

ORIGINAL ARTICLE

중국 생활폐기물 사례로 살펴본 개발도상국과 신흥국의 소각 처리를 이용한 폐기물 에너지화(WTE)에 따른 경제성 평가

김홍열* · 유경선

광운대학교 환경공학과

Economic Evaluation of Waste-To-Energy Incineration in Developing and Emerging Countries, Based on the Case of China's Municipal Solid Waste

Hong-Yeol Kim*, Kyung-Seun Yoo

Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea

Abstract

This study examined the economic feasibility of applying the waste-to-energy incineration method in developing and emerging countries based on a case study of a 600 ton/day stoker-type incineration power plant in China. The effects of major variables such as the lower calorific value of waste, government power sales incentives, and corporate tax reductions on the economic feasibility of the project were analyzed. When the lower calorific value of municipal solid waste in Chiping county, China was 1,480 kcal/kg, the power sales incentive was 0.65 yuan/kWh, the waste handling fee was 93.7 yuan/ton, the internal rate of return (IRR) was calculated to be 6.61%, and the return on equity (ROE) was 6.50%, which showed that it is difficult to achieve economic viability. However, when the lower calorific value was 1,800 kcal/kg or higher, the internal rate of return (IRR) was 8.65%, and the return on equity (ROE) was 9.12%, which showed business model was economically viable. The factors that greatly affected business profits were the lower calorific value of waste and power sales incentive, whereas corporate tax reductions did not significantly affect business viability. The results show that there is a clear limit to sustainability when relying solely on government financial and policy support for the treatment of municipal solid waste. However, if mechanical biological treatment (MBT), which has been shown to increase the low calorific value of waste, is applied as a pretreatment method, it is expected that the low calorific value of waste brought into the incinerator can be increased to an economically appropriate level of 3,400-4,000 kcal/kg or more.

Key words : Waste-to-energy, Incineration, Municipal solid waste, Developing countries, Emerging countries, Lower calorific value, Economic evaluation

1. 서 론

개발도상국과 신흥국의 급격한 도시 성장은 생활폐기물 발생량 급증을 유발하고 있으며, 궁극적으로 지구

환경과 삶의 질에 미치는 영향과 지속가능성에 대한 우려가 커지고 있다. 이러한 문제를 해결하고 폐기물 관리 시스템을 현대화하기 위한 수단으로서 폐기물 에너지화(Waste to energy, WTE)가 적극 검토되고 있으며

Received 16 October, 2024; **Revised** 31 October, 2024;

Accepted 1 November, 2024

***Corresponding author** : Hong-Yeol Kim, Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea
Phone : +82-2-940-5497
E-mail : benkhy@naver.com

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

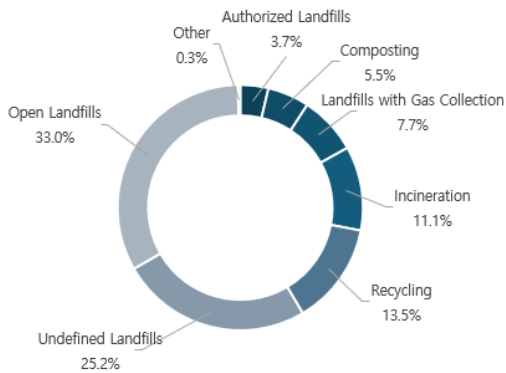


Fig. 1. Global MSW treatment methods and their rates (World Bank, 2018).

(Vukovic and Makogon, 2022), 이러한 WTE는 폐기물 처리 문제 뿐만 아니라 전력생산 부족, 매립지 부지 제한, 부적질 폐기물 처리로 인한 온실가스 배출 등 여러 가지 이슈를 동시에 해결할 수 있는 대안으로 지속적인 관심을 받고 있다(German Society for International Cooperation, GIZ, 2017).

세계은행 보고서에 따르면 217개국에서 발생하는 연간 폐기물 총량은 2016년의 20억 1천만 톤에서 매년 1.6%씩 증가하여 2050년에는 34억 톤에 달할 것으로 예상되며(World Bank, 2018), Fig. 1에서 알 수 있듯이 여전히 초기 투자비용이 저렴한 매립 방식이 전세계에서 가장 일반적인 생활폐기물 처리 방식으로 활용되고 있다. 이러한 상황에서 폐기물을 선별·분류하고 재

활용을 극대화함으로써 실제 최종 처리해야 하는 폐기물의 양을 최소화하거나, 폐기물 에너지화를 통해 전력을 생산하는 등 폐기물 처리 전과정을 지속 가능하게 전환하기 위한 노력도 확대되고 있다. 다만, 선진국에 비해 개발도상국과 신흥국 국가에서의 폐기물 발생량은 급증하여 2050년까지 2016년 대비 3배 이상 증가할 것으로 예상되며(World Bank, 2018), Fig. 2에서 도시한 바와 같이 2050년에는 동아시아·태평양 지역과 남아프리카, 사하라 이남 아프리카 지역의 폐기물 발생량이 전세계 발생량의 약 56%를 차지할 것으로 예상된다. 또한, 소득 수준이 낮아짐에 따라 유기성 폐기물 비율이 증가하여 개발도상국과 신흥국의 경우 그 비율이 평균 50% 이상을 나타냈으며, 높은 수분함량으로 인해 선진국 국가들에 비해 폐기물 저위발열량이 낮은 특성도 나타냈다(GIZ, 2017; World Bank, 2018).

