

연결도를 이용한 보행네트워크와 보행통행량의 상호관련성 연구

Relationship between Pedestrian Network
and Pedestrian Volume Using Connectivity

한 상 진

김 영 옥

오 순 미

(한국교통연구원 연구위원) (세종대학교 건축공학과 부교수) (한국교통연구원 연구원)

목 차

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적
2. 연구의 범위 및 방법

II. 보행량 예측에 관한 기존 연구

III. 연결도를 이용한 보행네트워크 분석

1. 연결도 개념
2. 연결도 산정 알고리즘

IV. 적용 결과

1. 사례분석 1 : 인사동 지역
2. 사례분석 2 : 송례문 지역

V. 결론 및 향후과제

참고문헌

Key Words : 보행교통량, 보행네트워크, 연결도, Dial 알고리즘

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

보행통행량은 전체 통행량 중 적지 않은 부분을 차지하고 있으며 보행안전분석과 보행환경개선에 매우 중요한 요소이다. 그러나 그에 관한 연구는 그 중요성에 비해 미약한 수준이다. 보행에 대한 연구는 주로 보행환경을 정성적으로 평가하고 개선하는 방법과 보행서비스분석 등에 치우쳐 있으며, 보행량 예측에 관한 연구는 드물다(신행우·김영옥, 2006).

특히, 교통계획 부문에서 보행통행량에 관한 고려가 절실히 요구됨에도 불구하고, 나날이 세밀하게 제공되는 차량 관련 자료에 비해 보행통행량이나 보행통행특성에 관한 자료는 구축되어 있는 경우조차 드물기 때문에 연구는 더욱 어려운 실정이다.

이러한 이유로 네트워크 특성만으로 보행량을 예측하는 Space Syntax 이론(공간구문론)이 연구되어져 왔고 이는 많은 연구에서 효과적으로 보행량

을 예측하는 것으로 밝혀졌다(Noah Raford·David R. Ragland, 2003). 그러나 Space Syntax 방법론을 이용한 보행량 예측 방법은 교통 부문의 네트워크 구성 및 통행배정 방식과 상이하어, 교통에서 주로 다루는 다른 수단 통행과의 연계 및 활용에 어려운 점이 있다.

따라서 본 연구는 교통의 관점에서 보행네트워크를 구성하고 이를 바탕으로 보행량을 예측하는 방법을 제시하는 것을 그 목적으로 한다.

2. 연구의 범위 및 방법

본 연구는 보행통행량 예측 방법의 효과 분석을 위하여 도심에 위치하여 도보통행이 활성화되어 있으며 Space Syntax 방법론을 통한 기존 연구가 이루어진 인사동과 송례문 지역을 사례분석 대상지로 선정하였다.

본 논문은 다음과 같은 순서로 진행된다. 보행량 예측에 관한 기존 연구들을 고찰한 후, 연결도 개념

을 도입하여 보행네트워크를 분석하는 알고리즘을 제시한다. 인사동과 승례문 지역을 대상으로 구해진 연결도 값과 보도폭 등 네트워크 특성 자료를 이용하여 보행량을 예측하는 모형을 제시한다.

II. 보행량 예측에 관한 기존 연구

보행량 예측 방법론으로는 비교 연구와 보행계획법이 있다(Liu-Briswold, 2006). 비교 연구는 특정 교차로에서 관찰된 보행량을 유사한 특성을 가진 교차로의 보행량을 예측하는데 사용하는 방법이나, 교차로의 특성을 비교하는 것이 쉽지 않은 단점이 있다. 보행계획법은 통행특성 및 토지 이용을 기반으로 하는 보행량 예측 모형이다. 즉, 토지이용집약도, 대중교통 접근도, 보도폭 등의 변수를 이용한 회귀분석 모형으로 보행량을 예측하는 것으로, Liu와 Briswold(2006)은 보행통행량에 가장 많은 영향을 끼치는 변수로 인구 및 산업 밀도, 대중교통 접근도, 토지이용 혼합도를 제시하였다. 그러나 각 도로 또는 교차로별로 이러한 지표가 조사되어 있지 않은 도시가 대부분이므로, 각 변수에 대한 상세한 조사가 뒷받침되어야 하는 단점이 있다.

