

S-BRT 주행로별 대중교통 우선신호 제어 전략

Control Strategy of Transit Signal Priority by S-BRT Driveway

김민지* · 한여희** · 김영찬***

* 주저자 : 서울시립대학교 교통공학과 석박사과정

** 교신저자 : 서울시립대학교 교통공학과 연구교수

*** 공저자 : 서울시립대학교 교통공학과 교수

Minji Kim* · Yohee Han** · Youngchan Kim***

* Dept. of Transportation Eng., Univ. of Seoul

** Dept. of Transportation Eng., Univ. of Seoul

*** Dept. of Transportation Eng., Univ. of Seoul

† Corresponding author : Yohee Han, yeohee@gmail.com

Vol. 21 No.5(2022)
October, 2022
pp.78~89

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2022.21.5.78>

요약

기존 간선급행버스체계(BRT)의 신속성 및 정시성 저해 문제를 해결하기 위해 도시철도의 이점을 BRT에 적용한 고급 간선급행버스체계(S-BRT)가 등장하였다. 국내 지침에서는 S-BRT 주행로를 기존 BRT 주행로와 동일한 전용차로와 전용도로로 분류하였다. 그러나 S-BRT와 BRT는 상이한 운행 목표와 특성을 지니므로 서로 다른 체계적인 S-BRT 주행로 구분이 필요하다. 이에 본 연구는 국내 여건을 바탕으로 S-BRT 주행로를 전용차로, 혼용차로, 일반차로로 분류하였다. 이후 목표 서비스 수준 달성을 위해 각 주행로별 특성을 바탕으로 대중교통 우선신호 제어 전략을 제시하였다. 대부분의 분석 시나리오에서 S-BRT 목표 서비스 수준을 달성했으며 전용차로, 혼용차로, 일반차로 순으로 높은 운행 속도를 보였다. 본 결과는 S-BRT 운행 시 각 주행로별 특성을 고려한 대중교통 우선신호 운영이 필요함을 시사한다. 본 연구의 결과는 향후 각 지자체에서 S-BRT 도입 시 주행로 설계와 우선신호 운영을 위한 자료로 활용 가능할 것으로 기대된다.

핵심어 : 간선급행버스체계, S-BRT, 주행로, 전용차로, 대중교통 우선신호

ABSTRACT

Super - Bus Rapid Transit (S-BRT), adding the advantages of urban railroads to BRT, has emerged to solve the problem of low speed and reliability of the existing BRT. Notably, the S-BRT driveway is classified into exclusive lanes and roads, as BRT, in the domestic guidelines. However, S-BRT and BRT have different operating goals and characteristics, so it is necessary to systematize the S-BRT driveway. Therefore, this study classified an S-BRT driveway into exclusive lane, shared lane with overtaking lane, and shared lane without overtaking lane based on domestic conditions. Subsequently, a control strategy for transit signal priority in each driveway was presented by the study based on the characteristics of the driveway to achieve the S-BRT target service level. Finally, the S-BRT target service level was almost achieved, and the travel speed was high and increased in the order respectively in the exclusive lane, shared lane with overtaking lane, and shared lane without overtaking lane in the study. Hence, it is important to operate a transit signal priority considering the characteristics of each driveway when operating the S-BRT. In essence, this study

Received 3 June 2022
Revised 27 June 2022
Accepted 5 October 2022

© 2022. The Korea Institute of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

is expected to be used as a reference for driveway design and transit signal priority operation when introducing S-BRT in each local government in the future.

Key words : Bus rapid transit, S-BRT, Driveway, Exclusive lane, Transit signal priority

I. 서 론

2000년대 초반 인구 및 산업시설의 수도권 집중 현상이 심화됨에 따라 교통체증이 심각해졌다. 도로 공급이 한정된 상황에서 교통수요를 효율적으로 관리하기 위해 대중교통 활성화에 대한 관심이 증가하였다. 이에 서울과 인근 도시를 연결하는 수도권 주요 간선도로에 철도와 버스의 장점이 적절하게 조화된 간선급행버스체계(BRT: Bus Rapid Transit)가 등장하였다 (Gang et al., 2005). 국토교통부에서는 「간선급행버스체계(BRT) 설계지침」과 「간선급행버스체계(BRT) 기술기준」을 마련하여 국내 여건에 부합한 BRT 서비스를 도입하기 위한 기준을 제시하였다.

국내 지침에서는 BRT 주행로를 전용도로, 전용차로, 혼용차로로 구분하고 있다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010). BRT 전용도로와 전용차로는 다른 교통수단과 분리된 BRT 차량만이 이용 가능한 도로 혹은 차로를 의미한다. 이와 달리 BRT 혼용차로는 전용차로 설치 시 물리적 제약으로 인해 일반차량과 BRT 차량이 혼용되어 운영되는 구간을 의미한다. 국내에서는 이러한 BRT 주행로의 특성을 고려한 다양한 연구를 시행하고 있다.

최근 정부가 3기 신도시를 발표하면서 기존 신도시 주민이 겪었던 광역 대중교통의 불편함을 해소하기 위해 광역 철도 건설에 비해 단기간, 저비용으로 교통문제를 해결할 수 있는 S-BRT(Super-BRT) 도입 계획을 발표했다(Ko, 2020). 이러한 상황을 고려하여 국토교통부에서는 S-BRT의 개념을 구체화하고 높은 수준의 서비스 수준을 제공하기 위해 「고급 간선급행버스체계 표준가이드라인」을 수립하였다. 본 가이드라인에서는 S-BRT 일반노선, 급행노선에 대해 각각 시속 25km, 시속 35km 달성을 목표로 대중교통 우선신호, 추월차로 등 세부 서비스 기준을 명시하였다. 그러나 S-BRT 운영 시스템과 목표 서비스 수준은 기존 BRT보다 높은 수준을 요구하고 있음에도 불구하고 본 가이드라인에서는 기존 BRT 지침과 동일한 전용도로, 전용차로로 S-BRT 주행로를 분류하고 있다.

