

# 설계단계 시공성 평가를 위한 BIM기반 설계 복잡성 지표화 연구

## Development of a BIM-Based Design Complexity Index for Constructability Evaluation in the Design Phase

○ 정 윤 영\*      우 효 림\*      김 아 란\*      김 태 완\*\*  
Jung, Yun-Young      Woo, Hyo-Rim      Kim, A-Ran      Kim, Tae-Wan

### Abstract

The purpose of this study was to develop BIM-based design complexity indicators for constructability evaluation in the design phase. A total of 337 constructability criteria were collected and filtered to 61 BIM-applicable items, from which four categories—shape, façade, plan, and detail complexity—were defined. Algorithms were implemented in Revit and Dynamo to extract geometric information such as wall inclination, curvature, and opening repetition. Application to low-, medium-, and high-complexity models showed clear differences in scores, and an AHP survey confirmed the relative importance of the four categories. The results demonstrate that the proposed indicators can quantitatively evaluate constructability and support effective decision-making in BIM-based project delivery.

키워드 : BIM, 시공성, 설계 복잡성, 지표화, Dynamo

Keywords : BIM, Constructability, Design Complexity, Index Development, Dynamo

### 1. 서론

#### 1.1 연구 배경 및 목적

건설 프로젝트는 공기, 품질, 비용, 안전 등 다양한 목표를 동시에 달성해야 하며, 이를 위해 설계단계에서의 시공성 검토가 필수적이다(Oh 외, 2002). 그러나 시공성은 여전히 명확한 정의가 부족하며, 국내 실무 역시 경험에 크게 의존하고 있어 설계자가 활용할 수 있는 체계적 기준이 부족하다. 이러한 한계를 보완할 대안으로 BIM(Building Information Modeling)이 주목받고 있으나, 실제 적용 가능한 검토 기준과 자동화 체계는 아직 미비하다. 이에 본 연구는 시공성을 지식과 경험을 통합하는 관리 개념으로 정의하고, BIM 데이터를 활용해 설계 복잡성과 시공성의 상관관계를 분석하며, 건물의 시공 난이도를 ‘설계 복잡성 지표’로 수치화하는 자동 평가 모델을 제안한다.

#### 1.2 연구 범위 및 방법

본 연구는 BIM 기반 설계단계 시공성 평가를 위한 체계적 지표를 마련하고자, 문헌에서 제안된 검토 기준을 수집·정리한 뒤 중복을 제거하고, 세 가지 기준을 적용하여 61개를 선별하였다. 이후 유사 개념을 통합해 ‘설계 복잡성’ 지표를 정립하고, 형상·파사드·평면·디테일 복잡성의 네 범주로 구분하였다.

형상 복잡성: 벽체 기울기와 곡률에 따른 복잡성

파사드 복잡성: 개구부의 정렬성과 반복성

평면 복잡성: 벽체 및 공간 배치의 일관성

디테일 복잡성: 요소의 형태와 분포 다양성

평가 항목은 LOD 300 수준에서 확인 가능한 정보를 중심으로 구성되었으며, 각 항목은 수식화하여 정량화할 수 있도록 하고 Autodesk사의 Revit Dynamo를 통해 자동 추출이 가능하도록 구현하였다.

또한 AHP(Analytic Hierarchy Process)를 활용해 네 범주의 상대적 중요도를 전문가 설문으로 도출하고, 산출된 가중치를 반영하여 최종 지표를 산정하였다. 이 과정에서 일관성 검토를 통해 결과의 신뢰성을 확보하였으며, 마지막으로 시공 난이도가 다른 세 개의 BIM 모델에 적용해 복잡성 점수를 비교·분석함으로써 지표의 실효성을 검증하였다. 연구 절차는 그림 1에 제시하였다.

