LHI Journal (2013) 4(1):33-42 http://dx.doi.org/10.5804/LHIJ.2013.4.1.033
http://lhi.lh.or.kr

DEA모형을 이용한 지역별 친환경주택단지계획 요소에 따른 온실가스 감축 효율성 분석

Efficiency Analysis of Greenhouse Gas Reduction according to Local Eco-friendly Housing Development Planned Element Using DEA Models

홍하연[1] · 이주형[2]
Ha-Yeon Hong[1] and Joo-Hyung Lee[2]

(Received September 19, 2012 / Revised November 15, 2012 / Accepted November 21, 2012)

요 약

본 연구는 주택단지계획에서 친환경적인 요소의 효율성분석에 관한 실증적 연구의 부족함을 인지하고 전국 시도별 주택단지를 대상으로 녹색건축설계요소와 정책의 투입에 따른 온실가스 저감량 산출의 효율성을 분석하여, 온실가스 배출 저감을 위한 주택단지의 설계요소 및 정책의 활성화 방안을 제시하고자 한다.. 또한 지금까지 조직의 성과를 평가하는데 효과적인 기법으로 인정받고 있는 DEA의 모형을 전국 지역별 친환경주택단지 계획요소와 제도에 적용해 보았다. 연구의 결과, 16개의 지역별 친환경주택단지 CCR 효율성이 1인 지역은 5개로 서울특별시, 인천광역시, 울산광역시, 충청남도, 경상남도였고 나머지 11개의 지역은 비효율적인 것으로 분석되었다. 또한 각각의 비효율적 지역은 효율성 점수에 따라서 준거집단과의 비교를 통해 각 변수별로 달성해야 하는 비율, 측정량이 다르게 도출되었기 때문에 지역별 특성을 드러내어주고 있다. 둘째로, 건축적, 물리적 요인뿐만 아니라 제도적, 외부 환경적 요인 또한 친환경 건축의 온실가스 배출에 영향을 미치고 있으며, 가중치 점수 또한 높게 나왔다. 하지만 그 가중치 수치가 주택품질우수단지 비율에는 미치지 못하는 변수들이 다소 있었기 때문에 아직은 개별 건축물 위주의 평가가 중요하게 여겨진다고 할 수 있다. 따라서 향후 건축물 외에도 운영제도와 외부 환경적 요소에도 많은 관심을 기울여야 할 것을 시사해준다.

주제어 : DEA모형, 자료포락분석, 효율성 분석, 친환경주택단지

ABSTRACT

This study which are recognized that the lack of empirical research about the efficiency of the elements of environmentally friendly housing development planned presented housing design elements and policies to revitalize for the reduction of greenhouse gas emissions by analyzing the effectiveness of reduction of greenhouse gas output. In addition, it used various models of DEA which are accepted until now effective technique to evaluate the performance of the organization. In conclusion, there are effective 5 regionals which are Seoul, Incheon, Ulsan, South Chungcheong Province, South Gyeongsang Province. other regionals was analyzed to be inefficient. The conclusion from this study are as follows: First, in case of 11 regionals which are analyzed to be inefficient, they have to difference plan elements to make up. So each region should establish strategy to complement vulnerability. Second, not only internal architectural factors but institutional, and external environmental factors also affect the reduction of greenhouse gas emissions. And weighted scores also were moderately high. But levels of weighted scores still less than the ratio of Good quality housing. So it can be determined that evaluation of individual architecture still considered important. It need to pay more attention to the operating system and the external environmental factors.

Key words: DEA Model, Data Envelopment Analysis, Efficiency Analysis, Friendly Environment Apartment

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

기후변화와 녹색성장은 인류가 직면한 가장 큰 문제 중의 하나로서 이에 대한 대응은 우리 모두의 책임이다. 특히 온실가스 배출로 인한 기후변화가 심각한 문제로 많은 사람들의 관심의 대상이 되고 있다. 세계 각국에서는 이와 같은 에너지·기후시대가 도래함과 더불어 자원위기와 환경위기에 직

1) 한양대학교 도시대학원 석사과정(주저자: hy520@hanyang.ac.kr)
2) 한양대학교 도시대학원 교수(교신저자: joo33@hanyang.ac.kr)

면하게 되면서 다양한 정책수단을 통해 '저탄소 녹색성장'을 도모하고 있다. 국내에서도 지난 2008년 '저탄소 녹색성장'을 공언하고, 이후 정부와 지자체 차원에서 다양한 정책과 계획을 추진하고 있다.

이 중에서 특히 전체 온실가스 배출원 중의 40%를 차지하는 건물(가정 및 상업부문)부문의 온실가스 감축 방법이 가장 경제적인 것으로 알려지면서 매우 현실적인 방안으로 주목받고 있다 (Synthesis Report, 2007). IPCC 4차 평가보고서에 의하면, 건물(가정 및 상업부문)부문의 온실가스 감축 잠재량이 가장 높게 나타나, 2050년까지 CO_2톤당 감축 비용 25달러 수준의 감축 잠재량은 약 77억 톤에 이를 전망이다(고재경, 2011). 이런 이유에서 선진 국가들을 비롯한 많은 국가들이 건물의 신축, 유지, 보수에서 에너지 효율을 높이기 위한 정책을 시행하고 있다.

정부가 녹색건축정책을 추진하고는 있지만 우리나라는 삶의 질 향상 및 건축물 수 증가 등으로 인해 건축물의 에너지 소비량이 지속적으로 증가할 것으로 예측되고 있으며, 주거에서의 에너지소비 증가율을 살펴보면 연평균 증가율(2000~2006) 기준으로 한국은 3.9 일본 -0.2, 독일0.0, 미국 -1.6의 선진국에 비해 높은 편이다(녹색성장위원회, 2009). 또한 아직까지는 녹색건축의 제도, 설계요소에서의 고려사항이 건물 자체의 경제적, 물리적 관점의 건축 및 관리에만 국한 되어 있어 단지차원의 외부환경이나 소프트웨어적인 제도의 운영 측면에 대한 고려가 부족한 실정이다.

이러한 상황 속에서 친환경주택단지 계획요소의 효율성에 대한 실증적인 연구는 매우 취약하다고 할 수 있다. 또한 기술적 차원 뿐 아니라 제도적 측면까지 고려한 시도별 효율성의 측정은 시도별 계획요소 투입에 따른 공정한 평가기준을 마련해 주며, 각 시도별 개선방안을 마련해 준다는 점에서 본 연구에서의 효율성 측정은 상당한 의의가 있다고 판단된다.

