



지역산업연관표에 기반한 국토 공간의 폐기물 투입산출구조 분석^{*,**}

: 수도권을 중심으로

Spatial Structure Analysis of Waste Flow based on Regional Input-Output Table
: Focusing on Seoul Metropolitan Area

이이주^{***} · 남진^{****}

Lee, Yi-Joo · Nam, Jin

Abstract

As global environmental problems become more serious, it is mainly argued that waste treatment should be managed from the perspective of a circular economy beyond the past linear economy system. Basic statistics are important to prepare countermeasures for such waste treatment. Conversely, it is difficult to assess the waste flow by region based on Korea's waste statistics. In this study, from the perspective of urban metabolism, interregional waste flows are indirectly estimated using regional input/output tables. The results show that waste from the Seoul Metropolitan area is scattered across the country. In the case of waste treatment in Incheon and Jeonnam, where the treatment rate is particularly high, there seems to be great demand. The waste flow estimated in this study is expected to serve as basic data for which there is no official waste movement statistics yet. The status of waste generation is additionally disclosed so that the distribution of waste by region can be identified. Therefore, it is necessary to additionally establish official data that can help assess the flow of waste resources.

주제어 시도단위 지역산업연관표, 폐기물 관리, 도시신진대사

Keywords Regional Input-Output Table (RIO), Waste Management, Urban Metabolism

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

과거 “대량생산-대량소비-대량폐기”라는 선형적인 사회경제 시스템에서 발생한 폐기물은 매립, 소각 등 전통적인 폐기의 관

점에서 처리되어왔다(김형욱 외, 2019; 조지혜 외, 2021). 한편, 최근 국제기관 및 해외 선진국에서 UN의 지속가능한 목표(Sustainable Development Goals, SDGs), OECD의 지속 가능 물 질관리(SMM, Sustainable Materials Management), 유럽연합(EU)의 순환경제 패키지(Circular Economy Package), 바젤 협약(Basel Convention)과 같은 국제적 논의 및 협약을 기준으

* 이 논문은 국토교통부의 스마트시티 혁신인재육성사업으로 지원되었습니다.

** 이 논문은 대한국토·도시계획학회 2021 추계학술대회 발표 내용을 수정·보완하여 작성하였음.

*** Master's Candidate, Department of Urban Design & Planning/Department of Smart Cities, University of Seoul (First Author: ee94j@kakao.com)

**** Professor, Department of Urban Design & Planning/Department of Smart Cities, University of Seoul (Corresponding Author: jnam@uos.ac.kr)

로 정책이 마련되고 있다. 즉, 매립지 부족, 자원 고갈, 고준위 핵 폐기물 등 선형적인 사회경제 시스템을 운영하는 과정에서 발생하는 폐기물 문제가 순환경제(circular economy) 관점의 논의로 빠르게 전환되고 있는 것이다(Mahesh et al., 2020; 서세욱, 2015).

폐기물처리의 핵심은 전 과정(수집-운반-매립 및 소각)에서 발생하는 오염을 최소화하기 위하여 첫째, 폐기물 총량을 감소시킨다는 것, 둘째, 폐기물을 순환경제의 고리(circular economy chain) 안에서 자원화할 수 있도록 관리하는 것, 셋째, 구체적인 통계자료 수집을 통해 관리체계를 구축하는 것이다.

구체적으로 OECD 주요 국가들을 비롯하여 유럽 등지의 나라들은 이미 가연성폐기물의 직매립을 금지하고, 최소한의 소각재와 불연성폐기물만을 매립하는 등 폐기물을 최소화·자원화하기 위한 정책들을 펼치고 있다(김규연 외, 2013). 또한, 독일 베를린시는 도시폐기물(Siedlungs-abfälle), 유기폐기물(Bioabfälle), 건설폐기물(Bauabfälle)뿐 아니라 <Figure 1>과 같이 통합적인 처리현황을 자원흐름도로 표현하여 공개하고 있다. 이는 시의 2030 폐기물처리기본계획(AWK; Abfallwirtschaftkonzept, 2021)의 목표와 가이드라인의 기반이 된다.

서울시의 폐기물 정책은 지방자치단체(이하 ‘지자체’)보다는 중앙정부 중심의 정책에 뿌리를 두고 있다. 1980년대 후반 서울 난지도 쓰레기 매립장이 한계 용량에 육박하자 중앙정부에서 본래 농지 확충을 목적으로 간척된 김포매립지(現 수도권 매립지)를 광역 매립장 용도로 강제적으로 전환한 것을 현재까지 사용 중이다(정원욱·김숙진, 2016). 한편, 인천시가 2025년을 기점으로 수도권 매립지 종료를 선언하였고, 서울시는 2022년 현재까지 폐기물처리시설에 뚜렷한 대책이 발표된 바 없다. 수도권(서울, 인천, 경기)과 중앙정부(환경부)에서는 대체 매립지를 찾고 있으나, 이해관계자 간 갈등으로 인해 확충이 불분명한 상황이다(서울연구원, 2020; 환경부, 2022; 정성우, 2019).

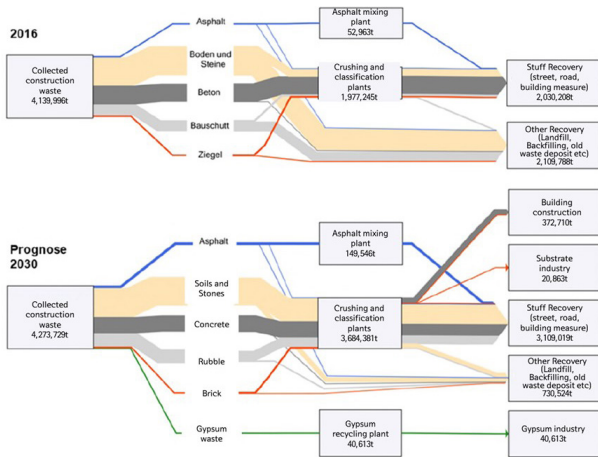


Figure 1. Treatment and whereabouts of the mineral waste to be recycled in 2016 and forecast year 2030 (Berlin, 2021)

폐기물 처리에 대한 대응 전략을 세우기 위해 기초통계는 중요한 역할을 하는데, 한국의 경우 폐기물 발생과 처리에 대한 구체적인 통계자료가 미흡하여 폐기물의 지역별 흐름까지는 알 수 없다.

따라서 이 연구는 지역산업연관표를 기반으로 지역 간 폐기물 처리의 흐름을 분석하는 것을 목적으로 한다. 이를 통해 순환경제 구현을 위한 노력의 일환으로 지역적으로 폐기물 전체의 흐름을 관리하기 위한 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 연구의 범위 및 흐름

이 연구의 공간적 범위는 전국 시도로 하며, 시간적 범위는 시도 산업별 사업장 배출시설계 폐기물 자료가 최초로 공개된 2019년으로 한다.

연구의 흐름은 <Figure 2>와 같다. 2장에서는 도시 생태학 관점에서 도시를 하나의 유기체로 보며 신진대사가 작동하는 개념의 ‘도시 신진대사 이론’에 대해 살펴보고, 관련하여 폐기물 관리를 비롯한 도시환경 개선을 위한 자원관리 연구를 검토한다. 3장에서는 국내 폐기물 자료 구축현황과 처리관점에서의 국내 폐기물 발생과 처리량을 살펴본다. 4장에서는 지역 산업연관표와 폐기물 발생 및 처리현황을 활용하여 지역 간 폐기물 처리 흐름을 간접 추계하여 지역 간 폐기물의 이출입 구조를 파악한다. 5장에서는, 이를 통해 우리나라 순환경제 구축 및 실현에 있어 폐기물 관리에 대한 정책적 시사점을 제공하고자 한다.

