

도시철도 투자타당성 평가를 위한 운영비용 추정모형 개발

김동규^{1,2} · 박신형^{2*} · 김기혁²

¹대구도시철도공사 3호선 통합관제부, ²계명대학교 도시학부 교통공학전공

Development of the Operating Cost Estimation Models to Evaluate the Validity of Urban Railway Investment

KIM, Dong Kyu^{1,2} · PARK, Shin Hyoung^{2*} · KIM, Ki Hyuk²

¹Line 3 Integrated Control Division, Daegu Metropolitan Transit Corporation, Daegu 41407, Korea

²Department of Transportation Engineering, Keimyung University, Daegu 42601, Korea

*Corresponding author: shpark@kmu.ac.kr

Abstract

Since inaccurate demand estimation for recent urban rail construction may result in financial burden to cities, precise prediction for operating cost as well as construction costs is necessary to avoid or reduce budget loss of the local or central government. The operating cost is directly related to the public fare and affect a policy to determine the rate system. Therefore, there is a pressing need to develop an estimating model for reliable operating cost of urban railway. This study introduces a new model to estimate the operating cost with new variables. It provides a better prediction in accuracy and reliability compared to the existing model, considering the feature of urban railway. For verification of our model, railway operation data from a few cities for the last five years were comprehensively examined to determine variables that affect the operating cost. The operating cost was estimated in a dummy regression model using five independent variables, which were average distance between stations, daily trains distance, total passenger capacity of a train in a train, driving mode(manned/unmanned), and investment type(financial/private).

Keywords: correlation analysis, heavy rail transit, light rail transit, operating cost, regression model, urban railways

초록

최근 일부 도시에서는 도시철도 건설 시 부정확한 수요예측에 따른 재정적 부담으로 많은 갈등을 겪은 바 있는데, 건설비용뿐만 아니라 운영비용을 잘못 예측할 경우에도 지자체 또는 정부에 막대한 예산 낭비를 초래할 우려가 있다. 특히 운영비용은 공공재인 도시철도의 요금정책에도 직접적인 영향을 줄 수 있으므로 도시철도의 현실적인 운영비용을 추정하는 모형 개발이 시급하다. 이에 본 연구에서는 도시철도의 특성을 가장 잘 설명하는 변수와 기존 연구에서 사용된 변수들보다 정확성과 신뢰성을 높일 수 있는 변수를 투입하여 운영비용의 추정모형을 개발하는 것을 목적으로 한다. 먼저 국내 도시철도를 대상으로 최근 5년의 도시철도 운영데이터를 수집하여 운영비용에 영향을 미치는 변수들을 종합적으로 검토하였고 평균 역간거리, 열차 운행거리, 열차정원, 운전유형(유·무인), 사업유형(재정·민자)을 독립변수로 선정, 더미회귀모형을 구축하여 실질적인 운영비용을 추정하였다.

주요어: 상관분석, 중량전철, 경량전철, 운영비용, 회귀분석, 도시철도

J. Korean Soc. Transp.
Vol.34, No.5, pp.465-475, October 2016
<http://dx.doi.org/10.7470/jkst.2016.34.5.465>

pISSN : 1229-1366
eISSN : 2234-4217

Received: 15 June 2016

Revised: 11 August 2016

Accepted: 5 October 2016

Copyright ©
Korean Society of Transportation

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

1. 연구배경 및 목적

최근 기후변화와 관련하여 교통 부문에서도 탄소저감을 위한 교통 혼잡의 해결방안으로 대도시의 경우 도시철도의 필요성이 증대되고 있는 실정이다. 효율적인 대중교통체계를 지향하는 정부에서는 도시철도 사업을 추진하고 있으며, 현재 대도시 및 기초 지자체에서도 비용의 효율성을 추구하고 다양한 형태의 도시철도 시스템을 계획·추진·운영하고 있다.

그러나 여러 형태의 도시철도 시스템을 계획하고 추진하려면 계획타당성을 거쳐 선정된 노선에 대하여 한국개발연구원(KDI)에서 진행하는 예비타당성 조사와 사업시행자가 진행하는 본 타당성조사 등의 투자평가 제도를 통과해야 사업을 시행할 수 있기 때문에 경제적 타당성이 면밀히 검토되어야 한다. 도시철도 건설에 투입되는 비용은 크게 건설비, 용지보상비, 차량구입비, 운영비 등으로 구성되어 있다. 운영비를 제외한 비용들은 단기적으로 투입되는 비용이지만, 운영비는 매년 지속적으로 발생하는 장기적인 비용이므로 경제성 분석 시 이를 정확히 추정하는 것이 매우 중요하다 할 수 있다. 그럼에도 불구하고, 현재 도시철도와 관련된 지침연구들이 과학적이고 체계적이지 못해 실질적인 운영비용을 추정하는데 한계를 드러내고 있다. 특히 도시철도 시스템의 특성에 따라 중량전철(대형전동차, 중형전동차), 경량전철로 구분할 수 있고 규모별 운영비용의 차이가 존재함에도 불구하고 규모를 반영한 연구가 전무한 실정이다.

최근 일부 도시에서 도시철도 건설 시 부정확한 수요예측으로 재정적 부담이 발생하였듯, 운영비용의 잘못된 예측도 지자체 또는 정부에 막대한 예산 낭비를 초래할 우려가 있다. 특히 운영비용은 공공재인 도시철도의 요금정책에도 직접적인 영향을 줄 수 있으므로 도시철도 특성을 반영할 수 있는 실질적인 운영비용을 추정하는 모형 개발이 시급하다.

