

다양한 공정변수를 포함한 생산품의 효율성 평가방법에 관한 연구

김철^{a*}, 조용주^a, 서윤호^b, 조현제^a

Production Efficiency Evaluation Considering Various Process Parameters

Kim Chul^{a*}, YongJu Cho^a, Yoonho Seo^b, Hyunjae Jo^a

^a KITECH, 89 Yangdaegiro-gil, Ipjang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan-si, Chungcheongnam-do 331-822, Republic of Korea

^b Dept. of Industrial Engineering, KOREA UNIVERSITY, 145 Anam-ro Seongbuk-gu 136-701, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	24	October	2013
Revised	21	Month	2013
Accepted	25	November	2013

Keywords:

Production Efficiency
Data envelopment analysis
Analytic hierarchy process
DEA
AHP

ABSTRACT

From an economic perspective, an enterprise's business activity depends on the efficient use of corporate resources for generating profits. However, on the enterprise side, it is difficult to measure and evaluate the effective use of each resource. This paper suggests an alternative for eliminating process inefficiencies in the consolidation of competitive power in auto parts manufacturing company A. Multitudinous process variables from company A's raw materials-to-shipment process are configured as input resources, and a Data Envelopment Analysis(DEA) is carried out to determine economical benefit of said resources' operation, as well as how products are manufactured. The DEA model offers a non-parametric approach to measuring relative efficiency using input and output factors. Furthermore, AHP is used for logically deciding the importance of each evaluation factor. In general, DEA models have been used for measuring efficiency of the service and public sectors. However, this study focused on measuring the efficiency of SMEs production lines .

1. 서론

제조업은 원재료를 투입하여 인력이나 기계 및 다른 힘으로 원재료를 가공하여 제품을 산출하는 산업이다. 경제적 관점에서 기업의 경영활동은 그 기업의 자원을 얼마나 효율적으로 사용하여 이윤을 이끌어 내는지에 관한 문제이다. 기업이 가진 자원의 모든 사용성을 검토하고 가장 효율적으로 사용될 수 있는 방법을 선택할 때에 가장 적은 비용으로 기업의 경영성과를 극대화할 수 있는 것이다. 이렇듯 기업 자원의 효율적 사용은 기업에게 있어 매우 중요한 내용이지만 각각의 자원이 얼마나 효율적으로 사용되고 있는지를 측정하고 평가하는지에 관한 문제는 매우 어려운 일이다.

전통적인 경제학 분야에서의 효율성의 개념으로는 제품의 원가를 통한 제품별 분석으로 수익성 분석을 하기가 비교적 용이하다. 그러나 공학적 개념으로써 접근하게 되면 제품의 개발과 생산에서 적용되는 개발의 난이도, 적용 기술수준, 공정간 변수의 차이 등은 간단하게 원가로 계량하여 비용으로 반영하기가 어려워 경제학 분야에서의 효율성 개념을 적용하기 어려운 부분이 있다. 또한 다수의 경쟁사회에서 단순히 원가분석과 수익성만으로 효율을 분석하여 대응한다는 것은 기업 운영의 경쟁성을 저하시키는 원인이 된다. 그래서 제품의 개발에서부터 출하까지 이르는 과정에서 발생하는 수많은 공정변수들을 투입자원으로 반영하고 납기에서 발생하는 여러 가지 산출성과를 비교하여 제조과정에서의 효율을 종합적

* Corresponding author. Tel.: +82-41-589-8418

Fax: +82-41-589-8419

E-mail address: mr.kimchul@gmail.com (Kim Chul).

으로 분석해볼 필요가 있다. 이러한 과정을 통하여 효율성이 낮은 제품에 관해서는 어느 제품을 벤치마킹의 대상으로 삼아야 하는지, 어떠한 제품이 보다 효율적인지, 구체적으로 얼마만큼의 투입과 산출이 부족하고 과한지를 생산품의 효율성 측면에서 공정변수를 분석해 보고자 한다.

2. 효율성에 관련된 연구

2.1 효율성의 개념

효율성의 개념과 관련하여 다음과 같은 3가지 질문에 대한 합리적인 답변이 필요하다^[1].

- ① 생산조직의 투입요소와 산출요소가 다수일 때 어떤 투입요소와 산출요소를 분석에 포함시켜야 하는가?
- ② 어떤 방법으로 총괄해야 하는가?
- ③ 생산조직의 잠재능력을 어떻게 결정해야 하는가?

Knight (1933)는 첫 번째 및 두 번째 질문에 대하여 다음과 같이 설명하고 있다. 만약 생산조직이 사용하는 모든 투입요소와 생산하는 모든 산출물을 분석에 포함시킨다면 에너지보존법칙에 따라 모든 생산조직의 효율성 비율이 1의 값을 갖게 될 것이다. 따라서 효율성 개념은 투입요소에 대한 유용한 산출물의 비율로 다시 정의되어야 한다. 효율성에 대한 Knight의 재정의는 유용한 투입요소에 대한 유용한 산출물의 비율로 확장하고 유용성을 시장가격을 반영한 가중치로 나타낸다면 이는 현대적 의미의 효율성 개념이 된다. 그러나 실질적으로 문제가 되는 것은 모든 투입요소와 산출물을 분석에 포함시켰을 때가 아니라 오히려 충분한 투입요소와 산출물을 포함시키지 못했을 때 이다.

Stigler (1976)가 지적했듯이 비효율성은 포함시켜야 할 변수와 제약이 누락된 결과일 수도 있으며 생산조직의 경제적 목적을 옹호 반영하지 못한 결과일 수도 있다. Stigler의 이러한 견해는 Kopp, Smith, and Vaughan (1982)에 의해 뒷받침된 바 있다^[2].

2.2 효율성의 정의

Farrell (1957)은 확정적 비모수프론티어로 투입물의 효율성을 처음 측정하였는데, 복수개의 투입요소를 고려하여 기업의 효율성을 기술적 효율성(technical efficiency)과 배분적 효율성(allocative efficiency)으로 나누어 이들의 종합적인 개념을 Fig. 1과 같은 그래프로 나타내고 경제적 효율성이라고 정의하였다.

