

■ 論 文 ■

대중교통 운영비용계수 추정 및 도시철도 도입 효율성 검토

Estimation of Operating Cost and Efficiency of the Introduction of Urban Subway

박 준 식

오 동 규

고 승 영

(한국교통연구원 광역도시교통연구실 (서울대학교 건설환경공학부 박사수료) (서울대학교 건설환경공학부 교수) 책임전문원)

목 차

- | | |
|---|---|
| <p>I. 서론</p> <p>1. 연구의 배경 및 목적</p> <p>2. 연구의 범위 및 내용</p> <p>II. 운영비용계수 추정</p> <p>1. 운영비용계수 추정모형</p> <p>2. 운영비용계수 추정모형의 계수값 산출</p> | <p>3. 운영비용계수 산출 결과</p> <p>III. 도시철도 도입 효율성 검토</p> <p>2. 모형 내부에서의 가변성</p> <p>3. 모형 외부에서의 가변성</p> <p>IV. 결론 및 향후 연구과제</p> <p>참고문헌</p> |
|---|---|

Key Words : 대중교통, 운영비용계수, 도시철도, 대중교통 통행수요, 투자평가
Transit, Operating Cost, Urban Subway, Transit Demand, Feasibility Study

요 약

본 연구에서는 위계구조 대중교통 노선망의 효율성을 이론적으로 해석한 박준식 외(2007c)의 연구를 연장하여 실제 자료를 적용한 결과를 도출하고 이의 실제 적용성을 검토하였다. 가상의 운영비용계수를 추정하는 모형을 구축하여 운영비용계수를 추정하였으며, 이를 활용하여 도시철도 도입을 위해 요구되는 최소 통행수요를 도출하였다. 본 연구에서 산출한 최소 통행수요는 하나의 계산 예에 불과하며 모형 내/외부의 여러 가지 요소에 따라 가변적이다. 모형 내부의 경우 운영비용계수와 도시철도의 통행속도가 주요 변화요소인데, 운영비용계수가 작고 통행속도가 빠른 경량전철의 경우 도시철도의 도입 가능성이 보다 높은 것으로 검토되었다. 모형 외부의 경우 노선망의 구조와 수요분포, 대중교통의 수단분담율에 대해서 검토한 바, 본 연구에서 산출한 최소 통행수요 값이 이들 변화요소들에 따른 예상치들 중 최대값이 될 것으로 판단된다. 투자평가의 경우 본 연구의 모형에서보다 편익을 과다추정하고 비용을 과소추정하는 것으로 검토되었는데, 본 연구의 결과 값이 현실적인 변화요소들에 따른 기대치들 중 최대값임을 감안하면 투자평가는 결국 현실적인 수준에서 적정하게 평가하고 있는 것으로 볼 수 있다. 본 연구는 해석적인 접근을 통해 도시철도 도입의 효율성을 분석하였기 때문에 많은 단점과 한계를 갖고 있다. 또한 투자평가와 같은 실용적인 분석에 있어서도 나름대로의 한계를 갖는 것을 확인하였다. 이론적인 해석과 실용적인 방법론을 비교 검토하여 보다 정확하고 합리적인 분석 틀을 마련하는데 본 연구가 바탕이 될 수 있을 것이다.

This study extended Park et al.(2007c), which analyzed the efficiency of a hierarchical transit network, showed the result of a real data, and analyzed its applicability. Operating cost was estimated using a model which was established in this study, and minimum transit demand was derived from the operating cost. The minimum transit demand value is just a sample calculation, thus it varies by many inside and outside factors of the model. Looking at the inside of the model, operating cost and travel speed are major factors, and the possibility of introducing urban subway becomes high when the operating cost of the transit system is low and its travel speed is high. As far as the outside factors are concerned, according to the analysis on the network structure, transit demand, and transit mode share, the minimum transit demand value which was derived in this study will be the maximum value among the possible values. In the feasibility study, the benefit is likely to be overestimated and the cost is likely to be underestimated than those of this study. It could be concluded that the methodology of a feasibility study is appropriate in the field standard. This study analyzed the efficiency of introduction of urban subway using analytical approach, thus has many shortcomings and limitations. However the practical approach, like feasibility study, has some limitations as well. This study could be a basis on establishing an analysis framework that is more accurate and reasonable by comparing analytical approach and practical approach.

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

대중교통 노선설계에 관한 연구는 1960년대부터 시작되었는데, 초기에는 기본적인 변수들 간의 상호관계 및 운영과라미터에 대한 해석적 연구가 주를 이루다가 1980년대에 들어서면서 컴퓨터의 발달에 힘입어 해석적 연구를 바탕으로 보다 정확한 해를 구하기 위한 수리적 연구가 발전하였다.[10-14] 수리적 연구는 주어진 상황과 조건 하에서 최적의 노선위치, 정류장 위치, 및 배차시간 등을 결정하는 것으로 모든 조건이 주어질 경우 정확한 해를 보장하지만, 주어진 조건의 변화에 따른 해의 변화를 예측하는데 어려움이 있으며 주어진 조건 이외의 상황에 대해서는 전혀 결과를 알 수 없기 때문에 대중교통 시스템 전체적인 차원에서 전역 최적해를 보장하지 못한다.

국내의 경우 1990년대의 일부 연구[1,2,3,4]를 제외하면 해석적 연구가 이루어지지 않은 상태에서 수리적 연구가 수행되었다고 볼 수 있다.[9] 컴퓨터의 계산능력이 급속도로 발전한 것에 힘입어 이전에 풀기 어려웠던 많은 문제들의 해를 구하는 것이 가능해진 것은 사실이나 해석적 연구의 부재로 인해 여전히 많은 의문이 남아있다. 이러한 수리적 연구의 한계가 최근 많은 연구들에서 언급되고 있으며[6,7,8,9], 수리적 연구의 한계를 보완하려는 노력이 활발하게 이루어지고 있다.

