# 스마트 제조 혁신을 위한 온톨로지 기반 지식 관리 및 시맨틱 탐색 도구 개발 기획안: 시장 분석, 기술 스택 및 구현 전략

## 1. 서론: 기획 배경 및 목표

### 1.1. 사업 기획 배경: 중소기업 디지털 트윈 도입의 필요성

오늘날 중소기업의 지속 가능한 성장을 위해서는 디지털 전환(DX)이 필수적인 전략으로 부상하고 있다.1 특히 제조업 분야에서는 첨단 정보통신기술(ICT)을 활용한 스마트팩토리 구축이 생산성과 경쟁력 제고의 핵심 동력으로 작용하고 있다. 이러한 혁신의 중심에는 현실 세계의 물리적 자산을 가상 세계에 복제하고, 이를 통해 모니터링, 예측, 최적화를 수행하는 디지털 트윈 기술이 있다.

그러나 기존의 디지털 트윈 솔루션은 IoT 센서를 통한 단순 데이터 수집 및 시각화, 모니터링 수준에 머물러 있어, 데이터 간의 복잡한 관계를 이해하고 의미 기반의 심층적인 분석을 수행하는 데 한계가 있다.3 예를 들어, IoT 기술은 특정 설비의 '현재 상태'인 진동 수치를 제공하지만, 이 진동이 특정 원자재의 품질 문제와 왜 연관되는지, 또는 다른 공정 설비의 작동 방식과 어떤 상호작용을 하는지에 대한 설명은 제공하지 못한다.6 이러한 한계의 본질은 데이터가 단순한 숫자 형태로 존재할 뿐, 그 의미와 맥락이 연결되지 않은 데서 비롯된다.

이러한 근본적인 문제를 해결하기 위한 핵심 기술로 온톨로지(Ontology)와 지식 그래프(Knowledge Graph)가 부상하고 있다. 온톨로지는 특정 도메인 내의 개념, 범주, 속성, 관계를 정의하여 단순한 데이터를 ‘의미 있는 정보’로 변환하는 지식 표현 방식이다.6 지식 그래프는 이러한 온톨로지를 기반으로 다양한 데이터를 '점(노드)'과 '선(관계)'으로 연결하여 지식 기반을 구축함으로써, 데이터 간의 복잡한 관계를 분석하고 지능형 추론을 가능하게 한다.7 본 기획안은 이러한 기술을 활용하여 중소기업이 현장의 '암묵적 지식과 경험'을 형식화된 '지식 자산'으로 전환하고, 더 나아가 시뮬레이션 및 최적화 단계의 고도화된 디지털 트윈으로 나아갈 수 있도록 돕는 핵심 인프라를 제공하는 것을 목표로 한다.10

중소기업은 이러한 첨단 솔루션의 개발 또는 도입에 필요한 막대한 비용과 전문 인력의 부재로 어려움을 겪는 것이 현실이다.12 따라서 정부의 중소기업 지원 정책, 특히 AI 바우처 및 스마트서비스 지원사업 등과의 연계를 통해 초기 진입 장벽을 낮추고 사업의 안정적인 성공 기반을 마련하는 것이 필수적이다.2

### 1.2. 사업 목표: 온톨로지 모델링 도구의 핵심 기능 정의

본 기획안은 아래의 핵심 기능들을 포함하는 온톨로지 기반 지식 관리 및 시맨틱 탐색 도구의 개발을 목표로 한다.

* **온톨로지 모델링:** 전문가가 특정 도메인(예: 제조업, 물류)의 지식 체계를 직관적으로 정의할 수 있는 웹 기반의 협업 환경을 제공한다.
* **시맨틱 검색:** 사용자의 자연어 쿼리(예: "A 공장의 B 기계 고장 원인")를 이해하고, 단순 키워드 매칭을 넘어 데이터 간의 의미적 관계를 기반으로 정확하고 포괄적인 답변을 제공한다.13
* **고성능 멀티-홉 탐색:** 복잡하게 얽힌 데이터 네트워크(지식 그래프)에서 수십 단계의 관계(multi-hop)를 신속하게 탐색하여 기존 방식으로는 발견하기 어려웠던 숨겨진 패턴과 비즈니스 인사이트를 발굴한다.16
* **교차 도메인 지원:** 제조, 물류, 경영 등 서로 다른 분야의 온톨로지를 유기적으로 통합하고, 이종 데이터 간의 의미적 연결을 가능하게 하여 기업 전체의 지식 통합을 지원한다.7

### 1.3. 기대 효과: 생산성 및 경쟁력 제고 방안

개발될 솔루션의 도입을 통해 중소기업은 다음과 같은 실질적인 비즈니스 가치를 창출할 수 있을 것으로 기대된다.

* **예지보전(Predictive Maintenance)을 통한 설비 효율화:** 설비에 부착된 센서 데이터(진동, 온도 등)를 분석하여 고장 징후를 사전에 감지하고 불필요한 정비를 줄여 설비 가동 시간을 획기적으로 늘릴 수 있다.20
* **품질관리 및 의사결정의 정확성 향상:** 수작업으로 이루어지던 품질 데이터 집계 및 보고 방식을 지식 그래프로 가시화함으로써 정보의 오류를 줄이고 정확한 의사결정을 지원한다.3 이는 곧 생산성 향상으로 직결된다.
* **새로운 비즈니스 모델(BM) 창출:** 데이터 간의 새로운 관계를 발견하고 이를 활용함으로써 신규 비즈니스 모델을 창출하거나 기존 사업의 고부가가치화를 모색할 수 있다.2

## 2. 시장 및 기술 동향 분석

### 2.1. 온톨로지 및 지식 그래프 기반 솔루션의 부상

지식 그래프는 실시간 데이터, 텍스트 문서, 이미지 등 다양한 형태의 데이터를 '점(노드)'과 '선(관계)'으로 연결하여 지식 기반을 구축하는 데 효과적인 기술이다.7 이는 기존의 관계형 데이터베이스(RDB)가 여러 테이블의 복잡한

JOIN 연산을 통해서만 가능했던 관계 분석을 보다 직관적이고 효율적으로 처리할 수 있게 한다. 특히, 최근 인공지능(AI) 기술, 그중에서도 대규모 언어 모델(LLM)의 발전과 함께 지식 그래프는 RAG(Retrieval Augmented Generation)의 핵심 구성 요소로 주목받고 있다.24 지식 그래프는 LLM이 내부 학습 데이터에만 의존하여 부정확한 정보를 생성하는 문제(환각)를 줄이고, 기업의 특정 도메인 지식에 기반한 정확하고 신뢰성 있는 답변을 제공하는 데 기여한다.

