



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학 박사학위 논문

교통카드 자료를 이용한
급행버스 노선 및 운영 계획 최적화 방안

Optimizing Express Bus Route and Operation
Scheme with Smart Card Travel Data

아주대학교 대학원

건설교통공학과

이 용 주

교통카드 자료를 이용한 급행버스 노선 및 운영 계획 최적화 방안

Optimizing Express Bus Route and Operation
Scheme with Smart Card Travel Data

지도교수 최 기 주

이 논문을 공학 박사학위 논문으로 제출함.

2016년 2월

아주대학교 대학원

건설교통공학과

이 용 주

이용주의 공학 박사학위 논문을 인준함.

심사위원장 오 세 창 인

심 사 위 원 최 기 주 인

심 사 위 원 이 상 수 인

심 사 위 원 신 성 일 인

심 사 위 원 한 종 학 인

아 주 대 학 교 대 학 원

2016 년 1 월 5 일

요 약

본 연구는 대중교통의 경쟁력 향상을 위한 대안 중 하나로 최근 각광받고 있는 급행 서비스체계, 그중에서도 급행버스에 주안점을 두고 교통카드DB를 이용하여 이용자의 총통행시간 또는 사회적 총비용을 최소화할 수 있는 급행버스노선 정차정류장 선정모형 및 급행버스 도입노선 우선순위 평가 방법론을 제시하고자 하였다. 특히, 기존의 관련 연구가 전체 네트워크 노선체계의 개편, 새로운 노선의 개발 등을 중점적으로 다룬데 비하여 본 연구에서는 현재 운영중인 네트워크에 즉각적으로 적용 가능한 개선책을 제시하여 대규모 예산 투입 없이 대중교통의 경쟁력과 운영 효율성을 향상시키는데 중점을 두었다.

이를 위해 본 논문은 1) 교통카드DB로부터 획득한 노선 및 통행 자료와 현실적인 제약조건을 고려한 급행버스노선 정차정류장 선정모형을 구축하고, 2) 급행버스 운영 효율성 영향요인을 반영한 다중회귀분석모형을 포함하는 급행버스 도입노선 우선순위 평가 방법론을 제시하며, 3) 수원시 노선버스 사례를 적용하여 모형의 검증 및 급행버스 도입 효과 도출을 수행하였다.

사례 분석을 통한 급행버스노선 정차정류장 선정모형 적용 결과, 총통행시간 최소화시에는 1인당 5.3%의 통행시간 절감, 총비용 최소화시에는 일일 약 320만원의 사회적 총비용(이용자비용과 운영자비용의 합) 절감을 보여, 대중교통의 경쟁력 제고를 위한 급행버스 최적 서비스 계획을 제시할 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 급행버스 도입노선 우선순위 평가 방법론에서 제시된 다중회귀분석모형 검증 결과, 노선간 급행버스 도입 효율성을 손쉽게 비교하는데 활용될 수 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제시된 모형을 통해 효율적인 급행 서비스 계획 대안을 발굴함으로써 급행 대중교통 서비스 체계의 확산 추세에 일조할 수 있을 것으로 기대된다.

주제어: 급행버스, 교통카드DB, 유전 알고리즘, 노선 평가, 다중회귀분석모형

차 례

제 1 장 서론	1
제 1 절 연구 배경 및 목적	1
제 2 절 연구 내용 및 방법	5
제 2 장 이론 및 선행연구 고찰	7
제 1 절 교통카드DB의 개념 및 활용	7
1. 교통카드DB의 개요	7
2. 교통카드DB의 활용	11
제 2 절 대중교통 노선설계 및 급행 운영체계	17
1. 대중교통 노선설계	17
2. 급행 운영체계 도입 및 분석	22
제 3 절 대중교통 노선 평가	27
제 4 절 유전알고리즘의 활용	29
제 5 절 기존 연구의 한계 및 시사점	34
제 3 장 연구방법론 및 모형 구축	37

제 1 절	연구방법론의 정립	37
1.	연구목표 설정	37
2.	분석체계 구성	37
제 2 절	급행버스노선 정차정류장 선정모형 구축	38
1.	총시간 최소화	40
2.	총비용 최소화	48
3.	승하차 정류장 전환	49
제 3 절	급행버스 도입노선 우선순위 평가 방법론	54
1.	시나리오 분석	55
2.	실제 노선 대상 모형 적용	57
제 4 장	모형 적용 및 평가	58
제 1 절	교통카드DB를 이용한 기초자료 생성	58
1.	교통카드DB의 가공	58
2.	이용특성 분석	62
제 2 절	유전알고리즘의 도입 검토	66
제 3 절	급행버스노선 정차정류장 선정모형 적용 및 평가	73
1.	적용 대상 노선 선정	73
2.	기초자료 구축	75

3. 유전 알고리즘 적용	76
4. 적용 결과 및 평가	84
제 4 절 급행버스 도입노선 우선순위 평가 방법론 적용 및 평가	93
1. 시나리오 분석	93
2. 실제 노선 대상 모형 적용	100
3. 결과 비교 및 평가	102
제 5 절 모형의 검증 및 활용	103
1. 기존 정류장 선정 방법론 적용 결과와의 비교	103
2. 네트워크 차원에서의 급행버스 도입 효과	110
제 5 장 결론 및 향후 연구과제	115
제 1 절 결 론	115
제 2 절 향후 연구과제	117
참고문헌	118
부 록	125

표 차 례

<표 2-1> 교통카드DB의 구성	9
<표 2-2> 교통카드DB의 교통수단코드 구분	10
<표 2-3> 교통카드DB 데이터 형태 예시 (일부 항목 생략)	11
<표 3-1> 승하차정류장 급행버스 정차여부에 따른 이용가능 버스서비스 형태	41
<표 3-2> 정류장 도보 접근영향권 기존 문헌 고찰	50
<표 3-3> 승하차정류장 전환 가능시 이용가능 버스서비스 형태	51
<표 3-4> 시나리오 분석과 실제 노선에 대한 모형 적용의 특성 비교	54
<표 3-5> 급행버스 운영 효율성 영향요인 설정 값	55
<표 4-1> 분석 대상 노선 (73개) 개요 (자료 수집일자 기준)	59
<표 4-2> 행정동별 대중교통 통행량 (자료 수집일자 기준)	62
<표 4-3> 시간대별 대중교통 통행발생량 (자료 수집일자 기준)	63
<표 4-4> 상위 환승인원 역/정류장 (상위 10개)	64
<표 4-5> 행정동별 환승인원 (상위 20개)	64
<표 4-6> 검증 예제의 유전 알고리즘 적용 결과	70
<표 4-7> 급행버스 정류장 선정모형 적용 대상 노선 검토	74
<표 4-8> 유전 알고리즘 코딩에 사용된 용어 설명	78
<표 4-9> 급행버스노선 정차정류장 선정모형 적용 결과 (총통행시간 최소화)	86
<표 4-10> 급행버스 운영비용 절감분에 해당하는 추가차량 투입시 총통행시간	89
<표 4-11> 급행버스노선 정차정류장 선정모형 적용 결과 (총비용 최소화)	90
<표 4-12> 각 시나리오별 O/D 생성 기초자료	93
<표 4-13> 노선연장, 정류장간격, 평균통행거리 영향요인을 반영한 시나리오 조건 표 94	
<표 4-14> 시나리오별 통행시간 변화폭(감축률)	97
<표 4-15> 급행버스 운영 효율성 영향요인별 통행시간 변화폭	99
<표 4-16> 급행버스 도입 효과(통행시간 감축률) 추정 다중회귀분석 결과	100
<표 4-17> 다중회귀분석모형과 급행버스노선 정차정류장 선정모형 결과 비교	100
<표 4-18> 통행시간 절감량 순위 차이에 대한 윌콕슨 부호 순위 검정 결과	103
<표 4-19> 기존 방법론에 따른 분석 대상 노선(300번)의 급행 정차정류장 선정 결과	106
<표 4-20> 기존 방법론에 따른 급행버스 정차정류장 선정시 총통행시간 (시나리오 1) ...	109
<표 4-21> 기존 방법론에 따른 급행버스 정차정류장 선정시 총통행시간 (시나리오 2) ...	110

<표 4-22> 급행버스 일부구간 공유 노선 이용자의 이용가능 버스서비스 형태	112
<표 4-23> 급행버스 분석 노선(300번) 일부구간 공유 노선	112
<표 4-24> 이용가능 버스서비스 형태별 대기·환승시간 적용	113
<표 4-25> 급행버스 일부구간 공유 노선 이용자를 포함한 급행버스노선 정차정류장 선정 모형 적용 결과 (총통행시간 최소화)	114



그 립 차 례

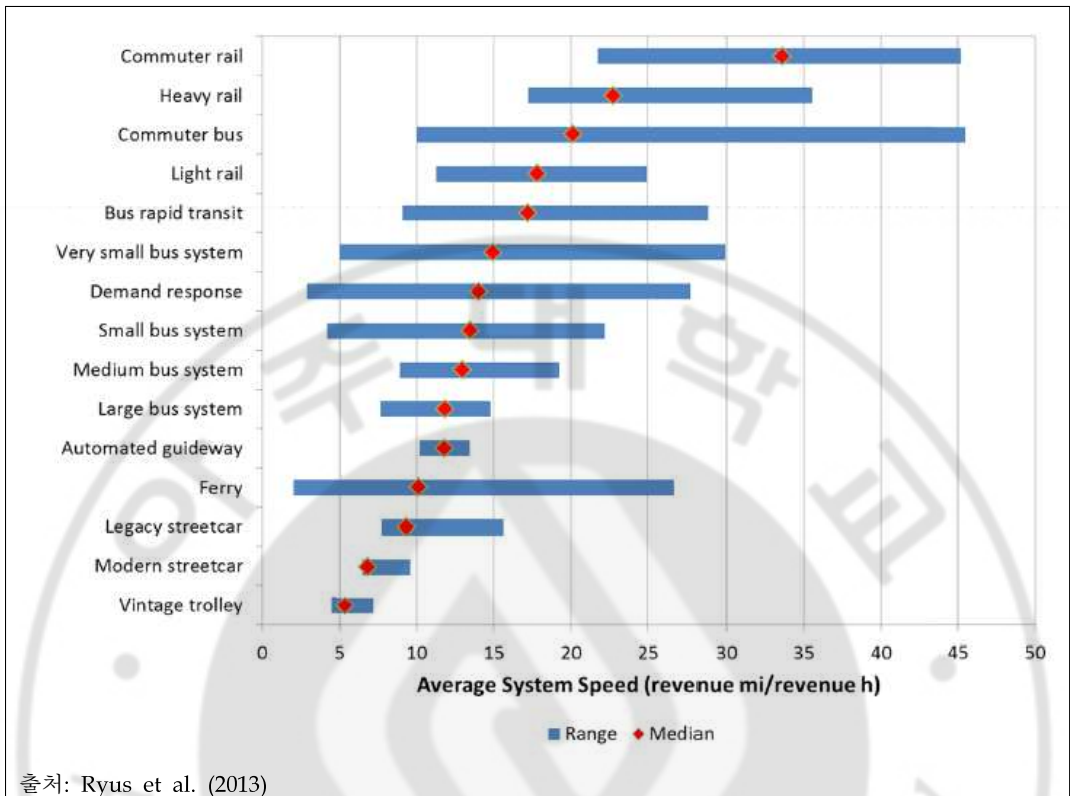
<그림 1-1> 수단별 평균 운행속도	2
<그림 1-2> 연구 내용 및 방법	6
<그림 2-1> 교통카드(AFC)의 대중교통 요금 지불·수집·정산 과정	7
<그림 2-2> 대중교통 운영 계획 과정 흐름도	18
<그림 3-1> 급행버스노선 정차정류장 선정모형의 흐름도 (총시간 최소화시)	39
<그림 3-2> 급행버스노선 정차정류장 선정모형의 흐름도 (총비용 최소화시)	39
<그림 3-3> 승하차정류장 전환에 따른 영향권 변화	52
<그림 4-1> 교통카드DB의 가공	61
<그림 4-2> 시간대별 대중교통 통행발생량 (자료 수집일자 기준)	63
<그림 4-3> 행정동별 환승승하차량 분포	65
<그림 4-4> 유전 알고리즘 검증 예제 노선	69
<그림 4-5> 모집단 크기에 따른 유전 알고리즘 수렴 추이 (모집단 5개)	71
<그림 4-6> 모집단 크기에 따른 유전 알고리즘 수렴 추이 (모집단 10개)	72
<그림 4-7> 모집단 크기에 따른 유전 알고리즘 수렴 추이 (모집단 25개)	72
<그림 4-8> 모집단 크기에 따른 유전 알고리즘 수렴 추이 (모집단 50개)	72
<그림 4-9> 급행버스 정류장 선정모형 적용 대상 노선(300번) 노선도	74
<그림 4-10> 급행버스노선 정차정류장 선정모형의 유전 알고리즘 적용 흐름도	77
<그림 4-11> 급행버스 대수별 승객 총통행시간	87
<그림 4-12> 총통행시간 최소화 수렴 그래프 (일부)	87
<그림 4-13> 급행버스 정류장 선정 결과 (총통행시간 최소화시)	88
<그림 4-14> 급행버스 대수별 총비용	91
<그림 4-15> 총비용 최소화 수렴 그래프 (일부)	91
<그림 4-16> 급행버스 정류장 선정 결과 (총비용 최소화시)	92
<그림 4-17> 분석 대상 노선(300번)의 정류장별 승하차인원	105
<그림 4-18> 기존 방법론에 따른 급행버스 정차정류장 선정 결과 (시나리오 1)	107
<그림 4-19> 기존 방법론에 따른 급행버스 정차정류장 선정 결과 (시나리오 2)	108

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경 및 목적

시내버스는 우리 주변에서 가장 흔하게 접할 수 있는 대중교통 수단 중 하나로 노선 운영의 유연성이 뛰어나고 접근성이 좋아 대부분의 도시에서 특히 중단거리 통행 승객의 주요 교통수단으로 이용되고 있다. 약 1,000만 명이 거주하는 서울시의 경우 지하철 망이 촘촘하게 연결되어있음에도 버스의 수단분담률은 27.4%(2012년 기준, 서울시(2014))를 차지하며, 지역 내부를 연결하는 지하철 망이 상대적으로 미흡한 수원시(약 120만 명 거주)는 약 34.8%의 통행이 버스를 이용하고 있다(2011년 기준, 수도권교통본부(2013)).

그러나 과거 40~50%대에 육박했던 시내버스의 수단분담률은 2000년대 들어 지하철 망의 확대와 승용차 보급 증가, 도로망 확충, 교통정체 증가 등으로 인한 경쟁력 상실로 답보 상태를 보이거나 소폭 하락하는 추세를 보이고 있다. 대중교통의 경쟁력 제고를 위해서는 접근성(accessibility: 통행 유발원으로부터 대중교통 결절점까지의 거리 또는 접근 편의성)과 이동성(mobility: 단위 시간당 이동할 수 있는 범위)이 일정 수준 이상 보장되어야 하나, 두 개념은 상반되는 특성을 가지고 있으며 전철은 이동성 위주, 버스는 접근성 위주로 운영되고 있어 전체 통행시간의 측면에서 전철이나 승용차에 비해 버스의 이동성은 한계를 가지고 있다. 수단별 운행 속도를 비교한 <그림 1-1> (Ryus et al. (2013))에서 볼 수 있듯이, 버스의 경우 전반적으로 철도에 비해 대체적으로 절반 정도의 운행 속도를 보이고 있어 일정 거리 이상 통행의 경우 경쟁력 확보가 어렵다고 볼 수 있다.



<그림 1-1> 수단별 평균 운행속도

서울시의 경우 2004년 7월 대중교통체계 개편을 통해 중앙버스전용차로, 간선 버스노선 도입, 버스정보시스템 도입 등 대중교통의 경쟁력을 높이기 위한 다양한 기법을 도입하였으며 실제 승객 증가, 정시도착률 향상 등의 효과를 보인 바 있으나, Chang et al. (2004)에서 제시한 BRT의 주요 6개 요소(Running ways, Stations, Vehicles, Fare Collection, ITS, Service and Operating Plans)에 비교해 보면 서울시의 사례는 BRT의 형태를 갖추기에는 일부 부족한 측면이 존재한다. 특히 간선노선의 경우에도 예외 없이 해당노선이 통과하는 모든 정류장에 정차 하며 중앙버스전용차로를 이용한다 하더라도 동일 구간에 운행되는 노선수가 많아 정류장에서 승하차 소요시간 및 선행 차량 정차로 인한 정류장 체류 시간이 길어 전체적인 운행속도가 크게 개선되지 못하고 있다.

나날이 증가하는 교통혼잡비용의 절감과 대기환경 개선 등의 측면에서 대중교통 이용은 지속적으로 장려되는 추세로, 이를 뒷받침하기 위해서는 이동성과 접근성 측면에서 대중교통 수단이 승용차 등 개인교통수단에 대한 경쟁력을 담보하여야 한다. 포화 단계에 다다른 대도시 대중교통 인프라 및 노선망에 대한 더 이상의 양적 확대 여력은 크지 않은 실정에서, 급행 서비스 체계는 대규모 예산 투입 없이 대중교통의 접근성과 이동성을 모두 만족시킬 수 있는 대안의 하나로써 최근 도입이 확대되는 추세로 우리나라의 경우 수도권 전철 일부 노선과 광역급행 M버스, 지방 대도시권 급행버스 등에서 그 사례를 찾을 수 있다. 도시교통의 패러다임이 점차 도시 내 단거리 이동은 트램·자전거 등 느린 수단을, 도시 지역간 중장거리 이동은 급행철도(서울9호선, GTX, 신분당선 등)·광역급행M버스 등 빠른 수단을 추구하는 방향으로 이원화되고 있는데, 기존의 시내 및 광역버스 노선 대부분은 최대한의 배후수요 확보를 위하여 짧은 정류장 간격과 높은 굴곡도를 유지하고 있어 지역간 이동성 확보에 한계가 존재한다. 따라서 타 수단에 비해 우수한 접근성 요소는 어느 정도 보장되 버스의 이동성을 향상시키는 시도로써 본 연구에서는 급행버스 도입에 적합한 노선 선정과 급행버스 노선의 정차정류장 선정 방안을 제시하여 급행 대중교통 서비스 체계의 확산 추세에 기여하고자 한다.

현재까지 급행 대중교통 노선과 정차역 선정 및 운영 방안에 대한 체계적 분석은 부족한 실정으로, 급행노선의 선정은 노선 연장이 길고 장거리 통행비중이 높은 노선이나 물리적 도입 여건(차로폭, 추월차로(철도의 경우 대피선로) 등)이 우수한 노선, 정류장 선정은 정류장 이용 승하차 수요가 많거나 타 수단과의 환승이 빈번할 것으로 예상되는 정류장 등 경험적인 요인을 이용한 경우가 대부분이다. 따라서 급행 대중교통 체계의 확산에 앞서 최적 급행 노선 및 정차역의 선정 방법론에 대한 개발이 필요한 실정인데, 최근 교통카드 보급과 이용의 확산으로 전수화에 가까운 통행 데이터를 얻을 수 있다는 점은 급행 체계 도입효과 분석의 정확도를 크게 높일 수 있다는 측면에서 고무적이다. 특히 한국 내

다수 도시의 경우 대중교통요금체계가 탑승거리 비례 요금제로 운영되고 있어 승객이 승차와 하차시 모두 카드를 태그함에 따라 모든 승객의 승하차 위치와 시간 데이터를 획득할 수 있다. 이러한 다양한 장점으로 말미암아 교통카드DB는 수단 및 노선선택모형 추정, O/D 추정, 통행행태 분석 등 다양한 대중교통 분야에서 최근 폭넓게 활용되고 있다.

한편, 기존에 진행되어온 연구는 가상의 도시나 전체 네트워크의 노선체계 개편을 전제로 한 연구가 많으나, 우리나라를 비롯한 대부분의 선진국 도시에서는 자생적 또는 정책적으로 개발된 노선망이 이용자의 만족도와 운영자의 운영 효율성을 극대화하는 방향으로 발전되어오면서 어느 정도 최적해에 근접한 형태로 형성되어있어, 전체 네트워크 노선체계 개편의 필요성보다는 실제 데이터를 기반으로 하여 즉각적으로 적용 가능한 개선책 마련의 중요성이 점차 높아지고 있는 실정이다. 실제 우리나라에서도 최근 서울 지하철 9호선, 수도권 광역급행 M버스, 지방대도시권(부산 등)의 급행버스노선 등 기존 완행 노선체계를 보완하는 급행 운영체계 도입으로 통행시간 단축 및 이용자 증가 등의 효과를 보이고 있으며, 향후 대중교통의 경쟁력 지속적 제고를 위해 관련 연구의 활성화가 필요한 시점이다.

따라서 본 논문에서는 교통카드DB를 활용하여 승객 총통행시간 또는 전체 사회적 비용을 최소화하는 최적 급행 노선 및 정류장 선정 방법론을 제시하고자 하며, 연구의 내용적 범위는 급행체계 도입이 유연하고 도입비용이 경제적인 버스에 국한하여 모형의 구조를 직관화하고 도입 현실성을 높이고자 한다. 이를 통해 통행시간 단축을 통한 대중교통 이용자 편익 개선, 버스운행시간 감소를 통한 운영비용 감축 또는 추가차량 투입효과 기대, 버스 경쟁력 확보를 통한 이용자 증대 및 사회적 편익 증진 등의 효과를 얻는 것을 목적으로 한다. 특히, 본 모형 및 방법론을 통해 기존 노선망에 즉각적으로 적용 가능한 대중교통 효율성 및 경쟁력 증대방안을 제시함으로써 대중교통 정책 방향 및 이용자 요구 사항에 대한 대응책을 마련하는데 기여하고자 한다.

제 2 절 연구 내용 및 방법

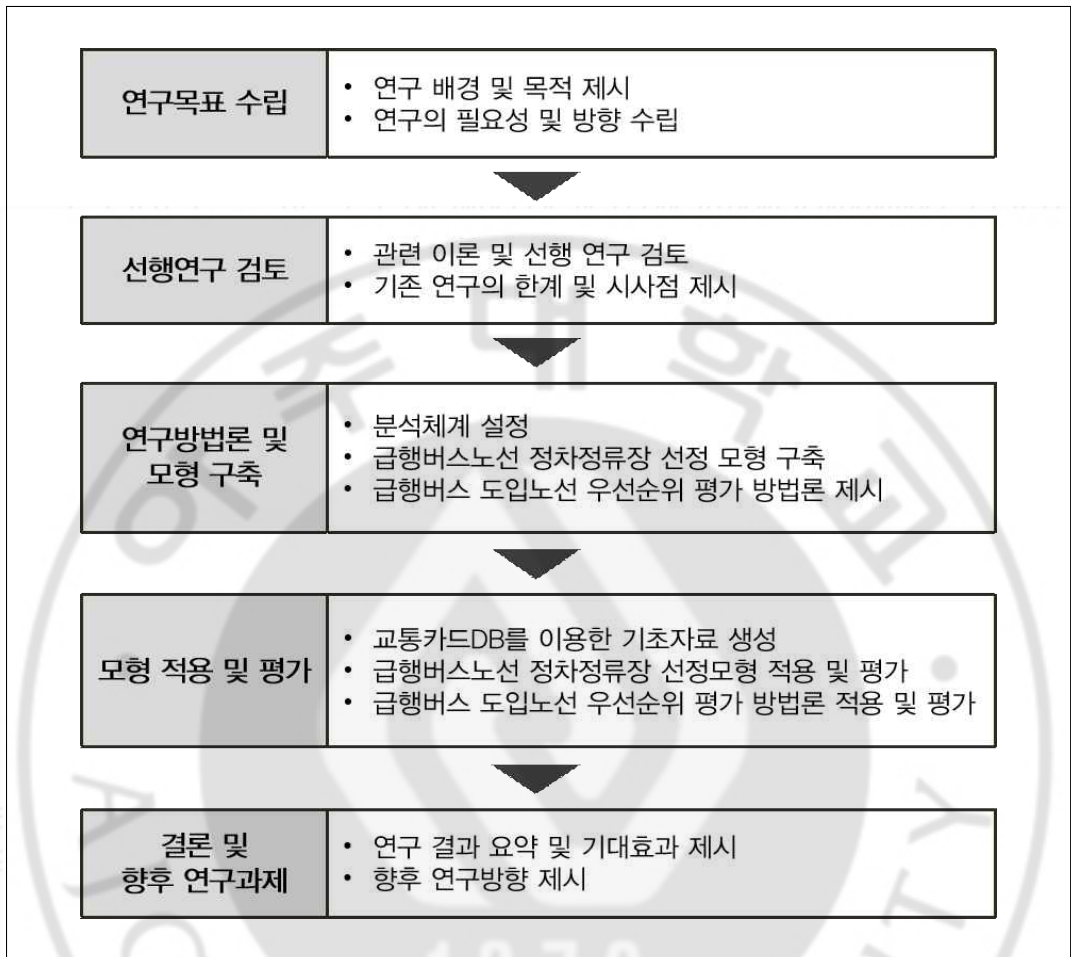
본 연구의 목적은 전수화된 현황 자료라고 할 수 있는 교통카드DB를 통해 승객 총통행시간 또는 전체 사회적 비용을 최소화하는 급행버스 노선과 정류장을 선정하는 방법론을 개발하는 것이다. 기존 문헌 고찰 및 데이터 분석, 급행체계 도입시 차량운행시간 및 승객 총통행시간 추정 기법 개발과 검증, 급행버스 도입노선 우선순위 평가 방법론 개발 및 검증 등이 수행되며 각 장별 주요 연구 내용은 다음과 같다.

제2장에서는 관련 이론과 선행 연구의 검토를 통해 기존 관련연구의 동향과 한계, 개선점을 모색하고, 본 연구의 차별성 제시와 연구 방향 설정 및 이론적 근거를 확립한다.

제3장에서는 본 논문의 연구방법론 및 이를 위한 모형·방법론 구축을 수행한다. 구체적으로는 급행버스노선 정차정류장 선정모형 구축, 노선별 급행버스 서비스 도입 효과를 기반으로 한 급행버스 도입노선 우선순위 평가 방법론을 제시한다.

제4장에서는 유전 알고리즘 도입의 필요성 검토, 제3장에서 구축된 모형을 수원시 실제 노선과 교통카드DB에 적용한 결과물(급행버스 정차 정류장 선정 및 급행버스 도입효과) 검증 및 평가, 급행버스 도입노선 우선순위 평가 방법론의 적용 가능성 등에 대해 논의한다.

제5장에서는 논문의 주요 결과물과 결론을 정리하여 시사점을 도출하고 한계점과 향후 연구 방향을 제시하였다.



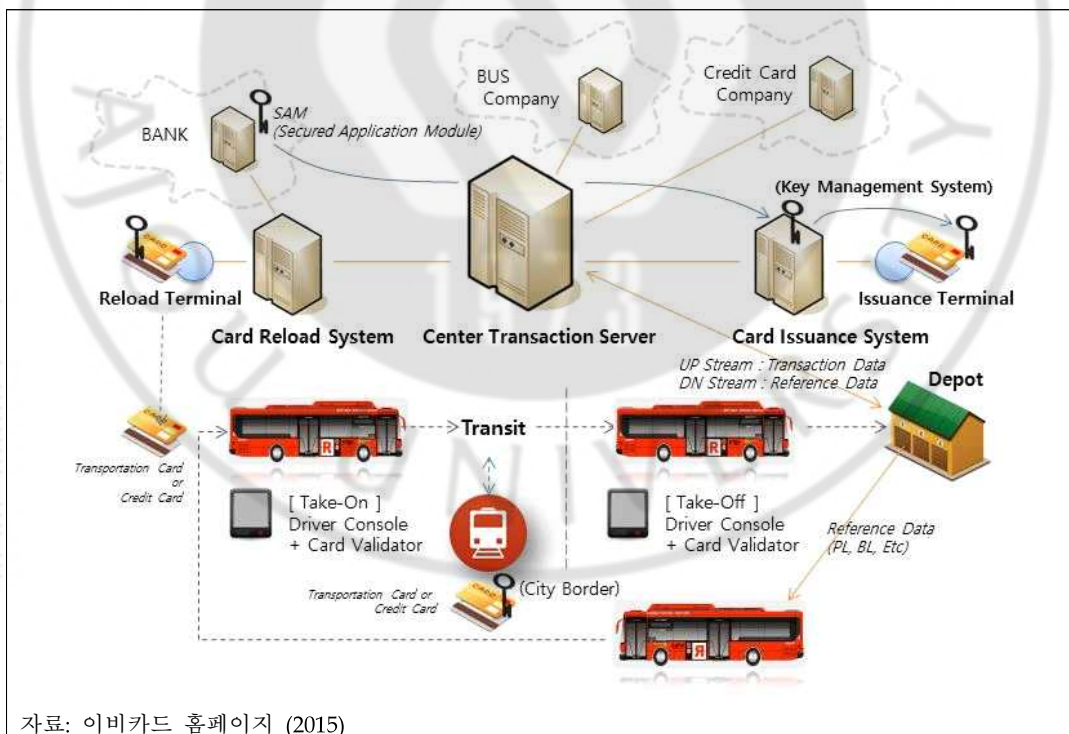
<그림 1-2> 연구 내용 및 방법

제 2 장 이론 및 선행연구 고찰

제 1 절 교통카드DB의 개념 및 활용

1. 교통카드DB의 개요

교통카드(AFC, Automated Fare Collection) 시스템은 대중교통 요금의 지불·수집·정산 과정을 자동화함으로써 요금 관리의 신속성과 정확성을 향상시킬 수 있는 시스템으로, 국내에서는 도입된 지역·수단에 따라 다소간 차이는 있으나 약 95~99%의 이용자가 이용하는 등 모집단에 근접한 대중교통 이용 데이터를 체계적으로 수집·관리하는 것이 가능하다. <그림 2-1>은 교통카드의 대중교통 요금 지불·수집·정산 과정을 나타낸다.



<그림 2-1> 교통카드(AFC)의 대중교통 요금 지불·수집·정산 과정

수도권 교통카드DB는 총 47개의 칼럼(column)으로 구성되어 탑승자 및 일시, 교통수단 등에 대한 정보를 제공하는데, 최초출발지, 환승지점, 최종도착지 및 각각의 교통수단 정보를 통행사슬(trip-chain) 형태(환승을 포함하는 한 통행 전체의 탑승이력들이 한 개의 데이터로 구성)로 구성하고 있어 개별 통행자의 기종점 통행패턴 및 환승 통행패턴에 관련된 정보를 분석할 수 있고, 승하차 시간 정보를 포함하고 있어 시간대별 통행 패턴 또한 분석 가능하다. 기존의 교통조사 등을 통한 통행 자료는 일정 시간 단위로 집계되어 제공됨으로써 정확한 이용 패턴(대기시간 및 환승시간, 차량별 재차인원 등)에 한계가 존재함을 감안할 때, 이러한 교통카드의 특성을 통해 개별 통행자별·차량별 분석이 가능하다는 점은 큰 장점으로 작용한다. 교통카드DB의 구성은 <표 2-1>, 교통수단코드의 구분은 <표 2-2>와 같으며, <표 2-3>에서는 교통카드DB의 데이터 형태 예시를 보여주고 있다. 서울시 버스 및 수도권 전철의 경우 한국스마트카드사(KSCC, Korea Smart Card Company), 인천시 및 경기도 버스의 경우 eb카드사가 교통카드 시스템을 구축·운영중에 있으나 양 기관에서 수집되는 데이터의 주요 구조 및 형태, 자료값(정류장ID 등)은 동일하다.

수도권 통합요금제 시행 이후 서울시 시내버스 단독통행(승차거리에 관계없는 단일요금(기본요금)으로, 승차시만 태그하여도 무방)을 제외한 모든 수단에서는 승하차시 교통카드 태그가 필수적이기 때문에, 대부분의 자료는 승하차 관련 데이터가 정상적으로 기록되어있다. 다만, 일부 데이터의 경우 이용자가 하차시 태그를 하지 않거나 교통카드 시스템상 오류 등의 이유로 하차, 환승 등과 관련된 일부 자료가 누락되어있는 경우가 발생하며, 이러한 데이터를 포함할 경우 분석에 오류가 발생할 수 있으므로 분석 과정에서 이를 배제하고 분석하여야 한다.

〈표 2-1〉 교통카드DB의 구성

컬럼명	구분	설명
UNI_NUM	일련번호	교통카드 일련번호 (암호화)
PNO	사용자번호 재부여	자료 고유번호 관련항목
PCARD_NO	기존 사용자번호	자료 고유번호 관련항목
TRANS_ID	트랜잭션ID	자료 고유번호 관련항목
PASGR	총이용객수	해당 교통카드를 통해 동시에 이용한 이용객수
USER_CLASS	교통카드사용자구분	일반, 초등생, 중고생/청소년, 장애인, 노인 등
MODE1	교통수단코드1	1번째 탑승수단의 교통수단종류 (표 2-2 참조)
MODE2	교통수단코드2	2번째 탑승수단의 교통수단종류 (표 2-2 참조)
MODE3	교통수단코드3	3번째 탑승수단의 교통수단종류 (표 2-2 참조)
MODE4	교통수단코드4	4번째 탑승수단의 교통수단종류 (표 2-2 참조)
MODE5	교통수단코드5	5번째 탑승수단의 교통수단종류 (표 2-2 참조)
BUSLINE_ID1	노선ID1	1번째 탑승수단의 운행노선ID
BUSLINE_ID2	노선ID2	2번째 탑승수단의 운행노선ID
BUSLINE_ID3	노선ID3	3번째 탑승수단의 운행노선ID
BUSLINE_ID4	노선ID4	4번째 탑승수단의 운행노선ID
BUSLINE_ID5	노선ID5	5번째 탑승수단의 운행노선ID
CAR_ID1	차량ID1	1번째 탑승수단의 차량ID
CAR_ID2	차량ID2	2번째 탑승수단의 차량ID
CAR_ID3	차량ID3	3번째 탑승수단의 차량ID
CAR_ID4	차량ID4	4번째 탑승수단의 차량ID
CAR_ID5	차량ID5	5번째 탑승수단의 차량ID
RIDE_TIME1	승차일시1	1번째 탑승수단을 승차한 일시(년/월/일/시/분/초)
RIDE_TIME2	승차일시2	2번째 탑승수단을 승차한 일시(년/월/일/시/분/초)
RIDE_TIME3	승차일시3	3번째 탑승수단을 승차한 일시(년/월/일/시/분/초)
RIDE_TIME4	승차일시4	4번째 탑승수단을 승차한 일시(년/월/일/시/분/초)
RIDE_TIME5	승차일시5	5번째 탑승수단을 승차한 일시(년/월/일/시/분/초)
ALIGHT_TIME1	하차일시1	1번째 탑승수단을 하차한 일시(년/월/일/시/분/초)
ALIGHT_TIME2	하차일시2	2번째 탑승수단을 하차한 일시(년/월/일/시/분/초)
ALIGHT_TIME3	하차일시3	3번째 탑승수단을 하차한 일시(년/월/일/시/분/초)
ALIGHT_TIME4	하차일시4	4번째 탑승수단을 하차한 일시(년/월/일/시/분/초)
ALIGHT_TIME5	하차일시5	5번째 탑승수단을 하차한 일시(년/월/일/시/분/초)
O_RIDE_TIME	최초승차일시	최초 탑승수단의 승차일시
D_RIDE_TIME	최종하차일시	최종 탑승수단의 하차일시
RIDE_ID1	승차역ID1	1번째 탑승수단을 승차한 역/정류소ID
RIDE_ID2	승차역ID2	2번째 탑승수단을 승차한 역/정류소ID
RIDE_ID3	승차역ID3	3번째 탑승수단을 승차한 역/정류소ID
RIDE_ID4	승차역ID4	4번째 탑승수단을 승차한 역/정류소ID
RIDE_ID5	승차역ID5	5번째 탑승수단을 승차한 역/정류소ID
ALIGHT_ID1	하차역ID1	1번째 탑승수단을 하차한 역/정류소ID
ALIGHT_ID2	하차역ID2	2번째 탑승수단을 하차한 역/정류소ID
ALIGHT_ID3	하차역ID3	3번째 탑승수단을 하차한 역/정류소ID
ALIGHT_ID4	하차역ID4	4번째 탑승수단을 하차한 역/정류소ID
ALIGHT_ID5	하차역ID5	5번째 탑승수단을 하차한 역/정류소ID
O_RIDE_ID	최초승차역ID	최초 탑승수단을 승차한 역/정류소ID
D_ALIGHT_ID	최종하차역ID	최종 탑승수단을 하차한 역/정류소ID
TOTAL_FREQ	총수집건수	개별 탑승건수의 합계
AREA	자료구분	한국스마트카드(KSCC) 및 EB카드 자료구분

〈표 2-2〉 교통카드DB의 교통수단코드 구분

구분	코드(ID)	설명	구분	코드(ID)	설명
서울시 버스	105	마을버스	경기도 버스	509	도시형(700)-2
	115	간선버스		510	도시형(700)-3
	120	지선버스		511	일반버스-기본요금
	121	지선버스		512	도시형(800)-2
	122	지선버스		513	도시형(800)-3
	130	광역버스		514	도시형(650)-2
	131	광역버스		515	좌석(1100)
수도권 전철	151	마을버스		516	좌석(1200)
	200	도시철도(공통)		517	좌석(1300)-1
	201	서울메트로		518	좌석(1300)-2
	202	한국철도공사		519	좌석(1300)-3
	203	서울도시철도공사		520	좌석(1300)-4
	204	인천교통공사		521	좌석(1300)-5
	205	9호선		522	좌석(1300)-6
	206	공항철도		523	좌석(1300)-7
	207	공항철도-수도권		524	좌석(1300)-8
인천시 버스	208	신분당선		525	좌석(1300)-9
	470	인천간선		526	고급좌석(1400)-1
	475	인천급행간선		527	고급좌석(1400)-2
	476	인천시내좌석		528	고급좌석(1400)-3
	480	인천지선		529	고급좌석(1400)-4
	481	인천마을버스		530	경기좌석(530)
	486	인천공항좌석		531	경기좌석(531)
	487	인천광역구버스		532	경기좌석(532)
	488	인천광역버스		533	경기좌석(533)
	490	인천좌석버스		534	고급좌석(1500)-1
	496	국토부인천광역1		535	고급좌석(1500)-2
경기도 버스	497	국토부인천광역2		536	고급좌석(1500)-3
	498	국토부인천광역3		537	고급좌석(1500)-4
	500	일반버스-거리비례제		550	경기순환버스
	501	도시형(500)		570	국토부경기광역1
	502	도시형(550)		571	국토부경기광역2
	503	도시형(580)		572	국토부경기광역3
	504	도시형(600)-1		580	경기 마을버스(580)
	505	도시형(600)-2		581	경기 마을버스(581)
	506	도시형(600)-3		582	경기 마을버스(582)
	507	도시형(650)-1		583	경기마을버스(583)
	508	도시형(700)-1		599	경기 시외버스

〈표 2-3〉 교통카드DB 데이터 형태 예시 (일부 항목 생략)

카드 번호	탑승 횟수	사용 자 구분	수단 코드 1	수단 코드 2	노선 ID 1	노선 ID 2	차량 ID 1	차량 ID 2	승차일 시 1	승차일 시 2	하차일 시 1	하차일 시 2	승차 역 ID 1	승차 역 ID 2	하차 역 ID 1	하차 역 ID 2
5.41 E+19	1	1	500		410 310 20		141 703 619		201310 161244 13		201310 161312 11		4108 169		4116 845	
1.01 E+19	1	4	500		410 062 55		141 781 063		201310 161954 43		201310 162021 23		4170 101		4111 867	
1.01 E+19	2	1	500	500	410 031 03	410 020 90	141 772 665	141 773 316	201310 160949 28	201310 161017 49	201310 161015 35	201310 161020 56	4108 134	4116 887	4116 887	4111 872
1.01 E+19	1	1	500		410 031 03		141 772 651		201310 160638 16		201310 160722 03		4100 158		4116 897	
1.02 E+19	1	4	500		410 081 48		141 761 053		201310 162316 20		201310 162331 41		4117 032		4179 337	
1.02 E+19	1	4	500		410 020 46		141 773 309		201310 161821 42		201310 161826 45		4116 955		4117 067	
1.02 E+19	1	4	500		410 020 46		141 771 537		201310 160619 44		201310 160650 28		4116 671		4116 760	
1.04 E+19	2	1	533	583	410 081 54	412 040 03	141 701 179	141 708 431	201310 161258 20	201310 161323 55	201310 161308 49	201310 161327 49	4117 049	5173 190	4160 270	5372 430
3.56 E+19	1	1	500		410 310 50		141 701 703		201310 161524 59		201310 161546 53		4150 178		4116 940	
3.56 E+19	2	1	500	500	410 361 08	410 080 04	141 701 239	141 761 005	201310 160800 23	201310 160819 11	201310 160803 48	201310 160836 57	4108 221	4108 044	4108 044	4108 011
3.79 E+19	2	1	533	200	410 081 54	200 000 00	141 701 132	999 999 999	201310 161220 56	201310 161309 39	201310 161306 53	201310 161332 56	4114 200	433	4116 659	4119
4.52 E+19	2	1	500	500	410 020 46	410 024 78	141 771 640	141 771 799	201310 161836 05	201310 161840 47	201310 161839 38	201310 161850 16	4108 062	4116 899	4116 899	4116 828

2. 교통카드DB의 활용

교통카드DB는 기존의 대규모 통행행태 조사를 대신하여 정확도 높은 방대한 RP(Revealed Preference) 자료를 제공함으로써 대중교통 분야에서 폭넓게 활용되고 있는데, 크게 수단 및 노선선택모형 추정, O/D 추정, 통행행태 분석 등에서 그 활용 예를 찾을 수 있다.

Morency et al. (2007)은 캐나다 퀘벡 Gatineau시의 대중교통망에서 수집된 277일간의 대중교통 통행 자료 620만 건을 수집하고, 이 중 7,118개 개인 스마트 카드의 약 220만 건 탑승 자료를 분석 대상으로 정하여 사용자 유형별(성인, 청소년, 노인) 월별 통행특성, 개별 통행자의 시공간적 대중교통 이용 패턴 등을 분석하였다. 또한 군집분석을 이용하여 시간적 이용 패턴을 총 5개 유형(학생, 노인, 성인(일반), 성인(급행), 성인(지역간))로 분류하였다. 다만 승차 자료만이 존재하는 점, 군집분석 유형 구분이 일부 모호한 자료가 있는 점 등은 연구의 한계로 지적하였다.

Kurauchi et al. (2014)은 차량의 도착 시간, 배차 간격, 요금 등에 의해 달라질 수 있는 대중교통 복수 경로의 선택 행태를 교통카드 자료를 통해 분석하였다. 런던의 오전 출근시간대 버스 탑승 시계열 자료(약 2주간, 일평균 약 630만 건)를 n-step Markov 모델을 통해 분석한 결과 매일 동일한 노선을 이용하는 이용자는 20% 내외에 불과한 것으로 나타났으며, 요일에 따른 유의한 영향은 없는 것으로 나타났다. 다만 교통카드 탑승 기록이 GPS와 연계되어있지 않아 정확한 탑승 위치 추적이 어려운 점과 탑승 버스 ID 대신 버스 노선번호만이 기록되는 점은 분석의 한계로 지적하였다.

Janosikova et al. (2014)은 슬로바키아 질리나(Žilina)시 교통카드 자료 1주일 분 약 11만 5천 건을 통해 기종점별 복수 노선간 선택 모형을 도출하였다. 도로망과 운행스케줄 자료 등을 함께 이용하여 차내시간, 환승이동시간 및 접근시간, 환승여부 등을 효용값 산출에 반영하였으며, 선택 모형에는 MNL(Multinomial Logit) 모형을 활용하였다. 분석 결과 첨두·비첨두 시간대에 관계없이 노선 선택에는 차내시간이 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났고, 이어서 첨두시간대에는 배차간격, 환승횟수, 도보시간의 순, 비첨두시간대에는 도보시간, 환승횟수, 배차간격의 순으로 영향이 큰 것으로 나타나 시간대별로 차외시간에 대한 가중치가 다른 것으로 도출되었다.

Wang (2010)은 런던시의 대중교통 통행데이터(ADCS, Automatic Data Collection Systems)를 통해 버스노선 승객의 O/D 추정과 통행 행태를 분석하였다. 교통카드(AFC) 자료를 활용하여 개별 통행자의 승차 지점을 기점(origin)으로 설정하는 한편, 하차시에는 교통카드 태그를 하지 않기 때문에 차량 운행 데이터(AVL, Automatic Vehicle Location)를 함께 활용하여 다음번 승차 수단의 탑승 지점을 이전 통행의 종점(destination)으로 설정하였다. 이후 분석 자료를 기반으로 노선별 시간대별 이용 추이, 환승 정류소 및 환승시간 등을 분석하였다.

