

# 비대칭적 중방향 교통류 대응을 위한 이동식 중앙분리대 활용 버스전용차로 도입 전략 분석

김태완\* · 정연식\*\* · 전교석\*\*\* · 김원길\*\*\*\*

Kim, Taewan\*, Chung, Younshik\*\*, Jeon, Gyo Seok\*\*\*, Kim, Wongil\*\*\*\*

## Operational Strategies of a Bus-Exclusive Lane Using Barrier Transfer Systems to Control Tidal Traffic Flows

### ABSTRACT

Lane management with a central variable lane(s) (or reversible lane) where the traffic flow is temporarily reversed in one or more lanes during peak periods has been evaluated as an effective strategy to alleviate congestion caused by tidal traffic flows. However, due to traffic safety issues, such a movable barrier system can be considered as an alternative to supplement the existing its operation facilities such as static and/or dynamic signs and special pavement markings. In addition, when combined with a bus exclusive lane strategy, its effectiveness could be greatly increased. The objective of this study is to propose a feasibility analysis procedure for operational strategies of a bus-exclusive lanes using a barrier transfer system (BTS) for urban expressways. To this end, a case study was conducted on two urban expressways on the west side of the Han River in Seoul. As a result, temporary operation during rush hour in the morning was found to be most effective. The results presented in this study are expected to serve as a basis for establishing bus-exclusive lane operation strategies using similar systems in the future.

**Key words :** Urban expressway, Barrier transfer system (BTS), Bus-exclusive lane, Tidal traffic flow, Mode choice

### 초록

중앙 가변차로제는 비대칭적 중방향 교통류에 의한 혼잡을 완화하기 위한 효과적인 대안으로 평가되어 왔으나, 교통안전에 대한 문제로 국내에서는 점차 사라지고 있다. 이동식 중앙분리대 시스템은 교통안전 문제를 보완하기 위한 대안으로 활용될 수 있으며, 일시적 버스전용차로 운영과 결합하여 효율적으로 교통혼잡을 관리할 수 있을 것으로 평가된다. 본 연구는 도시고속도로 대상으로 이동식 중앙분리대 활용 버스전용차로 운영 전략에 대한 설정 절차 및 최적의 대안에 대한 평가 절차를 제안하고자 하였다. 이를 위해 서울시 한강변 서측 2개의 도시고속도로 대상 사례 연구를 진행하였으며, 그 결과 오전 혼잡시간대 일시적 운영이 가장 효과적인 것으로 나타났다. 본 연구에서 제시된 결과는 향후 유사 시스템을 활용한 버스전용차로 운영 전략 수립의 기반이 될 것으로 기대된다.

**검색어 :** 도시고속도로, 이동식 중앙분리대(BTS), 버스전용차로, 비대칭적 중방향 교통류, 수단선택

\* 정희원 · 아주대학교 교통공학과 석박사통합과정 (Ajou University · taewan1994@ajou.ac.kr)

\*\* 종신회원 · 교신저자 · 영남대학교 도시공학과 부교수 (Corresponding Author · Yeungnam University · tpgist@yu.ac.kr)

\*\*\* 정희원 · 아주대학교 TOD기반 지속가능 도시교통 연구센터 연구조교수 (Ajou University · wjsrytjr@ajou.ac.kr)

\*\*\*\* 국토교통과학기술진흥원 교통물류실 PD (Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement · wongil@kaia.re.kr)

Received August 11, 2021/ revised August 23, 2021/ accepted October 8, 2021

## 1. 서론

도시가 성장하게 되면 도시의 공간구조는 도시화(urbanization) 과정을 통해 변화하게 된다. 특히, 도시화는 지리적으로 변화의 과정 (spatial process), 즉, 공간적 집중화(Spatial Concentration), 접근성(Accessibility) 증대, 중심지로부터 주변지역으로의 확산(Diffusion), 인간정주체계(Human Settlement System) 형성 과정이 진행된다(Im et al., 2006). 이중 접근성의 증대는 도시지역의 공간적 확대를 의미하는 도시팽창 과정이다. 도시의 팽창은 수직적 혹은 수평적으로 진행되며, 도시화의 자연스러운 현상일 것이다. 서울의 경우 1970년대 이후 급속한 성장과 팽창이 이루어졌으며, 1980년대 말에 이르러 이른바 1기 신도시라 불리는 분당, 일산, 평촌, 산본, 중동 지역에 신도시를 계획하였다. 이후 이들 도시는 서울과 함께 성장하여 2기 신도시를 형성하였으며, 최근에는 3기 신도시에 대한 계획을 발표하는 수준에 이르렀다.

한편, 도시의 팽창과정에서 도로망의 구축 및 대중교통 서비스 구축과 같은 접근성 확보를 위한 노력이 동반되어야 한다. 그러나 도시가 급속도로 팽창하는 경우, 도로망의 확충이나 대중교통 서비스 제공 속도가 도시의 공간적 성장에 보조를 맞추지 못하는 경우도 발생한다. 대표적으로 현재 경기도 김포시, 파주시, 고양시 지역에서 서울로 연결하는 교통서비스와 경기도 남양주시, 구리시에서 서울로 연결되는 교통서비스는 다소 열악한 수준이다. 특히, 서울 외곽지역의 이들 신도시와 서울로 연결되는 주요 도로망에서 발생하는 교통문제(교통혼잡)는 직장인 서울지역과 주거지인 신도시 간 통근 통행이 주요 원인이다. 즉, 출근 시간대에는 서울로 진입하는 방향으로의 교통혼잡이, 퇴근 시간대에는 신도시로 진입하는 방향으로의 교통혼잡 패턴이 형성된다. 대중교통 이용 인센티브 제공을 통해 교통혼잡을 줄이고자 버스중앙차로제와 같은 교통서비스 개선 정책을 추진하고 있으나, 그 효과는 다소 미미한 수준이며, GTX (Great Train eXpress)와 같은 급행철도망을 계획하고 있으나 서비스 제공을 위해서는 장기간 공사기간이 소요된다는 한계가 존재한다. 따라서 단기적으로 교통 서비스 제공을 위한 새로운 교통서비스 전략이 요구되는 상황이다.

