

버스정보시스템 데이터를 활용한 Low Emission Bus Zone 도입의 탄소배출 저감 효과 분석

Analyzing the Effects of Low Emission Bus Zones Using Bus Information System Data

송혜인* · 신강원**

* 주저자 : 충북대학교 통계학과 박사과정

** 교신저자 : 경성대학교 도시공학과 부교수

Hye Inn Song* · Kangwon Shin**

* Soluin Corporation and Statistics, Chungbuk National University

** Department of Urban Engineering, Kyung Sung University

† Corresponding author : Kangwon Shin, kangwon@ks.ac.kr

Vol. 22 No.6(2023)
December, 2023
pp.196~207

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2023.22.6.196>

Received 24 October 2023
Revised 1 November 2023
Accepted 14 November 2023

© 2023. The Korea Institute of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요약

기후위기 대응을 위한 대책으로 버스도 전기, 수소 버스로 우선 전환되고 있다. 지자체는 신규 투입, 전환되는 전기, 수소 버스 배정의 우선순위를 탄소배출량에 따라 판단할 필요가 있으며 그 방법으로 특정 구간에 무공해버스 운행만 허용하는 LEBZ 도입을 고려할 수 있다. LEBZ를 도입하기 위해서는 도입 전후 탄소배출량 절감 효과를 비교할 필요가 있으나 LEBZ 도입 방안과 도입 시 효과를 분석하는 연구는 부족한 상황이다. 본 논문에서는 버스정보시스템 데이터를 활용하여 제주특별자치도를 대상으로 버스우선차로에 LEBZ 도입 시 효과를 산출하고 비교하였다. 분석 시나리오를 총 5개로 구분하여 시나리오1부터 4까지는 LEBZ 도입, 시나리오5는 LEBZ를 지정하지 않고 일부 차량만 전기, 수소 버스로 전환하는 경우로 구성하였고, 버스정보시스템 자료를 이용하여 탄소배출량을 비교한 결과 LEBZ를 도입한 경우가 km당 감축량이 최대 0.097t, 그렇지 않은 경우가 0.022t으로 LEBZ 도입은 높은 효율을 보임을 확인하였다. 본 논문은 제안한 버스정보시스템 데이터를 활용한 탄소배출량 산출 및 LEBZ 도입에 따른 효과 비교를 통해 각 지자체에서도 전기, 수소 버스 투입 시 의사 결정을 보다 합리적으로 할 수 있는 방법론 제시에 의의를 두었다.

핵심어 : LEBZ, 탄소배출량, 버스정보시스템, 효과 분석

ABSTRACT

As part of measures to address the climate crisis, buses are also being converted to electric and hydrogen buses. Local authorities need to prioritize carbon emissions when allocating newly introduced and converted electric and hydrogen buses, and as a method, consider the introduction of Low Emission Bus Zones (LEBZ) to propose the reduction of pollution from specific links. To introduce LEBZ, it is necessary to compare the carbon emissions before and after its implementation, yet there is a shortage of studies that focus solely on buses or analyze the effects of introducing LEBZ to specific links. In this paper, we utilized bus information system data to calculate and compare the effects of introducing LEBZ to bus priority lanes in Jeju. We categorized scenarios into five groups, with scenarios 1 through 4 involving the introduction of LEBZ, and scenario 5 designating cases where LEBZ was not introduced. Comparative results confirmed that in scenarios

with LEBZ introduction, the reduction per km reached a maximum of 0.097t per km, whereas in cases without LEBZ, it amounted to 0.022t per km, demonstrating higher efficiency. It underscores the significance of conducting carbon emission calculations and comparing the effects of LEBZ introduction using bus information system data, which can be directly applied by local authorities to make informed and rational decisions.

Key words : Low Emission Bus Zone, Carbon Emission, Bus Information System, Effect analysis

I. 서 론

기후위기의 심각성이 대두되고 있다. 이에 정부에서는 기후위기 대응을 위한 탄소중립 녹색성장 기본법 제 10조에 따라 2023년 3월 국가 탄소중립 녹색성장 기본계획안을 발표하고 시행 중에 있다. 국가 탄소중립 녹색성장 기본계획안에 따르면 지방 중심의 탄소중립 녹색성장 전략을 수립 및 추진하겠다 하였으며, 수송 부문에서는 버스, 택시, 화물차 등 운수업종별 특성에 따라 전기, 수소차를 우선 전환하겠다 하였다. 따라서 버스는 전기, 수소차로의 우선 전환이 시행되며 이를 어떻게 운영할지는 지자체의 상황에 맞게 결정될 것이다. 더불어 대기관리권역법 제29조, 제26조에 따라 공해차량 운행제한지역(LEZ, Low Emission Zone) 제도가 시행되고 있다. 5등급 경유차 중 자동차 종합검사를 최종 불합격 받거나, 저공해조치명령(배출가스저감장치 부착 또는 조기폐차 중 하나를 수행해야한다는 명령)을 받은 후 약 6개월 동안 조치를 시행하지 않는 경우, 대기관리권역외 지역에 등록된 사업용 경유차 중 수도권에 1년에 60일 이상 운행하는 경우 지정된 지역에 운행이 제한되는 제도이다. 지정 지역은 서울시, 인천시, 경기도 등이며 2017년부터 시행되었다. LEZ는 해외에서도 시행되고 있는 제도이며, 스웨덴, 일본, 영국, 독일 등 많은 국가에서 운영하고 있다. 특히 영국 런던은 LEZ뿐만 아니라 저공해 버스구역(LEBZ, Low Emission Bus Zone)을 지정하여 배출기준에 맞는 버스만 해당 구간을 운행할 수 있게 하였다. Low Emission Bus Zone이란 대기질이 좋지 않은 특정 도로 구간에 배출기준(런던의 경우 Euro6)을 충족하지 못하는 버스의 운행을 영구적 또는 일시적으로 제한하는 제도이다.

