



BIM/IFC의 빌딩 프로젝트 모델에 대한 온톨로지 표현에 관한 연구

A Study on the Ontology Representation of the IFC based Building Information Model

| | |
|--------------------|--|
| 저자 (Authors) | 박정대, 김진욱 Park Jung-Dae, Kim Jin-Wook |
| 출처 (Source) | 대한건축학회 논문집 - 구조계 25(5) , 2009.5, 87-94(8 pages) JOURNAL OF THE ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA Structure & Construction 25(5) , 2009.5, 87-94(8 pages) |
| 발행처 (Publisher) | 대한건축학회 ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA |
| URL | http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01196073 |
| APA Style | 박정대, 김진욱 (2009). BIM/IFC의 빌딩 프로젝트 모델에 대한 온톨로지 표현에 관한 연구. 대한건축학회 논문집 - 구조계, 25(5), 87-94 |
| 이용정보 (Accessed) | 인천대학교 117.16.196.*** 2019/10/12 15:23 (KST) |

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

BIM/IFC의 빌딩 프로덕트 모델에 대한 온톨로지 표현에 관한 연구

A Study on the Ontology Representation of the IFC based Building Information Model

박 정 대* 김 진 욱**
Park, Jung-Dae Kim, Jin-Wook

Abstract

As the next ICT infrastructure the Semantic Web will bring a lot of new technologies, the Web Ontology Language (OWL). Ontologies can be successfully applied as a semantic enabler of communication in fragmented and heterogeneous field of AEC/FM such as CAD and GIS. This paper present a approach for the development of an ontology with semantics of interoperable information for the building and construction sector based on the Industry Foundation Classes (IFC); the Building Information Model (BIM) using technology form STEP(ISO-10303 Standard Exchange of Product data). We discuss several approaches of extension of IFC models with semantic annotation of the interoperable and extensible information sets enhanced ontological level encoded in the W3C OWL. The proposed conversion methods from an IFC to an OWL which has been developed for research purposes address the issues of the ontology representation of IFC based BIM. The prototype of these mapping provides a set of methods for effectively generating, managing, reusing and engineering the semantically interoperable building model.

키워드 : 온톨로지, IFC, 프로덕트 모델, 건축/건설정보모델, 온톨로지 웹 언어

Keywords : Ontology, IFC(Industry Foundation Classes), Product Model, BIM(Building Information Model),
OWL(Ontology Web Language)

1. 서 론

1.1. 연구의 배경 및 목적

특정한 도메인 영역 내에서의 자료 호환을 포함하여
인접한 산업계 사이에서 요구되는 자료에 관한 정보처리
의 상호운용(interoperability)에 대한 필요성이 점차로 증
대되어 가는 현실에서, AEC(Architecture Engineering
and Construction)/FM(Facility Management) 분야 역시
정보체계의 통합적 연동을 위한 프로덕트 모델의 표준에
대한 논의와 함께 상호운용의 중요성에 대한 인식이 확
대되고 있다.

건축물 정보 모델인 BIM(Building Information Model)
의 국제적인 표준으로 논의되고 있는 IFC(Industry
Foundation Classes)는, 최근 미국¹⁾ GSA(General

Services Administration)와 US Coast Guard, 핀란드²⁾의
Senate Properties, 노르웨이³⁾의 Statsbygg, 덴마크⁴⁾의
The Palaces and Properties Agency와 Defence
Construction Service, 싱가포르의 CORENET e-PlanCheck
등 주요 국가 공공기관들에 의해 BIM을 위한 제도적인
가이드로서 채택되고 있다. BIM/IFC와 관련하여 변화하
고 있는 환경에 맞추어, 대부분의 상용 CAD 시스템들

1) 다음을 참조. ①GSA (2007) 3D-4D Building Information
Modeling, <http://www.gsa.gov/Portal/gsa/ep/> ②NIBS (2007)
National BIM Standard Presentation,
<http://www.facilityinformationcouncil.org/bim/>

2) 다음을 참조. ①Senate Properties (2007) Product Modelling
Guidelines, <http://www.senaatti.fi/> ②Kiviniemi, A. (2007)
Finnish ICT Barometer 2007, <http://cic.vtt.fi/buildingsmart/>

3) 다음을 참조. ①IAI Forum Norway (2007), Information
Delivery Manual, <http://www.iai.no/idm/index.html> ②
Statsbygg (2007) BIM - Bygningsinformasjonsmodell,
<http://www.statsbygg.no/Prosjekt/BIMBygningsinformasjonsmodell/>

4) 다음을 참조. ①IAI Forum Denmark (2006) IFC Exchange
Guide - between 3D CAD applications,
<http://iaiforum.teknologisk.dk/> ②Det Digitale Byggeri (2007),
Bygherrekraftene, <http://detdigitalebyggeri.dk/>

* 호서대학교 건축학과 조교수, 공학박사

** 서울산업대학교 건축학부 교수, 공학박사

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업 - 지능형국토정보
기술혁신 사업과제의 연구비지원(07국토정보C04)에 의해 수행되
었습니다.

역시 모델링 관련 도구를 통해 자료 호환을 위한 공개된 표준포맷으로서 IFC를 지원⁵⁾하고 있다.

또한, 분산된 자료 소스, 다양한 포맷, 복잡한 정보표현 수준 등 AEC/FM 산업의 특성으로 인한 프로세스 불연속성의 문제를 해결로서, 정보처리 상호운용의 연동성을 고려한 객체 기반의 프로덕트 모델에 대한 지능적인 정보추론을 위한 의미론 정보(semantic information) 시스템에 대한 논의가 시작되고 있다.

이에, 본 연구는 IFC를 기반으로 상용 CAAD 패키지들에 의해 생성되어 있는 자료들을 활용할 수 있도록, GIS를 포함한 AEC 인접 분야와의 시스템 협업의 자료 레벨에서 상호운용 가능성을 제안하고자 한다.⁶⁾ 산업분야의 차이를 고려한 CAD와 GIS의 이중 시스템 간 자료 통합의 사전단계로서, 다른 시스템에서 요구되는 건축물의 해당 자료를 의미기반 검색으로 추출할 수 있는 시맨틱 웹 기술을 빌딩 프로덕트 모델에 적용하는 것이다. 이는 AEC/FM 인접 분야 사이에서 기존 자료 모델을 수용하여 효율적으로 상호운용할 수 있도록, 이중 시스템 간 호환성 측면에서 합리적인 온톨로지를 제안하는 방법론으로 이루어진다.

