

3차원 공간정보의 응용에 따른 최소 수준 세밀도 분석

Analysis of Minimum Required LOD According to Applications of 3D Geospatial Information

김 병 선* · 이 희 석** · 신 동 빈***

Kim, Byeong Sun · Lee, Hee Seok · Shin, Dong Bin

요약

이 연구는 건물과 도로를 대상으로 3차원 공간정보 응용 분야를 고려한 최소 LOD 수준을 제시하는데 목적이 있다. 이를 위해 3차원 공간정보의 LOD 개념에 대해 고찰하였으며, 문헌 검토 방법을 통해 총 10가지(건물의 태양 복사 에너지 추정, 건물의 에너지 사용량 추정, 도시 소음 분석, 도시 인구 추정, 3차원 입체지적, 가시권 분석, 교통 시뮬레이션, 도시 시설물 관리, 실내외 연계, 실감형 콘텐츠) 유스케이스와 응용사례에 대한 최소 LOD 수준을 제시하였다. 이 연구를 통해 도출한 최소 LOD 수준은 3차원 공간정보를 이용한 응용 시스템을 개발하는 사용자의 의사결정에 중요한 참고자료가 될 것으로 판단된다.

주요어 : 3차원 공간정보, 응용 분야, 유스케이스, 세밀도, 건물, 도로

ABSTRACT

This research aimed at developing minimum required LOD(Level of Detail) considering applications of 3D geospatial Information for building and road. For this, we examined the concept of LOD specification for 3D geospatial information, and then proposed 10 distinct types of use cases used in several application domains with minimum required LOD through comprehensive literature review(solar irradiation estimation, building energy demand estimation, analysis of noise propagation, population estimation, 3D cadastre, visibility analysis, transportation simulation, facility management, integrating indoor and outdoor, realistic content). It is believed that the minimum required LOD we suggested in this paper will be useful as an important reference for user's decision-making in association with developing applications based on 3D geospatial data.

Keywords : 3D Geospatial Information, Application, Usecase, Level of Detail, Building, Road

* 주저자, 정회원·안양대학교 스마트시티공학과 조교수(E-mail: geobskim@gmail.com)

** 공동저자, 안양대학교 도시정보공학과 박사과정(E-mail: lhshr4@gmail.com)

*** 교신저자, 안양대학교 도시정보공학과 교수(E-mail: dbshin@anyang.ac.kr)

1. 서 론

최근 다양한 분야에서 디지털 트윈(digital twin)에 대한 관심이 높아지면서, 공간정보 분야에서도 디지털 트윈국토(NDT: National Digital Twin)라는 이름으로 여러 프로젝트가 동시다발적으로 진행되고 있다. 특히, 3차원 공간정보가 디지털 트윈국토 제작의 핵심 데이터로 활용되면서, 기존의 시각화 용도에 머물렀던 3차원 공간정보의 응용 범위는 빠르게 확장하고 있으며, 이에 대한 서비스 모델 개발의 필요성까지 역시 강조되고 있다.

일반적으로 3차원 공간정보는 2차원 공간정보에 차원(dimension) 하나를 추가한 개념으로 쉽게 이해할 수 있으나, 3차원 공간정보는 데이터 수집 방법, 데이터 구조(structure), 분석 및 표출 방법 등에서 2차원 공간정보와 비교해 큰 차이가 있다.¹⁾ 이러한 차별성 때문에 기존의 2차원 공간정보 시스템을 재사용하여 단일 프레임 상에서 2차원과 3차원 공간정보를 함께 처리할 수 없기 때문에, 이에 따라 많은 시간과 비용을 투자하여 별도의 시스템을 새롭게 구축해야만 한다. 하지만, 2차원 공간정보에 익숙한 사용자가 3차원 공간정보를 어떤 응용 분야에 어떻게 활용할 것인가를 결정하는 것은 결코 쉬운 일이 아니다.

무엇보다 3차원 공간정보는 2차원 공간정보와 달리 LOD(LOD: Level of Detail)라는 개념이 있는데, LOD는 현실 세계의 객체와 데이터 모델에서 표현하는 객체가 서로 얼마나 유사한가를 나타내는 척도를 의미한다.²⁾ 이러한 LOD는 데이터 구축과 응용을 결정하는 가장 중요한 기준이 되는데, 이는 선택된 LOD에 따라서 데이터 구축 방법과

비용이 결정되고, 시스템의 실행 성능과 분석 모형의 알고리즘 등에도 큰 영향을 미치기 때문이다. 그러나 응용에 필요한 LOD 결정에 기준이 되는 국제표준인 CityGML2.0³⁾과 디지털 트윈국토 표준에서 사용하는 CityGML3.0⁴⁾ 모델의 LOD가 상이하고, 관련된 국내 기술규정인 3차원 국토공간정보 구축 작업규정⁵⁾에서 정의한 LOD 역시 국제표준인 OGC의 CityGML과는 다르게 규정하고 있다. 이렇게 LOD와 관련된 제도적 환경은 3차원 공간정보를 이용한 응용 시스템을 구축하는 데 있어서, 사용자의 혼란을 더욱 가중하는 원인으로 지적된다.⁶⁾

이러한 배경에서 이 연구는 건물과 도로를 대상으로 3차원 공간정보의 응용 분야를 고려한 최소 LOD 수준을 제시하는데 목적이 있다. 3차원 공간정보와 관련된 응용 분야는 매우 다양하기 때문에 이 연구에서는 활용도가 가장 높을 것으로 판단되는 건물과 도로를 대상으로 응용 분야와 최소 LOD 수준을 도출한다. 이 연구의 수행 방법으로 다음과 같다. 첫째, 3차원 공간정보와 관련된 LOD에 대한 개념을 살펴본다. 둘째, 연구 수행에 필요한 방법론을 정립한다. 셋째, 건물과 도로에 대한 응용 분야별 최소 LOD 기준을 도출하고, 마지막으로 이 연구에 대한 시사점을 제시한다.

2. 3차원 공간정보의 LOD

세밀도인 LOD(Level of Detail)는 현실세계(Real World)의 건물, 도로 등과 같은 다양한 도시 객체를 데이터 모델에서 정의한 객체 및 표현 방

1) Worboys, M. F., & Duckham, M., "GIS: a computing perspective. CRC press", 2004, p.4.

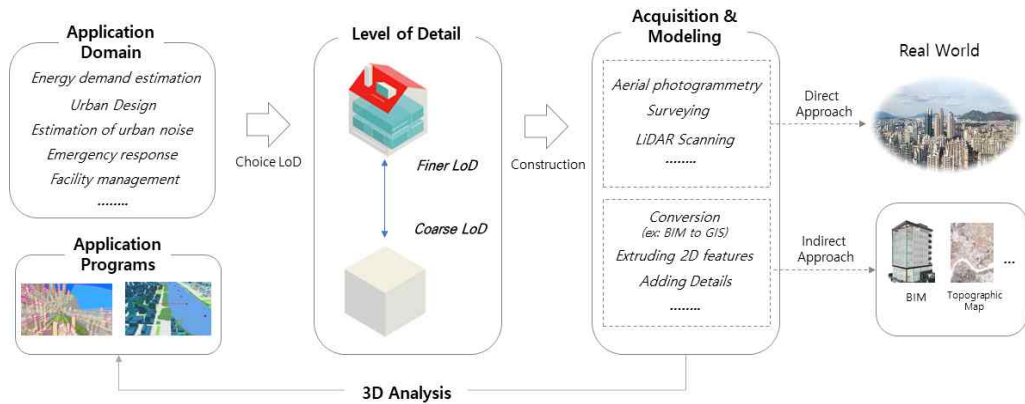
2) 김병선·이희석·홍상기, "CityGML 3.0 ADE를 이용한 데이터 모델 개발 방법에 관한 연구", 「대한공간정보학회지」, 제30권 3호, 2022, p.41.

3) OGC, "OGC City Geography Markup Language(CityGML) encoding standard", 2012, pp.1-325.

4) OGC, "OGC City Geography Markup Language(CityGML) Part 1: Conceptual Model Standard", 2021, pp.1-316.

5) 국토지리정보원, 「3차원국토공간정보구축작업규정」, 2019.

6) 김병선·김걸, "한국의 3차원 도시 모델 이슈와 정책적 개선 방안 연구", 「한국도시지리학회지」, 제23권 3호, 2023, p.50.



자료 : 김병선·이희석·신동빈, “3차원 공간정보 세밀도 사양 개발에 관한 연구”, 『대한공간정보학회지』, 제31권 4호, 2023, p.14.

