

시스템 다이내믹스를 이용한 폐기물관리시스템의 지속가능성 분석모델에 관한 연구

A study on Sustainability Model of Waste Management Using System Dynamics

박 래* · 차근호**

Park, Rhae* · Cha, Gun-Ho**

Abstract

Using materials recovered from the waste stream instead of virgin resources as a raw material in manufacturing has great environmental and economic benefits. However, there is lack of public interest in needs for integrated waste management and its relevant facilities, because of NIMBY syndrome.

This article has proposed a system dynamics model for the study of the potential and systemic consequences of resource circulation management system(RCMS) policy for a Sudokwon landfill site in Korea. The results of the study indicate that the effects of RCMS are seen continuously to increase in term with both the community welfare level and the resource and energy level. Moreover the effects of RCMS appear sharply in the first half of the simulation period.

Keywords: 통합폐기물관리, 환경효율성, 지속가능한 폐기물관리, 폐기물 최소화, 자원순환관리시스템, 자원회수율
(IWMS:integrated waste management system, eco-efficiency, sustainable waste management, RCMS : resource circulation management system, recovery rate)

* 수도권 매립지관리공사 조사 팀장 (제1저자, parkrhae@slc.or.kr)

**항공대학교 경영학과 교수 (공동저자, khcha@hau.ac.kr)

I. 서론

1992년 지구환경문제에 대한 종합규범체제인 21세기 지속가능한 발전을 위한 “의제 21(Agenda 21)”이 채택됨으로써 국제사회는 환경과 조화된 지속가능한 발전을 정책이념으로 확립하게 되었다.

이에 따라 21세기에 들어서면서부터는 ‘환경의 세기’를 강조하면서 경제·환경·사회부문의 각종정책에서 “지속가능한 발전”, “자원순환형 사회구축”이라는 용어와 개념이 각종정책의 기조로 자리 잡기에 이르렀으며 최근 중요한 이슈로 대두되고 있다. 즉 대량생산과 대량소비의 연결고리를 끊고 자원순환형사회를 건설하는 것이 지속가능한 발전의 요체라는 개념을 인식하게 되었으며 이러한 맥락에서 볼 때 여러 형태의 자원재생 잠재력을 가지고 있는 폐기물관리부문은 자원의 지속가능성 유지 차원에서 중요한 부분이라 할 수 있다.

산업사회가 다양화되고 고도화됨에 따라 인류의 생활이 풍요로워지면서 인류는 미래세대의 지속성에 대한 우려와 관심이 높아지게 되었으며 이러한 관심의 중요한 요소 중 하나로 자원고갈문제를 들 수 있다. 이러한 배경에서 폐기물관리 분야에서도 청소개념에서 적정처리단계를 초월하여 이제는 재활용 뿐 아니라 생태학적 사고와 환경효율성을 기반으로 하여 재자원화를 적극 모색하는 자원관리형태로 전환되고 있는 추세에 있다. 이는 유한자원인 환경자원의 효율적인 활용과 순환을 강조하는 개념으로 자원을 효율적으로 활용하여 사회의 자원 집약도를 낮추려는 동시에 발생폐기물 등 폐자원을 가장 비용효과적인 방법으로 자원화 또는 처리를 하면서 부정적인 모든 환경문제를 최소화하는 지속가능한 폐기물관리의 실천전략으로 볼 수 있다. 그 대표적인 사례로 통합폐기물관리시스템(IWMS : Integrated Waste Management System)¹⁾을 들 수 있다²⁾.

이 연구에서는 지속가능한 폐기물관리의 개념적인 틀을 구축함과 동시에 관련요소들의 인과관계를 활용한 모형을 통하여 현재 반입폐기물을 전량 매립처리하고 있는 수도권매립지관리공사가 매립처리의 대체방안으로 추진하고 있는 “자원순환관리시스템(RCMS)”³⁾이

1) M. Kuras and J. Mikolas, “Integrated Waste Management Concepts-Experience of the Czech Republic”, (Itay; CISA-Environmental Sanitary Engineering Centre, 2001)에서 통합폐기물관리시스템의 정의를 비용효과적이며 지속가능한 방법으로 폐기물처리에 있어서의 부정적인 모든 환경문제를 최소화 하는 것이라고 정의하고 있다.

2) C. Chip, *Integrated Waste Management for New Developments; Sustainable Cities*, (LosAngeles, Calif. : Eco-Home Media, 1992).

3) 자원순환관리시스템(RCMS : Resource Circulation Management System)이란 수도권매립지관리공사가 현행의 매립중심 폐기물관리체제를 환경효율적인 자원관리체제로 전환을 위해 새롭게 추진중인 통합폐기물관리시스템이며, 최종 매립처리를 위해 수도권매립지로 반입되는 폐기물을 건조-파쇄-선별-균질화-열적

사회의 지속가능성에 어떤 영향을 미칠 수 있는지에 대해서 분석해보고자 한다.

아울러, 연구의 범위는 대표적인 폐기물 매립장인 수도권매립지를 분석대상으로 하고 있으므로 지역적 범위는 수도권지역으로 한정하였고 폐기물매립에 따른 침출수 처리·안정화 등 사후관리를 고려하여 시간적 범위를 100년으로 가정하였으며 폐기물 범위는 생활계 폐기물로 한정하였다.

연구를 위해 문헌연구 및 폐기물관리와 관련된 각종의 기술·통계자료 등을 통하여 폐기물관리시스템의 지속가능성 제고와 관련된 개념과 발전방향·적용이론 및 요소·원칙 등을 우선 분석 정리하였다. 이와 연계하여 현행의 국내·외 폐기물관리실태 및 정책동향·시책수단 등을 재조명함으로써 이론적인 접근을 하였다. 이러한 문헌적 연구와 폐기물관리 정책 및 사례분석을 기초로 System Dynamics 방법론을 사용하여 지속가능성 분석영역을 ‘환경·경제’·‘폐기물관리’ 그리고 ‘사회후생’ 분야로 구분하였다. 그리고 이들 상호간에 영향 및 인과관계를 규명하고 이를 기초로 전체적인 분석모델을 구축하였다.

II. 선행연구 검토

1. 지속가능한 발전의 개념⁴⁾ 및 시각

최근까지의 연구결과를 토대로 한 지속가능한 발전 개념은 [그림 2-1]과 같이 경제·사회·환경생태적 관점을 모두 포함하고 있다. 이는 사회적, 경제적 개발의 목표들이 환경을 고려한 지속가능성의 관점에서 정의되어야 한다는 것을 의미한다.

그러나 최근 미래세대를 위해 자연보전과 경제발전을 어떻게 조화시키느냐에 대한 관점의 차이로 인해 지속가능성에 대한 견해가 엇갈리고 있다. 경제학에서는 자연자원(환경재)의 손실은 비용으로 환산가능하며 이러한 비용은 비용-편익분석을 통하여 나타낼 수 있다고 본다. 그리고 이러한 비용은 자체 규제적인 시장(self-regulative market) 내에서 가격조정

처리·발전공정 등으로 구성된 시스템으로 관리함으로써 폐기물처리 단계에서 유기물질 회수 등 폐기물 감량화와 폐열·전기 등 에너지 회수를 극대화하면서 환경문제는 최소화 시키는 환경효율성(Eco-efficiency) 제고 시스템이다. 이 시스템은 폐기물로부터 회수된 물질·에너지 등의 자원을 생활·산업계로 재순환·사용한다는 의미에서 자원순환관리시스템(RCMS : Resource Circulation Management System)으로 부르고 있다.(수도권매립지관리공사, 「자원순환관리시스템 구축 타당성조사 보고서」(2001), pp.131~133.)

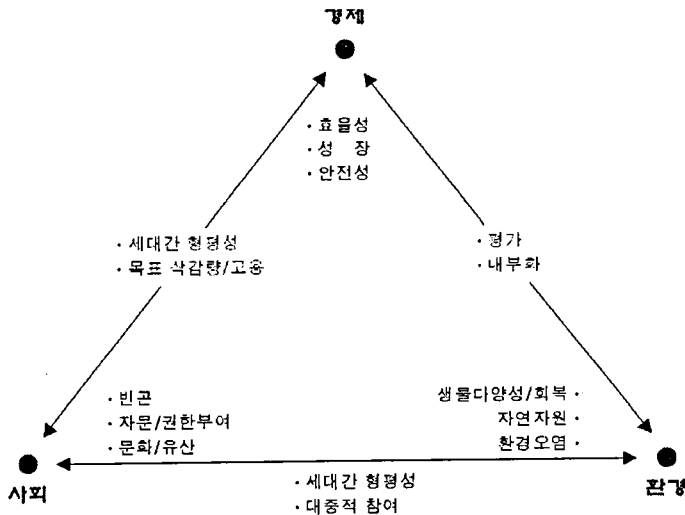
4) 정희성(외), “지속가능성 평가를 위한 지역 생태-경제 모형 개발 연구(I)”, (한국환경정책평가연구원, 2002) 내용을 발췌·요약한 것임.

을 통해 시장의 최적 상황을 만들어 낼 수 있다는 관점을 지닌다(Seidl, 2000: 770).

반면 생태학에서는 우주의 에너지는 일정하다는 열역학 제1법칙과 에너지가 사용되는 만큼 엔트로피는 증가한다는 열역학 제2법칙을 근본으로 하고 있다. 지구의 자연자원은 한정되어 있고 인간의 경제활동으로 인해 이용 가능한 자원이 이용 불가능한 자원으로 전환되어 가는 과정, 즉 지구의 엔트로피를 증가시키는 과정이 계속되면 결국 한계에 도달하는 때가 도래한다는 점을 강조한다.

이러한 견해차는 주로 자연환경이 제공하는 서비스를 인간이 만들어 놓은 사회기반시설로 대체하는 경제체제의 가능성에 관한 것이다. 이런 면에서 신고전학과 경제학자들의 견해는 약한 지속가능성(weak sustainability)이라 불리고 생태경제학자의 개념은 강한 지속가능성(strong sustainability)이라 불린다.

여기서 약한 지속가능성이라는 의미는 인간경제가 생산하는 재화를 유지하는데 중점을 두는 것이고, 강한 지속가능성이라는 것은 인간경제가 생산해내는 환경서비스 대체품에는 한계가 있으니 자연 시스템에 의지한 지속가능성을 주장하는 것이다).



[그림 1] 지속가능한 발전에 대한 접근방식

자료 : Mohan Munasinghe and Jeffrey Mcnelly, 1995, "Key Concepts and Terminology of Sustainable Development", Mohan Munasinghe and Walter Shearer(ed), Defining and Measuring Sustainability; The Biogeophysical Foundations, the United Nations University and The World Bank, p.25.

2. 시스템 다이내믹스를 적용한 지속가능성 분석 연구동향

국내에서도 최근 지속가능성을 동태체계 모형으로 구축하여 정책적인 시사점을 찾고자 하는 연구가 진행되고 있어 고무적이다. 문태훈(1998)은 지속가능성을 현실적으로 파악하기 위한 환경지표를 개발해야 할 필요성을 지적하고 시스템 다이내믹스를 이용하여 부존의 자연환경, 지속가능한 인간 활동의 적정규모, 환경부하의 크기, 환경의 질 등을 순환적으로 결합할 수 있는 지표체계 개발방법을 제안하였다⁶⁾.

Thirumurthy(1992)는 인도의 환경설비와 도시성장과의 관계를 체계적인 동태모형으로 분석하기 위해 시스템 다이내믹스를 사용하였다. 그의 모델은 1980년에서 2020년까지 마두라스 도시의 환경서비스 확대를 위해 요구되는 투자를 평가하기 위해 개발되었다. 도시 고품폐기물관리는 이 연구에서 다른 분야들 중 하나로 인구와 산업활동으로 인하여 발생된 폐기물의 재활용과 선별, 매립과정에서 소요되는 비용과 투자간의 피드백 모형을 개발해 적절한 기술·설비 투자 대안을 제시하였다⁷⁾.

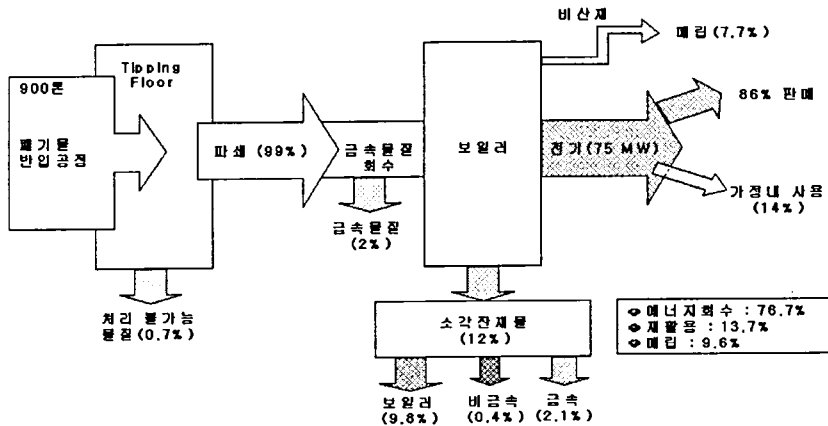
Mashayekhi(1993)의 “뉴욕시 고품폐기물관리시스템의 전환 : 동태적 분석”⁸⁾은 뉴욕시의 고품폐기물 처리문제를 시스템 다이내믹스 모델을 적용시켜 분석한 것이다. 이 연구는 1987년 뉴욕시에서 폐기물 발생량이 매립지나 소각장의 용량을 초과할 때 발생했던 문제를 사례로 폐기물관리 모델을 구축하였다. 이 모델은 매립중심의 처리방식에서 다른 처리 대안으로 전환할 때 비용측면에서 폐기물관리시스템이 어떻게 흘러갈 것인지를 보여준다.