따라서 본 연구는 전국 시도별 주택단지를 대상으로 녹색건축설계요소와 정책의 투입에 따른 온실가스 저감량 산출의 효율성을 분석하여, 온실가스 배출 저감을 위한 주택단지의 설계요소 및 정책의 활성화 방안을 제시하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

연구의 범위와 대상은 전국 16개 시,도를 대상으로 설정하고 진행한다. 분석을 위한 자료는 통계청, 국토해양통계누리, 환경부 환경통계포털 등의 제공 자료를 통해 수집하도록 한다.

또한 본 연구에서 시도하려는 친환경주택단지의 효율성 분석은 투입자원과 산출량의 관계에 대한 검토에서부터 출발할 수 있다. 친환경주택단지의 계획요소에 따른 온실가스의 감축효과는 다종의 투입을 통해 다종의 산출물을 나타내므로 단순한 투입과 산출의 방법으로는 효율성 분석이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 다종의 추입과 산출에 대한 효율성을 추정하는 방식을 택하고자 분석방법으로 자료포락분석(Data Envelopment Analysis:이하 DEA)을 사용한다.

연구목적에 따른 자료분석 방법은 첫째, 연구대상인 친환경주택단지계획요소를 추출하고 상관성 분석을 통해 상관성이 높은 변수를 제거한다. 둘째, 16개 시도의 효율성 측정을 위해 DEA분석을 실시하였다. 셋째, DEA분석을 통한 효율성 있는 시도의 특성을 알아보고, 비효율적 특징을 가진 시도의 개선방향을 제시한다.

2. 이론고찰 및 선행연구 검토

2.1 친환경 계획요소의 평가방법

2.1.1 기존친환경 주택단지 평가방법의 한계

친환경 건축 및 단지계획을 정의하면 "지구환경보전의 관점에서 에너지, 자원, 폐기물 등의 환경부하가 저감되도록 충분히 절약, 순환되고 도시환경 보전을 위하여 자립적이고 안정적인 생태계시스템을 보전, 구축하여 주민이 건강하고 쾌적하게 생활할 수 있도록 계획된 주거단지"라고 할 수 있다 (김용일, 2007).

친환경 주택단지를 평가하는 방법으로는 EIA(Environment Impact Assessment)와 LCA(Life Cycle Assessment)의 두 가지 방법론이 있다(남지연, 2004). EIA는 특정지역에서 주어진 환경에 따라 실제적인 환경적 영향을 평가하는 방법이며, LCA는 평가목적 대상이 사용되는 전 생애 기간 동안의 잠재적인 환경영향을 평가하는 방법으로 친환경 주택단지는 환경 성능 평가를 위한 대상건물로서 이 두 가지 범위 모두에 해당한다. 이 방법들은 건물의 환경성능에 대한 객관적인 정보가 될 수 있다. 하지만 투입된 친환경주택 계획요소와 온실가스의 저감량을 동시에 고려하고, 개별 주택이 아닌 주택단지간의 효율성을 평가하기에는 EIA와 LCA가 적절하지 못한 측면이 있다고 판단되어 효율성을 측정할 수 있는 다른 방법이 요구된다.

2.1.2 효율성의 평가기법

Farrell(1957)은 Koopmans(1951)와 Debreu(1951)의 영향을 받아 효율성을 실증적으로 측정하기 위한 연구를 시도하였다. Farrell의 연구는 1960년대 후반 이후 Aigner와 Chu(1968)에 의해 효율성 측정을 위한 모수적 방법으로 발전하였고 1970년대 후반 Charnes et al.(1978)에 의해 효율성 측정을 위한 비모수적 방법으로 발전하였다.

효율성 측정을 위한 모수적 방법 및 비모수적 방법 모두 이론적 정교화 과정을 거치면서 다양한 변형모형들이 제시되어 왔다. 이 중 Farrell이 제시한 측정 개념에 입각하여 의사결정단위(Decision Making Units: 이하 DMU)간의 상대적 효율성을 측정하는 방법으로 자료포락분석(DEA) 방법이 있다.

이 방법은 1978년 Rhodes가 Cooper의 지도를 받아 미국 Carnegie Mellon대학교의 박사학위논문에서 공공부문 교육프로그램의 효과를 평가한 것을 시작으로 효율성 평가 방법으로 활용되기 시작했다. 이 방법은 연구자인 Charnes, Cooper, Rhodes의 첫 글자를 따서 CCR모형이라고도 불린다.

2.1.3 DEA의 방법론적 특징

비모수적 효율성 측정방법 중에서 DEA는 통계학적으로 회귀분석법과는 달리 사전적으로 구체적인 함수 형태를 가정하고 모수를 추정하는 것이 아니고, 선형계획법에 근거하여 일반적으로 생산가능 집합에 적용되는 몇 가지의 공준을 가지고 평가대상이 경험적인 투입요소와 산출물간의 자료를 이용하여 경험적 효율적 프론티어를 도출한 후 평가대상들이 효율성 프론티어 상에서 얼마나 떨어 있는지의 여부로써 비효율성을 측정한다.

특히, DEA분석은 각기 상이한 단위로 측정된 투입 및 산출요소들을 임의적 가중치를 부여하지 않고 측정된 그대로 모형에 포함시킬 수 있으며, 측정모형도 특정한 함수형태를 전제로 하지 않는다는 특징을 갖고 있기 때문에 기존의 공공부문의 효율성 평가에 매우 유용한 것으로 인식되어 왔다(이재길, 2007).

또한 DEA분석은 측정의 타당성뿐만 아니라 다른 측정방법들이 제시하지 못하는 정보를 추가적으로 제공해 준다는 점에서 그 유용성이 인정되고 있다. DEA분석은 비효율적인 조직단위가 효율적인 조직단위로 되기 위하여 참조할 수 있는 준거집단을 제시해주며, 또한 비효율적인 조직단위별로 어떤 투입요소와 산출요소에서 어느 정도의 비효율성이 존재하는지를 제시해 줌으로써 비효율적인 조직단위가 효율적인 조직단위로 되기 위하여 취해야 할 투입감소분과 산출 증가분을 책정하는데 도움을 줄 수 있다.

