Journal of Korea Port Economic Association
Vol.32, No.1, 2016, pp.165-178.

불확실성 DEA모델을 이용한 컨테이너 항만의 효율성 분석 연구

팜티퀸마이* · 김화영** · 이청환***

A Study on the Analysis of Container Ports' Efficiency using Uncertainty DEA model

Pham, Thi-Quynh-Mai* · Kim, Hwa-Young** · Lee, Cheong-Hwan***

Abstract

Container port nowadays becomes one of the most vital link of the transportation chain, plays an important role in trading with other countries. Therefore, evaluating the operational efficiency of container ports to reflect their status and to reveal their position in this competitive environment is very important for port development. Although there have been lots of methods used to measure efficiency in the past, the DEA (Data Envelopment Analysis) model is still the most commonly applied approach. However, the data used in the model sometimes is complex and uncertain to handle using the basic DEA model. In this paper, we applied an uncertainty theory to create an uncertainty DEA model (UDEA), which can solve the limitation of the traditional one. This study mainly focuses on measuring efficiency of 41 container ports by applying proposed an UDEA model. The results show that among 41 container ports, only six container ports are regarded to have efficient operation through the clustering, meanwhile others have technical and scale inefficiencies. We found out that an UDEA model is better to analysis efficiency than existing DEA model.

Key words: Port Efficiency, Container Port, Uncertainty DEA, Port Clustering

▷ 논문접수: 2016. 02. 23. ▷ 심사완료: 2016. 03. 14. ▷ 게재확정: 2016. 03. 22.

* 목포해양대학교대학원 해상운송시스템학과, 제1저자, phammai090691@gmail.com
** 목포해양대학교 국제해사수송과학부 교수, 교신저자, hwayoung@mmu.ac.kr
*** 목포해양대학교대학원 해상운송시스템학과, chwanlee@hanmail.net

Ⅰ. 서 론

세계 물동량의 90% 가까이가 선박을 통한 해상 운송에 의해 이루어지고 있다(Haralambides et al. 2001). 그리고 해상운송은 과거부터 현재에 이르기까지 국가 발전의 중추적인 역할을 해왔으며(Cullinane et al. 2002), 컨테이너에 의한 국제운송은 더욱 중요해지고 있다. 컨테이너 항만은 해상 운송의 중요한 기반 시설로 모든 국가의 경제성장에 결정적인 역할을 수행하고 있고, 이에 컨테이너 항만 효율성은 국가 경쟁력에 주요 지표가 되고 있다(Tongzon, 1989). 해당 국가의 경제발전과 항만기능의 향상을 위해 항만 서비스의 국제경쟁력 제고가 중요하기 때문에 항만당국, 지자체 등은 효율성 제고에 많은 노력을 기울이고 있다.

과거에는 컨테이너 항만의 효율성을 측정하기 위해 설문조사를 통한 주성분 분석(Clark et al. 2004), 매개변수 분석(Estache et al. 2002) 등이 주로 사용되었다. 그러나 이 방법들은 상당한 제약이 있다. 조사 데이터는 설문조사 참여자의 주관에 의존하고, 컨테이너 항만 효율성의 기존 조사는 특정시간을 이용하였다. 그리고 매개변수 방법은 소정의 한계 기능을 갖게 되고 항만 생산의 구조는 한 항만 또는 터미널의 수준으로 생산 또는 비용 함수의 계량 추정이 제한되었다. 특히 이러한 방법들은 다중 입력과 다중 출력이 있는 컨테이너 항만의 생산 시스템에 적합하지 않다. 마지막으로 많은 연구에 의해 사용되는 방법은 자료포락분석(DEA, Data Envelopment Analysis) 방법이다. DEA는 수학적으로 다중 입·출력과 의사결정단위(DMU) 집합의 효율성을 평가하기 위한 프로그램에 기반한 방법이다. 계산은 비모수이고 다중 출력을 처리 할 수 있고 출력과 입력 사이의 명확한 관계결정을 요구하지 않기 때문에 DEA 기법은 컨테이너 항만의 효율성 측정에 많이 이용되었다. 그러나 DEA 모델도 한계가 있다. 첫째 경계에 집중되기 때문에 데이터에 작은 변화가 생기면 효율적인 경계가 변경될 수 있다. 따라서 DEA를 성공적으로 적용하기 위해 입력과 출력을 모두 정확하게 측정해야한다. 예를들면 선박 대기시간은 컨테이너 항만의 서비스에 있어서 야드내 대기시간, 장비 고장률, 운전인력의 능숙도 등을 반영하기 때문에 중요한 변수이다. 그러나 선박 대기시간과 같이 항만 수행능력(performance)의 입·출력 데이터의 관찰 값은 불확실한 변수 형태로 존재하고, 상당한 기간 동안의 데이터를 요하거나 정확한 값을 수집하기 쉽지 않다.

따라서 본 논문에서는 불확실한 변수값을 처리할 수 있는 방식으로 컨테이너 항만 효율성을 평가하기 위한 새로운 DEA 모델을 연구하는데 목적이 있다. 본 논문은 다음과 같이 구성하였다. 2장에서는 컨테이너 항만 효율성의 평가와 관련한 선행연구를 분석하였다. 3장에서는 불확실성 DEA모델에 대하여 설명하고 4장에서는 불확실성 DEA모델을 이용한 컨테이너 항만 효율성의 평가결과를 분석하였다.

Ⅱ. 선행 연구 분석

기존 연구문헌에서 효율성 분석과 관련하여 DEA 모델을 이용한 많은 연구가 수행되었다. 이 방법은 교육 시스템, 건강관리, 농산물, 군용 물류 등에 사용되고 있으며, 컨테이너 항만 효율성 분석에도 적용되었다. 컨테이너 항만의 효율성을 분석하기 위해 DEA 방법을 적용한 연구는 다음과 같다.

