전기 자동차용 배터리의 에너지 효율화를 위한 예열 온도 최적화 연구

김선웅 권도훈 조인호†
국립 한국교통대학교 전력변환시스템 연구실

Optimization Study of Preheating Temperature for Energy Efficiency in Electric Vehicle Batteries.

Seon-Woong Kim, Do-Hun Kwon, In-Ho Cho†
Korea National University of Transportation, Power Conversion System Lab.

ABSTRACT

전기자동차 배터리팩에 사용되는 리튬계열 이차전지의 경우 저온에서 성능이 저하되는 특성을 지닌다. 이에, 배터리 예열을 통해 성능을 향상하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만, 기존 연구는 배터리 예열 방법과 시간 단축에 집중된 경향을 보이며, 예열 이후 배터리의 용량이득에 대한 연구는 미비한 상황이다. 이에 본 연구는 배터리의 에너지 효율을 최대화할 수 있는 예열 방법을 제안한다.

1. 서론

전 세계적으로 온실가스 배출량이 증가하면서 지구 온난화가 가속화되고 있다. 이에 대응하기 위해 여러 나라에서 온실가스 배출과 지구 온난화 대응을 위한 정책을 강화하고 있다. 주요 국가들은 그린딜 정책을 통해 탄소중립을 추구하고 있으며, 이를 위해 탄소세를 강화하고 있다. 국내에서도 2050년 까지 탄소중립을 목표로 국가전략과 2030년 까지의 온실가스 감축 목표를 설정하였다. 이를 위해 자동차 연비표준을 강화하고 EV제조와 배터리산업 규모를 확대 지원하고 있다. 이에 따라 전기차 시장도 크게 성장하였다. 2021년에는 전기차 판매량이 650만대였지만, 2024년에는 1670만대로 약 157% 성장하였다. 전반적인 EV 시장은 확대되고 있지만, 성장세는 감소하는 추세이다. 2021년에는 약 100%의 성장률을 보였으나, 2022년에는 약 60%로, 2024년에는 20% 전후로 예상된다. 이는 EV의 주요 단점 중 하나인 겨울철 주행거리 감소와 충전시간 증가로 인한 것이다. 전기 자동차 배터리에 사용되는 리튬이온 배터리는 저온에서 내부 저항이 증가하는 특성이 있어 겨울철 전기 자동차의 주행 거리 감소를 야기한다. 이를 해결하기 위해 배터리를 예열하는 기술이 연구되고 있지만, 기존 연구들은 주로 예열 방식에 초점을 두고 있으며, 에너지 효율화에 관한 연구는 미비한 상태이다. 이에, 본 연구에선 배터리의 온도별 방전용량과 배터리 예열 시간을 토대로 효율적인 예열방안을 제시한다.

2. 본론

2.1 리튬이온 배터리의 저온특성

리튬이온 배터리는 저온에서 용량이 감소하고 충전시간이 증가한다. 이는 리튬이온 배터리의 내부저항 성분이 저온에서 증가하기 때문이다. 그림 1은 리튬이온 배터리의 내부저항 성분을 보여준다. 내부저항 성분을 살펴보면 전해액에서의 리튬이온의 이동저항, 양극 음극간의 전하 이동 저항, 고체내의 확산저항이 있다. 전해액에서의 리튬이온의 이동성은 전해액의 점성과 반비례하는데, 전해액의 점도는 온도가 낮을수록 올라간다[1]. 양극 음극간의 전하 이동저항, 고체내의 확산저항은 각각 양극과 음극에서 리튬이온이 삽입,이탈할 때 발생하는 저항과 리튬이온이 양극과 음극 활물질에 삽입된후 각 활물질에서 확산될 때 발생하는 저항이다. 이때 이 두 저항 성분은 아레니우스 방정식(1)에 의한 속도 정수 k에 의해 결정된다. 이때 A는 반응계수, EA는 활성화 에너지, R은 기체정수, T는 온도이다.

$$k = Ae^{(\frac{-EA}{RT})} \quad (1)$$

식에 따르면 온도 T가 낮아질수록 속도 정수 k의 값이 낮아짐을 알 수 있다. 즉, 온도가 낮을수록 배터리 내부에서 리튬이온의 이동이 어려워지므로 내부저항 성분이 증가함을 알 수 있다.

