

## DEA(자료포락분석)를 이용한 도시철도 전동차 운영효율 연구

## Urban railway train operation efficiency studies using DEA

서경수<sup>\*†</sup>, 안현미<sup>\*\*</sup>Kyoung-soo Seo<sup>\*†</sup>, Hyun-mi Ahn<sup>\*\*</sup>

**Abstract** In the urban railway rolling-stock operations the choice, extended use and disposal decisions of rolling-stock It should be carefully consider Because these decision are closely related as safety, operation punctuality and customer service. and also it's a core component of life-cycle cost in entire rolling-stock operation period. In this study we present the empirical analysis result of Seoul Metro Line#1 rolling-stock's operation efficiency using DEA in order to know what difference in effectiveness between rolling-stock model Type. This study provide implications for Entire Urban Railway Operation, railway vehicle Choice, Establishing Rolling stock Maintenance Policy and Build Supply Chain for Maintenance etc.

**Keywords :** Rolling stock, Maintenance Operation, Efficiency, DEA, Data Envelopment Analysis

**초 록** 도시철도차량 운영에 있어서 차종의 선택과 도입, 유지보수정책 결정, 연장사용, 폐기 등의 의사결정은 차량운행의 안전성, 운행의 정시성, 고객서비스 등과 밀접하게 관련되어 있을 뿐만 아니라 차량 운영기간 전체의 수명주기비용을 결정하는 핵심 요소이기 때문에 중요하게 고려되어야 한다. DEA(자료포락분석)를 이용한 도시철도 전동차 운영 효율연구는 서울메트로 1호선에 운영되고 있는 2개 차종인 저항형 전동차와 VVVF전동차의 운영효율을 운행 및 유지보수 관련 자료를 바탕으로 DEA(자료포락분석)를 이용 분석하여 차종에 따라 유지보수 비용 및 운영효율이 어떠한 차이를 가지는지를 실증적으로 보여 준다. 이를 통해 차종 선택, 차량의 연장사용, 유지보수 정책의 수립, 유지보수 자재의 공급사슬 구축 및 관리 등 도시철도차량 운영과 관련된 전반적 의사결정에 시사점을 제시하고자 한다.

**주요어 :** 철도차량, 유지보수, 효율성, DEA, 자료포락분석

## 1. 서 론

기업이나 조직의 운영에 있어 운영효율을 측정하는 것은 현재 운영상태의 파악과 미래성과 지표들의 변화를 예측 한다는 점에서 그 중요성을 가진다. 운영전략의 기본은 조직이 가지고 있는 자원(Resource)을 성과목표(Performance Object)인 품질(Quality), 속도(Speed), 유연성(Flexibility), 신뢰성(Dependability), 비용(Cost)들과 일치시키기 위해 생산능력(Capacity), 공급망(Supply Network), 프로세스 기술(Process technology) 그리고 개발과 조직(Development and organization)에 관한 의사결정을 하는 것이다(Slack, Lewis, 2015).

† 교신저자: 서울메트로 도시철도연구원(lifetide@seoulmetro.co.kr)

\* 서울메트로 도시철도연구원

\*\* 한양대학교 경영학과

따라서 이러한 의사결정을 위해서는 자신이 가진 자원과 그 자원 운영의 제반 구조를 파악하는 것이 중요한데 이를 위해 운영 효율성 분석을 통해 의사결정을 위한 중요한 정보를 찾을 수 있다. 도시철도의 운영에 있어 차량 운영은 도시철도 시스템을 위한 여러 인프라와 더불어 상가에서 기술한 전략적 운영관리의 성과목표와 밀접하게 관련이 있기 때문에 매우 중요하다. 특히 차량의 선택과 도입, 유지보수정책 결정, 연장사용, 폐기 등의 의사결정은 차량운행의 안전성, 정시성, 고객서비스 등과 밀접하게 관련되어 있을 뿐만 아니라 차량 운영기간 전체의 수명주기비용을 결정하는 핵심 요소이기 때문에 중요하게 고려되어야 한다.

서울메트로 1호선에는 1974년 서울지하철 개통 시부터 사용된 저항형 전동차와 현재 전국 도시철도에서 주력으로 사용하고 있는 VVVF전동차 2종의 차량이 운행되고 있다. 단일종류의 차량이 아닌 복수 종류의 차량이 운행됨에 따라 차량의 유지보수 정책과 계획 수립, 자재 관리, 운행 계획 수립 등 차량운영 전반에 걸쳐 불일치가 발생하게 되는데 이는 전체적인 차량 운영의 비효율을 유발하는 원인이 되고 있다. 또한 저항형 전동차는 기계적인 구조를 기반으로 하는 제어 특성상 고장발생 빈도가 높고 장시간 운행에 부적절하며 낮은 승차감과 소음 및 저항열 발생과 같은 승객서비스 저해 요인을 가지고 있어 차량의 내구연한 도래 시 수명연장 또는 폐기 등의 의사결정에 있어 비용발생 구조, 고객 서비스 그리고 유지보수 문제 등에 대해 종합적이고 장기적으로 고려해 볼 필요가 있다.

본 논문에서는 서울메트로 1호선에 운행되고 있는 2개 차종인 저항형 전동차와 VVVF전동차의 운영효율을 운행 및 유지보수 관련 자료를 바탕으로 DEA(Data Envelopment Analysis, 자료 포락분석)로 분석하여 차종에 따라 운영효율이 어떠한 차이를 가지는지를 실증적으로 보여 준다. DEA는 분석대상들인 의사결정단위들의 상대적인 효율성을 직관적으로 보여주어 비효율적인 대상들이 효율적인 벤치마킹 대상들과 동일한 효율을 얻기 위해 어떠한 투입 및 산출요소를 개선시켜야 하는지를 구체적으로 제시하여 운영전략 수립의 방향을 정하는 기초로 사용할 수 있다는 점에서 큰 장점을 가지고 있다.

