

자율주행차 운영 환경하에서 통근자 출발시간 선택의 영향에 관한 연구

김찬성¹, 진영근^{2*}, 박지영¹

¹한국교통연구원 스마트교통본부, ²충남도립대학교 컴퓨터정보과

Exploring the influence of commuter's variable departure time in autonomous driving car operation

Chansung Kim¹, Young-Goun Jin^{2*}, Jiyoung Park¹

¹Smart transport center, The Korea Transport Institute

²Department of Computer & Information, Chungnam Provincial University

요 약 자율주행택시, 자율주행셔틀과 같은 새로운 교통서비스들에 대한 연구들이 전 세계적으로 여러 도시들을 대상으로 진행 중이지만 대부분 현재 통행 수요는 출발시간이 고정적이라고 가정하고 기존 교통수단과 새로운 교통수단의 도입 효과를 분석한다. 본 연구는 자율주행기반 교통서비스 운영에서 통근자의 출발시간 조정에 따른 교통체계의 영향을 행위자기반 모형으로 분석하였다. 통행시간 선택에 대해 다양한 시나리오를 설정하였고 자율차를 수용할 수 있는 도로용량의 영향도 분석하였다. 분석결과 통근자가 원하는 출발시간에서 집에서의 활동종료시간과 출발시간이 상당히 조정된 후 시스템적으로 안정적인 통근통행이 완료되었으며, 또한 도로용량의 감소는 과도한 스케줄 조정에도 불구하고, 많은 통행자들이 9시 이전에 통근하기 어려운 것으로 나타났다. 이와 같은 결과를 통해 현재와 다른 교통운영과 교통가격정책이 필요성을 정책적 제언으로 제시하였다.

주제어 : 자율주행, 출발시간, 행위자기반모형, 도로용량, 교통정책

Abstract The purpose of this study is to analyze the effect of commuter's departure time on transportation system in future traffic system operated autonomous vehicle using agent based model. Various scenarios have been set up, such as when all passenger choose a similar departure time, or if the passenger chooses a different departure time. Also, this study tried to analyze the effect of road capacity. It was found that although many of the scenarios had been completed in a stable manner, many commuters were significantly coordinated at the desired departure time. In particular, in the case of a reduction in road capacity or in certain scenarios, it has been shown that, despite excessive schedule adjustments, many passengers are unable to commute before 9 o'clock. As a result, it is suggested that traffic management and pricing policies are different from current ones in the era of autonomous car operation.

Key Words : autonomous car, departure time, agent based model, road capacity, transport policy

1. 서론

최근 10년 동안 과거와 다른 새로운 교통서비스 등장으로 교통체계에 큰 변화를 주고 있다. 대표적으로는 전

기차, 우버택시, 드론 등이다. 새로운 교통수단의 등장은 이용자에게 편리성을 가져다 주지만 기존 교통체계에도 영향을 주고 있는데, 특히 육상교통서비스의 경우 편리성 때문에 도로에 과거보다 시공간적으로 형성되는 교통

*Corresponding Author : Young-Goun Jin (ygjin@cnsu.ac.kr)

Received March 12, 2018

Accepted May 20, 2018

Revised April 12, 2018

Published May 28, 2018

류는 더욱 복잡해질 전망이다.

최근 제공되거나 이용되는 서비스보다 교통체계에 큰 영향을 줄 자율주행 기반 교통서비스는 공공교통수단에 대한 이용편의성을 개선하고 기존 교통수단보다 차량 이용의 효율성을 높일 것으로 기대된다. 따라서 자율주행 택시, 자율주행셔틀과 같은 새로운 교통서비스들에 대한 연구들이 전 세계적으로 여러 도시들을 대상으로 진행 중이다. 그러나, 이 연구들 대부분 현재 통행 수요는 고정적이고 특히, 출발시간이 현재와 같다고 가정하고 기존 교통수단과 새로운 교통수단의 도입 효과를 비교한다. 그러나 신교통수단이 도입되어 운영될 때 통행자의 출발 시간의 다양한 변동성의 영향을 시스템적 차원에서 충분히 검토되어야 한다. 즉, 극단적으로 개인들의 자율자동차 수요가 짧은 시간대에 집중되거나 좁은 공간에 자율차가 밀집되어 물리게 되는 현상이 발생할 수 있다. 본 연구는 출발 시간 변동의 개연성을 가정하고 교통체계에의 영향을 분석하고자 한다.

