經營科學
第22卷 第2號
2005年 11月

DEA 및 시뮬레이션에 의한 컨테이너 터미널의 효율성 분석*

박 병 인**

An Efficiency Analysis for the Korea Container Terminals by the DEA/Simulation Approach*

Byungin Park**

■ Abstract ■

The traditional measures of a container port (or terminal) efficiency such as crane productivity, cargo throughput, etc. were generally presenting the partial efficiency since they evaluated only each individual factor and based on cross-sectional data. To overcome this problem, and in an effort to help port authorities develop a winning strategy in the increasingly competitive container transportation market, this paper develops a meaningful set of benchmarks that will set the standard for best practices. In particular, this paper proposed a combined method to merge the DEA and simulation technique over time. To illustrate the usefulness of the proposed combined DEA/simulation model, this paper used the panel data of the four Gwangyang container terminals and seven Busan container terminals in Korea over the four-year period of 1999 through 2002.

Keyword : DEA, Container Terminal, Simulation, Efficiency, Inter-temporal, Window Analysis

1. 서 론

대외무역 의존도가 매우 높은 우리나라는 수출입화물의 원활한 수송이 매우 중요하다. 실제로 우리나라는 2003년에 전체 수출입화물중 99%이상(중량기준)을 선박 운송하였다. 이에 필요한 항만

논문접수일 : 2004년 8월 13일 논문게재확정일 : 2005년 10월 12일
* 이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2002-002-B00058). 본 논문의 완성도를 높일 수 있게 많은 조언을 준 익명의 두 심사자께 깊이 감사드립니다.
** 여수대학교 교통·물류학부

물류시설은 단순 수출입뿐만 아니라 환적, 유통가공 등의 부가가치물류 서비스를 제공하기 때문에 정부는 특히 컨테이너항만의 경우 단순하역수송기지로부터 종합물류기지로 기능을 개선 중이다. 컨테이너항만이 계획대로 종합물류기지 역할을 수행하기 위해서는 효율적인 항만운영이 필요하다.

그러나 컨테이너항만은 갠트리 크레인·야드 크레인·야드 트랙터 등의 기계나 장비적 요인들과 안벽·야드·에이프런·게이트·CFS(Container Freight Station) 등 물리적 요인들의 존재·사양·수, 그리고 재무적 요인 및 인구통계학적 요인 등에 따라 전체시스템의 성격이 달라지는 매우 복잡한 특성을 지닌다. 또한 항만은 건설 및 운영에 막대한 국가자원을 필요로 하는 중요한 물류기반시설이다.

그러므로 화주나 선사 등 항만고객들의 물류서비스 선택이나 국가의 자원배분결정 등을 위한 항만효율성의 합리적인 평가가 매우 중요하다. 그러나 항만물류시설은 매우 복잡하기 때문에 그동안 크레인당 생산성, 터미널 처리량 등으로 부분적인 효율성만을 평가·활용하여, 전체적 관점에서 다른 항만시설들과의 적절한 비교가 매우 어려웠다.

이러한 상황에서 최근 시스템의 전체효율성을 평가할 수 있는 방법인 자료포괄분석(Data Envelopment Analysis, DEA)이 물류시설 전체효율성분석에도 활발히 적용되고 있다. 자료포괄분석(DEA)은 다수투입변수와 다수산출변수의 가중합에 의해 시스템의 상대적인 효율성을 비교하기 위해 개발되었으며, 처음에는 주로 서비스조직과 공공기관의 효율성을 평가하는데 사용되어 왔다. 이 기법은 Charnes 등[11]이 '의사결정단위의 효율성 측정(Measuring the efficiency of decision making units)'이라는 논문을 발표하면서 활용되기 시작했다. 그 후 DEA 기법은 발전을 거듭하여 최근에는 공항[3, 4, 5, 13, 15, 23]뿐만 아니라 항만[18, 19, 22, 24, 30, 29]의 효율성 평가에도 확장되고 있다.

그러나 항만에 대한 기존의 DEA 효율성 평가연구는 주로 횡단면분석(cross-sectional analysis)의 벤치마킹을 통해 상대적인 효율성을 평가하며, 일부[19]만이 시설의 시간에 따른 운영효율성 변동추세를 분석하고 있다. 그렇지만 Min 및 Park[19]의 종단면분석방법(inter-temporal analysis)도 단순히 DEA의 윈도우분석(window analysis) 모형을 항만의 효율성분석에 적용해 본 것으로, 컨테이너항만 운영에 있어 규모의 경제나 순기술적 효율성 등의 다양한 요인을 고려하지는 못한 것이다.

이에 본 연구는 컨테이너터미널(항만)의 다양한 운영효율성을 측정하기 위해 2단계의 DEA/시뮬레이션 결합모형을 제시한다. 제안된 모형은 항만당국이 컨테이너 터미널의 벤치마킹기준을 설정하고, 포화된 컨테이너운송시장에서의 경쟁력을 평가하는데 도움을 줄 수 있을 것이다. 제안된 DEA/시뮬레이션 결합모형을 1999~2002년 기간의 국내 11개 컨테이너터미널(감만, 우암, 자성대, 신선대, 광양1단계)의 분석에 적용하여 항만운영에 필요한 전략을 구축하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에는 컨테이너터미널과 관련된 기존의 DEA 및 처리능력산정연구들을 간단하게 소개하였다. 3장에는, DEA/시뮬레이션 기법의 모형과 투입/산출변수를 열거했다. 4장에서는, 기법의 적용결과를 요약하였다. 마지막으로, 5장에서 연구의 결론과 추후연구과제들을 제시하였다.

2. 문헌연구

2.1 DEA

실제 항만분야의 DEA 응용연구는 다음과 같다 (<표 1> 참조).

먼저 Roll 및 Hayuth[22]는 최초로 항만운영 효율성평가에 DEA를 이용했으나, 그들은 20개의 가상항만 자료를 만들어 DEA가 항만의 효율성 평가에도 적용 가능함을 이론적으로만 단순하게 보여주었다. 그들은 인력, 자본, 및 시설/화물동질성이라는 3개의 투입요소와 화물처리량, 서비스수준,

〈표 1〉 DEA를 이용한 컨테이너터미널(항만) 효율성 평가 연구

연 구	지 역	데이터	항수	모형/요소		
				모 형	산출요소	투입요소
Roll 및 Hayuth (1993)	전세계	가상	20	CCR	◦ 컨테이너 처리량 ◦ 서비스 수준 ◦ 고객만족 ◦ 입항선박수	◦ 연평균 노동력 ◦ 항만당 연투자액 ◦ 시설/화물 동질성
Martinez-Budria 등(1999)	스페인	1993~ 1997년	26	BCC	◦ 총화물처리량 ◦ 항만시설운영수익	◦ 노무비 ◦ 감가상각비 ◦ 기타 비용
Tongzon (2001)	전세계	1996년	16	CCR Additive	◦ 화물 처리량 ◦ 선박 작업율	◦ 자본 - 선석수 - 크레인수 - 예선수 ◦ 노동 - 하역인력수 ◦ 토지 - 터미널면적 ◦ 대기시간
Valentine (2003)	아프리카	1999년	16	CCR	◦ 총 톤처리량 ◦ 총 컨테이너수	◦ 총안벽길이 ◦ 선석길이
Min 및 Park (2005)	한국	1999~ 2002년	11 (터미널)	window analysis -CCR	◦ 화물 처리량	◦ 안벽길이 ◦ 크레인수 ◦ 야드면적 ◦ 노동력
본 연구	한국	1999~ 2002년	11 (터미널)	window analysis -CCR -BCC Simulation	◦ 화물 처리량 ◦ 터미널 처리능력	◦ 안벽길이 ◦ 크레인수 ◦ 야드면적 ◦ 노동력 ◦ 선박당평균하역량 ◦ 순선석평균생산성

사용자 만족, 및 선박입항횟수라는 4개의 산출요소로 이루어진 CCR모형을 사용했다.

Martinez-Budria 등[18]은 1993년부터 1997년까지 26개의 스페인항만을 '복잡항만', '보통항만', 그리고 '한산한 항만'이라는 3집단으로 나누어 상대적인 효율성과 효율성의 변화를 검토했다. 그들은 노무비, 감가상각비, 및 기타비용 이라는 3개의 비용투입요소와 항만시설을 통해 이동한 총화물과 항만시설의 임대로부터 얻은 수익이라는 2개의 산출요소를 갖는 BCC모델을 이용해 배분효율성을 측정했다. 그 결과 복잡성이 높은 항만이 효율성이 높다고 주장했다.

Tongzon[21]은 4개의 호주 및 12개의 기타국 컨테이너 항만에 대한 1996년 데이터를 이용하여 항만의 성과와 효율성에 영향을 미치는 다양한 요인들을 구성하고 이를 경험적으로 검증했다. 그는 크레인수, 컨테이너선석수, 예인선수, 터미널면적, 지연시간, 및 노동력이라는 6개의 투입요소와 화물처리량과 선박작업율이라는 2개의 산출요소를 갖는 CCR 및 Additive 모형을 사용했다.

Valentine[29]은 15개의 아프리카항만들의 효율성을 평가했다. 그는 총 안벽길이 및 선석길이라는 2개의 투입요소와 톤기준 총처리물동량과 컨테이너수라는 2개의 산출요소로 된 간단한 CCR모형을 사용했다.

한편 Min 및 Park[19]은 1999년부터 2002년까지

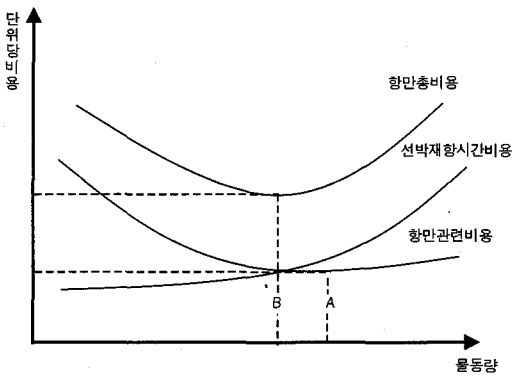
우리나라의 단위 컨테이너터미널을 기준으로 운영효율성의 기간변동과 자원의 활용도에 대해 분석했다. 여기서는 총처리물동량을 산출요소로, 그리고 크레인수, 안벽길이, 야드면적, 및 터미널 운영인력을 투입요소로 사용하였다.

이러한 DEA적용의 여러 연구에 대해 Wang 등[30] 및 Alderton[6]은 "전체 항만수준으로 측정될 수 있는 것은 거의 없으며, 대부분의 비교가능 데이터는 당연히 터미널수준에 초점을 맞추어야만 한다."라고 했다. 이는 무엇보다 적절한 의사결정단위(Decision Making Unit, DMU)의 선택이 가장 중요함을 강조한 것이다. 그러나 Min 및 Park[19]을 제외한 기존연구는 전체항만수준의 효율성을 비교하는데 그치고 있다.