본 논문의 목적은 저항형 전동차와 VVVF전동차의 운영효율 분석을 통해 차종 선택, 유지보수 정책 수립, 유지보수 자재의 공급사슬 구축 및 관리, 차량 폐기 또는 연장사용 등 도시철도 차량 운영과 관련된 전반적 의사결정 및 운영전략 수립에 시사점을 제시하는 것이다.

## 2. DEA 및 선행연구

### 2.1 효율성 및 DEA

효율성(Efficiency)이란 특정 조직이 제한된 자원이나 노력을 투입하여 거두어들인 성과(산출)와의 비율을 의미한다(이정동, 오동현, 2012). 효율성이 투입대비 산출의 비율이라는 점을 고려할 때 일반적으로 말하는 비효율은 기술적 비효율(technical inefficiency)이며 이는 일정한 기술수준에서 생산요소의 투입에 의해 달성 가능한 최대의 산출을 달성하지 못하는 정도라고 할 수 있다(Farrell, 1957). 효율성은 절대효율성과 상대효율성으로 구분되는데 절대효율성은 관심의 대상이 되는 활동주체의 투입대비 산출의 비율을 의미하며 주로 생산성을 나타낼 때 많이 사용한다. 반면 상대효율성은 활동주체가 가진 효율성 중에서 최고치와 비교하여 상대적으로 나타낸 값으로 최고 수준의 효율을 1 또는 100%로 표준화하였을 때의 상대적 비율

을 나타낸다(이정동, 오동현, 2012). 상대효율성을 분석하기 위해 사용하는 방법이 DEA인데 DEA는 비모수적인 방법으로 Farrell(1957)의 효율성 측정 개념과 Shephard(1970)의 거리함수 개념을 바탕으로 Charnes, Cooper and Rhodes(1978)의 연구에 의해 탄생하게 되었다. Charnes, Cooper and Rhodes(1978)는 효율성의 측정 대상을 DMU (Decision Making Unit, 의사결정단위)라고 불렀으며 DEA는 유사한 활동을 하는 평가 대상이 되는 DMU들로부터 가장 효율적인 DMU를 도출한 후 이들 가장 효율적인 DMU들이 만들어 내는 생산변경(Frontier)과 생산변경 내부에 위치하는 비효율적인 DMU와의 거리를 선형계획법(Linear Programming)으로 측정하여 개별 DMU의 상대적인 효율성을 측정한다. DEA는 회귀모형에서와 같이 잔차(Residual)에 대한 분포를 가정하는 모수적인 방법이 아니라 주어진 관찰 자료에서 가장 효율적인 DMU들을 기반으로 생산변경을 추정한다는 점에서 비모수적이다. DEA는 화폐단위로 측정되지 않은 다수의 투입변수와 산출변수를 분석할 수 있기 때문에 비영리 조직과 같은 개별 DMU의 상대적 효율성 측정에 많이 사용되어 왔다(이은국 외, 2003).

DEA는 규모수익(RTS, Return to Scale)의 가정에 따라 CCR과 BCC의 두 가지 모형으로 구분된다. Charnes, Cooper and Rhodes(1978)에 의해 처음 개발된 CCR 모형은 투입과 산출의 관계가 규모에 상관없이 일정 비율로 동일한 불변규모수익(CRS, Constant Return to Scale)을 가정하며 Banker, Charnes and Cooper(1984)에 의해 제시된 BCC 모형은 CCR 모형의 불변규모수익을 완화하여 투입과 산출의 관계가 규모에 따라 변하는 가변규모수익(VRS, Variable Return to Scale)을 가정한다. DEA 모형은 투입지향(Input-oriented)과 산출지향(Output-oriented)로 구분할 수 있는데 투입지향 모형은 산출을 고정한 상태에서 투입을 최소로 줄여 효율을 개선하는 것을 목적으로 하고 산출지향은 반대로 투입을 고정한 상태에서 산출을 최대화 하여 효율을 개선하는 것을 목적으로 한다.

DEA를 이용하여 상대적인 효율성을 계산하면 먼저 J개의 DMU가 있다고 가정하면  $DMU_j(j = 1, 2, \dots, J)$ 는 M개의 투입물  $x_m(m = 1, 2, \dots, M)$ 를 투입하여 N개 산출물  $y_n(n = 1, 2, \dots, N)$ 를 산출한다고 할 때 k번째 관측치인 k DMU의 효율성은 식(1)의 투입지향 CCR 모형에서처럼 선형계획법으로 해를 구하게 된다(이정동, 오동현, 2012).

$$\begin{aligned} \theta^k &= \min_{\theta, \lambda, s^-, s^+} \left\{ \theta^k - \epsilon \left( \sum_{m=1}^M s_m^- + \sum_{n=1}^N s_n^+ \right) \right\} \\ \text{subject to} \\ \theta^k x_m^k &\geq \sum_{j=1}^J x_m^j \lambda^j + s_m^- \quad (m = 1, 2, \dots, M); \\ y_n^k &\leq \sum_{j=1}^J y_n^j \lambda^j - s_n^+ \quad (n = 1, 2, \dots, N); \\ \lambda^j &\geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, J); \quad s_m^- \quad (m = 1, 2, \dots, M); \quad s_n^+ \quad (n = 1, 2, \dots, N); \end{aligned} \quad (1)$$

식(1)의 투입지향 CCR 모형 선형계획(Linear Programming)식에서  $\theta$ 는 투입량을 줄이는 비율이며  $s_m^-$ 과  $s_n^+$ 는 각각 투입과 산출에 대한 여유분(Slack)이다.  $\theta^*$ 가 1이며 투입과 산출의 모

