전기차의 V2X 기반 예측 열관리 제어

장승훈*, 박창은*, 최경환*
한국과학기술원*

V2X-Based Predictive Thermal Management for Battery Electric Vehicles

Seunghun Jang*, Changeun Park*, Kyunghwan Choi*
Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)*
{shjang7071, aegis314, kh.choi}@kaist.ac.kr

Abstract - This paper proposes a V2X-based predictive thermal management method for battery electric vehicles. Control-oriented models of the battery, cabin, and motor are identified from experimental data using a multistep prediction error method. Future speed and acceleration are predicted through quadratic programming using traffic signal and preceding vehicle information. The predicted thermal loads are incorporated into model predictive control to regulate component temperatures and optimize thermal management energy use. Simulations over urban and highway driving conditions yielded a speed prediction RMSE of 11.75 km/h and a battery temperature RMSE of 0.45° C, with an SOC decrease of 8.79%.

1. 서 론

배터리 전기자동차(Battery Electric Vehicle, BEV)의 배터리 열관리(Battery Thermal Management, BTM) 시스템은 배터리의 안전성, 성능 및 수명을 확보하기 위한 핵심 요소이다. 특히 배터리 온도를 허용 범위 내에서 유지하면서 냉각 시스템의 에너지 소비를 최소화하기 위해 모델 예측 제어(Model Predictive Control, MPC)가 널리 활용되고 있다. MPC는 미래 시스템 거동을 예측하고 이를 기반으로 제약조건을 고려한 최적 제어 입력을 결정할 수 있다는 장점을 갖는다. 그러나 이러한 예측 기반 제어 성능은 차량의 주행 속도 및 구동 부하와 같은 미래 주행 조건의 예측 정확도에 크게 영향을 받는다. 실제 도로 환경에서는 교통 흐름, 주변 차량의 거동 및 도로 상황 등이 지속적으로 변화하기 때문에 미래 주행 부하를 정확하게 예측하는 데 한계가 존재한다.

본 논문에서는 교통 및 주변 차량 정보를 활용하여 Ego vehicle의 미래 주행 속도를 예측하고, 이를 통합 열관리 시스템의 예측 제어에 활용하는 방법론을 제안한다. 제안 방법에서는 제한된 측정 데이터를 기반으로 배터리, 캐빈 및 전동기 열동역학을 식별하고, 이를 제어 지향적(control-oriented) 열모델로 구성하여 통합 최적 제어 문제를 정의한다. 또한 교통 인프라 정보 기반 속도 예측를 통하여 미래 구동 부하 및 열부하를 선제적으로 반영함으로써 온도 제약 위반을 감소시키고 열관리 에너지 소비를 효과적으로 관리한다. 이를 통해 배터리 냉각과 캐빈 열관리 사이에 존재하는 강한 열적·에너지적 결합을 고려하여 배터리, 캐빈 및 모터의 온도 제어 성능과 전체 열관리 시스템의 에너지 효율을 향상시킨다.

2. 통합 열관리 시스템 모델 및 문제 정의

2.1 통합 열관리 시스템 구성 [1]

통합 열관리 시스템은 캐빈 및 배터리의 온도를 조절하기 위한 냉매 루프, 배터리 냉각을 위한 저온 냉각수 루프, 그리고 모터 및 인버터 냉각을 위한 고온 냉각수 루프로 구성된다. 냉매 루프와 저온 냉각수 루프는 3-way valve를 통해 유로가 조절되며, 칠러를 통해 열교환이 이루어진다. 전체 열관리 시스템의 구성은 그림 1과 같다.

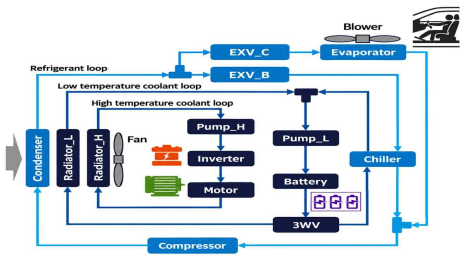


그림 1 열관리 시스템 구성

2.2 제어 지향적 열모델

제한된 측정 정보와 제어 입력을 기반으로 통합 열관리를 수행하기 위해서는 제어 지향적 모델이 필요하다. 각 열관리 구성요소의 제어 모델은 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{Q}_{cool,bat}(u_{pump,bat},u_{comp}) = a_1 u_{bat,pump} + a_2 u_{bat,pump}^2 + a_3 u_{comp} + a_4 u_{comp}^2 + a_5 u_{bat,pump} u_{comp}, \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{cool,mot}(u_{pump,mot}) = b_1 u_{mot,pump} + b_2 u_{mott,pump}^2,$$

$$\dot{T}_{bat} = \frac{\dot{Q}_{bat}(v_{veh},a_{veh}) + \dot{Q}_{amb,bat} - \dot{Q}_{cool,bat}(u_{comp},u_{bat,pump})}{C_{th,bat}}, \quad (2)$$

$$\dot{T}_{cab} = \dot{Q}_{amb,cab} - a_1 u_{comp} - a_2 u_{evap},$$

$$\dot{T}_{mot} = \frac{\dot{Q}_{mot}(v_{veh},a_{veh}) + \dot{Q}_{amb,mot} - \dot{Q}_{cool,mot}(u_{bat,mot})}{C_{th,mot}},$$

