

## 전동차 소비전력 영향요인 분석 및 예측 방안 연구

### Analysis on the influence factors of energy consumption and study on the prediction of energy consumption in EMU

김명한\*<sup>†</sup>, 박경봉\*, 조현직\*, 이재욱\*\*

Myong Han Kim\*<sup>†</sup>, Keong Bong Park\*, Hyun Jik Cho\*, Jae Wook Lee\*\*

**Abstract** Energy efficiency is a key factor for the EMU trains reasons of cost effectiveness and environmental competition. In this study, affecting factors to energy consumption for EMU trains such as train weight, efficiency, running resistance, gradient resistance, curve resistance, starting resistance and inertia mass are analyzed with TPS(Train Performance Simulation) and performance calculation. And energy consumption of each load for APU(Auxiliary Power Unit) which is fed the power to the major equipment and service equipment is analyzed. Based on the results of this analysis, energy saving strategy and prediction method of energy consumption were derived and it will be applied to the capacity optimization of APU.

**Keywords** : Energy consumption, Traction inverter, Auxiliary power unit, Train resistance, TPS

**초 록** 전동차의 소비전력(Energy Consumption)은 유지보수 비용 절감 및 온실가스 배출 규제 대응을 위한 중요한 요인으로 본 연구에서는 전동차의 주요 전력 소모 장치인 추진 제어장치의 소비전력에 영향을 미치는 중량, 효율, 주행저항, 구배저항, 곡선저항, 출발저항 및 관성질량 등의 요인을 TPS(모의 주행 시뮬레이션) 및 성능 계산을 이용하여 분석하였으며, 차량의 주요 장치와 서비스 기기에 전원을 공급하는 보조전원장치의 부하 별 소비전력을 분석하였다. 이러한 분석 결과를 바탕으로 소비전력 영향 요인 및 전력 사용량 예측 방안을 도출하였으며 주요장치의 용량 최적화 자료로 활용하고자 한다.

**주요어** : 소비전력, 추진제어장치, 보조전원장치, 주행저항, TPS

## 1. 서 론

에너지 절감은 온실가스 감축과 기후변화 대비 저탄소, 녹색성장을 위해 지속적인 관심과 요구가 증가하고 있으며, 철도분야의 유지보수 비용 중 소비전력이 큰 부분을 차지하고 있어 에너지 절감을 위한 운영 효율화, 회생전력 회수장치, 에너지 저장 장치 등 다양한 시도가 진행되고 있다. 또한 해외에서는 소비전력에 대한 각종 국제 규격(EN, TSI, UIC 등) 제정 및 요구사항을 강화하고 있는 추세로 이러한 요구사항 만족을 위해 전동차의 소비전력 영향 요인을 정확히 분석하고 이를 예측 할 수 있는 방안 마련이 필요하다.

† 교신저자: (주)현대로템 기술연구소, 시스템엔지니어링팀(hans@hyundai-rottem.co.kr)

\* (주)현대로템 기술연구소 시스템엔지니어링팀

\*\* (주)현대로템 기술연구소 전장품개발팀

## 2. 본 론

### 2.1 전동차 소비전력 영향 요인 및 일반식

#### 2.1.1 소비전력 영향 요인

전동차의 추진 소비전력에 영향을 미치는 요인으로는 가/감속도, 중량, 관성질량, 최고 속도 및 제한 속도 등이 있으며, 열차의 저항으로 작용하는 노선 조건(구배, 곡선, 터널 등), 주행저항 등이 있다. 보조전원장치에 영향을 미치는 주요 요인으로는 온도, 습도 등의 환경 조건, 주요 장치들의 동작주기(duty cycle) 등이 있으며 추가적인 소비전력 영향 요인으로는 전력 변환장치들의 효율이 영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 각종 영향 요인을 파악하고 각 요인 별 예측 방안이 마련되어야 한다.