든 여유분  $s_m^-$  과  $s_n^+$  가 0일 때 해당 DMU는 가장 효율적인 강효율(strongly efficient)이 된다. 가변 규모수익을 가정하는 BCC 모형은 투입기준일 경우 식(2)와 같은 선형계획식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta^{k*} = \min_{\theta, \lambda, s^-, s^+} & \left\{ \theta^k - \epsilon \left( \sum_{m=1}^M s_m^- + \sum_{n=1}^N s_n^+ \right) \right\} \\ \text{subject to} & \\ \theta^k x_m^k & \geq \sum_{j=1}^J x_m^j \lambda^j \quad (m=1, 2, \dots, M); \\ y_n^k & \leq \sum_{j=1}^J y_n^j \lambda^j \quad (n=1, 2, \dots, N); \\ \sum_{j=1}^J \lambda^j & = 1 \\ \lambda^j & \geq 0 \quad (j=1, 2, \dots, J) \quad s_m^- \quad (m=1, 2, \dots, M); \quad s_n^+ \quad (n=1, 2, \dots, N); \end{aligned} \quad (2)$$

BCC 모형에서는  $\sum_{j=1}^J \lambda^j = 1$ 이라는 볼록성(Convexity) 제약조건이 추가되어 관측치 혹은 관측치들을 선형내분으로 조합된 점을 무한히 축소하거나 확장하는 것을 허용하지 않는다. 대신 관측치들 간의 내분점 및 자유가치분성(free disposability)을 만족하는 점들만이 생산가능(production possibility)한 것으로 인정된다(이정동, 오동현, 2012). 따라서 BCC 모형에서의 생산변경은 불변규모수익을 가정하는 CCR 모형에서의 생산변경보다 안쪽에 있게 되어 BCC 모형에서 측정된 효율성이 더 크게 된다. 이러한 두 모형의 효율성 차이를 규모효율성(SE, Scale Efficiency)이라 하며 이는 규모의 최적성에 따라 나타나게 된다. 규모효율성 SE는 CCR 모형 효율성  $\theta_{CCR}^*$  과 BCC 모형 효율성  $\theta_{BCC}^*$  에 의해 식(3)과 같이 계산할 수 있다.

$$SE = \frac{\theta_{CCR}^*}{\theta_{BCC}^*} \quad (3)$$

SE가 1이면 CCR 모형과 BCC 모형의 효율성이 동일한 상태로 규모로 인한 비효율이 없는 불변규모수익(CRS, Constant Return to Scale) 상태임을 나타내며 1보다 작으면 규모의 경제성(IRS, Increasing Return to Scale) 또는 규모의 불경제성(DRS, Decreasing Return to Scale) 상태임을 나타내 규모로 인한 비효율이 존재한다는 것을 보여준다.

CCR 모형에서의 효율성을 기술효율성(TE, Technical Efficiency)라고 부르며 BCC 모형에서의 효율성을 순수기술효율성(PTE, Pure Technical Efficiency)이라고 부르는데 이는 규모로 인한 비효율을 제거하고 순수하게 기술적인 효율성만을 보여준다는 의미이다.

## 2.2 선행연구

철도 및 도시철도와 관련된 효율성을 분석한 선행연구로 김민정(2004)은 DEA와 프론티어 분석의 한 종류인 확률적 프론티어 분석(SFA, Stochastic Frontier Analysis)을 이용하여 서울메트로, 철도공사 광역철도 그리고 부산지하철의 효율성과 생산성을 분석하였으며 심광식과 김재운(2009)은 국내 도시철도 운영기관의 효율성을 DEA에 계층분석과정(AHP, Analytic Hierarchy Process)을 추가한 DEA-AR/AHP 모형을 이용하여 분석하였다. 유경상, 김승준(2012)은 전국 도시철도 16개 노선과 경전철 2개 노선을 대상으로 11개 투입요소와 6가지 산출요소의 DEA로 효율성을 분석하였으며 김수현, 정현영, 이원규(2014)는 전국 17개 도시철도 노선을 DEA를 이용하여 무임손실비용과 운임제도를 수송효율성의 영향요인으로 제시하였다. 강병재, 손기형, 이수열(2014)은 전국 7개 도시철도 운영기관을 확률적 프론티어 분석을 이용하여 효율성을 분석하였다. 이들 선행연구는 대부분 도시철도 운영기관 자체의 효율성이나 운행 노선별 효율성에 초점이 맞추어 분석이 이루어 졌으며 도시철도 차종에 따라 효율성을 분석한 연구는 아직 이루어지지 않고 있다.

## 3. 연구방법

### 3.1 분석 대상선정, 자료수집 및 분석도구

분석 대상인 DMU(의사결정단위, Decision Making Unit)는 서울메트로가 운영하는 1호선 VVF전동차 10개 편성과 저항형 전동차 6개 편성의 총 16개 편성(101~116편성)을 대상으로 분석을 진행하였다. DEA에 있어서 모든 DMU는 유사한 범위의 자원투입과 유사한 환경에서의 운영을 전제로 하기 때문에(Dyson, Allen, Camanho, 2001) 다른 호선의 차량을 제외하고 1호선 차량만을 분석의 대상으로 삼았다.

분석에 사용된 자료는 1호선 전동차 16개 편성의 2008년 1월 부터 2015년 12월 까지 8년 간의 유지보수 및 운영관련 자료를 서울메트로 RIMS(Rolling stock Information Maintenance System: 차량분야정보화시스템)에서 추출하여 분석 하였다. 분석에 사용된 도구는 공개된 통계 소프트웨어인 R 3.3.1 및 Benchmarking Package를 사용하였다,

### 3.2 DEA 모형 및 투입 산출 변수 선정

DEA에서 연구의도에 부합하는 타당한 분석이 이루어지기 위해서는 분석대상 DMU의 투입과 산출변수의 선정, 분석방법 등의 결정이 중요하다. DEA는 규모수익 가정에 따라 CCR 모형과 BCC 모형으로 나누어지며 투입 또는 산출 지향에 따라 모형이 나누어진다. 본 연구에서는 CCR 모형과 BCC 모형 모두들 사용하여 분석하였으며 Barros and Alves(2003)가 제시한 바와 같이 투입기준 모형을 사용하였다. 공공분야와 같은 비경쟁적 환경에서는 DMU의 운영 목적이 산출요소를 최대화하는 것이 아니며 공공기관은 주어진 예산을 효과적으로 사용하여 공공의 효익을 추구하기 때문에 일반적으로 투입기준 모형을 사용한다(Barros, Alves, 2003).

