

환경요소를 고려한 국내공항 생산성 측정 : DEA 모형의 적용

전승진¹ · 이철웅^{2*}

¹고려대학교 산업경영공학과 / ²고려대학교 산업경영공학부 · 기술경영전문대학원

Measure the Productivity of Airports in Korea Considering Environment Factor : An Application of DEA

Seungjin Jeon¹ · Chulung Lee²

¹Department of Industrial Management Engineering, Korea University, Seoul, 136-713, Korea

²Division of Industrial Management Engineering, Korea University and Graduate Management of Technology, Seoul, 136-713, Korea

In the recent, it is gradually important for airport to consider environmental aspects as sustainable development is emerged. ICAO, FAA and individual countries has tried to reduce airport noise and pollution. Thus, the effort is needed to incorporate environmental factor into productivity indicator of airport. Our paper use DEA method with the non-parametric directional output distance function(DDF) to assess productivity of 14 airports in Korea during 2008 ~ 2010. In addition to three inputs, two conventional outputs, two undesirable outputs have been considered : noise and air pollution. Results are compared from models that do not include undesirable outputs. Inclusion in the analysis of the undesirable effects of airport operations leads to greater and closer airport's efficiency scores.

Keywords: DEA, Direction Distance Function, Airport, Efficiency, Environmental Factor

1. 서론

세계를 중심으로 자유무역협정이 보편화되면서 국가 간 교역 증대에 사람의 이동뿐만 아니라 물류수요도 빠르게 변화하고 있다. 특히, 1978년 미국에서 항공운송산업 규제완화가 실시된 이후, 자유화 추세가 빠르게 진전되었다. 또한 1990년 이후로 세계 곳곳에서 빠르게 공항의 민영화가 이루어지면서(Hooper *et al.*, 2000), 공공 복리적 측면만을 강조했던 과거와는 달리 성장 중심적 개발전략을 통해 공항은 경제적인 면에서 괄목할 만한 발전을 이룩하였다.

하지만 다른 한편으로 항공기 소음 및 공항에서 방출되는 온실가스는 환경적 측면에서는 부정적인 결과를 초래하여 간과하지 않을 수 없게 되었다. ICAO(International Civil Aviation

Organizatin), FAA(Federal Aviation Administration) 및 여러 나라에서 비행기 소음 및 온실가스를 줄이기 위하여 노력하고 있다. 따라서 환경요소를 공항의 생산성 측정 지표에 통합시키는 노력이 필요하다. 이 전까지의 연구에서는 환경요소를 포함하여 공항의 생산성을 평가한 연구는 거의 없었다. Yu (2004, 2008)는 공항의 소음만 고려하여 공항의 생산성을 평가하였으며, 소음 및 온실가스를 동시에 고려한 논문은 없었다. 본 연구에서는 환경요소를 고려하여 처음으로 국내공항 생산성을 평가하고 환경요소를 배제하고 생산성을 측정했을 때 나오는 결과를 시나리오를 통하여 비교해 보고자 한다. 본 연구의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 관련 연구를 간단하게 소개하고, 제 3장에서는 환경요소를 포함한 생산성 측정 모델이 제시되며 제 4장에서는 변수 선정 및 데이터 수집이 제시된다. 제 5장

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2009-0076365).

* 연락처 : 이철웅 교수, 136-713 서울특별시 성북구 안암동 5가 고려대학교 산업경영공학부 · 기술경영전문대학원, Tel : 02-3290-3395,

Fax : 02-929-5888, E-mail : leecu@korea.ac.kr

2011년 9월 10일 접수; 2011년 10월 16일 수정본 접수; 2011년 11월 10일 게재 확정.

에서는 실증분석이 제시되며 마지막으로 제 6장에서는 본 연구를 요약하였다.

2. 관련 연구

1990년대 초반까지 공항의 생산성 분석에 관한 연구는 PFP (Partial Factor Productivity) 방법을 주로 사용했다(Pathomsiri, 2008). PFP는 특정한 하나의 투입요소 대비 얻어진 산출물의 비율을 의미한다. 즉 PFP 방법으로는 다수의 투입물과 산출물 사이의 관계를 하나의 생산성으로 통합 할 수 없기 때문에 공항의 전체적인 흐름을 이해하는데 한계가 있었다. 반면 모든 투입요소를 고려한 투입 대비 산출의 생산성을 나타내는 TFP (Total Factor Productivity)는 단일의 통합된 생산성 측정 방법이다. TFP는 일반적으로 모수적(Parametric) 방법과 비 모수적(Non-Parametric) 방법으로 분류할 수 있다. 모수적 방법은 생산 함수(Production function) 또는 비용 함수(Cost function)를 이용하여 산출물과 투입물 사이의 관계를 형성한다. 위 방법을 이용하여 Tolofari(1990), Pels(2000)는 각각 영국 및 유럽 공항의 생산성을 평가 하였다.

