



한국원자력학회
Korean Nuclear Society

한국원자력학회 2026년 춘계학술발표회 워크숍(P)

AI로 가속하는 원자력 연구개발: 최신 동향과 적용사례

Digital Input Card와 DC-DC Converter의 수명 시험 데이터 분석을 통한 수명 예측

박용훈*, 정준하*, 박상철*, 김정환**, 김창희**

*아주대학교 산업공학과, **한국원자력연구원

Data Intelligent PHM Lab

joonha@ajou.ac.kr



Introduction



- 경력

- 아주대학교 산업공학과 조교수 2022.09 –
- 한국기계연구원 선임연구원 2019.04 – 2022.08
- 서울대학교 기계항공공학부 학사 / 박사 2012.08 / 2019.02

- 세부 전공

- 인공지능 기반 산업설비 Prognostics and Health Management (PHM)

- 주요 활동

- 대한기계학회 신뢰성부문 편집이사, 한국PHM학회 수석총무이사, 한국신뢰성학회 사업이사
- 한국설비진단자격인증원 위원
- 첨단혁신장비 얼라이언스 이차전지분과 위원



Lab. Introduction



데이터 지능형
PHM 연구실



Research Interests

- 인공지능 기반 산업설비 PHM
- 신뢰성 연구 및 PHM 응용연구
(제로샷 학습 PHM, 온톨로지 PHM)

Lab Members

- 석박사통합과정 2명
- 석사과정 3명
- 학사과정 4명

Seminars & Lectures

- 2026.02. PHM 전문기술 강좌
- 2025.09. KSNVE 원자력·에너지부문 워크숍
- 2025.08. KEPIC-Week Invited Talk
- 2025.07. ICSV31 Invited Talk
- 2025.07. 대한기계학회 인공지능연구회 강습회
- 2025.04. 대한기계학회 신뢰성부문 Tutorial

Projects

- **20여개의 PHM 프로젝트 수행**
 - 산업설비 안전성 제고를 위한 AI 기반 상태진단 및 LLM 연계 유지보수 기술 개발 (교육부, 2025-2030)
 - 상반회전 추진시스템 기반의 중대형 선박 전기추진 시스템 개발 (산업부, 2025-2028)
 - 이차전지 양극재 소재 품질 연계 자율제어 시스템 및 공정 분석 장비 개발 (산업부, 2024-2027)
 - 디지털 전환을 통한 친환경 차량 이음 및 결함 스마트 진단 시스템 개발 (중기부, 2024-2027)

Awards

- PHM Data Challenge 3위 (2024)
- PHM Data Challenge 2위 (2019)
- 국가과학기술연구회 이사장상
- 한국기계연구원 신인상

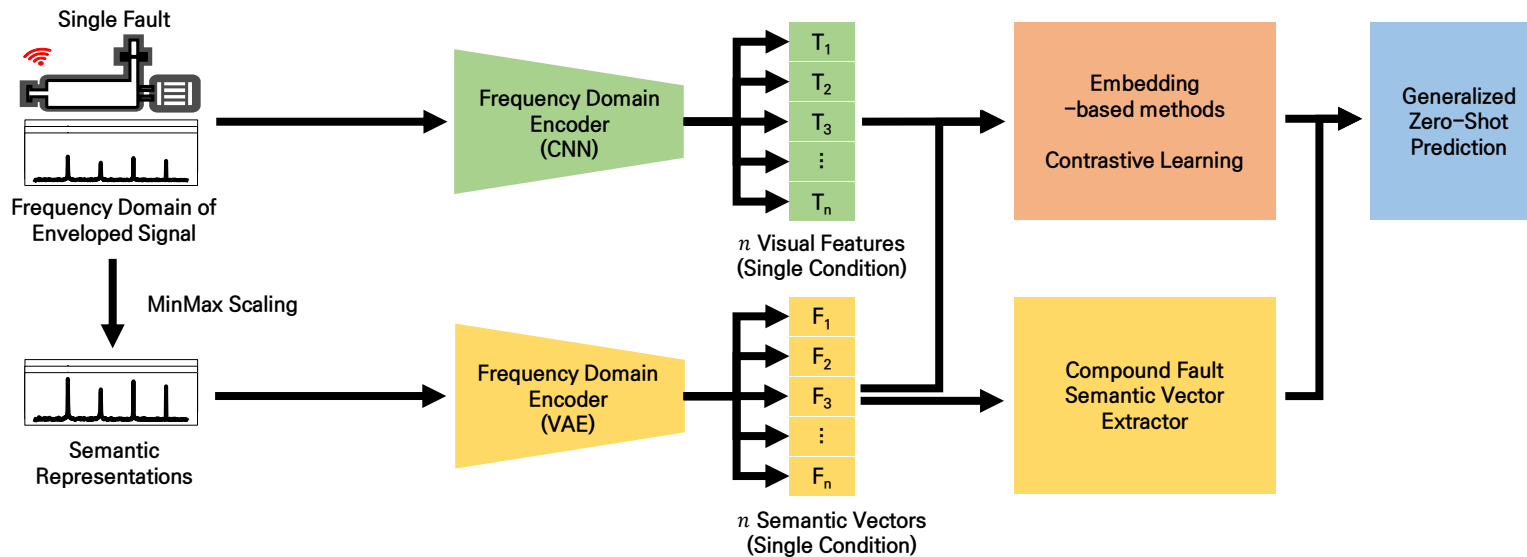
Journal Publications

- **International Journal Papers: 23**
 - Mechanical Systems and Signal Processing, 2026 (IF 8.9, JCR 3.0%)
 - Reliability Engineering and System Safety, 2024 (IF 11.0, JCR 1.4%)
 - Advanced Engineering Informatics, 2024 (IF 8.0, JCR 2.0%)

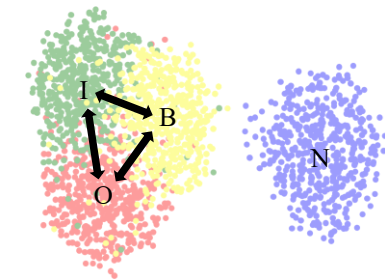
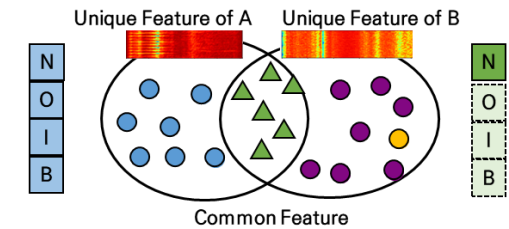
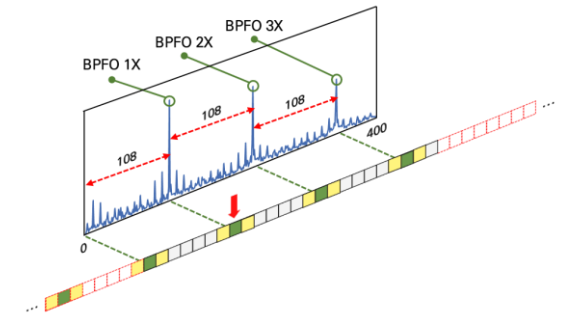
Lab. Introduction

