

# 네트워크 위상구조 기반 대중교통 연결성 분석에 관한 연구

## Public Transport Connectivity Analysis based on Network Topology

김혜영<sup>1)</sup> · 박인혜<sup>2)</sup> · 전철민<sup>3)</sup>

Kim, Hye Young · Park, In Hye · Jun, Chulmin

- 1) 서울시립대학교 지적정보학과 (mhw3n@hanmail.net)
- 2) 서울시립대학교 지적정보학과 (pih4080@hanmail.net)
- 3) 서울시립대학교 지적정보학과 부교수 (cmjun@uos.ac.kr)

### 요 지

대중교통 노선의 복잡성을 정량적으로 측정할 수 있는 적절한 방법의 부재로 대중교통노선 정책은 편협한 경험을 바탕으로 이루어진다. 결과적으로 같은 도시 안에서의 편중된 접근성은 같은 거리를 이동하는 사람들 간의 시간, 비용적인 불평등과 심리적인 부담감을 안겨준다. 이 논문은 대중교통노선체계의 위상구조를 기반으로 대중교통 시스템의 연결성을 계산하는 방법을 제시한다. 이 방법론의 중점은 더 많은 환승이 일어날수록 대중교통에 대한 접근성의 이점이 적게 평가된다는 것이다. 측정대상지역에서 도시 곳곳에 대한 연결성을 평가하는 방식으로 도시의 대중교통에 대한 편의성의 정량적인 계산이 가능하다. 이 연구에서는 서울지역을 대상으로 노선체계의 위상구조를 이용하여 계산과정은 자동화 시킬 수 있는 알고리즘을 제시한다.

### Abstract

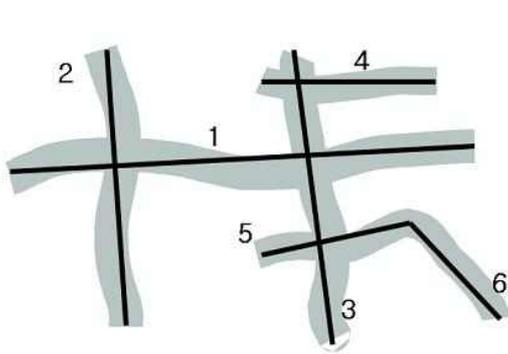
Relatively less research on the design and distribution of public transportation network and limitations in quantitative approaches have made implementation and operation practically difficult. Over- or under-supply of transportation routes caused unbalanced connectivity among areas and differences in time, expenses and mental burden of users. On the other hand, the Space Syntax theory, designed to calculate the connectivity of urban or architectural space, helps generate quantitative connectivity of whole space simply based on the spacial structure. By computing the connectivity of each bus or subway station with all others in a city, we can quantify the differences in the serviceability of city areas based on the public transportation. This paper is based on the topological interpretation of the routes network using space syntax theory and suggests an algorithm that can automate the computation process. The process is illustrated using a simple artificial network data built in a GIS.

## 1. 서론

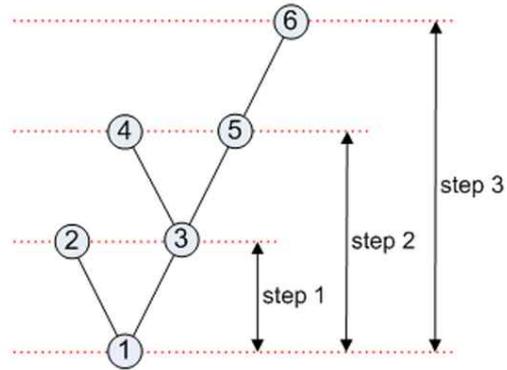
대도시의 교통 혼잡은 시민들로 하여금 자가 교통수단 보다는 대중교통을 이용을 유도하는 정책을 이끌어낸다. 이러한 요인들로 인해 대중교통에 대한 관심과 이용도가 증가하고 있다. 그러나 노선의 설계나 배분에 관한 연구가 미흡하고 정량적인 방법론이 구축되어 있지 않아 설계, 운영에 어려움을 겪고 있다. 대중교통 노선의 공급 과잉이나 부족으로 인해 접근성이 지역간에

