ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 31(3), 131-137 (2021) https://doi.org/10.4283/JKMS.2021.31.3.131

Investigation of Fuel Economy of Light Electric Vehicle According to Size of Traction Motor Considering Material Properties and Driving Cycles

Dong-Min Kim
Department of Automotive Engineering, Honam University, Gwanju 62399, Korea

Dae-Kee Kim and Myung-Seop Lim*
Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

(Received 19 June 2021, Received in final form 25 June 2021, Accepted 25 June 2021)

This paper deals with the fuel economy of the light electric vehicle (LEV) according to the size of the traction motor. Firstly, the cross-sectional area design was conducted considering the electromagnetic and mechanical properties of materials for the traction motor. Based on this design result, the characteristics of the traction motor was estimated according to the stack length by using finite element analysis (FEA) and equivalent circuit. Next, to investigate the effect on fuel economy, the vehicle simulation was constructed. The ADVISOR, freeware of the MATLAB-based program, was utilized. Especially, to reflect the successive charge-discharge situation, 2nd order RC equivalent circuit was adopted. Finally, the relationship between the traction motor size and fuel economy was analyzed for the urban driving cycle and highway driving cycle.

Keywords : driving cycle, fuel economy, light electric vehicle, traction motor

주행사이클과 재질 특성을 고려한 구동모터의 사이즈에 따른 경량 전기차의 전비 분석

김동민
호남대학교 미래자동차공학부, 광주시 광산구 호남대길 120, 62399

김대기 · 임명섭*
한양대학교 미래자동차공학과, 서울시 성동구 왕십리로 222, 04763

(2021년 6월 19일 받음, 2021년 6월 25일 최종수정본 받음, 2021년 6월 25일 게재확정)

본 논문은 경량 전기차의 구동모터 사이즈에 따른 전비 분석에 관한 연구 내용을 다룬다. 먼저, 구동모터를 구성하고 있는 재료의 자기적 특성과 기계적 특성을 고려하여 단면 형상 설계를 진행하였다. 이 단면 형상을 이용하여 적층 길이 별, 즉, 모터 사이즈 변화에 따른 특성을 전자기 유한요소 해석과 등가회로를 이용하여 예측하였다. 이렇게 예측한 특성의 차량 전비에 대한 영향을 분석하기 위하여 차량 시뮬레이션을 구성하였다. MATLAB기반의 ADVISOR 프로그램을 활용하였으며, 특히 배터리의 충-방전 상황을 잘 반영하기 위하여 2차 RC 등가회로를 배터리 모델로 채용하였다. 마지막으로 구성된 시뮬레이션을 기반으로 도심 주행 사이클과 고속 주행 사이클에 대하여 구동모터 사이즈와 전비 사이의 관계를 분석하였다.

주제어 : 경량 전기차, 구동모터, 전비, 주행사이클

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-2-2220-4466,
Fax: +82-2-2220-4465, e-mail: myungseop@hanyang.ac.kr

I. 서 론

최근 승용차의 전동화에 이어 상용차 및 개인용 이동수단에도 전동화가 많이 이루어지고 있다. 그 중에서도 개인용 이동수단으로 사용되는 경량 전기차(Light-duty Electric Vehicle, LEV)이 개인 이동수단 뿐만 아니라 관광지나 배달용도로도 주목을 받고 있다. 이러한 용도의 LEV는 배터리 용량이 보통 작기 때문에 구동 모터의 효율, 나아가 차량의 전비가 중요 이슈로 자리잡고 있다.

차량 전비를 향상시키기 위해서는 결과적으로 에너비 소비량을 감소시켜야 한다. 이를 위해서는 차량이 하는 일을 저감하는 경량화 방향이나, 구동모터의 주 운전 영역 효율 증대가 필요하다. 이러한 측면을 반영하여 전비에 대한 구동모터의 영향을 살펴보기 위해서는 차량 시뮬레이션을 통한 에너지 소비량 분석이 수행되어야 한다.

또한 모터의 효율은 자성 재료의 영향이 굉장히 크다[1]. 모터의 고정자와 회전자 코어에 사용되는 전기 강판, 고정자 권선, 회전자 영구자석 등은 모두 모터의 손실과 출력 특성에 영향을 미친다. 따라서 이러한 자성 재료의 특성을 잘 파악하여 모터 설계에 잘 반영하여야 한다[2].

