Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association, 31(4), pp.29-39 (2023)
ISSN 1225-6498 eISSN 2508-3015 https://doi.org/10.17137/korrae.2023.31.4.29

Original Paper

대규모 감염병 발병에 따른 의료폐기물 발생량 예측에 관한 연구

김상민[a], 박진규[b], 고인범[c], 이병선[c], 신상룡[c], 이남훈[d†]

A Study on Medical Waste Generation Analysis during Outbreak of Massive Infectious Diseases

Sang-Min Kim[a], Jin-Kyu Park[b], In-Beom Ko[c], Byung-Sun Lee[c], Sang-Ryong Shin[c], Nam-Hoon Lee[d†]

(Received: Nov. 29, 2023 / Revised: Dec. 12, 2023 / Accepted: Dec. 12, 2023)

ABSTRACT: In this study, an analysis of medical waste generation characteristics was conducted, differentiating between ordinary situation and the outbreaks of massive infectious diseases. During ordinary situation, prediction models for medical waste quantities by type, general medical waste(G-MW), hazardous medical waste(H-MW), infectious medical waste(I-MW), were established through regression analysis, with all significance values (p) being <0.0001, indicating statistical significance. The determination coefficient(R2) values for prediction models of each category were analyzed as follows : I-MW(R2=0.9943) > G-MW(R2=0.9817) > H-MW(R2=0.9310). Additionally, factors such as GDP(G-MW), the number of medical institutions (H-MW), and the elderly population ratio(I-MW), utilized as influencing factors and consistent with previous literature, showed high correlations. The total MW generation, evaluated by combining each model, had an *MAE* of 2,615 and *RMSE* of 3,353. This indicated accuracy levels similar to the medical waste models of H-MW(2,491, 2,890) and I-MW(2,291, 3,267). Due to limitations in accurately estimating the quantity of medical waste during the rapid and outbreaks of massive infectious diseases, the generation unit of I-MW was derived to analyze its characteristics. During the early unstable stage of infectious disease outbreaks, the generation unit was 8.74 kg/capita・day, 2.69 kg/capita・day during the stable stage, and an average of 0.08 kg/capita・day during the reduction stage. Correlation analysis between generation unit of I-MW and lethality rates showed +0.99 in the unstable stage, +0.52 in the stable stage, and +0.96 in the reduction period, demonstrating a very high positive correlation of +0.95 or higher throughout the entire outbreaks of massive infectious diseases. The results derived from this study are expected to play a useful role in establishing an effective medical waste management system in the field of health care.

Keywords: Massive Infectious Diseases, Medical Waste(MW), Generation Prediction, Regression Analysis

초 록: 본 연구에서는 의료폐기물에 대해 평상시 상황과 대규모 감염병 발병 상황으로 구분하여 발생 특성을 분석하였다. 평상시 상황에서는 회귀분석을 통해 의료폐기물 종류별 발생량 예측 모델을 수립하였으며, 유의값(*p*)은 모두 <

[a] 안양대학교 환경에너지공학과 박사과정(Ph.D. student, Department of Environmental and Energy Engineering, Anyang University)
[b] ㈜에코윌플러스 대표이사(Managing Director, Ecowillplus co., LTD.)
[c] 환경시설관리주식회사 환경기술연구원(Environment Management Corporation, Environmental Technology Institute)
[d] 안양대학교 환경에너지공학과 교수(Professor, Department of Environmental and Energy Engineering, Anyang University)
† Corresponding author(e-mail: nhlee@anyang.ac.kr)

0.0001로 통계적으로 유의미하였다. 각 분류별 예측 모델식의 결정계수(R^2) 값은 I-MW(R^2=0.9943) > G-MW(R^2=0.9817) > H-MW(R^2=0.9310) 순으로 분석되었다. 또한, 기존 문헌과 유사한 결과로 영향인자로 사용된 GDP(G-MW), 의료기관 수(H-MW), 고령 인구비(I-MW)는 모두 높은 상관성을 나타내었다. 각 모델식을 종합한 총 의료폐기물 발생량의 *MAE*는 2,615, *RMSE* 3,353로 평가되어 H-MW(2,491, 2,890)와 I-MW(2,291, 3,267) 의료폐기물 모델식과 유사한 수준의 정확도를 나타내는 것이 확인되었다. 단기간 내 대량 발생하는 감염병 사태 시기의 의료폐기물 발생 특성은 정확한 추정이 제한적이므로 격리의료폐기물의 발생원단위를 분석하였다. 감염병 초기인 불안정기 8.74 kg/인・일, 안정기 2.69 kg/인・일, 감소기 시기 평균 0.08 kg/인・일의 발생원단위를 나타내었다. 격리의료폐기물 발생원단위와 치명률 간의 상관분석 결과, 불안정기 +0.99, 안정기 +0.52, 감소기 +0.96으로 나타났으며, 감염병 발병 전체시기에서 +0.95 이상의 매우 높은 양의 상관성을 나타내는 것이 확인되었다. 본 연구에서 도출된 연구 결과는 보건 의료상에 적절한 의료폐기물 관리시스템을 구축하는 데 유용한 역할을 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

주제어: 대규모 감염병 발병, 의료폐기물, 발생량 예측, 회귀분석

1. 서 론

2019년 12월 COVID-19(Coronarvirus disease 2019)이 발병 이후 세계보건기구(World Health Organization, WHO)는 최고 경고 등급으로 대규모 감염병 사태를 칭하는 펜데믹(Pandemic)을 공표하였다. 과거에도 이와 유사한 수준의 대규모 감염병 발병이 몇 차례 발생하였는데, SARS(중증급성호흡기증후군, Severe Acute Respiratory Syndrome)와 MERS(중동 호흡기 증후군, Middle East Respiratory Syndrome)가 대표적이다[1]. SARS는 2002년 11월부터 2003년 7월까지 중국에서 발생하여 전 세계적으로 확산하여, 2003년 7월 기준 국내 감염자 3명, 30개국 기준 8,439명의 감염자를 발생시켰다[2]. MERS는 2015년 5월부터 2개월 동안 국내에서 186명의 감염자가 발생한 것으로 보고되었다. SARS와 MERS의 국내 전염 정도는 미미한 편으로 의료 행위에 관련된 폐기물을 감염관리수칙 및 「폐기물관리법」에 따라 문제없이 처리가 가능하였다[3]. 반면에 COVID-19는 현재 2023년 기준 약 4년간 34,571,873명의 유례없는 국내 감염자를 발생시켰으며, 2021년에는 전년 동월 대비 7.9~11.1배 많은 막대한 양의 의료폐기물을 발생시켰다. 또한, 사회적 거리두기 영향으로 야외활동이 제한됨에 따라 배달서비스와 택배 소비로 폐기물 발생량이 증가하면서, 국내 폐기물 처리 및 관리체계의 한계를 명확히 보였다[4].