편중되어 나타나며, 도시 각 구역의 정류장은 다른 지역으로 이동하는 시간과 비용, 심적 부담에 있어 큰 편차를 보이고 있다. 이러한 대중교통 정책의 한계점을 극복하기 위해 교통 노선의 연결성 내지는 편의성산출을 위한 적절한 방법론이 필요하다. 한편, Space Syntax 이론은 도시공간이나 건축공간의 접근성을 공간의 기하학적인 연결구조에 기반 하여 정량적으로 산출해주는 이론이다(Hillier 1996). 이 이론은 처음으로 실내공간이나 도보이동경로 내에서 인간의 움직임을 조사하는 연구에 적용 되었고, 공간 연결(spatial links)의 위상 구조에 기초하여 정량적으로 만들어진 네트워크의 연결성을 계산하도록 돕는다(Hillier 1984). 연결성을 계산하는 과정을 자동화하기 위해 이 이론을 GIS분야에 적용하는 최근의 몇몇 사례가 있었지만 실제적으로 대중교통 네트워크 분석은 없었다.

이 논문은 위상구조를 기초로 한 대중교통 네트워크의 연결성의 평가를 위한 방법을 제시한다. 두개의 다른 루트를 연결하는 연결 node로 대중교통의 환승을 나타낸다. 더 많은 환승이 발생할수록 연결성은 깊어지게 되고 대중교통 접근성이 낮은 지역으로 평가된다. 이 논문은 물리적인 거리 보다는 대중교통 노선의 연결성에 기초한 기하학적인 접근성을 계산하는 알고리즘을 소개한다. 산출과정을 자동화 하기위해 노선(routes)과 정류장(stops)을 포함하는 GIS로 구축된 대중교통 데이터와 관련 database 그리고 C#언어로 구현된 알고리즘을 사용하였다. 서울의 버스와 지하철 데이터는 제안한 알고리즘을 설명하기위해 사용되었다.



<그림 1> 보행공간



<그림 2> ①번공간에서의 Depth의 표현

## 2. Space Syntax

건축공간이나 보행공간에서 공간간의 연결체계를 분석하는 도구로 사용되는 Space Syntax는 영국의 Bill Hillier 와 Julienne Hanson 등에 의해 연구된 것으로, 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.

Space Syntax의 계산과정에 가장 기본이 되는 것은 Axial Line과 Total Depth 값이다. Axial Line은 모든 공간을 직선으로 연결하였을 때, 최대 길이와 최소 개수로 구성되는 직선들의 구조를 의미한다. 넓이와 굴곡을 가진 보행공간의 경우 Axial Line을 그려서 나타내

면 <그림 1>과 같이 표현할 수 있다. 모든 공간에서 특정 공간까지 도달하기 위해 몇 번의 단계를 거쳐야 도달할 수 있는지를 나타내는 지표가 *Total Depth*가 된다. 즉  $TD(Total\ Depth)$ 는 한 특정한 공간으로부터 다른 모든 공간으로의 깊이의 합을 말한다.

<그림 1>의 1번 Line의 경우 2번과 3번 Line으로 가기 위해서는 한 번의 공간적인 전환이 필요하게 되고, 1번 Line에서 4번과 5번 Line으로 가기 위해서는 두 번의 공간적인 전환이 필요하며, 1번 Line에서 6번 Line으로 가기 위해서는 세 번의 공간적인 전환이 필요하게 된다. 이러한 공간적인 전환을 하나의 *Step(Depth)*으로 볼 수 있다. 1번 Line에서 다른 모든 Line으로의 경로를 살펴보면 <그림 2>와 같이 Step 3까지 진행됨을 볼 수 있다. <식 1>을 적용하여 1번 Line에서의  $TD$ 를 구해보면,  $TD_1 = 1 \times 2 + 2 \times 2 + 3 \times 1 = 9$ 가 된다.

