

DEA 모형에 의한 제철용 석탄의 효율성 평가*

성덕현** · 서민수***

The Efficiency Evaluation of Coking Coals Using Data Envelopment Analysis*

Deokhyun Seong** · Min Soo Suh***

■ Abstract ■

This paper proposes a DEA model for the performance evaluation of each brand of coking coals in an integrated steel mill. The performance is defined as the efficiency which is the ratio of two linear combinations of the output factors to the input factors. There is only one input factor considered in the model : unit price of each brand based on CIF. Five output factors are chosen in consideration of their impact to the quality of cokes such as Ash, VM, LMF, TD, and Rm. Some of the output factors are treated as undesirable in DEA model because the quality criteria are given by the range.

The CCR and BCC efficiencies are derived by the DEA model, and the scale efficiency is calculated, too. Each brand of coking coal is classified into four categories according to the CCR and BCC efficiencies, and the most inferior brands are identified as a result. The impact of the input and output factors to the efficiency is analyzed using a multiple regression, then the unit price is revealed as the most critical among them. Also, ANOVA results show that there exist efficiency differences among the coal types and the countries imported, respectively. Finally, the quantitative projection for the inefficient brands is performed if they are to be efficient.

The result could be utilized in selecting the good or bad brands of coking coal based on the efficiency in an integrated steel mill. Also, this model will be used to assess the relative efficiency of a new brand of coking coal if it is a candidate to be imported.

Keyword : Efficiency of Coking Coal, DEA, Coal Quality

1. 서 론

1.1 제철공정과 제철용 석탄

제철소의 주요 원료는 철광석과 석탄(유연탄)이며, 이 중에서 석탄은 건류과정을 거쳐 coke로 만들어져 고로(blast furnace)에 투입된다. A사에서 사용하는 제철용 석탄은 호주, 캐나다, 미국, 러시아 등지에서 수입하여 사용하고 있으며, 광산이 위치한 지역에 따라 석탄의 성분이 달라지게 되는데, 각각의 석탄은 어느 하나의 탄종(Type I~V)에 속하는 고유한 브랜드로 관리되고 있다.

제철용 coke를 만들기 위한 석탄(coking coal)은 여러 브랜드의 석탄 배합을 통해 만들어지게 되는데(배합탄), 고품질의 coke 생산을 위한 배합탄의 품질기준은 다음 <Table 1>과 같이 일반적으로 Ash, VM, LMF, TD, Rm 등 5가지 품질지표로 관리되고 있다. 5가지 품질 기준 중에서 Ash(회분)은 함량이 적을수록 선호되고 있으며, 유동도(LMF)와 전팽창지수(TD)는 값이 클수록 선호되고 있다. 한편, 휘발분(VM)과 반사율(Rm)은 값이 너무 커도 혹은 작아도 좋지 않으며, 기준의 중앙값에 근접할수록 선호되고 있다. 예를 들어, 휘발분(VM)의 배합탄 기준이 22~30이라 할 경우, 개별 브랜드의 석탄은 그 중앙값인 26의 값을 갖는 탄이 선호되고 있음을 의미한다.

고려대상의 석탄은 총 19개 브랜드로서 주요 성분과 단가(CIF기준)는 <Table 2>와 같다[15]. 단가인 CIF 가격은 FOB 가격에 운송비와 보험료가 추가된 것으로서, 수송선박의 크기가 단위당 운송비에 크게 영향을 미치게 된다. 운송비 산정 시 수송선박의 크기는 선적항이 허용하는 범위 내에서 가장 큰 선형을 기준으로 제시된 가격이며, 최종

운송비는 선적항으로부터 국내에 도착하는 경우를 가정하여 산정한 자료이다. 예를 들어, 호주와 캐나다로부터의 석탄은 Cape급 선박 투입 기준이며, 미국은 Panamax급 선박을, 그리고 러시아는 Handy급 선박 투입 기준을 의미한다. 한편, 브랜드별 품질 자료는 각 공급사에서 제시하고 있는 석탄의 품질을 나타내고 있다.

1.2 연구의 동기와 목적

우리나라의 제철용 석탄은 모두 해외에서 수입하여 사용하고 있으며 장거리 선박 수송에 의존하고 있어 수송단가가 최종 가격에 크게 영향을 미친다. 또한, 품질이 좋은 석탄일수록 가격이 비싼 경우가 일반적이는데, 이 때의 가격이란 FOB 가격을 의미한다. 그러나 최종수요자인 제철소에서 실제 지불해야 하는 석탄의 단가는 FOB가 아닌 CIF(FOB+수송비+보험료)를 기준해야 하므로, 단위당 수송비가 증가할 경우 품질이 열위인 석탄이 품질이 좋은 석탄에 비해 CIF 가격이 더 비싸지는 역전현상이 발생할 수도 있다.