Farrell (1957)에 의하면 일정하게 고정되어진 산출요소(생산)을 위해 생산요소(투입)를 최소화할 수 있는 능력을 기술적 효율성이라 의미하였다. 기술적 효율성을 달성하기 위해서는 Fig. 1의 등량곡선(Isoquant Curve) 상(on)에서 생산을 해야 한다. 배분적 효

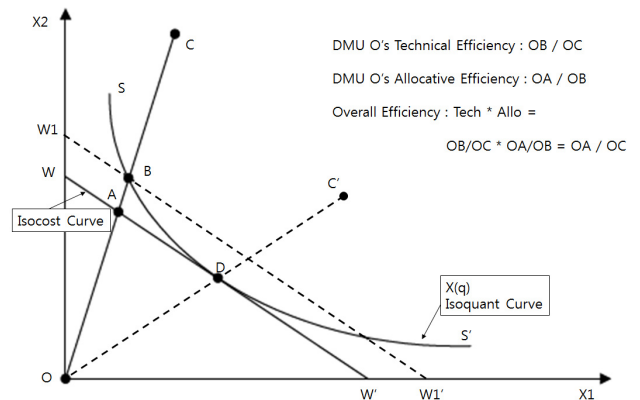


Fig. 1 Farrell (1957)'s economical efficient

율성이란 선분 \overline{OC} 가 최적 DMU (Decision Making Unit)인 D를 통과하지 않아 투입요소 간의 결합비율이 최적이지 아닌 상태에서 생산이 이루어짐으로 발생하는 것이다. 즉, 배분적 효율성이란 기술적 효율성을 충족함과 동시에 투입요소의 상대가격까지 고려하여 최적 요소 투입의 비율을 결정하는 것으로 정의된다. 전형적인 미시경제학 교과서 그래프에서 등량곡선과 등비용선이 접하는 점 D가 바로 Farrell의 배분적 효율성을 나타낸다.

본 논문에서 사용되어질 효율성 측정방법은 Farrell의 연구결과를 기초로 개발한 Charnes, Cooper, and Rhodes (1978)의 자료 포락분석(data envelopment analysis: DEA)이라는 비모수적 효율성 측정방법이다. DEA는 선형계획법모형의 형태를 갖는 경영과학 기법으로 제안되어 기업의 효율성 측정 뿐 아니라 비효율성의 원인분석 및 효율성 개선의 목표설정을 위한 도구로 널리 활용되고 있다^[2].

2.3 효율성 분석 방법론의 선택

일반적인 효율성의 평가는 Fig. 2와 같이 투입대비 산출의 비로 표현할 수 있다. 경제학적 효율성 분석 방법에서는 투입과 산출의 관계에 대해 콥-더글라스(Cobb-Douglas) 생산함수와 같은 특정한 형태의 생산함수를 가정하고 관측된 자료에 기초하여 이 생산함수의 모수를 추정하고 그 효율성을 분석하게 된다. 그러나 경제적 분석방법에서는 규모수익 불변의 법칙이 절대적으로 성립한다는 가정 하에 제시된 것이므로 일반적인 제조산업에서는 다양한 투입

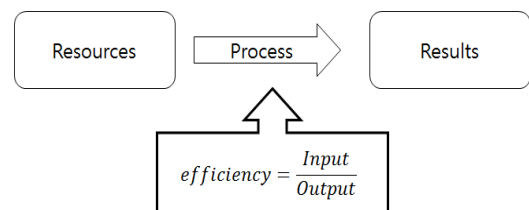


Fig. 2 A basic model for efficient

변수들을 고려할 때에 가정이 성립되지 않는 문제가 발생하게 된다. 그러나 DEA는 이러한 생산함수의 형태에 대해 가정을 하지 않고, 주어진 자료만으로 투입/산출의 생산관계를 비모수적으로 추정하기 때문에 분석자의 자의적인 판단에 따른 함수형태 설정의 오류를 피할 수 있다. 또한 DEA는 기존의 연구에서 주로 수행되는 절대 효율성의 정도를 비교 평가하기 위한 기준치를 제공하지 못하는 한계점을 해결하는 방안으로 적용할 수 있다. 즉, DEA는 다수의 투입과 산출 변수들을 동시에 고려하여 가장 효율적인 개체와의 상대적 효율성(relative efficiency)을 측정 한다는 점에서 성과 평가를 위한 효과적인 방법론으로 사용되어 왔다^[3].

이러한 기법은 그 동안 공공기관이나 영리/비영리 기관의 상호이용 효율성을 분석하는데 주로 적용되어 왔으며, 제조업계를 대상으로 한 논문도 경영학적 개념으로써 기업간의 효율성 분석에만 주로 편중되어 있었다.

본 논문에서는 기존의 표준원가 또는 매출액을 산출하여 효과성을 비교, 분석하는 종래의 방법과는 다른 방법으로 제품의 효과를 분석하여 보겠다는 접근으로 시작하였다. 종래의 방법은 사전에 책정된 비용과 평가 기준을 적용하고 사후 실적을 비교하여 개선방향을 결정하였다면, 본 논문에서는 DEA로 평가대상(제조생산물)을 다중 투입요소와 산출요소로 나눈 뒤 우수한 효율성을 가진 생산품과 그렇지 못한 것을 구분한다. 아울러 DEA에서 이용되는 자료에서 비롯되는 실증자료에 통계적 오류 한계점과 현장전문가의 정성적 중요도가 반영되지 않는 단점이 있음으로 Fig. 3과 같이 AHP를 통한 설문으로 DMU의 각 요소에 실증적 중요 가중치를 부여하여 산출하게 된다.

AHP (Analytic Hierarchy Process) 기법은 Saaty (1980)가 제시한 정성적인 요인 고려 방법으로 AHP기법의 의사결정의 계층구조를 구성하고 있는 요소간의 쌍대 비교에 의한 판단을 통하여 인간의 직감을 계량화하고 합리화 시켜 주며, 문제를 분해해서 평가하고 이를 다시 종합하여 최종결정을 내리는 문제해결 구조가 인간의 논리적인 문제해결 구조와 유사하므로 현실에 적용하기가 용이하다^[4]. 이렇게 상호 비교하여 도출된 효율성은 투입요소와 산출요소에 관한 과부족/과충분점을 계량화 할 수 있게 되고 높은 효율을 향한 지향점을 가진다는 점이 기업에의 전략적 경제적 측면에서

유용한 시사점을 제공하게 될 것이다.

3. 분석 도구의 이론적 배경

3.1 Data Envelopment Analysis (DEA)

DEA 측정모형은 의사결정단위 DMU (Decision Making Unit)의 투입물 및 산출물에 대해 선형계획법을 적용하여 가장 효율적인 DMU의 투입물 및 산출물의 Frontier를 구축한 후, 이 Frontier와 특정 DMU의 투입 및 산출물 간의 거리를 계산하여 상대적 효율성을 측정하는 기법이다^[5].

효율성을 측정하는 방법은 크게 산출수준은 유지하면서 투입요소 사용량의 비례감소로 기술적 효율성을 계산하는 (1) 투입기준 효율성 측정방법(Input Based Measures)과 투입수준은 유지하면서 산출물 생산의 비례증가로 기술적 효율성을 계산하는 (2) 산출기준 효율성 측정방법(Output Based Measures)이 있다. 이러한 방법론은 Debreu (1951)와 Koopman (1951)을 시작으로 Farrell (1957)등에서 이론적 기초가 마련되었다^[6]. Charnes, Cooper와 Rhodes (1978)는 규모에 대한 수익 불변(Constant Return to Scale: CRS)모형(CCR모형)을 개발하였으며, 이후 Banker, Charnes와 Cooper (1984)는 규모에 대한 수익변동(Variable Return to Scale: VRS)모형(BCC모형)으로 발전시켰다.