본 연구에서 이용하는 방법은 행위자기반 모형이며, 이미 많은 연구들이 자율차의 도입효과 분석에 이러한 방법을 적용하였다. 본 연구에서는 통행시간 선택에 대해서 인위적으로 가정한 다양한 시간창(time window) 선택과 통행거리대별 서로 다른 출발시간 분포를 가정하여 시나리오를 설정하고자 한다. 하루 동안의 통행 중 출근통행만을 대상으로 하며, 이용자와 시스템 관점에서 통행시간 변동이 미치는 영향을 분석하기 위하여 평균 통행시간, 출발시간분포, 도착시간 분포 그리고 출근을 위한 집에서의 활동시간 조정과정을 평가 지표로 활용한다.

본 논문의 구성은 다음의 section 2에서 행위자기반 자율주행차 선행연구 중심으로 살펴보고, section 3은 본 연구에서 사용한 자료와 분석방법 그리고 시나리오 구성에 대해 소개하고, section 4는 분석결과를 정리한다. 그리고 마지막 section은 결론과 정책적 함의를 다룬다.

2. 기존문헌검토

최근 자율주행자동차 기술수준이 빠르게 성장함에 따라 자율주행기반 새로운 교통수단에 대한 연구들도 점차 증가하고 있다. 자율주행자동차의 도입효과에 대한 선행 연구들은 시뮬레이션 이용방법, 실제 현장테스트를 수행, 자율주행차량의 도입을 가정한 메타데이터 분석 방법 등

을 사용했다. 그러나 아직 자율주행기반 교통수단에 대한 충분한 실험이 어렵기 때문에 현장테스트나 메타데이터 분석은 적절하지 않을 것이며, 대부분 연구들은 시물레이션 기법을 활용하고 있다.

교통수단의 변화가 이용자들의 수단선택과 통행행태에 미치는 영향을 산정하기 위해서는, 개별 이용자들을 묘사할 수 있는 시물레이션 방법이 필요하다. 따라서 많은 연구들은 행위자 기반 모형 시물레이션을 이용하여 자율주행자동차 도입의 효과를 분석하였다. 행위자 기반 모형을 이용하는 시물레이션 도구는 다양하지만 최근에는 MATSim [8], NetLogo 등을 이용한 연구가 늘고 있다. MATSim을 이용하여 자율주행택시의 효과를 분석한 사례로는 [1,2,4,11] 등이 있다. NETLogo를 이용하여 버스 통행을 자율주행택시로 대체할 경우 시스템에 미치는 영향을 분석하였다 [12]. 특히 이러한 시물레이션은 자율주행 ICT 기술의 발달과 산업효과 및 영향과 실제 도입에 대한 거리감을 좁혀줄 수 있다.[18,19]. Table 1은 행위자기반 연구의 사례지역과 주요결과를 요약한 것이다.

행위자 기반 모형을 활용하여 자율주행기반 교통수단의 영향을 분석한 연구들을 요약하면 Table 2와 같다. 선행 연구들을 살펴보면 현재 운행 중인 승용차 또는 버스가 공유형 자율주행자동차로 전환되는 경우, 분석결과 대상지에 따라 제시하는 기존 차량 대체비율은 다르지만, 공유형 자율주행자동차 도입은 기존 개인 승용차 통행을 현재보다 줄일 수 있는 것으로 예측하고 있다.

따라서 자율주행 기반 서비스로 기존 교통수단의 대체 가능성을 검토하기 위해서는 이용자와 시스템 등 다양한 교통시스템 요소를 고려하여 평가지표 발굴이 필요하다. 본 절의 문헌연구에서는 선행연구들에서 효과 평가를 위해 사용한 지표들을 검토하여 교통네트워크, 이용자, 서비스 운영자 측면으로 재분류하였다.

교통네트워크 측면 분석지표는 차량주행거리(Vehicle Kilometer Traveled, VKT), 통행시간, 지연비율, 환경오염/온실가스 배출 등의 지표가 사용되었다. 이용자 측면 평가지표는 대기시간, 통행시간, 운영자 측면 평가지표는 자율주행 활용률, 공차 운행비율, 차량 가용성, 운영비용 등의 지표로 효과를 분석하였다. Table 2는 주요 평가지표와 선행연구의 분석결과를 정리한 내용이다.