우리나라의 「폐기물관리법」에서는 의료폐기물을 “보건・의료기관, 동물병원, 시험・검사기관 등에서 배출되는 폐기물 중 인체에 감염 등 위해를 줄 우려가 있는 폐기물과 인체 조직 등 적출물(摘出物), 실험 동물의 사체 등 보건・환경보호상 특별한 관리가 필요하다고 인정되는 폐기물로 대통령령으로 정하는 폐기물”로 정의하고 있다. 대분류 상으로는 격리된 사람에 대한 의료 행위에서 발생하는 격리의료폐기물(Infectious Medical Waste, I-MW), 혈액, 탈지면 등을 포함한 폐기물은 일반의료폐기물(General Medical Waste, G-MW), 조직물, 손상성, 생물・화학폐기물 등을 포함한 위해의료폐기물(Hazardous Medical Waste, H-MW)로 분류하고 있다. 최근 대규모 감염병의 발병 주기는 점차 짧아지고 있기 때문에 향후 언제 유사 사태가 발병하여 폐기물의 양이 급증할지 그 누구도 예상할 수 없다. 따라서 대량의 폐기물을 안정적으로 처리하기 위해서는 국내 발생량에 영향을 미칠 수 있는 사회적 요인들을 분석하고 의료폐기물의 종류별 양과 흐름을 구체화하여 대응방안을 마련할 필요성이 있다[5].

이러한 점에 비롯하여 국외에서는 다양한 통계적 기법을 활용하여 의료폐기물 발생량을 추정하기 위한 연구가 활발히 수행되고 있다. 통계적 기법으로는 회귀분석, 다중 회귀분석, 인구・경제학적 요인을 파악할 수 있는 STIRPAT(STochastic Impact by Regression on Population, Affluence and Techology), EKC(The Environmental Kuznets Curve) 모형 기반 등이 사용되고 있다[6,7]. 다만, 해석의 어려움과 예측의 오차를 발생시킬 수 있는 회귀분석의 특성에 따라,

최근에는 선형 회귀분석에 대한 편리성과 신뢰성이 다시금 주목받고 있다. 특히, 국내총생산지수(Gross Domestic Product, GDP), 인구수, 의료기관의 병상수, 기관 수, 연령분포, 교육 수준 등의 경제・사회 영향인자를 중심으로 다양한 연구가 수행되었다. 폐기물은 관리 방안에 따라 발생 특성이 상이하게 나타남으로 국내 환경에 적합한 추정 방법이 연구되어야 하지만, 현재 국내에서 의료폐기물의 발생량과 흐름을 추정하는 연구는 미흡한 실정이다[8].

또한 대규모 감염병 확진시 격리자가 배출하는 폐기물은 감염관리수칙에 따라 격리의료폐기물로 처리되며, 의료폐기물의 급격한 증가를 초래한다. 이러한 관점에서 의료폐기물 발생량은 대규모 감염병이 발생하지 않은 평상시 발생량과 대규모 감염병이 초래된 이후의 발생량으로 구분하여 설명할 수 있다. 평상시 의료폐기물 발생량은 지역 간 차이가 존재하지만 대체로 일정한 경향성을 나타내는 것으로 보고된다. 하지만, 대규모 감염병의 경우 정부 정책과 대응 방안 수립 여부에 따라 의료폐기물의 발생량이 특정 기간에 따라 급격히 변화하는 특성을 나타내기 때문에 정량적인 추정에 한계가 존재하지만, 구체적인 연구 사례는 미흡한 편이다[9].

따라서 본 연구에서는 이러한 한계점을 보완하기 위해 감염병 발병 및 평상시 상황을 분리하여 국내 환경에 적합한 의료폐기물 발생 특성을 분석하고자 하였다. 평상시 상황에서는 다양한 경제・사회 영향인자와 회귀분석을 통해 의료폐기물 발생량 예측 모델식을 구축하고 평가하였으며, 감염병 발병 상황에서는 의료폐기물 발생의 특이성을 고려하여 확산 시기별로 격리의료폐기물의 발생원단위를 도출하고 치명률과의 상관성 분석을 수행하였다. 본 연구에서 도출된 연구 결과는 보건 의료상에 적절한 의료폐기물 관리시스템을 구축하는 데 유용한 역할을 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구방법

2.1. 통계자료 수집 방법

의료폐기물 발생량 예측 모델식과 발생원단위 계산을 위해 의료폐기물 분류별 발생량과 경제・사회 영향인자 자료를 수집하였다. 감염병 발병 당시 격리의료폐기물 발생량을 포함한 국내 의료폐기물 발생 및 처리 관련 통계자료는 공공데이터법에 따라 자료제공을 요청하여 한국환경공단으로부터 자료를 확보하였으며, 그 외 영향인자와 통계자료는 국가통계포털(Korean Statistical Information Service, KOSIS)에서 수집되었다. 단, SARS, MARS 시기의 의료폐기물 발생량 데이터는 자료 확보에 한계가 확인되어, 본 연구에서는 COVID-19 사태를 중점으로 연구가 수행되었다. COVID-19 감염병 발병 당시 감염병 확진자 수, 사망자 수 및 치명률 현황 등 발생원단위 분석을 위한 통계자료는 감염병 연보, COVID-19 관리 홈페이지나 COVID-19 정책보고서 자료를 수집하였다. 또한, 환경부의 “코로나바이러스 감염증-19 관련 폐기물 안전관리 특별대책(제1판~6판)”의 자료를 참고하여 의료폐기물의 발생 특성을 분석하고자 하였으며, 사용된 통계자료의 세부 내용은 다음의 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Data Collection Methods and Sources by Category

