KIEAE Journal, Vol. 23, No. 1, Feb. 2023, pp.37-44.

KIEAE Journal

Korea Institute of Ecological Architecture and Environment

119

생태공장 구축사업 원년에 시행된 설비 리모델링의 의사결정 요인

Decision-making Factors in Facility Remodeling Implemented in the First Year of the Eco-factory Construction Project

정상규* · 민하서영** · 반영운***

Sang-Kyu Jeong* · Ha-Seo-Young Min** · Yong-Un Ban***

* *Main author, Professor, Dept. of Smart Eco-Industrial Convergence, Chungbuk National Univ., South Korea (neoshaky@chungbuk.ac.kr)*

** *Coauthor, Researcher, Policy Coordination Team, Chungbuk Carbon Neutrality support Center, South Korea (mgh3340@naver.com)*

*** *Corresponding author, Professor, Dept. of Urban Engineering, Chungbuk National Univ., South Korea (byubyu@chungbuk.ac.kr)*

A B S T R A C T

Purpose: This study explored factors to be considered when making decisions in the process of remodeling the existing factory into an eco-factory. **Method:** This study listed the main production items, remodeled facilities, and reduction targets of 99 factories that first supported by the government in 2020, and analyzed their relationships through social network analysis (SNA). **Result:** This study found that the support for facility remodeling was concentrated on the manufacturers of 'Fabricated metal products', 'machinery', 'automobile', and 'rubber and plastic' related items, which have strong tendencies to emit greenhouse gases. It was calculated that the direct and indirect influence of facilities related to greenhouse gas emission control such as 'air compressor'and 'duct' among remodeling facilities was very strong. The reduction targets through facility remodeling were investigated as fine dust, hazardous chemicals, greenhouse gas, and waste. Among them, reduction of greenhouse gases was found to be the target with the greatest expected effect, followed by reduction of fine dust. It can be seen that in accordance with the carbon-neutral policy pursued by the government. the projects for factory remodeling first promoted by the government in 2020 were focused on controlling greenhouse gases and reducing fine dust. On the other hand, it was found that the facilities to reduce hazardous chemicals and waste, which are not factors that directly affect the climate change, had relatively low centrality. Therefore, it is necessary to expand and develop facilities that can improve environmental and economic efficiencies by actively controlling or recycling various by-products and wastes.

K E Y W O R D

생태공장
설비 리모델링
소셜네트워크분석(SNA)
의사결정 요인
탄소중립 정책

Eco-factory
Facility Remodeling
Social Network Analysis (SNA)
Decision-making Factor
Carbon-neutral Policy

A C C E P T A N C E I N F O

Received Dec. 27, 2022
Final revision received Jan. 11, 2023
Accepted Jan. 16, 2023

ⓒ 2023. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

환경오염과 자원고갈에 따른 환경 영향 최소화를 위한 지속 가능한 산업 개발을 실현하기 위해 기존의 산업단지(이하 산단)를 환경친화적으로 변화시키거나 새로운 산단을 건설하면서 산단 부지와 개별공장에서 물질과 에너지를 효율적으로 순환시켜 활용하기 위한 노력들이 1990년대를 기점으로 세계적으로 활발히 행해져왔다[1]. 개별공장의 경우에 전통적 생산방식에서 야기되는 환경 문제를 해결하기 위해 기존 공장을 생태공장(eco-factory)으로 리모델링하려는 시도들이 나타났다[2].

2002년 1월 국토해양부와 환경부의 주관으로 공동주택부문의 친환경건축물 인증제도가 시작되었다. 이 제도의 인증심사 대상이 2003년 1월부터는 주거 복합 및 업무용 건물, 2005년 3월부터는 학교시설, 2006년 8월부터는 판매 및 숙박시설로 점차 확대되었다. 하지만 친환경건축물 인증제도에서 공장시설부문은 마련되어있지 않아서 친환경 공장시설의 개발이 어려웠다. 2010년 7월 그 내용이 전면 개정되면서 기존의 '주거복합건축물기준'이 '그 밖의 건축물'로 분리되며, '그 밖의 건축물' 기준에서 공장 용도의 건축물에 적용될 수 있도록 확대 시행 되었다[3]. 공장 건축물의 친환경성 제고 기회는 더욱 확대되어 2020년 10월 환경부는 기후변화와 환경위기 대응을 위해 오염물질 배출 비중이 높은 기존 공장을 친환경 제조공장으로 전환하기 위한 '스마트 생태공장 구축사업'을 추진하였고 산업통상자원부는 공장 시스템을 친환경 공정으로 개선하여 산단을 저탄소·녹색 산단으로 조성하기 위한 '산단 내 클린팩토리 구축 지원사업'을 추진하였다. 이와 같이 2020년은 환경부와 산업통상자원부가 기후변화 위기에 적극적으로 대응하기 위해 각각 기존 공장을 생태공장으로 리모델링하기 위한 사업을 한국 최초로 시행한 원년(元年)이다. 이 두 사업은 그린뉴딜 3대 분야 중 '녹색 산업 혁신 생태계 구축'을 위해 추진되었고 서로 연계 지원이 가능하다[3, 4]. 2021년 9월에는 탄소중립 사회로의 이행 과정에서 발생할 수 있는 불평등 해소와 녹색기술과 녹색산업의 육성, 촉진, 활성화를 도모하기 위해 "기후위기 대응을 위한 탄소중립 · 녹색성장 기본법"이 제정되었다. 이 법에 따르면 정부는 에너지 및 자원 소비를 최소화하고 온실가스 배출을 줄이기 위해 그린 리모델링 사업을 지속적으로 추진해

pISSN 2288-968X, eISSN 2288-9698
https://doi.org/10.12813/kieae.2023.23.1.037

야 한다. 이에 이 연구에서는 기존 공장을 설비 리모델링을 통해 생태공장으로 전환하는 과정에서 필요한 여러 설비물들 중에서 당해 기업의 제조 공정에 필요한 설비를 선택하여 결정하는 과정에 영향을 주는 요인들의 관계적 특성을 SNA분석을 통해 규명하였다. 이로써 향후에 공장의 그린 리모델링 과정에서 생태 효율 향상을 위한 의사결정 시 중점적으로 고려해야 할 요소들을 탐구하였다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