투입 및 산출변수의 선정은 도시철도 차량 종류에 따른 유지보수 운영의 효율성을 파악한다는 본 연구의 목적에 따라 Table.1 과 같이 유지보수건수 및 부품교환량의 2개 투입요소와 총 운행시간 및 총운행거리의 2개 산출요소를 사용하여 분석하였다.

일반적으로 DMU의 수는 투입과 산출변수의 합보다 최소 3배는 많아야 하는데(Barros, Alves, 2003) 본 연구에서는 이를 만족한다( $16 > 3 \times (2+2)$ ). 투입 및 산출요소의 데이터는 Table. 2 기술통계량은 Table. 3에 제시한다.

**Table. 1 Input and Output Variables Definition**

구 분	항 목	비 고
투입 변수 Input Variables	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ X1: 유지보수건수(The number of performed maintenance) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 일상적인 점검을 제외한 예방정비 및 사후정비 건수</li> </ul> </li> <li>○ X2: 부품교환량(A mount of part replacement) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 유지보수를 위해 사용(교체)한 부품의 수</li> </ul> </li> </ul>	검수 작업 기준
산출 변수 Output Variables	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Y1: 총운행시간(Total operation hours: Hours) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 차량이 운행된 총 시간</li> </ul> </li> <li>○ Y2: 총운행거리(Total driving distance: km) <ul style="list-style-type: none"> <li>- 영업운행과 회송거리를 합산한 총 운행거리</li> </ul> </li> </ul>	

**Table. 2 Input and Output Data**

DMU	투입 (유지보수건수)	투입 (부품교환량)	산출 (총주행시간, Hour)	산출 (총주행거리, km)
101	8,261	8,247	36,416.5	1,359,371.9
102	7,872	8,039	37,513.4	1,400,928.1
103	7,797	7,950	37,100.8	1,378,314.6
104	8,598	8,764	35,109.7	1,344,266.7
105	9,186	9,498	35,764.0	1,324,238.2
106	9,306	9,102	36,135.8	1,333,302.1
107	8,257	8,295	35,542.6	1,270,324.6
108	8,007	7,815	35,172.7	1,275,917.3
109	8,344	8,695	35,114.0	1,251,131.7
110	7,863	7,743	35,354.6	1,256,416.9
111	12,456	11,479	20,090.7	661,260.7
112	12,524	11,775	22,118.0	721,958.3
113	13,722	12,614	25,012.0	829,480.0
114	12,745	12,194	23,235.1	762,644.2
115	12,165	11,753	21,692.1	715,664.5
116	13,191	12,023	22,627.9	745,039.3

Table. 3 Descriptive Statistics of Input and Output Data

변수	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Dev
유지보수건수	16	7797.00	13722.00	10018.3750	2287.50050
부품교환량	16	7743.00	12614.00	9749.1250	1849.84111
총 주행시간	16	20090.70	37513.40	30874.9937	6828.42180
총 주행거리	16	661260.70	1400928.10	1101891.1937	294729.83565

## 4. 분석결과

### 4.1 투입 산출 변수의 차종간 차이

VVVF 차량과 저항 차량의 투입 산출요소의 평균은 Table. 4 처럼 차량 종류간 차이가 큰 것으로 나타났다. VVVF전동차는 저항차량에 비해 평균 유지보수건수에서 65%, 평균 부품교환량에서 41% 수준의 유지보수가 이루어 있었던 것에 비해 평균 총주행시간은 저항형 전동차에 비해 160%, 평균 총주행거리는 178% 로 큰 차이를 보여준다.

Table. 4 Mean Value of Input and Output Element at 2 Type of Train

	평균 유지보수건	평균 부품교환량	평균 총주행시간	평균 총 주행거리(km)
VVVF 전동차	8,349	8,415	35,922	1,319,421
저항형 전동차	12,801	20,388	22,463	739,341
차이(%)	4,451 (65%)	11,973 (41%)	13,460 (160%)	580,080 (178%)

### 4.2 투입 산출 변수간 상관분석

투입 및 산출변수의 상관분석(Correlation Analysis) 결과는 Table. 5 와 6에 제시한다. 일반적으로 DEA의 투입과 산출변수 사이의 상관관계는 투입변수가 증가하면 산출변수도 증가하는 양(+)의 상관을 가져야 한다(Mostafa, 2009). 상관분석 결과 저항형 전동차의 투입과 산출변수간 상관관계는 모두 강한 양(+)의 상관관계를 가지는 것으로 분석되었으나 VVVF전동차의 경우 입력변수인 유지보수건수는 총주행시간과 총주행거리 모두에서 음(-)의 상관을 그리고 부품교환량은 총주행시간과 음(-)의 상관관계를 보이고 있으나 유의수준  $\alpha=0.05$ 에서 유의하지 않은 것으로 나타나 분석을 진행하기로 하였다.

상관분석결과에서 주목해야 할 것은 저항형 전동차와 VVVF전동차의 투입요소와 산출요소간의 상관관계에서 서로 다른 특징이 발견 되었다는 것이다. 저항형 전동차는 투입변수와 산출변수가 강한 양(+)의 상관관계를 보여 차량의 운행이 유지보수와 밀접하게 관련이 되어 있음을 나타낸다. 그러나 VVVF전동차의 경우 투입요소인 유지보수건수는 2개 산출요소와 음(-)의 상관관계를 부품교환량은 총주행시간과 음(-)의 상관 및 총주행거리와 약한 양(+)의 상관이 있는 것으로 나타나 차량운행의 조건이 저항형 전동차처럼 유지보수와 밀접하게 관련되어 있지 않음을 추정할 수 있게 한다.

