

■ 論 文 ■

공항의 지속가능성 평가모형의 개발

A Development of System Dynamics Model for Airport Sustainability Assessment

유 광 의

(한국항공대학교 항공교통물류학부 교수)

김 원 규

(한국항공대학교 항공교통물류학부 교수)

김 병 중

(한국항공대학교 항공교통물류학부 교수)

김 미 경

(한국항공대학교 대학원 항공교통물류학과)

목 차

- I. 서론
 - 1. 연구의 배경 및 목적
 - 2. 연구의 방법 및 구성
- II. 문헌 고찰
 - 1. 지속가능성의 개념
 - 2. 지속가능성 관련 기존연구
- III. 공항시스템의 지속가능성 모델링의 기본방향
- IV. 시뮬레이션 실행 및 모델 분석
 - 1. 모형의 사용자료
 - 2. 시뮬레이션 실행
- V. 결론 및 연구의 한계
- 참고문헌

Key Words : 인천국제공항, 지속가능성, 시스템 다이내믹스, 공항배후지역개발, 항공교통시스템

요 약

본 연구의 목적은 시스템의 지속가능성 개념을 공항에 적용하여 공항의 지속가능성 평가모형을 개발하는 것이다. 분석방법은 시스템 사고를 기본적 틀로 하고 있는 시스템 다이내믹스(System Dynamics) 기법을 사용하여 공항 시스템의 모델을 구축하고, 구축된 모델을 이용하여 분석공항 및 배후지역의 실제 데이터를 적용, 지속가능성을 평가하는 것이다.

시뮬레이션 결과 공항의 활동으로 인해 공항 및 배후지역은 경제적으로는 지속가능하나 사회, 환경적으로는 지속가능하지 않은 것으로 나타나 향후 이를 개선시키기 위한 정책이 필요하다는 것을 알 수 있었다. 또한 현재의 상황에서 공항개발을 3년 앞당겨야 항공수요를 매끄럽게 처리할 수 있는 것으로 나타났고, 대기오염물질 배출량을 최소 3% 저감시킬 경우 배후지역개발에 따른 항공화물 물동량 및 인천지역 GRDP의 6% 증가범위 내에서 공항 및 배후지역의 경제, 사회, 환경 측면에서 모두 지속가능한 것으로 나타났다.

A large scale international airport is an essential ingredient of the regional and the national economy. It helps the regional and the national economy booming. On the other hand, some international airport forms a region by itself with the surrounding community, which tends to keep growing. The airport development can be viewed as a sort of regional development and its sustainability needs to be examined during both planning phase and operating phase. In this paper, a system dynamic model is proposed to access the sustainability of airport development and the model is applied to address the sustainability of Korea's new international airport, Incheon International Airport, development. The study reveals that the phase 2 facilities need to be built quickly to meet anticipated future traffic and that the air pollutants need to be reduced by 6% to keep the airport development sustainable.

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

최근 경제성장과 환경보존, 사회발전이 조화와 균형을 이루는 “지속가능한 개발(Sustainable Development)”의 개념이 모색되고 있다. 지금까지의 개발 방식이 경제성장을 위해 지구의 환경용량을 고려하지 않고 무한생산, 무한소비에 기초한 지속가능하지 않은 개발(unsustainable development)이었다면, 지구의 환경용량을 초과하지 않는 범위 내에서 제한적으로 개발되어 지속적인 성장을 가능하게 하는 개발이 “환경적으로 건전하고 지속가능한 개발이다. (Environmentally Sound and Sustainable Development : ESSD)” (이동걸, 2002).

이러한 지속가능한 개발에 대한 인식은 항공교통시스템에 있어서도 중요한 문제로 적용될 수 있다. 인구의 증가와 생활수준의 향상에 따라 항공수요는 계속 증가되고 있으며 이에 따라 항공교통시스템의 확장 필요성이 제기되고 있다. 그러므로 환경의 영향을 최소화하면서 효율적인 운송이 가능하도록 하는 시스템 구축전략을 세워야 한다.

세계의 주요 공항들은 지속적인 공항경쟁력을 확보하고자 공항 및 배후지역의 환경보존을 위한 노력을 기울이고 있다. 이를 위해서는 경제·사회·환경적 측면의 지속가능한 발전을 위한 종합적 사고가 필요하다. 공항의 개발과 운영이 경제성장에 정(+)의 효과를 주지만 자연환경과 지역사회에 부(-)의 영향을 줄 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 지속가능성의 개념을 공항에 적용하여, 공항과 그 배후지역을 하나의 시스템으로 설정 공항의 지속가능성 평가할 수 있는 시스템 다이내믹스 모형을 개발하고자 한다. 공항시스템의 지속가능한 개발에 대한 연구는 자연 및 사회환경을 고려한 공항개발 정책수립에 중요한 기초가 될 수 있을 것이다.

2. 연구의 방법 및 구성

초기의 지속가능성에 대한 연구는 Meadows et

al.(Beyond The Limits)의 연구를 비롯하여 대부분의 연구들이 지구적 차원에서 이루어져 왔다(문경주, 2001). 그러나 최근 국가, 도시, 지역으로 지속가능성 연구의 범위는 점점 축소되고 있다. 본 연구는 공항이라는 기반시설과 배후지역간의 관계를 통해 공항의 지속가능성을 연구하고자 하므로 도시 시스템에 기초를 두었다. 따라서 본 연구는 공항과 그 배후 도시를 시스템의 경계로 설정하였다.

분석 방법으로는 시스템 사고를 기본적 틀로 하고 있는 시스템 다이내믹스(System Dynamics) 기법을 사용하여 공항시스템의 모델을 구축하고, 구축된 모델을 이용하여 분석공항의 지속가능성을 평가하였다. 모델링에 사용된 소프트웨어는 VENSIM 4.2a를 활용하였다. 그리고 인천국제공항과 인천광역시를 공간적 범위로 하고 시뮬레이션 기간은 50년¹⁾으로 하였다.

II. 문헌 고찰

1. 지속가능성의 개념

지속가능성은 현세대의 과도한 자원과 환경의 개발이 미래세대의 후생을 위협하지 않도록 진행되는 개발을 의미한다. 이 개념은 최근 정치·경제·사회 등 전 분야의 정책수립 시 가장 우선적으로 고려해야 할 기초 개념이 되고 있다(환경부, 2001).

초기의 지속가능한 발전의 개념이 인간의 욕구충족 혹은 빈곤의 해결에 더 중심을 두었다면, 90년대로 접어들면서 생태계와 미래세대, 그리고 자연적 총량개념에 대한 고려로 무게중심이 이동하였다. 즉, 지속가능한 발전이란 결국 자연환경을 훼손하기보다는 영윈토록 혹은 아주 장기적으로 보존할 수 있는 수준으로 자원을 사용하면서 인간의 물질적 효용이나 복지를 증진시켜 나가는 것이라 할 수 있다(Sohn, 1997).

2. 지속가능성 관련 기존연구

문경주(2001)의 연구에 의하면 시스템 다이내믹스 방법으로 지속가능성에 대하여 처음으로 일반인에게 소개된 것은 Meadows를 중심으로 한 MIT 그룹의

1) 일반적으로 모델의 행태는 단기간에도 관찰할 수 있지만, 본 연구에서 시스템 행태의 지속가능한 상태 즉, 동태적 균형상태를 관찰하기 위해서는 장기간의 Time Span이 요구된다.

World 3 모델이다. "성장의 한계(The Limits to Growth)"의 개념을 이용한 이 모델은 인류 역사상 최초로 시스템다이나믹스 시뮬레이션을 사용하여 인류와 지구의 암울한 미래를 전망했다. World 3 모델로 분석한 결과에 따르면, 그들은 만약 현재의 성장추세가 바뀌지 않고 계속된다면 이 지구상의 성장은 향후 100여년 내에 한계에 도달할 것이며 그 결과 인구나 산업 능력은 급격히 통제 불능의 상태에 도달한다고 전망하였다.

또한, 도시문제 분석에 있어 처음으로 시스템 다이나믹스 방법을 도입한 것은 Forrester(1969)였다. 그는 "Urban Dynamics"를 출간하여 이전의 접근방법과 다른 새로운 시각에서 도시문제를 분석하였다. 그는 인구, 주택, 산업부문들간의 상호작용하는 도시시스템을 구축하였다.

Sohn(1997)은 기반시설/교통계획을 위한 지속가능 발전모형을 구축하였다. 그는 사회, 경제, 환경, 정치, 기술적 관계를 기초로 하는 시스템 다이나믹스 모형을 이용 사회-경제적 이익과 환경비용을 정량적으로 평가하였다.

Heathrow 공항, Gatwick 공항, Manchester 공항, Schipol 공항 등 세계 주요 공항들은 sustainability report를 발간함으로써 매년 그들의 운영 실적, 환경영향, 지역사회에의 사회활동 등을 점검하고 이를 대중에게 배포하고 있다. Brain Graham(1999)는 환경적 지속가능성에 주의를 기울인 유럽지역의 항공운송 자유화 정책들과 부적절한 공항의 용량추가계획들간의 상충되는 상황에 대해 논의하고 경쟁시장에서 항공사들이 채택한 환경적으로 적합하지 않은 전략들에 대한 항공운송의 주요 이해관련자들의 모순된 반응을 분석하였다.

Paul Upham(2001)은 폐기물의 증가 등을 바탕으로 경제활동은 환경에 불리한 영향을 주기 때문에 화물과 사람을 많이 처리하는 공항은 주어진 유사한 기술과 규정을 따르는 적은 규모의 공항보다 덜 지속가능할 것이라고 주장하였다. Paul Upham 외(2003)는 환경영향 요인들과 이에대한 공공의 인식은 많은 공항에서 이미 그 성장을 제약하고 있고 미래에는 더욱 제한요인으로 작용할 것이라고 하였다.

공항활동의 영향은 공항 자체와 연관산업 뿐 아니라 마을 포함하는 도시 전체적으로 연결되어 있다. 따라서 배후지역간의 상호관계를 통해 보다 동태적

이고 객관적으로 공항의 지속가능성을 평가할 필요가 있다.