2.1.4 본 논문에서 DEA 방법론의 활용

본 연구에서는 DEA모형 중 CCR모형을 사용하고 투입-산출 변수의 영향력을 알아본다. DEA 모형의 목표 중 하나는 효율성이 약한 DMU의 효율성 개선을 위하여 벤치마킹 대상을 찾는 데 있으므로 본 연구에서 시·도별 친환경주택단지계획요소의 건물 내·외부의 적절한 계획요소 및 관련제도를 투입요소로 하여 분석하고, 계량적 수치로 나타난 결과를 통해 시·도별 거시적 관점에서의 효율적 친환경주택단지 계획요소 투입비율을 도출한다.

2.2 선행연구 검토

2.2.1 선행연구 검토

본 연구와 관련된 친환경주택단지계획요소의 효율성분석에 관한 기존 연구는 녹색건축에 관련한 연구와 효율성분석에 관한 연구, 온실가스발생량 산출 등의 범주로 나눌 수 있다. 선행연구들은 일반적으로 건축물의 구성·설계 요소에 따른 탄소 배출 저감을 실증적으로 분석하였고, 결론적으로는 에너지사용에 따른 탄소 배출 저감에 관한 분석을 통해 저탄소 녹색건축 지향적 제도·설계 조성의 필요성을 제시하고자 하였다.

녹색건축에 관한 연구는 녹색건축 인증제도와 녹색건축 설계요소에 관한 연구로 분류할 수 있는데, 녹색건축 인증제도에 관한 연구로는 서혜수 등(2005)는 친환경 인증제도로서 인증된 건물에 거주하는 거주자의 중요도, 만족도 조사를 통해 부위별 연관류율, 열교, 급탕 에너지 등의 요소 개선이 필요하다고 하였고, 송승영과 이수진(2007)은 국내·외 건축물 평가 제도별 특성 및 현황분석을 통해 향후 에너지효율등급 인증제도 의무화를 대비한 인센티브 개선을 위한 대비책을 마련하고자 하였다.

설계요소와 관련된 연구로는 도시, 건축적 측면에서 기후변화에 통합적으로 대응하기 위한 조성방안을 제시하였다. 반영운 등(2011)는 전문가 설문조사를 통하여 공간 계획적 요소 뿐 아니라 비물리적 계획요소를 제시하였으며, 송승영 등(2008)의 연구에서는 국내 각 브랜드별 친환경인증 공동주택을 대상으로, 친환경 건축물 인증심사기준 상의 각 평가부문 및 항목별 심사결과와 설계 시공 현황을 파악하였다.

또한 건축물의 효율성을 검증하는 연구 분야에서 이재혁 등(2009)는 공동주택 부문 에너지 효율등급 평가방법에 이용되고 있는 간이 평가도구를 적용하여 방이, 창호, 열관류율, 단열재 두께 등의 효율성을 검증하였다. 이향아 등(2010)는 탄소포인트 제도의 원리인 전기·수도사용 데이터를 이용하여 에너지 사용량 비교분석을 이용한 탄소포인트 제도의 효율성을 평가하였다.

온실가스 저감량 산출에 관한 연구로 황영섭과 임영문(2010)은 단위 범위 전체의 전기 사용량이나 가스 사용량을 토대로 베이스라인인 CO_2배출량을 계산하는 방법을 제안했고, 김홍배와 김재구(2010)는 산업부문, 수송부문, 가계부문, 흡수부문 이산화탄소의 배출원단위 도출 및 민감도 분석을 통해 도시 내 탄소 발생 메커니즘에 따른 탄소 발생량을 산정하고 이를 바탕으로 저탄소 도시 개발을 위한 구체적 개발전략을 제시하였다.

2.2.2 본연구의 착안점

기존 선행연구검토 결과 녹색건축, 효율성 분석, 온실가스 발생량 산출 등에 관한 연구를 통해 녹색건축의 효율성 및 개선방향을 제시하였다.

하지만 기존의 연구는 건축물의 내부 설계요소만을 중시한 효율성 및 온실가스 저감량 산출 연구를 수행하였으며, 외부공간과 제도 등을 통합한 효율성을 분석하지는 못하였다고

표 1. 투입 및 산출 요소에 대한 세부 내역

항 목				자 료		자 료
구 분	대분류	중분류	소분류	원 자 료	가 공 자 료	출 처
투입	탄소 저감	토지 이용	친환경적 밀도	지역별 동수	주택 동수 밀도 (지역별 동 수/지역별 단지면적)	통계청
				지역별 단지면적		
		교통	대중교통 중심 교통계획	지역별 대중교통 인접현황	대중교통 인접밀도 (지역별 대중교통 인접현황/지역별 단지면적)	
				지역별 단지면적		
		신재생 에너지	신재생에너지 보급	신재생에너지 보급량	신재생에너지보급밀도 (신재생에너지보급량/지역별단지면적)	
				지역별 단지면적		
		에너지 저감 건축	에너지저감 기술 적용	친환경인증주택개수	주택품질우수단지 비율 (친환경+주택성능우수단지개수/지역별 단지수)	환경부
				주택성능등급우수단지 개수		
				지역별 단지수		통계청
	탄소 흡수	녹지, 생태	도시공원 면적	도시공원면적	단지별 공원면적 비율 (도시공원면적/지역별 단지면적)	국토해양부
				지역별 단지면적		통계청
		수자원	투수성 포장	지역별 포장률	지역별 포장비율	국토해양부
	운영	제도	운영제도 활성화	탄소포인트제 참여가구수	탄소포인트제 참여 가구 비율 (탄소포인트제 참여가구수/ 지역별 가구수)	환경부
				지역별 가구수		통계청
산출	오염물질 발생량			지역별 CO 배출량	지역별 CO, NOx, SOx 감축량 (측정 이전3개년도 평균치-측정년도 측정치)	환경부
				지역별 NOx 배출량		
				지역별 SOx 배출량		

판단된다.

따라서 본 연구는 건축물의 내부공간에 대한 효율성에 대한 부분은 친환경인증을 받은 단지로 대신하고, 그 밖의 도시공원밀도, 대중교통접근도 등을 통한 외부공간의 검토, 제도적 운영 분야를 대표적으로 탄소발자국 제도 참여가구 수 등으로 종합적으로 검토하여 효율성을 분석한다는 것에서 기존 연구와 차별성이 있고, 기업 및 공공사업 등에 사용되는 자료포락분석(DEA)의 투입-산출 프로세스를 적용하여 건축 및 도시 분야에 활용하여 본다는 점에서 의의가 있다.

