

단거리 순환버스 도입을 위한 통행패턴 기반의 우선순위 결정방법

A Prioritization Method Considering Trip Patterns to Introduce Short-turn Buses

문 세 동* · 김 동 규** · 조 신 형***

* 주저자 : 서울대학교 건설환경공학부 석박사통합과정

** 공저자: 서울대학교 건설환경공학부 부교수

*** 교신저자 : 서울대학교 공학연구원 선임연구원

Sedong Moon* · Dong-Kyu Kim* · Shin-Hyung Cho**

* Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul Nat'l Univ.

** Institute of Engineering Research, Seoul Nat'l Univ.

† Corresponding author : Shin-Hyung Cho, shinhungcho@snu.ac.kr

Vol.18 No.5(2019)

October, 2019

pp.1~18

pISSN 1738-0774

eISSN 2384-1729

<https://doi.org/10.12815/kits.2019.18.5.1>

Received 23 August 2019

Revised 21 September 2019

Accepted 14 October 2019

© 2019. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요 약

기존 노선의 일부 구간을 운행하는 버스를 '단거리순환버스(short-turn bus)'라 하는데, 단거리순환버스 관련 연구는 버스 네트워크보다 단일 노선에 대해 최적 회차지점을 결정하였으며, 대중교통의 편의성에 큰 영향을 미치는 차내혼잡을 고려하지 않은 한계가 존재한다. 따라서, 본 연구에서는 버스 네트워크의 노선별 및 구간별로 단거리순환버스 도입의 우선순위를 차내혼잡을 반영하여 결정하는 방법론을 개발하였다. 이를 위해 교통카드 데이터 기반으로 단거리순환버스 노선과 중복되는 기존 버스 노선들의 단거리순환버스 도입 전후의 재차인원을 산정하고, 단거리순환버스 도입 전후의 버스 네트워크 전체에서의 차내혼잡 감소 편익을 산정하였다. 또한, 단거리순환버스 도입으로 인한 운영자 및 사회적 비용을 산정하여 단거리순환버스를 도입할 노선 및 그 노선 내에서의 운행 구간을 변화시켜 반복적으로 결과를 도출하였다. 한 노선 내에서 단거리순환버스 도입의 비용/편익 비(B/C)가 가장 큰 구간을 그 노선의 단거리순환버스 도입 구간으로 채택하였다. B/C 값을 기반으로 버스 노선들의 단거리순환버스 도입 우선순위를 결정하였으며, 여러 노선에 도입할 경우의 최적 대수를 산정하였다.

핵심어 : 단거리순환버스, 차내혼잡비용, 통행패턴, 스마트카드 데이터

ABSTRACT

A short-turn bus is a bus that is operated within a subsection of an existing bus line. Previous studies regarding short-turn buses decided optimal turn-back points for a single bus line rather than a bus network. Also, in-vehicle crowding which has a significant impact on transit convenience was rarely considered. Therefore, this study aimed to develop a methodology to set priorities for the introduction of short-turn buses of bus lines and sections, considering crowding. To achieve this objective, we calculated occupancies and crowding alleviation benefits of existing bus lines overlapping a new short-turn route based on transit card data, before and after the introduction of short-turn strategy. Also, operator and social costs caused by the introduction of short-turn buses were calculated. Those procedures were iterated over bus lines and sections to operate a short-turn service, and a section whose benefit-to-cost ratio (B/C) is the largest in a line was selected to operate a short-turn service in the line. After, priorities of bus lines to introduce short-turn services could be

determined based on B/C values, and the optimum total fleet size could be determined when a short-turn strategy is applied in multiple lines.

Key words : Short-turn bus, Crowding cost, Travel pattern, Smartcard data

I. 서론

2017년 6월, 서울에서 출근시간대에 기존 버스노선의 차내혼잡구간을 집중적으로 운행하면서 차내혼잡을 분산하는 버스인 출퇴근맞춤버스, 일명 ‘다람쥐버스’가 운행을 시작하였다(Seoul Metropolitan Government a, 2017). 다람쥐버스는 한정된 차량을 차내혼잡구간에 집중적으로 투입함으로써 적은 비용으로도 효과적으로 차내혼잡을 완화하는 방법이라 할 수 있다.

서울의 다람쥐버스처럼 기존 대중교통 노선의 일부 구간만을 운행하는 것을 단거리순환(short-turn)이라 한다. 단거리순환버스를 도입하는 목적은 크게 세 가지가 있다. 첫째로, 차내혼잡도가 높은 구간을 반복운행함으로써 기존 노선의 수요를 분산하고 혼잡을 완화하기 위한 목적이 있다. 둘째로, 버스 노선 중에서 수요가 낮은 구간의 운행 횟수를 감축함으로써 운영비용을 절감하기 위한 목적도 있다. 셋째로, 승객이 집중되는 구간에 더 많은 버스를 배차함으로써 승객의 대기시간을 최소화하는 목적도 있다. 이러한 세 가지 목적 중에서 서울의 다람쥐버스는 차내혼잡 완화에 초점을 맞춘 사례라고 볼 수 있다.

현재는 차내혼잡 완화를 위한 단거리순환버스가 주로 단순히 혼잡이 있는 구간에 도입되고 있다. 예를 들어 서울시에서는 다람쥐버스의 도입 구간을 운수업체들이 제출한 혼잡구간 중 차내혼잡 여부(재차인원 60명 이상), 혼잡구간 길이(왕복 10km 내외의 단거리), 혼잡지속시간(1시간 내외) 등을 고려하여 선정하고 있다(Seoul Metropolitan Government a, 2017). 그러나 실제로는 혼잡이 있으면서도 단거리 통행자가 많은 구간에 단거리순환버스가 도입되어야 단거리 통행 수요를 흡수함으로써 혼잡을 효과적으로 분산할 수 있다. 또한, 지금까지의 단거리순환버스 관련 연구들은 버스 네트워크보다 단일 노선에 대해서만 최적 회차지점을 결정하였으며, 대중교통의 편의성에 큰 영향을 미치는 차내혼잡을 반영한 연구는 많이 이루어지지 않았다. 서울시에서 차내혼잡 여부를 바탕으로 단거리순환버스의 도입 구간을 결정하고 있으나, 이는 단순히 차내혼잡이 존재하는지의 여부에 따라 정성적으로 결정한 것에 불과하며 차내혼잡의 정도가 정량적으로 고려된 것이 아니다. 이 점들을 고려하여, 버스 네트워크 내의 단거리순환버스를 도입할 노선 및 구간을 차내혼잡을 반영하여 체계적으로 결정하는 방법론이 구축될 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 버스 네트워크에서 단거리순환버스 도입의 우선순위를 차내혼잡을 반영하여 결정하는 방법론을 개발하는 것을 목적으로 한다. 구체적으로 노선별 및 구간별로 단거리순환버스 도입을 위해 대상 네트워크에서 장거리 노선의 비중이 높은 시내버스(광역, 간선, 지선, 순환버스)를 대상으로 차내혼잡 완화 편익과 운행 비용을 산정하고, 이를 통해 우선순위를 선정하고자 한다.

II. 선행 문헌 검토

단거리순환버스에 대한 초기 연구에서는 기존 노선과 단거리순환노선의 스케줄을 작성함으로써 차량 대수(fleet size)를 최소화하는 것에 중점을 두었으며, 단거리순환버스 도입의 경제적 효과에 대한 정량적 분석보다 규칙 기반으로 단거리순환전략을 수립하는 방법론을 주로 사용하였다. Furth(1987)는 차량 대수를 최소

화하면서 승객의 대기 시간도 최소화하기 위한 단거리순환버스의 회차지점을 결정하였다. 해당 연구에서는 원래 노선과 단거리순환노선의 운행 빈도가 특정 정수비를 이뤄야 한다는 제약조건을 두었고, 공차회송과 interlining(한 대의 버스가 두 개의 노선을 번갈아 가면서 운행하는 것)을 동시에 고려하였다. Ceder(1989)는 차량 대수를 최소화하기 위해 원래의 버스 시간표에서 일부 버스 배차를 삭제하고 일부 배차는 단축하는 방식의 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다. 해당 연구에서는 배차간격의 최댓값을 최소화하고, 버스 운행구간의 최대 수요를 바탕으로 계산한 시간당 최소 운행빈도를 제약조건으로 하였다.

Vijayaraghavan and Anantharamaiah(1995)는 한 노선에서 차량의 분배를 위한 운영 전략으로서 급행 및 단거리순환을 제안하고 그 경제적 효과를 분석하였다. 해당 연구에서는 경제적 효과를 산정하기 위한 비용 및 편익으로 자본 비용 감소, 통행시간 감소, 수익 감소를 고려하였다.