그리고 1997년 「System Dynamics Review」를 통해 발표된 Sudhir et al의 “인도의 지속 가능한 고품폐기물 관리계획”⁹⁾은 정부의 공식적인 폐기물관리 시스템과 재활용단계에서 참여하는 비공식적인 참여자들이 구성하는 시스템이 공존한다는 개발도상국에서의 폐기물관리를 인도의 광역시를 통해 보여준다. 그리고 공식적인 폐기물 수집, 비공식적인 자원재생 및 폐기물 발생시스템들 간의 피드백작용을 보여주고 제안된 모델로 정책적 대안들을 시뮬레이션 하였다. 이 모델은 지속가능한 도시 고품폐기물관리를 위한 정책대안과 구조들의 잠재적이고 체계적인 논의 쟁점을 제공해준다.

-
- 6) 문태훈, "지속가능한 성장을 위한 환경용량의 산정과 환경지표 개발에 관한 연구", 「한국정책학회보」 7(1), (1998).
- 7) A. M. Thirumurthy, "Environmental facilities and urban development in India", (Academic Foundation, 1992).
- 8) Mashayekhi, A.N. "Transition in New York state solide waste system; a dynamic analysis", System Dynamics Review Vol. 9., (1993), p.23~48.
- 9) V.Sudhir, G.Srinivasan and V.R.Muraleedharan, "Planning for sustainable solid waste management in urban India", System Dynamics Review, 13(5), (1997).

우리나라에는 폐기물관리정책에 대한 모델을 구축한 문태훈(2000)의 ‘시스템 다이내믹스를 이용한 폐기물관리정책에 관한 연구’가 있다. 이 연구는 폐기물 관리정책에 의해 자원의 효율적인 관리를 이끌어 낼 수 있는 적절한 정책대안을 시스템 다이내믹스 모델분석을 이용하여 도출하고자 하였다. 그는 폐기물관리정책에서 논의될 수 있는 자원의 보호에 중점을 두어 천연자원의 사용, 제품의 생산, 제품의 사용, 폐기물의 발생, 재활용 등의 과정을 중심으로 인과관계를 도출하였다.

Nicholas J. Themelis¹⁰⁾는 미국 뉴욕시를 중심으로 한 “The Environmental Impacts Assessing Waste-to-energy and Landfilling in the US”의 사례연구¹¹⁾에서 매립처리방식을 통한 적정처리 방안과 폐기물 에너지화 등 자원화방식에 대한 비교연구에서 자원화방식 중 폐기물 에너지회수시설에서의 물질 흐름도를 [그림 2-2]와 같이 제시하면서 폐기물로부터 자원회수를 제고를 위한 지속적인 연구 필요성을 강조하고 있다.



[그림 2] 폐기물 에너지 회수시설의 물질흐름도

그동안 폐기물관리에 대해서 시스템 다이내믹스를 적용하여 동태적인 관계를 분석한 연구는 있었지만 폐기물관리시스템과 지속가능성을 함께 분석한 연구는 상대적으로 거의 없는 상황이다. 이러한 주제에 대해서 선언적 형태의 주장이나 개념적인 틀에 관하여는 많은 연구가 있지만 시스템의 동태적인 특성과 개념을 정량화한 분석 연구는 드문 것이 현실이다.

10) Nicholas J. Themelis는 미국 뉴욕에 위치한 콜럼비아 대학에서 지구환경공학센터장 및 지구환경공학과 교수를 겸임하고 있음.

11) Nickolas J. Themelis, "The Environmental impacts Assessing Waste-to-energy and Landfilling in the US", (<http://www.seas.columbia.edu>, 2002).

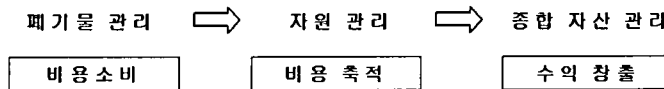
Ⅲ. 폐기물관리시스템과 지속가능성

1. 폐기물관리시스템

1) 폐기물의 정의 및 관점

폐기물관리법에서는 폐기물을 “사람의 소비활동이나 생산과정에서 필요하지 아니하게 된 물질”로서 “쓰레기·연소재·오니·폐유·폐산·폐알카리·동물의 사체 등”을 포함하는 것으로 정의하고 있다. 이러한 정의는 대부분 소유자 중심의 용도여부를 기준으로 폐기물을 정의하고 있다.

유럽연합에서는 폐기물의 정의에 따른 폐기물관리상의 여러가지 제한요인들이 지속가능한 폐기물관리에 장벽이 될 수 있음을 인식하고 지속가능한 폐기물관리차원에서 폐기물의 정의를 “완전하게 사용되어 최종적으로 버려지는 물질¹²⁾”로 규정하고 있다. 이러한 관점은 그동안 폐기물을 보는 관점을 ‘청소·처리대상’에서 ‘자원’으로의 확실한 전환을 의미하며 최근에는 한 단계 더 발전하여 기업경영의 지속가능성을 연구하는 그룹을 중심으로 폐기물을 자산(Asset)의 관점¹³⁾에서 관리해야한다는 주장이 제기되고 있다. 이들은 폐기물을 폐기물로 관리하면 비용소비, 자원으로 관리하면 비용축적, 자산으로 관리하면 수익창출이라는 개념을 강조하고 있다(그림 3) 참조).



[그림 3] 폐기물관리관점의 변화

따라서 지속가능성이라는 관점에서 폐기물관리는 생산·유통·소비 등 경제활동과정에서의 근원적 감량유도(발생억제), 배출되는 폐기물을 수집하고 운반하는 과정에서의 분리·선별·재이용 및 재활용(물질회수), 전기·폐열 등의 자원화(에너지 회수)는 극대화하고 최종 버려지는 물질을 최소화(환경부하 극소화)하여 불필요하게 된 물질의 최종매립 등 적정처리(안전처리)를 포괄하여 각종시책 및 제도개발, 각종 자원회수시설 등 인프라 확충

12) Oliver Gohlke et al., “New grate-based waste-to-energy system produces inert ash granulate”, Waste Management World, May-June, (2003), pp.37~409.

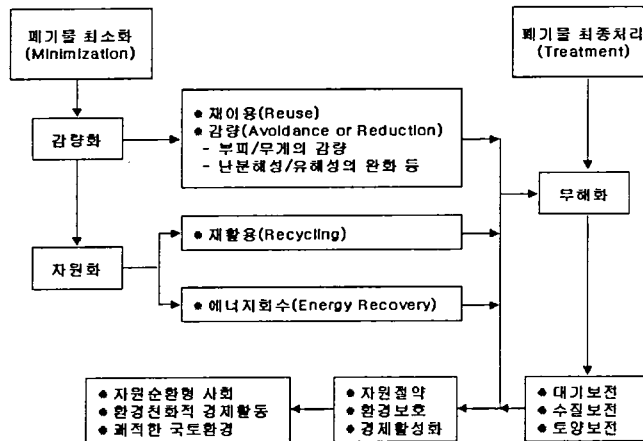
13) 차근호, “기업에서의 지속가능성 의미와 CEO의 역할-Total Asset Management”, (WRI Bell Conference, 2003).

행위로 정리할 수 있다.

2) 국내 폐기물관리 정책

폐기물은 폐기물관리에 관한 기본법인 「폐기물관리법」을 중심으로 「자원의절약과재활용촉진에관한법률」 및 「폐기물의국가간이동및그처리에관한법률」 등에 의하여 관리되고 있으며, 기타 관련법률로는 「폐기물처리시설설치촉진및주변지역지원등에관한법률」, 「한국자원재생공사법」 및 「수도권매립지관리공사의설립및운영에관한법률」 등이 있다. 이러한 법률들을 기반으로 국가폐기물관리종합계획을 수립·추진 중에 있다.

제1차 국가폐기물관리종합계획에 이어 2002년에 수립된 「제2차 국가폐기물관리종합계획」에서는 폐기물의 최소화·자원화·안전처리 등 기존의 정책방향을 유지하면서 지속 가능한 “자원순환형 경제사회기반 구축”을 정책목표로 설정하고 있다. “지속가능성의 원칙”, “예방의 원칙”, “오염자부담원칙의 강화”, “통합 및 효율성의 원칙”, “참여와 파트너십의 원칙”이라는 정책기조 하에 폐기물감량·재활용 등 자원화·적정처리를 위한 정책수단과 세부실천방안을 제시함으로써 폐기물관리정책에 있어서 근원감량·자원화·효율성을 기반으로 하는 지속가능성의 개념이 본격적으로 반영되기 시작하였다. [그림 4]는 「제2차 국가폐기물관리종합계획」에서 제시한 폐기물의 최적관리 개념도¹⁴⁾이다.

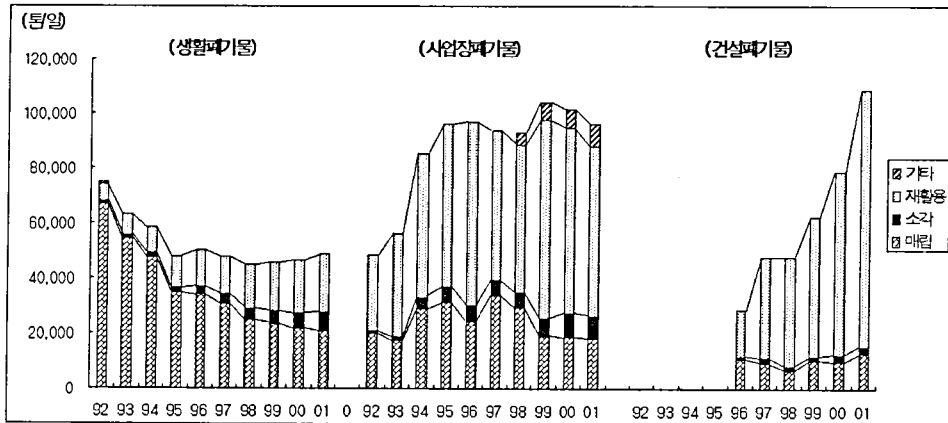


[그림 4] 폐기물의 최적관리 개념도

14) 환경부, 「제2차 국가폐기물관리종합계획」, (2002), p.52.

3) 폐기물 처리 및 관리현황

우리나라의 가정 및 사업부문에에서 배출되는 생활계폐기물(지정폐기물 제외)은 전체적으로 계속 증가추세에 있다. 그러나 배출원별로 보면 가정 및 사업부문에에서 배출되는 생활계폐기물의 경우는 1995년 시행된 쓰레기종량제를 계기로 점진적인 감소추세, 사업장 배출시설계 폐기물은 점진적인 증가수준을 유지하고 있다. 그렇지만 특이한 점은 건설폐기물의 경우 최초로 통계를 잡기 시작한 1996년에 28,425톤/일에서 2001년도에는 108,520톤/일로 5년 사이에 약 4배 가까이 증가하고 있으며 이러한 배출현상은 IMF 상황이었던 1998년도를 제외하고는 계속되고 있어 우리나라 부동산 가격과 비슷한 증가추세를 보이고 있다. (그림 5) 참조)



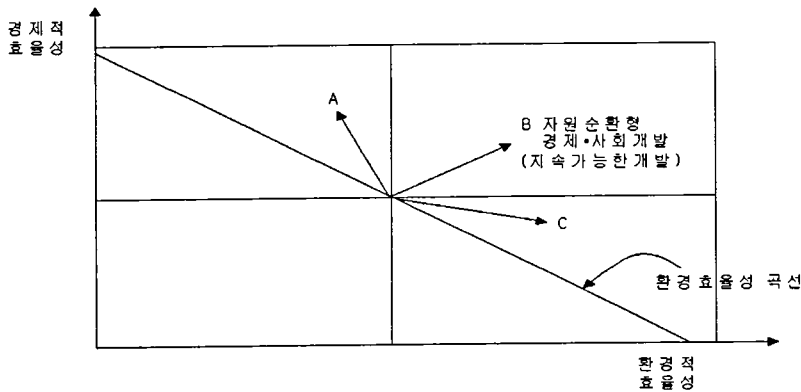
[그림 5] 전국의 배출원별 폐기물 발생 및 처리실태

2. 지속가능한 폐기물관리

1) 환경효율성(Eco-efficiency)측면의 접근

자원순환형 경제·사회와 산업생태학의 기본철학을 설명하는데 있어 가장 기초가 되는 환경효율성 개념은 『지속가능발전세계기업협의회(WBCSD : World Business Council for Sustainable Development)』에 의해 널리 보급되고 있으며 “환경효율성은 지구의 자정능력과 일치할 수 있는 최소한의 수준을 유지하는 자원집약도와 생태학적 영향력을 감소시키면서도 삶의 질을 높이고 인간의 욕구를 만족시킬 수 있는 서비스와 가격 경쟁력 있는 제품의 제공을 달성할 수 있도록 하는 것”이라고 정의하고 있다¹⁵⁾.