이 연구는 2020년 산업통상자원부의 지원으로 처음으로 시행되었던 '산단 내 클린팩토리 구축 지원사업' 수혜를 받은 13개 산단의 99개 공장을 대상으로 진행되었다. 조사 대상 공장들의 '주요 생산품목', '리모델링된 설비', 그리고 설비 적용에 따른 '환경부하 감축대상'을 목록화하고 그들의 관계와 위상을 소셜네트워크분석(social network analysis, 이하 SNA)을 통해 규명하여 당해 사업 원년에 기존 공장의 생태 효율 증진을 위해 시행되었던 설비 리모델링의 의사결정 요인들의 관계적 특성을 분석하였다. 조사 대상 설비는 공장의 시스템 제어와 운영을 위한 소프트웨어가 아닌, 환경 부하 감축을 주 기능으로 작동하는 하드웨어를 대상으로 하되 이를 지원하는 부속 설비는 조사 대상에서 제외하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 생태공장의 개념

1990년대 이후로 전통적인 생산 방식에서 야기되는 환경 문제를 해결하기 위해 제품의 제조부터 폐기 및 재활용에 이르는 시스템 전역의 구조 조정을 위해 '생태공장(eco-factory)'의 개념이 도입되었다. '생태공장'은 산업 생산활동과 생태계 사이의 조화를 이루면서 산업 생산 및 폐기물 재생 과정을 생태계 순환 사이클로 조정하기 위해 물질 및 에너지 자원의 소비와 폐기 과정에서 환경 보존과 효과적인 폐기물 재활용으로 지구 생태계에 부과되는 부담을 최대한 완화하고 산업 생산 과정에서 경제성과 기술 발전을 저해하지 않으면서 지구의 환경 문제 해결에 기여하도록 설계된 공장이다[1]. 생태 공장 계획 과정에서는 공장 수준에서 최고 효율로 제품을 생산하면서도 보다 적은 투입물을 사용하여 동일 수준의 결과물을 만들어내고 깨끗하고 사회적으로 매력적인 작업 및 거주환경을 제공함과 동시에 환경에 영향을 주는 자원들을 재생 및 순환 가능한 자원들로 대체해야 한다. 2014년에 유럽 9개국의 17개 파트너들이 컨소시엄 체결로 에너지와 자원의 효과적인 이용과 기술 혁신으로 환경 및 기후 변화에 적절한 대응을 위한 생태공장 연구 프로젝트를 수행하면서 유럽연합의 지원 하에 공장, 공정, 기계 수준에서 미래의 생태공장에 대한 계획 및 운영 해법을 모색하였다. 이 프로젝트에 따르면 생태공장 계획 시 환경 및 경제적 관점에서 대안들이 사전 평가될 수 있도록 모든 시스템 요소들의 전 생애주기에서 나타나는 물질 흐름의 영향과 에너지 소비량 등을 평가하고 전반적으로 에너지와 자원 효율성, 환경 영향과 비용을 포함하는 여러 차원에서 제조 시스템 모델링과 평가를 위한 체계적이고 융통적인 틀을 구축하여 생태공장 계획 의사결정을 효과적으로 지원하였다[2].

이 논문에서 언급된 '생태공장'이라는 용어는 '산단 내 클린팩토리 구축 지원 사업'에서 명명한 '클린팩토리'와 '스마트 생태공장 구축사업'에서 명명한 '스마트 생태공장'의 개념을 포괄한다.

2.2. 생태공장 구축 관련 제도

1991년에 시행된 "공업배치 및 공장설립에 관한 법률"은 수차례의 개정으로 2003년 "산업집적활성화 및 공장설립에 관한 법률"로 명칭이 변경되었다. 이 법에 따르면 경쟁력강화, 기업환경 개선, 환경친화적 산업구조 전환이 필요하고 지능정보기술 활용에 적합한 여건을 갖추고 있거나 에너지 효율화 및 신 · 재생에너지 활용계획이 타당한 기업의 기술 혁신을 위해 기존 시설의 유지 · 보수 · 개량 · 확충이 필요한 산업단지를 평가하여 "스마트그린산단"을 지정할 수 있다. 1996년에 시행된 "환경친화적 산업구조로의 전환촉진에 관한 법률"에 따르면 정부는 종합시책이나 산업환경 실천과제 추진을 위해 생산공정 개선이나 설비의 수리, 교체, 신설 또는 증설하는 투자사업을 지원할 수 있다. 2010년에 시행된 "저탄소 녹색성장 기본법"에 따르면 정부는 저탄소 녹색산업구조로 단계적으로 전환되도록 자원 절약 및 효율적 이용, 폐기물 발생 감소 등 자원순환의 촉진과 자원생산성 제고를 위한 다양한 시책을 마련하고 기업의 친환경 생산체제로의 전환을 위한 기술지원을 촉진하며, 에너지 · 자원 이용 효율화, 온실가스 배출량 감축 등의 성과를 공개해야 한다.

2021년 제정된"기후위기 대응을 위한 탄소중립 · 녹색성장 기본법"에 따르면 환경오염이나 온실가스 배출로 인한 경제적 비용이 재화 또는 서비스의 시장가격에 합리적으로 반영되도록 조세와 금융체계 등을 개편하여 오염자 부담의 원칙을 구현하고 탄소중립 사회 이행을 위해 우수한 녹색기술과 산업에 대한 투자와 지원을 강화하고 사업자는 녹색경영으로 사업활동에 따른 온실가스 배출을 억제해야 하고 녹색경영 지원을 위해 친환경 생산체제로의 전환을 위한 기술지원 시책을 수립 · 시행해야 한다[4].

2.3. 생태공장 구축 지원 정책

1) 스마트 생태공장 구축 지원 사업

2020년 환경부는 기후변화와 환경위기에 대응하기 위한 친환경 제조공장의 선도모델로 전환할 11개 기업을 지원 대상으로 선정하여 '도시·공간·생활 인프라 녹색 전환' 및 '저탄소·분산형 에너지 확산 분야'와 함께 그린뉴딜 3대 분야인 '녹색산업 혁신 생태계 구축'을 위한 '스마트 생태공장 구축사업'에 착수하였다. 이 사업으로 오염물질 배출 비중이 큰 제조공장을 대상으로 오염물질 배출 저감 외에, 자원·에너지 효율화, 스마트시설 도입 등 종합적인 설비 개선이 이루어질 수 있도록 지원 계획을 수립하였다. 이로써 선정된 기업들은 저탄소·친환경 제조공정 전환사업을 추진하게 되었다. 한국환경공단은 선정기업에 업종·공정별 맞춤형 지원을 추진하고 다양한 분야의 친환경 설비를 융합하여 개선될 수 있도록 지속적인 상담 지원과 사업관리를 수행할 수 있도록 하였다. 이 사업의 선정 기업은 산업통상자원부의 클린팩토리 사업, 중소벤처기업부의 스마트공장 사업과 연계 지원을 받을 수 있다[5].