한편, 석탄의 경제성이란 단가 대비 품질의 우수성으로 표현할 수 있는데, 고려해야 할 품질요소가 하나가 아닌 다수이므로 이들을 종합적으로 고려한 품질 대비 단가에 대한 정량적인 지표가 마련되어야만이 석탄의 경제성을 판단할 수 있게 된다.

본 연구에서는 DEA(data envelopment analysis) 방법론을 이용하여 석탄의 브랜드별 경제성(효율성)을 평가할 수 있는 방법론을 제시하고자 한다. 이렇게 함으로써 다수의 품질요소를 고려한 석탄의 경제성에 대한 정량적 평가가 가능해지게 된다.

제시된 방법론을 이용할 경우 제철소에서 사용하는 석탄의 구매 시 각 브랜드의 품질에 적절한

<Table 1> The Quality Criteria of a Coking Coal

Quality factors		Ash	VM	LMF	TD	Rm
Criteria	Min	0	min _{VM}	min _{LMF}	min _{TD}	min _{Rm}
	Max	max _{Ash}	max _{VM}	max _{LMF}	max _{TD}	max _{Rm}

〈Table 2〉 The Specification of Coking Coals

Coal type	Country	Brand	Price (CIF, \$/T)	Quality factor				
				Ash	VM	LMF	TD	Rm
Type I	USA	A	214	6.25	34.50	4.45	200	1.02
	China	B	181	9.60	29.68	4.24	221	0.96
Type II	Australia	C	149	6.5	33.3	3.65	157	0.82
	Australia	D	149	8.6	23.8	2.97	118	1.05
	Australia	E	149	6.5	33	3.48	275	0.93
Type III	Australia	F	138	9.9	20.6	2.58	99	1.25
	Australia	G	149	9.9	19.3	2.2	83	1.34
	Australia	H	149	9.7	18.4	1.84	200	1.46
	Australia	I	149	10	20.5	2.48	60	1.32
	Australia	J	150	9.3	19.5	2.24	70	1.35
	Canada	K	150	9.7	22.8	2.04	31	1.14
Type IV	Australia	L	149	9.8	28	3.48	150	1
	Australia	M	149	6.7	21.7	2.35	36	1.12
	Canada	N	148	9.5	23.5	2	50	1.22
	Russia	O	139	9.49	18.10	1.08	28	1.51
	Russia	P	140	9.04	34.97	4.48	236	0.75
Type V	Australia	Q	105	9.1	26.5	1.6	7	0.9
	Australia	R	105	8.8	34.6	2.24	35	0.69
	Australia	S	105	8.93	38.93	3.48	100	0.71

가격(CIF)이 얼마인지에 대한 지침을 제공할 수 있게 될 것으로 보이며, 이로 인하여 장기적인 원료의 조달전략에 도움을 줄 것으로 기대된다.

다고 가정할 경우, 다음 식 (1)의 LP 원본모형으로, 그리고 식 (2)에서와 같이 쌍대문제로 제시하고 있다. 여기서, u_r , v_i 는 각각 투입요소(x)와 산출요소(y)에 부과된 가중치를 나타낸다.

2. DEA(Data Envelopment Analysis)

DEA(data envelopment analysis)는 의사결정단위(DMU)의 상대적 효율성을 측정하기 위한 LP(Linear Programming)를 이용한 방법론으로서, DMU들은 동일한 다수의 투입과 산출변수를 사용하고 있다. DEA는 Farrell[8], Charnes et al.[5] 등에 의해 개발되어 주로 은행 등 공공기관 등의 효율성 평가에 널리 이용되어 왔다[1, 6, 7, 14, 18, 19]. Charnes et al.[5]이 제시한 CCR 모형은 투입요소가 s 개, 산출요소가 m 개, 그리고 DMU가 n 개 있

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

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

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

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

$$\text{Min } \theta - \epsilon \left(\sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^s s_r^+ \right) \quad (2)$$

$$\text{st } \theta x_{i0} - \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j - s_i^- = 0, \quad i=1, \dots, m$$

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

$$s_i^-, s_r^+, \lambda_j \geq 0 \text{ for } r=1, \dots, s$$

$$i=1, \dots, m \quad j=1, \dots, n$$

식 (2)에서 s^- 는 투입요소의 초과분을, 그리고 s^+ 는 산출요소의 부족분을 나타내며, 식 (2)의 최적해가 $\theta^* = 1$ 을 만족하면서 모든 여유변수가 0인 경우 해당 DMU는 CCR 효율성(기술효율성, TE : Technical Efficiency)이 있다고 판정하며, 최적해가 $\theta^* = 1$ 을 만족하면서 일부 여유변수가 0이 아닌 경우에는 약효율성(weak efficiency)이 있다고 판정한다. 한편, Banker et al.[3, 4]는 기술효율성을 순수기술효율성(PTE : Pure Technical Efficiency)과 규모효율성(SE : Scale Efficiency)으로 구분하기 위하여 $\sum_j \lambda_j = 1$ 의 제약조건을 추가하였다. 이러한 모형을 BCC 모형이라 하며(식 (3)), 이의 최적해가 $\theta_B^* = 1$ 을 만족하면서 모든 여유변수가 0인 경우 해당 DMU는 BCC 효율성이 있다고 판정한다.