기술적 관점에서, RDF(Resource Description Framework) 모델은 W3C 표준에 기반하지만, 스키마에 엄격한 제약을 두어 산업 현장의 유연성 요구를 충족시키지 못하는 한계가 지적되기도 한다.26 반면, 노드와 엣지(관계)에 속성(Property)을 부여하는

Property Graph 모델은 데이터가 원형 그대로 저장되어 고효율을 실현할 수 있으며, 새로운 데이터 모델을 쉽게 만들고 비즈니스 요구 사항에 따라 유연하게 조정할 수 있다는 장점이 있다.26 이러한 기술적 특성은 본 기획안의 솔루션이

Property Graph 모델을 중심으로 설계되어야 하는 당위성을 제공한다.

### 2.2. 국내외 디지털 트윈 시장 동향과 주요 플레이어

글로벌 시장의 선두 주자들은 이미 온톨로지 기반 디지털 트윈 기술을 성공적으로 적용하여 운영 효율을 극대화하고 있다. 독일의 지멘스(Siemens)는 스마트팩토리 EWA(Electronics Works Amberg)를 통해 가상 세계와 현실 세계의 통합을 이루어냈으며, GE는 항공기 엔진 관리 시스템에 산업용 디지털 트윈을 적용하고 있다.1 현대자동차는 싱가포르 글로벌 혁신센터(HMGICS)에 '메타팩토리(Meta-factory)'를 구축하여 주문부터 생산, 인도까지 자동차 생애주기 전반의 가치사슬을 연구하고 실증하고 있다.1 이러한 대기업들의 성공 사례는 온톨로지 기술이 단순한 연구 단계를 넘어 실질적인 비즈니스 가치를 창출하는 성숙한 기술임을 증명하며, 이는 중소기업이 기술 도입을 결정할 때의 위험 요소를 낮추는 중요한 근거가 된다.

국내에서도 이에이트(E8)와 같은 선도 기업들이 온톨로지 기반 디지털 트윈 솔루션으로 스마트팩토리 혁신을 주도하고 있으며, 상장 및 유상증자 등 재무 구조 개선을 추진하며 성장 잠재력을 보여주고 있다.6 그러나 현재까지의 성공 사례가 주로 대규모 투자가 가능한 대기업에 집중되어 있다는 점은, 중소기업 시장이 아직 미개척된 블루오션이라는 점을 시사한다.1 이는 본 기획안이 제시하는 솔루션이 중소기업 특화 시장을 선점할 수 있는 절호의 기회를 의미한다. 이에이트의 사례가 보여주듯, 기술력 기반의 성장 전망과 함께 외부 경제 변수(환율 변동성, 글로벌 경쟁 등)에 대한 리스크가 존재하기 때문에, 솔루션의 비즈니스 모델은 정부 지원사업 연계 및 구독형 SaaS와 같은 안정적인 수익 구조 확보 방안을 포함해야 한다.27

### 2.3. 온톨로지 기반 예지보전 및 품질관리 사례 심층 분석

**예지보전(Predictive Maintenance):** 기존의 예지보전 시스템은 설비에 부착된 센서 데이터(진동, 온도 등)를 시계열 기반으로 분석하여 고장 징후를 예측하고 알람을 발송하는 방식이었다.20 이 방식은 불필요한 정기 점검을 줄여 설비 가동 시간을 획기적으로 늘리는 데 기여했지만, 고장 원인을 정확히 파악하는 데는 한계가 있었다.3 그 이유는 시계열 분석이 '장비 간 상호작용'과 같은 복잡한 관계 요소를 고려하지 못하기 때문이다. 지식 그래프를 도입하면 이러한 장비 간의 관계를 모델링하고 고장 패턴을 기록, 분석함으로써 고장의 잠재적 요인을 더 정확하게 예측할 수 있다.3 이는 단순한 예측을 넘어, 고장 원인에 대한 '설명 가능한 AI'를 가능하게 하는 근본적인 도구 역할을 수행한다.

**품질관리:** 수작업으로 이루어지던 품질 데이터 집계 및 보고 방식을 지식 그래프로 가시화하고 실시간 자동 집계 시스템을 구축함으로써, 정보의 오류를 줄이고 의사결정의 정확성을 높인 사례가 보고되었다.22 이는 단순한 데이터 관리를 넘어 생산성 향상으로 직결되는 효과를 가져왔다.

## 3. 상용 vs. 오픈소스 솔루션 비교 분석

### 3.1. 상용 솔루션 심층 분석

상용 솔루션은 단순히 기술 자체를 제공하는 것을 넘어, 구축, 유지보수, 보안, 인력 운영과 같은 관리 부담을 크게 줄여주는 데 강점이 있다. 특히 IT 부서가 없는 중소기업에게는 클라우드 기반의 SaaS(Subscription as a Service)나 PaaS(Platform as a Service) 모델이 초기 자본 투자와 운영 리스크를 줄이는 매우 효율적인 방법이다.

* **AWS IoT TwinMaker:** 물리적 시스템의 3D 모델에 IoT 데이터를 통합하여 디지털 트윈을 구축하는 데 특화된 서비스이다. Knowledge Graph 기능을 통해 엔티티 간의 관계를 시각적으로 보여주며, PartiQL이라는 유연한 쿼리 언어를 지원하여 데이터 탐색을 용이하게 한다. 또한 Amazon Managed Grafana와 연동하여 풍부한 데이터 시각화 및 분석 환경을 제공한다.
* **Azure Digital Twins:** DTDL(Digital Twins Definition Language)이라는 개방형 모델링 언어를 사용하여 건물, 공장, 도시 등 모든 환경을 모델링할 수 있는 PaaS 솔루션이다. IoT Hub를 통해 실시간 데이터를 연결하고, Azure Data Explorer 등 다른 Azure 서비스와 유연하게 통합된다는 강점을 가진다.28
* **Oracle Graph:** Oracle Autonomous Database에 통합된 Converged Database 모델로, 별도의 데이터베이스를 구축할 필요 없이 기존 데이터에 그래프 분석을 적용할 수 있다.29  
  Graph Studio라는 UI를 통해 비전문가도 클릭 몇 번으로 그래프 모델링, 분석, 시각화가 가능하며, PGQL을 쿼리 언어로 사용한다.30
* **TigerGraph:** Native Parallel Graph 기술을 기반으로 대규모 데이터에서 초고속, 멀티-홉 탐색에 특화된 솔루션이다.29  
  GraphStudio라는 통합 GUI는 드래그 앤 드롭 방식을 지원하여 비전문가도 직관적으로 스키마 설계, 데이터 로딩, 시각적 탐색이 가능하게 한다.34 한 시장 조사 기관의 리뷰에 따르면,  
  TigerGraph는 Oracle이나 Neo4j보다 '통합 및 배포 용이성'과 '서비스 및 지원' 면에서 더 높은 평가를 받았다.38 이는 복잡한 엔터프라이즈 환경보다 상대적으로 단순한 중소기업 시장에 더 적합할 수 있다는 중요한 시사점을 제공한다.