또한 WBCSD의 보고서에서는 환경효율성 개념을 [그림 6]을 이용하여 환경효율성과 경제적 효율성 사이의 관계에서 자원순환형 경제·사회 개발의 추진방향성을 설명하고 있다¹⁶⁾.



[그림 6] 운영전략 차원의 지속가능한 개발과 환경

이 그림에서 A, B와 C는 한 사회에서 선택 가능한 개발 경로를 묘사하고 있다. 이 개발 경로들은 비록 경제적 효율성과 환경적 효율성 모두가 개선될 수 있는 지속가능한 개발을 위한 방향을 보여 주지만 변화의 방향이 경제적 효율성만이 달성되는 경우(A)에는 환경효율성이 저하될 수 있는 문제점이 발생하며 환경효율성만을 강조하는 경우(C)에는 경제적 효율성의 상실이 예상된다. 따라서 가장 이상적인 자원순환형 경제·사회 개발의 경로는 (B)이다.

3) 지속가능한 폐기물관리의 정의 및 원칙

‘지속가능한 발전’이 새로운 패러다임으로 자리 잡게 되면서 폐기물 역시 지속가능성 관점에서 관리되어야 한다는 논지에서 ‘지속가능한 폐기물관리(Sustainable Waste Management)’가 제기된다. 지속가능한 폐기물관리를 위해서는 폐기물 발생억제, 재활용, 폐기물의 소각·매립과정에서의 에너지 회수와 같은 방안들을 포함하는 보다 진보적인 접근방식이 필요하다는 것이다.

지속가능한 폐기물관리라는 개념이 아직 명확하게 정의되지는 못하고 있지만 현재까지

15) WBCSD, Measuring Eco-efficiency a Guide to Reporting Company Performance, (2000), p.7.

16) 이 그림은 지속가능한 개발차원이 환경효율성(Eco-efficiency)의 개념과 어떻게 연계가 되는지를 설명하고 있으나 본 연구목적에 따라 일부 내용을 수정·보완하여 나타내었음.

논의된 개념들을 종합해보면 지속가능한 폐기물관리란 폐기물(waste)이 곧 자원(resource)이라는 시각에서 폐기물의 배출·유통·처리단계 상의 물질·에너지 회수효율을 극대화하면서 환경문제를 최소화하는 통합전략이라고 정의할 수 있다.

지속가능한 폐기물관리는 지속가능한발전에 요구되는 자원의 효율성 향상을 달성하고 사회·환경적 만족을 달성하는 것이 목표이며¹⁷⁾ 국가 전체의 지속가능성 목표를 달성하는데 있어서 지속가능한 폐기물관리는 필수적이다¹⁸⁾.

지속가능한 폐기물관리를 실현시키기 위해 필요한 원칙에 대해서 도시폐기물 전문가프로그램(Urban Waste Expertise Programme: UWEP)에서는 [표 1]과 같이 4가지 기본적인 원칙을 제시하고 있다.

[표 1] 지속가능한 폐기물관리를 위한 4가지 원칙

Equity(형평성)	모든 시민들은 환경적인 건강을 이유로 알맞은 폐기물관리 시스템을 공유할 권리가 있음
Effectiveness(유효성)	폐기물관리 모델은 모든 폐기물이 안전하게 처리될 수 있게 시행되어야 함
Efficiency(효율성)	모든 폐기물의 관리는 형평성·유효성·지속가능성을 고려한 가운데 이익을 극대화하고 비용을 최소화하며 자원사용의 최적화를 달성해야 함
Sustainability(지속가능성)	폐기물관리시스템은 지역조건을 충족시키고 기술적, 환경적, 사회적, 경제적, 재정적, 제도적, 정치적 관점에서 실행 가능해야 함

4) 지속가능한 폐기물관리의 전략-통합폐기물관리시스템¹⁹⁾

폐기물의 지속가능한 관리를 위한 전략의 하나로 폐기물의 효율적인 관리를 포함한 종합적 접근 즉 ‘통합폐기물관리(Integrated Waste Management)’ 혹은 ‘통합폐기물관리시스템(Integrated Waste Management System)’의 필요성이 대두되었다.

폐기물의 통합적 관리를 위해서는 특정 지역사회에서 폐기물관리 프로그램을 집행하는데 있어 우선순위(priority)²⁰⁾를 정하여야 한다. 폐기물 양의 감소를 위한 지속가능한 폐기

17) UNEP & ISWA, Waste Management, (the United Kingdom; The Beacon Press, 2002).

18) Paul S. Phillips et al. "A UK county sustainable waste management program", Int. J. Environment and Sustainable Development, Vol.1, No.1, (2002).

19) 이 논문에서는 ISWM(Integrated Sustainable Waste Management)를 의미한다.

20) 매립에만 의존하던 기존의 폐기물 관리 위계에 경종을 울리기 시작한 것은 1970년대 환경운동가들의 반대운동이다. 그들은 쓰레기는 매립되어야 한다는 생각에서 벗어나 폐기물 발생량저감, 재사용, 재활용

물관리의 핵심은 폐기물처리 우선순위를 적용하는데 있다. 폐기물관리의 위계(hierarchy)는 문제가 발생한 후의 해결보다 처음부터 문제의 발생을 원천적으로 예방하지는 사고(thinking)에서 비롯되었다. OECD는 1996년 베를린 워크샵(Berlin Workshop)을 통해 폐기물 최소화²¹⁾를 위한 단계와 최종목표를 제시하고 있으며 이후 유럽환경청(European Environment Agency)에서는 여기에 배출폐기물의 질적 개선, 청정생산(Clean Production)과 외부 재이용·재활용(external recycling)개념을 추가한 개념을 제시하고 있다. OECD, 유럽환경청의 폐기물 최소화에 대한 정의는 구체성에 있어 다소 차이가 있으나 청정생산차원에서 접근해야한다는 점을 공통적으로 강조하고 있다.

UWEP는 지속가능한 폐기물관리를 제도적인 시스템을 구축하고 실현시키기 위한 전략적 방향으로 지속가능한 통합폐기물관리 모형을 제시하였다. 지속가능한 통합폐기물관리 모델에서 지속가능성을 향한 프로세스상의 3가지 핵심 구성요소로 폐기물관리시스템요소(waste management system elements), 이해관계자, 폐기물관리 관점(aspects) 등이 있으며 이들의 통합적인 조화를 통하여 지속가능한 폐기물관리 목표를 달성할 수 있다는 것이다. 지속가능한 통합폐기물관리를 위한 관점은 “환경적인관점”, “정치적·법적인 관점”, “제도적인 관점”, “사회·문화적인 관점”, “재정·경제적인 관점”, “기술적·성능적인 관점” 등 6가지로 구분하여 구체적인 중점내용을 제시하고 있으며 이를 통하여 폐기물관리 주체는 현재의 시스템을 평가하고 새롭게 확장된 시스템을 계획할 수 있다는 것이다.

IV. 지속가능성 분석모델 구축 및 분석

1. 분석대상 시스템(수도권매립지 “RCMS”)

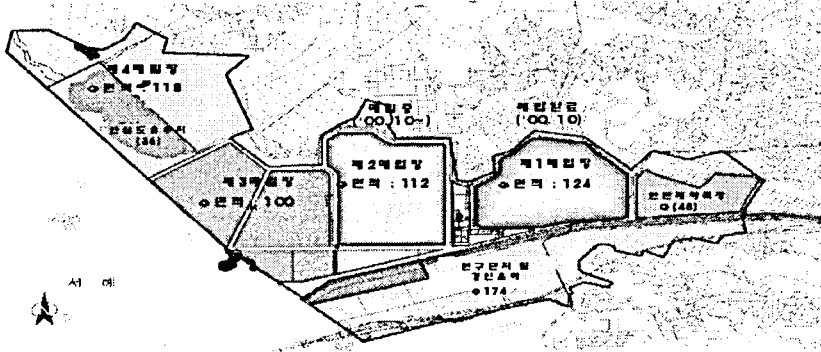
이 연구의 분석대상인 수도권매립지는 수도권지역에서 발생하는 생활계폐기물 중 매립대상폐기물의 매립처리를 위해 조성된 광역폐기물매립장이며 600여 만평에 4개 매립장으로 설치되어 1992년부터 운영 중에 있다.([그림 7], [그림 8] 참조)

그러나 폐기물 처리방법이 단순히 매립처리에 의존하고 있어 이로 인한 악취·먼지·침출수 등 환경문제를 이유로 주변지역 주민에 대한 보상차원에서 반입수수료의 10%를 주민

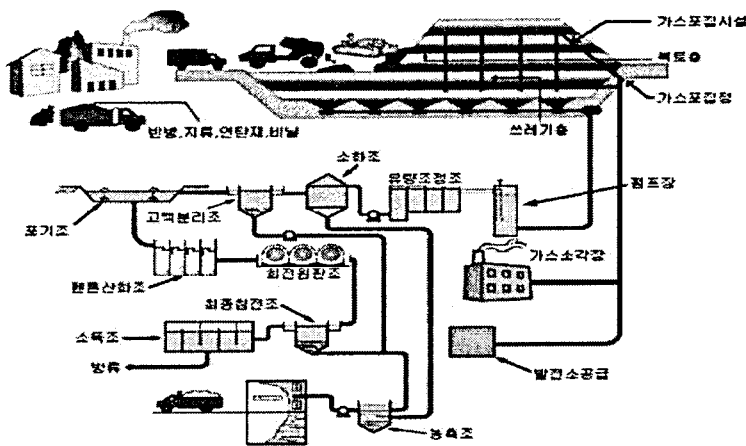
또는 퇴비화, 소각과 매립에 이르는 폐기물 우선순위(The waste hierarchy)를 지정해야 한다고 주장했다(J. Gertsakis et al. 2003).

21) 1994년 OECD Background Paper에서는 폐기물최소화란 “폐기물의 발생을 억제하거나 줄이며 유해성을 완화하는 것을 포함하여 발생한 폐기물의 질을 개선하고 재이용(reuse), 재활용(recycling) 및 회수(recovery) 등을 촉진하는 것”이라고 정의하였다.

지원기금으로 지급하고 있으나 주변지역 주민들로부터 민원은 근절되지 않고 있다.



[그림 7] 수도권매립지 매립장별 위치도



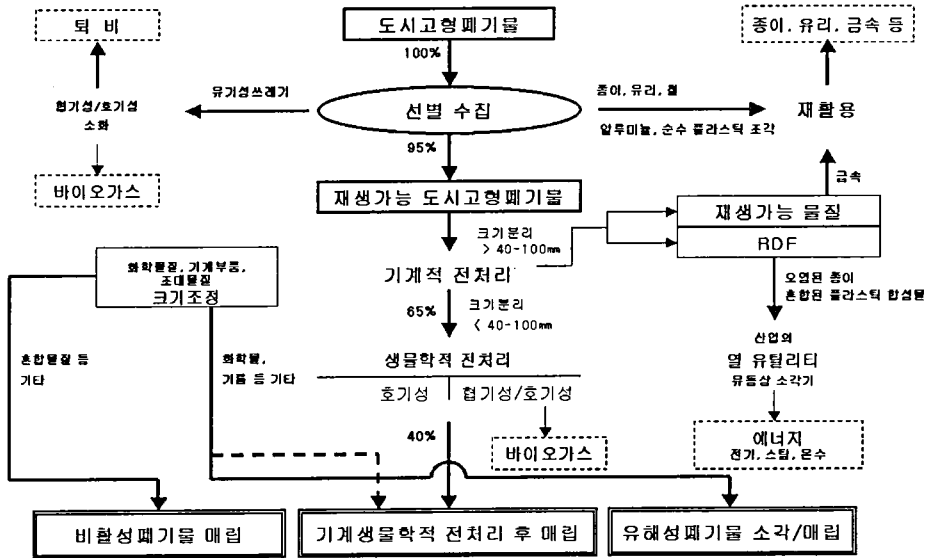
[그림 8] 수도권매립지 주요시설 운영 모식도

따라서 수도권매립지관리공사에서는 현행의 매립처리방법을 유지하는 상황에서는 주변 지역의 환경문제는 물론 주변지역 발전둔화문제 등을 근본적으로 해결하는데 한계가 있음을 인식하고 폐기물처리방법을 보다 더 환경친화적이고 지속가능한 방법으로 전환하는 방안을 모색하였다.

