

리튬電池 陽極 再合成時 黑鉛 導電材 混合方法이 電極特性에 미치는 影響†

†李結京 · 金兌炫*

金烏工科大學校 新素材시스템工學部, *資源再活用技術開發事業團

Effect of Graphite Mixing Method on Electrode Characteristics in Cathode Resynthesis of Lithium Battery†

†Churl Kyoung Lee and Tae-Hyun Kim*

School of Advanced Materials & System Eng., Kumoh National Institute of Technology

*Resources Recycling R&D Center

요 약

리튬이온전지의 양극 전자전도도를 향상시키기 위하여 탄소제를 첨가할 때 기존의 혼합법과는 다르게 abrasive milling에 의하여 LiCoO₂ 양극 활물질에 흑연을 균일하게 분산시켜서 충방전시 용량감소를 줄이고자 하였다. 밀링 조건은 300 rpm, 10 min으로 하였으며, 흑연 농도는 전기 전도성 향상과 용량의 관계를 고려해 볼 때, 1 wt% 경우가 가장 우수한 전극특성을 보여주었다. Abrasion 법은 기존 혼합법에 비하여 10% 이상 capacity retention의 향상을 가져올 수 있었으며, 비가역적인 용량에 있어서도 초기 방전 용량의 효율도 높아 비가역 용량이 감소되는 효과를 얻을 수 있었다. 이는 첨가한 흑연이 균일하게 혼합되고 일부는 LiCoO₂ 표면에 코팅되어 전자전도도를 향상시키고 산화물인 활물질의 용해를 억제하기 때문으로 생각된다.

주제어 : 리튬이온전지, 전극재합성, 흑연, LiCoO₂, 마모, 혼합

Abstract

To improve electronic conductivity of cathodic active materials of lithium ion battery, carbonaceous materials is usually added. New mixing method of abrasive milling has been investigated in mixing of graphite and LiCoO₂ powders. It would be expected that uniform mixing of graphite reduces capacity fading of cathode of lithium battery. Abrasion milled LiCoO₂ composite showed the best electrochemical performance as a cathode material with 1 wt% of graphite content, 300 rpm of milling speed, and 10 min of milling time. The improvement of the electrochemical performances such as cycleability and charge/discharge capacity retention would be mainly attributed to increase of the electronic conductivity and/or prevention of the active materials by uniform dispersion and coating of graphite on LiCoO₂.

Key words : Lithium ion battery, Electrode resynthesis, Graphite, LiCoO₂, Abrasion, Mixing

1. 서 론

휴대용 전자기기나 전기자동차용으로 리튬전지는 에너지 밀도 면에서 매우 이상적인 전지이다. 리튬금속은 표준전위(-3.04 V vs. NHE)가 낮고 자연계에 존재

하는 가장 가벼운 금속이기 때문이다. 리튬이온전지의 양극재료로는 수많은 intercalation 화합물이 제안되었다. 양극용 화합물은 무기질 전이금속 산화물과 황화물(chalcogenides), 유기 분자, 그리고 고분자로 크게 나눌 수 있지만 산화물과 황화물 계통의 물질들에 대한 연구가 많이 이루어졌다. 이중 황화물 계통의 양극재료들은 대부분 Li⁺을 가지고 있지 않기 때문에 항상 음극으로 Li 금속을 사용해야 하는 문제가 있다. 이를 해결하기

† 2009년 11월 23일 접수, 2010년 1월 6일 1차수정

2010년 1월 13일 수리

* E-mail: cklee@kumoh.ac.kr

위하여 합성단계에서 Li를 가지고 있는 산화물 계통에 많은 연구가 이루어졌는데, 이중 가장 대표적인 물질은 LiCoO_2 , LiNiO_2 , $\text{Li}(\text{NiCo})\text{O}_2$, LiMnO_2 , LiMn_2O_4 등이 있다. LiCoO_2 는 1980년경 양극 활물질로의 사용에 대한 가능성이 제기되었고 1991년 이후, 상용화된 리튬이온전지의 양극 활물질로 계속 사용되어왔다.¹⁾

