

전기자동차 리튬이온 배터리 제조공정에서 Loading Level 산포최소화 코팅을 통한 전극 품질개선에 관한 연구

장찬희, 이재천*
아주대학교 시스템공학과

Development of Slurry Flow Control and Slot Die Optimization Process for Manufacturing Improved Electrodes in Production of Lithium-ion Battery for Electric Vehicles

Chan-Hee Jang, Jae-Chon Lee*
Dept. of Systems Engineering, Ajou University

요약 전기자동차는 가솔린 자동차와는 달리 배출가스가 없어 친환경 차량을 대표하지만, 장착된 축전지에 충전된 전기로 구동되기 때문에, 1회 충전으로 갈 수 있는 거리가 전지의 에너지 밀도에 의해 좌우된다. 따라서 높은 에너지 밀도를 갖는 리튬이온 전지가 전기자동차용 전지로 유력한 후보이다. 리튬이온 전지의 효율을 지배하는 중요한 구성품은 전극이므로 전극 제조공정은 리튬이온 전지 전체 생산 공정에서 중요한 역할을 한다. 특히 전극의 제조 공정 중 코팅 공정은 성능에 큰 영향을 미치는 매우 중요한 공정이다. 본 논문에서는 전극 제조에서 코팅 공법의 효율성 및 생산성 증대를 위한 혁신적인 공정을 제안하고, 장비 설계 방법 및 개발 결과에 대하여 기술하였다. 구체적으로, 극판 핵심 코팅 품질 25% Upgrade 기술, 제품 고출력/고용량화에 따른 조립 마진 감소 대응 가능 기술, 그리고 제품 용량 품질 및 조립 공정 수율 향상 기술들에 대한 설계 절차 및 개발방법을 제시하였다. 결과로 리튬이온 배터리의 셀의 제품 수명 개선 효과를 확보 하였다. 기존의 코팅 공정과 비교할 때 양극 용량 유지 위해 Target Loading Level 유지, 산포를 향상시켰다($\pm 0.4 \rightarrow \pm 0.3 \text{mg/cm}^2$ 감소).

Abstract Electric vehicles are environmentally friendly because they emit no exhaust gas, unlike gasoline automobiles. However, since they are driven by the electric power from batteries, the distance they can travel based on a single charge depends on their energy density. Therefore, the lithium-ion battery having a high energy density is a good candidate for the batteries of electric vehicles. Since the electrode is an essential component that governs their efficiency, the electrode manufacturing process plays a vital role in the entire production process of lithium-ion batteries. In particular, the coating process is a critical step in the manufacturing of the electrode, which has a significant influence on its performance. In this paper, we propose an innovative process for improving the efficiency and productivity of the coating process in electrode manufacturing and describe the equipment design method and development results. Specifically, we propose a design procedure and development method in order to improve the core plate coating quality by 25%, using a technology capable of reducing the assembly margin due to its high output/high capacity and improving the product capacity quality and assembly process yield. Using this method, the battery life of the lithium-ion battery cell was improved. Compared with the existing coating process, the target loading level is maintained and dispersed to maintain the anode capacity ($\pm 0.4 \rightarrow \pm 0.3 \text{ mg / cm}^2$ reduction).

Keywords : Electric Vehicles, Li-ion Battery, Electrode, Manufacturing Process, Coating, Slitting, Vacuum Drying

*Corresponding Author : Jae-Chon Lee (Ajou Univ.)

Tel: +82-10-8276-7196 email: jaelee@ajou.ac.kr

Received January 3, 2018

Revised (1st February 7, 2018, 2nd March 2, 2018)

Accepted March 9, 2018

Published March 31, 2018

1. 서론

현 사회는 기후변화 및 에너지 문제 해결을 위해 자동차 부문 온실가스 규제를 강화하는 추세이다. 전체 온실가스배출량 중 자동차 분야가 차지하는 비중은 약 20%에 달한다. 각국 정부에서는 산업적 과급효과가 크고 생활과 밀접한 자동차 분야를 이산화탄소배출 저감 우선 분야로 정하고 연비 규제 및 친환경 차량 개발 등을 통해 배출량의 저 감을 목표로 정책을 강화하고 있다[1].

