

폐기물매립지의 온실가스 배출량 산정을 위한 분해가능유기탄소(DOC) 및 혐기분해가능유기탄소분율(DOC_F) 평가방법에 관한 연구

정용길 · 박진규* · 김인희* · 유문형 · 이남훈[†]

안양대학교 환경에너지공학과 · *(주)에코윌플러스

(2015년 10월 21일 접수, 2015년 12월 7일 수정, 2015년 12월 14일 채택)

A Study on the Determination Methodologies of Fraction of Degradable Organic Carbon (DOC) and Fraction of DOC Decomposed (DOC_F) for Estimating Methane Emissions from Solid Waste Landfills

Yong-Gil Chong · Jin-Kyu Park* · In-Hee Kim* · Moon-Hyoung Yoo · Nam-Hoon Lee[†]

Department of Environmental and Energy Engineering, Anyang University

**Ecowillplus co, Ltd.*

(Received 21 October 2015 : Revised 7 December 2015 : Accepted 14 December 2015)

Abstract

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) recommended the first order decay (FOD) model for estimating methane emissions from solid waste landfills. However, selecting appropriate parameter is a major challenge in methane emission modeling. The degradable organic carbon (DOC) and the fraction of degradable organic carbon which decomposes (DOC_F) are the two primary parameters in the methane generation potential (L_0). The DOC is the amount of organic carbon that can be decomposed by biochemical reactions in microorganisms. Chemical analysis methods are currently available to measure the DOC including using total organic carbon and element analysis methods. However, chemical analysis methods are not appropriate for determination of the DOC, which indicated that the DOC should be measured by biochemical tests. In addition, these methods should consider a fossil carbon content that needs a complex and high cost of analysis. The DOC_F is an estimate of the fraction of carbon that is ultimately degraded and released from landfills. However, no methodology is provided for determination of the DOC_F in landfills. Therefore, the purpose of this study was to suggest methodologies for the determination of DOC and DOC_F in solid waste landfills. A biochemical methane potential (BMP) test could be used to calculate the DOC because the BMP represents an upper limit on the methane potential of a waste, which corresponds to a maximal amount of degraded organic carbon. The calculation was based on the assumption that the DOC_F is 100%. In this study, two methodologies were suggested to determine the DOC_F in landfills. The first one uses a new equation ($DOC_F = 2.76W - 0.44$) with moisture content in the landfill that actual methane flux data are unavailable. Moisture content is a major ecological parameter on the anaerobic biodegradability of the solid waste in the landfill. Another methodology is to use $L_{0, Landfill} / L_{0, BMP}$ ratio. The $L_{0, Landfill}$ could be determined by a regression analysis if methane flux data were available.

Key Words : Greenhouse gas, Solid waste landfill, L_0 , DOC, DOC_F

[†]Corresponding author

E-mail : nhlee@anyang.ac.kr

Tel : 031-463-1366

I. 서 론

폐기물매립지에서 배출되는 메탄(CH₄)은 온실가스 대상 물질 중 하나로 기후변화에 상당 부분 기여하는 물질 중 하나로 잘 알려져 있다. 따라서 폐기물매립지의 온실가스 배출량 관리와 전략을 수립하기 위해서는 온실가스 배출량 산정 모델을 활용하도록 하고 있다¹⁾. 이에, 2006 IPCC(Intergovernmental panel on climate change) 가이드라인²⁾에서는 1차 반응모델(First order decay method)과 모델에 적용되는 배출계수들을 이용하여 폐기물매립지에서의 메탄 배출량을 산정하도록 하고 있다. 배출계수에는 매립폐기물의 메탄발생잠재량(Methane generation potential, L₀)과 메탄발생속도상수(Methane generation rate constant, k)가 있으며, 일반적으로 메탄발생잠재량은 BMP(Biochemical methane potential) 또는 모의매립조 등의 혐기성 조건에서의 실내실험을 통해 산정하고 있다³⁻⁴⁾. 메탄발생잠재량에 적용되는 매개변수로는 유기탄소(Degradable organic carbon, DOC), 혐기성 조건에서 메탄으로 전환 가능한 DOC 비율(Fraction of degradable organic carbon that can decompose, DOC_F), 호기성 분해에 대한 메탄 보정계수(Methane correction factor, MCF), 발생 매립가스에 대한 메탄 부피비(Fraction of methane in generated landfill gas, F) 등이 있다²⁾. 매개변수들 중에 DOC는 생화학적 분해(Biochemical decomposition) 가능한 유기탄소량을 의미하는 것으로(IPCC, 2006), 활동도 자료인 폐기물 물리적 조성 및 매개변수인 DOC_F와 함께 메탄 발생량 예측에 큰 영향을 미치는 가장 기초적인 자료라 할 수 있다⁵⁾.

