

# 이차전지 화성공정 최적화를 통한 불량률 Zero화

데이터분석 C4팀

고다영, 김우영, 송준희, 신하나, 이현희, 장수명, 전현지



# CONTENTS

- 1 추진배경
- 2 현상 및 개선 기회
- 3 분석 계획
- 4 분석 결과
- 5 개선안 및 적용방안
- 6 Learned Lesson

# 제조 공정

## 이차전지

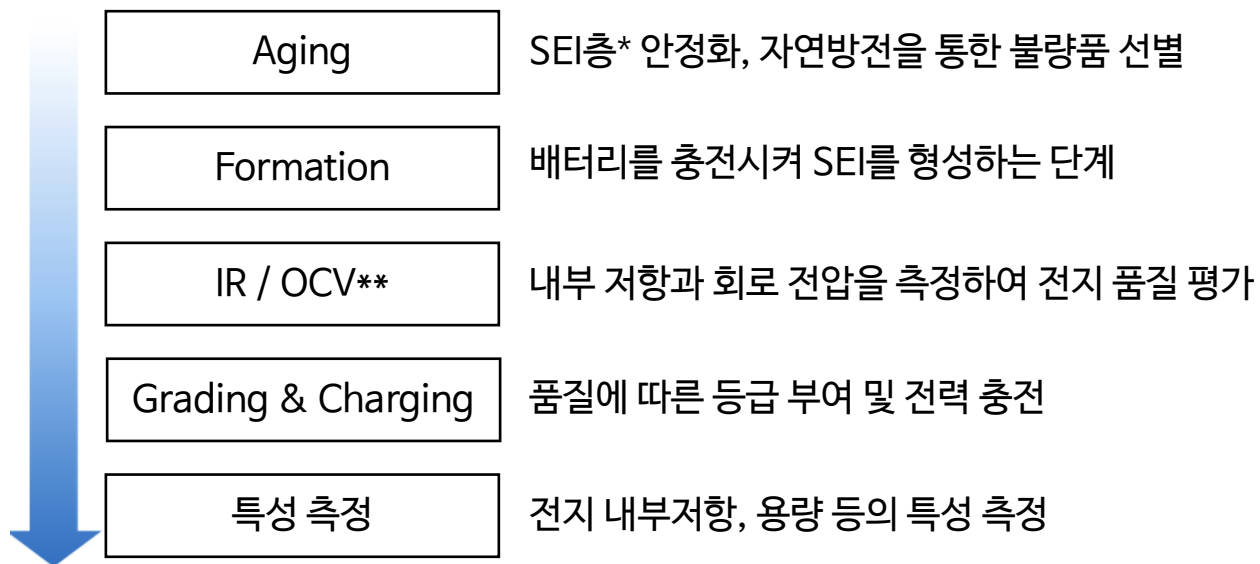
방전된 이후에도 충전을 통해 **재사용이 가능**한 전지  
경량화 · 소형화가 가능한 **리튬이온 배터리**가 대표적이다.

## 화성공정

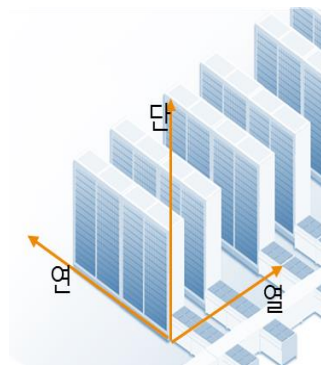
배터리 활성화, 안정화 이후 결함을 검사하는 공정

- ▶ 배터리 품질에 영향을 미치는 데이터가 수집된다.
- ▶ 평균 13.4일간 진행된다.

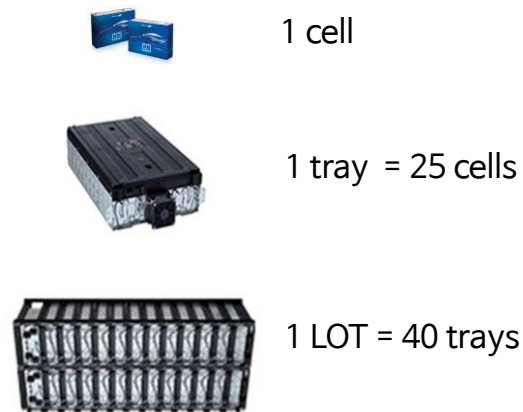
## 화성공정 프로세스



## 설비 구조



## 공정 진행 단위

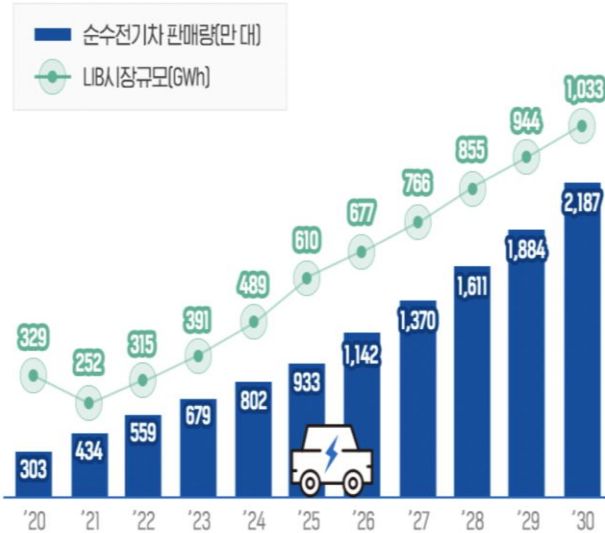


\* SEI : Solid Electrolyte Interphase \*\* IR / OCV : Inner Resistance / Open Circuit Voltage