분석 결과에서 보듯이 교통시스템, 이용자 측면에서 각각 평가지표를 통해 자율주행기반 교통서비스의 도입 효과를 평가할 수 있다. 교통시스템 측면의 분석결과

VKT는 공유형 자율주행차량 도입으로 8~11% 증가하며, 통행시간과 지연비용은 도로용량과 공유차량 비율에 따라 효과정도가 다른 결과가 나타났다. 환경오염/온실가스 배출 물질은 운영형태에 따라 증가 또는 감소하는 것으로 분석하였다. 이용자 측면 분석 결과 공유형 자율주행차량의 증가는 대기시간과 통행시간이 줄어들었다.

Table 1. Previous studies of autonomous driving using agent base model

Resear cher	Findings	Tools
[1]	- Analysis subject: Weekdays Berlin and neighboring Brandenburg region -Usage data: only10% of 6million individual passengers -Analysis:Passengercarreplacement	MATSim
[2]	- Analysis subject: Berlin -Usagedata:network(98,000links,37000nodes),traffic volume(16million) -Analysis:Passengercarreplacement	MATSim
[12]	- Analysis target: Ann Arbor, Michigan on weekdays -Usagedata:AnnArborAreaTransitAuthority(AAATA)system,latency,traveltime,mileage,CO2emissions -Analysis target: Substitution of bus traffic	NetLogo
[4]	- Analysis includes: Austin, Texas (12 x 24 miles), 32,272 links -Analysistarget:Personalpassengercarreplacement	MATSim
[11]	- Analysis of: Lisbon, Portugal -Usagedata:basedonLisbonTravelSurvey -Analysistarget:Allpassengercarbusreplacement	MATSim

Table 2. Previous studies of the effects of autonomous driving introduction

Resear cher	Findings	Index
[4]	VMT 22% increase	VKT
[5]	VMT 8% increase	VKT
[16]	VMT 8.3% increase	VKT
[12]	Single/shared ride increases VKT over existing buses	VKT
[1]	[As of 3:00 pm - 4:00 pm] .When there is no capacity change - 100% replacement, increased travel time (799 seconds -> 1,056 seconds) . 1.5 times increase in capacity - Compensation level (799 to 777 seconds)	Travel time
[1]	[As of 3:00 pm - 4:00 pm] . When there is no capacity change - Increased delay rate (13.8% -> 50.3%) . Capacity change more than 1.5 times increase - Delay rate reduction (13.8% -> 9.7%)	Delay
[12]	.CO2 - 77% increase (single-ride) / 21% decrease (shared-ride)	Pollution

[4]	. PM10: 6.5% reduction / CO: 34% reduction	Pollution
[1]	[As of 3:00 pm - 4:00 pm] . Without capacity change - Replacement rate 40%, shortest waiting time . Capacity change more than 1.5 times increase - Average latency reduction pattern	Waiting time
[2]	. Average waiting time 2.5 minutes, 95th percentile 8.5 minutes	Waiting time
[14]	. Peak time, maximum wait time - 250,000 units: 30 minutes / 300,000 units 15 minutes	Waiting time
[4]	. Average wait time less than 20 seconds	Waiting time
[14]	. Average waiting time: 6 minutes (95th 15 minutes)	Waiting time
[14]	. single bus: 9.1 minutes / shared bus: 16.1 minutes . Existing 29.3 minutes	Travel time

3. 분석방법과 자료

3.1 분석모형 설정

앞서 선행연구 검토를 바탕으로 본 연구에서도 자율주행 기반 신고통수단의 도입에 따른 변화를 추정하기 위하여 시뮬레이션을 통한 분석방법론을 적용하고자 한다. 대상 서비스로는 무인운전으로 운영되는 자율주행택시를 선택하였으며, 시뮬레이션 도구는 MATSim을 선택하였다. MATSim은 자바를 기반으로 오픈소스로 개발되어 있어서 다른 시뮬레이션 도구에 비해 다양한 목적으로 연구 활용이 용이하다.

MATSim 시뮬레이션 과정은 초기수요(initial demand), 시뮬레이션(Mobsim), 점수(Scoring), 분석(Analyses), 재구성(Replanning) 5개의 모듈로 구성되며, 반복된 연산 과정을 통해 최적화가 이루어진다(Fig. 1. 참조).

