
Global Report

도시 기능 향상을 위한 교통시스템 개선의 영향

1. 개요
2. 다중 수단 도시 교통모델 문헌 연구
3. 모델링 및 수치 연구
4. 대중교통 개선이 도시교통에 미치는 영향
5. 결론

1. 개요

도시교통 개발을 위해서는 위치접근성을 변경함으로써 도시 공간 구조의 변화를 일으키기 때문에 도시의 토지 이용과 교통 사이에는 상호작용이 존재한다. 한편, 주거 밀도 및 도시 레이아웃 등 토지 이용패턴은 교통수요의 공간적, 시간적 분포를 직접 결정함으로써 도시교통계획에 영향을 미친다. 이러한 상호작용에 대한 선행연구로 1964년 Alonso, 1969년 Muth, 1972년 Mills가 있으며, 이들은 모든 주민이 자가용 승용차를 이용하여 공평한 교통수요를 갖는다고 가정하였다[1][2][3]. 이를 기반으로 1973년 Capozza, 2008년 Su and DeSalvo, 2017년 Franco, 2018년 Brueckner 및 Franco 등은 대중교통을 고려하였다. 아울러 1990년 Sasaki, 2005년 Brueckner, 2008년 Borck과 Wrede, 2017년 Takayama와 Kuwahara 등은 비 주거 도시민과 다양한 교통모드를 동시에 고려하였다. 이러한 연구는 각 거주자가 자가용승용차 또는 대중교통 중 하나를 선택할 수 있다고 가정하고, 주민들의 자동차 소유현황이 단일 모델로 통일될 수 있다면 더욱 현실적인 통계가 도출될 수 있을 것이다. 그러나 실제로 거주자들을 차량 가용성에 따라 두 개의 클래스(CARs(Car-Available-Residents : 자가용 승용차를 이용하는 거주자)와, CURs(Car-Unavailable-Residents : 자가용 승용차를 이용하지 않는 거주자))로 나누어질 수밖에 없다. 따라서 CARs는 자가용 승용차 또는 대중교통 중 하나를 선택할 수 있으며, CURs는 대중교통만 사용할 수 있다. 여기서 도시의 토지이용과 교통 사이의 복잡한 상호작용으로 인해 자동차 가용성이 도시 공간 구조에 어떤 영향을 미치는가에 대한 중요한 질문이 제기된다. 이 질문에 대한 답은 지속가능한 교통 시스템과 도시개발을 위한 중요한 가치를 지니고 있다. CAR과 CUR로 구분된 bi-modal 교통 모델 관련 주요 분석연구 문헌 목록을 <표 1>에 나타낸다. 운송(여행) 모드 선택과 도시 공간 구조 사이의 상호작용과 관련된 연구문헌은 없는 것으로 나타났다.

<표 1> bi-modal 교통모델 관련 주요 분석 연구문헌

주요 분석연구문헌	트래픽 모드	사용자 이질성(Heterogeneity) 및 주거분포 형태(Residential Distribution)
Tabuchi(1993) Mirabel & Reymond(2011) Liu 등(2020)	자가용승용차 & 철도	이질성 있음, 외인성(Exogenous)
Danielis & Marcucci(2002) Huang (2002)	자가용승용차 & 철도	이질성 없음, 외인성
Ying & Yang(2005) Meng & Liu(2012)	자가용승용차 & 철도	이질성 없음, 외인성
Huang 등(2007)	자가용승용차 & 버스	이질성 없음, 외인성
van den Berg & Verhoef(2014)	자가용승용차 & 철도	이질성 있음, 외인성
Wu & Huang(2014)	자가용승용차 & 철도	이질성 없음, 외인성
Yao 등(2015)	자가용승용차 & 버스	이질성 없음, 외인성
Capozza(1973) Su & DeSalvo(2008)	자가용승용차 & 철도	이질성 없음, 내인성(Endogenous)
Sasaki(1990)	자가용승용차 & 철도	이질성 있음, 내인성
Borck & Wrede(2008)	자가용승용차 & 철도	이질성 있음, 내인성
Xu 등(2018)	자가용승용차 & 철도	이질성 없음, 내인성
Franco(2017)	자가용승용차 & 철도	이질성 없음, 내인성

* 자료 : Shu-Xian Xu, Tian-Liang Liu, Ning Jia, Pengfei Wang, Peng Liu, Shoufeng Ma, "The Effects of Transportation System Improvements on Urban Performances with Heterogeneous Residents", Journal of Management Science and Engineering, p.2.

