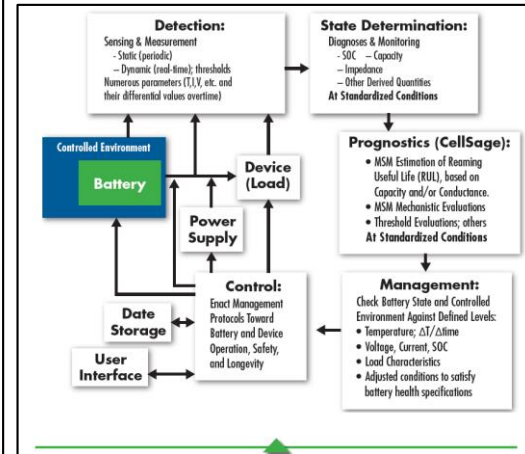
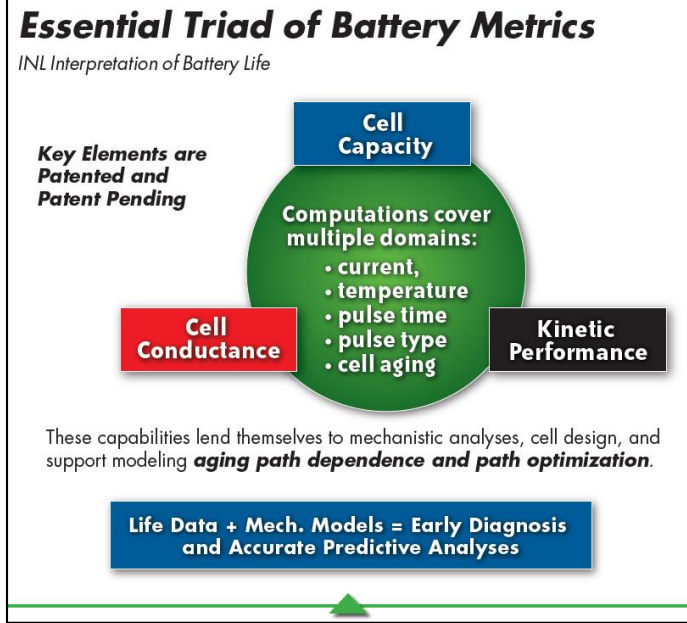
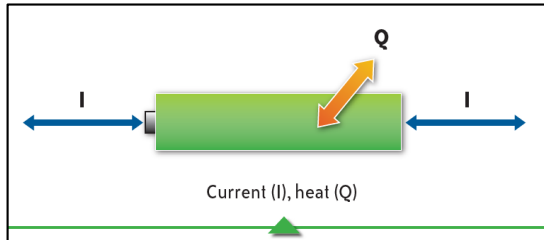


배터리 수명 평가 및 최적화

노화경로 기반 CellSage 배터리 Cycle Life 진단 및 예지 솔루션



Contents

1. 배터리 건전성 진단 및 예지
2. 노화 경로 의존 (Aging Path Dependence)
3. CellSage 소프트웨어 Demonstration

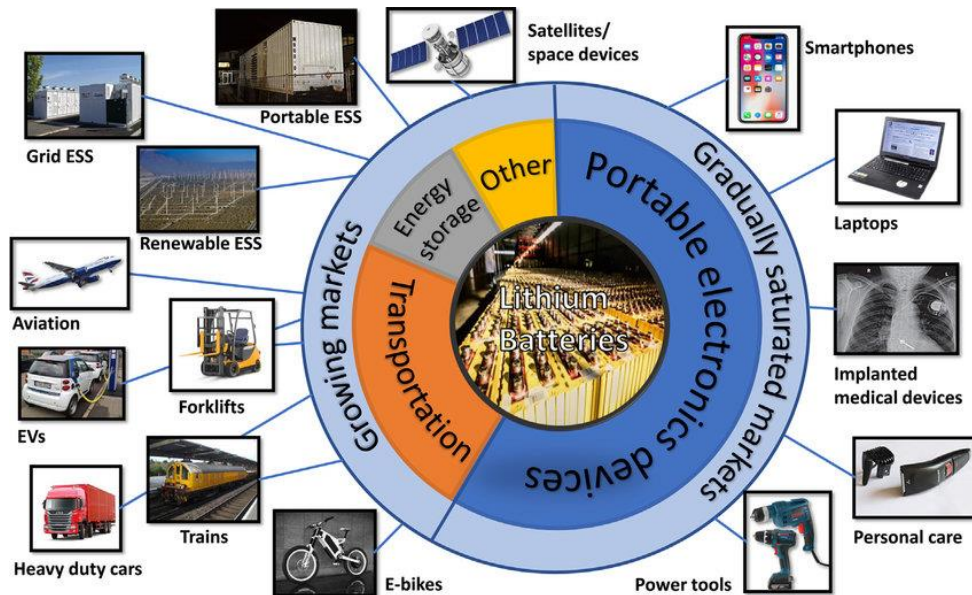


1. 배터리 건전성 진단 및 예지

개요

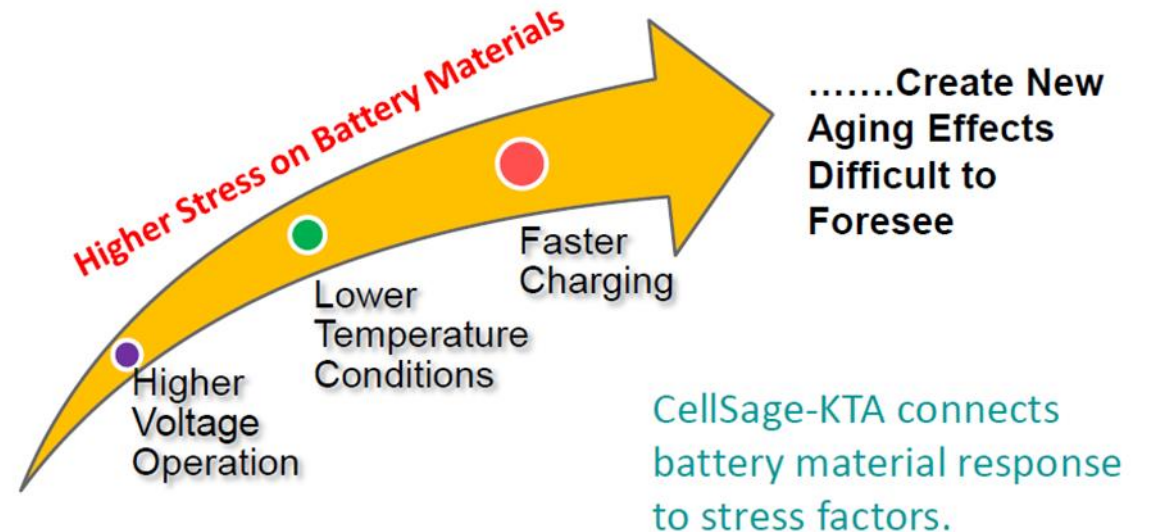
- 배터리가 노화되고 조건이 변화함에 따라 배터리시스템의 운영가능 범위를 정확하게 결정해야 하는 산업계 필요와 요구.
- 다양한 용도의 도메인에 배터리가 사용됨에 따라, 동적인 임무 사이클 조건, 환경적 요소, 배터리 팩내 각 셀마다 다른 노화정도등 복잡한 상황에 맞춘 수명예측 필요.
- 배터리에 부여된 새로운 요구는 예측하기 어려운 노화 효과를 생성함.