2) 클린팩토리 구축 지원 사업

2020년 산업통상자원부는 산업단지 내 중소·중견 사업장을 대상으로 생산단계부터 4대 오염물질인 미세먼지, 온실가스, 폐기물, 유해화학물질을 원천적으로 감축하기 위해 맞춤형 공정개선·생산설비 보급을 지원하는 '클린팩토리 구축 지원 사업'을 추진하였다. 이 사업은 그린뉴딜 3대 분야 중 '녹색산업 혁신 생태계 구축'의 일환으로 2025년까지 총 1,750개 사업장에 대한 지원 계획을 수립하였다. 사업의 원년인 2020년에는 사업공고·신청, 서면평가·현장진단·최종평가 등의 절차를 걸쳐 100개 사업장이 선정되었다. 먼저, 7개 산단 내 입주기업을 대상으로 126개 사업장의 신청을 받아 현장진단, 사업계획서 평가 등을 거쳐 94개 사업장을 선정하였고 스마트생태공장 사업(환경부)과 연계를 통해 스마트생태공장 지원사업장 11개 중 현장진단을 거쳐 지원 효과가 우수한 6개 사업장을 선정하였다. 사업장별 현장진단 결과에 따라 청정생산설비 보급, 부산물·폐기물 등의 현장 재이용 시스템 구축, 친환경 연료전환 등과 같은 맞춤형 지원이 주로 이루어졌다[6].

2.4. 네트워크 기반의 의사결정 방법론

의사결정 방법론 중에서 분석적 위계 프로세스(analytic hierachy process, 이하 AHP)기법은 다단계 계층 구조를 이루는 요인들에 대한 간단한 쌍대 비교로 우선 순위를 도출하는 의사결정방법이다. 이러한 AHP를 기반으로 보다 복잡한 상호 관계 처리를위해 개발된 분석 네트워크 프로세스(Analytic Network Process, 이하 ANP)는 여러 방향으로 분산된 네트워크 내에서 복잡하게 상호종속된 요인들과 그 군집들 간의 외적 종속성와 동일 군집 내의 내적 종속성를 토대로 개별 요인들의 특성이 의사결정을 위한 우선 순위에 영향을 미칠 수 있음을 고려한 방법이다[7]. SNA는 여러 요인들의 상호종속적인 관계를 보다 정교하게 규명하여 그 요인이 전체 시스템에서 갖는 위상을 중심성을 산출하여 파악할 수 있는 의사결정방법으로 전술한 방법론들에 비해 네트워크와 같은 복잡한 체계를 이루는 요인들 간의 상호 작용 패턴을 정량화할 수 있다. 다만 산출 지표인 중심성이 요인들 간 연결관계의 구조에 초점을 두기 때문에 분석 결과가 종종 주관적이거나 정성적으로 해석될 수 있다[8]. SNA는 조직의 사회적 관계와 구조를 증명하기 위해 Moreno(1934)가 개발한 사회 측정법(sociometry), 1930년대와 1940년대 하버드 스쿨(Harvard School), 그리고 1950년대와 1960년대 맨체스터 스쿨(Manchester School)에서 개발한 분석법 등에서 기원하였고 요인들의 위치와 관계를 정량화하여 복잡한 사회 구조를 측정할 수 있다[9]. 이와 같이 SNA는 복잡한 변인들의 관계 규명으로 여러 분야에서 의사결정을 돕는 방법론으로 활용되어왔다. Ciarapica, Bevilacqua, 그리고 Antomarioni (2019)는 SNA을 이용하여 다양한 출처로부터 수집된 빅데이터로부터 유용하고 영향력 있는 정보를 추출하여 가공 산업의 환경 위험 관리를 위한 의사결정을 지원할 수 있는 방법을 제시하였다[10]. Nabi와 El-adaway(2022)는 SNA를 활용하여 법적 규제 사항, 건설 폐기물 관리, 녹색 관행(green practices), 테스트 등을 포함하는, 모듈러 건축 프로젝트의 의사결정에 영향을 미치는 다양한 요인들을 규명하였다[11].

3. 연구 방법

3.1. 자료 수집 및 목록화

이 연구에서는 한국 정부의 그린 뉴딜 및 탄소 중립 정책에 따라 산업통상자원부에서 추진된 '산단 내 클린 팩토리 구축 지원사업'에 따라 적용된 생태 공장 설비 리모델링 특성을 규명하기 위해 당해 사업이 추진된 원년인 2020년에 사업 지원을 받아 설비 리모델링이 이루어진 13개 산단 내 99개 공장들을 대상으로 설비 리모델링 자료들을 수집하였다. 수집된 사례들에 대한 1차 분석을 위해 설비 리모델링이 행해진 공장들에서 주요 생산품목, 리모델링된 설비, 그리고 설비 적용을 통한 환경부하 감축대상으로 자료 유형들을 분류하여 목록화였다(Table 1.). 분류된 유형들 중에서 주요 생산품목은 13개 제조업종에 명시된 품목으로 구분하였고 리모델링 설비는 사업신청 및 선정 과정에서 계획된 21개

Table 1. Items classified by type from the collected data

Main products (p)	Remodeled facilities (f)	Reduction target (r)
p_Primary metal p_Rubber and plastic products p_Fabricated metal products p_Machinery p_Non-metallic mineral products p_Textile products p_Grocery p_Automobile p_Electrical equipment p_Electronic parts p_Paper products p_Cokes and refined petroleum products p_Chemicals	f_Fiber laser welding machine f_Powder spray f_Foreign material detector f_Dryer f_Air compressor f_Cooler/ Freezer f_Air conditioner f_Air pollution prevention facility f_Gas boiler f_Motor f_Pipe f_Duct f_Air curtain f_Air tank f_Heat exchanger f_Exhaust facility f_Electric melting furnace f_Electric wire f_Dust collector f_Wastewater treatment facility f_Waste coolant refiner	r_Fine dust r_Hazardous Chemicals r_GHG r_Waste

ⓒ2023. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment all rights reserved.

