

■ 論 文 ■

유해산출물을 고려한 서울시 간선버스노선의 효율성 평가

Evaluation of Efficiency in the Seoul's Arterial Bus Routes Considering Undesirable Outputs

한 진 석

(서울대학교 공학연구소 연구원)

김 혜 란

(국토연구원 책임연구원)

고 승 영

(서울대학교 건설환경공학부 교수)

목 차

- | | |
|--|---|
| <p>I. 서론</p> <p>1. 연구의 배경 및 목적</p> <p>2. 연구의 범위 및 방법</p> <p>II. 선행연구고찰</p> <p>1. 선행연구 검토</p> <p>2. 유해산출물을 고려한 효율성 추정방법</p> <p>3. 외부영향 고려방법</p> | <p>III. 분석모형 설정</p> <p>1. 분석자료 구축</p> <p>2. 다중회귀분석</p> <p>3. 분석모형</p> <p>IV. 효율성 평가 및 해석</p> <p>V. 결론 및 향후 연구과제</p> <p>참고문헌</p> |
|--|---|

Key Words : 효율성, 전이불변성, 역 2단계기법, 자료포락분석, 토빗회귀분석
Efficiency, Translation Invariance, Reverse Two-Stage Method, Data Envelopment Analysis, Tobit Regression

요 약

본 연구에서는 현행 버스 서비스 평가체계를 보완하고 선행연구에 비해 합리적인 분석결과를 도출하기 위해 유익·유해산출물을 모두 반영한 수정 BCC 모형을 이용하여 2009년 서울시 113개 간선버스노선의 효율성을 추정하였다. 분석대상은 총 보유비와 총 가동비, 중앙차로 정류장수 비율과 타노선과의 중복길이를 사용하여 유익산출물인 총 승객수와 서비스 만족도 점수, 그리고 유해산출물인 CO2 배출량을 산출하는 형태로 상정하였다.

분석결과 유해산출물을 함께 반영한 모형이 유익산출물만을 반영한 모형에 비해 합리적인 결과를 도출하는 것으로 나타났다. 서울시 간선버스노선은 총 보유비와 총 가동비, 그리고 타노선과의 중복길이를 평균적으로 약 10% 감소할 수 있으며, 중앙차로 정류장수 비율은 약 160% 증가시킬 수 있는 것으로 분석되었다. 한편 효율성에 영향을 미치는 결정요인을 분석하기 위한 토빗회귀분석을 수행한 결과 총 보유비와 중앙차로 정류장수 비율이 통계적으로 유의미성을 확보하였다.

In order to improve the existing evaluation system of bus services and gain more reasonable analysis outputs, the authors evaluate the efficiency of 113 arterial bus routes in Seoul in 2009 using a modified BCC model considering not only desirable outputs but also undesirable outputs. Each Decision Making Unit (DMU) is assumed to use inputs such as possession costs, operating costs, the ratios of median bus stops overlapped route lengths to produce estimates of desirable outputs (the number of passengers and service satisfaction score) and undesirable outputs (CO2 emissions).

According to the analysis, the modified BCC model considering both desirable outputs and undesirable outputs shows more appropriate results. DMUs would be more efficient on average to reduce nearly 10% of the 3 inputs (possession costs, operating costs, and overlapped route lengths) and increase by about 160% the ratios of median bus stops. Also, a Tobit regression analysis is conducted to identify the most effective variables for maximum efficiency and discover that the variable of possession costs and the ratios of median bus stops are statistically significant.

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

1990년대 이후 서울과 수도권 지역의 자동차 보유대수 및 이용증가에 따른 교통 혼잡과 인건비의 상승으로 인해 버스 수단의 운행비용은 급격히 증가하였으나, 운임수입은 연례적인 운임상승에도 불구하고 도심 철도망 인프라의 확장과 승용차의 지속적인 증가에 따른 버스 분담율의 감소로 인해 두드러진 증가를 보이지 못하였다. 이를 해결하기 위해 서울시는 2004년 7월 수입금공동관리제를 기반으로 하는 준공영제 도입과 노선 및 요금체계 변화를 통한 전반적인 대중교통체계를 개편하였다.

그러나 약 6년이 지난 현재 유도고속차량(Guided Rapid Transit: GRT) 및 신설 지하철 노선과의 중복으로 인한 버스공급용량의 낭비와 장대노선의 불필요한 구간 운영에 따른 운행비용의 증가, 그리고 버스노선 간 중복에 따른 과도한 재정지원 초래 등과 같은 운영체계의 문제점들이 발생하고 있으며, 더욱이 시내버스업체들의 적자를 보조하는 대중교통 보조금의 지급으로 인해 서울시의 재정부담은 크게 완화되지 못하였다.

이를 해결하기 위해 서울시는 버스의 경쟁력을 강화하기 위한 정책들을 지속적으로 시행할 계획이며, 해당 정책들의 효과를 객관적으로 평가하기 위해서는 버스수단 경쟁력의 기반이 되는 노선의 효율성(efficiency)을 추정하고, 이에 영향을 미치는 요인들을 분석할 필요가 있다. 그러나 현재 시행되고 있는 버스 서비스 평가체계는 업체만을 위한 성과이윤배분을 목적으로 하며, 절대평가지표의 사용 및 과다한 평가항목으로 인한 변별력 감소 등의 문제로 인해 향후 시행될 정책의 효과를 평가하기 위한 방안으로는 적합하지 못하다.

또한 지구온난화에 따른 생태계 변화에 대응하기 위해 전 세계적으로 대기오염 및 온실가스를 감축하기 위한 노력이 강화되고 있으며 이를 위해 국내의 경우 청정개발체계의 도입과 저탄소 녹색성장의 실천적 목표를 제시하였다. 이와 같이 환경적 문제를 해소하기 위한 노력이 전 세계적으로 이루어지고 있으며 이에 대한 비중이 점차 증가될 것으로 예상되기 때문에 효율성 평가시 분석대상의 환경적 문제를 줄이려는 노력, 즉 유해산출물에 대한 저감 노력이 반영되어야 할 것으로 사료된다.

