# 로봇 팔 모터
# 이상 징후 감지 시스템 개발

**Filab 김창현, 오정윤**

Pohang University of Science and Technology

# ❖ 목차


**- S1. 프로젝트 개요**

- Background
- 문제 정의
- 목표 및 해결 방안 설정

**- S2. 데이터 준비**

- Prior Knowledge 수집
- 데이터 수집 방법 기획
- 데이터 수집 및 선별
- 데이터 레이블링

**- S3. 향후 추진 계획**

- 데이터 전처리
- 이상 탐지 알고리즘 개발
- 모니터링 시스템 개발

# ❖ S1. 프로젝트 개요 : Background

**산업 로봇 팔** (Industrial Robotic Arm)은 제조, 물류, 의료 등 다양한 산업에서 **반복적이고 위험한 작업**을 **자동화**하여 **생산성과 안전성을 향상**시키는 **핵심 장비**이다.

- ✓ **유형:** 관절형, 직교좌표형, 델타형, SCARA, 원기둥형, 구형 등 **구조와 특성**에 따라 **용접, 조립, 포장, CNC 가공 등**과 같은 특정 작업에 최적화
- ✓ **구성:** 축(axis)과 관절(joint)로 이루어진 팔, 센서, 컨트롤러를 포함
- ✓ **특징:** 작업 환경과 목적에 맞게 설계되며, 효율성과 유연성을 극대화하는 자동화 솔루션으로 활용

용접용



조립용



포장용



CNC 가공용

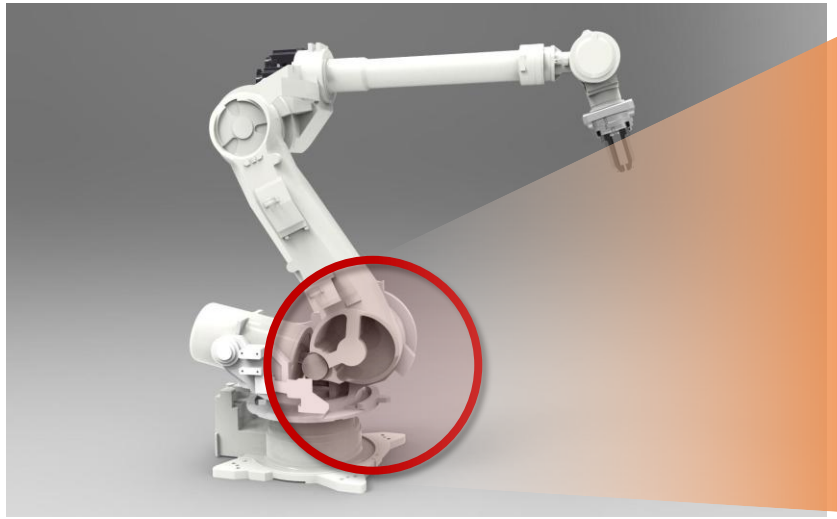


# ❖ S1. 프로젝트 개요 : Background

**로봇 팔**은 모터, 감속기, 관절, 엔드 이펙터와 센서, 제어 시스템 등으로 구성되어 **동작과 작업을 수행**

✓ 모터, 감속기, 관절, 힘 센서, 베어링, 기어를 통해 **움직임 구현**

산업용 로봇팔



로봇팔 부품



**모터**



**베어링**



**기어**

# ❖ S1. 프로젝트 개요 : Background

**로봇 팔**은 산업 자동화에서 핵심 장비로, **반복되고 높은 정밀성**을 요구하는 작업을 수행합니다. 부품 결함은 고장으로 이어지며 **생산성 저하, 다운타임, 유지보수 비용 증가, 장비 수명 단축** 등의 문제가 발생할 수 있다.

➔ 로봇팔의 **이상 징후를 조기에 진단**하고 **대응**하는 **기술 필수**

**로봇 1대의 고장이 라인 전체에 미치는 영향**
(조선비즈, 2019)

이 기능은 로봇의 집단 지성과 같은 '필드(FIELD) 시스템'으로 이어지고 있다. 그동안 로봇 100대 중 1대가 고장 나면 라인 전체가 중단됐다. 앞으로 이 시스템이 적용되면 나머지 99대가 공정 속도를 늦춘 뒤 작업을 분담한다. 네트워크로 두뇌를 연결한 로봇이 스스로 공장을 돌리는 것이다. 화낙은 최근 이 시스템으로 720시간 동안 사람 없이 공장을 가동하는 '완전 무인(無人) 공정'에 성공했다.