리튬 배터리 응용환경



Lithium-ion battery data and where to find it, Energy and AI, 2021

배터리에 대한 새로운 요구

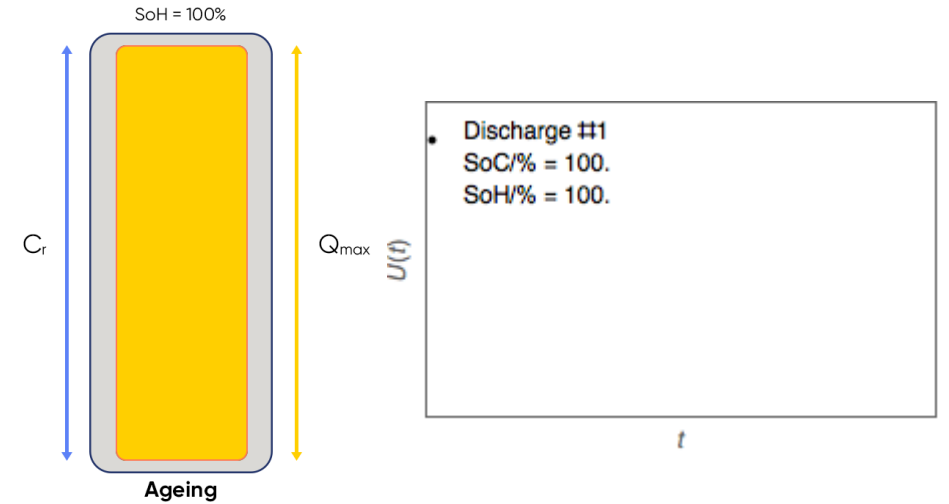


배터리 건전성 진단 및 예지

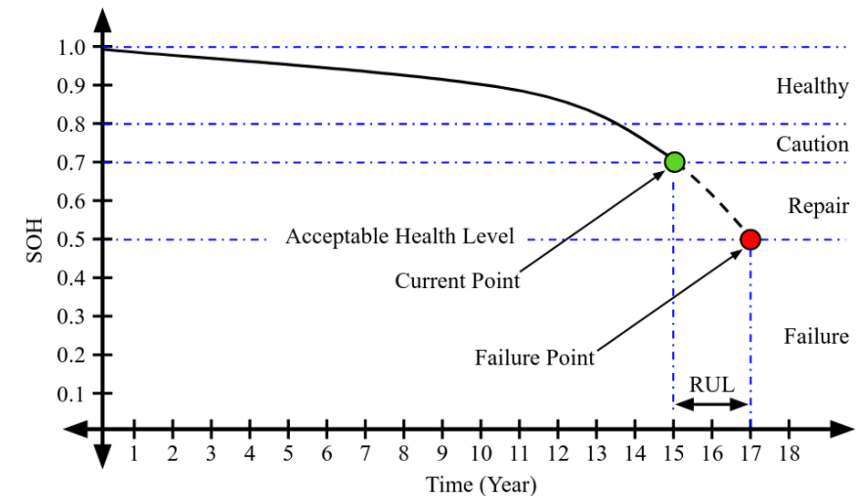
- 배터리 건강상태(Battery State of Health, SOH): 특정한 목표성능 관점에서 노화된 배터리의 초기 성능대비 현재 상태

$$SOH = \frac{Q_{Present}}{Q_{Fresh}}$$

배터리 능력 (현재 상태) ← $Q_{Present}$
배터리 능력 (초기 상태) ← Q_{Fresh}

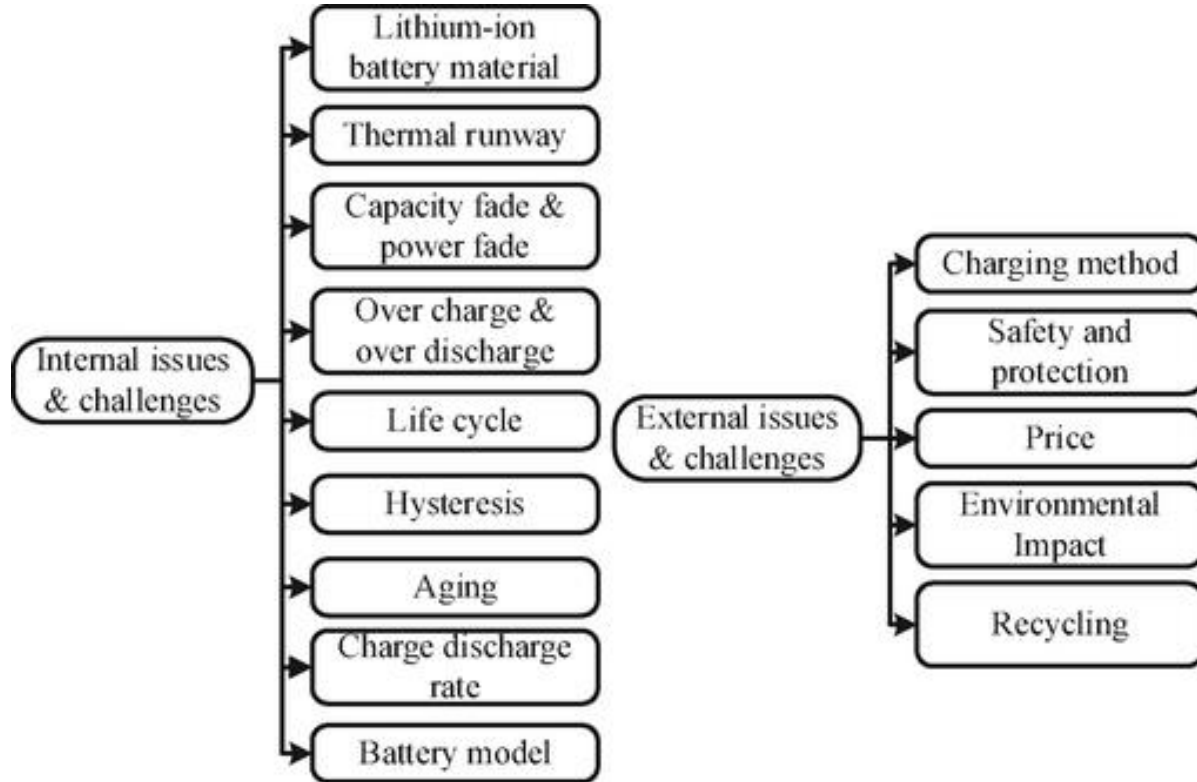


- 배터리 잔존수명(Battery Remaining Useful Life, RUL): 배터리의 SOH가 허용가능한 건전성 수준이 유지될 때까지 남아있는 잔여시간 또는 사이클 수 .



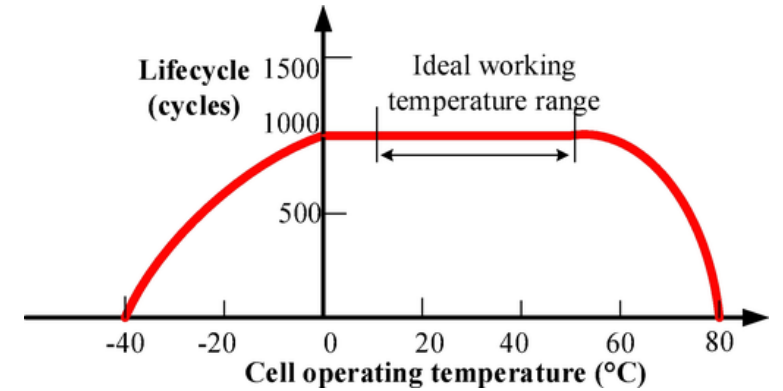
리튬이온배터리의 SOH & RUL 예측 도전과제

- 수 많은 스트레스 요인들과 이들 간의 조합을 모두 고려할 수 있는 강력한 모델이 필요

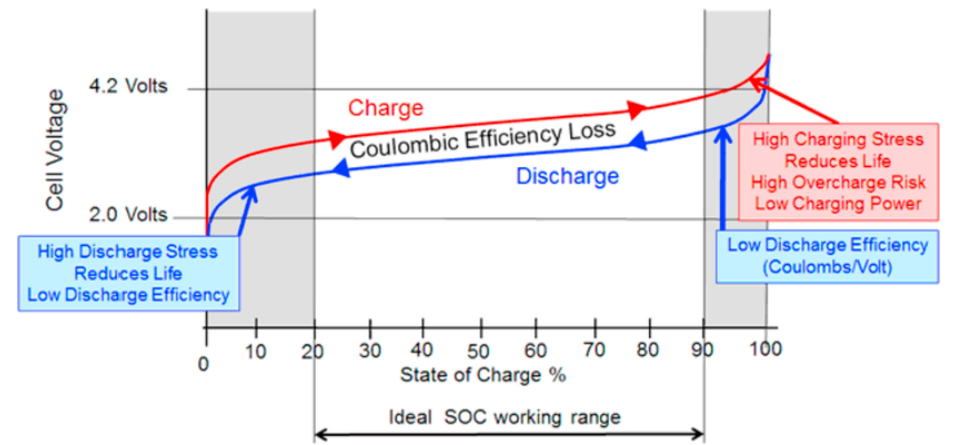


이슈 와 도전과제 분류

A review of state of health and remaining useful life estimation methods for lithium-ion battery in electric vehicles: Challenges and recommendations, 2018



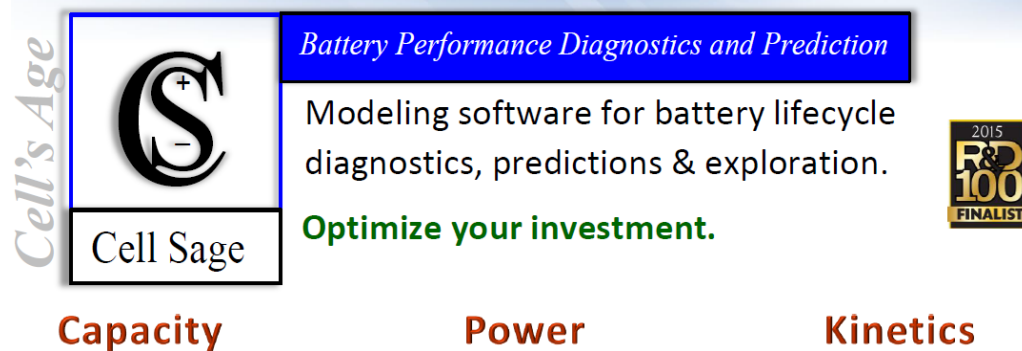
Battery life cycle relation with temperature (Hannan et al., 2018a, b)



