

지하철 효율성 평가를 위한 DEA-AR/AHP 모형 설계*

심광식** · 김재윤**†

DEA-AR/AHP Model Design for Efficiency Evaluation of Metropolitan Rapid Transit

Gwang Sic Sim** · Jae Yun Kim**

■ Abstract ■

Data Envelopment Analysis (DEA) is a methodology of computing the relative efficiency of each decision making unit (DMU) by comparing it with other DMUs having similar input and output structure. In this paper, we compare the efficiency of Korean rail transit corporations using DEA. To do this, we design a DEA-AR/AHP model, and evaluate efficiency by comparing the subway operating agencies of six big cities. The analysis reveals that Seoul Metro and Seoul city railroad construction turn out to be the most efficient groups. The result of this research can provide helpful information for effective management in a domestic subway operating agency.

Keyword : Data Envelopment Analysis, Assurance Region, Analytic Hierarchy Process, Efficiency, Subway

1. 서 론

1974년 8월 개통된 서울 지하철 1호선을 시작으로

우리나라 지하철은 2008년 10월 현재 서울·부산·대구·인천·광주·대전에서 16개 노선, 503.9km를 운행 중이다. 지하철은 환경 친화적 교통수단이

논문접수일 : 2009년 03월 03일 논문게재확정일 : 2009년 07월 25일

논문수정일(1차 : 2009년 05월 26일)

* 이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구된 결과임(KRF-2007-332-B00179).

** 전남대학교 경영대학 경영학부

† 교신저자

〈표 1〉 전국 7대 특별시/광역시 대중교통 1일 이용률¹⁾

구 분	인 구 (명)	시내버스			지하철		
		운행횟수(회)	1일 이용인원(명)	이용비율(%)	운행횟수(회)	1일 이용인원(명)	이용비율(%)
서울	10,181,166	54,871	5,461,896	53.6	4,262	6,219,426	61.1
부산	3,611,992	18,101	1,377,111	38.1	1,032	666,697	18.5
대구	2,496,115	9,203	762,676	30.6	624	296,799	11.9
인천	2,624,391	20,103	1,033,840	39.4	304	195,873	7.5
광주	1,407,798	5,318	441,590	31.4	272	31,112	2.2
대전	1,466,158	5,049	389,881	26.6	248	35,147	2.4
울산	1,092,494	3,634	282,133	25.8	-	-	-
평균	3,268,588	16,611	1,392,732	35.1	1,124	1,240,842	17.3

고 승객의 통행 소요시간을 단축시키며 대기오염·소음·진동으로 인한 피해가 적고 에너지 절감에도 효과적이어서 사회적 비용을 절감하는데 중요한 교통수단으로 인식되고 있다. 또한, 지하철의 사회적 제적 가치²⁾는 계량화가 가능한 차량운행비용 절감분, 교통사고비용 감소분, 대기오염비용 감소분, 교통혼잡비용 감소분, 형평성 향상분 등과 계량화가 쉽지 않은 지역개발효과, 주차비용 절감분 등을 포함한다. 특히, 지하철은 지난 30여년 간 대도시 교통체계의 핵심수단으로 자리매김하였고 수송 효율성이 매우 높다는 특징을 갖는다. 이는 <표 1>의 자료에서 확인할 수 있다. <표 1>은 2006년 12월 기준 전국 7대 특별시/광역시 대중교통 1일 이용률을 보인 것이다. 표에서 보는 바와 같이, 서울의 경우 지하철의 이용비율은 시내버스의 이용비율보다 높으며, 평균적으로 지하철 이용비율은 시내버스 이용비율의 절반을 차지하고 각 지역의 지하철 이용비율도 차츰 상승하리라 예상된다.

지하철은 여러 가지 장점을 가짐에도 불구하고, 지하철 건설에 따른 재정문제가 심각하여 전국 지

하철 운영기관들의 부채는 상당히 높은 수준으로 알려져 있다.³⁾ 이러한 재정난은 서비스 개선을 위한 투자 여력을 저하시켜 이용객들의 서비스 욕구를 충족시키지 못하고, 지하철 이용을 기피하는 요인으로 작용하게 될 수 있다. 따라서 지하철 운영기관의 경영적자 문제는 지하철의 효율적인 운영을 위해서라도 반드시 개선되어야 할 문제이다. 하지만 지하철 운영기관들은 도산의 위험이 없기 때문에 민간 기업에 비해 비용절감 등을 통해 경영 효율성을 제고하고자 하는 동기가 미흡하고, 정부의 인사와 경영에 대한 간섭 및 노조의 압력 등 때문에 경영 자율성이 낮아 스스로 경영성과를 개선하는데 한계가 있는 것으로 인식되어 왔다[3]. 행정안전부(과거, 행정자치부)는 지하철 운영기관들의 이러한 문제점을 개선하고, 기업성과 공익성을 높인다는 취지에서 지하철 운영기관을 포함한 지방 공기업의 경영실적 종합평가를 실시하고 있으며, 국

1) 교통안전공단(<http://ptc.kotsa.or.kr>) 대중교통현황조사 : 시내버스 1일 이용인원은 농어촌버스 및 마을버스 이용 인원을 포함한 수치임.

2) 서울도시철도노동조합, 서울지하철 개혁방안 연구보고서(2008).

3) 2008년 10월 8일 서울시가 국회 행정안전위원회 한나라당 안경률 의원에게 제출한 자료에 따르면 2003년 이후 2007년까지 5년 간 서울메트로(1~4호선)와 서울도시철도공사(5~8호선)의 적자 누적 액은 2조 2142억 원이다. 또한 2008년 6월 30일 현재 서울메트로의 부채총액은 2조 866억 원, 서울도시철도공사 총 부채액은 1조 2806억 원으로, 서울지하철 전체 부채가 3조 3672억 원에 달하고 있다.

토해양부(과거, 건설교통부)는 대중교통의 합리적 지원 근거를 마련하기 위해 지하철 등 대중교통 운전자 등을 대상으로 경영 및 서비스 평가를 하고 있다. 그러나 그 평가결과는 운영기관이 통제 가능한 내부요인 뿐만 아니라 통제할 수 없는 외부요인의 영향 등도 함께 포함되어 있어, 평가대상 기관들이 이에 대한 결과를 수용하지 못하거나 경영개선활동 수립을 위한 자료로 활용하지 못하고 있다. 따라서 평가대상 기관의 경영성과 또는 효율성(eficiency)을 공정하게 평가하기 위해서는 통제할 수 없는 외부요인의 영향을 배제하고 내부요인만의 영향으로 각 기관별 절대적 비교가 아닌 상대적인 효율성을 평가할 필요가 있다.

이를 위하여, 본 연구에서는 자료포락분석(Data Envelopment Analysis : DEA) 모형을 방법론으로 사용하여, 전국 6개 도시의 지하철 운영기관별 상대적 효율성을 평가하고자 한다. DEA 모형은 비영리적 의사결정단위(Decision Making Unit : DMU)의 상대적 효율성을 측정할 목적으로 개발된 방법이다[28]. 이 모형은 투입 및 산출구조가 유사한 기업과 비교하여 평가대상 DMU의 상대적 효율성을 계산할 때, 평가 항목에 대한 가중치를 사전에 할당하지 않고 모형내에서 내재적으로 결정하며, 관측된 데이터의 단위를 통일하거나 가공하지 않고 그대로 이용하여 효율성을 측정할 수 있다는 장점이 있다[17]. 또한 비효율적인 DMU의 비효율성 정도를 양적으로 제시하여 효율성 개선을 위해 실무적으로 유용한 정보를 제공할 수 있다.

그러나 전통적인 DEA 모형은 다음과 같은 단점을 갖는다. 첫째, DEA 모형에 의해 효율적이라고 판별된 과제들 간의 우열에 대하여 변별력을 가질 수 없다. 특히, 평가대상 기관의 수보다 평가기준의 수가 많은 경우 대부분의 사업이 효율적이라는 결과가 나올 가능성이 많으므로 변별력에 문제가 생기게 된다[1]. 이러한 문제점으로 인하여, 효율성 평가 결과가 평가 대상기관간의 서열을 부여하거나 이에 대한 예산지원의 등급을 결정하는데 있어서는 기초자료로 활용될 수 없다는 단점을 갖는다. 둘째,

DEA 모형은 정성적인 평가항목을 처리하기 어렵다. 예를 들어, 평가항목으로 사용되는 요소들은 경우에 따라서는 점수일 수도 있고, 계량화하기 어려운 다양한 요소들이 존재할 수 있는데 이들을 모형에서 수용하기 어렵다. 셋째, DEA 모형에서는 평가를 수행하는 전문가들의 의견이 반영되기 힘들다는 단점이 있다. 이러한 DEA 모형 자체가 내포하고 있는 문제점들을 해결하기 위하여 모형 내부에 제약식을 추가하는 DEA-AR(Assurance Region) 기법에 관한 연구가 진행되었고, AR의 범위 지정을 위해 체계적으로 접근을 시도한 DEA-AR과 AHP (Analytic Hierarchy Process)의 결합 모형에 관한 연구가 꾸준히 진행되어 오고 있다. 본 연구에서는 우리나라 지하철 운영기관의 효율성을 평가하기 위하여 DEA-AR과 AHP를 결합한 모형을 개발하고, 개발한 모형을 방법론으로 하여 전국 6개 도시의 지하철 운영기관의 효율성을 분석하고자 한다.