"RCMS"는 폐기물발생에서 유통·처리단계까지 일련의 과정에서 자원·에너지·비용 등 환경경제적인 측면 등을 함께 고려하여 폐기물관리의 환경효율성(Eco-efficiency)을 높이는 통합폐기물관리(IWMS : Integrate Waste Management System)개념의 하나로 볼 수 있다. 매립을 위해 반입되는 폐기물을 종류 및 성상 등에 따라 적정한 기계생물학적 전처리 및 소각 등 열적처리시스템 등으로 통합하여 구축함으로써 폐기물관리로 인한 환경문제는 최

소화하고 유기물질 및 전기·폐열 등 자원회수는 극대화하는 폐기물처리시스템이다.

이렇게 회수되는 물질 및 전기·폐열 등 에너지를 생산시설과 가정으로 재사용한다는 의미에서 자원순환관리시스템(RCMS : Resource Circulation Management System)이라 정의²²⁾하고 있으며 적용을 위한 구체적인 기술공정과 적용기술 개념도²³⁾는 [그림 9]과 같다



[그림 9] 자원순환관리시스템 적용 이론개념도

자료 : Rainer Stegmann, "아시아 대도시지역의 통합폐기물처리 개념", (Pre-APLAS, 2002).

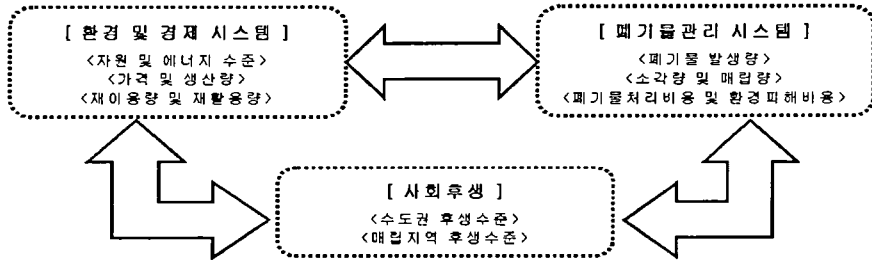
2. 모델의 개념적 틀 및 측정변수

폐기물관리시스템과 지속가능성이라는 관점에서 볼 때 연구대상이 되어야 하는 전체 시스템은 3개로 구분할 수 있다. 폐기물관리시스템은 환경 및 경제 시스템이 함께 존재하여야 의미가 있는 시스템이 될 수 있으므로 환경시스템, 경제시스템 그리고 폐기물관리시스템을 모두 함께 조망할 때에만 의미가 있을 것으로 보았다. 따라서 폐기물관리시스템을 중심으로 분석하되, 환경 및 경제시스템을 하나의 모듈로 구성하고 폐기물관리시스템을 하나의 독립적인 모듈로 구분하여 2개 부분으로 나누고 지속가능성의 사회적 측면을 평가하는 기준으로 사회후생수준을 도입하여 이 2개의 시스템들 간의 그리고 이들 시스템과 사회후

22) 수도권매립지관리공사, 「자원순환관리시스템 구축 타당성 보고서」, (2001), p.132.

23) Rainer Stegmann, "아시아 대도시지역의 통합폐기물처리 개념", (Pre-APLAS, 2002), p.34.

생간의 상호영향을 분석하였다(그림 10) 참조).



[그림 10] 연구모델의 개념적 틀

이러한 구성을 통해서 환경 및 경제시스템에서는 매립처리방식의 변화에 따른 환경적·경제적 영향관계를 살펴보고 폐기물관리시스템에서는 폐기물관리시스템의 지속가능성을 분석하기 위하여 환경피해비용 등의 영향관계를 파악한다. 그리고 각각에 대하여 사회후생과의 상관관계를 분석함으로써 지속가능성관련 여러 가지 복합적인 영향관계를 파악할 수 있게 된다. 이러한 모형을 통해서 전체 시스템의 지속가능성을 파악하는 변수는 [표 2]와 같다.

[표 2] 지속가능성 측정변수

시스템	측정변수	지속가능성 관련분야
환경 및 경제시스템	자원 및 에너지수준	환경적 관점
	누적생산량(제품)	경제적 관점
후생수준	수도권 후생수준	사회적 관점
	매립지역 후생수준	사회적 관점
폐기물관리시스템	매립시설용량	환경적 관점
	매립선호도	사회적 관점
	소각선호도(지역)	사회적 관점
	방치폐기물 비율	환경적 관점

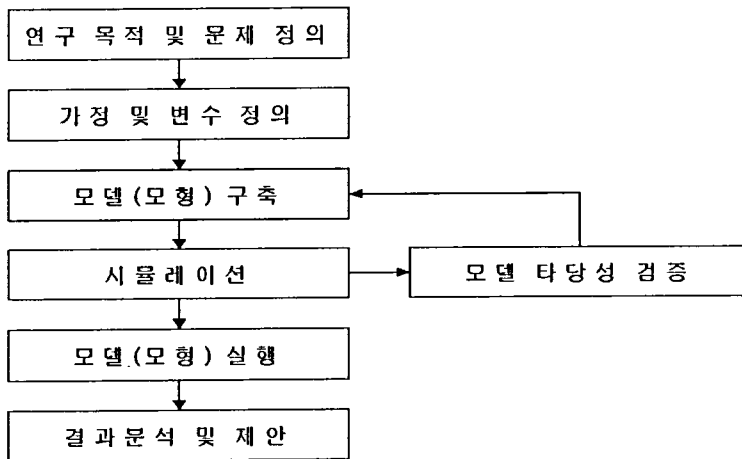
3. 모델의 가정 및 연구절차

우선 이 논문에서는 생산기술과 환경기술 및 환경오염 피해비용에 대해서는 현재의 상태가 계속 유지되는 것으로 가정하였다. 현실적인 측면에서는 혁신이 일어남에 따라 생산기술의 발전에 따른 자원소모량 감소가 가능하고 또한 환경관련 기술의 발전으로 폐기물

발생량을 낮추거나 환경오염 처리효율 등을 높일 수 있기 때문에 동태적인 영향을 받을 수 있지만 이러한 변화는 예측하기가 매우 어렵기 때문에 불변한다고 가정하였다. 하지만 생산 측면에서 규모 및 범위의 경제효과가 존재하는 것으로 가정하여 생산량의 증가로 인한 생산비용의 감소측면을 반영하였다.

시스템에서의 시간의 변화는 100년으로 하였다. 이는 폐기물매립에 의한 자연환경에의 영향이 상당기간 존재하기 때문이다. 이와 함께 매립되는 폐기물로부터 자원회수 중요성을 감안하여 지속가능성의 관점을 도입하였으며 자원 및 에너지량과 누적생산량 사이의 대체 관계는 발생하지 않는다고 가정하였다.

또한 폐기물 처리시설관련 투자예측도 민원 등을 고려할 때 어려운 부분이 있어 현재의 폐기물 처리시설규모(소각, 매립시설)가 증가하지 않는 것으로 가정하였다. 또한 정책적인 측면에서도 우리나라 폐기물관련 정책 및 체제가 현재의 방향대로 계속 유지된다고 가정하였다.



[그림 11] 연구모델(모형) 개발과정

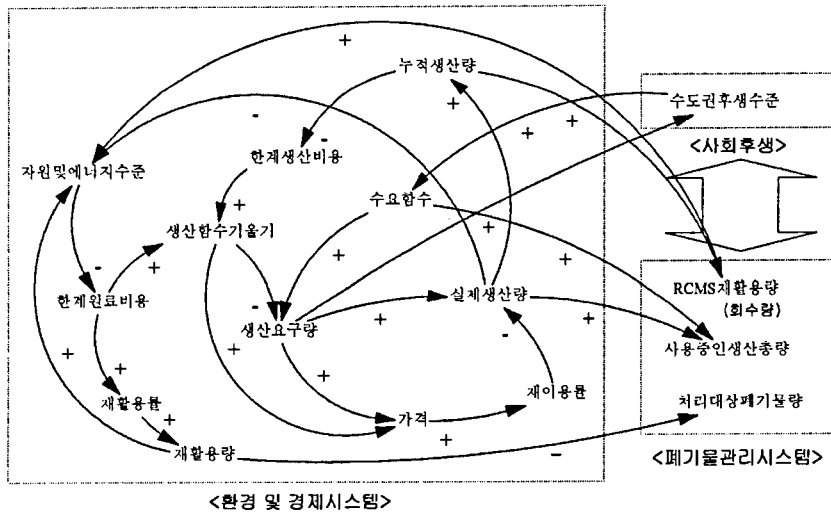
4. 모델의 개발 및 검증

1) 모델의 개발 및 피드백 루프

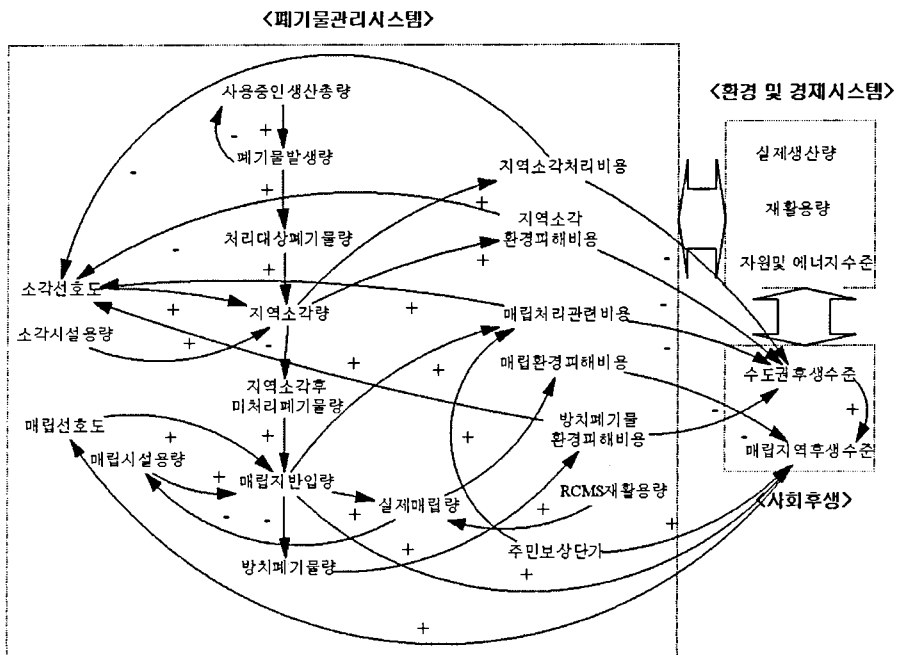
[그림 12]는 환경 및 경제시스템을 중심으로 하여 사회후생과 폐기물관리시스템간의 인과관계 및 모형의 기본구조를 나타낸 것이며 이 모형은 [그림 14]의 전체모델 중 수도권 후생수준과 RCMS 회수량·총생산량·자원 및 에너지·재활용률·누적생산량 변수 중심의 인과관계를 나타낸 것이다.

[그림 13]은 폐기물관리시스템을 중심으로 환경 및 경제시스템과 사회후생간의 인과관계

를 나타낸 모형의 구조이다. 이 모형은 [그림 14]의 전체모델 중 폐기물관리시스템에서의 폐기물 흐름에 관련된 제반요소들과 수도권 후생수준 및 매립지역 후생수준 변수 중심의 인과관계를 나타내고 있다.

