» 研究論文 «

NCM계 리튬이온電池 工程스크랩의 水素還元處理에 의한 리튬회수 및 NCM 粉末의 浸出舉動

*金大原 · 張成太 · 白京畋

(주)타운마이닝컴파니

Recovery of Lithium and Leaching Behavior of NCM Powder by Hydrogen Reductive Treatment from NCM System Li-ion Battery Scraps

*Dae Weon Kim, Seong Tae Jang and Kyung Min Baek

Townmining Company Ltd., 260 Gongdandong, Kumi, Gyeongsangbukdo, 730-340, Korea

요 약

NCM계 페리튬전지 공정 스크랩 재활용의 연구에 일환으로서 리튬화합물의 회수와 NCM 전구체를 제조하기 위한 침출거동에 대하여 살펴보았다. 이와 같은 목적을 달성하고자 수소를 이용하여 NCM계 스크랩 분말을 환원한 후, 먼저 CO₂ 가스로 탄산리튬을 회수하고, 산에 의한 침출거동을 연구하였다. 수소에 의한 환원율은 800°C에서 약 93%를 나타내었으며, 수세에 의해 약 99% 순도의 탄산리튬을 제조하였다. 그리고 수소환원 처리 전후 분말에 대한 산 침출거동을 비교한 결과, 수소환원 처리에 의하여 2M 황산농도에서 코발트 32%, 니켈 45%의 침출효과가 향상되었으며, 망간의 경우에는 약 90% 정도 침출되었다.

주제어 : 자원재활용, NCM계 리튬이온전지, 수소환원, 침출

Abstract

A study on the recovery of lithium and leaching behavior of NCM powder by hydrogen reduction for NCM system Li-ion battery scraps was investigated. The reductive rate was about 93% at 800°C by hydrogen treatment. The lithium carbonate with 99% purity was manufactured by using CO₂ gas and washing method with water for NCM powder after hydrogen reduction. As a result of comparing the powders before and after the hydrogen reduction treatment for acid leaching behavior we obtained 32% enhanced leaching rate of cobalt, 45% enhanced leaching rate of nickel and the 90% leaching effect for manganese by hydrogen reduction at 2M H₂SO₄ concentration condition.

Key words : scrap recycling, NCM system lithium ion battery, hydrogen reduction, leaching

1. 서 론

리튬이차전지¹⁻⁴⁾는 고출력 특성, 높은 에너지 밀도와

에너지 효율 등의 특성을 가지는데 성능을 만족시키기 위하여 리튬이차전지의 가장 중요한 핵심소재이자 원가 비중이 큰 양극소재의 성능향상 및 기초원재료 확보가

* Received : November 5, 2012 · 1st Revised : January 8, 2013 · 2nd Revised : February 28, 2013 · Accepted : March 21, 2013

*Corresponding Author : Dae Weon Kim (E-mail : mdsimul@naver.com)

Research Center, Townmining Company Ltd., 260 Gongdandong, Kumi, Gyeongsangbukdo, 730-340, Korea

Tel : +82-54-462-6117 / Fax : +82-54-462-6122

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

절대적으로 필요하다. 기존 사용되는 소형 가전기기 및 모바일용은 LiCoO_2 (LCO)를 위주로 사용되어 왔으나 이는 코발트의 높은 가격과 폭발의 위험성으로 고출력을 요구하는 중/대형 전지에는 사용이 부적합하기 때문에 이에 고가의 코발트를 다량 사용하는 LCO를 대체할 수 있는 양극소재로 3원계 양극활물질이 각광을 받고 있으며, 니켈, 코발트, 망간의 3가지 금속이 주를 이루고 있다. 현재 하이브리드 전기자동차(HEV)용 고용량 양극소재로 $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z)\text{O}_2$ (NCM)이 적용되어지고 있다.

이에 본격적으로 생산될 것으로 예측되는 전기자동차용 NCM계 양극소재에 있어서 불량 스크랩에 대한 재처리 및 재활용의 필요성이 대두되고 있다.

