

수도권 도시철도의 이산화탄소 배출량 절감 효과에 대한 환경 기여도 분석

Evaluation of Environmental Contribution to the Effect of Reducing Carbon Dioxide Emission in Metropolitan Urban Railways

주재문¹ · 홍기만^{2*} · 홍영석³ · 김태균⁴

Jaemoom Joo¹, Kiman Hong^{2*}, Youngsuk Hong³, Teagyun Kim⁴

¹Research Associate, Local Investment Management Center, Korea Research Institute for Local Administration, Wonju, Republic of Korea

²Post-doctoral Researcher, Department of Highway&Transportation Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Republic of Korea

³Research Professor, Disaster Response Traffic Management Center, Myongji University, Yongin, Republic of Korea

⁴Director, Mobility Consulting Business Division, Studio Galilei Co., Ltd., Yongin, Republic of Korea

*Corresponding author: Kiman Hong, kmhong@kict.re.kr

ABSTRACT

Purpose: The purpose of this study is to quantitatively identify the environmental contribution generated by urban rail users in the metropolitan area. **Method:** As for the analysis method, the mode choice and assignment of the traffic demand analysis were repeatedly performed on the assumption that each line was not opened for the metropolitan urban railway lines 1 to 9. After that, the environmental contribution according to changes in demand for the road was analyzed. **Result:** The total amount of carbon dioxide emissions and benefits were found to be the largest for subway line 1. However, when considering the number of stations and length, it was analyzed that the environmental contribution was the greatest in Metro Line 4. **Conclusion:** Measures to promote the use of public transportation are representative of environmental improvement policies, but there is a limit in that it is difficult for actual users/non-users to feel it. Therefore, it is judged that it is necessary to quantitatively present the effect in order to improve and spread awareness of the environment.

Keywords: Urban Rail, Transit, Environmental benefit, Carbon dioxide Emissions, Mode Choice

요약

연구목적: 본 연구는 수도권 도시철도 이용자에 의해 발생하는 환경 기여도를 정량적으로 파악하는데 목적이 있다. **연구방법:** 분석방법은 수도권 도시철도 1~9호선을 대상으로 각 노선이 미개통되었다는 전제하에 교통수요분석의 수단선택과 통행배정을 반복 수행한 후, 공로의 전환수요에 따른 각 노선별 환경기여도를 분석하였다. **연구결과:** 이산화탄소 배출량의 총량적인 측면에서는 도시철도 1호선에서 환경기여도가 가장 큰 것으로 나타났으나, 역수 및 연장을 고려할 경우, 도시철도 4호선이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. **결론:** 대중교통 이용 증진 방안은 대표적인 환경 개선 정책이나, 실제 이를 체감하기 어렵다는 한계가 있다. 따라서 환경에 대한 인식 개선 확산을 위해 그 효과를 정량적으로 제시할 필요가 있을 것으로 판단된다.

핵심용어: 도시철도, 대중교통, 환경 편익, 이산화탄소 배출량, 수단선택

Received | 23 August, 2022

Revised | 16 September, 2022

Accepted | 20 September, 2022

 OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

서론

온실가스에 의한 지구온난화는 국가적 차원에서 심각한 문제로 인식되고 있으며, 국내에서는 2020년 발표된 「2050 탄소 중립 추진전략」(MOEF, 2020)을 통해 온실가스 감축 정책을 추진중에 있다. 온실가스 발생에는 여러 요인이 존재하나 전체 온실가스 배출량 중 약 80% 이상이 이산화탄소에 의한 것으로 수송부문에서는 주로 도로에서 발생하고 있는 실정이다. 이에 정부에서는 교통부문의 대표적인 정책으로 개인교통수단에 대한 수요를 억제하고 대중교통 이용 증진 방안을 제시하고 있다. 특히, 대중교통 수단 중 버스수단과 달리 공로의 교통 혼잡에 영향을 받지 않는 철도수단의 이용은 온실가스 감축과 밀접한 연관이 있으며, 이산화탄소 배출 저감에 효과적인 것으로 나타났다(Kang, 2011; Lee, 2015).

한편, 수도권 인구의 대표적 이동수단인 철도망을 살펴보면, 1974년 서울도시철도 1호선을 시작으로 현재까지 다수의 도시철도, 광역철도, 경전철 등 다양한 형태의 철도망이 구축운영중에 있으며, 주요 거점을 대상으로 한 광역급행철도(GTX) 계획이 추진중에 있다. 이러한 철도망의 확장은 공로 수단 이용자의 수단전환 효과를 통해 도심부 공로 혼잡 완화와 더불어 차량으로부터 발생하는 이산화탄소의 저감 등 환경개선 효과를 유발하며, 이에 대한 효과를 분석하기 위한 대표적인 방법은 통행배정모형을 활용하는 것이다.