# 1. 추진배경

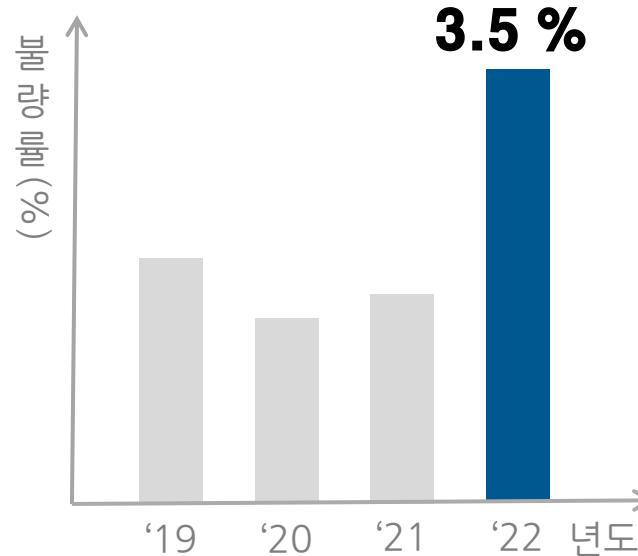
리튬 이온 배터리 시장이 빠르게 성장하면서 요구되는 품질 수준 역시 높아지고 있는 상황이다. 그러나 현재 자사의 배터리 불량률은 3.5%로 급증하였으며 막대한 품질 비용 발생이 우려되므로 시급한 개선 방안이 필요하다.

## 리튬 이온 배터리 수급 전망



\* 출처 : TSR('18~'19), FUJI('18~'19), SNE Research('20) 편

## 화성공정 불량률 급증



## 배터리 불량으로 인한 품질 이슈 증가

HOME > 업계정보

### LG, "GM과 볼트 EV 배터리 리콜 합의"...1.4조원 배상

LG와 GM간의 배터리 리콜 관련 비용 협상이 최종 타결됐다.

LG에너지솔루션은 12일 입장문을 통해 "당사와 LG전자, 제너럴모터스(GM) 등 3사간의 리콜 관련 합의가 종결됐다"며 "리콜 비용은 1조4000억원으로 예상되며 LG에너지솔루션과 LG전자가 7000억원씩을 분담할 예정"이라고 설명했다.

## 2. 현상 및 개선 기회

불량률 급증으로 인한 문제를 해결하기 위해 3년 내 불량률 Zero화를 목표로 KPI를 설정하였다.

불량률 급증으로 인한 문제			
생산성 저하	납기 지연	고객 불만 증가	신뢰도 저하



성과 지표 선정					
KPI	가중치	현수준	목표수준		
			'23년	'24년	'25년
<b>불량률</b> (%)	70%	3.50	2.30	0.90	0.00
<b>품질 기회비용</b> (억 원)	30%	27.57	18.11	7.09	0.00

1) 불량률(%) : (불량품 수량 ÷ 생산 수량) × 100    2) 품질 기회비용(억 원) = 불량 cell 개수 x cell당 가격

### 3. 분석 계획 – 잠재원인 도출

불량률 급증에 영향을 미치는 잠재원인을 중요도와 분석가능성 측면에서 **5건** 선정하였다.

잠재원인	중요도	분석가능성	합계	선정
Aging 시간	9	9	18	0
충/방전 온도	9	9	18	0
Fitted Capacitor의 기준 불확실	3	3	6	
설비 유의차(열, 연, 단)	9	9	18	0
배터리 전기적 특성 측정의 오류 (전류, 전압, 용량, 임피던스)	9	9	18	0
공정시간 증가에 따른 용량 감소	9	9	18	0
작업 스킬 부족	1	3	3	
제품 두께	3	9	12	

9점 척도 : 1(약), 3(중), 9(강)

# 3. 분석 계획

목적	데이터 분석 계획		
	분석 방법	분석 단위	분석 내용
변수의 분포와 구조 파악	Histogram Box Plot / Line Plot	불량 판정*	온도, 전압, 전류 등 연속형 변수의 데이터 분포와 구조 파악
설비 유의차 분석	Heatmap	불량 판정	설비 유의차와 불량 판정 간의 관계 시각화
		불량률**	설비 유의차와 불량률 간의 관계 시각화
	ANOVA	불량률	설비 별 불량률 차이가 유의한지 알아보기 위해 분석
	Chi-squared	불량 판정	설비 별 불량 빈도 차이가 유의한지 알아보기 위해 분석
영향 인자 도출	Logistic Regression / Decision Tree Random Forest / Gradient Boosting	불량률	분류모델을 이용해 불량률에 영향을 미치는 핵심인자 도출
		불량 판정	분류모델을 이용해 불량 판정에 영향을 미치는 핵심인자 도출
최적 작업 조건 도출	Decision Tree / Random Forest Gradient Boosting	불량 판정	다양한 모델을 활용해 불량 빈도를 최소화하는 최적 작업 조건 도출
모델을 이용한 불량률 예측	Logistic Regression / Decision Tree Random Forest / Gradient Boosting Neural Net	불량 판정	최적 작업 조건 적용 후 불량률 예측

\*불량 판정 : cell의 양품 또는 불량 여부    \*\*불량률(tray 기준, %) : (불량 cell 수 ÷ 전체 cell 수) × 100

## 4. 분석 결과 – 데이터 정제

2021-12-01 ~ 12-17 까지 화성공정에서 LOT 45개에 대한 데이터를 수집했다.

