한 연구를 선택하였다. 실제 대전 지하철의 노선 데이터를 이용하여 열차 주행 결과를 시뮬레이션 하였다. SVM (Space Vector Modulation) - DTC (Direct Torque Control)로 구현된 M-G Set으로 열차가 주행 시 모터에서 소비되는 에너지와 제동 시 제너레이터에서 발생되는 회생 에너지를 Simplorer 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 열차의 소비 에너지와 회생 에너지를 연구한다.

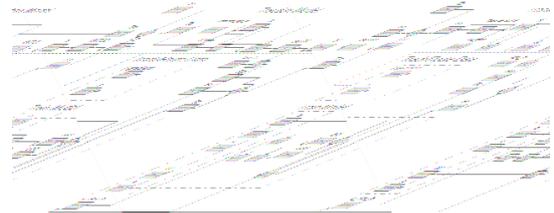
1. 서론

현재 국가물류 수송의 경쟁력 향상과 증가되는 교통수요에 부응하기 위해 경부 고속철도의 건설 등 철도의 고속화와 수송량 증대에 많은 관심과 투자가 이루어지고 있지만, 점점 상승하는 유가 에너지의 비용에 대한 문제가 발생하고 있다. 이에 전기철도차량의 역할이 증대되고 있다. 본 논문에서는 추진 장치에 대한 성능시험과 추진 장치 성능시험기의 열차운행모의에 대한 연구를 수행하였다. 이를 통해 추진 장치 성능시험의 안전성 및 신뢰성을 확보해 유지비용 절감에 기여할 수 있다^[1]. 추진 장치에 들어가는 유도전동기는 PMSM과 비교하여 제작이 용이하고 안정성이 높은 장점이 있으나 특히, rotor flux 관측이 어려워 정밀 위치제어가 복잡한 단점이 있다. 정확한 전류제어의 수행과 함께 파라미터 변동 시에 요구되는 제어기의 강인성은 제어기의 필수 특성이 되었다. 추진 장치 시험에 사용되는 인덕션 모터는 매우 복잡한 식으로 구성되고, 벡터 제어를 이용한 인버터 또한 복잡하다. 따라서 간단한 회로로 구성하여 개발자가 수시로 모의할 수 있는 프로그램이 필요하다. 이러한 연구에 있어서 열차의 중심부를 모의할 수 있는 시뮬레이션을 Simplorer 프로그램을 사용하여 완성하였다. 이 프로그램을 도시철도차량, 고속철도차량의 주행 시뮬레이션에 적용하여 소비 및 회생 에너지에 대한 연구를 하였다. 본 연구실에서 추진 장치에 대한 논문을 발표했기 때문에 열차 주행과 그 결과에 대해서만 논하였다.

2. 열차 주행



(a) 실제 열차 주행 시스템 블록도
 (a) Block diagram for Actual Train Running System



(b) Simplorer 열차 주행 시스템 블록도
 (b) Block diagram for Simplorer Train Running

그림 1 열차 주행 시스템 블록도
 Fig. 1 Block diagram for Train Running System

열차의 주행은 출발 후 가속하여 제한 속도까지 속도를 증가시킨 후, 타행, 제동, 정지의 순으로 구동된다^[2,3]. 그림 1의 (a)는 실제 열차 주행 시스템을 블록도로 나타낸 것으로 열차 주행에 관련된 식들을 바탕으로 구성되었고, (b)는 Simplorer 프로그램에서 이와 똑같은 모양으로 구성하여 사용자가 프로그램의 이해 및 수정이 편하도록 하였다. 이 시스템은 견인력 (\$T_m\$), 열차저항(\$T_r\$), 공기저항(\$T_b\$), 열차관성(\$T_a\$)으로 크게 네 부분으로 나눌 수 있다^[4,5].