모형을 이용하여 이산화탄소 배출량을 추정해 본 기존 연구들을 살펴보면, 공로부문의 이산화탄소 배출량 추정의 정확성을 향상시키기 위한 방법론 연구(Choi et al., 2009; Back, 2013; Han, 2013; Kim et al., 2014; Yoo et al., 2020)가 많이 수행되었으며, 이외에 여객 및 화물 수송을 위해 친환경 수단 도입에 따른 탄소배출 연구(Lee, 2010; Lee et al., 2018; Lee et al., 2021; Oh et al., 2021) 등이 수행된 것으로 나타났다.

그러나 철도 이용에 따른 수단전환 효과에 의해 발생하는 환경 영향을 파악하는 연구는 미미한 것으로 나타났으며, 이러한 이유 중 하나로는 대부분의 철도 사업의 경우, 추진 계획 수립시 타당성조사가 수행되기 때문에 편익 산정 과정에서 환경 편익이 반영됨에 따라 그 효과를 예측할 수 있기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 철도 사업의 계획 단계에서는 예측된 결과를 기반으로 편익이 산정되고 있으나, 노선의 변경 또는 역사의 변경 등으로 인해 항상 예측된 철도 이용수요가 실제 철도 이용수요와 동일하지 않다는 문제가 발생한다.

따라서 현재 운영중인 철도 수단 이용자로 인해 발생하는 사회적 편익에 대해 재고할 필요가 있으며, 본 연구에서는 수도권 도시철도를 대상으로 환경 기여도를 파악하는데 목적이 있다. 여기서 환경 기여도는 도시철도의 이용자뿐만 아니라 이를 이용하지 않는 사람에게도 혜택을 주는 편익으로 본 연구에서는 각 도시철도 노선별 미개통을 전제로 온실가스의 주요 원인인 이산화탄소 배출량에 따른 편익을 산정하여 이를 비교 평가 하였다.

분석 방법

분석 시나리오 및 수단선택 모형

본 연구의 분석 방법은 철도시설에 대한 교통수요분석 방법을 적용하였으며, 이에 따라 국가교통DB(KTDB)에서 제공하는 수도권 자료를 이용하여 각 시나리오별 전환수요를 예측하였다. 일반적으로 철도시설에 대한 분석 방법은 수단선택과 통행배정의 반복 과정을 거치며, 예비타당성조사 지침(KDI, 2004)에서는 이러한 과정을 2~3회 수행시 수단분담률이 안정적인 균형 상태에 도달한다고 제시하고 있다. 이와 유사한 연구로 Kim et al.(2016)은 L2-Norm을 지표로 지역간 대중교통의 수단선택과 통행배정간 반복수행을 수행한 결과, 5회 이상 반복 수행시 기종점간 수단분담률이 안정적으로 도출된다고 제시하였다.

여기서 L2-Norm은 (식 1)과 같이 이전 Iteration과 현재 Iteration의 모든 기종점간 수단통행량의 차이를 통해 산정되며, 이때의 값이 ‘0’에 가까울수록 균형 상태에 도달함을 의미한다.

$$L2Norm = \sqrt{\sum_i \sum_j \sum_k (T_{ijk}^{t-1} - T_{ijk}^t)^2} \tag{식 1}$$

여기서, i, j : 기종점 존

k : 수단

t : iteration

T : 통행량

본 연구에서는 Kim et al.(2016)의 연구 결과를 반영하여 수단선택과 통행배정 반복 수행횟수를 5회 적용하였으며, 분석의 기준년도는 2016년으로 수도권 대중교통 데이터는 Fig. 1과 같다. 또한, 분석 시나리오는 Table 1과 같이 수도권 도시철도 1호선~9호선에 대하여 각 노선의 미개통을 전제로 설정하였다.

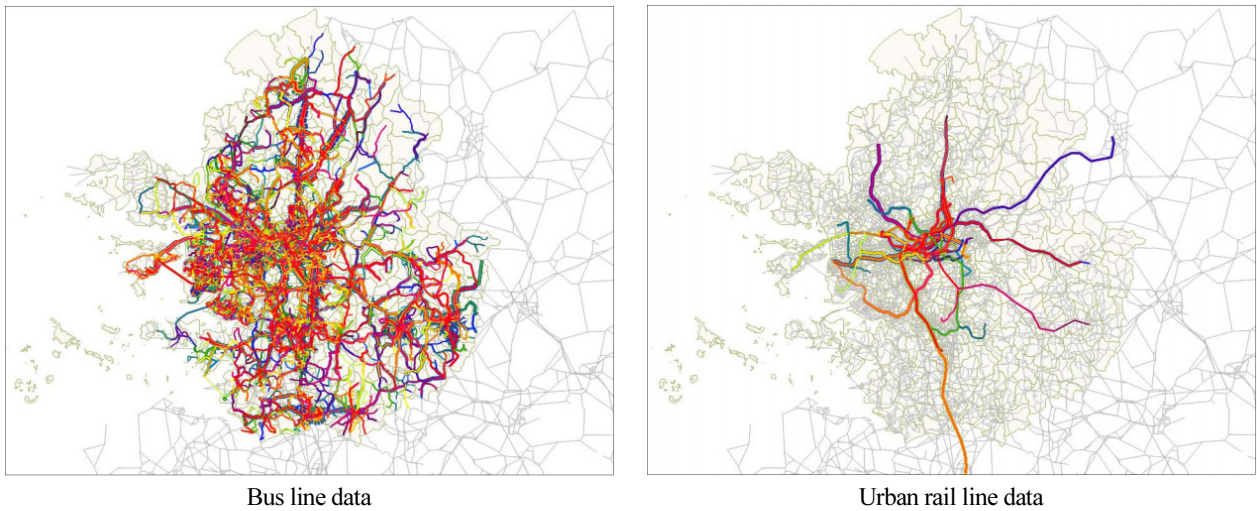


Fig. 1. Transit network in metropolitan(2016)