이에 본 연구는 국내 지자체의 현실적인 도로 여건을 고려하여 S-BRT 주행로를 3가지로 분류하여 제안하고자 한다. 또한, S-BRT 운행속도 달성을 위해 각 주행로별 특성을 고려하여 도입 가능한 기존 대중교통 우선신호 제어 전략을 제시하고자 한다. 이를 통해 대중교통 우선신호 도입 시 S-BRT 주행로별 달성 가능한 서비스 수준을 제시하여 향후 지자체에서 S-BRT 도입 고려 시 기준이 되는 기초자료를 마련하고자 한다.

II. 선행연구고찰

1. 간선급행버스체계(BRT) 관련 지침

국내 BRT 도입 시 바탕이 되는 기준을 마련하기 위해 Ministry Of Construction & Transportation(2005)에서 BRT 계획과정과 운영 및 시행방안을 규정하였다. 이를 통해 BRT 도입 시 바탕이 되는 기준을 마련하였

으며 BRT 기반시설을 교차로, 전용차로 및 도로, 차량, 정류소 및 환승시설, 운영센터, 요금체계, 지원서비스 등 7개의 구성요소로 정의하였다. 이후 BRT 기반시설 공급 시 BRT 자동차, 전용차로, 운영관리시스템이 일관적이고 통일될 수 있도록 BRT 설계지침을 마련하였다(Ministry Of Construction & Transportation, 2006). 그러나 해당 설계지침이 활용되는 과정에서 BRT 시설 기준이 국내 실정 및 현장 여건 부합되지 않는다는 문제점이 제기되었다. 이에 기존 BRT 설계지침의 BRT 유형별 시설 및 설치 기준과 주행로, 정류장, 교차로 등에 대한 기준을 정비하기 위해 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2010)에서는 개정된 BRT 설계지침을 배포하였다. 개정 전 지침은 BRT 주행로를 전용도로와 전용차로로 구분하였으나 개정판에서는 물리적 제약이 있는 구간을 고려하여 일반차량과 혼용하여 운영할 수 있는 혼용차로를 추가하였다. 이후 2017년 국내 여건에 부합하며 적절한 서비스 수준을 제공하기 위한 BRT 기술기준을 마련하였다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2017). 해당 기술기준에서는 BRT 건설, 운영 및 유지 관리에 관한 기준을 내포하고 있다. 기반시설 이용방식에 따라 전용형과 혼용형 방식을 도입하였으며 전용형 BRT의 경우 해당 BRT 체계를 운영하는 노선이 BRT 시스템 내에서만 운행되고 시스템에 포함되지 않은 버스는 진출입이 불가하도록 정의하였다. 이와 달리 혼용형 BRT는 특정 축의 일부 구간에 BRT 인프라를 구축하고 이 구간의 전부 또는 일부를 기존 혹은 새로운 버스 노선이 운행 가능하도록 정의하였다.

2019년 3기 신도시 교통대책 및 수도권 광역교통개선대책의 일환으로 S-BRT(Super BRT) 도입을 발표함에 따라 S-BRT의 개념을 구체화하고 지하철 수준의 버스 서비스를 제공하기 위해 고급 BRT 표준가이드라인을 수립하였다. S-BRT는 전용주행로, 교차로 우선처리, 수평승하차, 전용차량 등을 바탕으로 일반노선의 경우 시속 25km, 급행노선의 경우 시속 35km 달성을 운영 목표로 한다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2019). S-BRT 운영 목표 달성을 위해선 S-BRT 전용도로 혹은 전용차로를 통해 신속성과 정시성을 확보해 줄 필요가 있다. 그러나 국내 여러 지자체에서는 일반차량의 주행로를 줄여 BRT 차로를 확충한 상황이다. 이로 인해 S-BRT 차로를 추가로 도입하기는 어려운 상황이다. 즉, 기존 BRT 차로에서 S-BRT와 BRT를 동시 운영 시 S-BRT의 신속성 및 정시성을 보장하기 위한 방안이 필요하다. 기존 BRT 관련 지침에서는 BRT 차량의 원활한 소통을 위해 추월차로 설치를 권장하고 있으나 모든 지자체에서 추월차로를 설치하고 있지는 않다. 따라서 이와 같은 상황을 고려하여 S-BRT 주행로를 재정의할 필요가 있다.

2. 대중교통 우선신호

대중교통 우선신호는 대중교통에 물리적, 운영적 통행우선권을 부여하는 방법으로 신호교차로에서 정지 지체 감소 및 통행시간 단축을 통해 승객의 수송 효율과 도로 교통의 수송 용량을 높일 수 있다(Kim et al., 2010). 우선신호는 제어 전략에 따라 크게 대중교통의 배차계획과 정차시간을 바탕으로 대중교통에 대한 신호 연동 계획을 수립하는 수동형 우선신호(passive priority)와 검지된 특정 대중교통 차량에 실시간으로 우선신호를 제공하는 능동형 우선신호(active priority)가 있다(Smith et al., 2005).