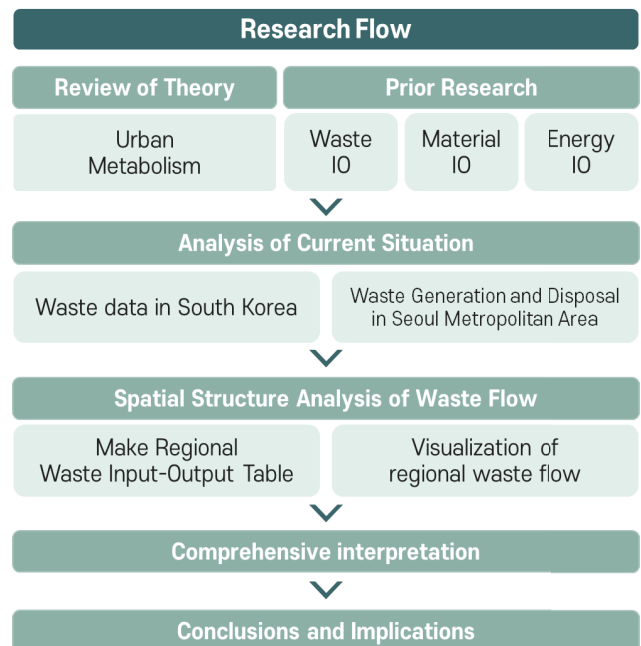


Figure 2. Flow chart of research

II. 관련 이론 및 선행연구 검토

1. 도시 신진대사 이론(Urban metabolism theory)

도시 신진대사는 막스(Marx)가 도시생태계의 순환 과정 이행을 위해 인간과 동물의 배설물을 비료화하는 도시-농촌의 신진대사(Metabolism)에 대해 논하면서 처음 사용되었다(Chrysoulakis et al., 2013; 반영운 외, 2018). 도시 생태학에서 기원하는 도시 신진대사는 생명체와 마찬가지로 도시 역시 생산과 소비의 시스템으로 이루어져 있고, 인간 활동이 토지이용에 직접적인 영향을 끼치기 때문에 도시를 하나의 유기체로 보고 자연 혹은 인간의 신진대사 개념을 동일시 적용한다(Turner, 1989; Kennedy et al., 2007; Golubiewski, 2012; Pataki, 2010; 이성희·김정곤, 2013).

대표적으로 Wolman(1965)은 물, 음식, 연료 등을 투입(Input), 하수·고형 쓰레기·공기 오염을 산출(Output)로 설정하여 정량화하고, 이 물질들의 변형 및 흐름에 대해 추적하는 방법을 통해 도시 신진대사 개념을 도시와 커뮤니티를 분석하는 수단으로 사용하였다. 현대에 이르러서는 많은 도시가 빠르게 성장함에 따라 폐기물 배출량이 늘어나 이를 관리할 목적으로 발전되고 있다(Chrysoulakis et al., 2013).

도시 신진대사는 <Figure 3>과 같이 도시 내로 물질이 투입되고 사용된 후에는 배출되는 산출물이 재활용되지 않는 구조의 선형(Linear)과 다른 공정에서 투입물로 재사용될 수 있는 구조의 순환형(Circular)으로 구분된다(Venturini, 2021). 1980년대 독일, 네덜란드 등의 국가를 중심으로 유럽에서는 '순환형 도시 신진대사' 개념이 지속가능한 개발과 탄소중립 도시의 핵심으로서 인식되었다(최정은 외, 2011).

이후 도시 신진대사는 도시환경에서 에너지 소비패턴을 정량

화하는 선도적인 방법론으로 부상하였다. 이후 학제 간 연구를 통해 도시의 총에너지 및 자원 입출력을 설명하는 방법에서 도시 에너지 소비패턴에 대한 보다 포괄적이고 통합적인 평가를 허용하는 방식으로 확장되었다(Pincetl et al., 2012).

즉, 도시 신진대사 이론은 도시가 성장하며 이루어지는 모든 사회경제적 프로세스를 파악하는 종합적인 도시관리의 개념이다. 따라서, 이 연구에서는 도시 신진대사 관점에서 도시에서 발생하는 폐기물의 흐름을 파악하고 이에 대한 도시구조를 설명하고자 한다.

2. 선행연구 검토

현대사회에 접어들어 높은 에너지 수요와 결합된 인간사회의 도시화 현상 증가는 도시의 관행들이 지속가능한가에 대한 의구심을 불러일으켰다. 이에 폐기물 관리, 에너지 관리, 탄소배출 관리 등 도시환경 개선을 위한 자원관리 연구들이 활발하게 진행되어왔다. 대부분 산업연관표를 활용하여 자원의 흐름을 추적하였는데 관련 선행연구를 정리해보면 <Table 1>과 같다.

구체적으로 3개로 구분되는데, 폐기물 투입산출분석을 통해 폐기물 발생량 및 처리구조를 파악한 연구(Towa et al., 2020; 신상철 외, 2015; Barles, 2010; 공성용 외, 2009), 물질흐름분석(Material Flow Analysis, MFA)으로 국내 주요 폐자원의 흐름을 파악한 연구(오길중 외, 2018; 고영재·장용철, 2016; 김정주 외, 2014; 조지혜 외, 2013; 민달기·정성우, 2011; 주현수 외, 2008), 에너지 및 환경산업연관표를 활용하여 이산화탄소 유발배출량을 추정하는 연구(장미란·강성원, 2018; 최한주·이기훈, 2004; 심상렬, 2005; 박창귀, 2009) 등이 있다.

폐기물 투입산출구조를 분석한 선행연구는 순환경제 이행을 목적으로 주로 폐기물 관리 방향을 시사하기 위해 산업연관표를 활용하여 폐기물 발생량을 추정하는 방법론 연구들이 주를 이룬다. 대표적으로, 신상철 외(2015)는 폐기물처리와 관련된 정책변화에 따른 파급효과를 분석하기 위해 산업연관표를 활용하여 대분류 기준 국내 산업의 폐기물흐름을 간접 추계하였다.

물질흐름분석을 활용한 연구는 주로 자원의 성질 변환에 초점을 맞추고 다양한 폐기물 자원의 지속가능한 활용방안을 탐구한다. 오길중 외(2018)는 물질흐름분석을 통해 사업장폐기물의 실제 재활용률과 최종처분율의 산정하고 분석하였다. 이는 자원순환 성과관리대상인 사업장폐기물의 실제 배출 및 처리량을 직접적으로 산정할 수 없어 통계기법을 개선하는 것에 목적이 있다.

에너지 산업연관표를 활용한 연구는 산업연관표의 에너지 생산과 소비에 관련하여 산업들을 중심으로 발전량을 추계하는 특성이 있다. 박창귀·이기훈(2011)은 기존 에너지 하이브리드 산업연관표 작성이 산업의 실질적인 에너지 사용과 탄소배출량을 파악하기가 불분명함에 따라 생산공정도와 기초가격 거래표를 사

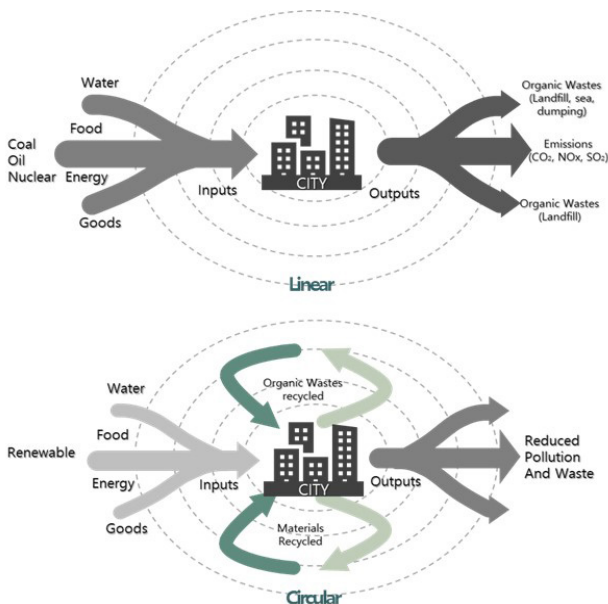


Figure 3. Linear and circular urban metabolism

Table 1. Summary of previous studies

Type	Author	Contents
Input-output table	Towa et al. (2020)	In this case, they categorize all IO modles into four types WEIO (waste extended IO), WIO (waste IO), PIO (physical IO), and HIO (hybrid IO). And then they define deach model within a waste anlysis framework and carry out a bibliometric analysis.
	Shin et al. (2015)	In order to implement the circular economy, the input-output table is used to anlyze other ripple effects on policy changes related to waste treatment using domestic data. Based on this analysis, the flow of domestic industrial waste was indirectly estimated.
MFA (Material Flow Analysis)	Oh et al. (2018)	The actual recycling rate was calculated based on the amount of resources actually circulating in the material flowchart based on the material balance for the entire recycling process from the separate collection of household waste to the manufacture of final recycled products.
	Ko and Jang (2016)	The recyling processes of construction and demolition waste (C&D waste) were analyzed, and its national recycling rate was determined using material flow analysis.
	Kim (2014)	This study investigated the optimization plan the recycling of waste home appliances recycling to the final stage of developmental stages through the material flow analysis TV, refrigerator, washing machine and air conditioning products.
Fossil energy input-output table	Jang and Kang (2018)	In order to make up for the weakness of the existing emission estimation methodology, they propose a top-down approach for estimating CO ₂ emissions in the 16 cities and provinces of South Korea.
Environmental IO model	Choi et al. (2004)	This study estimate carbon embodied in the export goods of Korea. For the estimation, an environmental hybrid model that extended the existing input-output model to the environmental industry was used.