개발된 모형은 향후 신규 건설될 도시철도 사업의 투자평가 제도에 적용한다면 평가의 정확성을 높여 한정된 재원을 효율적으로 투입하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 연구의 내용 및 방법

도시철도 운영비용이란 도시철도를 구성하고 있는 모든 구성요소 전반에 소요되는 비용의 합으로 각 기관별 손익 계산서를 활용하여 운영비용을 산출하였다.

공간적 범위는 현재 전국에 운영 중인 도시철도 노선부산(1-4호선), 대구(1-2호선), 인천(1호선), 대전 (1호선), 광주(1호선), 신분당선, 의정부 경전철을 대상으로 하였다. 추정모형의 검증을 위한 노선으로는 서울도시철도(5-8호선)와 서울9호선 및 부산-김해경전철과 용인경전철을 선정하였다. 시간적 범위는 2010년부터 2014년까지 5년간의 자료를 사용하였고, 2015년의 자료를 검증자료로 활용하였다. 인천도시철도는 2012년에 인천메트로와 인천교통공사가 합병되어 인천지하철 1호선만의 자료 수집이 어려워 2011년까지의 자료를 사용하였다.

모형의 개발을 위하여 운영비용을 운행비용과 유지보수비용으로 나눈 후, 운행비용을 시설특성과 운행특성, 유지보수비용을 차량특성과 수요특성으로 세분화하였다. 그리고 각 특성을 대표하는 변수를 선정하여 운영비용을 추정하는 모형을 구축하였다. KDI에서 제시하는 지침인 ‘철도부문 사업의 예비타당성조사 운영비 추정 개정[PIMAC 업무 GUIDELINE](2015)’은 원단위법을 사용하여 운영비용을 추정하고 있지만, 본 연구에서는 운영비용 추정방법 중 통계적 방법을 사용하여 회귀모형을 개발하였다. 모형 검증은 본 연구의 추정값과 실제 운영비용 및 ‘PIMAC 업무 GUIDELINE’에 의한 비용을 비율로 환산하여 비교하였다. 본 고의 마지막 부분에는 연구의 결론과 향후 연구 과제를 제시하였다.

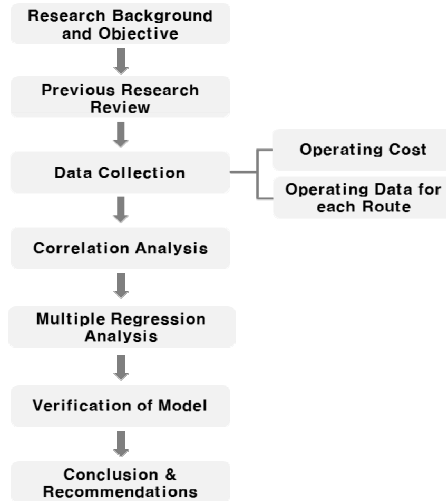


Figure 1. Study process

기존 문헌 고찰

1. 운영비용의 국내·외 선행 연구

1) 국내 연구

Park(2007)의 연구에서는 서울메트로 및 서울도시철도공사 운행실적자료(2001-2005년)를 바탕으로 선형(전체 회귀, 더미회귀), 비선형(전체회귀, 더미회귀)회귀분석을 수행하여 모형을 구축하였고, 모형의 적용성 검증 결과, 최적모형으로는 더미 비선형회귀모형이 선택되었다. 설명변수는 역수, 운행횟수_평일, 차량소요_침두, 전동차 보유량이며 평일과 휴일의 구분, 침두와 비침두의 구분 등 다양한 도시철도 운행여건을 반영한 모형을 도출하였다.

Suh et al.(2010)의 연구에서는 국내 고속철도를 대상으로 철도 운영 및 유지보수 비용의 합리적 산정을 위한 함수식을 부분배정방법을 통해 개발하였는데 유지보수비용에는 궤도연장, 운영비용에는 여객 운송수입, 차량키로, 역수가 사용되었다. 운영비용과 유지보수비용을 분리함으로써 '예비타당성조사 표준지침(5판)'의 모형식보다 실제비용을 합리적으로 산정할 수 있었다. 또한 일반철도 및 광역(도시)철도에 대한 철도 운영 및 유지보수 비용 산정과 선로 유지보수비용 산정을 위한 데이터베이스 구축의 필요성을 제시하였다.

Lee(2011)의 연구에서는 일본의 경전철 A.G.T 및 모노레일을 대상으로 더미 변수가 추가된 회귀 분석을 통해 운영비용모형을 개발하였다. 운행실적 자료로는 A.G.T 3개 노선, 모노레일 6개 노선에 대한 운영현황 분석을 통해 영향을 줄 수 있는 변수들을 조사하였다. 최종적으로 선정된 설명변수들은 1일 평균승차인원, 전동차 보유량과 표정속도이며 1일 평균승차인원이 모형에서 가장 높은 설명력을 보이고 전동차 보유량, 표정속도 순으로 나타났다. 모형의 적용성 평가를 위하여 검증을 실시한 결과, 오차가 비교적 작고 기존 모형들보다 높은 정확도를 보이는 것으로 나타났다.