Jun and Dongyuan (2013)은 중국 난닝 시의 스마트카드 자료 및 GPS, 정류장 좌표, 기타 운영 데이터 등을 이용하여 통근 통행자의 기종점을 추정하고자 하였다. 난닝 시에서는 승차시에만 스마트카드를 태그하기 때문에, 대중교통 통근에 3가지 가정(오전 침두시 출근 및 오후 침두시 퇴근, 오전 침두시 승차 정류장이 거주 지역, 오후 침두시 승차 정류장이 근무 지역)을 설정하여 기종점을 추정하였다. 추정 알고리즘을 개발하여 기종점 추정 후 “통행사슬(trip-chain)” 방법에 따른 기종점 추정치와 비교한 결과 해당 연구의 모형 추정 정확도는 84~98% 수준으로 나타났다.

Nassir et al. (2011)은 미국 미네아폴리스-세인트폴 광역권의 교통카드 자료 및 차량 운행데이터(AVL)를 이용하여 개별 승객의 기종점 정류장을 분석하고자 하였는데, Wang(2010) 및 Jun and Dongyuan (2013)의 연구와 마찬가지로 하차 데이터는 존재하지 않기 때문에 이에 대한 추정이 필요하다. 하차 정류장 추정 모델에는 교통카드 자료, 차량 배차 자료, 승객 카운터 자료가 사용되었고, 환승 및 배차시간을 고려한 환승 통행 추정 모델도 함께 개발하였다. 하차 정류장 추정의 기본 원칙으로는 다음 통행의 탑승 지점을 이전 통행의 하차 지점으로 추정하되, 시간적·공간적 논리성을 검토하여 추정의 정확성을 검증하였다.

Agard et al. (2006)은 캐나다 가티노 시의 스마트카드 통행 자료를 통해 이용

자 행태를 분석하고자 하였다. 데이터 필터링, K-mean 및 HAC (Hierarchical Ascending Clustering) 군집분석, 그룹 특징 분석 등의 데이터 마이닝 기법을 통해 승차 시간대, 연령대(성인/학생/노인), 분석기간(12주)동안의 통행 일관성 등을 기반으로 이용자 유형을 4개로 분류하였다.

Tao et al. (2014)은 호주 브리즈번 시의 버스 이용자 교통카드 자료를 이용하여 BRT 이용자의 시·공간적 통행 특성을 분석하고자 하였다. 버스 운행 데이터와 BRT/non-BRT 통행 구분을 통해 각각의 시공간 패턴을 분석한 결과, BRT 이용자의 장거리 통행 비율이 상대적으로 높으나, BRT/non-BRT의 시간적 이용 패턴은 유사하고, BRT 노선이 브리즈번 시의 주간선 역할을 담당하는 것으로 나타났다.

Nishiuchi et al. (2013)은 일본 고치 시의 스마트카드 자료(1개월분)를 이용해 승객 일일 통행의 시공간적 패턴을 분석하여 승객 통행 패턴의 다양성을 확인하고자 하였다. 시간대별·요일별 AVOVA 분석, 이용자 유형별 통행 빈도 분석, 공간적·시간적 집중도(전체 통행 중 시간적·공간적으로 가장 높은 빈도가 차지하는 비율) 분포 분석 결과, 주중 일일 통행수는 일정한 수준으로 나타났으나 이용자 유형별 통행 패턴은 다양한 것으로 나타났다.

박종수와 이금숙 (2006)은 데이터 마이닝 기법 중 순회 패턴 탐사법을 이용하여 대용량의 교통카드 데이터에서 통행패턴의 공간적 특징과 시점간 차이를 분석하고자 하였다. 3개년간 각기 다른 시점의 일일 교통카드 자료로부터 통행 시퀀스 자료를 생성한 뒤 1회 통행시간의 빈도분포, 시간대별 수요의 출발 및 도착 분포 지역 등 통행패턴 특성 분석 결과를 제시하였다.

신성일 등 (2008)은 교통카드 자료를 이용한 지역간 대중교통 서비스 평가 지표와 평가 모형 구축 방안을 제시하였다. 우선 교통카드 데이터에서 도출 가능한 평균 통행시간, 평균 통행속도, 총 환승횟수, 평균 환승시간, 평균 승차요금, 지역간 통행특성을 서비스 평가 지표로 선정하여 각 지표의 산정 방법을 제시

하였고, 정류장 기반 네트워크와 지하철 이용경로 행태모형, 지리정보체계 연계 등을 기반으로 경로기반 통행배정 모형 및 유사통행경로 모형을 이용한 서비스 평가 모형 구축 방안을 제시하였다.

천승훈 (2010)은 효율적 교통체계 구축을 위한 통합대중교통망에 있어 환승 행태를 반영한 통행배정모형을 개발하는데 교통카드 자료를 활용하였다. 경로통행배정 모형은 크게 통합대중교통망 구축, 효율적 최적 대안경로 선정, 경로선택모형 구축의 3단계로 구성되었는데, 교통카드의 실제 기종점간 경로 이력자료를 활용하여 불필요한 경로탐색 범위를 배제함으로써 시간과 노력을 절약하고 실제 이용자 행태를 반영할 수 있는 효율적인 모형을 구축하였다.

빈미영 등 (2011)은 경기도의 교통카드 자료를 이용하여 통행패턴을 분석하고 활용방안을 제시하였다. 통행사슬(trip-chain) 단위(최초 출발지에서 최종 목적지까지 환승을 포함한 총 통행)로 통행 자료를 집계하여 시·군별 내외부 통행량과 환승횟수, 시간대별 통행수요 등 통행패턴 현황을 분석하고, 이용수요와 평균 대기시간 및 접근거리, 환승횟수 지표를 군집 분석한 결과와 관광지 유형을 접목하여 환승정류소 유형을 구분하였다. 이에 대한 활용방안으로 정류소 개선사업 대상지 선정에 대하여 시나리오별 분석 결과를 제시하였다.

임용택 등 (2012)은 장래 통행패턴의 변화를 반영하고 있는 교통DB와 현재 통행패턴을 가장 잘 나타내는 교통카드 자료의 장점을 접목시켜 통행분포 추정 of 정확도를 향상시키고자, 교통카드 데이터에서 관측된 실제 통행량과 모형 추정 통행량의 차이를 최소화시키는 통행분포모형 계수(parameter) 추정에 관한 연구를 수행하였다. 서울 한강이남 지역을 대상으로 행정동 단위의 O/D를 구축하여, 이중제약 중력모형을 기반으로 관측통행량과 추정통행량의 차이를 최소화하는 계수 추정 결과를 제시하였다.

이인묵 등 (2013)은 교통카드 데이터를 활용한 연구와 정책 동향을 조사 및 제시하였다. 교통카드 데이터의 활용은 서울시 버스개편 이후인 2006년부터 시

작되어 대중교통 O/D 추정, 통행사슬 분석, 환승행태 분석 등 통행행태 분석의 기초적 방법론으로부터 유관 데이터와의 연계 분석, 교통카드 데이터 기반의 대중교통 운영계획 및 효과분석 소프트웨어 개발 등 응용 연구가 수행되고 있음을 검토하였다. 또한 서울시 및 기타 지자체, 중앙정부 등에서는 교통카드 데이터를 활용하여 수요 맞춤형 서비스 시행, 대중교통 최적경로 서비스 제공, 버스 노선체계 개편, 관련 정책 수립을 위한 통계자료 배포 및 관련연구 수행 등의 정책을 펼치고 있는 것으로 조사되었다.

한상욱 등 (2015)은 교통카드 자료를 활용하여 수도권 주요 역세권별로 대중교통 통근통행자의 주거지 분포를 분석하여 서울시 공간 위계체계에 대한 실증적 검토를 수행하였다. 평일 출퇴근 시간에 통행한 교통카드 자료를 기반으로 강남, 종로, 여의도 중심업무지구 및 기타 업무활동 중심지에 대한 출발지 분포를 조사하였으며, GIS 공간보간법을 통해 각 버스정류장 및 지하철역 승차 인원으로부터 각 배후 주거지역별 공간구조를 파악하고 지도화를 통해 공간구조를 표현하였다.

김경태 등 (2015)은 교통카드 자료를 활용하여 서울시 버스 노선의 굴곡도를 평가하고자 하였다. 기존의 굴곡도 평가는 기종점간 통행거리와 최단거리/직선거리의 비로 정의(노선굴곡도)되었는데, 이러한 개념은 실질적인 대중교통 이용자 통행특성 반영이 어렵다는 한계에 착안하여 실질적인 승객의 통행 특성을 반영한 경로굴곡도의 개념을 제시하여 합리적인 버스 노선 계획 및 운영을 도모하고자 하였다. 구체적으로는 특정 노선에 대하여 교통카드 자료로부터 개별 통행자의 경로를 추출하고, 각 승객이 이용한 경로의 실제 운행거리와 최단(직선)거리의 비를 조사하여 전체 이용객에 대한 통행거리 가중 평균 값을 산출하였는데, 사례 분석을 통해 노선굴곡도와 경로굴곡도를 비교한 결과 노선굴곡도에 비해 대체로 굴곡의 정도가 완화되는 것으로 나타났으며, 경로굴곡도가 낮을수록 이용수요가 더 많은 것으로 나타났다.

제 2 절 대중교통 노선설계 및 급행 운영체계

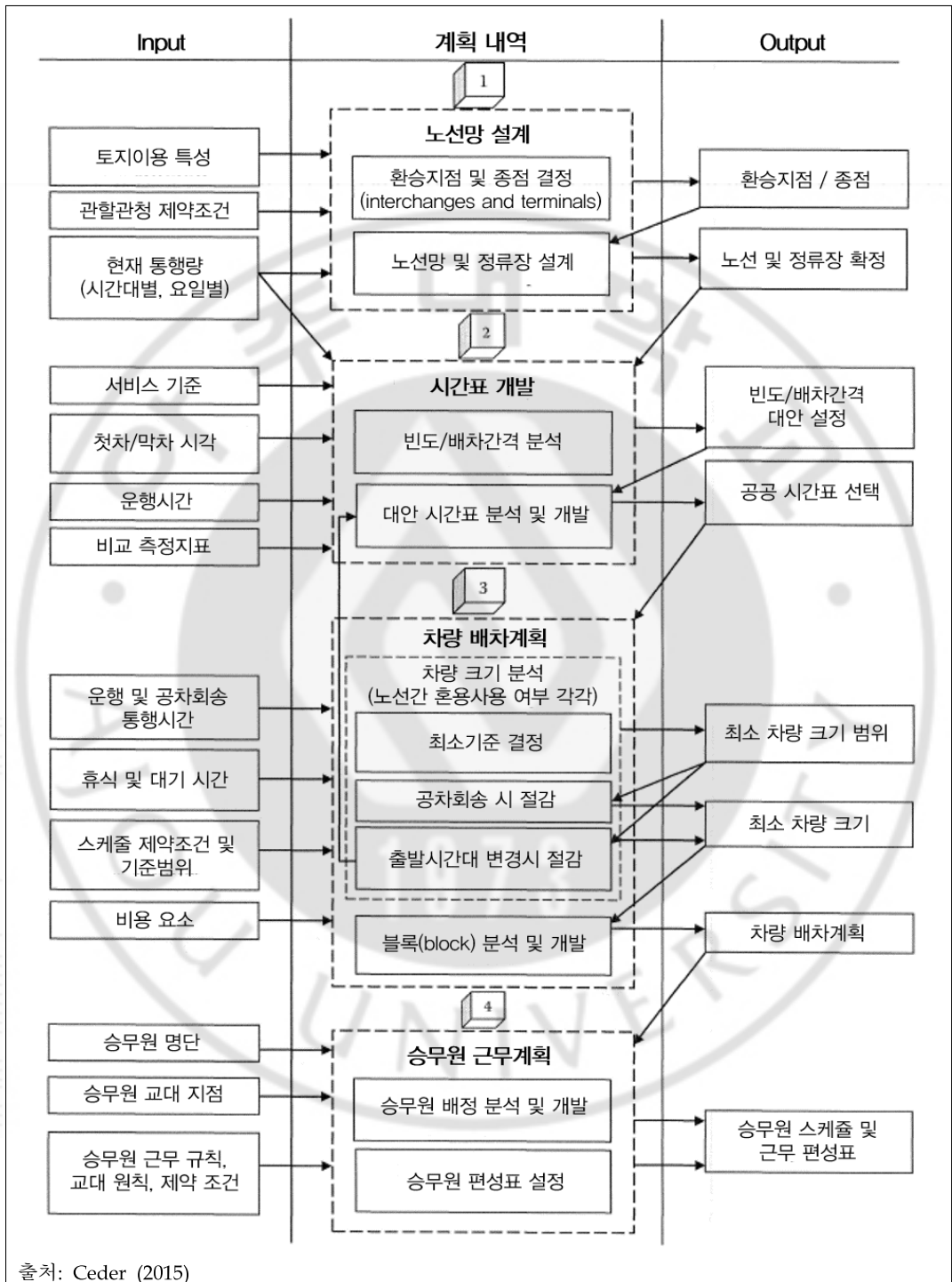
1. 대중교통 노선설계

대중교통 노선망 설계 문제(TRNDP, Transit Route Network Design Problem)는 모형의 복잡성과 규모의 방대함에 기인하여 대표적인 NP-난해 문제(NP(Non-deterministic Polynomial)-hard, NP에 속하는 어떠한 문제를 다항 시간(polynomial-time)에 다대일(many-one)로 환산할 수 있는 문제)의 하나로 꼽히며, 본 논문에서는 직접적으로 TRNDP에 대하여 논하지는 않고 있으나 이를 응용한 모형을 개발하는 만큼 전체적인 틀과 그간의 연구 동향에 대해 살피고자 한다.

Ceder (2015)는 대중교통 운영 계획 과정을 크게 노선망 설계, 시간표 개발, 차량 배차계획, 승무원 근무계획 등 4단계로 제시하였으며, 각각에 대한 세부적인 내역과 입력 및 출력 자료의 흐름을 <그림 2-2>와 같이 제시한 바 있다. 대중교통 노선망 설계는 이 중 가장 첫 번째 단계에 해당하며 이후 단계의 기초 자료로 활용되는 중요도 높은 과정이다. 노선망 설계에 대한 구체적인 절차는 목적함수 설정 및 풀이법 결정과 노선 선택 및 배정 단계로 구성되는데, 목적함수 설정시에는 3개 이해당사자(이용자, 운영자, 관할주체)의 견해와 4가지의 기준(승객 대기시간 최소화, 공석 최소화, 최단 경로와의 시간차 최소화, 차량 소요대수 최소화)을 고려하도록 명시하고 있다. 목적함수는 총효용(Z_1)과 차량 소요대수(Z_2)를 최소화하는 2개의 함수를 기본 형식으로 제시하고 있으며 이는 다음과 같다.

$$Z_1 = \begin{cases} a_1 \sum_{i,j \in N} WT(i,j) + a_2 \sum_r EH_r + a_4 \sum_{i,j \in N} DPH(i,j) & , for\ single\ set \\ a_1 \sum_{i,j \in N} WT(i,j) + a_2 \sum_r EH_r + \sum_{i,j \in N} [a_3 PH(i,j) - a_4 DPH(i,j)] & , for\ comparison \end{cases} \quad (2-1)$$

$$Z_2 = FS \quad (2-2)$$



<그림 2-2> 대중교통 운영 계획 과정 흐름도

여기서 $PH(i,j)$ 는 i 와 j 사이간 승객통행시간(passenger hours), $DPH(i,j)$ 는 i 와 j 사이간 최단경로 이용시의 승객통행시간과 $PH(i,j)$ 의 차이, $WT(i,j)$ 는 i 와 j 사이간 대기시간, EH_r 는 노선 r 의 시간당 공석(empty seat/space-hours), FS 는 차량 소요대수(fleet size)를 의미하며, a_k 는 가중치(금전적 가치 등)에 해당한다. 즉, <식 2-1>에서는 승객 총대기시간 최소화, 공석 최소화를 통한 차량 활용도 최대화, 통행시간 손실을 최소화한 노선 경쟁력 제고를, <식 2-2>에서는 차량 소요대수 최소화를 통한 운영 효율 증가를 목적으로 한다.

이어서 노선 선택 및 배정 단계에서는 승객의 다양한 노선 선택 행태와 영향 요소를 반영하여 복수의 노선 대안 각각에 대한 선택 확률을 추정하고자 하였다. 복수 노선 대안의 선택 확률 모델링에는 각 노선의 대기시간을 주요한 변수로 적용함과 동시에, 차내시간 차이, 승객의 정류장 도착 분포, 차량 배차간격 분포 등을 일부 반영하였다. 모형의 기초 자료로는 각 기종점간 정확한 노선망 구조, 단일 및 환승 경로에 대한 차내 시간, 승객 대기시간, 복수 노선에 대한 승객의 대기 원칙, circular problem (승객 수요와 배차 간격간의 인과관계 딜레마), 네트워크의 크기(규모가 큰 경우 각 기종점 쌍을 분리하여 처리하는 대신 동시에 분석) 등이 확보되어야 한다. 도시부 노선은 정해진 스케줄이 아닌 일정 간격마다 운행하는 경우가 많기 때문에 대부분의 승객은 무작위로 도착하며 기존의 반복적 이용을 통해 승객이 각 노선의 배차간격 분포와 평균 차내 통행시간을 인지하고 있을 때, 정류장 도착 후 대기 경과시간이 노선 선택에 영향을 주는 것을 기본 전제로, 대기시간과 차내시간을 합한 총 통행시간이 최소화되는 노선을 선택하도록 모형을 구성하였다.

Guihaire and Hao (2008)는 대중교통 노선망 설계 및 스케줄링에 관련된 기존 연구의 목적함수와 제약조건, 적용 방법론 등에 대한 비교 검토를 수행하고 향후 요구되는 연구 방향을 제시하였다. 대체적으로 모형은 과거 QSAP(Quadratic Semi-Assignment Problem)에서 최근에는 이진 변수와 연계한 MINLP(Mixed Integer Non-Linear Program)도 사용하는 추세이며, 최적화 기법

에 대한 범주를 분류한 결과 그리디 휴리스틱(greedy heuristic) 기법, 모의 담금질(simulated annealing) 및 터부(Tabu) 탐색법 등의 이웃탐색(neighborhood search) 기법, 유전 알고리즘 등의 진화적 탐색 기법, 두 개 이상의 방법을 혼합한 하이브리드 탐색 기법 등 4개 범주로 정리되었다. 과거 연구들의 목적함수와 제약조건 및 적용 방법론을 연도순으로 나열하여 정리한 결과, 목적함수는 과거 총통행시간, 차량소요대수, 환승횟수, 승객수, 환승 최적화 등 승객 중심의 관점에서 최근에는 이와 더불어 운영 비용, 총 시스템비용, 이윤, 서비스영역 범위 등 운영자적 관점의 목적함수가 함께 고려되는 것으로 나타났다. 제약 조건의 경우 차량 정원, 수요, 예산, 최소/최대 배차간격, 환승 횟수, 노선 연장, 승객 최대 대기시간 등 다양한 요인이 고려되었으며, 최적화 기법으로는 과거 수학적 방법론 및 일반적 휴리스틱 방법론에서 발전하여 최근에는 이웃탐색 기법, 진화적 탐색 기법 등의 활용도 활발한 것으로 나타났다.

Kepaptsoglou and Karlaftis (2009) 역시 대중교통 노선망 설계 문제의 과거 연구 동향에 대하여 목적함수, 운영환경 변수 및 풀이 기법에 대한 비교 검토를 수행하였다. 우선 목적함수는 사용자 편익 최대화, 운영자 비용 최소화, 총 편익(welfare) 최대화, 용량 최대화, 에너지 절약(환경 보호), 개별 변수 최대화 등 크게 6가지 범주로 분류되었는데, 전반적으로 많은 연구는 총편익 최적화(이용자 관점에서는 통행시간 최소화, 환승 최소화, 서비스영역 범위 최대화, 운영자 관점에서는 효율 및 서비스수준 최대화, 운영비용 최소화, 이윤 최대화, 차량 소요대수 최소화 등)를 목적함수로 설정하였으며 일부 연구에서는 이용자, 운영자, 환경적 측면 등 특정 계층에 초점을 맞춘 목적함수를 설정하였다. 운영환경 변수 중 결정 변수로는 노선 및 배차간격, 노선 연장, 요금, 차량 크기 등이 설정되었고, 네트워크 구조는 과거 직사각 격자형이나 방사형 구조에서 최근에는 비정형 격자 구조가 많이 이용되는 추세이며, 수요 패턴은 대부분 다대다(many to many), 수요는 고정된 형태이거나 시공간 및 서비스에 따라 변화하는 형태로 설정되었다. 마지막으로 풀이 기법으로는 과거 전통적 분석 기법에서 NLP,

휴리스틱 기법을 거쳐 최근에는 유전 알고리즘 등 메타휴리스틱 기법이 많이 활용되고 있는 것으로 나타났다. 특히 과거 연구가 주로 노선 생성 및 배치에 치중한 반면 최근 일부 연구는 기존노선 개선을 다루고 있어 기존에 생성된 노선의 효율성 강화가 점차 중요해짐을 시사하고 있다.

Farahani et al. (2013)은 도로 및 대중교통 네트워크 설계 문제에 대하여 기존 연구에서의 정의 및 구분, 목적함수, 제약조건, 네트워크 위상 결정변수, 풀이 기법에 대한 전반적인 비교 검토를 수행하였다. 대중교통 네트워크 설계에 대한 주요 입력 변수를 정리한 결과, 가용 네트워크, 추정 통행수요, 가용 예산, 버스의 용량, 최대 노선수, 사전 설정 노선, 최소/최대 왕복노선운행시간, 배차간격, 최대 정류장수, 최소한의 서비스영역 범위, 최대 환승횟수 등이 사용되었으며, 배차간격 결정을 동시에 하는 경우에는 최대 차량대수 및 최소 배차간격 변수 등이 추가로 사용되었다. 일반적인 제약조건으로는 기존 노선에 대한 의존성, 지역 범위, 노선 및 통행의 직결성(directness), 개별 통행수요의 서비스 기준 충족, 네트워크의 전체적인 형태 등이 사용되었다. 특히 목적함수는 대부분 가중치가 적용된 총계가 사용되었고, 최적화 풀이의 복잡성을 방지하고자 승객의 행태는 매우 단순한 가정이 적용됨과 동시에 버스 외 교통수단에 대한 도로 혼잡의 가중은 배제되었다. 풀이 기법으로는 네트워크 설계 문제에 내포된 NP-난해 문제의 특성상 후보 노선 집합을 생성하여 반복 풀이를 거치는 휴리스틱과 메타휴리스틱을 활용하는 경우가 많았으며, 과거 일반적인 휴리스틱 기법이나 수학적 풀이 기법에서 최근에는 유전 알고리즘, 그리디(greedy) 탐색, 모의 담금질, 터부(Tabu) 탐색 등 다양한 기법이 적용되는 것으로 조사되었다. 한편 장래 연구방향으로는 환경 관련 목적함수를 고려한 목적함수 설계, 시간 종속적 결정변수 설계, 보다 현실적인 승객 행태의 가정, 다양한 메타휴리스틱 기법의 적용 및 비교 등을 제시하였다.

2. 급행 운영체계 도입 및 분석

Schwarcz (2004)는 시카고 대중교통국 (CTA, Chicago Transit Authority) 사례 분석을 통해 간선축에 대한 급행/일반 버스 이원화 서비스 제공에 대하여, 급행 버스 서비스 평가 모델과 설계 지침을 개발하고자 하였다. 급행버스 서비스의 평가 척도로는 4가지를 제시하였는데, 여기에는 시장 점유율('완행 선호'와 '급행 선호', '선택적 탑승(choice rider)'으로 분류하여, 실질적 통행시간 절감을 선호하는 '급행 선호' 승객 비율이 높아야 성공적), 정류장 및 노선 배정(완행 정류장과 급행 정류장 대기 승객 비율을 예측하는 '정류장 배정', 완행 버스와 급행 버스의 이용 승객 비율을 예측하는 '노선 배정'), 승객통행시간 변화율(급행버스 서비스 도입시 총통행시간(접근, 대기, 차내시간 각각에 적정 가중치 적용)의 비율 변화, 성공적 급행 서비스는 가중 및 비가중 통행시간 모두 절감되어야 함), 효율성('통행당 평균 승객수'(완행과 급행의 차이가 작을수록 서비스 운영이 효율적), '대-시간당 평균 승객수'(전체적 비용 효율성 척도))이 포함된다. 또한 급행버스 서비스의 평가 모델의 기본 가정으로는 모든 승객이 탑승 정류장 및 노선 선정 과정에서 자신의 기대 통행시간의 가중 합계를 최소화하고자 하는 것으로 설정하였고, 모델에서는 통행시간을 계산하여 시장 점유율을 결정한 뒤 실제 수요에 대한 정류장 및 노선 배정을 수행, 최종적으로 평가 척도 값을 도출하였다. 모델의 주요 입력 변수로는 총차량대수, 유형별 배차간격, 급행 정류장, 배차간격 분포, 정류장 간격, O-D 수요, 완행 및 급행 운행시간, 통행시간별 가중치가 사용되었는데, 우선 접근시간, 대기시간, 차내시간을 각각 산정하여 통행시간을 계산하고, 이어 시장(market) 분류 (각 O-D쌍별로 '완행 선호', '급행 선호', '선택적 탑승' 경우에 대한 총통행시간을 계산한 뒤, 최소 통행시간을 갖는 조합에 전량배정), 정류장 및 노선 배정 (시장 점유율 결과를 토대로 각 O-D쌍에 대한 정류장 및 노선을 지정한 뒤 이를 집계)의 순으로 적용된다. CTA에서 운영중인 완행/급행 노선에 모델 적용 결과 일부 노선에서 급행 노선 정차 정류장 빈도 조정 등이 필요한 것으로 나타났다. 급행 서비스의 축

(corridor) 또는 노선 잠재력에 대한 설계 지침 고려 사항으로 O-D의 높은 집중도 및 장거리 통행 승객 비율이 효율성에 중요한 요인으로 나타났으며, 추가적으로 기존 배차간격 및 승객수, 잠재적인 통행시간 절감 수준을 고려해야 할 것으로 나타났다. 또한 급행 서비스 설계 지침은 정류장 간격 설정 및 배차간격 빈도를 다루는데, 급행 노선의 정류장 간격은 높은 수요 지점, 환승 지점, O-D 분포, 통행시간 절감을 위한 충분한 간격 유지 등을 고려해야 하며, 급행 노선의 배차 비율을 50% 이상 유지시 효율적인 것으로 나타났다.

Sun et al. (2008)은 BRT 운영 수준의 향상을 위해 BRT 차량의 배차간격 최적화 및 스케줄링 조합을 연구하고자, 승객 통행 비용과 차량 운영비용을 최소화하고 승객수, 시간, 빈도를 제약조건으로 고려한 모형을 개발하였다. 스케줄링 조합은 normal, zone, express로 구성되었으며, 가변 길이 코딩(variable-length coding)의 유전 알고리즘을 모델에 적용하였다. 목적 함수는 승객 대기비용(평균 승객 대기비용과 급행 미정차정류장 대기비용 포함), 승객 차내시간비용(승객 탑승시간과 정류장정차(dwelling) 비용으로 구성), 차량 운영비용(운행시간, 두 정류장간의 첫차 및 막차 시간, 정류장 정차시간으로 구성)을 포함하였다. 유전 알고리즘의 코딩은 스케줄링 조합(normal, zone, express)과 배차 간격을 이용한 가변 길이 형태로 입력되었으며, 최초 모집단은 모집단 크기 N (first term)과 무작위로 선택된 최적화 공간(optimizing space) N 점(second term)으로 결정되었다. 모델 적용 결과는 적합한 것으로 도출되었으며, 민감도 분석 결과 교통량이 증가하고 통행속도가 감소할 때 스케줄링 조합을 통한 차량의 배차(allocation)는 통행 비용을 감소시키는 것으로 나타났다.

Leiva et al. (2010)은 급행 버스의 네트워크 효율성에 있어 경로(itinerary), 배차, 차량 크기 등이 중요한 요인이나 관련 연구가 많지 않은 바, 특정 버스차로 노선축(corridor)에 대한 대기시간, 차내시간, 운영비용 최소화를 위한 최적화 연구를 수행하였다. 운영적 특성(노선축의 정류장 집합(set), 정류장 간격, 정류장 간 통행수요 O/D, 연역적(priori)으로 결정된 경로 집합(set))을 수용할 수 있는

다양한 최적화 모델이 생성되었으며, 이에 따라 결정된 노선에 대한 배차, 차량 크기의 최적화 결과값을 도출하고, 칠레 산티아고를 대상으로 사례 연구를 수행하였다. 버스 노선축에 대한 총 사회적 비용은 운영비용과 이용자 비용으로 분류하였는데, 운영비용은 고정비용 및 가변비용으로 구분하여 운영 특성에 따라 변화하는 가변비용만을 모델에 반영하였으며, 이용자 비용은 접근시간, 대기시간, 차내시간 및 환승시간을 고려하였다. 각 비용의 합을 최소로 하는 수식을 작성한 뒤, 여기에 차량 용량 제약, 환승 제약 조건을 추가하여 최종적인 모델을 도출하였는데, 모든 조건을 고려시 비선형 적분 모델로서 풀이가 어렵기 때문에 용량 제약 조건은 제외하고 최적화 프로그래밍 언어인 AMPL과 MINOS solver 소프트웨어를 이용하였다. 다만 여기서 얻은 결과는 용량 제약 조건을 충족하지 않을 수 있기 때문에, 과혼잡 노선에 대해 제약 조건을 추가함으로써 반복적인 풀이를 통해 최적 해를 도출하였다. 산티아고의 특정 버스 축에 대한 사례 연구 및 시나리오 분석 결과, 일부 노선에서는 급행 도입시 10% 이상의 절감 효과가 있으며, 수요 가변성이 높은 경우 급행 도입의 편익이 높은 것으로 나타났고, 교통축에 대한 평균 통행길이가 급행 도입의 잠재적 편익을 좌우하는 것으로 나타났다.

Tetreault and El-Geneidy (2010)는 통행 행태 조사에 더해 AVL(Automatic Vehicle Location) 및 APC(Automatic Passenger Counting) 데이터를 이용하여, 신규 급행 서비스에 대한 정류장 선정 및 운행시간 예측을 수행하고자 몬트리올의 주요 버스노선 중 하나인 67번 노선을 분석하였다. 버스 주행 시간의 변수로 시간대, 버스 형태, 지체, 승객 행태와 관련된 지표들이 선정되었으며, 급행 서비스의 설계로는 4가지 시나리오 (1. 환승 정류장만 정차, 2. 대상노선이 경유하는 정류장 중 APC 데이터를 기준으로 승하차 상위 25% 정류장만 정차, 3. 대상노선 이용 승객의 O-D 데이터를 분석하여 상위 25% 정류장만 정차, 4. 앞의 3개 시나리오에 대한 결과를 통합하여 최적 시나리오 설정)를 설정하였다. 각 시나리오별 비교 결과, 시나리오 1은 실제 승객 이용패턴을 고려하지 못하여

비효율적이며, 시나리오 2는 노선 중반부에 정류장이 집중되어 운영 효율이 다소 떨어졌고, 시나리오 3은 33% 이상의 승객이 기존의 승하차 정류장 그대로 급행 노선을 이용할 수 있는 등 효율성이 있으나 일부 정류장 간격이 가깝게 선정되었다. 이에 시나리오 4는 기존 시나리오에서 선정된 정류장 기준과 더불어 정류장 간격을 800~1600m 간격으로 유지하여 선정하였다. 급행 노선의 주행 시간은 3가지 경우(일반적, 낙관적, 비관적)로 가정하여 예측하였는데, 시나리오 별 비교 결과 모든 경우에서 시나리오 4의 급행 노선 주행시간이 가장 짧은 것으로 나타났다.

Ulusoy et al. (2010)은 완행(All-stop), 중간회차(short-turn), 급행(express) 대중교통 서비스의 비용-효율적 최적화를 위한 모델을 개발하였다. 총비용 함수의 결정변수로는 대상 노선의 정류장(station)을 공유하는 통합 SP(Service Pattern) 및 관련 서비스 빈도를 포함하며, 모델에 사용된 변수는 운영적 요소, 운영비용, 사용자 비용, 네트워크 요소, 수요 패턴 등과 관련된 변수들을 포함하였다. 모델의 가정 조건은 다음과 같다: 1) 대상 노선에는 n 개의 정류장이 있으며, 정류장 위치 및 O-D 패턴은 주어졌고, 모든 SP의 승객 수는 총통행시간을 고려한 로짓 기반 모델로 추정, 2) 완행 및 중간회차 SP는 완행 SP로 간주되며, 중간회차 SP의 적합한 회차(turn-back) 지점은 정류장 구조를 고려하여 운영자에 의해 사전에 결정, 3) 모든 SP에 대해 운임은 동일하며, 환승 비용은 없고, 완행 SP간 환승은 불가하며, 1회 초과 환승은 무시하고, 각 승객의 환승 정류장 선택은 총통행시간 최소를 기준으로 선택. 각 승객의 i 에서 j 까지의 이동은 4개 카테고리(급행 탑승 (환승 X), 급행 탑승 후 local로 환승, local 탑승 (환승 X), local 탑승 후 급행으로 환승)로 분류하였다. 총 비용은 사용자 비용(대기 비용, 환승 비용, 차내시간 비용) 및 운영자 비용(차량 통행시간, 배차, 시간당 차량운영비용)으로 구성되며, 제약조건으로는 배차간격 보전(frequency conservation), 차량용량, 차량 대수를 고려하였다. 개발 모델에 대하여 실제 노선에 대한 적용을 통해 검증하였는데, 3가지 종류의 서비스(완행만 운영, 완행+중간회차, 통합SP(완

행+중간회차+급행))에 대해 적용한 결과 통합SP로 운영시 총비용이 가장 낮은 것으로 나타났으며, 이때의 운영형태(운영형태별 정차 정류장, 배차간격, 차량 크기) 또한 제시하였다.

Lee et al. (2014)은 지하철 노선에 Skip-stop 체계(한 노선상에 두 개의 서비스를 운영하여 일부 역은 둘 중 하나의 서비스만 정차하고, 일부 역은 두 서비스가 모두 정차하여 두 서비스간 환승을 제공함으로써 별도의 대피선 설치 없이 표정속도를 높이는 기법) 도입시 각 서비스의 정차역을 선정함에 있어 유전 알고리즘을 이용하였다. 목적함수는 3가지 형태(총통행시간 최소화, 운영자 이익 최대화, 총비용 최소화)로 설정하였으며, 충돌 방지를 위한 정차역 운영 및 배차간격 유지 형태에 따라 4개의 시나리오를 구성하였다. 또한 O/D별로 기종점역의 정차서비스 구성에 따른 배차간격값, 기종점역 변경(접근시간이 다소 증가하더라도 전체 통행시간이 감소하는 경우 환승 대신 승하차 역을 변경) 등을 함께 반영하였다. 서울 지하철 4호선을 대상으로 한 사례 연구에서 Skip-stop 체계 도입시 총통행시간이 기존보다 17~20%가량 단축되는 것으로 나타났다.

조혜진과 이영인(2005)은 교통카드 자료를 이용하여 승객 기·종점을 고려한 급행버스 노선의 최적 정류장 위치 및 완·급행버스 배차간격 결정방법론을 수립하고자 하였다. 총비용(운영비용과 통행시간비용의 합)의 최소화를 목적함수로 설정하여 초기조건 입력, 정류장 위치 대안 생성, 완·급행 O/D 배분 및 배차간격 설정, 총교통비용 산출 및 최적해 도출의 4단계 분석 과정을 수행하였는데, 전수열거법(All Enumeration)을 이용하여 모든 경우에 대한 결과값을 비교하였다. 서울 광역권의 2개 노선에 대해 분석을 수행한 결과, 승객의 평균이동거리가 급행버스 도입효과를 좌우하는 것으로 나타났으며, 총통행시간이 단축되더라도 이용자의 승하차 패턴에 따라 시간가치가 더 큰 차외시간이 증가하여 총교통비용이 증가하는 결과가 도출될 수도 있는 것으로 나타났다.

제 3 절 대중교통 노선 평가

Sheth et al. (2007)은 DEA(Data Envelopment Analysis) 기법 중 Network Model과 Goal Programming을 이용하여 대중교통 네트워크 시스템의 이용자·운영자 측면의 효율성뿐 아니라 사회적 편익(배기가스, 소음 등)을 함께 반영하여 다양한 버스 노선을 평가하고자 하였다. 모형의 입력변수로는 각 노선별 배차간격, 요금, 운행시간대, 교차로 개수, 전용차로 여부 등이고, 출력변수로는 노선별 평균 통행시간, 운행거리(vehicle-miles), 운행스케줄 신뢰성(reliability), 승객 통행거리(passenger-miles)를 사용하였다. 또한 외부/사회적 변수로는 사고횟수, 배출가스, 소음, 자원 퇴화(resource degraded)를, 환경 변수로는 접근성, 주차장 이용가능성, 인구밀도, 연결성 요인을 사용하였다.

Shimamoto et al. (2010)은 승객, 운영자, 전체 시스템 효율성 각각의 측면에서 기존의 네트워크 최적화 모델(bi-level model: 대중교통 통행 배정 모델(lower)과 이용자·운영자 비용 최소화 모델(upper)로 구성)을 활용하여 일본 히로시마시의 버스 노선망을 평가하고자 하였다. 대중교통 통행 배정 모델은 Kurauchi et al. (2003)¹⁾의 용량 제약 배정 모델(배차간격과 차량 용량을 적용한 시간당 노선 용량을 기준으로 배정)을 적용하였고, 이용자·운영자 비용 최소화 모델은 Deb et al. (2000)²⁾의 NSGA-II(elitist non-dominated sorting genetic algorithm) 모델과 Inagaki et al. (1999)³⁾의 GA 기반 노선 설정 모델을 적용하였다. 히로시마시의 각 버스 회사에서 수집된 승객 수요 데이터(일수요 및 주간 통행수요 기반)를 통해 버스 노선망에 적용하여 평가한 결과, 운영중인 노선망

-
- 1) Kurauchi, F., Bell, M. G., & Schmöcker, J. D. (2003). Capacity constrained transit assignment with common lines. *Journal of Mathematical modelling and algorithms*, 2(4), 309-327.
 - 2) Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., & Meyarivan, T. (2000). A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. *Lecture notes in computer science*, 1917, 849-858.
 - 3) Inagaki, J., Haseyama, M., & Kitajima, H. (1999). A method of determining various solutions for routing application with a genetic algorithm. *Trans. Inst. Electron. Inf. Commun. Eng. DI (Japan)*, J82D-I (8), 1102-1111.

은 이용자·운영자 비용 최소화 측면에서 파레토 최적해(Pareto front)에 근접한 것으로 나타났으나 일부 서비스 운영의 분산이 필요한 것으로 나타났으며, O/D 패턴의 변동성이 민감도에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

Currie and Delbosc (2014)은 다양한 영향 요인을 발굴하여 호주의 BRT체계 도입 성과를 평가하고자 하였다. 브리즈번의 상급 BRT로부터 멜버른의 하급 BRT까지 다양한 형태에 대하여 분석한 결과, 이용 승객수에 영향을 미치는 요인으로는 높은 서비스 수준, 낮은 속도, 짧은 정류장 간격, 분리된 통행로, 최신 차량, 낮은 요금, 통합 체계 및 사전 요금지불시스템 등이 도출되었다. 이 중 낮은 속도와 짧은 정류장 간격은 승객수가 많은 도심 지역에서 정체로 인한 운행 속도 저하와 고밀도 환경으로 인한 짧은 정류장 간격에 기인한 것으로 해석되었다.

Georgiadis et al. (2014)은 자료포락분석(DEA, Data Envelopment Analysis)을 사용하여 그리스 제2의 도시인 테살로니키(Thessaloniki)시의 개별 버스 노선 효율성을 평가하고자 하였다. 노선 연장, 일일 운행서비스 시간, 차량 대수, 영업 거리(vehicle-km 및 seat-km), 승객수 등의 정보가 사용되었으며, 효율성의 기준에 따라 3개 모델(차량운영 효율성, 승객수송 효율성, 혼합형)을 적용한 결과 가장 영향력이 높은 요인으로 교통소통 여건과 인구밀도가 도출되었다.

한중학(2005)은 체계적인 버스노선망 설계모형 개발에 있어 노선망의 효과성 및 서비스수준을 평가하였다. 노선망 대안 생성프로그램을 통한 후보노선집합의 속성(배차횟수, 기종점통행량 등)을 입력자료로 하여 버스노선망 평가모형을 통해 개별노선 정보 및 이용자·운영자비용, 노선망구조 등을 도출, 최적 버스노선망을 도출하고자 하였다. 버스노선망 평가모형의 분석구조는 버스노선별 통행량 배분 및 서비스 배차횟수 결정 후, 배차횟수 수렴여부에 따른 버스통행 배분, 버스차량크기결정, 배차횟수설정과정의 반복수행 및 수렴을 통해 노선배차횟수와 노선망 실적지표를 구득하는 과정으로 구성되었다.

원제무(2015)는 급행버스서비스 도입의 타당성 평가를 위하여 승객 수요의 기준을 아래와 같이 제시하였다.

$$\overline{P_{af}} \geq \frac{K(60)}{H_{\max}} \quad (2-3)$$

여기서, $\overline{P_{af}}$ = 외곽존 a 와 도심존 f 간 여객수요 (중방향/1방향/피크시 1시간),

K = 버스가 허용할 수 있는 용량, H = 최대로 가능한 평균배차간격, $\frac{K(60)}{H_{\max}}$
= 1시간 최대서비스 용량

즉, 기존 버스가 1시간동안 처리할 수 있는 서비스 용량보다 승객 수요가 더 큰 경우 급행버스의 도입이 타당한 것으로 판단하고 있다. 또한 급행버스 도입 편익 계산에 사용되는 버스 감축대수 q 를 아래와 같이 제시하였는데, 이는 기존 완행버스 운영시 소요되는 차량대수에 급행버스 도입으로 인한 운행시간 감축률을 적용한 값이다.

$$q = \frac{\overline{P_{af}}}{K} (t_L - t_E) \quad (2-4)$$

여기서, q = 급행버스 투입으로 감축되는 버스대수, t_L = 일반버스 서비스의 왕복운행시간, t_E = 급행버스 서비스의 왕복운행시간

제 4 절 유전알고리즘의 활용

Pattnaik et al. (1998)은 GA를 이용해 전체 비용(이용자·운영자)을 최소화하는 버스 노선망(노선 및 배차간격 설정)을 설계하고자 하였다. 모델은 두 단계로 구성되었는데, 우선 노선망 후보 집합을 생성한 뒤 각각의 후보 집합에 대하여 GA를 수행하여 최적 해를 찾는 과정으로 진행되었다. 목적함수의 제약조건으로는 최소배차간격과 최대 탑승률(load factor)을 설정하였는데, 구체적으로는 각

중점 노드에 대한 노선을 모두 생성한 뒤 최단경로, 노선연장 제약조건 등을 충족하는 노선에 대하여 대안경로 비교를 통해 노선망 후보 집합을 생성하고, FSLC (Fixed String Length Coding, 노선수(route set size)를 고정시켜놓고 분석하기 때문에 다양한 노선수 조건에 대한 반복분석 필요) 및 VSLC (Variable String Length Coding, 노선수와 최적해를 동시에 도출) 방법을 비교 적용한 GA를 이용하여 각 노선망 후보 집합을 평가하였다.

Chien et al. (2001)은 총비용을 최소화하는 대중교통 노선망, 특히 지선버스 노선망 설계를 목적으로 GA를 사용하였는데, 제약조건으로는 지리적 특성, 용량, 예상 제약을, 고려 사항으로는 교차로 지체, 불규칙한 도로격자 패턴, 다양한 수요 분포, 현실적인 지리적 다양성 등을 포함하였다. 지선버스 노선의 주요 서비스 지역, 즉 도심이나 주요 환승 터미널이 아닌 종점부 외곽 지역의 네트워크를 격자 형태로 모형화하였으며, 완전탐색(exhaustive search) 알고리즘을 활용하여 GA를 통한 반복 연산을 통해 후보 노선들에 대한 평가를 수행하였다.

Bielli et al. (2002)은 버스 네트워크 최적화를 위한 GA의 목적함수(fitness function)값 계산 방법에 주안점을 두었다. GA 모델은 총 3단계로 수행되었는데, 우선 반복 생성되는 노선 집합 모집단 노선망에 O/D 수요를 배정하고, 배정된 결과를 기반으로 각 노선에 대한 평가지표(차량대수, 이용자수, 노선수 및 기타 관련지표)를 도출한 뒤, 다기준분석을 적용하여 각 평가지표별로 가중치를 적용한 목적함수 값을 산출하였다. 이탈리아의 중북부 소도시 파르마시의 버스 노선망(22개 노선, 459개 정류장)에 적용한 결과 운영중인 노선망의 효율성 개선 여지가 있는 것으로 나타났다.

