

전기자동차 급속 충전 시 배터리 팩 온도 모사를 위한 열 모델링 기법

김동환, 강승현, 배정현, 노태원, 이병국[†]
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Thermal Modeling of Battery Pack for Electric Vehicles for Temperature Estimation during Fast Charging

Dong Hwan Kim, Sung hyun Kang, Jeong Hyun Bae, Tae-Won Noh, and Byoung Kuk Lee[†]
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 전기자동차 급속 충전 시 배터리 팩의 온도 모사를 위한 열 모델링 기법을 제안한다. 배터리 등가 회로 모델을 기반으로 배터리 팩 내부 발열량을 계산하고, 배터리 열 모델 구성을 위한 파라미터 추출 실험 방안을 제안한다. 또한, 전기자동차 방열 시스템의 영향 등으로 인한 발열량 변화를 실시간으로 보정하여 온도 모사 정확도를 개선한다. 열 모델링 기법의 유효성 검증은 위하여 전기자동차용 배터리 팩 기반의 시뮬레이션 및 실험을 진행한다.

1. 서론

전기자동차용 배터리 팩 급속 충전 시, 충전 전류에 의한 배터리 내부 발열로 인하여 배터리 팩의 온도가 상승한다. 배터리 팩의 온도의 과도한 상승으로 인하여 온도가 상한선을 초과할 경우, 배터리 팩의 노화가 가속화되며 열 폭주로 인한 안전 문제가 발생할 우려가 있다. 따라서 배터리 팩을 안전하게 관리하기 위하여 배터리 팩의 단자 전류에 의한 온도 변화를 모사할 수 있는 배터리 열 모델이 필요하다.

배터리 열 모델은 충전 전류에 의한 발열량과 배터리 온도 간 동특성을 기반으로 배터리 온도를 모사한다. 따라서 전류에 의한 발열량과 배터리 온도 사이의 동특성을 구현하기 위하여 배터리 열 모델의 구조 선정 및 열 모델 파라미터 추출이 반드시 필요하다. 또한 전기자동차용 배터리 팩의 과도한 온도 상승 시 방열 시스템이 동작하여 배터리 팩의 온도 변화가 나타난다. 따라서 열 모델을 통한 배터리 온도 모사 시 방열 시스템에 의한 영향을 실시간으로 반영할 필요성이 있다.

기존 연구에서는 동특성 모사를 위하여 배터리 내부에서 발생하는 화학 반응을 나타내는 전기화학 방정식을 기반으로 배터리 온도를 모사하였다^[1]. 하지만 배터리 팩 내부의 화학적 특성을 모두 파악해야 하므로 모델링 구조가 복잡해지며 온도 모사를 위한 연산량이 과도해지는 한계가 있다. 따라서 열 등가 회로를 구성하여 배터리 온도를 모사하는 모델링 기법이 제안되었다. 그러나 열 등가 회로 구성을 위한 열 저항 및 열 용량 추출 시 배터리 구성 물질의 특성을 모두 고려해야하므로, 열 모델 구성을 위한 파라미터 추출의 어려움이 있다. 또한 배터리 방열 시스템의 영향을 고려하기 위해서는 추가적인 파라미터가 요구되어 열 모델 구조가 복잡해지는 한계를 지닌다.

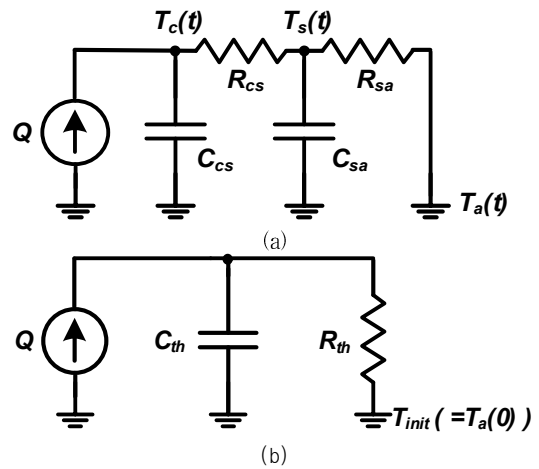


그림 1 배터리 열 모델: (a) Cauer 열 모델, (b) 제안하는 열 모델
 Fig. 1 Battery thermal model: (a) Cauer thermal model, (b) proposed thermal model.

따라서 본 논문은 전기자동차 급속 충전 시 배터리 팩의 온도 모사를 위하여 열 등가 회로 기반의 열 모델링 기법을 제안한다. 배터리 열 모델 구성 파라미터 추출 방안 및 방열 시스템 영향 고려를 위한 실시간 발열량 보완 방안을 제안하고, 열 모델의 유효성을 검증하기 위하여 전기자동차용 배터리 팩을 이용한 실험 및 시뮬레이션을 진행한다.