Period	Variable type	Variable	Unit
Ordinary situation (Regression analysis)	Dependent	MW generation	Ton
	Independent	GDP	Billion won
	〃	Number of medical institutions	Number
	〃	Ratio of the elderly population	%
Outbreaks of massive infectious diseases (Generation unit analysis)	〃	I-MW generation	Ton
	〃	Number of COVID-19 confirmed patients	Capita
	〃	Number of COVID-19 confirmed mortality	Capita
	〃	Ratio of COVID-19 confirmed lethality	%

2.2. 의료폐기물 발생량 분석 방법론

폐기물 발생량은 운송, 처리 과정에서 영향을 미치는 요인임으로 정확한 양을 예측하는 것이 중요하며, SARS, MERS, COVID-19와 같은 대규모 감염병은 정부 규제, 세금 및 지원 등 정책 시행으로 폐기물 발생에 막대한 영향을 미칠 수 있다[10,11]. 따라서 본 연구에서는 먼저 평상시 상황에서 경제・사회 영향인자와 의료폐기물 발생량을 회귀분석하여 예측 모델식을 수립하고자 하였다. 우리나라는 2019년「폐기물관리법」개정으로 감염성이 낮은 일회용 기저귀가 제외되었으며, 이러한 폐기물 분류체계 변화는 의료폐기물 발생량을 크게 변동시킨다. 이에 의료폐기물 발생량 중 폐기물 분류체계 개정으로 인한 변화량은 제외되었으며, 평상시 상황의 발생량 예측을 위해 감염병 사태 시 격리의료폐기물 발생량 역시 제외하여 추후 실제 발생량과의 오차를 최소화하였다.

폐기물 발생량의 예측기법으로 다중 선형회귀분석과 과거경향법이 주로 이용되어 왔다. 이는 각 인자의 효과를 파악하는 것보다 전체 인자 효과를 총괄적으로 파악하는 것이 가능하기 때문이다. 하지만 국내 폐기물처럼 변화가 예측하기 곤란한 경우 여러 영향인자들은 오히려 해석의 어려움을 줄 뿐더러 큰 편차와 예측 오차를 발생시킬 수 있다[12]. 이에 따라 선형 회귀분석에 대한 편리성과 신뢰성이 다시금 주목받고 있다.

의료폐기물 발생량 예측은 GDP, 인구수, 의료기관의 병상수, 기관 수, 연령분포, 교육 수준 등의 경제・사회 영향인자를 중심으로 상관성이 활발히 연구되고 있다. 이는 폐기물 발생량 예측에 있어 산정식의 영향인자가 단일화되는 경우 세부 폐기물 종류별 특성이 상이한 이유로 현재 시점에서 상관성이 높더라도 추후에도 동일한 경향이 유지될 것이라고 장담할 수 없기 때문이다. 한 예시로 경제지표를 단일인자로 사용하는 경우 인플레이션, 경기 침체 등이 발생하게 되면 폐기물 발생량 추정의 신뢰도는 급격히 감소하게 될 것이다. 이러한 점으로 본 연구에서는 의료폐기물을 H-MW, I-MW, G-MW로 구분하고 예측이 비교적 간단하고 신뢰성과 상관성이 높은 GDP, 의료기관 수, 고령인구 비율의 3개 영향인자를 사용하여 발생량을 추정하였다. 감염 위해성이 높은 I-MW는 고령인구 비율, 의료기관 등의 일회용 의료용품 수요와 관계가 깊은 H-MW은 의료기관 수, 일반폐기물이 혼합 처리되는 G-MW는 GDP와의 상관성이 가장 높게 분석되었다. 이에 3개 인자가 포함된 의료폐기물 발생량 예측 모델식을 수립하였으며, 각 모델식을 통해 총 의료폐기물(T-MW) 발생량 식을 도출하였다. 각 영향인자는 추후 발생량 예측의 편의성을 고려하여 국가통계포털에서 제공하는 기본 단위를 사용하였다. 또한 의료폐기물 발생량 예측 모델의 신뢰성 검증을 위해 회귀모델의 성능 평가지표인 *MAE*(Mean Absolute Error)와 *RMSE*(Root Mean Squared Error)를 활용하였다. *MAE*란 모델의 예측값과 실제값 차이의 절대값 평균을 의미하며, *RMSE*는 예측 대상의 크기에 영향을 크게 나타내어 회귀모델을 평가할 수 있는 지표로 평가값이 낮을수록 실제값과의 일치성이나 모델식의 개선 정도를 평가할 수 있다.

대규모 감염병 발병 시 정부의 대응 방안으로 의료폐기물의 발생량이 급변하기 때문에 정량적인 추정에 한계가 존재한다. 이에 2019~2022년간 COVID-19 발병 기간 중의 확진자 및 사망자 수를 고려하여, 감염병 발병시 확진자 수를 대상으로 의료폐기물의 발생원단위(kg/인・일)를 계산하고 발생 특성을 분석하고자 하였다. 감염병 발병시 점염성이 급격하게 증가하고 감염 환자와 관련하여 발생하는 모든 폐기물은 격리의료폐기물로 분류되어 처리됨에 따라서 의료폐기물 중 격리의료폐기물(I-MW) 만을 대상으로 분석이 수행되었다. 또한 격리의료폐기물 발생원단위와 감염병 치명률과의 상관분석을 수행하였으며, 의료폐기물 발생량 예측에 관한 세부 방법론은 아래의 Fig. 1에 나타내었다.

