

DEA-AR 모형을 이용한 일관제철소 철광석 브랜드별 효율성 평가*

성덕현** · 변귀원***

The Efficiency Assessment of the Iron Ore Brands Using DEA-AR Model in an Integrated Steel Mill

Deokhyun Seong** · Gwuiwon Byeon***

■ Abstract ■

This paper proposes a DEA-AR model for the efficiency evaluation of the iron ore brands in an integrated steel mill. The input factor is defined as unit cost of each brand based on CIF and two output factors are chosen as Fe and Al which are the important ingredients of iron ore. The relative importance between two output factors is determined by several experts using AHP model. The efficiency of each brand is determined using DEA and DEA-AR models. The negative correlation between the DEA-AR efficiency and the unit cost (CIF) is shown as significant whereas no significant correlation exist between the efficiency and the output factors. Also, the Kruskal Wallis rank sum test shows that there exist efficiency differences among the iron ore types whereas no difference is shown among the countries. The result could be utilized in selecting good brands of iron ores based on the DEA-AR efficiency in an integrated steel mill.

Keyword : Efficiency of Iron Ore, Quality of Iron Ore, DEA-AR, Steel Mill

1. 서 론

일관제철소(Integrated steel mill)의 원료로 사용되는 철광석(iron ores)에는 주요 성분인 철(Fe) 성분 이외에 불순물인 Si, Al, P 등이 함유되어 있다. 이러한 구성성분은 철광석의 산지와 브랜드에 따라 달라지게 되는데, 수요자인 철강회사에서는 가능한 한 최소의 경비로서 좋은 품질의 철광석을 구매하고자 한다.

철광석의 FOB 가격은 철광석에 포함된 철(Fe) 성분에 의해 결정되며, 일반적으로 US\$ per dmtu (dry metric ton unit)로 표시된다. 예를 들면, 1톤당 Fe 성분이 68%인 철광석의 FOB 가격이 US\$ 147 per dmtu라고 할 때, 이 철광석의 톤당 가격은 US\$99.96(= $147 \times 68/100$)이 된다. 즉, 철광석의 FOB 가격은 철광석에 포함된 순수한 Fe 성분에 의해 결정되게 된다.

그런데, 제철소에서 철광석을 구매할 경우에는 FOB에 운송비와 보험료가 추가된 CIF 가격이 지출되는데, 이때의 운송비와 보험료 산정 기준은 철광석의 전체 중량에 대해 매겨지게 된다. 위에 제시한 예시에서 철광석 1톤당 FOB 가격은 철광석의 함량에 의해 결정된 가격이지만, 운임과 보험료는 불순물을 포함한 철광석의 총 중량에 의해 산정하게 됨을 의미한다. 한편, 철광석의 운임은 철광석 중량뿐만 아니라 수송거리와 수송 선박의 크기에 따라 달라지게 되는데, 장거리 수송의 경우 운임이 증가하게 되며, 수송 선박의 크기가 커질수록 톤당 운임은 규모의 경제효과로 인하여 낮아지게 된다.

이와 같은 가격결정 구조에 의해, Fe 함량이 낮은 저품질 철광석은 고품위 철광석에 비해 FOB 가격이 낮게 되지만, 만약 저품질 철광석의 수송거리가 길어지게 되면 Fe 함량이 높은 고품위 철광석에 비해 CIF 가격이 높아지게 되는 가격역전 현상이 발생할 수 있다. 한편, Fe 함량이 낮은 철광석으로 철을 생산할 경우 고품위 철광석에 비해 불순물이 보다 많이 함유되어 있어 처리과정에서

의 비용이 증가하게 된다. 이러한 사유로 저품질 철광석을 높은 단가(CIF)에 구매한다는 것은 매우 비경제적이며 절대 피해야 할 의사결정으로 여겨지고 있다.

이상에서와 같이 이 연구에서는 제철소에서 사용하는 여러 철광석 브랜드 중에서 단가(CIF) 대비 효율이 높은 철광석을 선별할 수 있는 방법론을 제시하고자 한다. 이를 위한 방법론 중에서 이 연구에서는 다양한 투입과 산출요소를 반영할 수 있는 DEA 방법론을 적용하고자 한다.