**무리한 로봇 팔 가동으로 인한 고장 사례**
(동아일보, 2024)

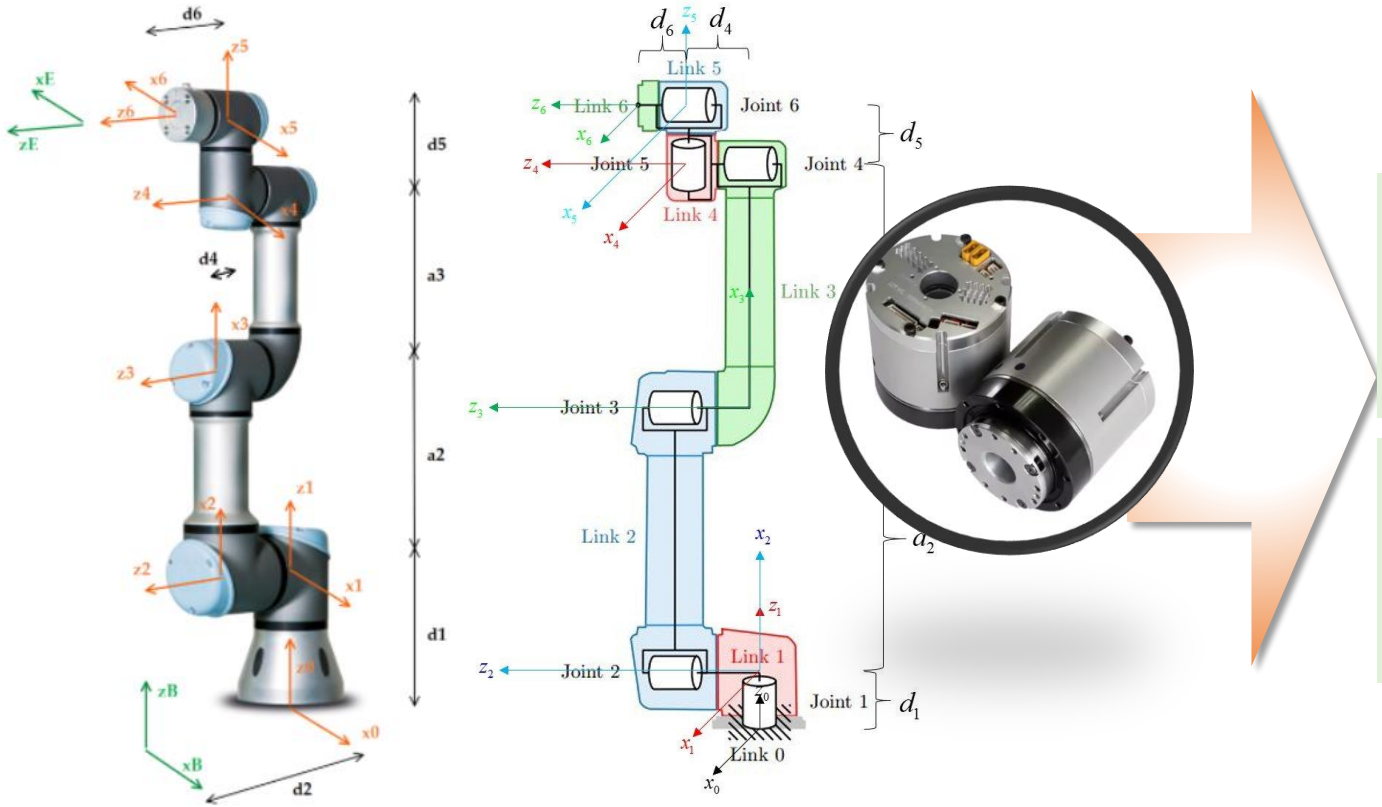
로봇 팔은 원래 고장이 자주 나는 제품이 아니다. 실제 대기업 제조 현장에서는 짧게는 8년, 길게는 10년 이상 사용되곤 한다. 하지만 같은 로봇 팔이라도 중소기업에서 운용될 때 수명은 유독 더 짧다. 그 원인을 성노윤 대표는 '현실과 이상의 차이'로 본다. 그는 "중소기업에서는 물량과 납기일을 맞추기 위해 무리하게 로봇 팔을 가동하기도 한다. 그래서 실제 수명보다 단명하거나 오작동이 잦아지는 것"이라며 "한 대에 1억 원이 넘는 로봇 팔을 대기업에서는 여분을 두고 여유롭게 운용할 수 있지만, 중소기업이 그러기는 어렵다"고 설명했다.