$$TD_i = \sum_{s=1}^m S \times K_s$$

<식 1> Total Depth

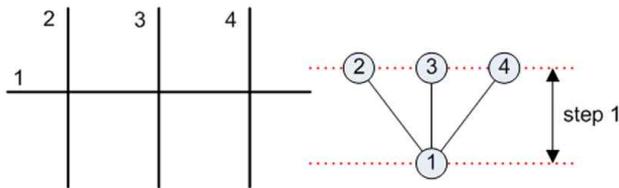
$TD_i$  : 공간  $i$ 의 Total Depth

$S$  : 공간  $s$ 에서부터 거치게 되는 단계의 수

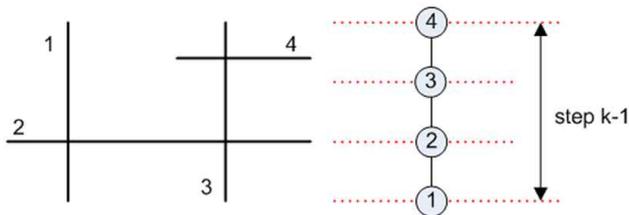
$m$  : 공간  $s$ 에서 가장 깊은 공간까지 거치게 되는 단계의 수

$K_s$  :  $s$ 단계에서의 공간의 개수

이렇게 계산 되어진  $TD$ 값이 다른 공간들에 비해 상대적으로 큰 값을 가질 경우 그 공간은 접근하기 힘들다는 것을 알 수 있다. 그러나 이 수치가 너무 커서 공간 간 비교가 곤란하므로  $TD$ 를 측정대상공간을 제외한 나머지 공간의 수( $K-1$ )로 나누어 평균깊이( $MD, Mean\ Depth$ )를 구한다. 이는 특정 공간에 대한 평균적인 깊이를 의미한다. <그림 3> 동일한 수의 node를 갖는 교통망에서 1번 node로부터 시작되는 두개의 극단적인 경우를 나타낸 것이다. 첫 번째 경우, 1번 node와 나머지 node가 모두 이웃하고 있어 한번의 공간적 전이만 필요한 반면(<그림 3>의 a), 1번 node에서 4번 node로 이동시 2번과 3번 node 모두를 거쳐야 하는 경우가 존재한다(<그림 3>의 b).



a. 규칙적인 교통망



b. 불규칙적인 교통망  
(※  $k$ : 전체 node의 수)

<그림 3> 상반되는 경우의 Depth

위의 두 경우에 대해 MD 값을 구해보면 a의 경우 다음과 같고,

$$MD = \frac{1+2+\dots+(k-1)}{k-1} = \frac{(k-1)k/2}{k-1} = \frac{k}{2}$$

b의 경우,

$$MD = \frac{k-1}{k-1} = 1$$

위와 같다. 이를 공간의 수와 관계없이 0과 1 사이의 값을 갖도록 정규화 시켜 *Normalized Depth(ND)*를 구하면 다음과 같다.

$$0 \leq \frac{2(MD-1)}{k-2} \leq 1$$

<식 2> ND

보통 ND는 접근성에 반비례함으로 직관적인 수치로 나타내기 위해 ND의 역수를 사용하게 되는데 이를 해당 공간의 *Integration*이라 한다. 즉, TD와 *Integration* 값은 반비례의 관계를 갖게 된다.