(그림 1) 3차원 공간정보 구축 과정

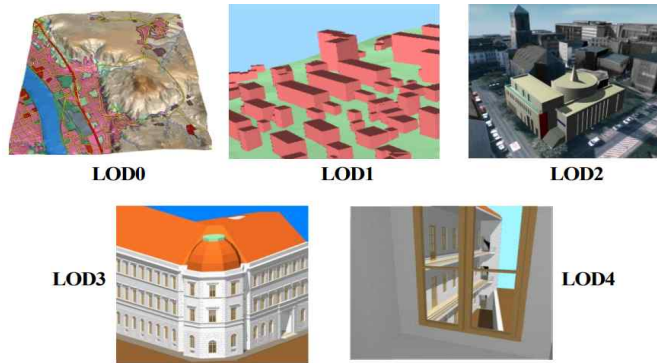
법 등과 얼마나 유사한지를 판단하는 기준으로 활용된다.⁷⁾ 3차원 공간정보에서 LOD는 [그림 1]과 같이 응용 분야를 결정하고, 데이터 수집부터 모델링, 실제 시스템 구현까지 전 생애주기 단계에서 직간접적인 영향을 미치게 된다. 응용 측면에서 사용자는 유스케이스에 요구사항에 맞춰 LOD를 결정하고, 데이터를 구축하게 되는데, 높은 LOD를 적용한 데이터 구축 시 불필요한 객체의 구축으로 인한 비용이 급격히 증가하여 응용에 적합한 LOD를 적용하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 이렇게 응용 분야에 맞춰 최소 LOD가 결정되면, LOD 수준에 따라 간접적인 방법 또는 직접적인 방법을 통해 수행된다. 데이터 수집 및 모델링 측면에서 LOD가 낮다면 기구축된 2차원 데이터 (ex: 수치지형도 등)에 높이 값을 이용한 간접적인 방식을 통해 구축되나, LOD가 높을수록 객체의 세부 항목을 모델링해야 하기 때문에, 드론, 라이다와 같은 고비용의 직접적인 방법으로 데이터를 구축하는 것이 효율적인 방법이라 할 수 있다. 또한, 3차원 공간정보의 LOD가 높을수록 응용 프로그램에서 처리하기 위한 데이터 용량, 처리 연산

량 등이 증가하기 때문에, 이는 공간분석을 수행하기 위한 시스템 성능에도 직접적인 영향을 미치게 될 수 있다.

현재까지 국내외에서 활용도가 높은 3차원 공간정보의 LOD는 OGC(Open Geospatial Consortium)의 CityGML 2.0과 CityGML 3.0, 디지털 트윈국토 데이터 모델 표준 등이 대표적이라 할 수 있다. OGC의 CityGML 2.0은 3차원 공간정보의 기하(geometry), 모델 스케일(model scale), 시맨틱(semantic) 등을 고려하여 건물, 도로 등 각종 도시 객체의 LOD를 5단계로 정의하고 있다. 일례로, 건물의 LOD는 [그림 2]와 같이 LOD 0에서 2차원 평면, LOD 1은 박스 형태, LOD 2는 지붕의 형태를 비롯하여 발코니, 계단과 같은 건물 객체, LOD 3은 문과 창문 등을 추가적으로 표현할 수 있으며, LOD 4에서는 LOD 3 모델에서 방, 계단, 가구 등과 같은 실내공간 객체의 모델링이 가능하다. 그러나 CityGML 2.0의 LOD는 기하와 시맨틱에 대한 표현 수준을 제한적으로 정의하였기 때문에, LOD를 활용한 응용 서비스 개발 시 많은 제약이 존재한다.⁸⁾

7) 김병선·이희석·신동빈, “3차원 공간정보 세밀도 사양 개발에 관한 연구”, 『대한공간정보학회지』, 제31권 4호, 2023, p.14.

8) 국토교통부, 『2021년 국가공간정보 표준화 연구』, 2021, p.74.



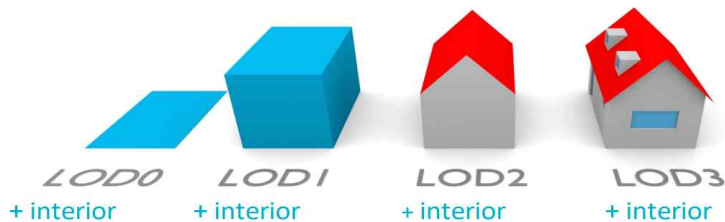
자료 : OGC, “OGC city geography markup language (CityGML) encoding standard”, 2012, p.11.

(그림 2) CityGML 2.0의 건물 LOD

이러한 문제를 해결하기 위해 OGC는 CityGML 2.0의 고정적인 형태의 LOD를 다중 표현(multi representation) 체계로 개선하고, 모든 LOD에서 실내공간을 포함한 시맨틱 객체를 표현할 수 있도록 [그림 3]과 같이 CityGML 3.0의 LOD를 개발하였다. LOD 0은 건물의 실내외 공간을 다중 레이어(multi-layer)인 평면 형태로 LOD 1은 건물의 시맨틱 객체를 블록 형태로 표현한다. 그리고 LOD 2는 건물의 지붕 구조, 문, 창문과 같은 구조물 요소를 입체 모델로 표현하며, LOD 3은 건물 객체를 BIM(Building Information Modelling)과 같은 건축 모델로 표현한 모델이다. CityGML 3.0은 다양한 응용 분야의 요구사항을 반영하여 유연한 LOD를 규정하고 있으나, 현재 개발된 기간이 짧고 기하, 시맨틱 객체에 대한 모호한 기준을 제시하여 응용 분야에 따른 LOD 적용에 있어 어려

울 것으로 판단된다.

국토교통부(9)10)의 디지털 트윈국토 데이터 모델 표준은 OGC의 CityGML 3.0을 기반으로 국내 제도적/기술적 특성에 맞춰 프로파일 및 확장하여 건물, 도로 등 3차원 공간정보의 구축 기준으로 활용되는 LOD를 정의하고 있다(<표 1> 참조). 디지털 트윈국토 데이터 모델의 LOD는 응용 분야의 공통된 요구사항을 바탕으로 일반사항(Generalization), 기하(Geometry Representation), 시맨틱(Semantic) 등에 객체를 프로파일링(Profile)한 4단계의 LOD 모델을 제안하였으며, 이는 실제 디지털 트윈국토의 기반이 되는 3차원 공간정보의 구축뿐만 아니라, 응용 서비스 개발에 적용하기 위한 LOD 기준으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.



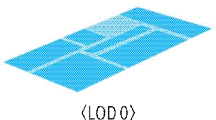
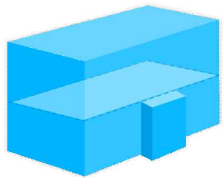
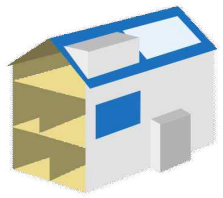

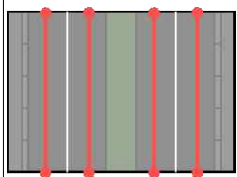


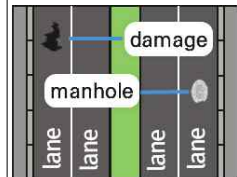
자료 : Virtual City Systems, “CityGML 3 - What’s new and What’s out there”, 2023, p.29.

(그림 3) 개선된 CityGML 3.0의 건물 LOD

9) 국토교통부, 「2021년 국가공간정보 표준화 연구」, 2021, pp.55-86.

10) 국토교통부, 「2022년 국가공간정보 표준화 연구」, 2022, pp.33-72.

〈표 1〉 디지털 트윈국토 건물과 도로 데이터 모델의 LOD

구분		LOD 0	LOD 1	LOD 2	LOD 3
건물	일반 사항	2차원 멀티 레이어	건물의 형상에 고유한 높이를 부여한 블록 모델	건물의 외형과 시설물을 함께 구체적으로 표현하는 입체 모델	건물을 현실과 유사하게 표현한 건축 모델
	기하 표현	Point, Curve, MultiSurface	Solid	MultiSurface, Solid	LOD 0~2의 모든 기하표현
	시맨틱	Building, BuildingPart, ConstructionSurface, FillingSurface, Door, Window, Room	Building, BuildingPart, ConstructionSurface, FillingSurface, Door, Window, Room	LOD 1의 시맨틱, BuildingInstallation	LOD 2의 모든 시맨틱 객체 표현
	예시	 〈LOD 0〉	 〈LOD 1〉	 〈LOD 2〉	 〈LOD 3〉
도로	일반 사항	도로를 선형 객체로 표현하는 모델	도로를 단일 객체로 보고 면형태로 표현하는 모델 (구간, 교차로 포함)	차도 수준으로 도로 객체를 표현 (보도, 중앙선 등)	차도 수준으로 도로와 시설물, 노면표시 등을 개별 객체로 표현
	기하	Point, Curve, MultiCurve	LOD 0의 기하표현, MultiSurface	LOD 1의 기하표현, MultiCurve	LOD 2의 기하표현, MultiSurface, Solid
	시맨틱	Road, Section, Intersection, Square	LOD 0의 시맨틱, TrafficSpace, TrafficArea, AuxiliaryTrafficSpace, AuxiliaryTrafficArea	LOD 1의 시맨틱, RoadFurniture, Restriction, Mark, Indication, Mark, Hole, HoleSurface, ClosureSurface	LOD 2의 모든 시맨틱 객체 표현
	예시	 〈LOD 0〉	 〈LOD 1〉	 〈LOD 2〉	 〈LOD 3〉

3. 연구방법

3차원 공간정보 응용 분야에 적합한 LOD 수준을 도출하기 위해서는 먼저, 3차원 공간정보 응용 분야에 대한 분류체계가 필요하다. 그러나 현재까지 3차원 공간정보 응용 분야와 관련된 국내외 표준이나 기술규정과 같은 공식화된 분류체계는 존재하지 않는다. 다만, 이와 관련된 다양한 연구는 다양한 형태로 진행되어 왔는데, Batty et al. (2000)는 공간 계획을 고려하여 3차원 공간정보를 활용할 수 있는 산업을 총 12개의 항목(응급의료

서비스, 도시 계획, 정보통신, 건축, 시설관리, 마케팅, 부동산, 관광, 환경, 교육, 전자 상거래, 도시 포털)으로 분류하였다. 또한, 도시 디자인 관점에서 3차원 공간정보의 응용 분야를 구분한 연구도 있으며,¹¹⁾ 최근에는 24가지 유스케이스로 응용 분야를 구분한 사례가 있다.¹²⁾ 하지만, 이 역시 지나치게 건물 중심으로 분류체계가 구성되어 있고, 분류 항목 간에도 내용이 중복되는 부분이 존재하는 문제가 있다.

