

(옆면)

(앞면)

18CTAP-C
133228-02

보안 과제(), 일반 과제() / 공개(), 비공개()발간등록번호()

국토교통기술촉진연구사업 최종보고서

R&D / 18CTAP-C133228-02

지역 불균형 완화를 위한 대중교통 노선 조정 시뮬레이션 기법 개발 최종보고서

2019. 6.

주관연구기관 / 서울시립대학교

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

지역 불균형 완화를 위한 대중교통 노선 조정 시뮬레이션 기법 개발
최종보고서
2019
국토교통과학기술진흥원
국토교통부

제 출 문

국토교통과학기술원장 귀하

‘지역 불균형 완화를 위한 대중교통 노선 조정 시뮬레이션 기법 개발’(연구개발 기간 : 2017. 06. 30 ~ 2019. 03. 30) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2019 . 6 . .

주관연구기관명 : 서울시립대학교 산학협력단 (대표자) 김 강 수



주관연구기관책임자: 전 철 민

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C133228-02	해당 단계 연구 기간	2018.01.01. ~ 2019.03.30	단계구분	2017.06.30. ~ 2019.03.30
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	창의도전 연구분야			
연구과제명	대과제명	지역 불균형 완화를 위한 대중교통 노선 조정 시뮬레이션 기법 개발			
	세부과제명				
연구책임자	전철민	해당단계 참여연구원 수	총: 10 명 내부: 10 명 외부: 0 명	해당단계 연구비	정부: 210,000 천원 민간: 천원 계: 210,000 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 10 명 내부: 10 명 외부: 0 명	총 연구비	정부: 210,000 천원 민간: 천원 계: 210,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	서울시립대학교 산학협력단			참여기업명: 없음	
국제공동연구	상대국명: 없음			상대국 연구기관명: 없음	
위탁연구	연구기관명: 없음			연구책임자: 없음	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	보안등급 : 일반 / 보안과제 아님
-------------------------	---------------------

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록· 기탁 번호											

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약 - 대중교통 빅데이터 통합 DB 및 네트워크 구축 - 정류장 단위의 시간-거리 접근성 산출 기법 개발 - 머신러닝 기반 개인별 통행경로 선호도 분류기 개발 - 개별 승객의 통행경로 선호도 기반 다목적 통행경로 배정기법 개발 - 시나리오 기반 노선 조정 시뮬레이션 기법 개발	보고서 면수 113
--	----------------------

요약문

연구의 목적 및 내용	대중교통 빅데이터 기반 데이터 주도형 분석을 통한 노선 공급 현황 분석 및 신규 노선 추가, 기존 노선 변경(배차, 경로 등), 폐쇄 등 노선 조정에 대한 정량적 시뮬레이션 기법을 개발하고, 이를 이용하여 지역 불균형 완화를 위한 미시적 노선 조정 방안 제시				
연구개발성과	• 대중교통 빅데이터 통합 DB 및 네트워크 - 대중교통 노선, 정류장, 스마트카드 거래내역, 운행시간표 등 대중교통 빅데이터 통합 DB를 구축하고, 이를 기반으로 대중교통 네트워크 데이터 구축 • 정류장 단위 시간-거리 접근성 산출 기법 - 기존 대중교통 네트워크에서 수요/공급 불균형을 파악하기 위한 시간-거리 접근성 지표를 개발하고, 모든 정류장간 시간-거리 접근성을 분석하여 수요대비 공급 불균형이 높은 지역 도출 • 머신러닝 기반 개인별 통행경로 선호도 분류기 - 스마트카드 자료에서 승객의 개별 통행이 어떤 통행경로를 선호하는지(최단 시간 경로, 최소 환승 경로 등) 파악하기 위한 머신러닝 기반 선호도 분류기를 개발하고 모든 통행의 경로 선호도를 분류 • 개별 승객 통행경로 선호도 기반 다목적 통행경로 배정 기법 - 대중교통 네트워크에서 환승을 고려한 정류장간 다목적 통행경로 산출 기법을 개발하고, 이를 스마트카드 자료에 기록된 모든 기종점 수요에 적용하여 통행경로를 탐색 - 스마트카드 자료의 승객별 통행경로 선호도에 따라 통행경로를 배정하는 기법을 개발하고 이를 이용하여 노선별 수요를 예측 • 시나리오 기반 노선 조정 시뮬레이션 기법 - 수요 대비 공급 불균형이 높은 지역에 대해 현황 분석을 수행하여 문제점 진단 및 개선 시나리오를 수립하고, 각 시나리오별 시뮬레이션 실험 결과를 정량적으로 비교·분석 - 대중교통 노선 조정 효과, 기대 편익 등을 산출하여 지역 불균형 완화를 위한 합리적 노선 조정 방안을 제시				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	본 연구의 최종성과물은 지역 불균형 완화를 위한 미시적 대중교통 노선 조정 시뮬레이션 기법임. 이를 위해 머신러닝, 대중교통 빅데이터 기반 데이터 주도형 분석을 통해 개인별 통행경로 선호를 추론하였고, 경로 선호도를 고려하여 대중교통 승객의 경로를 탐색하여 승객을 노선에 배정하는 통행경로 배정기법을 개발하였음. 이를 통해 노선별, 시간대별 통행수요를 예측 할 수 있으며, 이와 같은 수요 예측 기법은 개인의 성향을 반영한 미시적 기법으로 거시적 모형들이 가지는 예측 오차를 최소화할 수 있을 것으로 기대함.				
국문핵심어 (5개 이내)	지역 불균형	대중교통	노선 조정	머신러닝	시간-거리 접근성
영문핵심어 (5개 이내)	regional imbalance	public transportation	route adjustment	machine learning	time-distance accessibility

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	5
가. 연구의 배경 및 목적	5
나. 국내외 관련 분야의 기술개발 현황	9
다. 연구개발의 중요성	22
라. 기술개발 성숙도	23
2. 연구수행내용 및 성과	24
가. 연차별 연구 목표	24
나. 연차별 연구수행내용	25
다. 연구 핵심성과 및 성과별 평가방법	96
라. 연구개발의 추진전략·방법 및 추진체계	100
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	103
가. 연구 성과 현황 및 자체평가	103
나. 연차별 연구개발 목표 달성도	108
4. 연구개발성과의 활용 계획 및 기대효과	110
가. 연구개발성과의 활용 계획	110
나. 연구개발 결과물 타 연구 연계방안	111
붙임. 참고 문헌	112

<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구의 배경 및 목적

(1) 연구 배경

○ 대중교통 서비스의 지역간 불균형 심화

- 수도권 교통난 해소와 장거리 통근자들의 교통복지 제고를 위해 수도권 외곽과 주요 거점을 연결하는 광역급행철도망 구축이 추진 중이지만, 버스, 철도 등의 복합수단을 이용한 연계환승체계는 여전히 미흡한 실정임
- 수도권 대중교통 서비스 수준을 지역별로 살펴보면, 도시·광역철도 시설과 버스 시설의 면적당 공급 수준이 최저지역과 최고지역의 차이가 각각 약 14.6배, 약 4.3배에 이를 정도로 불균형이 심각함
- 현 대중교통 투자평가체계는 통행수요를 찾아다니는 형태이기 때문에, 유동인구가 많고 비교적 활발한 개발활동이 이루어지는 지역에는 투자가 이루어지는 반면, 개발이 열악한 지역은 지속적으로 투자에서 소외되는 부익부 빈익빈 현상이 나타나고 있음

○ 지역간 불균형 완화를 위한 정량적 지표 기반 대중교통 노선 조정 필요

- 교통정책 우선과제로 ‘국민체감형 지역균형발전 정책추진’과 ‘국민을 위한 대중교통인프라 확충’이 제시되어 있는 만큼, 서비스의 균형적인 제공을 위해 대중교통 노선 조정이 필요한 상황임
- 현재 노선 조정은 승하차인원, 배차간격, 굴곡도 등의 현황 데이터를 참고하여 민원이나 효율성의 문제가 제기된 구간에 대해 전문가들이 토의하여 결정하고 있음
- 하지만 전문가들의 경험 및 직관에 의존적인 노선 조정 방식은 노선 조정에 따른 편익 편화를 예측하기 어렵고 예상하지 못한 결과로 인해 많은 민원을 야기할 수도 있음
- 실제로 2016년 인천 시내버스 노선 조정 후 열흘 간 노선 조정 관련 민원은 4,444건으로 조정 직전 달의 닷새간 접수된 민원 668건에 비해 매우 높은 비율을 보였으며, 민원에 의해 추가 노선 조정이 수행되었음

○ 노선 조정 전후 대중교통 서비스 수준의 미시적 변화 예측 필요

- 노선 조정 전후의 대중교통 서비스 수준 변화를 분석하는 기존의 방법론들은 거주 및 활동 공간을 집합화한 교통존으로 연구 지역을 구분하고 하나의 교통존에 포함된 통행자들이 모두 동일한 원칙 하에서 노선을 선택한다는 가정을 내포하고 있음
- 하지만 개인 단위 교통카드 통행자료, 버스운행관리 시스템(BMS: Bus Management System)등의 대중교통 빅데이터 수집이 가능해짐으로써, 각 개인 행태를 고려한 통행패턴 분석과 같은 보다 미시적인 연구를 수행할 수 있는 여건이 마련됨
- 이에 따라 빅데이터 분석 및 머신 러닝 등의 기법을 활용해 개인별 노선 선택 유형을 분류하고 이를 기반으로 노선 조정 이후의 대중교통 서비스 수준 변화를 예측할 수 있는 체계적 방법론 정립이 필요함

(2) 연구 목적

○ 지역 불균형 완화를 위한 대중교통 노선 조정 시뮬레이션 기법 개발

- 본 연구에서는 대중교통 서비스의 지역간 불균형을 완화하기 위해 정량적 지표 기반의 노선 조정 시뮬레이션 기법을 개발함
 - 스마트카드로부터 얻어진 통행사슬 자료와 머신러닝 기법을 이용한 ‘개인별 통행경로 선호도 분류기’를 개발하여 실제 대중교통 이용자들의 개인별 통행경로 선택 유형을 분석함
 - ‘정류장 단위 시간-거리 접근성’을 산출하여 대중교통 서비스 개선 필요 지역(경로)을 도출함
 - 서비스 개선 필요 경로에 대해 노선 신설, 기존 노선 변경 등 ‘노선 조정 시나리오’를 적용함
 - 조정된 노선 체계에 대중교통 이용자들의 통행경로 선택 유형을 적용하여 노선별 통행수요를 예측하고 이를 통해 서비스 수준 변화 정도를 분석함

(3) 연구 핵심 키워드

○ 개인별 통행경로 선호도 분류기

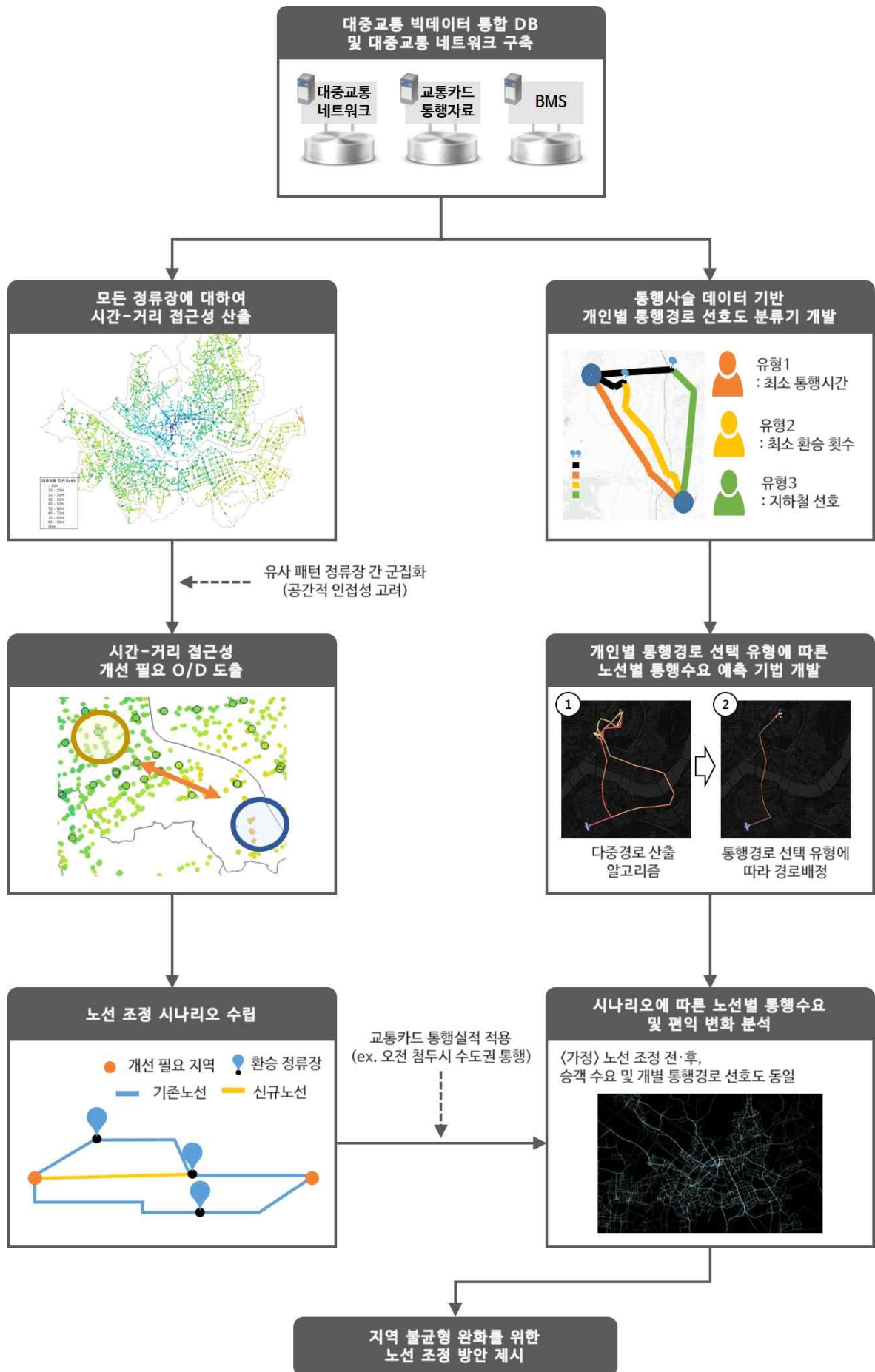
- 통행사슬 데이터로부터 개인별 통행경로 선호도를 분석할 수 있는 분류기 개발
ex) 최소 통행시간 경로, 최소 환승횟수 경로, 최소 도보 이동거리 경로 등
- 이용자별 선호 통행경로 라벨링을 통해 개인 행태를 고려한 통행패턴 분석
- 머신러닝 기법을 이용하여 정확도 향상

○ 정류장 단위 시간-거리 접근성

- 대중교통 이용자의 차내시간, 차외시간(환승시간), 환승횟수 등을 종합적으로 고려하여 특정 정류장에서 다른 모든 정류장으로 이동하는데 소요되는 시간-거리 개념
- 개별 정류장 단위의 미시적인 접근성 개념으로 대중교통 이용자들이 체감하는 서비스 수준 지표
- 정류장 단위는 포인트 단위이므로 행정구역, 격자 등의 단위로 확장성이 있으므로 다양한 인구사회 데이터들과의 중첩 분석 가능

○ 노선 조정 시나리오

- 하나의 기종점 쌍(경로)을 통행할 수 있는 다양한 대중교통 노선이 존재할 때, 해당 경로에 신규 노선을 임의로 추가하거나, 기존 노선의 링크 변경
- 노선 조정 후, 개인별 통행경로 선호도에 따라 해당 조정 경로 및 이로 인해 영향을 받는 모든 대중교통 이용자들의 통행패턴 변화 시뮬레이션 수행
- 노선별 수요, 시간-거리 접근성, 이용자 편의 등의 노선 조정 전후 변화 분석



[그림 1-1] 지역 불균형 완화를 위한 대중교통 노선 조정 시뮬레이션의 흐름

(4) 연구 범위

○ 시·공간적 범위

- 본 연구에서는 스마트카드 거래내역, BMS, 대중교통 노선 데이터 및 운행시간표 등 2017년 서울시 대중교통 데이터를 활용하여 연구를 진행하였음
- 서울시의 버스 및 지하철 노선을 대상으로 시간-거리 접근성 분석 및 노선 조정 시뮬레이션을 수행하였음

○ 내용적 범위

[표1-1] 연차별 연구 범위

구분	세부과제	세부 연구 목표
1차 연도 (2017)	대중교통 빅데이터 통합 DB 및 대중교통 네트워크 구축	• 대중교통 빅데이터 통합 DB 구축 • 대중교통 네트워크 구축
	지역 불균형 파악을 위한 정류장 단위의 시간-거리 접근성 지표 개발	• 정류장 O/D에 대한 시간-거리 접근성 지표 개발 • 정류소간 최소 도착 시간 경로 탐색 알고리즘 개발
2차 연도 (2018)	머신러닝을 이용한 대중교통 통행사슬 기반 개인별 통행경로 선호도 분류기 개발	• 딥러닝 기반 개인별 통행경로 선호도 분류기 개발 • 및 스마트카드 거래내역을 이용한 분류 결과 검증
	개별 승객 통행경로 선호도를 고려한 통행경로 배정 기법 개발 및 수요 예측	• 다목적 통행경로 산출 알고리즘 • 개별 승객 통행경로 선호도 및 정류장 군집간 O/D 기반 승객별 통행경로 배정 기법 개발
	지역 불균형 완화를 위한 시나리오별 노선 조정 시뮬레이션 실험	• 시나리오별 시뮬레이션 실험 수행 및 결과 비교·분석

나. 국내의 관련 분야의 기술개발 현황

(1) 국내 현황

- 연구개발 대상의 국내 현황에서는 ‘지역 불균형 완화를 위한 노선 조정 시뮬레이션 기법 개발’에 포함된 요소 기술들의 국내 연구를 살펴보았음
- 살펴본 국내 연구들은 크게는 지역별 대중교통 서비스 평가 분야와 노선 조정에 따른 통행수요 예측 분야로 구분할 수 있고 구체적인 방법론 측면에서는 대중교통 접근성 산출 연구와 통행배정모형 연구에 해당함

○ 대중교통 서비스 평가지표

- 대중교통 서비스의 정량적 평가를 위한 연구는 매우 다양하게 진행되었으며, 최근에는 균형적인 대중교통 서비스 공급 및 지역별 형평성 제고와 같은 대중교통 서비스의 균형적 투자를 위한 연구들이 증가하고 있음
- 이용자들의 통행시간 및 비용, 만족도 등 실증적 자료를 바탕으로 대중교통 서비스 수준을 평가하고 있으며, 이를 지역별로 비교하여 대중교통 서비스의 공급현황 및 지역간 형평성 등을 분석하고 있음

[표 1-2] 대중교통 서비스 평가지표 관련 선행연구

구분	선행연구	주요 연구내용
1	지속가능한 이동성 연구 (정일호, 2002)	• 대중교통 평가지표 및 평가매뉴얼 개발 • 대중교통 서비스 평가지표 및 평가체계 개발 • 정책활용 방안과 개선방향 도출
2	대중교통 서비스지표 산출연구 (이신해 외, 2009)	• 대중교통 서비스지표 개발 및 서비스수준의 진단 • 대중교통 서비스지표 속성 분석 • 서울시 대중교통 정책 방향제시
3	공정한 사회를 위한 인프라 정책의 사회적 형평성 제고방안 (정일호 외, 2011)	• 사회여건 및 실증 분석을 통한 교통정책측면의 형평성 제고 방안 제시 • 교통정책측면의 형평성 평가지수 개발 및 정책방안 제시
4	국토교통인프라의 최저서비스 기준 정립에 관한 연구 (고용석 외, 2011)	• 도로교통인프라의 최저서비스 기준 정립 및 평가 • 교통기본권의 개념 검토 • 최저교통서비스 관련 실태조사 및 GIS 분석 • 법·제도 및 정부조직체계 정책대안 제시
5	대중교통 현황조사 (교통안전공단, 2013)	• 대중교통 현황조사 • 대중교통 운행 및 이용실태조사 • 대중교통 환승실태 및 만족도조사

6	대중교통 서비스 개선을 위한 서울시 출근통행의 질 평가 (김순관 외, 2013)	• 통행의 질에 영향을 주는 요인분석 및 통행의 질 평가 방법론 정립 • 사례조사 지역에 대한 출근통행의 질 평가 • 대중교통 이용증진을 위한 서울시 대중교통 정책 방향제시
7	교통비용 지출의 사회적 형평성 연구 (이주연 외, 2013)	• 소득계층에 따른 교통비용 지출 및 사회적 형평성 평가 • 사회적 형평성의 개념 및 분석 방법론 고찰 • 교통비용지출 현황 분석 및 사회적 형평성 분석지표 개발
8	대중교통 이용자 체감지표를 이용한 지역별 서비스 형평성 제고방안 (배운경, 2015)	• 대중교통 서비스의 형평성 개념 정립 • 대중교통 서비스 평가 지표 및 평가체계 개발 • 지역별 대중교통 서비스 형평성 분석 • 대중교통 서비스 불균형지역 평가체계 정립

○ 대중교통 접근성

- 교통접근성은 연구 목적과 대상에 따라 다양하게 정의되고 있으며 일반적으로는 교통수단을 이용하여 특정 목적지까지 도달하는데 소요되는 통행시간의 적절성 및 용이함의 정도를 의미함
- 대중교통 접근성은 통계적 방법, GIS 활용 방법, 통계적 방법과 GIS를 복합적으로 활용하는 종합적 방법 등으로 산출할 수 있으며 [표 1-3]은 해당 연구들의 주요 내용을 정리한 것임

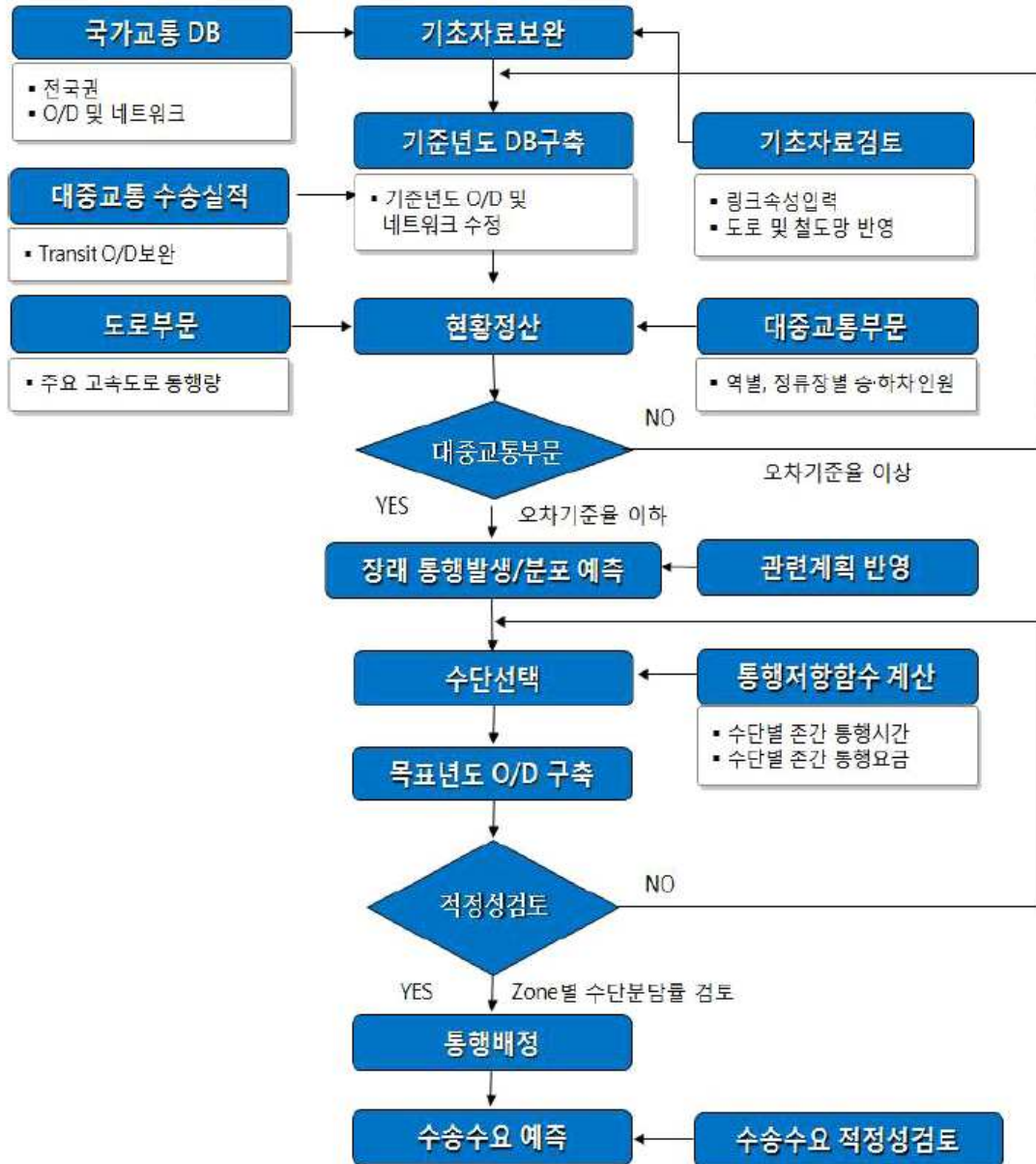
[표 1-3] 대중교통 접근성 산출방식

구분	선행연구	대중교통 접근성 산출방식	
1	수도권 가구통행 조사를 바탕으로 한 교통 형평성 분석 (이원도 외, 2012)	통 계 적 방 법	• 행정동이 지니고 있는 버스정류장 수와 지하철역 수를 이용하여 교통인프라 밀도(인프라 수/인구 또는 면적) 측정
2	인구 유입과 유출을 결정하는 지역 특성 요인에 관한 연구 (김리영 외, 2013)		• 대중교통 서비스의 교통수단 분담률
3	주거입지선택에서의 대중교통 접근성과 직주균형의 구조적 관계가 가구수준의 통행행태에 미치는 영향 (성현곤, 2012)		• 버스정류장 혹은 지하철역까지의 도보접근성 (도착시간) • 대중교통 시설에 도착하는데 걸리는 시간이 10분을 초과할 경우, 영향권 범위에서 벗어난 것으로 간주

4	대구시 대중교통서비스의 접근성에 대한 환경적 형평성 분석 (김아연 외, 2012)	GIS 활용 방법	- 버스 서비스권과 지하철 서비스권을 설정한 후, 각 서비스권에 포함되는 행정구역 중심수 파악 - 버스서비스권: 정류장 반경 400m - 지하철서비스권: 지하철역 반경 500m
5	버스이용의 접근성 차이에 따른 교통취약지 분석 (박지영, 2008)		- 대중교통 시설의 영향권을 티센 폴리곤으로 설정하여 물리적인 거리 측정 - 정류장 분포 밀도로부터 커널추정 방식을 통해 강도 분석 - 도로 네트워크를 따라 서비스 권역 추출
6	행정동별 접근도가 교통수단별 분담률에 미치는 영향분석 (장성만 외, 2011)	종합적 방법	- 행정동 단위 평균값을 대푯값으로 사용 - 도시철도역과 버스정류장을 구분하여 접근도 감쇄정도 측정 - 시간당 통과차량수를 가중치로 사용
7	서울의 고령일인가구 분포와 대중교통 접근성 (조대현, 2014)		- 수요지점으로부터 임계거리 내에 존재하는 모든 서비스를 누적 - 버스와 지하철에 대한 임계거리: 1000m - 서비스 수준은 대중교통 운행횟수 및 노선의 총 연장 사용
8	서울시 대중교통 접근성의 공간적 정의에 대한 실증연구 (윤종진 외, 2015)		- 대중교통 시설이 지는 서비스면적 영향력(보행접근성)과 서비스 수준(통행량)으로 정의 - 행정동 단위 접근성 산출 - 지니계수를 이용하여 지역, 인구, 주택 유형별 불평등 정도 분석

○ 대중교통 수요분석

- 국내 대중교통 수요는 4단계 수요추정 모형을 이용하여 예측하고 있음
- 4단계 수요추정 모형은 통행발생, 통행분포, 수단선택, 통행배정으로 구성되어 있고 각 단계별 수행내용은 다음과 같으며 [그림1-2]로 표현됨
 - ① 통행발생: 각 교통존에서 발생하는 교통량과 해당 존에 도착하는 교통량을 추정하는 단계
 - ② 통행분포: 교통량을 각 존에 배분하는 단계
 - ③ 수단선택: 교통존 간의 O/D에 대해 이용자가 선택 가능한 교통수단을 세분화하는 단계
 - ④ 통행배정: 교통수단별 O/D자료를 대상지역의 교통망에 배정하는 단계



[그림 1-2] 국내 대중교통 수요분석 과정

○ 대중교통 통행배정모형

- 대중교통 통행배정모형에는 전량 통행배정, 최적전략 통행배정, 확률적 통행배정 등이 모형이 사용되고 있음
- 전량 통행배정은 이용자가 목적지까지 가기 위해 최소 통행비용이 소요되는 노선을 선택한다는 가정 하에 출발지와 목적지 사이의 단일 최단경로에 전체 수요를 배정하는 기법으로 교통계획 소프트웨어 TRANPLAN에서 기초적인 알고리즘으로 사용되고 있음
- 확률적 통행배정은 교통상황의 인식이 개별 통행자마다 다르다는 가정 하에 출발지와 목적지를 연결하는 다수의 노선 중 이용자가 확률적으로 노선을 선택하는 모형임
- 최적전략 통행배정은 Spiess-Florian(1989)에 의해 제안된 모형으로 다양한 경로선택방법 (전략) 중 평균통행시간 및 비용을 최소화하는 노선을 선택하는 방식이며, 대중교통

이용자는 대기하고 있는 정류장에서 전략에 포함된 노선 중 가장 먼저 도착하는 노선을 이용하게 됨

- 최적전략 통행배정모형은 교통계획 소프트웨어 EMME/2,3에 적용되어 있고 국내에서 가장 일반적으로 활용되고 있는 모형임
- 최근에는 교통카드 기반 대중교통 통행배정모형들이 연구되었으며 [표 1-4]는 해당 연구들의 주요 내용을 정리한 것임

[표 1-4] 교통카드 기반 대중교통 통행배정모형

구분	선행연구	주요 연구내용
1	복합수단을 고려한 확률적 대중교통 통행배정모형 (박경철 외, 2007)	• 경로기반 확률적 통행배정모형 • 버스와 철도로 구성된 복합수단 선택대안 구성 • 차내시간, 환승시간, 환승패널티로 구성된 효용함수 제시
2	차량용량과 정류장혼잡을 고려한 대중교통 통행배정 모형 (김주영, 2010)	• 최적전략 통행배정모형 기반 • 차량의 용량초과로 인해 발생하는 혼잡도를 고려하기 위해 기존 방식에 대중교통 용량제약 요소 적용
3	대중교통카드기반 수도권 도시철도 통행수요배정모형 (손지언, 2016)	• 경로기반 동적 통행배정모형 • 교통카드기반 실시간 수요변화의 예측 가능성 모색 • 환승 횟수 증가에 따른 인지 파라미터 구성 및 연속 시간형 모형 구축
4	Stepwise 환승계수를 고려한 Logit 유형 대중교통통행배정모형 (신성일 외, 2016)	• 경로기반 확률적 통행배정모형 • 전체경로삭제기법을 이용하여 가능경로집합 구성 • Stepwise 환승계수가 반영된 logit 모형 구축

(2) 국외 현황

- 연구개발 대상의 국외 현황에서는 국내 현황에서 살펴본 연구 분야의 국외 동향과 상용화되고 있는 교통계획 소프트웨어를 살펴보았음
- 대중교통 서비스의 균형을 위한 연구 및 통행수요 추정 방식은 국내와의 큰 차이가 나타나질 않았지만, 교통계획 소프트웨어 분야는 국외 기술력이 시장을 주도하고 있는 것으로 나타남

○ 대중교통 수요분석

- 대중교통 수요분석은 일반적으로 국내와 동일하게 4단계 수요추정모형을 통해 이루어지고 있음
- 미국의 경우, 중소도시에서는 대중교통 수단분담율이 높지 않기 때문에, 교통 수요분석 과정에서 대중교통 통행을 세밀하게 다루고 있지 않음
- 유럽의 대중교통 통행배정은, 국내와 유사하게 최적전략 통행배정모형을 사용하고 있으며 접근시간, 대기시간, 차내시간, 환승시간, 환승횟수, 도착시간 등을 수요분석 속성으로 활용함

○ 대중교통 서비스 평가지표

- 지역간 대중교통 서비스의 불균형은 형평성 관점에서 연구되고 있고 형평성을 측정하는 대표적인 지표들은 다음과 같음(Litman, 2016)
 - 혼잡도(congestion impacts, level of service)
 - 접근성 및 이동성(accessibility, mobility)
 - 통행비용(cost, affordability, cost recovery)
- 대중교통 시설의 밀도 및 이동성, 교통약자들의 대중교통 이용 편의성, 소득 수준을 고려한 대중교통 요금의 적정성 등을 판단하여 지역별 대중교통 서비스 수준을 비교하고 있음
- 대중교통 수요와 공급에 대한 지표를 제시하고, 두 지표 간의 격차로 대중교통 서비스 수준을 설명하는 연구들이 교통지리학 분야에서 수행된 바 있으며, 해당 연구들의 주요 내용을 정리하면 아래의 표와 같음

[표 1-5] 공급과 수요 간의 격차를 통한 대중교통 서비스 분석

선행연구	2010, Quantifying spatial gaps in public transport supply based on social needs
공급지표	$SI_{CCD} = \sum N \left(\frac{Area_{B_n}}{Area_{CCD}} * SL_{B_n} \right)$ - 호주 센서스 공간 단위 - 대중교통 종류(버스, 트램, 철도)에 따른 정류장 개수 - 버퍼 넓이(버스 400, 트램 400, 철도 800) - 대중교통 종류에 따른 정차 빈도 수
수요지표	$NS_{CCD} = \sum (SI1_{CCD} * W1) + (SI2_{CCD} * W2) + \dots + (SI8_{CCD} * W8)$ - 대중교통 수요를 유발하는 인구사회적 통계 지표 및 교통약자 통계 지표 활용(SL_i) - 주성분 분석을 이용하여 각각의 가중치 설정 - 총 인구 가중치 부여 -> 절대 수요 지표 - 교통약자 인구 가중치 부여 -> 상대적 수요 지표
시사점	- 대중교통 시설의 공간 점유율 및 서비스 수준(frequency)을 고려한 공급 지표 제시 - 표준화된 두 지표의 합산(공급 지표 + 수요 지표)을 통해 각 CCD의 대중교통 서비스 격차 비교 - 공급 지표에 있어 대중교통 이동시간은 고려하지 않음 - 목적지에 따른 각 지표의 변동성을 반영할 수 없음- 공급(수요) 지표가 높은 수준으로 나타났으나, 특정 목적지로의 대중교통 공급(수요) 수준이 낮은 경우
선행연구	2012, Spatial disparity in transport social needs and public transport provision in Santiago de Cali(Colombia)
공급지표	$A-IPTP_j = \frac{1}{A_j} \sum_{i=1}^n S_{ij} w_{ci} w_{fi} \quad w_{ci} = \frac{c_i}{c_{min}}$ $R-IPTP_j = \frac{1}{P_j A_j} \sum_{i=1}^n S_{ij} w_{ci} w_{fi} \quad w_{fi} = \frac{f_i}{f_{min}}$ n : 대중교통 서비스(모드) 개수 S_{ij} : 구역 j의 모드 i의 정류장 개수 w_{ci}, w_{fi} : 모드 i의 용량 가중치 및 정차 빈도 가중치 A_j, P_j : 구역 j의 넓이 및 인구 c_i, c_{min} : 모드 i의 용량 및 최소 용량 f_i, f_{min} : 모드 i의 정차 빈도 및 최소 정차 빈도

수요지표	$ITSN_j = \sum_{i=1}^n TI_{ij}P_i$ $TI_{ij} = \frac{I_{ij} - I_i^{\min}}{I_i^{\max} - I_i^{\min}} 100$ • TI_{ij} : 구역 j의 교통 불편 요소 i에 대한 표준화 지표(0~1) • P_i : 교통 불편 요소 i에 대한 가중치 • 인구사회, 교통약자, 일반 교통 등에 대한 통계를 이용하여 교통 불편 요소 도출 • 주성분 분석을 이용하여 각 요소의 가중치 부여 • 총 인구 가중치 부여 -> 절대 수요 지표 • 교통약자 인구 가중치 부여 -> 상대적 수요 지표
시사점	• 대중교통 서비스의 용량 및 정차 빈도, 정류장 개수를 고려한 공급 지표 제시 • 수요 지표와 공급 지표의 차이를 통해 대중교통 불균형 지표 제시 IDNP(Index of Disparity between Nees and Provision) = ITSN - IPTP • 공급 지표에 있어 대중교통 이동시간은 고려하지 않음 • 목적지에 따른 각 지표의 변동성을 반영할 수 없음 - 공급(수요) 지표가 높은 수준으로 나타났으나, 특정 목적지로의 대중교통 공급(수요) 수준이 낮은 경우
선행연구	2015, Identifying public transport gaps using time-dependent accessibility levels
공급지표	$A_{i,S,T} = \sum_j G(t_{ij}) F_{S,j} \quad A_{i,S} = \sum_{T=1}^n A_{i,S,T} W_T$ • $A_{i,S,T}$: 지역 i의 대중교통 이동시간 범위 T (0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60 min)에서의 목적지(서비스) 종류 S (직장, 학교, 병원 등)에 대한 접근성 • t_{ij} $G(t_{ij})$: 지역 i에서 j로 도달하는데 소요되는 이동시간 및 시간함수(if $t_{ij} \leq T$ then 1) • $F_{S,j}$: 지역 j의 서비스 종류 S에 대한 기회(직장, 학교의 수) • $A_{i,S}$: 지역 i의 목적지(서비스) 종류 S에 대한 접근성 • W_T : 이동시간 범위에 따른 가중치 (6/6, 5/6, ... ,1/6)
수요지표	• 대중교통 수요를 유발하는 인구사회적 통계 지표 및 교통약자 통계 지표를 활용하여 대중교통 수요 지표 생성 • 주성분 분석을 이용하여 각 요소의 가중치 부여

시사점	• 시공간 접근성 지수를 이용하여 공급 지표 설명 • 대중교통을 이용하여 1시간 안에 도착할 수 있는 기회의 수를 합산하여 접근성 계산(첨두시와 비첨두시를 나누어 계산) • 대중교통 이동시간과 목적지에 따른 변동성이 반영된 공급 지표 제시 • 다만, 1시간의 이동시간 범위 및 주요 시설물에 대한 접근성 계산 등 제한적인 공급 지표 생성 • 수요 지표와 공급 지표의 차이를 통해 대중교통 불균형 지표 제시 IPTG(Index of Public Transport Gaps) = IPTN - IPTP • 기존 연구들과 마찬가지로 인구사회적 통계 수치와 주성분 분석을 이용하여 수요 지표 제시 • 공급 지표와 달리, 수요 지표는 시간적 변동성 및 목적지에 따른 변동성이 반영되어 있지 않음
선행연구	2017, Dynamic transit accessibility and transit gap causality analysis
공급지표	$WATT_{i,t} = \frac{\sum_{j=1}^J O_j * tt_{ij,t}}{\sum_{j=1}^J O_j}, j = 1, 2, \dots, J, i \in J$ $O_{TAZ_i} = D_{TAZ_i} * I_{TAZ_i} \quad I_{TAZ_i} = \frac{\sum_{k=1}^K WAS_{TAZ_k}}{K * WAS_{TAZ_i}}$ • $WATT_{i,t}$: 정류장 i의 출발시간 t에서의 중력 기반 접근성 • O_j : 정류장 j에서의 가능한 기회의 수(직장 수, 400m 버퍼) • $tt_{ij,t}$: t시간에 정류장 i에서 정류장 j로의 이동시간 • D_{TAZ_i}, I_{TAZ_i} : TAZ i의 기회의 수 및 임금 조정 계수 • WAS_{TAZ_k}, K : TAZ k의 가중 평균 임금 및 전체 TAZ 개수
수요지표	$NPTS_{TAZ_i} = WD_{TAZ_i} * NI_{TAZ_i}$ $NI_{TAZ_i} = \frac{\sum_{k=1}^K WAI_{TAZ_k}}{K * WAI_{TAZ_i}}$ • WD_{TAZ_i} : TAZ i의 노동자 수 • NI_{TAZ_i} : TAZ i의 소득 조정 계수 • WAI_{TAZ_k} : TAZ k의 가중 평균 소득

시사점	• 중력 기반의 시공간 접근성 지수를 이용하여 공급 지표 설명 • 10분 간격의 시간적 변동성 및 목적지에 따른 공간적 변동성이 반영된 공급 지표 제시 • 소득 수준을 고려한 수요 지표와 이동시간 기반의 공급 지표의 곱으로써 대중교통 서비스 격차 지표 제시 PTAG = WATT*Norm(NPTS) -> 해석: 노동자가 많고 소득이 낮은 지역일수록 대중교통 접근성이 높아야 함(이동시간이 적음) WATT ↑ + NPTS ↑ -> PTAG ↑ 저소득 노동자가 많음에도 불구하고, 대중교통 접근성이 낮기 때문에 서비스 격차 또한 큼 • 공급 지표와 달리, 수요 지표는 시간적 변동성 및 목적지에 따른 변동성이 반영되어 있지 않음
-----	---

○ 교통계획 소프트웨어

- 교통 체계의 변화에 따른 수요 예측 및 경제적 효과를 분석하기 위해 다양한 교통계획 소프트웨어가 개발됨
- 국내에서는 캐나다, 미국, 독일 등 해외 교통계획 소프트웨어에 의존하고 있음