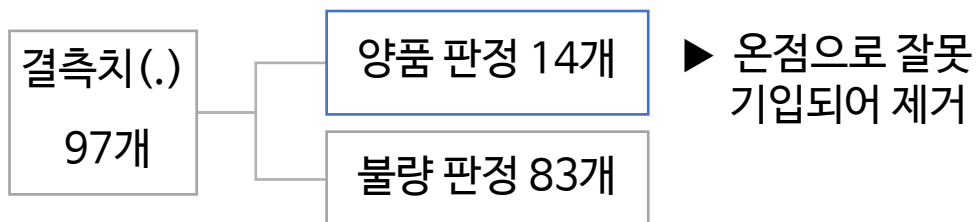
### (1) 결측치 처리

출하 전 공정에서 결측치 97개 (0.21%)가 확인되었으며,  
그 중 14개를 제거했다.

#### 출하 전 공정 프로세스

출하 Aging → OCV 측정 → 불량 판정

불량 판정 받은 배터리 : '불량' 혹은 '.' 기입



\* 불량 판정 : OCV < 기준값

### (2) 이상치 처리

공정 시간 데이터의 1,769개 (4.04%)가 이상치로  
발견되어 제거했다.

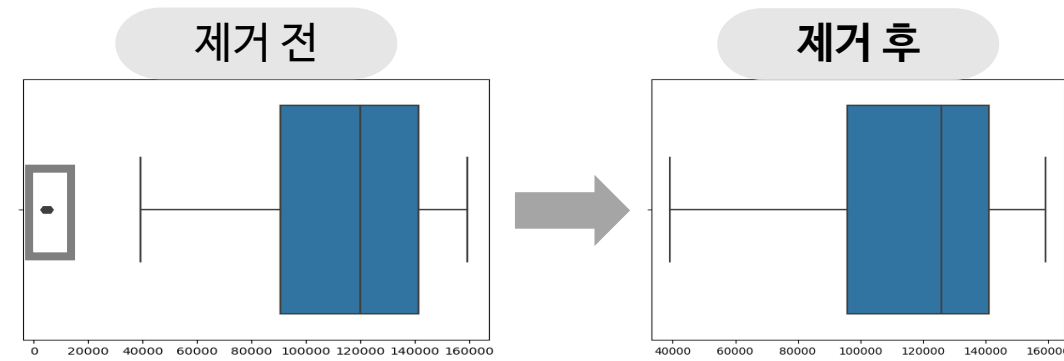
#### 상온 Aging 2단계

1,518개 (3.47%)

#### 출하 Aging 2,3,4단계

251개 (0.35%)

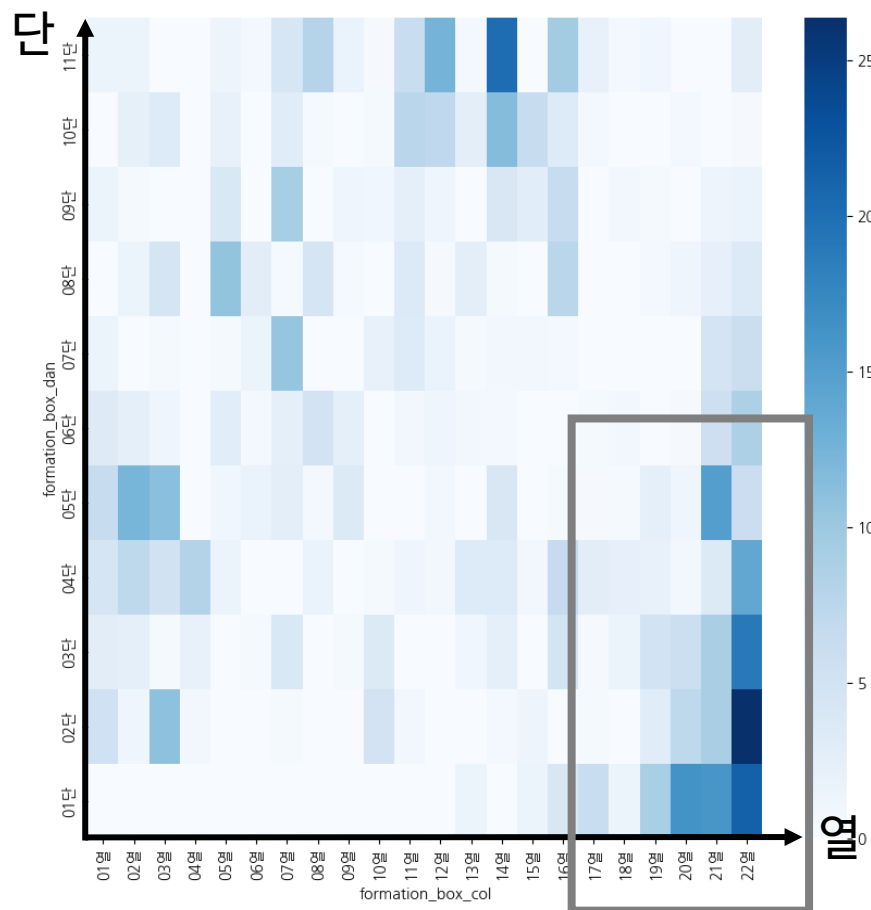
총 1,769개 (4.04%)