박준식 외(2007c)의 연구는 그러한 노력의 일환으로 위계구조 대중교통 노선망의 효율성을 이론적으로 해석하였다. 그 연구에서는 상위 노선을 도입함에 따라 발생하는 통행비용 절감이 상위 노선을 도입함에 따라 추가적으로 발생하는 비통행비용보다 큰 경우에 위계구조 대중교통 노선망이 효율성을 갖는다는 매우 타당한 결과를 도출하였으나 이론적인 해석에 그친 한계를 갖는다.

본 연구에서는 박준식 외(2007c)의 연구를 바탕으로 실제 자료를 사용하여 도시철도 도입의 효율성을 분석하고 결과의 적용성을 검토하고자 한다. 또한 투자평가의 방법론을 본 연구와 비교·검토하여 이론적인 접근과 실용적인 분석의 차이와 연결 가능성을 타진하고자 한다.

2. 연구의 범위 및 내용

본 연구는 위계구조 대중교통 노선망의 효율성에 대

한 이론적 해석에 그친 박준식 외(2007c)의 연구에 대한 실용적 연장으로 이론적 측면은 박준식 외(2007c)의 연구를 그대로 수용한다.

박준식 외(2007c)의 연구에서는 단위 거리당 운영비용이라는 가상의 운영비용계수를 사용하여 모형을 구축하였기 때문에 실제 자료를 적용하여 모형의 결과를 산출하기 위해서는 운영비용계수를 추정하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 운영비용계수를 추정하는 모형을 구축하고 서울시 도시철도와 경기도 버스에 대한 실제 자료를 적용하여 운영비용계수를 추정한다. 추정된 운영비용계수를 활용하여 도시철도 도입 효율성을 보장하기 위한 수요 기준치를 산정하고, 모형 내/외부의 변화요소에 따른 결과치의 변화를 검토한다. 또한 현재 투자평가에서 사용되고 있는 방법론과 비용항목들을 박준식 외(2007c)의 연구와 비교·검토하여 차이점을 분석하고 이론적인 접근과 실용적인 분석의 연결 가능성을 타진한다.

본 연구는 논리적으로 타당한 이론적 모형인 박준식 외(2007c)의 연구를 활용하여 실제 대중교통 노선망을 분석할 때 어떤 것들이 추가적으로 필요하며 어떤 부분에서 현실과 차이가 있으며 어떤 요인들이 이러한 차이를 유발하는지를 밝히는 것에 근본적인 목적이 있다. 따라서 노선구조나 수요형태의 변화와 같이 보다 근본적인 모형의 기본적인 측면은 본 연구의 범위에서 제외한다.

II. 운영비용계수 추정

1. 운영비용계수 추정모형

박준식 외(2007c)의 연구에서는 단위 거리당 운영비용계수 γ_c (원/km)를 사용하여 일정 공간의 통행수요를 서비스하는 노선망의 총 운영비용을 산출하는 모형을 구축하였다. 그러나 현실적으로는 여러 가지 복잡한 운영비용 항목들의 많은 변수들을 고려하여 단위 거리당 운영비용계수를 추정해야 한다.

대중교통 시스템의 운영비용은 크게 시설비, 가변 운행비, 그리고 고정 운행비의 세 가지 항목으로 구분될 수 있다. 시설비는 선로와 역사 등 시설에 대한 건설비용을 나타내고 가변 운행비는 차량을 운행함에 따라 발생하는 유류비, 재료비 등을 나타내며, 고정 운행비는 차량을 운행하지 않더라도 발생하게 되는 차량의 구입비용(감가상각비로 반영됨), 노무비, 시설 운영비 등을 나타낸다. 박준식 외

(2007c)의 연구에서 사용한 공간과 대중교통 노선망 상에서 단위 거리당 운영비용은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma_o &= \gamma_1 \frac{2AB}{R} \frac{1}{V} \\ &+ \gamma_2 \left(\frac{2A}{Vh} \frac{B}{R} + \frac{2B}{Vh} \frac{A}{R} \right) \\ &+ \gamma_3 \left(\frac{2A}{Vh} \frac{B}{R} + \frac{2B}{Vh} \frac{A}{R} \right) \frac{1}{V} \\ &= \gamma_1 \frac{2AB}{VR} + \gamma_2 \frac{4AB}{VhR} + \gamma_3 \frac{4AB}{V^2hR} \end{aligned} \quad (1)$$

- 여기서, γ_o : 단위 거리당 운영비용계수 (원/km)
 γ_1 : 노선망의 시설비용계수 (원/h-km)
 γ_2 : 차량 운행비용계수 (원/대-km)
 γ_3 : 차량 보유비용계수 (원/대-h)
 A : 공간의 가로폭 (km)
 B : 공간의 세로폭 (km)
 R : 노선 간격 (km)
 V : 차량의 통행속도 (km/h)
 h : 평균 배차간격 (h)

식(1)을 보면 노선망의 시설비용은 노선의 간격에 따라 변하고 고정 운행비용은 노선망을 운행하기 위해 필요한 차량수가 노선간격(노선수)과 배차간격에 따라 변화하기 때문에 노선간격과 배차간격에 따라 가변적인 것을 알 수 있다. 박준식 외(2007c)의 연구에서 산출한 최적 노선간격과 배차간격을 식(1)에 대입하면 식(2)와 같이 정리된다. 격자형 대중교통 노선망의 총 비용은 이용자비용과 운영자비용의 합으로 구성되며 $TC = (C_a + C_w + C_f) + C_o$

$TC = 2qAB\gamma_a \frac{R}{4v_a} + qAB\gamma_w kh + qAB\gamma_t \frac{d}{V} \gamma_o + \frac{2AB}{R} \frac{1}{h}$ 이를 노선간격과 배차간격에 대해 미분하면 최적 노선간격 $R^* = \left(\frac{8v_a^2 k \gamma_w \gamma_o}{\epsilon^2 \gamma_a^2 q} \right)^{\frac{1}{3}}$ 과 배차간격 $h^* = \left(\frac{\epsilon \gamma_a \gamma_o}{v_a k^2 \gamma_w q} \right)^{\frac{1}{3}}$ 가 산출된다.

