Regular paper

Journal of the KIECS. pp. 361-368, vol. 14, no. 2, Apr. 30. 2019, t. 94, pISSN 1975-8170 | eISSN 2288-2189
http://dx.doi.org/10.13067/JKIECS.2019.14.2.361

전기차 기반의 1톤급 상용차용 통합공조 시스템에 관한 연구

백수황* · 김철수**

A Study on Integrated Air-conditioning System for Electric Vehicle Based 1-ton Class Commercial Vehicle

Soo-Whang Baek* · Chul-Soo Kim**

요 약

본 논문은 전기차 기반의 1톤급 상용차용 통합공조 시스템에 관한 연구이다. 전기 상용차의 경우 화물의 승하차를 위해 문의 개폐가 빈번하게 이루어지기 때문에 열손실이 크게 발생한다. 따라서 냉난방 부하가 승용 전기차에 비해 더 크게 요구된다. 결과적으로 승객이 요구하는 열 쾌적성을 만족하기 위해서 냉난방 시스템이 소비하는 에너지가 승용 전기차 보다 크다. 이러한 단점을 극복하기 위해 효율적인 통합공조 시스템을 적용한 연구를 수행했다. 최종적으로 1톤급의 경상용 전기트럭의 상품성 개선과 전기트럭 분야의 산업 생태계 기반 확충을 위한 고효율 공조 시스템 개발을 위해 냉방을 위한 전동식 압축기와 난방을 위한 히트펌프 시스템의 구상 설계와 해석적 검증을 수행한다.

ABSTRACT

This paper is a study on integrated air-conditioning system for 1-ton class commercial vehicle based on electric vehicle. In the case of an electric commercial vehicle, since the opening and closing of the door is frequently performed in order to get in and out of the cargo, the heat loss largely occurs. Therefore, the heating and cooling load is required to be larger than the electric vehicle. As a result, the energy consumed by the heating and cooling system is larger than the passenger electric car in order to satisfy the heat comfort required by passengers. In order to overcome these disadvantages, we performed research using an efficient integrated air conditioning system. Finally, the design and analysis of a heat pump system for heating and a electrical compressor for cooling need to be proceed to develop a high-efficiency air conditioning system for improving the commerciality of 1 ton-class electric trucks and expanding the industrial ecosystem in the electric truck sector.

키워드

Electric Vehicle, Commercial Vehicle, Air-conditioning System, Electric Compressor, Heat Pump
전기 자동차, 상용차, 공조 시스템, 전동식 압축기, 히트 펌프

Ⅰ. 서 론

오늘날 지구온난화와 배출가스 문제로 인하여 전기트럭이 실증실험을 거쳐 최근 실용화 단계에 이르고 있으나 전기트럭의 활용을 위해 핵심부품 및 시스템 개발을 통한 전기차 생태계 기반의 확충은 아직 미진

* 교신저자 : 호남대학교 미래자동차공학부
** 호남대학교 미래자동차공학부(kimcs@honam.ac.kr)
· 접 수 일 : 2019. 03. 12
· 수정완료일 : 2019. 03. 29
· 게재확정일 : 2019. 04. 15
· Received : Mar. 12, 2019, Revised : Mar. 29, 2019, Accepted : Apr. 15, 2019
· Corresponding Author : Soo-Whang Baek
Dept. Automotive Engineering, Honam University,
Email : swbaek@honam.ac.kr

한 상태이다[1-3].

따라서 전기트럭 기반의 전기 상용차의 보급량 증대와 더불어 활용분야를 다양하게 확장해 나간다면 전기차 생태계의 기반을 확충할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 택배와 퀵서비스의 경우에는 1일 평균 운행거리가 비교적 짧아 1톤 이하의 전기트럭 개발 시 많은 수요가 있을 것으로 판단된다[4-6].