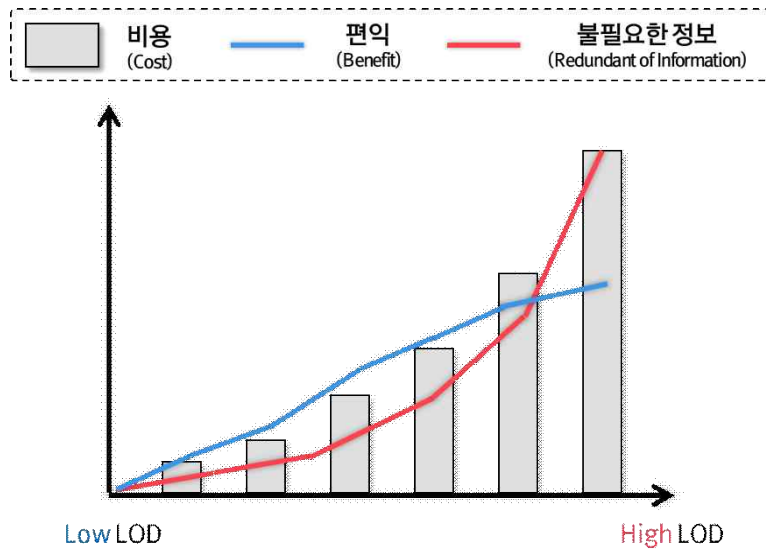
이처럼 연구 분야나 연구자별로 상이하게 3차원 공간정보 응용 분야에 대한 분류체계를 개발하

〈표 2〉 건물과 도로에 대한 3차원 공간정보 응용 분야별 최소 LOD 수준

구분	유스케이스	응용 분야	건물				도로			
			LOD0	LOD1	LOD2	LOD3	LOD0	LOD1	LOD2	LOD3
1	건물의 태양 복사 에너지 추정	태양광 패널 최적 위치 선정	-	-	✓	-	-	-	-	-
2	건물의 에너지 사용량 추정	건물 에너지 개선	-	-	✓	-	-	-	-	-
3	도시 소음 분석	교통계획, 방음벽 설치 위치 분석	-	✓	-	-	-	-	-	-
4	도시 인구 추정	도시 계획 수립	-	✓	-	-	-	-	-	-
5	3차원 입체지적	지적 측량, 부동산 등록	-	✓	-	-	-	-	-	-
6	가시권 분석	도시경관 심의, 통신탑 설치 위치 선정, 부동산 가치평가	-	✓	✓	-	-	-	-	-
7	교통 시뮬레이션	교통 상황 인식, 경로 안내, 자율주행 지원	-	✓	-	-	✓	-	✓	-
8	도시 시설물 관리	시설물 상태/위험요인 인지, 시설물 유지보수	-	-	-	✓	-	-	-	✓
9	실내외 연계	실내외 네비게이션, 재난 시뮬레이션, 대피 경로 안내, BIM to GIS 등	-	-	✓	✓	✓	-	-	✓
10	실감형 콘텐츠	3차원 가시화, 배리어 프리, 재난 상황 대응 및 모니터링, 가상 훈련 등	-	-	-	✓	-	-	-	✓

11) Chen, R., "The development of 3D city model and its applications in urban planning", 19th International Conference on Geoinformatics. IEEE, 2011, p.2.

12) Biljecki, F. et al., "Applications of 3D city models: State of the art review", ISPRS International Journal of Geo-Information, Vol.4. No.4, 2015, p.2851.



자료 : Tang, L et al., “An application-driven LOD modeling paradigm for 3D building models.”, 2020, p.6을 참조하여 재구성

(그림 4) LOD의 비용과 편익 간 관계

였으나, 상술한 바와 같이 현재까지 표준화된 체계는 부재한 실정이다. 따라서 이 연구에서는 앞서 검토한 여러 연구를 참고하여, <표 2>와 같은 유스케이스와 응용분야를 선정하고, 최소 요구되는 LOD 수준을 제시하였다. 구체적으로 이 연구에서 사용한 유스케이스는 공간 분석을 위한 3차원 공간정보의 연산 집합을 의미하고, 응용 분야는 이러한 유스케이스가 적용된 사례를 뜻한다. <표 2>와 같은 응용 분야별 최소 LOD 수준은 문헌 검토 방법을 통해 선정하였으며, 최소 LOD 수준은 앞서 살펴본 여러 LOD 모델 중 디지털 트윈 국토 데이터 모델에서 사용하는 LOD 모델을 적용하여 도출하였다.

이 연구에서 정의한 최소 LOD(minimum required LOD) 수준은 응용에 필요한 분석을 수행하기 위해 반드시 요구되는 가장 낮은 수준의 3차원 공간정보 LOD를 뜻한다. 현실 공간을 대상으로 응용을 위한 공간분석을 수행하기 위해서는 현

실과 가장 유사한 최고 수준의 LOD가 모든 공간 분석 모델에 가장 적합한 데이터가 될 것이다. 하지만, [그림 4]와 같이 LOD가 높을수록 데이터 구축 비용(cost)이 많이 소요되고 편익(benefit)은 감소하기 때문에, 모든 경우에 높은 LOD를 적용하는 것은 실용적 측면에서 매우 비효율적인 방법이다.¹³⁾ 가령, 3차원 입체지적 분야에서 건물의 권리 정보를 등록 및 관리하기 위해 건물의 외형과 실내에 대한 블록 모델이 필요하나, 실내공간을 표현하기 위해 CityGML 2.0 LOD 4를 적용하는 것은 불필요한 정보의 포함, 시스템의 성능 저하 등과 같은 문제를 발생시킬 수 있다. 또한, 응용 분야별로 최적화된 LOD(optimized LOD)를 제안할 경우, 응용 분야에 따라 최적 LOD의 기준이 다르고, 판단 과정에서 연구자의 주관이 개입될 우려가 있다. 따라서 이 연구에서는 연구 결과의 객관성을 확보하기 위해 여러 문헌을 참고하여 응용 분야별로 요구되는 최소 LO 수준을 제시하였다.

13) Tang, L. et al., “An application-driven LOD modeling paradigm for 3D building models”, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 161, 2020, p.6.

4. 응용 분야별 세밀도 수준 분석

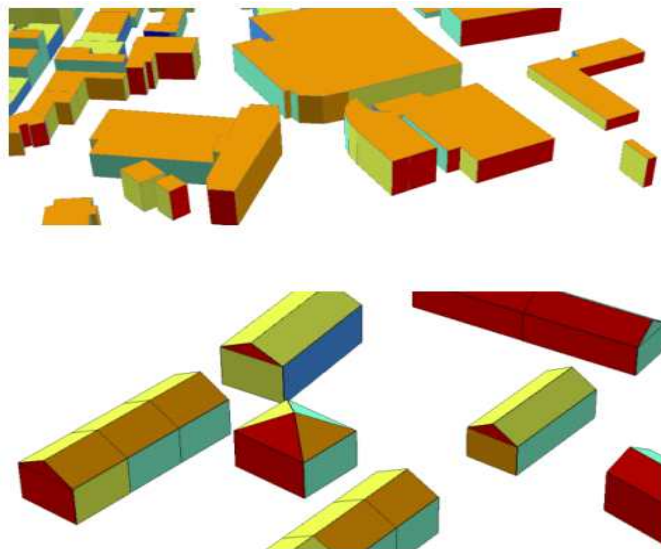
4.1 건물의 태양 복사 에너지 추정

3차원 건물에 대한 태양 복사 에너지 추정은 날짜와 시간, 그리고 음영(shadow)을 고려하여, 지붕과 벽면에 도달하는 태양 복사 에너지의 강도(W/m^2)를 측정하는 것으로, 관련 연구의 대부분은 지붕까지 표현한 LOD 2 수준의 모델을 사용한다.¹⁴⁾ Wieland et al.(2015)은 [그림 5]와 같이 동일 지역에 대해 CityGML 2.0의 LOD 1과 LOD 2 데이터를 이용하여 건물의 태양 복사 에너지를 추정하였고, 그 결과 지붕까지 표현한 LOD 2가 유의적으로 높은 정확도를 보이는 것으로 나타났다. 무엇보다 태양 복사 에너지를 가장 많이 받는 지붕은 지붕면에 따라서 다양한 값을 가질 수 있으나, 지붕의 모양을 구체적으로 묘사하지 않는 블록 형태의 LOD 1은 지붕에 도달하는 태양 복사