설명변수는 연구에서는 국내 대도시에서 운영 중인 부산, 대구, 인천, 광주, 대전 도시철도의 최근 5년간(2008-2012년) 운영비용 자료를 활용하여 회귀분석을 통한 중간규모의 도시철도(Medium-sized Urban Railway) 운영비용 추정모형을 개발하였다. 3가지 방법(독립변수 8개 모두 사용, 5개 변수 사용, 단계적 회귀분석)으로 회귀분석을 실시한 결과, 단계적 회귀분석(Stepwise Regression)방법이 통계적으로 가장 유의한 모형으로 제시되었고 설명변수로는 전동차량수, 종업원수, 열차운행 km/년을 선정하였다. 하지만 시간적인 유지관리비용의 변화를 반영할 수 있는 변수를 반영하지 못하였다는 한계가 있다.

2) 국외 연구

Savage(1997)는 미국의 경전철(LRT)을 운행하는 9개 도시와 중전철(HRT)을 운행하는 13개 도시의 7년(1985-1991)간의 통합자료를 바탕으로 장·단기적 관점에서 초월대수비용 함수를 추정하였다. 연구 결과 도시철도를 운행하는 모든 도시에서 규모에 상관없이 밀도의 경제가 나타난 반면, 규모의 경제 및 불경제는 나타나지 않았다. 자동화 시스템이 잘 갖춰진 회사는 그러지 못한 회사보다 단기적으로 약 27%정도의 비용감소 효과가 있는 것으로 나타났다. 그리고 평균이동거리의 증가는 비용 감소에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 반면에 침투시간 및 노선의 터널비율이 높을수록 비용이 증가하는 것으로 나타났다.

Andrikopoulos and Loisides(1998)는 EU의 10개국을 대상으로 1969-1993년에 해당하는 철도산업에 대해 초월대수비용 함수로 승객-마일, 노동, 동력, 자본, 시간추세를 이용하여 총비용함수모형을 구축하고, 규모의 경제성과 생산성을 분석하였다. 그 결과, 모든 국가에서 규모의 경제가 존재하는 것으로 나타났다. 규모의 경제성을 산출물 효과, 기술변화, 투입요소 가격효과로 분리한 결과 시간효과는 음의 효과를 가지는 것으로 도출되었다. 모든 국가에서 총요소생산성 증가율은 음의 값을 갖는 것으로 나타났는데 -0.06%에서 -2.67%까지 분포하였다.

Cantos와 Maudos(2000)는 유럽 OECD 철도회사를 대상으로 1970-1990년 자료를 확률적 변경 접근법으로 생산성, 효율성, 기술 변화 수준을 추정하였다. 생산 함수에 따라 대부분의 연구와는 달리, 확률 변경비용 함수를 추정하였고, 연구에 사용된 변수로는 인건비, 동력비, 재료비 등이 사용되었다. 그 결과 생산성 향상의 주요 공급원은 효율성에 이득이 뒤따르는 것으로 나타났다. 또한, 기업의 효율성 결정에 관해서는 다른 연구 결과와 일치하고, 의사결정의 기업경영자의 관리와 자율도가 가장 높은 기업이 가장 효율적이라고 하였다.

Mizutani(2004)는 일본의 소유권을 민영(Private)철도와 공영(Public)철도의 운영비용을 비교하였으며, Translog 함수를 이용하여 분석하였다. 인건비, 동력비, 역수, 재료비 등을 변수로 사용하여 분석한 결과, 공영철도의 운영비가 민영철도의 운영비보다 약 10-20% 더 많이 필요한 것으로 나타났다.

Farsi(2005)는 1985-1997년의 스위스 철도를 대상으로 5가지 모형을 적용하여 콥 더글라스 함수형태로 승객-km, 화물-km, 노선길이, 자본, 노동, 동력, 시간더미를 이용해서 총비용함수를 추정하였다. 5가지 모형은 기업의 이질성과 비효율성을 고려하였는데, 5가지 모형에서 모두 밀도와 규모의 경제가 존재하는 것으로 나타났다.

Wang and Liao(2006)는 1991년 1월-2000년 12월까지 대만 철도의 비용 구조 및 생산성의 성장을 연구했다. 단기 Translog 비용 함수를 사용했는데 연금/보수 비용은 고정 계수로 간주하였고, 화물 및 승객 서비스의 동작 특성 변수를 포함하였으며, 월간 시계열 데이터를 이용하여 추정하였다. 연구 결과 대만 철도의 기술변화는 중립적이고, 규모와 범위의 경제성이 존재했다. 또한, 총요소생산성 증가율은 최근 몇 년간 개선되었고 주로 기술 진보와 규모의 경제에 의해 구동되었다.

2. 연구의 차별성

운영비용 추정 모형에 대한 기존 문헌을 고찰한 결과, 도시철도 특성을 반영한 변수가 선정되지 않았고 운영비용 추정을 위해 투입된 변수의 신뢰성 확보가 어렵다고 판단되었다. 이런 측면에서 본 연구의 차별성은 다음과 같다.

첫째, 기존 연구는 중량전철과 경량전철 각각의 추정모형을 구축하였으나, 본 연구는 중량전철과 경량전철을 동시에 고려한 운영비용 추정모형을 구축하였다.

둘째, 모형에 투입된 변수선정을 위하여 운영비용을 운행비용과 유지보수비용으로 구분하였다. 그리고 운행비용을 시설특성과 운행특성, 유지보수비용을 차량특성과 수요특성으로 세분화 후 각 특성을 가장 잘 설명하는 변수를 선정하여 분석하였다.