WTE는 더 이상 재활용할 수 없는 폐기물을 전기, 열, 연료 등 사용 가능한 에너지 형태로 전환할 수 있는 다양한 기술 및 설비를 통칭하며, 소각이 가장 보편화되어 있는 사례이나 가스화, 열분해, 혐기성 소화, 매립가스 발전도 포함하고 있다(Confederation of European Waste-To-Energy Plants, CEWEP, 2018). EU 집행위원회(European Commission, EC) 2015년 발표에 따르면 WTE는 순환경제를 위한 핵심 수단으로서, 순환경제에서는 폐기물과 자원의 사용이 최소화되며 수명이 다한 제품도 추가 가치 창출을 통해 반복적으로 사용되고 유지되는 것으로 설명하고 있다. 또한 WTE를 통해 기존 매립 방식의 폐기물 처리를 대체하고 궁극적

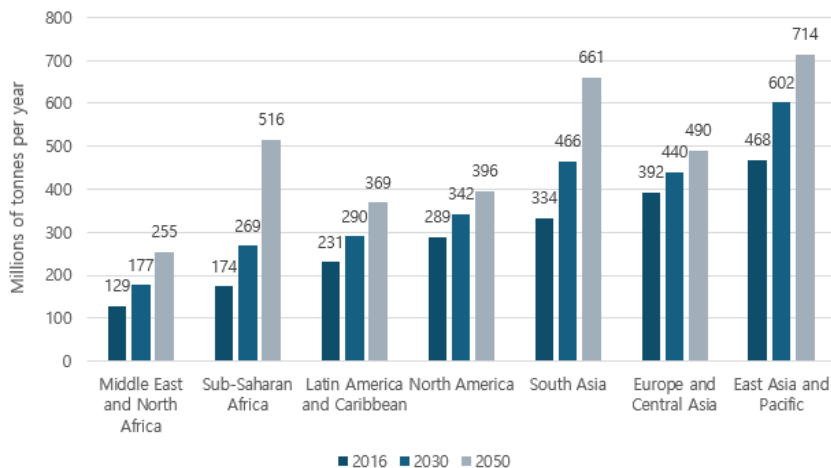


Fig. 2. Projected waste generation, by region (World Bank, 2018).

으로 화석연료 사용을 저감함으로써 온실가스 배출을 저감하며, 이를 통해 지속 가능하고 비용 효율적이며, 지역 중심의 신뢰할 수 있는 에너지 제공을 목표로 하고 있다(German Federal Environment Agency, UBA, 2015).

이러한 WTE 플랜트의 설치는 당초 도입 취지에 맞춰 지속 가능한 관리, 순환경제, 환경영향 등에 대한 고려가 전제되어야 하며, 이를 위해 기본적으로 환경영향 평가와 전과정평가가 수행되고 있으며(Mayer et al., 2019; Cudjoe and Acquah, 2021), 가장 중요한 경제적 효용성 판단을 위해 자기자본투자수익률 또는 현금 유출 비용의 현재가치와 현금유입 비용의 비교를 통한 도입 시설의 경제성 평가가 수행되고 있다(Potravny and Baah, 2021). 경제성 평가에 대한 이전 연구들을 살펴보면, 스토커 및 유동층 소각로와 같은 소각기술 차이에 따른 환경적 편익에 대한 연구(Chen and Christensen, 2010)가 있었으며 일부 연구자들은 매립, 소각, 퇴비화 등 생활폐기물 처리 방식에 따른 환경적 편익 비교 연구를 수행하기도 하였다(Hong et al., 2006; Zhao et al., 2009; Dong et al., 2014). 또한, 원가계산 등의 평가 모델에 기반하여 폐기물 관리의 전 과정에 걸친 편익에 대한 연구도 수행된 바 있다(Khandelwal et al., 2018). 그러나, 이러한 다양한 연구에도 불구하고 유럽 및 북미 등 선진국과 달리 생활폐기물 분리 배출 체계와 전처리 인프라 등이 부족한 개발도상국과 신흥국들을 대상으로 WTE 등을 통한 경제성 확보 방안과 이를 통한 지속 가능한 폐기물 관리 체계 구축에 초점을 맞춘 연구는 여전히 제한적이라 할 수 있다 (Yu and Dong, 2020).

따라서 본 연구에서는 대표적인 WTE 방식인 소각 처리를 전제로 유기성 폐기물과 음식물류 폐기물의 비율이 높으며 높은 수분함량으로 발열량이 낮은 개발도상국과 신흥국들의 생활폐기물 처리에 있어 경제성과 관련된 고려 요소들을 도출하고, 이에 따른 경제적 효용성을 객관적으로 평가하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 연구 대상지

본 연구는 개발도상국과 신흥국들의 생활폐기물 조성에 대한 대표성을 가지며 소각 처리가 기술적·정책적으로 보편화되어 있어 경제성 평가를 위한 기초 자료 수

집이 용이한 중국 내 도농복합지역을 연구 대상지로 선정하였다.

중국은 폐기물 발생량이 최상위 수준인 동아시아 국가이면서 음식물류 폐기물 비율과 수분함량이 높은 신흥국에 해당되며(GIZ, 2017; World Bank, 2018), 특히 본 연구의 경제성 평가 대상지인 중국 산둥성 랴오칭시 치평현의 경우 1인당 GDP가 2022년 기준 46,995 위안(6,980 달러)으로서(CEIC, 2024), International Monetary Fund(2024) 분류에 따르면 2,500~10,000 달러 구간으로 몽골, 에콰도르, 리비아 등과 같은 개도국 수준으로 확인되었다. 또한 중국의 생활폐기물 발생량은 2016년 기준 1.89억 톤으로서 동 기간 동아시아·태평양 지역 4.68억 톤의 약 40%를 차지하였으며(NBSC, 2016; World Bank, 2018), 생활폐기물 수분함량과 저위발열량이 각각 약 75% 수준과 1,000~1,500 kcal/kg 수준으로서(Yan et al., 2020), 본 연구의 대상인 개발도상국과 신흥국들의 생활폐기물에 대해 대표성을 가지는 것으로 판단되었다.

중국의 2022년 기준 생활폐기물 발생량은 2.44억 톤으로서 이 중 소각처리가 1.95억 톤으로 약 80%를 차지하였으며 위생매립은 0.30억 톤으로 약 12% 수준, 나머지 8%는 퇴비화 등 기타 위생처리 방식으로 확인되었다(NBSC, 2022). 이와 같이 중국은 폐기물 위생처리와 에너지 부족 문제를 동시에 해결하기 위해 WTE로서 소각 처리를 적극적으로 확대하고 있으며, 산둥성의 경우 2025년까지 강소성의 경우 2030년까지 소각처리 비율을 85%까지 확대할 계획이며 절강성의 경우에는 2030년까지 소각처리 비율을 100%까지 확대하는 것으로 발표하였다(Guanyan Tianxia, 2023). 특히 중국은 '13.5' 계획 기간(2015~2020년)부터 도시와 농촌 지역의 소각처리시설 건설을 가속화 하고 있으며, 특히, "현급 지역 생활폐기물 소각처리시설 건설 강화 지도의견"(NDRC and MOHURD, 2022), "바이오 경제 발전을 위한 '14.5' 계획"(NDRC, 2021)" 등을 통해 폐기물 처리 시설이 부족한 농촌지역을 중심으로 재정적·정책적 인센티브 부여 등을 통해 민간 투자 확대를 적극적으로 지원하고 있다.