에너지를 하나의 수치로 일반화하기 때문에 정확한 분석을 수행하는 데 한계가 있다. 또한, 지붕까지 표현한 모델을 사용하면 지붕의 태양광 패널 설치 공간을 정확하게 도출하는 응용에도 활용할 수 있는 장점이 있다. 덧붙여, 정확한 건물의 태양 복사 에너지를 추정하기 위해 건물 주변 식생이나 건물의 이미지 또는 텍스처를 활용하는 연구도 진행되고 있다.¹⁵⁾

4.2 건물의 에너지 사용량 추정

기후변화 시대에서 건물 에너지 수요와 탄소 배출량을 추정하는 것은 도시의 에너지 낭비 요인을 개선하고, 에너지 이용의 효율성을 높이는 건물 Retrofit 정책의 과학적인 근거로 활용될 수 있다. 건물의 에너지 사용량을 추정하는 분석 모델에 따라서 사용되는 인자는 다양하지만, 건물의 체적, 층수, 건물의 타입 그리고 문과 창문의 크기는 대



자료 : Wieland, M et al., "Computing solar radiation on CityGML building data.", 2015, p.3.

(그림 5) LOD 1과 LOD 2를 이용한 건물의 태양 복사에너지 분석

14) Waqas, H et al., "An Integrated Approach for 3D Solar Potential Assessment at the City Scale.", Remote Sensing, 15.23, 2023, p.5.

15) Freitas, S et al., "Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review.", Renewable and Sustainable Energy Reviews 41, 2015, p.918.



자료 : Rossknecht and Airaksinen, “Concept and evaluation of heating demand prediction based on 3D city models and the citygml energy ADE-Case study helsinki”, 2020, p.13.

(그림 6) CityGML 2.0의 LOD 2 모델을 이용한 건물 에너지 수요 분석

부분의 모델에서 공통으로 필요한 정보이다.16) 문, 창문과 같은 Opening은 건물의 에너지 손실을 추정하는데 사용되는 매우 중요한 인자로, Rossknecht and Airaksinen(2020)은 [그림 6]과 같이 헬싱키를 대상으로 지붕까지 표현한 LOD 2 자료를 사용하여 건물 단위로 에너지 수요와 탄소 배출량을 분석했다. 다만, 분석에 중요 요소인 Opening 정보는 벽면에서 창문이 차지하는 비율 값을 이용해 간접적으로 추정하는 방식을 사용했다. 이런 측면에서, 건물의 에너지 사용량 추정 모델의 최소 LOD 수준은 지붕까지 표현된 3차원 공간정보를 이용하는 것이 가능하고, Opening과 같은 정보는 간접적으로 추정하는 것도 합리적인 접근법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

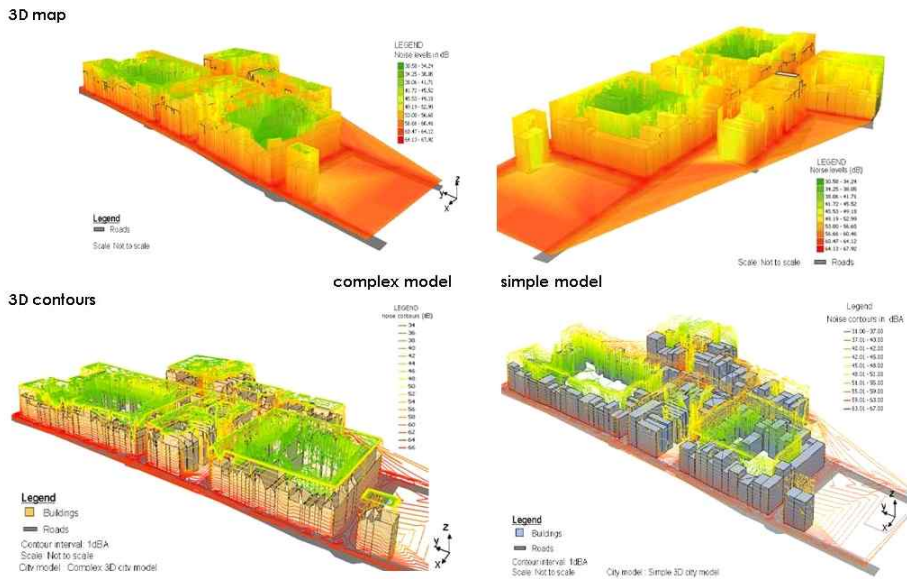
4.3 도시 소음 분석

도시 소음이 어떻게 확산하고 어떤 지역에 어느 정도의 영향을 미치는가를 분석하여, 방음벽(noise barrier)의 설치 위치를 분석하는 연구는 대부분 2

차원 공간정보를 많이 사용했다.17) 일반적으로 검증된 소음 모델(noise model)에 위성영상이나 토지피복도를 중첩하여 토지피복 유형별 소음 주제도를 많이 제작해 왔다. 하지만, 최근에는 3차원 공간정보를 이용하여 소음의 수평적 확산과 함께 수직적으로도 소음 공해의 영향도를 측정하는 것이 가능해지면서, Kurakula et al.(2007)은 소음 관측 센서를 도로 주변 건물에 층별로 설치하고, 측정값을 통해 [그림 7]과 같은 noise contour map을 제작하였다. 그리고 내삽법을 이용해 LOD 1 Block 모델에 시각화했다. LOD 관점에서 도시 소음 분석은 3차원 데이터의 시맨틱이나 기하정보가 소음 분석 모델의 인자로 직접 사용되지 않고 단순 시각화 용도로만 사용되었기 때문에 LOD와는 직접적인 관계가 없는 것으로 판단된다. 따라서 분석 모델의 정확도를 개선하기 위해 특정 시맨틱 객체나 별도의 속성 정보를 소음 모델에 추가하지 않는다면, 블록 모델이나 fine exterior 모델 모두 도시 소음 분석 결과의 시각화 용도로 가능할 것으로 판단된다.

16) Kaden, R. and Kolbe, T. H., “Simulation-based total energy demand estimation of buildings using semantic 3D city models”, International Journal of 3-D Information Modeling(IJ3DIM), Vol.3, No.2, 2014, p.39.

17) 김민호, “도로교통소음이 도시환경에 미치는 영향: 토지피복을 중심으로”, 『한국지역지리학회지』, 제19권 3호, 2013, p.541.



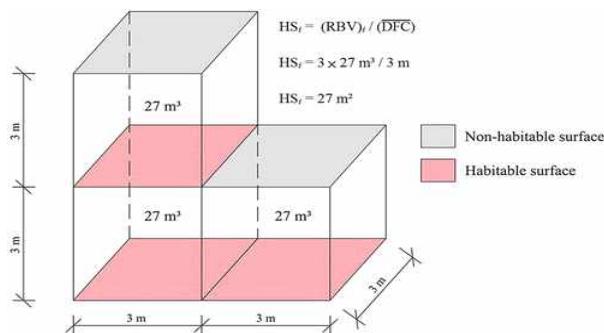
자료 : Kurakula, V. et al., “A GIS based approach for 3D noise modelling using 3D city models”, 2007, pp.57-64.

(그림 7) 3차원 공간정보를 이용한 소음 확산 모델

4.4 도시 인구 추정

도시 계획 수립에서 가장 중요한 것은 장래의 도시 인구를 정확하게 추정하는 것이다. 일반적으로 인구추정 모델은 2차원 공간정보에서 인간이 거주하는 주거지역을 추출한 면적을 기초로 인구

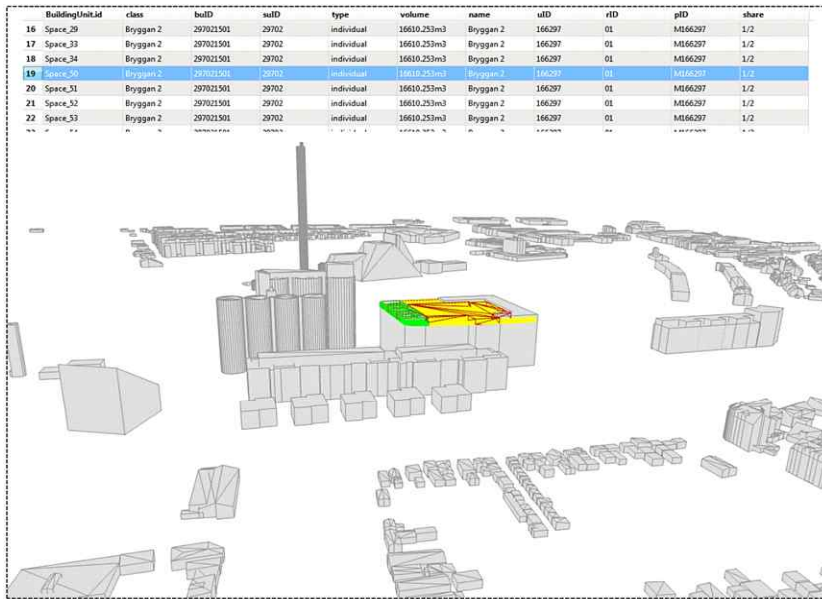
를 추정하였지만, 높은 정확도를 기대하기 어려웠다. 반면에, 3차원 건물 데이터의 체적 정보를 이용한 부피 기반 접근법은 인간이 거주하는 공간을 보다 정확한 수치로 산출할 수 있기 때문에, 기존의 2차원 자료를 이용한 면적 기반 접근법보다 높은 정확도를 갖는다.¹⁸⁾ Tomás et al.(2013)은 [그림 8]과 같이 Block 형태의 3차원 건물 데이터를



자료 : Tomás, L et al., “Urban population estimation based on residential buildings volume using IKONOS-2 images and lidar data”, 2016, p.14.