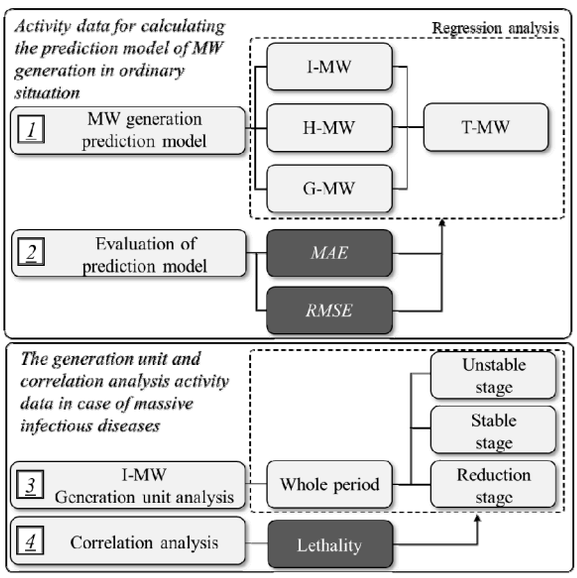

Fig. 1 Flow diagram of the research steps.

3. 결과 및 고찰

3.1. 평상시 의료폐기물 발생 예측 모델 수립 및 평가

3.1.1. 의료폐기물 발생 예측 모델 수립

평상시의 의료폐기물 발생량에 영향을 미치는 유의한 변수를 확인하고 예측 가능한 모델을 수립하고, Fig. 2에 의료폐기물 종류별 발생량 예측 곡선과 모델식을 나타내었다. 모든 분석의 유의값(p)은 < 0.0001로 통계적으로 유의미하였다. G-MW, H-MW, I-MW의 회귀분석을 통한 예측 모델의 결정계수 값은 I-MW(R^2 = 0.9943) > G-MW(R^2 = 0.9817) > H-MW(R^2 = 0.9310) 순으로 나타났다. 각 의료폐기물 종류별 발생량 예측 모델을 종합하여 총 의료폐기물(T-MW) 발생량 모델을 계산하였다. 본 연구에서 도출된 각 발생량 예측 모델식은 다음의 식 (1)~(4)와 같다.

$$\text{H-MW Generation(ton/year)} = 2.3241X_1 - 110{,}503 \quad (1)$$

$$\text{I-MW Generation(ton/year)} = 333.88X_2^2 - 7{,}761.1X_2 + 44{,}767 \quad (2)$$

$$\text{G-MW Generation(ton/year)} = 0.0993X_3 - 71{,}183 \quad (3)$$

$$\text{T-MW Generation(ton/year)} = 2.3241X_1 + 337.88X_2^2 - 7{,}761.1X_2 + 0.0993X_3 - 136{,}919 \quad (4)$$

여기서, X_1은 의료기관 수(개소), X_2는 65세 이상의 고령 인구비(%), X_3은 GDP(십억 원)를 의미한다.

기존 문헌에서는 경제 성장과 의료폐기물 발생 간의 관계가 다수 연구되었으며, GDP와 의료폐기물 발생량을 회귀분석한 연구에서는 두 인자 간에 양의 상관관계가 있음이 보고되었다[13]. 마찬가지로 Windfeld and Brooks(2015)은 회귀분석을 통해 GDP와 발생량 간의 선형적 관계가 있음을 보고하였으며, 경제가 빠르게 발전하면서 질적으로 높은 의료 제품 및 서비스가 제공되면서 더 많은 의료폐기물의 발생을 나타낼 수 있음을 주장하였다. 의료기관 수는 의료행위가 직접적으로 수행되어 자원이 소비되는 장소로 발생량 증가를 초래할 수 있으며[14], 병원, 건강관리센터, 의원 등 기타 보건 관련 의료기관에서 다양한 폐기물이 발생할 수 있기 때문에 중요한 영향인자로 간주된다[15]. Wei et al.(2021)의 연구진들은 실증분석을 통해 의료기관의 수와 발생량 간의 유의한 상관관계를 보고하였으며, 의료기관 유형별로 발생량에 큰 차이가 존재할 수 있음을 주장하였다[16]. 고령 요인은 질병으로 인한 감염성을 상당히 증가시키는데, 이는 질병의 평균 지속 기간이 연령에 따라 증가하기 때문이다. 따라서 고령화가 가속화됨에 따라 의료서비스 이용 빈도 증가에 기인하여 의료폐기물 발생량이 증가할 수 있으며[17], Brownlee et al.(2017)은 선진국에서 급속한 인구 고령화가 의료 제품 사용량 급증의 원인으로 의료폐기물 발생량이 그에 상응하는 증가를 가져왔다는 것을 발견하였다[18]. 이러한 이유로 본 연구에서도 고령인구 비 변화에 따라 I-MW 발생량이 급격히 증가하는 경향을 보이는 것은 노인층 그룹에서의 감염병 질환 발생 가능성이 급증하기 때문으로 사료된다.

이처럼 문헌에서는 경제 성장의 원동력으로 의료시스템이 확장되기 시작하면서 수요 및 공급 원칙에 따라 의료기관 수는 증가하게 됨을 시사하고 있다. 이에 병원, 요양원 등 보건 관련 의료기관의 다양성이 접근성과 직결되기 때문에 의료폐기물 발생

