

실내 충전 환경에서 전기차 배터리 열폭주 실시간 감지 및 대응 시스템

문종환*·윤민혁*·홍대기*·문대원**†

*상명대학교 시스템반도체공학과, **†상명대학교 전자정보시스템공학과

Real-time Detection and Response System for Electric Vehicle Battery Thermal Runaway in an Indoor Charging Environment

Jong Hwan Moon*, Min Hyuk Yoon*, DaeKi Hong* and DaeWon Moon**†

*Department of Systems Semiconductor Eng., Sangmyung University,

**†Department of Electronic and Information and System Eng., SangMyung University

ABSTRACT

This paper proposes a system that utilizes the Micro Controller Unit to detect and effectively respond to thermal runaway events that may occur during electric vehicle battery charging. Thermal runaway refers to a rapid fire hazard caused by the increase in internal battery temperature, which can be particularly catastrophic in indoor charging environments. The proposed system is equipped with real-time temperature sensors and communication modules to monitor battery temperature changes. When a fire is detected, the system automatically moves the battery to a fire suppression area to extinguish the fire. Finally, a prototype was developed, and the system's functionality was verified through simulations of fire scenarios.

Key Words : Electric Vehicle Battery, Thermal Runaway, Real-time Detection, Indoor Charging Environment

1. 서 론

최근 기후 변화에 우려가 증가함에 따라 탄소 배출가스 규제 및 국제 정세의 불안을 이유로 에너지 값이 증가하고 있다. 탄소배출의 문제점과 에너지 효율성을 향상시키기 위해 태양광을 이용한 실리콘 태양전지 응용 연구도 소개되었다[1]. 자연스럽게 사회에서는 유동적인 자원을 이용하는 내연기관 자동차보다 친환경 에너지를 사용하는 전기 자동차에 관심을 가지게 되었고, 전기 자동차 산업의 시장 규모가 점점 커지고 있다[2]. 전기 자동차 시장이 커짐에 따라 자연스럽게 전기 자동차 보급률도 올라갔고, 보급률이 증가함에 따라 배터리 결함으로 인한

화재 건수와 피해액 등이 증가하고 있다[3-4].

배터리 화재가 일어나는 이유는 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째는 배터리 관리 시스템(BMS, Battery Management System)의 오류로 인해 배터리에 화재가 발생하는 경우이다. 배터리 관리 시스템은 배터리의 SoC(State of Charge)를 추정할 때 전류 적산법과 OCV(Open Circuit Voltage)를 통해 배터리 용량을 측정한다. 전류 적산법은 쉽게 말해 전하량을 세는 방법으로, 배터리의 초기 SoC 값을 임의로 설정한 후 충/방전 사이클 동안의 전류를 적분하여 계산하는 값으로 SoC를 추정한다. OCV는 배터리에 일정 휴지 기간을 준 다음 OCV와 SoC 관계를 통해 SoC를 추정하는 방식이다[5]. 보통은 시간적 이점이 큰 전류 적산법을 이용하게 된다. 이 과정에서 치명적인 문제점이 발생하게 되는데, 초기 SoC 값의 오차가 누적되면서

†E-mail: bigwonmoon@gmail.com

앞으로의 추정 값에 영향을 미친다는 것이다[6]. 초기에는 미미하였던 오차 값은 결국 시간이 지나면 유의미한 오차 값이 되어 시스템적으로 오류가 발생할 확률이 매우 커지게 되며, 이는 결국 BMS 시스템에 오류를 발생시켜 배터리 화재로 이어지게 된다. 두 번째는 열폭주 현상이다. 열폭주란 배터리 셀의 자기 발열로 인한 급격한 온도 상승을 의미하고, 양극과 음극 사이의 분리막 붕괴로부터 시작된다. 배터리 셀 내부의 온도 상승으로 인해 분리막이 분해되고 양극과 음극이 접촉되면서 내부에 저장된 기준 이상의 에너지의 방출과 함께 전해액이 열분해로 인해 인화성 가스가 발생(off-gas)한다. 그래서 의도하지 않는 가스 팽창으로 인해 압력이 일정 수준 이상으로 높아지게 되면서 배터리 셀 밖으로 가스와 전해액이 누출되면서 발화한다[7]. 리튬 배터리 열폭주 현상은 다양한 원인이 있는데 대표적으로 과전압, 과방전 물리적 충격 등 전기적 충격으로 인해 폭주가 일어나게 된다. 배터리는 양극과 음극을 분리해 놓는 분리막이 있는데, 이 분리막 손상으로 인해 양극과 음극이 접촉하여 열폭주가 발생하게 된다.