용하는 방법으로 에너지 산업연관표를 개선하여 국내 산업의 화석에너지 소비구조를 분석하였다.

장미란·강성원(2018)은 지방자치단체별 온실가스 배출량 산정 기준이 서로 달라 비교할 수 없어 이를 개선하고자 화석연료 에너지 소비량을 시도단위 지역산업연관표에 할당하고, 에너지 소비량에 배출계수를 적용하여 전국 시도의 온실가스 배출량을 공통된 기준으로 산정하였다. 외에도 산업연관표를 활용하여 탄소배출량을 추계하는 연구는 주로 탄소배출권 거래(Emission trade)의 기반으로 산업들이 유발하는 탄소량을 추정한다.

3. 연구의 차별성

국내 폐기물 자원의 흐름을 파악하는 연구는 국가적인 관점에서 산업 발생량 또는 폐기물 자원 종류에 따른 발생 흐름을 파악하는 것이 대부분이다.

폐기물 투입산출분석을 통해 파악한 폐기물 구조는 산업연관에 따른 폐기물 발생량을 추계하는 것이 중점으로 폐자원의 지역 간 흐름을 파악하기에는 어려움이 있다. 물질흐름분석의 경우 폐기물 자체의 흐름보다는 자원의 성질에 초점을 맞추고 있어 공정 과정을 통해 특정 성질로 전환된 후 활용방안 연구가 다수 이루어져 있다. 관련 연구들은 성질 변형에 따른 지역적 이동까지의 파악이 어렵다. 환경산업연관표와 에너지산업연관표는 산업연관구조를 중심으로 탄소발생량을 추계하는 데 그 의미가 있다.

지역 간 폐기물 자원의 흐름을 분석하는 것은 국가적으로 폐기

물 발생 및 처리구조를 공간적으로 파악함으로써 국가 환경관리에 있어 체계적인 대응이 가능하며, 지역적으로는 폐기물의 흐름을 파악함으로써 지역 순환 자원의 확보와 최종 배출물에 대해 관리가 가능하다. 이 연구는 한국은행에서 제공하는 지역산업연관표와 환경부에서 제공하는 폐기물 발생 및 처리현황 자료를 활용하여 시도단위의 지역 간 폐기물 흐름을 추정하는 것에 차별성을 가진다.

III. 현황 분석

1. 국내 폐기물 자료 구축 현황

현재 지역별 폐기물에 대한 공식적인 자료는 환경부에서 발표하는 전국 폐기물 발생 및 처리현황으로, 매년 전년도 발생량 및 처리량을 집계하여 발표한다. 이는 「자원순환법」 제13조 및 같은 법 시행규칙 제10조(자원순환 통계조사)에 근거한다. 이는 폐기물을 처리하는 각 사업체에서 환경청 및 지자체(시군구→시도)로 신고하고, 한국환경공단을 거쳐 환경부에서 최종적으로 보고하는 형태이다.

법적 폐기물의 분류는 <Figure 4>¹⁾와 같으며, 크게 생활폐기물과 사업장폐기물로 나뉜다. 생활폐기물은 가정 등에서 발생하는 폐기물로, 음식물쓰레기 포함 일반적으로 생활 속에서 버려지는 쓰레기를 의미한다. 생활폐기물의 발생량은 폐기물 처리시설에서 계절별 1회 표본조사를 통해 집계된 성상별(가연성, 불연성)

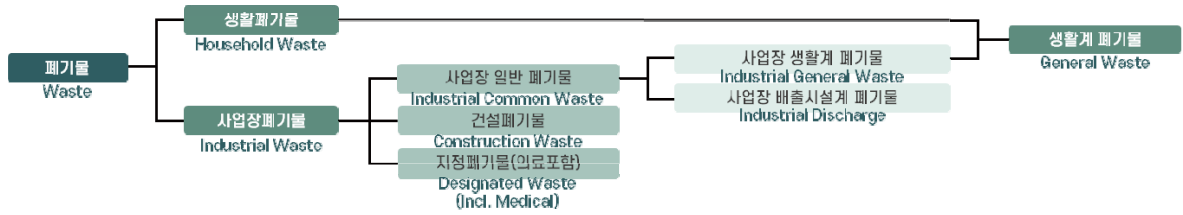


Figure 4. Legal classification of waste in Korea

폐기물 반입 비율에 관할구역 내 연간처리량을 곱하여 산정한다. 사업장폐기물은 사업장에서 발생할 수 있는 폐기물을 일컫는 말로, 사업장 일반폐기물과 건설폐기물, 지정폐기물(의료 포함)로 나뉜다. 이들은 폐기물 처리 주체별(공공처리, 위탁처리, 자가처리)로 나뉘어 집계되고 해당년도 발생량과 처리량이 '톤/일'로 산정된다. 사업장 폐기물의 경우 2020년에 발표된 2019년 폐기물발생현황에서 최초로 지역 산업별 폐기물 배출량을 발표한 특징이 있다.

국내 폐기물 자료는 폐기물 종류 및 시도(시군구)단위에 대하여 발생 및 처리량을 각각 구별하여 발표하고 있다. 모든 지역의 발생량과 처리량을 합한 값은 전국 발생량 및 처리량과는 일치하지만, 지역의 폐기물 발생 총량과 지역의 폐기물 처리 총량은 일치하지 않는다. 따라서, 한 지역에서 발생한 폐기물이 어떤 지역에서 어떻게 처리되었는지는 알 수 없는 상황이다.

이러한 통계자료의 발표는 지역 폐기물 관리에 어려움을 초래한다. 특히 매립지 용량이 한계에 육박하고, 매립과 소각에 따른 오염물질 배출로 환경오염에 대한 우려가 커지는 현재, 지역의 폐기물 발생과 처리에 대한 정확한 흐름을 파악하는 것은 폐기물 관리에 있어 중요한 부분이다. 그러나 현재의 자료로서는 지역적 측면에서 관리하기에 미흡한 상황이다.

2. 수도권 폐기물 발생 및 처리현황

〈Figure 5〉와 같이 전국 폐기물처리시설 187개 중 44개가 수도권에 위치하며, 서울 내 폐기물 처리시설은 노원구, 은평구, 마포구, 양천구, 강남구 각각 1개소씩 총 5개소의 공공 소각시설(Incinerator)만이 존재한다.

환경부에서 발표한 자료에 따르면, 2019년 기준 서울시에서 발생한 폐기물(지정, 의료 제외)은 총 '47,290톤/일'이며 서울시에서 보유한 폐기물 처리시설인 소각시설 5개소에서 폐기물(지정, 의료 제외) 처리량은 '713,757톤/년'이다. 서울시 발생폐기물을 년 단위로 환산하여 서울시 보유 폐기물 처리시설에서 처리했다는 가정하에 서울시의 자체적인 처리비율은 약 4.1%에 불과한 것으로 나타났다.

경기도는 2019년 기준 수도권 내에서는 가장 많은 폐기물 처리 시설을 보유하고 있고, 전국적으로는 전남 다음으로 가장 많은 폐기물 시설을 보유하고 있다. 소각시설의 경우 전국에서 가장

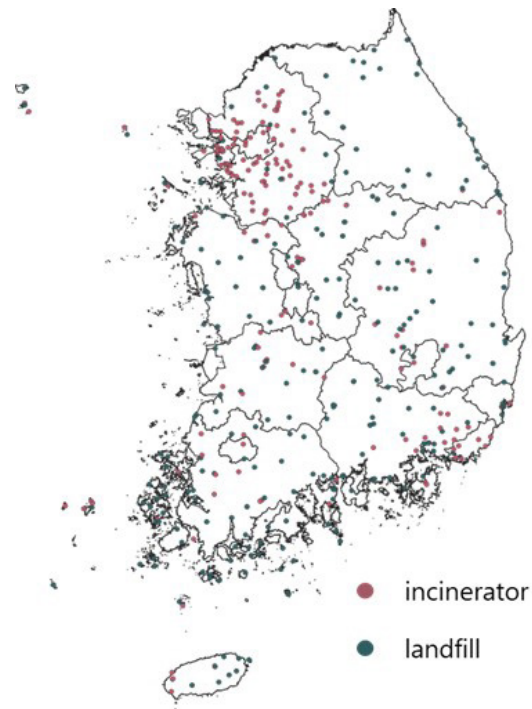


Figure 5. Distribution of waste treatment facilities in 2019

많이 분포하고 있다. 이는 경기도 내 많은 인구로부터 발생하는 많은 폐기물을 처리함과 동시에 인근 지역인 서울시의 폐기물도 일부 수용하고 있는 것으로 유추된다.

