

교통카드 데이터를 이용한 버스 승객 대기시간 최소화 알고리즘 개발

Development of an Algorithm for Minimization of Passengers' Waiting Time Using Smart Card Data

전상우* · 이정우** · 전철민***

Sangwoo Jeon · Jeongwoo Lee · Chulmin Jun

요약 버스 배차간격은 승객의 대기시간 및 차내 혼잡도 등 서비스 수준에 직접적인 영향을 미치고 간접적으로는 버스 운행비용 및 이용자의 교통수단 선택에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 대부분의 선행연구에서 버스 배차간격은 침두시와 비침두시 구간 통행량을 기반으로 시간대별 수요의 차이만을 반영하고 있다. 이러한 방식의 배차계획하에서는 세분화된 시간적 수요의 차이까지 고려하지 못하므로 승객들의 대기시간 비용이 증가하게 되는 요인이 될 수 있다. 또한, 승객의 승차패턴은 노선, 도로, 정류장의 공간적 배치 특성에 따라 다를 수 있으므로 버스 승객들의 시공간적 수요분포 특성과 변화를 고려한 배차간격 조절에 관한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 교통카드 데이터에서 획득한 승객 탑승정보를 바탕으로 정책적 대기시간 제약과 운행 대수 제약조건 및 노선 특성을 반영하여 승객들의 대기시간을 최소화하는 방향으로 배차간격을 조절하는 알고리즘을 제안하였다. 개발 알고리즘의 활용성 검증에 위해 서울시 간선노선 중 143번 노선에 적용한 결과, 승객 대기시간 감축비용을 계산하였을 때 비용절감 효과는 일일 기준 약 600,000원에 이르는 것으로 나타났다. 따라서 개발 알고리즘의 적용 노선을 확장할 경우 버스 승객의 편의 증진에 이바지할 것으로 기대된다.

키워드 : 버스 배차간격, 승객대기시간, 대기시간 가치, 교통카드 데이터, 알고리즘 개발

Abstract Bus headway plays an important role not only in determining the passenger waiting time and bus service quality, but also in influencing the bus operation cost and passenger demand. Previous research on headway control has considered only an hourly difference in the distribution of ridership between peak and non-peak hours. However, this approach is too simple to help manage ridership demand fluctuations in a short time scale; thus passengers' waiting cost will be generated when ridership demand exceeds the supply of bus services. Moreover, bus ridership demand varies by station location and traffic situation. To address this concern, we propose a headway control algorithm for minimizing the waiting time cost by using Smart Card data. We also provide proof of the convergence of the algorithm to the desired headway allocation using a set of preconditions of political waiting time guarantees and available fleet constraints. For model verification, the data from the No. 143 bus line in Seoul were used. The results show that the total savings in cost totaled approximately 600,000 won per day when we apply the time-value cost of waiting time. Thus, we can expect that cost savings will be more pronounced when the algorithm is applied to larger systems.

Keywords : Bus headway, Passenger waiting time, Value of time, Smart Card data, Algorithm

1. 서 론

대중교통 패러다임은 승용차 통행을 억제하고 대중교통 이용을 활성화하는 방향으로 변화하고 있다. 서울시 교통정책과에 따르면 1996년부터 2010년까지 버스와 도시철도 등을 포함한 대중교통의 수송 분담률은 수도권에서 59.5%에서 64.3% 수준으로 올라갔

으나, 실제 버스 분담률은 30.1%에서 28.1% 수준으로 감소한 것으로 나타난다. 이는 수도권 대중교통 분담률이 철도노선의 증가로 지속적으로 증가했으나 실제 버스 이용승객은 승용차 보유증가 및 도시철도 개통 등의 이유로 점점 줄어드는 추세에 있는 것으로 해석된다. 도시철도는 건설비용이 과다하게 소요되고 건설된 노선의 변경이 어려우므로 일정 수준 이상의

† This work was supported by the National Research Foundation of Korea Grant funded by the Korean Government (NRF-2012S1A5B8A03045234).

* Sangwoo Jeon, Master's Student, Dept. of GeoInformatics, University of Seoul. swjeon@uos.ac.kr (Primary Autor)

** Jeongwoo Lee, Professor, The Institute of Urban Science, University of Seoul. jeongwoo@uos.ac.kr

*** Chulmin Jun, Professor, Dept. of GeoInformatics, University of Seoul. cmjun@uos.ac.kr (Corresponding Author)

승객수요가 확보되지 않는 한 건설이 쉽지 않고 장기적 계획 수립을 수반한다. 또한, 도시철도는 모든 지역의 이용자를 대상으로 서비스할 수 없는 반면, 버스는 수요에 대응한 노선변경 및 유동적인 운영이 용이하여 상대적으로 더 넓은 지역 승객들의 편익향상에 부합할 수 있다는 점에서 주목해야 할 대중교통 수단이다.

버스운영 효율을 증대하고자 서울시는 지난 2004년 7월에 버스준공영제를 근간으로 하는 대중교통체계의 전반적인 개편을 시행하였다. 버스 준공영제 시행 이후 요금체계·노선체계·버스운영체계의 개선과 환승할인제도를 통해 승객들은 더욱 좋은 서비스를 받을 수 있게 되었다. 버스업체는 수입금 공동 관리를 통해 적자 매출을 서울시에서 보전해 주면서 안정적인 운영이 가능하게 되었다. 이에 따라 버스의 서비스 수준이 향상되었고 수송인원이 다소 증가하는 추세를 보였다. 하지만 서울시의 버스 재정지원 금액이 2007년 1,649억 원에서 2010년 3,069억 원으로 지속적으로 증가하고 있는 실정이다. 이러한 시의 재정부담 실정을 고려한다면 버스 운행횟수를 증가시키는 방법보다는 현 운행횟수를 유지하면서 배차간격을 효율적으로 조절함으로써 승객들이 느끼는 체감 서비스 수준을 향상하는 방안이 적절할 것으로 판단된다.

버스 배차간격을 결정하는 일반적인 방법은 시간대를 분할하고 통행수요가 많을 것으로 예상되는 출퇴근 시간대에 운행횟수를 높게 설정함으로써 배차간격을 결정하는 방법이다[1,12]. 시간대별로 운행횟수를 분할하는 경우 분할 경계에서 배차간격의 급격한 변화가 발생할 수 있으며 시간대 내 통행수요가 일정하게 확보되지 않으므로 동일한 수준의 서비스 제공은 어렵다[12]. 또한, 승객들의 승차는 노선의 길이, 승차량이 높은 정류소와 차고지의 공간적인 관계, 승차량이 많이 발생하는 시간대와 같이 다양한 변인에 의해서 일어나게 되므로 시간과 공간적인 특성을 동시에 고려해야 한다.

