

2006 IPCC 가이드라인 적용에 따른 폐기물 매립 부문의 온실가스 배출량 산정 및 변화 요인 분석

김란희^a, 박진규^b, 송상훈^a, 박옥윤^c, 이남훈^{dt}

Estimation of greenhouse gas emissions from the landfill sector with the application of the 2006 IPCC guidelines and the change factors analysis

Ran-Hui Kim^a, Jin-Kyu Park^b, Sang-Hoon Song^a, Ok-Yun Park^c, Nam-Hoon Lee^{dt}

(Received: Mar. 2, 2020 / Revised: Mar. 11, 2020 / Accepted: Mar. 11, 2020)

ABSTRACT: Following the Paris Agreement adopted at the end of 2015, global stock-taking has been planned to be carried out on a 5-year basis from 2023, and it is mandatory to report on national GHG inventory and progress toward achieving greenhouse gas reduction targets. To prepare for this, it is important to improve the reliability of estimation of the greenhouse gas emission, identify the characteristics of each greenhouse gas emission source, and manage the amount of emissions. As such, this study compared and analyzed the amount of emissions from the landfill sector using the 2000 GPG, the 2006 IPCC Guidelines, and the 2019 Refinement estimation method. As a result, in comparison to 2016, there were 2,287 Gg CO₂_eq. in scenario 1, 1,870 Gg CO₂_eq. in scenario 2-1, 10,886 Gg CO₂_eq. in scenario 2-2, 10,629 Gg CO₂_eq. in scenario 2-3, and 12,468 Gg CO₂_eq. in scenario 3. Thus, when the 2006 IPCC Guidelines were applied with respect to 2000 GPG, it was revealed that greenhouse gas emissions have increased. Such difference in the emission changes was due to the changes in the calculation method and the emission factor values applied. Therefore, it is urgent to develop national-specific values of the emission factor based on characteristics of greenhouse gas emission in Korea.

Keywords: Greenhouse gas, GHG Inventory, 2000 GPG, 2006 IPCC guidelines, Landfill

초록: 2015년 말 채택된 파리협정으로 2023년부터 5년 단위로 국제이행점검(Global stock-taking)이 진행될 예정이며, 국가 온실가스 인벤토리와 온실가스 감축 목표 달성 경과 등을 의무적으로 보고해야 한다. 이에 대비하여 온실가스 배출량 산정의 신뢰도를 향상시키고, 온실가스 배출원별 특성 파악과 배출량 관리가 중요한 시점이다. 이에 본 연구에서는 폐기물 매립 부문을 대상으로 2000 GPG, 2006 IPCC 가이드라인 및 2019 Refinement 산정방법에 따라 온실가스 배출량을 비교·분석하였다. 그 결과, 2016년 기준 시나리오 1에서는 2,287 Gg CO₂_eq, 시나리오 2-1은 1,870 Gg CO₂_eq, 시나리오 2-2는 10,886 Gg CO₂_eq, 시나리오 2-3은 10,629 Gg CO₂_eq, 시나리오 3은 12,468 Gg CO₂_eq로 나타나 2000 GPG 대비 2006 IPCC 가이드라인 적용 시 온실가스 배출량이 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 배출량 변화의 차이는 산정방식의 변화와 적용되는 배출계수 값에 기인하였으며, 이에 우리나라 특성에 따른 배출계수의 국가고유값 개발이 시급한 것으로 나타났다.

주제어: 온실가스, GHG 인벤토리, 2000 GPG, 2006 IPCC 가이드라인, 매립지

^a 안양대학교 환경에너지공학과 박사과정(Ph. D. student, Department of Environmental and Energy Engineering, Anyang University, Korea)

^b (주)에코윌플러스 대표이사(Managing Director, Ecowillplus co, LTD.)

^c (재)한국건설생활환경시험연구원 산업융합센터 선임연구원(Senior researcher, Korea Conformity Laboratories)

^d 안양대학교 환경에너지공학과 교수(Professor, Department of Environmental and Energy Engineering, Anyang University, Korea)

† Corresponding author(e-mail: nhlee@anyang.ac.kr)

1. 서론

2015년 말에 프랑스 파리에서 개최된 제21차 유엔 기후변화협약 당사국총회(2015 United Nations Climate Change Conference(UNFCCC), COP21)에서는 195개 협약 당사국 모두 온실가스 감축과 적응 노력에 동참하는 파리협정(Paris Agreement)을 채택함에 따라 2020년에 만료되는 교토의정서를 대체하는 신기후체제의 도입이 확정되었다. 신기후체제에서는 지구 평균 온도 상승을 산업화 이전대비 2°C로 제한하며, 상승폭을 1.5°C 이하로 제한하기 위해 선진국과 개도국 모두 책임을 분담하여 감축에 동참하여야 한다¹⁾. 이를 위해 교토의정서에서의 하향식 의무 방식 보다는 당사국들이 자발적으로 감축목표(Nationally Determined Contribution, NDC)를 제시하는 상향식 방식으로 바뀌었으며, 감축목표에 대한 세부이행지침이 확정·채택되었다. 신기후체제에서는 2023년부터 매 5년마다 각국이 제출한 자발적 감축목표에 대하여 감축공약 및 기여, 감축의무이행이 계획대로 잘 이루어지고 있는지를 객관적으로 판단하고 확인하기 위해 산정·보고·지침 체계를 통해 평가하는 국제이행점검(Global stocktaking)이 진행될 예정이다. 이에 우리나라는 온실가스 감축량 검증을 위해서 2023년부터 의무적으로 국가 National Inventory Report(이하 'NIR')와 온실가스 감축 목표 달성 결과를 보고해야 한다²⁾. 따라서 정확한 온실가스 배출량 산정은 국가 NIR의 신뢰도를 높이고, 온실가스 감축계획 수립에 중요한 기초자료가 된다.

국가별 온실가스 배출량 산정의 신뢰성과 통일성을 확보하기 위하여 UNFCCC에서는 온실가스 배출량 산정방법에 관한 가이드라인을 제시해왔으며, 2015년

부터 ANNEX I 국가들은 온실가스 배출량 산정을 위해 2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories (이하 '2006 IPCC 가이드라인'이라 한다)을 의무적으로 적용하도록 하였고, 개도국들에게도 2006 IPCC 가이드라인을 권고하고 있다. 이에 국가 NIR을 제출하고 있는 Annex I의 해당 국가들은 모두 2006 IPCC 가이드라인을 기반으로 온실가스 배출량을 산정하고 있다³⁾. 이러한 흐름에 따라 우리나라에서도 2006 IPCC 가이드라인을 적용하여 온실가스 배출량을 산정하여야 하나, 폐기물 매립 부문의 경우 현재까지 2000 Good Practice Guidance (이하 '2000 GPG'라 한다)를 기반으로 온실가스 배출량을 산정하고 있으며, 2016년 기준 매립 부문 배출량이 7,600 Gg CO₂-eq로 폐기물 분야에서 46%를 차지하고 있다(Table 1 참조)⁴⁾. 더욱이 2006 IPCC 가이드라인의 업데이트 버전인 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories⁵⁾ (이하 '2019 Refinement'라 한다)가 나와 산정방법은 동일하나 적용되는 1차 반응식의 배출계수 값에 대해 2006 IPCC 가이드라인과 다른 기본 값을 제시하고 있어 우리나라에서의 2006 IPCC 가이드라인 적용은 매우 시급한 실정이다.