미국에서는 변수를 이용한 회귀모형을 통한 보행량 예측 방법론을 주로 연구한 반면, 영국에서는 Space Syntax 방법론과 가시도표분석(Visibility Graph Analysis, VGA)방법으로 유럽 및 아시아 지역의 보행량을 예측하였다. Space Syntax 방법론에서는 보행 네트워크를 가시성이 확보되는 범위 내에서 최대로 긴 최소한의 개수의 축선으로 구축한다. 한 축선에서 연결되는 모든 축선의 개수를 나타내는 연결도와 특정한 한 노드에서 다른 노드로 가기 위해 거쳐야 하는 축선의 개수를 나타내는 공간 깊이를 이용하여 통합도(integration) 값을 산출하게 된다. 통합도는 링크의 접근성을 나타내는 척도로서, 특정 공간의 통합도가 크면 접근성이 좋은 공간, 즉 다른 모든 공간으로 이동할 때 거치게 되는 축선의 개수가 적은 공간임을 의미한다.

Penn 등(1998)은 이 방법을 사용하여 영국 근교의 4개 지역에 대해 전체통합도와 최대빌딩높이를 변수로 결정계수(R^2)가 0.979로 상당히 설명력이 높은 회귀모형을 제시하였다. 국내에서도 김영옥 등(2005)이 인사동 지역을 대상으로 Space Syntax 방법론을 이용한 결과 공간깊이 3의 국부통합도와

도로폭으로 결정계수 0.77의 회귀모형을 도출하였고, 이를 통하여 장례 보행통행량을 예측하였다. 또한 신행우·김영옥(2006)은 토지이용행태에 따라 보행네트워크와 보행량의 관계가 달라지고, 특히 업무지역과 상업지역에서 그 관계가 확실함을 밝혔다.

건축 및 도시계획에서 주로 활용되어 온 Space Syntax 방법론이 이처럼 보행량을 설명하는데 있어 우수한 것이 사실이다. 하지만 전통적인 교통분야의 네트워크 분석기법을 통해, Space Syntax 방법론과 유사한 모형을 구축할 수도 있다.

III. 연결도를 이용한 보행네트워크 분석

1. 연결도 개념

본 연구에서 연결도(Connectivity)란 어떤 링크가 한 장소를 다른 장소와 연결할 때 그 상대적인 중요성을 나타내는 개념이다. 즉, 한 링크가 전체 네트워크 상에서 지리적으로 중요한 위치에 있어서 사용될 확률이 높다면 그 링크의 연결도는 크고, 반대로 링크가 지리적으로 덜 중요한 곳에 위치하면 링크의 연결도는 작아진다. 일반적으로, 전체 네트워크의 중심부에서는 연결도 값이 크고, 주변부에서는 그 값이 작다. 그러나 링크가 주변부에 위치하였다 하더라도 다른 많은 링크들과 연결되어 있으면 연결도 값이 클 수 있다.

2. 연결도 산정 알고리즘

본 연구에서는 Dial 알고리즘(Dial, 1970)을 수정하여 개별 링크의 연결도를 산출하였다. Dial은 경로를 따라 출발지로부터 점점 멀어지고 도착지에 가까워지는 합리적 경로(reasonable route) 개념을 고안하고 이를 기반으로 링크이용확률을 평가하는 알고리즘을 개발하였다. 합리적 경로가 어떤 링크를 자주 이용하면, 이 링크는 높은 링크이용확률을 가지게 된다. 반대로 합리적 경로에 의해 사용되지 않는 링크는 낮은 링크이용확률을 가진다. 링크이용확률이 연결도 개념을 정확히 설명하기 때문에 본 연구에서는 연결도를 정량화하기 위해서 링크이용확률을 사용하였다. 링크가 합리적 경로에 의해 자주 사용되면 분명 전체 네트워크에서 지리적으로 중요한 위치에 있을 것이므로, 이 링크의 연결도 또한

클 것이다.