본 연구는 총 5개의 장으로 구성되어 있다. 제 1장은 서론으로 연구목적과 방법, 연구의 구성에 대해서 기술하고 제 2장은 DEA-AR/AHP 모형과 선행연구를 소개하며, 제 3장은 분석에 사용될 DMU 및 투입/산출변수에 대해 설명하고 제 4장에서는 분석결과를 제시한다. 마지막으로 제 5장에서는 분석 결과를 요약정리하고, 결론 및 본 연구의 한계점을 제시한다.

2. 이론적 배경과 연구현황

2.1 CCR/BCC 모형

DEA 모형은 여러 가지 모형들이 있다. 이 중에서 Charnes, Cooper, and Rhodes[28]의 CCR 모형과 Banker, Charnes, and Cooper[23]의 BCC 모형이 대표적이며, 본 연구에서는 산출물을 고정하고 투입공간에서의 효율성을 측정하는 투입지향(input-oriented) CCR-I 모형을 중심으로 연구를 전개하였다. 또한 BCC-I 모형에서의 효율성도 측정하여 비교하고자 하는 DMU의 규모효율성도 분

석한다. CCR과 BCC 모형은 생산가능집합에 대한 가정에 약간의 차이가 존재한다. DEA 모형들은 처분성(disposability), 볼록성(convexity), 규모수익(returns to scale : RTS)에 관한 가정을 하고 있다. CCR 모형은 생산가능집합에 대해 강제처분성(strong disposability), 볼록성, 불변규모수익의 가정을 부여하고, BCC 모형은 강제처분성, 볼록성, 변동규모수익(variable returns to scale)의 가정을 부여하고 있다⁴⁾.

CCR 모형은 표현되는 형태에 따라 비율모형(ratio model), 승수모형(multiplier model), 포락모형(envelopment model)등으로 구별된다. CCR 비율모형은 매우 직관적인 해석이 가능하고 이해하기 쉬우며 CCR 비율모형에 변수변환을 취하면 CCR 승수모형이 된다. CCR 승수모형은 선형계획 모형이기 때문에 쌍대정리를 사용하면 CCR 포락모형으로 표현할 수 있다. 아래 식 (1)은 k 번째 DMU의 효율성을 구하기 위한 CCR 승수모형을 표현한 것이다. 여기서, s 는 산출변수의 수, m 은 투입변수의 수, n 은 DMU 수, v_i 와 u_r 은 각각 측정하고자 하는 DMU의 투입 및 산출 가중치로 해당 DMU의 효율성 값을 극대화할 수 있는 가중치가 계산되어진다.

$$\begin{aligned} \text{Max.} \quad & \sum_{r=1}^s u_r y_{rk} & (1) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^m v_i x_{ik} = 1 \\ & \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0 \\ & u_r, v_i \geq 0 \quad r=1, 2, \dots, s; \\ & i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

BCC 모형은 CCR 모형으로 DMU의 비효율성 원인을 파악하지 못하기 때문에 DMU에 대한 규모의 효율성을 찾기 위한 모형이다. 식 (2)는 k 번째 DMU

의 효율성을 구하기 위한 BCC 승수모형을 표현한 것이다. 목적함수에 있는 U_0 는 규모에 대한 보수를 나타내는 지표로서 규모의 효율성을 파악하는 지표로 사용된다. BCC 모형의 효율성 값은 주어진 생산 규모에서의 순수한 기술 효율성을 의미하고, 규모의 효율성은 생산규모가 최적 규모의 상태인가를 측정하는 것을 의미한다[11]. 규모의 효율성은 CCR 모형의 효율성 값을 BCC 모형에서 얻은 효율성 값으로 나누어 구할 수 있다. 이렇게 구한 규모의 효율성 값과 기술의 효율성 값을 비교하여 비효율의 원인을 찾아낼 수 있으며, 효율성 개선을 위한 방향을 제시할 수 있다. 일반적으로 비효율적인 DMU는 CCR 모형에서 얻은 효율성 값이 BCC 모형에서 얻은 값보다 작다[13].

$$\begin{aligned} \text{Max.} \quad & \sum_{r=1}^s u_r y_{rk} - U_0 & (2) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^m v_i x_{ik} = 1 \\ & \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - U_0 \leq 0 \\ & u_r, v_i \geq 0 \quad r=1, 2, \dots, s; \\ & i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

2.2 AR 모형

DEA 모형의 가장 큰 특징은 평가항목들의 가중치에 대한 정보가 필요하지 않다는 점이다. 그러나 때로는 이러한 점이 DEA 모형의 단점으로 작용하기도 한다. 즉, DEA 모형은 단순히 DMU가 효율적인지 또는 비효율적인지에 대한 여부만을 판별해 내기 때문에 효율적이라고 판별된 기관들 간의 우열 또는 순위에 대하여 변별력을 갖지 못한다. 다수의 DMU가 효율적이라고 판별된다면 DEA 모형이 아무리 객관적이라 하더라도 그 모형의 효용이 그다지 크지 않을 것이다. 만약, 지하철 운영기관의 효율성 평가 결과를 중앙 정부의 운영기관에 대한 예산 지원 및 기타 관련 정책 수립에 반영하고자

4) DEA 모형의 가정에 관해서는 Emmanual Thanassoulis(2003), "Introduction to The Theory and Application of Data Envelopment Analysis," Kluwer Academic Publishers를 참조.

한다면, 이러한 문제점들은 반드시 해결해야 할 것이라 생각된다. DEA 모형의 변별력 문제를 해결하기 위하여 가중치가 가질 수 있는 값의 범위를 다양한 방법에 의하여 제한할 수 있다[34]. 본 연구에서는 여러 방법들 중에서 Thompson et al.[38]에 의해 개발된 AR(Assurance Region) 모형을 사용하고자 한다. AR 모형을 사용하는 것은 DEA 모형의 변별력을 높일 수 있을 뿐만 아니라, 평가 대상기관의 효율성 측정을 위한 전문가의 견해를 반영할 수 있는 수단이 되기도 한다. 식 (3)은 DEA-AR 승수모형으로 DMU의 투입 및 산출 가중치인 v_i 와 u_r 의 범위 제약이 있다는 것이 특징이다. 식에서 OU_r 과 OL_r 은 산출변수 가중치의 상한 및 하한을, IU_i 와 IL_i 는 투입변수 가중치의 상한 및 하한을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Max. } \sum_{r=1}^s u_r y_{rk} & (3) \\
 & \text{s.t. } \sum_{i=1}^m v_i x_{ik} = 1 \\
 & \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0 \\
 & u_1 > 0, v_1 > 0 \quad OL_r u_1 \leq u_r \leq OU_r u_1, \\
 & IL_i v_1 \leq v_i \leq IU_i v_1 \quad r=2, 3, \dots, s; \\
 & i=2, 3, \dots, m; j=1, 2, \dots, n
 \end{aligned}$$

AR 측정치(가중치의 한계값)를 구하는 체계적 방법으로 본 연구에서는 AHP 기법을 이용한다. AHP는 Saaty[35]에 의하여 개발된 이래 의사결정과정의 목표에 따라 체계화시키고 각 목표 또는 의사결정 기준간의 가중치를 구하기 위한 접근법으로 활용되어져 왔다[19]. AHP는 의사결정자의 오랜 경험과 판단을 바탕으로 하고 있기 때문에 정량적인 평가항목과 함께 정성적인 평가항목들도 비교적 쉽게 처리할 수 있는 방법이다[20].

2.3 연구현황

DEA 모형에 대한 연구들은 크게 모형 자체에 대

한 연구와 모형에 대한 적용성을 검증하여 DMU의 효율성을 측정하고 관리 증대방안을 모색하는 연구로 나눌 수 있다. 또한 모형 자체에 대한 연구들은 기본 모형(CCR 모형과 BCC 모형), AHP 모형과의 결합함으로써 문제해결을 시도한 DEA/AHP 모형, 모형 내부에 제약식을 추가한 DEA-AR 모형, 그리고 AR의 범위 지정을 위해 체계적으로 접근을 시도한 DEA-AR/AHP 모형에 관한 연구로 나눌 수 있다[1]. 한편, DEA의 적용성을 검증한 연구들은 매우 다양한 연구들이 진행되어 오고 있다⁵⁾. 본 연구에서는 연구주제와 직접적으로 관련 있는 분야, 즉 DEA 모형 자체의 연구에서는 DEA와 AR, AHP를 결합한 연구 내용을 개략적으로 살펴보고, DEA 모형의 적용성 연구에서는 지하철 또는 대중교통수단 운영기관의 효율성 평가에 관한 연구들만을 조사하여 제시하고자 한다.

2.3.1 DEA-AR/AHP 결합모형에 관한 연구

Tone[29]⁶⁾은 도쿄의 도시이전과 관련하여 가장 효율적인 도시의 위치 선정을 평가하기 위하여 DEA-AR 모형과 AHP 모형의 접목을 시도하였다. 이 연구는 DEA-AR/AHP 모형을 체계적으로 설계했다는 데 의의가 있으나, 투입과 산출변수의 정밀한 보정이 부족하고 모형이 단순하다는 문제점이 있다. 또한 기준설정의 체계적 접근방식으로 논리적 타당성을 확보하지 못하였다는 한계점을 가지고 있다. 임호순 등[19]은 연구개발사업의 평가 및 선정을 위한 DEA/AHP 통합모형을 개발하였다. 이들이 개발한 모형은 AHP 모형의 활용으로 평가항목이 지나치게 많은 경우 평가자에게 부담감이 가중된다는 점과 DMU가 상호종속적인 특성을 가지는 경우 이러한 특성을 고려하여 측정할 수 없다는 한계점이 있다. 홍석기[22]는 연구개발(R&D) 사업이

5) DEA Bibliography 사이트(<http://www.emp.pdx.edu/dea/deabib.html>)에서는 DEA 관련 학자, 이론, 가중치 등을 분류하여 논문리스트를 제공하고 있다.
6) 홍석기(2002)의 연구에 기술되어 있는 내용을 축약하여 재인용한 것임. 이 연구내용은 Cooper et al.(2000) (pp.169-174)에 수록되어 있음.