이에 2006 IPCC 가이드라인에서는 DOC와 DOC_F의 기본값을 제시하고 있으나, 각 국가별 폐기물 특성을 반영하지 못하는 문제점이 있기 때문에 국가별 특성을 반영한 고유값을 개발하도록 권장하고 있다. 그러나 국내에서는 매립폐기물 전체를 대상으로 물질수지를 이용한 DOC 산정에 관한 연구가 있었으나⁶⁾, 폐기물 성상별 DOC 산정에 대한 연구 성과는 매우 미흡한 실정이다. 이는 DOC 산정을 위해 사용되고 있는 유기탄소, 원소분석 등의 화학적 분석방법⁷⁾의 경우 무기탄소를 고려해야 할 뿐만 아니라 종이, 섬유, 고무 등의 폐기물에 대해서는 총 탄소량 중 화석탄소(Fossil carbon) 함량을 고려해 주어야 하나 분석이 어렵고 비용이 비싼 문제점이 있다. 또한, DOC는 미생물들의 생화학적 반응에 의해 분해되는 유기탄소량이기 때문에 연소 및 산화에 의한 화학적 분석방법보다 정확히는 미생물을 이용한 생화학적 실험(Biochemical tests)으로 평가되어야 한다.

DOC_F는 DOC 중 혐기성 조건 하에서 최종적으로 분해되어 배출되는 탄소의 비율로, 이는 DOC 중 탄소 형태 또는 환경적 인자에 의하여 매우 느리게 분해되거나 분해되는 않는 탄소가 있는 것을 의미하며 이러한 탄소들은 DOC_F에 포함되지 않는다²⁾. DOC_F를 평가하는 공식적인 방법은 확립되어 있지 않으며, BMP 및 모의매립조 실험 등으로 생분해도를 측정하여 DOC_F를 평가하는 것은 적합하지 않은 것으로 나타나 있다⁷⁾. 이는 DOC_F는 폐기물매립지 특성에 따른 최종적인 분해도를 나타내고 있으나 BMP는 최적조건에서 실험이 이루어지는 것이며, 모형매립조 실험도 폐기물매립지 현장 특성을 정확히 반영할 수 없기 때문이다.

이에 본 연구에서는 BMP 실험을 통해 화석탄소 함량을 평가하지 않고 DOC를 평가할 수 있는 방법을 제안하고자 하며, 제안된 평가방법으로 음식물류, 종이류, 섬유류, 목재류 폐기물들을 대상으로 DOC를 산정하고자 한다. 또한, DOC_F의 평가방법을 제안하고 적합성을 평가하여 향후 국가 고유값 배출계수 개발 시 기초자료로써 활용되고자 하였다.

II. 연구내용 및 방법

1. 실험재료

본 연구에서는 경기도 A시에서 배출되는 생활폐기물 대상으로 하였으며, 생활폐기물 중 음식물, 종이류, 섬유류, 목재류를 대상으로 실험을 실시하였다. 폐기물 성상별 특성을 살펴보면 음식물은 곡류와 채소류가 주요 성상이었으며, 종이는 휴지가 대부분을 차지하였다. 섬유는 천과 면장갑이 주요 성상이었으며, 목재는 나무젓가락이었다. Table 1은 각 폐기물의 삼성분 분석결과를 나타낸 것이다.

2. L₀와 DOC 평가

DOC는 생화학적 분해(Biochemical decomposition) 가능한 유기탄소량²⁾으로 여기서의 생화학적 반응은 생물학적 개체인 미생물들의 화학반응을 의미한다. 따라

Table 1. Proximate analysis of each waste

Waste component	Moisture (%)	Combustible (%)	Ash (%)
Food	59.9	27.9	12.2
Paper	30.2	60.4	9.4
Textile	25.4	72.5	2.1
Wood	19.4	76.3	4.3

서 DOC를 연소방식에 의해 탄소함량을 분석하여 평가하는 방법은 적절하지 않는 것으로 판단되며, DOC는 혐기성 조건 하에서 미생물의 생화학적 분해에 의해 가스로 배출되는 탄소의 양을 평가하는 방식이 적절할 것으로 사료된다.

BMP 실험은 혐기성 미생물과 영양분을 공급하여, 혐기성 분해의 최적 조건에서 메탄발생량을 측정하는 방법이다⁷⁾. 따라서 BMP 실험을 통해 평가되는 메탄발생량은 IPCC에서 제시하는 메탄발생잠재량(L_0)과 동일한 의미로 L_0 (kg-CH₄/ton waste)는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다^{2,8)}.

$$L_0 = \text{DOC} \times \text{DOC}_F \times F \times \text{MCF} \times 16/12 \quad (1)$$

BMP 실험은 혐기성 분해의 최적 조건에서 이루어지기 때문에 MCF는 1이며, DOC_F 는 혐기성 조건에서 분해 가능한 유기탄소 비율로 이는 매립지 내부의 환경적 특성에 따라 달라지나 BMP 실험에서는 생분해 가능한 유기탄소가 혐기성 미생물에 의해 모두 분해되어 배출되는 것으로 가정할 경우 100%로 나타낼 수 있다. 따라서 BMP 실험을 통해 F와 L_0 를 측정할 경우 최종적으로 DOC를 산정할 수 있으며, 이때 화석탄소는 생분해되지 않는 것으로 가정하였다⁹⁻¹⁰⁾.