Tornqvist Total Factor Productivity의 비모수적 지수(Non-Parametric index number) 방법도 이용되었다. 위 방법은 각각 모든 투입물과 산출물에 가중치 지수를 부여하여 생산성을 평가한다. Hopper and Hensher(1998)는 위 방법으로 호주 공항의 생산성을 평가하는데 이용하였다. DEA(Data Envelopment Analysis) 모형도 비모수적 방법이다. 가중치 지수가 적용된 투입물 대비 산출물의 생산성을 비교하는 방법으로써 비모수적 TFP 방법과 유사하다. 하지만 DEA에서 투입물과 산출물의 가중치는 선형 계획법 모형의 결과로 정해지기 때문에 가중치를 사전에 정할 필요가 없다. 따라서 요구하는 자료가 복잡하지 않기 때문에 자료 수집이 상대적으로 용이해 다른 방법들보다 널리 사용되고 있다. 지난 수십 년 동안 DEA는 항공분야에서 많이 사용되었다. Gillen and Lall(1997)는 DEA를 사용하여 미국의 상위 21개 공항을 대상으로 터미널 서비스와 운송서비스를 따로 구분해서 생산성을 분석하였으며, Joseph Sarkis(2000)는 DEA를 사용하여 미국의 44개 주요 공항을 대상으로 생산성을 분석하였다. Bazargan and Vasigh(2003)는 DEA를 사용하여 각 미국의 15개 대형, 중형, 소형 공항을 대상으로 공항의 크기가 생산성에 어떠한 영향을 미치는지 분석하였다. Parker(1999)는 DEA를 사용하여 영국의 22개 공항 및 British Airports Authority (BAA)의 민영화 전·후에 대해서 생산성을 분석하였다. Martin and Roman(2001)는 DEA를 사용하여 스페인 공항의 생산성을 분석하였으며, 결과를 이용하여 공항의 민영화 과정 전에 고려해야 되는 정책을 도출하였다. Fernandes and Pacheco(2002)는 DEA를 사용하여 브라질 35개 공항을 대상으로 공항시설을 이용하는 승객을 통하여 공항의 생산성을 분석하였다. 위의 연구들은 긍정적인 산출물만 고려하였다. 하지만 공항의 처리 실적 및 운항 횟수 증가는 터미널 혼잡도, 항공기 지연, 소음

및 온실가스의 증가를 초래한다. Salazar de la Cruz(1999)는 공항 이용률이 높아질수록 혼잡도가 증가한다는 것에 주목하였다. 따라서 부정적인 산출물을 고려하지 않는다면 공항생산성 평가는 완벽하다고 할 수 없다. 공항에서는 부정적인 산출물을 고려한 연구는 거의 없었다. Yu(2004, 2008)는 대만의 공항을 대상으로 생산성을 분석하였으며, 부정적인 산출물로 항공기 소음을 고려하였다. 항공기 소음을 생산성 평가요소에서 제외시키면 공항의 생산성이 좋아지며 효율적인 프론티어에 더 많은 공항이 위치에 있다는 것을 발견하였다. Pathomsiri (2008)는 부정적인 산출물로 항공기 지연을 고려하여 미국 56개 공항을 대상으로 생산성을 분석하였다. 지연을 생산성 평가요소에서 제외시키면 크고 혼잡한 공항이 효율적 프론티어에서 발견되며 반대로 지연을 포함시키면 작고 덜 혼잡한 공항이 효율적이게 된다는 것을 알았다. 부정적인 산출물을 고려한 위의 연구들은 방향거리함수(Directional Distance Function)를 적용하였다. DDF는 Chambers(1996), Chambers *et al.* (1998)에 의해 처음으로 이론적 수준의 개념이 정의되었으며, Färe and Grosskopf(2000)에 의하여 DDF의 쌍대성이 소개되어 졌다.

DDF는 각 DMU(Decision Making Unit)들이 효율적인 상태를 찾기 위해 방향을 수정할 수 있으며, 데이터의 변환 없이 부정적인 산출물을 감소시키는 DMU는 높은 생산성을 부여하고 부정적인 산출물을 증가시키는 DMU에게는 낮은 생산성을 부여하는 것이 핵심이다. DDF는 DEA 절차에 어떤 조건 없이 적용될 수 있는 부가적인 함수 형태이기 때문에 다양한 산업의 생산성 평가에 적용될 수 있다.

3. 방향거리함수(Directional Distance Function)

Coelli *et al.*(2002)는 고정된 투입물(Input ≠ Non-negative value)과 기술을 사용하여 최대의 산출물을 생산할 수 있는 것이 한 산업의 가용력(Capacity)이라고 했다. Chambers *et al.*(1996)는 산업의 가용력을 생산 함수 식 (1)로 정의하였다. 생산 함수는 각 투입물 벡터 X 에 의해서 생산되어 질 수 있는 긍정적인 산출물과 부정적인 산출물의 조합의 집합이다.

$$P(x) = (y, b) : x \text{ can produce } (y, b) \quad (1)$$

$$Y \in R_m^+ : \text{산출물(Desirable output), 벡터}(m = 1, 2, \dots, M)$$

$$b \in R_j^+ : \text{산출물(Undesirable output), 벡터}(j = 1, 2, \dots, J)$$

$$x \in R_n^+ : \text{투입물(Input output), 벡터}(n = 1, 2, \dots, N)$$

Färe *et al.*(1989, 2007)는 생산함수 $P(x)$ 를 최적화하기 위하여 아래의 조건을 가정하였다.

