

오염총량 개념을 적용한 매립장 사후관리종료제도 개선 방안

Improvement Method for the Post-Management End System of a Landfill by Applying Total Pollutant Load Concept

천 승 규¹⁾ · 심 낙 종²⁾ · 전 은 정³⁾ · 류 돈 식[†]

Seung-Kyu Chun · Nak-Jong Sim · Eun-Jeong Jeon · Don-Sik Ryu

Received: November 30th, 2020; Revised: December 21st, 2020; Accepted: January 21st, 2021

ABSTRACT : A method of improving the post-management end system of a landfill that reflected total pollutant load was applied to the SUDOKWON 1st Landfill Site. Modeling results showed that the ratio of remaining methane, when compared to the total maximum potential of $2,521 \times 10^6 \text{ Nm}^3$, was estimated to be 8.8% in 2020, 7.0% in 2030, and 6.5% in 2040. If the average oxidation rate of 89.1% in 2005-2019 was applied, the ratio decreased by 1.01% in 2020, 0.76% in 2030, and 0.70% in 2040. This suggests that if the amount of methane generated is all emitted from the surface of the landfill after 2025, the real amount emitted to the atmosphere is less than that in 2019; therefore, the post-management end is possible. According to the results of trend analysis of the quality of leachate water, effluent criteria for Biochemical Oxygen Demand (BOD) can be satisfied in 2024, while those for Chemical Oxygen Demand (COD) and Total Nitrogen (T-N) can be satisfied in 2047 and 2117, respectively. If the post-management end system changed based on total pollutant load, the post-management can be terminated BOD today and COD within a few years; however, the fact that T-N could be terminated only after 2041 shows the need to fundamentally change management methods.

Keywords : Landfill stability, Post-management end, Total pollutant management, Landfill gas, Leachate

요 지 : 오염총량 개념을 반영한 매립장 사후관리종료제도 개선방안을 수도권매립지 제1매립장을 대상으로 적용하여 분석하였다. 매립가스 모델을 통해 분석한 메탄 잔여비율은 총 발생 가능량인 $2,521 \times 10^6 \text{ Nm}^3$ 에 대하여 2020년 8.8%, 2030년 7.0%, 2040년 6.5%이었다. 2020년 이후의 표면발산 메탄량에 2005~2019년의 평균 산화율 89.1%를 적용할 경우, 실제 배출기준 메탄 잔여율은 2020년 1.01%, 2030년 0.76%, 2040년 0.70%로서 2025년 이후 메탄이 전량 표면 발산되어도 2019년 기준 표면 발산량보다 적어 사후관리 종료 가능성이 있었다. 침출수 수질에 대한 추이분석 결과, BOD는 2024년, COD 2047년, T-N은 2117년경에 배출허용기준을 만족할 수 있을 것으로 추정되었다. 사후관리종료를 배출부하량을 기준으로 변경할 경우 BOD는 현 시점에서 그리고 COD도 수년 내 사후관리종료가 가능하나, T-N의 경우 2041년 이후에나 가능하여 근본적인 관리방식의 전환이 필요한 것으로 분석되었다.

주요어 : 매립장 안정화도, 사후관리종료, 오염총량관리, 매립가스, 침출수

1. 서 론

그동안 우리나라는 사회·경제의 유지와 발전에 필수적인 사회기반시스템에 많은 투자를 해왔으나, 이제는 기존시설의 유지관리에 많은 비용이 소요되는 시기로 접어들고 있다. 환경기초시설인 매립장 역시 이러한 사회기반시스템의 일종으로서 지금까지는 폐기물 최종처분을 위한 시설확충과 운영관리가 주된 관심분야였고, 관련 법령도 이에 초점이 맞추어져 왔다.

매립장은 법에서 정한 시설설치 및 운영규정이 있고, 사용이 종료된 이후에도 매립장이 안정화(Chen et al., 2020) 되어 환경상의 문제가 없어질 때까지 사후관리(Morris &

Barlaz, 2011)를 하여야 한다. 법상 사후관리는 기본적으로 30년으로 되어 있으며, 사후관리가 종료되기 위해서는 폐기물관리법 시행규칙 제70조제2항에서 규정한 바와 같이 환경영향조사서를 작성하여 관할청에 제출하여 승인을 받아야 한다. 환경영향조사 시 사후관리종료를 위한 적합여부의 판정기준은 현재 폐기물관리법에는 명확하게 규정되어 있지 않고, 다만, 불량매립지(Park et al., 2008) 정비를 위해 마련된 환경부의 「사용종료 매립지 정비 및 사후관리 업무지침(지침)에 따른 안정화도 평가기준을 준용하고 있다. 안정화도 평가 기준은 매립가스, 침출수 등 여러 판별지표로 이루어져 있으며, 원칙적으로는 이들 지표 모두를 만족해야만 환경영향조사서상 적합 판정을 받을 수 있다. 그러

1) Professor, Graduate School of Energy & Environment, Seoul National University of Science & Technology

2) General Manager, SUDOKWON Landfill Site Management Corporation

3) Deputy General Manager, SUDOKWON Landfill Site Management Corporation

† Director, SUDOKWON Landfill Site Management Corporation (Corresponding Author : dsyou@slc.or.kr)

나 현실적으로 30년 이상 사후관리를 하여도 현재의 안정화 기준을 만족하여 사후관리를 종료하는 것은 현실적으로 어렵다(SLC, 2017a).

매립장이 안정화 완료 평가를 받는다는 것은 사후관리를 하지 않아도 더 이상 환경에 위해를 일으키지 않는다는 것을 의미하며, 이때 환경에의 영향여부는 매립장의 구조변경 여부와 밀접한 관계가 있다. 현재 대부분의 사용종료 매립지는 매립장 상부에 체육시설, 태양광 발전시설 등을 설치한 상태로 사후관리를 하고 있다. 이 경우는 구조변경이 일어나지 않음에도 현재 구조변경 시에 적용해야할 안정화 평가기준을 일률적으로 적용하고 있다. 이는 근본적으로 지침의 제정취지나 안정화도 평가기준이 비위생 매립장을 굴착하여 재정비할 때를 위한 것이기 때문이다. 즉, 폐기물관리법에 따라 설치되지 않았던 과거 소규모 매립장에 대하여 사전평가(Lee et al., 2009) 후 안정화가 충분한 경우에 대하여 폐기물 굴착 처리(Kim et al., 2009) 및 해당 토지를 타 용도 또는 매립장으로 재사용할 때 적합한 내용이다. 또한 환경에의 영향은 오염농도가 아닌 총량이 중요하므로 수질, 대기, 자연생태 등 환경 제 분야에서 총량관리 방식이 확대되고 있으나 매립장에 대해서는 아직 이러한 개념이 적용되지 않고 있다.