본 논문은 LEV 구동용 모터의 사이즈에 따른 전비 양상 분석에 대하여 소개한다. 먼저 자성 재료의 자기적, 기계적 특성을 반영하여 구동 모터의 단면 개선 설계를 수행한다. 다음으로는 차량 시뮬레이션을 통한 에너지 소비량 파악을 위하여 차량 시뮬레이션을 구성한다. 이어서 구성된 차량 시뮬레이션을 통하여 개선 설계된 구동모터 모델의 적층 길이 별 특성을 반영한 차량 시뮬레이션을 수행한다. 이 때, 도심 주행 사이클과 외각 주행 사이클에 대하여 각각 전비 분석을 진행한다.

II. 모터 단면 개선 설계

본 장에서는 LEV 용 구동 모터의 단면 개선 설계에 대해

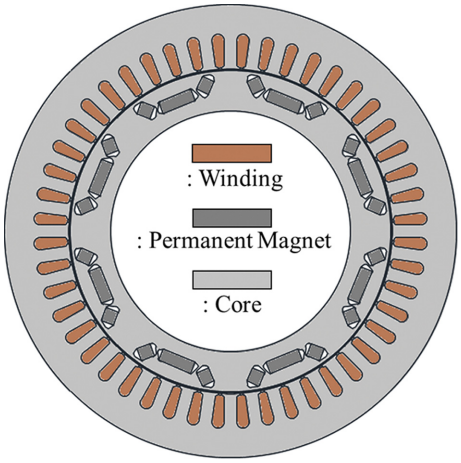

Fig. 1. (Color online) Base model of traction motor for LEV.

소개한다. 먼저 Fig. 1에는 LEV 용 구동 모터의 기존 모델이 나타나 있다. 8극 48 슬롯의 매입형 영구자석 동기 모터(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)이며, 최대 속도 10,000 RPM 기준으로 기계적인 강성이 확보 되어있다. 운전 사양은 DC 전압 180 V 일 때, 기저속도는 4,000 RPM, 최대 토크는 72 Nm, 최대 출력은 30 kW를 만족하여야 한다. 사용한 재질은 회전자 및 고정자 코어는 50PN470이며, 영구자석은 N39UH를 사용하였다.

이 모델로부터 개선 설계를 하기 위하여 먼저 자성 재료 변경을 진행하였다. 고정자 및 회전자 코어는 50PN470에서 30PNF1600으로 변경하였고, 영구자석은 N39UH에서 N42UH로 변경하였다. 코어의 철손 특성과 영구자석의 자화 특성을 Fig. 2에 도시하였다.

코어 재질 변경은 철손 저감을 목적으로 하였다. 최대 10,000 RPM까지 운전하기 때문에, 철손 저감이 필수적이다. 영구자석 재질 변경은 동손 저감을 목적으로 하였다. 영구자석 잔류 자속밀도를 증가시켜 쇄교자속량을 증가시킬 수 있고, 이는 동일 전류 당 마그네틱 토크 증가로 이어지기 때문

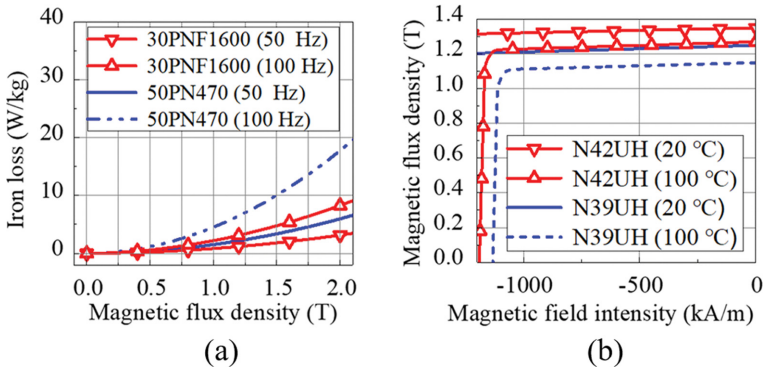

Fig. 2. (Color online) Magnetic characteristics of materials (a) iron loss of core materials and (b) B-H curve of permanent magnet.

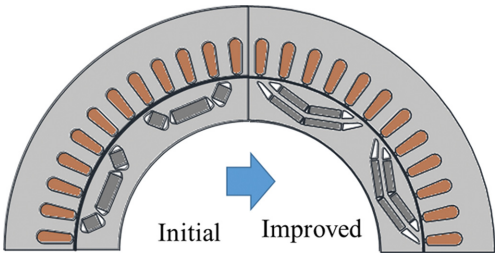

Fig. 3. (Color online) Comparison of initial model and improved model geometry.