Table. 5 Correlations of VVVF Control Train's Input and Output Variables

	유지보수건수	부품교환량	총주행시간	총 주행거리
유지보수건수	1			
부품교환량	.941**	1		
총 주행시간	-.246	-.198	1	
총 주행거리	-.004	.050	.838**	1

\*\*. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Table. 6 Correlations of Resistor Control Train's Input and Output Variables

	유지보수건수	부품교환량	총주행시간	총 주행거리
유지보수건수	1			
부품교환량	.853*	1		
총 주행시간	.812*	.986**	1	
총 주행거리	.8255*	.990**	.998**	1

\*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

\*\*. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

#### 4.3 효율성 분석결과

분석대상 DMU들의 투입요소들과 산출요소들이 만들어 내는 생산변경 및 DMU들의 위치는 Fig. 1 및 2에서 확인할 수 있다.

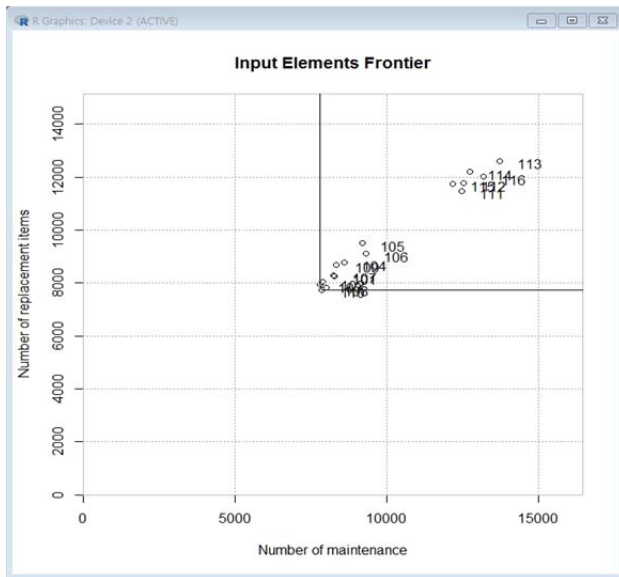


Fig. 1 Efficiency Frontier of Input Elements

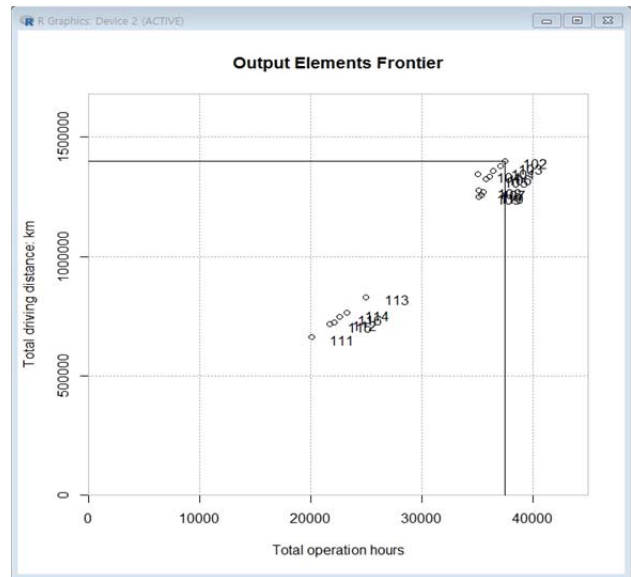


Fig. 2 Efficiency Frontier of Output Elements

Fig. 1에서 VVVF전동차(101~110)는 2가지 투입요소를 모두 저항형 전동차(111~116) 보다 원점 방향으로 가깝게 군집을 형성하며 생산변경을 그리고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는



VVVF전동차가 저항형 전동차보다 적은 투입요소를 사용하고 있다는 것을 의미한다. Fig. 2에서도 역시 VVVF전동차가 2가지 산출요소를 모두 저항형 전동차(111~116) 보다 원점 방향에서 멀게 군집을 형성하며 생산변경을 그리고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 VVVF전동차가 저항형 전동차보다 많은 산출을 하고 있다는 것을 의미한다. 따라서 VVVF전동차는 저항형 전동차에 비해 투입요소는 적게 사용하고 산출은 많다는 점에서 효율적임을 직관적으로 알 수 있다.

Fig. 3은 CCR 모형과 BCC 모형에서의 생산변경 및 DMU들의 위치를 보여준다. CCR 모형의 생산변경은 CRS(불변규모수익, Constant Return to Scale)가정에 따라 원점에서 출발하는 생산변경(청색 실선)을 그리고 BCC 모형의 생산변경(적색 점선)은 VRS(가변규모수익, Variable Return to Scale) 가정에 따라 CCR 모형에서의 생산변경 안쪽에 위치한다. CCR 모형에서는 VVVF 전동차인 102,103편성이 효율값 1로 생산변경에 위치하며 BCC 모형에서는 역시 VVVF 전동차 102,103,110 편성이 생산변경에 위치하고 다른 VVVF전동차 DMU들 역시 생산변경 가까운 위치에 군집화 하여 높은 효율을 보여준다. 반면 저항형 전동차들은 CCR 모형 및 BCC 생산변경 내부 좌측 하단(Lower Right)에 군집화 하여 상대적으로 비효율적임을 보여준다.

