하이브리드 자동차용 배터리 열화 모델 기반 용량 감소 영향성 분석 및 시뮬레이션 기반 연구

김재원*, 박진형*, 김재영*, 유성일**, 김종훈*
충남대학교 에너지저장변환실험실*, 현대 자동차**

A Study on the capacity degradation impact analysis and simulation based on battery aging model for hybrid vehicles

Jaewon Kim*, Jinhyeong Park*, Jaeyeong Kim*, Sungil Yoo**, Jonghoon Kim*
Chungnam National University*, Hyundai Motor Group**

ABSTRACT

본 논문에서는 열화에 따른 하이브리드 차량의 연비 특성을 분석하기 위해 시뮬레이션을 통한 연구를 진행하였다. 전기적 특성 실험 기반으로 배터리 내부 파라미터가 열화에 어떤 영향을 미치는지 분석을 하고 이를 기반으로 하이브리드 차량 모델을 통해 시뮬레이션을 진행하였다. 분석 결과를 통해 배터리 열화 상태에 따른 State-Of-Charge (SOC) 및 연비 효율 그래프의 변화 추이를 비교하였다.

1. 서 론

내연기관의 연비 및 배출가스 규제는 해마다 증가하고 있다. 이에 따라 기업들은 기존의 내연기관 차량의 개발 및 양산을 감소시키고, 내연기관에서의 연비 및 배출가스 규제에 대응 가능한 하이브리드 차량의 개발을 활발히 진행하고 있다.

하이브리드 자동차는 내연기관의 출력과 배터리의 출력을 분배하여 자동차의 출력을 제어한다. 특히 배터리의 State-Of-Charge (SOC)를 기준으로 배터리의 충/방전을 하며 배터리의 사용량을 높임으로써 차량의 연비 및 배출가스를 저감할 수 있다. 따라서 배터리의 상태에 따라 차량의 제어 전략이 유동적이며, 상황에 따라 변동적인 배터리의 특성을 반영하기 위한 연구가 요구된다. 하지만 배터리의 특성은 열화 및 온도와 같은 조건에 따라 비선형적인 용량 감소 특성을 나타내고 이는 곧 SOC에 영향을 미치기 때문에 이에 대한 전략이 요구된다. 배터리의 사용 이력, C-rate, 외부 온도 등 다양한 원인은 열화에 영향을 가한다. 열화가 진행됨에 따라 배터리의 용량이 감소하고, 내부 저항이 증가하게 된다. 저항이 증가할수록 내부의 온도 및 전압의 변동성 또한 증가하여 배터리 운용에 어려움이 따르고 안전상의 문제가 발생할 수 있다.

배터리의 열화에 기인하는 파라미터는 대표적으로 SOC, 온도, 전류 크기이다. 특히 하이브리드 차량의 경우 SOC 범위가 고정되어 있어 부하 및 환경 조건에 따라 전류 및 온도에 대한 영향에 배터리는 수동적으로 운용된다. 따라서, 제약조건 및 외부 요인에서 배터리에 대한 영향성을 파악하고 이를 기반으로 최적의 제어 조건을 찾기 위해 시뮬레이션 기반의 연구가 요구된다. 따라서 본 논문에서는 전기적 특성 신호에 기반한 내부 파라미터에 대한 분석을 진행하였다. 배터리의 상태 및 열화에 따른 배터리의 SOC 변화 추이와 자동차 연비 효율의 영향성을 시뮬레이션과 모델을 통해 분석 및 검증하였다.

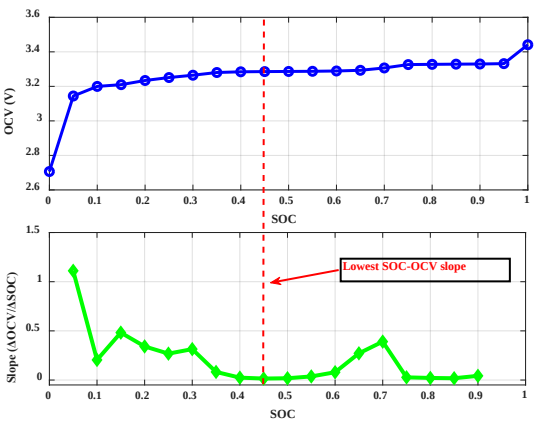

그림 1 배터리 전기적 내부 특성 파라미터 분석: SOC-OCV 그래프 (위) ΔOCV/ΔSOC 기울기 (아래)