임의의 기종점(Origin-Destination, OD) 쌍에 대하여 링크 연결도 값을 계산하는 알고리즘은 다음과 같다.

단계1: 링크 가능성(likelihood) 계산

출발노드 o 로부터 각 노드 i 까지의 최소통행비용 C_{oi}^* 을 구하고, 모든 링크 (i,j) 의 가능성(likelihood) $a_{(i,j)}$ 를 계산한다.

$$a_{(i,j)} = \begin{cases} e^{\theta[C_{oi}^* - C_{oj}^* - c_{(i,j)}]} & \text{if } C_{oj}^* > C_{oi}^*, C_{id}^* > C_{jd}^* \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

단계2: 링크 가중치(weight) 계산

출발노드 o 에서부터 C_{oi}^* 를 구한 순서대로 모든 노드 i 에 대하여, 각 링크 (i,j) 의 링크 가중치 $w(i,j)$ 를 구한다.

$$w(i,j) = \begin{cases} a_{(i,j)} & \text{if } i = o \\ a_{(i,j)} \sum_{(k,i) \in B(i)} w(k,i) & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서, $B(i)$ 는 노드 i 를 끝노드로 하는 모든 링크의 집합이다. 도착노드 d 에 도달할 때까지 계산한다.

단계3: 링크이용확률 계산

도착노드 d 부터 시작하여 C_{oj}^* 를 구한 순서의 역순으로 모든 노드 j 에 대하여 연결된 링크의 링크이용확률을 계산한다.

$$p(i,j) = \begin{cases} \frac{w(i,j)}{\sum_{(k,j) \in B(j)} w(k,j)} & \text{if } j = d \\ \frac{w(i,j)}{\sum_{(k,j) \in B(j)} w(k,j)} \sum_{(j,m) \in A(j)} p(j,m) & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서, $A(j)$ 는 노드 j 를 시작노드로 하는 모든 링크의 집합이다.

링크의 연결도는 네트워크 상에서 발생할 수 있는 모든 OD쌍에 대하여 위의 알고리즘을 반복하여 구한다.

$$\text{연결도}(i,j) = \frac{\sum_{o \forall d} p(i,j)^{od}}{N}$$

여기서, $p(i,j)^{od}$ 는 특정한 od에서의 링크 (i,j) 의 이용확률이며, N 은 가능한 모든 OD 쌍의 수이다.

IV. 적용 결과

1. 사례분석 1: 인사동 지역

1) 인사동 지역 보행현황

인사동 지역은 서울에서도 보행활동이 가장 활발한 지역 가운데 하나로, 특히 주말에 인사동길을 중심으로 관광통행이 많다. 본 논문에서는 인사동 지역 내 주요 36개 지점에 대한 2001년 8월 31일(금)~9월 2일(일)의 보행통행량 조사 자료¹⁾를 바탕으로 분석을 시행하였다.



그림 1 대상지역

2) 네트워크 구축

네트워크는 전형적인 교통분석용 네트워크의 구축 원칙에 따라 교차로를 노드, 노드와 노드를 이어주는 선을 링크로 정의하였다. 단, 링크가 곡선 형

1) 자료 출처: 서울특별시(2002), 「인사동 지구단위계획 수립에 따른 시간대별 교통영향 분석」.

태 또는 꺾인 형태를 하고 있어 교차로와 교차로를 그냥 연결하였을 때 본래의 형태를 알아보기 힘든 경우에는 노드를 더 추가하여 비슷한 모양으로 구축한다. 또한 보행네트워크이므로 보행자들이 다니는 인도를 중심으로 하고, 보차혼용도로인 경우는 도로를 중심으로 네트워크를 구축하였다. 구축된 네트워크는 <그림 2>와 같으며 184개의 노드와 450개의 링크로 구성되어 있다.