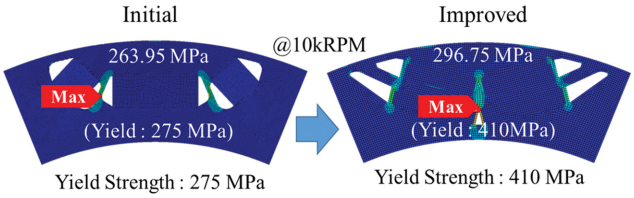

Fig. 4. (Color online) Mechanical stress distribution comparison of initial and improved model.

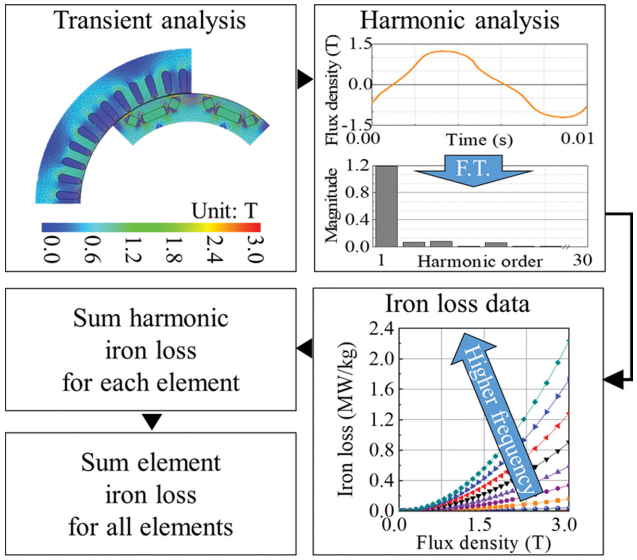

Fig. 6. (Color online) Iron loss calculation process.

에, 입력 전류의 저감 효과를 달성하였다[3].

다음으로는 회전자의 형상 개선 설계를 진행하였다. 먼저 자석의 형태를 V-shape의 2층 형태로 변경하여 자석 사용량을 확보하였고, 동시에 d축과 q축 인덕턴스의 차이를 증가시켰다. 이는 앞서 언급한 마그네틱 토크 확보와 더불어 d축과 q축 인덕턴스 차이에 의해 발생하는 릴럭턴스 토크 또한 확보할 수 있는 방향이기 때문에, 동손 저감 및 출력 밀도 증대를 기대할 수 있다[4]. 하지만 V-shpae의 2층 형태로 변경함에 따라 기계적 강성 확보가 추가로 필요하다[5]. 이를 위해 추가적으로 브리지 형태를 적용하였다.

Fig. 3에 대상 모터 단면의 초기 모델 형상과 개선 모델 형상을 비교하였다. 동일 사이즈 내에서 개선 설계가 된 것을 확인할 수 있다. Fig. 4에는 이 두 모델의 최대 속도에서 기계적 응력 해석 결과를 나타내었다. 이 때 사용된 방법은 ANSYS를 활용하여 2D 응력 유한요소 해석을 이용하였다. 개선 모델의 경우 최대 응력이 263.95 MPa에서 296.75 MPa로 소폭 증가하였지만, 변경된 재료의 항복 응력이 410 MPa로 기존 275 MPa에 비해 매우 크기 때문에 안전계수는 더욱 많이 확보된 것을 확인할 수 있다[6].