2.2. 경제성 평가 대상

본 연구에서 적용된 중국 내 소각로는 스토커 방식으로 2023년도 중국 생활폐기물 소각발전 프로젝트 입찰 현황(China procurement and bidding network,

Table 1. Summary of analysis of MSW composition in Chiping county, China

Category	Combustible matter (%)						Moisture (%)	Ash (%)	Total (%)
	C	H	S	O	N	Cl			
Ratio	18.82	2.4	0.34	11.30	0.54	0.27	47.11	19.22	100

Table 2. Summary of heat and power production

Category	Result	Note
Amount of waste	600 ton/day	365 day/year 기준
Steam production	50.2 ton/hr	1,480 kcal/kg* 기준
Power production	8.9 MWh	
Power sales	7.3 MWh	Internal power consumption 1.6 MWh

* Calculation of low calorific value through analysis of waste components in Chiping county

China Bidding, 2024) 등을 고려하여 시설용량 600 톤/일, 연간 운전시간 8,000시간으로 소각로 설비 기준을 설정하였다. 또한 중국 치평현 내 생활폐기물의 저위발열량 수준을 파악하기 위해 현지에서 운영 중인 매립장 2곳을 샘플링하여 폐기물 성분분석을 수행하였으며 그 결과는 Table 1에 정리하였다. 이를 통해 확인된 치평현 내 생활폐기물 저위발열량은 1,480 kcal/kg 수준으로 2021년도 국내 생활폐기물 저위발열량인 4,025 kcal/kg(KOSIS, 2021)에 비해 약 37% 정도에 불과한 수준이었다. 이는 조사 대상지인 중국 치평현이 중국 내에서도 전형적인 도농복합지역으로서 음식물류 등 수분함량이 높은 유기성 폐기물의 비율이 상대적으로 높기 때문으로 판단된다.

위와 같은 치평현 생활폐기물 저위발열량과 중국의 생활폐기물 소각발전시설 설치기준(MOHURD, 2001)을 참고한 결과, 치평현 내 생활폐기물 연소시 시간당 50.2 톤의 고온·고압의 스팀이 생산되며 스팀 터빈을 통해 8.9 MWh의 전력을 생산할 수 있는 것으로 확인되었으며 그 결과는 Table 2에 정리하였다. 이렇게 생산된 전력 중 실제 판매되는 전력은 7.3 MWh 수준으로서 1.6 MWh는 소내전력으로 사용되는 것으로 설정하였다.

2.3. 경제성 평가기법

본 소각발전 시스템을 신축·운영 시 공사비, 시운전비, 인건비, 유지보수비, 이자 등의 비용이 발생되며 생

산된 전력의 판매 수입과 폐기물 반입수수료가 편익으로 구분된다. 비용과 편익 발생의 결과를 내부수익률법(Internal rate of return, IRR)을 통해 경제성을 분석하였다. 또한 비용 및 수익에 연관되는 여러가지 변수의 변동폭을 조정하여 각각의 변수가 미치는 민감도 분석을 수행하였다.

내부수익률법은 현금유출 비용의 현재가치와 현금유입 비용이 동일하게 되는 할인율 계산을 통해 경제성을 평가하는 방법이다. 아래의 식에서 r 을 내부수익률이라고 하며 각 기업에서 기대하는 할인율과 비교하여 상대적으로 높을 경우 경제성이 있는 사업으로 판단하게 된다.

$$\sum_{t=0}^n \frac{CO_t}{(1+r/100)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{CI_t}{(1+r/100)^t}$$

여기서, CO_t 는 현금유출, CI_t 는 현금유입, t 는 기간을 의미한다. 내부수익률법은 현금흐름에 기초를 두고 있으며 화폐의 시간적 가치를 고려한다는 장점이 있으며 투자 안에 따라 복수의 수익률이 존재하는 경우가 있다는 단점이 있다.

내부수익률과 같은 사업 전체의 수익률을 조금 더 세분화하면 대주단과 주주의 투자 수익을 구분할 수 있다. 대주단은 금융조건에 명시된 이자율에 따라 정해진 기간에 이자를 수령하므로 확정된 투자수익을 얻을 수 있는 반면, 주주의 경우에는 운영기관이 제반 지출 및 차

Table 3. Summary of initial investment costs (600 ton/day stoker-type incineration power plant in China)

Category	Amount		Ratio
	CNY(×10,000)	KRW(×1,000,000)*	
Investigation costs	1,590	3,049	3.6%
Design costs	1,413	2,711	3.2%
Construction costs	Mechanical	20,450	46.3%
	Construction	12,632	28.6%
	Electrical	6,316	14.3%
	Landscaping	486	1.1%
	Total	39,884	90.3%
Construction management costs	44	85	0.0%
Others	1,237	2,372	2.8%
Total	44,168	84,705	100.0%

* Applying the 2022 average annual exchange rate (191.78 KRW/CNY)

입원리금 상환 후 잔여이익에 대해 운영배당과 청산배당 등을 통해 투자자금 회수 및 일정 수익을 확보하게 된다. 이러한 이유로 본 연구에서는 사업 전체의 수익률인 내부수익률(IRR)을 기본으로 하되 주주의 수익률인 자기자본투자수익률(ROE)을 추가로 분석하였다.

내부수익률법 등과 같은 경제성 분석 과정에서 어느 한 투입요소가 변동할 때 그 투자안의 가치가 어느 정도 변동하는가를 분석하는 것을 민감도 분석이라고 한다. 민감도가 큰 투자안 일수록 순현재가치의 변동이 심하고 더 위험한 투자로 평가된다. 이러한 민감도 분석은 서로 다른 투자안의 상대적인 위험을 측정하는 수단이 된다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 투자모형설정

3.1.1. 투자계획

초기투자비의 경우 중국내 소각처리 발전 프로젝트 (600 톤/일) 투자금액 사례(China Bidding, 2024)와 국내 유사시설 현황 파악 등을 통해 조사비, 설계비, 기계공사, 건축·토목공사, 전기·계장공사, 조경공사, 공사관리, 기타비용으로 나누어 Table 3에 정리하였으며 총 사업비는 약 847 억원으로 산출되었다. 공사기간은 18개월, 시운전 기간은 2개월로 산정하였으며 폐기물 반입 및 전력 생산을 시작하고 30년간 시설을 운영하는 것으로 설정하였다. 투자비용은 자본으로 30%를 조

달하여 공사비에 먼저 사용하고 나머지 70%는 중국 현지에서 차입하는 것으로 설정하였으며 차입금의 금리는 중국 National Interbank Funding Center (NIFC)에서 공표하는 1년 기준 대출금리인 4.25%에 PF투자 가산금리 1.5%를 적용하여 5.75%로 설정하였다. 또한, 차입금의 상환은 공사기간을 포함하여 2년 거치 7.5년 분할 상환으로 하였으며 감가상각비는 시설 운영기간인 30년간 균등분할 상각을 원칙으로 하였다.