$$\text{Min } \theta_B - \epsilon \left(\sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^s s_r^+ \right) \quad (3)$$

$$\text{st } \theta_B x_{i0} - \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j - s_i^- = 0, \quad i=1, \dots, m$$

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

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

$$s_i^-, s_r^+, \lambda_j \geq 0 \text{ for } r=1, \dots, s$$

$$i=1, \dots, m \quad j=1, \dots, n$$

DEA의 투입요소는 값이 작을수록, 그리고 산출요소는 값이 커질수록 효율성이 커지게 된다. 그런데, 산출요소 중에서는 부채(debt)와 같이 값이 작아질수록 선호되는 경우도 존재하며(undesirable out-

put), 이러한 특성을 갖는 자료에 대한 처리방법이 다양하게 논의되고 있다[2, 9, 10, 16, 21]. Zuh[21]에 의하면 DEA에 사용되는 모든 자료는 0보다 커야 하므로, X_i 를 i 번째 브랜드에 대한 undesirable output 값이라 하고, DEA 투입을 위해 변환된 i 번째 브랜드의 값을 $\text{New} X_i$ 라 하면 다음이 성립한다고 제시하였다. 이 때 상수 0.1은 모든 자료의 값을 양수로 만들기 위한 작은 값을 의미한다.

$$\text{New } X_i = \max_j X_{ij} - X_i + 0.1$$

이러한 과정을 거쳐 undesirable output에 대한 자료변환 과정을 통해 DEA에 필요한 자료를 생성할 수 있게 된다.

DEA 분석은 다양한 분야에서 여러 연구가 있어 왔지만 석탄과 같은 원료나 제품의 브랜드별 가격 대비 품질평가에 활용된 연구는 찾아볼 수 없다. 그러나 공급망(supply chain)을 구성하는 단계 중에서 공급자를 DMU로 하고, DEA를 활용하여 그 성과를 평가하는 연구는 다양하게 진행되어 왔다[11-13, 17, 20]. 이 때 공급자 평가에서는 ‘공급자를 활용하는데 드는 비용’에 대한 ‘공급자의 성과(품질, 납기, 유연성 등)’를 효율성 지표로 삼아 분석하고 있다. 동일한 개념을 브랜드별 원료의 평가에 적용할 경우, ‘원료 구매에 드는 비용’ 대비 ‘원료의 품질’을 효율성의 척도로 삼아 DEA를 이용한 평가가 가능할 것으로 판단된다.

3. 분석 및 결과

3.1 투입(input)/산출(output) 요소의 선정

제철용 석탄의 브랜드별 효율성을 평가하기 위한 DEA 모형 적용을 위해 우선 투입요소와 산출요소가 결정되어야 한다. <Table 3>에서와 같이 투입요소로서는 톤당 가격(CIF)을 정하였으며, 산출요소로서는 5가지 품질요소를 선정하였다.

〈Table 3〉 Input and Output Factors

Input	Unit price(\$ in CIF/ton)
Output	Ash, VM, LMF, TD, Rm

산출요소 중에서 회분(Ash)은 값이 적을수록 선호되므로 Undesirable output으로 볼 수 있다./반대로, 유용도(LMF)와 전팽창지수(TD)는 값이 클수록 선호되므로 Desirable output요소로 볼 수 있다. 한편, 휘발분(VM)과 반사율(Rm)은 배합탄의 품질기준의 중앙값으로부터의 편차가 크지 않아야 선호되므로, 중앙값과의 편차를 undesirable output으로 처리함으로써 자료준비가 가능하다. 예를 들어, A탄은 현재의 VM 값이 34.5이고, 바람직한 배합탄의 VM 중앙값은 26이라 할 경우, 그 편차인 $|34.5-26| = 8.5$ 를

현재의 output값으로 하고, 이 편차는 가급적 적은 것이 선호되므로 undesirable output으로 처리할 수 있다. Undesirable output에 대한 DEA data는 Zuh [20]가 제시한 절차에 따라 작성하였다.