[표 1-6] 교통계획 소프트웨어 비교

구분	EMME/3	TransCAD	Cube	VISUM
통행발생	회귀분석모형, 교차상관분석모형, Trip rates			
통행분포	중력모형, 프라타모형			
수단선택	• 로짓모형 • 네스티드 로짓모형	• 로짓모형 • 네스티드 로짓모형 • Incremental 모형	• 로짓모형 • 네스티드 로짓모형 • 모형구조 변경 가능	• 로짓모형 • 모형구조 변경 가능
통행배정 (Transit)	• Multi-path • Timetable based • User equilibrium • Multi-class • Transit system based	• Multi-path • Timetable based • User equilibrium • Transit system based	• Multi-path • Timetable based • Dynamic • Transit system based(distance, stage or zone based)	• Multi-path • Timetable based • Headway based • Transit system based

(3) 유사 연구개발과제의 내용 및 결과

○ 국내 교통여건이 반영된 정책지원시스템 개발

- 국내 교통여건의 반영, 교통 빅데이터 활용, 국외 소프트웨어 의존도 탈피 등을 목적으로 대규모 자본 및 인력이 투입되어 교통정보 및 정책지원시스템의 개발이 이루어짐
- 각 시스템에는 기존 통행배정모형의 한계로 인해 통행수요가 부정확하게 예측되는 한계를 개선하기 위해 고도화된 통행배정모형이 개발되어 있는데, 이는 본 연구와 유사한 부분임
- [표 1-7]은 해당 연구들의 주요 내용을 정리한 것임

[표 1-7] 선행 연구 과제의 주요 특징

과제명	교통정책 지원 및 분석시스템 개발	철도 중심 교통체계로의 개편을 위한 차세대 교통정보시스템 개발	교통정책지원시스템 구축을 위한 정보화전략계획 수립
부처명	국토교통부	산업통상자원부	서울특별시
주요 성과물	MASTER (Macroscopic Analytical System for Transportation decision-maker)	TRIPS (Travel Record based Integrated Public transport operation System)	서울시 교통정책지원시스템
개발 목표	• 거시적 정책 효과를 신속하게 평가하여 합리적 교통정책 수립 지원	• 교통카드 데이터를 활용하여 통행실적기반 복합대중교통 운영계획수립 지원	• 도시 교통정책 관련 빅데이터 분석 툴 개발 및 데이터 시각화
주요 기능	• SOC투자효과 분석 • 교통투자관련 기초 자료 분석 • 수요탄력성 분석 • 환경영향 및 정책타당성 분석	• 교통카드 데이터 기반의 복합대중교통 운영현황 분석 및 수요추정 • 도시철도 수요 및 운영조건에 따른 최적 운행 스케줄링	• 교통정책 관련 빅데이터 분석 도구 개발 • 정책수립 시 활용하기 위한 데이터 시각화 • 교통정책 조회 및 평가도구 구축
예산	77.5억	100억	4.8억
비고	2009~2014년 (5년)	2010~2014년 (4년)	2014~2015년 (10개월)

(4) 본 연구개발과제의 차별성

○ 국내외 기술개발 현황과의 차별성

[표 1-8] 국내외 기술개발 현황과의 차별성

구분	국내 현황	본 연구
대중교통 접근성 및 서비스 평가지표	• 교통존, 행정구역 단위의 지역별 서비스 수준 비교 및 대중교통 접근성 산출 방식 • 거시적 관점의 대중교통 정책방향은 제시할 수 있으나 실제 이용자들이 체감하는 서비스 수준을 대변하기는 한계가 존재	• 정류장 단위 시간-거리 접근성 산출을 통해 보다 미시적으로 지역별 서비스 수준 비교 가능 • 정류장 단위의 분석을 수행함으로써 실제 이용자들이 체감하는 서비스 수준 반영
대중교통 수요 추정 및 통행배정	• 최적전략에 의한 통행배정 기법은 전체 대중교통 이용자들의 통행 행태를 수리적 방법에 의해 결정하는 모형이기 때문에 개별 이용자들의 통행 특성이 반영되기 어려운 한계 존재 • 수단선택과 통행배정의 통합 모형 개발 미비 • 단일 수단 중심 분석체계로 인해 환승을 고려한 통합분석기능 미비	• 머신 러닝 기법을 이용하여 대중교통 이용자들의 통행사슬 데이터로부터 개인별 통행경로 선호도 분류 • 수단선택 및 통행배정을 개인별 통행 특성에 따라 진행 • 개인별 통행경로 선호도 분류기를 통해 대중교통 이용자들의 개인별 통행패턴 분석 • 개인별 통행특성에 따라 수단선택 및 통행배정이 이루어지는 구조이며 스마트카드 거래내역로부터 산출한 O/D를 이용하므로 실제 수요를 탄력적으로 반영
데이터 연계성	• 패키지화 되어 있는 S/W들이므로 데이터 구조 및 형식을 S/W가 요구하는대로 지정해야 함 • 교통카드 통행자료, 국가교통DB 등 국내 대중교통 데이터와의 직접적 연계 불가능	• 수학적 모형이나 가정으로부터 승객들의 통행패턴을 추론하는 방식의 접근이 아니라 교통카드 통행자료 빅데이터가 가진 특성을 분석하는 데이터 주도형 분석 수행 • 대중교통 빅데이터를 중점적으로 활용 • 소스 코드를 직접 개발하므로 데이터 연계가 용이

○ 유사 연구개발과제와의 차별성

[표 1-9] 관련 연구개발과제와의 유사성 및 차별성

구분	목적		방법		수단		통행배정		시뮬레이션	
	중장기	단기	4단계 모형	교통카드 실적	복합 수단	단일 수단	확률적 통행 배정	개인별 통행 특성	수요 예측	편익 분석
MASTER	○		○	○	○		○		○	○
TRIPS		○	○	○	○		○		○	○
서울시 교통정책 지원시스템		○		○		○	○		○	
본 연구		○		○	○			○	○	○

- 본 연구와 기존 연구개발과제와의 주된 차이점은, 본 연구에서는 개인별 통행수단 및 경로 선택 특성이 반영된 통행수요 예측 기법을 개발했다는 점임
- MASTER의 경우, 중장기 교통계획을 위한 수요 예측이 목적이며 본 연구를 포함한 그 외 시스템은 단기 교통계획 수립을 지원하기 위한 목적임
- 통행수요를 추정하기 위해 교통카드 데이터를 활용한다는 점은 모든 시스템의 공통적인 사항이며 MASTER와 TRIPS는 전통적인 4단계 모형을 이용하고 서울시 교통정책지원 시스템과 본 연구는 교통카드 데이터로만 수요를 추정한다는 점이 유사함
- 통행수단의 경우, 서울시 교통정책지원시스템은 버스 통행에 대해서만 개발되어 있고 본 연구를 포함한 그 외 시스템들은 복합수단(버스, 지하철)을 고려함
- 통행배정의 경우, 선행 연구에서는 확률적 통행배정모형을 이용하는데, 본 연구는 확률적 가정을 내포한 통행배정이 아니라 실제 교통카드 실적으로부터 파악한 개인별 통행수단 및 경로 선택 특성이 반영된 통행수요 예측 기법을 개발하였음

다. 연구개발의 중요성

(1) 사회적 측면

○ 이용자가 체감할 수 있는 균형적인 대중교통 서비스 제공을 위한 기초자료 역할

- 본 연구에서는 이용자가 체감하는 대중교통 서비스 수준을 가장 미시적으로 반영할 수 있는 정류장 단위 접근성을 기반으로 노선 조정 시뮬레이션을 수행하고 그에 따른 편익변화를 분석함
- 균형적인 대중교통 정책의 사회적 요구가 증대되고 있고 그에 따라 현 교통정책도 국민이 체감할 수 있는 지역균형발전을 지향하고 있기 때문에, 본 연구의 성과물은 정책 수립을 위한 기초자료로써의 중요성을 가짐
- 특히, 실제 노선 조정 수요가 많은 지역에 대해 우선적 노선 조정 대안을 제시함으로써 동일 비용의 조정으로 최대의 승객들이 접근성 개선 효과를 체감할 수 있도록 함

(2) 기술적 측면

○ 통행자 각 개인 행태를 기준으로 한 대중교통 분석기술 제공

- 통행수요를 추정하는 기존 방법론에서는 결정적 모형, 확률적 모형 등의 통계적 기법을 이용하여 대중교통 이용자들의 통행패턴을 분석하고 이를 기반으로 수요를 추정함
- 그러나 기존 방법은 공간적 집합화와 노선 선택 행동의 집합화가 필연적으로 수반되기 때문에 이에 따른 오차를 내포하고 있으며, 통행자 각 개인의 노선 선택 행동을 기준으로 구축된 모형은 아님
- 또한, 정류장간 공간적 위치, 노선 상황, 배차 상황, 승객의 심리적 상황, 승차 시간 등에 따라 승객이 통행경로를 결정하는 기준은 다르게 되며 기존 모형들은 이와 같은 결정에 대해 미시적으로 접근하는데 한계를 가짐
- 본 연구에서는 머신러닝 기법을 이용해 교통카드 통행자료로부터 개인 단위 통행경로 선호도를 예측하여 이를 통해 노선 조정 후의 통행 수요를 파악함
- 이는 개인별 통행패턴이 교통존 및 통계적 모형에 의해 집합화되는 기존 방법론과 비교했을 때, 개인의 통행 특성이 유지되는 완전히 새로운 접근방식에 해당하기 때문에 학술적 의의가 있음

라. 기술개발 성숙도

○ 연구 착수: TRL 1

- 노선 조정(교통계획)에 따른 통행수요 예측 및 대중교통 서비스 수준의 변화 정도를 분석하는 기술력은 이미 오래전부터 시장이 형성되어 활발한 사업이 이루어지고 있음(TRL 8,9)
- 본 연구에서는 통계적 방법을 이용해 대중교통 통행패턴을 분석하는 기존의 방법론과는 달리, 머신러닝을 이용하여 빅데이터로부터 개인 단위 통행패턴(선호 수단 및 노선)을 추론하는 새로운 방법론을 개발함

○ 연구 종료: TRL 3

- 정류장 단위 시간-거리 접근성 개념을 정립하고, 개인별 통행경로 선호도 기반 노선 조정 시뮬레이션 기법의 이론적 완성도 제고 및 시나리오 기반 실험을 통해 이론을 증명하는 단계에서 연구를 종료함

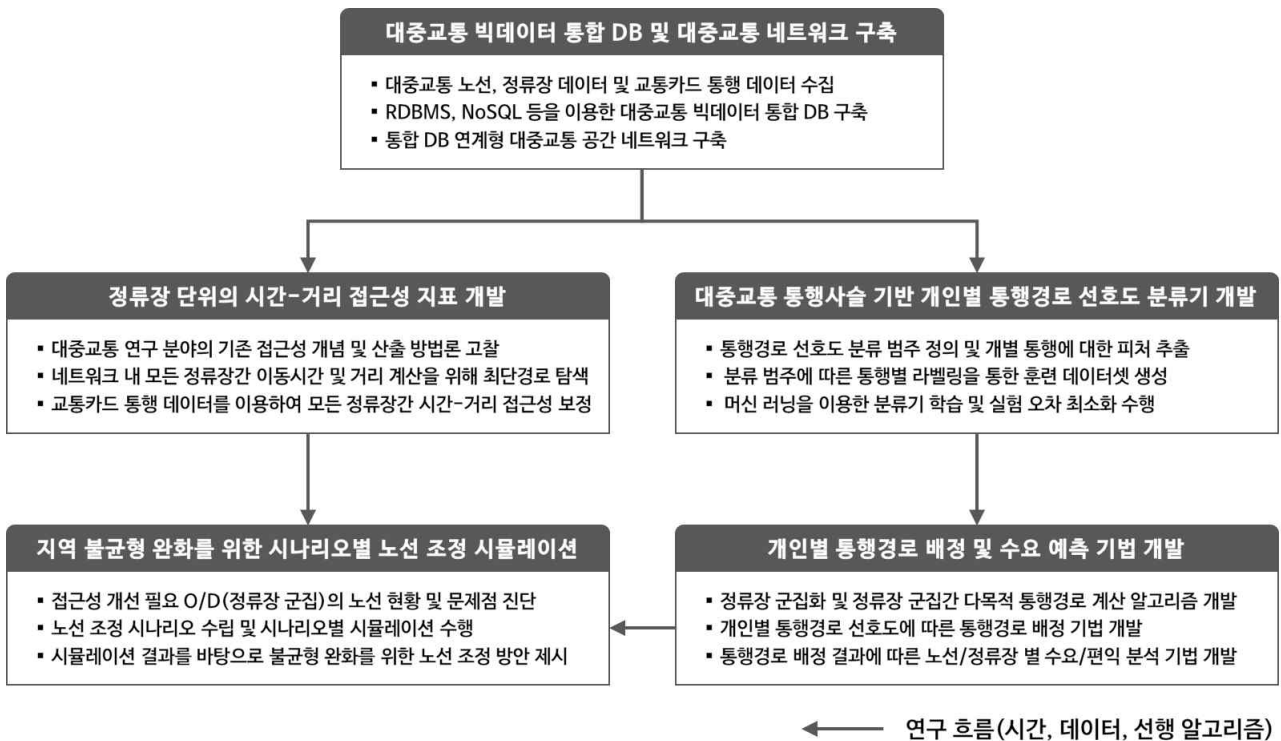
구분		연구 착수	연구 종료	단계별 설명	
기초연구 단계	TRL 1	■	☐	TRL 1	이론적 연구단계
	TRL 2	☐	☐	TRL 2	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☐	■	TRL 3	실험적 증명 단계
	TRL 4	☐	☐	TRL 4	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	☐	TRL 5	유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	☐	TRL 6	유사환경 기술시범 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	☐	TRL 7	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	☐	TRL 8	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	☐	TRL 9	현장적용/사업화 단계

2. 연구수행내용 및 성과

가. 연차별 연구 목표

[표 2-1] 연차별 연구 목표

구분	내용	
최종 목표	지역 불균형 완화를 위한 대중교통 노선 조정 시뮬레이션 기법 개발	
세부 목표	1차 연도	- 대중교통 빅데이터 통합 DB 및 대중교통 네트워크 구축 - 지역 불균형 파악을 위한 정류장 단위의 시간-거리 접근성 지표 개발
	2차 연도	- 머신러닝을 이용한 대중교통 통행사슬 기반 개인별 통행경로 선호도 분류기 개발 - 개별 승객 통행경로 선호도를 고려한 통행배정 기법 개발 및 수요 예측 - 지역 불균형 완화를 위한 시나리오별 노선 조정 시뮬레이션 실험



[그림 2-1] 연구흐름도

나. 연차별 연구수행내용

(1) 1차 연도 연구범위

[표 2-2] 1차 연도 연구범위 및 수행방법

세부 목표	수행방법	내용
대중교통 빅데이터 통합 DB 및 대중교통 네트워크 구축	데이터 수집	• TOPIS와의 연구협력체계를 구축하여 대중교통 네트워크 및 스마트카드 거래내역 등 데이터 수집
	대중교통 빅데이터 통합 DB 구축	• 수집 데이터를 분석하여 데이터 간 관계 도출 • R-DBMS 기반 대중교통 빅데이터 통합 DB 모델링 • 통합 분석 서버 구축
	대중교통 네트워크 구축	• 노드(정류장), 버스 및 지하철 링크(노선 링크), 환승 도보 링크, 운행시간표 등을 포함하는 대중교통 네트워크 구축
지역 불균형 파악을 위한 정류장 단위의 시간-거리 접근성 지표 개발	정류장 군집화 기법 개발	• DBSCAN 알고리즘을 기반으로 거리 및 명칭 유사도를 고려한 정류장 군집화 기법 개발 • 정류장 군집은 접근성 분석 단위로 활용
	시간-거리 접근성 지표 개발	• 시간-거리 접근성 관련 선행연구 분석 • 동일 거리 급간에서의 상대적 이동시간을 고려한 시간-거리 지표 개발 • 차내 혼잡도를 고려한 시간-거리 접근성 지표 개발
운행시간표 기반 대중교통 최적경로 탐색 알고리즘 개발	RAPTOR 기반 대중교통 최적경로 탐색 알고리즘 개발	• 운행시간표 기반 대중교통 경로 탐색 알고리즘 분석 • RAPTOR 알고리즘 분석 • 수단간 환승저항을 고려한 운행시간표 기반 대중교통 최적경로 탐색 알고리즘 개발

(2) 1차 연도 연구수행내용

(가) 대중교통 빅데이터 통합 DB 및 대중교통 네트워크 구축

○ 데이터 수집

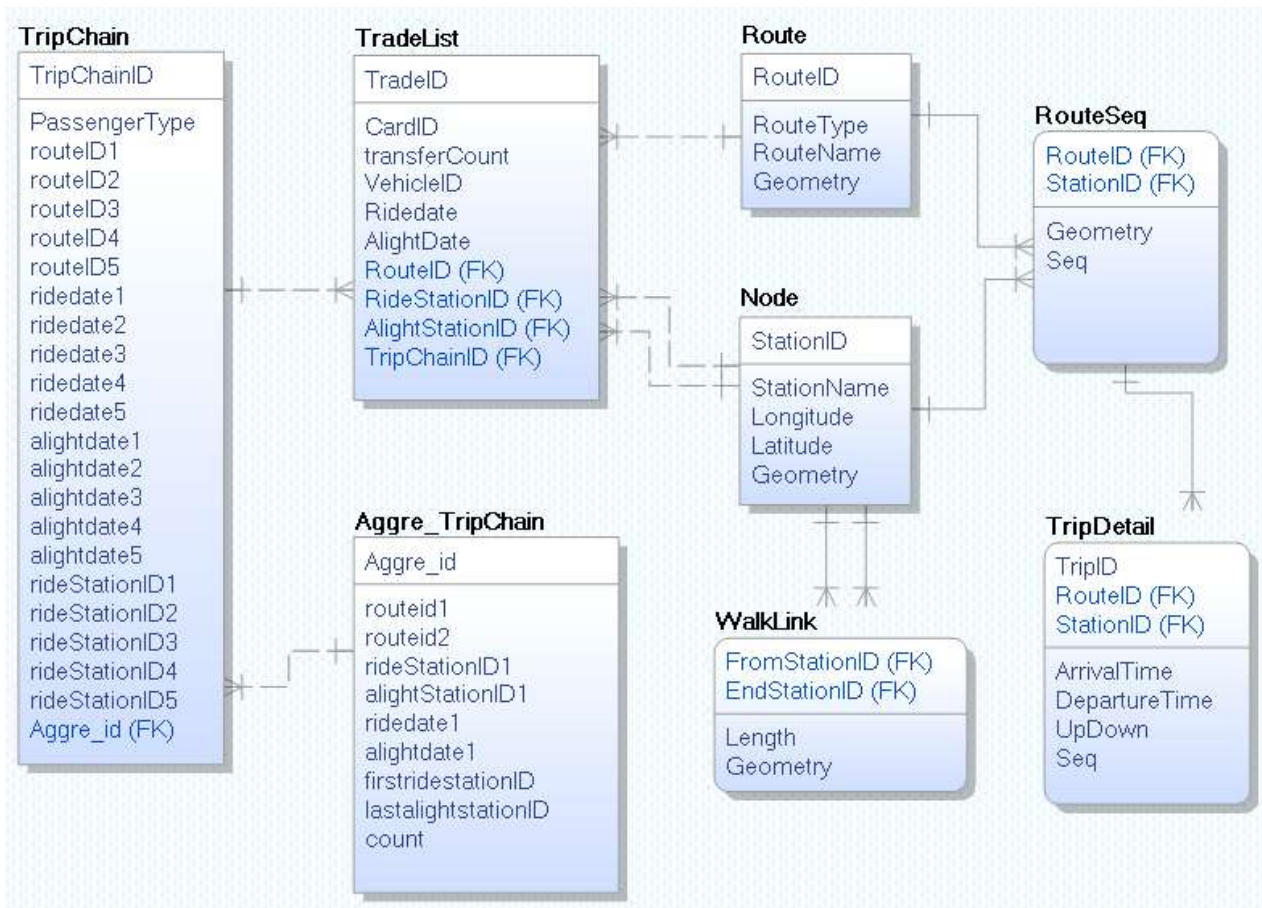
- 서울시 교통정보센터(TOPIS)에 본 연구의 내용 및 결과에 대해 협의하여, 데이터 협조 요청 및 연구 결과를 공유하는 데이터 협조체계를 구축함
- 15년, 17년 각 1주일, 18년 한달 간의 스마트카드 거래내역과 17년 10월 기준의 대중교통 운행시간표 및 네트워크(정류장, 노선 등) 데이터를 수집하였음
- [표 2-1]은 TOPIS 및 대중교통 관련 기관에서 수집한 데이터 목록 및 시간 범위를 정리한 것임
- 2015년 스마트카드 거래내역에는 1300만명 승객의 통행이 기록되어 있으며, 일주일간 통행은 1억 3천만건이 기록되어 있음
- 2017년 스마트카드 거래내역에는 1100만명 승객이 이용한 8천만건의 통행이 기록되어 있고, 2018년에는 1100만명 승객이 이용한 약 1억건의 통행이 기록되어 있음
- 서울시에서 제공받은 대중교통 네트워크에는 630개 노선(버스 610, 지하철 20)과 13,419개의 정류장이 포함되어 있음
- 대중교통 운행계획표에는 노선의 차량별, 정류장별 출·도착시각으로 나뉘어 500만건의 운행이 기록됨
- 마을버스의 운행계획표는 서울시에서 직접 수집하지 못해 BIS (Bus Information System)을 이용하여 직접 구축하였음

[표 2-1] 대중교통 빅데이터 수집 내용 및 시간 범위

구분	요약	출처	시간 범위
교통카드 데이터	대중교통 이용객의 출발 정류장, 도착 정류장, 출발 시간, 도착 시간, 이용 노선 등	TOPIS	2017.10.12. ~2017.10.18
대중교통 네트워크	대중교통(지하철, 버스) 정류장(노드) 및 노선(링크)	TOPIS, 서울시 철도공사	2017.10
대중교통 운행시간표	노선별 정류장 출·도착 시간, 배차간격 등	TOPIS, 서울시 철도공사	2017.10.19
도로 네트워크	일반 도로망을 구성하는 노드 및 링크	ITS 국가교통 정보센터	2017.9

○ 대중교통 빅데이터 통합 DB 및 대중교통 네트워크 구축

- 스마트카드 거래내역, 대중교통 네트워크, 운행시간표 등 대중교통 빅데이터 통합 DB를 구축하기 위해 수집 데이터의 특성 및 관계를 분석함
- 대중교통 시·공간 데이터의 효율적 관리를 위해 RDBMS(Relational Database Management System) 기반의 DB 스키마를 설계하고 데이터 서버를 구축함
- 파일형식으로 된 수집 데이터들을 전처리하여 각 테이블에 입력, 스마트카드 데이터는 정규화하지 않고 트랜잭션 및 통행사슬로 구분하여 각각 저장함
- [그림 2-2]는 대중교통 DB 스키마를 설계한 내용임



[그림 2-2] 대중교통 통합 DB 스키마

- 정류장(Node) 테이블

- 정류장 테이블은 [그림 2-3]과 같이, 정류장ID, 정류장 명칭, 경위도 좌표 등의 컬럼으로 구성되어 있음

StationID	StationName	STX	STY	Geom4326	ZoneID
150	서울	126.972559	37.554648	0xE6100000010C8D9B1A683EBE5F405A65A6B4FEC64240	219
151	시청	126.977108	37.564718	0xE6100000010C3D2AFEEF88BE5F4034BBEEAD48C84240	192
152	종각	126.982923	37.570161	0xE6100000010C1EDFDE35E8BE5F40323A2009FBC84240	193
153	종로3가	126.991806	37.571607	0xE6100000010C807EDFBF79BF5F4014950D6B2AC94240	194
154	종로5가	127.001849	37.570926	0xE6100000010CF1A1444B1EC05F40D237691A14C94240	194
155	동대문	127.009745	37.57142	0xE6100000010C2B137EA99FC05F40E223624A24C94240	195
156	신설동	127.025087	37.575297	0xE6100000010C812381069BC15F40533E0455A3C94240	169
157	제기동	127.034893	37.578103	0xE6100000010CFF76D9AF3BC25F40185C7347FFC94240	169
158	청량리	127.046835	37.580178	0xE6100000010CB9533A58FFC25F40E9EDCF4543CA4240	170
159	동묘앞	127.016429	37.572627	0xE6100000010C2F6D382C0DC15F403EE76ED74BC94240	168
201	시청	126.977108	37.564718	0xE6100000010C3D2AFEEF88BE5F4034BBEEAD48C84240	192
202	을지로입구	126.982618	37.566014	0xE6100000010C809D9B36E3BE5F40018A912573C84240	193
203	을지로3가	126.99191	37.566295	0xE6100000010CD3A414747BBF5F40B471C45A7CC84240	194
204	을지로4가	126.998079	37.566941	0xE6100000010CC3F4BD86E0BF5F407AE1CE8591C84240	194
205	동대문역사문화공원	127.007896	37.565138	0xE6100000010C3B71395E81C05F4009DD257156C84240	195
206	신당	127.01782	37.565972	0xE6100000010CBE4D7FF623C15F40D2393FC571C84240	196
207	상왕신리	127.029354	37.564354	0xE6100000010C6F8099EFF0C15F40F3AE7AC03CC84240	197

[그림 2-3] Node 테이블 예시

- 노선(Route) 테이블

- 노선 테이블은 [그림 2-4]와 같이, 노선ID, 노선 명칭, 노선이 지나는 정류장ID와 순서(Seq) 등이 저장되어 있으며, 대중교통 운행시간표(TripDetail) 테이블과 노선ID를 매칭 키로 사용하여 연계함

ID	RouteID	StationID	Seq	RouteName
100100102	100100102	210000246	1	661
100100102	100100102	210000214	2	661
100100102	100100102	210000084	3	661
100100102	100100102	210000083	4	661
100100102	100100102	210000082	5	661
100100102	100100102	210000081	6	661
100100102	100100102	210000259	7	661
100100102	100100102	210000368	8	661

[그림 2-4] ROUTE 테이블 예시

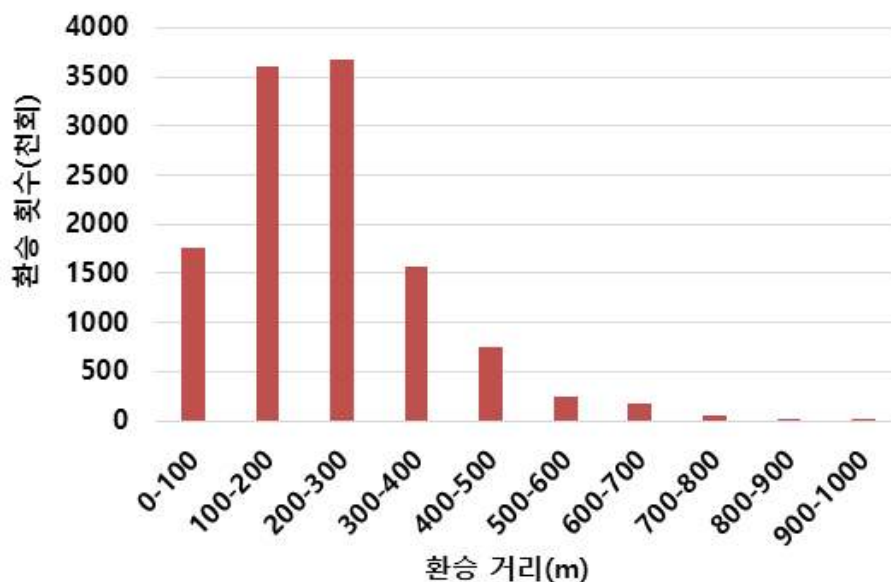
- 대중교통 운행시간표(TripDetail) 테이블

- 대중교통 운행시간표 테이블은 [그림 2-5]와 같이, 노선ID, 해당 노선을 운행하는 차량ID, 각 정류장에 대하여 차량의 도착시각 및 출발시각 등이 저장되어 있음

RouteID	TripID	Seq	Arrival	Depature
100100001	1	1	19 7 0 0	19 7 0 10
100100001	1	2	19 7 6 19	19 7 6 29
100100001	1	3	19 7 7 34	19 7 7 44
100100001	1	4	19 7 8 42	19 7 8 52
100100001	1	5	19 7 10 24	19 7 10 34
100100001	1	6	19 7 12 50	19 7 13 0
100100001	1	7	19 7 14 5	19 7 14 15
100100001	1	8	19 7 16 38	19 7 16 48

[그림 2-5] TripDetail 테이블 예시

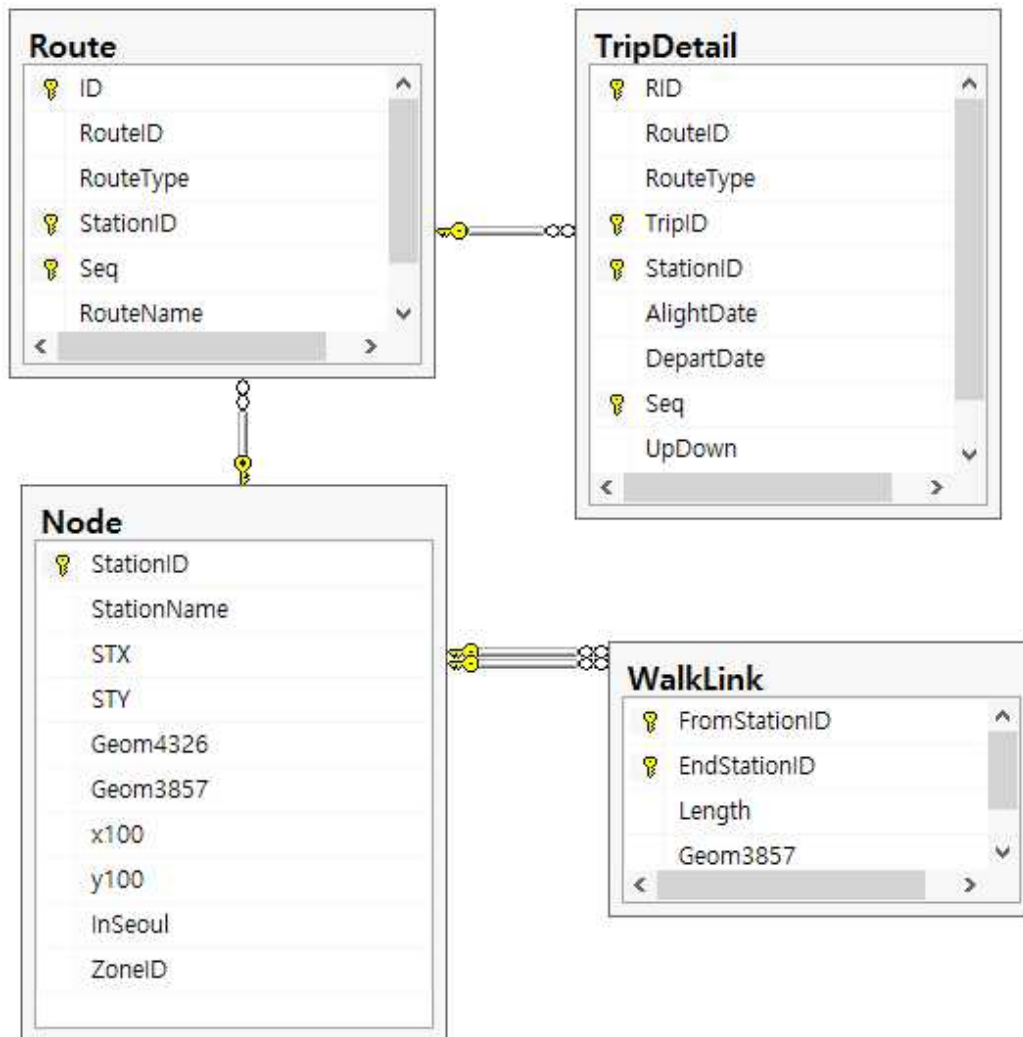
- 환승 도보링크(WalkLink) 테이블
 - 도보를 통한 환승을 경로 탐색에 고려하기 위해서는 환승 도보링크를 반영하여 대중교통 네트워크를 구축해야함
 - 환승 도보링크는 정류장간 직선거리를 적용하였고, 최대 환승 거리는 스마트카드 자료에 있는 환승 기록을 이용하여 700m로 제한하였음
 - [그림 2-6]은 2017년 스마트카드 자료에서 승객들의 환승 거리와 환승 횟수를 100m 간격으로 묶어 그래프로 나타낸 것임
 - 환승 도보링크 테이블에는 출발정류장ID, 도착정류장ID, 정류장간 도보 이동거리 등이 포함되고 이는 [그림 2-7]과 같음



[그림 2-6] 실제 승객의 환승 거리별 환승 횟수

FromStationID	EndStationID	Length	Geom3857
150	426	360	0x110F0000011002699A139FF56A41EEF63289D73A5141026...
150	1251	412,246723168912	0x110F0000011402699A139FF56A41EEF63289D73A5141953...
150	1291	432	0x110F0000011002699A139FF56A41EEF63289D73A5141026...
150	101000003	57,587339366386	0x110F0000011402699A139FF56A41EEF63289D73A5141106...
150	101000004	116,27087480637	0x110F0000011402699A139FF56A41EEF63289D73A514133F...
150	101000005	106,290417126983	0x110F0000011402699A139FF56A41EEF63289D73A51411B7...
150	101000006	121,300452182356	0x110F0000011402699A139FF56A41EEF63289D73A5141891...
150	101000007	132,767275961177	0x110F0000011402699A139FF56A41EEF63289D73A51411D6...
150	101000008	576,609261794403	0x110F0000011402699A139FF56A41EEF63289D73A5141E4...
150	101000011	579,602909815035	0x110F0000011402699A139FF56A41EEF63289D73A5141AE...
150	101000012	425,470892250785	0x110F0000011402699A139FF56A41EEF63289D73A514123E...
150	101000013	492,280423113367	0x110F0000011402699A139FF56A41EEF63289D73A5141042...
150	101000014	648,393029178603	0x110F0000011402699A139FF56A41EEF63289D73A5141BA...

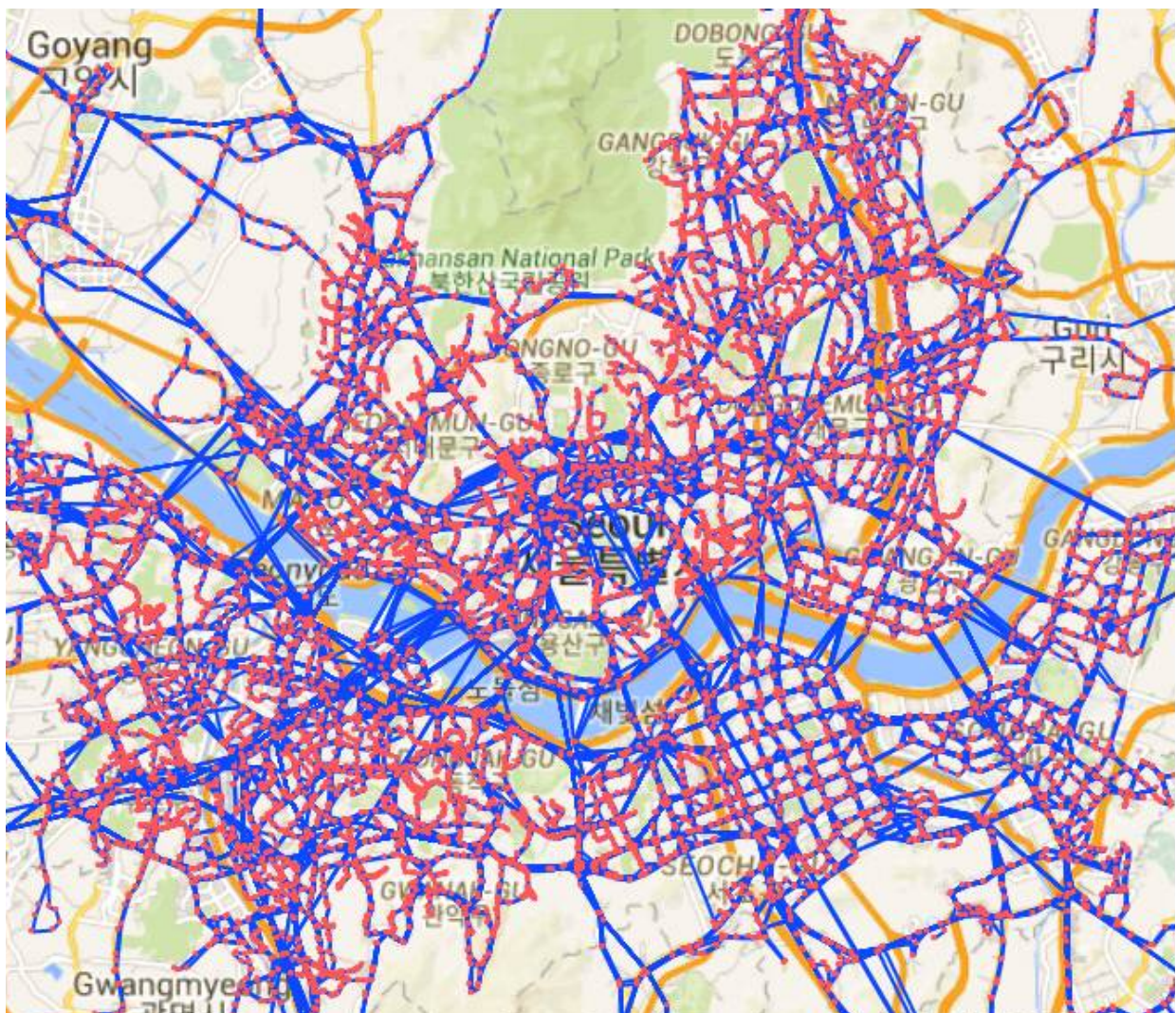
[그림 2-7] WalkLink 테이블 예시



[그림 2-8] 대중교통 네트워크를 구성하는 테이블 간 관계도

- 대중교통 네트워크 테이블 그룹

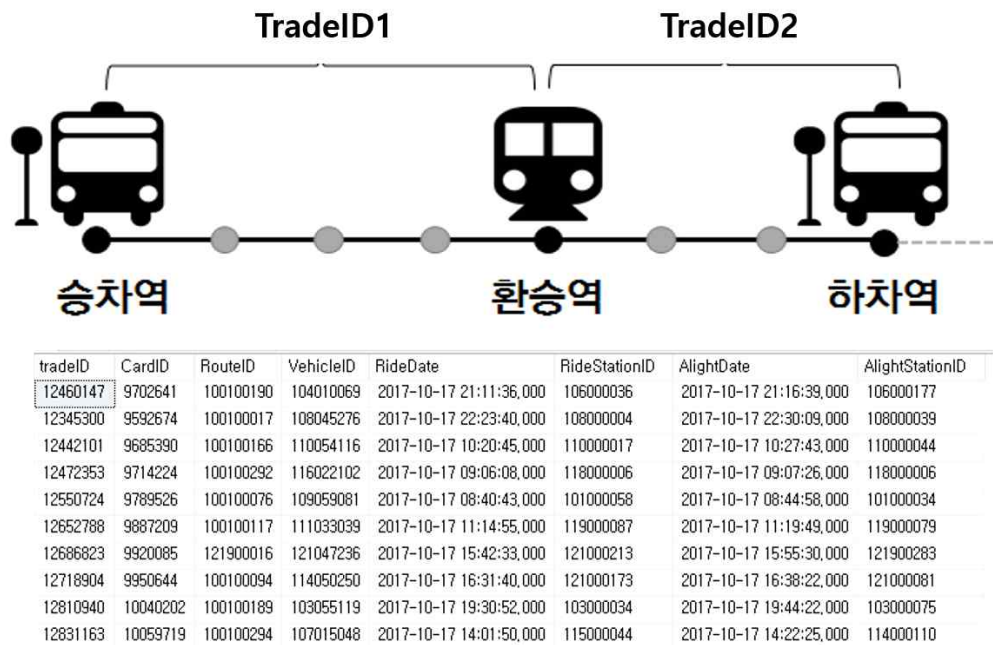
- 대중교통 네트워크 테이블 그룹은 앞서 설명한 정류장, 노선, 운행시간표, 도보 환승링크 테이블로 구성됨
- [그림 2-8]은 대중교통 네트워크를 구성하는 테이블 간 관계도를 나타낸 것이며, 각 테이블의 기본키는 열쇠 모양으로 표현되어 있음
- 정류장-노선 간 관계에서 매칭 키는 정류장ID이며, 하나의 정류장은 여러 노선에 포함될 수 있기 때문에 1:N의 카디날리티를 가짐
- 노선-운행시간표 간 관계에서 매칭 키는 (노선ID, 정류장ID, 정류장순서)의 다중 키로 구성되어 있고, 하나의 노선은 특정한 배차간격을 두고 반복 운행되기 때문에 1:N의 카디날리티를 가짐
- 정류장-도보링크 간 관계에서 매칭 키는 (정류장ID, 정류장ID)인데, 이는 출발 정류장과 도착 정류장으로 구분되고, 1:N의 카디날리티를 가짐
- [그림 2-9]은 서울시의 대중교통 네트워크를 시각화한 것으로, 붉은색 포인트는 지하철과 버스를 포함한 정류장, 파란색 라인은 개별 노선을 나타냄