Table 1. Scenario settings

시나리오	미개통 노선	비고	시나리오	미개통 노선	비고
Base Scenario	-	-	Scenario 5	5호선	마천지선 포함
Scenario 1	1호선	경부선, 경인선, 경원선, 장항선 포함	Scenario 6	6호선	응암 순환선 포함
Scenario 2	2호선	까치산 외선, 신설동 외선 포함	Scenario 7	7호선	-
Scenario 3	3호선	일산선 포함	Scenario 8	8호선	-
Scenario 4	4호선	안산선, 과천선 포함	Scenario 9	9호선	-

철도 시설에 대한 타당성 분석에서 적용되는 신규 수단 도입에 따른 수단전환 효과를 본 연구의 분석에 적용하면, 시나리오별 해당 노선이 없는 경우, 기존에 이를 이용하던 이용자는 다른 수단(승용차, 택시, 버스 등) 또는 다른 도시철도 노선을 이용하게 된다. 본 연구에서는 이를 산정하기 위해 「교통수요 분석 기초자료 배포 설명자료」(KOTI, 2015)에서 제시된 수단선택 모형을 이용하였으며, 수도권 자료는 총 4개의 통행 목적(가정기반출근, 가정기반등교, 가정기반기타, 비가정기반)으로 구분하여 Table 2와 같이 승용차, 택시, 버스, 지하철, 버스+지하철의 5개 수단에 대한 효용함수식을 제시하고 있다.

Table 2. Utility function structure of mode choice model in Metropolitan

$$\text{승용차 효용} = \alpha_A + \beta_{1,pr} * Ttime + \beta_{2,pr} * Acost + \gamma_1 * AdminD$$

$$\text{택시 효용} = \alpha_T + \beta_{1,pr} * Ttime + \beta_{2,pr} * Tcost$$

$$\text{버스 효용} = \alpha_B + \beta_{1,pb} * Ttime + \beta_{2,pb} * Bcost + \gamma_2 * TRno$$

$$\text{전철 효용} = \alpha_S + \beta_{1,pb} * Ttime + \beta_{2,pb} * Scost + \gamma_2 * AdminD + \gamma_3 * DumSta$$

$$\text{버스-전철 효용} = \beta_{1,pb} * Ttime + \beta_{2,pb} * BScost + \gamma_2 * TRno$$

여기서, *Ttime* : 기-종점간 총통행시간

Tcost : 택시 통행비용

Scost : 지하철 통행비용

AdminD : 행정구역더미

Dum.Sta : 지하철역 더미

β_{pr} : 개인교통수단 시간-비용변수의 계수

γ : 더미변수의 계수

Acost : 승용차 통행비용(유류비+주차비)

Bcost : 버스 통행비용

BScost : 버스+지하철 통행비용

TRno : 환승횟수

α_m : m수단의 상수항

β_{pb} : 대중교통수단 시간-비용변수의 계수

자료 : Korea Transport Institute(2015)

도시철도 노선별 현행화 결과

철도 통행배정모형 현행화의 경우, 예비타당성조사 표준지침(KDI, 2008)에서는 영향권 및 주요 인접지역에 따라 노선별 역별 정산을 수행하고 있으며, 최대 오차율 30%이하를 제시하고 있다. 이에 본 연구에서는 국내 교통수요분석 S/W인

Table 3. Result of urban rail calibration

(단위: 통행/일, %)

노선명	관측승차(A)	배정승차(B)	오차(B-A)	오차율((B/A)/A*100)
1호선	1,451,767	1,345,550	-106,217	-7.3
2호선	1,544,667	1,317,229	-227,438	-14.7
3호선	663,364	621,180	-42,184	-6.4
4호선	860,012	763,139	-96,873	-11.3
5호선	597,045	553,332	-43,713	-7.3
6호선	366,467	339,547	-26,920	-7.3
7호선	722,769	640,458	-82,311	-11.4
8호선	169,968	172,630	2,662	1.6
9호선	258,033	185,205	-72,828	-28.2
합계	6,634,092	5,938,270	-695,822	-10.5

자료 : Ministry of Land, Infrastructure and Transport et al.(2017).

TOVA(Total Vehicle Assignment)를 이용하여 수도권 도시철도 노선별 정산을 수행하였으며, 오차허용 기준은 30% 이내로 적용하였다. 정산 결과, Table 3과 같이 오차율은 노선에 따라 -28.2%~1.6%로 나타났으며, 관측치와 배정치의 상관관계를 분석한 결과, 0.993으로 나타났다.