Chakroborty and Dwivedi (2002)는 구간 통행시간과 대중교통 수요 데이터를 GA 기법에 접목시켜 최적 대중교통 노선망을 구축하는 기법을 개발하였는데, 최적 노선망의 속성으로는 최대한의 대중교통 수요를 만족시킬 것, 환승을 최소화할 것, 승객통행시간을 최소화할 것을 설정하였다. 구체적인 연구 방법론으로

는 우선 확률적 기법의 일종인 IRSG(initial route set generation)을 통해 초기 노선을 설정한 뒤, 승객통행시간, 무환승, 환승 1회, 환승 2회 각각의 통행자 비율, 환승 3회 이상이 필요하여 실질적으로 대중교통 이용이 어려운 통행자 비율을 각각 산정하여 각 요소별로 가중치를 적용한 종합 점수를 통해 노선망을 평가하고 수렴 범위를 만족할 때까지 노선망의 수정을 반복하였다. Mandl 네트워크 등 기존 연구 결과와 비교한 결과 개선된 결과를 도출하는 것으로 나타났다.

이신해 등 (2003)은 개별 차량과 다른 대중교통 특성의 정확한 반영을 위하여 유전 알고리즘을 적용한 최적경로 탐색과 로짓모형 기반의 확률적 통행량 배정모형을 적용한 통행량 배정을 통해 대중교통 통행배정모형을 개발하였다. 최적 경로 탐색은 모집단을 생성하고 각 경로(염색체)들의 통행시간을 산출하는 초기화 단계, 우수한 염색체를 다음 세대로 복제하는 선택 단계, 교배확률에 따라 공통유전자 이후의 유전자들을 서로 교환하는 교배 단계, 일정 비율의 돌연변이를 생성하는 단계 등을 수행하는 유전 알고리즘으로 구성되었으며, 이후 확률적 통행배정모형을 거쳐 최종 통행배정결과를 도출하는 과정으로 개발되었다.

Cevallos and Zhao (2006)는 운영중인 버스 스케줄과 각 환승 지점의 승하차 데이터를 토대로 유전 알고리즘을 이용하여 배차 간격의 조정 없이 버스 노선망의 환승시간을 최소화하는 버스 스케줄링 계획을 도출하고자 하였다. 한 버스에서 내려 다음 버스로 갈아탈 때까지의 도보 및 대기시간을 각 통행자별로 모두 더한 값을 최소화하는 것을 목적함수로, 버스 스케줄을 반복 조정해가면서 최적 해를 도출하였다. 주어진 배차간격을 평균값으로 로그 정규분포에 따른 무작위 값을 적용하여 실제 도착 현상을 반영하고자 하였으며, 미국 플로리다주 Broward시의 대중교통 자료(40개 노선, 255개 환승정류장)에 적용한 결과 총 환승시간이 13.1% 감소하는 것으로 나타났다.

Fan and Machemehl (2006)은 가변적인 통행수요에 대한 버스노선 설계 최적화를 위해 유전 알고리즘을 활용하였다. 모형은 총 3단계로, 모든 가능한 노선

을 포함하는 최초 노선집합 생성 절차와, 통행수요 배정과 배차간격 결정 및 효과척도를 분석하는 네트워크 분석, 2개 선행 절차를 결합하여 방대한 모집단으로부터 최적 노선망을 결정하는 유전 알고리즘 분석 절차로 구성된다. 목적함수로는 총비용과 최대허용 환승횟수 초과 통행 최소화를 설정하였으며, 제약 조건으로는 배차간격 범위, 차내혼잡률, 차량 크기, 통행거리 범위를 설정하였다. 가상의 네트워크를 대상으로 유전 알고리즘에 대한 민감도 분석을 수행한 결과, 모집단 크기는 30~50, 반복 횟수는 최소 80회, 교차(crossover) 확률은 0.8, 변이(mutation) 확률은 0.1로 도출되었다.

박경철 등 (2007)은 다양한 대중교통 수단을 반영하는 대중교통 네트워크 통합 설계 기법을 개발하고자 2단계 모형을 구성하였는데, 상위 구조에서는 노선 생성 및 최적 노선망 설계문제, 하위 구조에서는 통행배정 및 세부 수단(중전철·경전철·간선버스·지선버스) 결정 과정을 다루었다. 특히, 노선집합 생성 이후 노선대 선택 및 각 노선 배차횟수를 동시에 결정하고자 유전 알고리즘을 사용하여 최적 노선망 설계 모형을 설계하였다. 전체 목적 함수는 총비용의 최소화로 설정하였으며 노선망 설계 모형의 제약 조건으로는 배차횟수 제약을 적용하였는데, 효율적인 해 탐색을 위하여 실수형태(10진 구조)의 배차횟수 표현 기법을 사용하여 두 대상노선의 배차횟수 제약이 다른 경우에도 동일한 선택확률을 가질 수 있도록 하였다. 예제 네트워크인 Mandl 네트워크와 실제 사례인 서울시 강남구 일부 지역을 대상으로 모형을 적용한 결과, 기존 연구결과 및 현황에 비하여 개선된 결과를 도출하는 것으로 나타났다.

Yu et al. (2009)은 전체 버스 차량대수의 제약조건 하에서 승객 총통행시간을 최소화하는 버스노선별 최적 배차간격을 결정하고자 통행 배정과 노선별 배차간격 결정으로 구성되는 2단계 모형을 구축하였는데, 하위 구조인 승객 통행 배정에서 표지 고정(label-setting) 알고리즘을 통해 도출된 각 노선별 승객 수요를 활용하여 상위 구조인 최적 배차간격 결정 모델에서 유전 알고리즘을 통해 최종 해를 도출하였다. 최적 배차간격 결정 모델에서는 구체적으로 각 노선의 배

차간격을 결정변수로 설정하였는데, 동일한 버스회사에 소속된 버스노선 간에는 차량의 이전(transfer)이 자유로운 것으로 가정하였으며, 배차간격 10분을 기준으로 이보다 짧은 노선은 승객의 도착 분포를 균일하게, 이보다 긴 노선은 버스 스케줄에 가까워질수록 도착 분포 확률이 높아지는 것을 가정하였다. 예제 네트워크와 실제 네트워크(중국 대련시)에 적용하여 모형을 검증한 결과 한정된 자원을 가장 효율적으로 활용할 수 있는 버스 배차계획을 도출할 수 있는 것으로 나타났다.

Kalantari et al. (2014)은 버스노선의 전면 개편에 현실적 어려움이 많기 때문에 기존 노선체계를 수정하는 방법론을 개발하였다. 기존(base) 및 개선(proposed) 네트워크의 유사성(similarity)을 지표로 삼아 비교하는 방법으로, 목적함수가 많기 때문에 유전알고리즘을 통해 두 개(Mandl, Iran Kashan)의 사례 분석을 수행하였다. 운영 측면의 목적함수로는 통행시간, 대기시간, 환승시간의 최소화를 고려하였고, 그 외 네트워크 범위(network coverage) 확대, 차량 규모(fleet size) 증가 최소화, 각 기종점 쌍에 대한 지리적 유사성(기존 노선과 개선 노선의 중복도) 유지 등을 목적함수에 포함하였다. 위 목적함수를 동시에 충족시키는 최적 해를 찾고자 유전알고리즘을 이용하였으며, 두 개의 사례 분석에 적용한 결과 특히 실제 네트워크(Iran Kashan)에서 개선 대안이 상당한 효과가 있는 것으로 나타났다.

Nayeem et al. (2014)은 대중교통망 설계가 일반적으로 규모가 방대하고 제약 조건이 다양한 NP-Hard 문제이기 때문에, 이용 승객의 극대화, 환승의 최소화, 총통행시간의 최소화를 목적으로 하는 대중교통망 설계 방법론을 제시하고자 유전알고리즘을 적용하였다. Mandl 네트워크를 이용해 가장 많은 직결수요를 갖는 기종점 간을 연결하는 노선을 찾고, 사전에 설정한 노선수만큼의 노선을 생성하거나 모든 수요를 만족하는 직결 노선이 생성되면 노선 생성을 중단하였다(예제 네트워크에서는 노선 개수를 4, 6, 7, 8개로 각각 제약). 이후 유전알고리즘을 통해 생성된 노선 집합에 대한 교차(crossover), 변이(mutation) 연산을

반복 시행하면서 개선된 노선 집합을 탐색하였는데, 기존 연구와의 비교 결과 환승 없이 통행하는 비율이 상당히 높아지는 것으로 나타났다.

Amiripour et al. (2014)은 주어진 승객 수요에 대하여 이용자, 운영자 및 사회적 편익을 최대화하는 버스노선망 최적 수정안을 도출하고자 하였다. 기존에 운영되는 노선 중 기준에 만족하는 노선은 최대한 존치함과 동시에 환승 필요 횟수는 최소화하고자 하였으며, 노선집합 대안 설정 및 유전 알고리즘을 이용한 노선망 설계, 실제 운영시 제약사항 검토 및 노선 연장여부 검토 등 4단계 과정으로 수행되었다. 노선망 설계를 위한 유전 알고리즘 분석에서는 전체 노선집합 대안을 염색체(chromosome)로, 노선집합 내 각 노선은 유전자(gene)로 설정하여 노선집합 중 각 노선의 포함 여부를 반복적으로 수정해가면서 최적 노선을 선정하는 과정으로 진행되었다. 예제 네트워크인 Mandl 네트워크를 대상으로 한 검증을 거쳐 실제 사례인 이란 마슈하드 시를 대상으로 모형을 적용한 결과, 전체 노선의 36%를 수정한 뒤 목적함수 값이 26.36% 개선되는 것으로 나타났다.

제 5 절 기존 연구의 한계 및 시사점

교통카드DB, 대중교통 노선설계 및 급행 운영체계, 노선 평가, 유전알고리즘의 활용 등 본 연구에서 다루고자 하는 다양한 내용에 대한 검토를 통해 한계와 시사점을 발굴하여, 기존 연구와 차별성을 갖는 본 연구의 방향 수립을 도모하고자 한다.

첫째, 교통카드DB를 활용한 많은 기존 연구는 통행행태 조사 및 이용패턴 분석, 서비스 평가 등 기초적 분석이 주를 이루고 있어, 교통조사에 필요한 막대한 시간과 노력의 절감, 전수화된 자료를 통한 무결성 확보 등 교통카드 자체가 지닌 장점을 활용하는데 그치고 있다. 특히 외국의 경우 하차시 태그를 하지 않는 경우가 많아 기종점 추정 자체만을 다루는 다양한 연구가 존재하는 점 등에

비추어볼 때, 국내 교통카드DB는 승하차 위치와 시간이 명확한 양질의 자료로써 최근에는 수단 및 노선선택모형 추정, 통행분포 모형 추정 등 다양한 응용연구가 부각되고 있으며 본 연구에서도 교통카드DB의 활용을 통해 급행버스 노선 및 정류장 선정에 대한 분석의 정확성과 현실 적용성을 향상시키고자 한다.

둘째, 급행 운영체계의 도입 및 분석에 관한 연구는 증가하는 추세로, 특히 급행버스의 도입 효과를 극대화하는 영향 요소 탐색, 특정 노선에 대하여 경험적 급행 정차 정류장 선정 방법론을 적용한 급행 노선 도입 효과, 다양한 운영형태(all-stop, limited-stop, skip-stop, short-turn)에 대한 비교 검토 등이 진행되어왔으며 일부 연구에서는 유전 알고리즘 등 모형을 개발하여 최적 급행 정류장을 결정하고자 하였다. 그러나 대부분의 연구가 단일 노선을 대상으로 하고 있어, 실제 도입 단계에 있어 전체 버스 노선망에서 어떠한 노선에 우선적으로 급행 운영체계를 도입해야 하는가에 대한 연구가 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 다양한 현실적 제약조건을 고려한 급행버스노선 정차정류장 선정모형과 함께, 급행버스 도입노선 우선순위 평가 방법론을 개발하여 현재 운영중인 노선망에 대한 적용성을 도모하고자 한다.

셋째, 대중교통 노선 평가와 관련된 연구는 주로 이용자 및 운영자 측면의 효율성 평가에 초점을 두고 자료 포락 기법(DEA), 네트워크 최적화 모델 등을 적용하여 주요 영향요인과 평가 결과를 제시하고 있다. 다만 대부분의 연구가 각 노선의 위계가 동일한 경우에 대한 분석을 수행하고 있어, 노선망 내 다양한 노선에 대한 기능 및 위계 분리와 운영 이원화 방안 등에 대한 연구는 부족한 실정이다. 또한 관련 연구가 국내보다 국외에서 많이 진행된 관계로, 교통카드DB를 이용한 전수화 통행자료를 반영하여 평가한 사례가 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 교통카드DB와 다양한 영향 요소들을 반영하여 급행버스 도입노선 우선순위 평가를 진행한다.

넷째, 대중교통 노선망 설계 문제의 동향 및 유전 알고리즘을 활용한 관련 연구를 검토한 결과, 모형의 복잡성과 규모의 방대함으로 말미암아 과거부터 최적화 모형의 개발에 있어 휴리스틱 기법의 도입이 활발하였으며, 그 중에서도 유전 알고리즘은 전역 최적해 탐색을 위한 가장 보편적인 기법 중 하나로 다양한 연구에서 활용된 바 있다. 따라서 본 연구에서도 모형의 향후 확장성과 적용성을 고려하여 유전 알고리즘을 도입하고자 한다.



제 3 장 연구방법론 및 모형 구축

제 1 절 연구방법론의 정립

1. 연구목표 설정

제2장의 이론 및 선행연구 고찰 결과를 바탕으로 본 논문의 전체적인 연구목표를 아래와 같이 설정하였다.

- (1) 승객 총통행시간 최소화 또는 사회적 총비용 최소화를 목적으로 하는 급행버스노선의 정차 정류장 선정모형을 구축한다.
- (2) 급행버스 운영 효율성 영향요인별 승객 총통행시간 감축률 추이와 노선별 급행버스 서비스 도입 기대효과를 기반으로 한 급행버스 도입노선 우선순위 평가 방법론을 구축한다.
- (3) 사례 분석을 통한 모형 적용 결과의 검증과 네트워크 차원의 급행버스 전이 수요를 고려한 급행버스 도입 효과를 제시한다. (제4장)

2. 분석체계 구상

연구목표의 실현을 위한 각 목표별 구체적인 분석체계는 다음과 같다.

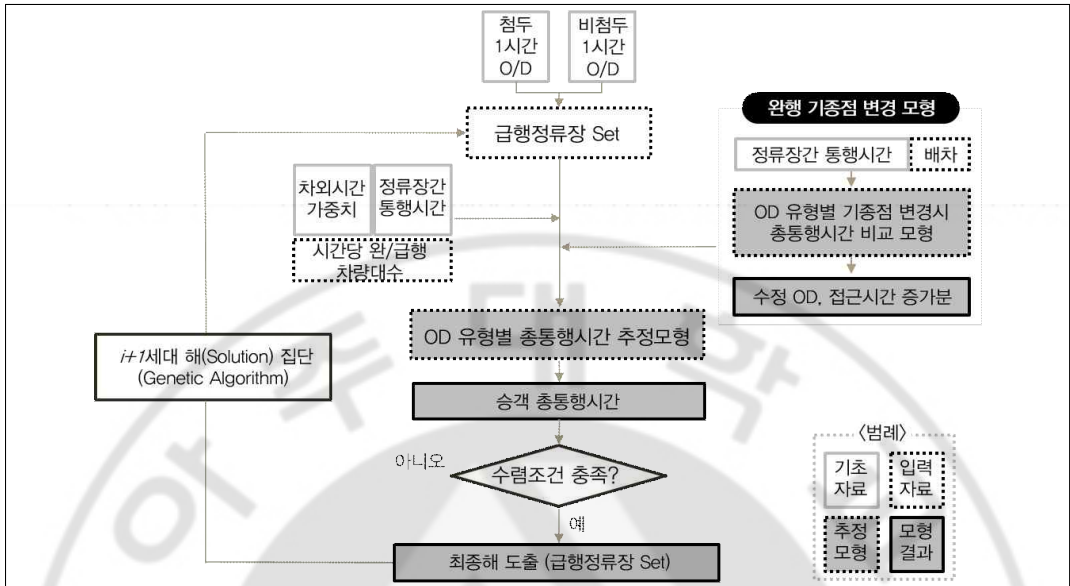
- (1) **급행버스노선 정차정류장 선정모형:** 교통카드DB에서 획득한 특정노선 이용 승객의 O/D 정보와 노선 운행정보, 가용차량대수, 통행시간 유형별 가중치, 급행버스 정류장으로의 기종점 변경(전이) 등 실질적 변수를 활용하여 전체 승객통행시간 또는 사회적비용(승객통행시간비용+운영자비용)을 최소화하는 급행버스 정차정류장을 선정하고, 도입 전후의 승객통행시간 또는 사회적비용을 비교하여 급행버스 도입 효과를 산정한다.

(2) **급행버스 도입노선 우선순위 평가 방법론**: 급행버스 운영 효율성 영향요인을 선정하여 각 요인별로 승객 총통행시간 감축률에 대한 민감도 분석을 수행하고 다중회귀분석모형을 구축하며, 이를 급행버스노선 정차정류장 선정모형에 간이 적용한 결과와 비교하여 적정성을 검증하는 방안을 제시한다.

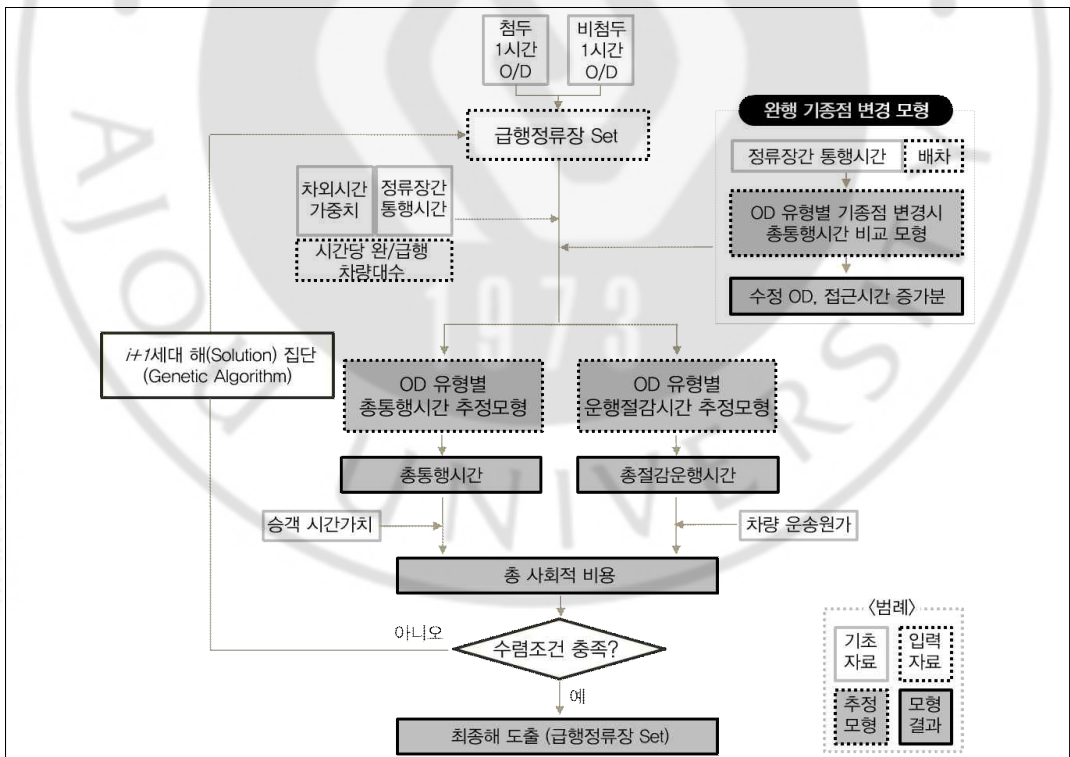
(3) 개발된 모형에 대하여 수원시의 교통카드DB를 활용한 사례 분석(case study)을 통해 모형의 적용성을 검토하고, 분석 대상 노선과 동일축을 공유하는 타 노선에서의 환승 수요, 즉 네트워크 차원의 확장성을 고려한 급행버스 도입 효과를 제시한다. 또한, 기존 급행버스노선 정차정류장 선정 방법론 적용 결과와의 비교를 통해 본 모형의 실효성을 검증한다. (제4장)

제 2 절 급행버스노선 정차정류장 선정모형 구축

본 모형은 특정 버스노선에 급행 서비스를 추가 도입하는 경우, 즉 동일 노선을 완행과 급행의 이원화 체계로 운영시 해당 노선을 이용하는 전체 승객의 총통행시간 또는 총비용(승객총통행시간비용+운영자비용)을 최소화하는 급행 서비스의 정차 정류장을 선정하는 것이 목적이다. 본 논문에서는 모형에 사용되는 입력 자료로 정류장 기반의 승하차 O/D(침두/비침두), 가용 차량대수, 정류장 간 거리(통행시간)를 활용하였으며, 가용 차량대수를 제약조건으로 하여 총시간 또는 총비용을 최소화하는 정류장 집합(set)을 도출한다. 최적화 알고리즘으로는 유전 알고리즘을 사용하여 비선형최적화의 국지해(local minimum) 발생 가능성을 줄이고자 하였으며, 모형의 전체적 구조는 <그림 3-1>(승객총통행시간 최소화시), <그림 3-2>(총비용 최소화시)와 같다.



<그림 3-1> 급행버스노선 정차정류장 선정모형의 흐름도 (총시간 최소화시)



<그림 3-2> 급행버스노선 정차정류장 선정모형의 흐름도 (총비용 최소화시)

1. 총시간 최소화

가. 목적함수

모형의 목적을 총시간 최소화로 설정시 k 노선에 대한 목적함수는 아래와 같이 설정한다.

$$\begin{aligned} \min Z_k &= \sum_{r=1}^{N-1} \sum_{s=r+1}^N (q_{rs} \cdot TT_{rs}(i_n, h_L, h_R)) \\ \text{subject to: } &V_L + V_R = V_T \\ &V_L > 0, V_R > 0 \\ &i_n = [0, 1], \forall i_n \in S_k \\ &\text{where } h_L = \frac{60}{V_L}, h_R = \frac{60}{V_R} \end{aligned} \quad (3-1)$$

여기서, Z_k 는 k 노선 이용 승객의 총통행시간(차내시간 및 차외시간을 모두 포함), N 은 k 노선의 총 정류장 개수, r, s 는 각각 승·하차 정류장, q_{rs} 는 r 정류장에서 승차하여 s 정류장에서 하차하는 승객 수, TT_{rs} 는 r 정류장에서 승차하여 s 정류장에서 승차하는 승객의 통행시간(차내·차외시간의 합)이다. TT_{rs} 는 r 정류장과 s 정류장 사이에 위치한 정류장들의 급행버스 정차정류장 여부(i_n)와 완행버스/급행버스의 배차간격(h_L, h_R)의 영향(대기시간)을 받는다. S_k 는 노선 k 에 속하는 정류장의 집합(set)으로, 여기에 속하는 i_n 은 V_L, V_R (시간당 완행버스/급행버스 배차대수)과 더불어 본 모형의 결정변수로 각 정류장의 급행버스 정차 여부를 의미하는데, n 번째 정류장에서 급행버스가 미정차하는 경우 $i_n=0$, 급행버스가 정차하는 경우 $i_n=1$ 로 표현된다. 예를 들어 5개 정류장을 가진 노선 1의 1·3·5번째 정류장에 급행버스가 정차한다면 S_1 는 $[1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1]$ 의 형태로 표현되며, 각각의 정류장에 대한 급행버스 정차 여부 표현은 $i_1 = 1, i_2 = 0, i_3 = 1, i_4 = 0, i_5 = 1$ 이 된다. 마지막으로 V_L, V_R 의 합인 시간당 버스 배차대수(V)는 분석 대상 노선의 기존 운영 대수로 설정하여 운영비용의 외재적 증감 요인을 배제한다.

TT_{rs} 는 급행버스, 완행버스, 또는 급행버스와 완행버스의 환승 중 어떠한 서비

스를 이용했는지에 따라 달라지는데, 이는 급행버스와 완행버스의 배차간격 차이 및 정류장 정차 여부에 따른 운행시간 차이 등에 기인한다. r 정류장과 s 정류장의 급행 정차 여부에 따라 이용 가능한 서비스는 아래의 <표 3-1>과 같이 정리될 수 있다.

<표 3-1> 승하차정류장 급행버스 정차여부에 따른 이용가능 버스서비스 형태

구분	승차정류장(r) 급행정차여부	하차정류장(s) 급행정차여부	이용 가능 버스서비스 형태
유형 1	○	○	완행 / 급행
유형 2	○	×	완행 / 급행 탑승 후 완행 환승
유형 3	×	○	완행 / 완행 탑승 후 급행 환승
유형 4	×	×	완행 / 완행 탑승 후 급행 환승 후 완행 환승

급행버스 서비스의 일부 정류장 미정차 통과에 따른 통행시간 절감 요인으로 는 승객 승하차시간 절감, 정류장 가감속시간 절감, 교차로 신호지체시간 절감, 고가/지하차도 이용시 교차로 무정차 통과로 인한 통행시간 절감을 포함하였다. 즉, r 정류장과 s 정류장간 차내통행시간 t_{rs} 는 완행/급행버스 서비스에 따라 아래와 같이 구분된다. 여기서 $t_{n,n+1}$ 는 n 번째 정류장과 다음 정류장($n+1$ 번째)간 통행 시간으로, 모형의 복잡성을 지양하기 위하여 차량운행자료 등으로부터 획득한 값(상수)으로 가정하였다.

$$t_{rs}^R = \sum_{n=r}^{s-1} t_{n,n+1} - \sum_{n=r}^{s-1} t_{n,n+1}^{reduced} \cdot (1 - i_n) - P_{rs} \quad (3-2)$$

$$t_{rs}^L = \sum_{n=r}^{s-1} t_{n,n+1} \quad (3-3)$$

여기서 <식 3-2>는 급행버스, <식 3-3>은 완행버스의 통행시간이며, 급행버스의 n 번째 정류장 미정차에 따른 통행시간 절감분인 $t_{n,n+1}^{reduced}$ 은 아래와 같이 계산된다.

$$t_{n,n+1}^{reduced} = AccDec + OnOffTime_n + \left(\frac{\sum_{w=1}^{\lfloor (1-g/C) \times C \rfloor} w}{C} - \frac{\sum_{w=1}^{\lfloor ((1-g/C) \times C) - AccDec - OnOffTime_n \rfloor} w}{C} \right) \quad (3-4)$$

여기서, $AccDec$ 는 정류장 가감속시간으로 Robinson(2013)의 연구결과를 참조하여 11.6초로 설정하고, n 정류장의 승객 승하차 소요시간은 <식 3-5>와 같이 n 정류장 총 승차소요시간(승차승객수×승차소요시간(2.3초/인⁴⁾), n 정류장 총 하차소요시간(하차승객수×하차소요시간(2.0초/인⁵)) 중 더 큰 값으로 적용한다. 승객 O/D는 1시간 단위의 값이므로 해당 승하차승객수를 반영하기 위하여 해당 정류장에 정차하는 시간당 배차대수(급행버스 시간당 배차대수(V_R)와 해당 정류장 급행버스 정차여부(i_n)를 곱함으로써 급행버스 미정차정류장은 완행버스 배차대수(V_L)만 반영)로 나눈 값을 적용한다.

$$OnOffTime_n = \max \left(\frac{\sum_{s=1}^N q_{ns}}{V_L + V_R \cdot i_n} \cdot 2.3, \frac{\sum_{r=1}^N q_{rn}}{V_L + V_R \cdot i_n} \cdot 2.0 \right) \quad (3-5)$$

한편, <식 3-4>의 대괄호 내의 수식은 정류장 정차시간(승하차시간+가감속시간) 절감으로 인한 교차로 신호지체 기대시간 절감을 나타낸다. C 는 교차로의 평균 주기 길이, g 는 주방향 녹색 직진 신호시간, g/C 는 주방향 녹색 직진 신호시간의 비율을 나타내며, 교차로에 정차시간 절감분인 $AccDec + OnOffTime(=x)$ 초만큼 먼저 도착시 적색신호를 받지 않고 교차로를 감속 없이 통과할 확률이 증가함을 반영하고자 하였다. 예를 들어, 수원시 교차로의 평균 주기인 162초, g/C 비 0.42(수원시(2009)에서 조사된 17개 교차로의 평균값)를 적용하면, 교차로에 무작위로 도착시 적색 신호를 받을 확률은 93초($=162 \times (1-0.42)$), 녹색 신호를

-
- 4) 교통카드DB에서 정류장 첫 번째 승차승객과 마지막 승차승객의 교통카드 태그 시각과 승차 인원으로 평균 승차소요시간을 산출
 - 5) 교통카드DB에서 정류장 첫 번째 하차승객과 마지막 하차승객의 교통카드 태그 시각과 하차 인원으로 평균 하차소요시간을 산출

만을 확률은 68초(=162×0.42)이다. 따라서 교차로에서의 평균 신호대기 기대시간

$$\text{은 } \frac{\sum_{w=1}^{\lfloor (1-g/C) \times C \rfloor} w}{C} = \frac{\sum_{w=1}^{93} w}{162} \text{가 되고, 교차로 이전 정류장 미정차로 정류장에 정}$$

차시간 절감분인 x 초만큼 먼저 도착시 신호대기 기대시간은 $\frac{\sum_{w=1}^{\lfloor 93-x \rfloor} w}{162}$ 로 감소하게 된다. 여기서 x 초가 정수가 아닐 경우를 대비하여, 해당 값을 초과하지 않는 가장 큰 정수값을 반환하는 $\lfloor \rfloor$ 기호를 사용하였다.

또한 고가/지하차도 이용시 교차로 무정차 통과로 인한 통행시간 절감분인 P_{rs} 는 기존에 고가/지하차도 측도에 위치한 정류장 정차로 고가/지하차도 이용이 불가능했던 노선이 해당 정류장 미정차로 고가/지하차도 이용시 상·하부교차로 신호대기 시간이 절감됨을 반영하는 것으로, 아래와 같이 산정된다.

$$P_{rs} = \sum_{a=r}^{s-1} \left((b-a+1) \cdot \frac{\sum_{w=1}^{\lfloor (1-g/C) \times C \rfloor} w}{C} \cdot \prod_{n=a}^b (1-i_n) \right) \quad \forall a, b \in S_P(A, B) \quad (3-6)$$

여기서, $S_P(A, B)$ 는 대상 노선의 각 고가/지하차도 측도에 위치한 첫 정류장(a) 및 마지막 정류장(b)의 집합으로, $a \sim b$ 간 모든 정류장에 급행이 정차하지 않을 경우 해당 구간 개수만큼 교차로 평균 신호대기시간이 절감된다. 예를 들어 대상 노선의 13, 14, 15번째 정류장이 특정 지하차도의 측도에 위치한 경우, 해당 정류장 모두에서 급행버스가 정차하지 않을시 급행버스 노선은 지하차도를 이용함으로써 지하차도 상부 교차로의 신호대기 시간을 절감하게 된다. 이 때의 $a=13$, $b=15$ 가 되며, 해당 지하차도 이용에 따른 절감시간은 통과하는 신호교차로 개수(정류장 1구간당 교차로 1개소가 있는 것으로 가정)와 교차로 평균 신호

$$\text{대기시간의 곱인 } (15-13+1) \times \frac{\sum_{w=1}^{\lfloor (1-g/C) \times C \rfloor} w}{C} \text{가 된다.}$$

나. 버스서비스 선택 확률 및 통행시간 산정

<표 3-1>에서 언급한 바와 같이, TT_{rs} 는 급행버스, 완행버스, 또는 급행버스와 완행버스의 환승 형태에 따라 달라지는데, r 정류장과 s 정류장간을 완행버스로 이용(TT_{rs}^L), 급행버스로 이용(TT_{rs}^R), 완행버스 최초 탑승 후 최초 급행정차 정류장에서 급행버스로 환승(TT_{rs}^{L+R}), 급행버스 최초 탑승 후 목적지 도착 전 마지막 급행정차 정류장에서 완행버스로 환승(TT_{rs}^{R+S}), 완행버스 최초 탑승 후 최초 급행정차 정류장에서 급행버스로 환승 후 목적지 도착 전 마지막 급행정차 정류장에서 완행버스로 환승(TT_{rs}^{L+R+L})시 통행시간은 아래와 같다.

$$TT_{rs}^L = VOT_{wait} \cdot \frac{h_L}{2} + t_{rs}^L + \sum_{n=r}^{s-1} OnOffTime_n \quad (3-7)$$

$$TT_{rs}^R = VOT_{wait} \cdot \frac{h_R}{2} + t_{rs}^R + \sum_{n=r}^{s-1} OnOffTime_n \cdot (1 - i_n) \quad (3-8)$$

$$TT_{rs}^{L+R} = VOT_{wait} \cdot \frac{h_L}{2} + VOT_{transfer} \cdot \frac{h_R}{2} + t_{ra}^L + t_{as}^R + \sum_{n=r}^{a-1} OnOffTime_n + \sum_{n=a}^{s-1} OnOffTime_n \cdot (1 - i_n) \quad (3-9)$$

$$TT_{rs}^{R+L} = VOT_{wait} \cdot \frac{h_R}{2} + VOT_{transfer} \cdot \frac{h_L}{2} + t_{ra}^R + t_{as}^L + \sum_{n=r}^{a-1} OnOffTime_n \cdot (1 - i_n) + \sum_{n=a}^{s-1} OnOffTime_n \quad (3-10)$$

$$TT_{rs}^{L+R+L} = VOT_{wait} \cdot \frac{h_R}{2} + VOT_{transfer} \cdot \left(\frac{h_R}{2} + \frac{h_L}{2} \right) + t_{ra}^L + t_{ab}^R + t_{bs}^L + \sum_{n=r}^{a-1} OnOffTime_n + \sum_{n=a}^{b-1} OnOffTime_n \cdot (1 - i_n) + \sum_{n=b}^{s-1} OnOffTime_n \quad (3-11)$$

여기서, VOT_{wait} 는 대기시간 가중치, $VOT_{transfer}$ 는 환승시간 가중치, h_L 는 완행버스 배차간격($=60/V_L$), h_R 는 급행버스 배차간격($=60/V_R$)을 나타내며, V_L 과

V_R 의 합(V_T)은 제약조건 X 의 값을 갖는다.

승하차 정류장의 급행 정차여부에 따라 <표 3-1>과 같이 총 4가지 유형이 존재하는데, 각 유형별로 이용 가능한 버스서비스 중 평균대기시간과 차내통행시간의 합이 가장 짧은 버스서비스에 해당 기종점 통행량 전량을 배정하는 것은 대기시간의 편차를 고려하지 못하는 비현실적인 문제가 존재한다. 이에 Ceder (2015)는 기존문헌 고찰에서 검토한 바와 같이 복수 노선 대안간 대기시간과 차내시간 등을 고려한 노선선택 확률 및 배정 모형을 소개하고 관련 연구동향을 크게 배차간격 기반(frequency-based features)과 스케줄 기반(schedule(timetable)-based features)으로 구분하여 제시한 바 있는데, 배차간격 기반의 연구에서는 먼저 도착하는 차량(노선)에 탑승하는 것을 기본 가정으로 차량 용량(혼잡도) 제약을 설정한 경우가 많으며, 스케줄 기반의 연구는 효용함수 기반의 경로 선택 모형을 적용한 사례가 많은 것으로 나타났다. 한편, 대중교통 통행에 있어 환승은 상당한 저항을 유발하기 때문에 이를 최소화하려는 경향이 있으며, 따라서 환승횟수에 대한 계층적(hierarchy) 구분을 먼저 적용한 뒤에 동일 환승횟수를 갖는 노선간 선택 확률 모형을 적용한 연구도 진행되어온 바 있는데, 이는 Han and Wilson (1982)에서 적용된 이후 Baaj and Mahmassani (1990), Fan and Machemehl (2004), Chien et al. (2010) 등의 연구로 계승되어왔다. 최근의 관련연구 중 하나인 Yan et al. (2013)에서는 총 운영비용을 최소화하는 버스 노선망 설계에 있어 기종점 특성에 따라 환승 횟수를 가장 중요한 기준으로 설정하는 형태와 총 통행비용을 가장 중요한 기준으로 설정하는 형태로 구분하여 적용하였다.

본 연구에서도 각 버스서비스 형태별 배차간격과 통행시간을 고려한 확률적 배정을 실시하고자 하였다. 이에 대한 실증적 연구로 Lee (1998)는 승객이 정류장에서 실제 대기한 시간과 먼저 도착한 버스 서비스의 차내 통행시간, 그리고 나머지 버스 서비스의 기대 대기시간과 차내 통행시간을 비교하여 해당 시점에서 전체 통행시간이 짧은 버스 서비스를 선택하는데 있어, 승객의 최대 대기시간 중 먼저 도착한 버스 서비스를 이용할 확률과 나중에 도착하는 버스 서비스

를 이용할 확률을 이용한 각 서비스별 통행량 배정 방법을 제시하였다. 다만 비교 대상 버스 서비스간 차내통행시간 및 대기시간, 총통행시간 각각의 최단시간 여부에 따라 시나리오를 별도 설정하여 결과를 제시한 점, 이용 가능한 버스 서비스가 3개 이상 존재하는 경우 수학적 단순성을 위하여 통행시간 여건이 가장 불리한 1개 서비스는 배제한 점 등에 개선의 여지가 존재하며, 본 논문에서는 이를 개선한 모형을 아래와 같이 제시한다.

예를 들어, r 정류장과 s 정류장간 통행에 2가지의 버스 서비스가 존재하고, 버스 서비스 A는 5분 간격 배차, 통행시간 20분이 소요되고 버스 서비스 B는 10분 간격 배차, 통행시간 17분이 소요된다고 가정하면, 버스 서비스 A가 먼저 도착할 확률은 $2/3$, B가 먼저 도착할 확률은 $1/3$ 이 된다. B의 통행시간이 더 짧으므로 B가 먼저 도착할 시에는 B를 이용하게 되나, A가 먼저 도착하는 경우에는 B의 대기시간 기댓값에 따라 탑승 여부를 결정하게 된다. 즉, A와 B의 통행시간 차이인 3분 이내에 B가 도착할 것으로 기대되면, A가 먼저 도착하더라도 B를 이용하고, 그렇지 않은 경우에는 A를 이용한다. 각 서비스의 배차간격의 $1/2$ 를 평균 대기시간으로 간주하면, A의 평균 대기시간은 2.5분, B의 평균 대기시간은 5분인데, B의 기대 대기시간(평균 대기시간에서 정류장 도착 후 실제로 대기한 시간을 제한 값)이 3분 이내로 떨어지기 전(즉, 정류장 도착 후 2분 이내) A가 도착하는 경우 A를, 이후에는 A가 먼저 도착하더라도 B를 이용한다. 따라서 조건부 확률을 적용하면, A를 이용할 확률은 A가 먼저 도착할 확률 $(2/3) \times$ 대기 후 2분 이내 A가 도착할 확률 $(2/5) = 4/15$, B를 이용할 확률은 $11/15$ 로 볼 수 있다. 한편 두 서비스간 통행시간 차이와 비교했을 때, A의 배차간격보다 더 크거나 B의 평균 대기시간이 더 작으면 A의 선택확률은 0이 된다. 이를 수식으로 정리하면 r 정류장과 s 정류장간 통행에 있어 A를 선택할 확률(Pr_{rs}^A)과 B를 선택할 확률(Pr_{rs}^B)은 <식 3-12>와 같다. 여기서 두 서비스 중 통행시간이 더 짧은 서비스를 B로 설정하며, V_A 및 V_B 는 버스 서비스 A 및 B의 시간당 배차 대수를 의미한다.

$$\Pr_{rs}^A(A,B) = \begin{cases} \frac{V_A}{V_A + V_B} \cdot \frac{h_B/2 - (TT_{rs}^A - TT_{rs}^B)}{h_A}, & \text{if } 0 < (TT_{rs}^A - TT_{rs}^B) < h_A \\ & \text{and } (TT_{rs}^A - TT_{rs}^B) < h_B/2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\Pr_{rs}^B(A,B) = 1 - \Pr_{rs}^A(A,B) \quad (3-12)$$

각 버스 서비스의 선택 확률과 통행시간을 적용하면, 해당 구간의 평균 통행 시간을 산출할 수 있으며, 이는 4가지 유형에 따라 아래와 같이 적용된다.

(유형 1) 승차정류장 급행 정차, 하차정류장 급행 정차

$$TT_{rs} = \Pr_{rs}^L(TT_{rs}^L, TT_{rs}^R) \cdot TT_{rs}^L + \Pr_{rs}^R(TT_{rs}^L, TT_{rs}^R) \cdot TT_{rs}^R \quad (3-13)$$

(유형 2) 승차정류장 급행 정차, 하차정류장 급행 미정차

$$TT_{rs} = \Pr_{rs}^L(TT_{rs}^L, TT_{rs}^{R+L}) \cdot TT_{rs}^L + \Pr_{rs}^{R+L}(TT_{rs}^L, TT_{rs}^{R+L}) \cdot TT_{rs}^{R+L} \quad (3-14)$$

(유형 3) 승차정류장 급행 미정차, 하차정류장 급행 정차

$$TT_{rs} = \Pr_{rs}^L(TT_{rs}^L, TT_{rs}^{L+R}) \cdot TT_{rs}^L + \Pr_{rs}^{L+R}(TT_{rs}^L, TT_{rs}^{L+R}) \cdot TT_{rs}^{L+R} \quad (3-15)$$

(유형 4) 승차정류장 급행 미정차, 하차정류장 급행 미정차

$$TT_{rs} = \Pr_{rs}^L(TT_{rs}^L, TT_{rs}^{L+R+L}) \cdot TT_{rs}^L + \Pr_{rs}^{L+R+L}(TT_{rs}^L, TT_{rs}^{L+R+L}) \cdot TT_{rs}^{L+R+L} \quad (3-16)$$

한편, 본 연구에서 설정된 각 유형에서는 서비스 선택 대안이 2개만 존재하기 때문에 <식 3-12>를 활용하여 선택 확률의 추정이 가능하나, 향후 모형의 확장성을 고려하여 선택 대안이 3개 존재하는 경우에 대한 각각의 선택 확률 추정 방법을 <식 3-17>에 추가로 제시하였다. 이 때 통행시간이 가장 긴 서비스는 A, 가장 짧은 서비스는 C에 해당한다. 우선 A를 이용할 확률은, A가 B나 C보다 먼저 도착하고, 그 때의 B, C의 기대 통행시간(기대 대기시간과 통행시간의 합)

이 A의 통행시간보다 긴 경우의 조건부 확률로 구성된다. 한편, B를 이용할 확률은 B가 C보다 먼저 도착하고 그 때 C의 기대 통행시간이 B의 통행시간보다 긴 경우의 조건부 확률과, A가 B나 C보다 먼저 도착하였지만 B의 기대 통행시간이 A나 C보다 짧을 때의 조건부 확률의 합으로 구성되며, C는 A와 B의 선택 확률을 제한 나머지 확률이 된다.

$$\begin{aligned}
 \Pr_{rs}^A(A, B, C) &= \begin{cases} \frac{V_A}{V_A + V_B + V_C} \cdot \frac{h_B/2 - (TT_{rs}^A - TT_{rs}^B)}{h_A}, \\ \text{if } 0 < (TT_{rs}^A - TT_{rs}^B) < h_A \text{ and } (TT_{rs}^A - TT_{rs}^B) < h_B/2 \\ \text{and } (TT_{rs}^A - TT_{rs}^C) < h_C/2 \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases} \\
 \Pr_{rs}^B(A, B, C) &= \begin{cases} \frac{V_B}{V_A + V_B + V_C} \cdot \frac{h_C/2 - (TT_{rs}^B - TT_{rs}^C)}{h_B} \\ + \frac{V_A}{V_A + V_B + V_C} \cdot \left(\frac{TT_{rs}^A - TT_{rs}^B}{h_A} - \frac{h_B/2 - (TT_{rs}^A - TT_{rs}^C)}{h_A} \right), \\ \text{if } 0 < (TT_{rs}^B - TT_{rs}^C) < h_B \text{ and } (TT_{rs}^B - TT_{rs}^C) < h_C/2 \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases} \\
 \Pr_{rs}^C(A, B, C) &= 1 - \Pr_{rs}^A(A, B, C) - \Pr_{rs}^B(A, B, C) \quad (3-17)
 \end{aligned}$$

2. 총비용 최소화

가. 목적함수

목적함수를 총비용 최소화로 설정시에는 k -노선에 대한 목적함수를 아래와 같이 설정한다.

$$\min Z_k = VOT \cdot \sum_{r=1}^{z-1} \sum_{s=r+1}^z (q_{rs} \cdot TT_{rs}(i_n, h_L, h_R)) - VOC \cdot V_R \cdot VST_k \quad (3-18)$$

$$\text{subject to: } V_L + V_R = V_T \\
 V_L > 0, V_R > 0$$

$$i_n = [0, 1], \forall i_n \in S_k$$

$$\text{where } h_L = \frac{60}{V_L}, h_R = \frac{60}{V_R}$$

여기서 VOT 는 버스 승객의 시간가치, VOC 는 시간당 차량운행비용, VST_k 는 k 노선의 완행버스 대비 급행버스 운행시간 절감분을 의미한다. 즉, 본 목적함수를 통해 버스 승객의 시간비용은 최소화, 급행버스 운행시간 절감으로 인한 차량운행비용 절감폭은 최대화된다. 급행버스 운행시간 절감분(VST , <식 3-19>)은 급행 미정차 정류장의 통행시간 절감분($t_{n,n+1}^{reduced}$)의 총합과 기점정류장(d)~종점정류장(d)간 고가/지하차도 이용시 통행시간 절감분(P_{od})의 합으로 구성된다. 마지막으로 목적함수는 시간당 버스 배차대수(V_n)의 제약을 받는다.

$$VST_k = \sum_{n=1}^{z-1} t_{n,n+1}^{reduced} \cdot (1 - i_n) + P_{od} \quad (3-19)$$

3. 승하차 정류장 전환

한편, 승하차 정류장의 급행 정차여부에 따른 4가지 유형에서, 유형 1(승하차 정류장 모두 급행 정차)을 제외하고는 급행 미정차 정류장에서의 승차 또는 하차를 포함하고 있다. 이 경우, 전체 통행시간이 단축된다면 완행버스와 급행버스의 환승 이용 대신 급행버스 이용을 통해 기존에 급행이 정차하지 않는 정류장에서 급행 정차 정류장으로 승차 또는 하차 정류장을 변경할 여지가 있다. 이에 본 논문에서는 몇 가지 가정 사항을 두고 승차 또는 하차 정류장을 급행 정차 정류장으로 전환하는 모형을 개발하였다.