이러한 배경 하에, 본 연구는 수도권 서부권인 경기도 김포시, 파주시, 고양시와 서울을 연결하는 주요 간선도로를 대상으로 새로운 대중교통 서비스 운영 전략을 계획하고 평가하고자 하였다. 특히, 본 연구는 새로운 도로망의 형성, 기존 도로망의 확장, 대중교통의 새로운 노선의 신설 없이, 기존 도로망의 효율적인 운영을 위한 다양한 전략을 대안으로 제시하여 평가 하였다.

## 2. 선행연구 고찰

### 2.1 중앙 가변차로제의 효과 및 한계

특정 시간대 방향별 교통량 비율이 현저하게 차이가 발생하며

혼잡한 도로구간에 대하여 중앙 가변차로제(reversible center lane traffic system)는 효과적인 도로운영 전략으로 고려되어 왔다. 이 전략은 1970년대 이전부터 미국에서 적용되어 왔으며(DeRose, 1966), 캐나다, 브라질, 호주, 영국, 유럽 등 전 세계적으로 적용되었다. 국내에서는 1981년 소공로에 처음 도입되었으며, 이후 전국 주요 도시로 확산되었다(Oh and Choi, 2004). 본 장에서는 중앙 가변차로제에 대한 일부 사례를 고찰하여, 그 효과와 한계를 파악하고자 한다.

Oh and Choi(2004)는 6차로 이상인 구간에서 V/C가 0.8 이상, 교통량의 방향비가 6:4 이상의 차이를 보이는 도로구간에 대하여 가변차로제를 시행할 경우 평균지체, 연료소모량, 정지율, 통행속도가 감소한다는 연구결과를 제시하였다. Wei et al.(2017)는 지체, 연료소비 및 배출가스 비용을 최소화하기 위한 BPR (Bureau of Public Road) 합수 기반 중앙 가변차로제 운영 모형을 개발하였다. 이 연구는 교통 시뮬레이션 모형인 VISSIM (Verkehr In Städten-SIMulationsmodell)을 통해 평가되었으며, 중앙 가변차로제 운영은 지체와 연료소비 및 배출가스에 대한 비용을 감소시키는 것으로 나타났다. Ampoutolas and Carlson(2018)은 교통량 비대칭성을 언급하였으며, 홀수 차로제 기반 가변차로제를 운영하게 되면 침투 시간대 혼잡도 완화에 효과가 있다는 연구결과를 제시하였다. 이후 Ampoutolas and Carlson(2019)은 교통량 불균형에 대해서 차로를 변경하는 것이 교통량 비대칭성 해소에 효과적이라고 언급하였으며, Pontryagin의 최대 원리(Pontryagin's maximum principle)를 활용하여 최적의 제어 전략 모형을 구축하였다.

Chada and Newland(2002)는 미국 대도시를 대상으로 버스 우선 신호 시스템(bus signal priority system) 도입 효과를 분석하였으며, Los Angeles의 경우 버스 통행시간이 25 %까지 감소했으며, Seattle의 경우 교차로에서 발생하는 버스 지체가 34 %까지 감소한 것으로 제시하였다. Lee et al.(2005)의 연구에서는 버스 우선 신호 도입 시, 버스 지체와 버스통행시간을 감소시킬 수 있으며, 이를 통해 네트워크의 효율성과 대중교통 이용률을 제고할 수 있다고 언급하였다. 또한 교통량에 따라 버스 우선 신호 시스템의 적용이 달라져야한다고 언급하였다. Yoon(2008)은 서울시 강남대로, 도봉-미아로, 수색-성산로에서 중앙버스전용차로 시행 후 교통량 변화를 분석하였다. 그 결과 해당 구간에서 승용차의 통행시간 증가로 차량 통행량은 감소하였고, 우회도로의 교통량 또한 증가하지 않은 것을 토대로 차량에서 버스로의 수단전환효과가 크다고 주장한 바 있다.

Wang et al.(2013)의 연구에서는 로지스틱 모형을 이용하여 중국 내 BRT 시행 시 수단 간 전환 효과에 대해 분석을 하였다. 결과적으로 통행 거리가 5 km 이상이면 최대 57 %, 주간 이용 횟수가 10회 이상이면 최대 55 %의 확률로 BRT로의 수단 전환의

효과가 있다고 제시하였다. Kim(2013)는 대전광역시에서 중앙버스전용차로제 시행에 따른 수단전환효과에 관해 연구하였다. 중앙버스전용차로제 시행으로 차로 감소가 발생하며, 이 때문에 승용차의 통행속도가 감소하였지만, 재차인원이 더 많은 버스의 평균속도가 증가하였고, 평균지체시간이 감소하는 것으로 나타났다. 더불어 소득이 낮고 목적지의 주차가 용이하지 않으며, 중앙버스전용차로 이용 경험이 많을수록 버스로의 수단 전환에 긍정적이라고 언급하였다.