도시철도 이용 수요 변화 분석

수단분담율 변화 분석

앞서 제시한 현황 정산 결과를 이용하여 시나리오별 수단선택모형을 적용한 결과, Table 4와 같이 모든 시나리오에서도 시철도 통행량은 감소한 반면, 타 수단(승용차, 택시, 버스)의 통행량 및 수단분담률이 증가한 것으로 분석되었다.

노선별 수요 변화 분석

분석 시나리오에 따른 각 도시철도 노선의 이용 수요 변화를 살펴보면, Table 5과 같이 나타났으며, 시나리오별 주요 증가 노선과 증가 지역은 다음과 같다.

- 시나리오 1 : 도시철도 7호선(경기 부천 통행), 2호선(서울 중구 통행), 4호선(경기 안양 통행)
- 시나리오 2 : 도시철도 5호선(서울 동대문구, 성동구 통행), 7호선(서울 강서구, 서초구 통행), 1호선 및 3호선(서울 중구 통행)
- 시나리오 3 : 도시철도 2호선 및 4호선(서울 강남구, 중구 통행), 5호선(서울 송파구 통행)
- 시나리오 4 : 도시철도 1호선(경기 안양 통행), 6호선(서울 중구 통행), 7호선(서울 동작구 통행)
- 시나리오 5 : 도시철도 2호선(서울 동대문구, 성동구 통행), 9호선(서울 강서구, 동작구 통행), 8호선(서울 강동구 통행)
- 시나리오 6 : 도시철도 1호선(서울 용산구, 종로구 통행), 4호선(서울 중구 통행)
- 시나리오 7 : 도시철도 1호선(경기 부천 통행), 2호선(서울 강서구, 서초구 통행), 4호선(서울 동작구 통행)
- 시나리오 8 : 도시철도 5호선(서울 송파구, 강동구 통행)
- 시나리오 9 : 도시철도 2호선 및 7호선(서울 강남구, 송파구 통행), 5호선(서울 강서구, 동작구 통행)

이 중 시나리오 8을 살펴보면, 도시철도 2호선에서 이용수요가 감소한 것으로 나타났으며, 이러한 원인으로는 성동구 지역과 송파구 지역간 통행에서 기존 2호선 + 8호선을 이용하는 경로에서 8호선 미개통으로 인해 5호선으로 경로가 전환됨에 따라 이용수요가 다소 감소된 것으로 분석되었다. 또한, 시나리오 9에서는 도시철도 1호선의 이용수요가 감소된 것으로 나타났다. 이는 구로구 지역과 강남구 및 송파구 지역간 통행에서 기존 1호선 + 9호선 경로 이용수요가 2호선 또는 7호선 경로로 전환됨에 따라 감소하는 것으로 분석되었다.

Table 4. Changes in modal trips and modal split

(단위: 통행/일, %)

구분	수단					
	승용차	택시	버스	도시철도	버스+도시철도	합계
Base Scenario (A)	17,607,999 (49.80)	3,236,511 (9.15)	6,884,193 (19.47)	4,748,186 (13.43)	2,879,082 (8.14)	35,355,971 (100.00)
Scenario 1 (B)	17,955,247 (50.78)	3,271,717 (9.25)	6,976,479 (19.73)	4,275,406 (12.09)	2,877,122 (8.14)	35,355,971 (100.00)
Scenario 2 (C)	17,763,374 (50.24)	3,284,401 (9.29)	6,949,835 (19.66)	4,456,688 (12.61)	2,901,673 (8.21)	35,355,971 (100.00)
Scenario 3 (D)	17,720,566 (50.12)	3,262,567 (9.23)	6,939,061 (19.63)	4,537,178 (12.83)	2,896,599 (8.19)	35,355,971 (100.00)
Scenario 4 (E)	17,845,207 (50.47)	3,273,240 (9.26)	6,966,687 (19.70)	4,366,533 (12.35)	2,904,304 (8.21)	35,355,971 (100.00)
Scenario 5 (F)	17,729,565 (50.15)	3,267,427 (9.24)	6,931,375 (19.60)	4,510,343 (12.76)	2,917,261 (8.25)	35,355,971 (100.00)
Scenario 6 (G)	17,668,053 (49.97)	3,252,204 (9.20)	6,918,516 (19.57)	4,609,357 (13.04)	2,907,841 (8.22)	35,355,971 (100.00)
Scenario 7 (H)	17,726,960 (50.14)	3,257,296 (9.21)	6,934,169 (19.61)	4,518,679 (12.78)	2,918,867 (8.26)	35,355,971 (100.00)
Scenario 8 (I)	17,667,670 (49.97)	3,244,581 (9.18)	6,905,386 (19.53)	4,647,261 (13.14)	2,891,073 (8.18)	35,355,971 (100.00)
Scenario 9 (J)	17,659,103 (49.95)	3,251,688 (9.20)	6,903,750 (19.53)	4,660,357 (13.18)	2,881,073 (8.15)	35,355,971 (100.00)
(B) - (A)	347,248 (0.98)	35,206 (0.10)	92,286 (0.26)	-472,780 (-1.34)	-1,960 (-0.01)	-
(C) - (A)	155,375 (0.44)	47,890 (0.14)	65,642 (0.19)	-291,498 (-0.82)	22,591 (0.06)	-
(D) - (A)	112,567 (0.32)	26,056 (0.07)	54,868 (0.16)	-211,008 (-0.60)	17,517 (0.05)	-
(E) - (A)	237,208 (0.67)	36,729 (0.10)	82,494 (0.23)	-381,653 (-1.08)	25,222 (0.07)	-
차이 (F) - (A)	121,566 (0.34)	30,916 (0.09)	47,182 (0.13)	-237,843 (-0.67)	38,179 (0.11)	-
(G) - (A)	60,054 (0.17)	15,693 (0.04)	34,323 (0.10)	-138,829 (-0.39)	28,759 (0.08)	-
(H) - (A)	118,961 (0.34)	20,785 (0.06)	49,976 (0.14)	-229,507 (-0.65)	39,785 (0.11)	-
(I) - (A)	59,671 (0.17)	8,070 (0.02)	21,193 (0.06)	-100,925 (-0.29)	11,991 (0.03)	-
(J) - (A)	51,104 (0.14)	15,177 (0.04)	19,557 (0.06)	-87,829 (-0.25)	1,991 (0.01)	-