차량에 따라 신규 버스로 대체 시 전기, 수소 버스로의 전환이 이루어지고 있다. 이때 발생할 수 있는 문제는 전기, 수소 버스의 신규 투입 또는 전환을 어떤 노선을 우선으로 해야 하는가이다. 전기, 수소 버스로의 전환은 대기오염물질 배출량뿐 아니라 탄소배출량 감축량을 우선적으로 고려할 필요가 있다. 이때 고려할 수 있는 방법으로 지자체에서 탄소배출량 감축을 목표로 LEBZ의 도입을 추진하여 해당 구역을 지나는 노선에 전기, 수소 버스를 우선 배치하는 것이다. 이를 위해서는 LEBZ 도입 전 후 탄소배출량을 미리 산정·비교할 필요가 있으며 더불어 현실성을 파악하기 위해 LEBZ 도입 시 영향을 받는 노선 및 버스 대수를 파악할 필요가 있다. LEBZ로 선정할 수 있는 여러 구간 후보를 나열하고 탄소배출량 감축량 및 실현 가능성을 검토하여 최종 구간을 선택하는 것이다.

본 연구에서는 탄소배출량 감축량 및 보조 지표(LEBZ로 인해 영향을 받는 노선 수, 전환 필요 버스 대수)를 버스정보시스템을 활용하여 산출할 것을 제안하고자 한다. LEBZ로 선정할 수 있는 구간을 시나리오로 구분하고 시나리오별 도입 전후 효과를 버스정보시스템 데이터를 활용하여 비교하는 것이다.

버스정보시스템은 30초 단위로 버스의 위치 정보(정보 발생 시간, 좌표 등)로 적재되고, 이벤트(정류장 도착, 출발 등)가 발생할 때 추가로 해당 위치 정보가 적재되는 데이터이다. 해당 시스템은 이미 지자체별로 구축 및 운영되고 있다. 따라서 이동거리와 시간을 계산할 수 있으므로 링크별 탄소배출량을 산출하기에 용이하고, 지자체별로 구축이 되어있으므로 지자체별 탄소배출량을 직접 산출할 수 있다는 이점이 있다.

본 연구에서는 제주특별자치도를 사례로 버스정보시스템을 활용한 탄소배출량 산정 과정을 소개하고자 하며, 이때 LEBZ 도입 후보로 제주특별자치도에서 운영 중인 버스가로변차로, 버스중앙차로, 공항로를 선정하였다. 또한 LEBZ를 선정하지 않고 전기, 수소 버스로의 전환을 하였을 때를 추가로 고려하여 시나리오1은 버스가로변차로에 LEBZ를 도입하였을 때, 시나리오2는 버스중앙차로에 LEBZ를 도입하였을 때, 시나리오3은 공항로에 LEBZ를 도입하였을 때, 시나리오4는 세 구간 모두 도입하였을 때, 시나리오5는 LEBZ를 도입하지 않고 저상버스 운행 노선의 디젤버스를 모두 무공해차로 전환하였을 때로 나누어 효과를 분석하였다(제주특별자치도는 전기, 수소버스 전환 시 저상버스 노선을 최우선으로 하고 있음).

본 연구는 지자체별로 구축되어있는 버스정보시스템 데이터를 통해 지자체가 직접 탄소배출량을 산출하고 LEBZ 도입의 효과를 비교할 수 있으며, 이를 통해 전기, 수소 버스의 전환을 보다 취지에 맞게 효율적으로 수행할 수 있다는 점에 의의가 있다. 더 나아가 버스정보시스템 데이터가 실시간으로 적재되기 때문에 LEBZ의 효과를 실시간으로 모니터링 할 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서 LEBZ 도입과 관련된 선행연구 고찰을 통해 기존 연구와의 차별성을 도출한다. 3장에서는 제주특별자치도를 대상으로 버스정보시스템 데이터를 활용하여 LEBZ 도입 효과를 분석하는 과정 및 결과를 제시한다. 4장에서는 결론, 한계, 향후 연구 과제를 논의한다.

II. 선행 연구 고찰

LEBZ 효과 분석 및 수송 부문 탄소배출량 산정 및 대기환경 개선 효과와 관련된 선행 연구들을 검토하였다. LEBZ 효과 분석 연구사례로는 Ahn et al.(2007)이 일반 차량을 대상으로 지역별(서울, 인천, 경기, 수도권) Low Emission Zone을 도입했을 때의 효과를 교통수요예측모형을 통해 파악하였다. 이때 교통수요예측모형에는 수단별, 목적별 통행량을 집계한 OD자료 및 네트워크 자료(노드, 링크)를 활용하였고, 결과로 링크별 배정되는 차량대수와 통행속도 등을 도출하였다. The Seoul Institute(2019)은 국가교통DB와 교통수요분석 프로그램 Emme/2를 활용하여 서울시 녹색교통진흥지역과 서울시 전체를 대상으로 차량 운행제한을 상시적으로 하였을 때 탄소배출량을 산출하였다. 이때 차량운행 데이터를 차종, 연식, 연료유형별로 세분화하여 분석하였다. Jeong and Shon(2020)이 수도권 여객 기종점통행량 자료를 활용하여 지역별, 자동차 배출가스 등급별 교통량을 산출하고, 자동차 등록대수 데이터를 활용하여 등급별 차량 비율을 산정하여 녹색교통지역 및 서울시 25개 각 자치구에 도착하는 자동차 등급별 진입 교통량을 추정하였다. 해당 연구에서는 직접적인 탄소배출량을 산정하지는 않았고, 산출한 자치구별 진입 교통량을 통해 LEZ 도입이 필요할 경우 효과가 클 것으로 판단되는 지역을 제안하였다. Lee et al.(2021)이 광주광역시를 대상으로 지도플랫폼(네이버 클라우드 플랫폼, ODSAY LAB, KTDB)을 활용하여 승용차 및 대중교통 통행속도 및 이동거리를 산출하였고, KTDB의 2020년 기준 승용차 통행량을 적용하여 승용차 대비 버스 속도가 낮은 지역을 선정하였다. 해당 지역의 LEBZ 지정 시 대중교통 인프라 향상에 의한 전환 수요 발생으로 탄소저감 효과가 클 것이라 판단하였다. 해당 연구에서도 직접적인 탄소배출량이 아닌 간접적으로 효과가 있을 지역을 선정하였다. Lee and Song(2021)은 UTEAS(Urban Transportation Emission Assessment Systems) 분석체계를 활용하여 자동차 등급별 배출량을 산출하고 수도권, 수도권 외 광역시, 수도권 외 도의 5등급 운행제한 시 배출저감 효과를 제시하였다. UTEAS는 자동차 검사관리 시스템(VIMS) 및 차종 분류체계(TCODE)를 활용하여 자동차 등록대수, 주행거리를 산출한 후 자동차 등급별 배출량을 산출하는 분석체계이다. 수송 부문 탄소배출량 산정 및 대기환경 개선 효과 관련 연구사례로 Hahn and Kim(2016)은 차급별 친환경차 보급 정책이 지속되었을 때 장래 자동차 등록