따라서 현행 평가체계의 문제점을 보완하기 위해서는 업체의 지구노력 향상을 기대할 수 있는 분석대상의 상

대평가 및 비교를 위한 대표적인 지표마련이 필요하며, 버스노선의 효율성을 올바르게 추정하기 위해서는 노선의 유익·유해산출물을 동시에 반영하여 객관적이고 합리적인 평가방안이 구축되어야 한다.

2. 연구의 범위 및 방법

본 연구는 2009년 서울시 7개 권역의 간선버스노선 중 자료취득이 가능한 113개 노선을 대상으로 하며, 유익산출물로는 노선별 총 승객수와 서비스 만족도 점수를, 유해산출물로는 노선별 CO2 배출량을 사용하였다. 또한 기존 BCC 모형(Banker, Charnes&Cooper)의 전이불변성을 이용한 Seiford and Zhu(2002)의 수정 BCC 모형을 이용하여 버스노선의 효율성을 추정하였으며, 분석결과에 대해 토빗회귀분석(tobit regression analysis)을 수행하여 효율성의 결정요인을 검토하였다.

이와 같이 해당 결과에 영향을 미치는 요인들을 분석함으로써 상대적으로 효율성이 열등한 노선에 대한 문제해결이 가능하며 이를 통해 단기적으로는 노선운영에 대한 불필요한 비용의 감소가 가능하고 장기적으로는 대중교통 보조금에 대한 서울시 재정부담을 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

II. 선행연구고찰

1. 선행연구 검토

현재까지 국내·외 모두 버스노선의 효율성을 분석함에 있어 자료포락분석기법(Data Envelopment

<표 1> DEA 모형을 이용한 국내 선행연구

선행연구	분석대상	분석기법	유해산출물 고려여부
김성수 외 (2002)	버스업체	불변·가변규모, 방사, 투입·산출지향	×
오미영 외 (2002)	버스업체	불변규모, 방사, 투입·산출지향	×
최인영 외 (2002)	버스업체	가변규모, 방사, 투입·산출지향	×
오미영 외 (2005)	버스업체	가변규모, 방사, 투입지향	×
오미영 (2008)	버스업체	불변규모, 비방사, 투입지향	○
한진석 외 (2009)	버스노선	가변규모/방사/투입지향	×

Analysis: DEA)을 적용한 사례가 많지 않기 때문에, 버스업체를 대상으로 효율성을 분석한 연구를 포함하여 검토하였다. 버스업체 및 노선의 효율성을 평가하기 위하여 DEA 모형을 이용한 국내 선행연구는 <표 1>과 같다.

<표 2> DEA 모형을 이용한 국외 선행연구

선행연구	분석대상	분석기법
Tone and Sawada (1991)	버스업체	불변규모, 방사, 투입지향, 강처분성
Chu et al. (1992)	버스업체	불변규모, 방사, 투입지향, 강처분성
Levaggi (1994)	버스업체	불변규모, 방사, 투입지향, 강처분성
Obeng (1994)	버스업체	가변규모, 방사, 투입지향
Kerstens (1996, 1999)	버스업체	가변규모, 방사, 투입·산출지향, 강·약처분성
Nolan (1996)	버스업체	불변·가변규모, 방사, 투입·산출지향
Viton (1997)	버스업체	불변·가변규모, 방사·비방사, 투입·산출지향, 강·약처분성
Viton (1998)	버스업체	가변규모, 방사, 산출지향, 약처분성
Cowie and Asenova (1999)	버스업체	가변규모, 방사, 투입지향, 강처분성
Husain et al. (2000)	버스업체	불변규모, 방사, 투입지향, 강처분성
Carotenuto et al. (2001)	버스업체	불변·가변규모, 방사, 투입·산출지향, 강처분성
Nolan et al. (2001)	버스업체	불변규모, 방사·비방사, 투입지향, 강처분성
Odeck and Alkadi (2001)	버스업체	가변규모, 방사, 투입지향, 강처분성
Boile (2001)	버스업체	불변·가변규모, 방사, 투입지향, 강처분성
Pian and Torres (2001)	버스업체	가변규모, 방사, 투입지향, 강처분성
Cowie (2002)	버스업체	가변규모, 방사, 투입지향, 강처분성
Karlaftis (2003, 2004)	버스업체	불변·가변규모, 방사, 투입지향, 강처분성
Tsamboulas (2006)	버스업체	불변규모, 방사, 투입지향, 강처분성
Odeck (2008)	버스업체	가변규모, 방사, 투입지향, 강처분성
Sampaio et al. (2008)	버스업체	가변규모, 방사, 산출지향, 강처분성
Tadon (2006)	버스노선	불변규모, 방사, 산출지향, 강처분성
Barnum et al. (2008)	버스노선	불변규모, 방사, 산출지향, 강처분성
Lao and Liu (2009)	버스노선	가변규모, 방사, 산출지향, 강처분성

한편 버스업체 및 노선의 효율성을 평가하기 위하여 DEA 모형을 이용한 국외 선행연구는 <표 2>와 같다.

국내의 경우 버스노선의 효율성을 분석한 선행연구는 한진석 외(2009)를 제외하고는 전무한 상태이며, 대부분의 연구가 버스업체를 대상으로 수행되었다. 또한 효율성 추정시 유해산출물을 고려한 선행연구로는 방향거리함수를 이용한 오미영(2008)의 연구가 유일하며, 해당 연구에서는 유해산출물로서 사고비용을 고려하였다.

한편 국외의 경우도 대부분의 연구가 버스업체를 대상으로 수행되었으며, Tadon(2006), Barnum et al.(2008), Lao and Liu(2009)의 연구만이 버스노선을 대상으로 효율성을 추정하였다. 선행연구들을 검토한 결과 분석대상에 대한 생산가능집합의 가정(투입지향 vs. 산출지향, 불변규모 vs. 가변규모, 강처분성 vs. 약처분성, 방사 vs. 비방사 등)들은 부여하는데 정해진 규칙이 없으며, 분석목적에 따라 분석가가 합리적으로 가정함을 알 수 있다.