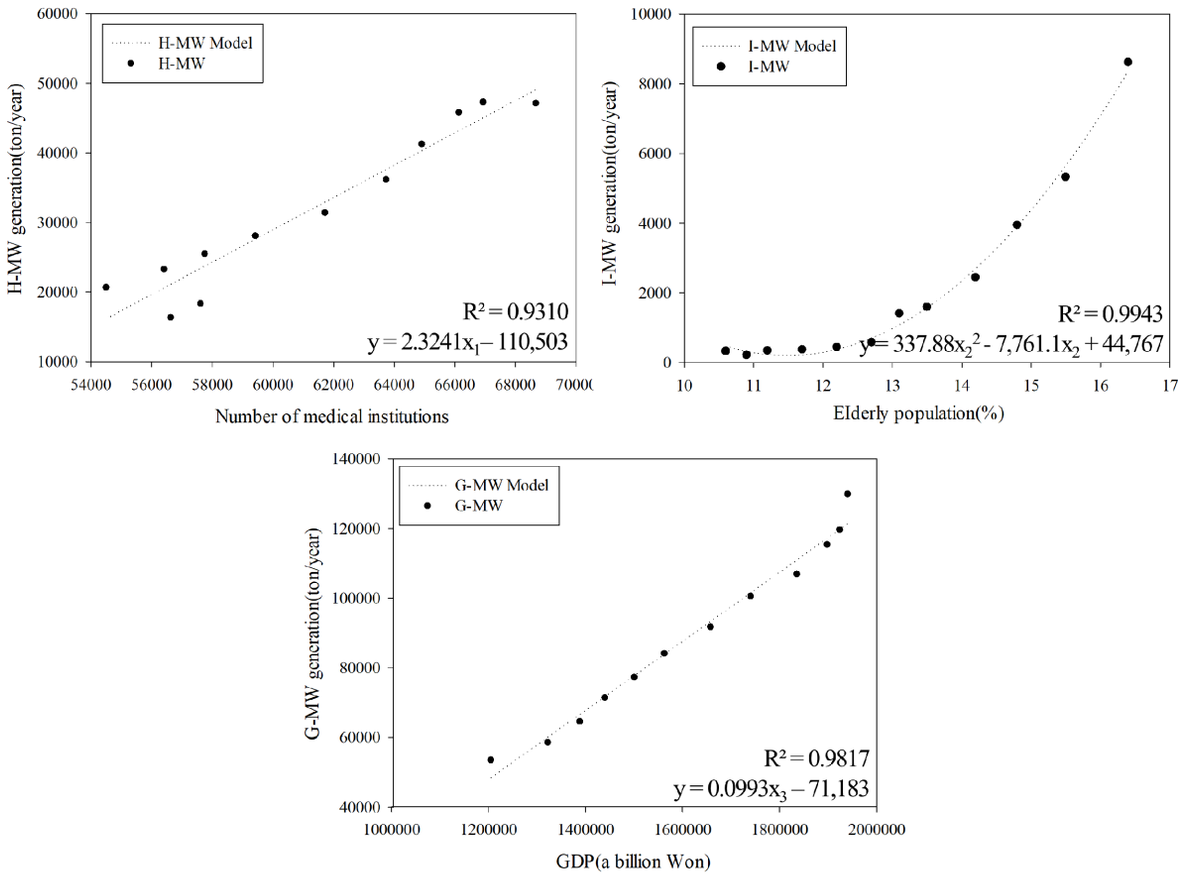

Fig. 2. Prediction models for generation by medical waste classification(linear and nonlinear regression analysis).

량이 급증하는 것이다[19]. 또한, 경제 성장은 인구수 및 고령화 비율을 증가시키며, 노령층의 면역력 저하로 질병 평균 지속시간이 장기화되면서 의료폐기물 발생량이 증가함을 주장하고 있다[20]. 하지만, 이러한 독립변수들과 의료폐기물 발생량 간의 상관성은 국가별로 매우 상이하기 때문에 국내 환경에 적합한 영향인자를 도출하고 지속적인 검증 과정이 필요할 것으로 판단된다.

3.1.2. 의료폐기물 발생량 예측 모델 평가 및 단기예측

Table 2는 각 의료폐기물 발생량 예측 모델식의 평가 결과를 나타내었다. 각 의료폐기물 종류별 평가 결과를 살펴보면, H-MW는 *MAE* 2,491, *RMSE* 2,890, I-MW는 *MAE* 159, RMSE 189, G-MW는 *MAE* 2,291, *RMSE* 3,267로 평가되어, I-MW의 모델식이 실측값과 가장 근접한 결과를 나타내는 것으로 나타났다. 또한, 각 모델식을 종합한 총 의료폐기물 발생량의 *MAE*는 2,615, *RMSE* 3,353로 평가되어, H-MW와 I-MW 의료폐기물 모델식과 유사한 수준의 정확도를 나타내는 것이 확인되었다.

최종 도출된 총 의료폐기물 발생량 예측 모델식을 통해 2030년까지의 총 의료폐기물 발생량을 단기 예측하였으며, 예측 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 2030년의 총 의료폐기물 발생량은 300,698 톤/년으로 예측되었다. 이는 2020년 기준 국내 의료폐기물 전용 소각시설 허가 용량인 198,036톤/년과 비교하여 약 1.5배 많은 수준이며, 의료폐기물 소각시설은 일반적으로 허가 용량의 130%까지 가동 가능하다는 점을 고려하여 볼 때도 약 1.2배 정도 많은 발생량 예측 값이다[21]. 본 연구에서 예측된 발생량으로 볼 때, 2026년 이후에 현재 가동되는 의료폐기물 소각시설 허가 용량 130% 수준을 초과하게 될 것으로

Table 2. Evaluation Result of Generation Prediction Models by Medical Waste Classification

Classification			T-MW	H-MW	I-MW	G-MW
Regression model evaluation	R^2		0.9965	0.9310	0.9943	0.9817
	p		-	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	t	y_0	-	-8.99	11.99	-10.16
		a	-	11.61	-13.71	23.19
		b	-	-	15.99	-
	MAE		2,615	2,491	159	2,291
	RMSE		3,353	2,890	189	3,267