$$\begin{aligned} \gamma_o &= \gamma_1 \frac{2AB}{V} \left(\frac{\epsilon^2 \gamma_a^2 q}{8v_a^2 k \gamma_w \gamma_o} \right)^{\frac{1}{3}} \\ &+ \gamma_2 \frac{4AB}{V} \left(\frac{\epsilon \gamma_a k \gamma_w q^2}{8v_a \gamma_o^2} \right)^{\frac{1}{3}} \\ &+ \gamma_3 \frac{4AB}{V^2} \left(\frac{\epsilon \gamma_a k \gamma_w q^2}{8v_a \gamma_o^2} \right)^{\frac{1}{3}} \\ &= \gamma_1 \psi \left(\frac{q}{\gamma_o} \right)^{\frac{1}{3}} + \gamma_2 \Phi \left(\frac{q}{\gamma_o} \right)^{\frac{2}{3}} + \gamma_3 \Psi \left(\frac{q}{\gamma_o} \right)^{\frac{2}{3}} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $\psi = \frac{2AB}{V} \left(\frac{\epsilon^2 \gamma_a^2}{8v_a^2 k \gamma_w} \right)^{\frac{1}{3}}$ [km]

$\Phi = \frac{4AB}{V} \left(\frac{\epsilon \gamma_a k \gamma_w}{8v_a} \right)^{\frac{1}{3}}$ [대]

$\Psi = \frac{4AB}{V^2} \left(\frac{\epsilon \gamma_a k \gamma_w}{8v_a} \right)^{\frac{1}{3}}$ [대-h/km]

- q : 단위시간-면적당 통행수요 (인/h-km)
 γ_o : 단위 거리당 운영비용계수 (원/km)
 γ_a : 접근시간에 대한 비용환산계수 (원/h)
 γ_w : 대기시간에 대한 비용환산계수 (원/h)
 v_a : 접근 통행속도 (km/h)
 ϵ : 접근계수
 k : 대기시간 계수

통행수요 q 와 운영비용계수 γ_o 를 제외한 모든 계수들이 고정일 경우 운영비용계수 γ_o 는 통행수요에 대한 함수가 된다. 통행수요가 증가할수록 노선망의 전체 노선연장이 증가하고 필요 차량수가 많아지기 때문에 운영비용계수도 증가할 것으로 예상할 수 있다. 위의 방정식은 5차 방정식으로 5차 방정식의 일반해는 구할 수 없는 것으로 알려져 있으나 수리적 근사법을 사용하면 어렵지 않게 해를 구할 수 있다.

2. 운영비용계수 추정모형의 계수값 산출

1) 단위 운영비용

(1) 버스

경기도는 2005년 부터 매년 경기도 버스 업체들의 경영 및 서비스평가를 실시하고 있으며, [5] 2007년에 수행된 해당 과업을 통해 구해진 버스 업체들의 운영 자료(2006년 기준 자료)에 의하면 경기도 내에서 운행 중인 1,120개 노선의 평균 차량 운행비용은 309원/대-km이고 차량 보유비용은 13,110원/대-h인 것으로 나타났다. 여기서 차량 운행비용은 유류비, 타이어비, 부품비 등으로 구성되고 차량 보유비용은 노무비, 경비, 판매 및 관리비 등으로 구성된다.

- 차량 운행비용계수 γ_2 : 309원/대-km
- 차량 보유비용계수 γ_3 : 13,110원/대-h

(2) 도시철도

여기서는 8량으로 구성된 중전철을 기준으로 분석하

〈표 1〉 버스의 최적 노선/배차간격 및 운영비용

q^* 대중교통 통행수요 (인/h-km ²)	R^* 노선 간격 (km)	h^* 배차 간격 (분)	운영비용계수 (원/km)		
			γ_0 총 운영비용	가변운행비용 (30.9%)	고정운행비용 (69.1%)
1	8.8	44.9	12,840	3,972	8,869
10	5.5	28.3	32,253	9,977	22,277
20	4.8	24.7	42,559	13,164	29,394
30	4.4	22.8	50,052	15,482	34,570
40	4.2	21.5	56,157	17,370	38,786
50	4.0	20.5	61,399	18,992	42,407
100	3.5	17.9	81,017	25,060	55,957

기로 한다. 서울시의 내부자료(2006년 기준으로 환산된 자료)에 의하면 서울시 도시철도 6호선의 경우 건설비용이 908.8억원/km 가량 소요되었는데 시설의 내구연한을 30년으로 가정하고 1일 운행시간을 20시간을 적용하여 이를 시간당 비용으로 환산하면 414,977원/h-km 정도가 된다. 역사운영비는 개소 당 2,633,617원/일이 소요되는데 서울시 도시철도 전구간 역사 평균간격인 1.12km를 적용하면 117,572원/h-km의 역사 운영비용이 발생한다. 따라서 노선망의 시설비용계수 γ_1 은 532,549원/h-km로 계산된다.

가변 운행비에 해당하는 차량의 운행비용은 단위 거리당 비용으로 차량운행비용계수 γ_2 는 20,264원/대(8량)-km인 것으로 조사되었다. 노무비의 경우 고정 운행비에 포함되어야 하나 서울시 자료의 경우 가변 운행비에 포함되어 있어 가변 운행비용이 다소 크게 나타나고 있다.

고정 운행비는 감가상각비용으로 계산되는 차량의 구입비용과 노무비, 수리비 등을 합산한 비용에 해당한다. 도시철도 1량당 감가상각비용은 115,068원/량-일로 8량으로 운영되는 것을 가정하면 차량의 감가상각비는 46,027원/대-h로 계산되고 수리비 등의 차량 고정비용은 69,722원/대-h로 조사되어 차량 보유비용계수 γ_3 는 115,749원/대-h로 계산된다.