절차에 의하면 모든 DEA 모형은 생산가능집합을 정의하는 것으로부터 시작된다. 특정한 수준의 투입으로 특정한 수준의 산출을 만들어 낸다면 그것을 “생산가능” 이라고 하며 생산가능한 투입/산출물의 조합들을 모두 모아 놓은 것을 생산가능집합이라 한다. 실증분석 단계에서 연구의 기준이 된 모델은 분석결과 규모에 대한 수익불변(CRS)이 해당되는 모수들에 의해 이루어졌기에 DEA-CCR모형을 적용할 것이며 투입지향모형을 기본으로 하고 있다. CCR모형은 평가대상이 되는 DMU들의 투입물의 가중합계에 대한 산출물의 가중합계의 비율이 1을 초과해서는 안되며, 각 투입요소와 산출요소의 가중치들은 0보다 크다는 단순한 제약조건하에서 DMU의 투입물 가중합계에 대한 산출물 가중합계의 비율을 최대화시키고자 하는 선형분수계획법이다. 따라서 CCR모형은 투입요소 가중치와 산출요소 가중치의 비율로서 실적을 요약한다. 즉, 투입요소에 대한 가중치 $v = (v_1, v_2, \dots, v_m)$ 와 산출요소에 대한 가중치 $u = (u_1, u_2, \dots, u_s)$ 를 사용하여 가상산출(Virtual Output)과 가상투입(Virtual Input)의 총요소생산성 비율을 아래의 식 (1) 과 같이 구한다.

$$\frac{\sum_{r=1}^s u_r y_r}{\sum_{i=1}^m v_i x_i} \tag{1}$$

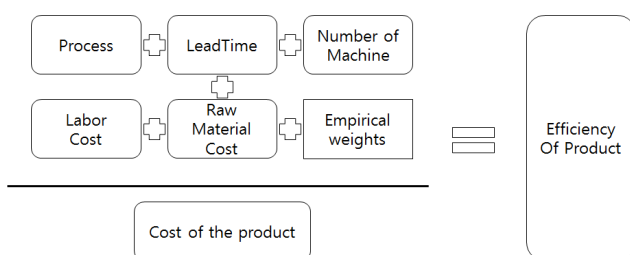


Fig. 3 Total efficiency with empirical weight

평가대상이 되는 개별 DMU_k $k \in \{1, 2, \dots, n\}$ 에 대하여 효율성은 다른 DMU의 실적을 반영하는 제약조건하에서 가중산출과 가중투입 비율의 극대치로써 측정할 수 있다. 투입지향 CCR모형은 평가되어야 할 n 개의 DMU가 존재하고 각 DMU는 m 개의 투입물을 사용하여 s 개의 산출물을 생산한다. 특히 j 번째 DMU_j ($j = 1, 2, \dots, n$)의 i 번째 투입물의 사용량을 x_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m$)라고 하고, r 번째 산출물을 아래와 같이 y_{rj} ($r = 1, 2, \dots, s$)라고 하자. 그리고 $x_{ij} \geq 0$ 이고 $y_{rj} \geq 0$ 이라 하고, 개별 DMU는 최소한 하나 이상의 투입요소를 사용하여 하나 이상의 산출요소를 생산한다고 하자. 그러면 특정 의사결정단위, DMU_0 의 효율성 측정치, h_0 를 구하기 위한 수리계획모형은 다음과 같은 분수형계획문제 (Fractional Programming Problem) 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{Max } h_0 &= \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{r0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}} & (2) \\
 \text{s.t. } & \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1, \quad j = 1, \dots, n \\
 & u_r \geq \varepsilon > 0, \quad r = 1, \dots, s \\
 & v_i \geq \varepsilon > 0, \quad i = 1, \dots, m
 \end{aligned}$$

여기서, ε : non-Archimedean

상수위 식에서 첫 번째 제약식은 목적함수에서 동일한 가중치 u_r 와 v_i 를 이용하여 계산한 가중합계의 비율이 1보다 작거나 같다는 것을 나타내며, 나머지 두 제약조건식은 투입물과 산출물의 가중치는 0보다 커야 한다는 것이다. 또한 ε 은 모든 조건 가중치의 값이 임의의 작은 양수 ε 이상의 값을 갖도록 하는 조건을 나타낸다. 그리고 위 식은 목적함수가 비선형(Nonlinear), 제약조건이 비볼록(Nonconvex)이므로 목적함수의 투입물의 가중합을 1로 고정하고 제약조건식을 변형한 후 개별 DMU에 대해서 아래 식 (3)과 같이 선형계획법 문제로 풀면 된다.

$$\begin{aligned}
 \text{Max } h_0 &= \sum_{r=1}^s u_r y_{r0} & (3) \\
 \text{s.t. } & \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0, \quad j = 1, \dots, n \\
 & \sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1 \\
 & u_r, v_i \geq \varepsilon, \quad \forall r, i
 \end{aligned}$$

위 식을 쌍대문제로 변형하면 식 (4)과 같은 선형계획법 문제로 주어진다.

비효율적인 관측치에 대해서 효율성 분석을 수행하여 θ^{k*} , λ^{j*} , s^{-*} , s^{+*} 의 해를 얻게 된다. 이를 이용하면 비효율적인 관측치가 어떤 점을 벤치마킹의 대상으로 삼아 효율적인 상태로 이동할 수 있는지에 대한 정보를 알 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{Max } h_0 &= \theta & (4) \\
 \text{s.t. } & \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- = \theta x_{i0}, \quad i = 1, \dots, m \\
 & \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_{r0}, \quad r = 1, \dots, s \\
 & s_i^-, s_r^+, \lambda_j \geq 0, \quad \forall i, r, j
 \end{aligned}$$

최적 해(θ^{k*} , λ^{j*} , s^{-*} , s^{+*})를 투입기준 CCR 모형을 이용한 효율성 측정 문제의 제약식에 대입하면 식 (5)와 같은 다음의 관계를 알 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \theta^{k*} x_m^k - s_m^{-*} &= \sum_{j=1}^J x_m^j \lambda^{j*} \quad (m = 1, 2, \dots, M); & (5) \\
 y_n^k + s_n^{+*} &= \sum_{j=1}^J y_n^j \lambda^{j*} \quad (n = 1, 2, \dots, N)
 \end{aligned}$$

식 (5)의 관계로 최종적으로 변환된 값인(θ^{k*} , $x_m^k - s_m^{-*}$, $y_n^k + s_n^{+*}$)를 k 번째 관측치의 투영점이라고하며 이 투영점은 해당 관측치의 비효율성이 모두 제거된 상태로서 효율성을 개선하고자 할 때의 최종 목표치이다.