배터리로 인한 화재는 흔히 알려진 화재와 많이 다른 특성을 가진다. 일반적인 화재는 물을 뿌리거나 연소에 필요한 산소를 차단하지만, 배터리에서 일어난 화재는 배터리 셀에서 화재로 인해 물질이 분해되면서 산소가 공급되기 때문에 일반적인 방법으로 화재를 진압할 수 없고, 배터리가 다 연소될 때까지 기다려야 하는 한계점이 있다. 쉽게 화재가 진압되지 않으므로 화재가 옆으로 옮겨져 더욱 큰 범위의 화재가 일어나거나, 신속한 조치가 되지 않아 주위 사물에 피해를 끼칠 수 있다[8].

현재 전기차 배터리 화재가 일어났을 때, 화재 시스템을 살펴보면 소방차가 오기 전까지 아무 대처도 할 수 없는 상황이다. 소방차와 소방관이 도착하여 방수포를 설치한 후, 배터리 연소가 다 될 때까지 물을 계속 뿌려 화재 진압을 하는 방식을 주로 사용하고 있다[9]. 하지만 이러한 방식은 실외에서 적용되는 방식이며, 만약 화재가 지하 주차장 등 실내에서 일어나게 된다면, 소방차의 진입이나 방수포 설치가 힘들기 때문에 적절한 조치가 되지 않아 2차, 3차 피해가 발생할 수 있다.

현재 시스템상 실내에서 배터리 화재가 일어났을 때 명확하게 해결할 방법은 없는 상황이다. 그렇기에 본 논문에서는 전기 자동차 배터리 화재가 실내에서 일어났을 때 신속하게 화재를 감지하고 진압할 수 있는 메커니즘을 전기차 충전 시설에 도입함으로써 시스템적 문제를 해결하고 개선하고자 한다.

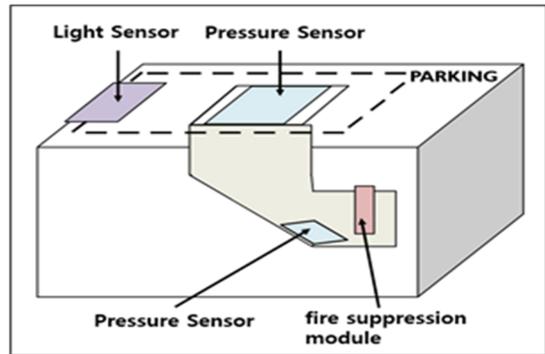


Fig. 1. Fire detection and fire extinguishing structures

2. 본 론

2.1 시스템 구성

Fig 1은 본 연구에서 제안하는 화재 진압 알고리즘을 적용하여 가상 구현한 주차 공간이다. 시스템의 전체적인 동작 과정은 다음과 같다. 먼저, 주차장에 설치된 조도 센서(Light Sensor)를 통해 전기 자동차가 충전을 하기 위해 주차된 것을 센서의 값을 Atmega128A에 전송하여 화재 감지 시스템이 작동할 수 있도록 한다. 이후 화재 감지 시스템이 작동하여 화재가 일어났음을 인식하게 되면 전기 자동차의 배터리가 분리되고, 감압 센서(Pressure Sensor)를 통해 배터리가 탈착 되었는지 확인 후 아래로 떨어뜨려 화재 진압 공간으로 배터리를 격리시킨다. 격리된 배터리는 소화 공간에서 감압 센서를 통해 배터리가 소화 공간으로 이동했는지 확인 후 화재 진압 장치(Fire Suppression Module)를 통해 화재를 진압할 수 있다.

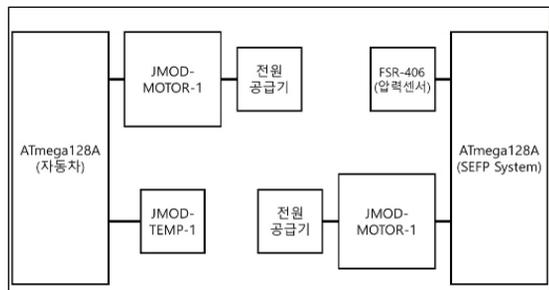


Fig. 2. Fire suppression algorithm.

