

리튬이온 이차전지용 고로딩 양극 제조공정에서 건조온도의 영향에 대한 연구

김민진 · 류지현*

한국공학대학교 융합기술에너지대학원

(2023년 12월 12일 접수 : 2024년 1월 15일 수정 : 2024년 1월 15일 채택)

Impact of Drying Temperature in High-Loading Positive Electrode Fabrication Process for Lithium-ion Batteries

Min Jin Kim and Ji Heon Ryu*

Graduate School of Convergence Technology and Energy, Tech University of Korea,
237 Sangidaehak-ro, Siheung-si, Gyeonggi-do, 15073, Korea

(Received December 12, 2023 : Revised January 15, 2024 : Accepted January 15, 2024)

초 록

리튬이온 전지의 전극제조 공정 중에서 건조공정은 생산속도 및 공정비용의 측면에서 매우 중요하다. 특히 전지의 에너지 밀도를 높이기 위하여 전극의 로딩레벨이 증가하게 됨에 따라 전극 건조의 공정변수의 조정은 더욱 큰 주목을 받게 된다. 이에 본 연구에서는 양극에서의 건조온도를 다르게 하여 전극의 건조시간 및 그 성능에 대하여 비교하였다. $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$ (NCM622)를 양극 활물질로 사용하고 2.5 및 4.5 mAh cm⁻²의 로딩레벨에서, 건조온도는 120 °C에서 210 °C까지 다양한 건조온도 조건에서 제조되었다. 이와 같이 제조된 전극들의 물리적 및 전기화학 특성 비교하였다. 전극의 로딩레벨이 증가함에 따라 전극의 건조시간은 증가하였으나, 건조온도를 높이면 시간을 줄일 수 있다. NCM622 양극의 제조 과정에서 사용된 건조 온도는 전극의 전기화학 성능에 큰 영향을 미치지 않았으나, 210 °C 이상의 건조에서는 비저항의 증가 및 전기화학 성능의 저하가 발생하였다. 이에 고로딩 전극의 제조에 있어 건조온도를 190 °C까지 높여 성능의 손실없이 전극의 제조시간을 단축할 수 있다.

Abstract : Among the electrode manufacturing processes for lithium-ion batteries, the drying process is crucial for production speed and process cost. Particularly, as the loading level of the electrode increases to enhance the energy density of the battery, optimizing process conditions for electrode drying becomes more critical. In this study, we compared the drying time and electrochemical performance of the positive electrode prepared at different drying temperatures. $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$ (NCM622) was used as the active material and manufactured under various drying temperature conditions ranging from 120 °C to 210 °C at loading levels of 2.5 and 4.5 mAh cm⁻². The physical and electrochemical properties of the electrodes were compared. As the loading level of the electrode increases, the drying time of the electrode also increases, but this time can be reduced by increasing the drying temperature. The drying temperature used in manufacturing the NCM622 positive electrode does not significantly affect the electrochemical performance but drying above 210 °C resulted in an increase in the volume resistivity of the electrode and a decrease in electrochemical performance. Accordingly, in the

*E-mail: ryujh@tukorea.ac.kr

manufacture of high-loading electrodes, the drying temperature was increased to 190 °C to shorten the electrode manufacturing time without a loss of performance.

Keywords : Electrode fabrication, High-loading, Drying temperature, Positive electrode, Lithium-ion batteries

1. 서 론

리튬이온 이차전지는 지속적으로 성장하여 높은 에너지 및 출력 밀도로 휴대용 전자기기에서부터 전기자동차에 이르기까지 다양한 용도에서 널리 사용되고 있다.¹⁻³⁾ 특히 전기자동차에서 주행거리의 확보를 위해 요구하고 있는 높은 에너지 밀도의 전지를 제조하기 위해서는 고용량의 새로운 소재를 적용하는 방법과 더불어 전극의 로딩레벨을 높임으로써 전지 내부에 전극 활물질의 충전량을 증가시키는 것도 주요한 전략이라 할 수 있다.⁴⁻⁷⁾