2. DEA 모형

DEA(data envelopment analysis)는 의사결정 단위(DMU)의 상대적 효율성을 측정하기 위한 방법론으로서 다수의 투입과 산출변수가 존재할 경우 유리하다. Charnes et al.[9]에 의해 개발된 식 (1)에서의 CCR 모형은 제약조건을 추가함으로써 식 (2)의 BCC 모형 개발[7, 8]로 이어졌다.

$$\text{Max } E_0 = \sum_{r=1}^S u_r y_{r0} \quad (1)$$

$$\text{st } \sum_{r=1}^S u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0, \quad j=1, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} = 1, \quad j=1, \dots, n$$

$$u_r, v_i \geq 0 \quad \text{for } r=1, \dots, s \quad i=1, \dots, m$$

$$\text{Min } \theta_B - \varepsilon \left(\sum_{i=1}^m S_i^- + \sum_{r=1}^S S_r^+ \right)$$

$$\text{st } \theta_B x_0 - \sum_{j=1}^n x_{j0} \lambda_j - S_i^- = 0, \quad i=1, \dots, m$$

$$\sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j + S_r^+ = y_{r0}, \quad r=1, \dots, S$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

$$S_i^-, S_r^+, \lambda_j \geq 0$$

$$\text{for } r=1, \dots, S \quad i=1, \dots, m \quad j=1, \dots, n$$

DEA 모형을 통한 효율성은 투입요인의 가중 합

에 대한 산출요인의 가중 합으로 나타나는데, 투입 요소 값이 작아짐에 따라 혹은 산출요소 값이 커짐에 따라 효율성이 커지게 된다. 그런데, 부채(debt)와 같은 산출요소는 값이 적을수록 선호되며(undesirable output) 이에 대해 다양한 처리방법이 논의되고 있다[6, 15, 16, 22, 26].

DEA 분석은 공공기관의 효율성 평가에 주로 이용되어 왔지만[3, 10, 11, 24], 상업적인 조직에서도 활용된 경우도 있으며[17, 18, 19, 25], 원료의 효율성 평가에 활용된 연구[2]도 제시되고 있다.

DEA 모형의 단점으로서 DMU 개수에 비해 투입 및 산출요소가 많아질 경우 효율적이라고 판단되는(효율 = 1) DMU가 증가하게 되는데, 이를 해결하기 위한 방법론으로서 DEA-AR, Super efficiency, Con ratio method 등이 제안되고 있다. 우선, Allen et al.[5]은 가중치에 직접 제약을 가하는 방법, 관측된 투입-산출요소의 수준을 조정하는 방법, 그리고 가상의 투입-산출요소에 제약을 가하는 방법 등 세 가지를 제시하고 있다. 그중에서 DEA-AR(DEA assurance region) 모형은 투입요소와 산출요소에 적용되는 가중치들 간의 상하한 제약을 부과함으로써 효율적인 DMU(효율성 = 1)가 너무 많이 발생되지 않도록 하고 있다[11, 20]. 또한, 이들 상하한의 결정은 전문가 의견을 반영하거나 혹은 외부 기관의 객관적인 자료를 이용한 방법이 제시되고 있다[21].

한편, DEA-AR 모형에서 가중치들 간의 상하한 제약조건 도출을 위해 AHP 모형을 결합한 방법이 제시되고 있다. 우선 투입 및 산출요소에 부과되는 가중치들 간의 상대적 중요도를 AHP 모형에 의해 구하고, 응답자들로부터의 상대적 중요도의 최대값/최소값, 최소값/최대값을 각각 제약조건의 상한과 하한으로 사용하는 방법을 제시하고 있다[1, 4, 12, 13, 14]. 이를 적용할 경우 DEA 모형에 의한 효율성이 1이 되는 DMU 개수가 축소되는 장점이 있는 반면에 상대적 중요도의 결정이 전문가에게 의존하는 경향이 있어 주관적인 판단에 흐를 수 있는 단점이 있다.

본 연구에서는 DEA-AR모형을 이용하고자 한다. 투입 및 산출요소에 부과되는 가중치들 간의 중요도 제약조건을 추가함으로써 효율적으로 평가되는 DMU의 개수를 제한하고자 하며, 투입-산출요소들간의 가중치는 현장 전문가들로부터 중요도 우선순위를 반영할 수 있는 AHP(analytic hierarchy process) 모형을 이용하고자 한다.