2. 제안하는 배터리 열 모델링 기법

2.1. 배터리 열 모델 구조 선정

그림 1(a)는 배터리 셀의 내부 발열량 (Q)에 의해 변화하는 배터리 내부 온도 (T_c) 및 표면 온도 (T_s)를 모사하는 Cauer 열 모델 구조를 나타낸다. 그러나 열 모델 구성을 위해서 다수의 열 저항 및 열 용량 (R_{cs} , C_{cs} , R_{sa} , C_{sa}) 추출이 요구되며, 열 모델의 기준 온도인 외기 온도 (T_a)가 배터리 발열에 의해 실시간으로 변화하여 내부 발열량과 배터리 온도 간 동특성 분석의 어려움이 따른다.

따라서 본 논문에서는 그림 1(b)와 같이 내부 발열량에 의한 표면 온도의 변화만 고려하였으며, 내부 발열량과 표면 온도 사이의 동특성 모사를 위한 열 저항 (R_{th}) 및 열 용량 (C_{th}) 추출을 통해 배터리 온도를 모사한다. 또한 열 모델의 기준 온



그림 2 배터리 열 모델링을 위한 배터리 팩 구조
Fig. 2 Battery pack structure for thermal modeling.

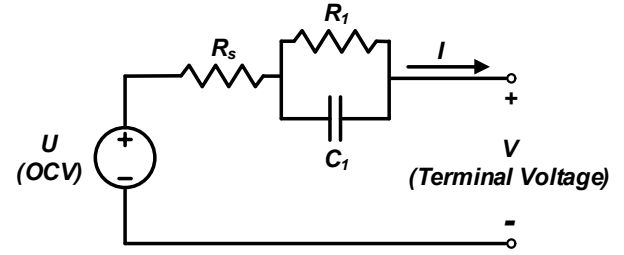


그림 3 배터리 등가 회로 모델
Fig. 3 Equivalent circuit model of battery.

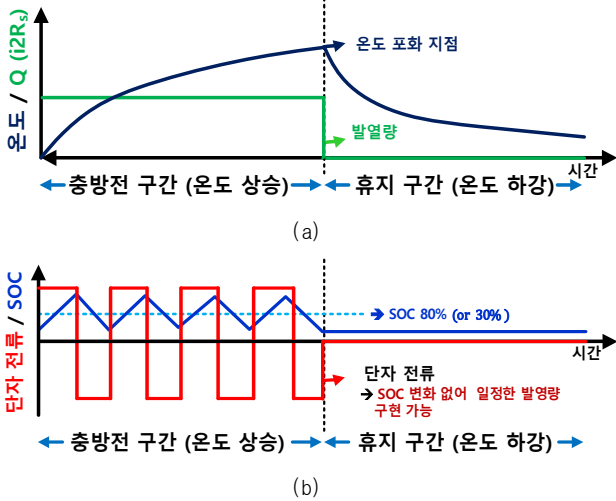


그림 4 제안하는 열 저항 및 열 용량 추출 실험 개요: (a) 온도 및 발열량 (b) 전류 프로파일 및 SOC
Fig. 4 Proposed experiment for extracting thermal parameters: (a) Temperature and Heat (b) Current profile and SOC

도를 배터리 초기 온도 (T_{init})로 설정함으로써 내부 발열량과 배터리 온도 간 동특성 분석을 용이하게 하였다. 배터리 팩에 정전류가 인가될 경우, 제안하는 열 모델에 의해 모사되는 배터리 온도는 식 (1)과 같다.

$$T_s(t) - T_{init} = QR_{th} + (T_s(0) - T_{init}) - QR_{th}e^{-\frac{t}{R_{th}C_{th}}} \quad (1)$$

2.2. 배터리 열 모델 파라미터 추출

본 논문은 배터리 열 모델 파라미터 추출을 위하여 그림 2와 같이 용량이 175 Ah인 전기자동차용 NCM (nickel cobalt manganese) 배터리 10개가 직렬로 연결된 배터리 팩을 구성하였다. 배터리 팩 구성 셀 중 온도가 가장 높은 셀 5를 기준으로 열 모델 파라미터 추출을 진행하였다.