하지만, 전극의 로딩레벨을 높인 고로딩 전극을 제조하기 위해서는 전극공정에서부터 조정을 필요로 한다. 일반적으로 리튬이온 이차전지용 전극의 제조공정은 믹싱, 코팅, 건조, 압연, 슬러리 등의 단계로 진행되는데, 전극 성능의 일관성을 유지하기 위해 균일하고 갈라짐이 없는 전극이 필요하다.⁸⁾ 따라서, 용매 제거 및 전극 구조 형성이 이루어지는 건조 공정은 매우 중요한 단계로, 건조 온도는 전체 공정에 중대한 영향을 미치는 매우 중요한 변수이다. 따라서, 건조 중의 온도조절을 통해 건조속도를 빠르게 하면서도 전극을 균일하게 하며 성능을 유지하는 것이 중요하다.⁹⁻¹¹⁾

액상의 슬러리가 코팅된 상태에서 건조되어 전극이 형성될 때에 건조온도가 너무 높은 경우에는 바인더의 이동이 발생하여 전극 표면의 바인더 농도가 증가할 수 있어 전극 코팅층과 집전체 사이의 접착력을 감소시킬 수 있다. 반면, 너무 천천히 건조하는 경우 바인더가 코팅 층 아랫부분으로 이동할 수 있어 바인더의 고르지 못한 농도 분포가 발생할 수 있다.¹²⁻¹⁵⁾ 이러한 균일하지 않은 바인더의 분포는 전극의 물리적, 기계적, 및 전기화학적 특성에 영향을 미칠 수 있다.^{15,16)} 또한, 전극 건조장비의 높은 가격을 고려하였을 때, 전극의 건조시간이 증가하는 것은 전극의 생산 속도 저하라는 심각한 문제를 발생시키게 된다. 따라서 전극의 특성을 유지하며 건조속도를 높이는 것은 비용 효율성을 높이기 위한 주요 전략이다.

본 연구에서는 리튬이온 이차전지에서 흔히 사용되는 양극 활물질인 $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$ (NCM622)를 사용하여 2.5 mAh cm^{-2} 의 로딩레벨을 지닌 전극과 4.5 mAh cm^{-2} 의 높은 로딩을 갖는 고로딩 전극을 제조할 때, 각각 120~210 °C의 다양한 건조온도를 적용

하였다. 건조온도 별로 시간에 따른 건조상태를 체크하고, 각 온도에서 제조한 전극에 대하여 이에 대한 전기화학적 특성을 평가하고 비교하였다. 이러한 결과는 리튬이온 전지의 전극공정에서 건조온도의 영향을 확인하고, 비용 절감을 위한 최적의 공정을 도출하는데 기여할 것으로 기대된다.

2. 실 험

2.1. 전극 제조

양극 활물질로는 $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$ (NCM622, 유미코아)를 사용하였고, 도전재는 carbon black (Super-P), 바인더는 polyvinylidene fluoride (PVdF, Kureha KF1100)를 사용하여 90 : 5 : 5의 무게 비율로 혼합하였다. 용매로 N-methyl-2-pyrrolidone (NMP)를 사용하였고, thinky mixer를 이용하여 슬러리를 제조하였다. 제조된 슬러리를 baker blade를 이용하여 집전체인 알루미늄 호일 위에 균일하게 코팅한 후, 120, 170, 190, 210 °C로 온도가 유지된 컨베이어 오븐에서 각각 15분간 건조하였다. 이를 롤 프레스를 사용하여 압연해 준 다음, 11 mm 직경의 원형으로 펀칭하고 120 °C의 진공상태에서 8시간 이상 건조한 뒤에 아르곤 가스 분위기인 글러브 박스 내에서 보관하였다. 전극의 로딩은 면적당 용량기준으로 $2.5 \pm 0.2 \text{ mAh cm}^{-2}$ 와 $4.5 \pm 0.2 \text{ mAh cm}^{-2}$ 에 맞추어 각각 제조하였다. 활물질의 용량인 170 mAh g^{-1} 을 이용하여 활물질 무게 로딩을 계산하였다. 이와 같이 제조된 전극에 대해서는 전극저항 측정기(HIOKI RM2610)를 사용하여 전극 비저항 값을 측정하였다. 같은 로딩 레벨과 기공도를 가진 전극을 각 조건마다 5개씩 준비하여 비저항을 측정하고 평균값을 얻었다.

2.2. 전지 조립

전기화학적 특성평가를 위한 2032 타입의 코인형 반쪽 전지로 아르곤 가스 분위기인 글러브 박스 내에서 조립하였다. 작동 전극은 11 mm 직경의 NCM622을 사용하였고, 반대 전극은 16 mm 직경의 리튬 메탈을 사용하였다. 전해액은 1 M의 LiPF_6 염이 EC (ethylene carbonate)와 EMC (ethylmethyl carbonate)가 3 : 7 부피비로 혼합되어 있는 용매에 녹아 있는 용액에, 5 중량%의 FEC (fluoroethylene carbonate)를

첨가제로 추가하여 사용하였다. 분리막은 Celgard사의 PP (polypropylene, C2400) 다공성 막을 사용하였다. 또한, 제조한 전극의 표면을 관찰하기 위해 SERON사의 AIS1800C 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM)을 사용하여 전극의 표면 형태를 확인하였다.