Over-charged and over-discharged effects on battery (Hannan et al., 2018a, b)

CellSage

- CellSage (Cell's Age 라고 호칭) 는 혁신적인 배터리 및 셀 노화 예측용 시뮬레이션 소프트웨어로 10여년간에 걸친 전기화학, 물리학, 열역학 연구의 결과로 미국내 6개 특허 제품.
- CellSage 는 시뮬레이션된 배터리 수명사이클 동안 서로 다른 사용 프로파일에 반응하여 여러 배터리 화학조성이 어떻게 노화되고 열화되는 지를 평가.
- 이 선구적 시뮬레이션 플랫폼은 배터리 최종 사용자들이 배터리 성능과 배터리 건전성에 대한 운영 및 환경적 스트레스 요인들에 얼마나 영향을 받는지를 What-if 시나리오를 생성하여 예측할 수 있도록 함. CellSage 가 제공하는 이 시뮬레이션 결과와 분석은 주어진 미션에 가장 적합한 배터리를 선정할 수 있도록 도와줌.
- CellSage 는 SOH와 RUL을 결정할 수 있도록 도와주는 최신의 진단 및 건전성 관리(PHM)소프트웨어 도구.



Cell's Age

S

Cell Sage

Battery Performance Diagnostics and Prediction

Modeling software for battery lifecycle diagnostics, predictions & exploration.

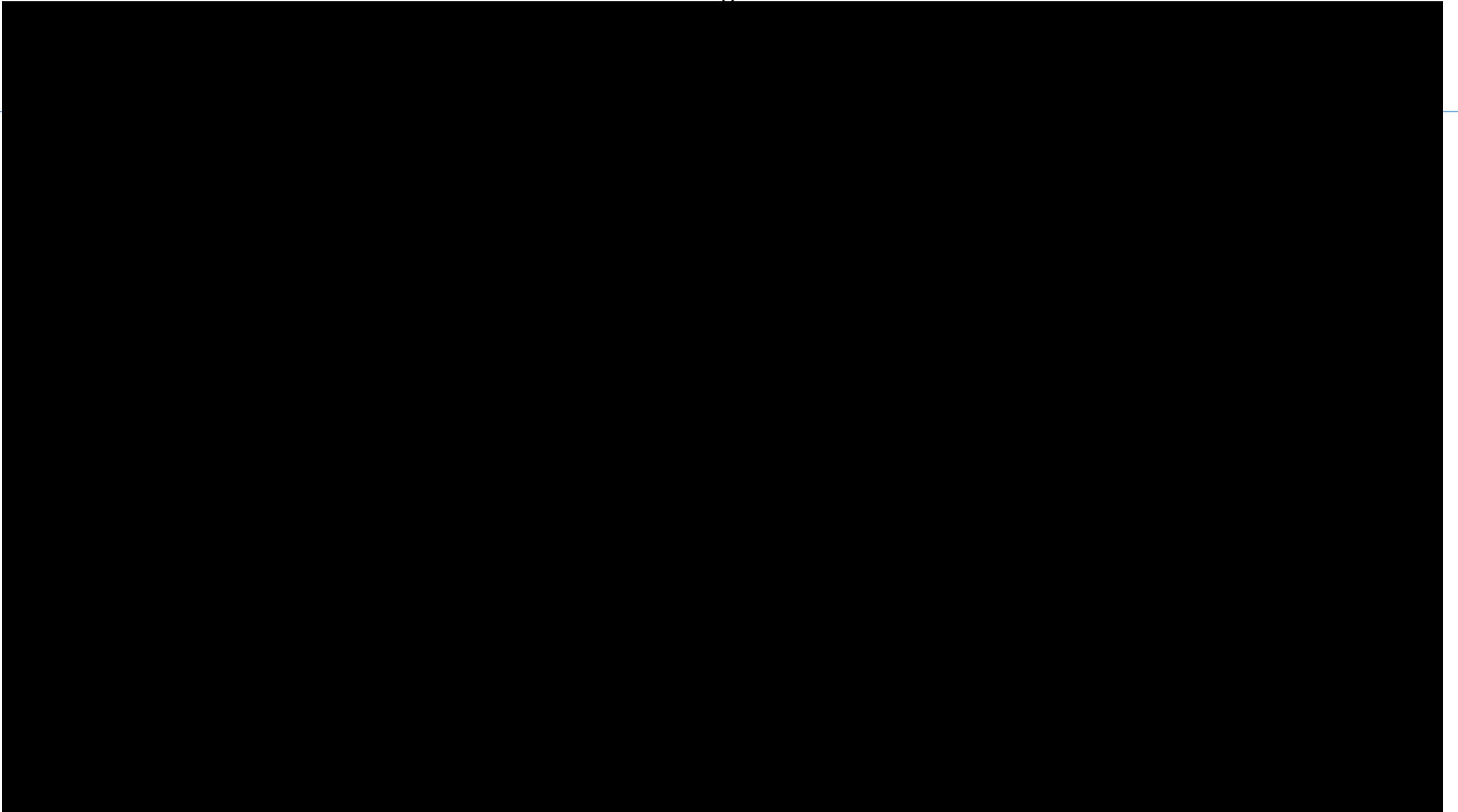
Optimize your investment.

2015 F&D 100 FINALIST

Capacity **Power** **Kinetics**

Key Model Parameters (partial list): *any combination, can vary over time.*

- Temperature
- SOC
- Cycling Regime (cal- vs cyc-Life)
- Cycling Magnitude/Freq.
- Daily Thermal Cycling (DTC) Range
- DTC Frequency
- City of Interest
- Cell Chemistry

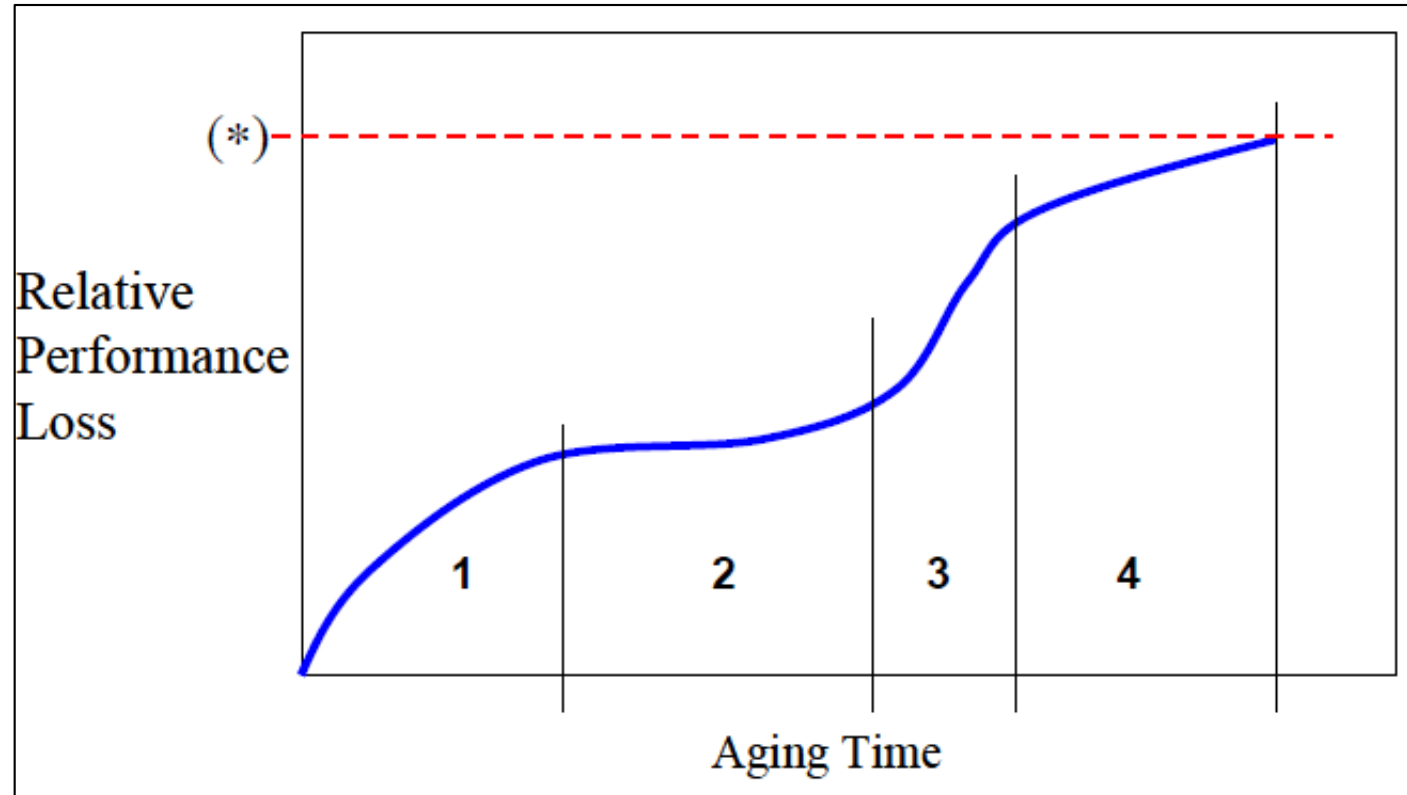




2. 노화 경로 의존 (Aging Path Dependence)