- 노선망의 시설비용계수 γ_1 : 532,549원/h-km
- 차량 운행비용계수 γ_2 : 20,264원/대-km
- 차량 보유비용계수 γ_3 : 115,749원/대-h

2) 시간에 대한 비용환산계수

접근시간, 대기시간, 및 통행시간에 대한 비용환산계수는 “도로·철도 예비타당성조사 표준지침(제4판), 한

국개발연구원, 2004”에서 제시한 값을 2006년을 기준으로 환산하여 산출하였다. 상위 노선으로의 접근은 버스를 통해 이루어지기 때문에 상위 노선의 접근시간에 대한 비용환산계수는 버스 통행자의 통행시간가치를 적용하고 상위 노선의 통행시간에 대한 비용환산계수는 철도의 통행시간가치를 적용하기로 한다. 대기시간에 대한 비용환산계수는 임의적으로 상위 노선의 통행시간에 대한 비용환산계수의 두 배를 적용한다.¹⁾

- 접근시간에 대한 비용환산계수: 4,673 원/h
- 대기시간에 대한 비용환산계수: 10,471 원/h
- 통행시간에 대한 비용환산계수: 5,235 원/h

3) 공간에 대한 가정 및 계수

분석 대상이 되는 공간은 모형 구축 시에 고려하였던 바와 동일하게 격자형의 가로망을 갖으며 통행수요의 분포는 균일함을 가정한다.

- 공간의 가로폭 A: 20km
- 공간의 세로폭 B: 20km
- 접근계수 ϵ : 23/30

4) 통행수단에 대한 가정 및 계수

하위 노선은 버스로, 상위 노선은 도시철도(8량으로 구성된 중전철)로 가정하고 모든 차량들은 균일한 시간 간격으로 운행되는 것으로 가정한다. 상위 노선인 도시철도의 접근수단은 하위 노선인 버스가 되기 때문에 상위 노선의 접근 통행속도는 하위 노선인 버스의 통행속도가 된다.

- 버스의 통행속도: 19km/h
- 도시철도의 통행속도: 35km/h
- 대기시간 계수 k : 0.5

3. 운영비용계수 산출 결과

1) 버스의 운영비용계수 산출결과

통행수요에 따른 버스의 최적 노선간격, 배차간격 및 운영비용은 〈표 1〉과 같이 산출된다. 통행수요가 증가함에 따라 노선간격과 배차간격이 감소하고 운영비용은 증가하는 결과를 나타낸다. 여기서 가변운행비용과 고정운행비용의 비율은 통행수요에 관계없이 항상 일정함을 알

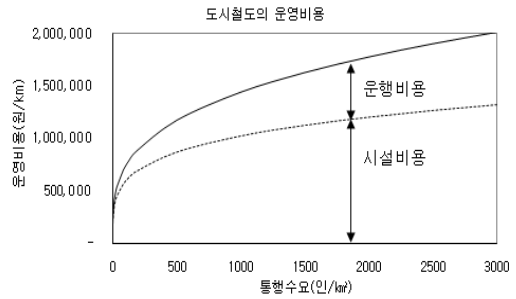
1) 대기시간에 대한 시간가치는 연구자들마다 상이한 값들을 제시하고 있어 어떤 값이 정확한 값인지를 판단하기는 어려우나 많은 연구 결과를 종합해볼 때 통행시간가치의 두 배 정도로 보는 것이 타당한 것으로 의견이 모아지고 있다.

수 있는데 가변운행비용이 전체 운영비용의 30.9%, 고정운행비용이 전체 운영비용의 69.1%를 차지하는 것으로 계산되었다. 경기도 내부 자료에 의하면 차량 운행과 관계된 재료비가 104,757원/대-일이고 노무비, 경비 등의 비용은 249,094원/대-일로 가변운행비용이 전체의 29.6%, 고정운행비용이 전체의 70.4%로 나타난다. 본 연구에서 사용한 운영비용 추정모형의 결과와 실제 운영비용이 매우 유사한 것을 알 수 있다.

2) 도시철도의 운영비용계수 산출결과

운영비용계수 추정 모형식에 앞에서 산출한 각 계수 값들을 적용하여 통행수요에 따른 도시철도의 최적 노선 간격, 배차간격 및 단위 운영비용을 추정하였다. 추정된 운영비용은 해당하는 통행수요를 서비스하기 위한 최적의 노선간격과 배차간격이 반영되어 계산된 값으로 가정한 공간의 크기보다 노선간격이 작은 경우에만 의미를 갖는다. 따라서 통행수요가 112인/h-km² 이상인 경우에만 도시철도 운영이 가능해진다.

〈표 2〉를 보면 노선간격이 20km일 때 배차간격은 21.6분이고 총 운영비는 단위 거리당 758,926원/km로 이 중 시설비는 609,109원/km로 전체의 80%를 차지하고 운행비가 149,817원/km로 전체의 20%를 차지하는 것으로 계산되었다. 〈그림 1〉을 보면 통행수요가 증가할수록 노선간격과 배차간격이 감소하여 단위 거리당 운영비용은 증가하지만 통행인 당 운영비용은 감소하게 된다. 전체 운영비용 중 시설비가 차지하는 비율은 통



〈그림 1〉 도시철도의 운영비용 추정결과

행수요가 증가할수록 감소하고 운행비의 비율이 증가하게 된다. 또한 통행수요에 대한 운영비용의 함수가 위로 볼록한 형태를 나타내는 것을 통해 대중교통 시스템이 규모에 의한 경제성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

III. 도시철도 도입 효율성 검토

1. 도시철도 도입을 위한 수요조건

1) 도시철도 도입 효율성 분석의 기본 모형

박준식 외(2007c)의 연구에서는 격자형 노선망과 균일한 수요분포를 가정하여 대중교통 노선망의 총비용을 모형화하고 위계구조를 갖는 노선망과 그렇지 않은 노선망의 총비용을 비교하여 위계구조를 갖는 노선망이 효율적인 조건식을 도출하였다.