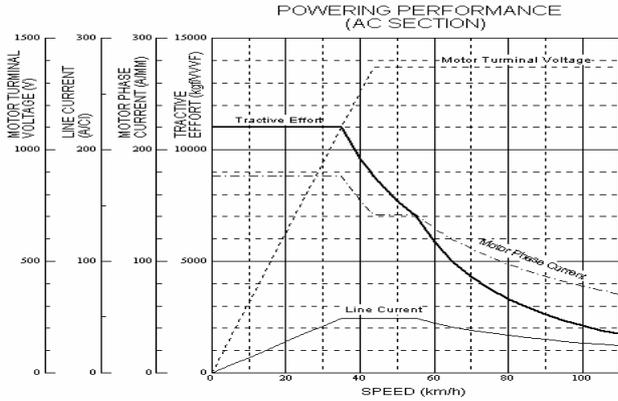
$$T_m - T_r - T_b = T_a(\text{kgf}) \quad (1)$$

$$\text{Accel} = (T_a \times 9.8) / W \quad (\text{m/s}^2) \quad (2)$$

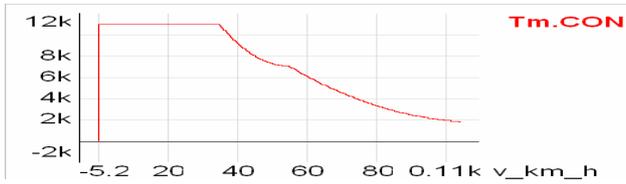
$$\text{Velocity} = \int_t \text{Accel} dt \quad (\text{m/s}) \quad (3)$$

여기서 \$W\$는 열차의 무게로 만차 시 무게인 113ton이다. 열

차의 견인력은 그림 2의 (a)와 같이 실제 열차의 속도(km/h)에 따른 견인력 그래프를 모사해 식 (3)에 의해 출력되는 속도(m/s)를 단위 변환하여(km/h) 그림 2의 (b)와 같이 견인력이 출력 되도록 하였다.



(a) AC 모터의 견인력 성능 그래프
(a) Traction Performance Graph of AC Motor



(b) Simplorer 견인력 그래프
(b) Simplorer Traction Graph

그림 2 열차의 견인력 - T_m
Fig. 2 Train Traction - T_m

열차저항(T_r)은 주행저항(R_r), 구배저항(R_g), 곡선저항(R_c)으로 이루어져 있으며 식 (4)와 같다^[4].

$$T_r = R_r + R_g + R_c \text{ (kgf)} \quad (4)$$

$$R_r = (1.867 + 0.0359V + 0.000745V^2) \times W \text{ (kgf)} \quad (5)$$

$$R_g = W \times (i \times m) \text{ (kgf)} \quad (6)$$

$$R_c = 600/r \text{ (kgf)} \quad (7)$$

$$R_c = 600/r \text{ Distance} = \int_t \text{Velocity} dt \text{ (m)} \quad (8)$$

식 (5)는 주행저항을 나타낸 식으로 1.867은 기계부분 마찰저항, 0.0359는 차축과 궤조간 마찰저항, 0.000745는 공기저항이고, V는 열차의 속도(km/h)이다. 식 (6)은 구배저항으로 m은 구배계리이고, i는 구배 높이이다. 식 (7)은 곡선저항으로 600(m)은 궤간과 고정축 거리의 합이고, r(m)은 곡선의 반경이다. 이 값들은 노선 데이터를 이용하여 열차의 주행거리 식 (8)에 따라 변화하도록 프로그램 하였다.

$$\text{Berak} = 28.34 \times (113 + 40 \times 0.14 + 33 \times 0.06) \times 3.5 \quad (9) \\ = 11960 \text{ kgf}$$

식 (9)는 열차의 회생제동(역 토크) 식으로 11960kgf가 나온다. 이 값은 공기제동(T_b)과 차량제동(T_{m_break})이 합해진

값이다. 위에서 설명한 견인력과 마찬가지로 열차의 속도에 맞는 역토크를 발생시켜 열차의 제동 작용을 한다. 이 값은 열차가 제동을 거는 순간부터 정차구간에 근접하여 속도가 5km/h 이하일 때까지 역토크를 발생 시키고, 이후로는 공기제동으로만 열차를 정지 시킨다. 그림 3은 열차의 전기제동 성능 그래프로 견인력처럼 속도에 맞는 값이 출력되도록 하였다.

