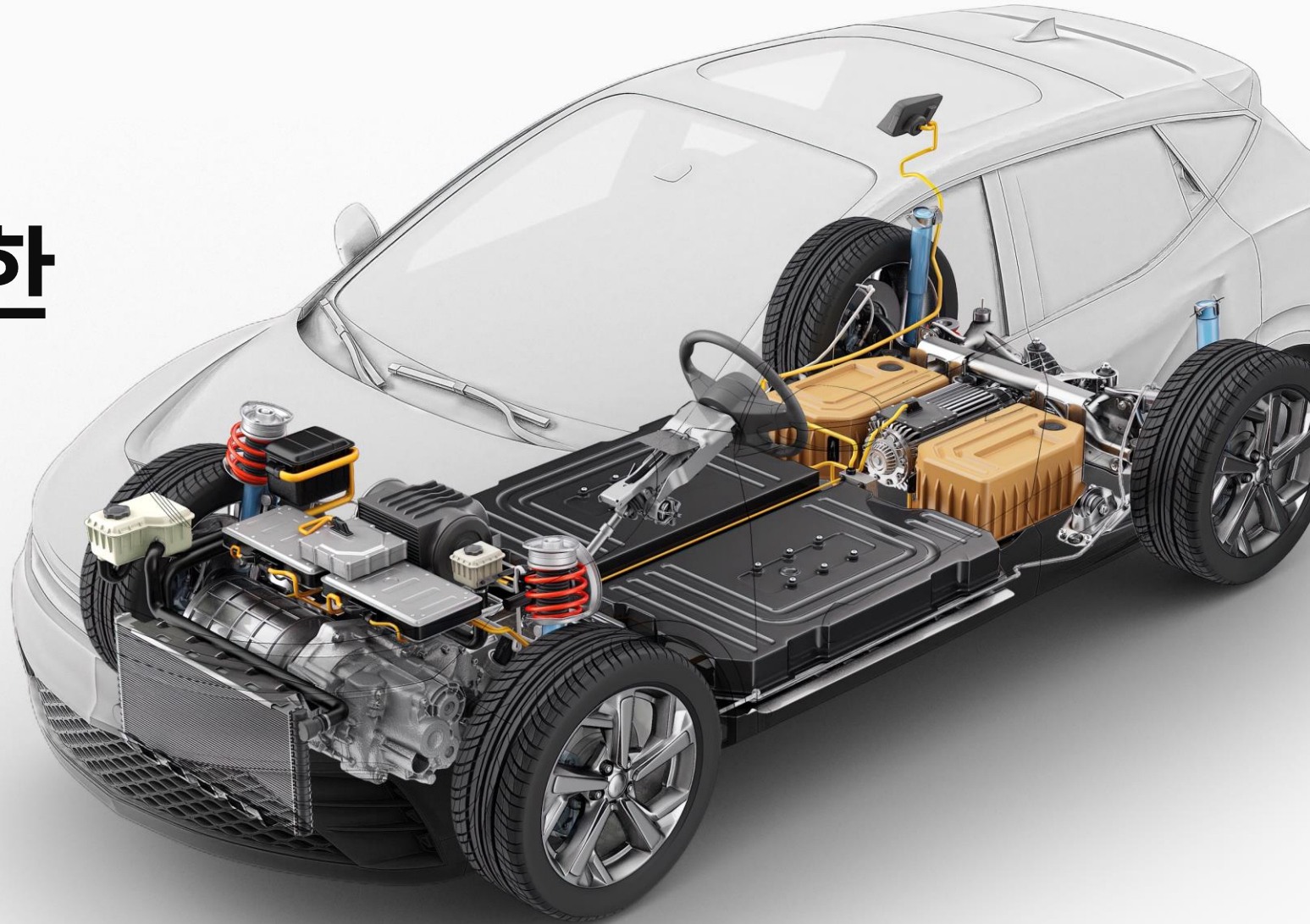


자동차 2차 전지 공정 최적화를 통한 불량률 저감



2024.03.22

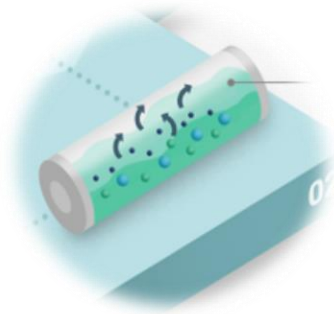
C2조 김병우, 김예원, 김준혁, 배빛나리, 신지우, 심정욱

이차전지 충전 불가능한 일회용 1차 전지와는 달리, 방전된 이후에도 충전을 통해 재사용 가능한 전지

전극공정 배터리의 양극/음극을 만드는 단계

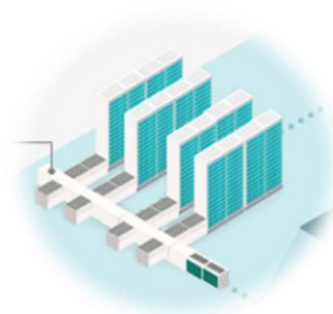
조립공정 배터리의 모양을 갖추는 단계

화성공정 배터리의 충/방전과 품질 검사 단계를 진행



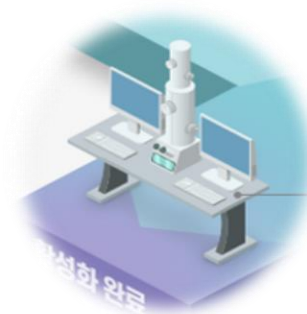
Aging

- 일정 온도에서 30분 ~ 3시간 동안 보관하며, 배터리 내부에 주입된 전해질이 양극과 음극에 스며들게 하는 과정
- 리튬 이온의 이동이 최적화될 수 있도록 돕는 과정.



Charging / Discharging

- 전기 에너지의 특성을 부여하기 위해 배터리를 충전하고, 방전하는 과정
- 충전 시 리튬 이온은 모두 음극으로 이동하고 전해질이 분해되어 *SEI라는 보호막을 형성한다.



Grading, Selecting

- 배터리의 품질을 확인하고 양품의 배터리를 선정하는 과정
- *IR/OCV 검사를 통해 배터리의 성능과 수명을 확인
- 이후 품질 기준에 따라 배터리의 등급 분류

* SEI (Solid Electrolyte Interphase) : 음극재 표면에 생기는 얇은 막으로, 배터리의 성능과 수명에 영향을 끼친다.

* IR(Internal Resistance, 내부저항) / OCV(Open Circuit Voltage, 개방 회로 전압) : 전지의 효율과 성능, 품질을 평가하는 지표

목차

- 1 추진 배경
- 2 현상 파악 및 목표
- 3 데이터셋 구조
- 4 분석 계획
- 5 분석결과
- 6 개선안
- 7 개선결과

1. 추진 배경

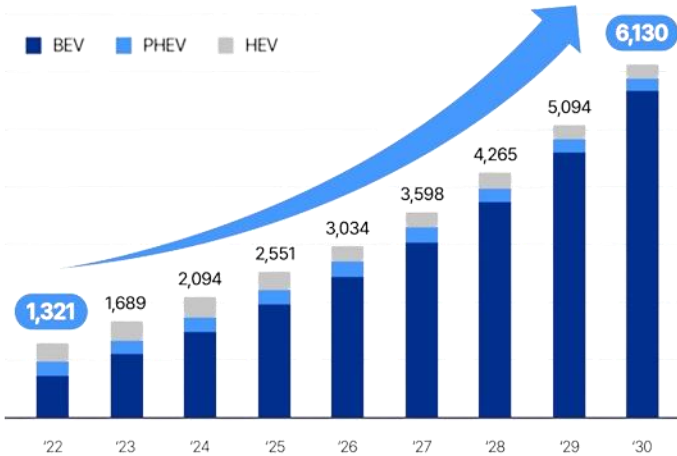
글로벌 전기차 시장이 빠르게 성장하면서 전기차의 배터리 수급량이 증가하고 있는 상황

