

플러그인 하이브리드 및 전기 자동차 고압배터리 전압 측정 방법

An Approach for High Voltage Battery Voltage Sensing of Plug-In Hybrids and Battery Electric Vehicle

권용성*
(Youngsung Kwon)

Abstract - This paper proposes an approach for measuring voltage of high voltage(HV) battery of plug-in hybrid electric vehicle(PHEV) and battery electric vehicle(BEV). The proposed methods use isolation resistor and isolation amplifier in order to measure high voltage which should be electrically separated from measuring circuit. In terms of practical applications their advantages and disadvantage are discussed and key design points are addressed by simulations. More importantly, the proposed methods are applicable to various applications such as on-board charger, inverter and battery management system (BMS) which are directly connected to HV battery in PHEV and BEV.

Key Words : HV battery, PHEV, BEV, Isolation resistor, Isolation amplifier

1. 서론

기후변화에 대한 국제 협약으로 온실가스(CO₂) 배출량 감축방안에 대해 관심이 높아지고 있다. 유럽연합에서는 CO₂ 감축을 위한 강제법규 제정 등, 소형 자동차로부터의 CO₂ 배출 감소 방법을 모색하고 있다. 이러한 국제적 CO₂ 감소 움직임으로 인해 친환경 자동차의 수요가 매년 가파르게 성장하고 있다[1,2]. 2030년까지, 늦어도 2040년 이내에 내연기관 차량 판매를 금지하는 법안이 유럽 연합을 중심으로 합의되었으며, 아직 합의에 이르지 못한 일부 나라들은 판매 중단 계획을 발표했다[3]. 세계 최대 자동차 시장인 중국에서도 CO₂ 배출 감소를 위해 가솔린과 디젤 차량의 생산과 판매를 중단하는 계획을 마련 중이다[4,5]. 미국 또한 차량 배기가스 배출 감소를 목적으로 차내 진단 시스템(OBD-II: On-Board Diagnostic II)을 적용하고 있다. 1996년 스모그 문제 해결을 위한 캘리포니아 주의 자동차 배기가스 배출 조절 시스템 시작으로부터, 90년대 말 미국자동차기술회(Society of Automotive Engineers)가 개발하고 미국환경보전국(Environmental Protection Agency)이 채택한 OBD-II는, 센서가 엔진 성능을 측정하고 시스템을 조정하여 배기가스 배출로 인한 오염을 최소화하는 진단 시스템이다.

친환경 자동차 PHEV의 경우 내연기관 자동차와 전기자동차의 구성요소(전동기, 충전기, 고압배터리 등)가 혼합되어 있어 OBD-II가 적용된다[6]. 고압배터리의 충전 정도, 즉 고압배터리 전압을 센서 고장 등의 이유로 오 측정하여 내연기관의 동작을

증가시킬 경우, 배출가스 CO₂가 증가 될 수 있다. 따라서 배출가스 영향에 직접적으로 영향을 미치는 고압배터리 전압 측정 센서의 역할은 중요하다. 또한 에너지 밀도가 높은 리튬이온 고압배터리의 전압 센서의 개발은 안정성 측면에서 필수적이다. 정확한 전압측정을 통해 과충전 및 과방전으로 인한 발열 및 발화의 위험을 사전에 진단함으로써, 고압배터리 충방전 특성을 관리하고 보호할 수 있다[7].