3.1.2. 운영수익

소각발전은 폐기물 반입 및 전력 생산이 시작된 후부터 수익이 발생되며 전력 판매와 폐기물 반입수수료로 인한 매출로 구성된다. 생활폐기물 반입량은 600 톤/일, 운전시간은 중국의 생활폐기물 소각발전 시설 설치기준(MOHURD, 2001)에 따라 8,000시간을 적용하였다. 전력 판매 단가는 중국 현지 소각발전 에 따른 전력 판매가인 0.65 위안/kWh(NDRC, 2012)를 적용하였으며 전력 판매가는 2019년부터 변동이 없으므로 단가변동은 고려하지 않았다. 폐기물 반입 수수료는 2022년도 중국내 평균 수수료인 93.7 위안/톤(Wuhan Energy Conservation Association, Wuhan ECA, 2024)을 적용하였으며 중국의 경우 실제 반입되는 폐기물의 양과 상관없이 최초 허가받은 시설의 처리 용량을 기준으로 수수료를 책정하므로 폐기물 반입량은 600 톤/일을 적용하여 산정하였다.

Table 4. Summary of estimate operating costs (600 ton/day stoker-type incineration power plant in China)

Category		Amount		Ratio
		CNY/year	KRW(×100)/year*	
Fixed	Personnel expenses	3,659,353	7,017,908	17.7%
	Taxes and management fees	2,915,078	5,590,537	14.1%
	Total	6,574,432	12,608,445	31.8%
Variable	Facility maintenance	8,352,422	16,018,276	40.4%
	Purchase of consumables	2,666,986	5,114,746	12.9%
	Operating expenses			
	Fuel and electricity	599,555	1,149,827	2.9%
	Water usage	1,095,739	2,101,407	5.3%
	wastewater treatment	310,115	594,738	1.5%
	Ash treatment	1,075,064	2,061,758	5.2%
Total	14,099,882	27,040,753	68.2%	
Total		20,674,313	39,649,198	100.0%

* Applying the 2022 average annual exchange rate (191.78 KRW/CNY)

3.1.3. 운영비용

운영비용 추정 내역은 Table 4에 정리하였으며, 중국 소각발전 프로젝트 입찰공고(China Bidding, 2024)와 중국의 2022년도 “환경시설 관리 직종” 평균 급여(NBSC, 2023)를 고려하여 고용인원은 58인, 월 급여는 5,258 위안을 적용하였으며 유지보수비는 초기 투자비의 2.2%로 설정하였다. 또한, 운영기간 중 지속적으로 유지보수비가 발생하는 것으로 가정하였으며 운영비용은 인플레이션율을 반영하여 추정하는 것이 일반적이나 운영기간이 30년 장기이며 매출계획 추정의 경우에도 인플레이션율을 반영하지 않았으므로 운영비용 추정에도 인플레이션율을 반영하지 않는 것으로 설정하였다. 감가상각의 경우 건물, 기계장치 등 자산의 내용연수에 따라 다르게 적용하는 것이 타당하나 매년 유지보수비로 초기투자비의 2.2%를 투입하는 것을 전제로 하고 있으므로, 감가상각은 운영기간인 30년간 상각하고 별도의 채투자자는 발생하지 않는 것으로 설정하였다.

3.2. 손익계산서 산출

투자 및 매출계획을 기반으로 손익계산서, 대차대조표, 현금흐름표를 작성하고 이를 이용하여 경제성 평가를 수행하였다. Table 5는 사업연도별 손익계산서를 정리한 결과로 표에서 보인 바와 같이 사업 시작 2차년도부터 당기순이익이 발생하여 30년간 수익이 창출되는

것으로 확인되었다. 영업이익은 운영수익에서 운영비용을 차감한 금액을 의미하며 영업외수익과 영업외비용은 매출에 따른 예금과 부채에 따른 이자비용을 각각 1.5%와 5.75%로 반영한 결과이다(NIFC, 2024). 법인세율은 중국의 기업소득세법을 적용하여 25%로 설정하였으며 설립 후 3년간은 법인세 면제, 4~6년은 50% 감면을 적용하였다. 이러한 조건을 토대로 내부수익률(IRR)과 자기자본투자수익률(ROE)은 각각 6.61%, 6.50%로 계산되었다.

3.3. 경제성 평가 결과

스토커 방식의 소각발전 설비는 시설용량에 따라 초기투자비와 운영비용 등이 소각발전시설 설치기준(MOHURD, 2001)에 따라 표준화되어 있어 변동성이 크지 않으므로, 사업 수익성에 직결되는 영향은 운영수익의 증감에 달려 있다고 할 수 있다. 소각발전 운영수익은 전력 판매와 폐기물 반입수수료로 인한 매출로 구성되며, 특히 반입 폐기물의 저위발열량을 완전 연소시 단위질량당 발생하는 열량 중 증발잠열을 제외한 열량으로서 소각로의 연소성능과 전력 생산량에 영향을 끼치는 핵심적 요소라 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 우선적으로 소각발전 반입 폐기물의 저위발열량 변화에 따른 사업수익률 추이를 파악하기 위해 반입 폐기물의 저위발열량 중심으로 민감도 분석을 수행하였다.