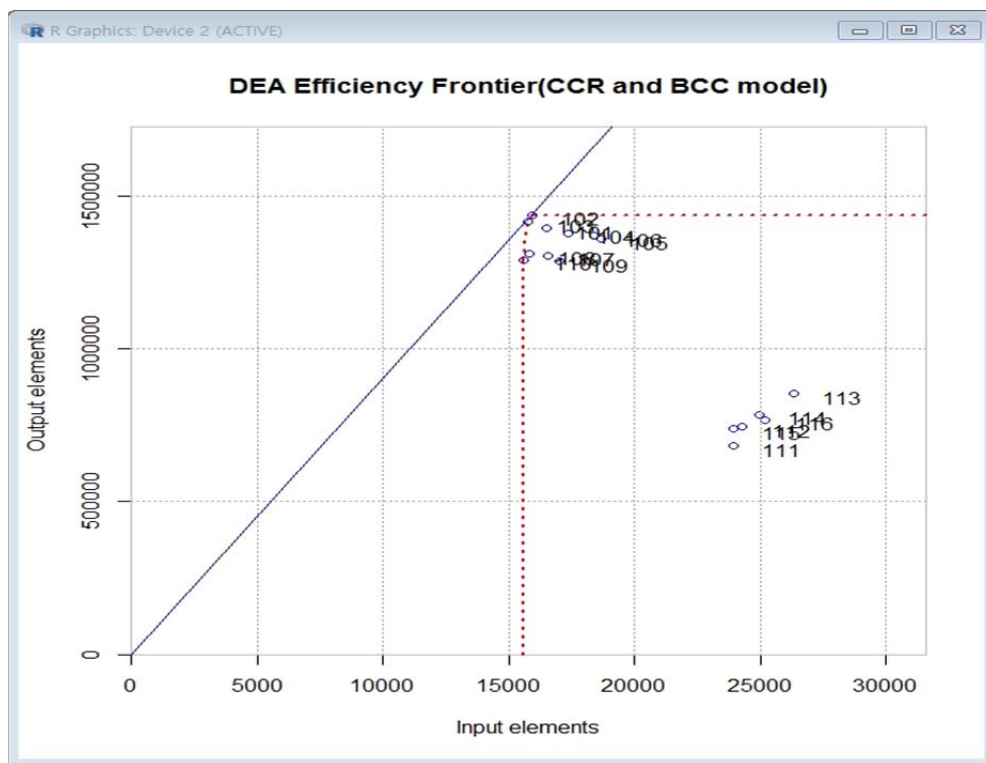


Fig. 3 CCR and BCC Model DEA Efficiency Frontier of Input and Output Elements

DEA 결과 나타난 효율성 값은 CCR 모형의 기술효율성(TE, Technical Efficiency), BCC 모형의 순수기술효율성(PTE, Pure Technical Efficiency), 규모효율성(SE, Scale Efficiency)으로 구분하여 Table. 7에 종합적으로 제시하였다. 분석결과 VVVF전동차(101~110)는 CCR 모형의 기술효율성(TE) 및 BCC 모형의 순수기술효율성(PTE) 모두에서 저항형 전동차에 비해 높은 수치를 보여 효율적임을 증명하고 있다. CCR 모형의 기술효율성(TE)에서 VVVF전동차는 102편성과

103편성이 효율값 1의 가장 높은 효율을 보이고 있으며 VVVF전동차 평균은 0.92로 전체적으로 높은 효율을 보여준 반면 저항형 전동차는 평균 0.4로 낮은 효율을 보여준다.

BCC 모형의 순수기술효율성(PTE)에서도 VVVF전동차는 102, 103, 110편성이 효율값 1로 가장 높은 효율을 보이고 있으며 VVVF전동차 평균은 0.95로 높은 효율을 보여준다. 반면 저항형 전동차는 평균 0.65로 낮은 효율값을 보여준다. CCR 모형에서의 기술효율성(TE) 보다 BCC 모형에서의 순수기술효율성(PTE)이 높은 수치를 보여주는 것은 규모의 비효율을 제거한 상태에서 순수하게 기술적인 효율만을 보여주기 때문이다.

CCR 모형과 BCC 모형의 결과값을 이용하여 규모효율성(SE, Scale Efficiency)값을 산출할 수 있는데 본 연구 결과에서는 102, 103편성이 규모효율성 1로 불변규모수익(CRS)상태에 있음을 확인할 수 있다. 나머지 DMU들은 규모효율성이 1이하의 가변규모수익(VRS)이며 람다합(Sum of Lambda)이 1 이하로 규모의 경제성(IRS, Increasing Return to Scale) 상태임을 보여준다.

**Table. 7 Result of DEA with Efficiency, Status of Return To Scale and Sum of Lambda**

DMU	TE	PTE	SE	Reference	RTS	Sum of Lambda
101	0.9462	0.96	0.9856	103	Increasing	0.971664642
102	1	1	1.0000	102	Constant	1
103	1	1	1.0000	103	Constant	1
104	0.8801	0.9069	0.9704	103	Increasing	0.959554384
105	0.817	0.8488	0.9625	103	Increasing	0.953365997
106	0.8507	0.865	0.9835	103	Increasing	0.973989779
107	0.9181	0.9477	0.9688	103	Increasing	0.958000906
108	0.9644	0.9949	0.9693	103	Increasing	0.94803077
109	0.8831	0.9344	0.9451	103	Increasing	0.936038855
110	0.9784	1	0.9784	110	Increasing	0.952933629
111	0.375	0.6745	0.5560	110	Increasing	0.541516625
112	0.4025	0.6575	0.6122	110	Increasing	0.596159652
113	0.4249	0.6138	0.6922	110	Increasing	0.67416336
114	0.4083	0.6349	0.6431	110	Increasing	0.626269514
115	0.3955	0.6588	0.6003	110	Increasing	0.584680115
116	0.4033	0.644	0.6262	110	Increasing	0.609903291

#### 4.4 비효율 DMU의 개선목표

DEA는 비효율적인 DMU가 효율적으로 되기 위한 구체적인 참조집합과 가중치 정보를 제공한다. 따라서 분석결과 나타난 개선 정보를 이용하여 효율화를 위한 개선방향과 전략을 도출할 수 있으나 본 연구와 같이 도시철도 전동차의 운영효율 분석에 있어서는 차종에 따른 특성차이가 효율에 반영된 것이기 때문에 다른 관점에서 접근이 이루어져야 한다. 이는 구체적인 개