이후의 연구에서는 승객의 대기시간, 차내시간과 운영 비용에 대한 경제학적 분석을 바탕으로 총 비용을 최소화함으로써 단거리순환전략을 최적화하였다. 이 중 일부 연구는 대기시간의 비용과 운영 비용의 합을 최소화하였고(Delle Site and Filippi, 1998; Chen and Niu, 2009), 다른 연구에서는 차내시간의 비용도 고려하였으나, 대부분의 연구에서는 차내시간이 승객들의 승차하 시간에 따라 달라지는 것으로 간주하였다(Cortés et al., 2011; Tirachini et al., 2011; Zhang et al., 2016). 이 연구들에서는 회차 지점, 차량 정원, 운행 빈도, 스케줄, 요금 등이 결정변수로 사용되었다. 일부 연구에서는 수요가 급증하는 정류장에 회차 지점을 설정하거나, 평균 통행량 대비 한 링크의 통행량의 비율을 지표로 사용하여 회차 지점을 설정하는 등, 규칙 기반으로 회차 지점을 결정하였다. 다른 연구에서는 회차 지점을 결정변수에 포함하여 최적화하였다. 또한, 일부 연구에서는 단거리순환과 공차회송 또는 급행을 통합한 전략도 고려하였다. 많은 연구에서 전역 최적화 방법을 사용하였으나, 일부 연구에서는 유전 알고리즘을 사용하였다.

Yang et al.(2017)은 차내혼잡의 완화에 중점을 둔 단거리순환전략을 수립하였다. 이 연구에서는 차내혼잡의 영향을 승객이 인지하는 차내시간 비용(perceived in-vehicle cost)의 일부분으로서 반영하였다. 이를 위해 bi-level 최적화 모형을 개발하였는데, 상위 모형은 총 비용을 최소화하였고, 하위 모형은 로짓모형으로서 이용자들의 단거리순환노선과 기존 노선 사이의 수단 선택을 반영하였다. 해당 연구에서는 한 기존 노선에 대해 차내시간 비용, 대기시간 비용과 운영비용의 합을 최소화하기 위한 회차지점을 결정하였다.

철도에서의 단거리순환전략은 지연이 발생하여 선행 열차와의 간격이 멀어졌을 때 이를 회복하기 위한 실시간 전략(Coor, 1997)이나 수요 증가, 차량 대수 감축, 외부 원인 등으로 인해 서비스에 문제가 발생하였을 때 이를 해결하기 위한 전략(Canca et al., 2012; Canca et al., 2016)으로 간주되었다. 이 연구들은 대기시간과 초과 수요를 최소화하고, 일정 서비스 수준을 유지하며, 단거리순환 열차가 처리하는 승객의 수를 최대화하고 열차의 혼잡도를 균일하게 하는 것을 목적으로 하였다. 결정변수로는 회차 지점과 서비스 오프셋이 사용되었으며, 일부 연구에서는 단거리순환과 선택정차의 통합 전략도 고려되었다. 또한, 철도 시간표의 불확실성을 완화하기 위한 단거리순환전략도 제안된 바 있으며(Mesa et al., 2009; Hadas and Ceder, 2010), 특히 Hadas and Ceder(2010)의 연구에서는 환승 편의를 위해 환승역에서 열차 시간표를 연동하는 경우에 시간표 불확실성을 완화하기 위한 단거리순환전략을 제안하였다.

차내혼잡으로 인해 승객들이 체감하는 불편을 수치화한 비용 또는 비효용(disutility)은 입석승객 밀도 또는 좌석 점유율과 차내시간의 곱에 대한 함수로 표현되어왔다(Whelan and Crockett, 2009; Hensher et al., 2011; Tirachini et al., 2013; Tirachini et al., 2014). 이 중 한 연구에서는 입석 상태의 승객과 착석 상태의 승객에 대해 차내혼잡의 비효용을 별도로 산정하였다. 차내혼잡의 비용은 로짓 모형의 파라미터 또는 차내시간 가치의 증가로서 표현되었으며, 입석승객 밀도와 좌석 점유율에 대해서 선형, 제곱 또는 로그함수로 표현되었다.

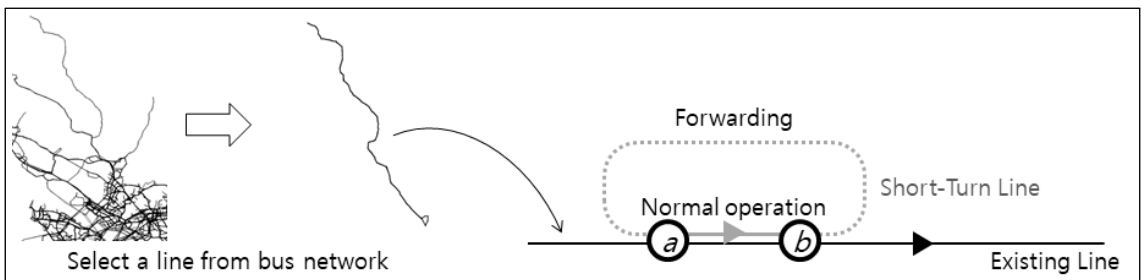
대중교통 네트워크는 일반적으로 여러 노선으로 구성되어 있으나, 지금까지의 단거리순환전략 관련 연구

는 전체 네트워크 중 어느 노선에 단거리순환을 도입할지보다 한 노선에서 어느 구간에 단거리순환을 도입할지 결정하는 데 초점을 맞추었다. 또한, 단거리순환을 도입하면 도입된 노선 외에도 이와 중복되는 다른 노선들의 수요가 영향을 받게 되며, 따라서 단거리순환의 차내혼잡 감소 편익을 산정하기 위해서는 네트워크 전체의 편익을 산정하여야 하나, 선행 연구들은 단거리순환이 도입된 노선만의 편익에 집중하였다. 그리고 대부분의 기존 연구는 운영 비용의 감축에 중점을 두었으며, 일부의 연구에서만 차내혼잡의 영향을 고려하였다. 따라서 본 연구에서는 대중교통 네트워크를 구성하는 노선 중 단거리순환전략을 도입할 노선을 선정하고, 네트워크 전체의 차내혼잡 감소 편익을 산정하며, 차내혼잡의 영향 또한 반영함으로써 기존 연구의 한계를 해결하고자 한다.

Ⅲ. 연구 방법론

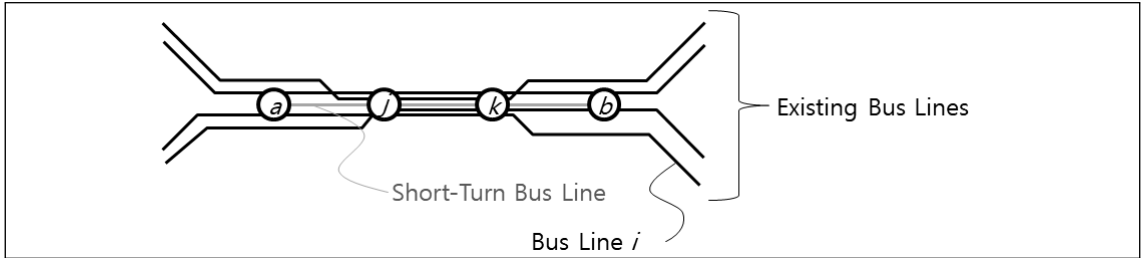
1. 단거리순환버스 도입 방법론

본 연구에서는 버스 네트워크에서 한 노선을 선택하고, 해당 노선의 두 정류장 a, b 사이에 $a \rightarrow b$ 방향으로의 정상 운행, $b \rightarrow a$ 방향으로의 회송하는 단거리순환버스를 도입하는 상황을 가정하였다<Fig. 1>. 우선 단거리순환버스 도입 이전의 O-D쌍(Origin-Destination Pair, O-D Pair) 간 수요는 현재의 교통카드 데이터를 바탕으로 산정할 수 있다. 단거리순환버스는 혼잡한 시간대에 차내혼잡을 완화하기 위해 도입되는 것이므로, 최대 재차인원이 나타난 시점의 교통카드 데이터를 기반으로 단거리순환버스 도입 노선을 결정하는 것이 타당하다. 그러나 최대 재차인원이 나타난 순간의 교통카드 데이터를 사용하면 표본이 작아 오차가 발생할 수 있으며, 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 일정 시간 동안의 수요에 (그 시간 동안의 최대 재차인원)(그 시간 동안의 평균 재차인원)을 곱한 값을 최대 재차인원이 나타난 시점의 수요로 가정하고 사용하였다.



<Fig. 1> Problem definition of this study

우선 O-D쌍의 출발지·도착지 중 하나 이상이 단거리순환버스 노선에 포함되지 않는다면, 그 수요는 단거리순환버스 도입 후에도 변하지 않는다고 가정할 수 있다. 그리고 출발지·도착지가 모두 단거리순환버스 노선에 포함된 O-D쌍의 단거리순환버스 도입 이후의 수요는 다음과 같이 산정되었다. <Fig. 2>와 같이 단거리순환버스 노선 상의 두 정류장 j 와 k 를 경유하는 어떤 기존 노선 i 에 대해, 단거리순환버스 도입 전의 O-D쌍 (j, k) 간 수요를 $\lambda_{i,jk}$ 라고 하자. 그러면 O-D쌍 (j, k) 간 전체 수요는 식 (1)과 같다.