이러한 제도상의 미비는 그동안 국내의 매립장 관련 법제가 사후관리종료 문제를 먼 훗날의 일로서 우선순위에 미뤄왔기 때문이다. 따라서 기존 매립장들이 사후관리종료기간을 넘기기 시작함에 따라 이에 대한 법적 및 기술적인 개선조치를 마련하지 않으면 많은 매립장들이 사후관리종료가 불가능할 것이며, 이는 사회적인 비용의 증가와 행정 및 재정의 낭비 요인이 될 것이다. 본 연구는 상기 지침의 별표에 따른 안정화도 평가기준 중 매립가스 및 침출수 부문을 대상으로 매립장 구조변경이 없는 경우에 적용가능한 새로운 평가방식을 제시하고자 하였다. 새로운 평가방식은 수도권매립지 제1매립장(LS1)에 적용·평가하였으며, 이를 통해 장기간에 걸친 경제적 낭비요인을 제거하고, 환경적 문제가 없으면서 보다 현실에 부합한 매립장 사후관리종료제도의 정립에 착안할 수 있는 사항들을 제시하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 연구대상지 개요

연구대상 매립지인 LS1은 수도권 발생 생활 및 사업장 일반폐기물 등을 처리하기 위해 조성된 것으로서 주요 특징

Table 1. Design structure and specifications of LS1

Design and operation	Specification and content
Area/Real disposed area (10 ⁴ m ²)	409/250
Construction/Operation cost (billion Won)	32.7/301
Design structure	Sandwich cell type, 8 Layer, 24 blocks (each 300 m × 300 m)
Landfill period	1992. 2 ~ 2000. 10
Disposed waste quantity 10 ⁴ m ³ /10 ⁴ Mg	6,467/6,425
Composition of waste type (weight %)	Municipal (63.8), Demolition (23.3), Industrial (12.9)
Legal post management periods	2000. 10. ~ 2020. 10.

은 Table 1과 같다. 1992.4~2000.10의 기간 중 약 64.7×10⁶ m³의 폐기물이 매립된 후, 현재 최종복토 상부에는 36홀 규모의 대중골프장을 조성하여 사후관리 중에 있다. 발생된 매립가스는 인접 수도권매립지 제2매립장(LS2) 발생 매립가스와 함께 포집(Zheng et al., 2018; Spokas et al., 2006)되어 50MW 발전소로 이송되고 있으며, 매립가스는 폐기물관리법 외에 「공공부문 온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침」에 따라 관리되고 있다. 침출수는 LS2 발생 침출수 그리고 수도권매립지 내에 설치되어 있는 폐자원 에너지화 시설에서 발생되는 폐수와 병합되어 6,700 m³/d 처리용량의 침출수 처리시설에서 처리된 후 인근 수계로 방류되고 있다. LS1의 사후관리법적 기간은 개정 전 규정인 20년의 적용을 받아 2020년 10월까지이나, 몇몇 항목에서 아직 안정화 기준을 만족하지 못하여 현재의 사후관리방법이나 관련 법제 하에서는 향후 장기간이 경과되어도 사후관리종료가 어려울 것으로 판단된다.

2.2 매립가스 부문

현행 지침은 굴착 폐기물을 대상으로 생물학적 분해에 의한 가스 발생량을 평가하도록 하고 있다. 방대한 매립량과 매립지점별로 상이한 매립물의 성상 그리고 함수율과 같은 상이한 분해조건을 감안할 때, 대표성 확보를 위해서는 많은 굴착지점 수가 필요할 뿐만 아니라, 근본적으로 이는 과거 매립력이 거의 없는 불량매립지의 굴착정비 시에 필요한 내용이다. 따라서 전술한 대로 매립장의 구조변경이 없고 매립폐기물에 관한 이력이 있는 경우에는 굴착 폐기물이 아닌 성상별 매립 폐기물의 총량과 발생되었거나 발생될 잔여 메탄을 대상으로 평가하는 것이 시간과 비용 그리고 평가결과의 신뢰도 측면에서 합리적이다. 또한 지침의 안정화 기준은 매립가스 내 메탄함량 5% 이하이며, 이는 침출

수와 마찬가지로 농도규정이므로 메탄 발생량이 미미해도 농도기준 초과 시 원칙적으로 사후관리종료가 불가능하다. 따라서 매립 폐기물의 최대 메탄 발생량 대비 잔존하는 발생 가능한 양이 어느 수준 이하로 판단되면 사실상 내부 안정화가 이루어져서 총량 측면에서 무의미해지므로 사후관리종료가 가능해져야 한다.

최대 메탄 발생 가능량 대비 향후 발생 가능한 메탄의 비율인 메탄 잔여비율은 Eq. (1)과 같다. 이때 평가기준 시점 이전 과거의 메탄 발생량 Q 는 측정치가 없을 경우 모델링을 통하여 구하며, 메탄의 최대 발생 가능량은 매립폐기물 총량 W 에 L (Pearse et al., 2018)을 곱하여 구할 수 있다.

$$R = \left(1 - \frac{Q}{\sum_{i=1}^n L_i W_i} \right) \times 100 \quad (1)$$

여기서, R 은 메탄 잔여비율(%), Q 는 과거 발생 메탄량(Nm^3), L 은 폐기물 성상별 메탄 최대 발생가능량(Nm^3/Mg), W 는 성상별 매립 폐기물 총량(Mg), n 은 폐기물 성상의 수

Eq. (1)은 매립장에서 표면 발산(Mønster et al., 2019; Di Trapani et al., 2013)되는 메탄의 산화율은 고려되지 않았다. 향후 발생할 메탄이 포집되지 않고 모두 복토층을 통해 발산 될 경우 복토층에서의 메탄 산화율(Feng et al., 2017)을 반영하여 실제 미 산화 부분만을 메탄의 추가 배출로 평가할 경우 Eq. (2)와 같이 표현할 수 있다. 이는 실질적인 메탄 배출량의 반영이라는 측면과 함께 매립장 운영조직에서 복토관리에 대한 관심을 기울이게 하는 유인책이 될 수 있을 것이다.

