Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 20, No. 3 pp. 617-631, 2019

https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.3.617
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

Space Syntax를 이용한 교통수요예측의 중력모형 저항함수의 개선방안

장진영
홍익대학교 과학기술연구소

A Study on Improvement of Gravity model Decay Function of Transporting Demand Forecasting Considering Space Syntax

Jin-Young Jang
Research Institute of Science and Technology, Hongik University

요 약 본 4단계 교통수요예측모형의 통행분포단계에서 중력모형이 가장 일반적으로 활용하고 있다. 본 연구는 중력모형 변수(통행시간, 통행비용 등)의 가변적인 한계를 보완하기 위해 접근성 속성을 단일 마찰인자로서 표현할 수 있는 보다 현실적이고 장래 활용이 용이한 신규 마찰인자를 개발하는데 그 목적이 있다. 이에 신규 마찰인자 도출을 위해 도시공간구조의 특성을 정량화할 수 있는 공간구문론(space syntax)을 활용하여 Link 단위 통합도를 도출 후 통행시간, 통행거리 관계를 이용해 일종의 대리변수로서의 신규 마찰인자를 도출하였다. 대수전환을 통한 마찰인자별 정산결과, 기존 마찰인자(최단거리, 통행시간) 대비 유사하거나 더 높은 수준을 보이는 것으로 분석되었다. 다양한, 검증지표를 활용하여 기존 마찰인자와의 비교 시, 전체적으로는 기존 마찰인자와 유사하지만, 단거리 구간 및 장거리 구간에서 설명력이 뛰어난 것으로 분석되었다. 따라서, 기존 최단거리의 한계에서 벗어나 접근성을 보완할 수 있는 통합도 지표를 이용하여 신규마찰인자 도출 및 적용이 가능하고, 장래 활용성에서 좀 더 장점을 갖는 것으로 판단된다.

Abstract In the four-step demand model, a gravity mode is used most commonly at the trip distribution stage. The purpose of this study was to develop a new friction factor that can express the accessibility property as a single friction factor to compensate for the variable limits of the gravity model parameters (travel time, travel cost). To derive a new friction factor, a new friction factor was derived using the space syntax that can quantify the characteristics of the urban space structure, deriving the link-unit integration degree and then using the travel time and travel distance relationship. Calibration of the derived friction factor resulted in a similar level to that of the existing friction factor. As a result of verifying the various indicators, the explanatory power was found to be excellent in the short - and long - distance range. Therefore, it is possible to derive and apply the new friction factor using the integration index, which can complement the accessibility beyond the limit of the existing shortest distance, and it is believed to be more advantageous in future utilization.

Keywords : Gravity Model, Space Syntax, Decay Function, Integration, Calibration

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

1.1.1 연구의 배경

4단계 수요예측모형 중 두 번째 단계인 통행분포 모형은 첫 단계인 통행발생에서 예측된 각 교통존(TAZ :

본 논문은 홍익대학교 일반대학원 2019년도 박사학위논문의 일부 요약본임
*Corresponding Author : Jin-Young Jang(Hongik Univ.)
Tel: +82-2-320-3091 email: mymyjjy@gmail.com
Received January 30, 2019 Revised February 21, 2019
Accepted March 8, 2019 Published March 31, 2019

traffic analysis zone)의 생성-유인(production- attraction) 또는 발생-도착(origin-destination) 통행량을 각 존간 통행량으로 연결시키는 과정이다. 통행분포 모형은 성장인자모형, 중력모형, 간섭기회모형, 엔트로피 극대화 모형 등 4가지로 구분된다. 이중, 각 존별 통행량 및 존간 통행특성 변수를 활용하는 중력모형이 가장 일반적으로 활용되고 있다.

국내에서 교통수요예측시 활용되는 국가교통데이터베이스(이하, KTDB)는 지역간 및 5대 광역권(수도권, 부산울산권, 대구권, 광주권, 대전권)으로 구분되어 있는데, 5대 광역권에서는 장래 통행분포 예측시 이중제약 중력모형을 활용하고 있으나, 지역간 KTDB에서는 각 존간 교차통행량이 장래에 큰 변화 없을 것으로 가정하여, 성장인자모형 중 하나인 fratar 모형을 활용하고 있다. 즉, 5대 광역권과 달리 지역간에서는 교통체계(고속도로 및 철도망)의 변화를 통행분포 모형에서 반영되지 못하는 한계가 있는 것으로 판단된다.[1,2]

Table 1. Cross-traffic comparison by metropolitan → Destination (Unit : 1,000trip/day)

Spec.	2011 KTDB		2016 KTDB	Increase Rate	
	2010Y (A)	2015Y (B)	2015Y (C)	(B-A) /A	(C-A) /A
Metropolitan area	23,972	25,853	25,389	7.8%	5.9%
Gangwon area	117	126	150	7.3%	27.9%
Chungbuk area	136	142	111	4.3%	-18.2%
Chungnam area	284	339	250	19.5%	-11.8%
Jeonbuk area	30	31	35	0.9%	17.1%
Jeonnam area	37	39	40	5.6%	7.3%
Gyeongbuk area	68	74	65	8.1%	-3.9%
Gyeongnam area	53	56	60	5.2%	12.4%
Total	24,698	26,660	26,102	7.9%	5.7%

예를 들어, <Table 1>과 같이 2011KTDB의 현황(2010년) 및 예측(2015년), 2016KTDB의 현황(2015년)의 수도권에서 각 권역별 교차통행량을 비교한 경우를 보면, 2011KTDB의 현황(2010년) 대비 장래(2015년) 교차통행량은 세종시가 포함되는 충남권을 제외하면, 수도권 총 통행발생량의 증가율과 큰 차이가 나지 않는데, 이는 장래에 큰 변화가 없을 것으로 가정하여 fratar 모형을 적용했기 때문으로 판단된다. 그러나, 2011KTDB의 현황(2010년) 및 2016KTDB의 현황(2015년)을 비교하면, 장래에 큰 변화가 없을 것으로 가정하여 예측한 결과와는 달리, 각 권역간 교차통행량에 비교적 큰 증감이 발생하였다. 변화가 큰 지역을 중심으로 보면, 강원권은 이전에 7.3% 증가할 것으로 예측하였으나, 실제로는 27.9%로 크게 증가하였고, 충북권・충남권・경북권은 증가할 것으로 예측된것에 비해 실제로는 감소하는 것으로 분석되었다. 분석결과에는 각 교통존 통행발생 단계의 오차가 포함된 결과일 수 있으나, 수도권→강원권의 경우에는 서울~춘천 고속도로, 수도권→전북・전남권은 호남고속철도 등 관련 교통시설 개통으로 인한 영향이 fratar 모형에서는 반영되지 않기 때문으로 판단된다.

기존 중력모형 관련 연구는 크게 2가지로 구분되는데, 저항함수(deterrence function, decay function)의 마찰인자(impedance)의 변수를 개선하여 설명력을 높이고자 하는 방법, 마찰인자에 다양한 변수를 추가 투입하여 모형을 개선하고자 하는 방법 등이 있다.

첫째, 국내에서는 저항함수의 마찰인자 관련 변수로 공로(highway)의 존간 최단거리(KTDB 5대 광역권)를 활용하고 있으나, 해외의 경우 존간 통행시간(travel time) 또는 일반화비용(generalized cost)을 활용하고 있다. 해외의 경우 오전 및 오후 첨두시간(peak hour)의 통행량을 별도로 제공하고, 장래 사회적 변화가 크지 않아 입력변수의 장래 변동이 비교적 적은 측면이 있다.[3-7] 하지만, 국내에서 통행시간 및 일반화비용을 활용하고자 할 경우 시간대별・요일별・계절별 변동성이 큰 특징이 있으며, 시간대별로 구분된 통행량(OD)이 미구축되어 있음을 감안하면 현실적으로 활용이 어려운 상황으로 판단된다. 아울러, 4단계 모형의 가장 큰 장점중 하나는 이전 단계의 결과가 다음 단계의 입력 자료로 활용되는 것인데, 마찰인자의 변수로 존간 최단거리 활용시 “수단선택-통행배정” 단계만 순환 반복하지만, 마찰인자로 통행시간 또는 일반화비용을 활용하고자 할 경우에는 통행배정 후 도출된 skim data를 활용해야 한다. 따라서, “통행분포-수단선택-통행배정” 단계의 순환 반복 과정이 필요하므로 많은 소요시간과 번거로움으로 인해 실제적인 활용 및 적용에 어려움이 발생하는 것으로 판단된다.

둘째, 저항함수에 다양한 변수(접근성, 상대적 유인력, 토지이용특성 및 교통특성을 감안한 보정계수)를 추가 고려한 선행연구가 있다. 이는 존간 통행패턴에 다양한 특성이 혼재되어 기존 중력모형 구조로 설명하기 어려워져 통행패턴 변화를 설명할 수 있는 독립변수의 추가 투

입이 요구되었기 때문이다. [8-12] 이와 같은 연구에서는 독립변수의 추가 투입으로 모형의 설명력이 증진되었으나, 네트워크 측면에서의 추가 변수가 아닌 사회경제적 측면에서의 추가 변수가 도입되어 통행발생 단계에서 독립변수로 적용된 사회경제지표 등이 통행분포에서 재활용되는 구조적인 한계가 있고, 장래 적용성에 있어서 어려움이 있는 것으로 판단된다.

