

■ 論 文 ■

# 버스승객의 승하차 패턴을 고려한 최적 정류장 수 산정 모형 개발

Development of Optimal Number of Bus-stops Estimation Model Based on On-Off Patterns of Passengers

**강 주 란**

(서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정)

**고 승 영**

(서울대학교 지구환경시스템공학부 교수)

목 차

- I. 서론
  - 1. 연구의 배경 및 목적
  - 2. 연구의 범위 및 방법
- II. 관련연구고찰
  - 1. 사회적 편익 최대화 모형
  - 2. 시스템 총비용 최소화 모형
- III. 모형의 정립
  - 1. 모형의 설정
- 2. 운전자 비용
- 3. 이용자 비용
- IV. 모형의 적용
  - 1. 개요
  - 2. 모형 적용의 결과
- V. 결론
- 참고문헌

Key Words : 승하차수요, 정류장 수, 정류장 간격, 버스 주행시간, 승객 통행시간, 시스템 비용

요 약

현재 우리나라에서는 버스 노선의 정류장 수 및 간격 산정을 위해 전문가의 주관적인 판단에 의존하는 경우가 많다. 좀 더 객관적인 절차를 통해 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해 최적 정류장 수 및 간격을 구하는 기존 모형들을 살펴보았지만 하차수요와 임의적인 수요분포를 고려하지 못한다는 한계점을 안고 있었다. 본 연구는 기존 모형들의 이러한 한계를 인식하고 수요를 승차와 하차로 구분하고 그 분포에 따라 일정한 구간별로 서로 다른 최적 정류장 수와 간격을 탄력적으로 산출해 낼 수 있는 모형을 정립하였다. 정립된 모형을 다양한 수요분포를 가지는 간단한 예제 노선에 적용해본 결과, 승차 혹은 하차수요에 비례하여 구간별 정류장 수가 탄력적으로 산출됨을 알 수 있었다.

At present, Korean many cities depend on subjective judgements of experts to estimate the number of bus-stops and inter-stop space. To get reliable results by using more objective procedure, we search for old studies and models, but they don't concern alighting demands and a random demand distributions. Our study recognize and overcome these limitation. We devide the demand into boarding and alighting demands, and define the model that can estimate flexibly optimal number of bus-stop and inter-stop space on each segment by the demand distribution. Also we apply this new model to a simple example route having various demand distributions. As a result, the number of bus-stop on each segment can be estimate flexibly in proportion to boarding or alighting demand by using this model.

본 연구는 서울대학교 공학연구소의 지원 하에 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## I. 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

현재 우리나라 여러 도시에서 운행 중인 시내버스의 노선 길이, 노선/정류장 간격, 버스운행간격 등의 기본적인 운영요소들은 거의 대부분 전문가들의 주관적인 판단에 의존하여 결정되고 있다. 때에 따라 이 방법은 매우 효율적인 대안이 될 수 있지만 좀더 설득력있는 결과를 얻기 위해서는 체계적이고 객관적인 기법들이 요구되고 있는 것이 사실이다.

2004년 7월에 이루어진 서울시 버스체제개편사업은 그러한 측면에서 좀 더 개선된 기준을 마련해 놓고 있다. 하지만 이 사업은 버스 운영에 관련된 소프트웨어적인 요소에만 집중하는 경향을 보이며, 특히 버스 이용자 편익에 막대한 영향을 미친다고 할 수 있는 정류장 위치에 관한 문제는 이번 사업에서 거의 다루어지지 않았다. 다루어진 경우가 있다 하더라도 정류장 위치를 완전히 이동시키거나 새로이 만드는 일은 없었고 중앙버스전용차로제 시행을 위한 약간의 조정이 전부였다.

이 문제는 장기적으로 봤을 때 이용자에 대한 서비스 수준과 운영 효율성 저하를 초래할 가능성을 내포하고 있다.

이와 같은 정류장 위치선정 문제를 해결할 수 있는 기존 연구의 모형들을 살펴보았을 때 몇 가지 한계점을 발견할 수 있었다. 첫째로 노선 전체에 걸쳐 수요가 연속적으로 균일하게 분포한다는 가정을 사용함으로써, 가정 자체로도 비현실성을 내포하고 있지만 결과로 얻어지는 정류장 간격도 노선 내에서 모두 동일해지게 된다. 둘째로 승차와 하차수요가 서로 다르게 분포하고 있음에도 불구하고 승차수요만을 중심으로 모형을 설계하고 있는 한계가 있다. 만약 노선의 승하차수요의 차가 큰 경우 정류장에서 버스가 정차하는 시간은 실제보다 과소 혹은 과대 추정해 내는 정도가 커지기 때문에 심각한 문제로 제기될 수 있다.

본 연구는 버스의 기본적인 운영요소들 중에서도 이용자에 대한 서비스 수준과 직결되는 중요한 요인 중 하나인 정류장 수를 산정해 내는 모형을 개발하는데 목적을 둔다. 동시에 개발될 모형은 버스 운영요소 산정에 관한 기존 모형들이 가지고 있는 수요 설정의 한계성을 극복하여, 수요를 승차와 하차로 구분하고 그 분

포에 따라 서로 다른 최적 정류장 수를 탄력적으로 산출해 낼 수 있도록 한다.

### 2. 연구의 범위 및 방법

정류장 수의 변화는 버스의 운영에 관련된 거의 모든 요소들에 영향을 미치게 된다. 하지만 그 중에서도 버스의 정류장 정차시간은 정류장 수와 비례관계에, 승객의 정류장/목적지 접근시간은 반비례관계에 있으면서 직접적인 영향을 주고받는다.

본 연구는 정류장 수에 따른 이러한 버스과 승객의 통행시간 변화에 주목하여, 통행시간을 기초로 한 시스템 비용 모형을 정립하고 비용을 최소화할 수 있는 최적 정류장 수 산정 모형을 구성하는데 초점을 맞춘다.

우선 대중교통수단의 기본적인 버스 운영요소들을 산정해 낼 수 있는 모형들을 개발한 관련연구들을 살펴보고 기존 모형들의 특징과 문제점을 제시한다. 여기서 제시된 문제점을 바탕으로 노선을 따라 임의적으로 분포하고 있는 승하차 수요를 모두 고려할 수 있는 정류장 수 산정 모형을 정립하고 이를 예제 노선에 적용하여 모형을 분석, 평가한다.

## II. 관련연구고찰

대중교통 운영계획 중 첫 번째 단계인 노선설계는 대중교통 네트워크를 구체적으로 설정하는 단계로 주로 하드웨어적 요소들을 결정하게 된다. 이를 위해 주로 사용하는 방법은 바로 수학적 프로그래밍(mathematical programming) 기법이다. 이 기법을 이용한 모형에서 무엇보다 중요한 것은 목적함수의 구성방법으로, 그 이유는 모형을 만든 사람과 이용하는 사람이 어떤 가치를 더 중요하게 여기는지 직접적으로 반영할 수 있는 것이 목적함수이고 그 구성에 따라 결과값이 크게 달라지기 때문이다.