류동근(2005)은 종업원수, 부두길이, 부지면적, C/C수를 투입요소로 컨테이너처리량, 연간선석점유율, 컨테이너내장화물톤수를 산출요소로 하여 부산항, 광양항의 효율성을 평가하였다. 권신혜(2007)는 선석수, 선석길이, 수심, 부두총면적, C/C수를 투입요소, 컨테이너처리량을 산출요소로 동북아시아 22개항만의 효율성을 측정하였다. 박홍균(2011)은

부산항과 광양항 등 11개 컨테이너터미널을 대상으로 투입변수로 CY면적, C/C대수, T/C대수, Y/T대수를 설정하고, 산출변수는 환적물동량으로 효율성을 분석하였다. 방희석(2011)은 전세계 76개 컨테이너 항만을 대상으로 2005~2009년 자료를 기반으로 지역별 · 기간별로 효율성을 비교 분석하였다. 김민수(2012)는 한국과 중국의 주요 컨테이너 항만을 대상으로 금융위기 이전과 이후의 운송량 처리실적을 비교하여 효율성을 분석하였다. 투입변수는 선석수, 선석길이, 터미널 면적, 크레인 대수를 사용하였고 산출변수는 컨테이너 운송량을 사용하였다.

외국의 연구에 있어서도 Tongzon(2001)은 호주에 있는 12개의 컨테이너 항만을 대상으로 기술적 효율성 분석을 위해 DEA-CCR 모델을 사용했다. Valentine and Gray (2001)는 21개 글로벌 컨테이너 항만을 대상으로 상대적 효율성을 평가하기 위해 각각 2개의 투입요소와 산출요소로 구성된 DEA-CCR 모델을 적용하였다. Wang and Cullinane (2006)는 유럽의 104개 컨테이너 터미널의 효율성을 측정하였다.

이와 같이 국내외 많은 연구에서 항만 효율성을 측정하기 위해 DEA 모델이 활용되었다. 그러나 대부분의 기존연구에서는 불확실한 변수를 반영한 투입 및 산출요소를 고려하지 않았다. 즉 선석길이, 장비대수, 면적 등 정해져 있는 확실한 값을 기준으로 효율성을 분석하였다. 그러나 컨테이너 항만에서는 항만의 수행능력(performance), 즉 운영결과에 있어서 정확한 값도 있지만 데이터가 애매모호한 경우도 존재한다. 이러한 점을 해결하기 위해서 일부 연구자들은 DEA에 데이터의 변화를 다루는 방법에 대한 여러 모델을 제안했다. 예를 들면, Sara Bray et al(2013)는 기초 DEA와 퍼지 선형 프로그래밍 공식을 기반으로 새로운 퍼지 DEA 모델을 제안했다. 그러나 이 연구는 퍼지접근 방법에만 집중하여 이따금 간격 데이터(Interval data)의 신뢰도를 정확하게 설명할 수 없었다. 따라서 본 논문에서는 컨테이너 항만의 효율성을 보다 객관적으로 측정하기 위해 불확실한 변수를 처리할 수 있도록 불확실성 이론을 적용하여 불확실성 DEA 모델을 제안하였다. 그리고 불확실한 변수는 컨테이너 항만의 운영의 결과를 반영하는 선박 대기시간으로 설정하여 컨테이너 항만의 효율성을 평가하였다.

Ⅲ. 불확실성 DEA모델

1. 불확실성 이론

2007년에 불확실성 이론(Uncertainty Theory)은 칭화대 Baoding Liu 교수에 의해 개발되었다. 현재의 불확실성 이론은 인간의 불확실성을 모델링을 하기 위한 공리적 수학의 한 분야가 되었다. 이 절에서는 불확실한 변수에 대한 기본 개념은 다음과 같다.

정의 1 (Liu, 2013) 불확실한 변수는 실수의 집합에 대한 불확실성 공간 (Γ, L, M)에서 측정한 함수 ξ이고, 그 {$\xi \in$ B}는 어떤 B의 보렐 (Borel) 집합을 설정하기 위한 이벤트 (event) 이다.

정의 2 (Liu, 2013) 어떤 실수 X에 대해 불확실한 변수 ξ의 불확실성 분포는 $\Phi(x) = M\{\xi \leq x\}$로 정의된다. 예를 들면 선형 불확실 변수 $\xi \sim L(a, b)$의 불확실성 분포는 식(1)과 같다.

$$\Phi(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x \leq a \\ \dfrac{x-a}{b-a} & \text{if } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{if } x \geq b \end{cases} \quad (1)$$

a와 b는 실수 (a 〈 b)이고, L(a, b)로 나타낸다.

정의 3 (Liu, 2013) 규칙적인 불확실성 분포 $\Phi(x)$와 ξ는 불확실한 변수가 될 수 있다. 이어서 역함수 $\Phi^{-1}(\alpha)$는 ξ의 역불확실성 분포이다. 예를들

면 선형 불확실한 변수 L(a, b)의 역불확실성 분포는 식(2)와 같다.

$$\Phi_{(\alpha)}^{-1} = (1-\alpha)a + \alpha b \quad (2)$$

정의 4 (Liu, 2013) 목적 함수 f(x, ξ_1, ξ_2,..., ξ_n)는 ξ_1, ξ_2,..., ξ_m에 대해 강하게 증가하고 ξ_{m+1}, ξ_{m+2},..., ξ_n에 대해 강하게 감소하는 것으로 추정된다. 각각 불확실성 분포 Φ_1, Φ_2,..., Φ_n와 ξ_1, ξ_2,..., ξ_n가 독립적인 불확실한 변수이면 예상 목적 함수 E[f(x, ξ_1, ξ_2,..., ξ_n)는 식(3)과 같다.

$$\int_0^1 (f(x,\Phi_1^{-1}(\alpha),...,\Phi_m^{-1}(\alpha), \Phi_{m+1}^{-1}(1-\alpha),...,\Phi_n^{-1}(1-\alpha))d\alpha \quad (3)$$

정의 5 (Liu, 2013) 목적 함수 g(x, ξ_1, ξ_2,..., ξ_n)는 ξ_1, ξ_2,..., ξ_k에 대해 강하게 증가하고 ξ_{k+1}, ξ_{k+2},..., ξ_n에 대해 강하게 감소하는 것으로 추정한다. 각각 불확실성 분포 Φ_1, Φ_2,..., Φ_n와 ξ_1, ξ_2,..., ξ_n는 독립적인 불확실한 변수이며 제약조건은 식(4)와 같다.

$$M\{g(x,\xi_1,\xi_2,...,\xi_n)\} \le 0 \ge \alpha \quad (4)$$

또한 필요충분 조건을 유지한다.

$$g\left(x,\Phi_1^{-1}(\alpha),...,\Phi_k^{-1}(\alpha), \Phi_{k+1}^{-1}(1-\alpha),...,\Phi_n^{-1}(1-\alpha)\right) \le 0 \quad (5)$$