• 제로 샷 학습 기반 PHM

- 제로 샷 학습 기반 Domain Adaptation 및 Domain Generalization 연구
- 제로 샷 학습 기반 복합고장 연구



〈제로샷 학습 기반 진단 프레임워크〉

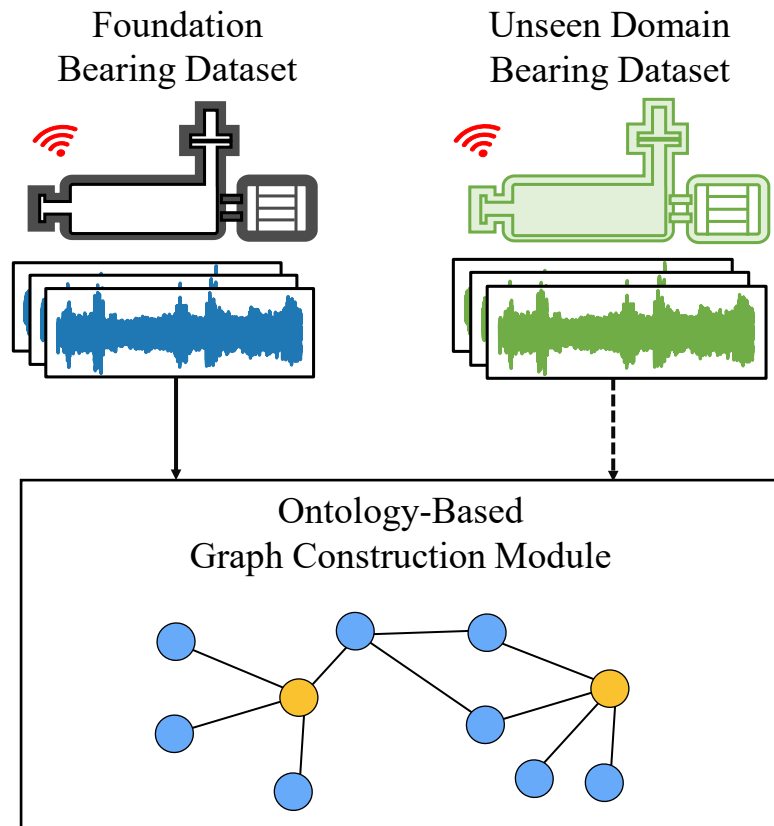


〈Feature 및 Semantic Vector 추출 방법〉

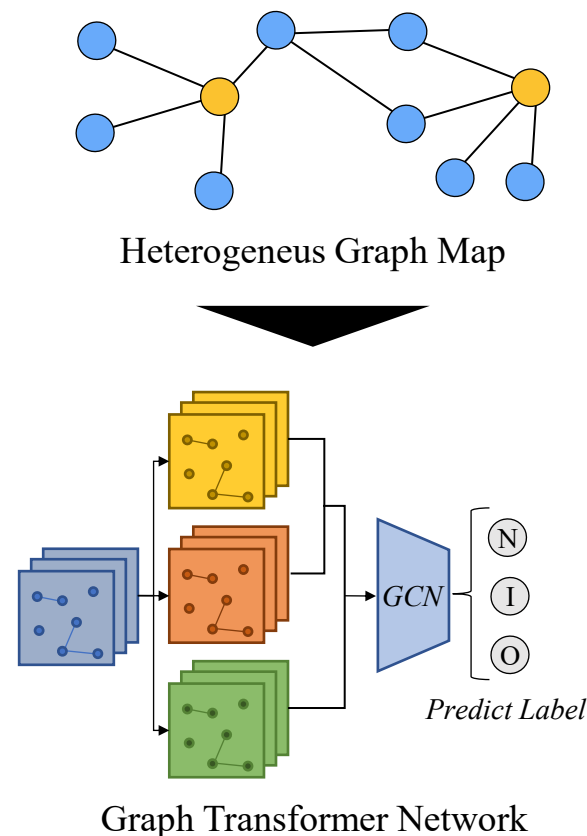
Lab. Introduction

• 온톨로지 PHM

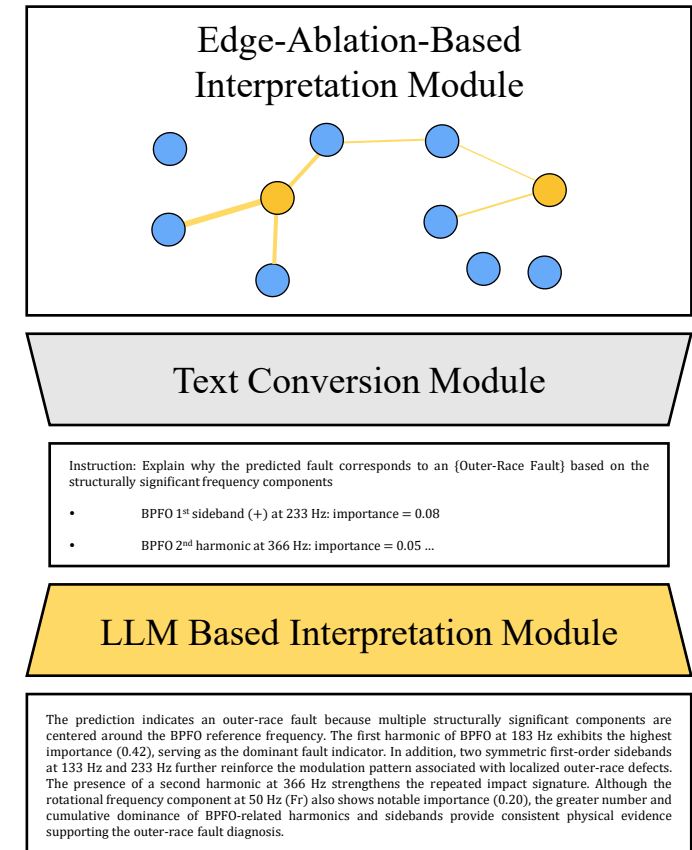
① 온톨로지 기반 그래프 매핑 모듈



② GTN 기반 분류 모듈



③ LLM 기반 그래프 해석 모듈



1. 전자 부품 수명 예측 기술 개요
2. 전자부품 열화 데이터 및 메커니즘 분석
3. (이온 트랩 현상으로 인한) 누적 손상 기반 수명 추정 기법
4. 결과 및 결론

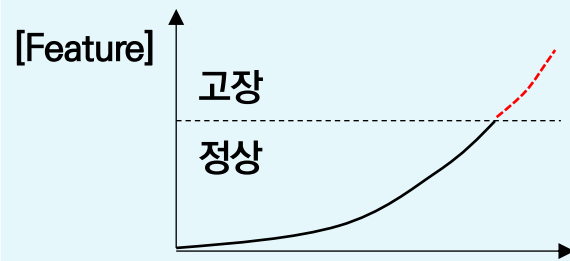
1. 전자 부품 수명 예측 기술 개요

- PHM과 신뢰성

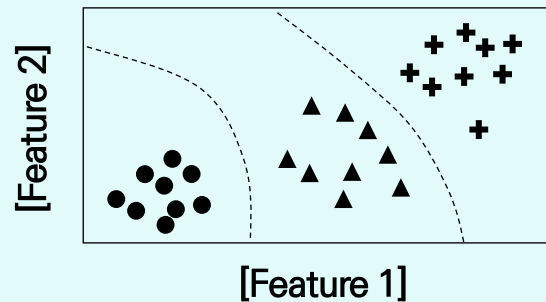


1. 전자 부품 수명 예측 기술 개요

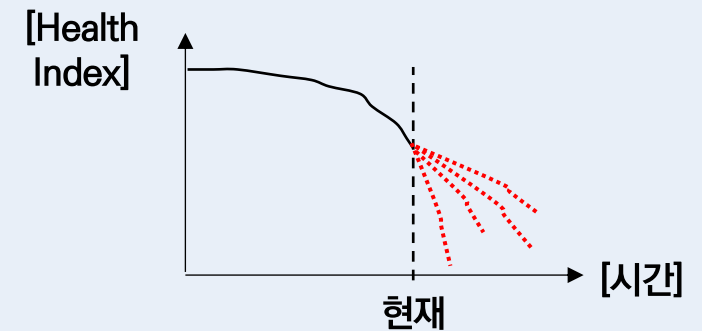
• PHM의 목적



- 정상 / **고장** 유무 감지
- 고장 데이터 불필요



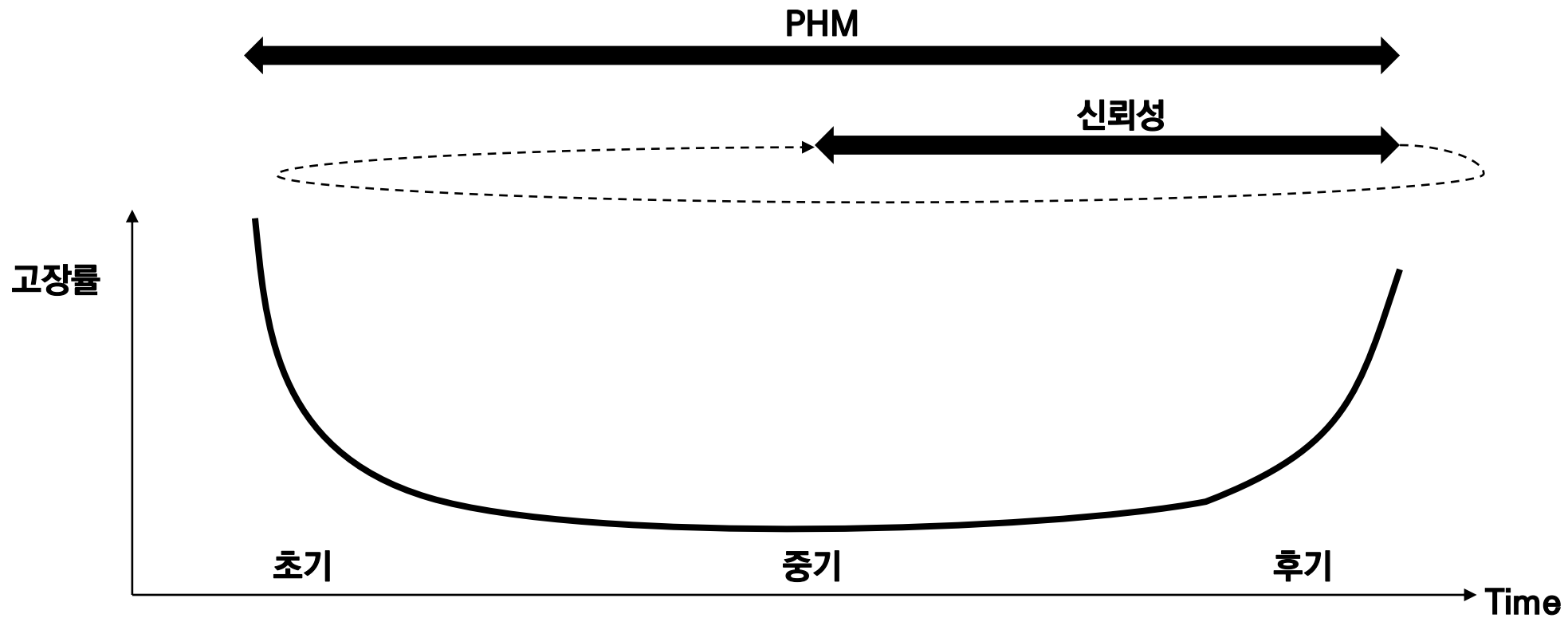
- 고장 모드별 분류
- 고장 모드별 데이터 필요



- 잔여수명 예측
- 열화 데이터 필요

1. 전자 부품 수명 예측 기술 개요

- 설비의 전주기에서 PHM과 신뢰성



1. 전자 부품 수명 예측 기술 개요



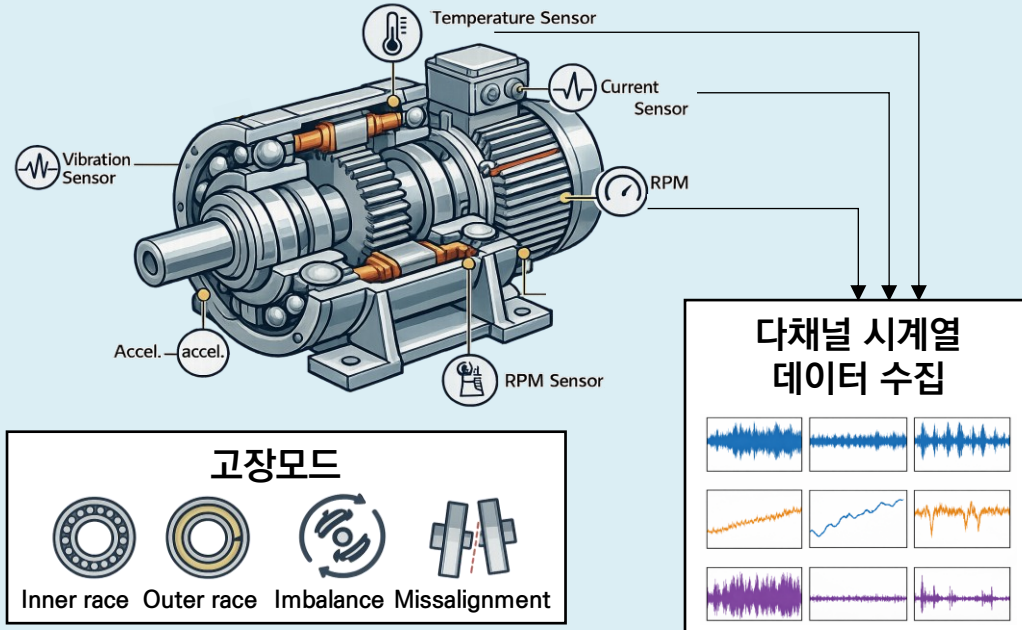
- PHM 수명 vs. 신뢰성 수명

	PHM 수명 예지	신뢰성 수명 산출
대상	개별 유닛 실시간 수명	모집단 평균 수명
실시간성	○	△
예측 방법	Data-driven	Statistics-driven
데이터	시계열 데이터	고장 이력 데이터
결과	RUL 분포	B10, MTTF 신뢰도 함수