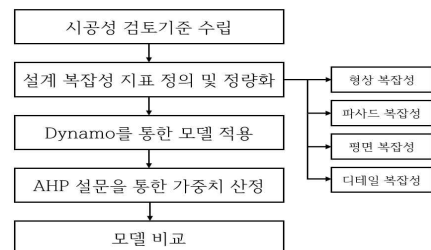


그림 1. 연구 절차 과정

### 2. 시공성 검토 기준

#### 2.1 시공성 정의

시공성은 초기에는 설계 도면의 완성도와 시공 편의성에 한정되었으나, 점차 프로젝트 전 단계에서 지식과 경험을 통합해 성과를 높이는 전략적 개념으로 확장되었다. 국

\* 인천대 도시건축학부 학사과정

\*\* 인천대 도시건축학부 교수, 공학박사

(Corresponding author : Division of Architecture and Urban Engineering, Incheon National University, taewkim@inu.ac.kr)

내외 연구 역시 설계 초기부터 시공성을 반영하고 실무 지식을 통합할 필요성을 강조한다. 이에 본 연구는 시공성을 프로젝트 전 단계에서 지식과 경험을 통합하여 생산성을 높이고, 설계단계부터 정보가 연계되는 통합적 관리 개념으로 정의한다.

## 2.2 설계안의 시공성 검토 기준 수집 및 선별

본 연구는 BIM 기반 설계단계 시공성 평가 지표를 구축하고자 국내외 문헌 약 10편을 검토하였으며, 중복을 제거하고 유사 개념을 정리한 결과 건축·구조·시공·설비 등 다양한 분야를 포함하는 337개의 기준을 도출하였다. 그러나 단순한 나열만으로는 활용이 어려워, BIM 구현 가능성·설계단계 검토 가능성·IFC 표현 가능성의 세 가지 기준을 적용하여 최종 61개의 기준을 선별하였다.

하지만 선별된 기준 61개를 모두 개별적으로 자동화하기에는 한계가 있었고, 일부는 유사한 속성을 공유하였다. 이에 본 연구는 이를 묶어 대표 지표인 ‘설계 복잡성’을 설정하였다. 설계 복잡성은 다양한 시공성 요소를 포괄하면서도 형상과 구성에 기반해 정량화가 가능하므로, BIM 환경에서 자동 평가 지표로 활용하기에 적합하다.

## 3. 설계 복잡성 지표

### 3.1 형상 복잡성

벽체 기울기가 시공성에 미치는 영향을 정량화하기 위해, 수직 대비 기울기 파라미터 값을 자동 추출하고 거꾸집 설계 및 구조 안전 기준을 반영하여 0° - 15° 구간의 평가 알고리즘을 제시하였다 (FHWA-NHI-10-024 Vol.I).  $\theta > 5^\circ$  경우 특수 보조 장비가 (SoloForm™ Application Guide),  $\theta \geq 15^\circ$  경우 구조 보강이 요구되므로, 다음과 같이 해당 구간에서 선형보간한 정규화 지표를 사용하였다.

$$T(\theta) = \begin{cases} 0 & \theta \leq 0 \\ 0.02 \cdot \theta & 0 < \theta \leq 5 \\ 0.1 + 0.09 \cdot (\theta - 5) & 5 < \theta \leq 15 \\ 1 & \theta > 15 \end{cases}$$

T: 벽체 기울기 지표

계산된 지표는 0-1범위로 도출되며, 0에 가까울수록 벽체 기울기가 작아 시공성이 높음을 의미한다.

벽체 곡률은 벽체 중심선의 굴곡 정도를 정량화한 값이다. 모델에서 추출한 벽체 중심선 곡선을 3D 셀 곡률 반지름 개념에서 착안한 2D 곡률 계산 방식으로 반지름 R을 구한 뒤 곡률  $k=1/R$ 로 변환하였다(Kimura와 5인,2024) (그림 2).

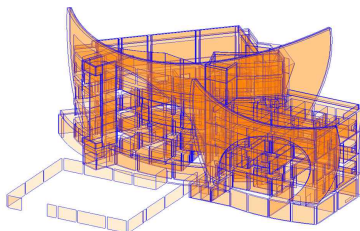


그림 2. 벽체 곡률 형상 추출 Dynamo 실행 Revit 화면  
<표 1>과 같이 곡률에 따른 임계값에 따라 등급을 구분

하고 아래 수식으로 구간별 선형 정규화를 진행하였다.