본 연구는 우리나라 컨테이너 항만에 비해 다양한 의미의 종단적인 운영효율성을 평가하고 효율성의 향상전략을 제시하기 위해 광양항을 중심으로 국내의 개별 컨테이너 터미널수준의 상세한 분석을 수행하였다. 특히 Min 및 Park[19]에 비해 입항선박당 처리량(LPC), 순선석생산성(NBP)을 투입변수로, 그리고 시뮬레이션에 의한 처리능력을 또 하나의 산출변수로 하는 CCR 및 BCC 윈도우 분석을 동시에 수행하였다. 이 결과로 기술적 효율성외에 비효율의 원인을 순기술적 효율성과 규모효율성으로 구분하여 평가함으로써, 실제 비효율적인 컨테이너터미널들에서 벤치마킹할 수 있는 전략들을 개발하고자 했다.

2.2 처리능력

항만의 최적처리능력은 '항만이 연간 처리할 수 있는 물동량'[14]으로, 이는 <그림 1>의 B와 같이 항만비용과 선박시간비용을 모두 포함하는 최소총비용에서 달성된다[28, 20]. 그러나 비용모형외에 컨테이너터미널은 다수고객과 다수서버로 이루어진 대기행렬모형으로 분석하는 것이 일반적이다. 컨테이너터미널의 처리능력분석에는 선박하역작업, 접안-이안(또는 선박 이용률), 크레인 할당, 선박서비스시간, 및 보관부문 활동과 같은 다양한 요인들을 포함하기 때문에, 여러 고객과 서버들로 이루어진 복잡한 대기행렬시스템인 컨테이너터미널을 해석적으로 평가하기는 매우 복잡하고 어렵다[21].



〈그림 1〉 물동량 변화에 따른 항만의 총비용 변동

실제 컨테이너 터미널의 처리능력을 추정하기 위해서는 위의 요인들 외에 선박과 적재화물의 대기시간도 고려해야만 한다. 따라서 최근에는 이러한 복잡한 처리능력을 추정하기위해 시뮬레이션을 주로 이용하고 있다. Ballis and Abacoumkin [7], Kia 등[16, 17], Ward [31], Turner [27], 그리고 박광태 등[2]과 같은 최근의 많은 연구들은 대기시간/서비스시간 비율(ratio of waiting time to service time), 선석점유율(occupancy ratio) 등과 같은 여러 서비스지표를 기준으로 한 시뮬레이션을 통해 처리능력을 추정한다.

항만처리능력 시뮬레이션모형에서 선박의 도착패턴은 대개 특정한 유형의 확률분포로 표현된다. 특히 선박의 도착간 시간은 음의 지수분포(포아송 도착률)가 가장 일반적으로 사용된다[17]. 그러나 컨테이너터미널의 경우는 선박들이 무작위 확률분포를 따라 입출항하는 것으로 보기 어렵다. 왜냐하면 모든 컨테이너선박들은 특정한 지역에 있는 컨테이너항만이나 터미널에 주간기준 등의 미리 정해진 일정(weekly schedule)에 따라 입항을 하기 때문이다. 따라서 시뮬레이션모형에서 선박의 도착

시간은 미리 정해진 시간과 그에 대한 변동으로 표현하게 된다[31]. 이러한 변동은 날씨, 직전기항지의 사정 및 선박의 상태 등에 따라 사전에 정해진 입항 스케줄에 대해 일정한 범위의 시간차를 갖는 것으로 파악할 수 있으며, 이를 표현하기 위해 컨테이너터미널 시뮬레이션에서는 일양분포를 사용한다. 이러한 방법이 서비스 정시성을 갖는 컨테이너선의 성격에 더욱 잘 맞는다.

3. DEA/Simulation 모형

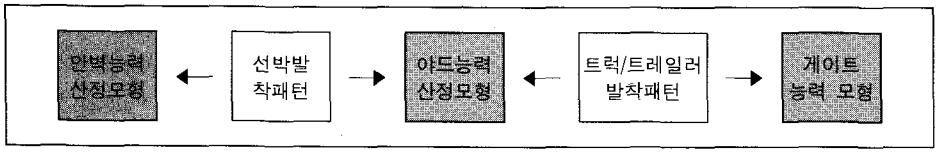
3.1 시뮬레이션 처리능력 모형

시뮬레이션에 의한 터미널 처리능력 추정연구를 위해서는 전체 컨테이너터미널을 세부분으로 나눌 수 있다(<그림 2> 참조). 이는 터미널이 선박들과 접속되는 안벽부분, 야드의 컨테이너보관부분, 그리고 일반차량들이 출입하는 게이트부분이다. 터미널 처리능력을 정확하게 평가하기 위해서는 이 3부분의 통합 처리능력 모형을 구성해야만 한다. 그러나 서로의 인터페이스부분을 제외하면 세부분은 어느 정도 독립된 것으로 봐도 큰 무리가 없다. 또한 처리능력은 전체터미널시설의 병목처리능력과 관련되어 있고, 일반적으로 터미널 시설에서 병목을 이루며 물리적으로 쉽게 확장하기 어려운 곳이 안벽부분이다.

그 외에 본 논문에서는 시뮬레이션에 의해 터미널 처리능력이 컨테이너터미널의 DEA 효율성분석에 활용될 수 있음을 보여주는데 목적이 있기 때문에 안벽을 중심으로 비교적 단순한 시뮬레이션을 수행했다. 컨테이너터미널의 능력에 있어 가장 중요한 요소가 고객인 선박들과의 접점인 안벽에 있기 때문에, 안벽을 기준으로 한 시뮬레이션 분석은 통합시뮬레이션분석을 대체할 수 있다[2].

본 연구에서는 선박 도착률, 선박당 하역량 등을 비롯한 통계분포의 추정에 Averill M. Law and Associates에서 개발한 통계분포 추정 및 검정용 프로그램인 ExpertFit V. 3.0을 사용했으며, 적합도 검정(goodness-of-fit-test)은 A-D(Anderson-Darling), K-S(Kolmogorov-Smirnov), 또는 χ^2를 다양하게 활용했다. 아래에는 한정된 지면으로 인해 특별히 언급하지 않는 경우 적합성 검정을 통과한 것이다.

먼저 컨테이너선의 도착간분포는 특정연도의 특정터미널을 제외하고는 특정한 이론분포로 추정되지 않았다. 이는 컨테이너선이 다른 선박과는 달리 일반적으로 스케줄에 따라 운항되는 특성을 갖기 때문인 것으로 판단된다. 컨테이너선은 운항여건에 따라 사전에 정해진 입항시각을 기준으로 이에 시간차를 두고 입항하게 된다. 이는 기존의 모형에서처럼 입항시각을 확률적으로 해석했을 때 각 터미널들에서 목격할 수 있는 것으로 추정되는 극심한 선박대기상황이 실제로는 나타나지 않는다는 사실에서도 유추할 수 있다. 컨테이너터미널과 선사들은 수개월 전부터 입항스케줄을 정해놓고 이를 입항시각이 임박해감에 따라 대략 입항예정시각 10시간 전까지 접안예정시각을 계속 수정한다. 따라서 선박과 터미널 간에 상호 협의된 시각에 선박이 입항하기 때문에 터미널에서는 실제 대기하는 선박들이 많이 나타나지 않게 되는 것이다. 본 연구에서는 전술한대로 11개 터미널에 대한 4년간의 자료를 분석했으나, 운영사의 교체 등으로 전 기간의 선박입출항분포 추정을 위한 데이터를 구할 수 없는 경우 각 터미널의 직전 년도 료를 미비된



〈그림 2〉 컨테이너터미널 처리능력 모형

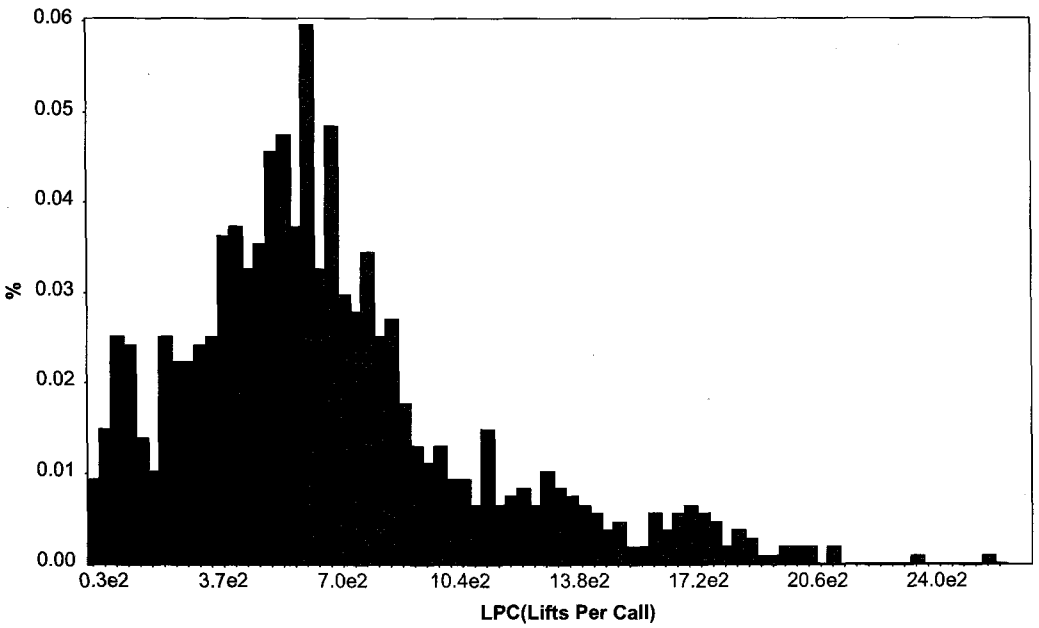
〈표 2〉 선박당 하역량 분포

터미널(연도)		선박당 하역량 분포
B1	1999	Johnson SB/Johnson SB/Beta 합성분포
	2000	Johnson SB/Johnson SB/Beta 합성분포
	2001	Beta/Beta/Johnson SB/Inverted Weibull 합성분포
	2002	Beta/Beta/Weibull 합성분포
B2	1999	Beta/Beta/Beta 합성분포
	2000	Johnson SB/Pearson Type V 합성분포
	2001	Gamma/Pearson Type V 합성분포
	2002	Gamma/Pearson Type V 합성분포
B3	1999	Normal/Log-Logistics 합성분포
	2000	Normal/Erlang 합성분포
	2001	Normal/Normal 합성분포
	2002	Normal/Normal 합성분포
B4	1999	Johnson SB 분포
	2000	Random Walk 분포
	2001	Log-Logistics/Johnson SB/Johnson SB/Beta/Johnson SB 합성분포
	2002	Log-Logistics/Johnson SB/Johnson SB/Beta/Johnson SB 합성분포
B5	1999	Gamma/Pearson Type V/Pearson Type V 합성분포
	2000	Gamma/Johnson SB/Gamma 합성분포
	2001	Beta/Log-Laplace 합성분포
	2002	Beta/Log-Laplace 합성분포
B6	1999	Johnson SB 분포
	2000	Johnson SB 분포
	2001	Johnson SB/Beta 합성분포
	2002	Johnson SB/Beta 합성분포
B7	1999	Johnson SB 분포
	2000	Johnson SB 분포
	2001	Gamma/Beta 합성분포
	2002	Gamma/Beta 합성분포
G1	Johnson SB/Gamma 합성분포	
G2	Gamma/Pearson Type V 합성분포	
G3	Beta/Johnson SB 합성분포	
G4	Johnson SB/Inverted Weibull 합성분포	

연도의 자료로 대용했다.