여기서 $\dot{Q}_{bat,cool}, \dot{Q}_{mot,cool}$는 제어 입력에 따른 열 제거 특성을 나타낸다. 식 (2)의 배터리, 캐빈 및 모터 온도 동역학에 포함된 계수들은 실험 데이터를 기반으로 multistep Prediction Error Method (PEM)를 통해 식별된다.

2.3 최적제어 문제정의

통합 열관리 시스템의 소비전력을 최소화하면서 각 열관리 대상의 온도 제약조건을 만족시키기 위해 다음과 같은 최적제어 문제를 정의한다.

$$\min_{u} J = \sum_{i=0}^{N_p-1} \left[P_{comp}(u_{comp,i}) + P_{bat,pump}(u_{bat,i}) + P_{mot,pump}(u_{mot,i}) \right] \quad (3)$$

$$s.t\,(1),(2)$$

$$\underline{T}_{bat} \le T_{bat,i} \le \overline{T}_{bat},$$

$$\underline{T}_{mot} \le T_{mot,i} \le \overline{T}_{mot},$$

$$\underline{T}_{cab} \le T_{cab,i} \le \overline{T}_{cab},$$

$$\underline{u} \le u_i \le \overline{u}$$

여기서 $P_{comp}, P_{bat,pump}, P_{mot,pump}$는 각각 컴프레서, 배터리 펌프 및 모터 펌프에서 소비되는 전력을 의미하며, 각 입력에 대한

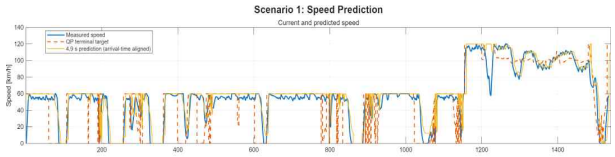


그림 3 실제 속도 프로파일과 예측 속도 비교

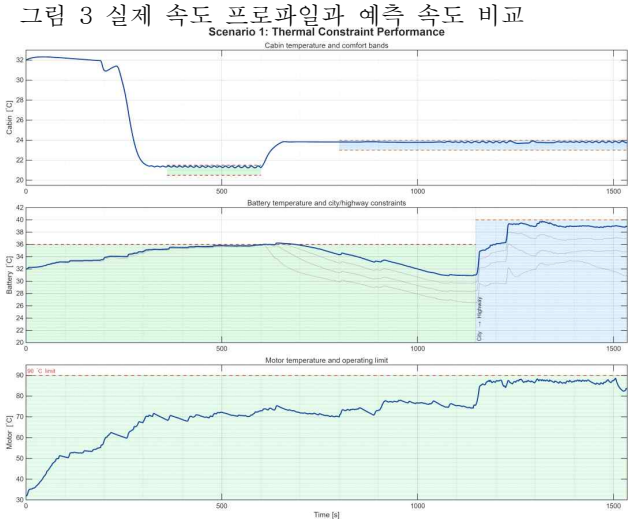


그림 3 캐빈, 배터리 및 모터 온도

소비전력 모델은 실험 데이터를 기반으로 식별된다. 또한 제어 입력 벡터 $u := [u_{comp}, u_{bat,pump}, u_{mot,pump}]^T$은 각각 컴프레서, 배터리 펌프 및 모터 펌프 입력을 의미한다.

3. 교통 정보 기반 속도 프로파일 최적화

식 (2)에서 정의된 주행 조건에 따른 발열량을 예측하여 각 시스템의 온도 거동을 계산하고, 식 (3)의 최적제어 문제를 통해 온도 제약조건을 만족하는 최적 제어입력을 결정한다. 따라서 미래 주행 부하의 예측 정확도는 통합 열관리 시스템의 제어 성능에 직접적인 영향을 미친다. 교통 인프라 및 V2X 정보 기반으로 속도 프로파일을 예측 문제 정의를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\min_{a} J_v = w_1\left(S_{N_p} - S_{ref}\right)^2 + w_2\left(v_{N_p} - v_{ref}\right)^2 + w_3 \sum_{i=0}^{N_p-1} a_i^2 \quad (4)$$

$$s.t \;\; 0 \le v_i \le v_{\max},$$
$$a_{\min} \le a_i \le a_{\max},$$
$$s_i \le d_L + v_L i \Delta t - d_{safe} + \epsilon_{L,i},$$
$$s_i \le s_{stop} + \epsilon_{TL},$$
$$s_{i+1} = s_i + v_i \Delta t,$$
$$v_{i+1} = v_i + a_i \Delta t,$$

여기서 s_i, v_i, a_i는 각각 예측 주행거리, 속도 및 가속도이며, 는 목표 종단 거리와 속도이다. d_L, v_L은 선행 차량의 상대거리와 속도이며, 예측 구간 동안 선행 차량은 등속으로 주행한다고 가정한다. d_{safe}는 안전간격, s_{stop}은 신호등 전방의 정지 위치이다. 목표 종단 상태는 V2X로 제공되는 신호 상태, 잔여 시간 및 신호등까지의 거리를 이용하여 설정한다.