정의 6 (Liu, 2013) j = 1, 2, …, p와 목적 함수 f(x, ξ_1, ξ_2,..., ξ_n)는 ξ_1, ξ_2,..., ξ_m에 대해 강하게 증가하고, ξ_{m+1}, ξ_{m+2},..., ξ_n에 대해 강하게 감소한다. 또한 목적 함수 g(x, ξ_1, ξ_2,..., ξ_n)는 ξ_1, ξ_2,..., ξ_k에 대해 강하게 증가하고 ξ_{k+1}, ξ_{k+2},..., ξ_n에 대해 강하게 감소하는 것으로 추정한다. 각각 불확실성 분포 Φ_1, Φ_2,..., Φ_n와 ξ_1, ξ_2,..., ξ_n는 독립적인 불확실한 변수이면 불확실한 프로그램은 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned} &\min E[f(x,\xi_1,\xi_2,...,\xi_n)] \\ &\text{subject to:} \\ &M\{g_j(x,\xi_1,\xi_2,...,\xi_n) \le 0\} \ge \alpha_j, j = 1,2,...,p. \end{aligned} \quad (6)$$

이것은 식(7)과 같이 크리스피 (crisp) 수학 프로그램에 해당한다.

$$\begin{aligned} &\min \int_0^1 (f(x,\Phi_1^{-1}(\alpha),...,\Phi_m^{-1}(\alpha), \\ &\qquad \Phi_{m+1}^{-1}(1-\alpha),...,\Phi_n^{-1}(1-\alpha))d\alpha \\ &\text{subject to:} \\ &M\{g_j(x,\xi_1,\xi_2,...,\xi_n) \le 0\} \ge \alpha_j, j = 1,2,...,p. \end{aligned} \quad (7)$$

2. 자료포락분석(DEA)

자료포락분석(DEA)은 Charnes, Cooper & Rhodes (1978)에 의해 개발되었다. DEA는 의사결정단위(DMU, Decision Making Units)의 상대적 효율성을 추정하는 비모수적 방법이다. DEA 기법은 입력과 출력 사이의 관계의 가정이 필요가 없고, 효율성 계산에 있어서 다중 입력 및 다중 출력을 처리 할 수 있다. 따라서 컨테이너 항만의 기술 및 규모의 효율성을 평가하기 위해 이 연구에서는 각각 불변 (CCR모델)와 가변규모수익 (BCC모델)을 적용했다.

1) DEA-CCR모델

만일 평가할 DMU가 n개 있다고 가정하면, 각 DMU의 다른 출력을 s개 생성하기 위해 다른 입력을 m개 사용한다. 특별히 DMU는 다량의 입력 X_j = [x_{ij}]을 (i=1,…,m) 소비하고 다량의 출력 Y_j = [y_{rj}]을 생산한다(r=1,…,s). s × n 출력 수단의

매트릭스 (Matrix)는 Y로 나타낸다, 그리고 m × n 입력 수단의 매트릭스 (Matrix)는 X로 나타낸다. $x_{ij} > 0$ 와 $y_{r\ j} > 0$을 가정한다. n개의 DMU 대해 상대적 효율성 평가에 대하여 고려하면 DMU_0처럼 한정된다. DMU_0 대한 상대적인 효율성은 목표 출력의 가중 합을 최대화함으로써 계산된다. 목표 입력의 가중 합이 1과 동일하고, 출력의 가중 합과 입력의 가중 합의 차이가 0보다 더 작은 제약조건을 갖으며 식(8)과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} &\max\theta = \sum_{r=1}^{s} u_r y_{rj0} \\ &s.t. \sum_{i=1}^{m} v_i x_{ij0} = 1, \\ &\sum_{r=1}^{s} u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^{m} v_i x_{ij} \le 0, j = 1,2...,n \\ &u_r \ge 0, r = 1,2,...,s. \\ &v_i \ge 0, i = 1,2,...,m. \end{aligned} \tag{8}$$

u_r,v_i는 각각 출력 r과 입력 i에 가중치를 할당한다.

정의 7 DMU_0는 CCR이 효율적이면 $\theta^* = 1$하고 $v_r^* > 0$와 $u_i^* > 0$와 최적 (v_r^*, u_i^*)는 최적해이다. 그렇지 않으면, DMU_0는 비효율적이다.

2) DEA-BCC모델

BCC모델은 식(9)와 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} &\max\theta = \sum_{r=1}^{s} u_r y_{rj0} - u_0 \\ &s.t. \sum_{i=1}^{m} v_i x_{ij0} = 1, \\ &\sum_{r=1}^{s} u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^{m} v_i x_{ij} - u_0 \le 0, j = 1,2...,n \\ &u_r \ge 0, r = 1,2,...,s. \\ &v_i \ge 0, i = 1,2,...,m. \\ &u_0 \ free\ in\ sign. \end{aligned} \tag{9}$$

정의 8 DMU에 있어서 CCR가 효율적이면 BCC도 효율적이다.

u_0를 제외하고 식(9)에 있어서 함수의 모든 변수는 음수로 제약된다. 이는 양수, 음수 또는 0일 수 있다. RTS을 식별하기 위해 DEA-CCR의 효율성 점수는 DEA-BCC가 동일하면 그는 불변규모수익을 의미한다. DMU는 규모수익체증인지 규모수익체감인지 확인하기 위해 NIRS(Non Increasing Return to Scale)모델을 사용할 수 있다($u_0 \ge 0$).

DEA-NIRS와 DEA-BCC모델의 효율성 점수가 동일하면 규모수익체감을 DEA-NIRS와 DEA-BCC모델의 효율성 점수는 다르면 규모수익체증을 의미한다.

3) 규모의 효율성

대부분의 연구는 DEA-CCR모델로부터 얻어지는 기술적인 효율성으로 점수를 분할하였다. 하나는 규모의 효율성이고 다른 하나는 순수한 기술적인 효율성이다. 이는 동일한 데이터에 따라서 CRS (DEA-CCR)모델 및 VRS(DEA-BCC)모델을 모두 수행하여 결과를 얻을 수 있다. 특정 DMU는 두 효율 점수에 차이가 있다면 DMU가 규모 비효율성을 갖는다는 것을 의미한다. 그리고 그 규모 비효율성은 DEA-CCR 효율성 점수와 DEA-BCC 효율성 점수의 차이에 의해 계산 될 수 있고 식(10)과 같이 나타낸다.

