

인지형 에이전트를 활용한 BIM기반 건축공간의 거주 시뮬레이션 분석 연구

Cognitive Inhabitation Analysis: Demonstrating Cognitive-Agent Simulation in BIM-Based Architectural Space

○송민준* 전영훈**
Song, Min-Jun Jeon, Young-Hoon

Abstract

Space gains its use from the relation between form and occupant, yet design-stage prediction has rested on form alone. This study demonstrates Cognitive Inhabitation Analysis: agents with memory, reflection and planning inhabit an unbuilt BIM school plan and the space is read from their conduct. In three days and three seeds, 36 agents left trajectories and 1,542 free-time conversations, read as five patterns: home base, encounter, appropriation, diffusion and adaptation. The output answered to space, occupant and time. Where form predicts, it converged with space syntax (occupancy $r = 0.62$, co-presence $r = 0.67$); where form is silent, it read further: cross-grade encounter was set by layout, not disposition, identical clusters diverged in use by grade, and bonds accumulated across days. The method thus brings inhabitation into the design stage and shows, before construction, what layout governs and what the occupant does.

키워드 : 인지형 에이전트, 인지거주분석, BIM, 거주 시뮬레이션

Keywords : Cognitive Agent, Cognitive Inhabitation Analysis, BIM, Inhabitation Simulation

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

건축 공간은 벽으로 둘러싸인 정적인 부피이기에 앞서, 그 안의 사람에게 행위를 불러일으키는 능동적 조건이다. 공간은 형태와 주체의 관계 속에서 행위를 유발하며 쓰임을 얻는다. 건축계획은 아직 지어지지 않은 공간 속의 행위를 미리 예측하는 일이며, 그 근거는 오랫동안 형태에 있었다. 공간구문법(space syntax)은 평면의 위상 관계만으로 사람이 모이고 지나갈 가능성을 계산하여, 계획 단계의 도면에서 '만남의 잠재력'을 읽어내는 방법을 제시하였다(Hillier & Hanson, 1984). 그러나 공간구문법을 비롯하여 형태만으로 행위를 예측하는 형태 분석에는 공간을 이루는 또 다른 축인 '주체'와 '시간'이 없어, 그 잠재력이 언제 누구의 행위가 되는가에는 답하지 못한다.

이 자리를 메우려는 시도는 거주자를 행위 주체로 세우려는 구상(Cha & Kim, 2015)과 BIM 위의 인지적 점유 모형(Gath-Morad et al., 2022)으로 이어졌으나, 전자는 판단을 재현할 수단이 없어 개념에 머물렀고 후자의 주체는 규칙을 따를 뿐 기억을 쌓지 않았다. 이후 대규모 언어모델(LLM) 위에서 기억·반성·계획의 순환을 갖춘 생성형 에이전트가 인간과 유사한 일상 행동을 산출하였으나(Park

et al., 2023), 그 무대는 실제 도면이 아닌 가상 환경이었고, 실내 장면으로 옮긴 후속 연구(Wu et al., 2025)와 도시 규모의 보행에 투입한 사례(Noyman et al., 2026)도 건물 규모의 거주 구조를 관측하지 않았다. 국내의 설계 시스템 아키텍처 제안(강지수 외, 2025)과 AI를 설계 주체로 두는 지표 체계(박주성, 2026) 역시 거주자의 행동을 관측 대상으로 삼지 않았다. 곧 인지적 주체와 실제 설계안은 아직 한자리에서 구현되지 못하였다.

본 연구는 인지형 생성 에이전트를 실제 설계안의 공간에 거주시켜 그 자율적 행위로부터 공간을 읽는 방법(이하 인지거주분석)을 하나의 계획안 위에서 시연한다. 이 출력이 분석 자료로서 타당한지는 두 가지 축으로 검증한다. 첫째, 출력이 공간구문법의 예측과 수렴하는지를 확인한다. 둘째, 그럼에도 형태 분석에 없는 주체와 시간을 통해 무엇을 읽어내는지를 확인한다. 전자는 방법의 필요조건이고, 후자는 방법의 고유한 기여이다.