LiCoO_2 는 274 mAh/g의 이론 용량을 갖지만 실제로는 4.2 V (vs. Li/Li^+)까지만 충전을 하기 때문에 이론 용량의 약 50%인 140mAh/g의 용량만을 사용하고 있다. 이는 4.2 V 이상의 전압에서 나타나는 LiCoO_2 의 구조적, 화학적 불안정성에 기인한다고 알려져 있다. 따라서 4.2 V 이상으로 충전될 경우 LiCoO_2 는 구조적 변화 즉, 격자의 부피변화와 상전이를 겪기도 하고,^{2,3)} 격자로부터 산소이온의 탈리 등이 일어나게 되는데,^{4,5)} 이것은 활물질의 구조적인 안정성을 저하시켜 가역적인 충전반응을 어렵게 한다. 더불어 화학적으로는 Co 용해와 양극 표면에서의 전해질 분해와 이로 인한 전극 표면에 표면막 생성에도 큰 문제가 된다.⁶⁻⁸⁾

최근 표면 코팅된 LiCoO_2 물질의 연구를 통해서, 표면 개질법이 4.3 V 이상의 높은 충전 전압에서 양극물질의 가역성을 향상시키는데 효과적이라는 것이 확인되었다. 그러나 표면 코팅 효과에 대한 정확한 원인은 아직도 불분명하다. 표면 코팅이 LiCoO_2 벌크 특성에 영향을 미쳐서 높은 전압 영역에서 나타나는 상전이와 격자의 부피변화를 최소화시키고, 이로 인해 구조적 안정성이 향상된다는 보고가 있는 반면, 다른 연구자들은 표면 코팅이 LiCoO_2 분말의 표면 특성에 영향을 준다고 설명한다.

페리튬이온전지의 발생량이 증가하면서 다양한 리사이클링 기술이 개발되어 왔으며, 개발기술의 실용화를 위한 연구도 많이 이루어지고 있다.⁹⁻¹³⁾ 기존 연구에서 페리튬이온전지에 대한 리사이클링의 일환으로 질산침출액으로부터 양극활물질인 LiCoO_2 의 합성에 대하여 연구하였다.¹³⁾ 기계적 처리-습식처리-citrate precursor combustion법에 의하여 초미립 LiCoO_2 분말을 합성하였으며, 전극특성 평가 결과에 의하면 합성된 양극활물질은 상용분말에 거의 근접하는 충전용량을 보였다. 그러나 전처리과정에서 완전히 제거되지 못한 금속불순물과 습식처리과정에서 혼입된 비금속 불순물들의 완전 제거가 이루어지지 않아 충전반이 반복될수록 충전용량의 감소가 현저히 관찰되었다.

기존 연구결과에서는 합성된 LiCoO_2 분말을 이용하여 양극을 제조할 때, 기계적 방법에 의한 탄소코팅¹⁴⁾

을 통하여 전극특성 향상을 꾀하였다. 그러나 이러한 방법으로는 충전용량 혹은 사이클 특성 향상에는 한계가 있는데 이는 기존 방법에 의한 탄소의 첨가는 단순 혼합의 효과만 볼 수 있어 전극물질의 용해와 도전재의 응집문제를 해결할 수 없었다.

본 논문에서는 LiCoO_2 양극 활물질의 충전전 동안에 활물질간의 연결구조(networking)가 깨어지면서 발생하는 용량감소를 완화하고 양극 활물질 자체의 전자전도성을 증가시키기 위하여 탄소계 물질을 혼합할 때, 기존의 불밀링, Spex milling 및 abrasive milling에 의하여 혼합이 전지전극특성에 미치는 영향을 조사하였다. Abrasive milling은 탄소의 균일분포와 함께 활물질 표면에 탄소가 코팅되는 부수적인 효과를 얻을 것으로 생각되며, 이는 활물질간의 효과적인 연결효과(wiring)를 가능하게 함으로서 전극 용량감소를 억제시켜서 리튬전지 양극의 전극특성을 향상시킬 것으로 기대된다.

