

xDT (Executable Digital Twin) 의 배터리 공정 적용 전략

Executable Digital Twins for battery manufacturing

문종민 프로 / STS Pre-Sales team1 / Siemens Digital Industry Software

지속 가능한 배터리 공정의 과제 및 추세



배터리 셀/팩의 품질, 수율



공정의 효율성, 생산성, 유연성



리소스 사용의 최적화



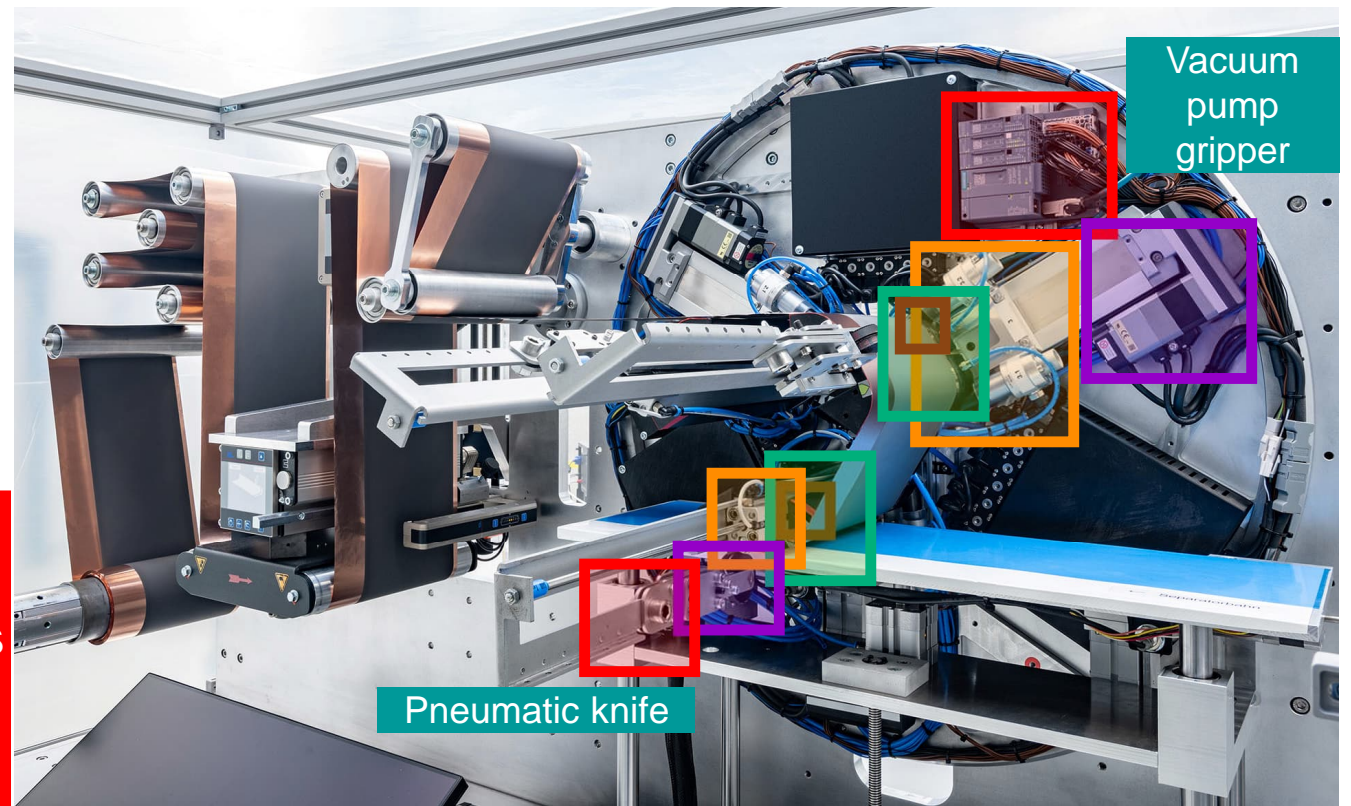
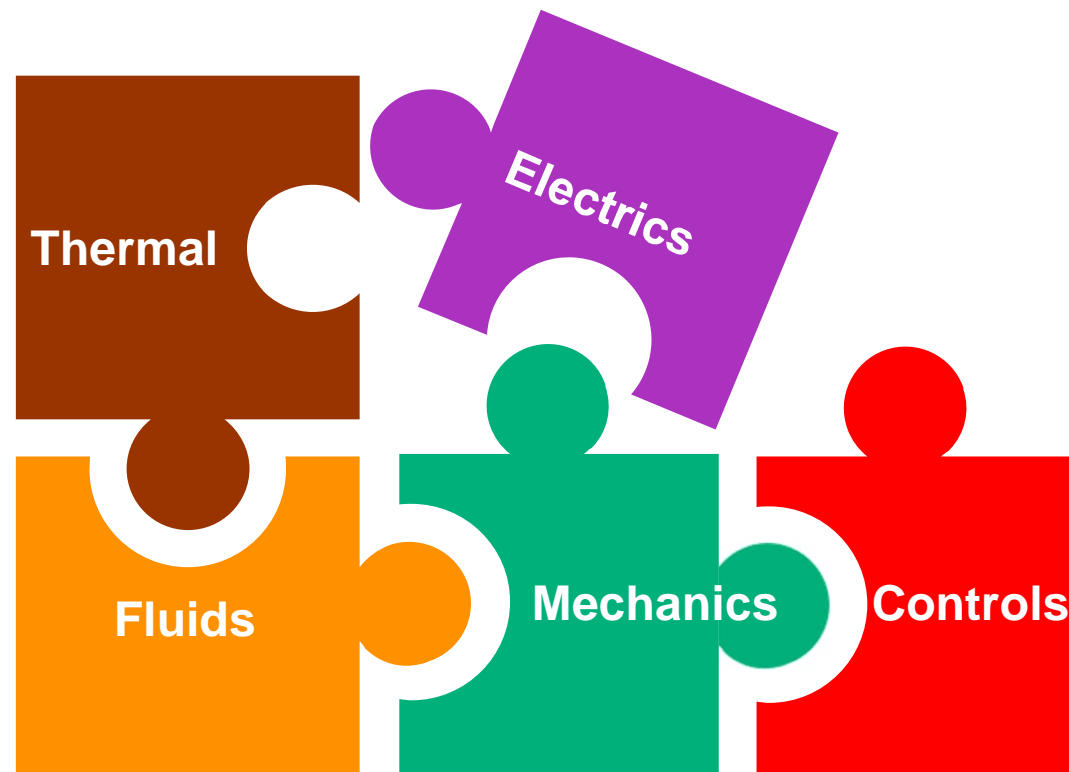
경쟁과 시간의 압박

구성

- AI
- 제어
- 가상 센싱 (Virtual sensing)과 예지보전 (Predictive maintenance)
- 모바일 로봇 (Mobile robotics) 과 비전 기술 (Vision technology)
- 재생 가능한 에너지

지속 가능한 공장과 더욱 경쟁력 있는 제품 품질을 향한 중요한 발걸음

공정에서의 시뮬레이션 적용?



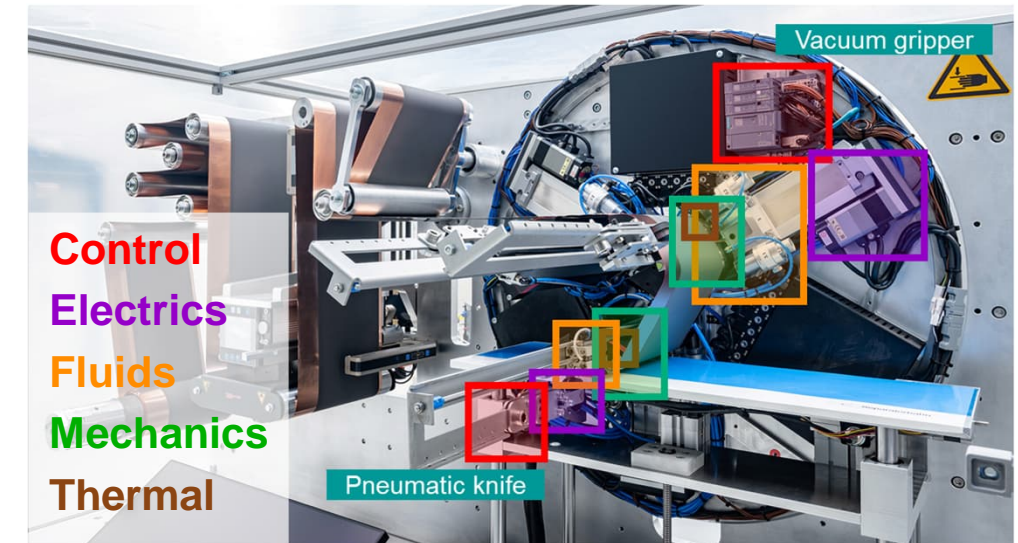
KIT **wbk** Cell assembly - stacking
Karlsruher Institut für Technologie Institut für Produktionstechnik

다중 물리 시뮬레이션에 가장 적합한 “전형적인 메카트로닉 시스템”

메카트로닉스 시스템 시뮬레이션이란?

시스템 시뮬레이션으로 해결되는 기존의 설계 문제:

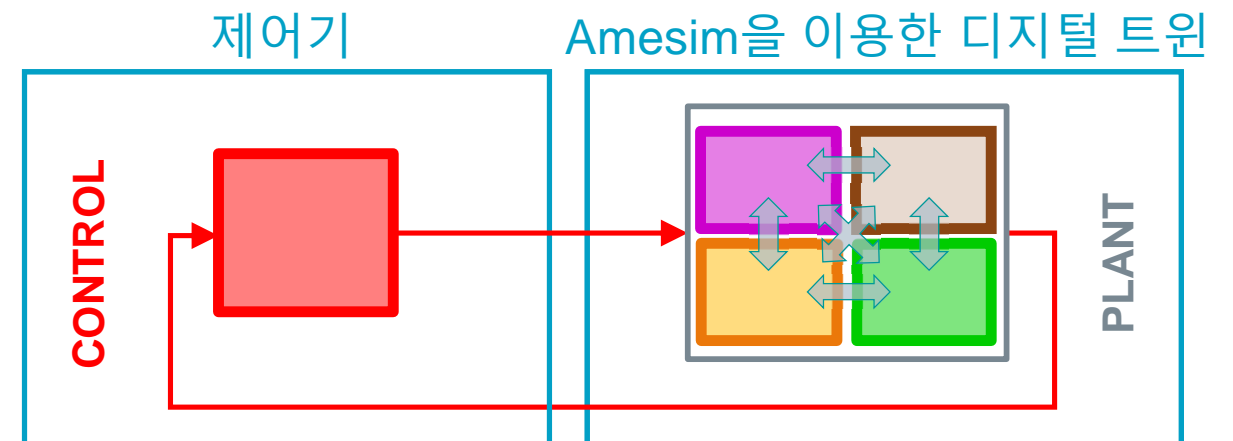
- 구성요소와 시스템의 크기가 적절한가?
- 샤프트, 롤러, 밸브, 펌프 및 컴프레서 등의 구성 요소들을 원활하고 정확하게 조절하기 위한 제어 전략을 최적화 할 수 있는가?
- 에너지 소비를 줄이고 생산 속도를 높이는 방법은 무엇인가?
시스템에서 주요 에너지 소비원은 무엇인가?
- 도달할 수 있는 토크/속도/온도/압력의 최대값은?
- 안정성과 안전에 대한 리스크가 있는가?
- ...



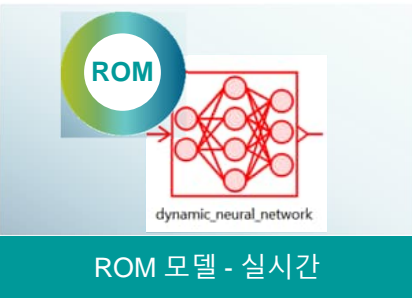
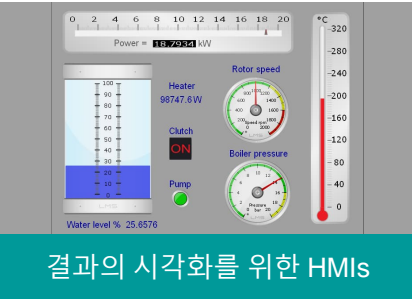
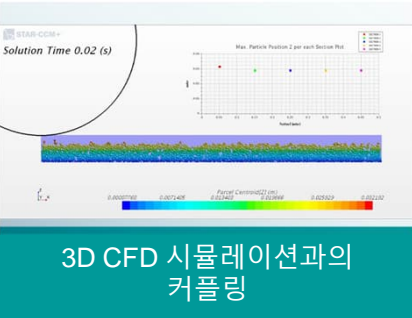
KIT wbk Cell assembly - stacking

키워드:

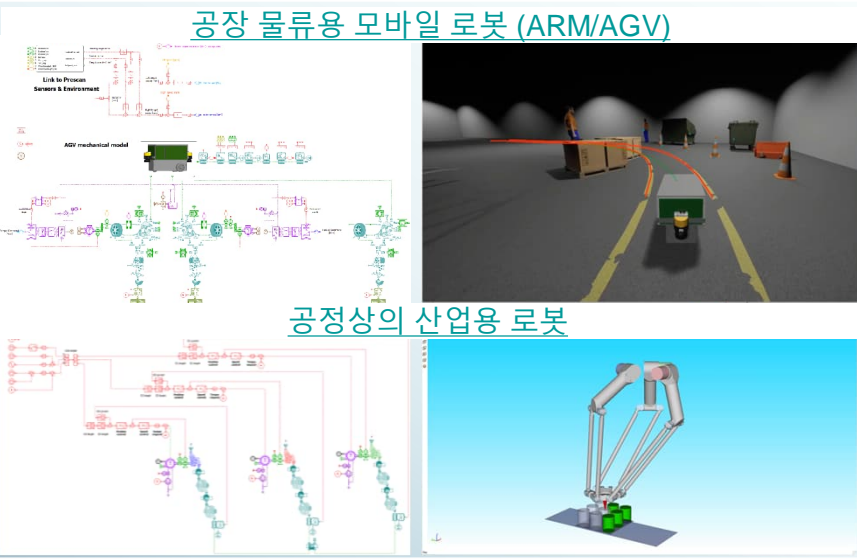
- 현실적인 물리적 표현 = 디지털 트윈
- 동력 교환을 위한 다중물리학
- 동적 시스템 (시간에 대한 함수)