화물자동차 운송사업의 운행특성에서 중대형 트럭을 사용하는 일반화물, 개별화물, 용달화물의 경우 1일 평균 운행거리가 200km 이상으로 나타나 전기트럭을 활용하기에는 운행거리가 긴 것으로 분석되며 중대형 트럭을 이용하는 일반화물 및 개별화물 용도로 전기트럭을 제작할 경우에는 1회 충전 항속거리가 300km 이상 되어야 할 것으로 예상된다. 또한 1톤 트럭을 이용하는 용달화물의 경우에도 1일 평균 운행거리가 200km 이상으로 나타나고 있어 현재 개발된 1톤급 개조 전기트럭의 사양(항속거리 140km)으로는 수요 성능을 충족시키기 어려울 것으로 예상된다[7-9].

그러나 택배와 퀵서비스의 경우에는 1일 평균 운행거리가 비교적 짧아 1톤 이하의 전기트럭 개발 시 많은 수요가 있을 것으로 판단된다. 택배의 경우 1일 평균 운행거리가 45.9km에 불과하여 1회 충전 항속거리를 감안할 때 전기트럭이 활용되기에 적합하며, 퀵서비스에 사용되는 경차와 1톤 트럭의 1일 평균 운행거리가 160km 이상으로 나타나 현재의 개조 전기트럭 성능(항속거리 140km 이하)으로는 평균적인 수요 성능을 충족시키기 어렵지만, 시스템 효율 향상을 통하여 대응 가능한 수준이다[10-12].

내연기관은 난방 열원(엔진)을 보유하나 전기차는 엔진의 부재로 난방을 위한 별도의 열원이 필요하므로 저온 운전 시, 난방 부하의 대응을 위하여 현재 주로 적용되고 있는 전기히터의 작동에 따라, 전기승용차량의 경우에도, 주행거리가 20~50%까지 낮아지는 것으로 보고(히트 펌프 시스템 : 30%이하 수준, 전기히터 : 40.0%이상) 되고 있으며, 전기 상용차는 감소폭이 더 클 것으로 예상되기 때문에, 히트 펌프 시스템의 개발은 필수적이다[13-15].

본 연구에서는 전기트럭분야에서 상용화가 가장 먼저 이루어질 수 있는 택배 분야에 사용하는 전기차기반의 1톤급 상용차용 통합공조 시스템에 관한 연구를 수행한다. 특히 본 연구에서 대상으로 하는 전기 상용차의 경우 화물의 승하차를 위해 문의 개폐가 빈번하게 이루어지기 때문에 냉난방 부하가 승용 전기차에 비해 더 크게 요구되는 특징이 있다. 따라서 냉난방 시스템 적용으로 인한 전비(Fuel economy) 감소가 승용대비 더 클 것으로 예상되므로 주행거리 연장(전비 향상)을 위해 효율적인 통합공조 시스템을 적용한 연구가 필요하다.

최종적으로 전기구동 자동차가 기존 차량과의 경쟁 속에서 시장점유율을 높이기 위해서는 혹한기 및 혹서기에도 우수한 주행성능을 보일 수 있어야하기 때문에 고효율 공조 시스템 기술의 활용이 필수적이므로 본 연구에서는 1톤급의 경상용 전기트럭의 상품성 개선과 전기트럭 분야의 산업 생태계 기반 확충을 위한 고효율 공조 시스템 개발을 위해 난방을 위한 히트 펌프 시스템과 냉방을 위한 전동식 압축기의 구상 설계와 해석적 검증을 수행한다.

II. 전기 상용차의 통합공조 시스템

그림 1에 본 연구의 개발대상인 통합공조 시스템 적용 1톤급 상용차량의 레이아웃을 나타냈다.