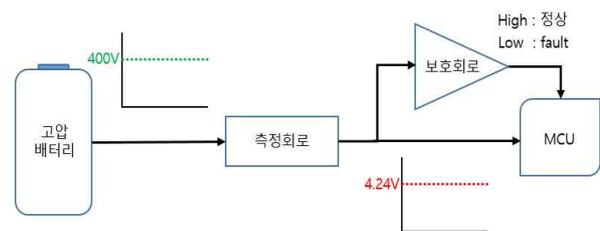


그림 1 고압배터리 전압 측정 시스템

Fig. 1 Voltage Sensing System for High Voltage Battery

본 논문에서는 친환경 자동차, PHEV와 BEV에 적용 가능한 고압배터리 전압 센서를 제안한다. 고압배터리로부터 분배저항과 측정저항을 거친 전압 신호가 차동증폭기로 증폭되어 소형제어장치(MCU: micro-controller unit)에 입력되는 구조이다. 또한 보호회로를 통해 고압배터리 과전압에 따른 발열문제를 사전에 방지할 수 있다. 제안된 고압배터리 전압 센서는 측정방식에 따라 두 가지로 분류된다. 첫째는 절연저항을 사용하여 측정하는 방식과 둘째는 절연증폭기를 이용하여 광학적으로 신호를 전달하는 방식이다. 두 가지 전압측정 방식에 대한 장단점 비교와 설계 시 유의점에 대해 설명한다. 또한 제안된 고압배터리 전압

* Corresponding Author : School of Mechanical and Control Engineering, Handong Global University, South Korea.
E-mail: youngsung.kwon@handong.edu
ORCID: https://0000-0002-9977-4254

Received : November 26, 2018; Accepted : December 24, 2018

센서의 유용성을 검증하기 위해 실제 차량 부품 최악 온도 조건 (105[℃])에서 시뮬레이션을 수행한다. 본 논문에서 제안하는 고압배터리 전압 센서는 PHEV와 BEV의 차내 충전기(on-board charger), 인버터(inverter) 그리고 배터리유지관리시스템(BMS: battery management system)에서 손쉽게 적용될 수 있다.

2. 고압배터리 전압 센서 설계

2.1 고압배터리 전압 센서의 중요성 및 설계 고려사항

친환경 자동차에서 고압배터리 전압을 측정하는 센서의 역할은 중요하다. 차내 충전기 또는 인버터에서 고압배터리 전압측정 정보를 기반으로 출력을 제어함으로써 차량 성능에 직접적으로 영향을 미친다. 특히 차량 BMS에서는 안정성과 관련하여 고압배터리 전압 센서의 역할은 더욱 중요하다. 기능 안정성 표준(ISO26262), 다시 말해 안전 목표(safety goal)를 만족하기 위해 ASIL C 또는 D 레벨의 안전기능을 수행하며, 배터리의 고전압 관련 사고 발생 시 차량 내의 여러 고압 부품과 연결된 접촉기(contactor) 또는 계전기(relay)를 차단함으로써 안전기능을 수행할 수 있게 하는 역할을 한다[8].

본 논문에서는 고압배터리 센서 설계 시 측정결과에 영향을 미치는 요인, 즉 제조과정 중에 발생하는 초기허용오차(initial tolerance)와 온도 변화에 따른 전력소모(power dissipation), 온도계수(temperature coefficient)를 설계에 중요 요인으로 고려한다. 반대로 영향이 미미한 열충격(thermal shock), 진동(vibration), 습도, 정전기 등의 요인들은 측정결과에 미치는 영향이 없다고 가정한다.

2.2 시스템 구성

그림 1은 친환경 자동차 고압배터리 전압 측정 시스템을 나타낸다. 측정 시스템 구성은 400[V]의 고압배터리와 전압측정 회로, 보호회로 및 MCU로 구성되어 있다. 측정회로를 통해 400[V]의 고압배터리가 4.24[V]로 축소(scale-down)되어 측정되고, 측정된 신호가 MCU로 입력되는 구조이다. 고압배터리가 최대 동작 전압(예를 들어 430[V])을 초과하는 경우, 보호회로의 high 신호가 low가 되고, 이를 MCU가 감지하여 동작하고 있는 친환경 자동차의 고전압 부품(차내 충전기 또는 인버터)을 정지시킨다.