<표 3-2>와 같이 정류장 도보 접근영향권(walk accessibility)에 대한 기존 문헌 고찰 결과, 버스 정류장은 통상 500m 정도를 영향권으로 설정하는 것으로 나타나, 본 논문에서도 이를 적용하였다. 즉, 인접한 급행 정차 정류장과 거리 1km 미만인 경우, 급행 정차 정류장으로부터 500m 범위 내 승객은 기존에 이용하던 급행 미정차 정류장이 더 가깝더라도 급행 정차 정류장에서 급행버스를 이용할 수 있는 것으로 설정하였다.

〈표 3-2〉 정류장 도보 접근영향권 기존 문헌 고찰

문헌	정류장유형	접근거리 (평균)	접근거리 (백분위%)	대상도시
Wang et al. (2013) (TCQSM*)	버스	—	400m (75~80%)	—
Sullivan et al. (1996)	LRT (도시 평균)	649m	840m (75%)	캘거리 (캐나다)
	LRT (CBD)	326m	419m (75%)	
Lam et al. (1981)	버스	322~329m	450m (75%)	캘거리 (캐나다)
Matthew et al. (2007)	대중교통 (access)	600m	1300m (85%)	브리즈번 (호주)
	대중교통 (egress)	470m	1090m (85%)	
Jiang et al. (2012)	BRT	475m	—	지난 (중국)
Kimpel et al. (2007)	버스	402m	—	포틀랜드 (미국)
Hoback et al. (2008)	대중교통	233m (반경) 580m (도보거리)	—	디트로이트 (미국)
김경환 등 (2010)	버스	—	472m (80%)	부산 (한국)
	지하철	—	672m (80%)	
김성희 등 (2001)	대중교통	450m	—	과천 (한국)

* TCQSM: Transit Capacity and Quality of Service Manual (TCRP Report 165, Transportation Research Board, Washington, D.C.)

또한, 진행방향으로만 보행하는 것으로 가정(즉, 진행방향의 반대쪽으로 거슬러 올라가 탑승하거나, 목적지를 지나쳐 내린 뒤 역방향으로 되돌아가는 경우는 배제)하였다. 급행 미정차 정류장에서의 승차 또는 하차를 포함하는 기종점 유형의 경우 완행버스 이용 대신 급행버스 정차 정류장으로 도보 이동 후 급행 버스를 이용하는 형태가 가능하다. 다만 유형 4의 경우 기종점을 모두 변경하는 형태는 전체 보행거리의 과다 증가 우려로 배제하였으며, 유형별 이용가능 버스 서비스 형태는 <표 3-3>과 같다.

〈표 3-3〉 승하차정류장 전환 가능시 이용가능 버스서비스 형태

구분	승차정류장 급행정차	하차정류장 급행정차	이용 가능 버스서비스 형태
유형 2	○	×	완행 / 급행 탑승 후 완행 환승 / 급행 탑승 후 도보
유형 3	×	○	완행 / 완행 탑승 후 급행 환승 도보 후 급행 탑승
유형 4	×	×	완행 / 완행 탑승 후 급행 환승 후 완행 환승 / 완행 탑승 후 급행 환승 후 도보 / 도보 후 급행 탑승 후 완행 환승

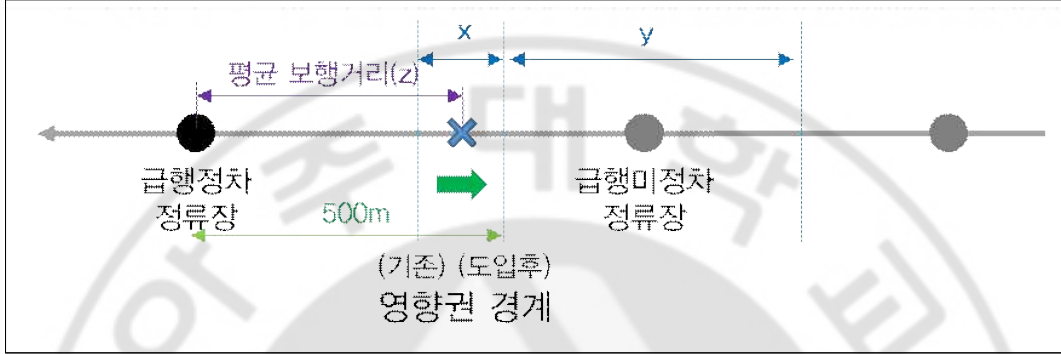
승하차정류장 전환 승객의 평균 보행거리(d)는 두 정류장 간격의 절반과 정류장 도보 영향권(500m)의 평균값을 적용하였고, 기존 대비 접근통행시간 증가분($WalkT$)은 전환 승객의 급행정류장 평균 보행거리(d)에서 기존 이용정류장(급행미정차 정류장)으로의 평균 보행거리를 제외한 값에 평균 보행속도를 적용하여 산정하였다. 또한, 이 때 기존 정류장에서 승하차정류장을 전환하는 승객의 비율은 기존 정류장 영향권 중 급행 정류장 영향권 거리의 비율($x/(x+y)$)로 산정하였다. 이를 수식으로 표현하면 <식 3-20, 21>과 같으며, 이에 대한 개념은 <그림 3-3>에 나타냈다.

$$WalkT_{ab}^{access} = \frac{\left(\sum_{n=a}^{b-1} DIST_n \right) / 2 + 500}{WalkSpeed} - \frac{DIST_a}{4} \quad (3-20)$$

$$WalkT_{ab}^{egress} = \frac{\left(\sum_{n=a}^{b-1} DIST_n \right) / 2 + 500}{WalkSpeed} - \frac{DIST_{b-1}}{4} \quad (3-21)$$

여기서, $WalkT_{ab}^{access}$ 는 출발정류장(a)에서 급행 정차 정류장까지 도보로 이동 후 도착정류장(b)까지 급행버스를 이용한 경우, $WalkT_{ab}^{egress}$ 는 출발정류장(a)에

서 급행버스 탑승 후 급행 정차 정류장에서 하차, 도착정류장(b)까지 도보로 이동한 경우의 접근통행시간 증가분이며, $DIST_n$ 는 n 번째 정류장과 $n+1$ 번째 정류장 간격, $WalkSpeed$ 는 평균보행속도(5km/h)이다.



<그림 3-3> 승하차정류장 전환에 따른 영향권 변화

승하차정류장 전환은 기존 정류장 승하차시에 대비하여 전환 이용시의 통행 시간이 단축되는 경우에 적용되며, 이때 승하차 O/D는 유형 2의 경우 <식 3-22>, 유형 3은 <식 3-23>, 유형 4는 <식 3-24>에 따라 수정된다.

$$CVT(q_{rs}) = \begin{cases} q_{rs} = q_{rs} - q_{rs'}^{cvt}, & \text{if } TT1 > TT3 \text{ and } TT2 > TT3 \\ q_{rs'} = q_{rs'} + q_{rs'}^{cvt}, & \\ q_{rs}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-22)$$

where,

$$TT1 = TT_{rs}^L$$

$$TT2 = TT_{rs}^{R+L}$$

$$TT3 = TT_{rs}^R + WalkT_{s's}^{egress}$$

$$s' = r + \max(i_n \times (r+n)), \text{ if } s' < s \text{ and } \min(i_n \times (r+n)) \neq \max(i_n \times (r+n)),$$

$$\text{where } \forall i_n \in [1], n > 0, (r+n) < s$$

$$TT3 = \infty, \text{ otherwise}$$

$$CVT(q_{rs}) = \begin{cases} q_{rs} = q_{rs} - q_{r's}^{cvt}, & \text{if } TT1 > TT3 \text{ and } TT2 > TT3 \\ q_{r's} = q_{r's} + q_{r's}^{cvt}, & \\ q_{rs}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-23)$$

where,

$$TT1 = TT_{rs}^L$$

$$TT2 = TT_{rs}^{L+R}$$

$$TT3 = WalkT_{rr'}^{access} + TT_{r's}^R$$

$$r' = r + \min(i_n \times (r+n)), \text{ if } r' > r \text{ and } \min(i_n \times (r+n)) \neq \max(i_n \times (r+n)),$$

$$\text{where } \forall i_n \in [1], n > 0, (r+n) < s$$

$$TT3 = \infty, \text{ otherwise}$$

$$CVT(q_{rs}) = \begin{cases} q_{rs} = q_{rs} - q_{rs'}^{cut}, TT1 > TT3 \text{ and } TT2 > TT3 \text{ and } TT4 > TT3 \\ q_{rs'} = q_{rs'} + q_{rs'}^{cut}, \\ q_{rs} = q_{rs} - q_{r's}^{cut}, TT1 > TT4 \text{ and } TT2 > TT4 \text{ and } TT3 > TT4 \\ q_{r's} = q_{r's} + q_{r's}^{cut}, \\ q_{rs}, \text{ otherwise} \end{cases} \quad (3-24)$$

where,

$$TT1 = TT_{rs}^L$$

$$TT2 = TT_{rs}^{L+R+L}$$

$$TT3 = TT_{rs'}^{L+R} + WalkT_{s's}^{egress}$$

$$TT4 = WalkT_{rr'}^{access} + TT_{r's}^{R+L}$$

$$r' = r + \min(i_n \times (r+n)), \text{ if } r' > r \text{ and } \min(i_n \times (r+n)) \neq \max(i_n \times (r+n)),$$

$$\text{where } \forall i_n \in [1], n > 0, (r+n) < s$$

$$s' = r + \max(i_n \times (r+n)), \text{ if } s' < s \text{ and } \min(i_n \times (r+n)) \neq \max(i_n \times (r+n)),$$

$$\text{where } \forall i_n \in [1], n > 0, (r+n) < s$$

$$TT3 = TT4 = \infty, \text{ otherwise}$$

여기서 유형 4(<식 3-24>)를 기준으로 설명하면, r 는 r 정류장과 s 정류장간 최초 급행 정차 정류장 (즉, 가장 r 정류장에 가까운 급행 정차 정류장), s 는 r 정류장과 s 정류장간 최종 급행 정차 정류장 (즉, 가장 s 정류장에 가까운 급행 정차 정류장)이며, r 와 s 가 같은 경우(r 정류장과 s 정류장간 급행 정차 정류장이 1개로 급행버스 이용이 불가능한 경우) 또는 r 정류장과 s 정류장간 급행 정차 정류장이 존재하지 않는 경우 $TT3$, $TT4$ 에 무한대의 패널티를 부여하여 급행버스 이용 형태가 배제될 수 있도록 하였다. 아울러, $TT1$ 은 $r \sim s$ 정류장간 이동시 완행버스 이용, $TT2$ 는 $r \sim s$ 정류장간 이동시 완행버스 탑승 후 급행버스 환승 후 완행버

스 환승 이용, $TT3$ 은 $r \sim s$ 정류장간 이동시 완행버스 탑승 후 급행버스 환승 후 s 정류장에서 하차하여 s 정류장까지 도보, $TT4$ 는 $r \sim s$ 정류장간 이동시 r 정류장까지 도보 이동하여 완행버스 탑승 후 급행버스 환승 이용하는 형태이다.

제 3 절 급행버스 도입노선 우선순위 평가 방법론

급행버스 도입노선 우선순위 평가 방법론은 대중교통 네트워크 상에 존재하는 다양한 노선 중 어떤 노선에 우선적으로 급행 버스를 도입하는 것이 효율적 일지에 대한 판단을 지원하는 방법론으로, 다양한 노선별 속성에 따른 급행버스의 도입 효과의 크기를 도출하는 것이 핵심이다. 따라서 우선 시나리오 분석을 통해 다양한 노선 속성에 따른 급행버스의 도입 효과를 분석하고 회귀모형을 도출한 뒤, 실제 노선들에 대한 회귀모형 적용 결과와 급행버스노선 정차정류장 선정모형 적용의 결과를 비교하여 회귀모형의 적정성을 검토한다. <표 3-4>는 시나리오 분석과 실제 노선 대상의 정류장 선정모형을 비교한 결과이다.

<표 3-4> 시나리오 분석과 실제 노선에 대한 모형 적용의 특성 비교

구분	시나리오 분석	실제 노선 모형적용
목적함수	노선 유형별 급행 도입시 총통행시간 감소폭	노선별 급행 도입시 총통행시간 감소폭
모형 입력변수	시나리오별 O/D, 노선 연장, 정류장간 통행시간	노선별 O/D, 노선 연장, 정류장간 통행시간
모형 출력변수	각 시나리오별 총통행시간	각 노선별 총통행시간
장점	다양한 노선 형태에 대한 분석 가능	기초자료 구축 용이, 실제 O/D 형태 반영
단점	O/D 생성이 다소 인위적이고 복잡	노선 형태 편중 및 결과 해석 모호 우려

1. 시나리오 분석

앞서 문헌고찰에서 검토된 바와 같이 급행버스 서비스의 영향 요인에 있어 O-D의 높은 집중도 및 장거리 통행 승객 비율 (평균 통행길이), 수요 가변성, 급행 정류장간 최소 간격, 그 외 배차간격 및 승객수, 잠재적인 통행시간 절감 수준 등을 급행버스 효율성의 중요 요인으로 분석한 바, 본 연구에서는 급행버스 운영 효율에 영향을 줄 수 있는 요인으로 노선 연장, 평균 정류장 간격, 평균 통행거리, O/D 형태를 선정하였다.

각 요인별로는 3가지 case를 가정하였는데, 이는 수원시내 일반 버스노선 73개의 노선 및 승객 특성을 조사하여 각각 백분위 상위 15%, 50%, 85% 값을 사용하였다(<표 3-5>). 백분위 값은 전체 데이터 분포를 포괄적으로 대표할 수 있는 백분위 수로, Snyder (1989), Taoka (1989), Zimmerman et al. (2003), Gates et al. (2006), Ban et al. (2010), El-Shawarby et al. (2011), Songchitruksa et al. (2011), Dixon and Brown (2014), Jain et al. (2014) 등의 연구에서도 해당 백분위 수가 활용된 바 있다. O/D 형태의 경우 모든 정류장이 유사한 승하차 패턴을 갖는 Flat 형태, 전체 노선 정류장 중 2개 정류장에서 많은 승객에 타고 내리는 2 Peaks 형태, 전체 노선 정류장 중 4개 정류장에서 많은 승객에 타고 내리는 4 Peaks 형태로 정의하였다. 본 분석에서 사용되는 시나리오는 4개 요인의 3개 값에 대한 모든 조합인 81개($=3^4$)이다.

<표 3-5> 급행버스 운영 효율성 영향요인 설정 값

	노선 연장	정류장 간격	평균 통행거리	O/D 형태*
백분위 상위 15%	19.7km	390m	2.8km	균등
백분위 상위 50%	32.5km	430m	3.4km	2개 정류장 집중 패턴
백분위 상위 85%	42.4km	470m	4.1km	4개 정류장 집중 패턴

* 백분위 순위와 무관

급행버스의 도입 효과는 승객 총통행시간의 절감분으로 정의하고, 각 시나리오별 급행 정류장은 급행버스노선 정차정류장 선정모형을 통해 총통행시간을 최소로 하는 정류장 조합으로 선정하며, 승객 통행시간은 차내시간, 대기시간, 환승시간으로 구성하고, 각 시나리오별 노선 총수요는 수원시의 km당 평균 승객수(174인/km, 교통카드DB에서 집계)와 총연장의 곱으로 적용하여 모든 시나리오에서 동일한 수준의 O/D 총량을 갖도록 하였다. 급행노선의 완행정류장 미정차에 따른 운행시간 절감요소로는 승하차소요시간, 가감속시간, 교차로 신호대기 절감시간을 포함하였다.

기종점의 급행 정차 여부에 따라 O/D는 3가지 유형(급행+급행, 급행+완행, 완행+완행)으로 구분되며, 급행+완행, 완행+완행의 경우 완행으로 목적지까지 탑승하는 경우와 급행으로 환승하는 경우의 총통행시간을 비교하여 앞 절에서 제시하였던 확률적 배정(<식 3-12>)을 적용한 뒤 평균 통행시간을 산정하였다. 정류장간 통행속도는 수원시 버스 평균통행속도(20km/h)를 적용하고, 기존 완행 운영차량의 50%가 급행버스에 배정되는 것으로 가정하였으며, 분석의 효율성을 위하여 기종점 정류장의 급행버스 미정차에 따른 급행버스 정차정류장로의 기종점 변경은 없는 것으로 가정하였다.

O/D 생성은 시나리오 분석에 있어 가장 중요한 부분 중 하나로, O/D 형태(균등, 2개 정류장 집중 패턴, 4개 정류장 집중 패턴)별로 각 정류장별 발생 통행량을 생성하였다. 우선 균등 형태의 O/D의 경우에 대한 방법론은 다음과 같다. 마지막 정류장에서는 하차만 가능하므로 정류장별 평균 탑승 인원은 총 탑승인원/(정류장수-1)이 되며, 이 값을 평균으로 하는 정규 분포에 따라 아래 식을 통해 정류장별 발생 통행량을 랜덤 생성하는데, 이 때 분산은 k 노선의 총 정류장수에 비례하게 적용하였다. 또한, 평균 통행거리를 평균 정류장 간격으로 나누어 평균 통행 정류장수를 산정하여, 이 값을 평균으로, 잔여 정류장수에 비례하는 분산을 갖는 정규 분포에 따라 각 정류장에서 탑승하는 인원 개별로 통행 정류장수를 부여하여 O/D를 생성한다. 2·4개 정류장 집중 패턴의 경우에는

총 통행량의 일정 비율(2개 정류장 집중: 30%, 4개 정류장 집중: 40%로 가정)을 제외한 나머지는 균등 형태의 O/D 생성 방법론으로 O/D를 생성하고, 집중 정류장의 통행량을 추가 적용하였다. 2개 정류장 집중 형태는 첫 번째 집중 정류장에서 총 승객의 15%가 승차하며, 두 번째 집중 정류장에서 총 승객 15%가 하차하는 것으로 가정하였고, 4개 정류장 집중 형태의 경우 총 승객 10%가 첫 번째 정류장에서 승차, 두 번째, 세 번째 정류장에서는 총 승객 10%가 승차 및 하차, 네 번째 정류장에서는 총 승객 10%가 하차하는 것으로 가정하였다. 각 정류장의 위치는 전체 정류장의 균등 분할 위치로 지정하여, 2개 정류장 집중 패턴의 경우 전체의 1/3번째 및 2/3번째, 4개 정류장 집중 패턴의 경우 전체의 1/5, 2/5, 3/5, 4/5번째 정류장으로 지정하였다. 집중 정류장의 승하차 분포 또한 해당 정류장만을 특정하여 균등 형태의 O/D 생성 방법론과 동일하게 적용하였다.

각 시나리오별 급행버스 도입시의 총통행시간 추정은 급행버스노선 정차정류장 선정모형에서 사용되었던 모형(<식 3-13~16>)을 동일하게 적용하였다.

2. 실제 노선 대상 모형 적용

네트워크 상의 각 노선별로 급행버스노선 정차정류장 선정모형을 적용하여 급행버스 도입 효과(총통행시간의 감소폭)를 산출하여 시나리오 분석 결과의 비교 검증 자료로 활용한다. 전체적인 분석 과정은 급행버스노선 정차정류장 선정모형과 동일하게 적용되나, 분석 효율성 향상을 위하여 승하차정류장 전환은 고려하지 않고, 침두O/D를 기준으로 분석한다.

제 4 장 모형 적용 및 평가

본 장에서는 앞서 개발된 급행버스노선 정차정류장 선정모형과 급행버스 노선 선정 방법론을 실제 교통카드DB에 적용하여 검증 및 평가를 진행하며, 사용된 교통카드DB의 가공 방법 및 통행 패턴 정보의 소개, 선형계획법(LP, Linear Programming) 풀이와의 비교를 통한 유전 알고리즘 도입의 타당성 검토, 급행버스노선 정차정류장 선정모형의 적용 및 평가 결과 도출, 급행버스 도입노선 우선순위 평가 방법론 적용 및 평가 결과 도출의 순으로 진행된다. 또한 기존 급행버스노선 정차정류장 선정 방법론 적용 결과와의 비교를 통해 본 모형의 실효성을 검증하고, 급행버스노선 정차정류장 선정모형의 대상 범위를 확장하여 일부 노선축을 공유하는 노선으로부터의 급행버스 전이 수요까지 함께 고려했을 때의 효과를 추가로 제시한다.

제 1 절 교통카드DB를 이용한 기초자료 생성

1. 교통카드DB의 가공

본 논문의 공간적 범위는 수원시로, 내용적 범위는 해당 지역을 지나는 노선으로 설정하였다. 수원시는 도시의 구조가 집약적이면서 약 120만 명의 인구로 통행 수요량이 풍부하고, 지하철 노선망이 미비하여 대중교통 수단 중 버스에 대한 의존율이 높으며, 수도권에 일반적인 위성도시와 달리 자체적인 업무·상업 기능을 보유하고 있어 다양한 통행 패턴에 대한 분석이 가능하다. 시간적 범위는 연중 평균적인 교통량 값을 보이는 10월의 평일(2013년 10월 16일 수요일)을 대상으로 설정하여 교통카드DB를 수집하였다. 해당 날짜의 수원시 관계통행(통행의 기종점 중 1개 이상이 수원시에 해당하는 경우) 교통카드 자료 662,268건(통행사슬(trip-chain) 기준, eb카드사 수집) 중 일부 오류/결측 자료를 제외한

정상 데이터 개수는 654,922건(일부 자료는 2인 이상이 동일 카드를 이용한 경우로, 탑승인원은 663,616명)으로 나타났다. 전체 데이터의 98.9%가 유효한 데이터로 나타나는 만큼, 별도의 보정 없이 이상치 데이터를 제외하고 분석을 시행하여도 무방한 수준으로 판단하여 결측치에 대한 보정작업은 실시하지 않았다.

수원시내를 경유하는 119개 일반버스 노선 중 2015년 현재 폐선된 노선과, 농어촌 지역을 운행하는 노선 등 배차간격이 과도하게 긴 노선 등 일부를 제외한 73개 노선(<표 4-1>)을 분석 대상 노선으로 선정한 뒤, 노선ID 및 정류장ID 등 노선 기반정보를 활용하여 교통카드DB에서 분석 자료만을 추출하였다. 교통카드DB는 통행사슬(trip-chain) 형태로써 목적지까지 1회 이상의 환승을 하여 도달한 경우 한 건의 데이터 내에 여러 건의 통행 자료가 포함되어있으므로, 이를 개별 통행 자료로 분리한 뒤 분석 대상 노선에 해당하는 자료만을 선별하고, 정류장ID를 이용하여 승하차 정류장이 각 노선의 몇 번째 정류장에 해당하는지 표기하였다. 승하차 정류장의 순번은 각 노선별 O/D 수요표 작성을 위하여 필요한 데이터로, 기점으로부터 첫 번째 정류장을 1번으로 하여, 종점 회차 후 기점으로 들어오기 전 마지막 정류장까지 순차적으로 부여하였다. 일련의 데이터 가공 과정은 <그림 4-1>에 나타나있으며, 가공 후 데이터 건수는 698,634건으로 나타났다.

<표 4-1> 분석 대상 노선 (73개) 개요 (자료 수집일자 기준)

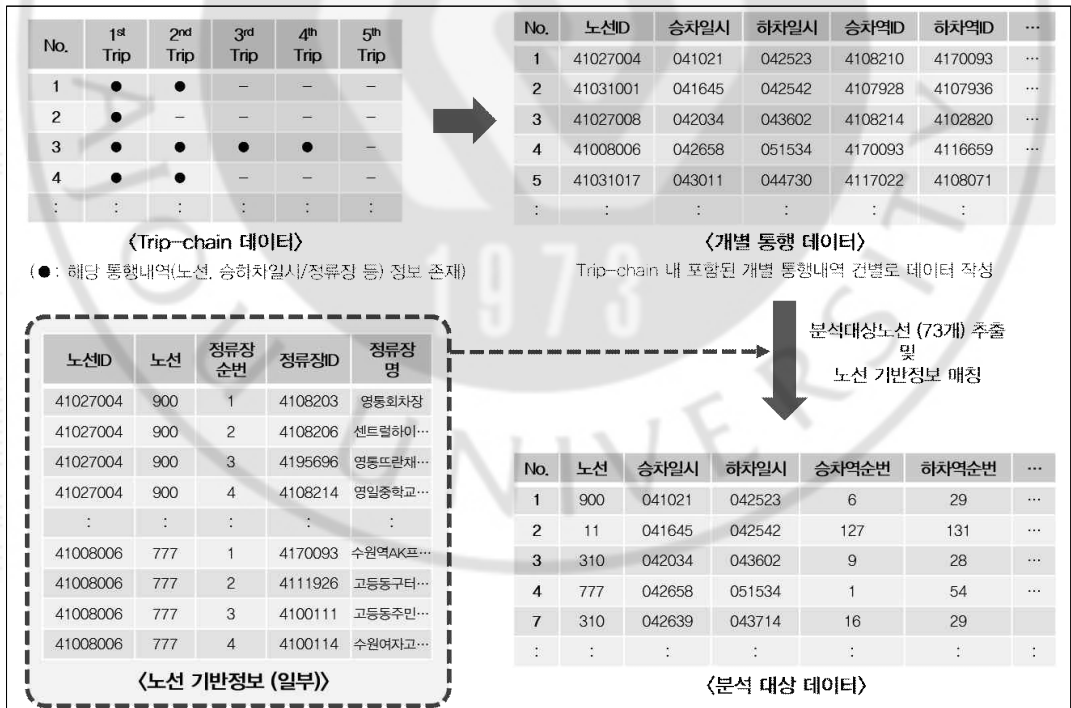
노선번호	기점	종점	운행거리 (km)	왕복 정류장수	차량 대수	배차간격(분)		일일 승차인원*
						첨두	비첨두	
720-2	안녕동	백현마을8단지	81.4	194	58	4	10	20,042
62-1	동탄차고지	LG빌리지3차	62.6	158	27	8	10	19,413
92	곡반정동	이목동	36.8	91	26	6	7	18,598
65	광고차고지	인양역	51.7	118	44	5	10	17,470
92-1	동탄신도시	성대역	49.4	113	22	8	10	16,004
301	범계역	하북차고지	76.2	160	38	5	7	15,492
720-1	삼성반도체정문	성남(은행동)	91.5	214	52	5	12	13,993
3	영통차고지	삼환아파트	38.5	103	21	8	8	13,783
700-2	구미동차고지	수원대	57.2	134	33	8	15	13,737
13	상광교	철보초교	33.9	74	19	6	8	13,246

- 6) 일부 데이터의 경우 이용자가 하차시 태그를 하지 않거나, 교통카드 시스템 내 오류 등의 이유로 하차, 환승 등과 관련된 일부 자료가 누락되어있는 경우가 발생하며, 이러한 데이터를 포함할 경우 분석에 오류가 발생할 수 있으므로 분석 과정에서 이를 배제

노선번호	기점	종점	운행거리 (km)	왕복 정류장수	차량 대수	배차간격(분)		일일 승차인원*
						첨두	비첨두	
777	수원역	사당역	55.8	104	33	5	6	13,049
30	북부차고지	봉담택지지구	35.3	73	9	6	8	13,016
2-1	천천아파트	영통차고지	38.9	103	19	8	9	12,905
13-1	영통차고지	칠보초교	48.7	128	24	7	9	12,849
98	이목동	동탄차고지	49.7	124	19	10	12	12,095
82-1	곡반정동	수원여고	33.8	84	21	6	8	11,794
5	영통차고지	이목동	45.7	108	21	7	10	11,597
300	하북차고지	안양범계역	73.6	139	34	6	8	10,869
66	수원역	에버랜드	65.0	152	26	25	30	9,810
112	곡반정동	율전동	31.5	74	18	8	12	9,535
51	영통황골	오목천동차고지	34.4	76	14	10	20	9,344
7-1	보훈원	동탄차고지	38.7	100	15	9	12	8,891
9	강남아파트	경희대	35.4	81	12	13	15	8,851
88	오목천차고지	조원동차고지	42.5	106	13	16	20	8,734
37	보훈원	민속촌	46.2	116	17	8	13	8,665
83-1	곡반정동	수원여고	22.3	60	23	6	8	8,348
730	수원대	성남(서현역)	70.2	158	21	8	15	7,684
11	보훈원	반월공단	70.4	141	25	9	12	7,600
7-2	영통차고지	미금역	66.2	162	17	12	16	7,475
13-5	동탄신도시	당수동삼정아파트	50.3	105	14	12	15	7,320
7	영통차고지	미금역	63.4	149	17	13	17	6,561
80	곡반정동	광교호수마을	33.5	80	15	8	10	6,434
11-1	영통차고지	당수동인정아파트	49.6	108	17	10	12	6,258
99	서부차고지	기산중	80.5	189	9	15	30	5,891
10	백암	수원역	85.0	169	23	10	12	5,860
88-1	서부차고지	동부차고지	40.4	94	10	13	18	5,726
64	동탄차고지	안양역	70.1	160	13	15	19	5,683
66-4	수원역	에버랜드	76.0	188	21	14	14	5,659
900	영통차고지	보라매공원	83.4	166	30	8	11	5,652
35	보훈원	향남지구	53.1	110	12	14	18	5,272
25	파장동차고지	발산리	45.5	93	9	14	14	4,773
63	동탄차고지	파장동	50.3	124	13	12	16	4,605
99-2	서부차고지	곡반정동	51.1	118	7	20	30	4,476
60	광주차고지	수원역	93.3	213	26	15	20	4,473
38	수원역	향남지구	41.7	80	11	7	15	4,399
27	파장동	수지중	52.1	130	15	15	15	4,325
5-1	서수원터미널	동탄차고지	44.6	93	11	13	15	4,154
20	동부차고지	오산운암단지	57.7	122	18	13	16	4,106
82-2	영통차고지	율전주공아파트	36.0	88	10	15	20	4,079
4-1	신갈차고지	조원동차고지	37.4	91	8	15	20	4,063
310	영통차고지	이목동(동원고)	36.9	89	7	20	20	4,055
36	북부차고지	수일여중	53.0	118	11	18	20	3,986
9-1	서부차고지	용인대주파로터미널	52.5	101	6	20	25	3,766
10-5	수원역	용인터미널	47.0	108	11	15	18	3,536
15-1	서부차고지	나루고	58.8	124	5	25	35	3,508

노선번호	기점	종점	운행거리 (km)	왕복 정류장수	차량 대수	배차간격(분)		일일 승차인원*
						첨두	비첨두	
400-4	광고휴먼시아	마도산업단지	68.5	139	10	18	28	3,443
34	왕림휴게소	흥덕2단지	60.5	134	12	12	15	3,279
660	수원역	광주차고지	76.4	145	13	15	25	3,261
400	광고수자인	궁평항	97.0	187	9	20	35	3,202
9-2	금곡동강남아파트	광고휴먼시아	39.9	86	8	20	30	3,138
20-1	보훈원	오산운암단지	47.1	97	9	18	25	2,979
34-1	왕림휴게소	경희대	50.6	114	13	10	20	2,920
202	원영화남아파트	아주대병원입구	46.3	96	5	20	25	2,752
2-2	영통차고지	율전화남아파트	41.6	102	6	15	18	2,654
46	보훈원	우남퍼스트빌3차	42.5	95	7	25	30	2,519
85	곡반정동	광고웰빙타운	29.0	70	8	16	18	2,354
990	북부차고지	서신	82.4	154	8	20	45	2,203
62	동부차고지	성대역	34.8	81	10	15	16	2,027
10-2	흥덕13단지	수원역	20.0	58	5	20	25	2,021
39	서수원터미널	천천아파트	33.3	81	8	18	20	1,925
720-3	단국대	동탄(푸른마을)	53.6	123	14	15	25	1,712
61	동탄차고지	금곡거산아파트	62.6	158	5	13	18	1,642
13-4	동부차고지	호매실능실마을	45.8	99	11	14	16	1,504

* 일일 승차인원: 수원시 관계통행만을 대상으로 집계 (수원시 외부 지역에서 승하차가 모두 이루어진 경우는 제외)



〈그림 4-1〉 교통카드DB의 가공

2. 이용특성 분석

본 분석에 앞서, 수집된 교통카드DB의 기본적인 이용특성 분석을 통해 대상 지역의 대중교통 이용수요가 어떠한 패턴을 보이고 있는지 파악하고자 하였다. 여기에서 사용된 교통카드DB는 73개 노선에 대한 가공 자료가 아닌 수원시 관계통행 전체(버스 및 전철)를 대상으로 하였다.

우선 수원시 각 행정동별 대중교통 발생/유발 통행량(최초 출발지 및 최종 목적지에 해당하는 경우)을 산정한 결과(<표 4-2>), 수원역이 위치한 매산동이 승하차 123,037인/일로 가장 많은 것으로 나타났고, 이어서 주거 및 상업지역이 밀집한 인계동, 율천동, 영통1동 등의 순으로 나타났다. 반면 2013년 당시 재개발 사업이 진행중이거나 인구 밀집도가 낮은 세류1동, 입북동, 세류3동 등의 경우 대중교통 통행량이 적은 것으로 나타났다.

<표 4-2> 행정동별 대중교통 통행량 (자료 수집일자 기준)

(단위: 인, 통행/일)

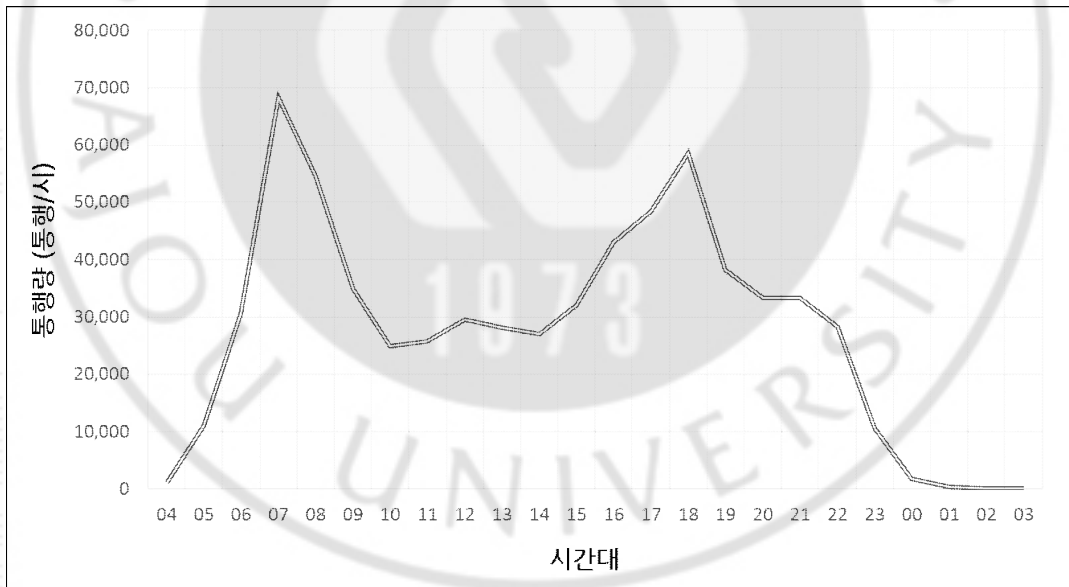
구	동	인구	승차	하차	구	동	인구	승차	하차
팔달구	고등동	12,080	3,514	4,659	권선구	곡선동	31,108	9,577	8,428
	매교동	11,316	7,267	8,401		구운동	28,620	11,905	11,691
	매산동	12,164	61,360	61,677		권선1동	25,769	8,918	9,195
	우만1동	23,611	6,421	6,388		권선2동	43,014	10,175	9,450
	우만2동	18,831	8,042	9,579		금호동	52,970	13,937	12,900
	인계동	43,027	22,928	24,070		서둔동	42,697	10,559	11,309
	지동	15,433	6,686	6,669		세류1동	4,198	402	995
	행궁동	12,140	18,705	19,543		세류2동	27,021	11,167	10,682
	화서1동	26,591	9,206	9,466		세류3동	25,147	3,663	4,145
	화서2동	29,480	14,594	14,085		입북동	14,367	2,552	2,431
장안구	송죽동	19,514	8,725	9,619	영통구	평동	36,768	12,691	12,420
	연무동	21,124	10,101	9,015		광교동	50,578	15,194	13,858
	영화동	22,509	14,545	13,851		매탄1동	21,802	9,731	7,389
	율천동	44,890	20,865	21,231		매탄2동	17,713	5,400	5,179
	정자1동	34,468	9,380	9,034		매탄3동	39,151	8,652	9,855
	정자2동	33,526	8,615	8,011		매탄4동	25,590	5,245	4,371
	정자3동	46,589	12,859	12,872		영통1동	43,090	19,579	22,190
	조원1동	32,767	4,329	4,582		영통2동	48,009	18,772	18,033
	조원2동	20,685	5,766	5,237		원천동	19,994	16,806	17,024
	파장동	24,445	10,545	10,249		태장동	48,861	8,443	9,066
총 계							1,151,657	467,821	468,849

다음으로 탑승 시간대별(환승 승차는 제외) 대중교통 통행량 분포를 분석한 결과(<표 4-3>, <그림 4-2>), 출퇴근시간대인 7~8시, 18~19시의 통행량이 가장 많은 것으로 나타났다.

<표 4-3> 시간대별 대중교통 통행발생량 (자료 수집일자 기준)

(단위: 통행/시)

시간대	통행량	시간대	통행량	시간대	통행량
04~05	1,014	12~13	29,574	20~21	33,346
05~06	11,081	13~14	28,175	21~22	33,259
06~07	30,447	14~15	26,968	22~23	28,237
07~08	68,258	15~16	32,030	23~00	10,616
08~09	54,704	16~17	43,065	00~01(익일)	1,696
09~10	34,851	17~18	48,492	01~02(익일)	361
10~11	24,844	18~19	58,549	02~03(익일)	127
11~12	25,693	19~20	38,165	03~04(익일)	64



<그림 4-2> 시간대별 대중교통 통행발생량 (자료 수집일자 기준)

마지막으로 환승 승하차가 발생하는 주요 지점을 분석한 결과, 정류장 기준(<표 4-4>)으로는 수원역 및 일대 정류장, 성균관대역, 법원사거리, 화서역 등의 순으로 주로 전철역 및 주변 정류장, 다양한 버스 노선이 지나는 정류장에서 환승 발생량이 많은 것으로 나타났으며, 행정동별 기준(<표 4-5> 및 <그림 4-3>)으로는 매산동, 율천동, 행궁동, 영화동 등 전철역사가 입지한 지역, 상업/업무 중심지역, 버스노선 집중지역 등의 환승 발생량이 많은 것으로 나타났다.

<표 4-4> 상위 환승인원 역/정류장 (상위 10개)

(단위: 통행/일)

순위	정류장명	정류장ID	정류장코드	환승 승하차 계	환승 승차인원	환승 하차인원
1	수원	1713	(전철역)	31,080	15,185	15,895
2	수원역.AK프라자	4170093	03-017	29,130	15,120	14,010
3	수원역.AK프라자	4116760	03-015	20,828	9,444	11,384
4	수원역.AK프라자	4116849	03-022	17,058	12,253	4,805
5	역전시장	4102820	03-023	11,809	2,634	9,175
6	성균관대	1711	(전철역)	10,933	5,502	5,431
7	매산시장	4107928	03-164	7,112	5,162	1,950
8	법원사거리	4116895	04-042	5,799	2,243	3,556
9	화서	1712	(전철역)	5,798	3,091	2,707
10	장안동	4107940	03-134	4,918	2,461	2,457

<표 4-5> 행정동별 환승인원 (상위 20개)

(단위: 통행/일)

순위	행정동	환승 승하차계	환승 승차인원	환승 하차인원	순위	행정동	환승 승하차계	환승 승차인원	환승 하차인원
1	매산동	124,907	63,945	60,962	11	인계동	7,055	3,450	3,605
2	율천동	24,226	12,278	11,948	12	구운동	6,703	3,240	3,463
3	행궁동	23,820	12,095	11,725	13	서둔동	5,812	2,707	3,105
4	영화동	17,428	8,789	8,639	14	매교동	5,638	2,672	2,966
5	영통2동	16,855	8,842	8,013	15	권선2동	5,460	2,900	2,560
6	화서2동	13,568	6,862	6,706	16	우만2동	5,178	2,458	2,720
7	원천동	12,729	6,327	6,402	17	광고동	4,563	2,315	2,248
8	세류2동	10,198	5,074	5,124	18	평동	3,695	1,633	2,062
9	영통1동	10,085	5,058	5,027	19	태장동	3,654	1,473	2,181
10	매탄1동	7,421	4,049	3,372	20	파장동	3,366	1,477	1,889

제 2 절 유전알고리즘의 도입 검토

본 논문에서 개발된 급행버스 정류장 선정모형은 다양한 제약조건과 방대한 자료 규모에 기인하여 노선 연장 및 정류장 수와 승차 인원의 증가에 따라 계산의 복잡성이 상당 폭으로 증가한다. 따라서 기존의 선형모형 등을 이용한 수학적 계산은 모형의 확장성 측면에서 불리하므로 대표적인 휴리스틱 최적화 모형 중 하나인 유전 알고리즘의 도입을 검토하고자 한다. 유전 알고리즘은 생물의 진화 원리에 착안하여 Holland(1975)가 개발한 전역 최적화 기법으로, 선택·교차·변이 등의 진화적 연산 기법을 반복하여 최적해에 도달하는 특징을 지니고 있으며 현재 공학을 비롯한 다양한 분야에서 활용되고 있다. 유전 알고리즘에서 사용되는 주요 용어의 정의는 다음과 같다(문병로(2008), 김재은(2013a)의 요약).

- 적합도 함수(fitness function): 최적화 대상의 목적함수
- 개체(individual): 문제 해결상의 임의의 해를 유전 알고리즘이 이해하는 형태로 표현하여 적합도가 평가되는 설계 변수의 집합으로, 염색체(chromosome) 등으로도 불림
- 유전자(gene): 개체(염색체)를 이루는 각 요소(인자)로서, 설계 변수의 개념과 동일하며 유전 알고리즘의 최소 단위임
- 집단(population): 개체가 모인 집합으로, 적합도가 높은 개체가 다음 세대에서 살아남을 확률이 큼
- 세대(generation): 집단을 구성하는 개체들은 매번 적합도 평가를 통해 적합도가 높은 개체들로 구성된 집단으로 반복하여 진화하며, 이러한 일련의 연속적인 집단을 세대라고 하며 최적화의 반복 연산(iteration)에 해당함
- 선택(selection): 다음 세대의 자식 개체들(children)을 생성하기 위한 부모 세

대(parents)를 선택함에 있어, 현재 집단에 대해 우수한 해를 선택할 확률을 높이는 일정한 적합도 평가 방법을 이용함

- 교차(crossover): 선택된 부모 개체들을 일정한 교차 법칙에 의해 결합하여 부모의 일부 유전자를 갖는 새로운 개체들(crossover children)을 생성
- 변이(mutation): 집단의 다양성을 갖도록 특정 개체들에 대해서는 임의의 변화를 가하여 다음 세대의 자식 개체들(mutation children)을 생성

또한, 유전 알고리즘을 적용시 각 단계에서 적용되는 다양한 설정 항목과 내역은 다음과 같다(문병로(2008), 김재은(2013a), 김재은(2013b)의 요약).