이에 본 연구에서는 국가 온실가스 배출량 산정에 적용되는 활동자료(매립량)를 기반으로 2000 GPG, 2006 IPCC 가이드라인, 2019 Refinement 적용에 따른 폐기물 매립부문의 온실가스 배출량의 차이를 산정하고자 하였으며, 이를 기반으로 산정 방법별 다른 배출량 변화요인을 분석하여 개발이 필요한 배출계수 도출 등 향후 국내 폐기물 부문의 온실가스 배출량의 산정에 관한 정확도 및 신뢰도 향상에 기여하고자 하였다.

Table 1. Status of the IPCC Guidelines Application for NIR in Annex 1 Countries and Korea

Country	GPG 2000	2006 IPCC guideline
ANNEX I countries (Australia, Austria, Belgium, Bulgaria, Canada, Croatia, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Japan, Latvia, Liechtenstein, Lithuania, Luxembourg, Norway, Netherlands, New Zealand, Malta, Poland, Portugal, Romania, Sweden, Switzerland, Slovakia, Turkey, Ukraine, UK, USA)		○
Korea(non-Annex I country)		○

2. 폐기물 매립 부문 온실가스 배출량 산정방식 변화

폐기물 매립 부문에 있어서 2000 GPG와 2006 IPCC 가이드라인 산정방법의 차이는 온실가스 배출량 산정식의 변화와 산정식에 적용되는 활동자료 및 배출계수의 세분화로 인한 것이다. 2000 GPG에서의 온실가스 배출량 산정방법은 물질수지 방법과 1차 반응모델(First Order Decay (FOD) Method, 이하 ‘FOD 방법’) 중 하나를 각 나라의 상황에 따라 결정할 수 있지만, CH₄의 배출 경향을 좀 더 정확히 반영하는 FOD 방법의 사용을 권장하였다⁶⁾. 2000 GPG에서는 매립 부문의 배출량 산정방법을 식 (1)과 식 (2)와 같이 제시하였으며, 활동자료의 대상은 폐기물 매립량이다. 배출계수는 폐기물 성상별 구분 없이 적용하도록 하고 있다⁷⁾.

$$E = \sum_x [(A \times k \times MSW(x) \times L_0(x) \times e^{-k(t-x)} - R] \times (1 - OX) \quad (1)$$

여기서,

- E : 어느 특정년도에서의 CH₄ 배출량(ton/yr)
- t : CH₄ 발생량을 산정하는 해당년도(yr)
- x : CH₄ 발생과 관련된 폐기물 매립년도(yr)
- $A = (\frac{1 - e^{-k}}{k})$: 합계를 보정해주는 정규화 계수(-)
- k : CH₄ 발생속도상수(day⁻¹)
- MSW(x) : x년에 매립되는 고형폐기물 총량(ton/yr)
- R : CH₄ 회수량(Gg/yr)
- OX : CH₄ 산화율(-)

$$L_0 = MCF \times DOC \times DOC_F \times F \times \frac{16}{12} \quad (2)$$

여기서,

- L₀ : CH₄ 잠재발생량(ton-CH₄/Mg-MSW)
- MCF : CH₄ 보정계수(Methane Correction Factor)
- DOC : 생화학적 분해 가능한 유기탄소 함량 (Gg-C/Gg-waste)
- DOC_F : 혐기성 조건에서 분해 가능한 폐기물 내 유기탄소 비율(-)
- F : 매립가스 중 CH₄ 성분비(-)

2006 IPCC 가이드라인에서의 산정식은 물질수지 방법을 제외하고 FOD 방법만을 적용하도록 하였으며, 2000 GPG와는 다른 식(3)~식(7)에 따라 온실가스 배출량을 산정하도록 하고 있다. 또한 매립 후 CH₄ 발생에 소요되는 지체기를 고려해 폐기물이 매립되는 당해 연도에는 CH₄ 배출량이 발생하지 않는 것으로 가정하여 배출량이 과대 산정되는 것을 방지하였다^{8,9)}. 이외에도 2006 IPCC 가이드라인에서는 성상별로 구분된 폐기물 매립량과 성상별 배출계수를 적용하도록 하고 있어 단일 폐기물 성상으로 매립량과 배출계수를 적용하도록 하는 2000 GPG와 다른 특성을 나타내고 있다¹⁰⁾.

$$E = [\sum CH_{4,x,T} - R_T] \times (1 - OX_T) \quad (3)$$

$$DDOC_m = W \times DOC \times DOC_f \times MCF \quad (4)$$

$$DDOC_{maT} = DDOC_{mdT} + (DDOC_{maT-1} \times e^{-k}) \quad (5)$$

$$DDOC_{m,decompT} = DDOC_{maT-1} \times (1 - e^{-k}) \quad (6)$$

$$CH_{4,x,T} = DDOC_{m,decompT} \times F \times 16/12 \quad (7)$$

여기서,

- E : T년도에 배출된 CH₄ (Gg)
- CH_{4,x,T} : CH₄ 발생량 (Gg)
- T : CH₄ 발생량을 산정하는 해당년도(인벤토리 연도) (yr)
- x : 폐기물 카테고리나 성상/물질(-)
- R_T : T년도에 회수된 CH₄ (Gg)
- OX_T : T년도의 산화율(-)
- DDOC_m : 혐기적으로 분해 가능한 매립된 DOC의 총량(Gg)
- DDOC_{maT} : T연도까지 SWDS에 축적된 DDOC_m (Gg)
- DDOC_{maT-1} : (T-1)연도까지 SWDS에 축적된 DDOC_m (Gg)
- DDOC_{mdT} : T연도까지 SWDS에 축적된 DDOC_m (Gg)
- DDOC_{m,decompT} : T연도에 SWDS에서 혐기적으로 분해된 DDOC_m (Gg)
- W : 매립된 폐기물의 총량 (Gg)
- MCF : CH₄ 보정계수(Methane Correction Factor)
- DOC : 생화학적 분해 가능한 유기탄소 함량 (Gg-C/Gg-waste)

DOC_f : 혐기성 조건에서 분해 가능한 폐기물 내 유기탄소 비율(-)

F : 매립가스 중 CH_4 성분비(-)

2019 Refinement는 2006 IPCC 가이드라인과 산정 방법은 동일하나 Table 2와 같이 DOC_f 와 MCF값을 세분화하여 제시하고 있다. 2006 IPCC 가이드라인의 DOC_f 는 일괄적으로 0.5를 적용하지만 2019 Refinement에서는 폐기물의 분해에 리그닌이 미치는 영향을 반영하여 목재류 및 나무잔재물은 0.1, 종이, 섬유, 기저귀류는 0.5, 음식물, 정원, 공원폐기물(나무잔재물 제외)은 0.7, 전체 폐기물은 0.5로 DOC_f 값을 제시하였다⁵⁾. 또한 2019 Refinement에서는 호기성 공법의 MCF를 제시하고 있다. 이는 최근 독일, 이탈리아 등의 국가에서 폐기물매립지의 온실가스 감축방안

으로 저압 호기성 공법을 개발 및 적용하고 있기 때문이다. 특히 독일은 국가 기후변화 전략 중 저압 호기성 공법을 온실가스 감축의 주요 수단 중 하나로 선정하여 해당 기술에 대한 보조금을 지원함으로써 지자체 폐기물매립지에서의 온실가스 감축수단으로 활용될 수 있게 유도하고 있다¹¹⁾. 이러한 동향을 반영하여 2019 Refinement에서는 매립지 내부에 호기성 공법을 적용하면 온실가스의 60%는 감축된다고 가정하여 MCF 0.4를 제시하였으며, 매립지 내부의 침출수 집배수가 안되어 공기주입이 제대로 안되거나 고압의 공기주입으로 미생물의 활동에 필요한 수분이 부족할 경우에는 MCF 0.7을 적용하도록 제시하였다.

