

Development and Application of AI Solutions in the Semiconductor Industry

Seungwon Seo

GSFSolution · Republic of Korea

GSF SOLUTION

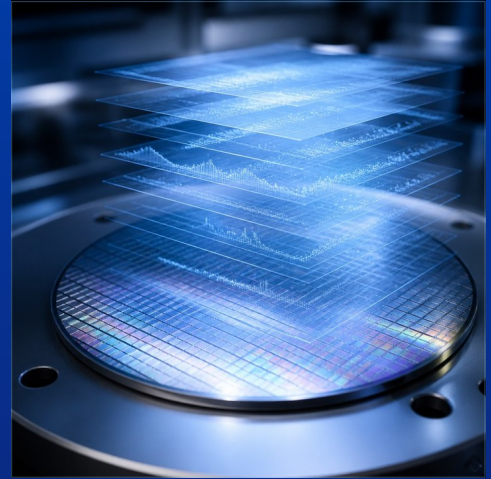
Development and Application of AI Solutions in the Semiconductor Industry

Experience-Grounded Reasoning for Equipment and Process Intelligence

Seungwon Seo · GSF Solution

www.gsfsolution.com

대외 공개본 · PUBLIC RELEASE



GSF SOLUTION

AGENDA

발표 순서

문제에서 시작해 신호 · 경험 · 검증을 거쳐 사업으로 — 6개 파트 · 22개 섹션

PART I 01 - 03

문제 정의

- 01 회사 소개
- 02 문제 정의 · 통합 구조
- 03 산업 구조적 제약

PART II 04 - 05

데이터 기반

- 04 수집 · 통신 기반과 SVID 연동
- 05 P&ID 지능화

PART III 06 - 11

신호화 · 공정 적용

- 06 거동 신호화
- 07 Wobbling 특징량 · Vision 실증
- 08 착수점 이상 탐지
- 09 논문 검증 · 산학협력
- 10 신호 - 공정 해석
- 11 신호-물리 맵 · 예측 파이프라인

PART IV 12 - 16

경험 재사용 · 추론

- 12 사건 정렬 · 경험 재사용
- 13 공정 인식 유사도 · 조치 등급
- 14 가설 검증 · 통합 시나리오
- 15 지식 기반 SENTIX
- 16 하이브리드 추론 스택

PART V 17 - 19

검증 · 최적화 과제

- 17 PEALD 증착 공정 검증
- 18 기술 성숙도 · KPI 검증
- 19 최적화 과제 · 온프레미스 추론

PART VI 20 - 22

사업 · 결론

- 20 시장성 · 구조적 진입장벽
- 21 익명화 · IP 경계
- 22 결론

검증된 항목과 확장 중인 항목을 각 파트에서 구분해 말씀드립니다.

01 회사 소개 About GSF Solution

공정과 장비를 같은 축에서 해석해 이상을 사전에 차단한다

Customized Process & Equipment Solutions for Semiconductor FAB

회사 개요

회사명	GSF솔루션
대표	김승환
설립	2022년 5월 · 사내벤처로 출범
사업 분야	반도체 공정 · 장비 기술 맞춤형 솔루션
거점	본사 충북 청주 · 지사 / 기업부설연구소 경기 성남

공정 레시피와 장비 거동을 동일한 축에서 해석해 온 20년의 현장 경험 — 사후 분석이 아니라 사전 개입을 전제로 솔루션을 설계합니다.

단계별 성장 · Growth Path

1	원천기술 개발	전문가 인사이트 · Hybrid 아키텍처 · 수집 기반	완료
2	실증 · 지식 축적	ETCH · PEALD · Wet Clean 실증 · PHOTO TRACK 확대	진행 중
3	초기 성장	개선품 양산 · 무인화 FAB 진입	진행 중
4	중기 성장	공정 확대 · 플랫폼 서비스	계획
5	고도 성장	해외 진출 · 세정 공정 확대	계획

현재까지 축적된 자산

10건+

특허 출원 · 등록
연구 개발, 인력

3+α공정

식각 · 증착 · 세정

1,000건+

구조화 지식 문서
공정 레시피, 장비

본 발표의 사례는 자사 실증 · 구축 환경에서 확보한 것입니다



02 문제 정의 · 통합 구조 The Problem → Context Fabric

데이터의 양은 해석력을 보장하지 않는다 — 결손된 계층은 문맥이다

장비는 소프트웨어가 아니라 하드웨어 · 공정의 언어로 말합니다 — Equipment speaks in physics, electricity and chemistry.

분리된 다섯 개의 데이터 흐름

- 영상 Vision — 프레임 단위, 고빈도
- 센서 진동 · 변위 · 정전기, 개별 수집
- FDC RF · Gas · Pressure · Temperature
- 알람 이벤트 시퀀스, 코드 체계 상이
- 정비 문서 비정형 텍스트, 사후 기록

다섯 개의 흐름이 서로 다른 시간축과 서로 다른 ID 체계를 가진다.
수집은 이미 되어 있으나 같은 사건으로 묶이지 않는다.

판단 지점

Vision	Sensor	FDC	Alarm	Docs
--------	--------	-----	-------	------

공유되는 문맥 없음

엔지니어의 판단이 멈춘다

다섯 개의 화면과 공유되지 않는 문맥 — 엔지니어가 수동으로 대조합니다.
수집의 문제가 아니라 문맥 결손의 문제입니다.

FDC 단독으로는 원인을 설명할 수 없다

GSF 통합 구조 · CONTEXT FABRIC — 구조에서 시작해 증거 기반 조치로 끝난다

WHERE

장비 구조
Equipment
Topology

WHEN

공정 문맥
Recipe · Step
Chamber State

WHAT

거동 · 신호 특징
Motion & Signal
Features

BEFORE

Expert Case
Memory
Validated Cases

NEXT

증거 기반 조치
Evidence-Based
Action

하나의
수평 흐름

해석 축 — P&ID 한 장에 의지하지 않습니다

배관 위상은 해석의 시작점입니다. 물리 · 전기 · 화학 거동을 함께 읽어야 같은 신호가 Step마다 다른 의미를 갖는 이유를 설명할 수 있습니다.