이러한 인식을 바탕으로 본 연구에서는 시스템 다이나믹스 방법론을 사용 도시 시스템의 중요 부분을 차지하고 있는 공항시스템의 활동이 배후지역에 미치는 영향을 고려하여 공항의 지속가능성을 평가하고자 한다. 여태까지 공항의 전체 시스템에 대해 시스템 다이나믹스 방법론을 적용한 연구는 없었다. 다만 항공분야에서 항공사의 경영 (James M. Lyneis, 2000 & Martin Liehr et al., 2001)과 전략적 제휴(Buyung Agusdinata et al., 2002)에 관한 전략 수립에 적용되었을 뿐이다.

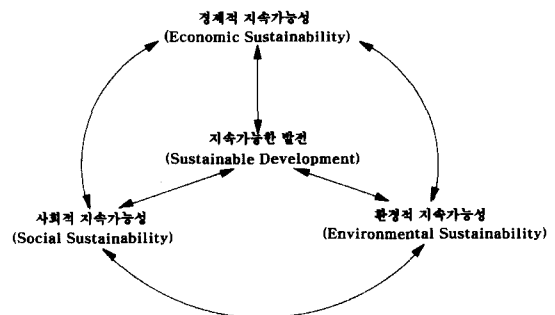
III. 공항시스템의 지속가능성 모델링

1. 공항시스템의 지속가능성 모델링의 기본방향

한계용량 내에서 인간의 삶의 질을 향상시키는 개발을 지속가능한 개발로 본다면 어떤 차원의 한계용량을 염두에 둔 지속가능성이 존재하는 것인지를 고찰할 필요가 있다. 먼로(1995)는 생태적, 사회적, 경제적 한계용량을 고려한 생태적 지속가능성, 사회적 지속가능성, 경제적 지속가능성의 세 가지 차원에서의 지속가능성을 논의하고 있다. <그림 1>은 본 연구에서 고려한 세 가지 차원의 지속가능성間 상호 관계를 보여준다.

본 연구에서 사용된 시스템 다이나믹스 모형에서 정의되는 모든 시스템의 행태는 준변수(level variable)와 변화율변수(rate variable)로 표현될 수 있다. 이들간의 관계는 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{dL}{dt} = R \tag{1}$$



<그림 1> 지속가능한 발전의 개념도

여기서, L은 하나의 수준변수를 의미하며, R은 변화율 변수를, t는 시간을 의미한다. 따라서 시간에 따른 수준변수의 변화율이 바로 변화율 변수의 값이 된다.

수준변수는 저장변수(stock variable)라고도 하며, 이는 행위의 결과로 저장되는 변수를 의미하며 특정시점에서 시스템의 상태를 표현한다. 반면에 변화율변수는 흐름변수(flow variable)라고도 하는데, 이는 수준변수의 값을 변화시키는 역할을 하며 시스템의 상태가 어떻게 변화되는가를 의미한다. 이외에 변화율변수의 계산식을 단순화시키기 위하여 보조변수가 사용된다.

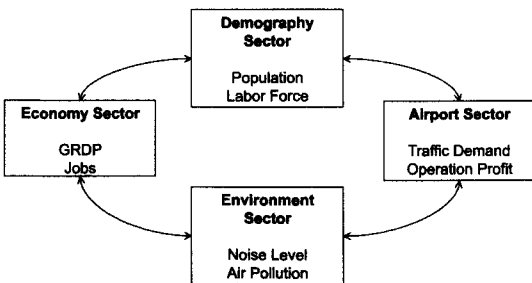
시스템 다이내믹스 모델링과 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 컴퓨터를 기반으로 한 시뮬레이터가 많이 사용되고 있으며, 본 연구에서는 vensim을 사용하였다.

2. 모델 개발

1) 모델의 개념적 틀

본 연구에서는 시간의 경과에 따른 공항과 공항이 영향을 미치는 하위 시스템들간의 상호작용 현상을 시스템 사고의 관점에서 정의한 후 이러한 시스템 사고를 통하여 도출한 요소들간의 상호관계성을 모형화시키고 이를 컴퓨터상에서 실험하였다.

우리나라의 국제항공수요의 처리는 대부분 인천국제공항을 통해 이루어지므로 인천국제공항의 영향은 전국적이고, 전국의 인구 및 경제적 상황이 인천국제공항의 운영에 영향을 미친다. 그러나 그 영향의 범위가 너무 광대하고 복잡하여 본 연구에서는 인천국제공항과 인천국제공항의 배후도시인 인천지역을 시스템의 경계로 한



〈그림 2〉 연구의 일반모델

다. 향후 전국의 공항을 대상으로 하는 공항시스템에 대한 국가모델(National Model)을 구축시 모델은 모형의 중요한 일부분이 될 수 있다.

이러한 시스템 경계와 더불어 모형구축을 위한 하위 시스템은 연구자의 Mental Model²⁾에 근거하여 인구 부문, 경제부문, 공항부문, 환경부문으로 나누었다.

2) 모델의 구조와 내용

(1) 인구부문³⁾

인구부문의 저장변수는 인천지역의 총 인구 수이다. 인구의 수는 4개의 변화율(rate) 변수와 관련된다. 도시 내의 출생과 사망, 외부 지역과의 인구의 이동을 나타내는 인천시 전입과 전출이다.

또한 인구는 지역이 가지고 있는 조건에 따라 달라지는데 이를 승수(multiplier)로 나타내었다. 승수는 일자리 매력, 환경오염 등 삶의 질을 반영하는 요소이다.

$$POP_t = POP_{t-1} + \int_{t-1}^t (B_t - D_t + IM_t - OM_t) dt \tag{2}$$

여기서, POP : Population in Incheon, 인천시 총인구

B : Birth, 출생자수

D : Death, 사망자수

IM : In-migration, 전입인구수

OM : Out-migration, 전출인구수

$$IM_t = POP_{t-1} \times IMN_t \times IMM_t \tag{3}$$

여기서, IMN : In-migration Normal, 정상 전입률

IMM : In-migration Multiplier, 인구유입승수

$$IMM_t = JAM_t / POLRM_t \tag{4}$$

여기서, JAM : Job Attractiveness Multiplier, 일자리매력승수

POLRM : Pollution Multiplier, 환경오염승수

2) Mental Model은 우리가 가지고 있는 우리 주변의 세계에 대한 Mental Image가 Mental Model이며 개념과 인과관련성을 선택하여 이를 통해 실제 세계를 나타내게 된다(Forrester, 1971).

3) 본 연구가 인구증가와 감소의 면밀한 연구가 될 수 없기 때문에, 연령구조적 관점에서 보지 않고 전체인구에서 차지하는 고정적 비율로 추정하였다.

인구가 증가하면 지역경제의 시장활동에 제공되는 노동력이 많아진다. 노동력이 증가하면 일자리 대비 노동력의 비율이 증가하게 되는데, 일자리가 감소함에 따라 인구는 보다 많은 일자리를 제공하는 곳으로 이주해갈 것이다. 따라서 인구 유입을 감소시켜 결과적으로 지역의 인구증가에 음(-)의 영향을 미칠 것이다. 이러한 요소를 모델에 반영하기 위해 일자리매력승수를 사용한다. 일자리 매력승수는 지역의 일자리 매력도가 일자리 대비 노동력의 비율이 커짐에 따라서 감소하게 된다.4)

$$LF_t = POP_t \times LPF_t \quad (5)$$

여기서, LF : Labor Force, 노동력 즉, 지역 내에서 일자리를 원하는 사람의 수

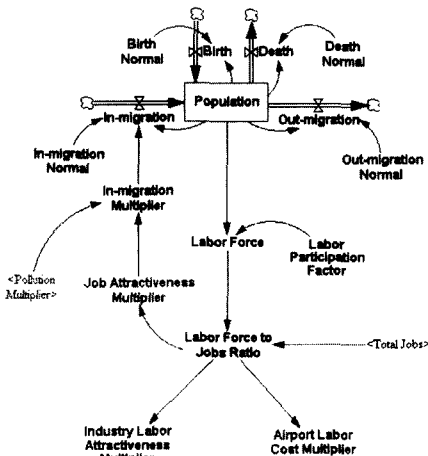
LPF : Labor Participation Factor, 노동 참여요소, 여기에서는 상수로서 총인구 중 경제활동 조참가율

$$LPTJ_t = LF_t \times TJOBS_t \quad (6)$$

여기서, LPTJ : Labor Force to Jobs 일자리 수 대비 노동력의 비율

TJOBS: Total Jobs, 총 일자리 수

또한 인구 증가는 오염도에 의해 조정된다. 공항의 항공기 운항으로 인한 소음도, 항공기·지상조업서비스·접근교통 등으로 인한 대기오염도의 증가는 쾌적한 생활을 영위하려는 욕구를 저해하여 지역으로의 인구



<그림 3> 인구부문 flow-diagram

유입을 막고 다른 지역으로의 이주를 촉진할 것이다. 따라서 일자리 수 대비 노동력의 비율이 감소하여 노동력 부족으로 지역경제에 부정적인 영향을 끼친다. 이것은 환경오염승수를 통해 반영된다. 다음의 <그림 3>은 인구부문의 flow-diagram이다.

(2) 지역경제부문

지역경제 부문의 저장변수는 지역의 경제적 여건을 파악할 수 있는 보편적인 지표인 지역내총생산(GRDP)이다. 본 모델에서의 지역내총생산은 인천지역의 GRDP이다.

$$GRDP_t = GRDP_{t-1} + \int_{t-1}^t (GRDPI_t - GRDPD_t) dt \quad (7)$$

여기서, GRDPI : GRDP Increase, 지역내총생산 증가분

GRDPD : GRDP Decrease, 지역내총생산 감소분

$$GRDPI_t = GRDP_{t-1} \times GRDPIN \times ILAM_t \times IEFM_t \quad (8)$$

여기서, GRDPIN : GRDP Increase Normal, 지역내 총생산 정상 증가율

ILAM : Industry Labor Attractiveness Multiplier, 경제활동에 대한 노동력 제한 승수

GRDPIE : GRDP Induced Effect, GRDP 유도효과

IEFM : Industry Environment Factor Multiplier, 환경오염에 따른 산업 활동 제한 승수

$$GRDPD_t = GRDP_{t-1} \times GRDPDN \quad (9)$$

여기서, GRDPDN : GRDP Decrease Normal, 지역내총생산 정상 감소율

$$TJOBS_t = JFGI_t + JFAA_t \quad (10)$$

여기서, JFGI : Jobs from General Industry, 인천 지역 일반 사업체로부터의 일자리 수

4) 본 연구에서는 문태훈의 인구, 환경, 산업활동관련 승수를 사용하였다.