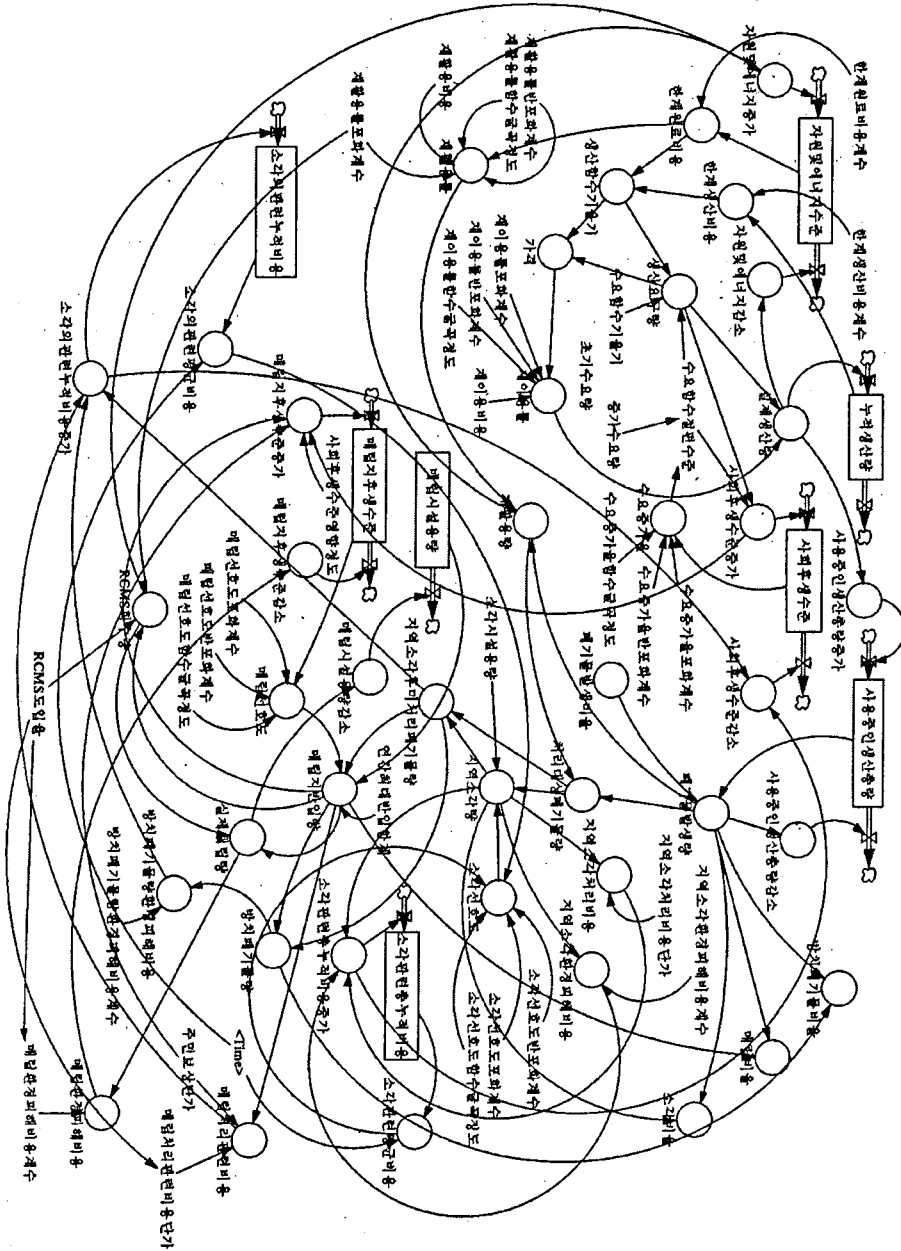


[그림 12] 환경 및 경제시스템의 인과관계



[그림 13] 폐기물관리시스템의 인과관계

[그림 14]은 [그림 12, 13]의 환경 및 경제시스템과 폐기물관리시스템 그리고 후생시스템간의 인관관계와 관계식·상수값 등을 ‘벤심(Vensim)프로그램’으로 코딩한 시스템 전체의 연구모델을 보여주고 있다.



[그림 14] 전체 연구모델

2) 시뮬레이션 가정 및 모델 타당성 검증

이 논문의 연구모형은 지속가능성에 대해서 분석하고자 하기 때문에 각 수준변수의 절대적인 값을 측정하기 어려운 점을 고려하여 각 변수간의 인과관계를 밝히고 추세를 분석하고자 하므로 모형에서 사용하는 값들도 상대적인 비율을 적용하였다.

최대 재활용률은 0.8로 가정하였으며 이것은 RCMS 도입시 자원화할 수 있는 것은 모두 자원화하고 남은 폐기물의 비율을 추정된 자료에 근거²⁴⁾하였고, 최대 재이용률은 0.2로 가정하였다. 제품 중에서 얼마나 재이용하는지에 대한 자료는 불충분하므로 일반적인 관점으로 생각하여 재활용률 또는 50% 보다는 낮은 수준에서 결정하였고 민감도 분석을 통하여 이러한 가정을 검증하였다.

비용단가 중에서 운반비용은 임운택(2002)²⁵⁾에서 조사한 13,149원/톤을, 소각비용은 2002년 소각장 운영비 현황²⁶⁾에 근거하여 46,316원/톤을 적용하였다. 매립장으로 반입되는 폐기물의 처리비용과 운영비용을 합한 총변동비용은 RCMS를 도입하기 전에는 9,201원/톤을, RCMS를 도입한 경우에는 17,350원/톤을 적용하였다. 매립시설의 경우에 기존의 시설은 감가상각이 끝났다고 간주하고 신규시설의 건설비는 RCMS 회수량에 의한 수입으로 상쇄된다고 가정하였다. 매립지 반입료는 16,320원/톤²⁷⁾을 사용하였다. 그리고 2001년 반입수수료 대비 주민 보상 비율인 10%를 주민보상단가 산정시 적용하였다. 이러한 자료를 근거로 각 비용 간의 비율을 산정하여 시뮬레이션 모형의 상수값에 적용하였다.

폐기물 발생비율은 구자인의 논문²⁸⁾을 근거로 하였으며 폐기물처리방식별 환경피해비용은 현실적으로 그 값을 추정하기 어려우므로 우선 매립 > 소각 > 방치폐기물의 순으로 환경피해가 크다고 가정하였다. 이러한 가정의 근거는 일반적으로 주변에 매립시설이 건설되는 경우와 소각시설이 건설되는 경우 주민의 반대가 매립시설이 건설되는 경우가 보통 크다고 할 수 있기 때문이다. 하지만 매립보다 소각에 의한 환경피해가 더 클 가능성이 존재하며 실질적으로 매립과 소각의 환경피해가 어느 쪽이 더 큰지는 지역 환경이나 상황마다 다르기 때문에 추후 시나리오 구분에 의한 민감도 분석을 통하여 이러한 가정을 검증하고 그 결과를 분석하였다.

24) 수도권매립지관리공사, 「자원순환관리시스템 구축 타당성조사 보고서」, (2001), pp.131~148

25) 임운택, “환경협오시설의 적정입지 모형-수도권 도시 폐기물 소각장 입지 사례 분석”, (박사학위논문, 연세대학교 건축공학과, 2002).

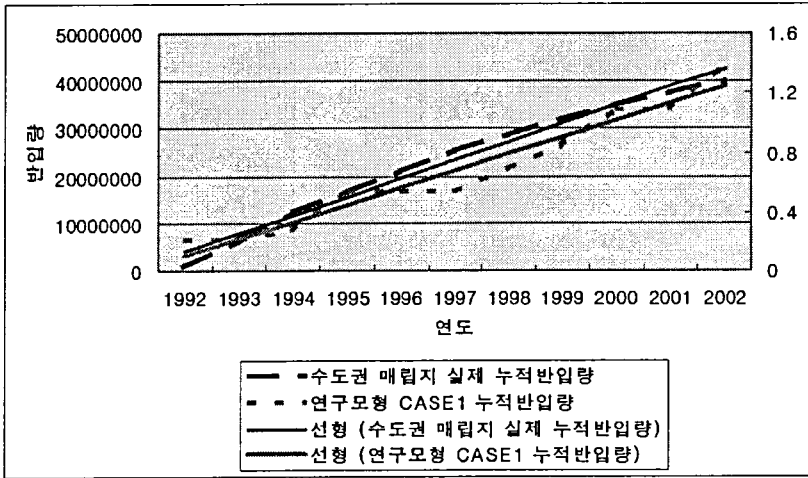
26) 환경부, 「전국 폐기물 발생 및 처리현황」, (2003).

27) 쓰레기 종류별로 반입료가 다른데 생활쓰레기만을 고려할 경우 16,320원/톤이고 종류별 평균 반입료는 21,842원/톤이다. 소각처리비용과 비교하기 위해서는 종류별 평균 반입료를 사용할 수 있다.

28) 구자인, “자연자원이용과 생활쓰레기 발생사이의 상관관계에 관한 연구”, (석사학위논문, 서울대학교 환경대학원, 1994).

RCMS(자원순환관리시스템)의 도입에 의해서 매립장에 반입된 폐기물을 처리하는데 소요되는 총처리비용은 높아지나, 매립 및 매립시설에 의해서 발생하는 환경피해비용은 감소한다는 것을 기본가정으로 하였다. 또한 RCMS의 도입에 의해서 매립에 의한 환경피해비용 계수와 소각에 의한 환경피해비용 계수가 같아진다고 가정하였다.

1992년부터 2002년까지 연도별 누적반입량과 시뮬레이션에 의해서 도출된 결과를 상호 비교해 보면 [그림 15]와 같다. 누적반입량은 매립시설용량과 직접적으로 관련된 변수로 볼 수 있다. 이 모형에서 매립시설용량 이외의 다른 지속가능성 변수들에 대한 실질적인 자료를 얻는 것이 현실적으로 어렵다는 점과 폐기물관리시스템에서 매립시설용량이 매우 중요한 변수라는 점에서 매립시설용량에 대한 유사성이 모형의 적합성을 검증할 수 있다고 판단하였으며 매립시설용량의 현실적인 자료는 누적반입량으로 표현될 수 있기 때문에 누적반입량에 대해서 현실과 시뮬레이션 자료를 비교하였다.



[그림 15] 연구모형 CASE 1과 수도권매립지 실제 누적반입량 비교

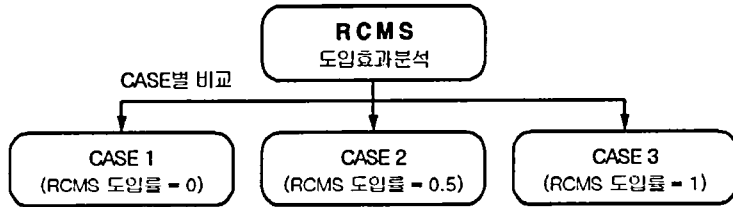
자료: 수도권매립지공사, 통계자료, 2003.

5. 모델을 이용한 지속가능성 분석

수도권매립지에 RCMS 도입의 정도를 RCMS 도입률²⁹⁾로 정의하여 매립지로 반입되는 폐기물을 전량 매립처리체제에서 RCMS체제로 전환하여 처리할 수 있는 상태를 1로 하여, RCMS 도입률이 0인 경우를 CASE 1로, RCMS 도입률이 0.5인 경우를 CASE 2로, RCMS 도입률이

29) RCMS 도입률은 현재 반입되는 폐기물을 전량 매립관리중심체제로 운영되고 있는 수도권매립지가 기계적 전처리 및 열적처리 등 에너지·자원관리중심체제로 전환되어가는 정도를 가정한 비율임.

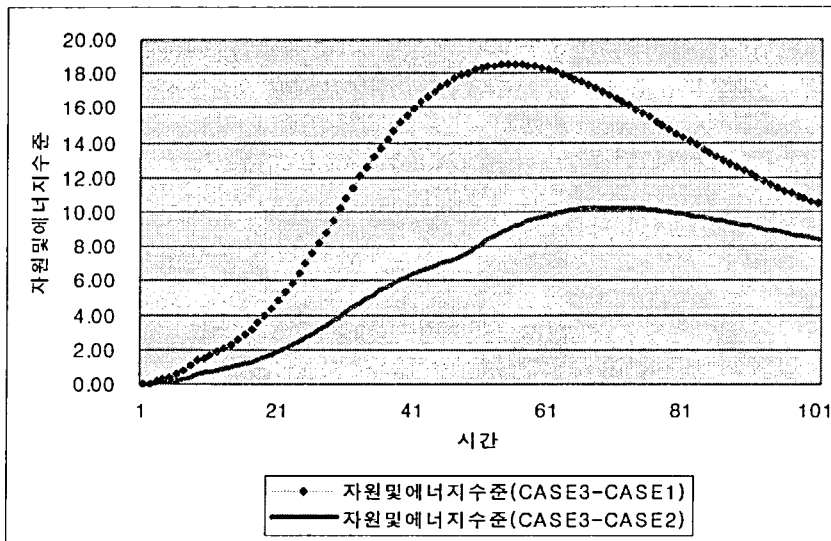
1인 경우를 CASE 3으로 설정([그림 16] 참조) 하였으며 변수별 분석결과는 다음과 같다.



[그림 16] 연구모형의 지속가능성 분석절차 및 내용

1) 자원 및 에너지 수준

[그림 17]은 CASE 3의 자원 및 에너지 수준에서 CASE 1의 자원 및 에너지 수준을 뺀 값과 CASE 3의 자원 및 에너지 수준에서 CASE 2의 자원 및 에너지 수준을 뺀 값을 나타낸다. 즉 CASE 3과 다른 CASE의 차이가 양의 값을 가지면 CASE 3의 경우의 지속가능성이 높다는 것을 의미하고 반대로 음의 값을 가지면 CASE 3의 지속가능성이 낮다는 것을 뜻한다.