2.2 화재 진압 시스템 알고리즘

Fig 2는 화재 진압 시스템의 알고리즘으로 만일 MCU에 5V의 전압이 인가되면 차량이 들어왔음을 인식할 수 있는 조도 센서와 차량의 배터리 온도를 실시간으로 확

인할 수 있는 온도 센서가 작동되어 화재 감지 시스템이 작동하게 된다. 배터리는 각 지점별로 온도가 전송되며 HC-05 블루투스 모듈을 이용하여 Terminal HC-05 통신용 앱을 이용하여 관리자가 배터리의 온도를 확인할 수 있게 된다. 이후 배터리의 급격한 온도 상승으로 화재를 감지했을 때 충전 중이던 배터리를 탈착 후 FSR-406 압력 센서 위에 배터리가 떨어져 ATmega128A로 감압이 인지되었음을 전송하면, 배터리를 소화 공간으로 떨어뜨려 화재 진압을 실시하게 된다.

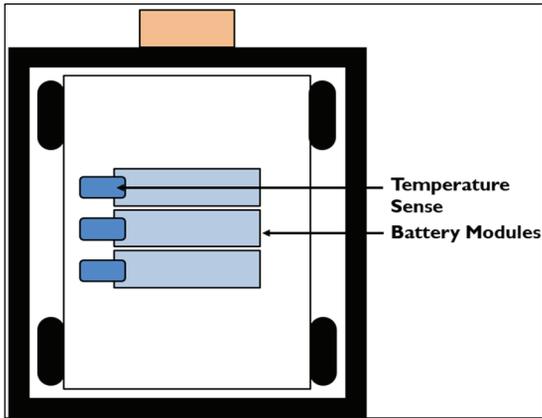


Fig. 3. Implementation of fire detection system.

2.3 화재 감지 시스템 구성

배터리의 열폭주 현상은 동시다발적이 아닌 한 곳으로부터 시작되어 주변 배터리 셀에 영향을 주며 점차 커진다. 이렇기 때문에 본 구현에서는 Fig. 3과 같이 화재 감지 시스템의 작동 원리에 대해 고안하였다. 배터리 전체의 온도를 측정하는 것이 아닌 일정 간격을 두고 배터리셀의 온도를 각각 측정한다. 이는 블루투스 모듈(HC-05)을 통해 실시간으로 값을 터미널 앱을 통해 전송할 수 있

며, 사용자는 이를 실시간으로 확인할 수 있도록 한다. 만약 한 개의 온도 센서에서 값이 주변 온도 센서 값보다 비정상적으로 높다면 이를 열폭주라고 인식되고 배터리 화재가 일어났다고 감지하게 된다.

2.4 화재 진압 시스템 하드웨어 구성

Fig. 4와 같이, MCU(Microcontroller Unit)에 전원이 인가되면 온도 센서, 조도 센서, 압력 센서, 블루투스 모듈로부터 5V의 정격 전압을 감지하여 내장된 ADC 회로와 새롭게 설계된 알고리즘을 통해 Integer Type의 데이터 값을 주기적으로 수신하는 상태가 된다. 이 각각의 센서들은 서로 상호작용 관계에 있으며, 순차적으로 조도 센서, 온도 센서, 블루투스 모듈, 압력 센서 순으로 알고리즘 상의 우선순위를 갖게 되며, 상위 우선순위의 필요충분조건이 만족되면 다음 센서의 알고리즘으로 넘어가는 순차적 알고리즘을 갖게 된다. 예외적으로 온도 센서와 블루투스 모듈은 동시적으로 실행된다.

각 단계에서 다음 단계로 알고리즘이 이동하는 필요충분조건을 설명하자면 먼저 조도 센서 알고리즘에서 온도 센서의 알고리즘으로 넘어가는 조건은 주차장에 위치한 조도 센서 위 자동차가 주차되어 조도 센서의 광량이 50 LUX보다 작다면 자동차가 충전을 위해 주차된 것으로 인식하여 온도 센서 알고리즘으로 넘어간다. 온도 센서 (JMOD-TEMP-1) 모듈은 VCC, GND, SCL, SDA 신호를 각각 모듈의 VEXT(5V), GND, SCL, SDL에 연결하여 주기적으로 온도를 측정하게 된다. 이후 측정된 온도 값을 통신용 앱으로 전송하는 동시에 읽는 과정에서 급격한 온도 상승이 일어난다면 화재가 일어난 상황임을 인지하고 압력 센서 알고리즘으로 이동하여 압력을 감지하도록 압력 센서를 작동하는 알고리즘으로 넘어가게 된다. 이러한 과정은 앞서 설명한 화재 진압 알고리즘의 순서에 따른 것이다.