Tuan(2015)은 하노이의 사례를 기반으로 SP조사를 통해 승용차에서 BRT로의 수단 전환량에 관하여 기술하였으며, 수단전환제고를 위해서는 노선의 연장뿐만 아니라 환승시설, 수단에 대한 안전성 등 부가적인 부분이 중요하다고 주장하였다. 또한 승용차 이용 편의성으로 인해 승용차에서 타 수단으로의 수단전환에 어려움이 존재한다고 언급하였다. 또한 승용차 이용수요 저감 및 전환을 위해 주차장 공급제한 등 기존 승용차 이용 편의성의 조절, 대체제에 대한 상대적 편의성 부각을 언급한 바 있다. Wang and Li(2020)은 오전 첨두시간대에 한 차로를 버스전용차로로 설정할 경우, 차량의 속도가 감소하는 반면 승용차 통근 통행량이 감소하여 전체 통행비용이 감소하는 것을 수학적으로 증명하였다. Li et al.(2020)도 첨두시간 전용버스차로를 설치하였을 때, 승용차에서 버스로의 수단전환효과가 발생하여 전체 시스템의 효율성을 증가시킬 수 있다고 언급하였다.

기존 연구들을 고찰한 결과 중앙 가변차로제를 시행할 경우 도로의 확장 없이 효율적으로 교통혼잡 문제를 대응할 수 있음을 확인하였다. 특히 방향별 비대칭성이 심한 첨두시의 경우 가변차로제를 도입 시 지체도 감소, 교통량 및 전체 통행속도 증가의 효과가 뛰어났다. 또한, 가변차로를 버스전용차로로 운영 시 기존의 승용차에서 버스로의 수단전환 효과가 있음을 확인하였다. 이를 통하여 기존 승용차 이용자는 버스로의 수단전환이 이루어져 결과적으로 기존 도로구간에서 발생하던 교통혼잡도의 감소를 기대할 수 있다. 그러나 기존 가변차로의 경우 방향별 교통류는 차선과 가변정보판(Variable Message Sign: VMS)을 통해 구분하기 때문에, 운전자들은 가변차로 이용을 선호하지 않거나 잘 못 이용하여 교통사고로 이어지는 부작용이 발생하기도 한다. 즉, 방향별 도로의 용량을 일시적으로 증가시켜 도로 운영 효율을 증가시키는 장점에도 불구하고, 이 전략은 교통안전 측면에서 다소 부정적인 측면이 부각되기도 하였다. Manuel et al.(2020)은 가변차로의 운영이 교통사고 증가로 이어질 수 있다는 연구결과를 제시하였다.

## 2.2 이동식 중앙분리대

전술한 바와 같이, 노면의 차선을 통한 교통류의 분리과 VMS 기반 방향별 교통제어 정보 제공방식의 중앙 가변차로제는 교통안전 문제에 대한 한계가 지속적으로 제기되어 왔다. 이러한 교통안전

문제를 해결하기 위해 이동식 중앙분리대 시스템(barrier transfer system: BTS)이 개발되어 운영되고 있다(Fig. 1 참조). 이 시스템은 중앙분리대 이동차량(Barrier Transfer Machine: BTM)을 이용하여 T자 형태의 이동식 중앙분리대를 컨베이어 시스템 개념으로 이동시켜 기존의 가변차로에 물리적인 중앙분리대를 더한 개념이다(Fig. 2 참조). 이 시스템은 미국을 중심으로 호주, 뉴질랜드,



Fig. 1. Traffic Control on Golden Gate Bridge Before (left) and After BTS (right) (Kang and Chung, 2020)



Fig. 2. Movable Barrier and Barrier Transfer Machines (Kang and Chung, 2020)

브라질 등지에서 성공적으로 운영 중이다.

Christopher(1991)는 미국 Texas 주 Dallas 지역에서 BTS 기반 다인승 전용차로(High-Occupancy Vehicle Lane) 운영에 대한 타당성 조사를 수행하였다. 이 연구에 의하며, 해당 구간에 대하여 이동식 이동분리대가 아닌 일반 분리 시설을 적용할 경우 비용대비 편익(benefit-cost ratio: B/C)은 1.5 수준이었으며, 안전에도 문제가 있는 것으로 분석되었으나, BTS를 적용할 경우 안전성 확보는 물론 B/C 또한 1.9 수준으로 보다 효과적인 것으로 나타났다. Bain(2001)는 침투시간대 도로의 비대칭성을 해결하기 위한 BTS 도입 효과에 대한 사례분석을 진행하였다. 이 연구는 US, Brazil, Australia, New Zealand의 11개 고속도로를 대상으로 진행되었으며, 경제성 분석 결과 B/C가 2.0을 상회하는 결과를 제시하며 비용 대비 효과가 뛰어나고 신속하게 도입하여 운영할 수 있다는 장점을 언급하기도 하였다. Paul(2016)은 도로의 신설 대신에 교통량 패턴에 따라 가변적으로 차로를 운영하는 방안이 출근도로와 같은 비대칭성이 심한 도로에 효과적이라고 언급하며, 기존의 가변차로 운영전략은 도로 이용자의 혼란을 초래할 수 있어 BTS의 적용을 효과적인 대안으로 제시하였다. 아울러 Sydney, San Francisco 등의 사례연구를 통해 이러한 효과를 증명하였다.

결과적으로 가변차로제는 중방향 교통량 비대칭 구간에서 효과적일 수 있지만, VMS 기반 차로 운영 정보에 대한 도로 이용자들의 혼란으로 교통안전에 부정적인 측면이 지속적으로 제기되고 있다. 이에 대한 대안으로 해외에서는 BTS를 도입하여 성공적으로 운영되고 있다. 그러나 모든 교통 시스템의 도입을 위해서는 지역적 도로망의 특성, 교통패턴, 운전자 특성 등 다양한 측면을 고려해야 한다. 즉, 운영구간, 운영시간대, 운영 차로의 수 등에 대한 최적의 운영 전략은 지역적으로 다르게 형성될 수 있다는 것이다. 이러한 특성을 고려하여, 본 연구에서는 서울시 도시고속도로에 BTS를 적용할 경우, 최적의 운영 전략 수립을 위한 절차를 수립하고자 한다.