따라서, 중력모형의 개선을 위하여 저항함수에 독립변수의 추가 투입은 지양하고, 통행시간과 유사한 설명력을 가질 수 있는 신규 마찰인자를 개발하고, 장래 활용이 용이하도록 하는 연구가 필요하다.

1.1.2 연구의 목적

저항함수의 마찰인자에 복잡화되고 다양화된 통행특성(교통특성의 변화 및 토지이용특성 등)을 반영하되, 신규 마찰인자가 통행시간 수준의 설명력을 유지하고 기존 존간 통행거리의 편리성 및 일관성을 유지할 수 있는 방안이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 도시공간구조 및 교통네트워크가 상호유기적인 관계임을 감안하여 도시공간구조의 특성을 정량화 할 수 있는 공간구문론(space syntax)을 활용하고자 하였다. space syntax 분석을 통해 정량적 접근성으로 도출된 link 단위 통합도(integration) 지표를 이용하여 통행시간, 통행거리와의 관계를 분석하여 신규 마찰인자를 도출하였고, 마찰인자별 정산(calibration)을 통해 설명력 및 유의성을 검증하고자 하였다.

1.2 연구의 범위

1.2.1 내용적 범위

본 연구는 이론 및 기존연구 고찰을 통한 착안점 도출, space syntax를 활용한 공로 저항함수의 정산 및 검증, 결론 및 향후 연구과제 등의 내용을 포함하고 있다.

이론 및 기존연구 고찰에서는 중력모형에 관한 연구와 space syntax에 관한 연구로 구분하여 다루었다. 우선, 중력모형에 관한 연구에서는 국내 KTDB 및 해외의 통행분포 모형과 주요 마찰인자 관련변수에 대해 검토하고, 독립변수 추가 투입으로 인한 모형개선에 관한 연구 및 저항함수의 설명력을 개선하기 위한 연구에 관해 고찰하였다. 이후, space syntax에 관한 연구에서는 이론적 개념 및 분석지표, 주요 활용 분야 등에 관해 고찰하였으며, 교통분석 분야의 네트워크 활용성에 관해 검토하였다. 특히, 이용자가 느끼게 되는 인지거리에 관한 선행연구 및 교통분야에서의 활용연구 등을 고찰하였다. 이를 통해 국내 수요예측시 통행분포 단계에서의 중력모형 적용의 한계를 검토하고, 이를 보완하기 위한 space syntax 활용방안을 도출하고자 하였다.

space syntax를 활용한 공로 저항함수의 정산 및 검증에서는 현황 공로 네트워크 및 관측 OD를 기반으로 통행배정 수행 후 통행시간을 도출하고, space syntax 분석을 통해 상대적 접근성을 표현하는 지표인 통합도를 산정하였다. link를 기반으로 통행시간 및 거리, 통합도간 상관관계를 검토하여 통행시간을 대체할 수 있는 대리변수(proxy variable) 역할을 수행할 수 있는 신규 마찰인자를 도출하였다. 도출된 신규 마찰인자와 기존 마찰인자간의 저항함수 정산을 통해 모형의 유의성 및 설명력 확보여부를 검토하였으며, 다양한 검증기법을 활용하여 신규 마찰인자를 검증하였다.

1.2.2 공간적 범위

본 연구의 공간적 범위는 전국 지역간 통행을 대상으로 설정하였다. 광역권 자료는 해당 지역 내부 통행패턴 묘사에 중점을 두고 있고, 장래 통행분포에서 존간 최단거리를 기반으로 중력모형을 적용하고 있으나, 전국 지역간 통행은 장래 통행분포에 fratar 모형을 적용하고 있어 신규 도로 개설효과가 좀 더 명확하게 검증할 수 있을 것으로 판단되기 때문이다.

전국 지역간 통행에 관련된 자료는 개별설문자료(비집계자료)와 전수화·현행화 자료(집계자료)로 구분된다. 본 연구에서는 현황 분석 뿐 아니라, 장래 네트워크 확장에 대한 검증까지 연구의 내용적 범위에 포함하였고, 매 연도별로 기준연도의 공로 및 대중교통 통합 네트워크와 함께 전수화·현행화가 제공됨을 감안하여, 해당 자료를 적용하였다.

2. 이론 및 기존연구 고찰

2.1 중력모형 관련연구

2.1.1 중력모형 적용사례 검토

1) 국내 적용사례 검토

국내에서는 『국가통합교통체계효율화법』 제12조에 의거하여 국토교통부(한국교통연구원)가 매년 KTDB를

제공하고 있다.[13] KTDB는 권역별로 별도 구축하여 제공하고 있는데, 전국 지역간 및 5개 대도시권으로 구분하고 있다. 각 권역별 통행분포 모형을 보면, 지역간은 장래 네트워크 변화로 인한 교차통행량 패턴의 변화가 없는 것으로 가정하여 fratar 모형을 적용한데 비해, 5개 대도시권은 이중제약 중력모형을 적용하고, 수정혼합함수(combined function) 형태, 마찰인자로는 존간 공로 최단거리를 활용하였다. 즉, 전국 지역간 OD의 통행분포 분석을 보면, 광역권 내부는 각 대도시권의 중력모형 적용결과를 활용하고, 기타 지역에 대해 fratar 모형을 적용 후 완성되었다. 따라서, 전국 지역간 OD의 장래 특성은 1가지의 모형으로 정의하기 어려운 혼재된 상황으로 볼 수 있는 문제점이 있다.[1,2]

2) 해외 적용사례 검토

미국의 경우에는 미국 연방 공로국에서 수요예측 증진 프로그램(travel model improvement program)을 통해 넓은 범주에서의 매뉴얼을 제시하고 있고, 각 주의 DOT(Department of Transportation) 및 MPO (Metropolitan planning organization)에서 이를 구체화하여 수요예측모형을 제시하고 있다.

우선, FHA(1997)에서는 이중제약 중력모형을 제시하고 있으며, 일반화비용을 마찰인자로 활용할 수 있음을 제시하였다. Florida DOT(2011)에서는 마찰인자로 통행시간에 대중교통 추가 소요시간(터미널 시간 등) 및 통행요금(유료도로비용 및 대중교통 비용)을 추가 고려하여, 사실상 일반화비용을 적용하고 있는 것으로 조사되었다. Texas DOT(1999)는 Dallas-Fort 지역 수요예측시 이중제약 중력모형을 활용하였으며, 마찰인자는 공로에서의 교통존 간 최단통행시간을 활용하였다. 그리고 US DOT(2012)의 SCAG 지역에서는 가정기반 통학(HBSC, HBCU)은 중력모형을 활용하였으나, 다른 통행목적은 이산선택론(discrete choice)을 활용한 목적지 결정 모형(destination choice model)을 활용하였다. 중력모형을 적용하는 2개의 통행목적에 대해 마찰인자는 공로의 교통존 간 통행시간을 활용하였다. 아울러, CAMPO (2013)은 이중제약 중력모형을 적용하였으며, 마찰인자는 공로의 통행시간을 활용하였다.[4,6,14,15]

뉴질랜드 교통부(2012)에서는 약 2001년 Wellington 지역 가구통행실태조사 표본(2,538 가구)을 대상으로 통행분포 모형의 다양한 정산방법을 연구하였다. 해당 연구에서 마찰인자로는 공로 기반 일반화비용을 활용하였다. 멕시코 IMIP(Instituto municipal de investigación y planeacion)(1999)에서는 Juarez 지역을 대상으로 3중제약 중력모형(tri-proportional model)을 적용하였다. 중력모형 단점 완화를 위해 거리별 급간에 보정계수를 추가 반영하였고, 교통 존간 수단분담 비율을 활용하여 가중치를 적용한 존간 통행시간을 마찰인자로 활용하였다.[16,17]

2.1.2 중력모형 관련연구 검토

중력모형 관련연구는 크게 2가지로 구성된다. 첫 번째는 변수의 추가 투입 또는 보완을 통한 인한 모형의 설명력 개선에 관한 연구, 두 번째는 모형의 이론적 보완에 관한 연구로 구분하였다.