3.2 DEA 분석 결과

3.2.1 효율성(Efficiency)

다음의 〈Table 4〉는 DEA 실행 결과 효율성(ef-ficiency)을 나타낸 표이며, 산출요소(output)인 품질수준이 고정되어 있을 경우 투입요소(input)인 단가(CIF)가 적정한지에 대한 평가결과를 나타내고 있다. 표에서 기술효율성(TE : technical efficiency)은 CCR 모형의 효율성으로서, 주어진 품질 요소에 대한 단가가 적정한지에 대한 정보를 주고

〈Table 4〉 DEA Result for each Brand

Brand	TE (CCR-I)	Reference set	PTE (BCC-I)	Reference set	SE	RTS (BCC)
A	0.87	D, E, S	1		0.874	Decreasing
B	0.92	E, L, P	1		0.915	Decreasing
C	1		1		1	Constant
D	1		1		1	Constant
E	1		1		1	Constant
F	0.88	D, L	0.94	D, E, L, Q	0.944	Constant
G	0.65	D, L	0.76	E, Q, S	0.851	Increasing
H	0.78	E, Q	0.89	E, Q, S	0.879	Increasing
I	0.71	L, S	0.77	L, Q, S	0.918	Increasing
J	0.65	D, E, L, Q	0.74	E, Q, S	0.883	Increasing
K	0.97	M, Q	0.99	D, M, Q	0.984	Constant
L	1		1		1	Constant
M	1		1		1	Constant
N	0.85	D, M, Q	0.86	D, M, Q	0.990	Constant
O	0.40	C, E, P, Q	0.75	Q, S	0.528	Increasing
P	1		1		1	Constant
Q	1		1		1	Constant
R	0.83	C, P, Q	1		0.831	Increasing
S	1		1		1	Constant
평균	0.87		0.93		0.93	

있다. TE가 1인 브랜드는 C, D, E, L, M, P, Q, S 등 모두 8개 브랜드로 나타났으며, 나머지 브랜드들의 TE는 1보다 작게 나타나 비효율적임을 알 수 있다. 예를 들어, A의 TE = 0.87로서 주어진 품질요소 대비 단가가 비싸다는 것을 의미하며, 이는 곧 효율적이라고 나타난 브랜드(TE = 1인 브랜드)에 비해 단가가 13% 비싸다고 판단할 수 있다.

다음으로 <Table 4>에서 'Reference set(참조집합)'이란 특정 브랜드와 투입-산출 구조가 유사한 브랜드로서 벤치마킹 대상으로 삼는 브랜드를 의미한다. 예를 들어, 브랜드 A는 CCR 효율성이 0.87로서 비효율적임을 의미하는데, A가 벤치마킹으로 삼아야 할 브랜드는 D, E, S임을 나타내고 있다. 따라서, 참조집합에 등장하는 빈도가 많을수록 다른 비효율적인 브랜드들의 벤치마킹 대상인 매우 효율적인 브랜드라 할 수 있다. 현재의 자료를 이용할 경우 참조집합에 등장하는 빈도가 많은 브랜드는 Q(6회), D, E, L(이상 각 5회)로서 모범이 되는 브랜드임을 볼 수 있다.

다음으로 순수기술효율성(PTE : pure technical efficiency)은 BCC 모형의 효율성으로서 '운영효율성'을 나타내고 있으며, SE(scale efficiency)는 '규모효율성'을 나타내고 있다(TE = PTE×SE가 성립). 예를 들어 브랜드 A는 TE = 0.87인데, PTE = 1, SE = 0.87로 나타나고 있다. 즉, 브랜드 A는 효율적인 브랜드에 비해 단가가 13% 비싼데, 이는 운영의 비효율성이라기 보다는 규모의 비경제로 인하여 발생하는 것임을 볼 수 있다. 다른 예에 의하면 브랜드 O의 기술효율성은 0.40으로서, 효율성이 1로 나타난 브랜드에 비해 60% 단가가 더 비싼 것으로 판단된다. 이러한 비효율성은 운영효율성(PTE = 0.75)에 의한 것이라고도 할 수 있지만, 규모효율성(SE)이 0.53으로서 주로 규모의 비경제로 인해 발생되고 있음을 볼 수 있다.

마지막으로, RTS(return to scale)는 BCC 모형에서 가장 효율적인 브랜드(혹은 비효율적인 브랜드의 경우에는 projected 브랜드의 frontier)가 일정(constant), 증가(increasing), 감소(decreasing)인지를 나

타내고 있다. 예를 들면 A의 경우 BCC 효율성을 기준으로 현재는 효율적인 것으로 평가되고 있으며 (PTE = 1), frontier의 형태는 decreasing RTS를 의미한다. 즉, 현재에 비해 규모를 키울수록 얻게 되는 효율성의 한계증가율은 떨어짐을 의미한다.