2. 다중 수단(multi-modal) 도시 교통모델 문헌 연구

지난 수십 년 동안 많은 연구자들은 운송시스템에서 통합된 다중 수단(multi-modal) 도시 교통모델에 대한 문헌 연구를 조사해 왔다. 이를 시계열적으로 간단히 요약하면 다음과 같다.

- 1977년 Thereinto, Florian은 운송수단 분할과 교통문제를 자가용 승용차와 대중교통을 결합한 로그 모델(logit model)을 제안한 바 있다.
- 2000년 Huang은 두 여행자에 대한 탄력적인 수요를 가정하고 다양한 정책이 경쟁력 있는 고속도로 및 대중교통을 통해 여행자의 수단선택 행동에 어떤 영향을 미치는지에 대해 조사한 바 있다.
- 2004년 Lo 등은 중첩된 로그 모델을 공식화하여 경쟁력 있는 다중 수단 대중교통 서비스에 대해 조사한 바 있다.
- 2008년 Borck와 Wrede는 두 가지 운송수단에 대해 각기 다른 통근보조금을 지급하는 방안을 제시한 바 있다.
- 2010년 Li 등은 다중 수단 트래픽 네트워크에서 활동 기반 접근방식을 이용하여 대중교통 스케줄링 및 유류할증료 부과방안을 제시한 바 있다.
- 2014년 Berg와 Verhoef는 도로 및 철도 네트워크가 복합된 도심에서의 혼잡통행료 지불방안을 제시한 바 있다.
(혼잡통행료 지불방안은 Tabuchi(1993)/Ying와 Yang(2005)/Zheng과 Geroliminis(2016)이 제시한 방안과 2013년 Tian/2018년 Wang 등이 제시한 거래 가능한 신용/허가제도를 기반으로 하고 있음)
- 2014년 Wu와 Huang은 경쟁적인 고속도로/대중교통 시스템에서 평형 출발패턴을 조사한 바 있다.
- 2015/2016/2020년 Liu 등은 여행목적지, 출발시간, 교통경로 및 교통수단을 다중 수단 슈퍼 네트워크에서 하나의 활동 여행경로 통합할 수 있는 활동여행 할당방식을 제안한 바 있다.

3. 모델링 및 수치 연구

3.1. 여행비용 및 모달 분할 모델링

선형형태의 도시와 CBD(Central Business District)의 모든 주거위치 사이의 교통수요를 수용하기 위해 고속도로(h)와 도로교통(p)을 운행하는 자동차와 같이 두 가지 교통수단을 제공한다. 이는 주거지(x)의 클래스(k) 거주자의 결정적인 여행비용 모드(j)를 이용하여 $k \in \{a, u\}$ and $i \in \{h, p\}$ 는 (식 1)과 같이 표현할 수 있다:

$$C_i^k(x) = 2 \left(f_i + (w_i^k t_i + m_i) x \right), \quad (k, i) \in \{(a, h), (a, p), (u, p)\} \quad \dots\dots\dots \text{(식 1)}$$

여기서, 곱셈 수 2는 운송수단에 대한 일일 왕복 및 단방향 고정비용(f_i)을 나타내는 경우 이동거리와는 별개로 간주된다. CAR의 관점에서 볼 때, 주거지(x)의 클래스(k) 거주자들은 수단선택을 위해 각각 h와 p모드의 일일 이동비용을 비교한다. CAR의 일일 인식된 여행비용은 (식 2)와 같이 계산할 수 있다:

$$\bar{C}_i^a(x) = C_i^a(x) + \varepsilon_i^a(x), \quad i = h, p \quad \dots\dots\dots \text{(식 2)}$$

3.2. 수치 연구

도시의 여러 가지 다양한 기능을 향상 시키기 위한 교통시스템 개선의 효과를 설명하기 위해 도시교통 시스템 개선 관련 파라미터와 그에 대한 기준 값을 <표 2>에 나타낸다.