1.2. 연구의 방법 및 절차

건축물의 프로덕트 모델에 대한 온톨로지 표현을 제안하고자 하는 본 연구는 온톨로지 마크업 언어인 OWL(Ontology Web Language)을 사용하여 STEP(Standards for the Exchange of Product models) 기반의 IFC 자료 모델을 시맨틱 기반의 자료 모델로 전환하는 방안을 제시한다. 이를 위해, 본 연구는 AEC/FM의 프로덕트 모델링 분야에 활용된 ICT(Information & Communication Technology) 인프라들의 변화된 전개과정과 해당 기술의 주요 특징들을 살펴보고, IFC 모델의 온톨로지 표현을 위해 EXPRESS와 OWL 언어의 주요한 특징 및 언어 간 매핑방법을 검토한 후, IFC의 EXPRESS 스키마를 OWL 온톨로지 메타레벨

로 전환된 자료 모델을 제시하도록 한다.

의미검색 기반의 메타레벨에서 자료 모델을 제시하고자 하는 본 연구 방법론은 빌딩 모델의 자료 호환을 위한 표준에 요구되는 주요한 이슈와 관련이 있다. 이는 건설 산업의 여러 분야에 걸친 수많은 서브 도메인들에서 요구되는 자료를 제공해야만 하는 현실적인 상황에서, 복잡한 빌딩 모델에 대한 적절한 접근론이 될 수 있기 때문이다. 특히, 다양한 도메인에 걸쳐 파일 구조와 자료 모델의 측면에서 진화와 변화를 거듭하고 있는 BIM/IFC에 대해, 시맨틱 웹 기술을 활용함으로써 AEC/FM 분야의 협업체계에 따른 분산된 시스템 환경에서 이 기중간의 자료 상호운용에 필요한 연구방법론을 제시하고자 하는 것이다.

2. AEC/FM 분야 프로덕트 모델링 기술

ICT 인프라 환경의 변화에 따라, 건축물의 전 생애주기에 걸치는 AEC/FM 분야의 통합된 빌딩 모델에 관한 연구에서 활용되는 빌딩 자료의 구조를 정의하는 언어는 STEP로부터 XML(eXtensible Markup Language)로, 그리고 RDF와 RDF(S)를 거쳐 최근 OWL로 진화되어 가고 있다. [표 1]

표 1. 자료 구조 공개형 표준(open standards)과 적용기술

| Information Structure / Language | | Data Schema |
|----------------------------------|--------------|---|
| ISO STEP | SPFF EXPRESS | IAI IFC(ISO 16739) ISO 12006-3 IFD ⁷⁾ |
| W3C Plain XML | XML XSD | Link with Web Services SOA/Web2.0 (Ajax) |
| W3C Semantic Web | RDF/XML OWL | EU SWOP ⁸⁾ PMO EU ManuBuild ⁹⁾ PMO Dublin Core ¹⁰⁾ |
| W3C Web Services | XML WSDL | SOA(Service Oriented Architecture) integration |

5) IFC 2x3의 2단계 인증(2nd Step Certification for the 'Coordination View Definition')을 받은 상용 CAD 프로그램들은 다음과 같다. ACTIVE3D v4.0(www.active3d.net), ALLPLAN 2006.2(www.nemetschek.com), ArchiCAD 11 (www.graphisoft.com), AutoCAD Architecture 2008 sp1 (www.autodesk.com), Bentley Architecture 8.9.3 (www.bentley.com), DDS .CAD 6.4(www.dds-cad.com), Facility Online(www.vizelia.com), MagiCAD(www.progman.fi), Revit Architecture 2008 sp1(www.autodesk.com), Solibri Model Checker(www.solibri.com), TEKLA Structures 13.0 (www.tekla.com).

6) 건축물을 포함한 도시 내 시설물과 관련한 다양한 도시환경-건축물 및 도시설계(urban planning), 토지정보(cadastral DB), 교통영향, 도시거주환경성능, 시설물관리, 재난대처, 차량 및 보행자 위치정보(navigation) 등-을 위한 의사결정 정보체계의 통합적 구축 필요성 증대를 고려할 때, CAD와 GIS 시스템 간 자료의 연동을 위한 '정보처리의 상호운용(Interoperability)'은 중요한 의미를 지닌다. 박정대, 김진욱 (2008) CAAD와 GIS 자료 상호운용을 위한 정보표준에 관한 기초적 연구.

7) IFD(international framework for dictionaries)는 STEP ISO TC 59/SC 13 규약에 따라 EXPRESS로 표현된 온톨로지를 위한 메타 모델로 1999년 시작됨. ISO 12006-3의 IFD에 기반하여 개발되고 있는 온톨로지에는 네덜란드 STABU의 LexiCon, 노르웨이의 BARBi, 프랑스의 EDIBATEC 프로젝트를 들 수 있으며, LexiCon과 BARBi 프로젝트는 단일 라이브러리(physical library) 개발을 위한 협의를 거쳐, 2006년 5월 1차 버전의 공개형 API를 발표한 이래 공동 연구를 진행하고 있음.

8) EU SWOP(Semantic Web-based Open engineering Platform)는 유럽연합(European Commission) 공동지원에 의한 European STREP의 no.016972 프로젝트로 2005년에 시작. product modeling을 위해 OWL 위에 상위 레이어인 PMO(Product Modeling Ontologies)를 부여하고 건설관련 분야 product ontologies 사용자들을 위한 표준 온톨로지 플랫폼을 개발. <http://www.swop-project.eu> 참조.

9) Manu Build-Open Building Manufacturing는 유럽연합의 6번째 Framework Programme의 일환으로 2005년에 시작하여 2009년에 종료되는 프로젝트로, 10개국 24개 파트너들이 참여. <http://www.manubuild.org/> 참조.

2.1. ISO STEP

프로덕트 모델 관련분야 연구의 발전과정¹¹⁾에서 IAI(International Alliance for Interoperability)¹²⁾의 IFC는 프로덕트 자료 상호운용을 위해 ISO 10303¹³⁾을 따르는 EXPRESS¹⁴⁾ 언어에 기반하고 있으며, 해당 자료는 SPFF(STEP Physical File Format)로 저장된다.

그런데, 프로덕트 자료 구조의 표준인 IFC가 기반하고 있는 EXPRESS 언어는 온톨로지의 측면에서 보면 주요한 제약이 따른다. 수학적 논리 이론에 토대를 두고 있지 않아 인공지능 알고리즘과 같은 진화하고 있는 기술들을 활용해볼 수 없으며, EXPRESS를 따르는 엔지니어링 분야를 벗어나게 되면 개발도구와 모델링 언어의 활용성이 떨어져 자료의 재사용과 상호운용에 있어 제한이 따른다. 또한, 파일 기반의 인덱싱과 지역적으로 정의된 엔티티의 속성값으로 인해 온톨로지 언어로서 요구되는 분산 네트워크 환경에 대한 지원에 어려움이 있다.