3. DEA를 이용한 실증분석

3.1 자료수집

지역별 녹색건축단지의 설계요소별 효율성을 검증하기 위해 표 1과 같이 탄소 저감, 탄소 흡수, 운영에 근거한 데이터를 선정하였다. 지역은 서울특별시, 경기도, 인천광역시 등 수도권과 부산광역시, 대구광역시, 광주광역시 등 비수도권을 포함한 총 16개의 시도를 DMU로 지정하였으며, 평가지표 선정의 기준은 탄소 저감효과, 조성비용, 적용 가능성 등을 고려하여 탄소를 저감하거나 흡수하는 직접적인 탄소 중립 도시의 세부 요소를 도출한 기존 연구의 기준(반영운 등, 2008)을 참고하여 탄소 저감, 탄소 흡수와 소프트웨어적인 운영 측면을 투입요소로 삼고, 산출요소는 대표적 온실가스로 꼽히는 일산화탄소, 질산화물, 황산화물의 감축량으로 측정하였다.

녹색건축단지의 설계요소별 효율성 검증은 DMU가 효율적 또는 비효율적인지를 파악하는 것이므로 DEA변수는 세부적인 모든 항목을 설명할 수는 없지만 탄소 저감형 도시조성의 계획요소로서 대표성과 효율성 평가의 목적에 부합되는 변수를 선정하였다.

토지이용, 교통, 신재생에너지를 검토하기 위한 지표는 통계청의 아파트 주거환경통계와 신재생에너지보급실적조사 중 2010년의 데이터를 추출하였으며, 에너지저감건축 항목과 운영 제도 항목에 있는 탄소포인트제 참여 가구 수, 지역별 오염물질 배출량은 환경부의 2011년 환경통계연감과 환경통계포털 상 데이터 중 2010년의 데이터가 사용되었다. 탄소 흡수 차원에서의 도시공원면적과 지역별 포장률은 국토해양부의 통계포털사이트인 국토해양통계누리의 2010년 데이터를 사용하였다.

추출된 원 자료를 가공하여 종합적으로 투입요소로 주택동수 밀도, 대중교통 인접 밀도, 신재생에너지 보급 밀도, 주택품질우수단지 비율, 단지별 공원면적 비율, 지역별 포장비율, 탄소포인트제 참여 가구 비율을 설정하였고, 산출요소로는 현재 운영되고 있는 탄소 포인트 제도에서의 온실가스 감축량 산정 방법[1]을 적용하여 온실가스 배출에 영향을 미치는 일산화탄소와 질소산화물, 황산화물의 배출량을 2006년부터 2008년까지의 3개년 평균을 내어서 2009년 배출량과의 차이를 내어 온실가스 감축량으로 도출하였다.

1) 탄소포인트제도의 인센티브 포인트의 산정방법은 가입일 이전 2년간의 월별 평균 사용량 대비 금월 사용량의 비율로 산정되는 것으로, 전기 등 지방자치단체가 시행하는 개별 항목별(전기, 상수도, 도시가스 등)온실가스 감축률에 따라 포인트를 부여하여 포인트 당 2원 이내의 인센티브를 지급한다.

표 2. 투입 및 산출 요소에 대한 세부 내역

	동수밀도	대중교통 밀도	단지별 재생 에너지보급량	주택품질우수 단지비율	도시공원 밀도	도로 포장율	탄소포인트제 참여비율	CO절감량	NOx 절감량	SOx 절감량
동수밀도	1.0									
대중교통밀도	0.976**	1.0								
단지별 재생에너지 보급량	-0.131	-0.005	1.0							
주택품질 우수단지비율	-0.203	-0.164	-0.238	1.0						
도시공원밀도	0.938**	0.943**	0.164	-0.320	1.0					
도로포장율	0.315	0.368	0.022	-0.126	0.292	1.0				
탄소포인트제참여비율	0.279	0.377	0.478	0.112	0.396	0.114	1.0			
CO절감량	-0.458	-0.430	0.382	0.100	-0.315	0.212	0.111	1.0		
NOx절감량	0.345	0.344	-0.142	-0.321	0.281	0.117	-0.075	-0.188	1.0	
SOx절감량	0.133	0.103	-0.087	0.022	0.156	-0.078	-0.138	0.144	0.656**	1.0

3.2 변수 간 상관관계분석

투입 및 산출 변인간의 상관관계를 분석한 결과다음과 같은 결과가 도출되었다. 다음 표 2는 person상관계수에 의한 상관성을 나타내주고 있다. 이 상관분석 자료를 통해 어떤 변수가 포함되어야 할지 선택이 가능하다. 만약 어떤 하나 혹은 그 이상의 변수가 다른 변수와 매우 강한 상관관계를 가지고 있다면, 그 변수가 분석에서 결과 값에 영향을 미치기 때문에 상관성이 강한 투입 및 산출변인을 감소시켜 DMU간의 차별을 보다 명확하게 할 수 있게 된다.

따라서 상관분석에서 상관계수가 높은 동수밀도와 대중교통 밀도, 도시공원밀도, 그리고 SOx 저감량을 제거하여 효율성 분석을 보다 명확히 하였다.

DEA모형에 사용된 투입 및 산출물의 변수의 수와 분석대상 DMU의 수에는 일정 관계식이 존재하는데, 분석대상 DMU의 개수 N은 분석에 이용되는 산출물의 개수인 Y와 투입물 개수 X를 합한 값의 2배 이상이면 분석에 설명력이 있다고 할 수 있다(Fare and Grosskof, 1994). 본 연구에 최종적으로 사용된 투입물의 개수는 4개이고, 산출물의 개수는 2개이므로 조사한 DMU 16개는 위의 조건을 충족한다고 할 수 있다.

3.3 DMU간 기술효율성 분석

상관분석 이후 표 3과 같이 효율치 결과가 나왔으며, 각각의 DMU 평가에 사용된 준거집단의 준거DMU 빈도수를 함께 표기하였다. 분석결과 각 지역별 효율성 점수는 아래와 같다. 효율성 점수(CCR효율)가 100인 지역들은 효율적인 운영을 하고 있다는 것을 볼 수 있었다.