〈표 2〉 통행수요에 따른 도시철도의 최적 노선간격, 배차간격 및 운영비용

q* 대중교통 통행수요 (인/h-km ²)	R* 노선간격 (km)	h* 배차간격 (분)	운영비용계수 (원/km)			
			γo 총 운영비용	시설비용	가변운행비용	고정운행비용
112	20.0	21.6	758,926	609,109 (80%)	128,797 (17%)	21,020 (3%)
500	14.0	15.2	1,171,806	867,747 (74%)	261,398 (22%)	42,661 (4%)
1000	11.9	12.9	1,440,984	1,020,474 (71%)	361,510 (25%)	58,999 (4%)
1500	10.9	11.7	1,629,087	1,121,341 (69%)	436,507 (27%)	71,239 (4%)
2000	10.2	11.0	1,778,678	1,198,577 (67%)	498,711 (28%)	81,390 (5%)
2500	9.6	10.4	1,904,990	1,261,937 (66%)	552,830 (29%)	90,223 (5%)
3000	9.2	10.0	2,015,436	1,316,051 (65%)	601,259 (30%)	98,126 (5%)

$$\frac{r_l^1}{V_l}q - \left(\frac{r_u^2}{V_u}q_u + \frac{r_l^2}{V_l}q_l \right) \geq \kappa_u q_u^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

여기서, κ_u : 상위 노선의 비통행비용 계수

r_l^1 : 단일 노선망에서의 하위 노선의 단위 시 간당 평균 통행 거리 · 비용

r_l^2 : 위계구조 노선망에서 하위 노선만을 이용하는 통행의 단위시간당 평균 통 행 거리 · 비용

r_u^2 : 위계구조 노선망에서 상위 노선의 단 위시간당 평균 통행 거리 · 비용거리

q_l : 하위 노선의 통행수요

q_u : 상위 노선의 통행수요

V_l : 하위 노선의 평균 통행속도

V_u : 상위 노선의 평균 통행속도

식(3)의 조건식은 상위노선을 이용함에 따른 통행비용 절감이 상위노선을 도입함에 따라 추가적으로 발생하는 비통행비용(접근비용, 대기비용, 및 운영비용의 합) 보다 큰 경우를 나타낸다. 이는 기본적인 상식 수준에서 타당한 결론으로 이해될 수 있다.

하위 노선을 버스로 보고 상위노선을 도시철도로 볼 경우 박준식 외(2007c)의 연구에서 제시한 위계구조 대중교통 노선망의 효율성 분석 모형은 도시철도 도입 효율성 분석을 위해 그대로 적용할 수 있다.

2) 도시철도 이용비율에 따른 분석

앞에서 정의한 계수를 적용하여 도시철도 노선을 도

입할 경우 전체 노선망의 효율성이 향상되는 최소 통행수요를 산정한 결과는 <표 3>과 같다. 공간의 크기가 20km×20km인 경우에 대중교통의 최소 통행수요가 354.4인/h-km²로, 서울과 6개 광역시의 평균적인 통행지표(대중교통 통행분담율 57.2%, 인당통행수 1.8통행/인)를 적용할 경우 이에 해당하는 인구는 2,745천명이 고 인구밀도는 6,862명/km²로 계산되었다.

3) 도시철도 통행속도에 따른 분석

도시철도 이용비율 α 는 도시철도의 통행속도와 접근 시간, 대기시간, 그리고 통행시간에 대한 비용환산계수에 따라 결정되는 값이다. 도시철도 통행속도가 낮을 경우에는 통행시간 절감편익이 감소하기 때문에 더 많은 통행수요가 요구되며, 도시철도의 통행속도가 높을 경우에는 통행시간 절감편익이 증가하기 때문에 보다 적은 통행수요만으로도 효율성을 보장할 수 있게 된다. 또한 통행시간 절감편익은 통행시간에 대한 비용환산계수가 증가할수록 증가하게 되므로 통행시간에 대한 비용환산계수가 작아지면 더 많은 통행수요가 요구되며, 반대로 커지면 다소 적은 통행수요만으로도 도시철도의 효율성이 보장될 수 있다.

최소 대중교통 통행수요는 최적 노선간격이 공간의 크기와 같아질 경우의 통행수요에 해당하며 도시철도의 최적 노선간격은 도시철도의 이용수요에 의해 결정된다. 동일한 노선간격에 대한 도시철도 이용수요는 동일하기 때문에 최소 대중교통 통행수요에 따라 도시철도 이용비율이 결정된다. 결과적으로 도시철도 이용비율 α 는 도시철도의 통행 속도에 따라 결정되는 도시철도의 분담율을 의미하지는 않는다. 즉, 도시철도의 통행속도가 35km/h에서 60km/h

<표 3> 도시철도 도입을 위한 수요조건 분석결과

α 도시철도 이용비율	γ_0 운영비용 (원/km)	R^* 도시철도 최적간격(km)	h^* 도시철도 최적배차간격(분)	q^* 최소 대중교통 통행수요(인/h-km ²)	인구 (명)	인구밀도 (명/km ²)
0.10	321,232	41.0	44.3	55.0	427,350	1,068
0.20	575,403	25.2	27.2	212.2	1,648,878	4,122
0.30	728,473	20.6	22.3	326.2	2,534,459	6,336
0.316	758,926	20.0	21.6	354.4	2,744,844	6,862
0.40	915,383	17.1	18.5	539.6	4,192,367	10,481
0.50	1,143,298	14.3	15.4	921.8	7,179,822	17,950
0.60	1,425,621	12.0	13.0	1609.8	12,602,946	31,507
0.70	1,775,947	10.2	11.0	2842.9	22,089,022	55,223

〈표 4〉 도시철도 통행속도에 따른 수요조건 분석결과

도시철도 통행속도(km/h)	q^* 최소 대중교통 통행수요 (인/h-km)	α 도시철도 이용비율(%)	인구 (명)	인구밀도 (명/km ²)
30	374.3	29.9%	2,908,326	7,271
35	354.4	31.6%	2,744,844	6,862
40	338.9	33.1%	2,632,968	6,582
45	327.1	34.2%	2,541,181	6,353
50	317.6	35.3%	2,467,752	6,169
55	309.9	36.1%	2,407,674	6,019
60	303.4	36.9%	2,357,609	5,894

로 증가할 경우에 도시철도 이용비율이 31.6%에서 36.9%로 증가하는 것은 아니다.