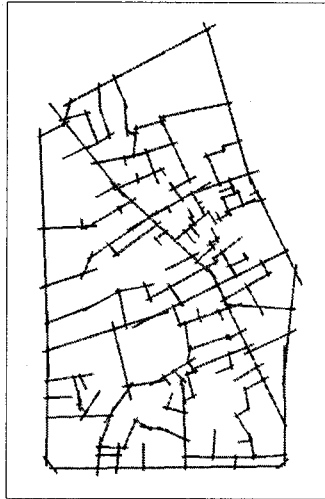


그림 2 구축된 네트워크

3) 분석 결과

분석 결과 연결도의 평균값은 0.02392이다. 연결도의 개념이 어떤 링크가 이용될 확률이므로 연결도 값은 이론적으로 0에서 1 사이이다. 최대값은 인사동길에서 0.17271로 산출되었고 최소값은 아트코리아 부근 막다른 골목에서 0.00003으로 산출되어 실제 네트워크의 특성을 잘 반영하는 것으로 보인다. <그림 3>에 산출된 연결도 값을 링크 두께로 표시하였다. III장에서 언급한 대로 네트워크의 중심에 가까울수록, 다른 링크와 많이 연결된 링크일수록 연결도가 커짐을 알 수 있다.

표 1 연결도 산출 결과

최대값	최소값	평균
0.17271	0.00003	0.02392

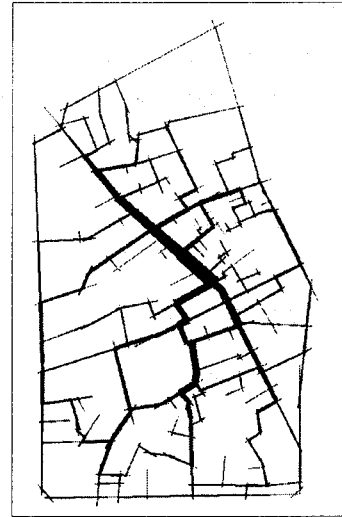


그림 3 연결도 산출 결과

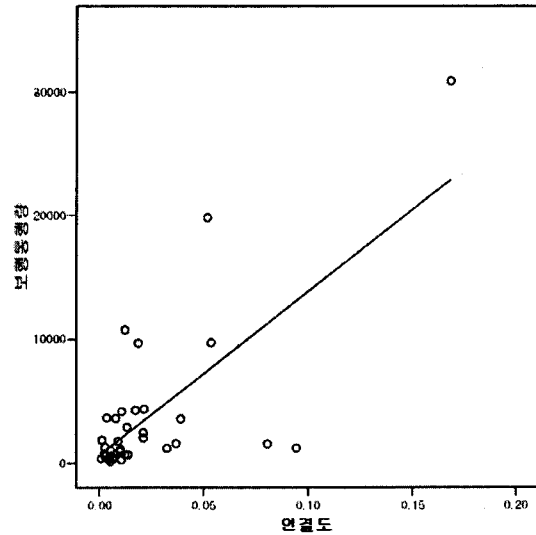


그림 4 연결도-보행통행량 산점도

조사된 36개 보행통행량을 바탕으로 보행량과 연결도간의 상관관계를 도출한 결과, Pearson 상관계수²⁾가 0.713으로 강한 양의 상관관계가 있는 것으로 분석되었다.