<표 2> 도시교통시스템 개선 관련 파라미터 및 기준 값

파라미터	기준 값
총 CARs 수	20,000
총 CURs 수	30,000
CARs의 연소득, RMB/거주자/연간소득	120,000
CURs의 연소득, RMB/거주자/연간소득	100,000
도시경계지역의 농업용지임대료[RMB/km ²]	4,000,000
준 선형 유틸리티 함수의 하우징 파라미터	6,000
CARs의 운송시간에 대한 가치산정[RMB/h]	30
CURs의 운송시간에 대한 가치산정[RMB/h]	25
거주자 당 CBD로의 일일 평균 운행횟수	250
각 기간에 할당된 자동차이용 고정비용/RMB]	15,000
자동차별 거리 단위당 이동시간[h/km]	0.01

※ 1) CARs : Car-Available-Residents(자가용승용차를 이용하는 거주자)

2) CURs : Car-Unavailable-Residents(자가용승용차를 이용하지 않는 거주자)

3) CBD : Central Business District(도심 상가)

* 자료 : Shu-Xian Xu, Tian-Liang Liu, Ning Jia, Pengfei Wang, Peng Liu, Shoufeng Ma, "The Effects of Transportation System Improvements on Urban Performances with Heterogeneous Residents", Journal of Management Science and Engineering, p.15.

4. 대중교통 개선이 도시교통에 미치는 영향

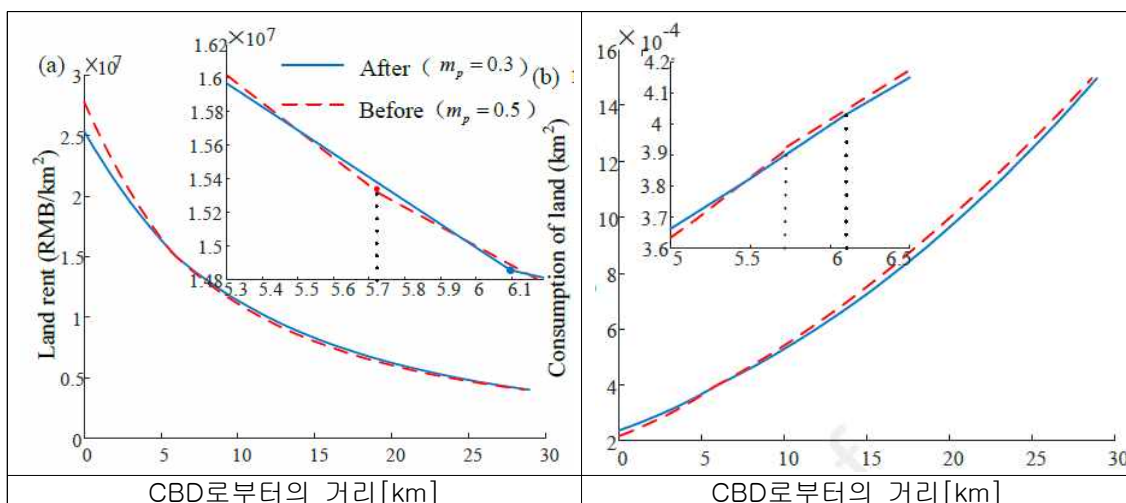
대중교통 관련 정책 개선효과가 도시교통에 미치는 영향을 나타내기 위해 네 가지 시나리오를 설정하였다. $\theta=0.05$ 에서 서로 다른 m_p 값을 갖는 도시의 성능 비교결과를 <표 3>에 나타낸다. $m_p=0.5$ 인 경우와 $m_p=0.3$ 인 경우 대중교통 개선효과를 각각 $\theta=0.05$ 를 설정하여 수치실험을 수행하였다. <표 3>에 나타낸 도시의 임계위치/도시경계, CAR 및 CUR 유틸리티 수준 등에 대한 변경내용을 서로 다른 m_p 값으로 표시한 것이다.

<표 3> $\theta=0.05$ 에서 서로 다른 m_p 값을 갖는 도시의 성능 비교

성능지수	$m_p=0.5$	$m_p=0.3$
임계위치[km]	5.73	6.10
도시경계[km]	28.66	28.95
CAR의 유틸리티 수준 [유틸리티 단위]	49,851	50,188
CURs의 유틸리티 수준[유틸리티 단위]	42,351	42,899

* 자료 : Shu-Xian Xu, Tian-Liang Liu, Ning Jia, Pengfei Wang, Peng Liu, Shoufeng Ma, "The Effects of Transportation System Improvements on Urban Performances with Heterogeneous Residents", Journal of Management Science and Engineering, p.16.