또한 선박당하역량분포의 경우도 일반적으로 단일의 확률분포로 추정하기가 곤란했다. 이는 국내 선사들이 운영하는 터미널인 한진, 자성대(구 현대상선)부두 등은 선사의 모항이기 때문에 많은 양의 컨테이너를 한꺼번에 하역하는 자사선, 기타 외항선, 연안선 등으로 구성되어 일반적으로 2개 이상의 분포가 합성된 형태로 볼 수 있기 때문이다 (<표 2> 참조). 예를 들어, <그림 3>에 있는 B1터미널의 2001년 선박당하역량분포는 대략 3개 또는 4개의 분포가 합성된 형태로 판단할 수 있다. 이 경우 본 연구에서는 하역량에 따라 4개의 분포(201개 이하, 201개~1106개, 1006개~1551개, 그리고 1551개 이상)로 나누어 추정한 다음 이를 합성한 분포를 선박당하역량분포로 사용하였다.

그리고 입항선박의 입항예정시각과 실제입항시각 간의 차이분포는 B1의 2000년 자료(Log-Logistics)를 제외하고는 예외 없이 Johnson SU분포를 따르는 것으로 추정되었다. 이 분포는 입항예정시각(평균)을 기준으로 실제 입항시각이 정규분포와 유사



〈그림 3〉 선박당 처리량 분포(B1터미널, 2001년)

한 유형의 격차를 보이나, 입항예정시각 시점의 실입항 확률이 정규분포에 비해 매우 높은(첨도(kurtosis)가 매우 높음) 형태의 확률분포이다.

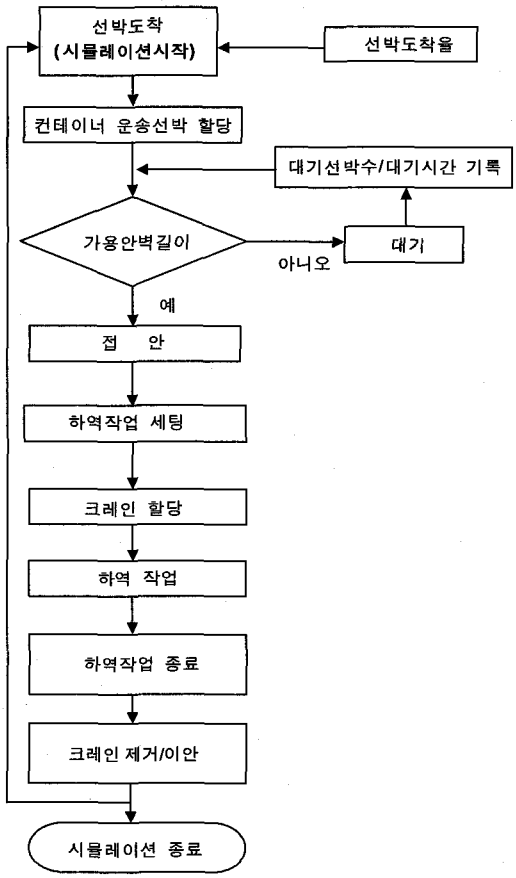
마지막으로 접안시설이 부족하거나 소형의 연안선들이 많이 입항하는 경우(1999년 및 2000년의 B1 및 광양항1단계터미널)에는 입항하는 선박의 길이 또한 중요한 요소가 된다. 선석이 부족할 때 길이가 짧은 선박은 1선석에 2척이 동시 접안 작업하는 경우가 많다. 또한 B3터미널의 경우 선박길이가 대체로 175미터이상인 경우는 76번 선석에만 접안할 수 있다. 그러나 이에 필요한 실제 입항선형의 분포는 어느 경우도 적절한 이론분포로 추정할 수 없어 경험분포를 사용했다. 이와 같은 요인들로 인해 각 터미널-연도마다 별도의 시뮬레이션 모형을 구축해야만 했다. 4년에 걸친 원자료중 특히 광양항의 경우는 대략 2000년 이후 자료를 축적하였기에, 1999년의 도착시간차분포, 선박당하역량분포, 그리고 선형분포는 2000년 자료를 원용하였다.

한편 선박당 서비스시간은 크레인의 사용에 달려있는데, 크레인의 가용상황을 감안하여 입항 선박당 크레인을 할당하였다. 그러나 광양항터미널들과 부산 자성대부두의 제5번 선석은 중소형선박이 주로 입항하여, 동시에 2척의 선박을 서비스하는 경우가 많았다. 이와 같이 크레인이 2기뿐인 단일선석 터미널에서 2척의 선박을 동시에 작업하는 경우에는 각각 1기의 크레인만을 사용하는 것으로 모형을 구성하였다.

실제 시뮬레이션에 있어서는 충분한 시스템 안정화시간(warm-up time, 8,760시간)동안 진행한 다음 누적된 정보를 지운다. 그 다음에 10년에 걸친 시뮬레이션을 10번 수행하여 그 평균값을 최종 시뮬레이션 값으로 사용하였다. 터미널의 시뮬레이션 값과 실제처리량간의 차이는 데이터가 미흡한 광양항 터미널들의 경우에도 3%이내의 정확성을 보여, 시뮬레이션 모형이 연구목적을 위해 사용할 만큼 정확한 것으로 판단했다.

컨테이너터미널 처리능력 시뮬레이션모형에서, 컨테이너선들은 계획된 일정과 변동에 따라 터미널에 도착한다. 터미널에는 안벽 또는 선석의 규모에 따라 접안하는 선박크기에 제한이 있기 때문에,

입항선박들은 선박의 크기와 가용한 안벽길이를 감안하여 접안한다. 선박이 접안할 때, 선박마다 크레인과 운영요원들이 정해지며, 양하 및 적하 하역작업이 시작된다. 작업을 마치고 크레인이 제거된 선박은 선석으로부터 이안후 터미널로부터 출항한다(<그림 4> 참조).



〈그림 4〉 컨테이너 터미널 능력산정 시뮬레이션모형

실제로 시뮬레이션을 통해 컨테이너터미널의 처리능력을 추정하기 위해서는 국가나 지역상황에 맞는 합리적인 서비스 척도가 필요하다. 과거에는 UNCTAD[28] 등의 권고에 따라 선박의 대기시간과 서비스시간의 비율(이하 대기시간비율)을 서비스지표로 사용하였다. UNCTAD[28]는 합리적인 서비스 수준으로 대기시간비율 10~50% 수준을 권고 했다. 그러나 컨테이너터미널의 지속적인 확충과 서비스 수준 제고를 위해 갈수록 낮은 비율을 지표로 사용하여, 최근까지 국가 항만개발계획 등에는 대기시간비율 10%를 지표로 사용하나 그자체도 문제를 안고 있다. 예를 들어, 어떤 터미널이 비효율적인 하역시스템을 보유하고 있어, 서비스시간이 과도하게 길어지게 되고 이에 따라 대기시간도 매우 길어질 경우에도 대기시간/서비스시간 비율은 변하지 않는다. 그러나 대기시간이 과도하게 길어지면 비율을 고려할 필요도 없이 매우 열악한 컨테이너 터미널로 간주할 수 있다.

따라서 본 논문에서도 보다 우수한 서비스척도[2]로 사용하고 있는 대기선박 비율(입항선박중 대기선박비율)을 사용한다. 즉, 터미널 처리능력을 구하기 위한 합리적인 서비스 수준으로 10%의 대기선박비율을 가정했다.

본 연구에서는 Pritsker에서 개발한 시뮬레이션 전용 언어인 AweSim v.3.0을 사용하여 1999~2002년 기간 동안 부산 및 광양의 11개 컨테이너 터미널에 대한 컨테이너처리능력을 추정하였다. 본 연구에서 터미널의 처리능력을 계산한 후, 터미널처리능력을 제2의 산출요소로 하여 2단계로 DEA분석을 수행했다.

3.2 DEA 모형

3.2.1 투입 및 산출 요소

DEA기법은 전체효율성을 측정하기위해 여러 변수들의 가중치를 사전에 설정하지 않고서도 부분측정치들을 결합할 수 있다. 또한 DEA는 여러 개의 산출요소를 동시에 사용할 수 있다. 따라서 항만물류시설을 평가할 경우 평가하고자하는 항만운영 측면에 따라 여러 상이한 산출요소들을 사용할 수 있다[26]. 그러나 적절한 산출 및 투입요소의 선정이 연구의 성패를 좌우하는 중요한 요인이므로 유의해야 한다.

본 논문은 1999년부터 2002년 기간의 국내 컨테이너 터미널에 대한 벤치마킹 효율성평가를 위해

여섯 개의 투입요소와 두개의 산출요소를 사용했다. 연구에 사용된 투입요소는 크레인수, 터미널안벽길이, 터미널면적, 터미널인력(하역인력수), 입항선박당 평균처리량(LPC), 그리고 순선석평균생산성(NBP)이다.

먼저, 크레인수가 증가하면 컨테이너터미널의 하역능력을 높일 수 있기 때문에, 갠트리크레인은 컨테이너터미널에서 화물처리량을 늘리는 주요소가 될 수 있다. 따라서 갠트리크레인수를 투입요소중 하나로 선정했다.

또한 컨테이너터미널의 안벽길이가 터미널에 접안하는 컨테이너선형을 좌우하며, 입항하는 컨테이너선 규모가 전체 컨테이너터미널의 처리량에 영향을 미친다. 따라서 컨테이너터미널의 안벽길이도 투입요소로 선정했다.

그리고 야드의 크기는 컨테이너터미널의 처리효율성을 향상시키는데 중요한 컨테이너흐름, 컨테이너장치, 및 컨테이너 유지보수 등의 능력과 유연성에 영향을 미치는 요소이기 때문에 투입요소로 선정했다.