1) 변수의 추가투입 또는 보완 관련연구

Gonçalves et al(2001)은 저항함수의 정산시 하이브리드 모형을 최우추정법(maximum-likelihood principle)을 활용하여 정산기법을 개선하고자 하였으며, 마찰인자로 주로 활용되는 일반화비용 이외에도 통행거리에 따른 간섭기회값(number of intervening opportunities)를 추가 변수로 반영하여 모형을 설명하였다. 기존 모형의 오차가 감소하긴 하였지만, 장래 간섭기회값의 측정이 주관적인 단점이 있는 한계가 있는 것으로 판단된다.[18]

유영근(2006)은 중력모형 예측정도 향상을 위해 모형과 예측치간 괴리를 야기하는 잠복변수(lurking variable)의 존재를 가정하였다. 잠복변수에 의한 영향이 모형의 잔차에 포함되며, 교차통행량의 잔차가 시계열적으로 상관관계가 있음을 분석하였다. 마찰저항으로는 최단거리 및 시간거리(존간 수단별 평균 소요시간의 가중평균)을 이용하였다. 연도별로 잔차의 증가가 없음을 확인한 뒤, 기존 중력모형에 잔차를 결합한 형태로 개선된 중력모형을 도출하였다.[19]

전용현 등(2015)은 중력모형 한계 극복을 위해 신규 보정계수를 산출하였으며, 보정계수는 사회경제지표(가구수, 자동차수, 인구밀도, 종사자수), 토지이용특성(용도별 특화도), 교통서비스특성(지하철 및 간선도로IC 유무), 권역간 통행특성 등을 반영하여 도출하였다. 신규 보정계수를 추가 활용한 중력모형은 기존 모형에 비해 설명력이 증가하는 것으로 검토되었다.[20]

최성택(2014) 및 최성택 등(2015)은 지역간 상호교류

특성 및 경제적 의존성 등을 감안하기 위하여 수요기반 접근성 변수를 저항함수에 추가 반영하였다. 수요기반 접근성 변수는 해당 존을 제외한 나머지 존에 대한 상대적 거리와 인구 규모에 대한 가중평균값으로 정의되었다. 추가된 접근성 변수를 포함하여 2단계 정산을 수행한 결과, 설명력이 개선되는 것으로 분석되었다.[21,11]

전용현 등(2017)은 접근성 변수를 저항함수에 추가 반영하였다. 접근성 변수의 의미는 기존 문헌과 유사하지만, 접근성 변수를 유출 접근성 및 유입 접근성으로 구분하여 존간 교차통행량×통행비용 대비 존간 교차통행량으로 정의하였다. 검증결과, 접근성 변수 추가시 기존 모형대비 오차율이 감소하는 것으로 분석되었다.[12]

2) 모형의 이론적 보완에 관한 연구

모형의 이론적 보완에 관한 연구는 정산에 관한 연구를 중심으로 이루어져왔다. 1970년~80년에 걸쳐 Hyman(1969), Wilson(1969), Evans(1970), Lamond et al(1981) 등 해외에서 다수의 연구가 집중되었다.[22-25] 국내는 1990년대 이후 노정현(1991)은 하이브리드 기법을 제안하여, 윌슨의 반복평형기법의 단점을 보완하였고, 윤성순(1993)은 최우추정법을 개선하여 파라미터 추정방법을 제안하였다. 김형진(1996)은 적합도 검증을 위해 카이제곱비율에 의한 평가 방법을 제시하였다.[26-28]

2000년대 이후에는 모형의 보완 및 장래 적용성에 관한 연구, 실증 분석에 관한 연구 등 다양하게 수행되었다.

Tillema et al(2004)는 신경망 네트워크를 이용하여 전통적인 통행분포 모형과 비교하였다. 기존 방법론은 표본을 구득하는데 매우 많은 시간과 비용이 소요되는데, 신경망 네트워크 활용시 표본이 적을 경우에는 기존 모형보다 활용성이 뛰어난 것으로 나타났다.[29]

Veenstra et al.(2010)은 네덜란드에서의 쇼핑 목적 통행을 대상으로 제한된 목적지에서의 통행분포 모형을 제시하였다. 제시된 모형은 공간적 구성을 모델링 과정에 통합한 중력모형으로 기존 중력모형에 비해 설명력이 증진되는 것으로 분석되었다.[30]

Mishra et al.(2013)은 Maryland를 대상으로 중력모형과 도착지 선택모형을 분석하여 비교하였다. 검토결과, 가정기반업무 목적통행에서 도착지 선택모형이 통행거리 분포와 OD의 설명력이 좀 더 우세한 것으로 나타났다.[31]

2.2 space syntax 관련연구

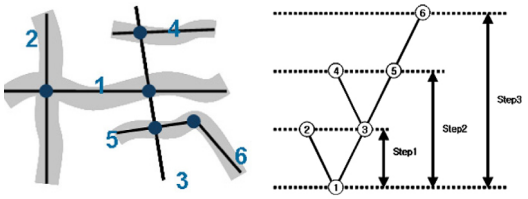
2.2.1 space syntax의 이론적 개념

1) 이론적 개념

Space syntax는 Hillier et al.(1984)에 의해 개발된 개념으로서, 공간의 속성을 물리적 구조로 보고 정량적으로 제시하는 이론으로, 건축분야 및 도시분야, 교통분야 등에서 활용도가 증가하고 있다. space syntax는 특정 대상지역의 공간구조 중요도를 분석범위 내 모든 공간을 기종점으로 하여 접근성을 분석한다. 이때, 도출된 결과는 전체 공간에 대한 통합성 및 공간구조의 위계성을 나타낸다. 따라서, space syntax에 의한 분석지표인 통합성(integration)이 큰 곳은 접근성이 뛰어나다는 의미로 해석할 수 있다.[32-34]

space syntax의 공간분석방법은 축선에 의한 분석방법 및 단위공간에 의한 분석방법 등 2가지로 구분 할 수 있다. 우선 축선에 의한 분석방법(axial analysis)은 공간의 물리적 구조를 축선(axial line)으로 설정하여 연결된 정도를 표현하는 방법이고, 단위공간에 의한 분석방법(convex analysis)은 공간의 물리적인 구조를 단위 공간(convex space)으로 설정하여 연결된 정도를 분석하는 방법이다. 단위 공간에 의한 분석은 주로 도시계획 또는 건축분야에서 주로 활용하고 있고, 네트워크를 이용하는 교통분야는 축선에 의한 분석방법을 주로 활용하고 있다.[35-36]

축선의 기본개념은 사람이 시각적으로 최대한 볼 수 있을 정도로 최대한 긴 한 개의 직선으로 표현한 것이 축선이며, 이를 기반으로 만든 것이 축선도(axial map)이다. 이 축선도는 가시영역도를 기반으로 구성되며, 접근성 의미가 포함된다. 하나의 축선도에 대해 공간적 분석을 위한 지표 분석을 위한 샘플을 [Fig 1]과 같이 구성하였다. 축선을 단순화하여 좌측처럼 표현하면, 총 6개의 축선이 있고, 축선간 공간적 깊이(depth)는 우측의 그래프처럼 표현할 수 있다. 예를 들어, 1번 축선과 2번 축선의 깊이는 “1”이며, 1번과 4번 축선은 3번 축선을 경유해야 하기 때문에 깊이가 “2”로 표현된다. 아울러 5번과 6번은 하나의 선처럼 보일 수 있으나, 인지거리를 벗어나 별도의 축선으로 구축되었기 때문에 깊이가 “1”로 표현된다.[32,34,37]



(a) (b)

Fig. 1. Examples of Axial Line and Spatial Structures
(a) Setting of axis line
(b) Gragh of Spatial Structures

2) 분석지표

space syntax 분석을 통해 개별 노드의 특성을 나타내는 지표인 연결도(connectivity), 통제도(control), 통합도를 구축할 수 있으며, 통합도를 산출하는 방법은 다음과 같다.

1단계 : 총 깊이(TD : total depth)의 도출로써, 노드간의 깊이는 두 노드간 회전으로 계산되며, 노드간 깊이가 클수록 위계적 차이 단계가 커진다. 즉, 총 깊이는 특정 노드에서 모든 노드들로의 깊이를 의미한다.(수식1)

$$TD_i = \sum_{s=1}^{m} (s \times N_s) \quad (1)$$

여기서, TD_i : 노드 i에서의 총 깊이
s : 노드 i에서의 단계 수
m : 노드 i에서의 최대 단계 수
N_s : 단계 s에 존재하는 노드의 수

2단계 : 평균깊이(MD : mean depth)의 도출로써, TD를 노드로 나누어 계산하여, 특정 노드의 MD는 1이상 n/2로 정규화된다.(수식2)

$$MD_i = \frac{TD_i}{n-1} \quad (2)$$

여기서, MD_i : 노드 i에서의 평균 깊이
n : 축선도 총 노드 수

3단계 : 상대성 비대칭(RA)의 도출로 MD가 노드수에 관계없이 0과 1 사이의 값을 가지도록 변환하여 다른 네트워크와의 깊이 비교가 가능토록 한다.(수식3)

$$0 \le RA_i \le \frac{2(MD_i - 1)}{n-2} \le 1 \quad (3)$$

여기서, RA_i : 노드 i에서의 상대성 비대칭

4단계 : 실질적 상대성 비대칭(RRA)의 도출로써, RA의 총 노드수로 인한 영향을 배제하기 위해 RA와 같은 개수의 공간에 대한 편차보정치(D_n)로 나누어 산출한다.(수식4)

$$RRA_i = RA_i / D_n \quad (4)$$

$$D_n = \frac{6.644n \times \log(n+2) - 2.17n \div 2}{(n-1)(n-2)}$$

여기서, RRA_i : 노드 i에서의 실질적 상대성 비대칭

5단계 : 통합도(I : integration) 도출로써, RRA 값이 너무 작아 변별력이 저하되기 때문에 역수로 전환하여 활용한다.(수식5)

$$I_i = \frac{1}{RRA_i} \quad (5)$$

여기서, I_i : 노드 i에서의 통합도

2.2.2 교통부분에서의 공간 관련 연구

1) GIS 네트워크와 축선도 대응에 관한 연구

교통분야에서 네트워크를 기반으로 space syntax 분석을 수행한 연구가 다수 있지만, 이에 대한 의문 및 한계를 제기하는 성격의 연구도 일부 있는 것으로 검토되었다. 우선, 교통부분의 네트워크와 축선도와의 대응에 관한 문제가 있다. 주로 지리정보 분야에서 제기된 문제인데, 네트워크를 활용하는 것은 전통적인 축선도와 구성 방법이 다르다는 점이다. 구체적으로는 <Table 2>와 같이 기본적으로 서로 공간을 구성하는 방식이 다르다는 점을 제기하고 있다.[38]