### 3. 대상구간 현황 및 공간적 범위 선정

#### 3.1 대상구간 선정 및 교통현황

본 연구에서는 서울로의 진출입 교통혼잡이 매우 심하게 발생하며, 도시고속도로가 제한적인 경기도 서부권을 대상지역으로 선정하였다. 이 지역은 경기도 파주시, 고양시, 김포시 등 1기 및 2기 신도시가 형성된 지역이며, 최근 3기 신도시 계획이 발표되며 교통

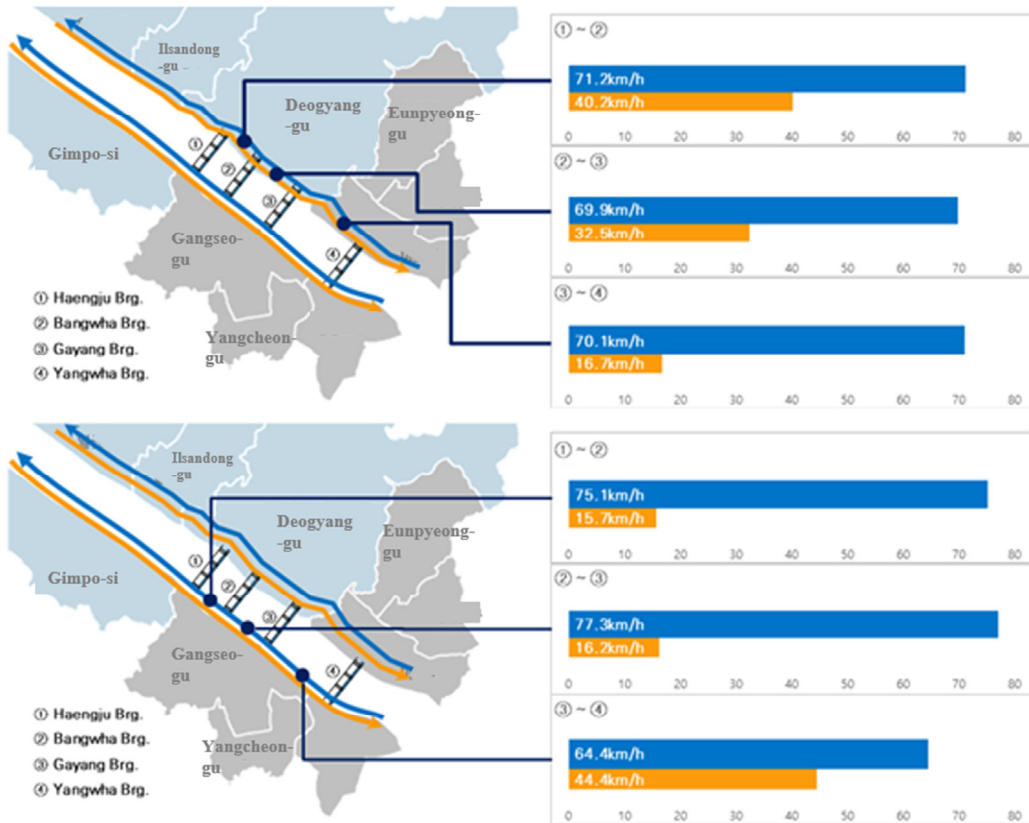


Fig. 3. Average Section Travel Time at Study Site for AM Peak Period



혼잡 문제가 더욱 가중될 것으로 예상되는 지역이다. 한편, 경기도 서부권에서 서울로 진입을 위한 주요 도시고속도로는 한강을 중심으로 북부에는 자유로(혹은 강변북로), 남부에는 올림픽대로가 운영중이다. 따라서 한강을 중심으로 운영되는 2개의 도시고속도로가 주요 대상구간으로 선정될 수 있다. 이중 행주대교(①)에서 양화대교(②) 구간은 출퇴근 시간 극심한 교통혼잡이 발생하는 구간으로 연구대상 지역으로 우선 고려하였다. 또한 이 구간은 편도 4차로 이상으로 구성되어 중앙 가변차로제의 운영이 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 3은 민간 내비게이션 자료 기반 2019년 4월부터 9월간(6개월) 올림픽대로와 강변북로 서측 주요 구간에 대한 오전 7시부터 9시까지 소통상황을 나타낸다. 그림에 제시된 바와 같이, 출근 시간대 강서구 지역에서 서울방향의 통행속도는 시속 10 km 대를 형성하다 영등포구 지역에서 속도가 증가함을 알 수 있다. 그러나 영등포구에서 김포시로 접근함에 따라 속도가 증가함을 알 수 있다. 강변북로의 경우, 서울과 경기도 진입 통행속도 차이는 올림픽대로와 유사한 속도차이 패턴을 형성한다. 그러나 경기도 외곽지역에서 서울로 진입할수록 통행속도는 감소함을 알 수 있다.

한편, 경기도와 서울시에 구축된 버스정보시스템(Bus Information System: BIS)을 활용하여 방화대교와 가양대교 구간 버스 운행현황 자료를 조사하였다. 2019년 10월 현재 강변북로 구간에는 첨두 2시간 동안 총 143대의 노선버스가 운행되고 있으며, 올림픽대로 구간에는 160대의 노선버스가 운행중이다. 이 자료는 BIS 기반

자료로 인천공항과 김포공항을 통행하는 공항버스, 전세버스, 기타 대형 버스는 제외된 자료이다. 마지막으로 대상구간에 대한 첨두시간 기준 방향별 교통량을 조사하였다. 조사결과 강변북로의 경우 오전 첨두시간의 경우 서울로 진입하는 교통량과 경기지역으로 진출하는 교통량의 비는 65:35 수준을 형성하였으며, 올림픽대로의 경우, 동일방향 기준 67:33 수준을 형성하였다.