따라서 아직 2000 GPG를 적용하고 있는 국내 폐기물 매립 부문의 경우 온실가스 배출량 산정의 정확

Table 2. Defaults Values of Emission Factors by Each Guideline

Reference	Waste type	DOC (Gg C/Gg waste)	DOC_f (-)	k (day ⁻¹)	MCF (-)	F (-)	OX (-)	
GPG 2000	All waste	0.09	0.5	0.05	Managed anaerobic	0.5	0.1	
					Managed semi-aerobic			1.0
					Unmanaged deep (>5m waste)			0.8
					Unmanaged shallow (<5m waste)			0.4
					Uncategorized landfill			0.6
2006 IPCC guideline	Food	0.15	0.5	0.06	Managed anaerobic	0.5	0.1	
	Garden	0.20		0.05	Managed semi aerobic			0.5
	Paper	0.40		0.04	Unmanaged deep (>5m waste)			0.8
	Wood	0.43		0.02				
	Textiles/Nappies	0.24		0.04				
	Rubber/leather	0.39		0.02	Unmanaged shallow (<5m waste)			0.4
	Sludge	0.05		0.06				
	MSW	0.00		0.05	Uncategorised landfill			0.6
	Industrial	0.15		0.05				
2019 Refinement	Food	0.15	0.5	0.06		Managed anaerobic	0.5	
	Garden	0.20		0.05	Managed well semi-aerobic	0.5		
	Paper	0.40		0.04	Managed poorly semi-aerobic	0.7		
	Wood	0.43		0.02	Managed well active-aeration	0.4		
	Textiles	0.24		0.04	Managed poorly active-aeration	0.7		
	Nappies	0.24		0.04	Unmanaged deep (>5m waste)	0.8		
	Sludge	0.05		0.06				Unmanaged shallow (<5m waste)
	MSW	0.00		0.05	Uncategorized landfill	0.6		
	Industrial	0.15		0.05				

성과 신뢰성이 Annex I 국가들과 비교하여 낮을 것으로 사료되며, 이에 국가 NIR의 신뢰도를 향상시키기 위해서는 2006 IPCC 가이드라인과 2019 Refinement의 빠른 적용이 이루어져야 할 것이다.

3. 연구방법

폐기물 매립부문의 온실가스 배출량 산정 시 적용되는 산정식과 배출계수 기본값은 IPCC 가이드라인의 변화에 따라 달라져 왔다. 이에 온실가스 배출량의 차이 및 배출량 변화요인을 분석하기 위해 Table 3과 같이 시나리오별로 구분하여 온실가스 배출량을 산정하였다. 시나리오 구분은 산정식과 배출계수 적용에 따라 구분하였으며, 산정식의 경우 시나리오 1은 2000 GPG 산정식을 적용하였으며, 이외의 시나리오들은 2006 IPCC 가이드라인의 산정식을 적용하였다. 세부적인 시나리오 내용을 살펴보면 2000 GPG와 2006 IPCC 가이드라인의 산정식 변화에 따른 차이를 알아보기 위해 2000 GPG 산정방법을 적용한 시나리오 1과 2006 IPCC 가이드라인 산정방법을 적용한 시나리오 2-1로 구분하였으며, 배출계수는 2000 GPG의 기본값을 적용하였다. 다음으로 IPCC 가이드라인의 배출계수 변화에 따른 차이를 알아보기 위해 2006 IPCC 가이드라인 및 2019 Refinement의 배출계수 기본값을 각각 적용한 시나리오 2-2와 시나리오 2-3으로 구분하여 산정하였다. 마지막으로 향후 2006 IPCC 가이드라인 적용에 대비해 우리나라 국가고유값을 적용하였을 때를 시나리오 3으로 하였다. 이는 IPCC 가이드라인에서 기본값보다 배출계수들에 국가고유값을 적용하는 것을 권장하기 때문이다. 우리나라의 현재 배출계수 개발현황은 「전국 폐기물 발생 및 처리현황」에서 나타나고 있는 폐기물 성상분류를 기준으로 2006 IPCC 가이드라인보다 세분화된 폐기물 성상별 DOC에 대한 국가고유값이 개발되어 있고, DOC는 음식물, 종이류, 목재류에 대해 각각 0.6343, 0.6256, 0.4446의 국가고유값이 개발되어 있다⁴⁾.

폐기물매립지 온실가스 배출량 산정에 적용되는 값들은 상기의 배출계수 이외에도 활동자료와 지구

온난화지수(Global Warming Potential, 이하 'GWP 지수'라 한다)가 있으며, 이는 일괄적으로 동일한 값을 적용하였다. 활동자료는 우리나라의 현재 온실가스 배출량 산정 시 적용되는 「전국폐기물 발생 및 처리현황」과 「지정폐기물 발생 및 처리현황」에 따른 고품폐기물의 매립성상과 매립량을 기반으로 하였다. GWP 지수는 이산화탄소가 지구온난화에 미치는 영향을 기준으로 각각의 온실가스가 지구온난화에 기여하는 정도를 수치로 표현한 것으로 온실가스는 종류에 따라 대기 잔류 기간 동안 방열 수준이 서로 다르므로, 배출량의 수준 파악 및 상호 비교를 위해서 GWP 지수를 사용하여 계산한 CO₂ 환산톤(CO₂eq., carbon dioxide equivalent)으로 국가 총배출량을 산정한다¹¹⁾. 현재 우리나라 온실가스 인벤토리에서는 IPCC 제2차 평가보고서에서 제공하는 GWP 지수 21을 사용하나, 2006 IPCC 가이드라인을 바탕으로 NIR을 보고하는 ANNEX I 국가들은 2007년 IPCC 제4차 평가보고서(Fourth Assessment Report, 이하 'AR4')에서 나타낸 CH₄의 GWP 지수 25를 적용하고 있으므로 모든 시나리오에 25를 적용하였다¹²⁾.

4. 결과 및 고찰

4.1. 시나리오별 폐기물 매립 부문 온실가스 배출량

Table 4와 Fig. 1은 2016년 기준으로 과거 20년 동안의 매립부문 온실가스 배출량을 각 시나리오별로 산정한 결과이다. 2000 GPG 산정방법을 적용한 시나리오 1과 2006 IPCC 가이드라인 산정방법을 적용하였으나 2000 GPG 배출계수를 적용한 시나리오 2-1의 경우 온실가스 배출량은 차이가 있으나 온실가스 배출특성은 유사한 경향을 나타내었다. 반면에 폐기물 성상별로 2006 IPCC 가이드라인의 배출계수 기본값을 적용한 시나리오 2-2의 경우 시나리오 2-1과 전혀 다른 배출특성을 나타내었다. 따라서 가이드라인의 온실가스 배출량 산정에 있어 영향을 미치는 것은 산정방식보다 배출계수의 적용방식이 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Table 3. Emission Factor Values for Each Scenario