## 4. 분석 결과 – 설비 유의차 확인

Formation 단계 중 설비의 22열 등 가장자리 부근에서 높은 불량률이 나타나는 것을 확인하였다. 통계적 검정을 실시한 결과, **설비 위치에 따른 불량 편차가 유의하였다.**



가설 1 : 설비의 열에 따라 불량 발생 빈도 차이가 있다.

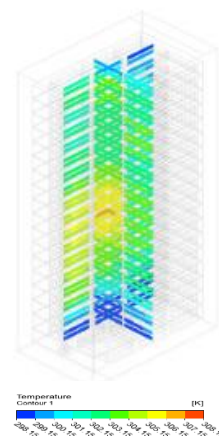
Chi-squared 검정 결과,  $p\text{-value} < 0.001$

따라서, **설비의 열에 따른 불량 발생 빈도 차이는 유의미하다.**

가설 2 : 설비의 열에 따라 불량률에 차이가 있다.

ANOVA 검정 결과,  $p\text{-value} < 0.001$

따라서, **설비의 열에 따른 불량률 차이는 유의미하다.**



구조물 하단에 배기구가 위치하여 대류에 방해를 받아 온도 변화에 민감한 불량률의 원인이 된다.

[참고논문] 강을호, 이준현 and 이진경. (2020). ESS용 Rack 내부의 공기유동에 따른 배터리 열관리에 관한 해석적 연구. 동력시스템공학회지, 24(2), 37-44.

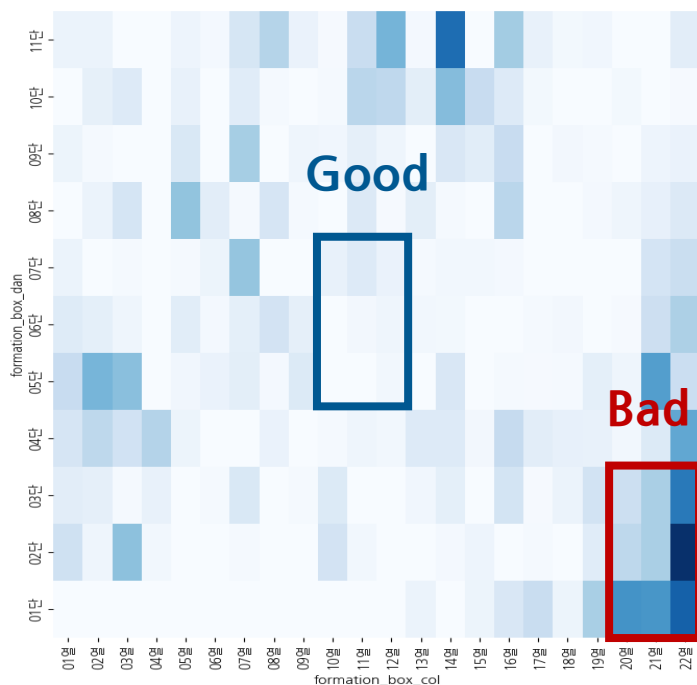
온도 변화가 불량률에 영향을 준다는 사실은 아래 논문의 연구 결과로도 확인된다.

[참고논문] 장경민 and 김광선. (2017). 급격한 온도 변화에 따른 리튬 이온 배터리의 전해질 내 염 농도 분포 특성. 반도체디스플레이기술학회지, 16(1), 11-15.

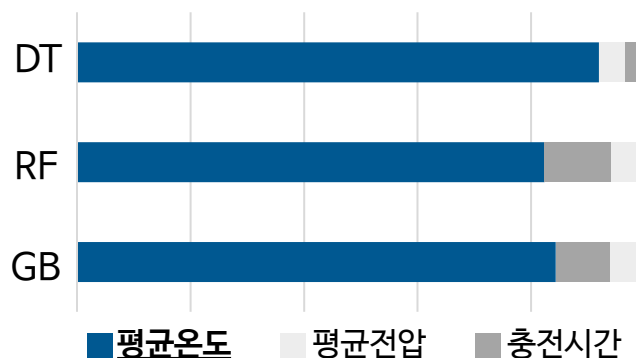
# 4. 분석 결과 – 핵심인자 도출

설비 유의차를 발생시키는 원인을 찾은 결과, 온도가 불량 여부에 가장 중요한 영향을 미치는 것으로 확인하였다.