자사 또한 배터리의 공급을 늘리기 위해 공장 설비를 확장했지만, 불량률이 3.1%로 급증해 시급한 개선이 필요

전기차 시장의 지속적인 성장

(단위 : 만대)

■ BEV ■ PHEV ■ HEV

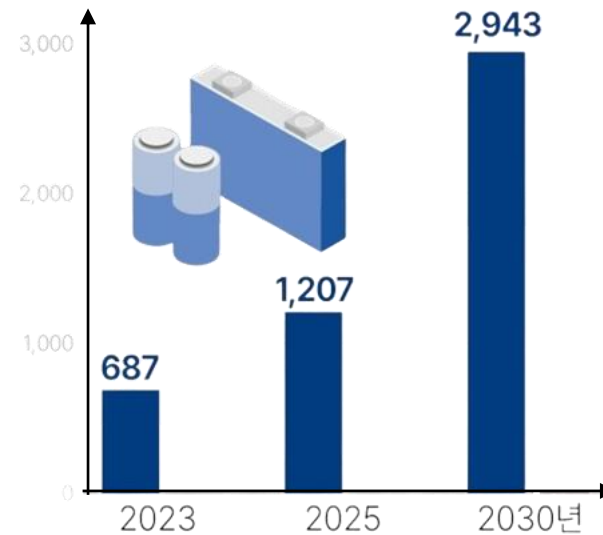


출처: 글로벌 EV 및 LIB 시장 전망(SNE Research, 2022.03)

전기차 배터리의 수급량 증가

(단위 : GWh)

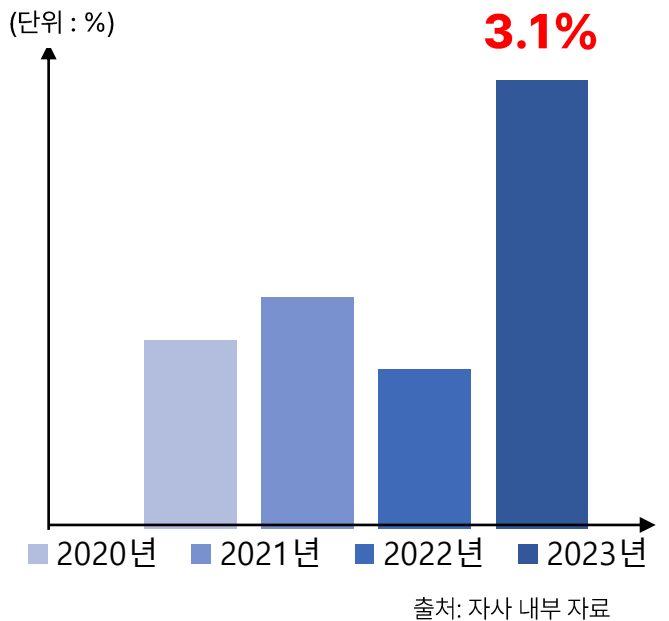
■ 리튬이온배터리



출처: SNE 리서치

화성공정 불량률 급증

(단위 : %)

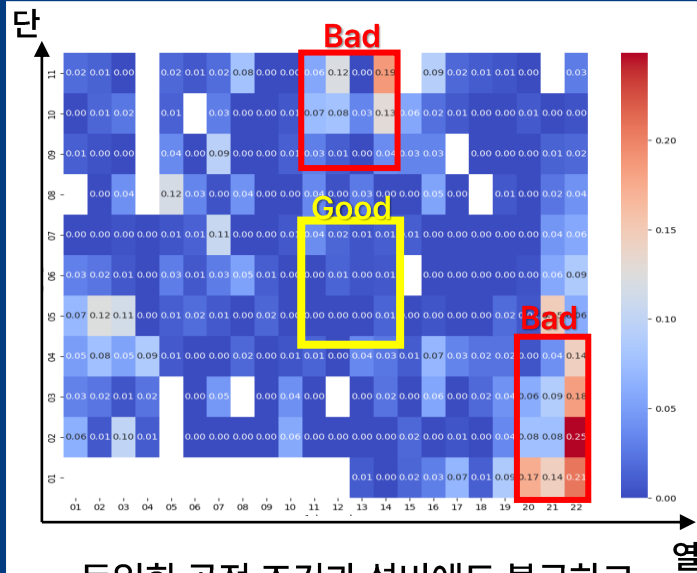


출처: 자사 내부 자료

2. 현상 파악 및 목표

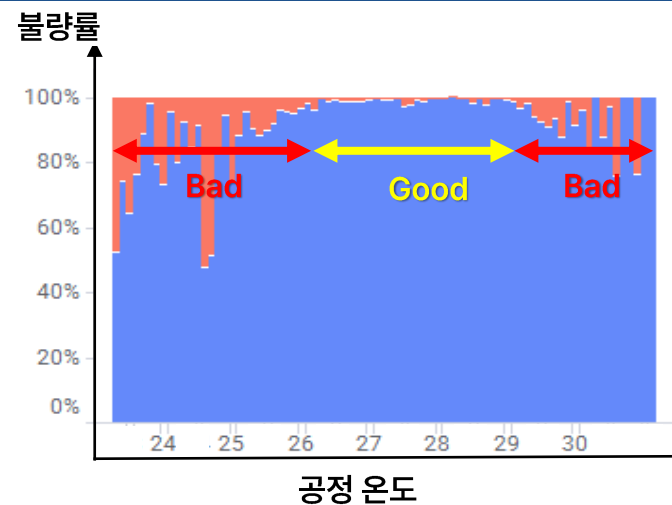
불량률이 3.1%로 급증한 원인 파악 및 개선 필요

설비에 따른 불량 발생



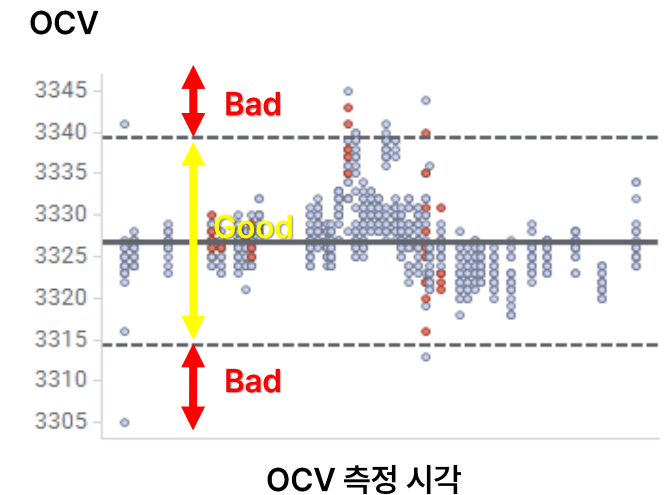
동일한 공정 조건과 설비에도 불구하고,
설비유의차에 따른 불량률 차이 존재