3.2.2 효율성에 영향 미치는 요인의 분석

효율성에 가장 영향을 미치는 요인을 찾기 위하여 종속변수는 CCR 효율성을, 그리고 독립변수는 이 연구에서 사용되는 모든 투입과 산출 변수를 사용하여 다중회귀분석을 실시하였다. 여기서 입력자료의 값 중에서 VM과 Rm은 원자료가 아닌 DEA 모형에 입력된 값을 사용하였다. 이들 변수는 품질 기준의 중앙값으로부터의 편차가 커질수록 효율성이 떨어지도록 설계되었으므로(undesirable output), 이를 반영하기 위해서는 DEA 모형에 투입하기 위해 변환된 값을 이용하는 것이 타당하기 때문이다.

다중회귀분석 결과 <Table 5>에 나타난 바와 같이 회귀모형은 5% 유의수준에서 유의(p-value = 0.0001)함을 알 수 있다. 변수들 중 5% 유의수준에서 CCR 효율성에 유의하게 영향을 미치는 요인은 단가(p-value = 0.0001), LMF(p-value = 0.0103), Rm(p-value = 0.0121)으로 나타났다. 마찬가지로의 방법에 의해 BCC 효율성을 종속변수로 하여 회귀분석을 수행한 결과 다중회귀모형은 유의하다고 판단되지만, CCR 효율성과 달리 BCC 효율성은 오로지 단가(p-value = 0.014)만이 유의하게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 한편, 각 회귀모형에 대한 변동계수는 각각 0.87과 0.69로 나타났으며, 모수에 대한 추정치를 <Table 5>에 표기하였다.

이상에 의하면 CCR 효율성 관점에서는 단가, LMF, Rm 등이 효율성에 영향을 미치는 요소로 나타났으며, BCC 효율성 관점에서는 단가만이 효율성에 유의한 영향을 미치는 요소로 나타났다. 따라서 원료 구매 시 단가, LMF, Rm 등을 기타의 다른 요소인 Ash, VM, TD 등에 비해 보다 주의를 기울여야 할 것으로 판단되며, 특히 단가가 효율성에

〈Table 5〉 Regression Results

Dependent variable : CCR efficiency			
H ₀ : Regression model is not significant		p-value = 0.0001	r ² = 0.87
H ₀ : Each factor is not significant		Parameter estimate	p-value
	Unit price	-0.00597	0.0001
	Ash	0.02543	0.1571
	VM	0.00590	0.6007
	LMF	0.09669	0.0103
	TD	0.00058	0.1576
	Rm	0.88167	0.0121
	Intercept	1.06135	< 0.0001
Dependent variable : BCC efficiency			
H ₀ : Regression model is not significant		p-value = 0.0143	r ² = 0.69
H ₀ : Each factor is not significant		Parameter estimate	p-value
	Unit price	-0.00282	0.0140
	Ash	0.02628	0.1211
	VM	0.00601	0.5692
	LMF	0.06008	0.0668
	TD	0.00022	0.5473
	Rm	0.28296	0.3312
	Intercept	0.98801	< 0.0001

가장 크게 영향을 미치므로 이에 대해서는 주의를 기울여야 함을 보여주고 있다.

3.2.3 브랜드별 효율성의 그룹핑

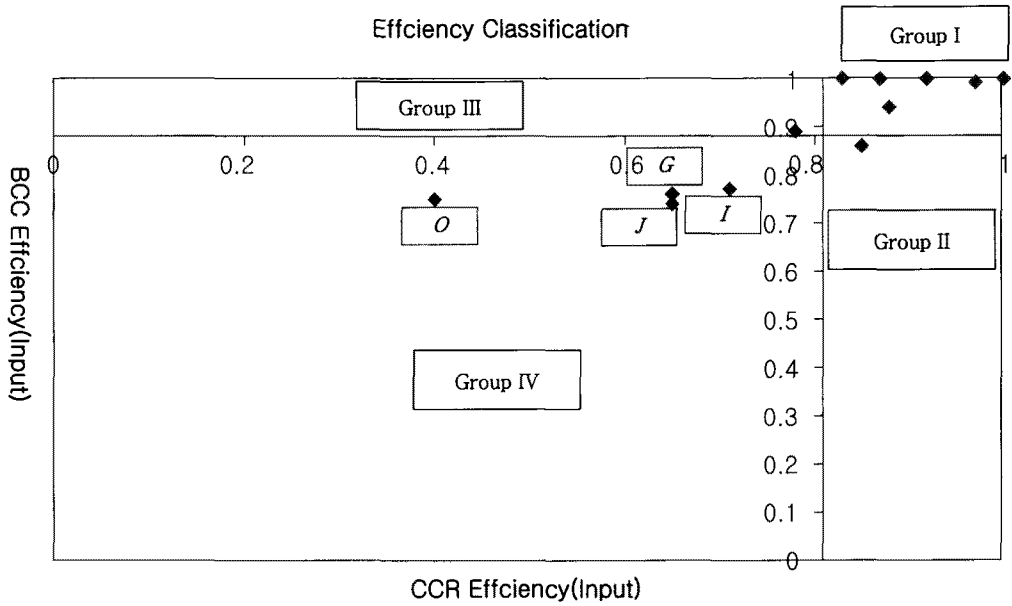
Input 모형을 기준으로 부분최적화와 전체최적화 관점에서 브랜드를 그룹핑하였다. [Figure 1]에서와 같이 그룹핑은 Input 모형을 기준으로 CCR 효율성을 가로축에, BCC 효율성을 세로축에 나타내었으며, 각 효율성의 제1사분위수를 좌표축으로 나타내었다.