규모의 효율성 (SE) = 기술적인 효율성 (TE)/ 순수한 기술적인 효율성 (PTE)

$$SE = CCR\text{-}TE/BCC\text{-}PTE \tag{10}$$

3. 불확실성 DEA모델

DEA 기초 모델과 같은 경우 불확실성 DEA 모델은 DMU j_0의 효율성 수준을 최대화하는 것을 제약조건으로 한다. 불확실성 DEA모델은 식(11)과 같다.

$$\begin{aligned}
&\max\theta = \sum_{r=1}^{s} u_r \widetilde{y_{rj0}} \\
&s.t.\, M\left\{\sum_{i=1}^{m} v_i \widetilde{x_{ij0}} \le 1\right\} \ge \alpha, \\
&M\left\{\sum_{r=1}^{s} u_r \widetilde{y_{rj}} - \sum_{i=1}^{m} v_i \widetilde{x_{ij}} \le 0\right\} \ge \alpha, j = 1,..,n. \\
&u_r \ge 0, r = 1,...,s. \\
&v_i \ge 0, i = 1,...,m.
\end{aligned} \tag{11}$$

정의 9 DMU_0가 CCR이 효율적이면 $\theta^* = 1$하고 $v_r^* > 0$과 $u_i^* > 0$의 최적 (v_r^*, u_i^*)은 최적해이다. 그렇지 않으면, DMU_0는 CCR은 비효율적이다.

식 (11)은 불확실한 프로그래밍 모델이라서 직접 계산하면 너무 복잡하다. 따라서 다음과 같이 연산 과정을 단순화 한 것이다.

정의 10 목적 함수 $\theta\left(u_r, \widetilde{y_{1j0}}, ..., \widetilde{y_{sj0}}\right)$는 $\widetilde{y_{1j0}}, \widetilde{y_{2j0}} ..., \widetilde{y_{rj0}}$에 대해 강하게 증가하고 $\widetilde{y_{(r+1)j0}}, \widetilde{y_{(r+2)j0}}, ..., \widetilde{y_{sj0}}$에 대해 강하게 감소하고, 목적함수 $X\left(v_r, \widetilde{x_{1j}}, \widetilde{x_{2j}} ..., \widetilde{x_{mj}}\right)$는 $\widetilde{x_{1j}}, \widetilde{x_{2j}}, ..., \widetilde{x_{kj}}$에 대해 강하게 증가하고 $\widetilde{x_{(k+1)j}}, \widetilde{x_{(k+2)j}}, ..., \widetilde{x_{mj}}$에 대해 강하게 감소하고, 목적함수 $Y\left(u_r, \widetilde{y_{1j}}, ..., \widetilde{y_{sj}}\right)$는 $\widetilde{y_{1j}}, \widetilde{y_{2j}}, ..., \widetilde{y_{lj}}$에 대해 강하게 증가하고 $\widetilde{y_{(l+1)j}}, \widetilde{y_{(l+2)j}}, ..., \widetilde{y_{sj}}$에 대해 강하게 감소하는 것으로 추정한다. 각각 불확실성 분포 $\Psi_{1j0}, \Psi_{2j0}, ..., \Psi_{sj0}$와 $\Psi_{1j}, \Psi_{2j}, ..., \Psi_{sj}$, $\Phi_{1j}, \Phi_{2j}, ..., \Phi_{mj}$와 $\widetilde{y_{1j0}}, \widetilde{y_{2j0}} ..., \widetilde{y_{sj0}}$, $\widetilde{y_{1j}}, \widetilde{y_{2j}}, ..., \widetilde{y_{sj}}$와 $\widetilde{x_{1j}}, \widetilde{x_{2j}}, ..., \widetilde{x_{mj}}$가 독립적인 불확실한 변수이면 불확실한 CCR 프로그램은 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned}
&\max\theta = \sum_{r=1}^{s} u_r \widetilde{y_{rj0}} \\
&s.t.\, M\left\{\sum_{i=1}^{m} v_i \widetilde{x_{ij0}} \le 1\right\} \ge \alpha, \\
&M\left\{\sum_{r=1}^{s} u_r \widetilde{y_{rj}} - \sum_{i=1}^{m} v_i \widetilde{x_{ij}} \le 0\right\} \ge \alpha, j = 1,..,n. \\
&u_r \ge 0, r = 1,...,s. \\
&v_i \ge 0, i = 1,...,m.
\end{aligned} \tag{12}$$

이것은 크리스피 (crisp) 수학 프로그램에 해당하여 식(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Max \int_0^1 \sum_{r=1}^{s} u_r \Psi_{rj0}^{-1} d\alpha \tag{13}$$

subject to:

$$\begin{cases}
\sum_{i=1}^{m} u_i \Phi_{ij0}^{-1}(\alpha) \le 1 \\
\sum_{r=1}^{s} u_r \Psi_{rj}^{-1}(\alpha) - \sum_{i=1}^{m} v_i \Phi_{ij}^{-1}(1-\alpha) \le 0, j = 1,...,n. \\
\sum_{r=1}^{s} u_r \ge 0, r = 1,...,s. \\
\sum_{i=1}^{m} v_i \ge 0, i = 1,...,m.
\end{cases}$$

마찬가지로, 불확실한 BCC모델도 식(14)와 같다.

$$\begin{aligned}
&\max\theta = \sum_{r=1}^{s} u_r \widetilde{y_{rj0}} - u_0 \\
&s.t.\, M\left\{\sum_{i=1}^{m} v_i \widetilde{x_{ij0}} \le 1\right\} \ge \alpha, \\
&M\left\{\sum_{r=1}^{s} u_r \widetilde{y_{rj}} - \sum_{i=1}^{m} v_i \widetilde{x_{ij}} - u_0 \le 0\right\} \ge \alpha, j = 1,..,n. \\
&u_r \ge 0, r = 1,...,s. \\
&v_i \ge 0, i = 1,...,m. \\
&u_0 \ free\ in\ sign.
\end{aligned} \tag{14}$$

이 모델도 크리스피(crisp) 수학 프로그램에 해당하여 식(15)와 같이 나타낸다.