#### 2.1.2 소비전력 일반식

상기와 같이 전동차에서 에너지를 소비하는 장치는 크게 추진제어장치와 보조전원장치로 나눌 수 있으며 이는 아래와 같은 전동차 소비전력 일반식으로 나타낼 수 있다.

$$E_{TRAIN} = \int_t \frac{E_{TRAC}}{\eta_{TRAC}} dt + \int_t \frac{E_{AUX}}{\eta_{AUX}} dt \quad (1)$$

$E_{TRAIN}$	전동차 소비전력
$E_{TRAC}$	추진제어장치 소비전력(역행 및 회생)
$E_{AUX}$	보조전원장치 소비전력 (주요장치 및 서비스 기기의 전원)
$\eta_{TRAC}$	추진제어장치 효율
$\eta_{AUX}$	보조전원장치 효율

여기에서 추진제어장치의 소비전력( $E_{TRAC}$ )은 아래와 같이 세분화하여 나타낼 수 있다.

$$E_{TRAC} = (M_I + M_P)xa + R_R + R_G + R_S + R_C \quad (2)$$

$M_I$	관성질량(Inertial mass)
$M_P$	성능만족을 위한 차량 중량(Weight)
$a$	요구 가속도(Acceleration)
$R_R$	주행저항(Running Resistance)
$R_G$	구배저항(Gradient Resistance)
$R_S$	출발저항(Starting Resistance)
$R_C$	곡선저항(Curved Resistance)

단, 추진 소비전력은 이외에도 운행 모드, 속도 프로파일, 제한 속도 등에 따라 달라질 수 있으나 이러한 조건은 배제하고 순수한 차량 자체의 영향에 대해서만 검토하기로 한다.

## 2.2 시뮬레이션에 의한 소비전력 영향 분석

### 2.2.1 차량 및 시뮬레이션 조건

하기와 같은 사양의 특정 전동차, 노선 조건에 대해 모의 주행 시뮬레이션을 하고 소비전력 영향 요인을 분석하였다.

- |   |                                    |
|---|------------------------------------|
| (1) 차량 조건   | (6) 노선 길이 : 22.1km                 |
| - 차량 구성 : Mc-M-T-Mc(3M1T)   | (7) 가/감속도 : 1.1m/s <sup>2</sup>    |
| - 중량 M(성능기준 AW3) : 216.9ton   | (8) 가선전압 : 1500Vdc                 |
| (2) 최대 속도 : 80km/h  | (9) 출발저항 $R_S = 49N/ton$           |
| (3) 최대 구배 : 50%   | (10) 관성질량 계수 : 10%(Mcar), 5%(Tcar) |
| (4) 출발저항 : 49N/ton  | (11) 곡선 저항 : 700*M/R               |
| (5) 주행저항 $R_R = 16.37702 + 0.22083*V + 0.00657*V^2$ [ N/ton] – Modified Davis Formula |                                    |

### 2.2.2 시뮬레이션 및 계산 결과

#### (1) 모의 주행 시뮬레이션(TPS)

아래 그림은 위와 같은 차량 및 성능 조건에서 전속 주행시의 시뮬레이션 결과에 대한 제한 속도, 운행속도 및 이동거리를 나타내고 있으며 시뮬레이션 결과 소비전력 값은 460kWh 이다. 추가로 소비전력에 영향을 미치는 요인을 분석하기 위해 중량, 주행저항, 구배/곡선 저항 등의 값을 변경하여 반복 시뮬레이션하고 결과를 도출하였다. 단, 회생 에너지는 일반적인 시뮬레이션 조건과 동일하게 100% 가선 수용 조건으로 시뮬레이션 하였다.