- (1) $P(X)$ is convex and compact
- (2) $P(0) = (0, 0)$
- (3) If $(y, b) \in P(x)$ and $b = 0$, then $y = 0$

- (4) If $(y, b) \in P(x)$ then for $y' \leq y, (y', b) \in P(x)$,
and for $x' \leq x, (y', b) \in P(x) \subseteq P(x')$
- (5) If $(y, b) \in P(x)$ and $0 \leq \theta \leq 1$ then $(\theta y, \theta b) \in P(x)$

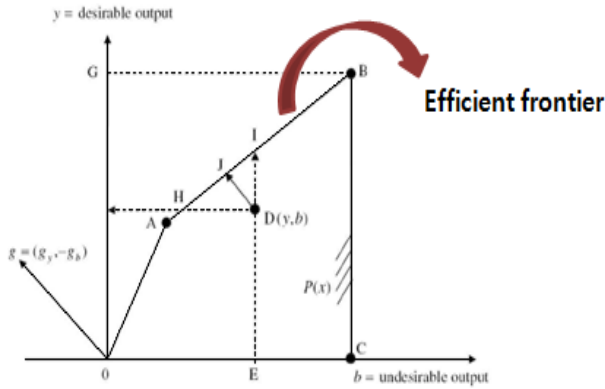


Figure 1. Construct of production possibility set and the directional output distance function

5개의 가정을 사용하여 생산함수 $P(x)$ 를 <Figure 1>로 나타낼 수 있다. 여기서 A, B, C, D는 각 DMU이다. 4개의 DMU는 모두 동일한 투입물을 사용하여 서로 다른 산출물을 생성하였다. (1)의 가정에 의하여 $P(x)$ 의 가능영역은 $OABC$ 로 한정되어 있으며, (2), (3)의 가정에 의하여 $(0, 0)$ 는 $P(x)$ 에 포함된다. (4)의 가정에 의하여 현재 투입물과 산출물이 $P(x)$ 범위 내 포함된 경우, 현재 수준보다 적은 산출물은 투입물을 증가하지 않아도 생산이 가능하기 때문에 BC 선이 형성된다. (5)의 가정에 의하여 $P(x)$ 는 $OABC$ 선 또는 안의 모든 영역이 가능하다. $P(x)$ 는 DEA를 사용하여 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P(x) [(y, b) : \\
 \sum_{k \in K} \lambda_k y_{km} \geq y_{km}' \quad m = 1, 2, \dots, M \\
 \sum_{k \in K} \lambda_k b_{kj} = b_{kj}' \quad j = 1, 2, \dots, J \\
 \sum_{k \in K} \lambda_k x_{kn} \leq x_{kn}' \quad n = 1, 2, \dots, N \\
 \lambda_k \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, K] \quad (2)
 \end{aligned}$$

공항시설의 특성상 공항은 일단 투자가 이뤄지면 공항운영자는 비용 절감을 위하여 투자회수 또는 철회가 어려우므로 산출물을 극대화 하는 전략을 갖는다. 결과적으로 공항의 효율성을 평가 시, 긍정적인 산출물의 최대화와 부정적인 산출물의 최소화를 고려한 평가가 되어야 한다. 방향거리함수는 투입물은 고정으로 유지하면서 긍정적인 산출물과 부정적인 산출물을 비대칭적으로 처리할 수 있다. 다시 말하면 긍정적인 산출물이 많이 발생하는 공항은 생산성이 높은 공항으로, 부정적인 산출물이 많이 발생하는 공항은 생산성이 낮은 공항으로 처리할 수 있다. Chamber *et al.*(1998), Färe and Grosskopf (2000)에서 제시한 방향거리함수 쌍대성을 사용하여 DODF

(Directional Output Distance Function)는 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \vec{D}_0 &= (x, y, b; g_y, -g_b) \\
 &= \max \beta : (y + \beta g_y, b - \beta g_b) \in P(x) \quad (3)
 \end{aligned}$$

식 (3)에서 $g = (g_y, g_b)$ 는 긍정적인 산출물과 부정적인 산출물에 대한 벡터로서($g_y \in R_+^M, g_b \in R_+^J, g = (y, 0)$)은 부정적인 산출물을 고려하지 않는다는 것을 의미하고 $g = (1, -1)$ 은 긍정적인 산출물과 부정적인 산출물의 가중치가 같다는 것이다.

방향거리함수는 어떤 모형에도 쉽게 적용될 수 있다. 따라서 방향거리함수를 DEA 모형에 포함시켜 생산 효율성(β)을 측정하기 위해 식 (4)의 선형계획법 모형으로 변환시켰다. β 값이 0이면 효율적인 공항이고, β 값이 증가 할수록 공항의 효율성은 악화된다.

$$\begin{aligned}
 \text{Max } & \beta_k \\
 \text{s.t. } & \sum_{k \in K} \lambda_k y_{km} \geq y_{km} + g_y \beta_k \quad m = 1, 2, \dots, M \\
 & \sum_{k \in K} \lambda_k b_{kj} = y_{kj} + g_b \beta_k \quad j = 1, 2, \dots, J \\
 & \sum_{k \in K} \lambda_k x_{kn} \leq x_{kn} \quad n = 1, 2, \dots, N \\
 & \lambda_k \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (4)
 \end{aligned}$$

4. 모형의 적용

4.1 변수선정

DEA에 의해 국내공항의 생산성을 평가하기 위해 우선적으로 공항의 투입물과 산출물을 정의해야 한다. 기존 연구들에서 산출물과 투입물 선정의 차이점은 저자들이 보는 공항의 주요 역할 및 분석 대상에 따라서 달라진다. 미국 주요 공항의 생산성을 분석한 Sariks(2000)는 투입물로 재무비용, 직원 수, 게이트 수, 활주로 수를 산출물로는 운영수익, 항공기 운항 수, 탑승객 수, 화물 처리 양이 선정 되었다. 부정적인 산출물로 공항의 지연을 고려하여 미국 주요 공항을 분석한 Pathomsiri (2008)는 투입물로 활주로 수, 활주로 면적, 계류장 면적을 투입물로 정시에 도착하는 항공기 수, 탑승객 수, 화물 처리 양 및 지연되는 비행기 수 등을 고려하였다. 일본 공항의 생산성을 분석한 Yoshida *et al.*(2004)는 투입물로 활주로 길이, 터미널 면적, 공항으로의 접근 비용, 직원 수를 산출물로는 항공기 운항 수, 탑승객 수, 화물 처리량이 고려되었다. 한편 Gillen and Lall(1997), Pels *et al.*(2001)은 공항이 터미널 및 운송 서비스 2 가지를 제공한다고 보아 투입물과 산출물을 그에 따라 각각 정의하였으며 Alder and Berechman(2001)은 공항의 품질과 투입물의 관련성을 알아보기 위해 투입물로 공항 수수료, 최소 연결시간, 여객터미널 수, 활주로 수 및 통제 불가능한 변수인