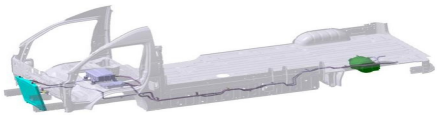

그림 1. 차량 레이아웃
Fig. 1 Vehicle layout

1톤급 전기 상용차는 환경부 고시 제 2017-174호(2017. 9. 15) 전기 자동차 보급대상 평가에 관한 규정에 따라서 적용 대상 차량이 상온조건(20~30℃)에서 100km 이상을 확보해야하는 규정을 만족해야하며 저온 운전(-6.7℃) 조건에서 상온주행거리의 60.0%이상을 확보해야 전기차량으로서 인증을 받을 수 있다. 표1에 차량의 주요 사양을 나타냈다. 특히, 저온 환경에서의 난방 운전 시 주행거리 감소를 최소화하기 위해 히트 펌프 방식을 적용하고, 효율이 향상된 전기 상용차용 냉난방 시스템을 개발하여 외부환경 변화에 적합한 전비를 확보하고자 한다.

표 1. 차량의 주요 사양
Table 1. Main specifications of vehicle

Item	Description
Traction motor	60kW
Capacity of Battery	60kWh
Per-charge driving range	Above 100~150km
Maximum payload	1Ton
Air conditioning system	Air Conditioning Only, Heat-pump Belt-pulley mechanical compressor connected to motor

그림 2는 전기트럭의 요구 난방 성능 대응을 위한 히트 펌프 시스템 목표를 나타낸다. 전기트럭에 적용되는 히트 펌프 시스템의 경우, 외기온도 변화에 따라 시스템 난방 성능의 변화가 크기 때문에 전기트럭에 적용하기 위한 난방 부하와 히트 펌프 시스템의 난방 능력의 부조화로 인하여 비효율적인 특성을 갖는 단점이 있다. 따라서 캐빈룸 승객의 부하와 외부 환경 및 차량의 운전조건을 고려한 난방부하에 따라 히트 펌프 시스템과 전기히터의 사용을 최적화하기 위한 전기트럭용 FATC(: Full Automatic Temperature Controller) 기술을 적용한다. 히트 펌프 시스템은 크게 3가지의 문제점을 가지고 있다. 첫 번째, 외기온도 -10℃이하에서 흡열을 위한 공기열원 부족으로 성능 저하. 두 번째, 외기온도 0~10℃와 다습한 조건에서 공기열원 적용 시에 실외기에 착상 발생으로 성능 저하. 세 번째, 겨울철 실내 제습 시 난방 성능 저하에 대한 문제점이 존재한다. 이를 극복하기 위해 본 연구에서는 난방을 위한 냉각수를 가열하는 방식으로 히트 펌프 시스템을 적용하여 에너지 효율을 향상시키고자 했다. 특히, 저온 조건에서 성능 향상을 위해 가열된 냉각수를 활용한 히트 펌프 시스템을 통해 외기온도 -10℃이하의 저온조건에서도 동작이 가능할 수 있도록 했다. 또한 냉각수를 사용하기 때문에 제습을 위한 냉방 사이클을 적용해도 냉각수 가열과 제습이 가능하도록 구현되었다.

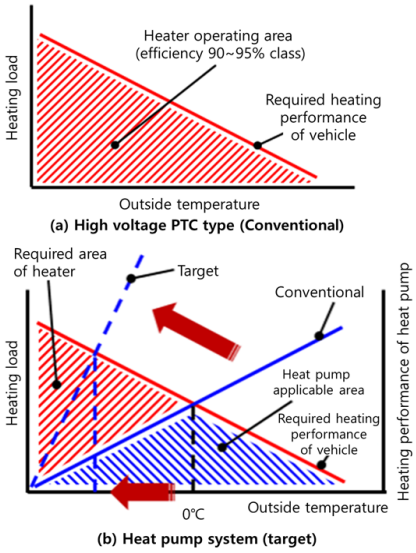

그림 2. 전기차 요구 난방 성능 대응을 위한 히트 펌프 시스템 목표
Fig. 2 Heat pump system target for heating performance of electric car requirement