또한 한진석 외 (2009)의 연구는 분석대상의 유해산출물과 효율성에 영향을 미치는 외부영향 등을 고려하지 않았기 때문에 분석결과가 비합리적인 것으로 판단되며, 버스노선의 효율성을 평가한 국외 선행연구들은 모두 유해산출물을 고려하지 않은 것으로 검토되었다.

Triants(2004)는 DEA 모형을 이용하여 버스수단의 효율성을 평가한 대부분의 선행연구들이 업체 또는 국가와 같이 거시적인 관점에서 분석을 수행하였으나, Chu et al.(1992)과 Karlaftis(2004)의 선행연구에서와 같이 서로 상반된 결과를 도출할 수 있기 때문에 분석대상을 보다 미시적인 관점에서 선정할 필요가 있음을 지적하였다.

Tandon(2006)과 Barnum et al.(2008)은 효율성에 영향을 미치는 외부적 요인들을 고려하기 위해 기존 방법론의 문제점을 해결할 수 있는 역 2단계기법(reverse two-stage method)을 제시하였으며, Seiford and Zhu(2002)는 수정 BCC 모형을 통해 유익산출물과 유해산출물을 동시에 고려하여 분석한 결과가 유익산출물만을 반영하여 분석한 결과에 비해 합리적임을 증명하였다.

이상의 선행연구 검토를 토대로 본 연구에서는 서울시 간선버스노선을 대상으로 효율성을 분석하며, 분석대상은 시내버스업체의 제한된 투입물을 사용하여 산출물을 생산하는 형태로 상정하였다. 분석의 관점은 각 분석대상을 운영·관리하는 업체의 관점에서 수행하였기 때문

에 분석대상의 효율성은 현재 생산하는 유익·유해산출물의 수준에서 타 노선에 비해 투입요소를 얼마나 감소시킬 수 있는지에 따라 결정된다.

2. 유해산출물을 고려한 효율성 추정방법

분석대상이 유익산출물과 유해산출물을 동시에 산출하는 경우 생산과정에서 비효율성을 줄이기 위해 공해물질과 같은 유해산출물은 제거되어야 한다. 전통적인 DEA 모형에서는 효율성 개선을 위한 투입물의 감소는 가능하지만 산출물의 감소는 허용되지 않는 한계가 있으며, 이를 해결하기 위한 대표적인 방법으로 방향거리함수를 이용한 방법과 자료변환을 통한 수정 BCC 모형이 있다.

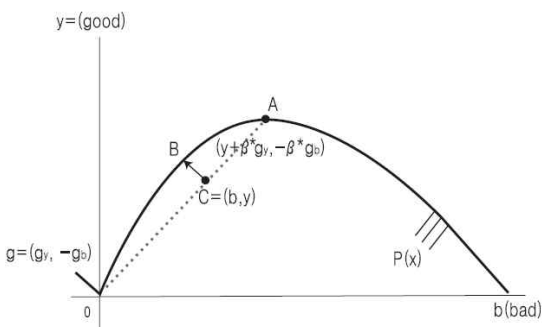
1) 방향거리함수

방향거리함수는 Chung et al.(1997)과 Fare and Grosskopf(2000)등에 의해 개발된 방법으로 수식으로 표현하면 식(1)과 같다.

$$\overline{D}_T(x, y, b; g) = \text{sub}\{\beta : (y, b) + \beta g \in P(x)\} \quad (1)$$

여기서 x 와 y , 그리고 b 는 각각 투입물 벡터와 유익·유해산출물 벡터를 의미하며, $g(-g_x, g_y, -g_b)$ 는 0이 아닌 방향성 벡터로 이는 투입물과 유해산출물은 감소하는 방향으로, 유익산출물은 증가하는 방향으로 측정하도록 방향을 정해주는 역할을 한다.

생산변경 아래 관찰점 C 에 위치한 비효율적인 분석대상은 효율적인 기준점 B 에 도달하기 위해 C 의 방향성 벡터 g 에 β^* 를 곱한 만큼 유익산출물을 늘리는 동시에 유해산출물을 줄여야 한다.



<그림 1> 방향거리함수

2) 수정 BCC 모형

수정 BCC 모형은 기존 BCC 모형에서 자료변환(data transformation)을 수행하더라도 BCC 모형을 통해 측정되는 효율성에는 영향을 주지 않는다는 특성을 이용하였으며, 이는 Ali and Seiford(1990)의 선행연구에서 증명한 BCC 모형의 전이불변성(translation invariance)으로 인해 가능하다.

$$\text{Max } h \quad (2)$$

제약조건

$$\sum_{j=1}^n z_j y_j^{good} \geq h y_o^{good},$$

$$\sum_{j=1}^n z_j y_j^{bad} \geq h y_o^{bad},$$

$$\sum_{j=1}^n z_j x_j \leq x_o,$$

$$\sum_{j=1}^n z_j = 1,$$

$$z_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n.$$

여기서,

- x : 투입요소
- y_j^{good} : 유익산출물, y_j^{bad} : 유해산출물
- $\overline{y}_j^{bad} = (-y_j^{bad} + w)$: 전환된 유해산출물
- w : 전환벡터, z_j : j 의 집중계수

Seiford and Zhu(2002)는 BCC 모형의 특성을 이용하여 유해산출물을 고려해도 모형의 선형성과 볼록성이 유지되는 수정 BCC 모형을 식(2)와 같이 제시하였다. 따라서 분석대상의 유익산출물은 확대하면서 유해산출물은 축소하는 방향으로 생산과정이 이루어진다. 이와 같이 유해산출물을 고려할 수 있는 기법들을 검토한 결과 본 연구에서는 효율성 측정시 분석대상의 효율성 평가뿐만 아니라 비효율적인 노선에 대한 개선방향 제시도 가능한 수정 BCC 모형을 적용하기로 한다.

3. 외부영향 고려방법

효율성 평가시 분석대상이 제어할 수 없는 외부영향을 고려하기 위한 일반적인 방법으로는 2단계기법(two-stage method) 또는 배제기법(exclusion method) 등이 있다. 그러나 2단계기법의 경우 오랜 기간 동안 신뢰성에 대한 문제가 제기되어 왔으며, 최근에는 분석결

과에 상당한 편의(bias)가 존재하고 설명력이 낮은 것으로 입증되었다(Grosskopf, 1996, Barnum et al, 2007).