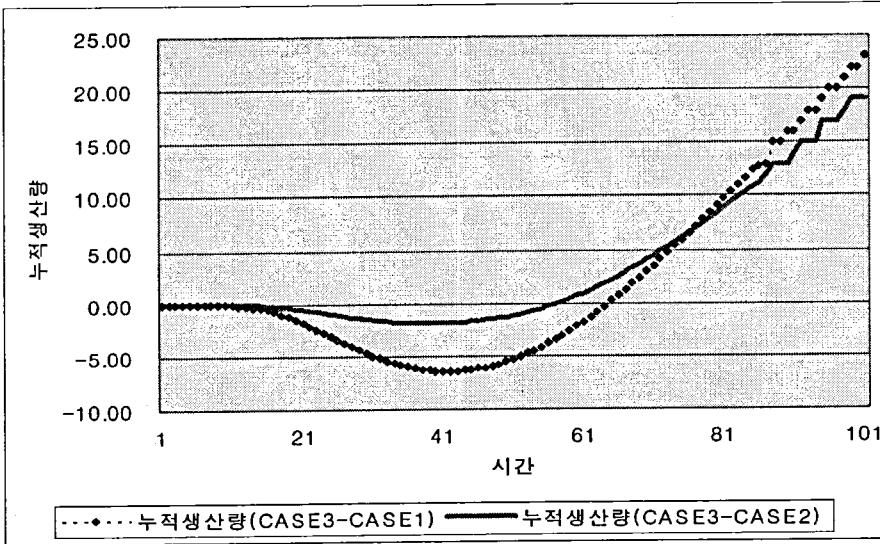


[그림 17] CASE 3과 CASE 1 및 CASE 2와 차이-자원 및 에너지수준

2) 누적생산량

[그림 18]는 CASE 3의 누적생산량에서 CASE 1의 누적생산량을 뺀 값과 CASE 3의 누적생산량에서 CASE 2의 누적생산량을 뺀 값을 나타낸다. 즉 CASE 3과 다른 CASE의 차이가 양의 값을 가지면 CASE 3의 경우의 누적생산량이 높고 따라서 지속가능성도 높다는 것을

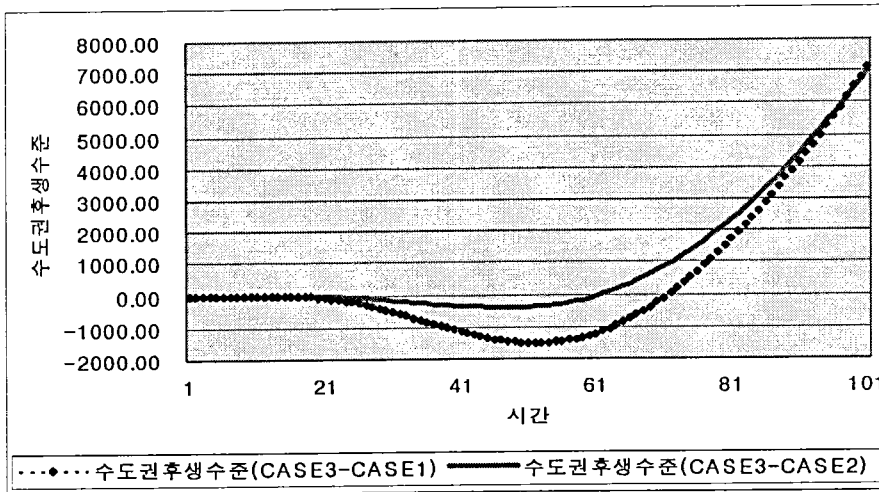
의미한다. 반대로 음의 값을 가지면 CASE 3의 누적생산량이 적고 따라서 지속가능성도 낮다는 것을 뜻한다.



[그림 18] CASE 3과 CASE 1 및 CASE 2와 차이-누적생산량

3) 수도권 후생수준

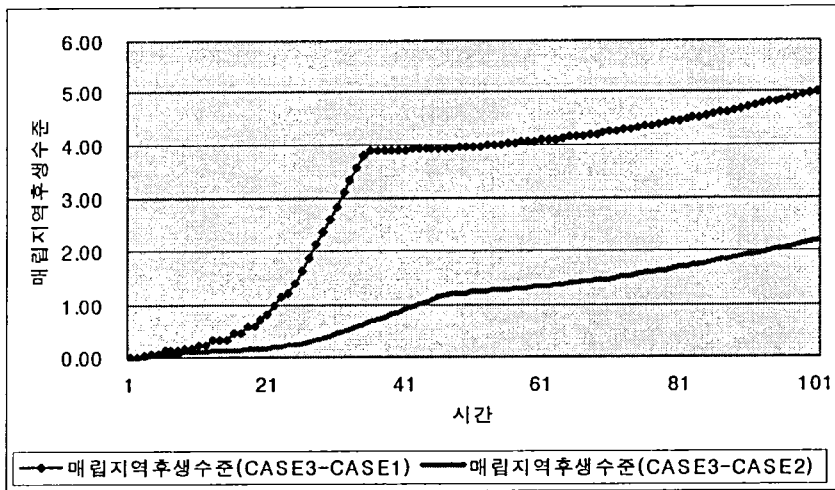
[그림 19]에서 RCMS 도입수준이 높아질수록 수도권 후생수준이 증가함을 알 수 있고 이것은 RCMS의 도입률이 높아질수록 지속가능성이 높아짐을 의미한다.



[그림 19] CASE 3과 CASE 1 및 CASE 2와 차이-수도권 후생수준

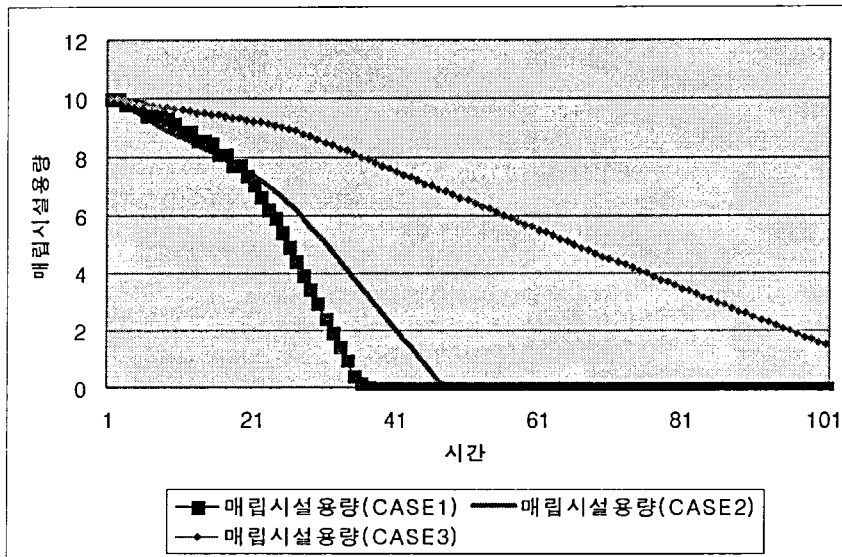
4) 매립지역 후생수준

[그림 20]에서 RCMS 도입수준이 높아질수록 매립지역 후생수준이 증가함을 알 수 있고 이것은 RCMS의 도입률이 높아질수록 지속가능성이 높아짐을 의미한다.



[그림 20] CASE 3과 CASE 1 및 CASE 2와 차이-매립지역 후생수준

5) 매립시설 용량



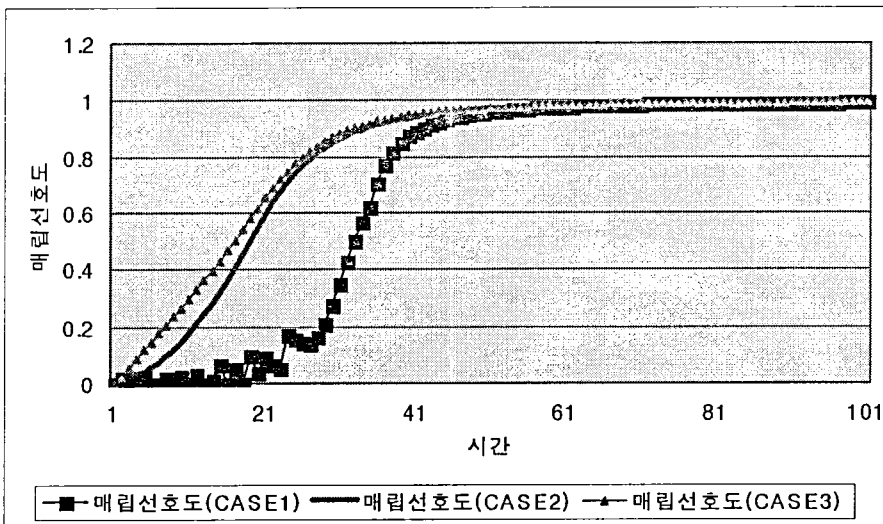
[그림 21] CASE별 매립시설용량의 변화

[그림 21]에서 RCMS 도입수준이 높아질수록 매립시설용량이 증가함을 알 수 있고 이것은 RCMS의 도입률이 높아질수록 지속가능성이 높아짐을 의미한다.

6) 매립선호도

매립선호도는 현재 매립장 부지 및 시설용량을 얼마나 사용할 수 있게 할 것인가와 관련된 것으로 매립장으로 반입되는 폐기물 및 매립시설에 대한 허용과 인식정도(선호도)를 나타내는 지표로 볼 수 있다. RCMS의 도입수준이 높을수록 매립장에 대한 긍정적인 인식이 높아지게 되고 이것은 주민들이 매립장으로 반입되는 폐기물에 대한 반대가 감소할 수 있다는 것을 의미한다.

이러한 매립선호도는 RCMS 도입수준이 어느 정도만 유지된다면 큰 차이가 나타나지 않게 됨을 볼 수 있다. 이것은 RCMS의 도입 여부에 큰 영향을 받게 됨을 의미하며 일단 RCMS가 도입이 될 경우 반입되는 각종 폐기물 및 매립장에 대한 거부감은 지속적으로 해소될 것임을 역설적으로 설명할 수 있다. 초·중반기를 지나면 RCMS 도입수준에 반응하지 않음을 알 수 있으며 결과적으로 RCMS의 도입이 지속가능성에 기여하고 있음을 알 수 있다(그림 22 참조).



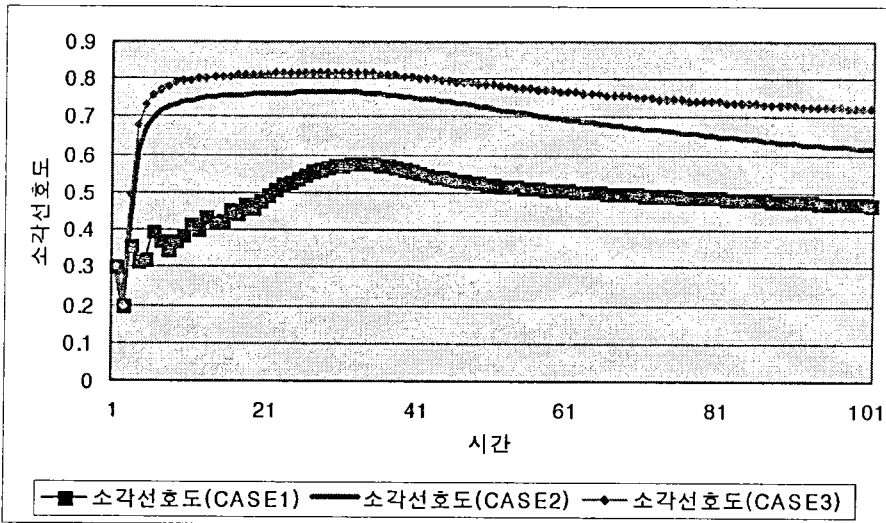
[그림 22] CASE별 매립선호도의 변화

7) 소각선호도

소각선호도는 현재 소각시설용량을 얼마나 사용할 수 있게 할 것인가와 관련된 것으로

소각선호도는 소각장으로 반입되는 폐기물 및 소각시설에 대한 허용 및 (선호)인식정도를 나타내는 지표로 볼 수 있다. 소각선호도가 낮으면 수도권 주민의 반대가 높다고 예상할 수 있고 이에 따라 소각시설의 가동률도 하락할 것으로 예상할 수 있다. 이러한 관점에서 보았을 때 RCMS의 도입수준이 높을수록 소각선호도가 높아지고 주민의 소각에 대한 반대가 감소할 수 있다는 것을 의미한다.