이에 본 연구에서는 폐기물 성상별 DOC를 산정하기 위해 BMP 실험을 실시하였으며, 실험은 2회 반복 실험을 실시하였다. BMP 실험에서 사용한 영양배지 제조와 실험방법은 기존연구¹⁾에서 나타난 방법으로 실시하였다. 제조한 영양배지 140 mL를 serum bottle에 넣어 감압멸균기를 이용하여 10분 멸균하여 배지에 녹아있는 산소를 배출시키고, 상온으로 냉각시킨 후 A하수처리장에서 채취하여 200번(0.075 mm) 체로 걸러낸 식중슬러지를 영양배지 부피의 10%인 14 mL를 주입하였다. 시료는 2 g-VS/L를 기준으로 하였으며, pH는 7.0으로 조정하였다. 미생물 반응에 의한 급격한 산형성에 따른 pH 저하를 억제하기 위해 알칼리 물질인 중탄산염(NaHCO₃)을 넣어준 후 질소가스로 충분히 퍼징하여 혐기성 상태가 되도록 만들어 밀봉하였으며, 이를 중온소화의 최적온도인 35°C에서 배양하였다. 가스발생량은 유리주사기로 측정하였고, 가스 성분은 gas chromatography(Younglin 6000 M, Korea)를 사용하여 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 메탄수율

Fig. 1은 각 폐기물 성상별 누적메탄수율을 나타낸

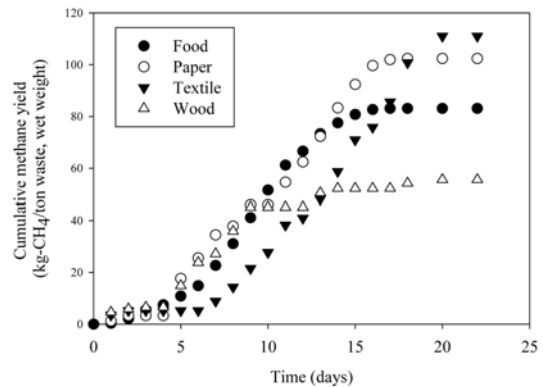


Fig. 1. Cumulative methane yield profiles.

것이다. 성상별 누적메탄수율을 살펴보면 음식물류 폐기물 110.8 kg-CH₄/ton-waste(386.8 mL-CH₄/g-VS), 종이류 136.5 kg-CH₄/ton-waste(273.8 mL-CH₄/g-VS), 섬유류 148.0 kg-CH₄/ton-waste(277.73 mL-CH₄/g-VS), 목재류 74.1 kg-CH₄/ton-waste(128.7 mL-CH₄/g-VS)으로 나타나 VS 기준일 경우에는 음식물류가 가장 높은 메탄수율을 나타내었으나, 폐기물 습윤 중량 기준으로는 섬유류가 가장 높게 나타났다. 다만 합성섬유의 혼합비율에 따라 누적메탄수율의 차이가 발생할 수 있기 때문에 향후 이에 대한 추가연구가 필요하다.

이를 기존연구 결과와 비교하면 Kim et al.¹¹⁾은 음식물 420.2 mL-CH₄/g-VS, 종이류 320.5 mL-CH₄/g-VS, 섬유류 288.3 mL-CH₄/g-VS, 목재류 107.7 mL-CH₄/g-VS로 본 연구 결과가 약간 낮은 메탄수율을 나타내었다. 또한, Kim et al.¹²⁾은 종이 종류에 따른 메탄수율이 달라졌으며, 137.3 ~ 328.7 mL-CH₄/g-VS의 범위를 나타내는 것으로 보고하고 있다. Park et al.¹³⁾은 폐목재를 대상으로 각재는 91.1 mL-CH₄/g-VS, 판재는 79.3 mL-CH₄/g-VS의 메탄수율을 나타내는 것 조사되었다. 목재류의 메탄수율이 가장 낮은 것은 목재 내에 함유되어 있는 리그닌에 의한 분해 저해 현상으로 판단된다. 목재류의 경우 일반적으로 25 ~ 30%의 리그닌을 함유하고 있으며, 리그닌이 가수분해를 저해시켜 분해를 및 메탄 전환율이 매우 낮은 것으로 알려져 있어 메탄수율이 낮게 나온 것으로 판단된다¹³⁻¹⁵⁾.

Table 2는 2006 IPCC 가이드라인에서 나타난 DOC 값을 식 (1)을 이용하여 환산하였을 때의 메탄발생잠재량⁸⁾을 나타낸 것으로 종이와 목재의 메탄발생잠재량이 본 연구 결과와 비교하여 매우 높은 것으로 나타나, 종이와 목재의 경우 IPCC 기본값을 적용 시 메탄발생량이 과대평가될 것으로 판단된다.

Fig. 2는 각 폐기물의 시간대별 메탄농도를 나타낸

Table 2. Cumulative methane yields of each waste

Item	L ₀ (kg-CH ₄ /ton-waste, wet weight)	
	This study	IPCC
Food	110.8	100
Paper	136.5	267
Textile	148.0	160
Wood	74.1	287

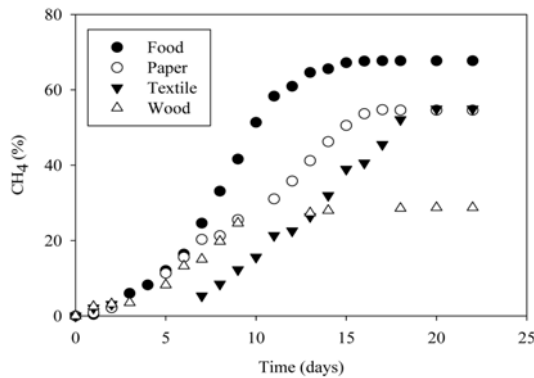
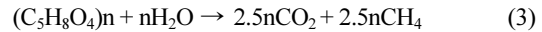


Fig. 2. CH₄ concentration profiles.