셋째, 기존 연구에 투입된 일부 변수는 정확성과 변동성 문제로 추정 결과의 신뢰성을 떨어뜨릴 수 있다. 따라서 본 연구에서는 새로운 변수를 발굴하고, 신뢰할 수 있는 객관화된 변수를 선정하여 모형을 구축하였다.

운영비용 추정모형 자료 및 변수 선정

1. 모형 개발을 위한 자료 수집

기존 연구 및 문헌을 토대로 변수를 도출하였으며, 수요특성과 관련이 있는 열차정원, 보유전동차 정원 및 운전유형(유인운전, 무인운전), 사업유형(재정사업, 민자사업)을 새로운 변수로 추가하였다. 검토한 변수 항목들은 Table 1과 같다.

Table 1. Selection variable

Category	Variable name
Dependent variable	Operating cost(million)
Independent variable	Route length(km)
	Total number of stations
	Average distance between stations(meter)
	One-way travel time(minute)
	Daily trains distance(km/day)
	Number of trains during peak time
	Number of trains during non-peak time
	Scheduled speed(km/h)
	Number of owned cars
	Peak time headway(minute)
	Non-peak time headway(minute)
	Service frequency_weekday
	Total passenger capacity of the owned cars
	Total passenger capacity of a train
	Investment type(finance/private)
Driving mode(manned/unmanned)	

2. 운영비용과 변수간의 상관 분석

본 연구에서는 운영비용에 영향을 미치는 변수를 선정하기 위하여 상관분석을 실시하였으며, 그 결과 운영비용에 전반적으로 높은 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 운영비용에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 노선길이(0.955), 보유전동차 총정원(0.954), 역수(0.945), 편도 소요시간(0.938) 순으로 나타났으며, 가장 낮은 영향을 미치는 변수는 운행횟수_평일(0.086), 표정속도(-0.133), 침두 배차간격(-0.201) 순으로 나타났다. 상관분석을 통해 16개 변수가 운영비용에 미치는 영향을 살펴보고, 그 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. The results of correlation analysis

Independent Variable	Dependent Variable	Operating Cost(million)
Route length(km)		0.955
Total number of stations		0.945
Average distance between stations(meter)		0.466
One-way travel time(minute)		0.938
Daily trains distance(km/day)		0.928
Number of trains during peak time		0.923
Number of trains during non-peak time		0.908
Scheduled speed(km/h)		-0.133
Number of owned cars		0.925
Peak time headway(minute)		-0.201
Non-peak time headway(minute)		-0.345
Service frequency_weekday		0.086
Total passenger capacity of the owned cars		0.954
Total passenger capacity of a train		0.767

3. 최종변수 선정

최종변수 선정 기준을 다음과 같이 설정하였다.

Step 1. 운영비용을 운행비용과 유지보수비용으로 구분하여야 한다.

Step 2. 운행비용에는 시설특성과 운행특성을, 유지보수비용은 수요특성과 차량특성을 고려해야 한다.

Step 3. 각 특성을 대표하는 변수이면서, 도시철도 규모를 잘 반영한 변수이어야 한다.

Step 4. 기존연구에서 투입된 변수들과 차별성이 있어야 하며 선정된 변수의 정확성, 신뢰성 및 자료 수집의 용이성이 확보되어야 한다.

먼저, 운행비용과 관련된 특성으로 시설특성과 운행특성으로 구분하였고, 유지보수비용과 관련된 특성으로 수요특성과 차량특성으로 구분하였다. 각 특성별 관련된 변수로 시설특성은 노선길이, 역수, 평균 역간거리로 구성하였다. 평균 역간거리는 운영비용과의 상관관계가 노선길이와 역수보다는 낮지만, 노선길이와 역수의 변수 설명이 가능하기 때문에 시설특성으로 선정하였다.

운행특성은 편도 소요시간, 표정속도, 배차간격, 운행횟수, 열차 운행거리로 설명되지만, 편도 소요시간은 표정속도와 노선길이의 설명이 가능하고 열차 운행거리는 배차간격과 운행횟수의 설명이 가능하다. 따라서 편도 소요시간과 열차 운행거리를 운행특성으로 선정하였다.

유지보수비용과 관련된 수요특성은 운송수입, 열차정원을 고려하였지만, 운송수입은 자료 수집 및 신뢰성 확보의 문제로 제외시켰다. 반면에 열차정원은 자료의 신뢰성 확보 및 자료수집이 용이하고 배차간격(침두/비침두), 차량대수(침두/비침두)의 설명이 가능하기 때문에 열차정원을 수요특성의 변수로 선정하였다.

차량 특성의 경우, 전동차 보유량은 배차간격(침두/비침두), 차량대수(침두/비침두)의 설명이 가능하다. 그리고 한 개의 편성에 연결된 차량수가 운영기관별로 상이하기 때문에 유지보수비용 측면에서 설명이 유리하여 최종변수로 선정하였다. 보유전동차 정원은 유지보수비용의 수요특성과 차량특성을 모두 대신할 수 있는 변수이기 때문에 최종변수로 선정하였다.