반복성 — 같은 지점에서 다시 일어납니다

지식 체계는 방대하지만 이상은 무작위가 아닙니다. 같은 지점(Topology) · 같은 Step에서 반복되므로 탐색 범위는 유한한 집합으로 좁혀집니다.

Not another dashboard — a reasoning layer for semiconductor operations.

방대한 지식은 반복되는 지점에서 재사용 가능한 판단 카드로 축적됩니다 — Experience is captured as reusable decision cards.

03 산업 구조적 제약 Structural Constraints

AI 도입을 제약하는 것은 알고리즘이 아니라 산업 구조다

Four structural constraints of semiconductor manufacturing — 우회할 수 없으므로 전제로 설계해야 하는 조건들

01 데이터 폐쇄성 · NO DATA EGRESS

팹도, 장비사도 데이터를 내주지 않습니다

- 팹 차원 — 인터넷 연결이 허용되지 않아 클라우드 AI를 쓸 수 없고, 추론은 장비 PC 연산 안에서 끝나야 합니다 · IP 보안 우려 **73%**
- 장비사 차원 — 장비 데이터가 공급사 플랫폼 · 포맷에 귀속됩니다. 태그 사전 비공개, 구조화 export 미제공, EDA Freeze Version 불일치

현상 — ① 필요한 신호를 필요한 주기로 확보하기 어렵고 ② 이상의 원인 규명이 공급사 리드타임에 종속되며 ③ 학습에 쓸 수 있는 데이터 범위가 공급사 허용 범위로 축소됩니다

PDF Solutions 2025 · Accenture 2024 · Semiconductor Engineering 2022 · Cimetrix

02 데이터 사일로 · DATA SILOS

통신 표준은 50년째, 의미의 통일은 아직입니다

SEMI 표준화 1970 설립 · 1973 프로그램 출범 · SECS-I 78 · SECS-II 82 · GEM 92 · HSMS 94 · 현재 1,000건+

- 50년간 표준화를 이어왔지만 **채택은 자발적이고 인증 체계가 없습니다**
- 같은 표준을 지켜도 **OEM마다 변수 · 메타데이터 정의가 다르고**, EDA Freeze Version이 어긋나면 통신 자체가 불가능합니다

현상 — MES · FDC · SPC · YMS가 각각 저장하고 구형 · 후공정 장비는 표준 밖에 있어, 같은 사건으로 묶이지 않고 챔버 기록은 테스트 시점엔 이미 삭제됩니다

SEMI 1973 · 2019 · Cimetrix · DR Yield · Semiconductor Engineering 2022

03 도제식 전수 · TACIT KNOWLEDGE

판단 기준이 사람에게만 남습니다

- 현장 지식은 감각적 · 문맥 의존적 · 무의식적 — **매뉴얼과 교육 영상으로 포획되지 않습니다**
- 2030년까지 반도체 신규 숙련 인력 **100만 명 이상** 필요
- 미국 반도체 신규 기술자의 **80% (약 6.7만 명)** 미충원 위험

Dirac 2024 · Deloitte 2022 · SIA 2023

04 희소 이벤트 · RARE FAILURES

고장 사례는 지도학습에 부족하고, 장비 상태는 계속 변합니다

- 센서 **1,000만 건 중 라벨된 고장은 37건** — 오퍼피팅과 오탐으로 신뢰를 잃은 실제 사례
- 챔버 상태 **drift**로 예측 모델 성능이 빠르게 저하됩니다
- AI 가치를 전사로 확장하지 못하는 기업 **74%**

PDF Solutions 2025 · IEEE T-SM 2019 · BCG 2024

반도체는 SEMI 표준에 힘입어 여기까지 왔습니다 — 장비 구매 1건당 표준 20~25건 인용 · 300mm 팹은 GEM300 사실상 의무 · 표준화는 지금도 진행 중입니다

GSF는 이 제약을 우회하지 않고 설계 전제로 채택했습니다 — 팹 내부에서 데이터를 직접 생성하고, 동일한 축으로 정렬하고, 전문가 판단을 카드로 축적합니다

04 추론의 전제 — 수집 · 통신 기반과 SVID 연동 Acquisition Layer · Data Pipeline

데이터를 직접 생성하고 동일한 축으로 정렬한다

데이터를 직접 만드는 계층

기존 장비 센서
온도 · 압력 · 펄스 · RF · 가스

추가 센서 Install
비전 · 변위 · 정전기 · 진동

설치 환경 분석 → 최적 배치 설계 → 보정

Raw Data + Solution Data

다채널 통신 · 자체 구축

40ch 최대 확장

0.1초 수집 주기

7종 산업 프로토콜

SECS/GEM · PROFINET · EtherCAT · EtherNet/IP · CAN · Modbus · DNP3

NON-SECS 장비도 변환 모듈을 통해 동일 축으로 편입

SVID 정의 5종

SVID 01 와류 · 파동 Data 대조 Tool의 일치도 값

SVID 02 파형의 개수 Data
설정 Edge Level을 초과한 파형 수 Count

SVID 03 X-bar 위치폭 Tool 대상 물체의 X-axis Position

SVID 04 Y-bar 위치폭 Tool 대상 물체의 Y-axis Position

SVID 05 편차값폭 Tool 기준 흔들리는 범위의 편차

적용 솔루션 범위

CHAMBER

Wobbling Nozzle 유량 Nozzle 처짐

Spin Plate 진동 Wafer Notch Suck Back

EFEM · TRANSFER

Blade 처짐 Blade 진동 Wafer 정전기

Chemical Tank 수위

동일한 수집 · 정렬 · 추론 구조를 공정별 문제에 반복 적용합니다.

채널 구조 · 로드맵

1 Set
Sensor 단위

15 SVID
대조 · 엡지 · 폭 X/Y

8 Set = 120
확장 예비 포함

Set당 4개 실측 채널과 11개 Spare 채널로 구성되어 Tool 추가 시 세 설계 없이 확장됩니다.