1. 전자 부품 수명 예측 기술 개요

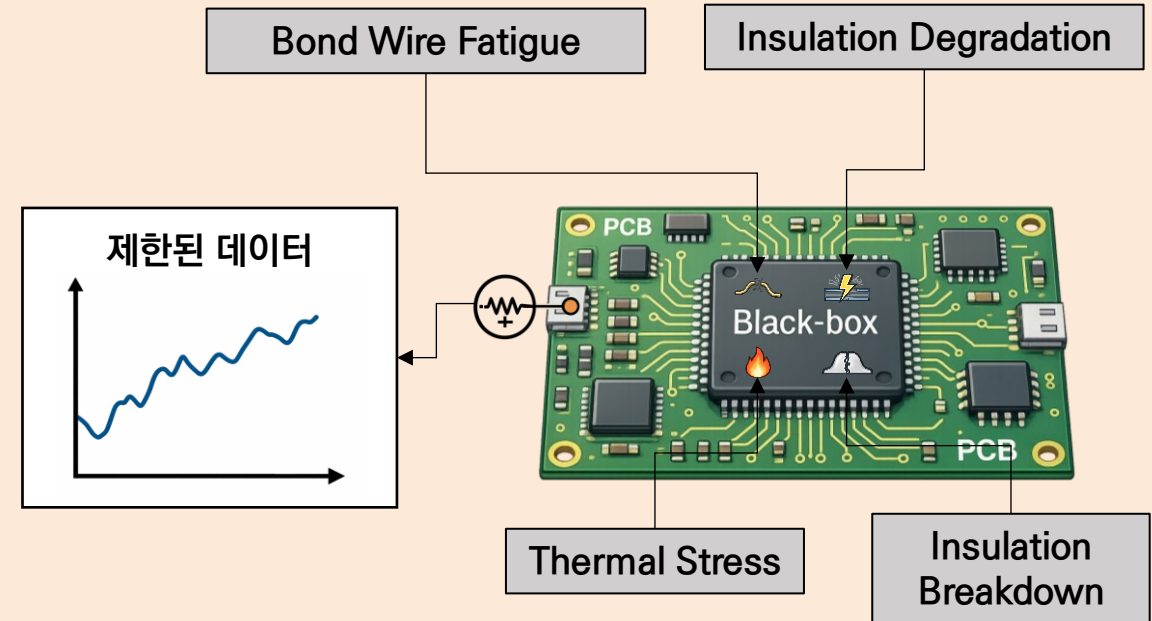
• PHM 수명 vs. 신뢰성 수명

기계 시스템 신뢰성



물리현상 → 측정 신호 → 고장원인 분석 가능

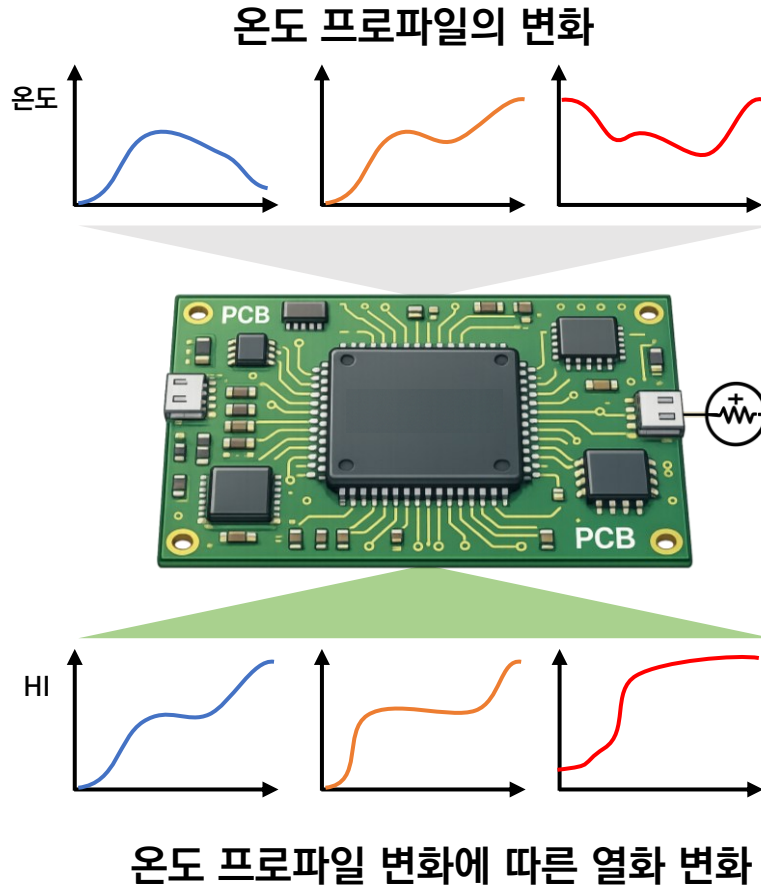
전자제품 신뢰성



내부 열화 → 제한적 데이터 → 고장원인 분석 어려움

1. 전자 부품 수명 예측 기술 개요

• 원자로 제어계통 전자 부품의 특징



온도 민감도 정량화

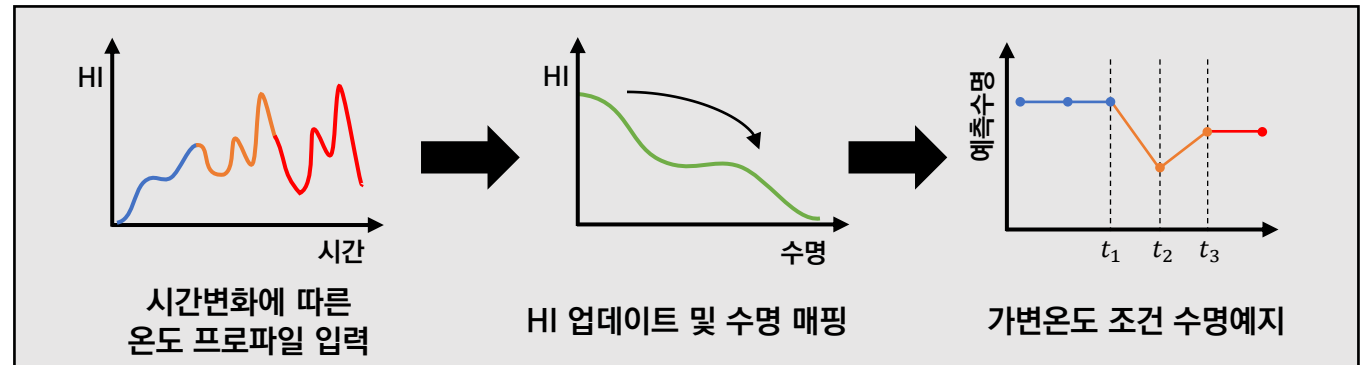
- 온도 변화율 정의

$$HI(T_1) \rightarrow HI(T_2) \rightarrow HI(T_3)$$

- 온도 프로파일 의존적 HI 변화율

$$\frac{dHI}{dt} = g(T(t), \dot{T}(t), \text{Thermal history})$$

강건한 수명예측 수행

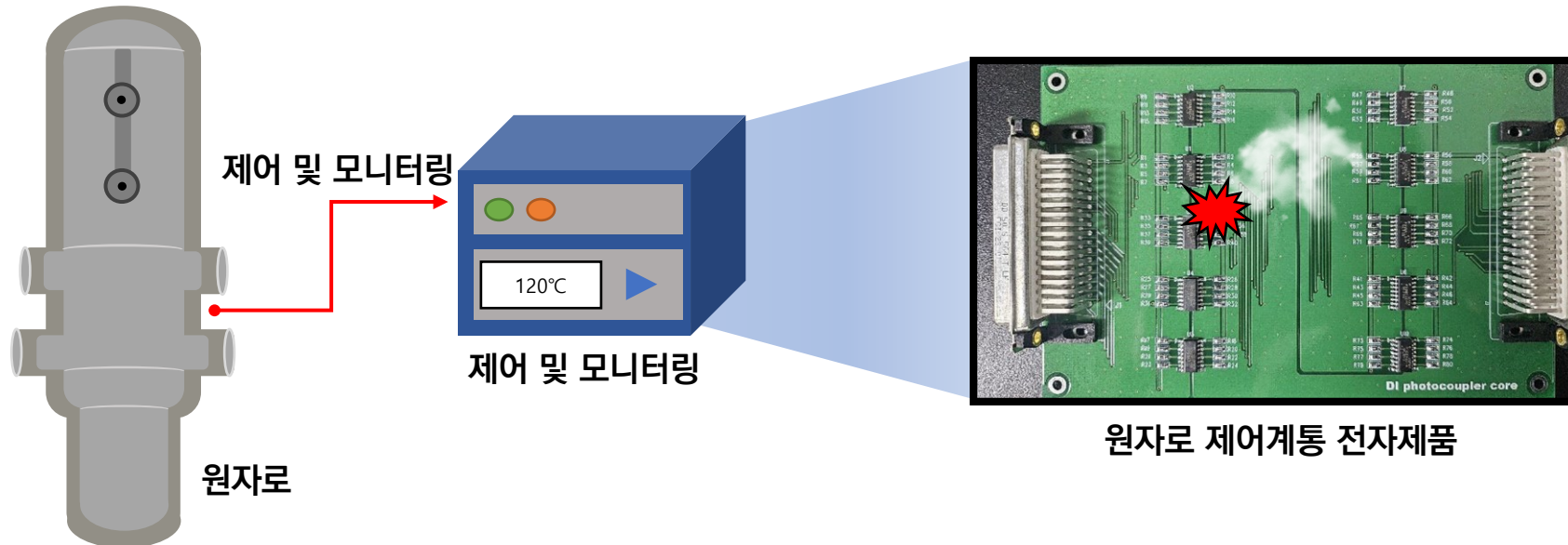


1. 전자 부품 수명 예측 기술 개요

• 원자로 제어계통 전자 부품의 특징

- 고장 발생 사례 없음 → 데이터 기반 수명 예측 어려움
- 추가 계측 가능한 데이터 없음 → 데이터 기반 수명 예측 어려움
- 고장 정보 부재로 인해, 권장 교체 주기를 임의로 설정

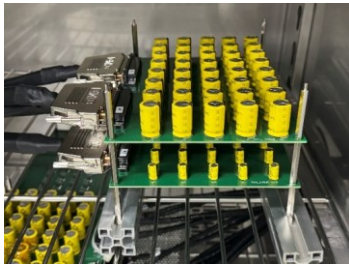
(Step 1) 평균적인 수명 예측 → (Step 2) 환경 조건을 고려한 수명 예측



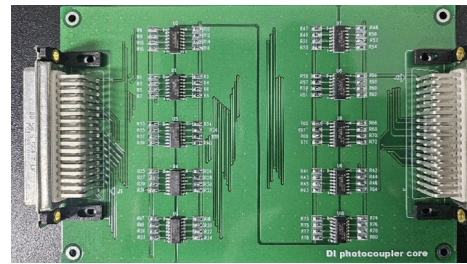
1. 전자 부품 수명 예측 기술 개요

• 원자력 제어계통 전자 부품

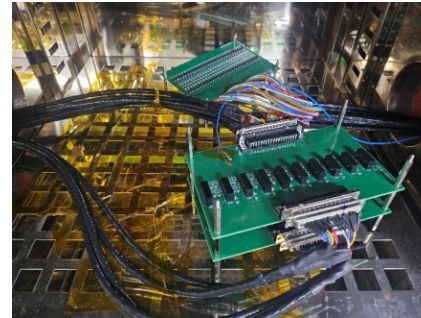
- 소자 단위: Capacitor 330 μF , Capacitor 6800 μF
- 부품/모듈 단위: Photocoupler, DC-DC Converter
 - ✓ DC-DC Converter: 주 전원으로부터 각 모듈에 적합한 전압을 안정적으로 공급하는 장치
- 보드 단위: Digital Input (DI) 제어카드



Capacitor



Photocoupler



DC-DC Converter



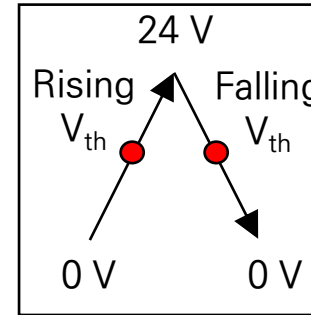
DI 제어카드

2. 전자 부품 열화 데이터 및 메커니즘 분석

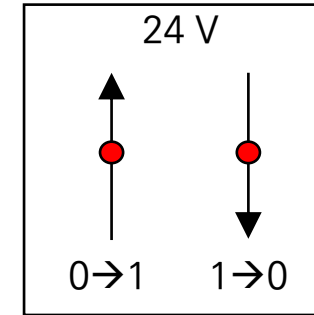
• 원자력 제어계통 전자 부품

– DI 제어카드

- ✓ INPUT: 0~24 V 승압, 24V~0 V 강압
- ✓ OUTPUT: 0 → 1, 1 → 0 디지털 값
- ✓ 가속열화 조건: 100 °C
- ✓ Acquired Data: Rising & Falling Threshold Voltage