공정 조건 편차에 따른 불량 발생



공정 온도, 시간 등의 공정 변수가
특정 범위를 벗어날 경우 품질 이상 발생

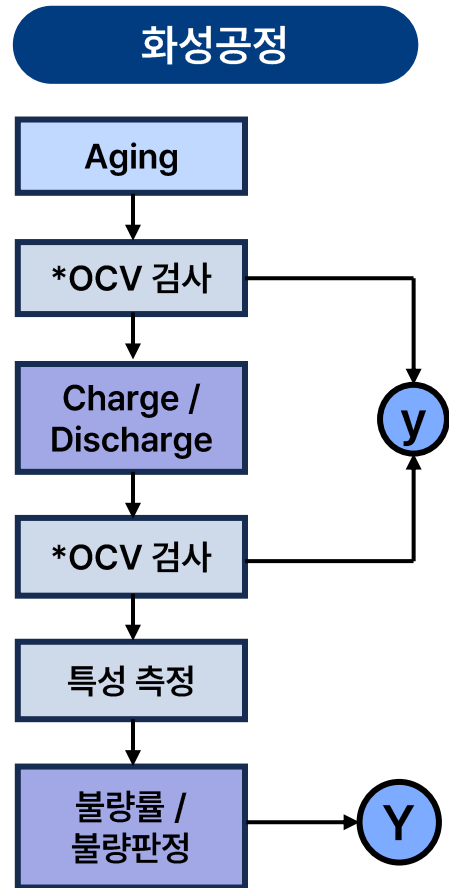
사전 불량 대응 시스템 미흡



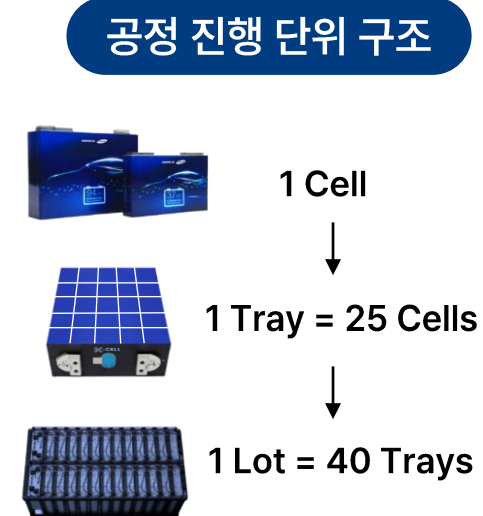
공정별 중간 측정값(OCV)을 활용한
모니터링 기반 사전 불량 대응 시스템 미흡

24년 4분기까지 불량률 1.0% 달성 목표

3. 데이터셋 구조



* OCV : 공정 중 전지의 성능과 품질을 검사



분석 대상

데이터 수집 기간	2023/11/25 ~ 2023/12/11
*설비 작업시간 (Lot과 Tray 기준 – Lot 45개, Tray 1,780개)	
작업 조건/측정값 (Cell 기준 – Cell 38,595개)	

* 설비 작업시간(TAT, Turn Around Time)에서 Queue time(대기시간)은 고려되지 않는다.

트레이 별 셀 개수

Tray 별 작업 Cell 수 편차 : 20개 미만 제외
 - Cell당 불량률 산출 영향도 상이
 - 온도 등 작업조건의 Cell 영향도 편차

	*불량률	Tray별 Cell 개수	Tray 개수
사용 (72%)	Cell 1개당 영향 4~5%	25	682
		24	127
		23	156
		22	77
		21	186
		20	66
제거 (28%)	Cell 1개당 영향 6~9%	19	41
		18	14
		17	126
		16	102
		15	164
		14	16
		13	23
		12	14
		11	3

*불량률: Tray 별 Cell 에 불량이 1개 있다고 가정할 때의 불량률

4. 분석 계획

목표변수		분석목적	분석기법	분석내용
Y 최종품질 지표 목표변수	*불량률 (Tray 기준)	설비유의차 분석 및 검정	Heatmap	설비의 열, 연, 단 위치 별 불량 패턴 확인
	불량판정		ANOVA, DT, RF, XGB	설비의 열, 연, 단 위치 별 차이 분석/검정
			Chi-squared test, DT, RF, XGB	설비의 열, 연, 단 위치 별 차이 분석/검정
	*불량판정 (Cell 기준)	불량 발생 패턴 분석 및 검정	Bar plot, Box plot	불량 판정 패턴 및 공정조건 연계분석
			T-test	공정 변수 별 불량 판정 유의성 검정
		불량 발생 핵심 영향 인자 도출	DT, RF, XGB	불량판정에 영향을 미치는 핵심 영향인자 중요도 파악
		불량 판정 (확률) 예측	Logistic Regression DT, RF, XGB	핵심 영향 인자를 활용한 불량판정 예측
		핵심 영향 인자 최적화	DT, Histogram	불량판정을 최소화하는 최적 작업 조건 도출
		OCV와 불량판정 유의성 검정	T-test	OCV 값에 따른 불량 판정 유의성 검정 (모니터링 용도)
y 중간품질 지표 모니터링변수	OCV	OCV와 공정조건 상관 분석	Scatter, Correlation	공정조건에 따른 OCV 측정값 관계 분석 (모니터링 용도)
		OCV 예측 모델	Linear Regression	공정조건을 활용한 OCV 예측 모델 (모니터링 용도)

*불량률 : Tray 당 $\frac{\text{불량 cell의 개수}}{\text{전체 cell의 개수}}$ 비율 (%) *불량판정 : Cell의 양/불량 여부

5. 분석 결과 – 설비 유의차 (1)

충/방전 공정 설비 위치 별 발생 편차 확인 및 불량을 발생시키는 공정조건 분석 진행
(에이징 공정이 가장 유의하나 공정조건 데이터 수집 불가 사유로 충/방전 공정 설비 대상 분석 진행)

분석 별 우선순위

목표 변수	공정		χ^2 검정	F검정	DT	RF	XGB
불량률	에이징	열	-	4	3	3	4
		연	-	5	1	1	1
		단	-	3	5	2	5
	충/방전	열	-	2	2	4	3
		단	-	1	4	5	2
불량 판정	에이징	열	5	-	3	3	5
		연	2	-	2	1	2
		단	4	-	1	2	4
	충/방전	열	1	-	4	4	1
		단	3	-	5	5	3