2.3. 전기화학적 성능평가

제조된 코인셀의 사이클 수명을 평가하기 위해 정전류 충방전 실험을 Wonatech사의 WBCS 3000Le cyclers를 사용하여 진행하였다. 25 °C의 항온조에 12시간 휴지(rest)한 후, 처음 3사이클은 안정화를 위해 0.1C에 해당하는 17 mA g⁻¹의 전류를 인가하여 진행하였으며, 그 이후에는 0.2C에 해당하는 34 mA g⁻¹의 전류밀도를 인가하여 사이클을 진행하였다. 전압구간은 4.3–3.0 V (vs. Li/Li⁺) 범위에서 진행하였으며, 각 단계를 넘어갈 때마다 10분의 휴지(rest)구간을 두었다. 또한, 속도특성 실험을 위해 충전 전류는 모두 17 mA g⁻¹으로 고정한 상태에서, 로딩별로 방전전류를 단계적으로 변경하여 인가하였다. 로딩레벨이 2.5 mAh cm⁻²인 전극은 17 / 34 / 170 / 680 / 1360 mA g⁻¹의 방전 전류를 차례대로 각 3사이클씩 인가하여 진행하였다. 로딩레벨이 4.5 mAh cm⁻² 고로딩 전극은 17 / 34 / 85 / 170 / 340 / 510 mA g⁻¹의 방전전류를 단계별로 인가하여 각 3사이클씩 진행하였다.

2.4. 용매 제거량 계산

각 온도별로 제거된 용매의 양을 비교하기 위해 건조시간을 동일하게 하고, 건조 온도를 변수로 두어 실험을 진행하였다. 각 전극을 똑같은 크기의 집전체에 코팅하고 온도별로 3분 또는 5분간 건조한 뒤, 무게를 측정하고 다시 120 °C에서 15분간 완전히 건조하여 무게를 측정하였다. 용매가 제거된 양은 3분 또는 5분간 건조한 상태에서 제거된 용매의 무게를 완전히 건조한 상태에서 완전히 제거된 용매의 무게로 나누어 상대적인 비율로 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

전극의 로딩 레벨에 따라 건조온도에 따른 건조시간과 제거된 용매 양을 측정하여 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)에는 로딩레벨이 각각 2.5 mAh cm⁻² (LL 2.5)와 4.5 mAh cm⁻² (LL 4.5)인 전극에 대하여 각 온도 별로 3분간 건조 후 무게를 측정하고나서 전극을 다시 120 °C에서 15분간 완전히 건조한 후에 다시 무게를 측정하여 3분동안 제거된 용매 양의 비율을 계

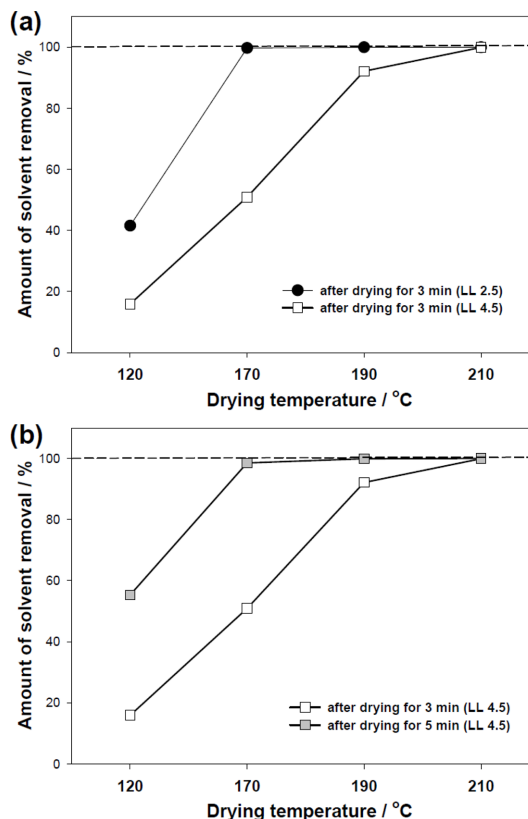


Fig. 1. Amount of solvent removal according to the drying temperature and drying time; (a) drying time for 3 min and (b) 4.5 mAh cm⁻² loading level.