후속 로드맵

1 Real Data 취합 및 분석 제품 구현

2 FDC LAN 선 포설

3 Nozzle 상태 모니터링 Protocol 개발

4 FDC 연결 및 Data 관리

IP · 구축 이력

특허 출원

Wobbling 감지 (미국 · 대만 · 일본)

용액 토출 감시

장비 부품 모니터링

블레이드 처짐 감시

ESD 관리

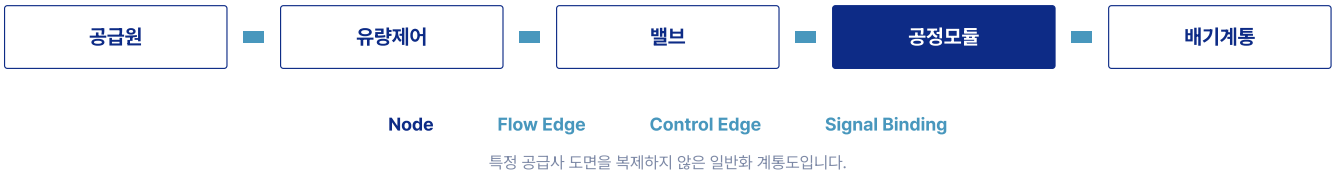
반도체 팹 대상 FDC 구축 및 추가 센서 연동 수행 이력

수집 계층을 직접 보유해 필요한 신호를 필요한 주기로 확보하고, Vision Tool 출력도 FDC SVID 채널에서 동일한 축으로 관리합니다

05 P&ID 지능화 Equipment Map

P&ID를 기계가 해석하는 설비 위상 지도로 변환한다

일반화된 배관 계통도



그래프화 4단계

- ✓ 심볼 · 태그 인식 Symbol / Tag Detection
- ✓ 배관 위상 복원 Line Topology Reconstruction
- ✓ 신호 결합 Signal Binding
- ✓ 전문가 검증 Human Validation

왜 필요한가

A deviation matters only when we know where it occurs and what it can affect.

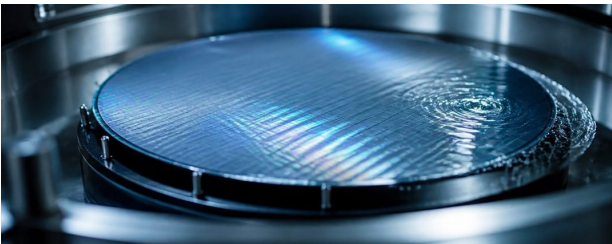
이상이 발생한 지점과 영향 경로를 알면, 연결되지 않은 부분은 원인 후보에서 제외됩니다.



06 거동 신호화 Wobbling · Wet Clean Process

관측되지 않던 거동을 정량 측정 가능한 신호로 변환한다

현상 — 세정 공정 회전 중 미세 흔들림



Wet Clean 공정 — 회전축 편심과 DIW 국소 와류 (설명용 이미지)

신호화 — 중심 궤적 Signature



특정 위상에서 궤적이 반복 확대되고 UCL에 근접한다

실측 — 폭 Tool 거리 편차 (정규화 지수)

구분	측정 기준	정규화 범위	상대 편차
정상 Chamber-A	Cup - Wafer 테두리	Index 1.00 (기준)	약 1.8%
와블링 Chamber-B	Cup - Wafer 윤곽	Index 약 1.20	약 4.0%
와블링 Chamber-B	Cup - 기준 마커 윤곽	Index 약 1.20	약 3.5%

특징량 · Motion Signature

대조(일치도) · Edge(파형 수) · 폭(거리) 3개 Tool 병행
검출 구간: Wafer 최고 위치 2nd Step (DIW), Spin & Dry
속도 · 조명 · 보정 상태로 정규화

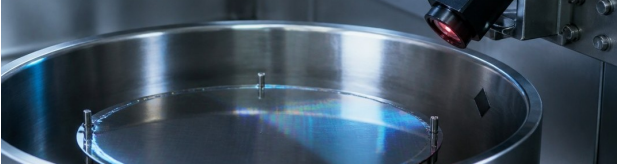
정규화 지수로 표기 · 독립 평가 전



07

Wobbling 특징량과 Vision 실증 Feature Definitions · PoC

센서 설치 구성



IR 센서 · 전용 브래킷 · Chuck Pin · Cup 내벽 기준 마커 — 설명용 이미지

- ✓ 적외선 Type 선정 — 백색광은 Flash가 공정에 영향을 줄 가능성을 배제할 수 없음
- ✓ 전용 브래킷 제작 — 챔버 내 고정 수단이 없어 각도 · 위치 재현성 확보
- ✓ 정상/이상 동시 설치 — Chamber-A(정상) · Chamber-B(와블링)에 각 1 Set, Dummy Wafer 비교 Test

3개 Tool 검출 방식

일치도



대조 Tool

DIW 와류로 발생하는 파동의 일치도 값. 정상은 낮은 범위, 와블링은 80~120 범위로 기준점 분리 가능.

Edge Level



Edge Tool

정상은 잔잔한 파형, 와블링은 Peak가 높은 위치에 형성. 설정 Level을 초과한 파형 수를 Count해 판정.



대조 Tool을 base로 Edge Count Tool을 결합해 정상 · 와블링을 분리합니다.

폭 Tool

Cup 기준 거리와 편차를 측정. Chuck Pin이 오차를 유발할 수 있어 기준 마커 윤곽 검출을 병행.

특징량 6종

dx / dy

프레임별 중심 이동량

radius

중심 - 외곽 반경 r(t)

P-P 진폭

구간 내 최대 - 최소

RMS

대표 경고 후보 지표

ellipticity

타원률 — 편심 지표

frequency band

주파수 대역 성분

Calibration & 정규화

- 01 특징량 추출 전에 렌즈와 장착 오프셋을 제거
- 02 RPM 설정에 따른 속도 정규화
- 03 조명 변화에 따른 밝기 · 대비 정규화
- 04 동일 임계값을 조건 변화와 무관하게 유지

경고 후보 판단 로직

연속성 단일 프레임 이상은 채택하지 않음

신뢰도 추적 품질이 낮으면 보류

운전상태 가감속 구간은 별도 처리

세 조건을 결합해 경고 후보를 결정

영상 단독 이상은 즉시 장비 고장으로 단정하지 않습니다.