또한 컨테이너터미널의 항만운영작업은 노동집약적이기 때문에, 컨테이너터미널은 많은 관리자, 터미널운영자, 터미널작업자, 및 하역인력을 포함한다. 또한 이러한 많은 인력에 의한 노무비가 컨테이너터미널업의 주요 비용중 하나가 된다. 이에 따라 Tally[25]는 항만이나 컨테이너터미널의 효율성을 평가할 때 노동력수를 가장 중요한 요인 중 하나로 꼽았다. 따라서 본 연구도 노동력수를 투입요소로 포함하였다. 그러나 실제 연구목적에 비추어 가장 합당한 노동 투입요소는 하역인력(stevedore)의 수이다[26]. 다만 터미널마다 하청작업인력 등으로 인해 순수한 하역인력수를 정확히 규정하기 어렵기 때문에, 터미널의 총고용인원을 관련터미널의 하역인원에 대한 대체변수로 사용하였다.

마지막으로, 입항선박당 평균처리량(LPC)과 순선석 평균생산성(NBP)은 일반적으로 컨테이너터미널의 운영생산성을 좌우하는 가장 중요한 두 지표로 알려져 있다. 특히 본 연구에서는 컨테이너터미널의 연간화물처리량외에 처리능력도 산출지표로 사용하였는데, 터미널의 처리능력을 좌우하는 것이 바로 이 두 개의 운영지표로 판단된다. 즉, 입항선박당 처리량이 크거나 순선석생산성이 높은 터미널은 그렇지 못한 터미널들에 비해 선박의 입출항시간 및 크레인이동시간 등을 절감할 수 있어, 일정한 기간에 훨씬 더 많은 화물을 처리할 수 있는 것이다. 이에 입항선박당 처리량과 순선석생산성을 투입변수로 포함하였다.

한편 산출면에서, 컨테이너터미널의 전반적인 성과는 각 터미널에서 하역되는 전체 컨테이너량으로 나타내는 화물처리량으로 측정할 수 있다. 이에 터미널의 총화물처리량을 산출요소로 선정하였다.

컨테이너터미널의 성과를 나타내는 또 하나의 주요지표는 컨테이너터미널 처리능력의 이용률이라고 할 수 있다. 전술한대로 컨테이너터미널의 최적운영과 관련된 다양한 요인들(선박입출항, 선형, 선석이용률, 크레인 할당, 서비스수준 등)이 항만에서의 선박시간비용과 이와 관련되는 총비용을 결정하기 때문에, 터미널능력의 이용은 컨테이너터미널의 성과를 반영할 수 있어 산출요소중 하나로 포함하였다.

그러나 경상이익률이나 투자수익률과 같은 잘 알려진 재무비율들은 투입요소로 사용하지 않았는데, 왜냐하면 이익이 적은 터미널도 인력이나 장비 등의 면에서 이익성이 높은 터미널보다 더 효율적일 수 도 있기 때문이다.

본 논문은 광양항 컨테이너터미널을 중심으로 1999부터 2002년 기간에 운영중인 우리나라의 11개 컨테이너터미널의 자료를 사용했는데, 그중 7개(<표 3>의 B1부터 B7)는 부산항내의 터미널이며, 다른 4개(G1부터 G4)는 광양항 1단계 터미널이다. 윈도우 분석을 위해 필요한 기간 동안의 시계열자료가 없는 1999년 이후 개장된 터미널들은 분석에서 제외하였다. 또한 시뮬레이션에 필요한 많은 자료수집이 곤란하여 전체비교대상을 국내의 컨테이너터미널로 한정했다. 자세한 전체 산출 및 투입요소는 <표 3> 및 <표 4>에 제시하였다.

〈표 3〉 컨테이너터미널 자료

터미널명	연도	처리량 (천TEU)	처리능력 (천TEU)	크레인수 (기)	안벽길이 (m)	야드면적 (천㎡)	노동력 (인)	LPC** (Box)	NBP** (Box)
B1	1999	1,062.7	1,375.2	14.0	1,447.0	419.4	638.0	423.9	41.9
	2000	1,403.4	1,360.8	14.0	1,447.0	419.4	648.0	497.6	38.1
	2001	1,310.3	1,680.9	14.0	1,447.0	419.4	648.0	675.9	53.2
	2002	1,602.3	1,601.8	14.0	1,447.0	419.4	648.0	799.7	46.6
B2	1999	1,244.2	1,882.2	11.0	1,200.0	900.7	659.0	860.5	62.4
	2000	1,324.6	1,706.7	11.0	1,200.0	900.7	659.0	860.7	54.0
	2001	1,360.1	1,786.1	11.0	1,200.0	900.7	659.0	829.8	59.5
	2002	1,528.3	1,755.0	11.0	1,200.0	900.7	659.0	823.2	57.4
B3	1999	366.8	430.2	4.0	500.0	81.3	214.0	445.4	36.2
	2000	355.6	448.6	4.0	500.0	155.4	214.0	441.0	37.8
	2001	406.2	418.2	4.0	500.0	155.4	214.0	516.9	35.4
	2002	502.5	406.6	4.0	500.0	155.4	214.0	499.3	34.2
B4	1999	263.8	506.2	3.0	350.0	94.9	125.0	947.3	63.4
	2000	439.4	381.5	3.0	350.0	94.9	148.0	670.3	62.4
	2001	389.9	382.9	3.0	350.0	94.9	148.0	510.2	61.4
	2002	492.5	408.2	3.0	350.0	94.9	148.0	650.6	63.6
B5	1999	424.6	463.1	3.0	350.0	97.0	174.0	1,520.4	71.7
	2000	565.7	470.5	3.0	350.0	97.0	180.0	1,464.9	71.8
	2001	555.3	510.9	3.0	350.0	97.0	180.0	1,520.1	74.5
	2002	539.6	472.3	3.0	350.0	97.0	180.0	1,303.9	72.5
B6	1999	461.1	500.5	3.0	350.0	96.5	211.0	1,006.7	73.6
	2000	499.1	532.5	3.0	350.0	96.5	206.0	1,000.8	76.5
	2001	495.0	520.2	3.0	350.0	96.5	206.0	956.3	75.5
	2002	605.7	451.4	3.0	350.0	96.5	206.0	900.1	68.3
B7	1999	374.6	404.8	3.0	350.0	139.6	185.0	747.6	64.2
	2000	506.0	388.7	3.0	350.0	139.6	187.0	669.6	64.9
	2001	579.8	442.3	3.0	350.0	139.6	187.0	636.0	73.9
	2002	659.9	443.6	3.0	350.0	139.6	187.0	811.8	73.9
G1*	1999	47.8	146.0	2.0	350.0	144.8	73.0	115.9	27.2
	2000	131.6	132.5	2.0	350.0	144.8	67.0	129.1	27.8
	2001	133.4	143.7	2.0	350.0	144.8	73.0	144.9	31.7
	2002	151.1	190.5	2.0	350.0	144.8	73.0	159.6	39.3
G2	1999	94.3	160.9	2.0	350.0	144.8	100.0	140.3	35.6
	2000	139.7	156.4	2.0	350.0	144.8	93.0	142.1	38.8
	2001	236.3	182.1	2.0	350.0	144.8	100.0	197.9	38.6
	2002	295.1	240.6	2.0	350.0	144.8	100.0	208.0	41.5
G3	1999	143.5	235.9	2.0	350.0	144.8	86.0	301.9	37.9
	2000	149.7	253.2	2.0	350.0	144.8	102.0	280.9	43.1
	2001	164.4	196.5	2.0	350.0	144.8	100.0	249.0	34.9
	2002	163.5	298.8	2.0	350.0	144.8	100.0	254.4	56.6
G4	1999	180.8	248.7	2.0	350.0	144.8	117.0	279.9	45.2
	2000	272.9	298.8	2.0	350.0	144.8	121.0	355.5	55.0
	2001	360.1	349.1	2.0	350.0	144.8	128.0	503.1	61.4
	2002	397.6	402.4	2.0	350.0	144.8	128.0	498.7	62.2

주) * : 1999년8월 가동개시 : 1999년 처리량인 47.8은 19.9(5개월 실 처리량)를 연간기준으로 환산한 것임
** : LPC : Lifts per call, NBP : Net Berth Productivity
자료) 한국컨테이너부두공단 및 시뮬레이션결과

〈표 4〉 투입 및 산출변수 요약

	데이터수	최소	최대	평균	표준편차	유형
처리량(천TEU)	44	47.8	1,602.3	531.4	429.7	산출
처리능력(천TEU)	44	132.5	1,882.2	585.6	524.4	산출
크레인수(기)	44	2.0	14.0	4.5	3.9	투입
안벽길이(m)	44	350.0	1,447.0	540.6	383.8	투입
야드면적(천m^2)	44	81.3	900.7	224.0	233.2	투입
노동력(인)	44	67.0	659.0	238.5	203.3	투입
입항선박당 평균처리량(Box)	44	115.9	1,520.4	612.5	388.8	투입
순선석 평균생산성(Box)	44	27.2	76.5	53.3	17.1	투입

3.2.2 분석모형설정

DEA 모형을 설정할 때는 일반적으로 세 가지 측면의 고려가 필요하다. 첫째, 적용하는 연구대상이 투입 지향적인지 산출 지향적인지를 고려해야 한다. 둘째, 규모에 대한 수익(Returns-to-Scale, RTS)이 불변(Constant Returns to Scale, CRS)과 가변(Variable Returns to Scale, VRS)중 어느 것인지 하는 문제이다. 그리고 마지막으로는, 효율성 프로티어를 직선으로 할 것인지 곡선으로 할 것인지의 여부이다[1].

이에 본 논문은 기존 컨테이너터미널 생산성연구의 경우 기본적으로 터미널이 갖추어진 상태에서 가능하면 많은 컨테이너를 처리하는 것이 터미널의 목표이기 때문에 우선적으로 산출 지향적 분석이 필요한 것으로 판단하였다. 그러나 이와 같은 컨테이너터미널의 운영에 있어 규모의 경제효과가 작용하고 있는 것으로 볼 수 있으나, 그 효과를 일정한 것으로 판단하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 벤치마킹을 위한 기술적 효율성을 평가함에 있어 순기술적 효율성과 규모의 효율성으로 나누어 분석하는 것이 필요했다. 이에 규모에 대한 불변수익을 가정하는 CCR 모형과 가변수익을 가정하는 BCC모형을 동시에 사용한다. 마지막으로, 통상적인 연구와 같이 해석 편의상 효율성 프론티어를 직선으로 가정한다.