2.5 조도 센서 알고리즘

본 조도 센서 알고리즘에서는 광자 수의 증가에 반비례하여 감소하는 저항 값을 통해 전류 값을 조절하는 조도 센서(GL5537-CDS)를 사용하였다. 전기 자동차가 들어왔음을 인식하는 광량의 기준으로 인식의 편의성을 위해 20 Lux로 설정하였다. ATmega128A에 전압이 공급되면 초기 설정 함수를 통해 ADMUX(ADC Multiplexer Selection Register)와 ADCSRA(ADC Control and Status Register A) 등을 설정해 준다. 이러한 과정을 통해 AVcc(Autonomous Vehicle Computing Consortium)를 참조 전압으로 사용하여 ADC를 활성화하고, 프리스케일러(Prescaler)를 128로 설정한다. ADC를 활성화함으로써 ADC가 클럭 주파수를 적절히 나누어 안정적인 변환을 수행할 수 있게 된다. 이렇게 초기화된

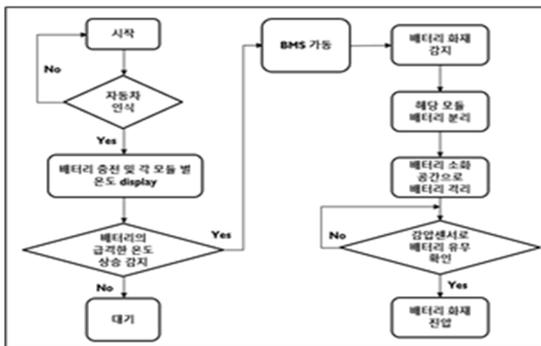


Fig. 4. Circuit diagram.

ADC는 이후에 아날로그 입력을 디지털 값으로 변환하여 읽을 수 있게 한다. 변환 값을 통해 초기에 한 번만 읽는 것이 아닌 주기적으로 값을 받아온다. 저항 값을 기준으로 설정할 때에는 100 Lux에서 저항 값이 5 [K Ω]을 기준으로 고려하였으며, 아날로그 값을 기준으로 20 Lux를 변환하면 저항 값을 450 [Ω]으로 설정하였다. 측정된 값의 저항 값이 기준 저항 값보다 높은 경우에는 온도 센서 및 블루투스 모듈 알고리즘으로 넘어가도록 설정하였다.

2.6 온도 센서 및 블루투스 알고리즘

본 온도 센서 및 블루투스 알고리즘에서는 온도에 비례하는 보정된 아날로그 전압을 출력하는 온도 센서(JMOD-TEMP-1) 모듈을 사용하였다. I2C(Inter-Integrated Circuit) 통신을 하기 위해서 ATmega128A에 전압이 공급되면 초기 설정 함수를 통해 TWSR(TWI Status Register)과 TWBR(TWI Bit Rate Register)를 설정하였다. 이러한 과정을 통해 프리스케일러 값을 1배로 설정하고, 클럭 비트 전송 속도를 설정하여 온도 센서와의 통신을 원활하게 한다. 이러한 역할을 해주는 온도 센서(LM75A)를 사용하였고, 이는 온도 센서 모듈에 내장되어 있다. 본 시스템에서는 2개의 온도 센서 모듈을 이용하여 지점 간의 온도 차를 계산함으로써 통신용 앱을 통해 관측함과 동시에 화재 감지를 할 수 있도록 고안해 보았다.

2.7 블루투스 모듈 알고리즘

계산된 온도를 앱에 표시하기 위해서 블루투스(JMOD-BT-1) 모듈을 이용해야 한다. 통신을 하기 위해서는 UCSRIB(송수신 가능 여부), UCSRIC(데이터 특성), UBRR1n(통신 속도 결정)을 설정한 후 관측된 온도를 Puchar1 함수를 통해 앱으로 전송하여 볼 수 있도록 한다. 통신용 앱을 통해 관리자는 현재 온도를 직접 눈으로 확인할 수 있으며, 이는 계산의 오류를 방지할 수 있는 대체 방안이기도 한다.