대수를 추정하여 온실가스 감축 효과를 추정하였다. 이때 자동차 등록대수는 설문조사를 통해 신규 차량 구매 시 선택할 차종, 차급에 대한 모형을 구축하여 산정하였고, 온실가스 배출량은 승용 일반형 1대당 1일 평균 주행거리, EV 1대당 1일 평균 주행거리, 차급별 차종별 LCA 배출계수, 온실가스 사회적 비용 원단위 등을 고려하여 산정하였다. Kim et al.(2020)은 도로교통부문의 온실가스 배출량을 에너지 소비량에 온실가스 배출계수를 곱하는 방법을 사용하였으며 이때 에너지 소비량은 회귀모형을 통해 연료별 차종별 등록대수와 대당 주행거리를 산정하여 계산하였다. 해당 연구에서는 2030년 기준 온실가스 감축로드맵의 시나리오 세 가지(친환경차 보급, 연비 향상, 대중교통 활성화)에 따른 온실가스 배출량을 산출하여 CO₂ 감축 잠재량을 추정하였다. Jung and Park(2023)은 DTG(Digital Tacho Graph)데이터를 활용하여 택시의 순간속도 및 가속도를 활용하여 광주광역시 1일 택시 에너지 소모량을 산출하고 2022년 3월 기준 택시부제를 기준으로 하루 총 5,464대 차량이 운행함을 가정하였을 때 택시가 전기차로 전환되었을 경우의 온실가스 방출량을 산정하고 효과를 제시하였다. 효과 비교는 전기차로 전환된 택시 비율에 따른 경우와 광주광역시 보조금 예산 수준에 따른 경우로 나누어 제시하였다. Go et al.(2023)이 SK Planet Tmap Open API 경로안내 데이터를 활용하여 통근거리를 산정하고 KTDB의 2019년 기준 수도권 여객 O/D 현행화 자료를 활용하여 행정동별 승용차 통근통행에서 발생하는 탄소배출량을 추정하였다. 해당 연구는 차량 전환에 따른 효과를 비교한 것이 아닌 통근통행 시 발생하는 탄소배출량에 영향을 미치는 요인을 분석하고 제시하였다. Jang et al.(2023)은 건물 및 수송 부문에서 수소에너지로 전환 시 온실가스 배출량을 산출하였으며 이때 수송 부문의 온실가스 배출량은 Tier1 산출식을 활용하였고, 이때 연간 연료 사용량을 일반용, 사업용 차량의 국내 대당 하루 평균 이동거리를 활용하여 산출하였다. 전환 시나리오는 2050 탄소중립 시나리오 수송 부문 목표치를 활용하였고, 시나리오별 온실가스 배출량을 통해 부문별 탄소중립 기여도를 제시하였다. 이 외 버스를 대상으로 탄소배출량을 산정하거나 버스정보시스템을 활용한 선행연구를 찾기는 어려웠다.

위 선행 연구에서는 Lee et al.(2021)을 제외하고는 LEbZ이 아닌 모든 차량을 대상으로 한 Low Emission Zone에 대한 연구로 버스를 단독 분석 대상으로 한 연구는 부족한 실상이다. 또한, 차량 이동거리 및 속도의 경우 Jung and Park(2023)를 제외하고 직접적인 차량의 이동거리 및 통행속도를 산출하지는 않았다. 따라서 본 연구에서는 버스정보시스템 데이터를 통해 직접적인 버스의 이동거리 및 통행속도를 산출하고 이에 따른 탄소배출량을 계산하여 LEbZ의 도입에 따른 효과를 분석한다는 점에서 차별점이 있다. 버스정보시스템 자료는 Jung and Park(2023)의 DTG자료와 유사하게 차량의 위치, 속도를 파악할 수 있다는 장점이 있다. 또한 버스정보시스템은 지자체별로 구축되어 있으므로 지자체가 본 연구내용을 바탕으로 직접 구간을 설정하여 LEbZ의 도입 효과를 판단하고 전기, 수소 버스로 전환된 버스의 배치를 탄소배출량 감축 목적에 맞게 수행할 수 있는 기초자료로 활용할 수 있다는 점에 의의가 있다.