3.2.3 DEA(CCR 및 BCC) 모형

DEA의 산출지향 CCR모형과 BCC모형은 수학적으로 다음과 같이 표현된다. 먼저 CCR 모형은 $\max\ \eta,\ s.t.\ x_o - X\mu \geq 0,\ \eta y_o - Y\mu \leq 0,\ \mu \geq 0$이다. 또한 BCC모형은 $\max\ \eta_B,\ s.t.\ X\lambda \leq x_o,\ \eta_B y_o - Y\lambda \leq 0,\ e\lambda = 1,\ \lambda \geq 0$로 표현된다. 일반적으로 위의 식들을 쌍대모형으로 변환하여 풀면 각 의사결정단위는 1(또는 100%)이하의 효율성을 갖게 된다. 1(또는 100%)이라는 효율성 점수는 고려중인 의사결정단위가 다른 의사결정단위들에 비해 상대적으로 효율적이라는 것이고, 반면에 1(또는 100%)미만의 효율성점수는 고려중인 의사결정단위가 비효율적임을 나타낸다. 넓은 의미에서 효율성점수는 투입요소 집합(주어진 자원)을 산출요소 집합으로 변환하는 터미널의 능력을 나타낸다. 또한 위의 모형은 비효율적인 의사결정단위에 대한 참조집합을 식별해 준다[8, 12].

본 연구에서는 컨테이너터미널간의 벤치마킹을 통한 효율성평가를 위해 DEA의 횡단면분석 뿐 아니라 시간의 변화(inter-temporal)에 따른 효율성 변동추세와 안정성을 동시에 보여주는 윈도우분석(window analysis)을 사용한다. 윈도우 분석은 일종의 이동평균법을 반영한 것으로 시간변화에 따른 의사결정단위들의 시계열분석이다. 여기서 윈도우의 폭이 3기라면, 첫 번째 세트는 첫기, 둘째기, 그리고 셋째기에 운영되는 데이터들로 구성된다. 두 번째 세트는 둘째기, 셋째기, 그리고 넷째기의 운영데이터로 구성된다. 따라서 각 분석은 새롭고 상이한 의사결정단위의 집합을 갖게 됨으로써 시간의 변화에 따른 효율성 점수의 변화를 반영하게 된다[10, 12].

이러한 방식의 연간데이터를 사용하게 되면 의

사결정단위(DMU)의 수가 늘어날 뿐만 아니라, 의사결정단위 집합이 변경됨에 따라 각 의사결정단위에 대한 효율성점수의 변화 추세를 파악할 수 있다[10]. Bowlin[9]은 이와 같은 윈도우분석의 절차를 제시하고 있다.

윈도우분석을 사용할 경우는 적절한 윈도우 폭을 정하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서 사용된 패널데이터가 4년에 걸친 시계열데이터이기 때문에, 그 폭은 1, 2, 3, 또는 4가 될 수 있다. 윈도우분석의 경우 적절한 윈도우 폭을 정하는 방법이 아직 개발되지 않았다. 그러나 통계적으로 판단하면, 총 의사결정단위의 수를 최대로 하는 폭을 선정하는 것이 더 우수한 결과를 얻을 수 있다. 총 의사결정단위의 수는 윈도우 폭에 따라 각각 44, 66, 66, 및 44였다. 분석결과 윈도우 폭을 2로 하는 경우와 3으로 하는 경우에 최대 의사결정단위가 66개로 두 번 나타나기 때문에 둘 중 하나를 선택해야만 한다. 윈도우 폭을 2로 하게 되면 각 윈도우의 의사결정단위 수는 22가 되며, 폭을 3으로 하게 되면 33이 된다. 이 때 전체 의사결정 단위수를 최대로 하면서 한 윈도우 내에서 가능한 한 의사결정단위의 수도 최대화하는 윈도우 폭 3이 통계적으로 더 우수한 대안이다. 또한 투입변수 및 산출변수 수와 적절한 DMU수에 대한 연구에 의하면, 의사결정단위의 수가 적어도 투입변수와 산출변수 수를 합한 것보다 3배 이상이 될 것을 권하고 있다[12]. 이에 따라서도 윈도우 폭을 3으로 하는 것이 타당하다.

여기서는 터미널 처리능력을 계산한 후 이를 추가적인 산출요소로 한 DEA윈도우분석을 수행했으며(<표 5>, <표 6>, <표 7>, <표 8> 및 <표 9> 참조), 이 분석을 위해 Saitech사가 개발한 DEA Solver Pro v. 4.1을 사용하였다. 이 분석결과가 우리가 얻고자 했던 효율성점수이다.

4. 결과 분석

4.1 DEA모형의 타당성 분석

DEA기법은 비모수 기법이기 때문에 통계적 유의성보다는, 모형에 포함된 DMU의 수, 비교대상 DMU의 이질성 여부, 그리고 효율적인 DMU의 비율로 타당성을 판단 할 수 있다[1]. 먼저 변수 수와 관련하여 Cooper 등[12]은 *max*{투입변수수*산출변수수, 3(투입변수수+산출변수수)}를 DMU수의 기준 및 투입 및 산출변수수에 대한 지침으로 제시하고 있다. 본 논문에서는 윈도우 분석의 경우에도 위 기준에 의한 최소 필요 DMU인 24개 이상의 DMU를 확보하고 있어, 표본의 수에는 문제가 없다고 볼 수 있다.

둘째, 비교대상 DMU의 동질성과 관련해서는 동질성을 어떻게 해석하느냐에 따라 논란이 있을 수 있으나, 가능한 한 동질적인 DMU를 사용하기 위해 Wang 등[30] 및 Alderton [6]의 권고에 따라 항만기준이 아닌 개별 컨테이너터미널기준으로 연구를 수행했다.

마지막으로, DEA-CCR 윈도우분석을 기준으로 효율적 DMU의 비율이 약 36.4%였다. 이는 모형이 판별력을 유지하기 위한 효율적 DMU의 비율로 사용하고 있는 30~40%[1] 수준을 넘지 않기 때문에, 적절한 것으로 판단된다.

4.2 결과분석

<표 5>의 윈도우 분석결과중 한 윈도우내에서의 변화는 '추세'를, 그리고 칼럼간의 변화인 칼럼폭은 '안정성'을 나타낸다. 분석결과에 따르면 B3 터미널의 경우 효율성이 지속적으로 저하되는 동시에 효율성간의 폭도 커 상당히 불안정한 효율성을 보여주고 있다.

또한 <표 6>에 따르면, 1999~2002년 기간 동안 국내 11개 컨테이너터미널에 대한 DEA-CCR 윈도우 분석을 했을 때, 전체 44개의 터미널-연도(DMU)중 약36.4%인 16개만이 효율성 점수가 1(100%)인 효율적인 터미널로 분석되었다. 나머지 28개의 터미널-연도는 효율적인 16개의 터미널-연도가 형성하는 효율적 프로티어를 참조집합으로 하여 효율성이 상대적으로 측정된 것이다.

〈표 5〉 터미널 처리량 및 처리능력에 대한 효율성 점수(CCR, %)

터미널	연 도				요약통계		
	1999	2000	2001	2002	평 균	칼럼폭	전체폭
B1	100.00	100.00 100.00	100.00 100.00	100.00	100.00	0.00	0.00
B2	100.00	100.00 99.63	99.23 94.79	100.00	98.73	4.44	5.21
B3	100.00	85.86 86.70	86.76 81.78	91.32	88.22	4.99	18.22
B4	100.00	100.00 90.46	100.00 95.10	100.00	97.11	9.54	9.54
B5	91.39	100.00 99.31	100.00 100.00	96.37	98.14	0.69	8.61
B6	94.88	100.00 100.00	100.00 99.98	100.00	98.97	0.02	5.12
B7	78.71	90.30 82.65	100.00 97.78	100.00	89.89	7.65	21.29
G1	66.82	87.35 82.27	81.57 78.19	97.88	79.24	5.08	31.05
G2	67.66	77.56 75.01	100.00 87.70	100.00	81.58	12.30	32.34
G3	78.58	75.18 83.89	69.79 70.06	100.00	75.50	8.71	30.21
G4	64.80	84.92 81.38	100.00 88.85	100.00	83.99	11.15	35.20
평균	85.71	90.11	92.34	98.69			

〈표 6〉 터미널 처리량 및 처리능력에 대한 평균효율성 점수(CCR, %)

터미널	1999	2000	2001	2002	평균
B1	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
B2	100.00	99.81	97.01	100.00	99.21
B3	100.00	86.28	84.27	91.32	90.47
B4	100.00	95.23	97.55	100.00	98.20
B5	91.39	99.66	100.00	96.37	96.85
B6	94.88	100.00	99.99	100.00	98.72
B7	78.71	86.48	98.89	100.00	91.02
G1	66.82	84.81	79.88	97.88	82.35
G2	67.66	76.28	93.85	100.00	84.45
G3	78.58	79.54	69.92	100.00	82.01
G4	64.80	83.15	94.42	100.00	85.59
평균	85.71	90.11	92.34	98.69	91.71

주) 윈도우분석결과를 터미널-연도별 평균

DEA-CCR윈도우 분석 결과는 B1터미널의 경우 전체 연구기간 중 지속해서 효율적으로 운영되었다. 또한 B2와 B4 터미널은 1999년 및 2002년에 1(100%)의 효율성 점수를 기록함을 보여주고 있다. 그렇지만 2000년 및 2001년에는 효율성을 상실했다. 또한 B5도 2001년에 최고의 효율성을 달성했다. 2002년에는 전체적으로 8곳(72.7%)의 터미널들이 100%의 효율성을 달성했다. 그러나 기타 터미널-연도의 최종효율성 점수는 64.80%로부터 99.99%까지에 걸쳐 있으며, 이는 터미널의 산출이 실제로 개선될 여지가 많다는 사실을 지적하고 있다(<표 6> 및 <표 7> 참조).

컨테이너 처리량과 처리능력에 기반을 둘 때 전 기간에 걸쳐 광양항터미널들과 B3의 최종 효율성은 매우 낮았다. 특히 <표 6>에 따르면 예상한 대로 광양의 터미널들의 전반적인 효율성이 크게 저조했는데, <표 7>을 보면 이는 안벽, 야드 및 순선석생산성이 크게 비효율적으로 사용되었기 때문이다. 또한 B3은 주로 안벽의 구조적인 문제로 인해 안벽길이를 충분하게 사용할 수 없기 때문에 나타난 비효율로 해석할 수 있다.