폐기물 성분분석을 통해 도출된 치평현 생활폐기물

Table 5. Summary of income statement

[KRW(×1,000,000)]

Year	Operating			Non-operating		Net income before income tax	Corporate tax	Net income
	Income	Expenses	Profit & loss	Income	Expenses			
Y+0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y+1	3,753	2,263	1,491	-	1,461	29	-	29
Y+2	11,249	6,788	4,461	15	3,409	1,066	-	1,066
Y+3	11,249	6,788	4,461	73	2,955	1,579	197	1,382
Y+4	11,249	6,788	4,461	20	2,500	1,981	248	1,733
Y+5	11,249	6,788	4,461	-	2,167	2,294	287	2,007
Y+6	11,249	6,788	4,461	-	1,902	2,559	640	1,919
Y+7	11,249	6,788	4,461	-	1,623	2,838	709	2,128
Y+8	11,249	6,788	4,461	-	1,349	3,112	778	2,334
Y+9	11,249	6,788	4,461	-	1,062	3,399	850	2,549
Y+10	11,249	6,788	4,461	-	988	3,472	868	2,604
Y+11	11,249	6,788	4,461	-	895	3,566	891	2,674
Y+12	11,249	6,788	4,461	-	550	3,911	978	2,933
Y+13	11,249	6,788	4,461	-	185	4,276	1,069	3,207
Y+14	11,249	6,788	4,461	5	-	4,466	1,116	3,349
Y+15	11,249	6,788	4,461	15	-	4,475	1,119	3,357
Y+16	11,249	6,788	4,461	30	-	4,490	1,123	3,368
Y+17	11,249	6,788	4,461	49	-	4,510	1,128	3,383
Y+18	11,249	6,788	4,461	74	-	4,535	1,134	3,401
Y+19	11,249	6,788	4,461	105	-	4,565	1,141	3,424
Y+20	11,249	6,788	4,461	140	-	4,601	1,150	3,450
Y+21	11,249	6,788	4,461	180	-	4,641	1,160	3,481
Y+22	11,249	6,788	4,461	226	-	4,687	1,172	3,515
Y+23	11,249	6,788	4,461	277	-	4,738	1,184	3,553
Y+24	11,249	6,788	4,461	333	-	4,794	1,198	3,595
Y+25	11,249	6,788	4,461	395	-	4,855	1,214	3,642
Y+26	11,249	6,788	4,461	462	-	4,923	1,231	3,692
Y+27	11,249	6,788	4,461	534	-	4,995	1,249	3,746
Y+28	11,249	6,788	4,461	613	-	5,073	1,268	3,805
Y+29	11,249	6,788	4,461	697	-	5,157	1,289	3,868
Y+30	11,249	6,788	4,461	786	-	5,247	1,312	3,935
Y+31	7,496	4,526	2,970	882	-	3,852	963	2,889

저위발열량 1,480 kcal/kg을 기초로 하여 저위발열량을 1,600 kcal/kg, 1,800 kcal/kg, 2,000 kcal/kg으로 증가시키면서 내부수익률(IRR)과 자기자본투자수익률(ROE)을 도출하고 그 변화 추이를 Fig. 3에 도시하였다. 중국 환경기업 추정 자기자본비용(17.69%)을 고

려할 때 가중평균자본비용은 8.33%로 계산되었으며, 내부수익률(IRR)이 가중평균자본비용 보다 크면 경제성이 있는 것으로 판단하였다.

Fig. 3에서 알 수 있듯이 치평현 생활폐기물(저위발열량 1,480 kcal/kg) 소각발전시 내부수익률(IRR)

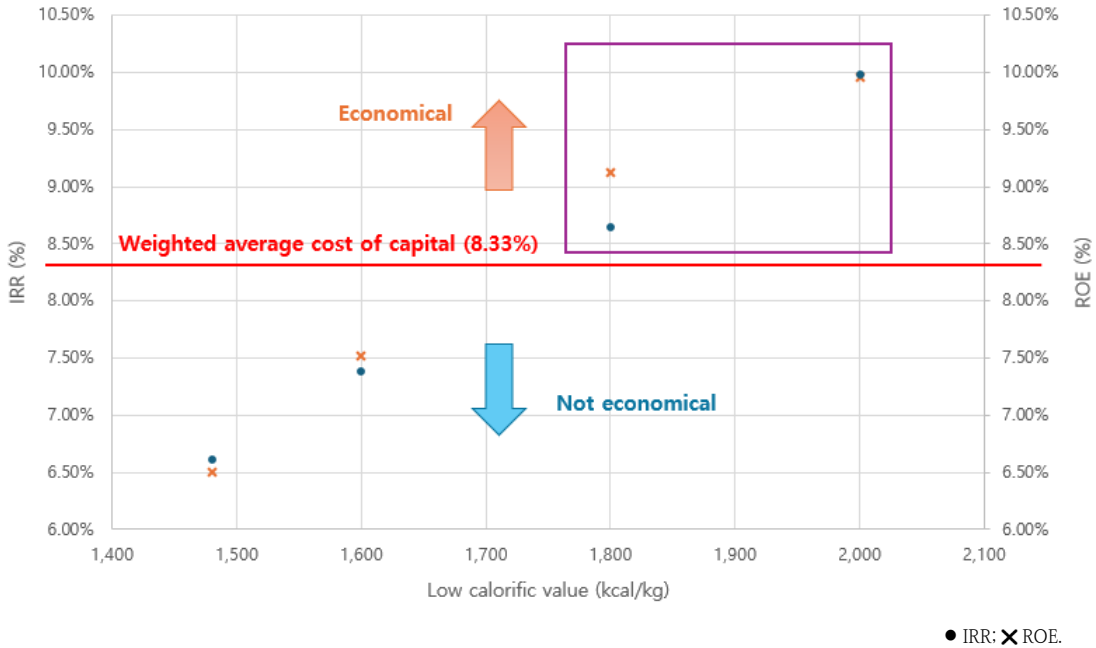


Fig. 3. Effect of on IRR and ROE with a variation of lower calorific value.