1.2 연구의 범위 및 방법

관측 대상은 하나의 학교 계획안에서 벌어지는 자유시간 행위로 한정하였다. 이는 성향이 다른 집단이 한 건물을 공유하고, 목적지가 지정되지 않은 자율적 시간대가 일과 안에 있기 때문이다. 방법은 기억·반성·계획을 갖추고 행선지와 대화를 LLM으로 판단하는 인지형 에이전트 36명을 IFC(BIM) 모델에서 유도한 공간에 거주시켜 3일간 시뮬레이션하고, 같은 초기 상태에서 출발한 독립 시드 셋으로 반복하여 양상이 한 시행의 우연이 아님을 확인하는 것이다. 분석 자료는 에이전트가 남긴 동선 궤적과 자유시

* 중앙대 건축학부 겸임교수, 건축사

** 중앙대 건축학부 교수, 공학박사

(Corresponding author : School of Architecture & Building Science, Chungang University, jeonyh@cau.ac.kr)

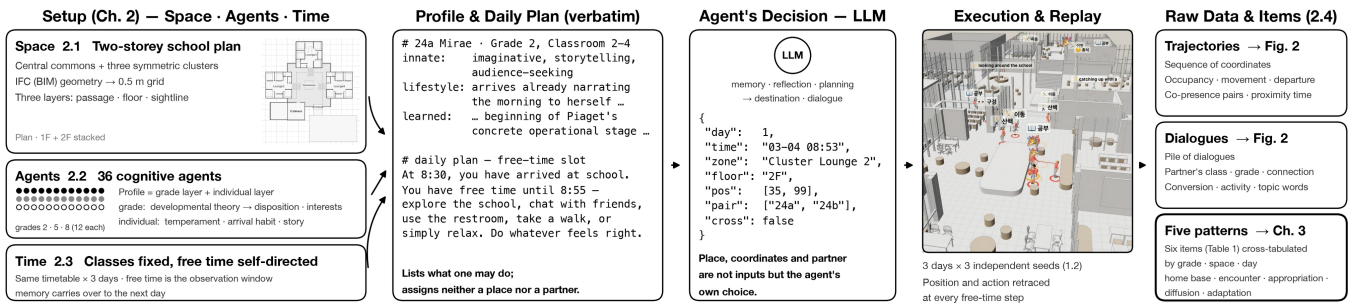


그림 1. 인지거주분석의 설정과 산출

간 대화록(all seeds 함께 1,542세션)이며, 모든 지표는 이들에서만 산출된다. 검증의 범위는 출력이 공간·주체·시간 변수에 체계적으로 반응하는가라는 '관계적 타당도'로 한정하며, 실제 학생 행동과의 일치라는 '대응적 타당도'는 실측 대조군이 없어 범위 밖이다.

2. 연구의 설정

2.1 공간

대상은 초등 저학년부터 중등까지 세 학년 집단이 한 건물에서 생활하는 지상 2층 학교 계획안이다. 중앙의 공유공간을 중심에 두고 세 학년의 클러스터가 그 주위로 갈라져 나가며, 각 클러스터는 라운지를 중심으로 교실 넷과 그룹룸을 거느린다. 클러스터 밖의 중앙 공유공간·카페테리아·현관 등은 공유 영역이라 부른다. 세 클러스터는 형태와 연결 관계가 서로 대칭이 되도록 계획되어 있어, 형태가 같은 공간에서 행위가 갈리는지를 관측하기에 적합하다. 공간 환경은 IFC(BIM) 모델의 실·벽·문·계단 기하를 직접 읽어 통행 가능 여부, 층 소속, 시야 투과의 세 층 격자(1타일 0.5 m)로 변환하였다(그림 1).