Applied method	Scenario 1	Scenario 2-1	Scenario 2-2	Scenario 2-3	Scenario 3			
	2000 GPG default value	2006 IPCC default value	2006 IPCC default value	2019 Refinement default value	Country-specific value			
DOC (Gg C/Gg waste)	Food			0.15	0.15	0.1319		
	Paper			0.4	0.4	0.3349		
	Wood			0.43	0.43	0.3685		
	Rubber and leathers			0.39	0.39	0.4625		
	Others(Combustible)			0.5	0.5	0.2850		
	Clothes			0.24	0.24	0.3415		
	Industrial sludge	0.09	0.09	0.05	0.05	0.1845		
	Domestic sludge			0.05	0.05	0.1036		
	Animal and vegetable residues			0.5	0.5	0.2272		
	Cooking oil waste			0.5	0.5	0.7196		
	Boards			0.04	0.04	0.01		
	Panel			0.04	0.04	0.01		
	Construction waste			0.04	0.04	0.01		
	Hazardous waste					0	0	0.15
Food						0.7	0.6343	
Paper						0.5	0.6256	
Wood						0.1	0.4446	
Rubber and leathers								
Others(Combustible)								
Clothes								
Industrial sludge	0.5	0.5	0.5					
Domestic sludge								
Animal and vegetable residues					0.5	0.5		
Cooking oil waste								
Boards								
Panel								
Construction waste								
Hazardous waste								
Food						0.06	0.06	
Paper						0.04	0.04	
Wood						0.02	0.02	
Rubber and leathers						0.02	0.02	
Others(Combustible)						0.05	0.05	
Clothes						0.04	0.04	
Industrial sludge	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05			
Domestic sludge			0.06	0.06				
Animal and vegetable residues			0.05	0.05				
Cooking oil waste			0.06	0.06				
Boards			0.05	0.05				
Panel			0.05	0.05				
Construction waste			0.05	0.05				
Hazardous waste			0.05	0.05				
F(-)			0.5	0.5		0.5	0.5	0.5629
MCF(-)						1.0		
OX(-)						0.1		
GWP 지수(-)						25		

Table 4. Comparison of GHG Emissions According to Each Scenario

Unit : Gg CO₂_eq

Year	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Scenario 1	4,738	4,115	4,178	3,839	3,676	3,649	3,819	3,375	3,452	4,483
Scenario 2-1	5,697	4,610	4,551	4,526	4,934	4,771	4,798	3,524	3,446	3,273
Scenario 2-2	16,646	15,797	15,848	15,952	16,389	16,200	16,209	14,908	14,755	14,393
Scenario 2-3	17,219	16,333	16,340	16,391	16,779	16,542	16,509	15,170	14,978	14,548
Scenario 3	20,251	19,597	19,753	19,834	20,223	19,959	19,885	18,485	18,220	17,656
Year	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Scenario 1	3,441	2,938	2,279	2,089	2,241	2,654	2,262	2,251	2,865	2,287
Scenario 2-1	2,479	2,343	2,388	2,172	1,975	1,525	1,431	1,585	2,025	1,870
Scenario 2-2	13,393	13,076	12,929	12,551	12,162	11,500	11,167	11,096	11,274	10,886
Scenario 2-3	13,485	13,112	12,918	12,497	12,067	11,367	10,998	10,893	11,043	10,629
Scenario 3	16,458	15,987	15,661	15,065	14,466	13,624	13,134	12,912	12,973	12,468

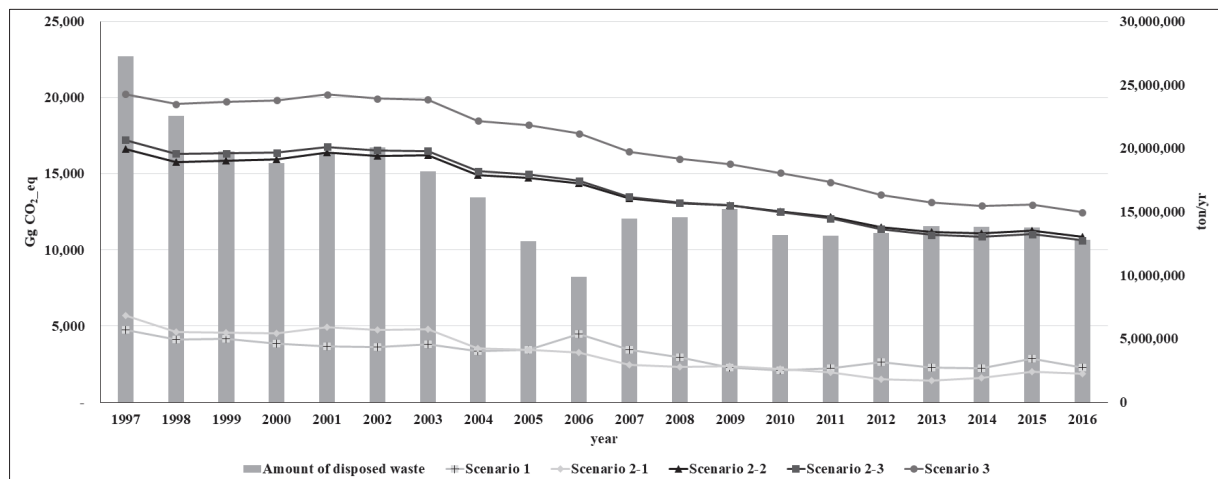


Fig. 1. Variation of GHG emissions by each scenario in 1997-2016.

시나리오별로 배출량의 차이를 알아보기 위해 Fig 2에 2016년 기준 최근 20년간 산정된 온실가스 총 배출량을 나타내었다. 시나리오 1의 총 배출량은 64,632 Gg CO₂_eq, 시나리오 2-1은 63,992 Gg CO₂_eq로 시나리오 1 대비 710 Gg CO₂_eq만큼 더 낮게 산정되었다. 이러한 배출량의 차이는 동일한 배출계수를 적용하였기에 산정식의 차이에 의한 것이며, 이는 2000 GPG 산정식에 적용하는 정규화 계수에 의한 것으로 판단된다. 시나리오 2-2의 총 배출량은 277,133 Gg CO₂_eq, 시나리오 2-3의 총 배출량은 279,818 Gg CO₂_eq로 시나리오 2-1과 비교하였을 때 각각 213,211 Gg CO₂_eq와 215,896 Gg CO₂_eq

만큼 증가한 것으로 나타났다. 시나리오 2-1 대비 시나리오 2-2와 2-3의 배출량 증가 이유를 살펴보면 산정방법은 동일하나 슬러지, 건설폐기물(폐보드류, 폐판넬 포함)을 제외하고 DOC 배출계수 값이 증가하였기 때문이다. 시나리오 2-2와 시나리오 2-3의 온실가스 배출량 차이는 2,685 Gg CO₂_eq로 시나리오 2-2가 다소 낮게 나타났다. 이는 2019 Refinement 기본값을 적용한 시나리오 2-3의 경우 음식물류 및 목재류의 DOC_f 기본값을 각각 0.7과 0.1, k값의 기본값은 각각 0.06과 0.02로 적용하였으며, 일괄적으로 DOC_f 0.5와 k값 0.05를 적용한 시나리오 2-2와 비교 시 음식물류에서 유기탄소 비율에 증가로 온실가스

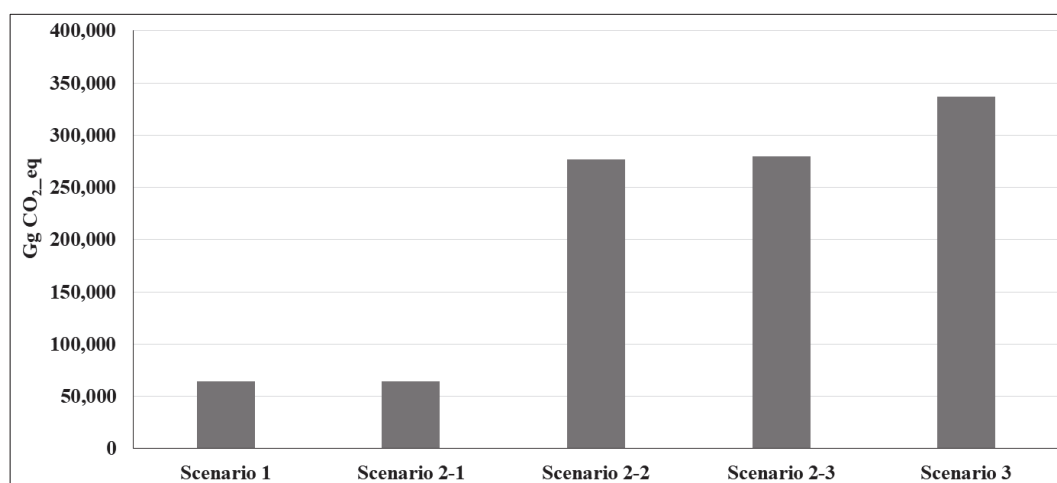


Fig. 2. Estimation of total GHG emissions by each scenario (1997-2016).