2. 실험방법

폐전지로부터 양극활물질을 분리하고 침출하는 리사이클링 공정은 이전 연구¹⁴⁾와 동일하게 수행하였다. 양극활물질이 농축된 전지 스크램으로부터 Li과 Co를 추출한 질산 침출액으로 비정질 구연산 전구체를 제조하고 열분해하여 전극활물질인 리튬코발트산화물 분말(LiCoO_2)를 제조하였다.¹⁴⁾ 합성한 양극활물질에 흑연(graphite, 325 mesh, 시약급)과 카본블랙을 첨가하여 전극을 제조하였으며, 탄소제를 불밀에 의한 혼합,¹⁴⁾ Spex milling과 Fig. 1과 같은 abrasive milling에 의한 혼합 방법으로 각각 전지특성 평가용 양극을 준비하였다. 효율적인 abrasive milling 조건을 알아보기 위하여 회전 속도(200~600 rpm), 시간(10~60 min) 및 흑연 첨가량(1~2 wt%) 등의 조건을 변화시키면서 혼합하였다.

양극은 결합제(binder)로 poly-vinylidene fluoride(PVdF)를, 도전제(conductive agent)는 carbon black(Super P)을 사용하였다. 활물질과 도전제, 결합제의 혼합비는 중량비로 85:5:10로 하였다. 먼저 PVdF를 소형 유리병 내에서 NMP(n-methyl-2-pyrrolidinone)에 마그네틱 바와 교반기를 이용하여 12시간 이상 충분히 녹인 후 마노 유발에서 활물질과 도전제를 섞은 혼합분말을 넣어 24시간 동안 교반하여 용매와 혼합분말이 잘 섞이도록 하였다. 이렇게 제조된 슬러리를 알루미늄 박판에 바른 후 NMP 용매를 증발시킨 다음 롤러를 사용해 전극을 압착시켰다. 제조된 전극은 120°C 진공오븐에서 4시간

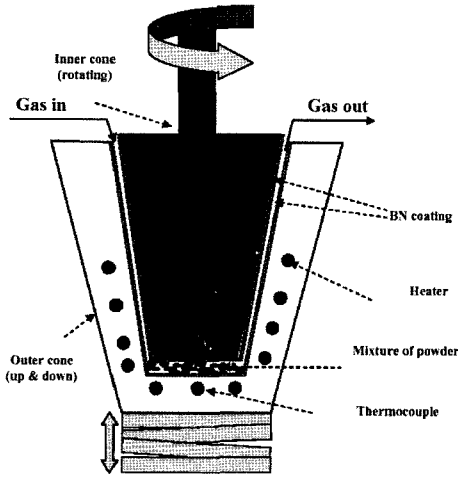


Fig. 1. Schematic diagram of abrasive mill.

이상 건조시켰다. 실험용 전극은 지름 1 cm의 천공기 (cutter)를 사용하여 자른 뒤 알루미늄 연결선을 점접합기 (spot welder)를 이용해 접합시켜 아르곤이 채워진 글러브 박스 안으로 옮겨 실험에 사용하였다.

실험에 사용된 셀은 글러브 박스 안에서 사용한 polypropylene 재질의 셀을 사용하였다. 대전극(counter electrode)과 기준전극(reference electrode)으로는 리튬금속 (Cyprus foote mineral, 두께 25 μm)을 사용하였으며, 분리막으로 polypropylene 재질의 Celgard 2400을 사용하였다. 전해액은 제일모직의 1M LiPF₆+EC/DEC(ethylene carbonate:diethyl carbonate=1:1 in vol.) 용액을 사용하였다.