것으로 최종 메탄농도를 살펴보면 음식물 67.7%, 종이류 54.6%, 섬유류 54.9%, 목재류 28.7%로 나타났다. 일반적으로 폐기물매립지에서의 메탄 농도는 50%로 알려져 있으며, 이에 2006 IPCC 가이드라인에서는 F의 기본값으로 50%(불확도 5%)를 제시하고 있다²⁾. 다만 기질에 기름이나 지방 등이 있을 경우에는 메탄 농도가 50%이상 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서 나타난 음식물의 경우 기름이나 지방 성분의 함유로 메탄 농도가 높게 나타난 것으로 판단되며, 종이류와 섬유류의 경우 50%와 유사한 것으로 나타났다.

목재류의 경우 매우 낮은 메탄 농도를 나타내고 있

으나 이는 기질이 제한 인자로 작용하였기 때문으로 판단되며, 셀룰로오스(Cellulose)와 헤미셀룰로오스(Hemicellulose)의 혐기성 분해 반응은 아래와 식(2)와 (3)에서 나타난 것과 같이 메탄과 이산화탄소의 비율이 동일하기 때문에 최종적으로는 50%의 메탄농도를 나타낼 것으로 사료된다¹⁶⁾.



2. DOC 평가

Table 3은 상기에서 측정된 L₀와 F값을 이용하여 폐기물 성상별 DOC를 산정한 결과이다. 습윤기준으로 음식물 12.3%, 종이류 18.8%, 섬유류 20.2%, 목재류 19.3%로 2006 IPCC 가이드라인에서 제시한 DOC 기본값과 비교하면 음식물과 섬유류는 유사한 값을 나타내고 있으나, 종이류는 본 연구결과가 IPCC 기본값보다 약 11%, 목재류는 약 23% 낮은 것으로 나타났다. 이는 DOC 산정에 리그닌(Lignin)의 포함 여부에 기인하는 것으로 판단된다.

일반적으로 리그닌은 혐기성 조건에서는 거의 분해가 이루어지지 않는다. 따라서 리그닌을 구성하고 있는 탄소가 분해되지 않는다고 가정할 경우 리그닌이 함유하고 있는 탄소 함량은 다음과 같이 구할 수 있다. 우선, 종이류는 재질에 따라 리그닌 함량에 차이가 있으며, 사무용 종이(Office paper)만 리그닌 함량이 0.93~2.3%로 매우 낮고 그 외에는 15.0~23.9%의 범위를 나타내고 있다¹⁷⁻¹⁸⁾. 따라서 사무용 종이의 경우 대부분 재활용되기 때문에 종이의 리그닌 함량을 20%로 가정하고 리그닌의 탄소함량을 50%¹⁶⁾로 가정하면 종이류에서의 분해되지 않은 탄소량은 10%로 산정될 수 있다. 이를 연구결과인 건기준 DOC 26.9%에 합하면

Table 3. DOC values of each waste

Item	DOC			
	kg/ton	%		
		This study	IPCC ²⁾	
Wet base	Food	122.8	12.3	15 (8 ~ 20)
	Paper	187.5	18.8	40 (36 ~ 45)
	Textile	202.1	20.2	24 (20 ~ 40)
	Wood	193.3	19.3	43 (39 ~ 46)
Dry base	Food	306.2	30.6	38 (20 ~ 50)
	Paper	268.6	26.9	44 (40 ~ 50)
	Textile	270.9	27.1	30 (25 ~ 50)
	Wood	239.8	24.0	50 (46 ~ 54)

36.9%로 IPCC 기본값과 거의 유사한 DOC값을 나타내게 된다. 또한, 목재의 경우 리그닌 함량을 30%로 가정하면 분해되지 않은 탄소량은 15%로 산정될 수 있으며, 건기준 DOC 24.0%에 합하면 39.0%로 IPCC 기본값과 약 10% 낮지만 리그닌에 의해 분해가 저해된 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스가 함유하고 있는 탄소가 잔존하고 있어 차이가 나타난 것으로 판단된다. Mou et al.⁸⁾의 연구결과에서는 종이와 목재가 주요 성분인 가연성폐기물의 DOC 산정결과 7.96~8.74%(습기준)로 본 연구결과보다 더욱 낮은 값을 나타내고 있다. 다른 연구들에서도 목재에 대하여 리그닌을 고려하지 않을 경우 DOC를 18~30%(건기준)로 나타내고 있어 향후 종이류와 목재류에 대한 DOC 산정 시 리그닌 포함 여부를 나타내야 할 것으로 판단된다^{16,19)}.