나 평가항목 군(群)이 서로 영향을 미치는 경우, 연구개발 사업 선정 평가를 위하여 CIDEA(Cross Impact Data Envelopment Analysis) 모형과 기존의 DEA 모형, DEA-AR 모형의 결과간 비교분석을 행함으로써 상호영향을 반영한 사전 연구개발 사업 선정 평가의 타당성과 유용성을 입증하였다. 그러나 AR 범위지정을 위해 AHP 모형을 이용하는데 있어 2명의 의견만을 수렴하여 객관성이 약하다는 점과 영역별 CIDEA 모형 적용시 전체의 DMU 수가 현저히 줄어드는 단점이 있다. 남인석 등[11]은 19개 정부출연연구기관의 상대적 효율성을 분석하기 위하여 DEA-AR과 AHP를 결합한 모형을 이용하였다. 그러나 각 기술 분야의 기술적 환경, 연구기관의 목적 등 정성적 항목을 반영하지 못하는 한계점을 갖고 있다.

비록 AR의 개념을 직접적으로 사용하지 않았으나, 본 연구에서 접근을 시도하고 있는 방향과 유사한 개념에서 진행된 몇 개의 연구들이 있다. Sinuany-Stern et al.[36]은 DEA 모형에 AHP 모형을 결합 시킴으로써 두 모형의 단점을 극복한 새로운 평가 모형을 제시하였다. 김민석[2]은 AHP와 DEA를 활용한 인터넷 쇼핑몰 평가방법을 제안하였으며, Yang and Kuo[39]은 제품의 기관설계 배치 대안들 중에서 가장 효율적인 배치안을 선정하기 위하여 AHP와 DEA의 결합을 시도하였다. 박길영 등[12]은 컨테이너항만의 국제 경쟁력을 생산 효율성 측면에서 살펴보기 위해서 일반적인 DEA 모형에 의한 결과와 AHP 모형의 변수별 가중치 접근기법을 이용하여 실증분석하고 유효성을 검증하였다. 김재홍[9]은 대안간 순위를 구하지 못하고 상대적 효율만 구한다는 DEA의 단점을 극복하기 위하여 AHP와 결합한 DMU의 효율순위를 산정하는 방법에 관한 이론적 연구를 수행하였다.

2.3.2 DEA 모형을 활용한 지하철 또는 대중교통수단 운영기관 효율성에 관한 연구

DEA 모형의 적용성 평가는 주로 금융기관(은행, 보험회사, 협동조합 등)을 대상으로 많이 수행되었

으며[7, 14, 21, 27, 33], 최근에는 병원, 소매업체, 공공기관, 그리고 인터넷 기업의 효율성 평가에도 활발히 적용되고 있다[6, 17, 24, 26, 37]. 그러나 본 연구에서 다루는 문제와 같이 DEA 모형을 적용하여 지하철 운영기관의 효율성 평가에 관한 연구는 매우 미흡하다. 따라서 여기에서는 지하철 운영기관을 포함하여 대중교통수단의 효율성을 평가한 여러 연구들을 살펴보고자 한다.

Bhattacharyya et al.[25]은 확률적 비용변경접근법(Stochastic Cost Frontier Approach)을 이용하여 인도의 공영 버스업체들을 대상으로 조직 유형별 생산적 효율성을 분석하였으며, Kim and Kim[31]은 확률적 비용변경접근법을 이용하여 서울시 지하철공사의 효율성을 판단하였다. DEA 모형을 이용하여 대중교통수단 기관들의 효율성을 평가한 연구들은 다음과 같다. 김성호 등[5]은 DEA 모형을 적용하여 세계철도협회(International Union of Railway)에서 발간하는 세계철도통계를 철도청에서 번역하여 발간한 통계연감(1997)에 회원으로 등록되어 있는 23개 철도를 표본으로 설정하고, 한국철도의 상대적 운영 효율성을 평가하고 분석하였다. 이 연구는 철도의 효율성을 평가하는데 DEA 모형을 이용했다는 점에서 의의가 있지만, 기본 모형인 CCR 모형을 이용하여 분석내용이 단순하다. 김민정, 김성수[3]는 DEA 모형과 확률적 비용변경접근법을 이용하여 우리나라 지하철 운영기관들의 효율성과 생산성을 분석하였다. 이 연구는 자료에 이상점과 외부 요인들에 의한 확률적 오차의 영향을 받았다 하더라도 통계적 검정을 할 수 없으며 지하철 운영기관 3개만을 대상으로 효율성을 평가했다는 단점이 있다. 이연식[18]은 DEA 모형을 이용하여 우리나라 철도산업체 두 곳의 상대적 효율성 지수를 추산하였다. 이 연구는 투입변수선정에 있어서 지하철 운영기관의 생산성에 영향을 미치는 변수들을 사용하지 않고 (-)비용인 부채를 사용하였다는 점과 2개의 운영기관만을 비교하여 제한적인 효율성만을 평가하였다는 한계점이 있다. 김재윤, 심광식[8]은 CCR 모형과 BCC 모형을 이용하여 2002년

부터 2005년까지 지하철 운영기관의 효율성을 평가하였다. 그러나 DEA 모형이 가질 수 있는 가치의 극단적인 선택을 방지할 별도의 방법이 없었고, 투입 및 산출변수의 선정에 대한 객관적 검증이 이루어지지 않았다.

한편, DEA 모형을 포함한 변경 접근법을 이용하여 도시내 대중교통부문의 효율성을 분석한 해외의 선행 연구들에 대한 개괄적인 설명은 De Borger et al.[30]를 참조할 수 있다. 오미영 등[15]과 김성수 등[4]은 DEA 모형을 이용하여 서울시내버스 운송업을 대상으로 효율성과 규모의 경제성을 분석하였으며, 토빗(Tobit) 회귀식을 추정하여 효율성에 영향을 미치는 요인들을 분석하였다.

3. DMU와 투입/산출변수

3.1 DMU 선정

효율성 측정에 참여하게 되는 지하철 운영기관의 수는 DEA 모형에서의 DMU가 된다. DMU를 선정할 때에는 DMU간 동질성(homogeneity)이 요구되며, 적절한 자유도 확보를 위하여 DMU 개수를 결정하는 것에 신중해야 한다[16, 17]. 대도시 지하철 운영기관은 동질성의 측면에서 DMU 선정 조건에 부합하지만, 각 도시별 지하철 개통일이 다르므로 효율성 측정을 위해 결정한 기간에 따라 DMU의 수가 서로 다르게 된다. 이와 관련하여, Cooper et al.[29]은 적절한 자유도의 확보를 위한 DMU의 수(n), 투입변수의 수(m), 산출변수의 수(s)의 관계는 $n \geq \max[m \times s, 3(m + s)]$ 의 식을 따르도록 제안하였다. 따라서 이와 관련한 특성 및 관계식을 고려하여 합리적인 DMU의 수를 결정할 필요가 있다.

6개 지하철 운영기관을 분석단위로 하여 효율성을 평가할 경우 적절한 자유도의 확보가 어렵기 때문에, 본 연구에서는 연도별 각 운영기관의 호선을 서로 다른 DMU로 선정하기로 하였다. 그리고 효율성 측정 기간을 2004년부터 2006년으로 하였다.

이렇게 되면 총 43개의 DMU를 확보할 수 있으며, 각 운영기관 및 호선의 효율성을 시계열 측면에서 분석할 수 있다는 특징을 갖는다. 동일한 기관의 연도별 효율성을 서로 다른 DMU로 선정한 것은 유럽 각국을 대상으로 1980~2003년 사이의 화물수송 효율성을 DEA로 분석한 Hilmola[32]의 연구에서도 찾아볼 수 있다.

다음으로, <표 2>를 통해 각 지역별 지하철 현황에 대하여 개략적으로 설명한다. 서울 지하철은 서울메트로(Metro)와 서울도시철도공사가 각각 4개의 호선을 나누어 운영중이다. 1974년 8월 서울역 청량리 구간을 개통으로 운영을 시작한 서울메트로는 서울시 인구증가와 더불어 노선을 계속 증축해나가 현재 1~4호선을 운영중이며, 나머지 5~8호선은 서울도시철도공사가 운영을 담당하고 있다. 부산은 1985년 첫 개통을 시작으로 1999년 2호선, 2005년 11월에는 3호선이 개통되어 시민교통편의를 제공하고 있으며, 인천은 서울지하철과 연계 되어 1개의 노선만을 운영함에도 불구하고 상당한 승객을 유치하고 있다. 대구는 2003년 화재사건 이후 지하철 승객이 감소하다 다시 회복세를 보이고 있고 2005년 10월 2호선이 개통되어 현재 2개 노선을 운영중이다. 광주 1호선만 개통된 상태이고 2004~2005년 미개통상태여서 분석대상에 포함되지 않았지만 대전지하철은 2006년 3월 1호선이 개통되어 운영중이다.