충방전 실험은 Maccor 사의 충방전 테스트 장비 (series 4000)를 사용하여 일반적으로 사용되는 전류밀도 30 mA/g의 조건에서 수행하였다. 다공성 전극인 관계로 겉보기 면적에 대한 전류 밀도보다는 활물질 중량에 대한 전류량으로 실험을 수행하였다. 전위 범위는 3.0~4.2 V로 하였다. 모든 실험은 정전류 실험을 하였으며 셀 조립 후 전극과 분리막에 전해액이 충분히 스며들도록 하기 위해 3시간 동안 담지 하였다. 이후 표기에 있어서 작업전극(working electrode)에 리튬이 빠져나오는 반응을 충전(charge), 리튬이 들어가는 반응을 방전(discharge)이라고 하였다. 그리고 X선 회절 분석 (Bruker axs, D5005, Co-Kα)을 통하여 전극 물질의 상과 결정성을 확인하였다. LiCoO₂-graphite composite의 형상은 SEM(JSM-6500F)을 이용하였고 EPMA 및 EDS(Oxford, INCA Energy/Crystal) 분석을 통하여 제

조된 복합물의 조성과 분포를 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 혼합방법의 영향

합성이 아닌 LiCoO₂ 입자 위에 흑연을 코팅하고 균일한 혼합물을 얻기 위하여 abrasive milling을 택하였고, 양극 물질의 경우 결정구조의 확보가 전기화학적 특성에 상당한 영향을 끼치므로 고에너지의 구현이 아닌 저에너지의 조건인 300 rpm, 10분 동안 혼합하였다. Fig. 2에 흑연이 첨가된 LiCoO₂의 XRD pattern으로 abrasive milling에 의한 composite와 Spex mill에 의한 혼합물, 볼밀에 의한 혼합물과 같은 peak 위치를 가지는 것으로 보아, 전형적인 layered 결정구조를 가지는 LiCoO₂ 결정구조와 동일한 것을 알 수 있었다.¹⁵⁾ 또한 abrasive milling에 의해서 결정구조가 변하거나 심하게 왜곡되는 부분이 없는 것으로 보인다.

Fig. 3, Table 1과 2는 LiCoO₂ composite의 충방전 거동을 도시한 결과로서 볼밀에 의한 혼합과 Spex mill에 의한 혼합물에 비하여 abrasive milling에 의하여 혼합한 경우 첫 사이클과 37 사이클 이후 모두 충방전 효율이 우수한, 즉, capacity retention이 가장 우수한 것으로 나타났다. 또한 abrasive milling에 의한 전극의 경우 37 사이클 후에 비가역 용량이 줄어든 것을 voltage profile에서 알 수 있으며 전극의 분극이 감소된 것으로 보인다. 위의 결과를 바탕으로 전기전도도의 향상을 위한 흑연과 도전재의 혼합은 abrasive milling이 유리한 것을 적당함을 알 수 있다.

일반적으로 LiCoO₂는 충방전이 진행됨에 따라 분극

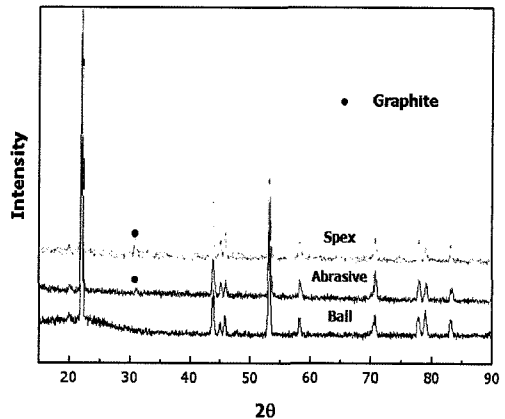


Fig. 2. XRD patterns of LiCoO₂-graphite composite.