〈표 7〉 투입자원의 평균 이용률(CCR, %)

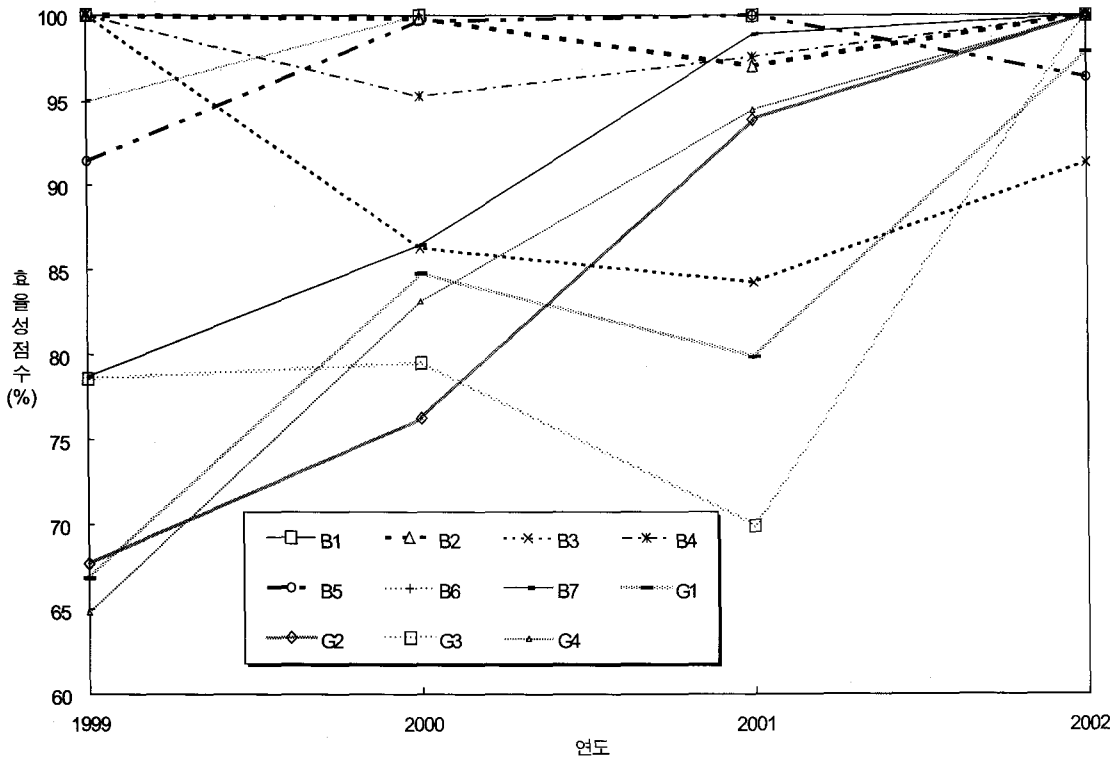
자 원	터미널	연 도				자 원	터미널	연 도			
		1999	2000	2001	2002			1999	2000	2001	2002
크레인수	B1	0.00	0.00	0.00	0.00	노동력	B1	0.00	0.00	0.00	0.00
	B2	0.00	0.00	0.00	0.00		B2	0.00	-1.87	-0.75	0.00
	B3	0.00	0.00	0.00	0.00		B3	0.00	-1.46	-3.68	-3.94
	B4	0.00	0.00	0.00	0.00		B4	0.00	0.00	0.00	0.00
	B5	0.00	0.00	0.00	0.00		B5	-5.53	0.00	0.00	0.00
	B6	0.00	0.00	0.00	0.00		B6	-6.16	0.00	-1.30	0.00
	B7	0.00	0.00	0.00	0.00		B7	0.00	-3.35	-2.61	0.00
	G1	-37.88	-32.50	-25.33	-23.95		G1	0.00	0.00	0.00	0.00
	G2	-15.97	-3.23	0.00	0.00		G2	0.00	0.00	0.00	0.00
	G3	-15.04	-3.13	0.00	0.00		G3	0.00	0.00	0.00	0.00
	G4	0.00	0.00	0.00	0.00		G4	0.00	0.00	-2.51	0.00
안벽길이	B1	0.00	0.00	0.00	0.00	선박당 처리량	B1	0.00	0.00	0.00	0.00
	B2	0.00	-0.43	-0.18	0.00		B2	0.00	-4.04	-0.40	0.00
	B3	0.00	-12.49	-14.24	-14.35		B3	0.00	0.00	-15.56	-12.35
	B4	0.00	-0.12	-1.46	0.00		B4	0.00	-2.03	0.00	0.00
	B5	-0.03	0.00	0.00	0.00		B5	-11.07	-13.25	0.00	-0.40
	B6	-0.36	0.00	-0.15	0.00		B6	0.00	0.00	0.00	0.00
	B7	-1.35	-0.69	-1.06	0.00		B7	0.00	-7.64	0.00	0.00
	G1	-61.10	-54.30	-53.04	-44.65		G1	0.00	0.00	0.00	0.00
	G2	-47.54	-38.57	-1.75	0.00		G2	0.00	0.00	0.00	0.00
	G3	-45.74	-27.95	-31.58	0.00		G3	0.00	0.00	0.00	0.00
	G4	-36.59	-24.24	-19.02	0.00		G4	0.00	0.00	-0.01	0.00
야드면적	B1	0.00	0.00	0.00	0.00	순선석 생산성	B1	0.00	0.00	0.00	0.00
	B2	0.00	-5.21	-2.09	0.00		B2	0.00	0.00	-6.29	0.00
	B3	0.00	0.00	0.00	0.00		B3	0.00	-5.21	0.00	0.00
	B4	0.00	0.00	0.00	0.00		B4	0.00	0.00	-10.54	0.00
	B5	0.00	0.00	0.00	0.00		B5	-0.82	-1.56	0.00	-0.56
	B6	0.00	0.00	0.00	0.00		B6	0.00	0.00	-1.03	0.00
	B7	0.00	0.00	0.00	0.00		B7	-3.77	-3.01	-11.12	0.00
	G1	-32.46	-62.92	-64.71	-54.87		G1	-69.58	-45.77	-54.36	-43.81
	G2	-6.24	-53.23	-1.71	0.00		G2	-71.61	-61.73	-0.26	0.00
	G3	-35.72	-18.66	-39.17	0.00		G3	-45.52	-27.53	-20.75	0.00
	G4	-2.15	-6.45	-14.86	0.00		G4	-55.43	-33.05	-19.66	0.00

주) 1. 윈도우분석결과를 터미널-연도별 평균
2. 음수로 된 수치는 자원의 저이용; 0%는 자원의 완전한 이용

1999년으로부터 2002년까지의 4년 기간 동안 평균효율성의 순위에 따르면, 가장 효율적인 터미널은 B1이었으며, B2, B6, B4, 그리고 B5가 전체적으로 91.71%인 평균이상의 효율성을 기록했다. 한편, 효율성이 가장 열악한 터미널은 G3이었으며 그 다음이 G1, G3, G4, B3, 그리고 B7 순이었다(<표 6> 참조).

본 연구에서 평가된 컨테이너터미널들은 윈도우 분석에 의한 종단적(inter-temporal) 추세를 볼 때 B3을 제외한 대부분의 터미널 효율성들이 지속해서 개선되었으며, 마침내 2002년에는 11개중 8개의 터미널들이 100%의 효율성에 다다랐다(<표 5>, <표 6> 및 <그림 5> 참조). 그들은 또한 시간에 따라 화물처리량과 처리능력도 점진적으로 개선되었다(<표 3> 참조).

본 연구에서 사용한 여섯 투입요소와 처리량 및 처리능력간의 상관관계를 분석해보면, 특히 노동력수가 처리량과의 상관관계(0.97)가 높아 전체효율성의 점수에 가장 큰 영향을 미쳤다. 크레인의 수와 안벽길이 또한 처리량과 크게 상관(0.95 및 0.92)되어 있다. 그러나 반대로 선박당 처리량과 순선석 생산성은 처리량과 상관관계가 매우 낮았다(0.37이하). 또한 처리능력과의 상관관계도 이와 유사한데 노동력수(0.99), 크레인수(0.96), 안벽길이(0.95), 그리고 야드면적(0.88)의 높은 상관관계를 보여준다. 그러나 선박당처리량 및 순석선생산성과는 낮은 상관관계(0.31이하)를 나타내는데, 이는 처리능력에는 이러한 요소들이 서로 연계되어 복합적으로 작용하기 때문인 것으로 보인다. 따라서 크레인, 안벽길이 및 노동력을 잘 관리하는 터미널이 더 우수한 성과를 내며 경쟁우위를 달성할 가능성이 높다고 판단할 수 있다.



〈그림 5〉 의사결정단위들의 기간별 효율성 변동 추이(CCR)

4.3 컨테이너 터미널의 비교항목별 효율성 평가

4.3.1 터미널 규모별 비교

<표 6>에 의하면, 본 연구의 DEA 모형에 포함된 DMU 44개 터미널-연도의 평균 효율성점수는 91.7%이다. 터미널 규모별 평균 효율성 점수를 살펴보면 2개의 대형 컨테이너터미널(B1과 B2)의 평균 효율성 점수는 99.6%이며, 나머지 9개의 중소형 컨테이너 터미널의 평균 효율성 점수는 90.0%이다. 평균효율성 점수의 측면에서 보면, 대형컨테이너 터미널의 효율성점수는 표본의 평균효율성 점수보다 크게 높은 반면, 중소형 컨테이너터미널의 운영효율성점수는 전체 효율성 점수보다 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 이는 그동안 일반적으로 생각했던 바와 같이, 컨테이너 터미널을 운영할 때 단일선석으로 운영하는 것보다 여러 선석을 동시에 운영하는 것이 보다 효율적인 것으로 해석할 수 있다. 따라서 향후에는 컨테이너 터미널을 개발할 경우 컨테이너터미널을 다선석으로 운영하는 방안을 적극 모색할 필요가 있다.

4.3.2 터미널의 위치별(부산과 광양) 비교

<표 6>에 의하면, 본 연구의 DEA 모형에 포함된 DMU 44개의 터미널-연도 중 2개의 대형터미널(B1과 B2)을 제외하고, 터미널의 위치별로 부산항의 터미널과 광양항의 터미널의 효율성을 비교해볼 때, 부산항 터미널의 평균 효율성점수는 95.0%(B3을 제외하면 96.2%)를 나타냈다. 한편 광양항의 터미널의 평균 효율성 점수는 83.6%이다. 평균효율성 점수의 측면에서 보면, 부산항 컨테이너 터미널의 효율성점수는 표본의 평균효율성 점수보다 상대적으로 높은 반면, 광양항의 컨테이너 터미널의 운영효율성점수는 전체표본 효율성 점수보다 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 이는 광양항의 컨테이너 터미널은 적은 규모의 자원을 투입하고 있으나, 그에 비해 산출이 더 적은 수준으로 개선할 여지가 많은 것을 나타낸다. 따라서 향후에는 부산항의 컨테이너터미널을 벤치마킹하여 광양항 컨테이너터미널들의 효율성을 향상시키는 전략이 필요하다.

특히 새롭게 개발된 광양항의 모든 터미널들은 정상궤도에 진입하는데 필요한 학습곡선과 시간지연으로 인한 탐색기간으로 인해 성과가 열악했다. 이에 광양항 터미널들은 전체 기간 동안 평균이하의 효율성 점수를 기록하여, 많은 개선의 여지를 안고 있다(<표 7> 참조).