Table 2. Difference between GIS network and axis line

Spec.	GIS network	Axis line
To whom the event occurs	node	axial line
Connect to	link	intersection

반대로, 축선도를 연결 그래프(connectivity graph)로 구현하면 네트워크와 균일하게 대응되기 때문에 활용 가능함을 밝힌 연구도 있다. 그리고, space syntax는 거시적 교통구조가 대도시 중심부에 영향을 미치지만, 이러한 요소가 space syntax 분석 개념에는 포함되지 않음을 지적하였다. 아울러, GIS 자료의 속성중 연장, 차로수, 제한속도 등 도로의 속성이 space syntax에는 고려되지

않는 한계가 있음을 지적한 연구도 있다.[39-40]

검토결과, 대부분의 연구에서는 전통적인 의미의 축선도와 개념상 차이가 있긴 하지만, space syntax 분석의 잠재력이 좀 더 큰 것으로 보고, GIS 네트워크 및 교통부분에서 하나의 지표로서 활용 가능함을 꾸준히 제시하고 있는 것으로 파악되고 있다.

2) 인지거리에 관한 선행연구 검토

교통분야에서 거리에 관련된 연구는 통행에 대한 마찰 및 저항을 의미하기 때문에 매우 중요한 부분이다. 인지거리에 관한 연구는 크게 2가지로 구분할 수 있는데, 설문조사를 통한 인지거리에 영향을 미치는 요소를 분석하는 연구와, space syntax 분석을 통해 기존 연구를 개선하는 방법 등으로 구분된다.

우선 설문조사를 통한 인지거리에 영향을 미치는 요소에 관한 연구는 다음과 같다.

국토연구원(2008)은 고속도로 건설 파급영향을 개별노선이 아닌 집합적 구축효과로 평가하기 위해 이용자 439명을 대상으로 설문조사를 수행하였다. 도시간 이동시 이용자의 심리적 거리 인식 차이를 구분하는 인지도(cognitive map) 작성으로 고속도로 이용자의 국토 공간상 인지거리 단축효과를 평가하였다. 분석결과, 물리적 거리에 비해 심리적 인지거리는 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 임하나 등(2014)은 강남역 일대 보행자 309명을 대상으로 설문조사를 수행한 뒤, 직접 체험한 경로에 대한 체감거리와 보행환경평가요인 특성을 분석하였다. 분석결과, 주변환경이 쾌적하거나 볼거리가 많은 경우 체감거리를 짧게 느끼는 반면, 횡단보도 및 신호주기, 방향전환 등 연결성 저해요소에는 체감거리를 길게 느끼는 것으로 나타났다.[41,42]

Space syntax 분석을 통해 기존 연구를 개선하고자 하는 연구는 다음과 같다.

조형규(2010)는 도시가로 네트워크를 기반으로 축선도를 구축하여, 축선도 상 가로 연결각을 가중치로 선정한 뒤, 공간분석모델을 이용해 실제 도시공간 적용 모델의 예측력을 검증하였다. 검토결과, 가로 연결각을 토대로 최단 각도 경로를 도출하여, 물리적 거리와 더불어 방향전환 횟수도 경로선택에 영향을 주는 것으로 분석하였다. 권순일 등(2010)은 GIS 데이터를 이용하여 축선도 구현 방법에 대해 연구하였다. 배치도를 이용한 전통적인 방법과 GIS 도로망 데이터를 이용한 방법을 수행하여 결과에 큰 차이가 없는 것을 제시하였고, 전통적인 방법의 작성 기준이 주관적이고 어려운 점을 감안하여, GIS 도로망 데이터를 이용해 다양한 알고리즘 적용시 일정한 규칙을 기반으로 빠르게 작성할 수 있는 장점을 나타냈다. 아울러, 서울시청 주변 교통량과 통합도간 상관관계 분석시 결정계수가 0.5387로 비교적 높게 나타나, 통행량과 통합도간의 상관관계 가능성을 제시하였다.[43,44]

3) 인지거리에 관한 선행연구 검토

교통 네트워크를 활용한 선행연구는 접근성 산출을 위한 연구와 보행(교통량) 또는 통행속도, 경로탐색 등과의 관계를 규명하고자 하는 연구 등 크게 2가지로 구분할 수 있다.

우선, 네트워크에서의 접근성 산출을 위한 연구는 다음과 같다.

전철민(2004)는 대중교통 노선에 기반하여 접근성을 산출하기 위해 space syntax 기법을 수정하여 적용하였다. 가상 네트워크를 이용해 분석한 결과, 도출한 접근성 정도가 실제와 부합하여 적절히 산출되는 것으로 검토되었다. 이병욱 등(2005)은 space syntax와 통행시간을 이용하여 접근성 산출 방법론을 제안하였다. 분석지표에 시간이나 거리에 관한 개념이 미포함되어 내적(inner product) 개념을 도입해 대중교통 노선단위와 space syntax 단위를 일치시켜 접근성을 산출하였다.[37,45]

보행(교통량) 또는 통행속도, 경로탐색 등과의 관계를 규명하고자 하는 연구는 다음과 같다.

김영욱(2003)은 인사동 공간구조를 분석하고 공간사용 패턴을 조사하여 두 인자간의 상호관련성을 규명하였다. space syntax 분석을 통해 도출한 국부 통합도와 보행량 패턴간 밀접한 관련성이 있으며, 자동차의 경우에는 전체 통합도와 밀접한 관련성이 있는 것으로 분석하였다. Jiang et al.(2004)는 가로 네트워크의 속성을 유지하는 신규 일반화 모형을 제안하였다. space syntax의 축선도를 연결 그래프로 변환하여 네트워크와의 속성 정보를 공유할 수 있음을 밝히고, 스웨덴 도시에 적용하였다. 류승규 등(2005)은 이용자의 인지도를 고려한 최적경로 탐색을 위해 space syntax 분석을 활용하여 알고리즘을 보완하였다. 아울러, 알고리즘 평가를 위한 설문조사 수행결과, 기존 경로에 비해 개발된 최적경로 알고리즘을 좀 더 선호하는 것으로 분석되었다.[46-48]

Shirabe(2005)는 기존 최단경로 알고리즘이 네트워크의 표면적인 성격(연장 및 연결성)과 외적인 물리적 요소(제한속도 등)만을 고려하고 있음을 지적하였다. 이를 극복하기 위해 물리적 제약을 고려한 관점을 제안하였다. 정찬희 등(2010)은 space syntax를 이용한 통합도를 도출하여, 대구시 도심 8개 블록 주변가로의 보행량과의 상관관계를 검토하였으며, 통합도가 높은 가로계획의 중요성을 제안하였다. Paul(2012)은 축선도를 이용하여 경로를 처리하고자 할 경우 거리 및 시간에 관련된 정보가 없는 단점을 감안하여, 시간-비용 변수를 통해 차량 이동 네트워크 모델에서 경로선택이 좀 더 정확해질 수 있는 이론적 토대를 제시하였다. segment 단위로의 통합을 통해 기존에 비해 경로선택에 좀 더 유리한 것으로 분석되었다. Law et al(2012)는 런던을 대상으로 일반 도로네트워크 및 대중교통망(런던 지하철 및 일반철도망)이 추가된 네트워크를 대상으로 접근성의 변화를 분석하였다. 일반도로 네트워크에 지하철 네트워크를 결합하여 다수단 space syntax 네트워크 분석을 수행하였다. 분석결과, 다수단 통합 네트워크의 분석이 도로 네트워크에 비해 공간적 중심을 좀 더 정확히 표현하는 것으로 분석되었다.[49-52]

이미영 등(2015)은 space syntax의 통합도를 감안하여 통합도가 높은 링크의 연결성을 경험할 수 있도록 space syntax와 보행자 통행배정모형을 통합하여 제시하였다. 두 모형의 결합으로 보행 네트워크에서 보행자가 경험하는 접근성 및 이동성에 대한 통합적 판단이 가능한 장점이 있다. 김종형 등(2016)은 보행네트워크의 보행성 판단을 위해 space syntax과 logit 경로선택모형의 통합을 제안하였다. 통합모형은 보행자가 경험하는 통합도를 비롯하여 이동성, 접근성, 안전성과 같은 요소들을 확률적으로 정량화하여 제공할 수 있는 장점이 있다. 송유미 등(2016)은 OSM(open street map)을 이용하여 수원, 안산, 평택, 수도권 고속도로를 대상으로 통합도를 산출하여 차량의 통합도가 space syntax의 통합도에 영향받는 것으로 분석하였다. 이규진 외(2016)은 대전광역시 교통 제주도를 기반으로 각 행정동의 평균 통합도를 도출하였다. 도출된 지표를 이용하여 PUI(난개발 지수)에 적용하여 존 내부 통행량 추정모형에 활용하였다.[53-55, 36]

2.3 시사점 도출

선행연구 검토결과, 해외의 경우에는 대부분 마찰인자가 통행시간 또는 일반화 비용을 이미 사용중이며, 경우에 따라서는 대중교통 통합네트워크를 활용하기도 하는 것으로 검토되었다. 특히, 국내에서도 사람이 이동시 인지하는 거리에 통행거리 보다는 통행시간 특성이 더욱 강한 것으로 연구 사례가 있으므로 마찰인자 변경 필요성이 증대되고 있다. 하지만, 국내의 경우 시간대별 통행량이 미구축되어 통행시간의 현실적인 반영이 어렵고, 이후의 통행배정 단계의 부산물을 통행분포 단계에서 활용해야 한다는 점에서 단계의 반복이 추가되어야 하는 단점이 있다.