$$R = \left[1 - \frac{Q}{Q + \left(\sum_{i=1}^n L_i W_i - Q \right) \times (1 - O_x)} \right] \times 100 \quad (2)$$

여기서, O_x 는 향후 발생될 메탄을 전량 표면 발산시킬 경우의 메탄 산화율(0~1)

최대 매립가스 발생 가능량 대비 잔존량의 비율인 R 이 어느 수준 이하일 때 사후관리종료가 가능한지 그 기준을 정해야 하며, 이를 위해서는 과학적 근거에 기반한 정책적 판단이 필요할 것이다. 예로서 현 관련지침의 안정화 척도인 메탄 함량 5% 이하, 폐기물 내 유기물 함량 5% 이하, 그리고 메탄의 GWP 21을 고려할 때 R 을 최소 5%로 보고 여기에 모델링 및 각종 자료의 불확실성, 안전율 등을 감안하여 그 이하로 할 수 있을 것이다.

Eq. (2)에서 R 을 구하기 위해서 Eq. (3)의 매립가스 모델을 사용하였다. 「온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침」의 ‘별표6 배출활동별 온실가스 배출량 등의 세부산정방법 및 기준’은 기본적으로 IPCC 방법론(Park et al., 2019; IPCC, 2006)과 같고 Eq. (3)의 1차 반응함수를 사용한다(Sun et al., 2019). IPCC 방법론에서 분해 가능한 유기탄소 비율(DOC), 메탄으로 전환 가능한 DOC 비율(DOCf), 메탄 보정계수(MCF)는 BMP 실험(Strömberg et al., 2014)에서의 최대 메탄 발생량인 L 과 동일한 개념이다.

$$Q_{CH_4} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n L_i W_{ij} (1 - e^{-k_j t}) \quad (3)$$

여기서, Q_{CH_4} 는 메탄 총 발생량(Nm^3), L 은 단위 폐기물량 당 메탄 최대 발생 가능량(Nm^3/Mg), W 는 연간 매립 폐기물량(Mg/y), k 는 분해 속도 상수(y^{-1}), t 는 폐기물 매립 경과 연수(y), n 은 폐기물 성상의 수, m 은 매립된 연도

Eq. (3)에서 W 와 L 은 LS1의 조사 자료를 적용하였다. k 의 경우 기존 연구결과(SLC, 2017b)를 참조하여 음식물을 이분해성으로 나머지는 중분해성으로 하였다. 모델 결과 값은 실제 발생된 매립가스 실측값과의 비교를 통해 L 과 k 를 조정하여 보정하였다. 이때 실측값은 매립가스의 포집량, 간이소각기 소각량, 표면발산량 세 가지의 합이어야 하나, 표면발산량은 LS1에서 2005년부터 측정이 시작되었다. 따라서 비교를 위한 현장 실측값은 2005~2019년의 것이다.

최적 L , k 는 몬테카를로법(Giner-Sanz et al., 2015)을 사용하여 구하였다. 이때 난수발생 범위는 k 는 IPCC의 k 불확도 범위 30%를 적용하였고, L 의 경우 생활폐기물의 음식물, 종이, 목재, 섬유는 LS1에서 1997년도에 수행한 BMP 실험값(SLA, 1997)을 적용하되 IPCC의 불확도 범위 20%를 적용하였다. 생활폐기물 기타와 건설폐기물의 종이, 목재, 섬유, 그리고 슬러지는 1997년 당시 연구되지 못하였다. 따라서 이후 LS1에서 세 차례 수행된 각 성상별 L 의 최대와 최소값을 각 난수 발생의 상·하한으로 하였다. 이상의 조건에서 10,000회 계산을 하여 현장 실측값과의 평균편차의 절대값이 가장 작은 L , k 를 찾아 Eq. (3)에 적용하였다. LS1의 최대 메탄 발생 가능량은 Eq. (1)과 같이 최적 L 을 W 에 곱하여 구하였다. Eq. (2) O_x 의 경우 표면발산되는 메탄의 유량에 따라 다르겠으나(Feng et al., 2017), 이에 대한 연구결과가 없기 때문에 2005~2019년 측정된 표면발산량의 산화율을 적용하였다.

2.3 침출수 부문

침출수 자료는 LS1에서 1993.1월부터 시작된 월별 평균 발생량 및 수질항목별 분석 자료를 사용하였다. 현 상태에 대한 분석을 위해 우선, 2019년을 기준으로 침출수 원수의 수질항목별로 환경영향평가협의기준 및 배출수역 지역기준별 배출허용기준에 대한 만족여부를 평가하였다. 그리고 연평균 수질이 환경영향평가협의기준 등을 준수하지 못하고 있는 주요 수질항목에 대한 추이분석을 통해 기준 만족 예상시기를 추정하였다. 또한 현재의 오염농도 중심의 사후관리종료 제도를 오염총량기준으로 전환하는 경우에 대한 차이점을 평가하였다. 이를 위해 현재 기준을 초과하고 있는 주요 수질 항목에 대하여 1993~2019년의 각 월별 침출수 발생량에 수질농도를 곱하여 월별 오염 부하량을 구하였으며, 동 기간의 최고 및 평균값 등을 2019년의 침출수원의 오염부하량과 비교·평가 하였다.