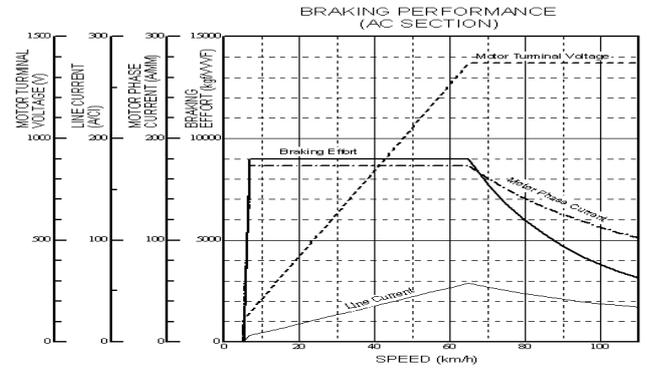


그림 3 전기제동 성능 그래프
Fig. 3 Breaking Performance Graph

공기제동(T_b)은 위에서 설명한 것과 같이 열차가 제동을 시작하는 시점에서부터 정차하는 순간까지 발생하여 열차가 정확한 정차구간에서 정지하도록 한다. 이 값은 1262kgf로 총 M카(추진 장치가 있는 부분)의 요구제동력계산식 식(10)에서 나온 값을 회생제동 값에서 빼주면 나온다. 식 (11)이 공기제동 식이다^[2,4].

$$60 \times 1000 \times 0.1783 = 10698 \text{ kgf} \quad (10)$$

$$11960 - 10698 = 1262 \text{ kgf} \quad (11)$$

제동 시 모터에는 역토크가 인가되어 역 회전을 하게 된다. 이 때 맞물려 있는 제너레이터는 정 회전을 하게 되어 발전기로서 구동 할 수 있게 된다. 이를 통해 본 연구의 궁극적인 목표인 소비에너지와 회생에너지에 대한 연구를 할 수 있다.

3. 시뮬레이션

표 1 모터, 제너레이터의 파라미터
Table 1 Paramater of Motor and Generator

	MOTOR	GENERATOR		MOTOR	GENERATOR
전압	11000[V]	690[V]	고정자 인덕턴스	0.0482[H]	0.00454[H]
최대 토크	239.98[N.m]	10.396[N.m]	회전자 인덕턴스	0.0483[H]	0.00457[H]
회전자 저항	0.0777[Ω]	0.00388[Ω]	상호 인덕턴스	0.047[H]	0.00439[H]
고정자 저항	0.13448[Ω]	0.00509[Ω]	관성 모멘트	42.62[kg·m ²]	42.62[kg·m ²]

시뮬레이션에 사용된 인덕션 모터와 제너레이터의 파라미터를 표 1에 나타내었다. 열차 주행을 모사한 프로그램과 추진장치를 모사한 프로그램을 합쳐 전체적인 열차 구동 시스템을 완성하였다. 그림 4는 Simplorer에서 구현된 전체 시스템이다. 실제 견인 열차는 총 4대의 M-G set으로 구성 되어있지만 이를

시뮬레이션하면 프로그램이 복잡해지고 계산량이 많아져 프로그램이 실행되지 않는다. 하지만, 전체 시스템이 선형적이므로 하나의 M-G set으로 실험을 하였다. 본 논문의 목적인 회생에너지 연구를 위해 주행 시 발생하는 열차의 견인력(kgf)을 토크(Nm)로 변환하여 모터의 레퍼런스로 입력되고, 열차의 속도(km) 또한 제너레이터의 레퍼런스로 입력시키기 위해 rpm으로 단위 변환하였다.

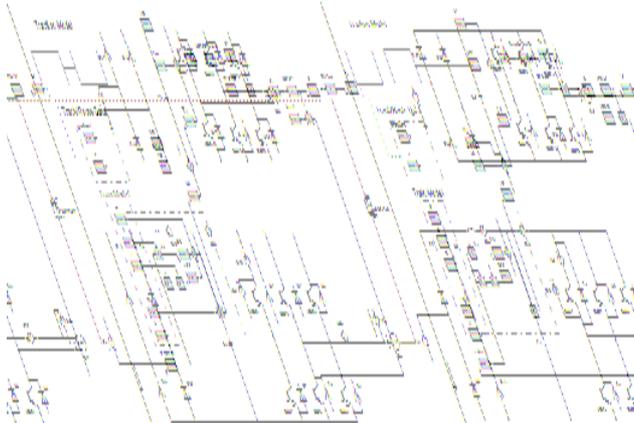
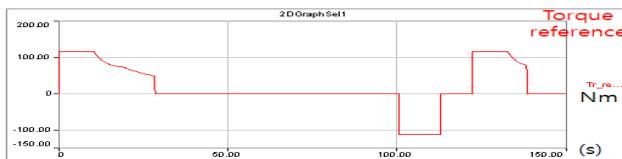
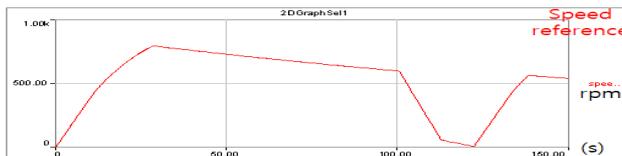