III. Low Emission Bus Zone 효과 분석

1. 제주특별자치도 대중교통 현황

제4차 제주 지방대중교통계획에 따르면 2026년까지 총 293대의 전기, 수소버스 도입을 계획하였고, 제주도 제4차 교통약자 이동편의증진계획(22년~26년)에 따라 22년부터 26년까지 매년 20대의 저상버스를 도입을 계획하였으며 이때의 저상버스는 모두 전기버스와 수소버스로 계획되었다. 실제 22년 24대의 전기, 수소버스가 도입되었으며(전기 15대, 수소 9대), 이 중 수소버스 9대는 23년 9월 제주시 구좌읍 행원리 그린수소 실증

단지 조성과 함께 운행 중이다.

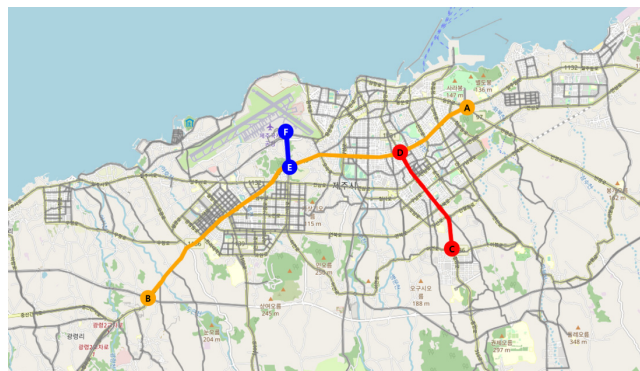
제주특별자치도의 2023년 5월 기준 노선버스 847대이며, 차고지 및 회차지는 공영 차고지 제주시 1개, 서귀포시 1개, 회차지 제주도 전역 49개이다. 노선수는 가지노선수로 산출하였으며 총 901개이다. 버스 노선이 운행되는 링크의 총 거리는 2,295km, 23년 5월 한달 대상 버스의 평균 속도는 34.35km/h이다. 이는 버스정보 시스템에 적재된 순간속도를 데이터에 적재 오류로 판단되는 경우를 제외하고 평균한 결과이다.

또한 제주특별자치도에는 대중교통우선차로가 운영되고 있다. 대중교통우선차로는 전일 대중교통만 이용하는 버스중앙차로와 공항로 및 특정 시간(평일 오전 7시~9시, 오후 16시30분~19시30분)에 대중교통만 운행할 수 있도록 하는 버스가로변차로가 있다. 버스중앙차로는 총 2.7km, 공항로는 총 0.8km, 버스가로변차로는 총 11.8km이며 평균 속도는 각 31.29km/h, 30.89km/h, 29.06km/h이다. 해당 속도 또한 23년 5월 대상 버스정보 시스템 데이터에 적재된 순간속도를 평균한 결과이다.

<Table 1> The public transportation situation in Jeju

Category	The entire Jeju Island	Transit Priority Lane		
		Bus central lane	Airport road	Bus lateral lane
Number of Buses	847 buses	291 buses	193 buses	555 buses
Number of Routes	901 routes	62 routes	41 routes	106 routes
Bus Service Frequency	5,797 times	2,007 times	1,417 times	3,516 times
Number of Stations	4,081 stations	12 stations	2 stations	47 stations
Number of Bus Turnaround Points	51 points	-	-	-
Total Distance	2,295km	2.7km	0.8km	11.8km
Average Speed	34.35km/h	31.29km/h	30.89km/h	29.06km/h

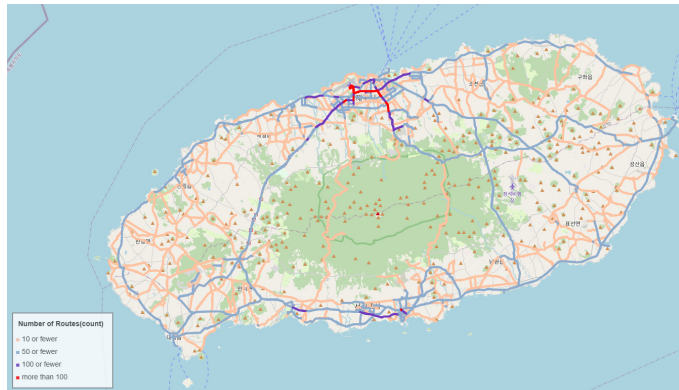
<Fig. 1>은 버스중앙차로와 버스가로변차로, 공항로의 위치를 나타낸 지도이다. 버스중앙차로는 광양사거리(D)에서부터 아라초등학교(C)까지, 공항로는 신제주입구교차로(E)부터 제주국제공항입구(F)까지, 버스가로변차로는 국립제주박물관(A)부터 무수천사거리(B)까지이다.



<Fig. 1> The location of Jeju Public Transportation Priority Lane

<Fig. 2>는 23년 5월 기준 제주특별자치도의 노선도 및 링크별 운행 노선개수를 시각화한 결과이다(노선수는 가지노선수로 파악). 제주시내와 서귀포 시내에 노선이 많이 분포되어 있고, 특히 버스중앙차로, 공항

로, 버스가로변차로가 운영되고 있는 구간에 50개 초과 노선이 운행되고 있었다. 더불어 서귀포시내에도 50개 초과 노선이 운행되고 있다. 본 연구에서는 버스중앙차로, 공항로, 버스가로변차로를 대상으로 분석을 수행하고자 한다. 현재 제주특별자치도는 버스중앙차로를 분리식에서 섬식으로 전환하고 양문형 버스를 도입하는 계획이 있으며 이에 따라 버스 전용차로를 연장할 계획에 있다. 다만 본 연구에서는 버스정보시스템 데이터를 이용하여 탄소배출량을 산정할 수 있음에 목적이 있으므로 해당 계획은 분석 범위에 포함하지 않았다.



