

3D-GIS 기반 내부공간 접근성 분석

Indoor Space Accessibility based on 3D-GIS

김혜영* · 전철민**

Kim, Hyeyoung · Jun, Chulmin

1. 서 론

접근성은 교통체계와 같은 네트워크를 기반으로 하는 외부공간에서 공간구조 위계상의 중요도, 이동의 용이함 등을 가늠할 수 있는 척도로 이용된다. 현대에는 대규모의 복합공간이 생겨나면서 실내공간배치나 출구까지의 경로탐색 등을 위한 내부공간의 접근성에 대한 계량적인 분석방법이 요구되고 있다.

한편 Space Syntax는 공간 상호간의 접근성(Connectivity) 또는 통합도(Integration)를 구하는 데에 사용되어 온 기법이다. 본 이론은 주로 도시·건축·보행 공간에 대해 각 공간의 연결성을 정량적으로 산출하고 이를 시각적으로 표현하는 분야에서 집중적으로 연구되어 왔다(Bafna 2003, Hillier 1984, 1996, Penn et al. 1998). 최근에는 Space Syntax 이론을 GIS 공간데이터에 적용하여 접근성의 산출과정을 자동화시키는 연구도 시도되고 있다(Jiang 1999, 2002). 2차원 네트워크를 이용한 접근성 분석은 이루어진 사례가 있으나 3차원 공간에서의 접근성 분석에 관한 연구는 사례가 극히 드물다. 지금까지의 3차원 모델은 시각화에 초점을 맞춰 발전되어왔기 때문에 건물내부의 위상구조 정보가 결여되어 있다. 즉 3차원 객체들이 분리되어 있지 않아 공간간의 연계가 특별히 정의되어 있지 않고 속성정보의 저장이 어렵기 때문에 3차원 모델에서의 공간분석과 쿼리는 한계를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 3차원 공간에서의 접근성을 산출하는 방법을 제안하고 기존의 전통적인 space syntax에서의 접근성 산출방법과 이를 3차원 공간 내에 적용하기 위한 새로운 방법을 제시하고 실제 모델을 구현하여 양측의 값을 비교, 분석하였다.

2. Space Syntax

건축공간이나 보행공간에서 공간간의 연결체계를 분석하는 도구로 사용되는 Space Syntax는 공간의 접근성을 분석하기 위해서는 전체 대상 공간에서의 상호관련성에 대한 분석과 인간이 공간을 인지하고 사용하는 행태에 대한 이해에 기반을 둔다는 전제에서 출발하여 각 공간간의 상대적인 접근성을 표현하고 이를 정량화하여 해석하는 방법이다.

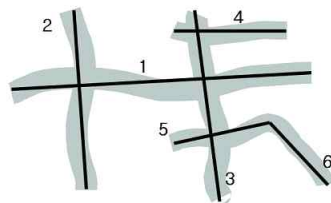


그림 1. 보행공간과 Axial Line

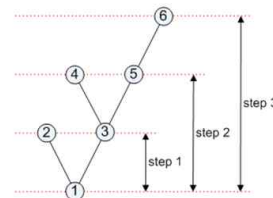


그림 2. 그림 1의 위계구조

Space Syntax에서 가장 기본이 되는 것은 Axial Line과 Total Depth 값이다. Axial Line은 모든 공간을

* 서울시립대학교 지적정보학과 석사과정 · E-mail : mhw3n@uos.ac.kr - 발표자

** 서울시립대학교 지적정보학과 부교수 · E-mail : cmjun@uos.ac.kr

직선으로 연결하였을 때 최대 길이와 최소 개수로 구성되는 직선들의 구조를 의미한다. 넓이와 굴곡을 가진 보행공간의 경우 Axial Line을 그려서 나타내면 그림 1과 같이 표현할 수 있고 모든 공간에서 특정 공간까지 도달하기 위해 몇 번의 단계를 거쳐야 도달할 수 있는지를 나타내는 지표가 Total Depth가 된다.