$$ND_i = 2 \times \frac{MD_i - 1}{K - 2}$$

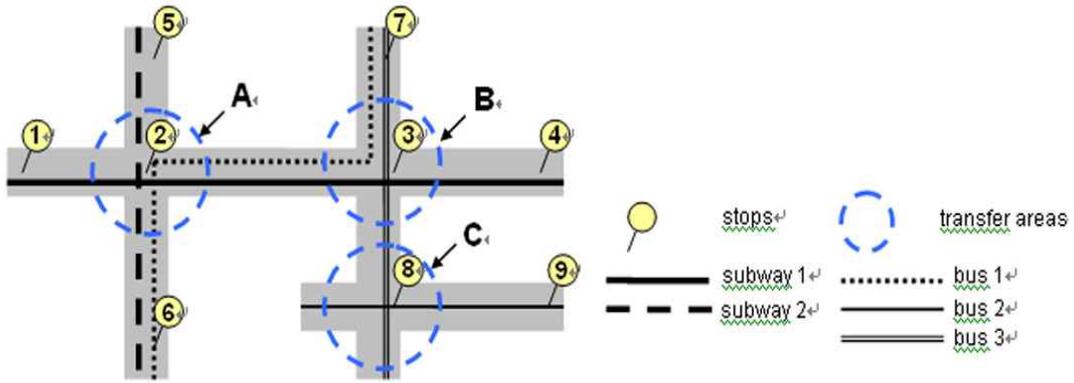
<식 3> Normalized Depth

- ND<sub>i</sub> : 공간의 상대적 비대칭성
- MD<sub>i</sub> : 공간의 평균 깊이
- K : 분석대상 공간의 총 개수

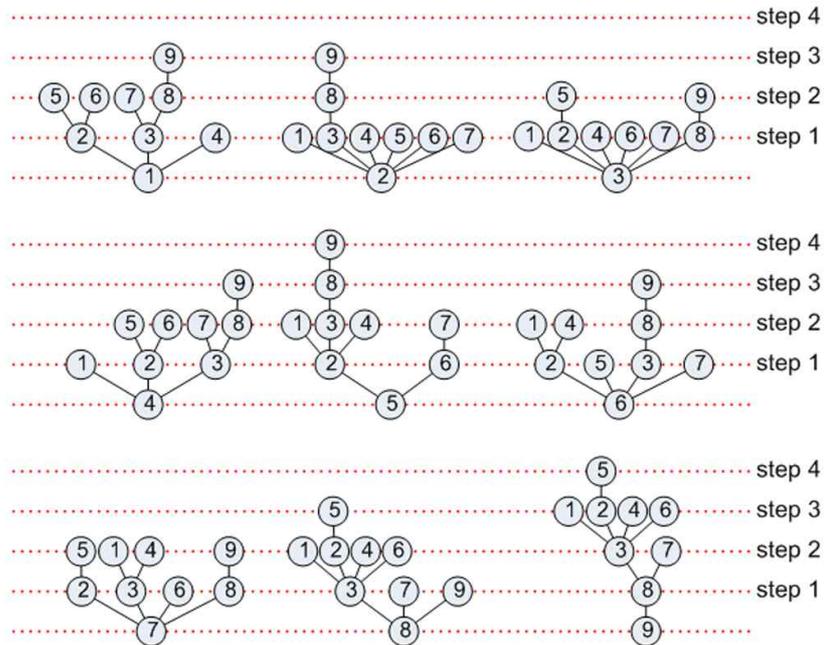
### 3. 대중교통망에의 적용

보행공간에서의 Axial Line을 대중교통 공간에 적용하면 <그림 1>의 Axial Line은 하나의 정류장으로 볼 수 있으며, 이들의 관계가 <그림 4>에 표현되어 있다. <그림 4>의 1번 정류장에서 2번, 3번, 4번 정류장으로 갈 경우 이들 정류장은 동일한 지하철1 노선 상에 있기 때문에 환승이 필요 없다. 하지만 5번과 6번 정류장으로 가기 위해서는 같은 노선 상에 있지 않기 때문에 A지역에서의 환승이 필요하다. 마찬가지로 7번과 8번 정류장으로 가기 위해서는 B지역에서의

환승이 필요하고, 9번 정류장으로 가려면 B지역에서 환승한 다음 다시 C지역에서 환승해야 한다. 이는 Space Syntax 이론에 의해 ‘공간적인 전이’라 볼 수 있으며 이때에 환승이 하나의 Step이 된다. 각각의 정류장에서 다른 모든 정류장으로의 이동 경로를 살펴보면 <그림 5>와 같이 표현된다. 즉, 버스 네트워크에서는 시점에서 종점까지의 연결 노선과 환승지에 대한 고려가 동시에 필요하다.