표 1. 곡률별 시공성 등급 기준 (단위: mm)

| 등급     | 곡률 반지름 R             | 곡률 k                          | 시공 공법         |
|--------|----------------------|-------------------------------|---------------|
| Low    | $R \geq 8000$        | $k \leq 0.000125$             | 일반 평판 사용 가능   |
| Medium | $6000 \leq R < 8000$ | $0.000125 < k \leq 0.0001667$ | 탄성 굽힘, 프레스 성형 |
| High   | $R < 6000$           | $k > 0.0001667$               | 유연 합판, 폴리곤 성형 |

$$C_i = \begin{cases} 0 & k_i \leq k_{low} \\ \frac{k - k_{low}}{k_{high} - k_{low}} & k_{low} < k_i < k_{high} \\ 1 & k_i \geq k_{high} \end{cases}$$

$$k_{low}=0.000125, k_{high}=0.0001667,$$

$$k_i=1/R \text{ (곡률 반지름 기준, 단위: 1/mm)}$$

이후 실제 시공 영향도를 반영하기 위해 벽체 면적 비율로 가중하여 가중 곡률 지표 C로 통합하였다.

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i \times A_i)}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

C: 가중 곡률 지표,  $C_i$ : 곡률 지표,  $A_i$ : 벽체 면적

이 지표는 0-1 범위로, 값이 0에 가까울수록 곡률 영향이 적어 시공성이 양호함을 의미한다.

### 3.2 파사드 복잡성

개구부 정렬성은 개구부가 수평/수직으로 일정 선상, 간격에 배열된 정도로 정의한다. 정렬성이 높을수록 비정형 작업이 감소되어 시공성이 향상된다. 정렬성 판정을 위해 모델의 개구부 중심좌표( $x_i, y_i$ )를 추출하고, 축별 인접 간격의 중앙값으로 임계거리  $d_{th}$ 를 산정한 후  $d_{th}$ 이내의 점들을 클러스터링하여 정렬 그룹을 도출하였다.

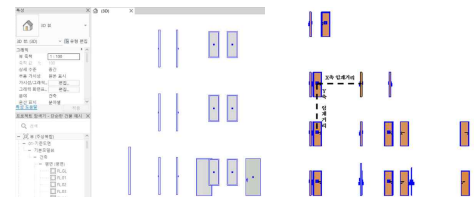


그림 3. 정렬성 분석을 위한 임계거리 계산

이후 그룹 규모와 그룹 중심으로부터 편차를 각각 정규화한 정렬일관성  $E_c$ 과 위치신뢰도  $E_r$ 에 상대적 비중을 두어 개구부 정렬성 지표  $E_g$ 를 산출하였다 (Li와 3인,2020).

$$E_g = \lambda_1 E_c + \lambda_2 E_r (\lambda_1 = 1.0, \lambda_2 = 0.5)$$

$E_g$ : 개구부 정렬성 지표,  $E_c$ : 정렬일관성,  $E_r$ : 위치신뢰도

개구부 정렬성 지표  $E_g$ 는 0-1범위로 계산되며, 0에 가까울수록 정렬성이 높은 배치임을 나타낸다.

파사드의 동일 규격 개구부 반복이 시공성에 미치는 영향을 정량화하기 위해, 개구부의 네 꼭짓점을 자동 추출하여 치수쌍(W×H)을 산출하고 유형별 빈도를 집계하는 알고리즘을 구축하였다 (Recheis, 2009) (그림 4).

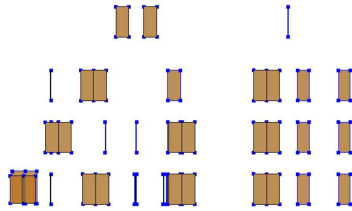


그림 4. Dynamo 사용 개구부 형상 크기 추출

계산을 위해 분포 집중도를 나타내는 HHI(Herfindahl-Hirschman Index)<sup>1)</sup>방식을 사용하고, 1-HHI로 반복성이 높을수록 시공 복잡성이 낮아짐을 지표에 반영하였다.

$$D = 1 - \sum_{k=1}^n \left( \frac{f_k}{N} \right)^2$$

N: 전체 개구부 수,  $f_k$ : k번째 개구부 유형의 빈도,

D: 개구부 반복성 지표

이 지표는 0-1 범위에서 비교 가능성을 확보하며, 개구부 반복성이 시공성의 정량적 판별에 유효함을 시사한다.

