

## 음폐수 이용 기존 매립지 가스 발생 향상에 따른 온실가스 감축효과

신경아<sup>†</sup> · 동종인\* · 박대원\*\* · 김재형\*\*\* · 장원석\*\*\*\*

서울시립대학교 환경공학부\*, 서울과학기술대학교\*\*, 수도권매립지관리공사\*\*\*, 한국지역난방공사\*\*\*\*

(2016년 8월 11일 접수, 2016년 9월 13일 수정, 2016년 9월 19일 채택)

## Greenhouse Gas Reduction Effect of Improvement of Existing Landfill Gas(LFG) Production by Using Food Waste Water

Kyounga Shin<sup>†</sup>\*, Jongin Dong\*, Daewon Park\*\*, Jaehyung Kim\*\*\*, Wonsoek Chang\*\*\*\*

School of Environmental Engineering, University of Seoul\*,

Seoul National University of Science & Technology\*\*,

Sudokwon Landfill Site Management Corp.\*\*\*, Korea District Heating Corp.\*\*\*\*

(Received 11 August 2016, Revised 13 September 2016, Accepted 19 September 2016)

### 요 약

본 연구에서는 신기후체제 대비를 위한 온실가스 감축 수단으로써 신재생에너지원인 매립가스의 에너지이용 확대를 위해 현장 매립폐기물을 적용하여 음폐수 주입에 따른 메탄가스 생산량 증대 및 이에 따른 온실가스 감축효과를 분석하고자 하였다. 메탄가스 생산량 증대를 위해 주입하는 음폐수는 35℃, pH 6으로 전처리한 후 사용하였고, 전처리 반응조는 타공성 담체가 고정된 상향류식 고정층 반응기를 이용하였다. 실제 매립폐기물을 이용한 pilot-scale 바이오리액터 운전결과 음폐수 주입시 강우를 활용한 대조군에 비해 6배의 매립가스 증가율을 보였으며, 평균 매립가스 발생량은 56ℓ/day/m<sup>3</sup>으로 1 m<sup>3</sup> 매립지용적에서 연간 약 20 m<sup>3</sup>의 메탄가스가 생산 가능함을 확인하였다. 이를 에너지원으로 활용할 경우 25만 m<sup>3</sup> 이상의 중규모 매립지에 적용시 사업성이 확보될 뿐만 아니라 기 등록되어 있는 매립가스 활용 CDM 사업 및 방법론을 기준으로 폐기물 처리용량 25만 m<sup>3</sup> 규모의 매립지를 대상으로 온실가스 감축량을 산출한 결과 연간 약 4~5만 톤의 온실가스 감축효과가 있음을 확인하였다.

**주요어 :** 매립가스, 음폐수, 모형매립조, 바이오리액터, CDM방법론, 온실가스 감축

**Abstract -** This study analyzes correlation between methane gas production and injection of food waste water to motivate to expand renewable energy as a way of GHG (Green House Gas) mitigation to achieve the national GHG target proposed for the climate agreement in Paris last year. Pretreatment of food waste water was processed with pH 6 at 35℃ and used the fixed-bed upflow type reactor with the porous media. As a result of operation of pilot-scaled bioreactor with food waste water, the methane gas production was 6 times higher than the methane gas production of control group with rain water. The average production of methane was 56 ℓ/day/m<sup>3</sup> which is possible to produce 20m<sup>3</sup> of methane in 1m<sup>3</sup> of landfill. As a way of energy source, when it is applied to the landfill over 250,000m<sup>3</sup>, it is also able to achieve financial feasibility along with GHG reduction effect. GHG reductions of 250,000m<sup>3</sup> scale landfill were assessed by registered CDM project and the annual amount of reductions was 40,000~50,000 tCO<sub>2</sub>e.

**Key words :** Landfill gas(LFG), Food waste water, Bioreactor, CDM methodology, GHG reduction

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.