산하여 도시하였다. 통상적인 전극수준과 유사한 LL 2.5의 상대적으로 낮은 로딩레벨의 전극에서는 170 °C에서 3분만 건조하여도 99.7%의 용매가 제거되어 거의 건조가 완료된 것을 알 수 있다. 하지만 LL 4.5의 고로딩 전극에서는 190 °C에서는 92.1%, 210 °C에서는 99.9%의 용매가 제거되었다. 로딩레벨이 높아질수록 코팅된 전극 슬러리 층의 두께가 증가하고 사용된 용매인 NMP의 양도 증가하기 때문에 이를 동일한 시간 내에 건조하기 위해서는 더욱 고온의 환경이 필요하였다. 다음은 LL 4.5의 고로딩 전극의 건조시간을 3분과 5분으로 설정하여 진행한 결과를 Fig. 1(b)에 나타내었다. 170 °C에서 5분을 건조하면 98.5%의 용매가 제거되어 거의 건조가 완료된 것으로 판단할 수 있다. 고로딩 전극의 건조에는 210 °C에서는 3분 정도, 170 °C에서는 5분 정도의 건조시간이 필요한 것으로 나타났기에, 건조온도를 높일수록 공정시간을 단축할 수 있음을 알 수 있다.

전극의 건조온도를 높여서 건조시간을 단축함에 따

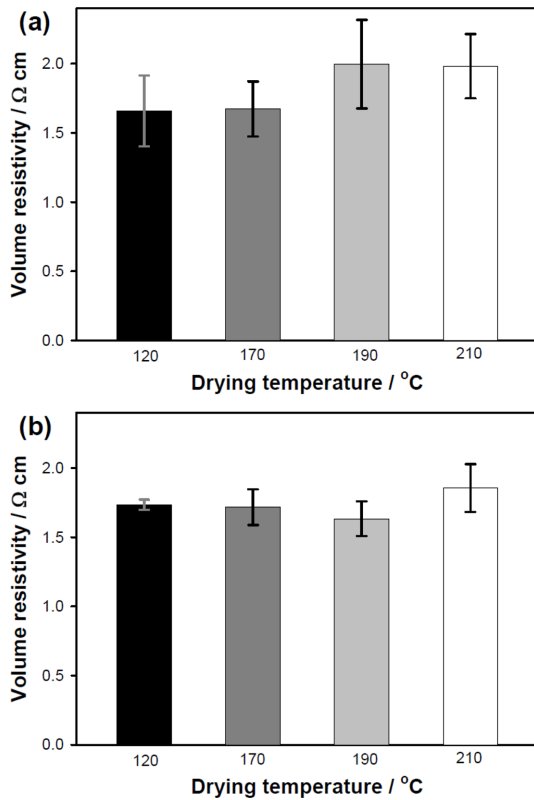


Fig. 2. Volume resistivity of NCM622 electrodes with different drying temperature according to the loading level of (a) 2.5 mAh cm⁻² and (b) 4.5 mAh cm⁻².

라 전극의 물리적 성질의 변화를 확인하기 위하여 전극의 체적 비저항(volume resistivity)을 측정하고, 압연 전과 후의 전극형상에 대하여 전자현미경으로 관찰하였다. 먼저 전극의 건조 온도에 따른 비저항을 LL 2.5 및 LL 4.5 전극에 대하여 측정해서 Fig. 2의 (a)와 (b)에 각각 나타내었다. Fig. 2(a)를 보았을 때, 120, 170, 190, 및 210 °C에서 15분간 건조한 LL 2.5 전극의 비저항은 각각 1.66, 1.67, 2.00, 1.98 Ω cm 이었다. 120 °C와 170 °C 조건보다 190 °C 및 210 °C 전극의 비저항 값은 약 20% 정도 높은 값을 나타냈다. 이는 PVDF 바인더의 열분해(thermal decomposition)는 300 °C가 되어야 시작되지만 160 °C 이상에서는 용융이 시작되어 바인더의 용집이 발생하는 것으로 예상해 볼 수 있다.¹⁶⁾ LL 4.5의 코로딩 전극의 비저항은 이전과 같은 건조온도에 따라 차례대로 1.73, 1.72, 1.63, 1.86 Ω cm으로, 큰 차이는 나타나지 않았으나 210 °C의 건조에서 전극의 비저항이 다소 높게 나타났다. 이는 LL 4.5 전극은 증발되어야 하는 용매의 양