6종 특징량과 3개 Tool로 거동을 좌표 분포로 변환하고, 세 조건을 결합해 경고 후보를 확정합니다



08

착수점 이상 탐지 Wet Clean Landing Point · Vision

고속 회전면의 용액 착수 위치를 통계적 정상 영역으로 판정한다

대상 공정 · 파이프라인

Wet Clean 공정(Clean & CMP 연결 영역) — 고속 회전하는 웨이퍼에 세정 용액을 토출하는 구간으로, 용액 착수점의 위치 편차가 미세 결함으로 이어지는 고위험 구간입니다.

3단 구성

① 고속 영상 획득

고휘도 조명 · 반사 · 회전 대응

② 용액이 닿는 지점 찾기

닿는 지점을 좌표로 변환

③ 판정 · 시각화 · 기록

범위를 벗어난 장면을 바로 표시

경량 구조로 설계 — 스마트팩토리 · 디지털트윈 감시 체계에 통합 가능한 형태입니다.

이상을 판정하는 기준

① 정상만 보고 기준을 만듭니다

속행자가 정상이라고 판단한 토출 장면만 학습합니다. 불량 사례를 일부러 만들 필요가 없어, 이상이 드물게 나는 공정에도 적용됩니다.

시중의 범용 영상 인식 도구는 이 착수점을 찾기 못해, 자사 공정 장면으로 다시 학습시켰습니다.

1,650

지점 직접 표기

8,396

학습한 장면 수

≈900

정상 지점 표본

② 정상 산포가 관리 범위가 됩니다

정상 토출은 용액이 닿는 지점이 한곳에 모입니다 — 그 묶음의 중심과 폭이 공정 허용 범위입니다

③ 범위를 벗어나면 이상으로 봅니다

SPC 관리 한계를 영상에 적용한 것과 같은 개념입니다. 정상 토출 30초에서 닿는 지점 약 900개로 중심과 폭을 정하고, 벗어난 장면은 시각과 위치가 함께 기록됩니다.

Mock-up 완료 · 양산 라인 적용 중

현재 상태와 확장 계획

Mock-up 검증을 마치고 양산 환경 적용 단계입니다 — 추가 확장을 진행할 예정입니다.

남은 기술 과제

① 한 지점을 둘로 잡는 경우 — 학습을 과하게 시키면 착수점을 2개로 잘못 잡습니다. 착수점 자체가 눈으로도 희미한 데서 오는 현상입니다.

② 판정까지 걸리는 시간 — 단독 환경은 짧지만, 실제 라인에서는 서버를 거치는 단계가 늘어 지연이 커집니다.

③ 정밀하게 볼수록 느려집니다 — 정밀도와 속도 중 어디에 맞출지는 공정 기준으로 정합니다.

적용 대수가 아직 적어 성능은 수치로 증명하지 않습니다. Wobbling과 동일한 **거동 감시 체계**로 통합할 예정입니다.

본 기술은 동료심사 학술지 게재와 정부 지원 R&D 과제 수행을 통해 검증되었습니다 · 서지 정보와 과제 정보는 대외 공개본에서 생략

거동을 좌표 분포로 변환하는 방식은 Wobbling과 동일하며, 적용 단계만 다릅니다

09 논문 검증 · 산학협력 Peer-Reviewed Validation

산학협력 과제로 수행하고 결과를 학술지에 게재했다

앞 페이지의 착수점 탐지 기술을 산학협력 과제로 수행했습니다 — 주황색 표기는 모두 학술지에 게재된 내용입니다

게재 상태 · PUBLICATION

딥러닝 기반 고속 회전면
용액 착수 이상 탐지 방법

게재 국내 동료심사 학술지 게재 완료
Peer-Reviewed Journal · 서지 정보 비공개

시점 2025년 상반기 게재

수행 대학 연구진 · 교신저자
GSF솔루션 기술부

심사 동료심사 접수 → 수정 → 게재확정
절차 완료

연구비 정부 지원 R&D 과제
과제번호 비공개

논문이 밝힌 것 · FINDINGS

① 기성 도구로는 탐지되지 않습니다
사전학습 상태의 영상 인식 도구 3종을 비교한 결과, 착수점을 **전혀 다른 사물로 오탐**했습니다. 학습 데이터에 이런 대상이 없었기 때문입니

② 착수점은 논문으로도 잘 안 보입니다
위에서 토출하면 용액이 닿는 즉시 퍼져 웨이퍼 표면이 거울처럼 작동합

③ 데이터를 늘리면 오히려 틀립니다
8,396장으로 늘려 학습하니 착수점을 2개로 잡았습니다. 최종 모델은

④ 기준은 운영자가 정합니다
정상만으로 만든 통계로 비정상성을 찾는 것은 논리적 모순이라, **허용 폭**

시뮬레이션 결과 · TEST

Accuracy 0.99 Precision 0.93

Recall 0.89 F1 Score 0.91

허용 폭 10 조건 · 비정상 장면 50개를 무작위로 섞어 넣고 10회 반

논문이 스스로 밝힌 한계

지표는 허용 폭을 어떻게 정하느냐에 따라 달라지므로 절대적인 값

함께 구현한 것 — 웹 기반 감시 화면에 허용 범위 기준선과 현재 좌

과제 수행 형태

대학 연구진과 산학협력 과제로 수행했고, 고객 정보를 제외한 방법과 실험 결과를 논문으로 정리했습니다.

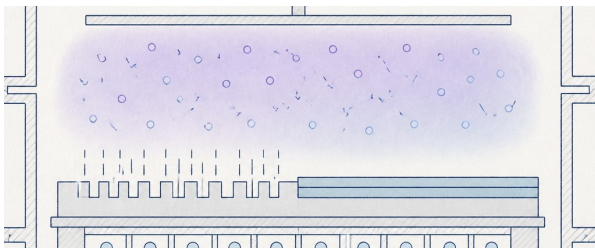
이 수치의 범위

위 지표는 논문의 Mock-up 시뮬레이션 결과입니다. 양산 라인 성능은 적용 대수가 쌓인 뒤에 별도로 보고합니다.