Tel : 031-780-4440 E-mail: sophia71@kdhc.co.kr

## 1. 서론

최근 제21차 기후변화협약 당사국총회에서 2020년 이후 신기후체제에 대한 합의가 이루어짐에 따라 선진국만이 감축의무를 지닌 체제에서 우리나라를 포함한 개발도상국까지 참여하는 신체제로 전환되었고,[1,2] 이와 관련하여 우리나라 정부도 2030년 온실가스 배출전망치(BAU; Business As Usual) 대비 37%를 감축하는 국가 감축목표를 설정하고 신기후체제 이행을 위한 강화된 이행계획을 수립하고 있다.[3,4]

신기후체제에 대비한 온실가스 저감 방법의 하나로서 쓰레기 매립장에서 발생하는 매립가스를 에너지원으로 활용함으로써 온난화지수가 21인 메탄가스를 연소를 통해 파괴하고 온난화지수가 1인 이산화탄소로 배출함은 물론 화석연료 대체에 따른 온실가스저감 효과까지 얻을 수 있는 매립가스의 활용은 에너지이용 측면뿐만 아니라 온실가스 저감 측면에서도 우수한 수단임이 확실하다 할 수 있으나,[5-8] 시간이 경과함에 따라 매립장내 유기물 감소로 인한 매립가스의 발생량 감소는 시설투자에 대한 사업성 확보가 불확실하여 매립가스 이용활성화에 걸림돌로 작용하고 있는 실정이다.[9-11]

본 연구에서는 매립가스 발생량이 감소하고 있는 기존 매립지에 매립가스 발생을 향상시킬 수 있는 방안으로서 메탄생성을 위한 혐기성소화 조건에 적합하도록 전처리한 음식물류폐수(이하, 음폐수)를 파이롯 스케일 바이오리액터에 주입하여 침출수의 pH, ORP(Oxidation Reduction Potential; 산화환원전위, 이하 ORP), TOC(Total Organic Carbon; 총유기탄소, 이하 TOC) 등 성상 변화 및 매립가스 발생량 변화를 확인하였으며, 매립가스 발

생량 향상에 따른 재무적 타당성이 있는 매립지 규모를 도출하고, 국제적으로 인정되는 청정개발체제(Clean Development Mechanism; 이하 CDM)사업에 이미 등록되어 있는 매립가스 활용사업의 기초자료를 활용하여, 재무적 타당성이 있는 규모의 매립지 활용사업에 대한 온실가스 감축효과를 산출하고자 하였다. 이를 위한 수행방법으로 실험장치 구성, 매립가스발생 특성확인, 분석방법, 재무적 타당성 분석, 매립가스 발생량 증대에 따른 온실가스 감축효과분석에 대해 설명하고 이에 대한 결과 및 고찰과 결론으로 보고서를 구성하였다.