주) 괄호()안은 비율을 의미함

Table 5. Changes in demand for urban rail line

(단위: 통행/일)

구분	1호선	2호선	3호선	4호선	5호선	6호선	7호선	8호선	9호선
Base Scenario	1,345,550 (-)	1,317,229 (-)	621,180 (-)	763,139 (-)	553,332 (-)	339,547 (-)	640,458 (-)	172,630 (-)	185,205 (-)
Scenario 1	-	1,455,216 (137,988)	639,871 (18,691)	922,113 (158,973)	615,422 (62,090)	393,447 (53,900)	915,014 (274,555)	172,127 (-503)	203,044 (17,839)
Scenario 2	1,470,084 (124,533)	-	731,529 (110,349)	834,594 (71,455)	761,386 (208,054)	375,119 (35,573)	814,442 (173,984)	205,528 (32,898)	206,199 (20,995)
Scenario 3	1,356,262 (10,712)	1,427,648 (110,419)	-	781,033 (17,894)	605,046 (51,714)	388,708 (49,161)	646,927 (6,469)	191,114 (18,484)	181,900 (-3,305)
Scenario 4	1,549,421 (203,870)	1,325,617 (8,389)	662,774 (41,594)	-	563,338 (10,006)	402,635 (63,088)	682,732 (42,274)	171,985 (-645)	183,286 (-1,919)
Scenario 5	1,376,177 (30,627)	1,459,856 (142,627)	642,179 (20,999)	769,351 (6,212)	-	351,026 (11,479)	656,747 (16,289)	219,756 (47,126)	250,548 (65,343)
Scenario 6	1,389,429 (43,879)	1,336,400 (19,171)	656,841 (35,661)	798,622 (35,483)	570,726 (17,394)	-	644,624 (4,166)	173,141 (511)	187,592 (2,388)
Scenario 7	1,496,493 (150,943)	1,424,324 (107,096)	629,842 (8,663)	797,492 (34,352)	580,277 (26,945)	350,115 (10,568)	-	178,502 (5,872)	186,683 (1,478)
Scenario 8	1,346,214 (664)	1,309,692 (-7,537)	635,017 (13,837)	762,977 (-162)	584,438 (31,106)	339,775 (229)	643,937 (3,478)	-	184,417 (-788)
Scenario 9	1,336,507 (-9,044)	1,420,067 (102,839)	634,090 (12,910)	783,976 (20,836)	643,518 (90,186)	344,989 (5,442)	701,386 (60,927)	173,397 (767)	-

주) 괄호(-)안은 Base Scenario와의 이용수요 차이를 의미함

도시철도 환경 기여도 분석

이산화탄소 배출량 추정 및 편익 산정 결과

본 연구는 도시철도망 미개통(시나리오)에 따라 여객 수요 변화에 의한 환경 영향을 분석하는 것으로 여객 수단 중 승용차, 택시를 대상으로 이산화탄소 배출량 및 편익을 추정하였다. 도시철도 이용자의 전환 수단으로는 버스가 포함될 수 있으나, 본 연구에서는 버스 노선 데이터를 이용함에 따라 버스 운행체계의 변화는 없는 것으로 가정하였다.

이산화탄소 배출량 및 편익 산정은 예비타당성조사 지침에서 제시된 승용차의 속도별 배출 원단위와 대기오염비용 원단위를 이용하였으며, 10km/h 단위로 제시된 원단위에서 중간값은 회귀식을 구축하여 Table 6과 같이 추정하였다.

시나리오별 이산화탄소 배출량 추정 결과를 살펴보면, Table 7과 같이 시나리오 1에서 이산화탄소 배출량은 약 619톤/일 가장 큰 증가를 나타내는 것으로 분석되었으며, 이산화탄소 배출량 증가가 가장 작은 시나리오는 시나리오 9로 나타났다. 또한, 이산화탄소 배출량 증가에 따른 부(-)의 편익 산정 결과에서는 시나리오 1에서 약 117.7억원/년, 시나리오 9에서 12.2억원/년으로 산정되었다.

