

온톨로지 기반 설명가능성을 제공하는 공장 이상진단

김말희, 정훈
한국전자통신연구원

mariekim, hjeong@etri.re.kr

A Study on the factory fault diagnosis providing ontology-based explainability

Marie Kim, Jeong Hoon
Electronics and Telecommunications Research Institute

요약

본 논문은 공장 설비의 이상진단을 통해 공장 운영의 안정성과 비용 절감을 달성하기 위한 온톨로지 기반 이상진단 기술을 다룬다. 온톨로지 기반 이상진단 기술은 공장 주요 설비의 에너지 및 운영 상태 데이터를 기반으로 이상 발생 시점과 원인, 위치를 구조화된 형태로 표현함으로써 현장 전문가가 보다 신속하고 정확하게 대응할 수 있도록 지원한다. 특히 전력 기반 관제점(FEMS, Factory Energy Management System) 데이터와 설비에 부착된 센서를 병행 활용함으로써 이상감지의 범위와 정밀도를 동시에 확보할 수 있는 구조를 제안한다.

I. 서론

공장 운영의 자동화를 위해서는 설비 운영상태에 대한 모니터링과 이상진단 및 유지보수가 매우 중요하다. 설비의 이상을 진단하는 방법은 다양하다. 이상진단에 있어서 중요한 것은 이상을 감지한 후 맥락정보를 정확히 파악함으로써 효과적인 대응이 가능하도록 하는 것이다. 이를 위해서는 이상진단에 따른 정확한 해석정보를 제공할 수 있어야 한다. 본 연구는 공장 설비의 이상진단을 온톨로지 기반 처리함으로써 이상에 대한 원인분석을 지원한다. 공장 전체의 에너지 흐름을 모니터링할 수 있는 FEMS 시스템이 설치된 공장에서 에너지 사용 패턴의 이상상황 정보를 진단하고, 이와 병행하여 설비 자체 센서를 통해서 이상 진단을 수행한다. 이렇게 진행함으로써 공장 전반의 이상상황을 진단하는 동시에 문제 발생의 원인에 대한 정밀한 이상진단이 가능하게 된다. 관제점 진단은 전체 흐름을 보는 레이더 역할을 수행하고, 설비 진단은 정밀 진단을 위한 청진기 역할을 수행하게 된다. 본 연구에서는 설비 이상진단을 보다 체계적으로 설명하고 추론 가능하도록 하기 위해 온톨로지 기반의 지식 표현 구조를 제안한다. 이를 통해 이상 이벤트가 왜, 어디서, 어떤 조건에서 발생했는지를 RDF(Resource Description Framework) 기반 지식그래프로 표현할 수 있으며, SPARQL 질의를 통해 자동 분석 및 인과 추적이 가능해진다.

II. 제안 모델

온톨로지(Ontology)란 특정 영역에 대한 개념적 이해를 여러 사람이 공유할 수 있도록, 형식적이고 명확하게 표현한 명세이다[1]. 기술적으로는 RDF, Turtle, OWL과 같은 표준적인 데이터 모델, 어휘, 스키마를 사용한다. 온

톨로지에 기반하여 실제적인 데이터들이 저장되고 관리되는 것을 지식그래프(Knowledge Graph)라고 한다. 본 논문에서 제안하는 온톨로지는 Group → Company → Plant → MonitoringPoint → Channel → Equipment → AnomalyEvent로 이어지는 계층 구조를 갖는다. 이 구조는 ETRI에서 개발한 표준 FEMS[2,3] 데이터 모델을 참조하여 설계되었다. 다음 그림 1은 주요한 클래스들의 계층 구조를 가시화한 것이다.

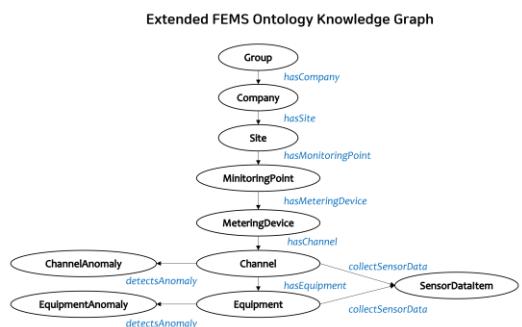


그림 1 공장 이상진단 클래스 계층도

각 계층은 공장의 물리적 구조 및 전력 흐름을 반영한다. 에너지원이 전력인 경우, 관제점(MonitoringPoint)에는 GEMS3500 같은 전력량계가 설치되며, 센서 기반 설비는 진동, 온도 등의 데이터를 수집한다. Channel은 GEMS3500 와 같이 멀티채널 계측기에서 채널 별 구별(feeder)을 위한 것이다. 이 채널에 공정 설비(Equipment)가 하나 이상 연결된다. 각 공정 설비에는 설비 상태를 모니터링하기 위한 센서가 부착된다. 이상감지는 관제점 내 각 Channel에서 에너지 사용 패턴 기반 감지되고, 상세한 이상감지는 각 공정 Equipment에 부착된 센서 기반 검출된다. 표 2는 그림 1에서 설계된 조

직 구조 및 계측 정보에 대한 예시를 정리한 것이다.