가까운 도심까지의 거리를 산출물로는 항공사를 대상으로 설문조사를 통하여 각 공항의 단일 품질 지수라는 주관적인 자료를 고려하였다. 본 연구에서는 소음 및 온실가스를 포함하여 공항의 운영적 측면에서 생산성을 분석하는 것이 목적이다. 따라서 투입물로 WLU 연간처리능력, 운영비를 산출물로는 WLU, 수익, 공항 소음 및 온실가스를 고려하였다. 여기서 WLU(Work Load Unit)는 화물 100kg, 승객 1명을 1 WLU 단위로 변환시킨 것으로 산출물의 단위가 다른 화물 및 승객을 하나의 단위로 통합시킨 것이다(Graham, 2005). 다른 기존의 연구에서 주로 사용되었던 계류장 면적, 활주로 수와 길이, 주차장 크기 등은 제외하였다. 그 이유는 김포, 제주, 무안 등 일부 공항을 제외한 나머지 공항들은 군사적인 용도와 병행하여 설계되고 사용하고 있으며 국내의 공항은 모두 국가에서 관리하고 있기 때문이다. 예를 들면 활주로 및 계류장은 군과 공동으로 사용하고 있다. 공항의 환경상태가 동일하지 않고 그 환경상태가 통제 불가능하다면 생산성의 비교 분석에서는 환경변수를 고려해야 된다(Yu, 2004). Alam *et al.*(1998)에 의하면 공항에 대한 수요는 공항 주변에 인접한 도시의 인구수, 도시의 소득수준, 도시의 근로자수에 영향을 받는다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 환경변수로 공항 주변 도시의 인구 및 소득수준을 고려하였다.

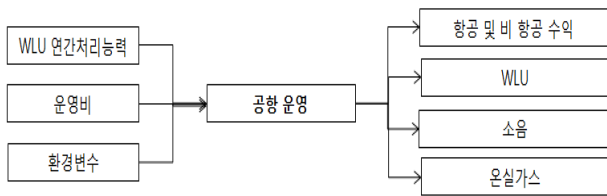


Figure 2. Production model of airport operation

4.2 데이터 수집

한국공항공사가 운영하는 공항 중 양양공항을 제외한 13개의 공항을 대상으로 하였으며 2008~2010기간의 데이터를 사용하였다. 양양 공항 및 인천공항은 다른 공항에 비해 생산성이 너무 낮거나 높기 때문에 생산성 측정이 왜곡될 수 있어서 제외하였다. WLU 연간처리 능력, 운영비용, 연간 WLU 처리실적, 항공 및 비 항공 수익은 한국공항공사 자료를 참조하였다. 한편 DEA 모형을 통한 분석은 DMU간의 상대적 평가이므로 상대적 평가에 필요한 자유도를 확보하기 위해서 투입요소와 산출요소의 수에 비해 충분한 수의 DMU가 있어야 한다. Boussofiane *et al.*(1991)에서 최소로 필요한 DMU 개수는 $n \geq m \times s$, Fitzsimmons(1994)는 $n \geq 2 \times (m+s)$, Cooper *et al.*(2000)는 $n \geq \text{Max}\{3 \times (m+s), m \times s\}$ 로 제시되어 졌다. 여기서 n은 최소로 필요한 DMU 개수이며 m은 투입요소의 수, s는 산출요소의 수이다. 본 연구는 3개의 투입요소, 4개의 산출요소 및 13개의 공항으로 이루어져 있어 위에서 제시된 권고사항을 만족하지 못한다. 따라서 표준 DEA 방법으로는 불안정한 생산성 점수가 나

올 수 있기 때문에 Nghiem and Coelli(2001)에서 제시한 확장된 DEA 방법인 n-year-window DEA 방법을 사용하였다. 시간 창 의 너비는 2로 하였으며 첫 번째 그룹은(2007~2008), 두 번째 그룹은(2008~2009), 세 번째 그룹은(2009~2010)로 형성하였다. 예를 들어 2008년의 효율적인 프론티어는 첫 번째 그룹인(2007~2008)의해서 형성되고, 따라서 각 년도의 효율적인 프론티어는 26개의 DMU에 의해서 형성되어진다.

4.2.1 공항 온실가스 배출량

공항 온실가스 배출원 현황을 살펴보면 항공기 온실가스 배출이 약 90% 이상을 차지하고 있다. 본 연구에서는 공항 생산성을 분석하는 것이 목적이므로 순항 단계에서 나오는 배출량은 공항에 영향을 미치지 않으며 퍼블릭 부분은 통제할 수 없는 부분이기 때문에 배제하였다. 또한 직원 출퇴근 배출, 입차차 배출 및 지상조업체 GSE는 전체에서 매우 작은 비율이라서 배제하였다. 먼저

Table 1. Greenhouse gases emission condition in 2008

	배출량(Ton)	사용자별(%)	전체(%)	
KAC	직접통제배출	60,902	66.8	3.4
	직원출퇴근배출	1,503	1.6	0.1
	입차차배출	28,804	31.6	1.6
	소계	91,209	100.0	5.1
Air-side	항공기(LTO)	570,279	35.0	31.8
	항공기(Cruise)	1,050,675	64.5	58.6
	지상조업체 GSE	7,796	0.5	0.4
	소계	1,628,750	100.0	90.8
퍼블릭	GAV_Pulbic	72,986	100.0	4.1
합 계		1,792,945	-	100.0

자료 : 탄소경영보고서(2010), 한국공항공사.