(그림 8) 인구 추정을 위한 3차원 건물의 층별 바닥 면적 추출

18) Lu, Z., Jungho, I., Lindi Q, “A volumetric approach to population estimation using LiDAR remote sensing”, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol.77, No.11, 2011, p.1146.



자료 : Sun, J. et al., "Utilizing BIM and GIS for Representation and Visualization of 3D Cadastre", 2019, p.20.

(그림 9) CityGML 3.0의 LOD 1 모델을 이용한 3차원 입체지적 분석

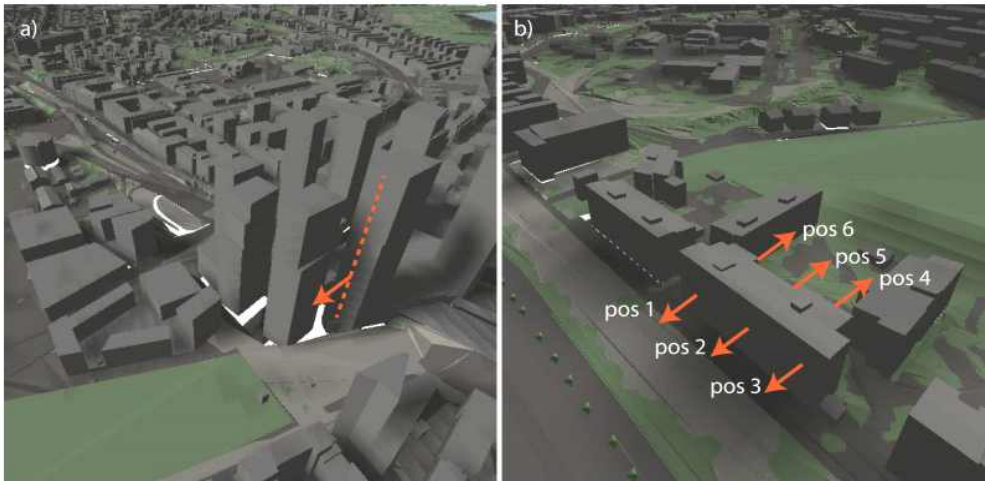
구축하고, 건물 각 층에 대한 바닥 면적을 산출하여 인구를 추정하였으며, 김병선 외(2022)는 LOD 1 건물 블록 모델의 체적값을 이용하여 안양시 인구를 추정하고, 2차원 공간정보를 사용한 사례와 분석 모델의 정확도를 비교하였다. 이러한 연구에 비추어 볼 때, 도시 인구 추정 모델은 최소 LOD 1 모델을 이용해도, 기존의 2차원 데이터에 비해 높은 정확도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

4.5 3차원 입체지적

기존의 2차원 평면 지적을 확장하여 3차원 입체지적을 등록 및 관리하는 것은 일관된 지적측량 성과를 확보하고, 각종 토지 행정업무를 지원하기 위한 기초자료로 활용될 수 있다. 3차원 입체지적은 소유자의 법적 소유 형태와 권리관계에 따라 표현 수준이 다양할 수 있으나, 일반적으로 건물의 층에 대한 LOD 1 모델에 각종 속성(지번, 소유

자, 면적, 높이 등) 정보를 입력할 수 있어야 한다.¹⁹⁾ Pouliot et al.(2018)은 항공영상, 포인트 클라우드 등의 데이터를 활용하여 건물의 층과 방, 기둥에 대한 Block Model을 구축하고, 공동소유권, 구분소유권 등에 대한 공간 단위(Spatial Unit)를 구획하여 3차원 입체지적에 대한 정보를 등록 및 시각화할 수 있는 응용 프로그램을 개발하였다. 다만, 건물의 Block Model과 권리정보를 연계하는 과정에서 정확도, 좌표계 이슈에 대한 문제를 제기하였는데, 김창완·이원희(2014)는 기술적인 관점에서 건물 모델과 권리정보를 연계하고 권리공간의 정확성을 확보하기 위해 BIM 데이터를 이용하여 건물의 세부 객체를 구축하는 것이 핵심이라고 언급하였다. 이를 토대로 Sun et al.(2019)은 [그림 9]와 같이 CityGML 3.0의 LOD 1과 BIM 데이터를 이용하여 건물의 층, 방, 구조물 등을 포함한 Block Model을 구축하여 스웨덴의 3차원 입체지적 등록 및 관리를 위한 연구를 수행했다. 이렇

19) Stoter, J., Ploeger, H., van Oosterom, P., "3D cadastre in the Netherlands: Developments and international applicability", Computers, Environment and Urban Systems, Vol.40, 2012, p.61.



자료 : Virtanen, J. P. et al., "Near real-time semantic view analysis of 3D city models in web browser", 2021, p.10.

[그림 10] 건물의 Block 모델을 이용한 도시 가시권 분석

듯, 건물의 최소 LOD 수준은 건물의 외형, 층 등을 표현한 LOD 1수준이 적합하나, 복잡한 건축물의 특징을 고려한 3차원 입체지적의 등록 및 관리를 위해서는 BIM의 구조물, 층을 추가적으로 구축하는 방식으로 응용 서비스 개발이 가능할 것으로 판단된다.

4.6 가시권 분석

가시권 분석(visibility analysis)은 도심지의 특정 지점에서 대상 영역에 대한 가시 여부를 판단하기 위한 기법으로써,²⁰⁾ 도시경관 심의,²¹⁾ 통신탑 설치,²²⁾ 부동산 가치평가²³⁾ 등에서 널리 활용되고 있다. 기존의 가시권 분석 모델은 도시 단위에서 디지털 고도 모델(DEM : Digital Elevation Model)의 고도 값을 이용하여 가시권 영역을 추정

하였으나, 인근 지형지물 및 식생의 높이 및 방향 등을 고려하지 못하여 가시권 영역의 부정확한 분석 결과를 도출하는 문제가 발생하였다. 이를 위해 Yu et al.(2007)은 주변 지형, 건물의 높이와 방향, Facade 등을 고려한 Block 형태의 3차원 건물 모델링을 수행하여 가시 영역을 추정하였으며, Virtanen et al.(2021)은 [그림 10]과 같이 3차원 건물의 Block 모델과 주변 경관을 고려하기 위해 도로, 교량, 식생 등을 포함한 토지피복도를 이용하여 가시권 분석을 수행하고 정확도를 비교 분석하였다. 해당 선행연구를 살펴보면, 가시권 분석을 수행한 응용 프로그램 개발 시 최소 건물의 LOD 1 Block 모델만을 사용하여 분석을 수행하였으나, 실제 도시경관의 복합적인 요인을 고려한 분석을 수행하기 위해서는 건물의 지붕, 외형 등을 구체적으로 표현한 LOD 2 이상의 건물 데이터와 주변

20) Bishop, I. D. and Hulse, D. W., "ediction of scenic beauty using mapped data and geographic information systems", Landscape and urban planning, Vol.30, No.1-2, 2007, p.59.

21) Virtanen, J. P. et al., "Near real-time semantic view analysis of 3D city models in web browser", ISPRS International Journal of Geo-Information, Vol.10, No.3, 2021, pp.1-23.

22) Tabik, S., Zapata, E. L., Romero, L. F., "Simultaneous computation of total viewshed on large high resolution grids", International Journal of Geographical Information Science, Vol.27, No.4, 2013, pp.804-814.

23) Yu, S. M., Han, S. S., Chai, C. H., "Modeling the value of view in high-rise apartments: A 3D GIS approach" Environment and Planning B: Planning and Design, Vol.34, No.1, 2007, pp.139-153.

식생 및 시설물에 대한 세부적인 3차원 모델이 필요하다고 언급하고 있다.