표 1 조직 구조 및 계측 정보 예시

조직 구조	Group KFEMS Company A Cement Plant GangneungPlant
관제점	위치 154KV S/S 에너지원 전력 설치장비 GEMS3500 포함 속성 설비번호, 패널명, 피더명, IP, PORT, 항목 TAG 등
관제점 종류	PM001 전력량계 PP001 피크미터기 (기타) 유량계, 기상장비 등
센싱정보 (GEMS3500 기반)	V, A_R, HZ 전압, 전류, 주파수 KW, KWH 유효전력, 전력량 온톨로지 SensorDataItem 클래스로 정의

다음은 설비의 회전체(모터, 펌프, 펜등)에서 발생하는 비정상적인 진동 패턴 중 고조파 성분이 비정상적으로 증가했을 경우를 감지하는 것과 관련된 이상진단 예시이다. 관제점 기반 전력 수급의 이상이 감지되고, 설비 센서 기반 진동 고조파 성분이 증가한 경우 설비 이상으로 진단한다.

이상감지에 대한 온톨로지 표현은 다음과 같다. 우선은 관제점에서 전력 계측 값 이상을 감지한다. 그리고 설비 센서단에서 진동 고조파 이상을 진단한다. 이러한 조건에 기반해서 외부 검출 모듈(Rule engine, ML/DL 모델)이 실시간 수집되는 센싱값들을 기반으로 이상을 검출한다. 검출되면 해당 정보를 AnomalyEvent 클래스를 통해 해당 이벤트 정보를 지식 그래프에 표현한다.

표 2 이상진단을 위한 온톨로지 정의 예시

ex:Anomaly_KW_Overload a ex:AnomalyEvent ; ex:description "KW 부하 급증" ; ex:triggeredBy "KW > 35kW for 5s" ; ex:timestamp "2025-04-22T15:24:00"^^xsd:dateTime ; ex:occursOn ex:Feeder01 .
ex:Anomaly_VIB_THD a ex:AnomalyEvent ; ex:description "진동 고조파 이상" ; ex:triggeredBy "VIB_THD > 0.6g" ; ex:timestamp "2025-04-22T15:25:10"^^xsd:dateTime ; ex:occursOn ex:Sensor_VIB_01 ; ex:detectedBy ex:Sensor_VIB_01 .

이상 감지 이벤트 간 인과 관계 분석은 지식그래프를 통해 표현할 수 있다. 예를 들어 Feeder01에서 KW 급증이 발생하고 이어서 연결된 설비에서 진동 이상이 발생하면, 이 두 이벤트 간 인과성을 possiblyCauses 관계로 연결할 수 있다.

이러한 내용의 진단은 외부 진단 모듈이 수행하고 그 결과를 표 3과 같이 생성하여 지식그래프에 추가하면 일회성이 아니라, 설명 가능한 사건의 맥락화된 기록으로 남김으로써 정보의 재사용성과 확장성을 제공할 수 있게 된다. 즉, 이상 발생의 원인과 맥락을 구조화하여, 이후 분석·설명·예측에 재사용 가능하도록 지식화하기 위해서이다.

표 3 인과 관계 분석을 위한 온톨로지 정의 예시

```
ex:Anomaly_002 ex:timestamp "2025-04-22T15:23:50"^^xsd:dateTime ;
ex:occursOn ex:Feeder01 .
ex:Anomaly_001 ex:timestamp "2025-04-22T15:24:00"^^xsd:dateTime ;
ex:occursOn ex:Pump_01 .
ex:Feeder01 ex:feeds ex:Pump_01 .
ex:Anomaly_002 ex:possiblyCauses ex:Anomaly_001
```

SPARQL 질의를 통해 이러한 인과 관계를 추론할 수 있다. 예를 들어, 특정 시간 간격 내에 연속적으로 발생한 이상 이벤트 간의 연결을 찾는 질의는 다음과 같다:

표 4 인과관계 분석을 위한 질의 예시

```
SELECT ?event1 ?event2 WHERE {
?event1 a ex:AnomalyEvent ; ex:timestamp ?t1 ;
ex:occursOn ?feeder .
?event2 a ex:AnomalyEvent ; ex:timestamp ?t2 ; ex:occursOn ?equip .
?feeder ex:feeds ?equip .
FILTER (?t2 > ?t1 && (?t2 - ?t1) < "PT1M"^^xsd:duration)
}
```

온톨로지 기반 이상진단 시스템에서는 이상 진단 결과는 외부 모듈이 수행되며, 온톨로지와 지식그래프는 공장 전체의 맥락과 인과 구조를 통합하여 이상 상황을 설명 가능하고 분석 가능한 지식으로 표현하는 역할을 수행한다.

III. 결론

본 논문에서는 공장 설비의 이상 감지를 구조화하고 설명 가능하게 표현하기 위한 온톨로지 기반 지식 표현 구조를 제안하였다. RDF 지식그래프를 통해 이상 발생 위치, 조건, 원인을 연계하여 표현할 수 있으며, SPARQL을 통해 인과관계 분석 및 자동 대응 로직 개발이 가능하다. 향후에는 SHACL 기반의 이상 패턴 정의, 실시간 RDF 스트리밍 연계, 예지보전 알고리즘과의 통합을 통해 실질적 현장 적용을 확대할 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2025년도 과학기술정보통신부(MSIT)의 지원으로 정보통신기획평가원(IITP)의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-02304333).

참 고 문 헌

- [1] Guarino, N., Oberle, D., & Staab, S. (2009). What is an Ontology? In S. Staab & R. Studer (Eds.), Handbook on Ontologies (pp. 1– 17). Springer.
- [2] 김말희, 신영미, 허태욱, 이일우, “선택 가능하고 구성 가능한 표준 FEMS 플랫폼 기술”, 한국통신학회 추계종합학술대회, 2022, pp.52-53.
- [3] 김말희, 허태욱, 이일우, “FEMS 메타데이터 관리 기술”, 한국통신학회 제 2 회 한국에너지학술대회 2023, pp.53-53.