3. 철광석 브랜드 별 효율성 분석

3.1 DEA 입력자료

DEA 모형 적용을 위해서는 투입과 산출요소를 결정해야 하는데, 이 연구에서의 투입요소로서는 단가(CIF)를, 산출요소로서는 Fe, Si, Al, P를 선정하였다. 산출요소인 Fe는 값이 커질수록 선호되는 요소임에 반하여, 다른 산출요소들인 Si, Al, P 성분은 값이 커질수록 공정에서 선호되지 않는 요소이므로, 다음의 식 (3)에서와 같이 undesirable output의 처리과정[26]에 따라 처리하고자 한다. 식 (3)에서 X_i 를 i 번째 브랜드에 대한 undesirable output 값이라 하고, DEA 투입을 위해 변환된 i 번째 브랜드의 값을 $NewX_i$ 라 하면 다음이 성립하며, 상수 ε 은 모든 자료의 값을 양수로 만들기 위한 작은 양의 값을 의미한다.

$$NewX_i = \max_i X_i - X_i + \varepsilon \quad (3)$$

다음으로, 투입 및 산출요소들 간의 상관관계를 다음의 <Table 1>에 나타내었다. 표에 의하면 우선 투입요소인 CIF와 다른 산출요소들과는 유의한 상관관계가 나타나지 않음을 볼 수 있다. 일반적으로 투입요소와 산출요소들 간의 상관관계가 존제해야 하는 것으로 알려져 있다. 그러나, 이 연구에서는 당초 예상에 따라 CIF로 환산된 최종 지불가격과 품질은 독립적인 것으로 나타났으며, 결론적으로 DEA 모형을 통해 단가(CIF) 대비 철광석의 품질을 분석하는 것은 유용할 것으로 판단된다. 다음으로 CIF와 P와의 상관관계는 거의 없는

것으로 나타나(상관계수 <math>< -0.1, p\text{-value} = 0.972)</math> P는 분석대상에서 제외하는 것이 타당할 것으로 평가되었다. 마지막으로 산출요소들 간의 상관관계에 의하면 Fe와 Si는 매우 상관이 크고(유의수준 1%), Al과 Si는 상관이 어느 정도 있으므로 Al과 Si 두 요소 중 Si를 분석의 대상에서 제외하는 것이 타당할 것으로 보인다. 따라서 최종적으로 투입요소는 단가(CIF)를 선정하였으며, 산출요소로서는 Fe와 Al을 선정하여 모두 3개의 투입 및 산출요소로 정하였다. 기타의 투입요소로서는 남기를 들 수 있으나 이는 연간 계획에 의해 수송선박을 투입하여 제철소에 도착하는 시간을 계획에 따라 맞출 수 있기 때문에 고려의 대상에서 제외하였다.

한편, 철광석의 브랜드 별 단가와 주요 성분은 철광석을 채굴하는 국가와 브랜드에 따라 달라지게 되는데, 다음의 <Table 2>는 A제철소에서 사용 예정으로 있는 철광석들에 대한 채굴국가, 광종 및 단가와 구성성분을 보여주고 있다. 이 때 단

가는 CIF 가격으로서 통상적으로 1톤당 가격(US \$)을 나타내며, Al 성분은 불순물로서 많이 포함될수록 품질이 낮아지게 된다.

<Table 1> Correlation between Input-Output Factors

Variables	CIF	Fe	Si	Al	P
CIF	1	0.36 (0.155)	0.09 (0.741)	0.28 (0.283)	-0.01 (0.972)
Fe		1	0.63 (0.007)	0.58 (0.014)	0.30 (0.235)
Si			1	0.53 (0.030)	0.38 (0.131)
Al				1	0.74 (0.001)
P					1

일반적으로 DEA를 적용하고자 할 경우, DMU 개수는 투입요소와 산출요소의 총 개수보다 3배 이상 많아야 함을 제시하고 있으며[11], 이 연구에서는 DMU의 개수는 17개로서 이 조건을 충족하

<Table 2> DEA Input Data

DMU	Country	Type	Unit Cost (CIF)	Ingredients	
				Fe	Al
A11(L)	A	L	129.89	63.7	0.95
A12(L)	A	L	127.87	62.7	0.9
A13(L)	A	L	128.27	62.8	0.85
B11(L)	A	L	123.23	61.1	1
A21(F)	A	F	91.71	62.8	0.1
A22(F)	A	F	90.27	61.7	0.3
A24(F)	A	F	84.12	57.7	0.85
A23(F)	A	F	89.98	61.7	0.25
A25(F)	A	F	84.7	58.11	0.83
B21(F)	A	F	87.09	60.2	0.4
B22(F)	B	F	83.74	67	1.3
B23(F)	B	F	77.34	65	1.1
B31(P)	B	P	146.35	66.09	1.1
B32(P)	B	P	142.57	66.71	1.81
C11(L)	C	L	165.89	64.5	0.86
C21(F)	C	F	104.4	63.94	0.39
D21(F)	D	F	96.23	67.16	1.97

고 있음을 볼 수 있다. 더구나, 향후 자료가 축적되어 DMU 개수가 증가할 경우 실제 활용 가능성은 높아질 것이므로 탐색적 연구로서의 가치도 있을 것으로 판단된다.