페리튬이온전지의 양극 스크랩으로부터 유가금속을 회수하는 방법에 대한 연구는 다수 수행되었다.⁵⁻¹⁶⁾ 2000년대 초기의 연구로서 Lee와 Kim⁹⁾은 페리튬이온 전지에서 분리한 양극물질인 LiCoO_2 로부터 리튬과 코발트를 회수하기 위하여 질산 혹은 황산 침출 거동을 연구하였으며, 침출율을 향상시키기 위하여 환원제인 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 및 H_2O_2 등을 사용하여 최적의 LiCoO_2 의 침출조건을 조사하였다. 또한 2001년에 Lee와 Kim⁸⁾은 황산용액에서 LiCoO_2 의 환원침출 거동에 대하여 자세하게 연구하였으며, 황산농도, 침출온도, 초기광택농도, 과산화수소 첨가량, 반응온도에 대한 조건을 확립하였다. 2005년 Swalin 등⁶⁾은 LiCoO_2 를 황산에 침출하여 용매추출법을 사용하여 순도 99.99% 이상의 황산코발트용액을 회수하는 연구를 하였으며, 2010년 Lee와 Chung⁵⁾는 LiCoO_2 를 황산에 침출하여 용매추출로 분리 및 정제를 하여 염기성 시약을 이용하여 수산화코발트 및 열처리를 통하여 99.98% 이상의 삼산화코발트를 제조하였으며, 리튬은 탄산나트륨을 이용하여 제조하는 연구를 수행하였다. 그리고 NCM계에 대하여서는 2011년 Kim 등¹⁶⁾이 전기자동차용 페리튬이온전지 배터리팩을 물리적/화학적 처리를 통하여 니켈, 코발트, 망간 양극활물질 Precursor를 제조하였으며, 공침여액을 이용하여 탄산리튬을 제조하는 연구를 수행하였다. 그러나 기존의 이차전지 양극활물질을 재활용 방법은 먼저 유가금속인 코발트, 니켈, 망간을 회수하고, 리튬은 탄산나트륨을 사용하여 탄산리튬 형태로 회수하게 되는데, 이 경우 나트륨이 불순물로 작용하여 여러 번 수세 공정을 거쳐야 하는 단점이 발생한다.

이에 본 연구에서는 NCM계 양극물질 제조공정에서 발생하는 스크랩에 대하여 수소환원 처리에 의해 리튬

Table 1. Chemical composition of NCM system Li-ion battery scraps (%)

Element	Ni	Co	Mn	Li	Al
Content	31.7	10.6	15.7	6.6	0.08

을 CO_2 가스를 이용하여 먼저 회수하고, 나머지 니켈, 코발트, 망간 함유 분말을 회수하게 위하여 산 침출거동을 살펴보았다.

2. 실험방법

2.1. 실험원료

실험에 사용한 시료는 국내 리튬이온전지 제조공정에서 발생하는 NCM계 양극스크랩으로서 알루미늄 호일에 도포하기 전의 원료를 사용하였으며, 그 화학조성은 왕수로 침출한 후 ICP (Inductively Coupled Plasma, GBC Integra XL)로 분석하여 그 결과를 Table 1에 나타내었다.

사용한 시료의 니켈, 코발트 및 망간의 금속비는 니켈 54.7%, 코발트 18.3%, 망간 27.1%로 $\text{Li}(\text{Ni}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3})\text{O}_2$ 의 양극 활물질에서 나온 공정스크랩이라 추정되어진다.

또한, 사용한 NCM계 양극물질 스크랩 분말의 입도는 $0.1\ \mu\text{m}$ 에서 $80.0\ \mu\text{m}$ 까지 분석하였으며, D50 값은 약 $6.8\ \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 또한, 이 시료에 대한 XRD (X-Ray Diffraction, Rigaku) 결정상은 대표적인 LiCoO_2 층상구조를 하고 있었으며, 코발트 위치에 니켈과 망간이 치환됨으로서 XRD 피크가 약간 오른쪽으로 이동되어 있음을 알 수 있었다⁷⁾. 이 시료에 대한 입도분포 및 XRD 결과를 Fig. 1, 2에 나타내었다.