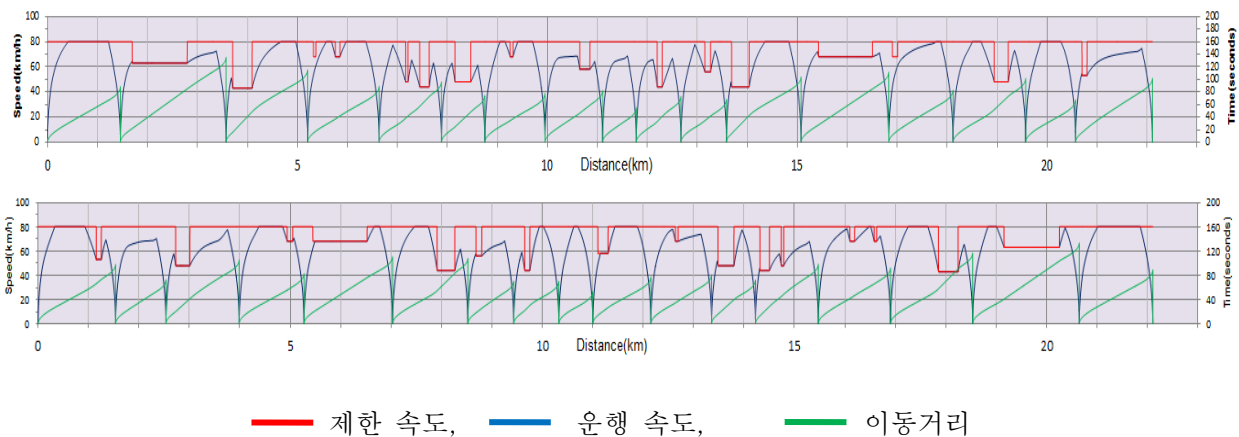


Fig. 1 Train performance simulation result for forward and backward

(2) 보조전원

역행, 제동을 제외한 차량의 전력 소모 장치로는 주요 기능 장치 및 서비스 기기가 있으며, 이러한 부하 장치 별 용량을 계산하고 영업 운행시의 동작 조건 반영, 운행시간을 고려하여 소비전력[kWh]을 산출하였고 값은 123.2kWh이다.

(3) 기타 영향 요인

출발저항 및 관성질량은 역행/회생 성능(tractive/braking effort curve)에 직접적인 영향을 미치고 비례적으로 증감 되므로 견인력[kN] 비율을 소비전력 비율로 환산하였으며, 장치 별 효율은 부하 및 속도 별로 일정한 것으로 가정하였다.

(4) 소비전력 비율

추진제어장치에 대한 모의 주행 시뮬레이션 결과, 보조전원장치의 소비전력, 기타 영향 요인에 따른 소비전력의 비율은 아래 표와 같다. 회생 에너지는 역행 에너지에서 차감되었으며 전체 소비전력에서 추진 소비전력은 약 80%를 차지하고 있다. 이는 다시 중량, 주행 저항, 효율, 구배 저항 등의 영향 요인으로 나눌 수 있다. 또한 보조전원장치의 소비전력은 전체의 약 20%로 냉난방장치(HVAC)의 영향이 가장 큰 것을 알 수 있다. 단, 이러한 비율은 차량 성능, 노선 조건, 요구 사양, 환경 조건 등에 따라 크게 달라지므로 절대적인 값으로 볼 수는 없다.