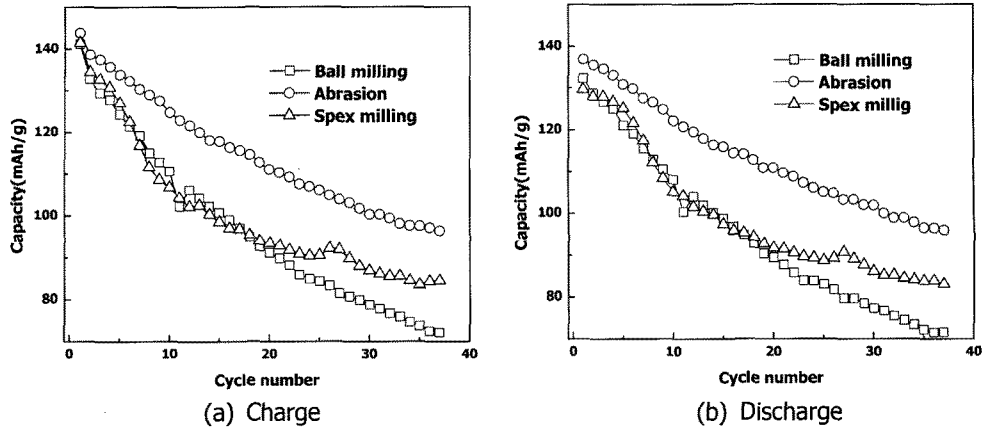


Fig. 3. Effect of mixing method on cycle performance of LiCoO₂-graphite composite.

Table 1. Efficiency of charge and discharge at the first cycle

	Ball milling	Abrasive milling	Spex milling
Discharge	132.4	137.0	130.1
Charge	141.8	144.4	141.5
Efficiency	93.0%	95.3%	92.0%

Table 2. Efficiency of discharge capacity at the first and 37th cycle

	Ball milling	Abrasive milling	Spex milling
First Cycle	132.4	137.0	130.1
37 th Cycle	71.6	95.3	83.1
Efficiency	58.0%	70.3%	63.0%

현상이 지속적으로 증가되며 이것이 LiCoO₂의 용량감소를 일으키는 주요원인으로 알려져 있다. 이와 같은 분극의 증가는 전극내의 저항증가에 의해서 기인한다.¹⁴⁾ 충방전 과정에서 전극의 분극을 야기할 수 있는 요인은 여러 가지가 있겠지만 가장 큰 요인은 다음 3가지로 요약할 수 있다. a) 충방전 과정에서의 구조적인 변화와 격자의 부피변화 b) 양극재료의 전해질로의 용해 c) 전해질의 분해와 이로 인해 생성되는 SEI(Solid Electrolyte Interface) 생성이다. 양극의 충방전은 복합양극(활물질, 도전재, 결합제)내에서 활물질 입자와 도전재 입자 사이의 접촉점을 통해 전자가 전달되며, 활물질 입자와 도전재 입자 그리고 전해질이 만나는 삼상계면(three-phase boundary)을 통해 리튬 이온의 추출과 삽입이 이루어져야 가능하다.

또한 전자전도도가 뛰어난 탄소계 물질을 첨가함으로써 사이클링 수명의 향상과 방전 용량의 효율 또한 증

가되었다. 이는 충방전이 거듭됨에 따라 구조적인 붕괴를 일으키면서 저항의 증가를 가져왔던 볼밀링 LiCoO₂와는 달리 전자전도도가 뛰어난 탄소계 물질로 인해서 양극 활물질과 카본 도전재 사이의 원활한 연결효과를 기대할 수 있기 때문이며, 이는 활물질 표면에 모든 점에서 전자들이 이동할 수 있게 되었다고 볼 수 있다.

슬러리 과정만으로 균일하고 완전한 LiCoO₂ 입자들 사이 또는 도전재와의 연결구조를 달성하기 어려우므로 본 연구에서는 abrasive milling을 이용하였다. Abrasive milling을 이용할 경우에 보다 용이하게 전극 활물질 입자들 사이의 전기적 접촉을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 이로 인해 충방전시에 야기되는 국부적 기계적 응력과 열 발생을 감소시킬 수 있으며, 밀링매체의 제어로 인해 입자의 형상 또한 제어가 가능하다. 소량의 탄소계 물질을 abrasive milling을 통하여 혼합하는 경우, 슬러리 제작과정에서 달성할 수 없었던 보다 균일한 도전재의 분포(Fig. 4(g))를 가능하게 해서 양극 활물질 입자들 사이의 전기적 접촉이 향상되었기 때문으로 보인다. Fig. 4(e, f, g)의 SEM image, EDS 및 EPMA 결과를 볼 때, 탄소계 물질들이 LiCoO₂ 각각의 분말 입자에 고르게 분포하고 있다는 것을 알 수 있으며 이로 인해 향상된 전기화학적 특성을 야기했다고 볼 수 있다.

