

미니트램 차량의 주행 성능 분석을 통한 에너지 소모량 예측

정락교*, 조일선*, 이광섭**, 김찬수**, **강석원***
 한국철도기술연구원*, ㈜우진산업 철도차량 기술연구소**

Energy Requirement Estimation through the Performance Analysis of a Mini-Tram Vehicle

Rag-Gyo Jeong*, Il-Sun Cho*, Kwang-Seob Lee**, Chan-Soo Kim**, Seok-Won Kang*
 Korea Railroad Research Institute*, WOJIN Industrial Systems Co., Ltd.**

Abstract - 미니트램(Mini-Tram)은 승차차 시간 동안 정거장에서의 무선급전 방식에 의한 급속충전(약, 2분 30초 이내)을 통해 에너지를 공급받으며, 운행 시 차상에 설치된 에너지저장 매체(LIC: Lithium-Ion Capacitor)로부터 전기에너지를 공급받아서 운행된다. 차량에 요구되는 에너지 소모량을 분석하고 이에 맞춰서 저장 매체의 직-병렬 구성 및 전력 변환 장치(Regulator 및 DC-DC 컨버터 등)를 설계하는 것은 전기 구동 차량인 미니트램의 설계에서 매우 중요한 부분이다. 본 논문에서는 미니트램 시스템을 개발하는 과정에서 수행된 에너지공급시스템의 사양 설정을 위한 에너지 소모량 예측과 더불어 이와 관련된 주행저항 및 주행성능 분석에 대해서 다룬다.

차량이 일정한 주행속도로 주행하다가 가속을 하였을 때 차량은 먼저 달리던 속도를 그대로 유지하려는 특성을 나타내며, 이를 가속저항(R_{ac})이라 한다.

$$R_{ac} = \frac{\alpha}{g} (W_e + W) \quad (3)$$

여기서, W 는 차량의 중량[kg], W_e 는 회전 부분의 관성 상당 중량[kg], a 는 가속도[m/s²], g 는 중력가속도[m/s²]를 의미한다. 미니트램 차량의 감가속도 성능은 <표 1>과 같으며 회전부 관성질량 보상계수는 0.08을 적용한다.

1. 서 론

미니트램(PRT: Personal Rapid Transit)은 1~6인승의 초소형 신교통 시스템으로 간선철도나 관련 유관 대중교통(예, 버스나 지하철 등)에서 담당할 수 없는 연계 교통시스템으로서의 역할을 수행하기에 적합한 시스템으로 주목받고 있다. 한국형 미니트램은 철도의 중앙 관제에 의한 운영 개념과 전기 구동 자동차 기반의 차량 시스템이 융합되어 개발되고 있다. 특히, 운행 중 차상의 독립 전원에만 의존하여 운행되는 미니트램의 경우 향후 상업적인 면에서의 경쟁력을 갖추기 위해서는 시스템적으로 안정적인 에너지 공급에 대한 신뢰성을 확보하는 게 필수이다. 이에 기존 자동차 및 철도 차량의 주행저항식을 바탕으로 미니트램만의 주행저항식을 도출하고 추진모터의 성능사양을 예측하여 차량의 운행에 요구되는 에너지 요구 사양을 도출하였다. 본 연구를 통해서 수행된 에너지 소모량 분석 결과는 현재 개발 중인 한국형 미니트램 차량의 에너지 시스템 설계에 반영될 예정이다.

<표 1> 미니트램 차량의 가감속 성능

항목	사양[m/s ²]	
가속도	0.97	
감속도	상용	1.4
	비상	3.3

끝으로, 구배저항(R_{gr})은 경사각 θ 에 대하여 아래와 같이 계산된다.

$$R_{gr} = W \sin \theta \approx W \tan \theta \quad (4)$$

여기서 W 는 차량의 중량[kg]이며, 미니트램 차량의 최대 등판 구배는 100%($\theta=5.71^\circ$)이다.