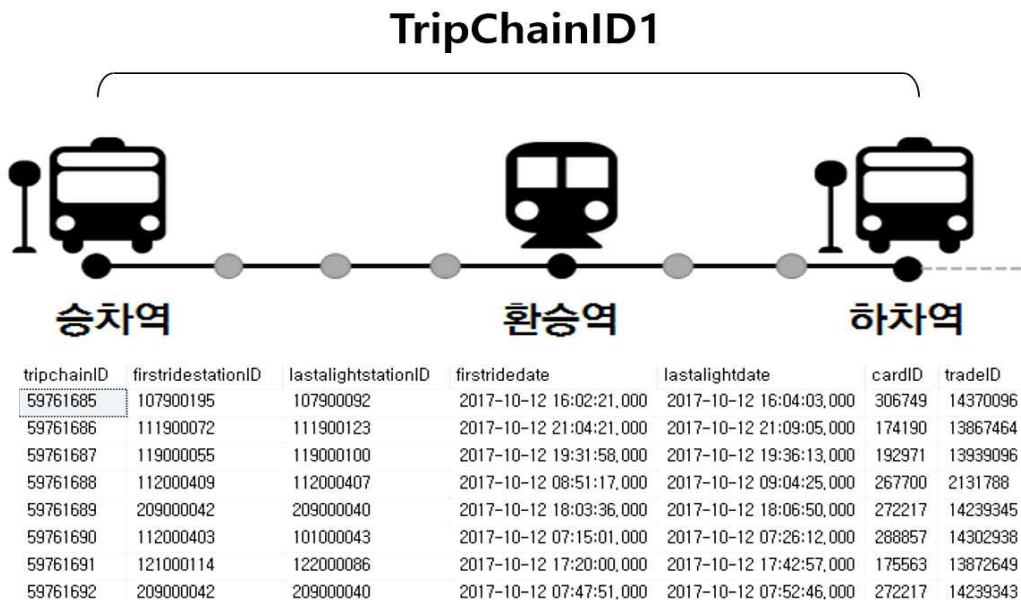
[그림 2-9] 전체 대중교통 네트워크

- 스마트카드 거래내역

- 스마트카드 자료에 기록된 트랜잭션(Trade)에는 승객이 탑승한 단일 교통수단에 대한 정보(승·하차 정류장, 승·하차 시간 등)가 기록되어 있음
- [그림 2-10]과 같이 이동한 승객은 승차 역에서 환승역까지의 이동(Trade1), 환승역에서 하차 역까지의 이동(Trade2), 2번의 트랜잭션이 기록됨
- 통행사슬(TripChain)은 환승을 포함하여 승차 역에서 하차 역까지의 이동을 의미함
- [그림 2-11]의 트랜잭션을 통행사슬 형태로 변환하면 [그림 2-10]과 같이 승객의 통행정보(첫 탑승 정류장, 마지막 하차 정류장, 출발시각, 도착시각, 환승 횟수 등)가 저장됨

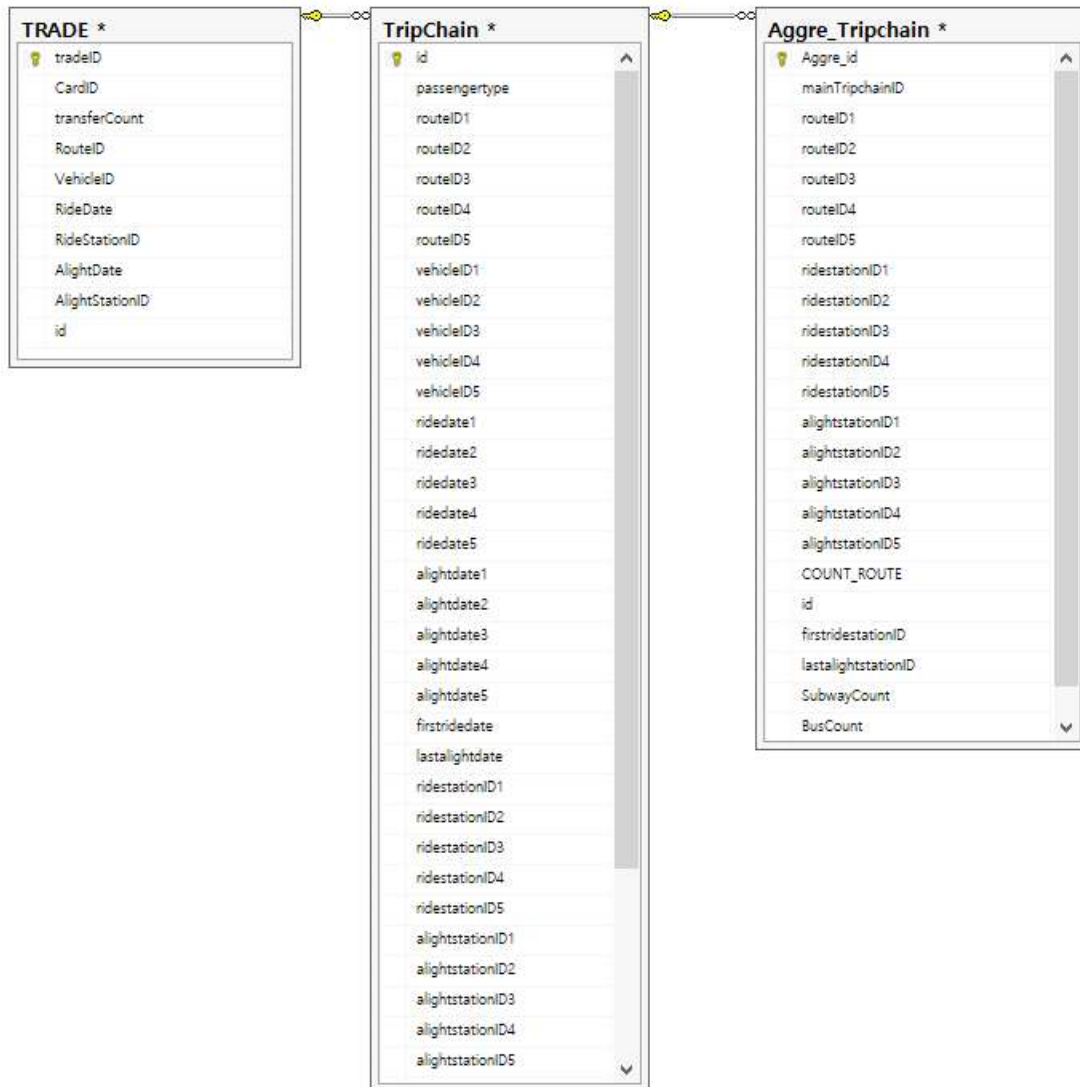


[그림 2-10] 스마트카드 트랜잭션(TRADE) 테이블 예시



[그림 2-11] 스마트카드 통행사슬(TripChain) 테이블 예시

- 변환된 통행사슬 테이블에서 정류장-to-정류장의 통행량을 계산하기 용이하도록 동일한 출발역과 도착역을 가진 승객들을 집계하여 Aggre_TripChain 테이블을 구성함
- 스마트카드 자료 테이블은 트랜잭션, 통행사슬, 통행사슬 집계 3가지의 테이블로 구성되며 테이블간 관계는 [그림 2-12]와 같이 나타낼 수 있음



[그림 2-12]스마트카드 자료 데이터 구조 및 테이블간 관계

(나) 지역 불균형 파악을 위한 정류장 단위의 시간-거리 접근성 지표 개발

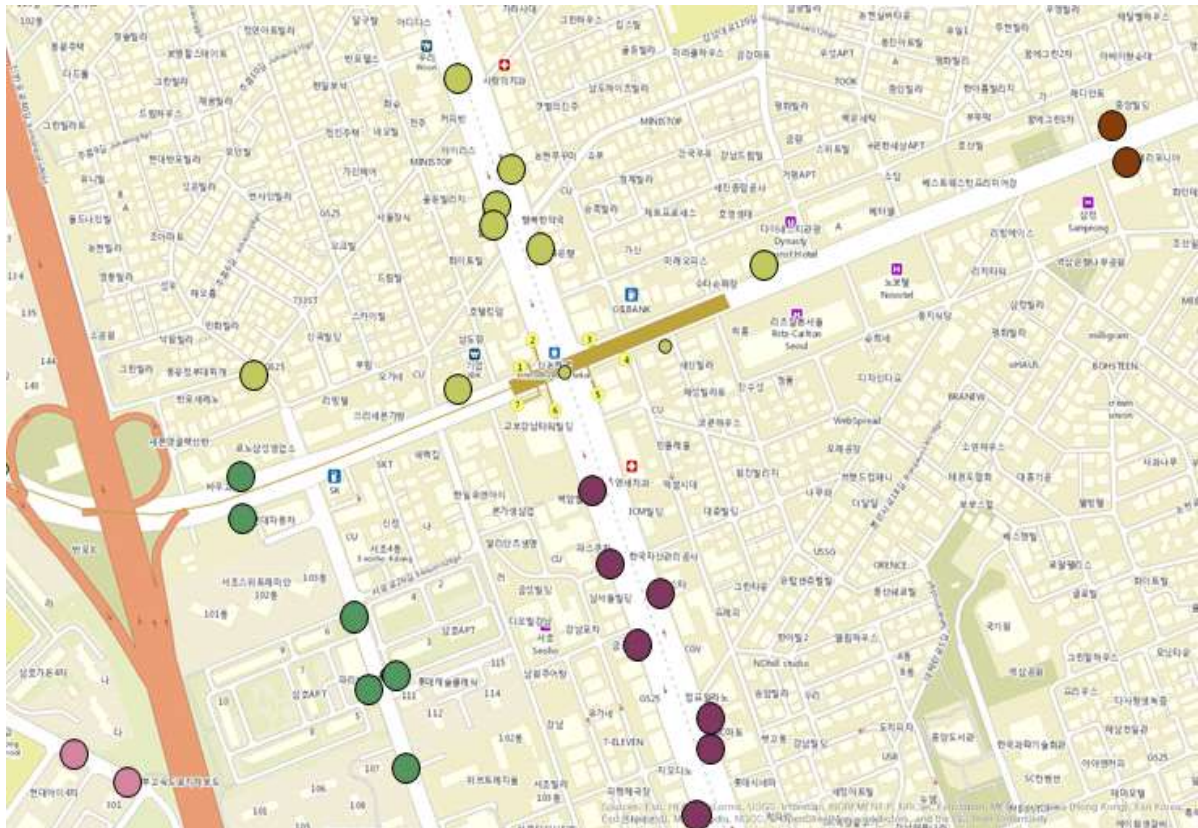
○ 정류장 군집화 기법 개발

• 개요

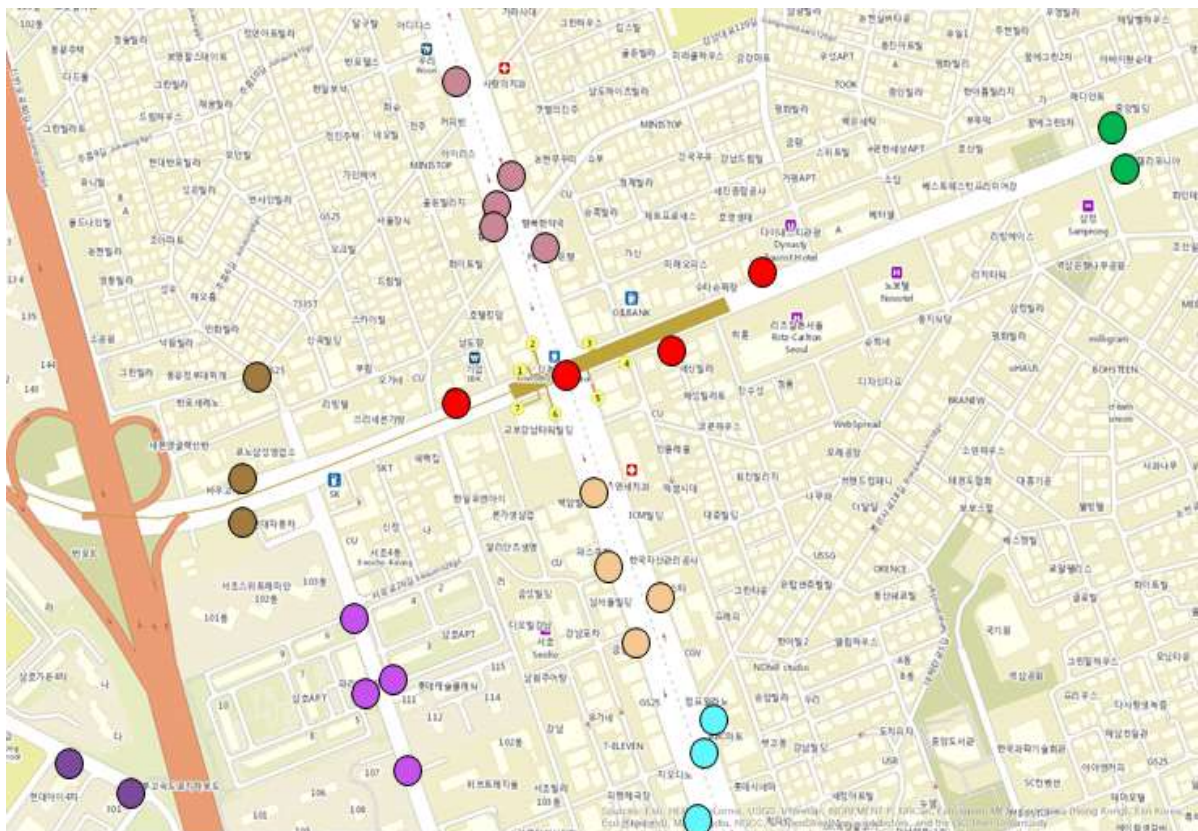
- 실제 대중교통 이용 승객은 정류장을 선택하여 경로를 탐색하는 것이 아니라 출발지 근처에 존재하는 정류장에서 도착지 근처에 존재하는 정류장으로의 다양한 정류장 쌍들을 이동하는 경로를 탐색하고 이들 중 적합한 경로를 선택함
- 따라서 단순히 정류장 단위로 접근성을 해석하게 되면 실제 대중교통 이용 승객의 경로 선택 유형을 반영하는데 한계가 있기 때문에 이를 반영하기 위해 적절한 크기의 군집으로 정류장을 묶어 존 단위 분석을 수행할 필요가 있음
- 기존의 교통 분석에서 이용하는 행정동 단위의 존은 다소 거시적이기 때문에, 보다 미시적인 분석을 수행하기 위해 K-means 알고리즘과 DBSCAN 알고리즘을 이용하여 군집 생성 결과를 분석하였음
- [그림 2-13]은 행정동 단위로 존을 형성한 경우, [그림 2-14]은 K-means 알고리즘을 적용한, [그림 2-15]는 DBSCAN 알고리즘을 적용한 결과임



[그림 2-13] 행정동 단위 정류장 군집 예시



[그림 2-14] K-means 알고리즘 군집 예시



[그림 2-15] DBSCAN 알고리즘 군집 예시

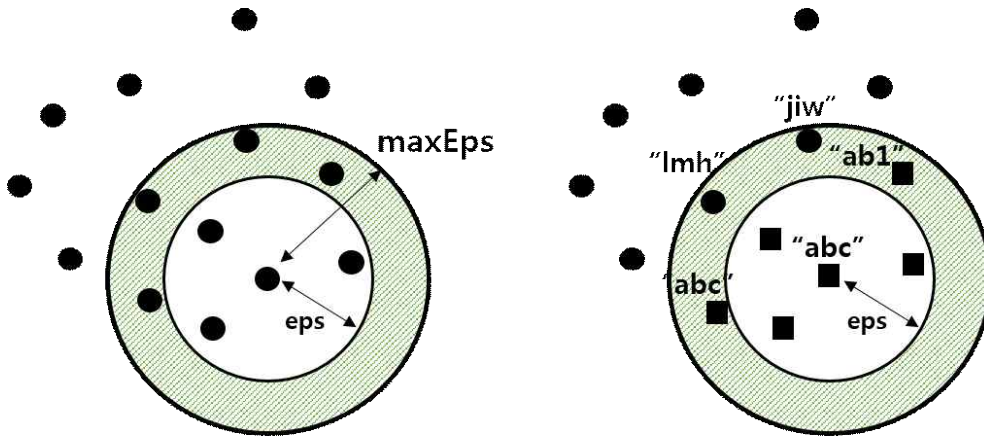
- 행정동 단위로 정류장을 군집한 결과를 확인해보면 동일한 정류장이름을 가지고 있는 승·하차 정류장이 대로를 중심으로 구분되어 있어 서로 다른 군집에 속해 있는 것을 확인할 수 있음
- K-mean 알고리즘을 이용하여 정류장을 군집한 결과를 확인해보면 행정동 단위의 군집 방식에 비해 정류장의 공간적 인접성이 높고, 다른 군집과는 일정거리 이상 떨어진 것을 확인할 수 있음
- DBSCAN 알고리즘을 이용한 정류장 군집 결과는 K-mean보다 군집에 속한 정류장이 적고 더 유사한 정류장들끼리 하나의 군집으로 형성되는 것을 확인할 수 있었고, 정류장간의 거리가 고려되어 공간적 인접성이 가장 높은 결과를 나타냄
- K-mean 알고리즘과 DBSCAN 알고리즘을 비교해보면 [표 2-4]과 같이 나타나고, K-mean 알고리즘은 군집개수가 600개인 경우에 DBSCAN보다 높은 공간적 인접성이 나타나며 정류장간 평균거리도 짧지만, 군집개수가 늘어날수록 DBSCAN의 공간적 인접성이 더 높게 나타나고 정류장간 평균거리도 더 짧아짐

[표 2-4] 정류장 군집화 방식별 적용 결과

구분			군집 개수	정류장들 간 평균거리(m)	정류장과 군집 중심과의 평균거리(m)	공간적 인접성
DB- SCAN	eps(m)	150	1379	206.47	161.59	6.79
	minpt	3				
	eps(m)	200	604	1117.26	576.41	2.28
	minpt	5				
k-means			600	373.30	294.97	3.29
			1400	358.13	205.44	4.98
행정동 단위			428	688.20	534.46	0.77

- 따라서 DBSCAN이 K-means 보다 군집의 개수가 많더라도 정류장들 간의 공간적 인접성이 높기 때문에 본 연구에서는 DBSCAN 알고리즘 기반의 정류장 군집 기법을 개발하였음
- 개선된 DBSCAN 알고리즘을 이용한 정류장 군집화
 - 기존 DBSCAN 알고리즘이 군집 대상의 물리적 고리만을 고려하는 것에 반해, 본 연구를 통해 개발한 군집화 알고리즘은 정류장간 물리적 거리와 정류장의 명칭 유사도를 고려하여 군집을 형성함
 - DBSCAN 알고리즘은 군집을 형성할 수 있는 정류장간 최소 거리(eps)와 최소 거리 내에 존재하는 주위 정류장 수(N)를 이용하여 군집을 형성하고, 본 연구는 이에 정류장 간 명칭 유사도를 비교할 수 있는 최대 거리(maxEps)를 설정하여 개선된 DBSCAN을 개발함

- [그림 2-16]과 같이 정류장간 거리가 eps보다 작은 정류장들은 기존 DBSCAN 알고리즘에 의해 군집이 형성되고, 만약 eps보다 크지만 maxEps보다 작은 정류장은 정류장들끼리의 명칭 유사도를 확인하여 군집을 형성함



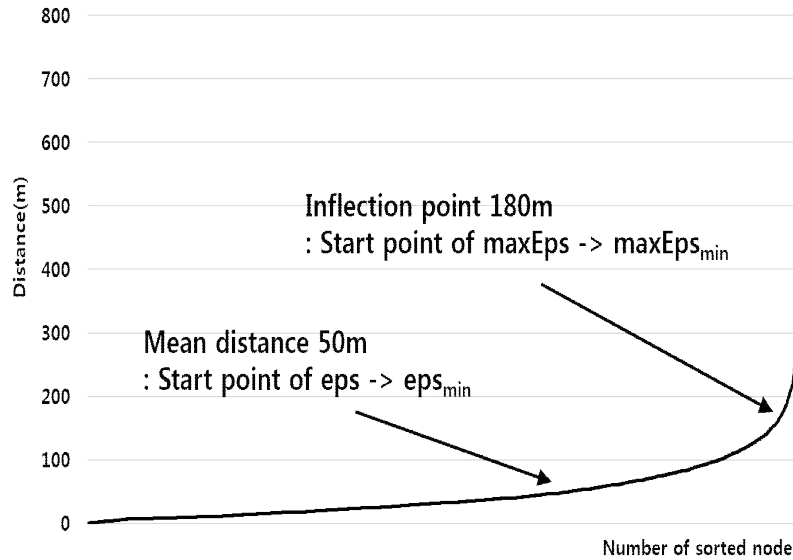
[그림 2-16] 개선된 DBSCAN 알고리즘 설명 예시

- 명칭 유사도는 편집거리 알고리즘을 활용하여 비교하였으며, 기존 편집거리 알고리즘은 두 단어가 동일해지려면 몇 개의 음절을 편집해야하는 가를 계산하는 알고리즘으로 식 (2-1)로 계산함
- 본 연구에서는 편집거리 알고리즘을 활용하여 비교하려는 두 정류장 명칭의 편집거리를 계산하고, 가장 긴 명칭의 길이로 나누어주어 명칭 유사도를 계산하였으며 다음과 같이 식 (2-2)을 통해 명칭 유사도를 산출함

$$m_{i,j} = lev(t_i, t_j) \quad (\text{식 2-1})$$

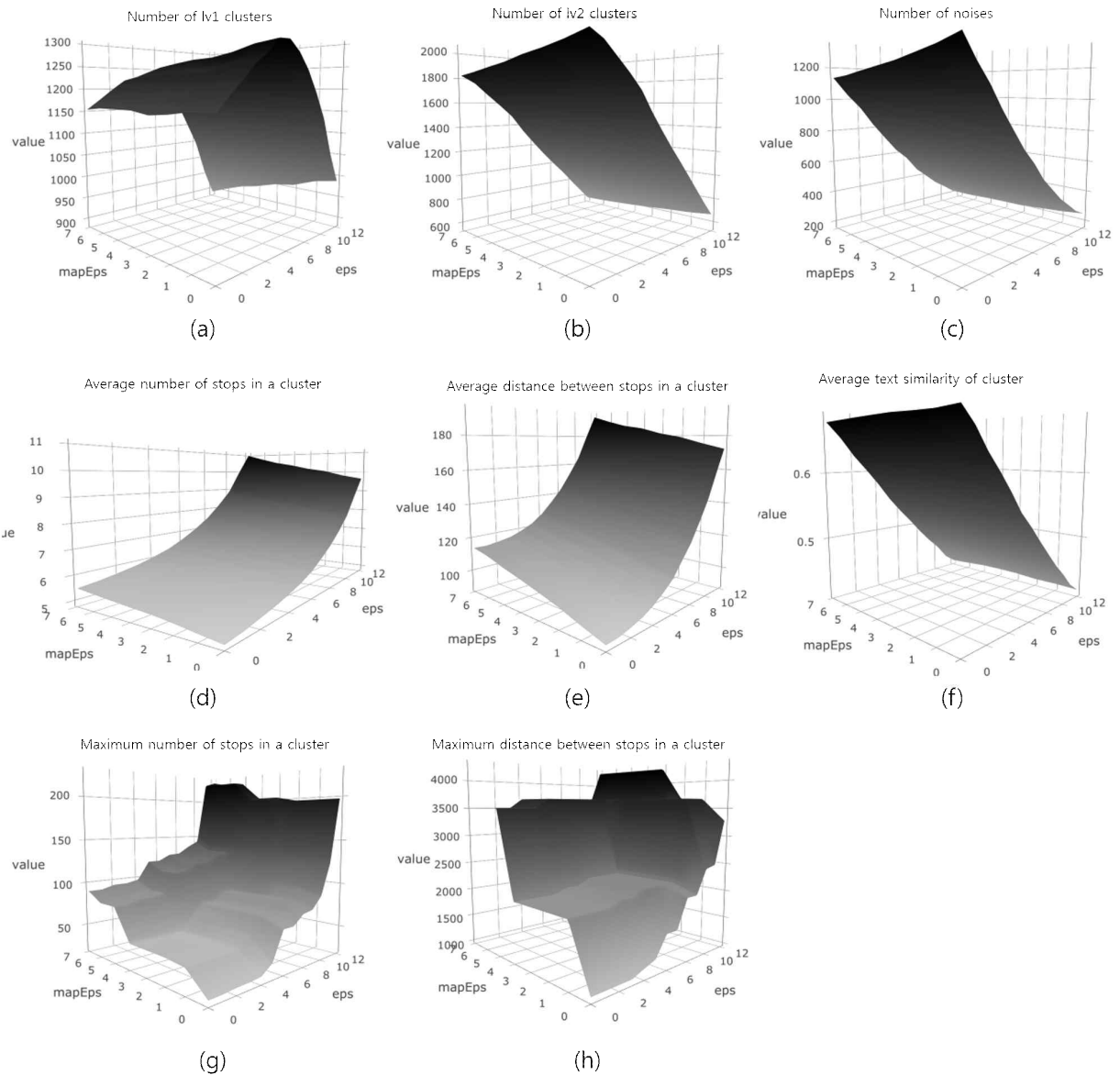
$$s_{i,j} = 1 - \frac{lev(t_i, t_j)}{\max\{l(t_i), l(t_j)\}} \quad (\text{식 2-2})$$

- 여기서 $s_{i,j}$ 는 단어 t_i 와 단어 t_j 의 명칭 유사도를 의미하고 $l(t_i)$ 는 단어 t_i 의 음절 개수를 의미함
- DBSCAN의 경우 eps와 최소 이웃 정류장수를 어떻게 설정하는지에 따라 결과가 달라지기 때문에, 본 연구에서는 적합한 eps와 최소 이웃 정류장수를 결정하기 위한 실험을 진행함
- DBSCAN 알고리즘의 특성상 최소 이웃 정류장수가 1개이면 모든 정류장이 연결되어 하나의 거대한 군집이 생길 우려가 있고, 최소 이웃 정류장수가 2개이면 군집이 직선 형태로 길게 형성되는 한계가 있음
- 이에 본 연구에서는 DBSCAN 알고리즘의 군집 방식을 고려하여 최소 이웃 정류장수를 3개로 결정함
- 서울시 대중교통 정류장을 대상으로, 각 정류장에 대하여 최근접 정류장까지의 거리를 계산하여 그래프로 나타내면 [그림 2-17]과 같음



[그림 2-17] 정류장별 최근접 정류장까지의 거리 계산 결과

- 최근접 정류장까지의 평균 거리(50m)를 eps의 최소 범위로 설정하고, 최근접 정류장까지의 거리가 급격히 변하는 거리(180m)를 maxEps의 최소 범위로 설정함
- 적합한 eps와 maxEps를 탐색하기 위해 두 파라미터 값을 10m씩 증가시키면서 정류장 군집결과를 확인하였고 결과는 [그림 2-18]과 같음
- [그림 2-18]의 (a)를 보면 eps가 6(100m)일 때 가장 많은 군집이 형성되고 이후 군집의 개수가 줄어드는 것을 확인하였고, (d),(e)에서 eps가 커질수록 군집 내 평균 정류장 개수가 급격히 증가하며, 군집 내 정류장간 거리도 급격히 증가하는 것을 확인함
- [그림 2-18]에서 maxEps는 모든 실험결과에서 maxEps가 작으면 작을수록 군집 개수는 많아지고, 군집 내 평균 정류장 개수, 군집 내 정류장간 거리가 적어지는 것을 확인함
- [그림 2-18]의 결과에 따라 군집 개수가 많이 형성되면 유사한 정류장끼리 군집을 형성할 확률이 높고, 군집 내 정류장 개수와 정류장간 거리가 짧은 것이 정류장끼리 더 밀집되어 있음을 확인하였음
- 본 연구에서는 eps가 100m일 때 가장 좋은 군집 결과를 보였고, maxEps는 가장 작은 값인 180m 일 때 가장 좋은 군집 결과를 보여 이 두 값이 개선된 DBSCAN에 가장 적합한 것으로 판단됨
- 선정된 파라미터를 적용한 정류장 군집 결과는 [표 2-5]와 [표 2-6]에 정리되어 있음
- [그림 2-19]는 선정된 파라미터를 바탕으로 개선된 DBSCAN 알고리즘을 이용한 대중교통 정류장 군집화의 전체 과정을 나타낸 것임



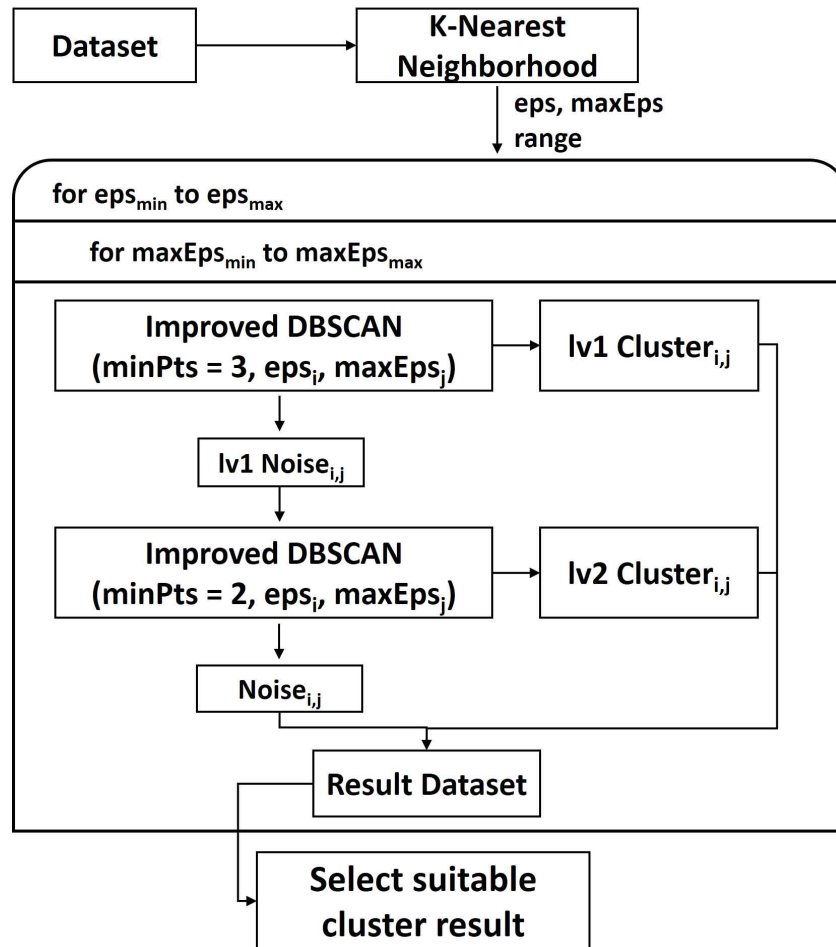
[그림 2-18] 개선된 DBSCAN 알고리즘의 파라미터 결정 실험 결과

[표 2-5] 개선된 DBSCAN을 이용한 군집 결과

Indicator	Value
Number of clusters	2830
Number of noises	748
Average number of stops in a cluster	5.65
Average distance between stops in a cluster	101.44m
Average text similarity	0.56
Average intra flow rate	0.003

[표 2-6] 군집 내 정류장 개수 비율

Number of individual stops in group	Number of groups	%
3-5	848	66
6-10	335	26
11-15	70	5
16-20	23	2
21-25	13	1
26-30	3	0
31-35	2	0
Total	1,294	100



[그림 2-19] 개선된 DBSCAN 알고리즘을 통한 정류장 군집화

• 군집화 결과

- 서울시의 총 11,131개의 대중교통 정류장에 대하여 군집화를 수행한 결과, 대부분의 상·하행 정류장 쌍이 하나의 군집으로 형성되었고, 동일한 POI(Point of Interest)를 공유하는, 즉, 유사한 명칭이지만 다소 거리가 떨어진 정류장들이 하나의 군집에 속하게 되는 것을 확인할 수 있었음
- [그림 2-20]은 기존 DBSCAN을 이용하여 서울시 대중교통 정류장을 군집한 경우와 본 연구에서 개발한 개선된 DBSCAN을 이용하여 군집한 경우를 비교한 그림임
- 일부 정류장들에 대해서는 명칭을 표기하였고 붉은색 점은 노이즈, 하나의 군집은 모두 동일한 색으로 표현하였음
- 실험 결과 기존 DBSCAN의 경우 비슷한 정류장 명칭을 가진 정류장이라도 거리 파라미터 값을 초과하면, 다른 군집으로 형성되는 반면 개선된 DBSCAN은 정류장 명칭이 비슷한 정류장들이 하나의 군집으로 형성됨
- 이는 POI를 중심으로 경로를 탐색하는 대중교통 이용객들의 특성을 잘 반영하였다고 판단됨
- 따라서 본 연구에서 제안하는 정류장 군집화 기법을 바탕으로 분석 존을 설정하고, 이를 이용하여 대중교통 접근성을 평가하는 것이 적절하다고 판단됨



(a)



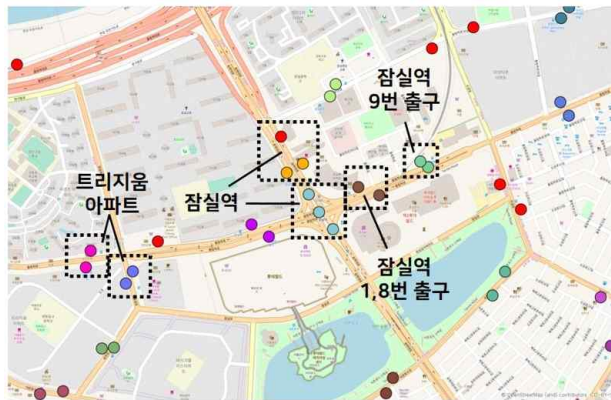
(b)



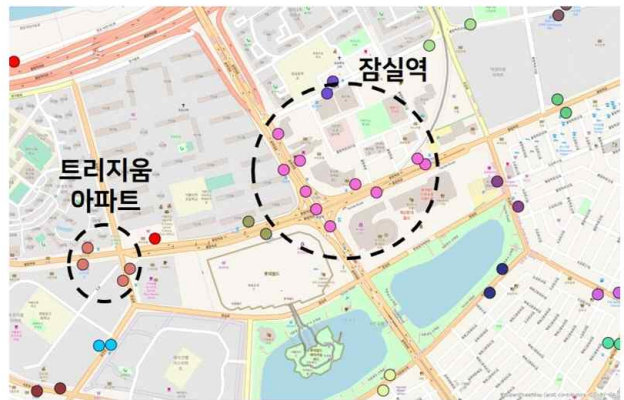
(c)



(d)



(e)



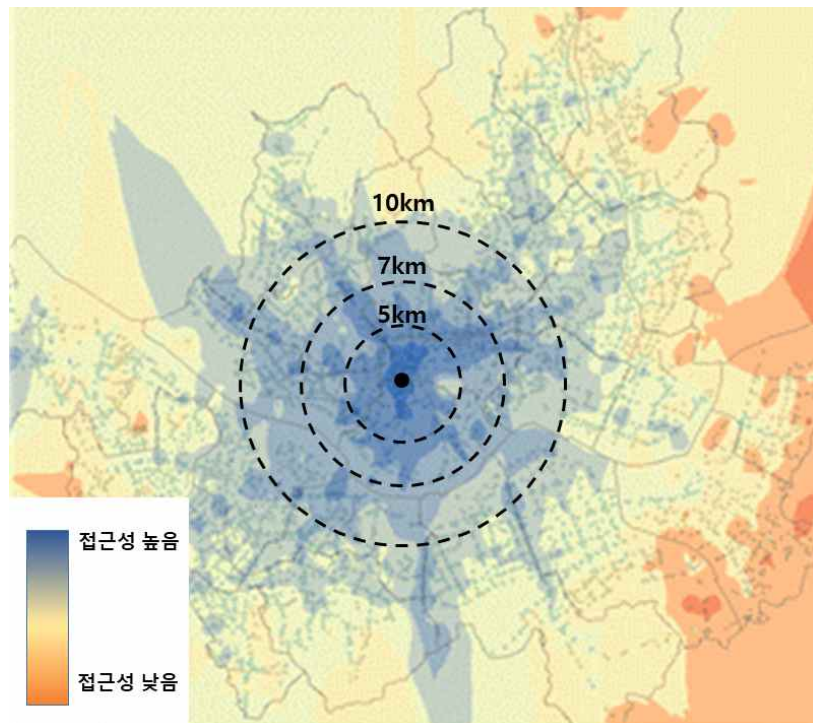
(f)

[그림 2-20] 기존 DBSCAN과 개선된 DBSCAN의 군집 결과 비교

○ 시간-거리 접근성

• 개요

- 접근성은 연구 분야별로 다양하게 정의되며, 일반적으로 목적지에 도달하기 용이한 정도를 나타냄
- 대중교통 분야에서는 정류장과 같은 교통 시설의 밀도, 노선의 다양성 및 운행빈도, 통행시간 등을 고려하여 접근성을 측정하고 있음
- 시간-거리는 출발지에서 도착지까지의 거리를 이동에 소요되는 시간으로 표현하는 개념으로, 동일한 거리라도 통행시간이 길면 시간-거리가 길다고 할 수 있음
- [그림 2-21]은 서울역에서 출발하여 다른 정류장까지의 시간-거리를 시각화한 것으로, 서울역에서 동일한 직선거리에 있더라도 시간-거리는 다르게 나타남



[그림 2-21] 서울역에서 다른 모든 정류장까지의 시간-거리

- 일반적으로 시간-거리 접근성은 (식 2-3)과 같이 정의됨(이금숙 외, 2014)
- A_i 는 임의의 지역 i 의 접근성, T_{ij} 는 지역 i 에서 지역 j 로의 시간-거리, B 는 상수임
- 지역 i 의 접근성은 다른 지역에 도달하는데 소요되는 통행시간의 역수를 모든 지역에 대해서 연산하고, 이를 합산한 것으로, 다른 지역으로의 통행시간이 짧은 지역일수록 높은 접근성을 갖게 됨

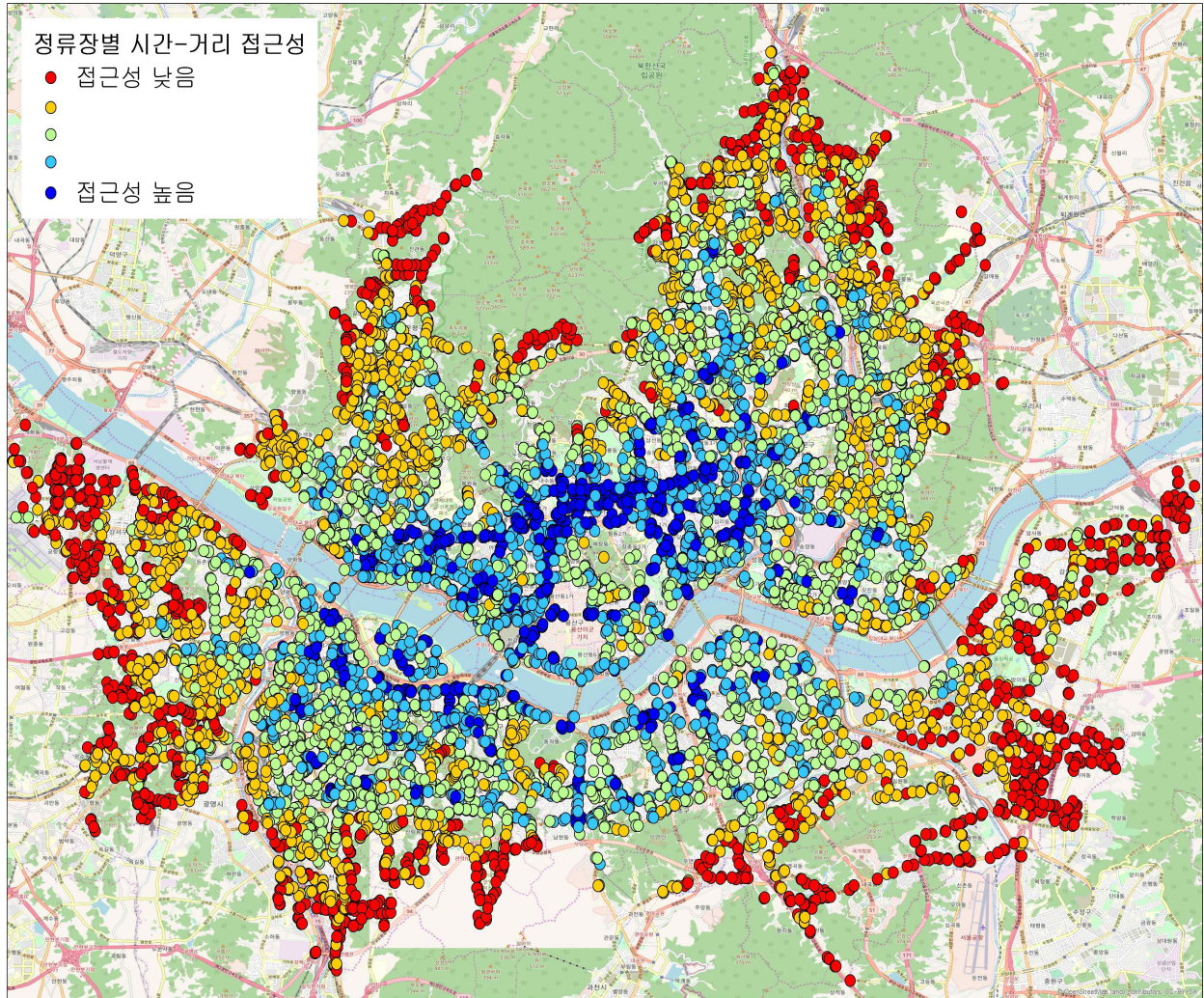
$$A_i = B \sum_{j(i \neq j)}^n T_{ij}^{-1} \quad (\text{식 2-3})$$

- 시간-거리 T 는 (식 2-4)와 같이 정의되며, 총 차내시간(T_{iv}), 총 도보이동시간(T_{walk}), 총 대기시간(T_{wait}), 환승저항($T_{penalty}$) 등으로 구성됨