DEA분석에서 특히 비효율적인 것으로 나타난 광양항터미널은 부산항의 감만터미널에 비해 주로 소형선이 입항하며, 매 선박마다의 평균처리량(LPC)도 2002년 기준 310개에 불과해 부산 870개의 절반에도 미치지 못했다(<표 3> 참조). 실제 터미널의 부가가치는 주로 선박이 안벽에 접안해 있는 상태에서 발생된다. 그러나 선박의 입출항 소요시간은 선박의 크기와 거의 무관하며, 하역작업의 생산성은 대형선과 대형LPC의 경우 훨씬 높다. 그러므로 광양항의 경우는 전체 처리물동량의 증대도 중요하지만 이 보다는 대형선의 취항과 선박당 처리량의 증대가 더욱 중요하다.

한편 광양항의 1단계 터미널의 운영사들은 부산 감만터미널 1단계의 운영사와 전부 일치한다. 또한 광양항에서 부족한 1개씩의 크레인을 제외하면 양쪽 터미널의 시설은 정확하게 일치한다. 그러나 <표 6>의 DEA분석 결과 감만과 광양1단계의 평균 효율성은 96.2%와 83.6%로 크게 차이가 난다. 이는 시사 하는 바가 크다. 부산과 광양을 동시에 운영하는 운영사들은 둘 중 어느 한 곳에서만 화물을 처리하면 되기 때문에, 선사들이 상대적으로 선호하는 부산항을 위주로 운영하는 것으로 해석할 수 있다. 이는 실제로 광양항의 활성화를 위해서는 부산항의 터미널 운영사와 광양항의 터미널 운영사를 겹치지 않게 하여 경쟁을 도입하도록 해야 한다는 분석이 가능하다.

4.3.3 운영주체별 비교

<표 6>에 의하면, 본 연구의 DEA 모형에 포함된 DMU 44개의 터미널-연도 중 터미널의 운영형

태별로 선사전용 터미널과 하역사 운영 터미널의 효율성을 비교해볼 때, 선사전용 터미널의 평균 효율성 점수는 91.3%를 나타낸다. 한편 나머지 하역사 운영 터미널의 평균 효율성 점수는 91.9%였다. 이에 따르면, 평균효율성 지수의 측면에서 보면, 선사전용 컨테이너 터미널의 효율성지수는 표본의 평균효율성 지수보다 약간 낮은 반면, 하역사가 운영하는 컨테이너터미널의 운영효율성지수는 전체 표본 효율성 지수보다 상대적으로 약간 높은 것으로 나타났다. 그러나 두 집단간의 효율성지수가 크게 차이가 나지 않아 운영형태를 구분하기 보다는 각 터미널이 얼마나 자원의 효율적인 사용을 위해 노력하느냐가 효율성을 높이는데 중요한 요인인 것으로 할 수 있다.

4.4 DMU의 비효율 원인판별 및 효율성 향상 방안

앞의 분석결과를 통해 비효율적 DMU를 구분하였다. <표 6>에 제시된 효율성 점수는 CCR 모형의 효율성 점수로, 이는 DMU의 기술적 효율성을 의미한다. 이는 다시 순기술적 효율성(pure technical efficiency)과 규모의 효율성(scale efficiency)으로 구분할 수 있다. 따라서 비효율적인 컨테이너터미널-연도의 효율성 제고방안을 모색하기 위해서는 기술적 효율성을 구성하는 순기술적 효율성측면뿐만 아니라 규모의 효율성측면도 고려해야 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 수익에 대한 가변성을 가정하는 BCC 모형을 적용하여 <표 8> 및 <표 9> 같이 컨테이너터미널의 기술적 비효율성의 원인을 순기술적 효율성 측면과 규모의 효율성측면으로 구분하여 분석하였다.

<표 9>는 <표 6>과 <표 8>을 이용해 비효율적 DMU의 기술적 효율성 점수, 순기술적 효율성 점수 그리고 규모의 효율성 점수를 계산한 것이다. 기술적 효율성 점수는 CCR 모형에서, 순기술적 효율성 점수는 BCC 모형에서 도출한 것이다. 그리고 규모의 효율성 점수는 CCR의 기술적 효율성 점수를 BCC의 순기술적 효율성 점수로 나누어 도출한 것이다.

〈표 8〉 터미널 처리량 및 처리능력에 대한 평균효율성 점수(BCC, %)

터미널	1999	2000	2001	2002	평균
B1	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
B2	100.00	100.00	97.03	100.00	99.26
B3	100.00	99.54	99.64	100.00	99.79
B4	100.00	98.76	100.00	100.00	99.69
B5	91.40	99.66	100.00	96.37	96.85
B6	95.71	100.00	100.00	100.00	98.93
B7	87.54	93.78	100.00	100.00	95.33
G1	100.00	100.00	94.63	100.00	98.66
G2	100.00	100.00	98.11	100.00	99.53
G3	100.00	96.66	98.79	100.00	98.86
G4	89.90	94.00	95.91	100.00	94.95
평균	96.78	98.40	98.55	99.67	98.35

주) 윈도우분석결과를 터미널-연도별 평균

〈표 9〉 비효율적 DMU의 비효율성 주원인 분석

DMU	기술적 효율성 (CCR)	순기술적 효율성 (BCC)	규모 효율성 (CCR/BCC)	비효율성 주원인	
				순기술적 효율성	규모 효율성
B2-00	99.81	100.00	99.81		◎
B2-01	97.01	97.03	99.98	◎	
B3-00	86.28	99.54	86.68		◎
B3-01	84.27	99.64	84.58		◎
B3-02	91.32	100.00	91.32		◎
B4-00	95.23	98.76	96.43		◎
B4-01	97.55	100.00	97.55		◎
B5-99	91.39	91.40	99.99	◎	
B5-00	99.66	99.66	100.00	◎	
B5-02	96.37	96.37	100.00	◎	
B6-99	94.88	95.71	99.13	◎	
B6-01	99.99	100.00	99.99		◎
B7-99	78.71	87.54	89.92	◎	
B7-00	86.48	93.78	92.21		◎
B7-01	98.89	100.00	98.89		◎
G1-99	66.82	100.00	66.82		◎
G1-00	84.81	100.00	84.81		◎
G1-01	79.88	94.63	84.41		◎
G1-02	97.88	100.00	97.88		◎
G2-99	67.66	100.00	67.66		◎
G2-00	76.28	100.00	76.28		◎
G2-01	93.85	98.11	95.66		◎
G3-99	78.58	100.00	78.58		◎
G3-00	79.54	96.66	82.29		◎
G3-01	69.92	98.79	70.78		◎
G4-99	64.80	89.90	72.08		◎
G4-00	83.15	94.00	88.46		◎
G4-01	94.42	95.91	98.45	◎	

주) G2-00은 G2터미널의 2000년을 의미

<표 9>에 의하면, CCR 모형에서 확인된 비효율적인 DMU 28개중 21개의 DMU는 기술적 비효율의 원인이 상대적으로 순기술적 효율성 측면보다는 규모의 효율성 측면에서 비롯되었음을 알 수 있다. 그러나 나머지 7개의 비효율적 DMU는 규모의 효율성 측면보다는 순기술적 효율성 측면에서 비롯된 것으로 판단된다. 따라서 비효율적 DMU의 효율성을 높이는 방안은 규모의 효율성 측면과 순기술적 효율성 측면에서 각각 논의할 필요가 있다.

4.4.1 규모의 효율성 측면의 효율성 향상방안

컨테이너 터미널의 경우, 어느 정도 규모의 경제가 존재한다고 판단된다. 즉 규모에 대한 수익의 가정에 있어서 규모가 커질수록 효율적이거나 또는 비효율적인 수 있다는 것이다. DEA Solver Pro의 BCC분석 결과에 의하면, 본 연구에서의 비효율적인 DMU는 모두 투입규모의 확대로 효율성을 높일 수 있는 '규모에 관한 수익체증'의 특성을 지닌다.

따라서 이와 같이 컨테이너터미널의 비효율성 원인이 규모의 효율성 측면에서 비롯된 경우, 가능하면 터미널을 대형화시키기 위해 주변의 가용한 컨테이너 터미널들과의 인력 및 자원의 공유 단계를 거쳐서, 궁극적으로 터미널 운영의 합병을 통한 효율성의 제고방안을 모색할 필요가 있다. 이에 최근의 컨테이너 터미널에서의 선석 통합운영 움직임도 이러한 차원에서 이해할 수 있을 것이다

4.4.2 순기술적 효율성 측면의 효율성 향상방안

CCR 모형에서 확인된 28개 비효율적 DMU중 7개의 DMU는 비효율성의 원인이 상대적으로 규모의 효율성 측면보다는 순기술적 측면에 의한 것으로 나타났다(<표 9> 참조). 따라서 BCC 모형에서 도출된 순기술적 효율성을 가진 DMU와 비교하여, 비효율적인 7개의 DMU들이 순기술적 측면에서 벤치마킹할 준거집단들과 그러한 준거집단들 중에서 가중치(λ값)가 가장 높은 투입과 산출구조를 가진 DMU를 우선 벤치마킹 하도록 해야만 한다.

예를 들면, 전체 DMU중 상대적으로 비효율적인 컨테이너 터미널로 판명된 DMU B2-01은 비효율의 원인이 규모의 효율성 측면보다는 순기술적 효율성 측면에서 야기 되었다. 이에 순기술적 효율성 측면에서 효율적인 준거집단인 B1-99(0.019), B2-99(0.493), 그리고 B2-02(0.483)를 벤치마킹하여 효율성 제고방안을 모색하여야 한다. 특히 준거집단들 중에서도 가중치(λ값)가 가장 높은 DMU B2-99는 DMU B2-01이 우선적으로 벤치마킹할 대상이다. 즉, 이 경우는 동일 터미널의 과거경험을 반추하여 투입측면에서 선박당 하역량을 높이고(대개 선박 대형화로 나타남), 동시에 순선석생산성을 높이게 되면 산출측면에서는 컨테이너 처리량 및 처리능력이 향상되고 이에 따라 전체효율성이 향상될 수 있는 것이다. 나머지 순기술적 측면에서 비효율적인 터미널-연도(DMU) 들이 우선 벤치마킹해야 할 터미널-연도를 열거해보면 B5-99(B5-01), B5-00(B5-01), B5-02(B5-01), B6-99(B6-00), B7-99(B7-02), 그리고 G4-02(G4-02)이다.

5. 결 론

DEA기법은 그동안 은행, 병원 등과 같은 서비스기관의 효율성 측정에 주로 이용되었다. 그렇지만 최근에는 공항과 항만과 같은 물류시설의 효율성 평가에까지 확대적용 되고 있다.

본 연구는 처리량과 적정처리능력에 기반을 둔 효율성을 측정하고자 했다. 이를 위해 2단계 DEA/Simulation기법을 사용했다. 그 절차는 먼저 대기선박비율 10%의 서비스지표에 근거해서 1999에서 2002년 기간 동안 모든 컨테이너터미널에 대한 터미널 처리능력을 추정했다. 그 다음에 시뮬레이션 결과 구해진 터미널 처리능력을 DEA윈도우분석의 추가 산출요소로 삼아 분석을 수행했으며, 그 결과가 바로 구하고자 하는 최종효율성이다.