# ❖ S1. 프로젝트 개요 : 문제 정의

**구성 부품 중 특히 모터의 이상 탐지는 시스템 안정성과 효율성을 보장하기 위해 가장 우선적으로 고려되어야 함**

✓ 모터는 로봇팔을 직접적으로 제어하는 핵심 부품

✓ 모터의 **상태 데이터**는 타부품에 비해 **데이터 수집 및 분석이 용이**하여 이상 감지 시스템 구현에 적합함




## 모터 이상 탐지가 중요한 이유

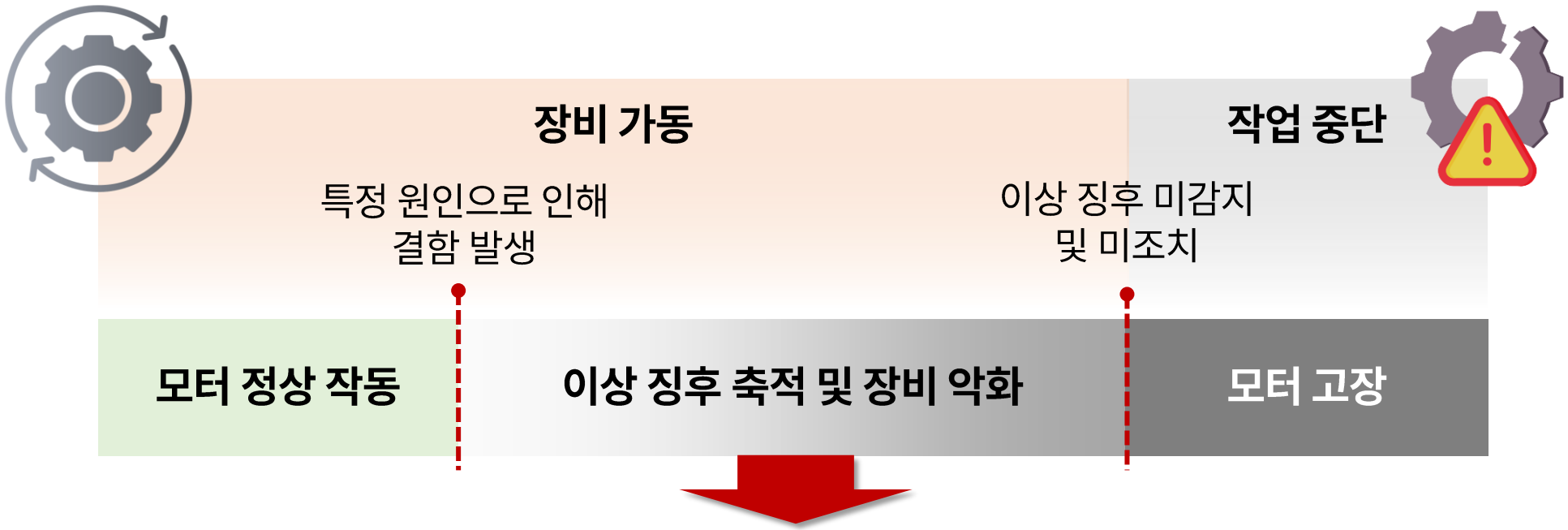
움직임을 제어하는 **핵심 부품**

데이터 수집 및 분석 용이

# ❖ S1. 프로젝트 개요 : 문제 정의

로봇 팔을 **움직이게 하는 핵심 부품**인 **모터**의 **결함을 감지하지 못하면** 가동이 지속되며, 이는 **결함 악화를 가속화**하여 결국 **시스템을 중단**시킴

➔ 이러한 상황 예방을 위해 **모터의 결함 발생**을 **빠르게 감지**하는 것이 필수적




**모터의 이상 징후 감지 필요**

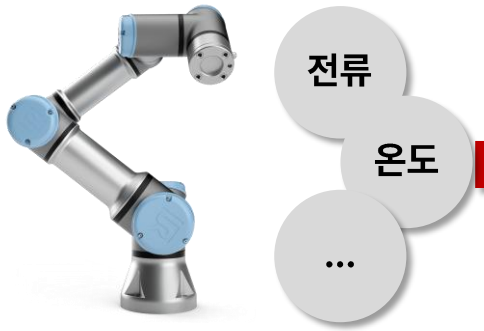
# ❖ S1. 프로젝트 개요 : 목표 및 해결 방안 설정

**목표**

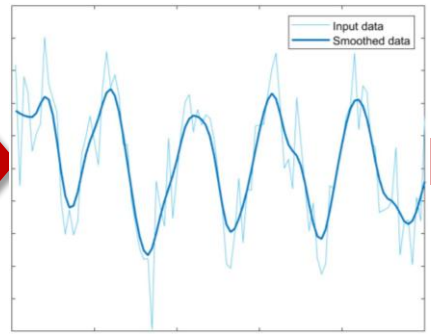
**로봇팔 모터 데이터**(전류, 진동 등)의 주요 센서를 통해 **핵심 데이터를 추출**하고, 이를 기반으로 진단 분석(Diagnostic Analytics)과 **이상 징후 감지 시스템을 구현**