탄소성분 중에서 화석탄소는 난분해성이기 때문에 폐기물매립지에 저장되는 탄소를 DOC 산정 시 화석탄소 함량은 제외해주어야 한다^{2,9-10)}. 따라서 본 연구결과에서 산정된 섬유류 DOC는 20.2%로 화석탄소 함량을 제외하고 나타난 IPCC 기본값 범위에 부합되는 것으로 평가되어 BMP 실험을 통한 DOC값 산정의 경우 화석탄소 함량을 평가하지 않고 DOC값 산정이 가능한 것으로 사료된다.

최종적으로 본 연구에서 제시한 DOC 평가방법은 IPCC에서 나타내는 DOC의 정의인 생화학적 분해 가능한 유기탄소량이라는 의미와 가장 부합하는 것으로 판단되며, 화석탄소 함량을 평가하지 않아도 되기에 경제적이고 효율적인 방법으로 사료된다.

3. DOC_F 평가

본 연구에서는 DOC_F 산정을 위하여 폐기물매립지에서 연도별 메탄가스 발생량 측정 데이터가 없을 때와 있을 때로 구분하여 평가방법을 제시하고자 한다. 우선 연도별 메탄가스 발생량 측정 데이터가 없을 경우이다. DOC는 생물학적 개체인 미생물의 화학반응에 분해 가능한 유기탄소량을 의미하는 것이라면, DOC_F는 폐기물매립지의 환경적 인자에 따라 혐기성 조건하에서 최종적으로 분해되는 탄소 비율을 의미한다. 2006 IPCC 가이드라인에서는 DOC_F를 0.5로 제시하고 있으나, DOC_F는 폐기물매립지의 여러 환경적 인자에 따라 영향을 받는 것으로 보고되고 있다²⁾. 유기탄소의 분해에 영향을 미치는 환경적 인자들로는 수분, 온도, 유기물 함량, 셀룰로오스/리그닌 비, SO₄²⁻(Sulfate) 등이 있다²⁰⁾. 그러나 수분을 제외한 환경적 인자들은 일반적인 폐기물매립지의 환경조건에서는 탄소의 분해속도, 즉 메탄발생속도(k)에만 영향을 미칠 뿐이며 분해

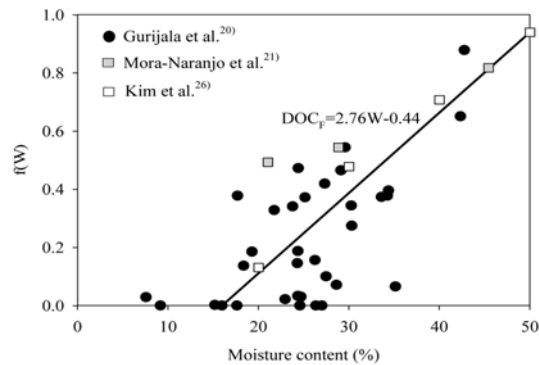


Fig. 3. Evaluation of moisture content on DOC_F (data replotted from literatures).

되는 탄소의 총량에는 변함이 없는 것으로 나타내고 있다²¹⁻²²⁾.

환경적 인자들 중 수분은 분해속도뿐만 아니라 메탄발생량에도 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 기존 연구결과들에서도 매립폐기물을 대상으로 함수율을 달리하였을 때 최종 메탄발생량에 차이가 발생하는 것으로 나타나 있으며, 수분 함량과 최종 메탄발생량에 선형적인 관계가 있는 것으로 보고하고 있다^{21,23)}. Pommier and Lefebvre²⁴⁾ 연구결과에서는 메탄발생이 더 이상 진행되지 않은 시점에 수분을 추가로 주입하였을 경우 메탄발생이 다시 시작되는 것으로 보고하고 있다. 이러한 수분의 영향에 대해 Meraz et al.²⁵⁾은 매립폐기물 내의 생분해성 유기물이 메탄으로 전환되기 위해서는 우선 유기물의 가수분해가 이루어져야 하며, 가수분해가 이루어진 유기물은 폐기물 내의 공극에 있는 수분으로 용해되어야 메탄으로 전환할 수 있기 때문에 수분이 중요한 것으로 나타내고 있다.

Mora-Naranjo et al.²¹⁾은 폐기물매립지에서의 폐기물 분해 모델 구성에서 미생물 증식속도에 함수율이 미치는 영향 정도를 식 (4)의 수식으로 나타내고 있다. 이에 본 연구에서는 식 (4)의 수식을 기초로 기존 연구결과들을 통해 함수율이 메탄발생량에 미치는 영향을 살펴보고, 이를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에 나타난 기존 연구결과들은 연구결과들에서 평가한 함수율에 따른 메탄발생 및 메탄발생량에 미치는 영향 정도를 식 (4)의 기준으로 수정한 데이터이다. f(W)는 함수율이 메탄발생량에 미치는 영향지수로 0~1의 범위를 나타낸다.

$$f(W) = 2.76W - 0.44 \quad (4)$$

여기서, f(W) : 함수율 영향 지수(Water content factor)
W : 함수율(%)

미생물 증식속도는 기질의 소비속도와 상관성이 있으며, 기질 소비속도는 메탄발생속도와 밀접하다는 가정을 통해 메탄발생률은 함수율과 선형적 상관성이 있는 것으로 나타낼 수 있다^{21,27}. 또한, Pommier et al.²³은 메탄발생률과 메탄발생량 간에 선형적 상관성이 있는 것으로 나타내고 있어 결론적으로 메탄발생량과 함수율 간에도 선형적 상관성이 있는 것으로 보고하고 있다. 따라서 상기의 $f(W)$ 는 함수율에 따라 메탄발생량에 영향을 미치는 폐기물의 분해도로 표현할 수 있으며, 이를 DOC_F로 나타낼 수 있다. 단, 여기서는 폐기물매립지 내의 수분분포와 물성별 함수율은 고려하지 않았다.