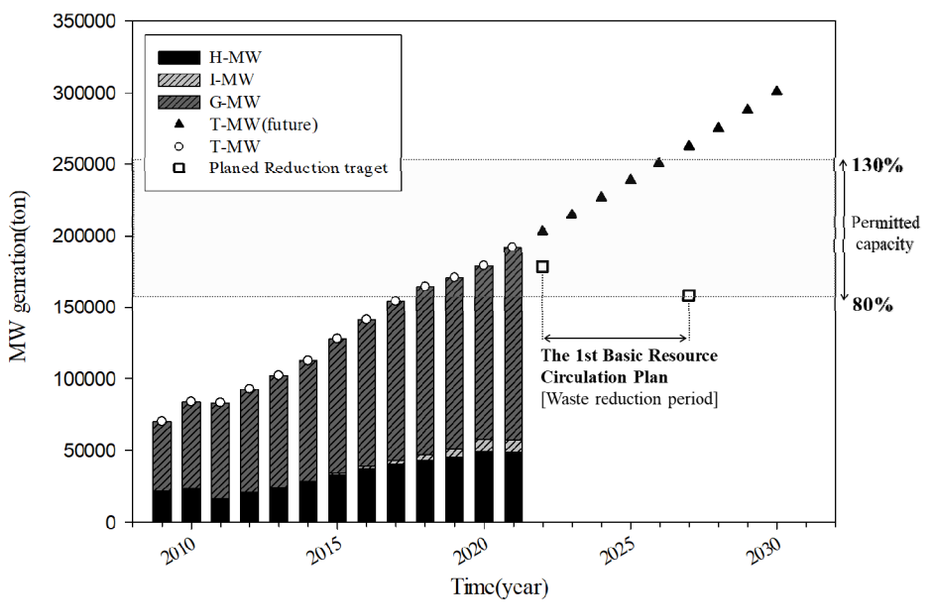

Fig. 3. The short-term prediction results of T-MW generation.

분석되었다. 특히 제1차 자원순환기본계획에 따라 의료폐기물 적정 처리시설 확보 목표를 2027년 기준 80%로 설정하였기 때문에 목표계획 달성과 원활한 처리를 위해서는 추가적인 처리용량의 확보가 반드시 필요할 것으로 사료된다[22].

3.2. 대규모 감염병 발병시 격리의료폐기물 발생원단위 분석

단기간 내 대량 발생하는 감염병 사태 시기의 의료폐기물 발생 특성을 분석하기 위하여, COVID-19 시기의 격리의료폐기물(I-MW) 발생량과 확진자 및 사망자 수를 기반으로 발생원단위를 도출하고 확산 시기별 변화를 분석하였다. Fig. 4는 확산 시기별 COVID-19 감염병 당시 확진자 수를 기반으로 격리의료폐기물 발생원단위 분석 결과를 나타낸 것이다.

2020~2022년까지 3년간의 발생원단위는 최대 25.6 kg/인・일에서 최소 0.01 kg/인・일로 평균 2.98 kg/인・일 수준으로 변동하였다. 발병 초기 4개월 간(불안정기)의 발생원단위는 25.6 kg/인・일까지 급격히 증가하는 특징을 보여주었으며, 평균 8.74 kg/인・일 수준으로 유지되었다. COVID-19 발생 초기 발간된 “코로나19 폐기물 안전관리 특별대책(1~3판)”에서 미확진자와 관련한 폐기물을 제외한 모든 폐기물이 의료폐기물로 처리되어 의료폐기물 발생량은 급격히 증가하였다. 반면에 전염병 확산이 미약하여 확진자의 수가 현저히 적었기 때문에 발생원

단위가 높게 나타난 것으로 판단된다[23]. 이후 2020년 6월부터 2021년까의 안정기에는 평균 2.69 kg/인・일(0.68~6.31) 수준으로 상대적으로 안정한 발생원 단위 값을 보였으며, 2022년 이후의 감소기에는 발생원단위가 급감하면서 평균 0.08 kg/인・일 수준으로 유지되었다. 2021년 10월 이후 “코로나19 폐기물

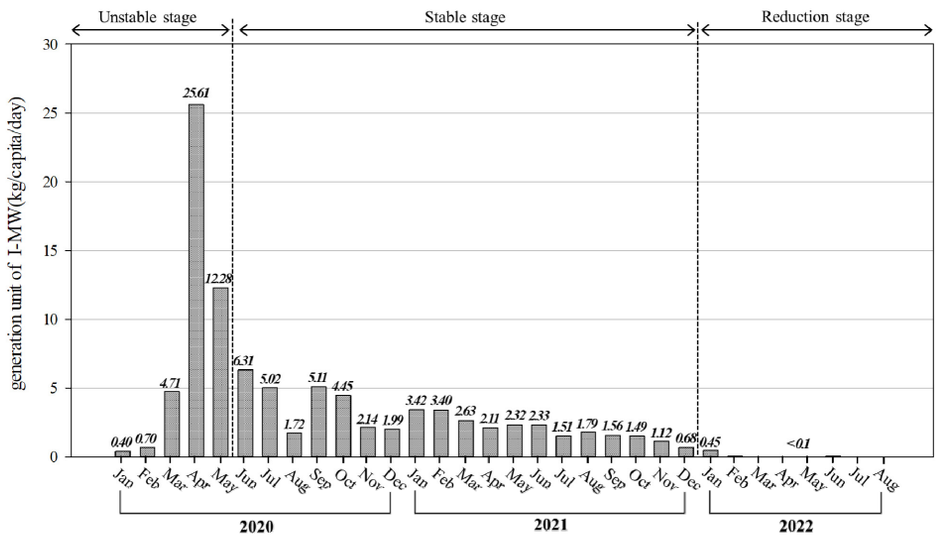

Fig. 4. Results of the generation unit of I-MW by outbreak stage of massive infectious diseases.