2.2.1 절연저항

그림 2는 절연저항을 사용한 고압배터리 전압 센서이다(그림 1의 측정회로). 절연저항과 측정저항, 그리고 전압폴로어(voltage follower)와 차동 증폭기를 거쳐 고압 배터리의 전압 신호가 MCU에 전달되는 구조이다. 이 센서의 특징은 높은 저항 값(수 MΩ)을 사용하여 서로 다른 고압배터리 GND 전위와 chassis GND 전위를 전기적으로 분리시키는 것이다. 즉, 큰 저항 값으로 미세 전류가 흐르게 하여(다시 말해, 전류가 거의 흐르지 않는다

고 가정하여) 전기적으로 절연시키는 것이다. 여러 개의 직렬연결로 구성된 절연저항의 구현은 간단하지만, 설계 시 주의 사항은 다음과 같다.

첫째는 절연저항 값 설계이다. 아래 그림 2는 chassis GND 기준으로 고압배터리 (+)와 (-)단에 동일한 값의 절연저항과 측정저항이 연결된 병렬구조이다. 각각 (+)와 (-)단에 측정되는 전압신호의 크기는 다음과 같이 동일하다.

$$V_{batt,+} = \frac{\text{측정저항}}{(\text{절연저항} + \text{측정저항})} \times V_{batt} \times 0.5 \quad (1)$$

위의 식에서 $V_{batt,+}$ ($V_{batt,-}$)은 측정회로의 chassis GND를 기준으로 고압배터리의 (+) 또는 (-)단의 전압크기를 의미한다. 그림 2에서 절연저항을 이용한 센서는 (+)와 (-)단에 동일한 저항 값을 적용한 방식으로 식 (1)에서와 같이 0.5가 곱해진다.

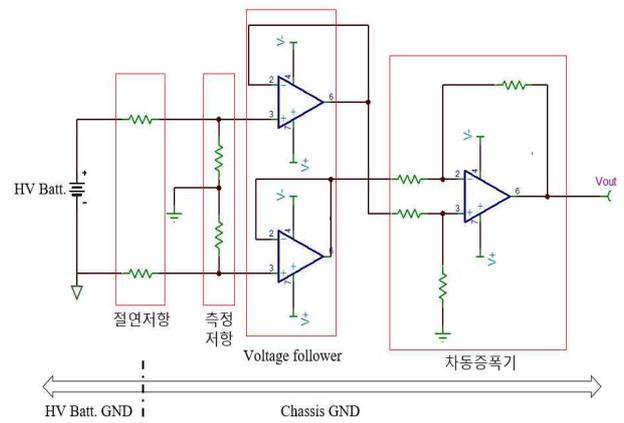


그림 2 절연저항을 이용한 고압배터리 전압 센서
Fig. 2 HV Battery Voltage Sensor using Isolation Resistor

따라서 전기적 안전을 위한 절연저항 테스트 시 병렬구조로 인해 (+)와 (-)단 저항의 절반 값이 측정된다. 절연저항 값을 크게 하여 전기적 안전성을 강화하는 것도 좋지만, 저항개수의 증가로 인해 PCB에 배치 시 공간의 제약이 따를 수 있다. 더욱이 OEM 혹은 고객사에서 높은 절연 저항 값을 요구할 경우, 고압배터리의 (+)와 (-)단에 두 배의 저항 값, 두 배로 늘어난 저항개수로 인해 설계 시 배치에 대해 반드시 고려해야 한다.

둘째는 부하영향(loading effect)을 고려한 voltage follower의 설계이다. 서로 다른 두 GND의 전위를 절연저항으로 분리시킬 경우, 수 MΩ의 큰 저항 값을 사용하게 되므로 측정저항 값도 수십 kΩ 이상의 큰 값을 사용하여야 한다. 그림 2에서 voltage follower를 고려하지 않을 경우 차동증폭기의 입력 저항은 수 kΩ으로 절연저항과 측정저항의 수십~수백 kΩ에 비해 작은 값이 된다. 전압신호를 전달 받는 차동증폭기의 입력 저항 값이 절연저항과 측정저항의 값보다 작게 되어 왜곡된 전압 신호가 차동증폭기의 입력으로 전달되는 것이다. 결과적으로 설계된 고압배터리 전압 값보다 작은 값이 측정되어 심각한 오차를 발생시킬 수

있다. 이럴 경우, voltage follower의 사용이 요구되어진다. 입력 저항 값이 매우 크고(이론상 무한대) 출력 저항 값은 수십 Ω로 작은 voltage follower를 사용하면 전압 신호를 손실없이 전달할 수 있다.