의 설비 유형들로 구분하였다. 또한 감축 대상은 공장 설비 리모델링을 통해 원천적으로 배출을 줄이기 위한 4대 오염물질로 구분하였다.

3.2. 자료 코딩 및 변환

주요 생산품목(p), 리모델링된 설비(f), 환경부하 감축대상(r)에 해당하는 요인들은 네트워크 구축을 위해 서지정보 형식으로 코딩하여 파일로 저장하였다. 데이터의 유형 구분을 위해 주요 생산품목에는 'p_', 리모델링된 설비에는 '_f', 환경부하 감축대상에는 'r_'이라는 식별자를 앞에 붙여서 보다 구체적으로 구조화된 데이터를 구성하였다. 이러한 입력 변수 데이터를 SNA의 3가지 지표로 분석하기 위해 데이터 파일을 네덜란드의 레이던 대학(Leiden University)에서 개발한 VOS viewer 프로그램[12]을 활용하여 그래프 모델링 언어(Graph Modelling Language, 이하 GML)의 파일로 변환하였다. GML 파일은 네트워크 가시화 및 분석을 위한 데이터셋으로 변환할 수 있다. 데이터셋은 파일은 데이터 변환 기능을 통해 네트워크 구조로 가시화될 수 있다.

3.3. SNA 분석

이 연구에서는 사업이 추진된 공장의 주요 생산품목(p_), 리모델링된 설비(_f), 환경부하 감축대상(_r)에 해당하는 요소들을 노드(node)로 가시화하고 이 요소들이 동시 출현한 경우에 서로 관련을 맺고 있는 것으로 산정하여 관련된 노드들을 연결선(link)으로 이어서 그들의 상호관계를 네트워크로 구축하였다. 이렇게 가시화된 네트워크를 기초로 노드와 연결선의 속성들을 산출하였다. 네트워크 분석은 Freeman, Everett 그리고 Borgatti(2002)가 개발한 네트워크 분석 프로그램인 'Ucinet'을 통해 SNA 분석을 수행하였다. 'Ucinet'은 소셜 네트워크 데이터 분석을 위한 소프트웨어 패키지로 'NetDraw'라는 네트워크 시각화 도구와 함께 제공된다. 이 도구는 기본적인 그래프 이론 및 순열 기반 통계 분석, 하위 그룹 식별, 역할 분석, 중심성 측정 등의 목적으로 활용될 수 있다[13].

SNA 분석 과정에서 먼저 연결 강도를 산출하였다. 이 지표는 전술한 3대 항목(주요 생산품목, 리모델링된 설비, 환경부하 감축대상)에 해당하는 요인들이 프로젝트들의 사례들에서 동시에 출현한 빈도를 바탕으로 두 요인들이 맺고 있는 연관관계의 정도를 정량적으로 산출한 것으로 각 요인이 다른 요인들과 연관된 연결강도를 기반으로 네트워크 내에서 요인들의 사이의 관계와 그들의 위상에 따라 요인별로 SNA의 주요 지표들인 연결정도 중심성, 매개 중심성, 근접 중심성을 통해 정량적으로 산출하였다.

연결 정도 중심성은 네트워크에서 어떤 노드가 인접 노드들과 직접 연결된 상태를 파악하여 부분적 수준의 중심성을 산출한다. 이 지표는 여러 요인들과 직접적으로 연관될 수 있는 화제 요인들을 찾아낼 때 사용된다(Eq. 1).

$$C_D(i) = \sum_{j=1}^{n} A_{ij} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

여기서, $C_D(i)$: 노드 i에 대한 연결정도 중심성

A_{ij} : 노드 i와 j의 연결여부(연결: 1, 비연결: 0)

매개 중심성은 어떤 노드가 다른 노드들 사이의 최단 경로 상에 놓이는 경우를 파악하여 노드들 중 네트워크의 다른 영역들을 연결해 주는 매개적 영향력이 높은 요인을 찾아내는 데 사용된다(Eq. 2).

$$C_B(i) = \sum_{j<k}^{n} G_{jk}(i) / G_{jk} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

여기서, $C_B(i)$: 노드 i에 대한 매개 중심성

$G_{jk}(i)$: 노드 j와 k 사이의 최단 경로 중에 노드 i를 경유하는 경로의 개수

G_{jk} : 두 노드 j와 k 사이의 최단 경로들의 개수

근접 중심성(closeness centrality) 은 어떤 노드가 다른 모든 노드들과 근접한 정도를 노드들 사이의 최단 경로 거리의 총합으로 산출한다. 근접 중심성은 시스템에서 가장 신속히 영향을 주는 요인들을 탐색하기 위해 네트워크에서 각 노드가 다른 노드들로부터 근접한 정도를 파악하기 위한 지표로서 네트워크의 전체적 수준(global level)에서 직접적 연결성과 간접적 연결성에 기반한 영향력들을 함께 고려하여 중심성을 산출한다(Eq. 3)[14].

$$C_C(i) = \frac{1}{\sum_{j=1}^{n} D_{ij}} \qquad \text{(Eq. 3)}$$

여기서, $C_C(i)$: 노드 i에 대한 근접 중심성

D_{ij} : 노드 i와 j 사이의 최단 경로 거리

앞서 구축된 GML 파일을 'Ucinet' 프로그램에서 호출하여 생태공장 설비 리모델링에서 고려해야 하는 요인들을 네트워크로 가시화하고 전술한 SNA의 주요 중심성 지표들을 산출하였다.