전기 자동차는 친환경 차량을 대표하며, 가솔린 자동차와는 달리 전기로 구동하기 때문에 전지의 에너지 밀도가 일 충전으로 갈 수 있는 거리를 좌우하게 된다. 전지의 에너지 밀도 이외에도 순간 가 속력을 나타내는 출력과 충방전시 안전성 문제 또한 고려되어야 한다. 전기 자동차용 전지로 납축전지, 리튬이온전지, 니켈수소전지 등이 거론되었고, 그중 가장 유력한 후보는 높은 에너지 밀도를 갖는 리튬이온전지이다[2].

리튬이온전지는 높은 에너지 밀도, 고출력, 우수한 저온 특성 및 높은 이론 전압 등의 장점을 가지고 있기 때문에 전기자동차의 가장 유력한 동력원 중 하나이다. 리튬이온전지의 높은 에너지 밀도는 높은 이론 전압에서 기인된 것이다. 니켈수소전지의 경우 전지의 전압이 1.1V인 것에 반해 리튬이온전지의 경우 3.7V로 3배 이상의 큰 값을 가진다. 이것은 리튬이온전지의 음극전위가 매우 낮아 기전력이 커지기 때문이다[3].

리튬이온 전지의 구조는 양전극, 음전극, 분리 막 및 전해질 그리고 보호회로 등으로 구성되어 있다. 전지 전극 제조공정에서 코팅공정은 2차전지의 성능에 큰 영향을 미치는 매우 중요한 공정이다. 현재 양산중인 리튬이온 극판공정 전극 코팅 공정은 제조된 슬러리를 코터 헤드를 통과시켜 정해진 패턴 및 일정한 두께로 금속 집전체 상에 코팅한 후 건조하는 공정 이다. 이 공정은 권출(Unwinding)공정, 코팅공정, 건조 공정, 밀도측정공정, 권취 공정으로 구성되며, 전극 구조 특성상 전극전면 및 전극 후면 코팅 2가지로 이루어진다. 전극 코팅 공정은 양극 및 음극 모두 동일한 형태로 진행되며, 양극 집전체로는 알루미늄 박막을, 그리고 음극 집전체로는 구리 박막을 사용한다. 권출 공정은 코팅 작업을 진행하기 위해 일정한 장력으로 금속 집전체 또는 전면 코팅 전극(전극 후면 코팅일 경우)을 공급하는 공정이다. 코팅공정은 혼합공정에서 제조된 슬러리를 코팅헤드를 통해 정해진 패

턴 및 일정한 두께로 박막의 금속 집전체 위에 일정 두께로 도포하는 공정이다.

기존 리튬이온 배터리 코팅 공법에서 리튬이온 배터리 Loading Level 산포를 개선시키고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에서는 본 연구의 사회, 기술 및 연구 동향과 필요성을 제시하였고, 본문에서는 자동차 리튬이온 배터리 코팅 공법의 효율성 및 생산성 증대를 위한 핵심 개선 기술의 개선에 대해서 기술하였다. 극판 핵심 코팅 품질 25% Upgrade 기술, 제품 고출력/ 고 용량화에 따른 조립 마진 감소 대응 기술, 제품 용량 품질 및 조립 공정 수율 향상 기술들에 대한 설계 절차 및 개발 방법을 시스템공학기반으로 접근한 활동들을 명시한다. 이를 기반으로 실제 자동차 리튬이온 배터리 코팅 공법을 양산에 적용시킨 실례를 기술하였다. 마지막으로 본 논문의 결과를 정리 및 요약하였다.

2. 문제의 정의

2.1 리튬이온 배터리 제조 시스템

리튬이온전지는 제조 공정은 크게 전극공정, 조립공정,化成공정의 3단계로 구분된다. 이를 Fig. 1,2에 도식화하였다.