2.2. XML

전통적으로 많은 분업화에 의한 분화된 산업구조를 지닌 AEC/FM 분야 산업구조의 특성에도 불구하고, 인접 산업분야에서 XML 기술이 활용되는 것을 참고하여, XML 기반으로 IFC 자료를 표현하려는 ifcXML, aecXML, BLIS-XML, bcXML¹⁵⁾ 등의 관련 연구들이 진

행되어 왔다.

이 중 ifcXML은 EXPRESS 기반의 IFC2x와 IFC 2x2 스키마를 STEP ISO 10303 Part 28 표준을 따라 XML Schema Language (XSD)로 매핑한 것으로, IAI에 의해 공식적으로 채택되기도 하였다. STEP EXPRESS 기술은 제한된 사용자 층에 국한되었다면, XML 기술은 여러 영역에서 폭넓게 채택된 기술로서 해당 분야에서 새로운 어플리케이션을 비교적 용이하게 개발할 수 있는 다양한 유틸리티들이 제공되고 있다. [표 2]

그렇지만, XML의 여러 장점에도 불구하고 XLM 스키마의 표현성 한계¹⁶⁾로 인해, EXPRESS 스키마의 특정 한정 정의(expressiveness)와 제약요소(constraints)들이 상실되기도 한다. 또한, 상호호환성을 위한 자료 모델의 의미론적 연관성에 있어서는 XML의 한계가 지적되어 왔다. 이에, 최근 OWL 기반의 온톨로지 언어에 기반하여 AEC/FM 분야의 빌딩 프로덕트 모델에 관한 논의가 새롭게 전개되고 있다.

표 2. bcXML, IFC, ISO 12006-3의 메타 스키마 엔티티 비교
출전: Lima et al.(2004)

| meta schema item | bcXML | IFC | ISO 12006-3 ¹⁷⁾ |
|---|-------------------|----------------------------|----------------------------|
| Semantic Resource identification | Taxonomy | IfcRoot (ABS) | XtdRoot (ABS) |
| Concept | Object | IfcObject (ABS) | XtdObject (ABS) |
| Relation | Relationship | IfcRelationship | xtdRelationship |
| Property | Property | IfcProperty | xtdProperty |
| Assign properties to objects | Property | IfcRelDefined-ByProperties | xtdRelAssigns-Properties |
| Description | Description | Description (attribute) | xtdDescription |
| Reference to an external resource / entity | ExternalReference | IfcExternalReference | xtdReference |

2.3. RDF와 RDF(S)

시멘틱 웹을 위한 의미부여 언어로, W3C에 의해 개발되어 1999년 권고안으로 제안된 RDF(Resource Definition Framework)는 'subject(개체, 자원)-predicate(속성, 자원간의 관계)-object(속성값)'의 triple 구조인

Lima et al. (2003)

16) 문서 내용의 역할을 지정하는 추가 정보를 붙여 문서에 논리적 구조를 부여해줄 수 있는 XML은 문서 구조를 지정할 수 있을 뿐, 문서가 지닌 의미에 대해서는 정의하지 않아 컴퓨터가 그 문서의 의미를 해석 및 추론할 수 없음. 즉, XML은 순서가 중요한 트리구조로 되어 있어 tag 배치 순서가 다르면 서로 다른 문서로 인식될 뿐만 아니라, node가 문서에 포함된 채 indexing 되므로 메타 자료를 표현하기 위한 유연성이 부족. 또한, XML Schema는 문서에 대한 의미론적 해석이 아닌 구문적 해석만이 가능함.

17) ISO 12006-3는 객체(objects), 집합(collections) 그리고 관계(relationships)의 기본 엔티티로 건설분야의 스키마를 정의하기 위한 분류 모델의 표준. EeM (2004)

10) 1995년 Dublin에서 개최된 "OCLC/NCSA Metadata Workshop"에서 시작되어 도서관학, 컴퓨터 과학, 서지학, 박물관학 등의 여러 분야에 걸친 전문가들의 국제적인 학제간 연구성과를 토대로 제안된 Dublin Core는 도메인 간에 온라인 리소스를 기술하는 표준화된 메타자료(metadata element set). <http://dublincore.org/> 참조.

11) IAI의 IFC 이전 프로덕트 모델에 관한 연구로는 다음을 참조. GARM(Gielingh, 1988), NIAM(Nijssen & Halpin, 1989), RATAS(Björk, 1994), IDEF1X(IDEF1X, 1993), COMBINE(Augenbroe, 1994), EXPRESS(Schenck & Wilson, 1994) 등.

12) 1995년 10월 북미에 IAI 설립. STEP 프로젝트에서 ISO 표준으로 개발되었던 EXPRESS 정보정의 언어를 사용하여 개발작업을 수행하기로 결정. 1997년 1월 최초의 IFC 모델(IFC Release 1.0) 발표. 1998년 7월 IFC Release 1.5.1에서 처음으로 상용 CAAD 응용 패키지들을 위한 기초를 제공하여 2000년 중반 Allplan, ArchiCAD, ADT 프로그램들이 첫 IFC 인증 받음. 2000년 10월 IFC Release 2.x에서 ifcXML 상세 소개.

13) IFC는 형식명세(formal specification)로 ISO 10303 part 11을 사용하며, 자료 교환을 위한 파일 코딩은 ISO 10303 part 21을 따르고, 스키마 모델은 ISO 10303의 41, 42, 43 과 46 파트 내의 코드 표준을 참조.

14) ISO의 TC184/SC4 그룹에 의해 개발되어 1994년 발표된 국제표준으로, STEP 분야(ISO 10303), Oil & Gas 분야(EPISTLE, ISO 15926), 건축/건설 분야(IFC, ISO/PAS 16739, ISO 12006-3) 등의 자료 정보 모델인 스키마와 상호운용의 표준을 기술하는데 적용됨.

15) bcXML(Building and Construction eXtensible Markup Language)은 건축/건설분야 마켓 플레이스 상에서 프로덕트 혹은 컴포넌트들의 정확한 검색과 관련된 문제를 해결하게 위해 제안됨. 이를 위해 AEC 분야의 객체들에 대한 명확하게 합의되고 형식화된 정의와 이에 근거한 속성 및 관계에 따른 분류(taxonomy)를 진행. 이 분류는 XTD(eXtensible Taxonomy Definition)라 명칭된 bcXML의 메타 스키마를 기반으로 함.