- 환승저항은 환승으로 인해 발생하는 심리적 저항감을 시간으로 치환한 값으로, 환승을 고려한 통행시간 기반의 통합 분석을 가능하게 함

$$T = T_{iv} + T_{walk} + T_{wait} + T_{penalty} \quad (\text{식 2-4})$$

- [그림 2-22]는 지하철과 버스를 모두 포함한 서울시 대중교통 체계의 정류장 단위 시간-거리 접근성을 나타낸 것임

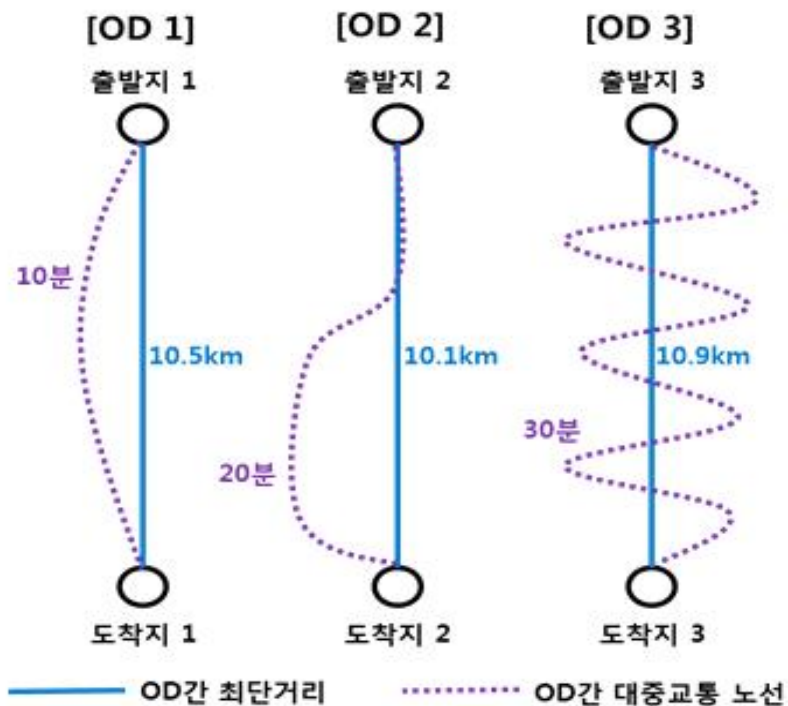


[그림 2-22] 전체 정류장의 시간-거리 접근성

○ 동일 거리 급간에서의 상대적 이동시간을 고려한 시간-거리 접근성

• 개요

- 절대적 통행시간 기반 시간-거리를 이용하여 접근성을 산출하게 되면, 비교적 다른 지역으로의 이동이 용이한 도심 중심부가 접근성이 높게 산출되고, 도심 외각은 낮은 접근성이 산출되는 다소 단순한 결과가 도출됨
- 이에 본 연구에서는 유사한 거리를 대중교통을 이용하여 통행하는데 소요되는 평균 이동시간에 대한 상대적 이동시간을 지역 i 에서 지역 j 로의 시간-거리로 정의하고, 상대적 이동시간 기반의 시간-거리 접근성 지표를 개발하였음
- 예를 들어, [그림 2-23]와 같이 약 10km 떨어진 3개의 O-D 쌍이 있을 때, 첫 번째 O-D의 대중교통 이동시간은 10분, 두 번째 O-D는 20분, 세 번째는 30분이 소요된다고 가정하자
- 10km를 대중교통을 통해 이동한다는 점은 동일하나, 세 번째 O-D의 대중교통 통행시간은 평균적으로 10분 더 소요되고, 첫 번째 O-D는 10분이 덜 소요됨
- 즉, 첫 번째 O-D는 유사한 거리만큼 떨어진 다른 O-D 쌍에 비해 더 좋은 대중교통 서비스를 공급받고 있다고 할 수 있음
- 이처럼 본 연구에서는 동일 거리 급간의 O-D들을 비교하여 상대적 이동시간을 연산하고, 이를 바탕으로 시간-거리 접근성을 분석, 정류장 단위 대중교통 서비스 수준을 살펴보았음



[그림 2-23] 동일 거리 급간의 O-D 쌍들의 이동시간 비교

- 정류장 단위 상대적 시간-거리 기반 접근성 지표 정의

- 정류장 i 의 절대적 접근성은 (식 2-3)과 동일하나, 상대적 접근성은 T_{ij} 대신 상대적 시간-거리를 적용함
- 출발 정류장 i 에서 도착 정류장 j 로의 상대적 시간-거리 T_{ij}^* 는 (식 2-5)와 같이, i - j 의 거리($d(p,q)$)와 유사한 거리를 갖는 모든 O-D들(X)의 평균 시간-거리($\bar{T}_X$)와 i - j 의 시간-거리(T_{ij})의 차이임
- 이는 다시 말해, i - j 가 속한 집합(거리 기준)의 평균 이동시간에 대한 편차를 의미함

$$T_{ij}^* = T_{ij} - \bar{T}_X \quad (\text{식 2-5})$$

- i - j 의 최단거리 $d(i,j)$ 와 유사한 최단거리를 갖는 모든 O-D 쌍이 포함된 집합을 X 라 할 때(i - j 도 포함), $\bar{T}_X$ 는 집합 X 의 평균 시간-거리임

$$X = \{(O,D) | d(i,j) \approx d(O,D)\} \quad (\text{식 2-6})$$

- O-D의 최단거리는 도로 네트워크 기준 최단거리로 계산하고, 동일 거리 급간 X_l 은 km 단위로 (식 2-7)과 같이 구분함

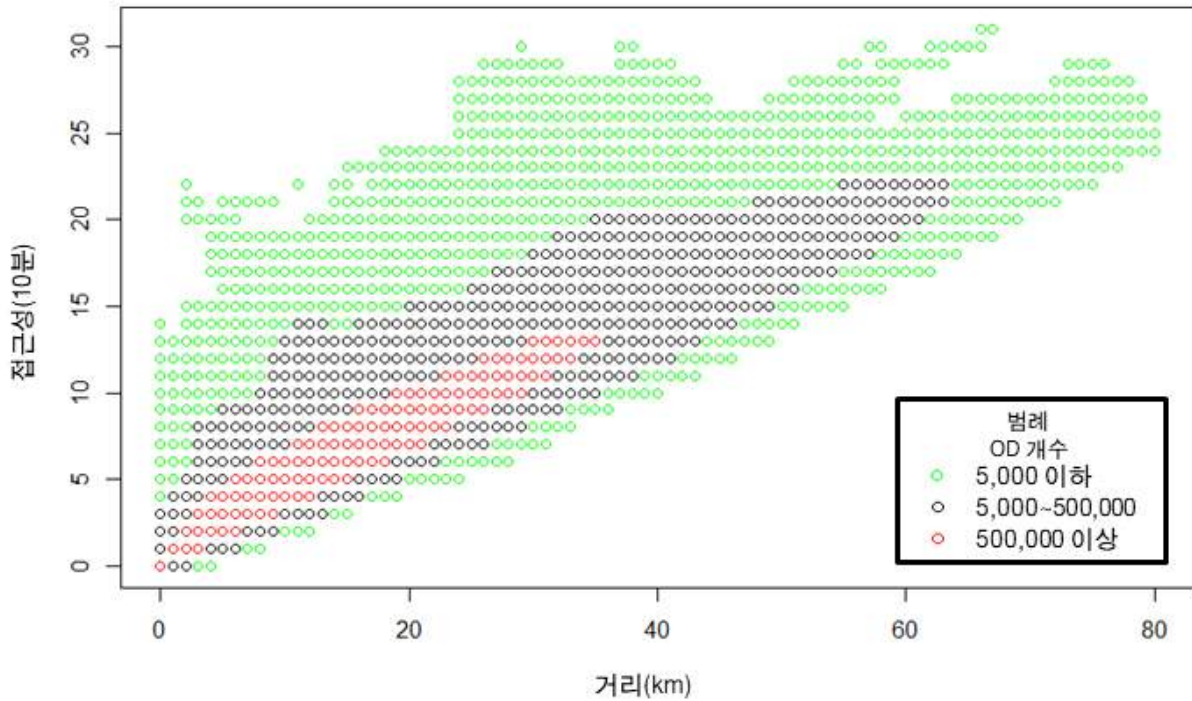
$$X_l = \{(i,j) | [d(i,j)] = l\}, l \in \mathbb{Z} \quad (\text{식 2-7})$$

- 최종적으로 정류장 i 의 상대적 접근성(A_i^*)은 다음과 같이 정의됨

$$A_i^* = -B^{-1} \sum_{j(i \neq j)}^n T_{ij}^* \quad (\text{식 2-8})$$

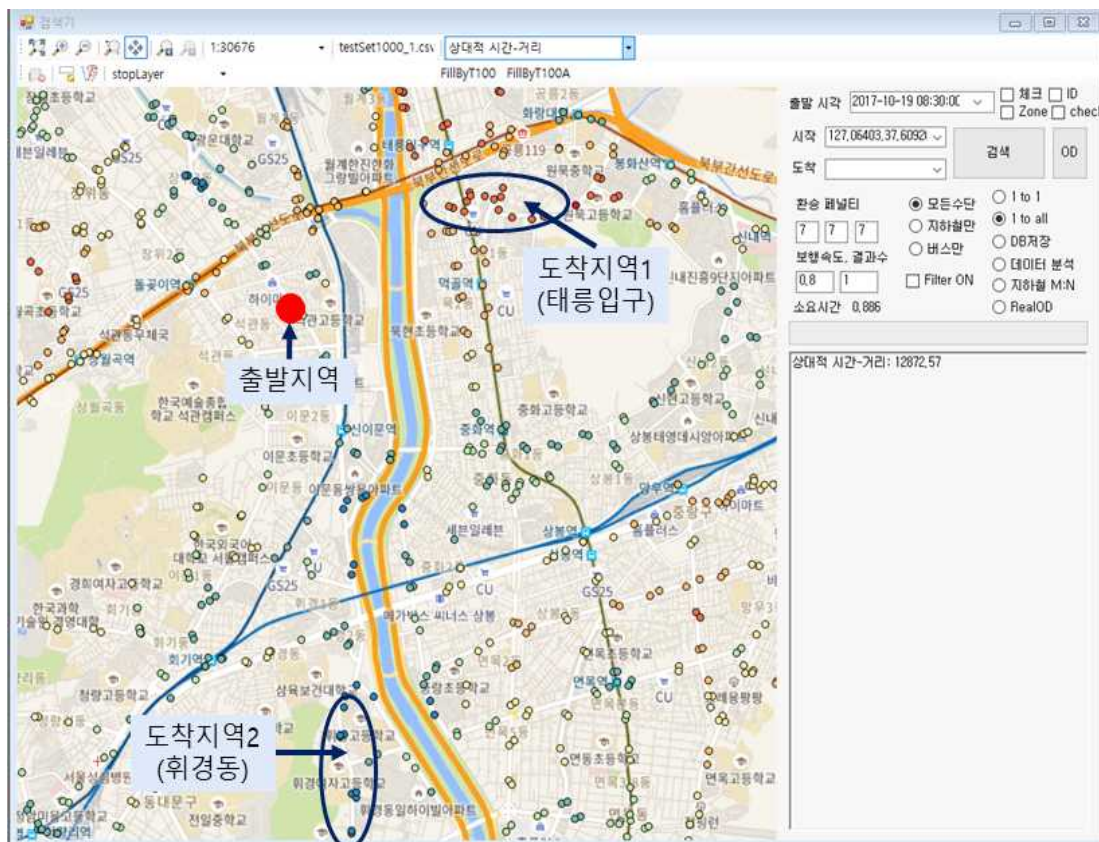
- 정류장 단위 All-to-All 시간-거리 연산

- [그림 2-24]는 동일 거리 급간별 시간-거리에 대한 O-D의 분포를 시각화한 것임
- 가로 축은 1km 단위의 동일 거리 급간, 세로 축은 절대적 시간-거리, 포인트의 색은 해당 거리 급간 및 시간-거리에 대한 O-D의 개수를 나타냄
- 예를 들어 20km 거리 급간을 살펴보면, 5분~10분 사이의 시간-거리를 갖는 O-D들이 많이 분포해 있고, 10분~15분 사이에는 50만 쌍 미만의 O-D, 15분 초과에는 5천 쌍 미만의 O-D들이 분포해 있는 것을 확인할 수 있음
- 따라서 20km 거리 급간에서는 평균적으로 약 10분 사이에 대부분 O-D들의 시간-거리가 형성되어 있고, 그보다 시간-거리가 짧은 O-D들은 높은 대중교통 서비스 수준, 긴 O-D들은 낮은 대중교통 서비스 수준을 제공받고 있는 것으로 해석할 수 있음
- 이는 단순히 통행시간으로 대중교통 서비스를 평가하는 것이 아닌, 상대적 통행시간으로 대중교통 서비스를 평가했다는 점에서 의의가 있음
- 정류장 단위 All-to-All 시간-거리 연산에는, 모든 경우의 수에 대한 최단경로 탐색이 이루어져야 하고, 그로 인해 높은 연산복잡도 및 시간을 요함



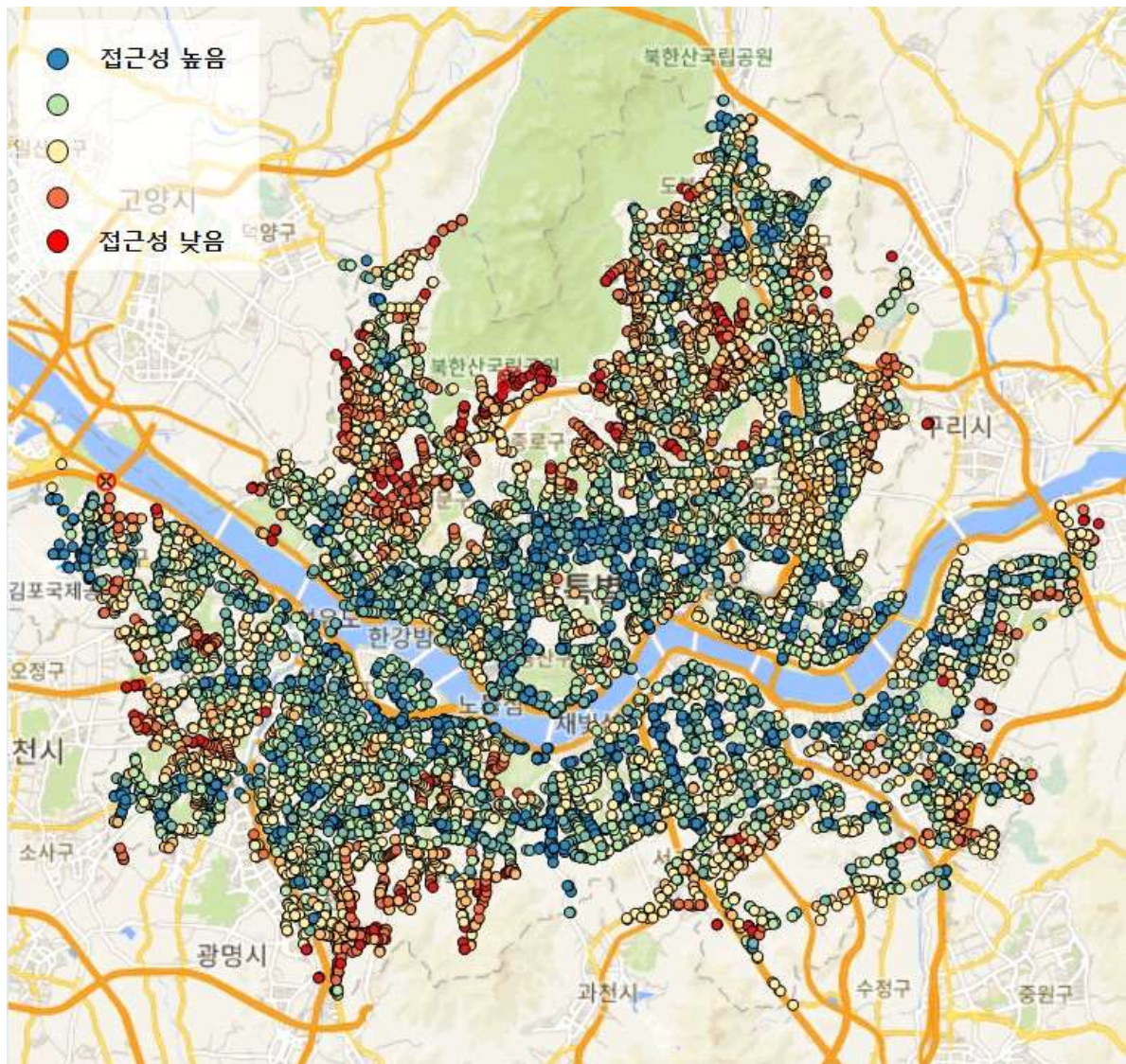
[그림 2-24] 군집단위의 O-D별 직선거리 및 접근성 산출 결과 예시

- 본 연구에서는 운행시간표 기반의 실시간 대중교통 최단경로 탐색 알고리즘을 개발하여, 다음과 같은 복잡한 연산을 단 시간에 수행할 수 있었음



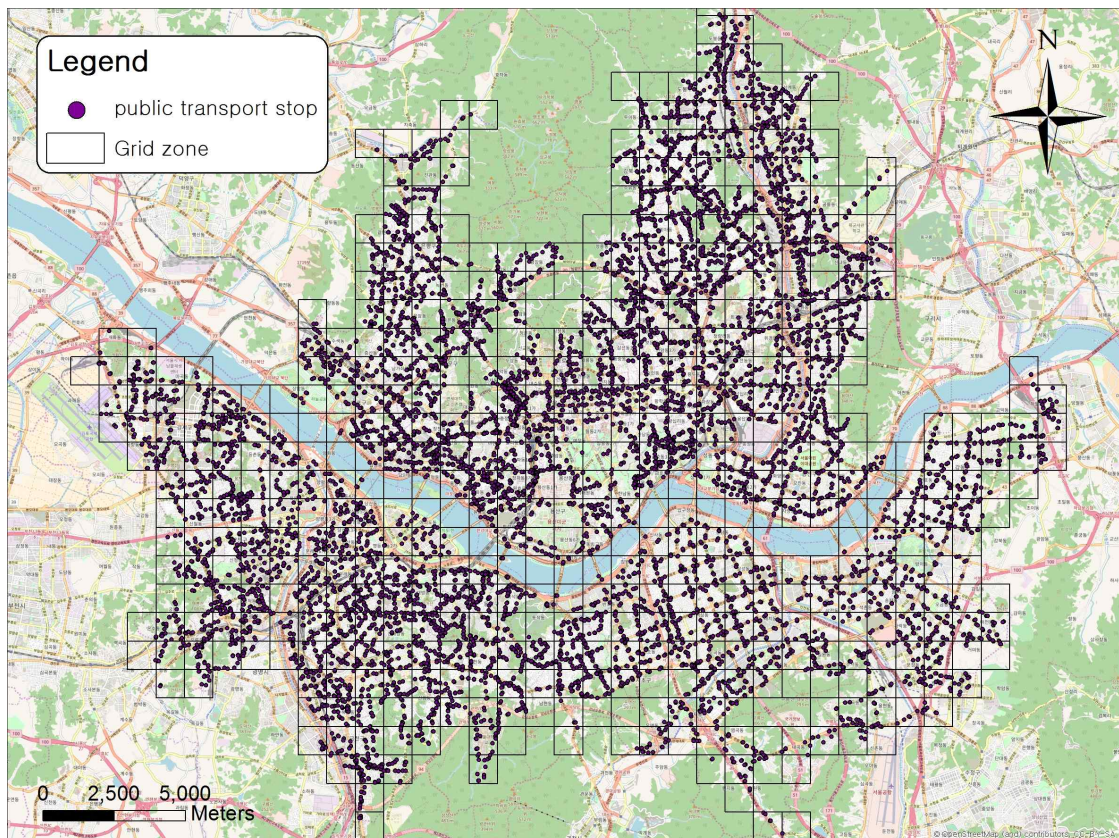
[그림 2-25] 출발지역에서 다른 정류장으로의 상대적 시간-거리

- 상대적 시간-거리 지표를 이용한 불균형 지역 탐색
 - [그림 2-25]은 성북구에 위치한 석관중고등학교 앞 정류장을 출발지역으로 하고 다른 정류장으로의 상대적 시간-거리를 표현한 것임
 - 태릉입구역 근처 정류장들과 휘경동 근처 정류장들은 동일한 네트워크 거리 급간에 (4km) 속해있음
 - 시간-거리가 짧을수록 파란색에 가깝게 표현되며, 시간-거리가 길수록 빨간색에 가깝게 표현됨
 - 즉, 석관중고등학교에서 출발한다고 했을 때, 태릉입구와 휘경동은 유사한 거리만큼 떨어져 있지만, 태릉입구보다 휘경동으로의 이동이 보다 빠르다는 것을 알 수 있음
 - 4km 급간의 평균 시간-거리는 약 21분이고, 석관중고-태릉입구 구간은 평균보다 약 5분 더 소요되며, 석관중고-휘경동 구간은 4분이 덜 소요됨



[그림 2-26] 전체 정류장의 상대적 시간-거리 접근성

- [그림 2-26]은 모든 정류장에 대한 All-to-All 경로 분석을 수행하여 개별 정류장 단위의 상대적 시간-거리 접근성을 분석한 것으로, 접근성이 좋을수록 파란색, 나쁠수록 빨간색으로 표현됨
- [그림 2-22]의 절대적 접근성과 달리, 도시 외각에 위치한다고 하여 무조건 접근성이 낮게 산출되지 않는다는 것을 확인할 수 있음
- 외각에 위치하지만 접근성이 높게 나온 지역들은 대부분 도시철도 역세권에 해당하여, 대부분의 지역으로 도시철도를 이용한 신속한 이동이 가능하기 때문에 대중교통 접근성이 높게 산출됨
- 접근성이 낮은 정류장들이 밀집되어 있는 지역들은 은평구와 도봉구로 분석되었음
- 은평구는 출퇴근시간대 극심한 버스혼잡으로 노선 신설이 계획되어 있고, 도봉구는 다른 지역과의 교통 격차를 해소하고자 대중교통 서비스 질 향상에 대한 논의 시의회를 통해 논의되고 있는 지역임
- 은평구와 도봉구의 대중교통 서비스 향상에 대한 논의 2017년 이후 진행된 사항이기 때문에, 본 연구에 적용한 데이터의 시점을 고려할 때, 적절한 분석 결과가 도출되었다고 판단할 수 있음
- 인구, 토지이용과 같은 GIS 데이터 및 스마트카드 데이터에 나타난 통행기록을 활용한 접근성 지표로 발전시킨다면, 보다 많은 시사점을 도출할 수 있을 것으로 예상됨

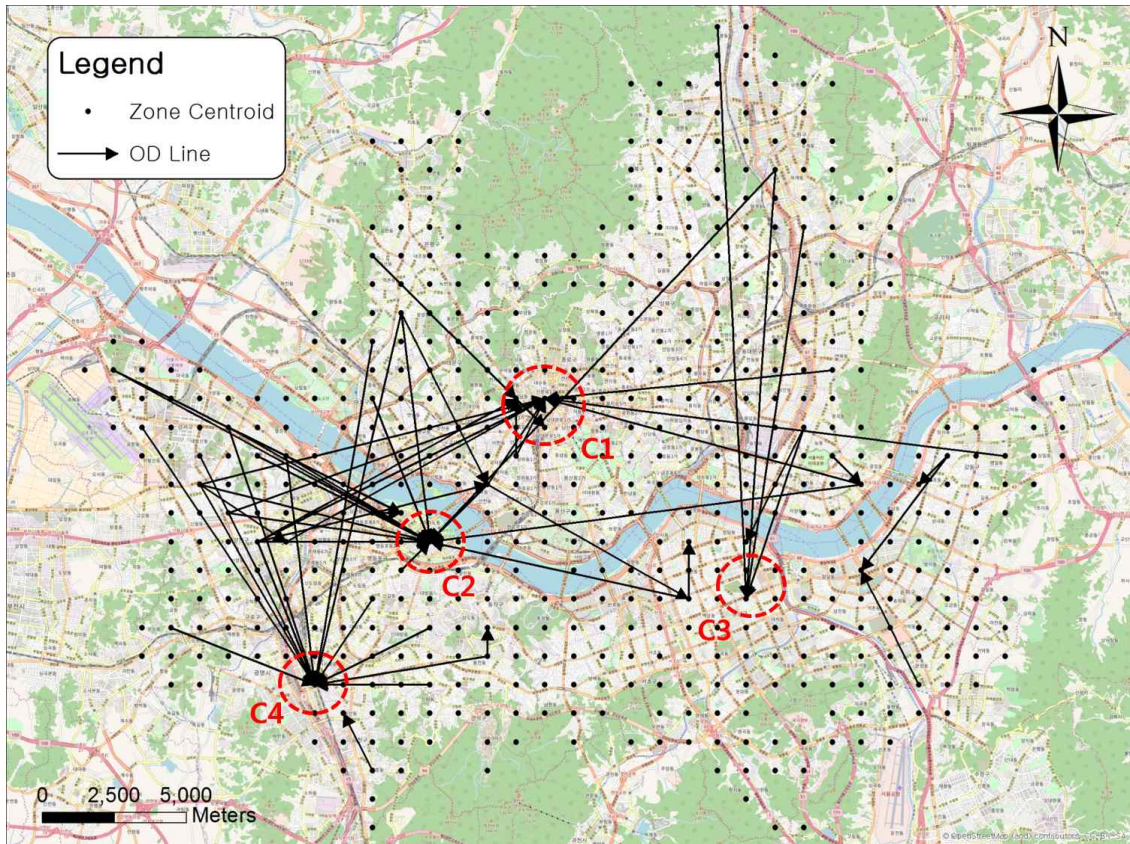


[그림 2-27] 서울시 대중교통 정류장 및 격자 단위 교통존

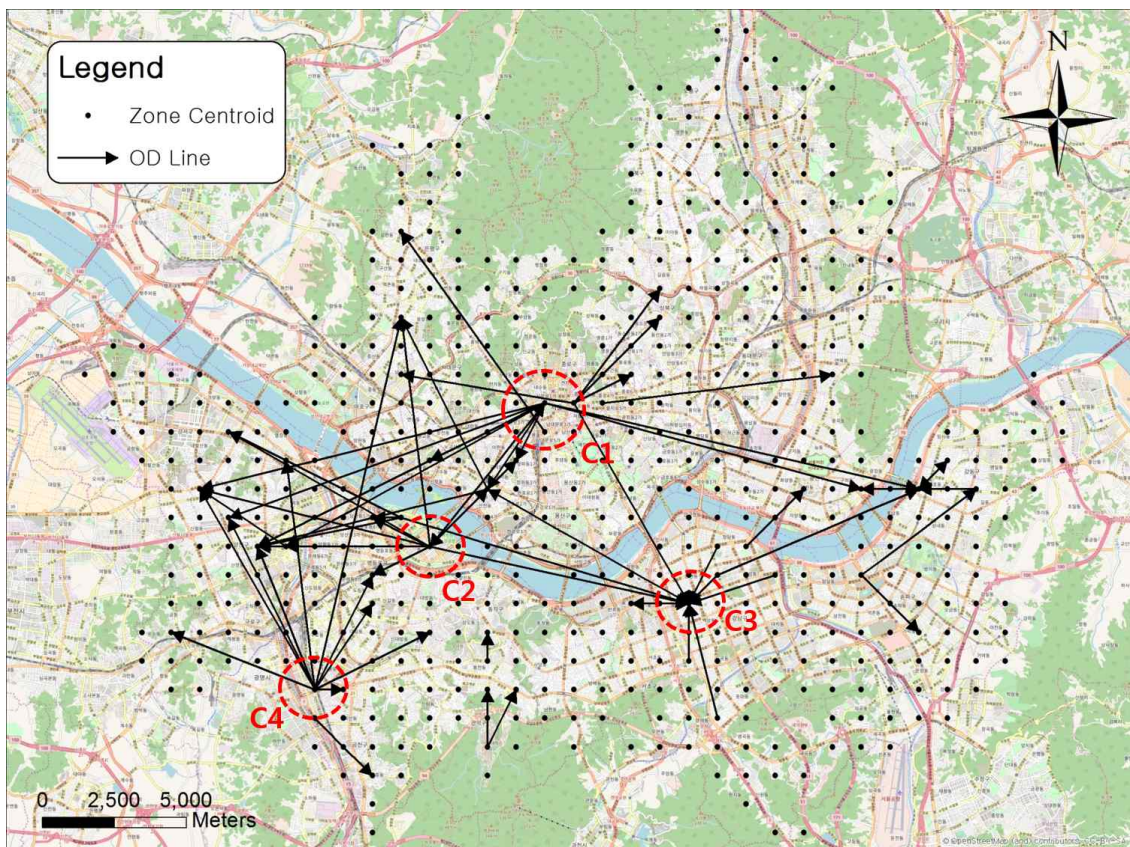
- 상대적 이동시간과 스마트카드 거래내역 기반 통행량을 이용한 서비스 격차 평가
 - 개발한 상대적 이동시간 기반 시간-거리 지표와 스마트카드 거래내역 기반 통행량을 이용하여 서울시 대중교통 체계의 서비스 수준을 분석하였음
 - [그림 2-27]와 같이, 서울시를 1km*1km 크기의 격자로 분할하여, 격자 단위의 O-D를 기반으로 분석을 수행하였음
 - 정류장 단위의 O-D로 분석을 수행할 경우, 연산량이 너무 많고 결과가 복잡하기 때문에 결과 해석에 어려움이 있고, 개별 정류장 단위로 통행량을 집계할 경우, 수요가 없는 정류장들이 다소 존재하여 의미없는 결과가 산출됨
 - 또한 행정구역 단위의 O-D로 분석을 수행할 경우에는 보유한 데이터의 세밀함에 비해 다소 거시적인 결과가 도출되기에, 본 연구에서는 연산 및 해석의 복잡도를 줄이고 미시적 데이터의 활용도를 높이기 위해 격자 단위의 교통존을 구성하였음
 - 격자의 크기는 격자의 중심으로부터 일반적인 도보 이동권역인 500m를 적용하여 1km*1km로 설정하였고, 격자의 개수는 총 548개로, 가능한 모든 O-D의 수는 약 300,000개임

$$SG_{ij} = Z(T_{ij}^*) - Z(D_{ij}) \quad (\text{식 2-9})$$

- 격자존 단위 O-D의 서비스 격차는 (식 2-9)에 의해 계산함
- 존 i 에서 존 j 로의 대중교통 서비스 격차 SG_{ij} 는 i - j 의 상대적 시간-거리 T_{ij}^* 와 i - j 의 스마트카드 거래내역 기반 대중교통 통행량 D_{ij} 를 이용하여 연산함
- 시간-거리의 차원은 시간이고 통행량은 이용객 수(명)이기 때문에, 두 지표의 절대적인 비교는 불가능함
- 이에 통행량이 많은 O-D에 상대적으로 높은 수준의 대중교통 서비스가 제공되어야 한다는 관점에서, 두 지표를 평균이 0, 표준편차가 1인 표준 점수(Z score)로 변환하여 서비스 격차를 분석하였음
- 즉, 서비스 격차가 음의 방향으로 클수록, 공급 수준에 비해 많은 대중교통 수요가 있다는 것을 의미하고, 양의 방향으로 클수록, 높은 공급 수준이 제공되고 있지만 수요는 많지 않음을 의미함
- 따라서 서비스 격차가 0에 가까울수록 균형적인 대중교통 서비스가 제공되고 있음을 나타냄
- 상대적 시간-거리 및 통행량은 오전/오후 침두시(07~09, 18~20)와 비침두시(13~15)로 나누어 산출하였고, 통행량은 주중 평균치를 적용하였음

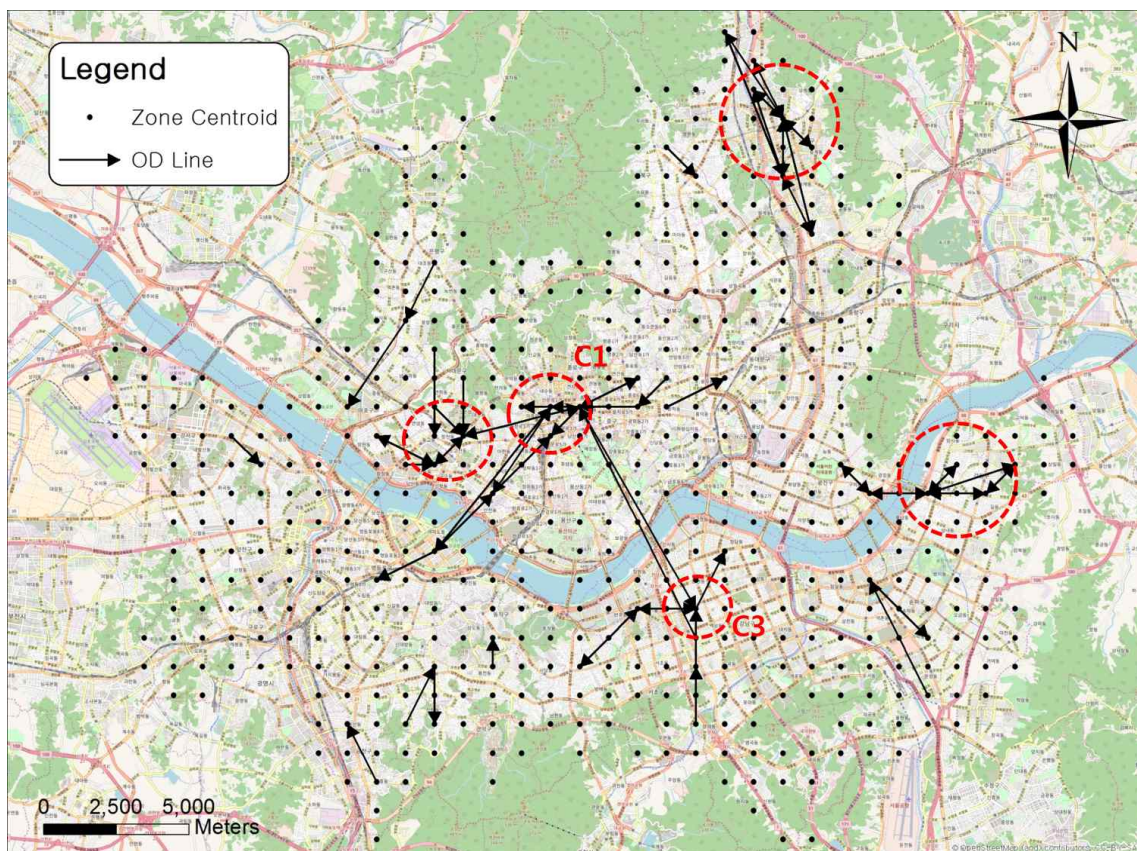


[그림 2-28] 오전 청두시의 서비스 불균형 O-D



[그림 2-29] 오후 청두시의 서비스 불균형 O-D

- [그림 2-28], [그림 2-29], [그림 2-30]는 오전/오후 첨두시, 비첨두시의 서비스 격차 하위 2%에 해당하는 O-D들을 시각화한 것임
- 오전 첨두시에는 주요 고용중심지로 향하는 O-D들이 통행량이 과도하게 집중되는 현상으로 인해 서비스 격차가 크게 나타남
- 도착 지역을 토대로 O-D들을 군집화하면 4개의 그룹(C1, C2, C3, C4)이 형성되는데, 서비스 격차가 큰 것으로 나타난 대부분의 O-D들은 도시철도가 운행되고 있어, 상대적 시간-거리도 평균보다 좋은 수준임
- 하지만 오전 첨두시의 특성상, 공급의 차원을 넘어서는 수요가 집중되기 때문에 서비스 불균형 O-D로 분석된 것으로 판단되며, 특히, 서울 서부지역에서 C2 지역으로의 O-D, 즉 9호선 구간과 같은 극심한 혼잡 구간이 도출되었음
- 오후 첨두시에는 오전 첨두시와는 반대로, 고용중심지가 출발 지역이 되어 퍼져나가는 형태가 확인되었고, 오전 첨두시에 서비스 개선이 필요한 O-D 중 32개는 오후 첨두시에도 불균형한 서비스가 제공되는 것으로 나타남
- 특히, 강남 지역은 오전, 오후 모두 통행량이 집중되어 대중교통 서비스 개선이 필요한 것처럼 나타났음
- 비첨두시에는 상시적으로 통행량이 많은 서울 중심부(C1)와 강남(C3)을 연결하는 O-D가 서비스 개선이 필요한 것으로 나타났고, 그 밖에 신촌 등의 대학 밀집지역과 서울 외곽지역의 일부 O-D들이 서비스 불균형으로 분석되었음

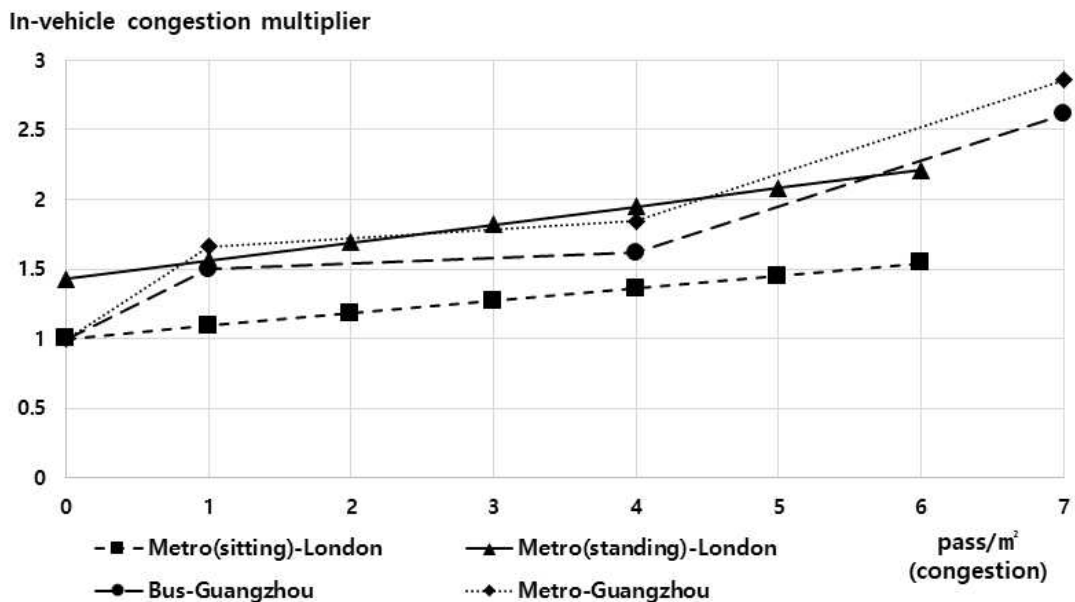


[그림 2-30] 비첨두시의 서비스 불균형 O-D

○ 차내 혼잡도를 고려한 대중교통 시간-거리 접근성

• 개요

- 시간-거리 접근성은 목적지까지의 통행시간을 이용하여 승객의 이동편의성을 설명하며, 통행시간에는 차내 이동시간, 도보 이동시간 등의 물리적 이동시간 뿐만 아니라 환승으로 인한 심리적 저항감도 반영됨
- 환승과 마찬가지로, 높은 차내 혼잡도는 불쾌감과 육체적 피로를 유발하여 체감 통행시간을 증가시킴
- [그림 2-31]는 국외 연구에서 분석된 차내 혼잡도에 따른 시간승수를 나타낸 것으로, 가로축은 단위 면적당 승객 수(혼잡도), 세로축은 시간승수임
- 실제 통행시간에 혼잡도에 따른 시간승수를 곱하면 승객이 체감한 통행시간이 산출됨
- 예를 들어, 런던 지하철 이용객들의 경우(입석 승객), 최대 혼잡도일 때는 실제 통행시간보다 2배 이상의 체감통행시간을 느끼는 것으로 나타남
- 서울시의 경우, 하루 평균 천만 명 이상이 대중교통을 이용하고, 전체 통행량의 약 20% 이상이 출퇴근 시간대에 집중되고 있어, 출퇴근 시간대에 발생하는 대중교통 혼잡이 매우 심각함
- 하지만 이로 인해 발생하는 이동편의성 감소에 대한 정량적 분석은 미흡한 실정임
- 이에 본 연구에서는 차내 혼잡도를 고려한 대중교통 시간-거리 접근성 지표를 개발함



[그림 2-31] 국외의 차내 혼잡도에 따른 시간승수

- 차내 혼잡도를 고려한 대중교통 시간-거리 접근성
 - 정류장 i 의 접근성(A_i)은 이금숙 외(2014)와 동일하게 (식 2-10)과 같이 정의되며, $T_{ij}^{Journey}$ 는 정류장 i 에서 정류장 j 로의 시간-거리로, 혼잡도를 고려한 체감통행시간을 적용함

$$A_i = B \sum_{j(i \neq j)}^n (T_{ij}^{Journey})^{-1} \quad (\text{식 2-10})$$

- 시간-거리는 (식 2-11)와 같이, 차내 혼잡도에 따른 시간승수(β^{iv})를 적용한 차내시간(T^{iv})과 총 도보 이동시간(T_{ij}^{walk}), 총 대기시간(T_{ij}^{wait}), 환승저항($T_{ij}^{penalty}$)을 합산하여 산출함

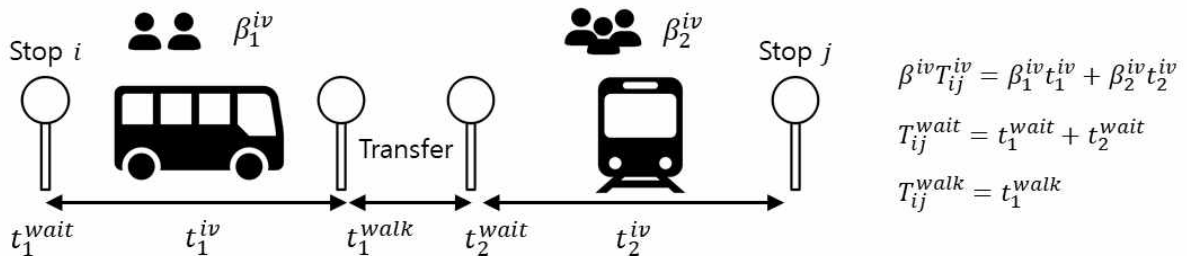
$$T_{ij}^{Journey} = \beta^{iv} T_{ij}^{iv} + T_{ij}^{walk} + T_{ij}^{wait} + \beta^{tr} c \quad (\text{식 2-11})$$

- 환승저항은 심리적 부담을 시간으로 환산한 값(β^{tr})과 환승횟수(c)를 곱하여 계산하고, 양수정 외(2017)의 β^{tr} 값 5.35분을 적용함
- 차내 혼잡도에 따른 시간승수를 적용한 차내시간은 이용 노선별(m)로 구분하여 적용하고, 시간승수는 [표 2-7]과 같이 Wardman and Whelan(2011)의 결과를 적용함
- 이 때 시간승수는 착석 가중치(β^{sit})와 입석 가중치(β^{std})의 중간값을 이용함
- [그림 2-32]는 2개의 노선을 이용하는 경로에 대하여 차내 혼잡도를 고려한 시간-거리의 구성을 도식화 한 것임
- 최종적으로, 정류장 i 의 차내 혼잡도를 고려한 대중교통 시간거리 접근성은 (식 2-12)로 정의됨

$$A_i = \sum_{j(i \neq j)}^n \left[\left\{ \sum_{m=1}^k (\beta_m^{iv} t_m^{iv} + t_m^{walk} + t_m^{wait}) \right\} + 5.35(k-1) \right]^{-1} \quad (\text{식 2-12})$$

[표 2-7] In-vehicle time multipliers

Load factor(%)	β^{sit}	β^{std}
0-100	1	-
100-125	1.05	1.62
125-150	1.16	1.79
150-175	1.27	1.99
175-200	1.40	2.20
200-	1.55	2.44

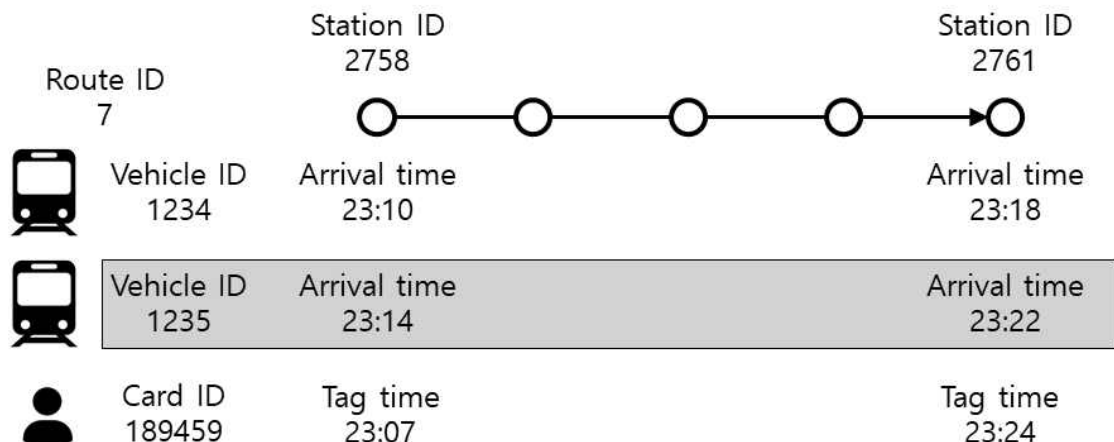


[그림 2-32] 차내혼잡도를 고려한 시간-거리 접근성 산출 예시

- 스마트카드 데이터를 이용한 차내 혼잡도 연산
 - 차량별 재차인원은 운행시간표에 기록된 차량별 도착시각 정보와 스마트카드에 기록된 승객의 탑승시각, 탑승노선 정보를 비교하여 산출함
 - [표 2-8]는 스마트카드 자료에 기록된 승객들의 탑승정류장, 하차정류장, 차량ID를 이용하여 재차인원을 산정하는 예시임
 - 다만 지하철은 최초 탑승역과 마지막 하차역만 기록되어 중간에 어떤 정류장에서 환승했는지에 대한 정보가 결여되어 있음
 - 따라서 본 연구는 승객의 지하철 승·하차 정보와 탑승시각을 경로 탐색 알고리즘에 적용하였고, 경로 탐색 결과에 따라 차량별 재차인원을 산정함
 - [그림 2-33]은 한 승객의 지하철 탑승시각, 하차시각과 지하철 운행시간표를 이용하여 승객이 탑승한 차량을 추정하는 방법을 설명하는 그림임
 - 23:07분에 탑승한 승객이 23:24분에 하차하기 위해서 탑승할 수 있는 차량 1234번과 1235번 중 하차 시각에 더 가까운 1235번 차량이 승객이 탑승한 차량으로 추정됨

[표 2-8] 교통카드 데이터를 이용한 재차인원 산출 예시

차량ID	순서	정류장ID	승객ID			재차인원
			175644	25123	963749	
100100159	1	109000072		승차		1
	2	109000088		차내	승차	2
	3	109000108	승차	차내	차내	3
	4	109000113	차내	차내	차내	3
	5	109000118	차내	차내	차내	3
	6	109000120	차내	하차	차내	2
	7	109000130	차내		차내	2
	8	110000144	하차		차내	1
	9	109000152			하차	0
	...	...	...	...	...	...