3.2 투입/산출변수의 선정

투입 및 산출변수를 결정하는 것은 DMU를 선정하는 것만큼 중요하다. 일반적으로 투입변수는 조직의 비용(cost)을 의미하며, 산출변수는 조직의 편익(benefit)을 의미한다고 볼 수 있다. DEA 모형은 총괄투입에 대한 총괄산출의 비율을 극대화하는 측면에서 평가 대상기관의 효율성을 평가하므로, 투입변수와 산출변수는 직·간접적으로 인과관계를 가지고 있어야 한다[10]. 또한 투입 및 산출변수들은 DMU의 기능과도 밀접한 관련성을 지녀야 한

〈표 2〉 국내 지하철 운영현황⁷⁾

구 분	노 선	연 장(km)	역수	사업비(억 원)	최초개통일
합계	16	503.9	480	268,874	-
서울 (8)	1호선	7.8	10	330	1974년 8월 15일
	2호선	60.2	50	10,712	1980년 10월 31일
	3호선	35.2	31	10,304	1985년 7월 12일
	4호선	31.7	26	8,315	1985년 4월 20일
	5호선	52.3	51	31,210	1995년 11월 15일
	6호선	35.1	38	25,496	2000년 8월 7일
	7호선	46.9	42	27,851	1996년 10월 11일
	8호선	17.7	17	8,502	1996년 11월 23일
	소 계	286.9	265	122,720	
부산 (3)	1호선	32.5	34	9,751	1985년 7월 19일
	2호선	45.2	43	28,553	1999년 6월 30일
	3호선	18.1	17	17,395	2005년 11월 28일
	소 계	95.8	94	55,699	
대구 (2)	1호선	28.3	30	15,187	1997년 11월 26일
	2호선	29.0	26	23,330	2005년 10월 18일
	소 계	57.3	56	38,517	
인천	1호선	22.9	23	16,349	1999년 10월 6일
광주	1호선	20.5	20	16,658	2004년 4월 28일
대전	1호선	20.5	22	18,931	2006년 3월 16일

다. 위에서 언급한 Cooper et al.[29]의 관계식은 투입변수와 산출변수의 수가 증가할수록 효율성 값이 커지는 단점을 없애기 위한 것이기도 하다.

본 연구에서는 각 지하철 운영기관별 투입 및 산출변수의 대상이 될 요소들을 선별한 후 최적의 투입·산출변수 조합을 선정하도록 한다. 투입변수의 대상이 될 요소로는 선로길이, 차량수, 노동력, 운영역수를, 산출변수의 대상이 될 요소로는 수송인원과 운수수입으로 결정하였다. 지하철은 선로의 총 연장길이가 길면 길수록, 차량수가 많으면 많을

수록, 운영역이 많으면 많을수록 수송 서비스 기관으로서 많은 승객을 태울 수 있을 것이라 판단된다. 노동력에 대한 변수는 직원 정원을 기준으로 하였는데 지하철 운영기관의 경우 일반 기업과 달리 직원수는 한정된 정원 내에서 노동력이 투입되므로 연간 평균 직원수를 구하는 번거로움 없이 투입변수를 공사직원 정원으로 하였다. 이와 관련하여 노동력보다는 인건비가 투입 및 산출의 연관성 측면에서 적절한 투입변수라고 판단되나, 과거 인건비 자료를 구하는데 어려움이 많았다. 또한, 각 지하철 운영기관은 독립적으로 근속년수에 따라 인건비를 지급하여 동일한 노동량을 제공하였더라도 각 기관

7) 국토해양부(<http://www.mltm.go.kr>) 도시철도 운영·건설현황(2008년 10월).

<표 3> 호선별로 DMU를 선정하였을 경우 투입/산출요소 대상 자료

구 분	투입 요소				산출 요소			
	선로길이 (km)	차량수 (량)	노동력 (명)	운영역 (개)	수송인원 (천 명, 연)	운수수입 (억 원, 연)		
2004년	서울메트로 1호선	7.8	160	833	9	172,082	66,011	
	서울메트로 2호선	60.2	834	4,345	49	703,795	330,909	
	서울메트로 3호선	35.2	480	2,501	31	265,399	120,601	
	서울메트로 4호선	31.7	470	2,449	26	312,583	141,856	
	서울도시철도공사 5호선	52.3	608	2,552	51	220,388	147,256	
	서울도시철도공사 6호선	35.1	328	1,377	38	104,605	67,870	
	서울도시철도공사 7호선	46.9	496	2,082	42	208,207	140,509	
	서울도시철도공사 8호선	17.7	132	554	17	57,154	38,114	
	부산교통공사 1호선	32.5	360	1,771	34	164,956	94,200	
	부산교통공사 2호선	38.0	336	1,653	39	86,569	49,400	
	인천지하철공사	24.6	200	1,143	22	71,236	38,446	
	대구도시철도공사	25.9	204	1,397	30	50,889	23,781	
광주도시철도공사	12.1	52	558	14	7,668	3,800		
2005년	서울메트로 1호선	7.8	160	833	10	171,944	71,804	
	서울메트로 2호선	60.2	834	4,345	50	698,776	361,451	
	서울메트로 3호선	35.2	480	2,501	31	259,165	128,811	
	서울메트로 4호선	31.7	470	2,449	26	306,529	152,419	
	서울도시철도공사 5호선	52.3	608	2,555	51	218,357	153,605	
	서울도시철도공사 6호선	35.1	328	1,378	38	105,960	71,152	
	서울도시철도공사 7호선	46.9	496	2,085	42	211,481	149,013	
	서울도시철도공사 8호선	17.7	132	555	17	56,782	40,260	
	부산교통공사 1호선	32.5	360	1,573	34	155,019	105,800	
	부산교통공사 2호선	38.0	336	1,469	39	84,944	58,000	
	부산교통공사 3호선	18.1	80	350	17	1,592	1,100	
	인천지하철공사	24.6	200	1,143	22	69,634	40,036	
	대구도시철도공사 1호선	25.9	204	1,397	30	52,402	30,793	
	대구도시철도공사 2호선	28.0	180	667	26	7,782	4,750	
	광주도시철도공사	12.1	52	558	14	11,308	5,657	
	2006년	서울메트로 1호선	7.8	160	833	10	169,903	68,411
		서울메트로 2호선	60.2	834	4,345	50	699,222	357,521
서울메트로 3호선		35.2	480	2,501	31	257,544	125,600	
서울메트로 4호선		31.7	470	2,449	26	304,327	148,642	
서울도시철도공사 5호선		52.3	608	2,690	51	215,515	147,824	
서울도시철도공사 6호선		35.1	328	1,451	38	108,115	70,626	
서울도시철도공사 7호선		46.9	496	2,194	42	213,273	146,334	
서울도시철도공사 8호선		17.7	132	584	17	55,975	38,570	
부산교통공사 1호선		32.5	360	1,600	34	141,896	105,582	
부산교통공사 2호선		38.0	336	1,524	39	81,087	61,657	
부산교통공사 3호선		18.1	80	363	17	20,386	14,063	
인천지하철공사		24.6	200	1,143	22	71,494	41,267	
대구도시철도공사 1호선		25.9	204	1,397	30	62,854	35,084	
대구도시철도공사 2호선		28.0	180	667	26	45,477	26,908	
광주도시철도공사		12.1	52	577	14	10,991	5,469	

〈표 4〉 투입/산출변수 선정을 위한 단계별 회귀분석 결과

구 분		수송인원을 산출변수로			운수수익을 산출변수로		
		1단계	2단계	3단계	1단계	2단계	3단계
노동력	T-Value	15.81	18.02	3.51	19.47	14.40	1.53
	P-Value	0.00	0.00	0.001	0.00	0.00	0.13
운영역	T-Value	-	-5.85	-6.36	-	-2.04	-4.32
	P-Value	-	0.00	0.00	-	0.048	0.00
차량수	T-Value	-	-	2.59	-	-	3.82
	P-Value	-	-	0.013	-	-	0.00
R ²		85.91	92.40	93.52	90.24	91.15	93.56
Ra ²		85.57	92.02	93.02	90.00	90.71	93.07

마다 인건비가 서로 다르게 되어 인건비가 아닌 노동력을 투입변수로 선정하였다. 산출변수의 측면에서 운수수익은 지하철 운영기관마다 요금체계가 다르고 도시별 지하철 무임승차인원이 다르기 때문에 같은 수의 승객을 수송하였다 하더라도 그 수익성은 서로 다르다는 특징을 갖는다. 일평균 수송인원이 자료로 산출된 경우는 연수송인원을 알기 위해 365일을 곱하였고, 년중에 개통한 지하철의 경우에는 일평균 수송인원에서 연간 영업일수를 곱하여 연수송인원을 산출하였다. 투입과 산출에 선정된 지하철 관련 자료는 각 공사 홈페이지에 소개된 공사현황, 경영정보, 결산현황, 운영개요 등을 참고하였으며 그 밖에 국토해양부 지하철 통계자료도 보조지표로 활용하였다. 자료를 구하기가 어려운 경우에는 해당 운영기관에 직접 질의를 통하여 자료를 확보하였다. 이에 대한 상세 자료는 <표 3>과 같다.