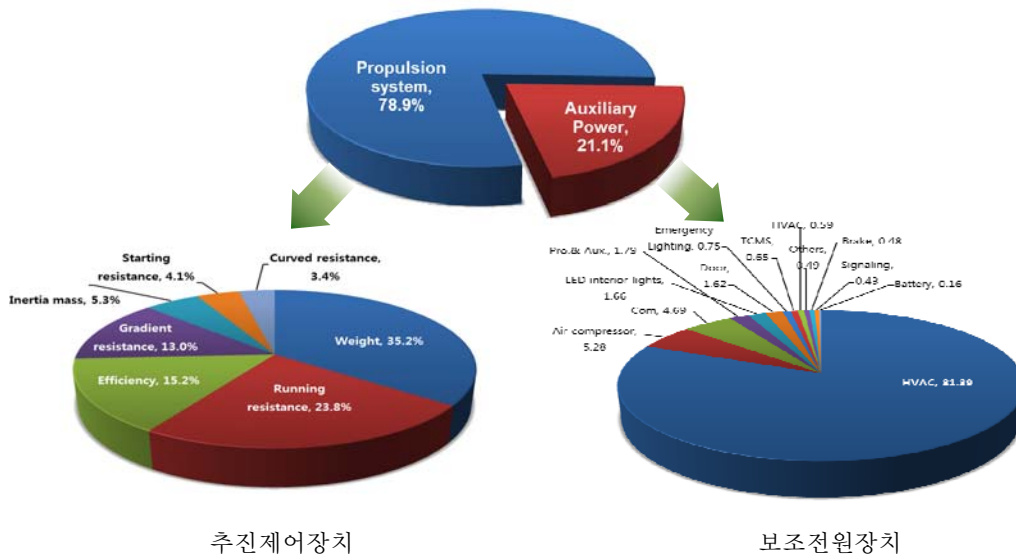


Fig. 2 Percentage share of energy consumption for propulsion and auxiliary power unit

**Table 1** The percentage figure of energy consumption in a train

순	항목	비율
1	Weight	27.8%
2	Auxiliary power	21.1%
3	Running resistance	18.8%
4	Efficiency	12.0%
5	Gradient resistance	10.2%
6	Inertia mass	4.2%
7	Starting resistance	3.2%
8	Curved resistance	2.7%

상기 표는 차량 전체 소비전력에 대한 각 영향 요인의 비율을 보인다. 순수 중량은 약 28%의 영향을 미치고 있으나 중량이 증가하게 되면 주행저항을 포함한 각종 저항(구배, 출발, 곡선) 및 관성질량이 증가하므로 그 영향이 절대적이라고 할 수 있다.

## 2.3 소비전력 영향 요인 별 분석 결과 및 예측 방안

### 2.3.1 중량(Weight)

차량의 중량은 소비전력의 절대적인 영향 요인이며 축중 한계를 만족하기 위한 필수적 관리 항목이다. 따라서 차량의 주요 장치 별 중량을 분석하고 절감 방안을 마련하여 성능은 만족되 중량은 최대한 절감할 수 있도록 해야 한다. 관리 방법으로는 설계 단계별 중량 관리 시스템을 적용하고 이력관리, 중량 DB 및 설계 툴(ex. CATIA)을 이용하여 단계별 예측, 관리가 되어야 한다.

### 2.3.2 보조전원(Auxiliary power)

차량에서 전력을 소비하는 개별 장치의 정확한 용량 반영이 필요하며 냉난방장치(HVAC)의 경우 환경 및 운행 조건(단열재, 정차시간, 출입문, 윈도우, 승객 발열 등)을 고려한 소비전력 계산이 필수적이다. 보조전원 소비전력 영향 요인 중 또 다른 주요 장치인 주 공기압축기는 차량의 제동 성능, 공기 스프링, 하중 변화, 손실 및 기타 공기 소모 장치들의 공기 소모량을 정확히 예측, 계산하고 완성차에서 시험을 통한 검증으로 소비전력을 예측 할 수 있다. 기타 추진/제동 제어장치, 출입문, 냉각 장치 등에 대해서는 동작 주기 및 특성을 고려한 소비전력 예측이 필요하다.

### 2.3.3 주행저항(Running resistance)

주행저항은 열차의 진행을 방해는 힘으로서 일반적으로  $R = A + BV + CV^2$  (Davis formula) 식으로 나타내며 회전부 마찰(A), 구름 저항(B), 공기저항(C)이 주된 원인이다. 주행저항의 정확한 예측은 어려우나 소비전력에 큰 영향을 미치므로 차종 별 시험을 통해 최대한 유사한 주행 저항 식의 확보 및 적용이 필요하다.