JFAA : Jobs from Airport Activity, 공항활동 (항공수요증가)으로 창출된 일자리 수

$$JFGI_t = NOI_t \times AJI \quad (11)$$

여기서, NOI : Number of Industry, 인천지역 사업체 수

AJI : Average Jobs per Industry, 사업체 당 평균 일자리 수

지역내총생산의 증가는 사업체 수의 증가로 이어지게 된다. 사업체 수가 증가하면 일자리 수가 많아지게 되어 일자리 수 대비 노동력의 비율을 낮추게 된다. LPTJ가 낮아지면 노동력 부족으로 인하여 인력추출이 어려워져 높은 노동비용으로 지역내 총생산은 다시 감소하는 루프를 이루게 된다. 또한 사업체 수의 증가는 환경오염 배출을 증가시켜 이에 대한 통제비용 증가로 인해 다시 지역내총생산에 부정적 영향을 주는 반대 효과를 내게 된다.

$$TSAL_t = TSAL_{t-1} + \int_{t-1}^t (SCAL_t) dt \quad (12)$$

여기서, TSAL : Total Sales of Airline, 항공운송산업의 총 매출

SCAL : Sales Change of Airline, 항공운송산업의 연간 매출증대

$$TSBS_t = TSBS_{t-1} + \int_{t-1}^t (SCBS_t) dt \quad (13)$$

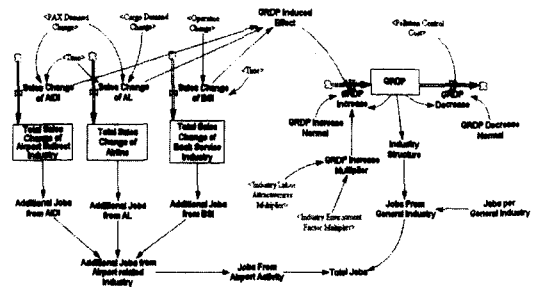
여기서, TSBS : Total Sales of Back Service, 항공운수보조서비스산업의 총 매출

SCBS : Sales Change of Back Service, 항공운수보조서비스산업의 연간 매출증대

$$TSAIEI_t = TSAIEI_{t-1} + \int_{t-1}^t (SCAIDI_t) dt \quad (14)$$

여기서, TSAIEI : Total Sales of Airport Indirect Effect Industry, 공항에 의해 간접 효과를 받는 산업의 총 매출

SCAIDI : Sales Change of Airport Indirect Effect Industry, 공항에 의해 간접 효과를 받는 산업의 연간 매출증대



〈그림 4〉 지역경제부문 flow-diagram

인천국제공항의 항공수요와 운항회수의 증가로 인하여 공항의 활동과 직접적으로 관련된 항공운송산업, 항공운수보조 서비스산업 그리고 공항을 통한 외국인 입국자들에 의한 간접적인 효과로 이들에 의해 발생하는 숙박, 음식점, 소매, 운수 및 보관 등의 산업의 매출이 증대되고 이는 지역의 GRDP를 증가시키고, 또한 지역의 일자리 수를 증가시킬 것이다. 〈그림 4〉는 지역경제부문의 flow-diagram이다.

(3) 공항부문

공항부문의 저장변수는 항공수요(여객수요와 화물수요 : PAX와 CARGO)와 운영이익(operation profit)이다. 본 연구에서 항공수요는 국제선 수요만을 고려하였다. 인천국제공항은 개발계획과 개항 당시 국제선 중심의 공항으로 고려되었고, 실제로도 2001년과 2002년 총 운항회수의 97.5%, 총 여객의 99%, 총 화물의 99.7%가 국제선 실적이었다.

$$PAX_t = PAX_{t-1} + \int_{t-1}^t (PAXI_t - PAXD_t) dt \quad (15)$$

여기서, PAX : Passenger Demand, 항공여객수요

PAXI : Passenger Demand Increase, 항공여객수요 증가

PAXD : Passenger Demand Decrease, 항공여객수요 감소

$$CARGO_t = CARGO_{t-1} + \int_{t-1}^t (CARGOI_t - CARGOD_t) dt \quad (16)$$

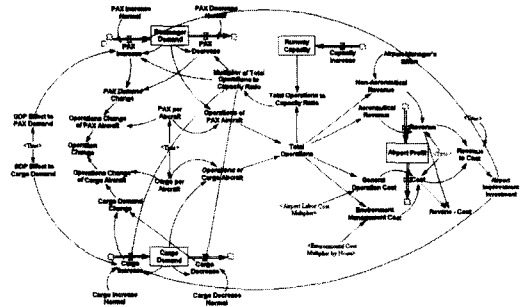
여기서, CARGO : Cargo Demand, 항공화물수요

CARGOI : Cargo Demand Increase, 항공화물수요 증가

CARGOD : Cargo Demand Decrease, 항공
화물수요 감소

$$TO_t = OPAX_t + OCARGO_t \quad (17)$$

여기서, TO : Total Operations, 총 운항회수
OPAX : Operations of PAX Aircraft, 여객기 운항회수
OCARGO : Operations of Cargo Aircraft, 화물기 운항회수



〈그림 5〉 공항부문 flow-diagram

항공수요는 운항회수를 결정하고 운항회수와 항공수요는 공항의 항공수익(aeronautical revenue)과 비항공수익(non-aeronautical revenue), 운영비용에 영향을 미친다. 항공수요가 증가하면 공항의 수익(항공수익+비항공수익)이 상승하고, 상승된 이익은 부대시설에 투자로 이어져 다시 항공수요를 유도한다. 항공수요를 산출하는 변수는 앞에서 언급했던 공항의 이익증가로 인한 투자와 외생변수로 주어지는 국내총생산⁵⁾(GDP)이다.

$$AP_t = AP_{t-1} + \int_{t-1}^t (R_t - C_t) dt \quad (18)$$

여기서, AP : Airport Profit, 공항운영이익
R : Revenue, 공항 운영수익
C : cost, 공항 운영비용

$$R_t = AR_t + NAR_t \quad (19)$$

여기서, R : Aeronautical Revenue, 항공수익
NAR : Non-Aeronautical Revenue, 비항공수익

$$C_t = GC_t + EMC_t \quad (20)$$

여기서, GC : General Operation Cost, 일반운영비용
EMC : Environment Management Cost, 환경관리비용

그러나 항공기 운항회수의 증대로 공항주변지역에

소음도가 증가하게 되어 이에 대한 대책 및 보상과 관련한 비용을 유발하게 된다. 이는 공항의 운영비용 중 환경관리비용을 증대시켜 공항의 운영이익에 악영향을 끼친다. 또한 지역인구의 노동력에 의해서 공항의 운영비용이 증가하게 되는데, 환경오염으로 인한 지역인구 유입의 감소는 산업에서의 노동력 부족현상을 이끌어 임금을 상승시키게 되는 것이다. 공항부문의 모델에서 사용된 〈그림 5〉은 공항부문의 flow-diagram이다.

(4) 환경부문

환경부문의 주요 변수는 소음도(noise level)와 대기오염물질 배출량(air pollution)이다. 소음도와 대기오염물질 배출량은 지역 환경의 질을 의미한다. 공항이 환경에 미치는 영향은 여러 가지 있겠지만 본 연구에서는 소음과 대기오염만을 기준으로 평가하기로 한다. 여기에서의 소음도와 대기오염물질 배출량은 공항이 환경에 미치는 영향을 모두 함축한 의미이다.

소음도는 저량변수가 아니다. 소음도는 계속하여 축적되는 것이 아니고 항공기가 내는 평균 소음도와 항공기 운항회수에 따라서 변하는 보조변수이다. 소음도는 항공기 운항회수에 의해서 결정된다. 본 모델에서 소음도는 ICAO에서 권장하는 WECPNL 산정방식을 사용한다.

$$NL = dB + 10 * \log(T_1 + 3 * T_2 + 10 * T_3) - 27 \quad (21)$$

여기서, NL : Noise level, 소음도

dB : Average Noise Level, 평균 소음도⁶⁾

5) 항공수요 예측에 있어 가장 중요한 설명변수는 소득변수이다. 항공은 고속의 고급교통수단으로서 소득에 대한 수요의 가격탄력도가 1.5~2에 달할 정도로 높다(대한교통학회, 2003).

6) 소음도는 온도, 바람의 방향 및 세기 등 측정 당일의 상황에 의해 영향을 받으므로 일률적으로 계산할 수 없다. 본 연구에서는 항공기 운항회수의 증가가 소음도에 미치는 영향을 알아보고자 하여 특정 지역(본 연구에서는 인천국제공항 주변지역인 모도)을 기준으로 2002년 연평균 소음도에서 운항회수에 따른 영향을 감안해 평균소음도를 계산하였다.

- T1 : 07:00~19:00시의 비행횟수
- T2 : 19:00~22:00시의 비행횟수
- T3 : 22:00~07:00시의 비행횟수

운항횟수가 증가하면 소음도가 높아져 소음 비용인성(noise annoyance)이 낮아진다. 이때 소음 비용인성은 소음기준과 소음도에 따른 것으로 소음을 받아들이는 정도이다. 소음 비용인성이 높아지면 환경오염승수(pollution multiplier)에 영향을 미쳐 지역내의 인구 유입을 낮추고 타 지역으로의 유출을 유도한다. 이는 또다시 공항 운영비용 중 노동비용을 높일 수 있게 된다. 또한 넓게는 지역경제에 악영향을 미쳐 항공수요를 감소시키는 결과를 낳기도 한다.