방법과 실험은 논문으로 정리하고, 공정 데이터는 팸 안에 남깁니다

10 신호 · 공정 해석 Plasma · Etch · Deposition

플라즈마 반응을 신호로 해석하면 식각과 증착은 동일한 문법을 갖는다



설명용 도해 — 좌: 이온 충격에 의한 이방성 식각 / 우: 박막 증착

식각 · ETCH [검증 완료]

RF 출력으로 **종횡비(Aspect Ratio)**를 맞추는 것이 식각의 핵

DOE 15 Run 독립 평가

증착 · PEALD (MT-NIT) [검증 완료]

Cycle별 특징량 — DCS · NH₃ 유량 · RF Power · Purge

공통 문법 · SHARED KEY

Equipment — Chamber — Recipe — Step — Timestamp

실증 수집 규모 — Plasma Etch Class-A

70여 Active Field 4천여 Step 900여 Recipe Pair 1,200+ 수집 태그

GSF interprets a signal by its physical role, timing and equipment history.

11 ETCH 신호-물리 맵과 예측 파이프라인 Signal-Physics Map · Prediction Pipeline

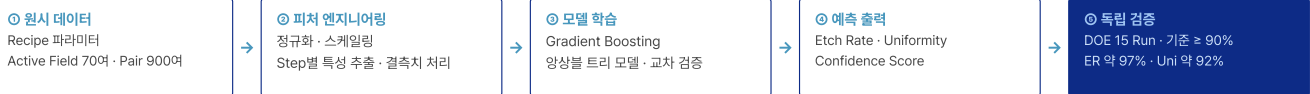
신호에 물리 역할을 부여하면 예측은 검증 가능한 수치가 된다

신호 · 물리 역할 대응

신호 그룹	물리적 역할	Step 내 의미	파생 특징량
RF Source / Bias	이온 에너지 · 종횡비(Aspect Ratio) 제어	점화 · 안정화 구간 구분	Setpoint-Actual, Settling
Gas / MFC	Reaction supply	Step별 조성 전환 시점	전환 지연, 유량 편차
Pressure / APC	Pressure balance	배기 · 공급 균형 상태	Drift, 밸브 위치 변화
ESC / Temperature	Thermal state · 적 상태	누적 이력에 따른 기준 이동	Chamber History 보정
Event Log	상태 전이 기록	Step 경계 확정 근거	Event Sequence

같은 값이라도 Recipe Step이 다른면 정상 · 이상 판정이 달라집니다. 화학식과 상세 Recipe 조건은 노출하지 않습니다 · OES / VI Probe는 본 구축 범위의 성과로 주장하지 않습니다.

회귀 모델 기반 가상 공정 예측



Etch Rate 예측 성능

약 97%

정확도 = 100% - MAPE
(MAPE 약 2.8%)

MAE	약 1.7 Å/min	오차 절대값 평균
RMSE	약 2.2 Å/min	큰 오차 민감 지표
R ²	약 0.89	결정계수
15 Run 중 14 Run APE ≤ 10% · 해당 14 Run 평균 APE 약 1.9%		

Uniformity 예측 성능

약 92%

정확도 = 100% - MAPE
(MAPE 약 7.9%)

이상치 제외	약 97%	특이 조건 1 Run 제외 시
MAE	약 0.08 %p	절대오차 평균
RMSE	약 0.17 %p	이상치 영향 포함
특이 조건 1 Run(APE 약 71%) 포함한 값을 대표 수치로 보고		

신호에 물리 역할과 Step 의미를 부여해 특징량을 구성하고, 성능은 독립 평가셋으로만 보고합니다



12 사건 정렬 · 경험 재사용 StepSync → Expert Case Memory

정렬된 사건은 검색 가능한 경험 자산으로 축적된다

01 정렬 · StepSync



02 저장 · Event Envelope

- 01 기준 구간 Baseline
- 02 전조 구간 Precursor
- 03 사건 구간 Event
- 04 회복 구간 Recovery
- 05 검증된 원인 · 조치 · 결과

Envelope 한 건 = Case 한 건.
검색 키는 Context(장비 · Recipe · Step)와 Symptom(특징량 백터)입니다.

03 재사용 · 4R Cycle

① Retrieve

유사 사례 검색

② Reuse

가설 · 조치 재사용

③ Retain

검증본만 축적

④ Revise

현장 검증 · 수정

③ Retain → ① Retrieve로 재순환

CASE 레코드 구성



상태 관리 · LIFECYCLE

Draft → Reviewed → Validated → Retired

엔지니어가 Validated로 승인한 Case만 다음 추론에 인용됩니다.

The unit of intelligence is not a data point. It is a verified, retrievable event.



13 공정 인식 유사도와 안전 조치 등급 Similarity · Safe Action Ranking

유사도는 경험을 인출하고, 조치 등급은 안전 제약이 결정한다

유사도 구성 · 5요소

Similarity = Process Context + Topology + Trace Shape
+ Alarm Sequence + Maintenance History

Process Context	Recipe Family · Step · Chamber 상태가 같은 조건인가
Topology	P&ID 상에서 영향 경로가 연결되어 있는가
Trace Shape	파형의 형상 · 기울기 · 상승 패턴이 유사한가
Alarm Sequence	알람 발생 순서와 조합이 일치하는가
Maintenance History	직전 정비 · 교체 이력이 유사한가

가중치 정책 · 보정 방식

가중치 정책
고정 가중치는 공개하지 않습니다 — project-specific parameter입니다.

보정 방식
장비군 · 공정군별 검증 데이터와 전문가 판정 결과로 보정합니다. 유사도는 경험을 불러오는 역할이며, 적용 여부는 물리와 안전이 결정합니다.