### 3.3 평면 복잡성

층별 레이아웃 변화는 상·하층 내벽 배치의 일치 정도를 수치화한 지표이다. IoU<sup>2)</sup>개념을 적용하여 겹친 영역을 합집합 영역으로 나눈 후, 이를 1에서 차감하여 값이 0에 가까울수록 동일한 배치, 1에 가까울수록 불일치가 큰 배치를 의미하도록 정의하였다.

$$d_i(\text{레이아웃 변화}) = 1 - \frac{(B_i \cap B_{i-1})}{(B_i \cup B_{i-1})}$$

본 연구는 레이아웃 변화 값의 층별 산정값의 평균을 종합하여, 내벽 배치 패턴이 시공성 난이도에 미치는 영향을 정량적으로 나타내었다. 평면 모듈화에서 Ray Casting<sup>3)</sup>은 본 연구에서는 BIM 모델 룸 외곽을 추출한 후 각 룸의 중심에서 수직선을 쏘아 모듈 간의 실제 물리적 간격을 추출하는 데 사용한다(그림 5).

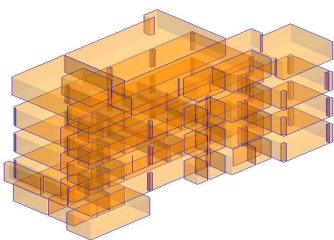


그림 5. Dynamo 사용 룸 경계 추출

RI (반복 강도) =  $\pm 10\%$  구간에 속하는 거리 합 / 전체 거리 합  
SC (크기 일관성) =  $1 - \min(\sigma/\mu, 1)$

1) HHI: Herfindahl-Hirschman Index: 분포의 집중도를 수치로 나타내는 지표. 본 연구에서는 해석 방향의 일관성을 위해 반복성 지표를 1-HHI로 사용하였다.

2) IoU=겹친 영역을 합집합 영역으로 나누어 유사도를 측정하는 지표

3) Ray Casting = 평면 또는 3차원 공간에서 특정 방향으로 직선을 투사하여, 구조물의 경계나 요소와 교차하는 지점을 계산하는 방식

$$M_i(\text{모듈화 지수}) = 0.5 \cdot SC_i + 0.5 \cdot RI_i$$

$$M_{all}(\text{건물 전체 모듈화 지수}) = \frac{\sum_{i=1}^{N_f} (A_i \cdot M_i)}{\sum_{i=1}^{N_f} A_i}$$

$$\text{평면 모듈화} = 1 - M_{all}$$

$i$  = 층,  $(1 \leq i)$   $A$  = 층 면적

크기 일관성과 반복 강도를 합하여 모듈화 지수  $M$ 을 구한다. 또, 층별로 사용 용도가 다르거나 면적이 다를 수 있기에 각 층별로 모듈화 지수를 구한 후, 층별 면적 가중치를 곱하여 평면 모듈화 지표를 산출한다.

### 3.4 디테일 복잡성

인스턴스 분포 정도는 LOD 300 수준 모델에서 추출이 가능한 대표 인스턴스인 문, 창, 가구, 일반모델로 인스턴스 분포도를 파악하였다(그림 6).

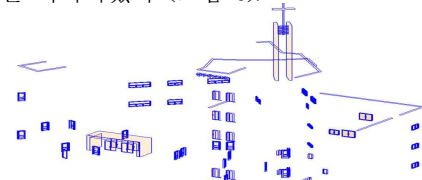


그림 6. 추출된 LOD300 수준 인스턴스

부품 분포는 평균 대비 표준편차의 비율인 CV(계수변동계수)로 측정하였으며, CV 값이 작을수록 고르게 분포된 상태, 클수록 특정 부품에 집중된 상태를 의미한다. 아래식을 보면, 이를 0~1 범위로 정규화한 후 1에서 차감하여 값이 1에 가까울수록 다양한 인스턴스가 균형 있게 분포된 복잡한 상태로 해석하였다.

$$H = \frac{CV}{CV+1}$$

$$\text{인스턴스 분포 정도} = 1 - \left( \frac{CV}{CV+1} \right)$$

CV = 계수 변동 계수

H = 0에서 1 사이의 식이 나오기 위한 계산과정.