최근 기존 신호 연동 최적화 모형을 수동형 대중교통 우선신호에 적용한 다양한 연구가 시행되었다. 정류장에서 대중교통의 정차시간 변동성은 운행 서비스에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 대부분의 기존 연구에서는 버스의 평균 정차시간과 변동성을 고려하여 대중교통 중심의 최적 신호 계획을 생성하였다. Kim et al.(2019)은 버스 통행량이 많은 환경을 대상으로 버스의 정차시간 변동성을 고려하는 동시에 정류장 용량을 고려하여 신호 계획을 수립하는 수동형 우선신호를 설계하였다. Ma et al.(2018)는 일반차량과 대중교통 차량의 서로 다른 주행 분기점을 고려하여 두 교통수단에 대한 최적 신호를 산정하는 PM-BAND를 개발하였다. 또한, 일반차량과 대중교통의 수요를 바탕으로 최소 연동폭 크기, 정류장에서 발생하는 정차시간 및 추가 대

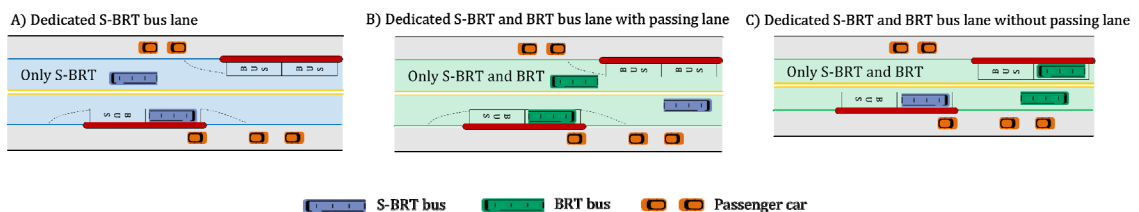
기시간을 최적화 시 반영하였다. Florek(2020)는 기존 신호 연동 최적화 모형 중 녹색시간을 보다 효율적으로 활용 가능한 AM-BAND를 이용해 최적 신호 연동 계획을 제공하는 BUS-AM-BAND를 설계하였다. Kim et al.(2021)은 버스의 계획 운행 스케줄을 바탕으로 정류장 단위의 신호 연동 계획을 제공하는 스케줄 기반 제어 전략을 마련하였다. 이때 정차시간이 계획보다 늦게 종료된 버스에 신속성과 정시성을 보장해주기 위해 하류부 연동폭 이용 가능 기회를 최대화하는 방법론을 설계하였다. Han et al.(2022)은 교차로 통과 전 정류장 (near-side stop)에서 발생하는 버스의 정차시간 변동성을 고려하는 동시에 정류장 단위로 일반차량과 버스에 교차로 무정차 통과를 지원하는 STEP BAND를 설계하였다.

능동형 우선신호 또한 버스 운행 서비스 향상을 위해 여러 연구가 진행되었다. Anderson and Daganzo (2019)는 배차간격 기반과 스케줄 기반 운행을 대상으로 각각에 대해 NTP(no transit signal priority), CSP (conditional signal priority), TSP(transit signal priority) 운영에 따른 영향을 분석하였다. 버스 서비스 측면에서 CSP와 TSP 운영 시 가장 많은 개선을 보였으나 CSP는 TSP보다 더 적은 횡수로 우선신호를 운영하여 타 이동류에 미치는 영향이 적으므로 결과적으로 CSP가 가장 우수하였다. Truong et al.(2019)는 불확실한 버스의 정류장 도착시간을 고려하여 운행 스케줄이 지연된 버스에 능동형 우선신호를 제공하는 확률적 최적화 모형을 설계하였다. 그러나 능동형 우선신호는 실시간으로 신호 운영 계획을 변경하여 다른 이동류에 부정적인 영향을 미칠 수 있어 일부 지자체에서는 이에 대한 우려를 보인다. 이에 본 연구는 S-BRT 주행로별 특성을 고려하여 적용 가능한 수동형 우선신호 제어 전략을 제시하고 이에 대한 효과분석을 진행하고자 한다.

III. 방법론

1. S-BRT 주행로

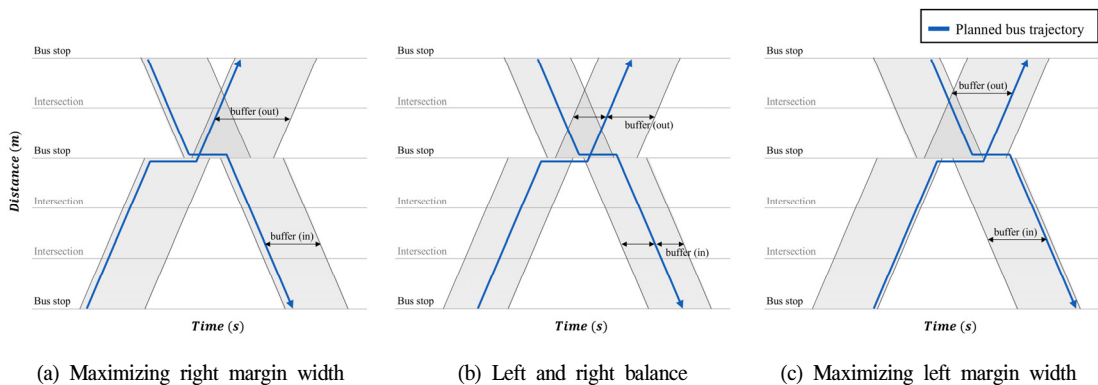
본 연구에서는 기존 BRT 지침에 명시된 주행로를 바탕으로 S-BRT 주행로를 제안하고자 한다. 국내 고급 BRT 표준 가이드라인에서는 전용주행로를 전용도로와 전용차로로 구분하고 있으며 S-BRT의 목표 운행 속도 달성을 위해선 전용주행로가 필요한 상황이다. 그러나 현재 국내 여러 지자체에는 BRT에 대한 인프라가 이미 구축되어 있으며 도로를 확장하여 S-BRT 주행로를 추가로 확충하기는 어려운 상황이다. 본 연구는 이러한 상황을 고려하여 <Fig. 1>과 같이 S-BRT 주행로를 전용차로, 혼용차로, 일반차로 등 3가지 형태로 분류하였다. S-BRT 전용차로의 경우 각 지자체에 도입 시 설계 단계에서부터 S-BRT 차량만이 통행 가능하도록 규정하여 S-BRT의 신속성과 정시성을 확보할 수 있도록 지원한다. 그러나 여러 BRT 차량이 운행되고 있는 지자체의 경우 S-BRT 도입 시 신규 차로를 확보하기가 어려운 상황이므로 기존 BRT 차로에 S-BRT가 운행 되도록 하나 추월차로 유무에 따라 S-BRT 혼용차로, S-BRT 일반차로로 분류한다.