두 Confidence의 분리

Detection Confidence

이상이 존재한다는 판단의 확신도

Action Confidence

권고 조치가 지금 적용 가능하다는 확신도

화면의 Confidence는 모델 정확도가 아닙니다

점수 구성 요소

- + Evidence Coverage
- + Context Match
- + Topology Consistency
- Counter-evidence
- Uncertainty Penalty

조치 등급화

추가 데이터 요청 증거가 부족해 판단을 보류하는 단계

확인 권고 기본 출력 원인 후보와 확인 순서를 제시하는 단계

자동 조치 제한적 허용 Validated Case와 Safety 제약을 모두 만족할 때만

Validated 상태이고 유효기간 내인 Case만 Action Candidate로 사용합니다

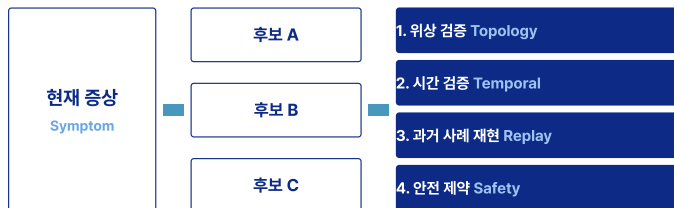


14 가설 검증과 통합 시나리오 Evidence Reasoner · Scenario

단일 추정을 내놓지 않고 경쟁 가설을 순차 검증한다

CANDIDATES

VERIFICATION GATES



우선순위 조치

- 01 근거가 남은 원인 후보
- 02 후보를 지지하는 증거
- 03 권고 확인 순서
- 04 금지 조치 목록

AI의 출력은 원인 확정이 아니라 근거 있는 확인 순서입니다.
연결되지 않은 부품, 비활성 Step, 안전 충돌 조치는 게이트에서 제외됩니다.

통합 시나리오 · 하나의 사건이 추론 루프 전체를 통과하는 8단계



No recipe change or automatic restart without verified evidence.

기술 설명용 합성 시나리오입니다 — 실제 고객 사례가 아닙니다.

Similarity retrieves experience. Physics and safety decide whether it applies.

15 지식 기반 · 전문가 인사이트 SENTIX Knowledge Base

데이터 반출이 불가능한 환경에서는 지식을 내부에 선축적이다



설명용 이미지 — 패세망 내부에 구축된 SENTIX 지식 서버

구조화 축적 규모

228문서 · 2.96 GB

장비 지식 — 매뉴얼 · 정비 · 절차

388문서 · 667 MB

공학 지식 — 식각 · 플라즈마 · 진공 · FDC

5공정군 스키마

Oxidation · Diffusion · CVD · Etch · Vacuum

문서를 그대로 쌓지 않습니다. 장비 지식과 공학 지식을 분리 색인하고, 현장 용어 사전과 시각 용어 사전으로 같은 부품을 같은 이름으로 정규화합니다.

축적된 지식의 형태

이중 지식베이스

Manual — 운전 · 점검 · 안전 절차
Theory — 현상의 물리 메커니즘

물리 계산 도구 7종

Arrhenius · Deal-Grove · 평균자유행로
체류시간 · 쉬스 전위 · CVD 성장속도 · 확산길이
물리 질문은 추정하지 않고 계산합니다.

전문가 인사이트의 역할

- ① 무엇을 볼지 정한다 — 피쳐 선정과 가중치
- ② 어떤 순서로 확인할지 정한다 — Check Sequence
- ③ 무엇을 하면 안 되는지 정한다 — Prohibited Action
- ④ 언제 사람에게 넘길지 정한다 — Escalation Rule

AI는 후보와 근거를 제시하고, 판단의 경계는 전문가가 정합니다.

왜 빠르게 답하는가

질문을 **의도별로** 분기합니다 — 절차 · 정의 · 시각 · 물리
키워드 검색과 의미 검색을 **결합**하고,
속연도에 따라 매뉴얼과 이론의 비중을 바꿉니다.
변경된 문서만 재색인하는 **중분 구조**입니다.

패세망 안에서 동작 — 데이터를 밖으로 내보내지 않습니다.

지식 검색 · 물리 도구 · 의도 라우팅은 구현 완료 · 현장 Case 연결은 확장 중

SENTIX는 Expert Case Memory의 자료 참고입니다



16 하이브리드 추론 스택 Neuro-Symbolic

하이브리드 추론은 탐지와 판단을 분리한다



Pattern recognition detects a deviation. Domain reasoning decides what it means.

가설 점수 — 개념식

$HypothesisScore(h) = PatternMatch$
+ ProcessContextMatch + TopologyConsistency
+ TemporalConsistency + VerifiedCaseEvidence
- ContradictionPenalty - UncertaintyPenalty
가중치는 장비군 · 공정군별 project-specific parameter이며,
피쳐 선정과 가중치는 전문가 지식을 기반으로 설정됩니다.

Release Gate

- ✓ 필수 증거 Coverage 충족
- ✓ P&ID 경로와 모순 없음
- ✓ 해당 Step에서 활성
- ✓ 반대 증거 없음
- ✓ Safety 제약과 충돌 없음
- ✓ Case Validated · 유효기간 내



17 PEALD 증착 공정 검증 MT-NIT · Golden Recipe · 조건값 비공개

실험 시리즈 · 4단계

단계	Run	핵심 결과
① DOE1	21	변수 감도 · Arrhenius 거동
② DOE2 (ToF)	19	Golden Recipe 확정 ToF 영향 없음 ($-0.4\text{\AA}$) 약 $85\text{\AA}$ $\sigma \approx \pm 0.4\text{\AA}$
③ 80 LOT 마라톤	80	U/F 약 1.4% · 합격 100% 약 $84\text{\AA}$ · U/F 약
누적 123 Run — 양산 유효성 검증		

사이클 수 변경 시 두께 차이 $< 0.2\text{\AA}$ — 설계된 ALD 공정 창 안에서 Self-limiting 거동 유지 확인

변수 감도 · 튜닝 우선순위

1순위 · FINE 전구체 유량

선형 $R^2=0.98$ · 유량에 선형 비례 — 두께 미세 조정

2순위 · COARSE 온도

Arrhenius · 온도에 지수 비례 ($r=0.95$) — 고온 구간 과민성 주의

3순위 · U/F RF Power

저출력 U/F 불량 → 일정 출력 이상 Plateau ($r=-0.92$)