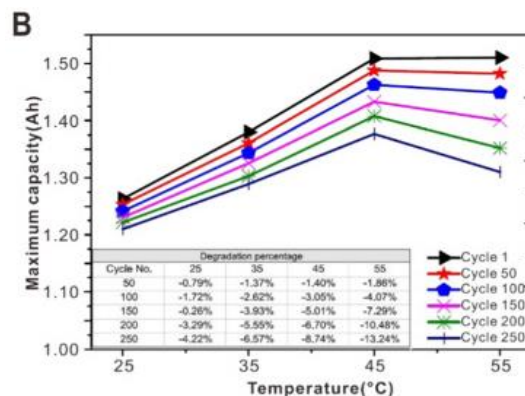
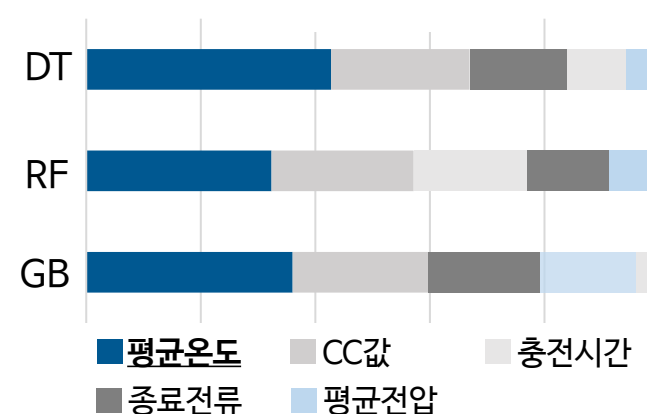
Bad	Good
불량 cell 303개 불량률 17.26%	불량 cell 34개 불량률 1.81%



목표변수 : Bad vs Good Group



목표변수 : Cell 불량 판정

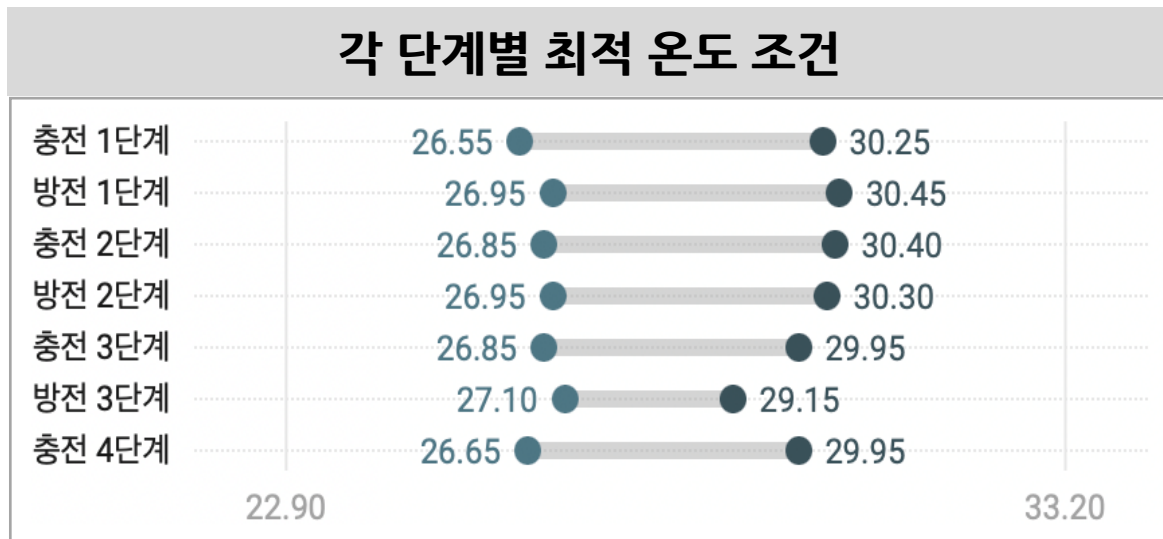


온도에 따른 최대 용량을 사이클 수에 따라 나타낸 그래프이다.  
모두 동일한 형태로 온도의 영향을 받고 있다.

[참고논문] Shuai Ma, (2018), Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review, Progress in Natural Science: Materials International, 653-666.