<Fig. 2> Jeju Bus Route Map and Number of Routes

2. Tier3 탄소배출량 산출식 및 링크별 탄소배출량 산출 방법

본 연구에서는 탄소배출량 산출을 위해 한국교통안전공단의 교통부문 지방자치단체 온실가스 배출량 산정지침에 따라 Tier3 산출식을 활용하였다. Tier3 산출식은 다음과 같으며 CO₂, CH₄, N₂O 계산을 위한 산출 계수가 다르다.

$$Tier_3 = VKT_{a,b,c,d} \times EF_{a,b,c,d} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 VKT 는 총 주행거리(km), EF 는 자동차 고유 배출계수(g/km), a 는 연료 종류(경유, 휘발유, LPG 등), b 는 자동차 종류(승용, 승합, 화물 등), c 는 자동차 규모(경형, 소형, 중형, 대형), d 는 지역(특별시, 광역시 등) 혹은 도로(고속도로, 일반국도 등)이다. 본 연구에서는 총 주행거리는 링크별 버스의 총 주행거리를 활용하였고, 자동차 고유 배출계수는 2021년 승인 국가 온실가스 배출, 흡수 계수를 활용하였으며 승합, 대형, 경유의 계수 산출식은 <Table 2>에 제시하였다.

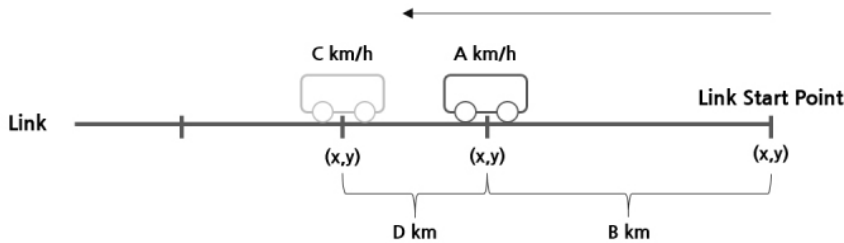
탄소배출량 산출을 위해 버스정보시스템 데이터를 활용하였다. 버스정보시스템 데이터는 30초마다 버스의 위치, 시각, 속도를 버스 및 노선정보(노선ID, 노선명, 버스ID)와 함께 데이터 베이스에 적재한다. 또한 해당 위치의 링크ID도 함께 적재된다. 더불어 메타데이터에는 각 버스의 상세 정보가 포함되어있는데, 상세정보에는 버스에 배정된 노선ID, 저장버스 여부가 있으며 해당 버스의 연료 타입(전기, 수소, 디젤 등) 또한 적재되어있다. 또한 버스가 운행되는 링크정보(링크ID, 링크 좌표)가 있으며, 링크 좌표는 링크ID별 시작점과 끝점 및 직선으로 연결하면 하나의 도로를 나타낼 수 있는 링크 내 여러 지점의 좌표이다. 따라서 특정 버스가 운행하는 노선, 경유하는 링크, 링크를 지나갈 때의 속도, 좌표를 활용한 이동거리를 계산할 수 있으므로

링크별 탄소배출량 계산이 가능하다. 여기서 속도는 데이터 적재시점의 버스의 순간속도이므로 해당 속도로 이동한 거리를 산출할 필요가 있다. 이동거리 산출 및 이동속도와 매칭하는 방법의 개념도를 <Fig. 3>에 나타내었다.

<Fig. 3>에서 링크시작점부터 링크내 버스의 첫 번째 위치까지의 거리(B km)가 첫 번째 위치의 순간속도(A km/h)와 매칭된다. 두 번째 위치의 이동거리는 첫 번째 위치의 좌표와 두 번째 위치까지의 거리(D km)가 되며 두 번째 위치의 순간속도(C km/h)와 매칭된다. 이후 동일한 과정을 반복한다. 매칭한 속도, 이동거리를 이용하여 탄소배출량을 계산한다. 이와 같이 버스정보시스템 데이터를 활용하면 직접적인 버스의 이동거리 및 운행 속도를 파악하여 링크별 탄소배출량을 확보할 수 있다.

<Table 2> Vehicle Specific Emission Coefficient

Category				Emission Coefficient (y : g/km, x : km/h)	
CO ₂	van	large car	diesel fuel	less than 64.7km/h	$y=4317.2386x-0.5049$
				over 64.7km/h	$y=0.1829x^2-29.8145x+1670.8962$
CH ₄				-	$y=0.4345x-0.9658$
N ₂ O				-	$y=0.0265+0.4362/x$



<Fig. 3> The Conceptual Diagram of Distance Calculation and Speed Matching

3. 제주특별자치도 탄소배출량 현황

탄소배출량 산출식에 따라 버스정보시스템 데이터를 활용하여 제주특별자치도의 2023년 5월 경유 버스를 대상으로 CO₂, CH₄, N₂O 배출량(g/km)을 계산한 결과를 <Table 3>에 제시하였다. 표를 보면 일평균 CO₂ 총 배출량은 117,222,865.8g/일이고, CH₄와 N₂O 배출량은 각 평균 2,352.35g/일, 6,510.74g/일이며 CH₄와 N₂O를 CO₂ 배출량으로 환산하여 계산한 총 배출량은 119,290,594.5g CO₂e이다. 이때 CO₂e는 온실가스별 지구온난화 계수를 활용하였으며 CO₂+21×CH₄+310×N₂O이다.

<Fig. 4>은 링크별 탄소배출량을 지도에 시각화한 결과이다. 그림을 보면 버스중앙차로, 공항로, 버스가로 변차로가 있는 제주시내와 서귀포시내, 제주도와 서귀포시를 잇는 516도로, 평화로 등에 이산화탄소 배출량이 높게 나타났다. 따라서 버스중앙차로, 공항로, 버스가로변차로를 LEBZ으로 지정하고 그 효과를 파악하는 사례로 활용하는 것은 적절하다고 판단된다. 제주시와 서귀포시를 잇는 도로는 향후 연구 과제로 제안하고자 한다. 본 연구에서는 LEBZ 도입 효과 분석에 CO₂e를 대상으로 하고자 한다.