2.2. 수소환원

실험에 사용한 NCM계 양극 분말 스크랩에서 먼저 리튬을 회수하기 위하여 수소환원을 실시하였다. 실험 장치는 (주) KF에서 제작한 로를 사용하였으며, 그 로의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 실험 장치는 크게 가열부, 온도조절부, 가스조절부로 구성되었다. 가열부는 SiC 발열체를 사용하였으며, 사용온도는 약 1300°C 로 환원 시에는 SUS316 챔버를 이용하기 때문에 상용온도는 약 900°C 이하가 적당하기 때문에 수소환원의 온도는 400°C 에서 800°C 까지 100°C 간격으로 하였으며, 유지시간은 1 hr로 고정하였다.

그리고 챔버의 크기는 $200\ \text{mm} \times 200\ \text{mm} \times 400\ \text{mm}$ (가

Fig. 1. Size distribution of NCM system Li-ion battery scraps.

Fig. 2. XRD patterns of NCM system Li-ion battery scraps.

Fig. 3. A schematic diagram of the experimental apparatus for reduction of NCM system Li-ion battery scraps.

로 × 세로 × 길이)이며, 온도조절부는 R-type 열전대와 PID 온도제어장치를 이용하였다. 가스조절부는 3가지 종류의 가스를 흘려보낼 수 있도록 설계를 하였으며, 수소가스 및 질소가스가 정량적으로 흘러들어 갈 수 있도록 5 L/min용 flow meter를 장착하였다.

실험은 알루미늄 도가니를 사용하여 약 100 g의 샘플을 취하여 환원실험을 하였다. 그리고 가스는 우선 질소가스를 소정온도까지 1 L/min의 속도로 흘린 후 온도

Fig. 4. TGA curve of NCM system Li-ion battery scraps.

유지 시간 동안 수소가스를 흘렸다. 이 때 사용한 수소가스는 99% 이상의 순도를 가지며, 유량 및 승온 속도는 1 L/min 및 5°C/min로 하여 소정 온도까지 올리고 1 hr 동안 유지하였다.

유지시간이 끝난 후에는 수소가스를 잠그고 챔버의 산화를 막기 위하여 약 200°C까지 SUS 챔버의 온도가 떨어질 때까지 질소가스를 흘려주었으며, 또한 SUS 챔버의 밀폐를 위한 고무링의 손상을 막기 위하여 실험하는 동안에는 냉각수를 챔버에 흘려주었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수소환원 실험

NCM계 양극스크랩 분말의 수소환원에 대한 기본적인 처리 온도를 살펴보기 위하여 우선 수소분위기의 TGA (Thermogravimetric Analysis) 분석기를 이용하여 중량 감소율을 측정하였으며, 이에 대한 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

TGA 분석 결과에 따르면 500°C ~ 700°C 사이에서 급격한 중량 감소를 나타냈으며, 그 감소량은 약 17.5%로 수소환원에 의한 반응으로 중량감소가 이루어짐을 알 수 있었다. NCM계 양극스크랩 분말의 수소양에 따른 환원반응식은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

Table 2. The reduction rate and weight loss according to the reduction temperature of NCM system Li-ion battery scrap powders.

Condition	Sample weight (g)		Reduction rate (%)
	Before	After	
400°C, 1 h	100.21	98.81	8.4
500°C, 1 h	100.13	92.64	45.1
600°C, 1 h	100.00	86.22	71.0
700°C, 1 h	100.07	87.07	78.3
800°C, 1 h	100.10	84.62	93.3

또한 환원율은 NCM계 양극스크랩 Li (M = Ni, Co, Mn)O₂가 완전히 환원되었을 때의 무게 감량으로 그 실험조건 (온도 및 수소투입량)에서 발생된 무게 감량을 나눔으로서 계산하였으며, Table 2에 그 결과를 나타내었다. 3가지 환원반응 중에서 실제로 수소에 의한 반응으로 M = Ni, Co, Mn은 완전히 금속화가 되지 않고 일부는 산화물 상태로 존재하기 때문에 본 실험에서의 환원율은 반응 (2)를 기준으로 계산하였으며, 그 반응식은 다음과 같다.

$$\text{환원율}(\%) = \frac{Li_2O + M + MO}{2Li(M)O_2} \quad (4)$$

NCM계 이차전지 공정 스크랩 분말에 대한 실제 수소환원 실험은 400°C ~ 800°C에서 100°C 간격으로 1시간 유지하였다. 400°C에서는 TGA 분석과는 달리 1.4%의 중량감소와 8.4%의 환원율이 계산되어졌는데, 그 이유는 수소환원 실험 시에는 400°C에서 1시간 유지하였기 때문에 중량감소가 일어난 것이라 판단된다. 500°C의 경우에는 7.5%의 중량감소에 의한 환원율이 45.1%로 상당히 환원되어 있음을 알 수 있었다.