한편, 인천은 수도권 최대 규모의 매립지(Landfill)인 '수도권 매립지'가 위치한다. 수도권 매립지는 수도권 폐기물을 가장 많이 처리하고 있는데, 〈Table 2〉를 보면 그중 서울시의 폐기물 반입량이 2019년 기준 가장 높은 것으로 나타났다.

이외에도 〈Figure 6〉처럼 전국적으로 폐기물 처리에 대한 통

Table 2. Statistics on Seoul Metropolitan landfill site 2019

	Total	Seoul	Incheon	Gyung-gi
Import (kt/year)	3,367.7	1,424.2	693.4	1,250.1
Import rate (%)		42.29	20.59	37.12
Fee (100M.won)	2,637.7	1,097.6	546.2	993.9
Fee rate (%)		41.61	20.71	37.68

Source: Sudokwon landfill site management corp, 2020

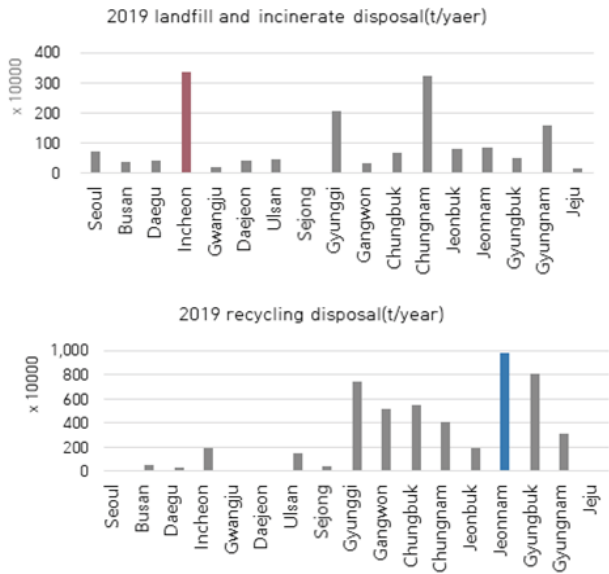


Figure 6. 2019 waste disposal by region

계자료를 보면, 인천, 충남, 경남 순으로 가장 많이 매립하였고, 소각의 경우는 경기, 서울, 경남 순으로 많이 처리하였다. 재활용의 경우는 전북, 경북, 경기 순으로 많이 처리한 것을 알 수 있다. 이는 발생량과 달리 처리시설 많거나 처리용량이 많은 곳이 중점적으로 소비되었음을 의미한다.

결과적으로, 국내 폐기물처리는 처리량이 많은 지역과 그렇지 못한 지역으로 구분된다. 하지만 결국 처리를 하는 지역의 처리 가능 용량이 포화상태에 이르면서, 또 다른 처리지역을 찾게 될 수밖에 없는 실정이다. 이는 근래에 환경문제를 해결하고자 하는 핵심적인 개념인 도시신진대사에서 권장하는 폐기물의 순환적 이용보다 소비-폐기의 선형 고리가 지속되게 된다. 따라서 앞으로 폐기물 순환관리와 지역의 폐기물 독립을 위해서는 구체적으로 지역별 발생량과 처리량을 기반으로 폐기물 관리구조를 구축할 필요가 있다.

IV. 시도단위 폐기물 지역투입산출표의 작성

1. 작성방법

지역 간 폐기물 흐름 도출을 위해 폐기물 지역투입산출표 작성에 사용한 자료는 전국 폐기물 발생 및 처리현황(자원순환정보시스템)과 지역산업연관표(한국은행)이다. 가장 최근 발표된 2019년 전국 폐기물 발생 및 처리현황 자료(2020)의 경우 지금까지 발표된 다른 자료와는 달리 사업장배출시설계 폐기물이 시도 산업분류(대분류 기준)별로 발표됨에 따라 지역별 산업분류에 따른 폐기물을 파악할 수 있다. 이를 바탕으로 지역 산업 간 연관관계를 설명하는 지역산업연관표의 특성을 활용하여 지역 간 폐기물의 흐름을 추계할 수 있다.

작성에 활용한 폐기물의 종류는 산업별 폐기물 발생량을 구체적으로 추계할 수 있는 사업장 배출시설계 폐기물과 건설업 출처의 건설폐기물을 합쳐 정의한 산업폐기물과 가계에서 발생한 생활(가정)폐기물을 다룬다. 사업장의 지역 산업정보가 불분명한 사업장 생활계 폐기물과 지정폐기물은 작성대상에서 제외하였다.

2022년 현재 한국은행에서는 2019년 발표한 2015년 시도단위 실측표를 가장 최근의 자료로 제공하고 있다. 지역산업연관표의 산업분류의 기준은 폐기물 발생 및 처리현황에서 제공되는 산업분류가 대분류임에 따라서 산업분류를 대분류로 하여 지역산업폐기물 배출량을 추계하되, 재활용처리와 재활용 외 처리(소각, 매립 등)에 대한 지역산업별 수요가 구분될 수 있도록 소분류 분류표를 활용하였다. 시도단위 폐기물 지역투입산출표의 작성단계는 다음과 같다.

- 1단계: 산업연관표를 활용한 지역산업별 폐기물 처리 총수요 파악
- 2단계: 폐기물 처리 총수요 할당
- 3단계: 양비례조정법(biproportional adjustment method, RAS)을 활용한 오차범위 축소

첫 번째로 지역산업연관표 배분구조(횡방향)의 소분류(폐기물 처리(491), 자원재활용서비스(492))에 대한 투입구조의 지역 산업별 폐기물 처리법별 총수요를 파악한다. 이 총수요를 파악할 때, 투입구조의 산업분류는 대분류여야 하므로, 174개의 소분류를 산업분류표 기준으로 32개로 재조정한다.

두 번째로 이에 대한 지역 산업별 폐기물과 가계발생량에 대한 폐기물 처리 총수요를 지역산업연관표에 할당한다. <Table 3>은 산업연관표의 구조에 각 해당하는 폐기물 종류를 표기한 것으로, 지역산업별 폐기물은 자원순환정보시스템에서 제공하는 시도 산업별 사업장배출시설계 폐기물과 시도별 건설폐기물을 각 산업에 할당하였고, 가계 발생량 폐기물에 시도별 생활폐기물을 할당하였다. 시도별 사업장 배출시설계 폐기물은 중간수요의 폐기물 처리(491)와 재활용서비스(492)에 할당하는데 각 지역산업 사업장에서 발생한 폐기물들은 투입구조의 산업들에 대응된다. 건설폐기물의 경우 건설업에 해당되므로, 건설업의 사업장배출시설계폐기물과 합하여 할당하도록 한다. 할당하는 방식은 다음 식을 따른다.

$$W_{ij}^R = W_i^R \times \frac{RIO_{i,j}^R}{\sum_j RIO_{ij}^R + Household_i^R} \tag{1}$$

$$W_{i,h}^R = W_i^R \times \frac{Household_i^R}{\sum_j RIO_{ij}^R + Household_i^R}$$

Table 3. Composition of regional input-output table and allocation method by type of waste

		Intermediate demand				Final demand		Total output
		13 regions (Sido)				13 regions (Sido)		
		...	Waste disposal (491)	Resource recycling service (492)	Household consumption	
Inter-mediate input	13 regions (Sido)	Industry I ...	Waste from business sites			Household waste		
		Construction Industry	Construction waste					
		... Industry N	Waste from business sites					
	Import	Industry I ...						
		... Industry N						
		Added value						
		Total input						

W_{ij}^R : R지역의 j산업에서 i형태로 폐기물을 처리하고자 하는 수요

$W_{i,h}^R$: R지역의 생활폐기물을 i형태로 처리하고자 하는 수요

W_i^R : R지역의 i형태의 폐기물처리에 대한 수요

RIO_{ij}^R : R지역에서 소비되는 i형태의 폐기물처리에 대한 j산업의 중간수요(지역산업연관표)

$Household_i^R$: R지역의 i형태의 폐기물처리에 대한 민간소비 수요(지역산업연관표)

여기서 지역산업연관표상의 폐기물처리 총수요는 해당 지역의 중간재 수요와 민간소비 수요의 합에 비례하다고 가정하였다. 이는 폐기물 배출의 주체가 중간재 사용 산업 및 가정이라고 판단하였기 때문이다. 이 식을 통해 각 폐기물량이 할당되고 나면, 지역별 산업폐기물(사업장 배출시설계 폐기물과 건설폐기물)과 생활폐기물을 합쳐 지역별 총폐기물 발생량과 처리량으로 재조정한다.