4.7 교통 시뮬레이션

도로의 주행 환경을 입체적으로 표현하여 차량과 기계 등의 교통 시뮬레이션, 자율주행 등을 지원하기 위해 3차원 교통 데이터가 활용되고 있다. 3차원 교통 데이터는 기존의 2차원 데이터에 비해 현실감 있게 구축하여 주행 환경의 다양한 상황을 직관적으로 해석하고 분석 및 예측할 수 있다는 장점이 있다.²⁴⁾ 일반적으로 교통 시뮬레이션은 교통 상황 인식, 경로 안내 등 여러 응용 모델이 복합적으로 함께 수행되는데, 이를 위해 교차로, 구간 등을 포함한 도로의 면형과 선형에 대한 입체 모델이 필요하다.²⁵⁾ Labetski et al.(2018)은 교통 분야의 다양한 응용 모델에 대한 요구사항을 비교

분석하고 CityGML 2.0 교통 모델과 LOD를 재정의하였다. 여기서, 교통 시뮬레이션을 수행하기 위한 최소 LOD는 도로의 주행 환경(차도 수준)을 표현한 LOD 2와 실제 경로 안내 등을 수행하기 위한 LOD 0 선형 모델이 복합적으로 활용된다는 것을 확인할 수 있다([그림 11] 참조). 이와 함께, 최근 도시 공간을 대상으로 건물과 도로, 도로의 주요 시설물 등을 표현한 Occupancy Map을 구축하고, 교통 시뮬레이션을 수행하여 차량 외에도 로봇의 자율주행 지원을 위한 연구도 활발히 진행되고 있다.²⁶⁾

4.8 도시 시설물 관리

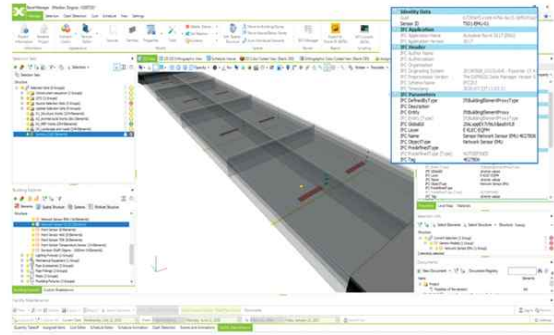
도시 시설물의 관리는 시설물의 노후화에 따른 점검, 유지보수 등을 통해 건설된 건물, 교량, 터널 등의 시설물에 대한 안전성을 확보하고, 효율적인



자료: Labetski, A. et al., “A proposal for an improved transportation model in CityGML.”, 2018, p.93.

[그림 11] CityGML 2.0 도로의 LOD 0과 LOD 2를 결합한 교통 시뮬레이션

- 24) 김병선·이희석·홍상기, “3차원 공간정보 데이터 검증을 위한 프로토타입 설계 및 구현”, 『대한공간정보학회지』, 제 28권 3호, 2020, p.40.
- 25) Beil, C. et al., “Detailed streetspace modelling for multiple applications: Discussions on the proposed CityGML 3.0 transportation model”, ISPRS International Journal of Geo-Information, Vol.9, No.10, 2020, p.11.
- 26) González, D. S. et al., “Leveraging dynamic occupancy grids for 3D object detection in point clouds”, In ICARCV 2020-16th IEEE International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, IEEE, 2020, pp.1-6.



자료 : Kang, H. Y., Nam, S. K., Hwang, J. R., Lee, J. Y., “LOD(Level of Detail) model for utilization of indoor spatial data”, 2018, p.553; Meža, S. et al., “Digital twins and road construction using secondary raw materials”, 2021, p.8.

[그림 12] 도시 시설물 관리 시스템

운영관리를 위한 체계라 할 수 있다.²⁷⁾ 기존의 시설물 관리 업무는 단순 2차원 도면정보를 활용하여 시각적 판독에 의한 시설물의 파손, 균열 등 위험요소를 확인하고 유지보수 및 점검을 진행하였기 때문에, 관리자가 시설물의 상태와 위험정도를 정확히 인지하고 유지관리 업무를 진행하는데 어려움이 존재하였다.²⁸⁾ 이를 개선하기 위해 Moshrefzadeh et al.(2015)는 건물의 Facade 정보를 바탕으로 건물에 대한 외부 구조물의 특징을 고려한 CityGML 2.0 LOD 3 수준의 3차원 건물 데이터를 구축하여 시설물 관리 모델을 제안하였으며, Kang et al.(2018)은 건물의 실내공간에 대한 응용분야를 고려한 기하, 시멘틱, 위치 정확성 등을 고려한 LOD 모델을 정의하였다. 하지만, 시설물 관리 업무에서는 실제 건물과 세부요소의 정확한 치수에 기반한 3차원 모델이 필요한데, [그림 12]와 같이 Kang et al.(2015)는 LOD 3 수준의 건물 데이터와 BIM의 세부 부재 정보를 연계한 건물의 실내외에 대한 시설물 관리 시스템을 제안하였으며, Meza et al.(2021)은 구간, 교차로 등을 포함한

도로 BIM 모델에 각종 속성(재질, 수량 등)과 센서정보를 연계하여 도로 상황 모니터링 시스템을 연구하였다. LOD 측면에서 살펴보면, 도시의 시설물 관리의 구현 수준에 따라 실제 LOD는 다양하게 적용될 수 있으나, 일반적으로 건물은 외형뿐만 아니라, 시설물, 지붕 등을 객체 단위로 표현할 수 있는 LOD 3, 도로는 차로 수준의 객체와 위험요소를 표현하기 위한 LOD 3이 최소 기준으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

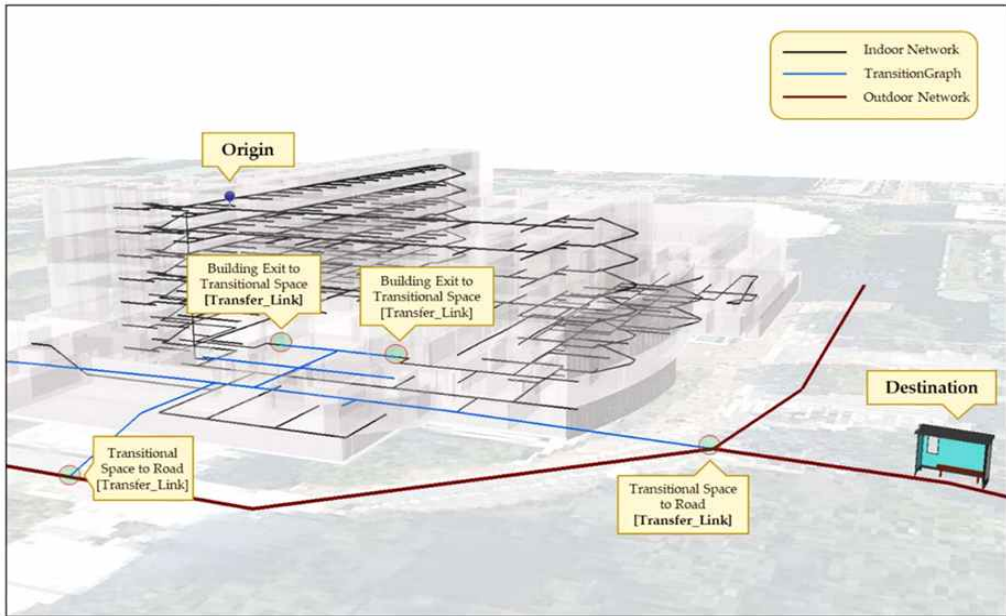
4.9 실내의 연계

3차원 공간정보는 지형, 건물의 외형 등과 같이 실외(outdoor)만을 모델링하는 것에서 실내외가 연계된 위치 기반 서비스로 활용 범위가 확장되고 있다. 여기서, 실내외 연계 서비스는 건물 단위부터 도시 단위까지 효율적으로 도시를 운영 및 관리하기 위해 실내외 네비게이션,²⁹⁾ 재난 시뮬레이션³⁰⁾ 등 다양한 영역에서 폭넓게 활용된다. 일례로, Tashakkori et al.(2015)는 건물의 방, 창문, 문

27) 민병근, “GIS를 활용한 Open API 기반의 항만시설물관리시스템 구축”, 박사학위논문, 부산대학교 대학원, 2014, p.1.

28) Zlatanova, S. and Jakob, B., “3D spatial information infrastructure: The case of Port Rotterdam”, Usage, Usability, and Utility of 3D City Models - European COST Action TU0801, 2012, p.1.

29) Claridades, A. et al., “Defining a model for integrating indoor and outdoor network data to support seamless navigation applications”, ISPRS International Journal of Geo-Information, Vol.10, No.8, 2021, p.565.



자료 : Claridades, A. et al., “Defining a model for integrating indoor and outdoor network data to support seamless navigation applications”, 2021, p.16.