3.2 Analytic Hierarchy Process (AHP)

AHP는 의사결정의 계층구조를 구성하고 있는 요소간의 쌍대비교(pairwise comparison)에 의한 판단을 통하여 평가자의 지식, 경험 및 직관을 포착하고자 하는 의사결정을 지원하는 방법론이다 (Saaty 1980). 이 모형은 이론적으로 명확하고, 간단하게 여러 평가자의 의견을 집계하여 하나의 공통된 의견을 제시할 수 있다는 장점을 가지며, 다음과 같은 단계를 거쳐 의사결정을 지원하게 된다.

(1단계) : 의사결정계층을 결정한다.

가장 상위 계층에는 의사결정을 위한 최종 목표가 위치하게 되고, 그 하위 계층에는 최종 목표를 이루기 위한(혹은 관련이 있는) 다수의 기준(criteria)들로 구성된다. 하나의 기준은 다시 여러 하위 기준들로 분기 될 수 있다. 맨 아래 계층에는 최종 선택의 대상이 되는 대안(alternative)이 놓이게 되는데, 기준과 대안들은 각

계층 내에서 상호 비교가 가능해야 한다.

(2단계) : 기준과 대안을 쌍대 비교한다.

쌍대비교는 한 단계에서 n 개의 평가기준이 존재한다고 할 때, 이 단계에서 쌍대비교 행렬 $n \times n$ 행렬을 구성한다. 이 행렬에서 행 i 와 j 의 숫자는 i 가 j 보다 얼마나 더 중요한가에 대한 정도를 주어진 척도에 의해 표현 한다. 여기서 요소 j 와 비교한 요소 i 는 a_{ij} 로 표시되며 $a_{ij} = 1/a_{ji}$ 가 된다. n 개의 요소가 있다면 $n(n-1)/2$ 회의 쌍대비교가 이루어 지고, 다음 식 (6)과 같은 행렬이 구성된다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, $a_{ij} = w_i/w_j$, $w_i =$ 구하는 기준, $w_j =$ 비교 기준

(3단계) : 기준과 대안들의 가중치를 구한다.

기준과 대안들의 비교 결과를 토대로 고유치 법을 이용하여 각 대안과 기준들간의 가중치를 구한다.

(4단계) : 대안간의 우선순위를 결정한다.

최종 목표에 만족시킬 수 있는 대안들의 우선 순위를 가중치를 이용하여 결정한다.

4. 연구절차

기업의 생산품에 관한 효율성 측정을 위한 연구절차는 Fig. 4와 같다. 가장먼저 효율성 측정방법에 관한 대상으로 자동차 부품 제조사인 A기업을 선택하였다. 선택된 기업은 직접 방문하여 공정을 분석하고, 연구에 유용하리라 생각되는 데이터 셋을 모두 수집하였

다. 수집된 데이터 셋에 의한 효율성 분석 도구로써 DEA와 AHP를 사용하기로 하였다. 수집된 데이터는 2012년 3분기 데이터로 투입요소와 산출요소를 고려한 생산품(DMU) 15종을 선택하고 그에 관한 동일한 환경의 투입/산출요소를 정의하였다. 투입과 산출 및 의사결정 유닛으로 분류된 데이터는 정규화 과정을 통하여 측정단위 스케일링을 실시하였고 그와 더불어 현장에서 현장전문가에게 실시하였던 설문조사 결과를 가중치로 같이 반영하여 주었다.

이 후 위의 이론적 배경에 맞는 자료포락분석 방법으로 효율성 분석을 실시하고 분석된 결과를 비모수적 통계량 분석 방법으로 검증한 뒤 기업관점에서의 효율성 결과를 도출하게 된다.

5. 연구대상의 개요 및 모수추출

5.1 연구대상의 분석

연구의 대상이 되는 A기업은 자동차 부품을 제조하는 중소기업이다. 국내에 4개의 사업장을 가지고 있으며 연매출 3,000억 정도의 규모를 가지고 있다. A기업에서 생산하는 제품은 자동차 전장 및 파워트레인 부분의 여러 제품을 생산하고 있지만

기업사정상 모든 자료를 수집 할 수 없어 Auto transmission의 부품인 Hub-Clutch와 Hub-Brake군 만을 선택 하였다. 트랜스미션의 허브와 클러치는 여러 종류의 자동차 트랜스미션에 사용되는 소재로 제품의 종류 및 규격이 다양하며, 자동차 시장 환경의 변화에 따른 변동이 민감한 제품이다. 위 제품의 산업 특징은 장치산업으로서, 많은 투자가 필요하며 생산에 필요한 설비를 갖추는데 소요되는 비용도 매우 크다. A사의 허브, 클러치 생산라인은 크게 2개의 라인으로 구성되어 있다. 각 생산라인은 각각 제조품목에 따라 특성이 다르며 투자비용 또한 차이가 있다. 각각의 생산라인에서 생산하는 제품의 구성에 따라 생산능력이 달라지며 제품마다 제품 생산의 난이도와 품질규격, 그리고 공정의 프로세스가 달라 수율 또한 이에 따라 변동되며 특정한 생산라인은 고가제품을 위주로

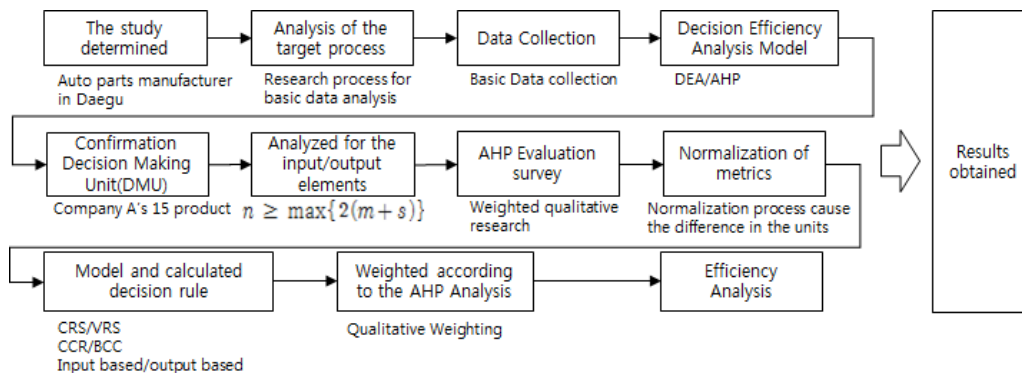


Fig. 4 Procedure of the study

생산하므로 생산량에 비해 상대적인 이익률이 높다. 이러한 상황은 산출되는 제품에 대하여 하나의 정형화된 기준을 정하여 평가하는 것을 어렵게 만드는 요소이다.