2. 본 론

2.1 미니트램의 주행주항

주행저항은 차량이 궤도나 노면을 주행할 시 주행에 대하여 저항하는 힘을 일컫으며, 주요 주행저항으로는 전동저항(Rolling Resistance), 공기저항(Air Resistance), 가속저항(Acceleration Resistance) 및 구배(등판)저항(Gradient Resistance)이 있다[1]. 일반적으로 주행저항식은 많은 주행시험의 자료 등의 경험치를 기초로 만들어진다.

2.1.1 주행저항 요소 분석

전동저항(R_r)은 차량이 평면 위에서 회전할 때 생기는 저항을 나타내며, 이 저항은 타이어와 노면과의 사이에서 생기는 마찰력에 의한 저항을 말한다.

$$R_r = W\mu \quad (1)$$

여기서, R_r 은 전동저항[kg], W 는 차량 총 중량[kg], μ 는 전동저항계수를 나타낸다. 특히, μ 는 노면 및 타이어의 상태에 따라 영향을 받으며 시간이 흐를수록 변화되고 예측할 수 없으므로 본 연구에서는 미니트램이 운행되는 노면의 상태를 고려할 때 마멸된 콘크리트 포장도로($\mu=0.012$)라 가정하여 계산한다[2]. 또한, 공기저항(R_a)은 차량이 주행할 때 차량 주변의 공기 때문에 발생하는 저항으로 차량 앞부분의 단면적과 공기 밀도 및 차량 속도 등이 영향을 미치며 다음 식에 의해 계산된다.

$$R_a = \mu_a A V^2 \quad (2)$$

여기서, μ_a 는 공기저항계수[kg·s²/m⁴], A 는 차량 전면 단면적[m²], V 는 공기와 차량의 상대속도(근사적으로 주행속도)[m/s]이며, 미니트램 차량의 전면 형상을 고려하여 승용차($\mu_a=0.012$)와 버스($\mu_a=0.040$)의 중간값인 0.026을 적용하기로 한다.

2.1.2 주행저항식 도출

미니트램 차량의 주행저항을 계산하기 위한 주요 제원[3]은 아래 <표 2>와 같으며, 각각의 주행저항 요소는 아래와 같이 계산된다.

<표 2> 주행저항 계산을 위한 주요 제원

항목	제원	비고
만차중량(W)	1,500kg	
전동저항계수(μ)	0.012	
공기저항계수(μ_a)	0.026kg·s ² /m ⁴	
차량 전면 면적(A)	3.6m ²	1.8*2.0(m)
가속도(a)	0.97m/s ²	3.0km/h/s
관성상당중량(W_e)	120kg	1,500*0.08(보상계수)
등판각(θ) (구배)	5.71°	100%

- 전동저항

$$R_r = W\mu = 18[kgf] \quad (5)$$

- 공기저항

$$R_a = \mu_a A V^2 = 0.0936 V^2[kgf] \quad (6)$$

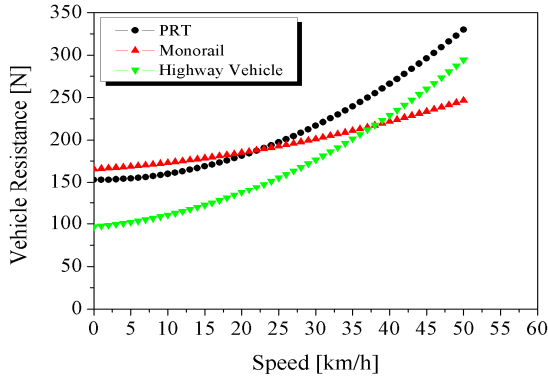
- 가속저항

$$R_{ac} = \frac{\alpha}{g} (W_e + W) = 160.35[kgf] \quad (7)$$

- 구배저항

$$R_{gr} = W \sin \theta = 149.24[kgf] \quad (8)$$

차량의 주행조건에 따라서 위의 4가지 저항요소(식(5)~(8)) 중 각기 다른 조합에 의해 주행저항식이 도출된다. 예를 들어, 평탄로를 일정한 속도로 주행할 경우 미니트램의 주행저항은 $18+0.0936V^2$ 이 되며, <그림 1>은 동일한 조건에서 다른 교통수단과의 비교를 나타낸다.