(그림 13) 실내외 연계를 통한 네비게이션 서비스

등을 포함한 LOD 4 수준의 건물 실사 모델을 이용한 분석 모델을 개발하여 재난 시뮬레이션을 수행하였으며, Claridades et al.(2021)은 [그림 13]과 같이 도시를 대상으로 건물의 실내외 통합 모델과 도로의 Network model을 이용한 실내외 네비게이션을 통한 효과성을 검증하였다. 일반적으로 실내외 연계 서비스 개발 시 최소 LOD는 건물의 외부와 내부 공간과 문, 창문 등을 표현한 LOD 4, 도로의 중심선을 표현한 LOD 0이 활용되나, 도로의 경우 사용자에게 정확한 시각적인 정보를 전달하기 위해 높은 수준의 LOD 데이터를 구축하여 활용하는 것으로 나타났다. 다만, 실내외가 공간정보 서비스 개발 시 가장 큰 이슈로 구축 비용이 높다

는 단점이 존재하는데³¹⁾, 이를 해결하기 위해 CAD, BIM 등 건설정보를 변환하여 LOD 2 또는 LOD 3 수준의 건물 모델을 구축하기 위한 기술개발도 활발히 진행되고 있다.³²⁾

4.10 실감형 콘텐츠

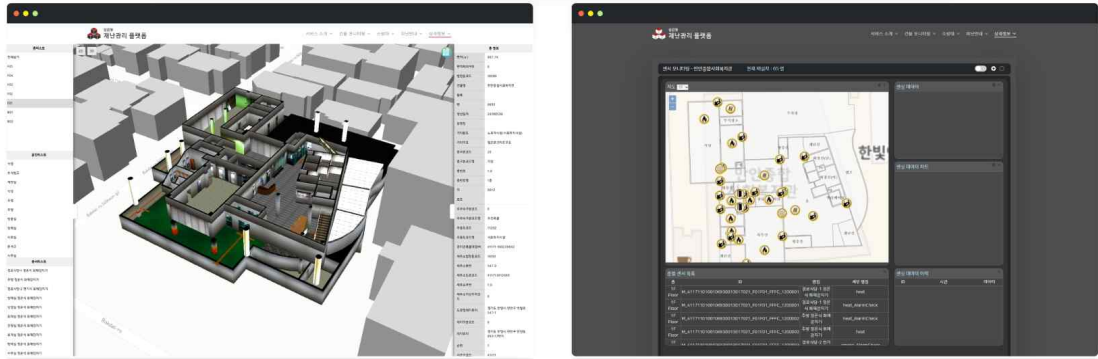
실감형 콘텐츠는 3차원 공간정보를 기반으로 현실 세계와 유사한 가상 환경을 재현하고, 가상 환경과 사용자가 상호작용하여 실제와 유사한 경험을 제공할 수 있는 서비스이다.³³⁾ 기존의 실감형 콘텐츠는 건물, 도로, 지형 등에 객체를 2차원 공간정보(항공사진, 수치지도 등)와 각종 속성정보

30) Tashakkori, H et al., “A new 3D indoor/outdoor spatial model for indoor emergency response facilitation”, Building and Environment, Vol.89, 2015, pp.170-182.

31) Hong, S, et al., “Semi-automated approach to indoor mapping for 3D as-built building information modeling”, Computers, Environment and Urban Systems, Vol.51, 2015, p.35.

32) Guo, R. et al., “Indoor Navigation Network Model Construction Method Based on Building Information Model”, Journal of Geographic Information System, Vol.15, No.4, 2023, pp.367-378.

33) OGC, “OGC Testbed-14: CityGML and AR Engineering Report”, 2019, p.16.



자료 : 행정안전부, “공간정보 기반 실감 재난관리 맞춤형 콘텐츠 제공 기술개발”, 2023, p.22.

(그림 14) 재난관리 실감형 콘텐츠 서비스

(높이, 체적 등)를 이용한 단순 3차원 가시화에 초점을 맞췄다면,³⁴⁾ 최근 들어 3차원 공간정보에 증강현실(AR: Augmented Reality), 가상현실(VR, Virtual Reality) 등의 기술을 접목한 재난관리 플랫폼,³⁵⁾ 배리어프리 콘텐츠³⁶⁾ 등으로 발전하고 있다. 김병선 외(2021)는 수치표고모델, BIM 등의 데이터를 활용하여 건물의 외관과 함께 실내공간을 포함한 LOD 3 건물 모델, LOD 3 도로 모델, 보행자의 장애요인을 식별하기 위한 LOD 3 도시시설을 구축하고, 가상현실 기반의 보행 약자의 배리어 프리 서비스 개발을 위한 연구를 수행한 바 있다. 그리고, 행정안전부(2023)는 건물의 층, 방 등을 상세히 표현한 LOD 3 수준의 실사 모델과 IoT 센서 정보 등을 바탕으로 재난 상황 대응, 재난 모니터링, 재난 발생 가상훈련 등을 위한 실감형 재난관리 콘텐츠를 개발하였다. 이렇게 선행연구를 살펴보면, 실감형 콘텐츠는 구축 대상 및 범위, 활용 사례 등에 따라 적용되는 대상과 LOD 수준이 상이할 수 있는데, 일반적으로 건물의 LOD 3 실사 모델과 도로의 LOD 3 모델 등과 같이 높은 수

준의 3차원 공간정보가 필요한 것으로 나타났다. 이와 함께, 최근 공공 및 민간에서 공간정보와 가상현실, 증강현실 등을 포괄하는 메타버스(metaverse) 개발이 게임, 관광 등 여러 산업 분야에서 확대되면서, 향후 건물과 도로 외에도 각종 도시시설, 문화재 등에 대한 높은 수준의 LOD 정보가 요구될 것으로 전망되고 있다.³⁷⁾

5. 결 론

3차원 공간정보의 LOD는 3차원 공간정보를 응용한 시스템 구축 개발의 기준이 되기 때문에, 선정된 LOD는 데이터 구축 비용과 응용 모델 개발에 큰 영향을 미친다. 하지만, LOD 선정에 기준이 되는 표준이나 기술규정에서는 서로 다른 형태로 LOD를 정의하고 있기 때문에, 사용자나 개발자 모두 응용 분야에 적합하고, 요구사항에 부합하는 3차원 공간정보 LOD를 선정하는 것은 매우 어려운 작업이다.

34) Zhang, L. et al., “Web-based visualization of large 3D urban building models”, International Journal of Digital Earth, Vol.7, No.1, 2014, pp.54-55.

35) 행정안전부, 「공간정보 기반 실감 재난관리 맞춤형 콘텐츠 제공 기술개발」, 2023, pp.1-153.

36) 김병선, 전해찬, “가상현실과 공간정보를 이용한 배리어 프리 콘텐츠 개발에 관한 연구”, 「한국콘텐츠학회논문지」, 제21권 11호, 2021, pp.193-202.

37) 울산연구원, 「메타버스를 활용한 행정혁신 방안 연구」, 2022, pp.70-85.

이러한 맥락에서 이 연구는 활용도가 높은 건물과 도로를 대상으로 3차원 공간정보의 유스케이스와 응용 분야를 고려한 최소 LOD 수준을 제시하기 위해 연구를 진행하였다. 이를 위해 3차원 공간정보의 전 생애주기 단계에서 세밀도의 역할에 대해 분석하였으며, OGC CityGML 2.0과 CityGML 3.0, 디지털 트윈국토 데이터 모델 표준의 LOD를 검토하여 3차원 공간정보의 응용 분야에 따른 LOD 기준으로 활용하기 위해 적합한 기준을 디지털 트윈국토 데이터 모델 표준으로 선정하였다. 그리고, 3차원 공간정보 응용과 관련된 방대한 양의 문헌 검토 방법을 통해 총 10가지 유스케이스와 응용 분야를 선정하였으며, 3차원 공간정보의 LOD에 따른 비용과 편익 간 관계를 분석하여 응용 분야에 따른 최소 LOD 수준의 필요성을 제시하였다. 이러한 내용을 토대로 건물의 태양 복사 에너지 추정, 건물의 에너지 사용량 추정, 도시 소음 분석, 도시 인구 추정, 3차원 입체지적, 가시권 분석, 교통 시뮬레이션, 도시 시설물 관리, 실내외 연계, 실감형 콘텐츠 등에 대한 10가지 유스케이스에 대한 전반적인 개요 및 특징, LOD 관점의 요구사항 등을 분석하여 주요 응용 분야와 최소 LOD 수준을 도출하였다.

이 연구의 의의와 향후 과제를 정리하면 다음과 같다. 첫째, 3차원 공간정보를 이용하여 응용 시스템을 개발할 경우, 이 연구는 LOD 선정의 중요성에 대한 사용자의 인식과 이해를 높이는 데 기여할 것이다. 둘째, 이 연구에서 제시한 최소 LOD 수준은 응용 시스템 구축의 참고자료로 사용될 수 있다. 특히, 많은 사용자들이 높은 LOD를 선호하고 있으나, 공간정보 응용 분야는 도시나 광역 또는 전국 단위 등 넓은 지역을 대상으로 수행하는 경우가 많다. 따라서 응용에 부합하고 데이터 구축 비용 등을 고려한 최적의 LOD를 선정하는 데 있어서, 이 연구에서 제시한 최소 LOD 수준은 사용자의 의사결정에 중요한 참고자료가 될 수 있을 것으로 판단된다. 셋째, 3차원 공간정보 LOD에 대한 공통된 규격이 마련되어야 한다. 데이터 구축

이나 응용 시스템 개발에서 LOD는 중요성이 매우 높으므로, 제도 개선을 통해 관련된 표준과 기술 규정을 일관된 형식으로 통일해야 할 것이다.