항공기 온실가스를 추정하는데 IPCC 가이드라인의 Tier 2 방법을 사용하였다. IPCC 방법론은 이착륙 사이클에 대한 연료 사용에 기반을 두고 있는 방법으로 보통 지역적 범위의 배출가스를 추정하는데 적합하다. IPCC 가이드라인에 따르면 가장 단순한 방법은 Tier 1 방법으로써 항공기 연료 총액에 세 가지 배출가스의 배출계수를 곱하여 도출하며, 배출계수는 연료의 10%가 이·착륙 시 사용된다는 가정 하에 모든 비행 단계에서 평균화 된다. Tier 1, Tier 2, Tier 3 방법 중 항공기 배기가스 배출량 추정 시 선택하는 방법은 자료의 유연성에 따라 결정된다. 즉 자료만 가능하다면 높은 단계의 방법론을 사용하는 것이 추정의 정확성을 높일 수 있다. 본 연구에서는 개별 비행 단계에 대한 배출가스를 계산하는 Tier 3 방법을 위한 자료는 구할 수 없었기 때문에 Tier 2 방법을 사용하였다. Tier 2는 이착륙 사이클(Landing and Take-off, LTO)을 배출량 추정에 반영하는 방법이다. ICAO에서는 배출량 추정을 위한 LTO 사이

클 시간을 개별적인 TIM(Time in Mode)에 기초하여 32.9분(이륙 0.7분, 상승 2.2분, 접근 4.0분, 지상이동 26분)으로 가정하고 있다. LTO Mode는 Taxi/Idle, Takeoff, Landing, Approach로 구분되며 LTO 배출량은 “LTO 수”×“LTO 배출계수”로 나타난다. LTO 배출계수는 항공기 엔진마다 다르며 다음 식 (5)과 같이 구할 수 있다.

$$E_{ij} = E_{ij} = \sum_k (TIM_{jk} \times FF_{jk} \times EI_{ijk} \times N_j) \quad (5)$$

- E_{ij} = 1 LTO에서 항공기 j에서 생산되는 온실가스 i
- TIM_{jk} = 항공기 j가 모드 k에서 머무르는 평균 시간
- FF_{jk} = 항공기 j의 엔진이 모드 k에서 사용하는 연료의 양
- EI_{ijk} = 항공기 j의 엔진이 모드 k에서 사용하는 연료의 일정 양에서 나오는 온실가스 i
- N_j = 항공기 j에서 사용하는 엔진의 개수

본 연구에서 항공기 온실가스는 CO_2 , CO , SO_2 , NO_x 를 고려하였다. 또한 각 온실가스가 미치는 피해는 온실가스마다 다르다(Ding *et al.*, 2003). 따라서 온실가스마다 미치는 피해비용을 환경부 자료를 참조하여 API(Air Pollution Index)를 도출하기 위해 식 (6)을 세웠다.

$$API_a = \sum_{i=1}^4 C_i \times E_{ia} \quad (6)$$

- API_a : 공항 a에서 방출되는 온실가스 금액
- C_i : 온실가스 i의 비용
- E_{ia} : 공항 a에서 방출되는 온실가스 i의 양

4.2.2 항공기 소음

항공기 소음은 기종 및 항공기의 이착륙 횟수에 따라서 결정된다. 항공기 소음 측정 기준점은 상공(Flyover), 측면(Lateral), 착륙(Approach) 3지점에서 측정된다. 각 항공기 소음 크기뿐만 아니라 지속되는 시간에 따라서 인간이 느끼는 소음의 크기는 달라질 수 있다. 이러한 항공기 소음의 지속시간을 고려한 평가 단위는 EPNL(Effective Perceived Noise Level)이다. 각 항공기의 소음측정 기준점에 대한 EPNL 값은 EASA(European Aviation Safety Agency)의 자료를 참조하였다. 우리나라에서 사용되는 WECPNL(Weighted Equivalent Continuous Perceived Noise Level)은 항공기의 운항회수, 운항 시 소음도, 소음지속시간, 소음발생 시간 등을 감안한 소음측정 값이다. 시간에 따른 보정치는 ICAO에서 제시한 07~19시는 Day, 19~22시는 Evening, 22~07시는 Night로 하여 Evening에 +5, Night에 +10을 가중하는 삼분할 법을 사용하였다. WECPNL의 삼분할 시간대의 1일 단위의 값은 다음 식으로 구하며, 시간대별 이착륙 횟수는 한국 공항공사 내부 자료를 참조하였다.

$$WECPNL = \overline{EPNL} + 10 \log N - 39.36 \quad (7)$$

- $N = N_1 + 5N_2 + 10N_3$ (항공기의 등가 통가횟수)
- N_1 = 07~19시까지의 운항횟수
- N_2 = 19~22시까지의 운항횟수
- N_3 = 22~07시까지의 운항횟수

1년 평균 \overline{WECPNL} 은 식 (8)로 나타낸다.

$$\overline{WECPNL} = 10 \text{LOG}[(1/365) \sum_{i=1}^{365} 10^{0.1 \times WECPNL_i}] \quad (8)$$

- $WECPNL_i$ = i일에 대한 WECPNL 값

군 겸용 공항에 이착륙하는 군 항공기의 소음은 민간 항공기보다 평균적으로 27.8 WECPNL 크다. 본 연구의 목적은 민간 공항에 대해서 생산성을 측정하는 것이 목적이어서 군 항공기의 소음은 제외하였다.