III. LEV 모델링

LEV의 모델링은 미국 NREL(National Renewable Energy

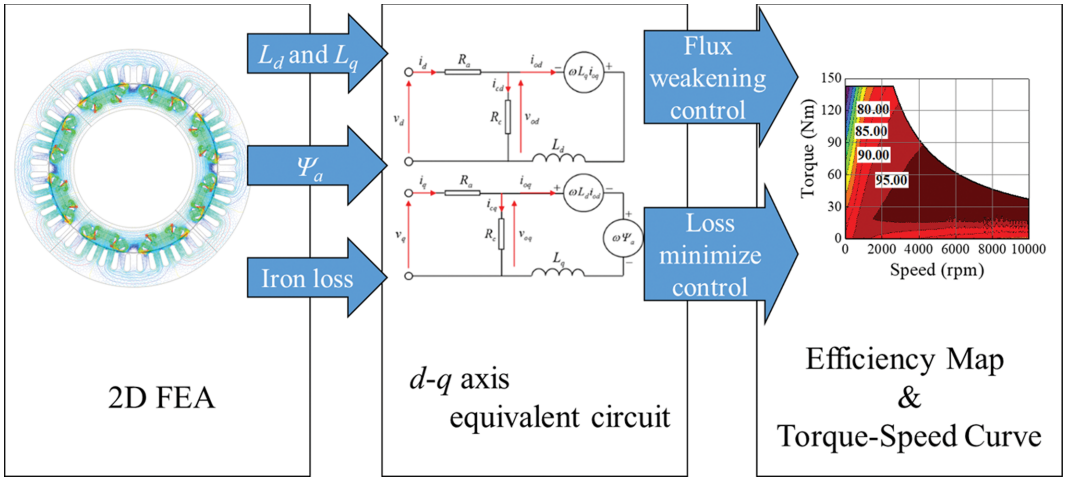

Fig. 5. (Color online) Process of traction motor efficiency map and torque-speed curve generation for motor modeling.

Laboratory)에서 배포한 MATLAB Simulink 기반의 차량 시뮬레이션 프로그램 ADVISOR(Advanced VehIcle SimulatOR)를 이용하였다[7]. 이를 기반으로 하여 모터 모델과 배터리 모델을 상세한 모델로 수정하여 LEV 모델링을 진행하였다.

모터 모델은 2D 전자기 유한요소 해석을 기반으로 하였다. 먼저 2D 전자기 유한요소 해석으로 d, q축 인덕턴스, 쇄교자속, 철손을 산정하고 d, q축 모터 등가회로를 이용하여 전압방정식을 구성하였다. 여기서 약자속 제어와 최소 손실 제어를 반영하여 모터의 효율 맵 및 최대 능력 곡선을 계산하였다. 이 과정은 Fig. 5에 설명되어 있다[8].