Input



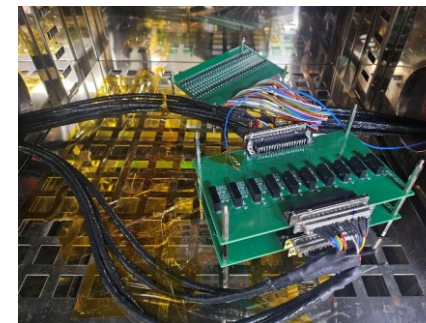
Output



DI 제어카드

– DC-DC Converter

- ✓ INPUT: 5 V
- ✓ OUTPUT: ±15 V
- ✓ 가속열화 조건: 140 °C
- ✓ Acquired Data: Positive & Negative Output Voltage



DC-DC Converter
열화 전

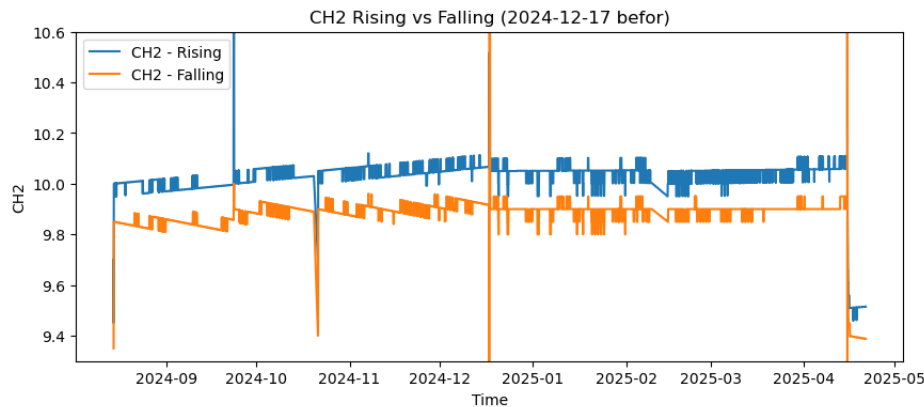
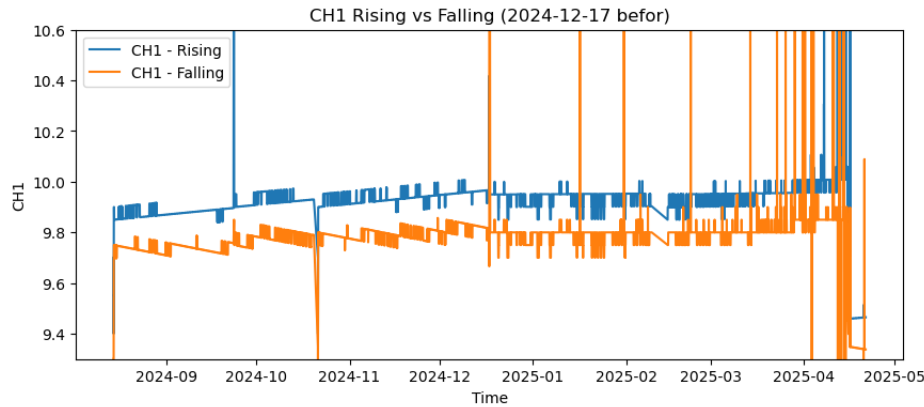


DC-DC Converter
열화 후

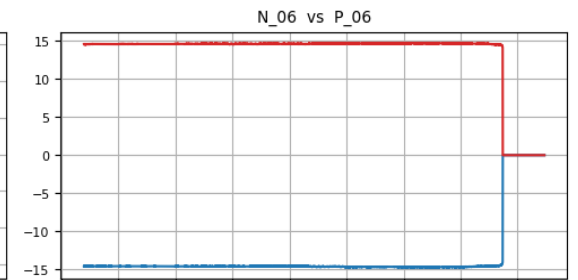
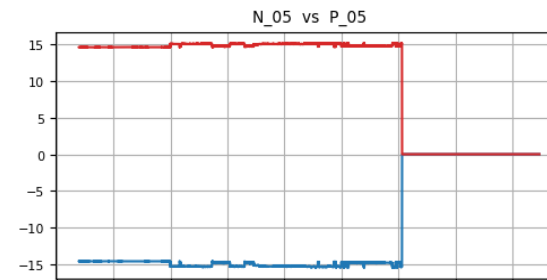
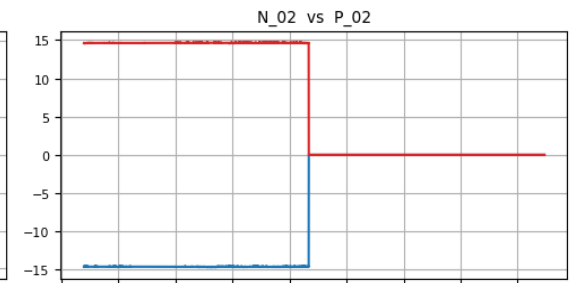
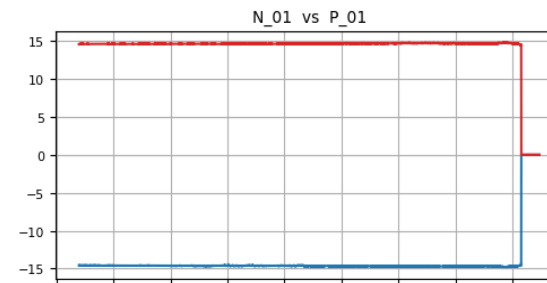
2. 전자 부품 열화 데이터 및 메커니즘 분석



• 열화 데이터 경향성



DI 제어카드

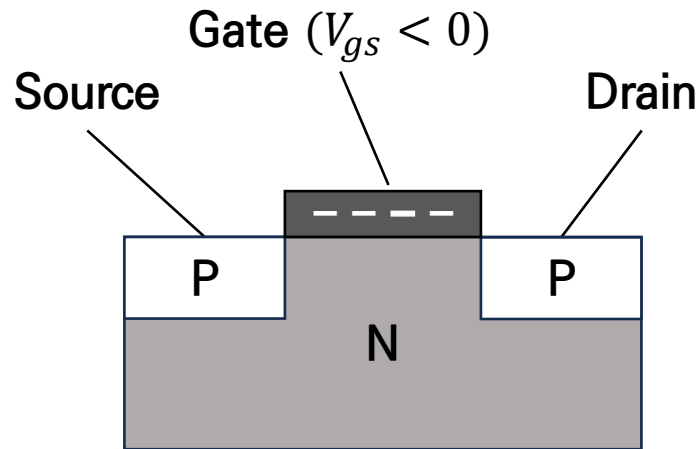


DC-DC Converter

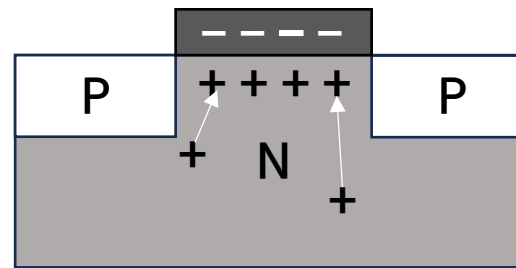
2. 전자 부품 열화 데이터 및 메커니즘 분석

• n/p형 반도체의 원리

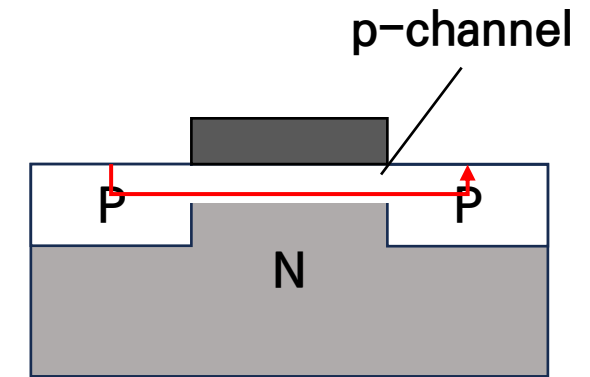
- 게이트(Gate)에 전압을 인가하여 전기장 형성
- 전기장에 의해 반도체 표면에 전하가 모여 채널 형성
- 채널이 열리면서 소스(Source)에서 드레인(Drain)으로 전류 발생



전압 인가



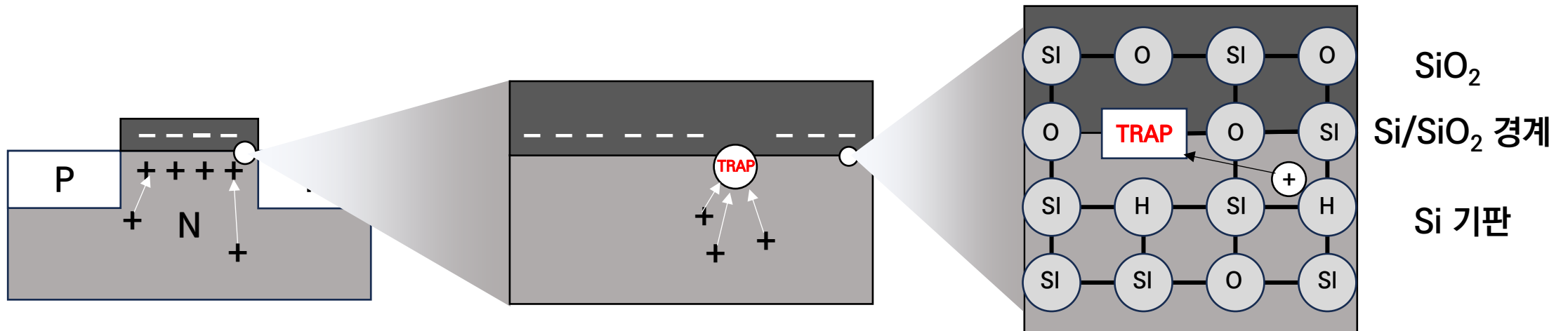
채널 형성



전류 발생

2. 전자 부품 열화 데이터 및 메커니즘 분석

- n/p형 반도체의 주요 고장모드: Negative Bias Temperature Instability (NBTI)
 - Negative Gate Bias와 고온 조건(가속 스트레스)에서 Si-H 결합이 전계 및 열 에너지에 의해 파괴
 - 수소가 탈리되면서 Si-SiO₂ 계면에 dangling bond가 형성되고, 이는 계면 트랩으로 작용
 - ✓ 계면(Si-SiO₂) 결합이 전하를 우선 포획 → 게이트 전압 일부가 트랩 충전에 사용
 - ✓ 채널 형성에 필요한 유효 전압 감소 → 동일 채널 형성 위해 더 높은 전압 필요 → ΔV_{th} 증가