노화 경로 의존

- 예시 : 4가지 서로 다른 노화조건 기간을 무작위로 재배열하면 마지막 시점의 상대적 성능저하값(*)이 다름



- 셀노화경로 또는 열화는 리튬재고량 손실(Loss of Lithium Inventory, LLI)와 활성물질손실(Loss of Active Material, LAM)임. 이런 효과의 증상은 용량손실(Capacity Fade)와 파워손실(Power Fade)로 나타남.
- 이러한 고장메커니즘은 피할 수 없고 조건에 따라서 부분적으로 회복될 수도 있지만 어떤 경우에는 회복되지 못함.
- LLI 와 LAM은 임무요구사항의 올바른 선택, SOC 관리, 열관리를 통해서 완화가능.
- 이러한 조건들이 CellSage 를 통해서 실험적으로 시뮬레이션 될 수 있음.

CellSage - 노화 경로 의존

노화 파라미터(스트레스 요인들)

방전 요인:

T, SOC, $\Delta SOC(t_{pulse})$, calL vs cycl, 펄스 크기, 펄스 모드(constant I, P, or V?)

충전 요인:

위와 비슷. 과도하고 예측불가능한 노화결과를 피하기 위해 제조사 충전절차 사용

기타요인:

압력, 기계적 충격, 열사이클링 등.

광범위한 시험 조합은 상당한 전담자원을 필요로 함.



Given an Aging Response Ψ_{j,i^*} (e.g., capacity loss):

$$\Psi_{j,i^*} = \Psi_{j,BL} + \left[\begin{aligned} & \left(\frac{\partial \Psi_j}{\partial T} dT \right)_{SOC,cyc} + \left(\frac{\partial \Psi_j}{\partial SOC} dSOC \right)_{T,cyc} + \left(\frac{\partial \Psi_j}{\partial cyc} dcyc \right)_{SOC,T} + \dots \\ & + \left\{ \left(\frac{\partial \Psi_j}{\partial SOC} \frac{\partial SOC}{\partial T} dT \right)_{cyc} + \left(\frac{\partial \Psi_j}{\partial cyc} \frac{\partial cyc}{\partial T} dT \right)_{SOC} + \dots \right\} \\ & + \{ \text{higher order terms} \} \end{aligned} \right]_{i^*}$$

Or,

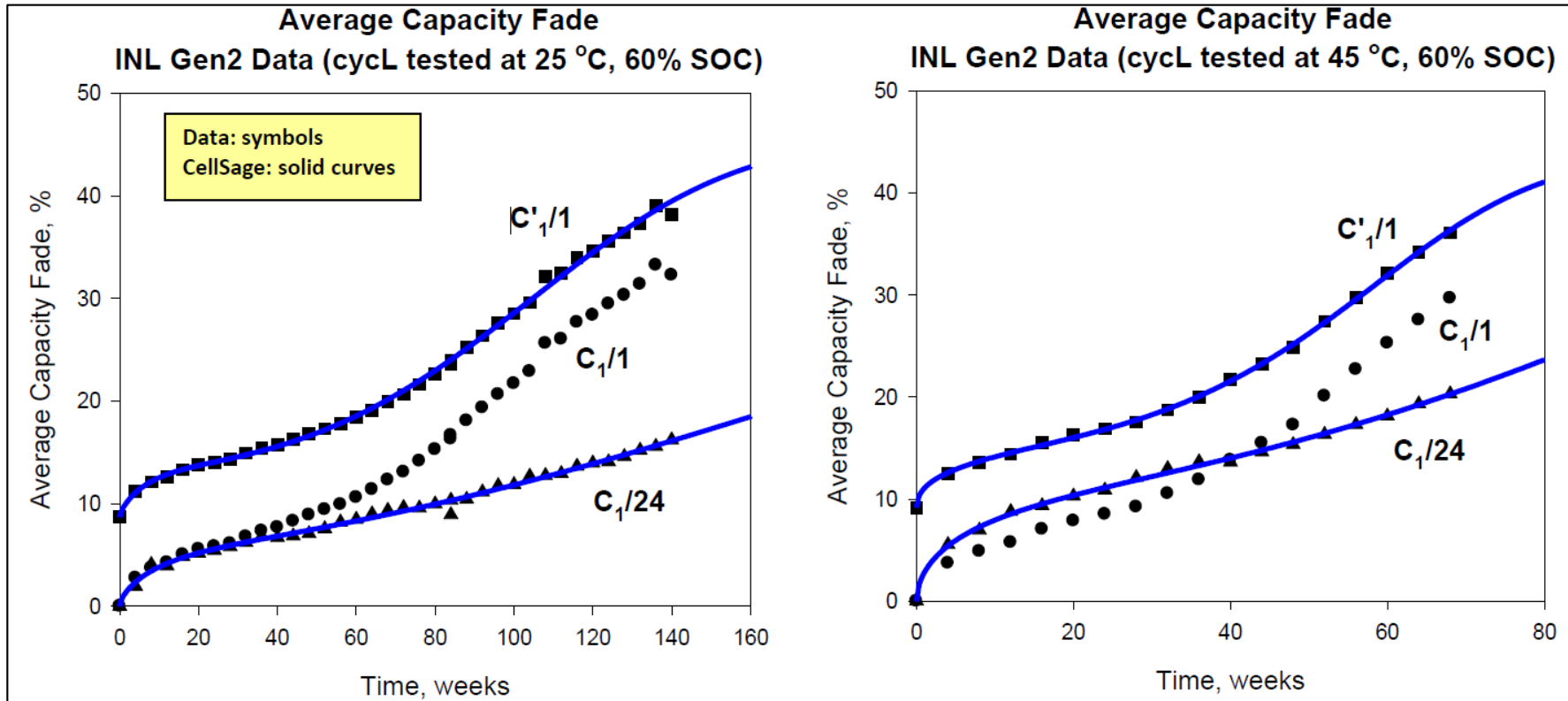
$$\Psi_{j,i^*} = \Psi_{j,BL} + \left[\begin{aligned} & \Delta \Psi_{j,T} + \Delta \Psi_{j,SOC} + \Delta \Psi_{j,cyc} + \dots \\ & + \{ \Delta \Psi_{j,SOC|T} + \Delta \Psi_{j,cyc|T} + \dots \} \\ & + \{ \text{higher order terms} \} \end{aligned} \right]_{i^*}$$

And then, $\Psi_{i^*} = \sum_j^{n_j} \Psi_{j,i^*}$ for n_j contributing mechanisms

노화경로의존

(임무 요구사항)

- 부여된 임무조건에 따라 용량손실이 다름



Gen2 Chemistry
(NCA/graphite)

C/1 은 한시간에 걸쳐
완전히 방전

C'/1 은 초기
용량손실(노화상태)를
가진 것으로 한 시간에
걸쳐 완전히 방전

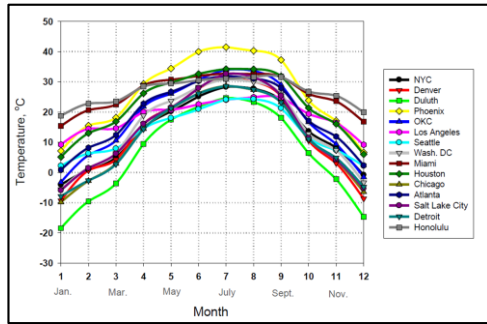
C/24 는 24시간에 걸쳐
완전히 방전

C/24 가 C/1보다는 용량손실이 적고, 높은 온도에서 용량손실이 큼

노화경로의존 (환경조건)