이에, 중력모형 개선에 관한 연구를 검토한 결과, 변수의 추가 투입시 설명력은 개선되지만, 정산과정이 용이하지 않거나, 통행발생 단계에서 활용한 사회경제지표 등을 재활용해야 하거나, 토지이용계획 등을 반영해 추가 변수를 도출해야하기 때문에 장래에 적용성이 저하되는 문제점이 있다. 따라서, 기존에 사용하는 마찰인자에 시간의 속성을 부여하기 위해 접근성 개념을 통합하고자 하여 space syntax에 관한 연구를 검토하였다. space syntax에서 활용하는 축선도와 교통분야에서 활용하는 GIS 네트워크의 공간 구성 방식이 상이하다는 문제가 있으나, 축선도의 연결 그래프구현시 네트워크와 균일한 대응이 가능하기 때문에 활용 가능성에 좀 더 무게를 두는 연구가 많은 것으로 나타났다.

이에 통행저항을 구성하는 가장 중요한 요소 중 하나인 인지거리에 대한 연구 검토결과, 일반적으로 인지거리에 가장 많은 영향을 미치는 요소로는 통행시간 및 인지도, 방향의 전환 등이 산출되었고, 이러한 요소는 space syntax의 통합도 지표를 통해 도출 가능한 것으로 판단된다. 또한, space syntax 분석을 통해 기존 네트워크와 결합하여 활용하고자 하는 연구도 다수인 것으로 나타났다. 초기에는 네트워크 접근성 산출을 위해 space syntax가 이용되었으며, 이후 보행패턴 및 네트워크에 활용되었고, 최근에는 차량간의 관계에 이르기까지 연구가 진행되고 있다. 다수의 연구에서 space syntax 분석을 통한 통합도가 보행량, 교통량, 통행속도와 상관관계가 있음을 밝히고 있다.

따라서, 장래 활용성이 유지되는 신규 마찰인자 도출을 위해 링크의 통행시간 및 거리, space syntax 분석을 통한 통합도간 관계를 분석할 필요성이 있는 것으로 판단된다.

3. space syntax를 이용한 통행저항함수 개발

3.1 통행저항함수 적용을 위한 변수 설정

3.1.1 신규 마찰인자 도출방안 설정

본 연구에서는 space syntax 분석을 통해 도출된 통합도가 개별 link의 상대적 접근성을 의미하는 것을 감안하여 기존 통행거리의 한계를 극복하는 신규 마찰인자를 개발하고자 하였다. 이에, 신규 마찰인자의 도출방법 및 도출된 결과를 토대로 저항함수의 정산 방법은 다음과 같이 설정하였다.

- 1단계 : 기준연도 네트워크 통행배정을 통해 개별 Link의 혼잡이 반영된 통행시간 및 교통량을 도출한다.
- 2단계 : 1단계에서 활용한 공로 네트워크의 space syntax 분석을 통해 개별 link의 통합도를 도출한다.
- 3단계 : link별 통행시간 및 통합도, 연장간의 관계를 검토한 뒤, 종속변수를 통행시간으로 독립변수를 통합도 및 연장으로 설정하여 관계식을 도출한다. 이때의 종속변수는 통행시간이지만, 관계식으로 도출되는 결과는 신규 마찰인자로서 통행시간에 대한 일종의 대리변수(proxy variable) 역할을 수행할 수 있으며, link 연장의 한계를 통합도로 보완하여 회전에 대한 지양 및 접근성을 감안할 수 있는 것으로 판단된다.
- 4단계 : 신규 마찰인자 및 기존 마찰인자(최단거리, 통행시간)간 통행목적별 통행거리분포(TFLD)의 특성을 검토한다.
- 5단계 : 3가지 마찰인자에 대한 저항함수 정산을 다양한 방법으로 수행하여 신규마찰인자의 유의성 및 설명력을 검토한다.
- 6단계 : 3가지 마찰인자의 정산결과에 대해 다양한 방법으로 검증하여 신규 마찰인자의 설명력을 보완·검토한다.

3.1.2 자료의 분석

일반적으로 도시공간구조를 분석할 수 있는 space syntax 분석시 미시적 공간을 대상으로는 도시·건축 분야에서 수치지도 및 배치도 등을 활용하고 있고, 거시적 공간을 대상으로 하는 도시·교통 분야에서는 수치지도 및 교통주제도 등을 활용하고 있다. 아울러, 교통 혼잡이 반영된 통행시간 도출을 위한 통행배정 수행시에는 교통주제도를 기반으로 구축된 교통분석 네트워크를 주로 활용한다. 따라서, 본 연구에서는 도로의 혼잡이 반영된 통행시간 도출이 용이하고, 지역간 통행의 존 체계(시·군·구 단위)와의 균형 등을 고려할 때 지역간 KTDB 네트워크를 활용하는 것이 보다 적절한 것으로 판단된다.

개별 링크의 통행시간 도출을 위해 교통수요 프로그램인 Transcad 6.0을 이용하고, 관련지침을 준용하여 공로 네트워크의 기준연도 통행배정을 수행하였다. 아울러, 네트워크의 space syntax 분석은 일반적으로 가장 많이 활용되고 있는 depthmap X'을 'ArcGIS 10.5'와 연계하여 분석에 활용하였다.

공로 네트워크에 대한 통합도 분석결과는 [Fig 2]와 같다. Link별 통합도 분석결과는 중부지역으로 갈수록 통합도가 높은 것으로 나타났으며, 통합도/㎞ 분석결가는 일부 고속도로 및 대도시 내부를 중심으로 높게 도출되었다.

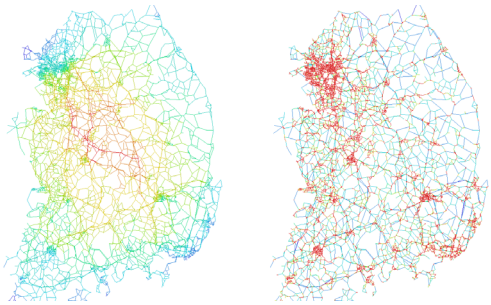


Fig. 2. Result of integration
(a) analysis of integration (b) integration/㎞

기준연도 기준 네트워크의 도로위계별 산정결과는 <Table 3>과 같다. 개별 링크의 평균 통합도는 0.200~0.247 수준으로 등급별로 차이가 크지는 않은 것으로 분석되었다. 하지만, 통합도에는 거리(연장)의 개념이 포함되지 않기 때문에 통합도를 연장으로 나누어 볼 경우에는 고속도로의 "통합도/연장" 지표가 가장 낮고, 특별광역시도의 지표가 가장 높은 것으로 분석되었다. 즉, 이동성이 강한 고속도로에서는 지표가 낮게 도출되고, 시군도 중 가장 고밀도인 특별시·광역시의 지표가 높게 도출된 것은 상대적 접근성이 가장 강하기 때문에 도로 위계별 성격에 도출된 관련지표가 잘 부합되는 것으로 판단된다.