<표 3>에 표시된 자료 중에서 가장 최적의 투입·산출변수 조합을 선정하기 위하여 회귀분석의 한 방법인 단계별 회귀분석(Stepwise Regression)을 사용하였다. 수송인원 및 운수수익을 각각 산출변수로 하였을 때 선로길이, 차량수, 노동력, 운영역 가운데 각 단계별로 선정되는 변수들 중 통계적으로 유의한 것들을 투입변수로 선정하였다. <표 4>

는 수송인원을 산출변수로 하였을 때와 운수수익을 산출변수로 하였을 때의 단계별 회귀분석의 결과를 나타낸 것이다. 두 경우 모두 첫 번째 단계에서 노동력, 두 번째 단계에서 운영역, 그리고 세 번째 단계에서 차량수가 추가되었으며 더 이상 추가시키거나 제거할 변수가 없어서 최종 투입변수 조합은 선로길이를 제외한 노동력, 운영역, 차량수로 결정되었다.

4. DEA 분석결과

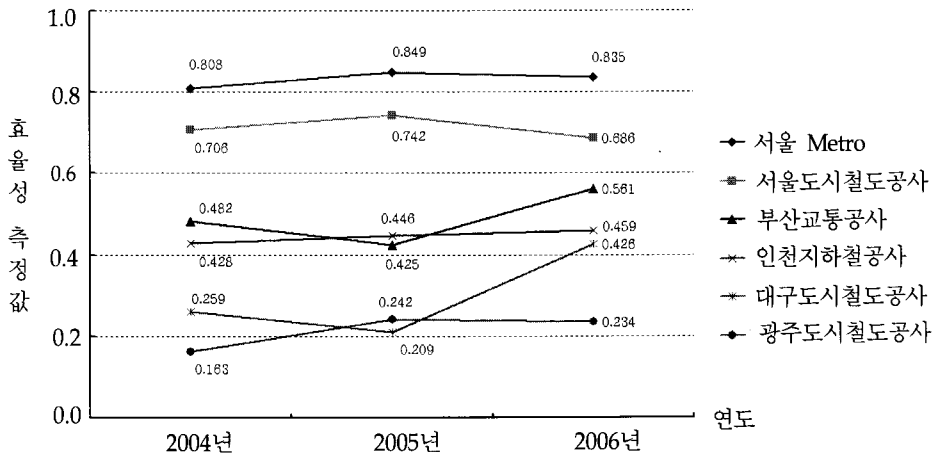
4.1 CCR 모형 분석

DEA 분석에 이용된 소프트웨어는 DEA-Solver (Cooper et al.[29])이다. 이 프로그램은 DEA분석을 위해 전문화된 소프트웨어 패키지로 CCR 투입 및 산출모형과 BCC 투입 및 산출모형으로 효율성을 측정할 수 있다. 본 연구에서 CCR-I 모형을 이용하여 분석한 결과 각 DMU의 효율성은 <표 5>와 같이 측정되었다.

분석결과, 연구에 사용된 43개의 DMU중에서 100% 효율성을 달성한 DMU는 2004년과 2005년의 서울메트로 1호선(DMU1, DMU14)로 나타났고 준거집단 출현빈도도 가장 높은 것으로 나타났다. 이는

〈표 5〉 CCR-I 모형에 의한 DMU별 효율성

No.	DMU	효율성	준거집단(Lambda)		
DMU1	04서울메트로 1호선	1.000	DMU1	(1.0000)	
DMU2	04서울메트로 2호선	0.929	DMU1	(2.9033)	DMU14 (1.9394)
DMU3	04서울메트로 3호선	0.560	DMU14	(1.6796)	
DMU4	04서울메트로 4호선	0.744	DMU1	(2.1490)	
DMU5	04서울도시철도공사 5호선	0.669	DMU14	(2.0508)	
DMU6	04서울도시철도공사 6호선	0.572	DMU14	(0.9452)	
DMU7	04서울도시철도공사 7호선	0.783	DMU14	(1.9568)	
DMU8	04서울도시철도공사 8호선	0.798	DMU14	(0.5308)	
DMU9	04부산교통공사 1호선	0.617	DMU14	(1.3119)	
DMU10	04부산교통공사 2호선	0.347	DMU14	(0.6880)	
DMU11	04인천지하철공사	0.428	DMU14	(0.5354)	
DMU12	04대구도시철도공사	0.260	DMU14	(0.3312)	
DMU13	04광주도시철도공사	0.163	DMU14	(0.0529)	
DMU14	05서울메트로 1호선	1.000	DMU14	(1.0000)	
DMU15	05서울메트로 2호선	0.999	DMU1	(2.1220)	DMU14 (3.0831)
DMU16	05서울메트로 3호선	0.598	DMU14	(1.7939)	
DMU17	05서울메트로 4호선	0.799	DMU1	(2.3090)	
DMU18	05서울도시철도공사 5호선	0.697	DMU14	(2.1392)	
DMU19	05서울도시철도공사 6호선	0.599	DMU14	(0.9909)	
DMU20	05서울도시철도공사 7호선	0.829	DMU14	(2.0753)	
DMU21	05서울도시철도공사 8호선	0.842	DMU14	(0.5607)	
DMU22	05부산교통공사 1호선	0.780	DMU14	(1.4735)	
DMU23	05부산교통공사 2호선	0.458	DMU14	(0.8078)	
DMU24	05부산교통공사 3호선	0.036	DMU14	(0.0153)	
DMU25	05인천지하철공사	0.446	DMU14	(0.5576)	
DMU26	05대구도시철도공사 1호선	0.336	DMU14	(0.4288)	
DMU27	05대구도시철도공사 2호선	0.083	DMU14	(0.0662)	
DMU28	05광주도시철도공사	0.242	DMU14	(0.0788)	
DMU29	06서울메트로 1호선	0.988	DMU1	(0.4343)	DMU14 (0.5535)
DMU30	06서울메트로 2호선	0.988	DMU1	(2.0989)	DMU14 (3.0496)
DMU31	06서울메트로 3호선	0.583	DMU14	(1.7492)	
DMU32	06서울메트로 4호선	0.779	DMU1	(2.2518)	
DMU33	06서울도시철도공사 5호선	0.638	DMU14	(2.0587)	
DMU34	06서울도시철도공사 6호선	0.565	DMU14	(0.9836)	
DMU35	06서울도시철도공사 7호선	0.774	DMU14	(2.0380)	
DMU36	06서울도시철도공사 8호선	0.766	DMU14	(0.5372)	
DMU37	06부산교통공사 1호선	0.766	DMU14	(1.4704)	
DMU38	06부산교통공사 2호선	0.469	DMU14	(0.8587)	
DMU39	06부산교통공사 3호선	0.449	DMU14	(0.1959)	
DMU40	06인천지하철공사	0.460	DMU14	(0.5747)	
DMU41	06대구도시철도공사 1호선	0.383	DMU14	(0.4886)	
DMU42	06대구도시철도공사 2호선	0.468	DMU14	(0.3747)	
DMU43	06광주도시철도공사	0.234	DMU14	(0.0762)	



[그림 1] 6개 지하철 운영기관들의 연도별 효율성 변화

가장 효율적인 기업으로 운영되고 있다는 증거이며 서울도시철도공사의 경우도 타 DMU에 비해 효율성이 높은 것으로 나타났다. 비효율적인 DMU는 준거집단을 갖게 되며, 준거집단의 투입과 산출변수에 각각 람다(Lambda : λ)값을 곱하면 효율적인 DMU가 된다는 정보를 제공한다. 예로, DMU25의 효율성은 44.6%이고, DMU14를 준거집단으로 가지며 람다값은 0.5576이다. DMU25가 효율적이기 위해서는 현재 200량의 차량을 약 112량($= 200 \times 0.5576$), 1,143명의 직원을 약 637명($= 1,143 \times 0.5576$), 22개의 운영역을 약 12개($= 22 \times 0.5576$)로 줄이도록 하는 방향성을 제시해줄 수 있다. 그러나 지하철 운영기관은 투입변수가 고정되어 유동성이 없으므로, 단순히 투입을 줄여야 한다는 결론보다는 정해진 투입변수에 대해 어떻게 산출을 늘릴 수 있는지에 대한 방안을 모색해야 할 것이다.

[그림 1]은 6개 지하철 운영기관의 연도별 효율성 추이를 보인 것이다. 2개 이상의 호선을 운영하는 기관의 효율성은 평균값을 적용하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 서울메트로와 서울도시철도공사가 효율성의 측면에서 상위권으로 나타났고, 부산 및 인천 지하철공사가 중위권, 대구 및 광주도시철도공사가 하위권으로 나타났다. 서울의 두 지하철 운영기관이 높은 효율성을 보인 이유는 앞의 <표

1>에서 제시된 지하철 이용비율이 매우 높다는 것에서 기인한 것으로 보인다. 그만큼 산출요소, 즉 수송인원 및 이에 따른 운영수익의 양이 많다는 것으로 해석될 수 있다. 또한, 단일노선을 운영중인 인천 지하철공사의 효율성이 2개의 노선을 운영하고 있는 대구도시철도공사의 효율성보다 높게 나타난 것은 연계노선 및 환승역의 시너지 효과 때문인 것으로 판단된다. 즉, 단일노선의 경우 고객들에게 제공할 수 있는 운영역의 수가 노선내로 한정되어 있으나, 연계노선이 많은 지하철의 경우 환승을 통해 다른 노선을 이용할 수 있기 때문에 더 많은 수송인원을 산출할 수 있고, 이로 인하여 투입요소의 양이 적더라도 산출요소의 양을 크게 할 수 있어 효율성이 높은 것으로 분석 가능하다. 따라서 지하철 운영기관의 효율성을 평가할 때에는 본 연구에서 다른 각 기관의 독립적인 투입 및 산출요소 뿐만 아니라, 다른 기관과의 상호 관련성(예를 들어, 연계노선 또는 환승역 체계 등)을 함께 고려해야 할 것으로 생각된다.