[그림 2-33] 승객의 지하철 경로 추정 예시

- 버스 및 지하철의 재차인원이 산출되면, 차량의 용량을 고려하여 차내 혼잡도를 추정할 수 있음
- [그림 2-34]는 스마트카드 거래내역을 바탕으로, 오전 8시~9시 사이의 지하철 혼잡구간을 시각화한 것임

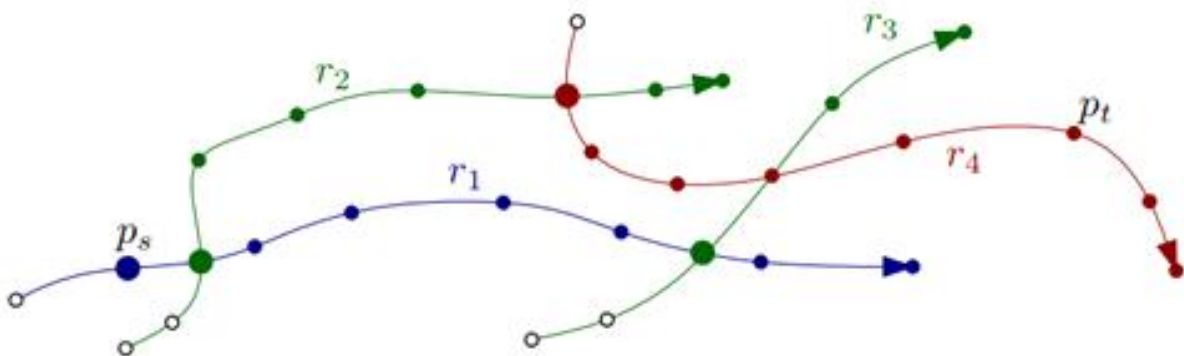


[그림 2-34] 오전 8시~9시 사이 평균 차내 혼잡도(지하철)

(다) 운행시간표 기반 대중교통 최적경로 탐색 알고리즘 개발

○ RAPTOR 기반 실시간 대중교통 최적경로 탐색 알고리즘

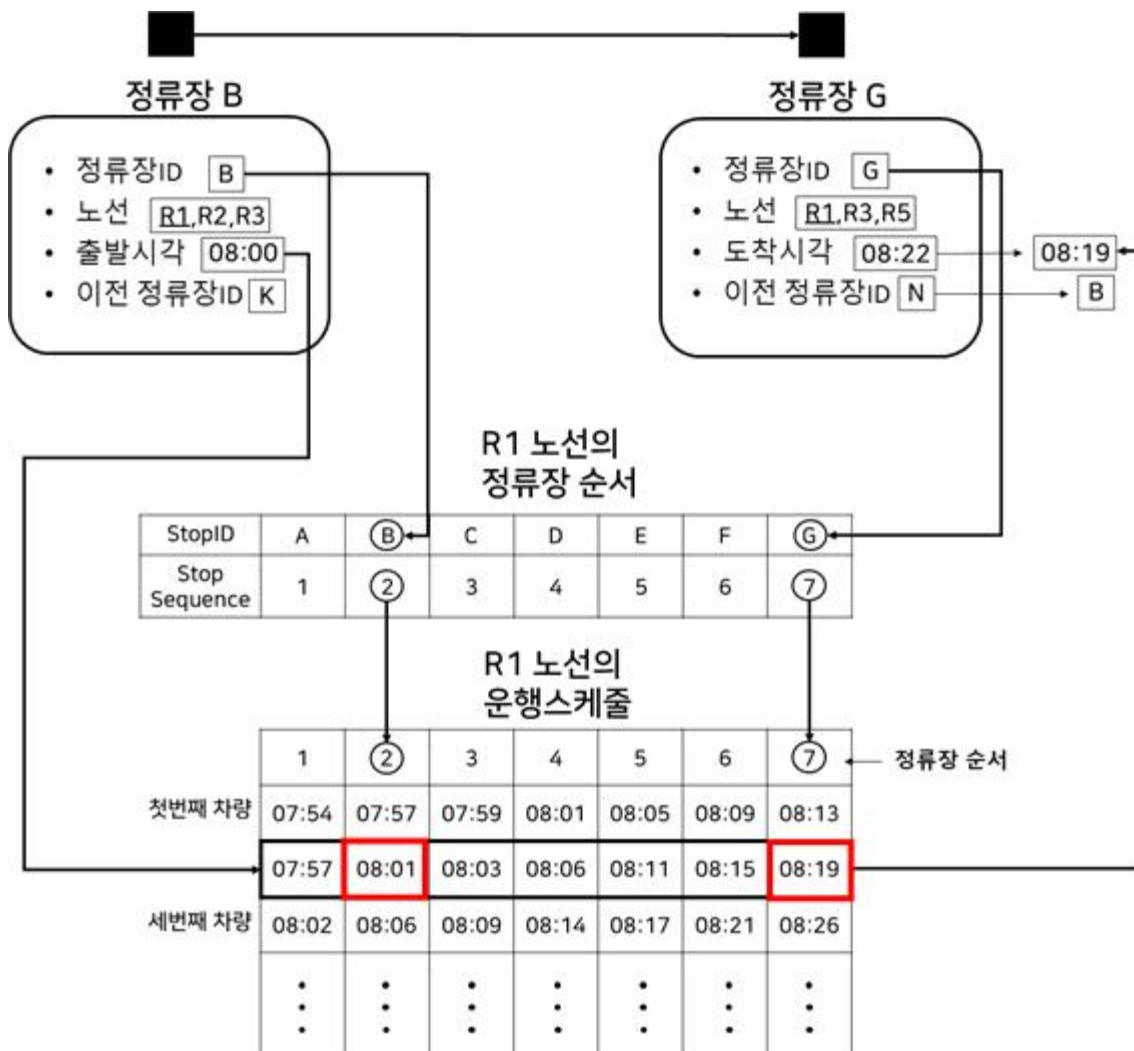
- 개요
 - 정류장-to-정류장 단위 시간-거리 기반 대중교통 접근성을 산출하기 위해서는 이동경로, 소요시간 및 거리 뿐만 아니라, 환승, 도보이동거리 등의 다양한 속성을 연산할 수 있는 경로 탐색 알고리즘이 필요함
 - 다층 네트워크에서의 다익스트라 알고리즘은 네트워크의 규모가 방대해지면 연산시간이 급격하게 증가하여, 실시간 경로 탐색에 한계가 있음
 - 이에 본 연구에서는 대중교통 운행시간표를 이용하여 최소 이동시간 경로를 탐색하는 RAPTOR(Round-Based Public Transit Routing) 알고리즘을 기반으로 수단간 환승저항 및 도보이동 파라미터의 조절이 가능한 실시간 대중교통 최적경로 탐색 알고리즘을 개발하였음
- RAPTOR
 - 매 라운드(개별 노선 단위, 환승 시 라운드 1 상승)를 돌며 출발 정류장(O)에서 도착 정류장(D)까지 도착시간을 갱신하며 최소 도착시간을 만족하는 경로를 찾는 알고리즘
 - 운행시간표를 이용하여 탑승 가능한 수단을 찾으므로 출발시각에 영향을 받음
 - 단, 출발시각을 설정하면 O-D에 대한 최소 도착시간 경로 1개만 탐색함



[그림 2-35] RAPTOR의 라운드 개념 예시

- 운행시간표 기반 실시간 대중교통 최적경로 탐색 알고리즘
 - RAPTOR 기반 실시간 대중교통 최적경로 탐색 알고리즘은 라운드 별로 경로 탐색을 진행하며, m번째 라운드는 출발 정류장에서 m번의 환승 또는 도보 이동을 통해 이동할 수 있는 모든 정류장까지의 최소 도착시각을 갱신함
 - 알고리즘은 0라운드부터 시작하며, 0라운드에서는 출발 정류장에서 도보 또는 교통수단을 이용하여 도착하는 환승 정류장(1st TS)을 탐색함
 - 알고리즘은 대중교통 네트워크와 운행시간표를 바탕으로 연산을 진행하며, 이에 필요한 데이터 구조로는 정류장(STOP), 노선(Route), 운행시간표(Trip)가 있음

- [그림 2-36]는 알고리즘을 구성하는 데이터 구조 및 탐색 방식을 나타낸 것임
- 본 알고리즘은 도착 정류장에 최소 도착시각과 도착시각을 갱신하기 전 출발한 정류장(Prior StopID)을 저장하기 때문에, 도착 정류장부터 정류장을 역으로 탐색하여 출발 정류장까지 반복하여 경로를 탐색함
- [그림 2-36]에서 정류장 G의 최소 도착시각을 갱신한 이전 정류장은 정류장 B이고, 정류장 B의 이전 정류장은 정류장 K, 이와 같은 방식으로 출발 정류장까지 탐색을 진행함
- 정류장 정보에는 정류장ID, 정류장 명칭 등 정류장 정보가 저장되고 라운드별로 갱신된 최소 도착시각과 이전 정류장 ID가 저장됨
- 노선 정보에는 노선이 지나는 정류장 ID와 순번이 기록되어 있고, 운행시간표에는 정류장 순번과 노선을 운행하는 각 차량이 정류장에 도착하는 시각 정보가 포함됨



[그림 2-36] RAPTOR 기반 실시간 대중교통 최적경로 탐색 알고리즘 데이터 구조

- 알고리즘의 경로 탐색 과정은 [그림 2-37]로 나타낼 수 있으며, 단계별로 설명하면 아래와 같음

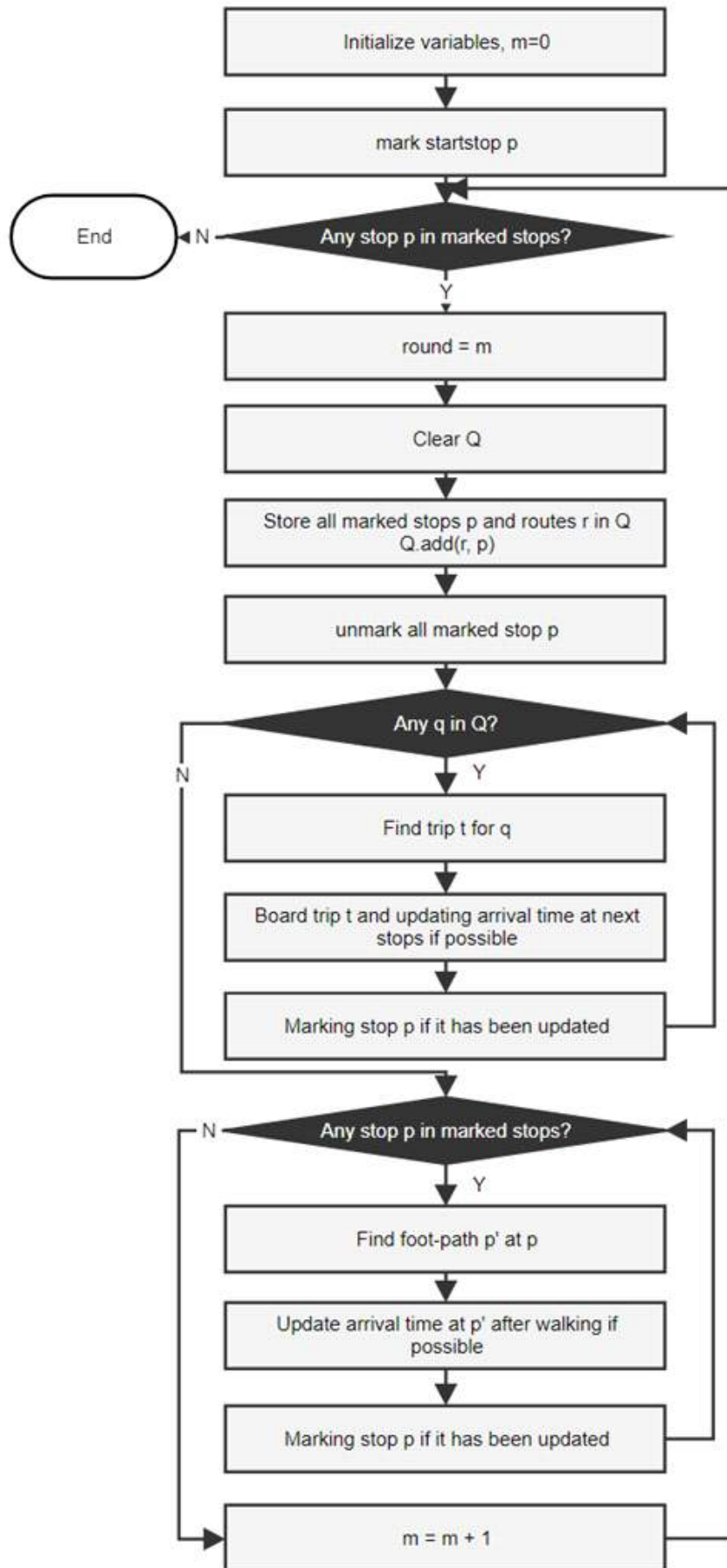
초기화 모든 정류자의 최소 도착시간은 ∞ 로 초기화하고 출발 정류장의 최소 도착시간을 출발시각으로 설정한다.

STEP 1. 0라운드가 아닌 경우에는 모든 정류장의 m라운드 최소 도착 시각에 m-1라운드까지의 최소 도착시간을 저장한다. 또한, m-1라운드에 마킹된 정류장에서 이용할 수 있는 모든 노선을 노선-정류장(R, S) 쌍을 Q라는 이름의 List에 저장한다. Q는 탐색을 위해 사용하는 변수이며, 마킹한 정류장에서 출발 가능한 노선을 묶음으로 저장한 리스트이다. 0라운드인 경우, 출발 정류장에서 이용할 수 있는 노선을 Q에 저장하고 STEP2를 진행한다.

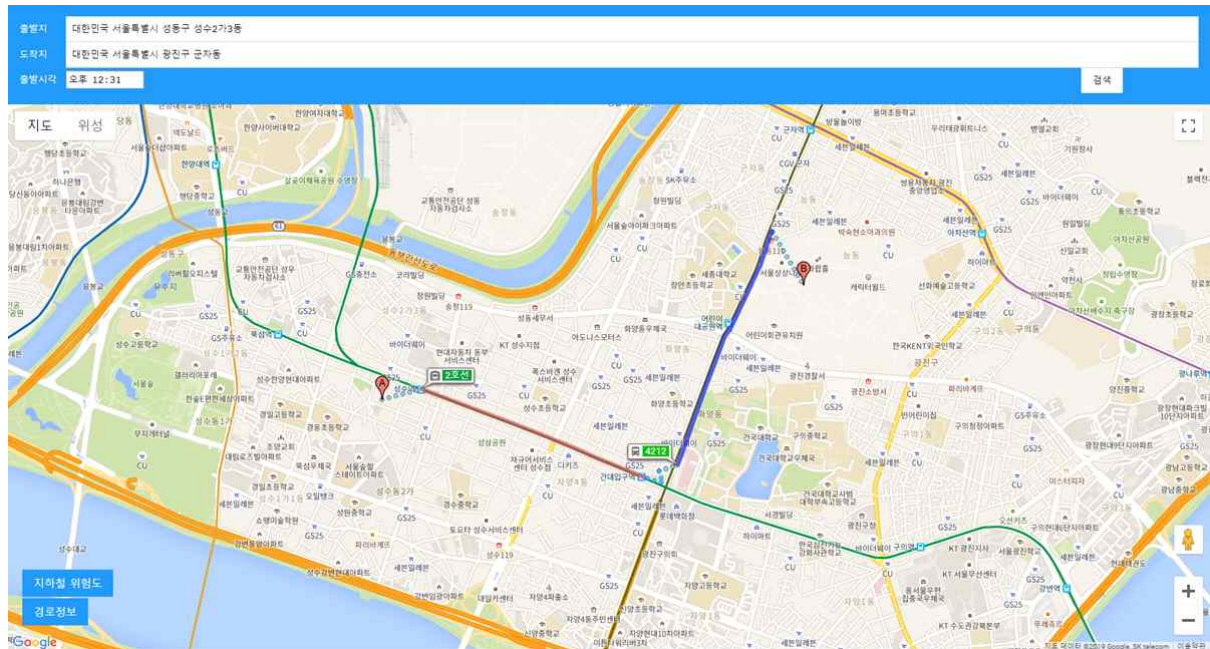
STEP 2. Q에 저장된 정류장-노선 쌍을 하나씩 이용하면서 $t_{r,v}$ 을 탐색한다. 정류장의 최소 도착시각 이후에 탑승할 수 있는 노선별 차량을 선택하고 이를 이용하여 지나는 모든 정류장(p')으로 이동한다. p' 에 차량이 도착했다면 차량을 탑승하여 정류장에 도착한 시각과 이전 라운드까지 p' 의 최소 도착시간을 비교하고, 차량을 탑승하여 정류장에 도착한 시각이 빠를 경우 p' 의 최소 도착시간을 갱신하고 해당 정류장을 마킹한다.

STEP 3. STEP2에서 마킹된 정류장에서 도보로 이동할 수 있는 정류장(p_i)까지 이동한다. STEP 2에서 마킹된 정류장의 최소 도착시각에 도보 이동시간을 더한 도착시각과 이전 라운드까지 p_i 의 최소 도착시간을 비교하고, 만약 도보로 이동하여 도착한 시각이 빠를 경우 p_i 의 최소 도착시간을 갱신하고 해당 정류장을 마킹한다.

STEP 4. 최소 도착시각이 갱신된 정류장이 있는지 확인한다. 최소 도착시각이 갱신된 정류장이 있을 경우 m을 1 증가시키고 STEP 1~3 과정을 반복한다. 최소 도착시각이 갱신된 정류장이 없다면 알고리즘을 종료한다.

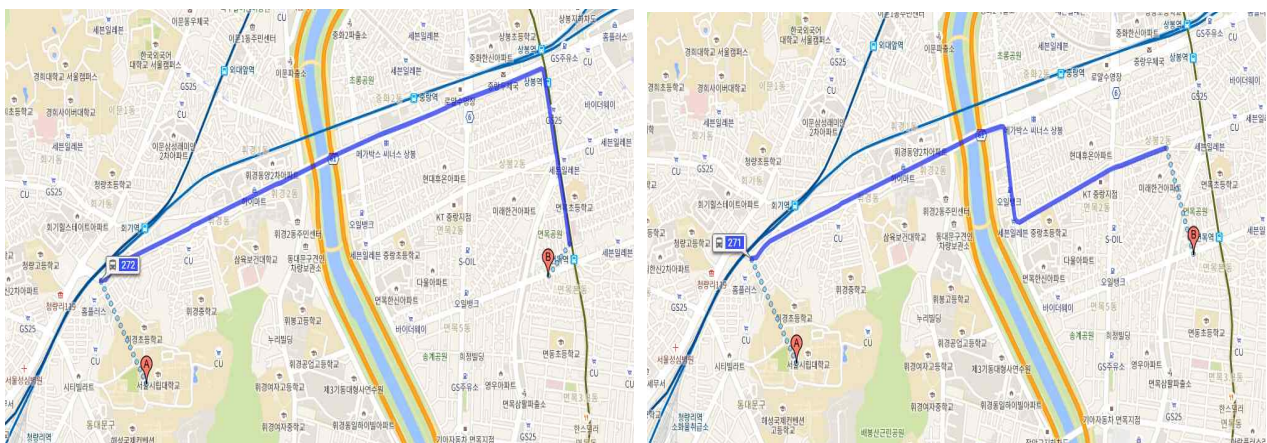


[그림 2-37] RAPTOR 기반 실시간 대중교통 최단경로 탐색 알고리즘 순서도



[그림 2-38] RAPTOR 기반 실시간 대중교통 최적경로 탐색 알고리즘 웹 버전 구현

- [그림 2-38]은 본 알고리즘을 웹 형태로 구현한 것으로, 사용자가 출발지와 도착지, 출발시각을 입력하면 알고리즘에 의해 경로가 탐색되며 탑승 노선 및 정류장 정보가 표현됨
- 알고리즘이 대중교통 운행시간표에 따라 경로 탐색을 진행하기 때문에 동일한 출발지와 도착지를 입력하더라도 출발시각에 따라 다른 경로가 탐색됨
- [그림 2-39]은 출발지를 서울시립대학교, 도착지를 면목역 근처로 지정한 후 출발시각을 오전 8시로 설정했을 때와 오전 11시로 설정했을 때의 경로를 비교한 것임



[그림 2-39] 오전 8시 30분 경로 탐색 결과(좌), 오전 11시 30분 경로 탐색 결과(우)

- 본 연구에서 개발한 RAPTOR 기반 실시간 대중교통 최적경로 탐색 알고리즘은 서울시 대중교통 네트워크를 대상으로, One-to-One, One-to-All 최적경로를 실시간(1초 이내)으로 탐색하고, All-to-All 최적경로는 약 1시간이 소요됨
- 성능 테스트를 수행한 환경은 Inter(R) Xeon(R) CPU X560, 8GB RAM, x64 프로세서임

(3) 2차 연도 연구범위

[표 2-9] 2차 연도 연구범위 및 수행방법

연구범위	수행방법	내용
실시간 대중교통 다중경로 탐색 알고리즘 개발	대중교통 빅데이터 통합 DB 및 대중교통 네트워크 구축	1차 연도에 구축된 대중교통 빅데이터 통합 DB 및 대중교통 네트워크를 이용하여 다중경로 탐색 알고리즘 개발 - 알고리즘을 통해 산출된 다중경로와 스마트카드 거래내역에 나타난 실제 승객들의 실적경로를 비교하여 알고리즘의 정확도 검증
	운행시간표 기반 대중교통 다중경로 탐색 알고리즘 개발	- 전통적인 그래프 데이터 구조가 아닌, 운행시간표 데이터 구조를 활용하여 최소 이동시간 경로를 산출하는 알고리즘 개발 - 기존 운행시간표 기반 알고리즘을 다중경로 탐색 및 다양한 파라미터 적용이 가능하도록 개발
	실시간 대중교통 다중경로 탐색 프로그램 개발	- 서울시 대중교통 네트워크 및 운행시간표를 바탕으로 정류장 단위의 one-to-one 다중경로를 실시간으로 연산하는 프로그램 개발 - 수단별 환승저항 및 도보이동속도 등 사용자가 파라미터 설정이 가능하도록 프로그램 GUI 구현
개인별 통행경로 선호도 분류기 개발	머신러닝을 이용한 대중교통 통행사슬 기반 개인별 통행경로 선호도 분류 모델 개발	- 대중교통 승객의 경로 선택 조건 및 유형 분석 - 다중경로 탐색 알고리즘을 이용하여 All-to-All 다중경로에 대한 선호 유형 분석 - 선호 유형이 분석된 대중교통 경로 정보를 활용하여, 해당 경로를 실제로 이용한 승객들의 경로 선호 유형 할당 - 딥러닝 기반 대중교통 승객 경로 선호도 분류 모델 개발을 위한 훈련 데이터셋 생성 및 모델 설계 - 하이퍼 파라미터 튜닝 및 모델 테스트를 통한 최적 모델 도출

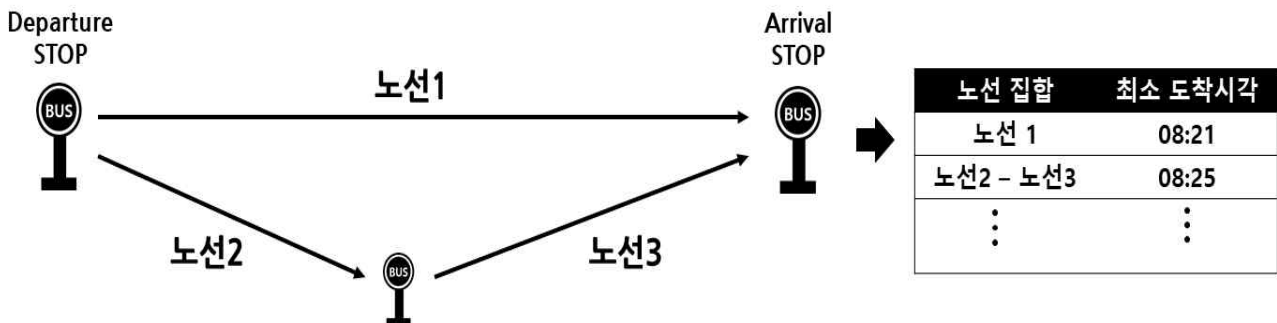
	I-RAPTOR를 이용한 대중교통 승객 경로 선택 유형 분류 모델 개발	- 대중교통 다중경로 탐색 알고리즘(I-RAPTOR)을 이용하여 경로 유형 분석 - 스마트카드 거래내역에서 유형이 분석된 경로를 실제로 이용한 승객들의 경로 선호 유형 결정
개인별 통행경로 선호도를 고려한 통행배정 기법 개발	스마트카드 거래내역을 활용한 에이전트 단위 통행배정	- 스마트카드 거래내역에서 실제 승객들의 정류장 단위 O-D, 출발시각 등을 추출하고, 노선 정보는 삭제 - 다중경로 탐색 알고리즘을 통해 이용 가능한 경로를 도출하고, 승객의 경로 선호도를 고려하여 특정 경로 배정 - 해당 승객의 실제 이용 노선과 알고리즘을 통해 배정된 노선 비교
노선 조정 시뮬레이션 기법 개발	노선 조정 시나리오 도출	- 정류장 단위 시간-거리 접근성 분석 결과를 고려하여 지역 불균형 완화를 위한 노선 조정 시나리오 수립 - 신규 노선 추가에 대한 시나리오 적용
	노선 조정 시뮬레이터 개발	- Look & Feel 방식의 GUI 기반 노선 조정 시뮬레이터 개발 - 사용자가 노선을 편집하고 임의의 운행시간표를 입력하는 시뮬레이터 개발 - 노선 조정 전·후의 수요 및 접근성 변화 분석

(4) 2차 연도 연구수행내용

(가) 실시간 대중교통 다중경로 탐색 알고리즘 개발

○ 운행시간표 기반 대중교통 다중경로 탐색 알고리즘

- 개요
 - 대중교통 이용객은 이동시간 뿐만 아니라 환승횟수, 도보이동거리, 대기시간 등 다양한 요소를 고려하여 경로를 선택함
 - 이에 본 연구에서는 1차 연도에 개발한 RAPTOR 기반 실시간 대중교통 최적경로 탐색 알고리즘을 개선하여 다중경로 탐색 알고리즘을 개발함
 - 본 알고리즘은 수단별 환승저항, 도보저항 등의 파라미터를 고려하여 실제 승객이 목적지까지 이동하는데 고려할 법한 k 개의 다중경로를 탐색함
- 운행시간표 기반 다중경로 탐색 알고리즘
 - 1차 연도에 개발한 경로 탐색 알고리즘은 정류장에서 최소 도착시각을 갱신한 정류장ID를 저장하고 이를 도착 정류장부터 역으로 추적하여 출발 정류장까지 탐색하여 전체 경로를 산출함
 - 개선된 다중경로 탐색 알고리즘에서는 정류장마다 k 개의 상위 도착시각을 저장하고 이를 도착시각이 빠른 순서대로 순위를 부여함
 - 또한 도착시각과 함께 이전 정류장ID가 아닌 해당 정류장에 도착할 때까지 이용한 노선 집합을 함께 저장함
 - [그림 2-40]은 출발 정류장에서 출발하여 도착정류장에 도착한 다중경로를 저장하는 방식을 설명한 그림임
 - [그림 2-40]에서 출발 정류장에서 도착 정류장까지의 경로가 2가지 있을 때, 각 경로를 구성하는 노선과 도착시각을 함께 저장함
Ex. {노선1, 08:21}, {노선2-노선3, 08:25}

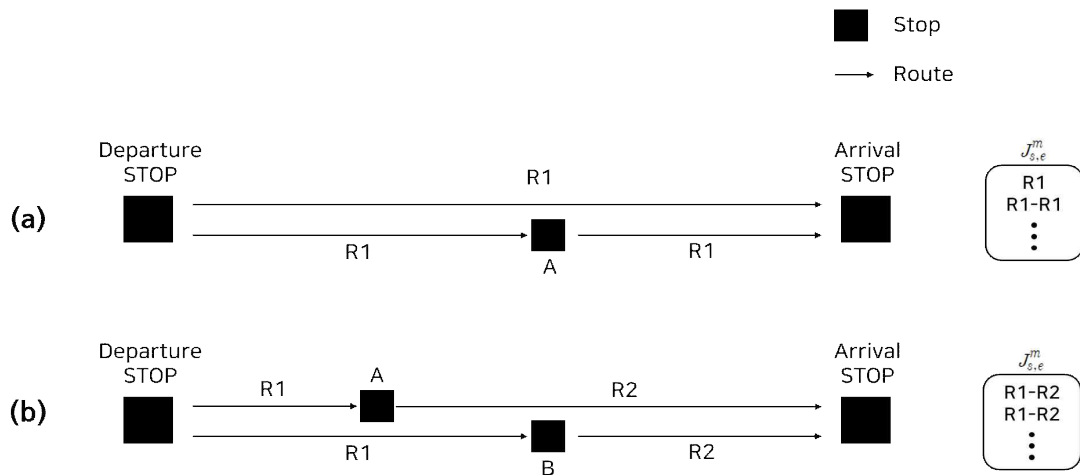


[그림 2-40] 정류장별 다중경로 저장 방식 예시

- 또한 개선된 다중경로 탐색 알고리즘은 경로 지배 조건(Dominant rule)을 통해, 비현실적인 경로 산출을 방지함
- 경로 지배 조건은 다음과 같음

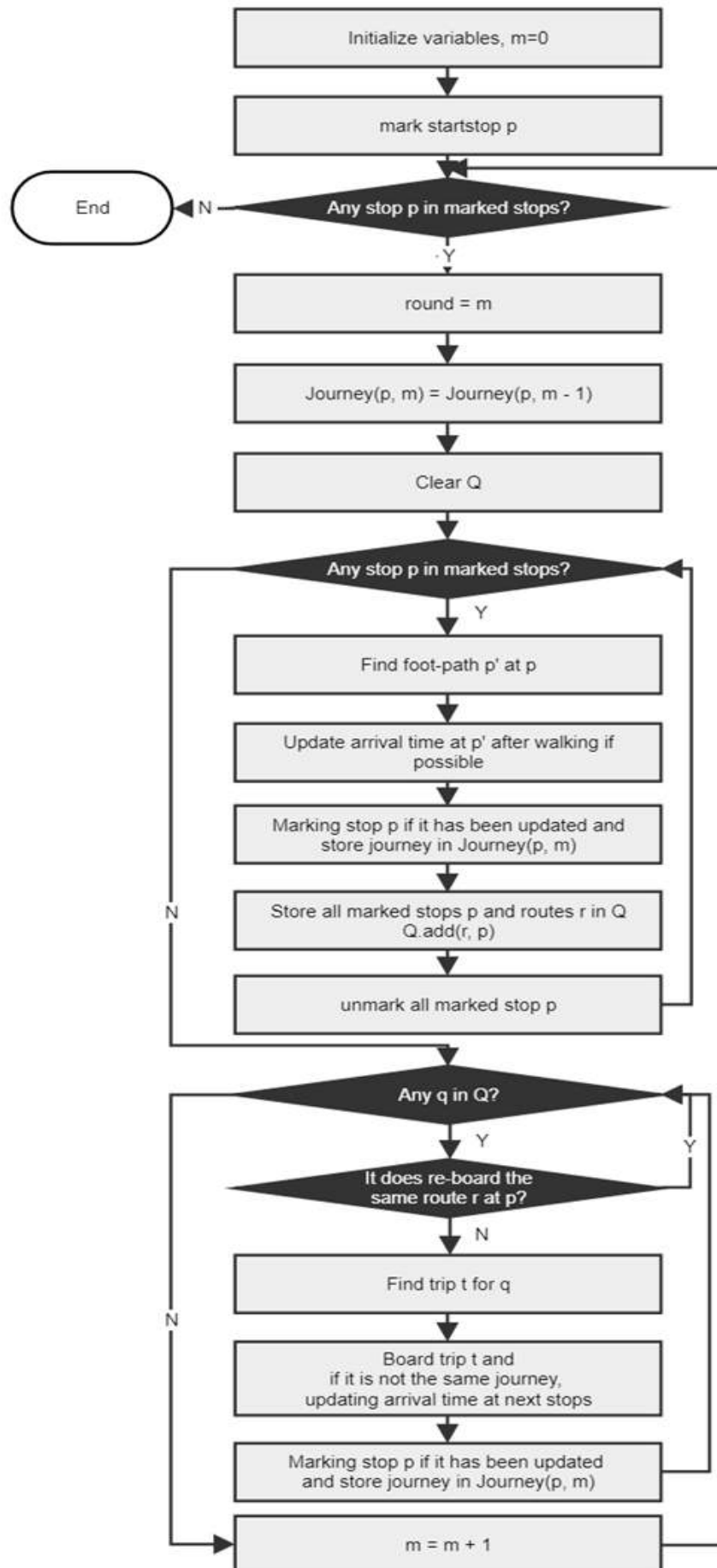
조건 1. [그림 2-41]의 (a)와 같이, R1 노선을 이용하여 한 번에 도착정류장에 도달한 경우와 R1 노선을 이용하다가 중간에 하차한 후, 다음 R1 노선 차량에 승차하는 경우는 노선 집합은 다르더라도, 단일 노선을 이용했기 때문에 동일한 경로로 인식함

조건 2. [그림 2-41]의 (b)와 같이, R1 - R2 노선을 이용하는 것은 동일하나, 환승 정류장만 다른 경우, 노선 집합은 동일하나 환승을 포함한 승/하차 정류장ID만 다를 경우에도 동일한 경로로 인식함

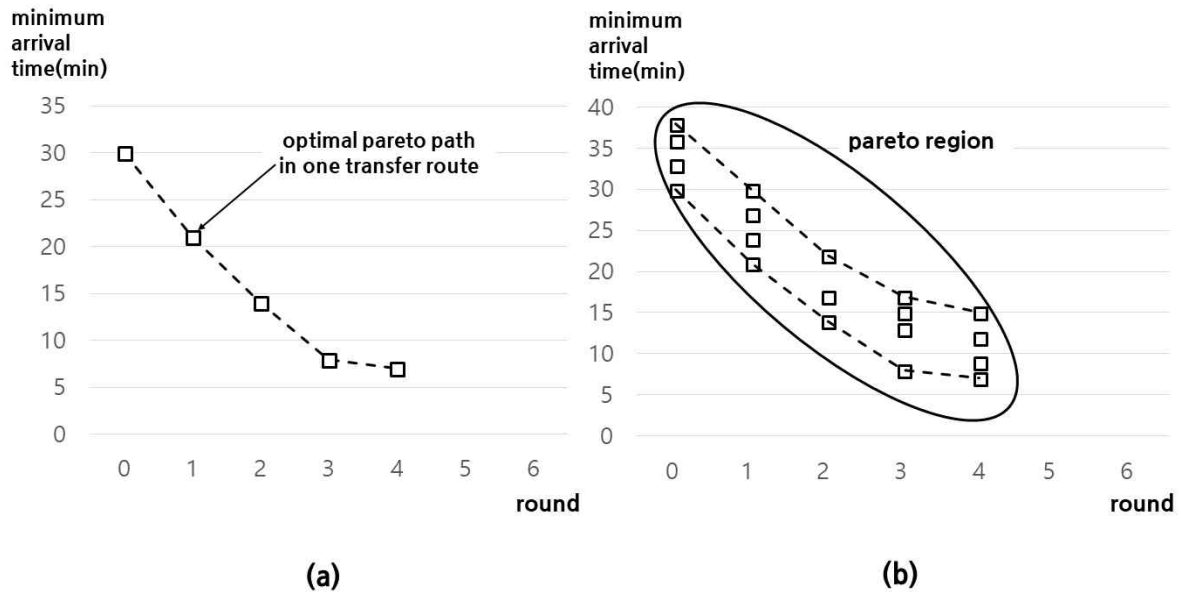


[그림 2-41] 다중경로 저장 시 발생하는 노선 중복 예시

- 본 알고리즘은 환승 시 발생하는 심리적 저항감을 이동시간으로 치환하여 최소 도착시간 산출 시 고려함
- 환승저항은 수단에 따라 다르게 적용하였고, 유형은 버스↔버스, 버스↔지하철, 지하철↔지하철 3가지로 구분하였음
- 수단별 환승저항 값은 연구자 및 승객의 선호에 따라 동적으로 적용 가능함
- 또한 현재 도보 환승링크가 직선거리로 구축되어 있기 때문에, 실제 이동거리와는 다소 차이가 있음
- 환승링크의 직선거리를 성인의 일반적인 걸음걸이인 1.2m/s로 나누면 도보이동시간이 실제 이동시간보다 적게 산출되기 때문에, 환승링크의 직선거리를 맨하튼 거리로 변환하여 이동시간을 연산하였음
- 성인, 노인, 어린이 등 보속의 차이 및 도보이동의 저항감을 알고리즘에 반영하기 위해, 일반 성인 기준의 도보 조정계수를 1이라고 가정하고, 0.2 ~ 1의 조정계수를 동적으로 입력하여 최적경로를 산출하도록 알고리즘을 개선함
- [그림 2-42]은 본 연구에서 개발한 대중교통 다중경로 탐색 알고리즘, 즉, 개선된 RAPTOR 알고리즘(I-RAPTOR)의 경로 탐색 방식을 설명한 순서도임