### 3.2 분석 자료 및 사공간적 범위

새로운 교통시스템 도입을 위해서는 도입으로 인한 시스템의 효과를 분석해야 한다. 이러한 효과는 미래에 발생하기 때문에 교통수요의 추정은 불가피하다. 본 연구에서는 교통수요 추정을 위해 국가교통데이터베이스(Korea Transport Database: KTDB)에서 제공한 수도권 도로망 및 대중교통망 자료를 활용하였다. KTDB의 기종점통행량자료는 다양한 수단의 통행량을 제공하고 있는 바, 본 연구에서는 BTS 활용 버스전용 중앙 가변차로제의 운영 효과 추정을 고려하여 승용차, 택시, 버스, 지하철, 지하철+버스, 기타버스 통행량 자료를 활용하였다. 여기서 지하철 및 버스란 환승을 통해 지하철과 버스를 모두 이용하는 경우를 의미하며, 기타 버스는 전세버스와 같은 비노선 버스와 공항버스를 의미한다.

교통수요모형의 적용과 편의 추정을 위해서는 결과 기반 사후적인 방법을 활용한 공간적 범위를 설정하게 되는데, 이를 ‘영향권’이라 한다. 본 연구의 영향권은 BTS 도입을 통한 버스전용차로의 검토 대상 구간이 포함되는 직접적 영향권과, 그 외 사업 시행으로

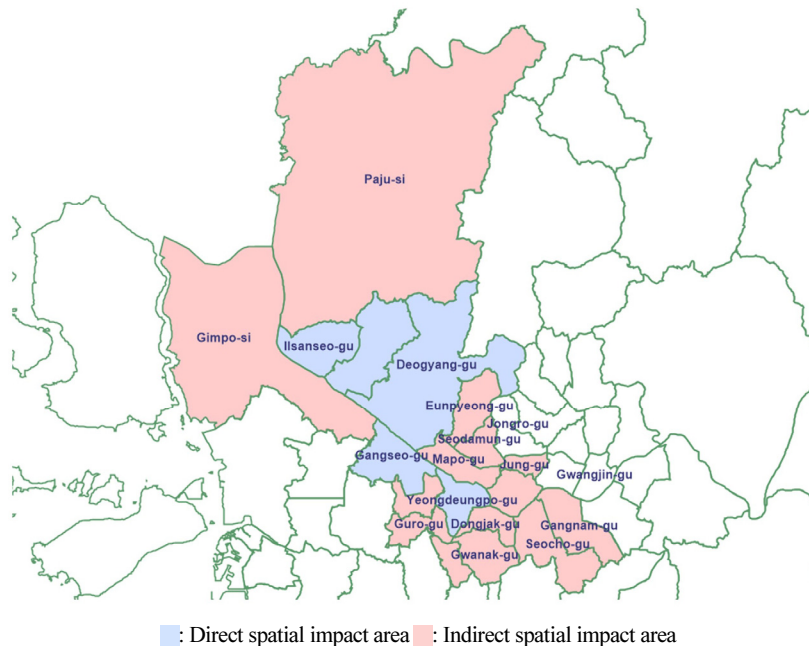


Fig. 4. Spatial Impact Area of the Study

인한 사회적 효과가 발생하는 간접적 영향권으로 구분할 수 있다. 일련의 교통수요모형 적용 상 방법론을 통해 선정된 본 연구의 공간적 범위는 Fig. 4와 같다.

분석의 시간적 범위는 분석 기준연도의 경우 2018년, BTS 활용 버스전용 중앙 가변차로제가 운영되기 시작하는 시점은 2023년, 이후 2025년부터 5년 단위로 분석하였다. 최종 분석연도는 일반적인 교통시설투자사업의 시간적 분석 범위에 해당하는 30년으로 설정하여 그 효과를 분석하였다.

#### 4. 연구 방법론 및 대상지역 효과분석

##### 4.1 연구 방법론

오전 첨두시의 비대칭성을 해소하기 위하여 Wei et al.(2017), Ampountolas and Carlson(2019)에서 언급한 차로제어를 통하여 가변차로제를 시행하며, Wang and Li(2020) 연구에서 검증된 비와 같이 대중교통 활성화를 위하여 BTS 활용 가변차로 구간에 버스전용차로의 운영전략을 분석하였다. 이동식 중앙분리대를 이용한 버스전용차로의 운영 기법 대안 별 비교는 4단계 교통수요예측 모형과 사회적 편익 추정 기법을 통해 수행하였다. 중앙 가변차로제 기반 버스전용차로제의 운영 기법에 따른 차이와 그 효과를 분석하는데 있어서 4단계 교통수요예측 절차 중 수단분담과 통행배정 단계는 매우 중요한 단계가 된다. 도로, 버스, 지하철 등 다수단(multi-modal)이 포함된 네트워크 내에서 수단선택을 위해 이용자의 효용이 반영되는 logit 모형을 적용하였다.

$$P^*_{i} = \frac{P_i \exp \Delta V_i}{\sum P_j \exp \Delta V_j}$$

여기서,  $P^*_{i}$  : 사업 시행 시 수단  $i$ 의 선택확률  
 $P_i$  : 사업 미시행 시 수단  $i$ 의 관측 분담률  
 $\Delta V_i$  : 사업 시행 전·후 수단  $i$ 의 효용 변화