이에 본 연구에서는 승객들의 통행수요를 시간 분할 없이 정류소 단위에서 파악하고 이를 바탕으로 승객들의 시공간적 도착 분포와 운행노선의 현실적 제약조건을 반영하여 운행횟수의 증감 없이 승객들의 대기시간을 감소시키는 배차간격 조절 알고리즘을 제안하고자 한다. 개발 알고리즘을 검증하기 위해 실제 운영 중인 서울시 143번 노선의 교통카드 데이터를 사용하여 대기시간과 비용 감축 효과를 분석하였다.

2장에서는 총 통행비용 중 대기시간 비용 산정과 배차간격 조절 시 고려해야 할 제약조건들에 대한 기존 이론 및 관련 문헌들에 대해서 살펴보고 본 논문과

의 차별성을 제시한다. 3장에서는 교통카드 데이터에서 발생하는 오류, 결측을 분석하고 보정 방안을 사용하여 교통카드 데이터베이스를 구축하는 내용을 담고 있다. 4장에서는 대기시간 비용을 최소화하기 위한 알고리즘의 프로세스를 설명하고 5장에서 실제 운행 중인 노선에 적용하여 효과를 분석한다. 6장에서는 연구 결과를 요약하고 연구의 한계 및 보완사항에 대해서 제시한다.

2. 기존이론 및 관련문헌 고찰

2.1 대기시간 비용 산정

대중교통 시스템에서 승객의 통행과정에서 발생하게 되는 비용과 대중교통을 운행할 때 발생하게 되는 비용을 합쳐 총 통행비용으로 정의한다. 대중교통 시스템에서 최적의 서비스를 제공하는 것은 총 통행비용을 최소화하는 것과 관련이 있다. 총 통행비용 모델은 분석의 목적에 따라 다양한 형태를 보이지만 일반적인 형태는 식 (1)과 같다[5,6,9,12].

$$C_T = \{C_a + C_w + C_t\} + C_0 \quad (1)$$

여기서,

C_T : 총 통행비용(원)

$\{C_a + C_w + C_t\}$: 이용자 비용(원)

C_a : 승객의 접근시간 비용(원)

C_w : 승객의 대기시간 비용(원)

C_t : 승객의 통행시간 비용(원)

C_0 : 버스 운행비용 = 운영자 비용(원)

이용자 비용은 승객의 접근비용, 대기비용 및 차내 통행비용으로 구성된다. 승객의 접근시간은 승객이 출발지부터 정류소까지 가는 데 걸리는 시간, 대기시간은 정류소에서 대중교통에 탑승할 때까지 걸리는 시간, 통행시간은 승객이 대중교통을 탑승하고 하차할 때까지 걸린 시간을 의미하며 각각의 비용은 소요된 시간에 시간 가치를 곱한 값으로 나타낼 수 있다. 이용자 비용 중 배차간격과 관련된 비용은 대기시간 비용이 유일하며 통행시간 비용과 접근시간 비용은 버스 배차간격의 변화와 무관하게 동일한 비용을 가진다.

버스 운행비용은 다양한 방법으로 계산할 수 있으나 버스 운행횟수와 운행비용의 곱으로 표현하는 것이 일반적이다. 운행횟수의 증가를 통해 버스 운행비

용을 조절하면 승객들의 대기시간이 감소하는 경향을 보인다. 본 연구에서는 버스 운행횟수를 증감 없이 유지하므로 운행횟수 조절을 통한 버스 운행비용의 변화는 고려하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 대기시간 비용에 초점을 맞춰 총 교통비용을 계산한다. 일반적인 대기시간 비용은 다음 식(2)과 같다[5,8,9].

$$C_w = r_w \times \sum_{i=1}^Q w_i \quad (2)$$

여기서,

r_w : 대기시간 가치(원/분)

Q : 총 탑승객수(인)

w_i : 승객 대기시간(분)

대기시간 비용은 각 승객의 대기시간에 대기시간 가치를 곱한 값으로 계산하며 시간 가치(r_w)의 계산을 위한 다양한 방법들이 존재한다. 대부분의 연구에서 대기시간 가치는 승객의 편의 관점이 아닌 비생산 시간의 증가 개념으로 접근하며 이에 따라서 대기시간 가치를 선형적인 형태의 단일 변수로 가정하고 계산한다[3,8,15]. 대기시간 가치는 우선 통행시간을 기준으로 차내 통행시간과 차외 소요시간을 각각 다른 가중치를 설정하여 적용하는 방법 [3,15]과 차내·외를 동일한 가중치로 계산하는 방법이 있다[8]. 또한, 사용지표를 기준으로 소비자 물가지수를 이용하는 방법[15]과 국민 총소득을 이용하여 계산하는 방법 등 다양한 가치 결정 기준이 있다[8,13].

승객 대기시간(w_i)은 승객의 버스 승차시각과 정류소 도착시각의 차이로 계산할 수 있다. 하지만 승객의 정류소 도착시각을 정확하게 파악할 수 없기 때문에 실제 대기시간을 파악하기 어렵다. 따라서 많은 선행 연구에서 대기시간을 수학적으로 모델링하는 방법을 이용하였다[5,9,10].

Newell[10]은 승객의 대기시간을 최소화하는 방법으로 배차간격을 결정하였고 이를 승객들의 누적 도착분포를 이용하여 계산하였다. 즉, 승객들이 균일하게 정류소에 도착한다고 가정하여 승객들의 대기시간은 평균 배차간격의 1/2과 같다고 제시하였다. 이외의 많은 연구에서 승객들의 대기시간 분포를 균일분포로 가정하여 사용하고 있다[4,6,9,14].

Osuna와 Newell[11]은 차량의 도착분포가 불규칙할 때 승객들의 평균적인 대기시간을 평균 차두간격과 차두간격의 표준편차의 식으로 계산하였다. 버스의 최적 배차간격을 탐색하기 위한 연구는 대부분이

1시간 이상의 큰 시간 단위이며 구분한 해석적이고 수리적인 연구가 대부분이고[8,12,13]. 세부적인 구간별로 배차계획을 작성하는 연구는 부족한 실정이다. 이러한 방식의 배차계획하에서는 세분된 구간별 수요의 차이까지는 고려하지 못하므로 버스 승객의 수요가 급격하게 변화하는 구간에 대하여는 대기시간 비용 낭비가 발생할 수 있다.