기존 국내연구에서는 수도권 1매립지를 대상으로 DOC_F 평가 시 폐기물 원소조성을 이용한 이론적 메탄발생량과 BMP 실험을 통해 산정한 메탄발생량의 비율인 생분해도 평가를 통해 DOC_F를 0.58로 산정하였다⁶). 그러나 BMP 실험은 상기에서 언급한 것처럼 최적의 조건에서의 메탄발생량을 평가하는 것이기 때문에 실제 폐기물매립지의 환경적 특성을 반영할 수 없어 생분해도 측정을 통한 DOC_F의 평가는 이론적으로 맞지 않다. Jeon et al.³은 수도권매립지에 반입되는 폐기물들을 대상으로 BMP 실험을 통해 메탄발생잠재량(L₀)을 산정하였으며, 수도권 1매립지의 L₀를 연도별 반입폐기물 성상에 따라 56 ~ 88 m³-CH₄/Mg-wet waste (평균 75.1 m³-CH₄/Mg-wet waste)로 나타내었다. 이때의 L₀는 DOC_F를 1.0으로 나타낼 수 있다. 또한, 연구결과에 나타나 있는 함수율을 반입폐기물 물리적 조성에 가중치를 적용하여 반입폐기물 함수율을 산정한 결과 평균 26.9%(19.6 ~ 30.8%)로 DOC_F는 상기의 식에 따라 0.3이 되며 L₀를 환산하면 평균 22.8 m³-CH₄/Mg-wet waste로 산정되었다. 이는 기존연구²⁸에서 측정데이터와 비선형회귀분석을 통해 산정한 L₀인 18.05 ~ 20.26 m³-CH₄/Mg-wet waste(포집효율 80% 기준)와 유사한 L₀를 나타내어 대상 매립지의 연도별 메탄발생량 측정 데이터가 없을 경우 본 연구에서 제시한 방법을 적용하여 함수율에 따른 DOC_F의 평가가 가능할 것으로 사료된다.

다음은 수도권매립지와 같이 연도별 메탄발생량 측정 데이터가 있는 경우이다. 연도별 메탄발생량 측정 데이터가 있을 경우에는 수식을 통한 회귀분석으로 대상 폐기물매립지의 L₀와 k값을 산정할 수 있다²⁸⁻²⁹). 따라서 BMP 실험을 통해 산정한 L_{0(BMP)}는 상기에서 나타난 바와 같이 DOC_F가 1이기 때문에 현장 데이터를 기초로 도출된 L_{0(Landfill)}와의 비율은 다음 식 (4)와 같이 대상 매립지의 DOC_F로 나타낼 수 있다. 여기서 L₀ 산정을 위한 식 (1)에서 DOC_F를 제외한 다른 매개변

수들은 동일한 것으로 가정하였다.

$$DOC_F = \frac{L_{0, Landfill}}{L_{0, BMP}} \quad (5)$$

식 (5)와 수도권 1매립지의 기존연구 결과를 이용하여 DOC_F를 산정하면 BMP 실험을 통해 도출한 L_{0(BMP)}는 75.1 m³-CH₄/Mg-wet waste³)이며, 현장 데이터를 기초로 비선형 회귀분석을 통해 산정된 L_{0(Landfill)}는 18.05 ~ 20.26 m³-CH₄/Mg-wet waste²⁸)이기 때문에 DOC_F는 0.24 ~ 0.27로 산정되었다.

현재 DOC_F를 평가할 수 있는 공식적인 방법은 없으며, 실내 실험의 생분해도 측정을 이용한 DOC_F 평가 방법은 폐기물매립지의 환경적 특성을 반영하고 있지 않기 때문에 정확한 DOC_F 평가방법이 될 수 없다⁷). 따라서 DOC_F의 국가고유배출계수를 개발하기 위해서는 국내 대표 매립지들을 선정하여 본 연구에서 제시한 방법과 같이 장기간의 연도별 메탄발생량 측정 데이터와 반입폐기물의 BMP 실험을 통해 산정된 L₀값을 이용하여 DOC_F를 평가하는 것이 가장 적합한 방법으로 판단된다. 또한, 메탄발생량 측정 데이터가 없는 폐기물매립지에서는 BMP 실험을 통한 DOC 산정과 폐기물의 함수율을 이용한 Fig. 3의 수식을 통해 DOC_F를 산정하면 L₀를 도출할 수 있을 것이다. 다만, 본 연구에서 제시한 DOC_F 평가 방법은 매립폐기물 전체를 대상으로 하기 때문에 향후 폐기물 성상별 DOC_F 평가 방법에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