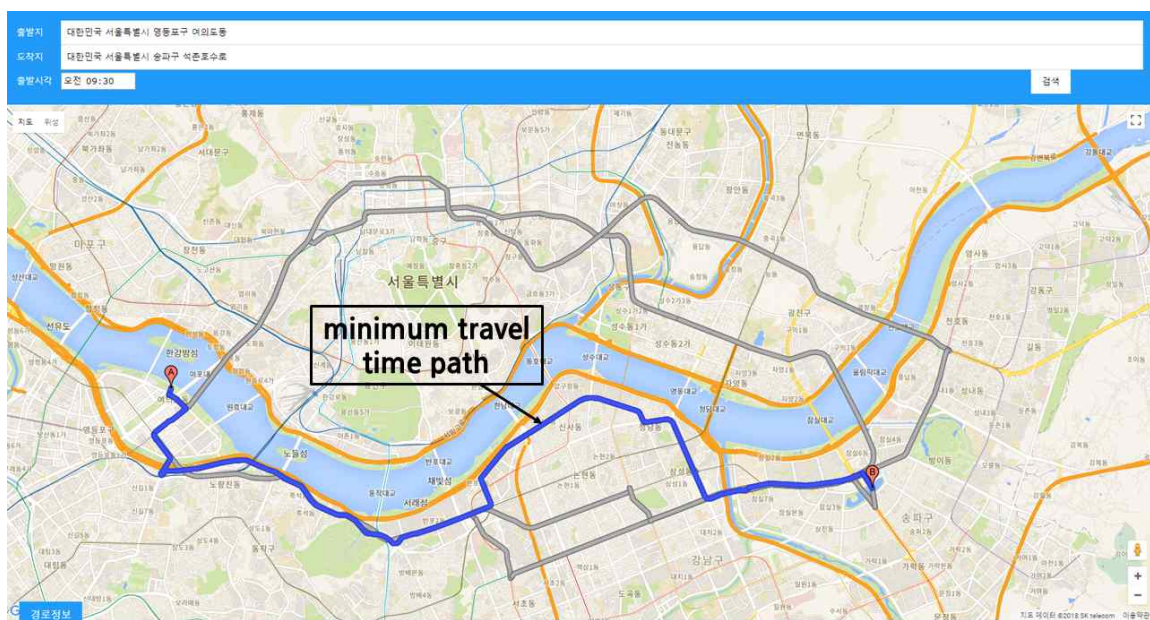


[그림 2-42] 개선된 RAPTOR의 경로 탐색 방식 순서도



[그림 2-43] 기존 RAPTOR와 개선된 RAPTOR의 최적 경로 탐색 비교

- [그림 2-43]은 본 연구를 통해 개발한 대중교통 경로 탐색 알고리즘의 해를 2차원 공간에 표현한 것임
- (a)는 1차 연도에 개발한 단일 최적경로 탐색 알고리즘의 해를 나타낸 것이고, (b)는 다중경로 탐색 알고리즘(개선도니 RAPTOR)의 해를 표현한 것임
- 다중경로 탐색 알고리즘은 각 라운드별로 k 개의 경로를 산출하고, 이로 인해 해가 선형으로 존재하지 않고 임의의 공간으로 존재함
- [그림 2-44]는 개선된 RAPTOR 알고리즘을 웹 버전으로 구현한 것임
- [그림 2-44]에서 파란색 경로는 단일 최적경로 탐색 알고리즘에서 산출한 경로와 동일하며, 회색 경로는 개선된 RAPTOR 알고리즘에서 산출한 다중경로임



[그림 2-44] 개선된 RAPTOR 알고리즘의 시각화 예시

- 스마트카드 거래내역의 실적경로와 알고리즘 산출경로 비교
 - 개선된 RAPTOR 알고리즘을 통해 산출되는 k 개의 경로가 대중교통 승객들의 이용가능성이 높은 경로인지, 최적경로에 해당하는지 등을 검증하기 위해 스마트카드 거래내역에 나타난 실적경로와 비교하는 실험을 진행하였음
 - [그림 2-45]은 환승저항을 고려하지 않은 경로 탐색 결과와 환승저항을 고려한 개선된 RAPTOR 알고리즘의 경로 탐색 결과에 대하여, 실적경로와의 유사도를 분석한 결과임
 - 스마트카드 거래내역에서 환승횟수가 0회인 경로 500개, 1회인 경로 500개 등 총 1000개의 경로를 무작위로 추출하고, 각 경로들의 O-D 및 출발시각을 알고리즘에 입력하여 산출된 경로가 실적경로에 해당하는지를 체크함
 - k 에 상관없이 환승저항을 고려한 경로 탐색 결과가 환승저항을 고려하지 않은 경로 탐색 결과보다 실제 승객이 이용한 경로를 더 잘 반영하는 것을 확인할 수 있음
 - 또한 k 가 5이상일 때부터는 실제 승객이 이용한 경로와 90%이상 일치하는 것을 확인함
 - 이를 통해 개선된 RAPTOR 알고리즘이 산출하는 다중경로가 대중교통 승객들이 이용할 가능성이 높은 최적경로를 산출한다고 판단할 수 있음



[그림 2-45] 환승저항 유무에 따른 경로 유사도 비교 실험 결과

- 수단별 환승저항 값을 적용하는 것이 경로 탐색 결과에 어떠한 영향을 주는지 확인하기 위해, [표 2-10]과 같이 7가지의 시나리오를 구성하여 실험을 진행하였고 결과는 [표 2-11]과 같음
- 시나리오 A는 환승저항이 없는 경우, B는 환승저항이 5분씩 부여된 경우, C는 버스에서 버스로 환승을 선호하지 않는 경우, D는 지하철간 환승을 선호하지 않는 경우, E는 버스 간 환승만 선호하는 경우, F는 모든 환승을 선호하지 않는 경우, G는 도보이동을 매우 싫어하는 경우를 의미함
- 오전 11시에 서울시립대 앞 정류장에서 강남역으로의 O-D에 대하여 경로 탐색을 진행하였고, k 값은 3으로 설정함

[표 2-10] 시나리오별 도보 조정계수 및 환승유형별 환승 저항값

시나리오	도보 조정계수	지하철 - 지하철 환승 저항값 (min)	버스-지하철 환승 저항값 (min)	버스-버스 환승 저항값 (min)
A	1	0	0	0
B	0.8	5	5	5
C	0.8	5	15	5
D	0.8	15	5	5
E	0.8	15	5	15
F	0.8	15	15	15
G	0.3	5	5	5

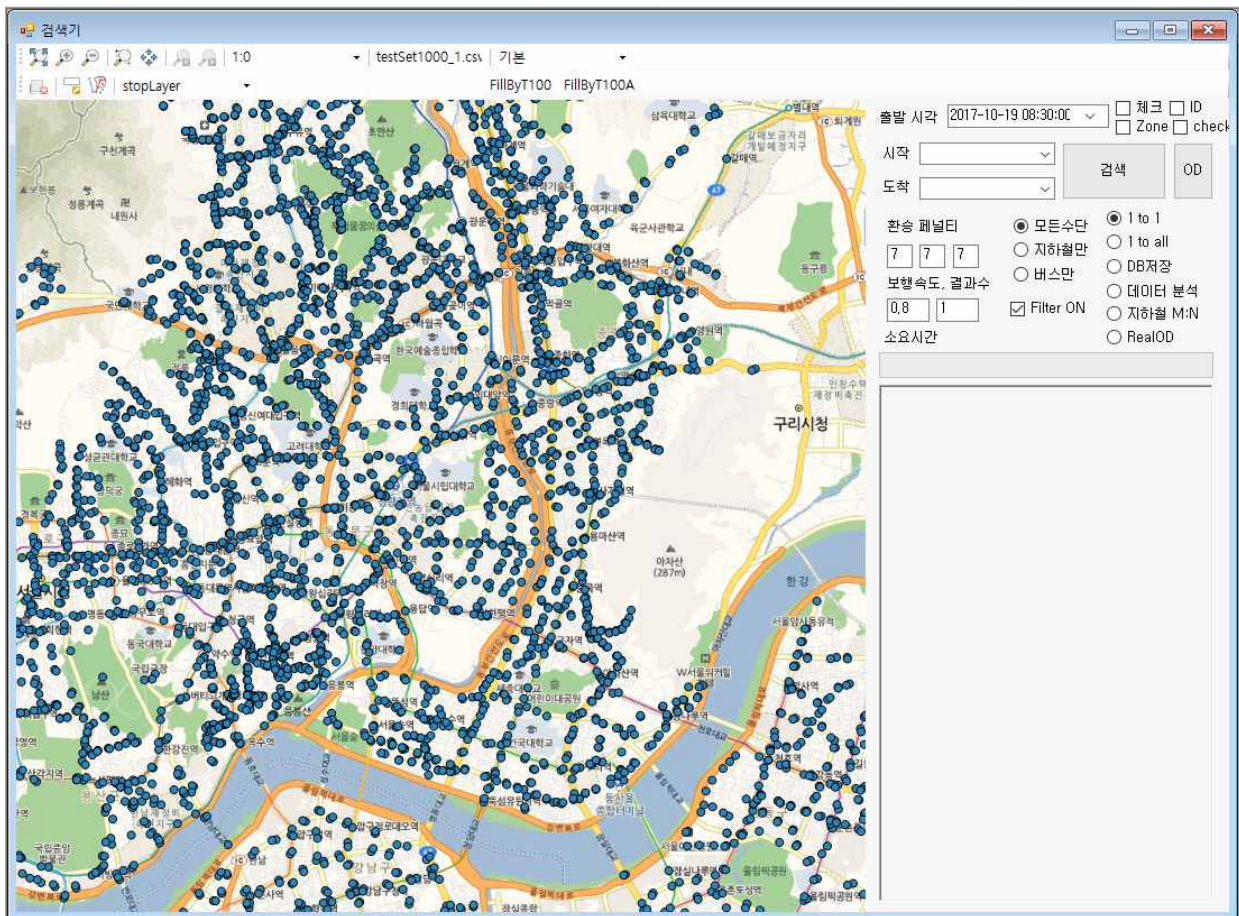
[표 2-11] 시나리오별 이동경로, 총 이동시간, 도보 이동시간 예시

시나리오	이동경로	총 이동시간	도보 이동시간
A	121 → 성동 02 → 분당선 → 2호선	41m	7m 35s
	420 → 9711A → 421	42m 55s	8m 13s
	420 → 경의중앙선 → 9711A → 145	43m 29s	8m 13s
B	121 → 분당선 → 2호선	54m	4m 20s
	420 → 경의중앙선 → 421	56m 55s	8m 34s
	420	1h 52s	3m 22s
C	420	1h 52s	3m 22s
	420 → 145	1h 3m 29s	41s
	1227 → 145	1h 3m 29s	1m 38s
D	420 → 경의중앙선 → 421	56m 55s	8m 34s
	420	1h 52s	3m 22s
	121 → 분당선 → 360	1h 1m 16s	11m
E	420 → 145	1h 5m 38s	2m 50s
	1227 → 145	1h 5m 38s	6m 45s
	420	1h 11m	14m
F	420	1h 52s	3m 22s
	420 → 145	1h 13m 29s	41s
	1227 → 2호선	1h 13m 29s	1m 38s

○ 실시간 대중교통 다중경로 탐색 프로그램 개발

• 개요

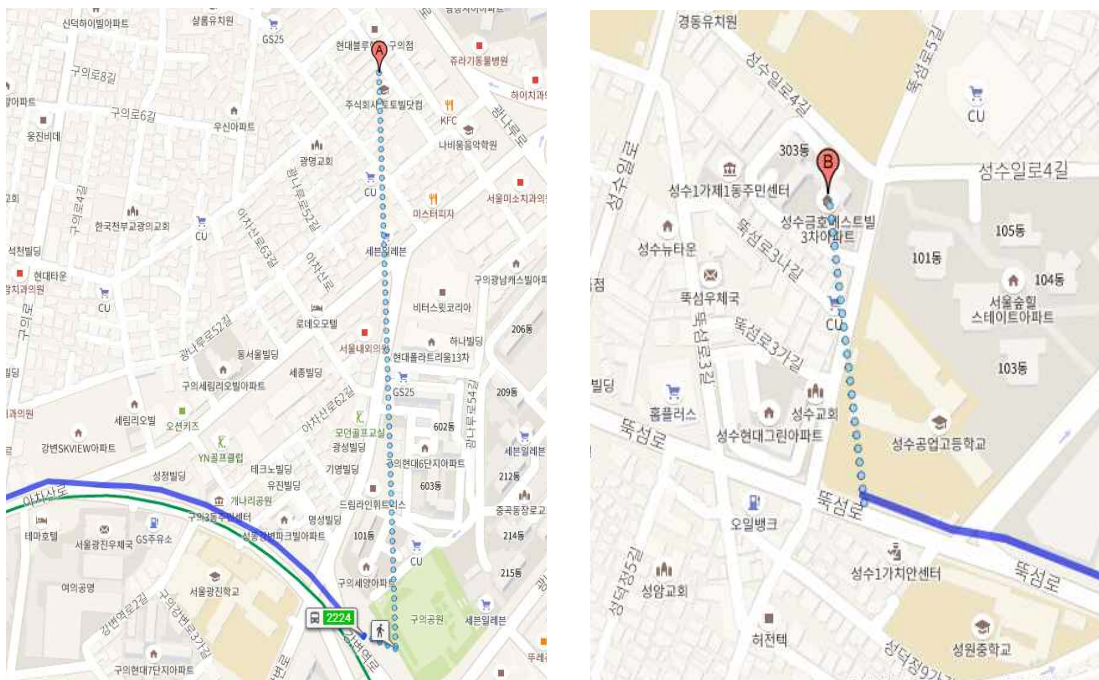
- 개선된 RAPTOR 알고리즘을 이용한 대중교통 경로 탐색 프로그램을 개발함
- C# 프로그래밍 언어를 이용하였고 GIS 라이브러리로는 SharpMap을 사용함
- 사용자가 출발 정류장, 도착 정류장, 출발시각, 수단별 환승저항값, 도보 조정계수를 입력할 수 있도록 GUI를 구성하였고, [그림 2-44]는 프로그램의 캡처 화면에 해당함
- 정류장 및 노선 등 대중교통 네트워크를 가시화할 수 있고, 파라미터 설정 및 경로 탐색 결과에 대한 리포팅은 프로그램의 오른쪽 화면에서 가시화됨
- [그림 2-46]와 같이 마우스 우클릭을 통해 출발 정류장과 도착 정류장을 지도에서 직접 선택할 수 있으며, 특정 정류장을 지정하지 않고 건물 및 임의의 포인트를 출발 지역으로 선택했다면, 700m 이내에 있는 정류장과 도보링크를 생성하고 도착지에서 700m 이내에 있는 정류장과 도보링크를 자동적으로 생성하여 경로 탐색을 진행함
- [그림 2-47]은 사용자가 출발지와 도착지를 입력하였을 때 생성되는 도보링크의 예시를 나타냄



[그림 2-46] 실시간 대중교통 다중경로 탐색 프로그램 예시



[그림 2-47] 출발지 및 도착지 선택 화면



[그림 2-48] 출발지와 도착지에서 주변 정류장까지의 도보링크 생성 예시

(나) 개인별 통행경로 선호도 분류기 개발

○ 머신러닝을 이용한 대중교통 통행사슬 기반 개인별 통행경로 선호도 분류 모델 개발

- 개요
 - 동일한 O-D라도, 대중교통 승객들의 경로 선택은 매우 다양하게 나타남
 - [그림 2-49]은 상봉역-서울역 구간을 이용한 3명의 승객의 스마트카드 데이터 예시로, 경로 선택 유형은 데이터에 포함되어 있지 않은 컬럼이지만 설명을 위해 삽입함
 - 지하철만 이용한 승객, 2개의 버스 노선을 이용한 승객, 환승 없이 단일 버스 노선을 이용한 승객이 있음
 - 만약, 개별 승객의 경로 선택 유형을 추정할 수 있다면, 개인 행태를 고려한 통행패턴 분석이 가능하고, 노선 조정에 따른 미시적 수요 분석이 가능함
 - 이에 본 연구에서는 대중교통 경로 탐색 알고리즘과 스마트카드 거래내역에 나타난 승객별 통행정보를 이용하여, 딥러닝을 활용한 대중교통 승객 경로 선택 유형 분류 모델을 개발함

카드ID	출발지	도착지	경로정보	경로 선택 유형
1	상봉역	서울역	7호선	??
2	상봉역	서울역	202,721	??
3	상봉역	서울역	121	??

[그림 2-49] 동일 O-D에 대한 승객별 실적경로 예시

- 접근방법
 - 지도학습 방식의 머신러닝을 위해서는 경로 선택 유형을 알고 있는 승객의 교통카드 데이터, 즉 레이블이 된 참값이 필요함
 - 하지만 교통카드 데이터만으로는 승객의 경로 선택 유형을 알 수 없고, 개인의 선호도와 연계된 교통카드 데이터가 필요한데 이는 현 시점에 취득이 불가능함
 - 이에 본 연구에서는 앞서 개발한 경로의 속성을 분석할 수 있는 다중경로 탐색 알고리즘을 이용하여 개별 경로에 대한 선호 유형을 분석하고 이를 활용하여 훈련 데이터셋을 생성하는 접근방법을 고안함
- 훈련 데이터셋 생성
 - ① 대중교통 통행특성 분석 및 이용객들의 경로 선택 조건 도출
 - ② 다중경로 탐색 알고리즘을 통한 개별 경로의 유형 분석
 - ③ 유형이 분석된 경로를 실제로 이용한 대중교통 승객 데이터 추출
 - ④ 추출된 승객들의 경로 선택 유형에 해당 승객이 이용한 경로의 유형 할당
 - ⑤ 경로 유형이 할당된 개별 승객의 데이터를 학습을 위한 입력 데이터로의 변환

- 대중교통 통행특성 분석을 통해 본 연구에서는 승객의 경로 선택 유형을 최소 이동시간 선호, 도보 선호정도, 수단별 환승 선호정도의 조합을 고려한 총 18개의 범주를 분류함
- [표 2-12]는 18개의 경로 선택 유형을 분류하기 위한 파라미터 값을 나타냄
- 각 파라미터 값은 경로 선택 모형 및 환승저항 관련 기존 연구 결과와 RAPTOR로부터 산출되는 경로의 결과가 달라지는 임계값에 근거하였음

[표 2-12] 경로 선호도를 분류하기 위한 범주별 파라미터 값

범주	도보 조정 계수	지하철-지하철 환승 저항값(분)	지하철-버스 환승 저항값(분)	버스-버스 환승 저항값(분)
1	1	15	15	15
2	1	7	7	7
3	1	3	3	3
4	1	0	0	0
5	1	15	0	0
6	1	15	15	0
7	0.66	15	15	15
8	0.66	7	7	7
9	0.66	3	3	3
10	0.66	0	0	0
11	0.66	15	0	0
12	0.66	15	15	0
13	0.16	15	15	15
14	0.16	7	7	7
15	0.16	3	3	3
16	0.16	0	0	0
17	0.16	15	0	0
18	0.16	15	15	0



경로	이동시간 (분)	도보이동 거리(m)	버스 이용횟수	지하철 이용횟수
A	40	350	1	1
B	30	500	2	1

A경로: 환승 및 도보이동 비선호

B경로: 최단시간 선호

[그림 2-50] 다중경로 탐색 알고리즘을 이용한 경로 분석 및 유형 결정

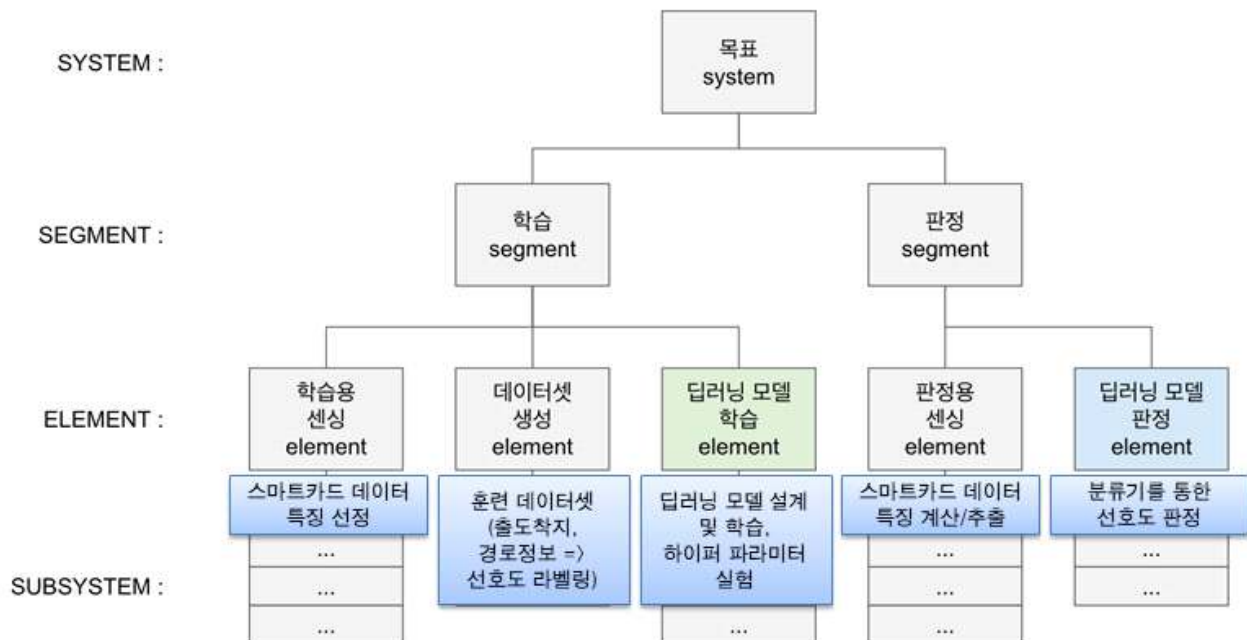
- [그림 2-50]은 다중경로 탐색 알고리즘을 이용하여 특정 O-D에서의 이용 가능한 경로들을 도출하고, 각 경로의 속성을 분석하여 경로의 유형을 결정하는 과정을 나타냄
- 스마트카드 거래내역에서 A경로를 이용한 승객들이 있다면, 해당 승객들은 환승 및 도보이동 비선호의 경로 선택 유형이 할당되고, B경로를 이용한 승객들이 있다면, 최단시간 선호 유형이 할당됨
- 이렇게 경로 선택 유형이 레이블된 데이터가 생성되면, 학습을 위한 입력 데이터로의 변환을 수행하는데, 데이터 구조는 아래와 같고, [그림 2-51]는 예시에 해당함
- 출발지, 도착지, 도보 제외 이동시간, 환승 제외 도보 이동거리, 지하철간 환승 도보 이동거리, 버스-지하철간 환승 도보 이동거리, 버스간 환승 도보 이동거리, 버스이용횟수, 지하철이용횟수, 경로 선택 유형

	COX	COY	CDX	CDY	RestTime	WdRest	WdS2S	WdS2B	WdB2B	SubwayCount	BusCount	ParamID
1	22	28	23	28	156	904	0	0	0	0	1	0
2	22	28	23	28	1595	286	0	0	67	0	2	6
3	22	28	23	28	292	688	0	0	0	0	1	4

[그림 2-51] 입력 데이터 구조

• 시스템 개요

- [그림 2-52]은 개인별 통행경로 선호도 분류 모델의 시스템을 나타냄
- 분류 모델로는 DNN(Deep Neural Network)를 이용하였고, [표 2-13]은 승객의 경로 선호도 분류 모델의 방법론 세부 단계별 내용을 정리한 것임

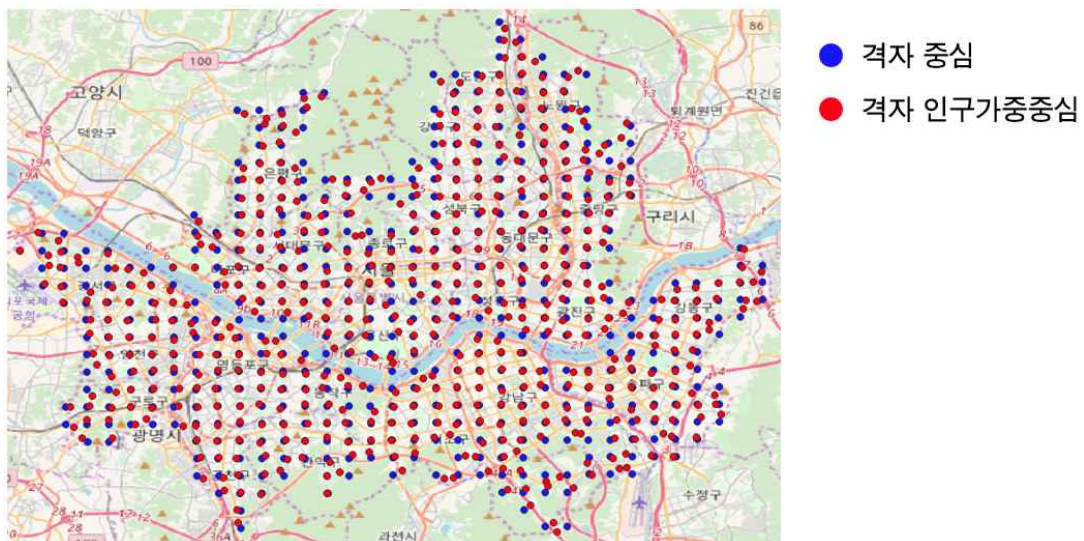


[그림 2-52] 승객의 경로 선호도 분류 모델 시스템 개요

[표 2-13] 분류 모델 세부 단계별 입/출력자료

순서	내용	입력자료	출력자료
1	스마트카드를 이용한 통행별 특징 추출	스마트카드 트립체인	통행특징 (9개의 특징 추출) 경로 선택 조건
2	대중교통 다중경로 탐색 알고리즘을 이용한 경로 분석	출발지/도착지, 파라미터 (환승, 도보 선호 정도 등)	경로별 속성 (경로의 유형 분류를 위한 특징 추출) 경로 유형 분류
3	승객별 경로 선택 유형 레이블	스마트카드 트립체인, 유형이 분석된 경로 정보	경로 선택 유형이 레이블 된 승객의 스마트카드 데이터
4	딥러닝 기반 학습을 위한 훈련 데이터셋 생성	경로 선택 유형이 레이블 된 승객의 스마트카드 데이터	원-핫 인코딩을 적용한 훈련 데이터셋
5	딥러닝 신경망 모델 설계 및 하이퍼 파라미터 테스트	훈련 데이터셋, 하이퍼파라미터	경로 선택 유형 분류 모델
6	승객의 통행경로 선호도 분류	스마트카드 트립체인, 분류모델	분류 결과 및 정확도

- 경로 유형 분류
 - 본 연구에서는 1km 크기의 격자를 설정하고 출발 정류장과 도착정류장이 포함된 격자 내 인구가중중심을 승객의 출발지와 도착지로 가정함
 - [그림 2-53]은 집계구 인구 자료를 이용하여 계산한 격자별 인구가중중심과 격자 중심의 차이를 나타낸 그림임



[그림 2-53] 격자 중심과 인구가중중심의 비교

경로 ID	경로 정보	오전8시 순위	오후1시 순위	오후6시 순위	오후10시 순위	평균순위
1	1호선,5호선	1	6	1	1	2,25
2	1호선,362	2	6	4	2	3,5
3	1호선,영등포11	3	1	3	6	3,25
4	1호선,9호선	4	4	2	3	3,25
5	경의중앙선,5호선	5	2	6	6	4,75
6	1호선,503	6	3	5	6	5
7	동대문05,5호선	6	6	6	4	5,5
8	420,5호선	6	5	6	5	5,5

[그림 2-54] 최소 이동시간 선호 범주의 경로별 순위 산출 예시

- I-RAPTOR 알고리즘은 운행시간표를 기반으로 경로를 탐색하기 때문에 출발시각에 따라 경로 산출결과가 달라지는 특징이 있음
- 이에 동일한 출발지, 도착지, 동일범주(파라미터)일지라도 시간대에 따라 다른 결과가 산출되므로 오전 8시, 오후1시, 오후6시, 오후10시 총 4개의 출발시각에 따른 경로를 산출하고 이를 종합하여 경로 선호 유형으로 결정함
- 각 시간대별로 5개의 경로를 탐색하여 이를 이동시간이 적은 순서대로 1위~5위까지 순위를 부여하고 순위를 부여받지 못한 경로는 6위를 부여함
- [그림 2-54]는 청량리에서 출발하여 여의도역에 도착하는 경로 중 최소 이동시간을 선호하는(도보 조정계수 1, 환승저항값 0) 범주를 이용하여 시간대별로 탐색하고 모든 시간대의 경로 선호 정도를 결정하는 예시임
- 오전8시를 출발시각으로 설정하였을 때 경로ID 1~5번 순서대로 1위~5위를 부여되었고, 오후 1시를 출발시각으로 설정하였을 때는 경로ID {3, 5, 6, 4, 8} 순서대로 1~5위의 순위가 부여됨
- 모든 시간대의 순위가 부여되면 각 경로별로 평균 순위를 계산함
- ‘1호선-5호선’을 이용한 경로는 최소 이동시간을 선호하는 범주에서는 2.25위의 순위를 가진다고 해석할 수 있음
- 이와 같은 방식으로 18개의 선호도 분류 범주에 대해 동일한 과정을 진행하여 각 범주별 평균 순위를 산출함
- [그림 2-55]은 경로의 선호도 분류 범주에 따른 평균 순위와 최종 경로의 선호도 범주를 결정하는 방법을 설명하는 예시임
- ‘1호선-5호선’ 경로는 최소 이동시간 선호 범주에서는 2.25위, 최소 도보이동선호 범주에서는 3위, 최소 환승선호 범주에서는 2.75위, 지하철 이동선호 범주에서는 5위가 산출됨
- 18개 범주의 평균 순위를 비교하여 가장 낮은 평균 순위가 산출된 범주를 경로의 최종 선호도 범주로 결정함
- ‘1호선-5호선’은 최소 이동시간 선호 범주가 가장 순위가 낮기 때문에 해당 경로는 최소 이동시간을 선호하는 승객이 이동하는 경로로 판단함

경로 ID	경로 정보	파라미터1 평균 순위 (최소 이동시간 선호)	파라미터2 평균 순위 (최소 도보이동 선호)	파라미터3 평균 순위 (최소 환승선호)	파라미터4 평균 순위 (지하철 이동선 호)	최종 파라미터
1	1호선,5호선	2,25	3	2,75	5	1
2	1호선,362	3,5	2	4,3	1,5	4
3	1호선,영등포11	1	2,5	2,5	3	1
4	1호선,9호선	2,1	1,6	3,7	6	2
5	경의중앙선,5호선	3,1	3,7	2,4	4,6	3
6	1호선,503	5,3	1,7	3,2	5,1	2
7	동대문05,5호선	2,25	3,5	3,25	4,75	1
8	420,5호선	5	5,5	5,5	2,5	4

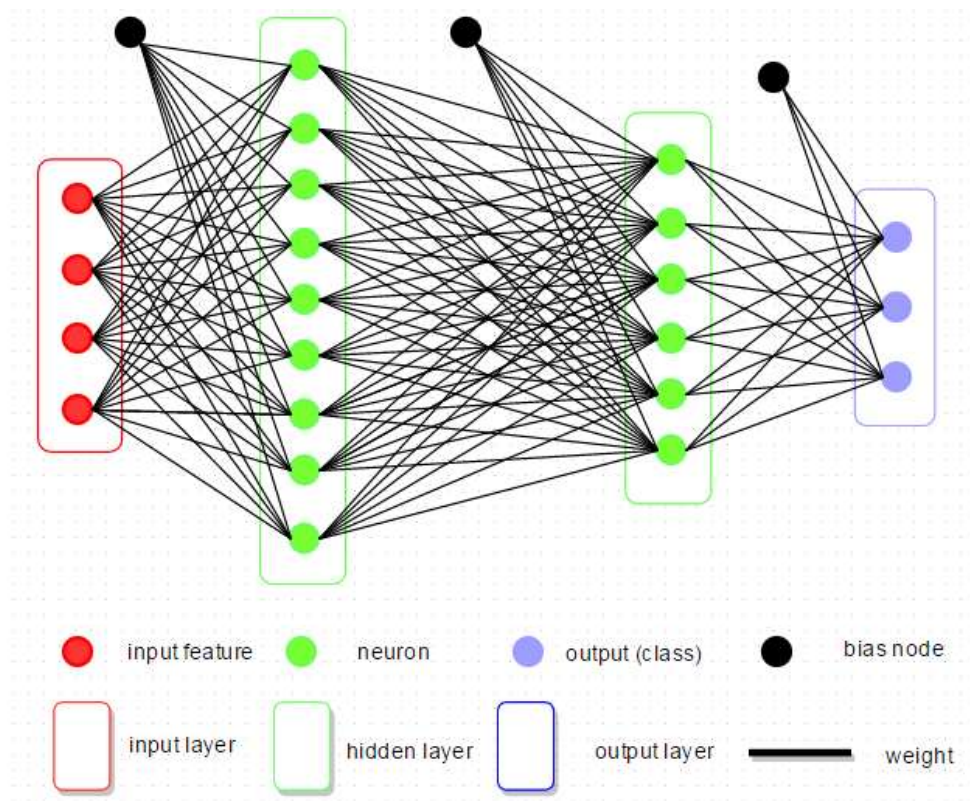
[그림 2-55] 경로별 범주 평균 순위 및 최종 선호도 범주 결정 예시

- 승객별 경로 선택 유형 레이블
 - 승객의 경로 선택 유형은 해당 승객이 이용한 경로의 유형을 통해 할당됨
 - [표 2-14]은 경로 선택 유형이 결정된 승객들을 바탕으로 범주별로 통행량 및 통행비율을 나타낸 것임
 - 2017년 10월 스마트카드 거래내역의 약 2천 6백만 건의 통행사슬에 대하여 경로 선택 유형을 결정하였고, 이 때 분석된 경로는 약 3백만 건임

[표 2-14] 범주별 통행사슬과 통행 경로의 이용 횟수 및 비율

범주 ID	통행사슬(개)	통행 경로(개)	통행사슬 비율	통행 경로 비율
0	11,454,413	758,904	44.1%	23.8%
1	762,082	87,644	3.0%	2.8%
2	669,708	76,854	2.6%	2.4%
3	407,231	48,807	1.6%	1.5%
4	295,347	51,993	1.1%	1.6%
5	1,206,429	227,281	4.7%	7.3%
6	22,108	15,333	0.1%	0.5%
7	3,673,154	522,457	14.2%	16.5%
8	188,079	42,402	0.7%	1.3%
9	211,403	43,081	0.8%	1.3%
10	202,305	36,014	0.8%	1.1%
11	149,227	33,363	0.6%	1.0%
12	1,093,060	234,774	4.2%	7.2%
13	34,637	24,135	0.1%	0.7%
14	4,729,763	779,773	18.3%	24.7%
15	143,281	43,207	0.6%	1.3%
16	63,721	19,419	0.2%	0.6%
17	589,352	135,946	2.3%	4.4%
합계	25,895,300	3,181,387	100	100

- 머신러닝을 이용한 개인별 통행경로 선호도 분류 모델
 - 승객별 경로 유형을 레이블하여 훈련 데이터셋 생성이 완료된 후에는, 딥러닝 신경망을 설계하고 모델 테스트를 수행하였음
 - Tensorflow 기반 Keras 라이브러리를 이용하여 분류 모델을 개발하였으며, 활성화 함수는 elu, 손실함수는 3개 이상의 범주로 분류할 때 좋은 성능을 보이는 categorical_crossentropy, 옵티마이저는 최근 가장 좋은 성능을 보이는 adam을 이용함
 - 전체 데이터셋의 80%를 학습에 사용하였고, 20%는 모델의 정확도 검증에 활용함
 - [표 2-15]는 모델별 테스트 결과이며, 분류 정확도가 약 89%인 모델을 도출할 수 있었음



[그림 2-56] 딥러닝 신경망 예시

[표 2-15] 모델별 분류 정확도 테스트 결과

은닉층 개수	은닉층별 뉴런수	분류 정확도
3	512, 256, 256	85.8%
4	512, 512, 256, 256	87.79%
6	512, 512, 512, 256, 256, 256	88.77%
8	256, 256, 256, 256, 256, 128, 128, 128,	88.11%
12	모두 256	87.33%

○ I-RAPTOR를 이용한 대중교통 승객 경로 선택 유형 분류 모델 개발

- 스마트카드 자료에서 훈련 데이터셋을 생성하기 위해 총 18개의 선호 범주 유형으로 구분하여 경로별 선호 범주를 결정함
- I-RAPTOR를 이용한 대중교통 승객의 경로 선택 유형을 분류하는 과정에는 18개의 선호 범주 유형 중 통행사슬 비율이 1%미만인 3가지 유형을 제외하고 총 15개의 범주를 이용하여 선호 유형을 분류함
- [표 2-17]은 I-RAPTOR에서 승객의 경로 선택 유형을 분류하기 위한 15개의 범주별 특징을 정리한 것임
- 도보 선호 정도를 기준으로 나눈다면 범주ID 0~6은 도보 이동을 선호하는 범주, 범주ID 6~11은 도보 이동이 보통인 범주, 나머지는 도보 이동을 비 선호하는 범주로 구분 할 수 있음
- 각 범주ID별로 선호 정도가 높으면 ‘O’, 선호 정도가 보통이면 ‘△’, 선호 정도가 나쁘면 ‘X’ 로 나타냈으며, [표 2-17]에 표시되어 있음

[표 2-17] 15개 범주별 도보 조정계수 및 환승 저항

범주 ID	도보 속도 (m/s)	버스-버스 환승 저항(분)	버스-지하철 환승 저항(분)	지하철-지하철 환승 저항(분)	환승 선호	도보 이동 선호
0	1.2	30	30	30	X	O
1	1.2	15	15	15	X	O
2	1.2	7	7	7	△	O
3	1.2	3	3	3	O	O
4	1.2	0	0	0	O	O
5	1.2	15	15	3	△	O
6	0.8	30	30	30	X	△
7	0.8	15	15	15	X	△
8	0.8	7	7	7	△	△
9	0.8	3	3	3	O	△
10	0.8	0	0	0	O	△
11	0.8	15	15	3	△	△
12	0.2	30	30	30	X	X
13	0.2	15	15	15	X	X
14	0.2	15	15	3	△	X

- 15개의 선호 범주를 전체 스마트카드 자료에 적용하였고, 범주ID별 통행사슬 비율 및 통행량 비율은 [표 2-18]에 정리되어 있음
- [표 2-18]의 통행사슬 비율을 확인해보면, 도보 이동은 선호하지만 환승을 선호하지 않는 승객이 가장 많았으며, 도보 이동과 환승 모두 선호하지 않는 승객이 그 다음으로 많았음
- 범주ID가 13인 경로는 통행사슬의 개수는 많지 않지만 통행사슬을 이용한 승객이 많아 통행 경로의 비율이 높은 것을 확인할 수 있음
- 도보 이동의 관점에서 확인하면 도보 이동을 선호하는 범주(0~5)가 전체 통행사슬의 50% 이상을 차지하는 것으로 보아 대부분의 승객이 도보 이동보다는 교통수단의 환승을 더 비 선호하는 것으로 판단할 수 있음

[표 2-18] 15개 범주ID별 통행사슬 및 통행량 비율

범주 ID	통행사슬(개)	통행 경로(개)	통행사슬 비율	통행 경로 비율
0	9,377,979	196,863	36%	6%
1	742,195	67,256	3%	2%
2	778,259	119,406	3%	4%
3	624,695	162,145	2%	5%
4	509,350	151,030	2%	5%
5	1,092,020	54,762	4%	2%
6	3,085,971	182,955	12%	6%
7	370,649	112,782	1%	3%
8	559,101	209,236	2%	6%
9	626,861	256,578	2%	8%
10	449,598	187,639	2%	6%
11	1,036,161	79,608	4%	2%
12	4,875,661	728,932	19%	22%
13	1,049,955	575,826	4%	18%
14	839,632	164,406	3%	5%
합계	26,018,087	3,249,424	100%	100%

- I-RAPTOR를 통해 15개의 범주로 경로별 선호 유형을 결정하였지만, 약 10%의 경로는 유형을 파악하는데 한계가 있음
- [표 2-19]는 I-RAPTOR를 통해 경로별 선호 유형을 분류한 결과를 요약한 것임
- 격자 단위의 출발지와 도착지를 이용하여 탐색을 진행한 결과 약 90%의 경로에 선호 유형을 부여할 수 있었음
- 다만, 승객의 출발 정류장과 도착정류장을 격자 단위로 출발지와 도착지로 변환하는 과정에서 오류가 발생하여 경로를 분류할 수 없었음

- 따라서 경로를 분류할 수 없는 10%의 경로를 대상으로 출발 정류장과 도착 정류장을 I-RAPTOR에 입력하여 15개의 범주로 다시 분류함
- 정류장 단위로 출발지와 도착지를 입력하여 경로별 선호 유형을 탐색한 결과 4.2%의 경로에 선호 유형을 부여할 수 있었음
- 결과적으로 I-RAPTOR에 승객의 출발지와 도착지를 입력하여 경로별 선호 유형을 분류한 결과 총 94.5%의 경로에 선호 유형을 부여함
- [그림 2-57]은 스마트카드 자료에 경로별로 선호 유형이 부여된 것임

[표 2-19] I-RAPTOR의 경로 선호 유형 분류 결과 요약

		통행사슬(개)	통행 경로(개)	통행사슬 비율	통행 경로 비율
분류 가능	계산해 놓은 경로에 있음	26,018,087	3,249,424	90.3%	62.5%
	정류장 단위로 계산 가능	1,224,915	762,055	4.2%	14.7%
분류 불가	동일존 이동	173,492	84,283	0.6%	1.6%
	동일 승·하차 정류장	141,456	48,272	0.5%	0.9%
	계산해 놓은 경로에 없음	1,264,099	1,052,381	4.4%	20.3%
합계		28,822,049	5,196,415	100.0%	100.0%

통행사슬ID	첫탑승정류장ID	마지막하차정류장ID	범주ID
1	18	215	0
3	122000148	123000068	12
5	15	50	1
6	50	8	0
7	119900018	119900010	0
12	2642	38	7
13	38	2642	5
15	2642	38	7
20	2	61	5
23	116000046	117000038	0
25	1704	2	0
28	2	77	0
29	2546	331	5

[그림 2-57] 통행사슬별 범주ID 부여 예시

(다) 개인별 통행경로 선호도를 고려한 통행배정 기법 개발

○ 스마트카드 거래내역을 활용한 에이전트 단위 통행배정

- 기존 통행배정 방법은 확률적으로 승객이 탑승한 노선을 배정하는 방식으로 진행되나, 본 연구에서는 I-RAPTOR를 이용하여 탐색된 경로에 승객을 배정하는 새로운 방식의 통행배정 기법을 개발함
- 먼저 스마트카드 자료에서 승객의 출발 정류장, 도착 정류장, 출발 시각, 경로 선호 유형을 추출함
- 스마트카드 자료에서 승객별로 추출한 정보를 I-RAPTOR에 입력하여 경로를 탐색하고, 탐색된 경로에 승객을 배정하여 통행배정을 진행함
- I-RAPTOR에서 탐색된 경로 중 승객은 최소 이동시간이 소요되는 경로를 선택하여 이동한다고 가정함
- [그림 2-58]는 스마트카드에서 추출한 정보를 I-RAPTOR에 입력하여 통행배정을 진행하는 예시임
- [그림 2-58]에서 동일한 출발지(상봉역)에서 도착지(서울역으로) 이동하는 승객 1,2,3은 선호 유형에 따라 다른 경로에 배정되는 것을 확인할 수 있음