그림 3은 실차 적용을 위한 통합공조 시스템의 레이아웃을 의미하며 냉방모드와 난방모드시의 공기흐름을 비교하여 나타냈다. 기존 자동차가 보유하고 있는 냉난방시스템을 활용하여 전기트럭에 특화될 수 있는 히트 펌프 시스템을 구축하기 위해 전동식 압축기, 열교환기, 냉각수 가열식 히터를 설계하고, 각 핵심부품들에 대한 운전조건과 냉매 및 냉각수의 흐름을 제어하여 실내측 열쾌적 향상을 위한 레이아웃을 구축하였다. 냉방모드 중에는 필요 시 수냉 콘덴서를 작동함으로 실내 공기의 혼합이 가능하며 증발기에서 제습된 공기가 히트 코어에서 가열되어 제습효과가 향상되는 장점을 갖는다. 만약 난방모드 중에 외부 열교환기 동결 발생으로 히트 펌프의 가동이 불가한 경우 전동식 압축기 측의 고온/고압의 냉매를 외부열교환기로 흘림으로서 동결 해소가 가능하며 이러한 경우 실내 난방은 워터히터로 대체하여 효율적인 냉난방 특성을 갖도록 구성하였다.

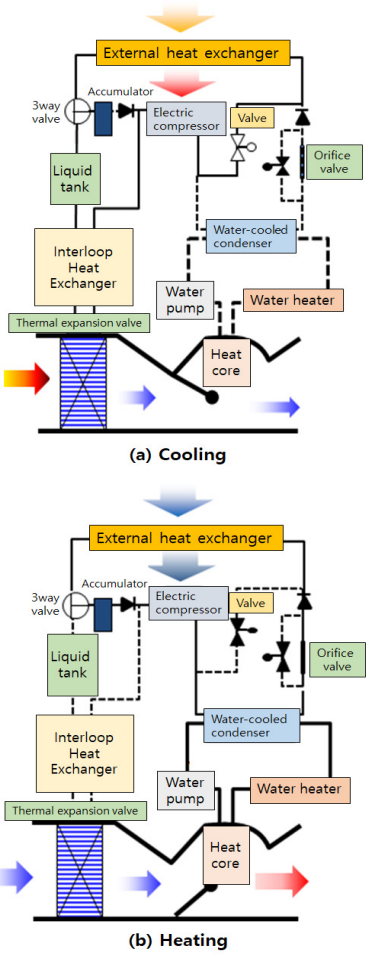

그림 3. 실차 적용을 위한 통합공조 시스템 레이아웃
Fig. 3 Layout of integrated air-conditioning system for electric vehicle

III. 냉방 및 난방을 위한 해석

3.1 전동식 압축기

내연기관 차량의 경우 냉방을 필요로 할 때 엔진에 연결되어있는 압축기의 동력을 활용했으나. 전기트럭의 경우 냉방을 위해서는 전동식 압축기를 사용하여 보다 효율적인 운전과 냉방효율을 얻을 수 있다. 따라서 정격출력이 3kW급이며 정격효율 93%이상의 특성을 갖는 전동식 압축기용 모터를 설계하였으며 유한요소해석을 통해 특성을 검증하였다. 그림 4에는 회전속도 1000rpm 기준의 전동식 압축기용 모터의 역기전력 특성을 나타냈으며 이 때 상전압 실효치 17.9V를 나타냄을 알 수 있다.

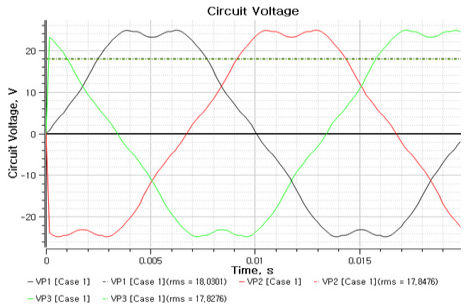

그림 4. 전동식 압축기용 모터의 역기전력 특성
Fig. 4 B-EMF characteristic of motor for electric compressor

그림 5에는 정격회전속도 5500rpm 기준의 전동식 압축기용 모터의 토크 특성을 나타냈으며 이 때 정격토크는 5.19Nm를 나타냄을 알 수 있다.