“A(O, V)”의 단순하지만 강력한 언어이다. 이러한 추상적인 RDF 자료 모델을 컴퓨터가 이해할 수 있는 기계적인 XML 선택스를 사용하여 코드화 것이 RDF/XML이다.

의미의 구조를 정의할 뿐 의미자체의 추론을 위한 메커니즘¹⁸⁾을 제공하지 못하는 RDF에, 온톨로지 개념을 적용하여 프레임 지식표현 패러다임으로 확장한 언어가 RDF Schema 혹은 RDF(S)이며, W3C에 의해 개발되어 2004년 권고안으로 제안된 것이다. 클래스와 속성에 대한 기본적인 어휘로 표현되는 RDF(S)는 객체지향 프로그래밍 언어와 유사하게 상속관계의 클래스 계층구조를 지원한다.

그러나, RDF(S)에는 특정한 속성에서 지닐 수 있는 속성값의 개수를 명시하는 관계차수의 제한(cardinality restriction), 임의의 클래스 간에 공통 인스턴스가 없는 경우인 클래스의 비접합성(disjointness), 다른 이름 동일 의미를 지닌 클래스나 속성의 동치성(equality) 혹은 동일 이름 다른 의미를 지닌 클래스나 속성의 비동치성(inequality) 등을 표현하는 어휘가 지원되지 않는 한계가 있다.¹⁹⁾

이러한 RDF와 RDF(S)의 한계를 보완하기 하기 위해 W3C의 권고안으로 2004년 개발된 온톨로지 마크업 언어인 OWL은 풍부한 어휘(vocabulary)와 형식적 의미론(formal semantics)을 포함하고 있어 XML, RDF, RDF(S) 보다 더 많은 의미 표현 수단을 제공한다. OWL²⁰⁾은 표현력 측면에서 포함관계를 지니는 서로 다른 3가지 하위 언어²¹⁾로 구성되어 있는데, 본 연구에서는 온톨로지 마크업 언어로서, 요구조건을 만족시킬 수 있는 표현력을 제공하는 동시에 추론 기능을 지원해주는 OWL DL(Description Logic)²²⁾에 기반하여 연구²³⁾를 진행한다.

3. 온톨로지 마크업언어 OWL

3.1. OWL Class 구문정의

OWL에서 클래스는 기본적으로 클래스 식별자(owl:Class)²⁴⁾, 열거(owl:oneOf)²⁵⁾, 속성 제한(owl:Restriction), Boolean 연산(owl:intersectionOf, owl:unionOf, owl:complementOf), 비접합성(owl:disjointWith), 동치성(owl:equivalentClass), 하위클래스(rdfs:subClassOf) 등의 방법으로 표현한다.

구체적인 클래스 표현방법을 살펴보면, 속성제한(property restriction)은 ‘값의 제약조건(value constraints)’과 ‘관계차수 제약조건(cardinality constraints)’의 2가지로 나누어진다. 임의의 클래스에 대한 속성을 제한하는 역할을 하는 값의 제약조건(value constraints)에는 다시 완전히 일치하는 속성만을 표시하는 ‘완전조건(owl:allValuesFrom)’, 속성 값 중 한 개 이상만 일치할 경우에 사용하는 ‘부분조건(owl:someValuesFrom)’, 특정한 속성을 지닌 클래스를 정의해주는 ‘속성값 제한조건(owl:hasValue)’²⁶⁾ 등이 있다. 그리고, 특정 클래스의 속성을 구분하는 속성 값의 숫자를 한정하기 위한 관계차수 제약조건으로는 ‘최대 관계차수(owl:maxCardinality)’와 ‘최소 관계차수(owl:minCardinality)’의 구문표현을 사용한다.

3.2. OWL Property

OWL의 속성(property)은 클래스를 다른 클래스에 속한 인스턴스와 연결해주는 ‘객체형 속성(owl:ObjectProperty)’과 클래스의 인스턴스와 특정한 자료 타입 사이의 관계를 표현하는 ‘자료 형태 속성(owl:DatatypeProperty)’²⁷⁾의 2가지로 구분된다. 속성을

18) RDF에는 ‘클래스’의 개념이 없어 속성의 범위를 제한하거나, 유사한 개체를 하나로 묶어주거나, 상하의 위계를 표현하거나 할 수 없어 자원들의 의미추론은 불가능. 즉, RDF에서는 속성의 subject와 object에 올 수 있는 자원의 범위가 지정되지 않았지만, RDF(S)에서는 어떤 속성이 취할 수 있는 클래스의 범위를 제한할 수 있으며, 이것이 정의역(domain)과 공역(range) 개념임.

19) Antoniou & Hamelen (2004)

20) Dean & Schreiber (2003)

21) OWL Lite를 확장한 언어가 OWL DL이며, OWL DL은 OWL Full에 포함되는 하위언어. ① OWL Lite: 클래스의 계층과 간단한 제약사항만이 제공되는 표현의 제한이 있으며, 이론적 복잡도가 높지 않아 기존의 분류체계 혹은 용어사전(thesaurus)을 OWL로 변환하는 작업에 적합. ② OWL DL: 논리학의 한 분야인 ‘기술논리(Description Logics; 이하 DLs)’에 기반하며, ‘계산적 완전성(computational completeness. 모든 결론이 계산될 수 있는 특징)’과 ‘결정 가능성(decidability. 모든 계산이 유한 시간 내에 완료되는 특징)’을 유지하면서 가능한 최대의 표현력을 제공. ③ OWL Full: RDF의 모든 문법이 사용가능한 최상위의 표현력이 있지만, 계산적 보장이 되지 않아 이를 완전하게 지원하는 추론 시스템의 개발은 쉽지 않음. <http://www.w3.org/TR/owl-features/>

22) OWL과 같은 온톨로지 마크업 언어의 기초적인 논리를 제공하는 기술논리(DLs)는 용어적 지식(terminological knowledge)

의 표현체제로, 기본적인 개념인 ‘기호(symbol)’와 이들 개념들을 연결해주는 ‘구성자(constructor)’로 구성. 기본개념(atomic concept)과 이 개념들 간의 기본 역할(atomic role)이 ‘기호’로 표현되며, 논리학의 Boolean 연산자와 각종 제약을 표현하는 한정자들이 ‘구성자’에 해당. Baader et al. (2003)

23) 온톨로지 언어의 편집을 위한 자바기반의 확장형 오픈 소스 온톨로지 편집기인 Protégé(<http://protege.stanford.edu/>)를 사용하여 RDF 자료를 생성하고, 가시화 도구인 plug-in OWLViz(<http://www.co-ode.org/downloads/owlviz/>)를 통해 온톨로지의 다양한 관계속성을 다이어그램 형식으로 표현.

