

건물 에너지 관리를 위한 온톨로지 모델 자동 생성에 관한 연구

권동우, 신슬비, 지영민

한국전자기술연구원

{dwkwon, seulbi0108, ym.ji}@keti.re.kr

A Study on Automated Ontology Model Generation for Building Energy Management

Dongwoo Kwon, Seulbi Shin, and Youngmin Ji

Korea Electronics Technology Institute (KETI)

요약

건물 에너지 관리는 공간, 설비, 제어점 등 이종 데이터를 통합적으로 해석해야 하나, 실제 현장에서는 데이터가 분산되고 관계가 명시되지 않아 재사용성과 확장성이 낮다. 이러한 문제를 해결하기 위해 온톨로지 모델 기반 접근이 주목받고 있으나, 수작업 중심의 구축 방식은 실제 적용에 한계가 있다. 본 논문은 관계점 식별자를 기반으로 RML을 활용해 온톨로지 모델 기반 지식 그래프를 자동 생성하는 시스템을 제안한다. 생성 결과는 형식 검증과 의미적 검증을 거쳐 평가되었으며, 공간 구조가 상이한 몇 가지 모델에서 안정적인 결과를 보였다.

I. 서론

건물 부문의 에너지 소비는 전 세계 에너지 사용량과 온실가스 배출에서 상당한 비중을 차지하고 있으며, 이를 저감하기 위한 건물 에너지 관제 및 최적 제어 기술에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 이러한 에너지 관리 기술은 실내 환경 정보(온도, 습도, 공기질 등), 설비 운전 상태, 제어점 데이터 등 다양한 이종 데이터를 기반으로 동작한다. 그러나 실제 건물 환경에서는 이러한 데이터들이 서로 다른 시스템과 플랫폼에 분산되어 존재하며, 각 데이터는 상이한 식별자 체계와 표현 방식을 사용하고 있어 통합적 활용에 큰 제약이 존재한다.

특히 공간 환경 관제 데이터, 설비 및 제어 설비의 상태 정보, 개별 제어점 데이터 등은 의미적 연관성이 높음에도 불구하고, 데이터 간의 관계성은 명시적으로 모델링되어 있지 않은 경우가 대부분이다. 이로 인해 현재의 건물 에너지 관리 시스템에서는 데이터 간 의미적 맥락을 사람이 직접 해석하고, 시스템 통합(System Integration) 과정에서 개별 프로그램이나 제어 스크립트를 통해 단편적으로 연결하는 방식이 주로 사용되고 있다. 이러한 접근 방식은 건물 디지털 트윈 분야에서도 동일하게 나타나며, 데이터 구조의 재사용성과 확장성을 저해하고 유지·보수 비용을 증가시키는 주요 원인으로 작용한다.

이와 같은 문제를 해결하기 위한 대안으로, 건물 및 에너지 관리 영역에서는 데이터에 체계적으로 식별자를 부여하고, 데이터 간 의미적 관계를 명시적으로 표현할 수 있는 온톨로지 모델의 도입이 적합한 접근으로 주목받고 있다.[1] 온톨로지 모델은 건물, 공간, 설비, 센서, 제어점 등의 객체와 이들 간의 관계를 정형화된 형태로 정의함으로써, 데이터의 의미 기반 통합과 능동적 활용을 가능하게 한다.[2] 그러나 건물은 건물마다 구조적 특성, 공간 구성, 설비 종류 및 배치, 운용 환경이 크게 상이하다는 특성을 가지므로, 실제 적용 과정에서는 매 건물마다 온톨로지 모델을 사람이 수동으로 설계하고, 이를 기반으로 데이터 인스턴스를 지식 그래프 형태로 구축해야 하는 문제가 발생한다. 이러한 수작업 기반 온톨로지 모델링 및 지식 그래프 구축에는 많은 시간과 노력이 소요되어 비용이 증가하는 한계가 있다. 본 논문에서는 이러한 한계를 극복하기 위해, 건물 에너

지 관리를 위한 온톨로지 모델과 이를 기반으로 한 지식 그래프를 자동으로 생성하는 시스템 구조와 방법을 제안한다.

II. 본론

본 논문에서는 온톨로지 모델 기반 지식 그래프를 자동으로 생성하기 위해 건물, 공간, 설비 객체 및 각 객체의 속성을 고유한 식별자로 정의하고, RML(Relational Mapping Language)을 활용하여 해당 식별자와 데이터에 기반해 모델 정합적인 지식 그래프를 자동으로 생성한다. 그리고 생성된 단위 지식 그래프를 구성 및 연결하고 검증하는 과정을 거친다.