$$Max \int_0^1 \left(\sum_{r=1}^{s} u_r \Psi_{rj0}^{-1} - u_0\right) d\alpha \tag{15}$$

subject to:

$$\begin{cases}
\sum_{i=1}^{m} u_i \Phi_{ij0}^{-1}(\alpha) \le 1 \\
\sum_{r=1}^{s} u_r \Psi_{rj}^{-1}(\alpha) - \sum_{i=1}^{m} v_i \Phi_{ij}^{-1}(1-\alpha) - u_0 \le 0, j = 1,...,n. \\
\sum_{r=1}^{s} u_r \ge 0, r = 1,...,s. \\
\sum_{i=1}^{m} v_i \ge 0, i = 1,...,m. \\
u_0 \ free\ in\ sign.
\end{cases}$$

그리고 NIRS모델에 u_0는 양수이다. (≥ 0)

Ⅳ. 효율성 분석결과

1. 데이터 수집

본 논문에서는 〈표 1〉과 같이 2014년 세계 상위 50개 컨테이너 항만 중 데이터가 부족한 9개 항만을 제외하고 41개 항만을 평가대상으로 하였다.

투입 및 산출변수는 실제 목적과 가능한 한 정확하게 컨테이너 항만의 생산성 처리를 반영하는 항목이어야 한다. 전술한 바와 같이 측정되는 출력은 컨테이너처리물동량 및 정박지 생산성이다. 컨테이너처리물동량은 항만 생산의 효율성이 가장 적합하고 분석적으로 취급이 용이한 지표이다. 이 출력은 화물 관련 시설 및 서비스와 밀접한 관련이 있다. 그리고 선박은 주요한 항만의 이용자에 해당하므로 두 번째 출력은 선박의 정박지생산성으로 하였다. 정박지생산성은 한 선박이 한 시간에 이동한 컨테이너의 수를 측정한 결과이며 작업중인 선박의 속도지표이다. 이 측정은 컨테이너 항만의 서비스 수준 및 품질을 나타낼 수 있다.

따라서 본 논문에서 선택된 투입변수는 정박지의 길이, 항만의 총면적, 크레인 수와 선박 대기시간이다. 이 선박 대기시간에는 노사분규, 작업 방법, 장비 고장, 포트 혼잡, 지각된 선박 문제와 기상악화 등으로 기인될 수 있다고 예상되는 불확실한 값이 포함되어 있다. 분석대상인 컨테이너 항만은 〈표 2〉와 같고, 그 컨테이너 항만의 투입 및 산출변수값을 나타내고 있다.

2. 컨테이너 항만 효율성 분석결과

컨테이너 항만 효율성 평가에 있어서 불확실한 변수로 처리한 선박 대기시간이 효율성에 어떤 영향을 미치는지 알기 위하여 DEA 모델을 적용한 경우와 불확실성 DEA 모델을 적용한 경우로 나누어 평가하였다. 기본 DEA모델에서 선박 대기시간은 수집된 데이터의 평균값을 이용하였다. 41개 컨테이너 항만에 대하여 얻어진 효율성 결과는 〈표 3〉과 같다.

〈표 3〉과 같이 DEA모델에서 대부분 아시아지역에 위치하고 있는 9개 컨테이너 항만이효율적으로 나타났다. 그러나 불확실성 DEA 모델에 있어서 6개 컨테이너 항만으로 감소하였다. 특히 상하이와 싱가포르 항만은 DEA모델에서는 효율성이 있는 것으로 평가되었으나 불확실성 DEA모델에서는 비효율적으로 평가되었다. 즉 불확실변수인 선박 대기시간이 영향을 미친 것으로 판단할 수 있어 보다 객관적인 효율성 평가가 가능하였다.

표 1. 효율성 평가대항 컨테이너 항만

지 역	컨테이너 항만 이름
남아메리카	로스앤젤레스
남아시아	콜롬보, 자와 할랄 네루
동남아시아	싱가포르, 클랑, 탕중 펠레 파스, 람차방, 자카르타, 호지민, 마니라, 하이퐁, 탄중 페락
동아시아	상하이, 센젠, 홍콩, 부산, 청도, 광주, 천진, 가오슝, 대련, 케이힌, 한신
아메리카	롱비치, 뉴욕-뉴저시, 산투스, 발보아, 시애틀-타코마, 콜론
아프리카	탕헤르 메드
유럽	로테르담, 함부르크, 앤트워프, 브레멘, 알헤 시라스 베이, 발렌시아, 펠릭스토우, Ambarli
중동	Port of Said East, 살라라, 제벨 알리

표 2. 컨테이너 항만의 투입 및 산출입력 값

번호	항만명	국가	투입변수				산출변수	
			C/C수	정박지 길이 (km)	총면적 (106㎡)	선박 대기시간간격 (시간)	물동량 (106TEU)	정박지 생산성 (move/Hr/Vsl)
1	상하이	중국	156	13.000	6.730	L(1.75,28.9)	35.29	101
2	싱가포르	싱가포르	212	17.350	7.100	L(5.52,13)	33.87	77
3	센젠	중국	148	14.463	3.700	L(15,20)	24.03	97
4	홍콩	중국	126	10.694	3.439	L(12,24)	22.23	74
5	부산	한국	114	12.523	6.307	L(9,15.7)	18.68	102
6	청도	중국	39	3.400	2.250	L(10.4,20)	16.62	126
7	광주	중국	50	5.729	4.050	L(24,120)	16.16	106
8	제벨 알리	아랍 에미리트	97	9.737	5.798	L(120,168)	15.25	131
9	천진	중국	80	8.063	3.360	L(48,96)	14.05	127
10	로테르담	네덜란드	118	16.125	6.850	L(13,23.5)	12.3	84
11	클랑	말레이시아	84	7.629	2.070	L(2,2)	10.95	69
12	가오슝	대만	52	8.402	2.683	L(19,20)	10.59	83
13	대련	중국	46	3.641	1.913	L(24,72)	10.13	81
14	함부르크	독일	80	7.570	5.930	L(40,70)	9.73	89
15	앤트워프	벨기	48	13.120	7.650	L(12, 26.2)	8.98	84
16	탄중 펠레 파스	말레이시아	57	5.040	1.800	L(48,72)	8.5	81
17	로스앤젤레스	미국	74	30.629	1.673	L(14.2, 18)	8.34	76
18	케이 힌	일본	85	10.621	13.875	L(8.5, 8.5)	7.85	112
19	롱비치	미국	66	8.644	5.094	L(12,72)	6.82	74
20	람차방	태국	58	8.160	3.547	L(3, 3)	6.58	80
21	자카르타	인도네시아	31	2.800	0.765	L(24,36)	6.4	70
22	호 지 민	베트남	46	3.000	5.450	L(24,72)	6.39	60
23	브레멘	독일	79	7.730	4.587	L(9.2, 9.2)	5.78	90
24	뉴욕주- 뉴저지	미국	59	8.182	5.229	L(7, 7)	5.77	64
25	한신	일본	50	7.550	2.634	L(8.5, 8.5)	5.32	64
26	콜롬보	스리랑카	26	3.172	0.670	L(24,48)	4.91	86
27	알헤 시라스 베이	스페인	30	5.594	1.110	L(8.5, 8.5)	4.56	81
28	자와 할랄 네루	인도	34	1.992	1.420	L(30,35)	4.45	91
29	발렌시아	스페인	36	4.453	1.480	L(30,42)	4.44	65
30	펠릭스 토우	영국	33	3.084	1.720	L(12,16.6)	4	71
31	산투스	브라질	22	1.870	0.639	L(12,48)	3.68	67
32	마닐라	필리핀	35	7.775	2.314	L(120,240)	3.65	60
33	Port of Said East	이집트	20	1.542	3.935	L(10, 10)	3.5	52
34	발보아	파나마	22	2.300	1.820	L(22,37.5)	3.47	97