시나리오 1을 예시로 보면, 현재 도시철도 1호선이 운영됨에 따라 이를 이용하는 이용자에 의해 발생하는 환경 개선 편익은 연간 약 117.7억원임을 알 수 있다.

Table 6. CO₂ Emission and cost estimation regression model

(단위 : km/h, g/km, 원/km)

속도	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
CO ₂ 배출량 원단위	380.437	257.480	204.913	174.262	153.682	138.685	127.152	117.940	110.371	104.012
비용 원단위	19.82	13.40	10.67	9.07	8.01	7.22	6.62	6.14	5.75	5.42

$$C_i = \alpha + \beta_1 \times S_i + \beta_2 \times S_i^2 + \beta_3 \times S_i^3$$

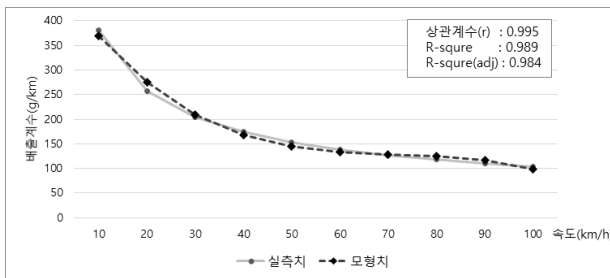
여기서, C_i = 링크별(i) 이산화탄소 배출량 원단위 또는 비용 원단위

S_i = 링크별(i) 통행속도

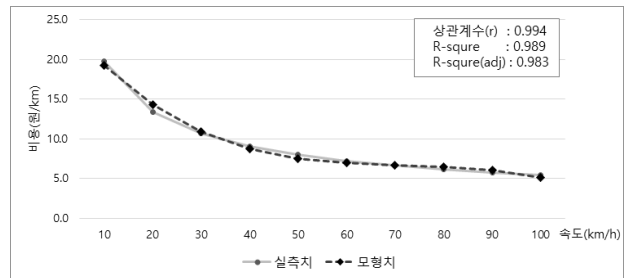
i = link index

α, β = parameter

이산화탄소 배출량 회귀모형



이산화탄소 배출 비용 회귀모형



이산화탄소 배출량 계수 추정결과

구분	계수	표준오차	t 통계량	P-value
α	498.77040	21.34619	23.36578	4.0E-07
β_1	-14.87412	1.60000	-9.29634	8.8E-05
β_2	0.20315	0.03300	6.15555	8.4E-04
β_3	-0.00095	0.00020	-4.77614	3.1E-03

이산화탄소 배출 비용 계수 추정결과

구분	계수	표준오차	t 통계량	P-value
α	25.98161	1.12108	23.17550	4.2E-07
β_1	-0.77517	0.08403	-9.22489	9.2E-05
β_2	0.01059	0.00173	6.11003	8.8E-04
β_3	-0.00005	0.00001	-4.74185	3.2E-03

주 : 비용원단위의 경우, 2007년 기준단가를 소비자물가지수(122.8)를 이용하여 보정한 값임.

자료 : Korea Development Institute(2008)

Table 7. Estimation of CO₂ emissions and benefits by scenario

(단위 : 톤/일, 억원/년)

구분	이산화탄소 배출량	이산화탄소 배출 비용	차이	
			이산화탄소 배출 증가량	부(-)의 편익
Base Scenario	19,534.22	3,712.52	-	-
Scenario 1	20,153.22	3,830.16	619.00	117.65
Scenario 2	19,721.93	3,748.19	187.70	35.68
Scenario 3	19,667.27	3,737.80	133.05	25.29
Scenario 4	19,856.14	3,773.70	321.91	61.18
Scenario 5	19,666.74	3,737.70	132.51	25.19
Scenario 6	19,602.09	3,725.42	67.87	12.90
Scenario 7	19,667.76	3,737.90	133.54	25.38
Scenario 8	19,605.15	3,726.00	70.93	13.48
Scenario 9	19,598.22	3,724.68	64.00	12.16

노선별 환경 기여도 분석

시나리오별 이산화탄소 배출량에 의한 양적 측면에서의 편익은 각 노선별로 역수 또는 연장에 차이가 있기 때문에 동일한 기준에서 환경기여도를 비교하기에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 현황을 고려하여 원단위를 산정하여 비교하였으며, 결과는 Table 8 및 Fig. 2와 같다.

Table 8에서와 같이 역수 및 노선의 연장 현황을 살펴보면, 2016년 기준 1호선(시나리오 1)의 역수는 98개로 다른 노선에 비해 많은 것으로 나타났으며, 연장 또한 약 195km로 가장 긴 것으로 알 수 있다. 반면, 도시철도 8호선(시나리오 8)은 역수 및 연장이 각각 17개, 17km로 가장 적은 것으로 나타났다.