CBD로부터의 거리[km]를 기준으로, 대중교통 개선 전후의 소비경향(좌 : 토지임대료, 우 : $q=0.05$ 인 경우)을 [그림 1]에 나타낸다.



★ 자료 : Shu-Xian Xu, Tian-Liang Liu, Ning Jia, Pengfei Wang, Peng Liu, Shoufeng Ma, “The Effects of Transportation System Improvements on Urban Performances with Heterogeneous Residents”, Journal of Management Science and Engineering, p.17.

[그림 1] 대중교통 개선 전후의 소비경향(좌 : 토지임대료, 우 : $q=0.05$ 인 경우)

도심의 토지임대료가 감소하고, m_p 값이 감소하면 CURs의 유틸리티가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 도시경계로 확장될 수 있으며, 대중교통 개선 후 CARs의 토지임대료는 인하되고, CAR의 유틸리티는 임계위치에서 증가됨을 알 수 있다. 이를 토대로 CBD로부터의 거리[km]는 (식 3)과 같이 계산할 수 있다:

$$\frac{dx_0}{dm_p} < 0, \quad \frac{dB}{dm_p} < 0, \quad \frac{du^a}{dm_p} < 0 \quad \text{and} \quad \frac{du^u}{dm_p} < 0 \quad \dots\dots\dots (\text{식 3})$$

5. 결론

이 연구에서는 두 개의 상주 클래스(CARs(Car-Available-Residents : 자가용 승용차를 이용하는 거주자)와, CURs(Car-Unavailable-Residents : 자가용 승용차를 이용하지 않는 거주자))로 구분하여 양방향 도로교통(고속도로 및 대중교통)이 있는 선형 단일 중심도시에서 다양한 도시교통정책(도시 공간 구조, 토지 임대료 및 거주자의 유틸리티 수준 등)에 따른 고정비용, 이동시간 및 단위거리 당 운송비용 계산 방식을 제시하였다. 로그 모델링을 통해 고속도로와 대중교통 간 CAR의 모달 분할을 캡처하여 여행패턴을 분석하였다. CURs+CARs 주거패턴에 따라 몇 가지 의미 있는 통찰력을 도출하였다. 첫째, CARs의 여행수단 선택기준에 대한 합리성의 정도가 증가함에 따라 도시는 확장되면서 CURs의 유틸리티가 증가하지만, CARs의 유틸리티는 감소한다. 둘째, 교통시스템의 개선은 도시의 규모확장에 대해서는 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 차량-고속도로 시스템 개선을 통해 도시 확장은 가능하지만 대중교통의 개선은 큰 효과를 기대할 수 없다는 점이다. 셋째, 공공 교통시스템 개선을 통해 CURs의 유틸리티는 증가시킬 수 있지만, CARs의 유틸리티는 상대적으로 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

이 논문은 공간평형모델(spatial equilibrium model)을 통해 도심의 양방향교통 문제를 개선(단위거리 당 이동시간 등 운송비용 감소 등)시킬 수 있는 다양한 유틸리티를 조사하였다. 그 결과, 차량의 주행수단에 따라 도시규모는 증가하지만, 대중교통의 개선은 도시규모의 확장보다는 수축을 초래할 수 있다는 것을 확인하였다. 이 연구결과는 국내 대도시의 도심, 고속도로 및 자동차 전용 도로에서의 양방향교통 문제를 개선을 위한 정책에 벤치마킹 자료로 활용할 수 있을 것이다.

[참고문헌]

- [1] Alonso, W., 1964. Location and land use: Toward a general theory of land rent. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
- [2] Muth, R.F., 1969. Cities and Housing. University of Chicago Press, Chicago.
- [3] Mills, E.S., 1972. Urban Economics. Scott Foresman, Glenview, Illinois.
- [4] Shu-Xian Xu, Tian-Liang Liu, Ning Jia, Pengfei Wang, Peng Liu, Shoufeng Ma, “The Effects of Transportation System Improvements on Urban Performances with Heterogeneous Residents”, Journal of Management Science and Engineering, p.16.

<원문제목> The Effects of Transportation System Improvements on Urban Performances with Heterogeneous Residents
--

<원문출처> Journal of Management Science and Engineering