5.2 연구대상의 제조품목 및 공정현황

대상제품은 45457로 시작하는 HUB-35R 클러치 5종, 45687로 시작하는 HUB-26R 브레이크 5종, 45456의 ASSEY 5종으로 구성하였다. 클러치와 브레이크는 단품으로 생산되기도 하며, 45457 제품군과 45687 제품군을 합쳐 45456 제품군을 만들어 내기도 한다. 모든 제품이 공정 중에 외주공정을 통한 생산이 있지만, 3제품 모두 동일한 외주시간과 절차를 가지고 있음으로 본 연구에서는 외주공정은 생략한 채 분석하기로 하였다. 일일 공정가동시간은 24시간으로 작업자 교대를 통한 휴식시간 없이 가동한다. 주간 공정 가동일수는 5.5일로 연간 약 280일 가동되며 공정에 따른 각 부품군 사이클타임 아래 Table 1와 같다. 모든 공정은 완전 자동 공정으로 작업시간은 작업자의 숙련도와 무관하게 진행되며 작업자는 제품의 투입 및 완료제품의 배출 작업만 관여하게 된다. 설비 고장률 및 작업 제품 교체에 의한 셋업시간은 2.5H/20M으로 배치에 의해 생산되는 공정의 특성상 위 시간은 제품 생산에 미치는 영향이 적어 데이터 수집에는 반영하지 않았다.

5.3 연구대상의 모수 추출

5.3.1 모수 설정의 적정갯수 결정문제

DEA모형은 효율성 평가대상인 DMU의 수와 투입요소와 산출요소로 선정되는 변수의 수에 따라 효율성 분별력이 영향을 받을 수 있다. DMU의 수가 투입요소와 산출요소의 수에 비해 지나치게 작은 경우에는 모든 DMU의 효율성이 1로 도출되어 평가 대상 DMU 모두가 효율적이라고 평가될 가능성이 있다. 이러한 DEA 모형의 판별력과 관련된 선행연구 중 대표적인 연구로는, Table 2과 같이 평가대상인 DMU의 수가 투입요소 수와 산출요소 수의 합보다 3배 이상 커야 변별력이 있다고 검증하는 사례와, 평가대상인 DMU의 수가 투입요소의 수와 산출요소수의 곱보다 2배 이상

Table 1 Cycletime of product family

	No.	Process Name	Cycle Time
Brake	1	800T Press	4 sec
	2	Forming	32.5 sec
	3	1500T Press TRF	4 sec
	4	1 St. CNC (O/S)	3 day
	5	Heat treatment (O/S)	3 day
	6	After Heating CNC	25~43 sec
Clutch	1	1500T Press	4.5 sec
	2	Pro-Forming	32 sec
	3	1 St. CNC (O/S)	3 day
	4	Pre-Heating CNC	42~48sec
	5	Heat Treatment (O/S)	3 day
	6	After Heating CNC	30.1~30.9 sec
	7	Welding	28.7 sec

Table 2 The problem of selecting the appropriate number

No.	Researchers	Formula
1	Banker et al. (1984)	$n \geq \max\{3(m+s)\}$
2	Boussofinance et al. (1991)	$n \geq \max\{2(m*s)\}$
3	Fitzsimmons (1994)	$n \geq \max\{2(m+s)\}$
4	Charnes and Cooper (1991)	$n \geq \max\{3(m+s)\}$

커야 변별력이 있다고 주장하는 사례, 평가대상인 DMU의 수가 투입요소의 수와 산출요소 수의 합보다 2배 이상 커야 변별력이 있다고 하는 사례, 등 여러 연구가 있다. 이들 연구 또한 분석에 이용한 자료의 성격이 서로 다른 특정 상황에서 도출한 결론이므로 절대적인 기준이 존재하는 것은 아니며, DEA모형을 실제로 적용한 많은 연구들의 대부분이 DMU의 수가 투입변수와 산출변수의 합보다 2배이상 커야 변별력이 있다는 기준을 사용하고 있기에, 본 논문에서도 Fitzsimmons (1994)의 방법론을 따라 투입요소와 산출요소의 합보다 2배 이상 큰 수의 DMU ($Min: n = 15$)를 선택하였다.

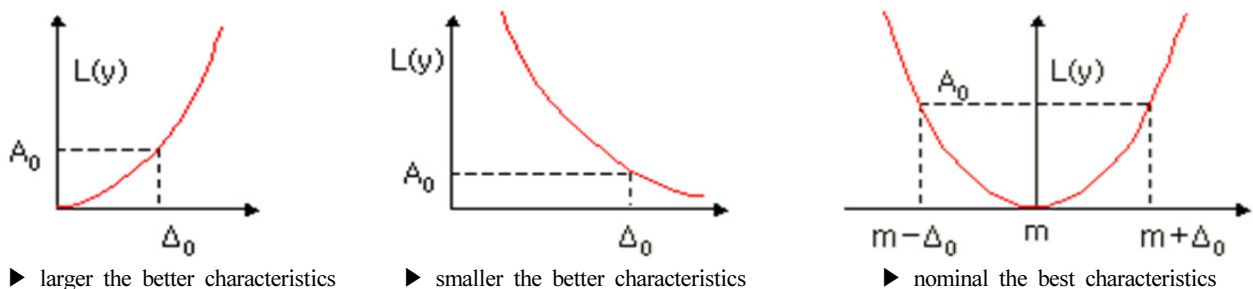


Fig. 5 Loss Function-specific characteristics

5.3.2 모수의 특성

효율성은 생산함수의 특성을 기반으로 발전하였으므로 투입요소의 증가는 산출요소의 증가로 이루어지는 관계가 성립해야 한다. 그러나 본 연구에서 활용하고자 하는 일부 요소는 이러한 관계가 성립되지 않는다. 품질공학의 다구찌 실험계획법에서는 이러한 경우 특성치를 망목특성(Nominal the best characteristics), 망대특성(Larger the better characteristics), 망소특성(Smaller the better characteristics)으로 구분하여 손실함수(Loss function)을 달리 계산한다(Fig. 5). 변수가 투입기준일 경우 망목변수는 특정한 값으로 수렴할 때 산출변수의 크기가 증대하고, 망소변수는 작을수록 산출에 대한 기여가 크며, 망대변수는 클수록 성과가 큰 변수로 정의하였다. 산출변수의 경우에는 망목변수는 특정한 값으로 수렴할 때 성과가 크고, 망소변수는 작을수록 기여가 크며, 망대변수는 클수록 성과가 큰 변수로 정의하였다.