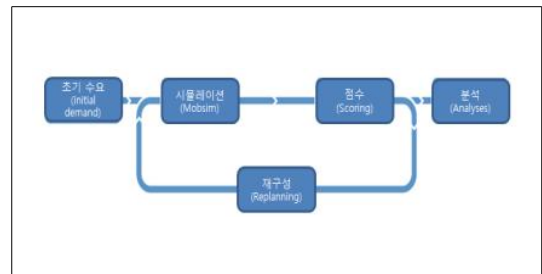


Fig. 1. Simulation modeling process of MATSim

MATSim은 각 행위자별 활동과 통행에 대한 계획을 최적화하기 위하여 병렬진화(co-evolutionary) 알고리즘을 사용한다. 본 알고리즘은 행위자의 계획을 실행하고 제약조건에 따라 개선할 수 있는 새로운 대안을 탐색하면서 더 이상 개선할 수 없는 상태에 도달하면 평행 상태로 도출하는 논리이다. 대규모 시나리오 분석을 위한 효율성을 높이기 위해 대기행렬 기반(queue-based) 교통 시뮬레이션으로 구성되었다.

본 연구에서 가정한 자율주행택시는 승용차 통행을 대체하기 위한 개인형 교통수단으로 가정하였으며, 배차 전략은 MATSim에 내재된 DVRP(Dynamic Vehicle Routing Problem) 알고리즘이 적용되었다. DVRP 알고리즘은 MATSim의 오픈소스로 제공되고 있으며 차량경로, 배차, 스케줄 관련 문제를 최적화하는 알고리즘으로, 이를 활용하여 개별행위자의 업무에 차량을 집에서 직장까지 예약 배차할 수 있어서 자율주행기반 교통수단과 서비스의 시뮬레이션이 가능하다.

3.2 사용된 자료

3.2.1 네트워크

본 연구에서는 효율적인 분석을 위하여 기구축되어 정산이 완료된 네트워크를 활용하였다. 실제 지역을 분석 네트워크로 구축하기 위해서는 활동기반 데이터 수집이 필요하며 네트워크 정산에 장시간이 소요되기 때문에 MATSim 유저 그룹에서 기구축되어 공유되고 있는 수폴스(Sioux Falls) 네트워크를 활용하였다.

수폴스 네트워크는 실제 다코타 주의 수폴스 시를 시뮬레이션하기 위해 구축된 네트워크로 인구 약 17만명, 면적 190km², 가구 수 49,731가구 규모이며, 도로 네트워크는 노드 282개, 링크 334개로 구성되어 있다. 링크의 자유속도는 도로 유형에 따라 최대 90km/시~50km/시이며, 시간당 링크 용량은 차로 수에 따라 1,600대에서 5,680대 규모이다. 분석네트워크에서는 대중교통 네트워크가 포함되어 있으며 총 5개의 버스 노선이 입력되어 있다([6], 아래 그림 Fig. 2. 참조).

수단선택에 내재된 파라미터들은 Horl 등 [6]이나 Horni et al [7]의 디폴트 값을 활용하였다. 즉, 이른 출발에 대한 벌점은 없고, 늦게 도착하는 통행에 대해서는 가장 큰 점수가 주어진다.



Fig. 2. Simulation Network layout of MATSim on Sioux Falls

3.2.2 활동자료

활동 자료를 토대로 1일 통행패턴을 살펴보면, 총 84,110명이 1일 평균 2회 통행하며, 통행목적은 가정-직장, 직장-가구, 그 외 통행으로 구성되어 있다. 시간대별로 수요분포를 살펴보면 오전 7시부터 8시까지, 오후 5시부터 6시까지 침두수요가 발생하는 전형적인 중소도시의 패턴을 보이고 있다. 수단별 분담 비율은 승용차가 전체 통행량의 78.2%, 버스는 21.8%를 차지하고 있다.

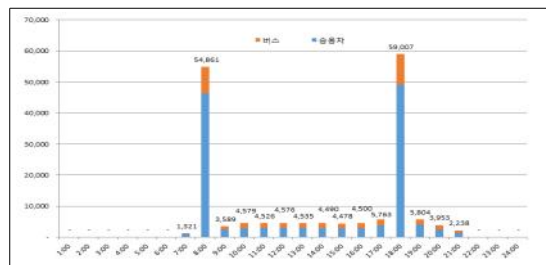


Fig. 3. departing passengers distribution on Sioux Falls (one hour interval)

3.2.3 모든 승용차 통행을 자율차로 대체할 적정대수 산정

수폴스의 적정 자율주행택시 차량 수를 선정하기 위해 필요 차량대수를 5,480대부터 49,900대까지 총 5개의 시나리오를 구성하고, 자율주행택시 도입 효과를 분석하

였다. 즉 개인 승용차를 이용하는 모든 통행자가 자율주행택시로 교체하는 경우 필요한 적정대수를 산정한다. 시뮬레이션 결과 산정된 택시 총량은 20,000대로 추정되었다. 본 연구는 20,000대가 다음의 section 4의 출근시간대 출발시간 조정 시나리오 분석에 활용된다.