메카트로닉스를 위한 Simcenter 시스템 시뮬레이션 솔루션 : Simcenter Amesim



사전 설계
시스템의 크기
조정 및 통합
성능의 최적화
제어의 유효성
검사



다양한 수준의
복합성
'기구'-'제어'간
연동

개방형 환경,
높은 연결성



+6,500
검증되고, 상호
연결 가능한
다중 물리
시뮬레이션
모델

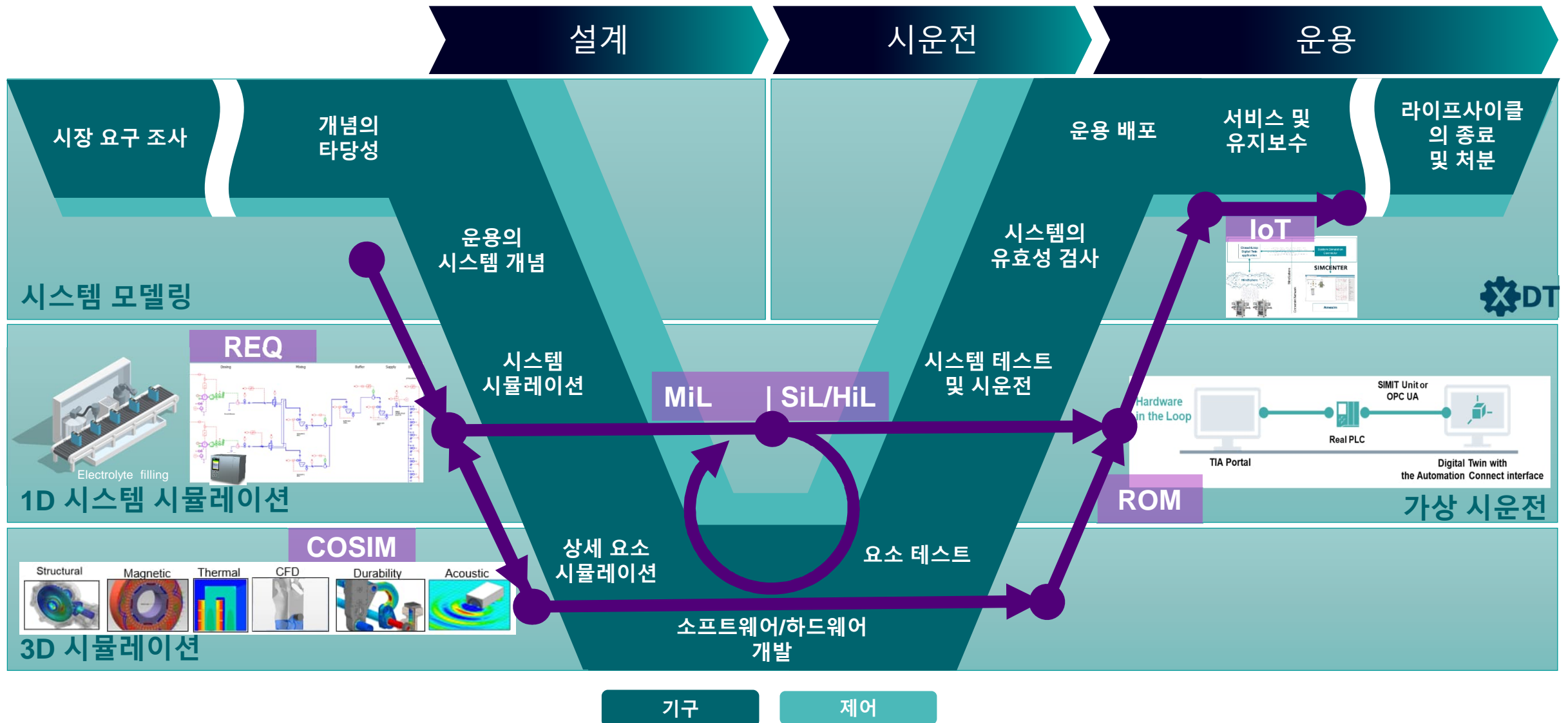


유압/공압
열유동
전기
기계적 시그널



V사이클 개발 프레임워크의 디지털 트윈

병렬화된 기계 및 제어 개발을 위한 연속적인 시스템 시뮬레이션



지멘스 시뮬레이션 솔루션

디지털트윈 (DT)에서 실행 가능한 디지털트윈 (xDT)까지

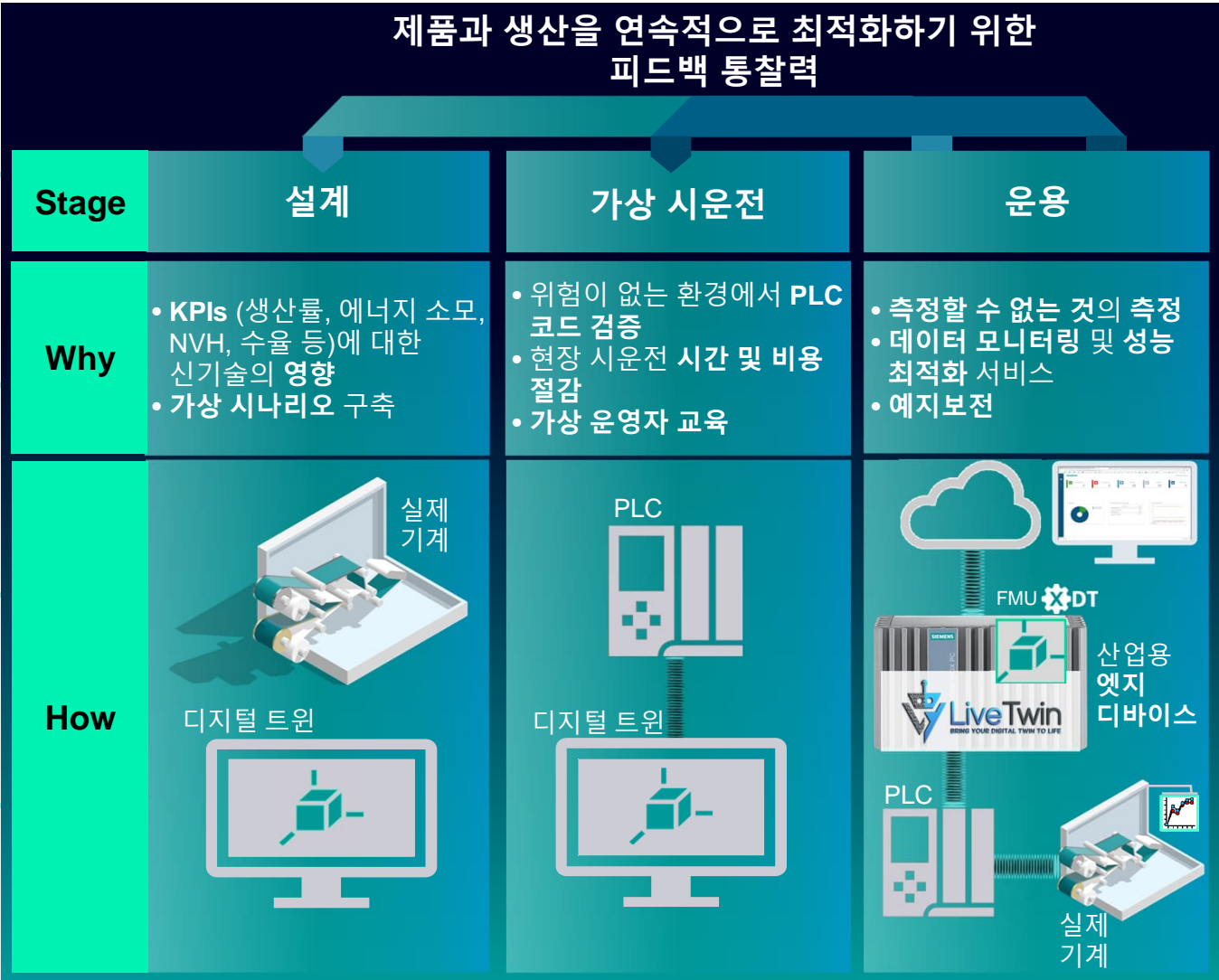
실제 제품 또는 생산 라인의 정확한 가상 표현

제품 또는 생산 라인을 시뮬레이션, 예측 및 최적화하기 위해 라이프사이클 전반에 걸쳐 사용

물리적 거동의 여러가지 측면에 대한 다양한 표현 또는 모델로 구성

라이프사이클을 관리하기 위한 객체의 진화

폐루프 (Closed-loop) 디지털 트윈은 물리적 자산과 가상 표현 간의 양방향 연결을 제공

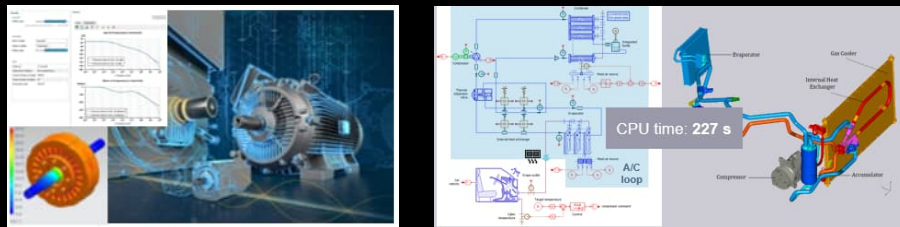


지멘스 시뮬레이션 솔루션 – xDT (Executable Digital Twin)

xDT 구축을 위한 주요 기술

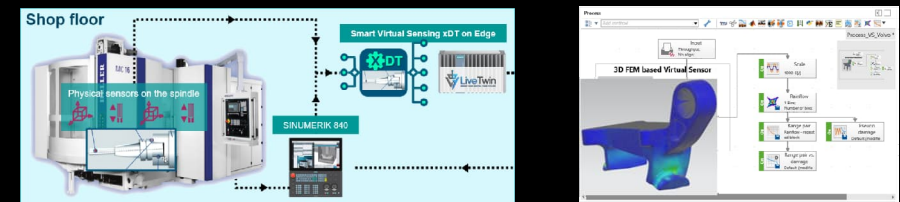
ROM (Reduced Order Model)

이기종(Heterogenous)의 데이터
소스로부터 차수 감소 모델 생성



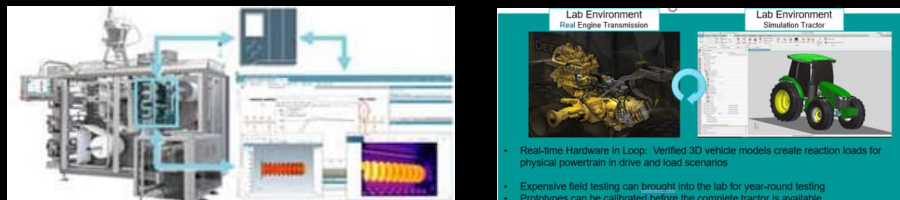
Smart Virtual Sensing

측정할 수 없는 곳에서의 측정



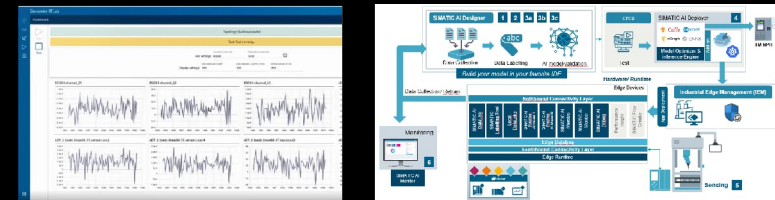
Export

XiL & 운용 + 연성해석



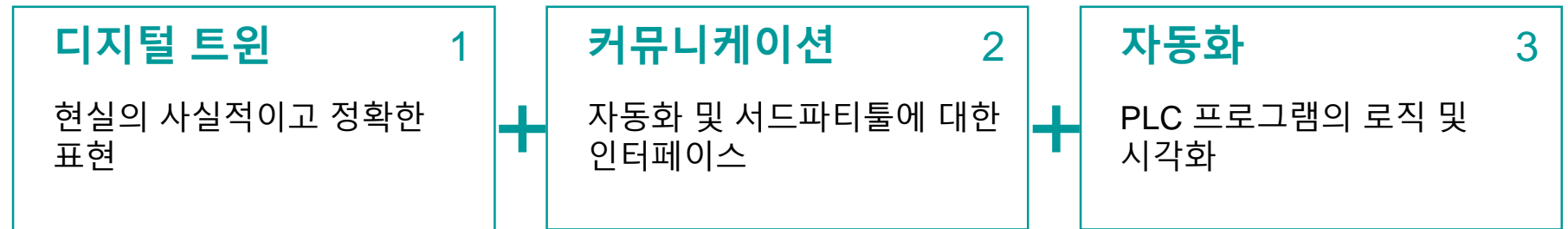
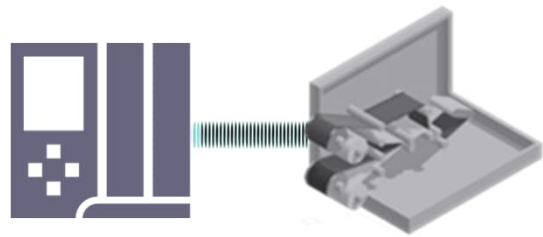
Execute