그룹핑에 의하면 '그룹 I'은 CCR 효율성과 BCC 효율성 모두 상위 75% 이내에 속하는 브랜드로서 단가 대비 품질이 '좋은' 그룹으로 분류할 수 있으며, 현재 13개 브랜드가 이에 속하는 것으로 나타났다. 마찬가지로, 그룹 II는 CCR 효율성은 상위 75% 내에 들지만 BCC 효율성은 하위 25%에 속하는 브랜드(1개), 그룹 III은 CCR 효율성은 하위

25% 내에 속하고, BCC 효율성은 상위 75% 내에 속하는 브랜드(1개), 마지막으로 그룹 IV는 CCR 효율성과 BCC 효율성 모두 하위 25%에 속하는 브랜드로서, 이들은 원료의 사용자 입장에서는 품질 대비 단가가 비싼 브랜드라 할 수 있음을 나타낸다. 이처럼 그룹 IV에 속하는 브랜드들은 추후 다른 브랜드로 대체를 검토하거나 혹은 단가를 낮추어 구매하는 것이 필요할 것으로 판단되며, 현재 O, J, G, I 등 4개 브랜드가 이에 속하는 것으로 나타났다.

3.2.4 탄종별 효율성(ANOVA)

탄종간에 효율성의 차이가 나타나는지에 대한 ANOVA를 하였다. <Table 6>에 나타난 바와 같이 CCR 효율성에 대해서는 탄종간에 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 BCC 효율성은 10% 유의수준에서 탄종 간에 차이가 있는 것으로 나타났다.



[Figure 1] Grouping the Brands According to the Efficiencies

으며(p-value = 0.0826), Duncan 통계량에 의하면 Type III(혹은 Types III과 IV)의 효율성만이 타 탄종에 비해 낮은 것으로 나타났다. 따라서 향후 Type III(혹은 Type IV)에 대한 구매계획 수립 시 단가가 저렴한 탄종 혹은 단가 대비 품질이 보다 나은 탄종을 탐색할 수 있는 방안이 필요할 것으로 보인다.

<Table 6> ANOVA Results for the Difference among Coal Types

H_0 : No differences of BCC efficiencies among coal types(p-value = 0.0826)

Duncan grouping	Mean	Coal type
A	1.0	I
A	1.0	II
A	1.0	V
B A	0.922	IV
B	0.848	III

한편, 국가별 규모효율성(SE)에 대해 ANOVA를 수행한 결과 다음의 <Table 7>에서와 같이 10%

유의수준에서 국가별 규모효율성에는 차이가 없는 것으로 나타났다(p-value = 0.3105). 그러나, Duncan의 다중범위검정(multiple range test)에 의하면 Canada로부터의 석탄이 다른 국가로부터의 석탄에 비해 규모효율성이 큰 것으로(혹은 Russia로부터의 석탄이 다른 국가로부터의 규모 효율성에 비해 작은 것으로) 나타났다. 이는 Canada로부터의 수송규모는 대형선박인 cape size, 그리고 Russia로부터의 수송은 소형선박인 handy size에 의존하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

<Table 7> ANOVA Results for the Difference among Countries

H_0 : No differences of SE among countries (p-value = 0.3105)

Duncan grouping	Mean	Country
A	0.9870	Canada
B A	0.9422	Australia
B A	0.9370	USA
B A	0.9150	China
B	0.7640	Russia

3.2.5 Projection

다음의 <Table 8>은 브랜드별로 projection을 일부 나타낸 것이다. 만약 어떤 브랜드가 비효율적이라 평가된 경우, 그 브랜드가 효율적이 되기 위해서는 투입요소인 단가가 떨어져야(또는 산출요소인 브랜드의 품질이 좋아져야) 하는데, 'projection'이란 얼마만큼 단가가 떨어져야만(또는 품질이 좋아져야만) 효율적인 브랜드가 되는지에 대한 수치적인 척도를 제시하고 있다. 이 때, input 모형에서의 projection은 산출요소인 품질이 모두 고정되어 있다고 가정할 경우 단가가 얼마나 감소해야 하는지에 대한 척도를 제시하고 있으며, output 모형에서의 projection은 투입요소인 단가가 고정되