가설 검정 결과

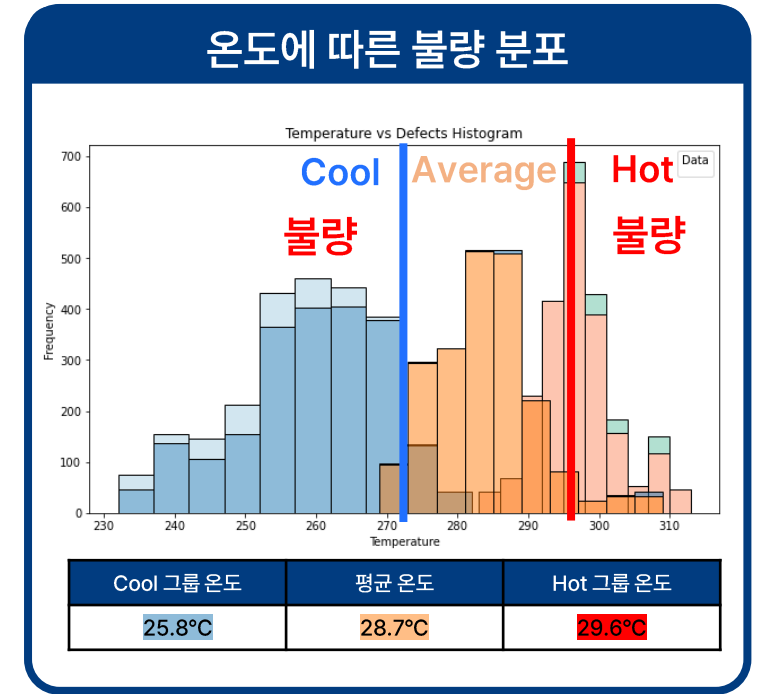
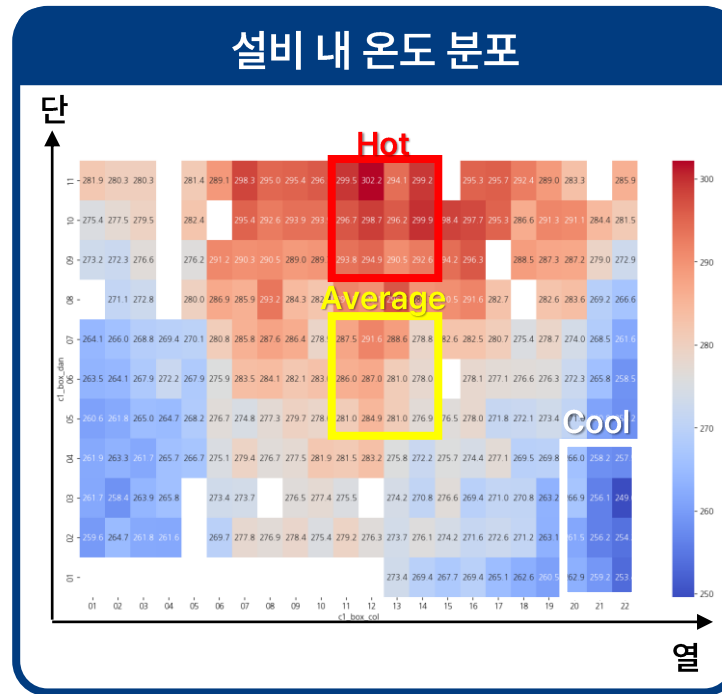
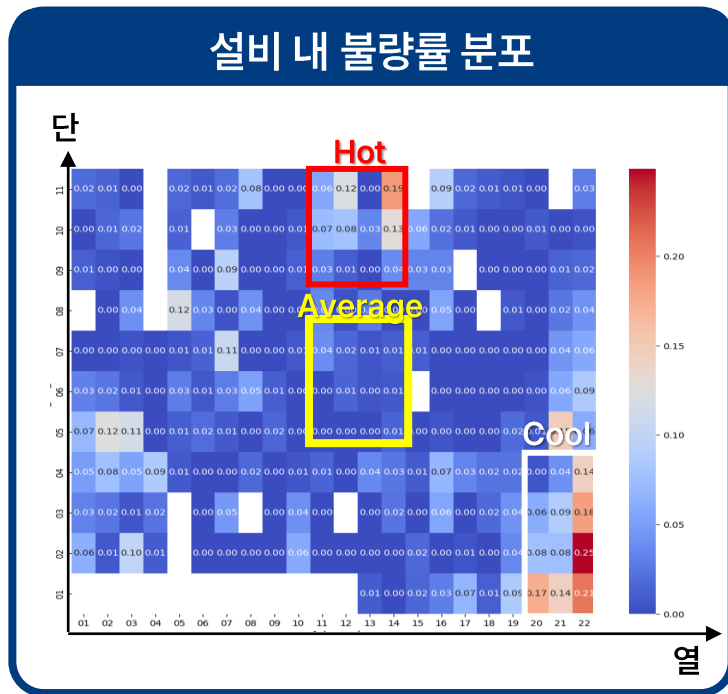
대립가설 H1	설비의 열, 단에 따라 불량률 차이가 있다.
검정방법	ANOVA 검정
P-value	< 0.001
결과	설비의 열,단에 따른 불량률의 차이는 유의하다.

대립가설 H1	설비의 열,단에 따라 불량 발생 빈도 차이가 있다.
검정방법	Chi-Squared Test
P-value	< 0.001
결과	설비의 열, 단에 따른 불량 발생 빈도 차이는 유의하다.

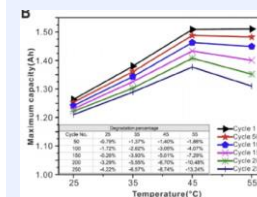
5. 분석 결과 - 설비 유의차 (2)

충전 1단계에서 설비의 열/단마다 온도 차이 존재

분석 결과 배터리의 온도가 높거나, 낮은 경우 모두 불량률이 높은 것을 확인



대립가설 H1	설비의 위치에 따라 온도가 불량률에 미치는 영향에는 차이가 있다.
검정	ANOVA 검정
P-value	<0.001
결과	설비 내 위치에 따른 온도는 불량률에 영향을 미친다.



“배터리의 온도가 너무 높거나, 낮은 경우 성능이 저하될 수 있다.”

[참고문헌] Shuai Ma, Modi Jiang, Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries, 2018, 653-666

5. 분석 결과 – 공정 조건 (1)

충/방전 공정 조건이 불량 판정에 영향을 미치는 지 검정
 불량 판정에 영향을 미치는 핵심 영향 인자 및 우선 순위 도출

분석 별 우선순위

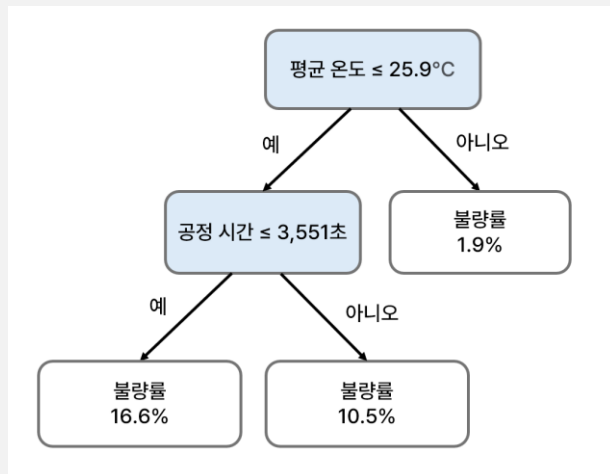
목표변수	설명변수	χ^2 검정	DT	RF	XGB
불량판정	평균온도	1	1	1	1
	공정작업시간	2	2	2	2
	전지용량	3	4	3	3
	충전시간	4	3	4	4
	평균전압	5	5	5	5

5. 분석 결과 - 공정 조건 (2)

온도가 임계값보다 낮을 때 공정 시간이 불량 판정에 영향을 더 미치는 것을 확인

트리 모델 결과

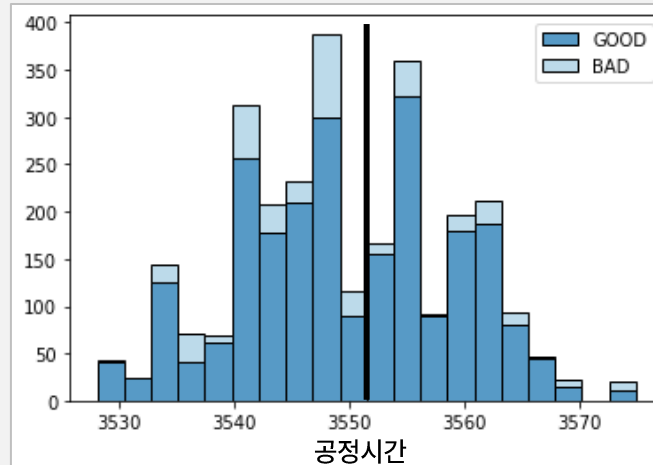
충전 1단계



온도 임계값	25.9°C
공정 시간 기준	3,551초

공정 온도와 시간에 따른 불량 판정 분석

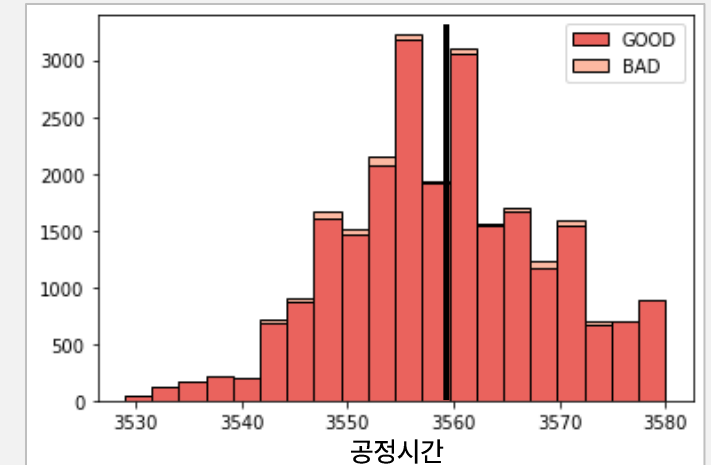
평균온도가 25.9°C 미만



공정 시간 조건	3,551초 미만	3,551초 이상
불량률	16.6% (310/1873)	10.5% (198/1891)