24) ‘클래스 식별자(identifier)’는 owl:Class로 시작하며 rdf:ID로 클래스의 이름을 제시하고, owl:Thing과 owl:Nothing을 사용. owl:Nothing은 구성원들이 없다는 의미로 모든 OWL 클래스는 owl:Thing의 하위 클래스가 되며, 반대로 owl:Nothing은 모든 클래스의 하위 클래스라는 의미로 사용.

25) 클래스를 구성하는 개체들을 일일이 열거하여 이를 정의해주는 ‘열거형(enumeration) 클래스’는 owl:oneOf 특성을 이용해 정의하며, rdf 구문인 rdf:parseType="Collection" 표현으로 기술.

26) 예를 들어, ExposedConcrete이란 클래스는 Concrete이면서, 그 조건으로 시공 속성(hasConstruction)을 사용하며, 그 속성값(owl:hasValue)이 Exposed여야 한다는 의미.

27) 자료형태 속성은 RDF의 자료 값 표현을 따름. 자료 값의 명세화를 위한 자료 범위선언으로는 RDF 자료 형태, rdfs:Literal 혹은 열거형 자료(owl:oneOf) 형태.

정의할 때, 임의의 속성을 취할 수 있는 클래스의 범위를 제한하는 것이 정의역(rdfs:domain)이며, 그 속성이 취할 수 있는 속성값의 범위를 한정하는 것이 공역(rdfs:range)이다.²⁸⁾ 속성도 클래스와 동일하게 ‘하위속성(rdfs:subPropertyOf)’ 어휘를 사용하여 속성들의 계층 구조를 구축할 수 있다.

속성과 속성들 간의 관계 및 이들 관계를 제한해주는 특별한 속성들을 활용하여 OWL에서는 직접 명시되지 않은 의미론적 추론 기능을 구현할 수 있도록 해준다. 먼저, 속성 간의 관계를 표현하기 위한 속성으로, 하위 속성들간의 관계가 대등하다는 것을 표현하는 ‘동격 속성(owl:equivalentProperty)’과 속성들이 서로 역관계임을 밝히는 ‘역관계 속성(owl:inverseOf)’을 사용한다. 또한, 속성 간의 관계를 제한하기 위해, 특정 속성의 기능과 관련된 속성은 통일되어 사용하도록 유일한 형태를 가지도록 한정하는 ‘기능적 속성(owl:FunctionalProperty)’과 해당 기능 속성에 대한 반대의 기능을 기술해주는 ‘역기능 속성(owl:InverseFunctionalProperty)’으로 이를 표현한다. 그리고, 속성의 논리적 특징을 기술해주는 속성으로, 속성들간의 계층구조인 이행적 관계를 표현해주는 ‘추이적 속성(owl:TransitiveProperty)’과 서로 대칭적인 속성관계를 표현하는 ‘대칭적 속성(owl:SymmetricProperty)’을 사용한다.

표 3. DL과 OWL의 구성자(constructs)와 공리(axiom) 비교

| | OWL | Description Logics |
|--------------|---------------------------|---------------------------------------|
| (constructs) | intersectionOf | $C_1 \sqcap \dots \sqcap C_n$ |
| | unionOf | $C_1 \sqcup \dots \sqcup C_n$ |
| | complementOf | $\neg C$ |
| | oneOf | $\{a_1\} \sqcup \dots \sqcup \{a_n\}$ |
| | allValuesFrom | $\forall P.C$ |
| | someValuesFrom | $\exists P.C$ |
| | maxCardinality | $(\leq nP)$ |
| (axiom) | minCardinality | $(\geq nP)$ |
| | subClassOf | $C_1 \sqsubseteq C_2$ |
| | equivalentClass | $C_1 \equiv C_2$ |
| | disjointWith | $C_1 \sqsubseteq \neg C_2$ |
| | sameIndividualAs | $\{a_1\} \equiv \{a_2\}$ |
| | differentFrom | $\{a_1\} \equiv \neg \{a_2\}$ |
| | subPropertyOf | $P_1 \sqsubseteq P_2$ |
| | equivalentProperty | $P_1 \equiv P_2$ |
| | inverseOf | $P_1 \equiv P_2^-$ |
| | transitiveProperty | $P^+ \sqsubseteq P$ |
| | functionalProperty | $\top \sqsubseteq (\leq 1P)$ |
| | inverseFunctionalProperty | $\top \sqsubseteq (\leq 1P^-)$ |

3.3. 동치성과 비동치성

효과적인 온톨로지 구축의 방법으로 서로 다른 온톨로지를 병합하거나 재사용할 경우, 각 온톨로지에서의 정의된 클래스와 속성 혹은 인스턴스에 대해 동일 이름이 다른

의미(비동치성)로 나타나거나 다른 이름이 동일 의미(동치성)로 표현할 수 있다. 클래스의 동치성은 owl:equivalentClass로, 속성의 동치성은 owl:equivalentProperty로, 인스턴스의 동치성은 owl:sameAs를 사용하며, 비동치성에 대해서는 owl:differentFrom로 나타낸다. 여러 개의 클래스, 속성 혹은 인스턴스가 서로 다르다는 비동치성을 한 번에 기술할 경우에는 owl:AllDifferent 구문으로 표현할 수 있다.

4. IFC의 OWL 온톨로지 표현

EXPRESS로 표현된 스키마에 대한 RDF/OWL로의 매핑 방법론을 통해, AEC/FM 분야 BIM/IFC 프로덕트 모델에 대한 온톨로지 스키마를 제안하고자 한다. RDF/OWL 언어를 사용하여 IFC 모델의 오브젝트, 속성 그리고 관계의 위계를 정의하기 위해, 온톨로지 언어에서는 클래스 사이에 가장 기본적인 관계인 포함관계(subclass) 즉 ‘is-a’ 관계 축에 의한 분류(taxonomy)로서 위계를 만드는 것이다.

그런데, 다양한 의미표현을 제공하고 있는 온톨로지 언어의 여러 장점에도 불구하고, 프로덕트 모델링 영역에서 요구되는 ‘부재화(aggregate/composite/decomposition)’²⁹⁾ 메커니즘과 관련한 내재된 어휘가 OWL 1.1³⁰⁾에서는 제공되고 있지 않다. 이것은 OWL의 일반적인 추상화 메커니즘인 subclass에 의한 ‘분화(specialization)’와는 구분된다. 즉, 프로덕트 모델링의 기반을 이루는 객체지향형 시스템의 part-whole 관계와 시멘틱 온톨로지 언어의 subclass 관계의 차이에서 기인한다. 이에, OWL에서 ‘부재화’ 메커니즘을 구현할 수 있도록, 서로 역관계에 있는 추이적 속성(transitive property)인 ‘hasPart’와 ‘isPartOf’의 정의를 사용하여 part-whole 관계를 표현할 수 있다.