### 3.2. 오픈소스 솔루션 심층 분석

오픈소스 솔루션은 라이선스 비용이 없다는 명확한 장점이 있지만, 구축, 유지보수, 운영에 필요한 인건비와 관리 리소스라는 숨겨진 비용이 존재한다.12 이는 자체 IT 인력이 부족한 중소기업에는 오히려 큰 부담으로 작용할 수 있다.

* **Protégé:** 온톨로지 모델링을 위한 가장 대표적인 오픈소스 에디터로, OWL 2, RDF 등 W3C 표준을 완벽히 지원하며 다양한 플러그인을 통한 확장성을 제공한다.40  
  WebProtégé는 웹 기반 환경에서 여러 사용자가 동시에 협업하고 서버를 공유할 수 있는 기능을 제공하여 온톨로지 모델링 과정의 효율성을 높인다. 다만, 동기화된 편집 기능의 부재가 단점으로 지적되기도 한다.41
* **Neo4j:** 세계에서 가장 널리 사용되는 Property Graph 데이터베이스로, Cypher라는 직관적인 쿼리 언어와 Index-free adjacency를 통한 빠른 멀티-홉 쿼리 성능이 강점이다. Community Edition은 단일 인스턴스 환경에 적합하고, Enterprise Edition은 클러스터링, 백업, 보안 등 생산 환경에 필수적인 기능들을 포함하고 있다.
* **NebulaGraph:** shared-nothing 분산 아키텍처를 기반으로 수평적 확장성(linear scalability)과 고성능을 제공하는 오픈소스 그래프 데이터베이스다.42  
  RocksDB 스토리지 엔진을 활용하여 낮은 지연 시간과 높은 처리량을 달성하며, nGQL이라는 SQL과 유사한 쿼리 언어를 사용한다.16

### 3.3. 종합 비교 테이블: 상용 vs. 오픈소스 솔루션 주요 지표 비교

| 지표 | TigerGraph | Oracle Graph | Neo4j EE | NebulaGraph |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **온톨로지 언어** | Property Graph | Property Graph, RDF | Property Graph | Property Graph |
| **쿼리 언어** | GSQL, openCypher | PGQL, SPARQL | Cypher, SPARQL | nGQL |
| **확장성** | 네이티브 분산 아키텍처, 선형적 확장성 33 | Autonomous DB에 통합, 자동 확장 31 | 클러스터링(EE), 고가용성 | Shared-nothing 분산, 선형적 확장성 42 |
| **멀티-홉 성능** | 초고속 탐색, 수십 홉 지원 33 | 인-메모리 그래프 서버 활용 30 | Index-free adjacency | 고성능, 낮은 지연 시간 16 |
| **협업 기능** | GraphStudio GUI 34 | Graph Studio 노트북 31 | Web-based collaborative tools | Web-based Studio 45 |
| **시각화** | GraphStudio GUI 34 | Graph Studio 내장 기능 31 | Neo4j Browser, NeoDash | NebulaGraph Studio 45 |
| **가격 모델** | 데이터 용량 기반 유료 구독, 무료 버전 46 | Autonomous DB에 통합, 사용량 기반 비용 47 | Community Edition (무료), Enterprise Edition (유료) | 오픈소스 (Apache 2.0), 유료 지원 |
| **중소기업 적합성** | 우수한 지원 및 쉬운 통합 38 | 기존 Oracle DB 사용 기업에 적합 29 | 전문 인력 필요, 자체 운영 부담 | 전문 인력 필요, 자체 운영 부담 |
| **지원/SLA** | 상용 지원 38 | 상용 지원 29 | 커뮤니티 지원 (CE), 유료 지원 (EE) | 커뮤니티 지원 |

오픈소스는 라이선스 비용이 없다는 장점이 있지만, 구축, 유지보수, 운영에 필요한 인건비 및 관리 리소스라는 숨겨진 비용이 존재한다.12 이는 IT 부서가 없는 대부분의 중소기업에는 오히려 더 큰 부담이 될 수 있다. 반면,

TigerGraph나 Oracle Graph 같은 상용 솔루션은 초기 투자 비용이 있지만, 관리의 용이성, 안정성, 전문적인 지원을 통해 기술 도입의 위험성을 크게 낮춰준다. 특히 TigerGraph는 중소기업 환경에 적합한 사용자 친화적인 통합 및 지원 역량을 갖추고 있다는 평가를 받았다.38

## 4. 제안 솔루션 아키텍처 및 핵심 기술 구현 방안

### 4.1. 솔루션 전체 아키텍처 설계

제안 솔루션의 전체 아키텍처는 클라우드 기반의 PaaS 모델을 채택하여 중소기업이 직접 서버를 관리하는 부담을 최소화하는 것을 목표로 한다.