또한 분석대상보다 외부영향이 비슷하거나 열악한 수준을 가지는 대상에 국한하여 상대 비교를 수행하는 배제기법의 경우, 환경적으로 가장 우수한 분석대상은 비교대상이 존재하지 않기 때문에 항상 효율적인 상태로 분석되는 문제점을 가지고 있다(Barnum et al., 2008).

이에 Barnum et al.(2008)은 기존 기법들의 문제점을 해결하기 위해 2단계기법의 순서를 역으로 수행한 역 2단계기법(reverse two-stage method)을 제안하였다. 이는 분석대상이 제어할 수 없는 외부영향을 효율성 분석을 수행하기 전 자료에서부터 제거하는 방안이며, 수식은 식(3)과 같다.

$$y = \alpha + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_M x_M + \gamma_1 z_1 + \dots + \gamma_N z_N \quad (3)$$

$$y_{adj} = y - (\gamma_1 z_1 + \dots + \gamma_N z_N)$$

여기서,

y : 산출물, x_M : M 개의 투입요소

z_N : N 개의 외부요인

y_{adj} : 외부요인의 영향을 제거한 수정된 산출물

III. 분석모형 설정

1. 분석자료 구축

본 연구에서 사용가능한 자료는 113개 간선버스노선에 대한 12개 항목이며, 모든 자료는 2009년을 기준으로 집계하여 구축하였다. 노선별 사용가능한 자료의 기술통계량은 <표 3>과 같으며, 유해산출물인 CO2 배출량의 경우 국립환경과학원의 2009년 기준 시내버스 배출계수를 이용하여 추정하였다.

한편 역 2단계기법을 위해 다중회귀분석을 수행하여야 하며, 이에 앞서 본 연구에서는 사용하는 자료들이 모두 정규분포를 따르는 모집단으로부터 추출된 자료인지를 판단하는 정규성 검정을 수행하였다. 5%의 유의수준에서 Anderson-Darling 통계량을 사용하여 분석자료의 정규성을 검정한 결과는 <표 4>와 같다.

분석결과 사용가능한 자료 중 D2, D5, D7, D11, D12를 제외한 7개 항목은 유의확률이 유의수준보다 작기 때문에 정규분포를 따르지 않는 것으로 나타났다. 이

<표 3> 사용가능한 자료의 기술통계량

구분	자료	최대값	최소값	평균	표준편차	
산출물	유익	D1	140	18	64	24
		D2	86	62	72	4
	유해	D3	65	9	30	11
투입물	D4	213	31	97	33	
	D5	722	100	325	111	
	D6	1,059	282	548	170	
	D7	170	49	98	23	
	D8	11	2	6	2	
	D9	77	0	19	15	
	D10	2,178	125	497	250	
외부영향	D11	391	50	202	64	
	D12	103	12	56	20	

주:1 D1: 총 승객수(만명), D2: 서비스 만족도 점수(점), D3: CO2 배출량(천만g), D4: 총 보유비(백만원), D5: 총 가동비(백만원), D6: 배차간격(초), D7: 정류장수(개소), D8: 경유존수(개), D9: 중앙차로 정류장수 비율(%), D10: 타노선과의 중복길이(km), D11: 경유존의 인구밀도(만명), D12: 경유존의 자가용 등록대수(만대)

주2: 총 보유비는 차량감가상각비, 차고지비, 차량보험료, 정비직인건비, 관리직인건비, 임원인건비, 기타차량유지비, 기타관리비, 정비비 등과 같이 총 9개 항목의 합계를, 총 가동비는 타이어비, 연료비, 운전직인건비 등과 같이 총 3개 항목의 합계를 의미함.

주3: 모든 자료는 서울시 교통국과 국립환경과학원, 한국스마트카드와 TOPIS에서 수집하여 구축하였음.

<표 4> 정규성 검정결과

구분	유의확률
D1: 총 승객수(만명)	<0.005
D2: 서비스 만족도 점수(점)	0.232
D3: CO2 배출량(천만g)	0.010
D4: 총 보유비(백만원)	0.024
D5: 총 가동비(백만원)	0.173
D6: 배차간격(초)	<0.005
D7: 정류장수(개소)	0.152
D8: 경유존수(개)	<0.005
D9: 중앙차로 정류장수 비율(%)	<0.005
D10: 타노선과의 중복길이(km)	<0.005
D11: 경유존의 인구밀도(만명)	0.253
D12: 경유존의 자가용 등록대수(만대)	0.067

에 본 연구에서는 해당 자료에 대해 λ 승을 해주어 정규분포로 근사시키는 방법인 Box-Cox 변환을 수행하였으며 결과는 <표 5>와 같다.

<표 5> 최적 λ 추정결과

구분	λ 추정값
D1: 총 승객수(만명)	0.25
D3: CO2 배출량(천만g)	0.34
D4: 총 보유비(백만원)	0.29
D6: 배차간격(초)	-0.54
D8: 경류존수(개)	0.48
D9: 중앙차로 정류장수 비율(%)	0.44
D10: 타노선과의 중복길이(km)	-0.10

Box-Cox 변환을 수행한 후 변환된 자료에 대해 다시 정규성 검정을 수행하였으며, 분석결과 경유존수 자료가 정규성을 확보하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 해당 자료는 본 연구의 사용가능한 자료에서 제외하였으며, 결과적으로 총 11개 항목을 사용하여 역 2단계기법을 위한 다중회귀분석을 수행하였다.

2. 다중회귀분석

분석모형의 산출물과 상관관계를 가지는 투입요소의 선정뿐만 아니라 효율성에 영향을 미치는 외부영향을 제거하는 역 2단계기법을 수행하기 위해 각 산출물을 종속

<표 6> 각 산출물에 대한 다중회귀분석 결과

구분	종속변수	수정된 R 제곱
유익산출물	총 승객수(만명)	0.990
	서비스 만족도 점수(점)	0.967
유해산출물	CO2 배출량(천만g)	0.993

<표 7> 독립변수 선정결과

종속변수	독립변수
총 승객수(만명)	총 보유비(백만원)
	총 가동비(백만원)
	경유존의 인구밀도(만명)
서비스 만족도 점수(점)	총 보유비(백만원)
	총 가동비(백만원)
	중앙차로 정류장수 비율(%)
CO2 배출량(천만g)	총 보유비(백만원)
	총 가동비(백만원)
	중앙차로 정류장수 비율(%)
	타노선과의 중복길이(km)

변수로 하는 다중회귀분석을 수행하였으며, 각 모형에 대한 분석결과는 <표 6>과 같다.