또한 온도에 따른 수소환원 처리에 의한 분말의 상태를 보면 400°C에서는 부피가 약간 감소한 분말상태로 존재하고 있었지만, 500°C부터는 환원되면서 온도에 의해 분말이 응집되어 단단한 덩어리 상태로 존재하였다. 600°C, 700°C, 800°C에서의 환원율을 계산하여 보면 71.0%, 78.3%, 93.3%였다.

그리고 수소환원 분말과 리튬을 회수하기 위하여 수소환원 후 수세한 분말에 대하여 초기의 Li(NCM)O₂의 결정구조가 환원온도에 따라 어떻게 변하는지 XRD 분석을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 5 및 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 5. XRD patterns of NCM system Li-ion battery scrap powders after hydrogen reduction. (● Li(NCM)O₂, Co/Ni, ▲ MnO, ■ Li₂O)

Fig. 6. XRD patterns of NCM system Li-ion battery scrap powders after washing process. (● Li(NCM)O₂, Co/Ni, ▲ MnO)

400°C, 1시간 수소환원 시에는 Li(NCM)O₂ 결정구조가 변하기 시작하였으며, 약간의 Li(NCM)O₂가 존재하였으며, 500°C, 1시간 수소환원 시에는 Li(NCM)O₂의 결정구조는 거의 관측되지 않고, 주로 Li₂O, Co, Ni, MnO의 피크가 관측되었다. 600°C, 700°C, 800°C 1시간 수소환원 시에는 500°C와 유사하나 특이한 사항은 LiMnO₂ 피크가 관측되기 시작하였다. 그 이유로는 분해된 망간산화물이 리튬과 반응한 것으로 추정된다. 그리고 망간의 경우에는 금속상태로 존재하지 않는데, 그 이유는 생성된 MnO는 1000°C에서도 수소로도 환원되지 않기 때문이라 판단된다¹⁷⁾. 또한 수소환원 후 수세한 분말의 경우에는 수세전 분말에 대한 결정상과 유사하게 보여지고 있으나, 가장 큰 차이점은 수세에 의해

Fig. 7. Leaching efficiency of lithium after hydrogen reduction.

Fig. 8. The XRD patterns of Li_2CO_3 .

리튬이 물과 반응하여 수산화리튬을 생성되어 용해되면서 Li_2O 피크가 없어짐을 알 수 있었다.

3.2. 리튬회수실험

수소환원 처리된 NCM계 이차전지 공정 스크랩 분말 100 g을 물 1L에 넣어 1시간 정도 수세한 후 여과를 통한 침출액의 리튬 함량을 분석하여 원료분말의 리튬 함량과 비교하여 리튬의 침출율을 구하였다. 리튬에 대한 침출율 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

400°C로 수소환원 처리된 분말의 경우, 리튬의 침출율은 약 53%였지만, 500°C 이상의 온도의 경우에는 약 75%의 침출율을 나타내었으며, 온도가 상승함에 따라 약간 감소하는 경향을 보였다. 그 이유는 XRD 결과에 나타난 바와 같이 수소에 의해 환원됨에 따라 리튬이 다른 금속과 반응하여 $\text{Li}(\text{M}=\text{Co}, \text{Ni}, \text{Mn})\text{O}_2$ 와 같은 산화물을 형성하여 수세에 의해 침출이 어렵기 때문에 감소한 것으로 판단된다.

상기 과정의 수세액의 리튬 함유량을 분석한 결과 약 10,000 ppm 정도 존재하였으며, 리튬을 회수하기 위하여 각 온도에서 수소로 환원처리된 분말 수세액 500 ml에 CO_2 가스를 1 L/min으로 약 30분 정도 불어 넣어 줌으로서 탄산리튬을 제조하였으며, 그 반응식은 다음과 같다.