* **데이터 수집 계층:** IoT 센서, CSV/JSON 파일, 기존 RDB 등 다양한 소스에서 데이터를 수집한다.20
* **데이터 처리 및 동기화 계층:** Kafka와 같은 스트리밍 플랫폼을 사용하여 CDC(Change Data Capture)를 통해 원본 데이터의 변경 사항을 실시간으로 감지하고 처리한다.50
* **지식 저장 및 관리 계층:** Neo4j Enterprise 또는 NebulaGraph와 같은 Native Property Graph 데이터베이스를 '단일 진실의 원천(Source of Truth)'으로 사용하여 모든 엔티티와 관계를 저장하고 관리한다.26
* **시맨틱 검색 및 인덱싱 계층:** Elasticsearch와 같은 전문 검색 엔진을 구축하고, Kafka Connector를 통해 그래프 DB의 데이터를 실시간으로 동기화하여 자연어 기반의 시맨틱 검색을 지원한다.53
* **분석 및 추론 계층:** In-memory Graph Server와 다양한 Graph Algorithm을 활용하여 복잡한 패턴 매칭, 커뮤니티 탐지, 경로 탐색 등 심층적인 분석 및 추론을 수행한다.30
* **사용자 인터페이스 계층:** 웹 기반의 온톨로지 에디터, 그래프 시각화 도구, 시맨틱 검색 인터페이스를 제공하여 사용자 접근성을 극대화한다. React, D3.js, Reaviz(Reagraph 포함) 등의 라이브러리를 활용하여 직관적인 UI/UX를 구현한다.55

### 4.2. 시맨틱 검색 기능 구현 전략

시맨틱 검색의 핵심은 사용자의 의도를 정확히 파악하고, 단순한 키워드 매칭을 넘어 데이터 간의 의미적 관계를 기반으로 가장 관련성 높은 정보를 제공하는 것이다.13 이를 위해 다음과 같은 하이브리드 검색 파이프라인을 구축한다.

* **자연어처리(NLP) 기반 온톨로지 연결 파이프라인:** 사용자 자연어 쿼리(예: "센서 데이터 이상 감지")를 받으면, Hugging Face Transformers와 같은 BERT 기반 모델을 활용하여 문장의 의도와 핵심 엔티티를 파악한다.58 이렇게 파악된 엔티티는 온톨로지 모델의  
  Class 또는 Instance와 연결되며, 이 과정은 Word Embeddings 및 Vector Search 기술을 통해 구현된다.8
* **벡터 임베딩과 지식 그래프의 결합:** Elasticsearch와 Neo4j의 연동 아키텍처를 통해 시맨틱 검색의 효율성을 극대화한다.53  
  Elasticsearch는 텍스트 검색 및 초기 엔티티 탐색에 강점을 가지며, Neo4j는 이 초기 엔티티를 기반으로 복잡한 관계를 탐색하는 데 탁월한 성능을 보인다. 이러한 하이브리드 접근 방식은 키워드만으로는 발견하기 어려운 숨겨진 관계를 효과적으로 발굴하는 데 필수적이다.

### 4.3. 고성능 멀티-홉 탐색 구조 설계

멀티-홉(Multi-hop) 탐색은 복잡하게 얽힌 관계를 여러 단계에 걸쳐 분석하여 새로운 패턴을 발견하는 기능이다. 관계형 데이터베이스는 JOIN 연산을 통해 관계를 탐색하므로 홉의 깊이가 깊어질수록 성능이 급격히 저하된다. 반면, Neo4j나 NebulaGraph와 같은 네이티브 그래프 데이터베이스는 데이터가 노드와 엣지로 직접 연결되어 있어, Index-free adjacency 방식으로 수십 홉의 관계를 상수 시간(constant time) 내에 탐색할 수 있다.

이러한 고성능을 유지하기 위해서는 단순한 기술 도입을 넘어선 최적화 전략이 필요하다. Neo4j의 사례에서 볼 수 있듯, 인덱스가 쿼리 성능에 큰 영향을 미치므로, 자주 사용되는 쿼리 패턴을 분석하여 컴포지트 인덱스와 같은 최적화된 인덱스를 설계해야 한다.60 또한

NebulaGraph의 세션 관리 및 쿼리 최적화 엔진과 같은 기능은 대규모 환경에서 쿼리 성능을 안정적으로 유지하기 위해 필수적인 운영 요소임을 보여준다.45

### 4.4. 교차 도메인 지식 통합 방안

서로 다른 도메인의 지식을 통합하는 것은 온톨로지 기반 솔루션의 핵심 가치 중 하나다. 이를 위해 Linked Data 원칙을 적용한다.19 이 원칙은 모든 데이터에 고유한

URI를 부여하고, 이를 통해 다른 데이터와의 링크를 포함시켜 하나의 거대한 데이터 네트워크를 형성하는 것을 목표로 한다. 이는 부서별 또는 시스템별로 분리된 '데이터 사일로(silo)'를 허물고, 서로 다른 데이터 소스를 하나의 '글로벌 데이터 그래프'로 통합할 수 있게 한다.19

그러나 온톨로지 매핑은 단순히 기술적 작업으로 끝나지 않는다. 두 개의 온톨로지 간에 개념적 유사성을 식별하고, 이를 반복적으로 갱신하는 복잡한 과정이 필요하다.7 이러한 어려움은

Alignment API와 같은 기술적 도구만으로는 해결하기 어려우며, 산업 전문가의 컨설팅과 지속적인 관리 프로세스가 필수적임을 의미한다.66 따라서 본 기획안의 비즈니스 모델은 단순 솔루션 판매를 넘어, 고부가가치의 '온톨로지 컨설팅 및 매핑 서비스'를 제공하는 방향으로 확장되어야 하며, 이는 중소기업 지원사업의 '컨설팅' 항목과 연계하여 사업성을 확보할 수 있다.67

## 5. 사업화 및 구현 로드맵

### 5.1. 제안 솔루션 기술 스택 및 선정 이유

* **프론트엔드:** React 기반의 사용자 친화적인 웹 UI를 구축한다. D3.js 및 Reaviz(Reagraph 포함) 라이브러리를 활용하여 직관적인 그래프 시각화 및 편집 기능을 구현한다.56
* **백엔드:** Python을 사용하여 NLP 파이프라인 및 백엔드 로직을 구현한다. 한국어 처리를 위해 KoNLPy나 soynlp와 같은 라이브러리를 활용한다.68
* **지식 저장소:** Native Property Graph DB로 Neo4j를 선정한다. 초기 PoC 단계에서는 비용 절감을 위해 Neo4j Community Edition으로 시작하고, MVP 이후 확장성과 안정성이 중요한 상용 환경을 위해 Neo4j Enterprise 또는 클라우드 모델로 전환한다.
* **검색 엔진:** Elasticsearch와 Kafka를 연동하여 지식 그래프의 변경 사항을 실시간으로 동기화하는 시맨틱 검색 파이프라인을 구축한다.51
* **클라우드 인프라:** AWS 또는 Azure와 같은 클라우드 기반 PaaS 모델을 통해 중소기업이 직접 서버를 관리하는 부담을 최소화한다.