2.2 주체

집단은 발달 단계의 간격이 뚜렷한 2·5·8학년의 셋, 학년 당 12명, 모두 36명이다. 에이전트는 기억·반성·계획의 순환(Park et al., 2023) 위에, 발달 이론(Piaget & Inhelder, 1969; Erikson, 1963)에 근거한 학년의 성향·관심사·어휘 수준에 개인의 기질·등교 습관·배경 서술을 더한 개인별 프로파일을 부여받는다. 프로파일은 장소를 지정하거나 상대를 제한하지 않으며, 자유시간 항목도 할 수 있는 일을 예시할 뿐이다. 따라서 3장의 공간 선택과 교류는 주체가 LLM을 통하여 스스로 내린 판단의 산물이다.

2.3 시간

시간환경은 등교·수업·점심·하교 시각은 일과표로 고정되고, 관측은 고정된 수업 사이의 자유시간에서 이루어진다. 같은 일과표의 하루가 사흘 이어지며, 에이전트는 그날의 경험을 기억으로 저장하고 다음 날 그 위에서 다시 행동하므로 시간은 공간과 함께 좌표축이 된다.

2.4 분석 항목

시뮬레이션이 남기는 것은 좌표의 나열과 대화문의 터미

며, 무엇을 세고 나눌 것인가라는 분석 항목의 설정이 곧 이 방법의 독법이 된다. 원자료는 표 1의 여섯 항목으로 기계적으로 집계하였다. 공존은 두 에이전트가 같은 시각 같은 실에 있는 상태, 근접은 그중 8 m 이내, 연결률은 학생 쌍 가운데 사흘 안에 한 번 이상 대화한 쌍의 비율, 전환율은 함께 머문 시간으로 대화 수를 나눈 값, 활동어는 대화문에서 빈도순으로 추출한 명사다. 이를 학년·공간·일자별로 교차 집계하여 반복적으로 읽힌 다섯 양상이 3장의 각 절을 이루며, 거점·조우·전유·확산·적응은 미리 세운 틀이 아니라 사후적으로 드러난 현상의 이름이다. 본문의 수치는 별도 표기가 없으면 seed 1이며, 세 시드에 공통인 결과는 all seeds로 표기한다. 원자료(케적·대화록)와 표·그림의 원장, 리플레이 영상은 cognitiveinhabitation.com/paper1에 공개한다.

표1. 두 원자료의 분석 항목과 현상

유형	분석 항목(측정)	읽힌 현상
케적	공간별 체류 분포 · 이동강도 · 최대이탈거리	거점, 전유
대화록	상대의 반 구성 · 쌍 연결률	거점
케적	공존 쌍 수 · 근접 시간	조우
대화록	대화 발생 위치 · 상대 학년 · 전환율	조우
대화록	활동어 빈도 · 협력 주제 종류	전유, 확산
케적 + 대화록	주제어의 일자별 · 공간별 이동과 채택률	확산, 적응

3. 관측

3.1 거점

각 학년의 클러스터 라운지는 학년의 시간이 모이는 거점이자, 반의 경계를 넘어 학년 단위의 결속을 만드는 자리로 작동하였다. 에이전트는 자유시간의 절반에서 3분의 2를 자기 클러스터 안에서 보냈고, 그중 라운지가 세 클러스터 모두에서 가장 오래 머문 단일 실이다(20~33%, all seeds). 같은 반끼리의 대화는 교실 안에 머무는 반면 다른 반 학생과의 대화는 교실을 벗어나 라운지로 모인다(그림 2). 사흘 안에 한 번 이상 대화한 학생 쌍의 비율은 같은 반 100%, 같은 학년의 옆 반 71~75%, 다른 학년 11~13%(all seeds) 고립자는 없었으며, 결속의 단위가 반에서 학년까지 넓어진다. 곧 거점은 학년의 유대와 정체성이 만들어지는 자리이며, 3.3의 학년별 분화는 이 결속을 배경으로 한다.