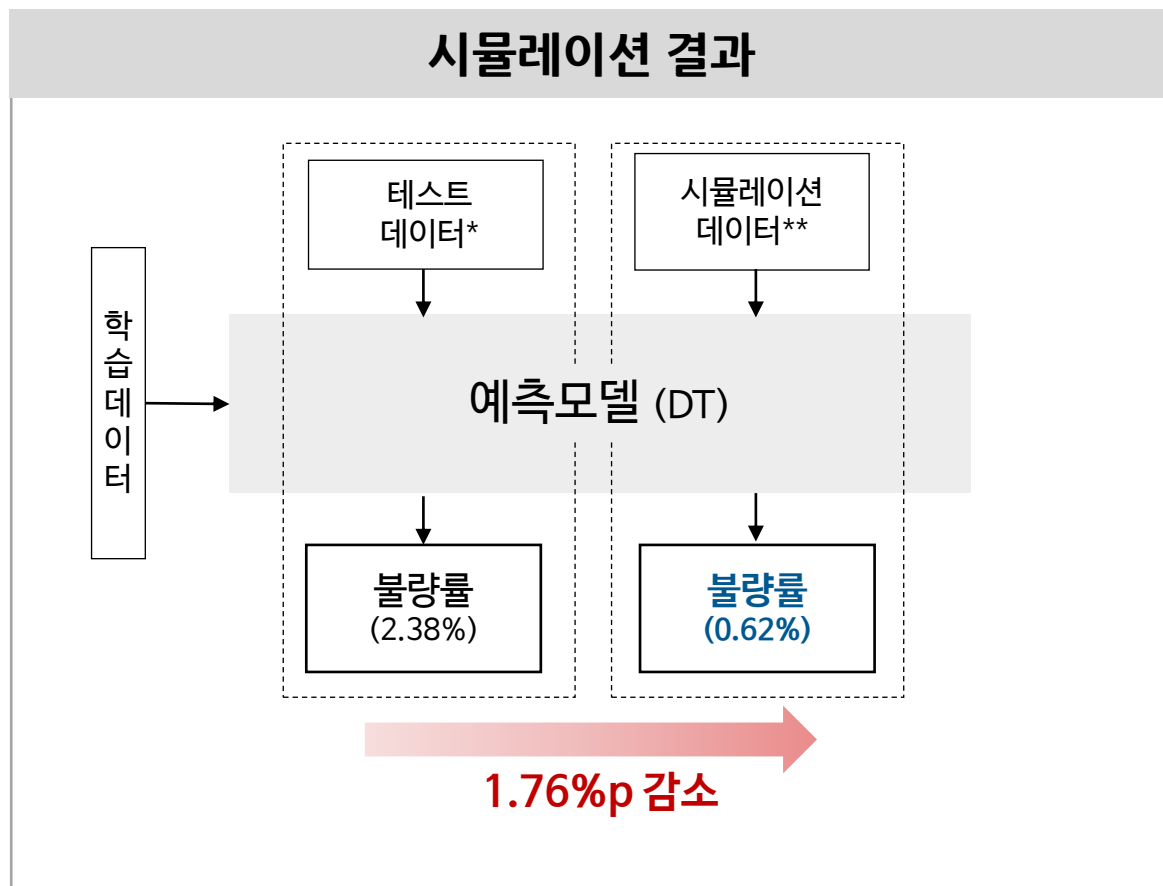
# 4. 분석 결과 – 최적조건 도출 및 시뮬레이션 결과

Formation 각 단계에서 불량률을 최소화하는 **최적 온도 조건을 도출**하였다. 도출한 최적 온도로 시뮬레이션한 결과 불량률이 1.76%p 감소하였다.



**온도 구간 별 불량률 비교**

Formation 충전 1단계			
온도 조건	26.55℃ 이하	26.55 ~ 30.25℃	30.25℃ 이상
불량률	8.82% (683/7,741)	1.59% (532/33,290)	9.15% (86/940)



\* 테스트 데이터 : 기존 온도 적용

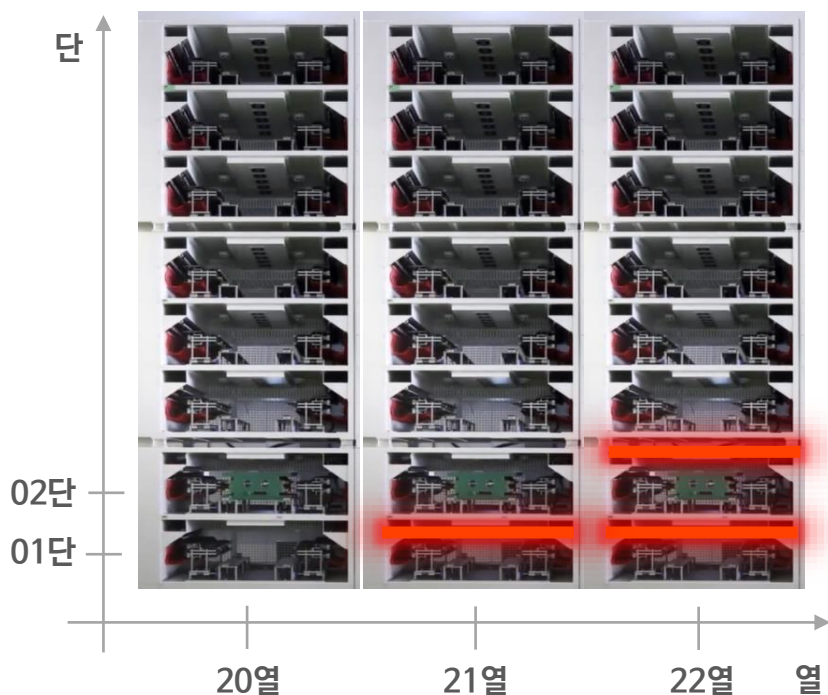
\*\* 시뮬레이션 데이터 : 도출한 최적 온도를 적용

# 5. 개선안 및 적용 방안 – 열선 설치

Formation에서 불량률이 높게 측정된 열과 단에 열선을 설치하여 온도 조건을 최적화한다.

불량률이 **2.0%p** 감소하여, 품질 기회비용 **15.8 억 원** 절감 효과를 기대할 수 있다.