## 데이터 수집 및 모델 구축 과정

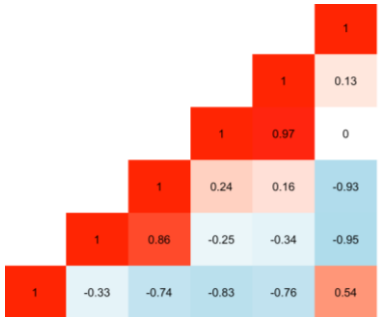
**1. 센서 데이터 수집**



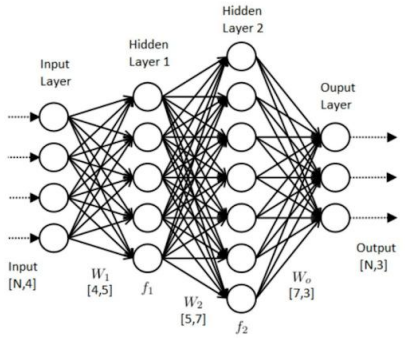

**2. 데이터 전처리**



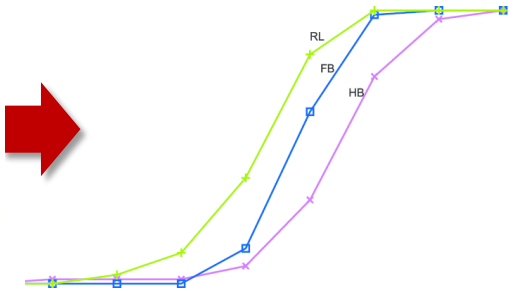

**3. 상관 계수 분석**




**4. AI기반 모델 구축**



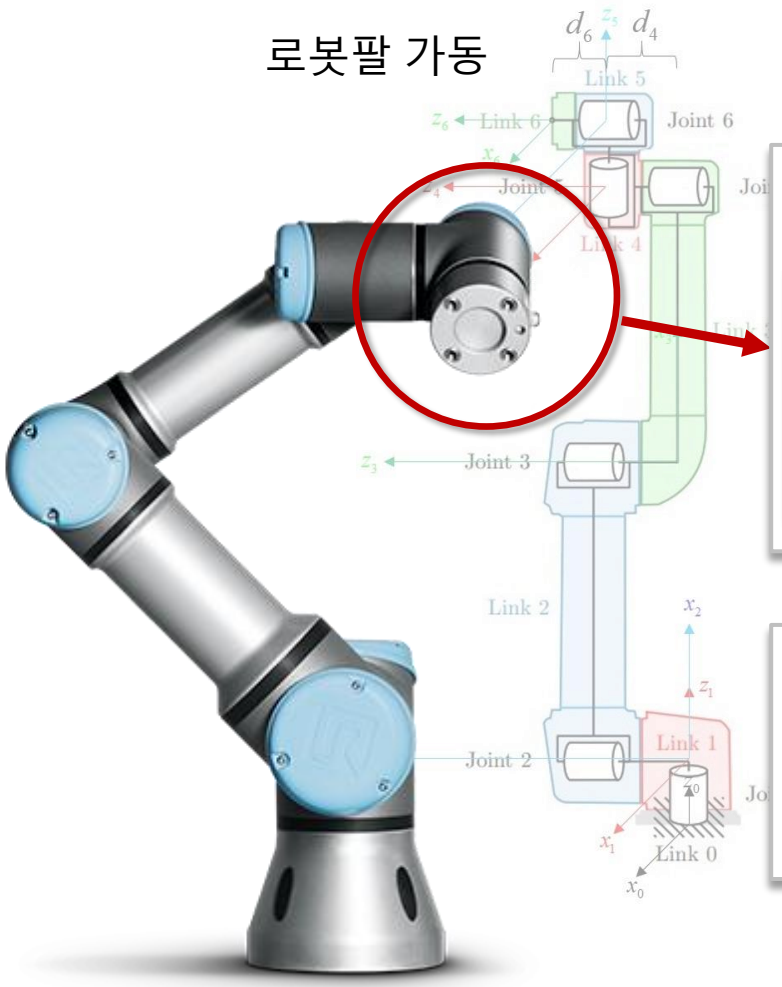

**5. 결과 평가 및 개선**



# ❖ S1. 프로젝트 개요 : 목표 및 해결 방안 설정

로봇팔 모터에서 가동시의 데이터를 수집하여 AI 알고리즘을 활용하여 이상탐지를 하는 해결방안 수립

로봇팔 가동




**데이터 수집**

Motor Sensor

전류 | 전압 | 온도

**데이터 저장**

데이터베이스

**알고리즘 및 데이터 처리**

정상 데이터 | 이상 데이터

**이상 판단 후 알림**

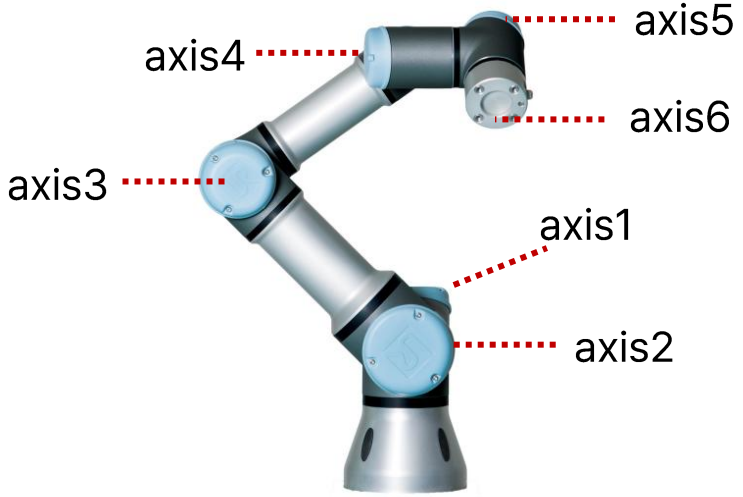
**작업자 이상 확인**

# ❖ S2. 데이터 준비: Prior Knowledge (1/2)

로봇은 제어기와 바디로 구성된다

✓ **제어기**는 safety board로 **전체 센서 데이터** 수집, **바디**는 **6개의 축별 데이터** 수집






**Controller** → **Total Data**

**Body** → **Axis Data**

Data Collection

# ❖ S2. 데이터 준비: Prior Knowledge (2/2)

각 축에는 **All-in-One Actuator**가 장착되어 있으며, 내부에는 **모터**(회전 운동), **감속기**(힘 증폭), **엔코더**(위치 파악), **브레이크**(자세 유지)로 구성