3.2 조우

중앙 공유공간은 학년의 경계가 허물어지는 거의 유일한 자리로 작동하였다. 학년 간 대화의 95~98%가 공유 영역에서 일어

났고(동학년 대화는 7~13%), 학년 간 쌍의 98.8%가 중앙 공유공간에서 공존하였다(표 2). 함께 머문 시간으로 대화 수를 나누면 건물 전체에서 동학년 쌍은 학년 간 쌍보다 약 3.4배 더 자주 대화로 전환하였으나, 비교를 중앙 공유공간 내부로 한정하면 배율은 1.3배로 떨어진다(95% CI 2.70~4.52 → 0.73~2.26). 곧 동질성 3.4배 가운데 2.6배는 같은 학년은 뻥뻥한 클러스터에서, 다른 학년은 성긴 중심에서 만나게 한 배치의 근접 성분이고, 이 성분은 세 시드 모두 유의하다(all seeds 2.2~3.7배, 95% CI 하한 1.4~2.2). 만날 기회는 중앙 공유공간이, 근접은 배치가 정하므로, 학년 간 조우는 성향보다 배치가 정하는 결과다.

3.3 전유

세 클러스터는 동일한 구성으로 계획되었으나 실제 사용은 학년마다 달랐다(그림 2). 2학년은 클러스터 내 이동량이 가장 많고(5학년의 2배 이상), 5학년은 라운지 체류가 가장 길며(31%), 8학년은 그룹룸과 교실 사용이 가장 많고 그룹룸 사용은 학년이 올수록 5→13→17%로 늘어났다. 이동과 대화는 반대로 갈려, 가장 많이 움직이는 2학년의 대화가 가장 적고 가장 적게 움직이는 5학년의 대화가 가장 많다(1인당 25.9회·31.0회). 활동어는 이 차이가 양이 아니라 종류의 차이임을 보여준다. 2학년은 보물찾기·해적 같은 신체적 상상놀이, 5학년은 벽화·인용구 같은 협동 제작, 8학년은 발표·시각자료 같은 형식적 작업으로 구별된다. all seeds에서 반복되는 것은 활동의 범주이며 구체적 어휘는 시행마다 새로 생성되므로, 이 분화는 입력 문장의 재생이 아니라 입력된 발달 성향이 공간 위에서 활동과 장소로 발현된 결과다.

3.4 확산

각 클러스터에서 발원한 협력 주제는 사람을 매개로 다른 학년으로 옮겨 갔다. 학년을 넘는 대화의 절반가량이 중앙 공유공간 한 곳에서 일어났고(49%, all seeds 49~54%), 한 주제를 추적하면 동학년 논의는 첫날 이미 학년 전역에 깔리는 반면 학년 간 대화는 날을 거치며 공유 영역에 누적된다(그림 2). 곧 확산은 클러스터에서 방사되는 과정이 아니라, 중앙 공유공간을 환승 지점 삼아 학년 간 교류로 쌓이는 과정이다.

그러나 운반된 주제가 모든 학년에 채택되지는 않았다. 각 학년의 대표 주제가 다른 학년의 동학년 대화에 채택되는 정도를 자기 채택 100 기준으로 정규화하면, 한 단계 차이인 2↔5와 5↔8학년에서는 7~17%가 넘어가지만 두 단계 떨어진 2↔8학년은 양방향 모두 0.4%와 0.6%로 사실상 끊긴다(all seeds 평균). 발원이 어느 쪽이든 두 단계에서 끊기므로 차단의 원인은 발달단계의 간격으로 보인다.

3.5 적응

앞의 네 양상은 정적 분포가 아니라 날을 거치며 쌓인다. 클러스터 안 같은 학년 대화에서 옆 반 상대의 비중은 40 → 49 → 59%로 매일 늘었다(all seeds, 3.1). 학년을 넘는 대화(3.4)도 첫날 13건에서 이튿날 22~23건으로 늘어난 뒤 그 수준에 머물렀다(all seeds 평균). 곧 시간은 형태 분석이 갖지 못하는 관측 가능한 축이다.