6.61%, 자기자본투자수익률(ROE) 6.50%로서 가중평균자본비용(8.33%)을 하회함에 따라 현 수준에서는 경제성 확보가 용이하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 다만, 저위발열량이 1,800 kcal/kg 이상인 경우에는 내부수익률(IRR) 8.65%, 자기자본투자수익률(ROE) 9.12%로서 경제성이 비교적 좋은 것으로 나타났으며, 이는 독일 경제협력개발부에서 WTE 기술기준(GIZ, 2017)으로 권고하고 있는 소각로 반입 폐기물 최소 저위발열량인 7~8 MJ/kg (1,672~1911 kcal/kg)과 유사한 수준임을 확인하였다. 이는 중국 정부의 생활폐기물 소각발전에 대한 전력 판매가 인센티브(0.65 위안/kWh, 2022년 평균환율 191.78 원/위안 적용시 124.66 원/kWh)와 법인세 감면 등의 각종 재정적·정책적 수단(NDRC, 2012)에 기인하는 면이 큰 것으로 판단되며, 중국과 달리 소각발전에 대한 정부의 재정적·정책적 지원이 없거나 부족한 경우의 경제성 평가는 금번 평가 결과와는 다소 상이하게 나타날 수 있을 것으로 판단된다.

Hoornweg and Bhada-Tata(2012)는 소각 처리 방식의 WTE에 있어 주요 수익 구조는 폐기물 반입수수료, 열·전력 판매, 정부 보조금 등으로 구성되며, 폐기물 발열량과 에너지 가격이 높은 유럽 등 선진국에서는 열·전력 판매 수익만으로도 전체 비용을 충당할 수 있으나 나

머지 국가에서는 보조금 등 정부의 재정적 지원이 없이는 안정적 설비 운영이 불가능하다고 설명하고 있다. 이러한 근거를 바탕으로 정부의 재정적·정책적 지원이 생활폐기물 소각발전의 경제적 효율성에 미치는 영향을 객관적으로 입증하기 위해 전력 판매가와 법인세 감면 여부를 변수로 내부수익률(IRR)에 대한 민감도 분석을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 도시하였다.

Fig. 4에서 도시한 바와 같이 중국 정부의 전력 판매가 인센티브를 0.65 위안/kWh를 기준으로 100~90% 범위 내에서는 2%씩 90~50% 범위 내에서는 5%씩 조정하면서 내부수익률(IRR) 변화 추이를 확인한 결과, 96% 이하에서는 내부수익률(IRR)이 가중평균자본비용을 하회하게 되었으며 34% 이하에서는 내부수익률(IRR)이 마이너스(-)로 손실 구간으로 전환되는 것으로 나타났다. 이를 통해 저위발열량 1,800 kcal/kg 수준에서도 중국 정부의 재정적 지원이 현 수준으로 유지되지 않는다면 수분함량이 높은 음식물류 혼합 폐기물을 단순히 소각 방식으로만 처리하는 경우에는 경제성 확보가 어려울 것으로 판단되었다.

참고로 Fig. 5에 도시한 바와 같이 법인세 감면 여부에 따라 내부수익률(IRR)은 기존 8.65%에서 8.43%로 낮아졌으나 두가지의 경우 모두 가중평균자본비용

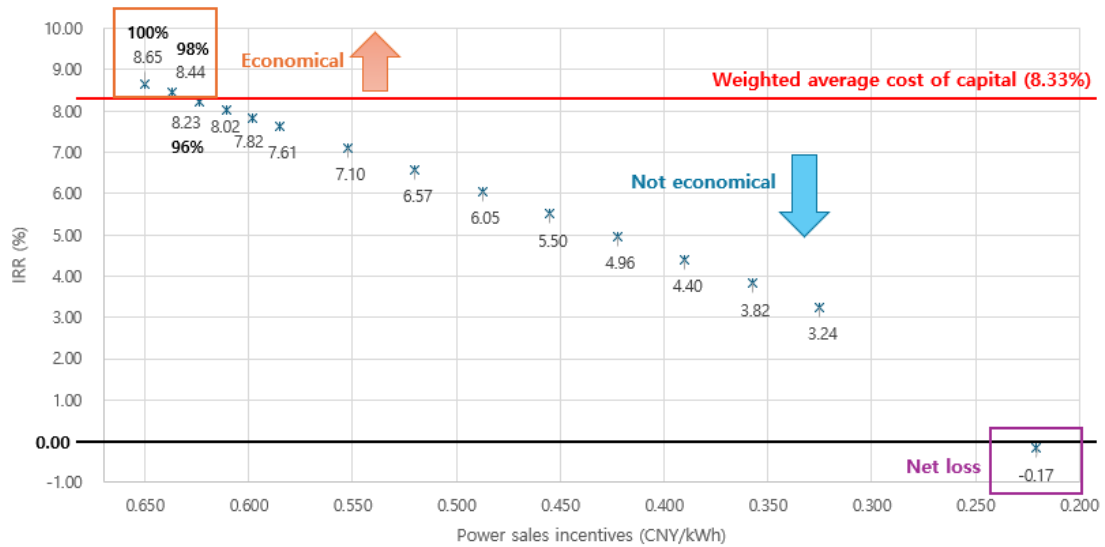


Fig. 4. Effect of on IRR with a variation of power sales incentive.

(8.33%)을 상회하는 값으로서, 법인세 감면이 사업성에 미치는 영향은 크지 않음을 알 수 있었다.

추가적으로 음식물류 폐기물을 분리·처리하고 있는 국내 사례를 적용하면, 국내 생활폐기물 저위발열량은 2021년 기준 4,025 kcal/kg으로서 경제성 평가 결과 내부수익률(IRR) 22.04%와 자기자본투자수익률(ROE) 22.58%로 산출되었으며, 가중평균자본비용(8.33%)을 고려할 때 전력 판매가 인센티브가 현재 0.65 위안/kWh의 약 41% 수준인 0.26 위안/kWh까지 낮아지더라도 경제성이 확보되는 것을 확인할 수 있었다.