R. van Nes와 P. H. L. Bovy(2000)는 승객과 운영자, 그리고 정부 각각의 입장을 고려한 목적함수 정립에 대한 연구를 수행하였다. 일반적으로 승객은 대중교통 이용을 통해 접근시간과 대기시간, 이동시간을 포함한 총 통행시간을 최소화하려 하고 운영자는 이윤의 극대화, 정부는 대중교통 시스템 총비용의 최소화, 혹은 사회적 편익 최대화를 목표로 한다. 연구는 이 세 관점에서 생각할 수 있는 6가지 목적함수를 정립하고 목적함수에 따라 여

러 지표 값들을 산출해 내어 그 성능을 평가하였다.

사회적인 관점에서 생각했을 때 대중교통을 통해 얻어지는 효과는 사회 구성원 모두가 직접적이든 간접적이든 경험하게 되는 비용과 편익이다. 따라서 대중교통 운영요소 산정 모형의 목적함수는 운영자와 이용자 모두의 비용과 편익을 더한 것으로 정의되는 것이 옳다.

기존 연구들은 이러한 바탕아래 사회적 비용과 편익을 목적함수로 하는 모형들을 사회적 편익 최대화와 대중교통 시스템 총비용 최소화를 기준으로 구분한다. 본 논문 또한 그 기준에 따라 기존 연구고찰을 수행한다.

### 1. 사회적 편익 최대화 모형

사회적 편익 최대화 모형은 소비자잉여와 생산자잉여의 합으로 이루어진 사회적 편익을 최대화 할 수 있는 운영요소들을 산출해 낸다.

P. G. Furth와 H. M. Wilson Nigel(1981)은 보조금과 차량보유대수, 차량의 승객부하수준의 제약을 만족하면서 순사회적 편익을 최대화시킬 수 있는 노선의 버스 운행간격을 찾는 모형을 개발하였다. 여기서 순사회적 편익이란 이용자의 대기시간 절약을 나타내는 소비자잉여와 외부효과를 더한 것이다. R. H. Oldfield와 P. H. Bly(1988)의 연구는 외부편익과 외부비용의 합에서 보조금을 뺀 순사회적 편익의 극대화를 목적함수로 설정하고 승객의 일반통행비용과 재정적 조건에 관련된 제약조건을 만족하는 최적 버스크기와 보유대수를 결정할 수 있도록 했다. Lazar N. Spasovic과 Maria P. Boile, Athanassios K. Bladikas(1994)는 소비자잉여를 더한 사회적 편익뿐만 아니라 운영자 이윤 최대화에 대해서도 목적함수를 정립하고 각 목적함수를 최대화시키는 최적 서비스 범위와 노선간격, 정류장 간격, 요금을 포함한 핵심 운영요소의 값을 구했다.

사회적 편익에는 정상적인 요소들이 많이 포함되어 있기 때문에 사실상 이를 정확하게 정량화하기는 힘들다. 따라서 이들 모형을 통해 얻어진 최적 운영요소들은 현실과 들어맞는 정확한 값이라고 하기 힘들고, 객관적이고 정량적인 시스템 총 비용 모형에 비해 실용성이 매우 떨어지는 한계를 가지고 있다.

### 2. 시스템 총비용 최소화 모형

시스템 비용은 크게 운영자 비용과 이용자 비용으로

나뉜다. 운영자 비용에는 대중교통 운영에 들어가는 유류비, 유지관리비 등이 포함되고 이용자 비용에는 요금으로 인한 지출, 통행시간 등이 속하게 된다. 이 모든 비용요소들을 포함시켜 목적함수의 모형식을 작성할 수도 있지만 보통은 대중교통 운영요소들이 통행시간에 직접적인 영향을 미친다는 사실에 주목하여 통행시간을 기반으로 한 시스템 비용 모형식을 정의한다.

시스템 총비용 최소화 모형은 운영자와 이용자 비용의 합으로 시스템 비용을 구성하고 이를 모형의 목적함수로 설정하여 용량이나 최대허용 운행간격 등의 제약조건을 만족하는 최적의 운영요소들을 산정해 내게 된다. 대부분은 이 큰 틀을 벗어나지 않지만 중요한 변수 중 하나인 수요를 모형에 어떻게 고려할 것인지에 따라 그 형태가 조금씩 달라진다.

이승현(1999)은 시간당 총비용을 최소화하는 운행간격, 정류장 간격 산정 모형을 개발하였는데, 기존 연구들과는 달리 변수들 간의 상호관계를 인정함으로써 복잡적으로 변수를 고려할 수 있도록 했다. 버스 수요는 노선 전체에 걸쳐 연속적으로 균일하게 분포하고 있다고 가정했기 때문에 모든 정류장 간격은 동일하게 된다. Lazar N. Spasovic과 Paul M. Schonfeld(1993)의 연구와 G. K. Kuah와 J. Perl(1988)의 연구는 연구대상지역을 설정한 방법이 다르긴 하지만 이용자 비용과 운영자 비용을 정의하는 개념에서 거의 비슷하다. Anthony A. Saka(2001)는 운영자의 입장을 중점적으로 고려하여, 시간당 필요차량대수를 최소화하면서 그와 반비례 관계에 있다고 할 수 있는 정류장 간격을 최소화하는 모형에 균일한 수요분포를 가정하였다.

이상에서 살펴본 모형들은 노선을 따라 수요가 연속적으로 균일하게 분포하고 있다는 것을 기본 가정으로 하고 있다. Peter G. Furth와 Adam B. Rahbee(2000)는 이런 continuum approach를 대신해 각 정류장별 수요를 독립적으로 설정하는 discrete approach를 통해 최적 정류장 간격을 산정할 수 있는 모형을 개발하였다. 이 연구에서는 노선에 위치한 모든 교차로를 정류장 후보지로 지정하고 기존 정류장을 기준으로 조사된 수요를 geographical modeling 기법으로 각 후보 정류장에 배분하여 총비용을 최소화하는 정류장 위치를 탐색한다.

시스템 총비용 최소화 모형은 사회적 편익 최대화 모형에 비해 좀 더 객관화되고 정량화된 기준으로 현실에 맞는 대중교통 운영요소들의 값을 산정해 낼 수 있다는 측면에서 널리 이용되고 있다. 그러나 노선을 따라 연속

적이고 균일한 수요분포를 가정하여 간단하게 시간당 노선 수요를 변수로 사용함에 따라 현실과 동떨어진 결과를 얻게 된다. 그 대표적인 경우가 정류장 간격으로, 노선에서 혹은 어떤 구간 안에서 간격은 동일해 질 수 밖에 없다. Peter G. Furth와 Adam B. Rahbee(2000)의 연구의 경우 불연속적으로 수요를 설정하기 때문에 정류장별로 서로 다른 간격을 가지게 되긴 하지만 수요배분 기법인 geographical modeling 기법의 정확도는 의심의 여지가 있다.