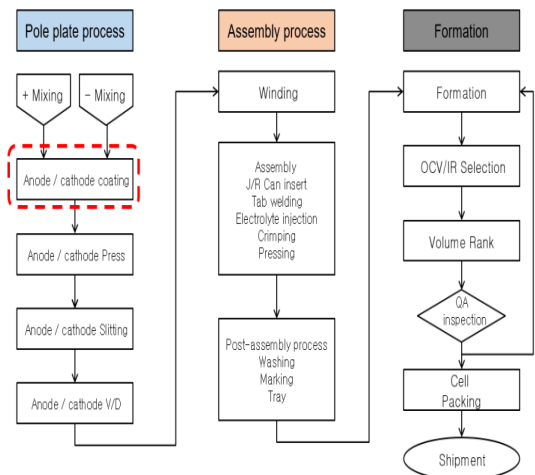


Fig. 1. Proposed Process Model.

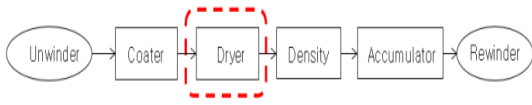


Fig. 2. Process for Manufacturing Polar Plate Anode/Cathode Coating.

2.2 리튬이온 배터리 코팅 공법

코팅 공정은 연속으로 진행되는 기재(Cu, Al Foil)위에 약 200um의 두께로 2차 전지의 주재료인 Coating액을 간헐적으로 도포하는 공정으로 핵심 품질 관리 포인트는 코팅 품질과 건조품질로 크게 구분된다.

1) 코팅품질

정해진 패턴의 형상 Dimension 정밀도, 코팅의 길이, 무지 부 길이, 코팅 끝단 부 끌림 등이 있고 Loading Level 편차는 폭방향 Loading Level의 균일도(Loading Level : 단위면적당 중량을 의미하며, 단위면적당 코팅량을 측정함), 길이방향 두께편차는 코팅 시작 부 솟아오름 또는 끝단 부 무너짐 등 길이방향 두께편차가 있다.

2) 코팅품질의 측정

패턴형상은 길이센서 및 작업자 수동 확인(Scale 활용) 및 폭 방향 Loading Level은 비접촉식 자동 방사선 측정기(밀도계)를 이용 길이 방향 두께편차는 마이크로 미터(샘플링 수동측정) 측정하고 있다.

극판코팅System은 주행 중인 기재 표면위에 일정한 Slurry를 정해진 Pattern으로 도포해 주는 공정이다 [4]. 대표적인 코팅공정개요는 아래와 같은 구성으로 되어 있다[5, 6]

1) 코팅의 원리

Die Head에 개량 Pump(Mono)로 Slurry를 공급하고 Back Roll(Coating Roll)에 의해 지지되어 주행되는 기재 위에 Die Lip을 일정한 간격을 유지하면서 Timing Valve의 개, 폐로 가로 방향 Pattern형상으로 Coating하는 방법이다. 이렇게 Coating부와 Uncoating부를 반복하여 Coating하는 것을 Pattern Coating 또는 간헐코팅이라고 호칭한다. 이때 균일하고 정확한 Pattern을 형성하는 것이 각 Maker의 기술이며 그 핵심은 Slot Die의 형상설계, Slurry 물성제어 설비 운전조건 최적화 등이 있다.

2) 고속 코팅의 핵심 Point

고속 Coating에 따른 품질수준 저하 방지는 설비적으로 제어 가능하고, 고속 동작이 가능한 간헐코팅 밸브 개발로 고속 동작 Mechanism으로 구현Slurry(Coating액)의 물성 관리는 제조기술 측면 공법 연구로 구현한다.

3) Pattern(간헐) 코팅 원리

A면 Coating시 Coating Roll의 회전속도와 Timer를 이용하여 입력된 코팅길이 만큼 Coating Valve를 On/Off한다.B면 Coating시 A면 Coating시와 마찬가지로 원리로 코팅길이를 결정한다. A면 Coating 형상과 연동하기 위해 코팅 전에 A면 패턴을 인식하기 위한 Sensor를 사용한다.Sensor는 명암을 판독하는 방식으로 Coating부와 Un coating부의 색상차이로 경계면을 인식한다.