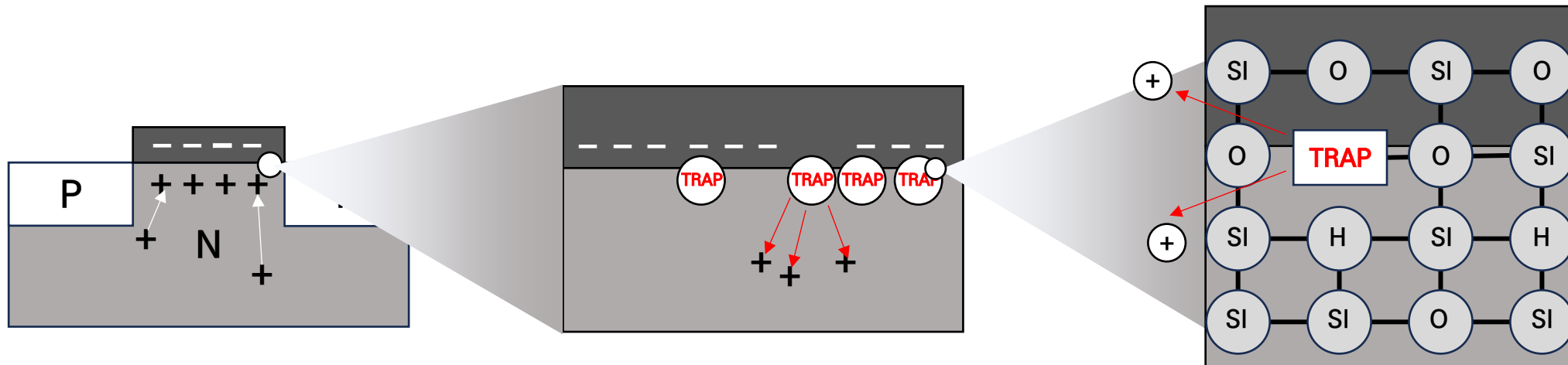


2. 전자 부품 열화 데이터 및 메커니즘 분석

- n/p형 반도체의 주요 고장모드: Negative Bias Temperature Instability (NBTI)

- NBTI에 의한 열화와 회복

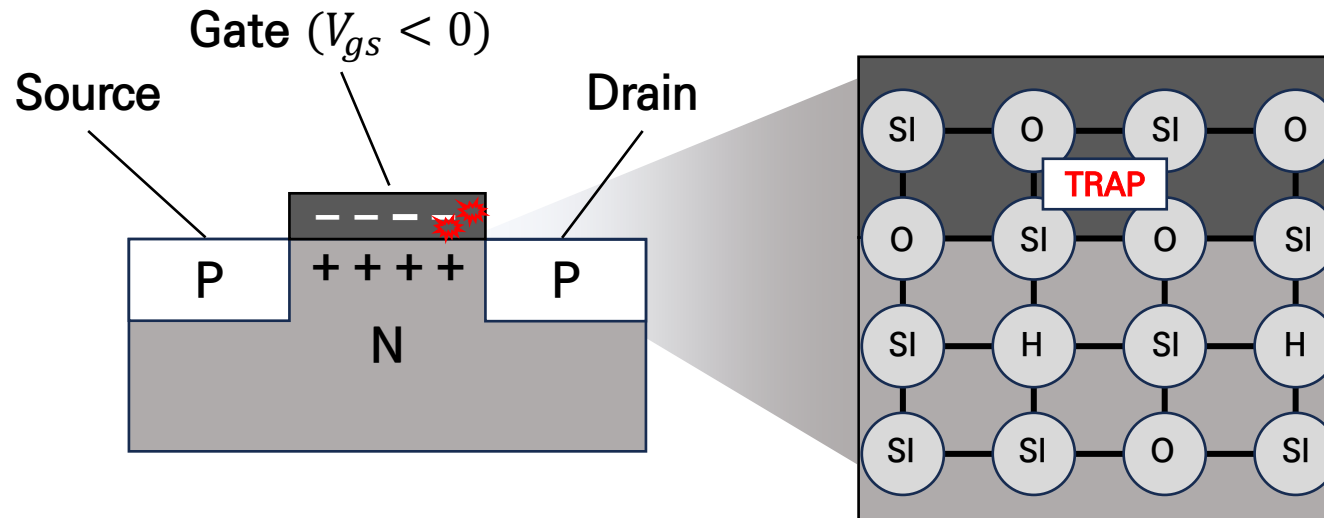
- ✓ 높은 전계 조건에서 고에너지 캐리어가 산화막 및 계면 결합을 파괴하여 계면 트랩과 산화막 전하가 생성되며 열화가 진행
- ✓ 스트레스 조건 제거 시, 일부 트랩은 전하 방출 또는 재결합을 통해 부분적으로 회복 (recovery)



2. 전자 부품 열화 데이터 및 메커니즘 분석

- n/p형 반도체의 주요 고장모드: Hot Carrier Injection (HCI)

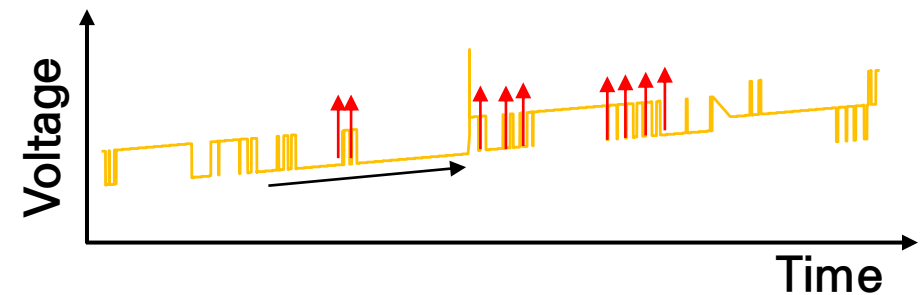
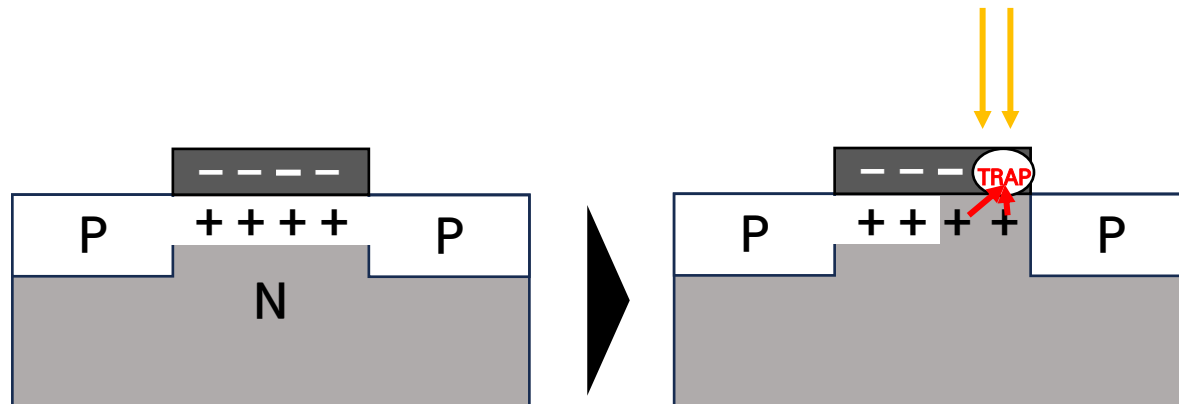
- 높은 Drain 전압 조건(V_{DS})에서 채널 내 정공 및 전자가 강한 전기장에 의해 가속
 - 고에너지(hot carrier) 상태
- 일부 고에너지 정공 및 전자가 게이트 산화막 내부로 주입되거나, Si-SiO₂ 계면에서 결합 파괴
 - 계면 트랩 및 산화막 전하를 생성
- 생성된 계면 트랩과 산화막 전하가 축적되면서 문턱전압(ΔV_{th}) 변화 및 구동 전류 감소를 유발



2. 전자 부품 열화 데이터 및 메커니즘 분석

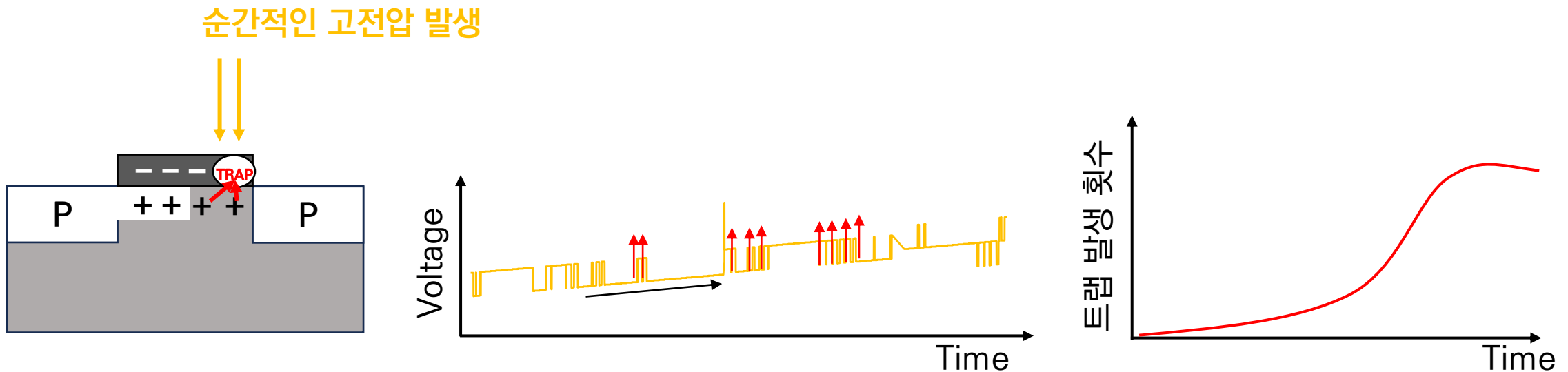
- n/p형 반도체의 주요 고장모드: Hot Carrier Injection (HCI)
 - 높은 드레인 전압에서 고에너지 Carrier 발생
 - 산화막과 계면에 주입된 캐리어가 트랩 전하를 형성
 - 추가적인 내부 전기장 생성
 - 채널 형성에 더 높은 전압이 필요하여, 문턱전압(ΔV_{th})이 순간적으로 상승

순간적인 고전압 발생



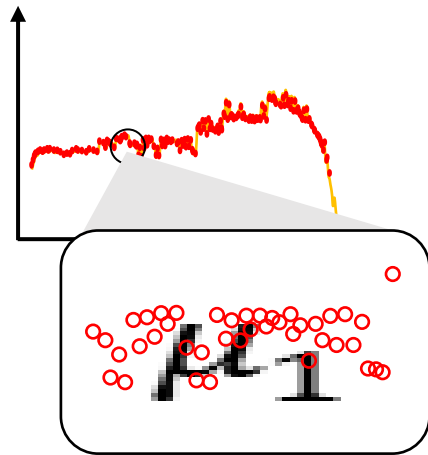
2. 전자 부품 열화 데이터 및 메커니즘 분석

- n/p형 반도체의 주요 고장모드: Hot Carrier Injection (HCI)
 - 트랩 발생 횟수는 스트레스 인가에 따라 점차 증가, 초기에는 빠른 증가
 - 일정 수준의 트랩 밀도 한계에 도달하면 증가율은 감소 → 소자의 전기적 성능이 임계치에 근접함
 - 트랩 밀도 한계를 고장 임계치로 정의하고, 해당 지점까지의 시간을 수명으로 추정
- 트랩 누적 거동을 정량화하여, 소자의 성능 임계치 도달 시점을 예측 (소자의 수명을 추정)