4. 시나리오 설정과 분석결과

4.1 시나리오 설정

앞에서 section 3.2.3에서 경험적으로 발견한 20,000대는 다음과 같이 설정한 다양한 시나리오 분석에 활용된다. 고려되는 대안은 현상태 포함 총 5가지 시나리오이며 출근통행을 대상으로 한다. 현 상태의 대안은 통행자들이 7시 20-30분을 중심으로 많은 통근자들이 출발하는 것으로 구성되어 있다. MATSim에서 현상태를 제외한 나머지 4개 시나리오는 개인별 활동자료로 구성된 plan 파일의 출발시간을 대안 1의 경우 모두 7시 30분으로 고정시키고, 대안 2의 경우 출발시간의 분포를 더욱 7시 20분에 집중시키는 피크집중(narrowing)하도록 하고, 대안 3은 출발시간을 7시 20분을 중심으로 현상태보다 이른 출발 또는 늦은 출발의 비중을 높이는 것이다. 마지막 대안은 짧은 거리대의 출근통행자는 늦게 출발하고, 긴 거리대의 출근통행자는 더 빨리 출발시키는 것이다. 긴 거리대는 7시 15분, 짧은 거리대는 7시 45분 그리고 나머지 거리대는 7시 30분에 통근자가 선호한다고 가정한다.

- 대안 0 (S0) : 기존 자료를 그대로 활용
- 대안 1 (S1) : 출발시간을 특정 시간에 셋업 (7시 30분)
- 대안 2 (S2) : Peak narrowing (대안 0보다 출발시간을 촘촘하게 출발)
- 대안 3 (S3) : Peak spreading (대안 0보다 출발시간을 분산시켜서 출발)
- 대안 4 (S4) : 통행거리에 따라 출발시간을 다르게 출발시키기

또한 도로용량과 링크의 자동차 수용용량에 대한 효과를 분석하기 위해 MATSim에서 고려할 수 있는 flowCapacityFactor, storageCapacityFactor의 값을 조정하였다. 기본 대안은 두 파라미터 모두 1.0으로 가정하는 것과 0.5 그리고 2로 변경시키는 대안이다. 이들 파라미터 값이 가지는 의미는 현상태보다 링크에서 수용가능한

차량들이 2배 늘어나거나 감소하는 효과를 분석하기 위한 설정이다. 출발시간의 영향은 아니지만 혼잡효과이나 차량의 뒤섞임을 고려하기 위해 몇몇의 선행연구들 de Freitas et al. [3], Larek [10], Horni et al. [7], Neumann et al. [13]에서 고려한 바 있다. 링크에 교통용량이 커지는 효과와(HS)와 감소하는 효과(DS)가 추가적인 시나리오로 구성된다.

- 대안 HS0, DS0
- 대안 HS1, DS1
- 대안 HS2, DS2
- 대안 HS3, DS3
- 대안 HS4, DS4

행위자 기반모형에서 반복횟수는 중요하다. 본 연구에서는 분석할 시나리오가 15개이므로 계산시간의 부담을 줄이기 위해 다른 선행연구들 처럼 100번 수행하는 것으로 하였다. 본 연구를 위해 사용된 컴퓨터는 Intel Core(TM) i7-4790 cpu 3.6G, 32G RAM의 사양을 가지고 있다. 각 시나리오별 수행시간은 시나리오별로 10시간에서 20시간이 소요되었고, 전체 분석을 위해 200시간이 소요되었다.

평가요소는 시스템의 수용성을 파악하기 위해 반복횟수별 평균통행시간, 출발시간분포, 도착시간분포를 중심으로 분석하였다.

4.2 분석결과

3개의 시나리오 그룹에 대해 전체 15개의 상세 시나리오들은 서로 다른 특징을 보여주고 있다. 가장 중요한 특징은 용량에 대한 결과이다. 링크의 용량이 50%로 줄어들면 시스템에서 자율자동차를 수용하는 상황이 어려워져 극심한 혼잡상황을 겪는 것으로 나타났다. 반면, 용량을 늘리면, 출발시간의 변화에 민감하지 않은 것으로 나타났다.