마지막으로 할당된 폐기물 투입산출표는 최종적으로 지역별 배출량 데이터를 기준으로 산업연관분석의 기본 원리를 잘 반영하고 있는 RAS(양비례조정법)를 사용하여 정교화하고 오차범위를 줄이도록 한다. 이 연구에서는 지역별 처리량을 기준으로 오차범위가 0.1% 이내로 하여 총 40회 시도하였다.

2. 시도단위 폐기물 지역투입산출표 작성결과

최종 시도단위 투입산출구조는 횡방향의 13개 시도와 최종발생량, 발생지와 처리방법을 뜻하는 종방향의 13개 시도와 각 2개의 처리방법(폐기물처리, 재활용서비스), 최종처리량으로 13×26의 행렬형태로, 도출된 결과는 <Table 4>와 같다.

이를 바탕으로 수도권 지역별 재활용 외 폐기물처리의 흐름을 시각화하면 <Figure 7>과 같으며, 마이크로소프트 파워비아이

프로그램(Microsoft Power BI)의 코드 다이어그램(Chord diagram) 시각화 방법을 사용하였다.

<Figure 7>는 서울, 경기, 인천으로부터 어느 지역의 어떤 처리방법으로 분산되는지 알 수 있으며, 호의 길이 비율을 통해 다른 지역의 처리량과 상대적으로 비교할 수 있다. 또한 각 호의 길이는 처리량의 정보를 담고 있으며, 각 지역에서 처리되는 방법에 따라 흘러 유입되는 폐기물량의 출처를 파악할 수 있다. 예를 들어, 서울시 폐기물 발생량 17만 톤이 인천 폐기물처리, 전남 재활용 등의 지역 처리량으로 빠져나갔다는 것을 알 수 있다.

수도권 지역별로 알기 쉽도록 시각화한 것은 <Figure 8-11>과 같다. 이들은 <Figure 7>와 동일 프로그램의 Forced-direct 그래프 시각화 방법을 사용하였으며 각 점과 선은 지리적 정보를 반영하지 않는다.

서울을 중심으로 한 <Figure 8>을 살펴보면 서울은 전남 재활용(16.6%), 인천 폐기물처리(13.3%), 충남 재활용(11.0%)과 강하게 연결되어 있다. 서울시의 폐기물처리와 재활용을 합하면 약 4.52%로 자체적인 폐기물처리는 전국 대비 순위 8번째이다. 경기를 중심으로 한 <Figure 9>을 살펴보면 경기도는 경기 재활용(31.3%), 인천 폐기물처리(22.3%), 전남 재활용(9.1%)으로 강한 연결성을 보였다. 경기도의 경우 경기 폐기물처리를 포함하면 경기도 자체 처리량은 총배출량의 약 38%를 차지한다. 인천을 중심으로 한 <Figure 10>을 살펴보면 인천은 인천 폐기물처리(52.9%), 인천 재활용(12.9%) 순으로 강하게 연결된 것을 확인하였다. 인천은 총 65.8%로 타 수도권 지역보다 처리 비율이 매우 높았다.

전체적으로 수도권의 폐기물이 전국 폐기물처리와 재활용으로 흩어지는 양을 살펴보면, 서울 수도권에서 발생한 폐기물들은 전국 각지로 흩어져 처리되었다. 눈에 띄는 점으로는 수도권의 폐기물처리 대부분이 인천에서 이루어지며, 인천시의 경우는 높은 비율로 자체적인 처리를 한다는 점이다. 이는 수도권 폐기물의

Table 4. 2019 waste disposal estimate based on regional input-output table

(kt/y)	Seoul	Incheon	Gyeonggi	Busan	Ulsan	Daegu	Daejeon	Sejong	Chungbuk	Chungnam	Gwangju	Jeonbuk	Jeonnam	Gyungbuk	Gyungnam	Gangwon	Jeju
W	687.0	34.7	131.6	48.4	9.6	51.8	30.5	5.7	6.3	2.7	28.0	7.7	1.2	2.5	22.8	6.6	4.9
R	79.5	0.2	0.9	0.5	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.1	0.2	0.1
W	2,254.0	5,583.4	7,223.3	661.7	138.8	1,656.0	519.5	104.4	1,491.5	267.7	902.5	1,330.3	248.4	338.3	307.5	331.9	420.8
R	177.9	1,365.2	466.3	34.1	10.4	80.3	6.9	3.6	59.9	15.1	44.8	240.6	45.3	28.4	9.1	231.8	89.5
W	225.2	158.8	2,138.4	178.6	42.4	111.7	92.5	26.8	22.1	21.3	63.0	27.7	4.1	13.8	173.9	14.3	19.6
R	472.2	99.1	10,130.4	189.7	46.2	48.3	27.3	14.0	8.6	14.4	32.8	39.5	6.5	13.3	77.1	52.7	30.1
W	71.8	17.1	260.4	703.4	0.9	103.0	7.1	1.4	43.4	6.7	48.4	47.9	8.0	8.2	1.7	21.2	21.2
R	2.7	0.5	11.9	679.6	0.1	2.0	0.1	0.0	1.6	0.4	1.1	6.5	1.2	0.7	0.1	6.2	2.4
W	17.1	4.1	62.9	1.1	568.9	26.0	1.6	0.3	9.5	1.4	12.2	10.8	1.7	1.8	0.5	5.6	5.1
R	14.3	3.1	61.7	1.3	2,673.7	10.5	0.4	0.2	8.4	2.1	5.8	33.6	6.3	3.8	0.3	32.1	12.4
W	229.6	61.2	242.5	68.5	12.4	586.1	43.6	8.1	16.6	6.1	48.0	20.1	3.1	4.9	39.4	14.2	12.4
R	33.0	6.9	30.8	12.3	3.3	414.1	1.8	0.9	2.0	1.2	2.9	8.1	1.5	1.4	4.4	8.8	3.6
W	137.3	23.2	185.0	31.6	6.2	77.6	362.1	224.4	20.9	3.9	38.5	24.4	3.9	4.7	14.3	14.4	12.4
R	4.0	0.5	5.1	1.2	0.3	0.9	34.2	17.5	0.5	0.2	0.5	2.1	0.4	0.3	0.3	2.1	0.8
W	4.9	0.7	7.0	1.0	0.2	2.7	28.5	11.4	0.6	0.1	1.4	0.8	0.1	0.1	0.4	0.5	0.4
R	36.5	4.8	46.7	10.7	3.1	8.1	313.1	160.2	4.9	1.5	4.7	19.7	3.7	2.7	3.0	19.6	7.5
W	166.5	91.2	218.1	102.4	21.3	64.5	54.9	12.6	398.6	9.0	35.2	3.8	0.2	4.3	79.4	5.3	6.4
R	1,693.4	410.4	1,071.5	717.0	185.8	140.5	97.7	50.0	3,261.4	49.9	98.0	41.3	3.1	35.4	274.1	101.4	58.5
W	693.9	217.3	622.1	329.3	64.9	231.2	192.7	39.8	4.6	773.7	127.9	9.1	1.2	12.7	208.0	15.7	17.4
R	1,855.2	279.9	927.0	696.7	187.8	145.2	101.0	51.7	5.1	10,520.0	102.2	34.4	5.1	36.6	238.0	91.0	50.0
W	80.9	28.1	90.9	24.7	4.9	32.3	14.5	2.7	6.2	2.5	194.8	7.3	1.1	1.7	13.1	5.4	4.1
R	4.5	1.3	4.6	1.8	0.5	0.7	0.2	0.1	0.3	0.2	112.5	1.2	0.2	0.2	0.6	1.4	0.5
W	272.2	130.3	423.9	125.0	25.9	136.0	70.1	14.0	44.0	15.7	68.3	356.4	7.7	11.5	77.2	22.6	22.5
R	243.5	68.6	270.5	95.9	27.9	40.0	12.9	6.6	19.9	11.5	23.9	1,891.1	14.3	12.5	32.7	86.1	32.0
W	454.9	191.6	717.5	210.7	42.6	229.7	122.0	25.0	77.0	24.9	117.0	85.3	131.8	20.8	133.0	37.6	39.6
R	2,811.6	622.7	2,948.3	1,036.0	289.1	457.4	147.1	75.3	221.0	114.0	277.9	900.5	4,513.3	143.3	355.9	949.9	371.6
W	238.8	115.9	456.9	137.4	27.3	125.0	77.9	17.9	48.2	17.1	66.5	52.5	8.7	422.0	106.3	20.2	24.3
R	1,382.4	271.6	1,393.7	508.3	127.1	215.4	75.3	38.5	93.0	52.5	134.7	386.6	70.5	6,742.0	197.0	407.7	179.2
W	268.7	131.4	427.0	138.7	27.8	130.0	77.9	16.5	38.3	16.2	67.1	43.2	6.8	11.6	2,111.1	20.1	21.7
R	220.3	55.0	216.8	86.9	23.3	31.8	12.1	6.2	13.2	9.0	19.8	54.4	9.6	9.7	4,367.3	59.5	24.5
W	385.1	207.6	531.0	255.8	60.9	159.9	135.2	33.3	12.6	19.7	86.7	16.7	2.0	12.6	181.5	61.9	14.3
R	1,506.0	288.4	818.1	587.8	167.6	122.2	81.0	41.4	12.3	33.0	83.1	55.9	7.9	31.1	190.0	3,842.1	39.7
W	195.8	80.2	188.4	84.0	14.0	59.7	48.3	9.3	1.2	6.8	33.9	2.5	0.1	2.8	60.8	4.1	51.0
R	34.8	9.9	25.4	15.7	3.7	3.1	2.1	1.1	0.1	1.3	2.2	0.9	0.0	0.8	6.7	2.2	35.0