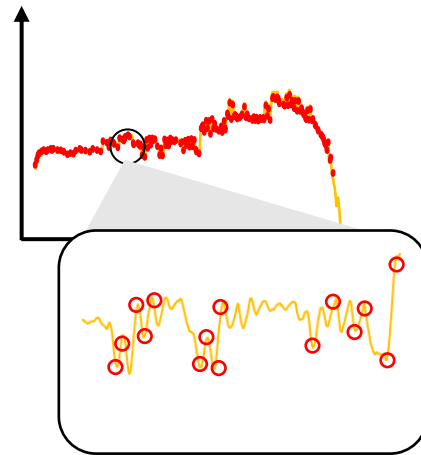


3. 누적 손상 기반 수명 추정 기법

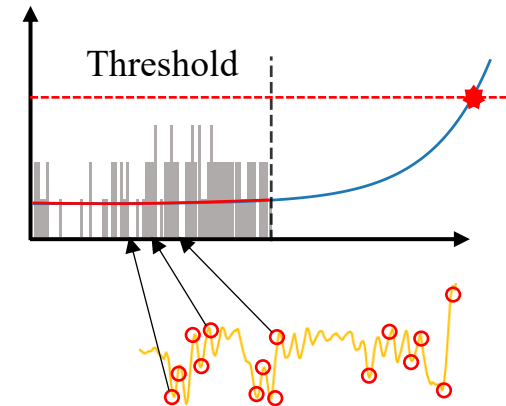
- 수명 추정 Framework



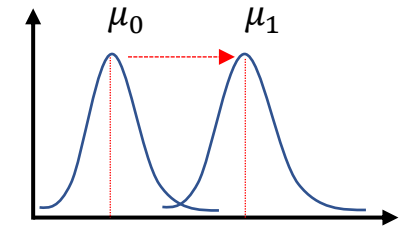
〈Rainflow Counting〉



〈Noise Filtering〉



〈누적 데미지 기반 수명 산출〉



Calculated MTTF

$$A_F = e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_s} \right)}$$

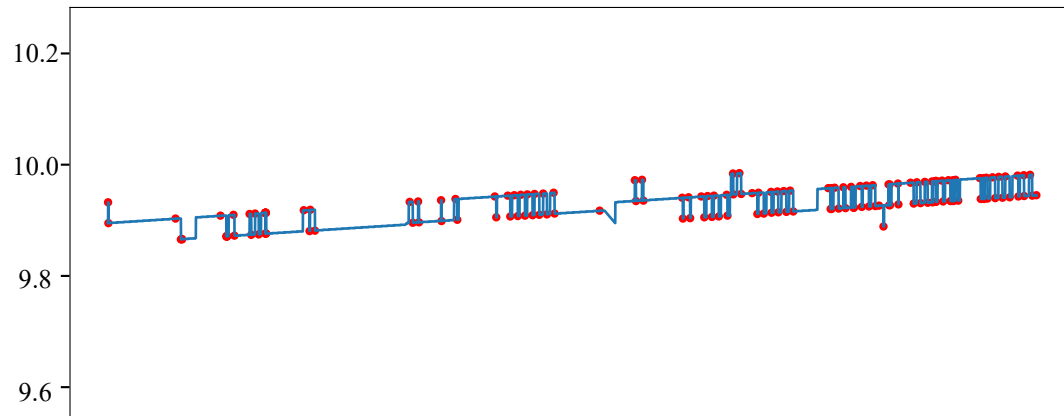
〈정상 조건에서의 수명 산출〉

3. 누적 손상 기반 수명 추정 기법

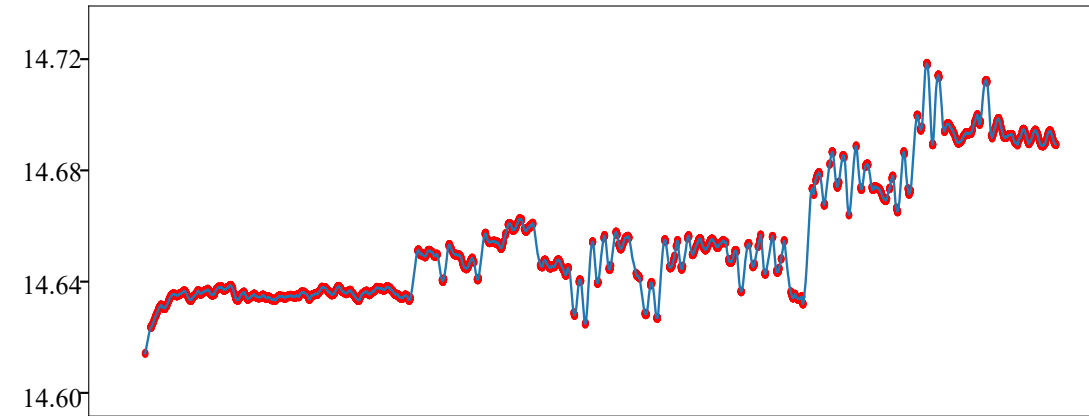
- Rainflow Counting 알고리즘

- 시계열 데이터에서 비주기적으로 반복되는 변화 패턴 추출 알고리즘
- 원 신호에서 변곡점 추출 $\{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ 후, 변곡점 전후 변화 양상이 다른 경우를 Event로 정의

$$\checkmark (V_i - V_{i-1})(V_{i+1} - V_i) < 0$$



〈DI 제어카드의 승압 문턱 전압〉



〈DC-DC Converter의 출력전압〉

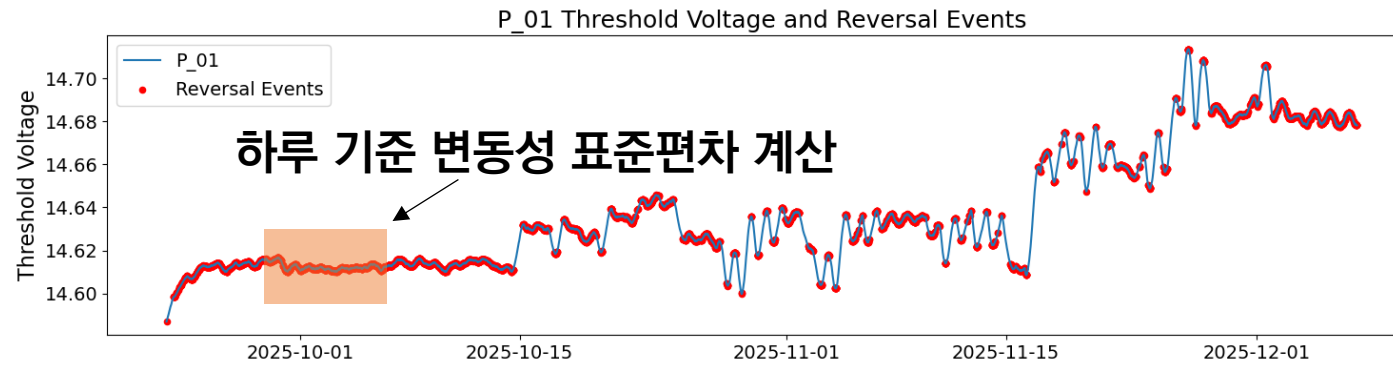
3. 누적 손상 기반 수명 추정 기법

- Noise Filtering

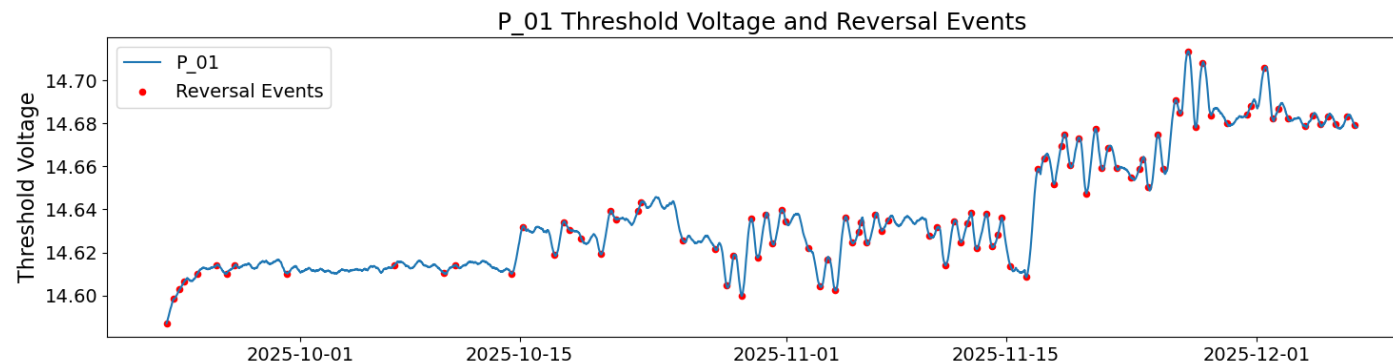
- Noise에 의한 영향을 줄이기 위해 변동성 기반 필터 적용

- ✓ 하루 기준 변동 폭 대비 3σ (표준편차) 이상 큰 변동만 의미 있는 변동으로 간주

Noise Filtering 전



Noise Filtering 후



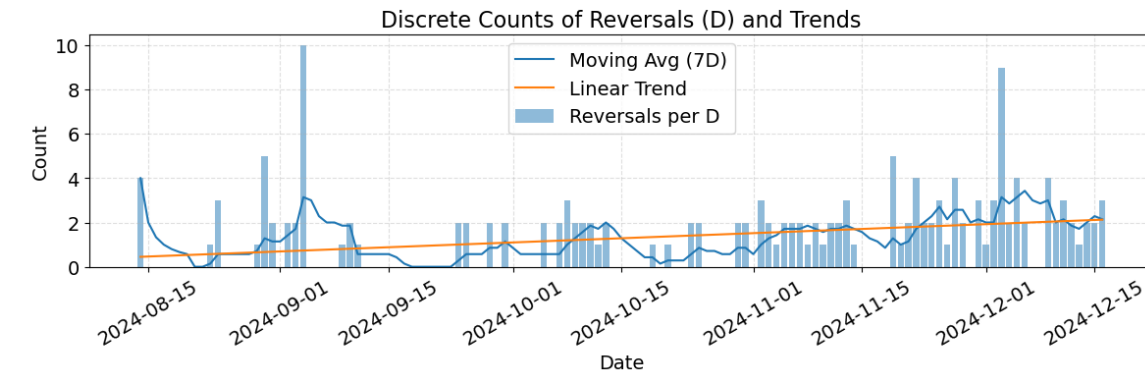
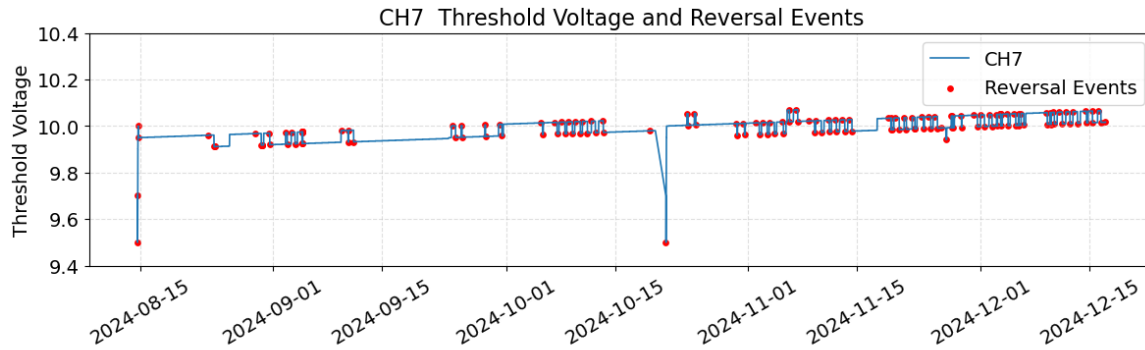
〈DC-DC Converter〉