2.2 배차간격 제약조건

배차간격 설정에 대해서는 여러 가지 제약조건이 존재한다. M.A. Forbes[2]는 무제약 다중 차고지 배차모형을 다양한 버스 운행비용과 고정비용의 합을 최소화시키는 방안으로 최적 배차간격을 설정하였다. 하지만 배차간격 설정에 운행시간, 운전자, 정비, 차량의 운행 가능거리 등 다양한 제약조건이 있기 때문에 이를 해결하기 위해 다양한 연구들이 진행되었다 [11,14]. 국외에서 진행된 대부분의 연구에서는 우리나라에서 시행하고 있지 않은 다중 차고지 개념을 사용하여 한 대의 버스가 여러 노선을 운행하도록 경로를 전환하는 알고리즘에 초점을 맞추고 있다.

국내에서도 배차간격 제약조건에 관한 많은 연구가 이루어졌다. Park et al.[12]은 최소 및 최대 배차간격을 고려하여 총 통행비용이 최소화되는 최적 배차간격을 산정하는 연구를 수행하였으며, Yun[15]은 노선별로 전체 구간의 최대 재차 인원 및 한계 배차간격을 고려하여 시간대별 최적운행횟수를 산정하였다. 정책적으로 최소 서비스 수준을 만족하게 하기 위한 최대 배차간격과 운행노선의 환경적인 특성이 배차간격 설정 시 제약조건이 될 수 있다.

시간대별 운행시간 및 배차간격이 일정할 경우에는 적정 운행횟수를 차량용량, 정책적 배차간격 등의 제약을 고려하여 시간대별 적정 운행횟수를 단순히 산정할 수 있다. 하지만 실제로는 운행시간 및 배차간격이 시시각각 변할 수 있고 시간대별 승차수요 또한 노선과 정류장의 특성별로 다르므로 시간대별로 군집화된 산술적 평균값의 운행횟수를 최적 배차계획으로 사용하기에는 현실적으로 한계가 있다.

기존연구의 이러한 한계점을 극복하기 위해 본 연구에서는 교통카드 데이터를 통해 획득한 승객들의 승하차 정보를 바탕으로 시공간적인 승객수요 패턴과 교통상황을 고려하고 정책적 대기시간 제약과 운행대수 제약조건 반영하여 승객들의 대기시간을 최소화하는 방향으로 배차간격을 조절하는 알고리즘을 제안한다.

3. 교통카드 데이터 분석

3.1 분석자료 개요

버스 준공영제 시행 이후 중앙버스차로제, 통합거리비례요금제 및 대중교통 통합환승할인요금제와 같은 혁신적인 제도가 도입됨에 따라 이를 시행하기 위해 스마트카드 시스템이 구축되었다. 스마트카드 시스템을 통해 수집된 데이터는 개인의 통행수단, 통행 시간, 환승 및 승하차 정류장 위치의 정보를 포함하고 있어 기존의 연구에서 추적할 수 없었던 버스 이용자의 통행패턴을 정확하게 파악할 수 있기 때문에 보다 효율적이고 과학적인 버스 운행 계획을 제안하는 데 이용될 수 있다.

이에 본 연구에서는 한국스마트카드에서 제공한 2011년 교통카드 자료를 이용하여 승객들의 통행수요를 바탕으로 대기시간 최소화 알고리즘을 개발하기 위해 별도의 데이터 오류 및 결측 보정, 데이터베이스 구축작업을 수행하였다. 분석 데이터의 시간적 범위는 일반적인 결과를 도출하기 위하여 주중인 2011년 10월 19일 수요일의 교통카드 데이터를 사용하였다. 교통카드 데이터를 통하여 수집 가능한 정보는 Table 1과 같다. 교통카드 데이터를 이용하여 승객 및 노선에 대한 정보를 획득할 수 있으며, 승객에 대한 정보는 승하차 시각, 정류소 정보와 탑승 노선, 탑승 차량, 탑승 거리를 알 수 있다. 또한, 개별 노선에 대해서는 운행횟수, 차량 대수, 차량별 출발시각 파악이 가능하여 배차계획 수립을 위한 효율적인 분석이 가능하다.

3.2 데이터 보정

본 연구에서는 Kim et al.[7] 연구의 교통카드 보정 방안에 따라, 교통카드데이터에서 발생 가능한 데이터의 오류 및 결측 현황을 검토하고 이를 보정하였다.

Table 1. Scheme of Smart Card Data

Division	Scheme	Division	Scheme
1	Smartcard ID	9	Run Departure time
2	Transaction ID	10	Ride Time
3	Transportation ID	11	Ride Station ID
4	Transfer Count	12	Alight Time
5	Route ID	13	Alight Station ID
6	Operation ID	14	Passenger Count
7	Vehicle ID	15	Ride Fare
8	User ID	16	Alight Fare

오류의 경우 기대치 오류와 논리 오류로 구분하였으며 결측의 경우 승차 결측과 하차 결측으로 구분하였다.

기대치 오류는 각각의 칼럼의 입력값이 기대치를 벗어나는 오류로 등록된 교통수단 이외의 ID가 입력된 경우, 환승 횟수가 4번을 초과한 경우, 탑승객 수가 0명으로 입력된 경우 등이 있다. 본 연구에서 사용한 데이터에서 기대치 오류는 그 발생빈도가 0.001% 미만이었다. 논리 오류는 논리적으로 불가능한 값이 입력된 경우로 하차시간이 승차시간보다 빠르거나 승하차 시간의 차이가 3시간 이상일 경우가 있다. 논리 오류의 경우 그 발생빈도는 0.01% 미만으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제안하는 알고리즘 수행과정에서 분석결과에 직접적인 영향을 주지 않을 것으로 판단하여 기대치 오류 값과 논리 오류 값을 포함한 칼럼을 필터링 기법을 통해 제외하였다.

승차정보 결측은 본 연구에서 사용한 데이터에서 발생하지 않았으며 하차정보 결측의 경우 7.5% 정도의 높은 발생빈도를 보였다. 하차결측에 대해서는 별도의 보정 작업이 필요하다고 생각하여 버스 이용자의 연계 통행자료를 이용해 유실된 하차 결측 정보를 역추정하여 결측 값을 보정하는 방법을 사용하였다[10].