배터리 충전 시 발생하는 내부 발열량은 그림 3의 배터리 등가 회로 모델의 내부 저항 (R_s)에 의한 발열로 나타낼 수 있으며, 이는 식 (2)와 같이 간단하게 계산할 수 있다^[2].

$$Q = I^2 R_s \quad (2)$$

열 저항 및 열 용량은 그림 4(a)와 같이 일정한 발열량을 인가한 후 나타나는 휴지 상태의 온도 곡선을 이용하여 식 (1) 기반의 Curve Fitting을 통해 추출할 수 있다. 식 (2)에 의해 일정한 발열량을 인가하기 위하여, SOC에 따른 R_s 변화가 발생하지 않도록 그림 4(b)와 같이 충전 및 방전을 반복하는 전

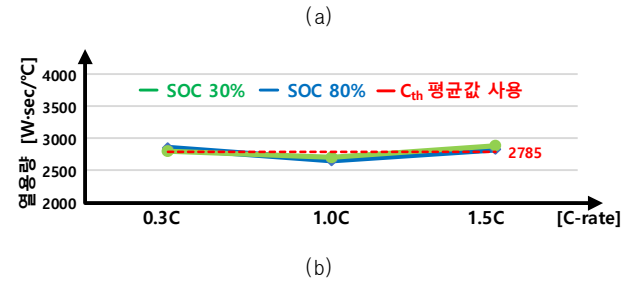
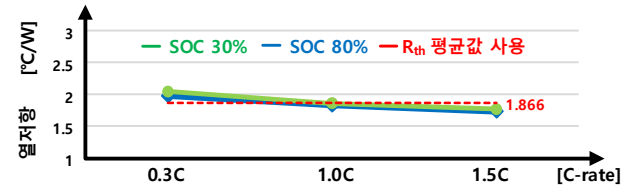


그림 5 R_{th} , C_{th} 추출 결과: (a) R_{th} (b) C_{th}
Fig. 5 R_{th} , C_{th} extraction result: (a) R_{th} (b) C_{th} .

류 프로파일을 통해 SOC를 일정하게 유지시킨다.

그림 5는 다양한 SOC (30%, 80%) 및 C-rate (0.3C, 1.0C, 1.5C) 조건에 따른 열 저항 및 열 용량 추출 결과를 나타낸다. 추출 결과 SOC 및 C-rate에 따른 열 저항 및 열 용량 변화가 미비하여, 본 논문에서는 열 모델 구성 시 SOC 및 C-rate에 대한 열 저항과 열 용량의 평균값을 사용한다.

2.3. 실시간 발열량 보정을 위한 열 모델링 기법

전기자동차용 배터리 팩 충전 시 단자 전류에 의한 발열량은 식 (2)에 의해 계산된다. 그러나 그림 6과 같이 방열 시스템이 동작하거나 배터리 내부 화학 반응이 두드러지는 경우 식 (2)에 의한 열 모델의 발열량 계산 시 실제 발열량과의 차이가 발생한다. 따라서 계산된 발열량의 차이로 인하여 그림 7과 같이 열 모델을 통해 모사된 배터리 온도가 실제 온도 대비 더 높거나 낮은 값으로 모사된다. 이러한 열 모델의 온도 모사 오차를 감소시키기 위하여 열 모델 구성 시 그림 8과 같이 측정 온도를 기반으로 발열량 계산 오차를 실시간으로 보완해주는 발열원 (Q_{comp})을 추가하였다. Q_{comp} 는 실시간으로 측정되는 배터리 온도 (T_s , T_{s-1}) 및 2.2절에서 추출한 파라미터인 R_{th} , C_{th} 를 통해 실시간으로 계산할 수 있으며, 이는 식 (3)과 같다.

$$Q_{comp} = \frac{T_s - T_{s-1} \times e^{-\frac{0.1}{R_{th}C_{th}}}}{R_{th}(1 - e^{-\frac{0.1}{R_{th}C_{th}}})} - I^2 R_s \quad (3)$$

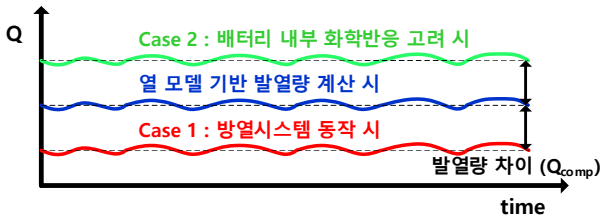


그림 6 방열 시스템 동작 또는 화학 반응에 의한 발열량 변화
Fig. 6 Heat change due to cooling or chemical reaction.



그림 7 방열 시스템 동작 또는 화학 반응에 의한 배터리 온도 변화
Fig. 7 Temperature change due to cooling or chemical reaction.

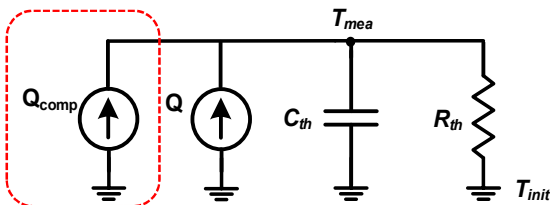


그림 8 발열량 변화를 고려한 배터리 열 모델
Fig. 8 Thermal model considering variable heat generation.