IV. 결 론

DOC는 생물학적 개체인 미생물의 화학반응에 분해 가능한 유기탄소량을 의미하는 것이며, DOC_F는 폐기물매립지의 환경적 인자에 따라 혐기성 조건하에서 최종적으로 분해되는 탄소 비율을 의미한다. 따라서 DOC를 연소방식에 의해 탄소함량을 분석하여 평가하는 방법은 적절하지 않으며, 기존 방법들은 화석탄소 함량을 고려해야 하는 문제점이 있다. 또한, DOC_F의 경우 생분해도의 측정을 통해 평가하는 것은 폐기물매립지의 환경적 특성을 반영할 수 없기 때문에 적합하지 않다. 이에 본 연구에서는 DOC와 DOC_F의 평가방법의 제안 및 적합성을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 연구에서 제시한 BMP 실험을 이용한 DOC 평가 방법은 2006 IPCC 가이드라인에서 나타내는 DOC의 정의인 생화학적 분해 가능한 유기탄소량이라는 의미와 가장 부합하는 것으로 판단되며, 화석탄소 함량을 평가하지 않아도 되기 때문에

- 경제적이고 효율적인 방법으로 사료된다.
2. 종이와 목재류의 경우 본 연구에서 산정한 DOC 값이 2006 IPCC 가이드라인에서 제시하고 있는 기본값보다 낮은 값을 나타내었으며, 이는 리그닌 함유 여부에서 기인한 것으로 판단된다. 따라서 BMP 실험을 통한 DOC 산정은 리그닌을 분해 가능한 탄소로 보지 않기 때문에 향후 DOC 평가 방법에 따라 리그닌 포함여부를 명시하여야 할 것으로 사료된다.
 3. 본 연구에서는 DOC_F 산정을 위하여 폐기물매립지에서 연도별 메탄가스 발생량 측정 데이터가 없을 때와 있을 때를 구분하여 평가방법을 제시하였다. 측정 데이터가 없을 때에는 본 연구에서 제시한 수분함량에 따른 DOC_F 산정식($DOC_F = 2.76W - 0.44$)을 통하여 DOC_F 를 도출할 수 있는 것으로 나타났다. 측정 데이터가 있을 때에는 BMP 실험을 통해 산정한 $L_{0(BMP)}$ 와 현장 데이터 및 비선형 회귀분석을 이용해 도출된 $L_{0(Landfill)}$ 와의 비율로 DOC_F 를 산정할 수 있는 것으로 나타났다.
 4. DOC_F 의 국가고유배출계수를 개발하기 위해서는 장기간의 연도별 메탄발생량 측정 데이터와 반입 폐기물의 BMP 실험을 통해 산정된 L_0 값을 이용하여 DOC_F 를 개발하는 것이 가장 적합한 방법으로 판단된다. 또한, 메탄발생량 측정 데이터가 없는 폐기물매립지에서는 BMP 실험을 통한 DOC 산정과 폐기물의 함수율을 이용한 DOC_F 산정식을 통해 DOC_F 를 산정하면 L_0 를 도출할 수 있을 것이다. 다만, 본 연구에서 제시한 DOC_F 평가 방법은 매립폐기물 전체를 대상으로 하기 때문에 향후 폐기물 성상별 DOC_F 평가 방법에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

References

1. Park, J. -K., Kang, J. -H, Kim, E. -C, Kim, K., Yoon, S. -P. and Lee, N. -H. : Estimation of methane production rates of municipal solid wastes, *Journal of Korea Society of Waste Management*, Vol. 30, No. 1, pp. 52-59 (2013)
2. IPCC : 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories (2006)
3. Jeon, E. J., Bae, S. J., Lee, D. H., Seo, D. C., Chun, S. K., Lee, N. H. and Kim J. Y. : Methane generation potential and biodegradability of MSW components, *Proceeding Sardinia 2007 Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 1-5 (2007)
4. Song, S. -H., Kim, H. -K., Park, J. -K. and Lee, N. -H. : A study on the calibration and verification of mathematical models for GHG emission from solid waste landfills, *Journal of Korea Society of Waste Management*, Vol. 28, No. 4, pp. 370-377 (2011)
5. Kim, H. -S., Kim, D. -S., Kim, H. and Yi, S. -M. : Sensitivity and uncertainty analysis of greenhouse gas emission from landfills in Korea, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 30, No. 3, pp. 257-262 (2008)
6. Bae, S. -J., Nah, J. -H., Jeon, E. -J., Seo, D. -C., Kim, Y. -J. and Lee, D. -H. : Estimation of DOC and DOC_F of municipal solid waste in landfill, *Journal of Korea Society of Waste Management*, Vol. 28, No. 4, pp. 413-422 (2011)
7. Jeong, S. and Kim, J. Y. : Methodologies to develop parameters of methane generation potential (L_0) to increase reliability of greenhouse gas inventory in solid waste landfills, *Journal of Korea Society of Waste Management*, Vol. 30, No. 6, pp. 617-624 (2013)
8. Mou, Z., Scheuta, C. and Kjeldsen, P. : Evaluating the Biochemical Methane Potential (BMP) of low-organic waste at danish landfills, *Waste Management*, Vol. 34, No. 11, pp. 2251-2259 (2014)
9. De la Cruz, F. B., Chanton, J. P. and Barlaz, M. A. : Measurement of carbon storage in landfills from the biogenic carbon content of excavated waste samples, *Waste Management*, Vol. 33, No. 10, pp. 2001-2005 (2013)
10. Law, Y., Jacobsen, G. E., Smith, A. M., Yuan, Z. and Lant, P. : Fossil organic carbon in wastewater and its fate in treatment plants, *Water Research*, Vol. 47, No. 14, 15, pp. 5270-5281 (2013)
11. Kim, H. -J., Jung, S. -R., Park, J. -K. and Lee, N. -H. : Evaluation of anaerobic biodegradability of organic waste considering diauxic growth, *Journal of Korea Society of Waste Management*, Vol. 25, No. 7, pp. 652-658 (2008)
12. Kim, Y. M., Moon, Y. C. and Kim, J. Y. : Methane generation potential and biodegradability of different types of paper, *Journal of Korea Society of Waste Management*, Vol. 29, No. 1, pp. 37-46 (2012)
13. Park, J. -K, Lee, W. -J, Kim, Y. -J., Yoo, M. -H. and Lee, N. -H. : Assessment of greenhouse gas emission factors for wood wastes in a solid waste landfill, *Journal of Korea Society of Waste Management*, Vol. 31, No. 6, pp. 811-819 (2014)