무엇보다 결정적으로 이들 모형에서 놓치고 있는 것은 승차차수 분포의 이질성이다. 예를 들어 도시 외곽에서 도시 중심부로 향하는 단방향 노선의 아침 첨두 시간대에는 승차수요가 도시 외곽에서 집중되고 하차수요는 대부분 도시 중심지역으로 몰리게 된다. 반대로 저녁 첨두 시간대에는 승차수요가 도시 중심부에, 하차수요가 외곽지역에 더 많이 분포하게 된다.

이처럼 노선 특성에 따라 승차차수요가 상이하게 분포한다는 사실이 명백함에도 불구하고 기존 연구들에서는 승차수요만을 중심으로 모형을 설계하고 있다. 이는 승차차수요의 차가 크게 벌어지는 노선의 경우 정류장에서의 버스 정차시간과 승객의 정류장/목적지 접근시간을 실제보다 과소 혹은 과대 추정해 내는 정도가 커지고 결국 모형의 핵심이라고 할 수 있는 시스템 비용이 잘못 계산되어 현실과 맞지 않는 결과를 도출해 내게 된다.

본 연구는 관련연구들에서 보여주었던 모형의 한계점을 인지하고, 이를 극복할 수 있는 버스의 최적 운영 요소 산정 모형을 만드는데 초점을 맞추고자 한다. 버스 노선을 따라 임의적으로 분포하고 있는 승차차수요를 모두 고려하여 버스와 승객의 통행시간을 기반으로 한 시스템 비용 산정 모형식을 개발하고 이를 최소화하는 최적 정류장 수 산정 모형을 정립한다.

### III. 모형의 정립

#### 1. 모형의 설정

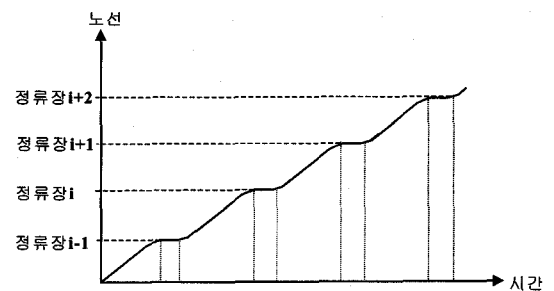
본 연구에서는 버스의 시스템 비용을 버스의 주행시간과 이용자의 통행시간을 기반으로 산출한다. 즉 시스템 비용의 운영자 비용은 버스의 노선 주행시간에 대한 금전적인 운행비용이며 이용자 비용은 승객의 출발지에서 목적지까지 가는데 들어가는 전체 통행시간의 가치

를 나타낸다.

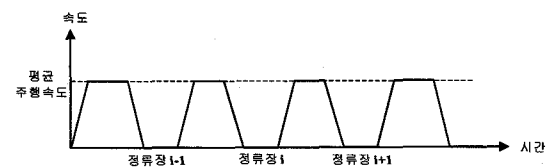
버스 통행시간은 여러 가지 요소에 영향을 받아 변할 수 있지만 정류장이나 신호교차로, 또는 기타 노변 교통류와의 마찰에 의한 정지체체가 가장 큰 부분을 차지한다. 여기서 신호교차로에서의 정지체체는 노선이 통과하는 모든 신호교차로의 신호시간과 버스가 적색신호에 걸리게 될 확률을 조사할 수 있다면 모형에 반영하는 일이 어렵지 않다. 하지만 본 연구에서 개발하고자 하는 모형의 결과물은 최적 정류장 수로 이 결정변수들은 신호교차로에 의한 버스 정차에 거의 아무런 영향을 받지 않는다. 한편 노변 교통류와의 마찰에 의한 버스정차를 모형에 반영하기 위해서는 언제, 어디서, 어떻게, 어느 정도의 시간만큼 정차가 이루어지는지를 정확히 밝힐 수 있어야 한다. 그러나 교통류 자체가 무척 불안정하고 어디서 어떤 일이 발생할지 정확히 예측할 수 없기 때문에 노변 교통류에 의한 정지체체 시간을 추정해 내는 것은 불가능하다.

따라서 본 연구의 모형에서는 '버스 정류장에서의 정지체체만을 통행시간 계산에 포함시킨다. 이 정류장 정지체체를 고려한 버스 운행의 기본적인 시공도와 속도-시간 diagram이 <그림 1>, <그림 2>와 같다.

노선을 따라 임의적으로 분포하는 승차차수요를 정확히 모형에 반영하기 위해서는 계획하고 있는 정류장별로 현재 수요를 배분할 수 있어야 한다. 그러나 아직 몇 개의 정류장이 어디에 설치될지 모르는 상황에서 모



<그림 1> 버스 운행의 시공도



<그림 2> 버스 운행의 속도-시간 diagram

형에 필요한 수요부터 정류장별로 추정해 낸다는 것은 모순이다.

본 연구는 그런 모순을 피해 가능한 한 현실적으로 수요를 고려하기 위해 노선을 일정한 간격으로 나누어 각 구간을 수요와 통행시간의 기본 단위로 사용한다. 각 구간별로 추정된 잠재적인 버스 수요는, 해당 구간 내에서는 수요가 연속적으로 균일하게 분포한다는 가정을 사용하면 구간의 시간당 승하차수요의 형태로 모형에 반영될 수 있다. 이렇게 구해진 구간의 버스 주행시간과 승객 통행시간은 모든 구간에 대해 더해져 시스템 비용의 기본 구성요소인 노선의 버스 주행시간, 승객 통행시간이 된다.

물론 모형의 최종 산출물인 최적 정류장 간격은 노선 전체적으로는 다르겠지만 구간 내에서는 똑같은 것이다. 이는 앞서 기존 연구의 한계점과 같지만 현 상황에서 가장 합리적인 방법은 구간별 승하차수요를 변수로 사용하는 것이라고 생각한다. 또한 모형의 기본 단위가 되는 구간의 길이를 작게 함으로써 현실에 가까운 결과를 얻을 수 있을 것이라 기대한다.