3.3 데이터베이스 구축

교통카드 데이터베이스는 7개의 테이블로 구축하였고 이중 실제 분석에 사용된 주요 테이블을 요약하면 Figure 1과 같다. 교통카드 테이블에는 승객들의 통행에 관한 정보가 저장되었으며 통행에 대한 기본적인 승객 정보, 탑승하차 정보, 노선 및 차량 정보가 포함되었다. 노선과 정류소에 대한 정보는 총 3개의 테이블에 분할 저장되었으며 승객의 승차 및 하차가

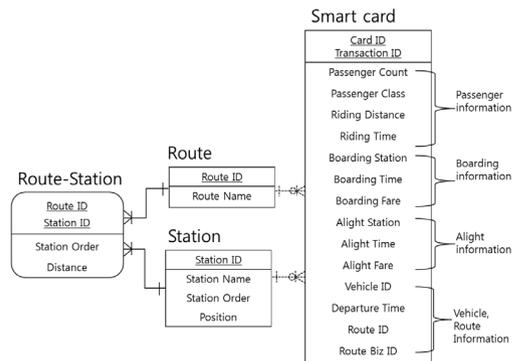


Figure 1. Conceptual Model of Smart Card Database

이루어진 정류장들의 위치값과 같은 구체적인 정보들이 포함되었다.

4. 대기시간 최소화 알고리즘

알고리즘 개발 및 수행과정은 보정된 교통카드 데이터베이스를 이용하여 승객 대기시간 최소화 알고리즘을 설계하고 이를 실제 노선에 적용하여 대기시간이 최소화되는 수렴 값을 찾아내는 순서로 진행된다 (Figure 2).

먼저 정류소별 차량의 도착시각을 승차가 발생한 정류소와 발생하지 않은 정류소로 구분해서 각각 결정한다. 이후 승객들의 승차분포를 도착분포로 변환하고 이를 바탕으로 현재 노선의 승객들의 대기시간을 계산한다. 마지막으로 정류소별 차량의 도착시각을 변경시키면서 승객들의 대기시간이 최소화되는 배차간격을 탐색하는 알고리즘을 반복 수행하여 최적 수렴 값을 도출해낸다.

4.1 정류장별 차량 도착시각 추정

앞서 구축한 교통카드 데이터베이스로부터 분석 노선의 노선정보와 승객들의 승차정보를 획득할 수 있다. 먼저 노선정보는 노선 ID, 노선을 구성하는 정류소, 정류소를 지나는 순서, 노선의 총 배차차량 및 순서 등을 포함하며, 승객들의 승차정보는 해당 노선을 이용한 승객 ID, 승객들의 승차정류소 및 승차시각을 포함한다. 본 연구에서 사용한 변수는 차량의 차고지 출발시각, 차량의 정류소 도착시각, 승객의 승차시각 및 대기시간, 탑승한 승객의 수, 차량이 정류소를 지나는 데 걸리는 최소시각이다.

우선 차량의 정류소별 도착시각을 추정하기 위해 탑승자가 있는 정류소와 탑승자가 없는 정류소에 대해 각기 다른 방법을 적용하였다. 탑승자가 있는 정류

소의 차량 도착시각은 정류소별 탑승한 사람들의 승차 최소시각을 바탕으로 계산하였다. 하지만 승객들이 승차하지 않은 정류소의 도착시각은 교통카드 데이터에서 별도로 저장하고 있지 않으므로 앞서 말한 방법으로 파악할 수 없다. 따라서 승객들이 승차하지 않은 정류소의 차량 도착시각은 별도의 추정방법이 필요하며 본 연구에서는 해당 일의 노선의 구간별 평균 통행시간을 통해 누락된 차량 도착시각을 추정하는 방법을 사용하였다. 구간별 평균 통행시간은 통행시간 측정이 가능한 차량만을 대상으로 계산되었다. 즉, 운행차량 중 구간을 구성하는 두 정류소의 탑승정보가 모두 존재하는 차량에 한하여 평균 통행시간을 계산하고 이를 이전 정류소 도착시각에 더하여 누락된 정류소의 도착시각을 계산한다. 구간별 평균 통행시간의 계산은 식 (3)과 같다.

$$T_j = \frac{\sum (T_{i,j} - T_{i,j-1})}{c} \quad (3)$$

여기서,

T_j : j 와 $j-1$ 정류소 사이의 평균 통행시간

$T_{i,j}$: i 차량의 j 정류소 도착시각

$T_{i,j-1}$: i 차량의 $j-1$ 정류소 도착시각

c : 통행시간의 측정이 가능한 차량 대수

4.2 승객들의 도착분포 추정

승객들의 도착분포와 차량별 정류소 도착시각을 이용하여 개인별 대기시간을 계산할 수 있으며 이를 수행하기에 앞서 승객들의 승차분포를 도착분포로 변환해주는 방법이 필요하다. 이를 위한 가정으로 차량과 차량 사이에 도착한 승객들은 균일한 분포로 도착하였다고 가정하였다. 즉, 승객들의 차량 승차시각은 교통카드 데이터를 이용하여 파악할 수 있으며, 승객들의 정류소 도착시각은 기 추정된 버스 도착시각으로부터 그 분포를 예측할 수 있다. Figure 3의 STEP 1은 버스도착 분포와 차량별 탑승자 수를 나타낸다. 여기서, i 번째 차량에 2명의 승객이 승차하였으므로 이 승객들은 $i-1$ 번째 차량과 i 번째 차량의 도착시각 사이의 시점에 해당 정류소에 도착하였다고 예상할 수 있다. 따라서 이 2명의 승객 도착시각을 $i-1$ 번째 차량과 i 번째 차량의 도착시각 사이에 균일하게 분포시킨다 (Figure 3 STEP 3). 본 과정을 해당 정류소를 지나간 해당 노선의 모든 차량에 대하여 반복 수행함으로써 해당 정류소에서 승차한 승객들의 도착분포 계산이