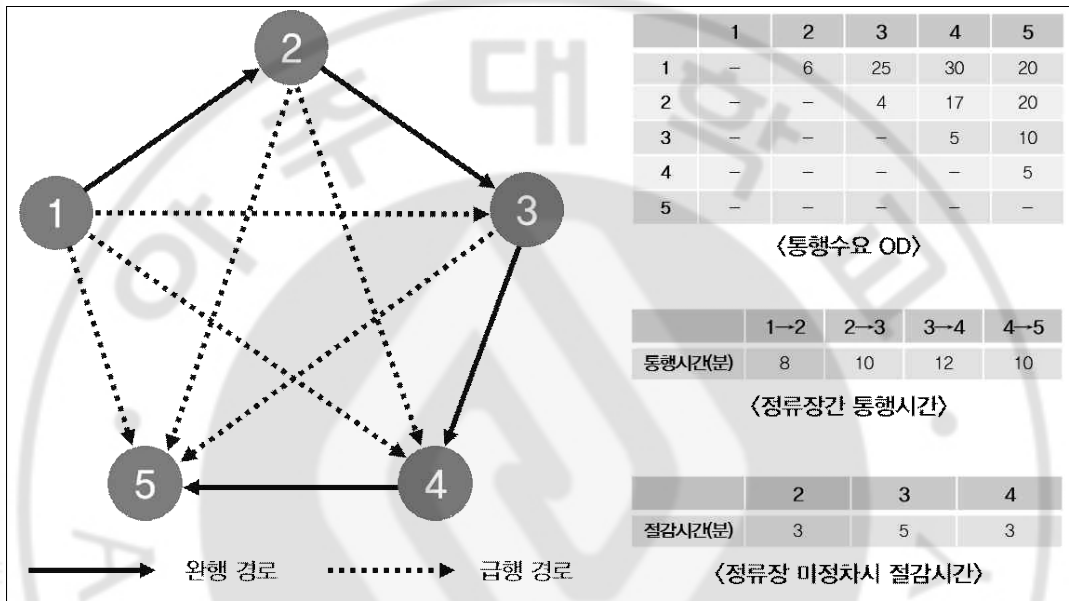
- 설계 변수의 형태(population type): 문제의 형태에 따라 실수(double vector), 이진값(bit string) 등으로 설정함
- 집단의 크기(population size): 한 세대의 집단을 이루는 개체의 개수로, 적어도 설계 변수의 개수보다는 커야 함. 크기가 커지면 보다 넓은 설계 공간을 탐색할 수 있으나, 계산 및 수렴 속도가 과다해질 수 있음
- 초기 집단의 생성 함수(creation function): 설계 변수의 형태에 따라 일반적으로 'double vector'인 경우에는 'constraint dependent', 선형 부등식, 등식 제한 조건이 없거나 설계 변수 제한 조건만 있는 경우에는 '균일 분포 생성(uniform)', 선형 제한 조건이 있는 경우 '유용 집단 생성(feasible population)'을 주로 사용함
- 적합도 조정 함수(fitness scaling function): 다음 세대의 부모가 될 염색체들을 선택함에 있어 우수한 개체들과 열등한 개체들 사이의 적합도 차이(선택압(selection pressure))에 따라 선택 확률이 달라지는데, 각각의 염색체들에 대해 평가된 적합도 함수 값의 조정을 통해 선택압을 조절함으로써 수렴의 속도와 해집단의 평균 품질을 제어할 수 있으며, 순위 기반 적합도 조정, 비례 적합도 조정, 최상위 개체 적합도 조정, 선형 이동 적합도 조정 등의 조

정법이 있음

- 선택 연산: 다음 자신 세대를 재생산하기 위한 교차 및 변이 연산자의 대상이 되는 개체를 생성하며, 해의 품질에 비례하는 선택 확률의 누적값과 (0,1) 사이의 난수를 이용하는 룰렛 휠 선택, 해의 품질에 비례하는 선택 확률과 (0, 1/부모개체의 수) 구간의 균일 분포 난수를 이용하는 확률 균등 선택, 각 개체의 조정된 적합도의 정수 값만큼 우선 선택 후 소수값들에 대해 확률 균등 방법을 적용하는 잔여 확률 표본 선택, 토너먼트 선택 등이 있음
- 교차 연산: 2개의 부모 세대를 교배하여 1개의 자식 세대를 생성하는 연산으로, 임의의 이진수 벡터에 따라 2개의 부모 개체 중 하나의 값을 선택하는 산란 교차, 1개 또는 2개 난수를 기준점(교차점)으로 2개의 부모 개체를 번갈아 선택하는 일점 교차 및 이점 교차, 임의의 가중치 평균을 적용하는 중간 교차, 2개 부모 세대 중 더 좋은 적합도를 갖는 부모 세대에 근접하도록 생성하는 학습 교차, 2개 부모 세대의 가중치 산술평균을 이용하는 산술 교차 등이 있음
- 변이 연산: 부모해에 없는 속성을 도입하여 탐색 공간을 넓히려는 목적을 가진 연산으로, 부모 벡터의 각 유전자에 표준 정규 분포로부터 임의로 추출된 난수를 더하는 정규 변이, 부모 세대의 각 유전자에 0과 1 사이의 균등 분포에서 취해진 확률을 할당하는 균등 변이 등이 있음

유전 알고리즘 도입에 앞서 간단한 예제를 통해 수학적 계산과 동일한 해를 도출하는지의 여부와 유전 알고리즘의 적정 모집단(population) 규모 및 반복 연산(iteration)의 횟수에 대한 검토를 진행하였다. <그림 4-4>와 같이 5개의 정류장(1~5, 편도 방향으로만 운행)을 가진 노선이 있다고 가정하고 통행수요 O/D와 정류장간 통행시간이 주어져있으며 배차간격 4분으로 시간당 15대가 운행하는 노선에 급행체계를 도입할 시, 승객 총통행시간을 최소화 하는 급행버스 정차 정류장 및 완행/급행버스의 대수를 찾는 것을 목표로 선형 프로그래밍과

유전 알고리즘의 결과를 비교한다. 제약 조건으로는 2~4번째 정류장 미정차시 각 3, 5, 3분의 통행시간 절감, 특정 기종점간 완행 및 급행 서비스를 모두 이용 가능한 경우 <식 3-12>에 따른 각각의 선택확률 적용을 설정하였고 기종점 전환 및 급행-완행간 환승, 대기시간에 대한 별도의 가중치는 고려하지 않았다.



<그림 4-4> 유전 알고리즘 검증 예제 노선

먼저 수학적 계산을 위하여 선형/비선형 등 다양한 최적화 형태에 대한 프로그래밍 패키지인 LINGO 15.0을 이용하여 급행버스 정차 정류장과 최적 차량대수를 계산한 결과, 4,492회의 반복 연산(iteration)을 통해 급행버스가 3번째 정류장만을 미정차하고 시간당 15대의 버스가 급행 8대, 완행 7대로 운영시 총통행시간이 3,708.96분으로 최소화되는 것으로 도출하였다. 동일한 모형을 수학적 계산 프로그래밍 패키지인 MATLAB R2014a를 이용하여 유전 알고리즘으로 풀이하였는데, 이 때 개체는 각 정류장에 대한 급행 정차 여부의 집합, 유전자는 개별 정류장의 급행 정차 여부(이진 변수로 설정하여 급행 정차시 1, 미정차시 0을 부여), 모집단의 개수는 50개, 초기 집단의 생성 함수는 균일 분포 생성, 적합도

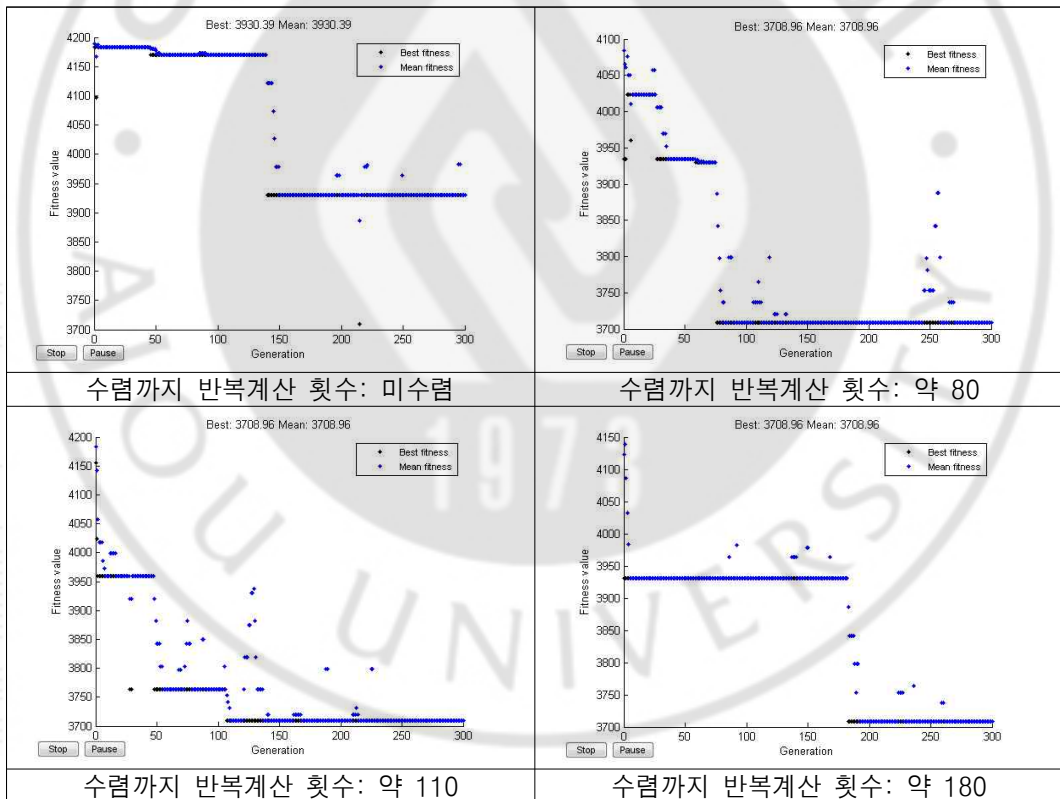
조정 기법은 순위 기반, 선택 연산 기법은 확률 균등 선택, 교차 연산 기법은 산란 교차, 변이 연산 기법은 균등 변이, 수렴 기준은 10^{-7} 로 설정하였다. 유전 알고리즘 적용은 모든 경우의 급행/완행 배분 대수를 대상으로 각각의 결과를 도출하였는데, 이 경우에도 수학적 계산 결과와 동일하게 급행 8대, 완행 7대로 운영 및 3번째 정류장 급행버스 미정차시 총통행시간이 3,708.96분으로 산출되었다.

<표 4-6> 검증 예제의 유전 알고리즘 적용 결과

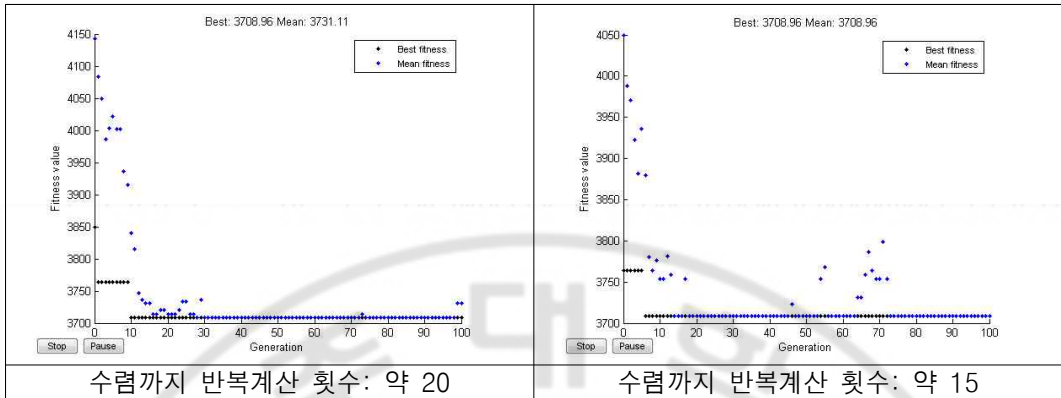
완행 대수	급행 대수	급행버스 정차 여부 (0: 미정차, 1: 정차)					승객 총통행시간 (분)
		1번째 정류장	2번째 정류장	3번째 정류장	4번째 정류장	5번째 정류장	
1	14	1	1	1	1	1	4670.00
2	13	1	1	0	1	1	4309.59
3	12	1	1	0	1	1	4023.25
4	11	1	1	0	1	1	3872.35
5	10	1	1	0	1	1	3776.67
6	9	1	1	0	1	1	3712.00
7	8	1	1	0	1	1	3708.96
8	7	1	1	0	1	1	3726.11
9	6	1	0	0	1	1	3738.67
10	5	1	0	0	1	1	3758.00
11	4	1	0	0	1	1	3807.91
12	3	1	0	0	0	1	3867.00
13	2	0	0	0	1	0	3909.69
14	1	0	0	0	1	0	3886.29

한편, 유전 알고리즘을 통한 최적해 도출을 위해서는 적정 수준 이상의 모집단 크기(population size)와 반복 연산(iteration) 횟수가 담보되어야 한다. 위 예제에 대하여 다양한 모집단 크기를 대상으로 수렴 양상 비교 및 경향성을 파악하고자, 모집단 크기가 5, 10, 25, 50인 경우에 대하여 유전 알고리즘 적용에 따른 최적해를 도출한 결과(<그림 4-5~8>), 모집단의 크기가 작은 경우에는 수렴되기까지 많은 반복 계산이 필요하거나 또는 최적해에 도달하지 못하는 것으로 나타났으나, 모집단의 크기가 클수록 최적해 도달을 위한 반복 계산 횟수는 짧아지는 것으로 나타나는 한편, 일정 모집단 크기 이상에서는 큰 폭의 수렴 속도

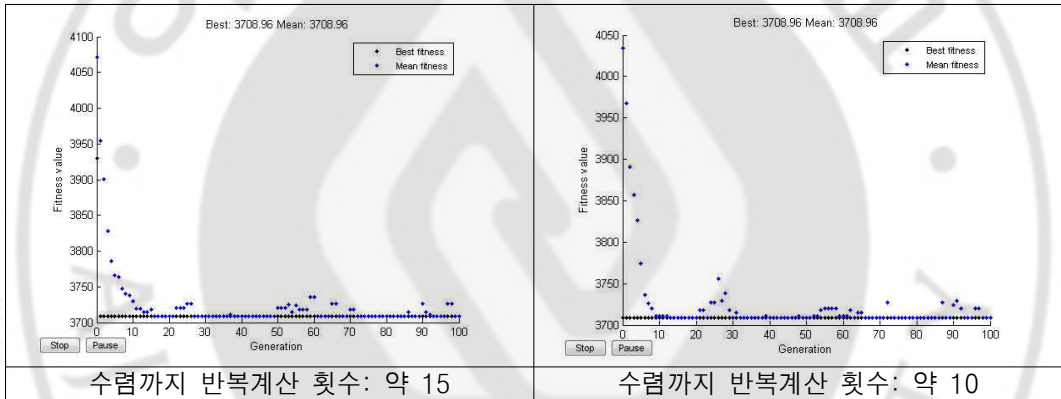
개선이 나타나지 않았다. 즉, 충분한 모집단 크기와 반복 계산 횟수가 보장될 경우 유전 알고리즘을 통해 최적해를 도출하는 데에는 문제가 없는 것으로 확인되었다. 다만 선형 프로그래밍을 통한 직접계산 방법은 각 정류장간 완행/급행 경로에 대한 정보에 대하여 개별적 입력이 필요한바 자료(노선) 규모의 확장 에 따라 입력 복잡성이 증가하며, 검증 예제에서 배제되었던 기종점 전환 및 급행-완행간 환승 등 다양한 비선형 제약조건에 대한 반영에 한계가 존재한다. 따라서 본 논문에서는 급행버스노선 정차정류장 선정모형의 적용에 있어 다양한 제약 조건을 반영하고 방대한 데이터에 대한 효율적 계산과 향후 확장성을 고려하고자 유전 알고리즘을 사용한다.



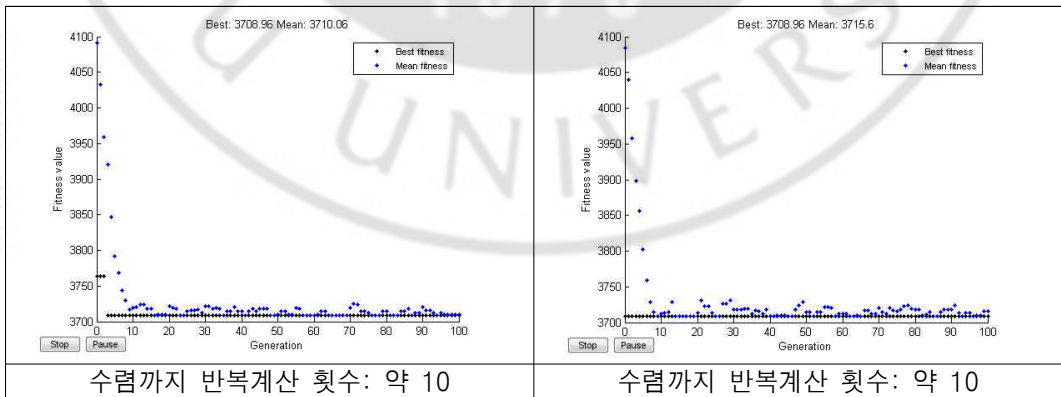
〈그림 4-5〉 모집단 크기에 따른 유전 알고리즘 수렴 추이 (모집단 5개)



<그림 4-6> 모집단 크기에 따른 유전 알고리즘 수렴 차이 (모집단 10개)



<그림 4-7> 모집단 크기에 따른 유전 알고리즘 수렴 차이 (모집단 25개)



<그림 4-8> 모집단 크기에 따른 유전 알고리즘 수렴 차이 (모집단 50개)

제 3 절 급행버스노선 정차정류장 선정모형 적용 및 평가

본 절에서는 실제 노선을 대상으로 제3장에서 개발된 모형을 적용하여 유전 알고리즘을 통해 총통행시간 또는 총비용을 최소화하는 최적 정류장을 선정하고자 한다.

1. 적용 대상 노선 선정

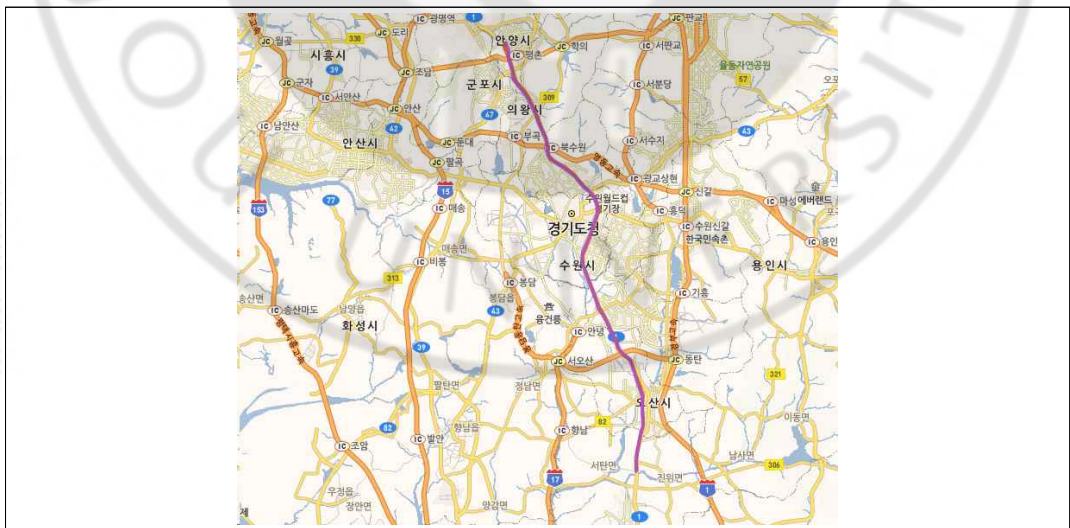
일반적으로 급행버스의 도입 효과를 극대화하고자 한다면, 이용 승객이 많고 노선 연장이 길며 굴곡도가 낮고 대로(폭 25~40m)나 광로(폭 40m 이상) 등 간선도로의 운행비용이 높아 미정차 정류장에서의 추월이 용이하며 특정 정류장의 승하차 또는 특정 구간의 수요가 높은 노선이 유리하다고 볼 수 있다. 교통카드DB 분석을 통해 가공한 수원시의 분석 대상 노선 73개 노선 중 승차인원 상위 20개 노선을 대상으로 해당 조건에 부합하는 노선을 <표 4-7>과 같이 검토하여 300번 노선을 선정하였다. 300번 노선은 평택시 진위면과 안양시 범계동을 연결하는 왕복 약 74km의 장거리 노선(노선도: <그림 4-9>)으로, 전구간이 1번 국도를 따라 운행중이며 배차간격 6~8분, 일 10,869명 승차로 이용 승객 또한 많은 편이다. 또한 일반좌석 버스로 운영되고 있어 이용자의 평균 통행거리가 9.8km에 달하는 점도 급행버스 도입의 효과를 높일 수 있는 요소이다.

<표 4-7> 급행버스 정류장 선정모형 적용 대상 노선 검토

순위	노선번호	승차인원 (수원 관계통행)	노선연장(km)	정류장수	굴곡도*	간선도로 운행비율**
1	720-2	20,042	81.4	194	1.46	38.4%
2	62-1	19,413	62.6	158	3.21	18.2%
3	92	18,598	36.8	91	1.32	16.6%
4	65	17,470	51.7	118	1.22	41.5%
5	92-1	16,004	49.4	113	1.20	27.7%
6	301	15,492	76.2	160	1.07	41.3%
7	720-1	13,993	91.5	214	1.42	55.5%
8	3	13,783	38.5	103	2.10	36.0%
9	700-2	13,737	57.2	134	1.49	69.8%
10	13	13,246	33.9	74	1.59	23.5%
11	777	13,049	55.8	104	1.09	51.3%
12	30	13,016	35.3	73	1.18	72.3%
13	2-1	12,905	38.9	103	1.83	25.7%
14	13-1	12,849	48.7	128	2.07	16.5%
15	98	12,095	49.7	124	1.26	8.6%
16	82-1	11,794	33.8	84	4.30	49.4%
17	5	11,597	45.7	108	1.46	30.1%
18	300	10,869	73.6	139	1.00	100.0%
19	66	9,810	65.0	152	1.41	80.9%
20	112	9,535	31.5	74	1.28	18.3%

* 굴곡도: 노선 기종점간 최단거리 대비 편도 노선연장의 비율

** 전체 연장 중 주요 간선도로 운행연장 비율(수원지역 한정) (간선도로: 덕영대로, 경수대로, 중부대로, 매산로, 정조로, 수인로, 매송고색로, 창릉대로)



<그림 4-9> 급행버스 정류장 선정모형 적용 대상 노선(300번) 노선도

2. 기초자료 구축

교통카드DB로부터 적용 대상 노선에 대한 제반 정보 및 승객 승하차 정보를 획득하여 모형에서 사용 가능한 형태로 변환하는 과정이 필요하며, 각 요소별 구축 과정은 다음과 같다.

가. 승객 승하차 데이터 (O/D)

교통카드DB는 개별 통행 각각에 대한 정보를 제공하기 때문에 이를 그대로 적용할 경우 더욱 정확한 분석이 가능할 수 있으나, 분석 규모와 계산의 복잡성이 증대하여 분석 효율성과 결과 해석의 직관성이 저하될 우려가 있다. 본 연구에서 개발하고자 하는 총통행시간/총비용 최소화 급행버스노선 정차정류장 선정모형은 개별 통행자의 통행 이력이나 차량별 재차 인원 등 미시적 정보보다는 집계된 자료를 이용한 거시적 분석 결과를 이용하고 있는 바, 첨두/비첨두 1시간 단위로 통행 자료를 집계하여 분석의 효율성을 높이하고자 한다. 이를 위해 분석 대상 노선을 이용한 개별 승객들의 승하차 정류장 및 시간 정보를 이용하여 첨두(07~09시 및 18~20시 승차 기준) 및 비첨두(첨두를 제외한 나머지 시간대) 1시간 O/D를 작성한다. 각 정류장을 기종점으로 설정하였는데, 분석 대상 노선인 300번의 경우 왕복 총 139개의 정류장이 있으므로 O/D 표의 크기는 139×139 가 되며, 이는 교통카드DB 가공시 부여되었던 승하차 정류장 순번(기점으로부터 첫 번째 정류장을 1번으로 하여, 종점 회차 후 기점으로 들어오기 전 마지막 정류장까지 순차적으로 부여)을 기준으로 한다. 분석 대상 노선을 이용한 개별 승하차 데이터 12,438건(수원시 관계통행 10,869건, 기타 지역 내 통행 1,569건) 각각의 승차하차 정류장 순번을 이용하여 첨두 시간대에 승차한 경우에는 첨두 O/D에, 비첨두 시간대에 승차한 경우에는 비첨두 O/D에 집계하였다. 집계를 완료한 뒤 각 O/D를 1시간 단위로 변환하기 위하여 첨두 O/D는 1/4(4시간 기준 데이터를 1시간으로 환산), 비첨두 O/D는 1/15(일일 운행시간(19시간) 중 첨두 4시간을 제외한 15시간 기준 데이터를 1시간으로 환산)의 가

중치를 적용하여 O/D 작성을 완료하였다.

나. 정류장간 통행시간

운행정보와 관련된 데이터는 획득하지 못한 관계로, 교통카드의 승하차 태그 시간을 기반으로 정류장간 통행시간을 추정하였다. 각 정류장을 기준으로 마지막 승차 태그한 시간을 정류장 출발 시간으로, 다음 정류장의 첫 번째 하차 태그한 시간을 다음 정류장 도착 시간으로 하여 두 시간의 차이를 정류장간 통행시간으로 가정하고, 각 운행 차량에 대해 집계된 정류장간 통행시간의 평균값을 적용하였다. 다만 승차 후 버스가 출발한 뒤에 뒤늦게 승차 태그를 하거나 버스가 정류장에 도착하기에 앞서 미리 하차 태그를 하는 경우를 집계에서 배제하기 위하여, 이전 또는 다음 카드 태그와의 시간 차이가 3초 이내인 경우에만 유효 태그로 인정하였다.

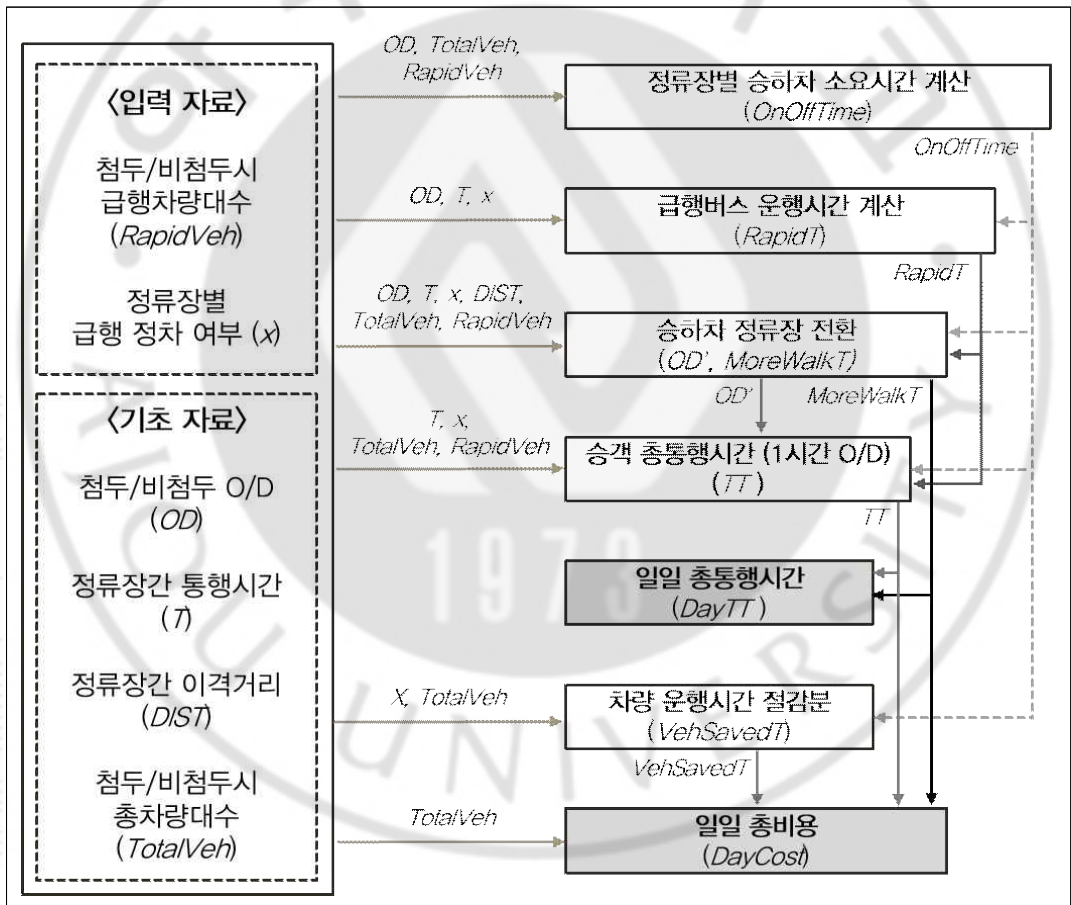
다. 정류장간 거리

각 정류장간 이격 거리는 eb카드에서 제공하는 노선 기반정보의 각 정류장별로 기록된 누적 운행거리를 기반으로 하였는데, 동일한 구간이더라도 방향별로 이격 거리에 다소 차이가 있기 때문에, 정류장 순번에 따라 왕복 전 구간에 대한 정류장간 거리를 산출하였다.

3. 유전 알고리즘 적용

본 논문에서는 MATLAB 패키지를 기반으로 유전 알고리즘을 적용하였는데, 이에 앞서 제3장에서 개발된 모형을 MATLAB 언어로 작성하는 코딩 과정이 수반되어야 한다. MATLAB은 특히 매트릭스 기반의 과학계산 프로그래밍에 강점을 지니고 있는 패키지로, 유전 알고리즘에 대한 기능도 제공하고 있어 본 모형의 적용에 알맞다고 볼 수 있다.

급행버스노선 정차정류장 선정모형을 유전 알고리즘으로 적용하기 위하여 우선 전체적인 세부 모형간 입출력자료간의 연계를 <그림 4-10>과 같이 나타내었다. 일련의 과정을 통해 목적함수(일일 총통행시간 또는 일일 총비용)를 최소화하는 입력 자료(급행차량대수, 정류장별 급행 정차 여부)를 찾는 것이 유전 알고리즘의 목적으로, 전체 목적함수에 대한 모형 및 세부 모형 각각에 대한 코딩 내역을 설명하고자 한다. 설명에 앞서 코딩에 사용된 각 용어에 대한 정의는 <표 4-8>에 정리하였다.



<그림 4-10> 급행버스노선 정차정류장 선정모형의 유전 알고리즘 적용 흐름도

<표 4-8> 유전 알고리즘 코딩에 사용된 용어 설명

용어	설명
<i>DayTT</i>	일일 총통행시간
<i>DayCost</i>	일일 총비용
<i>vehA</i> / <i>vehB</i>	첨두(A)/비첨두(B) 급행버스 대수
<i>TotalVehA</i> / <i>TotalVehB</i>	첨두(A)/비첨두(B) 총 버스 대수
<i>ODpeak</i> / <i>ODnonpeak</i>	첨두 / 비첨두 총 OD
<i>OD1</i> / <i>OD2</i>	첨두(1)/비첨두(2) 1시간 OD
<i>T</i>	정류장간 통행시간 (matrix)
<i>DIST</i>	정류장간 이격거리 (matrix)
<i>x</i> , <i>y</i>	<i>x</i> : 전체 정류장, <i>y</i> : 양방향 동일 정류장을 단일화한 정류장 집합
<i>OnOffTime1</i> / <i>OnOffTime2</i>	첨두(1)/비첨두(2) 정류장별 승하차 소요시간
<i>OnOffTime</i>	정류장별 승하차 소요시간 계산 함수
<i>RapidT1</i> / <i>RapidT2</i>	첨두(1)/비첨두(2) 급행버스 정류장간 통행시간 (matrix)
<i>RapidTT</i>	급행버스 정류장간 통행시간 계산 함수
<i>ConvertOD</i>	승하차 정류장 전환 계산 함수
<i>AddT1</i> / <i>AddT2</i>	승하차 정류장 전환으로 인한 총 추가 도보 접근시간
<i>PTT</i> / <i>NPTT</i>	첨두1시간/비첨두1시간 승객통행시간
<i>HourTravelTime</i>	1시간 O/D에 대한 총 승객통행시간 계산 함수
<i>VehSavedT1</i> / <i>VehSavedT2</i>	첨두(1)/비첨두(2) 차량 운행시간 절감분
<i>VehSavedTT</i>	차량 운행시간 절감분 계산 함수
<i>VOT</i>	버스 이용자 시간가치 (1분당)
<i>VehCost</i>	버스 대당 운송원가 (1분당)
<i>HVehCost</i>	버스 대당 운송원가 (1시간당)
<i>IntDelay</i>	교차로 평균 신호대기시간
<i>VOTacc</i> / <i>VOTwait</i> / <i>VOTtrf</i>	접근통행시간가중치 / 대기시간가중치 / 환승시간가중치
<i>WalkSpeed</i>	분당 보행거리 (5km/h 가정)

가. 목적함수

<부록 1>은 총통행시간을 최소화하는 목적함수를, <부록 2>는 총비용을 최소화하는 목적함수를 코딩한 내역이다. 먼저 총통행시간 최소화 목적함수에 대해 설명하면, 1번째 줄(이하 줄 1)에서 함수의 이름과 변수를 지정하는데, 여기서 *y*는 이전 변수로 구성된 정류장 집합(set)을 나타내며 유전 알고리즘의 개체(염색체)가 된다. 노선 전체의 왕복 정류장 집합은 *x*로 표현하였는데, 이를 그대로 개체(염색체)로 활용할 경우 계산의 복잡성이 증가하고, 실제 적용시 양방향의 동일한 위치에 존재하는 정류장의 급행 정차 여부가 서로 다를 경우 승객의 혼란을 야기할 수 있기 때문에 양방향 동일 정류장은 단일화된 인자(유전자) 값을

갓도록 하였다. 300번 노선의 경우 전체 139개의 정류장이 양방향 단일화 과정을 거쳐 77개의 인자를 가진 개체로 변환되었으며, 줄 7에서 78번째 값을 임의로 지정하여 유전 알고리즘에서 매 단계마다 인자 값을 변화시키는 개체의 전체 크기를 정의하였다. 줄 3에서는 급행버스 대수를 입력받고, 줄 14~15에서는 비첨두 시간대의 버스 대수를 첨두 시간대의 75%로 산정한다. 줄 17~18은 양방향 단일화 개체를 전체 정류장으로 변환하는 과정이며, 이후에는 순서대로 정류장별 승하차 소요시간 계산, 급행버스 운행시간 계산, 승하차 정류장 전환, 1시간 O/D에 대한 승객 총통행시간 계산 과정을 거쳐 일일 총통행시간을 산출한다.

다음으로 총비용 최소화 목적함수의 경우, 1시간 O/D에 대한 승객 총통행시간 계산 과정까지는 총통행시간 최소화 목적함수와 동일하며, 이후 차량 운행시간 절감분을 산정하여 승객 통행시간에는 승객 시간가치를, 차량 운행시간에는 운송원가를 적용하여 일일 총비용을 산정한다. 여기서 차량 운행비용의 경우 전체 운송원가를 적용하는 대신 운송원가의 절감분을 극대화하도록 수식을 설계하였다.

나. 정류장별 승하차 소요시간 계산 함수

정류장별 승하차 소요시간 계산 함수(<식 3-5>)는 급행버스가 미정차 정류장을 통과시 절감되는 승하차 소요시간을 계산하는 함수로, 해당 정류장에서의 총 승차소요시간과 총 하차소요시간 중 더 큰 값이 적용된다. <부록 3>에서 총 승차소요시간(줄 5)은 해당 정류장에서 승차하는 1시간 승차 인원을 시간당 완행 버스의 대수로 나눠 대당 승차인원을 계산한 후 인당 승차소요시간(2.3초)을 곱한 값을, 총 하차소요시간(줄 6)은 해당 정류장에서 하차하는 1시간 승차 인원을 시간당 완행 버스의 대수로 나눠 대당 하차인원을 계산한 후 인당 하차소요시간(2.0초)을 곱한 값을 적용한다.

다. 급행버스 정류장간 통행시간 계산 함수

급행버스 정류장간 통행시간 계산 함수(<식 3-2>)는 급행버스 서비스의 일부 정류장 미정차 통과에 따른 통행시간 절감 요인을 반영하는 함수로, <부록 4>에 코딩 내역이 수록되어있다. 먼저 줄 3에서 모든 기종점에 대한 급행버스 통행시간 matrix를 생성한 후, 줄 4~15에서 for문을 이용하여 각 cell에 대한 통행시간을 계산한다. 이 때 i 와 j 사이에 위치한 정류장 k 가 급행버스 정차 정류장이면 완행버스의 정류장간 통행시간 및 정류장 k 의 승하차 소요시간을 반영하고, 정류장 k 가 급행버스 미정차 정류장이면 완행버스 정류장간 통행시간에 포함되어있는 정류장 가감속시간(11.6초)과 함께 정류장 정차시간(승하차시간+가감속시간) 절감으로 인한 교차로 신호지체 기대시간 절감분을 반영한다. 마지막으로 줄 19 이후에서는 고가/지하차도 측도에 위치한 정류장을 모두 미정차시상·하부교차로 평균 신호대기 시간($IntDelay$) 절감을 반영하는 것으로, 정류장 1개소당 신호교차로 1개가 존재하는 것으로 가정하였다. 줄 19~25는 300번 노선의 23, 24번째 정류장 미정차시 세마지하차도 이용에 따른 절감시간을 계산하는 함수로, 실제 적용시에는 각 고가/지하차도별로 줄 19~25의 과정을 반복하여 계산한다.

라. 승하차 정류장 전환 계산 함수

전체 통행시간이 단축된다면 완행버스와 급행버스의 환승 이용 대신 급행버스 이용을 통해 기존에 급행이 정차하지 않는 정류장에서 급행 정차 정류장으로 승차 또는 하차 정류장을 변경하는 승하차 정류장 전환 계산 함수(<식 3-22~24>)의 코딩 내역은 <부록 5>에 나타나있다. 줄 3에서는 접근통행시간, 대기시간, 환승시간 각각에 대한 가중치를 제시하고 있는데, 이는 장수은과 박정욱 (2010)의 연구에서 검토된 기존의 보행통행 표준시간가치 산정 연구 결과 중 비교적 최근의 연구이면서 도보시간, 대기시간, 환승시간 모두에 대한 가중치를 제시한 손상훈 외 (2007)의 추정 결과(차내시간을 1.00으로 하였을 때 도보시간

은 1.53, 대기시간은 1.83, 환승시간은 1.37의 가중치를 가짐)를 인용하였다. 이어서 줄 5에서는 분당 보행거리(5km/h 가정)와 승하차 정류장 전환으로 인한 총 추가 도보 접근시간 초기값(0)을 설정하고, 줄 6에서는 변환 O/D의 초기값(O/D와 동일)을 설정한다. 이후 줄 7부터는 각 기종점 통행량에 대하여 급행버스 이용 비율과 기종점 전환시 추가 도보 접근시간을 산정하는데, 줄 10~88은 승하차 정류장이 모두 급행버스 미정차 정류장인 경우(유형 4), 줄 90~128은 승차 정류장만 급행버스가 정차하는 경우(유형 2), 줄 130~174는 하차 정류장만 급행버스가 정차하는 경우(유형 3)에 해당한다(<표 3-3> 참조).

먼저 유형 4에 대해 살펴보면, 완행버스만 이용하는 경우(*TSUM1*, 줄 11~14), 완행버스 탑승 후 첫 번째 급행버스 정차 정류장(*m*, 줄 17~24)부터 하차 정류장 도달 전 마지막 급행버스 정차 정류장(*n*, 줄 25~32)까지는 급행버스를 이용 후 다시 완행버스를 이용하여 최종 목적지까지 도달하는 경우(*TSUM2*, 줄 15~39), 최초 정류장에서 급행버스 정류장까지 도보 이동 후 급행버스와 완행버스 환승의 조합으로 이용하는 경우(*TSUM3*, 줄 40~61), 완행버스와 급행버스 환승의 조합으로 이용 후 급행버스 하차 정류장으로부터 최종 정류장까지는 도보 이동하는 경우(*TSUM4*, 줄 63~79)에 대해 통행시간을 계산하였다. 한편 *m*과 *n*이 동일한 경우의 패널티(줄 29), 출발지나 도착지로부터 급행버스 정류장까지의 거리가 1km 이상으로 도보 이용(500m)이 불가능한 경우의 패널티(줄 41, 64)를 각각 부여하여 배정이 되지 않도록 설정하였다. 도보 이용시 평균 보행거리에 대한 보행시간 산정(기존 이용 완행버스 정류장 접근 평균 보행거리는 제외)은 줄 43, 66에서 각각 *Walk3*, *Walk4*로 정의되며, 줄 45~55(<식 3-20>) 및 줄 68~73(<식 3-21>)에서는 기존 정류장에서 승하차정류장을 전환하는 승객의 비율(각각 *CHGRate3*, *CHGRate4*)을 계산하는 과정으로, 버스의 첫 번째 정류장(*i=1*)인지의 여부와 기존 정류장 및 급행버스 정류장의 영향권 중첩 폭(<그림 3-3>의 *x*)에 따라 다르게 적용된다. 이어서 줄 80~88은 <식 3-24>에 따라 *TSUM1*~*TSUM4* 중 어떠한 통행시간이 가장 짧은가에 따라 기종점 전환량 및 급행버스 이용량

이 계산되는 과정이다.

유형 2와 유형 3도 이와 마찬가지로 과정을 거치는데, 유형 2는 급행버스 탑승 후 완행버스 환승의 조합으로 이용하는 경우(*TSUM1*, 줄 91~103), 완행버스만 탑승하는 경우(*TSUM2*, 줄 105~107), 급행버스만 이용 후 급행버스 하차 정류장으로부터 최종 정류장까지는 도보 이동하는 경우(*TSUM3*, 줄 109~122)의 통행시간을 계산하여 줄 124~128에서 이들 통행시간을 비교하여 기종점 전환량 및 급행버스 이용량을 계산하고, 유형 3은 완행버스 탑승 후 급행버스 환승의 조합으로 이용하는 경우(*TSUM1*, 줄 132~144), 완행버스만 탑승하는 경우(*TSUM2*, 줄 146~149), 최초 정류장에서 급행버스 정류장까지 도보 이동 후 급행버스만 이용하는 경우(*TSUM3*, 줄 150~168)의 통행시간을 계산하여 줄 170~174에서 이들 통행시간을 비교하여 기종점 전환량 및 급행버스 이용량을 계산한다(<식 3-22~23>).

마. 1시간 O/D에 대한 총 승객통행시간 계산 함수

위에서 계산된 정류장별 승하차 소요시간, 급행버스 운행시간 및 승하차 정류장 전환 후의 기종점 통행량을 이용한 승객 총통행시간(1시간 O/D 대상) 계산 함수(<식 3-13~16>)의 코딩 내역은 <부록 6>과 같다. 우선 줄 4~6에서 완행 및 급행버스 배차간격(각각 $hctwyL$, $hctwyA$)을 정의한 후, 줄 8부터는 각 기종점 통행량에 대한 총통행시간(TT)을 순차적으로 합산한다. 줄 12~54는 승하차 정류장이 모두 급행버스 미정차 정류장인 경우(유형 4), 줄 56~74는 승하차 정류장이 모두 급행버스 정차 정류장인 경우(유형 1), 줄 76~103는 승차 정류장만 급행버스가 정차하는 경우(유형 2), 줄 105~134는 하차 정류장만 급행버스가 정차하는 경우(유형 3)에 해당한다.

먼저 유형 4의 경우에는 완행버스만 이용하는 경우(*TSUM1*, 줄 13~16)와, 완행버스 탑승 후 첫 번째 급행버스 정차 정류장(m , 줄 19~26)부터 하차 정류장

도달 전 마지막 급행버스 정차 정류장(n , 줄 27~34)까지는 급행버스를 이용 후 다시 완행버스를 이용하여 최종 목적지까지 도달하는 경우($TSUM2$, 줄 17~41)의 통행시간이 각각 계산된 뒤, 줄 42~51에서 각 유형별 배차간격과 통행시간을 고려한 확률적 배정(<식 3-12>)을 실시하여 해당 기종점 통행량에 대한 통행시간(TTT , 줄 53)을 산출, 누적 총통행시간(TT , 줄 54)에 합산한다. 다음으로 유형 1은 완행버스를 이용하는 경우($TSUM1$, 줄 57~60)와 급행버스를 이용하는 경우($TSUM2$, 줄 61)의 통행시간에 대한 확률적 배정(줄 62~71)을 통해 통행시간을 산출하며, 유형 2는 급행버스 탑승 후 완행버스로 환승하는 경우($TSUM1$, 줄 81~85)와 완행버스만 이용하는 경우($TSUM2$, 줄 87~90)의 통행시간에 대한 확률적 배정(줄 91~99)을 통해 통행시간을 산출한다. 마지막으로 유형 3은 완행버스 탑승 후 급행버스로 환승하는 경우($TSUM1$, 줄 111~116)와 완행버스만 이용하는 경우($TSUM2$, 줄 118~120)의 통행시간에 대한 확률적 배정(줄 121~129)을 통해 통행시간을 산출한다.