<그림 4> 대중교통망의 예



<그림 5> 정류장별 Depth Graph

<그림 5>의 결과를 바탕으로 *Integration*의 값을 구하는 과정이 <표 1>에 정리되어 있다.

정류장번호	TD	MD	ND	Integration
1	$1 \times 3 + 2 \times 4 + 3 \times 1 = 14$	1.750	0.214	4.673
2	$1 \times 5 + 2 \times 2 = 9$	1.125	0.036	27.778
3	$1 \times 6 + 2 \times 2 = 10$	1.250	0.071	14.085
4	$1 \times 3 + 2 \times 4 + 3 \times 1 = 14$	1.750	0.214	4.673
5	$1 \times 2 + 2 \times 4 + 3 \times 1 + 4 \times 1 = 17$	2.125	0.321	3.115
6	$1 \times 4 + 2 \times 3 + 3 \times 1 = 13$	1.625	0.179	5.587
7	$1 \times 4 + 2 \times 4 = 12$	1.500	0.143	6.993
8	$1 \times 3 + 2 \times 4 + 3 \times 1 = 13$	1.625	0.179	5.587
9	$1 \times 1 + 2 \times 2 + 3 \times 4 + 4 \times 1 = 21$	2.625	0.464	2.155

<표 1> Integration 값의 산출

<표 1>의 결과에서 Integration 값을 보면 2번과 3번 정류장의 Integration 값이 가장 큰 것을 알 수 있다. <그림 5>에서도 2번과 3번 정류장에서 다른 정류장으로의 접근성이 가장 좋다는 것을 쉽게 판단할 수 있다. 그에 반해 9번 정류장에서 다른 정류장으로의 접근성은 낮게 산출된다. 이와 같은 방법을 실제 대중교통 네트워크에 적용한다면 도시 전체의 각 지역마다 대중교통노선에 의해 접근성이 얼마나 좋은지 정량적으로 표현할 수 있다.

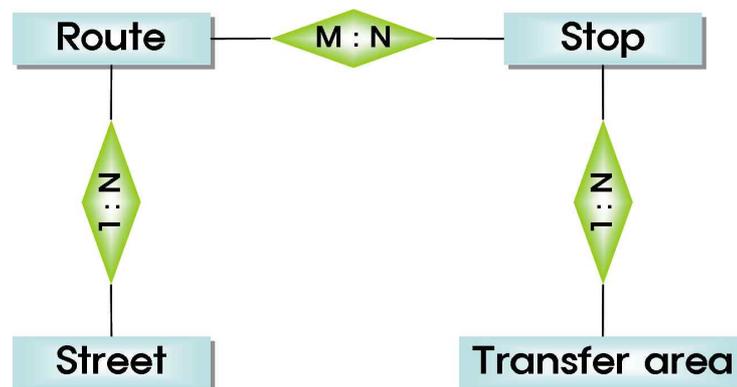
## 4. GIS로의 통합

### 4.1 GIS 데이터 생성

이 논문에서 제안된 과정을 실상황에 적용하기 위해 GIS 적용을 고려해 볼 수 있다. 그러나 대중교통 데이터는 아직 GIS와 호환이 이루어 지지 않는 단계이다. 대부분의 경우 GIS 데이터는 지형적 feature 데이터와 지형 feature에 상응하는 table로 구성된다. 따라서 현재 사용되는 GIS 데이터 구조는 대중교통에 존재하는 특성들의 복잡한 관계를 포괄할 수 없다.

street, route, stop 그리고 transfer area 사이의 관계는 <그림 6>에서 보여 지는 것처럼 관계 데이터베이스에서 개체 관계 모델(Entity Relation Diagram : ERD)로 추상화될 수 있다. 이 과정은 각각의 개체에 대한 관계를 정의하면서 시작한다. 하나의 street 는 하나 이상의 버스나 지하철 노선(route)을 포함한다. 그러므로 street와 route의 관계는 1:N 관계이다. 한편 route와 stop의 관계는 n:m 관계이다. 또한 하나의 transfer area는 하나 이상의 stop을 포함하므로 1:N의 관계가 성립한다.