### 5.2. 개발 단계별 로드맵

* **1단계: PoC(개념 증명) 및 모델링 (3개월):** 특정 제조업(예: 주물 소재 생산 공정)의 소규모 데이터를 대상으로 온톨로지 모델링을 진행한다.22  
  Protégé와 Neo4j Community를 활용하여 기본 온톨로지 및 지식 그래프를 구축하고, ‘설비 다운타임 원인 분석’ 또는 ‘제품 불량 원인 예측’ 기능의 가능성을 시연한다.20
* **2단계: MVP(최소 기능 제품) 개발 (6개월):** React 기반의 직관적인 웹 UI를 개발하여 Protégé의 복잡성을 숨기고 GraphStudio와 유사한 드래그 앤 드롭 방식의 모델링 기능을 구현한다.34  
  Neo4j와 Elasticsearch 연동 모듈을 개발하여 멀티-홉 쿼리 및 시맨틱 검색 기능을 완성한다. 이와 동시에 일부 스마트공장 지원사업의 공급기업으로 등록을 추진한다.72
* **3단계: 상용화 및 고도화 (12개월+):** SaaS 형태로 전환하고, Kubernetes 기반의 컨테이너 아키텍처를 도입하여 수평적 확장성을 확보한다. AI 바우처 사업을 통해 컨설팅 및 솔루션 구축 비용을 지원받는 대규모 프로젝트를 수주한다.73  
  멀티-모달 데이터(사진, 영상) 처리 및 연합 쿼리(SPARQL federation) 기능을 추가하여 교차 도메인 지원을 고도화한다.75

### 5.3. 비즈니스 모델 및 가격 전략

제안 솔루션은 정부 지원사업 연계형 SaaS(Subscription as a Service) 모델을 채택한다. 가격 전략은 Oracle Graph Studio의 사용량 기반 비용 모델을 참고하여, 클라우드 인프라(ECPU/GB) 사용량 및 기능별(예: 멀티-홉 쿼리 횟수) 차등 부과 방식을 도입한다.48 특히,

AI 바우처 또는 스마트서비스 지원사업을 통해 **최대 2.5억 원**까지 지원받을 수 있는 구조로 제안하여, 초기 투자 비용에 부담을 느끼는 중소기업에 매력적인 제안이 될 것이다.77

사업의 안정적인 현금 흐름 관리를 위해 정부 지원금 지급 방식을 고려한 전략 수립이 필요하다.72

스마트공장 지원사업은 지원금 지급 시점이 사업 완료 후(상생형) 또는 사업 착수 시(식품업 고도화, 광주 지자체 연계)로 상이하다.72 따라서

사업 착수 시 지원금을 지급하는 유형의 사업을 우선적으로 공략함으로써 솔루션 공급 기업의 재정적 안정성을 확보할 필요가 있다.

### 5.4. 중소기업 지원사업 연계 방안

* **스마트서비스 지원사업 및 AI 바우처 사업 활용 전략:** 도입기업과 공급기업이 컨소시엄을 구성해야 하는 지원사업의 특성을 적극 활용하여, 잠재 고객사(도입기업)를 대상으로 사업 설명회 및 컨설팅을 제공한다.67  
  AI 바우처 사업의 경우, 공급기업 Pool에 등록되어야 사업 참여가 가능하므로, 서류(재무제표, 사업계획서 등)를 철저히 준비하여 등록 절차를 완료한다.79
* **정부 지원금 확보를 위한 컨소시엄 구성 전략:** 사업계획서 작성 협력 및 사업관리 시스템 등록 등 복잡한 행정 절차를 적극 지원함으로써 고객의 편의성을 높이고 사업 수주 성공률을 극대화한다.72 또한,  
  스마트서비스 코디네이터 제도를 활용하여 사업 기획, 솔루션 매칭, 구축, 사후관리까지 전주기적인 컨설팅을 제공하는 파트너십을 구축한다.67

## 6. 결론 및 최종 제언

### 6.1. 제안 솔루션의 핵심 가치 요약

본 기획안은 온톨로지 모델링 도구 개발을 통해 중소기업이 지식 그래프 기반의 시맨틱 검색과 고성능 멀티-홉 탐색 기능을 활용하여 숨겨진 비즈니스 인사이트를 발굴하고, 궁극적으로 스마트팩토리의 디지털 트윈을 고도화하는 것을 목표로 한다. 상용 솔루션과 오픈소스의 장점을 결합한 하이브리드 아키텍처와 정부 지원사업 연계 비즈니스 모델을 통해, 중소기업이 겪는 비용 부담과 기술 전문성 부족 문제를 동시에 해결할 수 있는 최적의 방안을 제시한다.

### 6.2. 예상 리스크 및 대응 방안

* **기술적 리스크:** 복잡한 교차 도메인 온톨로지 매핑의 난이도와 성능 문제가 존재한다. SPARQL 연합 쿼리의 최적화 기술 연구를 지속적으로 수행하여 성능을 확보해야 한다.66
* **사업적 리스크:** 스마트공장 공급기업 시장의 경쟁 심화와 정부 지원사업 정책 변화의 가능성이 있다. 지속적인 시장 모니터링을 통해 변화에 신속히 대응하고, 솔루션 고도화를 통한 경쟁력 우위를 유지해야 한다.27

### 6.3. 추가 연구 및 개발 필요 사항

* **산업별 특화 온톨로지 라이브러리 구축:** 제조업 품질관리, 물류 공급망 등 특정 산업에 최적화된 온톨로지 모델을 라이브러리 형태로 구축하여 제공함으로써 솔루션의 도입 효과를 극대화한다.84
* **AI 기반 온톨로지 자동 구축 기술 개발:** AI를 활용하여 비정형 데이터에서 온톨로지 개념을 자동으로 추출하고 매핑하는 기술을 개발하여 온톨로지 구축에 필요한 시간과 노력을 획기적으로 줄인다.85
* **시각화 및 편집 기능 고도화:** VOWL 기반의 온톨로지 시각화 기술을 도입하여 온톨로지 모델의 복잡한 구조를 사용자가 직관적으로 이해하고 편집할 수 있도록 지원한다.87