2. 모형 내부에서의 가변성

본 연구에서는 박준식 외(2007c)의 위계구조 대중교통 노선망의 효율성에 대한 이론적 해석을 바탕으로 실제 자료를 적용하여 도시철도 도입을 위한 최소 수요조건을 도출하였다. 그러나 모형 내에서 사용된 많은 변수값들이 하나의 대푯값에 불과하기 때문에 이는 하나의 계산 예에 불과할 뿐 절대적인 지침이 될 수 없다. 즉, 모형에서 사용된 많은 변수값들은 지역과 상황에 따라 변화하는 값이기 때문에 본 연구에서 계산한 통행수요는 하나의 계산 예에 불과하다 따라서 모형 내에서 사용된 변수값들의 변화에 따른 결과치의 변화를 검토해보는 것이 본 연구에서 산출한 결과값에 대한 이해를 도울 것으로 판단된다.

도시철도 도입이 효율적일 조건은 도시철도를 도입함에 따른 통행시간 절감이 도시철도를 도입하기 위해 추가적으로 발생하는 비통행비용(접근비용, 대기비용, 및 운영비용) 보다 큰 경우에 해당한다. 따라서 크게 4개 비용항목으로 구분할 수 있으며 각 항목에 관계되는 변수값들에 따라서 결과의 변화를 검토해보기로 한다.

1) 운영비용계수

운영비용계수는 비통행비용의 운영비용을 결정짓는 변수로 결과에 미치는 영향이 매우 크다.

본 연구에서는 8량으로 구성된 서울시 도시철도 6호선의 자료를 사용하였는데, 차량 운행비용과 보유비용의 경우 인건비의 차이를 제외하면 차량의 종류와 구성에 따른 차이가 대부분을 차지하는 반면 시설비의 경우 차량의 종류와 구성에 따른 차이보다 지역별/도시별 차이가 대부분을 차지할 것이다. 즉, 서울과 같은 대도시의

경우 용지보상비와 건설비 등의 차이로 시설비가 지방의 중소도시의 시설비보다 크게 나타날 것이다. 따라서 서울시의 8량 중전철이 아닌 지방도시의 6량 경전철일 경우 운영비용계수는 상당히 작게 추정될 것이고, 이 경우 도시철도 도입을 위해 요구되는 통행수요도 그보다 작게 산출될 것임이 분명하다.

2) 시간가치

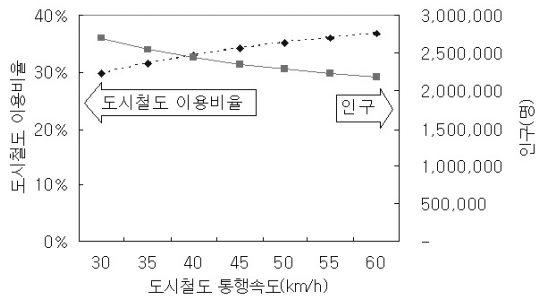
본 연구에서는 접근시간, 대기시간, 및 통행시간에 대한 비용환산계수를 “도로·철도 예비타당성조사 표준지침(제4판), 한국개발연구원, 2004”에서 제시한 값을 사용하였다. 이는 하나의 대표치에 해당하기 때문에 지역/도시에 따라 달라질 것이다. 즉, 평균임금이 높은 지역/도시의 경우 시간가치가 더 높게 산정될 것이고, 평균임금이 낮은 지역/도시의 경우 시간가치가 더 낮게 산정될 것이다. 또한 통행목적 및 통행시간대에 따라서도 시간가치가 달라질 것이다.

통행시간에 대한 비용환산계수가 커질 경우 통행비용 절감가치가 더 높게 나타날 것이기 때문에 도시철도 도입을 위해 요구되는 통행수요도 그보다 작게 산출될 것이다. 그러나 접근시간 및 대기시간에 대한 비용환산계수가 커질 경우는 이와 반대로 비통행비용이 더 크게 산정되기 때문에 도시철도 도입을 위해 요구되는 통행수요는 그보다 크게 산출될 것이다.

3) 통행속도

본 연구에서는 버스의 통행속도를 서울시와 경기도 버스를 기준으로 평균적인 통행속도를 적용하였으며 도시철도의 통행속도는 서울시 도시철도의 평균적인통행속도를 적용하였다.

버스의 통행속도는 일반 가로망의 교통혼잡에 크게 영향받기 때문에 일반 가로망이 혼잡할 경우 버스의 통



〈그림 2〉 도시철도 통행속도에 따른 수요조건

행속도가 낮아지며, 반대로 일반 가로망의 혼잡이 크지 않을 경우 버스의 통행속도가 높아진다. 지방 중소도시의 일반 가로망이 그다지 혼잡하지 않다면 버스의 통행속도는 본 연구에서 적용한 값보다 크게 나타날 것으로 예상되며, 이 경우 통행비용 절감이 줄어들게 되어 도시철도 도입을 위해 요구되는 통행수요는 증가하게 된다.

도시철도의 통행속도는 많은 부분 정류장 간격에 의해 결정되나, 가감속 성능이 뛰어난 차량시스템의 경우 평균 통행속도를 높일 수 있다. 정류장 간격이 길고 차량의 성능이 높을 경우 도시철도의 통행속도를 높일 수 있는데, 이 경우 통행비용 절감이 증가하므로 도시철도 도입을 위해 요구되는 통행수요는 감소하게 된다. 〈그림 2〉는 도시철도 통행속도에 따른 도시철도 도입을 위해 요구되는 통행수요를 나타낸다. 도시철도의 통행속도가 높을수록 필요 통행수요가 감소하고 도시철도 분담율은 증가하는 것을 확인할 수 있다.