최근 도입되는 대부분의 경전철은 무인자동운전시스템을 갖추고 있어 기존 시스템과의 비교를 위해 유·무인 운전유형을 고려하였다. 그리고 도시철도는 많은 건설비용이 소요되어 정부 및 지방자치단체의 재정적 부담을 초래하고, 운영기관의 비효율적 경영 등의 문제로 민자 유치로 추진되고 있어 재정사업과 구분하였다.

마지막으로 기존 연구에서 투입된 변수 중 일부는 아래와 같은 한계점이 있어 제외하였다.

- 여객운송수입 및 승차인원 : 두 변수의 실적자료를 활용하여 모형을 구축할 경우 사례를 통한 검증 시에는 높은 추정력을 보여주나, 신규 노선의 예비타당성 조사 시에는 건설 전 단계이기 때문에 실적자료가 아닌 예측값을 사용하여 추정하여야 한다. 최근 일부 도시철도 건설 시 부정확한 수요 예측으로 재정적 부담이 발생한 사례가 있듯이 잘못된 수요 추정이 운송수입 및 승차인원의 변수에 대한 정확성 및 신뢰성을 떨어뜨린다. 또한, 운송수입은 승차인원을 기반으로 추정이 가능한데, 정확한 승차인원이 추정되었더라도 도시철도는 무임승차 비율이 상당히 높고 그것에 대한 정확한 예측이 어렵다. 따라서 두 변수를 모형의 변수로 활용하는 것은 오류를 범할 가능성이 크다고 판단하여 제외하였다.
- 종업원수 : 'PIMAC 업무 GUIDELINE'에서 산출된 소요인원과 운영 시 투입되는 인원은 차이가 존재한다. 운영상 안전문제, 사회 여건 및 노·사의 관계 등에서 인원은 변동될 소지가 크기 때문에 종업원 수도 제외시켰다.

최종 선정된 변수는 Table 3과 같으며 선정된 변수와 운영비용과의 산점도 분석 결과는 Figure 2와 같다.

Table 3. The final selection variables

Division		The final selection variables	Description Possible variables
Train service cost	Facility characteristics	Average distance between stations	Route length, Total number of stations
	Train service characteristics	One-way travel time, Daily trains distance	Scheduled speed, Route length, Peak(non-peak) time headway, Service frequency_weekday
Maintenance cost	Demand characteristics	Total passenger capacity of a train	Number of trains during peak(non-peak) time, peak(non-peak) headway.
	Train characteristics	Number of owned cars	
Type	Driving mode	Manned/unmanned	
	Investment type	Finance/private	