선 방향의 설정이 일반 생산조직이나 판매조직과 같이 높은 산출을 경쟁하는 DMU들과 다르기 때문이다. 본 연구에서 비효율적으로 분석된 저항형 전동차의 구체적인 참조집합(102,103,110편성) 및 개선 목표를 Table. 8과 같이 제시하여 저항형 전동차의 구체적인 효율성 개선 전략에 도움이 될 수 있지만 투입요소인 유지보수건수와 부품교환량은 차량의 안전 확보와 운영을 위해 필수 불가결한 것으로 효율개선을 위해 투입요소를 줄일 수는 없는 것이며 산출요소인 총주행시간 및 총주행거리 역시 차량 운행계획 및 조건에 따라 결정되는 것으로 무조건 늘일 수 있는 요소는 아니다. 그러나 DEA를 통한 분석결과가 차량의 종류 및 특성에 따른 누적된 운영결과가 효율성에 반영되어 나타난 결과라는 점과 VVVF전동차(CCR:0.92, BCC:0.95)와 저항형 전동차(CCR:0.4, BCC:0.65)의 효율성 차이가 크다는 것을 고려할 때 차량운영 및 운영전략 수립에 있어 시사하는 바가 크다고 할 수 있다.

**Table. 8 Projection to Efficiency Frontier for Efficiency Improvement**

		투입(유지보수건수)			투입(부품교환량)			산출(총주행시간)			산출(총주행거리)		
DMU	EFF	Data	Pro- jection	Diff. (%)	Data	Pro- jection	Diff. (%)	Data	Pro- jection	Diff. (%)	Data	Pro- jection	Diff. (%)
101	0.96	8261	7807.2	-5.5	8247.4	7917.5	-4	36416.5	36829.3	1.1	1359372	1359372	0
102	1	7872	7872	0	8038.9	8038.9	0	37513.4	37513.4	0	1400928	1400928	0
103	1	7797	7797	0	7949.8	7949.8	0	37100.8	37100.8	0	1378315	1378315	0
104	0.907	8598	7797.4	-9.3	8764.4	7948.3	-9.3	35109.7	37088.0	5.6	1344267	1377436	2.5
105	0.849	9186	7797.0	-15.1	9497.5	7949.7	-16.3	35764.01	37100.4	3.7	1324238	1378301	4.1
106	0.865	9306	7821.3	-16.0	9102.0	7873.2	-13.5	36135.8	36455.8	0.9	1333302	1333302	0
107	0.948	8257	7825.0	-5.2	8295.0	7861.1	-5.2	35542.6	36353.9	2.3	1270325	1326189	4.4
108	0.995	8007	7852.4	-1.9	7815.1	7775.6	-0.5	35172.7	35633.8	1.3	1275917	1275917	0
109	0.934	8344	7796.9	-6.6	8695.2	7949.7	-8.6	35114	37100.4	5.7	1251132	1378301	10.2
110	1	7863	7862.9	-0.0	7742.5	7742.5	0	35354.6	35354.6	0	1256417	1256429	0.0
111	0.675	12456	7862.9	-36.9	11479.5	7742.4	-32.6	20090.7	35354.2	76.0	661260.7	1256404	90.0
112	0.658	12524	7862.9	-37.2	11775.2	7742.4	-34.2	22118.02	35354.2	59.8	721958.3	1256404	74.0
113	0.614	13722	7862.9	-42.7	12614.2	7742.4	-38.6	25012	35354.2	41.3	829480	1256404	51.5
114	0.635	12745	7862.9	-38.3	12193.8	7742.4	-36.5	23235.1	35354.2	52.2	762644.2	1256404	64.7
115	0.659	12165	7862.9	-35.4	11752.7	7742.4	-34.1	21692.1	35354.2	63.0	715664.5	1256404	75.6
116	0.644	13191	7862.9	-40.4	12023.1	7742.4	-35.6	22627.9	35354.2	56.2	745039.3	1256404	68.6

분석결과의 수치만을 해석할 때 Table. 6 과 같이 저항형 전동차는 VVVF 전동차 102,103편성과 동일한 효율을 얻기 위해 투입은 최소 32%에서 최대 42% 이상을 줄여야 하고 산출은 최소 41%에서 최대 90%까지 높여야 한다는 것은 두 차종간의 효율성 차이는 비용발생 구조 및 전체적인 도시철도 운영에 있어서 유의한 비효율을 유발한다는 것을 추정할 수 있게 한다.

## 5. 결론

### 5.1 연구결과 요약

DEA를 이용하여 도시철도 전동차의 운영효율을 분석하기 위해 투입요소로 유지보수건수 및 부품교환량의 2개 투입요소와 총운행시간 및 총운행거리의 2개 산출요소를 사용하여 투입지향 CCR 모형 및 BCC 모형으로 분석하였다. 또한 투입 및 산출변수의 타당성을 검증하기 위해 변수간 상관분석을 하였다.

DEA 결과를 종합하면 저항형 전동차는 VVVF전동차에 비해 상대적으로 낮은 운영 효율을 보여주고 있다. CCR 모형의 기술효율성(TE)에서 VVVF전동차 평균은 0.92로 전체적으로 높은 효율을 보여준 반면 저항형 전동차는 평균 0.4로 낮은 효율값을 보여주었다. BCC 모형의 순수기술효율성(PTE)에서도 VVVF전동차는 평균 0.95로 높은 효율을 보여준 반면 저항형 전동차는 평균 0.65로 낮은 효율값을 보여주었다. DEA를 통한 투입요소와 산출요소의 생산변경 및 CCR과 BCC 모형의 각 차종에 따른 DMU들의 생산변경과의 상대적 위치도 VVVF전동차와 저항형 전동차가 서로 다른 위치에 군집을 형성한다는 것을 확인할 수 있었다.

규모효율성 분석에서는 비효율적인 DMU의 개선을 위한 참조 집합으로 분석된 102, 103편성의 경우를 제외하고는 모두 규모효율성 SE 값이 1이하로 나타나 규모에 의한 비효율이 있는 상태이며 람다합(Sum of Lambda)이 1이하로 규모의 경제(IRS, Increasing Return to Scale) 상태임을 보여준다.