다양한 플랫폼으로부터 xDT 배포 및 실행
설계 & 엔지니어링
운용 및 서비스



지멘스 시뮬레이션 솔루션 – 자동화

Software in the Loop (SiL) 설정



Solution for
Simatic S7-1500

**심센터 시뮬레이션
솔루션**

**자동화된
연결**

**PLCSIM Advanced
Virtual PLC–synchronous**

A

**Software
in the Loop**



TIA Portal
PLCSIM Advanced

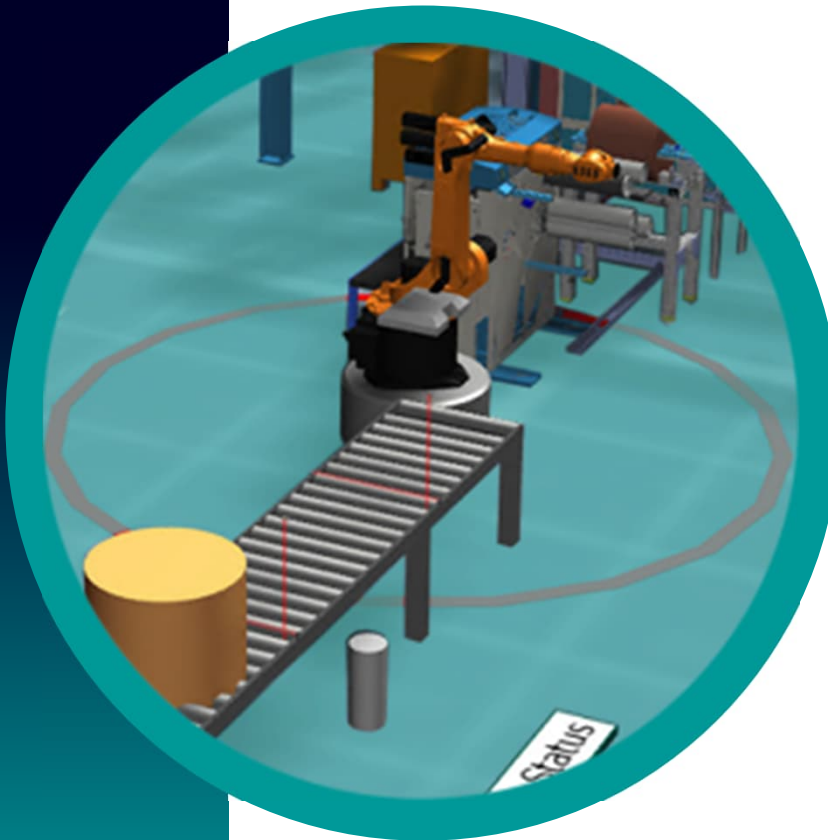
PLCSIM Advanced
API



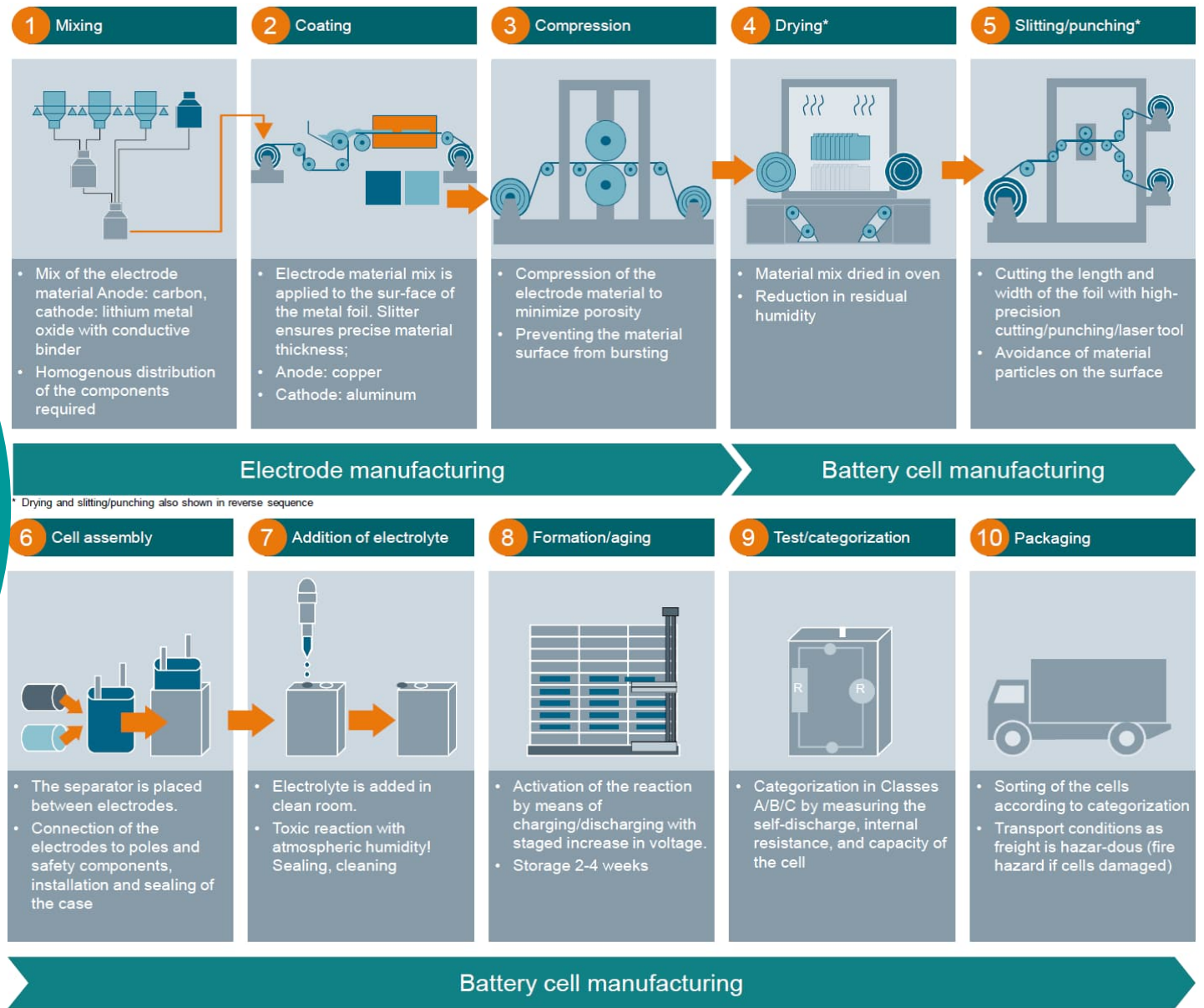
Simcenter Amesim with
Automation Connect

물리적 페루프 기구의
가상 표현

리튬 이온 배터리 생산 주요 공정

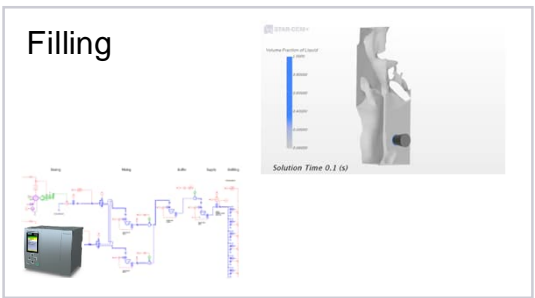
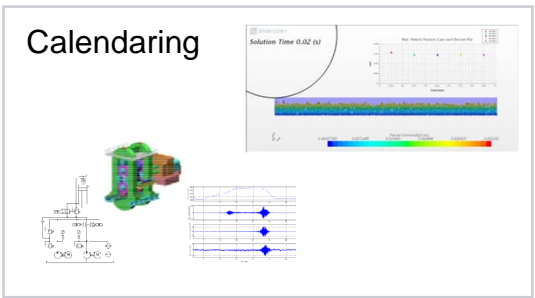
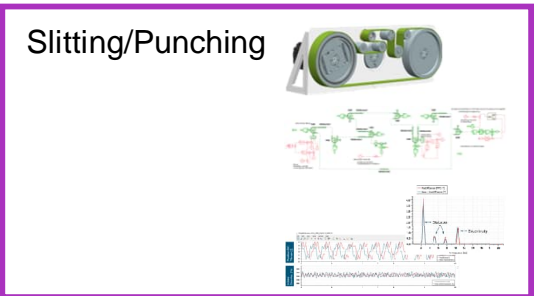
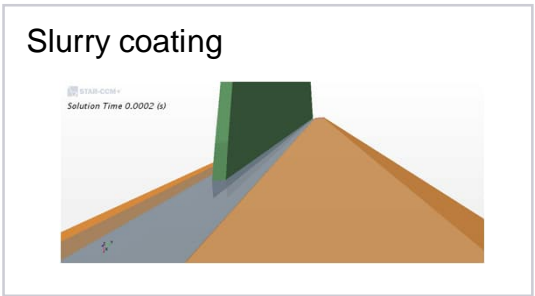
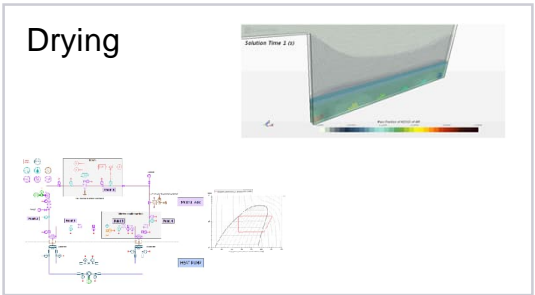
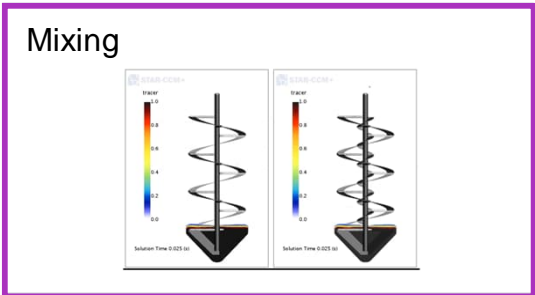
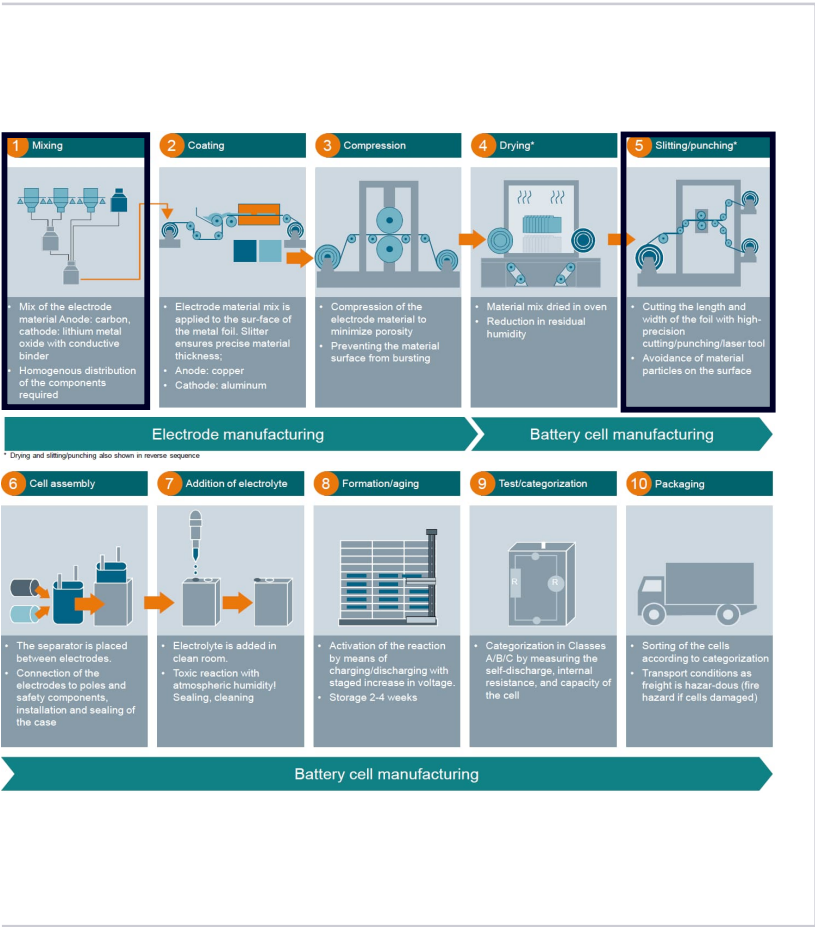
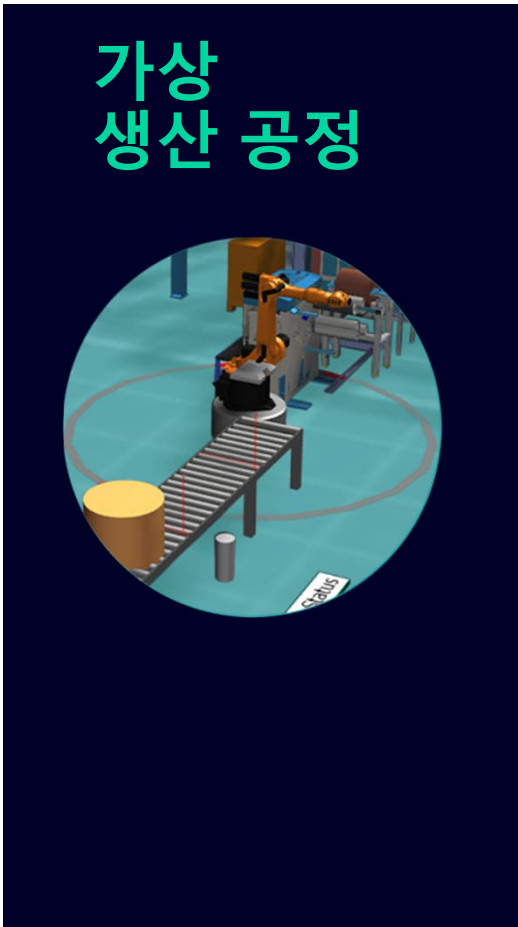


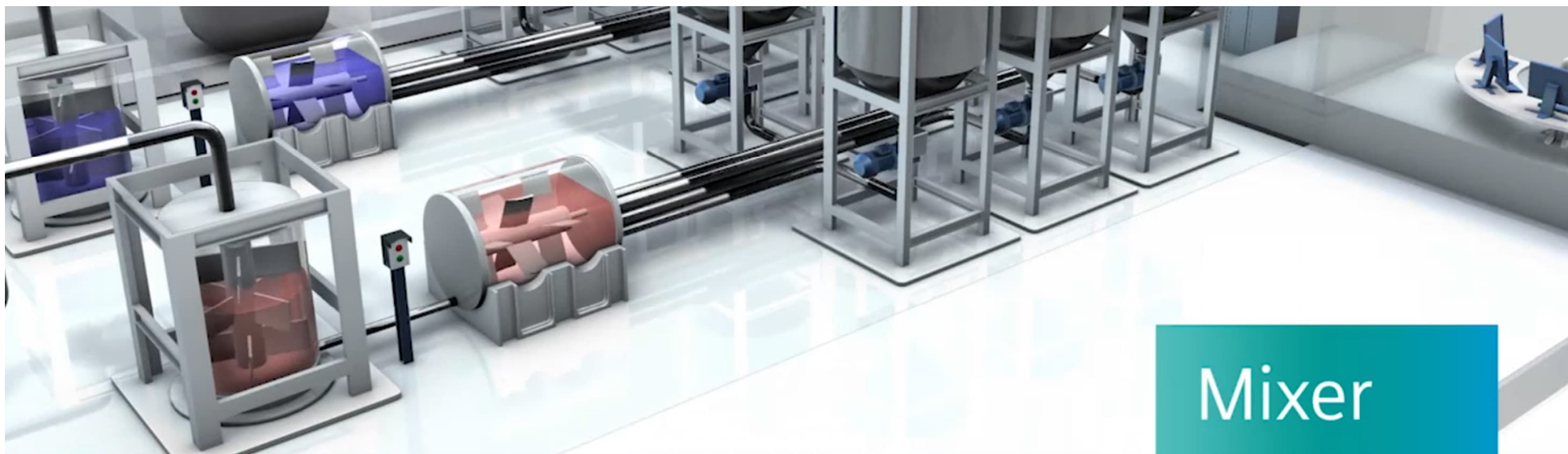
가상
생산 공정



리튬 이온 배터리 생산 주요 공정

CFD 및 시스템 시뮬레이션을 이용한 혁신 실현



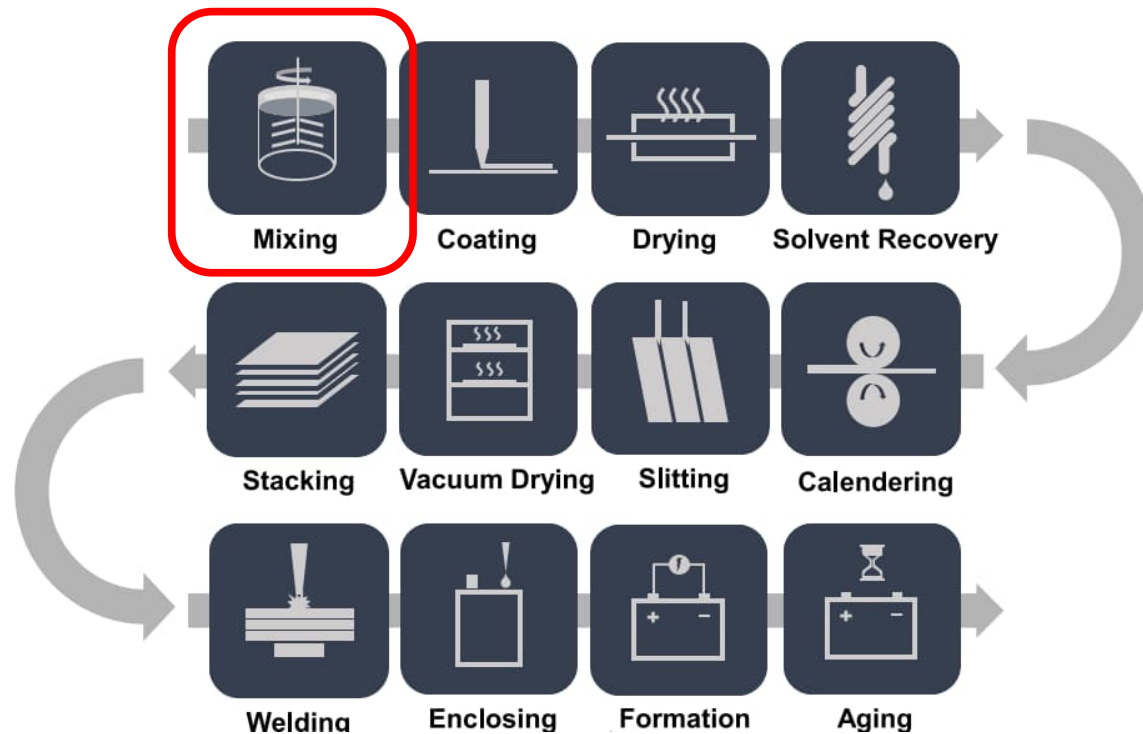


Mixer

xDT for battery manufacturing ; Mixing

리튬 이온 배터리 생산 주요 공정 : mixing

왜 mixing 공정이 중요할까?