Table 3. Result of Link's road-system integration

Spec.	No of Link	Total		Mean of link		integration / ㎞
		Length (㎞)	integration	Length (㎞)	integration	
Freeway	1,162	4,188	287	3.61	0.247	0.069
Expressway	510	434	107	0.86	0.209	0.245
Trunk road	10,469	13,473	2,358	1.16	0.225	0.175
Special city road	6,077	2,713	1,218	0.39	0.200	0.449
Nat'l local road	2,009	3,299	460	1.37	0.228	0.139
local road	5,078	11,132	1,171	1.79	0.230	0.105
City road	9,940	6,455	2,203	0.56	0.222	0.341

3.1.3 통합도를 고려한 신규 마찰인자의 개발

네트워크를 기반으로 도출된 개별 링크의 거리(㎞), 통행시간(분), 통합도의 관계를 검토하였다. 이때, 통행시간에는 혼잡이 반영된 통행시간이 도출되어야 하기 때문에 배정되지 않은 링크는 분석대상에서 제외하였다. 이를 토대로 링크의 통행시간을 대체할 수 있고, 접근성을 감안한 통합도를 고려할 수 있는 신규 마찰인자를 도출하기 위하여, 배정된 통행시간 및 거리, 통합도간 관계식을 구축하였다.(수식6)

$$T_i = \alpha L_i^{\beta} I_i^{\gamma} \quad (6)$$

여기서, T_i : 배정된 링크 i의 통행시간(분)

L_i : 링크 i의 거리(㎞)

I_i : 링크 i의 통합도

α, β, γ : 파라미터

앞의 관계식에 양변에 대수전환을 하여 다중선형 회귀분석을 통해 <Table 4>와 같이 파라미터를 추정하였다. 파라미터 산정결과, 각 계수의 t-value는 2.63을 상회하여 유의수준 1%를 만족하는 것으로 분석되었다. 아울러, 상수(α)는 양(+)으로 도출되어 타당한 것으로 판단되며, 거리관련 계수(β)도 0.971로 도출된 반면, 통합도 관련 계수(γ)는 -0.127로 도출되었다. 이는 통행시간과 거리간의 관계가 매우 강한 비례관계인 반면, 접근성을 나타내는 지표인 통합도와는 반비례인 성격을 지니기 때문에 타당한 것으로 판단된다. 아울러, 통행시간과 거리와의 관계에서 설명하지 못하는 부분을 도로간의 위계 및 회전 등 접근성을 표현하는 지표인 통합도가 설명하는 것으로도 볼 수 있다. 그리고, 수정된 결정계수($adj\,R^2$)도 0.951로 매우 높은 수준으로 나타나 관계식을 활용한 신규 마찰인자 도출에 큰 문제는 없을 것으로 판단된다.

Table 4. Result of Link's road-system integration

Spec.		Multiple linear regression analysis				parameter
		B	β	T-value	VIF	
parameter	$\ln\alpha$	-.196	-	-15.358	-	α: 0.822
	$\ln\beta$	.971	.977	1072.409	1.012	β: 0.971
	$\ln\gamma$	-.127	-.014	-14.986	1.012	γ:-0.127
N		54,503				-
$adj\,R^2$		0.951				-

3.2 space syntax를 고려한 저항함수 정산

통행저항함수의 정산방법은 급간을 활용한 대수전환 방법 및 반복추정법이 있다. 본 연구에서는 정산의 용이성 및 유의수준의 타당성 검토를 위해 대수전환방법을 수행하였다. 아울러, 저항함수의 형태는 일반적으로 많이 활용되는 수정혼합함수(combined or gamma) 함수를 대상으로 수행하였다. 그리고, 정산대상 통행목적은 2015년 현행화된 지역간 OD를 5가지(업무, 귀가, 레저, 기타, 총 목적)로 구분하였다.

Table 5. Comparison of Calculation Results of Modified Mixing Models by Friction Factor.

Spec.		Business	Come home	Lesuire	ETC	Total
Travel time	α	1,615**	55,216**	622**	66,569**	75,887**
	β	1.392**	0.594**	1.555**	0.537**	0.815**
	γ	-0.039**	-0.035**	-0.039**	-0.036**	-0.036**
	$adj\,R^2$	0.797	0.778	0.766	0.823	0.795
Shortest length	α	3,689**	84,036**	1,194**	147,857**	139,944**
	β	0.989**	0.304	1.201**	0.132	0.470**
	γ	-0.030**	-0.027**	-0.030**	-0.026**	-0.027**
	$adj\,R^2$	0.801	0.775	0.768	0.819	0.796
New inpedance	α	494,168**	15,434,910**	178,967**	14,238,626**	18,618,027**
	β	-0.745**	-1.551**	-0.570**	-1.491**	-1.267**
	γ	-21.401**	-8.961**	-18.424**	-13.723**	-14.300**
	$adj\,R^2$	0.928	0.913	0.891	0.932	0.930

note: **(p-value $\leq$ 0.05), *(p-value $\leq$ 0.10)

대수전환을 활용한 저함함수 정산결과를 <Table 5>와 같이 비교하였다. 마찰인자가 최단거리인 경우 귀가 및 기타 통행을 제외하면 모든 모형에서 유의수준 0.05를 만족하는 것으로 나타났다. 아울러, 상수항은 모두 양(+)으로 도출되고, 민감도를 나타내는 계수(γ)는 모두

음(-)으로 도출되어 적정한 것으로 판단된다. 모형의 설명력($adj\,R^2$)은 통행시간(0.766~0.823) 및 최단거리(0.775~0.819)가 비교적 유사한 수준으로 도출되었으나, 신규마찰인자의 설명력은 이보다 높은 0.891~0.932 수준으로 나타나 모형의 설명력이 상대적으로 높은 것으로 검토되었는데, 이는 TRB(2012)에서 권고한 바와 같이 신규마찰인자의 계수 중 β가 음(-)으로 도출되었기 때문으로 판단된다.[56]

3.3 정산결과의 검증

3.3.1 검증방법의 설정

마찰인자별 저항함수 정산결과의 적정성 검토를 위해 다양한 검증기법 검토하였다. 본 연구에서 활용하고자 하는 검증지표는 일반적으로 많이 활용되는 상관계수(r), C.R.(coincidence ratio), Theil의 부등계수(Theil's inequality coefficient), RMSE(root mean square error, 평균 제곱근 오차) 등을 활용하였다. 이중 검증지표의 특성상, 상관계수(r) 및 C.R.은 0에서 1사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 모형의 추정치와 실측치와 유사한 분포를 갖는 것으로 해석할 수 있다. 반면, Theil의 부등계수 및 RMSE는 값이 적을수록 모형 추정치와 실측치가 유사한 분포를 갖는 것으로 해석할 수 있다. 검증모형은 반복평형법에 의해 도출된 마찰인자별·통행목적별 모형 통행량을 대상으로 하였으며, 조정계수(K_{ij})는 제외하여 모형의 설명력을 검토하였다.

3.3.2 마찰인자별 검증결과

마찰인자별 검증결과는 <Table 7>과 같이 제시하였다. 검증결과, 상관계수는 귀가 및 총 목적 통행에서는 신규마찰인자, 업무 및 레저 통행에서는 최소통행시간, 기타 통행에서 최단거리의 설명력이 높은 것으로 나타났다. 다만, 최단거리 및 신규마찰인자의 설명력 수준은 비교적 유사한 것으로 나타났다. 전반적으로, 업무 및 레저 목적 통행은 통행시간의 설명력이 가장 높은 것으로 나타났으며, 다른 통행목적은 검증지표별로 설명력이 상이하게 도출되는 것으로 나타났다. 다만, 전반적으로 최단거리와 신규마찰인자의 검증결과가 최소통행시간에 비해서는 비교적 유사하게 나타났는데, 통행량이 많은 단거리 구간에서 신규마찰인자가 최단거리와 통행거리분포(TLFD) 패턴이 유사하기 때문으로 판단된다.

Table 7. Verification Results by Friction Factor

Spec.		Business	Come home	Lesuire	ETC	Total
r	Travel time	0.8725	0.8784	0.7464	0.8565	0.8887
	Shortest length	0.8644	0.9145	0.6359	0.9005	0.9134
	New inpedance	0.8610	0.9151	0.6289	0.9003	0.9135
C.R.	Travel time	0.6132	0.9973	0.4225	0.8816	0.8878
	Shortest length	0.5327	0.9248	0.3426	0.8935	0.8178
	New inpedance	0.5234	0.9282	0.3415	0.8710	0.8246
Theil"s inequality coefficient	Travel time	0.3070	0.2442	0.4568	0.2701	0.2383
	Shortest length	0.3381	0.2124	0.5350	0.2213	0.2266
	New inpedance	0.3448	0.2137	0.5390	0.2214	0.2286
RMSE	Travel time	258.8	1,075.8	209.9	1,243.1	2,169.6
	Shortest length	275.3	889.1	236.2	978.4	1,977.5
	New inpedance	279.3	888.6	237.5	978.1	1,986.2
%RMSE	Travel time	365.3	350.0	451.3	407.7	297.3
	Shortest length	388.6	289.3	507.8	320.9	271.0
	New inpedance	394.1	289.1	510.8	320.8	272.2

전체 구간을 대상으로 검증시 마찰인자별 설명력이 두드러지지 않아, 총 목적통행을 대상으로 통행거리별로 구분하여 마찰인자별 설명력을 <Table 8>과 같이 검증하였다. 검증지표로는 상관계수, %RMSE, Theil의 부등계수를 적용하였는데, C.R은 급간을 기본으로 하는 지표이고, RMSE는 급간별 통행량 차이를 감안하여 분석비표에서 제외하였다. 거리의 급간은 매 50㎞ 단위로 설정하였으며, 범주형은 단거리(50㎞ 이내), 중거리(50~250㎞), 장거리(250㎞ 이상)로 구분하였다. <Table 8>의 급간별 검토결과를 보면, 상관계수의 경우 전체 구간에서는 신규 마찰인자의 설명력이 가장 높은 것으로 나타났는데, 50㎞ 이내와 250㎞~450㎞ 구간에서 정밀도가 가장 높은 것으로 나타났으며, 이외 구간에서는 최단거리의 신뢰도가 가장 높은 것으로 나타났다. %RMSE의 경우 전체 구간에서 최단거리의 설명력이 가장 높은 것으로 나타났는데, 50~250㎞ 구간에서의 신뢰도가 가장 높은 반면, 50㎞ 이내 및 250㎞ 이상에서는 신규 마찰인자의 설명력이 가장 높은 것으로 검토되었다. Theil의 부등계수는 전체구간에서 최단거리의 정밀도가 가장 높은 것으로 나타났는데, 200㎞ 이내에서는 최단거리, 200~300㎞에서는 신규마찰인자, 300㎞ 이후 구간에서는 최소통행시간의 설명력이 가장 높은 것으로 나타났다.