또한 각 회귀식에 대한 분산분석을 수행하여 모형 및 독립변수에 대한 통계적 유의성을 확인하였으며, 각 산출물에 영향을 미치는 투입요소는 <표 7>과 같다.

다중회귀분석결과 유익·유해산출물인 총 승객수와 서비스 만족도 점수, CO2 배출량에 대한 투입요소로 총 보유비와 총 가동비, 중앙차로 정류장수 비율과 타노선과의 중복길이 선정되었다. 또한 독립변수 선정결과 총 승객수만이 본 연구에서 외부영향으로 설정한 경유존의 인구밀도에 영향을 받는 것으로 나타났기 때문에 식 (4)와 같이 해당요인에 대한 영향을 제거한 후 효율성을 측정하였다.

$$(총\ 승객수)_{adj} = [(총\ 승객수)^{0.25} - 0.002 \times (경유존의\ 인구밀도)]^4 \quad (4)$$

3. 분석모형

1) DEA 모형

Farrell(1957)의 효율성 개념을 실증적으로 추정하기 위한 기본적인 DEA 모형에는 불변규모수익을 가정하는 CCR(Charnes, Cooper&Rhodes) 모형과 가변 규모수익을 가정하여 순수기술성의 효율성을 알 수 있도록 CCR 모형을 확장시킨 BCC 모형이 있다.

2) 효율성 추정시 전제조건

본 연구에서 가정한 효율성 추정시 전제조건은 다음과 같으며, 분석대상(Decision Making Unit: DMU)은 서울시 간선버스노선이다.

(1) 투입지향(input-oriented)

vs. 산출지향(output-oriented)

서울시는 현재 준공영제를 시행하고 있기 때문에 매년 일정금액을 버스운영에 대한 보조금으로 지급하고 있으며 이로 인해 서울시 재정부담은 완화되지 못하고 있는 실정이다. 이를 해결하기 위해서는 분석결과에 따라 버스노선에 대한 개선이 필요하며, 대중교통의 경우 일반적으로 투입물의 조정이 산출물에 비해 용이하다.

따라서 본 연구에서는 투입지향 측정기법을 적용하여 현재 분석대상의 산출물 수준에서 투입요소를 얼마나

감소시킬 수 있는지를 파악하고 이를 통해 해마다 발생하는 재정부담을 감소시킬 수 있는 방안을 모색하고자 한다.

(2) 불변규모(constant returns to scale)

vs. 가변규모(variable returns to scale)

본 연구의 분석대상인 버스노선의 경우 운영기관인 시내버스업체가 노선의 규모조정을 자율적으로 규제할 수 없으며, 해당 노선의 성격에 따라 규모에 대한 수익이 다르게 나타날 수 있기 때문에 분석대상은 가변규모수익 상태로 가정하였다.

(3) 강처분성(strong disposability)

vs. 약처분성(weak disposability)

본 연구에서는 분석대상인 버스노선의 효율성을 추정함에 있어 시내버스업체의 관점에서 분석을 수행하였으며 분석에 사용되는 투입요소와 유익산출물의 경우 공익을 추구하는 대중교통 서비스의 특성상 정부의 규제 또는 노조의 요구 등으로 인한 과다사용 또는 부족산출이 용인될 수 있다.

따라서 이를 바탕으로 투입요소와 유익산출물의 경우 강처분성을 가정하였으나 유해산출물의 경우는 부족산출에 대한 용인을 부여할 수 없기 때문에 약처분성을 가정하여 분석대상에 대한 생산변경(production frontier)을 구축하였다.

(4) 방사적(radial) vs. 비방사적(non-radial)

본 연구에서는 투입·산출요소에 대한 처분성 가정을 구분하여 부여하였으며 비방사적 측정기법을 적용할 경우 유해산출물에 대해 약처분성을 가정한 의미가 없어지게 된다(Fare et al., 1985). 따라서 강처분성과 약처분성의 구분이 가능한 방사적 측정기법을 적용하여 서울시 간선버스노선의 상대적 효율성을 추정하였다.

3) 분석모형 구축

분석대상의 생산가능집합에 대한 4가지 가정들과 수정 BCC 모형을 기반으로 본 연구의 분석모형을 구축하였으며 이는 식(5)와 같다.

$$\text{Min } \theta \tag{5}$$

제약조건

$$\sum_{j=1}^n z_j x_i \leq x_k \theta,$$

$$\sum_{j=1}^n z_j y_r^{good} \geq y_k^{good}, \quad \sum_{j=1}^n z_j \overline{y_s^{bad}} = \overline{y_k^{bad}},$$

$$\sum_{j=1}^n z_j = 1, \quad z_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n.$$

여기서,

θ : 효율성 추정치 및 모형의 의사결정변수

y_r^{good} : 유익산출물, $\overline{y_s^{bad}}$: 유해산출물

x_i : 투입요소

z_j : 결정계수

n : 분석대상의 수

4) 토빗회귀분석

분석결과인 효율성 추정치는 상한이 1로 제한되기 때문에 일반적인 최소자승법을 사용하여 회귀계수를 추정할 경우 결과가 왜곡될 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서는 종속변수의 범위가 제한되어 있는 회귀식을 추정하는데 적합한 토빗회귀분석을 수행하여 효율성의 결정요인을 검토하였다.