• 생산 단가

Table 1. Cost, throughput, and energy consumption of LIB manufacturing processes

Manufacturing processes	Cost per year/\$* (Nelson et al., 2019)	Percentage %	Throughput (Heimes et al., 2019a)	Manufacturing processes	Energy consumption per cell/kWh	Percentage %
Slurry mixing	7,396,000	7.91%	30 min–5 h	Slurry mixing	0.11	0.83%
Coating/drying	13,984,000	14.96%	35–80 m/min	Coating	0.18	1.36%
Solvent recovery	4,296,000	4.60%	NA	Drying/solvent recovery	6.22	46.84%
Calendering	4,849,000	5.19%	60–100 m/min	Calendering	0.38	2.86%
Slitting	2,891,000	3.09%	80–150 m/min	Slitting	0.71	5.35%
Vacuum drying	2,990,000	3.20%	12–30 h	Stacking	0.77	5.80%
Stacking	8,086,000	8.65%	NA	Welding	0.25	1.88%
Welding	6,864,000	7.34%	NA	Enclosing	0.69	5.20%
Enclosing	11,636,000	12.45%	Depend on the cell design	Formation/aging	0.07	0.53%
Formation/aging	30,482,750	32.61%	Up to 1.5–3 weeks	Dry room	3.9	29.37%

*The manufacturing cost includes equipment depreciation, labor cost, and plant floor space cost.

The labor cost was calculated based on the US average factory worker's salary of \$15/h (Economic Research Institute, 2020).

The floor space cost was calculated based on \$3,000/m² per year (includes rent, utility, and management) (Nelson et al., 2019).

The depreciation cost was calculated by 16.7% of capital investment and 5% of floor space cost (Nelson et al., 2019).

- 슬러리 (고체+액체 혼합)의 품질(동질성)이 이후 공정의 수율에 직접적인 영향을 미침
- Mixing 시간을 단축함으로써 처리량 향상

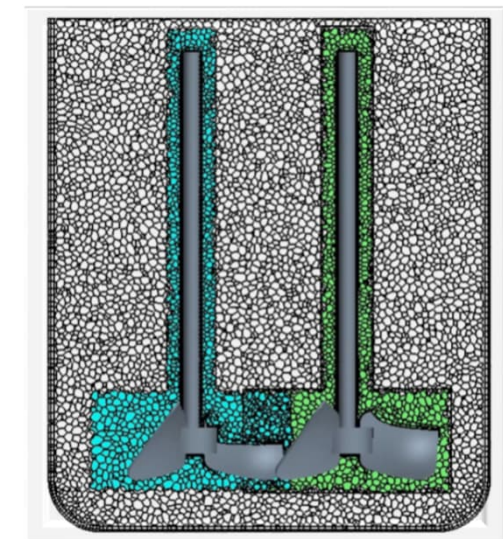
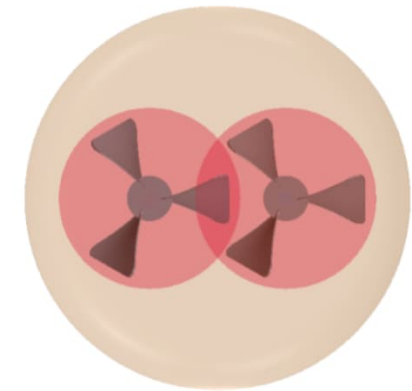
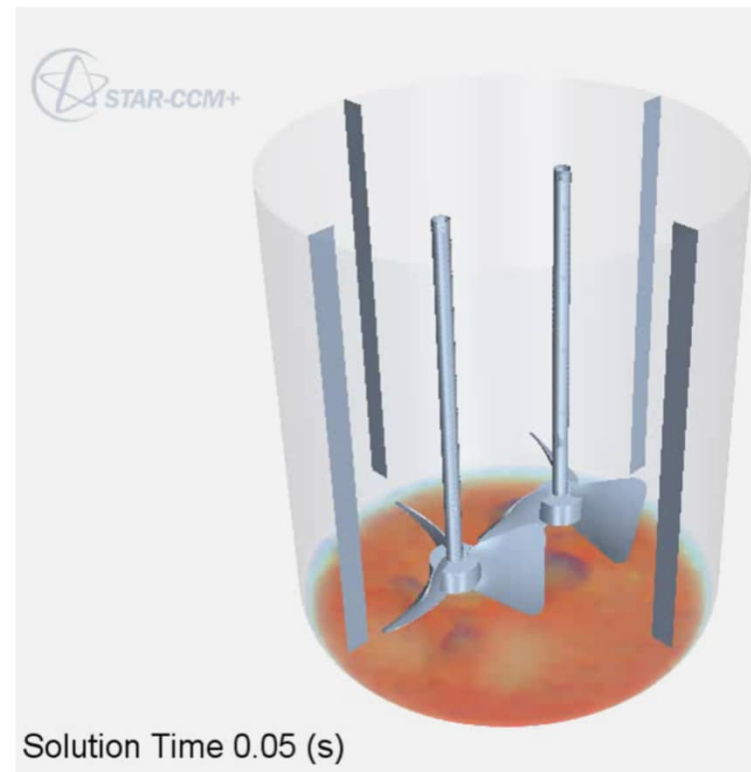
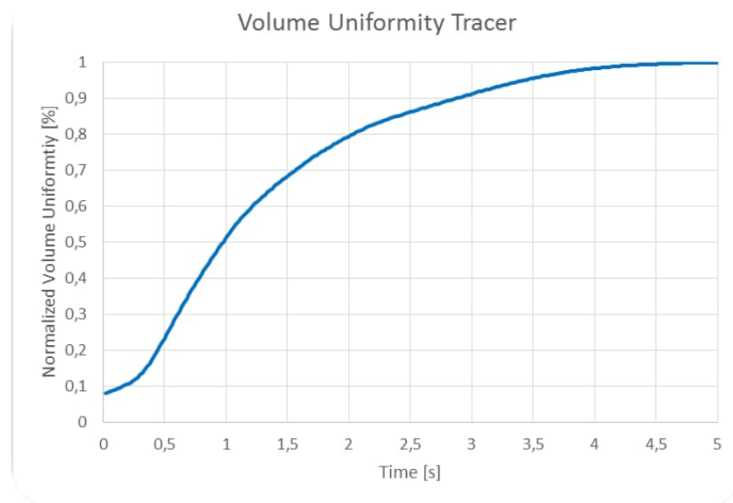
Pain Point 1: (복잡한 형상에서) mixing시간의 결정

Passive Scalar로 접근

passive scalar를 이용하여 mixing 시간 결정

- 아주아주아주 작은 입자

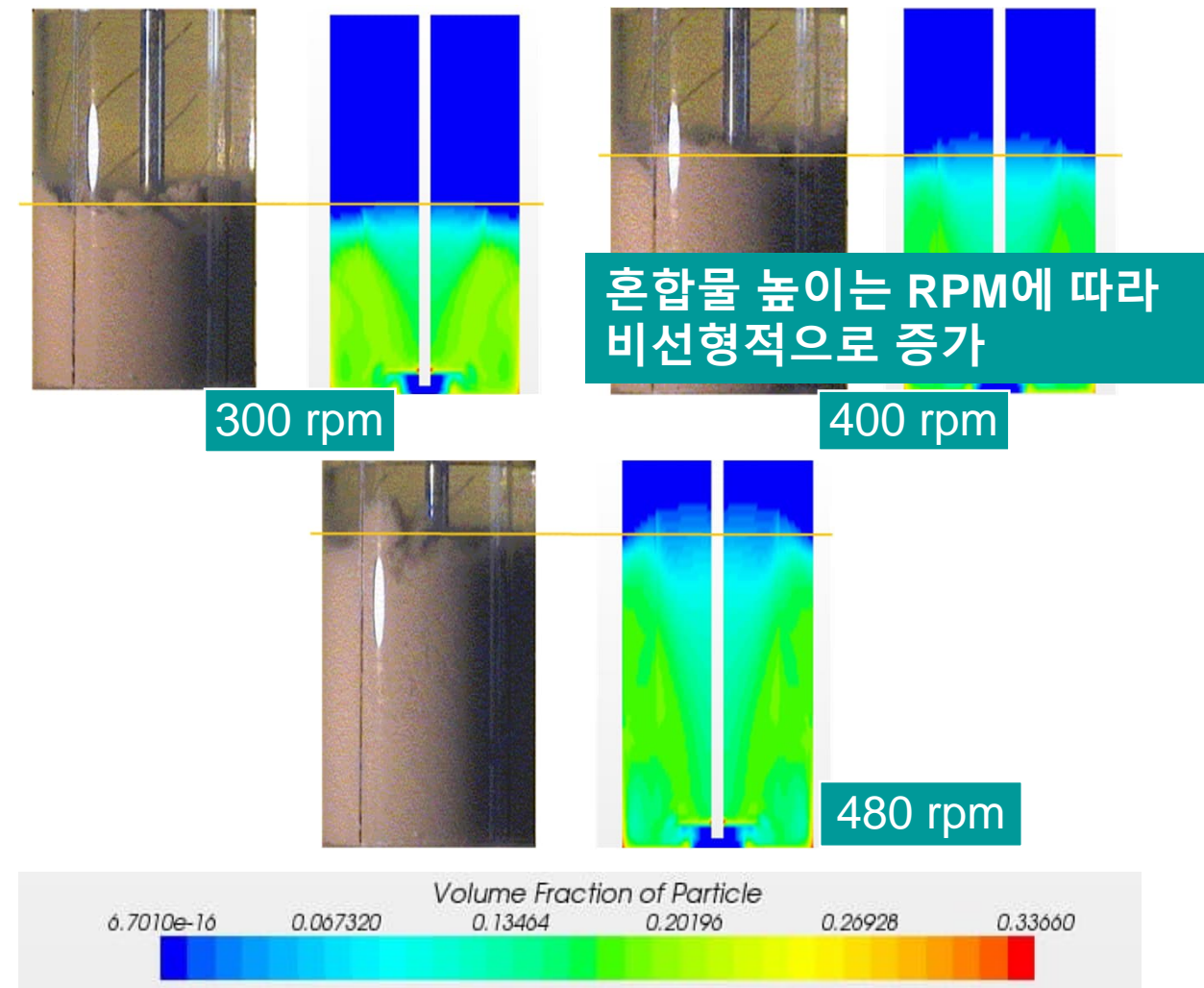
- 시간에 따른 “정규화된 체적 균일도”



Pain Point 2: 혼합물 높이 (Cloud height)