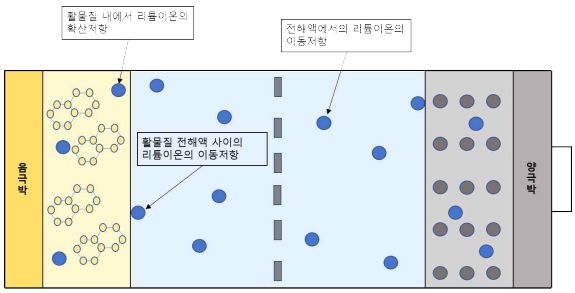

그림 1 리튬이온 배터리의 내부저항 성분.
Fig. 1 internal resistance of lithium-ion batteries.

2.2 리튬이온 배터리 예열 기술

저온에서의 내부저항의 증가로 인한 성능저하 문제를 해결하기 위하여 다양한 배터리 예열 기술이 개발 및 연구되었다[2]. 그림 2는 리튬이온 배터리 예열 기술의 분류를 보여준다. 배터리의 예열 기술은 크게 배터리의 외부를 예열하는 기술과 내부를 예열하는 기술로 나뉜다. 외부 예열 기술은 BTMS(Battery Thermal Management System)기반 기술과 전열 소자(Electrothermal element)를 사용하는 기술로 세분

화 된다. BTMS 기반 기술에는 공기, 액체, PCM(Phase Change Material)을 이용한 예열 방식이 있으며, 전열 소자를 이용한 기술에는 저항, 펠티어 효과, 전열필름을 활용한 예열 방식이 있다. 내부 예열 기술로는 배터리 자체의 에너지를 이용하는 자체 발열 기술과 외부에서 전류를 인가하는 전류 여자 방식이 있다. 자체 발열 기술에는 SHLB(Self Heating Lithium-ion Battry), 정전류/정전압 방전 방식이, 전류 여자 방식에는 DC, AC, 펄스 예열이 있다. 연구된 여러 예열 방식 중 BTMS와 결합이 용이하기 때문에 공기,액체 예열방식이 상용화 되었다. 하지만, 열 전단 효율이 낮다는 단점으로 인해 현재는 액체 예열 방식이 주로 사용되는 추세이다.

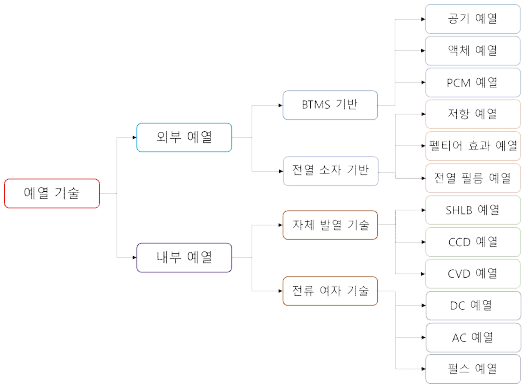

그림 2 리튬이온 배터리 예열 기술 분류.

Fig 2 Classification of preheating techniques for lithium-ion batteries.