#### 2.3.4 효율(Efficiency)

전력 변환장치의 효율 개선 방안은 한계가 있으나 최신 전력 변환 반도체 IGBT(SiC)의 적용, 영구자석 동기전동기(PMSM) 적용, 추진시스템(주변압기, 인버터, 견인전동기)의 속도 및 부하 별 효율 적용, 보조전원장치의 부하 별 효율 적용, 기타 배선 등의 저항에 의한 손실을 시뮬레이션에 반영하여 보다 정확한 결과를 획득 할 수 있다.

#### 2.3.5 구배저항

구배 저항은 일반적인 물리식으로 계산 가능하며  $R_G[N] = M * \sin(\tan^{-1}\%) * g \approx M * \% * g$  식으로 계산한다.

여기서, M은 차량 중량, % 구배,  $g[m/s^2]$  중력 가속도 이다.

#### 2.3.6 관성질량

회전체의 관성질량 값으로 공차 대비 퍼센트(%)로 나타내며 국내 전동차의 경우 구동차 14%, 부수차 6%를 적용하고 있으나 차량의 사양에 따라 값이 상이하므로 회전체의 관성모멘트로부터 관성 질량 계산 및 차종 별 DB화하여 해당 관성질량 계수를 적용한다. 본 논문에서는 구동차 10%, 부수차 5%를 적용하였다.

#### 2.3.7 출발저항

정차 상태 차량의 관성력, 회전 저항 등으로 인해 출발시 요구되는 힘으로 전동차의 경우 시험적으로 30~50N/ton으로 확인 되며 차량 사양 등을 고려하여 적절한 값을 적용해야 한다. 본 연구에서는 49N/ton를 적용하였다.

#### 2.3.8 곡선저항

곡선 운행시 레일트랙이 곡선을 따라 주행하도록 열차를 강제할 때 발행하는 힘으로  $R[N]=k*M(\text{중량})*9.81/R(\text{곡선 반경})$ 으로 나타낼 수 있으며 일반적으로 상수 k의 범위는 500~1200의 값을 적용한다. 국내의 경우 관련 규격에 따라 700을 적용한다.

### 3. 결론

본 논문에서는 전동차의 소비전력에 영향을 미치는 요인을 분석하고 각 항목에 대한 예측 방안에 대해 연구하였으며, 이러한 결과를 활용하여 보다 정확한 소비전력 예측이 가능 할 것으로 판단된다. 또한 본 연구 결과를 반영한 모의 주행 시뮬레이션 및 계산 결과에 대해 본선 시험을 통해 검증이 되면 보다 정확도 높은 결과가 예상되므로 추후 과제의 여지가 있다. 이러한 검증을 통해 보다 정확한 LCC 비용 예측, 입찰 경쟁력 확보, 전력변환장치의 용량 최적화 및 국제 규격에서 요구하는 소비전력 측정 방법을 만족 할 수 있으며, 영구자석 동기전동기(PMSM), 에너지 저장 장치(Energy storage) 등의 미래 사업에서도 활용 가능할 것으로 판단 된다.

## 참고문헌

- [1] Walter Günselmann (2005) Technologies for Increased Energy Efficiency in Railway Systems, *IEEE Power Electronics and Applications, 2005 European Conference*, ISBN : 90-75815-08-5
- [2] Jyh-Cherng JONG, En-Fu CHANG (2005) Models for Estimating Energy Consumption of Electric Trains, *Journal of the Eastern Asia society for Transportation Studies*, Vol.6, pp.278-291, 2005
- [3] Takamitsu YAMAMOTO (2015) Recently Studies and Developments of Energy Saving Technologies in the Field of Railway Vehicles, *QR Railway Technical Research Institute*, Vol.56, No.4, Nov. 2015
- [4] P Martin (2015) TRAIN PERFORMANCE SIMULATION, *2008 IET Professional Development course on*, IET, ISBN : 978-0-86341-948-5