그림 1의 1번 Line의 경우, 2번과 3번 Line으로 가기 위해서는 한 번의 공간적인 전환이 필요하게 되고, 1번 Line에서 4번과 5번Line으로 가기 위해서는 두 번의 공간적인 전환이 필요하며, 1번 Line에서 6번 Line으로 가기 위해서는 세 번의 공간적인 전환이 필요하게 된다. 이러한 공간적인 전환을 하나의 단계로 볼 수 있다. 1번 Line에서 다른 모든 Line으로의 경로를 살펴보면 그림 2와 같이 Step 3까지 진행됨을 볼 수 있다.

$$TD_i = \sum_{S=1}^m S \times K_s \quad \begin{array}{l} TD_i : \text{공간 } i \text{의 Total Depth} \\ S : \text{공간 } i \text{에서부터 거치게 되는 단계의 수} \\ m : \text{공간 } i \text{에서 가장 깊은 공간까지 거치게 되는 단계의 수} \\ K_s : s \text{단계에서의 공간의 개수} \end{array} \quad (1)$$

3. Space syntax기반 접근성 산출

실제 공간분포를 표현하는 데에 있어서 space syntax의 모델의 축선(Axial Line)과 네트워크 모델은 서로 공간을 구성하는 방식이 다르다. Space Syntax에서의 각 축선(Axial Line)은 네트워크에서 노드가 되고 축선의 교차점은 링크(link)가 된다. 반면 전통적인 네트워크 모델에서의 추상화 과정은 Space Syntax와는 서로 다르다. 축선의 교차점이 노드가 되고, 링크는 노드와 노드를 연결한 것을 의미한다. Space syntax에서는 굴절의 회수만을 이용하여 깊이를 계산하기 때문에 탐색 시간과 같은 비용은 고려되지 않는다. 그러므로 깊이의 개념은 공간의 접근성으로 설명될 수 없고, 오히려 연결성에 더 가깝다. 연결성은 두 공간이 인접해 있는지를 판단하는 지표가 되고 접근성은 공간 이동시 요구되는 거리나 시간과 같은 비용의 개념을 통합한 것이다. 일부 연구(Jiang *et al.* 1999)에서는 공간의 연결성에 기초한 깊이를 참조한 지리적 접근성이란 용어를 사용하기도 한다.

전통적인 네트워크 모델은 그것의 graph $G(V, E)$ 를 이용하여 정의되고, 이때의 V 는 노드의 집합 $\{v_i \mid i=1,2,\dots,n\}$ 으로 구성되고, E 는 노드가 서로 연결된 edge 또는 링크의 집합 $\{e_{ij} \mid v_i, v_j \in E, i, j = 1, 2, \dots, n\}$ 이다. 여기서 e_{ij} 는 다음과 같이 정의된다.

$$e_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } v_i v_j \in E \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3)$$

각 edge는 물리적인 거리 d_{ij} 를 갖게 되는데, 연결성(connectivity)에만 초점을 둔다면, 거리는 단위 edge $e_{ij}=1$ 또는 0으로 간주된다. 이때 한 step에서의 연결성 C_{ij} 는 i 노드에 직접적으로 연결된 edge들의 개수로 정의될 수 있다.

$$C_{ij} = \sum_j e_{ij} \quad (4)$$

여기서, 간단한 그래프 이론을 이용하여 higher-order 연결성을 정의해볼 수 있다. 노드사이에 직접적으로 연결된 것 외에, i 노드에서 j 노드까지의 경로를 셀 수 있고 이를 S_{ij}^z 로 정의한다. 이 값은 한 노드에서 다른 노드로의 깊이를 측정하고, 구조적인 측정은 Space Syntax 이론에서의 깊이에 기초한다. depth S_{ij}^z 에서의 z 는 i 노드에서 j 노드까지의 깊이이고 이는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} &\text{Let } S_{ij}^1 = e_{ij}, \text{ then,} \\ &S_{ij}^z = \begin{cases} 1, & \text{if } \sum_k S_{ik}^{z-1} e_{jk} > 0 \quad (k \neq i, k \neq j) \text{ and } \sum_t S_{ij}^t = 0 \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

이때 j 에서 i 까지의 총 깊이는 $S_{ij}^2=1$ 이라고 가정할 때 $S_{ij}^2=z$ 로 정의할 수 있다. Space syntax에서는 보다 직관적인 판단을 위해서 깊이 값의 역수를 취하기 때문에 전체적인 구조적 연결성은 다음과 같다.

$$A_i = \sum_j S_{ij}^{-1} \quad (6)$$

본 연구에서는 일반적으로 space syntax에서 축선에서 벗어날 때 깊이가 깊어진다는 사실을 적용하여 어떤 공간에서 다른 공간으로 굴절할 때 특정 패널티 또는 impedance가 추가 된다고 보았다.