하지만, 이 연구는 공간정보 분야에서 적용되는 디지털 트윈국토 데이터 모델 표준의 LOD를 기반으로 응용 분야별 최소 LOD 수준을 제시하였으나, 디지털 트윈, 스마트시티 등에서 폭넓게 활용되는 BIM 등 다양한 유형의 데이터를 고려하지 못하였다는 한계가 존재한다. 향후에는 응용 분야별 최소 수준 LOD의 실용성을 높이기 위해 공공과 민간 등에서 활용도가 높은 다양한 유형의 데이터의 특징을 고려한 응용 분야별 최소 LOD 수준을 분석하여 연계 및 활용할 수 있는 최소한의 가이드라인을 제시할 수 있는 연구를 진행하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 디지털 국토정보 기술개발사업 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2022-00142501).

<참고문헌>

1. 국토교통부, 「2021년 국가공간정보 표준화 연구」, 2021.
2. _____, 「2022년 국가공간정보 표준화 연구」, 2022.
3. 국토지리정보원, 「3차원국토공간정보구축작업 규정」, 2019.
4. 김민호, “도로교통소음이 도시환경에 미치는 영향: 토지피복을 중심으로”, 『한국지역지리학회지』, 제19권 3호, 2013.
5. 김병선·김걸, “한국의 3차원 도시 모델 이슈와 정책적 개선 방안 연구”, 『한국도시지리학회지』, 제23권 3호, 2023.

6. 김병선·이희석·신동빈, “3차원 공간정보 세밀도 사양 개발에 관한 연구”, 『대한공간정보학회지』, 제31권 4호, 2023.
7. 김병선·이희석·홍상기, “3차원 공간정보 데이터 검증을 위한 프로토타입 설계 및 구현”, 『대한공간정보학회지』, 제28권 3호, 2020.
8. _____, “CityGML 3.0 ADE를 이용한 데이터 모델 개발 방법에 관한 연구”, 『대한공간정보학회지』, 제30권 3호, 2022.
9. 김병선·전해찬, “가상현실과 공간정보를 이용한 배리어 프리 콘텐츠 개발에 관한 연구”, 『한국콘텐츠학회논문지』, 제21권 11호, 2021.
10. 김병선·전해찬·신동빈, “건물 부피와 토지이용정보를 이용한 인구추정 모델 개발 및 정확도 분석”, 『대한공간정보학회지』, 제30권 4호, 2022.
11. 김창완·이원희, “공간정보로서의 지적정보와 건물정보의 연계에 관한 연구”, 『한국지리정보학회지』, 제17권 3호, 2014.
12. 민병근, “GIS를 활용한 Open API 기반의 항만 시설물관리시스템 구축”, 박사학위논문, 부산대학교 대학원, 2014.
13. 울산연구원, 『메타버스를 활용한 행정혁신 방안 연구』, 2022.
14. 행정안전부, 『공간정보 기반 실감 재난관리 맞춤형 콘텐츠 제공 기술개발』, 2023.
15. Batty, M. et al., “Visualizing the city: communicating urban design to planners and decision-makers”, 2001.
16. Beil, C. et al., “Detailed streetspace modelling for multiple applications: Discussions on the proposed CityGML 3.0 transportation model”, ISPRS International Journal of Geo-Information, Vol.9, No.10, 2020.
17. Biljecki, F. et al., “Applications of 3D city models: State of the art review”, ISPRS International Journal of Geo-Information, Vol.4. No.4, 2015.
18. Bishop, I. D. and Hulse, D. W., “Prediction of scenic beauty using mapped data and geographic information systems”, Landscape and urban planning, Vol.30, No.1-2, 1994.
19. Chen, R., “The development of 3D city model and its applications in urban planning”, 19th International Conference on Geoinformatics. IEEE, 2011.
20. Claridades, A. et al., “Defining a model for integrating indoor and outdoor network data to support seamless navigation applications”, ISPRS International Journal of Geo-Information, Vol.10, No.8, 2021.
21. Freitas, S et al., “Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews 41, 2015.
22. González, D. S. et al., “Leveraging dynamic occupancy grids for 3D object detection in point clouds”, In ICARCV 2020-16th IEEE International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, IEEE, 2020.
23. Guo, R. et al., “Indoor Navigation Network Model Construction Method Based on Building Information Model”, Journal of Geographic Information System, Vol.15, No.4, 2023.
24. Hong, S, et al. “Semi-automated approach to indoor mapping for 3D as-built building information modeling”, Computers, Environment and Urban Systems, Vol.51, 2015.
25. Kaden, R. and Kolbe, T. H., “Simulation-based total energy demand estimation of buildings using semantic 3D city models”, International Journal of 3-D Information Modeling(IJ3DIM), Vol.3, No.2, 2014.
26. Kang, H. Y., Nam, S. K., Hwang, J. R., Lee, J. Y., “LOD (Level of Detail) model for utilization of indoor spatial data”, Journal of

- the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography, Vol.36, No.6, 2018.
27. Kang, T. W. and Hong, C. H., "A study on software architecture for effective BIM/GIS-based facility management data integration", *Automation in construction*, Vol.54, 2015.
 28. Kurakula, V. et al., "A GIS based approach for 3D noise modelling using 3D city models", Enschede, The Netherlands: ITC, 2007.
 29. Labetski, A. et al., "A proposal for an improved transportation model in CityGML", *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42, 2018.
 30. Lu, Z., Jungho, I., Lindi Q., "A volumetric approach to population estimation using LiDAR remote sensing", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol.77, No.11, 2011.
 31. Meža, S. et al. "Digital twins and road construction using secondary raw materials", *Journal of Advanced Transportation* 2021, 2021.
 32. Moshrefzadeh, M., Andreas, D., Kolbe, T. H., "A CityGML-based façade information model for computer aided facility management", *Bridging Scales-Skalenübergreifende Nah- und Fernerkundungsmethoden*, 35. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF. 2015.
 33. OGC, "OGC Testbed-14: CityGML and AR Engineering Report", 2019.
 34. _____, "OGC City Geography Markup Language (CityGML) encoding standard", 2012.
 35. _____, "OGC City Geography Markup Language (CityGML) Part 1: Conceptual Model Standard", 2021.
 36. Pouliot, J. et al., "3D Cadastres Best Practices, Chapter 5: Visualization and New Opportunities", *International Federation of Surveyors (FIG)*, 2018.
 37. Rossknecht, M. and Airaksinen, E., "Concept and evaluation of heating demand prediction based on 3D city models and the citygml energy ADE-Case study helsinki", *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Vol.9, No.10, 2020.
 38. Stoter, J., Ploeger, H., van Oosterom, P., "3D cadastre in the Netherlands: Developments and international applicability", *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol.40, 2012.
 39. Sun, J. et al., "Utilizing BIM and GIS for Representation and Visualization of 3D Cadastre", *ISPRS International journal of geo-information*, Vol.8, No.11, 2019.
 40. Tabik, S., Zapata, E. L., Romero, L. F., "Simultaneous computation of total viewshed on large high resolution grids", *International Journal of Geographical Information Science*, Vol.27, No.4, 2013.
 41. Tang, L. et al., "An application-driven LOD modeling paradigm for 3D building models", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 161, 2020.
 42. Tashakkori, H et al., "A new 3D indoor/outdoor spatial model for indoor emergency response facilitation", *Building and Environment*, Vol.89, 2015.
 43. Tomás, L. et al., "Urban population estimation based on residential buildings volume using IKONOS-2 images and lidar data", *International Journal of Remote Sensing*, Vol.

- 37, 2016.
44. Virtanen, J. P. et al., "Near real-time semantic view analysis of 3D city models in web browser", ISPRS International Journal of Geo-Information, Vol.10, No.3, 2021.
45. Virtual City Systems, "CityGML 3 - What's new and What's out there", 2023.
46. Waqas, H. al., "An Integrated Approach for 3D Solar Potential Assessment at the City Scale", Remote Sensing, Vol.15, No.23, 2023.
47. Wieland, M. et al., "Computing solar radiation on CityGML building data", 18th AGILE international conference on geographic information science, 2015.
48. Worboys, M. F. and Duckham, M., "GIS: a computing perspective. CRC press", 2004.
49. Yu, S. M., Han, S. S., Chai, C. H., "Modeling the value of view in high-rise apartments: A 3D GIS approach", Environment and Planning B: Planning and Design, Vol.34, No.1, 2007.
50. Zhang, L. et al., "Web-based visualization of large 3D urban building models", International Journal of Digital Earth, Vol.7, No.1, 2014.
51. Zlatanova, S. and Jakob, B., "3D spatial information infrastructure: The case of Port Rotterdam", Usage, Usability, and Utility of 3D City Models - European COST Action TU0801, 2012.

(접수일 2024.01.31., 심사일 2024.03.12., 심사완료일 2024.03.22.)