실제 승객과 동일한 에이전트 생성

I-RAPTOR로 찾은 이용 가능한 경로들

승객 ID	출발지	도착지	선호 유형		경로 정보	이동 시간 (분)	도보 이동 거리(m)	버스 이용 횟수	지하철 이용 횟수
1	상봉역	서울역	A	→	7호선	50	350	0	1
2	상봉역	서울역	B	→	202,721	43	500	2	0
3	상봉역	서울역	C	→	121	55	100	1	0
4	상봉역	목동아파트	B	→	1호선,4호선	37	250	0	2
5	상봉역	목동아파트	C	→	420	50	50	1	0

[그림 2-58] I-RAPTOR를 이용한 통행배정 예시

- I-RAPTOR를 이용한 통행배정 결과와 실제 승객의 이용경로를 비교하여 검증함
- 통행배정은 선호 유형을 고려하는 것에 따른 효과와 출발 정류장과 도착 정류장을 격자 단위의 출발지와 도착지로 변환하여 I-RAPTOR에 적용하는 것에 대한 효과를 확인하기 위해 총 4개의 시나리오를 세워 실험을 진행함
- [표 2-20]는 통행배정을 하기 위한 4개의 시나리오를 정리한 것임
- Model1은 출발 정류장과 도착 정류장을 격자 단위의 출발지와 도착지로 변환하여 I-RAPTOR에 적용하고 승객의 선호 유형을 고려한 시나리오, Model 2는 승객의 선호 유형을 고려하지 않은 시나리오임
- Model3은 출발 정류장과 도착 정류장을 I-RAPTOR에 적용하고 승객의 선호 유형을 고려한 시나리오, Model4는 승객의 선호 유형을 고려하지 않은 시나리오임

[표 2-20] 통행배정의 4가지 시나리오

출발 · 도착 분류 기준 적용 여부	출발지 · 도착지 존 중심 이용	출발지 · 도착지 탑승 · 하차 정류장 이용
분류 적용	Model 1	Model 3
분류 미적용	Model 2	Model 4

- 통행 배정 결과와 실제 승객의 이동경로의 유사성 검증을 위해 본 연구에서는 다음의 4가지 지표를 이용함

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (\text{식 2-12})$$

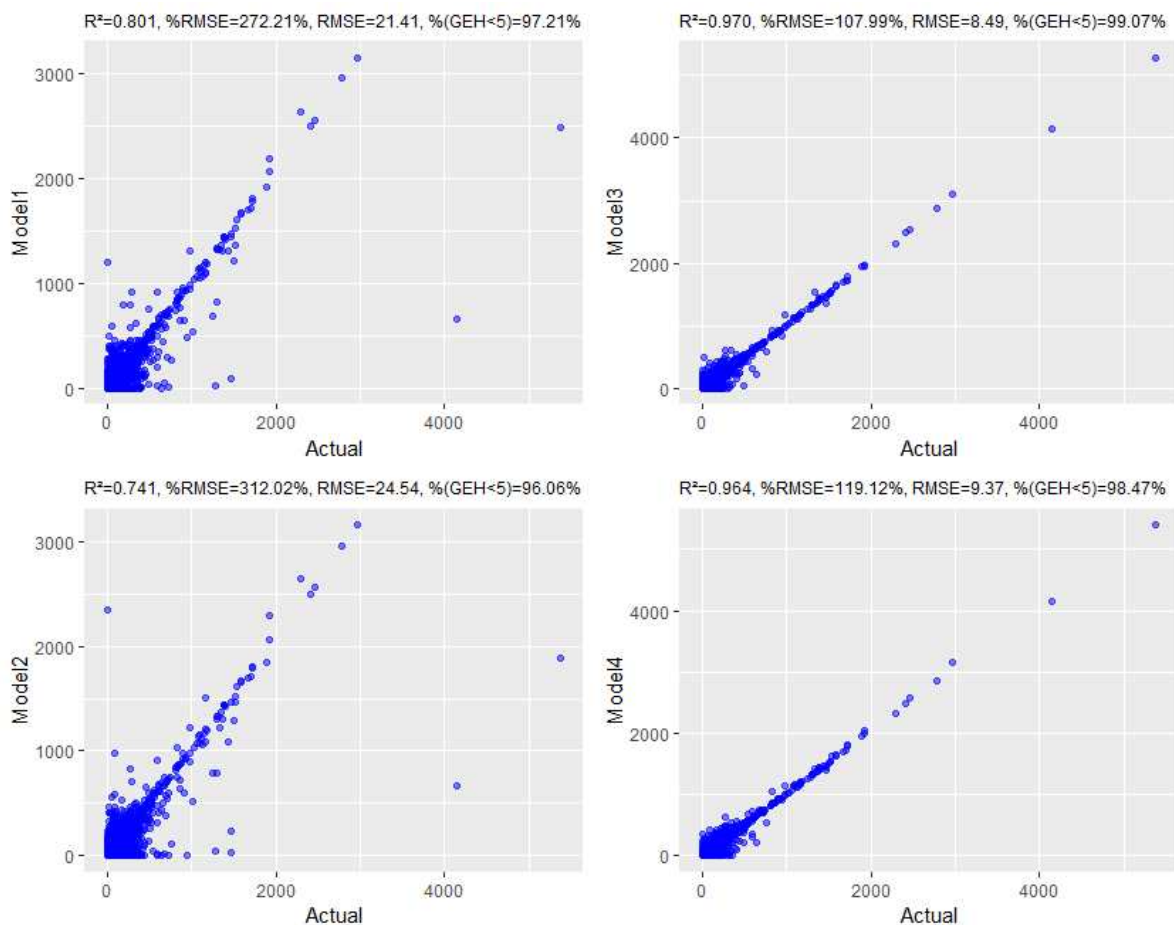
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Model_i - Actual_i)^2}{N}} \quad (\text{식 2-13})$$

$$\%RMSE = \frac{RMSE}{\left(\frac{\sum_{i=1}^N Actual_i}{N}\right)} \times 100 \quad (\text{식 2-14})$$

$$GEH = \sqrt{\frac{(Model_i - Actual_i)^2}{\frac{(Model_i - Actual_i)}{2}}} = \frac{|Model_i - Actual_i|}{\sqrt{\frac{(Model_i - Actual_i)}{2}}} \quad (\text{식 2-15})$$

- R^2 은 통행배정 결과로 산출된 경로와 실제 승객의 이동경로의 상관관계를 의미하며, 이 값이 1에 가까울수록 통행배정이 제대로 되었다고 판단함
- RMSE와 %RMSE는 두 경로의 전반적인 오차의 크기를 의미하며, RMSE는 자료의 크기가 커질수록 같은 비율의 오차라도 오차 정도가 매우 커지기 때문에 %RMSE를 이용하여 오차의 비율을 비교하고, 두 값 모두 0에 가까우면 가까울수록 통행배정이 제대로 되었다고 판단함
- GEH는 교통공학 분야에서 수요예측에 사용되는 경험적인 식으로 $GEH < 5$ 인 비율이 60% 이상이면 통행배정이 제대로 되었다고 판단함

- [그림 2-59]는 각 시나리오의 조건에 따라 통행배정 결과로 산출된 경로와 실제 승객의 이동경로를 비교한 것임
- 좌측 상단부터 Model1, 좌측 하단은 Model2, 우측 상단은 Model3, 우측 하단은 Model4를 이용한 통행배정 결과임
- Model1은 선호 유형을 고려하여 통행배정을 진행하였고, Model2는 선호 유형을 고려하지 않고 통행배정을 진행함
- 두 시나리오를 비교해보면 R^2 , RMSE, %RMSE, GEH 4개의 지표 모두 Model1이 Model2에 비해 통행배정 결과가 실제 승객의 이동경로와 더 유사하다는 것을 확인함
- 이를 통해 선호 유형을 고려한 통행배정 방식이 실제 승객의 이동경로와 더 유사하며, 통행배정 시 승객의 경로 선호 유형을 고려할 필요가 있다는 것을 확인함
- Model1은 출발 정류장과 도착 정류장을 격자 단위의 출발지와 도착지로 변환하였고, Model3은 출발 정류장과 도착 정류장을 이용하여 통행배정을 진행함
- 두 시나리오를 비교해보면 R^2 , RMSE, %RMSE, GEH 4개의 지표 모두 Model3이 Model2에 비해 통행배정 결과가 실제 승객의 이동경로와 더 유사함을 확인함
- 이를 통해 선호 유형을 고려하면서 정류장 단위의 출발지와 도착지를 I-RAPTOR에 입력하여 산출된 경로에 통행배정을 진행한다면, 실제 승객의 이동경로와 매우 유사한 통행배정 결과가 나타난다는 것을 확인함



[그림 2-59] 시나리오별 통행배정 결과 비교

- [그림 2-60]은 지하철만 이용한 경로에 대해 시나리오별 통행배정을 진행한 결과를 요약한 것이고, [그림 2-61]은 버스만 이용한 경로에 대해 시나리오별 통행배정을 진행한 결과를 요약한 것임
- [그림 2-60]과 [그림 2-61]을 확인해보면 Model3에서 4개의 지표가 가장 좋게 산출이 되었음
- 전체적으로 실험 결과를 확인해보았을 때, Model3의 조건을 이용하여 통행배정을 진행하여 산출된 경로는 실제 승객이 이동한 경로와 약 97% 정도 일치하는 것을 확인함

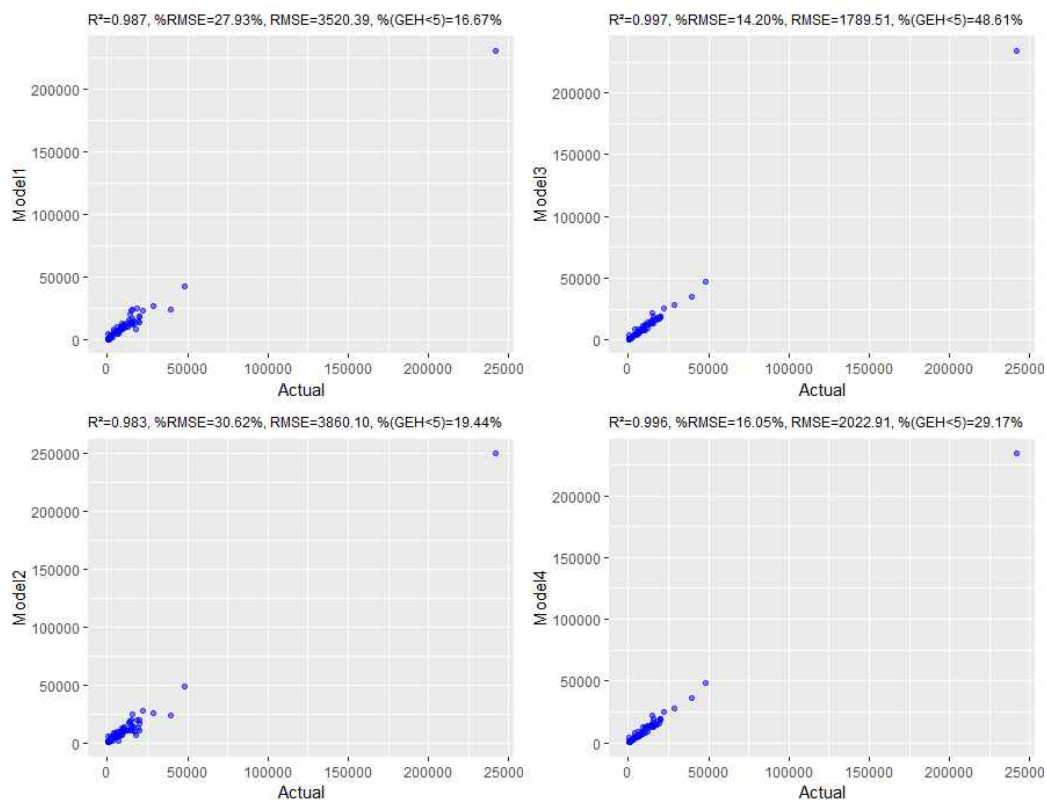
지표	Model1	Model2	Model3	Model4
통행수	263,040	234,801	306,598	293,090
RMSE	51.69	59.42	26.90	29.60
%RMSE	89.53%	102.93%	46.60%	51.28%
%(GEH < 5)	83.25%	77.25%	91.29%	86.85%
%(GEH < 10)	94.28%	91.54%	97.73%	96.80%
R ²	0.913	0.890	0.976	0.973

[그림 2-60] 지하철만 이용한 경로의 시나리오별 통행배정 결과

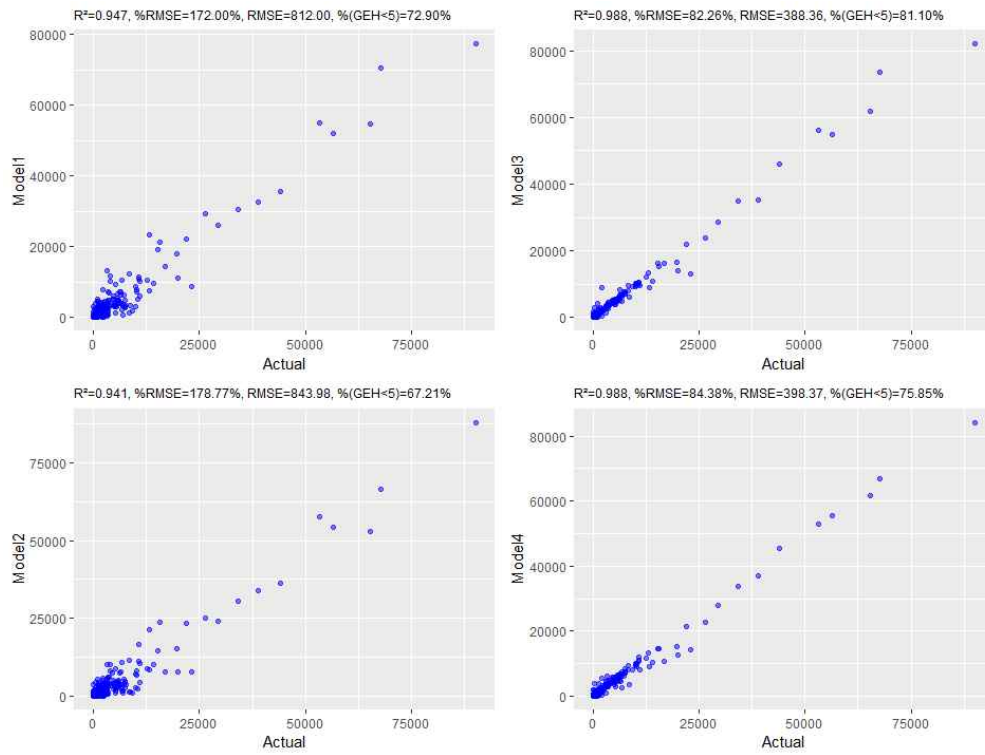
지표	Model1	Model2	Model3	Model4
통행수	386,993	329,599	428,822	403,610
RMSE	23.66	27.22	7.72	8.33
%RMSE	334.27%	381.30%	108.10%	116.65%
%(GEH < 5)	97.15%	96.17%	99.34%	98.97%
%(GEH < 10)	99.48%	99.37%	99.93%	99.91%
R ²	0.563	0.441	0.956	0.950

[그림 2-61] 버스만 이용한 경로의 시나리오별 통행배정 결과

- 스마트카드에 기록된 경로별 통행배정 결과 외에 노선별, 정류장별 통행배정 결과를 확인하기 위해 동대문구에서 출발하여 다른 지역으로 이동한 907,590개의 통행사슬을 대상으로 통행배정을 진행함
- 동대문구에서 출발하여 다른 지역으로 이동한 통행사슬에는 총 603개의 노선과 2,952개의 정류장, 1,393,657 건의 트랜잭션이 기록되어 있음
- [그림 2-62]은 시나리오별로 통행배정을 진행하고 이를 노선별로 나누어 실제 승객이 탑승한 노선과 비교한 결과임
- 모든 시나리오에서 R^2 모두 1에 가깝게 산출되었으며 %RMSE도 100% 미만으로 산출되어 노선별 통행배정 결과와 실제 승객의 탑승 노선이 유사한 것을 확인함
- 노선별 통행배정 결과 비교 실험에서도 Model3이 가장 통행배정이 잘된 시나리오였으며, 동대문구에서 출발한 통행사슬에 Model3의 조건을 적용하면 노선별 통행배정이 실제 승객의 노선별 통행량과 매우 유사하게 도출됨
- [그림 2-63]는 시나리오별로 통행배정을 진행하고 이를 정류장별로 나누어 통행배정 결과를 비교한 것임
- Model1과 Model2는 출발 정류장과 도착 정류장을 격자 단위의 출발지와 도착지로 변환하였기 때문에 정류장별 통행배정 결과와 실제 승객의 정류장별 통행량과는 상이한 것을 확인함
- [그림 2-63]에서도 역시 Model3에서 가장 통행배정 결과가 좋은 것으로 확인되었으며, 정류장 단위로 통행배정을 한 결과에 의한 것으로 판단됨



[그림 2-62] 4개의 시나리오에 따른 노선별 통행배정 결과

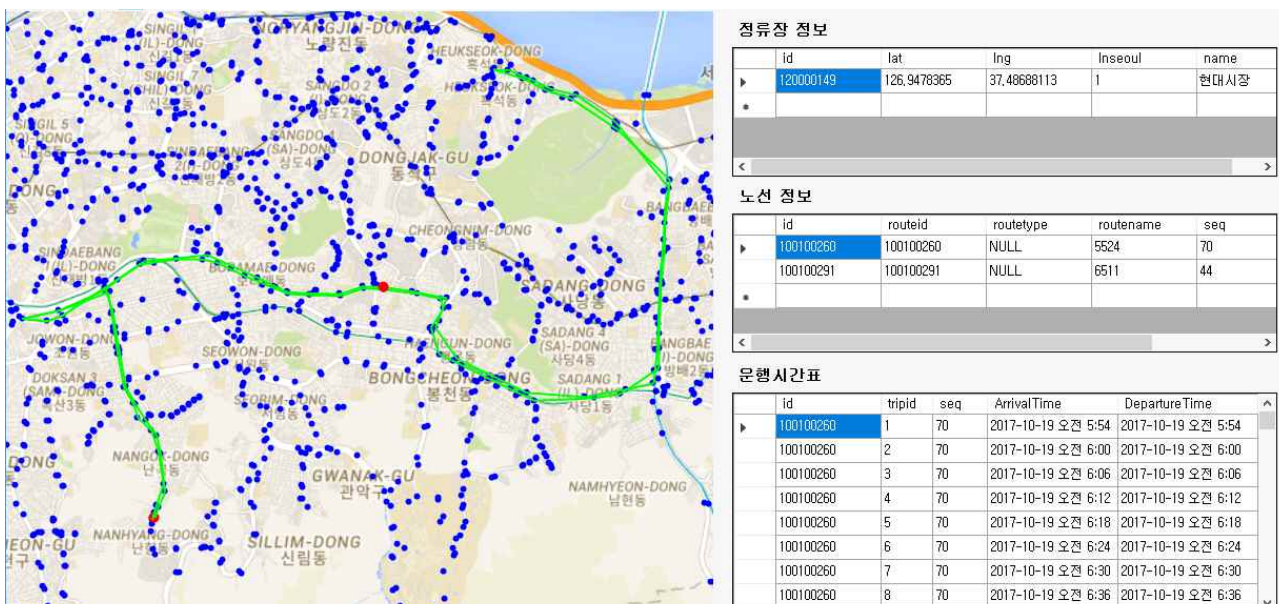


[그림 2-63] 4개의 시나리오에 따른 정류장별 통행배정 결과

(라) 노선 조정 시뮬레이션 기법 개발

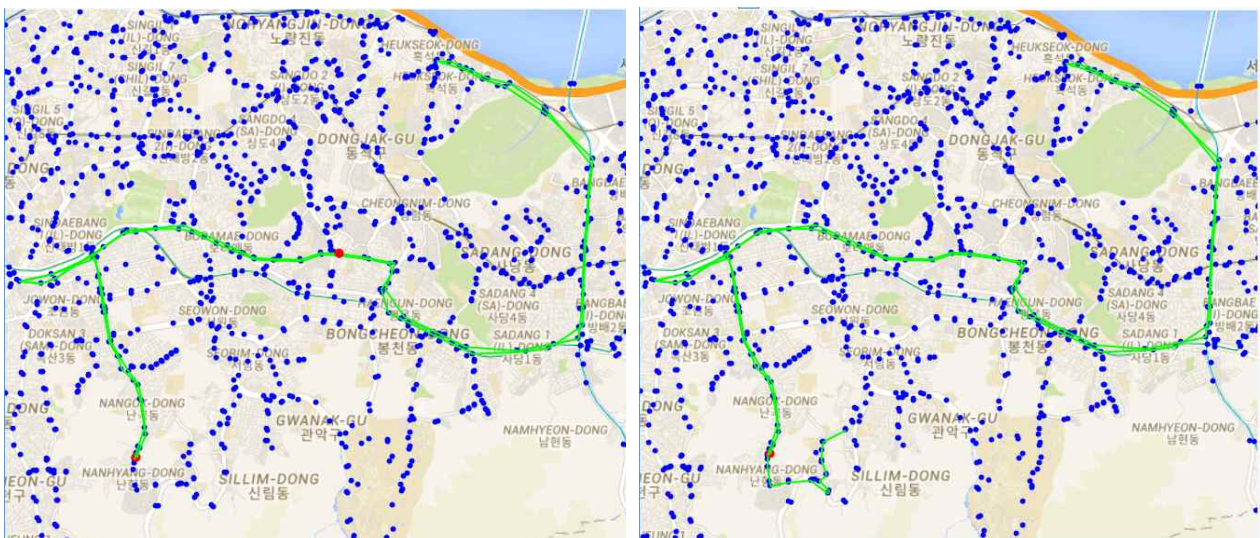
○ 노선 조정 시뮬레이터 개발

- 노선 조정 시나리오에 따라 기존 대중교통 네트워크의 추가, 변경, 삭제 등의 수정이 필요하며, 신규 노선을 생성할 수 있는 시뮬레이터를 개발함
- 또한 사용자가 직접 정성적으로 확인하며 노선을 조정할 수 있는 Look & Feel 방식의 GUI 기반 시뮬레이터가 개발되어야 함
- 따라서 본 연구에서는 기존 대중교통 네트워크의 수정이 가능하며 신규 노선의 네트워크를 생성할 수 있는 GUI 기반 시뮬레이터를 개발함
- 노선 조정 시뮬레이터는 총 3가지의 mode로 구성되며, 정류장 및 노선의 정보를 취득하는 탐색 mode, 기존 대중교통 네트워크의 추가, 변경, 삭제 등의 수정이 가능한 노선 조정 mode, 새로운 노선을 생성할 수 있는 신규 노선 추가 mode가 있음
- [그림 2-64]는 노선 조정 시뮬레이터의 구현 화면으로, 기본적으로 탐색 mode로 설정되어 있음
- 파란색 점은 정류장을 표현한 것이고, 연두색 선은 노선 정보에서 선택한 노선(5524번 버스)의 형상정보를 표현한 것임
- 탐색 mode에서 정류장을 선택하면 정류장을 지나는 노선들이 노선 정보에 나타나고, 노선 정보에서 선택된 노선의 운행 시간표 정보가 운행시간표 정보에 나타남
- 운행시간표 정보에는 노선의 id와 운행순서(seq)를 통해 정류장의 운행 정보가 탐색되고, 노선의 차량별로 정류장에 도착하는 시각이 표현됨
- 만약 노선 조정 시나리오가 기존 대중교통 노선을 수정(정류장 추가, 삭제 등) 해야 한다면 노선 조정 시뮬레이터 상단의 노선 조정 mode를 선택함

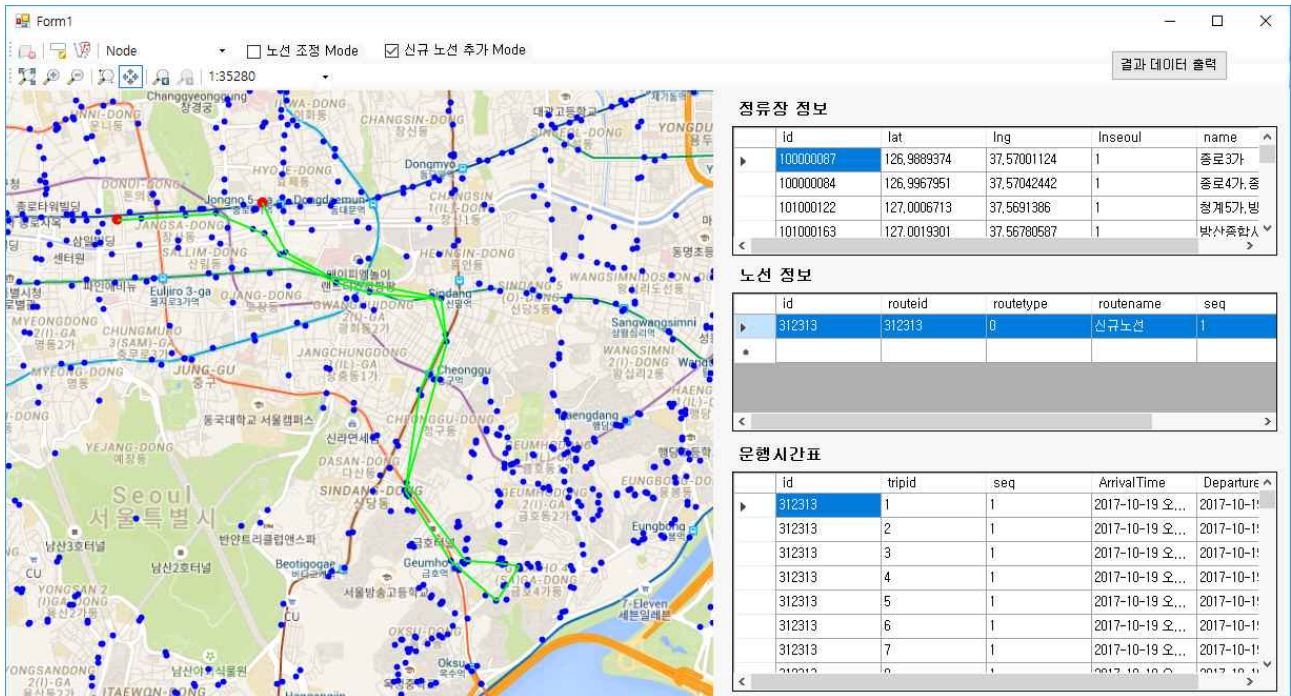


[그림 2-64] 대중교통 노선 조정 시뮬레이터 구현 화면 예시

- [그림 2-65]은 5524번 버스의 노선을 연장하여 신림동에 있는 거주단지까지 노선이 연장되는 시나리오에 따른 노선의 변경을 나타냄
- 왼쪽 그림은 기존 5524 버스 노선의 경로이며, 오른쪽 그림은 거주단지까지 노선이 연장된 경로임
- 노선 조정 방법은 변경해야할 노선과 추가 또는 삭제할 정류장을 선택하고 시뮬레이터의 추가/삭제 버튼을 클릭하면 변경된 정보에 따라 새로운 노선 형상정보 및 노선 속성을 변경함
- 또한 본 연구에서 개발한 시뮬레이터에서는 노선이 변경되면 변경된 노선 순서에 맞게 운행 시간표 정보를 생성/변경 할 수 있는 기능이 개발됨
- 정류장간 버스의 이동시간은 기존 운행 시간표 정보에서 정류장간 평균 이동시간을 계산하여 적용하였고, 이전 정류장의 출발시각에 이동시간을 더해 변경된 노선의 차량별 운행 시간표를 생성함
- 노선 조정 시나리오가 신규 노선을 생성하는 경우라면 노선 조정 시뮬레이터 상단의 신규 노선 추가 mode를 선택함
- [그림 2-66]은 종로 5가 - 금호4가동을 왕복하는 신규 노선의 생성 예시임
- 신규 노선의 생성 방법은 신규 노선이 지날 정류장들을 순서대로 신규노선 정류장 집합에 추가함
- 이후 [그림 2-67]와 같이 신규 노선의 첫차시간, 막차시간, 배차간격을 입력함
- 신규 노선 생성 버튼을 클릭하면 정류장간의 이동시간은 서울시 버스 평균 속도인 19km/h를 적용하여 산출하고, 첫차시간, 막차시간, 배차간격을 이용하여 신규 노선의 운행 시간표를 생성함



[그림 2-65] 5524번 버스 노선 조정 시나리오 전·후 비교



[그림 2-66] 종로 5가 - 금호4가동을 왕복하는 신규 노선 생성 예시

Form2

첫차 출발시간: 05:30

막차 출발시간: 22:30

배차간격(분): 8

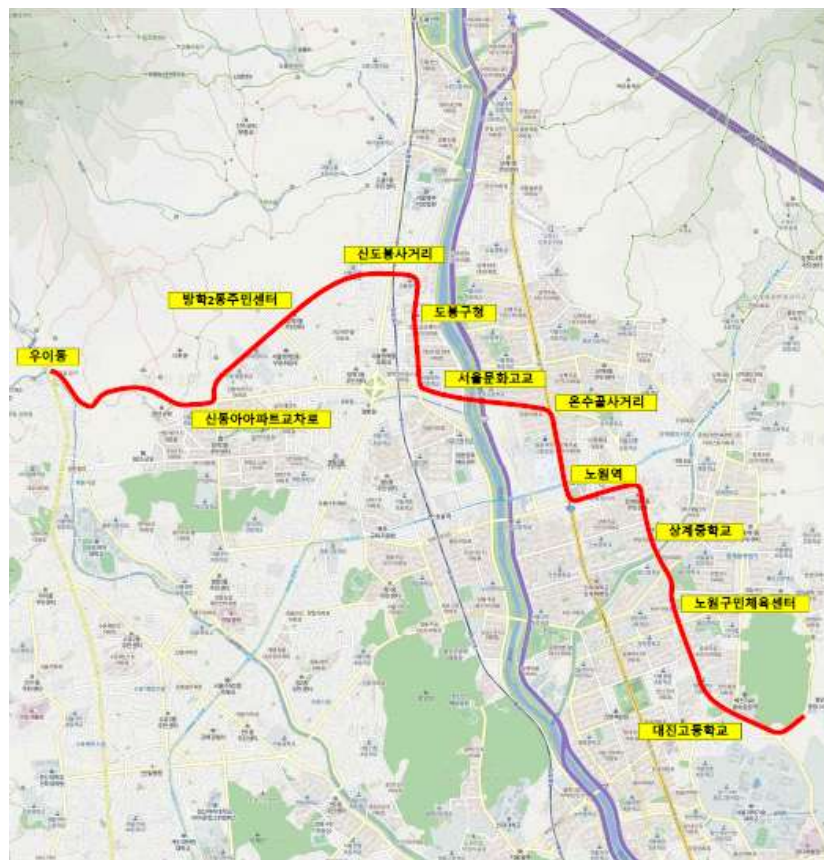
입력 완료

[그림 2-67] 신규 노선의 운행 시간표 생성 정보 입력

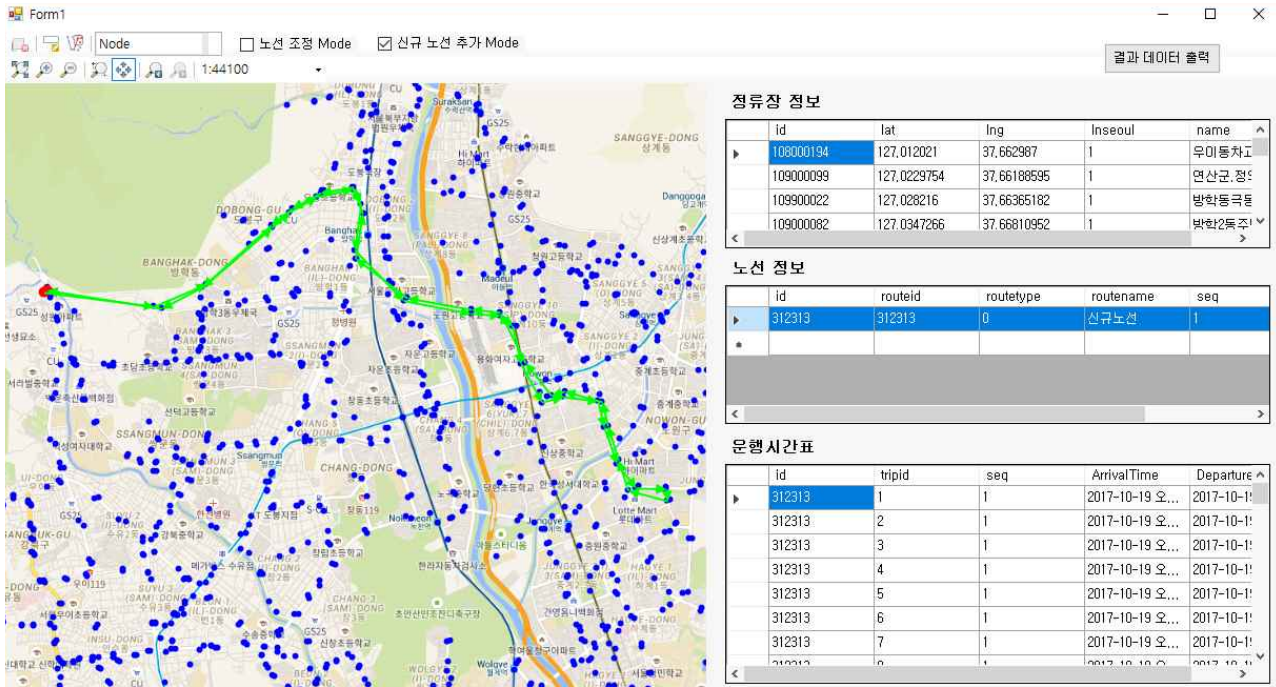
- 노선 조정 시나리오의 결과 대중교통 네트워크에 변화가 발생하였고, 이를 경로 탐색 알고리즘과 통행배정 알고리즘에 사용할 수 있도록 변화된 대중교통 네트워크를 파일로 출력함
- [그림 2-66]의 우측 상단에 위치한 결과 데이터 출력 버튼을 이용하면 I-RAPTOR와 통행배정 프로그램을 구성하는 정류장, 노선, 운행 시간표 데이터가 출력됨

○ 노선 조정 시나리오 수립

- 노선 조정 시뮬레이션
 - 노선 조정 시뮬레이션 과정은 총 3단계에 걸쳐 진행됨
 - 1단계는 스마트카드 자료 기반 수요 및 승객별 경로선택 유형을 분류하고, 노선 조정 필요 O-D를 파악하는 단계임
 - 2단계는 노선 조정 시나리오(신설, 변경, 폐쇄 등)를 구체적으로 수립하고, 대중교통 네트워크 편집기를 이용하여 노선이 조정된 네트워크 자료를 취득함
 - 다음은 조정된 자료를 이용하여 통행 배정을 수행하고, 통행 배정 전후 변화에 대한 정량적 편익 분석을 수행함
 - 3단계는 하나의 시나리오가 아니라, 여러 시나리오에 대한 분석 결과를 비교하여 합리적 노선 조정 방안을 도출하는 단계임
 - 본 연구에서는 1단계를 통해 대중교통 접근성이 낮은 O-D를 분석하였으나 보다 세부적인 노선 조정을 위해서는 현재 대중교통 수요 및 잠재 수요, 주변 대중교통 인프라 수준, 인구 및 토지이용 등의 GIS 자료와 종합적인 분석이 필요함
- 노선 신설 시나리오
 - ‘2018년도 서울시 시내버스 정기 노선조정 추진계획’에 따라 2단계부터 진행하여 정량적 편익 분석을 수행함



[그림 2-68] 1167번 버스 신설 방안



[그림 2-69] 1167번 버스 네트워크 및 운행시간표 생성 결과

- 2018년 버스노선 조정안 중 우이동~중계동을 운행하는 1167번 버스 신설 방안을 선택하여 분석을 진행하였고 버스 노선은 [그림 2-68]과 같음
- 1167번 버스는 첫차 04:45 ~ 막차 23:30의 운행계획과 20분의 배차간격을 이용하여 노선을 운행하며 운행거리는 18km, 운행시간은 1시간 11분임
- 수립된 노선 조정 시나리오를 토대로 대중교통 네트워크 편집기를 이용하여 신설 노선을 생성하였고 이는 [그림 2-69]와 같음
- [표 2-21]은 조정 전 실제 승객의 노선별 탑승자 수와 조정 후 노선별 탑승자 수를 비교한 것임

[표 2-21] I-RAPTOR의 추정결과와 실제 승객의 노선별 이용 비율 비교

노선 이름	실제 승객의 노선별 탑승자 수(명)	노선 조정 후 노선별 탑승자 수(명)	탑승자 수 변화
4호선	995,167	995,288	+121
7호선	1,028,977	1,029,157	+180
노원15	16,296	15,901	-395
1139	8,031	8,108	+77
1132	13,797	13,577	-220
1144	6,966	6,719	-153
1128	7,105	6,804	-301
1167(신규)	-	1,724	+1,724



[그림 2-70] 실제 1167번 버스의 정류장별 탑승객 수와
시뮬레이션 결과의 정류장별 탑승객 수 비교

- 버스 노선의 안정화 기간(6개월)을 고려한 2019년 5월 1167번 버스의 탑승객 수는 1,696명이었으며, 시뮬레이션 결과 1167번 버스의 탑승객 수는 1,724명으로 추정되었음
- [그림 2-70]은 실제 1167번 버스의 정류장별 실제 탑승객 수와 시뮬레이션 결과의 정류장별 탑승객 수를 비교한 것으로, 실제 이용객 수와 시뮬레이션 결과의 정류장별 탑승객 수가 거의 유사하게 산출되는 것을 확인함

[표 2-22] 신규노선 적용 전·후 통행시간 감소량 비교

일평균 신규노선 이용자 수(명)	신규노선 적용 전 평균 통행시간(분)	신규노선 적용 후 평균 통행시간(분)	신규노선이용자의 평균 통행시간 감소량(분)
1,724	42	36	6

- [표 2-22]는 신규노선을 이용한 승객을 대상으로 통행시간 감소량을 확인한 결과임
- 1167번 버스의 경우 첫차부터 마지막 차량까지 운행시간을 배차간격으로 나누어 계산하면 약 57대의 버스가 운행됨
- 1167번 버스가 하루 동안 운행한 거리를 모두 합하면 약 1,026km를 운행함
- 2016년 버스 표준 운송원가를 이용하여 비용 원단위를 계산해보면 2,992원/대-km가 산출되고 비용 원단위를 1167번 버스에 적용한 결과 하루 평균 2,351,592원의 운행비용이 발생함

[표 2-23] 신규노선의 하루 운행비용 산정 결과

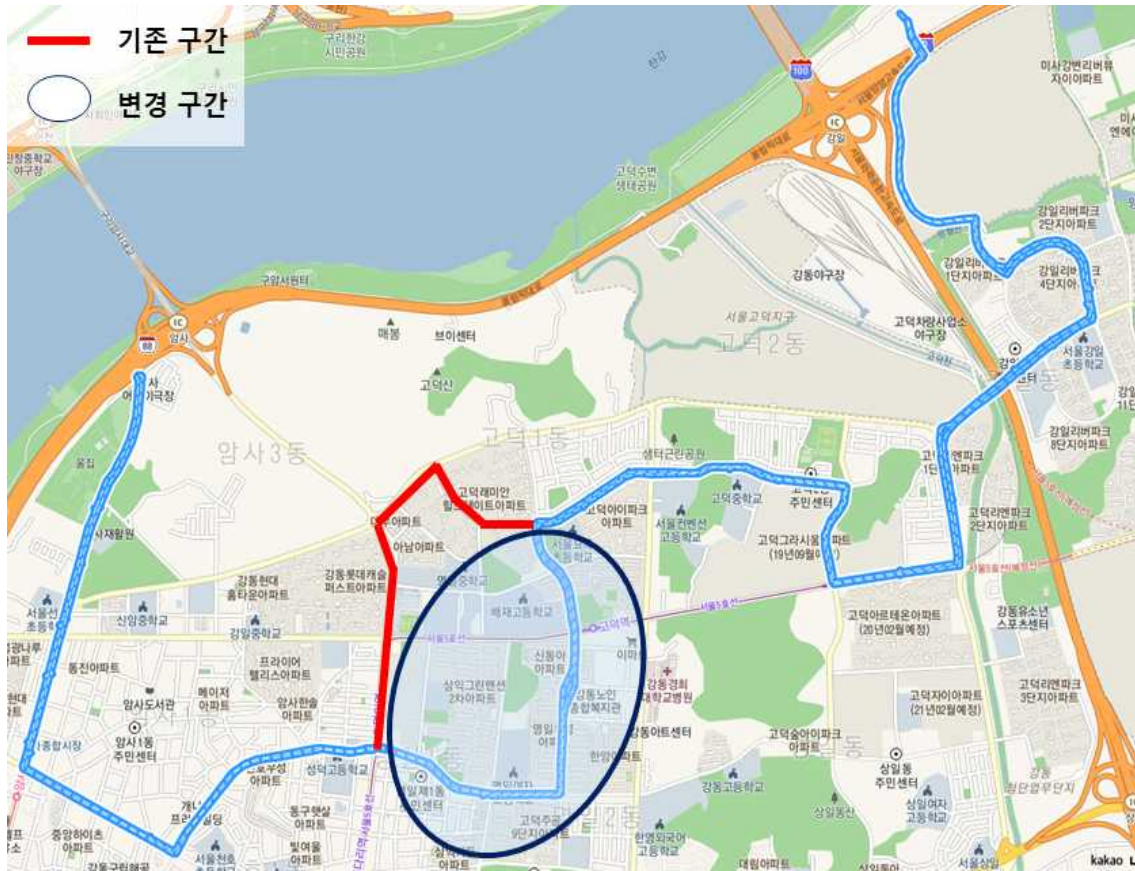
운행계획 시간(분)	배차간격(분)	총 운행대수	총 운행거리	버스 운행비용(원)
1,125	20	57	1,026km	2,351,592