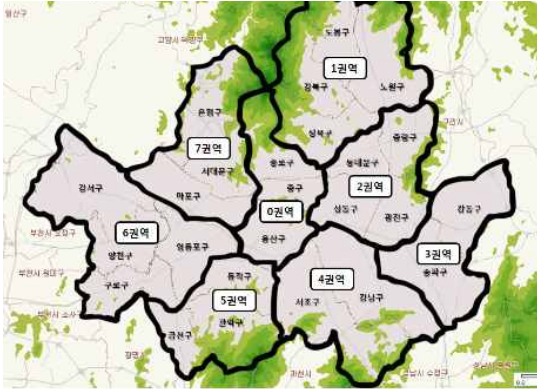
IV. 효율성 평가 및 해석

1. 효율성 추정결과

2009년 서울시 간선버스 113개 노선을 대상으로 유해산출물을 고려한 효율성을 추정하였으며, 분석에 사용된 권역별 노선수 및 서울시 권역구분도는 각각 <표 8>과 <그림 2>와 같다.

<표 8> 권역별 노선수(총 113개 노선)

권역	노선수
1권역: 도봉구, 강북구, 성북구, 노원구	32개 노선
2권역: 동대문구, 중랑구, 성동구, 광진구	12개 노선
3권역: 강동구, 송파구	11개 노선
4권역: 서초구, 강남구	16개 노선
5권역: 동작구, 관악구, 금천구	10개 노선
6권역: 강서구, 양천구, 영등포구, 구로구	15개 노선
7권역: 은평구, 마포구, 서대문구	17개 노선



<그림 2> 서울시 권역구분도

본 연구에서는 유해산출물 고려여부에 따라 2개 모형으로 구분하여 분석대상의 효율성을 추정하였으며 각 모형에 대한 분석결과는 <표 9>와 같다.

분석결과 유해산출물을 반영한 모형의 효율성 추정치가 유해산출물을 반영하지 않은 모형에 비해 평균 효율성 추정치가 높게 산출되었으며, 효율적인 노선수 또한 9%가량 증가한 것으로 분석되었다. 이와 같은 결과는 CO₂ 배출량과 같은 유해산출물을 고려하여 효율성을 추정하는 것이 총 승객수와 서비스 만족도 점수 등과 같은

<표 9> 모형별 분석대상의 효율성 추정결과

구분	유해산출물 미반영	유해산출물 반영
최대값	1.000	1.000
최소값	0.722	0.784
평균	0.879	0.928
표준편차	0.086	0.062
효율적인 노선수	26(23%)	36(32%)

주: ()는 전체 분석대상 수 대비 효율적인 노선수 비율임.

<표 10> 권역별 평균 효율성 추정치

권역	평균 효율성 추정치	효율적인 노선수
1권역	0.942	12(38%)
2권역	0.914	3(25%)
3권역	0.955	5(45%)
4권역	0.917	4(25%)
5권역	0.928	2(20%)
6권역	0.921	5(33%)
7권역	0.909	5(29%)

주: ()는 전체 분석대상 수 대비 효율적인 노선수 비율임.

유익산출물만을 기준으로 추정하는 것에 비해 유해산출물을 줄이려고 노력하는 분석대상을 보다 높게 평가하고 있음을 의미한다.

즉 분석대상인 서울시 간선버스노선을 운영·관리하는 모든 시내버스업체들은 해당 노선의 경쟁력 제고와 이에 따른 유익산출물을 증가시키기 위해 CO₂ 배출량을 최소화하기 위한 노력을 기울이고 있으며 이러한 노력이 분석결과인 효율성 추정치에 반영되어 규모의 경제 등과 같은 외형에 의해 결정되던 효율성의 차이가 줄어들음을 의미한다. 따라서 해당 모형의 분석결과는 유해산출물을 반영하지 않은 모형에 비해 합리적인 것으로 판단되며, 이후의 분석은 유해산출물을 고려한 수정 BCC 모형의 분석결과를 통해 수행하였다.

분석결과를 토대로 서울시 권역별 평균 효율성 추정치를 비교한 결과는 <표 10>과 같으며, 3권역을 운행하는 버스노선의 평균 효율성 추정치가 가장 높은 것으로 분석되었다.

또한 효율적이지 못한 분석대상을 개선하기 위해 벤치마킹해야 할 준거집단에 참조횟수를 권역별로 살펴보

<표 11> 권역별 평균 참조횟수

권역	평균 참조횟수	최다 참조 노선
1권역	5회	130번 노선(47회)
2권역	2회	240번 노선(9회)
3권역	6회	340번 노선(28회)
4권역	3회	412번 노선(22회)
5권역	6회	502번 노선(55회)
6권역	3회	600번 노선(38회)
7권역	3회	750번 노선(27회)

<표 12> 권역별 평균 투입요소 절감비율

권역	D4	D5	D9	D10
1권역	-6%	-6%	100%	-7%
2권역	-10%	-10%	177%	-9%
3권역	-6%	-7%	147%	-6%
4권역	-10%	-11%	144%	-11%
5권역	-9%	-10%	95%	-7%
6권역	-9%	-8%	247%	-8%
7권역	-11%	-11%	186%	-9%
평균	-9%	-9%	157%	-8%

주: D4: 총 보유비(백만원), D5: 총 가동비(백만원), D9: 중앙차로 정류장수 비율(%), D10: 타노선과의 중복길이(km)

면 <표 11>과 같다. 참조횟수가 높다고 해서 가장 효율성이 높은 노선이라고 평가할 수는 없지만 준거집단은 생산요소의 조합에 있어 우수하지 못한 노선들이 벤치마킹의 대상으로 삼아야 할 노선이라는 점에서 중요한 의미를 가진다.

한편 비효율적인 분석대상의 효율성을 개선하기 위한 투입요소의 절감비율을 권역별로 살펴보면 <표 12>와 같다.

분석결과 서울시 간선버스노선의 운영에 사용되는 총 보유비와 총 가동비, 그리고 타노선과의 중복길이는 모두 평균적으로 약 10%의 절감이 가능한 것으로 나타났으며, 중앙차로 정류장수는 평균적으로 약 160%를 증가시켜야 하는 것으로 분석되었다.

이와 같이 효율성을 개선하기 위한 중앙차로 정류장수의 증가비율이 크게 나타난 이유는 현재 노선별·권역별 중앙차로 정류장수의 편차가 크기 때문이며, 중앙차로 정류장수에 대한 개선을 통해 현재 약 20%인 서울시 전체 간선버스노선의 평균 중앙차로 정류장수 비율을 약 30%까지 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다.