이처럼 정부의 재정적·정책적 지원에만 의존하지 않고 WTE 자체의 경제성 확보에 있어 가장 중요한 변수는 폐기물 저위 발열량이다. 다만 개발도상국과 신흥국의 경우 높은 수분함량으로 인해 선진국 국가들에 비해 폐기물 저위발열량이 낮으므로(GIZ, 2017; World Bank, 2018), 해당 국가들의 WTE 경제성 확보를 위해서는 폐기물 내 수분함량을 저감시키고 궁극적으로 WTE 플랜트 반입 폐기물의 저위발열량을 증가시키는 것이 필수적이다. 일반적으로 폐기물 내 수분함량을 저감시키는 방법으로는 기계적 탈수, 열풍 건조, 건조·선별 등의 방법이 있으나, 과도한 에너지 사용 등의 이유로 선진국에서는 폐기물의 기계적·생물학적 처리(Mechanical biological treatment, MBT) 방법이 선호되고 있다. MBT는 기계적 선별과 생물학적 처리를

통해 폐기물 내 수분함량을 저감하고 에너지 밀도를 높임으로써 WTE를 통한 에너지 회수에 최적화된 기술이다. Chusak and Pisit(2017)은 MBT를 통해 수분함량은 30% 미만으로 저감되고 저위발열량은 5,000 kcal/kg 이상으로 증가하는 것으로 설명하고 있으며, Bernhard et al.(2005)는 MBT를 통해 저위발열량이 약 16,600 kJ/kg (3,968 kcal/kg)까지 증가하는 것으로 설명하고 있다. 이는 2021년 국내 생활폐기물 저위발열량(4,025 kcal/kg)과 유사한 수준으로 MBT를 전처리 방안으로 적용하는 경우 정부의 재정적·정책적 지원에만 의존하는 것이 아닌, WTE 자체의 경제성 확보가 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

수분함량이 높고 발열량이 낮은 개발도상국과 신흥국의 생활폐기물 소각 처리시 경제적 효율성을 산동성 랴오청시 치평현의 스토커 방식 600 톤/일 규모 소각발전 운영 사례를 통해 반입 생활폐기물 저위발열량, 전력 판매가 인센티브, 법인세 감면 등 다양한 요소를 변수로 평가하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 중국 치평현 생활폐기물 저위발열량은 폐기물 성상분석 결과 1,480 kcal/kg으로 확인되었으며 전력 판매

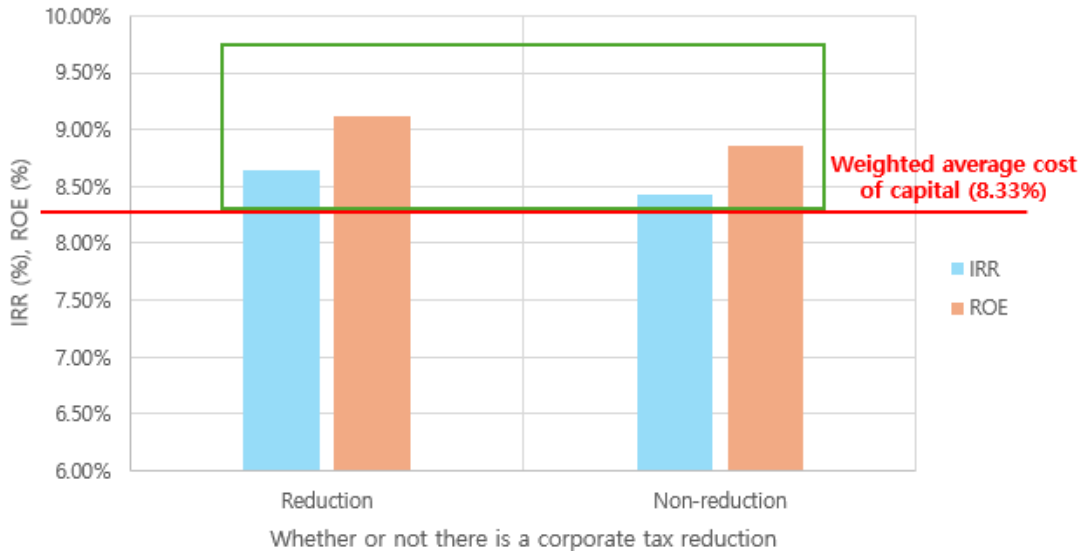


Fig. 5. Effect of on IRR and ROE depending on whether or not there is corporate tax reduction.

- 가 인센티브 0.65 위안/kWh, 폐기물 반입 수수료 93.7 위안/톤 적용시 내부수익률(IRR) 6.61%, 자기 자본투자수익률(ROE) 6.50%로 나타났다. 이는 중국 환경기업의 가중평균자본비용(8.33%)과 비교할 때 경제성 확보가 용이하지 않음을 확인할 수 있었다.
- 소각로 반입 폐기물 저위발열량 변화에 따른 민감도 분석 결과, 저위발열량이 1,800 kcal/kg 이상인 경우 내부수익률(IRR) 8.65%, 자기자본투자수익률(ROE) 9.12%로서 가중평균자본비용(8.33%)과 비교했을 때 사업성이 비교적 좋은 것으로 나타났다. 이는 독일 경제협력개발부에서 WTE 기술기준(GIZ, 2017)으로 권고하고 있는 소각 처리시 반입 폐기물의 최소 저위발열량 조건인 7~8 MJ/kg(평균 1,793 kcal/kg)과 유사한 수준을 나타냈다.
 - 전력 판매가 인센티브를 현재 0.65 위안/kWh에서 4%만 감소시켜도 내부수익률(IRR)은 기존 8.65%에서 8.23%로 낮아졌으며, 66%가 감소된 경우에는 내부수익률(IRR)이 마이너스(-)로 손실 구간으로 전환되었다. 이를 통해 저위발열량 1,800 kcal/kg 수준에서도 정부의 재정적·정책적 지원이 없이는 수분함량이 높은 음식물류 혼합 폐기물을 단순히 소각 방식으로만 처리하는 경우 경제성 확보가 어려운 것을 알 수 있었다.
 - 반대로 전력 판매가 인센티브가 0.65 위안/kWh의 약 50% 수준으로 낮아지는 경우 폐기물 저위발열량이 3,400 kcal/kg 이상이 되어야만 내부수익률(IRR)이 8.55%로서 경제성 확보가 가능할 것으로 나타났으며, 이는 국내 생활폐기물 저위발열량인 4,025 kcal/kg (KOSIS, 2021)을 고려할 때 음식물류 등이 선별·분리된 폐기물의 저위발열량과 유사한 수준으로 판단된다.
 - 법인세 감면의 경우 전력 판매가 인센티브와 달리, 감면 여부에 따라 내부수익률(IRR)이 기존 8.65%에서 8.43%로 다소 낮아지긴 하였으나 모두 가중평균자본비용(8.33%)을 상회하는 값으로서, 법인세 감면이 사업성에 미치는 영향은 크지 않음을 알 수 있었다.
 - 개발도상국과 신흥국의 WTE 적용에 있어 정부의 재정적·정책적 지원에만 의존하는 경우 지속가능 측면에서 한계가 명확한 바, 폐기물 저위발열량 증가가 확인된 MBT를 전처리 방안으로 적용한다면 WTE 시설 반입 폐기물의 저위발열량을 경제적으로 적정 수준인 3,400~4,000 kcal/kg 이상으로 높일 수 있을 것으로 판단된다(Bernhard et al., 2005; Chusak and Pisit, 2017).