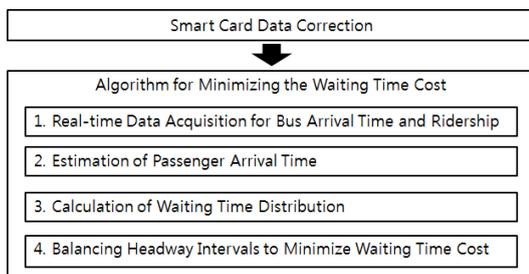


Figure 2. Algorithm for Minimizing the Waiting Time Cost

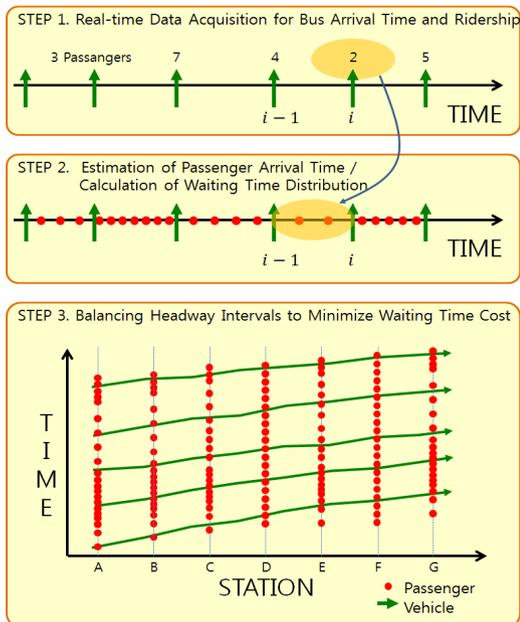


Figure 3. Step Sequence of Algorithm

가능하다. 이를 해당 노선의 전 정류소 구간으로 확장하여 적용한다면 해당 노선을 이용한 모든 승객들에 대한 도착분포 추정이 가능하다.

4.3 대기시간 비용 계산

그림 3의 STEP 3는 최종적으로 계산된 승객들의 도착분포와 해당 노선 버스의 정류소별 도착시각을 간략하게 표현한 것이다. 포인트는 개별 승객들의 탑승 정류소와 도착시각을 표현한 것이며 라인은 차량의 정류소별 배차시각을 연속적으로 표현한 것이다. 이를 통해서 승객들이 몇 번째 차량에 탑승하고 대기 시간을 얼마나 소모하였는지 계산할 수 있다. 여기서 대기시간은 승객들의 도착시각과 탑승 차량의 도착시각과의 차이를 이용하여 계산한다.

국내 대중교통 통행 비용의 산정은 임금율법과 한계대체율법을 사용하여 도출하는 것이 일반적이다. 한계대체율법과 임금율법을 적용하여 대기시간 비용을 산정한 연구 중 Son[13]의 연구가 가장 최신이며 비용 산정이 타당하다고 판단하여 본 연구의 대기시간 가치로 적용하였다. 이때 도출한 서울 시내 간 대기시간 가치는 시간당 2,722원이다.

4.4 차량배차간격 조절을 통한 대기시간 최소화

앞서 추정한 차량별 정류소 도착시각과 승객들의

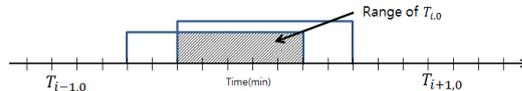


Figure 4. Determination of $T_{i,0}$

대기시간 분포를 이용하여 승객들의 대기시간을 최소화하는 차량 배차간격 조절 알고리즘을 제시하였다. 알고리즘 수행의 단계별 과정은 다음과 같다.

Step 0 : 초깃값 저장 및 저장변수 설정

알고리즘 수행을 위해 차량별 정류소 도착시각과 승객의 탑승 정류소와 정류소 도착시각을 저장하고, 대기시간을 최소화하는 배차간격과 최소 대기시간을 저장할 변수를 각각 생성한다.

Step 1 : 출발시각 변경차량 선택 및 범위 결정

차고지 출발시각을 기준으로 최초 출발차량과 최종 출발차량을 제외한 나머지 차량 중 한 대의 차량을 임의로 선택한다. 선택 차량의 출발시각의 범위는 Figure 4와 같이 직전 출발차량의 출발시각 3분 이후 10분 이내에 위치하며 직후 출발차량의 출발시각 3분 이전 10분 이내에 위치한다. 직전 차량과 직후 차량의 차고지 출발시각은 알고리즘이 최초로 실행될 때 교통카드 데이터를 통해 추정된 시각을 사용하며 이후에는 알고리즘으로 변경된 차고지 출발시각을 사용한다.

Step 2 : 변경된 차량의 정류소 도착시각 결정

Step 1에서 결정된 $T_{i,0}$ 의 범위에서 차고지 출발시각을 1분 단위로 변경시킨다. 변경된 차고지 출발시각에 따라서 정류소별 도착시각도 변화하게 된다. 정류소별 도착시각은 구간별 이동속도를 이용하여 계산한다. 각 차량은 시간대에 출발한 차량과 유사한 구간별 이동속도를 가질 것이며 본 논문에서는 직전 차량과 직후 차량의 움직임을 반영하여 정류소별 도착시각을 결정하였다. 그 식은 아래와 같다.

$$T_{i,j} = T_{i-1,j} + \left\{ (T_{i+1,j} - T_{i-1,j}) \times \frac{T_{i,0} - T_{i-1,0}}{T_{i+1,0} - T_{i-1,0}} \right\} \quad (5)$$

여기서,

- $T_{i-1,j}$: $i-1$ 차량의 j 정류소 도착시각
- $T_{i+1,j}$: $i+1$ 차량의 j 정류소 도착시각
- $T_{i-1,0}$: $i-1$ 차량의 차고지 출발시각
- $T_{i+1,0}$: $i+1$ 차량의 차고지 출발시각

i 차량의 차고지 출발시각과 $i+1, i-1$ 번째 차량 사

이의 차고지 출발시각과의 비율 차이가 각 정류소에 도착할 때도 일정하다고 가정하고 $T_{i,j}$ 를 결정한 것이다. 직전 차량과 직후 차량의 정류소 도착시각은 알고리즘이 최초로 실행될 때 교통카드 데이터를 통해 추정된 시각을 사용하며 이후에는 알고리즘으로 변경된 차고지 출발시각을 사용한다. 이는 각 차량의 직전, 직후 차량의 상황을 반영하여 선택 차량의 정류소 도

착시각을 계산함으로써 정류장 간 운행 거리와 시간 구간별 도로 정체, 신호 교차로 등과 같은 다양한 노선 상황을 간접적으로 반영한다.

Step 3 : 대기시간 계산 및 기존 최적 값과 비교 상위 단계에서 변경된 차량별 정류소 도착시각으로 교통카드 데이터를 통해 계산된 승객 도착분포를 이용하여 승객들의 총 대기시간을 계산한다. 최초 알고리즘 수행 시는 계산된 대기시간을 저장하고 최초가 아닌 경우 계산된 총 대기시간과 이전 대기시간과 비교하여 감소하였을 경우 차량별 정류소 도착시각과 대기시간을 저장한다. 다음의 과정을 Step 1에서 결정한 차량 출발시각 범위 동안 반복하여 승객들의 대기시간이 최소가 되는 선택차량의 출발시각을 결정한다.