BIM/IFC 자료의 온톨로지 표현에 대한 이러한 전제를 토대로, IFC 스키마에 대한 메타 레벨에서의 전환방법으로서 본 연구는 EXPRESS의 각 요소들에 대하여 다음과 같은 매핑방법론을 제시한다.

4.1. ENTITY

IFC의 ENTITY는 owl:Class에 대응하며, 이 클래스들은 온톨로지의 TBox³¹⁾를 통해 만들어진다. 다른 엔티티

29) 예를 들어, ‘건축물에는 학교, 공장 또는 오피스 등이 있다’는 ‘논리합(logical-or)’에 의한 분화(specialization)관계인 반면, ‘건축물은 벽, 창, 기둥, 지붕 등으로 구성된다’는 ‘논리곱(logical-and)’에 의한 부재화(aggregate/composite/decomposition) 관계임.

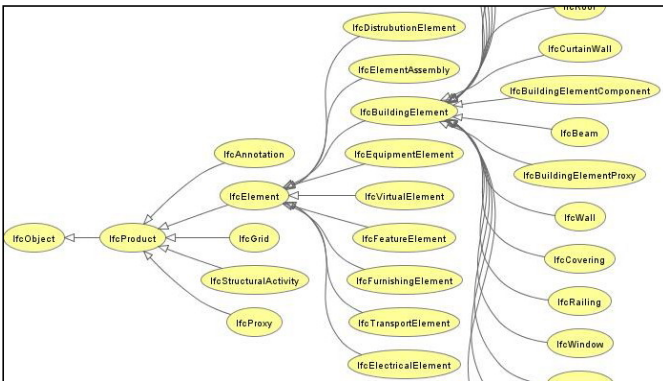
30) <http://www-db.research.bell-labs.com/user/pfps/owl/>

31) 기술논리(DLs)에서 복잡한 개념을 새롭게 명명하는 것을 ‘용어공리(terminological axiom)’라 하고, 그 속성을 기술하는 형식은 ‘선언적 공리(assertional axiom)’라 함. 이때, 특정 개념의 용어(terminology)에 관한 지식을 용어적 공리 형식으로 저장해두는 것을 ‘TBox’라 하며, 그 인스턴스들의 속성을 설명하는 선언

28) 특정 속성에 대하여 일단 지정된 정의역과 공역은 온톨로지 전체에 걸쳐 유효하기 때문에 정의역과 공역에 대한 반복과 추가는 허용되지 않음.

의 서브타입이 아닌 모든 엔티티는 owl:Thing의 서브타입이 된다. IFC 모델에서는 다중 상속(multiple inheritance)이 사용되지 않으며, 이는 RDF/OWL로의 매핑에서도 동일하게 적용된다. 대신, RDF/OWL에서는 다수의 상위 클래스들에 대해 owl:unionOf 또는 owl:intersectionOf 등의 연산자(set operators)를 사용하여 이를 표현할 수 있다. 다른 클래스와의 포섭관계에 따르는 하위개념인 'subtype of'와 상위개념인 'supertype of' 관계는 rdfs:subClassOf 클래스로 표현한다. [그림 1]

그림 1. IFC로부터 추출된 OWL 클래스 위계 (주요 엔티티 예시)



4.2. TYPE

IFC 모델의 기본 자료 형식(TYPE)의 정의는 동일한 이름을 지닌 owl:Classes로 매핑된다. 이들 owl:Classes들은 해당되는 XML 스키마에서 제한된 타입 값이 부여된 owl:DatatypeProperty³²⁾을 속성으로 가진다. 그런데, x, y, z의 좌표를 값으로 가지는 IfcPoint의 경우에는 간접적인 매핑이 요구된다. 즉, 1개의 속성에 대해 동일 자료 형식의 여러 개 값들이 필요하므로, 바로 owl:DatatypeProperty 클래스로 매핑할 수 없기 때문이다.

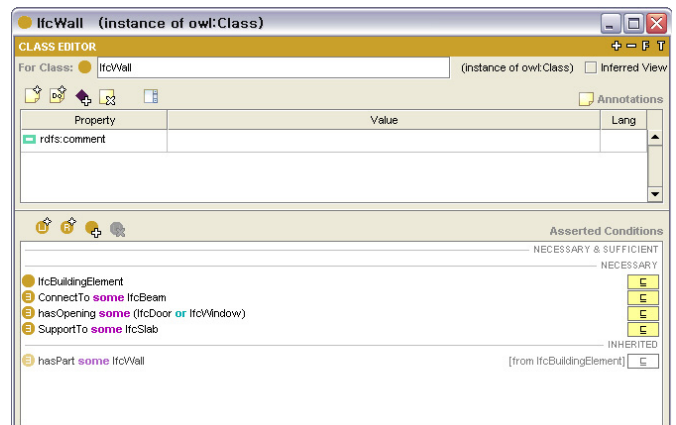
4.3. ATTRIBUTES

엔티티들의 속성(Attributes)은 자료 형식에 상관없이 모두 owl:ObjectProperties 클래스에만 매핑된다.³³⁾ 이는 여러 타입으로 표현된 속성들을 owl:DatatypeProperties 클래스를 만들어 매핑할 수도 있지만, owl:DatatypeProperties 클래스에 적용되는 독특한 제한 조건(속성 값이 XML 스키마 형식이나 literal 일 경우)이 있기 때문이다. [그림 2]

EXPRESS에서는 속성의 영역이 지역적(local)이지만, RDF/OWL에서는 각 속성들은 전역적(global)이기 때문에, RDF/OWL의 각 속성은 owl:allValuesFrom³⁴⁾에 의해

하나의 타입(SELECT 타입의 경우에는 여러 개)으로 제한된다. 그런데, IFC 모델에서는 동일한 속성 이름들이 다른 엔티티들의 영역에서는 다른 자료 형식으로 표현되는 경우가 더러 있다. 예를 들어, 어떤 엔티티에서는 INTEGER 타입으로 표현되어 있고, 다른 엔티티에서는 REAL 타입으로 표현되어 있는 '두께(Width)'라는 동일한 이름을 지닌 속성은 모두 owl:ObjectProperty 클래스의 'Width'에 매핑되는 것이다. RDF/OWL에서 서로 다른 자료 형식을 지니지만 동일한 이름의 전역 속성(global attribute)을 정의하려면, 이들 자료 속성들은 속성의 공역(range of the property)에 추가적으로 추가되어야 한다. 이 경우, 이 공역(range)은 해당 문맥에서 유효한 자료 형식으로 제한된다.