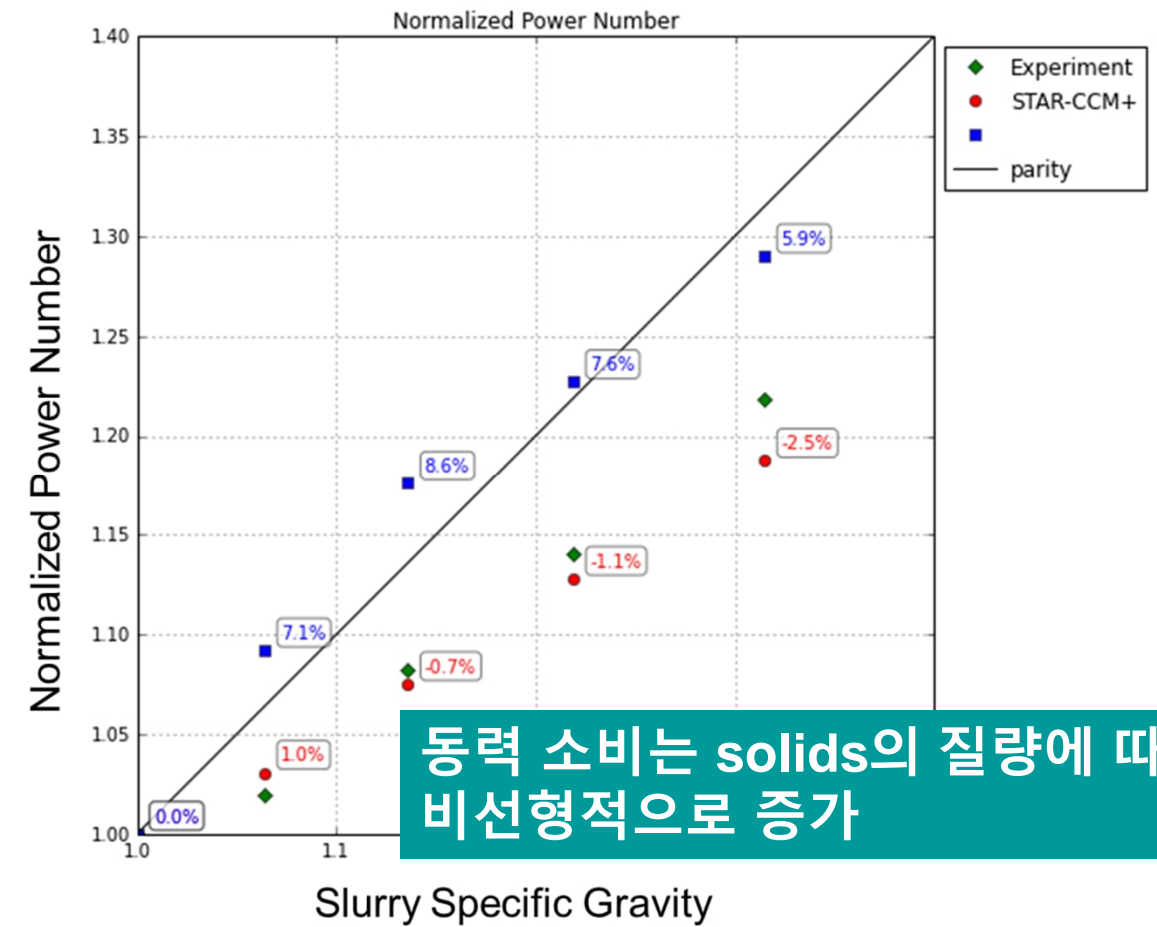
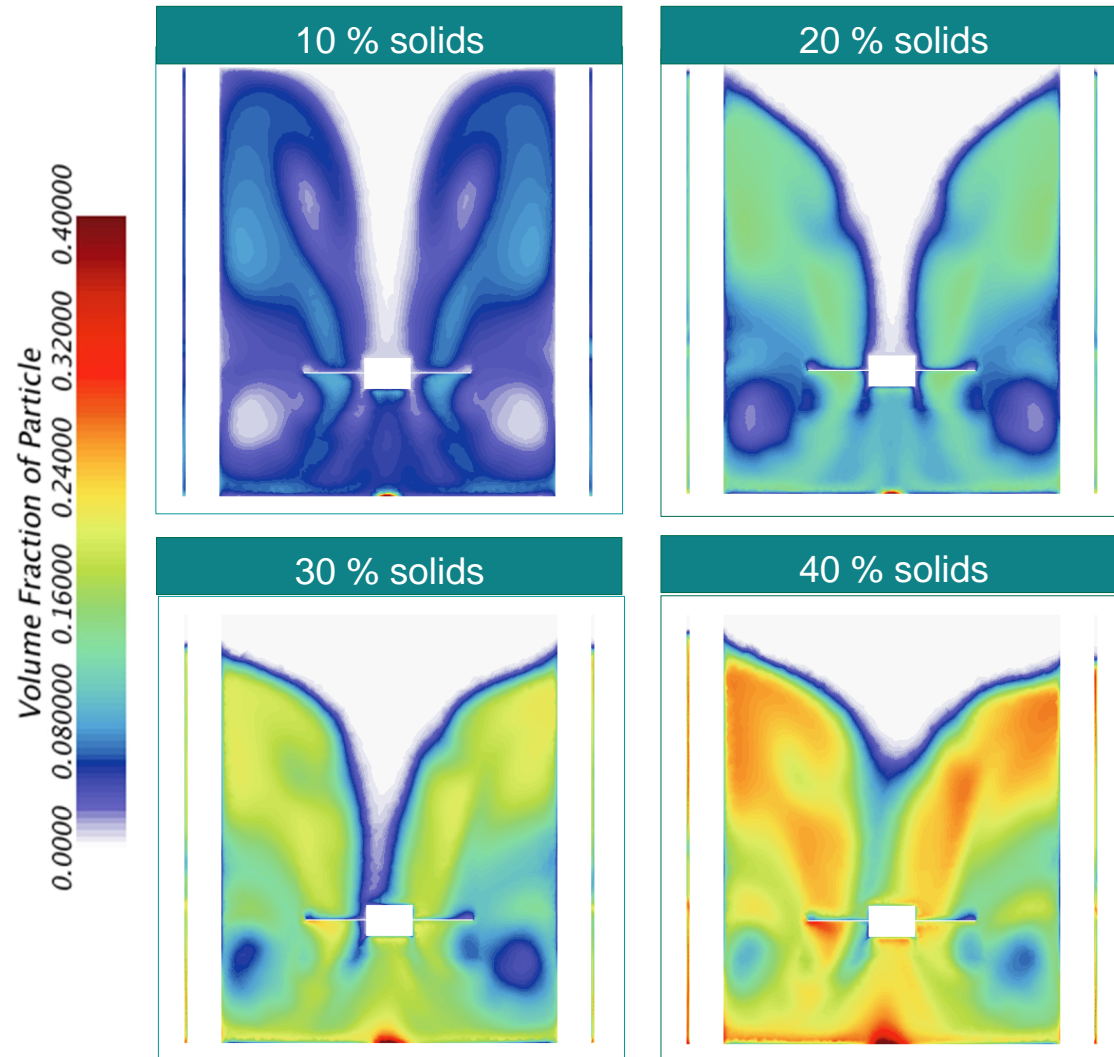
EMP-GF (Eulerian Multi-Phase/Granular Flow)로 접근

- 모든 상(phase)의 상태를 수송 방정식으로 푼다.
- 입자-입자간의 상호작용은 상대적으로 무시하지만 거시적인 granular flow의 운동학을 통해 설명
- 입자 크기의 분포를 고려할 수 있음
- 얻을 수 있는 정보
 - 입자 분포
 - 혼합물 높이 (Cloud height)
 - 요구되는 파워 (혹은 모터 토크)
 - 최소 RPM for 'off-bottom' suspension: 모든 입자가 바닥에서 부유 되는 속도



Pain Point 3: 동력 소모

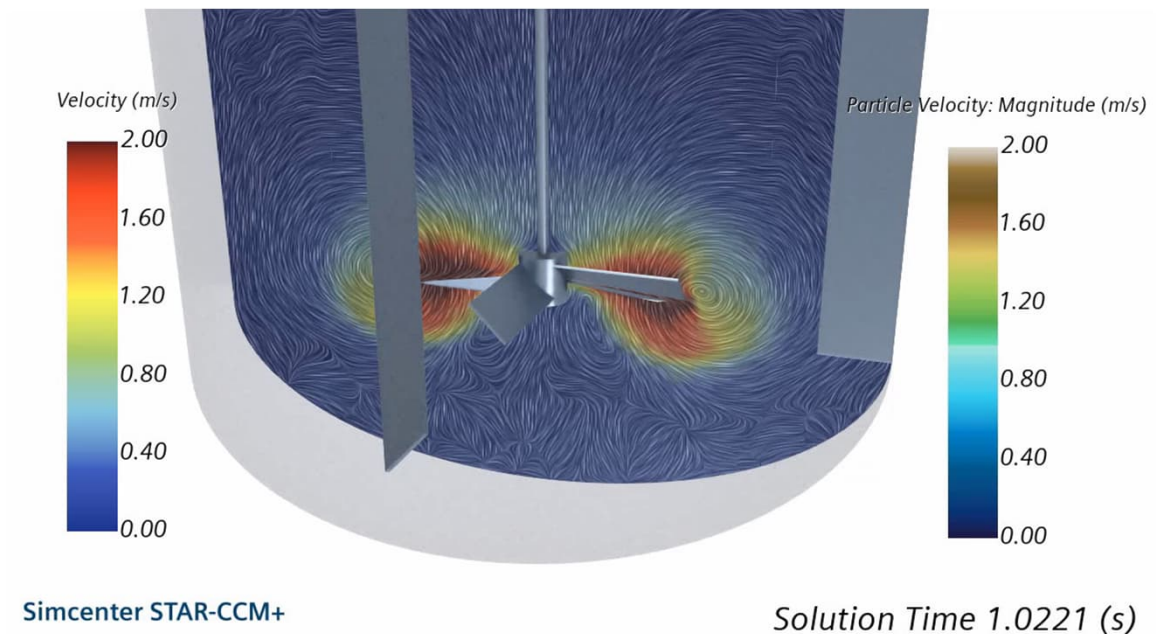
Particle Simulation을 풀지 않고...



동력 소비는 solids의 질량에 따라 비선형적으로 증가

입자 시뮬레이션 : 입자-입자 간의 상호작용이 중요한 경우 DEM (Discrete Element Method)으로 접근

- 입자 충돌을 포함한 개별 혹은 수치적 입자의 추적 가능
- 백그라운드 유체와의 운동량/열/질량 교환 가능
- 입자의 크기가 작을수록 입자의 수가 많아지면서 계산 비용이 기하급수적으로 상승 (Coarse-Grain 모델을 사용하여 완화)
- 입자 모양과 올바른 충돌 동작이 중요한 경우에 유용한 방식

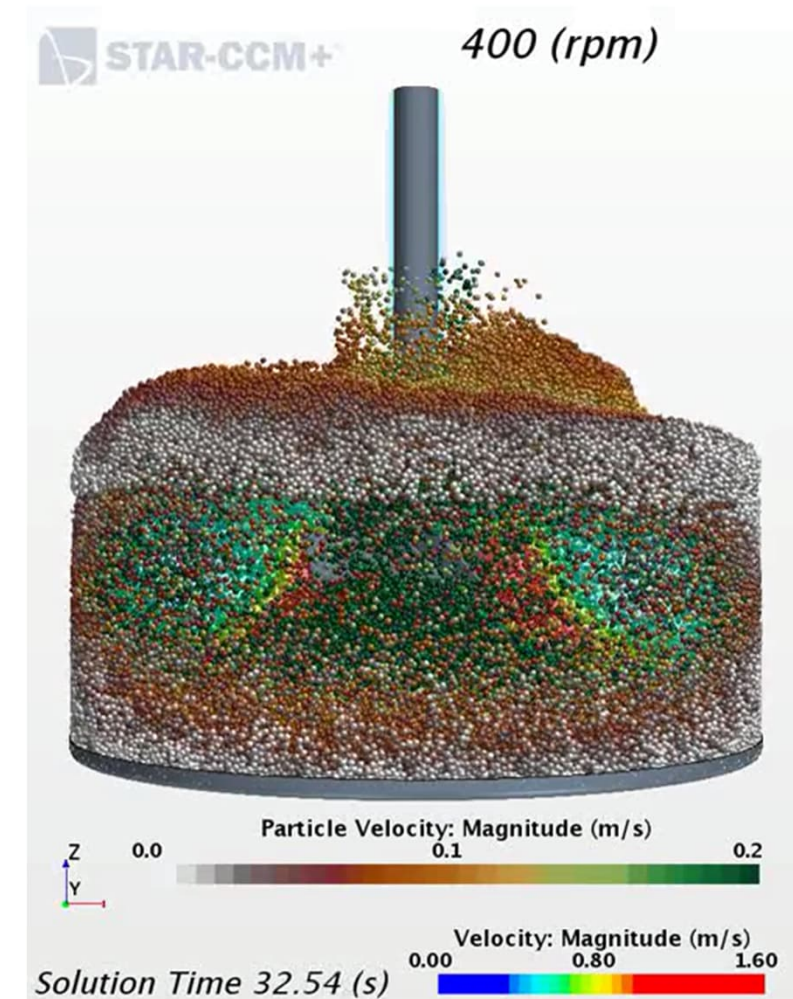
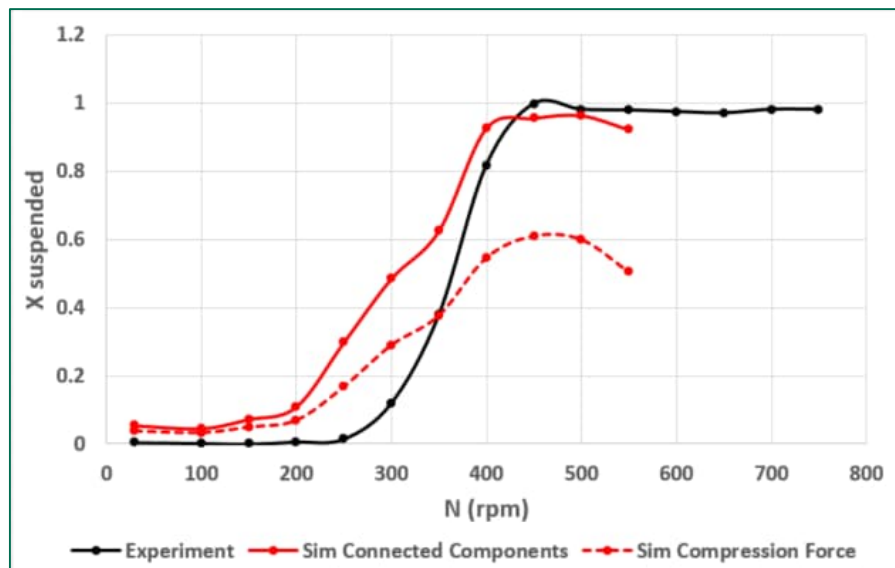


입자 시뮬레이션 : 입자-입자 간의 상호작용이 중요한 경우

층류 mixing에서의 DEM 유효성 평가

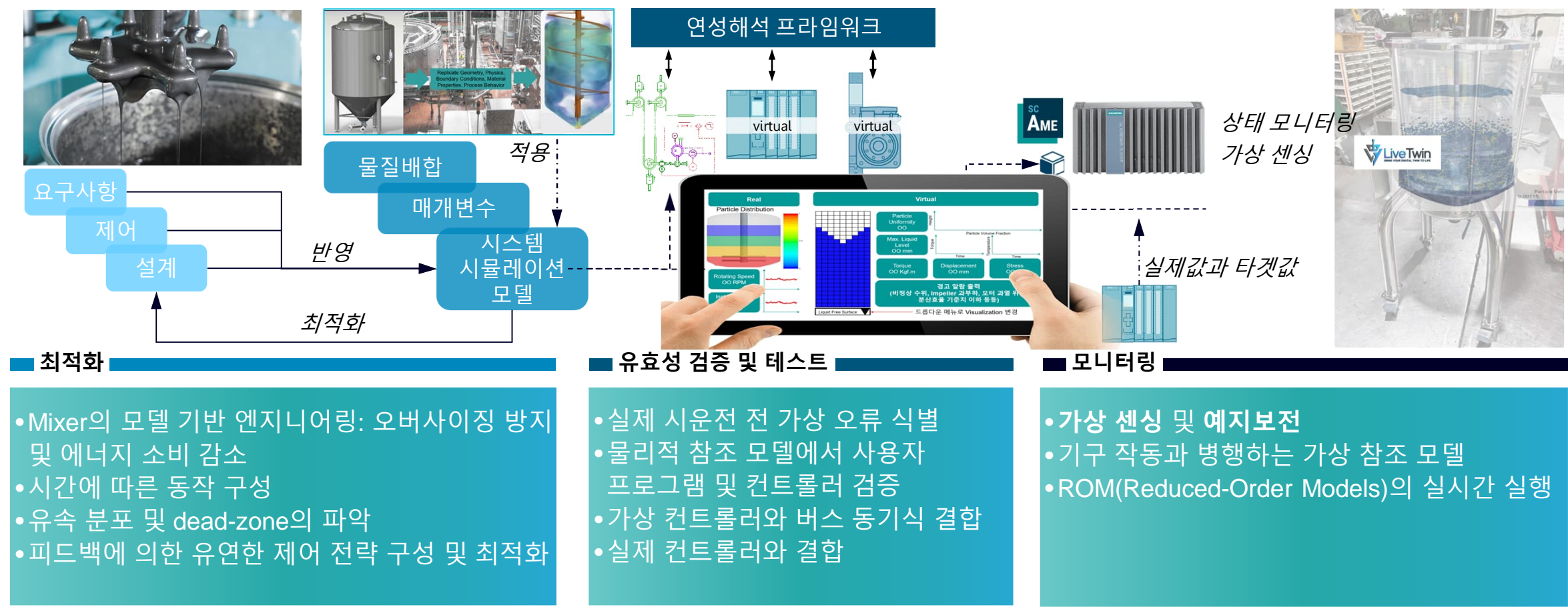
층류 Mixing:

- 액체 : 포도당 용액
 - 밀도 : 1400 kg/m^3
 - 동점성계수 : $1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (물의 약 1000배)
- 고체 : 글라스 비드 (직경 3 mm , 밀도 2500 kg/m^3 , 영률 100 MPa)
- 임펠러의 회전속도 : $30 \sim 550 \text{ rpm}$



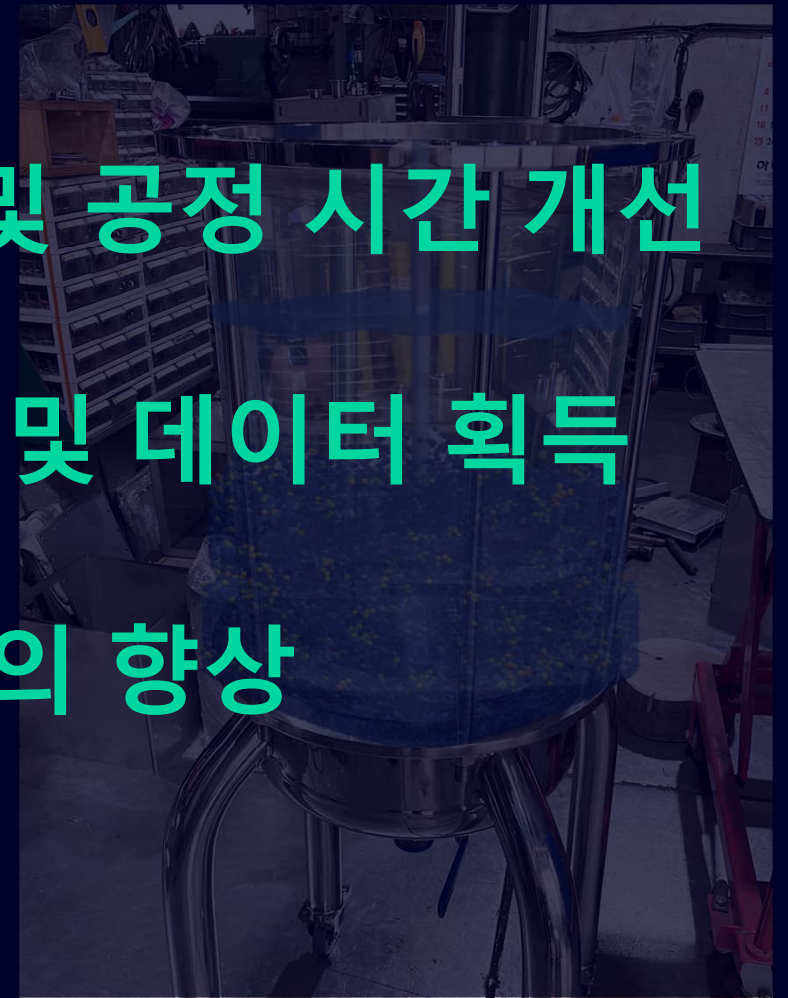
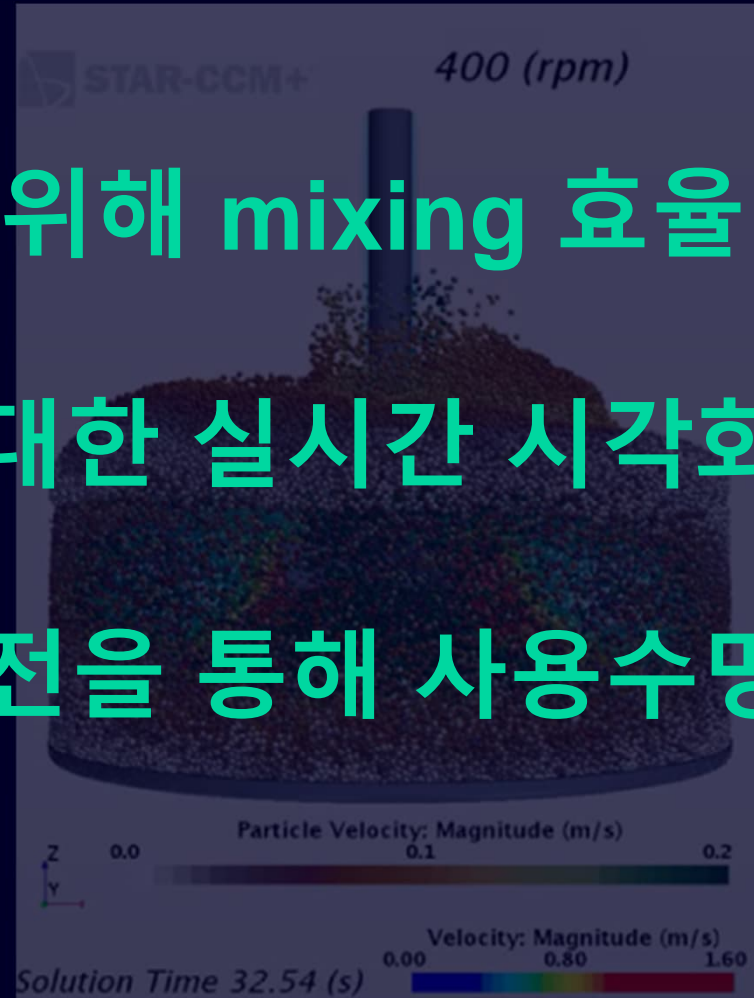
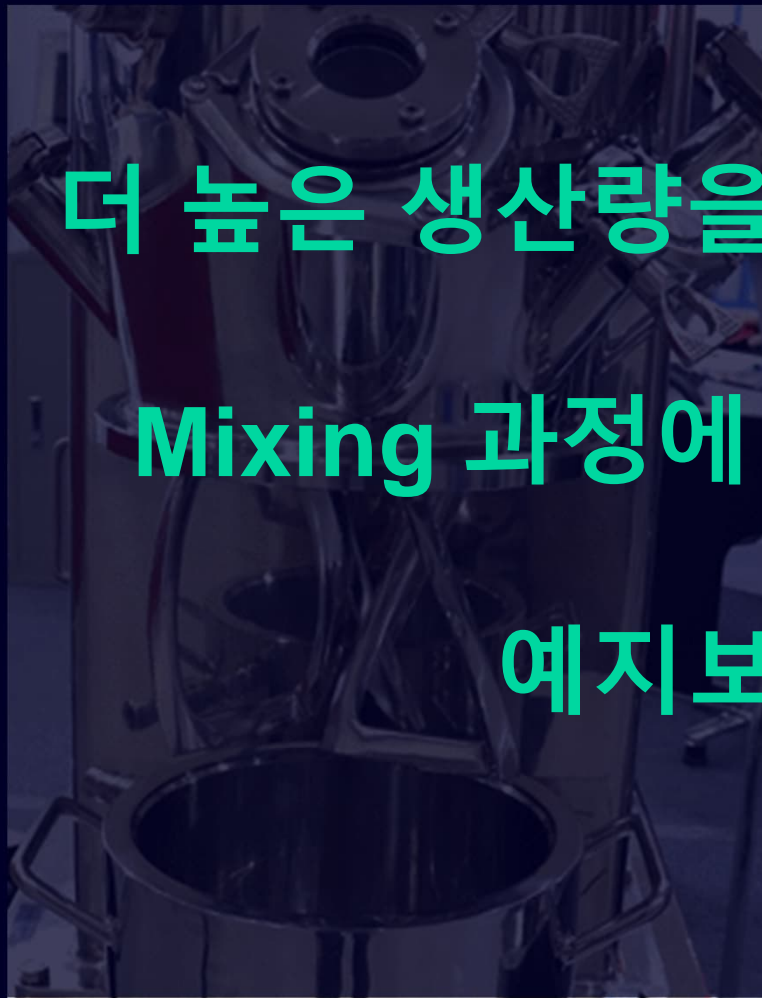
모델-기반의 시스템 설계

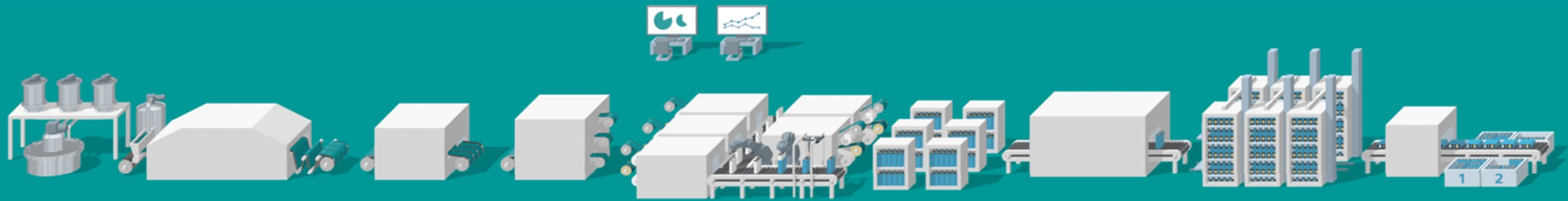
Mixer의 시뮬레이션 모델 활용



주요 핵심 내용

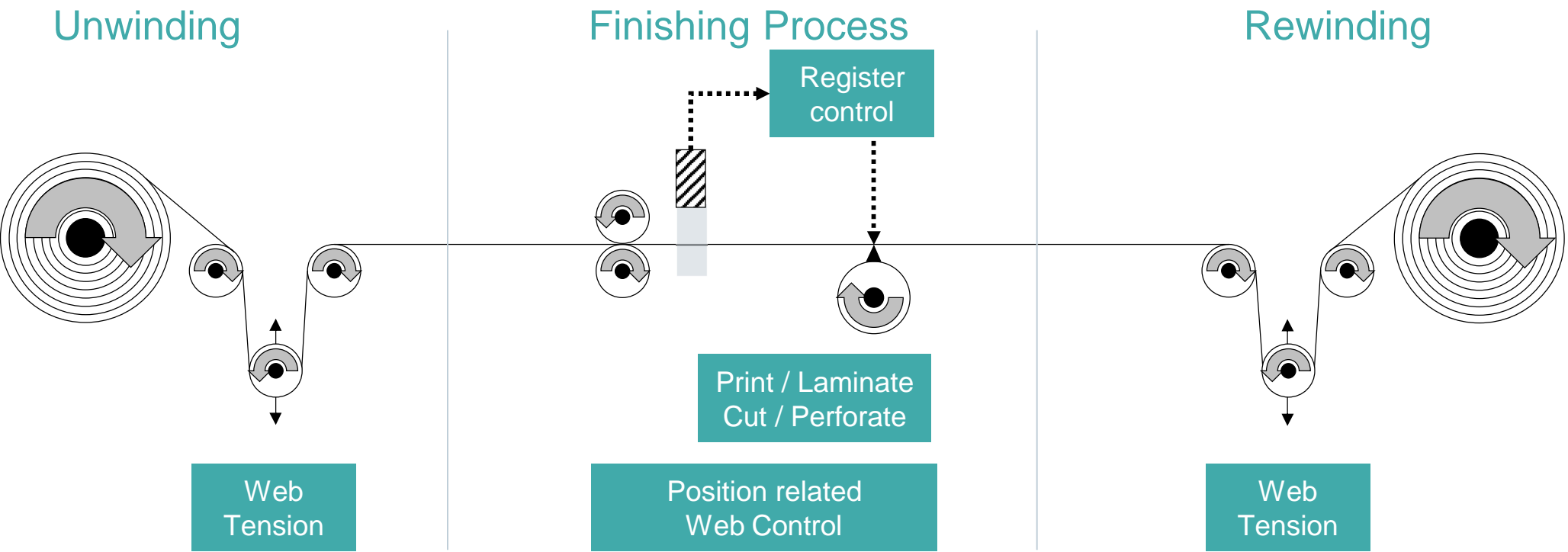
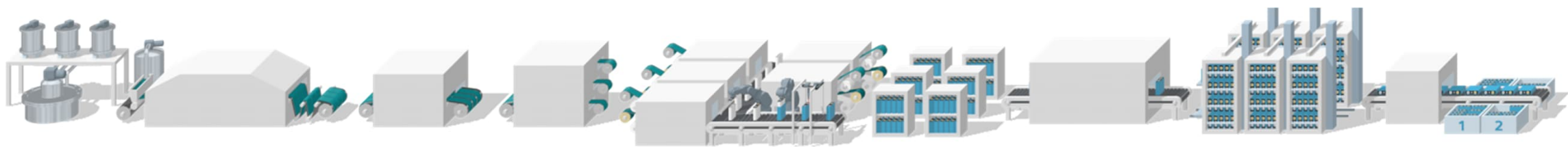
더 높은 생산량을 위해 mixing 효율 및 공정 시간 개선
Mixing 과정에 대한 실시간 시각화 및 데이터 획득
예지보전을 통해 사용수명의 향상