또 다른 중요한 발견점은 반복횟수에 따른 결과이다. 용량을 감소 또는 증가시키지 않고, 출발시간만 변화시키는 대안들은 반복횟수가 증가할수록 진화(adaptation)되면서 평균통행시간과 9시 이전 출발시간 승객수와 9시 이전 도착승객수의 격차가 줄어드는 것으로 나타났다 (Table 3 참조). 그러나, 이들 시나리오들 중에서 adaptation과정이 서로 다르게 나타난 것은 매우 흥미롭다. 즉, 짧은 거리대에 늦게 출발하고, 장거리대에서 일찍

통근하는 S4의 경우 반복회수 50까지는 다른 시나리오들과 달리 9시에 도착하지 못하는 통근자 수가 상당히 크다는 점을 보인 것이다. 반복회수가 증가함에 따라 다른 시나리오와 마찬가지로 줄어들어 비슷해진 것으로 나타났다 (Table 4 참조). 표에서 제시된 10회의 결과는 100회와 큰 차이를 보여준다. 전체 대안 중에서 대표적인 대안들을 그림으로 나타낸 것이 Fig. 4이며 이를 통해서 전체적인 경향을 확인할 수 있다. 위의 15개 시나리오 분석결과를 놓고 볼 때 10개의 시나리오가 시스템차원에서 안정적인 상태 결과가 도출되었으나, 나머지 5개 시나리오는 9시에 도착하지 못하는 통근자가 많다는 것을 발견할 수 있었다. 그리고 안정적인 상태에 도달한 10개의 시나리오 중에서도 시뮬레이션 중간까지도 도착시간 지표는 안정적인 수치를 보여주지 못했다.

이러한 결과를 통해 실제로 사람들의 출발시간 요구와 선택은 확률적으로 집중되거나 분산되는 등 다양하여 특정의 시공간적으로 시스템 성능에 예상치 못한 현상을 드러낼 수 있다고 예측할 수 있다.

Table 3. average travel time for each scenario

Scenario	Average travel time(h:m:s) (iteration 1)	Average travel time(h:m:s) (iteration 10)	Average travel time(h:m:s) (iteration 100)
S0	1:00:02	27:43	11:57
S1	1:03:19	26:38	12:11
S2	1:00:46	25:38	12:09
S3	1:00:42	26:16	12:15
S4	1:00:38	28:28	12:45
HS0	2:12:23	1:34:58	1:04:36
HS1	2:10:13	1:39:31	1:13:31
HS2	2:12:49	1:41:35	1:14:02
HS3	2:13:03	1:28:08	1:13:45
HS4	1:57:31	1:36:26	1:18:19
DS0	28:23	9:25	8:18
DS1	31:52	9:45	8:21
DS2	29:40	9:17	8:16
DS3	28:51	9:22	8:19
DS4	30:06	9:38	8:20

Table 4. the number of departing and arriving passengers before 9:00

	iteration 1		iteration 10		iteration 100	
	*	**	*	**	*	**
S0	49897	19807	49921	37645	52154	51787
S1	49852	13419	49962	39346	51918	51498
S2	49879	19444	49935	40846	51923	51501
S3	49876	19444	49940	39598	51922	51505
S4	49872	19891	49913	32427	51919	51487

HS0	49845	10945	49851	18406	49848	23864
HS1	49839	8702	49878	16657	49880	26431
HS2	49846	10959	49852	16553	49884	26435
HS3	49843	10790	49858	19031	49889	26459
HS4	49843	11591	49863	14936	49863	25625
DS0	49925	31640	50126	49784	52377	52131
DS1	49871	22242	50108	49787	52340	52069
DS2	49922	30531	50124	49764	52345	52088
DS3	49920	30766	50093	49773	52341	52055
DS4	49898	29946	50105	49761	52289	52045

* is the number of departing passengers before 9:00.