3.2 CCR 효율성

철광석 브랜드 별 효율성은 단가(CIF)가 싸거나 혹은 Fe함량이 높은 철광석이 좋을 것이라는 일반적인 예상과 비교하여 평가하였다. 다음의 <Table 3>에는 DEA 모형에 의한 결과인 효율성과 함께 투입 및 산출요소들의 값을 나타내고 있다. 여기에서 산출요소인 Al의 값은 앞서의 식 (3)에서 제시한 undesirable output 처리에 의한 값을 나타내고 있다.

<Table 3>의 두 번째 열에 DEA 모형에 의한 철광석의 CCR 효율성(Input model)을 나타내고 있다. 표에 의하면 CCR 효율성이 1인 철광석은 총 17개의 브랜드 중 2개로서, 브랜드 A21(F)와 B23

(F)가 가장 효율적인 것으로 나타났다. 또한, 효율성이 1인 2개의 브랜드 중에서는 B23(F)의 CIF단가가 가장 싸면서도 품질요소 중 Fe가 가장 높은 브랜드임을 볼 수 있다. 이상과 같이 DEA 모형에 의해 단가(CIF) 대비 2가지 품질기준에 의한 철광석 브랜드들의 효율성 평가가 가능하게 되었다.

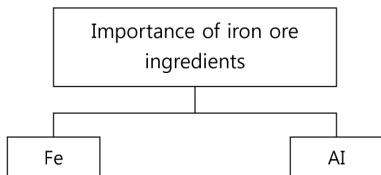
3.3 DEA-AR 모형에 의한 효율성

철광석 품질을 결정짓는 요소들은 서로 중요도가 다를 것으로 예상되는데, 이를 반영할 수 있는 DEA-AR(I) 모형을 적용하고자 한다. DEA-AR(I) 모형의 적용을 위해서는 산출요소 가중치들 간의 선형제약식을 부여하게 되는데, 이 연구에서는 AHP(analytic hierarchy process) 방법을 이용하여 가중치들간의 상한과 하한을 지정하고자 한다. 투입 요소는 단가(CIF) 한 가지로서, 투입요소와 산출요소들을 모두 포함하여 상하한 제약조건을 설정하는 DEA-AR(II) 모형의 적용은 고려하지 않았다.

<Table 3> The Results from Model with Data

DMU	Efficiency		Input	Output	
	CCR	DEA-AR	CIF	Fe	Al
A11(L)	0.60	0.58	129.89	63.7	1.12
A12(L)	0.61	0.58	127.87	62.7	1.17
A13(L)	0.62	0.58	128.27	62.8	1.22
B11(L)	0.61	0.59	123.23	61.1	1.07
A21(F)	1	0.82	91.71	62.8	1.97
A22(F)	0.97	0.82	90.27	61.7	1.77
A24(F)	0.89	0.82	84.12	57.7	1.22
A23(F)	0.98	0.82	89.98	61.7	1.82
A25(F)	0.89	0.82	84.7	58.11	1.24
B21(F)	0.97	0.83	87.09	60.2	1.67
B22(F)	0.95	0.95	83.74	67	0.77
B23(F)	1	1	77.34	65	0.97
B31(P)	0.54	0.54	146.35	66.09	0.97
B32(P)	0.56	0.55	142.57	66.71	0.26
C11(L)	0.49	0.46	165.89	64.5	1.21
C21(F)	0.84	0.73	104.4	63.94	1.68
D21(F)	0.83	0.83	96.23	67.16	0.1