어 있다고 할 때 산출요소인 품질이 얼마나 좋아져야만 효율적이 되는지에 대한 값을 제시하고 있다. 이 중에서 품질요소는 석탄의 구매자인 제철소 입장에서 통제하기가 곤란한 변수라 판단되므로 output 모형에 의한 projection은 효율가치가 없을 것으로 보여 input 모형에서의 projection을 대상으로 분석하고자 한다.

Projection의 예를 들면 <Table 8>에 나타낸 바와 같이 A는 CCR 효율성은 0.87로서 비효율적으로 나타났다. 만약 A의 모든 품질을 현재의 상태로 고정할 경우 A가 효율적인 브랜드가 되려면 단가는 현재에 비해 약 13% 감소한 \$187/톤으로 되어야만 효율적이 됨을 나타내고 있다. 그런데, A는 단가가 13% 감소한다 하더라도 여전히 100%

<Table 8> Projection of the Inefficient Brand(part)

Brand	Quality	CCR input model			BCC input model		
		Raw Data	Projection	%(+/-)	Raw Data	Projection	%(+/-)
A	Score	0.87			1		
	CIF	214	187	-13	214	214	-
	Ash	6.25	6.25	-	6.25	6.25	-
	VM	34.50	31.22	-9	34.50	34.50	-
	LMF	4.45	4.45	-	4.45	4.45	-
	TD	200	297	48	200	200	-
	Rm	1.02	1.02	-	1.02	1.02	-
C	Score	1.00			1		
	CIF	149	149	-	149	149	-
	Ash	6.50	6.50	-	6.50	6.50	-
	VM	33.30	33.30	-	33.30	33.30	-
	LMF	3.65	3.65	-	3.65	3.65	-
	TD	157	157	-	157	157	-
	Rm	0.82	0.82	-	0.82	0.82	-
F	Score	0.88			0.94		
	CIF	138	122	-12	138	129	-6
	Ash	9.90	9.24	-7	9.90	8.93	-10
	VM	20.60	21.87	6	20.60	23.99	16
	LMF	2.58	2.58	-	2.58	2.58	-
	TD	99	106	7	99	99	-
	Rm	1.25	1.25	-	1.25	1.25	-

효율적(fully efficient)인 브랜드가 되지 못하는 약 효율적(weakly efficient)인 상태가 된다. 따라서, 만약 A가 100% 효율적인 브랜드가 되기 위해서는 13%의 단가감소와 더불어 품질지표인 VM이 현재에 비해 약 9% 감소한 31.22로 되고, TD가 현재보다 48% 증가한 297이 되어야만 가능함을 의미한다.

한편, 운영효율성(BCC 효율성) 관점에서 동일한 projection이 가능하게 된다. BCC 모형에서의 projection은 CCR 모형에서의 projection에 비해 개선의 필요성은 적게 나타날 것으로 예상된다. 예를 들면 F의 품질수준을 현재로 유지한 채 BCC 효율적이 되기 위해서는 단가가 현재의 \$138/톤에서 6% 감소한 \$129/톤으로 되어야만 하며, 이 상태 또한 앞서 언급한 약효율적(weakly efficient) 상태가 된다. 따라서 100% 효율적이 되기 위해서는 6%의 단가감소와 더불어 품질수준은 Ash는 현재 대비 10% 감소, VM은 현재대비 16% 감소되어야만이 100% 효율적이 됨을 의미한다.

이와 같은 방법으로 비효율적으로 나타난 브랜드들이 효율적이 되기 위해서는 각각의 지표가 얼마나 개선되어야 하는지에 대한 정량적인 분석이 가능하게 된다.

4. 결론 및 추후 연구방향

DEA를 이용하여 제철용 석탄에 대한 단가 대비 품질지표에 의해 원료의 브랜드별 효율성(경제성)을 평가할 수 있는 모형을 제시하였다. 단가는 원료의 FOB 가격에 수송비와 보험료가 반영된 CIF를 기준으로 하였으며, 석탄의 품질은 제철소에서 coke 제조에 중요한 것으로 판단되고 있는 5가지 지표를 사용하였다.