사후관리종료 기준에 총량개념(Li et al., 2018)을 도입할 경우 전 수질 항목을 동시에 만족해야 하는 것 보다는 각 항목별로 적용할 필요가 있다. 이 경우 사후관리종료가 가능한 침출수원의 배출부하량 기준의 설정이 필요하다. 본 연구에서는 Eq. (4)와 같이 매립종료 후의 특정연도에서 침출수원의 특정 수질항목 배출부하량이 사후관리종료 기준 배출부하량보다 작을 때로 하였다. 이때 사후관리종료 기준 배출부하량은 특정 매립장의 총 매립기간 동안의 연도별 침출수 발생량에 환경영향평가협의기준 또는 배출허용기준 수질을 곱해서 구한 배출부하량의 평균값에 필요 시 정책적 또는 지역적 특성의 판단에 따른 안전율을 고려한 값으로 하였다. 그리고 이와 같은 방법에 의하여 LS1에 대한 생물화학적산소요구량(BOD), 화학적산소요구량(COD), 총질소(T-N)의 사후관리종료 가능 시점을 추정하였다.

$$Q_i C_i < f \cdot [(\sum_{i=1}^n Q_i C_{Li})] / n \quad (4)$$

여기서, Q_i 는 매립종료 후 특정연도의 침출수량(m^3/y), C_i 는 매립종료 후 특정연도의 침출수원의 농도(mg/L), Q 는 매립기간 중 연간 침출수량(m^3/y), C_L 은 환경영향평가협의기준농도 또는 배출허용기준농도(mg/L), f 는 정책적 판단에 의한 안전율($0 \sim 1$), n 은 매립년수(y)

3. 결과 및 고찰

3.1 매립가스

3.1.1 메탄 발생량 및 잔여율 분석

LS1에는 불연물을 제외한 분해 가능한 폐기물이 총 33.3×10^6 Mg 매립되었으며, 생활폐기물 82.7%, 건설폐기물 7.7%, 슬러지 9.7%이다. Table 2는 1992~2000의 불연물을 제외한 성상별 폐기물 매립량, 몬테카를로법 적용을 위한 L 과 k 의 상·하한 그리고 실측값과의 평균편차가 12.2%로서 가장 작아 최종 선택된 L 및 k 이다. L_{max} 는 최적 L 을 Eq. (1)과 같이 성상별 매립폐기물량에 곱하여 구한 폐기물 성상별 최대 메탄 발생 가능량으로서 총 $2,521 \times 10^6 Nm^3$ 이며, 기여율에 있어서 생활폐기물이 94.6%로서 대부분을 차지하고 있고, 건설폐기물 2.8%, 슬러지 2.6% 이다. 이는 분해 가능한 폐기물 매립량 가운데 생활폐기물의 비율이 크고 동일 성상이라 하여도 건설폐기물의 L 이 생활폐기물에 비하여 작기 때문이다(GRENCO, 2016).

모델을 통한 메탄의 기 발생량 및 예측량과 이에 따른 잔여비율은 Fig. 1과 같다. 2020년까지 발생된 메탄은 $2,300 \times 10^6 Nm^3$, 그리고 Table 2의 총 발생가능 메탄 $2,521 \times 10^6 Nm^3$ 에 대한 Eq. (1)의 메탄 잔여비율 R 은 2020년 8.8%, 2030년 7.0%, 2040년 6.5%로 추정되며, 폐기물분해와 매립가스 전환 속도가 시간이 흐를수록 느려지기 때문에 감소폭은 점점 작아지는 것으로 나타났다.

Table 2. Disposed decomposable waste W , optimum L , k , and maximum CH_4 generation potential of LS1

Waste	Household					Demolition			Sludge	
	Food	Paper	Wood	Textile	Other	Paper	Wood	Textile		
W (10^3 wet Mg)	12,649	11,132	613	1,903	1,192	503	1,849	192	3,221	
L ($Nm^3 CH_4/wet Mg$)	Upper limit	97.8	153.5	107.6	222.3	109.3	89.9	16.7	121.0	21.4
	Lower limit	65.2	102.3	71.7	148.2	28.0	54.5	6.1	65.1	14.2
	Optimum	65.4	104.6	83.6	150.2	47.2	66.0	8.1	117.7	20.5
k (yr^{-1})	Upper limit	0.901	0.180	0.180	0.180	0.180	0.180	0.180	0.180	0.181
	Lower limit	0.485	0.097	0.097	0.097	0.097	0.097	0.097	0.097	0.097
	Optimum	0.608	0.154	0.147	0.101	0.131	0.138	0.173	0.102	0.157
L_{max} ($10^6 Nm^3 CH_4$)	827	1,164	51	286	56	33	15	23	66	

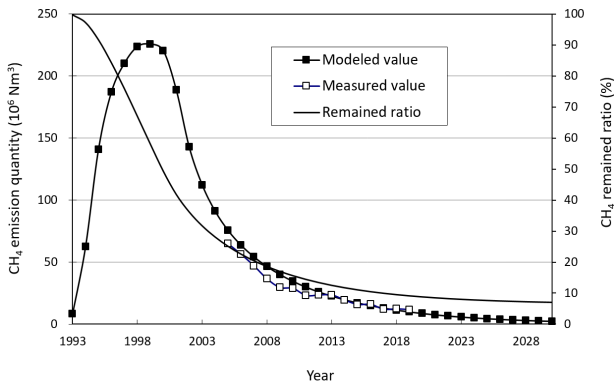


Fig. 1. CH₄ generation and estimated remained ratio (*R*) of LS1

3.1.2 메탄 산화율 적용 결과

전술한 메탄 잔여율 *R*은 2020년 이후 매립가스 포집을 중단하여 전량 표면 발산될 경우 Eq. (2)의 *Ox*는 고려되지 않았으므로 이를 반영하여 분석하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 2005년 총 발생 메탄량은 $65.9 \times 10^6 \text{ Nm}^3$ 에서 2019년 $12.0 \times 10^6 \text{ Nm}^3$ 으로 감소하였다. 동 기간 중 매립가스 포집율은 평균 81.8%이나, 2015년 87.6%에서 2019년 67.7%로 점차 떨어지는 추세이다. 2005~2019년 기간 중 메탄의 평균 표면 발산량은 $507 \times 10^3 \text{ Nm}^3$, 메탄이 산화되기 전의 양으로 환산하면 평균 $4,709 \times 10^3 \text{ Nm}^3$ 이다. 연도별 기록이 있었으나 동 기간 평균 산화율은 89.1%이었다. 매립가스의 발생량 감소, 유이한 표면 발산 메탄의 산화율, 포집율 감소의 세 가지 요인에 의한 메탄의 표면 발산량은 2005년 $9.7 \times 10^6 \text{ Nm}^3$, 2019년 $8.1 \times 10^6 \text{ Nm}^3$ 이고, 평균 $8.1 \times 10^6 \text{ Nm}^3$ 로 연도별로 유사하였다. 이는 포집율을 높일 경우 외기 유입에 의하여 매립가스 내 산소농도가 높아져 매립가스 발전 시 문제가 되기 때문에 포집율을 조정된 결과로서, 포집율이 낮아져도 전체 매립가스 발생량이 줄어들고 있기 때문에 표면 발산량 자체는 큰 변화가 없게 된 것으로 판단된다. 산화율은 메탄의 복토층으로의 투과 유량에 따라 변화될