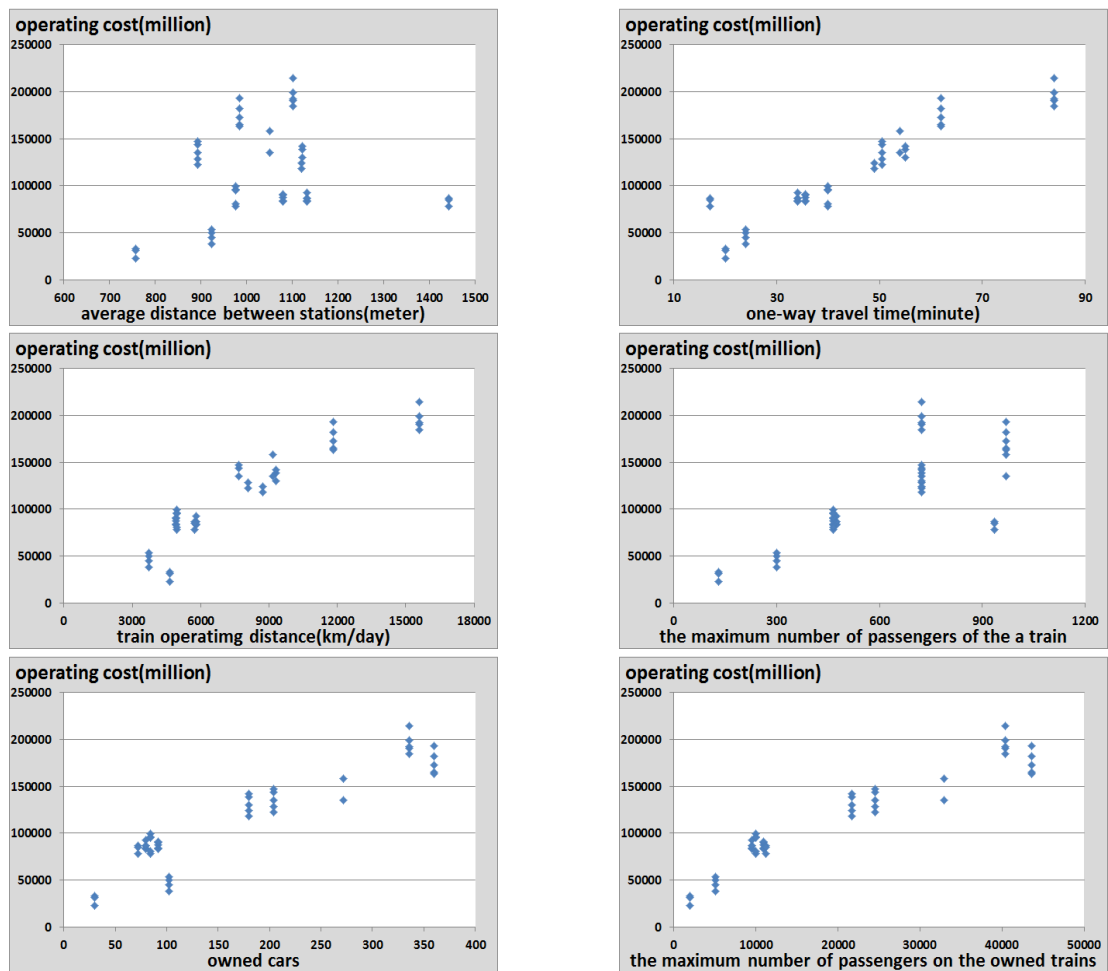


Figure 2. Scatter plot analysis of operating costs and selected variables

운영비용 추정모형 개발 및 검증

1. 모형 개발

장래 건설될 신규노선 및 도시철도 운영기관의 규모를 고려한 운영비용을 산출하기 위한 실질적인 모형을 구축하는 것이 본 연구의 주요 목적이다. 따라서 본 연구에서는 도시철도 규모별 운영비용에 밀접한 관계를 가지고 설명력이 있는 독립변수를 투입하였다.

추정모형에 투입된 독립변수의 경우 종속변수와 높은 상관성을 가지고 있는 변수이며, 더미변수는 운전유형(유·무인), 사업유형(재정·민자)을 설정하여 분석하였다. 이러한 내용을 기본으로 도시철도의 실질적인 운영비용 추정을 위하여 더미변수를 활용한 다중회귀모형을 도출하였다. 회귀분석 방법은 독립변수들의 진입과 진출을 반복하여 도시철도 특성을 가장 잘 반영한 변수를 선정하였으며, 최종 도출된 모형의 설명력과 독립변수의 계수 및 부호를 통해 모형을 살펴보았다.

2. 운영비용 추정모형 결과

국내 운영되는 도시철도를 대상으로 운영비용에 영향을 미치는 변수들 중에 도시철도 특성들을 대표하는 변수들을 선정하여 모형을 구축한 결과 더미회귀모형이 도출되었다. 투입된 변수로는 평균 역간거리, 열차 운행거리, 열차 정원, 운전 유형(유·무인) 및 사업유형(재정·민자)이 사용되었다.

Table 4. Model summary

R	R^2	Adjusted R^2	Std. Error of the Estimate
0.985	0.971	0.968	8,964.1170

Table 5. Anova

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	110,820,410,622.551	5	22,164,082,125	275.826	.000
Residual	3,294,571,124	41	80,355,393.28		
Total	114,114,981,746.979	46			

분석 결과 $R^2=0.971$ 로 나타나 모형의 설명력이 상당히 높은 것으로 분석되었다. 전체 모형의 적합도를 검정할 수 있는 분산분석 결과는 0.000으로 유의수준 5%내에서 유의한 것으로 나타났다.

모형에서 상수항이 0.253으로 나타나 유의수준 5%내에서 유의하지 않은 것으로 나타났으나, 전체 모형의 적합도가 유의한 것으로 나타나 설명력이 있는 것으로 볼 수 있다. 열차 운행거리, 열차 정원, 운전유형 및 사업유형은 양의 계수로 나타났으며, 평균 역간거리는 음의 계수로 나타났다. 운영비용에 영향도가 가장 큰 변수는 열차 운행거리, 열차정원, 유·무인 운전유형 순으로 나타났고, 영향도가 가장 작은 변수로는 평균 역간거리로 나타났다. 열차 운행거리와 열차 정원은 운영비용과 비례관계인 반면, 평균 역간거리는 운영비용과 반비례 관계임을 알 수 있다.

$$Y = 14,088.66 - 41.7X_1 + 9.097X_2 + 50.766X_3 + 26,952.148X_4 + 20,184.387X_5 \quad (1)$$

여기서 Y : Operating cost(million won)

X_1 : Average distance between stations(meter)

X_2 : Daily trains distance(km/weekday)

X_3 : Total passenger capacity of a train(persons)

X_4 : Driving mode(0:unmanned,1:manned)

X_5 : Investment type(0:private,1:finance)

Table 6. Coefficients

Model	Unstandardized Coefficients B	Std. Error	Standardized Coefficients Beta	t	Sig.	Collinearity Statistics Tolerance	VIF
(constant)	14,088.66	12,164.198		1.158	.253		
X_1	-41.7	12.003	-.125	-3.474	.001	.545	1.836
X_2	9.097	.500	.664	18.187	.000	.528	1.894
X_3	50.766	9.135	.251	5.558	.000	.345	2.900
X_4	26,952.148	6,104.652	.195	4.415	.000	.362	2.763
X_5	20,184.387	4,852.808	.137	4.159	.000	.652	1.534

즉 단위 길이당 역 수가 적으면 운영비용이 적게 추정이 되고, 단위 길이당 역 수가 많으면 운영비용이 많게 추정 되는 것을 알 수 있다.

더미변수로 사용한 유·무인 운전유형의 경우 무인운전은 유인운전에 비해 인력 감소에 의한 인건비 절감으로 운영비용에 영향을 미치는 것으로 판단되었고, 사업유형은 표준화 계수가 0.137로 나타나 운영비용에 미치는 영향도가 다른 변수에 비해 적은 것으로 나타났다.

독립변수는 VIF값이 10이하로 변수들 간의 다중공선성 문제는 없는 것으로 나타났다.