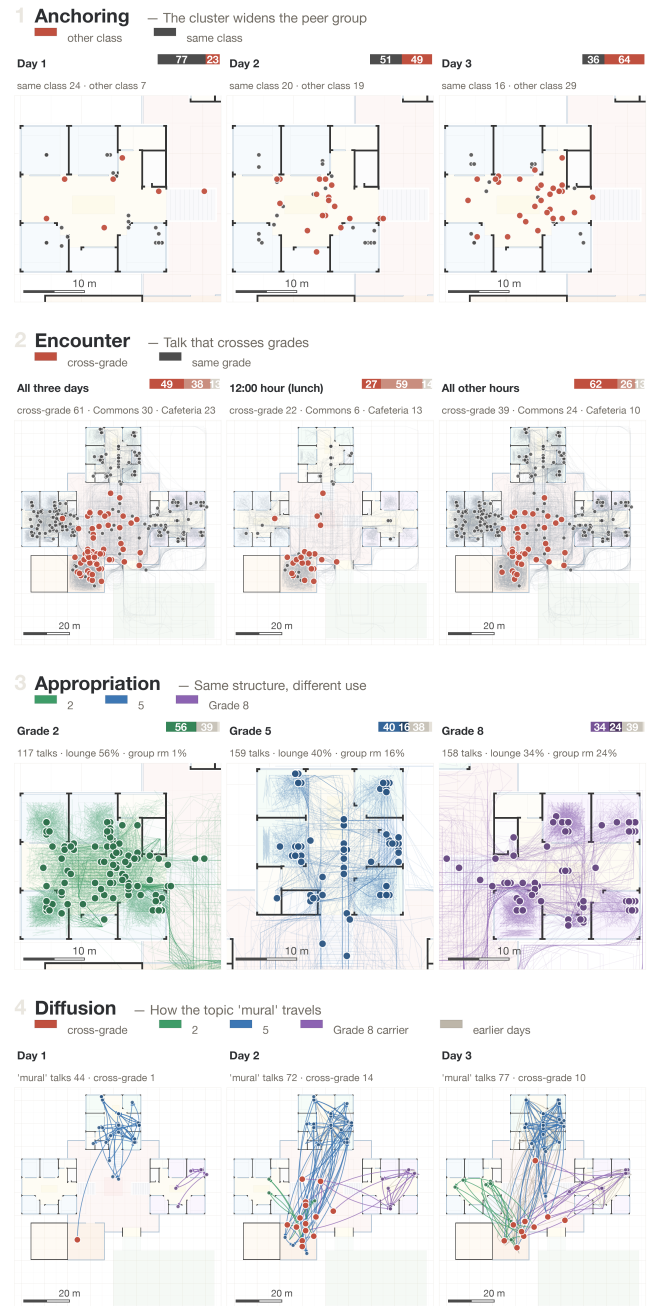


그림2. 사흘간의 네_양상(seed1)

4. 분석

4.1 수렴

3장의 발견이 이미 알려진 것과 어긋나지 않는지를 보기 위하여 같은 계획안의 공간구분법 분석과 3장의 관측을 나란히 놓은 것이 표 2다. 실내이므로 실을 단위로 삼고, 인접관계는 IFC 실 좌표와 개구부로 구성하되 아트리움으로 열린 라운지는 중앙 공유공간에 인접한 것으로 보았으며, 지표는 depthmapX 0.9.1과 대조하여 산출하였다. 사흘 전체 체류량은 전역 통합도와 $r = 0.62$ (그림 3), 공존 쌍 수는 선택도와 $r = 0.67$ 의 상관을 보였다. 통합도가 허브·라운지·말단의 세 계층으로 묶이므로 이 상관은 계층 수준의 수렴이다.

세 학년 라운지는 동일한 국부 핵이자 관문이다(표 2). 이

(a) Space syntax prediction

global integration · 27 spaces · convex-space map

Global integration

Room	Integration Value
1,211	3,400
1,211 · 18 leaf rooms (classrooms etc.)	
Lounge 5	2,106
1,243	
Commons	3,400
Lounge 2	2,106
Lounge 8	2,106
Kitchen	
Cafeteria	1,614
1,670	

Playground

20 m

(b) Prediction vs. observation

integration × observed dwell · convergence, residual

identical form · integration 2.106

Lounge 2 31,931

Central commons

Lounge 5 26,520

Lounge 8 20,151

Cafeteria

Observed dwell (steps, 3 days)

18 leaf rooms (classrooms, group rooms, WC, staff)