4.2 BCC 모형 분석

CCR 모형에 의한 분석은 비효율성 원인을 운영상의 결함으로만 인식한다. 반면, BCC 모형에 의

〈표 6〉 각 DMU별 규모의 효율성

DMU	2004년			2005년			2006년			규모 효율성 평균
	CCR	BCC	규모 효율성	CCR	BCC	규모 효율성	CCR	BCC	규모 효율성	
서울메트로 1호선	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.988	0.993	0.995	0.983
서울메트로 2호선	0.929	1.000	0.929	0.999	1.000	0.999	0.988	1.000	0.988	
서울메트로 3호선	0.560	0.581	0.964	0.598	0.610	0.980	0.583	0.594	0.981	
서울메트로 4호선	0.744	0.762	0.976	0.799	0.807	0.990	0.779	0.787	0.990	
서울도시철도 5호선	0.669	0.685	0.977	0.697	0.714	0.976	0.638	0.652	0.979	0.943
서울도시철도 6호선	0.572	0.580	0.986	0.599	0.600	0.998	0.565	0.567	0.996	
서울도시철도 7호선	0.783	0.800	0.979	0.829	0.849	0.976	0.774	0.792	0.977	
서울도시철도 8호선	0.798	0.978	0.816	0.842	1.000	0.842	0.766	0.941	0.814	
부산교통공사 1호선	0.617	0.624	0.989	0.780	0.792	0.985	0.766	0.777	0.986	0.780
부산교통공사 2호선	0.347	0.391	0.887	0.458	0.484	0.946	0.469	0.488	0.961	
부산교통공사 3호선	-	-	-	0.036	1.000	0.036	0.449	1.000	0.449	
인천지하철공사	0.428	0.564	0.759	0.446	0.568	0.785	0.460	0.572	0.804	0.783
대구도시철도 1호선	0.260	0.434	0.599	0.336	0.461	0.729	0.383	0.490	0.782	0.584
대구도시철도 2호선	-	-	-	0.083	0.615	0.135	0.468	0.692	0.676	
광주도시철도공사	0.163	1.000	0.163	0.242	1.000	0.242	0.234	1.000	0.234	0.213

한 효율성 분석은 규모에 대한 수익변화를 가정하기 때문에 비효율성의 원인이 규모에 의한 영향도 있다는 것을 나타낼 수 있다. 〈표 6〉은 BCC 모형에 의한 분석 결과와 DMU별 규모의 효율성을 보인 것이다.

〈표 6〉에서 알 수 있듯이 2004년부터 2006년까지 평균 규모의 효율성 측면에서 서울메트로가 가장 높고, 서울도시철도공사, 인천지하철공사, 부산교통공사, 대구도시철도공사, 그리고 광주도시철도공사 순으로 나타났다. 서울메트로는 CCR 및 BCC 효율성이 모두 높아 규모의 효율성을 가장 잘 달성한 운영기관으로 보여진다. 광주도시철도공사는 BCC 효율성이 100%이나 CCR 효율성이 상당히 낮아 규모의 효율성이 낮게 나왔다. 이는 투입요소의 기술적 결합에 비효율성의 원인이 있는 것이 아니라 현재의 조업규모가 최적이지 않기 때문인 것으로

판단할 수 있다. 따라서 광주도시철도공사 노선 추가 등 투입요소 증가를 통해 CCR 효율성과 규모 효율성의 상승을 가져올 수 있을 것으로 판단된다.

〈표 7〉은 분석대상이 되는 DMU들의 규모수익(RTS : Returns to Scale)을 제시하고 있다. 규모수익은 〈표 5〉에서 준거집단과 함께 제시된 랠다 값의 총합으로 추정할 수 있다. 총합이 1이면 불변 규모수익(constant returns to scale : CRS), 1보다 작으면 체증규모수익(increasing returns to scale : IRS), 1보다 크면 체감규모수익(decreasing returns to scale : DRS)인 것으로 해석한다. 분석결과, 서울메트로의 2, 3, 4호선, 서울도시철도공사 5, 7호선, 그리고 부산의 1호선을 제외한 대부분의 운영기관들이 체증규모수익 상태인 것으로 나타났다. 즉, 투입요소 사용량의 1단위 증가가 산출량을 1단위 또는 그 이상으로 증가시킬 것이므로, 이들 운

〈표 7〉 각 DMU들의 연도별 규모수익 측정

DMU	2004년		2005년		2006년	
	$\Sigma\lambda_j$	규모수익	$\Sigma\lambda_j$	규모수익	$\Sigma\lambda_j$	규모수익
서울메트로 1호선	1.000	CRS	1.000	CRS	0.988	IRS
서울메트로 2호선	4.843	DRS	5.205	DRS	5.149	DRS
서울메트로 3호선	1.679	DRS	1.794	DRS	1.749	DRS
서울메트로 4호선	2.149	DRS	2.309	DRS	2.252	DRS
서울도시철도 5호선	2.051	DRS	2.139	DRS	2.059	DRS
서울도시철도 6호선	0.945	IRS	0.991	IRS	0.984	IRS
서울도시철도 7호선	1.957	DRS	2.075	DRS	2.038	DRS
서울도시철도 8호선	0.531	IRS	0.561	IRS	0.537	IRS
부산교통공사 1호선	1.312	DRS	1.474	DRS	1.470	DRS
부산교통공사 2호선	0.688	IRS	0.808	IRS	0.859	IRS
부산교통공사 3호선	-	-	0.015	IRS	0.196	IRS
인천지하철공사	0.535	IRS	0.558	IRS	0.575	IRS
대구도시철도 1호선	0.331	IRS	0.429	IRS	0.489	IRS
대구도시철도 2호선	-	-	0.066	IRS	0.375	IRS
광주도시철도공사	0.053	IRS	0.079	IRS	0.076	IRS

〈표 8〉 AHP에 의한 투입/산출변수간 가중치

구분	수송인원에 대한 가중치 평균	운수수익에 대한 가중치 평균
차량수	0.385	0.420
노동력	0.286	0.261
운영역	0.329	0.306

영기관들은 적절 수준의 투입 증가를 통해 성과를 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 이로부터 인천 2호선 계획과 대구 2호선 및 부산 3호선 개통은 투입요소의 증가보다 산출량이 그 이상으로 증가될 것이므로 적정하다고 판단된다.

4.3 DEA-AR/AHP 모형 분석

AHP를 이용한 DEA-AR 모형은 투입 및 산출요소의 우선순위에 대한 주관적인 평가자들의 의견을

DEA 모형에 반영시킬 수 있다. 다만, 다수의 평가자들의 견해가 정확하게 일치하기 어렵기 때문에 AHP의 결과를 범위로 표현할 수 있는 AR 모형에 적용함으로써 DEA 모형이 가질 수 있는 가중치의 극단적인 선택을 방지할 수 있다. 이를 위하여, 본 연구에서는 DEA 또는 AHP의 학계 전문가 및 지하철 운영기관 관계자 15명을 대상으로 각 변수에 대한 설문조사를 실시하고, AHP에 의하여 가중치를 구한 후 AR의 입력자료로 사용하였다. AHP 설문문의 내용은 지하철 운영기관의 효율성 제고를

위해 수송인원과 운수수익 중 어느 것이 더 중요한 지에 대한 질문과 운수수익 및 수송 인원의 증가를 위한 차량수, 노동력, 운영역의 가중치를 계산하기 위하여 각 투입요소를 쌍대 비교하는 질문이 포함되어 있다. 쌍대비교는 Saaty[35]의 9점 척도를 이용하였고, 각 응답자의 가중치 평균값은 기하평균을 사용하였다.

AHP 설문결과는 <표 8>과 같으며, 모든 설문문의 CI는 0부터 0.0269사이에서 존재하고 CR은 0.1보다 낮아 응답에 일관성이 있었다고 판단하였다. <표 8>에서 알 수 있듯이 가중치의 측면에서 수송 인원을 증가시키기 위해 가장 중요한 변수로는 차량수이고 운영역과 노동력이 그 다음 순을 보였으며, 운수수익을 증가시키기 위한 투입변수의 중요도도 같은 결과를 보였다. 이는 공공기관이 인력적인 측면을

면을 과다하게 투입하여 노동력을 증가시켜도 산출변수에 대한 기여도가 낮을 것이라는 현재 사회적 인식에서 비롯된 것이라 할 수 있겠다. 또한, 산출변수에서 수송 인원의 가중치 평균은 0.656, 운수수익의 가중치 평균은 0.344로 수송인원의 가중치가 2배정도 더 중요하다고 응답한 것으로 보아, 지하철 운영기관의 경우 기업성 보다는 공공기관으로서의 서비스 측면을 더 중요하게 생각하는 것으로 나타났다.