2.3 리튬이온 배터리의 온도별 방전 용량

배터리를 효율적으로 예열하기 위해서는 배터리를 예열하는데 사용되는 에너지도 고려해야 한다. 배터리를 예열하여 회복한 에너지가 예열하는데 사용된 에너지에 비해 작다면 효율적이지 않다. 따라서, 리튬이온 배터리가 예열로 회복하는 용량을 온도별로 확인할 필요가 있다. 이를 위해 배터리의 온도별 방전 용량을 실험을 통해 도출하였다. 실험에는 LG INR18650 MH1셀을 사용했으며, 셀의 방전용량은 3.1Ah이다. 셀의 온도 작동 범위를 고려하여 온도를 설정하였으며, 셀을 설정한 온도(-20℃, -10℃, 0℃, 10℃, 25℃)에서 12시간동안 챔버에 방치시킨후 챔버의 온도를 일정하게 유지시키며 1C로 방전하였다. 실험을 통해 얻은 온도별 방전 용량을 그림 3에 나타내었다. 실험 결과를 살펴보면 영하 20℃에서는 배터리의 상온대비 방전용량이 약 63.7%로 성능이 굉장히 저하된다는 것을 확인할 수 있다. 또한 온도가 올라갈수록 배터리의 방전용량이 올라가는 것을 보아 배터리를 예열하면 겨울철 주행거리 감소 문제를 해결할수 있다는 점도 확인 가능하다. 하지만 온도 구간별로 리튬이온 배터리가 회복한 방전용량이 다르다. 이는 그림 3의 그래프로도 확인이 가능한데, 그래프의 기울기가 온도 구간별로 다른 것을 볼 수 있다. 영하 20℃에서 영하 10℃로 배터리를 예열하였을 때 얻을수 있는 용량 회복량은 410mAh인 것에 비해 0℃에서 10℃로 배터리를 예열하였을 때 얻을 수 있는 용량 회복량은 170mAh에 그친다. 또한, 그림 4의 배터리의 예열 시간 그래프를 보면 영하20℃에서 15℃ 까지는 21분이 소요되는 반면 15℃부터 20℃까지는 약 40분이 소요된다. 이를 통해, 배터리를 20℃ 까지 예열하는 것은 배터리가 예열을 통해 회복한 용량보다 배터리를 예열하는데 소모되는 에너지가 많다는 것을 보여준다.

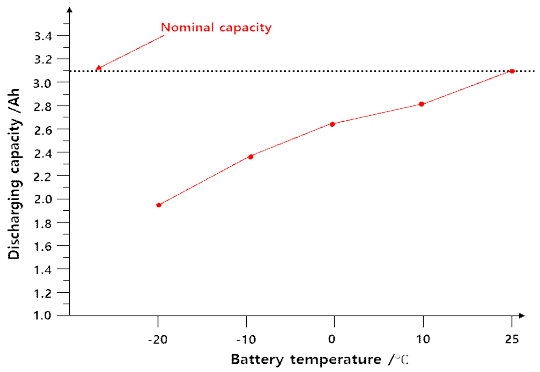

그림 3 리튬이온 배터리의 온도별 방전용량 그래프.

Fig. 3 Graph of the discharge capacity of lithium-ion batteries by temperature.

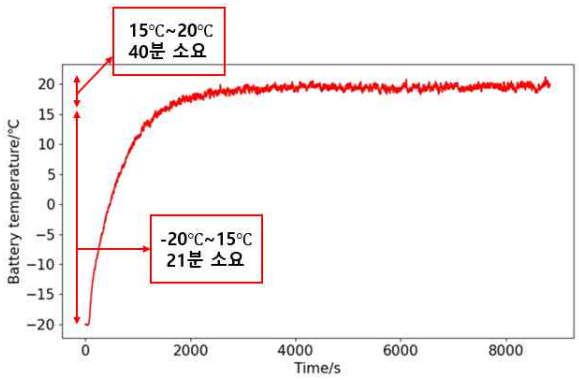

그림 4 리튬이온 배터리의 예열 시간 그래프.

Fig. 4 Graph of the preheating time of lithium-ion batteries.

3. 결론

본 연구에서는 저온에서의 전기자동차용 배터리의 에너지 효율화를 위한 저온시 온도관리 방안을 제안했다. 전기자동차의 겨울철 주행거리 감소 문제를 해결하기 위하여 배터리를 예열하고 있지만, 전기자동차를 효율적으로 사용하려면 배터리가 예열을 통해서 얻을 수 있는 용량 회복량에서 배터리를 예열시키는데 소모되는 용량을 뺀 용량이득을 고려해야 한다. 본 연구에서 실험을 통해 도출한 배터리의 온도별 용량 회복량과 예열 시간을 고려한다면, 15도 까지 예열하는 것이 용량이득이 가장 클 것 이라고 생각된다. 즉, 배터리를 15도 까지 예열한다면 전기자동차용 배터리를 저온에서 가장 에너지 효율적으로 관리할 수 있을 것이다.

본 과제(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학연협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

[1] LG에너지솔루션.100페이지로 읽는 배터리의 모든 것 2023 ENSOLPEDIA.

[2] Yujie Wang, Low temperature preheating techniques for Lithium-ion batteries: Recent advances and future challenges, Applied Energy,Volume 313, 2022,