<Table 3> CO₂, CH₄, N₂O, CO₂e Emissions for the Month of May 2023 in Jeju

Category	Daily average total emissions (g/day)	Emissions by link(g/day)			
		Min	Mean	Max	Sd
CO ₂	117,222,865.8	0.03	25,774.60	696,479.15	48,539.94
CH ₄	2,352.35	0.0000004	0.517	17.11	0.98
N ₂ O	6,510.74	0.000002	1.432	35.97	2.70
CO ₂ e	119,290,594.5	0.031	26,229.24	707,988.56	49,396.03



<Fig. 4> CO₂e Emissions by link in Jeju

4. Low Emission Bus Zone 도입에 따른 탄소배출량 감축 효과 비교

본 연구에서는 LEBZ 도입 효과를 파악하기 위해 경우에 따른 총 5가지 시나리오를 고려하였다. 시나리오 1은 버스가로변차로를 LEBZ로 지정하였을 때, 시나리오2는 버스중앙차로를 LEBZ로 지정하였을 때, 시나리오3은 공항로를 LEBZ로 지정하였을 때, 시나리오4는 버스가로변차로, 버스중앙차로, 공항로 모두를 LEBZ로 지정하였을 때, 시나리오5는 비교군으로 현재 전기, 수소버스 전환대상인 저상버스가 운행하는 노선의 디젤 차량이 모두 전환되었을 때 이다.<Table 4> 참조)

<Table 4> Scenarios

Scenario	Contents	Low Emission Bus Zone YN	Remarks
1	Introduction of LEBZ to Bus lateral lane	Y	
2	Introduction of LEBZ to Bus central lane	Y	
3	Introduction of LEBZ to Airport road	Y	
4	Introduction of LEBZ to All Transit Priority Lane	Y	
5	Conversion of Diesel Vehicles to Electric or Hydrogen Buses on Low-Floor Bus Routes	N	Comparison group

시나리오 5를 제외하고 모든 시나리오에서는 해당 도로를 지나는 모든 노선의 버스가 전기 또는 수소버스로 전환됨을 가정한다. 따라서 LEBZ 도입 후 배출량은 해당 도로를 지나는 노선에 배정된 버스의 탄소배출

량을 0으로 하여 계산한다. 이후 LEBZ 도입에 의해 변경된 노선의 총 운행길이를 활용하여 km당 감축량으로 시나리오를 비교한다. 시나리오 5의 경우 저상버스가 배정된 노선의 모든 디젤 버스가 전기 또는 수소버스로 전환됨을 가정한다. 따라서 저상버스가 배정된 노선의 총 운행길이를 활용하여 km당 감축량을 산정한다. 이때 총 운행길이는 노선이 운행하는 링크의 길이이며 회차와 무관하다.(<Fig. 5> 참조, 시나리오1은 (a), 시나리오2는 (b), 시나리오3은 (c), 시나리오5는 (d))

시나리오별 탄소배출량 및 감축량을 산출한 결과를 <Table 5>에 제시하였다. 더불어 시나리오별 전기, 수소버스로 전환되어야 할 버스 대수, 전기 및 수소버스만 다니게 될 노선수(가지노선을 포괄하는 대표 노선수), 전환 노선의 총 운행 길이, LEBZ 도입 전후 CO₂eq 배출량(도입 전은 <Table 3> 참조)도 함께 제시하였다. LEBZ 도입 전 CO₂eq 배출량은 119.29t/일로 제주특별자치도의 2018년 기준 도로부문 배출량 5,553.53t/일 대비 2.15%이며 시나리오별 배출량은 시나리오1 38.38t/일, 시나리오2 83.98t/일, 시나리오3 95.95t/일, 시나리오4 29.89t/일, 시나리오5 111.16t/일로 2018년 대비 각 0.69%(1.46%p 감축), 1.51%(0.64%p 감축), 1.73%(0.42%p 감축), 0.54%(1.61%p 감축), 2%(0.15%p 감축)이다. km당 감축량은 시나리오4(모든 버스우선차로에 도입)일 때 0.097t/km로 가장 높고, 시나리오5(저상버스 운행 노선 내 디젤차량 전환)일 때 0.022t/km로 가장 낮다. 시나리오5를 전환이 필요한 노선수가 유사한 시나리오3(공항로에 도입)과 비교하였을 때도 시나리오3의 감축량은 0.097t/km로 시나리오5보다 감축 효율이 좋다.