마지막으로 온도 및 전력소모를 고려한 저항 값 설계이다. 친환경 자동차에서 요구되어지는 온도 조건, -40~105[℃] 만족하기 위해, 최악 온도 조건 105[℃]에서의 정격전력을 고려해야 한다. 그림 3은 일반적인 thin film flat chip 저항의 정격전력을 나타낸다. 저항 제조사마다 조금씩 다르지만, 대부분 그림 3의 실선 70[℃]를 기준으로 정격전력이 감소하기 시작하며, 105[℃]를 기점으로 정격전력의 30~50[%]를 나타낸다. 예를 들어, 그림 3에서 105[℃] 온도 조건을 고려한 1206[inch] 크기의 저항을 선택할 경우, 전력소모는 식 (2)과 같이 정의할 수 있다.

$$P_{wc} = P_{s,1206} \times P_{d,105} \times M \quad (2)$$

여기서 P_{wc} 는 최악 온도 조건의 전력소모 값, $P_{s,1206}$ 는 1206[inch] 크기의 전력소모 값(0.25[W] at 70[℃]), $P_{d,105}$ 는 그림 3에서 105[℃]일 때 percentage 정격전력 값(0.25[W]의 30[%]), 그리고 M 은 마진 값(0.5)을 나타낸다. 단순히 M 값을 작게 설정하면 안정적으로 설계를 할 수 있지만, 비용 및 공간 측면에서 과한 설계가 될 수 있다. M 값 설정에는 특별한 기준이 없다. 반복적인 실험에 의한 경험 또는 고객사(OEM)에서 요구하는 값으로 고려하면 된다. 또한 제조과정에서 발생할 수 있는 초기허용오차, 상온기준 온도 변화에 따른 온도계수(temperature coefficient), 그리고 최대동작전압(max operating voltage)이 설계에 고려되어야 한다.

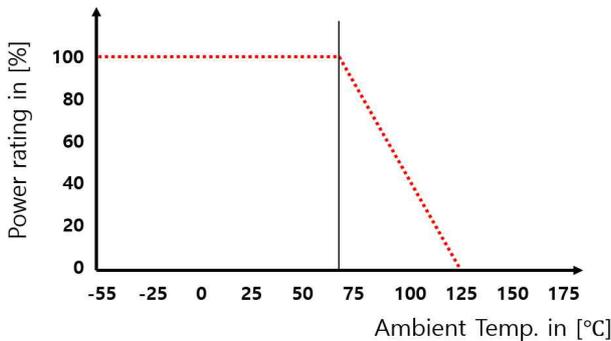


그림 3 온도에 따른 Thin Film Flat Chip 저항 Power Derating 곡선

Fig. 3 Power Derating Curve by Temperature for Thin Film Flat Chip Resistor

2.2.2 절연증폭기

절연저항과는 달리 절연증폭기는 전기적 절연뿐만 아니라 물리적 절연(그림 4)까지 제공함으로써 서로 다른 두 회로간의 GND를 분리시킨다. 서로 다른 두 회로 간에 빛을 이용하여 신호 전달을 함으로써, 전기적 안정성 및 빛을 이용한 신호 전달이란 측면에서 노이즈에 강하다[9]. 즉, 전기적 절연으로 인해 GND

loop를 통한 고압 측에서 저압 측으로 발생할 수 있는 노이즈 간섭을 줄일 수 있다. 또 다른 장점은 전기적 절연을 위해 사용했던 높은 저항 값이 필요 없게 되어, 저항 개수를 줄일 수 있다. 작은 저항 값 덕분에 voltage follower가 필요 없게 되고, 따라서 사이즈 측면에서 절연저항을 사용한 센서보다 유리하다.