협동로봇의 경우, 각 축에 **서보 드라이버 보드**가 추가되며 전류 값을 **V=IR**을 이용해 계산




**48V PMSP**

- **Reducer**
- **Motor**
- **Driver**
- **Brake**
- **Encoder**

*PMSP : Permanent Magnet Synchronous Motor

# ❖ S2. 데이터 준비: 데이터 수집 방법 기획 (1/2)

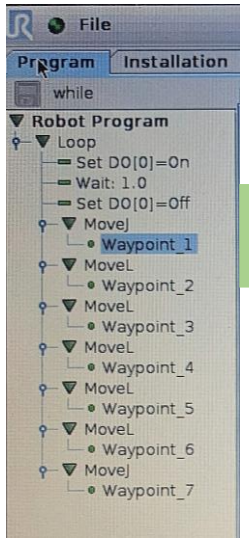
**Robot Program**: 로봇이 반복 동작을 수행시 일정 시간마다 서보 드라이버로 **위치 지령 전달**

**서보 드라이버**: 위치, 속도, 전류에 대해 PID 제어를 수행하며, 전류 제어는 Vector Current Control 방식 사용

➔ **모터**는 Vector Current Control을 통해 **위치와 토크를 제어**하며, 이때 **전류 값은 토크 값에 비례**

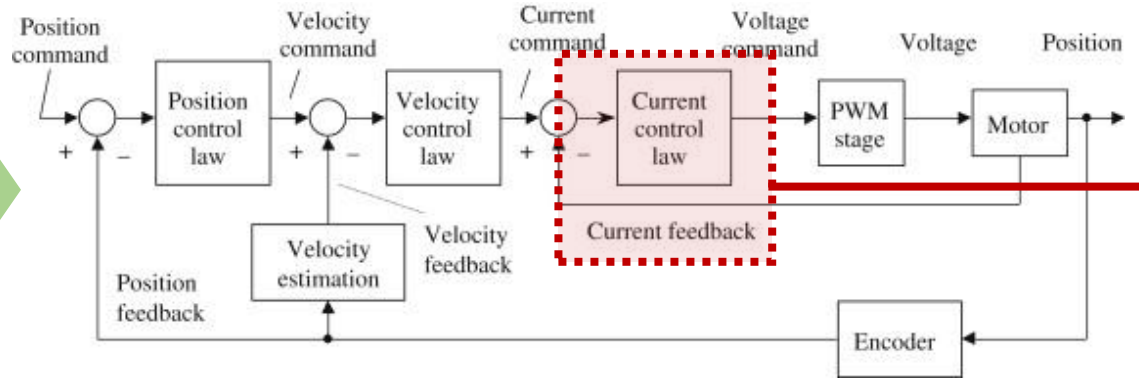
**Robot Program**

**위치 지령 전달**



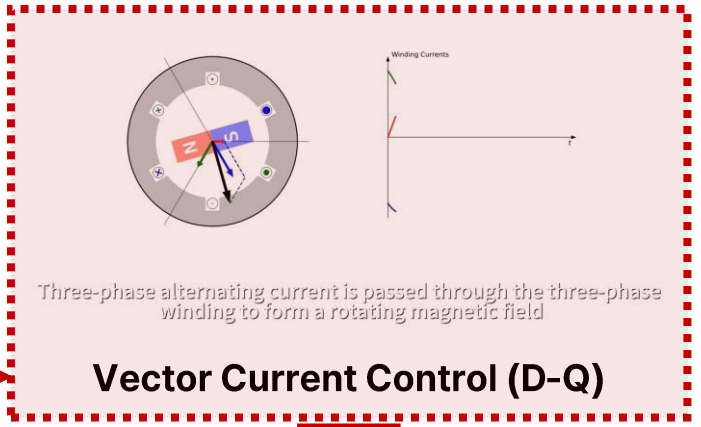

**Servo driver**

**위치, 속도, 전류 제어**




**PID Control Loop**
(Position, Velocity, Current)

**모터의 위치 및 토크 제어**




$$T = K_t \cdot I \qquad T \propto I$$

→ **Torque and current are proportional**

# ❖ S2. 데이터 준비: 데이터 수집 방법 기획 (2/2)

부품 고장이나 노후로 인한 **토크 증가를 모사**하기 위해 **무거운 물체를 부착해 이상 데이터를 수집**

✓ 기계에 **추가 무게를 부착**해 불균형을 유발하여 **고장 상태를 재현**하는 방식은 Li et al., 2019에서도 사용됨

**로봇 가동시 동작**



**모터 가동 상태별 실험 조건**

**정상 가동**



**하중 가동**
(3.5kg)



**고장 및 노후화 상태 재현 가능**

# ❖ S2. 데이터 준비: 수집 데이터 종류 및 유형

로봇팔 모터 센서에서 수집된 **전압, 전류, 온도 데이터**를 **정상 상태**와 **이상 상태**로 분류하여 기록

**모터 센서에서 수집되는 데이터**

| 전압 데이터 | 전류 데이터 | 온도 데이터 |
|---|---|---|
| 모터의 부하 상태를 실시간으로 반영 | 기계적 마모, 불균형, 균열 등 물리적 결함의 주요 지표 | 과열로 인한 성능 저하와 부품 손상 감지 |