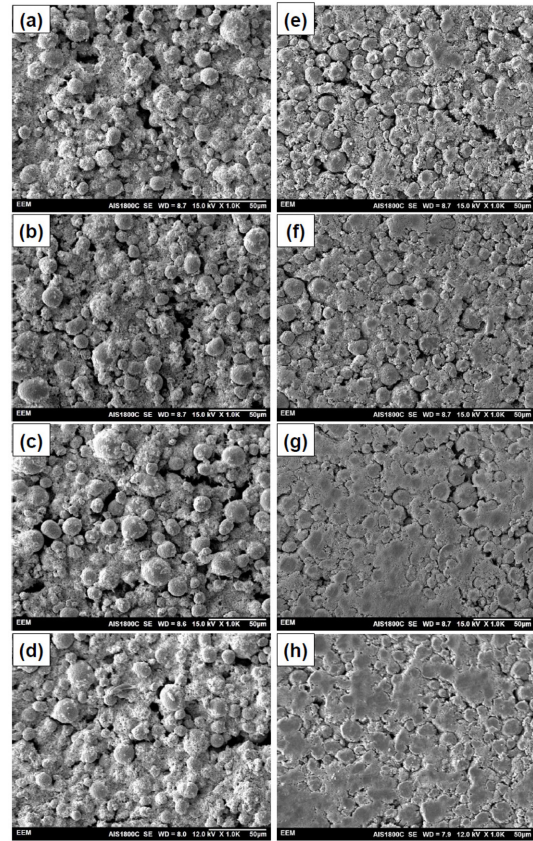


Fig. 3. SEM images of NCM622 electrodes with different drying temperature before and after press with different drying temperature; (a,e) 120 °C, (b,f) 170 °C, (c,g) 190 °C, and (d, h) 210 °C.

이 상대적으로 많기 때문에 외부에서 인가되는 열에너지를 잠열로 보다 더 소모하기 때문에 바인더의 용융이 발생하는 시점이 보다 지연되어 LL 2.5 보다 더 높은 온도의 건조에서부터 비저항이 증가한 것으로 판단된다. 전극의 건조온도를 달리하여 제조한 LL 4.5의 코로딩 전극의 SEM 이미지는 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 작은 크기의 일차입자가 뭉쳐진 이차입자로 구성된 원형의 NCM의 입자를 관찰할 수 있었다. 모든 건조 온도 조건에서 활물질과 카본블랙, 바인더가 잘 혼합되어 있는 것을 볼 수 있으며, 활물질의 형상 또한 잘 유지되고 있었다. 전극을 건조한 상태에서는 건조온도와 무관하게 전극의 미세한 크랙의 발생이 일부 관찰되지만 건조 온도와 관계없이 비슷한 형상을 지니고 있다. 압연을 진행한 후에도 건조온도에 의존하는 특별한 변형은 찾기 어려웠으며, 건조 온도의 증가가 전극 표면의 형상에는 직접적인 영향을

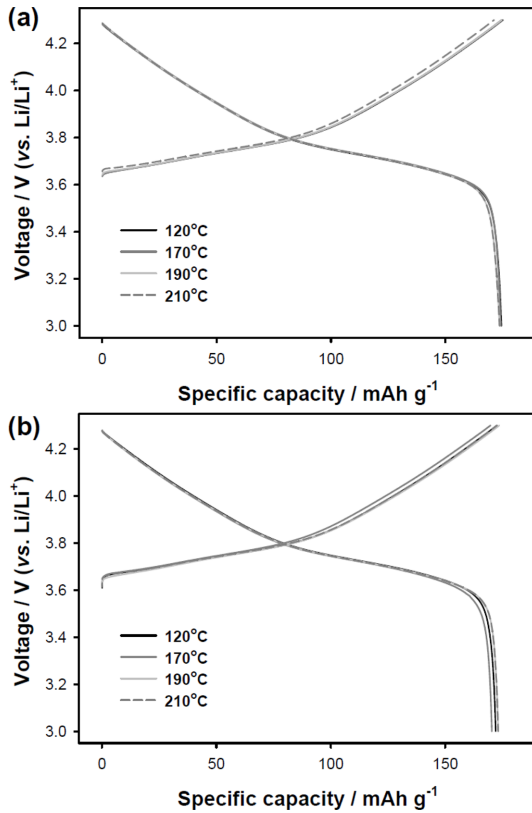


Fig. 4. The galvanostatic charge/discharge voltage profiles of NCM positive electrodes with different drying temperature at 3rd cycle; (a) loading level of 2.5 mAh cm⁻² and (b) loading level of 4.5 mAh cm⁻².