Step 4 : Step 1-3 과정 반복수행

모든 차량이 선택될 때까지 Step1-3의 출발시각 변경 과정을 수행한다.

Step 5 : 대기시간이 수렴 시까지 반복 수행

이전 단계들을 통해 결정된 총 대기시간과 이전 반복에서 결정된 총 대기시간을 비교하여 변화가 없을 때까지 알고리즘을 반복 수행한다.

상기 절차를 도식화하면 Figure 5와 같이 나타낼 수 있다.

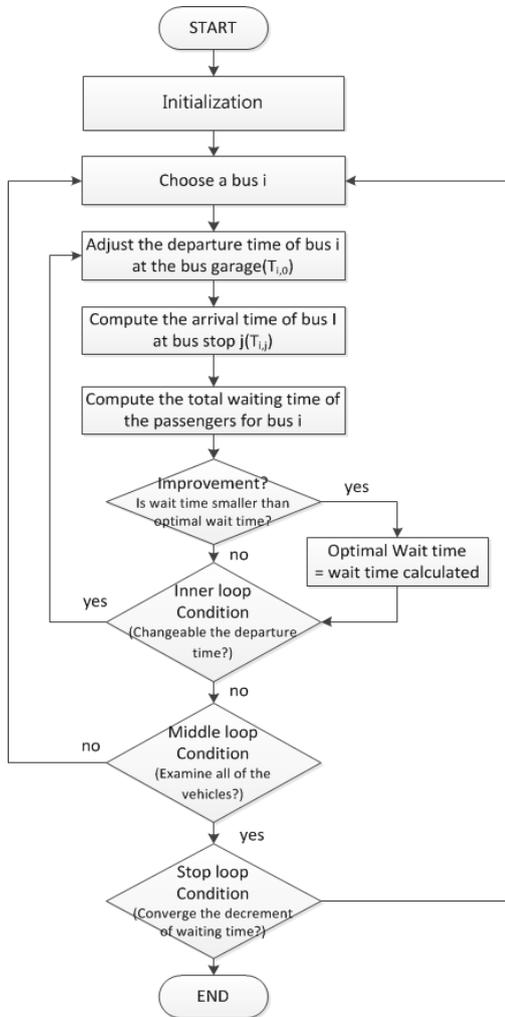


Figure 5. Algorithm for Bus Scheduling Optimization

5. 적용 및 효과분석

5.1 적용노선의 운행특성 및 승객의 도착분포

개발 알고리즘을 적용하고 평가하기 위해 C#(Visual studio 2012)을 이용하여 알고리즘을 구현하였으며, 적용대상 노선은 143번으로 선정하였다. 143번 노선은 간선노선으로 하루 평균 이용객이 가장 많은 버스 노선으로서 강북에서 강남을 통과하는 노선으로 지역 및 승객수요의 다양성이 반영되어 버스 배차간격의 적정성을 평가하는데 효율적이라고 판단하였다. 해당 노선의 총 길이는 60.729km로 3:37 AM에 첫 차량이

Table 2. Ridership Per Hour (Line No. 143)

Time	0	1	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ridership	179	7	182	319	668	2461	2458	1740	1128	1174	1220
Time	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Ridership	1362	1373	1733	2266	2238	2445	2121	1479	1467	1441	564

운행을 시작하였고, 마지막 차량이 10:10 PM에 차고지에서 출발하였다. 분석일 기준으로 31,433명이 탑

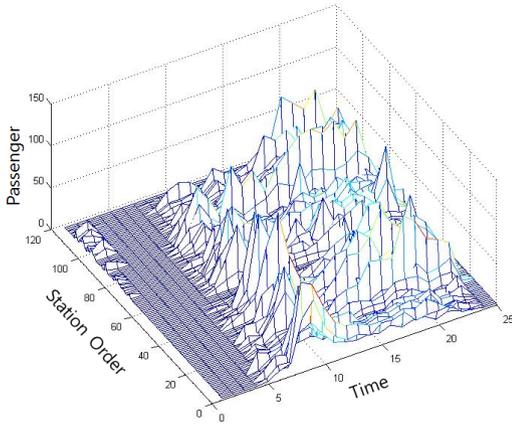


Figure 6. Station Ridership Per Hour (Line No. 143)

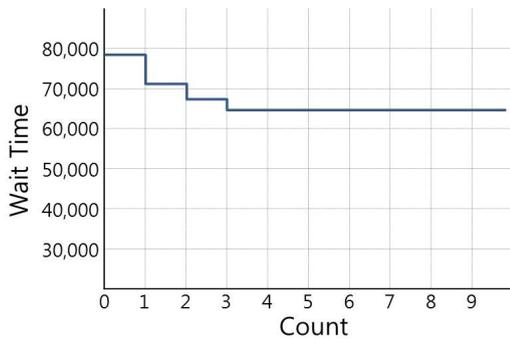


Figure 7. Convergence of algorithm

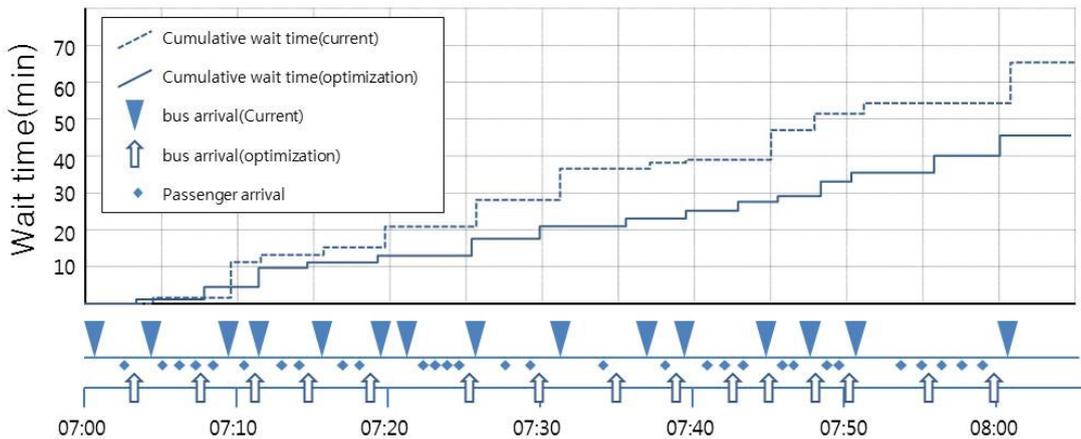


Figure 8. Change in Waiting Time according to Change in Headway between 7 and 8 AM (presented at the 75th Station of the Line No. 143)

승하였고 54대의 차량이 운행되었으며 본 노선의 총 운행횟수는 201회였다.