Note: W, Waste; R, Recycle

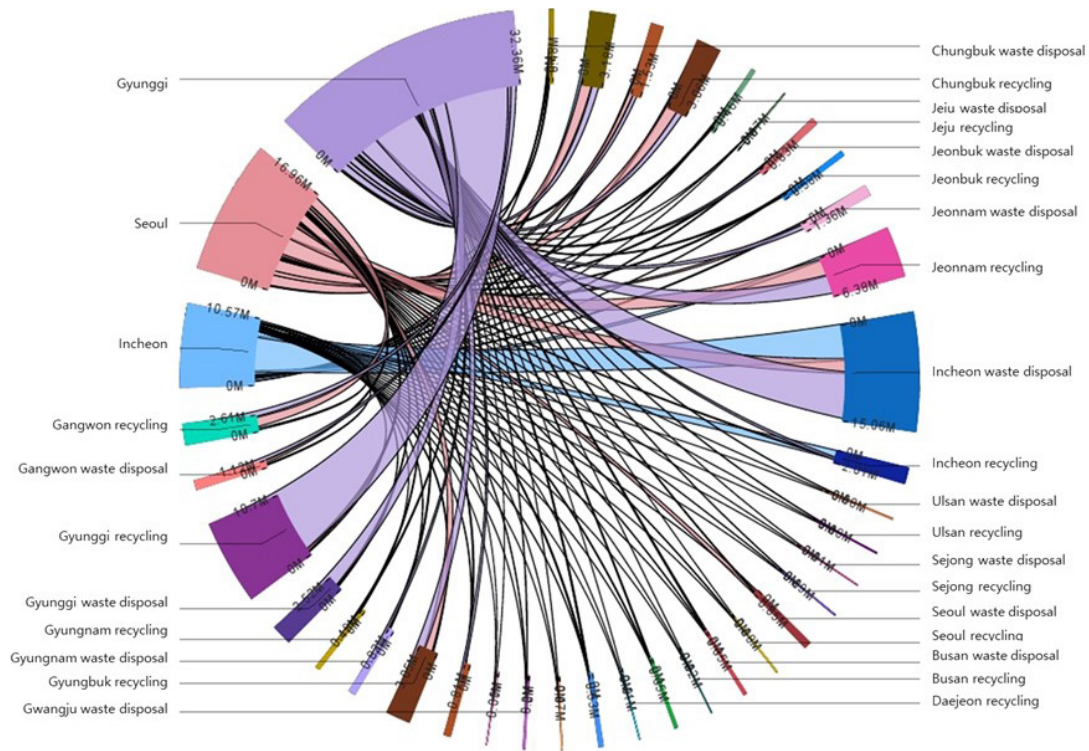


Figure 7. Waste flow chord diagram focusing on Seoul Metropolitan

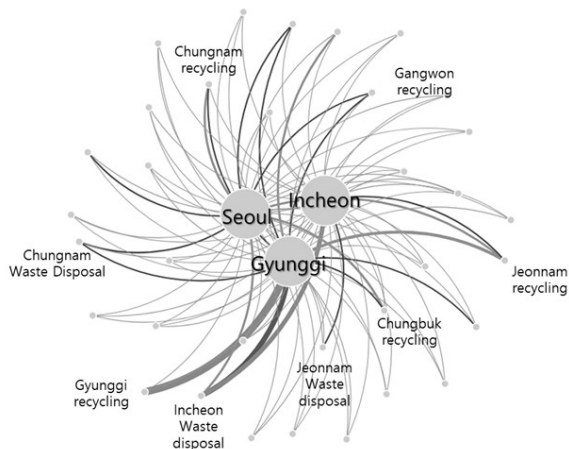


Figure 8. Waste disposal diagram of Seoul Metropolitan

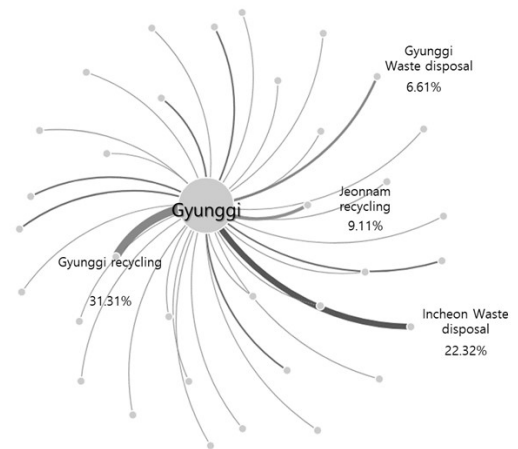


Figure 10. Waste disposal diagram of Gyunggi

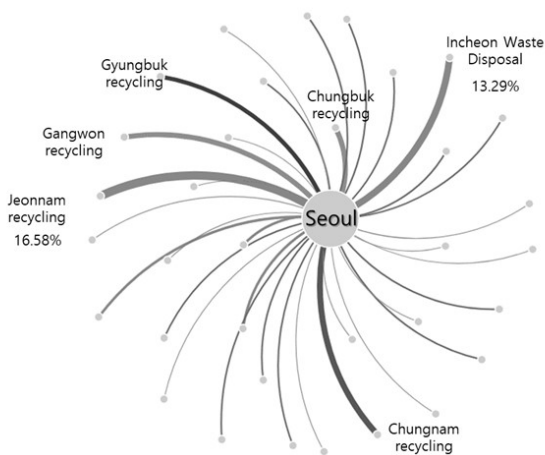


Figure 9. Waste disposal diagram of Seoul

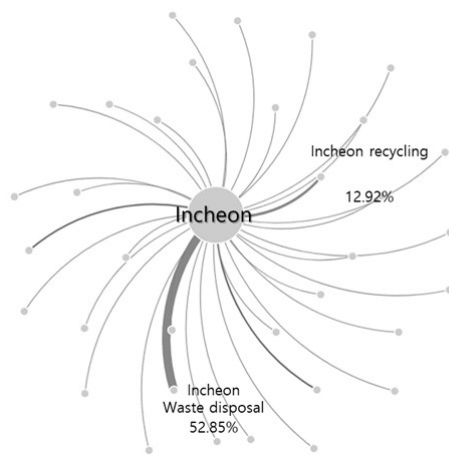


Figure 11. Waste disposal diagram of Incheon

대부분을 담당하는 수도권 매립지가 위치하는 데에서 비롯한 것으로 해석된다. 하지만 재활용의 경우 재활용을 제외한 폐기물처리 부분보다 눈에 띄게 전국 각지로 폐기물이 흩어지는 것을 확인하였다. 따라서 서울 수도권의 폐기물처리는 인천을 제외하고 서울·경기 지역에서는 지역 자체보다는 지역 외에서 처리함을 알 수 있다.