REFERENCES

- Bernhard R., Werner B. M., Li R., Wang Q., 2005, Management of municipal solid waste in China: Mechanical biological treatment can be an option, International Symposium MBT 2005, 72-88.
- Chen, D., Christensen, T. H., 2010, Life-cycle assessment (EASEWASTE) of two municipal solid waste incineration technologies in China, Waste Manag. Res., 28, 508-519.
- Chusak, R., Pisit, M., 2017, The potential of bio-drying process in improving quality of the processed waste from the mechanical biological treatment for industrial heating systems, International Journal of Renewable Energy, 12(2), 53-63.
- Confederation of European Waste-to-Energy Plants (CEWEP), 2018, <https://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2018/07/Interactive-presentation-2018-New-slides.pdf>.
- Cudjoe, D., Acquah, P. M., 2021, Environmental impact analysis of municipal solid waste incineration in African countries, Chemosphere, 265, 129-186.
- CEIC, 2024, <https://www.ceicdata.com/en/china/gross-domestic-product-prefecture-level-city-per-capita/cn-gdp-per-capita-shandong-liaocheng>.
- China Bidding (China procurement and bidding network), 2024, <https://www.chinabidding.cn/zbxx/>.
- Dong, J., Chi, Y., Zou, D., Fu, C., Huang, Q., Ni, M., 2014, Comparison of municipal solid waste treatment technologies from a life cycle perspective in China, Waste Manag. Res., 32, 13-23.
- German Federal Environment Agency (UBA), 2015, The climate change mitigation potential of the waste sector, TEXTE 56/2015, IFEU Institut, Öko-Institut, Heidelberg, Germany.
- German Society for International Cooperation (GIZ), 2017, Waste-to-energy options in municipal solid waste management, Bonn, Germany.
- Guanyan Tianxia, 2023, China's domestic waste treatment industry development trend research and future investment analysis report, 2023-2030, Beijing, China.
- Hong, R., Wang, G., Guo, R., Cheng, X., Liu, Q., Zhang, P., Qian, G., 2006, Life cycle assessment of BMT-based integrated municipal solid waste management: Case study in Pudong China, Resour. Conserv. Recycl., 49, 129-146.
- Hoorweg, D., Bhada-Tata, P., 2012, What a waste: A Global review of solid waste management, urban development series, Knowledge Papers, No. 15, World Bank, Washington D.C., USA.
- International Monetary Fund (IMF), 2024, https://www.imf.org/external/datamapper/NGDP_DPC@WEO/OEMDC/ADVEC/WEOWORLD.
- Kim, S. J., Nam, K. S., Lee, J. S., Seo, S. S., Lee, K. H., Yoo, K. S., 2010, Evaluation of economic feasibility of power generation system using waste woody biomass in a CFBC plant, Korean Chemical Engineering Research, 48(1), 39-44.
- Khandelwal, H., Dhar, H., Thalla, A. K., Kumar, S., 2018, Application of life cycle assessment in municipal solid waste management: A Worldwide critical review, J. Clean. Prod., 209, 630-654.
- Korean Statistical Information Service (KOSIS), 2024, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=106&tblId=DT_106N_09_0100286&vw%20_cd=MT_ZTITL E&list_id=106_008_001_003&seqNo=&lang_mode=ko&language=kor&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=MT_ZTITL E.
- Mayer, F., Bhandari, R., Gäth, S., 2019, Critical review on life cycle assessment of conventional and innovative waste-to-energy technologies, Sci. Total Environ., 672, 708-721.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of China (MOHURD), 2001, Construction standards for municipal solid waste incineration projects, No. 2001-213, Beijing, China.
- National Development and Reform Commission of China (NDRC), 2012, Notice of the national development and reform commission on improving the pricing policy for waste incineration power generation, No. 2012-801, Beijing, China.
- National Bureau of Statistics of China (NBSC), 2016, <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2016/indexeh.htm>.
- National Development and Reform Commission of China (NDRC), 2021, The 14th five-year plan for bioeconomic development, No. 2021-1850, Beijing, China.
- National Development and Reform Commission of China (NDRC), Ministry of Housing and Urban-Rural Development of China (MOHURD), 2022, Guiding opinions on strengthening the construction of domestic waste incineration treatment facilities at the county level, No. 2022-1746, Beijing, China.
- National Bureau of Statistics of China (NBSC), 2022, <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2022/indexeh.htm>.
- National Bureau of Statistics of China (NBSC), 2023, <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zb=A040J&sj=2023>.
- National Interbank Funding Center China (NIFC), 2024, <https://iftp.chinamoney.com.cn/english/>.
- Potravný, I. M., Baah, D., 2021, Energy management of

- municipal solid waste in the context of low carbon development, *Manag. Sci.*, 11, 6-22.
- Vukovic, N., Makogon, E., 2022, Waste-to-energy generation: Complex efficiency analysis of modern technologies, *Sustainability*, 14(21), 13814.
- World Bank, 2018, https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html.
- Wuhan Energy Conservation Association (Wuhan ECA), 2024, <http://www.wuhaneca.org/article.asp?id=43510>.
- Yan, Mi., Wibowo, Haryo., Liu, Qike., Cai, Yi., Rahim, Dicka. Ar., Yanjun, Hu., 2020, Municipal solid waste management and treatment in China, *IGI Global*, Pennsylvania, USA, 86-114.
- Yu, Shitong., Dong, Huijuan., 2020, Uncover cost-benefit disparity of municipal solid waste incineration in Chinese provinces, *Sustainability*, 12, 697.
- Zhao, W., Van Der Voet, E., Zhang, Y., Huppes, G., 2009, Life cycle assessment of municipal solid waste management with regard to greenhouse gas emissions: Case study of Tianjin China, *Sci. Total Environ.*, 407, 1517-1526.
-

- Graduate student. Hong-Yeol Kim
Department of Environmental Engineering,
Kwangwoon University
benkhy@naver.com
- Professor. Kyung-Seun Yoo
Department of Environmental Engineering,
Kwangwoon University
yooks@kw.ac.kr