4.2.3 공항의 잠재수요

공항의 수요는 다양한 요소에 의해서 결정된다. 배후 도시의 인구, 소득수준(가처분 소득, GDP), 도심까지의 거리, 기업 종사자수, 외국인 관광객 수 등이 있다. 공항에서 반경 30km 안의 도시는 공항 수요에 직접적인 영향을 끼치며, 60km 안의 도시는 간접적인 영향을 끼친다. 본 연구에서는 영향권 내에 있는 도시들의 지방세 및 인구수를 고려하였다. 지방세는 각 도시의 소득수준에 비례하기 때문에 GRDP의 공항수요 관련 지표로 선정해도 무관할 것이다.

$$ADI_a = \sum_{i=1}^n (P_i + T_i) + \sum_j^m \alpha (P_j + T_j) \quad (9)$$

- ADI_a = 공항 a의 잠재수요 지표
- P_i, P_j = 반경 30km, 60km안의 도시인구
- T_i, T_j = 반경 30km, 60km안의 지방세
- α = 반경 60km의 도시에 대한 계수(0.5)

5. 실증분석

소음, 온실가스 및 공항의 잠재수요를 고려했을 때 공항의 생산성을 분석하였다. Case I은 이전 연구에서 일반적으로 진행되었던 요소를, Case II는 환경요소인 소음 및 온실가스를, Case III는 공항의 통제 불가능한 환경상태를 반영하였다.

• Case I :

투입요소 = WLU 연간처리 능력, 운영비
 산출요소 = WLU, 수익

• Case II

투입요소 = WLU 연간처리 능력, 운영비
산출요소 = WLU, 수익, 소음, 온실가스

• Case III

투입요소 = WLU 연간처리 능력, 운영비, 공항 잠재수요
산출요소 = WLU, 수익, 소음, 온실가스

5.1 전통적인 생산성 분석

공항 생산성 점수는 0.02~11.80점까지 분포되어 있으며, 평균은 2.88점이다. 무한공항은 다른 공항에 비하여 비효율성 점수가 크게 도출되었다. 무안공항은 터미널 면적이 처리되는 WLU에 비해서 과도하게 크고 적자가 크게 발생하기 때문이다. 따라서 잘못된 수요 예측으로 공항 시설에 투자가 과도했으며, 김포, 김해, 제주공항이 상대적으로 높은 생산성을 보여 주었다.

5.2 환경요소를 반영한 생산성 분석

부정적인 산출물인 환경요소를 반영하였을 때, Case I의 결과와 크게 다르다는 것을 확인할 수 있었다. 평균 생산성 점수는 0.07로 Case I에 비하여 많이 향상되었으며 김포, 김해, 제주, 원주 공항이 효율적인 공항으로 나타났다. 김포, 김해, 군산, 무안, 원주공항은 생산성 순위가 향상된 반면 대구, 광주, 청주, 여수, 울산, 사천, 포항공항은 생산성 순위가 하락하였다. 생산성이 크게 향상된 공항은 대체로 온실가스/WLU의 값이 낮았다. 무안공항의 온실가스/WLU의 값은 평균보다 1.26, 포항공항의 온실가스/WLU의 값은 0.72작았다. 반면 무안, 군산, 원주 공항의 소음/WLU의 값은 평균에 비해 많이 높은 반면 생산성 값은

크게 향상되었는데, 이는 DEA의 한계중의 하나인 각 DMU가 최대의 생산성을 갖기 위해서 각 요소의 가중치가 한쪽으로 쏠리는 현상이 반영된 것으로 보인다.

5.3 공항 잠재수요를 반영한 생산성 분석

공항의 잠재수요에 영향을 끼치는 배후 도시의 인구 및 지방세를 고려하였을 때, 지방공항의 생산성이 향상된 것을 알 수 있었다. 여수, 울산, 사천, 포항, 군산공항의 생산성이 향상되었으며 울산을 제외하고는 소규모의 도시에 해당된다. 울산공항은 경우는 대구, 포항, 김해공항으로 인하여 수요의 영향력을 끼칠 수 있는 배후도시가 없기 때문에 생산성이 향상되었다. 여수와 사천공항의 생산성이 크게 향상되었는데 이는 공항수요의 영향력이 가장적기 때문이다.

5.4 기간 분석

2008~2010 3년 동안 공항 생산성 분석을 보면 Case I에 대해서는 2009년에 생산성이 약간 상승하였다가 2010년에 하락하였다. 각 공항의 승객 및 화물 처리 실적은 증가하였지만 김포, 김해, 제주공항을 제외하고는 적자폭이 커졌기 때문에 생산성이 감소하였다. 이는 지방공항이 비효율적으로 운영되고 있다고 볼 수 있다. Case II를 보면 년도에 상관없이 일정하다는 것을 볼 수 있다. 다시 말해서 공항들은 소음 및 온실가스를 감축하기 위해서 노력한다고 볼 수 있다. 공항의 처리실적은 증가하는 반면 소음은 2009년에 비해 2010년에 전체적으로 각 공항에 대한 소음도가 대폭 감소하였으며, 2008년도에 비해 2010년도의 온실가스/WLU의 값은 0.03 감소하였다. 최근 한국공항공사는 온실가스를 줄이기 위해서 온실가스 인벤토리