수도권만이 전국적으로 폐기물을 보내고 있는지 확인해 보면, 2019년 매립·소각 처리량이 가장 많은 지역은 인천(3,347,517톤/년), 재활용처리량이 가장 많은 지역은 전남(9,779,447톤/년)으로 나타났다. 이를 중심으로 다시 작성 결과를 살펴보면, 인천 폐기물처리로는 수도권을 비롯하여 충북, 대구, 전북, 대전 등 많은 시도에서 폐기물이 유입됨을 확인할 수 있었고, 반대로 전남 재활용 역시 서울, 경기를 비롯하여 전남, 부산, 강원 등 많은 시도에서 폐기량이 유의미하게 유입됨을 확인하였다. 이는 곧 처리량이 많은 곳으로 전국의 폐기물이 유입됨을 알 수 있다.

V. 결론 및 시사점

전 세계적으로 탄소배출 저감을 위해 폐기물 원천감량 및 자원화에 대해 노력하고 있는 지금, 전국의 폐기물 정책 역시 자원순환을 목표로 두고 있다. 기존의 폐기물처리 통계발표는 지역의 폐기물처리 흐름을 파악하기에는 어려움이 있지만, 지역산업연관표를 활용하면 지역의 폐기물이 어느 지역에서 어떤 형태로 처리되는지 간접적으로 추계가 가능하다. 따라서 이 연구는 폐기물 투입산출구조 분석을 통해 폐기물 처리 흐름 분석 방법을 제시하였다.

시도단위 폐기물 투입산출표 작성은 먼저, 환경부에서 제공하는 폐기물 정보를 폐기물 처리(소각, 매립)업과 재활용 서비스업에 식을 활용하여 지역산업연관표에 할당한다. 이후 최종처리량과의 오차범위를 줄이기 위하여 양비례조정법을 통해 최종 조정한다.

그 결과, 서울 수도권의 폐기물은 전국으로 흩어지고 있음을 확인하였다. 특히 인천의 폐기물처리(매립, 소각 등)와 전남의 재활용이 수도권에서 높은 비중을 차지하였는데, 이는 처리량이 많은 곳에 수요가 따르는 것으로 해석할 수 있다.

한편 폐기물 자원의 흐름을 알 수 있는 공식적인 통계자료가 없는 현재 이는 서울 수도권을 비롯하여 전국 지자체에서 순환경제를 지역적 측면으로 구현하는 데에 있어서 기초적인 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 산업연관표의 특성상 지역별 국민 계정자료를 활용하여 시점과 시군구 확장이 가능하다는 점을 고려해보면, 확장을 통해 보다 정교한 폐기물 흐름을 추계할 수 있을 것이다.

최근 폐기물 처리 분포 특성을 살펴볼 수 있도록 최근 자원순환 통계 데이터에 처리지역과 업체명을 추가하여 구축하고 있고, 산

업별로 배출현황을 볼 수 있도록 지역 산업별 폐기물 발생 현황을 추가로 공개하는 현황을 미루어보아 폐기물 자원의 흐름을 알 수 있는 공식적인 자료 역시도 추가적으로 구축될 필요가 있다.

주1. 이는 공식적인 영문표기법은 아니며, 한글표기를 병기하였음.

주2. 시군구 단위 국민계정자료는 발표되지 않아 구득이 불가능한 관계로 기초 지방자치단체 단위 확장이 어려우므로 이 연구에서는 2015년 시도단위 지역산업연관표를 활용함.

주3. 산업연관표의 경우 각 사업체의 대표적인 산업구분으로 집계되는 국민계정 자료로 작성이 되기 때문에, 폐기물처리업(491), 자원재활용서비스업(492)은 산업의 대표성을 가질 뿐 정확한 폐기물 처리량을 대체할 수는 없다는 한계가 있음.

인용문헌 References

- 고영재·장용철, 2016. “건설폐기물의 물질흐름분석을 통한 실질 재활용률 산정 연구”, 『한국폐기물자원순환학회지』, 33(5): 483-491.
Ko, Y.J. and Jang, Y.C., 2016. “A Study of the Determination of Actual Recycling Rate of Construction and Demolition Waste using Material Flow Analysis (MFA) in Korea”, *Journal of Korea Society of Waste Management*, 33(5): 483-491.
- 공성용·신상철·남재현, 2009. 「제품분류에 따른 대기오염물질 직·간접 배출량 추정과 변화요인 분석」, 한국환경정책·평가연구원.
Kong, S.Y., Shin, S.C., and Nam, J.H., 2009. *Estimation of Direct and Indirect Emissions of Air Pollutants According to Product Classification and Analysis of Change Factors*, Korea Environment Institute.
- 김규연·최익원·이상우·박재성·김영란·이동진·김기현·오길중, 2013. 「유기성 폐기물의 매립 최소화를 위한 방안 연구 - 고형연료화 시설 잔재물을 중심으로」, 국립환경과학원.
Kim, K.Y., Choi, I.W., Lee, S.W., Park, J.S., Kim, Y.L., Lee, D.J., Kim, K.H., and Oh, G.J., 2013. *A Survey on Minimization of Organic Waste Landfilling - on Residues from MBT Facilities*, National Institute of Environmental Research.
- 김정주, 2014. “폐가전제품의 물질 흐름분석을 통한 재활용 최적화 방안 연구”, 서울과학기술대학교 석사학위논문.
Kim, J.J., 2014. “A Study on the Recycling Optimization through Material Flow Analysis of Household Electric Appliances”, Master’s Dissertation, Seoul National University of Science and Technology.
- 김형욱·엄남일·오정근·이영기·김기현, 2019. “자원순환 경제로 이행을 위한 국내·외 과제와 전망”, 『한국폐기물자원순환학회지』, 36(2): 128-137.
Kim, H.W., Um, N.I., Oh, J.K., Lee, Y.K., and Kim, K.H., 2019. “International Challenges and Prospects for Transition to the Domestic Resource Circulation Economy”, *Journal of Korea Society of Waste Management*, 36(2): 128-137.