본 연구는 이용 가능한 국내의 11개 컨테이너터미널의 패널데이터에 DEA/ Simulation기법을 적용함으로써 개선된 방식의 터미널 효율성평가를 수행했다. 또한 DEA윈도우 분석이 횡단 및 종단

적으로 항만의 생산성을 평가하는 유용한 방법임을 예시했다. 한편, DEA는 상대적인 효율성 순위를 제공하는데 더해서, 투입 및 산출요소의 비효율성 원천요소 및 비교항만에 대한 결과도 제공한다. 비효율성의 원천요소를 구별하는 능력은 비효율적 항만들의 항만관리자들에게 유용하며, 이것은 항만성과를 향상시키는 노력에 초점을 맞추는 지침으로 사용될 수 있다[26]. 따라서 DEA는 자원이용율을 제시할 수 있기 때문에 운영자가 최대한의 효율성을 달성할 수 있도록 비효율적으로 사용된 자원들을 개선하도록 권고할 수도 있다.

현재 나타나고 있는 광양항 등의 컨테이너항만의 제 문제는 시스템다이내믹스, 제약이론 등의 다양한 기법의 활용을 통해 앞으로 연구할 계획이나, 본 연구의 결과를 통해 몇 가지 전략을 구축해 볼 수 있다.

우선 광양항이 효율적이 되기 위해서는 입항선박의 대형화를 통한 선박당처리량(LPC)의 제고가 필요하다. 이는 현재 상태에서 효율성을 높이기 위해서는 가능한 한 큰 배 그리고 선박당 많은 양을 처리할 수 있어야만 전체적인 효율성이 개선될 수 있기 때문이다.

둘째, 광양항의 컨테이너터미널을 비롯한 모든 항만에서 효율성을 제고하기 위해서는 가능하면 터미널을 대형화 할 필요가 있다. 규모의 효율성에서 제시한 것과 같이, 단일선석 터미널보다는 다선석 터미널이 자원의 활용, 터미널의 운영, 화물유치, 그리고 인력양성 및 조달 등의 여러 가지 면에서 우월하다.

셋째, 광양항에서 터미널을 운영 중인 운영사(Terminal Operating Company, TOC)들과 부산항의 운영사들을 분리하여 양항간 협력과 경쟁이 가능한 체제로 시장의 구조를 변경시킬 필요가 있다. 현재와 같이 운영사의 양항터미널의 동시운영은 조건이 상대적으로 열악한 광양항에 더 불리하다.

마지막으로, B3터미널의 경우는 안벽 등의 하드웨어가 비효율의 큰 원인을 차지한다. 실제로 B3터미널은 'ㅁ'형태의 안벽중 우측은 미군부두로 사용중이기 때문에 실제로는 250미터내외의 안벽이 각각 직각으로 연결된 'ㄱ' 형태의 안벽을 갖는 2선석으로 구성된다. 이에 대형선의 입출항이 곤란하며, 선석이 분리되어 크레인도 공동사용을 할 수 없기 때문에 상당히 비효율적이다. 또한 야드도 고가도로가 양분하고 있어 합리적인 사용을 방해하고 있다. 이러한 모든 점을 고려하면 실제로 B3터미널은 컨테이너터미널로 활용되기 어려운 조건들을 다수 보유하고 있기 때문에 일반부두로의 용도변경이나 터미널의 이전도 고려해볼 대안이 될 수 있다.

본 연구가 항만효율성평가에 대한 DEA/Simulation 기법의 적절성과 특정항만에 대한 정보를 제시해 주지만, 장래 연구해야만 할 많은 문제들이 남아 있다. 먼저, 터미널의 하역인력에 대한 데이터에의 접근이 미비했다. 따라서 향후 하역인력에 대한 고려가 필요하다.

둘째, 본 논문에서는 2단계 접근법을 위해 2개의 산출요소인 컨테이너 처리량 및 처리능력과 6개의 투입요소를 사용했다. 그러나 실제로 본 연구에서 사용한 변수들이 필수적인 다른 요소들이 빠진 채 선정되었는지를 과학적으로 판단함이 없이 선행연구와 그동안의 연구경험으로만 선정하였다. 따라서 목적에 맞는 적절한 변수의 선정방법과 모형의 구성방법이 검토되어야만 할 것이다.

셋째, 본 연구에서는 시뮬레이션 필요 자료 때문에 국내터미널들에만 한정하여 분석을 수행하였으나, 추후에는 주요 해외터미널들을 포함한 비교가 필요하다.

마지막으로는 장래에는 마케팅이나 서비스요소들과 같은 요소들이 어떻게 산출요소에 영향을 미치는 가를 반영하기위해 이러한 변수들을 분석에 포함해야만 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] 문경주, 강성철, "DEA를 이용한 사회복지관의 효율성 측정", 「한국행정논집」, 한국행정학

회, 제16권, 제2호(2004), pp.333-362.

[2] 박광태, 박병인, 박명섭, "대기이론과 시뮬레이션의 상호보완을 통한 컨테이너 터미널의 선박처리 시스템 분석", 「경영학연구」, 한국경영학회, 제28권, 제10호(1999), pp.151-166.

[3] Adler, N. and J. Berechman, "Measuring Airport Quality from the Airlines' Viewpoint : An Application of Data Envelopment Analysis," *Transport Policy*, Vol.8(2001a), pp.171-181.

[4] Adler, N. and J. Berechman, "Airport Quality and the Hub Location Question," *Proceedings of the 9th World Conference on Transport Research*, 22-27 July, Seoul, South Korea, (2001b).

[5] Adler, N. and B. Golany, "Evaluation of Deregulated Airline Network Using Data Envelopment Analysis Combined with Principal Component Analysis with an Application to Western Europe," *EJOR*, Vol.132, No.2(2001), pp.260-273.

[6] Alderton, P., *Port Management and Operation*, LLP Reference Publication, London, 1999.

[7] Ballis, A. and C. Abacoumkin, "A Container Terminal Simulation Model with Animation Capabilities," *Journal of Advanced Transportation*, Vol.30, No.1(1996), pp.37-57.

[8] Boussofiane, A., R.G. Dyson, and E. Thanassoulis, "Applied Data Envelopment Analysis," *EJOR*, Vol.52(1991), pp.1-15.

[9] Bowlin, W., "Evaluating the Efficiency of US Air Force Real-Property Maintenance Activities," *J. of Operational Research Society*, Vol.38, No.2(1987), pp.127-135.

[10] Bowlin, W., "Measuring Performance : An Introduction to Data Envelopment Analysis," *Journal of Cost Analysis*, (Fall 1998), pp.3-27.

[11] Charnes, A., W. Cooper, and E. Rhodes, "Measuring the Efficiency of Decision Making Units," *EJOR*, Vol.2(1978), pp.429-444.

[12] Cooper, W.W., L.M. Saiford, and K. Tone, *Data Envelopment Analysis : A Comprehensive Text with Models, Applications, References, and DEA-Solver Software*, Kluwer, Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, 1999.

[13] De La Cruz, F.S., "A DEA Approach to the Airport Production Frontier," *International Journal of Transport Economics*, Vol.26, No.2(1999), pp.255-270.

[14] Frankel, E., *Port Planning and Development*, John Wiley and Sons, Inc, 1987.

[15] Gillen, D. and A. Lall, "Developing Measures of Airport Productivity and Performance : An Application of Data Envelopment Analysis," *TR : E*, Vol.33, No.4(1997), pp. 261-273.

[16] Kia, M., E. Shayan, and F. Ghotb, "The Information Technology in Port Terminal Operations," *IJPDLM*, Vol.30, No.3/4(2000), pp.331-344.

[17] Kia, M., E. Shayan, and F. Ghotb, "Investigation of Port Capacity under a New Approach by Computer Simulation," *Com & IE*, Vol.42(2002), pp.533-540.

[18] Martinez-Budria, E., R. Diaz-Armas, M. Navarro-Ibanez, and T. Ravelo-Mesa, "A Study of the Efficiency of Spanish Port Authorities using Data Envelopment Analysis," *International Journal of Transport Economics*, Vol.26, No.2(1999), pp.237-253.

[19] Min, H. and B. Park, "Evaluating the Inter-Temporal Efficiency Trends of Interna-

tional Container Terminals using Data Envelopment Analysis," *Int. J. of Integrated Supply Management*, Vol.1, No.3(2005), pp.258-277.

[20] Musso, E., C. Ferrari, and M. Benacciho, "On the Global Optimum Size of Port Terminals," *International Journal of Transport Economics*, Vol.26, No.3(1999), pp. 415-437.

[21] PIANC, "Capability Ship Maneuvering Simulation Models for Approach Channels and Fairway in Harbours," *Supplement Bulletin*, Vol.77(1992).

[22] Roll, Y. and Y. Hayuth, "Port Performance Comparison Applying Data Envelopment Analysis," *Maritime Policy and Management*, Vol.20, No.2(1993), pp.153-161.

[23] Sarkis, J., "An Analysis of the Operational Efficiency of Major Airports in the United States," *Journal of Operations Management*, Vol.18(2000), pp.335-351.

[24] Song, D., K.P.B. Cullinane, and M. Roe, *The Productive Efficiency of Container Terminals, An Application to Korea and the UK*, Ashgate : Aldershot, England, 2001.

[25] Sueyoshi, T., "Production Analysis in Different Time Period : An Application of Data Envelopment Analysis," *EJOR*, Vol. 74, No.3(1995), pp.466-478.

[25] Talley, W., "Performance Indicators and Port Performance Evaluation, *Logistics and Transportation Review*, Vol.30, No.4(1994), pp.339-352.

[26] Tongzon, J., "Efficiency Measurement of Selected Australian and Other International Ports Using Data Envelopment Analysis," *TR : A*, Vol.35(2001), pp.107-122.

[27] Turner, H., "Evaluating Seaport Policy Alternatives : A Simulation Study of Terminal Leasing Policy and System Performance," *Maritime Policy and Management*, Vol. 27, No.3(2000), pp.283-301.

[28] UNCTAD, *Port Development*, 2nd ed, United Nations, 1985.

[29] Valentine, V., "A Comparison of African Port Performance," *8th National Maritime Conference and Exhibition*, Cape Town, South Africa, 3-5 March, 2003.

[30] Wang, T., D. Song, and K. Cullinane, "The Applicability of Data Envelopment Analysis to Efficiency Measurement of Container Ports," *IAME Panama 2002 Proceedings*, 2002.

[31] Ward, T., "Simulation Analysis in Terminal Planning Pier 300 Marine Terminal, Port of Los Angeles," *Planning and Research Seminar*, April 24-26, Tampa, Florida, USA, 1996.