- 환경조건 및 운용도시에 따라 용량손실이 다름

선정된 미국 도시 연간 온도 프로파일
(계절적 평균값 조정 T_{max} , T_{min} , T_{mean})



출처: NOAA National Data Centers
(<http://ols.nndc.noaa.gov/plolstore/plsql/olstore.prodspecific?prodnum=C00095-PUB-A0001#TABLES>)

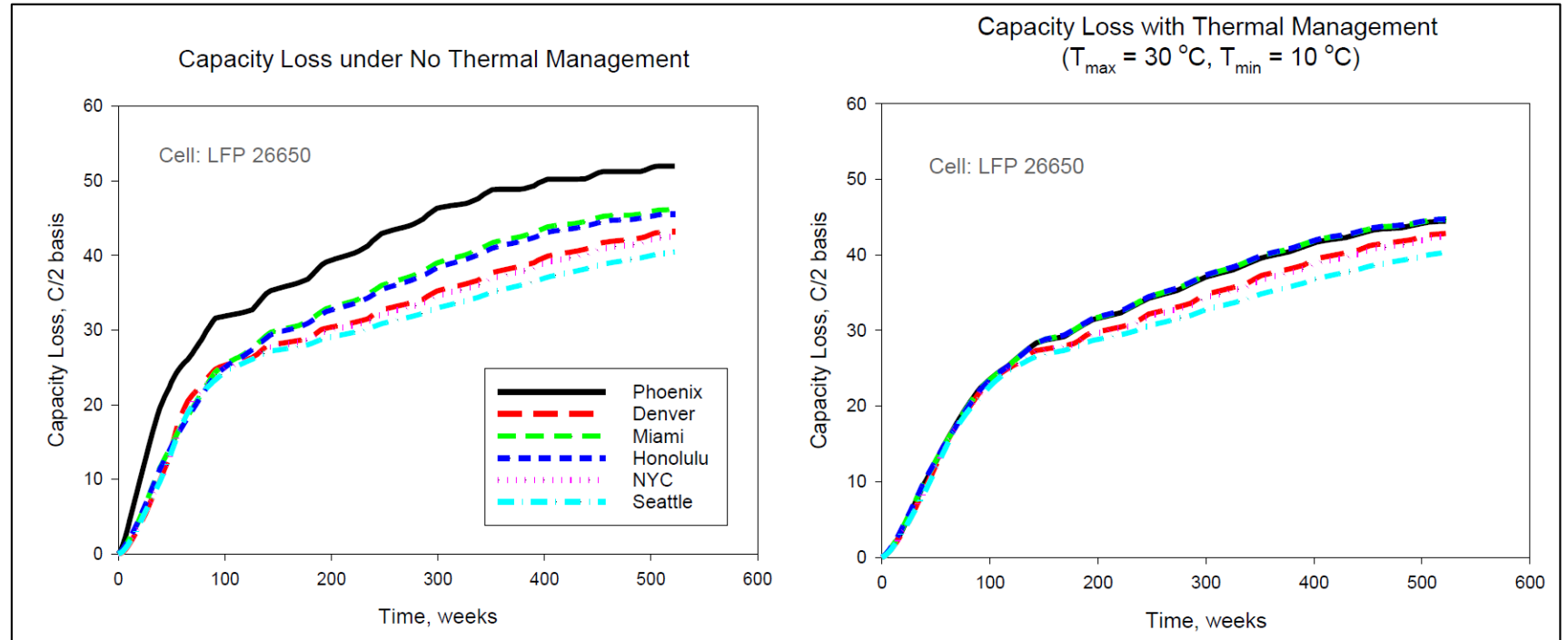
Without Thermal Management



With Thermal Management

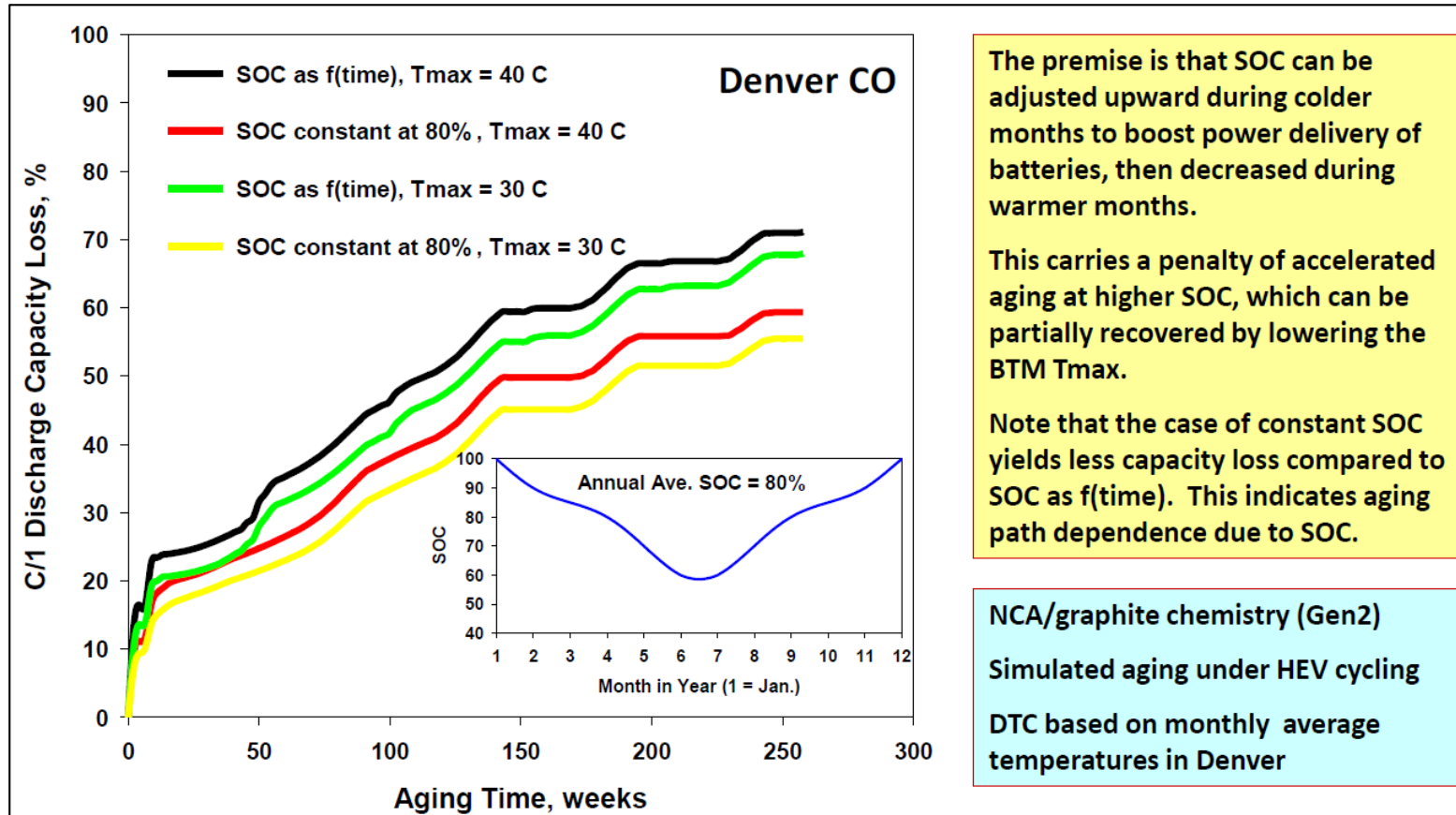


LFP 셀의 도시별 노화차이(열관리 적용 차이)



노화경로의존 (SOC 관리)

- 배터리 파워를 높이기 위해 추운 달에 SOC를 높일 수 있지만, SOC 80%로 일정하게 유지하는 것에 비해 용량손실이 높음.



The premise is that SOC can be adjusted upward during colder months to boost power delivery of batteries, then decreased during warmer months.

This carries a penalty of accelerated aging at higher SOC, which can be partially recovered by lowering the BTM T_{max} .

Note that the case of constant SOC yields less capacity loss compared to SOC as $f(\text{time})$. This indicates aging path dependence due to SOC.