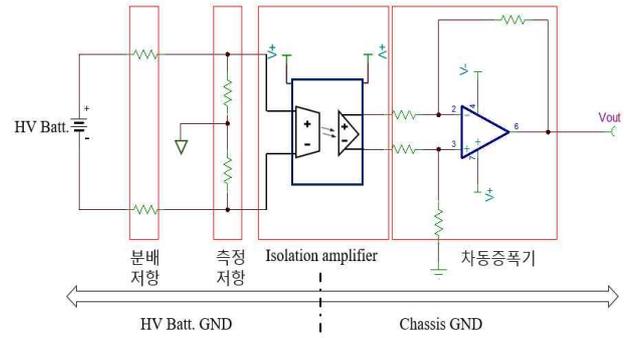


그림 4 절연증폭기를 이용한 고압배터리 전압 센서
Fig. 4 HV Battery Voltage Sensor using Isolation Amplifier

표 1 절연저항과 절연증폭기 비교

Table 1 Comparison of isolation resistor with isolation amplifier

	절연저항	절연증폭기
가격	○	
측정정확도	○	
크기		○

하지만 절연저항을 이용한 센서와 비교할 때 절연증폭기를 사용한 센서의 단점도 있다. 온도 변화에 따른 입력 오프셋(offset) 전압 및 입력 바이어스(bias) 전류 크기의 변화와 일부 비선형적 출력전압 구간은 센서의 입장에서 단점이다. 서론에서도 언급했듯이, 친환경 자동차에서 고압배터리 전압 센서의 측정 정확도는 배기가스 배출과 안전성 측면에서 매우 중요하지만 절연증폭기 적용 시 측정 정확도 측면에서는 불리하다. 또한 비용 측면에서도 절연저항보다 고가이므로 단점이다.

위 내용에서 언급한 절연저항과 절연증폭기를 이용한 센서의 특징을 비교하면, 표 1과 같이 요약할 수 있다. 표 1에서 유리한 점을 ○으로 표시하였다.

3. 고압배터리 전압 측정 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 고압배터리 전압 센서의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션을 진행했다. 제안된 두 가지 방법 중, 온도 변화에 따른 변화가 큰 절연저항 센서에 대해서만 시뮬레이션을 수행했다. 먼저, 상온 25[℃]에서의 시뮬레이션 결과를 살펴본 후, 최악 온도 조건 105[℃]에서의 결과와 비교했다. 온도증가에 따른 파라미터 값들의 변화에 초점을 맞추기 위해 다른 소자

(voltage follower, 비교기(comparator), 절연저항 이외의 다른 저항)는 변화가 없다고 가정한다. 또한 측정회로와 보호회로의 노이즈 신호에 따른 필터설계는 고려하지 않고 아래 표 2의 조건으로 시뮬레이션을 수행했다. 시뮬레이션 소프트웨어는 SPICE 기반의 Texas Instrument사의 무료 프로그램 TINA를 사용했다[10].

그림 5는 절연저항을 이용한 고압배터리 전압 센서 회로도이다. 표 2와 같이 각각 (+) 단과 (-)단에 10[MΩ](2[kΩ] × 5개)의 절연저항과 40[kΩ]의 측정저항을 사용했다. 그리고 부하효과를 고려한 voltage follower와 전압 신호증폭을 위한 차동증폭기, 그리고 보호회로의 OVP 동작을 확인하기 위해 최대전압 450[V], 60[Hz]의 사인파를 고압배터리의 전압신호로 인가하였다.

그림 6은 표 2와 그림 5의 파라미터 값들을 바탕으로 수행한 시뮬레이션 결과이다. X 축은 시간 500[usec/div] 그리고 Y 축은 신호 전압 크기 2[V/div]를 나타낸다.