3. 누적 손상 기반 수명 추정 기법

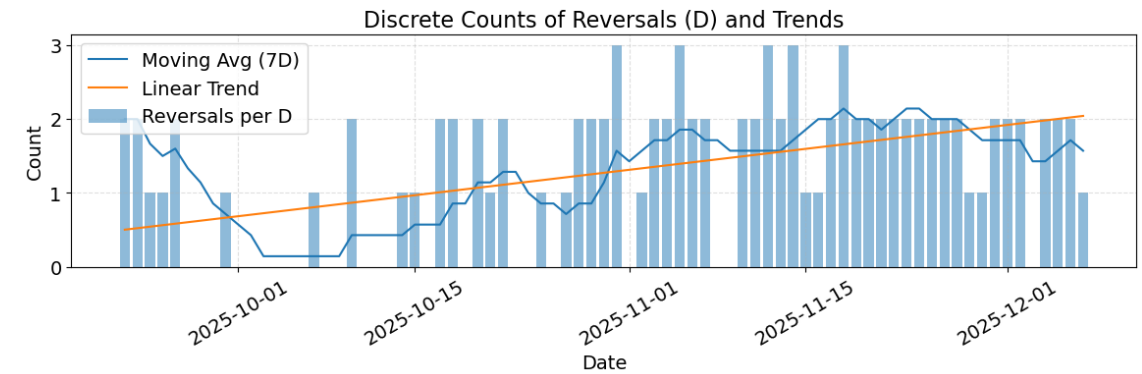
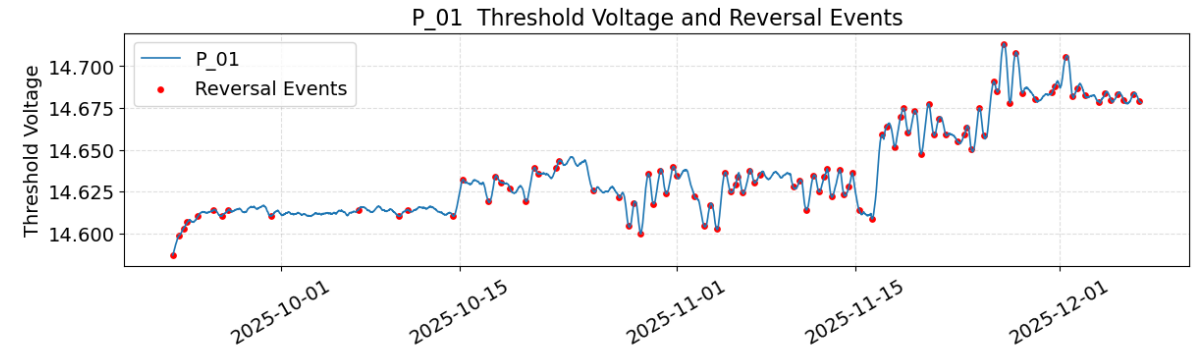


• 누적 손상 기반 수명 추정 방법론

- 열화 시험 시간에 따라 Event 발생 횟수 증가



〈DI 제어카드〉



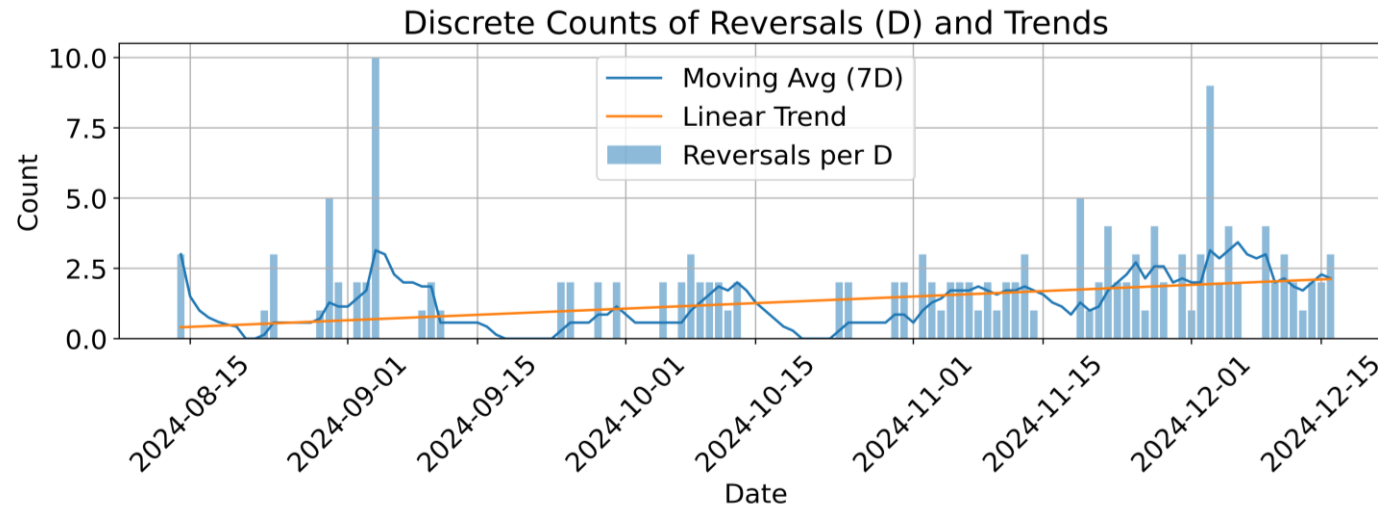
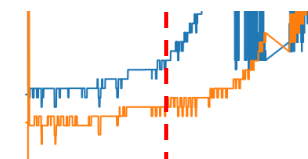
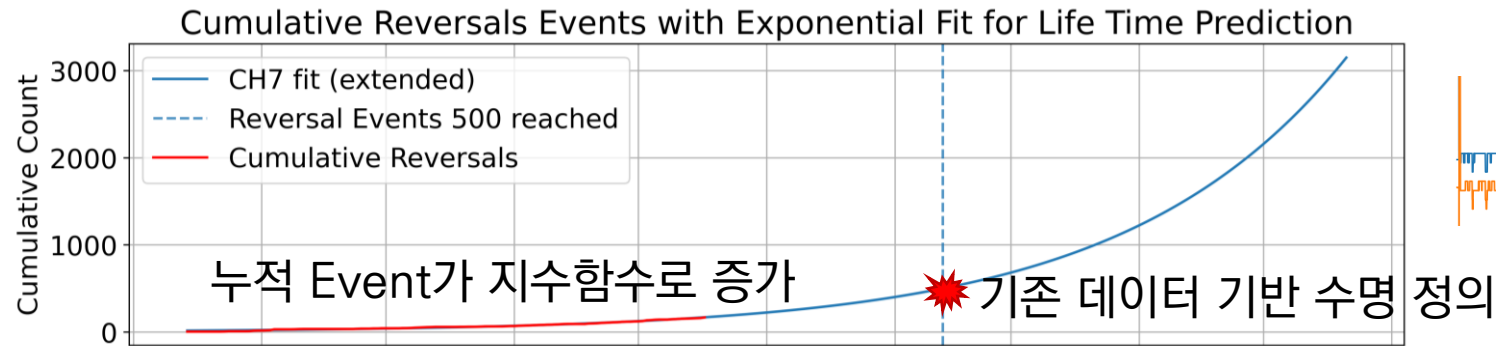
〈DC-DC Converter〉

3. 누적 손상 기반 수명 추정 기법



- 누적 손상 기반 수명 추정 방법론

- 수명



3. 누적 손상 기반 수명 추정 기법



- 정상조건에서의 Mean-Time-to-Failure (MTTF) 산출
 - 가속 시험 조건: 100 /140 °C, 정상 운전 조건: 25°C (상온)
 - Arrhenius 모델에 의한 정상 운전 조건에서의 MTTF 산출
 - ✓ 가속계수 (Acceleration Factor, AF)

$$AF = \exp\left(\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{use}} - \frac{1}{T_{test}}\right)\right), E_a = 0.43 \quad \longrightarrow \quad AF = 28.90$$

- ✓ 정상 운전 조건에서의 MTTF

$$MTTF_{use} = MTTF_{test} * AF$$

$$MTTF_{lognorm} = \exp\left(\mu' + \frac{\sigma^2}{2}\right)$$
$$MTTF_{weibull} = \eta * \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

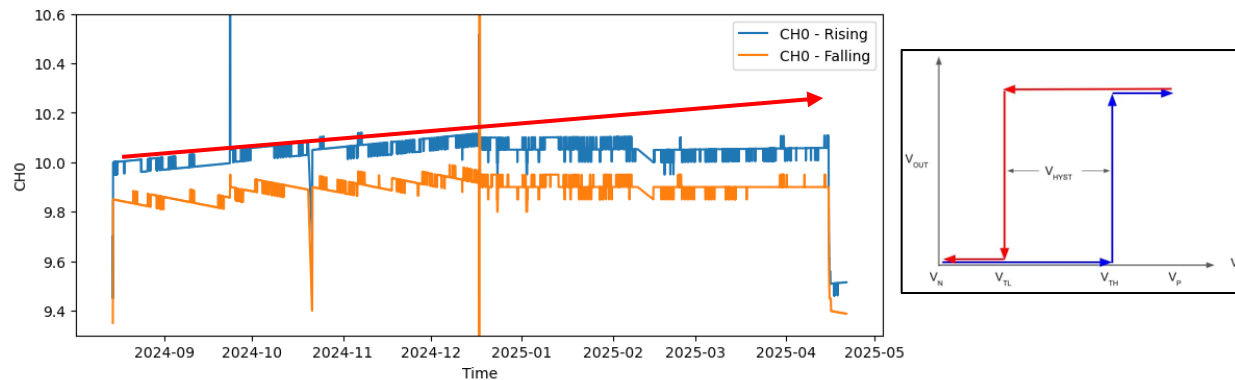
3. 누적 손상 기반 수명 추정 기법



• 비교 방법론 (기존 방법): DI 제어카드

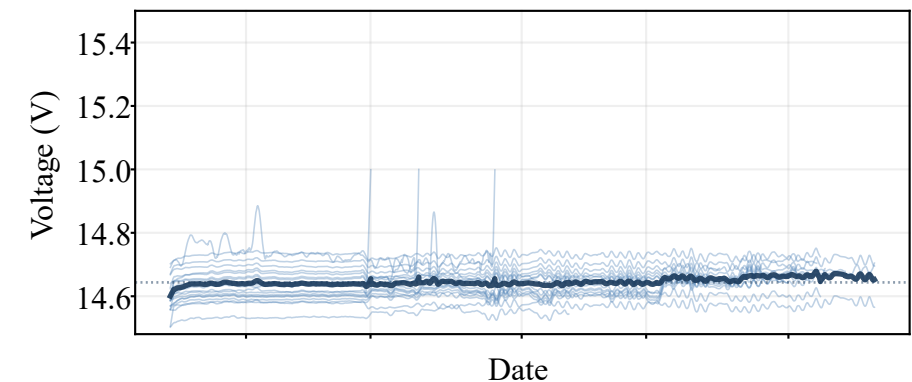
- 1) 상승 문턱 전압
- 2) Hysteresis

- ✓ Rising/Falling 차이를 Health index로 정의
- ✓ Falling Threshold: 특정 시점에서 급격히 상승
(내부 회로의 Hysteresis를 유지하려는 보정 메커니즘 추정)