- [표 2-23]은 신규노선 신설 결과 예상되는 운행비용을 계산한 결과임
- 신규노선이 생성됨에 따라 통행배정 결과 하루 평균 1,724명의 승객이 신규노선을 이용하는 것으로 추정되었으며 이에 따른 신규노선 이용자의 운영수입을 추정할 수 있음
- 첫 대중교통 수단으로 신규노선을 이용한 순 승차 승객은 1,200원의 비용을 지불하며 환승 승차 승객은 거리에 따른 추가적인 비용을 계산하였음

[표 2-24] 신규노선의 하루 운영수입 산정 결과

신규노선 이용 승객 수	순 승차 승객 수	환승 승차 승객 수	신규노선 운영수입(원)
1,724	1,011	713	1,248,850

- [표 2-24]는 신규노선 신설 결과 예상되는 운영수입을 계산한 결과임
 - 또한 기존 지선버스(1139,1132 등) 버스의 일평균 수요가 7,000 ~ 16,000명인 반면 1167번 지선버스의 경우에는 1,724명이 탑승하여 노선 조정에 대한 고려가 필요함
 - 이후 연구에서는 정확한 운행비용 산정을 위해서는 가동비용과 보유비용으로 나누어 산정할 필요가 있음
 - 가동 비용은 운전직의 급여, 퇴직급여, 복리후생비, 타이어비, 연료비 등으로 구성되고, 보유비용은 정비직, 사무관리직, 임원의 급여 및 퇴직급여, 복리후생비와 차량보험료, 차량감가상각비, 기타차량유지비, 차고지비, 기타관리비, 정비비, 적정이윤 등으로 구성됨
 - 노선의 신설, 조정, 폐쇄 등에 따라 차량 운행 상황의 변동이 발생하고, 이를 표준 운송 원가 항목을 통해 계산 가능함
- 노선 변경 시나리오
 - 정류장 군집의 상대적 접근성이 취약한 지역 중 강동구에 위치한 강일리버파크 단지를 대상지역으로 선정하여 노선 변경 시나리오를 수립함
 - 강일리버파크 단지에서 가장 가까운 지하철역은 명일역으로 이를 이용하기 위해 주로 강동02, 강동05번 마을버스를 이용함(일평균 8,000명 / 일평균 11,000명)
 - 하지만 강동02번 버스와 강동05번 버스는 고덕아이파크 - 명일역 구간을 중복으로 운행하고 있으며, 고덕아이파크- 고덕주공9단지 지역에는 마을버스가 다니지 않는 대중교통 음영지역이 존재함
 - 따라서 강동02번 버스 노선을 음영지역을 경유하도록 변경하는 시나리오를 구성함
 - [그림 2-71]는 변경된 강동02번 노선을 표현한 것임



[그림 2-71] 강동2번 버스 노선 변경 계획

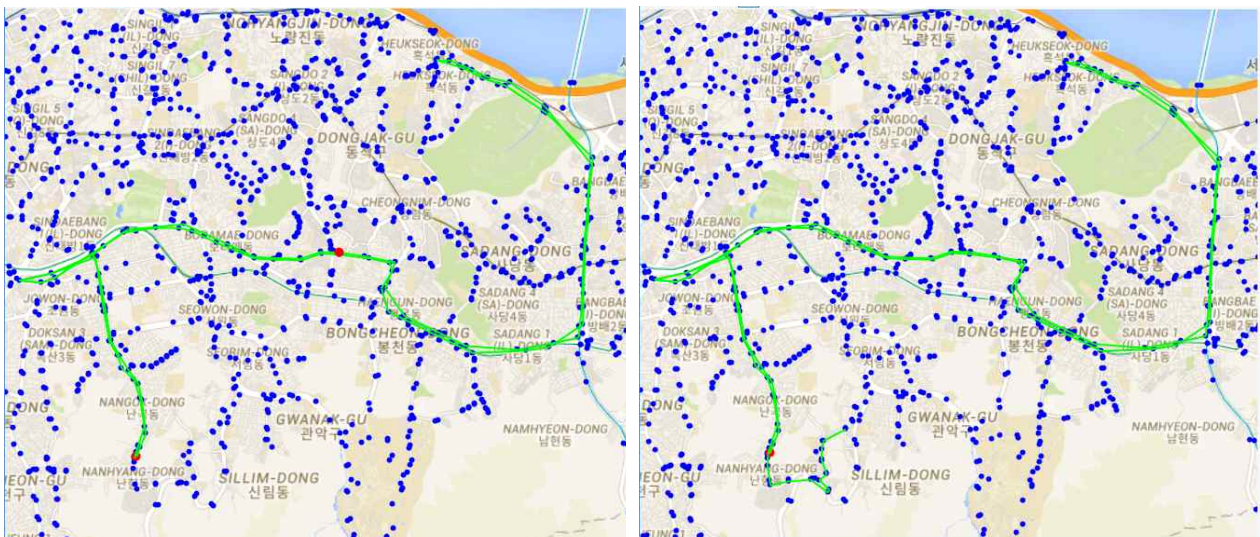
- 강동02번 버스 노선 조정에 의해 영향을 받은 승객은 약 2만명 정도이며, 이들의 통행을 스마트카드 자료에서 추출하여 노선 조정에 따른 통행배정을 진행함
- [표 2-25]는 강동 02 버스 노선 변경에 따른 경유 노선들의 수요 변화를 나타낸 것임
- 강동02번 버스 노선 변경 시나리오 적용 결과, 노선 조정 전 평균 통행시간(31분)에서 노선 조정 후 평균 통행시간(29분)으로 약 2분정도의 통행시간이 감소될 것으로 예측됨
- 노선이 변경된 구간에는 기존 3411번 버스가 운행하고 있었고 노선 조정 후 해당 지역의 수요가 강동02번 버스를 탑승하여 3411번 버스의 수요가 감소할 것으로 예상됨
- 기존 운행구간(1.78km)에서 노선 변경 구간(1.93km)로 약 0.2km 증가하였으나, 약 300명의 수요가 추가되어 강동02번 버스의 노선 변경 계획은 합리적인 것으로 판단됨

[표 2-25] 강동02 버스 노선 조정에 따른 노선별 수요 변화 비교

노선 이름	실제 승객의 노선별 탑승자 수(명)	노선 조정 후 노선별 탑승자 수(명)	탑승자 수 변화
5호선	1,198,819	1,199,312	+493
강동05	11,378	11,231	-147
3411	14,068	13,751	-317
강동02	7,729	8,048	+319
370	25,876	25,855	-21
342	9,388	9,346	-42
340	28,745	28,766	+21

- 노선 연장 시나리오

- 지선버스 5524번은 난향동 주민센터에서 출발하여 흑석동에서 회차하여 다시 난향동 주민센터로 돌아오는 경로를 운행함
- 난향동에서 300m 근처에 위치하는 삼성동 아파트 단지에는 관악08번 버스 1개 노선이 운행됨
- 관악08번 버스는 하루 평균 1만명의 승객이 탑승하는 마을버스 노선으로 배차간격이 5~20분으로 불규칙하게 운행됨
- 이에 5524번 버스의 기·종점 정류장을 삼성동 아파트 단지까지 연장하여 신림역과의 연계성을 높이는 버스 노선 연장 시나리오를 수립함
- [그림 2-72]은 5524번 버스의 기·종점을 난향동 주민센터에서 삼성동 아파트 단지로 변경한 노선 연장 시나리오를 시각화한 것임
- 노선 연장 시나리오 적용 결과, 5524번 버스는 25,108명 → 25,411명으로 300명 정도 수요가 추가될 것으로 예상되며 관악08 마을버스는 10,399명 → 10,112명으로 287명 정도 감소할 것으로 예상됨
- 노선 조정 전 평균 통행시간(38분)에서 노선 조정 후 평균 통행시간(35분)으로 감소하여 약 3분 정도의 통행시간이 감소될 것으로 예측됨
- 노선 연장 시나리오에 따라 약 1.9km의 운행거리가 증가되었고, 기존 5524번에 배치된 차량을 이용할 경우 배차간격이 늘어나 운행비용 및 대기시간이 증가될 것으로 예상됨
- 5524번 버스 노선 연장 시나리오는 통행시간 감소 및 수요의 증가보다 운행비용 및 배차간격의 증가가 더 많을 것으로 예상되어 합리적이지 못한 시나리오로 판단됨



[그림 2-72] 5524번 버스 기존 노선(왼쪽)과 연장 시나리오 적용 후 5524번 버스 노선(오른쪽)

다. 연구 핵심성과 및 성과별 평가방법

(1) 연구 핵심성과

[표 2-58] 연구 핵심성과 정리

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 수행내용 및 결과	성과 유형	해당 연차	TRL
1	대중교통 빅데이터 통합 DB 및 네트워크	- 대중교통 노선, 정류장, 스마트카드 거래내역, 통행사슬 등 대중교통 빅데이터 통합 DB 구축 완료 - 대중교통 네트워크 구축 완료	기타	1	3
2	정류장 단위 시간-거리 접근성 산출 기법	- 대중교통 네트워크에서 운행시간표를 기반의 최적경로 탐색 알고리즘 개발 완료 - 정류장을 기준으로 다른 모든 정류장까지의 시간-거리를 계산하여 직선거리 대비 상대적 시간-거리 접근성 산출 완료 - 차내 혼잡도를 고려한 시간-거리 접근성 지표 개발 완료	기타	1	3
3	머신러닝 기반 개인별 통행경로 선호도 분류기	통행사슬에 기록된 개별 승객의 통행경로 선택 선호도(최단거리, 최소환승 등)를 분류할 수 있는 딥러닝 기반 분류기 개발 완료	기타	2	3
4	개별 승객 통행경로 선호도 기반 다목적 통행경로 배정 기법	- 다목적(최단거리, 최소환승 등) 통행경로 산출 기법 개발 완료 - 승객별 통행경로 선호도와 통행사슬에서 얻은 O-D를 이용하여 현재 대중교통 네트워크 내 모든 승객의 통행경로 배정 기법 개발 완료	기타	2	3
5	시나리오 기반 노선 조정 시뮬레이션 기법	- 노선 조정 대상 파악 및 조정 시나리오 수립 - 시나리오에 따른 대중교통 네트워크 조정 및 시간-거리 접근성, 통행경로, 수요, 편익 등의 변화를 분석하는 시뮬레이터 개발	기타	2	3

(2) 핵심 연구성과별 세부내용

핵심성과 1		
정의	대중교통 빅데이터 통합 DB 및 네트워크	
목적	본 성과물은 전체 연구에 핵심 데이터들의 빠르고 안정적인 처리를 위해 필수적으로 구축해야 하는 요소기술이며, 연구에 필요한 대중교통 노선, 정류장, BMS 등의 인프라 및 운행정보, 1개월 이상의 스마트카드 데이터, 통행사슬 데이터, 대중교통 네트워크를 처리할 수 있는 분산 시스템 구축이 목적임	
성능목표	(기존기술 수준) 3 (개발기술 수준) 3	
소요기간	2017. 07 ~ 2017. 09 (3개월, 1차년도)	
성과달성 확인방법	- 물리적 서버 구축 및 DB 스키마 설계 여부 확인	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	0건
	논문	0건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심성과 2		
정의	정류장 단위 시간-거리 접근성 산출 기법	
목적	본 성과물은 대중교통 인프라의 지역 불균형을 확인하기 위한 지표를 개발하는 것이 목적이며, 현재 구축된 대중교통 정류장의 시간-거리 접근성을 계산하고, 이를 접근성이 유사한 정류장을 군집하여 시간-거리 접근성이 높거나 낮은 지역을 찾아 지역 불균형을 해소하기 위한 목적임	
성능목표	(기존기술 수준) 2 (개발기술 수준) 3	
소요기간	2017. 10 ~ 2017. 12 (3개월, 1차년도)	
성과달성 확인방법	- 대중교통 정류장 군집화 관련 논문 게재 - 정류장 단위 시간-거리 접근성 산출 관련 논문 게재	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	0건
	논문	일반학술지 2건
	저작	0건
	S/W	1건
	신기술	0건
	기타	인력양성 석사 1명, 학술대회 국내 2건, 국외 2건

핵심성과 3		
정의	머신러닝 기반 개인별 통행경로 선호도 분류기	
목적	본 성과물은 통행사슬에서 파악한 통행 O/D 및 통행경로 정보를 통해 개인별 통행경로 선택 선호도를 파악할 수 있는 머신러닝 기반 분류기이며, 기존 연구들과 같이 zone-to-zone에서 승객들의 통행경로 선택 비율을 추정하는 것이 아니라 개인 단위로 통행경로 선호도를 추정하며, 추후 통행경로 배정을 수행할 때 필요한 기초 자료를 생성하는 것이 목적임	
성능목표	(기존기술 수준) 없음 (개발기술 수준) 3	
소요기간	2018. 01 ~ 2018. 06 (6개월, 2차년도)	
성과달성 확인방법	- 머신러닝 기술을 이용한 통행경로 선호도 분류기 관련 논문 게재	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	0건
	논문	일반학술지 1건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	인력양성 박사 1명, 학술대회 국내 2건

핵심성과 4		
정의	개별 승객 통행경로 선호도 기반 다목적 통행경로 배정 기법	
목적	본 성과물은 통행사슬에서 추정한 개별 승객 통행경로 선호도와 통행사슬에서 파악한 실제 승객 O/D를 이용하여 대중교통 네트워크에서 모든 승객들이 어떤 경로로 통행을 하게 될 것인지 배정하는 기법이며, 실제 승객들의 통행과 가장 유사한 형태로 네트워크 내에 승객들의 이동을 파악하는 것이 목적임	
성능목표	(기존기술 수준) 상용프로그램은 8~9 수준, 본 연구와 유사한 방법론은 없음 (개발기술 수준) 3	
소요기간	2018. 07 ~ 2018. 12 (6개월, 2차년도)	
성과달성 확인방법	- 다목적 통행경로 산출 알고리즘 관련 논문 게재 - 개별 승객 통행경로 선호도 기반 통행경로 배정 기법 관련 논문 게재	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	1건
	논문	일반학술지 1건
	저작	0건
	S/W	2건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심성과 5		
정의	시나리오 기반 노선 조정 시뮬레이션 기법	
목적	본 성과물은 지역 불균형 완화를 위한 노선 조정 우선 지역을 파악하고, 해당 지역에 여러 가지 노선 조정 시나리오를 수립하여 각 시나리오별 통행 흐름 변화, 노선 수요 예측, 시간-거리 접근성 변화, 편익 분석 등을 파악하여 합리적인 노선 조정안을 제시하는 것이 목적임	
성능목표	(기존기술 수준) 상용프로그램은 8, 9 수준, 본 연구와 유사한 방법론은 없음 (개발기술 수준) 4	
소요기간	2019. 01 ~ 2019. 03 (3개월, 2차년도)	
성과달성 확인방법	- 시나리오 기반 노선 조정 시뮬레이터 개발 - 노선 조정 시나리오에 합리적 도출 방안 보고서 작성	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	0건
	논문	0건
	저작	0건
	S/W	1건
	신기술	0건
	기타	0건

라. 연구개발의 추진전략 · 방법 및 추진체계

(1) 연구개발 추진전략

○ 긴밀한 데이터 협조체계 구축

- 서울시 TOPIS와 데이터 협조체계를 추진하여 최신 스마트카드 통행기록 및 대중교통 네트워크 데이터를 이용하여 연구를 진행
- 연구 성과를 서울시 교통본부와 공유하여 서울시 교통계획 현장에서 활용할 수 있도록 전문가 의견 수렴 및 후속 연구 추진

○ 학계 의견수렴 및 전문가 자문을 통해 연구방법론 보완

- 교통 관련 학회에 참가하여 연구 성과물에 대한 논문을 게재하고 교통 전문가의 의견을 수렴하여 방법론을 보완하며 연구를 진행함
- 국외 교통 및 머신러닝 관련 학회 참가를 통해 최신 연구 동향 파악 및 의견 수렴
- 연구 결과를 통해 결정된 노선 조정 시나리오에 대해 전문가 자문을 구하고, 이를 보완하여 대중교통 계획에 반영할 수 있는 실현가능성이 높은 시나리오를 설정함
- 본 연구의 결과가 단순히 학술적인 의미만 갖는 연구 성과보다는 실질적으로 대중교통 분야에 활용될 수 있는 수준의 지역 불균형 완화 방안을 제시함

○ 스마트카드 거래내역을 이용하여 실제 대중교통 통행기록과 알고리즘 결과 비교

- 개인별 통행경로 선호도에 따른 통행배정 결과를 검증하기 위해 실제 대중교통 승객의 통행기록과 비교하여 경로별, 노선별, 정류장별 통행수요를 검증함
- 이를 통해 개인 단위의 통행배정이 가능하며 실제 대중교통 승객의 경로와 유사한 경로를 산출하는 일련의 시뮬레이션 기법이 개발됨

(2) 연구 추진체계

연구개발과제			
과제명	지역 불균형 완화를 위한 대중교통 노선 조정 시뮬레이션 기법 개발		
기 관 별 참 여 현 황			
구 분	기관수	인원수	총인원 수
산 업 계	1	10	10
대 학			
국공립(연)			
출 연 (연)			
기 타			
주 관 연 구 기 관			
서울시립대학교 산학협력단			
참 여 연 구 원			
주관연구책임자 (전철민)외 9명			
담당연구개발내용			
- 대중교통 빅데이터 통합 DB 및 대중교통 네트워크 구축 - 지역 불균형 파악을 위한 정류장 단위의 시간-거리 접근성 지표 개발 - 머신러닝을 이용한 대중교통 통행사슬 기반 개인별 통행경로 선호도 분류기 개발 - 개별 승객 통행경로 선호도를 고려한 통행경로 배정 기법 개발 및 수요 예측 - 지역 불균형 완화를 위한 시나리오별 노선 조정 시뮬레이션 기법 개발			

(3) 추진일정

○ 1차년도

세부과제	단위성과	질적 성과지표	분기별 추진일정			
			1/4	2/4	3/4	4/4
대중교통 빅데이터 통합 DB 및 대중교통 네트워크 구축	대중교통 빅데이터 통합 DB	통합 DB 구축				
	대중교통 네트워크	대중교통 네트워크 구축				
정류장 단위 시간-거리 접근성 산출 기법	시간-거리 접근성 지표	시간-거리 접근성 개발				
	정류장 군집화 기법	군집 내 정류장의 접근성 유사도				
운행시간표 기반 대중교통 최적 경로 탐색 알고리즘 개발	RAPTOR 기반 대중교통 최적 경로 탐색 알고리즘	알고리즘 경로 정확도				

○ 2차년도

세부과제	단위성과	질적 성과지표	분기별 추진일정				
			1/5	2/5	3/5	4/5	5/5
머신러닝 기반 개인별 통행경로 선호도 분류기	개인별 통행경로 선호도 분류기	분류기 정확도					
개별 승객 통행경로 선호도 기반 다목적 통행경로 배정 기법	다목적 통행경로 산출 알고리즘	알고리즘 경로 정확도					
	개별 승객 통행경로 선호도 기반 통행경로 배정 기법	통행경로 배정 정확도					
시나리오 기반 노선 조정 시뮬레이션 기법	노선 조정 시뮬레이션 기법	노선 조정 시뮬레이션 기법 개발					

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 연구개발 목표 달성도

(1) 성과 목표 및 달성치

성과지표	성과 목표	달성치	비고
SCI(E)급 학술지 게재(2점)	3	0	• 소프트웨어 등록 성과로 대체
일반학술지게재(1점)	4	4	• KCI 4건
특허출원(1점)	1	1	
특허등록(2점)			
디자인 등록(1점)			
소프트웨어(1점)		4	
하드웨어(1점)			
기타(1점)		8	• 인력양성 박사 1명, 석사 1명 • 학술대회 국내 4건, 국외 2건
소계(점수)	11점	17점	

○ 목표 달성도에 따른 자체 평가

- 본 연구의 목표는 지역 불균형 완화를 위한 대중교통 노선 조정 시뮬레이션 기법을 개발하는 것임
- 이를 위한 핵심성과로는 대중교통 빅데이터 통합 DB 구축, 시간-거리 접근성 산출 기법 개발, 머신러닝 기반 개인별 통행경로 선호도 분류기 개발, 통행경로 선호도 기반 통행배정 기법 개발, 시나리오 기반 노선 조정 시뮬레이션 기법 개발 등이 있음
- 정량적 성과로는 KCI 게재 4건, 특허 출원 1건, 소프트웨어 등록 4건, 인력양성 2건(박사 1, 석사 1), SCOPUS 등재 국외 학술발표 2건, 국내 학술발표 4건을 수행하여 목표로 설정한 성과 점수(11점)를 초과하는 성과 점수(17점)를 달성하였음
- 특히, 인력양성 성과는 박사학위 논문은 “개선된 RAPTOR를 이용한 대중교통 승객 경로 선택 유형 분류 모델”, 석사학위 논문은 “대중교통 네트워크와 교통카드 데이터를 이용한 상세 접근성 분석”으로, 본 연구개발과제의 100% 기여도를 통해 달성한 성과라 할 수 있음
- 기존에 목표치로 설정한 SCI 3건에 대해서는 소프트웨어 성과로 대체하였는데, 연구 종료 이후에도 성과물을 발전시켜 SCI 성과를 달성할 계획임
- SCI 저널은 대중교통 서비스의 지역간 격차에 대해 다룬 연구들이 게재된 바 있는 교통지리학 및 GIS 분야를 타겟으로 설정할 계획임
- 본 연구개발과제의 성과물은 대중교통 빅데이터 기반 데이터 주도형 분석을 통해,

대중교통 노선에 대한 새로운 문제 해결방법을 제시한다는 점에서 학술적 의의가 있다고 판단됨

- 다만, 본 연구의 범위는 개인별 통행경로 선호도 기반 노선 조정 시뮬레이션 기법의 이론적 완성 및 시나리오 기반 실험을 통한 증명 단계였기 때문에, 이를 대중교통 정책에 반영하기 위해서는 지속적인 연구개발이 필요한 상황임
- 향후 연구를 통해 사용자가 GUI를 이용하여 노선을 조정하고, 노선 조정에 따른 정량적 지표 변화가 동적으로 분석되고 직관적 해석을 위한 시각화까지 지원되는 노선 조정 시뮬레이터를 개발하게 된다면, 이는 매우 혁신적인 연구 성과가 될 것으로 기대됨

(2) 성과점검기준표

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수	달성 건수
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	기준치		
주관	1	대중교통 빅데이터 통합 DB 및 네트워크	1-1	대중교통 빅데이터 통합 DB	① 통합 DB 구축	100%	100%	대중교통 빅데이터 저장 여부	데이터 질의 결과 분석(내용, 질의시간)	5		
			1-2	대중교통 네트워크	② 대중교통 네트워크 구축	100%	100%	네트워크 구축 여부	데이터 형식, 구조 등 검증	5		
	2	정류장 단위 시간-거리 접근성 산출 기법	2-1	정류장 단위 시간-거리 접근성	① 시간-거리 접근성 개발	100%	100%	모든 정류장에 대한 시간-거리 접근성 지표 계산	통행시설 내 실제 실적 경로 소요시간 과 비교 분석	20	논문: 2건	논문: 2건 S/W: 1건 기타: 4건
			2-2	다층 네트워크상의 최단거리 알고리즘	② 알고리즘 개발 알고리즘 경로 정확도	90% 이상 정확도	100%	모든 정류소간 알고리즘을 이용한 경로 탐색 결과 분석	통행시설 내 실제 실적 경로와 비교 분석	10	논문: 1건	기타: 1건
	3	머신러닝 기반 개인별 통행경로 선호도 분류기	3-1	개인별 통행경로 선호도 분류기	① 분류기 개발 분류기 정확도	90% 이상 정확도	100%	훈련, 시험 데이터셋 분류 정확도 측정	semi-auto 라벨링 분류와 비교	20	특허출원: 1건 논문: 1건	논문: 1건 기타: 3건
	4	개별 승객 통행경로 선호도 기반 다목적 통행경로 배정 기법	4-1	다목적 통행경로 산출 알고리즘	① 알고리즘 개발 알고리즘 경로 정확도	90% 이상 정확도	100%	모든 정류소간 알고리즘을 이용한 경로 탐색 결과 분석	통행시설 내 실제 실적 경로와 비교 분석	10	논문: 1건	논문: 1건 특허출원: 1건 S/W: 1건
			4-2	개별 승객 통행경로 선호도 기반 통행경로 배정 기법	② 통행경로 배정 기법 개발 통행경로 배정 정확도	90% 이상 정확도	100%	모든 정류소간 O/D에 대한 통행경로 배정 결과 분석	통행시설 내 실제 실적 경로와 비교 분석	15	논문: 1건	S/W: 1건
	5	시나리오 기반 노선 조정 시뮬레이션 기법	5-1	노선 조정 시뮬레이션 기법	① 노선 조정 시뮬레이션 기법 개발	GUI 기반 편집 도구 개발	100%	여러 시나리오에 대한 시뮬레이션 결과 분석	시뮬레이션 결과에 대한 정상적 분석	15	논문: 1건	S/W: 1건
	계									100	특허출원: 1건 논문: 4건 논문: 7건	특허출원: 1건 논문: 4건 S/W: 4건 기타: 8건

(3) 연차별 연구개발 목표 달성도

○ 1차 연도

[표 3-1] 1차 연도 연구개발 목표 달성도

목표	달성도(%)	내용	가중치
대중교통 빅데이터 통합 DB 구축	100%	- 스마트카드 거래내역, 대중교통 네트워크 및 운행정보 수집 - RDBMS 기반 통합 DB 구축	15
대중교통 네트워크 구축	100%	- 노선, 링크, 노드 등의 대중교통 네트워크 구축 - 대중교통 네트워크와 운행정보 연계 - 환승 도보링크 구축 및 링크 단위 이동거리 및 소요시간 산출	15
정류장 O/D에 대한 시간-거리 접근성 지표 개발	100%	- 시간-거리 접근성 개념 정립 - 공간적 근접성 및 명칭 유사도를 고려한 정류장 군집화 기법 개발 - 상대적 이동시간을 고려한 시간-거리 접근성 지표 개발 - 차내 혼잡도를 고려한 시간-거리 접근성 지표 개발 - 일반학술지 게재 2건 - SCOPUS 등재지(국외 학술대회) 1건 - 접근성 분석 S/W 등록 1건 - 인력양성 석사 1건	40
정류소간 최소 도착 시간 경로 탐색 알고리즘 개발	100%	- 운행시간표 기반 실시간 대중교통 최적경로 탐색 알고리즘 개발 - 일반학술지 게재 1건	30
계			100

○ 2차 연도

[표 3-2] 2차년도 연구개발 목표 달성도

목표	달성도	내용	가중치
개인별 통행경로 선호도 분류기 개발	100%	- 통행사슬에서 통행별 피처 추출 및 통행경로 선호도 분류 범주 정의 - 정의된 분류 범주에 따른 통행별 라벨링을 통한 훈련 데이터셋 생성 - 딥러닝 신경망 설계를 통한 통행경로 선호도 분류기 개발 - 스마트카드 거래내역을 이용한 모델 분류 정확도 실험 - 스마트카드 기반 대중교통 승객유형 분류 관련 일반학술지 게재 1건 - 인력양성 박사 1건	30
다목적 통행경로 산출 알고리즘	100%	- 운행시간표 기반 실시간 대중교통 다중경로 산출 알고리즘 개발 - 최소 이동시간, 최소 환승, 최소 도보이동 등 경로 선호도를 고려한 다목적 통행경로 산출 - 특허출원 1건 - 일반학술지 게재 1건 - SCOPUS 등재지(국외 학술대회) 1건	30
개별 승객 통행경로 선호도 기반 통행경로 배정 기법 개발	100%	- 개별 승객 통행경로 선호도를 고려한 에이전트 단위 통행배정 기법 개발 - 스마트카드 거래내역 기반 통행배정 정확도 검증 - S/W 등록 1건	25
노선 조정 시뮬레이션 기법 개발	100%	- Look & Feel 방식의 GUI 기반 노선 조정 시뮬레이터 프로토타입 개발 - 노선 조정에 따른 대중교통 접근성 변화 실험 - S/W 등록 1건	15
계			100

나. 관련 분야에 대한 기여도

(1) 사회적 측면

○ 이용자가 체감할 수 있는 균형적인 대중교통 서비스 제공을 위한 기초자료 역할

- 균형적인 대중교통 정책의 사회적 요구가 증대되고 있고 그에 따라 현 교통정책도 국민이 체감할 수 있는 지역균형발전을 지향하고 있기 때문에, 본 연구의 성과물은 정책 수립을 위한 기초자료로써의 중요성을 가짐
- 정량화된 자료를 통해 노선 조정 효과를 제시함으로써 대중교통의 합리적 운영을 위한 정책 지원이 가능함

(2) 기술적 측면

○ 대중교통 서비스수준 평가 지표를 이용한 지역 불균형 파악 방법 제시

- 본 연구에서 개발한 시간-거리 접근성은 승객이 한 정류장에서 다른 정류장으로 이동할 때 소요되는 실제 이동시간의 개념이며, 승객은 비용이 적절할 경우, 시간이 짧을수록(접근성이 좋을수록) 높은 수준의 서비스를 받는 것으로 판단함
- 연구 대상 지역 내 모든 정류장에 대해 시간-거리 접근성을 계산하고 이를 시간대별로 시각화하면, 어떤 지역의 승객이 어떤 시간대에 낮은 수준의 서비스를 받고 있는지, 어떤 지역의 승객은 수요대비 높은 수준의 서비스를 받고 있는지 손쉽게 파악 가능함

○ 통행자 각 개인 행태를 기준으로 한 대중교통 분석기술 제공

- 통행수요를 추정하는 기존 방법론에서는 결정적 모형, 확률적 모형 등의 통계적 기법을 이용하여 대중교통 이용자들의 통행패턴을 분석하고 이를 기반으로 수요를 추정함
- 기존 방법은 공간적 집합화와 노선 선택 행동의 집합화가 필연적으로 수반되기 때문에 이에 따른 오차를 내포하고 있으며, 통행자 각 개인의 노선 선택 행동을 기준으로 구축된 모형은 아님
- 또한, 정류장간 공간적 위치, 노선 상황, 배차 상황, 승객의 심리적 상황, 승차 시간 등에 따라 승객이 통행경로를 결정하는 기준은 다르게 되며 기존 모형들은 이와 같은 결정에 대해 미시적으로 접근하는데 한계를 가짐
- 본 연구에서는 머신러닝 기법을 이용해 교통카드 통행자료로부터 개인 단위 통행경로 선호도를 예측하는 방법론을 제시함으로써 통행자 각 개인 행태를 기준으로 한 대중교통 분석기술을 제공함
- 머신러닝 기반의 통행경로 선호도 예측 방법은 교통카드 데이터가 갱신될 때마다 모델이 개선되어서 지속적으로 오차를 줄여 정확도를 향상시킬 수 있음
- 승객들을 집합화하여 통행선택 추정 및 배정을 하는 것이 아니라, 개별 승객에 대한 통행경로 선호도를 파악하므로 집합 모형이 가지는 오차를 최소화 할 수 있음

(3) 경제·산업적 측면

○ 다양한 노선 조정 시나리오 시뮬레이션 기반 편익분석으로 투자효용 제고

- 노선 조정이 필요한 여러가지 대안에 대한 시뮬레이션 기반 편익분석 방법을 제시하며, 이를 통해 직접 투자를 하지 않더라도 발생할 수 있는 승객 통행변화를 파악할 수 있음
- 동일비용을 투자했을 시에 얻을 수 있는 편익을 극대화하여 투자효용 제고 가능

○ 대중교통 접근성이 떨어지는 지역에 대한 노선 조정을 수행함에 따른 서비스수준 향상

- 가장 조정이 시급한 대상을 파악하여 조정 대안을 제시하므로 대상 지역에서 통행하는 승객들의 서비스수준 향상

4. 연구개발성과의 활용 계획 및 기대효과

가. 연구개발성과의 활용 계획

○ 대중교통 노선 변화에 따른 미시적 분석 가능

- 본 연구에서 개발하는 시뮬레이션 기법을 활용하면 버스 노선, 지하철 노선, 버스 정류장 등을 변경했을 때 영향을 받는 모든 승객들에 대한 미시적 수준의 변화 시뮬레이션이 가능함
- 승객들이 각각 기존 통행경로에서 어떤 통행경로로 이동하는지, 이동시간은 얼마나 변하는지, 이동 거리는 어떻게 변하는지 등에 대한 정보를 개별 통행단위(교통카드 통행사슬)로 분석 가능함
- 또한, 공간적 단위의 측면에서는 포인트 단위(정류장 단위)의 분석뿐만 아니라 격자 기반에도 활용 가능하므로 다양한 사회경제적 지표들과의 중첩 분석이 가능하며, 이를 통해 도시 공간의 이용패턴을 이해하는데 효과적인 도구로 활용 가능함

○ 대중교통 빅데이터의 활용방안 제시

- 주로 개별 집계정보 취득에만 이용되던 교통카드 자료를 포함한 대중교통 빅데이터를 머신러닝, 미시적 시뮬레이션 등에 활용함으로써 새로운 방향의 접근 가능성 제시
- 특히, 머신러닝 기법을 이용하여 승객이 대중교통을 이용한 기록인 스마트카드 통행사슬 데이터로부터 승객이 어떤 선택 기준으로 해당 경로를 이용했는지 파악할 수 있음
- 승객 정보를 얻기 위해 설문과 같은 비용과 시간이 많이 소요되는 기존 방식이 아니라 일단위로 수집되는 빅데이터를 이용하는 방법론을 제시함으로써 승객 정보를 수집하는데 추가적인 비용이 발생하지 않을 뿐만 아니라 샘플링된 승객이 아닌 전수데이터에 대한 정보를 취득 가능함

○ 개인별 통행경로 선호도 분류기의 활용

- 본 연구에서 개발한 개인별 통행경로 선호도 분류기는 개별 통행의 통행경로 및 통행수단 선택 선호도를 설문과 같은 기존 방식이 아니라 빅데이터에서 역으로 추론하는 방법을 제시함
- 해당 연구를 통해 개인별 통행경로 선호도를 파악할 수 있다면, 이는 통행경로 배정, 노선 신설, 대중교통 수요 예측 등 대중교통이 활용되는 전범위에 걸쳐 활용될 수 있는 자료가 될 것임
- 통행사슬 데이터는 일단위로 지속적 수집이 가능하므로, 지속적인 분류 모델 캘리브레이션이 가능하고, 이를 통해 오차가 최소화된 대중교통 수요 분석을 수행할 수 있음

○ 개별 승객 통행경로 선호도를 고려한 통행배정 기법

- 본 연구에서 개발한 통행배정 기법은 기존 방법들과 같은 모형을 이용한 통행경로 추정이 아니라, 해당 정류소간 혹은 정류소 군집간 이동하고자 하는 실제 O/D와 개별 승객들의 통행경로 선호도를 이용하여 통행경로를 배정함
- 마치 승객 관점에서 자신이 이용하고자 하는 경로를 선택하는 것과 유사하며, 개별 승객 단위로 경로를 선택하게 되므로 기존 모형들이 가지는 집합화에 기인하는 오차가 발생하지 않음
- 또한, 대중교통 네트워크 내 모든 정류소간 혹은 정류소 군집간 통행경로 배정을 수행할 때에도, 각 정류소쌍 혹은 정류소 군집쌍마다 실제 O/D와 개별 승객들의 통행경로 선호도가 있으므로 별도의 모형을 개발할 필요가 없음
- 이는 기존의 노선이 변경되거나 새로운 노선이 생성되었을 때 승객들의 노선 이용을 분석하여 승객들의 이동성의 변화를 파악하거나, 변경되는 노선에 대한 수요를 추정하는데 사용될 수 있음

나. 기대효과

○ 대중교통 서비스의 지역 불균형 완화를 위한 합리적 노선 조정안 제시

- 본 연구에서는 정류장 및 정류장 군집 단위로 미시적인 시간-거리 접근성 분석을 수행하였고, 이를 대중교통 수요와 연계하면 지역별 대중교통 서비스 형평성을 분석할 수 있음
- 또한 본 연구에서 개발한 노선 조정 시뮬레이션 기법은 노선의 신설, 조정 등으로 인해 발생하는 이동성 및 편익의 정량적 효과를 분석할 수 있고, 이를 발전시키면 동적 노선 조정 시뮬레이터 개발이 가능함
- 따라서 본 연구의 결과는 지역별 대중교통 서비스 형평성 분석 및 노선 조정 시뮬레이션을 통해 대중교통 서비스의 지역 불균형 완화를 위한 합리적 노선 조정안을 제시하는 기초자료로써 활용 가능함
- 이 외에도, 본 연구의 노선 조정 시뮬레이션 기법은 개별 승객의 경로 선호도를 고려한 통행배정을 수행하기 때문에, 모든 승객들에 대한 미시적 수준의 대중교통 통행 변화를 분석할 수 있고, 이는 사회적 약자의 특성을 고려한 대중교통 서비스 분석과도 연계할 수 있음

붙임. 참고문헌

- 김동호, & 박동주. (2015). 시공간 제약하에서 이용자 기반의 대중교통 접근성 측정 방법론 연구. 대한교통학회 학술대회지, 73, 545-550.
- 김웅철, & 김태호. (2009). 교통약자의 환승을 고려한 K 경로탐색 알고리즘 개발. 서울도시연구, 10(2), 147-159.
- 이금숙, 박종수, & 정미선. (2014). 수도권 광역철도망 확충에 따른 서울 대도시권 접근도 변화: 교통카드 빅데이터를 이용한 시간거리 산출 알고리즘 및 비교정성 교통망접근도 산출 모형의 개발과 적용. 한국경제지리학회지, 17(1), 98-113.
- 박종수, & 이금숙. (2015). 교통카드 빅데이터 기반의 서울 버스 교통망 시간거리 접근성 산출. 한국경제지리학회지, 18(4), 539-555.
- 이민혁, 전인우, & 전철민. (2017). 개선된 DBSCAN 알고리즘을 이용한 대중교통 정류장 군집화 기법. 한국지형공간정보학회지, 25(4), 97-106.
- 전인우, 남현우, & 전철민. (2018). 환승 저항을 고려한 운행시간표 기반 대중교통 다중 경로 탐색 알고리즘. 한국 ITS 학회논문지, 17(3), 72-86.
- 최승우, 전철민, & 조성길. (2016). 정류장 단위의 미시적 대중교통 접근성 분석. 한국지형공간정보학회지, 24(1), 9-16.
- Arbex, R. O. and da Cunha, C. B.(2015). Efficient transit network design and frequencies setting multi-objective optimization by alternating objective genetic algorithm, Transportation Research, vol 81, pp.355-376.
- Cionini, A., D'Angelo, G., D'Emidio, M., Frigioni, D., Giannakopoulou, K., Paraskevopoulos, A. and Zaroliagis, C.(2014). Engineering graph-based models for dynamic timetable information systems, In OASlcs-OpenAccess Series in Informatics, vol. 42, pp.46-61.
- Delling, D., Pajor, T., & Werneck, R. F. (2014). Round-based public transit routing. Transportation Science, 49(3), 591-604.
- Delling, D., Dibbelt, J., Pajor, T. and Werneck, R. F.(2015). Public transit labeling, In International Symposium on Experimental Algorithms. Springer. pp.273-285.
- Ester, M., Kriegel, H. P., Sander, J., & Xu, X. (1996, August). A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In Kdd (Vol. 96, No. 34, pp. 226-231).
- Garcia-Martinez, A., Cascajo, R., Jara-Diaz, S. R., Chowdhury, S. and Monzon, A.(2018). Transfer penalties in multimodal public transport networks, Transportation Research Part A: Policy and Practice.
- Guo, J. and Jia, L.(2017). A new algorithm for finding the K shortest paths in a time-schedule network with constraints on arcs, Journal of Algorithms & Computational Technology, vol. 11, no. 2, pp.170-177.
- Hartigan, J. A., & Wong, M. A. (1979). Algorithm AS 136: A k-means clustering

algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 28(1), 100-108.

- Hu, X. and Chiu, Y. C.(2015). A Constrained Time-Dependent K Shortest Paths Algorithm Addressing Overlap and Travel Time Deviation, *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 4, no. 4, pp.371-394.
- Kieu, L. M., Bhaskar, A., & Chung, E. (2015). A modified Density-Based Scanning Algorithm with Noise for spatial travel pattern analysis from Smart Card AFC data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 58, 193-207.
- Lee, S. G., Hickman, M., & Tong, D. (2012). Stop aggregation model: Development and application. *Transportation research record*, 2276(1), 38-47.
- Luo, D., Cats, O., & van Lint, H. (2017). Constructing Transit Origin-Destination Matrices with Spatial Clustering. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2652), 39-49.
- Madkour, A., Aref, W. G., Rehman, F. U., Rahman, M. A. and Basalamah, S.(2017). A survey of shortest-path algorithms. *arXiv preprint arXiv:1705.02044*.
- Pyrga, E., Schulz, F., Wagner, D., and Zaroliagis, C.(2008). Efficient models for timetable information in public transportation systems, *Journal of Experimental Algorithmics*, vol. 12, pp.1-39
- Tran, T. N., Drab, K., & Daszykowski, M. (2013). Revised DBSCAN algorithm to cluster data with dense adjacent clusters. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 120, 92-96.
- Strasser, B. and Wagner, D.(2014). Connection scan accelerated, In *2014 Proceedings of the Sixteenth Workshop on Algorithm Engineering and Experiments*, pp. 125-137.
- Wang, S., Yang, Y., Hu, X., Li, J. and Xu, B.(2016). Solving the K-shortest paths problem in timetable-based public transportation systems, *Journal of Intelligent Transportation Systems* , vol. 20, no. 5, pp.413-427.
- Wardman, M., & Whelan, G. (2011). Twenty years of rail crowding valuation studies: evidence and lessons from British experience. *Transport reviews*, 31(3), 379-398.
- Yujian, L., & Bo, L. (2007). A normalized Levenshtein distance metric. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 29(6), 1091-1095.

뒷면지

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구 사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.