DEA-AR 모형에서 AR의 범위는 항목별로 평가된 점수를 상호 비교하여 최소값을 하한(Lower bound), 최대값을 상한(Upper bound)으로 지정하게 된다. <표 9>는 AR에서 사용되는 가중치의 구간 폭을 결정하기 위해 AHP에 의한 응답한 자료들을 가지고 투입 및 산출변수들간 비율관계를 나

<표 9> AHP에 의한 투입 및 산출변수간 비율 관계

구 분	수송인원/운수수익	차량수/노동력	차량수/운영역	노동력/운영역
응답자 1	2.0	1.598	1.262	0.790
응답자 2	3.0	0.838	0.548	0.655
응답자 3	2.0	2.000	1.000	0.500
응답자 4	0.5	2.000	2.000	1.000
응답자 5	2.0	1.471	0.860	0.585
응답자 6	3.0	2.000	2.000	1.000
응답자 7	1.0	1.130	1.262	1.117
응답자 8	3.0	1.600	2.557	1.598
응답자 9	3.0	1.671	2.414	1.445
응답자 10	2.0	1.000	1.000	1.000
응답자 11	1.0	1.000	1.000	1.000
응답자 12	2.0	0.932	1.389	1.491
응답자 13	2.0	1.019	0.806	0.792
응답자 14	3.0	2.636	2.296	0.871
응답자 15	3.0	1.598	0.625	0.391
최소값(AR하한)	0.5	0.838	0.548	0.391
최대값(AR상한)	3.0	2.636	2.557	1.598

〈표 10〉 DEA-AR/AHP 모형 분석 결과

No.	DMU	효율성	순위	준거집단(Lambda)
DMU1	04서울메트로 1호선	0.993	2	DMU14 (0.991)
DMU2	04서울메트로 2호선	0.831	6	DMU14 (4.328)
DMU3	04서울메트로 3호선	0.535	20	DMU14 (1.605)
DMU4	04서울메트로 4호선	0.645	9	DMU14 (1.890)
DMU5	04서울도시철도공사 5호선	0.513	23	DMU14 (1.632)
DMU6	04서울도시철도공사 6호선	0.442	26	DMU14 (0.762)
DMU7	04서울도시철도공사 7호선	0.598	13	DMU14 (1.550)
DMU8	04서울도시철도공사 8호선	0.609	12	DMU14 (0.423)
DMU9	04부산교통공사 1호선	0.521	22	DMU14 (1.120)
DMU10	04부산교통공사 2호선	0.292	35	DMU14 (0.587)
DMU11	04인천지하철공사	0.351	31	DMU14 (0.469)
DMU12	04대구도시철도공사	0.201	38	DMU14 (0.312)
DMU13	04광주도시철도공사	0.086	41	DMU14 (0.048)
DMU14	05서울메트로 1호선	1.000	1	DMU14 (1.000)
DMU15	05서울메트로 2호선	0.865	4	DMU14 (4.505)
DMU16	05서울메트로 3호선	0.545	18	DMU14 (1.638)
DMU17	05서울메트로 4호선	0.661	7	DMU14 (1.937)
DMU18	05서울도시철도공사 5호선	0.524	21	DMU14 (1.666)
DMU19	05서울도시철도공사 6호선	0.457	25	DMU14 (0.787)
DMU20	05서울도시철도공사 7호선	0.622	11	DMU14 (1.615)
DMU21	05서울도시철도공사 8호선	0.626	10	DMU14 (0.435)
DMU22	05부산교통공사 1호선	0.596	14	DMU14 (1.162)
DMU23	05부산교통공사 2호선	0.349	32	DMU14 (0.637)
DMU24	05부산교통공사 3호선	0.027	43	DMU14 (0.012)
DMU25	05인천지하철공사	0.355	30	DMU14 (0.474)
DMU26	05대구도시철도공사 1호선	0.232	37	DMU14 (0.361)
DMU27	05대구도시철도공사 2호선	0.064	42	DMU14 (0.055)
DMU28	05광주도시철도공사	0.128	39	DMU14 (0.072)
DMU29	06서울메트로 1호선	0.984	3	DMU14 (0.984)
DMU30	06서울메트로 2호선	0.860	5	DMU14 (4.482)
DMU31	06서울메트로 3호선	0.537	19	DMU14 (1.612)
DMU32	06서울메트로 4호선	0.650	8	DMU14 (1.907)
DMU33	06서울도시철도공사 5호선	0.488	24	DMU14 (1.620)
DMU34	06서울도시철도공사 6호선	0.440	27	DMU14 (0.790)
DMU35	06서울도시철도공사 7호선	0.592	15	DMU14 (1.603)
DMU36	06서울도시철도공사 8호선	0.582	16	DMU14 (0.422)
DMU37	06부산교통공사 1호선	0.566	17	DMU14 (1.119)
DMU38	06부산교통공사 2호선	0.345	33	DMU14 (0.648)
DMU39	06부산교통공사 3호선	0.340	34	DMU14 (0.154)
DMU40	06인천지하철공사	0.365	29	DMU14 (0.488)
DMU41	06대구도시철도공사 1호선	0.271	36	DMU14 (0.422)
DMU42	06대구도시철도공사 2호선	0.367	28	DMU14 (0.315)
DMU43	06광주도시철도공사	0.121	40	DMU14 (0.069)

〈표 11〉 DEA 모형간 효율성 비교

구 분	2004년			2005년			2006년		
	CCR	BCC	AR	CCR	BCC	AR	CCR	BCC	AR
서울메트로	0.808	0.836	0.751	0.849	0.854	0.768	0.835	0.844	0.758
서울도시철도공사	0.706	0.761	0.541	0.742	0.791	0.557	0.686	0.738	0.526
부산교통공사	0.482	0.508	0.407	0.425	0.759	0.324	0.561	0.755	0.417
인천지하철공사	0.428	0.564	0.351	0.446	0.568	0.355	0.460	0.572	0.365
대구도시철도공사	0.260	0.434	0.201	0.210	0.538	0.148	0.426	0.591	0.319
광주도시철도공사	0.163	1.000	0.086	0.242	1.000	0.128	0.234	1.000	0.121

타낸 것이고, 가장 아래 두 개의 행에 표시된 최소값 및 최대값이 DEA-AR/AHP의 분석에서 사용될 가중치들의 하한과 상한이 된다.

〈표 10〉은 DEA-AR/AHP 모형을 적용한 결과 참조집단은 DMU14로 고정되는 결과를 얻어 CCR 모형에서는 효율성 순위를 나열할 수 없었던 것에 비해 각 DMU의 효율성 순위를 부여할 수 있었다. 분석결과, 2005년도 서울메트로 1호선이 가장 효율적인 DMU로 나타났고 대구도시철도공사와 광주도시철도공사가 상대적으로 비효율적인 것으로 나타났다. 그리고 〈표 11〉은 각 DMU별로 3가지 DEA 모형을 적용한 효율성 결과를 비교한 것으로, 모든 DMU에서 효율성의 크기는 BCC 모형이 가장 크고, CCR 모형, DEA-AR/AHP 모형 순이었다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내 지하철 운영기관의 효율성 평가를 위하여 DEA-AR/AHP 모형을 개발하고, 실제 운영자료를 바탕으로 효율성을 평가 및 분석하였다. 이를 위하여 지하철 운영기관에서 대표적으로 고려하고 있는 투입 및 산출변수 중 DEA 모형에 적절한 변수들을 도출하였고, DEA의 대표적 모형인 CCR 모형과 BCC 모형을 이용하여 각 운영기관의 효율성을 비교·평가하였으며, 최종적으로 DEA-AR/AHP 결합모형을 개발하고 전국 6개 도시의 지하철 운영기관의 각 호선별 상대적 효율

성을 분석하였다. 본 연구의 구체적인 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 단계별 회귀분석을 통하여 지하철 운영기관의 효율성 평가를 위한 최적 투입·산출변수 조합으로, 각각 투입변수(노동력, 운영역, 차량수)와 산출변수(수송인원, 운수수익)를 결정하였다. 둘째, 각 지하철 운영기관의 호선을 하나의 DMU로 선정하여 43개의 DMU중에서 100%의 CCR 효율성을 달성한 DMU는 서울메트로 1호선으로 나타났고, 준거집단 출현빈도도 가장 높았다. 상대적으로 광주도시철도공사의 BCC 효율성은 100%이나 CCR 효율성이 낮아 규모의 효율성이 낮게 나왔다. 이는 투입요소의 기술적 결합에 비효율성의 원인이 있는 것이 아니라 조업규모가 최적이지 않기 때문이다. 셋째, 규모수익을 측정할 결과, 서울 메트로의 2, 3, 4호선과 서울도시철도공사 5, 7호선, 그리고 부산의 1호선을 제외한 대부분의 운영기관들이 체증규모수익 상태인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구의 결과로 판단하였을 때 인천 2호선 계획과 대구 2호선 및 부산 3호선 개통은 적정하다고 판단된다. 넷째, AR 범위를 결정하기 위한 AHP 설문에서 수송인원에 대한 가중치가 운수수익에 대한 가중치보다 두 배 정도 더 중요하다고 분석되어 지하철 운영기관의 경우 공공기관으로서의 서비스 측면이 더 중요한 것으로 나타났다. 다섯째, DEA-AR/AHP 모형을 적용한 결과 준거집단이 2005년의 서울메트로 1호선으로 고정되는 결과를 얻었고, CCR 모형

에서 효율성 순위를 나열할 수 없었던 것에 비해 각 DMU 간의 비교가 가능하여 효율성 순위를 나열할 수 있었다.