• 비교 방법론 (기존 방법): DC-DC Converter

- 1) 출력 전압 기반

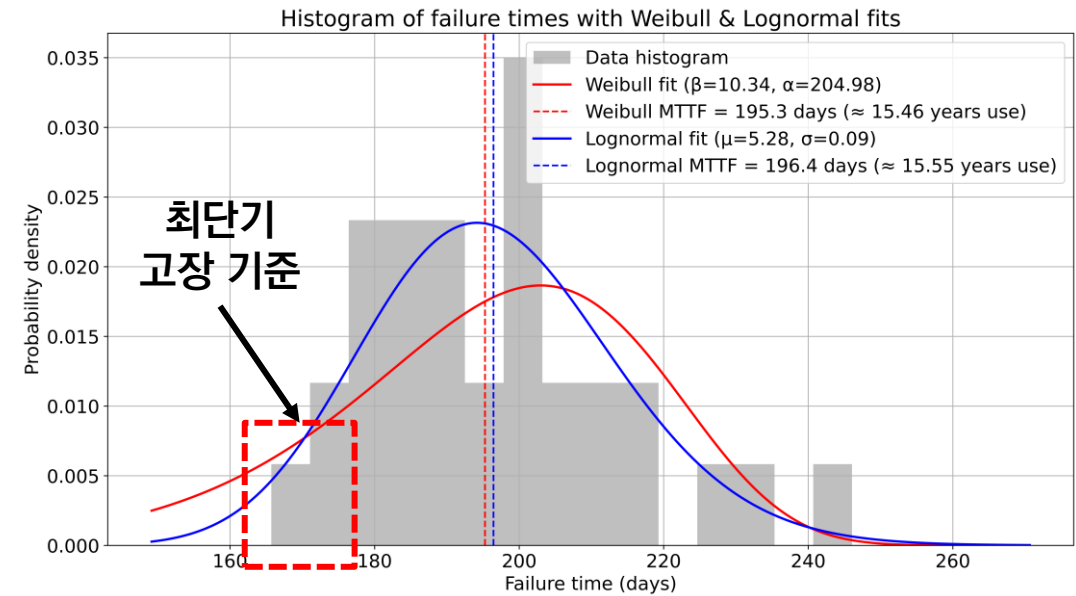
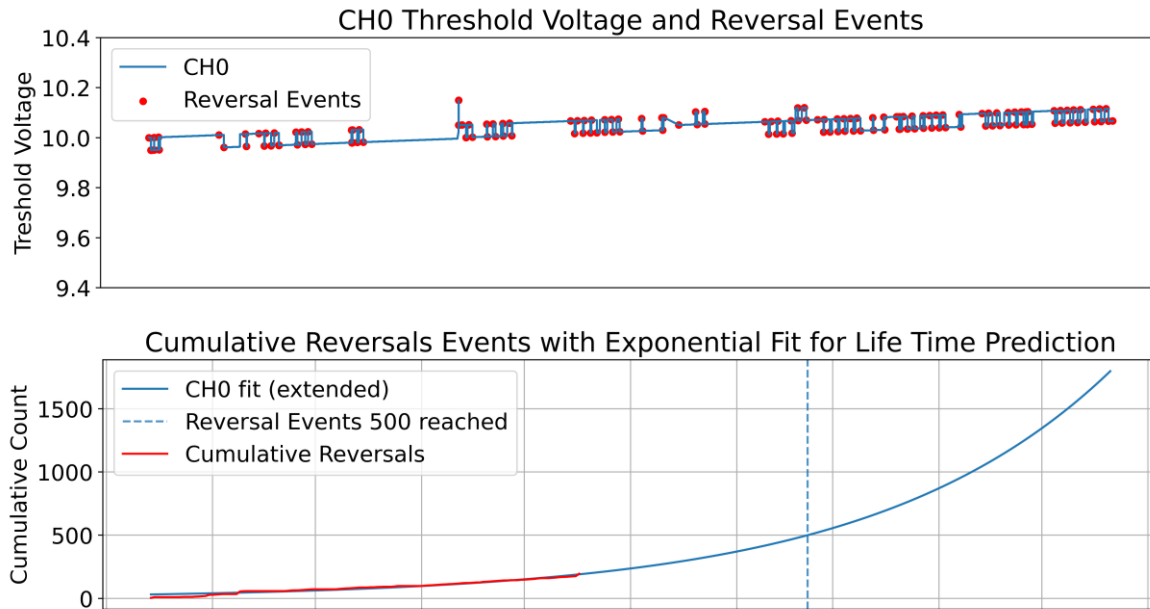


Ageing Impact on a HighSpeed Voltage Comparator with Hysteresis, Illani Mohd Nawi

3. 누적 손상 기반 수명 추정 기법

• 수명 추정 결과 (25°C 정상 사용 조건)

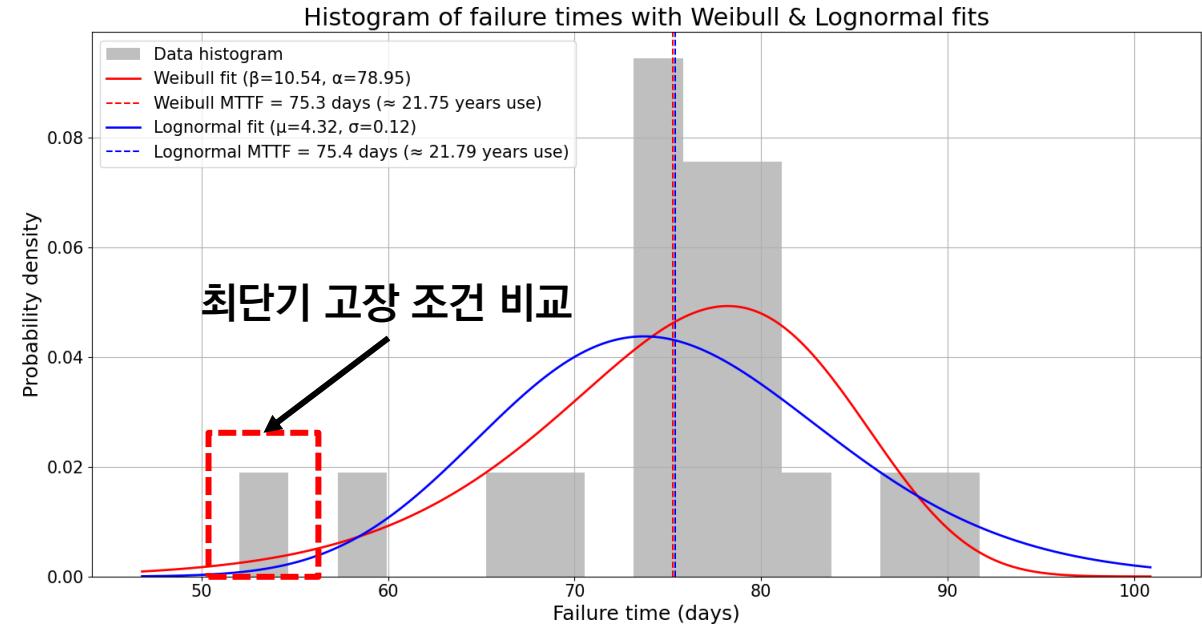
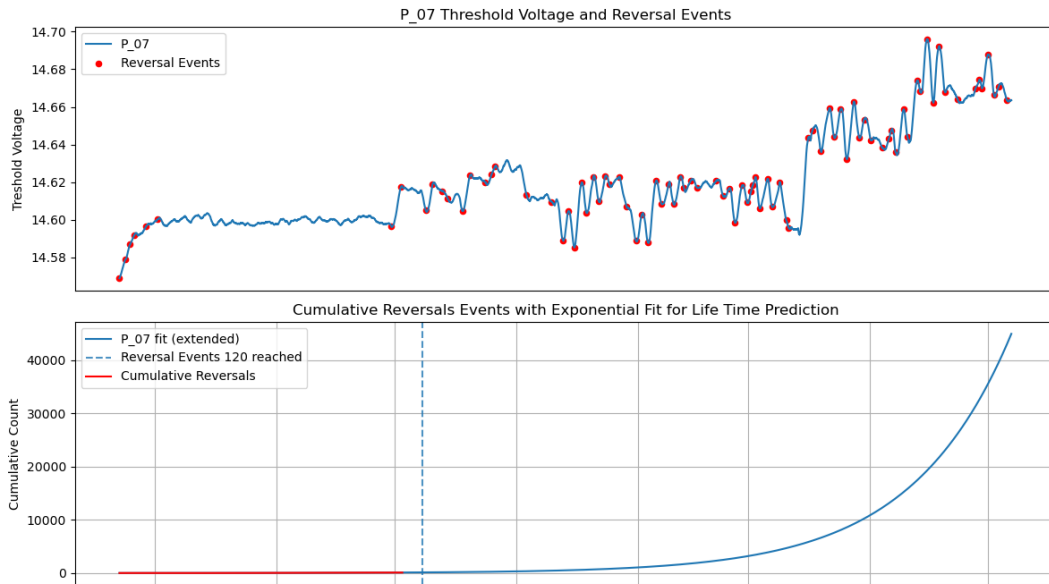
– DI 제어카드



Reversal Events	Method	Existing
500 Events	Lognormal Predicted Life (years)	15.46 ± 1.88years
	Weibull Predicted Life (years)	15.55 ± 1.47years

3. 누적 손상 기반 수명 추정 기법

- 수명 추정 결과 (25°C 정상 사용 조건)
 - DC-DC Converter



Reversal Events	Method	Existing
120 Events	Lognormal Predicted Life (years)	21.75 ± 2.49years
	Weibull Predicted Life (years)	21.79 ± 2.68years

4. 결론



• 결론

- 원자로 제어계통 전자 부품을 대상으로 열화 시험 수행 → 수명 예측
- 기존 방법론은 열화 메커니즘을 반영하지 못하고, 정확도가 낮음
- HCI 열화 메커니즘을 반영한 누적 데미지기반 수명 추정 방법론 제안
- 실제 제조사에서 제시한 수명값과 유사한 수명값 산출

• 향후 연구

- 열화 메커니즘의 발생 원인 및 확인 필요
- 열화 메커니즘과 열화 추세를 함께 고려한 수명 추정 방법론 개발
- 인공지능을 활용한 End-to-End 수명 추정 방법론 개발



Thank you

본 연구는 한국원자력연구원의
지원을 받아 수행되었습니다.

정준하

아주대학교 산업공학과

joonha@ajou.ac.kr