## 열선 설치



## 품질 기회비용 계산식

감소된 불량 개수<sup>1)</sup> 21,002개



21,002개

×

셀 1개 가격<sup>2)</sup>

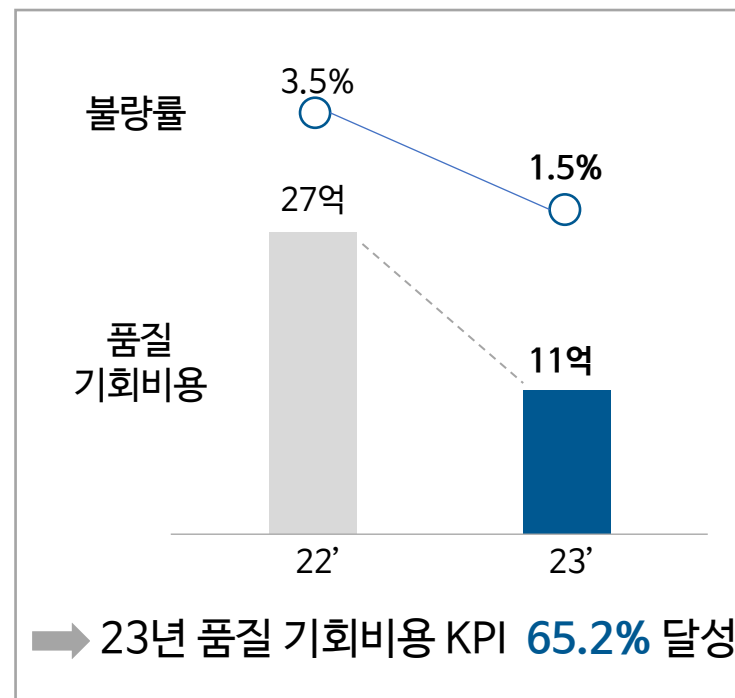


75,000원

15.8 억 원

➔ 연간 품질 기회비용 **42.8%** 감소

## 예상 품질기회비용



1) 기존 불량수 36,753개 - 개선 불량수 5,751개

2) 배터리 1kWh당 가격 = 150달러, cell 1개 용량 = 0.5kWh, 1달러 = 1,300원

# 5. 개선안 및 적용 방안 – 제약 조건 하 최적화

Formation 최적 조건에서 벗어나 불량 발생 확률이 높은 cell을, **Power Charging 단계에서 설비의 위치를 조절**하여 불량 발생 확률 감소를 기대할 수 있다.

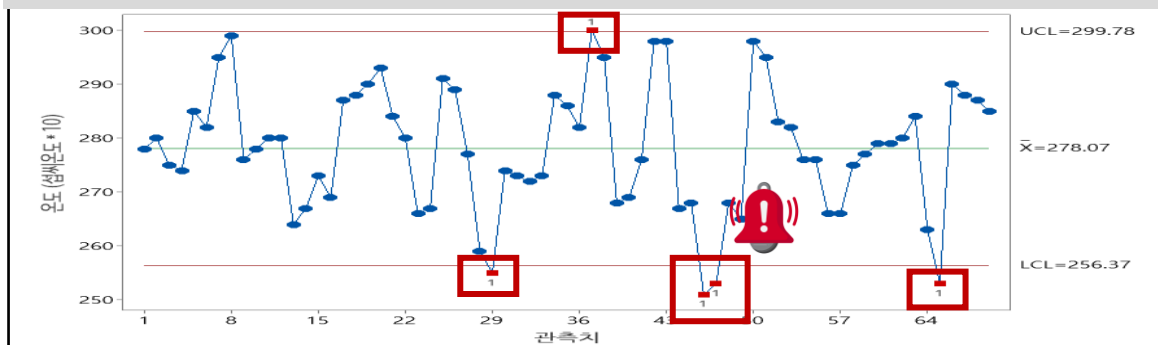
Formation 설비			Power Charging 설비		
	온도(°C)	불량률(%)		온도(°C)	불량률(%)
6단	28.60	0.81	9열	27.65	2.17
5단	28.08	0.01	8열	27.78	1.55
11열			7열	27.30	2.36
⋮			⋮		
3단	25.00	19.00	3열	26.17	4.12
2단	25.36	26.40	2열	25.75	3.40
1단	25.24	21.40	1열	26.00	6.21
22열			1단		

공정 순서		
Aging	Formation	Power Charging
설비 위치에 따른 불량률 감소		
	최적 조건이 아닌 Formation	Power Charging에서 온도 조절
공정 조건	27.10 ~ 29.00 °C 이외의 범위	27.10 ~ 30.25°C
불량률	6.51% (969/14,879)	3.11% (462/14,879)