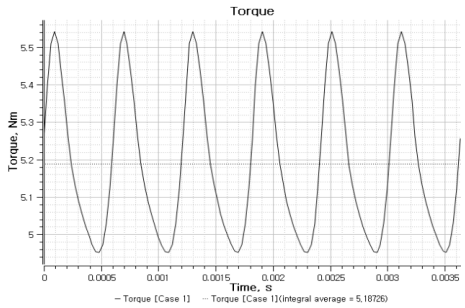

그림 5. 전동식 압축기용 모터의 토크 특성
Fig. 5 Torque characteristic of motor for electric compressor

그림 6은 모터의 자속밀도 분포도를 나타낸다. 철손의 분석을 위해 고정자와 회전자의 철심의 잔류자속밀도 값이 포화여부를 확인한다. 해석결과 잔류자속밀도의 최대치는 자로의 폭이 좁은 회전자 rib부분에서 1.9[T] 이하의 특성을 가지며 이는 자기포화를 고려했을 때 우려할 수준은 아님을 확인하였다.

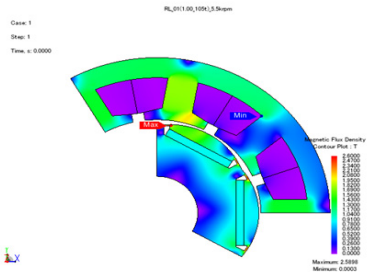

그림 6. 모터의 자속밀도분포도
Fig. 6 Magnetic flux density distribution of motor

그림 7은 전동식 압축기 구동을 위한 모터의 인버터 구성 다이어그램을 나타낸다. 운전조건에 알맞은 3상 전원을 모터에 공급하도록 전력을 제어한다.

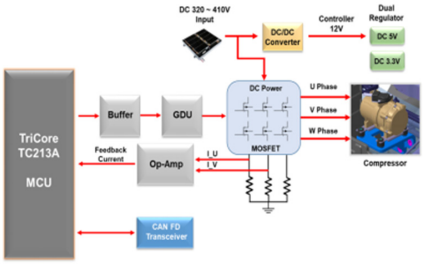

그림 7. 인버터 구성 다이어그램
Fig. 7 Configuration diagram of inverter

그림 8은 전동식 압축기의 시제품을 나타낸다. 정격출력 3kW를 만족하도록 제작되었고 치수는 외경 85mm 및 적층길이 60mm이다. 고정자는 9슬롯 구조, 회전자 자석은 6극의 희토류 재질(42UH)을 적용했다.

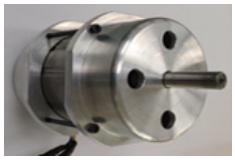

그림 8. 전동식 압축기 시제품
Fig. 8 Prototype of electric compressor

해석을 통한 전동식 압축기용 모터의 특성결과를 표 2에 나타냈다. 설계 목표인 정격출력 3kW에서 정격효율 93%이상을 만족하는 전동식 압축기용 모터의 설계결과를 해석적으로 검증하였다.

표 2. 전동식 압축기용 모터의 특성결과
Table 2. Characteristics of motor for electric compressor

Item		Unit	Value
Rated Operation	Rated speed	rpm	5500
	Torque	Nm	5.19
	Torque ripple (Peak to Peak)	Nm	0.59
	Torque ripple (VS rated torque)	%	11.4
	Phase current (Peak)	A	15.00
	Phase current (RMS)	A	10.61
	Current density	A/mm^2	16.65
	Lead angle	deg	15.00
B-EMF (RMS @1000rpm)		V	17.90
Cogging torque (Peak to Peak)		Nm	0.483
Copper loss		W	177.2
Iron loss		W	32.8
Hysteresis loss		W	9.6
Rated output power		W	2987
Rated input power		W	3207
Rated efficiency		%	93.2

3.2 냉난방 특성 검토를 위한 유동해석

그림 9는 냉방모드에서의 유동분포를 확인하기 위해 센터벤트 쪽 풍량을 60%로 설정하고 측면부 풍량을 40%로 하여 20:30:30:20의 풍배비율을 가정하여 유동 방향을 확인하였다.