2. 결정요인 분석결과

1) 상관분석

변수들 간의 상관관계의 정도를 통계적으로 측정하는 방법 중에서 가장 많이 사용하는 것은 피어슨의 상관계수(correlation coefficient)이며 통계적 정의식은 식 (6)과 같다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{(n-1)s_X s_Y} \tag{6}$$

여기서,

r : 피어슨 상관계수

n : 표본의 크기

s_X: 변수 X의 표준편차

s_Y: 변수 Y의 표준편차

토빗회귀모형의 독립변수인 총 보유비와 총 가동비, 그리고 중앙차로 정류장수 비율과 타노선과의 중복길이에 대해 모형구축에 앞서 상관분석을 수행한 결과는 <표 13>과 같다. 분석결과 총 보유비와 총 가동비의 상관계수는 약 95%로 매우 높은 상관관계를 보이고 있으며,

<표 13> 피어슨 상관계수 분석 결과

구분	D4	D5	D9	D10
D4	1.000	0.947	0.328	0.345
D5	0.947	1.000	0.299	0.313
D9	0.328	0.299	1.000	0.454
D10	0.345	0.313	0.454	1.000

주1: D4: 총 보유비(백만원), D5: 총 가동비(백만원), D9: 중앙차로 정류장수 비율(%), D10: 타노선과의 중복길이(km)

주2: 상관계수는 0.01 수준(양쪽)에서 유의함.

본 연구에서는 두 변수 중 하나를 제거함에 있어 상대적으로 적은 비용의 합계를 내포하고 있는 총 가동비를 제거하였다.

2) 토빗회귀분석

유해산출물을 고려한 수정 BCC 모형을 통해 추정된 효율성 점수를 종속변수로, 모형의 투입요소인 총 보유비와 중앙차로 정류장수 비율, 그리고 타노선과의 중복길이를 독립변수로 구성한 토빗회귀식의 모수를 추정한 결과는 <표 14>와 같다.

모수추정 결과 총 보유비와 중앙차로 정류장수 비율은 모두 1% 유의수준에서 통계적 유의미를 가지는 것으로 나타났으며, 타노선과의 중복길이는 유의수준이 10% 이상으로 나타나 효율성의 결정요인에서 제외하였다. 효율성의 결정요인 중 인건비와 유지비, 그리고 관리비와 정비비 등이 포함된 총 보유비는 업체의 보유대당 운행거리와 관련된 요인이며, 중앙차로 정류장수 비율은 운행속도와 관련된 요인이라 할 수 있다.

이와 같은 분석결과를 바탕으로 서울시 간선버스노선의 효율성을 현재보다 더욱 향상시키기 위해서는 투입요소의 합리적인 절감방안 마련과 함께 버스의 운행속도를 증가시켜 보유대당 승객수를 높일 수 있는 정책들인 버스전용차로 확대 또는 노선별 중앙차로 정류장수 증대, 그리고 혼잡통행료 부과방안 등을 시행할 필요가 있다.

<표 14> 토빗회귀분석 결과

독립변수	계수	표준오차	t 값	유의확률
총 보유비	0.009*	0.001	14.40	0.000
중앙차로 정류장수 비율	0.007*	0.003	2.73	0.007

주1: *p < 0.01

V. 결론 및 향후연구과제

본 연구에서는 유해산출물을 고려한 수정 BCC 모형을 기반으로 2009년 서울시 113개 간선버스노선에 대한 효율성을 추정하였으며, 분석결과 유해산출물을 반영한 모형의 효율성 추정치가 유해산출물을 반영하지 않은 모형에 비해 평균 효율성 추정치가 높게 산출되었다.

이러한 결과를 통해 분석대상을 운영·관리하는 모든 시내버스업체들은 해당 노선의 경쟁력을 제고하기 위해 유익산출물을 증가시키는 동시에 CO2 배출량을 최소화하기 위한 노력을 기울이고 있으며 이러한 노력이 분석결과에 반영되어 규모의 경제 등과 같은 외형에 의해 결정되던 효율성의 차이가 줄어들음을 알 수 있다.

또한 추정된 효율성 점수를 종속변수로, 그리고 모형의 투입요소인 총 보유비와 중앙차로 정류장수 비율, 타노선과의 중복길이를 독립변수로 구성한 토빗회귀식을 통해 효율성에 영향을 미치는 결정요인을 분석하였다.

분석결과 총 보유비와 중앙차로 정류장수 비율은 모두 1% 유의수준에서 통계적 유의미를 가지는 것으로 나타났다. 타노선과의 중복길이는 유의수준이 10% 이상으로 나타나 효율성의 결정요인에서 제외하였다.