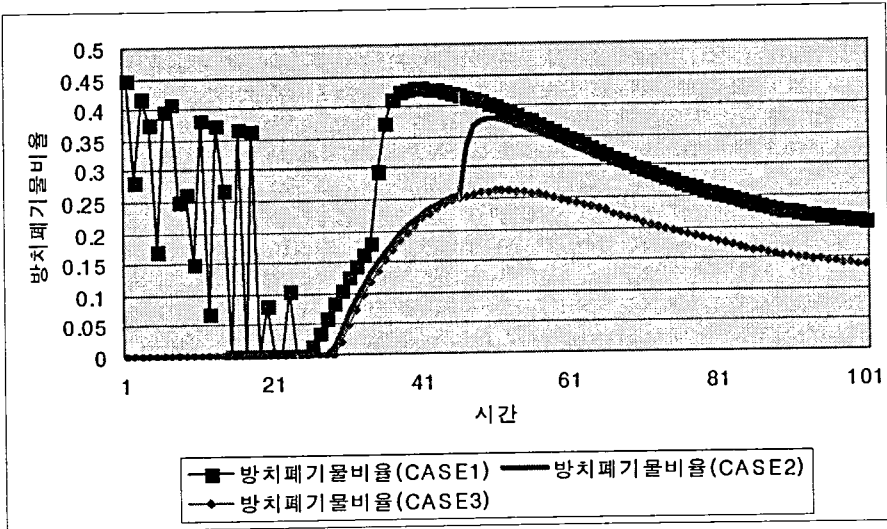
이러한 소각선호도가 RCMS 도입수준이 어느 정도만 유지된다면 큰 차이가 나타나지 않게 됨을 볼 수 있다. 이것은 RCMS의 도입 여부에 큰 영향을 받게 됨을 의미한다. 또한 RCMS의 도입에 의해서 소각선호도 역시 빠르게 증가하게 되기 때문에 현재 서울지역 대부분의 소각장 가동률이 30% 정도인 것을 감안하면 RCMS의 도입으로 지자체의 소각시설 가동률을 어느 정도 개선시킬 수 있을 것임을 알 수 있다. 이러한 결과에서도 RCMS의 도입이 지속가능성에 기여하고 있음을 알 수 있다([그림 23] 참조).



[그림 23] CASE별 소각선호도의 변화

8) 방치폐기물 비율

방치폐기물 비율은 소각시설과 매립시설을 통해서 처리할 수 있는 정도에 영향을 받게 되므로 CASE 3의 경우와 같이 소각선호도와 매립선호도가 높고 매립시설용량이 매우 긴 경우에는 다른 경우에 비해서 상대적으로 방치폐기물 비율이 낮게 된다. 즉 RCMS 도입수준이 높을수록 방치폐기물 비율이 낮아지게 되며 이것은 RCMS가 지속가능성에 기여하고 있음을 보여준다([그림 24] 참조)³⁰⁾.



[그림 24] CASE별 방치폐기물 비율

9) RCMS 도입률의 변화가 지속가능성에 미치는 영향분석 종합

앞의 분석과 같이 환경/경제/사회 세 가지 측면에서의 지속가능성 측정을 위한 8가지 변수가 RCMS 도입률의 변화에 따라 어떤 차이가 있는지에 대해서 분석하였다. 이러한 결과를 통해서 RCMS 도입률이 증가됨에 따라 장기적인 지속가능성은 향상되고 있음을 알 수 있다. 다만, 누적생산량과 수도권후생수준의 결과에서 볼 때 중기적인 측면에서의 지속가능성은 RCMS 도입률이 낮은 경우가 더욱 크고 장기적인 측면에서의 지속가능성은 RCMS 도입률이 높은 경우가 더욱 크게 나타나고 있다. 이러한 관점에서 중기적으로는 RCMS 도입률을 낮게 하는 것이 좋지만 장기적으로는 RCMS 도입률을 높게 하는 것이 좋다고 해석할 수 있다. 이러한 해석을 통해서 단기적인 측면 뿐 만 아니라 중·장기적인 측면을 모두 포함하는 전시점을 통해서 지속가능성이 높아지는 RCMS 도입률이 존재할 수 있음을 알 수 있으며 이는 최적도입률로 정의할 수 있다.

또한 매립선호도와 소각선호도의 결과에서 RCMS 도입률을 50%로 한 경우와 100%로

30) CASE 1의 경우, 초기 그래프의 형태가 변동폭이 큰 모습으로 나타나게 된 것은 RCMS 도입률이 0이기 때문이며, 매립선호도가 낮아지면 매립처리량은 감소됨에 따라 지역소각량을 늘릴 수밖에 없고, 이러한 지역소각량의 증가는 방치폐기물비율을 감소시키게 되며 방치폐기물비율 감소로 방치폐기물량이 줄어들면 지역소각량을 줄여도 되지만 지역소각량을 줄이게 되면 매립량이 증가되어야 하나 낮은 매립선호도 때문에 어려워 다시 방치폐기물비율이 증가하는 반복구조 현상이다. 이러한 현상은 시스템상에서 균형을 찾아가는 과정으로 설명할 수 있다. 결과적으로 방치폐기물비율은 0이 되며 시간이 지남에 따라 매립용량이 0이 되므로 방치폐기물비율은 매립용량이 0이 되는 시점부터 급격하게 증가하게 됨을 알 수 있다.

한 경우의 차이가 크지 않게 나타나는 분석결과에서 일단 도입하는 것 자체가 얼마나 도입되었는가보다 중요한 요소로 분석되고 있어 RCMS의 도입이 반드시 필요하다는 것을 알 수 있다. RCMS 도입률이 낮은 경우에는 효과가 평형을 이루고 있으나 어느 수준 이상으로 도입되었을 경우에 지속가능성의 급격한 향상을 가져온다는 결과에서 RCMS 임계도입률이 있음을 확인할 수 있다.

따라서 RCMS의 도입으로 인하여 수도권매립지의 지속가능성 개선은 가능하지만 임계도입률³¹⁾과 최적도입률³²⁾을 고려한 접근방법이 요구된다고 하겠다. 특히 RCMS 도입으로 지자체의 소각시설가동률을 어느 정도 개선시킬 수 있다는 분석결과는 최근 RCMS 도입으로 인한 폐기물관리정책에서의 발생지처리원칙과 상충된다는 문제제기가 폐기물관리체계의 복합적인 인과관계에 대한 이해부족임을 알 수 있으며 궁극적으로 발생지처리원칙과 광역처리원칙은 상호 보완적으로 적용될 때 폐기물관리시스템의 지속가능성을 높일 수 있다고 판단된다

V. 결 론

1. 연구결과 요약

폐기물관리에 대해서 시스템 다이내믹스를 적용하여 동태적인 관계를 분석한 연구는 있었지만 폐기물관리시스템과 지속가능성을 함께 분석한 연구는 상대적으로 거의 없는 형편이다. 이러한 주제에 대해서 선언적 형태의 주장이나 개념적인 틀에 관하여는 많은 연구가 있지만 시스템의 동태적인 특성과 개념을 정량화한 분석 연구는 드문 것이 현실이다.

그러므로 현재의 기존 연구에서 더 나아가 전체 폐기물관리시스템과 지속가능성의 관계를 파악하고 폐기물관리시스템 중에서 매립처리방식의 변화가 지속가능성에 어떤 영향을 미칠 수 있는지에 대해서 분석하였다. 이것은 현재 수도권매립지관리공사에서 추진되고 있는 RCMS 도입방안에 대한 영향을 정량적인 측면뿐만 아니라 정성적인 측면으로도 분석할 필요성이 있다는 점에 착안하였다. 이러한 필요성에 의해서 이 연구에서는 현재 국내의 폐기물관리시스템 유지 시나리오와 RCMS 도입시나리오의 동태적인 변화패턴을 지속가능성

31) 임계라는 용어의 사전적 의미는 어떠한 물리현상이 갈라져서 다르게 나타나기 시작하는 경계를 나타내고, 이러한 맥락에서 도입임계율이라는 것은 도입 전과 후의 지속가능성에 미치는 효과의 차이가 상당히 커지는 도입률을 의미하게 된다.

32) 최적도입률은 RCMS의 효과를 극대화할 수 있는 도입률을 의미하는 것으로 일반적으로 임계도입률보다 크게 된다.

의 관점으로 분석할 수 있도록 모델을 구축하게 되었다.

이 논문에서는 시스템 다이내믹스로 구축된 모델을 사용하여 폐기물관리시스템과 영향을 주고받는 환경 및 경제시스템·사회후생에 대한 상호작용을 파악하여 그러한 작용이 전체시스템의 지속가능성에 미치는 영향에 대하여 파악하였다.

지속가능성에 영향을 보기위해 환경·경제·사회 세 가지 측면에서 선정된 8가지 변수를 활용하여 RCMS 도입률의 변화에 따라 어떤 차이가 있는지에 대해서 분석하였다. 이러한 결과를 통해서 RCMS 도입률 증가에 따라 장기적인 지속가능성은 향상되고 있음을 알 수 있지만 단기적인 지속가능성의 관점에서 볼 때에는 RCMS 도입률이 높은 경우가 반드시 지속가능성을 증가시키지는 않는 것으로 나타나 단기와 장기적인 관점에서 모두 지속가능할 수 있는 최적도입률이 존재하고 있음을 알 수 있다. 또한 수도권매립지에 RCMS 도입·설치 그 자체가 향후 얼마의 규모로 도입되었는가보다 중요한 요소로 분석됨에 따라 RCMS의 도입은 반드시 필요하다는 것을 알 수 있었다. RCMS 도입률이 낮은 경우에는 효과가 평형상태를 이루다가 어느 수준 이상으로 도입되었을 경우에 지속가능성 향상을 가져오는 변수가 있다는 분석결과에서 RCMS 임계도입률이 있음을 확인할 수 있다. 이와 같이 RCMS의 도입으로 인하여 지속가능성 개선이 가능하지만 임계도입률³³⁾과 최적도입률 고려한 접근방법이 요구됨을 알 수 있다.

2. 시사점 및 정책제언

이 연구에서는 수도권매립지가 현재의 매립체제에서 자원회수관리체제로 전환을 전제로 자원 및 에너지수준 등 8가지 변수를 활용하여 지속가능성을 분석하였다. 그 결과 환경·경제·사회적 측면에서 모두 지속가능성이 향상되는 것으로 분석되고 있어 현행의 폐기물 매립장 건설·운영시책에 있어서 많은 시사점을 주고 있다. 따라서 현재 매립이 진행 중에 있는 매립장과 건설계획인 매립장은 단순매립보다 어떤 형태로든 자원회수관리체제로 전환 필요성이 요구되고 있음을 알 수 있다. 특히 비위생 매립지의 복원사업을 자원회수관리체제와 연계시킬 경우 지속가능성 측면에서 그 효과는 매우 클 것으로 기대된다. 이를 위해서는 우선 현행의 국고보조사업 가이드라인에 자원회수 개념이 반영된 통합처리시스템 구축이 가능하도록 보완방안에 대한 검토가 필요할 것으로 본다.

또한 폐기물매립장에서의 환경효율성을 확보할 수 있는 방안이 적극적으로 강구 되어야

33) 임계라는 용어의 사전적 의미는 어떠한 물리현상이 달라져서 다르게 나타나기 시작하는 경계를 나타내고, 이러한 맥락에서 도입임계율이라는 것은 도입 전과 후의 지속가능성에 미치는 효과의 차이가 상당히 커지는 도입률을 의미하게 된다.

한다. 매립장으로 반입되는 폐기물은 불필요한 자원이 아니라 새로운 산업을 생성·발전시킬 뿐 아니라 유효자원으로 활용할 수 있는 잠재적 가치가 높은 하나의 자원·자산이라는 인식전환이 필요하다. 특히 최근 음식쓰레기 분리수거 등의 효과로 인한 생활폐기물의 발열량 증가추세는 폐기물로부터 전기·폐열 등 에너지회수 필요성이 절실하게 요구되고 있다. 이는 대량의 폐기물을 관리하고 처리하는 광역폐기물매립장에서 산업생태시스템의 지속성 유지와 이를 통한 지속가능한 개발이라는 목표달성을 위한 주요 요소 중의 하나로 환경효율성이란 개념의 도입이 불가피하다는 것이다. 전문가들 대부분도 폐기물매립에서의 지속가능한 개발을 위해서는 폐기물 재자원화 정책방향으로의 전환 필요성을 인정하고 있는 추세이다.

따라서 폐기물매립장 운영시 이러한 자원낭비를 방지하고 환경부하를 줄이기 위해서는 우선 국가폐기물관리정책 기본방향에서부터 광역폐기물매립장에 환경효율성 개념이 도입되어야 한다. 기존 단순매립처리시설의 개선을 위해서는 자원효율성의 극대화, 비용/편익분석에 의한 사업성분석의 실시와 함께 환경효율성 제고를 위한 노력이 제도화되어 지속가능한 생산시설로 변화를 유도하고 운영관리의 효율극대화·최적화를 위한 개선방안이 수립·시행될 필요성이 있다.