4. 시뮬레이션 결과

MATLAB/Simulink IFAC2026 benchmark problem 기반 시뮬레이션 환경에서[1] 도심과 고속도로 구간을 포함한 주행 시나리오에서 제안 방법을 평가하였다. 속도 예측 지평과 시간 간격은 도심에서 25초와 0.5초, 고속도로에서 200초와 2초로 설정하였다. 가속도 범위는 -3.5~3.0 m/s² , 선행 차량 안전간격과 정지선 여유거리는 각각 10 m와 5 m로 설정하였다. 열관리 제어 주기는 0.1초이며, 예측 및 제어 구간 수는 각각 50과 20으로 설정하였다.

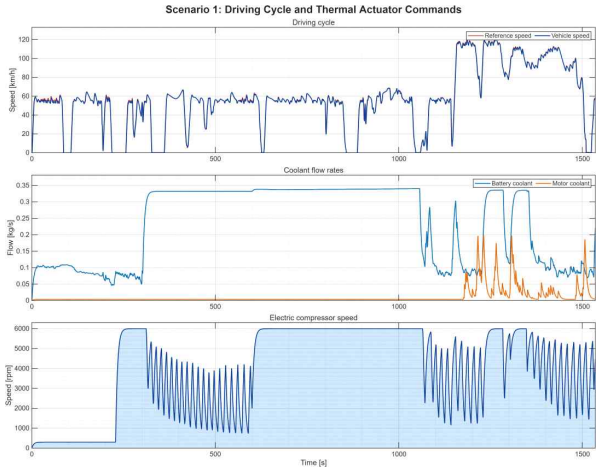


그림 4 주행 속도 및 열관리 입력

그림 2는 실제 속도와 예측 도달 시각에 맞춘 5초 선행 예측 속도를 비교한다. 예측 속도는 도심의 정차·재출발과 고속 구간의 속도 변화 경향을 반영하지만, 급격한 감속 구간에서는 예측 오차가 발생한다.

그림 3은 각 구성요소의 온도 응답을 나타낸다. 캐빈 온도는 초기 약 32도에서 21.5도 부근으로 감소한 뒤, 목표 변경에 따라 23.8도 부근에서 유지된다. 배터리 온도는 고속 구간 진입 전에 약 31도까지 감소하고, 고속 구간에서는 약 39도 수준을 보인다. 도심의 일부 과도구간에서는 표시된 36도 상한을 소폭 초과하지만, 고속 구간에서는 40도 이하로 유지된다. 모터 온도는 고속 구간에서 약 85~88도로 유지되며 90도 상한을 만족한다.

그림 4는 주행 속도와 열관리 입력을 나타낸다. 주행 조건과 온도 변화에 따라 배터리 냉각수 유량과 압축기 회전속도가 조절되며, 고속 구간에서는 모터 냉각수 유량이 증가한다. 전체 주행에서 SOC 소모량은 0.0879로, 정규화 SOC 기준 8.79%p 감소하였다. 속도 예측 RMSE는 11.75 km/h이며, 배터리 온도 모델의 RMSE는 0.45도이다.

5. 결 론

본 논문에서는 교통신호와 선행 차량 정보를 이용한 V2X 기반 예측 열관리 방법을 제안하였다. 식별된 열모델과 최적화 기반 속도 예측을 결합하여 미래 주행 조건에 따른 열부하를 열관리 제어에 반영하였다. 시뮬레이션에서 속도 예측 RMSE는 11.75 km/h, 배터리 온도 RMSE는 0.45도이며, 전체 주행의 SOC 감소량은 8.79%p로 나타났다. 향후 급격한 주행 변화에 대한 예측 정확도와 제약 처리 성능을 보완하고, 비교 제어기를 통해 에너지 절감 효과를 정량적으로 평가할 예정이다.

※ 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의
재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(RS-2025-00554087)

[참 고 문 헌]

[1] Yuanhao Cui, Fuguo Xu, Jiangyan Zhang, Tielong Shen, “Demand prediction using a vehicle social force model and its application to BEV thermal management”, Control Engineering Practice, Volume 176, 2026, 107172,ISSN 0967-0661.