AHP의 적용을 위해 우선 다음의 [Figure 1]에서와 같이 산출요소들 간의 계층구조(hierarchy)를 작성하였다. 즉, ‘현장 작업의 용이성 및 제품 품질’을 기준으로 ‘철광석 구성성분의 중요도’를 비교하도록 하였다. 다음으로 품질요소들 간 선형제약식의 상하한 결정은 Jablonsky[14]의 연구와 동일한 방법으로 결정하였다. 즉, 제철소 작업 과정에서 철광석의 사용량을 결정하는 전문가들로부터 품질요인들 간의 중요도를 쌍대비교(pairwise comparison)하도록 하였으며, 이를 바탕으로 전문가 개인별 AHP 모형을 실행하여 품질요인들 간의 중요도를 도출하였다. 전문가 개인별로 도출된 품질요소들 간의 중요도 값에 의해 다음의 식 (4)에서와 같이 중요도의 최소 값과 최대 값의 비율을 DEA-AR 모형의 하한과 상한으로 적용하였다. 전문가 3인 각각이 요소들 간 쌍대비교를 하고, 정해진 절차에 의해 AHP 모형으로부터 도출된 품질요소들 간 선형제약식의 상한과 하한을 다음의 <Table 4>에서와 같이 도출하였다. 쌍대비교 대상의 산출요소는 두 개인 AHP hierarchy가 매우 단순하며, 이 두 가지 산출요소간의 비교는 전문가들로서는 매우 유사한 의견을 가지고 있는 것으로 알려져 있는데, 쌍대비교 결과 전문가들은 산출요소들 간의 우선순위 부여에 차이가 없음을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과로부터 평가에 참여하는 전문가의 숫자는 3명으로서 충분한 것으로 판단하였다.



[Figure 1] AHP Hierarchy Among Output Factors

$$\begin{aligned}
 l_{ij} &= \max_k(w_{ijk})/\min_k(w_{ijk}), \\
 u_{ij} &= \min_k(w_{ijk})/\max_k(w_{ijk})
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

여기서 w_{ijk} : k번째 전문가가 도출한 j번째 요소에 대한 i번째 요소의 가중치

l_{ij}, u_{ij} : DEA-AR 모형에서 j번째 요소에 대한 i번째 요소의 가중치 하한과 상한

<Table 4> The Bounds of Linear Constraint

Lower bound	Numerator	Denominator	Upper bound
1.95	Fe	Al	3.42

위와 같이 산출요소 가중치들 간의 선형제약식을 반영한 DEA-AR Input 모형을 적용한 결과 효율성은 위의 <Table 3>의 두 번째 열에 나타내었다. 결과에 의하면 품질요인들 간의 제약을 반영할 경우 비용 대 효과가 가장 큰 것으로 평가되는 브랜드는 B23(F) 한가지인 것으로 나타났으며, 이는 앞서의 DEA 모형에서 2개의 브랜드가 효율적이라 나타난 것과 차이를 보여준다. 즉, 품질요인들 간의 가중치가 다를 경우 이를 반영한 효율성이 보다 합리적인 값이라 판단된다. 또한, 가장 비효율적인 브랜드는 C11(L)로 나타났는데, 그 이유로서는 해당 브랜드의 CIF 단가가 매우 높아 비효율적인 것으로 판단된다. 이상과 같이 품질요소의 가중치들 간의 제약조건을 적용한 DEA-AR 모형에 의해 철광석 브랜드들의 효율성을 도출할 수 있다.

3.4 효율성과의 상관관계

DEA-AR 모형에 의한 효율성과 단가 및 철광석의 품질요인들과의 상관관계를 분석하였다(<Table 5> 참조). 우선, 효율성은 단가(CIF)와 음(-)의 상관이 강한 것으로 나타났는데, 이는 철광석 단가(CIF)가 높아질수록 효율성은 낮아짐을 보여주고 있다. 그런데, 철광석의 FOB 가격은 품질이 좋을수록 높아지는 것이 일반적인데 반하여 이 연구에서처럼 품질이 높을수록 효율성이 떨어지는 것으로 나타난 원인으로서, 품질이 좋은 철광석의 경우 수송에 소요되는 비용(Freight, Insurance)이 높아져 CIF 가격이 높아지기 때문인 것으로 추정된다. 따라서, 철강생산 기업에서는 수송비를 고려한 실 구매단가

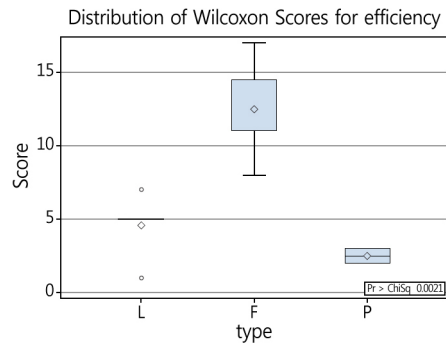
(CIF)를 바탕으로 가격 대비 품질 개념의 효율성에 근거하여 구매의사결정을 하는 것이 경제적인 것으로 판단된다.