35	하이 퐁	베트남	19	4.811	2.342	L(24,48)	3.45	57
36	시애틀-타코마	미국	47	6.135	4.100	L(24,48)	3.43	50
37	Ambarli	터키	11	0.910	0.330	L(7,7)	3.38	40
38	콜론	파나마	10	0.982	0.743	L(14,23)	3.29	54
39	탄중 페락	인도네시아	11	1.450	0.397	L(8.3,8.3)	3.13	65
40	탕헤르 메드	모로코	16	1.612	0.800	L(20,24)	3.08	46
41	살 랄라	오만	36	2.205	0.765	L(19,29)	3.03	99

자료: 각 항만당국 홈페이지, Journal of Commercial 자료를 이용하여 저자 재작성.

표 3. DEA와 UDEA모델의 효율성 분석 결과

DMU	DEA모델					UDEA모델				
	CCR	BCC	NIRS	SE	RTS	CCR	BCC	NIRS	SE	RTS
상하이	**1.000**	**1.000**	**1.000**	**1.000**	**Constant**	**0.877**	**1.000**	**1.000**	**0.877**	**Decreasing**
싱가포르	**1.000**	**1.000**	**1.000**	**1.000**	**Constant**	**0.914**	**0.935**	**0.935**	**0.978**	**Decreasing**
센젠	0.708	0.717	0.708	0.988	Increasing	0.641	0.656	0.653	0.977	Increasing
홍콩	0.971	1.000	1.000	0.971	Decreasing	0.893	1.000	1.000	0.893	Decreasing
부산	0.777	0.850	0.850	0.915	Decreasing	0.661	0.690	0.679	0.959	Increasing
청도	1.000	1.000	1.000	1.000	Constant	1.000	1.000	1.000	1.000	Constant
광주	0.758	0.760	0.758	0.998	Decreasing	0.758	0.760	0.758	0.998	Decreasing
제벨 알리	0.381	1.000	1.000	0.381	Decreasing	0.381	1.000	1.000	0.381	Decreasing
천진	0.432	0.633	0.633	0.683	Decreasing	0.432	0.633	0.633	0.682	Decreasing
로테르담	0.436	0.459	0.436	0.950	Increasing	0.375	0.410	0.375	0.999	Increasing
클랑	1.000	1.000	1.000	1.000	Constant	1.000	1.000	1.000	1.000	Constant
가오슝	0.505	0.562	0.505	0.898	Increasing	0.487	0.527	0.487	0.924	Increasing
대련	0.626	0.654	0.654	0.956	Decreasing	0.626	0.654	0.654	0.956	Decreasing
함부르크	0.306	0.307	0.306	0.998	Increasing	0.306	0.307	0.306	0.998	Increasing
앤트워프	0.518	0.542	0.518	0.956	Increasing	0.479	0.494	0.479	0.971	Increasing
탄중 펠레 파스	0.475	0.595	0.595	0.798	Decreasing	0.475	0.595	0.595	0.798	Decreasing
로스앤젤레스	0.637	0.638	0.637	0.999	Increasing	0.615	0.635	0.634	0.968	Increasing
케이 힌	0.832	1.000	1.000	0.832	Decreasing	0.800	0.989	0.989	0.809	Decreasing
롱비치	0.351	0.370	0.351	0.948	Increasing	0.270	0.272	0.270	0.992	Increasing
람차방	1.000	1.000	1.000	1.000	Constant	1.000	1.000	1.000	1.000	Constant
자카르타	0.816	1.000	1.000	0.816	Decreasing	0.816	1.000	1.000	0.816	Decreasing
호 지 민	0.477	0.493	0.477	0.967	Increasing	0.477	0.493	0.477	0.967	Increasing
브레멘	0.763	0.764	0.763	0.999	Increasing	0.718	0.727	0.718	0.988	Increasing
뉴욕주-뉴저지	0.613	0.684	0.613	0.897	Increasing	0.596	0.681	0.596	0.999	Increasing
한신	0.630	0.681	0.630	0.926	Increasing	0.612	0.677	0.612	0.904	Increasing