이러한 서로 다른 데이터 형식 때문에 기존 macro 언어를 사용할 수 없어 본 연구에서는 C# 언어를 이용하여 알고리즘을 적용하였다.



<그림 6> 대중교통 네트워크의 ERD Modeling

### 4.2 유전자 알고리즘

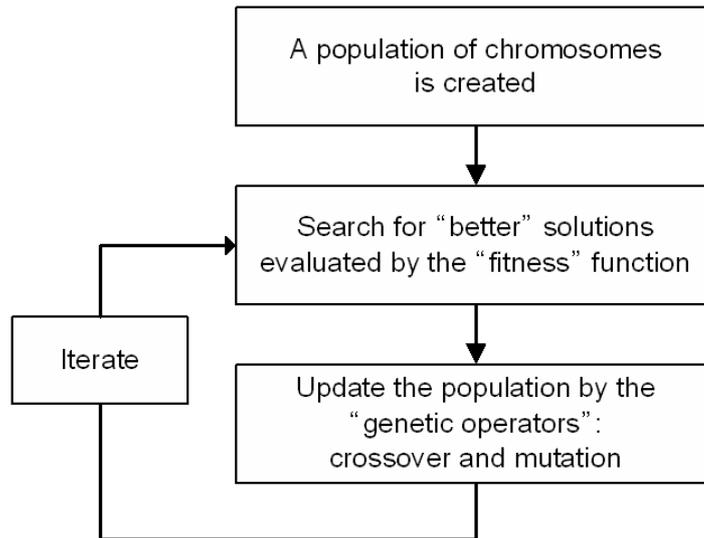
대상지역에서 정류장의 depth를 계산하는 것은 한 정류장에서 다른 모든 지역으로의 최소비용 경로를 찾는 것이다. 이 연구에서 최소비용경로는 시점에서 종점에 이르기까지 환승횟수가 가장 적다는 것으로 정의된다.

여러 형태의 교통수단, 환승 지역에서의 시간지체 등의 여러 요소가 포함된 대중교통 네트워크에서 최적의 경로를 찾는 것은 자가 교통수단 네트워크에서 보다 복잡하다. 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)은 이러한 복잡한 문제들을 대상으로 한다. 이 연구에서 최적의 경로를 찾기 위해 유전자 알고리즘에 기초한 연구방법을 적용하였다. 그러나 이미 유전자 알고리즘에 대한 많은 저서와 연구사례들이 있으므로 유전자 알고리즘에 대한 자세한 서술은 생략하도록 하겠다.

경로가 진화하는 과정은 <그림 7>과 같이 요약 할 수 있다. 이 연구에서는 시점과 종점 사이의 정류장들을 연결하는 것을 염색체로 하고 그것들의 적응도 측정에는 평가함수를 적용한다.

평가함수  $eval$ 은 다음과 같이 정류장( $C$ )에 대한 시점과 종점 간에 발생하는 환승횟수로 그 값이 달라진다.