탄산리튬은 CO_2 가스 투입 후 약 2분 정도부터 반응하기 시작하여 백색의 탄산리튬 입자가 생성되기 시작하였으며, 이 때 회수된 탄산리튬의 양은 약 18 g을 얻었으며, 건조 후 순도는 ICP분석 결과 약 99%의 분말이었다. 제조된 탄산리튬 입자에 대한 XRD 결과를 Fig. 8에 나타내었으며, 그 결과 Li_2CO_3 이외에 약간의 미지의 결정상이 생성되었다.

3.3. 산 침출 실험

수소로 환원 처리된 NCM계 이차전지 공정 스크랩 분말에 대한 황산에 따른 유가금속의 침출거동을 알아보기 위하여 황산 1M에서 4M까지 변화시키고 고액비는 100 g/L 고정시켜 침출실험을 하였으며, 비교를 위하여 수소환원 처리 전 분말에 대하여도 똑같은 조건으로 황산침출 실험을 하였으며, 수소로 환원된 침출 원료는 500°C에서 1시간 처리된 분말을 사용하였다. 1M의 황산농도에서는 코발트 39%, 니켈 38%, 망간 81%로 침출되었으며, 황산 2M에서는 코발트 88%, 니켈 99% 이상, 망간 90%로 침출되었으며 전체적으로 1M의 황산에 비해 약 45% 정도 침출율이 증가하였다. 3 M 이상의 황산농도에서는 코발트만을 제외하곤 99% 이상의 침출율을 나타내었다.

수소환원 전후 분말에 대한 황산농도에 따른 침출비교에 대한 결과를 Fig 9에 나타내었다. 전체적으로 수소환원 처리된 분말이 동일한 조건에서 원료분말의 황산 침출율보다 월등히 높게 나타내었다. 황산 농도 2M을 기준으로 하여 비교하여 보면, 코발트의 경우에는 약 32%, 니켈의 경우에는 약 45%, 망간의 경우에는 침출율이 매우 크게 상승하였다. 이는 수소환원 처리에 의하여 XRD 결과에도 언급하였다시피 $\text{Li}(\text{M}=\text{NCM})\text{O}_2$ 상태에서 코발트 및 니켈은 금속상태로 환원되었으며, 망간은 MnO 의 형태로 존재하며, 이는 황산에 잘 녹기 때문에 판단된다.

Fig. 9. The leaching efficiency of metal components according to sulfuric acid concentration ; (a) Co, (b) Ni, (c) Mn.

4. 결 론

NCM계 이차전지 공정 스크랩 분말에 대한 수소환원 처리에 따른 리튬회수 및 산침출 거동에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 수소를 이용한 환원반응에 따른 무게 감량은 400°C부터 이루어졌으며, 800°C에서 약 15% 감소하였으며, 이때의 환원율은 93.3%였다.

2) 수소환원 온도에 따른 결정상의 변화는 XRD로 평가하였다. 400°C에서는 Li(NCM)O₂ 결정구조가 변화

기 시작하였으며, 그 결정 피크가 약간 존재하였다. 500°C에서는 Li(NCM)O₂ 피크가 사라졌으며, Co/Ni, MnO, Li₂O 피크가 존재하였으며, 600°C부터는 LiMnO₂의 피크가 생성되기 시작하였다.

3) NCM계 이차전지 공정 스크랩 분말에 환원처리 후 리튬회수 결과를 보면, 500°C에서 수소환원 처리한 분말 100 g/L로 수세한 결과 약 75% 침출율로 최대를 나타냈다. 그 이유는 600°C부터는 LiMnO₂ 결정의 생성으로 리튬이 물에 침출되지 않기 때문으로 판단되며, 회수된 탄산리튬은 순도는 약 99%였다.

4) NCM계 이차전지 공정 스크랩 분말에 환원처리 전후 황산 침출 결과를 보면, 수소환원 처리 후의 분말이 2 M 황산농도에서 코발트가 32%, 니켈이 45%가 침출효율이 향상되었으며, 망간의 경우에는 90% 정도 침출되었다. 그리고 수소환원 처리 분말의 3 M 황산용액의 침출율은 코발트 89%, 니켈 99% 이상, 망간 99% 이상 침출되었다.