준거집단이란 유사한 투입 구조를 갖고 있어 비교가 효율적인 집단을 의미한다(이혜경, 2009). 이 준거집단은 매우 중요한 의미를 지니는데, 각 DMU의 효율성과 비효율성의 정도 그리고 비효율적 부문이 준거집단을 통해서 상대적으로 측정되기 때문이다. 준거집단은 두 가지 측면에서 분석될 수 있는데, 하나는 효율적 DMU가 준거집단을 출현한 횟수와 관련할 것이며, 다른 하나는 각각의 비효율적 DMU에 대하여 준거집단이 되는 DMU들에 관련한 것이다(김성종과 고승희, 2001).

표 3. 지역별 효율성 분석

DMU	지역	효율성 점수	효율성	준거 집단	준거집단 횟수	순위
1	서울특별시	100.00	E		1	5
2	부산광역시	80.98	IE	DMU 4		7
3	대구광역시	73.74	IE	DMU 11,15		8
4	인천광역시	100.00	IE		3	3
5	광주광역시	34.27	IE	DMU 4,15		10
6	대전광역시	88.59	IE	DMU 11,15		6
7	울산광역시	100.00	E		4	2
8	경기도	53.09	IE	DMU 4,15		9
9	강원도	-1.37	IE	DMU 7		15
10	충청북도	-0.25	IE	DMU 7		13
11	충천남도	100.00	IE		3	3
12	전라북도	13.10	IE	DMU 11,15		11
13	전라남도	-0.97	IE	-		14
14	경상북도	-1.60	IE	DMU 7		16
15	경상남도	100.00	IE		5	1
16	제주도	5.42	IE	DMU 1,7		12

* E : efficiency : 효율성 있음
* IE : inefficiency : 효율성 없음

본 연구에서는 효율적인 5개의 DMU는 11개의 비효율적 DMU의 준거집단이 되며, 준거집단으로의 횟수가 많을수록 대부분의 변수에서 효율적임을 의미하는데 DMU 15인 경상남도가 가장 효율적이며, 경상북도가 가장 효율성이 약한 것으로 나타났다. 효율적으로 판명된 DMU에 대한 신뢰도는 몇 회나 비효율적 DMU에 대한 준거집단으로 증장하였는가에 따라 판단할 수 있다. 즉 준거집단으로 출현한 횟수가 많

표 4. 효율적 지역의 가중치 분석

DMU	지역	단지면적당 신재생에너지	주택품질 우수단지비율	도로 포장율	탄소포인트 참여 가구 비율	CO 절감량	NOx 절감량
1	서울특별시	0.24	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
4	인천광역시	0.38	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00
7	울산광역시	0.00	0.11	0.01	0.00	0.00	0.00
11	충청남도	0.23	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00
15	경상남도	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
평균		0.17	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00

은 DMU일수록 상대적이 아니라 진정으로 효율적일 가능성이 높다는 것이다(Smith and Mayston, 1987).

DMU 1인 서울특별시의 경우는 비록 효율적으로 평가되었으나 타 DMU 평가에 1회에 지나지 않는다는 것은 DMU 1의 투입요소-산출물 배합이 판이하여 유사한 DMU의 수가 상대적으로 작았고, 이로 인해 DMU 1의 상대적 효율성 평가 시 비교대상의 수가 작아서 쉽게 효율적으로 평가되었으나 규범집단에 포함될 수는 없다는 것을 의미한다.

가장 1순위로 분석된 DMU 15인 경상남도는 단지면적당 신재생에너지 보급 비율, 탄소포인트 참여비율 등이 다른 시도에 비해 크게 많다거나 오염물질 절감량이 다른 시도에 비해 많지 않다. 하지만 다수의 투입변수와 산출변수를 통해 효율적인 지역으로 분석된 것은 그 의미가 크다고 할 수 있다.

3.4 효율적 의사결정단위의 결과 분석

효율적 시도로 분리된 5개 DMU는 서울특별시와 인천광역시, 울산광역시, 충청남도와 경상남도로 분석되었다. 이 중 가장 많은 준거집단으로 분석된 순으로 나열하면 경상남도, 울산광역시, 인천광역시와 충청남도, 마지막으로 서울특별시이다.

이들 지역에서 가장 가중치가 높았던 변수는 단지면적당 신재생 에너지와 주택품질 우수단지비율, 탄소포인트 참여가구 비율 순서였다. 산출치의 가중치는 CO와 NOx의 가중치 모두 부여되지 않았다.

지역별로 보았을 때, 서울특별시는 단지면적당 신재생에너지가 가장 높고, 탄소포인트 참여가구 비율 순이었으며. 인천광역시도 같은 순으로 가중치 값을 보였다. 울산광역시 같은 경우는 주택품질 우수단지비율과 도로포장율이 결과 값에 영향을 미친 변수로 나타났으며, 충청남도의 경우 단지면적당 신재생에너지의 가중치가 가장 높았고 탄소포인트 참여가구 비율이 그 뒤를 이었다.

준거집단으로 가장 많이 지정된 경상남도의 경우 주택품질우수단지비율에만 가중치 값이 주어졌다. 자세한 내용은 표 4와 같다.

표 5. DMU 2 의 이상치 결과표

효율치		0.8098			
준거집단		DMU 4			
변수		관찰치	효율점 가상지점 변수값	실제측정치와 목표치의 차이	잠재적 개선도(%)
투입 요소	단지면적당 신재생에너지	0.42	1.10	-0.68	-162
	주택품질 우수단지비율	11.46	8.29	3.17	27.7
	도로포장율	96.9	91.1	5.8	6.0
	탄소포인트 참여 가구 비율	10.15	4.38	5.17	50.9

3.5 비효율적 의사결정단위의 결과 분석

효율성이 약한 시·도로 분리된 11개 DMU에 대하여 구체적으로 분석하여 잠재적 개선도(potential improvements)를 알아보았다. 잠재적 개선도는 그 값이 클수록 부족함을 의미하는 것으로, 투자할 가치가 있는 것으로 볼 수 있고, 반대로 그 값이 작을수록 적은 노력으로도 개선될 가능성이 있는 것이다.

효율적 가상지점의 변수 값은 준거집단의 변수 값을 나타내는데, 단일 준거집단의 경우 해당 준거집단의 투입요소 값을 대입하였으며, 다중 준거집단이 분석된 경우 선형 회귀분석을 통해 해당 DMU에 영향을 미치는 정도의 Lamda 값을 대입하여 투입요소의 값을 산출하였다. 먼저 효율성이 약한 DMU 2인 부산광역시의 경우에 적용하여 살펴보면 다음 표 5와 같다. 부산광역시의 준거집단은 인천광역시였으며, 준거집단과 비교했을 때 효율성 개선을 위해 단지면적당 신재생에너지의 비율을 높이고, 주택품질우수단지의 비율, 도로 포장율, 탄소포인트 참여가구 비율을 감소시켰을 때 효율적 프론티어에 도달할 수 있다.