콜롬보	0.851	1.000	1.000	0.851	Decreasing	0.851	1.000	1.000	0.851	Decreasing
알헤 시라스 베이	1.000	1.000	1.000	1.000	Constant	0.998	1.000	0.998	0.998	Decreasing
자와 할랄 네루	0.861	1.000	1.000	0.861	Decreasing	0.849	1.000	1.000	0.849	Decreasing
발렌시아	0.376	0.377	0.376	0.997	Increasing	0.376	0.377	0.376	0.997	Increasing
펠릭스 토우	0.605	0.609	0.605	0.994	Increasing	0.562	0.570	0.562	0.986	Increasing
산투스	0.781	0.800	0.800	0.976	Decreasing	0.781	0.800	0.800	0.976	Decreasing
마닐라	0.319	0.321	0.321	0.994	Decreasing	0.319	0.321	0.321	0.994	Decreasing
Port of Said East	0.766	0.768	0.766	0.997	Increasing	0.764	0.766	0.764	0.997	Increasing
발보아	0.837	1.000	1.000	0.837	Decreasing	0.813	1.000	1.000	0.813	Decreasing
하이 퐁	0.554	0.557	0.557	0.994	Decreasing	0.554	0.557	0.557	0.994	Decreasing
시애틀-타코마	0.216	0.238	0.216	0.906	Increasing	0.215	0.235	0.215	0.915	Increasing
Ambarli	1.000	1.000	1.000	1.000	Constant	1.000	1.000	1.000	1.000	Constant
콜론	1.000	1.000	1.000	1.000	Constant	1.000	1.000	1.000	1.000	Constant
탄중 페락	1.000	1.000	1.000	1.000	Constant	1.000	1.000	1.000	1.000	Constant
탕헤르 메드	0.600	0.658	0.600	0.913	Increasing	0.600	0.658	0.600	0.999	Increasing
살 랄라	0.968	1.000	1.000	0.968	Decreasing	0.968	1.000	1.000	0.968	Decreasing

표 4. 클러스터링 결과에 따른 효율성 분석 결과

그룹	항만명	국가	효율성 분석결과			
			DEA	RTS	UDEA	RTS
대(大)	**싱가포르**	**싱가포르**	**1**	**Constant**	**0.914**	**Decreasing**
	홍콩	중국	0.971	Decreasing	0.893	Decreasing
	상하이	**중국**	**1**	**Constant**	**0.877**	**Decreasing**
	부산	한국	0.777	Decreasing	0.661	Increasing
	센젠	중국	0.708	Increasing	0.641	Increasing
	로테르담	네덜란드	0.436	Increasing	0.375	Increasing
중(中)	광주	중국	0.758	Decreasing	0.758	Decreasing
	대련	중국	0.626	Decreasing	0.626	Decreasing
	호 지 민	베트남	0.477	Increasing	0.477	Increasing
	탄중 펠레 파스	말레이시아	0.474	Decreasing	0.475	Decreasing
	천진	중국	0.432	Decreasing	0.432	Decreasing
	제벨 알리	아랍 에미리트	0.382	Decreasing	0.381	Decreasing
	마닐라	필리핀	0.351	Decreasing	0.319	Decreasing
	함부르크	독일	0.319	Increasing	0.306	Increasing
	롱비치	미국	0.306	Increasing	0.270	Increasing
소(小)	콜론	파나마	1	Constant	1	Constant
	Ambarli	터키	1	Constant	1	Constant
	클랑	말레이시아	1	Constant	1	Constant

	탄중 페락	인도네시아	1	Constant	1	Constant
	청도	중국	1	Constant	1	Constant
	람차방	태국	1	Constant	1	Constant
	알헤 시라스 베이	스페인	1	Decreasing	0.998	Decreasing
	살 랄라	오만	0.968	Decreasing	0.968	Decreasing
	콜롬보	스리랑카	0.861	Decreasing	0.851	Decreasing
	자와 할랄 네루	인도	0.851	Decreasing	0.849	Decreasing
	자카르타	인도네시아	0.83 7	Decreasing	0.816	Decreasing
	발보아	파나마	0.83 2	Decreasing	0.813	Decreasing
	케이 힌	일본	0.816	Decreasing	0.800	Decreasing
	산투스	브라질	0.781	Decreasing	0.781	Decreasing
	Port of Said East	이집트	0.766	Increasing	0.764	Increasing
	브레멘	독일	0.76 3	Increasing	0.718	Increasing
	로스앤젤레스	미국	0.63 7	Increasing	0.615	Increasing
	한신	일본	0.630	Increasing	0.612	Increasing
	탕헤르 메드	모로코	0.613	Increasing	0.600	Increasing
	뉴욕주- 뉴저지	미국	0.605	Increasing	0.596	Increasing
	펠릭스 토우	영국	0.600	Increasing	0.562	Increasing
	하이 퐁	베트남	0.554	Decreasing	0.554	Decreasing
	가오슝	대만	0.518	Increasing	0.487	Increasing
	앤트워프	벨기	0.50 5	Increasing	0.479	Increasing
	발렌시아	스페인	0.37 7	Increasing	0.376	Increasing
	시애틀-타코마	미국	0.21 6	Increasing	0.215	Increasing

UDEA-CCR과 UDEA-BCC 모델을 이용하여 효율성을 측정한 결과, 〈표 3〉과 같이 6개 컨테이너 항만은 UDEA-CCR 모델에서 효율적이고, 15개 컨테이너 항만은 UDEA-BCC 모델에서 효율성이 있는 것으로 평가되었다. 따라서 9개 컨테이너 항만은 규모의 비효율성이 존재한다고 할 수 있다.

가변규모수익(RTS)에 대해 UDEA-BCC 모델과 UDEA-NIRS 모델의 효율성 점수를 비교하면, 〈표 3〉과 같이 6개의 컨테이너 항만은 Constant이고 1 7개 컨테이너 항만은 Increasing이며, 나머지 컨테이너 항만은 Decreasing으로 나타났다.

또한 불확실한 DEA모델의 결과에 면밀한 관찰하기 위해 투입 및 산출요소를 이용하여 HCM (Hard C mean clustering) 방법으로 〈표 4〉와 같이 클러스터링하여 대 · 중 · 소 3개 그룹으로 나누었다.

대(大)그룹은 가장 많은 컨테이너크레인, 긴 선석길이, 넓은 면적, 많은 물동량, 높은 정박지 생산성 등의 특징을 갖고 있다. 그러나 이 그룹의 모든 항만은 효율성 점수가 1.0 보다 더 작다. 6개 항만 중에 3개 항만은 규모수익체감이고 3개 항만은 체증으로 간주된다. 즉, 부산, 센젠, 로테르담의 컨테이너 항만의 운영 규모가 증가하면 더 높은 효율성이 있을 수 있다. 예를들면, 로테르담 항만 당국의 개발자 및 관리자가 Maasvlakte 2의 건설을 지원해서 2014년 상반기에 2개 새로운 터

미널이 운영을 개시하고, 그 후에 연간 물동량이 20% 가까이 성장했다.