<Fig. 1> S-BRT driveway types

2. S-BRT 주행로별 대중교통 우선신호 제어 전략

S-BRT 주행로는 차량 종류와 추월차로 유무에 따라 3가지로 구분된다. S-BRT 전용차로의 경우 추월차로가 존재하는 환경에서 S-BRT 차량만이 주행 가능하므로 도시철도 운영방식과 동일한 스케줄 기반의 운행이 가능하다. 이에 따라 S-BRT 전용차로에서는 S-BRT 차량의 운행 스케줄을 바탕으로 수동식 대중교통 우선신호 운영 계획을 산정할 필요가 있다. S-BRT는 운행 스케줄 기준 출·도착 기준 2분 이내 정시성 확보를 목표로 함에 따라 운행 스케줄 준수를 위한 대중교통 우선신호 전략이 필요하다. 대중교통 우선신호는 이를 지향하는 서비스 디자인과 정책이 함께 수반될 때 더욱 효과가 극대화될 수 있다(Altun and Furth, 2009). Kim et al.(2021)은 이러한 관점을 고려하여 모든 대중교통에 동일한 수동형 우선신호 효과를 보장하기 위해 대중교통 운행 스케줄을 신호주기 배수 배로 설계하였다. Kim은 <Fig. 2>와 같이 각 운행 스케줄과 연동폭이 있을 때 3가지 최적화 방안을 제시하였다. (a)는 양방향에 하류부 연동폭이 있을 때 운행 스케줄 기준 우측 여유폭(buffer)을 설정하여 해당 값을 최대화하는 것을 목적으로 한다. 이 경우 운행 스케줄이 지연된 차량에 연동폭 이용 가능 기회를 최대화할 수 있다는 이점이 있다. (b)는 운행 스케줄이 있을 때 시간 축 기준 좌측, 우측 여유폭을 균일하게 최대화하는 것으로, 운행 스케줄 기준 좌측, 우측 변동성을 모두 다룰 수 있다는 이점이 있다. (c)는 운행 스케줄 기준 좌측 여유폭의 합을 최대화한 것으로, 대중교통 차량이 계획 스케줄보다 빠르게 주행하는 경우를 다룰 수 있다. 시나리오 분석 결과 운행 스케줄이 지연될 때 버스 운행 서비스에 가장 큰 영향을 미침에 따라 (a)전략이 가장 우수하였다. 이에 본 연구에서는 S-BRT 전용차로에 Kim이 제안한 우선신호 전략 중 버스의 운행 스케줄이 있을 때 시간 축 기준 연동폭의 우측 여유폭을 최대화하는 (a)방안을 적용하고자 한다.



<Fig. 2> Schedule-based transit signal priority control strategy

S-BRT 혼용차로와 일반차로에서는 S-BRT와 BRT 차량이 함께 운행됨에 따라 두 차량의 운행 특성을 모두 고려할 수 있는 운영 계획이 필요하다. S-BRT 차량은 도시철도를 모방하기 위해 계획된 운행 스케줄을 기준으로 운영된다. 그러나 BRT 차량의 경우 대부분 배차간격 기반으로 운행됨에 따라 승객 승하차 인원에 따라 정차시간 변동성이 발생할 수 있다. 이 경우 기존 BRT가 S-BRT 운행에 영향을 미칠 수 있으므로 S-BRT 차량의 운행 패턴과 BRT 차량의 정차시간 변동성을 동시에 고려할 수 있는 제어 전략이 필요하다.

다양한 정류장 형태 중 교차로 통과 전 정류장은 승객 승하차 종료 후 적색 신호를 맞닥뜨릴 수 있어 정류장 정차시간에 가장 많은 영향을 미치는 형태이다. Han et al.(2022)은 교차로 통과 전 정류장에서 각 버스가 정류장에 무작위로 도착하는 환경을 대상으로 정류장에서 모든 버스의 지체시간의 합이 최소화되도록 대

중교통 우선신호를 설계하였다. 두 개의 연속적인 교차로 그룹(sub area)이 있을 때 식 (1)에서와 같이 상류부 교차로 그룹을 신호주기만큼 1초 단위로 평행이동하면서 각 조합별 버스의 지체시간을 산정하였다. 최적 조합을 찾기 위해 식 (2)와 같이 각 교차로 그룹의 연동폭 시작 시간 차이를 외부 옵셋(external offset)이라 정의하였다. 식 (3)-(6)은 특정 외부 옵셋 조합에서 진행 방향별 각 버스의 정류장 지체시간을 산정한 것이다. 추월차로가 존재하는 혼용차로의 경우 <Fig. 3>의 (a)에서와 같이 후행 버스가 선두 버스보다 승객 승하차가 먼저 종료될 경우 진행이 가능하다. 이에 따라 정류장 지체시간을 정차면 포화 시 대기시간과 신호에 의한 대기시간으로 분류하였다. 추월차로가 존재하지 않은 일반차로의 경우 후행 버스가 선두 버스보다 먼저 승객 승하차를 종료할지라도 (b)와 같이 진행을 할 수 없으므로 이에 대한 지체를 추가적으로 반영하였다. 이후 식 (7)-(8)에서와 같이 방향별로 각 버스가 정류장에서 경험하는 지체를 합산한 후 식 (9)와 같이 양방향 버스의 총 지체를 최소화하는 외부 옵셋을 최적 해로 채택하였다. Han은 식 (10)과 같이 신호주기 당 평균적으로 정류장에 도착하는 버스 대수, 평균 승객 승하차 시간과 변동성을 고려하였으며 이에 따른 개선 효과를 입증하였다. 이에 본 연구에서는 S-BRT 혼용차로와 일반차로에 Han이 제안한 모형을 바탕으로 신호운영 계획을 생성하고자 한다. 이때 모든 S-BRT 차량에 동일한 우선신호 효과를 부여하기 위해 S-BRT 차량은 기존 BRT 차량과 달리 운행간격을 신호주기 배수 배로 설정할 필요가 있다.