Table 2. Productivity score and ranks for three cases in 2010

	Case I		Case II		Case III	
	점수	순위	점수	순위	점수	순위
김포	0.27	3	0	1	0	1
김해	0.03	2	0	1	0	1
제주	0.02	1	0	1	0	1
대구	1.23	5	0.04	6	0.04	8
광주	0.46	4	0.07	8	0.07	10
무안	11.80	13	0.11	11	0.11	12
청주	1.88	7	0.07	8	0.07	10
여수	3.24	9	0.10	10	0.02	7
울산	1.86	6	0.06	7	0.06	9
사천	5.35	11	0.19	12	0.01	6
포항	5.57	12	0.21	13	0.16	13
군산	2.35	8	0.004	5	0	1
원주	3.36	10	0	1	0	1
평균	2.88		0.07		0.04	

Table 3. Airport Productivity, 2008~2010

	2008			2009			2010		
	Case I	Case II	Case III	Case I	Case II	Case III	Case I	Case II	Case III
김포	0.34	0	0	0.37	0	0	0.27	0	0
김해	0	0	0	0.03	0.00	0.00	0.03	0	0
제주	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0
대구	0.89	0.04	0.04	1.08	0.02	0.02	1.23	0.04	0.04
광주	0.30	0.02	0.02	0.38	0	0	0.46	0.07	0.07
무안	12.06	0.15	0.15	10.24	0.17	0.17	11.80	0.11	0.11
청주	1.87	0.23	0.23	1.99	0.19	0.19	1.88	0.07	0.07
여수	3.01	0.11	0.01	3.30	0.12	0.02	3.24	0.10	0.02
울산	1.19	0.02	0.02	1.43	0.03	0.03	1.86	0.06	0.06
사천	3.88	0.17	0.03	4.08	0.19	0	5.35	0.19	0.01
포항	5.44	0.12	0.07	5.38	0.17	0.11	5.57	0.21	0.16
군산	3.26	0.01	0.01	3.00	0	0	2.35	0.00	0.00
원주	2.50	0.01	0.06	2.62	0	0	3.36	0	0
평균	2.67	0.07	0.05	2.61	0.07	0.04	2.88	0.07	0.04

및 관리시스템 구축 및 신재생 에너지 및 고효율 시설을 도입하여 친환경 공항으로 나아가고 있다. 공항의 잠재수요는 대도시는 천천히 상승하는데 비하여 중소도시는 정체하거나 하락하고 있다. 특히 김포공항의 잠재수요는 다른 공항에 비하여 상승폭이 컸는데 이는 수도권 집중화 현상이 가속화 되고 있기 때문이다. 이에 따라서 김포공항의 처리실적은 다른 공항에 비해 빠르게 상승하고 있다. Case III은 년도에 따라서 변함이 없음을 볼 수 있는데 이는 대도시 공항의 잠재수요에 패널티 점수를 부여했기 때문이다.

7. 결론

공항의 특성상 긍정적인 산출물과 부정적인 산출물은 동시에 발생한다. 하지만 이전의 국내 연구에서는 환경요소를 고려하여 공항 생산성을 평가한 적이 없었다.

본 논문에서는 DEA 모형에 방향거리함수를 적용하여 환경요소가 공항의 생산성에 미치는 영향은 전통적인 생산성을 분석한 결과와 크게 다르다는 것을 발견하였다. 무안공항은 온실가스/WLU의 값이 낮음으로써 생산성이 크게 향상되었다. 공항들은 부정적인 산출물/긍정적인 산출물의 값에 따라 생산성의 결과가 다르게 도출되었다. 이는 곧 공항에서 항공기 기종을 적절히 혼합하여 운영함으로써 소음 및 온실가스를 줄일 수 있다는 것을 확인하였다. 또한 동일하지 않는 공항 외부환경인 인구 및 지방세를 고려하여 공항의 생산성을 분석한 결과 잠재수요가 적은 공항의 생산성이 향상되는 것을 알았다. 공항의 효율성을 측정할 때 산출변수를 선정하는 것은 매우 중요하다. 환경변수 및 동일하지 않는 외부환경을 제외하고 공항의 효율성을 측정 하면 부정확한 결과를 초래할 수 있

며, 그 결과 공항운영 정책을 정하는데 잘못된 선택을 초래할 수 있다.

마지막으로 본 논문은 다음과 같은 추후 연구가 필요하다. 첫째, 공항의 잠재수요에는 인구, 지방세 및 영향을 끼치는 다양한 요소를 반영해야 한다. 둘째, 본 논문에서는 DEA의 한계인 각 요소의 가중치가 한쪽으로 할당되어 현실적이지 못한 공항 생산성 결과가 도출되었다. 이를 개선하기 위해 투입요소와 산출요소의 가중치를 현실적으로 반영한 연구가 필요하다고 생각한다. 셋째, 본 논문에서는 항공기의 LTO 시간은 모두 동일하다고 가정하고 온실가스 배출량을 도출하였는데, 공항의 규모에 따라 LTO 시간을 다르게 반영하는 연구가 필요하다고 생각한다.

참고문헌

- Alam, J. B. and Karim, D. M. (1998), Air Travel Demand Model For Domestic Air Transportation in Bangladesh, *Journal of Civil Engineering*, **26**(1).
- Alder, N. and Berechman, J. (2001), Measuring airport quality from the airlines' viewpoint : an application of data envelopment analysis, *Transport Policy*, **8**(3), 171-181.
- Alirezadee, M. R. and Afsharian, M. (2007), Model difficulties of DEA technique in the presence of special DMUs, *Applied mathematics and Computation*, **186**(2), 1600-1611.
- Bazargan, M. and Vasigh, B. (2003), Size versus efficiency : a case study of US commercial airports, *Journal of Air Transport Management*, **9**(3), 187-193.
- Boussofiene, A., Dyson, R. G., and Thanassoulis, E. (1991), Applied Data Envelopment Analysis, *European Journal of Operational Research*, **152**(1), 1-15.
- Chambers, R. G., Chung, Y., and Färe, R. (1996), Benefit and distance

function, *Journal of Economic Theory*, **70**, 407-419.