4. 생태공장 설비 리모델링을 위한 의사결정 요인

4.1. 의사결정 요인의 빈도

1) 공장의 주요 생산품

설비 리모델링이 적용된 99개소의 공장들은 생산품(p)들은 11개 품목들로 분류되었는데 그 중에서 '기계 및 장비'를 제작하는 공장들과 '금속 가공제품'을 생산하는 공장들이 각각 22개소(22.4%), 19개소(19.4%)로 주류를 이루는 것으로 조사되었다. 그 다음으로 '자동차' 관련 제품(14개소, 14.3%) 및 '고무 및 플라스틱'(12개소, 12,2%)을 제조하는 공장들도 설비 리모델링 사례들이 많이 나타났

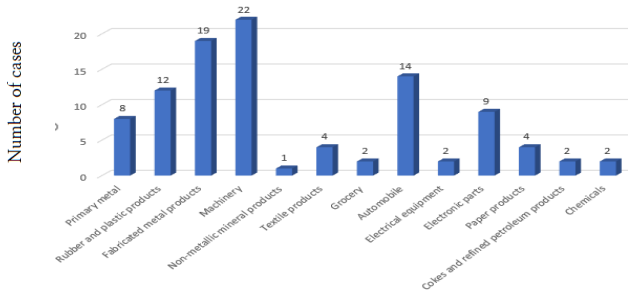

Fig. 1. Main products produced in the factory under investigation

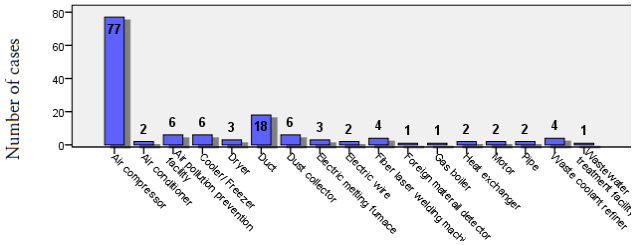

Fig. 2. Remodelled facilities in the factory under investigation

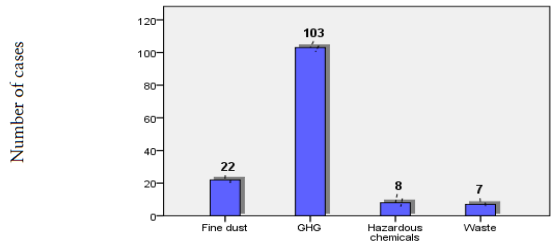

Fig. 3. Expected reduction targets through facility remodeling

다. 화학제품, 코크스 및 석유정제품, 식료품, 전기장비, 비금속광물 제품을 생산하는 공장의 경우에는 설비 리모델링이 이루어진 사례들이 2개소 이하로 적게 나타났다(Fig. 1.).

2) 설비물의 종류

2020년에 시행된 사업 대상 공장 99개소에서 140개 설비물(f)들에 대한 리모델링이 이루어진 것으로 파악되었다. 이들은 모두 17종의 설비물들로 분류되었는데 기존의 노후화된 공기압축기를 성능 및 효율 저하 및 고장빈도를 개선하기 위하여 고효율 인버터형 '공기압축기'로 교체한 사례들이 77개 사례(55%)로 압도적으로 높은 비중을 차지하였다. 그 다음으로 '덕트' 18개(12.9%), '대기 오염 방지 설비', '냉각/ 냉동기', '집진기' 각 6개 사례(4.3%) 등의 순으로 설비 리모델링이 이루어진 것으로 나타났다(Fig. 2.).

3) 감축 대상

당해 사업을 통해 감축을 계획한 4대 오염물질들 중 '온실가스' 감축을 목적으로 설비 리모델링을 적용한 사례들이 103건(73.6%)으로 가장 많았고 그 다음으로 미세먼지(22건, 15.7%), 유해화학물질(8건, 5.5%), 폐기물(7건, 5%)의 순으로 당해 오염물질 감축을 위해 설비 리모델링을 적용한 사례들이 조사되었다(Fig. 3.).

4.2. 네트워크 분석

1) 연결강도

전술한 네트워크를 구성하는 설비 리모델링 의사결정 요인들인 주요 생산품목(p), 리모델링된 설비(f), 그리고 감축대상(r)과의 관계를 분석하면 Fig. 4.와 같은 네트워크로 나타난다. 이 네트워크의 연결선은 관계가 있다는 것을 보여주고 연결선 굵기는 연결강도(tie strength)를 나타낸다. 이 네트워크에서 모두 310개의 연결선(tie)들이 형성되었고 연결강도는 최소 0.2부터 최대 34.6의 범위로 산출되었는데 대부분의 연결선들이 연결강도 1미만으로 약한 관계를 형성하였다. 먼저 리모델링된 설비(f)와 감축 대상(r)과의 관계를 살펴보면 리모델링된 설비(f)들 중에서 '공기압축기'가 감축대상(r)인 '온실가스(GHG)'와 연결강도가 36.4로 매우 강력하게 연관된 것으로 분석되었다. '덕트'와 '냉각/냉동기' 설비(f)의 경우에도 전술한 '온실가스' 감축(r)과 연결강도가 각각 3.0과 2.5로 연관되어 적지 않은 영향을 주는 설비 항목들로 나타났다. 또한 '집진기'설비(f)의 경우에 '미세먼지'의 감축(r)과 연결강도 1.9로서 직접적이고 상대적으로 적지 않은 연관 관계를 나타냈다.

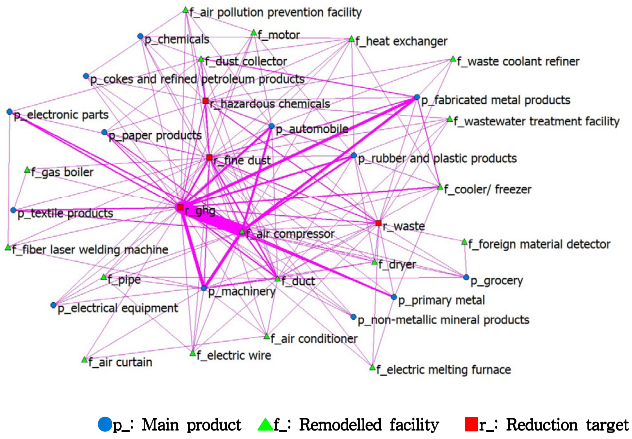

Fig. 4. Relevance between decision-making factors in facility remodeling

리모델링된 설비(f)와 주요 생산품목(p)과의 관계를 살펴보면 '공기 압축기' 설비를 중심으로 16개의 주요 생산품목들이 직접 연관되어 있는데 그 중에서도 '기계 및 장비' 품목이 가장 강력한 연결강도(8.2)를 나타냈고, '금속 가공제품'과 '자동차' 관련 품목들도 당해 설비와의 연결강도가 각각 6.5과 5로 높게 산출되었다. '냉각/냉동기'의 경우에는 '금속 가공제품'과 연결 강도 1.5로서 비교적 적지 않은 관련을 맺고 있는 설비인 것으로 나타났다. 그 외의 설비들은 다른 주요 생산 품목들과 1 미만의 약한 연결강도를 맺고 있는 것으로 분석되었다.