지금까지 설명한 모형 설정을 토대로 모형 수립을 위한 몇 가지 가정을 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 연구의 대상이 되는 지역은 도시부 지역으로 모든 노선의 평균 운행간격은 5~15분 사이이다.
- 연구의 대상이 되는 노선의 길이와 위치는 정해져 있다.
- 연구의 대상이 되는 노선은 타 노선에 대해 독립적이다.
- 정류장에서는 승차 및 하차수요의 유무에 상관없이 무조건 정차한다.
- 정류장 접근은 도보로만 이루어진다.
- 구간 내 승하차수요는 균일하게 분포한다.

## 2. 운영자 비용

버스의 주행시간은 승객의 승하차를 위해 정차해 있는 정류장 지체시간과 버스가 평균 순항속도로 노선을 주행하는 순항주행시간으로 구성된다. 여기에 시간당 버스 운행 빈도를 곱해 시간당 버스 총 주행시간을 구할 수 있다. 운영자 비용은 이 총 주행시간에 시간당 평균 운행비용을 곱한 것이 된다.

### 1) 정류장 지체시간

정류장 지체시간은 버스의 정류장 접근 감가속 시간과 출입문을 열고 닫는 시간, 승객이 승하차하는 시간으로 구성된다. 버스가 일단 정류장에 정차하면 운전사는 승객의 승차와 하차가 완벽하게 이루어진 다음 문을 닫고 출발하기 때문에, 승객 1인당 승하차 시간이 동일하다면 수요가 더 많은 쪽을 기준으로 해당 정류장의 승하차 시간이 결정된다.

$$T_{ls} = \frac{1}{3600} \left[ q_l \delta + \frac{60n_l(\alpha + \beta)}{h} \right] \quad (1)$$

여기서,  $q_l = \max[q_{l1}, q_{l2}]$

$T_{ls}$  : 구간  $l$ 에서의 시간당 버스의 정류장 지체시간(시),  $l=1, 2, \dots, L$

$q_{l1}$  : 구간  $l$ 에서의 승차수요(인/시간),  $l=1, 2, \dots, L$

$q_{l2}$  : 구간  $l$ 에서의 하차수요(인/시간),  $l=1, 2, \dots, L$

$\delta$  : 승객 1인당 승하차시간(초/인)

$n_l$  : 구간  $l$ 에서의 정류장 개수(개소),  $l=1, 2, \dots, L$

$h$  : 평균 차두시간(분/대)

$\alpha$  : 출입문 개폐시간(초)

$\beta$  : 감가속시간(초)

### 2) 순항주행시간

정류장 지체시간 안에 정차시간과 감가속시간이 포함되므로 순항주행시간은 노선을 평균 순항속도로 주행한 시간으로 간단하게 정의할 수 있다.

$$T_{lo} = \frac{d_l}{u} \times \frac{60}{h} \quad (2)$$

$T_{lo}$  : 구간  $l$ 에서의 시간당 버스의 순항주행시간(시),  $l=1, 2, \dots, L$

$d_l$  : 구간  $l$ 의 길이(km),  $l=1, 2, \dots, L$

$u$  : 버스의 평균 순항속도(km/h)

### 3) 운영자 비용

앞서 구한 구간별 정류장 지체시간과 순항주행시간

을 더하면 각 구간에서의 시간당 버스의 주행시간을 구할 수 있고, 이를 다시 모든 구간에 대해 합하면 노선의 시간당 버스 총 주행시간이 된다.

$$T_{op} = \sum_{l=1}^L (T_{ls} + T_{lb})$$

$$= \sum_{l=1}^L \left\{ \frac{1}{3600} \left[ q_l \rho + \frac{60n_l(a+\beta)}{h} \right] + \frac{d_l}{u} \frac{60}{h} \right\} \quad (3)$$

$T_{op}$  : 시간당 버스의 총 주행시간(시)

여기에 시간당 버스의 운행비용을 곱해 운영자 비용을 구한다.

$$C_o = \lambda_o T_{op} \quad (4)$$

$C_o$  : 시간당 운영자 비용(원)

$\lambda_o$  : 시간당 버스의 운행비용(원/시간)

원칙적으로 버스의 정차와 운행에 들어가는 비용이 서로 다르고 그에 따라 다른 값을 적용해야 옳지만, 현실적으로 그 값을 구하는 것이 쉽지 않다. 따라서 기존 연구들과 마찬가지로 평균적인 버스의 시간당 운행비용을 사용한다.

### 3. 이용자 비용

한 시간 동안 버스를 이용하는 모든 승객이 경험하게 되는 통행시간은 출발지에서 정류장으로 이동하는 시간과 정류장에서 버스를 기다리는 시간, 버스를 타고 목적지가 있는 정류장까지 이동하는 시간, 다시 정류장에서 목적지로 이동하는 시간으로 구성된다. 버스를 이용하여 이동하는 시간은 다시 출발 정류장에서 목적 정류장까지 이동하는 동안 겪게 되는 정류장 지체시간과 순항주행시간으로 나뉜다.

#### 1) 정류장/목적지 접근시간

정류장 사이 간격의 1/2이 되는 지점을 기준으로 승객은 각각 가까이에 있는 정류장을 이용한다고 하면 승객 1인당 걷게 되는 평균 정류장/목적지 접근거리는

앞·뒤 정류장 간격의 1/4이 된다. 여기서는 각 구간마다 같은 정류장 간격을 가지게 되기 때문에 승객의 도보 이동거리는 구간별 정류장 간격의 1/2이 된다.

$$T_{la} = \frac{d_l}{2v_a n_l} (q_{l1} + q_{l2}) \quad (5)$$

$T_{la}$  : 구간  $l$ 에서의 시간당 승객 접근시간(시),  $l=1, 2, \dots, L$

$v_a$  : 승객의 도보 접근속도(km/h)

#### 2) 정류장 대기시간

도시 외곽의 변두리 지역을 제외한 대부분의 도시부 지역 버스는 운행간격이 5~15분 사이로 승객들이 정해진 버스 스케줄에 맞추어 나가지 않고 정류장에 임의적으로 도착하게 된다. 본 연구 또한 도시부 지역의 버스 노선을 대상으로 하고 있으므로 승객의 정류장 도착은 임의적이고 승객 1인당 평균 대기시간은 운행간격의 1/2이 된다.

$$T_{lw} = \frac{h}{120} q_{ln} \quad (6)$$

$T_{lw}$  : 구간  $l$ 에서의 시간당 승객 대기시간(시),  $l=1, 2, \dots, L$

#### 3) 차내이동시간

##### (1) 정류장지체시간

각 구간 내 정류장에서 발생하는 정류장 지체시간은 해당 구간을 버스를 타고 지나가는 사람들이 경험하게 된다. 따라서 어떤 구간에서 승객이 경험하게 되는 정류장 지체시간은 구간 내 정류장에서의 지체시간에 구간 재차인원을 곱한 것이 된다.

$$T_{li} = \frac{\sum_{i=1}^L (q_{li} - q_i/2)}{3600} [q_l \rho + n_l(a+\beta)] \quad (7)$$