3.2. 회전속도의 영향

전기전도도의 향상을 위하여 첨가되는 흑연의 양을 1 wt%로 고정하고 밀링 시에 가장 중요한 회전속도의 영향을 알아보기 위하여 200 rpm에서 300 rpm까지 변수를 두어 10분간 흑연과 LiCoO₂를 혼합하였다. 회전 하한속도를 결정하기 위하여 200 rpm에서 10분간 밀링

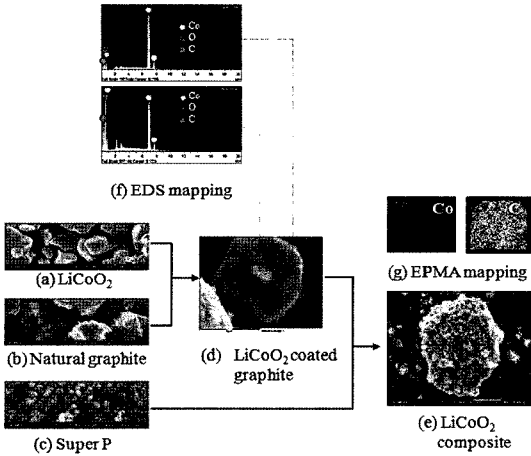


Fig. 4. Morphology and elemental distribution of LiCoO₂-graphite composite.

을 수행한 샘플의 XRD 분석한 결과, 결정구조의 변화가 없는 것을 알 수 있었으며, 볼밀링법, 200 rpm, 300 rpm 시료의 사이클링 특성은 Fig. 5에 나타내었다. 300 rpm으로 밀링 시에 가장 우수한 capacity retention을 알 수 있었으며, 이는 200 rpm의 경우 밀링의 에너지가 워낙 작아서 LiCoO₂상에 흑연의 균일한 분산이 이루어지지 않아 흑연이 다수인 영역과 LiCoO₂가 다수인 영역으로 분리된 영역이 존재할 것으로 생각되며, 300 rpm보다 우수하지 못한 전기화학적 특성을 보였으며,¹⁶⁾ 100 rpm의 경우는 의미가 없는 것으로 판단하였다. 200 rpm과 300 rpm으로 혼합한 전극 모두 흑연 첨가로 인하여 볼밀링에 의한 LiCoO₂ 보다는 향상된 사이클링 특성을 나타내었다.

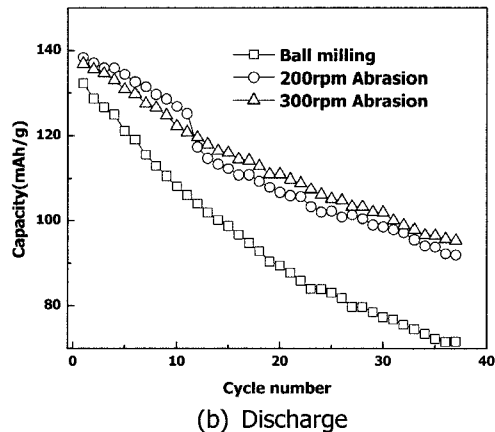
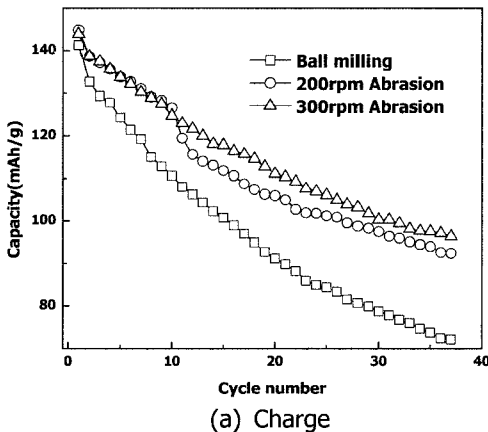


Fig. 5. Effect of milling speed on cycle performance of LiCoO₂-graphite composite.