평균 온도가 임계값보다 낮을 경우
공정 시간에 따른 불량 판정 차이 큼

평균온도가 25.9°C 이상

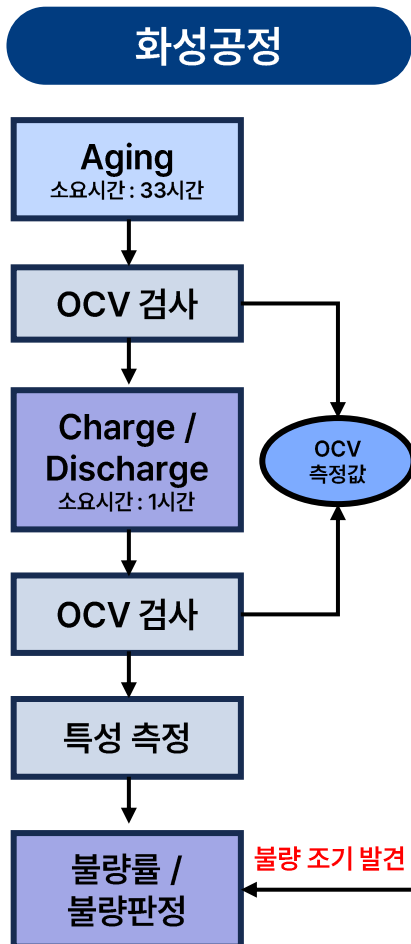


공정 시간 조건	3,551초 미만	3,551초 이상
불량률	1.9% (561/28504)	2.2% (113/5128)

평균 온도가 임계값보다 높을 경우
공정 시간에 따른 불량 판정 차이 적음

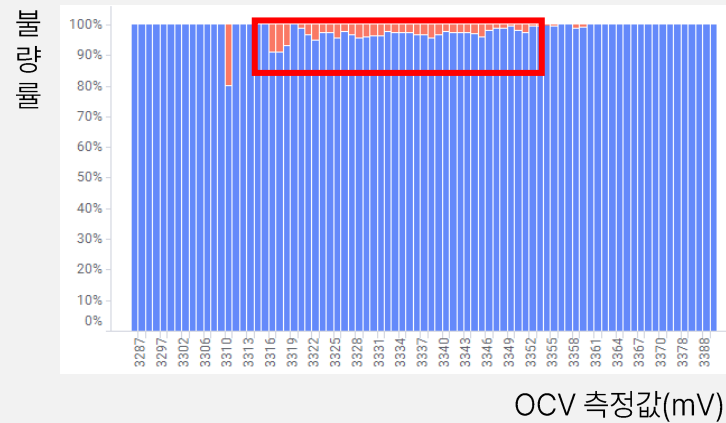
5. 분석 결과 - 모니터링 시스템의 부재

OCV 검사 결과값은 불량률에 영향을 미치므로 불량률 사전에 예측할 수 있는 중간 지표로 활용



OCV 검사 결과값에 따른 불량률 예측

OCV에 따른 불량 판정



대립가설 H1	OCV 검사 결과값은 불량 판정에 영향을 준다.
검정방법	Chi-Squared Test
P-value	< 0.001
결과	OCV 검사값은 불량 판정에 영향을 준다

OCV 범위	3,319mV~3,355mV	그 외
불량률	4.6%	0.8%

특정 범위 내 OCV는 불량 판정에 영향이 있다

6. 개선안 - 설비 온도 관리 최적화

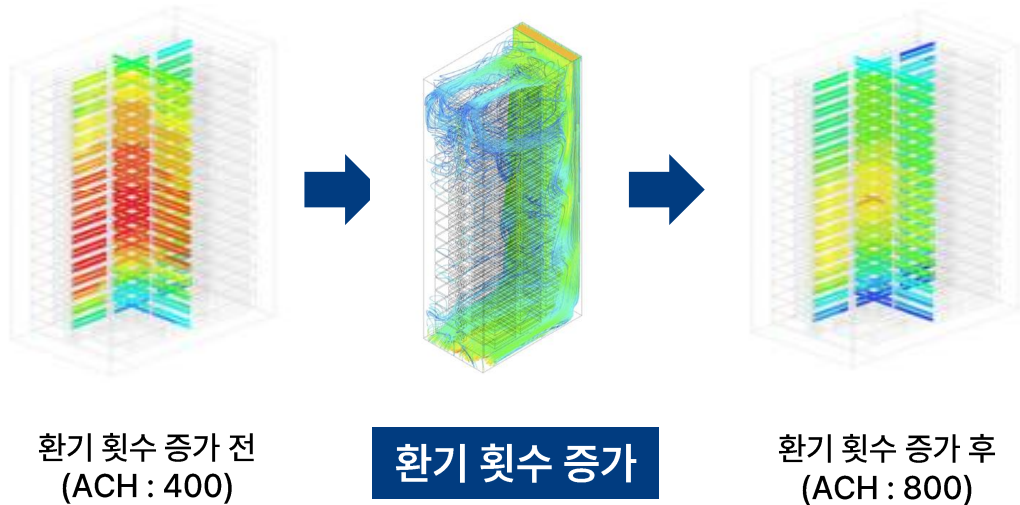
충/방전 공정에 2가지 온도 관리 방법을 적용하여 적정 범위 안에 머무르도록 관리
불량률 1.28%로 저감, *품질 기회 비용 분기당 340억원 절감 기대

1. 설비 내 환기 횟수 증가 : 온도 균일성

환기 횟수를 증가시킬 경우, 온도의 편차가 감소한다.
과열로 인해 발생하는 불량률을 개선할 수 있다.

이차전지 생산 설비의 온도 분포

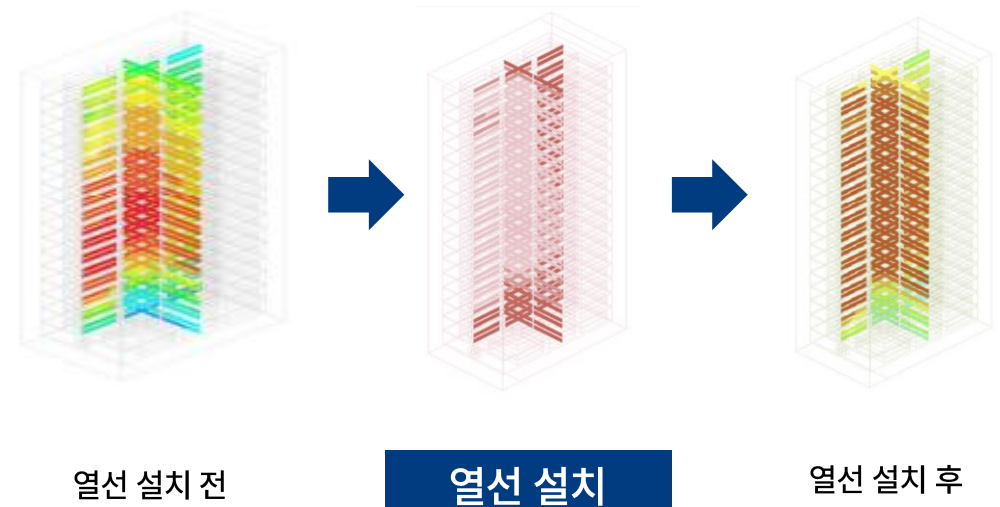
ACH : 시간 당 환기 횟수



2. 열선 설치 : 온도 보완

설비의 저온 구간에 열선을 설치하여 적정 온도까지 상승시킨다.
저온으로 인해 발생하는 불량률을 개선할 수 있다.