** is the number of passengers arriving before 9:00

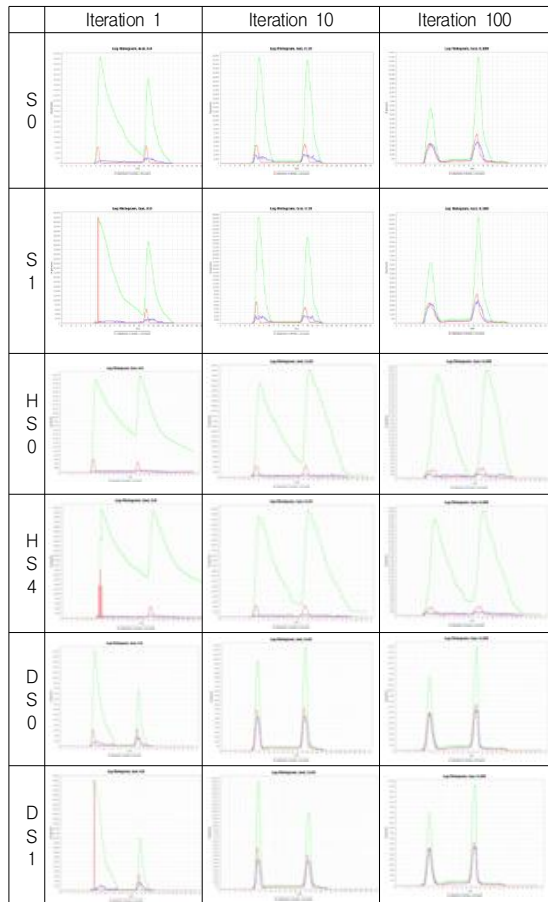


Fig. 4. Departing, arriving and en route commuters by time windows for representative Scenarios

5. 결론과 정책제언

본 연구는 자율주행자동차의 도입으로 나타나는 교통서비스의 변화를 예측하기 위하여 행위자 기반 모형의 시뮬레이션을 이용하여 통근자의 출발시간의 선택이 교

통체계에 미치는 영향을 분석하였다. 분석대상도시는 미국의 Sioux Falls를 대상으로 하였으며, 용량변화의 고려 여부 등 3개의 시나리오 그룹별 5개의 상세시나리오로 설정하고 분석하였다. 분석결과 출발시간이 변경된 교통 수요와 용량조건에 따라 시스템의 효율성에서 큰 차이를 보였고, 세부 시나리오별로도 약간의 차이를 보였다.

본 연구는 몇 가지 면에서 향후 연구가 필요하다고 판단된다. 첫째, HS 시나리오의 경우 9시에 도착하지 못하는 통행이 대부분이었고, 시스템적으로 와해되는 현상이 극명하게 나타났다. 이를 현실화하기 위해 최근 Matsim의 도착통행의 문제를 지적한 Xi등 [15]에서 처럼 현실적 반영이 필요할 것이다. 둘째, Matsim의 정산 모듈이 주요 지점의 관측교통량과 모형의 교통량비교에 한정된 것에서 합리적인 출발시간 정산이 필요하다고 생각한다. Repast모형을 이용한 뉴욕시의 자전거 통행분석[17]에서 행위자기반모형의 정산기법이 참고할만할 것이다. 마지막으로, 본 연구의 연구대상지를 우리나라와 같이 주택 밀도 그리고 고용밀도가 높은 지역을 대상으로 다양한 출발시간 영향하에서 적용해보고 시사점을 찾는 노력이 필요할 것이다.

그럼에도 불구하고 본 연구의 사례연구의 분석결과에서 보듯이, 자율주행기반 교통서비스는 기존 승용차를 대체하는 서비스로 운영이 가능하지만 수요변화와 링크 용량 조건에 따라 차량운용의 효율성이 극도로 비효율적인 경우가 발생되었다. 따라서, 특정 시간대에 수요가 집중되는 경우에는 자율주행택시만으로 효율적인 서비스 운영은 어려우며 고용량 수단이나 라이드셰어링 등 고효율서비스의 검토가 필요하다는 것을 보여준다. 또한 첨두 수요를 분산시킬 수 있도록 시간에 따라서 탄력적인 요금제 도입이나 도로이용의 사전예약제 [9] 등과 같은 정책도 검토할 필요가 있다. 궁극적으로 통행예약제를 포함해 교통정책에서 현재보다 보다 세밀한 연구가 필요할 것으로 보인다. 즉, 출퇴근시차제, 피크시 교통요금정책, 자율택시의 보완책으로서 자율주행셔틀버스의 활용 등 다양한 교통정책을 혼합한 전략들이 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

[1] M, Maciejewsk & J. Bischoff, (2016). Congestion effects of autonomous taxi fleets, *Transport*, 1-10.

[2] J. Bischoff & M, Maciejewski, (2016), Simulation of city-wide replacement of private cars with autonomous taxis in Berlin, *Procedia Computer Science*, 83, 237 - 244.

[3] D. Freitas, L. Meyer, O. Schuemperlin, & M. Balac, (2016), Road pricing: An analysis of equity effects with MATSim, *Conference paper STRC*

[4] D. J. Fagnant & K. M., Kockelman, (2014). The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios, *Transportation Research Part C*, 40, 1 - 13.

[5] D. J Fagnant, K. M., Kockelman & P. Bansal, (2015), Operations of a shared autonomous vehicle fleet for austin, texas, market. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.*, 2536, 98-106.