해당 결과를 바탕으로 서울시 간선버스노선의 효율성을 현재보다 더욱 향상시키기 위해서는 투입요소의 합리적인 절감방안 마련과 함께 보유대당 승객수를 높일 수 있는 정책들을 시행할 필요가 있으며, 보다 의미있는 정책적 시사점을 확보하기 위해서는 버스노선의 접근성 또는 연계성과 같은 정성적인 서비스 특성자료를 활용하여 분석을 수행할 필요가 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김성수·오미영·김민정(2002), “자료포락분석기법(DEA)을 이용한 서울 시내버스운송업체의 효율성과 규모의 경제성 분석”, 환경논총, 제40호, pp101~113.
2. 오미영·김성수·김민정(2002), “자료포락분석기법(DEA)을 이용한 서울 시내버스운송업체의 효율성 분석”, 대한교통학회지, 제20권 제2호, 대한교통학회, pp.59~68.
3. 최인영(2004), “서울시내버스 운송업체의 효율성과 생산성 변화(1996-2000)에 관한 연구”, 서울대학교 환경대학원 석사학위논문.
4. 오미영·김성수(2005), “서울의 대중교통체계 개편에 따른 시내버스업체의 생산성 변화”, 대한교통학회지, 제23권 제7호, 대한교통학회, pp.53~61.
5. 오미영(2008), “서울의 대중교통체계 개편에 따른 시내버스업체의 생산성에 관한 연구 : 사고비용을 포함한 자료포락분석기법을 인용하여”, 서울대학교 환경대학원 박사학위논문.
6. 한진석·김혜란·고승영(2009), “자료포락분석을 이용한 서울시 간선버스노선 효율성 평가”, 대한교통학회지, 제27권 제6호, 대한교통학회, pp.45~53.
7. Ali, A.I., L.M. Seiford(1990), “Translation Invariance in Data Envelopment Analysis”, Operational Research Letters 9, pp.403~405.
8. Tone, K. and Sawada, T.(1991), “An Efficiency analysis of public versus private bus transportation enterprises”, In: Twelfth IFROS International Conferences on Operational Research, pp.357~365.
9. Xuehao Chu and Gordon J. Fielding and Bruce W. Lamar(1992), “Measuring Transit Performance using Data Envelopment Analysis”, Transportation Research A, Vol. 26A, No. 3, pp.223~230.
10. R. Levaggi(1994), “Parametric and Non Parametric Approach to Efficiency: The Case of Urban Transport in Italy”, Studi-Economici 49 (53), pp.67~88.
11. Obeng. K(1994), “The Economic Cost of Subsidy-Induced Technical Inefficiency”, International Journal of Transport Economics, Vol. 21, No. 1, pp.3~20.
12. Kerstens, K.(1996), “Technical Efficiency Measurement and Explanation of French Urban Transit Companies”, Transportation Research A, Vol. 30, pp.431~452.
13. Kerstens, K.(1999), “Decomposing Technical Efficiency and Effectiveness of French Urban Transport”, Annales d’Economie et de Statistique, (54), pp.129~155.
14. Nolan, J. F.(1996), “Determinants of Productive Efficiency in Urban Transit”, Logistics and Transportation Review, Vol. 32,

- pp.319~342.
15. Viton, P. A.(1997), "Technical Efficiency in Multi-mode Bus Transit: A Production Frontier Analysis", *Transportation research B*, Vol. 31, pp.23~39.
 16. Viton, P. A.(1998), "Changes in Multi-mode Bus Transit Efficiency, 1998-1992", *Transportation*, Vol. 25, pp.1~21.
 17. Cowie, J. and Asenova, D.(1999), "Organization Form, Scale Effects and Efficiency in the British Bus Industry", *Transportation*, Vol. 26, pp.231~248.
 18. N. Husain, M. Abdullah and S. Kuman(2000), "Evaluating public sector efficiency with data envelopment analysis (DEA): a case study in road transport department, Selangor, Malaysia, *Total Quality Management* 11 (2000) (4/5), pp.S830-S836.
 19. Carotenuto et al.(2001), "Public Transportation Agencies Performance: an Evaluation Approach Based on Data Envelope Analysis", *NECTAR Conference no European Startegies in The Globalising Markets: Transport Innovations, Competitiveness and Sustainability in the Information Age*, 16-18 May 2001, Espoo, Finland.
 20. Nolan, J. F., Ritchie, P. C. and Rowcroft, J. R.(2001), "Measuring Efficiency in the Public Sector Using Non-parametric Frontier Estimator: A Study of Transit Agencies in the USA", *Applied Economics*, Vol. 33, pp.913~922.
 21. James Odeck and Abdulrahim Alkadi(2001), "Evaluating efficiency in the Norwegian bus industry using data envelopment analysis, *Transportation* 28, pp.211~232.
 22. Maria P. Boile(2001), "Estimating Technical and Scale Inefficiencies of Public Transit Systems, *Journal of Transportation Engineering*, pp.187~194.
 23. Vicente Pina, Lourdes Torres(2001), "Analysis of the efficiency of local government services delivery. An application to urban public transport", *Transportation Research Part A* 35, pp.929~944.
 24. Jonathan Cowie(2002), "Acquisition, efficiency and scale economies: an analysis of the British bus industry", *Transport Reviews*, Vol. 22, no. 2, pp.147~157.
 25. Seiford L. M., Joe Zhu(2002), "Modeling Undesirable Factors in Efficiency Evaluation", *European Journal of Operational Research*, 142, pp.16~20.
 26. Matthew G. Karlaftis(2003), "Investigating transit production and performance a programming approach", *Transportation Research Part A* 37, pp.225~240.
 27. Matthew G. Karlaftis(2004), "A DEA approach for evaluating the efficiency and effectiveness of urban transit systems", *European Journal of Operational Research* 152, pp.352~364.
 28. Triantis, K. P.(2004), "Engineering applications of DEA. In W. W. Cooper, L. M. Seifor, & J. Zhu (Eds.), *Handbook on data envelopment analysis*", Kluwer Academic Publications, pp.401~441.
 29. Dimitrios A. Tsamboulas(2006), "Assessing Performance under Regulatory Evolution: A European Transit System Perspective", *JOURNAL OF URBAN PLANNING AND DEVELOPMENT*, pp.226~234.
 30. James Odeck(2008), "The effect of mergers on efficiency and productivity of public transport services", *Transportation Research Part A* 42, pp.696~708.
 31. Breno Ramos Sampaio, Oswaldo Lima Neto, Yony Sampaio(2008), "Efficiency analysis of public transport systems: Lessons for institutional planning", *Transportation Research Part A* 42, pp.445~454.
 32. Tandon, S. (2006), "Performance Measurement of Bus Routes using Data Envelopment Analysis", Thesis, Univ. of

Illinois at Chicago, Chicago.

33. Darold T. Barnum, Sonali Tandon, and Sue McNeil, P. E., M.ASCE(2008), "Comparing the Performance of bus Routes after Adjusting for the Environment Using Data Envelopment Analysis", Journal of

Transportation Engineering, pp.77~85.

34. Yong Lao and Lin Liu(2009), "Performance evaluation of bus lines with data envelopment analysis and geographic information systems", Computers, Environment and Urban Systems 33, pp.247~255.

☞ 주 작 성 자 : 한진석

☞ 교 신 저 자 : 한진석

☞ 논문투고일 : 2010. 6. 22

☞ 논문심사일 : 2010. 8. 17 (1차)

2010. 9. 30 (2차)

☞ 심사판정일 : 2010. 9. 30

☞ 반론접수기한 : 2011. 2. 28

☞ 3인 익명 심사필

☞ 1인 abstract 교정필