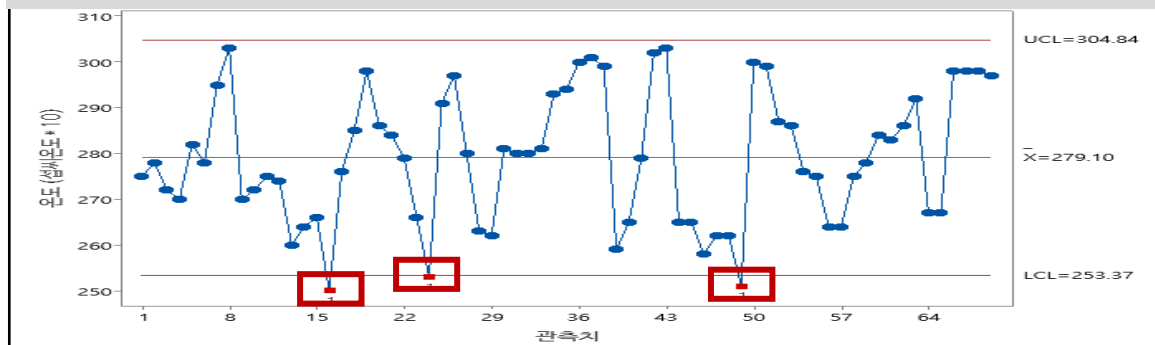
# 5. 개선안 및 적용 방안 – I 관리도

Formation 단계에서 3시그마 수준의 관리 한계선 이내로 I 관리도를 만들었다. 전·후 관리도를 비교하여 **개선 효과를 입증하고, 추후 공정의 안정성을 모니터링** 할 수 있다.

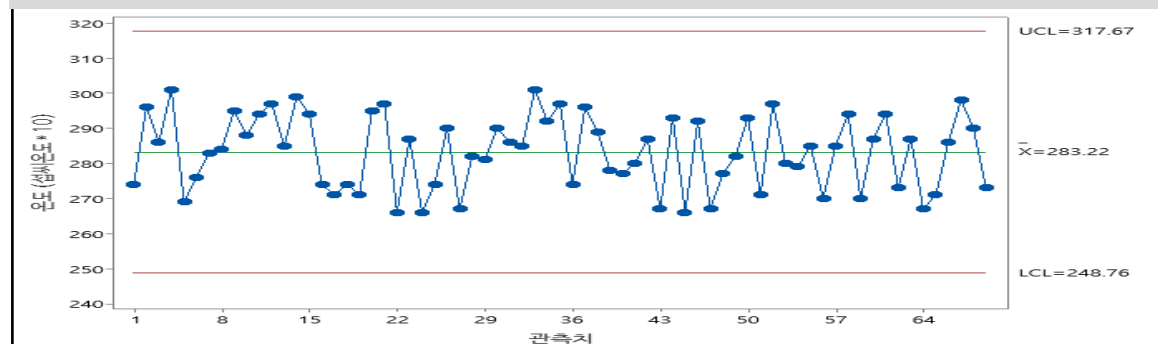
관리 전 충전 1단계의 평균온도 I 관리도



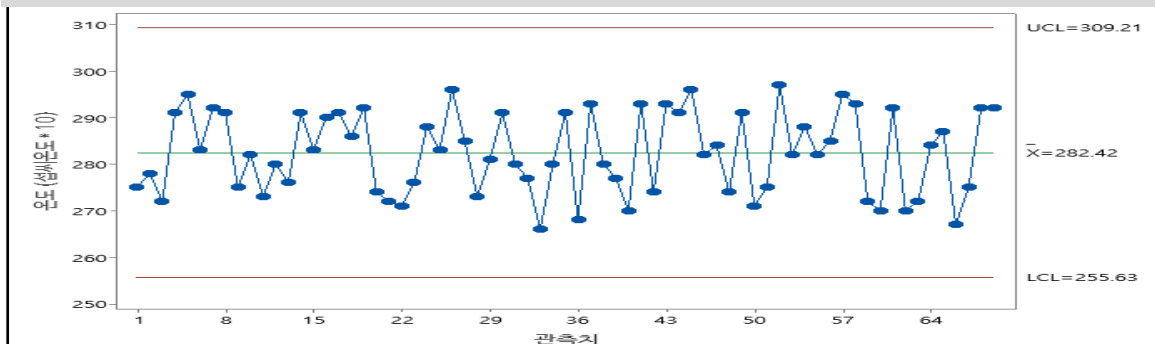
관리 전 충전 4단계의 평균온도 I 관리도



관리 후 충전 1단계의 평균온도 I 관리도



관리 후 충전 4단계의 평균온도 I 관리도



## 5. 개선안 및 적용 방안 – Pilot 계획

	내용
목적	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 개선안 실제 적용을 통한 개선 결과 검증</li> <li>- 도출된 개선안 중 불량이 최소화되는 최적안을 선정하고, 추가 개선 사항을 도출</li> <li>- 확대 적용에 필요한 비용을 예측 및 확보하고, 확대 적용함</li> </ul>
Pilot 적용 개요	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 적용 대상 : 화성공정 중 충 · 방전공정 (LOT 5개)</li> <li>- 적용 프로세스 : 전체 프로세스 5개 중 2개 (Formation, Power Charging)</li> <li>- 적용 일정 : 2022년 12월 01일 ~ 2022년 12월 14일 (14일) 2022년 12월 18일 ~ 2022년 12월 31일 (14일)</li> </ul>
현업 요청 사항	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 공장장 : 공정 설비에 개선안 적용 협조 요청</li> <li>- 공정 엔지니어 : 개선안에 명시된 최적 온도 조정 요청</li> </ul>