그림 1은 제안하는 온톨로지 모델 기반 지식 그래프 생성 시스템 구조를 나타낸다. 시스템은 크게 지식 그래프 생성을 담당하는 Ontology Builder, 생성된 지식 그래프를 검증하는 Ontology Validator, 지식 그래프 내 데이터를 갱신하는 Ontology Updater, 지식 그래프를 기반으로 의미 추론을 실행하는 Ontology Reasoner로 구성되어 있다.

Ontology Builder는 건물 메타데이터와 고유 데이터 식별자를 기반으로 RML과 거대언어모델(Large Language Model)의 지원을 통해 지식 그래프를 생성한다. 먼저 건물에서 수집되는 모든 유형의 데이터는 데이터 수집 시스템(Data Acquisition System, DAS)을 통해서 개별 관제점마다 고유한 데이터 식별자가 부여된다. 식별자 구조는 다음과 같다.

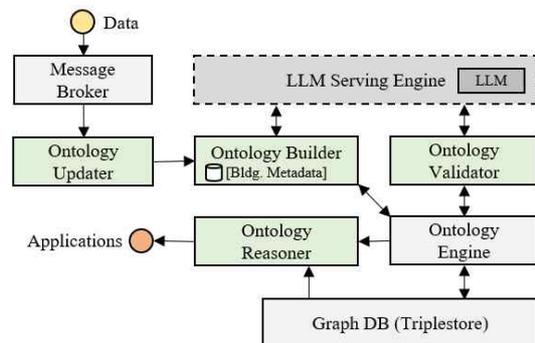


그림 1. 지식 그래프 자동 생성 시스템 구조

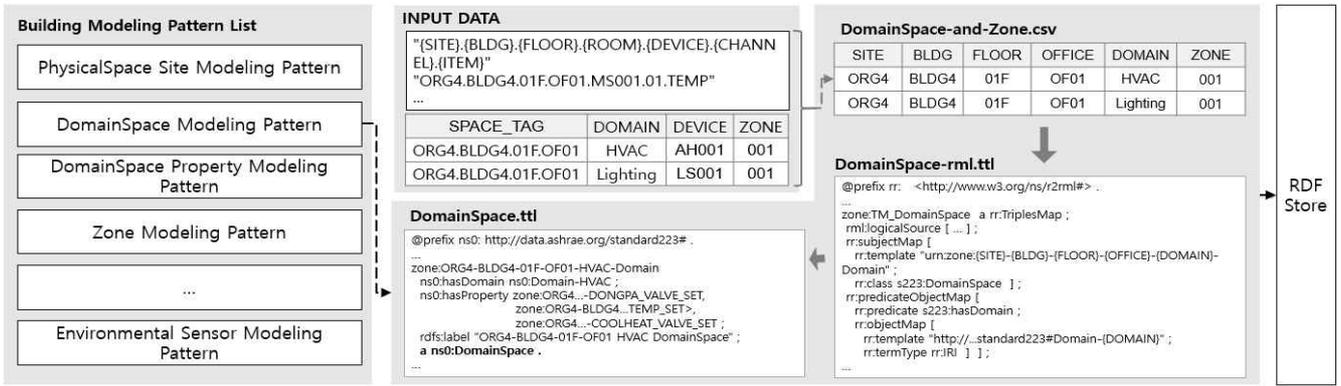


그림 2. 온톨로지 모델 기반 지식 그래프 자동 생성 과정

[기관명code(5).건물명code(5).층명code(2).공간명code(4).객체명code(4).채널code(2).수집항목code(*)]

데이터 식별자는 건물의 구조적인 정보와 공간 정보, 공간의 열 환경에 영향을 미치는 설비, 공간 관제를 위한 계측기, 센서 등의 계층 구조 정보를 내포하고 있다. 식별자에서 공간명은 사무실, 회의실, 방재실, 화장실 등과 같은 공간을 나타내고, 객체명은 전력량계, 유량계, AHU, FCU, 조명, 센서 등을 포괄한다.

그림 2는 지식 그래프 자동 생성 과정을 도식화한 것이다. 기존 관계형 식별자 데이터만으로는 가상 공간 및 조명 관리 공간과 설비 관계를 충분히 표현하기 어렵기 때문에 가상 제어 공간 정보를 가진 메타데이터를 추가로 구성하였다. 이러한 데이터를 토대로 RML 기반 규칙을 작성했으나, 건물 정보를 파일에 일괄적으로 기술하기에는 구조가 복잡하고 표현 범위에 제약이 있었다. 이에 건물 모델링 패턴별로 RML 매핑 규칙을 정의하고 변환하여, 마지막에 이를 결합하여 사용하는 방식을 적용하였다.