즉, 인스턴스 분포 정도 지표는 부품의 다양성과 분포 균형성을 기반으로 설계의 조립 복잡성을 정량화하기 위한 지표로 기능한다.

다음으로, 요소 복잡도에서 고려할 요소 또한 LOD 300 수준에서 추출 가능한 일반모델, 문, 창, 가구 등을 포함한다. 여기에 더해, 전체 기하 복잡도에 가장 큰 비중을 차지하는 벽·바닥·지붕 등 건물 외피와 구조 기둥·보까지 포함하여 구조 복잡성을 포함한 지표로 나타내었다.

요소 복잡도는 아래 수식을 통해 정량화하였으며 본래의 식(권순조 외 3인, 2015)에서 스케일업한 건물을 대입하는 것이므로, CEmax(임의의 수)는 BIM 모델의 요소 복잡도를 0에서 1의 수로 나타내는 100,000으로 선정하였다.

$$CE(\text{요소 복잡도}) = \frac{(C_s + C_c)}{CE_{\max}}$$

CE = 요소 복잡도,  $C_s$  = 표면타입별 개수를 더한 값

$C_c$  = 곡선 타입별 개수를 더한 값,  $CE_{\max} = 100,000$

CE값이 1에 가까울수록 해당 모델은 곡면, 모서리, 다양한 표면으로 구성된 복잡한 요소들로 이루어졌음을 의미하며, 이는 시공성 저하 요인으로 작용할 수 있다.

### 3.5 AHP 설문

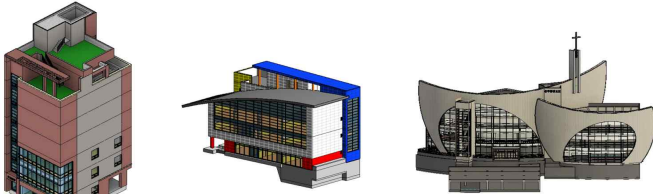
본 연구는 BIM 설계단계 시공성 영향 요인의 상대적 중요도를 파악하기 위해 1~9 척도의 AHP 설문을 실시하였다. BIM관련 프로젝트 경력이 있는 10명의 결과가 반영되었다. <표 2>와 같이 최종 가중치 산정결과를 정리하였다.

표 2. 가중치 산정

| 카테고리    | 가중치, $\omega$ |
|---------|---------------|
| 형상 복잡성  | 0.24          |
| 파사드 복잡성 | 0.16          |
| 평면 복잡성  | 0.41          |
| 디테일 복잡성 | 0.19          |
| 합계      | 1.00          |

### 4. 설계 모델 구축 및 평가

그림 7은 저·중·고 복잡도 모델 예시로, 저복잡도는 단순한 형상과 균일한 내력벽 배치를 특징으로 하며, 중복잡도는 정형 평면에 일부 비정형 입면·지붕 요소가 포함된 형태이다. 고복잡도는 곡면 파사드와 곡률을 가진 벽체, 비대칭 매스로 구성되어 높은 복잡도를 나타낸다.



(1)저복잡도 모델 (2)중복잡도모델 (3)고복잡도 모델  
그림 7. 복잡도별 BIM 모델

<표 3>의 모델 비교 결과, 세 모델은 각각 0.38, 0.44, 0.64로 나타나 예측한 복잡도 수준과 일치하였다. 본 연구에서 제안한 지표가 설계안의 형상 및 구성에 따른 시공 부담 정도를 효과적으로 반영하고 시공성과 정량적으로 연관됨을 입증하며 평가 지표의 적용 가능성과 신뢰성을 검증하였다.