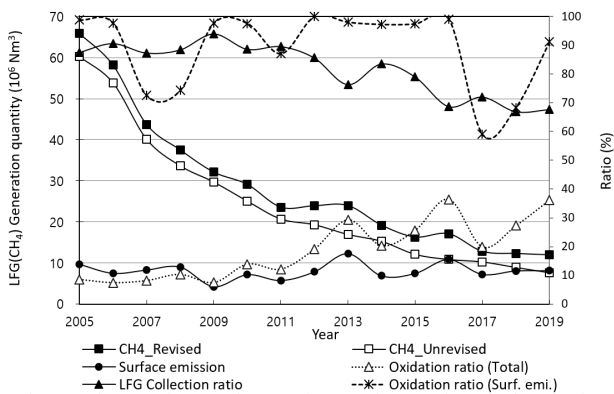


Fig. 2. Trends of LFG (CH₄) generation, collection rate, and oxidation rate

것이고, 유량이 클수록 산화율은 떨어질 것이나 이에 대한 구체적인 연구결과가 없다. 다만, 매립종료 후 시간이 지날수록 매립가스 발생량이 감소하므로 2020년 이후 표면 발산량이 2019년 이전보다 증가하지 않는다면 이후의 표면발산 메탄량에 2005~2019년의 평균 산화율 89.1%를 적용할 수 있을 것이다. 모델 적용결과에 의하면 2024년의 메탄발생은 2025년 $4,391 \times 10^3 \text{ Nm}^3$ 로서, 2025년 이후에는 발생하는 메탄을 포집 중단하여 전량 표면 발산된다 하여도 2005~2019년 평균 표면 발산량 이하이다. 따라서 2025년 이후의 표면 발산되는 메탄에 대해서 2005~2019년의 평균 산화율 89.1%를 적용하였다. 다만, 2020~2024년 사이에 포집중단 시 전량 표면 발산되는 양은 2025년보다 많고, 그 경우 산화율은 떨어질 수 있다. LS1에서의 표면 발산량과 산화율 간의 관계에 대한 조사 자료가 없으므로 표면 발산량과 산화율의 관계를 역 선형적이라고 보수적으로 가정하고, 2005~2019년의 평균 표면 발산량 대비 2020~2024년의 전량 표면 발산 시의 비를 89.1%에 반영하여 계산하였다. 이를 적용하여 모델 값을 수정할 경우 2020년 이후 총 발생 가능한 메탄량은 기존 $2,521 \times 10^6 \text{ Nm}^3$ 에서 $2,317 \times 10^6 \text{ Nm}^3$ 로 줄어들며, 이에 따른 메탄 잔여율 *R*은 2020년 1.01%, 2030년 0.76%, 2040년 0.70%이다. 표면발산 유량과 산화율의 관계는 매립장 조건에 따라 큰 차이가 나므로 향후 이에 대해서는 후속연구가 필요하다.

이상에서 본 바와 같이, LS1의 경우 매립가스를 이용하려는 목적이 아닌 경우 포집을 중단하여도 향후 복토층 산화 후 대기로 배출될 양은 총 메탄 발생 가능량의 2% 미만이다. 따라서 향후 포집율을 줄여 포집 매립가스 내 외기 함량을 낮추는 것이 바람직하다. 그리고 현재의 안정화 평가기준 가운데 매립가스 부문에 있어서 *R*을 어떻게 정하는가에 따라 다르겠지만 상기와 같은 새로운 기준에 의할 경우 적어도 2025년 이후에는 현재의 표면 발산량 이하가 되므로 전면 포집중단 및 매립가스 부문에 대하여는 사후관리 종료를 하여도 무방할 것으로 판단된다.

3.2 침출수

3.2.1 침출원수 배출허용기준 만족시기 추정

Table 3은 제1매립장의 수질항목별 환경영향평가협의기준(배출허용기준)과 각 지역별 배출허용기준 대비 2019년도 침출원수의 수질현황을 분석한 것이다. LS1의 배출수역은 법상 '나'지역이나 환경영향평가협의기준은 '청정'지역 이상으로 강화된 기준을 적용하고 있다. 매립종료 후 원수의 수질이 항목에 따라서는 크게 낮아짐에 따라 총 24개의 환경영향평가협의기준 중 17개 항목은 처리 없이도 기준을

만족하고 있다. 참고로 각 지역기준에 대한 원수수질을 평가해 보면 ‘청정’지역일 경우 17개, ‘가’지역의 경우 20개 ‘나’지역일 경우 22개 항목이 기준을 만족하며, ‘나’지역 조차 만족하지 못하는 항목은 COD, T-N 2개 항목이다.

Fig. 3은 BOD, COD, T-N의 추이분석에 의한 수질전망과 배출허용기준의 만족시기를 추정한 것이다. COD의 경우 개정된 배출허용기준이 환경영향평가협의기준보다 엄격하고, T-N의 경우 신설된 항목이며, BOD의 경우 환경영향

Table 3. Satisfaction level of each water quality item of leachate to regional legal criteria (2019)