DMU 3인 대구광역시의 경우의 준거집단은 충청남도와 경상남도였다. 이들의 Lamda 값은 각각 0.234와 0.778인데, 대구광역시의 경우 경상남도가 좀 더 벤치마킹에 가까운 지역이라는 것으로 해석될 수 있다. 준거집단과 비교했을 때 친환경 인증단지의 비율을 18.06%, 탄소포인트 참여 가구 비율을 163,43% 증가시킬 필요가 있고, 단지면적당 신재생에너

표 6. DMU 3 의 이상치 결과표

효율치		0.7374			
준거집단		DMU 11, 15			
Lamda		0.234	0.778		
변수		관찰치	효율점 가상지점 변수값	실제 측정치와 목표치의 차이	잠재적 개선도 (%)
투입 요소	단지면적당 신재생에너지	5.43	4.84	0.59	10.87
	주택품질 우수단지비율	29.41	34.72	-5.31	-18.06
	도로포장율	98.90	70.98	27.92	28.23
	탄소포인트 참여 가구 비율	2.68	7.06	-4.38	-163.43

표 7. DMU 5 의 이상치 결과표

효율치		0.4685			
준거집단		DMU 4, 15			
Lamda		-8.274	9.134		
변수		관찰치	효율점 가상지점 변수값	실제 측정치와 목표치의 차이	잠재적 개선도 (%)
투입 요소	단지면적당 신재생에너지	0.86	39.51	-38.65	-4494.19
	주택품질 우수단지비율	211.11	252.12	-41.01	-19.43
	도로포장율	99	-126.26	225.26	227.54
	탄소포인트 참여 가구 비율	11.09	39.76	-28.67	-258.52

지의 비율은 10.87%, 도로 포장율은 28.23% 초과 투입되고 있다. 부족한 점은 보완시키고 초과 투입량을 감소시켰을 때 온실가스의 절감량이 증대될 것이라는 분석이 나온다. 대구광역시의 경우 제도와 운영 측면에서 더욱 많은 관심을 기울여야 할 것이라고 판단된다.

DMU 5인 광주광역시의 경우의 준거집단은 인천광역시와 경상남도였다. 이들의 Lamda 값은 각각 -8.274와 9.134인데, 광주광역시의 경우 경상남도가 좀 더 벤치마킹에 가까운 지역이라는 것으로 해석될 수 있다. 준거집단과 비교했을 때 도로 포장율이 227.54% 초과로 조성되어 있는 것을 알 수 있으며, 나머지 변수에 관해서는 모두 부족한 양을 증가 시켜야 준거집단에 가까이 접근할 수 있을 것이다.

DMU 6인 대전광역시의 경우의 준거집단은 대구광역시와 같은 충청남도와 경상남도였다. 이들의 Lamda 값은 각각 0.438와 0.577로, 경상남도가 좀 더 벤치마킹에 가까운 지역이라는 것으로 해석될 수 있다. 준거집단과 비교했을 때 친환경 인증단지의 지정과 도로포장율의 조성에 초점을 맞추기보다는, 단지면적당 신재생에너지의 보급량과 탄소포인트 참여가구 비율을 증가시키면 온실가스의 절감량이 증대될 것이다.

표 8. DMU 6 의 이상치 결과표

효율치		0.8859			
준거집단		DMU 11, 15			
Lamda		0.438	0.577		
변수		관찰치	효율점 가상지점변 수값	실제 측정치와 목표치의 차이	잠재적 개선도 (%)
투입 요소	단지면적당 신재생에너지	0.74	4.38	-3.64	-491.89
	주택품질 우수단지비율	37.5	34.21	3.29	8.77
	도로포장율	99.7	72.45	27.25	27.33
	탄소포인트 참여 가구 비율	0.68	5.89	-5.21	-766.18

표 9. DMU 8 의 이상치 결과표

효율치		0.5858			
준거집단		DMU 4, 15			
Lamda		-11.107	11.848		
변수		관찰치	효율점 가상지점 변수값	실제 측정치와 목표치의 차이	잠재적 개선도 (%)
투입 요소	단지면적당 신재생에너지	3.35	50.84	-47.49	-1417.61
	주택품질 우수단지비율	16.09	322.63	-306.54	-1905.16
	도로포장율	84.8	-197.89	282.69	333.36
	탄소포인트 참여 가구 비율	4.89	49.93	-45.04	-921.06

표 10. DMU 9 의 이상치 결과표

효율치		-0.0137			
준거집단		DMU 7			
변수		관찰치	효율점 가상지점 변수값	실제 측정치와 목표치의 차이	잠재적 개선도 (%)
투입 요소	단지면적당 신재생에너지	11.4	64.85	-53.45	-468.86
	주택품질 우수단지비율	84.62	0	84.62	100.00
	도로포장율	72	96.8	-24.8	-34.44
	탄소포인트 참여 가구 비율	10.27	16.93	-6.66	-64.85

DMU 8인 경기도의 경우, 준거집단은 충청남도와 경상남도였다. 이들의 Lamda 값은 각각 -1.107와 11.848로, 개선방향은 다르지만 각각 영향을 주는 지역이라는 것을 알 수 있다. 준거집단과 비교했을 때 주택품질우수단지의 지정과 도로 포장율의 조성보다는, 단지면적상 신재생에너지의 보급과 탄소 포인트 참여가구 비율을 높이는 것이 준거집단에 달성하는 것에 더욱 가까워 질 것이다.