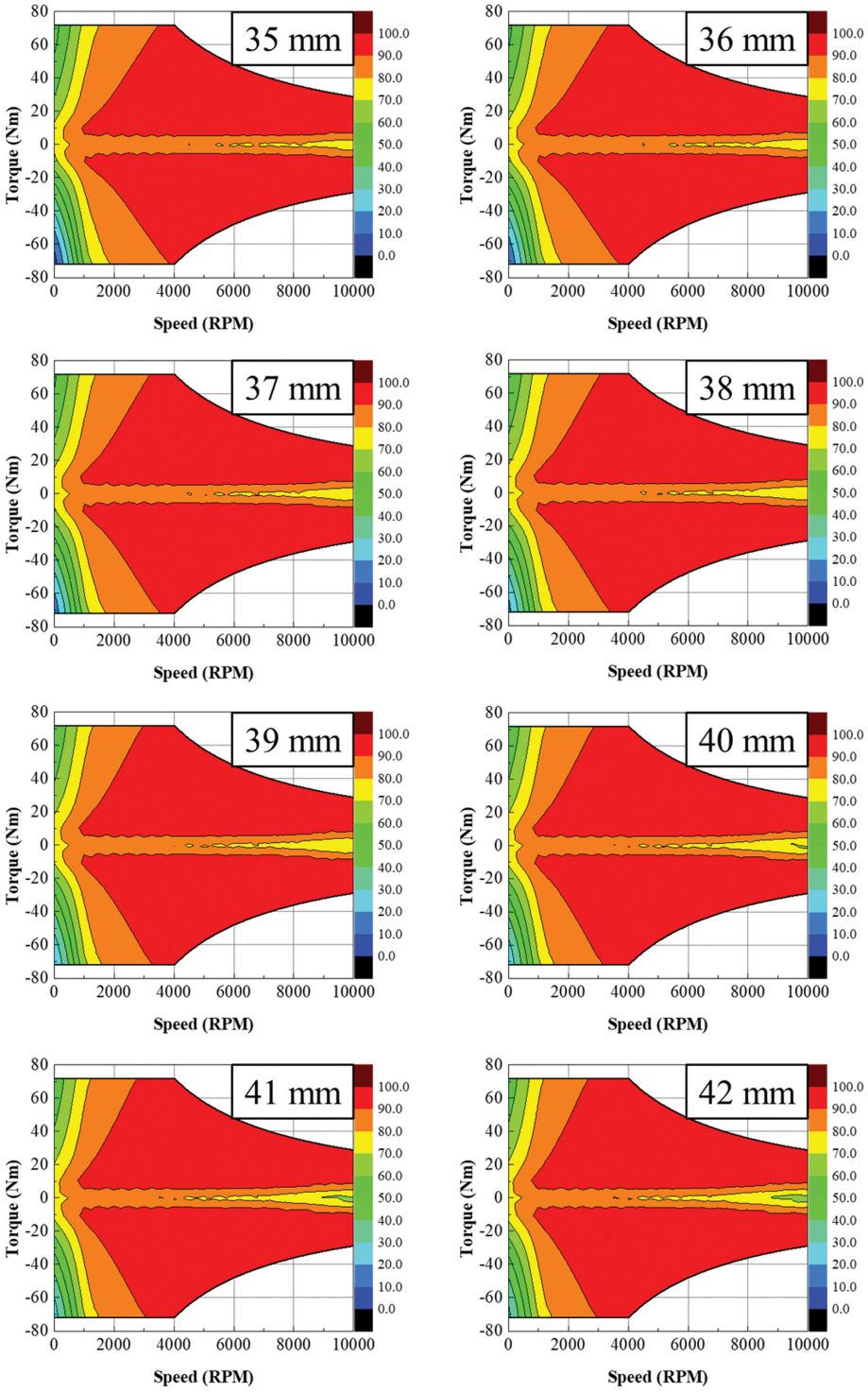

Fig. 7. (Color online) Efficiency map and torque curve of traction motor according to stack length.

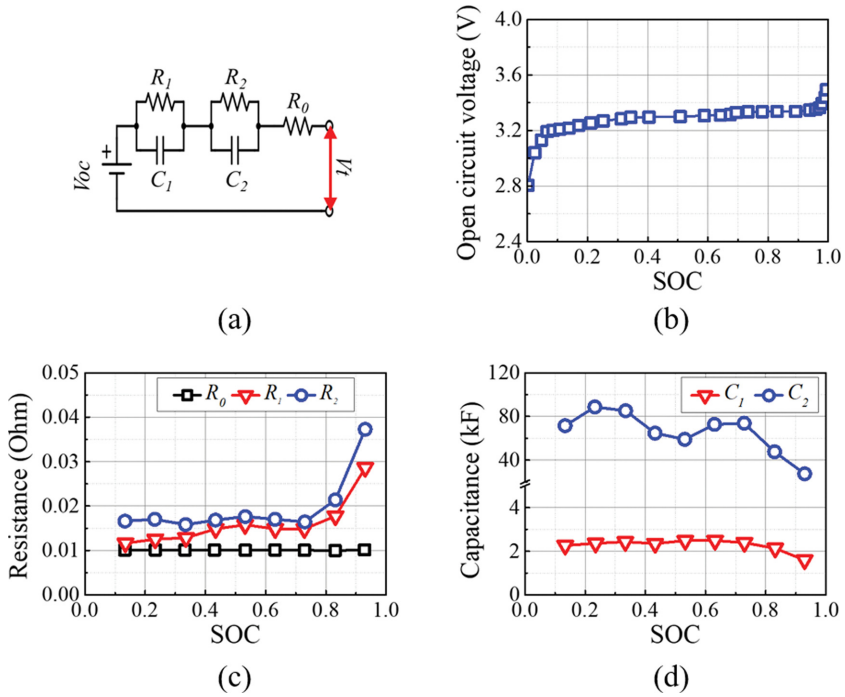

Fig. 8. (Color online) Battery model for vehicle simulation (a) equivalent circuit, (b) open circuit voltage, (c) resistance, (d) capacitance

또한 여기서 2D 전자기 유한요소 해석의 후처리 과정을 통하여 철손을 계산하게 되는데 이 과정은 Fig. 6에 설명되어 있다[9]. 유한요소 해석 결과로부터 각 요소의 자속밀도 변화를 고조파 분석을 통하여 성분을 분리하고 자속밀도 별 주파수 별 철손 측정 데이터를 이용하여 각 요소의 철손을 계산한다. 이를 모든 요소에 대하여 수행하여 모터 전체의 철손 산정을 진행하였다.

이렇게 구성한 모터 특성 예측 프로세스로 개선 모델의 적층 길이 별 모터 특성 분석을 진행하였다. 적층길이 35mm부터 42 mm까지의 구동 모터 최대 능력 곡선과 효율맵을 Fig. 7에 정리하였다.

Table I. Specification of target LEV.