거리 급간을 범주로 구분하여 검토한 결과, 50~250㎞ 구간에서는 최단거리, 250㎞ 이상에서는 신규마찰인자의 설명력이 가장 높은 것으로 나타났다. 아울러, 50

Table 8. Total purpose OD verification result by distance

Spec.			Total	~50㎞	~100㎞	~150㎞	~200㎞	~250㎞	~300㎞	~350㎞	~400㎞	~450㎞	450㎞~
r	By distance	Travel time	0.8881	0.870	0.517	0.432	0.341	0.263	0.424	0.420	0.396	0.277	0.289
		Shortest length	0.9220	0.909	0.533	0.474	0.398	0.286	0.489	0.470	0.482	0.333	0.311
		New inpedance	0.9223	0.909	0.531	0.471	0.394	0.284	0.496	0.489	0.490	0.344	0.302
	By category	Travel time	0.8881	0.870	0.577				0.389				
		Shortest length	0.9220	0.909	0.600				0.438				
		New inpedance	0.9223	0.909	0.598				0.445				
%RMSE	By distance	Travel time	303.87	109.8	216.7	250.0	287.0	357.2	229.5	186.9	198.5	278.8	333.2
		Shortest length	251.70	90.8	205.6	247.9	263.7	335.9	213.3	186.3	198.5	280.0	301.5
		New inpedance	251.75	90.8	207.7	253.7	271.9	339.3	212.9	184.5	197.7	280.0	300.3
	By category	Travel time	303.87	109.8	319.5				217.2				
		Shortest length	251.70	90.8	304.4				208.2				
		New inpedance	251.75	90.8	308.3				207.4				
Theil"s inequality coefficient	By distance	Travel time	0.2339	0.233	0.442	0.479	0.518	0.561	0.493	0.563	0.737	0.752	0.550
		Shortest length	0.2023	0.201	0.426	0.465	0.488	0.559	0.487	0.594	0.754	0.791	0.579
		New inpedance	0.2032	0.202	0.428	0.470	0.493	0.557	0.479	0.585	0.748	0.794	0.595
	By category	Travel time	0.2339	0.233	0.449				0.532				
		Shortest length	0.2023	0.201	0.433				0.539				
		New inpedance	0.2032	0.202	0.436				0.531				

㎞ 이내에서 상관계수 및 RMSE는 신규마찰인자의 정밀도가 높은 것으로 분석되었다. 따라서, 신규마찰인자는 단거리 및 장거리 통행에서 다른 마찰인자에 비해 신뢰도가 높은 것으로 분석되었다.

4. 결론 및 향후 연구과제

4.1 연구의 결론

본 연구는 기존 중력모형의 한계를 보완하기 위하여, 국내에서 현실적으로 활용이 어려운 통행시간을 대체하되 가변적인 한계를 보완할 수 있고, 독립변수의 추가투입 보다는 접근성의 속성을 단일 마찰인자로서 표현할 수 있으며, 보다 현실적이고 장래 활용이 용이한 신규 마찰인자를 개발하는데 그 목적이 있다.

이에, 우선 공로네트워크를 기반으로 통행배정 및 space syntax 분석을 통해 link의 혼잡이 반영된 통행시간, 거리, 통합도를 도출하였다. 이에 통행시간을 종속변수로, 거리 및 통합도를 독립변수로하는 관계식을 설정하여 해당 모형을 신규 마찰인자 도출하였다. 이때의 신규 마찰인자는 통행시간에 대한 대리변수(proxy variable) 역할을 수행할 수 있으며, 거리에 접근성을 추가 반영하였다는 특성이 있다. 기존 마찰인자(통행시간, 최단거리) 및 신규 마찰인자를 이용하여 중력모형 정산을 수행결과, 대수전환에 의한 방법에서는 신규 마찰인자가 기존 마찰인자에 비해 설명력이 뛰어난 것으로 나타났다. 정산결과의 검증결과, 통행목적별・검증지표별 설명력의 우선순위가 상이한 것으로 나타났으나, 신규 마찰인자는 대부분의 지표에서 50㎞ 이내 및 250㎞ 이상 통행에서 다른 마찰인자에 비해 설명력이 가장 높은 것으로 도출되었다.

4.2 향후 연구과제

본 연구는 통행분포 모형에서 space syntax의 통합도를 활용하였으나, 동일 연구분야의 활용사례가 거의 없는 한계점이 있다. 이에, 추후에는 본 연구가 갖는 다음의 한계점이 보완되어야 할 것으로 보인다.

첫 번째, 마찰인자별 모형의 정산시 최단거리에 비해 혼잡이 반영된 통행시간 및 신규 마찰인자의 설명력이 더 높아야 함에도 불구하고, 일부 목적통행 및 검증지표에서는 최단거리의 설명력이 가장 높게 도출되는 경향이 있다. 이에 대한 부분은 지역간 네트워크의 특성상 교통혼잡이 잘 반영되지 않기 때문으로 판단되기 때문에 추후 수도권 또는 광역권 네트워크를 활용하여 지정체가 뚜렷한 지역에서 검증해 볼 필요성이 있다.

두 번째, 중력모형의 특성상 가까운 거리는 과대, 먼

거리는 과소 추정되는 경향이 있는데, 이를 극복하기 위해 friction factor를 보완하여 tri-proportional model 등의 적용을 통해 극복해야 할 필요성이 있다.

세 번째, 해외사례의 경우 대중교통을 포함한 마찰인자를 적용하지만, 국내에서는 공로를 중심으로 하고있으며, 본 연구에서도 별도의 대중교통을 반영하지 않은 한계가 있다. 대중교통 특성상 정해진 경로를 운행하기 때문에 노선경로가 고려되지 않는 space syntax를 반영하는 것은 현실적으로 한계가 있는 것으로 판단된다.

마지막으로, 현재의 space syntax 분석을 통해서는 기존 도로의 용량이 증가하는 현상(장래 도로의 확장 또는 철도 서비스의 증가 등)을 반영하지 못하는 한계가 있다. 따라서, 추후 이를 통합하여 반영할 수 있는 방법론의 개발이 필요한 것으로 판단된다.

References

[1] Ministry of land, infrastructure and transport, “The 2011 national transportation demand survey & the construction of a transportation DB”, 2011.

[2] Ministry of land, infrastructure and transport, “The 2016 national transportation demand survey & the construction of a transportation DB”, 2017.

[3] J. D. Ortúzar, L. G. Willumsen, “Modelling transport”, New Jersey: Wiley, pp. 3-7, 2001.

[4] FHA, “Travel model validation and reasonableness checking manual(Travel Model Improvement Program)”, Cambridge Systematics, Inc, 1997.

[5] D. F. Pearson, P. L. Ellis, S. P. Farnsworth, “Farnsworth, Calibration of a past year travel demand model for model evaluation”, No. FHWA/TX-03/4198-1, 2002.

[6] U.S. Demartment of Transportation, “Renaissance planning group, 2035 long range transportation plan, Appendix E: FDOT model calibration & validation results”, 2011.

[7] CAMPO(Capital area metropolitan planning organization), “Travel demand forecasting model documentation”, 2013.

[8] P. R. Stopher, A. H. Meyburg, “Urban transportation modeling and planning”, 1975.

[9] T. G. Kim, “Development of a Trip Distribution Model Introducing Interzonal Relative Attractiveness”, Hanyang University(doctoral degree), 2006.

[10] Y. H. Jeon, “Development of a Trip Distribution Model reflecting land use and transportation service”, Hanyang University(master degree), 2011.

[11] S. T. Choi, J. H. Rho, “Development and Implementation of a 2-Phase Calibration Method for Gravity Model Considering Accessibility”, Journal of Korean Society of Transportation. Vol.33, No4, pp.393-404, 2015.
DOI: https://doi.org/10.7470/jkst.2015.33.4.393

[12] Y. H. Jeon, J. H. Rho, J. S. Jang, “Development of Estimation Model of Trip Generation Model and Trip Distribution Model Reflecting Coefficient of Accessibility”, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.18. No.6, pp.576-584, 2017.
DOI: https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.6.576

[13] Infrastructure and Transport,Ministry of Land, “NATIONAL TRANSPORT SYSTEM EFFICIENCY ACT(No.15344)”, 2018

[14] Texas Department of Transportation, “Review of the Current Dallas-Fort Worth Regional Travel Demand Model”, 1999.

[15] CAMPO(Capital area metropolitan planning organization), “Travel demand forecasting model documentation”, 2013.

[16] J. S. Shrewsbury, “Calibration of trip distribution by generalised linear models”, NZ Transport agency research, 2012.

[17] Instituto municipal de investigación y planeacion, “Estudio Integral de Transporte(Ⅲ)/Multimodal Transportation Study : Development of Travel Demand and Mobile Source Emissions Models for base year 1996”, Juarez, 1999.