3. 'PIMAC 업무 GUIDELINE'에 의한 운영비용 산출

'PIMAC 업무 GUIDELINE'에서는 운영비 추정을 인건비, 동력비 및 전력비, 유지관리비, 일반관리비로 구분하여 산정하였다. 인건비는 2015년의 소요인원에 각 기관별 1인당 연간 평균임금을 적용하여 산정하였다.

동력비 및 전력비는 전동차 운행에 필요한 동력비와 역사 및 차량기지에 필요한 동력비로 구분하여 산출하되 본 선, 역사 및 차량기지의 전력 소모량에 시간당 단위전력비를 곱해서 산출하였다. 각 기관의 단위전력비 자료수집의 한계로, 2015년 대구도시철도의 단위전력비 129원을 적용하였다.

유지관리비는 광역 및 도시철도 유지관리비의 구간별 특성을 고려하여 고가 및 터널 구간은 499,100천원/년·km(복선), 지상구간은 249,550천원/년·km(복선)을 적용하여 계산하였다. 그리고 경량전철은 445,552천원/년·km(복선)을 적용하였다.

일반관리비는 인건비, 동력비 및 전력비, 유지관리비 합계의 13%로 산정하였다.

'PIMAC 업무 GUIDELINE'의 기준과 절차에 운영비용을 산출하였고, 그 결과는 Table 7과 같다.

Table 7. Estimation of institutional operating costs

(unit: one million won)

Cost	Busan	Daegu	Daejeon	Gwangju	Uijeongbu	Shinbun dang	Seoul (5-8)	Seoul 9	Busan-Gimhae	Yongin
labor cost	268,888.74	129,569.58	33,773.95	30,054.71	4,195.78	17,400.57	394,909.56	41,058.20	5,579.50	8,123.75
power cost	54,800.93	34,436.60	9,445.77	8,704.71	1,671.31	7,873.67	104,065.56	13,582.73	2,875.46	1,629.59
maintenance expenses	54,420.22	38,166.99	10,231.55	10,231.55	4,722.85	8,634.43	80,954.02	13,475.70	10,069.48	8,082.31
general administrative cost	49,154.29	26,282.51	6,948.67	6,368.83	1,376.69	3,991.58	75,390.79	8,260.80	2,408.18	2,318.63
sum	427,264.18	228,455.68	60,399.94	55,359.80	11,966.63	37,900.25	655,319.92	76,377.43	20,932.61	20,154.28

4. 사례를 통한 모형 검증

도시철도 규모를 고려하여 구축한 실질적인 운영비용 추정모형을 검증하기 위해 모형의 도출 시 사용한 자료에 서울도시철도(5-8호선), 서울 9호선 및 부산-김해경전철과 용인경전철의 자료를 추가하여 비교·검증하였다.

모형 검증을 위해 실제비용을 본 연구의 추정비용 및 'PIMAC 업무 GUIDELINE'에 의해 산출된 비용과 비교하여 그 결과를 Table 8에 제시하였다.

Table 8. Estimates of urban railways operating costs

(unit : one million won)

Urban railways	Operating costs			Ratio	
	Actual(A)	Guideline(B)	Estimation(C)	B/A	C/A
Busan	578,444.0	427,264.18	533,611.9	0.74	0.92
Daegu	332,516.90	228,455.68	373,203.2	0.69	1.12
Daejeon	98,743.80	60,399.94	89,242.4	0.61	0.90
Gwangju	92,257.30	55,359.80	84,574.2	0.60	0.92
Uijeongbu	30,308.30	11,966.63	31,561.7	0.39	1.04
Shinbundang	79,790.7	37,900.25	80,725.1	0.47	1.01
Seoul(5-8)	941,410.40	655,319.92	873,331.3	0.70	0.93
Seoul 9	126,631	76,377.43	143,832	0.60	1.14
Busan-Gimhae	57,731.40	20,932.61	56,986.3	0.36	0.99
Yongin	42,002.80	20,154.28	27,879.3	0.48	0.66

분석 자료를 대상으로 모형의 결과를 실제비용과 비율로 비교한 결과, 본 연구의 모형이 'PIMAC 업무 GUIDELINE'의 방법보다 더욱 정확한 도시철도 운영비용을 추정하는 것으로 나타났으며, 실제 운영비용을 합리적으로 추정할 수 있는 것으로 분석되었다. 그리고 분석대상에서 제외된 기관의 운영비용을 추정한 결과, 서울도시철도(5-8호선), 서울 9호선 및 부산-김해경전철의 비율은 0.93-1.14로 높은 추정력을 나타냈다. 그러나 용인경전철의 경우 비율이 0.66으로 타 기관보다 다소 낮은 추정력을 나타냈지만, 'PIMAC 업무 GUIDELINE'의 방법보다는 우수한 추정력을 보이는 것으로 나타났다.

용인경전철의 운영비용 추정값과 실제값이 차이를 보이는 이유는 다음과 같이 판단된다. 첫째, 용인경전철이 타 동종기관(민자 경전철)보다 종업원 수가 많은 것으로 나타났다. 부산-김해경전철은 125명, 의정부경전철은 94명인데 반해 용인경전철은 182명으로 부산-김해경전철의 약 1.5배, 의정부경전철의 약 2배에 이르고 있다. 둘째, 평균 역간거리도 1,296m로 756m인 의정부경전철보다 상당히 길어 인건비 및 유지관리비 면에서 유리하다. 마지막으로 열차운행거리(평일)와 전동차 보유량도 타 동종기관과 비슷하거나 작은 것으로 나타났다.