크게 미치는 것은 관찰되지 않았다.

Fig. 4와 Fig. 5에는 각 건조 온도 별로 제조한 반쪽 전지의 정전류 충방전 실험의 결과를 나타내었다. Fig. 4(a,b)에 각각 도시한 LL 2.5와 LL 4.5 전극의 전압곡선은 3번째 사이클의 전압곡선이며 건조온도에 따라 비교하였다. LL 2.5 전극에서는 건조온도에 무관하게 174 mAh g⁻¹의 방전용량을 나타내었으며, LL 4.5의 고로딩 전극의 경우에는 172 mAh g⁻¹의 방전용량을 나타내었다. 로딩레벨이 증가한 LL 4.5의 경우에는 상대적으로 저항이 증가하기 때문에 발생하는 용량이 소폭 감소하였으나, 로딩레벨이 동일한 경우에는 전극의 건조온도와 무관하게 거의 동등한 용량을 나타내었기에 본 연구의 조건 내에서는 건조온도에 따라 전극의 손상은 거의 나타나지 않는 것으로 판단되었다. 건조 온도별로 제조된 반쪽 전지의 수명 특성에 대하여 Fig. 5에 결과를 도시하였다. LL 2.5 전극은 50 사이클 동안 각 온도별로 91.6, 88.3, 89.6,

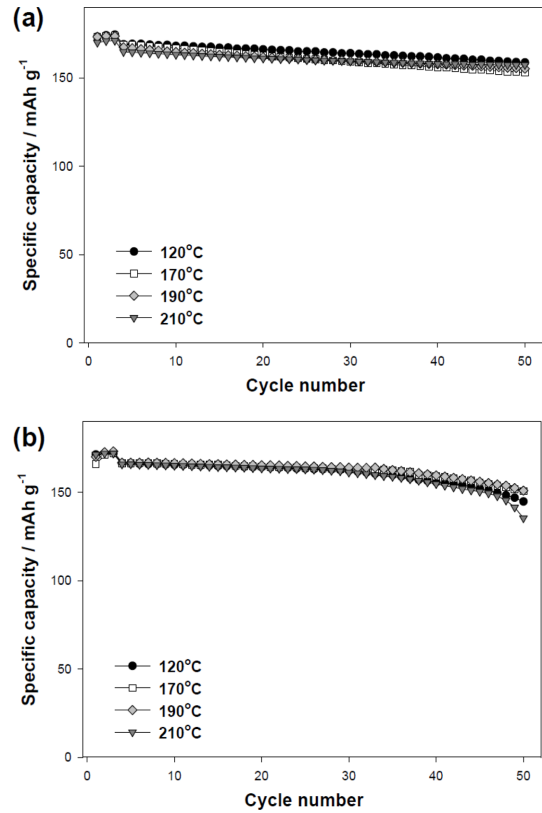


Fig. 5. Cycle performance of the NCM positive electrodes with different drying temperature; (a) loading level of 2.5 mAh cm⁻² and (b) loading level of 4.5 mAh cm⁻².

92.6%의 용량 유지율을 보여주었다. 상온에서의 사이클 수명은 건조온도에 따른 차이는 거의 없는 것으로 판단되었다. LL 4.5 전극은 건조 온도에 따라 차례대로 84.5, 90.8, 88.8, 79.0%의 용량 유지율을 보여주었으며, 210 °C에서 건조한 전극이 상대적으로 낮은 용량 유지율을 보여주었다. LL 4.5 고로딩 전극은 210°C에서 건조한 경우에는 비저항이 다소 높게 나타나는 결과와 일치하는 특성을 나타낸다. 이는 LL 2.5 전극에서는 건조온도별로 비저항의 차이가 있더라도 전극의 로딩이 낮기 때문에 0.2C의 전류로 충방전 하는 경우에 그 차이가 거의 나타나지 않았으나, 로딩이 4.5로 높아지게 되면서 전극이 두꺼워지기 때문에 전극의 비저항의 증가가 전기화학적 성능에 대하여 미치는 영향이 보다 증가하는 것으로 볼 수 있을 것이다.