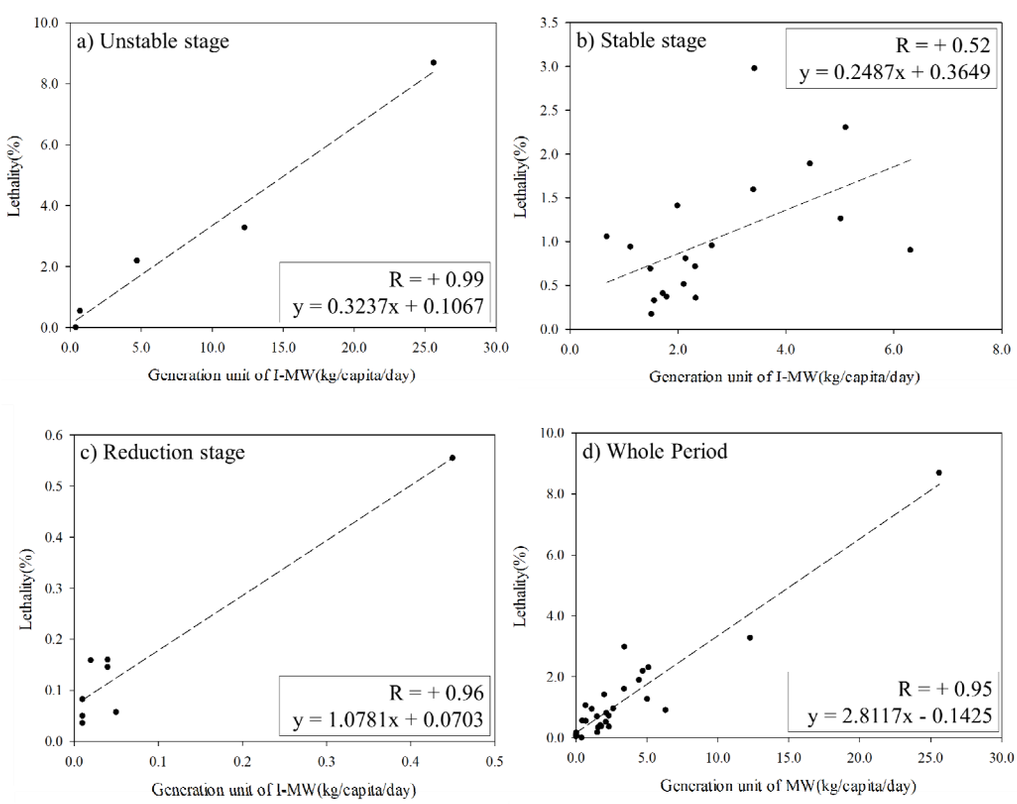

Fig. 5. Results of correlation analysis between generation of I-MW and lethality by COVID-19 period.

안전관리 특별대책(4-1~6판)"이 개정되면서 자가격리자(확진자) 및 생활치료센터에서 발생되는 격리의료폐기물이 생활폐기물로 처리되기 시작하였다. 2021년 11월부터는 사회적 거리두기 정책으로 단계별 일상회복 이행, 사적모임 인원 증가(6인→10인) 등이 시행되면서 격리의료폐기물의 원천 감소 및 확진자 수의 증가로 인해 발생원단위가 급감한 것으로 추정된다. Cho et al.(2023)의 연구에서도 초기 1차년도는 발생원단위가 급격히 증가하였다가, 정부의 의료폐기물 분류체계의 조정으로 2차년도에는 절반 수준의 감소를 3차년도에는 발생원단위가 급감하였음을 보고하였다[24].

COVID-19의 발생원단위는 발병 초기 급격한 상승 이후 감소하는 경향을 보이는데, 이는 대규모 감염병의 고유 특성인 치명률(Lethality, 확진자 중 사망자의 비)과 높은 상관성을 나타낸다. COVID-19 발병시기 동안 우리나라에서의 치명률은 전체시기 중 평균 1.11% 수준을 유지하였으며, 감염병 발병 초기 사망자가 없는 경우를 제외하면 0.04~8.68% 범위를 나타내는 것으로 조사되었다. 이 결과를 바탕으로 격리의료폐기물의 발생원단위와 치명률 사이의 상관분석을 수행한 산점도 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 시기별로 모든 구간에서 양의 상관성을 나타내었으며, 상관계수는 불안정기 +0.99, 안정기 +0.52, 감소기 +0.96으로 나타났고, 전체시기에 +0.95 이상의 매우 높은 양의 상관성을 나타내었다. 전체시기 중 안정기 시기의 상관성이 가장 낮은 것으로 분석되었는데, 이는 2021년 2월 안정기 초・중기에 COVID-19 백신 예방접종(2.26)이 전국적으로 시행되면서 발생원단위에 비해 치명률이 급격히 감소한 것에 기인하여 상대적으로 낮은 상관계수가 나타난 것으로 추정된다.

4. 결 론

감염병 발병과 평상시 상황에서 의료폐기물은 정부의 정책 수립, 폐기물관리 체계의 변화에 따라 특성이 따라 서로 상이게 나타나기 때문에 본 연구에서는 상기 두 상황을 구분하여 의료폐기물의 발생특성을 분석하였다. 평상시 상황에서는 경제・사회 영향인자와 회귀분석을 통해 의료폐기물 발생량 예측 모델식을 계산・평가하였으며, 감염병 발병 상황에는 확산 시기별 격리의료폐기물의 발생원단위를 나타내고 치명률과의 상관성 분석을 수행하였다. 본 연구에서 도출한 결론은 아래와 같다.

1) 평상시 상황에는 영향인자와 발생량을 회귀분석하여 의료폐기물 분류별 발생량 예측 모델식을 구축하였으며, 모든 분석은 유의값(p)은 < 0.0001로 통계적으로 유의미하였다. 각 분류별 예측 모델식의 결정계수(R^2) 값은 I-MW(R^2=0.9943) > G-MW(R^2=0.9817) > H-MW(R^2=0.9310) 순으로 분석되었다. 또한, 기존 문헌과 유사한 결과로 영향인자로 사용된 GDP(G-MW), 의료기관 수(H-MW), 고령 인구비(I-MW)는 모두 높은 상관성을 나타내었다.
2) 수립된 예측 모델식을 *MAE*, *RMSE* 지표를 통해 평가한 결과, H-MW는 *MAE* 2,491, *RMSE* 2,890, I-MW는 *MAE* 159, *RMSE* 189, G-MW는 *MAE* 2,291, *RMSE* 3,267로 평가되어, I-MW의 모델식이 실측값과 가장 근접한 결과를 나타내는 것으로 나타났다. 또한, 각 모델식을 종합한 총 의료폐기물 발생량의 *MAE*는 2,615, *RMSE* 3,353로 평가되어, H-MW와 I-MW 의료폐기물 모델식과 유사한 수준의 정확도를 나타내는 것이 확인되었다.
3) 감염병 발병 상황에서의 격리의료폐기물(I-MW)은 감염병 초기인 불안정기에 8.74 kg/인・일의 발생원단위가 분석되었다. 이후 안정기에 2.69 kg/인・일, 감소기에는 0.08 kg/인・일의 발생원단위를 나타내었는데, 이는 정부의 의료폐기물 관련 정책 변화에 매우 큰 영향을 받기 때문으로 분석되었다.
4) 치명률과 격리의료폐기물 발생원단위의 상관분석 결과, 모든 시기에서 양의 상관성이 분석되었다. 상관계수는 불안정기 +0.99, 안정기 +0.52, 감소기 +0.96으로 나타났으며, 감염병 발병 전체시기에서 +0.95 이상의 매우 높은 양의 상관성을 나타내는 것이 확인되었다.