배출량이 약간 증가하였으나 목재류에서 크게 감소하여 나타난 차이로 보인다. 이는 목재의 온실가스 배출량이 과다평가 되고 있음을 시사한다. 시나리오 3은 2006 IPCC 가이드라인 산정방법에 국가고유값을 적용한 것으로 총 배출량은 336,611 Gg CO₂eq이며, 2000 GPG를 적용한 시나리오 1과 비교하였을 때 온실가스 배출량 271,979 Gg CO₂eq가 더 높게 나타나 향후 우리나라의 NIR에 2006 IPCC 가이드라인을 적용 시 폐기물 매립부문의 온실가스 배출량은 크게 증가할 것으로 나타났다. 또한 현재 우리나라의 NIR에서는 GWP 21을 적용하고 있기 때문에 본 연구에서 나타낸 온실가스 배출량 차이는 더욱 크게 나타날 것이다. 따라서 향후 우리나라에 2006 IPCC 가이드라인을 적용 시 폐기물 매립 부문의 온실가스 배출량 증가에 따라 매립부문에 대한 국가 온실가스 감축계획 및 감축량을 재정립해야 할 것으로 사료된다.

4.2. 시나리오별 온실가스 배출량 변화 요인

앞에서 설명한 바와 같이 시나리오별 배출량 차이는 IPCC 가이드라인별 산정방법의 차이보다 배출계수의 변화로 인한 차이가 크게 나타났다. 이에 시나리오별로 배출계수 적용 차이에 따른 온실가스 배출량의 변화를 자세히 살펴보기 위해 2006 IPCC 가이드라인으로 산정방법을 동일하게 적용한 시나리오 2-1, 2-2, 2-3 그리고 시나리오 3을 대상으로 시

나리오 2-1 대비 시나리오 2-2와 2-3 및 시나리오 3 적용에 따른 폐기물 성상별 L₀값 및 2016년 기준 최근 20년간 총 온실가스 배출량을 폐기물 성상별로 산정하여 Table 5에 나타내었다.

시나리오 2-1 대비 시나리오 2-2의 L₀값 변화를 살펴보면 가장 크게 증가한 것은 기타가연분, 동식물성폐잔재물, 폐식용유로 나타났으며, 다음으로 목재류, 종이류, 고무/피혁, 섬유류 등의 순으로 나타났다. 이러한 변화는 시나리오 2-1과 2-2 모두 DOC_f는 동일하게 0.5를 적용하였으므로 폐기물 성상별 DOC값의 변화로 인한 것이다. 시나리오 2-2에서 폐기물 성상별 총 온실가스 배출량은 종이류, 기타가연분, 음식물류, 목재류 등의 순으로 나타났다.

시나리오 2-1 대비 시나리오 2-3의 L₀값 변화의 경우, 음식물류와 목재류를 제외하고는 시나리오 2-2의 L₀값 변화와 동일하게 나타났다. 이는 시나리오 2-2와 시나리오 2-3의 폐기물 성상별 DOC는 동일하나 시나리오 2-3에서 음식물과 목재류의 DOC_f를 각각 0.7과 0.1로 적용되었기 때문이다. DOC_f 0.7을 적용한 음식물의 경우, 시나리오 2-3에서의 온실가스 배출량은 DOC_f 0.5를 적용한 시나리오 2-2보다 866,973 ton-CH₄/yr 높게 나타났으며, DOC_f 0.1을 적용한 목재류의 경우는 1,001,490 ton-CH₄/yr 낮게 나타났다.

시나리오 2-1 대비 시나리오 3의 L₀값 변화에서 가장 크게 증가한 것은 폐식용유와 고무/피혁으로

Table 5. Comparison of L_0 Value According to Scenario

Type	L_0 (ton-CH ₄ /Mg-MSW)				Total GHG Emissions by each scenario [1997-2016] (ton-CH ₄ /yr)			
	Scenario	Scenario	Scenario	Scenario	Scenario	Scenario	Scenario	Scenario
	2-1	2-2	2-3	3	2-1	2-2	2-3	3
Food	0.030	0.050	0.070	0.063	1,435,441	2,503,724	3,505,214	3,004,510
Paper	0.030	0.133	0.133	0.157	1,265,377	5,115,857	5,115,857	6,632,550
Wood	0.030	0.143	0.029	0.123	367,542	1,083,716	216,743	1,506,477
Rubber and leathers	0.030	0.130	0.130	0.174	271,362	704,128	704,128	1,569,927
Others(Combustible)	0.030	0.167	0.167	0.107	734,167	4,078,703	4,078,703	2,617,328
Clothes	0.030	0.080	0.080	0.128	14,664	35,880	35,880	62,643
Industrial sludge	0.030	0.017	0.017	0.069	238,913	145,038	145,038	551,384
Domestic sludge	0.030	0.017	0.017	0.039	183,977	112,040	112,040	328,007
Animal and vegetable residues	0.030	0.167	0.167	0.085	27,501	152,782	152,782	78,158
Cooking oil waste	0.030	0.167	0.167	0.270	2,709	16,040	16,040	24,386
Boards/Panel	0.030	0.013	0.013	0.004	3,176	1,412	1,412	397
Construction waste	0.030	0.013	0.013	0.004	71,241	31,663	31,663	8,911
Hazardous waste	0.030	0.000	0.000	0.056	124,460	0	0	179,586

나타났으며, 다음으로 종이류, 섬유류, 목재류, 기타 가연분 등의 순으로 나타났다. 특히 음식물과 종이류의 경우 DOC_f 가 시나리오 2-1에서는 일괄적으로 0.5이었으나, 시나리오 3에서 적용된 국가고유값은 0.6343과 0.6256으로 0.5보다 증가하여 DOC 뿐만 아니라 DOC_f 도 온실가스 배출량 증가에 기여한 것으로 나타났다. 목재류의 경우에는 DOC_f 가 기존 0.5에서 0.4446으로 감소하였으나, DOC 가 0.09에서 0.3685로 크게 증가하였기 때문에 온실가스 배출량이 전체적으로 증가한 것으로 나타났다. 이와 반대로 폐보드류, 폐판넬, 혼합건설폐기물은 L_0 값이 감소한 것으로 나타났다. 이는 DOC 값이 0.09에서 0.01로 감소하여 L_0 값과 온실가스 배출량이 감소되었다.