통행자들이 특정수단  $K$ 를 선택할 확률은 아래와 같다.

$$P(K) = \frac{e^{U_K}}{\sum_i^n e^{U_i}}$$

여기서,  $P(K)$  : 특정수단  $K$ 를 선택할 확률  
 $U_K$  : 수단  $K$ 의 효용  
 $U_i$  : 수단  $i$ 의 효용  
 $n$  : 수단의 수

효용함수는 아래와 같은 형태를 나타낸다.

$$U_{ijk} = \alpha_1 (T_{TIME})_{ijk} + \alpha_2 (T_{COST})_{ijk} + (Dummy)_k + (\text{상수항})_k$$

여기서,  $U_{ijk}$  : 수단  $k$ 의 교통존  $i$ 와  $j$ 간의 효용함수  
 $(T_{TIME})_{ijk}$  : 수단  $k$ 의 교통존  $i$ 와  $j$ 간의 총통행시간  
 $(T_{COST})_{ijk}$  : 수단  $k$ 의 교통존  $i$ 와  $j$ 간의 총통행비용  
 $(Dummy)_k$  : 상수항 이외 설정한 더미변수  
 $\alpha_1, \alpha_2$  : 파라미터

도로 통행배정의 경우, Wardrop(1952)이 제안한 이용자평형상태(User Equilibrium: UE)를 전제하였다. 대중교통 통행배정의 경우, Caliper사의 TransCAD 8.0에 포함된 대중교통 통행배정모형 Pathfinder를 활용하였고, Pathfinder의 목적함수는 아래와 같다.

$$\text{Minimize } Z = \sum t_{\alpha}$$

$$\text{Subject to, } \alpha \geq 0$$

수단 분담의 경우 통행시간, 통행비용을 변수로 갖는 효용을 통하여 기존의 효용과 변화된 효용 간의 차이로 분담률을 구한다. 해당 과정을 거쳐 새로운 OD를 구축하며 공로의 경우 UE, 대중교통의 경우 Pathfinder를 통하여 배정을 진행한다.

결과적으로 해당 구간의 통행행태를 분석하여 비대칭성을 해소하기 위해 BTS를 이용한 가변차로제를 도입하였다. 이후, 버스전용차로의 도입에 대한 수단선택, 도로 및 대중교통 통행배정 절차를 거쳐 수요예측을 수행하였으며, 이를 기반으로 대안 간 상대비교를 위한 MOE (Measure of Effectiveness)와 편익을 추정하였다. 4단계 교통수요예측 모형 적용 상 세부적인 절차와 기준 및 편익 추정 방법론은 한국개발연구원(KDI, 2008)에서 제시하고 있는 내용을 차용하였다. Fig. 5는 이상의 방법 및 절차를 요약한 것이다.

##### 4.2 대안의 설정

한강을 중심으로 경기도 서부와 서울을 연결하는 도시고속도로는 크게 2개의 대안 축이 존재한다. 이 두 축에 대하여 BTS 활용 중앙 가변차로제를 도입하기 위해서는 방향별 교통류의 비대칭성 뿐 아니라, 도입 예정구간에 대한 물리적인 가능성도 검토되어야 한다. 대상구간의 교통현황 분석을 통해 방향별 교통류의 비대칭성은 확인이 되었다. 즉, “도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙” 해설(MOLIT, 2020)에 따르면, 방향별 교통량의 분포가 6:4 이상인 경우 가변차로제 적용은 가능하다. 그러나 BTS를 활용한 버스전용

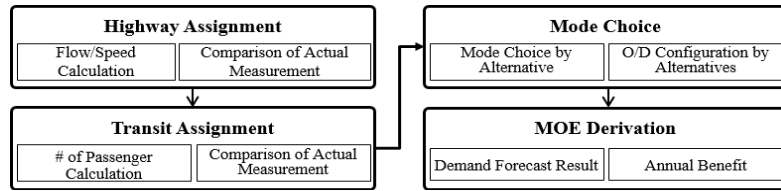


Fig. 5. Methodological Approach of Alternative Analysis of BTS Operations

Table 1. Mode Change Effect on Each Alternative (unit: trip/peak hour)

Year	Mode	Alternative 1	Alternative 2	Alternative 3
2025	Auto	-2,997	-2,997	-4,266
	Taxi	-88	-88	-367
	Bus	1,795	1,795	2,923
	Subway	-3,015	-3,015	-3,410
	Bus+Subway	3,480	3,480	4,058
	Non-Route Bus	825	825	1,062
	Total	6,100	6,100	8,042
2035	Auto	-3,152	-3,152	-4,288
	Taxi	-93	-93	-365
	Bus	1,887	1,887	2,984
	Subway	-3,170	-3,170	-3,573
	Bus+Subway	3,660	3,660	4,178
	Non-Route Bus	868	868	1,065
	Total	6,415	6,415	8,226

중앙 가변차로제를 도입하기 위해서는 버스의 진출입과 BTM의 유출입이 물리적으로 가능해야 한다. 강변북로의 경우, 연구대상 구간 중 일부 구간에서는 중앙차로와 합류되는 구간이 존재하여 이러한 한계를 극복하기 위해서는 별도의 차로 구성이 불가피하다. 즉, 장기간의 공사기간과 많은 예산이 소요된다는 한계가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 강변북로에 대한 BTS 기반 중앙 가변차로제 운영 전략은 우선적으로 제외하였다.