5.3.3 모수의 선정

DEA의 모수를 선정함에 있어 절대적인 기준은 특정 시점에 존재하는 다수의 의사결정단위들이 선정되어야 한다. 동일한 ‘활동목적’과 ‘활동범위’, ‘투입/산출의 종류’, ‘환경’을 가지고 있어야 하고 이러한 동질성 조건이 충족되지 않으면 마치 꺾과 사과를 비교하는 것과 같은 오류를 범하게 된다^[10]. 투입 및 산출변수의 상관관계에 대해서는 DEA모형의 특성상, 비통계적이므로 변수들 간의 상관관계가 분석결과에 어떤 통계적 영향을 미친다고 볼 수 없다. 따라서 그 변수가 분석대상 의사결정단위의 행동을 묘사하는데 있어 중요하다라는 개념적, 실증적 증거가 있다면 모형에 반영하는 것이 원칙적으로 바람직하다고 보았다^[3].

연구대상인 A기업의 경우 산출물인 클러치 제품군과 브레이크 제품군, Assy 제품군을 의사결정유닛(DMU)로 선택하고, 산출변수로서는 제품의 생산량으로 효율성을 분석하고자 하였다. 투입변수로서는 공정의수, 리드타임, 설비대수, 인건비, 원재료 비용을 적용하였다. 투입변수들은 제품이 만들어지는 과정에서 공통적으로 적용되어 산출됨으로 비교조건의 타당성이 충족된다. 투입변수의 공정 수는 제품이 만들어지기까지 거치는 공정의 수를 선택하였고, 리드타임은 각각의 공정에서 소요되는 사이클타임의 합, 설비대수는 생산되기까지 거치는 설비의 합이다. 인건비와 원재료비는 원재료부터 최종생산품까지 작업자가 투입되는 단위시간에 대한 인건비를 연구기간 동안의 합으로 나타낸 것이다. 원재료 비용의 경우 그 자체로써는 생산량의 증가와 큰 연관은 없지만 단가와 생산량의 비로써 경영에 기여할 수 있는 가중치 값이 다름으로 선택되었다. 이러한 투입 산출의 조합으로 제품의 생산량을 고려한 전사적 효율성을 비교 분석할 수 있었다.

5.3.4 분석 모형의 결정

분석모형을 결정할 때에 대표적인 판단기준은

- (1) 투입/산출의 생산관계가 불변규모기술(Constant Returns to Scale Technology) 인가 가변규모수익기술(Variable Returns to Scale Technology)인가?
- (2) 효율성을 측정할 때 투입기준(input-based) 혹은 산출기준(output-based)과 같이 지향성을 가지고 있는가?

를 고려해볼 수 있다. 투입지향/산출지향의 문제에서 관리 및 통제 가능한 요소가 무엇인지에 따라 투입지향 혹은 산출지향 모형을 선택하면 된다. 기존 연구의 대부분이 투입량 선정을 주요 의사 결정변수로 두는 투입지향분석을 하고 있다. 분석대상인 A기업 역시 산출물의 양은 고정 한 뒤에 투입되는 변수들의 수치를 조정하여 효율성을 개선하고자 함으로 투입지향 모형을 선택하게 되었다. 이것은 무한정 생산량을 늘려도 회사의 이익은 증가하지는 않는다는 규모의 경제 법칙이 적용되지 않음으로 당연한 결과일 것이다.

다음은 투입 산출의 생산관계를 분석해야 한다. 어떠한 관측치가 존재할 때 그 관측치를 동일비율로 확장하거나 축소한 점은 모두 생산가능집합내에 있다면 그 관측치는 불변규모수익(Constant Returns to Scale: CRS)를 만족한다고 할 수 있다. 분석대상인 A기업도 투입되는 변수들을 동일비율로 확장/축소 할 경우에 생산량에 비율에 영향을 끼치므로 CRS를 만족하고, 이에 분석모형은 CRS를 만족하는 투입기준 DEA모형인 투입지향 CCR모형을 선택하게 되었다.

6. 실증분석

6.1 AHP분석

DEA모형에서는 투입 및 산출요소의 측정단위가 각각 다른 경우에도 적용가능한 이점이 있지만 실제적 중요성을 고려한 의사결정 단위들에 대한 순위를 결정하지 못하는 단점이 있다. 이 모델에서는 일부 비효율적인 의사결정단위가 계량적 수치로써만 평가되어 효율적인 어떤 의사결정단위보다 더 나은 평가 결과가 나올 수도 있는 것이다. 이는 가중치에 어떤 제약조건을 별도로 두지 않았기 때문이다. 원칙적으로는 전문가와 분석자의 견해는 DEA에 반

Table 3 AHP evaluation scale

Scale	Definition / Explanation
3	Demonstrated Importance
2	Moderate Importance
1	Equal Importance
1/2	Not moderate Importance
1/3	Not Demonstrated Importance

Table 4 Results of AHP analysis

Consistency index							0.0565
AHP Weight	Process	LeadTime	# of Facility	Labor	Raw cost	Price	Yield
	0.090	0.161	0.088	0.281	0.091	0.164	0.125

영하지 않는 것이 타당하다. 그 이유는 정량적인 요소로 인해 결과를 의도적으로 왜곡시킬 가능성이 있기 때문이다. 하지만 본 논문에서는 현장 전문가의 직관을 반영하여 분석에 임하는 것이 타당하다고 판단하여 AHP를 통한 전문가 설문을 통해 가중치에 범위나 유연성을 부여하여 해결하였다.

AHP에서는 Table 3와 같은 1에서 3까지의 수 또는 역수들로서 표현되는 5점 척도를 사용하였다. 숫자들의 역수 1/2, 1/3은 요소 a가 요소 b에 대해 위의 척도 중 하나인 n인 값을 가질 때 요소 b는 요소 a에 1/n의 중요도를 갖는다.

현장 전문가의 설문을 통한 조사 결과는 Table 4와 같이 가중치 값으로 도출 되었으며 설문된 결과의 일관성 지수(Consistency index)는 0.0565로 상당히 신뢰성 있는 응답으로 이루어 졌다고 판단되었다.

6.2 데이터 정규화

DEA는 선형계획법을 통하여 각 DMU에 가장 유리한 최적의 가중치를 선정하여 상대적 효율성을 구하므로 투입변수나 산출변

수의 단위와 범위에 영향을 받지 않아 사용되는 투입/산출요소가 양수이면 원 자료를 그대로 적용하는 것이 일반적이다. 그러나 수집된 자료의 결과를 보면 각 요소는 측정단위가 달라 변동성이 매우 커 DEA에 적용할 경우 각 요소의 변동의 차이로 인해 가중치의 크기 차이를 유발하게 된다. 이러한 경우 가중치의 절대적인 크기에 대한 합리적인 판단을 할 수 없으므로 각 변수의 크기와 변동에 대한 범위를 정규화하여 적용할 필요가 있다.