표 2 회귀분석 결과

독립변수	결정계수(R^2)	비고
연결도	0.549	설명력이 부족
연결도, 도로폭	0.893	연결도 변수 설명력이 높음

주) 종속변수는 보행통행량, 관측수 36

또한 보행통행량을 종속변수로 설정하고, 연결도 및 도로폭을 독립변수로 설정하여 회귀모형을 구축

2) 김계수·강병서(1998), 「사회과학 통계분석」, 고려정보산업, pp.167-220

한 결과는 <표 1>과 같다. 연결도는 보행통행량과 강한 양의 상관관계를 가지고 있으나 단순회귀분석 모형의 설명력은 다소 떨어지는 것으로 나타났다. 그러나 도로폭을 추가변수로 설정한 경우에는 결정 계수가 0.893으로 상당히 높은 설명력을 가진다. 연결도와 도로폭을 독립변수로 하는 회귀모형은 다음과 같다.

$$V = -30.05 + 13.69W + 609.38C$$

(t=-5.581) (t=10.868) (t=4.900)

F=136.994, 유의확률 0.000

R²=0.893

여기서, V는 보행통행량(100인), W는 도로폭(m), C는 연결도를 의미한다. 도로폭에 비해 연결도가 보행통행량에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

2. 사례분석 2: 승례문 지역

1) 승례문 지역 보행현황

승례문 지역은 남대문시장 및 대형쇼핑몰 등 상업시설이 분포하고 있어, 관광 목적의 통행이 활발한 인사동 지역과는 다른 특성을 보일 것으로 예상되어 추가적인 분석을 진행하였다. 본 논문에서는 승례문 지역 내 주요 17개 지점에 대한 2003년 1월 24일(금)의 보행통행량 조사 자료³⁾를 바탕으로 시간당 보행통행량을 활용하여 분석을 시행하였다.

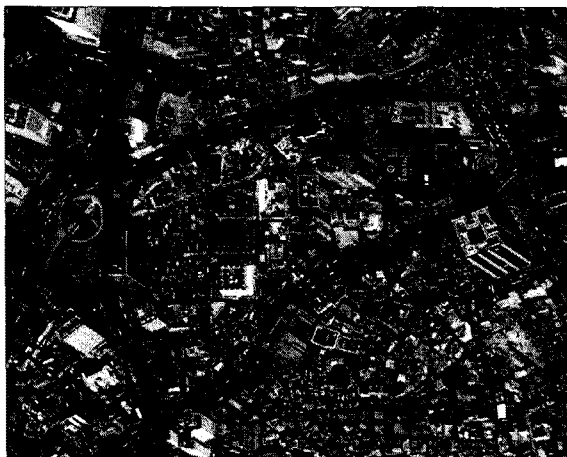


그림 5 대상지역

2) 네트워크 구축

인사동의 경우와 마찬가지로 교통분석용 네트워크의 구축 원칙에 따라 보행 네트워크를 구축하였다. 구축된 네트워크는 47개의 노드와 146개의 링크로 구성되어 있다.

3) 분석 결과

<그림 6>에 산출된 연결도 값을 링크 두께로 표시하였다. 인사동 사례의 결과와 마찬가지로, 네트워크의 중심에 가까울수록, 다른 링크와 많이 연결된 링크일수록 연결도가 커진다. 실제 네트워크에서 많은 보행통행량을 보이는 남대문시장의 남북축 도로 및 동서축 도로의 연결도가 높은 것으로 나타났다. 산출 결과 연결도가 최대인 링크는 네트워크 남쪽에 위치한 퇴계로로 0.08258이다. 사선으로 위치하여 있고 다른 링크들을 많이 연결해주기 때문에 연결도가 최대로 산출되었으나 주거지역과 인접해 있어 실제 보행통행량은 그다지 높지 않았다. 연결도 값이 최소인 링크는 남대문로 3가와 반포로가 만나는 곳에 위치한 링크로서 최소값은 0.00062이다.