본 연구에서 지하철 운영기관의 효율성을 평가하고 효율순위를 산출함으로써 국내 지하철 운영기관의 효율성 향상을 위한 관리행태나 프로세스의 개선에 유용한 정보를 줄 수 있을 것으로 기대되며, 도시철도를 운영하는 지방 공기업 평가의 통합 시행, 평가의 신뢰성과 객관성, 타당성이 확보된 평가기준을 마련하는 초석이 될 수 있다고 판단한다. 또한, DEA-AR/AHP 모형의 설계를 통하여 의사결정이론이나 효율성 측정 또는 DEA, AR, AHP 모형에 대한 적용성의 유연성을 확인할 수 있었다. 그러나 투입변수 측면에서 선로길이나 운영역수와 같은 변수에 대한 조정 내용을 제시한다는 것은 현실적으로 적용 불가능하므로, 실제적인 경영개선 자료로서 미흡할 수 있다. 이러한 한계는 산출지향(output-oriented) DEA 모형을 분석도구로 사용하여 지하철 운영기관이 운영수익이나 수송인원의 증가를 위해 어떠한 전략을 취할 수 있는지 분석하여 해결할 수 있다. 또한, DEA-AR/AHP 결합모형에서 AR 가중치의 범위가 갖는 의미를 파악하기 위하여 AR 가중치의 상한과 하한의 합리적이고 체계적인 변동폭을 선정하여 AR범위 변동시 효율성 변동추이를 파악하지 못한 점은 향후 연구될 요소 중 하나이다.

참고문헌

- [1] 권철신, 박준호, 홍석기, “상호영향형 R&D과 제군의 평가선정을 위한 새로운 DEA 모형의 개발”, 한국경영과학회/대한산업공학회 2003년 춘계공동학술대회, 「한국경영과학회」(2003), pp. 980-983.
- [2] 김민석, 「AHP/DEA에 의한 인터넷 쇼핑몰 평가에 관한 연구」, 박사학위논문, 고려대학교, 2001.
- [3] 김민정, 김성수, “자료포락분석기법을 이용한 도시철도 운영기관의 효율성 분석”, 「대한교통학회지」, 제21권, 제4호(2003), pp.113-132.
- [4] 김성수, 오미영, 김민정, “자료포락분석기법을 이용한 서울 시내버스 운송업의 효율성과 규모의 경제성 분석”, 「대한교통학회지」, (2002), pp. 101-113.
- [5] 김성호, 홍순흠, 최태성, “한국철도의 상대적 운영효율성 평가”, 「한국철도학회 추계학술대회논문집」, (2000), pp.17-23.
- [6] 김용민, “자료포락분석(DEA)에 의한 지역사회 복지관의 상대적 효율성 측정”, 「한국지방자치학회보」, 제16권, 제3호(2004), pp.133-153.
- [7] 김인철, 이해춘, “DEA를 이용한 외환위기 전후의 은행 효율성 비교 분석”, 「산업조직연구」, 제11권, 제2호(2003), pp.1-28.
- [8] 김재윤, 심광식, “DEA 모형을 활용한 지하철 운영기관의 효율성 평가”, 「산업경제연구」, 제21권, 제4호(2008), pp.1697-1723.
- [9] 김재홍, 「효율순위 결정을 위한 DEA-AHP 결합 모형」, 석사학위논문, 고려대학교, (1999).
- [10] 김진한, 민재형, “부분 효율성 정보를 이용한 DEA 모형의 투입·산출요소 선정에 관한 연구”, 「한국경영과학회지」, 제23권, 제3호(1998), pp. 201-217.
- [11] 남인석, 송윤영, 정병호, “DEA 모형을 이용한 정부출연연구기관의 상대적 효율성 분석”, 「한국산업경영시스템학회지」, 제31권, 제1호(2008), pp.1-10.
- [12] 박길영, 오성동, 박노경, “컨테이너항만의 경쟁력 측정방법: AHP와 DEA 접근”, 「한국항만경제학회지」, 제21권, 제1호(2005), pp.133-151.
- [13] 손소영, 주용규, “분류모형과 DEA를 이용한 두뇌한국(BK)21 사업단 효율성 분석”, 「산업공학」, 제17권, 제3호(2004), pp.249-260.
- [14] 안상돈, 김정주, “DEA 모형을 이용한 지역농협의 경영평가”, 「한국협동조합연구」, 제22권, 제1호(2004), pp.129-130.
- [15] 오미영, 김성수, 김민정, “자료포락분석기법(DEA)을 이용한 서울 시내버스 운송업의 효

- 율성 분석”, 『대한교통학회지』, 제20권, 제2호(2002), pp.59-68.
- [16] 윤경준, “DEA를 통한 보건소의 효율성 측정”, 『한국정책학회보』, 제5권, 제1호(1996), pp.80-109.
- [17] 이경제, 「DEA 모형을 활용한 인터넷 기업의 효율성 평가에 관한 연구」, 박사학위논문, 전남대학교, 2006.
- [18] 이연식, 「DEA 방법을 이용한 우리나라 철도산업의 경쟁력 비교연구」, 석사학위논문, 서울산업대학교, 2004.
- [19] 임호순, 유석천, 김연성, “연구개발사업의 평가 및 선정을 위한 DEA/AHP 통합모형에 관한 연구”, 『한국경영과학회지』, 제24권, 제4호(1999), pp.1-12.
- [20] 조근태, 조용곤, 강현수, 「앞서가는 리더들의 계층분석적 의사결정」, 동현출판사, 2003.
- [21] 홍봉영, “DEA에 의한 신용협동조합의 기술, 규모 및 배분효율성의 측정”, 『경영연구』, 제17권, 제4호(2002), pp.121-138.
- [22] 홍석기, 「상호영향형 과제군의 평가선정을 위한 CIDEAR 모형의 구축」, 석사학위논문, 성균관대학교, (2002).
- [23] Banker, R.D., A. Charnes, and W.W. Cooper, “Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis,” *Management Science*, Vol.30 (1984), pp.1078-1092.
- [24] Barua, A., P.L. Brouckett, W.W. Cooper, H. Deng, B.R. Parker, T.W. Ruefli, and A. Whinston, “DEA Evaluation of Long- and Short-Run Efficiencies of Digital vs. Physical Product “Dot Com” Companies,” *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol.38, No.4 (2004), pp.233-253.
- [25] Bhattacharyya, A., S.C. Kumbhakar, and A. Bhattacharyya, “Ownership Structure and Cost Efficiency : A Study of Publicly Owned Passenger-Bus Transportation Companies in India,” *Journal of Productivity Analysis*, Vol.6(1995), pp.47-61.
- [26] Bulter, T.W. and L. Li, “The Utility of Returns to Scale in DEA Programming : An Analysis of Michigan Rural Hospitals,” *European Journal of Operational Research*, Vol.161, No.2(2005), pp.469-477.
- [27] Camanho, A.S. and R.G. Dyson, “Cost Efficiency Measurement with Price Uncertainty : A DEA Application to Bank Branch Assessments,” *European Journal of Operational Research*, Vol.161, No.2(2005), pp. 432-446.
- [28] Charnes, A. W.W. Cooper, and E. Rhodes, “Measuring the Efficiency of Decision Making Units,” *European Journal of Operational Research*, Vol.2(1978), pp.429-444.
- [29] Cooper, W., L.M. Seiford, and K. Tone, *Data envelopment analysis : a comprehensive text with models, applications, reference and DEA-Solver software*, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, (2000).
- [30] De Borger B., K. Kerstens, and Á. Costa, “Public Transit Performance : What Does One Learn from Frontier Studies?,” *Transport Reviews*. Vol.22(2002), pp.1-38.
- [31] Kim, M. and S. Kim, *An Analysis of the Cost Structure of a Seoul’s rail Transit Property : A Stochastic Frontier Approach*, Proceedings of the 9th world Conference on Transport Research, Seoul, (2001).
- [32] Hilmola, Olli-Pekka, “European railway freight transportation and adaptation to demand decline,” *International Journal of Productivity and Performance Management*, Vol.56(2007), pp.205-225.
- [33] Paradi, J.C. and C. Schaffnit, “Commercial Branch Performance Evaluation and Results

- Communication in a Canadian Bank-A DEA Application," *European Journal of Operational Research*, Vol.156, No.3(2004), pp. 719-735.
- [34] Roll, Y. and B. Golany, "Alternate Methods of Treating Factor Weights in DEA," *OMEGA International Journal of Management Science*, Vol.21, No.1(1993), pp.99-109.
- [35] Saaty, T.L., *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw Hill, New York, (1980).
- [36] Sinuany-Stern, Z., A. Mehrez, and Y. Hadad, "An AHP/DEA methodology for ranking decision making units," *International Transactions in Operation Research*, Vol.7, No.2 (2000), pp.109-204.
- [37] Serrano-Cinca, C., Y. Fuertes-Callen and C. Mar-Molinero, "Measuring DEA efficiency in internet companies," *Decision Support Systems*, Vol.38(2005), pp.557-573.
- [38] Thompson, R.G., L.N. Langemeier, C.T. Lee, E. Lee, and R.M. Thrall, "The Role of Multiplier Bounds in Efficiency Analysis with Application to Kansas Farming," *Journal of Econometrics*, Vol.46(1990), pp.93-108.
- [39] Yang, T. and C. Kuo, "A Hierarchical AHP/DEA Methodology for the Facilities Layout Design Problem," *European Journal of Operational Research*, Vol.147(2003), pp.128-136.