보통 접근성은 공간 이동시 수반되는 비용을 포함하는 총 이점을 가늠할 수 있는 지표로 사용된다. 일반적으로 전통적인 도시 및 토지이용계획 등에서의 접근성은 중력이론에 기초하고, 다음과 같이 정의된다.

$$A_i = K \sum_j P_j d_{ij}^{-\alpha} \quad (7)$$

이때 P_j 는 공간 j 의 인구이고, K 는 중력 축척 계수, α 는 거리에 대한 마찰력이 된다. 일반적으로 접근성은 도시 규모에서 공간 간 상호작용을 목적으로 다루어진다. 그러나 소규모 네트워크나 내부공간과 같은 협소한 공간에서는 인력 요소인 P_j 가 매우 작기 때문에 무시할 수 있다. 또한 거리에 대한 마찰계수 α 는 공간 간 상호작용의 강도가 단지 사물간 거리에 비례하는 것보다 더 많이 감소함을 의미한다. 즉, α 는 거리가 증가함에 따라 상호관련성이 얼마나 빨리 감소하는지를 결정짓는다.

$$A_i = \sum_j A_{ij} = \sum_j f(d_{ij}) = \sum_j d_{ij}^{-\alpha} \quad (8)$$

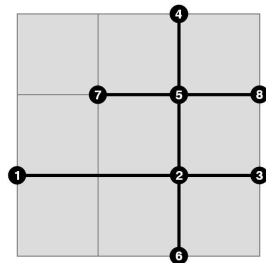


그림 4. 네트워크
(each cell is 1x1 dist.)

표 1. space syntax와 접근성 비교

node #	ND_i^{-1} in space syntax	$A_i=d_i^{-1}$
1	0.50	2.92
2	0.78	5.00
3	0.50	3.33
4	0.64	3.42
5	0.78	5.33
6	0.64	3.83
7	0.50	3.92
8	0.50	3.92

위의 그림에서 제시된 네트워크에서 space syntax의 integration과 수식 8에 의한 접근성을 산출해 보았다. 그림 4는 한 셀의 크기가 1x1로 구성된 네트워크를 보여준다. 만약 space syntax 과정을 따른다면, 이 때 노드 1과 노드 3의 TD 는 $14(1 \times 2 + 2 \times 3 + 3 \times 2)$ 로 동일한 깊이 값을 갖는다. 반면 접근성은 각각 2.92와 3.33으로 계산된다. 표 1은 모든 노드에 대한 계산 값을 나열해 놓은 것으로, 노드 (1, 3, 7, 8)과 (2, 5), (4, 6)의 integration 값은 각각 동일한 반면 거리에 기초한 접근성은 거리가 가까울수록, 또한 연결된 노드가 많을수록 더 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다. 깊이에 근거한 접근성과 이동시 발생하는 비용을 포함한 가중치를 고려함으로써, 한 공간에서 모든 공간으로의 접근성은 다음과 같이 산출 될 수 있다.

$$A_i = \sum_{k=1}^{D_i} w_k^{-1} \left(\sum_{j=1}^{M_k} d_{ij}^{-1} \right) \quad (9)$$

D_i : i 노드에서 최대 깊이 수
 M_k : k 깊이에서의 총 노드 수
 d_{ij} : i 와 j 사이의 거리
 w_k : k 깊이에서의 가중치

가중치 w_k 는 깊이가 증가함에 따라 점차 커지게 되고, 이는 곧 깊이에 대한 패널티로 생각할 수 있다. 그리고 이의 역수는 각 깊이에서 산출된 접근성에 곱해진다. 그러나 모든 깊이에 대해 동일한 가중을 적용한다