계산 길이와 실제Coating길이와의 차이가 발생하는 경우를 고려하여 연산 시 Offset 기능이 추가되어 있다.Stripe Coating시에는 당연히 기능을 작동시키지 않고 Coating Die내의 Spacer 형상을 변경하여 구축한다.

2.3 연구 목표 및 범위

본 논문의 연구 목표는 크게 3가지로 분류된다. 배압 밸브의 배압 Feedback 제어 공법을 확보하여 Data Base 기반 배압 조절로 Start 산포 최소화기술을 확보하는 것이다. 둘째, 슬러리 유량제어 알고리즘 개선하여 슬러리 정량공급으로 유량 편차 최소화 하는 것이다. 마지막으로 슬러리 맞춤형 슬롯다이 개발로 Die 내압을 균일화하고 폭 방향 산포 향상 기술을 확보하는 것이 목표라고 할 수 있다. 이를 Fig. 3에 도식화하였다.

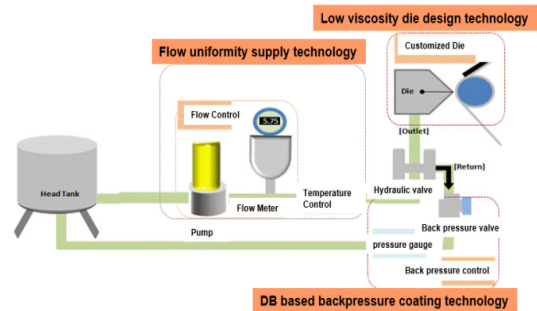


Fig. 3. Goal of Study.

3. 체계적인 접근을 통한 자동차 리튬이온 배터리 코팅 기술 개발

3.1 자동차 리튬이온 배터리 코팅 공법의 개발 절차 및 방법

전극코팅 공정은 혼합 공정에서 제조된 슬러리를 코터 헤드를 통과시켜 정해진 패턴 및 일정한 두께로 금속 집전체 상에 코팅한 후 건조하는 공정이다[7]. 이 공정은 권출(Unwinding)공정, 세정공정, 코팅공정, 건조공정 권취 공정(Rewinding)으로 구성되며, 전극 구조 특성상 전극전면 및 전극후면 코팅 2가지로 이루어진다. 상기 전극 코팅 공정은 양극 및 음극 모두 동일한 형태로 진행되며, 양극 집전체로는 알루미늄 박막을, 그리고 음극 집전체로는 구리 박막을 사용한다[8].

권출 공정은 코팅작업을 진행하기 위해 일정한 장력으로 금속 집전체 또는 전면 코팅된 전극(전극후면 코팅일 경우)을 공급하는 공정이다. 세정 공정은 양극 및 음극 모두 동일한 형태로 진행되며 집전체 표면 유분제거하는 공정이다. 코팅공정은 혼합공정에서 제조된 슬러리를 통해 정해진 패턴 및 일정한 두께로 박막의 금속 집전체 위에 일정 두께로 도포하는 공정이다[9].

Die Head에 계량 Pump로 슬러리를 공급하고 Back Roll(Coating Roll)에 의해 지지되어 주행되는 기재 위에 Die Lip을 일정한 간격을 유지하면서 Timing Valve의 개, 폐로 가로 방향 Pattern형상으로 Coating하는 방법이다. 이렇게 Coating부와 Un coating부를 반복하여 Coating하는 것을 Pattern Coating 또는 간헐코팅이라고 호칭한다. 이때 균일하고 정확한 Pattern을 형성하는 것이 기술이며 핵심은 Slot Die의 형상설계, 슬러리 물성제어 설비 운전조건 최적화 등이 있다. 고속 코팅의 핵심 포인트는 고속 Coating에 따른 품질수준 저하 방지 방법으로는 설비 적으로 제어가 필요하고 고속 동작이 가능한 간헐코팅 밸브 개발로 고속 동작 Mechanism 개발되어야 한다. 또한 슬러리(Coating액)의 물성 관리적인 측면에서 제조기술 공법 연구가 병행 되어야 한다.Turbo Dryer 건조 공정은 금속 집전체에 코팅된 슬러리를 건조하기 위하여 슬러리 내의 용매 및 수분을 제거하는 공정이다. 권취(Rewinding)공정은 Coating 및 건조까지 완료된 극판을 감아주는 장치이다. 상기에서 기술한 자동차 리튬이온 배터리 건조 공정의 대략적인 도면을 Fig. 4에 나타내었다.