따라서 시설특성 및 운행특성 등을 종합적으로 고려해 볼 때 운영비용이 많이 투입되는 이유는 종업원 수가 많아 인건비가 많이 투입된 결과로 판단된다.

본 연구에서 제시한 도시철도 운영비용 추정모형은 전반적으로 'PIMAC 업무 GUIDELINE'의 방법보다는 높은 추정력을 얻었으므로 모형 적용에 충분한 가능성을 확인하였다.

결론 및 향후 연구과제

1. 연구의 결론

본 연구의 목적은 국내 도시철도를 대상으로 규모를 고려하여 운영비용에 영향을 미치는 요소들 간의 관계를 분석한 후, 실질적인 운영비용 추정모형을 개발하는 것이다. 도시철도 운영비용의 각 특성을 대표하는 변수를 선정하여 중량전철과 경량전철을 동시에 고려한 후, 실질적인 운영비용 추정을 위하여 신뢰성 있는 새로운 변수를 투입하였다는 점에서 기존 연구와의 차별성이 있으며, 분석결과 다음과 같은 시사점을 도출하였다.

첫째, 도시철도 특성을 대표하는 변수를 선정하여 모형을 구축하였으며, 특히 수요특성을 나타내는 변수로 기존의 연구에서 사용하지 않았던 열차정원, 보유전동차 정원을 활용하였는데, 운영비용 추정에 상당한 영향력이 있는 것으로 규명되었다.

둘째, KDI에서 제시하는 ‘철도부문 사업의 예비타당성조사 운영비 추정 개정(2015)’에서 제시하는 원단위법을 적용할 때보다 본 연구의 회귀분석으로 추정된 모형에서 실제 운영비용의 추정력이 높은 것으로 나타났다.

셋째, 앞으로 경량전철 건설이 활발할 것으로 예상되는 점에 비추어 볼 때, 본 연구는 국내에서 운영되고 있는 경량전철 운영데이터를 기반으로 최초로 모형을 구축하였다는 점에 충분히 의의가 있다고 볼 수 있다.

넷째, 본 연구에서 제시한 운영비용 추정모형을 구성하는 변수들이 도시철도 건설 시 용이하게 수집할 수 있는 변수들로 구성되어 있어 모형 활용이 쉬울 것으로 판단된다.

다섯째, 본 연구의 모형을 신규 사업에 적용한다면, 투자의 적절성 검증에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 향후 연구과제

본 연구는 자료 수집의 한계점을 가지고 있다. 첫째, 국내 수도권에 도시철도가 집중되어 있다는 것을 감안할 때 수도권 도시철도의 일부 자료만 반영되었기 때문에 수도권 도시철도의 특성을 반영하는데 한계가 있다. 수도권 도시철도 자료 수집의 신뢰성과 용이성이 확보된다면 보다 정확한 운영비용을 추정할 수 있는 모형에 대한 연구가 가능할 것으로 판단된다.

둘째, 본 연구의 모형은 전반적으로 높은 추정력을 보였으나, 용인경전철의 경우 정확도가 타 노선에 비해 낮게 나타났다. 향후 다양한 경량전철(노면전차, 모노레일, 자기부상열차, LIM, PRT 등)의 운영이 예상되는바, 경량전철 자료를 추가로 확보하고 후속 연구를 통해 다른 연구 방법을 고안한다면 보다 실질적인 운영비용 추정이 가능할 것으로 판단된다.

알림 : 본 논문은 대한교통학회 제74회 학술발표회(2016.02.19)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

REFERENCES

- Andrikopoulos A. A., Loizides J. (1998), Cost Structure and Productivity Growth in European Railway Systems, *Applied Economics*, 30, 1625-1639.
- Cantos P., Maudos J. (2000), Efficiency, Technical Change and Productivity in the European Rail Sector: A Stochastic Frontier Approach, *International Journal of Transport Economics*, 27(1), 55-76.
- Chung S. Y., Lee W. Y. (2013), A study on the Estimation Function of the Operating Cost for an Urban Railway (With a focus on Medium-sized Rapid Transit), *Railway Journal*, 16(4), The Society for Railway, 327.
- Farsi M., Filippini M., Greene W. (2005), Efficiency Measurement in Network Industries: Application to the Swiss Railway Companies, *Journal of Regulatory Economics*, 28(1), Springer Science + Business Media, 81-85.
- Financial Supervisory Service, <http://dart.fss.or.kr>, 2016.06.01.
- KDI (2015), Preliminary Feasibility Study Operating Costs Estimated Revision of the Railway Sector Business, 19-29.
- Lee Y. K. (2011), A Study on the Development of Operating Cost Model in Light Rail Transit, Ph.D. Dissertation.
- Mizutani F. (2004), Privately Owned Railways' Cost Function Organization Size and Ownership, *Journal of Regulatory Economics*, 25(3), 297-322.
- Park J. S. (2008), A Development of the Operating Cost Function for Urban Railways in Seoul Metropolitan, *Seoul City Research*, 9(2), The Seoul Institute, 87-92.
- Savage I. (1997), Scale Economics in United States Rail Transit Systems, *Transportation Research Part A*, 31(6), 459-473.
- Wang S. E. (2006), Cost Structure and Productivity Growth of the Taiwan Railway, *Transportation Research Part E*, 42(4), Elsevier Science B.V., Amsterdam, 332-334.