또한, 전극의 로딩레벨과 건조온도에 따른 속도특성의 차이를 확인하기 위해 충전전류는 17 mA g⁻¹ (0.1C)로 고정하고 방전 전류를 각 3 사이클씩 다르게

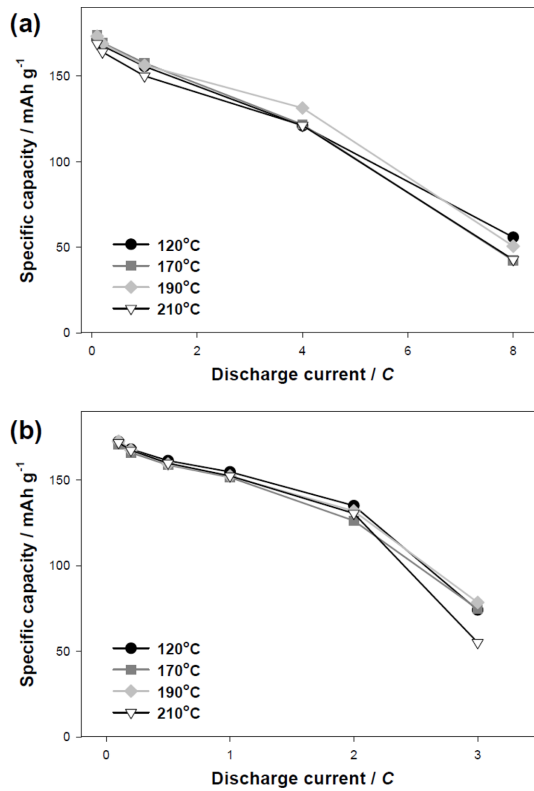


Fig. 6. Rate capability of the NCM positive electrodes with different drying temperature ($1C = 170 \text{ mA g}^{-1}$); (a) loading level of 2.5 mAh cm^{-2} and (b) loading level of 4.5 mAh cm^{-2} .

인가하면서 정전류 충방전 실험을 진행하였다. 전류크기에 따른 속도 특성 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 먼저, LL 2.5 전극은 전류크기의 증가에 따른 용량발현의 정도가 전극의 건조온도에 영향없이 모든 전류조건에서 유사한 용량을 나타내었다. 하지만, LL 4.5의 고로딩 전극은 사이클 특성과 유사하게 210°C 의 고온에서 건조하여 만들어진 전극은 510 mA g^{-1} ($3C$)의 고전류 조건에서는 성능의 감소가 확연히 발생하였다. 하지만, 다른 건조온도의 조건에서 제조한 전극은 유사한 속도 특성을 보여주었다.

따라서, NCM622를 양극 활물질로 사용할 때, 전극의 건조 온도가 전극의 사이클 수명, 속도 특성 및 전기화학적 특성에 미치는 영향이 크지 않으므로 전극 건조공정에서 건조온도를 높여서 공정시간을 단축하는 것이 충분히 가능한 것으로 판단되었다. 다만 온도영역은 210°C 보다는 낮은 조건에서 진행하여야 성능저하의 문제가 발생하지 않을 것이다. 이를 바탕으로 NCM622를 양극 활물질로 사용할 때는 건조온도

를 높이고 건조시간을 단축하여 생산속도의 향상 및 공정비용의 절감이 가능한 최적화된 공정조건으로 조정이 가능함을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 고로딩의 NCM622 양극의 제조공정에서 건조 온도에 따른 전극의 특성에 대하여 연구를 수행하였다.

전극의 건조온도가 높아질수록 전극에서 용매가 제거되는 시간이 단축되었으며, 전극의 로딩이 증가할수록 건조시간도 증가하였다. 전극의 형상은 건조온도에 따라 특별한 차이가 관찰되지 않았다. 전극의 건조온도가 특정 값 이상으로 증가하게 되면 전극의 비저항이 증가하였다. 190°C 이상의 온도에서 전극을 건조하는 것은 전극의 저항을 증가시킬 우려가 있다. 건조온도에 따라 사이클 특성과 속도특성을 측정한 결과 2.5 mAh cm^{-2} 로딩의 전극에서는 건조온도에 따른 성능차이는 존재하지 않았지만, 로딩이 증가한 4.5 mAh cm^{-2} 전극에서는 210°C 에서 건조된 전극의 전기화학적 성능이 저하됨을 확인하였다.