<Fig. 2> Schematic diagram of bus lines overlapping a short-turn line

$$\Lambda_{jk} = \sum_i \lambda_{i,jk} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, i : 정류장 j, k 를 경유하는 임의의 기존 버스 노선
 Λ_{jk} : O-D쌍 (j, k) 간 전체 수요
 $\lambda_{i,jk}$: 단거리순환버스 도입 전 기존 버스 노선 i 의 O-D쌍 (j, k) 간 수요

단거리순환버스가 도입되면 O-D쌍 (j, k) 간 수요 중 일부가 단거리순환버스로 분산되는데, 본 연구에서는 단거리순환버스로의 수요 분산에 대해 다음과 같이 가정하였다. 첫째, j 와 k 사이의 총 수요(Λ_{jk})는 변하지 않는다고 가정하였다. 둘째, 전체 수요 중 단거리 순환버스의 운행빈도와 전체 운행빈도의 비율만큼 단거리순환버스를 탑승한다고 가정하였다. 이는 O-D쌍 (j, k)의 승객들이 기존 버스와 단거리순환버스를 차별하지 않고 무조건 먼저 오는 차량에 탑승한다는 가정을 바탕으로 한 것이다. 만약 차량들과 승객들이 동일한 간격으로 j 에 도착한다면, 각 차량마다 탑승하는 O-D쌍 (j, k)의 승객의 수는 동일하고, 따라서 단거리순환버스 또는 기존 버스의 전체 수요는 각각의 운행 빈도에 비례하게 된다. 셋째, 기존 노선들의 수요의 비율은 단거리순환버스 도입 이전의 수요의 비율과 동일하다고 가정하였다. 이는 선택 공리(Luce, 1959)에 기반한 것으로, 선택 공리에서는 두 대안(기존 노선) 간의 선택 확률의 비율은 다른 대안(단거리순환버스)의 존재 여부에 영향받지 않는다. 이 가정들에 따라, 단거리순환버스 도입 이후에 O-D쌍 (j, k)에 대해서 단거리순환버스 노선(s)의 수요와 어떤 기존 노선(m)의 수요는 각각 식 (2), (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda'_{s,jk} = \Lambda_{jk} \frac{f_s}{\sum_i f_i + f_s} = \sum_i \lambda_{i,jk} \frac{f_s}{\sum_i f_i + f_s} \quad (j, k \in s) \dots\dots\dots (2)$$

$$\lambda'_{m,jk} = \Lambda_{jk} \left(1 - \frac{f_s}{\sum_i f_i + f_s} \right) \frac{\lambda_{m,jk}}{\Lambda_{jk}} = \sum_i \lambda_{i,jk} \frac{\sum_i f_i}{\sum_i f_i + f_s} \frac{\lambda_{m,jk}}{\sum_i \lambda_{i,jk}} = \lambda_{m,jk} \frac{\sum_i f_i}{\sum_i f_i + f_s} \quad (j, k \in s) \dots\dots\dots (3)$$

$$f_s = \frac{F_s}{T_s} \dots\dots\dots (4)$$

여기서, m : 기존 버스 노선
 s : 단거리순환버스 노선
 $\lambda'_{m,jk}, \lambda'_{s,jk}$: 단거리순환버스 도입 후 기존 버스 노선 m 과 단거리순환버스의 O-D쌍 (j, k) 수요
 f_i, f_s : 기존 버스 노선 i 와 단거리순환버스의 시간당 운행 빈도
 F_s : 단거리순환버스에 투입되는 차량 대수(fleet size)
 T_s : 단거리순환버스의 왕복 운행 시간(hr)

2. 재차인원 산정

어떤 버스 노선의 모든 O-D쌍 간 통행량이 주어져 있다면, n 번째와 $n+1$ 번째 정류장 사이의 평균 재차인원은 n 번째 이전 정류장에서 출발하여 $n+1$ 번째 이후 정류장을 목적지로 하는 총 통행량을 그 노선의 운행 횟수로 나누어 구할 수 있다. 따라서 기존 노선 m 에 대해서 $n, n+1$ 번째 정류장 사이의 단거리순환버스 도입 이전의 재차인원은 식 (5)와 같이, 단거리순환버스 도입 이후의 재차인원은 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$O_{m,n} = \frac{V_{m,n}}{\tau f_m} \dots\dots\dots (5)$$

$$V_{m,n} = \sum_{o \leq n, d \geq n+1} \lambda_{m,od} \dots\dots\dots (6)$$

$$O'_{m,n} = \frac{V'_{m,n}}{\tau f_m} \dots\dots\dots (7)$$

$$V'_{m,n} = \sum_{o \leq n, d \geq n+1} \lambda'_{m,od} \dots\dots\dots (8)$$

여기서,

- $O_{m,n}$: 단거리순환버스 도입 이전의 기존 버스 노선 m 의 $n, n+1$ 번째 정류장 사이의 재차인원
- $V_{m,n}$: 단거리순환버스 도입 이전의 기존 버스 노선 m 의 $n, n+1$ 번째 정류장 사이의 τ 시간 통행량
- $O'_{m,n}$: 단거리순환버스 도입 이후의 기존 버스 노선 m 의 $n, n+1$ 번째 정류장 사이의 재차인원
- $V'_{m,n}$: 단거리순환버스 도입 이후의 기존 버스 노선 m 의 $n, n+1$ 번째 정류장 사이의 τ 시간 통행량
- f_m : 기존 버스 노선 m 의 시간당 운행 빈도

단거리순환버스 노선은 단거리순환버스 도입 이전의 재차인원은 없으며, 단거리순환버스 도입 이후의 $n, n+1$ 번째 정류장 사이의 재차인원은 식 (9)와 같다.

$$O'_{s,n} = \frac{V'_{s,n}}{\tau f_s} \dots\dots\dots (9)$$

$$V'_{s,n} = \sum_{o \leq n, d \geq n+1} \lambda'_{s,od} \dots\dots\dots (10)$$

- 여기서, $O'_{s,n}$: 단거리순환버스의 $n, n+1$ 번째 정류장 사이의 재차인원
- $V'_{s,n}$: 단거리순환버스의 $n, n+1$ 번째 정류장 사이의 τ 시간 통행량

3. 차내혼잡 감소 편익 산정

단거리순환버스를 도입하면 수요가 분산됨으로써 차내혼잡이 완화되므로, 차내혼잡으로 인한 승객들의 불편이 감소한다. 이를 수치화한 것을 차내혼잡 감소 편익이라 할 수 있다. 차내혼잡의 불편을 비용으로 수치화하기 위해 본 연구에서는 Whelan and Crockett (2009)의 모형을 사용하였다. 해당 연구의 모형을 채택한 이유는 차내혼잡이 통행시간가치에 미치는 영향을 입석 승객 밀도에 대한 선형 함수 형태로 간단하게 표현하면서도, 착석 승객과 입석 승객의 통행시간가치를 별도로 산정하여 다른 모형에 비해 현실을 잘 반영하고 있다고 간주하였기 때문이다. 해당 연구는 철도를 대상으로 하였으나, 대중교통 수단 간 차내혼잡함수에는 큰 차이가 없는 것으로 가정할 수 있다(Hensher et al., 2011). Whelan and Crockett(2009)의 결과를 바탕으로 착석승객의 통행시간가치는 (11), 입석승객의 통행시간가치는 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$VOT_{scat} = VOT_0(1 + 0.105d) \quad (d \geq 0) \dots\dots\dots (11)$$

$$VOT_{stand} = VOT_0(1.53 + 0.085d) \quad (d > 0) \dots\dots\dots (12)$$

$$d = \frac{O - N_{scat}}{A_{stand}} \dots\dots\dots (13)$$

- 여기서, VOT_{scat} , VOT_{stand} : 착석승객과 입석승객의 실제 통행시간가치
 VOT_0 : 차내혼잡이 없을 때의 통행시간가치
 d : 입석승객 밀도(명/m²)
 O : 재차인원
 N_{scat} : 좌석 개수
 A_{stand} : 입석 면적(m²)

이에 따라 단거리순환버스 도입 전과 후에 어떤 노선 전체에서 발생하는 시간당 통행시간비용은 버스 1대 당 발생하는 통행시간비용에 시간당 운행 횟수를 곱함으로써 산출할 수 있으며 이를 식으로 표현하면 (14), (16)과 같다.