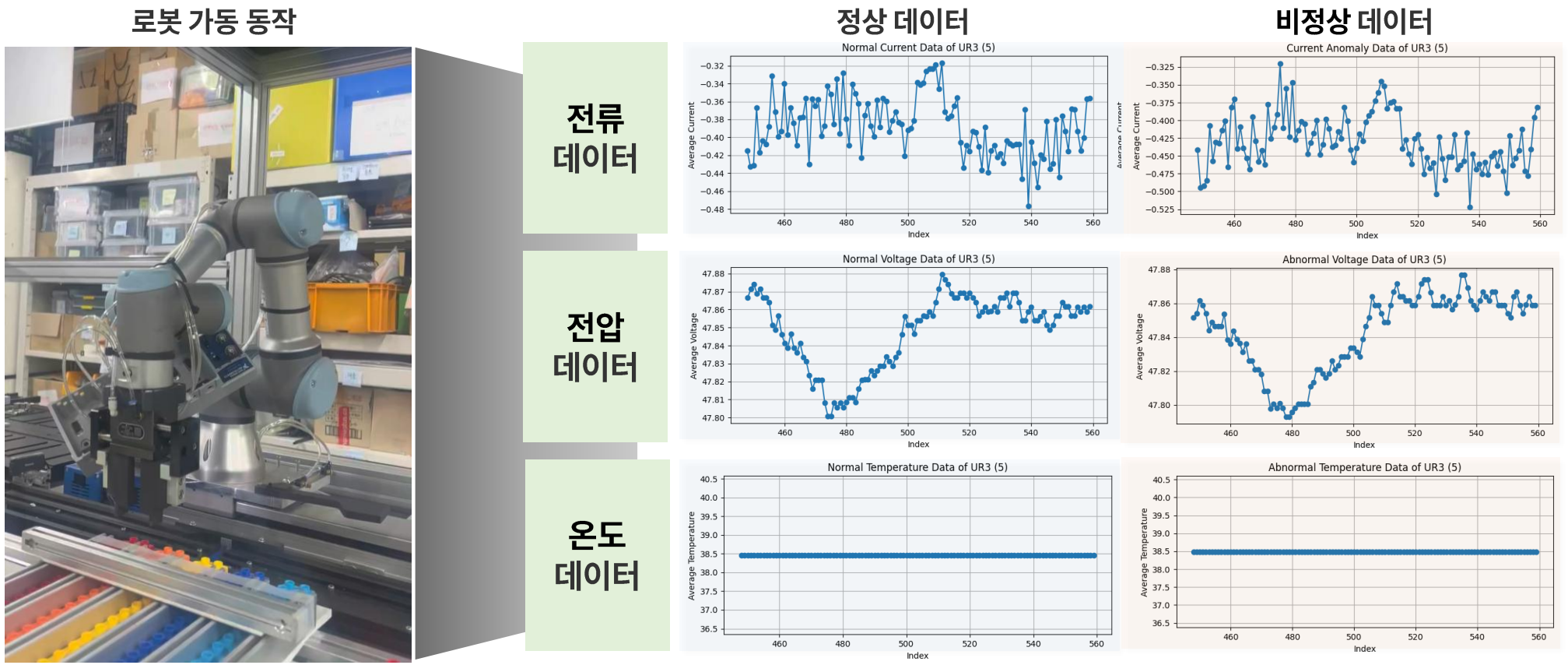
**수집 데이터의 유형**

- 정상 데이터
- 이상 데이터

# ❖ S2. 데이터 준비: 수집 데이터 시각화

**로봇 가동 동작의 데이터** 수집: Cycle time **3.5초**당 **112개**를 **실시간** 수집

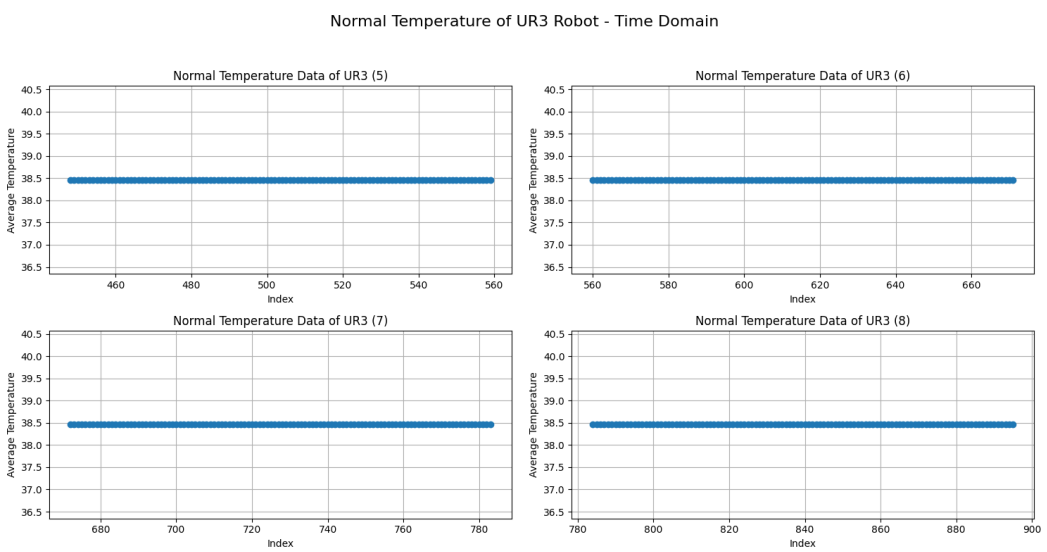