산정된 L_0 값과 폐기물 발생량을 기반으로 시나리오 2-1부터 시나리오 3까지 온실가스 배출량의 시계열적 변화를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 결과를 살펴보면, 2006 IPCC 가이드라인의 기본값과 국가고유값 적용에 따른 온실가스 배출량 차이가 큰 것으로 나타나며, 배출량의 시계열적 변화추이도 폐기물 성장별로 다르게 나타난다. 시나리오 2-3에서 2019 Refinement의 DOC_f 0.7과 k 값 0.06을 적용한 음식물은 타 시나리오 대비 가장 많은 온실가스 배출량을 나타냈으며, DOC_f 0.1과 k 값 0.02를 적용한 목

재류는 가장 낮은 배출량을 나타냈다. 특히 시나리오 3에서 목재류의 국가고유값인 0.4446을 적용하였을 때 2019 Refinement보다 온실가스 배출량의 차이가 상당히 나타나 향후 목재류의 DOC_f 에 대한 국가고유값의 지속적인 개발이 필요한 것으로 사료된다. 이외에도 폐기물 성장별로 국가고유배출계수를 적용한 시나리오 3의 배출량은 건설혼합폐기물을 제외하고 2000 GPG 배출계수를 적용한 시나리오 2-1보다 높게 산정되었다. 이는 앞에서 나타낸 바와 같이 추후 2006 IPCC 가이드라인에 기반하여 산정되는 온실가스 배출량을 산정할 경우 폐기물 성장별로 배출계수의 국가고유값에 대한 고려가 필요한 것으로 사료된다.

4.3. 향후 우리나라 폐기물 매립부문 온실가스 배출량 정확도 향상을 위한 개선방안

2006 IPCC 가이드라인에서 제시하는 산정식에서 DDOC에 영향을 미치는 인자는 DOC , DOC_f , MCF이기에 이들 인자들에 대한 국가 고유값 개발이 필요하다. 고무/피혁 DOC 의 경우 우리나라 국가고유값은 0.4625 Gg-C/Gg-waste이나 이탈리아 DOC ⁽¹³⁾는 0.1486 Gg-C/Gg-waste, 에스토니아 DOC ⁽¹⁴⁾는 0.39 Gg-C/Gg-waste

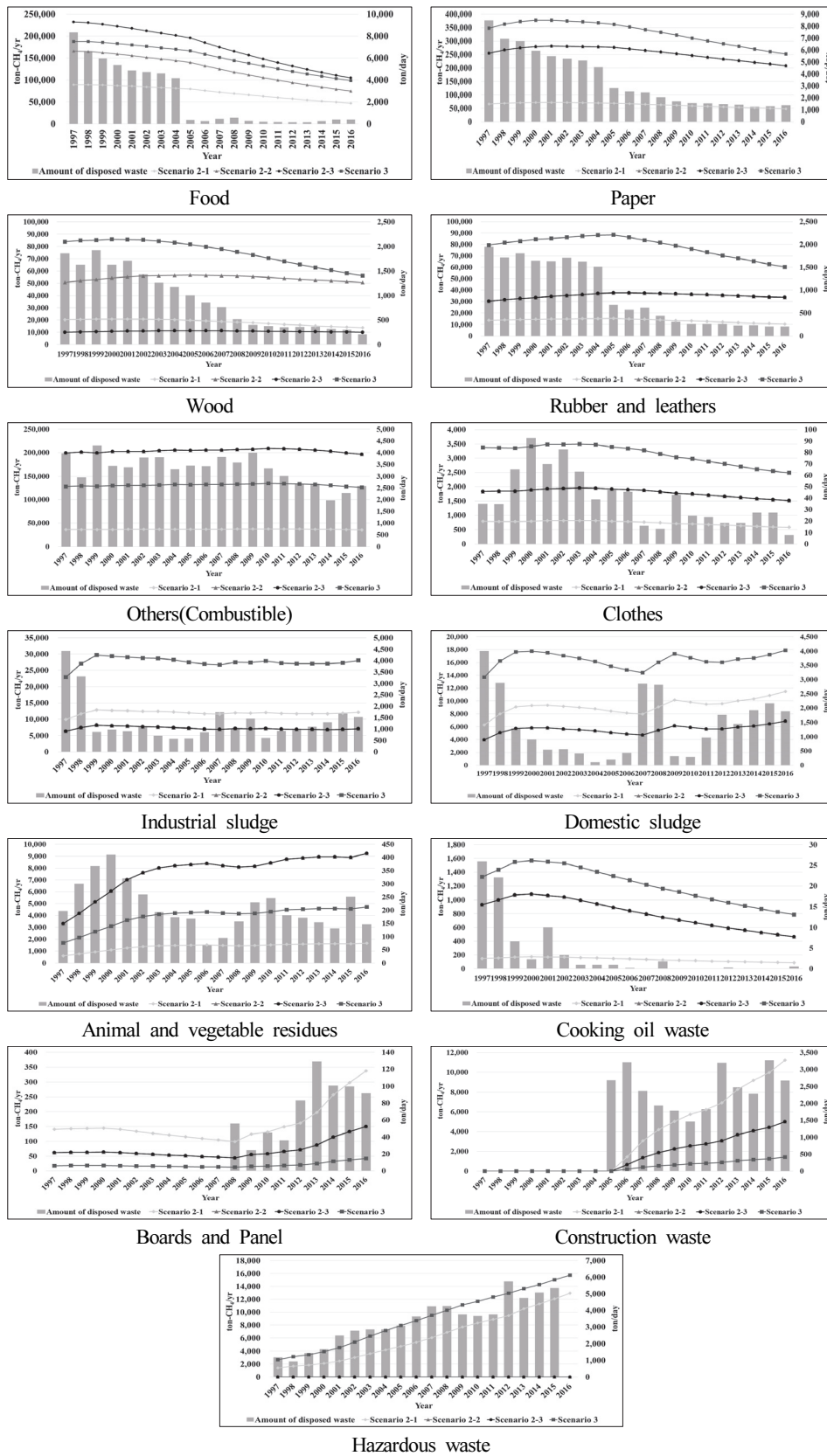


Fig. 3. Annual GHG emissions of each waste type by each scenario.

Table 6. DOC_f Values Calculated Through Laboratory Experiment for Each Type of Waste¹³⁾

Waste type	Initial total organic carbon (kg/dry kg)	Organic carbon remaining after decomposition (kg/dry kg)	DOC_f (A-B)/A
	A	B	
Newsprint	0.49	0.42	0.15
Office paper	0.40	0.05	0.88
Old corrugated containers	0.47	0.26	0.45
Coated paper	0.34	0.27	0.21
Branches	0.49	0.38	0.23
Grass	0.45	0.24	0.47
Leaves	0.42	0.30	0.28
Food	0.51	0.08	0.84

Table 7. DOC_f Values for Paper Type in Australia¹³⁾

Ppaer type	Composition (% of total paper in analysis)	Cellulose and hemicellulose (%)	DOC_f
Newspaper	4	54.6	0.15
Office paper	11	91.3	0.88
Cardboard	58	67.2	0.45
Coated paper	1	51.7	0.21
Other paper	25	72.0	0.49
Weighted average of above			0.49

로 타 국가와 비교하여 높을 뿐만 아니라 DOC_f 값은 2006 IPCC 가이드라인 기본값인 0.5를 그대로 적용하고 있어 고무/피혁의 분해특성을 고려하면 온실가스 배출량이 과대 산정될 것이기에 고무/피혁에 대한 DOC_f 값 개발이 시급한 실정이다. 목재류의 경우 DOC_f 값이 우리나라는 0.4446으로 되어 있으나 호주는 0.1로 매우 낮게 산정되어 있다¹⁵⁾. 폐기물 분해특성은 기후 및 매립조건에 따라 다를 수 있으나 국내·외에서 보고되고 있는 연구문헌^{16,17)}들과 비교 시 매우 큰 차이를 나타내고 있어 이에 대한 재검토가 필요할 것으로 판단된다.