공항은 주변지역의 대기 질에도 영향을 끼친다. 항공기의 운항횟수의 증가와 함께 항공기와 지상지원서비스 차량에서 대기오염 유발물질의 배출이 늘어나게 된다. 또한 항공수요의 증대로 인한 접근교통수단의 배기가스에 의해 대기오염이 증가하게 된다. 이러한 환경악화는 주변지역 주민들의 삶의 질을 저하시켜 공항이 사회적으로 지속가능하지 않게 만든다.

$$TAP_i = APG_i + APAA_i + APAT_i \quad (22)$$

여기서, TAP : Total Air Pollution, 총 대기오염 유발물질 배출량

APG : Air Pollution by General Industry, 일반산업활동으로 인한 대기오염유발물질 배출량

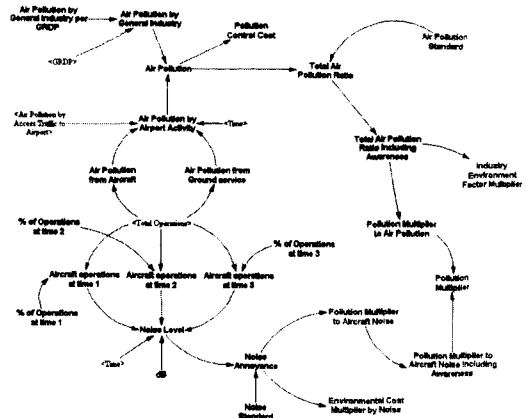
APAA : Air Pollution by Airport Activity, 공항활동으로 인한 대기오염유발물질 배출량

APAT : Air Pollution by Access Traffic to Airport, 접근교통으로 인한 대기오염유발물질 배출량

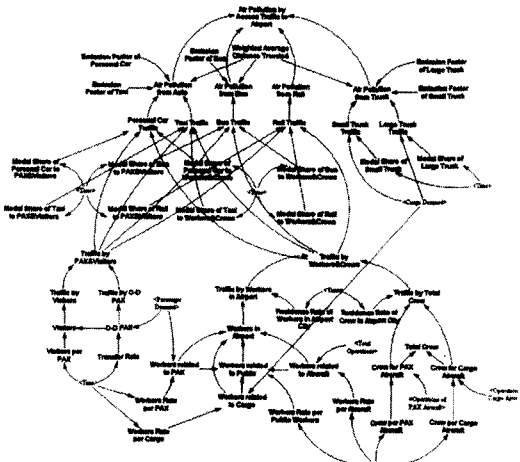
$$APOLR_i = TAP_i / APS \quad (23)$$

여기서, APOLR : Air Pollution Ratio, 대기오염율
 APS : Air Pollution Standard, 오염 기준치

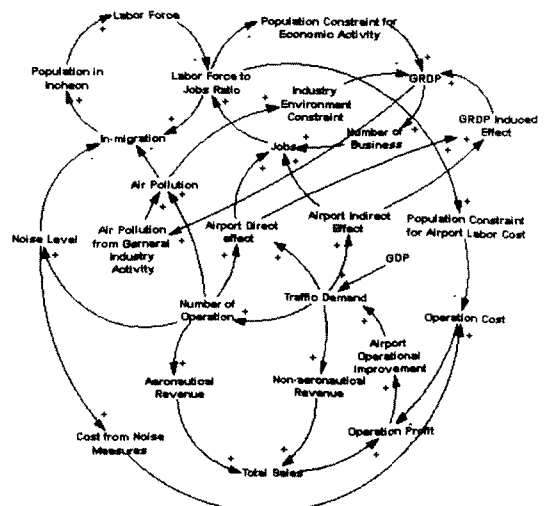
<그림 6>와 <그림 7>는 환경부문의 flow-diagram 이다. 그리고 <그림 8>은 모델 전체의 인과지도이다.



<그림 6> 환경부문 flow-diagram I



<그림 7> 환경부문 flow-diagram II



<그림 8> 전체 인과지도

N. 시뮬레이션 실행 및 모델 분석

1. 모형의 사용자료

시뮬레이션 모형에 투입된 자료는 크게 인천지역관련자료, 공항부문자료, 환경부문자료 등으로 구분할 수 있다. 인천지역관련자료에는 인천시의 인구관련자료, 지역내총생산 사업체 통계 등의 지역경제부분의 자료 등이 포함된다. 공항부문자료에는 항공수요 및 운항횟수 시설단계별 개발계획, 인천국제공항의 영업실적 환경비용지출 등의 회계자료 등이 사용되었다. 환경부문자료에는 인천국제공항의 항공기 소음, 차량의 대기오염 유발계수, 대기오염의 사회적인 비용 등의 자료가 포함되었다. 입력자료들은 인천시, 건설교통부에서 발간한 백서 및 통계연보의 자료들을 이용하였으며 일부 자료들은 내부자료들을 토대로 산출되었다. 전술한 바와 같이 환경관련 승수들은 선행연구자들이 사용한 값들을 적용하였다.

2. 시뮬레이션 실행

1) 모형의 타당성 검토

시스템 사고를 통하여 모형을 구축한 후 시뮬레이션을 수행하였다. 모형의 실행과정상 중요한 과제는 모형의 타당성(validity)을 검토하고 이를 높이는 것이다. 본 연구에서는 모형의 타당성을 높이기 위해 시뮬레이션 결과가 공항 시스템의 동태적 변화 행태와 유사하도록 준거모드(reference mode)를 도입하여 방정식들의 미세한 반복조정을 통하여 최종적으로 안정된 모형을 구축하였다.

모형의 타당성 평가에서 일반적인 계량·통계적 방법과는 달리 시스템 다이내믹스의 타당성 평가는 매우 어렵다. 그 이유는 시스템 다이내믹스를 구성하는 다수의 요소들이 서로 상호작용하기 때문이다.

Meadows는 시스템 다이내믹스와 계량경제학자들간의 논쟁에서 모형의 타당성은 역사적 데이터와 아주 정밀하게 일치하는 것보다는 모형의 시간에 따른 변화, 즉 행태를 평가해야 한다고 강조한다(Meadows, 1980). 요컨대 모형의 타당한 정도란 상대적인 개념으로 파악되어야 한다(김도훈 외, 2001). 공항시스템을 모델화한다는 것은 실제세계에서의 공항시스템을 단순

화하는 것이기 때문에 공항시스템을 모델화할 경우 완전한 타당도를 가질 수 없을 것이다.

또한 통계적 측면에서의 점 추정의 정확도도 시스템 다이내믹스의 유용한 타당도를 결정하는 기준으로 보기에는 어렵다. 따라서 공항시스템을 설명하고자 하는 모형의 타당도는 모형이 나타내는 동태적, 즉 시간에 따른 변화의 행태를 비교함으로써 판단해야만 할 것이다.

또한 본 연구에서는 모형의 상대적인 정확도를 알아보기 위해 평균절대백분율오차(MAPE, Mean Absolute Percentage Error)를 사용하였다. 모형의 정확도는 예측되는 변수의 단위 크기에 따라 동일한 정도를 가진 추세선의 오차의 값이 크거나 작게 나타날 수 있다. 그렇기 때문에 정확한 판단을 위해서 단위를 없애주어야 할 경우가 있다. 따라서 평균절대오차에 백분율을 취한 평균절대백분율오차를 사용한다(오주삼, 2001). MAPE 지표의 경우, 다수의 추정모형에 대해서 상대적인 정확도 비교에 우수한 지표로 알려져 있다.(John et al. 1992)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \frac{Z_t - \hat{Z}_t}{Z_t} \times 100 \quad (24)$$

여기서, Z_t : 관측치, \hat{Z}_t : 시뮬레이션 수치

MAPE < 10% : 매우 정확함

10% ≤ MAPE < 20% : 정확함

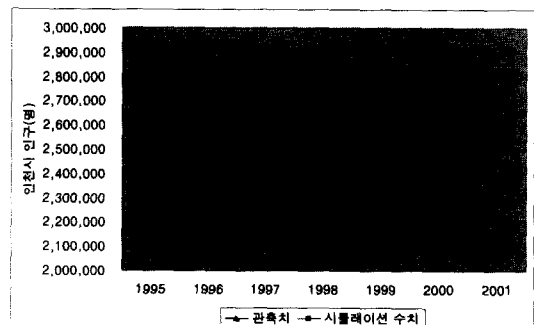
20% ≤ MAPE < 50% : 보통

50% ≤ MAPE : 부정확함

시뮬레이션 실행 후 주요 변수(estimated)들의 행태와 실제 관측(observed)값을 비교해 보면 다음과 같다.

(1) 인천시 인구

(그림 9)은 연구지역의 관측된(observed) 인구와 시뮬레이션(estimated) 결과의 인구를 비교한 것이다.

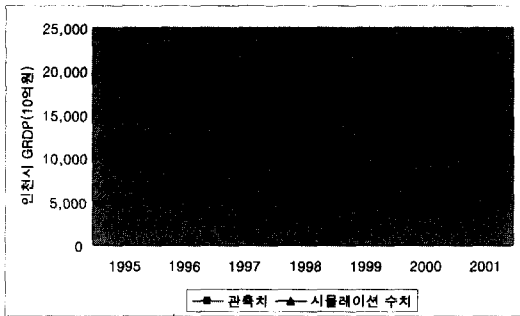


(그림 9) 인천시 인구의 관측치와 시뮬레이션 수치 비교

관측치와 모형에 의한 시뮬레이션 수치는 유사한 행태를 보이고 있으며 평균 오차 0.4%로 실제값을 잘 반영한다.

(2) GRDP

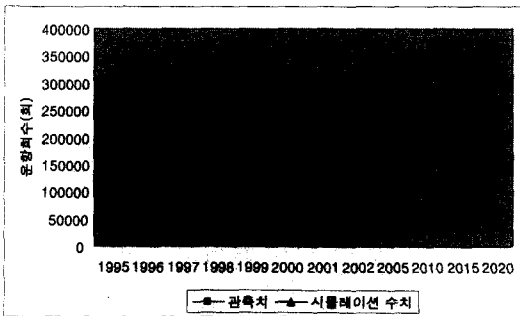
〈그림 10〉은 인천시의 지역내총생산(GRDP)의 관측치와 시뮬레이션 결과를 비교하여 나타낸다. 대체로 이 연구지역의 관측 GRDP와 시뮬레이션 GRDP간에는 우수한 상관성이 있으며 평균 오차는 5.3%이다. 1998년의 경우 IMF의 영향으로 GRDP의 감소가 발생한 것을 알 수 있다.