3.3. 혼합시간의 영향

Abrasive milling의 최적 조건을 도출하기 위하여 밀링시간의 영향을 조사하였다. 흑연 첨가량을 1 wt% 및 회전속도를 300 rpm으로 고정한 후, 10~60분으로 밀링시간을 변화시키면서 composite를 합성하였다. 시간에 따른 composite의 XRD 분석 결과(Fig. 6) 시간이 증가하면서 XRD peak의 강도가 감소하며, peak이 broad해진 것을 관찰할 수 있었다. 즉, 이것은 milling의 시간이 증가함에 따라서 상들이 다소 불규칙하게 된 것이라고 볼 수 있으며, 특히 리튬이온들이 제 위치에 있지 않은 것으로 보인다. 반면에 (003) peak은 Co와 관련되는 peak으로써 이차원적인 구조를 나타내는 요인으로써 전기화학적 특성과는 무관할 것으로 생각된다. 결론적으로, 1 wt%의 흑연 양과 함께 결정구조를 유지할 수 있는 저회전속도인 300 rpm이 적당하고, 역시 혼합시간

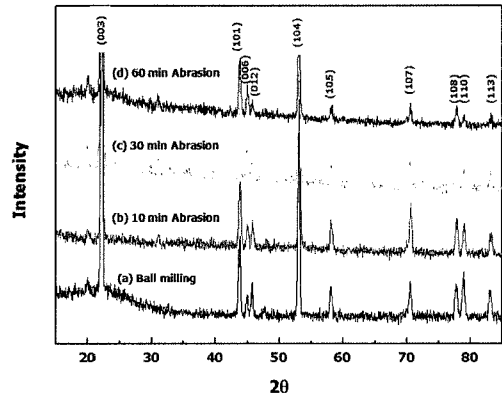


Fig. 6. XRD patterns of 1 wt% LiCoO₂-graphite composite with various milling time.

도 10분이 적당한 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 재합성한 리튬전지 양극활물질, LiCoO_2 의 전기전도도를 개선하고 충방전 사이클링 특성을 향상시키기 위하여 탄소물질을 첨가할 때 기존의 혼합방법과 비교하여 abrasive milling을 이용하는 경우 전극의 전지특성에 미치는 영향을 조사하였다. Abrasive milling을 이용하여 회전속도 300 rpm, 혼합시간 10 min 및 흑연첨가량 1 wt%의 조건으로 흑연을 혼합하는 경우, 활물질의 구조적 안정성을 유지하면서 우수한 전지특성을 가지는 composite 재합성이 가능하였다. 위의 조건에서 제조한 LiCoO_2 -graphite composite의 충방전 용량이 약 10%의 향상하였으며, 약 40회 사이클동안 초기 용량의 약 70%를 유지하는 결과를 얻을 수 있었다. 이는 낮은 밀링속도로 인하여 양극활물질의 구조적 안정성을 확보하고 흑연이 LiCoO_2 상 표면에 고르게 분포하기 때문이라 할 수 있다. 또한 마모에 의하여 LiCoO_2 표면에 일부 흑연이 코팅되는 효과도 얻을 수 있었으며, 이는 LiCoO_2 의 충방전 과정에서 나타나는 상전이와 이에 따른 격자의 부피변화, Co 용해에 의한 활물질과 도전재 사이의 접촉저항의 증가, 그리고 양극 표면에서 전해질 분해에 의해 생성된 SEI와 LiF 등의 저항체에 의한 전기 전도와 이온 전도 저항 증가 등을 억제하는 효과가 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