#### 참고 자료

1. 제조업&도시형의 디지털 트윈 사례ㅣ메타버스의 현실적인 활용방안 2편 - 투이컨설팅, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.2e.co.kr/news/articleView.html?idxno=302166>
2. [라이프 트렌드&] '스마트서비스 지원사업'으로 중소기업 디지털 혁신에 날개 단다 | 중앙일보, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.joongang.co.kr/article/25335483>
3. 그래프 모델링으로 예지정비시스템 구현하기, 8월 22, 2025에 액세스, <https://blog.skaiworldwide.com/483>
4. 디지털 트윈 기술 보고서 - ETRI 지식공유플랫폼, 8월 22, 2025에 액세스, <https://ksp.etri.re.kr/ksp/plan-report/file/831.pdf>
5. 플럭시티 | Digital Twin - Pluxity, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.pluxity.com/ko/our-tech/digital-twin.php>
6. “온톨로지 기반 제조 데이터 활용은 스마트 팩토리 핵심” - 데이터넷, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.datanet.co.kr/news/articleView.html?idxno=200481>
7. 온톨로지 - 위키백과, 우리 모두의 백과사전, 8월 22, 2025에 액세스, <https://ko.wikipedia.org/wiki/%EC%98%A8%ED%86%A8%EB%A1%9C%EC%A7%80>
8. J\_12. 지식표현과 온톨로지 - 옳은 길로.. - 티스토리, 8월 22, 2025에 액세스, <https://joyhong.tistory.com/148>
9. 관리 - RDF 스토어 - IBM, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.ibm.com/docs/ko/watson-explorer/12.0.x?topic=administration-rdf-stores>
10. 디지털트윈, 물류산업에 적용할 수 있을까? | 첼로스퀘어 (Cello Square), 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.cello-square.com/kr/blog/view-764.do>
11. 제조 분야 생성 AI 활용법과 사례 - K-SMARTFACTORY, 8월 22, 2025에 액세스, <http://k-smartfactory.org/index.php/information/ai/board_view?message_id=5540>
12. 클라우드 서비스로 도입으로 절감 가능한 5가지 기업 비용 - 스팬딧 블로그, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.spendit.kr/blog/%ED%81%B4%EB%9D%BC%EC%9A%B0%EB%93%9C-%EC%84%9C%EB%B9%84%EC%8A%A4%EB%A1%9C-%EB%8F%84%EC%9E%85%EC%9C%BC%EB%A1%9C-%EC%A0%88%EA%B0%90-%EA%B0%80%EB%8A%A5%ED%95%9C-5%EA%B0%80%EC%A7%80-%EA%B8%B0%EC%97%85-%EB%B9%84%EC%9A%A9-32734>
13. Sementic Search (시맨틱 검색)\_토스는 똑똑해, 8월 22, 2025에 액세스, <https://habwa.tistory.com/entry/Sementic-Search-%EC%8B%9C%EB%A7%A8%ED%8B%B1-%EA%B2%80%EC%83%89%ED%86%A0%EC%8A%A4%EB%8A%94-%EB%98%91%EB%98%91%ED%95%B4>
14. 시맨틱 검색이란 무엇인가? > 자료실 - 인공지능 플랫폼, 8월 22, 2025에 액세스, <http://talent.datalink.kr/comu02/6?sst=wr_datetime&sod=asc&sop=and&page=1>
15. [논문]RDF 기반 온톨로지 검색 서비스 플랫폼 구현에 관한 연구, 8월 22, 2025에 액세스, <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchArticle.do?cn=JAKO202011563174280>
16. 벡터 DB와 그래프 DB: 주요 차이점 설명 - Cody, 8월 22, 2025에 액세스, <https://meetcody.ai/ko/blog/%EB%B2%A1%ED%84%B0-db%EC%99%80-%EA%B7%B8%EB%9E%98%ED%94%84-db-%EC%A3%BC%EC%9A%94-%EC%B0%A8%EC%9D%B4%EC%A0%90-%EC%84%A4%EB%AA%85/>
17. 지식 그래프란 무엇인가요? - IBM, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.ibm.com/kr-ko/think/topics/knowledge-graph>
18. [보고서]AI 및 디지털트윈을 이용한 신기술 개발 사례 - 한국과학기술정보연구원, 8월 22, 2025에 액세스, <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=KOSEN000000000001877>
19. A walkthrough of Linked Data principles, 5 star ratings and Linked Open Data - TPXimpact, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.tpximpact.com/knowledge-hub/blogs/tech/linked-data-principles>
20. AI 예지보전으로 산업안전 혁신한 사례 - 한국딥러닝, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.koreadeep.com/blog/ai-%EC%98%88%EC%A7%80%EB%B3%B4%EC%A0%84>
21. AI 및 IoT 기반 자동화 카메라 유지보수 시스템: 예지보전을 통한 생산 효율성과 안전성 향상에 관한 연구 - YouTube, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.youtube.com/watch?v=V7J0zXzUFKI>
22. :: Journal of Korean Society for Quality Management, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.jksqm.org/journal/view.php?number=2158>
23. 중소기업스마트서비스지원사업 사업관리시스템, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.smb-service.kr/>
24. Integrated Graph Database - Oracle, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.oracle.com/database/integrated-graph-database/>
25. MCP를 통한 지식 그래프와 LLM 연동 - 한컴테크, 8월 22, 2025에 액세스, <https://tech.hancom.com/mcp-knowledge-graph-llm-integration/>
26. 그래프 DB를 선택할 때 고려해야 할 10 가지 사항, 8월 22, 2025에 액세스, <https://blog.skaiworldwide.com/514>
27. 디지털 트윈 강자 '이에이트', 스마트팩토리 혁신과 재무 전략으로 투자 매력 제고 - Goover, 8월 22, 2025에 액세스, <https://seo.goover.ai/report/202503/go-public-report-ko-c81132bb-dfe5-41e3-b135-1332b976b8f9-0-0.html>
28. Azure Digital Twins - Microsoft Community, 8월 22, 2025에 액세스, <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/digital-twins/overview>
29. Compare Oracle Spatial and Graph vs. TigerGraph in 2025 - Slashdot, 8월 22, 2025에 액세스, <https://slashdot.org/software/comparison/Oracle-Spatial-and-Graph-vs-TigerGraph/>
30. Data Sheet - Graph Technology at Oracle, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.oracle.com/a/tech/docs/graph-technology-at-oracle-data-sheet-oct2019.pdf>
31. Graph Studio - A new feature of Oracle Autonomous Database, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.oracle.com/a/ocom/docs/graph-database-analytics-details.pdf>