이차전지 생산 설비의 온도 분포



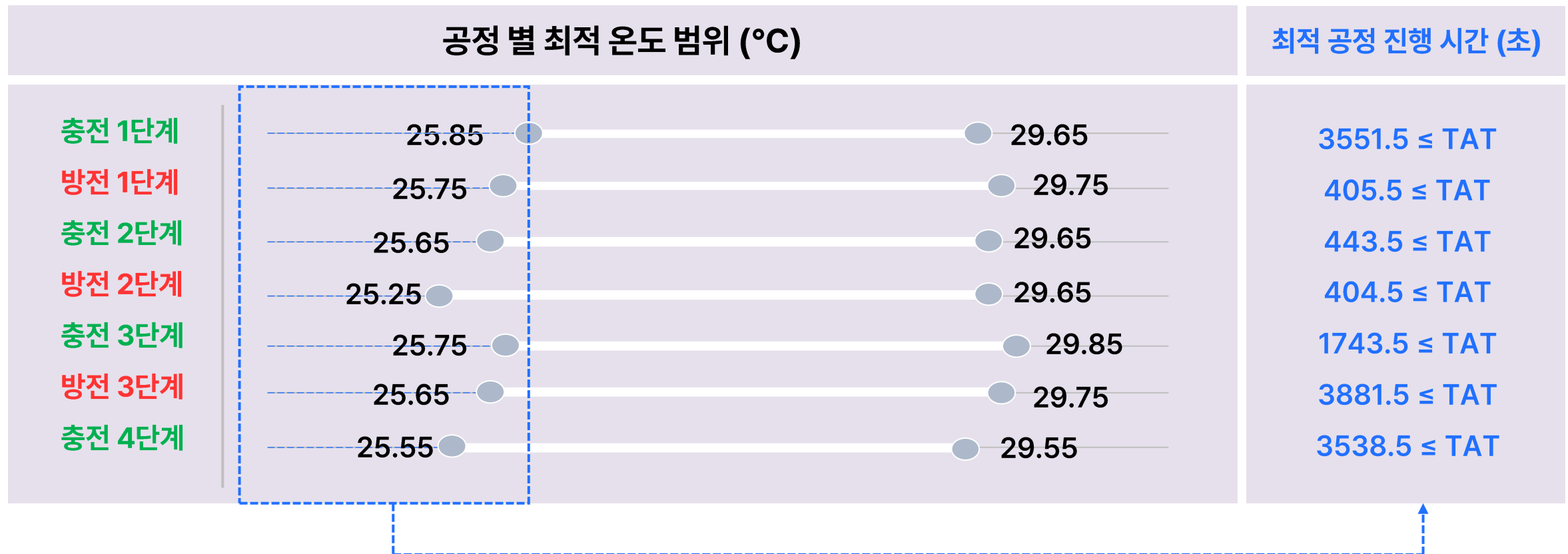
[참고논문] : ESS용 Rack 내부의 공기유동에 따른 배터리 열관리에 관한 해석적 연구 강윤희

*품질 기회 비용 계산식 : Cell 1개 가격(1,250만원) X 분기당 생산량(15만개) X 감소된 불량률(1.82%p)

6. 개선안 - 공정 온도 관리 최적화

최적 온도 범위 내에서 공정 진행 시, 양품일 확률이 98% 기대

특정 온도 이하에서 공정이 진행된 셀은 공정시간 조절을 통해 불량률 저감 기대



7. 개선결과

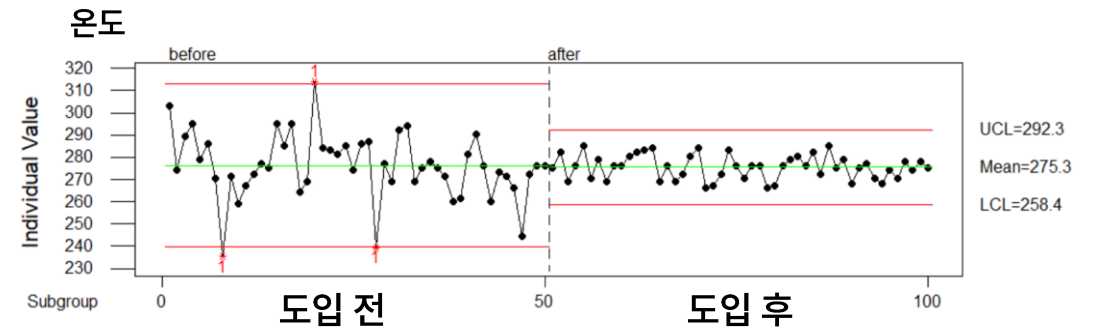
Pilot 계획

구분	내용
목적	<ul style="list-style-type: none"> - 개선안에 대한 실제 적용을 통한 개선 결과 검증 - 공정 온도를 중심으로 관리 방법을 개선하여 더 나은 개선 방안
Pilot 적용 개요	<ul style="list-style-type: none"> - 적용 대상 : 총/방전 단계에서의 설비 - 적용 프로세스 : 총/방전 공정에서 환기 횟수 2배 증가 및 열선 설치 후 온도를 실시간 모니터링하고 관리하는 공정 - 적용 일정 : 약 일주일 간격으로 Pilot (2024.03.15 ~ 2024.03.20) - 검증 도구 : 관리도, 2 Sample T-test
현업 요청사항	<ul style="list-style-type: none"> - 공장대표 : 공정 설비에 개선안 적용 협조 요청 - 공정 엔지니어 : 개선안으로의 공정 온도 조정 및 모니터링 협조 요청