다음으로 DEA-AR 효율성과 여타의 품질요인과의 상관관계는 없는 것으로 나타났다. 예를 들면, 효율성과 철분(Fe) 함량과의 상관관계가 없는 것으로 나타났는데, 이는 철광석의 가격 결정 구조가 FOB 가격에 의존하고 있음에 반해 CIF를 기준으로 하는 단가는 수송비 및 보험료가 추가되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 다른 품질 요인들에 대해서도 마찬가지로 DEA-AR 효율성은 CIF 기준의 가격에 의해 결정되기에, 이들과는 상관이 없는 것으로 나타난 것으로 판단된다. 이러한 결과는 일반적으로 철(Fe)의 함량이 높을수록 단가가 높고 Al, Si, P 등의 품질에 저해되는 요소의 함량이 높을수록 단가가 낮을 것이라는 상식에 위배되는 것으로서, 실제 기업이 철광석의 구매에 지불하는 단가가 FOB 가격에 운임 및 보험료를 포함한 CIF 기준으로 판단되어야 함을 시사한다.

3.5 국가별 및 광종별 효율성 비교

철광석 산지에 따라 국가는 4개(A, B, C, D), 광종은 3가지(F, L, P)로 분류하여 철광석의 국가별 광종별 DEA-AR 모형에 의한 효율성을 비교하였다. DEA모형은 효율성이 비모수적인 특징을

가지는 것에 비추어 다음의 <Table 6>에서와 같이 Kruskal Wallis 검정을 수행한 결과, 철광석 브랜드의 산지 국가간 효율성에는 차이가 없는 것으로 나타났다(유의수준 = 0.05). 반면에, 광종별 효율성 차이에 대한 검정 결과 5% 유의수준에서 차이가 있는 것으로 나타났으며(<Table 6>, [Figure 2] 참조), 결과에 의하면 광종 F의 효율성이 가장 높은 것으로, 그리고 광종 P의 효율성이 가장 낮은 것으로 나타났다. 일반적으로 품질이 가장 좋은 것으로 알려져 있는 광종 P의 효율성이 가장 낮게 나타난 이유는 광종 P는 품질이 높지만 그에 비례해서 단가가 높으며, 따라서 가격 대비 품질 기준의 효율성이 낮게 나타나고 있음을 볼 수 있다.



[Figure 2] Distribution of Efficiencies for the Types of Iron Ores

<Table 5> Correlation Analysis between DEA-AR Efficiency and Factors

Variables	CIF	Fe	Al	Si	P
Efficiency	-0.96 ($< .0001$)	-0.14 (0.59)	-0.16 (0.55)	0.04 (0.87)	0.09 (0.73)

<Table 6> Kruskal Wallis Rank Sum Test Among Countries and Ore Types

Test among countries						Test among types of iron ores					
Country	n	Sum of scores	Expected scores	χ^2	p-value	Type	n	Sum of scores	Expected scores	χ^2	p-value
A	10	91.5	90	2.91	0.405	L	5	23	45	12.3	0.002
B	4	38	36			F	10	125	90		
C	2	9	18			P	2	5	18		
D	1	14.5	9								

4. 결론 및 추후 연구방향

제철소에서 사용하는 철광석 브랜드들 간의 단가(CIF) 대비 품질 기준의 효율성을 구할 수 있는 DEA 모형을 제시하였다. DEA 효율성을 구하기 위해 투입요소로서는 구매단가(CIF)를, 산출요소로서는 품질을 결정짓는 요소인 Fe와 Al를 선정하였다. 기업에서의 적용 사례를 분석하기 위해 총 17개의 브랜드에 대해 CCR 모형을 적용한 결과가 가장 효율적인 것으로 평가된 브랜드는 모두 2개로 나타났다. 고려대상의 브랜드 개수에 비해 효율적인 브랜드라 평가된 개수가 많아, 투입-산출요소들의 가중치들 사이에 상하한 제약조건을 부과하여 DEA-AR 모형을 실행하였다. 상하한 제약조건 부과를 위해 품질요소들 간의 가중치를 AHP 방법에 의해 도출하였으며, 이를 위해 현장 전문가들로부터 품질요소들 간의 상대비교를 수행하였다. AHP로부터 도출된 품질요소들 사이의 중요도를 기준으로 상하한을 결정하여 DEA-AR 모형에 제약조건으로 반영하였다. DEA-AR 모형의 적용 결과 앞서 DEA 모형에서 가장 효율적으로 나타난 2개의 브랜드 중에서 1개 브랜드만이 효율적인 것으로 나타났다. 즉, 품질요소들 간의 중요도를 반영함으로써 철광석 브랜드에 대해 가격대비 품질 기준으로 가장 효율적인 브랜드의 판별이 가능하게 되었다.