이러한 자동 생성 과정 이후에는 생성 결과의 타당성을 검증하기 위한 절차가 수행된다. Ontology Validator는 LLM Serving Engine에서 Model Context Protocol(MCP)을 통해 연동되며, 생성된 온톨로지는 Ontology Engine을 통해 SHACL(Shapes Constraint Language) 기반으로 검증이 수행된다.

아울러 자동 생성된 온톨로지 평면과 이에 대응하는 지식 그래프의 신뢰성을 확보하기 위해, SHACL을 이용한 형식적 검증과 함께 대규모 언어 모델(LLM)을 활용하여 의미적 관점에서도 모델과 지식 그래프가 적절히 생성되었는지를 검증하는 절차를 수행한다. 구체적으로 형식적 기준과 의미적 기준에 따라 검증을 수행한다. 형식적 검증에서는 SHACL을 통한 그래프의 구조적 정합성과 구성 요소의 연결 관계를 확인한다. 의미적 검증에서는 지식 그래프를 기반으로 건물의 구조와 설비 정보를 파악 가능한지, 제어를 위한 정보가 명시적으로 포함되어 있는지를 판단한다.

Ontology Updater는 건물에 새로 추가되거나 변경된 설비를 인식하며, 실시간으로 변화되는 온톨로지 상의 수치 데이터를 갱신하는 역할을 수행한다. Ontology Reasoner는 기본 Ontology Engine과 SHACL-AF 규칙을 해석할 수 있는 추가 온톨로지 추론기를 조합하여 의미 추론 수행하며 응용 애플리케이션과 연동점이 된다.

아울러 자동 생성된 지식 그래프의 검증을 위해 다음과 같은 구조의 실험 건물 모델을 구성하였다. 총 세 가지의 건물 모델을 정의하였으며, 모델 1은 실 단위로 공조 및 조명 제어가 이루어진다. 모델 2는 층 단위로 공조 제어가 수행되며, 모델 3은 층 단위 공조 제어를 기본으로 하되 복도는 공조 대상에서 제외된 구조를 갖는다. 실험 모델은 AHU 설비를 포함하고 있으며, 2층 규모의 건물이다. 이러한 환경에 대해 지식 그래프를 자동 생성하고, 타당성 검사 기준에 따라 검증을 수행하였다.

표 1 온톨로지 모델 기반 지식 그래프 검증 결과

모델	의미 검증(%)	형식 검증(%)	종합(%)
1	93	93	93
2	95	96	95.5
3	95	96	95.5

표 1은 지식 그래프 검증 결과를 나타낸다. 실험 모델에 대해 유사한 검증 결과가 도출되었으며, 이는 자동 생성 시스템이 다양한 공간에 대해서 일관된 정합성을 유지함을 보여준다. 형식적 관점에서는 AHU에 흡기 및 배기 관련 연결점에 다른 연결이 표현되지 않은 점이 지적되었으나, 이는 제약 위반이 아닌 개선 제안에 해당한다. 해당 연결점 정보는 설비 구조 내 공기 흐름이 고려된 지점을 나타내기 때문에 제어를 위한 정보로 활용될 수 있다. 의미적 관점에서는 사무실, 회의실 등 다른 용도의 공간이 실험 형식으로 통합되어 표현된다는 점이 제안되었으나, 이는 공간 용도에 따른 세분화를 최소화하여 데이터 복잡성을 제어하기 위한 설계 선택에 해당한다. 공간 정보는 지식 그래프 내 식별자에 이미 포함되어 있어, 실제 제어 및 분석 과정에서 실질적인 제약을 발생시키지는 않는다.

III. 결론

본 논문은 건물 에너지 관리를 위한 온톨로지 모델 기반 지식 그래프 자동 생성 방안을 제안하였다. 이 방안은 각기 다른 복잡한 건물 지식 그래프 생성 과정을 시스템화하여 자동화하는 기반으로 활용된다. 이를 통해 본 연구는 건물 에너지 관리 및 디지털 트윈 시스템에서 온톨로지 모델 및 지식 그래프 구축의 비용과 복잡도를 감소시키고, 의미 기반 데이터 활용을 보다 효과적으로 지원하는 자동화된 접근 방법을 제시하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (RS-2024-00441420)

참고 문헌

[1] Lygerakis, F., Kampelis, N., & Kolokotsa, D. (2022). Knowledge Graphs' Ontologies and Applications for Energy Efficiency in Buildings: A Review. *Energies*, 15(20), 7520.

[2] Jung, W., & Kim, H. S. (2014, August 31). REST-Based Open API Ontology Modeling and Automatic Mash-Up Method Using In/Output Properties. *The Journal of Korea Information and Communications Society*. Korea Information and Communications Society.