32. Get started with a graph database for free - Oracle, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.oracle.com/autonomous-database/graph/get-started/>
33. TigerGraph Enterprise Edition - Free License, 8월 22, 2025에 액세스, <https://info.tigergraph.com/enterprise-free>
34. Overview :: GraphStudio and Admin Portal - TigerGraph Documentation, 8월 22, 2025에 액세스, <https://docs.tigergraph.com/gui/4.2/graphstudio/overview>
35. TigerGraph란? - Hee'World - 티스토리, 8월 22, 2025에 액세스, <https://1004jonghee.tistory.com/entry/TigerGraph%EB%9E%80>
36. Graph Data Visualization UI: GraphStudio | TigerGraph, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.tigergraph.com/graphstudio/>
37. GraphStudio :: TigerGraph Savanna, 8월 22, 2025에 액세스, <https://docs.tigergraph.com/savanna/main/integrations/graphstudio>
38. Top TigerGraphDB Competitors & Alternatives 2025 | Gartner Peer Insights, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.gartner.com/reviews/market/cloud-database-management-systems/vendor/tigergraph/product/tigergraphdb/alternatives>
39. 자연어 처리 기술 - Azure Architecture Center - Microsoft Learn, 8월 22, 2025에 액세스, <https://learn.microsoft.com/ko-kr/azure/architecture/data-guide/technology-choices/natural-language-processing>
40. protégé, 8월 22, 2025에 액세스, <https://protege.stanford.edu/>
41. 최고의 온톨로지 개발 환경 도구? - Reddit, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.reddit.com/r/semanticweb/comments/1fqec66/best_ontology_development_environment_tool/?tl=ko>
42. Nebula Graph: 분산형, 확장 가능하고, 번개처럼 빠른 그래프 데이터베이스 : r/programming, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.reddit.com/r/programming/comments/dag2oo/nebula_graph_a_distributed_scalable_lightingfast/?tl=ko>
43. Nebula Graph Architecture Overview - GitHub, 8월 22, 2025에 액세스, <https://github.com/vesoft-inc/nebula/wiki/Nebula-Graph-Architecture-Overview>
44. Graph Database Performance Comparison: Neo4j vs NebulaGraph vs JanusGraph, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.nebula-graph.io/posts/performance-comparison-neo4j-janusgraph-nebula-graph>
45. Kill sessions - NebulaGraph Database Manual, 8월 22, 2025에 액세스, <https://docs.nebula-graph.io/3.4.1/3.ngql-guide/17.query-tuning-statements/2.kill-session/>
46. Pricing - TigerGraph - The World's Fastest and Most Scala, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.tigergraph.com/pricing/>
47. Integrated Graph Database Features - Oracle, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.oracle.com/database/integrated-graph-database/features/>
48. Graph Studio FAQ | Oracle, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.oracle.com/database/integrated-graph-database/graph-faq/>
49. Ontology-Based Data Integration between Clinical and Research Systems - PMC, 8월 22, 2025에 액세스, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4294641/>
50. Logstash와 JDBC를 사용해 Elasticsearch와 관계형 데이터베이스의 동기화를 유지하는 방법, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.elastic.co/kr/blog/how-to-keep-elasticsearch-synchronized-with-a-relational-database-using-logstash>
51. MySQL과 Elasticsearch 간 CDC 기반 데이터 동기화 - spring열정개발 - 티스토리, 8월 22, 2025에 액세스, <https://youngwoon.tistory.com/m/7>
52. 검색엔진 색인 파이프라인 교체 CDC, Kafka, Spark, Elasticsearch | by sg - Medium, 8월 22, 2025에 액세스, <https://medium.com/naver-shopping-dev/%EA%B2%80%EC%83%89%EC%97%94%EC%A7%84-%EC%83%89%EC%9D%B8-%ED%8C%8C%EC%9D%B4%ED%94%84%EB%9D%BC%EC%9D%B8-%EA%B5%90%EC%B2%B4-cdc-kafka-spark-elasticsearch-10811beb30c7>
53. Graph-Powered Search: Neo4j & Elasticsearch | GraphAware, 8월 22, 2025에 액세스, <https://graphaware.com/wp-content/uploads/2024/10/graphpoweredsearch-neo4j-elasticsearch.pdf>
54. Graph-Powered Search: Neo4j & Elasticsearch - DZone Refcards, 8월 22, 2025에 액세스, <https://dzone.com/refcardz/graph-powered-search-neo4j-amp-elasticsearch>
55. 2025년 최고의 온라인 협업 도구 15가지(무료 및 유료) - ClickUp, 8월 22, 2025에 액세스, <https://clickup.com/ko/blog/2271/online-collaboration-tools>
56. reaviz/reaviz: Data visualization library for React. Maintained by @goodcodeus. - GitHub, 8월 22, 2025에 액세스, <https://github.com/reaviz/reaviz>
57. D3 by Observable | The JavaScript library for bespoke data visualization, 8월 22, 2025에 액세스, <https://d3js.org/>
58. BERT 모델과 지식 그래프를 활용한 지능형 챗봇 - Korea Science, 8월 22, 2025에 액세스, <https://koreascience.kr/article/JAKO201925462479152.pdf>
59. Hugging Face 트랜스포머 파이프라인을 사용한 NLP 시작하기 | Databricks Blog, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.databricks.com/kr/blog/2023/02/06/getting-started-nlp-using-hugging-face-transformers-pipelines.html>
60. # Neo4j Tutorial: Comprehensive Guide to Neo4j Indexing - DEV Community, 8월 22, 2025에 액세스, <https://dev.to/mangesh28/-comprehensive-guide-to-neo4j-indexing-current-best-practices-2b48>