DEA-AR 모형으로부터 도출된 효율성을 기준으로 CIF단가와 효율성 사이에는 음(-)의 상관관계가 존재함을 관찰할 수 있었다. 즉, 구매단가가 높은 브랜드일수록 효율성이 낮아지는 결과를 볼 수 있었으며, 이는 품질이 높은 철광석은 품질이 낮은 철광석에 비해 구매단가(CIF)가 상대적으로 크게 높음을 보여준다고 할 수 있다. 한편, 제철소에서 사용하는 브랜드들의 국가간 광종간 효율성에 대한 Kruskal Wallis 검정 결과 국가간 효율성에는 차이가 나타나지 않았으나, 광종간에는 차이가 나타남을 볼 수 있었다. 특히, 품질이 가장 높은 것으로 알려진 광종 P의 효율성이 가장 낮게

나타나, 가격 대비 품질 관점에서는 효율적이지 않다는 것을 보여주고 있다.

이 연구는 분석대상의 브랜드(DMU)가 17개로 적어 효율적인 DMU가 많이 도출된다는 단점이 있다. 향후 브랜드 개수를 증가하여 분석할 경우 실제 사용이 유용한 결과가 도출될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 고품질 브랜드의 경우 효율성이 낮게 나타나고 있는데, 고품질의 철광석은 실제 공정에서의 작업이 보다 유리할 것으로 추정되므로, 이 연구에서 제시된 2개의 품질요소 이외 실제 공정에서의 ‘작업 용이성’ 등에 대한 추가적인 산출요소를 반영할 필요가 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] 김준범, 김우제, 조남욱, “An Efficiency Evaluation among Manufacturing Processes using Hybrid DEA/AHP Model”, *IE Interfaces*, 제21권, 제3호(2008), pp.302-311.
- [2] 성덕현, 서민수, “DEA 모형에 의한 석탄의 효율성 평가”, 『한국IT서비스학회지』, 제10권, 제2호(2011), pp.177-188.
- [3] 임 환, 손명호, “DEA를 활용한 성과평가 지표의 가중치 결정모형 구축”, 『한국IT서비스학회지』, 제9권, 제4호(2010).
- [4] Ahmad, N., D. Berg, and G. R. Simons, “The integration of analytical hierarchy process and data envelopment analysis in a multi-criteria decision-making problem”, *International Journal of Information Technology and Decision Making*, Vol.5, No.2 (2006), pp.263-276.
- [5] Allen, R., A. Athanassopoulos, R. G. Dyson, and E. Thanassoulis, “Weights restrictions and value judgements in Data Envelopment Analysis : Evolution, development and future directions”, *Annals of Operations Research*, Vol.73(1997), pp.13-34.