정규화 방법은 원시데이터를 목적에 맞게 분류한 뒤(Raw Data), 각 데이터의 합을 기준으로 해당 데이터 값으로 나누어 준 뒤 정수 범위를 가지기 위해 100의 off-set 값을 곱해주었다(1St. Data). 즉, 전체 데이터 열의 합은 100이 된다. 이후 동일한 수치범위를 가진 첫 번째 가공자료는 망소/망대값을 적용하기 위해 망대특성을 가진 ‘설비대수’와 ‘인건비’ 항목을 역수로 취해(2nd. Data) 최종적으로 AHP설문을 통한 중요도 가중치를 더 해(3rd. Data) DEA 분석을 실시하기 위한 마지막 데이터를 도출하였다. Table 5상의 X1부터 X6까지는 차례대로 공정, 리드타임, 설비대수, 인건비용, 원재료비용, 단가를 나타내고 출력의 Y1은 생산량을 뜻한다.

Table 5 Normalization in Data Values

DMU	Input Data (1st. Data)						Output	Input Data (3rd. Data)						Output	
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	Y1	
Properties	Sbc	Sbc	Lbc	Lbc	Sbc	Sbc	ign	Sbc	Sbc	Lbc	Lbc	Sbc	Sbc	ign	
1	45457-3B000	4	123.30	8	1280	3000	9730	11493	6.10	12.41	1.42	4.68	2.62	10.21	3.98
2	45457-3B400	3	104.80	6	1060	3000	8850	22777	4.58	10.54	1.89	5.65	2.62	9.29	7.89
3	45457-3B600	4	106.55	10	1660	3000	11020	13783	6.10	10.72	1.14	3.61	2.62	11.57	4.77
4	45457-3B800	3	110.10	8	1260	3000	9500	15254	4.58	11.08	1.42	4.75	2.62	9.97	5.28
5	45457-26000	3	76.35	8	1200	3000	9580	27815	4.58	7.68	1.42	4.99	2.62	10.06	9.63
6	45687-3B000	3	65.00	6	960	3000	5680	11835	4.58	6.54	1.89	6.24	2.62	5.96	4.10
7	45687-3B400	1	25.00	1	150	3000	4530	23899	1.53	2.51	11.35	39.91	2.62	4.75	8.28
8	45687-3B600	2	36.00	5	750	3000	4850	25873	3.05	3.62	2.27	7.99	2.62	5.09	8.96
9	45687-3B800	2	34.25	5	750	3000	5530	13735	3.05	3.45	2.27	7.99	2.62	5.80	4.76
10	45687-26000	2	47.00	3	550	3000	5120	26714	3.05	4.73	3.78	10.89	2.62	5.37	9.25
11	45456-3B000	8	217.00	15	2470	15410	16960	94071	12.20	21.83	0.76	2.42	13.43	17.80	32.57
12	45456-3B400	5	158.50	7	1210	13380	14720	14510	7.63	15.95	1.62	4.95	11.66	15.45	5.02
13	45456-3B600	7	171.25	17	2870	15870	17460	19895	10.68	17.23	0.67	2.09	13.83	18.33	6.89
14	45456-3B800	6	173.05	17	2930	15030	16540	12943	9.15	17.41	0.67	2.04	13.10	17.36	4.48
15	45456-26000	6	152.05	13	2210	14700	16170	26414	9.15	15.30	0.87	2.71	12.81	16.97	9.15

6.3 DEA 분석

위 식 (1)~(5)에 따라 DEA를 분석하고 산출된 값은 Table 6과 같다. 식 (5)에 의한 투영점은 Project Point에 나타나있고 투영점을 기준으로 효율성 프론티어곡선 쪽으로의 이동 거리가 DMU에 대한 과투입 분량(Over Input) 으로 분석되어 있다. Ref. 항목은 준거집단으로서 비효율적 대상이 효율적 대상으로 이동하기 위한 참조집합을 이야기 한다 참조횟수가 높다고 해서 가장 효율성이 높은 거라고 평가할 수는 없지만 준거집단은 투입요소 및 산출요소의 조합에 있어서 비효율적인 것들이 벤치마킹의 대상으로 삼아야 할 것이라는 점에서 중요하다.

A기업의 제조 생산품을 15가지로 분류해 생산량을 기준으로 6가지의 투입자료로 효율성을 분석한 결과, 45457-26000, 45687-3B600, 45687-26000 제품이 효율성 척도 $\theta^* = 1$ 의 값을 가지고 모든 여유분 (s^-, s^+) 이 0이어서 강효율 상태에 있는 것으로, 그 외 제품은 비효율상태 인것으로 나타났다.

45457-3B400 제품의 경우 0.823의 효율성 값을 가져 강효율성의 성질을 띄고 있는 3개의 제품보다 약 18%정도의 효율 개선 여지가 있는 것으로 나타났다. 경영자가 분석결과를 검토할 때 주의해야 할 점은 여기서 효율적으로 평가된 제품들은 15개의 제품간 비교에서 상대적으로 효율적인 지점으로 평가된 것이지 절대적 의미에서 효율적인 것이 아니라는 점이다. 다시 말하면 여기서 효율적으로 평가된 제품들도 그 효율성을 개선할 여지는 있다는 것이다.

식 (5)에 의한 투입물 초과분은 Table 6와 같이 나타나 비효율성

을 야기하는 것으로 드러났다. 45457-3B400 제품의 경우 준거지점 중에서 특히 45457-26000 ($\lambda_5 = 0.6954$)에 대한 비중이 높아 5번 제품(45457-26000)을 벤치마킹 대상으로 선정하는 것이 바람직한 방향으로 나타났다. 45457-3B400 지점이 준거지점만큼의 효율성을 갖기 위해서는 공정이 0.2, 리드타임이 2.8, 설비대수가 0.19 만큼 감소되어야 하는것으로 나타났다. 위 값은 정규화 과정을 통해 가공 된 값이므로 리드타임(X2항목)의 예를 들면 2.89 단위가 과투입상태 이므로 정규화 과정에서 시행했던 과정을 역으로 계산하고 옅색값을 모두 제거하여 각 1제품당 46.39초의 리드타임을 줄이는 것이 효율성 향상의 방향으로 출력되었다.