Water quality items	Untreated leachate	EIA criteria (permissible emission standard)	Permissible emission standard		
			Clean area	“Ga” area	“Na” area
pH	7.9	5.8~8.0	5.8~8.0	5.8~8.0	5.8~8.0
BOD	49.5	30	30	50	70
COD	670.2	280	400	600	800
COD*	670.2	200	200	300	400
SS	14.8	30	30	50	70
T-N*	1,130	Not greater than 100	Not greater than 100	Not greater than 150	Not greater than 200
T-N* after '23.7.1	1,130	" 30	" 30	" 60	" 60
TIN**	1,060	130	" 50	" 200	" 300
NH ₃ -N**	1,040	20	" 50	" 100	" 100 (90%)
T-P	10.8	4	4	8	8
n-H (fat & oils of animals & plants)	2.75	5	5	30	30
n-H (mineral oils)	1.32	1	1	5	5
Phenol	0.05	1	1	3	3
Cu	0.92	0.5	0.5	3	3
Cd	0.0004	0.02	0.02	0.1	0.1
Pb	n.d.	0.2	0.2	1	1
AS	0.002	0.1	0.1	0.5	0.5
T-Cr	0.076	0.5	0.5	2	2
Cr ⁺⁶	0.031	0.1	0.1	0.5	0.5
Hg	n.d.	0	n.d.	0.005	0.005
S-Fe	2.45	2	2	10	10
S-Mn	0.18	2	2	10	10
Zn	0.20	1	1	5	5
CN	0.013	0.2	0.2	1	1
Org-P	n.d.	0.2	0.2	1	1
PCB	n.d.	0	n.d.	0.005	0.005
TCE	n.d.	0	0.06	0.3	0.3
PCE	n.d.	0	0.02	0.1	0.1

Note: Shaded columns are unsatisfied water quality item

* Permissible emission standard is applied because EIA criteria has not yet changed.

** Abolished by enforcement regulations revision (2020.11.27)

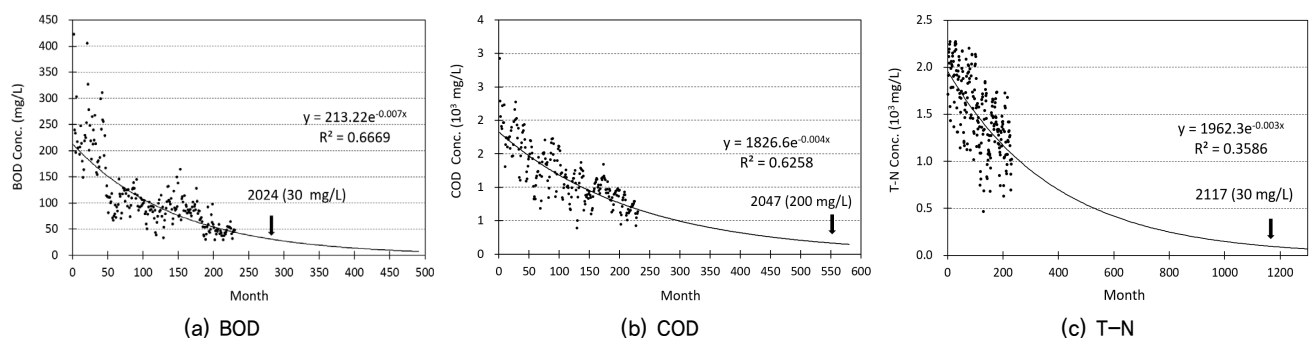


Fig. 3. Estimated satisfying years for environmental impact assessment consultation criteria of major water quality items of leachate

평가협의기준과 배출허용기준이 동일하다. 따라서 이들 3개 항목 모두 가장 엄격한 청정지역의 배출허용기준 만족시기에 대하여 분석하였다. BOD의 경우 2024년, COD 2047년, T-N은 2117년경이 되어야 배출허용기준을 만족할 수 있을 것으로 추정된다. 즉, 현재의 농도에 기반한 안정화 기준을 그대로 유지할 경우 매립장의 관리방식을 근본적으로 바꾸지 않는 한 향후 사후관리종료에는 장기간 소요가 불가피하다.

3.2.2 침출원수 배출부하량 현황 및 전망

Table 4는 BOD, COD, T-N에 대한 농도와 배출부하량 추이에 대한 세부 분석 결과이다. 1993~2019년 기간 중 BOD, COD, T-N의 침출원수 총 배출부하량은 각각 34,245 Mg, 81,290 Mg, 36,893 Mg이고, 청정지역의 배출허용기준에 따른 처리 시의 배출부하량은 각각 656 Mg, 4,372 Mg, 656 Mg이다. 3개의 수질항목별로 배출허용기준에 맞추기 위한 총량기준에 의한 동 기간 최소 처리율은 각각 98.1%, 94.6%, 98.2%이다.

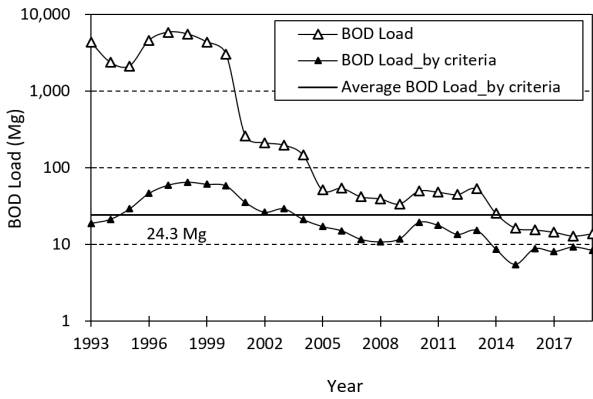
배출부하량은 침출수량 및 침출원수의 수질 농도의 저하로 인해 전반적으로 감소하고 있는데, BOD의 경우 최고시점에 비할 때 2019년 농도는 0.7%, 배출부하량은 0.2% 수준이며, COD는 농도는 3.3%, 배출부하량은 1.5% 수준으로 크게 감소했다. 1993~2019년까지 배출허용기준 농도로 방류했을 경우 배출부하량 평균치와 비교하면 2019년도의 BOD의 침출원수 배출부하량은 57.2%로 감소하였다. 즉, BOD의 경우 2019년도에 원수 그대로 방류할 경우에도 배출부

하량에서는 1993~2019년까지의 배출허용기준 대로 처리하여 방류한 평균 배출부하량보다 적다. COD의 경우는 배출허용기준 개정 전 환경영향평가협의기준인 280 mg/L로는 83.2%감소하였으나 개정된 기준 200 mg/L 적용 시 116.1%로 나타났다. T-N은 최고농도와 최고 배출부하량보다는 각각 52.2%, 7.5% 수준이나, 배출허용기준으로 처리한 평균 배출부하량에 비하여 1,303%이다. 이는 탄소계열 BOD, COD와 달리 질소계열은 비 기상 배출 물질(Chun, 2018)이므로 폐기물 분해에 의한 배출 시 거의 전량 침출수로 배출되며, 이로 인해 BOD, COD와 비교하여 상대적인 감소폭이 낮기 때문이다(Kim et al., 2004).