항목		값	단위
동체 무게 (파워트레인, 배터리 제외)		340	kg
폭		1.19	m
높이		1.46	m
휠베이스		1.69	m
바퀴 직경		0.53	m
구름저항계수		0.01	-
공기 저항 계수		0.30	-
공기 밀도		1.20	kg/m^3
감속기	기어비	8 : 1	-
	무게	20	kg
배터리	종류	인산철	-
	공칭 전압	189	V
	공칭 용량	17	kWh
	무게	136	kg

다음으로는 배터리 모델에 관하여 설명한다. 배터리 모델은 충-방전 상황을 잘 반영할 수 있는 2차 R-C pair 등가 회로를 이용하였다[10]. 개방 회로 전압과 등가회로 파라미터들은 모두 실험을 통해 도출하였다. 개방 회로 전압은 1/60C의 충전율 및 방전율로 충전 및 방전을 하면서 SOC별 전압을 측정하였고, 충전시와 방전시의 평균을 개방 회로 전압으로 사용하였다. 등가회로 파라미터는 HPPC(hybrid pulse power characterization) test로부터 도출하였다[11]. 등가회로 및 파라미터는 Fig. 8에 나타내었다.

다음은 LEV 주행조건에 대하여 설명한다. 먼저 차량의 사

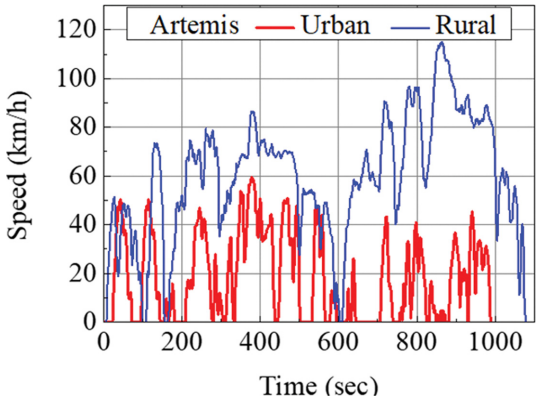

Fig. 9. (Color online) Target driving cycle.

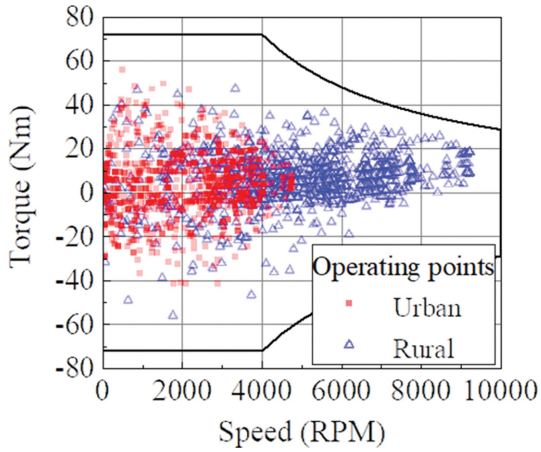

Fig. 10. (Color online) Traction motor operating points during vehicle simulation.

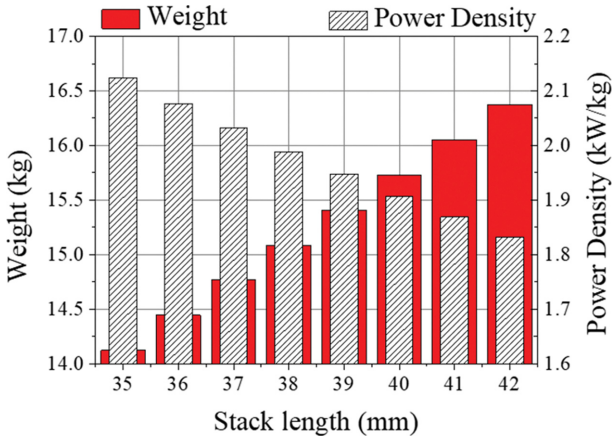

Fig. 11. (Color online) Weight and power density of traction motor according to stack length.

양은 LEV로 동체 무게(파워트레인 및 배터리 제외)는 340 kg으로 가정하였고, 차 폭과 높이는 1.19 m, 1.46 m, 휠베이스는 1.69 m로 반영하였다. 그리고 타이어를 포함한 바퀴의 직경은 0.53 m로 반영하였다. 상세한 사양 및 조건은 Table I에 정리하여 나타내었다.