그림 4 Simplorer 열차 구동 시스템 블록도
Fig. 4 Simplorer Train Operation System Block diagram



(a) 토크 레퍼런스와 결과 파형
(a) Torque Reference and Result Waveform



(b) 속도 레퍼런스와 결과 파형
(b) Speed Reference and Result Waveform

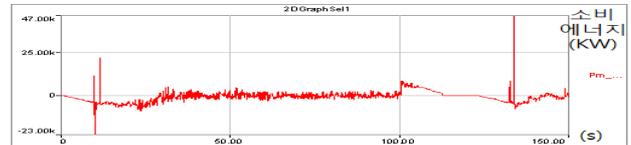
그림 5 Simplorer 시뮬레이션 결과 파형
Fig. 5 Simplorer Simulation Result Waveform

그림 5는 토크와 속도 레퍼런스 파형을 모터와 제너레이터의 출력 파형과 비교해 놓은 것으로 각각 레퍼런스를 잘 따라가고 있다. 식 (12)와 (13)은 모터와 제너레이터에서 발생하는 전력을 구하는 공식으로 토크와 회전 각속도로 구하였다. 이 식에

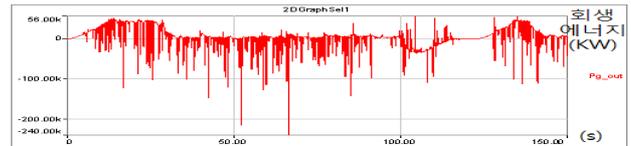
의해 나온 값들이 소비 에너지와 회생 에너지이다.

$$P_{m_out} = IM1.MI \times IM1.rad/s \quad (12)$$

$$P_{m_out} = IM2.MI \times IM2.rad/s \quad (13)$$



(a) 소비 에너지 결과 파형
(a) Consumption Energy Waveform



(b) 회생 에너지 결과 파형
(b) Recovery Energy Waveform

그림 6 Simplorer 에너지 결과 파형
Fig. 6 Simplorer Simulation Result Waveform

그림 6은 열차가 첫 정차역을 달려 다음 정차역에 도달하여 다시 출발하는 시점까지의 모터에서 소비되는 소비에너지와 제너레이터에서 회생되는 회생에너지의 결과 파형이다.

4. 결론

열차 주행 시뮬레이션과 추진장치를 모사한 프로그램을 합쳐 열차가 첫 구간을 주행했을 시 모터에서 소비되는 에너지와 제너레이터에서 회생되는 에너지를 연구할 수 있다. 이를 바탕으로 실제 실험 장치의 토크 레퍼런스와 속도 레퍼런스를 시간에 따라 입력해 장비의 효율 및 손실 측정시험, 온도 상승 시험, 견인 및 제동 특성 시험, 효율 측정 시험, 전동기 병렬 운전시험을 할 수 있다. 이러한 다양한 실험을 한국철도기술연구원과 함께 수행 중으로 한국 전기 철도차량의 연구개발에 큰 기여를 할 것이다.

이 논문은 2006년도 철도 기술 연구원의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] 한국철도기술연구원, "틸팅 시스템 실용기술 개발", 2004, 7.
- [2] 한국철도기술연구원, "추진 장치 성능시험설비 실시설계 기술자문 완료 보고서, 설비 기술 검토서", pp.14~15, 시험설비 시뮬레이션, 2000, 10.
- [3] 산업자원부, "전동차형 VVVF 추진 장치 개발", 1~2장 추진 제어장치, 2000, 12.
- [4] Fei Lu, Mumin Song, Guohui Tian, Xiaolei Li, "The Application of Robot Formation Approach in the Control of Subway Train", IEEE International Conf. 06, pp.5937~5941. 2006, October.
- [5] Lee-Gunther, J., Bolduc, M., Butler, S., "Vista rail network simulation" IEEE Railroad Conf. pp.93~98, 1995, April.