주요 생산품목(p)과 감축 대상(r)과의 관계를 살펴보면 '자동차', '기계 및 장비', '금속 가공제품', '고무 및 플라스틱 제품'과 같은 품목들을 생산하는 공장에서 '온실가스' 감축과 연결강도 4.6~9.1의 범위에 해당하는 강한 연결강도가 산출되었는데 그 중에서도 '기계 및 장비' 품목이 가장 강력한 연결강도(9.1)를 나타냈다(Fig. 4.).

2) 중심성

4.1절의 사례 빈도 분석 결과에 비해 보다 구체적이고 다각적인 결과를 도출하기 위해 SNA를 통해 요인들 간의 복잡한 상호작용 패턴을 국부적 수준과 전체적 수준에서 파악하여 영향력 있는 요인들을 찾아내고자 했다. 이를 위해 SNA 분석도구(UCINET)를 이용하여 3대 지표들(연결정도 중심성 , 매개 중심성, 근접 중심성)을 바탕으로 중심성을 산출하여 Fig. 5.와 같은 네트워크로 가시화하였다. 여기서 요인들 간의 상관관계의 강도, 즉 연결 강도는 연결선의 굵기로 표현되었고 요인별로 산출된 중심성은 노드의 크기로 표현되었다. 전반적으로 3대 중심성의 위계는 도식적으로는 유사하게 나타났다. 하지만 당해 중심성의 산출 방식과 내포된 의미는 전술한 바와 같이 다소 차이가 있다. 이러한 차이는 산출된 지표별 중심성의 정량적 수치를 나타낸 Table 2.에서

ⓒ2023. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment all rights reserved.

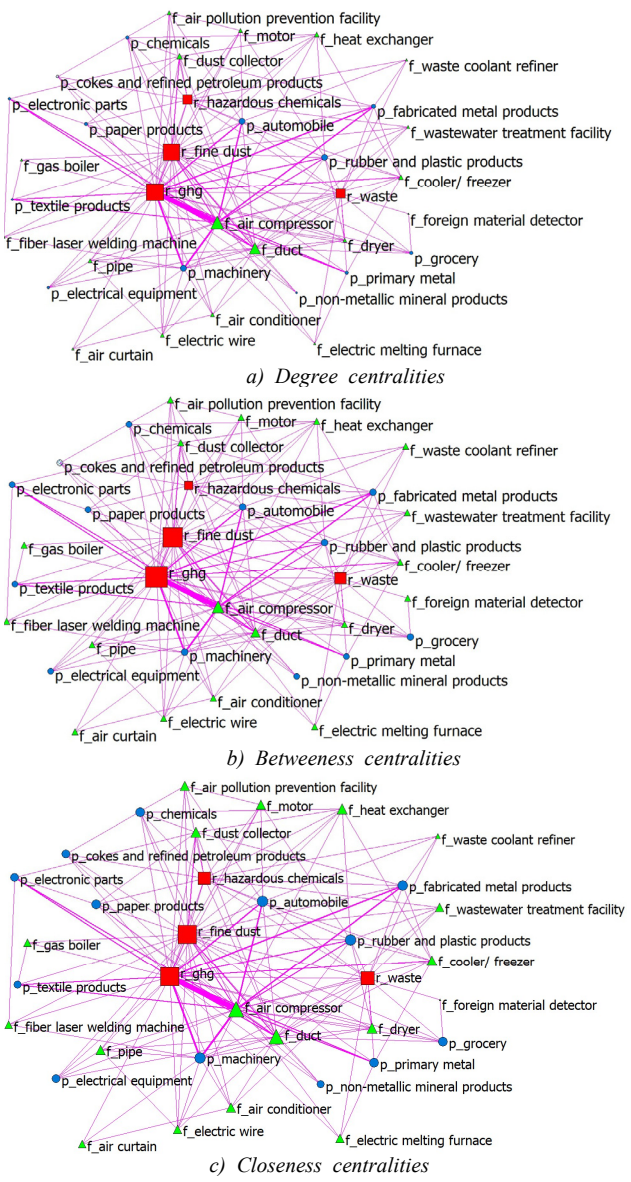

Fig. 5. The result of visualizing the centralities

찾아볼 수 있다.

Fig. 5.는 SNA에 기반한 3대 지표인 연결정도 중심성(Fig. 5. a), 매개 중심성(Fig. 5. b), 근접 중심성(Fig. 5. c)의 분석 결과를 네트워크로 가시화한 것이다. 이 도식에서 생태공장 구축 사업의 설비 리모델링에 적용된 17종의 여러 설비(f)들 중에서는 '공기압축기'의 중심성이 3대 지표 모두 가장 높게 나타났다. 공기압축기는 전술한 바와 같이 설치 빈도가 높아 전체 시스템의 위세에도 영향을 준 것으로 파악되었다. '덕트'설비도 3대 지표 모두 중심성이 비교적 높게 나타났는데 '공기압축기'와 연계하여 전술한 'r_온실가스' 감축을 유도하는 기능을 주로 수행하는 것으로 나타났다. 생태공장 구축 사업의 설비 리모델링 통한 감축대상(r) 중 영향력이 가장 강력한 대상은 '온실가스'와 '미세먼지'로 이들은 전술한 3대 지표 모두에 대해 강한 중심성을 갖는 것으로 산출되었다. 특히 '온실가스'는 '자동차', '고무 및 플라스틱 제품', '1차 금속', '식료품', '섬유제품', '종이제품', '화학제품' 등과 같이 여러 품목들의 생산과 직접 관련되는 것으로 분석되었다. 생태공장에 적용된 설비(f)들 중에서는 '공기압축기'와 '덕트'가 직·간접적인 영향력이 매우 크고 압도적인 것으로 분석되었다. 특히 '공기압축기'는 '기계 및 장비', '금속 가공 제품', "1차 금속', '자동차', '전자부품' 제조와 비교적 강한 연관을 갖는 설비로 나타났다.