$$D_{n,\theta} = D_n + I \dots\dots\dots (1)$$

$$\Theta_n = D_{n+1} - D_{n,\theta} \dots\dots\dots (2)$$

$$WT_{(out)n+1,\Theta_j} = BWT_{(out)n+1,\Theta_j} + SWT_{(out)n+1,\Theta_j} \quad \text{if passing lane} \dots\dots\dots (3)$$

$$= BWT_{(out)n+1,\Theta_j} + SWT_{(out)n+1,\Theta_j} + PWT_{(out)n+1,\Theta_j} \quad \text{otherwise} \dots\dots\dots (4)$$

$$WT_{(in)n+1,\Theta_j} = BWT_{(in)n+1,\Theta_j} + SWT_{(in)n+1,\Theta_j} \quad \text{if passing lane} \dots\dots\dots (5)$$

$$= BWT_{(in)n+1,\Theta_j} + SWT_{(in)n+1,\Theta_j} + PWT_{(in)n+1,\Theta_j} \quad \text{otherwise} \dots\dots\dots (6)$$

$$TWT_{(out)n+1,\Theta} = \sum_j (WT_{(out)n+1,\Theta_j}) \dots\dots\dots (7)$$

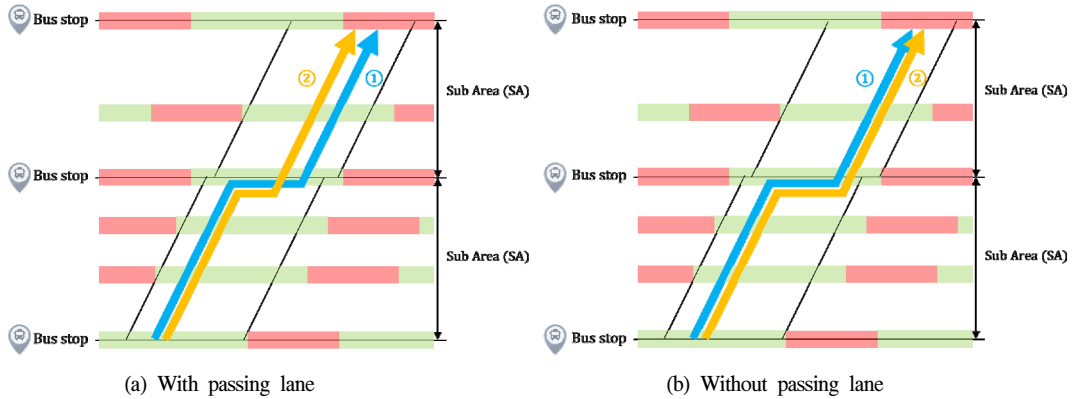
$$TWT_{(in)n+1,\Theta} = \sum_j (WT_{(in)n+1,\Theta_j}) \dots\dots\dots (8)$$

$$OP_n = \Theta \text{ when minimize}(TWT_{(out)n+1,\Theta} + TWT_{(in)n+1,\Theta}) \dots\dots\dots (9)$$

$$\forall i = 0, \dots, C_n - 1; \forall j = 0, \dots, N_{(out)n} - 1(N_{(in)n} - 1) \dots\dots\dots (10)$$

where,

- Θ_n : external offset between n_{th} sub area and $(n+1)_{th}$ sub area [s]
- D_n : outbound bandwidth starting point at n_{th} stop [s]
- C_n : n_{th} stop cycle length [s]
- $N_{(out)n}(N_{(in)n})$: average number of outbound(inbound) buses using n_{th} stop [bus/cycle]
- $WT_{(out)n,\Theta_j}(WT_{(in)n,\Theta_j})$: waiting time of outbound/inbound j_{th} bus at n_{th} stop [s]
- $BWT_{(out)n,\Theta_j}(BWT_{(in)n,\Theta_j})$: waiting time of outbound(inbound) j_{th} bus by failure to use the bus bay at n_{th} stop [s]
- $SWT_{(out)n,\Theta_j}(SWT_{(in)n,\Theta_j})$: waiting time for outbound(inbound) j_{th} bus by signal at n_{th} stop [s]
- $PWT_{(out)n,\Theta_j}(PWT_{(in)n,\Theta_j})$: waiting time for outbound(inbound) j_{th} bus by $(j-1)_{th}$ at n_{th} stop [s]
- $TWT_{(out)n,\Theta}(TWT_{(in)n,\Theta})$: outbound(inbound) total waiting time at n_{th} stop [s]
- OP_n : optimum external offset between n_{th} sub area and $(n+1)_{th}$ sub area [s]

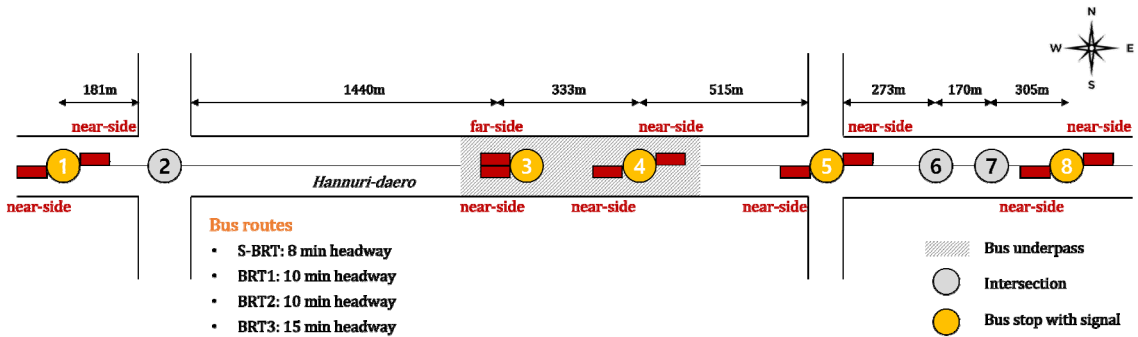


<Fig. 3> Bus trajectory with or without passing lane

IV. 분석

1. 분석 대상지 및 시나리오 설계

본 연구에서는 <Fig. 4>와 같이 세종시 한누리대로 일부 구간을 분석 대상으로 설정하였다. 분석 구간은 5개의 정류장과 3개의 교차로로 구성되어 있으며 중앙버스전용차로를 운영하고 있다. 교차로 통과 후 정류장(Far-side stop)인 3번 교차로 동측 접근로에 위치한 정류장을 제외한 모든 정류장은 교차로 통과 전 정류장(Near-side stop) 형태를 지니고 있다. 분석 구간은 세종교통공사에서 3개의 BRT 노선을 운영하고 있다.