NCA/graphite chemistry (Gen2)

Simulated aging under HEV cycling

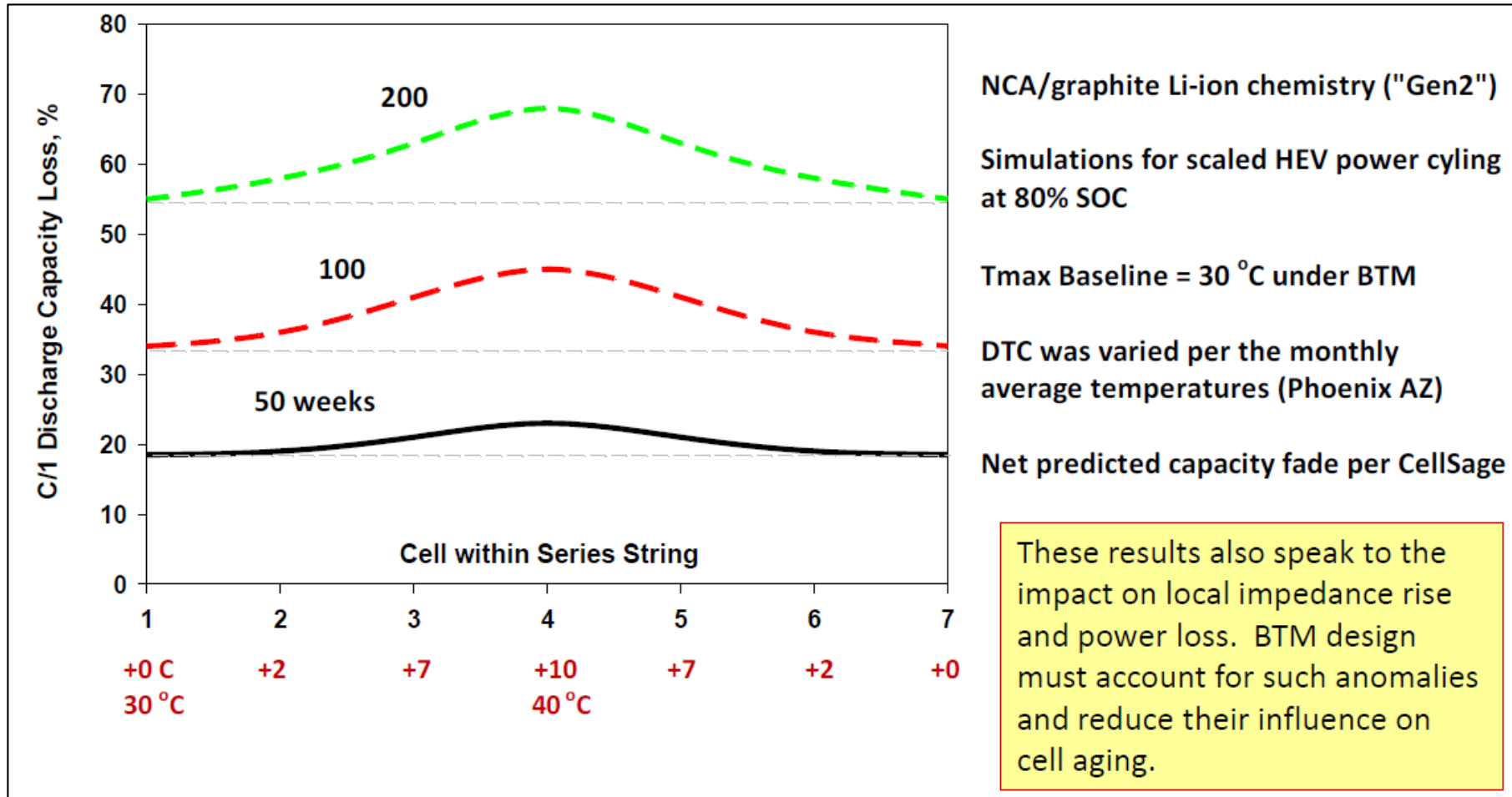
DTC based on monthly average temperatures in Denver

즉, 열관리를 통해 용량손실을 줄일 수 있음. SOC, ΔSOC 경로의 존성

노화경로의존

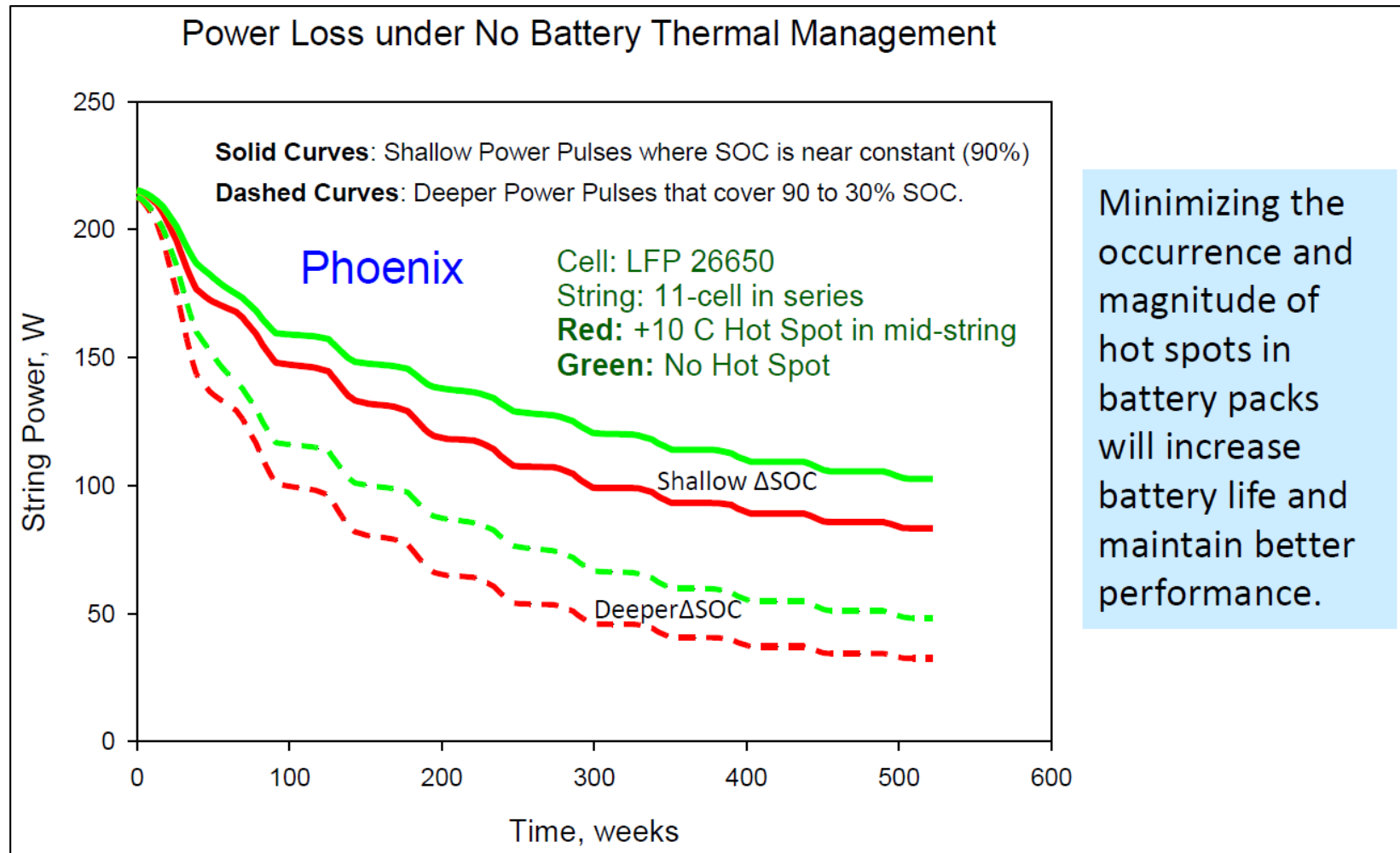
(스트링 구성요소 열적이상)