$$C_{t,l} = f c_{t,l} \dots\dots\dots (14)$$

$$c_{t,l} = \sum_{n=1}^{N_l-1} \{ VOT_{scat,l,n} t_{l,n} \min(O_{l,n}, N_{scat}) + VOT_{stand,l,n} t_{l,n} \max(0, O_{l,n} - N_{scat}) \} \dots\dots\dots (15)$$

$$C'_{t,l} = f c'_{t,l} \dots\dots\dots (16)$$

$$c'_{t,l} = \sum_{n=1}^{N_l-1} \{ VOT'_{scat,l,n} t_{l,n} \min(O'_{l,n}, N_{scat}) + VOT'_{stand,l,n} t_{l,n} \max(0, O'_{l,n} - N_{scat}) \} \dots\dots\dots (17)$$

- 여기서,
 l : 임의의 기존 버스 노선 또는 단거리순환버스 노선
 $C_{t,l}$: 단거리순환버스 도입 전 시간당 노선 l 전체에서 발생하는 통행시간비용
 $C'_{t,l}$: 단거리순환버스 도입 후 시간당 노선 l 전체에서 발생하는 통행시간비용
 $c_{t,l}$: 단거리순환버스 도입 전 버스 1대가 노선 l 전체를 운행했을 때 발생하는 통행시간비용
 $c'_{t,l}$: 단거리순환버스 도입 후 버스 1대가 노선 l 전체를 운행했을 때 발생하는 통행시간비용
 $VOT_{scat,l,n}$: 단거리순환버스 도입 전 노선 l 의 $n, n+1$ 번째 정류장 사이의 착석승객 통행시간가치
 $VOT'_{scat,l,n}$: 단거리순환버스 도입 후 노선 l 의 $n, n+1$ 번째 정류장 사이의 착석승객 통행시간가치
 $VOT_{stand,l,n}$: 단거리순환버스 도입 전 노선 l 의 $n, n+1$ 번째 정류장 사이의 입석승객 통행시간가치
 $VOT'_{stand,l,n}$: 단거리순환버스 도입 후 노선 l 의 $n, n+1$ 번째 정류장 사이의 입석승객 통행시간가치
 $O_{l,n}$: 단거리순환버스 도입 전 노선 l 의 $n, n+1$ 번째 정류장 사이의 재차인원
 $O'_{l,n}$: 단거리순환버스 도입 후 노선 l 의 $n, n+1$ 번째 정류장 사이의 재차인원
 N_l : 노선 l 의 정류장 개수
 $t_{l,n}$: 노선 l 의 $n, n+1$ 번째 정류장 사이의 통행시간

$C_{t,l}$ 과 $C'_{t,l}$ 의 차이는 노선 l 의 단거리순환버스 도입의 차내혼잡 감소 편익이다. 이를 단거리순환버스와 중복되는 기존 노선들에 대해 합산하고, 단거리순환버스 노선의 통행시간비용을 빼면 버스 네트워크 전체의 차내혼잡 감소 편익을 얻는다. 이를 식으로 나타내면 (18)과 같다.

$$B = \sum_i (C_{t,i} - C'_{t,i}) - C'_{t,s} \dots\dots\dots (18)$$

여기서, B : 버스 네트워크 전체의 시간당 차내혼잡 감소 편익
 $C_{t,i}$: 단거리순환버스 도입 전 시간당 기존 버스 노선 i 전체에서 발생하는 통행시간비용
 $C'_{t,i}$: 단거리순환버스 도입 후 시간당 기존 버스 노선 i 전체에서 발생하는 통행시간비용
 $C'_{t,s}$: 시간당 단거리순환버스 노선 전체에서 발생하는 통행시간비용

4. 단거리순환버스의 운행 비용 산정

단거리순환 전략 도입 시 차량의 대수가 많아질수록 더 많은 수요가 단거리순환 노선으로 분산되므로 차내혼잡 감소 편익은 증가한다. 그러나 그와 동시에 차량의 운행에서 발생하는 운영자 비용 및 사회적 비용이 증가하게 되며, 현실적인 최적의 단거리순환 전략을 결정하기 위해서는 차내혼잡 감소 편익과 운영자·사회적 비용 사이에 적절한 균형을 모색하여야 한다. 이에 본 연구에서는 단거리순환버스 도입 시의 운영자·사회적 비용 또한 산정하였다.

버스의 운행 비용은 운행차량대수와 대당 차량운행비용의 곱으로 표현할 수 있다(Bae et al., 2007). 그리고 대당, 시간당 차량운행비용은 대-km당 차량운행비용에 시간당 운행거리(속도)를 곱한 값이다. 따라서 단거리순환버스 도입 후 발생하게 되는 시간당 운행 비용은 식 (19)와 같다.

$$C = F_s v_s (c_o + c_s) = F_s \frac{D_s}{T_s} (c_o + c_s) \quad (19)$$

여기서, C : 단거리순환버스의 시간당 운행 비용
 v_s, D_s, T_s : 단거리순환버스의 속도(km/h), 왕복 운행 거리(km), 왕복 운행 시간(hr)
 c_o : 시내버스 1대-km 운행당 발생하는 운영자 비용
 c_s : 시내버스 1대-km 운행당 발생하는 사회적 비용

이와 같은 과정을 단거리순환버스를 도입할 노선을 변경하면서, 그리고 해당 노선 내의 모든 구간 (a, b)에 대해서 반복함으로써 단거리순환버스를 도입할 노선별·구간별 차내혼잡 감소 편익과 운행 비용을 산출하였다.

5. 도입우선순위 결정

차내혼잡비용의 최소화를 위해서는 버스 네트워크의 모든 노선에 단거리순환버스를 도입하는 것이 최적의 전략이나, 현실에서는 예산 및 자원의 제약이 존재하므로 단거리순환버스 도입의 우선순위를 결정하고 우선순위가 가장 높은 노선부터 단거리순환버스를 순차적으로 도입해나가는 것이 타당하다. 이에 본 연구에서는 버스 노선별로 단거리순환버스 도입의 우선순위를 결정하였다.

본 연구에서는 비용 대 편익 비율인 B/C (20)를 지표로 사용하여 버스 노선들의 단거리순환버스 도입 우선순위를 결정하였다. 이를 위해 먼저 각 노선별로 B/C가 가장 높은 구간을 그 노선의 단거리순환버스 도입 구간으로 채택하였으며, 노선의 B/C 값이 높은 노선부터 낮은 노선 순서로 노선별 단거리순환버스 도입 우선순위를 결정하였다.

$$B/C = \frac{B}{C} = \frac{\sum_i (C_{t,i} - C'_{t,i}) - C'_{t,s}}{F_s \frac{D_s}{T_s} (c_o + c_s)} \dots\dots\dots (20)$$

여기서, B : 식 (18)의 버스 네트워크 전체의 시간당 차내혼잡 감소 편익
 C : 식 (19)의 단거리순환버스의 시간당 운행 비용

IV. 데이터 및 모형 적용

1. 데이터

본 연구에서는 버스 이용자의 통행패턴을 활용하여 현재 운행 중인 버스 노선들의 혼잡비용을 감소시키기 위한 단거리순환버스를 도입한다. 따라서, 현재 버스 이용의 수요를 파악하고 수요에 따라 혼잡상황을 감소할 수 있는 단거리순환버스의 도입을 위해 서울시 스마트카드 데이터를 활용하였다. 또한, 단거리순환버스의 도입 이유에 맞게 문제를 풀기 위해서 오전첨두 시간대의 교통카드 데이터를 활용하였다. 단거리순환버스 도입 이전 및 단거리순환버스 도입 이후의 예상 O-D쌍 간 수요($\lambda_{i,jk}, \lambda'_{i,jk}, \lambda'_{s,jk}$)를 산정하기 위해, 2017년 5월 16-20일의 5일간 오전첨두 시간대(07~09시)에 승차한 교통카드 데이터를 사용하였다. 이 데이터는 교통카드를 이용한 각각의 대중교통 통행에 대해서 이용한 노선, 승차 일시, 승차 정류장, 하차 일시, 하차 정류장, 다인승 시의 이용 인원, 이용 거리, 이용 시간 등의 정보를 포함하고 있으며, 그 명세는 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Description of transit card data

No.	Information	No.	Information
1	Record ID	15	Ticketing Time
2	Virtual Card ID	16	Boarding Station ID (MOLIT*)
3	Fare Adjustment Region Code	17	Boarding Station ID (Transit Operator)
4	Card Classification Code	18	Alighting Date & Time
5	Vehicle ID (MOLIT*)	19	Alighting Station ID (MOLIT*)
6	Vehicle ID (Fare Adjustment Operator)	20	Alighting Station ID (Fare Adjustment Operator)
7	Vehicle Registration Number	21	Transaction ID
8	Departure (from depot) Date & Time	22	Number of Transfer
9	Arrival (to depot) Date & Time	23	User Classification Code
10	Mode	24	Number of Passengers
11	Line ID (MOLIT*)	25	Fare Charged on Boarding
12	Line ID (Fare Adjustment Operator)	26	Fare Charged on Alighting
13	Transit Operator ID	27	Total in-Vehicle Distance
14	Boarding Date & Time	28	Total in-Vehicle Time