다음으로는 차량 시뮬레이션을 진행한 주행 사이클에 대하여 설명한다. 전비를 분석하기 위하여 두가지 상황의 주행 사이클을 사용하였다. 한가지는 가감속이 많은 도심 주행사이클, 다른 하나는 비교적 가감속이 적고 고속 주행을 하는 외각 주행사이클을 활용하였다. Artemis라는 사이클 중에서 Urban과 Rural 사이클이며, 이를 Fig. 9에 도시하였다[12].

이를 이용하여 차량 시뮬레이션을 하였을 경우 구동 모터의 동작점을 Fig. 10에 나타내었다.

IV. 전비 분석 결과

앞서 진행한 LEV 모델링과 적층 길이에 따른 모터 특성을 반영하여 차량 시뮬레이션을 진행하였다. 차량 시뮬레이션 진행 시에는 적층 길이 별 모터의 무게 또한 반영하였다. 반영한 무게 및 구동 모터의 출력 밀도를 Fig. 11에 도시하였다. 무게는 각 재료의 밀도로부터 계산하여 추정하였다.

각 사이클에 대한 전비 분석을 위해 구동모터의 적층 길이 별 에너지 소비량을 살펴보았다. 먼저 Urban사이클에 대해서는 적층 길이가 길수록 에너지 소비량이 작았다. 즉, 전비가 구동 모터 사이즈가 클수록 좋은 결과를 나타냈다. 이는 Fig. 12에 그래프로 나타내었다. 이 결과는 Fig. 10에 나타낸 것처럼 Urban 사이클의 경우 저속 고토크 구간을 많이 사용하기 때문이라고 할 수 있다. 구동 모터의 무게가 무겁더라도, Fig. 7에서 볼 수 있듯이 적층 길이 증가가 저속에서의 효율 증대

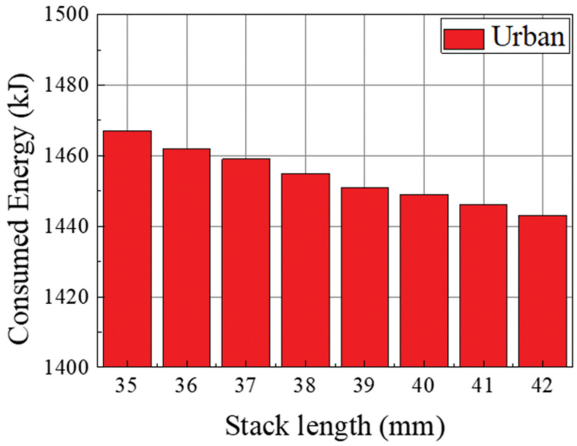

Fig. 12. (Color online) Energy consumption for Urban cycle according to traction motor stack length.

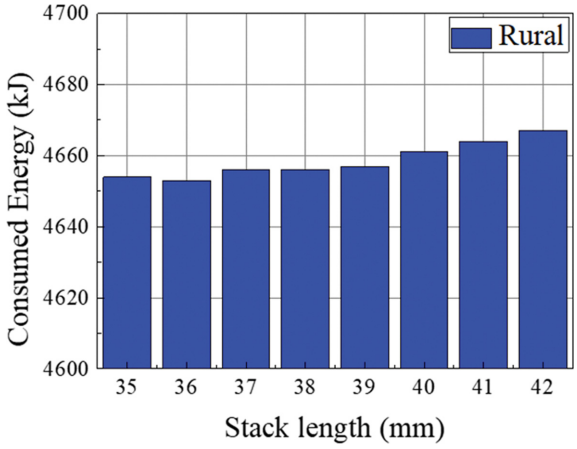

Fig. 13. (Color online) Energy consumption for Rural cycle according to traction motor stack length.

에 영향을 미치기 때문이다.

반면에 Rural 사이클에 대해서는 적층 길이가 짧을수록 에

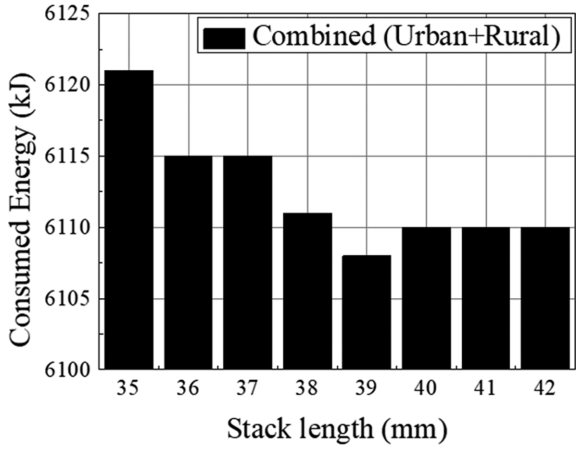

Fig. 14. Energy consumption for combined cycle according to traction motor stack length.