표 3 연결도 산출 결과

최대값	최소값	평균
0.08258	0.00062	0.02871

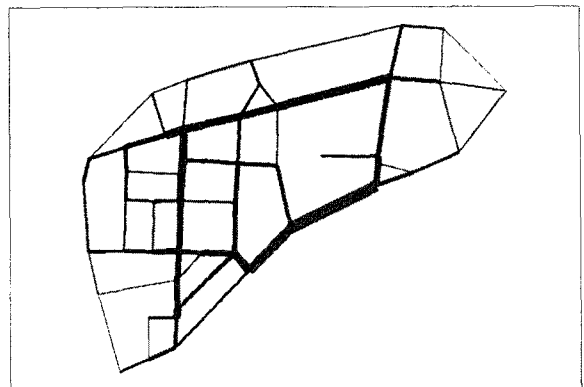


그림 6 연결도 산출 결과

조사된 17개 보행통행량을 바탕으로 보행량과 연결도간의 상관관계를 도출한 결과, Pearson 상관계수가 0.482로 약한 양의 상관관계가 있는 것으로 분석되었다.

3) 자료 출처: 신행우·김영욱(2006), "토지이용에 따른 보행네트워크와 보행통행량의 상호관련성 연구", 한국도시계획학회 추계학술발표대회 논문집

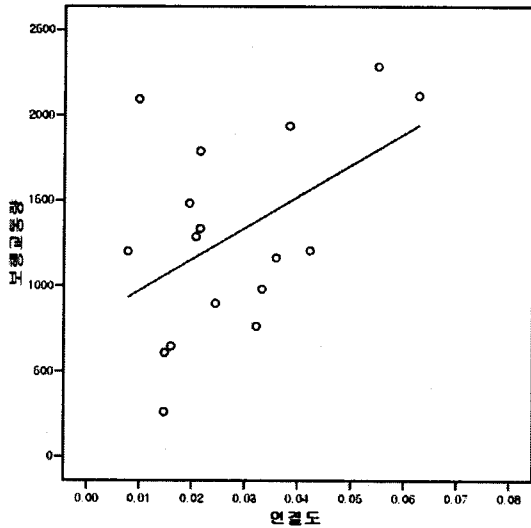


그림 7 연결도-보행통행량 산점도

승레문 사례는 인사동 사례 분석결과에 비해 상관계수 및 결정계수가 낮다. 이는 승레문 지역의 보행통행량 관측 지점수가 17개소로 작기 때문에 발생한 오차의 영향으로 생각된다. 또한, 인사동은 관광을 목적으로 하는 보행통행비율이 크고, 비교적 고른 상업 및 위락시설의 분포로 인하여 보행통행량이 보행네트워크의 영향을 많이 받는 것에 비해, 승레문 지역은 남대문시장 및 종합쇼핑몰 등 대부분이 보행통행량을 과다하게 집중시킬 수 있는 요소가 많아 보행네트워크의 영향이 상대적으로 작기 때문인 것으로 보인다.

또한 보행통행량을 종속변수로 설정하고, 연결도 및 도로폭을 독립변수로 설정하여 회귀모형을 구축한 결과는 <표 2>와 같다. 연결도는 보행통행량과 단순회귀분석 모형의 설명력은 부족한 것으로 나타났다. 그러나 도로폭을 추가변수로 설정한 경우에는 결정계수가 0.671로 모형이 어느 정도 설명력을 가진다. 연결도와 도로폭을 독립변수로 하는 회귀모형은 다음과 같다.

$$V = -1.45 + 6.33W + 86.41C$$

$$(t=-.511) \quad (t=4.316) \quad (t=4.379)$$

$$F=14.262, \text{유의확률 } 0.000$$

$$R^2=0.671$$

여기서, V 는 보행통행량(100인), W 는 도로폭(m), C 는 연결도를 의미한다. 도로폭에 비해 연결도가 보행통행량에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

표 4 회귀분석 결과

독립변수	결정계수(R^2)	비고
연결도	0.233	설명력이 부족
연결도, 도로폭	0.671	연결도 변수 설명력이 높음

주) 종속변수는 보행통행량, 관측수 17

V. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 Dial 알고리즘을 활용하여 링크의 상대적인 중요도를 나타내는 개념인 연결도를 구하는 방법론을 제시하였고, 이를 인사동 및 승레문 지역 보행네트워크에 적용하여 보행통행량을 추정하는 모형을 정립하였다.