표 2 시뮬레이션 조건

Table 2 Simulation Condition

절연저항	저항 값 및 개수	2 [MΩ] 5개
	전력소모	0.25 [W]
	최대동작전압	250 [V]
	초기허용오차	0.5 [%]
	온도계수	50 [ppm]
	M	0.5
고압배터리	최대동작전압	450 [V]
보호회로	OVP 레벨	430 [V]

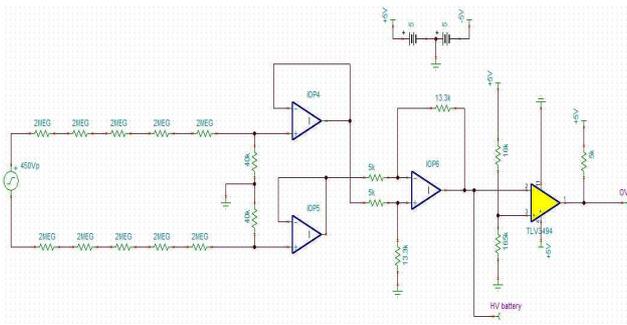


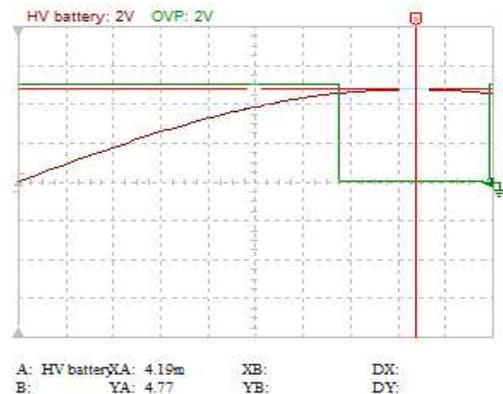
그림 5 절연저항 이용 고압배터리 전압 센서 회로도

Fig. 5 HV Battery Voltage Sensor Schematic using Isolation Resistor

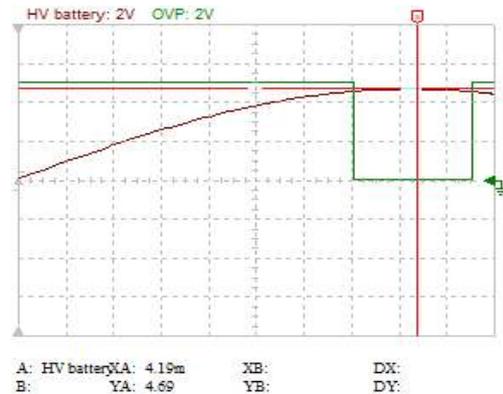
보호회로의 과전압 보호(OVP: over voltage protection)레벨은 4.56[V](실제 430[V])로 설정했고, 고압배터리가 정상동작 범위에 있을 때 보호회로의 출력은 high level 5[V]를 나타낸다.

제한된 고압배터리 전압 센서가 정상적으로 설계되었음을 그림 6을 통해 알 수 있다. 400[V] 이상의 고압배터리 전압신호가 5[V] 이하의 MCU의 입력 신호로 축소되었으며, 고압배터리 전압 신호가 OVP 레벨을 초과할 때 보호회로의 5[V](high level) 신호가 0[V](low level) 신호로 바뀌는 것을 확인할 수 있다.

그림 6의 (a)와 (b)는 온도에 증가에 따른 절연저항 센서 측정 오차를 비교 분석한 것이다. (a)는 상온 25[℃]에서의 측정 결과이고 (b)는 최악 온도 조건 105[℃]에서의 결과이다. (a)에서와 같이 450[V]의 고압배터리 신호가 4.77[V]로 측정되는 것을 볼 수 있고, (b)에서는 4.69[V]로 측정되는 것을 확인할 수 있다. 즉 상온대비 80[℃] 온도 증가에 따른 절연저항 값 변화로 인해 전압센서 측정 결과에 오차가 발생했다. 실제 고압배터리 전압 값으로 환산 시, 7.56[V](1.68[%])의 오차 값이다.