주요 생산품목(p)들 중에서는 '기계 및 장비'와 '고무 및 플라스틱 제품'의 연결정도 중심성과 근접 중심성이 가장 높게 나타났고 그 다음으로 그 다음으로 '자동차'관련 제품이 높은 중심성을 보여 이러한 생산품목들이 직·간접적으로 생태공장 설비 리모델링을 유도하는 영향력이 높은 의사결정 요인들로 분석되었다.

생산품목(p)의 경우에는 대부분 매개 중심성이 미약하게 나타나 대부분 매개적 역할이 약하게 작용하는 것으로 분석되었으나 '식료품', '기계 및 장비', '자동차' 제품의 경우에는 상대적으로 매개 중심성이 높아 다른 품목에 비해 전체 네트워크에서 직접적인 영향력 보다는 매개적 역할이 강하게 작용하는 것으로 산출되었다. 생태공장 기능 수행을 위해 리모델링된 설비물(f)의 경우에 '공기 압축기'의 매개 중심성이 가장 높았고 그 다음으로 '덕트' 설비의 매개 중심성이 높은 반면에 나머지 설비물들은 매개적 역할이 거의 없거나 미비한 것으로 나타났다. 설비 적용으로 감축되는 대상(r)의 경우에 '온실가스'와 '미세먼지'가 네트워크에서 압도적으로 높은 매개 중심성이 산출되어 이들의 매개적 역할이 강력한 것으로 산출된 반면에 '폐기물'과 '유해화학물질'의 경우에 매개 중심성이 낮게 산출되어 그 매개적 역할이 상대적으로 약한 것으로 분석되었다(Fig. 5. b).

주로 '자동차' 관련 제품을 생산하는 공장들은 14개소로 '고무 및 플라스틱' 제품을 생산하는 공장 12개소에 비해 사례 빈도가 높음에도 불구하고 상대적으로 연결정도 중심성과 근접 중심성이 낮게 나타났다(Table 2.). 이는 '고무 및 플라스틱' 제품이 '자동차' 관련 제품에 비해 오염물질 감축과 리모델링 설비 구축에 상대적으로 직·간접적 영향력이 높은 것으로 해석할 수 있다. 이는 특정 요인의 사례 빈도가 상대적으로 낮더라도 요인들이 네트워크 내의 요인들 간의 관계 구조와 연결 강도에 따라 그 영향력이 높아질 수 있다는 것을 보여준다.

4.3. 논의

이 연구에서는 공장의 제조업종별로 환경성 향상을 위해 생태공장에 적용된 설비 요소들과 생태공장 구축으로 절감되는 자원들과의 관계를 규명하여 2020년도 실행된 생태공장 구축 사업에서 기존 공장을 생태공장으로 변환시키기 위한 설비 리모델링 의사결정 과정에서 중점적으로 고려했던 요인들을 확인할 수 있었다.

2020년에 처음 실행된 '산단 내 클린팩토리 구축 지원사업' 대상 공장에 적용된 설비들 중에서 주로 '온실가스'와 '미세먼지' 감축에 초점을 둔 '공기압축기'가 압도적인 위상을 갖고 있었다. 이는 당해 사업에 '기계 및 장비', '금속 가공제품', '고무 및 플라스틱 제품' 등의 중화학 기반의 제조업체를 중심으로 집중적 지원이 이루어진 결과로 볼 수 있다. 이러한 '공기압축기'는 기존 공장의 환경 성능 향상에 크게 기여할 수 있는 설비로 판단된다. 하지만 탄소중립 정책을 위시한 성과 도출을 위한 공기압축기의 압도적인 적용으로 공장의 유지관리와 생산성 향상에 필요한 설비의 리모델링 비중이 상대적

Table 2. Results of SNA centrality analysis by factor

Group	Factors	Centrality		
		Degree	Betweenness	Harmonic Closeness
Main products (p)	p_automobile	*10	*8.08	*22
	p_chemicals	6	0.22	19.83
	p_cokes and refined petroleum products	5	0.34	19.33
	p_electrical equipment	5	0	19.17
	p_electronic parts	5	0.71	19.17
	p_fabricated metal products	8	5.21	21
	p_grocery	6	*9.01	20
	p_machinery	*11	*8.81	*22.5
	p_non-metallic mineral products	4	0	18.67
	p_paper products	6	0.22	19.83
	p_primary metal	6	1.12	20
	p_rubber and plastic products	*11	5.46	*22.5
	p_textile products	4	0.33	18.67
Remodelled facilities (f)	f_air compressor	*22	*48.03	28*
	f_air conditioner	6	1.69	20
	f_air curtain	3	0	18
	f_air pollution prevention facility	6	0.45	19.83
	f_cooler/ freezer	8	2.14	20.83
	f_dryer	7	0.17	20.50
	f_duct	*19	*30.11	*26.50
	f_dust collector	*9	*3.19	*21.33
	f_electric melting furnace	4	0	19
	f_electric wire	6	0	19.67
	f_fiber laser welding machine	4	0.25	18.67
	f_foreign material detector	2	0	15.17
	f_gas boiler	3	0	18.17
	f_heat exchanger	8	1.49	20.83
	f_motor	6	0.38	19.83
	f_pipe	7	0.4	20.17
	f_waste coolant refiner	4	0.14	17.50
	f_wastewater treatment facility	5	0	19.33
Reduction targets (r)	r_fine dust	*30	*121.97	*32
	r_ghg	*31	*143.84	*32.5
	r_hazardous chemicals	16	25.05	25
	r_waste	*17	*48.22	*25.5

Note: An asterisk(*) indicates a value that falls within the top three.

으로 적어진 것으로 추정되었다. 공기압축기의 경우에 인버터의 부하율이 낮은 경우에는 기존 설비와 효율이 비슷하고 높은 부하 운전을 하는 경우에는 오히려 에너지 소비량이 높아질 우려가 있으므로 자칫 생태공장 구축 사업의 실효성이 떨어질 우려도 있다. 또한 공장의 에너지 소비는 유체, 물질, 에너지의 흐름을 고려한 단지, 공장동 및 플랜트 배치 계획, 단열 및 기밀성을 고려한 재료 계획 등과 같은 건축 계획 요소들과도 연관된다. 따라서 정책을 위시하여 표면적으로 가시화된 사업 성과보다는 합리적인 건축 계획과 연동된 설비 리모델링 적용을 통해 최적의 환경 및 경제적 효과를 얻어낼 수 있는 의사결정 지원 체계의 마련이 필요하다고 본다.