[18] M. B. Gonçalves, E. S. José, "Parameter estimation in a trip distribution model by random perturbation of a descent method", Transportation Research Part B: Methodological . Vol. 35, No 2, pp.137-161, 2001,
DOI: https://doi.org/10.1016/S0191-2615(99)00043-0

[19] Y. G. Ryu, “Development of an Improved Gravity Model using Residual”, Jounrnal of The Korean Society of Civil Engineers D, Vol. 26, No 3D. pp.417-424, 2006.

[20] Y. H. Jeon, J. H. Rho, “Estimation of Adjustment Coefficients to Improve Accuracy of Predictions of Inter-zonal Trips”, Journal of Korea Planning Association, Vol.50, No.7, pp.131-140, 2015.
DOI: https://doi.org/10.17208/jkpa.2015.11.50.7.131

[21] S. T. Choi, “Development and implementation of a 2-phase calibration method for gravity model considering extension of travel deterrence function”, Hanyang University(doctoral degree), 2014.

[22] G. M. Hyman, “The calibration of trip distribution models”, Environment and Planning A. Vol.1, No.1, pp.105-112, 1969
DOI: https://doi.org/10.1068/a010105

[23] A. G. Wilson, “Developments of some elementary residential location models”. Journal of Regional Science, Vol. 9, No.3, pp.377-385, 1969
DOI: https://doi.org/10.1111/j.1467-9787.1969.tb01351.x

[24] A. W. Evans, “Some properties of trip distribution methods”. Transportation Research, Vol.4, No.1, pp19-36, 1970.
DOI: https://doi.org/10.1016/0041-1647(70)90072-9

[25] B. Lamond, F. S. Neil, “Bregman's balancing method”, Transportation Research Part B: Methodological, Vol.15, No.4, pp.239-248, 1981.

DOI: https://doi.org/10.1016/0191-2615(81)90010-2

[26] J. H. Rho, “Development of an Efficient Solution Method for the Wilson’s Trip Distribution Model”, Journal of Korean Society of Transportation, Vol.9, No.2, pp.121-126, 1991.

[27] S. S. Yun, “New Maximum Likelihood Estimation Algorithms for the Parameters of Generalized Gravity Model”, Journal of Korean Society of Transportation, Vol.11, No.1, pp.55-66, 1993.

[28] H. J. Kim, “Testing Goodness of Fit of Gravity Models”, Journal of Korean Society of Transportation, Vol.14, No.1, pp.43-50, 1996.

[29] F. Tillema, K. M. Zuilekom, M. F. Maarseveen, A. M. Huisken, “Trip generation and trip distribution : Comparison of neural networks and traditional methods”, 10th World Conference on Transportation Research, 2004.

[30] Veenstra, S. A., Tom Thomas, S. I. A. Tutert. Trip distribution for limited destinations: a case study for grocery shopping trips in the Netherlands., Transportation. 37(4), 2010, 663-676.
DOI: https://doi.org/10.1007/s11116-010-9274-0

[31] S. Mishra, Y. Wang, X. Zhu, R. Moeckel, S. Mahapatra, “Comparison between gravity and destination choice models for trip distribution in Maryland”, Transportation Research Board 92nd Annual Meeting, No. 13-3196, 2013.

[32] B. Hiller, J. Hanson, “The Social Logic of Space”, Cambridge University Press, 1984.

[33] B. Hillier, A. Penn, J. Hanson, T. Grajewski, J. Xu, “Natural movement : or, configuration and attraction in urban pedestrian movement”. Environment and Planning B: planning and design. Vol.20, No.1, pp.29-66, 1993.
DOI: https://doi.org/10.1068/b200029

[34] B. Hillier, “Space is the machine: a configurational theory of architecture”, Space Syntax, 2007.

[35] S. J. Kim, “A Basic Study on the Analysis of Space Syntax”, Journal of The Architectural Institute of Korea, Vol.4, No.3, pp.149-155, 1988.

[36] K. J. Lee, K. C. Choi, “Mobile Source Emissions Estimates for Intra-zonal Travel Using Space Syntax Analysis”, Journal of Korean Society of Transportation, Vol.34, No.2, pp.107-122, 2016.
DOI: https://doi.org/10.7470/jkst.2016.34.2.107

[37] C. M. Jun, “Applying the Space Syntax Technique to the Network of Public Transportation”, Journal of Korean Society for Geospatial Information System, Vol.12, No.2, pp.73-77, 2004.

[38] K. R, Lee, “Development of integrated model of GIS and space syntax for spatial analysis : automatizing the axial map process of space syntax based on GIS data”, Sejong University(master degree), 2005.

[39] R. H. M. Pereira, F. R. B. D. Holanda, V. A. S. D. Medeiros, A. P. B. G. Barros, “The use of space syntax in urban transport analysis: limits and potentials”, Institute for Applled Economic Research, 2011.

[40] G. Stegen, “Proposal for a methodical use of space syntax analysis in development and land use plans”, 1st INTERNATIONAL SPACE SYNTAX SYMPOSIUM, 1997.

[41] Korea Research Institute for Human Settlement, “KRIHS Policy Brief”, pp.192, 2008.

[42] H. N. Im, T. H. Choi, C. G. Choi, “What Variables Make the Perceived Walking Distance Shorter than Real Physical Distance?”, Journal of Korea Planning Association, Vol.49, No.7, pp.97-115, 2014.
DOI: https://10.17208/jkpa.2014.11.49.7.97

[43] H. K. Cho, “An Establishment of Angular-Weighted Model for Space Analysis”, Joutnal of The Architectural Insititute of Korea Planning & Design, Vol.26, No.6, pp.237-244, 2010.

[44] S. I. Kyun, S. H. Park, Y. J. Joo, “Axial map Implementation Using Linear Generalization of GIS data”, Spatial Information Research, Vol.18, No.4, pp.99-108, 2010.

[45] H. K. Lee, H. C. Kim, Y. O. Kim, “The Impact of the High Speed Rail on the Integration of the National Transport Network Through Space Syntax Analysis”, Korea Research Institute for Human Settlement, 2003.

[46] Y. O. Kim, “A Study on the Relationship between Properties of Spatial Configuration and Patterns of Space Use using Space Syntax”, Journal of Korea Planning Association, Vol.38, No.4, pp.7-17, 2003.

[47] B. Jiang, C. Christophe, “A structural approach to the model generalization of an urban street network”, GeoInformatica, Vol.8, No.2, pp.157-171, 2004.

[48] S. K. Ryu, S. J. Lee, W. Y. An, “Development of the Multi-Path Finding Model Using Kalman Filter and Space Syntax based on GIS”, Journal of Korean Society of Transportation, Vol.23, No.7, pp.149-158, 2005.

[49] T. Shirabe, "Shortest path search from a physical perspective." Spatial Information Theory, pp.83-95, 2005.
DOI: https://doi.org/10.1007/11556114_6

[50] C. H. Jung, M. H. Choi, “Analysis of Traffic Volume Using Space Syntax Model Supplemented by Accessibility Factor in Downtown Daegu”, Journal of Korea Planning Association, Vol.45, No.5, pp.129-140, 2010.

[51] A. Paul, “Unit-segment Analysis: A Space Syntax Approach to Capturing Vehicular Travel Behavior Emulating Configurational Properties of Roadway Structures”, European Journal of Transport & Infrastructure Research, Vol.12, No.3, pp.275-290, 2012.

[52] S. Law, C. Alain, S. Christian, “Towards a multimodal space syntax analysis : A case study of the London street and underground network”, Published in Proceedings of the 8th International Space Syntax Symposium, Santiago de Chile, Chile, Vol.36. 2012.

[53] M. Y. Lee, J. H. Kim, E. J. Kim, “A Pedestrian Network Assignment Model Considering Space Syntax”, The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems, Vol.14, No.6, pp.37-49, 2015.
DOI: https://doi.org/10.12815/kits.2015.14.6.037

[54] J. H. Kim, M.Y. Lee, “Integration of Space Syntax Theory and Logit Model for Walkability Evaluation in Urban Pedestrian Networks”, The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems, Vol.15, No.5,

pp.62-70, 2016.
DOI: https://doi.org/10.12815/kits.2015.14.6.037

[55] Y. M. Song, S. A. Kim, “Traffic Congestion Prediction System Using the Urban Data and Space Syntax”, Journal of The Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol.32, No.12, pp.91~100, 2016.

[56] TRB(Transportation Research Board), “Travel Demand Forecasting: Parameters and Techniques”, Vol.716, Cambridge Systematics, 2012.

장 진 영(Jin-Young Jang) [**정회원**]

- 2004년 2월 : 홍익대학교 도시공학과 공학사
- 2012년 8월 : 서울시립대학교 도시과학대학원 교통관리학과(공학석사)
- 2018년 2월 : 홍익대학교 일반대학원 도시계획과(공학박사)
- 2003년 10월 ~ 2014년 2월 : ㈜에이디엘이앤씨
- 2018년 2월 ~ 현재 : 홍익대학교 과학기술연구소 연구교수

<관심분야>
교통계획, 도시계획, 교통공학, 지역개발