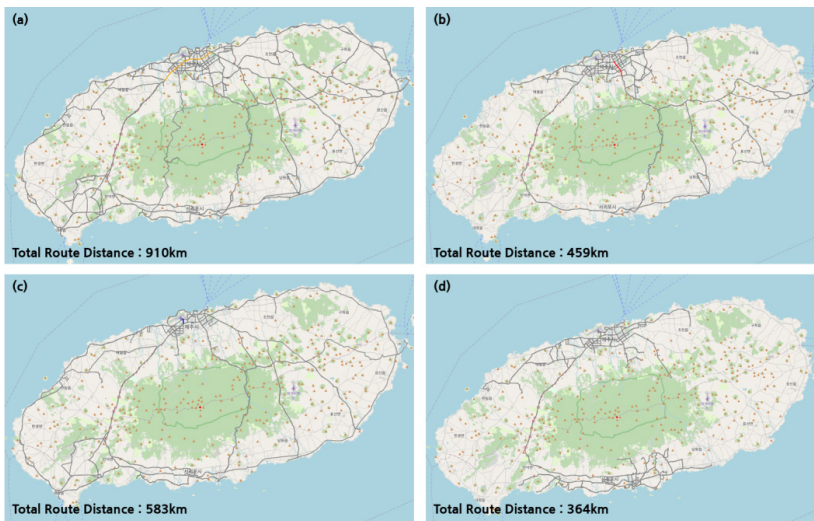
이와 같은 결과가 나타난 원인은 크게 두 가지로 생각할 수 있다. 첫 번째는 시나리오 수행에 의해 영향을 받는 노선의 길이이다. <Table 5>의 총 운행 노선 길이와 <Fig. 5>의 시나리오1, 2, 3, 5에 따라 영향을 받는 노선도를 보면 시나리오1과 시나리오3의 영향을 받는 노선에 장거리 노선이 많이 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 시나리오2와 시나리오5의 경우 가장 장거리인 일주동로, 일주서로가 포함되어 있지 않다. 이는 Tier3 계산 시 총 이동거리를 곱하므로 가장 큰 원인이라 할 수 있다. 두 번째는 해당 장거리 노선을 운행하는 일반간선 노선의 포함 여부이다. 제주특별자치도는 제주시와 서귀포시를 잇는 주요 도로에 급행이 운행되고 있다. 급행은 제주공항을 경유하는데, 제주공항을 제외하고 나머지 경로가 급행과 동일한 일반간선 또한 운행되고 있다. 해당 일반간선은 버스가로변차로를 지나고, 공항을 경유하지 않으므로 공항로는 지나가지 않는다. 따라서 <Fig. 5>의 시나리오1과 시나리오3은 유사하게 장거리 노선을 포함하는 것으로 보이나 운행하는 버스의 대수와 노선수는 시나리오1이 시나리오3보다 2배이상 많다. 따라서 버스가로변차로에 LEBZ를 도입하였을 때의 탄소배출량 감축량이 높은 것이다.

<Table 5> The result of comparison scenarios

Scenario	Contents	Number of requiring converting		Total Route Distance (km)	Emission of CO ₂ e (t/day)		Reduction per day (t/day)	Reduction per km (t/km)
		Bus	Route		Before	After		
1	Introduction of LEBZ to Bus lateral lane	480	84	910	119.29	38.38	80.91	0.089
2	Introduction of LEBZ to Bus central lane	244	46	459		83.98	35.31	0.076
3	Introduction of LEBZ to Airport road	150	31	583		95.95	23.34	0.040
4	Introduction of LEBZ to All Transit Priority Lane	532	97	924		29.89	89.40	0.097
5	Conversion of Diesel Vehicles to Electric or Hydrogen Buses on Low-Floor Bus Routes	52	39	364		111.16	8.13	0.022

시나리오4의 감축량이 가장 높음에도 시나리오4(모든 버스우선차로에 도입)를 첫 번째 우선순위에 두기에는 한계점이 있다. 시나리오3을 시행하기 위해서는 532대의 버스를 전환하여야 하고, 97개 노선을 운행하는 각 버스 운영사와 협의가 필요하다. 또한 차량이 많지 않아 아직 전환하기 어려운 버스가 있을 수 있다. 장기적으로는 높은 우선순위로 고려할 수 있으나 단기적으로는 수행이 어렵다.

시나리오2(버스중앙차로에 도입)는 시나리오4에 비해 현실성이 높다. 전환해야 하는 버스대수가 244대로 제주특별자치도의 향후 전기, 수소버스 전환 계획과 유사하고, 영향을 받는 노선수도 46개로 적다. 반면 km 당 감축량은 각 0.076t/km로 시나리오4의 0.097t/km의 약 78%에 해당된다. 따라서 본 사례에서는 시나리오2를 최우선으로 제안하고 지자체의 상황에 따라 효율은 시나리오4, 시나리오2보다 낮지만 현행(시나리오5)보다는 높은 시나리오3(공항로에 도입)을 제안할 수 있겠다.



<Fig. 5> Affected routes by Scenario1,2,3,5

데이터의 한계 또한 존재한다. 버스정보시스템 데이터를 활용하면 특정 링크를 지나갔음에도 해당 자료가 적재되지 않는 경우가 있다. 링크 길이가 짧아 빠르게 지나가는 경우가 있기 때문이다. 이 경우는 해당 링크의 탄소배출량은 산출되지 않으며 보정 방법에 대해서는 향후 연구로 남겨둔다.

그럼에도 불구하고 본 연구의 사례와 같이 버스정보시스템을 활용하면 링크별 탄소배출량 산출이 가능하며 LEVZ 도입에 따라 영향을 받는 노선, 버스 대수를 집계할 수 있으며 이에 따른 탄소배출량 감축량 산출이 가능하다. 버스정보시스템은 지자체별로 구축되어있기 때문에 본 연구와 같은 분석을 직접 수행할 수 있으며 LEVZ의 도입이 아니더라도 전기, 수소 버스 배치 시 탄소배출량 파악이 가능하므로 향후 전기, 수소 버스 배치의 기초자료로서 활용 가치가 높다고 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 버스정보시스템 데이터를 활용하여 LEVZ 도입 시 효과를 파악할 수 있음을 확인하였다. 버스정보시스템의 버스 속도, 위치, 링크ID, 링크 위치, 노선정보 등을 활용하여 링크별 탄소배출량을 산출