바. 일일 총통행시간 계산

일일 총통행시간은 <부록 1>의 줄 32와 같이, 첨두시간과 비첨두시간에 대하여 각각 산정된 1시간 O/D 총 승객통행시간 및 승하차 정류장 전환으로 인한 총 추가 도보 접근시간에 대하여, 첨두 4시간, 비첨두 15시간을 곱하여 계산된다.

사. 차량 운행시간 절감분 계산 함수

차량 운행시간 절감분이란 급행버스의 일부 정류장 미정차로 인한 전체 운행시간 절감분을 계산한 값으로 <식 3-19>에서 제시된 바 있다. 이를 코딩한 내역은 <부록 7>과 같은데, 줄 4~9에서 계산된 급행버스 미정차 정류장에 대한 절감 요소(승하차 소요시간 절감, 가감속시간 절감, 교차로 신호지체시간 절감)와 줄 13~17에서 계산된 고가/지하차도 이용시 교차로 무정차 통과로 인한 통행시

간 절감을 누적 합산하여 해당 운행시간 절감분을 계산하고, 여기에 시간당 급행버스 운행대수를 곱하여 전체 1시간당 차량 운행시간 절감분을 산정한다(줄 19).

아. 일일 총비용 계산

일일 총비용은 총승객 통행시간에는 승객 시간가치를, 차량 운행시간 절감분에는 운송원가를 적용하여 <부록 2>의 줄 35~36과 같이 계산되는데, 운행시간 절감분의 단위는 “분”이므로 분당 차량운송원가($VehCost$)를, 전체 차량 운영비용은 총 차량대수와 시간당 차량운송원가($HVehCost$)를 적용한다. 버스이용자의 시간가치로는 한국개발연구원(2008)에서 제시한 비업무통행 버스 이용자 시간가치(2007년 기준 3,036원/시에 2013년 기준 소비자물가지수 가중치(1.192)를 적용하여 3,620원/시)를 사용하였고, 운송원가로는 서울시(2013)에서 제시한 2013년 시내버스 표준운송원가인 672,891원/대/일(5~10월 대형버스(자율운영/입찰간선버스 기준))에 일일 운행시간(19시간)을 적용한 35,415원/대/시를 사용하였다.

4. 적용 결과 및 평가

가. 유전 알고리즘 설정 값

유전 알고리즘에 적용되는 다양한 설정 값을 타당한 범위로 부여하여 결과의 신뢰성과 연산의 효율성을 담보하고자 하였다. 우선 설계 변수(염색체)는 분석 대상 노선의 정류장 개수(단, 맞은편(반대방향) 정류장이 존재하는 경우는 둘 중 한 개만 개수에 포함)에 상응하는 크기를 가진 이진 변수(binary variables)로 설정하여 급행 버스가 정차하는 정류장에 해당하는 유전자는 1, 그렇지 않은 유전자는 0으로 설정하였다. 전체 왕복 139개의 정류장을 가진 300번 노선은 맞은편에 동일한 정류장이 존재하는 62개 정류장에 대하여 양쪽 정류장이 하나의 유전자 값(0 또는 1)을 갖도록 하였으며, 따라서 유전 알고리즘에 사용된 염색체

의 크기는 77개이다. 집단의 크기(population)는 충분한 모집단 내에서 최적해가 도출될 수 있도록 하되 너무 큰 값을 사용하게 되면 계산 규모가 방대하여 비효율이 발생하므로 200으로 설정하였으며, 초기 집단의 생성 함수(creation function)는 설계 변수의 형태가 이진 변수(binary variables)이므로 균일(uniform) 분포로 생성되도록 하였다. 적합도 조정 함수(fitness scaling function)는 일반적으로 사용되는 순위 기반 조정 기법을 적용하였고, 선택 함수(selection function)는 확률 균등(stochastic uniform) 함수를 적용하였다. 모집단 전체 중 가장 우수한 해를 갖는 5%는 변환과정 없이 그대로 다음 세대에 적용되도록 하여 진화 과정에서 발생할 수 있는 손상을 방지하였으며(엘리트 개체수(elite count)), 나머지 95%의 모집단 중 80%는 교차 연산(reproduction crossover fraction), 20%는 변이 연산을 적용하여 이전 세대에서 발생한 우수한 해 집합이 과도하게 변화하는 것을 방지하면서 다양성을 확보할 수 있도록 하였다. 교차 연산은 산란 교차 방법(scattered, 염색체 크기의 임의의 이진수 벡터를 생성한 뒤 0에 해당하는 자리와 1에 해당하는 자리에 각각 아버지 염색체와 어머니 염색체 값을 적용)을 적용하여 자식세대 해의 다양성이 증가할 수 있도록 하였으며, 변이 연산(mutation function)으로는 균등(uniform) 변이(rate: 0.01)를 적용하여, 변이 연산 대상의 부모 세대 각 유전자에 대하여 0과 1사이의 균등 분포 확률값 중 0.01 이하인 값을 부여받은 유전자는 초기 값(initial range)으로 대체되도록 하였다. 마지막으로 수렴 기준은 이전 세대 최적 해와 10^{-7} 이하의 값 차이를 보이는 경우로 설정하여 설익은 수렴을 방지하되, 수렴 기준에 만족하지 못하는 경우 200회의 반복 연산(iteration) 후 산출된 해를 사용하였다.

나. 적용 결과

첨두시 배차간격 4분(시간당 15대), 비첨두시는 첨두시의 75%가 배차된다고 가정하고 첨두시간 기준으로 전체 15대 중 3~12대(비첨두시는 75% 배차)가 급행버스로 운행되는 경우에 대하여 총통행시간 최소화 및 총비용 최소화시 최적

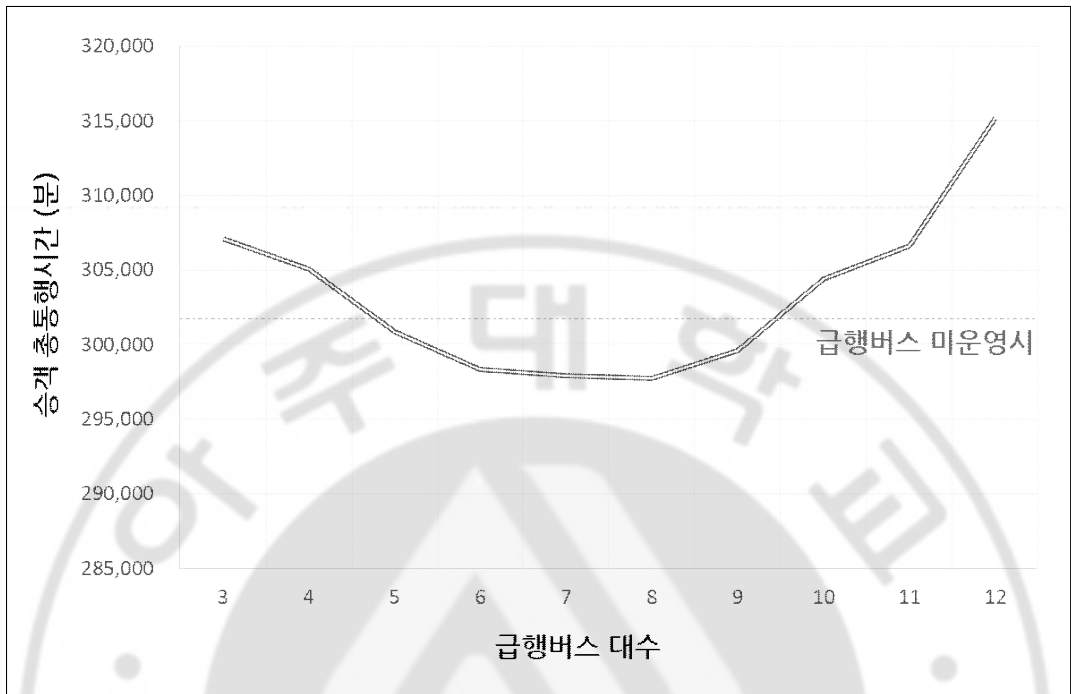
완행/급행 버스 배분 대수와 이때의 급행버스 정류장 선정 결과를 도출하였다.

먼저 총통행시간 최소화를 목적함수로 설정한 경우에 대한 완행/급행 배분 대수별 총통행시간은 <표 4-9>와 같으며, 각 분석별로 70~80회의 반복 연산(iteration)을 거쳐 수렴된 최종 해가 도출되었다. 완행/급행 배분 대수별 총통행시간을 비교한 결과, 급행버스에 8대, 완행버스에 7대가 배분되었을 때 총통행시간이 297,764분(승객 1인당 23.9분)으로 급행버스 미운영시 대비 1인당 통행시간이 0.4분 절감되는 것으로 나타났다. 이 때 전체 139개의 정류장 중 급행버스 정차정류장은 68개(48.9%)로 선정되었고, 급행버스 이용률(기종점간 통행에 있어 급행버스 이용이 포함되는 비율)은 66.1%로 계산되었다.

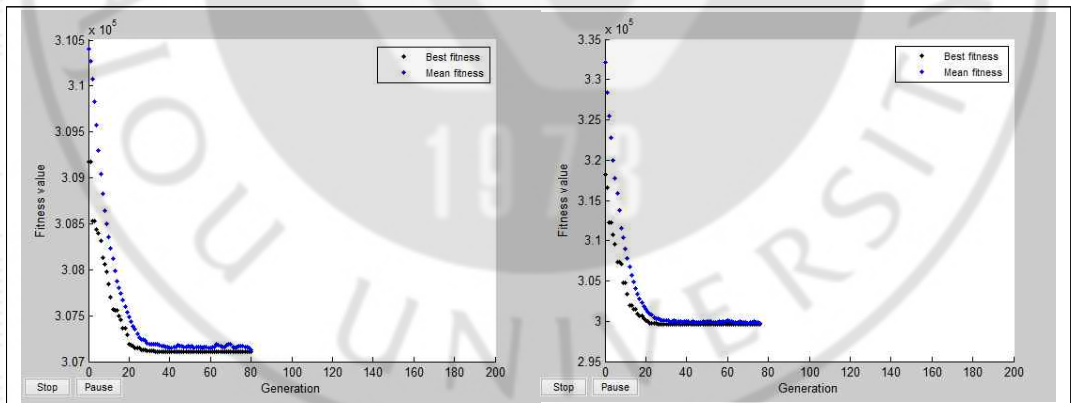
<표 4-9> 급행버스노선 정차정류장 선정모형 적용 결과 (총통행시간 최소화)

급행 버스대수 (vph)	완행 버스대수 (vph)	급행버스 정차정류장 개수	총통행시간 (분)	1인당 통행시간 (분)	총비용 (원/일)	급행버스 이용률* (%)
0	15	미운영	302,126.1	24.3	26,196,652	0.0
3	12	40	307,103.9	24.7	25,327,259	7.8
4	11	49	305,076.3	24.5	24,779,679	22.4
5	10	52	300,857.4	24.2	24,209,310	34.9
6	9	61	298,317.8	24.0	23,756,694	48.5
7	8	61	297,936.5	24.0	23,634,754	50.4
8	7	68	297,763.8	23.9	23,488,120	66.1
9	6	77	299,569.1	24.1	23,559,970	74.5
10	5	85	304,412.5	24.5	24,004,740	83.3
11	4	87	306,626.2	24.7	24,073,199	84.5
12	3	96	315,211.9	25.3	24,957,864	92.0

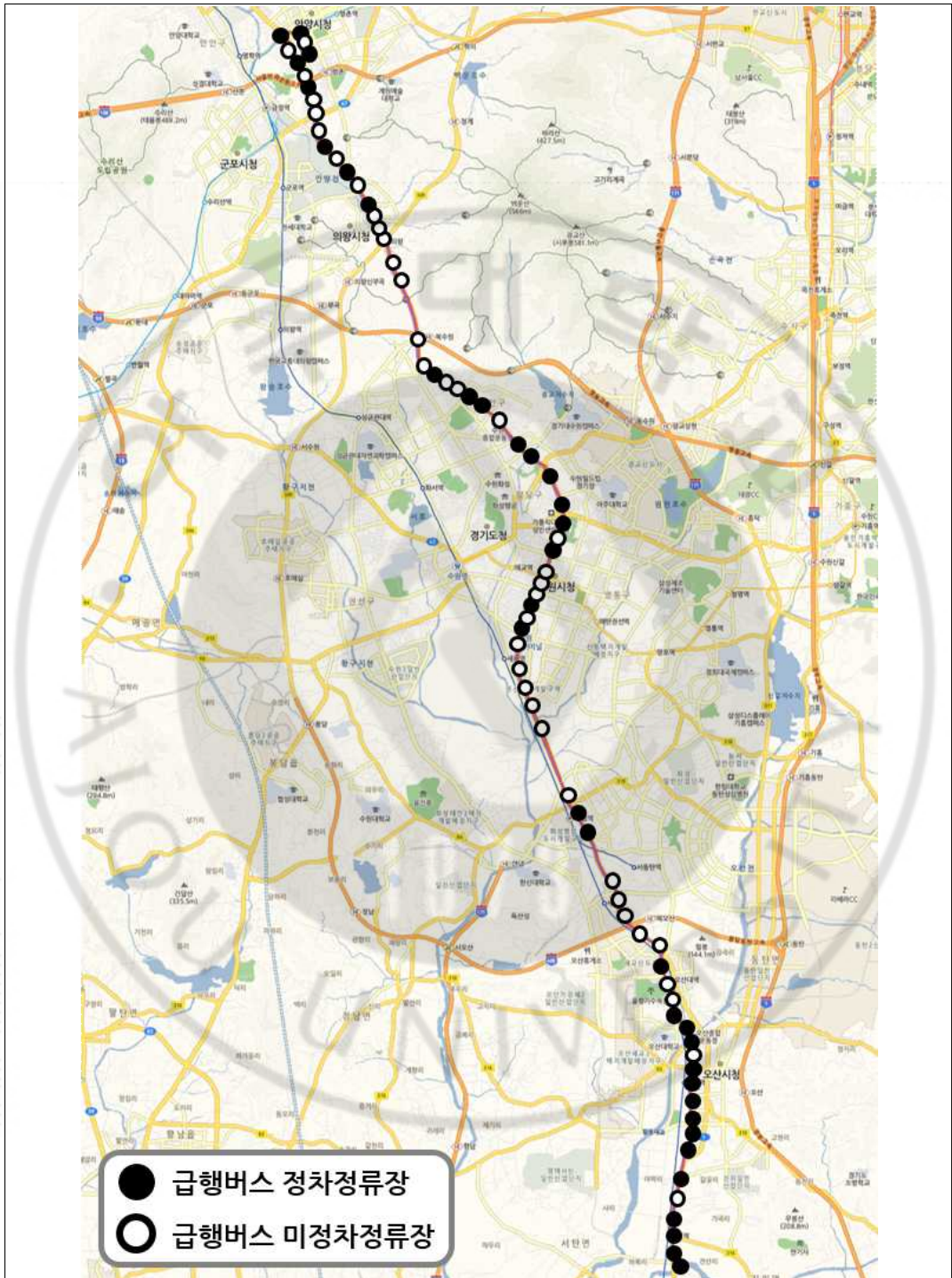
* 급행버스 이용률: 총 통행량 중 기종점간 급행버스 이용이 포함된 통행의 비율 (완행버스와 급행버스를 환승하여 이용하는 경우도 포함)



<그림 4-11> 급행버스 대수별 승객 총통행시간



<그림 4-12> 총통행시간 최소화 수렴 그래프 (일부)



〈그림 4-13〉 급행버스 정류장 선정 결과 (총통행시간 최소화시)

한편, 기존 전체 차량 완행버스 운영과 비교하여 일부 차량을 급행버스로 운영시에는 급행버스의 운행시간 단축에 따른 운영비 절감 요인이 발생한다. <표 4-9>의 최적해(급행버스 8대, 완행버스 7대) 조건에서 총비용이 급행버스 미운영 시 대비 약 270만원/일이 절감되었음을 확인할 수 있는데, 여기에서 순수 차량 운행비용 절감분에 해당하는 비용을 추가 차량 투입에 활용하여 승객 대기/환승시간을 감소시킴으로써 목적함수인 총통행시간을 더욱 낮출 수 있는 여지가 존재한다. 일일 차량운영 절감비용을 일일 운영비용(672,891원/대/일)으로 나누어 추가차량 투입 여력을 산출한 뒤, 이를 모두 완행버스에 추가로 투입한다고 가정하였을 때 총통행시간 및 1인당 통행시간은 <표 4-10>과 같은데, 그 결과 최적해에서의 1인당 통행시간은 23.0분으로 급행버스 미운영시에 대비하여 1.3분(5.3%) 절감되는 것으로 나타났다.

<표 4-10> 급행버스 운영비용 절감분에 해당하는 추가차량 투입시 총통행시간

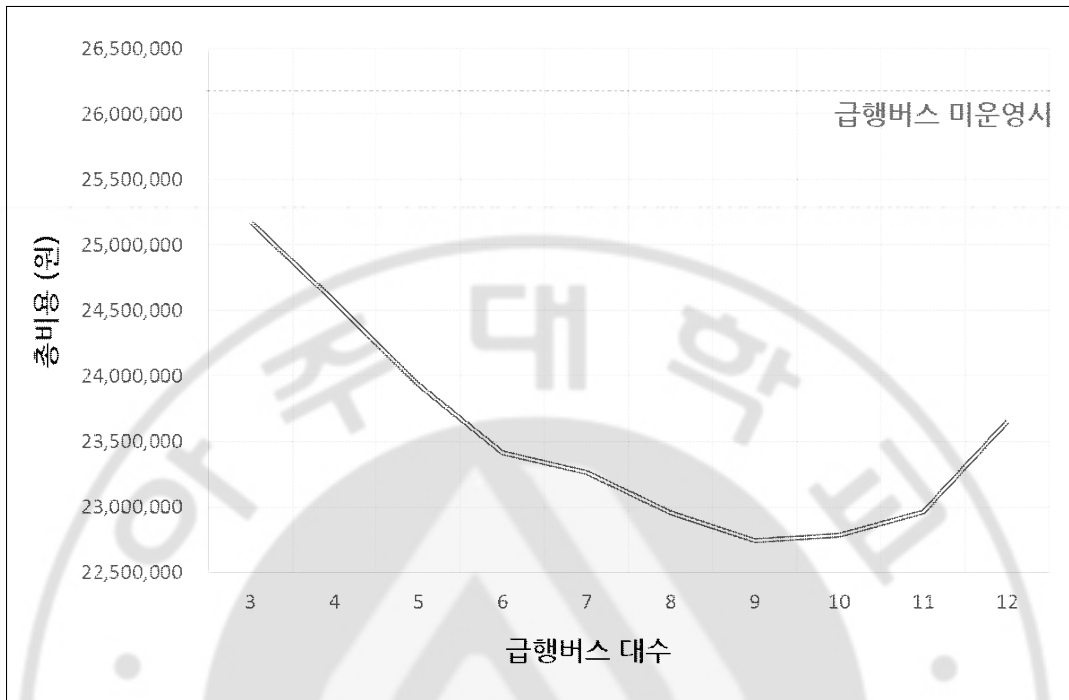
급행 버스대수 (vph)	완행 버스대수 (vph)	총비용 (원/일)	차량운영비용 절감 (원/일)	추가차량 투입 여력 (대)	추가차량 투입시 총통행시간 (분)	1인당 통행시간 (분)
0	15	26,196,652	0	0	302,126.1	24.3
3	12	25,327,259	1,169,719	1	303,251.3	24.4
4	11	24,779,679	1,594,965	2	297,646.1	23.9
5	10	24,209,310	1,910,796	2	293,216.4	23.6
6	9	23,756,694	2,210,186	3	287,134.6	23.1
7	8	23,634,754	2,309,122	3	286,251.3	23.0
8	7	23,488,120	2,445,335	3	285,563.5	23.0
9	6	23,559,970	2,482,407	3	285,586.5	23.0
10	5	24,004,740	2,329,854	3	288,445.9	23.2
11	4	24,073,199	2,394,955	3	289,164.7	23.2
12	3	24,957,864	2,028,295	3	292,480.5	23.5

다음으로 총비용 최소화를 목적함수로 설정한 경우에 대한 완행/급행 배분 대수별 총통행시간은 <표 4-11>과 같으며, 각 분석별로 60~80회의 반복 연산

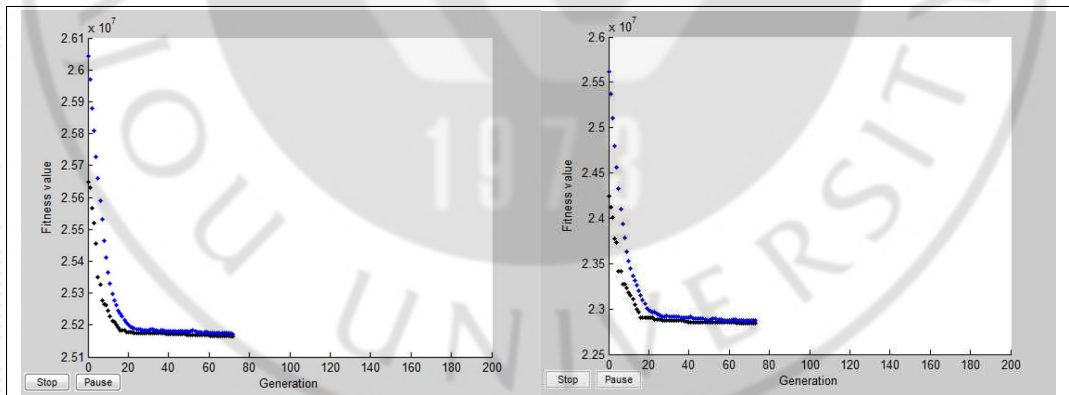
(iteration)을 거쳐 수렴된 최종 해가 도출되었다. 완행/급행 배분 대수별 총비용을 비교한 결과, 급행버스에 9대, 완행버스에 6대가 배분되었을 때 총비용이 22,955,247원/일로 급행버스 미운영시 대비 3,241,405원/일 절감되는 것으로 나타났다. 이 때 전체 139개의 정류장 중 급행버스 정차정류장은 36개(25.9%)로 선정되었고, 급행버스 이용률(기종점간 통행에 있어 급행버스 이용이 포함되는 비율)은 46.7%로 계산되었다. 다만 승객 총통행시간과 더불어 버스 운영비용이 함께 최적화되는 과정에서 1인당 통행시간은 급행버스 미운영시 대비 1.1분 증가하는 것으로 나타나, 타 수단·노선 대비 해당 노선의 경쟁력이 약화될 것으로 추정된다.

〈표 4-11〉 급행버스노선 정차정류장 선정모형 적용 결과 (총비용 최소화)

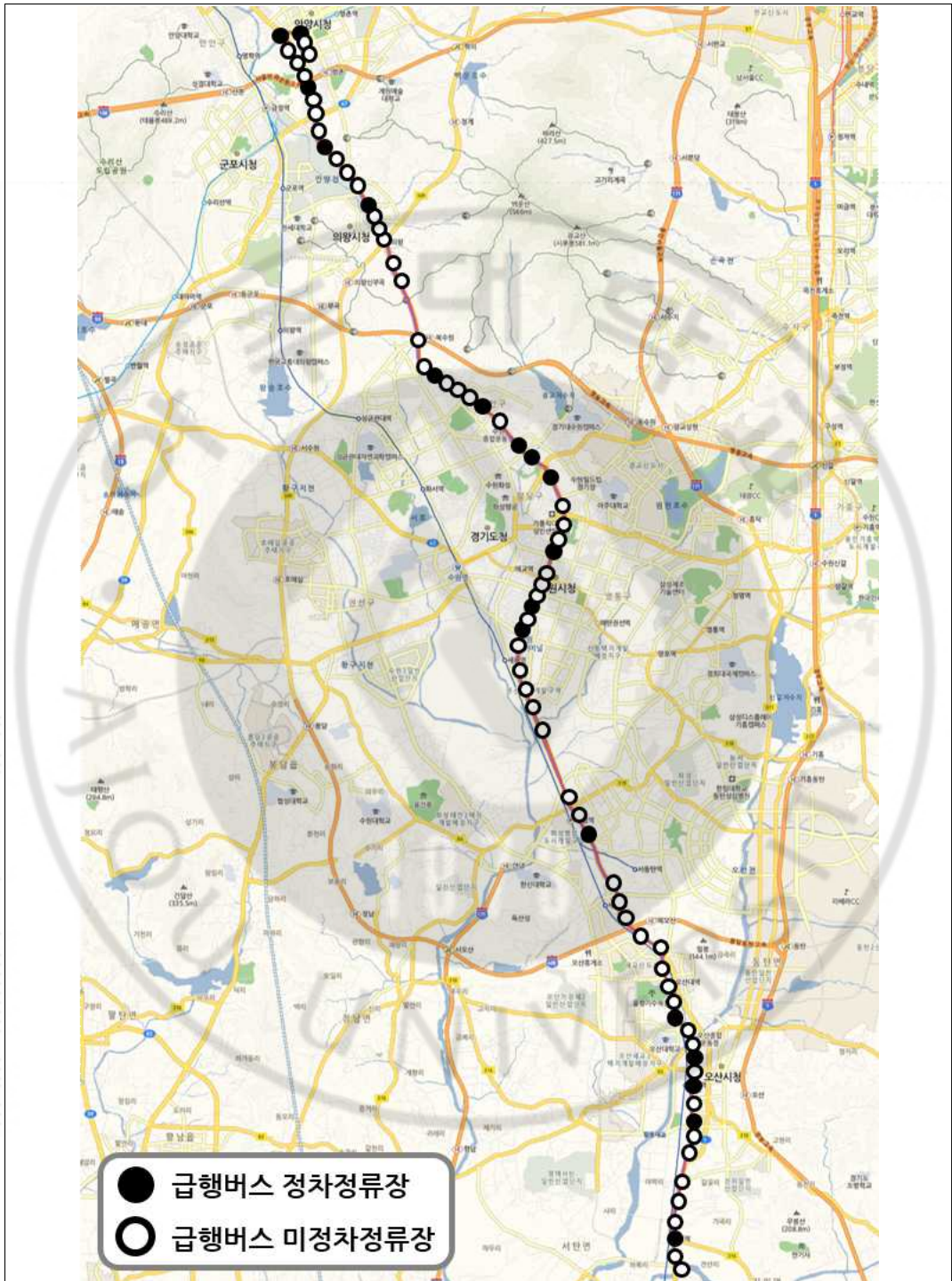
급행 버스대수 (vph)	완행 버스대수 (vph)	급행버스 정차정류장 개수	총통행시간 (분)	1인당 통행시간 (분)	총비용 (원/일)	급행버스 이용률 (%)
0	15	미운영	302,126.1	24.3	26,196,652	0.0
3	12	5	309,596.1	24.9	25,175,769	1.5
4	11	22	307,026.3	24.7	24,570,521	15.4
5	10	30	304,396.0	24.5	23,932,313	27.6
6	9	34	304,665.1	24.5	23,416,808	36.8
7	8	36	303,414.2	24.4	23,264,323	40.1
8	7	42	302,083.8	24.3	22,955,247	51.1
9	6	36	315,989.9	25.4	22,747,099	46.7
10	5	46	317,086.1	25.5	22,786,653	60.9
11	4	50	321,503.6	25.8	22,965,881	62.4
12	3	56	338,560.4	27.2	23,651,200	71.3



〈그림 4-14〉 급행버스 대수별 총비용



〈그림 4-15〉 총비용 최소화 수렴 그래프 (일부)



<그림 4-16> 급행버스 정류장 선정 결과 (총비용 최소화시)

제 4 절 급행버스 도입노선 우선순위 평가 방법론 적용 및 평가

1. 시나리오 분석

가. 분석 과정

시나리오 분석의 첫 번째 단계로, 방법론 구축시 소개한 81개 시나리오(노선 연장, 정류장 간격, 평균 통행거리, O/D 형태 등 4개 요인별 각 3개 값의 조합, <표 3-5> 참조)에 대한 가상의 O/D를 생성한다. 이를 위해 우선 각 시나리오에 대한 O/D 생성 기초자료를 <표 4-12>와 같이 생성한다.

<표 4-12> 각 시나리오별 O/D 생성 기초자료

자료	반영된 영향요인	설명
정류장개수	노선 연장, 정류장 간격	전체 노선 연장을 정류장 간격으로 나누어 산출
승객수	노선 연장	노선 연장에 대하여 수원시 km당 평균 승객수(174인/km)* 적용
평균통행정류장수	평균 통행거리	평균 통행거리를 정류장 간격으로 나누어 산출

* 교통카드DB에서 각 승객별 탑승거리와 노선 연장을 이용하여 전체 노선에 대한 평균값 산출

O/D 형태의 경우 코딩 과정에서 반영이 가능하므로, <표 4-12>에서 제시된 기초 자료 생성 원칙을 이용하여 <표 4-13>과 같이 노선 연장, 정류장 간격, 평균 통행거리 영향요인을 반영한 27개의 시나리오 조건 표(코딩 과정에서 각 조건별로 3개의 O/D 형태가 적용되므로 코딩 후에는 최종적으로 81개 시나리오 (=27×3)를 생성)를 생성하였다.

<표 4-13> 노선연장, 정류장간격, 평균통행거리 영향요인을 반영한 시나리오 조건 표

일련번호(ID)	정류장갯수(편도)	승객수(인)(편도)	평균통행정류장수
1	25	1,714	7.3
2	25	1,714	8.6
3	25	1,714	10.5
4	23	1,714	6.6
5	23	1,714	7.8
6	23	1,714	9.5
7	21	1,714	6
8	21	1,714	7.1
9	21	1,714	8.7
10	42	2,828	7.3
11	42	2,828	8.6
12	42	2,828	10.5
13	38	2,828	6.6
14	38	2,828	7.8
15	38	2,828	9.5
16	35	2,828	6
17	35	2,828	7.1
18	35	2,828	8.7
19	54	3,689	7.3
20	54	3,689	8.6
21	54	3,689	10.5
22	49	3,689	6.6
23	49	3,689	7.8
24	49	3,689	9.5
25	45	3,689	6
26	45	3,689	7.1
27	45	3,689	8.7

<부록 8>은 시나리오별 가상 O/D 생성과정을 코딩한 내역을 나타낸다. 우선 <표 4-13>에서 생성한 시나리오 조건 표(*ODScn*)를 불러온 후, 각 조건에 대하여 줄 5~32는 O/D 형태가 균등한 경우(*OD1*), 줄 34~81은 O/D 형태가 2개 정류장에 집중되는 패턴인 경우(*OD2*), 줄 83~161은 O/D 형태가 4개 정류장에 집중되는 패턴인 경우(*OD3*)에 대한 시나리오 O/D를 각각 생성한다.

먼저 O/D 형태가 균등한 경우(*OD1*)에 대한 생성 방법을 살펴보면, 줄 4~5에

서 시나리오 조건에 맞는 O/D 표(0행렬)를 생성한 뒤, 줄 10~13에서 마지막 정류장을 제외한 각각의 정류장에 대한 탑승 인원(*Trips*)을 생성한다. 여기서 탑승 인원(*Trips*)은 평균을 “총 탑승인원/(정류장수-1)”, 분산을 “ k 노선의 총 정류장수”에 비례하도록 설정하였는데, 분산의 경우 총 정류장수를 그대로 사용시 과다한 값이 적용될 수 있어 다양한 값을 비교한 뒤 “ k 노선의 총 정류장수/5”를 사용하였다. 이후 줄 15~28에서는 해당 정류장에서 발생하는 개별 통행에 대하여 통행 정류장수(*Trip*)를 부여하여 한 통행의 기점과 종점을 완성하는데, 여기서 통행 정류장수(*Trip*)는 평균을 “평균 통행 정류장수”로, 분산을 “평균 통행 정류장수 / 잔여 정류장수”로 적용하여 잔여 정류장수가 많을수록 통행 정류장수의 분산이 크도록 설계하였다. 생성된 O/D는 줄 31~32에서 이름을 부여하여 파일로 저장한다.

다음으로 O/D 형태가 2개 정류장에 집중되는 패턴인 경우(*OD2*)는 총 통행량의 30%(*Rsv*)가 특정 2개 정류장에 집중되는 것으로 가정하고(줄 36), 먼저 나머지 70%의 통행량(*Rmn*, 줄 37)에 대하여 *OD1*과 동일한 과정을 반복한다. 2개 정류장에 집중되는 총 통행량의 절반(즉, 전체의 15%)은 첫 번째 집중 정류장(*HVYstop*)에서 승차(승차 집중 정류장, 줄 65~70)), 나머지 절반(15%)은 두 번째 집중 정류장(*HVYstop*)에서 하차(하차 집중 정류장, 줄 72~78)하는 것으로 가정하여 각각 개별 통행에 대한 통행 정류장수(*Trip*)를 부여, 승차 집중 정류장에서 탑승한 개별 승객의 하차 정류장과 하차 집중 정류장에서 하차한 개별 승객의 승차 정류장을 부여하여 해당 통행들의 기종점을 완성하였다.

마지막으로 O/D 형태가 4개 정류장에 집중되는 패턴인 경우(*OD3*)는 *OD2*와 동일한 절차로 생성되는데, 총 통행량의 40%(*Rsv*)가 특정 4개 정류장에 집중되는 것으로 가정하고(줄 85), 먼저 나머지 60%의 통행량(*Rmn*, 줄 86)에 대하여 *OD1*과 동일한 과정을 반복한다. 4개 정류장에 집중되는 총 통행량의 1/4(즉, 전체의 10%)이 각각 첫 번째 집중 정류장(*HVYstop*)에서 승차(승차 집중 정류장, 줄 113~118), 두 번째 집중 정류장(*HVYstop*)에서 승하차(승하차 집중 정류장 1,

줄 131~143), 세 번째 집중 정류장(*HVYstop*)에서 승하차(승하차 집중 정류장 2, 줄 145~157), 네 번째 집중 정류장(*HVYstop*)에서 하차(하차 집중 정류장, 줄 120~126)하는 것으로 가정하여 각각 개별 통행에 대한 통행 정류장수(*Trip*)를 부여, 집중 정류장에서 탑승한 개별 승객의 하차 정류장 및 집중 정류장에서 하차한 개별 승객의 승차 정류장을 부여하여 해당 통행들의 기종점을 완성하였다. 한편, 승하차 집중 정류장(2번째, 3번째 집중 정류장)의 경우 해당 정류장에 배정된 통행량 중 절반(즉, 전체의 5%)은 승차, 나머지 절반(5%)은 하차하는 것으로 처리하였다.

생성된 각각의 시나리오 O/D에 대하여 제3절의 급행버스노선 정차정류장 선정모형을 적용하여 급행버스의 도입효과를 도출하였다. 다만 방대한 계산 규모를 고려하여 일부 사항(정류장간 통행시간은 수원시 버스 평균통행속도와 정류장 간격으로 계산, 전체 차량대수 중 급행 차량대수의 비율은 50%, 기종점 정류장 전환 없음)은 제3장에서 전술한대로 단순화하였다.

나. 분석 결과

각 시나리오 O/D별로 5회 반복 분석을 수행하여 통행시간 감축률이 높은 순으로 나타낸 결과는 <표 4-14>와 같은데, 대체로 O/D 형태는 대부분 침두 형태를 지니고, 기타 항목 3개 중 2개 항목 이상이 최적 조건일 때 통행시간 변화폭(감축률)이 높은 것으로 나타나고 있다. 보다 정확한 분석을 위해 나머지 요인이 동일한 조건 하에서 급행버스 도입에 따른 특정 요인별 통행시간 변화폭을 정리한 결과(민감도 분석)는 <표 4-15>와 같다. 최저값과 최고값의 차이를 비교하였을 때 O/D 형태에 따른 통행시간 변화폭이 가장 큰 것으로 나타났는데, 이는 특정 정류장에 승하차 패턴이 집중되었을 때 급행버스 도입의 효과가 큰 것을 의미한다. 이어서 정류장 간격이 짧을수록, 평균 통행거리가 길수록, 노선 연장이 길수록 통행시간 변화폭이 큰 것으로 나타났는데, 정류장 간격이 짧으면 급행버스 도입에 따른 시간절감 효과가 높아질 수 있고, 평균 통행거리가

길면 개별 승객의 시간 절감량이 커지며, 노선 연장이 길면 급행버스를 이용할 수 있는 총 승객수가 이에 비례하게 많을 확률이 증가하기 때문으로 판단된다.

<표 4-14> 시나리오별 통행시간 변화폭(감축률)

순위	노선연장	정류장간격	평균통행거리	O/D형태	통행시간 감축률(%)	총통행시간(분)	
						기존	급행+완행
1	상(42.4km)	하(390m)	상(4.09km)	4개 집중	8.14	5541.0	5089.8
2	하(19.7km)	하(390m)	상(4.09km)	2개 집중	7.57	2309.5	2134.6
3	상(42.4km)	하(390m)	중(3.36km)	2개 집중	7.34	4864.6	4507.7
4	중(32.5km)	하(390m)	중(3.36km)	4개 집중	7.33	3651.8	3384.1
5	상(42.4km)	중(430m)	상(4.09km)	4개 집중	7.27	5502.8	5102.8
6	상(42.4km)	하(390m)	상(4.09km)	2개 집중	7.11	5533.1	5140.0
7	중(32.5km)	하(390m)	상(4.09km)	4개 집중	6.86	4051.2	3773.5
8	상(42.4km)	상(470m)	상(4.09km)	4개 집중	6.79	5579.2	5200.7
9	상(42.4km)	하(390m)	하(2.84km)	2개 집중	6.71	4435.6	4137.9
10	하(19.7km)	중(430m)	상(4.09km)	2개 집중	6.61	2387.0	2229.2
11	상(42.4km)	중(430m)	중(3.36km)	2개 집중	6.58	4921.7	4598.0
12	중(32.5km)	하(390m)	하(2.84km)	2개 집중	6.56	3406.7	3183.3
13	상(42.4km)	하(390m)	중(3.36km)	4개 집중	6.56	4955.3	4630.2
14	중(32.5km)	중(430m)	중(3.36km)	4개 집중	6.54	3705.0	3462.7
15	하(19.7km)	하(390m)	중(3.36km)	2개 집중	6.47	2123.2	1985.9
16	중(32.5km)	하(390m)	상(4.09km)	2개 집중	6.44	4174.4	3905.5
17	상(42.4km)	중(430m)	상(4.09km)	2개 집중	6.37	5647.2	5287.5
18	중(32.5km)	하(390m)	하(2.84km)	4개 집중	6.25	3337.8	3129.1
19	하(19.7km)	중(430m)	중(3.36km)	2개 집중	6.19	2145.5	2012.8
20	중(32.5km)	상(470m)	중(3.36km)	4개 집중	6.10	3713.8	3487.4
21	하(19.7km)	상(470m)	상(4.09km)	2개 집중	6.08	2388.0	2242.8
22	상(42.4km)	상(470m)	중(3.36km)	2개 집중	6.07	4892.2	4595.2
23	상(42.4km)	중(430m)	중(3.36km)	4개 집중	6.02	4995.4	4694.7
24	중(32.5km)	중(430m)	상(4.09km)	4개 집중	6.01	4218.1	3964.8
25	중(32.5km)	하(390m)	중(3.36km)	2개 집중	5.97	3656.0	3437.9
26	상(42.4km)	하(390m)	하(2.84km)	4개 집중	5.90	4392.6	4133.7
27	중(32.5km)	중(430m)	하(2.84km)	4개 집중	5.89	3375.2	3176.3
28	상(42.4km)	중(430m)	하(2.84km)	2개 집중	5.88	4513.8	4248.5
29	중(32.5km)	중(430m)	상(4.09km)	2개 집중	5.85	4097.6	3858.1
30	상(42.4km)	상(470m)	상(4.09km)	2개 집중	5.66	5640.8	5321.7
31	중(32.5km)	상(470m)	상(4.09km)	4개 집중	5.65	4247.1	4007.1
32	하(19.7km)	하(390m)	상(4.09km)	4개 집중	5.64	2306.7	2176.6
33	중(32.5km)	중(430m)	하(2.84km)	2개 집중	5.64	3380.7	3190.0
34	상(42.4km)	상(470m)	하(2.84km)	2개 집중	5.56	4394.3	4150.2
35	상(42.4km)	상(470m)	중(3.36km)	4개 집중	5.55	4942.6	4668.3
36	하(19.7km)	상(470m)	중(3.36km)	2개 집중	5.47	2140.5	2023.4

순위	노선연장	정류장간격	평균통행거리	O/D형태	통행시간 감축률(%)	총통행시간(분)	
						기존	급행+완행
37	중(32.5km)	상(470m)	하(2.84km)	4개 집중	5.41	3343.4	3162.6
38	하(19.7km)	하(390m)	하(2.84km)	4개 집중	5.34	1941.4	1837.7
39	하(19.7km)	하(390m)	상(4.09km)	균등	5.34	2264.6	2143.8
40	하(19.7km)	중(430m)	하(2.84km)	2개 집중	5.33	1943.7	1840.1
41	중(32.5km)	중(430m)	중(3.36km)	2개 집중	5.31	3825.6	3622.6
42	상(42.4km)	상(470m)	하(2.84km)	4개 집중	5.30	4435.5	4200.4
43	중(32.5km)	상(470m)	상(4.09km)	2개 집중	5.28	4215.0	3992.5
44	하(19.7km)	하(390m)	중(3.36km)	4개 집중	5.25	2112.7	2001.7
45	하(19.7km)	하(390m)	하(2.84km)	2개 집중	5.23	1964.3	1861.6
46	중(32.5km)	상(470m)	하(2.84km)	2개 집중	5.21	3410.7	3233.1
47	상(42.4km)	중(430m)	하(2.84km)	4개 집중	5.20	4578.4	4340.3
48	하(19.7km)	중(430m)	상(4.09km)	4개 집중	5.16	2353.8	2232.4
49	중(32.5km)	하(390m)	상(4.09km)	균등	4.95	3948.5	3753.1
50	상(42.4km)	하(390m)	상(4.09km)	균등	4.91	5270.7	5012.0
51	중(32.5km)	상(470m)	중(3.36km)	2개 집중	4.84	3678.7	3500.6
52	하(19.7km)	중(430m)	상(4.09km)	균등	4.74	2252.1	2145.4
53	중(32.5km)	하(390m)	중(3.36km)	균등	4.69	3637.3	3466.8
54	상(42.4km)	하(390m)	중(3.36km)	균등	4.66	4791.8	4568.5
55	하(19.7km)	상(470m)	하(2.84km)	2개 집중	4.62	2062.8	1967.5
56	하(19.7km)	상(470m)	상(4.09km)	4개 집중	4.53	2365.4	2258.3
57	하(19.7km)	중(430m)	하(2.84km)	4개 집중	4.51	1963.1	1874.5
58	하(19.7km)	중(430m)	중(3.36km)	4개 집중	4.50	2125.6	2030.0
59	하(19.7km)	하(390m)	중(3.36km)	균등	4.45	2064.3	1972.4
60	중(32.5km)	중(430m)	상(4.09km)	균등	4.40	4013.8	3837.3
61	상(42.4km)	중(430m)	상(4.09km)	균등	4.40	5393.3	5156.3
62	중(32.5km)	하(390m)	하(2.84km)	균등	4.35	3256.2	3114.7
63	하(19.7km)	상(470m)	상(4.09km)	균등	4.35	2319.4	2218.6
64	하(19.7km)	하(390m)	하(2.84km)	균등	4.24	1873.3	1793.8
65	중(32.5km)	중(430m)	중(3.36km)	균등	4.22	3706.8	3550.6
66	상(42.4km)	하(390m)	하(2.84km)	균등	4.21	4433.5	4247.0
67	상(42.4km)	중(430m)	중(3.36km)	균등	4.13	4844.2	4644.3
68	중(32.5km)	상(470m)	상(4.09km)	균등	4.11	4119.8	3950.5
69	하(19.7km)	상(470m)	중(3.36km)	4개 집중	4.10	2143.3	2055.4
70	하(19.7km)	상(470m)	하(2.84km)	4개 집중	4.07	1956.2	1876.5
71	하(19.7km)	중(430m)	중(3.36km)	균등	4.05	2088.2	2003.5
72	상(42.4km)	상(470m)	상(4.09km)	균등	4.04	5351.9	5136.0
73	상(42.4km)	중(430m)	하(2.84km)	균등	3.93	4452.5	4277.4
74	중(32.5km)	상(470m)	중(3.36km)	균등	3.93	3739.4	3592.4
75	중(32.5km)	중(430m)	하(2.84km)	균등	3.92	3317.3	3187.2
76	상(42.4km)	상(470m)	중(3.36km)	균등	3.90	4794.2	4607.2
77	하(19.7km)	중(430m)	하(2.84km)	균등	3.87	1982.5	1905.9
78	하(19.7km)	상(470m)	중(3.36km)	균등	3.79	2144.7	2063.3

순위	노선연장	정류장간격	평균통행거리	O/D형태	통행시간 감축률(%)	총통행시간(분)	
						기존	급행+완행
79	중(32.5km)	상(470m)	하(2.84km)	균등	3.63	3287.7	3168.4
80	상(42.4km)	상(470m)	하(2.84km)	균등	3.59	4439.3	4279.9
81	하(19.7km)	상(470m)	하(2.84km)	균등	3.52	1969.0	1899.7

<표 4-15> 급행버스 운영 효율성 영향요인별 통행시간 변화폭

노선 연장		정류장 간격		평균 통행거리		O/D 형태	
설정 값	변화폭	설정 값	변화폭	설정 값	변화폭	설정 값	변화폭
42.4km	5.6%	470m	4.9%	4.09km	5.7%	균등	4.2%
32.5km	5.4%	430m	5.3%	3.36km	5.3%	2개정류장 집중	5.8%
19.7km	5.0%	390m	5.9%	2.84km	5.0%	4개정류장 집중	6.0%
변화폭 최고값/최저값 차이: 112%		변화폭 최고값/최저값 차이: 121%		변화폭 최고값/최저값 차이: 115%		변화폭 최고값/최저값 차이: 142%	

이어서 각 영향요인을 설명변수로 하는 급행버스 도입 효과(통행시간 감축률) 추정 다중회귀분석모형을 도출하여 실제 노선을 대상으로 분석하는 경우 대략적인 도입 효과를 가늠하는데 활용하고자 한다. 각 영향요인 중 O/D 형태의 경우 정성적인 값을 정량화할 필요가 있으며, 따라서 노선 전체 정류장별 승하차 인원의 분산 값으로 대체하여 적용하였다. 다중회귀분석결과는 <표 4-16>과 같은데, 4개 영향요인 중 노선연장 요인은 단계선택법(stepwise) 과정에서 다중공선성의 우려가 있어 제외되었다. R-sq는 0.864, Adjust R-sq는 0.859로 모형에 선형 관계가 존재한다고 판단할 수 있으며, 모든 변수의 유의확률 또한 0.0001 이하로 유의한 것으로 나타났다. 이에 따라 다중회귀분석모형을 다음과 같이 제시할 수 있다.

$$TTSR = 8.914 + 0.026 \times ODVar - 0.015 \times SS + 0.630 \times ATL \quad (4-1)$$

여기서, $TTSR$ = 통행시간 감축률(%), $ODVar$ = O/D 분산,
 SS = 정류장 간격(m), ATL = 평균 통행거리(km)

<표 4-16> 급행버스 도입 효과(통행시간 감축률) 추정 다중회귀분석 결과

변수	비표준화 계수		표준화 계수	t	Sig.	다중공선성 통계	
	B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
(상수)	8.194	0.675		12.132	.000		
O/D 분산	0.026	0.001	0.803	19.028	.000	0.992	1.008
정류장 간격	-0.015	0.001	-0.451	-10.696	.000	0.992	1.008
평균 통행거리	0.630	0.089	0.298	7.081	.000	1.000	1.000
R-square	0.864		F-statistic	106.47			
Adjusted R-square	0.859		p-value	0.000			

2. 실제 노선 대상 모형 적용

본 절에서는 다중회귀분석모형을 검증하고자 교통카드DB로부터 분석 대상 노선으로 선정한 73개 노선에 대하여 급행버스노선 정차정류장 선정모형과 다중회귀분석모형을 각각 적용하여 각 모형으로부터 산출된 급행버스 도입시 총통행시간 감축률을 비교하고, 이를 통해 다중회귀분석모형의 적용성을 검토하고자 한다. 단, 급행버스노선 정차정류장 선정모형의 경우 분석 효율성을 향상시키고자 승하차정류장의 전환은 고려하지 않았으며, 침두 O/D에 대한 분석만을 수행하였다. 분석 결과는 <표 4-17>과 같은데, 노선별로 통행시간감축률이 급행버스노선 정차정류장 선정모형은 9~19%, 다중회귀분석모형은 6~16% 수준으로 나타나 시나리오 분석(<표 4-14>)의 통행시간 감축률(최대 8% 수준)보다 높은 것으로 나타났다. 이는 시나리오 분석시 2개 또는 4개의 집중 정류장만을 가정한 데에 반해 실제 통행량 자료에서는 승하차가 집중되는 정류장 개수가 더 많이 존재하거나 특정 정류장에 승하차가 집중되는 비율이 더욱 높은 데에 기인한 것으로 판단된다.