그림 9. 냉방 모드에서의 유동 분포
Fig. 9 Flow distribution in cooling mode

그림 10은 난방모드에서의 유동분포를 확인하기 위해 운전석과 조수석의 풋 덕트 형상에 따른 유동 방향을 비교하였다. 이 때 풍배비는 50:50의 비율을 갖는다. 운전석은 발측으로 유동을 분포시키기 위해 샤

워타입의 덕트를 적용하였으나 왼발로 향하는 공기 토출구가 충분하지 않아서 대부분의 유동은 오른발이 위치한 방향으로 향하는 것으로 나타난다. 조수석 역시 왼발로 향하는 유동을 확보하기 위해 출구에 송풍핀을 장착하였으나 출구면적이 충분하지 못하여 대부분의 유동은 오른발로 향하는 것으로 나타났다.

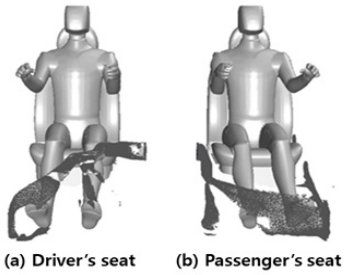

그림 10. 난방 모드에서의 유동 분포
Fig. 10 Flow distribution in heating mode

유동 해석을 통한 냉방 및 난방 모드에서의 토출유량을 비교하여 표 3에 나타냈다. 정확한 공조성능 예측을 위해서는 각 해석 대상 모드에서 실차기반의 토출 공기 유량 및 온도데이터 확보가 필수적이다. 향후 실차데이터의 반영과 덕트의 최적설계를 통해 유동의 효과적인 개선을 수행 할 것이다. 이를 통한 냉난방 통합공조 시스템을 적용한 전기트럭 에너지 효율의 개선 효과로서 1충전 주행가능거리 증대에 도움이 될 것으로 사료된다.

표 3. 냉방 및 난방 모드에서의 토출유량 비교
Table 3. Discharge flow rate in cooling and heating

Item	Cooling	Heating
Target air flow	383kg/h	250kg/h

Ⅳ. 결 론

전기트럭용 통합공조 시스템 기술은 승객의 열쾌적성을 만족시키면서도 주행거리의 감소를 최소화시킬 수 있는 기술로 전기차 기반의 기존 택배 시장등 상용차 시장에 진입이 가능할 수 있도록 상품성이 개선될 것으로 예상된다. 전기구동 승용 자동차(FCEV, PHEV, BEV)로의 수평전개가 가능해질 수 있을 것으로 분석되며, 전기구동 자동차가 기존 차량과의 경쟁 속에서 시장점유율을 높이기 위해서는 혹한기 및 혹서기에도 뛰어난 주행성능을 보일 수 있어야하기 때문에 고효율 히트 펌프 공조 시스템 기술의 활용이 필수적이다. 향후 통합공조 시스템 기술개발의 완성을 통해 다양한 전기 상용차에 적용이 가능한 부품들을 개발하고, 차량에 장착하여 시험할 계획이며, 중국 및 해외 전기차 시장에서 충분한 경쟁력이 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017R1C1B5075525).

※ 위 논문은 "2018년 가을철학술대회 우수논문"입니다.

References

[1] C. Lin, H. Peng, J. Grizzle, and J. Kang, "Power management strategy for a parallel hybrid electric truck," *IEEE Trans. Control Systems Technology*, vol. 11, no. 6, Nov. 2003, pp. 839-849.