* Ministry of Land, Infrastructure, and Transport of the Republic of Korea

또한, 기존 버스 노선의 운행 빈도 f_i 는 서울특별시 시내버스 인가현황 자료를 사용하였다. 이 자료는 서울특별시 면허의 버스 노선들에 대해 노선 번호, 유형, 총 운행 횟수, 첫차 시각, 막차 시각 등의 정보를 포함

하고 있으며, 그 명세는 <Table 2>와 같다. f_i 를 산정할 때는 (21)과 같이 버스의 일일 운행 횟수를 일일 서비스 시간으로 나누었다.

$$f_i = \frac{N_{service,i}}{HOS_i} \dots\dots\dots (21)$$

여기서,
 HOS_i : 버스 노선 i 의 일일 서비스 시간, 막차 시각과 첫차 시각의 차이에 해당
 $N_{service,i}$: 버스 노선 i 의 일일 운행 횟수

<Table 2> Description of bus authorization state data

No.	Information	No.	Information
1	Transit Operator	9	Authorized Line Length
2	Line Number	10	Authorized Round-Trip Time
3	Line Type	11	Total Number of Service per Day
4	Depot	12	Minimum Headway
5	Turning Point	13	Maximum Headway
6	Authorized Fleet Size	14	Time of First Bus Departure
7	Fleet Size in Service	15	Time of Last Bus Departure
8	Reserved Fleet Size		

2. 모형 적용

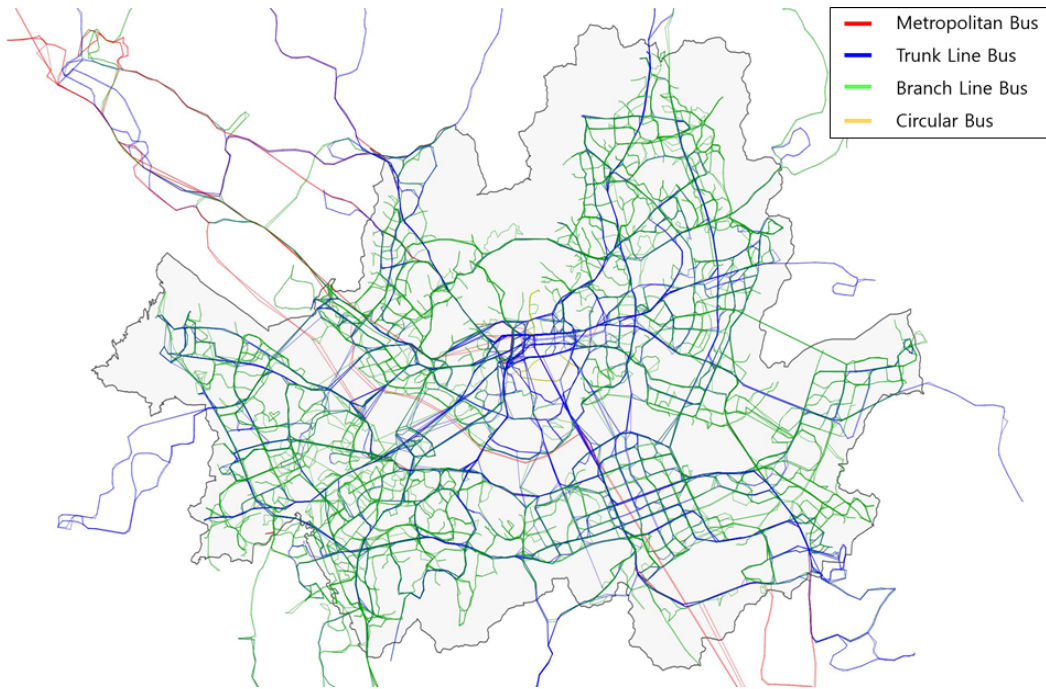
본 연구에서는 서울특별시의 343개 버스 노선에 대해 노선별로 단거리순환버스 도입의 차내혼잡 완화 편익과 운행 비용을 산정하고, 이를 통해 우선순위를 선정하였다. 본 연구의 대상 버스 네트워크를 그림으로 나타내면 <Fig. 3>과 같다.

식 (4)에서 단거리순환버스의 운행 빈도 f_s 를 산정할 때, 차량 대수 F_s 는 4대로 고정하였는데, 이는 서울에서 다람쥐버스의 차량을 편성할 때 버스의 증차 없이 다른 노선들의 유휴 예비차를 활용하는 것을 반영한 것이다(Seoul Metropolitan Government b, 2017; Seoul Metropolitan Government, 2018). 이 경우 확보할 수 있는 차량의 대수는 제한된다. 또한, 왕복 운행 시간 T_s 를 산출할 때, a 에서 b 까지의 정상 운행 시간은 기존 노선의 a 에서 b 까지의 운행 시간을 사용하였으며, 이는 교통카드 데이터에 나타난 a 에서 b 까지 탑승한 승객들의 이용 시간의 평균으로 구하였다. 그리고 b 에서 a 까지의 회송 시 버스는 다른 차량들과 동등한 속도로 이동한다고 가정하여, 회송 소요 시간은 b 에서 a 까지의 거리를 2017년 오전 철두 시간대의 서울 시내 평균 차량 속도(Seoul Metropolitan Government c, 2017)인 25.3km/h로 나눈 값을 사용하였다. 이때 운행 소요 시간이 120분 이상으로 산출된 경우에는 대상 시간대(오전 7~9시) 안에 운행을 모두 마치지 못하게 되므로 제외하였다.

식 (11)~(13)에서 승객의 통행시간가치를 산정할 때, VOT_0 은 교통시설 투자평가지침(Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2017)의 비업무 통행시의 버스 통행자 시간가치를 참고하여 5,011원/시간으로 하였다. 비업무 통행시의 시간가치를 적용한 것은 해당 지침에서 버스 통행자의 대부분을 비업무 통행으로 간주하였기 때문이다. 또한, 본 연구에서 활용되는 값인 버스의 좌석 개수 N_{seat} 및 입석 면적 A_{stand} 는 표준화된 값을 사용하기 위하여 도로용량편람(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2013)에서 버스의 서

비스 수준(LOS)을 산정하는 기준에 의하여 각각 31개, 7.5m²를 사용하였다.

식 (19)에서 운행 비용을 산정할 때, 대-km당 운영자 비용 c_o 는 인건비, 감가상각비, 보험료, 세금, 기타경비, 유류비, 정비관리비 등을 합쳐 2,240.1원/대-km, 사회적 비용 c_s 는 교통사고비용, 대기오염비용, 교통혼잡비용, 인프라비용 등을 합쳐 577.0원/대-km를 적용하였다(Jeon, 2016).



<Fig. 3> Bus network of interest in this study

3. 비용편익 분석 결과

단거리순환버스 도입의 편익 및 비용에 대한 기초통계량(최솟값, 중앙값, 평균, 최댓값)은 <Table 3>과 같다. <Table 3>에서는 전체 노선뿐만 아니라 노선 유형(간선, 지선, 광역, 순환버스)별로도 이들 기초통계량을 산정하였다. 또한, 각 노선별 단거리순환버스 도입 시의 편익 및 B/C의 도수분포표는 <Table 4>와 같다.

전체 노선의 대다수를 차지하는 간선 및 지선버스를 비교하면 다음과 같다. <Table 3>에서 간선버스는 단거리순환버스 도입 시 편익의 중앙값 및 평균이 지선버스에 비해 높게 나타났다. 그리고 <Table 4>에서 편익이 150,000원/시간 이상으로 나타난 노선의 비율은 간선버스가 38.5%, 지선버스가 15.4%로, 간선버스에서 그 비율이 더 높게 나타났으며 이는 <Table 3>의 결과에 부합한다. 그러나 편익의 최댓값은 지선버스에서 더 높게 나타났다. 또한, 어떤 노선에 대해 단거리순환버스 도입의 B/C가 1 이상이면 경제성이 있는 것으로 평가할 수 있다. 간선버스는 전체 노선의 23.0%에서 B/C가 1 이상, 10.7%에서 B/C가 1.3 이상으로 나타났으며, 지선버스는 전체 노선의 13.4%에서 B/C가 1 이상이며, 6.7%에서 B/C가 1.3 이상으로, 그 비율이 간선버스에 비해 상대적으로 낮게 나타났다. 따라서 간선버스는 평균적으로 지선버스에 비해 단거리순환버스 도입의 경제성이 높음을 알 수 있다.