2.8 감압 센서 알고리즘

본 감압 센서 알고리즘에서는 전기 자동차에서 분리된 배터리가 소화 공간으로 가기 전에 제대로 감압 센서에 올라갔는지 확인하며, 분리된 공간으로 가서 우리가 원하는 위치에 안착했는지 확인하기 위해 사용되었다. 먼저 조도 센서에서 전기 자동차가 들어와 충전 중이며, 온도 센서에서 화재가 감지되고, 감압 센서에 배터리가 올라가게 되면 Fig. 1의 밀 공간으로 배터리가 이동하게 된다. 밀 공간으로 들어간 것을 확인하기 위해 밀 공간에도 감압 센서를 설치하여 배터리가 밀 공간으로 들어왔음을 알려주는 것도 가능하다.

3. 결 론

본 논문을 기반으로 구현한 프로토타입 모델에서는 배터리에 장착된 두 개의 온도 센서 간의 값 차이를 측정하기 위해 2개 중 1개의 온도 센서의 값을 0도로 설정하였다. 따라서 Fig. 5에서는 온도 센서 간의 온도 차이를 감지 및 통신용 앱을 통해 확인할 수 있다. 그렇게 실험의 간편화를 위해 다른 쪽의 온도를 임의적으로 상승시켜 배터리 화재 감지 시스템이 정상적으로 작동하는지 확인할 수 있었다.



Fig. 5. Check the temperature difference in the communication app.

Fig. 6은 프로토타입 모델에 적용된 자동차 감지 모듈이며, 조도센서 3개를 이용하여 자동차가 오정렬 되었을 경우를 확인하기 위해 정해진 위치의 센서가 모두 활성화 되어야 자동차가 존재함을 인식하게끔 하였다.



Fig. 6. Prototype car detection module.

그림 7을 통해 프로토타입 모델에서 자동으로 시스템이 온도 상승으로 화재를 감지하여 작동됨을 확인할 수

있었다. 전기 자동차의 배터리 탈착은 편의상 모터를 이용하여 임의로 떨어뜨렸으며, 화재 감지 후 배터리가 정상적으로 감압 센서 위로 떨어져 소화 공간으로 이동되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 논문의 시스템이 구현된다면, 기술적인 측면에서 열폭주 감지 및 통제 기술을 통해 전기 자동차 배터리 화재에 대한 안전성이 더욱 확보될 것이다. 특히, 앞으로 더 많은 사람들이 전기 자동차를 이용하게 됨에 따라 열폭주 실시간 감지 및 대응 시스템의 중요성은 더욱 커질 것이다.



Fig 7. Prototype implementation.

참고문헌

1. In-Seung Lee, Keun-Joo Kim, "Sulfur Defect-induced n-type MoS₂ Thin Films for Silicon Solar Cell Applications", *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol. 22, No. 3, pp. 46~51, 2023.
2. "2024 Global Electric Vehicle Market Growth Forecast at 16.6%," SNE Research, https://www.sneresearch.com/kr/insight/release_view/246/page/0?s_cat=%7C&s_key word=, July 2, 2024
3. "Korea Power Exchange. Electric Vehicles and Chargers Distribution and Usage Analysis Report," Korea Power Exchange, pp. 2-8, 2021.
4. "Fire Incidence Statistics for Electric and Internal Combustion Engine Vehicles," Korean National Fire Agency, pp. 1-2, 2022
5. Kyung-Sang Ryu, Ho-Chan Kim, "Battery Cell SOC Estimation Using Neural Network," *The Korean Society of Electrical and Electronic Affairs*, Vol. 24, No. 1, pp. 333-338, 2020
6. Do-yang Jeong, "BMS technology for electric vehicles," *The Journal of The Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 19, No. 6, pp. 45-54, 2014
7. Myung-Bo Gang, Woo-Young Kim, Nam-Jin Kim, "Numerical Comparative Study on the Thermal Run-away of NCM/LFP Batteries of the Same Geometry," *Korean Society for Geothermal and Hydrothermal Energy (KSGHE)*, Vol. 18, No. 4, pp. 1-11, 2022
8. "Fire while charging an electric car in a Busan apartment...Damage to 6 vehicles (Roundup)," *Yonhap News Agency*, <https://www.yna.co.kr/view/AKR20230501048300051>, May 1, 2023
9. Dong-hyeon Jeong, "A Study on Fire Response in Charging Facilities for Electric Vehicle," Graduate School of Engineering, Kyunggi University with a Master's Degree in Korea

접수일: 2024년 8월 14일, 심사일: 2024년 9월 13일,
 게재확정일: 2024년 9월 21일