〈표 4-17〉 다중회귀분석모형과 급행버스노선 정차정류장 선정모형 결과 비교

노선 번호	노선연장 (km)	정류장간격 (m)	평균통행거리 (km)	O/D 분산	통행시간감축률(%)		감축률 순위	
					선정모형	회귀모형	선정모형	회귀모형
10-2	20.0	345	4.28	152	19.0	9.7	1	21
400	97.0	519	8.20	313	17.5	13.7	2	3
10	85.0	503	8.54	222	17.2	11.8	3	7
61	62.6	396	3.61	132	16.7	7.9	4	43
660	76.4	527	8.35	236	16.2	11.7	5	9
990	82.4	535	7.15	319	16.2	13.0	6	5
34-1	50.6	444	5.38	148	16.1	8.8	7	31
60	93.3	438	6.14	165	16.0	9.8	8	19
10-5	47.0	435	6.07	181	15.9	10.2	9	14
700-2	57.2	427	6.42	207	15.9	11.2	10	10
66	65.0	428	6.86	138	15.8	9.7	11	20
400-4	68.5	493	6.57	290	15.8	12.5	12	6
35	53.1	482	8.61	185	15.7	11.2	13	11
4-1	37.4	411	4.18	110	15.6	7.5	14	55
38	41.7	522	9.77	284	15.6	13.9	15	2
13-4	45.8	463	4.80	457	15.6	16.2	16	1
34	60.5	451	5.13	149	15.3	8.5	17	36
900	83.4	502	12.77	177	14.9	13.3	18	4
7	63.4	425	4.29	232	14.8	10.5	19	12
20	57.7	473	5.68	161	14.8	8.9	20	29
7-2	66.2	409	4.65	194	14.7	10.0	21	17
2-2	41.6	408	3.07	134	14.7	7.5	22	57
66-4	76.0	404	5.49	121	14.4	8.7	23	32
310	36.9	415	4.15	189	14.1	9.5	24	23
720-3	53.6	436	3.70	145	14.1	7.8	25	45
730	70.2	444	4.44	184	13.9	9.1	26	27
46	42.5	448	4.22	171	13.8	8.6	27	35
27	52.1	401	4.64	117	13.8	8.1	28	39
7-1	38.7	387	4.68	161	13.5	9.5	29	22
720-2	81.4	419	4.44	176	13.5	9.3	30	24
13-1	48.7	380	3.11	150	13.4	8.3	31	38
5	45.7	423	4.41	209	13.3	10.1	32	16
30	35.3	484	5.00	220	13.1	9.8	33	18
300	73.6	522	9.66	202	13.1	11.7	34	8
63	50.3	405	4.22	100	13.0	7.4	35	59
11-1	49.6	459	4.26	199	12.9	9.2	36	26
99	80.5	426	3.57	126	12.9	7.3	37	61
777	55.8	537	6.29	241	12.8	10.4	38	13
202	46.3	482	4.18	131	12.7	7.0	39	70

노선 번호	노선연장 (km)	정류장간격 (m)	평균통행거리 (km)	O/D 분산	통행시간감축률(%)		감축률 순위	
					선정모형	회귀모형	선정모형	회귀모형
13-5	50.3	479	4.63	175	12.7	8.5	40	37
20-1	47.1	486	4.80	138	12.6	7.5	41	56
25	45.5	489	5.41	134	12.5	7.7	42	46
720-1	91.5	428	4.53	112	12.5	7.5	43	54
3	38.5	374	3.77	87	12.5	7.2	44	65
301	76.2	476	5.54	166	12.5	8.8	45	30
62	34.8	430	3.61	124	12.4	7.2	46	64
9-1	52.5	520	4.21	214	12.4	8.6	47	34
62-1	62.6	396	4.17	107	12.3	7.7	48	49
37	46.2	399	3.77	135	12.3	8.1	49	40
99-2	51.1	433	3.66	119	12.2	7.1	50	68
5-1	44.6	479	4.08	163	12.2	7.8	51	44
65	51.7	438	4.48	121	12.2	7.6	52	53
82-2	36.0	409	3.31	133	12.1	7.6	53	52
9-2	39.9	464	4.36	236	12.0	10.1	54	15
88	42.5	401	3.22	134	11.9	7.7	55	48
2-1	38.9	377	3.10	159	11.7	8.6	56	33
88-1	40.4	429	3.18	149	11.6	7.6	57	50
64	70.1	438	4.11	124	11.6	7.4	58	58
51	34.4	453	3.67	140	11.5	7.4	59	60
15-1	58.8	474	3.78	209	11.2	8.9	60	28
85	29.0	414	3.27	116	11.1	7.1	61	69
80	33.5	419	3.18	97	11.0	6.4	62	73
36	53.0	449	3.33	144	10.9	7.3	63	62
83-1	22.3	371	2.84	87	10.7	6.7	64	71
82-1	33.8	402	2.78	146	10.5	7.7	65	47
11	70.4	499	4.22	182	9.9	8.1	66	41
9	35.4	437	3.57	156	9.9	7.9	67	42
98	49.7	401	3.42	107	9.7	7.1	68	66
13	33.9	458	3.97	207	9.7	9.2	69	25
92-1	49.4	437	3.60	142	9.5	7.6	70	51
39	33.3	411	2.39	143	9.4	7.2	71	63
92	36.8	405	2.78	125	9.4	7.1	72	67
112	31.5	426	3.22	103	9.0	6.5	73	72

3. 결과 비교 및 평가

다중회귀분석모형과 급행버스노선 정차정류장 선정모형에서 각각 산출된 통행시간 감축률 순위는 대체로 경향성이 일치한다고 볼 수 있으나 순위 차이가 큰 노선들이 존재한다. 따라서 다중회귀분석모형에서 산출된 순위가 급행버스노

선 정차정류장 선정모형으로부터 산출된 순위와 전체적인 경향성 차이가 있는지에 대한 통계적인 검증을 수행하였다. 쌍대(paired) 값을 가진 두 자료의 순위 검증에 활용될 수 있는 윌콕슨 부호 순위 검정(Wilcoxon signed ranks test)을 사용하였는데, 해당 검정 방법은 비모수 통계 검정의 하나로 두 순위간 크고 작음으로 표현되는 부호뿐 아니라 두 순위값 차이의 크기까지 함께 고려할 수 있다. 검정 결과는 <표 4-18>과 같으며 검정 결과 두 방법론으로부터 산출된 순위간 유의한 차이는 없는 것으로 나타나 전체 노선망에 대한 급행버스 도입노선 우선순위 산정시 다중회귀분석모형을 적용한 간이 분석을 수행하여도 문제가 없는 것으로 판단된다. 다만 전체 노선 중 몇 개 노선에 대하여 급행버스를 도입할 것인가에 대한 기준은 가용 차량대수 및 예산 등 제반 조건을 함께 고려하여 결정해야 한다.

<표 4-18> 통행시간 절감량 순위 차이에 대한 윌콕슨 부호 순위 검정 결과

		N	Mean Rank	Sum of Ranks
(b) - (a)	Negative Ranks	37	34.82	1288.50
	Positive Ranks	34	37.28	1267.50
	Ties	2		
	Total	73		
	Z	-0.060		
	Asymp. Sig. (2-tailed)	0.952		

제 5 절 모형의 검증 및 활용

1. 기존 정류장 선정 방법론 적용 결과와의 비교

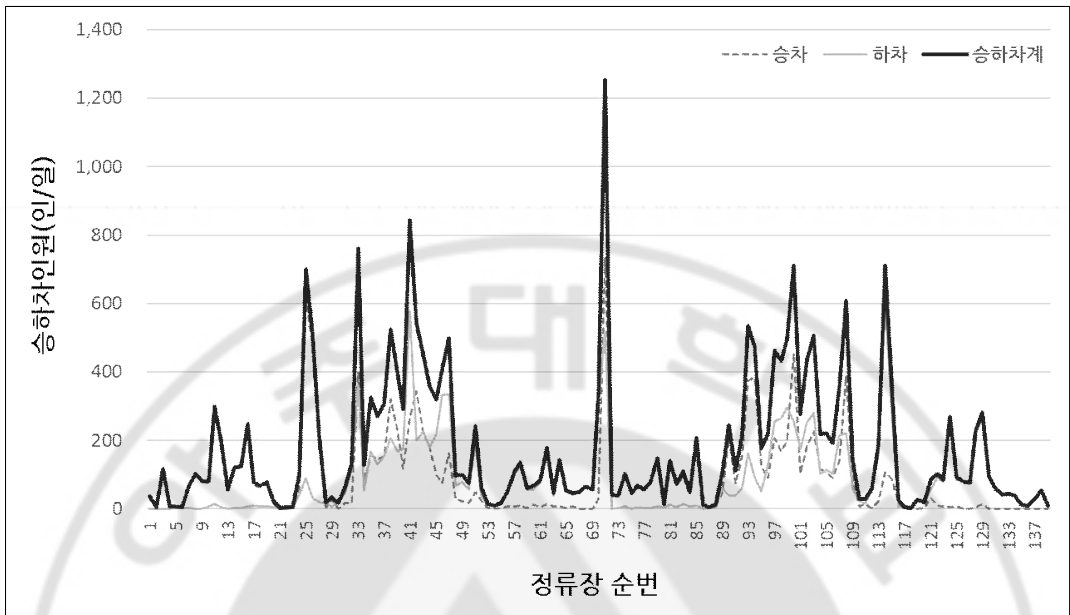
가. 방법론

기존의 급행버스노선 정차정류장 선정은 정류장 이용 승하차 수요, 전철 등 타 수단/노선과의 환승 발생 정류장, 정차정류장간 최소 간격 유지 등 경험적 요인을 이용한 경우가 대부분으로, 기존의 방법과 본 논문에서 제안된 모형에

따른 총통행시간 절감 효과 비교를 통하여 본 모형의 우수성과 적용성을 검증하고자 한다. 국내보다 활발한 연구가 진행되어온 국외 급행버스 정류장 선정 연구 중, 기존문헌 고찰 단계에서 검토한 바 있는 Tetreault and El-Geneidy (2010)의 정류장 선정 시나리오를 참고하였다. 해당 연구에서는 대상노선 이용 승객의 O-D 데이터를 분석하여 해당노선 승하차 상위 25% 정류장만 정차하며, 정류장 간격을 800~1600m 간격으로 유지하는 것이 가장 우수한 시나리오로 검토되었는데, 본 연구에서는 이를 응용하여 분석 대상 노선의 전체 정류장(139개) 중 승하차 합계 인원 상위 25%에 해당하는 정류장에 급행버스가 정차하는 시나리오(시나리오 1)와, 여기에 추가적으로 급행버스 정차 정류장이 두 개 이상 연달아 선정되지 않도록 제약 조건을 설정하는 시나리오(시나리오 2) 각각에 대하여 급행버스 정차 정류장을 결정한 뒤 총통행시간 최소화 목적함수에 정류장 조건을 부여하여 총통행시간을 산출한다.

나. 급행버스 정차 정류장 선정

분석 대상 노선(300번)의 정류장별 승하차 인원을 집계한 결과는 <그림 4-17>과 같은데, 노선 회차지점인 71번째 정류장(범계역)의 승하차인원이 일일 1,253명으로 가장 많은 것으로 나타났고, 이어 41번째 정류장(수원고용센터/동수원사거리) 845명/일, 33번째 정류장(수원버스터미널) 760명/일 등의 순으로 나타났다. 이용수요가 많은 대부분의 정류장은 타 환승 노선/수단이 다양하거나 상업시설이 밀집된 곳 등으로 나타나, 기존의 급행버스노선 정차정류장 선정 원칙과 상당 부분 일치하는 결과를 보였다.

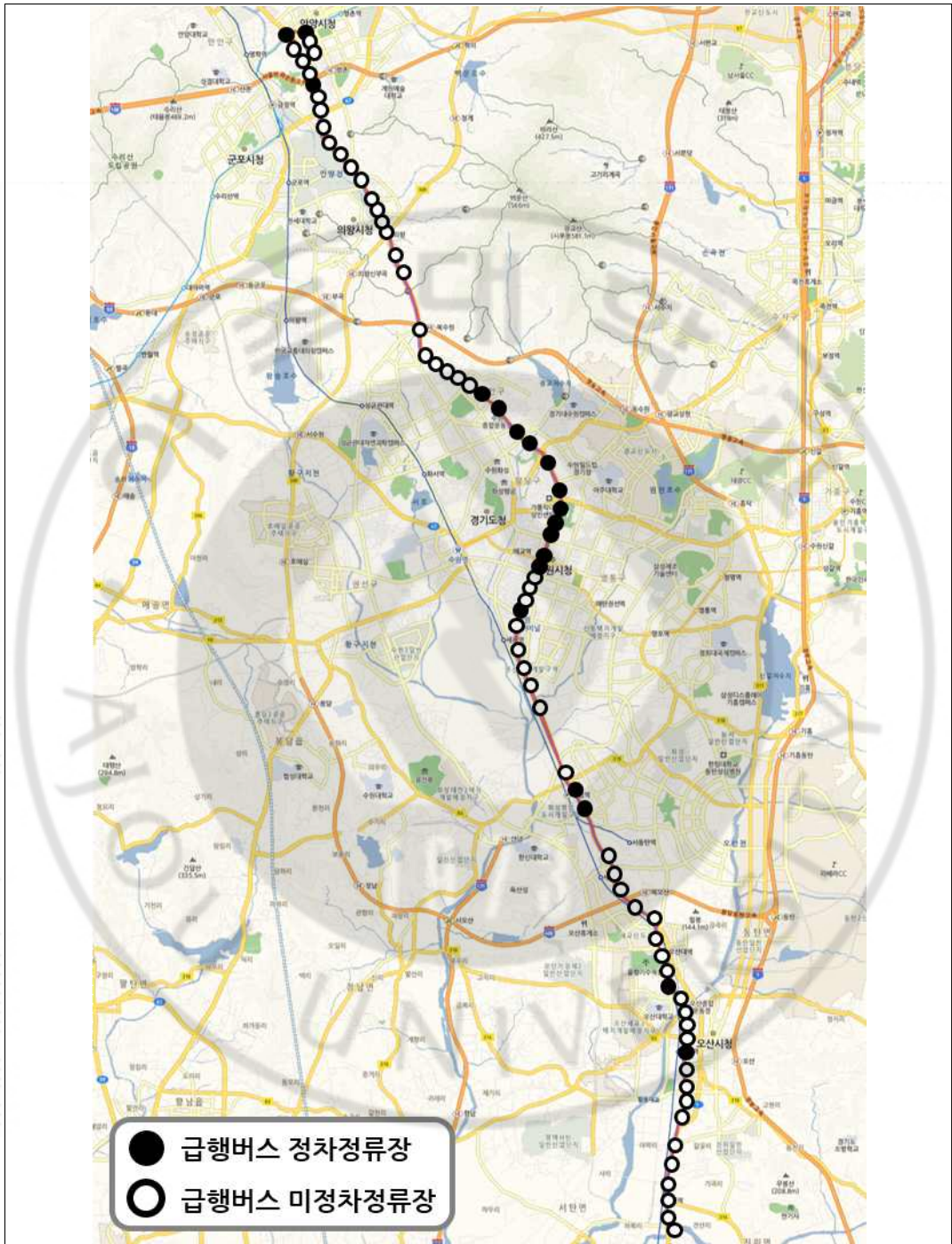


<그림 4-17> 분석 대상 노선(300번)의 정류장별 승하차인원

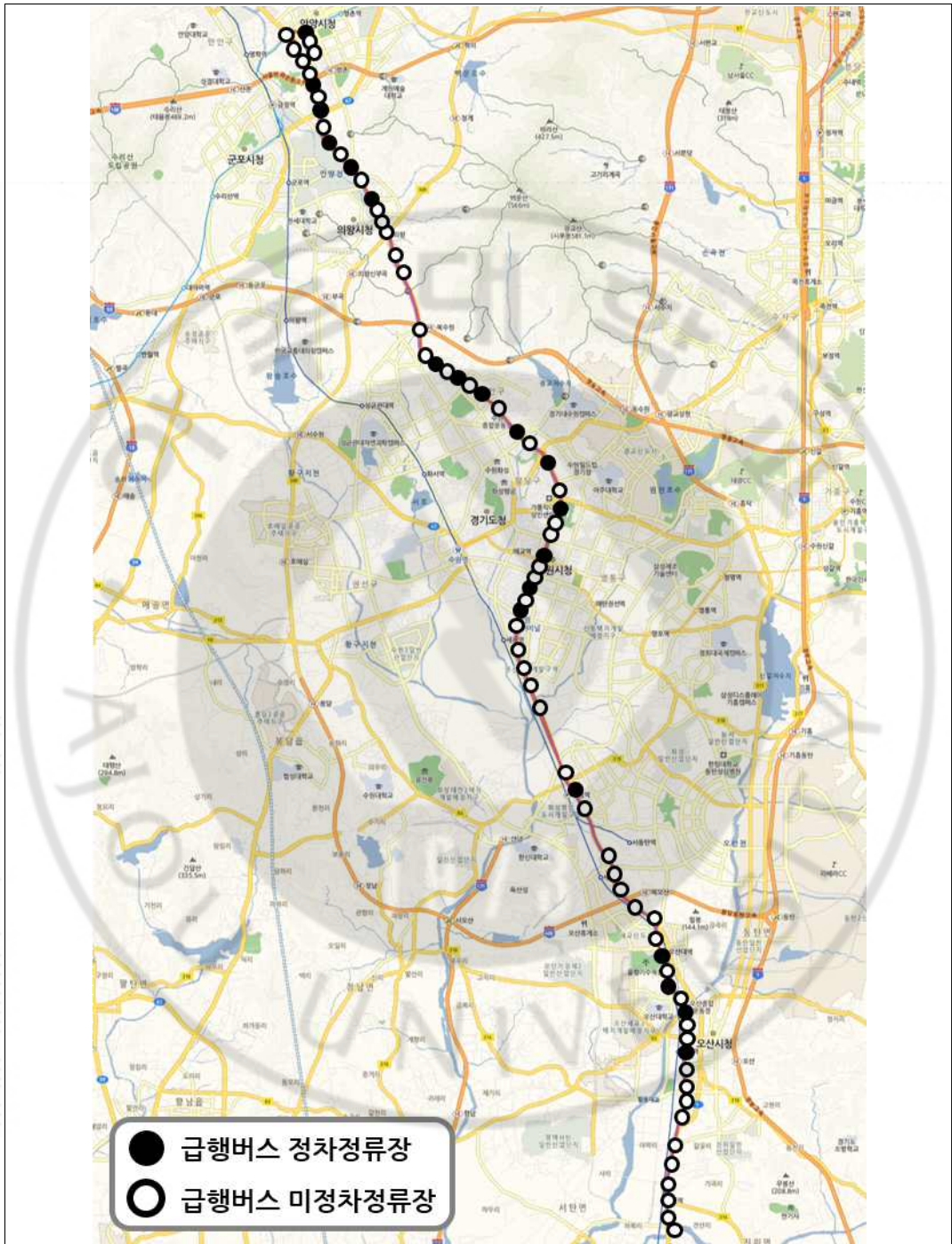
다만 이용 승객의 혼란을 방지하기 위해 본 모형의 정류장 선정 전제 조건으로 양방향 급행정류장 정차 여부가 일치되도록 설정하였기 때문에, 이를 단일화한 77개 정류장 개체에 대한 승하차 인원 순위를 부여(단일화된 정류장의 경우 양방향 정류장 승하차 인원의 평균값 적용)하고, 139개 정류장 중 상위 25%에 해당하는 35개 정류장을 선정한 결과는 <표 4-19>와 같다. 시나리오 1의 경우 승하차 인원 순위대로 정류장 누적 개수(양방향이 통합된 단일화 정류장의 경우 2, 그렇지 않은 경우 1을 누적)를 산출하여 35개 정류장이 누적되는 정류장 개체까지를 급행버스 정차 정류장으로 선정하였고, 시나리오 2의 경우 앞선 순위에서 선정된 정류장이 해당 정류장의 전후로 위치하는 경우 누적 개수 산출 및 선정에서 배제되도록 하였다. 예를 들어 5순위 정류장인 “신창미션힐.송화초교.홈플러스”의 경우 4순위인 “동부출장소.병점초등학교” 정류장과 맞닿아있는 정류장이기 때문에 선정에서 배제하였다. <그림 4-18, 19>는 각 시나리오별 정류장 선정 결과를 그림으로 나타낸 것이다.

〈표 4-19〉 기존 방법론에 따른 분석 대상 노선(300번)의 급행 정차정류장 선정 결과

순위	정류장명	단일화 정류장 여부	시나리오 1		전/후 정류장 선정여부	시나리오 2	
			정류장 누적 개수	선정 결과		정류장 누적 개수	선정 결과
1	범계역.엔씨백화점	×	1	○	×	1	○
2	수원고용센터.동수원사거리	○	3	○	×	3	○
3	수원버스터미널	○	5	○	×	5	○
4	동부출장소.병점초등학교	○	7	○	×	7	○
5	신창미선힐.송화초교.홈플러스	○	9	○	○	7	×
6	동부지구대.수원시장기요양...	○	11	○	○	7	×
7	한일타운.경기일보.홈플러스	○	13	○	×	9	○
8	수원시청사거리	○	15	○	×	11	○
9	장안지하차도	×	16	○	○	11	×
10	창룡문	○	18	○	×	13	○
11	인계사거리.국제사이버대학교	○	20	○	○	13	×
12	교육청사거리	○	22	○	○	13	×
13	범계사거리.호평지하도	×	23	○	○	13	×
14	종합운동장	○	25	○	○	13	×
15	오산역.오산터미널	○	27	○	×	15	○
16	KBS수원센터정문.한화생명	○	29	○	○	15	×
17	영화초등학교	○	31	○	×	17	○
18	KT남수원지사.중부일보	○	33	○	○	17	×
19	신장동주민센터.오산대입구	○	35	○	×	19	○
20	세권사거리	○	37	×	×	21	○
21	권선사거리.SK뷰아파트	○	39	×	○	21	×
22	경기도보건환경연구원	○	41	×	×	23	○
23	한양아파트.한마음외과	○	43	×	○	23	×
24	중원사거리.시장	○	45	×	○	23	×
25	병점입구.병점육교.화남아파트	○	47	×	○	23	×
26	고천.의왕시청	○	49	×	×	25	○
27	포도원.유한양행	○	51	×	×	27	○
28	수일여중.대우기술연구소	○	53	×	○	27	×
29	한성병원.민방위교육장	×	54	×	×	28	○
30	권선중학교	○	56	×	○	28	×
31	호계사거리.호계재래시장	○	58	×	○	28	×
32	고천파출소	×	59	×	○	28	×
33	대우3차아파트.귤동	○	61	×	○	28	×
34	미시장앞.대원약국	○	63	×	×	30	○
35	수일중학교	×	64	×	×	31	○
36	한국가스안전공사.택시공제	○	66	×	○	31	×
37	의왕지구대.글로벌도서관	○	68	×	×	33	○
38	대림아파트	○	70	×	○	33	×
39	오산대역.물향기수목원	○	72	×	×	35	○
40	하북삼거리.진위역	○	74	×	○	35	×



<그림 4-18> 기존 방법론에 따른 급행버스 정차정류장 선정 결과 (시나리오 1)



<그림 4-19> 기존 방법론에 따른 급행버스 정차정류장 선정 결과 (시나리오 2)

다. 분석 결과

기존 방법론에 따른 급행버스 정차정류장 선정 결과를 <식 3-1>의 i_n 에 입력하여 총통행시간을 산출한 결과는 시나리오별로 <표 4-20, 21>과 같다. 급행/완행버스의 대수에 상관없이 동일한 급행버스 정차정류장이 설정되어, 급행버스 배차 비율이 높아질수록 완행버스 이용자의 대기시간 증가에 따라 총통행시간과 1인당 통행시간이 증가 추세를 보이고 있으며, 급행버스 미운영 대안의 통행시간이 가장 짧은 것으로 산출되었다. 총비용의 측면에서는 급행버스가 일정 수준까지 증가하는 경우 급행버스 운행비용 절감으로 감소 추세를 보이다가, 완행버스가 시간당 6대 이하로 감소하는 경우 승객 대기시간의 급증으로 인하여 총비용 또한 증가세로 전환되는 양상을 보이는 것으로 나타났다. 시나리오 1과 2를 비교하면 대체로 비슷한 총통행시간 값을 보이고 있으며, 급행버스와 완행버스의 대수가 비슷한 수준으로 유지되는 경우에는 급행버스 정차정류장간 간격 제약 설정을 둔 시나리오 2의 총통행시간이 다소 짧은 것으로 나타났다.

<표 4-20> 기존 방법론에 따른 급행버스 정차정류장 선정시 총통행시간 (시나리오 1)

급행 버스대수 (vph)	완행 버스대수 (vph)	급행버스 정차정류장 개수	총통행시간 (분)	1인당 통행시간 (분)	총비용 (원/일)	급행버스 이용률* (%)
0	15	미운영	302,126.1	24.3	26,196,652	0.0
3	12	35	309,660.9	24.9	25,684,464	3.9
4	11	35	310,686.8	25.0	25,301,075	13.5
5	10	35	311,697.3	25.1	24,909,203	19.7
6	9	35	313,397.5	25.2	24,547,256	33.9
7	8	35	314,225.7	25.3	24,491,942	35.4
8	7	35	317,432.2	25.5	24,195,795	49.6
9	6	35	323,497.0	26.0	24,041,794	52.9
10	5	35	336,194.1	27.0	24,225,200	53.9
11	4	35	341,123.7	27.4	24,371,397	53.8
12	3	35	372,370.9	29.9	25,484,754	55.9

* 급행버스 이용률: 총 통행량 중 기종점간 급행버스 이용이 포함된 통행의 비율 (완행버스와 급행버스를 환승하여 이용하는 경우도 포함)

<표 4-21> 기존 방법론에 따른 급행버스 정차정류장 선정시 총통행시간 (시나리오 2)

급행 버스대수 (vph)	완행 버스대수 (vph)	급행버스 정차정류장 개수	총통행시간 (분)	1인당 통행시간 (분)	총비용 (원/일)	급행버스 이용률* (%)
0	15	미운행	302,126.1	24.3	26,196,652	0.0
3	12	35	309,921.3	24.9	25,683,801	2.4
4	11	35	311,892.6	25.1	25,348,367	12.3
5	10	35	311,911.6	25.1	24,884,051	25.4
6	9	35	312,003.2	25.1	24,410,238	39.8
7	8	35	312,321.9	25.1	24,318,911	41.8
8	7	35	315,181.3	25.3	23,978,496	48.5
9	6	35	322,313.6	25.9	23,856,479	51.9
10	5	35	336,666.4	27.1	24,088,048	54.0
11	4	35	341,644.9	27.5	24,220,239	54.5
12	3	35	375,860.3	30.2	25,406,536	56.3

* 급행버스 이용률: 총 통행량 중 기종점간 급행버스 이용이 포함된 통행의 비율 (완행버스와 급행버스를 환승하여 이용하는 경우도 포함)

분석 결과를 정리하면, 기존의 급행버스 정차정류장 선정 방법론은 총통행시간을 최소화하는 최적해에 도달하지 못할 가능성이 높으며 급행과 완행버스 대수의 비율에 따라서도 크게 영향을 받는 것으로 나타나, 급행·완행 차량 대수와 다양한 제약조건을 고려하여 총통행시간 또는 총비용을 최소화하는 급행버스 정차정류장 선정 결과를 도출하는 본 모형을 통해 급행버스 정차정류장 최적해를 도출해야 할 필요성이 확인되었다.

2. 네트워크 차원에서의 급행버스 도입 효과

가. 방법론

본 논문에서 개발한 모형은 단일 노선에 대한 최적해를 도출하고 있으나 실제 도시부 버스 노선망에서는 다양한 노선과 일부 구간을 공유하는 것이 일반

적으로, 해당 노선들로부터 급행버스 이용 수요가 추가로 발생할 가능성이 있다. 즉, 급행버스 노선이 운영되는 구간 내에서 승차와 하차가 모두 발생하는 통행이나, 급행버스 노선 구간 외부와 급행버스 노선 운영구간을 걸쳐 승하차가 발생하는 통행은 급행버스 단일 이용 또는 환승 이용으로 통행시간이 단축되는 경우 급행버스를 이용할 수 있으며, 따라서 급행 버스의 도입 효과를 전체 노선망 차원에서 점검할 수 있다. 기종점의 급행버스 운행구간 여부에 따른 이용가능 버스서비스 형태를 정리하면 <표 4-22>와 같은데, 우선 유형 1은 급행버스 운행구간 내에서 승차와 하차가 모두 발생하므로 <표 3-1>에서 제시한 이용가능 서비스 형태와 동일하게 적용할 수 있다. 유형 2는 급행버스 운행구간 외부에서 승차한 승객이 급행버스 운행구간 내에서 하차하는 경우인데, 하차 정류장에 급행버스가 정차한다면 급행버스 운행구간 진입 후 첫 번째 급행버스 정차 정류장에서 급행버스로 환승하여 이용하는 형태가 가능하나, 하차 정류장에 급행버스가 정차하지 않는 경우는 2회의 환승이 발생하므로 공유 구간의 연장을 고려하였을 때 통행시간 절감 여지가 없을 것으로 판단하여 급행버스 이용이 없는 것으로 가정하였다. 유형 3은 유형 2와 반대의 경우로 급행버스 운행구간 내부에서 승차한 승객이 급행버스 운행구간 외부에서 하차하는 경우인데, 마찬가지로 승차 정류장에 급행버스가 정차하는 경우에만 급행버스와 완행버스의 환승 이용이 가능한 것으로 가정하였다.

<표 4-22> 급행버스 일부구간 공유 노선 이용자의 이용가능 버스서비스 형태

구분	타 노선 이용자 기종점 급행버스 운행구간 여부		승하차 정류장 급행버스 정차 여부		이용 가능 버스서비스 형태
	승차 정류장	하차 정류장	승차 정류장	하차 정류장	
유형 1	○	○	○	○	완행, 급행
			○	×	완행, 급행+완행
			×	○	완행, 완행+급행
			×	×	완행, 완행+급행+완행
유형 2	×	○	(해당 없음)	○	완행, 완행+급행
				×	완행
유형 3	○	×	○	(해당 없음)	완행, 급행+완행
			×		완행

나. 공유 노선 자료 구축

먼저 분석 대상 노선(73개, <표 4-1>)을 대상으로 300번 노선과 일부 구간(편도 기준 5개 정류장 이상이 연속으로 중복)을 공유하는 노선을 조사한 결과 <표 4-24>과 같이 총 6개 노선이 존재하는 것으로 확인되었다.

<표 4-23> 급행버스 분석 노선(300번) 일부구간 공유 노선

노선번호	중복구간	구간 내 정류장수 (편도기준)
20	오산역~비상활주로(곡반정동)	19
64	골사그네~포도원(유한양행)	9
65	골사그네~포도원(유한양행)	9
301	하북차고지~비상활주로, 골사그네~범계사거리	30, 17
777	한일타운~호계3동주민센터	17
900	한일타운~호계사거리	24

해당 노선들 각각에 대하여 <표 4-22>의 3개 유형별로 침두/비침두 승하차 O/D를 각각 생성한 뒤, 300번 노선 정류장 순번과 매칭 작업을 실시한다. 이때 유형 2와 유형 3의 경우, 300번 노선 구간 외에서 승하차한 통행은 중복구간 내 첫 번째 정류장을 승차 정류장으로 선정(유형 2)하거나 중복구간 내 마지막

정류장을 하차 정류장으로 선정(유형 3)하였으며, 이에 따라 환승/대기시간 패널티를 이용 가능 버스서비스 형태별로 <표 4-24>와 같이 적절하게 부여한다. 유형 2의 경우 분석 구간 외에서 승차가 발생하지 않으므로 대기시간 가중치는 적용하지 않으며, 유형 3의 경우 분석구간 내에서 대기 및 승차가 발생하므로 대기시간 가중치를 적용하였다. 총통행시간 산정 역시 분석구간 내 통행에 대한 시간만을 산정하는데, 유형 2의 경우 실제 승차한 정류장으로부터 중복구간 내 첫 번째 정류장까지의 통행시간, 유형 3의 경우 중복구간 내 마지막 정류장으로부터 실제 하차한 정류장까지의 통행시간은 분석구간에 속하지 않으므로 총통행시간 산정에서 배제하였다. 한편, 공유 구간 내에서 완행서비스 이용시 300번 노선(완행 서비스)과 공유 노선 모두 이용이 가능하므로 공유 노선의 통행 자료에 대한 대기·환승시간 산정시 완행버스의 차량 대수는 300번 노선의 완행서비스 외에 추가로 6대(10분 간격)가 운행되는 것으로 가정하였다.

<표 4-24> 이용가능 버스서비스 형태별 대기·환승시간 적용

구분	승하차 정류장 급행버스 정차 여부		버스서비스 형태	대기·환승시간 적용	
	승차 정류장	하차 정류장		대기시간	환승시간
유형 1	○	○	완행	○	×
			급행	○	×
	○	×	완행	○	×
			급행+완행	○	○
	×	○	완행	○	×
			완행+급행	○	○
	×	×	완행	○	×
			완행+급행+완행	○	○ (2회)
유형 2	(해당 없음)	○	완행	×	×
			완행+급행	×	○
		×	완행	×	×
유형 3	○	(해당 없음)	완행	○	×
			급행+완행	○	○
	×		완행	○	×

다. 적용 결과

급행버스 분석 노선(300번)과 일부구간을 공유하는 노선 6개의 공유구간 일일 승하차 자료 43,709건을 추가하여 급행버스노선 최적정류장 선정모형(승객 총통행시간 최소화)을 적용한 결과는 <표 4-25>와 같다. 분석 결과 공유구간 내외에서 승하차하는 단거리 통행이 많이 포함되어 <표 4-9>와 비교하여 1인당 통행시간은 절반 수준(24.3분→14.0분)으로 감소하였으며, 완행/급행 배분 대수별 총통행시간을 비교한 결과 급행버스에 8대, 완행버스에 7대가 배분되었을 때 총통행시간이 771,303분(승객 1인당 13.7분)으로 급행버스 미운영시 대비 1인당 통행시간이 0.3분 절감되는 것으로 나타났다. 네트워크 차원에서의 급행버스 도입 효과를 분석한 결과, 단일 노선만을 분석했을 때와 대비하여 타 노선의 공유구간 내 단거리 이용 수요가 유입됨에 따라 1인당 통행시간 절감규모는 감소하였으나, 승객 총통행시간의 절감규모는 증가(단독노선 분석시(<표 4-9>): 4362.3분, 타노선 포함 분석시(<표 4-25>): 14,149.3분)하는 것으로 나타나, 네트워크 관점에서 전체 승객 통행시간의 규모를 감소시켜 전체 사회적 비용을 절감할 수 있는 것으로 분석되었다.

<표 4-25> 급행버스 일부구간 공유 노선 이용자를 포함한 급행버스노선 정차정류장 선정모형 적용 결과 (총통행시간 최소화)

급행 버스대수 (vph)	완행 버스대수 (vph)	급행버스 정차정류장 개수	총통행시간 (분)	1인당 통행시간 (분)	총비용 (원/일)
0	15	미운행	785,452.4	14.0	55,356,066
3	12	129	807,070.4	14.4	56,466,645
4	11	100	805,133.9	14.3	55,938,906
5	10	72	790,780.4	14.1	55,246,595
6	9	74	786,133.9	14.0	55,209,899
7	8	62	778,218.9	13.9	54,253,764
8	7	66	771,303.1	13.7	54,059,064
9	6	70	773,305.1	13.8	54,141,130
10	5	79	784,994.3	14.0	55,092,573
11	4	76	790,847.8	14.1	55,421,970
12	3	95	812,986.8	14.5	57,532,713

제 5 장 결론 및 향후 연구과제

제 1 절 결 론

본 연구에서는 대중교통의 경쟁력 향상을 위한 대안 중 하나로 최근 각광받고 있는 급행 서비스체계, 그중에서도 급행버스에 주안점을 두고 교통카드DB를 이용하여 이용자의 총통행시간 또는 사회적 총비용을 최소화할 수 있는 급행버스노선 정차정류장 선정모형 및 급행버스 도입노선 우선순위 평가 방법론을 제시하였다. 기존에도 대중교통 노선망 설계와 급행버스 관련 연구가 진행되어왔으나, 많은 연구가 전체 네트워크 노선체계의 개편, 새로운 노선의 개발 등을 다루고 있어 현재 운영되는 네트워크에 즉각적으로 적용 가능한 개선책 제시는 미흡한 실정이다. 따라서 전체 버스 노선망을 대상으로 한 급행 운영체계 도입 우선순위 평가와 다양한 현실적 제약조건을 고려한 급행버스노선 정차정류장 선정모형을 제시하여 현재 운영중인 노선망에 대한 적용성을 도모하고자 하였다.

급행버스노선 정차정류장 선정모형은 교통카드DB에서 획득한 특정노선 이용 승객의 O/D 정보와 노선 운행정보, 가용차량대수, 통행시간 유형별 가중치, 급행버스 정류장으로의 기종점 변경(전이) 등 실질적 변수를 활용하여 전체 승객 통행시간 또는 사회적비용(승객통행시간비용+운영자비용)을 최소화하는 급행버스 정차정류장을 선정하고, 도입 전후의 승객통행시간 또는 사회적비용을 비교하여 급행버스 도입 효과를 산정하는 모형으로 비선형최적화의 국지해(local minimum) 발생 가능성을 줄이고자 유전 알고리즘을 사용하였으며, 수원시의 교통카드DB를 활용한 사례 분석(case study)을 통해 모형의 적용성을 검토하고, 분석 대상 노선과 동일축을 공유하는 타 노선에서의 환승 수요, 즉 네트워크 차원의 확장성을 고려한 급행버스 도입 효과를 제시하였다. 특정 노선을 대상으로 한 모형 적용 결과에서 총통행시간 최소화시에는 1인당 5.3%의 통행시간 절감,

총비용 최소화시에는 일일 약 320만원의 총비용(이용자비용과 운영자비용의 합) 절감을 보여, 대중교통의 경쟁력 제고를 위한 급행버스 최적 서비스 계획을 제시할 수 있는 것으로 나타났다. 기존의 정류장 선정 방법론 적용과의 비교 결과 또한 급행버스 미운영시 대비 총통행시간이 증가하는 등 최적해에 도달하지 못하는 것으로 나타나, 급행버스 도입시 본 모형을 이용한 정류장 선정을 통해 전체 이용자의 효용을 최적화할 필요성이 확인되었다.

급행버스 도입노선 우선순위 평가 방법론에서는 급행버스 운영 효율성 영향요인을 선정하여 각 요인별로 승객 총통행시간 감축률에 대한 민감도 분석을 수행하고 다중회귀분석모형을 구축하며, 이를 급행버스노선 정차정류장 선정모형에 간이 적용한 결과와 비교하여 적정성을 검증하는 방안을 제시하였다. 급행버스 도입 효율성(통행시간 감축률)에 가장 큰 영향을 주는 변수로는 O/D의 승하차 패턴이 선정되었고, 이어서 정류장 간격, 평균 통행거리 등의 순으로 도출되었다. 이어서 수원시 73개 노선을 대상으로 다중회귀분석모형과 급행버스노선 정차정류장 선정모형에 각각 적용한 급행버스 도입 효율성(통행시간 감축률)을 비교한 결과, 두 결과로부터 도출된 노선별 통행시간 감축률 순위 간에는 유의한 차이가 없는 것으로 나타나 급행버스 도입 우선순위 평가시 본 연구에서 제시된 다중회귀분석모형을 통해 총통행시간 감축률을 간단하게 비교할 수 있을 것으로 판단된다.

급행버스 서비스 체계는 대규모 예산 투입 없이 대중교통의 접근성과 이동성을 모두 만족시킬 수 있는 대안의 하나로, 특히 포화 단계에 다다른 대도시 대중교통 인프라 및 노선망에 있어 운영의 효율성과 경쟁력을 향상시키는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서 제시한 급행버스노선 정차정류장 선정모형과 급행버스 도입노선 우선순위 평가 방법론을 통해 가장 효율적인 서비스 계획 대안을 발굴함으로써 급행 대중교통 서비스 체계의 확산 추세에 일조할 수 있을 것으로 기대된다.

제 2 절 향후 연구과제

본 연구에서는 교통카드DB를 이용하여 이용자의 총통행시간 또는 사회적 총비용을 최소화할 수 있는 급행버스노선 정차정류장 선정모형 및 급행버스 도입노선 우선순위 평가 방법론을 제시함으로써 향후 확장 연구의 발판을 마련하였으며, 향후 연구에서 고려되어야 할 본 연구의 한계점과 발전 방향은 다음과 같다.