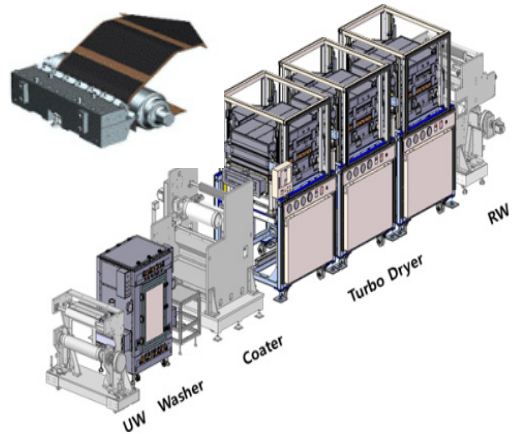


Fig. 4. Order of Drying Process.

3.2 Data Base 기반 배압조절 코팅기술 개발

극판 코팅 향상기술로서는 기존 배압밸브를 통해 초반 토출 헤팅을 제어를 통해 기존에 조절 량 정량화가 없었고 작업자의 감으로 손끝조절에 의존하였다. 배압밸브의 적용으로 간헐코팅 시작 시 적정 배압 유지로 Start Loading Level 커짐 및 솟아오름을 방지하고 코팅 Stop 후 배압 상승 및 코팅 Start 시 Loading Level 상승 예상되며 조건도출 시 코팅 Start시 Loading Level 헤팅 현상 발생 되는 것을 Fig.5에서 확인할 수 있다.

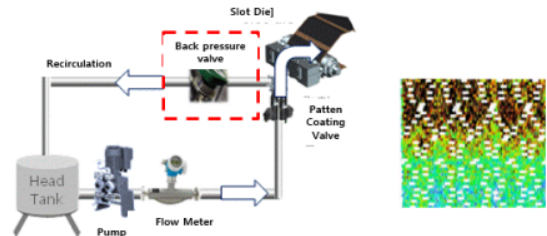


Fig. 5. Original Back Pressure Coating Method.

Data Base 기반 배압조절 코팅 공법 개발은 초기 Loading Level 산포 개선 및 극판 조건도출 및 Customer Service 감소된다.

본 개발은 코팅압력 초반 안정된 코팅 압력으로 수령 및 밸브의 정량화 Servo Motor 구동 적용하고 압력계 설치하여 폭 방향 Loading Level을 맞추기 위해 Gap 세팅, Data Base 기반 안정 코팅 압 기준 배압밸브 Open 을 조정, 최종 배압 조건 도출(압력유량 비교)을 Fig.6, Table 1.에서 확인할 수 있다.

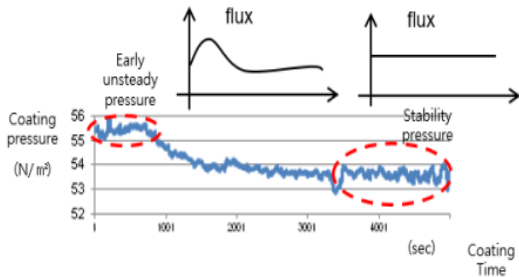


Fig. 6. Development of Back Pressure Control Coating Method using Data Base.

Table 1. Improvement of Initial Loading-Level Scattering and Derivation of Pole Plate Condition.

Management topics	Remarks
Coating Gap	Width direction L/L
flux	Coating Start/Late
Pressure	Cycle/Coating
Valve Open Rate	Relation to coating gap

3.3 유량 제어 알고리즘 기술 개발

유량 Feedback 제어를 통한 Slurry 공급 유량 산포 개선으로 균일공급을 가능하다.