4) 대중교통 분담율과 인당 통행수

본 연구의 모형을 통해 산출되는 최종 결과는 단위 시간-면적당 대중교통 통행수요이다. 인구규모와 인구밀도는 앞서 언급한 바와 같이 20km×20km인 가상의 공간에 서울과 6개 광역시의 평균적인 통행지표(대중교통 통행분담율 57.2%, 인당통행수 1.8통행/인)를 적용하여 산출한 것으로 특정 지역을 대표하지 않는다. 따라서 현실적인 의미를 갖지 않는다. 인구규모와 인구밀도값은 대중교통 통행분담율과 인당통행수가 높을수록 작아지게 된다.

2. 모형 외부에서의 가변성

1) 노선망 구조와 수요분포의 변화

박준식 외(2007c)의 연구에서는 격자형 노선망과 균

일한 수요분포를 가정하였다. 이는 서울시 강남지역의 경우 유사하다고 볼 수 있으나 일반적으로는 이러한 가정은 특수한 이상적 상황에 그친다. 따라서 이러한 가정이 위배되는 경우에 결과의 변화를 따져보는 것이 필요하다.

일반적으로 노선망의 구조와 수요분포는 순환적으로 상호 영향을 주고받는 관계를 갖는다. 수요분포가 불균일할 경우 이용자들의 접근비용을 최소화시키기 위해 대중교통 노선은 수요 밀집지역을 따라 설치될 것이며, 이용자들은 자신의 접근비용을 줄이기 위해 대중교통 노선을 중심으로 집중될 것이다. 이러한 과정이 반복되면 격자형 노선망에 균일한 수요분포는 방사형 노선망에 불균일한 수요분포에 가깝게 변화될 것이다.

방사형 노선망에 불균일한 수요분포, 특히 중심지로 통행이 집중되는 경우를 생각해보자. 이용자들의 접근비용은 격자형 노선망과 균일한 수요분포 하에서보다 작게 나타날 것이고 통행비용 절감은 더 크게 나타날 것이다. 이는 더 적은 통행수요 만으로도 도시철도 도입 효율성을 보장할 수 있음을 의미한다. 결국 본 연구에서 산출한 도시철도 도입을 위해 요구되는 최소 통행수요 값은 노선망 구조와 수요분포의 변화에 따른 그 값들 중 최대치가 된다. 즉, 현실적인 상황에서는 본 연구에서 산출한 값보다 작은 통행수요 하에서 도시철도 도입 효율성을 보장할 수 있을 것으로 판단된다.

2) 대중교통 수단분담율의 변화

본 연구에서는 전체 대중교통 이용자수는 고정된 것으로 가정하고 버스 대신 도시철도를 이용함에 따라 절감되는 통행비용만을 고려한다. 일반적으로 대중교통 노선망의 밀도가 높아지고 연계가 원활하게 될수록 대중교통의 수단분담율은 증가하게 된다. 그러나 한 두 개의 도시철도 노선이 신설될 경우는 승용차에서 대중교통으로의 수단전환은 미미한 것도 사실이다. 또한 대중교통의 수단분담율은 일정정도 도로의 혼잡수준과 균형을 맞추어 나가기 때문에 대중교통의 수단분담율 변화는 단시일 내에 관찰되지 않는다. 따라서 본 연구의 대중교통 수단분담율에 대한 가정은 긍정도 부정도 하기 어렵다.

도시철도가 도입됨에 따라 대중교통 수단분담율이 증가하는 경우를 생각해보자. 승용차에서 도시철도로 통행수단을 전환하는 통행자의 경우 자신의 효용이 증가하기 때문에 수단을 전환하게 되는데 통행비용(통행에 소요되는 돈을 나타내는 것으로 본 연구의 타 부분에서 사용된 통행비용과는 다르다.)은 감소하는 반면 통행시간은 증

가하게 된다. 이에 반해 수단을 전환하지 않은 도로 통행자들은 통행량 감소로 인한 혼잡의 완화로 통행시간을 절감할 수 있다. 이 경우 통행수단을 전환한 통행자들의 통행시간 증가와 그렇지 않은 통행자들의 통행시간 감소가 어떤 값이 더 큰지 알 수 없다. 이는 도로교통의 통행량과 혼잡수준, 전환 통행량, 도시철도의 접근시간, 대기시간, 및 통행시간 등에 따라 가변적이다. 그러나 일반적으로 타당성조사와 같은 투자평가의 경제성분석에서는 도로 이용자의 통행시간 절감이 절대적으로 큰 것으로 나타나고 있고, 그럴 경우 도시철도 도입을 위해 요구되는 통행수요는 본 연구의 결과보다 작아질 것이다.

3) 투자평가와의 비교

일반적으로 예비타당성조사 또는 타당성조사와 같은 투자평가를 실시할 경우 각종 비용들이 절감됨에 따라 산출되는 편익항목과 시설의 건설·운영에 소요되는 비용을 비교하여 경제성분석을 수행한다. 투자평가는 교통수요예측 4단계 모형에 따라 수행되는 것으로, 대중교통 노선이 신설될 경우 수단분담 단계를 거쳐 승용차에서 대중교통으로 통행량이 전환되는 것을 전제로 하고 있다. 편익항목은 공로상의 통행시간비용절감, 운행비용절감, 교통사고비용절감, 환경비용절감이 대부분을 차지하며 대중교통이용자들의 통행시간비용절감은 일부분에 지나지 않는다.

본 연구에서는 버스를 통해 도시철도로 접근하는 것을 고려하고 이를 비용에 반영하고 있으나 투자평가에서는 공로와 철도사이의 환승은 고려할 수 없다. 또한 투자평가에서는 철도로의 접근이 통행 기종점에서 바로 이루어지기 때문에 이들 접근비용과 대기비용이 비용항목에 반영되지 않고 단순히 기종점 경로 통행비용에 포함되어 최단경로 선택에 반영된다. 또한 운영비용 산정에 있어서 세금의 포함 여부와 같은 부분에서 다소의 차이가 있어 본 연구와 투자평가의 비용산정 방식에 있어 차이가 발생할 수 있다. 전체적으로 투자평가에서는 박준식 외(2007c)의 모형에서보다 편익을 과다추정하고 비용을 과소추정하는 것으로 판단된다. 그러나 박준식 외(2007c)의 연구가 이론적인 측면에서 접근하여 현실을 이상화 또는 단순화시켜 모형을 구축한 것에도 상당부분 원인이 있음을 주지해야 한다.