전극의 고로딩화에 따라 전극의 건조시간은 증가하게 되므로 건조온도를 높여서 이를 완화할 수 있다. 하지만 210°C 까지 높이면 전극의 저항 및 전기화학적 성능의 저하가 발생하므로 190°C 이내 조건이 적합할 것으로 판단된다.

Acknowledgments

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임. (20016103, 이차전지 소재부품 시험평가센터 구축사업)

References

1. T.-H. Kim, J.-S. Park, S. K. Chang, S. Choi, J. H. Ryu, and H.-K. Song, The current move of lithium ion batteries towards the next phase, *Adv. Energy Mater.*, **2**(7), 860 (2012).
2. H. Li, Z. X. Wang, L. Q. Chen, and X. J. Huang, Research on advanced materials for Li-ion batteries, *Adv. Mater.*, **21**(45), 4593 (2009).
3. S. Megahed and B. Scrosati, Lithium-ion rechargeable batteries, *J. Power Sources*, **51**(1-2), 79 (1994).
4. Y. Kuang, C. Chen, D. Kirsch, and L. Hu, Thick electrode batteries: Principles, opportunities, and challenges, *Adv. Energy Mater.*, **9**(33), 1901457 (2019).
5. M. Singh, J. Kaiser, and H. Hahn, Thick electrodes for high energy lithium ion batteries, *J. Electrochem. Soc.*,

- 162**, A1196 (2015).
6. H. Kim and J. H. Ryu, Effect of electrode design on electrochemical performance of highly loaded LiCoO_2 positive electrode in lithium-ion batteries, *J. Korean Electrochem. Soc.*, **23**(2), 47 (2020).
 7. J. M. Kang, H. W. Kim, Y. S. Jang, H. Kim, and J. H. Ryu, Thick positive electrode using polytetrafluorethylene (PTFE) binder for high-energy-density lithium-ion batteries, *J. Korean Electrochem. Soc.*, **24**(2), 28 (2021).
 8. R. Sahore, D. L. Wood III, A. Kukay, K. M. Grady, J. Li, and I. Belharouak, Towards understanding of cracking during drying of thick aqueous-processed $\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$ cathodes, *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **8**(8), 3162 (2020).
 9. J. Kumberg, M. Müller, R. Diehm, S. Spiegel, C. Wachsmann, W. Bauer, P. Scharfer, and W. Schabel, Drying of lithium-ion battery anodes for use in high-energy cells: Influence of electrode thickness on drying time, adhesion, and crack formation, *J. Energy Technol.*, **7**(11), 1900722 (2019).
 10. S. Ahmed, P. A. Nelson, K. G. Gallagher, and D. W. Dees, Energy impact of cathode drying and solvent recovery during lithium-ion battery manufacturing, *J. Power Sources*, **322**, 169 (2016).
 11. M. Ryu, Y.-K. Hong, S.-Y. Lee, and J. H. Park, Ultrahigh loading dry-process for solvent-free lithium-ion battery electrode fabrication, *Nat. Commun.*, **14**, 1316 (2023).
 12. Y. S. Zhang, J. J. Bailey, Y. Sun, A. M. Boyce, W. Dawson, C. D. Reynolds, Z. Zhang, X. Lu, P. Grant, E. Kendrick, P. R. Shearing, and D. J. L. Brett, Applications of advanced metrology for understanding the effects of drying temperature in the lithium-ion battery electrode manufacturing process, *J. Mater. Chem. A*, **10**(19), 10593 (2022).
 13. M. Müller, L. Pfaffmann, S. Jaiser, M. Baunach, V. Trouillet, F. Scheiba, P. Scharfer, W. Schabel, and W. Bauer, Investigation of binder distribution in graphite anodes for lithium-ion batteries, *J. Power Source*, **340**, 1 (2017).
 14. B. G. Westphal and A. Kwade, Critical electrode properties and drying conditions causing component segregation in graphitic anodes for lithium-ion batteries, *J. Energy Storage*, **18**, 509 (2018).
 15. B. Westphal, H. Bockholt, T. Günther, W. Haselrieder, and A. Kwade, Influence of convective drying parameters on electrode performance and physical electrode properties, *ECS Trans.*, **64**, 57 (2015).
 16. S. S. Hwang, M. Sohn, H.-I. Park, J.-M. Choi, C.G. Cho, and H. Kim, Effect of the heat treatment on the dimensional stability of Si electrodes with PVDF binder, *Electrochim. Acta*, **211**, 356 (2016).