$T_{li}$  : 구간  $l$ 에서의 시간당 승객이 경험하게 되는 정류장 지체시간(시),  $l=1, 2, \dots, L$

(2) 순항주행시간

각 구간을 버스로 이동하는 승객들은 구간의 거리만큼 버스의 평균 순항속도로 여행하게 된다.

$$T_{lr2} = \left[ \sum_{i=1}^l (q_{i1} - q_{i2}) \right] \frac{d_l}{u} \quad (8)$$

$T_{lr2}$  : 구간  $l$ 에서의 시간당 승객이 경험하게 되는 순항주행시간(시),  $l=1, 2, \dots, L$

4) 이용자 비용

구간별 승객의 정류장/목적지 접근시간, 정류장 대기시간, 차내이동시간을 더하여 각 구간에서의 시간당 승객 총통행시간을 구할 수 있다. 이를 다시 전체 구간에 대해 더하면 구간의 시간당 승객 총 통행시간을 얻게 된다.

$$\begin{aligned} T_u &= \sum_{l=1}^L (T_{la} + T_{lw} + T_{lr1} + T_{lr2}) \\ &= \sum_{l=1}^L \left\{ \frac{d_l}{2v_a n_l} (q_{l1} + q_{l2}) + \frac{h}{120} q_{l1} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sum_{i=1}^l (q_{i1} - q_{i2})}{3600} [q_{l1} \delta + n_l (\alpha + \beta)] \right. \\ &\quad \left. + \left[ \sum_{i=1}^l (q_{i1} - q_{i2}) \right] \frac{d_l}{u} \right\} \quad (9) \end{aligned}$$

$T_u$  : 시간당 승객의 총 통행시간(시)

승객이 걷고, 기다리고, 버스를 타고 이동하는 시간에 대한 가치는 전부 다르기 때문에 구성요소별로 각각의 시간가치를 따로 곱하여 이용자 비용을 구한다.

$$C_u = \sum_{l=1}^L \{ \lambda_a T_{la} + \lambda_w T_{lw} + \lambda_r (T_{lr1} + T_{lr2}) \} \quad (10)$$

$C_u$  : 시간당 이용자 비용(원)

$\lambda_a$  : 접근시간가치(원/시간)

$\lambda_w$  : 대기시간가치(원/시간)

$\lambda_r$  : 차내이동시간가치(원/시간)

4. 시스템 비용

운영자 비용과 이용자 비용을 더하여 모형의 목적함

수인 시스템 비용 모형을 구할 수 있다. 단 이는 버스의 용량 제약조건을 만족해야 한다.

$$Min. TC = C_o + C_u$$

$$\text{단, } \sum_{i=1}^l (q_{i1} - q_{i2}) \leq c_b, \quad l=1, 2, \dots, i, \dots, L \quad (11)$$

$TC$  : 시간당 노선의 시스템 비용(원)

$c_b$  : 버스 한 대 용량에 시간당 운행 빈도를 곱한 시간당 버스의 최대 승차인원(인/시)

5. 최적 정류장 수 및 간격 산정

노선의 시스템 비용을 최소화하는 구간별 최적 정류장 수와 간격을 구하기 위해서는 정류장 수를 나타내는 변수  $n_l$ 에 대하여 목적함수를 편미분한 것을 0으로 만드는 정류장 수를 찾으면 된다.

$$\frac{\partial TC}{\partial n_l} = \frac{\partial C_o}{\partial n_l} + \frac{\partial C_u}{\partial n_l} = 0, \quad l=1, 2, \dots, L$$

그 전에 우선 편미분한 도함수 값이 0이 되는 지점에서 시스템 비용이 최소가 되는지, 즉 목적함수가 변수  $n_l$ 에 대하여 convex 한 지를 살펴봐야 한다.  $n_l$ 에 대한 목적함수의 이차도함수는 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 TC}{\partial n_l^2} = \frac{\lambda_a d_l (q_{l1} + q_{l2})}{v_a n_l^3} \geq 0$$

이 식에 포함되는 모든 변수들이 양수이므로 이차도함수의 값도 양이 된다. 따라서 노선의 시스템 비용  $TC$ 는 구간별 정류장 수  $n_l$ 에 대해 convex하고  $TC$ 의 도함수가 0이 될 때 구간별 최적 정류장 수  $n_l^*$ 를 구할 수 있다.

$n_l$ 에 대해  $TC$ 를 편미분 한 식을 0으로 두고 다시  $n_l$ 에 대해 식을 정리하여 최적 정류장 수 및 간격 산정 식을 구한다.

$$n_l^* = \sqrt{\frac{3600h \lambda_a (q_{l1} - q_{l2}) d_l}{2v_a (\alpha + \beta) \{ 60\lambda_a + h \lambda_r \sum_{i=1}^l (q_{i1} - q_{i2}) \}}} \quad (12)$$

$$d_l^* = \frac{d_l}{n_l^*}$$

$n_l^*$  : 구간  $l$ 의 최적 정류장수

$d_l^*$  : 구간  $l$ 의 최적정류장 간격(km)

### IV. 모형의 적용

#### 1. 개요

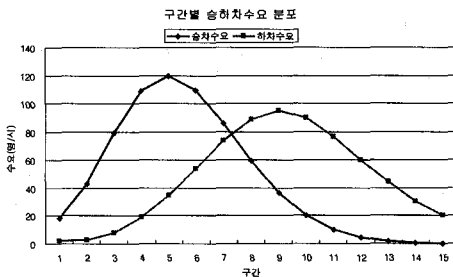
본 연구에서 개발한 모형이 연구의 목적에 맞게 수요 변화에 탄력적으로 정류장 수를 산출해 낼 수 있는지 알아보기 위해 모형 적용을 위한 예제 노선을 설계하였다. 예제 노선의 개요가 다음과 같다.

- 도시부 시내버스 노선으로 도시 중심부 CBD 지역을 통과
- 노선 총 연장 30km(2km 단위로 15개 구간 설정)
- 평균 버스 운행간격 10분(운행빈도 6회/시)
- 노선 이용승객 시간당 700명
- 좌석과 입석을 포함한 버스 한 대 용량 70명(시간당 최대 420명 수용)

노선의 다양한 승객 승하차 패턴에 따라 모형의 최적 정류장 수가 어떻게 변화하는지 살펴보기 위해 일반적인 도시부 버스 노선의 승하차 수요 분포를 반영하여 세 가지 경우로 구간별 승하차 수요를 가정하였다. 각 Case의 수요는 포아송 확률분포함수를 이용하여 임의적으로 만들어낸 것이다.

• Case 1.