<Fig. 4> Analysis site

본 연구에서는 S-BRT 차량만이 운행되는 S-BRT 전용차로, 기존 BRT와 S-BRT가 동일한 주행로를 이용하나 추월차로 유무에 따라 분류되는 S-BRT 혼용차로, 일반차로에 대해 분석을 실시하였다. 분석 시나리오는 정차시간과 정차면 개수에 따라 <Table 1>과 같이 4개의 시나리오로 구성하였다. 분석 시 모든 S-BRT 차량에 동일한 우선신호 효과를 부여하기 위해 운행간격을 신호주기 배수 배로 설정하였다. 또한, BRT 차량과 달리 모든 S-BRT 차량은 동일한 정차시간으로 운행된다 가정하였다.

<Table 1> Simulation scenario

Bus bay	Dwell time	Mean, 20 s; standard deviation, 5 s	Mean, 40 s; standard deviation, 10 s
1		Scenario 1-1	Scenario 2-1
2		Scenario 1-2	Scenario 2-2

시나리오별 주행로별로 신호운영계획 산정 시 분석 구간 현황 신호운영계획을 입력값으로 하였다. 신호주기는 현황 신호주기인 160초로 고정한 후 <Table 2>와 같이 옵셋(offset)을 최적화하였다. S-BRT 전용차로의 경우 Kim et al.(2021)이 제안한 대중교통 운행 스케줄 기준의 신호운영계획 최적화 방법론을 이용해 신호운영계획을 생성하였다. S-BRT 혼용차로와 일반차로는 타 BRT 노선과 차로를 공유하는 것을 고려하여 Han et al.(2022)이 설계한 배차간격 모형을 이용해 분석 구간의 신호를 최적화하였다. 시나리오 분석을 위해 교통 시뮬레이션인 VISSIM을 이용하였으며 분석 교통량은 2022년 4월 12일 화요일 13시 30분부터 15시 30분에 조사한 자료를 사용하였다.

<Table 2> Signal operation plan

Scenario	Lane type	Offset: [Intersection 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]
1-1	S-BRT exclusive lane	[21, 51, 5, 56, 127, 88, 95, 48]
	S-BRT shared lane with passing lane	[21, 51, 50, 5, 142, 103, 110, 63]
	S-BRT shared lane without passing lane	[21, 51, 32, 66, 42, 3, 10, 123]
1-2	S-BRT exclusive lane	[21, 51, 5, 56, 127, 88, 95, 48]
	S-BRT shared lane with passing lane	[21, 51, 48, 20, 156, 117, 124, 77]
	S-BRT shared lane without passing lane	[21, 51, 45, 20, 156, 117, 124, 77]
2-1	S-BRT exclusive lane	[21, 51, 21, 25, 27, 148, 155, 108]
	S-BRT shared lane with passing lane	[21, 51, 49, 21, 158, 119, 126, 79]
	S-BRT shared lane without passing lane	[21, 51, 51, 27, 49, 10, 17, 130]
2-2	S-BRT exclusive lane	[21, 51, 21, 25, 27, 148, 155, 108]
	S-BRT shared lane with passing lane	[21, 51, 56, 32, 9, 130, 137, 90]
	S-BRT shared lane without passing lane	[21, 51, 40, 16, 40, 1, 8, 121]

2. 분석 결과

전체 주행 구간을 대상으로 S-BRT 주행로별 속도를 집계한 결과 <Table 3>과 같이 나타났다. S-BRT 전용차로, 혼용차로, 일반차로 순으로 높은 속도를 보였다. S-BRT 전용차로의 경우 1개의 S-BRT 노선만 운행됨에 따라 정차면 개수와 관계없이 정차시간이 동일한 시나리오일 경우 동일한 통행속도를 보였다. 또한, 타 노선과의 상충이 없이 정해진 스케줄에 맞춰 주행이 가능함에 따라 모든 시나리오에서 <Table 4>에서와 같이 교차로에서 별도의 정지 없이 주행이 가능하였다. S-BRT 혼용차로와 일반차로의 경우 S-BRT와 타 BRT 노선들이 함께 운행됨에 따라 정차면 개수에 영향을 받을 수 있다. 정차면이 1개인 경우 추월차로의 유무와 관계없이 선두 버스의 승객 승하차 시간에만 영향을 받는다. 그 결과 시나리오 1-1과 2-1에서 혼용차로와 일반차로를 주행하는 S-BRT와 BRT는 유사한 통행속도를 보인다. 정차면이 2개인 시나리오에서 혼용차로의 경우 선두 버스의 승객 승하차가 종료되지 않았을지라도 후미 버스의 승객 승하차가 먼저 종료되었을 경우 후