DOC_f 개발방법에 관해서는 호주(Australia)의 사례를 참고할 수 있다. 호주는 Table 6과 같이 폐기물 성상별로 초기탄소와 혐기성 분해 후 잔존 탄소의 비율로 DOC_f 를 산정하였으며, 특히 종이의 경우 종류를 세분화 후 조성별 가중치를 적용하여 국가 고유값을 개발하였다(Table 7 참고). 국내의 경우 온실가스 배출량 산정을 위해 폐기물 성상을 Table 8에

서 보는 바와 같이 17가지로 구분하고 있으며, 이러한 폐기물의 종류는 2006 IPCC 가이드라인의 폐기물 성상 종류뿐만 아니라 본 논문에서 자료로 나타내지 않은 ANNEX I 국가들 중 핀란드를 제외하고 가장 세분화되어 있어 배출계수의 국가고유값 개발에 많은 노력이 필요한 실정이다. 또한, 이러한 폐기물 성상들에 대하여 DOC_f 에 대한 국가고유값은 개발되어 있으나, DOC_f 의 국가고유값은 음식물류, 종이류, 목재류를 제외하고는 개발되어 있지 않아 추가 개발이 필요하며, 기존에 개발된 국가고유값에 대해서도 지속적인 보완이 필요할 것으로 사료된다.

MCF는 매립지의 관리 상태를 반영하는 메탄보정계수로 공기 유입 여부에 의한 혐기성 분해비율을 반영한다. 매립된 폐기물은 모두 혐기성 조건에서만 분해되는 것이 아니라 매립지 운영 및 관리방법에 따라서 매립지 일부 또는 상당부분이 호기성 조건에서 분해될 수 있기 때문에 온실가스 배출량을 정확히 산출하기 위해서는 매립지의 관리 상태를 반

Table 8. Comparison of Waste Types for Estimating GHG Emissions in 2006 IPCC Guideline, Korea and Finland^{a,11),13)}

Country	Waste type
2006 IPCC	nine kinds of waste type (Food, Garden, Paper, Wood, Textiles, Nappies, Sludge, MSW, Industrial)
Korea	17 kinds of waste type (Food, Paper, Wood, Plastic, Rubber and leathers, Others(Combustible), Others(Non-combustible), Clothes, Industrial sludge, Domestic sludge, Animal and vegetable residues, Cooking oil waste, Boards, Panel, Construction waste, Medical waste, Hazardous waste)
	Solid municipal waste (Textiles, Food, Paper, Wood, Garden, Napkins, Mixed packaging, Other organic)
	Municipal sludge (from dry matter) (Handling plants, Septic tanks, Sand separation)
Finland	Industrial sludge (from dry matter) (Pulp and paper (mainly wastewater sludges), Other industry (mainly wastewater sludges), Deinking (pulp industry), Fibre and coating (paper industry))
	Solid industrial waste (Textile, Food, Paper, Wood, Garden, Deinking reject, Oil, Green liquor sludge, Mixed packaging and other organic (slowly), Other organic (moderately degrading))
	Construction and demolition waste (Asphalt and tar, Wood, Mixed, Paper (packaging), Textile (packaging), Other (packaging))

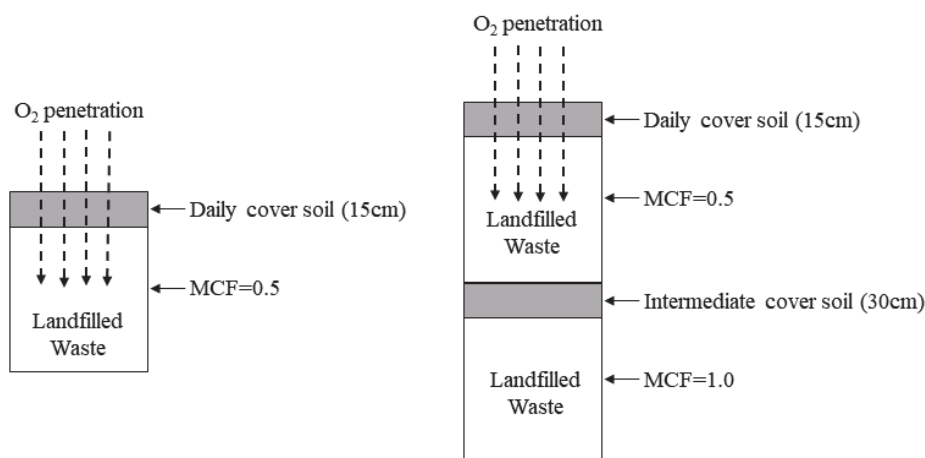


Fig. 4. Conceptual overview of MCF value at working face in anaerobic landfill.

영해야 한다. 우리나라 매립지의 경우 매립작업 종료 후 토사 등을 사용하여 15cm 이상의 두께로 일일 복토를 수행하여야 한다. 따라서 복토재를 통한 대기 중의 공기 유입이 이루어지기 때문에 작업구역은 완전한 혐기성 상태를 유지하기는 어렵다. 이에 따라 Fig. 4와 같이 혐기성 위생매립지의 경우 매립작업 중인 매립층의 경우 공기의 유입이 있으므로 MCF값을 2006 IPCC 가이드라인에서 제시한 1.0을 고정적으로 사용하는 것이 아니라 준호기성 위

생매립지의 MCF 값인 0.5의 값을 사용하다 추가적인 매립으로 기존의 매립층 위에 신규 매립층이 포설되는 경우 기존의 매립층 MCF값은 1.0으로 적용하는 것이 메탄 배출량의 과다 산정을 방지하고 보다 정확한 온실가스 배출량을 산정할 수 있을 것으로 판단된다. 이외에도 2019 Refinement에서는 폐기물매립지 호기성 공법에 대해 MCF 0.4를 제시하여 호기성 공법 적용 시 60%의 온실가스 감축을 인정해주고 있기에 향후 우리나라 폐기물매립지의 온실

가스 감축에 호기성 공법의 적용은 사후관리기간 단축과 더불어 매우 효율적일 것이다¹⁹⁾.

매탄발생속도상수(k)에 대한 폐기물 성상별 k값 개발도 필요하다. 일반적으로 음식물류 폐기물과 슬러지의 분해속도가 가장 빠르며^{20,21)}, 목재의 분해속도는 가장 느린 것으로 알려져 있다²²⁾. 그러나 우리나라에서는 단일 폐기물 성상에 대한 k값 0.05만 제시하고 있을 뿐 폐기물 성상별 k값 개발이 이루어지지 않아 향후 2006 IPCC 가이드라인 적용을 통한 온실가스 배출량 산정의 정확도와 신뢰도를 향상시키기 위해서는 폐기물 성상별 k값에 대한 개발이 필요할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 2000 GPG, 2006 IPCC 가이드라인, 2019 Refinement의 산정식 및 배출계수 변화를 살펴보고, 국가 온실가스 배출량 산정 시 사용되는 활동자료를 대상으로 가이드라인별로 산정방법 및 배출계수 변화를 시나리오별로 구분하여 온실가스 배출량을 산정 및 비교하였으며, 이를 기반으로 우리나라 폐기물 매립 부문 온실가스 배출량 산정도의 정확도 및 신뢰성을 향상시키기 위한 개선사항을 제시하였다.