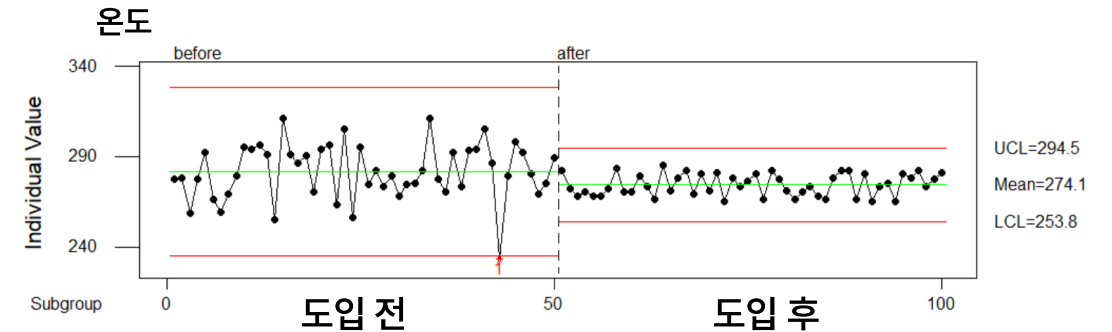
공정 온도를 최적화한 관리도

관리도를 통해 총/방전 공정 3시그마 범위로 관리 및 향후 공정의 안정적 운영을 지속적으로 감시

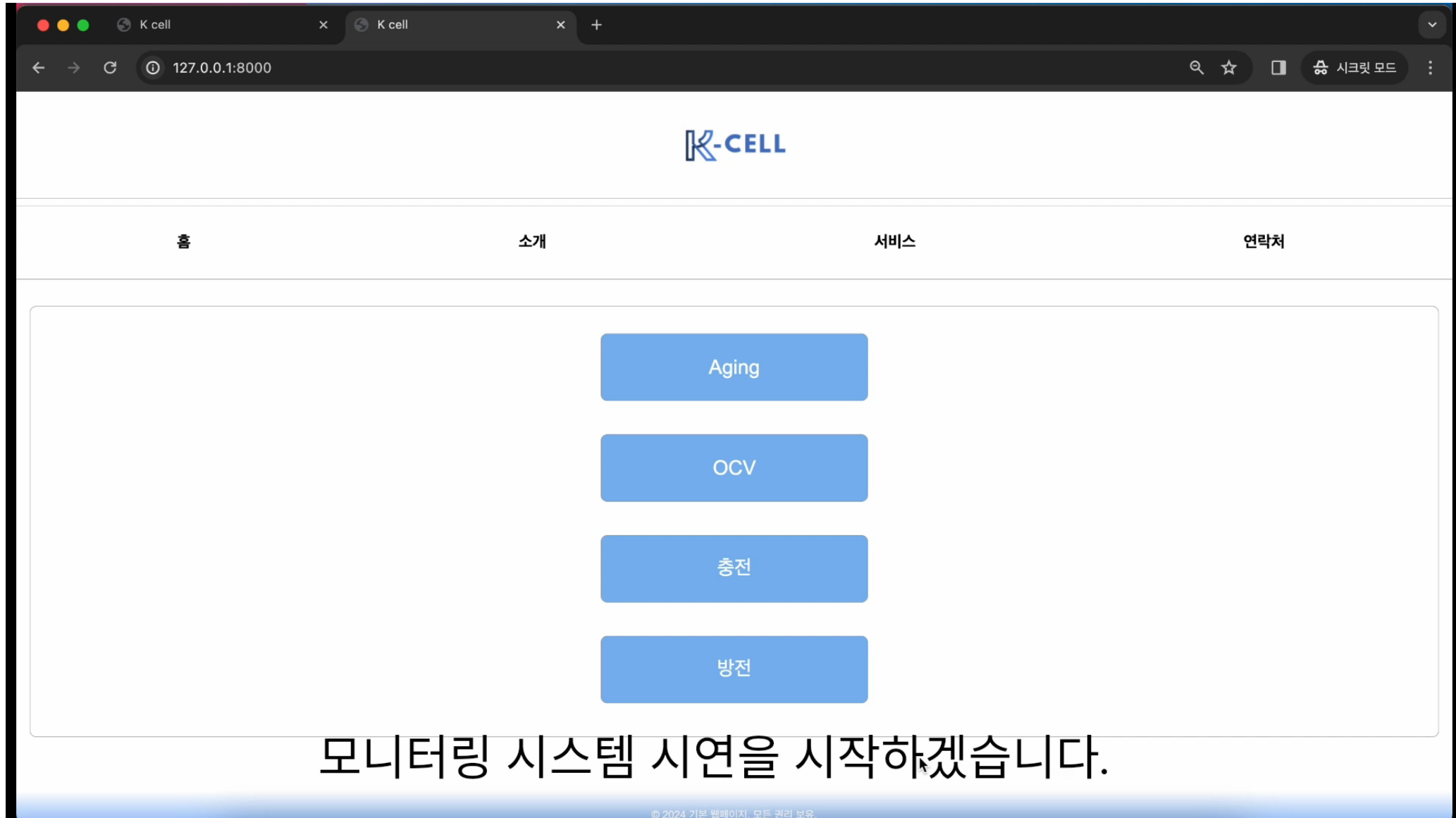
Test 1



Test 2



7. 개선결과 - 시연 영상



정년 Allright 카데미

감사합니다

포유드림

With POSCO

부록 1. 느낀 점

김병우 : 미래에 회사에 입사해서 프로젝트를 진행한다면, 불량을 줄이기 위해서 포빅아에서 배웠던 분석기법과 그래프로 데이터를 시각화하고 인사이트를 통해서 팀원들을 설득하고 있을 것 같다. 그렇게 하기 위해선, 복습과 데이터를 가지고 연습해보는 것이 중요할 것이다. 하지만, 포빅아에서는 복습할 시간은 없다. 잘 시간도 없다. 그치만 많은 것을 배운다.

김예원 : 실제 기업 데이터로 진행한 이번 빅데이터 프로젝트를 통해 데이터를 분석하기 전에 도메인에 대한 이해가 얼마나 중요한 지 깨달았고, 이전에는 들어보기만 했던 2차 전지 분야에 대해 좀 더 깊게 학습해볼 수 있었다. 무엇보다 팀원들과 함께 고민해보고 의견을 나누는 과정 속에서 많이 성장할 수 있었던 것 같다.

김준혁 : 배운 데이터 분석 기법들을 데이터 형태와 상관 관계에 따라 더 좋은 모델을 선택하고, 데이터에서 유의미한 관계를 찾을 수 있었다. 이번 과제를 통해서, 데이터에 근거한 결론과 인사이트를 도출할 수 있다는 것이 얼마나 큰 무기가 될 수 있는지 깨달았다.

배빛나리 : 배운 것을 아낌없이 활용해볼 수 있는 좋은 기회였다. 미숙했던 개념을 단단히 쌓을 수 있었고, 무엇보다 우리 조원들과 함께 결과물을 만들 수 있어서 힘들었지만 즐거운 기간이었다. 그리고 배드민턴은 재미있었다.

신지우 : 기계공학과로서 제조업에서 사용하는 실데이터를 다루어보고 싶다는 생각이 있었다. 막상 현실의 데이터를 마주하고나니 정말 막막했다. 데이터셋과 이차전지 제조공정을 이해하기도 어려웠고, 통계와 파이썬 모두 낯설어서 혼란스러웠다. 그래도 팀원들한테 많이 배우고 협업하면서 함께 성장할 수 있었던 것 같고, 데이터로부터 인사이트를 추출할 수 있게 되어서 매우 흥미로웠던 프로젝트였다.

심정욱 : “하고자 하면 방법이 보이고, 피하고자 하면 핑계가 보인다”라는 속담이 있다. 데이터셋을 처음 받았을 때, 답이 보이지 않아서 가슴이 답답하고 밥도 잘 안 넘어가고 그랬지만, 조원들에게 의지해서 계속 부딪혀보니 답을 찾아낼 수 있었다. 불가능할 것 같은 프로젝트를 마무리하게 되어서 정말 기쁘고 많은 것을 배울 수 있었던 시간인 것 같다.

부록 2. 잠재원인 도출

잠재원인	중요도	분석가능성	합계	선정여부
Aging 시간	9	9	18	0
충/방전 온도	9	9	18	0
제조공정에서의 Tray 배치(열, 연, 단)	9	9	18	0
셀의 두께	3	3	6	
충/방전 시 정전압과 정전류전압	5	7	12	0
배터리 전기적 특성 측정의 오류 (전류, 전압, 용량, 임피던스)	3	3	6	
공정시간 증가에 따른 용량 감소	3	3	6	
충/방전 속도	7	7	14	0

척도 : 1점(매우 아니다), 3점(약간 아니다), 5점(보통이다), 7점(약간 그렇다), 9점(매우 그렇다)

Supplier	Inputs	Process	Outputs	Customers
조립공정	*산출물 (개수, spec, 측정값 IR/OCV)	<u>Formation (화성, 활성화 공정)</u> ① Charging / Discharging : 온도, 습도, 압력, 시간, 투입량 ② Aging : 온도, 습도, 시간, SEI층 균일도 ③ Inspection (IR/OCV), Grading, Selecting : 전류, 저항, 전압 측정 환경 및 장비 오차 공통 : 외부환경 이물질 유입 (진공도) , QC (Quality Control) 부재, 장비 노후정도, 설비유의차, 원자재 순도, 함량, 작업자의 숙련도, 작업량	측정 데이터, 불량률, 등급	외관 포장 공정 (Packaging)

*산출물에는 결함이 없는 제품인 완제품만 이후 공정으로 넘어 온다고 가정한다.