Target 유량 설정 후 유량계에서 측정된 유량값을 Feedback하고, 슬러리 공급펌프 RPM 제어를 의한 S/W 를 설계 하였고 Fig.7에서 확인할 수 있다.

슬러리별 PID Gain 확보 및 양산 코팅 테스트 최적화(Kp, Kd, Ki)의 고점도(2,7,5) 저점도(4,7,5)값을 도출 하였다. Overshot, Steady-State Error 최적화 도출 및 Step 응답, Ziegler-Nichols, Trial & Error 방법으로 검증 하였다. 적용 결과 공정 능력 Cpk 2.06 → 3.33 증가 하였다.

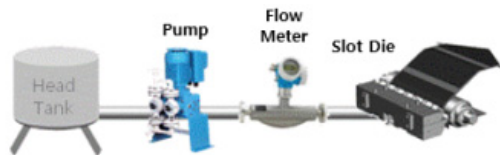


Fig. 7. Application of Flow Control Concept.

균일 유량 공급 최적화의 Batch 시작/종료 시점에 맞는 Sequence 구성은 배치 시작 시 배압 영향 최소화, 3분 Delay Time 적용(코팅 시작 3분 후 유량제어 On)하고 배치와 배치 사이 유형 헌팅에 따른 오동작 제거 후 무지부 구간 유량 제어 Off시 무 지부 유량 헌팅 발생 하였고 Fig.8에서 확인할 수 있다.

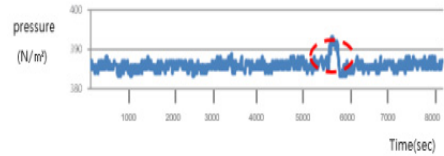


Fig. 8. Unknown Flow Hunting Occurred.

Noise 제거를 위한 Running Average 적용 하여 유량 편차 0.72kg/min에서 0.17kg/min로 감소하였고 Fig.9에서 확인 할 수 있다.

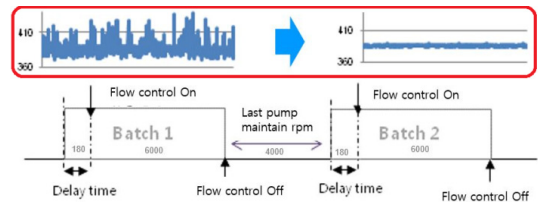


Fig. 9. Application of Running Average for Noise Removal.

3.4 슬러리 맞춤형 Die 기술 개발

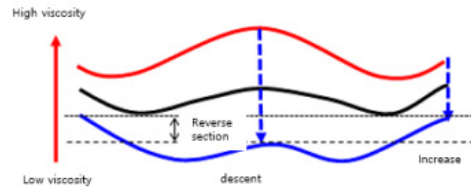


Fig. 10. Spreading Shape in Width Direction by Viscosity.

슬러리 저점도, 고점도대 용 슬롯다이 형상 최적설계를 유동관성력 최소화 개발하는데 있다. 기존 범용 슬롯다이는 점도(Range: 0 ~ 10,000cP), Loading Level Profile 역전현상이 발생하였고 Fig.10에서 확인할 수 있다.

본 개발다이의 점도대역별 슬롯다이 구분 설계를 하였다. 저점도(0 ~ 5,000)cP, 고점도(5,000~10,000)cP 저점도 용 슬롯다이 형상 최적화 및 고정도 현 상대 유지 하였고 Fig.11에서 확인할 수 있다.

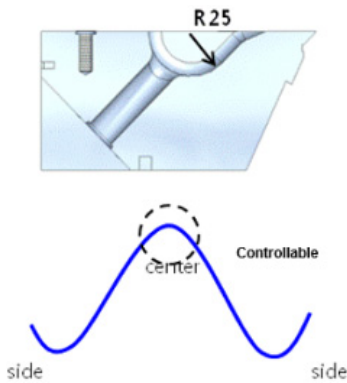


Fig. 11. Low Viscosity and Wide Direction Scattering Shape.