적용노선의 시간대별 승객 도착분포를 살펴보면 출근 시간대인 오전 7:00~10:00 사이에 2,000명 이상의 통행이 발생하고 있으며 퇴근시간대에는 16:00~20:00 사이에 많은 수의 통행이 발생하고 있음을 볼 수 있다 (Table 2). 퇴근시간대인 18:00~22:00에 가장 많은 통행이 발생하는 것이 일반적인 경우이나 143번 노선의 경우 퇴근시간대보다 2시간 앞선 시간대에 이미 높은 승차량이 발생함을 알 수 있다. Figure 6은 시간대별·정류소별 승차량 값을 3차원으로 표현한 것이다. 오전 시간대에는 높은 승차량 값을 가진 정류소가 30번째와 40번째 사이에 몰려있는 데 반해, 오후 시간대에는 높은 승차량을 가진 정류소들이 노선구간의 넓은 범위에 걸쳐 포진되어 있음을 알 수 있다. 이처럼 승차패턴이 어느 정류소에서 어느 시각에 변동할지 예측하기 어렵고 승차패턴 또한 노선과 정류소의 특성에 따라 다르므로 현재의 시간대별 일률적인 배차계획은 승객의 편익향상에 부합하기 어려울 수 있다.

5.2 배차간격 조절 알고리즘 시뮬레이션 결과

본 연구에서 제안한 알고리즘을 143번 노선에 적용한 결과, 다음 Figure 7과 같이 안정성 있는 수렴 결과를 보였다. 수렴 그래프의 X축은 수행횟수를 나타내며 Y축은 승객들의 총 대기시간을 나타낸다. 알고리즘 수행횟수가 증가할수록 계산된 총 대기시간의 변화가 점차 감소하며 수행횟수가 3회가 되었을 때 총 대기시간의 변화가 더 이상 나타나지 않았고 총 대기

Table 3. Hourly number of bus and waiting cost(Line No. 143)

Time Period	Number of buses		Waiting cost		Maximum occupants	
	Current system	Optimized system	Current system	Optimized system	Current system	Optimized system
03:00-04:00	1	1	671.4	567.1	20	20
04:00-05:00	10	9	907.3	871	15	15
05:00-06:00	13	14	22,706.9	20,242.6	26	27
06:00-07:00	16	18	31,825.6	28,199.9	34	33
07:00-08:00	14	12	45,525.5	42,490.4	41	36
08:00-09:00	13	13	225,057.2	192,495.8	36	33
09:00-10:00	9	10	204,603.7	179,652	35	33
10:00-11:00	9	9	114,863	95,719.1	35	32
11:00-12:00	10	10	158,877.7	157,948.6	34	36
12:00-13:00	11	11	207,787	201,749.6	36	36
13:00-14:00	11	12	239,465.7	209,337.7	41	40
14:00-15:00	13	12	200,287	179,053.2	51	46
15:00-16:00	12	12	157,599.7	126,804.4	47	38
16:00-17:00	11	11	172,482.3	153,480	41	43
17:00-18:00	10	10	223,297	218,739.9	51	42
18:00-19:00	10	10	181,795.6	167,811.3	39	35
19:00-20:00	10	10	195,461.4	173,064.8	35	37
20:00-21:00	8	9	214,364.3	184,941.8	34	33
21:00-22:00	9	8	105,349.6	86,251.1	25	26
22:00-23:00	1	1	230,038.5	195,258.1	13	13
23:00-24:00	0	0	366,000.1	176,222.3	0	0
24:00-01:00	0	0	223,424.5	112,895	0	0
01:00-02:00	0	0	43,612.8	27,700.9	0	0
Total	201	201	3566003.8	2,931,496.6	-	-

시간은 64,617분에 수렴하였다.

본 알고리즘을 통해 차량별 정류소 도착 위치를 결정하였지만 총 201회의 운행횟수와 118개의 정류소를 모두 나타내는 것은 어려우므로 임의의 정류소와 시간대를 설정하여 Figure 8과 같이 분석했다. 이는 차고지에서 75번째 정류소의 7:00~8:00 사이의 기존 차량의 움직임과 개선된 차량의 움직임을 나타낸 것이다. 삼각형 표시는 기존 차량의 정류소 도착한 시각을 나타내고 화살표는 본 알고리즘을 통해 조정된 차량 도착시각을 나타낸다. 또한, Figure 8의 그래프에서 점선은 회차별 기존 대기시간의 누적 값을 나타내며, 실선은 알고리즘 수행 후 회차별 개선된 대기시간의 누적 값을 보여준다. 분석결과 해당 시간대의 대기시간 누적 값은 알고리즘 수행 전 약 67분에서 알고리즘

수행 후 약 46분으로 21분 정도 대기시간의 감소가 발생하였다.

이를 Table 3과 같이 시간대별 버스 운행횟수, 승객들의 대기시간 비용과 최대 재차 인원의 변화를 표현하였다. 시간대별 운행횟수와 최대 재차 인원의 계산의 기준은 차량이 차고지에서 출발한 시각을 기준으로 시간대별로 몇 대의 차량을 출발시켜야 하는지를 계산한 것이다. 재차 인원은 차량이 각 정류소를 출발할 때 차내에 탑승한 승객 수를 의미한다. 대기시간 비용은 승객들이 탑승한 시간을 기준으로 시간대별 대기시간 비용의 증감이 어느 정도 발생하였는지를 계산하였다. 알고리즘을 수행하기 전 총 대기시간 78,607분에서 13,990분이 감소한 결과를 보였고 이는 17.8%의 대기시간 감소 효과를 의미한다. 대기시간