중(中)그룹은 중형 컨테이너 항만으로 제일 높은 선박 대기시간을 보이고 있다. 또한 다른 그룹을 비교하면 효율성이 제일 낮게 나타났다.

소(小)그룹은 소형 항만으로 이루어졌고 효율성 높은 컨테이너 항만이 5개로 나타났다. 그래서 이 그룹의 효율성은 가장 높다고 평가할 수 있다. 그 원인에는 다른 그룹과는 달리 상대적으로 낮은 선박 대기시간을 보이고 있어 그 영향에 따른 것으로 분석된다.

이와 같이 컨테이너 항만을 투입과 산출요소를 통해 클러스터링하여 분석해 봄으로써 항만 규모별 효율성이 높은 항만, 규모의 경제를 달성하고 있는 항만과 운영 효율성을 제고해야 하는 항만을 구별할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 선석수, 컨테이너터미널 면적, 장비수, 컨테이너처리량 등 정해진 투입요소와 산출요소를 이용한 DEA 모델을 보완하기 위해 불확실성 DEA 모델을 제안하였다. 불확실성 DEA 모델은 선박 대기시간이라는 불확실한 변수를 채택하여 제안한 모델의 유효성을 검증하였다. 그 결과 기존 DEA 모델에 비해 선박 대기시간의 영향으로 효율성이 좋은 항만의 수가 낮아지는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 선박 대기시간에 영향을 미치는 오퍼레이터의 운영기술, 고장률, 기상 등의 영향으로 기인한 것으로 추정할 수 있다. 따라서 기존의 DEA 모델이 해결할 수 없었던 불확실한 변수를 처리함으로써 보다 객관적인 효율성 평가가 가능하다는 것을 보여주었다.

또한 투입 및 산출요소를 이용하여 HCM 클러스터링 방법으로 컨테이너 항만의 규모별로 효율성이 높은 항만, 규모의 경제를 달성하고 있는 항만, 운영의 효율성을 제고해야 할 항만을 구별함으로써 다양한 관점에서 효율성을 분석하였다.

향후 과제로는 선박 대기시간 이외의 불확실한 변수를 찾아내어 불확실성 DEA 모델에 투입해 보는 방안과 지역별 또는 컨테이너 항만의 유형별로 효율성을 측정하는 방안에 대한 연구가 요구된다.

참고문헌

권신혜(2007), "동북아시아 항만의 효율성 분석에 관한 연구", 부경대학교 대학원 석사학위논문.

김민수 · 황천사(2012), "글로벌 금융위기 이후의 한 · 중 주요 컨테이너항만의 경쟁력 변화 비교",『중국과 중국학』, 제16호, 1-34.

류동근(2005), "국내 컨테이너 전용터미널의 효율성 비교 : DEA 접근",『해운물류연구』, 제47권, 21-38.

박홍균(2011), "환적화물의 컨테이너터미널 효율성 분석",『한국항만경제학회지』, 제26권 제1호, 1-19.

방희석 · 강효원(2011), "DEA를 활용한 글로벌해운선사의 효율성 측정",『한국항만경제학회』, 제27권 제1호, 213-234.

A. Charnes, W.W. Cooper and E. Rhodes (1978), "Measuring the Efficiency of Decision Making Units," *European Journal of Operational Research,* Vol.2, 429-444.

X. Clark, D. Dollar, A. Micco(2004), "Port efficiency, maritime transport costs, and bilateral trade," *Journal of Development Economics,* Vol.75, No.2, 417-450.

A. Estache, M. Gonzalez, L. Trujillo(2002), "Efficiency Gains from Port Reform and the Potential for Yardstick Competition: Lessons from Mexico," *World Development,* Vol.30, No.4, 545-560.

Liu, B.(2013), *Uncertainty Theory,* Springer-Verlag.

Sara Bray, L. Caggiani, M. Dell'Orco and M. Ottomanelli(2013), "Measuring Transport Systems Efficiency under Uncertainty by Fuzzy Sets Theory based Data Envelopment Analysis," *Procedia-Social and Behavioral Sciences,* Vol. 111, 770-779.

Tongzon, J.(2001), "Efficiency measurement of selected Australian and other international ports using data envelopment analysis," *Transportation Re-*

search Part A: Policy and Practice, Vol.35 No.2, 107-122.

Valentine and Gray(2001), "The measurement of port efficiency using Data Envelopment Analysis," *Proceeding of the 9th world conference on transport research.*

Wang and Cullinane(2006), "Data Envelopment Analysis (DEA) and Improving Container Port Efficiency," *Research in Transportation Economics,* Vol.17, 527-566.

불확실성 DEA모델을 이용한 컨테이너 항만의 효율성 분석 연구

팜티큔마이 · 김화영 · 이청환

국문요약

컨테이너 항만은 공급망관리(SCM)에 있어서 연결점(link) 역할을 하고 있어 국제 간 무역에서 중요한 위치를 차지하고 있다. 그러므로 컨테이너 항만의 운영 상태를 파악하기 위하여 컨테이너 항만의 운영 효율성을 평가하는 것은 공급망 관리에 있어서 중요한 일이다. 과거 항만의 효율성을 측정하기 위해 많은 방법을 사용되었다. 그 가운데 자료포락분석(DEA, Data Envelopment Analysis) 방법은 가장 일반적인 방법으로 활용되고 있다. 그러나 DEA 모델에 사용되는 투입, 산출 데이터는 때때로 복잡하고 불확실하기 때문에 기존 DEA모델 사용에 한계점이 존재한다. 이 논문에서는 기존모델의 한계를 해결하기 위해 불확실변수를 취급할 수 있는 불확실성 DEA(UDEA, Uncertainty DEA)모델을 제안하였다. 제안된 불확실성 DEA모델을 이용하여 41개 컨테이너 항만의 효율성을 측정하여 불확실성 DEA 모델의 유효성을 검증하였다. 또한 항만 클러스터링 방법으로 항만의 규모별로 효율성을 측정하여 6개의 컨테이너 항만이 효율성이 있음을 식별하였다. 이와 같이 제안된 불확실성 DEA(UDEA)모델이 기존 DEA모델 보다 효율성 측정에 효과적임을 확인하였다.

주제어: 항만효율성, 컨테이너 항만, UDEA모델, 항만 클러스터링