위의 현황 및 결과를 통해 산정된 역당 부(-)편익 및 1km당 부(-)의 편익은 시나리오 4에서 각각 1.27억원/년, 0.86억원/년으로 가장 크게 발생하였다. 이는 도시철도 4호선의 개통으로 인해 역당 또는 연장 1km당 가장 큰 환경 기여도를 나타내고 있음을 의미한다. 반면, 시나리오 6은 역당 부(-)편익 및 1km당 부(-)의 편익이 각각 0.34억원/년, 0.37억원/년으로 가장 낮은 환경 기여도를 보이는 것으로 나타났다.

각 조건에 따른 결과를 요약하면, 역당 부(-)편익은 시나리오 4(도시철도 4호선 미개통), 시나리오 1(도시철도 1호선 미개통), 시나리오 8(도시철도 8호선 미개통), 시나리오 2(도시철도 2호선 미개통) 순으로 높게 나타났으며, 1km당 부(-)의 편익은 시나리오 4(도시철도 4호선 미개통), 시나리오 8(도시철도 8호선 미개통), 시나리오 1(도시철도 1호선 미개통), 시나리오 2(도시철도 2호선 미개통) 순으로 높은 것으로 분석되어 전반적으로 시나리오 1, 시나리오 2, 시나리오 4, 시나리오 8이 다른 시나리오에 비해 환경 기여도가 높은 것으로 나타났다.

또한, 일부 시나리오의 주요 특징을 보면, 시나리오 1에서는 역당 부(-)의 편익이 1.20억원/년으로 시나리오 4에 이어 두 번째로 높은 것으로 나타났으나, 1km당 부(-)의 편익은 0.60억원/년으로 시나리오 8보다 낮은 것으로 분석되었다. 이용객수가 다른 노선에 비해 상대적으로 많은 시나리오 2의 경우에는 1km당 부(-)의 편익은 시나리오 1과 유사하나, 역당 부(-)의 편익은 시나리오 1의 약 58%수준(0.7억원/년)으로 나타났다. 시나리오 8은 양적인 측면에서 이산화탄소 배출량 및 편익은 Table 7에서 제시된 바와 같이 낮은 것으로 나타났으나, 역당 또는 1km당 부(-)의 편익에서는 높은 것으로 분석되었다.

Table 8. Results of benefit estimation(per station/per km)

(단위 : 개, km, 억원/년)

시나리오	역수	연장	역당 부(-)의 편익	1km 당 부(-) 편익
Base Scenario	-	-	-	-
Scenario 1	98	195	1.20	0.60
Scenario 2	51	60	0.70	0.59
Scenario 3	44	57	0.57	0.44
Scenario 4	48	71	1.27	0.86
Scenario 5	51	52	0.49	0.48
Scenario 6	38	35	0.34	0.37
Scenario 7	51	57	0.50	0.45
Scenario 8	17	17	0.79	0.79
Scenario 9	30	31	0.41	0.39

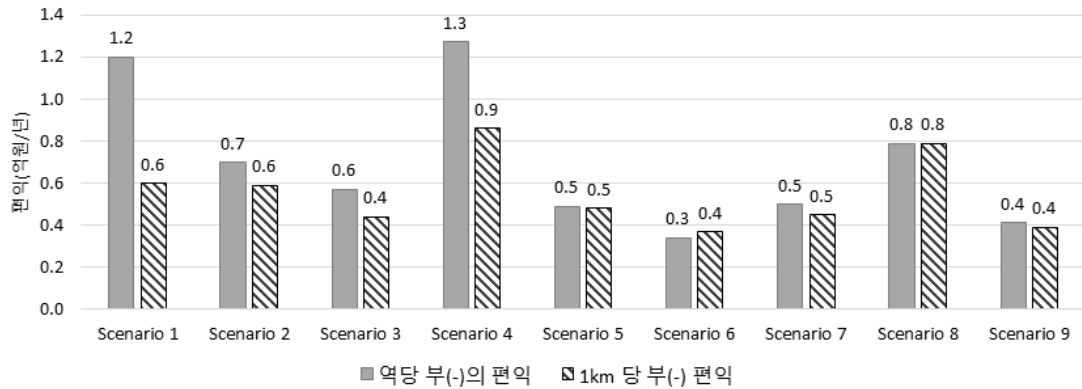


Fig. 2. Results of benefit estimation(per station/per km)

결론

연구의 결론

본 연구는 현재 운영중인 수도권 도시철도 1호선~9호선을 대상으로 각각의 노선이 환경측면에서 미치는 영향을 파악하였으며, 온실가스의 주요원인인 이산화탄소 배출량을 기준으로 편익을 산정하여 비교 분석하였다. 분석 방법은 철도 시설의 타당성 평가에서 적용되고 있는 교통수요분석 방법을 기반으로 각 노선이 미개통 되었다는 전제하에 수단선택과 통행배정 모형을 반복 수행하였으며, 분석의 기준년도는 2016년으로 설정하였다.