4. 개선된 자동차 리튬이온 배터리 코팅 공법의 구축 및 결과

4.1 목표 달성현황

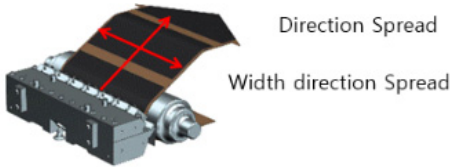


Fig. 12. Spread of Direction and Width Direction.

Table 2. Progress Direction Width Direction Achievement Status.

Goal items	Base Line	Development Goals		Achievement result	Remarks
		Goal	S/Goal		
Coating L/L Spread	$\pm 0.4 \text{ mg/cat}$	$\pm 0.3 \text{ mg/cat}$	$\pm 0.25 \text{ mg/cat}$	$\pm 0.29 \text{ mg/cat}$	Target type High viscosity 1, Low viscosity 1 type
Progress L/L Spread	$\pm 0.30 \text{ mg/cat}$	$\pm 0.21 \text{ mg/cat}$	$\pm 0.17 \text{ mg/cat}$	$\pm 0.20 \text{ mg/cat}$	Direction
Start L/L Spread	$\pm 0.30 \text{ mg/cat}$	$\pm 0.21 \text{ mg/cat}$	$\pm 0.17 \text{ mg/cat}$	$\pm 0.20 \text{ mg/cat}$	Direction
Slot Die L/L Spread	$\pm 0.30 \text{ mg/cat}$	$\pm 0.24 \text{ mg/cat}$	$\pm 0.21 \text{ mg/cat}$	$\pm 0.15 \text{ mg/cat}$	Width direction

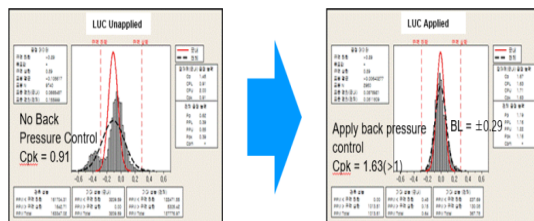


Fig. 13. Result of Process Capability Analysis.

코팅 Loading Level 산포는 기존 $\pm 0.4 \text{ mg/cm}^2$ 에서 $\pm 0.29 \text{ mg/cm}^2$, 진행 Loading Level 산포는 $\pm 0.30 \text{ mg/cm}^2$ 에서 $\pm 0.20 \text{ mg/cm}^2$, Start 시 Loading Level 산포 $\pm 0.30 \text{ mg/cm}^2$ 에서 $\pm 0.20 \text{ mg/cm}^2$, Slot Die Loading Level 산포는 기존 $\pm 0.30 \text{ mg/cm}^2$ 에서 $\pm 0.15 \text{ mg/cm}^2$ 으로 향상 되었고 Fig.12, Table 2. Fig 13. 에서 확인 할 수 있다.

5. 개선된 자동차 리튬이온 배터리 코팅 공법의 적용에 대한 고찰

Table 3. Progress & Width Loading Level Spread Dimension.

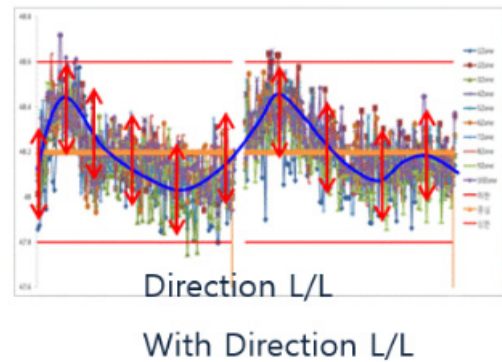
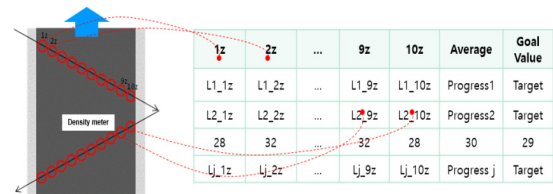


Fig. 14. Progress & Width Direction Dimension

진행 방향 산포는 슬러리 토출 량의 변화를 보기 위해 정의 하고 밀도계 1 Scan한 10 Zone의 평균값들의 Target Loading Level과의 차(~ 180 개/Bach) {(진행 k-Target)}의 집합이다.Table 3 확인 할 수 있다.