$$eval(C) = gene\_transfers(x)$$



<그림 7> 유전자 알고리즘 실행과정

## 5. 사례분석

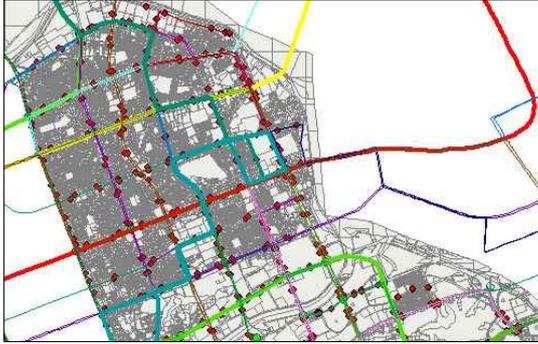
분석 대상지역의 선정은 지하철과 버스노선이 다양하고 복잡하게 얽혀있으며 환승이 보다 체계적으로 이루어지는 서울시로 선정하였다. 인접 정류장들은 하나의 Area로서 동일한 공간으로 설정하였다. 이때 Area의 설정은 지하철역을 중심으로 직선거리 250m로 설정하였고 설정되지 않은 정류장은 그것들을 가지고 동일한 방법으로 Area를 설정하였다. 하나의 Area 내에 있는 정류장들은 동일한 *Integration* 값을 갖게 된다.

### 5.1 정류장별 연결성

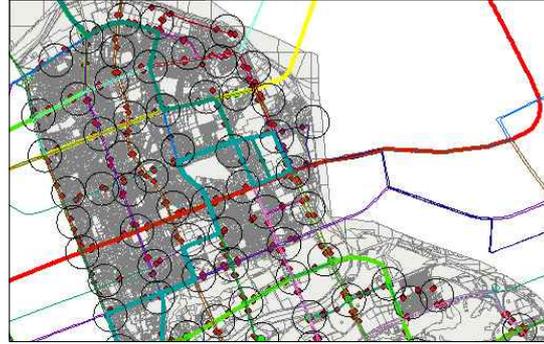
<그림 8>은 강남구 지역의 지하철, 버스 노선과 정류장들을 나타낸 것이고, 이를 위의 과정을 거쳐 각 Area를 설정하여 나타낸 그림이 <그림 9>이다.

총 7단계로 나누어 분석하였고 색이 진할수록 다른 지역과의 연결성이 좋음을 나타낸다. 즉, 다른 지역으로의 이동시 보다 적은 환승이 필요함을 의미한다.

이를 기반으로 인접 필지의 대중교통에 대한 편의성 정도를 산출할 수 있다.



<그림 8> 지하철 및 버스노선



<그림 9> 동일 Area 설정



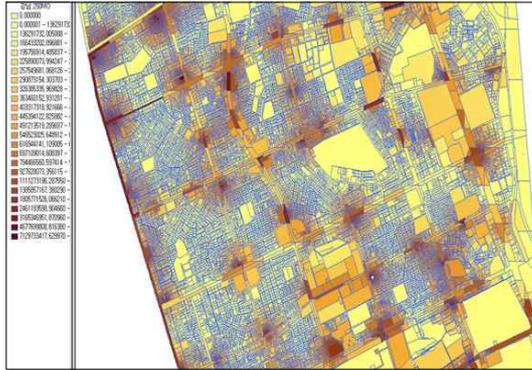
<그림 10> 강남지역 정류장별 연결성

## 5.2 필지별 대중교통 편의성

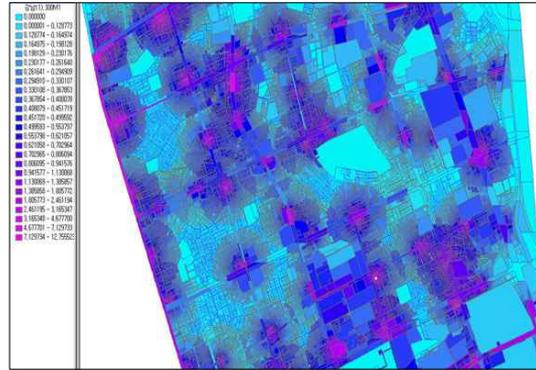
위에서 각 정류장들의 연결성을 산출해 보았다. 이를 이용하여 인접 필지의 편의성 정도를 산출하여 분석해 보고자한다. 이때 인접 필지의 선정을 위에서 설정된 각 Area의 무게 중심점을 구하여 이것으로부터 각 개별 필지의 무게 중심까지 직선거리로 200m부터 50m 간격으로 500m 분석할 수 있도록 하였다.