[6] H. Sebastian, A. Erath, K. W. Axhausen (2017). Simulation of autonomous taxis in a multi-modal trac scenario with dynamic demand, *TRB annual meeting*.

[7] A. Horni, K. Nagel & K. W. Axhausen (2015), *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*, Ubiquity Press, London.

[8] A. Horni & K. W. Axhausen (2014). Gridlock Modeling with MATSim, *14th Swiss Transport Research Conference*.

[9] Y. H Kim & S. C Kan. (2011), Innovative Traffic Demand Management Strategy : Expressway Reservation System, *Transportation Research Record*, 3245, 27-35.

[10] L. Patryk. (2015). Multi-Agent Traffic Assignment of a Synthetic Stockholm Population, Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm, Sweden, Master Thesis.

[11] L. Martinez & P. Crist. (2015). Urban Mobility System Upgrade-How shared self-driving cars could change city traffic, *International Transport Forum. OECD*.

[12] L. A. Merlin. (2017). Comparing Automated Shared Taxis and Conventional Bus Transit for a Small City. *Journal of Public Transportation*, 20, 2, 19-39.

[13] N., Andreas, I. Kaddoura & K. Nagel (2016). Mind the Gap - Passenger Arrival Patterns in Multi-agent Simulations, *International Journal of Transportation A*, 1, 27-40.
<http://dx.doi.org/10.14257/ijt.2016.4.1.02>

[14] K. Spieser, et al. (2017). Toward a systematic approach to the design and evaluation of automated mobility-on-demand systems: A case study in Singapore. *MIT Open Access Articles*.

[15] X., Yuliang, D. Qingyun, H. Biao, R. Fu, Y. Zhang & Y. Xinyue. (2017). The Dynamic Optimization of the

Departure Times of Metro Users during Rush Hour in an Agent-Based Simulation: A Case Study in Shenzhen, China, *Appl. Sci.* 7, 1102; doi:10.3390/app7111102

- [16] S. Zhu, & A. L. Kornhauser. (2017). The Interplay Between Fleet Size, Level-of-Service and Empty Vehicle Repositioning Strategies in Large-Scale, Shared-Ride Autonomous Taxi Mobility-on-Demand Scenarios, *Transportation Research Board 96th Annual Meeting*, 17-059.
- [17] H. M. Abdul Aziz, B. H. Park, A. Morton, N. Robert, M. Stewart, Hilliard & M. Maness, (2018). A high resolution agent-based model to support walk-bicycle infrastructure investment decisions: A case study with New York City, *Transportation Research Part C* 86, 280 - 299.
- [18] S. Y Oh. (2015). The Implementation of an Advanced Taxi Movement Model in the ONE Simulator, *Journal of Digital Convergence* 13, 237-241.
- [19] S. K Park. (2018). A Study of the Autonomous Vehicle Technology and its Future Trend : Focusing on Current Industry and Technology Convergence of Trend, *Journal of the Korea Convergence Society*, 9, 253-259.

김 찬 성(Chansung Kim) [정회원]



- 1994년 2월 : 서울대학교 환경대학원 교통계획과 (도시계획학석사)
- 2005년 5월 : 미국 Portland State University (Urban Studies in Ph.D.)
- 1994년 3월 ~ 2000년 7월 : 한국교통연구원 연구원, 부연구위원
- 2010년 8월 ~ 2016년 12월 : 한국교통연구원 국가교통 DB센터 Director, 연구위원
- 2017년 1월 ~ 현재 : 한국교통연구원 철도교통연구본부 연구위원
- 관심분야 : 교통빅데이터, 통행행태, 교통수요모형, 행위자기반모형
- E-Mail : chansungkim@hanmail.net

진 영 근(Youngoun Jin) [정회원]



- 1986년 2월 : 한국과학기술원 전기전자과 석사
- 1998년 8월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 박사
- 1989년 12월 ~ 1999년 2월 한국항공우주연구원 선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 충남도립대학교 컴퓨터정보과 교수
- 관심분야 : 오픈소스, 인공지능, 빅데이터, 가상현실
- E-Mail : ygjin@cnsu.ac.kr

박 지 영(Jiyoung Park) [정회원]



- 1999년 2월 : 서울대학교 도시공학과 석사
- 2009년 6월 : 미국 University of California, Irvine 토목공학 박사
- 2009년 7월 ~ 현재 : 한국교통연구원 4차산업혁명교통연구본부 부연구위원
- 관심분야 : 친환경차 정책, 신교통서비스 효과 분석, 통행행태 연구 등
- E-Mail : parkjy@koti.re.kr