너지 소비량이 작은 경향을 보였으며 36 mm에서 가장 효율적인 것을 확인하였다. 이는 Fig. 13에 그래프로 나타내었다. 이 결과는 Fig. 10에 나타낸 것처럼 Rural 사이클의 경우 고속 저토크 구간을 많이 사용하기 때문이라고 할 수 있다. 구동 모터의 고속 효율이 일부 감소하더라도 무게가 가벼운 것이 더 유리하다는 결과를 나타낸다. 또한 36 mm에서 최소점이 나타난 것으로부터 무게가 작아지는 효과보다 효율이 떨어지는 영향이 더 큰 지점이 있다는 것을 확인할 수 있었다.

마지막으로는 두 사이클을 전부 주행하였을 때 전비 경향을 살펴보기 위하여 에너지 소비량을 살펴보았다. 살펴본 적층 길이 범위 내에서 39 mm인 경우 에너지 소비량이 가장 작은 것을 알 수 있었다. 이는 Fig. 14에 그래프로 나타내었다.

V. 결 론

LEV 용 구동모터의 사이즈에 따른 주행 사이클 별 전비를 분석하였다. 이를 위하여 먼저 재료의 자기적 특성과 기계적 특성을 고려하여 구동 모터 단면의 개선설계를 진행하였다. 이 모델로부터 적층 길이 별 모터 모델링을 진행하여 차량 시뮬레이션에 반영하였다. 또한 차량 시뮬레이션 진행 시 보다 정밀한 에너지 소비량 분석을 위하여 배터리의 충-방전 상황을 잘 반영할 수 있는 배터리 시험 기반의 2차 R-C 등가회로 모델을 사용하였다. 이로부터 Urban, Rural, Combined 사이클에 대하여 에너지 소비량을 분석하였다. Urban 사이클의 경우 사이즈 저감 보다는 운전 포인트의 효율 증대 효과가 컸으며, Rural 사이클의 경우 어느 수준 까지는 효율 개선 보다는 사이즈 저감 효과가 컸다. Combined 사이클의 경우는 검토 범위 내의 중간 지점에서 가장 에너지 소비가 작은 사이즈가 있음을 알 수 있었다. 본 분석을 통하여 구동모터 무게가 영향이 크게 작용하는 LEV의 경우 효율 증대만이 전비 개선 효과 방향은 아니라는 것을 살펴볼 수 있었다. 따라서 LEV의 경우에는 적용 상황에 따라 구동모터의 사이즈를 적절히 결정하는 것이 전비 향상에 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 산업통상자원부 ‘산업전문인력역량강화사업’의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원을 받아 수행된 연구임(2021년 미래형자동차 R&D 전문인력 양성사업, 과제번호: N0002428).

References

[1] Y. H. Jung and J. P. Hong, J. Korean Magn. Soc. **28**, 4 (2018).
[2] C. S. Lee, J. H. Kim, and J. P. Hong, J. Magn. **20**, 2 (2015).
[3] N. Matsui, Y. Takeda, S. Morimoto, Y. Honda, Design, and Control of IPMSM, Ohmsha, Ltd. (2001) pp. 1~23.
[4] C. H. Baek, C. W. Kim, and J. Y. Choi, J. Magn. **25**, 3 (2020).
[5] K. S. Cha, D. M. Kim, M. R. Park, M. H. Yoon, and J. P. Hong, 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall) (2016).
[6] J. H. Kim, D. M. Kim, Y. H. Jung, and M. S. Lim, IEEE Transactions on Energy Conversion (Early Access).
[7] T. Markel, A. Brooker, T. Hendricks, V. Johnson, K. Kelly, B. Kramer, M. O’Keefe, S. Sprik, and K. Wipke, J. Power Sources **110**, 2 (2002).
[8] S. I. Kim and J. P. Hong, J. Magn. **21**, 3 (2016).
[9] D. M. Kim, J. W. Chin, J. P. Hong, and M. S. Lim, IET Electric Power Applications **13**, 9 (2019).
[10] M. P. Klein and J. W. Park, J. Electrochem. Soc. **164**, 9 (2017).
[11] H. E. Perez, Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley, USA (2016).
[12] S. Günther, S. Ulbrich, and W. Hofmann, 2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (2014).