〈그림 10〉 인천시 GRDP의 관측치와 시뮬레이션 수치 비교

(3) 항공기 운항회수

〈그림 11〉은 우리나라 국제선 항공기의 관측된(observed)⁷⁾ 운항회수와 시뮬레이션 결과(estimated)의 운항회수를 비교한 것이다. 〈그림 11〉을 보면 실제값이 최초 지속적으로 증가하다가 1998년 소폭 감소하였는데, 이는 IMF의 영향으로 인한 항공수요 감소에 따른 결과로 이후의 운항회수는 다시 지속적으로 증가하는 추이를 나타내고 있으며, 시뮬레이션값 또한 지속적인 증가를 보이고



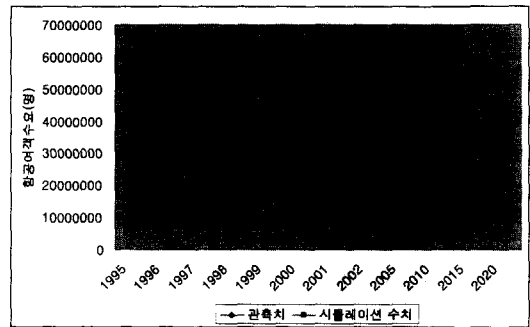
〈그림 11〉 항공기 운항회수의 관측치와 시뮬레이션 수치 비교

있다. 그림에서 보면 2005년 이후 항공기 운항회수가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 KDI의 GDP 예상 증가율이 2005년부터 급격히 증가하는 것을 반영한 것이다.

이러한 점을 고려할 때, 실제 수도권 국제선 운항회수 추이와 시뮬레이션에 의한 운항회수 행태는 매우 유사함을 알 수 있어 모델이 타당함을 알 수 있다. 오차는 평균 5.9% 정도이다.

(4) 항공여객수요

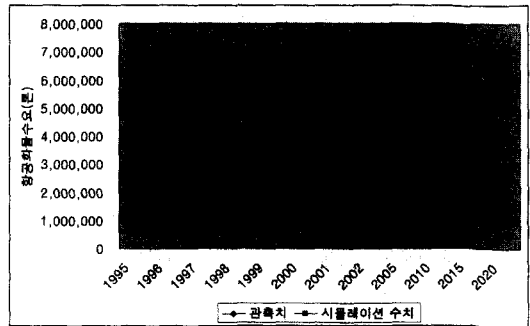
다음의 〈그림 12〉는 우리나라 국제선 항공여객수요의 관측치와 시뮬레이션 결과를 비교하여 보여준다. 1998년 약간의 높은 추정을 제외하고 시뮬레이션 결과는 평균 4.7%의 오차를 가지므로 모델이 현실을 잘 반영하고 있다.



〈그림 12〉 항공여객수요의 관측치와 시뮬레이션 수치 비교

(5) 항공화물수요

우리나라 국제선 항공화물수요의 관측치와 시뮬레이션 결과의 비교는 〈그림 13〉에서 보는 바와 같다. 관측된 항공화물수요에 대해 시뮬레이션 수치는 비교적 좋은 타당성을 가지고 있다. 평균 오차는 8%이다.



〈그림 13〉 항공화물수요의 관측치와 시뮬레이션 수치 비교

7) 여기서 2002년 이후의 자료는 2003년 대한교통학회의 "항공수요예측 및 항공정책검토 연구개발용역"의 운항회수 예측자료를 사용하였다.

2) 분석공항의 지속가능성 평가

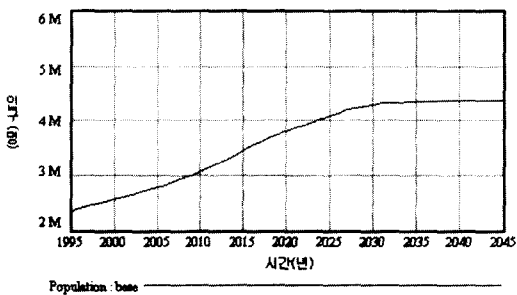
다음은 특별한 정책의 도입 없이(do-nothing) 얻게 되는 시스템의 행태이다. 즉 시스템에 대한 정책적인 충격을 배제한 채, 각 Level 변수의 초기값을 1995년의 값으로 하고 이러한 Level 변수를 변화시키는 Normal로 표현되는 파라미터의 값을 1995년에서 2001년간의 정상값으로 한다는 것이다.

분석에 이용되는 도구는 앞서 보았듯이 Time Graph이다. Time Graph는 시스템 다이내믹스 모형의 시물레이션 결과를 기술하고자 할 때 가장 많이 이용되고 있다.

(1) 인천지역 인구

〈그림 14〉은 인천지역 인구의 시간에 따른 변화. 즉 인구의 동태성을 분석하기 위해 시물레이션한 Time Graph이다. 그 결과에 의하면 2000년에는 2,572(천명), 2010년에는 3,056(천명), 2020년에는 3,832(천명), 2030년에는 4,324(천명)으로 증가 추이를 보이다가 2040년 이후 4,393(천명)에서 균형을 이루는 S자형 곡선을 나타낸다.

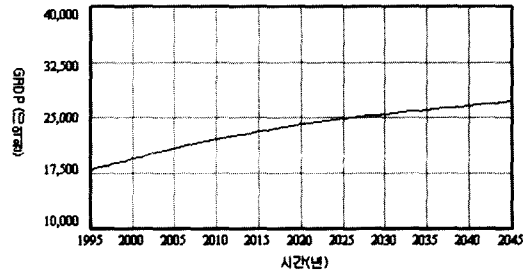
따라서 현 상태에서 어떠한 정책적 개입이 없을 경우, 인천시는 인천국제공항의 개항과 더불어 지역경제의 발전과 일자리 수의 증가로 인구가 계속적으로 증가하나 항공기의 이·착륙과 공항으로의 접근교통으로 인한 환경오염으로 인구유입의 증가세가 다소 쇠퇴하는 행태를 보이는 것을 알 수 있다. 그러나 이는 현재의 출생률과 사망률을 유지한다고 가정하였을 때의 결과이고 향후 출생률의 저하와 사망률의 증가를 감안하면 증가폭은 다소 줄어들 것으로 예상된다.



〈그림 14〉 인구에 대한 표준 시물레이션

(2) 인천시의 GRDP

〈그림 15〉은 인천시의 지역내총생산을 나타낸다.



〈그림 15〉 GRDP에 대한 표준 시물레이션

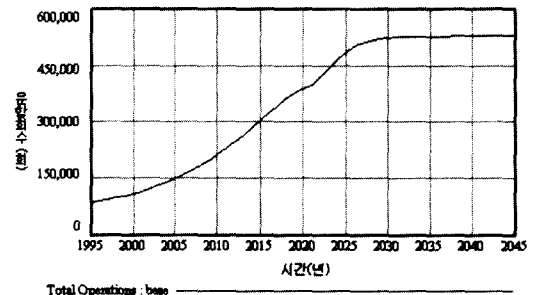
GRDP는 2000년에는 19,426(10억원), 2010년에는 22,055(10억원), 2020년에는 24,036(10억원), 2030년에는 25,444(10억원), 2045년까지 27,089(10억원)으로 계속적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 인천시 기존 산업의 성장과 인천국제공항으로 인한 경제적 과급효과로 관련 산업의 인천시 유입으로 인한 결과라고 할 수 있다.

그러나 2025년 이후 그 증가폭은 조금 감소되어 그동안보다 조금 낮은 증가폭으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 인천시의 환경오염으로 인한 산업체 입지의 제약과 환경오염 통제비용의 증가가 인천시의 지역내총생산을 다소 감소시켰기 때문이다.

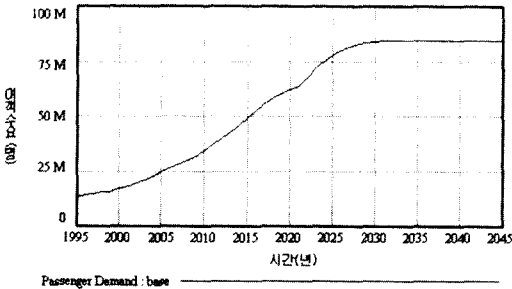
(3) 국제선 항공기 운항회수

항공여객수요와 항공화물수요의 증가에 따라 공항의 항공기 운항회수가 결정된다. 〈그림 16〉은 항공기 운항회수의 추이를 나타낸다.

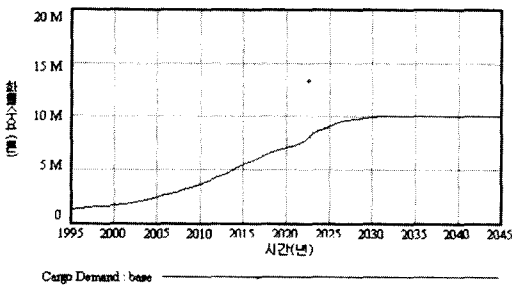
시물레이션 결과에 의하면 인천국제공항의 국제선 항공기 운항회수는 2025년 486,269(회)까지 큰 폭으로 상승하다 이후 아주 소폭 상승하는 것으로 나타났다. 이는 공항의 혼잡 발생이 항공사들의 운항회수 증대에 영향을 미치기 때문인 것으로 보인다.