비용은 전 시간대에 걸쳐서 감소하는 추세를 보이고 있으며 특히 오후 2시 이후부터 큰 폭으로 감소하는 경향을 보여주고 있다. 평균 대기시간은 최초 2.905분에서 2.4분으로 약 0.5분이 감소하였다. 대기시간을 바탕으로 총 대기시간 비용을 계산해 보면 최초 3,566,003원에서 2,931,458원으로 615,489원의 비용감소 효과가 나타났다. 또한, 본 연구에서는 차내 혼잡도 가치를 비용으로 환산하여 총 교통비용에 포함하지는 않았으나 Table 3에서 볼 수 있듯이 알고리즘 수행 전 최대 재차 인원은 51명에서 46명으로 감소하였고 전반적으로 최대 재차 인원이 감소하는 경향을 보이고 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 승객들의 통행수요를 시간 분할 없이 정류소 단위에서 회차별로 파악하고 이를 바탕으로 다양한 제약조건을 반영하여 승객들의 대기시간을 감소시킬 수 있는 배차간격 조절 알고리즘을 제안하였다. 개발 알고리즘의 활용성 검증을 위해 143번 노선에 적용한 결과, 버스 대기시간 가치를 금전적으로 환산하는 방법을 적용하여 대기시간 감축비용을 계산하였을 때 비용절감 효과는 일일 기준 약 600,000원에 이르는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 별도의 비용 투입 없이 버스 배차간격 조절을 통해 버스 서비스 수준을 개선하는 방안을 제시하였다. 또한, 본 연구는 승객들의 시공간적 수요 분포 패턴의 특성과 변화를 고려할 수 있는 배차간격 조절방안을 제시하고 있다는 점에서 의미를 가진다. 국내에서 각 차량은 단일 노선을 운행하는 경우가 일반적이며 1시간 단위에 몇 대의 차량을 운행할지까지만 결정한다. 배차간격 변경 주거나 1시간 이내의 배차간격 조절은 버스업체 배차원의 경험과 지식을 통해 이루어지고 있다. 따라서 배차원의 경험과 숙련도가 뛰어나면 최적에 가까운 배차간격을 결정할 수 있지만 도로 상의 교통조건 변화의 예측이 어려우며 배차원의 숙련도가 낮거나 부재 시 최적에 가깝지 않은 배차간격을 사용할 수도 있다. 이는 업무의 효율성이나 자동화 수준 향상을 위해 시스템 개선이 필요한 부분이다[12]. 본 연구에서 제시한 알고리즘을 적용하여 승객들의 수요패턴을 바탕으로 배차계획을 작성하고 이를 프로그램으로 개발하고 상용화한다면, 배차원의 숙련도와 관계없이 승객들의 대기시간 비용을 감축할 수 있는 배차간격의 결정이 가능할 것이다.

그러나 본 연구에서 제시하는 방법론을 실제 현장에서 적용하기 위해서는 몇 가지 추가적인 보완이 필

요하다. 우선, 대기시간 가치의 적용을 2007년도의 자료를 이용하였으나 연구에서 사용한 교통카드 데이터는 2011년 데이터로 그 시간 단위가 다르므로 시점에 맞는 대기시간 가치를 적용하는 것이 필요할 것이다. 또한, 본 연구에서 제안한 알고리즘은 혼잡도와 차량용량제약과 같은 다양한 교통비용들에 대해 고려하는 것이 필요하다. 또한, 교통카드 데이터만을 이용하여 버스의 정류소 도착시각을 추정하는 방법을 사용하였으나 향후 교통카드 데이터와 버스운행관리 시스템에서 제공하는 버스의 정류소 출·도착 정보와 연계하여 활용한다면 보다 정확한 분석이 가능할 것으로 판단된다. 마지막으로, 본 분석은 하루 치 교통카드 데이터를 사용하여 분석의 결과를 제시하였기 때문에 해당 노선의 일반적인 패턴으로 간주하기엔 다소 무리가 있다. 따라서 본 연구에서 제시하는 방법론을 현장에 적용하기 위해서는 해당 노선의 수요패턴을 일반화할 수 있을 정도의 데이터 표본의 확장이 필요하다. 데이터의 시간적 범위를 일일 아닌 주나 월 혹은 년 단위로 확보하여 본 알고리즘을 추후 적용한다면 장기간의 배차계획을 결정하는 문제에서도 적용될 수 있는 확장성을 갖는다.

References

- [1] Ceder, A. 2002, Urban transit scheduling: framework, review and examples, *Journal of urban planning and development*, 128(4):225-244.
- [2] Fobes, M. A. 1994, An exact algorithm for multiple depot bus scheduling, *European Journal of Operational Research*, 72(1):115-124.
- [3] Lee, B. K. 2008, Analysis on Efficiency for a Bus Network System, Daejeon Development Institute.
- [4] Haghani; Ali; Banihashemi, M. 2002, Heuristic approaches for solving large-scale bus transit vehicle scheduling problem with route time constraints, *Transportation Research Part A Policy and Practice* 36(4):309-333.
- [5] Kim J. E. 2012, (A) study on the effect of adjusting bus headways using Seoul's traffic card data, Thesis of Seoul National University.
- [6] Kim, J. E; Cheon, S. H; Lee, Y. I. 2011, A Development For Bus Interval Decision Model Considering Congestion Ratio, *Journal of Korean society of Transportation*, 2011(1):292-296.
- [7] Kim, S. K; Park, J. H; Jo J. S. 2007, The Estimation

and Application of Origin-Destination Tables by Using Smart Card Data, Seoul Development Institute.

- [8] Kim, W. I; Son, B. S; Chung, J. H; Kim, E. C. 2011, Development of Real-Time Optimal Bus Scheduling and Headway Control Models, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2111(2):33-41.
- [9] Ko, S. Y; Ko, J. S. 1998, A Development of Optimal Bus Headway and Fleet Size Model, Journal of Korean Society of Transportation, 16(2): 169-176.
- [10] Newell, G. F. 1979, Some Issues Relating to the Optimal Design of Bus Routes, Transportation Science, 13(1):20-35.
- [11] Osuna, E. E; Newell, G. F. 1972, Control Strategies for an Idealized Public Transportation System, Transportation Science, 6:52-72.
- [12] Park, J. S; Ko, S. Y; Kim, J. S; Kwon, Y. S. 2007, Determining Transit Vehicle Dispatching Time, Journal of Korean Society of Transportation, 25(3):137-144.
- [13] Son, S. H; Choi, K. J; Yoo, J. H. 2007, An Estimation of Generalized Cost for Transit Assignment, Journal of Korean society of Transportation, 25(2): 121-132.
- [14] Wren, A; Wren, D. O. 1995, A genetic algorithm for public transport driver scheduling, Computers & Operations Research 22(1):101-110.
- [15] Yun, H. L; Kim, S. J; Sin, S. I; Lee, S. H; An, K. J. 2011, Proposals to Improve the Seoul City Bus Quasi-Public Operating System, The Seoul Institute.

논문접수 : 2014.8.28
 수정일 : 2014.10.27
 심사완료 : 2014.10.28