분석 결과, 이산화탄소 배출량 및 부(-)의 편익의 양적인 측면에서는 시나리오 1(도시철도 1호선 미개통시)에서 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으나, 각 노선의 역수 및 연장을 고려하면 시나리오 4(도시철도 4호선 미개통시)에서 가장 큰 영향이 발생하는 것으로 분석되었다.

본 연구의 결과는 국내외 주요 이슈사항인 환경 문제에 있어 교통부문의 철도 수단 이용에 따른 환경 기여도를 실제 이용 수요를 고려하여 정량적으로 분석·제시 하였다는 점에서 의미가 있으며, 환경에 대한 인식 개선 확산을 위해 현재 추진되고 있는 다수의 철도망 계획에서 이러한 사후평가 개념의 검토가 필요할 것으로 판단된다.

연구의 한계

버스와 도시철도 수단은 상호 보완 관계로 도시철도가 서비스되지 않는 지역은 버스 노선의 신설 및 배차간격 조정 등을 통해 보완적 서비스가 제공된다. 또한, 수도권과 같이 ‘버스-도시철도’ 수단간 연계 환승이 빈번하게 발생하는 지역에서는 이러한 변화가 크게 적용될 수 있다. 본 연구에서는 수단분담 모형을 통해 수단 간 전환효과를 일부 반영하였으나, 이러한 버스노선의 신설 및 배차간격 조정 등의 세밀한 변화는 고려하지 못했다는 한계를 가지고 있다. 향후에는 간선축인 도시철도가 제외될 경우, 이를 대체할 수 있는 간선버스 및 순환형 버스의 도입을 고려한 시나리오 분석 등 보완적 연구 및 분석이 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 논문은 주저자의 석사학위논문을 수정·보완하여 작성하였습니다.

References

- [1] Baek, B.R. (2013). A Methodology to Estimate Vehicle CO₂ Pure Emission by Regional Groups. Master's Thesis, Myongji University.
- [2] Choi, K.C., Lee, K.J., Ahn S.C. (2009). "An improvement of bottom up approach for estimating the mobile emission level." *Journal of Korea Society of Transportation*, Vol. 27, No. 4, pp. 183-193.
- [3] Han, S.W. (2013). A Methodology to estimate vehicle CO₂ emissions using traffic assignment technique. Master's Thesis, Myongji University.
- [4] Kang, H.J. (2011). Transportation Sector Greenhouse Gas Reduction Plan for the Development of Eco-friendly Rail Way Study. Master's Thesis, Busan National University.
- [5] Kim, T.G., Hong, K.M., Hong, Y.S., Cho, J.R. (2016). "A study on improvement reliability through review of inter-regional transit analysis methodology." *Conference for Improvement of Method and System for Feasibility Evaluation of Public Investment Project*, Seoul, pp. 39-53.
- [6] Kim, Y.K., Wu, S.K. (2014). "Building emission map of inter-regional roads using transportation planning model and GIS." *Journal of Transport Research*, Vol. 21, No. 1, pp. 1-15.
- [7] Korea Development Institute (2004). A Study on General Guidelines for Pre-feasibility Study on Road and Railway Projects(4th Edition)(in Korean).
- [8] Korea Development Institute (2008). A Study on General Guidelines for Pre-feasibility Study on Road and Railway Projects(5th Edition)(in Korean).
- [9] Korea Transport Institute (2015). Explanatory Data of Basic Data for Traffic Demand Analysis(in Korean)
- [10] Lee, H.J., Park, J.H., Ko, J.H. (2021). "Estimation of carbon emissions reductions by the penetration rates of autonomous vehicles for urban road network." *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, Vol. 20, No. 6, pp. 162-176.
- [11] Lee, J.J. (2015). A Study of the Subway Utilization Awareness for Greenhouse gas Reduction in Road Traffic Sector. Master's Thesis, Chung-Ang University.
- [12] Lee, K.J., Yi, Y.J., Choi, K.C. (2018). "A methodology for evaluation the effects of transportation policies related to greenhouse gas reduction." *Journal of Korea Society of Transportation*, Vol. 36, No. 1, pp. 1-12.
- [13] Lee, N.H. (2010). A Study on Increase of Bicycle Use for Decrease Green House Gas with Transition of Other Transportation. Master's Thesis, Kwangwoon University.
- [14] Ministry of Economy and Finance (2020). Press release(URL: https://www.moef.go.kr/nw/nes/detailNesDtaView.do?menuNo=4010100&searchNttId1=MOSF_00000000052647&searchBbsId1=MOSFBBS_00000000028)
- [15] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Railroad, Korea National Railway (2017). 2016 Statistical Yearbook RailRoad(54th Edition)(in Korean).
- [16] Oh, S.Y., Lee, H.S. (2021). "An analysis of carbon dioxide emissions and environmental cost benefits in road transportation due to application of electric trucks." *Journal of Korea Society of Transportation*, Vol. 39, No. 4, pp. 474-492.
- [17] Yoo, H.S., Kim, I.K., Lee, T.H., Kim, J.H. (2020). "Estimating vehicle emissions based on traffic assignment analysis combined with vehicle inspection data on vehicle kilometers traveled." *Journal of Transport Research*, Vol. 27, No. 3, pp. 95-113.