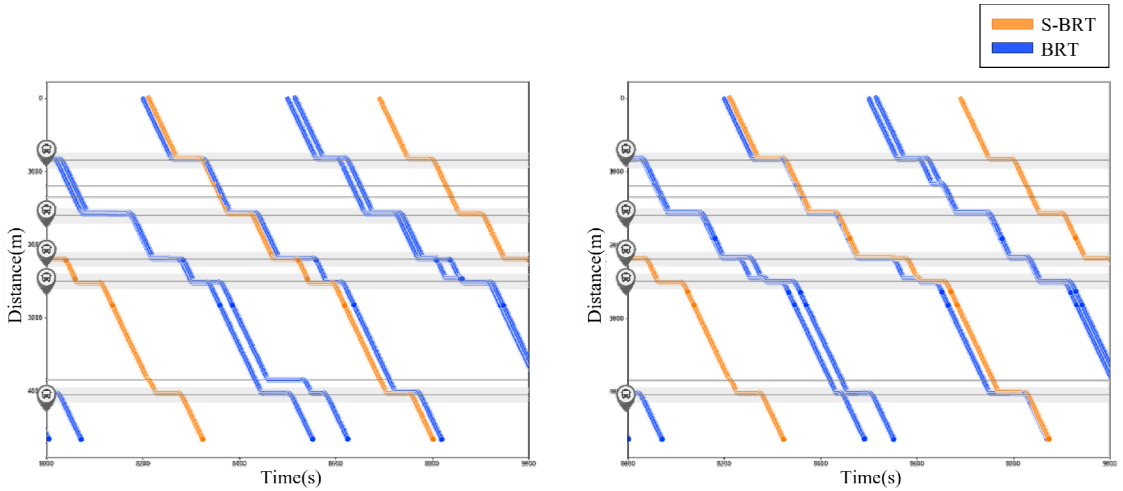
미 버스는 정류장 통과가 가능하다. 이와 달리 일반차로의 경우 후미 버스의 승객 승하차가 먼저 종료되었을 지라도 선두 버스의 승하차가 종료되지 않을 경우 정류장 출발이 불가능하다. <Fig. 5>에서 S-BRT 차량은 앞선 BRT 차량보다 늦게 최상류부 정류장에 진입하였으나 승객 승하차가 먼저 종료되었다. 그 결과 (a)와 같이 혼용차로에서는 추월차로가 존재함에 따라 S-BRT 차량이 먼저 진행하였다. 그러나 일반차로인 (b)의 경우 추월차로가 미비되어 S-BRT 차량이 정류장을 통과하지 못한 채 앞선 BRT 차량과 함께 연속으로 분석 구간을 진행하는 모습을 보였다. 이에 따라 <Table 5>와 같이 정차면 개수가 2개인 시나리오 1-2와 시나리오 2-2에서 일반차로의 정류장 정지지체가 혼용차로에 비해 높은 경향을 보였다.

<Table 3> Average bus travel speed(km/hr)

Scenario	Lane type	Bound			
		Eastbound		Westbound	
		S-BRT	BRT	S-BRT	BRT
1-1	S-BRT exclusive lane	35.1	-	34.6	-
	S-BRT shared lane with passing lane	30.8	29.5	29.9	27.7
	S-BRT shared lane without passing lane	28.8	28.4	28.6	28.7
1-2	S-BRT exclusive lane	33.5	-	33.7	-
	S-BRT shared lane with passing lane	32.0	31.0	31.3	31.2
	S-BRT shared lane without passing lane	31.7	30.6	31.5	31.0
2-1	S-BRT exclusive lane	29.1	-	28.8	-
	S-BRT shared lane with passing lane	24.7	24.7	25.9	23.9
	S-BRT shared lane without passing lane	25.2	24.8	25.7	23.6
2-2	S-BRT exclusive lane	29.1	-	28.8	-
	S-BRT shared lane with passing lane	27.4	26.0	28.1	25.9
	S-BRT shared lane without passing lane	27.1	25.6	27.2	25.8

<Table 4> Average number of stops of bus along transit corridor

Scenario	Lane type	Bound			
		Eastbound		Westbound	
		S-BRT	BRT	S-BRT	BRT
1-1	S-BRT exclusive lane	0.0	-	0.0	-
	S-BRT shared lane with passing lane	1.3	2.3	1.6	2.2
	S-BRT shared lane without passing lane	2.7	2.6	2.5	2.6
1-2	S-BRT exclusive lane	0.0	-	0.0	-
	S-BRT shared lane with passing lane	1.5	1.9	1.5	2.7
	S-BRT shared lane without passing lane	1.5	1.7	1.5	1.1
2-1	S-BRT exclusive lane	0.0	-	0.0	-
	S-BRT shared lane with passing lane	2.9	2.3	0.9	2.4
	S-BRT shared lane without passing lane	3.3	2.6	1.1	2.2
2-2	S-BRT exclusive lane	0.0	-	0.0	-
	S-BRT shared lane with passing lane	2.2	1.8	0.4	1.5
	S-BRT shared lane without passing lane	1.7	1.8	0.5	1.3



(a) S-BRT shared lane with passing lane

(b) S-BRT shared lane without passing lane

<Fig. 5> Bus trajectory at scenario 2-2

<Table 5> Average stopped delay(sec/bus)

Scenario	Lane type	Bound					
		Eastbound			Westbound		
		Stop 3	Stop 4	Stop 5	Stop 3	Stop 4	Stop 5
1-1	S-BRT exclusive lane	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	S-BRT shared lane with passing lane	45.6	1.1	6.0	1.9	3.1	12.7
	S-BRT shared lane without passing lane	29.9	1.1	18.9	3.9	2.3	11.9
1-2	S-BRT exclusive lane	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	S-BRT shared lane with passing lane	16.2	0.9	1.1	1.4	2.0	3.7
	S-BRT shared lane without passing lane	17.2	1.8	1.2	1.5	2.9	4.1
2-1	S-BRT exclusive lane	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	S-BRT shared lane with passing lane	30.1	1.1	6.4	1.3	5.1	25.6
	S-BRT shared lane without passing lane	32.5	0.0	7.9	2.5	2.8	35.7
2-2	S-BRT exclusive lane	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	S-BRT shared lane with passing lane	13.0	0.4	6.9	0.6	3.2	6.3
	S-BRT shared lane without passing lane	13.2	1.2	4.9	1.9	2.3	10.7