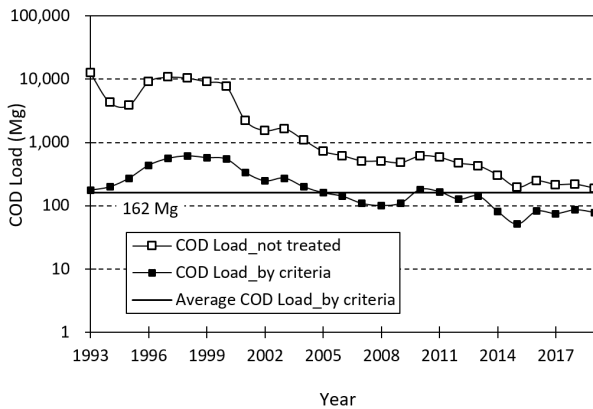
LS1의 BOD, COD, T-N의 원수의 배출부하량 그리고 배출허용기준으로 처리한 경우의 배출부하량의 연도별 추이는 Fig. 4와 같다. BOD는 1997년 5,864 Mg, COD는 1993년 12,596 Mg, T-N은 2000년 4,207 Mg으로 최대였고, 이후 3개 항목 모두 감소하고 있으며, 특히 BOD의 감소폭이 가장 크다. LS1의 BOD, COD, T-N을 배출허용기준대로 처리했을 경우의 배출부하량의 1993년부터 2019년까지의 연간 평균은 각각 24.3 Mg, 162 Mg, 24.3 Mg이다. BOD는 2015년 이후 미처리된 원수의 배출부하량은 이 연간 평균 값 이하로 낮아지고 있고, COD는 2019년도 기준으로 미처리 배출부하량이 116%로 초과하고 있으나 지속적인 감소추세이므로 수년 내 100% 이하로 감소할 가능성이 있다. LS1의 경우 안전율의 적용여부에 따라 다르겠지만 Eq. (4)의 안전율을 1로 할 경우 BOD는 2020년, COD도 수년 내 사후관리종료가 가능할 것으로 판단된다.

Table 4. The variation of concentration and total pollutant load of major leachate water quality items (1993–2019)

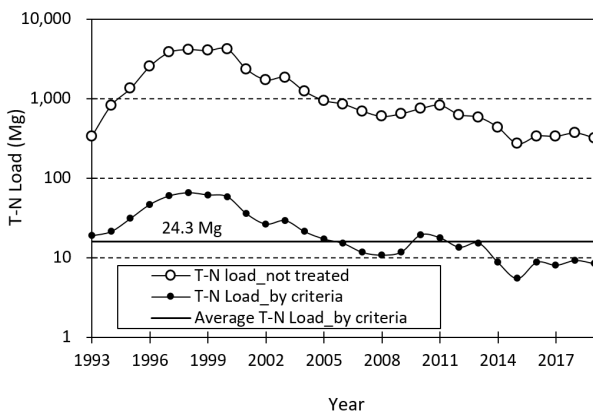
			BOD	COD	T-N
Conc.	Not treated (mg/L)	Ⓐ 2019	49.5	670	1,130
		Ⓑ Maximum (year)	6,887 (1993)	20,025 (1993)	2,163 (2000)
		Ⓒ Mean	991	2,843	1,529
	Ratio (%)	$100 \times \text{Ⓐ} / \text{Ⓑ}$	0.7	3.3	52.2
		$100 \times \text{Ⓐ} / \text{Ⓒ}$	5.0	23.6	73.9
Load	Not treated (Mg/y)	① 2019	13.9	187.9	316.6
		② Maximum (year)	5,864 (1997)	12,596 (1993)	4,207 (2000)
		③ Mean	1,268	3,011	1,366
	Treated by criteria (Mg/y)	④ Maximum (year)	65.3 (1998)	435 (1998)	65.3 (1998)
		⑤ Mean	24.3	161.9	24.3
	Ratio (%)	$100 \times \text{①} / \text{②}$	0.24	1.5	7.5
		$100 \times \text{①} / \text{③}$	1.1	6.2	23.2
		$100 \times \text{①} / \text{④}$	21.3	43.2	484.8
		$100 \times \text{①} / \text{⑤}$	57.2	116.1	1,302.9



(a) BOD



(b) COD



(c) T-N

Fig. 4. Annual trends of total pollutant load of major water quality item

그러나 T-N에 대하여 배출허용기준 배출부하량 24.3 Mg을 목표로 추이분석을 하면 만족 시기는 약 2041년이다. 물론 기준년도가 2019년 이후로 장기간 늦춰질수록 전체 평균 협의기준 처리 배출부하량은 24.3 Mg보다 낮아지므로 2041년보다도 늦을 것이다. 따라서 T-N의 경우에는 새로운 사후관리종료제도를 적용한다 하여도 현재의 매립장 사후관리방식을 근본적으로 변화시킬 필요가 있다. 새로운 사후관리방안으로는 매립장의 호기화, 저 질소함유 폐수 공급방식의 바이오리액터형 매립공법, 탈질유도를 위한 바이오리

액터형 매립공법 등에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다 (Bae et al., 2019; Won et al., 1999).

4. 결 론

구조변경 계획이 없는 매립장에 대하여 적용가능 한 사후관리종료제도 개선방안을 LSI을 대상으로 적용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 모델을 통해 분석한 2020년까지 발생된 메탄은 $2,300 \times 10^6 \text{ Nm}^3$ 로서, 메탄 잔여비율 R 은 총 발생가능량인 $2,521 \times 10^6 \text{ Nm}^3$ 대비 2020년 8.8%, 2030년 7.0%, 2040년 6.5%가 될 것으로 추정된다.
- (2) 2020년 이후의 표면발산 메탄량에 2005~2019년의 평균 산화율 89.1%를 적용하여 모델 값을 수정 시, 메탄 잔여율 R 은 2020년 1.01%, 2030년 0.76%, 2040년 0.70%이었다. 따라서 안정화 기준을 총량방식으로 전환할 경우, 2025년 이후 메탄이 전량 표면 발산되어도 2019년 기준 표면 발산량보다 적어 사후관리 종료가능하다.
- (3) BOD, COD, T-N의 추이분석 결과, BOD는 2024년, COD 2047년, T-N은 2117년경에 배출허용기준을 만족할 수 있을 것으로 추정된다.
- (4) 오염부하량 계산결과 1993~2019년까지 배출허용기준 농도로 방류 시의 배출부하량 평균치 대비 2019년도의 BOD, COD, T-N의 침출원수 배출부하량은 각각 57.2%, 116.1%, 1,303%이었다.
- (5) 사후관리종료를 배출부하량 기준으로 변경할 경우 BOD는 현 시점에서 그리고, COD도 수년 내 가능하나, T-N의 경우 기간이 크게 단축되기는 하나 2041년 이후에나 가능하여 근본적인 관리방식의 전환이 필요하다.