(a) 25 [℃] 측정 결과



(b) 105 [℃] 측정 결과

그림 6 온도변화에 따른 고압배터리 전압 측정 오차

Fig. 6 HV battery voltage sensor error depending on temperature

위의 절연저항을 사용한 고압배터리 센서 측정 결과로부터 향상된 측정 정확도를 확보하기 위해 낮은 초기허용오차와 온도 계수가 요구되어짐을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 친환경 자동차에 사용될 수 있는 두 가지 방식의 고압배터리 전압 센서를 제안하였다. 먼저 절연저항을 이용한 방식은 가격, 측정 정확도 측면에서 장점을 갖지만 저항 값을 높

계 설계해야 할 경우 개수 증가에 따른 소자 공간 활용에 대한 고려가 필요하다. 두 번째 절연증폭기를 이용한 방식은 그라운드 운영 및 회로 설계 시 간단한 구조설계의 장점이 있지만, 절연저항을 사용할 때보다 높은 가격 및 측정 정확도에서는 불리한 점이 있다. 시뮬레이션을 통해, 제안한 센서 방식의 유용성을 검증하였으며, 온도 증가에 따른 측정 오차를 확인할 수 있었다. 본 논문에서 제안한 친환경차 고압배터리 전압 측정 방식은 설계의 구조를 단순화하여 차내 충전기 및 인버터 그리고 BMS에서 구현할 수 있는 현실적 방안을 확인하였다.

References

- [1] T. E. Conner, P. L. Corsell, D. W. Crane, et al.: "Electrification roadmap: revolutionizing transportation and achieving energy security", *Electrification Coalition*, 2009.
- [2] T. Cleary, K. Sikes, Z. Lin, T. Sullivan, J. Ward, T. Gross: "Plug-in hybrid electric vehicle market introduction study: final report", *Oak Ridge Nat. Lab.*, 2010.
- [3] Shreya Dey, Brian Caulfield, Bidisha Ghosh, "Potential health and economic benefits of banning diesel traffic in Dublin, Ireland", *Journal of Transport & Health*, 2018.
- [4] D. Min, "Vehicles and CO₂", *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, 40(8), pp. 45-48, 2018.
- [5] J. Hofmann, D. Guan, K. Chalvatzis, and H. Huo, "Assessment of electrical vehicles as a successful driver for reducing CO₂ emissions in China", *Applied energy*, 184, pp. 995-1003, 2016.
- [6] Gilberto Geraldo, "Differences between on board diagnostic systems (EOBD, OBD-II, OBD-BR1 and OBD-BR2)", SAE Technical Paper Series, 2006.
- [7] I. Hwang, M. Park, C. Oh, M. Kim, and B. Lee, "Comparison of Battery Protection System for Eco-Friendly Vehicles", *KIEE Conference*, pp. 345-347, 2012.
- [8] W. Taylor, G. Krithivasan, and J. J. Nelson, "System safety and ISO 26262 compliance for automotive lithium-ion batteries", *IEEE Symposium on Product Compliance Engineering Proceedings*, pp. 1-6, 2012.
- [9] D. G. Woo, D. M. Joo, and B. K. Lee, "On the feasibility of integrated battery charger utilizing traction motor and inverter in plug-in hybrid electric vehicles", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(12), pp. 7270-7281, 2015.
- [10] TINA[Online], Available: <http://www.ti.com/tool/TINA-TI?keyMatch=tina&tisearch=Search-EN-Everything>

저 자 소 개



권 용 성 (Youngsung Kwon)

2009 송실대학교 전기공학부 공학사, 2012년, 2015년 University of Texas at Austin 공학석사, 공학박사. 2015년 10월~2018년 8월 LG전자 VC사업본부 선임연구원. 2018년 9월~현재 한동대학 교 기계제어공학부 조교수. 관심분야는 전기자동차 및 신재생 에너지 전력변환, 마이크로그리드 모델링 등.