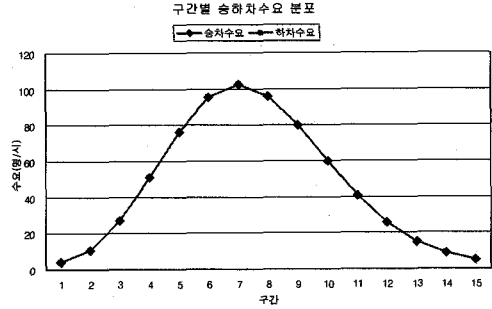
- 노선의 시점 부분에 승차수요가 많고 종점 부분에 하차수요가 집중됨
- 도시 외곽지역에서 고속도로, 혹은 간선도로를 이용해 CBD로 접근하는 단방향 노선
- 일산, 분당 등의 수도권 신도시와 종로, 광화문의 서울 중심지를 연결하는 광역버스노선



〈그림 3〉 Case 1의 구간별 승하차수요 분포

• Case 2.

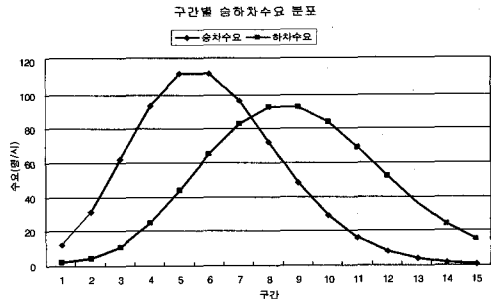
- 노선의 중앙에 승차와 하차수요 모두 집중
- 두 외곽지역을 연결하는 노선으로 중간에 CBD를 횡단
- 일반적인 도시부 시내버스 노선



〈그림 4〉 Case 2의 구간별 승하차수요 분포

• Case 3.

- Case 1과 2의 중간적인 형태
- 모형 적용시 Case간 비교를 위한 Case



〈그림 5〉 Case 3의 구간별 승하차수요 분포

### 2. 모형 적용의 결과

#### 1) Case별 모형 적용 결과

본 연구에서 개발한 모형을 각 Case 별로 적용하여 구간별 최적 정류장 수를 산정해낸다. 이때 사용할 여러 가지 parameter 값들이 다음과 같다.

$\delta = 3.5$ (초/승객)	$H = 10$ (분/대)
$N = 14$ (개)	$\lambda_0 = 3,676$ (원/시-대)
$\alpha = 3$ (초/정류장)	$\lambda_1 = 2,967$ (원/시-인)
$\beta = 14$ (초/정류장)	$\lambda_2 = 2,734$ (원/시-인)
$u = 35$ (km/h)	$\lambda_3 = 1,823$ (원/시-인)
$V_0 = 4.3$ (km/h)	

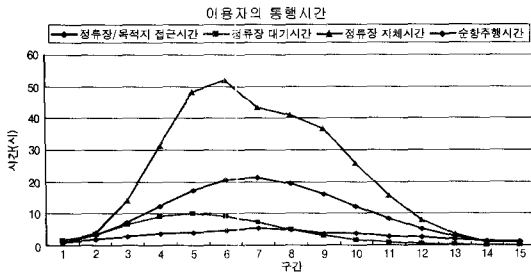
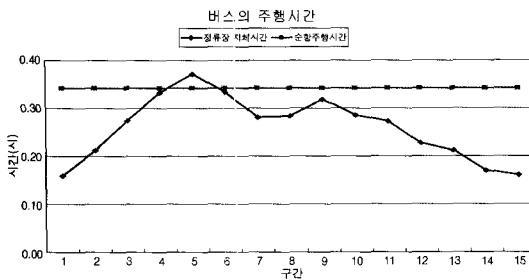
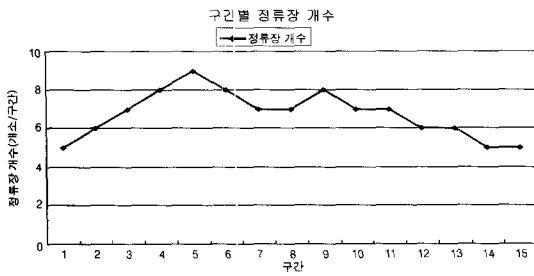
자료: 시내버스 개혁 종합 대책(1997, 서울시)  
서울시 교통센서스 및 데이터베이스 구축(1997, SDI))

각 Case별 적용 결과가 다음과 같다.

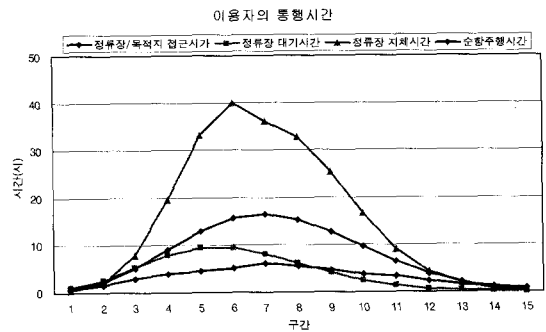
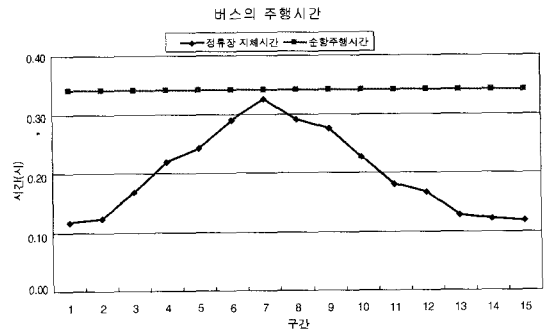
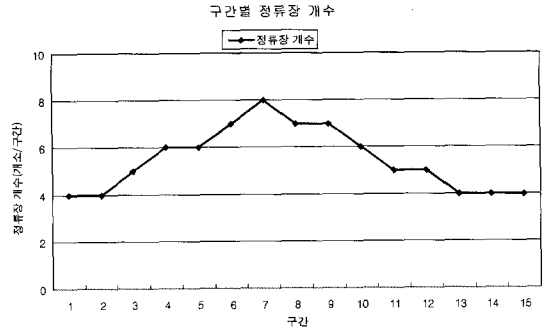


〈표 1〉 각 Case의 구간별 최적 정류장 개수

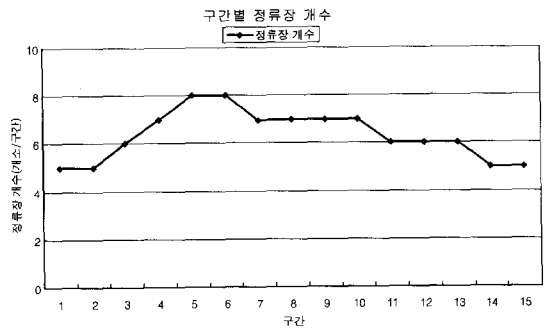
구간	구간별 최적 정류장 개수		
	Case 1	Case 2	Case 3
1	5	4	5
2	6	4	5
3	7	5	6
4	8	6	7
5	9	6	8
6	8	7	8
7	7	8	7
8	7	7	7
9	8	7	7
10	7	6	7
11	7	5	6
12	6	5	6
13	6	4	6
14	5	4	5
15	5	4	5