6. 민달기·정성우, 2011. “음식물류폐기물 처리시설의 물질흐름분석에 관한 연구”, 『한국폐기물자원순환학회』, 28(3): 235-241.
Min, D.K. and Chung, S.W., 2011. “A Study on the Material Flow Analysis of the Food Waste Treatment Facilities in Korea”, *Journal of Korea Society of Waste Management*, 28(3): 235-241.
7. 박창귀, 2009. “하이브리드 산업연관표를 이용한 우리나라 CO₂ 배출구조분석”, 『환경정책연구』, 8(1): 49-72.
Park, C.G., 2009. “An Analysis of CO₂ Emission Structure in Korean Industry Using Hybrid IO Table”, *Journal of Environmental Policy*, 8(1): 49-72.
8. 박창귀·이기훈, 2011. “화석에너지 산업연관표의 작성과 활용: 우리나라 직·간접 화석에너지 소비구조 분석”, 『경제분석』, 17(2): 124-151.
Park, C.G. and Lee, K.H., 2011. “A Study on the Construction and Application of Fossil Energy Input-Output Table”, *Economic Analysis*, 17(2): 124-151.
9. 반영운·백종인·김유미, 2018. “지속가능한 도시 메타볼리즘을 활용한 도시의 안전성 평가프레임워크 개발”, 『Crisisonomy』, 14(5): 119-135.
Ban, Y.U., Baek, J.I., and Kim, Y.M., 2018. “Developing an Urban Safety Assessment Framework Using Sustainable Urban Metabolism”, *Crisisonomy*, 14(5): 119-135.
10. 서세욱, 2015. “자원순환형사회 전환의 정책과제: 일본사례의 시사점을 중심으로”, 『예산정책연구』, 4(1): 181-213.
Seo, S.W., 2015. “Policy Issues of Transition into Resource-Circulating Society: Focus on Japan’s Biomass Policy”, *Journal of Budget and Policy*, 4(1): 181-213.
11. 서울연구원, 2020. 『제1차 서울특별시 자원순환시행계획』, 서울: The Seoul Institute, 2020. *The 1st Seoul Metropolitan Government Resource Circulation Implementation Plan*, Seoul.
12. 수도권매립지관리공사, 2020. 『2019 수도권매립지관리공사 통계연감 2020 제18호』, 인천.
Sudokwon Landfill Site Management Corp, 2020. *Year 2019 Sudokwon Landfill Statistics Yearbook 2020 Vol. 18*, Incheon.
13. 신상철·박효준·한인성, 2015. 『자원순환경제로의 이행을 위한 정책평가 방법론 개선: 폐기물산업연관표 구축 및 활용을 중심으로』, 한국환경정책·평가연구원.
Shin, S.S., Park, H.J., and Han, I.S., 2015. *An Application of the Waste Input-Output Analysis in Korea*, Korea Environment Institute.
14. 심상렬, 2005. 『에너지 산업연관표 작성』, 울산: 에너지경제연구원.
Sim, S.R., 2005. *Analysis of Energy IO Table*, Ulsan: Korean Energy Economic Institute.
15. 오길중·김지연·김기현, 2018. 『생활폐기물의 물질흐름분석을 통한 실질 재활용률 산정 및 온실가스 저감 효과 분석』, 인천: 국립환경과학원.
Oh, G.J., Kim, J.Y., and Kim, K.H., 2018. *Calculation of Actual Recycling Rate and Effect of Greenhouse Gas Reduction by Recycling of MSW in Korea*, Incheon: National Institute of Environmental Research.
16. 오길중·조윤아·김지연·김기현, 2018. “물질흐름분석을 통한 사업장폐기물의 실제적인 재활용률과 최종처분율의 산정 및 분석”, 『한국폐기물자원순환학회지』, 35(8): 785-798.
Oh, G.J., Cho, Y.A., Kim, J.Y., and Kim, K.H., 2018. “Calculation and Analysis of Actual Recycling Rate and Final Disposal Rate of Industrial Waste by Material Flow Analysis”, *Journal of Korea Society of Waste Management*, 35(8): 785-798.
17. 이성희·김정곤, 2013. “도시 메타볼리즘 중심의 기후변화대응 도시 계획 방향에 관한 연구”, 『한국기후변화학회지』, 4(3): 279-290.
Lee, S.H. and Kim, J.K., 2013. “A Study of the Direction of Urban Planning for Coping with Climate Change focusing on Urban Metabolism”, *Journal of Climate Change Research*, 4(3): 279-290.
18. 장미란·강성원, 2018. “하향식 지역자치단체 배출량 산정방안: 지역온실가스 산업연관표 작성”, 『환경정책』, 26(1): 117-153.
Jang, M.R. and Kang, S.W., 2018. “A Top-Down Approach to Estimate Regional CO₂ Emissions”, *Journal of Environmental Policy and Administration*, 26(1): 117-153.
19. 정성우, 2019. “중국발(發) 수입 규제 강화로 급변하는 아시아 재활용 시장 폐플라스틱 이슈, 동아시아의 자원 순환 관점에서 접근해야”, 『CHINDIA Plus』, 134: 56-57.
Jeong, S.W., 2019. “The Issue of Waste Plastics in The Asian Recycling Market, Which Is Rapidly Changing Due to Stricter Import Regulations from China, Needs to Be Approached from The Perspective of Resource Circulation in East Asia”, *CHINDIA Plus*, 134: 56-57.
20. 정원욱·김숙진, 2016. “수도권매립지 입지갈등의 전개: 네트워크 효과로서의 영역 개념을 중심으로”, 『대한지리학회지』, 51(4): 541-558.
Jung, W.W. and Kim, S.J., 2016. “Location Conflicts of Landfill, Seoul Metropolitan Region: Through the Concept of Territory as an Effect of Networks”, *Journal of the Korean Geographical Society*, 51(4): 541-558.
21. 조지혜·이희선·김충현·신경희, 2013. “희토류자석의 자원순환 활성화를 위한 폐자원흐름의 분석”, 『한국환경연구원 연구보고서』, 2013-13: 3284-3441.
Jo, J.H., Lee, H.S., Kim, C.H., and Shin, G.H., 2013. “Secondary Material Flow Analysis to Activate Recycling of Rare Earth Magnet”, *Korea Environment Institute Research Report*, 2013-13: 3284-3441.
22. 조지혜·주문술·신동원·고인철, 2021. “순환경제 이행 진단을 위한 모니터링 지표 개발 연구”, 『한국환경정책평가연구원 KEI 포커스』, 9(1): 1-14.
Jo, J.H., Ju, M.S., Shin, D.W., and Ko, I.C., 2021. “A Study on the Development of Monitoring Indicators for Diagnosis of Circular Economy Implementation”, *Korea Environment Institute KEI Focus*, 9(1): 1-14.
23. 주현수·김종호·장기복·하현선, 2008. 『주요자원의 물질흐름분석을 통한 자원생산성 향상방안 연구』, 인천: 국립환경과학원.
Ju, H.S., Kim, J.H., Jang, K.B., and Ha, H.S., 2008. *A Study on The Improvement of Resource Productivity through Material Flow Analysis of Major Resources*, Incheon: National Institute of Environmental.
24. 최정은·김정곤·오덕성, 2011. “도시 신진대사 관점에서 본 저탄소 녹색도시 계획특성 및 사례 분석”, 『한국생태환경건축학회 논문

- 문집], 11(5): 3-12.
Choi, J.E., Kim J.K., and Oh, D.S., 2011. "Characteristics and Case Study of Low Carbon Green City Planning from The Perspective of Urban Metabolism", *Journal of the Korea Institute of Ecological Architecture and Environment*, 11(5): 3-12.
25. 최한주·이기훈, 2004. "우리나라 수출상품에 체화된 이산화탄소 배출량의 추정", 「자원환경경제연구」, 13(3): 441-468.
Choi, H.J. and Lee, K.H., 2004. "An Estimation of Carbon Embodied in the Export Goods of Korea Using a Hybrid Input-output Approach", *Environmental and Resource Economics Review*, 13(3): 441-468.
26. Barles, S., 2010. "Society, Energy and Materials: the Contribution of Urban Metabolism Studies to Sustainable Urban Development Issues", *Journal of Environmental Planning and Management*, 53(4): 439-455.
27. Berlin, 2021. *Abfallwirtschaftskonzept für Siedlungs- und Bauabfälle sowie Klärschlämme für den Planungszeitraum 2020 bis 2030 – Zero waste Strategie des Landes Berlin*. Berlin.
28. Chrysoulakis, N., Lopes, M., José, R.S., Grimmond, C.S.B., Jones, M.B., Magliulo, V., Klostermann, J.E.M., Synnefa, A., Mitraha, Z., Castro, E.A., González, A., Vogt, R., Vesala, T., Spano, D., Pigeon, G., Freer-Smith, P., Staszewski, T., Hodges, N., Mills, G., and Cartalis, C., 2013. "Sustainable Urban Metabolism as a Link between Bio-physical Sciences and Urban Planning: The BRIDGE Project", *Landscape and Urban Planning*, 112: 100-117.
29. Golubiewski, N., 2012. "Is There a Metabolism of an Urban Ecosystem? An Ecological Critique", *Ambio*, 41(7): 751-764.
30. Kennedy, C., Cuddihy, J., and Engel-Yan, J., 2007. "The Changing Metabolism of Cities", *Journal of Industrial Ecology*, 11(2): 43-59.
31. Mahesh, P., Jeff, S., and Dave, M., 2020. "Waste Reduction using Lean Tools in a Multicultural Environment", *Journal of Cleaner Production*, 265.
32. Pataki, D., 2010. "Integrating Ecosystem Services into the Urban Metabolism Framework", University of California.
33. Pincetl, S., Bunje, P., and Holmes, T., 2012. "An Expanded Urban Metabolism Method: Toward A Systems Approach for Assessing Urban Energy Processes and Causes", *Landscape and Urban Planning*, 107(3): 193-202.
34. Towa, E., Zeller, V., and Achten, W.M.J., 2020. "Input-output Models and Waste Management Analysis: A Critical Review", *Journal of Cleaner Production*, 249.
35. Turner, M.G., 1989. "Landscape Ecology: The Effect of Pattern on Process", *Annual Review of Ecology and Systematics*, 20: 171-197.
36. Venturini, F., 2021. "Towards a Zero Waste Urbanism: A Manifesto for Sustainable Futures", *Documenti Geografici*, 2: 297-316.
37. Wolman, A., 1965. "The Metabolism of Cities", *Scientific American*, 213: 179-190.
38. 환경부, "수도권 대체매립지 제공모 종료", 2022.2.17. 읽음. <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=10525&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&boardId=1465770>
Ministry of Environment, "End of Public Offering for Alternative Landfill Sites for the Seoul Metropolitan Area", Accessed 17, 2022. <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=10525&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&boardId=1465770>

Date Received 2022-02-18
Date Reviewed 2022-05-31
Date Accepted 2022-05-31
Date Revised 2022-07-29
Final Received 2022-07-29