급행버스노선 정차정류장 선정모형 개발에 있어 모형 구조 및 계산의 복잡성을 개선하고자 완행/급행 대수 조합별로 별도의 분석을 수행하였으나 향후에는 정류장과 차량 대수를 동시에 분석할 수 있는 체계를 갖추어야 한다. 또한 분석 대상 노선에서 현재 운영중인 차량 대수가 승객 용량제약을 만족하는 것으로 가정하고 별도의 차량용량 제약을 설정하지 않았으나, 완행/급행별로 차량 용량의 제약을 설정하여 특정 구간 과밀 수요를 방지하여야 하며, 타 노선과의 환승 정류장 등 정책적으로 유지되어야 하는 정류장의 경우 급행 정차정류장으로 기본 선정하는 등 다양한 제약조건의 추가적인 고려가 필요하다. 아울러 교통카드DB의 장점인 개별 통행자료 단위의 분석을 통해 연속형 모델을 개발하고 현재의 집계 자료 기반 분석 결과와 비교 검증할 필요가 있다.

본 연구에서 사용된 교통카드DB는 급행버스노선 정차정류장 선정모형 적용의 경우 단일 노선, 급행버스 도입노선 우선순위 평가 방법론 개발의 경우 수원 시내를 운행하는 73개 노선만을 대상으로 모형 변수 및 결과가 도출되었으나, 다양한 도시 형태 및 노선 유형에 대한 추가 분석을 통하여 연구 결과의 추가 검증 및 보완이 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. 김정태, 이인묵, 곽호찬, & 민재홍. (2015). 스마트 카드 자료를 활용한 서울시 버스 노선의 굴곡도 평가. *서울도시연구*, 16(1), 113-122.
2. 김경환, 이덕환, 최종문, & 오일성. (2010). 지하철과 버스의 서비스권역 비교 및 이용자들의 도보거리 추정. *대한토목학회논문집 D*, 30(6D), 541-552.
3. 김성희, 이창무, & 안건혁. (2001). 대중교통으로의 보행거리가 통행수단선택에 미치는 영향. *국토계획*, 36(7), 297-307.
4. 김재은. (2013a). 기초강좌: MATLAB으로 배워 보는 유전 알고리즘 (1). 소음·진동 (한국소음진동공학회지), 23(5), 30-35.
5. 김재은. (2013a). 기초강좌: MATLAB으로 배워 보는 유전 알고리즘 (2). 소음·진동 (한국소음진동공학회지), 23(6), 34-39.
6. 문병로. (2008). *쉽게 배우는 유전 알고리즘*, 초판, 한빛미디어, 서울.
7. 박경철, 이성모, & 전경수. (2007). 대중교통 네트워크 통합 설계 모형 개발. *대한토목학회논문집 D*, 27(1D), 53-65.
8. 박종수, & 이금숙. (2006). 대용량 교통카드 트랜잭션 데이터베이스에서 통행 패턴 탐사와 통행 행태의 분석. *한국경제지리학회지*, 10(2), 44-63.
9. 빈미영, 이수진, & 정의석. (2011). 경기도 교통카드자료를 이용한 통행패턴 분석과 활용방안 연구. *정책연구*, 1-148.
10. 서울시. (2013). *2013년 시내버스 표준원가에 따른 운송비용 정산지침*.
11. 서울시. (2014). *제54회 2014년 서울통계연보(2013년 기준)*.
12. 손상훈, 최기주, & 유정훈. (2007). 대중교통 통행배정을 위한 일반화비용 추정. *대한교통학회지*, 25(2), 121-132. (장수은, & 박경욱. (2010)에서 재인용)
13. 수도권교통본부. (2013). *2011년 수도권 교통분석 기초자료*.
14. 수원시. (2009). *수원화성 제1종지구단위계획 교통영향분석·개선대책(변경심의회 최종보고서)*.
15. 신성일, 이창주, & 조용찬. (2008). 대중교통 카드 자료를 이용한 지역 간 대중교통 서비스 평가 방안. *교통기술과정책*, 5(1), 111-127.
16. 원제무. (2015). *도시교통론*. 박영사.
17. 이신해, 최인준, 이승재, & 임강원. (2003). 유전자 알고리즘을 이용한 대중교통 통행배정모형 개발. *대한교통학회지*, 21(1), 65-75.
18. 이인묵, 백주현, & 민재홍. (2013). 교통카드 데이터를 활용한 연구 및 정책 동

- 향. *철도저널*, 16(5), 27-32.
19. 임용택, 박철, 김대성, 엄진기, & 이준. (2012). 교통카드 데이터를 이용한 통행 분포 모형 추정. *교통연구*, 19(2), 1-11.
 20. 장수은, & 박경욱. (2010). 메타분석을 통한 보행통행의 시간가치 추정 연구. *교통연구*, 17(1), 13-22.
 21. 조혜진, & 이영인. (2005). 급행버스 노선의 정류장 위치 및 배차간격 결정에 관한 연구. *대한교통학회지*, 23(7), 63-74.
 22. 천승훈. (2010). *교통카드 자료 기반 통합대중교통망의 확률적 통행배정모형 개발*. 서울대학교 박사학위논문, 서울대학교.
 23. 한상욱, 강희용, & 이명훈. (2015). 교통카드 데이터를 활용한 주요 역세권별 대중교통 이용통근통행자의 주거지 분포. *국토계획*, 50(4), 103-117.
 24. 한국개발연구원. (2008). *도로·철도 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구*.
 25. 한종학. (2005). *최적 버스노선망 설계방법론에 관한 연구*. 서울시립대학교 박사학위논문, 서울시립대학교.
 26. Agard, B., Morency, C., & Trepanier, M. (2006, May). Mining public transport user behaviour from smart card data. In *12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing-INCOM* (pp. 17-19).
 27. Amiripour, S. M., Mohaymany, A. S., & Ceder, A. A. (2014). Optimal Modification of Urban Bus Network Routes Using a Genetic Algorithm. *Journal of Transportation Engineering*, 141(3), 04014081.
 28. Ban, X. J., Li, Y., Skabardonis, A., & Margulici, J. D. (2010). Performance evaluation of travel-time estimation methods for real-time traffic applications. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 14(2), 54-67.
 29. Baaj, M. H., & Mahmassani, H. S. (1990). TRUST: A LISP program for the analysis of transit route configurations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1283), 125-135.
 30. Burke, M., & Brown, A. L. (2007). Distances people walk for transport.
 31. Ceder, A. (2015). *Public Transit Planning and Operation: Modeling, Practice and Behavior*. CRC Press.
 32. Cevallos, F., & Zhao, F. (2006). Minimizing transfer times in public transit network with genetic algorithm. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1971), 74-79.

33. Chakroborty, P., & Wivedi, T. (2002). Optimal route network design for transit systems using genetic algorithms. *Engineering Optimization*, 34(1), 83-100.
34. Chang, M., Darido, G., Kim, E., Schneck, D., Hardy, M., Bunch, J., ... & Zimmerman, S. (2004). *Characteristics of Bus Rapid Transit for Decision-Making* (No. FTA-VA-26-7222-2004.1).
35. Chien, S., Yang, Z., & Hou, E. (2001). Genetic algorithm approach for transit route planning and design. *Journal of Transportation Engineering*, 127(3), 200-207.
36. Chien, S. I. J., Ulusoy, Y. Y., & Wei, C. H. (2010). Integrated transit services for minimum cost operation considering heterogeneous demand. *Transportation Planning and Technology*, 33(7), 605-624.
37. Currie, G., & Delbosc, A. (2014). Assessing Bus Rapid Transit system performance in Australasia. *Research in Transportation Economics*, 48, 142-151.
38. Dixon, K., & Brown, L. (2014). Assessing how drivers of through vehicles react to driveway activity. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2404), 77-84.
39. El-Shawarby, I., Rakha, H., Amer, A., & McGhee, C. (2011). Impact of driver and surrounding traffic on vehicle deceleration behavior at onset of yellow indication. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2248), 10-20.
40. Fan, W., & Machemehl, R. B. (2004). *Optimal transit route network design problem: Algorithms, implementations, and numerical results*. Tech. Rep. No. SWUTC/04/167244-1, Center for Transportation Research, University of Texas.
41. Fan, W., & Machemehl, R. B. (2006). Optimal transit route network design problem with variable transit demand: genetic algorithm approach. *Journal of Transportation Engineering*, (132), 40-51.
42. Farahani, R. Z., Miandoabchi, E., Szeto, W. Y., & Rashidi, H. (2013). A review of urban transportation network design problems. *European Journal of Operational Research*, 229(2), 281-302.
43. Gates, T., Noyce, D., Bill, A., & Van Ee, N. (2006). Recommended walking speeds for timing of pedestrian clearance intervals based on characteristics of

- the pedestrian population. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1982), 38-47.
44. Georgiadis, G., Politis, I., & Papaioannou, P. (2014). Measuring and improving the efficiency and effectiveness of bus public transport systems. *Research in Transportation Economics*, 48, 84-91.
 45. Guihaire, V., & Hao, J. K. (2008). Transit network design and scheduling: A global review. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(10), 1251-1273.
 46. Han, A. F., & Wilson, N. H. (1982). The allocation of buses in heavily utilized networks with overlapping routes. *Transportation Research Part B: Methodological*, 16(3), 221-232.
 47. Hoback, A., Anderson, S., & Dutta, U. (2008). True walking distance to transit. *Transportation Planning and Technology*, 31(6), 681-692.
 48. J. H. Holland. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. Ann Arbor, MI: The University of Michigan Press.
 49. Jain, A., Gupta, A., & Rastogi, R. (2014). Pedestrian Crossing Behaviour Analysis at Intersections. *International Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 4(1), 103-116.
 50. Janosikova, L., Slavik, J., & Kohani, M. (2014). Estimation of a route choice model for urban public transport using smart card data. *Transportation Planning and Technology*, 37(7), 638-648.
 51. Jiang, Y., Zengras, P. C., & Mehndiratta, S. (2012). Walk the line: station context, corridor type and bus rapid transit walk access in Jinan, China. *Journal of Transport Geography*, 20(1), 1-14.
 52. Jun, C., & Dongyuan, Y. (2013). Estimating Smart Card Commuters Origin-Destination Distribution Based on APTS Data. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 13(4), 47-53.
 53. Kalantari, N., Zamanian, M. H., & Amiripour, S. M. M. (2014). Bus Network Modification Problem: A New Approach to Bus Network Design. In *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting* (No. 14-4310).
 54. Kepaptsoglou, K., & Karlaftis, M. (2009). Transit route network design problem: review. *Journal of transportation engineering*, 135(8), 491-505.

55. Kimpel, T. J., Dueker, K. J., & El-Geneidy, A. M. (2007). Using GIS to measure the effect of overlapping service areas on passenger boardings at bus stops. *Urban and Regional Information Systems Association Journal*, 19(1), 5-11.
56. Kurauchi, F., Schmöcker, J. D., Shimamoto, H., & Hassan, S. M. (2014). Variability of commuters' bus line choice: an analysis of oyster card data. *Public Transport*, 6(1-2), 21-34.
57. Lam, W., & Morrall, J. (1981, September). Bus passenger walking distances and waiting times: a summer-winter comparison. In *RTAC Annual Conference Preprints* (Vol. 1).
58. Lee, Y. -J. (1998). *Analysis and optimization of transit network design with integrated routing and scheduling* (Doctoral dissertation, University of Pennsylvania).
59. Lee, Y. -J., Shariat, S., & Choi, K. (2014). Optimizing Skip-Stop Rail Transit Stopping Strategy using a Genetic Algorithm. *Journal of Public Transportation*, 17(2), 163-192.
60. Leiva, C., Munoz, J. C., Giesen, R., & Larrain, H. (2010). Design of limited-stop services for an urban bus corridor with capacity constraints. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(10), 1186-1201.
61. Morency, C., Trepanier, M., & Agard, B. (2007). Measuring transit use variability with smart-card data. *Transport Policy*, 14(3), 193-203.
62. Nassir, N., Khani, A., Lee, S., Noh, H., & Hickman, M. (2011). Transit stop-level origin-destination estimation through use of transit schedule and automated data collection system. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2263), 140-150.
63. Nayeem, M. A., Rahman, M. K., & Rahman, M. S. (2014). Transit network design by genetic algorithm with elitism. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 46, 30-45.
64. Nishiuchi, H., King, J., & Todoroki, T. (2013). Spatial-temporal daily frequent trip pattern of public transport passengers using smart card data. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 11(1), 1-10.
65. O'Sullivan, S., & Morrall, J. (1996). Walking distances to and from light-rail transit stations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation*

- Research Board*, (1538), 19-26.
66. Pattnaik, S. B., Mohan, S., & Tom, V. M. (1998). Urban bus transit route network design using genetic algorithm. *Journal of Transportation Engineering*, 124(4), 368-375.
 67. Robinson, S. (2013). Measuring Bus Stop Dwell Time and Time Lost Serving Stop with London iBus Automatic Vehicle Location Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2352), 68-75.
 68. Ryus, P., A. Danaher, M. Walker, F. Nichols, W. Carter, E. Ellis, L. Cherrington, & A. Bruzzone. (2013). *TCRP Report 165: Transit Capacity and Quality of Service Manual*. Transportation Research Board, Washington, D.C., Rep. TCRP Report, No. 165, Chapter 3.
 69. Schwarcz, S. (2004). *Service design for heavy demand corridors: limited-stop bus service* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
 70. Sheth, C., Triantis, K., & Teodorovic, D. (2007). Performance evaluation of bus routes: A provider and passenger perspective. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(4), 453-478.
 71. Shimamoto, H., Murayama, N., Fujiwara, A., & Zhang, J. (2010). Evaluation of an existing bus network using a transit network optimisation model: a case study of the Hiroshima City Bus network. *Transportation*, 37(5), 801-823.
 72. Songchitruksa, P., Ullman, G. L., & Pike, A. M. (2010). Guidance for Cost-Effective Selection of Pavement Marking Materials for Work Zones. *Journal of Infrastructure Systems*, 17(2), 55-65.
 73. Sun, C., Zhou, W., & Wang, Y. (2008). Scheduling combination and headway optimization of bus rapid transit. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 8(5), 61-67.
 74. Synder, D. (1989). Speeding, coordination, and the 55-mph limit: Comment. *The American Economic Review*, 79, 922-925.
 75. Tao, S., Corcoran, J., Mateo-Babiano, I., & Rohde, D. (2014). Exploring Bus Rapid Transit passenger travel behaviour using big data. *Applied Geography*, 53, 90-104.
 76. Taoka, G. T. (1989). Brake reaction times of unalerted drivers. *ITE journal*, 59(3), 19-21.
 77. Tetreault, P. R., & El-Geneidy, A. M. (2010). Estimating bus run times for

- new limited-stop service using archived AVL and APC data. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(6), 390-402.
78. Ulusoy, Y., Chien, S., & Wei, C. H. (2010). Optimal all-stop, short-turn, and express transit services under heterogeneous demand. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2197), 8-18.
79. Wang, W. (2010). *Bus passenger origin-destination estimation and travel behavior using automated data collection systems in London, UK* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
80. Yan, Y., Liu, Z., Meng, Q., & Jiang, Y. (2013). Robust optimization model of bus transit network design with stochastic travel time. *Journal of Transportation Engineering*, 139(6), 625-634.
81. Yu, B., Yang, Z., & Yao, J. (2009). Genetic algorithm for bus frequency optimization. *Journal of Transportation Engineering*, 136(6), 576-583.
82. Zimmerman, K., Bonneson, J., Middleton, D., & Abbas, M. (2003). Improved detection and control system for isolated high-speed signalized intersections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1856), 212-219.

부 록

1. 총통행시간 최소화 목적함수의 코딩 내역

```
1 function DayTT = TotalTravelTimeVeh(y)
2
3 global vehA;
4 load ODpeak;
5 load ODnonpeak;
6 load T;
7
8 y(:,78)=0;
9
10 OD1=ODpeak/4;
11 OD2=ODnonpeak/15;
12
13 TotalVehA=15;
14 vehB=round(vehA*0.75);
15 TotalVehB=round(TotalVehA*0.75);
16
17 x = [y(1:73) y(68:-1:64) y(74) y(63:-1:58) y(55) y(75) y(54) y(52:-1:50)
18 y(48:-1:47) y(76) y(46:-1:31) y(29:-1:8) y(77) y(7:-1:3) y(1)];
19
20 OnOffTime1 = OnOffTime(OD1,TotalVehA,vehA);
21 OnOffTime2 = OnOffTime(OD2,TotalVehB,vehB);
22
23 RapidT1 = RapidTT(OD1,T,x,OnOffTime1);
24 RapidT2 = RapidTT(OD2,T,x,OnOffTime2);
25
26 [OD1, AddT1] = ConvertOD(OD1,T,x,TotalVehA,vehA,RapidT1,OnOffTime1);
27 [OD2, AddT2] = ConvertOD(OD2,T,x,TotalVehB,vehB,RapidT2,OnOffTime2);
28
29 PTT = HourTravelTime(OD1,T,x,TotalVehA,vehA,RapidT1,OnOffTime1);
30 NPPT = HourTravelTime(OD2,T,x,TotalVehB,vehB,RapidT2,OnOffTime2);
31
32 DayTT = 4*(PTT+AddT1) + 15*(NPPT+AddT2);
```


2. 총비용 최소화 목적함수의 코딩 내역

```

1 function DayCost = TotalTravelTimeVeh(y)
2
3 global vehA;
4 load ODpeak;
5 load ODnonpeak;
6 load T;
7
8 y(:,78)=0;
9
10 OD1=ODpeak/4;
11 OD2=ODnonpeak/15;
12
13 TotalVehA=15;
14 vehB=round(vehA*0.75);
15 TotalVehB=round(TotalVehA*0.75);
16
17 x = [y(1:73) y(68:-1:64) y(74) y(63:-1:58) y(55) y(75) y(54) y(52:-1:50)
18 y(48:-1:47) y(76) y(46:-1:31) y(29:-1:8) y(77) y(7:-1:3) y(1)];
19
20 OnOffTime1 = OnOffTime(OD1,TotalVehA,vehA);
21 OnOffTime2 = OnOffTime(OD2,TotalVehB,vehB);
22
23 RapidT1 = RapidTT(OD1,T,x,OnOffTime1);
24 RapidT2 = RapidTT(OD2,T,x,OnOffTime2);
25
26 [OD1, AddT1] = ConvertOD(OD1,T,x,TotalVehA,vehA,RapidT1,OnOffTime1);
27 [OD2, AddT2] = ConvertOD(OD2,T,x,TotalVehB,vehB,RapidT2,OnOffTime2);
28
29 PTT = HourTravelTime(OD1,T,x,TotalVehA,vehA,RapidT1,OnOffTime1);
30 NPTT = HourTravelTime(OD2,T,x,TotalVehB,vehB,RapidT2,OnOffTime2);
31
32 VehSavedT1 = VehSavedTT(x,vehA,OnOffTime1);
33 VehSavedT2 = VehSavedTT(x,vehB,OnOffTime2);
34
35 DayCost = 4*(PTT+AddT1)*VOT-VehSavedT1*VehCost+HVehCost*TotalVehA +
36 15*(NPTT+AddT2)*VOT-VehSavedT2*VehCost+HVehCost*TotalVehB

```

3. 정류장별 승하차 소요시간 계산 함수의 코딩 내역

```
1 function OnOffTime=OnOffTime(OD,TotalVeh,vehA)
2
3 OnOffTime(:,size(OD,1))=0;
4 for k=1:size(OD,1)
5     sumA = sum(OD(k,:))/(TotalVeh-vehA)*2.3;
6     sumB = sum(OD(:,k))/(TotalVeh-vehA)*2;
7     OnOffTime(1,k)=max(sumA,sumB);
8 end
```

4. 급행버스 정류장간 통행시간 계산 함수의 코딩 내역

```
1 function RapidT = RapidTT(OD,T,x,OnOffTime)
2
3 RapidT(size(OD,1),size(OD,2))=0;
4 for i=1:size(OD,1)
5     for j=(i+1):size(OD,2)
6         for k=i:(j-1)
7             if x(:,k)==1
8                 RapidT(i,j)=RapidT(i,j)+T(1,k)/60+OnOffTime(1,k)/60;
9             else
10                 RapidT(i,j)=RapidT(i,j)+T(1,k)/60-(11.6+sum(1:93)/162
11                     -sum(1:(93-max(0,round(OnOffTime(1,k)+11.6))))/162)/60;
12             end
13         end
14     end
15 end
16
17 IntDelay = sum(1:93)/162/60;
18
19 if x(23)+x(24)==0
20     for i=1:22
21         for j=25:size(OD,2)
22             RapidT(i,j)=RapidT(i,j)-2*IntDelay;
23         end
24     end
25 end
```

5. 승하차 정류장 전환 계산 함수의 코딩 내역

```

1 function [ConvtoOD, WalkAddT] = ConvertOD(OD,T,x,TotalVeh,vehA,RapidT,
2 OnOffTime)
3 VOTacc=1.527; VOTwait=1.832; VOTtrf=1.370;
4 load DIST;
5 WalkSpeed=5000/60; WalkAddT=0;
6 ConvtoOD=OD;
7 for i=1:size(OD,1)
8     for j=(i+1):size(OD,2)
9         if OD(i,j)==0
10            elseif x(:,i)==0 && x(:,j)==0
11                TSUM1 = 60/(TotalVeh-vehA)/2*VOTwait;
12                for k=i:(j-1)
13                    TSUM1=TSUM1+T(1,k)/60+OnOffTime(1,k)/60;
14                end
15                TSUM2 = 60/(TotalVeh-vehA)/2*VOTwait + (60/vehA/2 +
16                60/(TotalVeh-vehA)/2)*VOTtrf;
17                m=i;
18                while x(:,m)<1
19                    m=m+1;
20                    if m==j
21                        TSUM2=TSUM2*1000;
22                        break
23                    end
24                end
25                n=j;
26                while x(:,n)<1
27                    n=n-1;
28                    if n==i
29                        TSUM2=TSUM2*1000;
30                        break
31                    end
32                end
33                for k=1:(m-1)
34                    TSUM2=TSUM2+T(1,k)/60+OnOffTime(1,k)/60;
35                end
36                TSUM2=TSUM2+RapidT(m,n);
37                for k=n:(j-1)
38                    TSUM2=TSUM2+T(1,k)/60+OnOffTime(1,k)/60;
39                end

```

```

40     if sum(DIST(i:(m-1)))>1000
41         TSUM3=1000000;
42     else
43         Walk3=((sum(DIST(i:(m-1)))/2+500)/2-DIST(i)/4)
44         /WalkSpeed;
45         if i==1 && (sum(DIST(i:(m-1)))+DIST(i)/2)<500
46             CHGRate3=1;
47         elseif i==1
48             CHGRate3=(500-sum(DIST(i:(m-1)))/2)/
49             (sum(DIST(i:(m-1)))/2+DIST(i)/2);
50         elseif (sum(DIST(i:(m-1)))+sum(DIST((i-1):i))/2)<500
51             CHGRate3=1;
52         else
53             CHGRate3=(500-sum(DIST(i:(m-1)))/2)/
54             (sum(DIST(i:(m-1)))/2+sum(DIST((i-1):i))/2);
55         end
56         TSUM3=60/vehA/2*VOTwait+Walk3*VOTacc;
57         TSUM3=TSUM3+RapidT(m,n);
58     for k=n:(j-1)
59         TSUM3=TSUM3+T(1,k)/60+OnOffTime(1,k)/60;
60     end
61 end
62
63 if sum(DIST(n:(j-1)))>1000
64     TSUM4=1000000;
65 else
66     Walk4=((sum(DIST(n:(j-1)))/2+500)/2-DIST(j)/4)
67     /WalkSpeed;
68     if (sum(DIST(n:(j-1)))+sum(DIST((j-1):j))/2)<500
69         CHGRate4=1;
70     else
71         CHGRate4=(500-sum(DIST(n:(j-1)))/2)/
72         (sum(DIST(n:(j-1)))/2+sum(DIST((j-1):j))/2);
73     end
74     TSUM4=60/vehA/2*VOTwait+Walk4*VOTacc;
75     for k=1:(m-1)
76         TSUM4=TSUM4+T(1,k)/60+OnOffTime(1,k)/60;
77     end
78     TSUM4=TSUM4+RapidT(m,n);
79 end

```

```

80         if min([TSUM1,TSUM2,TSUM3,TSUM4])==TSUM3
81             ConvtOD(m,j)=ConvtOD(m,j)+ConvtOD(i,j)*CHGRate3;
82             WalkAddT=WalkAddT+ConvtOD(i,j)*CHGRate3*Walk3;
83             ConvtOD(i,j)=ConvtOD(i,j)*(1-CHGRate3);
84         elseif min([TSUM1,TSUM2,TSUM3,TSUM4])==TSUM4
85             ConvtOD(i,n)=ConvtOD(i,n)+ConvtOD(i,j)*CHGRate4;
86             WalkAddT=WalkAddT+ConvtOD(i,j)*CHGRate4*Walk4;
87             ConvtOD(i,j)=ConvtOD(i,j)*(1-CHGRate4);
88         end
89
90     elseif x(:,i)==1 && x(:,j)==0
91         TSUM1=60/vehA/2*VOTwait+60/(TotalVeh-vehA)/2*VOTtrf;
92         m=j;
93         while x(:,m)<1
94             m=m-1;
95             if m==i
96                 TSUM1=TSUM1*1000;
97                 break
98             end
99         end
100         TSUM1=TSUM1+RapidT(i,m);
101         for k=m:(j-1)
102             TSUM1=TSUM1+T(1,k)/60+OnOffTime(1,k)/60;
103         end
104
105         TSUM2=60/(TotalVeh-vehA)/2*VOTwait;
106         for k=i:(j-1)
107             TSUM2=TSUM2+T(1,k)/60+OnOffTime(1,k)/60;
108         end
109         if sum(DIST(m:(j-1)))>1000
110             TSUM3=1000000;
111         else
112             Walk3=((sum(DIST(m:(j-1)))/2+500)/2-DIST(j)/4)
113             /WalkSpeed;
114             if (sum(DIST(m:(j-1)))+sum(DIST((j-1):j))/2)<500
115                 CHGRate3=1;
116             else
117                 CHGRate3=(500-sum(DIST(m:(j-1)))/2)/
118                 (sum(DIST(m:(j-1)))/2+sum(DIST((j-1):j))/2);
119             end

```

```

120         TSUM3=60/vehA/2*VOTwait+Walk3*VOTacc;
121         TSUM3=TSUM3+RapidT(i,m);
122     end
123
124     if min([TSUM1,TSUM2,TSUM3])==TSUM3
125         ConvtoD(i,m)=ConvtoD(i,m)+ConvtoD(i,j)*CHGRate3;
126         ConvtoD(i,j)=ConvtoD(i,j)*(1-CHGRate3);
127         WalkAddT=WalkAddT+ConvtoD(i,j)*CHGRate3*Walk3;
128     end
129
130     elseif x(:,i)==0 && x(:,j)==1
131         TSUM1=60/vehA/2*VOTtrf+60/(TotalVeh-vehA)/2*VOTacc;
132         m=i;
133         while x(:,m)<1
134             m=m+1;
135             if m==j
136                 TSUM1=TSUM1*1000;
137                 break
138             end
139         end
140
141         for k=1:(m-1)
142             TSUM1=TSUM1+T(1,k)/60+OnOffTime(1,k)/60;
143         end
144         TSUM1=TSUM1+RapidT(m,j);
145
146         TSUM2=60/(TotalVeh-vehA)/2*VOTwait;
147         for k=i:(j-1)
148             TSUM2=TSUM2+T(1,k)/60+OnOffTime(1,k)/60;
149         end
150         if sum(DIST(i:(m-1)))>1000
151             TSUM3=1000000;
152         else
153             Walk3=((sum(DIST(i:(m-1)))/2+500)/2-DIST(i)/4)
154             /WalkSpeed;
155             if i==1 && (sum(DIST(i:(m-1)))+DIST(i)/2)<500
156                 CHGRate3=1;

```

```

157         elseif i==1
158             CHGRate3=(500-sum(DIST(i:(m-1)))/2)/
159                 (sum(DIST(i:(m-1)))/2+DIST(i)/2);
160         elseif (sum(DIST(i:(m-1)))+sum(DIST((i-1):i))/2)<500
161             CHGRate3=1;
162         else
163             CHGRate3=(500-sum(DIST(i:(m-1)))/2)/
164                 (sum(DIST(i:(m-1)))/2+sum(DIST((i-1):i))/2);
165         end
166         TSUM3=60/vehA/2*VOTwait+Walk3*VOTacc;
167         TSUM3=TSUM3+RapidT(m,j);
168     end
169
170     if min([TSUM1,TSUM2,TSUM3])==TSUM3
171         ConvtOD(m,j)=ConvtOD(m,j)+ConvtOD(i,j)*CHGRate3;
172         WalkAddT=WalkAddT+ConvtOD(i,j)*CHGRate3*Walk3;
173         ConvtOD(i,j)=ConvtOD(i,j)*(1-CHGRate3);
174     end
175 end
176 end
177 end

```

6. 1시간 O/D에 대한 총 승객통행시간 계산 함수의 코딩 내역

```

1 function TT = HourTravelTime(OD,T,x,TotalVeh,vehA,RapidT,OnOffTime)
2
3 VOTwait=1.832; VOTtrf=1.370;
4 hdwyA=60/vehA;
5 vehL=TotalVeh-vehA;
6 hdwyL=60/vehL;
7
8 T=0;
9 for i=1:size(OD,1)
10     for j=(i+1):size(OD,2)
11         if OD(i,j)==0
12             elseif x(:,i)==0 && x(:,j)==0
13                 TSUM1=60/(TotalVeh-vehA)/2*VOTwait;
14                 for k=i:(j-1)
15                     TSUM1=TSUM1+T(1,k)/60+OnOffTime(1,k)/60;
16                 end

```

```

17 TSUM2 = 60/(TotalVeh-vehA)/2*VOTwait + (60/vehA/2 +60/(TotalVeh-
18 vehA)/2)*VOTtrf;
19 m=i;
20 while x(:,m)<1
21     m=m+1;
22     if m==j
23         TSUM2=TSUM2*100000;
24         break
25     end
26 end
27 n=j;
28 while x(:,n)<1
29     n=n-1;
30     if n==i
31         TSUM2=TSUM2*100000;
32         break
33     end
34 end
35 for k=1:(m-1)
36     TSUM2=TSUM2+T(1,k)/60+OnOffTime(1,k)/60;
37 end
38 TSUM2=TSUM2+RapidT(m,n);
39 for k=n:(j-1)
40     TSUM2=TSUM2+T(1,k)/60+OnOffTime(1,k)/60;
41 end
42 if (TSUM1-TSUM2)>0 && (TSUM1-TSUM2)<hdwyL/2
43     p1=(vehL/TotalVeh)*(hdwyL/2-(TSUM1-TSUM2))/hdwyL;
44 elseif (TSUM2-TSUM1)>0 && (TSUM2-TSUM1)<hdwyL/2
45     p1=1-((vehL/TotalVeh)*(hdwyL/2-(TSUM2-TSUM1))/hdwyL);
46 elseif (TSUM1-TSUM2)>=hdwyL/2
47     p1=0;
48 else
49     p1=1;
50 end
51 p2=1-p1;
52 TSUM=p1*TSUM1+p2*TSUM2;
53 TTT= OD(i,j)*TSUM;
54 TT=TT+TTT;
55 elseif x(:,i)==1 && x(:,j)==1
56     TSUM1=60/(TotalVeh-vehA)/2*VOTwait;

```



```

57     for k=i:(j-1)
58         TSUM1=TSUM1+T(1,k)/60+OnOffTime(1,k)/60;
59     end
60     TSUM2=60/vehA/2*VOTwait+RapidT(i,j);
61     if (TSUM1-TSUM2)>0 && (TSUM1-TSUM2)<hdwyA/2
62         p1=(vehL/TotalVeh)*(hdwyA/2-(TSUM1-TSUM2))/hdwyL;
63     elseif (TSUM2-TSUM1)>0 && (TSUM2-TSUM1)<hdwyL/2
64         p1=1-((vehA/TotalVeh)*(hdwyL/2-(TSUM2-TSUM1))/hdwyA);
65     elseif (TSUM1-TSUM2)>=hdwyA/2
66         p1=0;
67     else
68         p1=1;
69     end
70     p2=1-p1;
71     TSUM=p1*TSUM1+p2*TSUM2;
72     TTT= OD(i,j)*TSUM;
73     TT=TT+TTT;
74
75     elseif x(:,i)==1
76         m=j;
77         while x(:,m)<1
78             m=m-1;
79         end
80         TSUM1=60/vehA/2*VOTwait+60/(TotalVeh-vehA)/2*VOTtrf;
81         TSUM1=TSUM1+RapidT(i,m);
82         for k=m:(j-1)
83             TSUM1=TSUM1+T(1,k)/60+OnOffTime(1,k)/60;
84         end
85
86         TSUM2=60/(TotalVeh-vehA)/2*VOTwait;
87         for k=i:(j-1)
88             TSUM2=TSUM2+T(1,k)/60+OnOffTime(1,k)/60;
89         end
90         if (TSUM1-TSUM2)>0 && (TSUM1-TSUM2)<hdwyA/2
91             p1=(vehL/TotalVeh)*(hdwyA/2-(TSUM1-TSUM2))/hdwyL;
92         elseif (TSUM2-TSUM1)>0 && (TSUM2-TSUM1)<hdwyA/2
93             p1=1-((vehA/TotalVeh)*(hdwyL/2-(TSUM2-TSUM1))/hdwyA);
94         elseif (TSUM1-TSUM2)>=hdwyA/2
95             p1=0;
96         else
97             p1=1;

```

```

98         end
99         p2=1-p1;
100         TSUM=p1*TSUM1+p2*TSUM2;
101         TTT= OD(i,j)*TSUM;
102         TT=TT+TTT;
103
104     else
105         m=i;
106         while x(:,m)<1
107             m=m+1;
108         end
109
110         TSUM1=60/vehA/2*VOTtrf+60/(TotalVeh-vehA)/2*VOTwait;
111
112         for k=1:(m-1)
113             TSUM1=TSUM1+T(1,k)/60+OnOffTime(1,k)/60;
114         end
115         TSUM1=TSUM1+RapidT(m,j);
116
117         TSUM2=60/(TotalVeh-vehA)/2*VOTwait;
118         for k=i:(j-1)
119             TSUM2=TSUM2+T(1,k)/60+OnOffTime(1,k)/60;
120         end
121         if (TSUM1-TSUM2)>0 && (TSUM1-TSUM2)<hdwyL/2
122             p1=(vehL/TotalVeh)*(hdwyL/2-(TSUM1-TSUM2))/hdwyL;
123         elseif (TSUM2-TSUM1)>0 && (TSUM2-TSUM1)<hdwyL/2
124             p1=1-(vehL/TotalVeh)*(hdwyL/2-(TSUM2-TSUM1))/hdwyL;
125         elseif (TSUM1-TSUM2)>=hdwyL/2
126             p1=0;
127         else
128             p1=1;
129         end
130         p2=1-p1;
131         TSUM=p1*TSUM1+p2*TSUM2;
132         TTT= OD(i,j)*TSUM;
133         TT=TT+TTT;
134
135     end
136 end
137 end

```

7. 차량 운행시간 절감분 계산 함수의 코딩 내역

```

1 function VehSavedT = VehSavedTT(x, vehA, OnOffTime)
2
3 VehSavedT=0;
4 for k=1:size(x,2)
5     if x(k)==0
6         VehSavedT=VehSavedT+(OnOffTime(1,k)+11.6+sum(1:93)/162-
7             sum(1:(93-max(0,round(OnOffTime(1,k)+11.6))))/162)/60;
8     end
9 end
10
11 IntDelay = sum(1:93)/162/60;
12
13 if x(23)+x(24)==0
14     VehSavedT=VehSavedT+2*IntDelay;
15 end
16
17 <각 고가/지하차도에 대하여 줄 13~15 반복>
18
19 VehSavedT=VehSavedT*vehA;

```

8. 시나리오별 가상 OD 생성 코딩 내역

```

1 load ODScn;
2 folder = 'D:\MATLAB\ODScn\';
3
4 for i=1:size(ODScn(:,1))
5     clear OD1;
6     OD1(ODScn(i,2),ODScn(i,2))=0;
7     Tot=ODScn(i,3);
8
9     for j=1:(ODScn(i,2)-1)
10         Trips=-1;
11         while Trips<0.5 || Trips>=(Tot+0.5)
12             Trips=random('normal',(Tot/(ODScn(i,2)-1))*
13                 (1.25-(j/((ODScn(i,2)-1)*2))), (ODScn(i,2)-1)/5);
14         end
15         Trips=round(Trips);
16         for k=1:Trips
17             Trip=-1;

```

```

18         if ODScn(i,2)-j > ODScn(i,4)
19
20             Trip=random('normal',ODScn(i,4),(ODScn(i,4)/j));
21         end
22     else
23         while Trip<0.5 || Trip>=(ODScn(i,2)-j+0.5)
24             Trip=random('normal',(ODScn(i,2)-j),(ODScn(i,4)/j));
25         end
26     end
27     Trip=round(Trip);
28     OD1(j,(j+Trip))=OD1(j,(j+Trip))+1;
29 end
30 end
31 filename = sprintf('%sODScn_Route%d_Scn%d',folder,i,1);
32 save(filename,'OD1');
33
34 clear OD2;
35 OD2(ODScn(i,2),ODScn(i,2))=0;
36 Rsv=round(ODScn(i,3)*0.3);
37 Rmn=ODScn(i,3)-Rsv;
38 for j=1:(ODScn(i,2)-1)
39     Trips=-1;
40     while Trips<0.5 || Trips>=(Rmn+0.5)
41         Trips=random('normal',(Rmn/(ODScn(i,2)-1))*
42             (1.25-(j/((ODScn(i,2)-1)*2))), (ODScn(i,2)-1)/5);
43     end
44     Trips=round(Trips);
45     for k=1:Trips
46         Trip=-1;
47         if ODScn(i,2)-j > ODScn(i,4)
48             while Trip<0.5 || Trip>=(ODScn(i,2)-j+0.5)
49                 Trip=random('normal',ODScn(i,4),(ODScn(i,4)/j));
50             end
51         else
52             while Trip<0.5 || Trip>=(ODScn(i,2)-j+0.5)
53                 Trip=random('normal',(ODScn(i,2)-j),
54                     (ODScn(i,4)/j));
55             end
56         end
57         Trip=round(Trip);
58         OD2(j,(j+Trip))=OD2(j,(j+Trip))+1;

```

```

59     end
60 end
61
62 Trips=Rsv/2;
63 for k=1:Trips
64     Trip=-1;
65     HVYstop=round(ODScn(i,2)/3);
66     while Trip<0.5 || Trip>=(ODScn(i,2)-HVYstop+0.5)
67         Trip=random('normal',ODScn(i,4),(ODScn(i,4)/HVYstop));
68     end
69     Trip=round(Trip);
70     OD2(HVYstop,(HVYstop+Trip))=OD2(HVYstop,(HVYstop+Trip))+1;
71     Trip=-1;
72     HVYstop=round(ODScn(i,2)/3*2);
73     while Trip<0.5 || Trip>=(HVYstop-0.5)
74         Trip=random('normal',ODScn(i,4),(ODScn(i,4)/
75             (HVYstop-ODScn(i,4))));
76     end
77     Trip=round(Trip);
78     OD2((HVYstop-Trip),HVYstop)=OD2((HVYstop-Trip),HVYstop)+1;
79 end
80 filename = sprintf('%sODScn_Route%d_Scn%d',folder,i,2);
81 save(filename,'OD2');
82
83 clear OD3;
84 OD3(ODScn(i,2),ODScn(i,2))=0;
85 Rsv=round(ODScn(i,3)*0.4);
86 Rmn=ODScn(i,3)-Rsv;
87 for j=1:(ODScn(i,2)-1)
88     Trips=-1;
89     while Trips<0.5 || Trips>=(Rmn+0.5)
90         Trips=random('normal',(Rmn/(ODScn(i,2)-1))*
91             (1.25-(j/((ODScn(i,2)-1)*2))), (ODScn(i,2)-1)/5);
92     end
93     Trips=round(Trips);
94     for k=1:Trips
95         Trip=-1;
96         if ODScn(i,2)-j > ODScn(i,4)
97             while Trip<0.5 || Trip>=(ODScn(i,2)-j+0.5)
98                 Trip=random('normal',ODScn(i,4),(ODScn(i,4)/j));
99             end

```

```

100     else
101         while Trip<0.5 || Trip>=(ODScn(i,2)-j+0.5)
102             Trip=random('normal', (ODScn(i,2)-j),
103                 (ODScn(i,4)/j));
104         end
105     end
106     Trip=round(Trip);
107     OD3(j, (j+Trip))=OD3(j, (j+Trip))+1;
108 end
109 end
110 Trips=Rsv/4;
111 for k=1:Trips
112     Trip=-1;
113     HVYstop=round(ODScn(i,2)/5);
114     while Trip<0.5 || Trip>=(ODScn(i,2)-HVYstop+0.5)
115         Trip=random('normal', ODScn(i,4), (ODScn(i,4)/HVYstop));
116     end
117     Trip=round(Trip);
118     OD3(HVYstop, (HVYstop+Trip))=OD3(HVYstop, (HVYstop+Trip))+1;
119     Trip=-1;
120     HVYstop=round(ODScn(i,2)/5*4);
121     while Trip<0.5 || Trip>=(HVYstop-0.5)
122         Trip=random('normal', ODScn(i,4), (ODScn(i,4)/
123             (HVYstop-ODScn(i,4))));
124     end
125     Trip=round(Trip);
126     OD3((HVYstop-Trip), HVYstop)=OD3((HVYstop-Trip), HVYstop)+1;
127 end
128
129 for k=1:(Trips/2)
130     Trip=-1;
131     HVYstop=round(ODScn(i,2)/5*2);
132     while Trip<0.5 || Trip>=(ODScn(i,2)-HVYstop+0.5)
133         Trip=random('normal', ODScn(i,4), (ODScn(i,4)/HVYstop));
134     end
135     Trip=round(Trip);
136     OD3(HVYstop, (HVYstop+Trip))=OD3(HVYstop, (HVYstop+Trip))+1;
137     Trip=-1;
138     while Trip<0.5 || Trip>=(HVYstop-0.5)
139         Trip=random('normal', ODScn(i,4), (ODScn(i,4)/
140             (HVYstop-ODScn(i,4))));

```

```

141     end
142     Trip=round(Trip);
143     OD3((HvYstop-Trip),HvYstop)=OD3((HvYstop-Trip),HvYstop)+1;
144     Trip=-1;
145     HvYstop=round(ODScn(i,2)/5*3);
146     while Trip<0.5 || Trip>=(ODScn(i,2)-HvYstop+0.5)
147         Trip=random('normal',ODScn(i,4),(ODScn(i,4)/HvYstop));
148     end
149     Trip=round(Trip);
150     OD3(HvYstop,(HvYstop+Trip))=OD3(HvYstop,(HvYstop+Trip))+1;
151     Trip=-1;
152     while Trip<0.5 || Trip>=(HvYstop-0.5)
153         Trip=random('normal',ODScn(i,4),(ODScn(i,4)/
154             (HvYstop-ODScn(i,4))));
155     end
156     Trip=round(Trip);
157     OD3((HvYstop-Trip),HvYstop)=OD3((HvYstop-Trip),HvYstop)+1;
158 end
159
160 filename = sprintf('%sODScn_Route%d_Scn%d',folder,i,3);
161 save(filename,'OD3');
162
163 end

```

Abstract

Express bus is an emerging form of urban transit service as an alternative to improve the competitiveness of urban public transit. To be a successful system, the careful selection of bus stop, so called here EBSS (Express Bus Stop Selection) is important. In this study, a model and a method that minimize a user's total travel time or total social costs with using bus smart card data has been proposed. Whereas most of the previous studies focused on the reorganization of the entire transit network or the development of new routes, this study proposes an easily applicable solution for bus systems which are currently operating on transit networks. With the solution applied, an improvement of the competitiveness and operating efficiency of public transit without large-scale investment was identified. More specifically, this study 1) develops the EBSS model considering the practical constraints using route and travel data obtained from smart card data, 2) proposes the EBRPA (Express Bus Route Priority Assessment) method which utilizes a multiple regression model that considers the factors that influence operating efficiency, and 3) provides a case study on Suwon city to verify and evaluate the EBSS model and the EBRPA method. With the case study analysis of the EBSS model, travel time per person is reduced as much as 5.3 percent in the case of minimizing total travel time and the total social cost per day of as much as 3.2 million Korean Won is reduced in the case of minimizing total social costs. The method set forth in this study can be utilized as a tool to easily compare the operating efficiency between express bus and normal bus systems. Upon finding the optimal express bus route and operation scheme based on the EBSS model and the EBRPA method, the method is expected to promote the express bus transit service and to contribute to the overall efficiency of any urban transit system.

Keywords: express bus, smart card data, genetic algorithm, route assessment, multiple regression model