14. Wang, X., Padgett, J. M., De, I. C. and Barlaz, M. A. : Wood biodegradation in laboratory-scale landfills, *Environmental Science Technology*, Vol. 45, No. 16, pp. 6864-6871 (2011)
15. Wang, Y. S., Byrd, C. S. and Barlaz, C. S. : Anaerobic biodegradability of cellulose and hemicellulose in excavated refuse samples using a biochemical methane potential assay, *Journal of Industrial Microbiology*, Vol. 13, No. 3, pp. 147-153 (1994)
16. Barlaz, M. A. : Forest products decomposition in municipal solid waste landfills, *Waste Management*, Vol. 26, No. 4, pp. 321-333 (2006)
17. Eleazer, W. E., Odle, W. S., Wang, Y.-S. and Barlaz, M. A. : Biodegradability of municipal solid waste components in laboratory-scale landfills, *Environmental Science & Technology*, Vol. 31, No. 3, pp. 911-917 (1997)
18. Wu, B., Taylor, C. M., Knappe, D. R. U., Nanny, M. A. and Barlaz, M. A. : Factors controlling alkylbenzene sorption to municipal solid waste, *Environmental Science & Technology*, Vol. 35, No. 22, pp. 4569-4576 (2001)
19. Ximenes, F. A., Gardner, W. D. and Cowie, A. L. : The decomposition of wood products in landfills in sydney, Australia, *Waste Management*, Vol. 28, pp. 2344-2354 (2008)
20. Gurijala, K. R., SA, P. and Robinson, J. A. : Statistical modeling of methane production from landfill samples, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 63, No. 10, pp. 3797-3803 (1997)
21. Mora-Naranjo, N., Meima, J. A., Haarstrick, A. and Hempel, D. C. : Modelling and experimental investigation of environmental influences on the acetate and methane formation in solid waste, *Waste Management*, Vol. 24, No. 8, pp. 763-773 (2004)
22. Meima, J. A., Mora Naranjo, N. and Haarstrick, A. : Sensitivity analysis and literature review of parameters controlling local biodegradation processes in municipal solid waste landfills, *Waste Management*, Vol. 28, No. 5, pp. 904-918 (2008)
23. Pommier, S., Chenu, D., Quintard, M. and Lefebvre, X. : A logistic model for the prediction of the influence of water on the solid waste methanization in landfills, *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 97, No. 3, pp. 473-482 (2007)
24. Pommier, S. and Lefebvre, X. : Impact of moisture content on the biodegradation of heterogeneous solid waste: Simulations by a new modelling framework, *Third International Workshop, Hydro-Physico-Mechanics of Landfills*, Braunschweig, Germany, March 10-13 (2009)
25. Meraz, R. L., Vidales, A. M. and Dominguez, A. : A fractal-like kinetics equation to calculate landfill methane production, *Fuel*, Vol. 83, No. 1, pp. 73-80 (2004)
26. Kim, H. -J., Kim, J. -H., Oh, D. -I., Kim, S. -C., Lee, N. -H. and Kim, N. -J. : Effect of moisture on stabilization of municipal solid wastes in anaerobic landfill, *Journal of The Korea Organic Resources Recycling Association*, Vol. 13, No. 1, pp. 124-130 (2005)
27. Park, J. -K., Jeong, S. -R., Kang, J. -H., Kim, K. and Lee, N. -H. : Statistical evaluation of sigmoidal and first-order kinetic equations for simulating methane production from solid wastes, *Journal of The Korea Organic Resources Recycling Association*, Vol. 21, No. 2, pp. 90-98 (2013)
28. Park, J. -K., Kang, J. -H., Ban, J. -K. and Lee, N. -H. : Developments of greenhouse gas generation models and estimation method of their parameters for solid waste landfills, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 6B, pp. 399-406 (2012)
29. Faour, A. A., Reinhart, D. R. and You, H. : First-order kinetic gas generation model parameters for wet landfills, *Waste Management*, Vol. 27, No. 7, pp. 946-953 (2007)