반면, 올림픽대로의 경우 모든 유입·유출은 최우측 차로를 통해 진행되며, 성산대교에서 당산철교 구간에는 중앙에 녹지대가 형성되어 BTM의 운영과 버스의 진출입 공간의 형성이 매우 용이하다. 즉, BTS를 활용한 중앙 가변차로제는 서울방향에 대해서만 운영하며, BTM은 운영구간 양단에 대기소를 설치하여 운영하는 것으로 가정하였다. 또한 서울에서 김포 방향의 1개 차로를 활용하여 서울 방향으로의 차로를 확보 후, 버스 전용차로로 운영하기 때문에, 역방향 차로 확보를 위한 BTM의 운영은 서울에서 김포 방향, 즉, 일반 차량과 동일한 방향으로 운영하여 BTM과 일반차량과의 상충을 최소화할 수 있도록 가정하였다.

결과적으로 본 연구에서는 운영시간대를 차별화한 3가지 유형의 대안에 대한 효과를 분석하고자 하였다. 대안 내 노선의 조정은

기중점 및 정류장의 변화 없이 한강 교량을 통한 해당구간 경로 변경을 의미한다.

- 1) 대안 1: 오전 06~11 서울방향 운영, 노선 조정 불가)
- 2) 대안 2: 오전 07~09 서울방향 운영, 노선 조정 불가)
- 3) 대안 3: 오전 06~11 서울방향 운영, 노선 조정 가능)

### 4.3 효과 분석 및 비교

제시된 방법론에 따라 각 대안을 분석하였다. 대안 시행 시 대안 간 효과 분석을 위한 비교에는 대안 별 수단전환량 확인, 대안간 효과척도(measure of effectiveness: MOE) 등을 비교하는 방법이 있다. 대안 별 수단 전환량과 운영시간대 중 침투 1시간 주요 MOE, 전체 연간 편익을 산출하였다. Table 1에 제시된 바와 같이, 모든 대안에서 승용차, 택시, 지하철에서의 수단 전환이 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 침투 1시간 기준의 수단전환량은 버스 노선이 조정된 대안이 가장 많았음을 확인할 수 있다. Table 2에 제시된 MOE를 살펴보면 버스전용차로가 일반차로보다 2배 이상의 속도를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 운영시간대 침투 1시간 속도 변화를 살펴보면, 중차량에 해당하는 버스를 분리

Table 2. Results of MOEs on Each Alternative (unit: km/h, hundred million won/year)

Case	Year	Direction	Travel speed (before)	Travel speed (after)	Speed difference	Annual benefit
Alternative 1	2025	Seoul	32.93	37.26	4.33	80.42
		Ilsan	31.44	25.65	-5.79	
		Bus-Only lane	32.93	77.94	46.01	
	2035	Seoul	31.09	35.71	4.62	86.94
		Ilsan	33.95	27.84	-6.11	
		Bus-Only lane	31.09	76.51	46.42	
Alternative 2	2025	Seoul	32.93	37.77	4.84	53.39
		Ilsan	31.44	25.66	-5.78	
		Bus-Only lane	32.93	78.53	45.6	
	2035	Seoul	31.09	36.23	5.14	59.00
		Ilsan	33.95	28.83	-5.12	
		Bus-Only lane	31.09	77.9	46.81	
Alternative 3	2025	Seoul	32.93	38.05	5.12	59.32
		Ilsan	31.44	25.08	-6.36	
		Bus-Only lane	32.93	76.15	43.22	
	2035	Seoul	31.09	36.55	5.46	65.56
		Ilsan	33.95	28.82	-5.13	
		Bus-Only lane	31.09	76.39	45.3	

할수록, 일반 차로의 속도 또한 제고되는 효과를 나타내고 있다. 편의 측면에서는 운영시간이 길수록 편익이 크게 나왔음을 확인할 수 있다. 최종적으로 대안 간 단순 효과 비교 결과, 운영시간이 가장 긴 대안 1의 편익이 가장 큰 것으로 나왔으며 버스전용차로를 이용하도록 해당 구간의 버스노선을 조정하는 대안 3이 운영시간 대비 편익이 효율적인 것으로 나타났다.

### 5. 결론

BTS를 활용한 가변차로제의 도입은 대상구간의 교통현황에 대한 조건 분석뿐 아니라 도로의 기하구조에 대한 물리적 조건 분석이 포함된다. 또한 본 연구에서처럼 가변차로제를 버스 전용으로 운영할 경우, 그 효과 분석을 위해서는 경쟁 수단간 수단 전환에 대한 분석이 요구된다. 마지막으로 가변차로제의 경우 대상구간의 교통현황에 따라 운영시간을 다르게 편성할 수 있으며, 그 결과에 대한 효과는 다양하게 나타난다. 본 연구는 BTS 활용 버스전용 중앙 가변차로제 도입에 대한 일련의 절차를 제안하고 한강을 중심으로 서울시 서측 도시고속도로를 대상으로 사례 연구를 제시하였다. 그 결과 오전 혼잡시간(06~11시) 동안 운영하며, 대상구간의 운영 버스의 노선 변경을 허용하는 경우 그 효과가 가장 큰 것으로 나타났다.