61. Neo4j query multiple hops - Stack Overflow, 8월 22, 2025에 액세스, <https://stackoverflow.com/questions/48892383/neo4j-query-multiple-hops>
62. An Introduction to NebulaGraph's Query Engine, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.nebula-graph.io/posts/nebula-graph-query-engine-overview>
63. LinkedData - W3C Wiki, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.w3.org/wiki/LinkedData>
64. Linked Data - Design Issues - W3C, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.w3.org/DesignIssues/LinkedData.html>
65. Linked Data - Graphaware, 8월 22, 2025에 액세스, <https://graphaware.com/glossary/linked-data/>
66. 반복적 알고리즘을 이용한 온톨로지 매핑, 8월 22, 2025에 액세스, <https://koreascience.kr/article/CFKO200908355727664.pdf>
67. 2025년 ｢중소기업 스마트서비스 지원사업｣ 참여기업 모집 공고 - 한국여성공학기술인협회, 8월 22, 2025에 액세스, <https://witeck.or.kr/superboard/lib/download.php?wm_table=news&wm_bid=475&wm_num=0>
68. lovit/soynlp: 한국어 자연어처리를 위한 파이썬 라이브러리입니다. 단어 추출/ 토크나이저 / 품사판별/ 전처리의 기능을 제공합니다. - GitHub, 8월 22, 2025에 액세스, <https://github.com/lovit/soynlp>
69. 2단계) 데이터 전처리(Preprocessing 및 파이썬 자연어처리 라이브러리 정리), 8월 22, 2025에 액세스, <https://aileen93.tistory.com/128>
70. Ontology Design Best Practices - Part I - Enterprise Knowledge, 8월 22, 2025에 액세스, <https://enterprise-knowledge.com/ontology-design-best-practices-part/>
71. (PDF) WebProtégé: A Collaborative Ontology Editor and Knowledge Acquisition Tool for the Web - ResearchGate, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.researchgate.net/publication/242653636_WebProtege_A_Collaborative_Ontology_Editor_and_Knowledge_Acquisition_Tool_for_the_Web>
72. 스마트공장 구축 지원사업 신청안내, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.samsung-smartfactory.com/business/process>
73. AI 바우처로 시작해보세요 - 한국딥러닝, 8월 22, 2025에 액세스, <https://koreadeep.com/voucher>
74. AI 바우처 지원 사업: 270억 원으로 강화되는 중소기업의 디지털 경쟁력 - Goover, 8월 22, 2025에 액세스, <https://seo.goover.ai/report/202503/go-public-report-ko-4d22fde7-51a4-426c-93c8-e9fa96a55081-0-0.html>
75. SPARQL 1.2 Federated Query - W3C, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.w3.org/TR/sparql12-federated-query/>
76. SPARQL 1.2 Federated Query - W3C on GitHub, 8월 22, 2025에 액세스, <https://w3c.github.io/sparql-federated-query/spec/>
77. 중소기업 맞춤형 스마트공장 구축 지원…기업별 최대 2억 원 - 대한민국 정책브리핑, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148939576>
78. 서비스분야 중소기업 디지털 전환(DX)를 위한 ｢중소기업 스마트서비스 지원사업｣ 참여기업 모집(상세화면) - 보도자료 - 보도자료 - 알림소식 - 중소벤처기업부, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.mss.go.kr/site/smba/ex/bbs/View.do?cbIdx=86&bcIdx=1057780&parentSeq=1057780>
79. 2025년도 정부일반형 스마트공장 구축사업 공고 - 기업마당, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.bizinfo.go.kr/cmm/fms/getImageFile.do?atchFileId=FILE_000000000690754&fileSn=0>
80. 2025년 AI바우처 지원사업 - 공모안내서, 8월 22, 2025에 액세스, [https://www.duzon119.co.kr/\_lib/download.asp?downfile=[%EB%B6%99%EC%9E%841]\_(%EA%B3%B5%EB%AA%A8%EC%95%88%EB%82%B4%EC%84%9C\_AI%EB%B0%98%EB%8F%84%EC%B2%B4%EB%B6%84%EA%B3%BC)\_2025%EB%85%84\_AI%EB%B0%94%EC%9A%B0%EC%B2%98\_%EC%A7%80%EC%9B%90%EC%82%AC%EC%97%85\_v7.0\_(1).pdf&path=board](https://www.duzon119.co.kr/_lib/download.asp?downfile=%5B%EB%B6%99%EC%9E%841%5D_(%EA%B3%B5%EB%AA%A8%EC%95%88%EB%82%B4%EC%84%9C_AI%EB%B0%98%EB%8F%84%EC%B2%B4%EB%B6%84%EA%B3%BC)_2025%EB%85%84_AI%EB%B0%94%EC%9A%B0%EC%B2%98_%EC%A7%80%EC%9B%90%EC%82%AC%EC%97%85_v7.0_(1).pdf&path=board)
81. 2021년 AI 바우처 지원, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.gafic.or.kr/board/download.php?board=N&bo_table=support&file_name=attachFiles_1611799712oz0yr7f0z3.pdf&o_file_name=%EA%B3%B5%EB%AA%A8%EC%95%88%EB%82%B4%EC%84%9C_2021%EB%85%84+ai%EB%B0%94%EC%9A%B0%EC%B2%98+%EC%A7%80%EC%9B%90%EC%82%AC%EC%97%85.pdf>
82. 기획재정담당관, 8월 22, 2025에 액세스, <https://grant-documents.thevc.kr/download/204301_%5B%EB%B6%99%EC%9E%841%5D+AI%EB%B0%94%EC%9A%B0%EC%B2%98+%EC%A7%80%EC%9B%90%EC%82%AC%EC%97%85+3%EC%B0%A8+%EA%B3%B5%EA%B8%89%EA%B8%B0%EC%97%85+Pool+%EB%B3%80%EA%B2%BD+%EC%8B%A0%EC%B2%AD+%EA%B3%B5%EA%B3%A0(2024.02).hwp>
83. 스마트공장 사업관리시스템, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.smart-factory.kr/>
84. KR101092949B1 - 제품 온톨로지 구축 방법 및 이를 이용한 장치 - Google Patents, 8월 22, 2025에 액세스, <https://patents.google.com/patent/KR101092949B1/ko>
85. 제조 온톨로지 기반 품질예측 프레임워크 및 시스템 개발 - Korea Science, 8월 22, 2025에 액세스, <https://koreascience.kr/article/JAKO201213663899631.pdf>
86. 가상 비서의 인간과 유사한 상호 작용을 강화하는 자연어 처리 - Kore.ai, 8월 22, 2025에 액세스, <https://kore.ai/ko/platform/design-and-build/natural-language-processing/>
87. Web-based Visualization of Ontologies | 7wData, 8월 22, 2025에 액세스, <https://7wdata.be/data-science/web-based-visualization-of-ontologies/>
88. Visualizing Ontologies with VOWL - Semantic Web Journal, 8월 22, 2025에 액세스, <https://www.semantic-web-journal.net/system/files/swj1114.pdf>