Chambers, R. G., Chung, Y., and Färe, R. (1998), Profit, directional distance function and Nerlovian efficiency, *Journal of Optimisation Theory and Applications*, **98**(2), 351-364.

Chung, Y. H., Färe, R., and Grosskopf, S. (1997), Productivity and undesirable outputs : a directional distance function approach, *Journal of Environmental Management*, **51**(3), 229-240.

Coelli, T., Grifell-Tatje, E., and Perelman, S. (2002), Capacity utilization and profitability : a decomposition of short-run profit efficiency, *International Journal of Production Economics*, **79**, 261-278.

Cooper, W. W., Seiford, L. M., and Tone, K. (2000), *Data Envelopment Analysis : A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-solver Software*. Kluwer Academic Publishers.

Dings, J. M. W., Wit, R. C. N., Leurs, B. A., Davidson, M. D., and Fransen, W. (2003), *External Costs of Aviation*, Berlin, Federal Environmental Agency, Umweltbundesamt.

Färe, R. and Grosskopf, S. *et al.* (1989), Multiateral productivity comparisons when some outputs are undesirable : a nonparametric approach, *The Review of Economics and Statistics*, **72**, 90-98.

Färe, R. and Grosskopf, S. (2000), Theory and application of directional distance function, *Journal of Productivity Analysis*, **13**, 93-130.

Fernandes, E. and Pacheco, R. R. (2002), Efficient Use of Airport Capacity, *Transportation Research Part A*, **36**(3), 225-238.

Gillen, D. and Lall. A. (1997), Developing measures of airport productivity and performance : an application of data envelopment analysis, *Transportation Research Part E*, **33**(4), 261-273.

Graham, G. (2005), Airport benchmarking : a review of the current situation, *Benchmarking : An International Journal*, **12**(2), 99-111.

Hooper, P. and Hensher, D. (1998), Measuring total factor productivity of airports-an index number approach, Institute of Transport Studies Working Paper ITS-WP-98-2, Monash University, Sydney.

Joe, Z. (2003), *Quantitative models for performance evaluation and benchmarking-Data Envelopment Analysis with Spreadsheets and DEA Excel Solver*. Kluwer Academic Publishers.

Martin, J. and Roman, C. (2000), An application of DEA to measure the efficiency of Spanish airports prior to privatization, *Journal of Air Transport Management*, **7**(3), 149-157.

Nehiem, H. S. and Coeilli, T. (2001), The effect of incentive reforms upon productivity : evidence from the Vietamese rice industry, Department of Economics Working paper, University of New England, Armidale.

Parker, D. (1999), The performance of BAA Before and after privatization, *Journal of Transport Economics and Policy*, **33**(Part2), 133-146.

Pels, E., Nijkamp, P., and Rietveld, P. (2001), Relative efficiency of European airports, *Transport Policy*, **8**(3), 183-192

Sakis, J. (2000), An analysis of the operational efficiency of major airports in the United States, *Journal of Operational Research*, **18**(3), 335-351.

Salazar de la Cruz, F. (1999), A DEA approach to the airport productivity function, *International Journal of Transport Economics*, **26**(2), 255-270.

Seiford, L. M. and Zhu, J. (2002), Modeling undesirable factors in efficiency evaluation, *European Journal of Operational Research*, **142** (1), 16-20

Somchai, P. *et al.* (2008), Impact of undesirable outputs on the productivity of US airports, *Transportation Research Part E*, **44**(2), 235-259.

Tolofari, S., Ashford, N., and Caves. R. (1990), The cost of air service fragmentation, Department of Transport Technology Working Paper TT9010, Lough borough University of Technology.

Yoshida, Y. and Fujimoto, H. (2004), Japanese-airport benchmarking with the DEA and endogenous-weight TFP methods : testing the criticism of overinvestment in Japanese regional airports, *Transportation Research Part E*, **40**(6), 533-546.

Yu, M. M. (2004), Measuring physical efficiency of domestic airports in Taiwan with undesirable outputs and environmental factors, *Journal of Air Transport Management*, **10**, 295-303.

Yu, M. M. and Hsu, S. H. (2008), Productivity growth of Taiwan's domestic airports in the presence of aircraft noise, *Transportation Research Pare E*, **44**(3), 543-554.

<부 록>

공항	김포	김해	제주	대구	광주	무안	청주	여수	울산	사천	포항	군산	원주	합 계	LTO 배출계수(Kg)
B737	70585	39868	55550	5800	7554	498	6046	4751	8303	2356	3608	1324	706	206949	2051
B747	2919	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2926	10310
B757	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4349
B767	845	1102	204	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2153	5650
B777	1467	10	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1506	8171
A300	30305	13284	32055	2331	3190	532	836	956	886	2	138	0	0	84515	5492
A330	4709	3954	3004	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	11671	7116
TU154	0	6	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	10	6119
기타	5065	2942	8480	126	0	0	1997	0	0	0	0	0	0	18610	5106
계	115895	61171	99324	8257	10747	1032	8879	5707	9189	2358	3746	1324	706	328335	

Note) Number of ATM in 13 Airports in Korea(2010).