표 3. 모델 비교

|     | 저복잡도 모델                | 중복잡도 모델                | 고복잡도 모델                |
|-----|------------------------|------------------------|------------------------|
| 형상  | 곡률 0                   | 곡률 0                   | 곡률 0.21                |
|     | 벽체 기울기 0               | 벽체 기울기 0               | 벽체 기울기 0.12            |
|     | $0 \cdot 0.24=0$       | $0.00 \cdot 0.24=0.00$ | $0.17 \cdot 0.24=0.04$ |
| 파사드 | 정렬성 0.19               | 정렬성 0.15               | 정렬성 0.75               |
|     | 복잡성 0.24               | 복잡성 0.19               | 복잡성 0.94               |
|     | $0.22 \cdot 0.16=0.03$ | $0.17 \cdot 0.16=0.03$ | $0.85 \cdot 0.16=0.14$ |
| 평면  | 레이아웃 0.59              | 레이아웃 0.69              | 레이아웃 0.9               |
|     | 모듈화 0.83               | 모듈화 0.95               | 모듈화 0.86               |
|     | $0.71 \cdot 0.41=0.29$ | $0.82 \cdot 0.41=0.34$ | $0.88 \cdot 0.41=0.36$ |
| 디테일 | 인스턴스 0.36              | 인스턴스 0.54              | 인스턴스 0.52              |
|     | 요소 0.22                | 요소 0.27                | 요소 0.55                |
|     | $0.29 \cdot 0.19=0.06$ | $0.41 \cdot 0.19=0.08$ | $0.54 \cdot 0.19=0.10$ |

|       |      |      |      |
|-------|------|------|------|
| 설계복잡성 | 0.38 | 0.44 | 0.64 |
|-------|------|------|------|

### 5. 결론

본 연구는 기존의 정성적·경험적 시공성 평가의 한계를 정량적으로 보완하기 위해, 선행연구의 기준을 61개로 선별하고 이를 형상·파사드·평면·디테일의 네 범주로 구조화한 설계 복잡성 지표를 제안하였다. 각 지표는 Revit-Dynamo 환경에서 0-1 범위로 자동 산출할 수 있도록 구현되었으며, AHP 설문을 통해 범주별 중요도를 반영하여 최종 지표의 합리성을 확보하였다. 복잡도 수준이 다른 BIM 모델에 적용한 결과, 산출값이 사전 예측과 일치하여 제안 지표의 타당성이 검증되었다. 다만 사례 검증의 범위가 제한적이므로, 향후 다양한 프로젝트와 실제 시공 데이터와의 연계 검증이 요구된다.

본 연구는 기존 시공성 기준을 정량화하여 실제 BIM 프로젝트에 적용함으로써 시공성 평가의 수치적 활용 가능성을 입증하였다. 제안된 지표는 설계 초기 단계에서 시공 리스크를 객관적으로 예측할 수 있는 판단 근거를 제공하며, 설계·시공 간 불일치를 줄이고 복잡성 요소를 사전에 진단하여 보다 용이한 시공과 품질 향상에 기여할 수 있는 실용적 도구로 평가된다.

### 참고문헌

- 권순조, 김병철, 문두환, 한순홍, 2015, “형상 복잡도를 이용한 특징형상 기반 3D CAD 모델의 단순화”, 한국 CAD/CAM 학회학술대회 논문집, 20(4), pp. 422-426.
- 오정욱, 송규열, 안용선, 2002, “건설사업 제 단계에서 시공성(Constructability) 개념의 적용 방안에 관한 연구”, 대한건축학회 논문집 구조계, 제18권 제12호, pp. 157-164.
- Federal Highway Administration (FHWA), 2009, Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes - Design and Construction Guidelines (FHWA-NHI-10-024)
- Kimura, T., Hayashi, S., Muto, T., Yamasaki, K., Sakai, Y., and Gondo, T., (2024), “Form-finding for free-curved reinforced concrete shell structure considering structural performance and construction formwork”, Engineering Structures, 301, 117332.
- Li, J., Xiong, B., Qin, R., and Gruen, A., (2020), “A flexible inference machine for global alignment of wall openings”, Remote Sensing, 12(12).
- Limpert, E., Stahel, W. A., & Abbt, M. (2001). “Log-normal distributions across the sciences: Keys and clues.” BioScience, 51(5), pp. 341-352
- Recheis, Meinrad. “Automatic Recognition of Repeating Patterns in Rectified Facade Images.” Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Fakultät für Informatik, 2009.