면, 비현실적일수밖에 없다. Space syntax에서는 굴절이 발생 할 때마다 깊이를 추가하였지만, 실 상황에서는 경우에 따라 체감하는 정도가 달라진다. 그러므로 '깊이'와는 독립적으로 'impedances'를 적용해 볼 필요가 있다. 수식 9를 수정하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_i = \sum_{j=1}^{N_i} \left(d_{ij} + \sum_{r=1}^{R_j} e_r \right)^{-1} \quad \begin{array}{l} R_j : i\text{부터 } j\text{까지 가는데 걸리는 부하 수} \\ e_r : \text{부하} \end{array} \quad (10)$$

이때 impedance들의 집합 $E(e_r \mid r=1,2, \dots, n)$ 은 사람이 i 에서 j 로 이동하는데 직면하게 되는 edge들 간의 거리를 제외한 모든 비용으로 생각해 볼 수 있다. 여기에는 굴절 또는 층간 이동 등이 포함되고, 이는 또한 $E(E_L, E_R, E_S, \dots)$ 등으로 세분화 할 수 있다.

i 부터 j 까지의 경로 탐색 시, d_{ij} 와 발생하는 모든 impedance를 포함하여 산출된 하나의 최적경로가 존재하고 이를 산출해 내기위해서 다익스트라 알고리즘을 사용하였다(Dijkstra, 1959). 노드 i 와 j 의 현재 라벨에서 $d(j) > d(i) + c_{ij}$ 를 만족하는지를 검사하고, 만일 그렇다면 현재의 라벨을 $d(j) = d(i) + c_{ij}$ 으로 수정하게 된다(Ahuja *et al.* 1993). 거리 갱신 과정에서, 일반적인 다익스트라 알고리즘은 c_{ij} 항을 거리 또는 탐색 시간으로써 edge $i-j$ 간의 비용으로 정의한다. 여기서 우리는 d_{ij} 에 impedance $\sum e_{ij}$ 를 포함한 c_{ij} 를 사용하였다.

$$c_{ij} = d_{ij} + \sum e_{ij} \quad (11)$$

4. 사례 적용

4.1 데이터 생성

본 연구에 적용해 보기 위해 캠퍼스 중 규모가 크고 내부구조가 복잡한 건물로서 본 연구에 적합하다고 판단되는 건물을 선정하였다. 대상 건물은 7개의 출구를 포함하고 있고, 또한 강의실, 교수연구실을 비롯하여, 회의장, 전자도서관, 학생라운지 등 다양한 특성을 갖는 공간으로 구성되어있기 때문에 본 연구에 적용하기 적합하다.

일반적으로 내부공간은 폴리곤으로 구성되어있다. 또한 각 공간간의 연계가 정의되어 있지 않기 때문에 위의 이론을 복합건물 내에 적용하기에는 몇 가지 제한 조건이 따른다. 따라서 분석의 용이함을 위한 새로운 데이터 구조가 구축되어야 한다. 즉, 각각의 독립된 공간마다 하나의 노드를 부여한다. 또한 복도 중심선을 따라 노드를 연결해주는 링크를 구성함으로써 건물 전체를 연결하는 네트워크를 구성하게 된다.

4.2 각 실에서 출구까지의 접근성

접근성을 체감하는 데에 있어서 일반 공간보다는 출구까지의 용이함이 좀 더 쉽게 받아들여진다. 또한 대피나 진·출입 등의 수월함 역시 출구까지의 접근성이 우선적으로 고려되기 때문에 출구까지의 접근성을 특별히 고려해 볼 필요가 있다. 한편, 복합건물은 외부와 연결된 복수개의 출구를 포함하고 있고, 외부로 나가는 목적에 따라 이용하는 출구가 다르기 때문에 공간 내에 속해있는 모든 출구에 대한 접근성을 산출해야 한다. 이때 다익스트라 알고리즘을 이용함으로써 각 출구까지의 최단 경로를 검색해 볼 수 있다. 실험대상 건물에는 1층과 2층에 각각 5개와 2개의 출구가 있고, 각 출구는 모든 방향으로 분산되어있어 외부로 나가는 목적에 따라 각기 다른 출구를 선택할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 한 특정 공간에서 모든 출구로의 접근성이 얼마나 좋은지를 평가하였다.