Fig. 1 Battery electrical internal characteristics parameter analysis: SOC-OCV graph (top) ΔOCV/ΔSOC slope (bottom)

표 1 배터리 열화 모델의 계수 값

Table 1 Values of battery aging model's coefficient factor

Coefficient / SOC(%)	α	β
SOC ≤ 0.45	2896.6	7411.2
SOC > 0.45	2694.5	6022.2

2. 배터리 열화 모델 기반 하이브리드 차량 모델

2.1 Arrhenius 방정식 기반 배터리 열화 모델

하이브리드 차량의 에너지 관리에 대한 전략을 세우기 위해서 배터리의 가용 에너지에 따라 발전기와 모터의 사용 여부를 결정한다. 이는 배터리의 SOC를 기준으로 제어한다. SOC는 배터리 가용 용량에 사용한 전하량의 비율로써, 식 (1) 과 같이 입력 전류와 배터리 용량의 변화에 따라 결정되는 지표이다. 여기서, $\dot{SOC}$는 용량감소에 따라 변하는 배터리의 충전상태의 변화량을 나타낸다.

$$\dot{SOC} = -\frac{I_{bat}}{Q_{bat} - Q_{cyc}} \quad (1)$$

본 논문에서는 실시간으로 배터리의 열화에 대한 하이브리드 차량 모델에 대한 평가를 하기 위해서 이산 시간 형태로 식

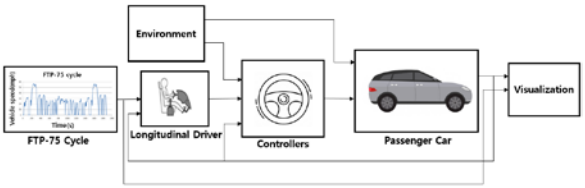

그림 2 P0 하이브리드 자동차 모델

Fig. 2 P0 Hybrid vehicle model

(2)와 같이 사용하였다[1]. α, β는 배터리의 SOC 영역에 따른 열화 정도를 나타내는 계수이며, E_a는 배터리 충/방전 화학반응을 할 수 있는 최소한의 활성화 에너지이다. η는 C_{rate}의 보상 계수이고, R_{gas}는 기체상수이다. T_K는 배터리 실험 시 외부 환경 온도를 나타내며 본 논문에서는 온도에 대한 영향성을 고려하지 않아 25℃로 고정하였다. z는 Power law factor이다. 배터리 열화 모델의 파라미터는 표 1에 나타냈다. 여기서 ΔAh 기준 시간에 배터리가 사용한 에너지의 양을 나타내며 식 (3)와 같이 표현된다.

그림 1은 본 논문에서 사용한 $LiFePO_4$ (LFP)셀의 SOC에 따른 Open Circuit Voltage (OCV)와 이에 대한 기울기를 나타낸 그래프이다. 배터리의 OCV의 변화는 SOC에 따라 변하며 기울기 값은 배터리 내부 저항에 따라 변하게 된다. 특히 논문에서 사용된 SOC에 따른 계수 값은 0.45를 기준으로 정의하였는데 이는 SOC-OCV의 기울기의 값이 0.45를 기준으로 변하기 때문이다. LFP의 배터리의 경우 노화에 직접적으로 영향을 미치는 인자는 Solid Electrolyte Interphase (SEI)층이다. 낮은 SOC보다 높은 SOC 조건이 열화에 대한 영향성이 더 높다[2]. 따라서 본 논문에서는 이러한 내부 특성 파라미터에 따라 차량 모델의 SOC 영역을 결정하고 이에 대한 영향성을 반영하여 시뮬레이션을 진행한다.

$$\Delta Q_{cyc,k} = \Delta Ah \cdot (\alpha SOC + \beta) \cdot \exp\left(\frac{-E_a + \eta \cdot C_{rate}}{R_{gas} \cdot T_K}\right) \quad (2)$$