DMU 9인 강원도의 경우, 준거집단은 울산광역시였다. 준

표 11. DMU 10 의 이상치 결과표

효율치		-0.0025			
준거집단		DMU 7			
변수		관찰치	효율점 가상지점 변수값	실제 측정치와 목표치의 차이	잠재적 개선도 (%)
투입 요소	단지면적당 신재생에너지	7.22	64.85	-57.63	-798.20
	주택품질 우수단지비율	130.77	0	130.77	100.00
	도로포장율	73.3	96.8	-23.5	-32.06
	탄소포인트 참여 가구 비율	7.23	16.93	-9.7	-134.16

표 12. DMU 12 의 이상치 결과표

효율치		0.1310			
준거집단		DMU 11, 15			
Lamda		1.821 -0.936			
변수		관찰치	효율점 가상지점변 수값	실제 측정치와 목표치의 차이	잠재적 개선도 (%)
투입 요소	단지면적당 신재생에너지	25.57	0.49	25.08	98.08
	주택품질 우수단지비율	66.67	25.51	41.16	61.74
	도로포장율	72.7	72.09	0.61	0.84
	탄소포인트 참여 가구 비율	4.25	-3.24	7.49	176.24

표 13. DMU 14 의 이상치 결과표

효율치		-0.0160			
준거집단		DMU 7			
변수		관찰치	효율점 가상지점변 수값	실제 측정치와 목표치의 차이	잠재적 개선도 (%)
투입 요소	단지면적당 신재생에너지	3.34	64.85	-61.51	-1841.62
	주택품질 우수단지비율	58.97	0	58.97	100.00
	도로포장율	73.2	96.8	-23.6	-32.24
	탄소포인트 참여 가구 비율	5.64	16.93	-11.29	-200.18

표 14. DMU 16 의 이상치 결과표

효율치		0.0542			
준거집단		DMU 1, 7			
Lamda		1.758 -1.355			
변수		관찰치	효율점 가상지점변 수값	실제 측정치와 목표치의 차이	잠재적 개선도 (%)
투입 요소	단지면적당 신재생에너지	25.39	-84.37	109.76	432.30
	주택품질 우수단지비율	0	18.36	-18.36	-
	도로포장율	83.9	44.64	39.26	46.79
	탄소포인트 참여 가구 비율	5.17	-1.88	7.05	136.36

거집단과 비교했을 때 단지면적당 신재생에너지의 보급량의 비율을 가장 많이 증가시키고, 탄소포인트 참여가구 비율, 도로포장율을 증가시키는 것이 가장 효율적 프론티어에 접근할 수 있다.

DMU 10인 충청도는 강원도와 같이 준거집단은 울산광역시였다. 준거집단과 비교했을 때 단지면적당 신재생에너지의 보급량의 비율을 증가시키고, 탄소포인트 참여가구 비율, 도로포장율 순으로 증가시키는 것이 효율적 프론티어에 접근할 수 있다.

DMU 12인 전라북도의 경우의 준거집단은 충청남도와 경상남도였다. 이들의 Lamda 값은 각각 1.821과 -0.935로 분석되었다, 전라북도의 경우 준거집단과 비교했을 때 관찰치과 효율적 가상지점의 변수 값에서 모든 변수가 초과 달성되어 있는 것으로 분석되었다. 전라북도의 경우 상대적 효율성 측면에서 보았을 때 과다측정 되어 효율성이 약하다고 분석할 수 있으며, 적정비율을 맞출 필요성이 보인다고 판단된다.

DMU 14인 경상북도는 DMU 중에서 가장 낮은 효율성을 보여주고 있다. 준거집단인 울산광역시와 비교했을 때 주택품질우수단지 비율을 제외한 모든 분야를 증가시켜야 하는 것으로 분석된다. 효율성 점수가 가장 낮았기 때문에 가장 많은 변화량을 보여주어야 효율적 프론티어에 접근할 수 있다. 그 중에서도 단지면적당 신 재생에너지의 보급을 가장 많이 증가시켜야 할 것이다.

마지막으로 DMU 16인 제주도는 5.42의 낮은 효율성을 보여주고 있다. 준거집단은 서울특별시와 울산광역시가 1.758과 -1.355의 비율로 영향을 미치고 있다. 제주도는 서울특별시의 효율적 프론티어에 좀 더 가까이 접근하고 있다. 준거집단들에 비교했을 때 주택품질 우수단지 비율을 제외한 모든 분야가 초과달성되어 있다. 단지면적당 신재생에너지, 도로포장율과 탄소포인트참여 가구 비율을 증가시키는 것 보다는, 주택품질 우수단지 조성이 효율적 프론티어에 보다 더 가까워질 수 있다. 제주도의 경우 지형의 특성상 신재생에너지의 보급비율이 높기 때문에 효율적 프론티어와 가까워지기 위한 초과달성의 비율이 높은 것으로 판단된다.

4. 결론 및 시사점

본 연구는 지금까지 조직의 성과를 평가하는데 효과적인 기법으로 인정받고 있는 DEA의 다양한 모형을 전국 지역별 친환경주택단지 계획요소와 제도에 적용해 보았다.

현재 조직의 성과측정을 위해 널리 사용되고 있는 DEA 모형은 전통적인 효율성 기법과는 달리 다중 투입물과 다중 산출물을 적용할 수 있기 때문에 항공사, 은행, 보험회사, 학교, 도서관 등 민간기관, 사업 및 공공기관, 사업에 광범위하게 적용되고 있다. 그러나, 현재 저탄소 친환경 녹색주택단지의 중요성이 부각되는 가운데 친환경주택단지계획효율성을 분석한 연구는 찾아보기가 힘들다. 따라서 본 연구에서는 다양한 DEA 모형을 대상지역에 적용하였다.

분석 결과, 16개의 지역별 친환경주택단지 CCR효율성이 1인 지역은 5개로 서울특별시, 인천광역시, 울산광역시, 충청남도, 경상남도였고 나머지 11개의 지역은 비효율적인 것으로 분석되었다. 이들 지역은 평균적으로 효율적 프론티어를 구성하는 것에 NOx 절감량, 도로포장율, 주택품질우수단지 가구 비율, 단지면적당 신재생에너지 보급률 순서로 가중치를 높게 부여하고 있다. 또한 각각의 비효율적 지역은 효율성 점수에 따라서 준거집단과의 비교를 통해 각 변수별로 달성해야 하는 비율, 측정량이 다르게 도출되었기 때문에 지역별 특성을 드러내어주고 있다.

분석을 통한 정책적 시사점은 다음과 같다 .

첫째, 각 지역은 상대적으로 취약점을 보완하기 위한 전략을 수립하여야 한다. 비효율적으로 분류된 11개 지역의 경우 지역별로 보완해야 하는 점이 모두 다르다. 단지면적당 신재생에너지 보급비율, 도시공원 밀도, 탄소포인트 제도 참여 가구 비율을 대부분 증가해야 하는 것으로 보완방향이 나왔지만 우수 주택품질 단지 비율 같은 경우 효율적 가상지점의 변수 값이 관찰치보다 적은 경우도 있었다. 이 경우 주택단지를 평가하는 수단이 중복, 과다 지정된 경우라고 할 수 있는데, 제도상 통합 등의 정책적인 해결방안을 수립하는 것이 필요하다고 할 수 있다.