5. 결론

이 연구의 결과에 따르면 생태공장 구축 사업 원년인 2020년에 시행된 사업에서 온실가스 배출과 에너지 소비 성향이 강한 '고무와 플라스틱' 제조업체와 '기계 및 장비' 및 '자동차' 관련 품목들을 생산하는 제조업체들에게 공장 설비 리모델링의 정부 지원이 집중적으로 이루어진 것으로 나타났다. SNA 분석을 통해 중심성 지표들을 산출한 결과에 따르면 설비 리모델링의 의사결정 과정에서 감축 대상 항목인 4대 오염물질(미세먼지, 온실가스, 폐기물, 유해화학물질) 중에서 인 '온실가스'가 리모델링 설비를 결정하는데 직 · 간접적으로 가장 큰 영향을 준 요인이고 그 다음으로 '미세먼지'도 그 영향 비중과 역할이 크게 작용한 요인인 것으로 나타났다. 이러한 감축 대상 요인들의 배출 제어를 위해 공장 설비 리모델링 과정에서 주로 '공기압축기'와 '덕트'의 교체 또는 증설이 이루어진 것을 추정할 수 있었다. 이러한 결과를 통해 탄소중립 정책에 따라 산업통상자원부에서 추진한 공장 리모델링의 최초 원년(2020년) 사업에서 온실가스 배출 억제에 주력한 공장 설비 리모델링에 초점을 두어 당해 사업의 지원 결정이 이루어졌음을 파악할 수 있었다. 공장 내 제조과정에서 발생할 수 있는 '폐기물'과 '유해화학물질'과 같은 감축 대상 요인들은 중심성이 낮게 산출되어 해당 요인들과 연관된 설비들도 상대적으로 관계 네트워크 내에서 영향력이 미비한 것으로 나타났다. 이에 생산과정에서 환경오염원이 될 수 있는 다양한 부산물 및 폐기물들을 적극적으로 통제하거나 재자원화 할 수 있는 설비물이나 플랜

ⓒ 2023. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment all rights reserved.

트의 확충과 개발이 필요할 것으로 판단된다. 특히 폐기물 재자원화 설비는 제품 제작 과정에서 환경적 효과 이외에 기업 이익을 향상시킬 수 있는 경제적 효과를 얻을 수 있는 설비로서 생태공장 구축을 위한 의사결정과정에서 충분히 고려해야 할 요인이 되어야 할 것이다. 향후 연구에서는 생태공장 설비 리모델링을 통해 얻어질 수 있는 효과에 대한 현장 실증 자료들을 확보하여 보다 정확한 사업 효과를 산출할 수 있는 생태공장의 성능 지표 개발도 병행되어야 할 것이다. 또한 환경성과 생산성 그리고 경제성을 제고할 수 있는 생태공장 설비 리모델링 기술 개발 및 건축 계획과 관련된 의사결정 지원 도구들이 지속적으로 개발되어야 할 것이다.

이 연구의 성과가 기존 공장들의 기능 강화와 생태공장으로의 전환 사업 추진을 위한 의사결정 과정에서 유용한 참고 자료로 활용될 수 있기를 희망한다.

Acknowledgement

본 연구는 정부의 재원으로 한국연구재단(NRF-2019R1A2C1008612)과 한국산업기술진흥원(P0008421)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

[1] Y. Nakazawa, MITI projects on recycling, Advanced Performance Materials, 2, 1995, pp.369-384.
[2] G. Posselt, J. Linzbach, N. Weinert, A. Kaluza, K. Slupek, M. Bernas, C. Palasciano, A. Eytan, The eco-factory – Solutions for experts and decision makers, EU: EMC2-Factory, 2014.
[3] 국토교통부, 보도자료: 친환경 인증 “모든 신축건축물로 확대”, 대한민국: 국토교통부, 2010.05.16. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), Press Release: Environmental Certification “Expanded to all new buildings”, South Korea: MOLIT, 2010.05.16.)
[4] 법제처 국가법령정보센터, www.law.go.kr, 2021.04.11. // (Korean Law Information Center, www.law.go.kr, 2021.04.11.)
[5] 환경부, 보도자료: 친환경 제조공장을 선도할 ‘스마트 생태공장’ 11개 기업 선정, 2020.10.15. // (Ministry of Environment (ME), Press Release: 11 companies were selected to promote the ‘smart eco-factory’ project that will lead eco-friendly manufacturing, South Korea: ME, 2020.10.15.)
[6] 산업통상자원부, 보도자료: 산업부, 클린팩토리 사업 지원사업장 100개 선정, 2020.10.27. // (Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), Press Release: MOTIE selected 100 clean factory project support sites, South Korea: MOTIE, 2020.10.27.)
[7] S. Sipahi, M. Timor, The analytic hierarchy process and analytic network process: An overview of applications, Manag. Decis, 48, 2010, pp.775–808.
[8] J. Fuhse, S. Mützel, Tackling connections, structure, and meaning in networks: quantitative and qualitative methods in sociological network research, Quality & Quantity, 45(5), 2011, pp.1067-1089.
[9] L. Bustikova, Social network analysis, SOCIOLOGICKY CASOPIS, 35 (2), 1999, pp.193-206.
[10] F. Ciarapica, M. Bevilacqua, S. Antomarioni, An approach based on association rules and social network analysis for managing environmental risk: A case study from a process industry, Process Safety and Environmental Protection, 128, 2019, pp.50-64.
[11] M.A. Nabi, I.H. El-adaway, Modular Construction: Determining Decision-Making Factors and Future Research Needs. Journal of Management in Engineering, 36(6), 2020, Article 04020085. https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000859
[12] N.J. Van Eck, L. Waltman, Text mining and visualization using VOSviewer, ISSI Newsletter, 7(3), 2011, pp.50-54.
[13] S.P. Borgatti, M.G. Everett, L.C. Freeman, Ucinet 6 for Windows: Software for social network analysis, USA: Analytic Technologies, 2002.
[14] L.C. Freeman, Centrality in social networks conceptual clarification, Social Networks, 1(1978/79), 1978, pp.215-219.