1) 시나리오별 구분은 산정방법에 따른 차이를 알아보기 위해 2000 GPG의 배출계수 기본값을 동일하게 적용하고 2000 GPG 방법과 2006 IPCC 가이드라인 방법을 각각 적용한 시나리오 1과 시나리오 2-1로 구분하였으며, 배출계수에 따른 차이를 알아보기 위해 2006 IPCC 가이드라인 산정방법을 바탕으로 각각 2006 IPCC 가이드라인, 2019 Refinement, 국가고유의 배출계수 기본값을 적용한 시나리오 2-2, 2-3, 3으로 구분하여 산정하였다. 시나리오별 온실가스 배출량 산정 결과, 2016년 기준 최근 20년간 온실가스 총 배출량은 시나리오 3에서 336,611 Gg CO₂ eq, 시나리오 2-3은 279,818 Gg CO₂ eq, 시나리오 2-2는 277,133 Gg CO₂ eq, 시나리오 1은 64,632 Gg CO₂ eq, 시나리오 2-1은 63,922 Gg CO₂ eq 순

으로 나타났다.

- 2) 산정방법의 차이를 알아보기 위한 시나리오 1과 시나리오 2-1의 차이는 710 Gg CO₂ eq, 배출계수에 따른 차이를 알아보기 위한 시나리오 2-1과 시나리오 2-2, 2-3의 차이는 각각 213,211 Gg CO₂ eq, 215,896 Gg CO₂ eq로 배출계수에 따른 온실가스 배출량 차이가 더 큰 것으로 나타났다. 현재 국내 온실가스 산정방법인 2000 GPG를 적용한 시나리오 1 대비 국가고유값을 적용한 시나리오 3의 차이는 271,979 Gg CO₂ eq로 매우 크게 나타났다. 따라서 향후 우리나라에 2006 IPCC 가이드라인을 적용 시 폐기물 매립 부문의 온실가스 배출량은 증가할 것이며, 이에 따른 국가 온실가스 감축계획 및 감축량에 대한 재정립이 필요할 것으로 판단된다.
- 3) 시나리오별 L₀값과 폐기물 성상별 온실가스 배출량의 시계열적 변화를 살펴본 결과, 2006 IPCC 가이드라인의 기본값과 국가고유값 적용에 따른 온실가스 배출량 차이가 큰 것으로 나타났다으며, k값의 차이로 인해 폐기물 성상별 시계열적 변화추이도 다르게 나타났다. 특히 목재류의 경우 최근 20년간 총 온실가스 배출량이 시나리오 3은 1,506,477 ton-CH₄/yr, 시나리오 2-3은 216,743 ton-CH₄/yr로 1,289,734 ton-CH₄/yr 높게 나타나 향후 목재류의 DOC_f와 k값의 국가고유값에 대한 지속적인 개발이 필요한 것으로 판단된다.
- 4) 배출계수로 인한 온실가스 배출량 차이가 크게 나타나므로 향후 2006 IPCC 가이드라인의 적용을 통한 온실가스 배출량 산정의 정확도와 신뢰도를 높이기 위해 폐기물 성상별 DOC, DOC_f, MCF, k값 등의 국가고유값의 재검토 및 개발이 필요하다. 더불어, 폐기물 성상별로 DOC가 국가고유값으로 개발되어 있으나 고무/피혁의 경우 타 국가와 비교하여 높아 재검토가 필요하며, DOC_f의 국가고유값은 음식물, 종이류, 목재류를 제외하고는 개발되어 있지 않아 추가 개발이 필요하다. k값도 폐기물 성상별로 분해속도가 달라 다르게 적용되어야 하므로 추후

폐기물 성장별 k값에 대한 개발 또한 필요할 것으로 사료된다.

- 5) MCF는 메탄보정계수로 매립된 폐기물이 모두 혐기성 조건에서만 분해되는 것이 아니기 때문에 온실가스 배출량을 정확히 산출하기 위해서는 매립지의 관리 상태를 반영해야 한다. 이에 혐기성 위생매립지의 경우 MCF 1.0을 고 정적으로 사용하지 않고, 매립작업 중인 매립 층의 경우 공기의 유입이 있으므로 MCF 0.5를 사용하다 신규 매립층이 포설되는 경우 기존의 매립층에 MCF 1.0으로 수정하여 적용하는 MCF값의 이원화는 메탄 배출량의 과다 산정을 방지하고 보다 정확한 온실가스 배출량을 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 환경부 글로벌탈 환경기술개발사업 중 Non_CO₂ 온실가스 저감기술개발 사업단(E619-0024 1-0708-0)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

1. UNFCCC, “Decision 1/CP.21 Adoption of the Paris Agreement,” (2015).
2. UNFCCC, “Matters relating to Article 14 of the Paris Agreement and paragraphs 99-101 of decision 1/CP.21,” (2018).
3. UNFCCC, <https://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/reporting-and-review-under-the-convention/greenhouse-gas-inventories-annex-i-parties/submissions/national-inventory-submissions-2018>, (2018).
4. Greenhouse gas inventory & research center (GIR), “National greenhouse gas inventory report of Korea,” (2018).
5. IPCC, “2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”, (2019).
6. IPCC, “IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”, (1996).
7. IPCC, “Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories”, (2002).
8. Amini, H. R., Reinhart, D. R. and Niskanen, A., “Comparison of first-order-decay modeled and actual field measured municipal solid landfill methane data”, *Waste Manage.*, Vol. 33, pp. 2720~2728. (2013).
9. Santos, M. M. O., van Elk, A. G. P. and Romanel, C., “A correction in the CDM methodological tool for estimating methane emissions from solid waste disposal sites”, *J. Environ. Manage.*, 164, pp. 151~160. (2015).
10. IPCC, “IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”, (2006).
11. Stegmann, R., Hupe, K., Heyer, K.-U., Koop, A. and Hiemastra, R., “Landfill aeration as a contribution to landfill stabilization and climate protection”, *Seventh International exchange of experience meeting of COCOON*, (2019).
12. IPCC, “IPCC Fourth Assessment Report : Climate Change 2007. Working Group I : The Physical Science Basis”, (2007).
13. Italy Institute for Environmental Protection and Research, “National Greenhouse Gas Inventory Report of Italy”, (2019).
14. Estonia Ministry of the environment, “National Greenhouse Gas Inventory Report of Estonia”, (2019).
15. Department of the Environment and Energy, “National Greenhouse Gas Inventory Report of Australia”, (2018).
16. Wang, X., Padgett, J. M., De la Cruz, F. B. and Barlaz, M. A., “Wood biodegradation in laboratory-scale landfills”, *Environmental Science & Technology*, 45(16), pp. 6864~6871. (2011).
17. Chong, Y. G., Park, J. K., Kim, R. H. and Lee, N. H., “Evaluation of greenhouse gas emissions from municipal solid wastes through carbon flows in landfill”, *J. Korea Soc. Waste Manag.*, 34(8), pp.

- 844~852. (2017).
18. Statistics Finland, "National Greenhouse Gas Inventory Report of Finland", (2019).
19. Ban, J. K., Park, J. K., Kim, K., Yoon, S. P. and Lee, N. H., "Possibility of aerobic stabilization technology for reducing greenhouse gas emissions from landfills in Korea", *J. of KORRA*, 23(4), pp. 40~51. (2015).
20. De la Cruz, F. B. and Barlaz, M. A., "Estimation of waste component-specific landfill decay rates using laboratory-scale decomposition data", *Environ. Sci. Technol.*, 44(12), pp. 4722~4728. (2010).
21. Mou, Z., Scheutz, C. and Kjeldsen, P., "Evaluating the methane generation rate constant (k value) of low-organic waste at Danish landfills", *Waste Manage.*, 35, pp. 170~176. (2015).
22. Wang, X. and Barlaz, M. A., "Decomposition and carbon storage of hardwood and softwood branches in laboratory-scale landfills", *Sci. Total Environ.*, 557-558, pp. 355~362. (2016).