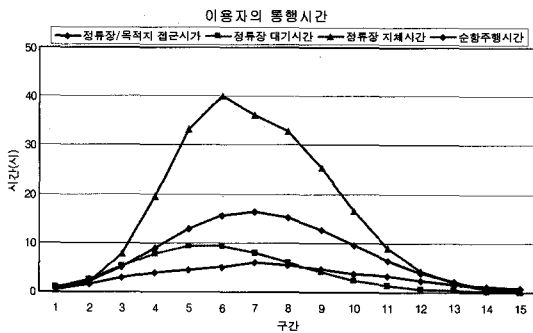
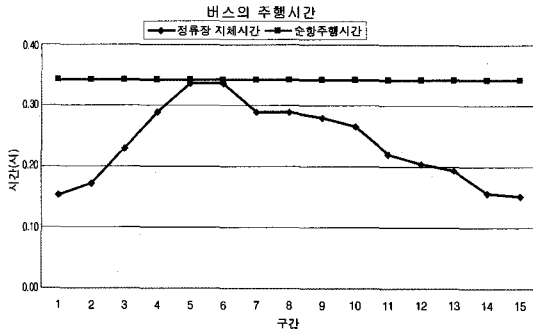
〈그림 6〉 Case 1의 구간별 최적 정류장 수 및 버스/이용자 통행시간 분포



〈그림 7〉 Case 2의 구간별 최적 정류장 수 및 버스/이용자 통행시간 분포



〈그림 8〉 Case 3의 구간별 최적 정류장 수 및 버스/이용자 통행시간 분포



(그림 8) Case 3의 구간별 최적 정류장 수 및 버스/이용자 통행시간 분포(계속)

각 Case의 첫 번째 그래프를 보면 쉽게 알 수 있듯이, 구간별 최적 정류장 개수는 승차와 하차수요 중 더 많은 쪽을 기준으로한 수요 그래프와 동일한 패턴을 보인다. 즉 구간의 승차나 하차수요가 많을 때는 정류장을 많이 설치해야 하고 수요가 없을 때는 정류장을 적게 설치해야 한다는 뜻이다. 또한 정류장 수에 직접적인 영향을 받는 버스/승객의 정류장 지체시간도 수요와 최적 정류장 수의 분포와 유사한 분포 형태를 가진다.

버스의 순항주행시간은 구간의 길이가 모두 같기 때문에 노선 전체에서 동일하고, 승객의 정류장/목적지 접근시간과 정류장 대기시간, 순항주행시간은 수요가 비교적 많은 노선 중간부분에서 크게 나타난다.

2) 모형 적용 결과 분석

일반적으로 생각했을 때 승차나 하차수요가 많은 곳일 수록 정류장이 많아야 큰 어려움 없이 승객수요를 소화해 낼 수 있다. 반대로 수요가 별로 없는 곳에서는 적은 수의 정류장을 필요로 한다. 이때 수요가 적은 구간에서 버스를 이용하는 소수의 승객들이 불만을 가지고 버스 이용을 포기하는 경우가 발생할 것이지만 이를 감수하더

라도 정류장 수를 줄이는 것이 노선 전체적인 관점에서 봤을 때는 운영의 효율성을 증가시키는 방법이 된다.

본 연구에서 제시한 모형을 이용하여 구간별 최적 정류장 수를 구한 Case 1, 2, 3의 결과는 그러한 일반적인 규칙을 잘 따르고 있다. 즉 각 Case별로 승차와 하차 수요 중 더 큰 쪽을 기준으로 한 수요분포와 구간별 최적 정류장 개수의 분포가 유사한 형태를 보이면서 4~10개 사이의 정류장을 구간별로 서로 다르게 배분한다.

여기서 또 하나 주목할 점은 승차수요를 따라 정류장 간격이 정해졌던 기존 연구들과는 달리 승차와 하차 중 더 많은 쪽을 기준으로 정류장 수를 결정했다는 것이다. 이렇게 함으로써 승객의 요구를 좀 더 다양하게 수용할 수 있고 이용자에 대한 서비스 수준도 향상될 것이다.

한편 구간별로 4~10개 정도의 정류장을 설치하게 되면 정류장 사이 거리는 500~200m로 비교적 짧은 간격을 가지게 된다. 승객이 버스를 이용할 때 기꺼이 도보로 이동하고자 하는 거리가 400m이고 따라서 정류장 사이 간격은 800m 이하여야 한다는 것을 생각하면 물론 옳은 결과이지만 승하차수요 모두 합쳐 10명도 되지 않는 구간에 500m 간격으로 4개의 정류장을 설치하는 것은 분명 무리가 있다.

이런 결과를 얻게 된 이유는 모형의 목적함수인 시스템 비용을 산정할 때 운영자 비용보다 이용자 비용이 더 크게 반영되기 때문이다. 한 시간 동안 버스를 이용하는 승객이 700명이고 이들 개개인이 통행시간을 가지며 이 모든 통행시간이 이용자 비용 계산에 들어가기 때문에 이용자 비용은 당연히 운영자 비용보다 훨씬 커지게 된다.

버스의 시스템 비용 모형식에는 정류장 수와 직접적인 관련이 있는 비용요소들이 존재한다. 버스의 정류장 지체시간과 승객의 정류장/목적지 접근시간, 정류장 지체시간이 바로 그것으로, 수요가 많아 정류장을 많이 설치하게 되면 정류장 사이 간격이 줄어들어 출발지에서 정류장으로, 정류장에서 목적지로 접근하는 시간은 줄어들게 되겠지만 정차해야 할 정류장이 많아지기 때문에 노선 전체적인 버스/승객의 정류장 지체시간은 증가한다. 반대로 정류장이 적게 설치되면 버스/승객의 정류장 지체시간은 감소하고 정류장/목적지 접근시간은 증가하게 된다.

마찬가지로 Case 1, 2, 3의 모형 적용 결과에도 이러한 정류장 수와 시간요소들 간의 관계가 잘 드러나 있다. 버스와 승객의 정류장 지체 시간의 구간별 분포

는 최적 정류장 수의 분포와 유사한 모습을 보이면서, 정류장 수가 증가하면 정류장 지체시간도 따라서 증가하고 정류장 수가 줄어들면 따라서 감소한다.