사 사

본 연구는 중소기업청에서 시행하는 2012년도 중소기업기술개발지원사업 기술혁신개발사업에 의하여 “리튬이온전지 스크랩을 원료로 한 NCM 전구체 및 고순도 리튬화합물 제조기술개발”에 관한 일련의 연구로 수행되었으며, 이에 감사드립니다(과제번호 S2045890).

참고문헌

1. H. C. Jung et al., 2010: *Overview and future concerns for lithium-ion batteries materials*, J. Korean Powder Metallurgy Institute, **17**(3) pp. 175-189.
2. H. K. Park, 2008: *The research and development trend of cathode materials in lithium ion battery*, J. Korean Electrochem. Soc., **11**(3), pp. 197-210.
3. H. S. Hong et al., 2011: *Overview and Prospects for cathode materials of lithium secondary batteries*, Trend in Metals & Materials Engineering, **24**(1), pp. 26-32.
4. G. C. Shim, 2011: *A state of art review on lithium-ion batteries for vehicular applications*, Trend in Metals & Materials Engineering, **24**(6), pp. 49-64.
5. J. J. Lee and J. D. Chung, 2010: *A study on the cobalt and lithium recovery from the production scraps of lithium secondary battery by high efficient and eco-friendly method*, J. Korean Inst. of Resources Recycling, **19**(6), pp. 51-60.

6. B. Swain et al., 2005: *Recovery of cobalt from waste cathodic active material generated in manufacturing lithium ion batteries by hydrometallurgical process*, J. Korean Inst. of Resources Recycling, **14**(6), pp. 28-36.
7. C. K. Lee and D. H. Yang, 2001: Recovery of valuable metals from spent lithium ion batteries, J. Korean Ind. Eng. Chem., **12**(8), pp. 890-895.
8. C. K. Lee and N. H. Kim, 2001: *Reductive leaching of LiCoO₂ in a sulfuric acid solution*, J. Korean Inst. of Resources Recycling, **10**(6), pp. 9-14.
9. C. K. Lee and T. H. Kim, 2000: *Leaching of cathodic active materials from spent lithium ion battery*, J. Korean Inst. of Resources Recycling, **9**(4), pp.37-43.
10. L. Li et al., 2010: *Environmental friendly leaching reagent for cobalt and lithium recovery from spent lithium-ion batteries*, Waste Management, **30**, pp. 2615-2621.
11. Y. Yamaji et al., 2011: *A novel flow sheet for processing of used lithium-ion batteries for recycling*, Resource Processing, **58**, pp. 9-13.
12. C. Liang et al., 2011: *Separation and recovery of Ni, Co, and Mn from spent lithium-ion batteries*, The Chinese Journal of Nonferrous Metals, **21**(5), pp. 1192-1198.
13. M. Petranikova et al., 2011: *Cobalt recovery from spent portable lithium accumulators after thermal treatment*, Acta Metallurgica Slovaca, **17**(2), pp. 106-115.
14. E. M. Garcia, et al., 2011: *Electrochemical recycling of cobalt from spent cathodes of lithium-ion batteries: its application as coating on SOFC interconnects*, J. Appl. Electrochem, **41**, pp. 1373-1379.
15. T. Georgi-Maschler et al., 2012: *Development of a recycling process for Li-ion batteries*, J. of Power Sources, **207**, pp. 173-182.
16. S. K. Kim et al., 2011: *The high efficient physical and chemical treatment of spent lithium ion battery module of electric vehicle for recovery of valuable metals*, The 2011 spring meeting and 36th conference, Korean Inst. of Resources Recycling, pp. 84-89.
17. R. Kononov, 2008: *Carbothermal solid state reduction of manganese oxide and ores in different gas atmospheres*, Ph. D. thesis, The University of New South Wales.

金 大 原

- 현재 (주)타운마이닝컴파니 연구소장
- 당 학회지 제20권 4호 참조

張 成 太

- 현재 (주)타운마이닝컴파니 선임연구원
- 당 학회지 제20권 4호 참조

白 京 晷

- 현재 (주)타운마이닝컴파니 연구원