따라서 Q_{comp} 를 통해 보완된 발열량 (Q_{tot})은 식 (4)와 같으며, Q_{comp} 의 영향을 고려하여 그림 8의 열 모델에 의해 모사되는 배터리 온도는 식 (5)와 같다.

$$Q_{tot} = Q + Q_{comp} = I^2 R_s + Q_{comp} \quad (4)$$

$$T_s(t) - T_{init} = Q_{tot} R_{th} + (T_s(0) - T_{init}) - Q_{tot} R_{th} e^{-\frac{t}{R_{th} C_{th}}} \quad (5)$$

3. 실험 및 시뮬레이션 검증

그림 9는 제안하는 열 모델의 온도 모사 정확도를 검증하기 위하여 배터리 팩에 그림 3(a)의 전류 프로파일을 인가하였을 경우, 방열 시스템 동작에 의한 온도 모사 오차 개선 결과를 나타낸다. 방열 시스템의 영향을 고려하지 않은 경우 열 모델의 온도 모사 결과 실제 온도 대비 높게 모사되었다. 그러나 Q_{comp} 를 통해 방열 시스템에 의한 영향 고려 시 온도 모사의 최대 오차가 0.88 °C로 온도 모사 정확도가 개선되었다.

그림 10은 15C의 정전류를 인가하여 배터리 팩 완충 시, 배터리 내부 화학 반응에 의한 발열량 오차로 발생한 온도 모사 오차 개선 결과를 나타낸다. 화학 반응에 의한 발열량 변화를 고려하지 않은 경우 열 모델의 온도 모사 결과 실제 온도 대비 낮게 모사되었으나, Q_{comp} 를 통한 발열량 보완 시 온도 모사 최대 오차는 약 0.33 °C로 온도 모사 정확도가 개선됨을 확인하였다.

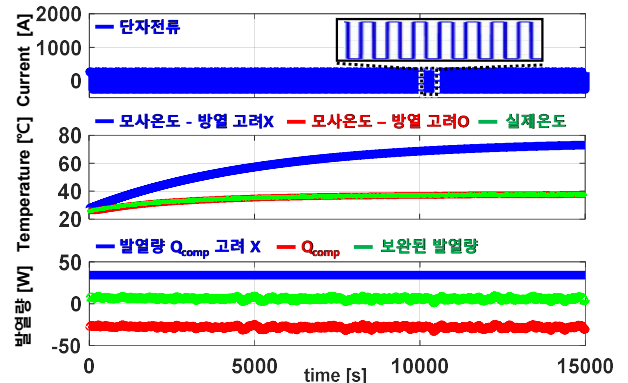


그림 9 방열 시스템 고려 유무에 따른 배터리 온도 모사 결과
Fig. 9 Temperature estimation considering cooling system.

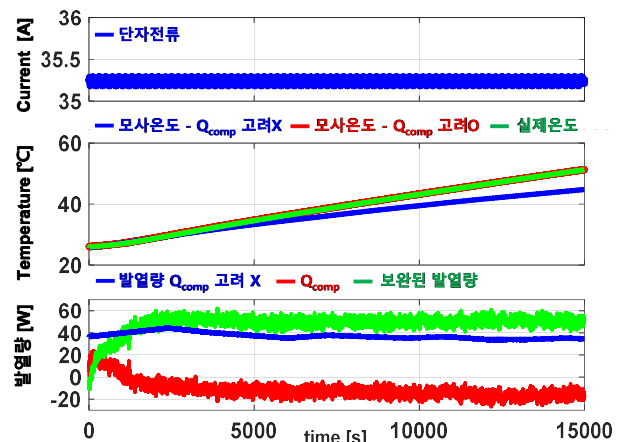


그림 10 화학 반응에 의한 발열량 변화 시 배터리 온도 모사 결과
Fig. 10 Temperature estimation considering chemical reaction.

4. 결론

본 논문은 전기자동차 급속 충전 시 배터리 팩의 온도 모사를 위하여 열 등가 회로 기반의 열 모델링 기법을 제안하였다. 배터리 열 모델을 구성하는 파라미터 추출 방안 및 외부 요인에 의한 발열량 보완 방안을 제안하였으며, 실험 및 시뮬레이션을 통해 제안하는 열 모델의 유효성을 검증하였다.

참고 문헌

[1] M. Yazdanpour, P. Taheri, A. Mansouri and B. Schweitzer, "A circuit-based approach for electro-thermal modeling of lithium-ion batteries," in *2016 32nd Thermal Measurement, Modeling & Management Symp. (SEMI-THERM)*, San Jose, CA, 2016, pp. 113-127.

[2] T. Yuksel and J. Michalek, "Development of a simulation model to analyze the effect of thermal management on battery life," in *Soc. Automotive Eng. World Congr. Exhibition*, Detroit, MI, 2012, pp. 8-18