본 연구에서 도출된 연구 결과는 보건 의료상에 적절한 의료폐기물 관리시스템을 구축하는 데 유용한 역할을 수행할 수 있을 것으로 기대된다. 아울러 다양한 감염병 사태시 의료폐기물 발생량 데이터 확보의 한계로 COVID-19 감염병을 중점으로 연구가 수행되었으나, 추후 감염병 발병 경험에서 비롯한 의료폐기물 관련 데이터의 축척으로 발생 경향을 주기적으로 예측할 필요성이 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 환경부/한국환경산업기술원 감염우려 의료폐기물 처리개발 사업 중 대규모 감염병 발생 대응 의료폐기물 전용 소각장 운영기술 개발(2021003350013)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

1. Haque, M.S., Uddin, S., and Sayem, S.M., et al., “Coronavirus disease 2019 (COVID-19) induced waste scenario: A short overview”, J Environ Chem Eng., 9(1), 104660. (2021).
2. Jeong J. W., and U J. H., “Severe Acute Respiratory Syndrome”, Korean Journal of Medicine, 65(2), pp. 154~159. (2003).
3. Ministry of Environment (Korea), MERS infectious medical waste safety management white paper. (2016).
4. Ministry of Environment (Korea), homepage, ttp://kosis.kr/covid/statistics. (2021).
5. Aldieri, L., Ioppolo, G., Vinci, C. P., and Yigitcanlar, T., “Waste recycling patents and environmental innovations: an economic analysis of policy instruments in the USA”, Japan and Europe. Waste Manag., 95, pp. 612~619. (2019)
6. Ma, Y., et al., “The impact of economic growth and tiered medical policy on the medical waste generation: An empirical analysis based on the environmental Kuznets curve model”, Frontiers in Environmental Science, 10, pp. 824435. (2022).
7. Cheng, J., Shi, F., Yi, J., and Fu, H., “Analysis of the Factors that Affect the Production of Municipal Solid Waste in China”, J. Clean. Prod., 259, pp. 120808. (2020).
8. Cho., M. H., and Jang., Y. C., “Study on the Generation and Disposal Characteristics of Infectious Medical Waste Following the Spread of the COVID-19 Infectious Disease”, J. Korea Soc. Waste Manag., 40(3), pp. 273~282. (2023).
9. Bdulredha, M., Kot, P., Al Khaddar, R., Jordan, D., and Abdulridha, A., “Investigating municipal solid waste management system performance during the Arba’een event in the city of Kerbala”, Iraq. Environment, Development and Sustainability, 22, pp. 1431~1454. (2018).
10. Shams, S., Sahu, J. N., Rahman, S. M. S., and Ahsan, A,. “Sustainable Waste Management Policy in Bangladesh for Reduction of Greenhouse Gases”, Sust. Cities Soc, 33, pp. 18~26, (2017).
11. Malinauskaite, J., Jouhara, H., Czajczyńska, D., Stanchev, P., Katsou, E., Rostkowski, P., et al., “Municipal Solid Waste Management and Waste-To-Energy in the Context of a Circular Economy and Energy Recycling in Europe”, Energy, 141, pp. 2013-2044. (2017).
12. Seo, K. S., and Jo, N. Y., “A study on the prediction of the specified waste generation”, J, Korean Society of Environmental Administration, 7(2), pp. 261~266, (2001).
13. Minoglou, M., and Komilis, D., “Describing Health Care Waste Generation Rates Using Regression Modeling and Principal Component Analysis”, Waste Manag., 78, pp. 811~818. (2018).
14. Khan, B. A., Cheng, L., Khan, A. A., and Ahmed, H., “Healthcare Waste Management in Asian Developing Countries: a Mini Review”, Waste. Manage, 37(9), pp. 863~875. (2019).
15. Karpusenkaite, A., Ruzgas, T., and Denafas, G.,

"Forecasting medical waste generation using short and extra short datasets: Case study of Lithuania", Waste Manag., 34(4), pp. 378~387. (2016).
16. Wei, Q. S., Tu, M., Lai, X, Q., and Xu, M., "Current status of classification and disposal of medical waste in different medical institutions in China", Department of Healthcare-associated Infection Management Control. 20, pp. 782~787. (2021).
17. Sharma, S. K., and Gupta, S., "Healthcare waste management scenario: a case of Himachal Pradesh (India)", Clin Epidemiol Glob, 5(4), pp. 169~172. (2017).
18. Hao, F., Zhang, Y., and Li, X.H., "Estimation of Endogenous Depreciation Rate of Health Capital and Relative Analysis in China", Popul. Dev. 26 (02), pp. 36~48 (2020).
19. Brownlee, S., Chalkidou, K., Doust, J., Elshaug, A. G., Glasziou, P., Heath, I., et al., "Evidence for Overuse of Medical Services Around the World", The Lancet, 390(10090), pp. 156~168. (2017).
20. Bloom, D. E., Khoury, A., and Subbaraman, R., "The Promise and Peril of Universal Health Care", Science, 361(6404). (2018).
21. Russo, G., Rego, I., Perelman, J., and Barros, P.P., "A Tale of Loss of Privilege, Resilience and Change: the Impact of the Economic Crisis on Physicians and Medical Services in Portugal", Health Policy, 120(9), pp. 1079~1086. (2016).
22. Ministry of Environment (Korea), "Special measures for waste safety management related to COVID-19", 3rd. (2020).
23. Korea Government, "The 1st resource circulation action plan (2018~2027)". (2018).
24. Ministry of Environment (Korea), "Special measures for waste safety management related to COVID-19", 4th, (2021).