최적경로를 따라 이동하면서 발생하는 impedance를 부여하여, 수식 10에 기초한 접근성을 산출해 보았다. 본 실험에서는 방향 전환, 계단 및 엘리베이터를 이용한 층간 이동만을 impedance로 적용하고 각각을 3m, 20m, 30m로 가정하였다. 그림 6은 본 실험의 적용결과를 보여준다. 계산된 접근성의 수치를 5단계로 나

누고, 각 공간에 해당하는 수치에 따른 색을 부여하였다. 출구가 1층과 2층에 분포하고 있기 때문에 출구 주변 공간의 수치가 높게 나타난 반면, 출구에서 멀어질수록, 즉 층이 높아질수록 수치가 점차 감소함을 볼 수 있다.

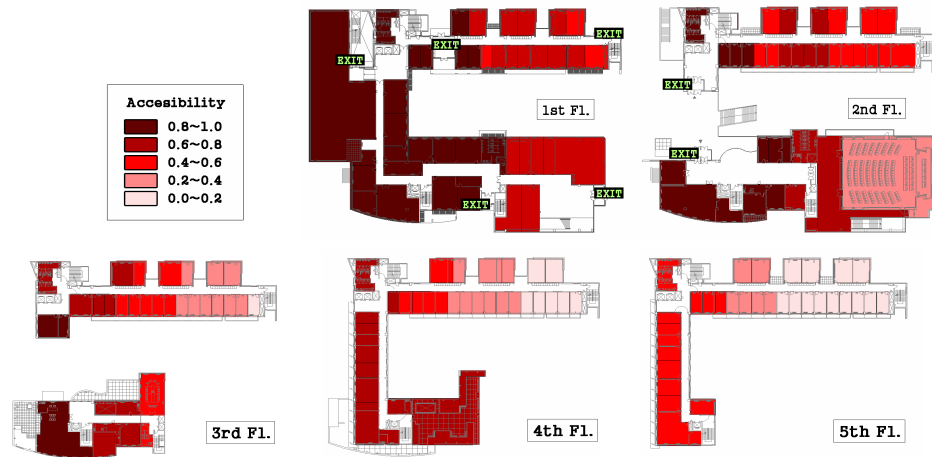


그림 6. 출구까지의 접근성 산출 결과

5. 결 론

Space Syntax이론은 도로나 보행공간에서의 연결성을 계산하는 데에 이용되는 이론이다. 선행연구에서는 space syntax의 integration값과 사람의 움직임 간의 관계에 대해 연구하였고, 그 둘의 관계는 일반적으로 밀집된 공간에서 보다 깊게 상호작용함을 보였다(Hillier *et al.* 1993). 그러나 space syntax는 넓은 공간에서의 움직임 등을 시험하는데 적합하기 때문에 소규모 또는 내부 공간에 적용하기에는 몇 가지 한계가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 부하를 고려함으로써 서로 다른 강도를 부여하였다. 특히, 3차원 모델에 적용하였을 때에는 방향 전환 뿐 만 아니라 층간이동 또한 패널티로 설정하여 접근성을 산출함으로써 선형으로 배열된 공간은 모두 동일한 깊이값을 갖는 것이 적절하지 못함을 보였다. 따라서 이러한 부하를 좀 더 현실적으로 고려한다면, 건축 설계나 방재 등에도 활용 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Ahuja, R. K., T. L. Magnanti and J. B. Orlin, 1993. *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*, Prentice Hall.
2. Bafna, S., 2003. Space syntax: a brief introduction to its logic and analytical techniques, *Environment and Behavior*, 35(1): 17-29.
3. Dijkstra, E. W., 1959. A note on two problems in connection with graphs, *Numer. Math.* I: 269-271.
4. Hillier, B., 1996. *Space is the Machine*, Cambridge University Press.
5. Hillier, B. and J. Hanson, 1984. *The Social Logic of Space*, Cambridge University Press.
6. Jiang, B., C. Claramunt and M. Batty, 1999. Geometric accessibility and geographic information: extending desktop GIS to space syntax, *Computers, Environment and Urban Systems*, 23: 127-146.
7. Jiang, B. and C. Claramunt, 2002, Integration of Space Syntax into GIS: new perspectives for urban morphology, *Transactions in GIS*, 6(3): 295-309.