〈그림 16〉 운항회수에 대한 표준 시물레이션



〈그림 17〉 여객수요에 대한 표준 시뮬레이션



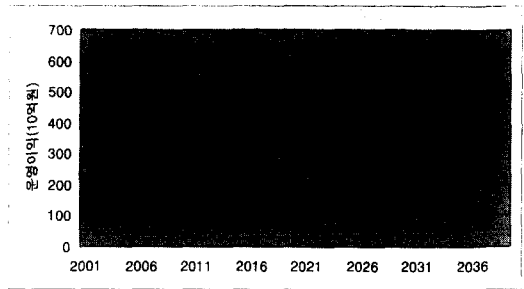
〈그림 18〉 화물수요에 대한 표준 시뮬레이션

공항의 항공기 운항회수는 여객 및 화물을 처리하는 양을 나타내고 이를 지원하는 직접관련산업 및 간접적인 영향을 받는 산업의 발달로 인천지역에 고용을 창출하게 된다. 또한 항공기의 운항회수는 항공기 운항으로 인한 소음발생 및 증대, 공항으로의 지상접근교통으로 인한 대기오염물질 배출로 인해 주변지역의 환경상태에 부정적인 영향을 주어 지역인구의 유입과 유출, 그로 인한 공항 및 인천지역 산업에 공급되는 노동력과 산업의 입지에 영향을 미칠 것이다.

〈그림 17〉과 〈그림 18〉은 운항회수에 영향을 미치는 우리나라 국제선 항공여객수요와 항공화물수요의 행태를 나타낸다. 본 연구에서는 여객터미널, 화물터미널 등과 같은 시설에 대한 고려는 하지 않았고 활주로 용량만을 고려하여 여객과 화물수요에 의해 운항회수가 결정된다고 보았다.

(4) 인천국제공항 운영이익

〈그림 19〉은 인천국제공항의 운영이익(운영수익 - 운영비용)을 나타낸다. 운영이익은 공항의 지속가능성과는 직접적인 연관은 없으나 향후 인천공항의 운영상태에 대한 좋은 시사점을 준다. 시뮬레이션 결과 운영



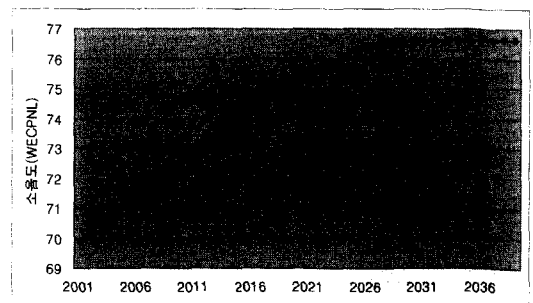
〈그림 19〉 운영이익에 대한 표준 시뮬레이션

이익은 증가하고 있지만 2031년 이후 점차 감소추세로 바뀌는 것을 볼 수 있다. 이는 운항회수가 활주로 한계 용량에 거의 이르렀을 때, 현재의 운영수익으로는 이익의 감소를 가져오는 것을 의미한다. 인천국제공항은 운영수익 중 항공수익을 감소시켜 더 많은 항공기 운항을 유치해 나갈 계획에 있다. 이를 위해서는 향후 비용을 감축시키고 비-항공수익을 증대시켜 운영상에서 이익을 내기 위해 노력해야 할 것이다.

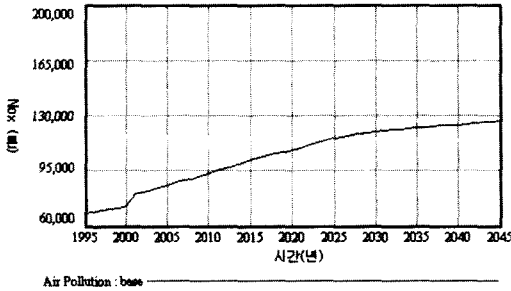
(5) 항공기 소음도 및 인천지역 대기오염

공항의 항공기 운항으로 인해 공항 주변지역에 소음으로 인한 피해가 발생한다. 〈그림 20〉은 인천국제공항의 항공기 소음변화 추이를 나타내는데, 2001년 개항부터 항공기 소음이 발생하게 되어 2045년까지 운항회수 증가에 따라 증가 행태를 보이고 있다.

시뮬레이션 결과, 인천국제공항의 항공기 소음도는 현행 항공법상 공항 소음피해지역의 지정 기준인 80웨클에는 미치지 않지만 가까운 일본(70웨클) 등 외국 선진국의 기준은 넘어서고 있다. 또한 앞으로 환경에 대한 사람들의 인식이 높아져 가고 보다 쾌적한 환경속에서 살아가고자 하는 욕구가 보다 낮은 소음 기준을 요구할 것이므로 인천국제공항은 항공기 소음 감축에



〈그림 20〉 항공기 소음도에 대한 표준 시뮬레이션



〈그림 21〉 인천지역 대기오염률에 대한 표준 시뮬레이션

대한 방안을 구축하여야 할 것이다.

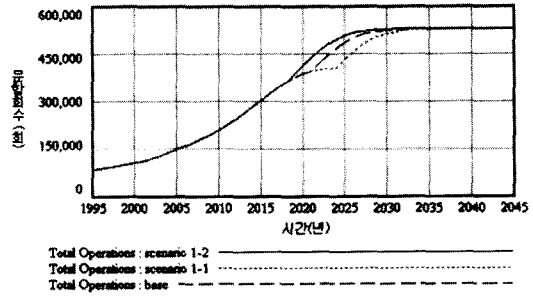
〈그림 21〉은 인천지역 대기오염물질 배출량의 그래프이다. 공항의 개항은 항공기는 물론 자동차, 선박의 인천 내 유·출입을 증가시킬 것이므로, 일정한 대기질의 악화가 예상된다. 대기오염물질 배출량은 인천시 일반 산업활동으로 인한 대기오염물질(NOx를 기준으로) 배출량과 공항의 개항으로 인해 추가로 발생하게 되는 항공기 운항과 지상지원 서비스로 인한 배출량 그리고 공항으로의 지상접근교통으로 인한 배출량에 의해 산정되었다.

오염 기준은 인천시 대기오염물질 배출량 추계⁸⁾ 중 2007년 배출량 91,385톤)을 용인할 수 있는 수준이라고 가정하고 그 비율이 1 이상이 되면 지역 거주자가 대기오염을 보다 확실히 느껴 그 지역에서 거주하는 것에 대해 부정적으로 인식하게 되는 것으로 보았다. 시뮬레이션 결과, 이산화질소 배출량은 증가하고 있으며 2025년 이후에는 GRDP의 증가추세 완화와 항공기 운항회수 균형으로 증가폭이 다소 완화되는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 대기오염은 점차 기존 거주자들의 인천지역 거주 지속성과 타 지역에서 인천지역으로의 인구유입에 영향을 미치게 될 것임을 알 수 있다. 또한 대기오염은 인천지역으로의 산업체 입지를 막고 오염에 따른 오염통제비용을 증가시켜 GRDP의 감소를 가져오는 것이다.

3) 시나리오 분석

(1) 공항개발시기 조정 시나리오

공항의 운영은 활주로 처리능력에 의해 결정된다고 할 수 있다. 현재 인천국제공항은 2020년 4번째 활주로를 오픈해 연간 항공기 처리능력 530,000회를 확보한다는 계획에 있다. 그러나 현재의 계획대로라면 증가하는 항공수요를 감당해 내기에 어려움이 있다. 따라서



〈그림 22〉 공항개발시기 조정 시나리오 결과

처리 운항회수 그래프 행태에 약간의 굴곡이 나타난다. 이러한 굴곡 없이 증가하는 항공수요를 매끄럽게 처리하기 위해서는 어떤 개발계획이 적합한지 시나리오 분석을 통해 알아보았다.

- base : 3단계 건설 활주로는 현행 계획대로 오픈될 경우
- 시나리오 1-1 : 3단계 건설 활주로 오픈이 3년 지연될 경우
- 시나리오 1-2 : 3단계 건설 활주로 오픈이 3년 앞당겨질 경우

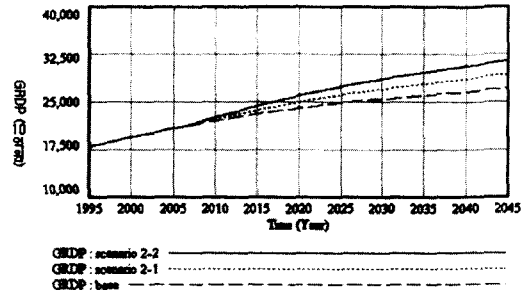
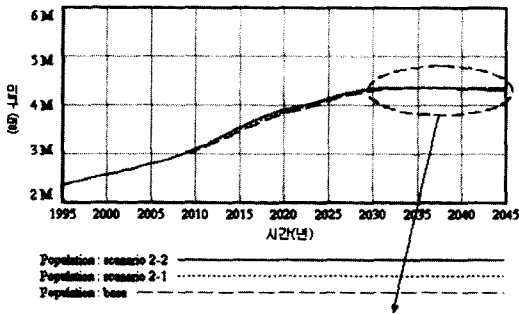
〈그림 22〉를 살펴보면 3단계 건설 활주로 오픈이 3년 앞당겨질 경우 가장 매끄러운 곡선을 나타냄을 알 수 있다. 3단계 건설 활주로 오픈이 3년 지연될 경우와 비교해 보았을 때, 상당한 운항회수의 차이를 보인다. 따라서 인천국제공항은 여러 가지 상황이 있겠지만 되도록 3단계 건설 활주로 오픈이 최소 3년 앞당겨질 수 있도록 해야할 것이다.

(2) 인천국제공항 배후지역개발 시나리오

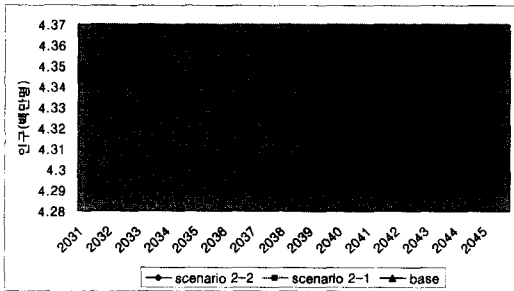
최근 들어 개발되는 대형 공항들은 주변지역을 효율적으로 활용하여 항공수요를 창출하고 지역사회와 연계하는 다양한 전략을 수립함으로써 공항의 범위를 그 배후지역까지 확대하려는 노력을 보여주고 있다. 인천국제공항 역시 관세자유지역, 국제업무지역 및 위락지역 개발 등의 개발이 진행 중이다.