반면 승객의 정류장/목적지 접근시간은 정류장 수와의 반비례 관계가 명확히 드러나지 않는다. Case 1, 2, 3의 정류장/목적지 접근시간 그래프를 보면 노선 중간 부분에서 볼록한, 완만한 정규분포 형태를 하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 구간의 접근시간이 수요에 많은 영향을 받기 때문으로, 구간의 수요가 많으면 개인의 접근시간은 작더라도 구간 전체의 접근시간은 커지게 된다.

지금까지 예제 노선이 서로 다른 승하차수요 분포를 가지는 세 가지 Case에 모형을 적용한 결과를 살펴보았다. 각 Case의 구간별 최적 정류장 수는 예상했던 결과에서 크게 벗어나지 않고 구간의 승차나 하차수요가 많은 경우에는 많은 수의 정류장을, 수요가 적은 경우에는 적은 수의 정류장을 최적 정류장 수로 산정해냈다. 결국 본 논문의 초반에 연구의 목적으로 제시했던 대로, 새롭게 개발한 모형을 이용하면 임의적인 승하차수요 분포에 따라 탄력적인 최적 정류장 수 산정이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

## V. 결론

본 연구에서 개발한 최적 정류장 수 산정 모형은 버스 시스템 비용을 구성하는 여러 가지 시간요소들과 결정변수인 정류장 수 사이의 관계를 인식하고 비용을 최소화할 수 있는 균형점을 찾아가는 과정을 담고 있다. 이때 노선을 따라 임의적으로 분포하고 있는 승하차수요를 모두 고려하여 탄력적인 최적 정류장 수와 간격 산정이 가능하도록 노선을 짧은 구간으로 분할하고 각 구간 내에서 최적 정류장 수를 찾게 하였다. 그 결과 기존 모형들에서 고려하지 못했던 하차수요가 승차수요와 함께 새로운 모형에 반영될 수 있었고 수요 분포에 따라 탄력적으로 정류장 수를 결정할 수 있게 되었다.

이처럼 새롭게 개발한 모형은 연구를 시작하게 된 초기의 목적을 충족시키고 있지만 몇 가지 한계점을 안고 있다. 우선 Case 1, 2, 3의 모형 적용 결과에서 나타난 지나치게 짧은 정류장 간격이 문제가 될 수 있다. 앞서서도 지적했듯이 이는 이용자 비용이 시스템 비용 계산에 훨씬 크게 적용되기 때문으로 버스 운영의 효율성을 떨어

트리는 요인이 될 수 있다.

두 번째로 수요 가정의 문제다. 본 연구는 정확한 수요를 모형에 도입하는 것은 불가능하다는 사실을 인지하고, 노선을 일정한 간격으로 나눠 각 구간 내에서는 수요가 연속적으로 균일하게 분포한다는 가정을 사용하였다. 하지만 아무리 작은 구간 안에서도 수요는 균일하게 분포하지 않는다. 그리고 정류장 수가 변함에 따라 수요도 변하지만 이와 같은 정류장 수에 대한 수요의 탄력성은 모형에서 고려하지 못한다.

마지막으로 구간간의 상호작용을 무시하고 있는 한계가 있다. 노선의 모든 구간은 결국 하나로 연결되어 있어서 서로 독립적이지 않고 버스의 속도나 수요 등 여러 측면에서 상호 밀접한 연관을 맺고 있다. 본 연구에서 개발한 모형은 이러한 구간간의 관계와 그 사이 상호작용을 고려하지 못함으로써 최적해의 현실성을 떨어트린다.

이와 같은 모형의 한계점을 극복하기 위해 향후 지속적인 연구가 필요할 것으로 보인다. 본 연구에서 모형을 적용한 노선은 임의로 가정한 예제 노선에 불과한 것으로, 후에 버스카드 자료를 바탕으로 한 승하차수요 자료를 얻게 되면 실제 자료를 이용하여 새롭게 모형을 재평가할 필요가 있다. 그리고 좀 더 현실적인 정류장 간격을 산정해 낼 수 있도록 적절한 제약조건을 갖춘 개선된 모형 개발이 뒤따라야 하겠다.

구간간의 상호작용을 모형에 반영할 수 있도록 노선을 여러 개의 구간으로 쪼개지 않고 노선 한 개를 기본 단위로 한 모형이 개발되어야 한다. 또한 여기서 더 발전하여 노선 간 상호작용을 반영한 지역 버스 네트워크의 최적 정류장 수 및 간격산정 모형도 연구되어야 한다.

정류장 수와 간격을 포함한 버스의 운영요소 산정에 있어서 가장 많은 영향을 미치는 것은 수요일 것이다. 그러나 이들 모형에 현재의 수요를 정확하게 반영하는 것은 매우 어려운 일로, 향후 좀 더 현실적인 수요 반영을 위한 여러 가지 기법 개발이 필요하다.

## 참고문헌

1. 이승현(1999), "버스운행특성을 고려한 운영효율 최적화 방안에 관한 연구", 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
2. R. van Nes and P. H. L. Bovy(2000), "Importance of Objectives in Urban Transit-Network Design", Transportation Research Record 1735, pp.25~34.

3. P. G. Furth and H. M. Wilson Nigel(1981), "Setting Frequencies of Bus Route: Theory and Practice", Transportation Research Record 818, pp.1~7.
4. R. H. Oldfield and P. H. Bly(1988), "An Analytic Investigation of Optimal Bus Size", Transportation Research Vol. 22B No. 5, pp.319~337.
5. Lazar N. Spasovic, Maria P. Boile, and Anthanassios K. Bladikas(1994), "Bus Transit Service Coverage for Maximum Profit and Social Welfare", Transportation Research Record 1451, pp.12~22.
6. Lazar N. Spasovic and Paul M. Schonfeld (1993), "Method for Optimizing Transit Service Coverage", Transportation Research Record 1402, pp.28~39.
7. G. K. Kuah and J. Perl(1988), "Optimization of Feeder Bus Routes and Bus Stop Spacings", Journal of Transportation Engineering(ASCE) Vol. 114 No. 3, pp.341~354.
8. Anthony A. Saka(2001), "Model for Determining Optimum Bus-Stop Spacing in Urban Areas", Journal of Transportation Engineering(ASCE) Vol. 127 No. 3, pp.195~199.
9. Peter G. Furth and Adam B. Rahbee(2000), "Optimal Bus Stop Spacing Through Dynamic Programming and Geographic Modeling", Transportation Research Record 1731, pp.15~22.

✉ 주 작 성 자 : 강주란

✉ 교 신 저 자 : 강주란

✉ 논문투고일 : 2005. 10. 29

✉ 논문심사일 : 2005. 11. 30 (1차)

2005. 12. 15 (2차)

2006. 1. 6 (3차)

✉ 심사판정일 : 2006. 1. 6

✉ 반론접수기한 : 2006. 6. 30