DEA 결과를 바탕으로 비효율적으로 분석된 저항형 전동차가 가장 효율적으로 나타난 VVVF 전동차 102,103편성과 동일한 효율을 얻기 위해 투입요소는 최소 32%에서 최대 42% 이상을 줄여야 하며 산출요소는 최소 41%에서 최대 90% 까지 늘려야 한다는 것을 알 수 있었다.

### 5.2 연구의 시사점과 향후 연구과제

연구결과 시사점은 첫 번째, 상관분석결과 저항차의 투입요소인 유지보수와 산출요소인 주행시간 및 거리가 강한 양(+)의 상관관계를 보여 저항차의 운영을 위해서는 많은 유지보수가 전제가 된다는 것을 알 수 있으며 두 번째, 저항형 전동차의 유지보수가 VVVF전동차에 비해 유지보수건수와 부품교환량 모두에서 더욱 많이 필요하다는 점에서 관련된 비용, 시간, 인력 요구량이 클 것임을 시사하며 세 번째, 저항형 전동차의 운영효율이 VVVF전동차의 운영효율에 비해 낮게 분석되었으며 이는 저항형 전동차의 운영으로 인해 전체 도시철도차량 운영에 전반적으로 부정적인 영향을 줄 것이라는 점을 시사한다.

따라서 종합적인 분석결과에 의해 노후 되어 효율이 떨어지는 차량과 효율이 높은 차량의 동시 운영 시 전체적인 운영시스템에 미치는 영향과 유발되는 문제점 등을 고려해서 운영전략을 수립해야 하며 노후 차량의 수명주기 도래에 따른 폐차, 차량개조, 연장사용 등 의사결정에 있어 발생비용, 운영효율, 고객서비스 등 종합적인 고려가 필요하다는 것을 시사한다.

향후 연구과제는 노후차량의 개조 대수선 및 연장사용에 따른 효과성을 분석하여 도시철도 차량 운영에 있어 차량의 선정, 폐기, 연장사용의 의사결정에 있어 판단 근거를 마련할 수 있는 보다 세부적인 연구가 지속되어야 할 것이다.

## 참고문헌

- [1] 김민정(2004), “한국도시철도 운영기관들의 효율성과생산성 분석” , 박사학위논문, 서울대학교.
- [2] 김수현, 정현영, 이원규 (2014), “DEA를 활용한 도시철도 노선별 수송효율성 분석,” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No.2, pp.605-616.
- [3] 박진경, 김성수(2007), “확률적 비용변경 접근을 이용한 한국과 일본 철도산업의 효율성과 생산성 분석” , 대한교통학회, 제25권, 제6호, pp.141-157.
- [4] 서울메트로 RIMS(Rolling stock Information Maintenance System: 차량분야정보화시스템).
- [5] 심광식, 김재윤(2009), “지하철 효율성 평가를 위한 DEA-AR/AHP 모형 설계” , 한국경영과학회, 제34권, 제3호, pp.105-124.
- [6] 오창호 (2012), “국과 일본 도시철도 운영기관의 효율성 및 생산성 비교분석 : 자료포락분석기법(DEA)을 이용하여” , 석사학위논문, 서울대학교.
- [7] 유경상, 김승준 (2012), “DEA 기법을 활용한 도시철도 운영효율성 분석에 관한 연구,” *도시철도연구* 제13권, 제4호, pp.237-246.
- [8] 이은국, 원구환, 오승은 (2003), “지방정부 생산성 측정의 이론과 실제,” 집문당.
- [9] 이정동, 오동현 (2012), “효율성분석이론,” (주)지필미디어.
- [10] Banker, R.D., A. Charnes, and W.W. Cooper (1984), “Some models for estimating technical and scale inefficiencies in Data Envelopment Analysis,” *Management Science*, Vol.30, No.9, pp.1078-1092.
- [11] Barros, C.P. and C.A. Alves (2003), “Hypermarket retail store efficiency in Portugal,” *International Journal of Retail and Distribution Management*, Vol.31, No.11, pp.549-560.
- [12] Charnes, A., W.W. Cooper, and E. Rhodes (1978), “Measuring the efficiency of decision making units,” *European Journal of Operational Research*, Vol.2, No.6, pp.429-444.
- [13] Cooper, W.W., L.M. Seiford, K. Tone (2000), “Data Envelopment Analysis; A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software,” Kluwer Academic Publishers.
- [14] Cooper, W. W., Deng, H., Gu, B., Li, S., and Thrall, R. M.(2001), “Using DEA to Improve the Management of Congestion in Chinese Industries(1981-1997),” *Socio-Economic Planning Sciences*, 35(4), pp.227-242.
- [15] Dyson, R.G., R. Allen, A.S. Camanho, V.V. Podinovski, C.S. Sarrico, and E.A. Shale (2001), “Pitfalls and protocols in DEA,” *European Journal of Operational Research*, Vol.132, No.2, pp.245-259.

- [16] Farrell, M. J.(1957), "The Measurement of Productivity Efficiency," Journal of the Royal Statistical Society, Series A(General), 120 (3), 253-290.
- [17] Grosskopf, S., D. Margeritis and V. Valmanis (2001), "Comparing Teaching and Nonteaching Hospitals: A Frontier Approach (Teaching VS. Non-teaching Hospitals)," Health Care Management Science, Vol.4, No.2, 83-90.
- [18] Mostafa, M.(2009), "Benchmarking the US specialty retailers and food consumer stores using data envelopment analysis," International Journal of Retail and Distribution Management, Vol.37, No.8, pp.661-679.
- [19] Shephard, R.(1970), "Theory of Cost and production Functions," Princeton, NJ, Princeton University Press.
- [20] Slack, N., M. Lewis (2015), "Operations Strategy: Fourth Edition," Pearson, Harlow United Kingdom, Pearson Education Limited.