References

1. Bae, W. K., Kim, S. G., Lee, J. H. and Chung, J. W. (2019), Effect of leachate circulation with ex situ nitrification on waste decomposition and nitrogen removal for early stabilization of fresh refuse landfill, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 371, pp. 721~727.
2. Chen, Y. M., Xu, W. J., Ling, D. S., Zhan, L. T. and Gao, W. (2020), A degradation-consolidation model for the stabilization behavior of landfilled municipal solid waste, *Computers and Geotechnics*, Vol. 118, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103341>.
3. Chun, S. K. (2018), Mass balance analysis on the behavior of major elements disposed at a waste landfill site, *Waste Management*, Vol. 71, pp. 233~243.

4. Di Trapani, D., Di Bella, G. and Viviani, G. (2013), Uncontrolled methane emissions from a MSW landfill surface: Influence of landfill features and side slopes, *Waste Management*, Vol. 33, No. 10, pp. 2108~2115.
5. Feng, S., Ng, C. W. W., Leung, A. K. and Liu, H. W. (2017), Numerical modelling of methane oxidation efficiency and coupled water-gas-heat reactive transfer in a sloping landfill cover, *Waste Management*, Vol. 68, pp. 355~368.
6. Giner-Sanz, J. J., Ortega, E. M. and Pérez-Herranz, V. (2015), Montecarlo based quantitative Kramers-Kronig test for PEMFC impedance spectrum validation, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 34, pp. 11279~11293.
7. Green Energy Development Co., Ltd. (GRENCO) (2016), The influence of waste energy recovery and resource recovery of sludge on landfill process of Sudokwon landfill, pp. 41~48 (In Korean).
8. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2006), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol. 5, 3.17.
9. Kim, D. O., Kim, T. Y., Kim, M. H. and Kim, M. I. (2009), Reclamation of closed non-sanitary landfills by sorting transfer control, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 10, No. 1, pp. 15~23.
10. Kim, J. K., Kim, S. K. and Park, N. B. (2004), A study on the chemical characteristics of waste and leachate on landfill site, *J. Korea Society of Waste Management*, Vol. 21, No. 6, pp. 607~617.
11. Lee, B. C., Lee, M. H., Park, S. C., Jeong, S. K., Han, Y. S. and Yeon, I. J. (2009), Analysis by environmental factor of similar closed non-sanitary landfills, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 10, No. 6, pp. 27~33.
12. Li, K., He, J., Li, J., Guo, Q., Liang, S., Li, Y. and Wang, X. (2018), Linking water quality with the total pollutant load control management for nitrogen in Jiaozhou Bay, China, *Ecological Indicators*, Vol. 85, pp. 57~66.
13. Morris, J. W. F. and Barlaz, M. A. (2011), A performance-based system for the long-term management of municipal waste landfills, *Waste Management*, Vol. 31, No. 4, pp. 649~662.
14. Mønster, J., Kjeldsen, P. and Scheutz, C. (2019), Methodologies for measuring fugitive methane emissions from landfills - A review, *Waste Management*, Vol. 87, pp. 835~859.
15. Park, J. K., Kim, R. H. and Lee, N. H. (2019), Determination of IPCC landfill gas generation model parameters using iterative non-linear least square method, *J. Korea Society of Waste Management*, Vol. 36, No. 3, pp. 308~320.
16. Park, S. C., Cho, B. R., Jeong, J. H., Lee, M. H., Kim, T. Y. and Park, J. H. (2008), Assessment on environmental stabilization of used open dumping landfill - a case study of Kamkok landfill, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 9, No. 6, pp. 13~19.
17. Pearse, L. F., Hettiaratchi, J. P. and Kumar, S. (2018), Towards developing a representative biochemical methane potential (BMP) assay for landfilled municipal solid waste - A review, *Bioresource Technology*, Vol. 254, pp. 312~324.
18. Spokas, K., Bogner, J., Chanton, J. P., Morcet, M., Aran, C., Graff, C., Moreau-Le Golvan, Y. and Hebe, I. (2006), Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems?, *Waste Management*, Vol. 26, No. 5, pp. 516~525.
19. Strömberg, S., Nistor, M. and Liu, J. (2014), Towards eliminating systematic errors caused by the experimental conditions in Biochemical Methane Potential (BMP) tests, *Waste Management*, Vol. 34, pp. 1939~1948.
20. SUDOKWON Landfill Site Management Corp. (SLC) (2017a), The survey report on managed landfill (In Korean).
21. SUDOKWON Landfill Site Management Corp. (SLC) (2017b), 2016 Site monitoring and generation characteristic analysis of LFG from sudokwon landfill, pp. 99~100 (In Korean).
22. SUDOKWON Landfill Site Operation and Management Association (SLA) (1997), Analysis and investigation on the installation efficiency of LFG treatment facility, p. 102 (In Korean).
23. Sun, W., Wang, X., DeCarolis, J. F. and Barlaz, M. A. (2019), Evaluation of optimal model parameters for prediction of methane generation from selected U.S. landfills, *Waste Management*, Vol. 91, pp. 120~127.
24. Won, C. H., Kim, Y. K. and Kim Y. D. (1999), Removal of carbon and nitrogen within the crushed stones layer of simulated columns and construction proposal of columns and construction proposal of semi-aerobic landfill, *J. Korea Society of Waste Management*, Vol. 16, No. 6, pp. 604~613.
25. Zheng, Q. T., Kerry Rowe, R. and Feng, S. J. (2018), Design of vertical landfill gas collection wells considering non-homogeneity with depth, *Waste Management*, Vol. 82, pp. 26~36.