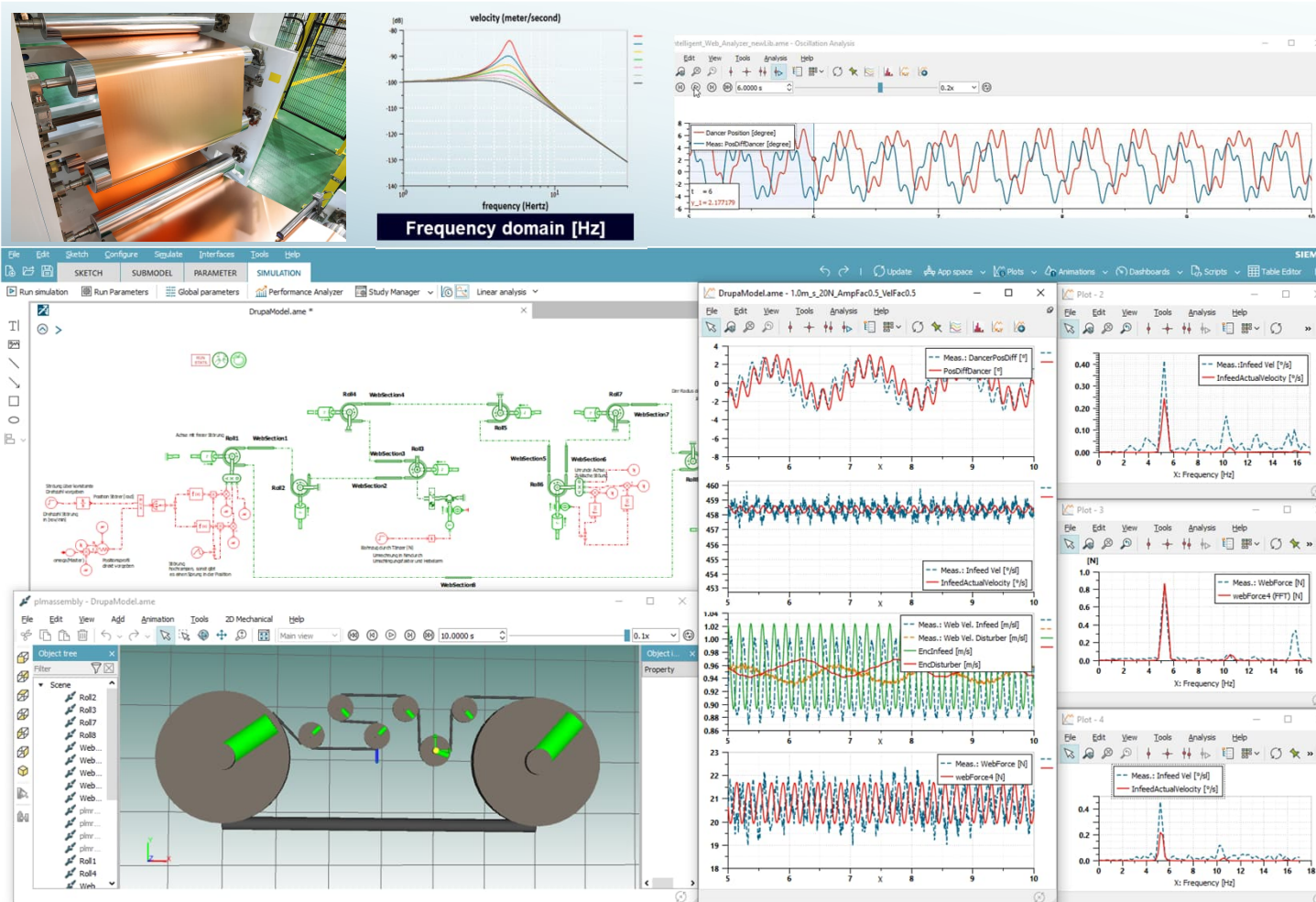
xDT for battery manufacturing ; Converting and Coil to stack process

전극 이송 공정에서의 웹-장력 제어를 위한 xDT 활용



웹-시스템 시뮬레이션

연속적인 웹 어플리케이션에 대한 요구사항



와인더, 댄서, 패시브 롤러, 웹, 인/아웃피드에 대한 동장 모델을 갖춘 모듈식/유연한 기구 설계

동적 웹-장력, 토크 progression 및 regulation 전략의 영향도 분석

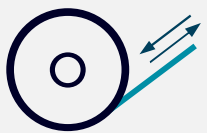
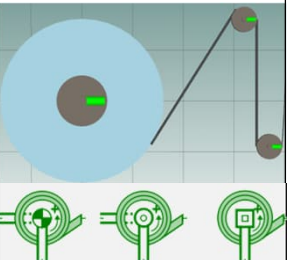

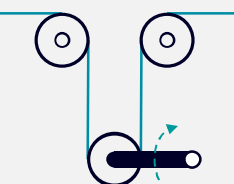
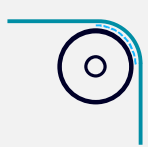
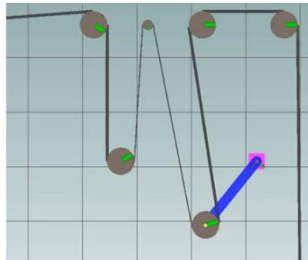
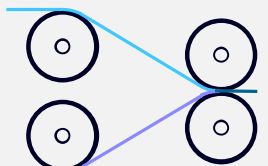
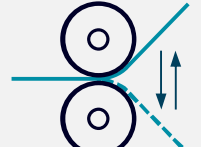
메카트로닉 최적화를 위한 시간 및 주파수 기반 시스템 분석

동일한 구성 인터페이스로 전용 드라이브 모델 연성 해석

시스템 시뮬레이션을 위한 웹-어플리케이션

이송 장비에 대한 DI 소프트웨어와 및 공장 자동화 노하우 및 협력



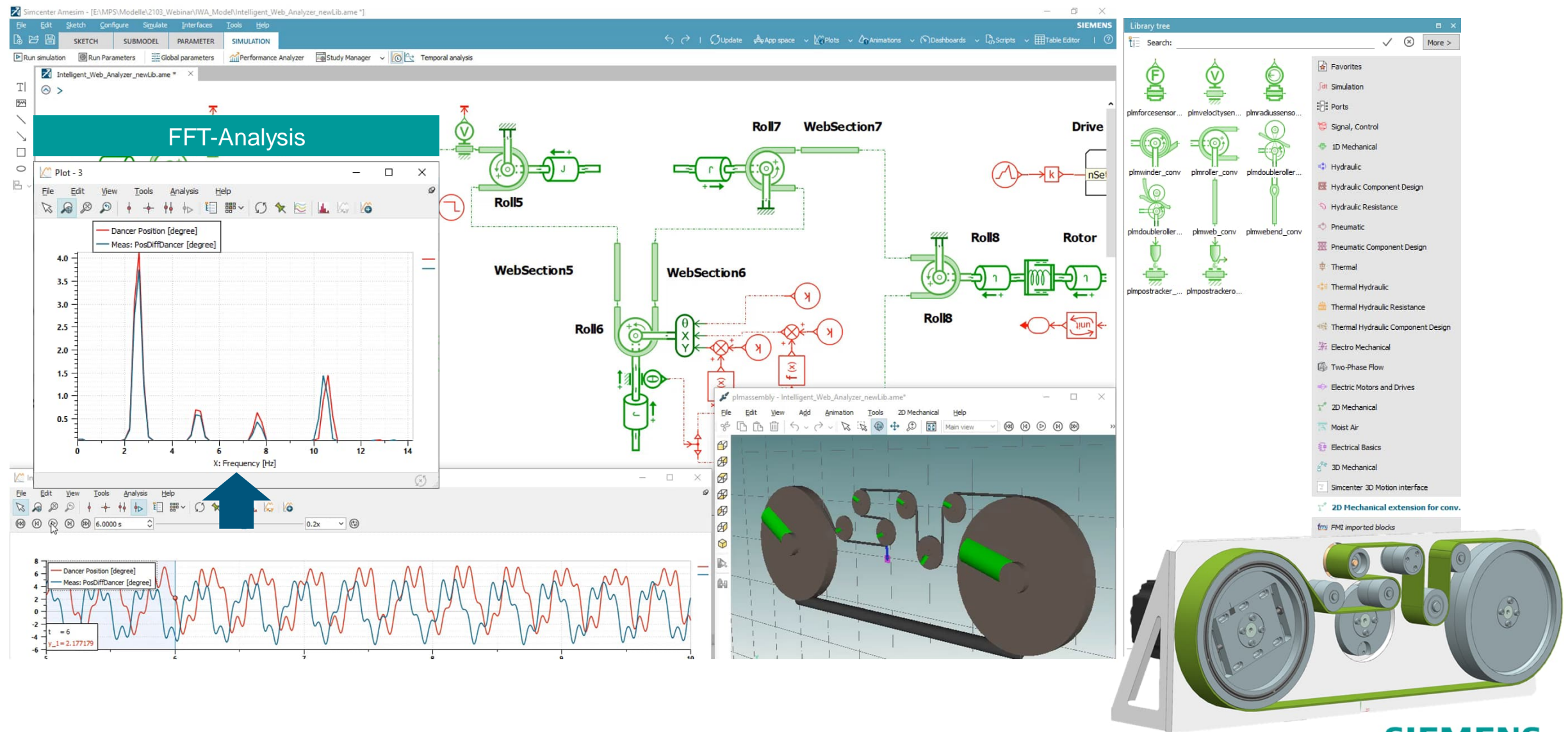
와인더 모델	롤러와 댄서	더블 롤러
  <ul style="list-style-type: none"> 직경과 관성의 변화 고려 코어 직경의 적용 	    <ul style="list-style-type: none"> 병진 및 회전 댄서를 포함하여 driven/passive 롤러 설정을 생성 웹 슬라이딩/슬리핑 효과 통합 	  <ul style="list-style-type: none"> 다중 웹 라미네이팅 롤러의 접점 변경 지원

웹-기반 애플리케이션에 적용되는 맞춤형 물리적 거동 모델 생성

 <p>$\sigma(x)$ $\epsilon(x)$</p> <ul style="list-style-type: none"> 공정에서 다양한 응력 히스토리를 적용하거나 파일로 시뮬레이션 저장 	  <ul style="list-style-type: none"> 어떠한 형상이든 커스터마이징 	 <ul style="list-style-type: none"> 시간 경과에 따른 웹 위치를 추적하여 롤러 움직임과 동기화 	 <p>F, v</p> <ul style="list-style-type: none"> 와인더, 웹 세그먼트 등에서 웹 관련 정보를 추적
---	---	--	--

응력 히스토리	비-원형 형상	위치 추적	센서
---------	---------	-------	----

웹-기반 시뮬레이션 지능형 웹 분석

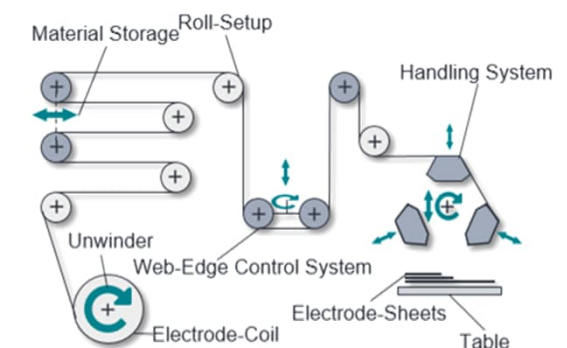
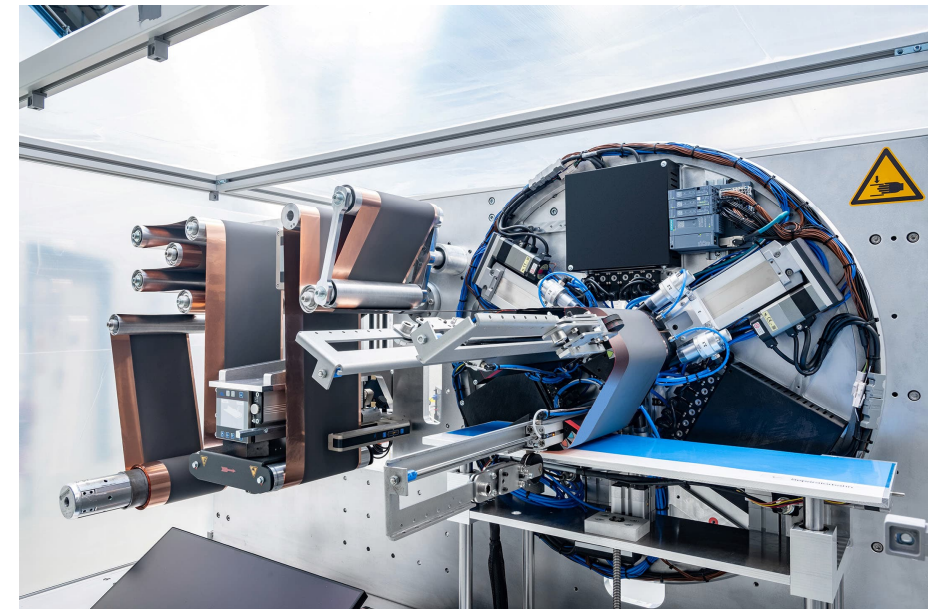


coil to stack으로 연결되는 배터리 셀 공정 – Coil2Stack 공정

유연한 생산 시스템을 위한 방법



- 카를스루에 공대(KIT) 산하 생산과학연구소(wbk)에서는 새로운 세대의 배터리 생산을 위한 혁신적인 솔루션 제안
- KIT는 매우 유연하게 전극 시트가 연속적으로 분리막에 적층될 수 있는 새로운 타입의 **Coil2Stack** 프로세스를 개발
- 웹 가이드 장치의 동적 영향, 동기화된 축의 제어 원리 및 웹-장력과 라미네이션 품질에 대한 재료 특성을 모델링하는 접근 방식을 취함