〈그림 1〉 평탄로/등속도 조건에서의 주행저항식 비교

2.2 주행성능 분석

주행저항의 차량의 주요 에너지 소모원은 추진모터이다. 이에 차량의 추진에 필요한 에너지양을 산정하여 적합한 (추진)모터의 용량을 계산함과 동시에 요구되는 에너지 소모량을 추정하고자 한다. 일반적으로 견인력(Traction Power)은 정지 상태에 있는 차량을 주행 저항력을 이겨내고 일정 속도까지 가속하기 위해 요구되는 힘을 의미한다.

$$TE = m \times a + R_r [N] = 28.35 \cdot W_d \cdot a + R_r [kgf] \quad (9)$$

여기서,

$$W_d = \left(0.1 \times \frac{1}{2} W_o\right) + \left(0.05 \times \frac{1}{2} W_o\right) + W \quad (10)$$

또한, W_d 는 관성 질량[ton], W_o 는 공차 중량[ton], W 는 만차 중량[ton], a 는 가속도[km/h/s]를 의미한다. 미니트램 차량의 경우, 만차 하중인 1.5[ton]의 차량을 25[km/h]의 속도까지 3.0[km/h/s]의 가속도로 내기 위하여 요구되는 견인력은 대략 157.7[kgf]이다. 이 영역에서의 점착계수(μ)는 아래 식에 의해 계산된다.

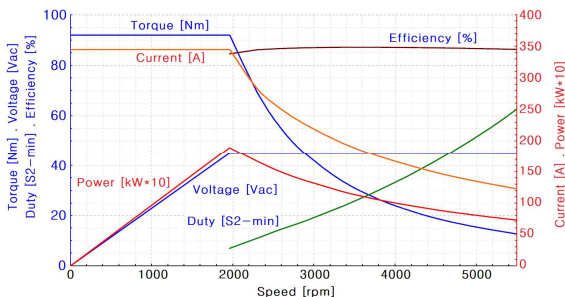
$$\mu = \frac{F}{M} = 0.21 \quad (11)$$

여기서 F 는 견인력[kgf]이며, M 은 축 1개당 축중[kg]을 나타낸다. 점착계수가 21[%] 수준으로 고무 Tire의 특성을 고려하면 출발 시 차량이 공회전할 가능성은 극히 적어 정상적으로 출발할 것으로 예상된다. 또한, 정출력 영역은 속도에 반비례하여 감소하고 출력은 일정한 특성을 갖는 구간으로, 이 영역에서의 견인력은 아래와 같이 계산된다. 정출력 중단 속도가 35[km/h]일 때, 전동기에 요구되는 견인력은 대략 112.64[kgf]이다. 그에 따른 점착계수는 0.15이다.

$$TE = \frac{F \times V_1}{V_2} \quad (12)$$

이와 더불어 특성 영역에서의 견인력은 (속도)²에 반비례하여 감소하고, 출력은 속도에 반비례하여 감소하는 특성을 갖는 구간이다. 차량이 설계 최고속도인 50[km/h]의 속도로 주행할 경우 견인력과 점착계수는 각각 55.19[kgf]와 0.074이다. 각 영역에서 요구되는 가속력은 성능사양인 3[km/h/s] 이하로 예측되었으며, 이에 필요한 모터 용량(P_m)은 기어효율(η)을 0.95라 가정할 때 대략 7[kW]로 예측되었다. <그림 2>는 미니트램에 적용된 7[kW]급 유도전동기의 특성곡선을 나타낸다.