1. T. Ohzuku, 1994: Developments and Perspective, Industrial Chemistry Library, Lithium Batteries-New Materials, G. Pistoia(Editor), Elsevier, Amsterdam, 5, p. 239.
2. Reimers, J. N. and Dahn, J. R., 1992: *Electrochemical and In Situ X-Ray Diffraction Studies of Lithium Intercalation in Li_xCoO_2* , J. Electrochem. Soc., 139, pp. 2091-2097.
3. Reimers, J. N., Dahn, J. R., and von Sacken, U., 1993: *Effects of Impurities on the Electrochemical Properties of LiCoO_2* , J. Electrochem. Soc., 140, pp. 2752-2754.
4. Chebiam, R. V., Kannan, A. M., Prado, F., and Manthriam, A., 2001: *Comparison of the Chemical Stability of the High Energy Density Cathodes of Lithium-ion Batteries*, Electrochem. Commun., 3(11), pp. 624-627.
5. Chebiam, R. V., Prado, F., and Manthriam, A., 2002: *Comparison of the Chemical Stability of $\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2$ and $\text{Li}_{1-x}\text{Ni}_{0.85}\text{Co}_{0.15}\text{O}_2$ Cathodes*, J. Solid State Chem., 163(1), pp. 5-9.
6. Amatucci, G. G., Tarascon, J. M., and Klein, L. C., 1996: *Cobalt Dissolution in LiCoO_2 -based Non-aqueous Rechargeable Batteries*, Solid State Ionics, 3(1-2), pp. 167-173.
7. Aurbach, D., et al., 2002: *On the Capacity Fading of LiCoO_2 Intercalation Electrodes: the Effect of Cycling, Storage, Temperature, and Surface Film Forming Additives*, Electrochem. Acta, 47(27), pp. 4291-4306.
8. Thomas, M. G. S. R., Bruce, P. G., and Goodenough, J. B., 1986: *AC Impedance of the $\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2$ Electrode*, Solid State Ionics, 18-19, pp. 794-798.
9. 이철경, 김태현, 2000: *페리튬이온전지로부터 분리한 양극활물질의 침출*, 자원리사이클링 학회지, 9(4), pp. 37-43.
10. 이철경, 양동효, 2001: *페리튬이온전지로부터 유기금속의 회수*, 공업화학회지, 12(8), pp. 890-895.
11. 이철경, 양동효, 김낙형, 2002: *Oxalic acid 용액에서 LiCoO_2 의 선택침출*, 자원리사이클링학회지, 11(3), pp. 10-16.
12. Lee, C. K. and Rhee, K.-I., 2002: *Preparation of LiCoO_2 from Spent Lithium Ion Batteries*, Journal of Power Sources, 109, pp. 17-21.
13. Lee, C. K. and Rhee, K.-I., 2003: *Reductive Leaching of Cathodic Active Materials from Lithium Ion Battery Waste*, Hydrometallurgy, 68, pp. 5-10.
14. 이철경, 박정길, 손정수, 2007: *LiCoO_2 의 재합성시 전극 특성에 미치는 탄소의 영향*, 자원리사이클링학회지, 16(6), pp. 10-19.
15. Ohzuku, T., et al., 1993: *Comparative Study of LiCoO_2 , $\text{LiNi}_{1/2}\text{Co}_{1/2}\text{O}_2$ and LiNiO_2 for 4 Volt Secondary Lithium Cells*, Electrochim. Acta, 38(9), pp. 1159-1167.
16. Kim, J., et al., 2005: *Direct Carbon Black Coating on LiCoO_2 Cathode using Surfactant for High-density Li-ion Cell*, J. Power Sources, 139, pp. 289-294.

李 喆 京

- 현재 국립금속공과대학교 신소재시스템공학부 교수
- 당 학회지 제16권 6호 참조

金 兌 炫

- 현재 자원재활용기술개발사업단 팀장
- 당 학회지 제17권 1호 참조