할 수 있었다. 제주특별자치도를 사례로 제시하였으며 LEBZ이 도입될 구간을 버스중앙차로, 버스가로변차로, 공항로로 지정하여 시나리오를 구성하였고, 저상버스 노선이 모두 전기, 수소버스로 전환되었을 경우를 비교군으로 시나리오에 추가하였다. 시나리오는 총 5개로 시나리오1은 버스가로변차로를 LEBZ으로 하였을 때, 시나리오2는 버스중앙차로를 LEBZ로 하였을 때, 시나리오3은 공항로를 LEBZ로 하였을 때, 시나리오4는 세 구간 모두 LEBZ로 하였을 때, 시나리오5는 저상버스 운행 노선의 디젤차량이 모두 전기, 수소버스로 전환되었을 때 이다. Tier3 탄소배출량 산출식을 활용하여 LEBZ 도입 전 후 CO₂e 배출량을 산출하였으며, 시나리오별 영향을 받는 노선의 총 운행길이를 활용하여 km 당 감축량을 산출, 비교 지표로 활용하였다. 효과 분석 결과 시나리오4(모든 버스우선차로에 도입)의 km당 감축량이 0.097t/km로 가장 높았으나 시행하기에 현실성이 낮다고 판단하여 시나리오2(버스중앙차로에 도입)와 시나리오3(공항로에 도입)을 지자체의 상황에 맞게 제안할 수 있음을 제시하였다.

본 연구 결과의 의의는 버스정보시스템 데이터를 활용하여 링크별 탄소배출량을 직접 산출했다는 것에 있다. 버스정보시스템은 이미 각 지자체별로 구축되어있기 때문에 탄소배출량의 효과를 지자체별로 산출하여 확인할 수 있고, 그 결과로 적절한 LEBZ 선정, 또는 전기, 수소버스를 배치할 수 있다. 또한 버스정보시스템 데이터가 실시간 데이터이기 때문에 LEBZ 도입 효과 또는 전기, 수소버스 배치 효과를 빈번하고, 유동적이게 확인할 수 있다는 것에 큰 장점이 있다. 또한 LEBZ의 도입이 아니더라도 전기, 수소 버스 배치 시 버스정보시스템을 활용하여 버스 배치에 따른 탄소배출량을 확인할 수 있으므로 보다 효율적인 버스 배치가 될 것으로 기대된다.

한계 또한 존재한다. 본 연구에서는 제주특별자치도의 버스중앙차로, 버스가로변차로를 활용하였으나 버스중앙차로나 버스가로변차로가 없는 지자체는 어떤 구간을 선택해야 하는지의 문제에 직면하게 된다. 해당 문제는 탄소배출량이 가장 높은 링크를 첫 번째로 선택하고 주변 링크로 확장하는 방법을 통해 해결할 수 있을 것으로 판단된다. 즉, 탄소배출량이 가장 높은 링크로부터 위치 및 순서가 가장 인접한 양옆 링크를 한 개씩 확장시키며 탄소배출량의 증가량을 그래프로 그렸을 때 크게 증가하다가 어느 시점에서 증가량이 더딘 지점까지를 하나의 구간으로 선정하는 것이다. 이와 같은 방법으로 제주시와 서귀포시를 잇는 도로에 대한 LEBZ 도입 효과 분석을 수행할 수 있으며 향후 연구로 제안하고자 한다. 또한 링크 길이가 짧아 버스가 데이터 적재 시점 전에 이미 링크를 통과하는 경우 해당 링크의 데이터가 적재되지 않는다. 따라서 해당 링크의 탄소배출량을 산출할 수 없다. 이는 해당 링크 길이와 전 후 링크의 평균 속도를 이용하여 보정이 가능할 것으로 판단되며 향후 연구로 제안한다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행한 결과입니다.
(RS-2023-00245871)

REFERENCES

Ahn, S. C., Lee, S. S. and Choi, K. J.(2007), “A Study on the Effect Analysis of Implementation of Environmental Zone Using Travel Demand Forecasting Model”, *Korean Society for Atmospheric*

Environment, pp.82-85.

- Go, S. W., Shin, Ch, H. and Lee, S. I.(2023), “Estimation of Passenger Private Car Carbon Emissions by Administrative District Using API-based Commuter Data”, *Journal of Korea Planing Association*, vol 58, no. 1, pp.91-103.
- Hahn, J. S. and Kim, H. C.(2016), “The Effects of Green Vehicle Supply on Greenhouse Gas Reduction”, *The Conference of Korean Society of Transportation*, vol. 75, pp.689-693.
- Jang, S. J., Park, S. R., Choi, Y. H. and Hwang, Y. W.(2023), “An Evaluation of Net-zero Contribution Regarding Hydrogen Energy Conversion in Urban Building and Transport Sector”, *Journal of Hydrogen and New Energy*, vol. 34, no. 2, pp.100-112.
- Jeong, J. E. and Shon, E. Y.(2020), “A Study on the Expansion of Low Emission Zone in Green Transport Zone and Seoul Metropolitan Government Using Origin-Destination Traffic Volume”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 19, no. 3, pp.90-99.
- Jung, J. M. and Park, S. J.(2023), “Estimation of the Effects of Introducing Electric Vehicle Taxi in Gwangju Metropolitan City”, *Korea Society of Transportation*, vol. 41, no. 1, pp.91-103.
- Kim, H., Ahn, Y. H., Yoo, T. J. and Yoo, S. J.(2020), “Research of National Greenhouse Gases Policies and Technologies: Methodology for CO2 Emission Projection and Reduction Potentials in Road Transport Sector of Korea”, *Korea Technology Innovation Society*, vol. 23, no. 2, pp.324-339.
- Lee, K. J. and Song, S. S.(2021), “Mobile Emission Analysis and Effects of Low Emission Zone by UTEAS”, *The Conference of Korean Society of Transportation*, vol. 85, pp.456-457.
- Lee, K. J., Ryu, I. G., Jung, W. H. and Lee, S. C.(2021), “A Study on Selection Low Emission Bus Zone for Hot Spot Management by Map-Platform”, *The Conference of Korean Society of Transportation*, vol. 85, pp.454-455.
- The Seoul Institute(2019), *Introducing Measures for Seoul’s Automobile Operation Restrictions Based on Environmental Ratings*, pp.11-13.