이와 함께 폐기물로부터 물질·에너지 등 자원회수율 관리제도의 도입이 필요한 시점으로 본다. 최근 지속가능한 폐기물관리·자원순환형 사회구축을 강조하면서 선진국을 중심으로 자원회수율(Recovery Rate)에 대하여 많은 관심을 가지고 있으며 이 분야에 많은 연구가 진행 중에 있음을 고려할 필요가 있다.

특히 폐기물 관리정책방향·수단에 있어서도 기존의 감량-재활용-적정처리 패턴에서 감량-재활용-자원화-최종처리 패턴으로 전환하여 폐기물의 발생·유통·처리단계를 포괄하여 궁극적으로 효용가치가 없어 최종적으로 버려지는 폐기물을 극소화 하는 방향으로 추진되어야 한다. 아울러, 각각의 폐기물관리 단계별로 여러 가지 다양한 기술과 시스템의 도입·통합설치·운영이 가능하도록 정책 및 시책 집행에 있어서도 유연성 확보가 필요할 것으로 생각된다.

3. 연구의 한계 및 향후 연구방향

1) 연구의 한계

본 연구는 거시적인 관점에서의 개념적 모형에 의한 연구이므로 폐기물관리시스템의 시간 흐름에 따라 지속가능성에 대한 긍정적 또는 부정적인지와 그 정도차이를 파악할 수 있는 방향성에 대해서는 분석할 수 있으나 환경정책이나 기술개발 및 경영전략에 있어서 정

량적인 결과를 얻기 위해 직접 사용하기에는 부족한 면이 있다.

또한 피드백 루프에 있어서도 폐기물관리의 지속가능성과 관련된 사회·경제·환경 분야의 다양한 인과관계를 감안할 때 선택될 수 있는 변수 및 요소는 무수히 많을 것으로 생각되며 이렇게 다양한 변수 및 요소를 가능한 모두 고려하여야 하나 그 중의 일부만을 고려한 측면이 있다. 특히 폐기물관리의 환경성과 경제성 등에 대한 기초적인 정량화 데이터의 한계로 폐기물관리의 지속가능성 정도를 구체적으로 정량화하여 제시하지 못한 점이 있다.

2) 향후 연구방향

앞으로 폐기물관리에 있어서 환경·경제·사회측면에서의 지속가능성에 대한 논란은 많이 있을 것으로 예상된다. 폐기물관리의 지속가능성 분석을 현실적인 측면의 활용성에 중점을 두기 위해서는 폐기물관리정책 및 폐기물 처리시스템에 대한 세부적인 모형이 추가적으로 구축되어야 할 것이다.

그리고 폐기물관리시스템의 지속가능성 예측에 도움을 주기 위한 실증적인 연구도 지속적으로 같이 수행되어야 하며 이를 위해서 폐기물에 포함된 물질·에너지의 흐름과 폐기물관리 및 처리단계에서의 환경문제 발생요인 등을 고려한 정량화된 지표 개발 등 다양한 지속가능성 측정지표 및 변수의 개발도 시급하게 이루어질 필요성이 있다.

[참고문헌]

- 김도훈(외). (1999). 「시스템다이내믹스」. 서울 : 대영문화사.
- 김익수. (1998). 「생태도시 조성을 위한 통합폐기물 관리방안-전과정평가(LCA)기법의 응용」. 서울대학교대학원 박사학위논문.
- 김준한(외). (1995). 생활폐기물 처리방법별 경제성 비교분석. 「산업연구」, 제1집.
- 문경주. (2001). 「도시체제의 지속가능성 연구: System Dynamics Model의 적용」. 부산대학교 대학원 박사학위논문.
- 문태훈(외). (2000). 시스템 다이내믹스를 이용한 폐기물관리 정책에 관한 연구. 「한국시스템 다이내믹스학회지」, Vol.3.
- 문태훈. (1998). 지속가능한 성장을 위한 환경용량의 산정과 환경지표 개발에 관한 연구. 「한국 정책학회보」, 제7권 1호.
- 박 래(외). (1997). 「폐기물 감량화 지침」. 지식공작소.
- 서성무(외). (1998). 「경영학원론」. 형설출판사.
- 성준용(외). (2000). 「에너지와 환경」. 삼성실업.
- 오호성. (1997). 「환경경제학」. 법문사.
- 이동훈. (2001). 광역화는 폐기물관리 선진화의 지름길. 「침단환경기술」, 제9권 4호.
- 이성규(외). (1984). 「환경학 개론-환경의 질과 환경행정을 중심으로」. 예지각.
- 이홍균. (2000). 지속가능한 발전 개념에 대한 환경 사회학적 비판. 「현상과 인식」, 봄호.
- 정희성(외). (2002). 지속가능성 평가를 위한 지역 생태-경제 모형 개발 연구(I). 「환경리포 트」, 제11호, 한국환경정책평가연구원.
- 지재성. (1997). 합리적인 폐기물관리 방향. 「토목」, 8월호.
- 차근호(외). (1994). 「세계화 시대의 Green 경영」. 명경사.
- 차근호. (2000). 21세기 지속가능패러다임을 위한 금융의 역할. 「그린삼성」.
- _____. (2003). 기업에서의 지속가능성 의미와 CEO의 역할-Total Asset Management. WRI Bell Conference.
- A. Klundert. (2001). Integrated Sustainable Waste Management-the Concept. UWEP.
- Allen V. Kneese. et al. (1975). *Economics and the Environment; A Materials Balance Approach, Resources for the Future, Inc.* Washington, D.C.
- A. M. Thirumurthy. (1992). Environmental facilities and urban development in India. *Academic Foundation.*

- Ayres, Robert U. (1994). *Industrial Metabolism; Theory and Policy, The Greening of Industrial Ecosystems; Overview and Perspective*. Washington D.C. : National Academy of Engineering.
- C. Chip. (1992). *Integrated Waste Management for New Developments; Sustainable Cities*. Los Angeles, Calif. : Eco-Home Media.
- Chertow, Marian R. (1999). Industrial Symbiosis ; A Multi-Firm Approach to Sustainability. *Greening of Industry Network Conference, Best Practice Proceedings*.
- Chertow, Marian R. and Esty, Daniel C. (1997). *Thinking Ecologically ; the Next Generation of Environmental Policy*. Boston Mass. : Yale University Press.
- G, Tyler Miller, Jr. (1996). *Sustaining the Earth: An Integrated Approach 2nd ed.* Belmont : Wadworth Publishing Company.
- G. P. Richardson. (1991). *Feedback Thought in Social Science and Systems Theory*. University of Pennsylvania Press.
- George Tchobanoglous, et al. (1993). *Integrated Solid Waste Management ; Engineering Principles and Management Issues*. New York : McGraw-Hill.
- Gradel, Thomas E. and Allenby, Braden R. (1995). *Industrial Ecology*.
- Hofflen Jukka. (2001). *Measuring the Eco-efficiency of Welfare in National Economy*. Pennsylvania : Academic Dissertations in the Economics of University of Tempere.
- Hudgins, M. and Read, A. (2001). *Sustainable Landfill Management via the Use of Aerobic Bioreactors*. Italy: CISA -Environmental Sanitary Engineering Centre.
- Malina, G. and Bien, J. (2001). *Legislative and Infrastructural Changes Towards Sustainable Waste Management in Poland; The New Act on the Waste*. Italy: CISA- Environmental Sanitary Engineering Centre.
- Mashayakhi, A.N. (1993). Transition in New York state solide waste system; a dynamic analysis. *System Dynamics Review*, Vol.9.
- Meier, Markus A. (1997). *LCA Document; Eco-Efficiency Evaluation of Wastes Gas Purification Systems in the Chemical Industry*. Los Angeles, Calif.: Eco-Inforna Press.
- M. Kuras and J. Mikolas. (2001). *Integrated Waste Management Concepts-Experience of the Czech Republic*. Italy; CISA-Environmental Sanitary Engineering Centre.
- Nickolas J. Themelis. (2002). *The Environmental impacts Assessing Waste -to-energy and Landfilling in the US*. <http://www.seas.columbia.edu>.
- Oliver Gohlke et al. (2003). New grate-based waste-to-energy system produces inert ash granulate. *Waste Management World*, May-June.

- Paul S. Phillips et al. (2002). A UK county sustainable waste management program. *Int. J. Environment and Sustainable Development*, Vol.1, No.1.
- Rachel L. Carson. (1962). *Silent Spring*. Boston; Houghton Mifflin.
- U.S. Environmental Protection Agency, (1989). *Decision-Makers' Guide to Solid Waste Management-EPA/530-SW89-072*. Washington D.C.
- V. Anderson and L. Johnson. (1997). *Systems Thinking Basics - From Concepts to Causal Loops*. Pegasus Communications, Inc.

[부록 : 시스템 주요변수의 수식 및 관련 상수 값]

변 수	관련 수식	관련 상수값
가 격	생산요구량*생산함수기울기	
누적생산량	INTEG(실제생산량, 초기값)	초기값=10
매립선호도	매립지역후생수준 ^{1.1} /(0.5 ^{1.1} +매립지역후생수준 ^{1.1})	
매립시설용량	INTEG(-실제매립량, 매립시설용량초기값)	매립시설용량초기값=10
매립처리관련비용	매립지반입량*(주민보상단가+(운반비용+기존처리비용)*(1-RCMS도입률)+(운반비용+RCMS처리비용)*RCMS도입률)	주민보상단가=0.02 운반비용=0.1 기존처리비용=0.08 RCMS처리비용=0.3
매립지반입량	MIN(지역미처리폐기물량, 매립시설용량*매립선호도, 연간최대반입한계)	연간최대반입한계=0.5
매립지후생수준	INTEG(주민보상단가*매립지반입량+SQRT(사회후생수준증가)*사회후생수준영향정도-매립환경피해비용, 매립지후생수준초기값)	사회후생수준영향정도=0.01 매립지후생수준초기값=0
매립환경피해비용	((1-RCMS도입률)*기존환경피해정도+RCMS도입률*RCMS환경피해정도)*실제매립량 ²	기존환경피해정도=1 RCMS환경피해정도=0.1
방치폐기물량	지역미처리량-매립지반입량	
방치폐기물 환경피해비용	방치폐기물환경피해비용계수*방치폐기물량 ²	방치폐기물환경피해비용계수=0.03
사용중인생산총량	INTEG(실제생산량-폐기물발생량, 초기값)	초기값=100
수도권후생수준	INTEG(생산요구량*수요함수절편/2-소각관련총비용-매립관련총비용-방치폐기물관련총비용)	
생산요구량	수요함수절편/(생산함수기울기+수요함수기울기)	수요함수기울기=0.5
생산함수기울기	한계생산비용+한계원료비용	

변 수	관련 수식	관련 상수값
소각선호도	$1 - (\text{소각관련평균비용} / (\text{소각관련평균비용} + \text{매립관련평균비용} + \text{방치폐기물관련평균비용}))^{1.2} / (1^{1.2} + (\text{소각관련평균비용} + \text{매립관련평균비용} + \text{방치폐기물관련평균비용}))^{1.2}$	
수요함수절편	$\text{INTEG}(\text{증가수요량} * \text{수도권후생수준}^{1.2} / (100^{1.2} + \text{수도권후생수준}^{1.2}), \text{초기수요량})$	증가수요량=10 초기수요량=10
실제매립량	매립지반입량-RCMS회수량	
실제생산량	생산요구량*(1-재이용률)	
처리대상폐기물량	폐기물발생량-재활용량	
재이용률	$\text{재이용률최대값} * (\text{가격} - \text{재이용비용})^{1.2} / (100^{1.2} + (\text{가격} - \text{재이용비용})^{1.2})$	재이용률최대값=0.2
재활용률	$\text{재활용률최대값} * (\text{한계원료비용} - \text{재활용비용})^{1.5} / (10^{1.5} + (\text{한계원료비용} - \text{재활용비용})^{1.2})$	재활용률최대값=0.8
재활용량	폐기물발생량*재활용률	
폐기물발생량	사용중인생산총량*폐기물발생비율	폐기물발생비율=0.01
지역소각량	$\text{MIN}(\text{소각시설용량} * \text{소각선호도}, \text{처리대상폐기물량})$	소각시설용량=0.5
지역소각처리비용	지역소각량*지역소각처리비용단가	지역소각처리비용단가=0.1
지역소각 환경피해비용	지역소각환경피해비용계수*지역소각량 ²	지역소각환경피해비용계수=0.1
지역미처리폐기물량	처리대상폐기물량-지역소각량	
자원및에너지수준	$\text{INTEG}(\text{재활용량} + \text{RCMS회수량} - \text{실제생산량}, \text{초기값})$	초기값=1,000
한계생산비용	한계생산비용계수/누적생산량	한계생산비용계수=100
한계원료비용	한계원료비용계수/자원및에너지수준	한계원료비용계수=10,000
RCMS회수량	매립지반입량*RCMS도입률*재활용률포화계수	재활용률포화계수=0.8 RCMS도입률=0 (CASE1)