그림 2. IFC 추출 엔티티 OWL 클래스의 속성 및 속성제한 (IfcWall 클래스 예시)



4.4. Collection TYPE

BIM/IFC와 같은 엔지니어링 프로젝트 모델에서 일정한 순서에 의해 조합(좌표체계, 작업공정 프로세스, 레이어 구성 등)된 자료의 경우 그 지정된 순서가 중요한 의미를 지닌다. 그런데, 객체들을 순서대로 조합시켜주는 내재된 메카니즘이 없는 OWL에서는 관계차수 제한(cardinality restrictions)을 사용한 매핑은 가능하지만, 인스턴스들의 순서를 유지하는 것을 추가적으로 고려하여야 한다. 즉, owl:Class의 모든 ObjectProperties(클래스의 인스턴스를 다른 클래스에 속한 인스턴스와 연결하는 속성)는 기본적으로 여러 개의 인스턴스를 가질수 있기 때문에, EXPRESS에서 정의된 collection types의 변환을 위해서는 상하부의 경계를 제한하는 동시에 순서를 유지하도록 하는 것이다. 이를 위해 rdf:Lists³⁵⁾를 사용하여, 여러 ObjectProperties 클래스들에 대해 인스턴스를 추가하는 방법으로 ObjectProperties의 순서를 지정하도록 한다.

적(assertional) 지식을 저장하는 것을 'ABox'라 함.

32) 클래스의 인스턴스를 특정한 자료 유형과 연결하는 속성.

33) 이에 반해, EXPRESS에서는 속성들이 여러 가지 서로 다른 타입들(단순 TYPES, 열거형(Enumeration) TYPES, named TYPES, references to ENTITIES)을 가지는 것이 가능.

34) 클래스의 모든 인스턴스에 대해 속성의 모든 값이 제약을 만족하는 것을 의미.

35) RDF(S) 어휘인 'rdf:Lists'는 여러 개의 객체들을 목록으로 표현할 때 사용하며, 목록의 첫 번째 객체는 'rdf:first'로 시작하여 나머지 항목들을 'rdf:rest'로 나타내고 'rdf:nil'로 끝맺음.

4.5. ENUMERATION

IFC 모델에서 자주 등장하는 열거형 자료에 의해 해당 개념의 특징을 특정하는 것³⁶⁾은 OWL에서 속성의 자료 값 영역을 제한해 주는 열거형 ‘owl:oneOf’을 포함하는 owl:DatatypeProperties 속성어휘를 사용하여 인코딩할 수 있다. 이때, owl:oneOf 구문은 rdf:List 내에 주어진 인스턴스에 적절한 값을 제한하는 rdfs:range를 지정하도록 한다.

4.6. SELECT

자료 값이 단순 타입과 엔티티의 조합으로 이루어지는 IFC의 특정 Select 타입은 EXPRESS에서는 유효한 구성이지만, OWL로 바로 전환가능한 적절한 어휘가 없어 owl:DatatypeProperty로의 직접적인 전환 대신 owl:ObjectProperties로 매핑한다. 이 경우, owl:ObjectProperties 구문 내에 속성의 공역인 rdfs:range를 합집합 Boolean 연산자인 owl:UnionOf 형식으로 제한하는 것이다.

4.7. EXPRESS에서 OWL로의 매핑 예시

IFC의 OWL 표현을 위한 주요 구성자의 매핑은 다음과 같으며 [표 4], 그 예시로서 OWL로 매핑된 ifcWindow의 속성, 속성제한 및 자료형식에 대한 소스코드를 제시한다. [표 5]

표 4. EXPRESS에서 OWL로의 매핑 (주요 구성자)

| EXPRESS concept | OWL Concept |
|--|---|
| schema | ontology |
| ENTITY type | Class |
| SUPERTYPE/SUBTYPE | subClassOf |
| SELECT type | Class 혹은 subClassOf |
| ENTITY 속성 | DatatypeProperty ³⁷⁾ |
| 열거형(enums) 타입의 ENTITY 속성 | ObjectProperty ³⁸⁾ |
| string, integer, boolean, number/real data types | XML 스키마형 string, integer, boolean, double data types ³⁹⁾ |
| INVERSE | inverseOf / InverseFunctionalProperty |
| Cardinality 제약조건 | owl:cardinality, owl:minCardinality, owl:maxCardinality |
| Entity 이름과 Entity.Attribute 이름 | EXPRESS 개체에 대한 OWL 표현으로서의 ID |

36) 예를 들어, 벽체는 ‘IfcWallTypeEnum’를 통해 STANDARD_WALL, POLYGONAL_WALL, SHEAR_WALL, USERDEFINED_WALL, NOTDEFINED_WALL 중의 유형을 가지는 것으로 기술.

37) rdfs:Datatype 타입의 인스턴스를 목적값으로 취하는 속성.

38) 공역(range)이 owl:Class의 인스턴스인 속성.

39) EXPRESS의 기본 자료 TYPE 들은 XML 스키마에서 REAL은 xsd:double로, INTEGER는 xsd:integer로, STRING은 xsd:string로, BOOLEAN은 xsd:boolean로 매핑..

표 5. IFC의 OWL 표현 (소스코드 예시)

| | |
|---------|---|
| EXPRESS | TYPE IfcLengthMeasure = REAL; END_TYPE; ENTITY IfcWindow SUBTYPE OF (IfcBuildingElement) ; OverallHeight : OPTIONAL ⁴⁰⁾ IfcPositiveLengthMeasure; END_ENTITY; |
| | <owl:Class rdf:ID="IfcRealType"/> <owl:DatatypeProperty rdf:ID="hasRealValue"> <rdfs:domain rdf:resource="#41)IfcRealType"/> <rdfs:range rdf:resource ="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double"/> </owl:DatatypeProperty> <owl:Class rdf:ID="IfcPositiveLengthMeasure"> <rdfs:subClassOf rdf:resource="#IfcRealType"/> </owl:Class> <owl:Class rdf:ID="IfcWindow"> <rdfs:subClassOf rdf:resource ="#IfcBuildingElement"/> <rdfs:subClassOf> <owl:Restriction> <owl:onProperty rdf:resource ="#OverallHeight"/> <owl:allValuesFrom rdf:resource ="#IfcPositiveLengthMeasure"/> </owl:Restriction> </rdfs:subClassOf> </owl:Class> <owl:ObjectProperty rdf:ID="OverAllHeight"> <rdfs:domain rdf:resource="#IfcWindow"/> <rdfs:range rdf:resource ="#IfcPositiveLengthMeasure"/> </owl:ObjectProperty> |

5. 결 론

이상의 본 연구는 BIM 자료 구조를 토대로 IFC 자료에 OWL notion을 추가하는 프로덕트 모델 구축 방안을 제시하였다. AEC/FM 분야의 표준 자료 모델인 BIM/IFC의 자료를 토대로 OWL 온톨로지로 기술된 프로덕트 모델 스키마를 제안한 본 연구를 통해, 다음과 같은 측면에서 관련분야의 연구방향에 대해 예측해 볼 수 있을 것이다.