- 한 스트링 내에서 대칭적 온도집중으로 방전용량손실의 차이 발생

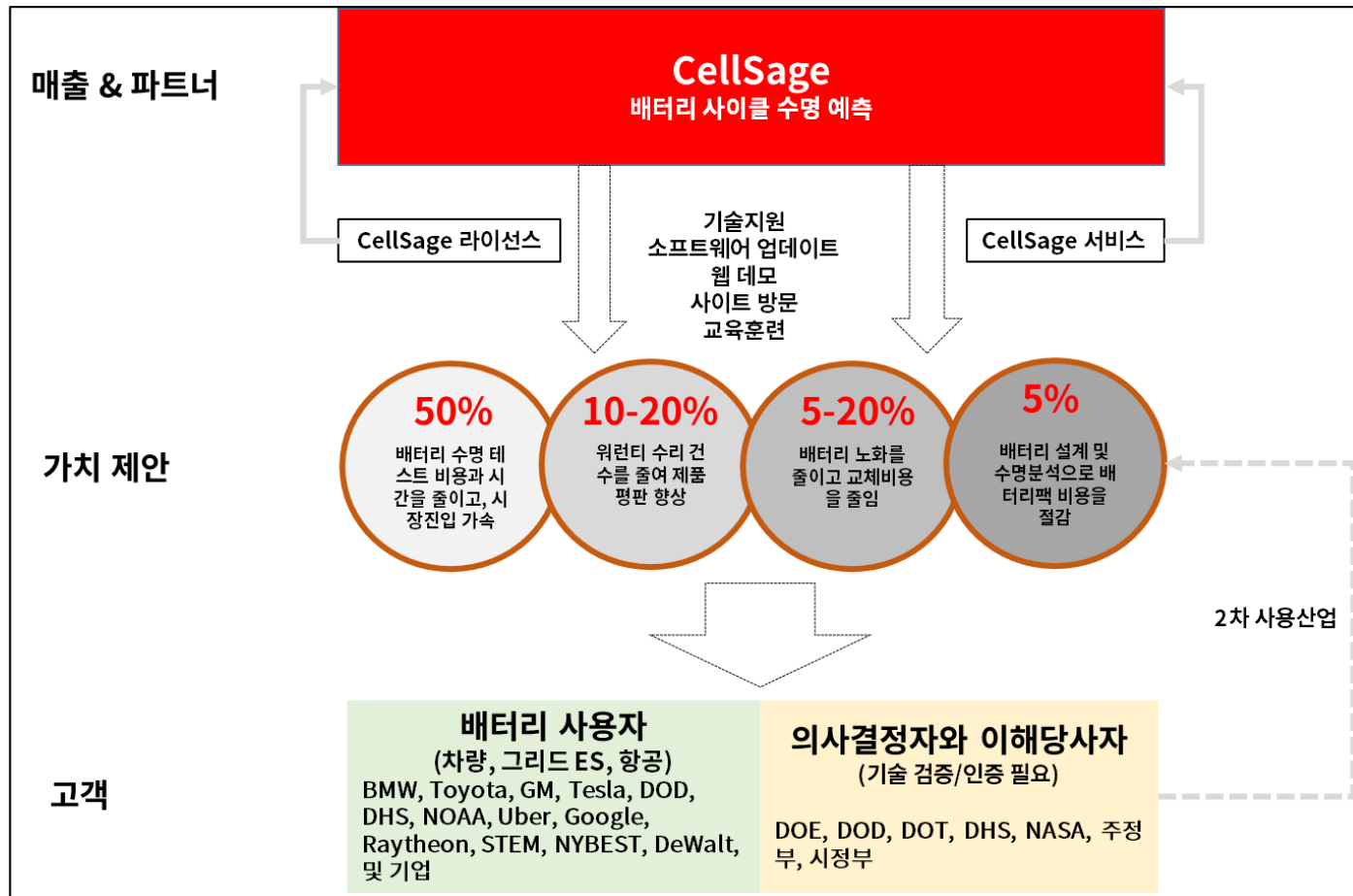


노화경로의존 (파워손실)

- 열집중(중앙부 +10도)이 있는 경우 없는 경우보다 스트링 파워가 낮음.



요약 (CellSage)



- 배터리 및 BMS 설계 지원
- 응용환경에 최적화된 사용
- 신규사용 및 재사용 지원
- 실시간 진단 및 예지 기능(Embedded)

요약

(CellSage)

- CellSage는 임의의 조건에서 배터리의 성능을 진단하고 예측하여 배터리의 설계와 성능, 관리를 개선하는 데 활용할 수 있음. 노화 경로에 따른 차이를 이용하게 되면 배터리를 더 오래 쓰고 품질보증요건을 만족하도록 사용 조건 최적화에 대한 통찰을 구할 수 있음.
- CellSage에 내장된 INL의 물리 모델이 개발됨으로써, 다양한 사용 조건에서 배터리 성능 한계와 노화 메커니즘을 결정하는 경로 의존에 대한 중요한 진전이 이루어짐. 이에 따라, 연간 기온 사이클과 SOC, 사이클링 형태와 크기, 일간 온도 사이클링 등의 영향을 포함하여 복잡한 사용 조건이 시뮬레이션될 수 있음.
- CellSage를 이용하면 프로젝트 계획 지원, 투자 위험 축소, 사용중인 시스템의 모니터링, 배터리 수명을 최대화하기 위한 제어등을 수행하여, 응용분야마다 고유한 배터리 수명추이 분석을 할 수 있음.
- 앞으로 CellSage에는 더 많은 도시에 대한 온도 프로파일, 새로운 화학물질, 내장된 CBM/PHM 버전 등이 개발되어 포함될 예정임.





3. CellSage 소프트웨어 Demonstration

CellSage 인터페이스

- CellSage 사용자 인터페이스는 사용하기 쉬우며 레커시 명령어실행방법과 GUI를 모두 지원



입력과 출력

- 전형적인 입력 파라미터

- 셀 화학조성(Cell Chemistry)
- 시뮬레이션 대상 기간(최대 8년)
- SOC(State of Charge)
- 상대적 사이클링 심각도(Relative Cycling Severity)
- 온도 모드(하나 또는 여러 개 미국 도시지역에 대한 단일 온도 또는 연간 온도 프로파일)
- 열관리 (Thermal Management, TM) 조건
- 일일 열 사이클링(Daily Thermal Cycling, DTC) 조건
- 스트링 분석 조건

- 전형적인 출력파일

- CS_Path-Dependence.txt: 경로의존노화를 제공하는 시뮬레이션 결과 파일
- CS_Path-Dependence-Dcc.txt: DCC시뮬레이션모듈에서 얻어진 추가적인 데이터 출력을 포함하는 더 상세한 경로의존 내용
- CS_String_Analysis.txt: 스트링 분석을 제공하는 시뮬레이션 결과 출력 파일
- CS_Diagnostics.txt: 회귀모델 시뮬레이션과 관련된 정보를 제공하는 파일
- Parameters.txt: 주어진 시뮬레이션을 위해 입력된 시뮬레이션 파라미터 각각에 대한 정보를 가진 파일

파라미터

상세 사이클링 조건(Detailed Cycling Conditions, DCC)

DCC CONFIGURATION

Input Mode for Charge and Discharge:
 1: C-Rate Basis, 2: Current Rate

Cycles Per Day	Charge Steps / Cycle	Charge Rest Steps / Cycle	Discharge Steps / Cycle	Discharge Rest Steps / Cycle
3	5	5	3	3

Charge Rates Per Step [Cr]

Discharge Rates Per Step [Cr]

Starting Charge [V] Vmin: 3.00, Vmax: 4.20 for Selected Chemistry

Voltage Values Per Step During Charge [V]

Voltage Values Per Step During Discharge [V]

Total Rest Values Time: 15.45 hr per day

Rest Values Per Step During Charge. [hr] Total: 3.80 hr/cyc

Rest Values Per Step During Discharge. [hr] Total: 1.35 hr/cyc

Discharge Mode 1: Constant Current, 2: Constant Power **Discharge Power Target [W]** **Cells In Series**

Days Per Week on Cyc-Life **Days Per Week on Cal-Life** **Cell Voltage At Cal-Life**

Total cycle-life time per day: 9.375940 hr
 Total cycle-life rest time per day: 7.124061 hr
 Total duty cycle time per day: 16.500001 hr
 Total cal-life time associated with duty cycles per day: 7.500000 hr
 Fraction of time at cycle-life conditions + related cycle recovery rests: 0.294643
 Fraction of time at cal-life conditions + related cal-life rests: 0.705357
 Cycling Severity Index from DCC inputs = 0.297977 (relative to value of 1.0 at BL)

일일 열 사이클링(Daily Thermal Cycling, DTC)

Edit Tucson AZ Temperature Profile Celsius

Unique Temperature Profile ID:

High Monthly Temperature Average [°C]

January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
18.89	21.11	23.89	27.78	32.78	37.78	38.33	37.22	35.00	29.44	23.33	18.89

Low Monthly Temperature Average [°C]

January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
5.56	7.22	9.44	12.22	17.22	22.22	24.44	23.89	21.67	15.56	8.89	5.56

열 관리(Thermal Management, TM)

SECTION 4.2: THERMAL MANAGEMENT (TM) CONDITIONS

4.2.1: TM Lower Limit [°C] **include Thermal Management in Simulation** **4.2.2: TM Upper Limit [°C]**

CellSage 소프트웨어 데모 Video

CellSage DCC Simulation Module

Menu

CellSage

Ridgetop Group Inc
ENGINEERING INNOVATION

Cell Chemistry & Global Simulation Conditions | Temperature Mode & DTC | Annual Temperature Profiles & TM | String Analysis & Data Output | Results

Cell Chemistry & Global Simulation Conditions

SECTION 1.0: SELECT BATTERY CHEMISTRY

- 1: NCA/graphite (DOE Gen2 18650)
- 2: NMC/graphite (Sanyo Y 18650)
- 3: LFP/graphite (A123 Nanophosphate 20Ah)
- 4: LFP/graphite (A123 26650)
- 5: NMC/graphite (Panasonic UR 18650)

REFERENCE CONDITIONS

Cell Rated Capacity: 0.977 Ah
Cell Maximum Voltage: 4.20 V
Cell Minimum Voltage: 3.00 V
Representative Cycling Rate = 1.0 C1 per hour
Test Temperature = 25 C
Test SOC (nominal) = 60%
Test Duration = 40 Weeks
During Testing: 1 cycle/day

SECTION 1.1: INDICATE SIMULATION TIME PERIOD

Enter the desired duration for the simulation, with a maximum up to 8 years.