순환버스는 <Table 3>과 <Table 4>에서 모두 단거리순환버스 도입의 편익이 가장 낮게 나타났으며, 특히

<Table 4>에 의하면 모든 노선에서 편익이 50,000원/시간 미만으로 나타났다. 광역버스는 순환버스에 비해서 상대적으로 높은 편익을 보였으나 <Table 3>에서 다른 버스 유형들에 비해 높은 비용을 나타냈다. 이에 따라 순환 및 광역버스는 B/C가 1 이상인 노선이 없어 단거리순환버스의 경제성이 부족한 것으로 나타났다.

<Table 3> Basic statistics of benefits and costs of short-turn buses (unit: won/hr)

Bus Type		Minimum	Median	Mean	Maximum	Standard Deviation
Total (n=343)	Benefit	0	63,893	89,657	401,084	85,682
	Cost	52,061	169,981	166,481	313,015	37,350
Metropolitan (n=10)	Benefit	2,450	62,019	71,108	178,159	53,473
	Cost	146,408	248,864	237,670	313,015	47,505
Trunk Line (n=122)	Benefit	1,949	130,554	127,359	311,030	84,929
	Cost	92,102	186,758	182,450	241,893	29,500
Branch Line (n=208)	Benefit	0	38,637	69,723	401,084	80,120
	Cost	52,061	156,251	153,981	240,097	33,493
Circular (n=3)	Benefit	138.7	157.0	346.6	744.2	344.4
	Cost	99,213	155,056	146,420	184,491	43,526

<Table 4> Frequency table of benefits and benefit-to-cost ratios (B/C) of short-turn buses

Bus Type		Benefit (won/hr)				B/C			
		0-50,000	50,000-100,000	100,000-150,000	150,000+	0-0.7	0.7-1.0	1.0-1.3	1.3+
Total (n=343)	Frequency	156	60	47	80	235	52	29	27
	Proportion	0.455	0.175	0.137	0.233	0.685	0.152	0.085	0.079
Metropolitan (n=10)	Frequency	5	3	1	1	9	1	0	0
	Proportion	0.5	0.3	0.1	0.1	0.9	0.1	0.0	0.0
Trunk Line (n=122)	Frequency	31	20	24	47	60	34	15	13
	Proportion	0.254	0.164	0.197	0.385	0.492	0.279	0.123	0.107
Branch Line (n=208)	Frequency	117	37	22	32	163	17	14	14
	Proportion	0.563	0.178	0.106	0.154	0.784	0.082	0.067	0.067
Circular (n=3)	Frequency	3	0	0	0	3	0	0	0
	Proportion	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0

4. 우선순위 선정 결과

1) 전체 노선의 우선순위

본 연구에서 전체 버스 노선에 대해 단거리순환버스 도입 우선순위를 B/C에 따라 결정한 결과를 10위까지 나열하면 <Table 5>와 같다. 상위 10개 노선 중 640, 507번은 간선버스, 나머지 8개는 지선버스로 나타났다. 또한 <Table 5>에는 편익의 순위도 같이 표시하였는데, 640, 6715, 6211번을 제외하면 B/C 순위 10위 이내인 노선들이 동시에 편익도 10위 이내에 드는 것으로 나타나, 대체로 단거리순환버스 도입의 편익이 높은 노선이 B/C도 높게 나타나서 단거리순환버스 도입의 경제성이 있는 것으로 판단되었다.

<Table 5> Short-turn service priority rank of total bus lines

Rank	Line No.	Line Type	Short Turn Zone	Distance (m)	Round-Trip Time (min)	B/C	Rank of Benefit	Benefit (won/hr)
1	5621	Branch Line	1 st - 10 th stop	3,466	30.0	2.57	1	401,084
2	5515	Branch Line	1 st - 12 th stop	3,581	29.3	2.11	3	349,677
3	3313	Branch Line	1 st - 13 th stop	5,017	41.3	2.07	5	341,026
4	5620	Branch Line	1 st - 16 th stop	4,576	37.1	2.05	4	342,579
5	640	Trunk Line	1 st - 8 th stop	2,428	25.8	1.95	19	248,974
6	6715	Branch Line	1 st - 8 th stop	2,428	25.6	1.94	20	248,535
7	3315	Branch Line	4 th - 21 st stop	7,226	53.2	1.91	2	351,552
8	6211	Branch Line	1 st - 8 th stop	2,428	25.1	1.88	21	245,859
9	5633	Branch Line	29 th - 41 st stop	3,926	33.6	1.84	9	291,028
10	507	Trunk Line	8 th - 20 th stop	3,925	31.4	1.79	7	303,202

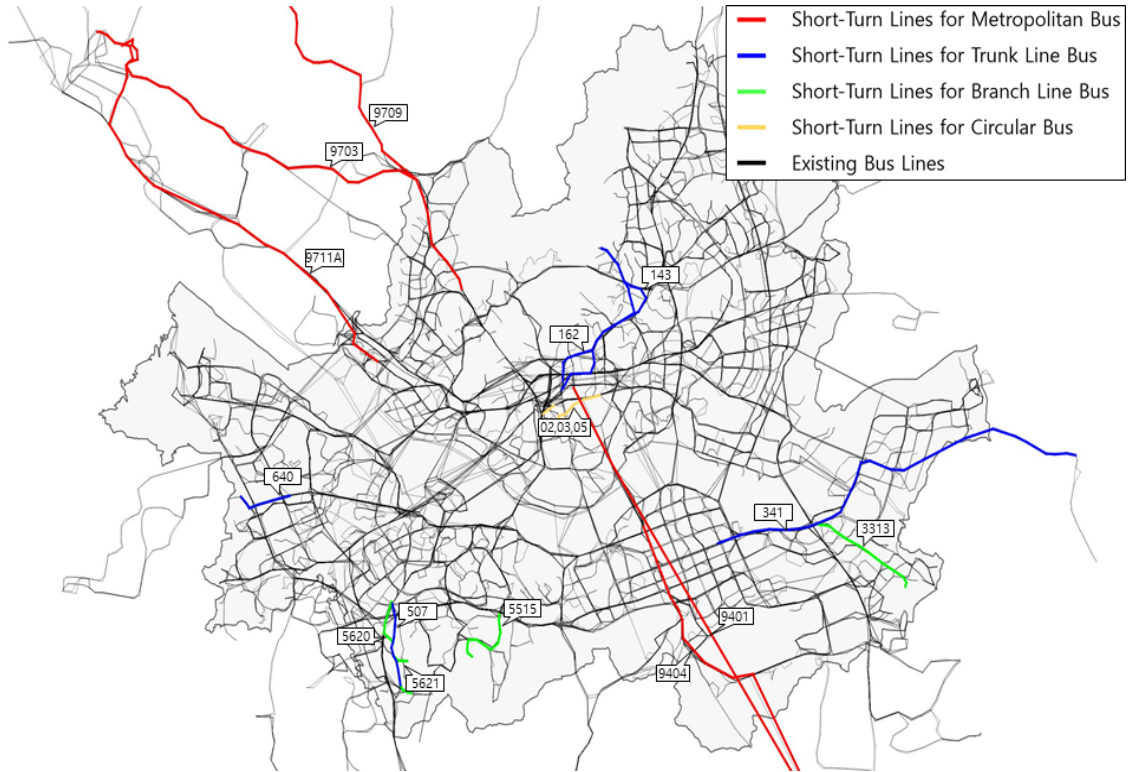
2) 버스 유형별 우선순위

버스 유형별로 단거리순환버스 도입 우선순위를 결정한 결과를 나열하면 <Table 6>과 같다. 간선, 지선, 광역버스는 각 5위, 순환버스는 3위까지 나열하였다. <Table 6>에서도 <Table 5>와 마찬가지로, 대체로 단거리순환버스 도입의 편익이 높은 노선이 B/C도 높게 나타나 단거리순환버스 도입의 경제성이 있는 것으로 판단되었다. 또한 <Table 6>에 나타난 단거리순환버스 도입구간들을 지도에 표시하면 <Fig. 4>와 같다.