✓ 모터 이상 상태를 시뮬레이션 하기 위해 실험시 **로봇 끝단에 가중하중보다 무거운 하중**(3.5kg)**을 부과**하여 **조건 재현**



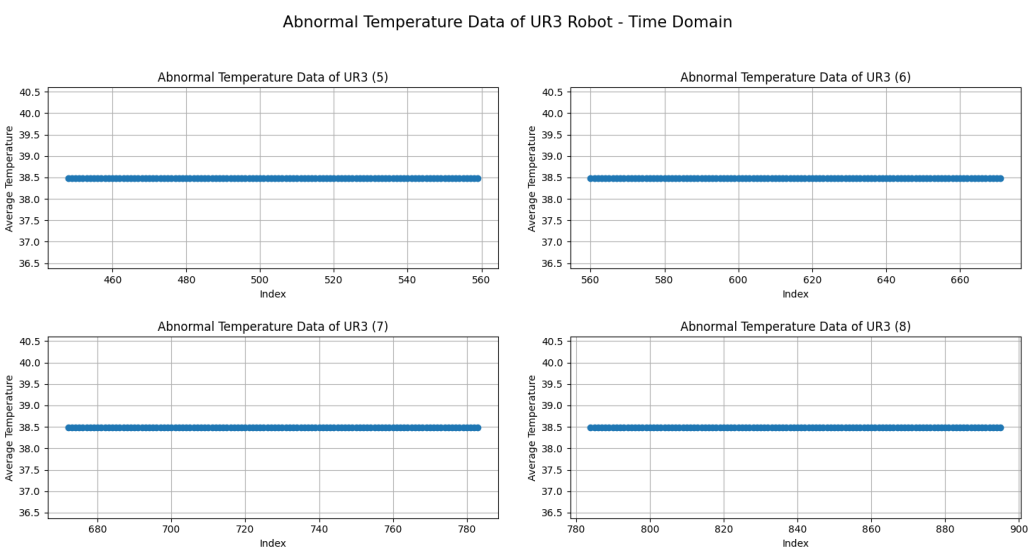
# ❖ S2. 데이터 준비: 수집 데이터 선별

단, **온도 데이터**의 경우, 정상 및 비정상 시계열 간 온도 변화에서 둘 다 약 38.5도로, **차이가 식별되지 않아** 학습 데이터에서 **제외**