2.0000 years (8 years max) ▼

Simulation Cycles for String Analysis: 728.00 cycles

SECTION 1.2: INPUT SOC CONDITION

This is a nominal SOC at which the cell will operate within +/- 10%
Select value from 20 to 100 %

80.00 % of 0.977 Ah = 0.782 Ah

SECTION 1.3: INDICATE RELATIVE CYCLING SEVERITY

This parameter covers magnitude of cycling severity in comparison to a baseline condition, such as C/1 cycling rate. Autoset if DCC enabled.

Input Value (can be fractional)

0.2980

Show More

SECTION 1.4: DETAILED CYCLING CONDITIONS (DCC)

DCC Configurations

- CellSage Detailed Inputs--Cycle_Set1.txt
- CellSage Detailed Inputs--Cycle_Set2.txt

CREATE/LOAD EDIT DELETE

CYCLING SEVERITY

0: no cycling (calendar-life condition)
1: at or near baseline testing condition
1 to 10: cycling condition more stressful than baseline
(10: Worst)

use DCC

DCC-DATA FILE

C:\Users\user\Documents\CellSage Simulations\DCC\CellSage Detailed Inputs--Cycle_Set1.txt

Simulation Cycles for Path Dependence DCC: 936.00 cycles

Summary File Name: Parameters Copy to Examples

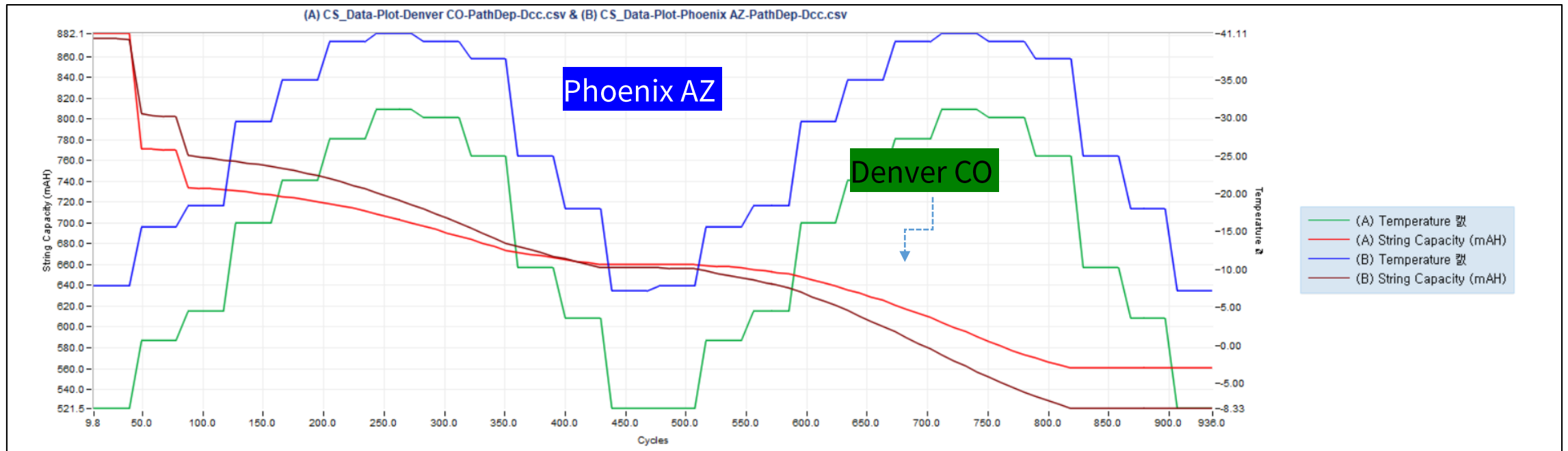
RESET RUN SIMULATION < >

4:50 PM

실행 결과

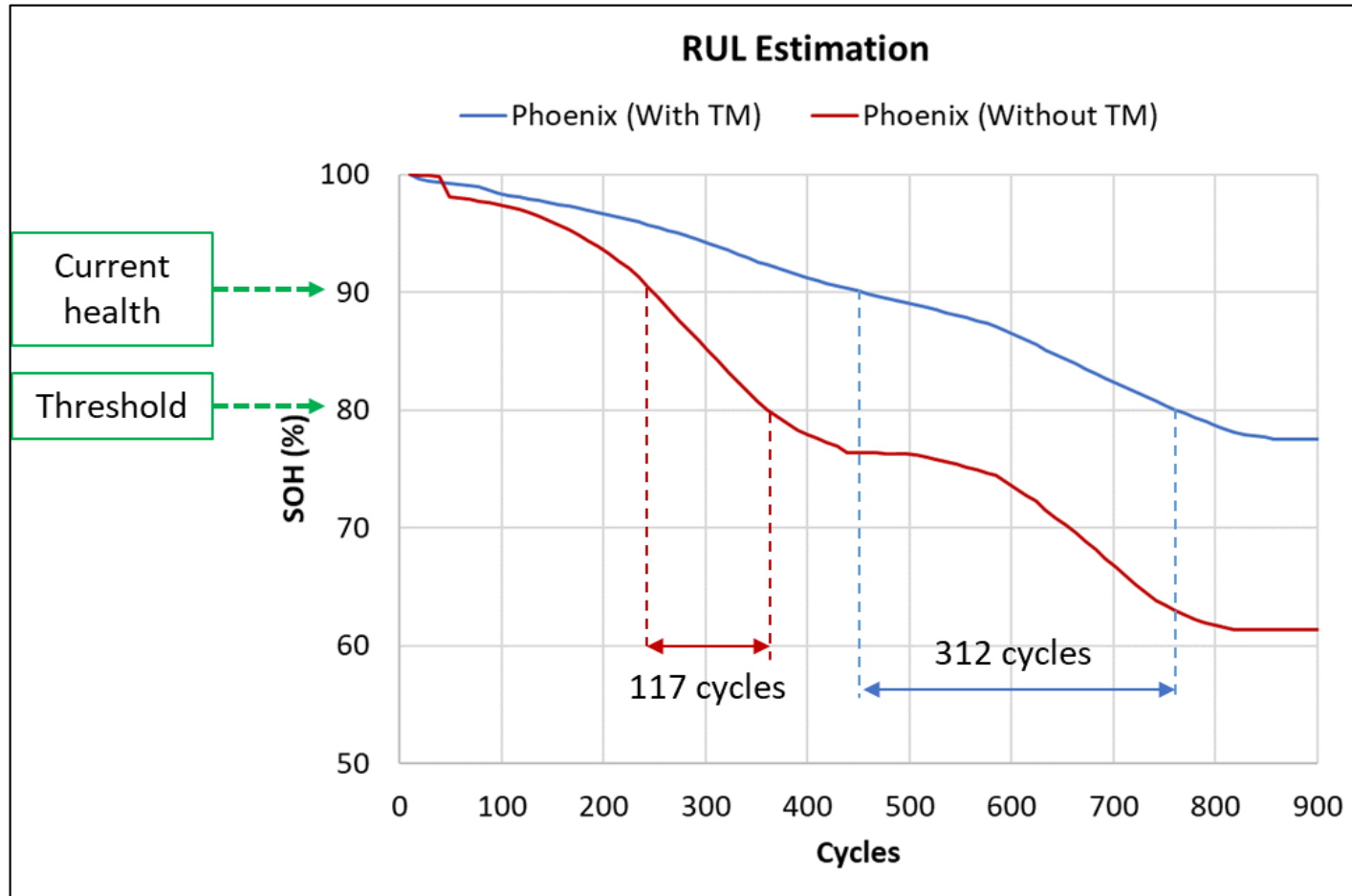
- 자동차용 배터리 노화경향은 다양한 사용조건에 따라 다름. 가장 중요한 파라미터는 지리적 위치, 부하 패턴과 빈도, 그리고 열 관리임.

Gen2 Battery with DCC, with DTC in Phoenix and Denver



잔존수명 예측

- 현재 배터리 SOH를 90%로 가정. 열관리가 없이 피닉스에서 운영되는 배터리는 117사이클 후에 교체가 필요하지만 열관리가 있는 경우는 312사이클동안 더 사용해야 SOH 80%에 도달함.



감사합니다.

Q & A

Contact: hakwon@ex1337.com