V. 결 론

본 연구는 기존 BRT 대비 고급화된 서비스인 S-BRT 도입 시 차로 운영 방법과 추월차로 유무에 따라 S-BRT 주행로를 3가지로 분류하였다. 또한, 각 주행로별 특성을 고려하여 S-BRT의 운행 목표를 달성하기 위한 수동형 대중교통 우선신호 제어 전략을 제시하였다. 이후 세종시 한누리대로를 대상으로 정차시간과 정차면 개수에 따른 시나리오 분석을 진행하였다. S-BRT 차량은 도시철도를 모방함에 따라 분석 시 사전 계획

된 스케줄을 바탕으로 운행되도록 하였다. BRT 차량은 배차간격 기반으로 운행됨에 따라 정규분포를 따르는 정차시간을 발생시켰다. 분석 결과 S-BRT 전용차로, 혼용차로, 일반차로 순으로 높은 주행속도를 보였으며 S-BRT 전용차로에서 S-BRT 차량은 모든 교차로를 무정차 통과하는 모습을 보였다. 혼용차로와 일반차로에서는 S-BRT 차량이 기존 BRT 차량과 함께 운행됨에 따라 일부 교차로에서 정지하는 모습을 보였다. 그러나 정차면 개수가 여러 개일 경우 혼용차로는 추월차로가 존재함에 따라 일부 S-BRT 차량의 신속 주행이 가능하였다. 본 연구의 결과는 각 지자체에서 개별적인 여건과 목표 운행 서비스 수준 등을 고려하여 S-BRT를 도입하는 데 있어 참고자료로 활용 가능할 것으로 기대된다.

본 연구는 S-BRT 차량의 목표 속도 달성을 위한 대중교통 우선신호 제어 전략을 제시하였다. 그러나 실제 S-BRT 시스템은 굴절버스, 사전요금징수, 관제 및 신호 센터 등의 구성요소를 포함하고 있으므로 향후 연구에서는 이를 고려한 추가 분석이 필요하다. 또한, 본 연구에서는 시나리오 분석 시 교차로 통과 전 정류장을 대상으로 분석을 진행하였다. 그러나 국내에는 교차로 통과 전 정류장 이외에도 교차로 통과 후 정류장, 도로 구간 내 정류장 등 다양한 형태의 정류장이 존재한다. 따라서 향후 여러 정류장 형태를 대상으로 각 주행로별 목표 서비스 달성을 위한 대중교통 우선신호 제어 전략을 제시할 필요가 있다. 일반적으로 대중교통 우선신호 도입 시 일반차량에 미치는 영향은 가장 주된 이슈이다. 따라서 향후 연구에서는 S-BRT 주행로에 우선신호 도입 시 일반차량에 미치는 영향을 고려할 수 있는 대안을 마련할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by a grant from the Development of S-BRT Priority Signal and Safety Management Technology Program funded by the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport of Korea [grant number 22SBRT-C158062-03].

REFERENCES

- Altun, S. Z. and Furth, P. G.(2009), "Scheduling buses to take advantage of transit signal priority", *Transportation Research Record*, vol. 2111, no. 1, pp.50-59.
- Anderson, P. and Daganzo, C. F.(2020), "Effect of transit signal priority on bus service reliability", *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 132, pp.2-14.
- Florek, K.(2020), "Arterial Traffic Signal Coordination for General and Public Transport Vehicles Using Dedicated Lanes", *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, vol. 146, no. 7, pp.04020051: 1-13.
- Gang, J., Park, J., Lee, S. and Choe, Y.(2005), "Trends and Introduction of BRT in Korea and Abroad", *Journal of the Korea Road & Transportation Association*, no. 98, pp.8-25.
- Han, Y., Kim, M. and Kim, Y.(2022), "Progression Control Model to Enhance Performance of Transit Signal Priority", *IEEE Access*, vol. 10, pp.14397-14408.
- Kim, H., Cheng, Y. and Chang, G.(2019), "Variable Signal Progression Bands for Transit Vehicles Under Dwell Time Uncertainty and Traffic Queues", *IEEE Transactions on Intelligent*

- Transportation Systems*, vol. 20, no. 1, pp.109-122.
- Kim, M., Han, Y. and Kim, Y.(2021), “The Strategy of Public Transportation Schedule Control Considering the Variability of Dwell Time”, *The 2021 Korean Institute of ITS Fall Conference*, pp.139-141.
- Kim, T., Jeong, Y. and Kim, Y.(2010), “Effectiveness of Bus Signal Priority on Bus Rapid Transit”, *The Korea Institute of Intelligent Transport Systems Conference*, pp.109-113.
- Ko, J.(2020), “Introduction Issues and Progress Direction of BRT in the 3rd New Town”, *Monthly Public Policy*, vol. 174, pp.51-53.
- Ma, W., Zou, L., An, K., Gartner, N. H. and Wang, M.(2018), “A Partition-Enabled Multi-Mode Band Approach to Arterial Traffic Signal Optimization”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, no. 1, pp.313-322.
- Ministry of Construction & Transportation(2005), *Bus Rapid Transit Manual*.
- Ministry of Construction & Transportation(2006), *Bus Rapid Transit(BRT) Design Guidelines*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2017), *Technical Standards for Bus Rapid Transit Facilities*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2019), *Guideline of Super Bus Rapid Transit*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2010), *Bus Rapid Transit(BRT) Design Guidelines*.
- Smith, H. R., Hemily, B., Ivanovic, M. and Fleming, G.(2005), *Transit Signal Priority (TSP): A Planning and Implementation Handbook*.
- Truong, L. T., Currie, G., Wallace, M., De Gruyter, C. and An, K.(2018), “Coordinated Transit Signal Priority Model Considering Stochastic Bus Arrival Time”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, no. 4, pp.1269-1277.