7. 결론

본 논문에서는 자동차 부품을 제조하는 A중소기업을 대상으로 하여 제조생산품들의 투입/산출 분석을 통해 효율성 분석을 시행하는 과정을 소개하였다. 기존의 단순한 가중합 만을 이용한 평가방법에서 벗어나 생산품에 대한 효율성이란 개념을 도입하였고, 이를 정량적으로 평가하기 위한 DEA CCR모형과 정성적인 평가를 위한 AHP를 조합하여 사용하였다. 이 과정에서 erp를 통한 현장데이터로 공정, 리드타임, 설비대수, 인건비, 원재료비, 단가를 투입 변수로선택하여 효율성 평가의 지표로 사용하였다. 효율성 분석을 한 결과 Table 6과 같이 0.1832부터 1 사이의 제품 효율성이 나타났다. 5개 제품이 효율성 계수 1로 나와 적절한 투입/산출의 비를

Table 6 Final Results of Data Envelopment Analysis

DMU #	Eff	Over Input						Project Point						Ref.
	CRS	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X1	X2	X3	X4	X5	X6	
1	0.4231	4.225	9.259	0.856	2.7	1.511	6.144	1.875	3.151	0.564	1.98	1.109	4.066	5,11
2	0.8264	0.996	4.667	0.526	0.981	0.455	1.613	3.584	5.873	1.364	4.669	2.165	7.677	5,8,10
3	0.5531	3.938	7.05	0.569	1.613	1.17	7.119	2.162	3.67	0.571	1.997	1.45	4.451	5,11
4	0.5584	2.087	6.892	0.665	2.097	1.157	4.547	2.493	4.188	0.755	2.653	1.463	5.423	5,11
5	1	0	0	0	0	0	0	4.58	7.68	1.42	4.99	2.62	10.06	5
6	0.4693	3.035	4.375	1.057	3.312	1.391	3.163	1.545	2.165	0.833	2.928	1.229	2.797	5,8,11
7	1	0	0	0	0	0	0	1.53	2.51	11.35	39.91	2.62	4.75	7
8	1	0	0	0	0	0	0	3.05	3.62	2.27	7.99	2.62	5.09	8
9	0.5556	1.439	1.533	1.008	3.549	1.228	3.097	1.611	1.917	1.262	4.441	1.392	2.703	7,8
10	1	0	0	0	0	0	0	3.05	4.73	3.78	10.89	2.62	5.37	10
11	1	0	0	0	0	0	0	12.2	21.83	0.76	2.42	13.43	17.8	11
12	0.2421	5.782	12.85	1.27	3.751	9.709	12.682	1.848	3.1	0.35	1.199	1.951	2.768	8,11
13	0.2671	8.101	12.63	0.496	1.532	10.996	14.563	2.579	4.603	0.174	0.558	2.834	3.767	8,11
14	0.1832	7.474	14.42	0.554	1.666	11.259	14.911	1.676	2.989	0.116	0.374	1.841	2.449	8,11
15	0.3925	5.74	9.295	0.549	1.647	9.095	11.961	3.41	6.005	0.321	1.063	3.715	5.009	8,11

이루고 있는 것으로 나타났고 그에 비해 타 제품은 투입의 수준을 개선할 필요가 있는 것으로 드러났다. 이러한 제품별 효율 분석방법은 기업의 운영 측면에서 매우 유효한 평가 방법론이 될 수 있다. 특히 요즘과 같이 급변하는 제조 환경 속에 기업에 맞는 다수의 평가모델을 적절히 섞어 활용하여 비교분석함으로써 기업의 공정 및 취약점 파악, 개선을 위한 실행계획 수립 시 유용하게 이용할 수 있을 것이다.

본 논문의 한계점으로는 효율성 분석 척도에 있어 6가지 투입 요소를 고려하였지만, 그 외 제품 생산에 기여하는 인자-예를 들면 계획대비 생산량, 발주 대비 생산량-들을 고려하지 못하였다. 이러한 데이터를 추가적으로 이용하여 DEA 함수 범위를 제약하여 세분화 한다면 좀 더 현실적인 평가가 될 수 있을 것이다 본다. 또한 DEA는 상대적 비교를 통해 효율적인 5개 제품을 산출하였지만 이들간의 순위를 파악할 수 없어 절대적인 효율성을 제시할 수 없었다. 이 후 연구에서는 DEA모델에 제약의 범위를 더 세분화 할 수 있는 DEA-AR (Assurance Region)모델과 순위를 파악할 수 있는 정준상관분석(canonical correlation analysis) 등을 이용하여 더욱 직관적인 효율성 지수를 파악하여 보고자 한다.

후 기

이 연구는 기획재정부의 밀착형 공동 R&D지원 사업으로 수행된 연구결과임.

References

- [1] Lovell, C. A. K., 1993, *Production Frontiers and Productive Efficiency: Techniques and Applications* Oxford University Press, Oxford.
- [2] Kim, S. H., 2007, *Analysis the efficiency: Theory and Applications* Seoul Economic Management, Korea.
- [3] Lee, H. Y., Park, Y. T., Choi, H. G., 2009, Comparative evaluation of performance of national R&D programs with heterogeneous objectives: a DEA approach, *European Journal of Operational Research*, 196:3 847-855.
- [4] Saaty. T. L., Wind Y., 1980, Marketing applications of the analytic hierarchy process *Management Science*, 26:7 641-658.
- [5] Thanassoulis, E., 2001, *Introduction to the Theory and Application of Data Envelopment Analysis*, Springer.
- [6] Cooper, W. W., Seiford, L., Zhu, J., 2004, *Handbook on data envelopment analysis* (2nd ed.) Kluwer Academic Publishers, Massachusetts.
- [7] Charnes, A., Cooper, W. W., Lewin, A. Y., Seiford, L., 1995, *Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology, and Applications*, Springer.
- [8] Subhash C. Ray., 2004, *Data Envelopment Analysis* Cambridge University Press, Cambridge.
- [9] Kim, J. B., Kim, W. J., Cho, N. W., 2008, An Efficiency among Manufacturing Process using Hybrid DEA/AHP Mode, *IE Interfaces*, 21:3 302-311.
- [10] Dyson, R. G., Allen, R., Camanho, A. S., Podinovski, V. V., Sarrico, C. S., Shale, E. A., 2001, Pitfalls and protocols in DEA, *European Journal of Operation Research*, 132:2 245-259.
- [11] Banker, R. D., Charnes, A., Cooper, W. W., 1984, Some models for estimation technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis, *Management Science*, 39:9 1078-1092.
- [12] Charnes, A., Cooper, W. W., Rhodes, E., 1978, Measuring the efficiency of decision making units, *European Journal of Operation Research*, 2:6 429-444.
- [13] Aigner, D. J., Chu, S. F., 1968, On estimating the industry production function, *American Economic Review*, 58:4 826-839.
- [14] Farrell, M. J., 1957, The Measurement of productivity efficiency, *Journal of Royal Statistical Society Series A*, 120:3 253-267.
- [15] Debreu, G., 1951, The coefficient of resource utilization, *Econometrica*, 19:3 273-292.
- [16] Koopman, T. C., 1951, Analysis of production as an efficient combination of activities, *Activity analysis of production and allocation*, 13 33-37.
- [17] Stigler, G. J., 1976, The Xistence of X-Efficiency, *The American Economic Review*, 66:1 213-216.
- [18] Knight, F. H., 1933, *The Economic Organization* Harper & Row, New York.
- [19] Moon, D. H., Lee, G. H., Song, J. B., 2011, Economic Assessment and Application of AHP for Determining the Design of Assembly Line for the Lens Module of Mobile Phone, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 20:8 509-515.