둘째, 기존 친환경건축 평가 시 주택단지 개별건축위주의 평가가 이루어진 것을 보완하기 위해 본 연구에서는 제도, 외부환경의 요소들을 투입하여 분석하였다. 그 결과 제도적, 외부환경적 요인들 또한 영향을 미치고 있으며, 가중치 점수 또한 높게 나왔다. 하지만 그 가중치 수치가 주택품질우수단지 비율에는 미치지 못하는 변수들이 다소 있었기 때문에 아직은 개별 건축물 위주의 평가가 중요하게 여겨진다고 할 수 있다. 하지만 점차 운영제도와 외부 환경적 요소에도 많은 관심을 기울여야 할 것을 시사해준다.

본 연구가 가지고 있는 연구의 의의에도 불구하고 신재생에너지보급량, 도시공원, 도로 포장율 등의 자료는 시,도 단위별로 측정된 자료이기 때문에 100% 단지 기준이라고는 할 수 없다는 점에는 한계가 있다. 특히 DEA분석의 결과는 투입 및 산출요소에 따라서 그 값이 달라질 수 있기 때문에 향후 주택단지 단위로 자료의 구축이 이루어진다면 좀 더 효율성을 정확하게 검증할 수 있는 연구가 될 것이다. 또한 DEA 모형이 가지고 있는 본질적 한계로서 분석의 특성상 상대적 비교이기 때문에 효율적이라고 결과가 도출된 지역이 완벽히 효율적이지 않을 수 있다는 우려가 있다. 향후 규모를 고려한 BCC등의 분석이 함께 이루어진다면 효율성 분석의 신뢰도가 더욱 높아질 것이다.

그럼에도 불구하고 직접적으로 효율성 분석을 시도하여 각각의 지역별 발전방향을 제시해 주었다는 데 큰 의의가 있으며, 객관적인 자료를 활용하여 효율성을 최대화하기 위해 제한적이지만 어떤 영역에 있어서 얼마나 변화가 있어야 하는지를 명확한 수치로 제시함으로써 실질적인 의사결정에 있어 좀 더 정량적인 정보를 제시해 주었다는 점에 있어서 향후 친환경주택단지계획을 수립하는 데에 참고가 될 것으로 보여진다.

참고문헌

1. 고재경(2011),「녹색도시를 꿈꾸는 저탄소사회전략」, 한울출판사.
2. 김성종, 고승희(2001), “지방공공서비스의 생산효율성 분석 - 생활폐기물 처리업무에 대한 기법의 작용”,「공공정책연구」, 10: 3～26.
3. 김용일(2007),「주택재개발단지의 친환경계획요소 분석 및 개선방안에 관한 연구」, 한양대학교 석사학위논문.
4. 김홍배, 김재구(2010), “도시 내 탄소발생량 산정과 저탄소도시 개발의 핵심부문에 관한연구”,「국토계획」, 45(1): 35～48.
5. 남지연(2004),「공동주택 친환경성능평가의 전산화 및 활용방안」, 연세대학교 석사학위논문.
6. 녹색성장위원회(2009),「녹색도시, 건축물 활성화 방안」, 제6차 녹색성장위원회 보고자료.
7. 반영운, 윤중석, 정지형, 우혜미, 주경선, 최나래, 김유미, 백종인(2011), “전문가 설문조사를 통한 통합적 기후변화 대응 도시 조성전략”,「서울도시연구」, 12(4): 41～63.
8. 반영운, 이재준, 김정곤, 오용선, 설영선, 최정석(2008), “기후변화에 대응한 국토 및 도시개발전략”,「도시정보」, 318: 3～17.
9. 서혜수, 정민정, 김광호, 김병선(2005), “거주자 만족도 조사를 통한 친환경건축물 인증제도의 실내환경인자 분석”,「대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집」, 25～25.
10. 송승영, 이수진(2007), “건물에너지효율등급인증제도 개선방향에 관한 연구”,「대한건축학회논문집」, 27(1): 765～768.
11. 송승영, 이현화, 이현우(2008), “친환경 공동주택 인증 심사항목별 득점비율분석을 통한 개선 필요 항목 도출”,「한국태양에너지학회 논문집」, 28(4): 1～9.
12. 이재길(2007), “DEA기법을 이용한 도시개발의 상대적 효율성 측정”,「토지개발」, 21(79): 103～114.
13. 이재혁, 유기형, 조동우(2009), “건물에너지효율등급 평가도구와 상세해석프로그램의 비교 분석”,「대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집」, 3～8.
14. 이향아, 여명길, 김유란, 전규엽, 김주영, 홍원화(2010), “대구광역시 내 공동주택의 온실가스 감축을 위한 탄소포인트 제도의 효과에 관한 연구”,「한국주거학회 학술발표대회」, 271～275.

15. 이혜경(2009), 「DEA를 활용한 직업재활시설의 효율성 연구」, 대구대학교 박사학위논문.
16. 황영섭, 임영문(2010), "단위 범위에서의 탄소발자국 계산 방법에 관한 연구", 「대한안전경영과학회 춘계학술대회」, 137～140.
17. Aigner, D., and S. F. Chu (1968), "On Estimating the Industry Production Function", *American Economic Review,* 58(4): 826～839.
18. Charnes, A., W. W. Cooper, and E. L. Rhodes (1978), "Measuring the Efficiency of Decision Making Units", *European Journal of Operational Research,* 2(6): 429～444.
19. Debreu, G. (1951), "The Coeficient of Resource Utilization", *Econometrica,* 19: 273～292.
20. Fare, R., and S. Grosskof (1994), "Cost and Revenue Contrained Production", *Springer-Verlag*, New York.
21. Farrell, M. J. (1957), "The Measurement of Productivity Efficiency", *Journal of Royal Statistical Society*, series A 120.
22. Synthesis Report (2007), *IPCC, Climate Change 2007.*
23. Koopmans, T. C. (1951), "An Analysis of Production as an Efficient Combination of Activities", *In Activity Analysis of Production and Allocation*, Wiley, New York.
24. Smith, P., and D. Mayston (1987), "Measuring efficiency in the public sector", *The International Journal of Management Science*, 15(3): 181～189.