이제까지의 STEP 언어를 따르는 기술들보다 더욱 진보된 새로운 시멘틱 웹 기술에 기반을 두고 있어, 기존 개체 모델들로부터 외부 추론기를 활용하여 새로운 정보를 의미론적으로 추출하는 것이 가능하다. 이는 다양하고 진보된 query 언어를 사용하며, AEC/FM 분야의 여러 산업영역에서 서로 다른 시스템 간의 복잡한 자료 상호

40) OPTION이 아닌 모든 속성은 ‘적어도 1’ 이상의 cardinality restriction을 가진.

41) 용어의 접두어 ‘#’의 의미는 rdf:ID를 통해 정의되었다는 의미이며, 일단 정의된 용어는 rdf:resource나 rdf:about를 통해서 # 기호를 부착해 표기.

운용을 자동적이며 통합적으로 수행할 수 있음을 의미한다. 또한, 스키마 자체와 인스턴스 파일 내의 노드들이 URI에 의해 인식되고 저장되는 리소스 개념을 사용하는 RDF 기술로 인해, 네트워크의 분산을 최소화한 범위에서 현재의 STEP 자료를 활용할 수 있는 현실적인 이점이 있다.

그리고, IFC 모델이 점차로 복잡한 구조로 발전하는 상황을 고려할 때, 특정 도메인에 요구되는 정보만을 추출하거나 버전 및 자료의 연속성을 체크하는 것과 같은 일을 지원해주는 Description Logics 기반의 관련 유틸리티들을 활용할 수도 있다. 나아가, ISO 12006-3 표준을 따르는 다른 분야 시스템과의 의미론적 자료 매핑에 의한 상호운용 및 통합을 고려하여, 자료의 로컬 복사 혹은 다른 포맷으로의 변환과정 없이 프로젝트 라이브러리부터 자료를 용이하게 참조해낼 수 있을 것이다.

참고문헌

- Antoniou, G., F. van Hamelen (2004) A Semantic Web Primer, The MIT Press
- Augenbroe, G. (1994) An overview of the COMBINE project. Proc. 1st European Conf. Product and Process Modeling in the Building Industry ECPPM'94
- Baader, F., Calvanese, D., McGuinness, D., and Nardi, D., & Patel-Schneider, P. (2003) The Description Logic Handbook: Theory, Implementation, Applications, Cambridge University Press
- Beetz, J., Leeuwen, J. van & de Vries, B. (2006) Towards a Topological Reasoning Service for IFC-based Building Information, ICCBE
- Björk, B. (1994) RATAS Project—developing an infrastructure for computer integrated construction. Journal of Computing in Civil Engineering 8(4)
- Brickley, D., & Guha, R. (2004). RDF Vocabulary description language 1.0: RDF schema W3C recommendation. Accessed at <http://www.w3.org/TR/2004/REC-rdf-schema-20040210/>
- Calvanese, D. & Lembo, D. (2007) Ontology-Based Data Access, 6th Int. Semantic Web Conference
- Dean, M. & G. Schreiber (2003) OWL Web Ontology Language Reference. <http://www.w3.org/TR/owl-ref/>
- European eConstruction Meta-Schema; EeM (2004) CEN Workshop Agreement – CWA 15141, COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN)
- Gielingh, W. (1988) General AEC reference model (GARM) an aid for the integration of application specific product definition models. Proc. CIB W74 + W78 Workshop
- Horrocks, I., Patel-Schneider, P.F., & van Harmelen, F. (2003) From SHIQ and RDF to OWL: the making of a Web Ontology Language. Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web
- IAI (2007) IFC2x Edition 3 Technical Corrigendum 1, International Alliance for Interoperability, <http://www.iai-tech.org/ifc/IFC2x3/TC1/html/index.htm>
- IDEF1x. (1993) Integration Definition for Information Modeling (IDEF1x). FIPS Publication 184, National Institute of Standards and Technology.
- Jiayi, P. & Anumba, C. J. (2008) Semantic-Discovery of Construction Project Files, Tsinghua Science & Technology Vol. 13
- Kiviniemi, A., Tarandi, V., KarKarshøj, J., Bell, H. & Karud, O. J. (2008) Review of the Development and Implementation of IFC compatible BIM, Erabuild funding organisations
- Lee, J., Min, K., Lee, Y. & Kim, J. (2008) Building Ontology to Implement the BIM focused on Pre-design Stage, the 25th Int. Symposium on Automation & Robotics in Construction
- Lima, C. P., Stephens, J. & Bohms, M. (2003) The bcXML – Supporting eCommerce and Knowledge Management in the construction industry, Itcon Journal, v. 8
- Lima, C., Fès, B. & Ferreira da Silva, C. (2004) Setting up the open semantic infrastructure for the European construction sector the FUNSIEC project. Proceedings of the ECPPM 2004.
- NIBS Facilities Information Council (2007) United States National Building Information Modeling Standard Version 1 – Part 1: Transforming the Building Supply Chain Through Open and Interoperable Information Exchanges, National Institute of Building Sciences
- Nijssen, G., & Halpin, T. (1989) Conceptual Schema and Relational Database Design: A Fact Oriented Approach. Upper Saddle River, NJ: Prentice - Hall.
- Schenck, D., & Wilson, P. (1994). Information Modeling: The EXPRESS Way. New York: Oxford University Press.
- Schevers H., Mitchell, J., Akhurst, P., Marchant, D., Bull, S., McDonald, K., Drogemuller, R. & Linning, C. (2007) Towards Digital Facility Modeling For Sydney Opera House Using IFC and Semantic Web Technology, Journal of IT Con., Vol.12
- SWOP (2008) D23 - The SWOP Semantic Product Modelling Approach with PMO - The SWOP Product Modelling Ontology, The SWOP Consortium
- W3C (2004) OWL Web Ontology Language Reference, <http://www.w3.org/TR/owl-ref/#Class>
- Yanga, Q.Z. & Zhangb, Y. (2006) Semantic interoperability in building design Methods and tools, Computer-Aided Design, Volume 38, Issue 10

(接受: 2009. 3. 2)