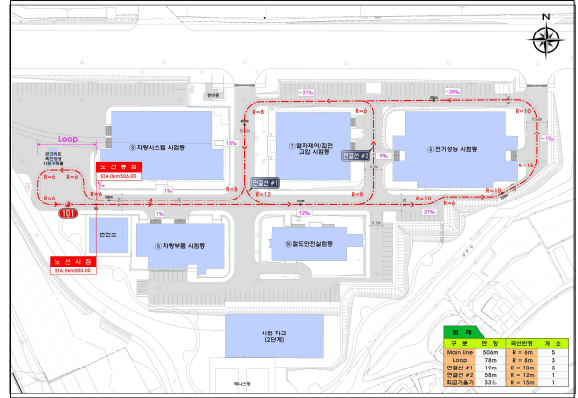
$$P_m = \frac{F \times V}{1.6 \times \eta} = 7.06 [kW] \quad (13)$$



〈그림 2〉 7[kW]급 유도전동기의 특성 곡선

2.3 요구전력량 산정

미니트램의 최소 운행 거리를 규정하기는 어려우며, 현재 연구원에 구축된 시험노선은 시범적용을 위한 노선보다는 시스템의 개념 검증을 위한 시험노선이라 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서는 불가피하게 시험노선을 기준으로 필요전력량을 산정하였다. 한국철도기술연구원 내 서측부지(6동~10동)에 구축된 시험노선은 총연장 506m이며, 총 5개의 역사(실제 구축된 역사 1개 외 가상역사 4개로 구성)가 구축되어 있다. 아래 그림은 실제로 구축된 노선의 평면도를 나타낸다.



〈그림 3〉 연구원 내 구축된 시험노선 평면도

차량의 운행은 정지 상태에서 2.5[km/h/s](2-3구역만 3.125[km/h/s])로 가속하여 30[km/h]의 속도에 도달하면 정속 운행 후 감속도 5.0[km/h/s]로 감속하여 정거장에 일시 정차한 후 다음 정거장까지 같은 운행패턴으로 반복하며 최초 출발지까지 운영되는 것으로 가정하였다. 또한, 가동률을 고려했을 때의 대략적인 서비스 기기의 소비전력량은 대략 3,333[kW] 정도인 것으로 조사되었다.

내부 서비스 기기의 부하량을 고려한 상태에서 시험노선에서의 차량 운행에 따른 견인력 및 주행저항에 의한 소비전력을 계산하였으며, 위에 언급된 운행패턴으로 1회전 시 241.1[Wh]가 필요한 것으로 조사되었다. 이에 실제 차량의 주 에너지원인 LIC(Lithium-Ion Capacitor)를 차량에 적용했을 때 차량에 공급 가능한 총 에너지양에 대해서 <표 3>과 같이 검토하였다.

〈표 3〉 차량의 에너지저장매체 구성(안)

모듈구성	2직렬 * 3병렬	2직렬 * 4병렬
최대전압[V]	91.2	91.2
최소전압[V]	52.8	52.8
정격용량[F]	412.5	550
최대전력[Wh]	226.26	301.68

그 결과, 2 직렬-4 병렬의 경우 현재 시험노선뿐만 아니라 1[km]의 거리를 가속(50[m], 2.5[km/h/s])-정속(925[m], 30[km/h])-감속(25[m], 5.0[km/h/s])으로 운행했을 때에도 문제가 없을 것으로 판단되었다. 참고로, 2직렬 구성은 전력변환장치(즉, DC-DC 컨버터) 없이 모터(MCU)에 직결할 수 있는 장점이 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 현재 개발 중인 미니트램 차량의 주행저항 및 추진성능 분석을 통한 에너지 소모량 예측을 수행하였다. 이에 근거하여 실제 차량의 에너지저장 매체 구성을 설계하였으며, 급년도 하반기에 제작될 시제 2호 차량에 반영될 예정이다. 향후 미니트램에 적합한 매체의 개발 및 에너지 공급 시스템의 효율성 향상을 통해서 미니트램의 확장성을 확보하기 위한 연구를 지속적으로 수행할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] R.K. Rajput, "A Textbook of Automobile Engineering", Firewall Media, 2007
- [2] 이창식, "자동차의 주행저항과 타이어의 성능", Tire & Rubber, 141, 2-10, 1989
- [3] 정락교 외, "수요응답형 순환교통시스템(PRT) 핵심기술 개발", 한국철도기술연구원, 2014