폭 방향의 산포는 슬러리 토출 량에 따른 변화를 제외한 산포를 보기 위해 정의 하였고 밀도계 각 Scan에서 각 Scan의 평균값과의 차(~ 180 개/Bach) {(Lk_1z_진행k),(Lk_2z_진행k),..., (Lk_10z_진행k)}의 집합으로 측정기준이다.

6. 결론

전기자동차 리튬이온 배터리 제조공정에서 Loading Level 산포최소화 코팅을 통한 전극 품질개선에 관한 연구는 첫째 신규 배압 조절 방식($\pm 0.04 \downarrow$) + 저점도용 슬롯다이($\pm 0.06 \downarrow$) 적용하여 현재 $\pm 0.3 \text{mg/cm}^2$ 수준으로 판단되고 기술 확보 하였다. 둘째 저점도 기종 배압조절 및 저점도용 다이 동시 적용 시 추가 감소예상 된다.

References

- [1] Business Information Research, Actual condition and prospect of eco-friendly electric vehicle market, Business Information Rdsearch, 2009, pp. 19-42.
- [2] Zempachi Ogumi, LITHIUM SECONDARY BATTERIES, HONGRLING PUBLISH COMPANY, 2010, pp. 4-53.
- [3] Simon, P. and Gogotsi, Y, "Materials for electrochemical capacitors," *Nature materials*, vol. 7(11), pp. 845-854, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1038/nmat2297>
- [4] Park, J.G., Principles and Applications of lithium Secondary Batteries, Hong-Reung Science Press, 2014, pp. 428.
- [5] Dong-Ju Lim, Battery Technology Symposium, The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry 2000)
- [6] W.A. Schalkwijk, B. Scrosati, Advances in Lithium-Ion Batteries, *Kluwer Acadmic*, New York(2002)
DOI: <https://doi.org/10.1007/b113788>
- [7] Young-Sik Hong, Next-generation secondary battery application technology, Korea Industrial Technology Support Center (2006)
- [8] Sung-su Kim, Mobile Device Battery Industry Trend Analysis Seminar etnnew(2008)
- [9] Myung-Huan Kim, Energy Conversion Chemical Material Symposium, Korea Research Institute Of Chemical Technology(2008)

장 찬 희(Chan-Hee Jang)

[정회원]



- 2008년 2월 : 경기대학교 교육대학원(교육학석사)
- 2012년 9월 ~ 현재 : 아주대학교 시스템 공학과 박사과정
- 2003년 6월 ~ 2016년 7월 : 삼성 SDI 중앙연구소 책임연구원
- 2016년 8월 ~ 현재 : 민관합동 스마트공장 추진단 기반구축팀 책임연구원

<관심분야>

시스템공학 (SE), Model-Based SE (MBSE), 자동화라인 설계, 미래形 스마트공장 구축, Big Data, CPS, IIoT, 스마트센서, 클라우드, 에너지 절감, 3D 프린팅, 홀로그래프 이용 스마트 설비 구축

이 재 천(Jae-Chon Lee)

[정회원]



- 1977년 2월 : 서울대학교 공과 대학 전자공학과(공학사)
- 1979년 2월, 1983년 8월: KAIST 통신시스템 (석/박사)
- 1984년 9월 ~ 1985년 9월 : 미국 MIT Post Doc 연구원
- 1985년 10월 ~ 1986년 10월 : 미국 Univ. of California 방문연구원
- 1990년 2월 ~ 1991년 2월 : 캐나다 Univ. of Victoria (Victoria, BC) 방문교수
- 2002년 3월 ~ 2003년 2월 : 미국 Stanford Univ. 방문교수
- 1994년 9월 ~ 현재 : 아주대학교 시스템공학과 정교수

<관심분야>

시스템공학 (SE), Model-Based SE (MBSE), Systems Safety, System T&E, Modeling & Simulation