IV. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 위계구조 대중교통 노선망의 효율성을

이론적으로 해석한 박준식 외(2007c)의 연구를 연장하여 실제 자료를 적용한 결과를 도출하고 이의 실제 적용성을 검토하였다.

박준식 외(2007c)의 연구결과는 일반 상식 수준에서 타당한 결론이지만 이를 적용하기 위해서는 여러 가지 어려움이 있다. 현실적으로 가장 어려운 부분은 운영비용계수를 추정하는 것인데, 이는 모형의 단순함을 위해 사용한 운영비용계수가 실제로는 존재하지 않는 가상의 값이기 때문이다. 본 연구에서는 가상의 운영비용계수를 추정하는 모형을 구축하여 운영비용계수를 추정하였으며, 이를 활용하여 도시철도 도입을 위해 요구되는 최소 통행수요를 도출하였다.

본 연구에서 산출한 최소 통행수요는 하나의 계산에 불과하며 모형 내/외부의 여러 가지 요소에 따라 가변적이다. 모형 내부의 경우 운영비용계수와 도시철도의 통행속도가 주요 변화요소인데, 운영비용계수가 작고 통행속도가 빠른 경량전철의 경우 도시철도의 도입 가능성이 보다 높은 것으로 검토되었다. 모형 외부의 경우 노선망의 구조와 수요분포, 대중교통의 수단분담율에 대해서 검토한 바, 본 연구에서 산출한 최소 통행수요 값이 이들 변화요소들에 따른 예상치들 중 최대값이 될 것으로 판단된다. 투자평가의 경우 본 연구의 모형에서보다 편익을 과다추정하고 비용을 과소추정하는 것으로 검토되었는데, 본 연구의 결과값이 현실적인 변화요소들에 따른 기대치들 중 최대값임을 감안하면 투자평가는 결국 현실적인 수준에서 적정하게 평가하고 있는 것으로 볼 수 있다.

본 연구는 해석적인 접근을 통해 도시철도 도입의 효율성을 분석하였기 때문에 많은 단점과 한계를 갖고 있다. 또한 투자평가와 같은 실용적인 분석에 있어서도 나름대로의 한계를 갖는 것을 확인하였다. 이론적인 해석과 실용적 분석은 항상 상호 보완되어야 한다. 이론적인 해석과 실용적인 방법론을 비교 검토하여 보다 정확하고 합리적인 분석 틀을 마련하는데 본 연구가 바탕이 될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 고승영(1995), "동시환승(Timed-Transfer) 버스 시스템", 대한교통학회지, 제13권 제4호, 대한교통학회, pp.105~115.
2. 고승영·이양호(1996), "구역분할 버스운영에 관

- 한 연구”, 제14권 제1호, pp.69~80.
3. 고승영·고종섭(1998), “버스의 최적운행시각 및 보유대수 모형 개발”, 대한교통학회지, 제16권 제2호, 대한교통학회, pp.169~176.
 4. 고승영(2002), “버스도착시간 정보에 대한 연구”, 대한교통학회지, 제20권 제5호, 대한교통학회, pp.175~181.
 5. 김점산·조혜정·박준식(2007), “시내버스업체의 경영 및 서비스 평가제도 도입 효과분석”, 대한교통학회지, 제25권 제5호, 대한교통학회, pp.43~55.
 6. 박준식·고승영·김점산·권용석(2007a), “최적 배차시각 설정에 관한 해석적 연구”, 대한교통학회지, 제25권 제3호, 대한교통학회, pp.137~144.
 7. 박준식·고승영·이청원·김점산(2007b), “최적 정류장 간격의 해석적 연구”, 대한교통학회지, 제25권 제3호, 대한교통학회, pp.145~154.
 8. 박준식·고승영·전경수(2007c), “격자형 대중교통 노선망의 위계구조 효율성 분석”, 대한교통학회지, 제20권 제4호, 대한교통학회, pp.123~133.
 9. 박준식·권용석(2007d), “대중교통 노선망 설계에 관한 해석적 연구의 모형 구조와 풀이”, 대한교통학회지, 제20권 제6호, 대한교통학회, pp.129~140.
 10. 박준식·고승영·이청원(2008), “간선-지선 노선 체계의 효율성”, 대한교통학회지, 제26권 제5호, 대한교통학회, pp.227~235.
 11. Holroyd, E.M.(1965) “The Optimal Bus Service: A Theoretical Model for a Large Uniform Urban Area”, Proceedings of the Third International Symposium on the Theory of Traffic Flow, New York.
 12. Kho, S.Y.(1990) “Design of Bus Routes for a Many-to-Few Travel Demand”, Proceedings of the Eleventh International Symposium on Transportation and Traffic Theory held in Yokohama, Japan, July 18-20, pp.343~362.
 13. Kho, S.Y.(2000) “Zigzagging of Bus Routes-An Analytical Approach”, Transportation Research Record, 1731, pp.10~14.
 14. Newell, G.F.(1979) “Some Issues Relating to the Optimal Design of Bus Routes”, Transportation Science, 13, pp.20~35.
 15. Vuchic, V.R., Newell, G.F.(1968) “Rapid Transit Inter-Station Spacing for Minimum Travel Time”, Transportation Science, 2, pp.303~399.

✉ 주 작성자 : 박준식

✉ 교신저자 : 박준식

✉ 논문투고일 : 2008. 7. 3

✉ 논문심사일 : 2008. 10. 1 (1차)

2008. 11. 18 (2차)

✉ 심사판정일 : 2008. 11. 18

✉ 반론접수기한 : 2009. 4. 31

✉ 3인 익명 심사필

✉ 1인 abstract 교정필