분석 결과 고려 대상의 석탄 브랜드에 대한 효율성 도출이 가능하였으며, 효율성에 중요한 영향을 미치는 요인에 대한 회귀분석 결과 단가, LMF, Rm 등이 효율성에 영향을 미치는 요소로 나타났다. 또한, 탄종별 BCC 효율성에 차이가 있는지 그

리고 국가별로 규모효율성(SE)에 차이가 있는지에 대한 분산분석(ANOVA)을 수행하였다. 한편, input 모형을 이용하여 BCC 효율성과 CCR 효율성에 의한 개별 브랜드를 사사분면에 위치시킴으로써 브랜드별로 효율성이 어느 정도 되는지에 대한 판단이 가능하도록 제시하였다. 마지막으로, 비효율적인 것으로 나타난 브랜드들이 효율적이 되기 위해서는 단가(혹은 품질지표)가 어느 정도 감소(혹은 증가)해야 가능한지에 대한 정량적 지표 설정이 가능하게 되었다.

이러한 연구는 보다 많은 석탄 브랜드들에 대한 분석할 경우 구매자인 제철소 입장에서 가장 경제적인(효율적인) 브랜드가 무엇인지에 대한 체계적인 분류가 가능하게 되었으며, 향후 장기적인 구매계획에 반영이 가능할 것으로 판단된다.

향후 제철소의 중요한 원료인 석탄과 더불어 철광석에 대한 브랜드별 경제성 분석에도 이용이 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 임환, 손명호, "DEA를 활용한 성과평가 지표의 가중치 결정모형 구축", 「한국아이티서비스학회지」, 제9권, 제4호(2010).
- [2] Amirteimoori, A., S. Kordrostami, and M. Sarparast, "Modeling undesirable factors in data envelopment analysis", *Applied Mathematics and Computation*, Vol.180(2006), pp. 444-452.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Farrell, M. J., "The measurement of productive efficiency", *J. of the Royal Stat. Soc., Series A*, Vol.120, No.3(1957), pp.253-281.
- [9] Jahanshahloo, G. R., F. Hosseinzadeh Lotfi, N. Shoja, G. Tohidi, and S. Razavyan, "Undesirable inputs and outputs in DEA models", *Applied Mathematics and Computation*, Vol.169(2005), pp.917-925.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Saen, R. F., "Supplier selection by the new AR-IDEA model," *Int J Adv Manuf Technol*, Vol.39(2008), pp.1061-1070.
- [13] Saen R. F., "Restricting weights in supplier selection decisions in the presence of dual-role factors", *Applied Mathematical Modelling*, Vol.34(2010), pp.2820-2830.
- [14] Sherman, H. D. and F. Gold, "Bank branch operating efficiency : Evaluation with data envelopment analysis", *Journal of Banking and Finance*, Vol.9, No.2(1985), pp.298-315.
- [15] The TEX Report, *Coal Manual*, 2008.
- [16] 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.
- [17] Wu, D., "Supplier selection : A hybrid model using DEA, decision tree and neural network", *Expert Systems with Applications*, Vol.36(2009), pp.9105-9112.
- [18] Yang, Z., "Assessing Canadian bank branch operating efficiency using data envelopment analysis", *IAENG Transactions on Engineering Technologies*, Vol.3(2009), pp.31-43.
- [19] Zenios, C. V., S. A. Zenios, K. Agathocleous, and A. C. Soteriou, "Benchmarks of the efficiency of bank branches", *Interfaces*, Vol. 29, No.3(1999), pp.37-51.
- [20] 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.
- [21] Zhu, J., *Quantitative models for performance evaluation and benchmarking : data envelopment analysis with spreadsheets and DEA Excel Solver*, Kluwer Academic, 2003.

◆ 저 자 소개 ◆



성 덕 현 (dhsung@pknu.ac.kr)

현재 부경대학교 경영학부의 교수로서, 서울대학교 산업공학과에서 학사와 석사학위를, 포항공과대학교 산업공학과에서 박사(1993)학위를 수여했습니다. 그는 포항제철 기술연구소와 POSRI 경영과학센터의 연구원을 역임하였으며, 현대제철의 초기 물류관련 연구를 수행하였습니다. 주요 관심 사항은 공급사슬관리, 생산계획, 다변량분석 등입니다.



서 민 수 (mssuh@hyundai-steel.com)

현재 현대제철 원료관리담당 임원으로 재직 중이며, 서울대학교 산업공학과에서 학사, KAIST 경영과학과에서 석사와 박사(1991) 학위를 수여했습니다. 그는 현대제철에서 제철원료의 조달과 관련하여, 재고관리와 입항 일정을 연동하여 관리할 수 있도록 최적화 및 시뮬레이션 모형을 통합하여 운영하는 그룹의 리더로 활동하고 있습니다. 현재 이 그룹은 원료의 조달과 물류, 그리고 생산을 연결하는 과정에서, 통합적인 관점으로부터의 수요와 공급을 연동시키는 중요한 역할을 수행하고 있습니다.