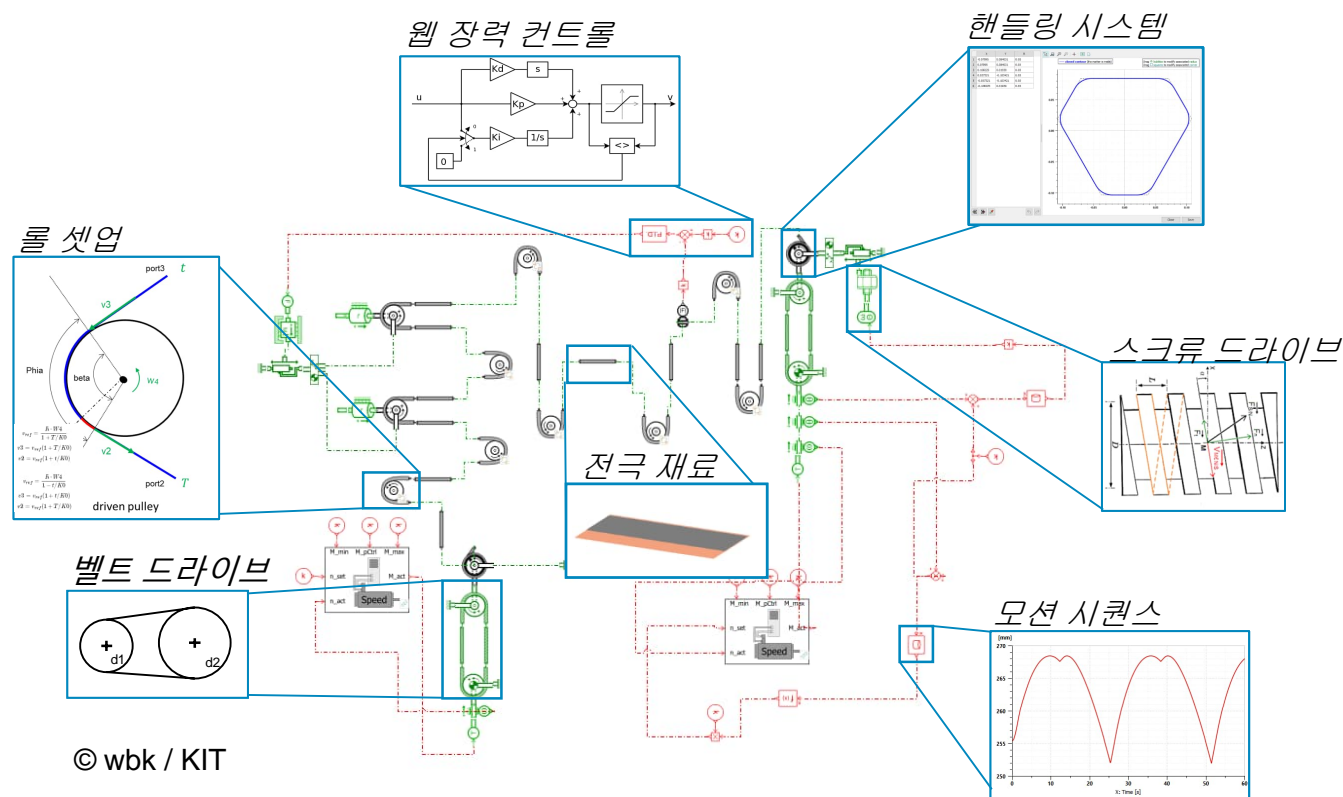
© wbk / KIT



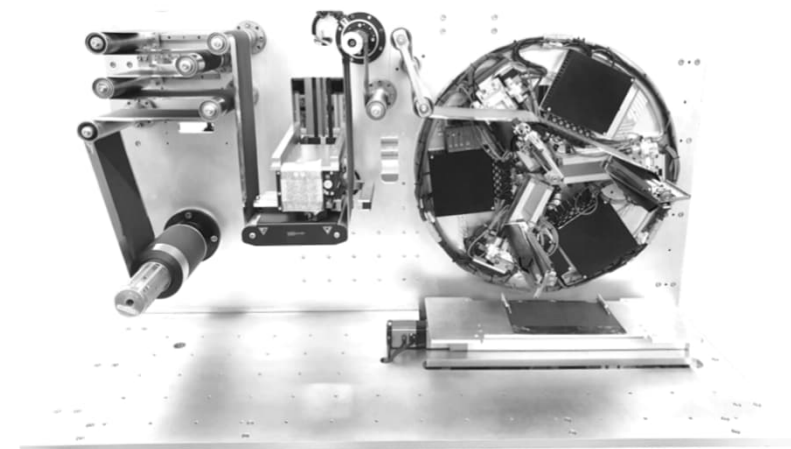
Coil2Stack 공정 – 시스템 시뮬레이션 디지털 트윈



Coil2Stack 기계에 대한 아메심 모델 구성



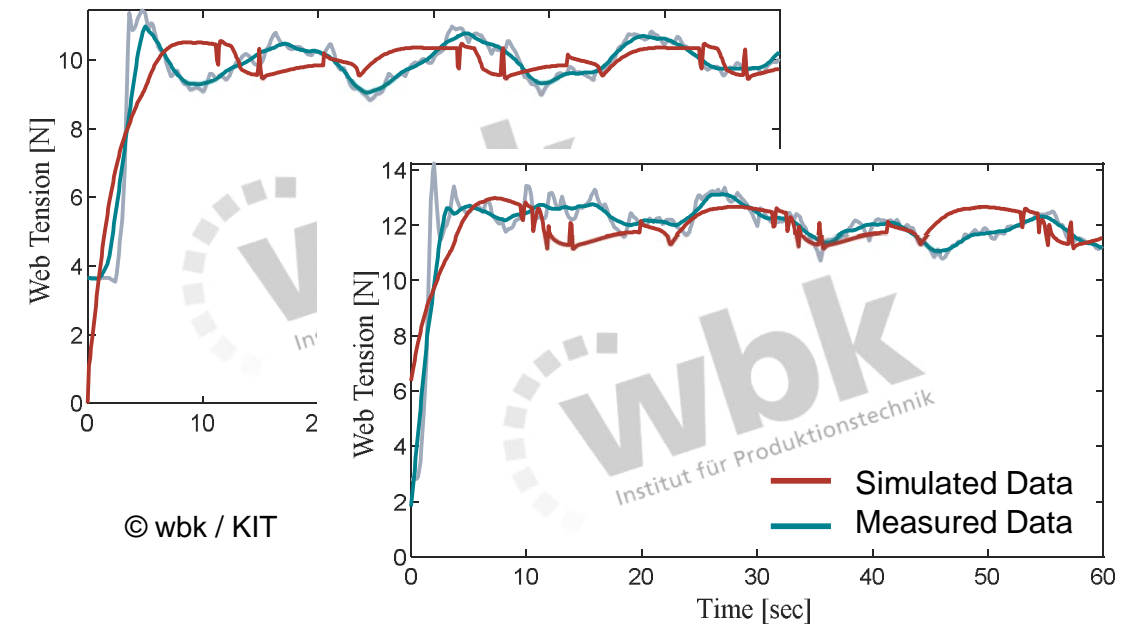
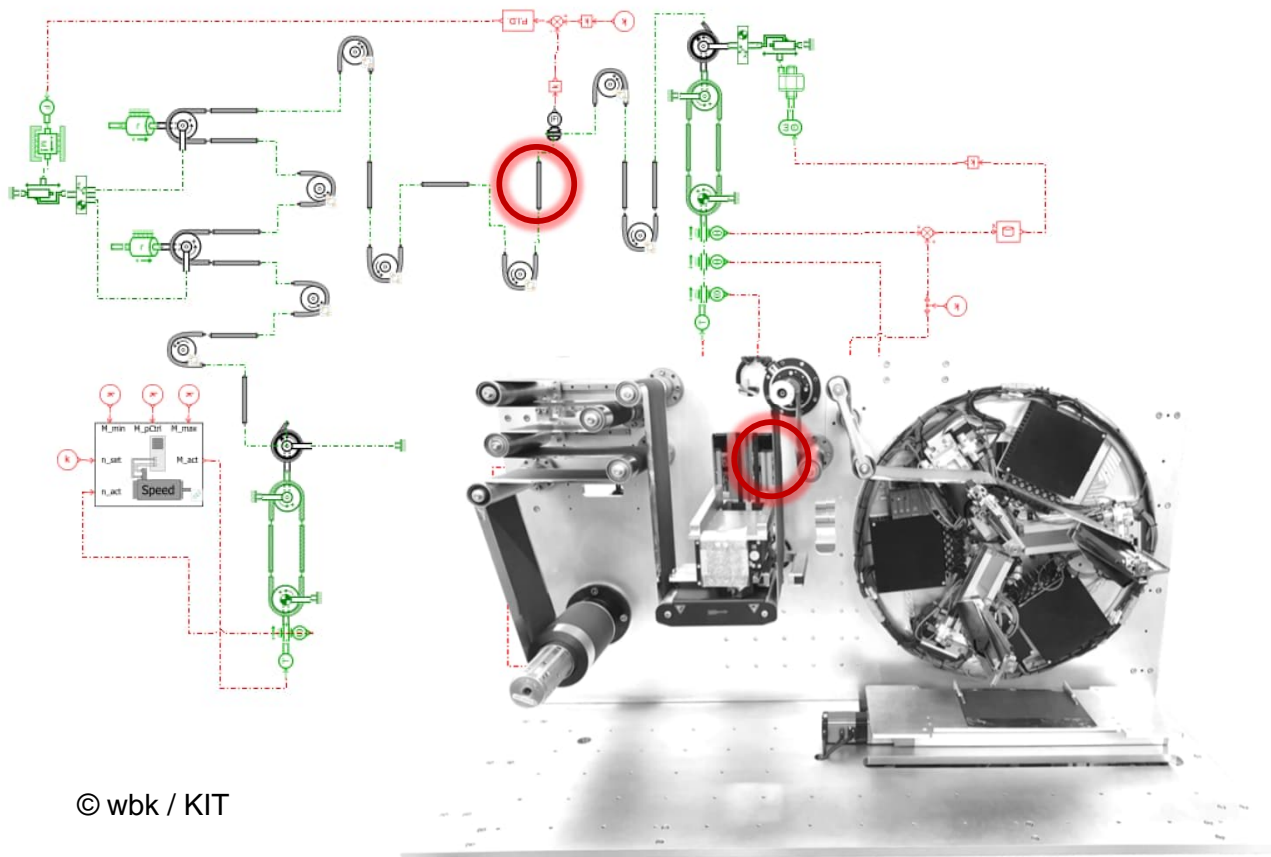
실제 시스템



© wbk / KIT

- 메카트로닉스 시스템 설계
- 빠른 모델 구성
- 기계 및 재료 거동의 가상 검증
- 최적의 제어 매개변수 결정

Coil2Stack 공정 – 시스템 시뮬레이션 디지털 트윈



- 재료는 매우 민감함
- 웹-장력은 품질에 중요한 매개변수
- 시스템의 모든 위치에서 웹-장력 시뮬레이션
- 다양한 기계 매개변수의 가상 탐색

모델-기반의 시스템 설계

Coil2Stack의 안정적 운영을 위한 제어 및 수율 예측 모델 활용

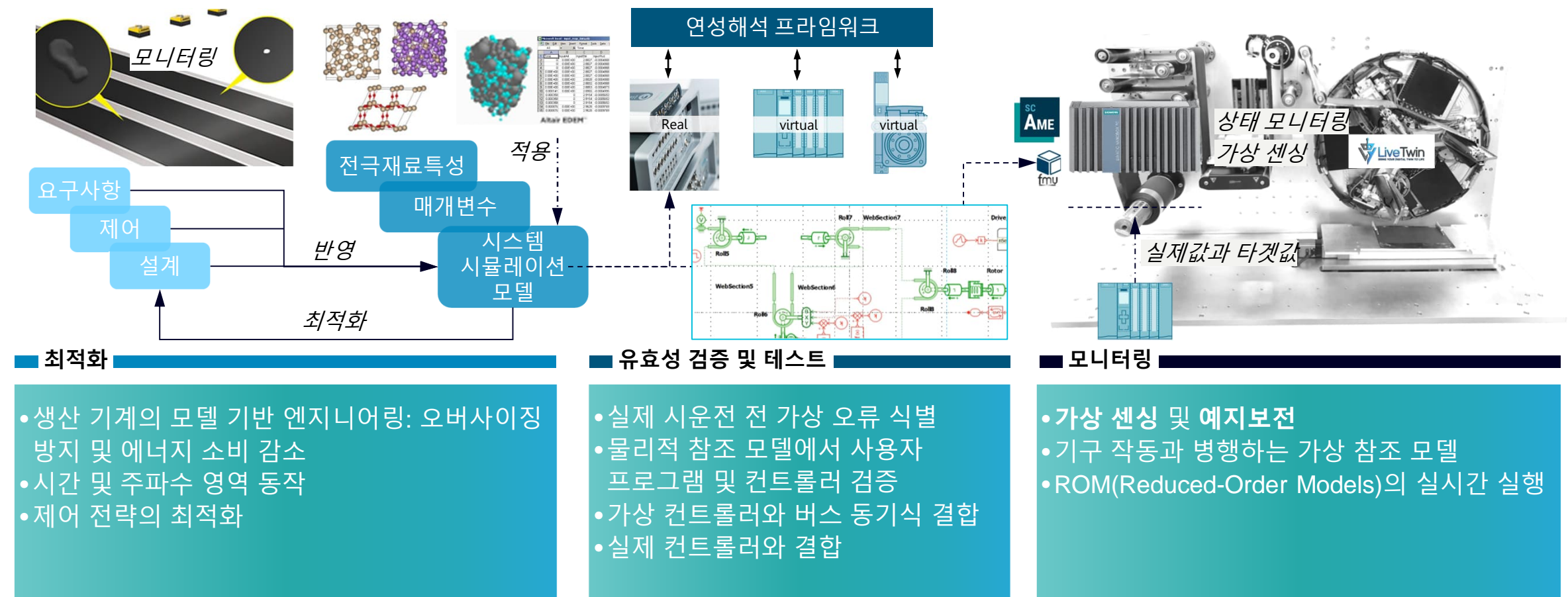
1 기구 개념 설계

2 기구 엔지니어링

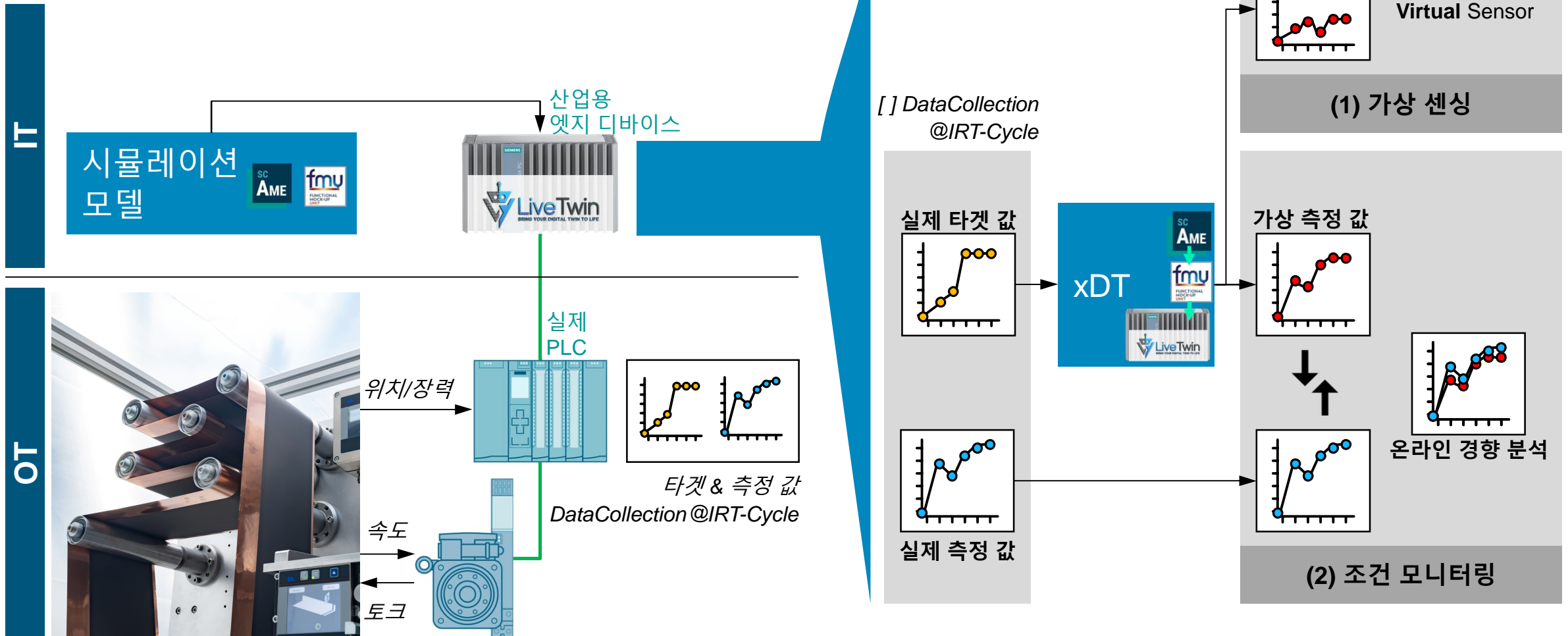
3 기구 시운전

4 기구 실행

5 서비스



조건 모니터링과 가상 센싱 산업용 엣지 디바이스를 이용한 라이브트윈 어플리케이션



다양한 산업군에서의 xDT 적용



Design



Manufacture



Service



Executable Digital Twin 요약



- Design : 제품 성능 최적화
- Manufacture : 생산 공정 최적화
- Service : 예지보전을 통해 사용수명 향상

| Thank you

Let's create better batteries together.