<Table 6> Short-turn service priority rank by bus line types

Line Type	Rank	Line No.	Short Turn Zone	Distance (m)	Round-Trip Time (min)	B/C	Rank of Benefit	Benefit (won/hr)
Metropolitan	1	9711A	3rd- 30 th stop	21,868	119.6	0.72	1	178,159
	2	9709	22 nd - 61 st stop	22,031	118.9	0.39	3	98,526
	3	9404	11 th - 30 th stop	22,621	118.7	0.38	4	98,330
	4	9401	14 th - 25 th stop	27,291	117.9	0.37	2	117,279
	5	9703	8 th - 48 th stop	21,818	117.5	0.32	5	80,377
Trunk Line	1	640	1 st - 8 th stop	2,428	25.8	1.95	12	248,974
	2	507	8 th - 20 th stop	3,925	31.4	1.79	2	303,202
	3	162	1 st - 19 th stop	8,330	67.0	1.66	6	279,707
	4	143	1 st - 18 th stop	8,378	62.4	1.65	3	299,147
	5	341	10 th - 41 st stop	17,670	119.8	1.56	1	311,030
Branch Line	1	5621	1 st - 10 th stop	3,466	30.0	2.57	1	401,084
	2	5515	1 st - 12 th stop	3,581	29.3	2.11	3	349,677
	3	3313	1 st - 13 th stop	5,017	41.3	2.07	5	341,026
	4	5620	1 st - 16 th stop	4,576	37.1	2.05	4	342,579
	5	6715	1 st - 8 th stop	2,428	25.6	1.94	8	248,535
Circular	1	05	9 th - 10 th stop	483	6.6	0.01	1	744
	2	03	6 th - 7 th stop	630	5.5	0.00	3	139
	3	02	2 nd - 7 th stop	2,182	15.9	0.00	2	157

간선, 지선, 순환버스의 최적 단거리순환버스 도입구간 길이는 수 km 내외로, 일반적으로 수십 km에 이르는 전체 버스 노선에 비해 확실히 단거리라 할 수 있으나, 광역버스의 경우 이 구간이 수십 km에 이르며 <Fig. 4>와 같이 서울 외부에서 서울 내부까지 이어져 실질적으로 노선의 거의 전체를 차지하는 것을 관찰할 수 있다.



<Fig. 4> Map of short-turn lines in <Table 6>

5. 여러 노선에 단거리순환버스 투입 시의 최적 차량 대수 결정

여러 노선에 단거리순환버스를 투입하고자 하는 경우, 앞서 산출한 우선순위에 따라 순차적으로 투입할 수 있다. 본 연구에서는 전체 차량 대수에 제한이 없고, 가장 우선순위가 높은 노선부터 차례대로 해당 노선 내에서 B/C가 가장 높은 구간에 단거리순환버스를 4대씩 투입해 나갈 때 단거리순환버스가 도입된 노선들의 누적 총비용 및 누적 총편익을 산출하였다. 차량 대수에 제한이 없다면, 총편익에서 총비용을 뺀 값인 총 잉여(total surplus, 식 (22))가 최대가 될 때까지 단거리순환버스를 투입하는 것이 사회 전체의 이익을 최대화하는 방법이 된다.

$$TS = \sum_m B_m - \sum_m C_m \quad (22)$$

여기서, TS : 총 잉여

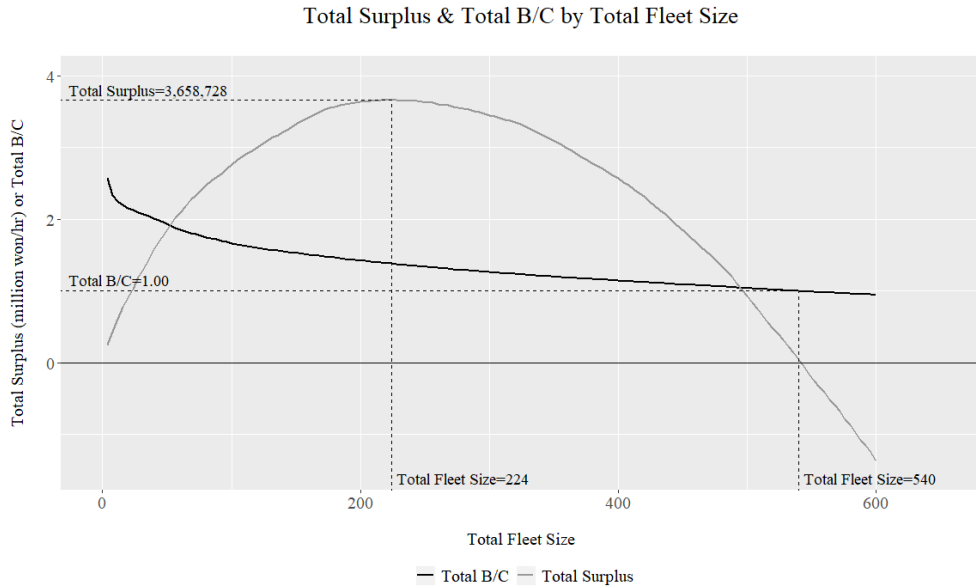
m : 단거리순환버스가 도입된 기존 노선

B_m : 버스 노선 m 에 단거리순환버스를 도입하였을 때의 시간당 차내혼잡 감소 편익

C_m : 버스 노선 m 에 단거리순환버스를 도입하였을 때의 단거리순환버스의 시간당 운행 비용

또한, 편익의 총합을 비용의 총합으로 나눈 값인 총 B/C가 1.0이 될 때까지 단거리순환버스를 투입한다면 사회 전체의 이익을 음으로 만들지 않으면서도 최대의 이용자 편익을 발생시킬 수 있는 방법이 된다.

투입된 차량의 대수와 총 잉여 및 총 B/C의 관계는 <Fig. 5>와 같다. 56개의 기존 노선에 224대의 단거리 순환버스를 투입했을 때 총 잉여가 3,658,728원으로 최대가 되며, 이때 사회 전체의 이익이 최대화된다. 이때 총편익은 13,220,730원/시간, 총비용은 9,562,003원/시간이다. 또한 135개의 기존 노선에 540대의 단거리 순환버스를 투입했을 때 총 B/C가 1.00이 되며, 이때 사회 전체적으로 손해를 보지 않으면서 이용자 편익이 최대화된다. 이때 총편익은 24,104,390원/시간, 총비용은 24,055,646원/시간이다.



<Fig. 5> Total Surplus and total B/C by total fleet size when short-turn buses are introduced in multiple existing bus lines

V. 논의

간선 및 지선버스를 비교하였을 때, 평균적으로 간선버스에서 단거리순환버스 도입의 편익 및 B/C가 높게 나타났다. 이는 간선버스가 지선버스에 비해 평균적으로 차내 재차인원이 많아 단거리순환버스 도입 시의 차내혼잡 완화 편익이 크게 나타남을 의미한다. 그러면서도 편익의 최댓값은 지선버스에서 더 높게 나타났으며, 전체 노선의 단거리순환버스 도입 우선순위를 B/C 순서로 나열하였을 때 상위 10개 노선 중에서 8개가 지선버스로 나타났다. 이는 지선버스가 평균적인 재차인원은 상대적으로 적으나, 노선 간 재차인원 편차가 커서 차내혼잡이 극심한 노선의 수는 오히려 간선버스보다 많음을 의미한다.

또한, 순환 및 광역버스는 단거리순환버스 도입의 경제성이 부족한 것으로 나타났으며 이는 이들 유형의 버스에는 단거리순환 전략이 적합하지 않음을 의미한다. 순환버스에서 편익이 낮게 나타난 것은 현재 서울시의 순환버스 노선들(02, 03, 05번)이 모두 남산을 연계하는 노선으로서 평일 출근 시간대의 특별한 수요처가 없다는 특징이 있는 것에 기인하는 것으로 보인다. 그리고 광역버스에서 비용이 높게 나타난 것은 광역버

스가 주로 위성도시에서 서울 시내의 장거리를 빠르게 연계하는 역할을 담당하여 운행 거리가 상대적으로 길기 때문에 볼 수 있다.

이와 같이 노선 유형별로 최적의 단거리순환 전략이 상이하므로 차내혼잡에 대한 개선방안 역시 노선 유형별로 다르게 수립되어야 한다. 간선 및 지선버스는 노선에 따라 다르나 단거리순환버스를 도입하였을 때의 경제성이 충분한 경우에는 단거리순환 전략을, 그렇지 않은 경우에는 노선 신설이나 급행 및 공차회송 등 다른 전략을 모색하여야 한다. 순환버스는 단거리순환버스 도입 편의 자체가 낮으므로 차내혼잡도가 해결이 필요할 정도로 높은 수준은 아닌 것으로 보이며, 광역버스는 최적 단거리순환버스 도입구간이 전체 노선과 동등한 수준의 길이로 나타난 것으로 보아 단거리순환보다 노선을 신설하는 것이 더 좋은 전략이 될 것으로 보인다.

단거리순환버스 도입 시의 B/C를 통해 노선별 단거리순환버스 도입 우선순위를 선정한 결과에서 편익이 큰 노선들이 B/C 또한 높아서 대부분 우선순위의 상위권에 위치하였다. 이를 통해 어떤 노선의 단거리순환버스 도입의 경제성은 주로 운행 비용보다 차내혼잡 감소 편익에 의해 크게 좌우되므로, 단거리순환전략을 수립하는 데 있어 차내혼잡 감소 편익은 반드시 고려되어야 할 중요한 요소임을 알 수 있다.