연구 결과, 연결도는 보행통행량과 상당히 높은 상관관계(인사동의 경우 Pearson 상관계수 0.713, 승레문의 경우 0.482)를 가지고, 연결도 및 도로폭을 종속변수로 사용하여 추정한 모형의 설명력 또한 높은 편(인사동의 경우 결정계수 0.893, 승레문의 경우 0.671)으로 나타났다. 이는 연결도가 보행통행량을 추정하는데 있어서 충분히 설득력 있는 방법론임을 의미한다. 또한, 연결도를 이용한 보행통행량 추정법은 일반적으로 사용되어져 온 Space Syntax 이론에 의한 추정법에 비해 그 과정이 간단하고, 특정 소프트웨어를 사용할 필요가 없어 많은 사용자가 손쉽게 사용할 수 있으며, 네트워크가 교통네트워크의 구축 방법과 같은 방법으로 구축된다는 장점이 있다.

그러나, 연결도는 Dial 알고리즘에서 적용된 분산계수인 θ 값에 따라 그 값이 변화하게 되는데, 이것이 보행통행량 추정에 미치는 영향에 대한 민감도 분석과 적절한 θ 값의 선정에 관한 연구가 더 진행될 필요가 있다. 또한, 연결도 값은 대상 네트워크의 크기 및 범위, 복잡한 정도에 따라 영향을 받는다. 따라서 대상 네트워크를 설정하는 방법 및 적절한 네트워크의 크기에 관한 연구도 필요하다.

연결도를 이용한 보행통행량 추정법은 연구대상 구역의 가로망 체계 변화, 즉 도로 및 보도, 횡단보도 등이 폐쇄, 신설 또는 확장, 축소되는 경우가 보행통행량에 미치는 영향을 간단한 방법으로 추정해 볼 수 있으므로, 보다 효율적이고 통합적인 보행네트워크를 계획하여 보행통행을 활성화 시키는데 기여할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 신행우·김영옥(2006), "토지이용에 따른 보행네트워크와 보행통행량의 상호관련성 연구", 한국도시계획학회 추계학술발표대회 논문집
2. Liu·Briswold(2006), "A Method for Estimating Pedestrian Volume for Street Intersections in San Francisco", TRB 2007 Annual Meeting
3. 김영옥·한상진·임현식·신행우(2005), "보행네트워크 분석을 통한 보행량 예측 방법 연구 -Space Syntax 기법을 활용하여-", 대한교통학회 제 48회 학술발표회
4. 서울특별시(2002), 「인사동 지구단위계획 수립에 따른 시간대별 교통영향 분석」
5. 한국교통연구원(2003), 「Preparation Studies for the ASEAN Highway Network Development」
6. Noah Raford·David R. Ragland(2003), 「Space Syntax: An Innovative Pedestrian Volume Modeling Tool for Pedestrian Safety」, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1878, pp.66-74
7. A Penn·B Hillier·D Banister·J Xu(1998), "Configurational modelling of urban movement networks", Environment and Planning B: Planning and Design 1998, volume 25, pp.59-84
8. 김계수·강병서(1998), 「사회과학 통계분석」, 고려정보산업, pp.167-220
9. Dirck Van Vliet(1979), "Selected Node-pair Analysis in Dial's Assignment Algorithm", Transpn Res. Vol. 15B, pp.65-68
10. Robert B. Dial(1970), "A Probabilistic Multipath Traffic Assignment Model Which Obviates Path Enumeration", Transpn Res. Vol. 5, pp.83-111

감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설기술혁신사업의 연구비지원(05 기반구축 D02-01)에 의해 수행되었습니다.