4순위 · 슬롯간 Purge 모드 최적화

U/F 약 0.8% — 기본 대비 70% 감소 · CVD-like 기상 반응 억제

확정 GOLDEN RECIPE · 조건값 비공개

온도 · 전구체 유량 · 반응가스 유량
RF 출력 · Purge 모드 조합 확정 → 목표 U/F $\leq$ 약 0.8%

고유량 조건에서 U/F 약 0.7%로 최우수 — 표준 조건은 별도 기준으로 유지

이상 감지 기준 · Control Limit

일계 기준	우선 점검 항목
두께 하한 이탈	RF 인터락 · 플라즈마 상태 NO PLASMA 시 두께 급감
두께 상한 이탈	전구체 라인 압력 · 사이클 설정값
U/F $> 2.0\%$	RF 출력 하한 미만 / 상한 초과 Purge Mode 3 확인
F2 Clean 직후 두께 상승 구간	챔버 시즈닝 — 정상 패턴 2 LOT 더미 런 후 양산 진입

이상 2건의 원인 계층 분리

LOT-A 통신 끊김 → 두께 급감

LOT-B 전구체 투입 이상 → 과증착

두 건 모두 장비 전기 · 제어계 이상으로 분류 — 공정 레시피 자체의 이상이 아님을 확인했습니다.

이상 2건의 원인은 레시피가 아니라 장비 제어계였습니다 — 원인 계층의 분리가 판정의 전제입니다

18 기술 성숙도 · KPI 검증 Validation Result

성능은 독립 평가 기준으로만 보고하고, 검증 공정과 확장 공정을 구분한다

식각 · ETCH — 계획 대비 실적 (독립 평가)

KPI 항목	계획 기준	실적	판정
AI 예측 정확도 (Etch Rate)	$\geq 90\%$	약 97%	충족
AI 예측 정확도 (Uniformity)	$\geq 90\%$	약 92%	충족
이벤트 감지율	$\geq 95\%$	약 98%	충족
장비 가동률	$\geq 95\%$	약 95%	충족
데이터 무결성	$\geq 95\%$	약 99%	충족
실시간 데이터 수집 태그	≥ 60 개	76개	충족

6개 항목 전 항목 충족 · 실증 규모 70여 Active Field · 4천여 Step · 900여 Recipe Pair
데이터 무결성은 캘리브레이션 주기 단축 · 불안정 구간 필터링으로 약 99% 확보

검증 4단계 · VALIDATION PROTOCOL

- 독립 평가셋 — 학습 구간 배제 · 현장 측정값을 정답으로 사용
- 지표 산출 — MAE · RMSE · MAPE · R^2 · 정확도 = $100\% - \text{MAPE}$
- 운영 지표 — False Alarm / Lot · Top-k Diagnosis · MTTR
- 재현 가능성 — 계산 스크립트와 원본 데이터 제출 · Leakage 차단

증착 · PEALD (MT-NIT) — 양산 검증

두께 재현성 · 유효 LOT 기준

약 $85\text{\AA}$ 편차 $1\text{\AA}$ 미만

U/F 2% 이내 합격률

100% 전 LOT 통과

평균 균일도 U/F

약 1%대 목표 2% 이내

Self-limiting 마진

LOOP 변경 · 계측기 장착에도

두께 변동 $1\text{\AA}$ 미만

Golden Recipe 고정 조건 · 120여 Run 연속 진행으로 양산 재현성 확인

Confidence ≠ 독립 평가 정확도

화면 표시값 · Confidence Score

모델 내부 신뢰도 — 학습 패턴과의 일치 정도, 실측값 대비 정확도를 보장하지 않습니다.

보고 기준 · 독립 평가 정확도

DOE 15 Run 현장 측정값 대비 MAPE로 산출 — 약 97% / 약 92%의 근거입니다.

두 값을 구분해 말하는 것이 성능 주장의 전제입니다.

확장 중 · IN PROGRESS

세정(Wet Clean) Wobbling 검출

Vision · SVID 연동 구현 완료 — 독립 평가셋 확보 중

포토(PHOTO) TRACK 장비 확대

동일 신호 체계 이식 진행 중 — 도포 · 이송 거동 대상

챔버 · Recipe 전반의 일반화

장비군을 넘는 적용 범위 판정 기준 정립 중

확장 단계도 같은 기준 적용

식각 · 증착과 동일한 독립 평가 절차를 그대로 사용

식각 · 증착에서 검증한 동일 신호 체계를 Wet Clean과 포토 TRACK으로 확장하고 있습니다



19 최적화 과제 — 스마트함과 속도 On-Prem Optimization

대형 LLM의 판단 품질을 폐쇄망 장비 PC 안에서 재현한다

The constraint is not model size — it is judgment quality per unit of on-premise compute.

관건 · THE CHALLENGE

엔지니어가 기대하는 수준은 대형 LLM의 스마트함과 대화형 응답 속도입니다.
그러나 팽은 인터넷이 차단되고 추론은 장비 PC의 제한된 연산에서 끝나야 합니다 — 모델을 키우는 방향으로 풀 수 없는 문제입니다.

연산 한도

장비 PC · 폐쇄망
클라우드 사용 불가

실시간성

공정은 초 단위
사후 분석은 무의미

근거 필수

확률적 답변만으로는
조치 승인 불가

01 구조 최적화

큰 모델 하나가 아니라 역할을 분리합니다

탐지는 신경망이, 판단은 문맥 그래프와 근거 검증이 맡습니다. 단계를 쪼개면 각 단계는 작은 모델로 충분해집니다.
거대 모델의 추론을 흥내내지 않고, 판단 경로 자체를 설계합니다.

구현 완료 — 하이브리드 스택

02 지식 최적화

파라미터 대신 검색으로 지식을 담니다

질문을 의도별로 라우팅하고(질차 · 정의 · 시각 · 물리), 키워드 검색과 의미 검색을 결합합니다.
변경된 문서만 증분 재색인하므로 지식이 늘어도 응답 경로는 늘지 않습니다.

구현 완료 — SENTIX

03 모델 최적화

공정별로 필요한 최소 모델을 고릅니다

예측은 Gradient Boosting 앙상블, 영상은 RT-DETR 경량 구조로 구성했습니다.
정확도와 복잡성의 트레이드오프는 공정 기준에 맞춰 선택합니다 — 항상 큰 모델이 정답은 아닙니다.