이에 본 연구의 시스템에 인천국제공항의 배후지역 개발에 따른 효과를 도입해 보았다. 이때 배후지역의 개발은 여객 및 화물의 수송량을 증가시킬 것이지만,

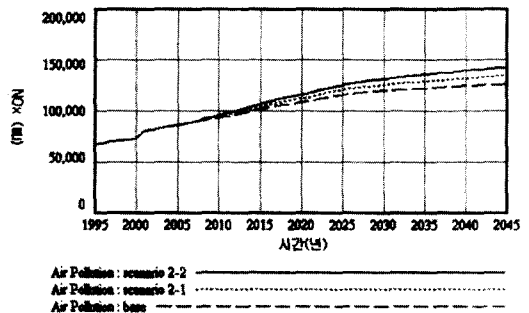
8) 인천시청 홈페이지, 대기질 개선 실천 계획



〈그림 24〉 배후지역개발 시나리오 : 지역경제부문



〈그림 23〉 배후지역개발 시나리오 : 인구부문



〈그림 25〉 배후지역개발 시나리오 : 환경부문

여객의 경우 연계승객의 유인효과가 있을 수 있으나 그 영향이 불확실하다. 그러나 관세자유지역의 설치는 물류 물동량을 증가시키고 또한 그것으로 말미암아 새로운 산업이 일어나므로 상당한 생산유발효과가 발생한다고 볼 수 있다.

- base : 표준 시물레이션
- 시나리오 2-1 : 화물물동량과 GRDP 10% 증가 가정
- 시나리오 2-2 : 화물물동량과 GRDP 20% 증가 가정

〈그림 24〉에서 〈그림 25〉을 보면, 시물레이션 결과 지역경제와 환경은 배후지역개발의 영향을 받는 것으로 나타났다. 지역경제는 배후지역개발에 따라 GRDP가 증가하고 대기오염배출량은 증가하는 것을 알 수 있다. 배후지역개발에 따른 지역경제 활성화는 환경악화에 따른 부정적인 효과로 서로 상쇄되어 인구는 배후지역개발에 큰 영향을 받지 않지만 장기적으로는 조금씩 감소하는 것으로 나타났다.

인천국제공항은 인천지역의 발전을 위한 중요한 촉매제가 될 것이지만, 인천광역시가 이를 얼마나 잘 활용하느냐에 따라 혜택의 폭이 달라지게 될 것이다(박용

화, 2000). 이제는 개발에만 주안점을 두기보다는 환경오염의 개선정책을 통해 삶의 질을 증진시켜야 한다.

(3) 환경오염 저감노력 및 항공산업활성화에 의한 서비스 산업 증가로 인한 환경오염 감소효과 시나리오

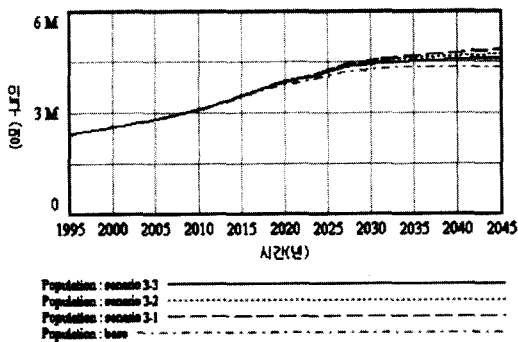
기본 시나리오(base)에 의한 시물레이션 수행결과, 현재의 시스템이 지속될 경우 경제적으로는 지속가능하지만 사회(인구), 환경적으로는 지속가능하지 않은 것으로 나타났다. 또한 현재의 시스템 상황에서 공항의 배후지역이 개발되면 경제 성장에 비해 환경적 지속가능성이 악화되고 이에 따라 사회적 지속가능성도 제자리 걸음을 하게 된다. 사회, 환경적인 지속가능성을 확보하기 위해서는 대기오염 개선정책의 시행과 대기오염 저감을 고려한 산업정책의 입안이 필요하다.

본 연구에서는 ICAO와 IATA에서 고려중인 항공기의 대기오염물질 배출량 저감규제와 지역경제적으로는 항공관련산업 활성화에 의해 인천지역의 2차산업의 비중을 낮추고 서비스산업 등 3차산업, 부가가치 산업

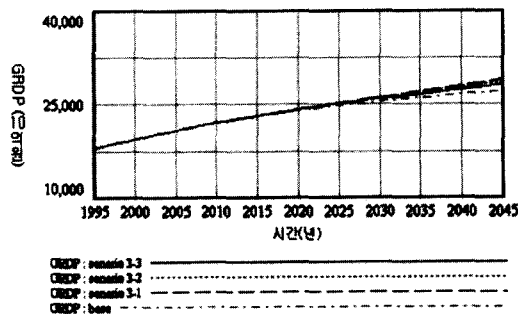
9) 국제민간항공기구(ICAO)와 국제항공운송협회(IATA)에서 항공기에 의한 대기오염물질 배출량 저감을 위한 방안과 정책을 고려중이다.

으로의 전환정책을 시행하는 시나리오를 설정하여 시물레이션을 수행하였다.

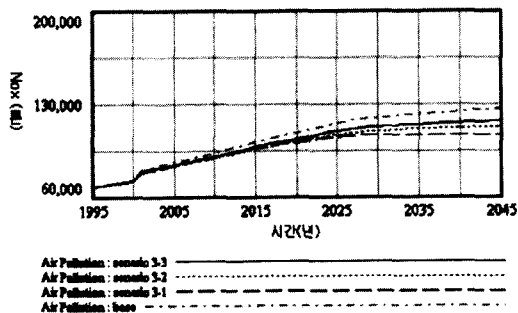
- base : 표준 시물레이션
- 시나리오 3-1 : 항공기 운항 및 지역내 일반산업에 의한 대기오염물질 배출량 3% 저감 가정
- 시나리오 3-2 : 항공기 운항 및 지역내 일반산업에 의한 대기오염물질 배출량 2.9% 저감 가정



〈그림 26〉 환경오염 저감노력 시나리오 : 인구부문



〈그림 27〉 환경오염 저감노력 시나리오 : 지역경제부문



〈그림 28〉 환경오염 저감노력 시나리오 : 환경부문

- 시나리오 3-3 : 항공기 운항 및 지역내 일반산업에 의한 대기오염물질 배출량 2% 저감 가정

〈그림 26〉에서 〈그림 28〉의 시물레이션 결과를 살펴 보면, 현재의 시스템에서 환경오염물질을 2%, 2.9% 감소시키는 시나리오의 경우 인구나 GRDP가 증가하지만 대기오염물질 배출량도 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 3% 감소시키는 정책을 실시할 경우 인구나 GRDP는 증가하고 대기오염물질 배출량은 감소하는 그래프로, 3가지 부문 모두에서 양호한 행태를 보이는 것으로 나타났다. 즉, 현재의 경제활동(일반경제활동 및 공항활동)이 지속될 경우 최소 3% 이상 환경오염물질을 저감시켜야 한다는 것을 알 수 있다.

(4) 종합 시나리오

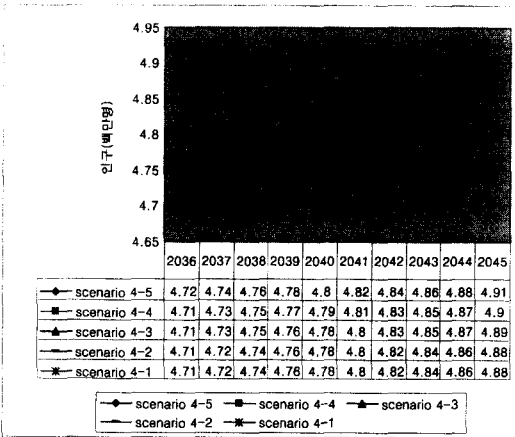
이제 배후지역개발과 환경개선에 대한 노력이 병행 되었을 경우의 상황을 살펴보기로 한다. 향후 환경오염물질을 3% 저감(항공기 배출 대기오염물질 3% 저감, 일반산업 배출 대기오염물질 3% 저감)시켜야 한다는 규제 아래 배후지역개발은 어느 정도까지가 적합한지 알아보기 위해 다음의 시나리오를 도입한다.

사회, 경제, 환경의 세가지 부문이 동시에 지속가능하기 위한 방안으로 다음의 시나리오를 도입했다. 여기에서 배후지역개발은 위에서 언급한 시나리오 2-series의 내용과 같다.

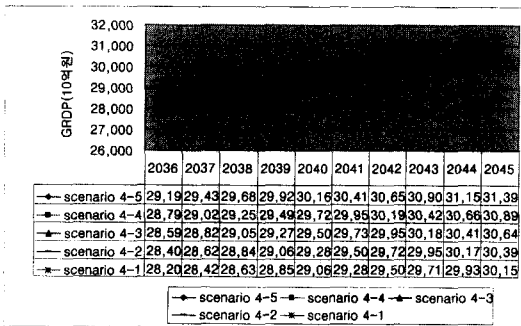
- 시나리오 4-1 : 배후지역개발 효과 5% 가정
- 시나리오 4-2 : 배후지역개발 효과 6% 가정
- 시나리오 4-3 : 배후지역개발 효과 7% 가정
- 시나리오 4-4 : 배후지역개발 효과 8% 가정
- 시나리오 4-5 : 배후지역개발 효과 10% 가정

다음의 〈그림 29〉에서 〈그림 31〉은 이와 같은 시나리오를 통해 시물레이션 한 결과이다. 시나리오 4-series는 그래프가 감소-균형-증가를 이루는 접점을 찾기 위한 시나리오로서 개발 효과를 작은 차이를 두고 시물레이션 하였으므로 그래프상의 큰 행태 변화는 없다. 단지 약간의 수치의 차이를 보여주하고자 2036년 이후의 결과만 따로 나타내었다.