1. 결측치 처리

Bat_tat.csv : 결측치가 발견되지 않음

Bat_Process.csv : 데이터셋에서 결측치 90개 (0.23%) 발견

출하 공정 전 프로세스

출하 전 Aging -> 출하 전 OCV 검사 -> **특성 검사**

특성 검사 단계에서 결측값 발견

결측치
90개

양품 12개

불량 78개



결측치 중 양품인
데이터만 제거

2. 이상치 처리

Bat_tat.csv : 데이터셋에서 이상치 121개 발견

Bat_Process.csv : 이상치가 발견되지 않음

상온 Aging 2단계

61개 (3.39%)

충전 1, 2단계

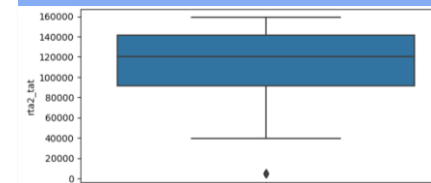
47개 (2.61%)

기타

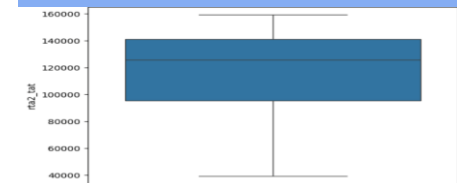
13개 (0.72%)

총 121개 (6.73%)

제거 전 그래프



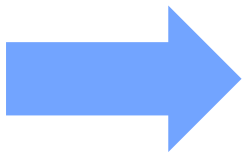
제거 후 그래프



측정 데이터셋 공정별 분류

공정별 분석의 용이성을 위해 같은 공정의 변수를 묶어 분류하였다.

분류 전
lot_id
tray_id
cell_id
judge
dt_start
rta1_cell_no
rta1_box_col
rta1_box_row
rta1_box_dan
hta1_box_col
hta1_box_row
hta1_box_dan
rta2_box_col
rta2_box_row
rta2_box_dan
c1_curr_end
c1_voltage_avg
c1_capa
c1_ccval

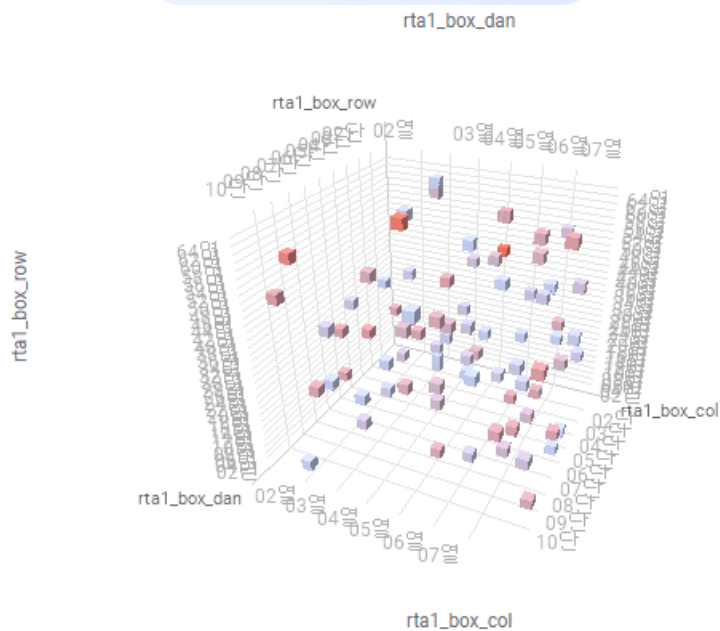


분류 후	
Bat_base	lot_id, tray_id, cell_id, judge, dt_start
Bat_rta1	rta1_cell_no, rta_box_col, rta1_box_row, rta1_box_dan
Bat_hta1 1	hta1_box_col, hta1_box_row, hta1_box_dan
Bat_rta2 2	rta2_box_col, rta2_box_row, rta2_box_dan
Bat_charge1	c1_curr_end, c1_box_col, c1_capa, c1_ccval, c1_time_cc, c1_box_col, c1_box_dan, c1_temp_avg, c1_voltage_avg

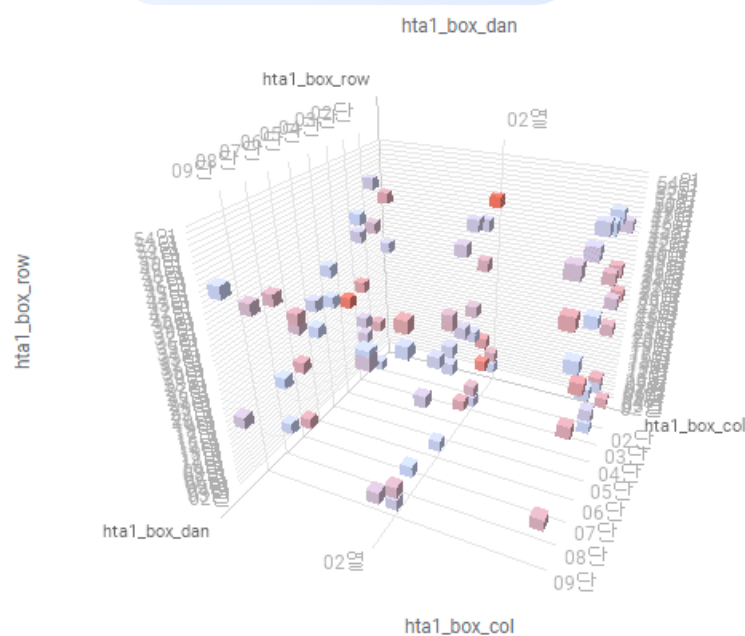
3D scatter Plot

- Aging 열, 연, 단에 따른 불량률 시각화

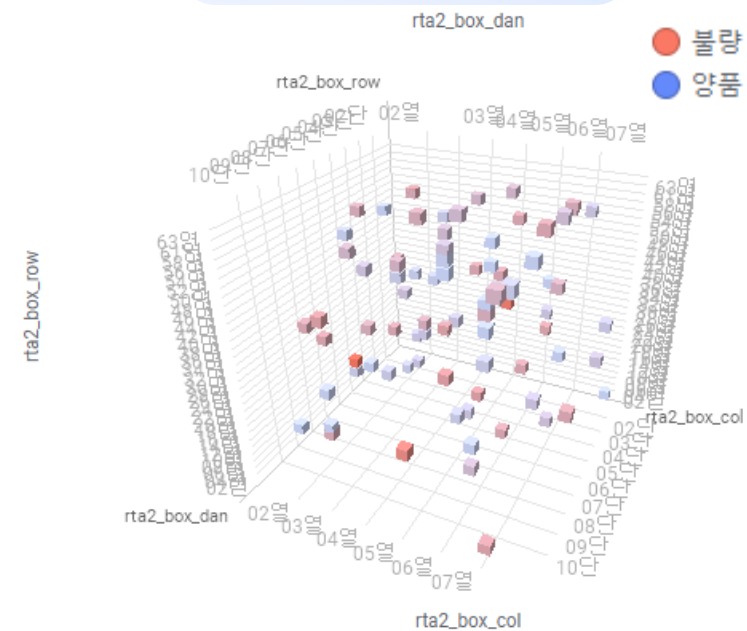
상온 Aging #1



고온 Aging #1



상온 Aging #2



부록 7. Insight 발굴 과정

Scatter Plot 과 Decision Tree

- C1 공정온도와 C1공정시간의 관계 유추