$$\Delta Ah = \frac{1}{3600}\int_{t_k}^{t_{k+1}} |I_{bat}(t)|\,dt \quad (3)$$

2.2 하이브리드 차량 모델

2.1절에서 소개된 배터리 용량 모델을 사용하여 차량에 대한 영향성을 평가하기 위해서 본 논문은 그림 2와 같은 모델을 사용하였다. 자동차 모델은 P0 하이브리드 자동차 모델이다. 자동차의 시동, 발전 및 전동 모터를 동시에 구현한 Mild Hybrid Starter and Generator (MHSG)의 부착 위치에 따라 P0~P4로 나눌 수 있다. 그림 2의 P0 모델은 자동차 클러치 입/출력 속도를 빠르게 동기화하기 위해 엔진의 시동 축에 MHSG를 부착한 모델이다. 그림 2의 모델은 엔진, 모터, 배터리, 전송선로 및 내연기관과 배터리에 관련된 구조를 제어하는 알고리즘으로 구성 되어있다. 모델에 입력되는 주행 프로파일은 US Environmental Protection Agency (EPA)에서 만든 주행 사이클인 Federal Test Procedure (FTP)-75 사이클이다. 고속도로에서의 주행 사이클과 도시에서의 주행 사이클을 합한 사이클이다. 모델의 주행 환경은 온도는 상온으로 유지하였고, 대기압은 1기압이며, 풍속은 0 m/s로 가정하였다. 주행 사이클이 모델에 입력되면 정의된 엔진과 모터의 토크, 속도 데이터를 통해 배터리의 충/방전 및 전류 크기가 결정되고 이를 기반으로 출력 값으로 SOC 변화 및 연비 효율이 산출되도록 모델을 정의하였다.

2.3 시뮬레이션 및 열화 영향성 평가

그림 3은 초기 셀과 열화 셀의 SOC를 비교한 그래프이다. 또한, SOC의 영역은 40%에서 30%로 제한을 걸었다. 열화

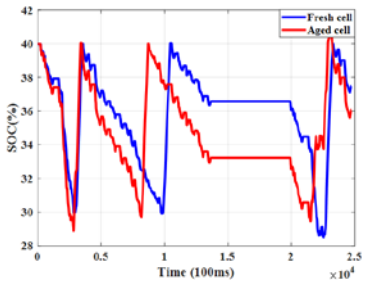

그림 3 배터리 초기 셀과 열화 셀에 따른 SOC 변화 추이 비교 그래프

Fig. 3 Comparison graph of SOC change about fresh cell and aged cell

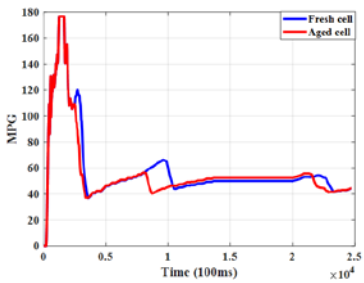

그림 4 배터리 초기 셀과 열화 셀의 연비 효율 비교

Fig. 4 Fuel efficiency comparison between fresh cell and aged cell

셀의 경우 초기 셀보다 빠르게 방전이 되기 때문에 그림 3과 같이 SOC의 운용 영역이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 앞서 설명한 초기 셀과 열화 셀의 기준을 자동차 모델에 적용하여 그림 4와 같은 연비 효율 그래프를 출력할 수 있었다. 따라서 열화 정도에 따라 일정한 연비 효율을 극대화하기 위해서는 SOC 운용 범위를 조절하는 것이 요구된다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 배터리 SOC 운용 범위는 시스템에 따른 최적의 제어 혹은 배터리의 열화를 방지할 방안 및 해결책이 요구된다.

3. 결 론

본 논문에서는 하이브리드 자동차용 배터리의 열화 모델을 통한 용량 감소의 영향성을 분석 및 검증하였다. 시뮬레이션 결과를 확인하여 배터리의 열화로 인해 배터리의 충전 상태, 차량의 연비 효율이 기존의 초기 셀보다 떨어지는 것을 검증하였다. 따라서 배터리의 수명전략, SOC에 따른 분석 및 최적 운용상태의 SOC 범위 선정과 추가 연구가 요구된다.

본 논문은 산업통상자원부(MOTIE)와 산업기술평가관리원(KEIT) (No. 20011596) 및 현대 자동차의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

참 고 문 헌

[1] Zhang, S., Hu, X., Xie, S., Song, Z., Hu, L., & Hou, C. (2019). Adaptively coordinated optimization of battery aging and energy management in plug-in hybrid electric buses. Applied Energy, 256, 113891.

[2] Weißhar, B., & Bessler, W. G. (2017). Model-based lifetime prediction of an LFP/graphite lithium-ion battery in a stationary photovoltaic battery system. Journal of Energy Storage, 14, 179-191.