## 정상 온도 데이터




## 비정상 온도 데이터



# ❖ S2. 데이터 레이블링

수집 데이터 정상/비정상 데이터 저장 후 **정상은 0**으로, **비정상은 1**로 labeling

## 정상 데이터

| timestamp | temp_j1 | temp_j2 | temp_j3 | temp_j4 | temp_j5 | temp_j6 | volt_j1 | volt_j2 | volt_j3 | volt_j4 | volt_j5 | volt_j6 | curr_j1 | curr_j2 | curr_j3 | curr_j4 | curr_j5 | curr_j6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 23:49.2 | 27.73119 | 29.56878 | 29.68943 | 31.09771 | 32.68378 | 30.24345 | 47.727 | 47.834 | 47.91 | 47.849 | 47.91 | 47.818 | 0.284866 | -0.90619 | -1.25053 | -0.37039 | 0.128684 | -0.02574 |
| 23:49.2 | 27.73119 | 29.56878 | 29.68943 | 31.09771 | 32.6854 | 30.24345 | 47.697 | 47.834 | 47.91 | 47.849 | 47.94 | 47.818 | 0.278137 | -0.78731 | -1.14988 | -0.52033 | 0.128684 | -0.05707 |
| 23:49.3 | 27.73407 | 29.56878 | 29.68949 | 31.09794 | 32.6854 | 30.24345 | 47.697 | 47.834 | 47.895 | 47.864 | 47.94 | 47.818 | 0.132339 | -0.55403 | -1.06143 | -0.50355 | 0.125327 | -0.06266 |
| 23:49.3 | 27.73407 | 29.56891 | 29.68949 | 31.09794 | 32.68686 | 30.24811 | 47.697 | 47.818 | 47.895 | 47.864 | 47.925 | 47.834 | -0.06056 | -0.47777 | -0.94705 | -0.59083 | 0.117494 | -0.09735 |
| 23:49.3 | 27.73666 | 29.56891 | 29.68949 | 31.09794 | 32.68686 | 30.24811 | 47.727 | 47.818 | 47.879 | 47.864 | 47.925 | 47.834 | -0.09869 | -0.37459 | -0.89672 | -0.60314 | 0.113018 | -0.03245 |
| 23:49.4 | 27.73666 | 29.56902 | 29.68954 | 31.09814 | 32.68686 | 30.25229 | 47.727 | 47.818 | 47.879 | 47.864 | 47.925 | 47.834 | -0.25346 | -0.47328 | -0.78387 | -0.57628 | 0.100709 | -0.19359 |
| 23:49.4 | 27.74 | 29.56902 | 29.68954 | 31.09814 | 32.68918 | 30.25229 | 47.727 | 47.818 | 47.879 | 47.864 | 47.925 | 47.834 | -0.32076 | -0.38356 | -0.82505 | -0.67923 | 0.06714 | -0.07945 |
| 23:49.4 | 27.74 | 29.56902 | 29.68958 | 31.09833 | 32.68918 | 30.25229 | 47.727 | 47.818 | 47.925 | 47.849 | 47.925 | 47.834 | -0.23103 | -0.45085 | -0.75185 | -0.65014 | 0.023499 | -0.05371 |
| 23:49.5 | 27.743 | 29.56911 | 29.68958 | 31.09833 | 32.69226 | 30.25607 | 47.682 | 47.834 | 47.925 | 47.849 | 47.925 | 47.818 | -0.21758 | -0.41721 | -0.73659 | -0.63111 | -0.03021 | -0.09511 |

## 비정상 데이터

| timestamp | temp_j1 | temp_j2 | temp_j3 | temp_j4 | temp_j5 | temp_j6 | volt_j1 | volt_j2 | volt_j3 | volt_j4 | volt_j5 | volt_j6 | curr_j1 | curr_j2 | curr_j3 | curr_j4 | curr_j5 | curr_j6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 32:56.5 | 27.42724 | 29.93999 | 30.96972 | 31.84117 | 33.85284 | 31.3442 | 47.697 | 47.803 | 47.895 | 47.879 | 47.895 | 47.834 | -0.11215 | -0.85909 | -1.09193 | -0.61545 | -0.09623 | -0.09511 |
| 32:56.5 | 27.42752 | 29.93999 | 30.96972 | 31.84117 | 33.85284 | 31.3442 | 47.712 | 47.788 | 47.895 | 47.879 | 47.895 | 47.834 | -0.02467 | -0.80974 | -0.9135 | -0.59866 | -0.10966 | -0.03805 |
| 32:56.6 | 27.42752 | 29.93999 | 30.96972 | 31.84406 | 33.85856 | 31.3442 | 47.712 | 47.788 | 47.895 | 47.834 | 47.895 | 47.834 | -0.11215 | -0.60786 | -1.06905 | -0.61657 | -0.13316 | -0.16337 |
| 32:56.6 | 27.42777 | 29.93999 | 30.96974 | 31.84406 | 33.85856 | 31.34578 | 47.682 | 47.818 | 47.91 | 47.834 | 47.895 | 47.818 | -0.1929 | -0.60114 | -0.92417 | -0.56397 | -0.14211 | -0.10966 |
| 32:56.6 | 27.42777 | 29.93999 | 30.96974 | 31.84406 | 33.85856 | 31.34578 | 47.682 | 47.818 | 47.91 | 47.834 | 47.91 | 47.818 | -0.323 | -0.58095 | -1.01415 | -0.65349 | -0.15554 | -0.05259 |
| 32:56.7 | 27.42777 | 29.93999 | 30.96977 | 31.84665 | 33.8637 | 31.3482 | 47.697 | 47.818 | 47.91 | 47.834 | 47.91 | 47.834 | -0.26917 | -0.65721 | -0.9257 | -0.59866 | -0.17344 | -0.06826 |
| 32:56.7 | 27.42799 | 29.93999 | 30.96977 | 31.84665 | 33.8637 | 31.3482 | 47.697 | 47.818 | 47.91 | 47.834 | 47.91 | 47.834 | -0.2086 | -0.61459 | -1.00805 | -0.59419 | -0.16002 | -0.10295 |

# ❖ S3. 향후 추진 계획

**데이터 전처리**

- 수집된 원본 신호 데이터 이상치 및 노이즈 제거
- 알고리즘 학습 형태로 가공

**알고리즘 개발**

- 이상 징후를 조기에 감지할 수 있는 알고리즘 개발
- 여러 알고리즘 비교 및 적용하여 최적 모델 선정

**시스템 개발**

- 실시간으로 모터 상태 모니터링 시스템 구현
- 시각화 대시보드 및 알람 기능을 활용한 이상 징후 감지 시스템 구축