[2] M. Yilmaz and P. Krein, "Review of charging power levels and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles," *2012 IEEE Int. Electric Vehicle Conf.*, Greenville, USA, Apr. 2012, pp. 1-8.

[3] O. Veneri, L. Ferraro, C. Capasso, and D. Iannuzzi, "Charging infrastructures for EV: Overview of technologies and issues," *2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion,* Bologna, Italy, Oct. 2012, pp. 1-6.

[4] U. Chukwu and S. Mahajan, "Real-Time Management of Power Systems With V2G Facility for Smart-Grid Applications," *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 5, no. 2, Apr. 2014, pp. 558-566.

[5] A. Babin, N. Rizoug, T. Mesbahi, D. Boscher, Z. Hamdoun, and C. Larouci, "Total Cost of Ownership Improvement of Commercial

Electric Vehicles Using Battery Sizing and Intelligent Charge Method," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 54, no. 2, Mar.-Apr. 2018, pp. 1691-1700.

[6] S. Baek, "A study on educational contents of hybrid electric vehicle using real time monitoring system," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 13. no. 2, 2018, pp. 443-448.

[7] S. Baek, "A Study on Contents for Education Using Actual Vehicle-based Electric Vehicle Diagnostic System," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 13. no. 3, 2018, pp. 555-560.

[8] A. Boufaied, "A Diagnostic Approach for Advanced Tracking of Commercial Vehicles With Time Window Constraints," *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, vol. 14, no. 3, Sept. 2013, pp. 1470-1479.

[9] D. Wu, Y. Li, C. Du, H. Ding, Y. Li, X. Yang, and X. Lu, "Fast velocity trajectory planning and control algorithm of intelligent 4WD electric vehicle for energy saving using time-based MPC," *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 13, no. 1, Jan. 2019, pp. 153-159.

[10] A. Risseh, H. Nee, and C. Goupil, "Electrical Power Conditioning System for Thermoelectric Waste Heat Recovery in Commercial Vehicles," *IEEE Trans. Transportation Electrification*, vol. 4, no. 2, June, 2018, pp. 548-562.

[11] S. Kwak, H. Kim, and J. Yang, "Design and implementation of oil pump control system driven by a brushless dc electric motor," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 1, Jan. 2014, pp. 83-90.

[12] U. Chukwu and S. Mahajan, "Real-Time Management of Power Systems With V2G Facility for Smart-Grid Applications," *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 5, no. 2, Apr. 2014, pp. 558-566.

[13] T. Masuta and A. Yokoyama, "Supplementary Load Frequency Control by Use of a Number of Both Electric Vehicles and Heat Pump Water Heaters," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 3, Sept. 2012, pp. 1253-1262.

[14] D. Papadaskalopoulos, G. Strbac, P. Mancarella, M. Aunedi, and V. Stanojevic, "Decentralized Participation of Flexible Demand in Electricity Markets－Part II: Application With Electric Vehicles and Heat Pump Systems," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 28, no. 4, Nov. 2013, pp. 3667-3674.

[15] Y. Hung, Y. Lue, and H. Gu, "Development of a Thermal Management System for Energy Sources of an Electric Vehicle," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 21, no. 1, Feb. 2016, pp. 402-411.

저자 소개

백수황(Soo-Whang Baek)

2005년 한양대학교 전자컴퓨터공학부 졸업(공학사)
2012년 한양대학교 대학원 전자전기제어계측공학과 석박사통합과정 졸업(공학박사)
2012년~2016년 현대케피코 기술연구소 책임연구원
2016년 호남대학교 미래자동차공학부 교수
※ 관심분야 : 친환경미래자동차, 자동차전자제어, 전기기기시스템

김철수(Chul-Soo Kim)

1980년 한양대학교 정밀기계공학과 졸업(공학사)
1982년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사)
1988년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학박사)
2016년 호남대학교 미래자동차공학부 교수
※ 관심분야 : 전기 자동차, 충전인프라