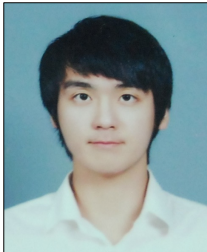
- [6] Amirteimoori, A., S. Kordrostami, and M. Sarparast, "Modeling undesirable factors in data envelopment analysis", *Applied Mathematics and Computation*, Vol.180(2006), pp.444-452.
- [7] Banker, R. D., A. Charnes, and W. W. Cooper, "Some models for estimating technical and scale efficiencies in data envelopment analysis", *Management Science*, Vol.30(1984), pp.1078-1092.
- [8] Banker, R. D., R. Conrad, and R. Strauss, "A comparative application of data envelopment analysis and translog methods : An illustrative study of hospital production", *Management Science*, Vol.32, No.1 (1986), pp.30-43.
- [9] Charnes, A., W. W. Cooper, and E. Rhodes, "Measuring the efficiency of decision making units", *Euro. J. Oper. Res.*, Vol.2(1978), pp. 429-444.
- [10] Chen, T. Y. and T. L. Yeh, "A measurement of bank efficiency, ownership and productivity changes in Taiwan", *Service Industries Journal*, Vol.20, No.1(2000), pp. 95-109.
- [11] Cooper, W. W., L. M. Seiford, and K. Tone, *Data Envelopment Analysis : a comprehensive text with models, applications, references, and DEA-solver software*, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [12] Giokas, D. I. and G. C. Pentzaropoulos, "Efficiency ranking of the OECD member states in the area of telecommunications : A composite AHP/DEA study", *Telecommunications Policy*, Vol.32(2008), pp.672-685.
- [13] Hoa, C. B. and K. B. Oh, "Selecting Internet company stocks using a combined DEA and AHP approach", *International Journal of Systems Science*, Vol.41, No.3 (2010), pp.325-336.
- [14] Jablonsky, J., "Measuring the efficiency of production units by AHP models", *Mathematical and Computer Modeling*, Vol.46 (2007), pp.1091-1098.
- [15] Jahanshahloo, G. R., L. F. Hosseinzadeh, N. Shoja, G. Tohidi, and S. Razavyan, "Undesirable inputs and outputs in DEA models", *Applied Mathematics and Computation*, Vol.169(2005), pp.917-925.
- [16] Jahanshahloo, G. R., A. H. Vencheh, A. A. Foroughi, and R. K. Matin, "Inputs/outputs estimation in DEA when some factors are undesirable", *Applied Mathematics and Computation*, Vol.156(2004), pp.19-32.
- [17] Kuo, R. J., Y. C. Wang, and F. C. Tien, "Integration of artificial neural network and MADA methods for green supplier selection", *Journal of Cleaner Production*, Vol.18 (2010), pp.1161-1170.
- [18] Saen, R. F., "Supplier selection by the new AR-IDEA model", *Int J Adv Manuf Technol*, Vol.39(2008), pp.1061-1070.
- [19] Saen, R. F., "Restricting weights in supplier selection decisions in the presence of dual-role factors", *Applied Mathematical Modeling*, Vol.34(2010), pp.2820-2830.
- [20] Thanassoulis, E., A. Boussofiane, and R. G. Dyson, "Exploring output quality targets in the provision of pertinent care in England using data envelopment analysis", *EJOR*, Vol.80(1995), pp.588-607.
- [21] Thompson, R. G., P. S. Dharmapala, L. J., Rothenberg, and R. M. Thrall, "DEA/AR efficiency and profitability of 14 major oil companies in US exploration and production", *Computers and OR*, Vol.23, No.4

- (1996), pp.357-373.
- [22] Vencheh, A. H., R. K. Matin, and M. T. Kajani, "Undesirable factors in efficiency measurement", *Applied Mathematics and Computation*, Vol.163(2005), pp.547-552.
- [23] Wu, D., "Supplier selection : A hybrid model using DEA, decision tree and neural network", *Expert Systems with Applications*, Vol.36(2009), pp.9105-9112.
- [24] Yang, Z., "Assessing Canadian bank branch operating efficiency using data envelopment analysis", *IAENG Transactions on Engineering Technologies*, Vol.3(2009), pp. 31-43.
- [25] Zeydan, M., C. Çolpan, and C. Çobanog, "A combined methodology for supplier selection and performance evaluation", *Expert Systems with Applications*, Vol.38(2011), pp.2741-2751.
- [26] Zhu, J., *Quantitative models for performance evaluation and benchmarking : data envelopment analysis with spreadsheets and DEA Excel Solver*, Kluwer Academic, 2003.

◆ 저 자 소 개 ◆

**성 덕 현 (dhsung@pknu.ac.kr)**

부경대학교 경영학부의 교수로서, 서울대학교 산업공학과에서 학사와 석사 학위를, 포항공과대학교 산업공학과에서 박사학위를 수여하였다. 그는 포항 제철 기술연구소와 POSRI 경영과학센터의 연구원을 역임하였으며, 현대 제철의 초기 물류관련 연구를 수행하였다. 주요 관심분야는 공급사슬관리, 생산계획, 다변량 분석 등이다.

**변 귀 원 (bgw0406@gmail.com)**

부경대학교 경영학과 4학년 휴학 중이며, 현재 캐나다 토론토에서 어학연수 중이다. 주요 관심분야는 IT경영, 마케팅 등이다.