<그림 11>와 <그림 12>은 위에서 구한 연결성을 기반으로 250m와 300m 내에 위치한 필지들의 편의성 정도를 분석한 결과이다.

Integration 값을 25단계로 세분화 하여 각 단계마다 색의 농도를 다르게 함으로써 시각적인 분석을 가능하도록 하였다. 즉, 진하게 나타난 부분일수록 상대적으로 편의성이 좋은 지역임을 의미한다.



<그림 11> 250m 내 인접필지의 접근성



<그림 12> 300m 내 인접필지의 접근성

## 5. 결론

대중교통노선 선정을 위한 적절한 분석기법에 관한 연구가 현재까지 미흡했다고 할 수 있다. 모든 대중교통 노선을 고려하여 전체 네트워크에서의 접근성을 산출하기 위해 본 연구에서는 Space Syntax 기법을 수정하여 적용해 보았다. 간단한 가상의 네트워크를 이용하여 분석해 본 결과 정류장의 접근성 정도가 실제와 부합하여 적절히 산출되는 것을 알 수 있었다. 이 방법론을 도시 전체의 실제 대중교통망의 접근성 분석에 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 현재의 알고리즘을 그대로 적용하기는 어렵겠지만 여러 가지 결정요소들 즉, 지상교통수단인 경우 차량의 이동속도, 환승지역에서의 이동시간, 환승지에서의 대기시간, 도보이동거리 등의 요소가 고려될 경우 보다 현실적인 방법들이 될 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- 강성래 (2002), 공간구문론에 의한 가로배치형태와 상업분포패턴의 상관성 연구 :창원시 단독주택지를 중심으로, 석사학위논문, 경상대학교 대학원
- 김성희 (2002), 주거지에서 대중교통수단으로의 보행접근성이 대중교통이용에 미치는 영향, 석사학위논문, 서울대학교 대학원
- 김영욱 (2003) Space Syntax를 활용한 공간구조속성과 공간사용패턴의 상호관련성 연구, 대한국토·도시계획학회지 「국토계획」, 제38권, 제4호
- 안병훈 (2000) 시내버스 노선조정체계의 합리화 방안에 관한 연구, 석사학위논문, 인하대학교 교통대학원

- 임승용 (2003), 첨단대중교통시스템(APTS)을 위한 환승경로 결정 알고리즘 연구, 석사학위 논문, 성균관대학교 대학원
- 임현식, (2003), Space Syntax를 활용한 보행공간체계 분석에 관한 연구: 서울시 시청주변의 보행환경을 중심으로, 석사학위논문, 세종대학교 대학원
- 조용진 (2000), 공간구문론(Space Syntax Theory)을 활용한 보행공간체계 분석에 관한 연구 :서울시 도심부(명동지구)를 중심으로, 석사학위논문, 홍익대학교 대학원
- 황윤철 (2000), 중부산간마을의 공간적 특성에 관한 연구 :충북 영동의 마을을 중심으로, 석사학위논문, 한양대학교 대학원
- 황재영 (2000), 1990년대 이후 한국 중정형 주택의 형태와 공간구성에 관한 유형분석 연구, 석사학위논문, 홍익대학교 대학원
- Hiller, B · Penn, A · Hanson, J · Grajewski, T · Xu , J (1993), "National Movement: Or, Configuration and Attraction in Urban Pedestrian Movement". *Environment and Planning B: Planning and Design* 20 : 29-66
- Hillier, B. (1984), *The Social Logic of Space*, Cambridge University Press.
- Hillier, Bill. (1996), *Space is the Machine*, Cambridge University Press.
- Penn, A et al(1998). "Configuration Modeling of Urban Movement Networks", *Environment and Planning B: Planning and Design* 25: 59-84