$r = 0.62$

$n = 27 \cdot \text{seed } 1 \cdot \text{Pearson}$

Global integration (space syntax)

표2. 공간구문법 분석의 예측과 시뮬레이션 관측의 대응

공간구분법 예측	본 연구의 관측	대응
중앙 공유공간 전역 통합도 최대(3.460) · 선택도 최대	체류 $r=0.62$ (그림3) · 공존 $r=0.67$ · 학년 간 쌍 98.8%가 중앙 공유공간에서 공존(3.2)	부합
세 라운지 동일한 국부 해 · 관문(R3 2.16 · 통제도 7.62) 1층 단일 시야장 2층 학년별 세 시야장	라운지가 각 클러스터 자유시간 체류 최대(20~33%) · 클러스터 안 대화의 열 반 비증 증가(3.1) 클러스터 결속과 중심 확산의 기능 분업(3.1·3.4)	부합
세 클러스터 위상 동일(대칭)	공간 이용과 활동 내용 학년별로 분화(3.3)	확장

3장의 다섯 양상 각각에서 형태 분석이 비어 있는 자리를 정리하면 표 3이 된다. 형태 분석에는 잠재력을 결과로 바꾸는 주체가 없어 주체가 남기는 궤적과 대화를 갖지 못하며, 시간이라는 좌표축이 없다.

양상	필요한 측정 축	형태 분석의 결여 이유
거점의 학년결속	주체(궤적+대화)	노드에 반·학년 소속이 없음
조우의 근접·신호 분해	주체(궤적+대화)	공존은 예측하나 대화 전환을 못 봄
위상 대칭 공간의 학년별 분화	주체(궤적+대화)	위상이 같으면 판정이 정의상 같음
주체 전파와 두 단계 차단	주체(궤적+대화)	흐름은 예측하나 대화를 담지 않음
날을 거친 적응	시간	변화라는 개념 자체가 없음

본 연구는 단일 계획안·단일 LLM의 3일 관찰에 한정된 시
 연 연구이며, 프로파일은 연구자가 설정한 것이므로 그 주관
 성이 결과에 실린다. 향후 과제는 둘이다. 같은 주체와 시간
 설정 아래 배치가 다른 복수의 계획안을 같은 자로 재면 본
 연구의 지표는 대안을 비교하는 근거가 되며, 주체가 공간을
 어떻게 지각하고 기억하는지를 지표로 세우면 본 방법은 행위
 의 관측에서 인지의 관측으로 나아갈 수 있다.

1. 강지수, 조경현, 차승현, AI 에이전트 시뮬레이션 기반 사용자 맞춤형 인터랙티브 공간 설계 시스템, 대한건축학회 학술발표대회논문집, 45(2), 821-824, 2025
2. 박주성, AI 에이전트의 지능화 공간 점유와 의미해석 체계 연구 박사학위논문, 국민대학교 테크노디자인전문대학원 건축디자인학과, 2026
3. Cha, S. H. & Kim, T. W. (2015). A conceptual framework of an agent-based space-use prediction simulation system, *Journal of Construction Engineering and Project Management*, 5(4), 12-15.
4. Erikson, E. H. (1963). *Childhood and Society*, W. W. Norton.
5. Gath-Morad, M. et al. (2022). Beyond the shortest-path: Towards cognitive occupancy modeling in BIM, *Automation in Construction*, 135, 104131.
6. Hillier, B. & Hanson, J. (1984). *The Social Logic of Space*, Cambridge University Press.
7. Noyman, A., Hu, K. & Larson, K. (2026). TravelAgent: Generative agents in the built environment, *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 53(2), 377-397.
8. Park, J. S. et al. (2023). Generative agents: Interactive simulacra of human behavior, *Proc. 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '23)*, 1-22.
9. Piaget, J. & Inhelder, B. (1969). *The Psychology of the Child*, Basic Books.
10. Wu, D. et al. (2025). IndoorWorld: Integrating physical task solving and social simulation in a heterogeneous multi-agent environment, *Findings of ACL: EMNLP 2025*.