본 연구에서 나타난 바와 같이, 버스 대중교통의 통행량이 많고,

방향별 교통량의 분포가 비대칭적인 도시고속도로에 대하여 BTS를 활용한 버스전용 중앙 가변차로제의 운영 효과는 긍정적으로 검토될 것으로 기대된다. 또한, 이러한 새로운 시스템이나 운영전략의 도입시 본 연구에서 제시한 절차, 즉, 도로의 기하구조 및 교통현황 분석, 수요추정 기반 수단전환 효과분석, 수단전환에 따른 MOE 분석 등 일련의 절차는 향후 유사 시스템 도입을 위한 기반으로 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

한편, 대안의 설정에 간략히 제시한 바와 같이, BTS의 운영은 교통량이 적은 역방향 차로를 순방향 차로로 활용하게 되어, BTM과 일반차량 간의 상충을 최소화하는 방안을 고려해야 한다. 또한, 차선이 아닌 기존 시설물에 의해 교통류의 방향이 구분되는 도로에서 BTS를 적용할 경우, 돌발상황 발생시 이에 대한 처리방안 제시가 필요하다. 이 경우, 기존 중앙분리 시설물에 대하여 일정 간격 개구부를 운영하여 돌발상황 처리 차량, 응급차량의 통행이 가능하도록 대안을 제시해야 한다. 본 연구는 수요추정 기반 주요 MOE에 대한 거시적 분석을 진행하였다. 그러나 미시적 시뮬레이션 기법을 활용한 보다 세밀한 분석을 통한 결과의 검토가 필요하다. 즉, BTS 기반 가변차로제의 시종점 혹은 합류부 및 분류부에서 발생할 수 있는 미시적 교통상황에 대한 분석으로 보다 구체적인 운영 전략의 수립이 가능할 것으로 판단된다. 마지막으로 본 연구는 주로 접근 방식 혹은 절차에 중점을 두어 연구를 수행하여 비교적 단순한 대안들을 비교·평가하였다. 그러나 보다 다양하고 구체적인



대안을 설정하여 평가한다면, 보다 현실적인 운영전략의 수립이 가능할 것으로 기대된다.

## References

- Ampountolas, K. and Carlson, R. C. (2018). "2.6. 4 A kinematic wave theory of tidal traffic flow." In *2nd Symposium on Management of Future Motorway and Urban Traffic Systems, MFTS 2018*, Ispira, Italy, pp. 61.
- Ampountolas, K. and Carlson, R. C. (2019). "Optimal control of motorway tidal flow." In *2019 18th European Control Conference, ECC, IEEE, Naples, Italy*, pp. 3680-3685.
- Bain, R. (2001). "Moveable barrier technology-the key to the dynamic highway?" *Traffic Engineering & Control*, Vol. 42, No. 10, pp. 340-344.
- Chada, S. and Newland, R. (2002). *Effectiveness of bus signal priority*, No. NCTR-416-04, National Center for Transit Research, US.
- Christopher, M. P. (1991). "Movable concrete barrier approach to the design and operation of a contraflow HOV lane." *Transport Research Board*, No. 1299, pp. 40-54.
- DeRose, F. (1966). "Reversible center-lane traffic system directional and left-turn usage." *Highway Research Record*, Vol. 151, pp. 1-17.
- Im, E. S., Lee, J. Y. and Lee, H. Y. (2006). "Measurement of urban form in urban growth management: Urban sprawl versus compactness." *The Korea Spatial Planning Review*, Vol. 51, No. 4, pp. 223-247 (in Korean).
- Kang, C. M. and Chung, Y. S. (2020). "Introducing barrier transfer system (BTS)." *Transportation Technology and Policy*, Vol. 17, No. 4, pp. 92-98 (in Korean).
- Kim, M. S. (2013). "Study on determinant of mode choice based on analysis on median exclusive bus lane effects." *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems, KITS*, Vol. 12, No. 4, pp. 33-43 (in Korean).
- Korea Development Institute (KDI) (2008). *A study on standard guidelines for pre-feasibility study on road and railway projects* (in Korean).
- Lee, Y. T., Kim, G. J. and Lee, T. G. (2005). "Case studies of bus priority signal system and introducing strategies to Korea." *Transportation Technology and Policy*, Vol. 2, No. 2, pp. 142-160 (in Korean).
- Li, X., Wang, X., Jia, B. and Jiang, R. (2020). "Modal split and commuting patterns on a bottleneck-constrained highway with peak-only bus lane." *Transportation Planning and Technology*, Vol. 43, No. 8, pp. 821-850.
- Manuel, A., de Barros, A. and Tay, R. (2020). "Traffic safety meta-analysis of reversible lanes." *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 148, 105751.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2020). *Commentary on rules for highway structure and facility standards* (in Korean).
- Oh, S. C. and Choi, B. H. (2004). "A study on warrant rearrangement using efficiency analysis of reversible lane." *Journal of Korean Society of Transportation, KST*, Vol. 22, No. 1, pp. 7-17.
- Paul, G. (2016). *Using moveable barrier in the new urban environment*. In 23<sup>rd</sup> ITS World Congress, Melbourne, Australia.
- Tuan, V. A. (2015). "Mode choice behavior and modal shift to public transport in developing countries-the case of Hanoi city." *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 11, pp. 473-487.
- Wang, X. and Li, X. (2020). *Alleviate traffic congestion and reduce energy consumption by setting a peak-only bus lane on a bottleneck-constrained highway*, In *Green, Smart and Connected Transportation Systems*, Springer, Singapore, pp. 563-579.
- Wang, Y., Wang, Z., Li, Z., Staley, S. R., Moore, A. T. and Gao, Y. (2013). "Study of modal shifts to bus rapid transit in Chinese cities." *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 139, No. 5, pp. 515-523.
- Wardrop, J. G. (1952). "Some theoretical aspects of road traffic research." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol 1, pp. 325-362.
- Wei, J., Wei, L. and Cui, Y. (2017). "Reversible lane scheme selection model based on the BPR function and environmental benefits." In *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Materials Science, Machinery and Energy Engineering*, Dalian, China, pp. 13-14.
- Yoon, B. J. (2008). "Change in road traffic demand after the operation of exclusive median bus lane in Seoul." *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 10, No. 3, pp. 139-147 (in Korean).