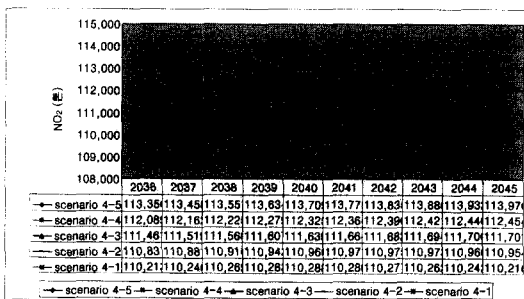
시물레이션 결과 시나리오 4-1에서 4-5는 모두 인



〈그림 29〉 종합 시나리오 : 인구부문



〈그림 30〉 종합 시나리오 : 지역경제부문



〈그림 31〉 종합 시나리오 : 환경부문

구와 GRDP에서는 증가 행태를 보였다. 그러나 환경 부문에서는 대기오염물질 배출량이 배후지역개발이 7% 이상이 될 때 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 배후 지역개발이 7% 이상이 되면 환경오염이 계속 증가하게 되는 것을 의미한다. 그러므로 향후 항공기 배출 대기오염물질(NO2)을 3% 저감해야한다는 규제가 있다면, 인천국제공항의 배후지역개발 효과가 7% 이상(하

〈표 1〉 시나리오 평가 매트릭스

(△: 균형, ○: 증가, ×: 감소)

	사회(인구)	경제(GRDP)	환경(대기오염)
base	△	○	×
scenario 2-1	×	○	×
scenario 2-2	×	○	×
scenario 3-1	○	○	○
scenario 3-2	○	○	×
scenario 3-3	○	○	×
scenario 4-1	○	○	○
scenario 4-2	○	○	○
scenario 4-3	○	○	×
scenario 4-4	○	○	×
scenario 4-5	○	○	×

물물동량 및 인천 지역내총생산이 7% 이상 증가)이면 대기오염물질 배출량은 계속 증가할 것이다.

다음의 〈표 1〉은 표준 시뮬레이션 결과와 시나리오 별 시뮬레이션 결과를 나타내는 매트릭스이다.

표준 시뮬레이션과 다양한 시나리오 하에서의 시뮬레이션 결과를 종합해 보면, 현재의 경제활동(일반산업 + 공항활동) 여건이 지속될 경우 보다 나은 환경을 위한 노력이 필요하다. 또한 공항의 입지로 인한 배후지역개발로 경제활동 여건이 달라질 경우 환경오염에 대한 별다른 노력이 없다면 지역경제는 지속가능한 것으로 보이나 사회, 환경적으로는 지속가능하지 않은 것으로 나타난다. 그러나 환경개선노력이 이루어지면서 공항활동이 이루어진다면, 현재의 경제활동 여건에 배후지역개발 효과로 인한 경제적 조건이 6% 증가한 경우까지는 경제, 사회, 환경적으로 모두 지속가능한 것으로 나타났다.

V. 결론 및 연구의 한계

공항은 공항이 가지고 있는 기본적인 역할뿐만 아니라 공항이 속해 있는 지역사회, 환경과 밀접하게 연관되어 있다. 본 연구에서는 공항 시스템을 공항과 공항을 둘러싼 요소들이 조직적, 구조적으로 상호관계를 이루는 집합체로 정의하고 공항의 지속가능성 개념은 공항이 지니고 있는 한계용량 내에서 지역사회의 환경체제와 사회체제의 생명력에 위협을 주지 않으면서 환경, 사회, 경제적 서비스를 제공하는 것이라고 보았다.

본 연구에서 구축한 시스템 다이내믹스 모델의 표준 시뮬레이션은 어떠한 정책적 개입이 없는 현재의 상황

하에서 얻게 되는 행태분석으로 분석공항의 지속가능성 분석을 위해 시뮬레이션한 결과에 의하면, 경제적으로는 지속가능하지만 사회, 환경적으로는 지속가능하지 않은 것을 알 수 있다는 사실을 보여준다. 이외에 본 연구에서는 향후 있을 수 있는 여러 가지 정책 시나리오별로 다양한 시뮬레이션을 수행하였다.

환경의 중요성에 대한 인식으로 항공기의 대기오염 물질 배출량의 저감 규제와 항공산업 활성화로 현재 인천지역의 2차산업의 비중을 낮추고 서비스산업 등 3차 산업, 부가가치 산업을 육성하는 정책시나리오에서는 대기오염물질 배출량을 최소 3%까지는 감소시켜야 하는 것으로 나타났다. 향후 대기오염물질 배출량 3% 저감하도록 규제했을 경우 배후지역의 개발효과별로 평가하였을 경우에는 최대 6%까지의 개발은 사회·경제·환경적으로 모두 지속가능한 것으로 나타났다.

본 연구의 향후 연구 방향과 한계를 제시하면 다음과 같다. 공항 시스템의 구성요소 추출과 인과관계를 본 연구는 연구자의 인지 내에서 구축하였으나, 관심이 무엇인가라는 시스템의 경계에 비추어 구성요소를 어떻게 설정하느냐에 따라 결과가 달라질 수 있다. 이러한 상이한 결과에 대하여 여타 방법론과의 연계를 통하여 시스템 경계에 대한 명확화와 그러한 작업을 통해 시스템 경계의 확장 및 축소, 구성요소의 추출, 추출된 구성요소들간의 인과지도 작성 등 광범위하고 세심한 분석이 수반되어야 할 것이다.

본 연구에서는 환경이 산업활동 및 인구증가에 미치는 영향 등을 나타내는 승수들을 기존연구에서 제시된 값들을 사용하였다. 실제 인천국제공항은 섬에 위치해 있어 인천광역시와는 거리적으로 멀리 위치해 있으며, 환경오염, 특히 소음과 대기오염이 인천광역시에 미치는 영향은 본 연구에 적용된 승수의 값보다 작을 수 있다는 점이 본 연구의 한계점으로 지적될 수 있으며 향후 연구를 통하여 보완되어야 할 부분이다.

참고문헌

1. 김도훈 외(2001), 시스템 다이내믹스, 대영문화사.
2. 김동환(1999), 김대중 대통령의 인과지도, 한국시스템다이내믹스 학회.
3. 대한교통학회(2003), 항공수요예측 연구개발용역.
4. 문경주(2001), 도시체제의 지속가능성 연구 - System Dynamics Model의 적용, 부산대학교 박사학위 논문.

5. 문태훈(1998), 지속가능한 성장을 위한 환경용량의 산정과 환경지표 개발에 관한 연구, 한국정책학회보.
6. 박용화(2000), 공항의 경쟁력 강화를 위한 주변지역 개발방향 - 인천국제공항을 중심으로, 항공산업 연구.
7. 오주삼(2001), 회귀분석을 이용한 일교통량 추정 모형의 개발 통계청[통계분석연구] 제6권 제2호.
8. 이동걸(2002), 환경교육, 초등1급 정교사 원격연수과정.
9. 이성용(2000), EDMS를 이용한 인천국제공항 주변지역의 대기오염도 평가, 수원대 석사학위논문.
10. 인천국제공항(2002), 환경성과보.
11. 인천시청(2002), 대기오염 배출량 추계.
12. 인천시청 홈페이지, 대기질 개선 실천 계획.
13. 최남희 외(1999), 지역 환경시스템과 지역 경제 시스템간의 동태적 상호작용과 정책실험에 관한 연구, 한국 시스템 다이내믹스 학회.
14. 한국과학기술원 테크노경영대학원(1998), 「청정 연료 사용지역내에서 지역난방 사용연료의 합목적 선정에 관한 연구」.
15. 환경부(2001), 국가 지속가능발전지표 개발 및 활용방안 연구.
16. 환경부(1998), 대기오염물질배출량.
17. 교통개발연구원(2000), 인천국제공항운영에 따른 경제적 파급효과 극대화 방안.
18. KDI(2003), 경제동향 주요지표.
19. A. Markandya(1998), The Indirect Costs and Benefits of Green house Gas Limitations, UNEP Collaborating Centre on Energy and Environment.
20. Brain Graham(1999), Environmental sustainability, airport capacity and European air transport liberalization: irreconcilable goals?, Journal of Transport Geography.
21. Buyung Agusdinata et al(2002)., The dynamics of airline alliances, Journal of Air Transport Management.
22. D. H. Meadows et al.(1992), Beyond The Limits, Chelsea Green Publishing Company.
23. D. H. Meadows et al.(1974), Dynamics of

- Growth in a finite world, Pegasus Communications.
24. D. H. Meadows(1980), Elements of the System Dynamics Method, MIT Press.
 25. D. H. Meadows(1980), The Unifavorable A priori, In Jorgen Randers(ed)., Elements of the System Dynamics Method, MIT Press.
 26. D. W. Sohn(1997), A transportation system planning model for sustainable development : system dynamics approach to balancing socio-economic and environmental concerns.
 27. J. D. Sterman(2000), Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World.
 28. James M. Lyneis(2000), System dynamics for market forecasting and structural analysis, System Dynamics Reviews.
 29. John E. Hanke-Arthur G. Reitsch(1992), Business Forecasting 4th Edition.
 30. J. W. Forrester(1969), Urban Dynamics, Pegasus Communications.
 31. Martin Liehr et al.(2001), Cycles in the sky: understanding and managing business cycles in the airline market, System Dynamics Reviews.
 32. Morecroft J.D.W.(1985), Rationality in the analysis of behavioral simulation models, Management Science.
 33. Munro, D.A.(1995), Sustainability: Retic or Reality?, In Trzyna, Thaddeus.(Eds). A Sustainable World-Defining and Measuring Sustainable Development, CA: International Center for the Environment and public Policy.
 34. Paul Upham(2001), A comparison of sustainability theory with UK and European airports policy and practice, Journal of Environmental Management.
 35. Paul Upham et al(2003)., Environmental capacity and airport operations: current issues and future prospects, Journal of Air Transport Management.
 36. P. Senge(1990), The Fifth Discipline, Currency Doubleday.
 37. <http://cosmos.changwon.ac.kr/~gen1213/>.
 38. <http://inha.net/phdlet>.

✉ 주 작 성 자 : 김원규

✉ 논문투고일 : 2004. 3. 12

논문심사일 : 2004. 5. 30 (1차)

2004. 8. 11 (2차)

2005. 2. 4 (3차)

심사판정일 : 2005. 2. 4

✉ 반론접수기한 : 2005. 8. 31