공정별 진행 중

04 실행 최적화

응답 시간을 설계 변수로 다룹니다

수집은 0.1초 주기 · 최대 40ch로 이미 실시간입니다.
남은 구간은 End-to-End Latency — 서버-클라이언트 다단 경유를 줄이고 판단 경로를 장비 측으로 당기는 작업입니다.

과제 — 수치 확보 전

앞으로의 개선 과제 · NEXT

자가 진단 엔진 · Self-Diagnostic

이상이 난 뒤 찾는 대신, 장비가 주기적으로 자기 상태를 점검합니다. 정상 baseline 대비 열화 추이를 스스로 판정해 사전 경고 지점을 확보합니다.

응답 지연 예산

공정별 허용 지연을 정의하고
구간별 예산으로 분해합니다

모델 크기 상한

장비 PC 연산 한도 안에서
운용 가능한 상한을 확정합니다

재학습 주기

дре프트 대응하는
자동 재학습 주기를 설계합니다

다음 목표는 이상을 빠르게 찾는 것이 아니라, 이상이 생기기 전에 장비가 스스로 알리게 하는 것입니다 — 사후 대응에서 사전 감지로

20 시장성과 구조적 진입장벽 Market & Moat

시장 규모 · 성장률

AI 예지보전 · 글로벌

49조 원 · CAGR 32.6%

2035년 전망 · TAM
Bizwit Research & Consulting

아시아 · 국내

15조 / 7.6조원

SAM 35.1% · SOM 34.0%
2035년 전망 · 같은 출처

제조 AI 중 반도체 성장률

34.7% CAGR

제조 산업군 중 최고
2024-2035 · 같은 출처

300mm Fab 장비 투자

\$133B 2026 · +18%

2027 \$151B → 2029 \$172B
SEMI, 2026-04

전방 시장이 커지는 것과 우리 매출은 다른 문제입니다. 우리가 파는 것은 장비 대수 × 공정별 비중으로 환산되는 팽 내 설치 단위입니다.

문제의 비용 — 왜 지금인가

비계획 정비 · 직접 손실	\$1.5~1.8M / 시간	Siemens · Aberdeen
숨은 비용 포함 총비용	\$5~9M / 시간	같은 출처
예지보전 도입 효과 (벤치마크 평균)	정지 최대 50% ↓	SNS Insider
AI 적용 Scrap 감소 사례	5% → 2%	학술 서베이

시간당 손실은 팽 노드 · 시설 가치 · 환산 기준에 따라 크게 흔들립니다. 직접 손실과 총비용을 구분해 인용해야 하는 수치입니다.

구조적 진입장벽

- Ⓞ 물리적 접근 — 팽 클린룸 진입 자체가 통제됩니다.
- Ⓞ 데이터 반출 금지 — 공정 · 장비 데이터는 외부로 나가지 않습니다. 외부에서 학습한 모델로는 시작할 수 없습니다.
- Ⓞ 도메인 해석 — 접근이 가능해도 전문가 없이 신호의 의미를 판정할 수 없습니다.

GSF는 팽 안에서 데이터를 직접 만들고, 폐쇄망 안에서 지식을 축적합니다 — 세 장벽의 안쪽에서 출발합니다.

진입장벽은 우리를 막는 벽이 아니라, 이미 진입한 쪽을 보호하는 벽입니다

21

익명화와 IP 경계 IP Boundary

대체 명칭 규칙

공급사명	Equipment Vendor-A
고객사명	Customer Fab-A / Pilot Site-A
장비명	Plasma Etch Class-A / PEALD Class-B Wet Clean Class-C / Photo Track Class-D
Chamber	Chamber-A / B / C
Recipe	Recipe Family-R1 / R2
Gas · 전구체명	Reactive Gas-A / B · Precursor-P1
Tag · Alarm	GSF Canonical Tag / Alarm Family-A
실제 수치 · Lot	Normalized Index · LOT-### / WAFER-##

공급사 매뉴얼의 문장 · 표 · 도면은 캡처하거나 재사용하지 않습니다.

범용 기반

Sensor · FDC · SPC · FFT
XGBoost · Retrieval · Knowledge Graph

공급사 매뉴얼은 도메인 근거로만 사용합니다.

GSF 고유 통합

Domain Ontology · Canonical Signal Dictionary
StepSync & Event Envelope
Wobbling / Etch / Deposition / Wet Clean / Track Feature Set
Expert Case Memory · Process-Aware Similarity
Evidence Reasoner · Safety Gate
Expert Feedback and Validation Workflow

고객 · 장비 · Recipe · Tag 정보는 공개하지 않습니다.

GSF SOLUTION

22 · 결론

범용 기술 위에 축적한 도메인 지식이 GSF의 IP다

알고리즘 하나가 아니라, 공정의 시간 · 물리 · 경험을 연결하는 페루프 운영지식입니다.

FOUNDATION · 범용 기반

Sensors
FDC · SPC · FFT
Machine Learning
Retrieval
Knowledge Graph

누구나 접근 가능한 공통 기술



GSF DOMAIN IP · 우리가 만든 계층

Equipment Topology
Process Signal Dictionary
장비 구조와 신호 사전

Expert Case Memory
검증된 사례만 축적하는 경험 저장소

StepSync &
Event Envelope
사건 단위 정렬과 저장

Evidence Reasoner
& Safety Gate
근거 검증과 안전 제막

Motion · Etch · Deposition
Wet Clean Feature Sets
공정별 특징량 체계

Expert Feedback Loop
전문가 판단이 다시 자산이 되는 순환

축적된 자산 · PROOF

10건+ 특허 출원 · 등록

Wobbling · 토출 · 처짐 · ESD
미국 · 대만 · 일본

3+α 공정 적용

식각 · 증착 · 세정 검증 + 포토 TRACK 확장 중

1,000건+ 구조화 지식

장비 지식 · 공학 지식 분리 색인

폐쇄망

안에서 축적
웹 안에서 데이터를 직접 만들고 학습

GSF makes semiconductor AI remember context, evidence and outcomes.

GSF는 데이터를 보는 AI를 넘어, 공정의 시간 · 물리 · 경험을 기억하는 반도체 도메인 AI를 만듭니다.

감사합니다 — 질문은 각 파트의 검증 자료로 바로 되돌아가 답변드리겠습니다.