여러 노선에 단거리순환버스를 투입할 때의 최적 차량 대수를 결정하는 과정에서, 총 잉여가 최대가 되거나 총 B/C가 1이 될 때까지 단거리순환버스를 투입하는 것을 상정하여 최적의 차량 대수를 결정하였다. 이는 전체 차량 대수에 제한이 없다는 가정 하에서 결정된 것으로 실제와는 다를 수 있으나, 장기적인 전략 측면에서는 차량의 확충이 가능하므로 도시 전체의 단거리순환버스 운영 비용을 예측하기 위한 의미 있는 지표로서 활용이 될 수 있을 것이다.

VI. 결 론

본 연구에서는 차내혼잡 완화를 위한 단거리순환버스의 도입 우선순위를 결정하는 체계적인 방법론을 개발하고자 하였다. 그 일환으로, 본 연구에서는 교통카드 데이터에 나타난 실제 O-D 패턴을 이용하여 단거리순환버스를 도입할 노선 및 그 노선 내에서의 운행 구간별로 차내혼잡비용 감소 편익 및 운행 비용을 산정하였다. 이를 통해 단거리순환버스 도입 노선별 비용 대 편익 비율(B/C)에 따른 단거리순환버스 도입의 우선순위를 결정하였다. 또한 단거리순환버스를 여러 노선에 도입할 경우의 최적 대수도 산정하였다. 그 결과, 노선 유형별로 최적의 단거리순환 전략이 상이하게 나타났으며, 노선의 특성에 따라 단거리순환이 유용하지 않은 경우도 있었다. 또한, 단거리순환전략을 수립하는 데 있어 차내혼잡 감소 편익은 B/C에 영향을 미치는 중요한 요소로 반드시 고려되어야 한다. 그리고 본 연구에서 여러 노선에 단거리순환버스를 투입할 경우 총 잉여를 최대로 하거나 총 B/C가 1이 되는 것을 기준으로 하여 최적의 차량 대수를 결정하였는데 이는 장기적인 전략 측면에서 도시 전체의 단거리순환버스 운영 비용을 예측하기 위한 의미 있는 지표로서 활용이 될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 이용자와 운영자를 모두 고려하여 사회 전체적인 편익 및 비용을 바탕으로 단거리순환버스 도입의 우선순위를 결정하였다. 그러나 본 연구의 방법론을 현실에 적용하기 위해서는 버스가 공공체 혹은 준공영체로 운영되고 있어, 버스 회사가 추가적인 비용을 들여 단거리순환버스를 운행하더라도 그로 인한 비용을 공공으로부터 보전받아서 손해를 보지 않는 상황이어야 한다. 만약 버스가 완전 민영체로 운영되는 지역이라면 B/C 대신 수익성 및 재정적 타당성을 기준으로 단거리순환버스 도입의 우선순위를 결정해야 할 것이다.

우선 본 연구에서는 단거리순환버스 도입 이후의 예상되는 노선별 수요를 산정할 때 단거리순환버스로의 수요 분산에 대해 일정한 가정을 수립하여 이를 바탕으로 산정하는 식을 수립하였다. 향후 연구에서는 이보다 정확한 수요 산정을 위해 단거리순환버스와 기존 버스에 대한 수단선택모형이 수립되며, 도시 네트워크 상에서 차내혼잡비용을 가장 많이 감소시키는 운행경로를 생성하는 방법론이 필요하다. 또한, 승객의 입석과 착석에 대한 차내혼잡비용을 체계적으로 산정함으로써 더욱 정확한 분석이 이루어져야 할 것이다.

마지막으로, 본 연구에서는 각 노선마다 단거리순환버스를 4대 도입한다는 가정 하에서 노선별 최적 단거리순환버스 도입 구간을 결정하였고, 이를 기반으로 네트워크 전체의 최적 단거리순환버스 도입 대수를 결정하였다. 그러나 실제로는 어떤 구간에 단거리순환버스를 도입하였을 때 해당 구간을 통과하는 모든 노선의 통행량을 다시 계산해서 업데이트하고, 그 상태에서 새로운 최적 단거리순환버스 도입 구간 및 차량 대수를 결정하는 것을 균형 상태에 이를 때까지 반복함으로써, 네트워크 전체의 균형 상태의 해법을 탐색해야 할 것이다. 이에 대해서는 향후 연구에서 도출하고자 한다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 연구과제(과제번호 18TLRP-C149346-01) 지원 및 서울대학교 지원으로 수행하였습니다. 또한 본 논문은 2019년도 한국ITS학회 춘계학술대회(2019.4.18.~4.20)에서 발표되었던 연구를 수정보완하여 작성하였습니다.

REFERENCES

- Bae S. -H., Kim T. -Y. and Ryu B. -Y.(2007), "Improvement of Optimal Bus Scheduling Model Reflecting Bus Passengers' Degree of Satisfaction," *The Journal of Korean Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 6, no. 3, pp.12-22.
- Canca D., Barrena E., Laporte G. and Ortega F.(2016), "A short-turning policy for the management of demand disruptions in rapid transit systems," *Annual Operation Research*, vol. 246, pp.145-166.
- Canca D., Barrena E., Zarzo A., Ortega F. and Algaba E.(2012), "Optimal train reallocation strategies under service disruptions," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 54, pp.402-413.
- Ceder A.(1989), "Optimal design of transit short-turn trips," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1221, pp.8-22.
- Chen M.(2009), "Modeling Transit Scheduling Problem with Short-Turn Strategy For A Congested Public Bus Line," *The Eighth International Conference of Chinese Logistics and Transportation Professionals*, pp.4320-4326.
- Coor G. T.(1997), *Analysis of the Short-Turning Strategy on High-Frequency Transit Lines*, Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Cortés C. E., Jara-Díaz S. and Tirachini A.(2011), "Integrating short turning and deadheading in the optimization of transit services," *Transportation Research Part A*, vol. 45, pp.419-434.
- Delle Site P. and Filippi F.(1998), "Service optimization for bus corridors with short-turn strategies

- and variable vehicle size,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 32, no. 1, pp.19 - 38.
- Furth P. G.(1987), “Short Turning on Transit Routes,” *Transportation Research Record*, vol. 1108, pp.42-52.
- Hadas Y. and Ceder A.(2010), “Optimal coordination of public-transit vehicles using operational tactics examined by simulation,” *Transportation Research Part C*, vol. 18, pp.879-895.
- Hensher D., Rose J. M. and Collins A. T.(2011), “Identifying commuter preferences for existing modes and a proposed Metro in Sydney, Australia with special reference to crowding,” *Public Transportation*, vol. 3, pp.109-147.
- Jeon S.(2016), *Operation Cost Comparison Research of Transportation Modes in 2014*, pp.43-52.
- Luce R. D.(1959), *Individual Choice Behavior: A Theoretical Analysis*, New York: Wiley.
- Mesa J. A., Ortega, F. A. and Pozo M. A.(2009), “Effective allocation of fleet frequencies by reducing intermediate stops and short turning in transit systems,” *Robust and Online Large-Scale Optimization*, vol. 5868, pp.293-309.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport(2017), *Transportation Infrastructure Investment Evaluation Manual* (6th edition), Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, p.184.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2013), *Korea Highway Capacity Manual 2013*, pp.586-609.
- Seoul Metropolitan Government a, http://traffic.seoul.go.kr/archives/33776?tr_code=sweb, 2017.06.16.
- Seoul Metropolitan Government b, http://opengov.seoul.go.kr/sanction/12449034?tr_code=open, 2017.06.14.
- Seoul Metropolitan Government c(2017), *2017 Seoul Car Trip Speed Report*.
- Seoul Metropolitan Government, http://opengov.seoul.go.kr/sanction/14813588?tr_code=open, 2018.03.09.
- Tirachini A., Cortés C. E. and Jara-Díaz S. R.(2011), “Optimal design and benefits of a short turning strategy for a bus corridor,” *Transportation*, vol. 38, pp.169-189.
- Tirachini A., Hensher D. A. and Rose J. M.(2013), “Crowding in public transport systems: Effects on users, operation and implications for the estimation of demand,” *Transportation Research Part A*, vol. 53, pp.36-52.
- Tirachini A., Hensher D. A. and Rose J. M.(2014), “Multimodal pricing and optimal design of urban public transport: The interplay between traffic congestion and bus crowding,” *Transportation Research Part B*, vol. 61, pp.33-54.
- Vijayaraghavan T. A. S. and Anantharamaiah K. M.(1995), “Fleet Assignment Strategies in Urban Transportation Using Express and Partial Services,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 29A, no. 2, pp.157-171.
- Whelan G. and Crockett J.(2009), “An Investigation of the willingness to pay to reduce rail overcrowding,” *International Choice Modelling Conference, Harrogate*, 30 March - 1 April 2009.
- Yang X., Ji Y., Du Y. and Zhang H. M.(2017), “Bi-Level Model for Design of Transit Short-Turning Service Considering Bus Crowding,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2649, pp.52-60.
- Zhang H., Zhao S., Liu H. and Liang S.(2016), “Design of Integrated Limited-Stop and Short-Turn Services for a Bus Route,” *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2016, pp.1-9.