## 2. 수행방법 및 내용

### 2-1. 실험장치

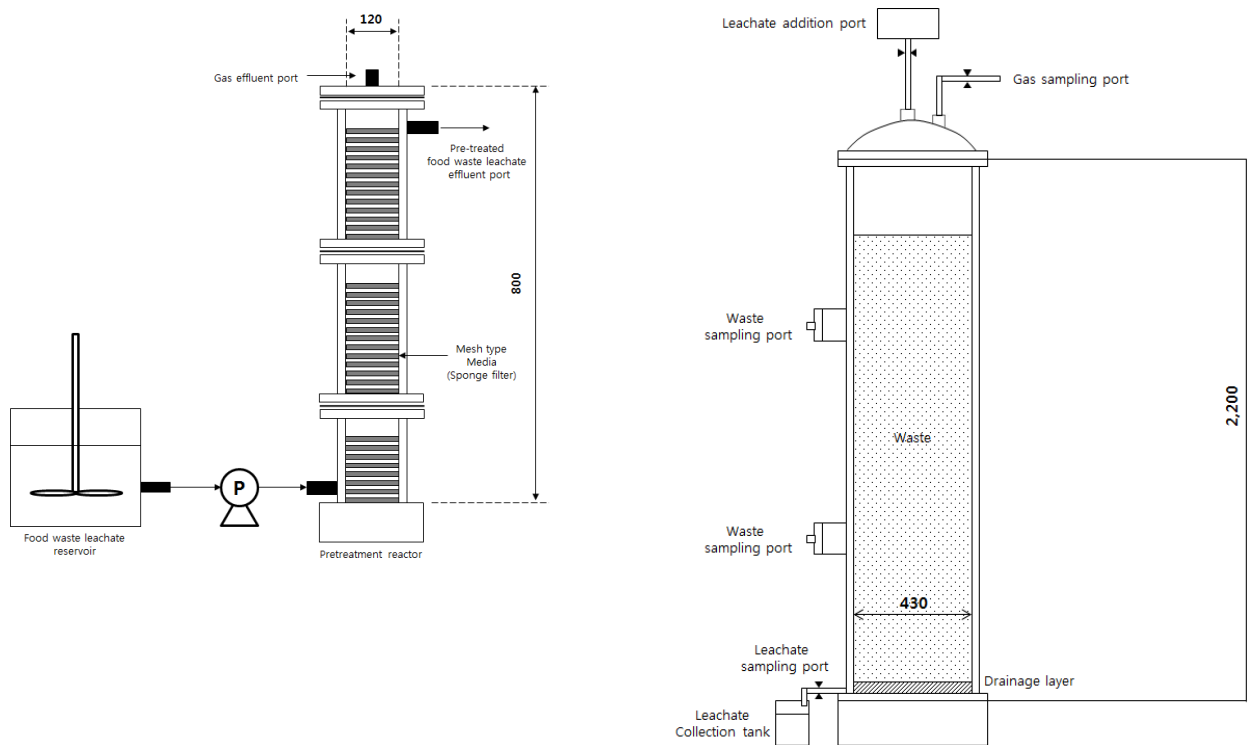
본 연구에 사용한 음폐수는 S시 D음식물중간처리장에서 음식물쓰레기를 분리 및 탈수하는 과정에서 발생하는 음폐수를 수거하여 음폐수에 포함된 입자가 큰 고형물 제거를 위해 체거름(200 mesh) 후에 냉장 보관하여 2일 이내에 사용하였으며, 음폐수에 대한 성상 분석결과는 Table 1에 나타내었다.

Table 1에서 볼 수 있듯이 음폐수는 pH가 낮고, 고분자 유기물질이 다량 함유되어 있어 메탄생성을 위한 혐기성 소화 조건에 맞지 않고, 점도 또한 높아 음폐수를 매립지에 주입하기에도 어려움이 있어 상향류식 고정층 반응기를 사용하여 전처리하였으며, Fig. 1에 음폐수 전처리를 위한 상향류식 고정층 반응기와 실제 매립폐기물을 이용한 파이롯 스케일 바이오리액터를 나타내었다.

파이롯 규모의 바이오리액터에 사용한 실제 매립폐기물은 K도 N시의 사용종료매립장의 매립폐기물을 활용

**Table 1.** Characteristics of food waste leachate

Characteristics	Average
pH	4.57±0.04
Conductivity (ms/cm)	13.17±1.67
Salinity (%)	0.515±0.064
TCODcr (mg/L)	104,843±27,299
SCODcr (mg/L)	63,408±7,960
Total solid (mg/L)	102,588±41,242
Suspended solid (mg/L)	70,275±43,381
Volatile Solid (mg/L)	89,525±38,714
Volatile Suspended Solid (mg/L)	64,500±40,093



**Fig. 1. Pilot scale Bioreactor of Landfill with Pre-treatment of food waste water system**

하였고 외부영향을 최소화하고 온도조절을 위해 밀폐형 시스템으로 설치하였으며 반응기의 재질은 PVC로써, 높이 2,200 mm와 직경 430 mm의 크기로 제작되었고 반응기 외부에 샘플링 포트를 구성하여 상부와 하부로 샘플링이 용이하게 만들었으며, 적정 온도를 위해서 온실을 구축하여 반응기 내부 온도를 35~40℃로 유지시켰다. 또한, 반응기의 상부에는 음폐수 및 침출수 주입 포트를 통해 표면주입방법으로 음폐수를 지속적으로 주입하였으며, 가스 샘플링 포트에는 유량계를 설치하여 실시간으로 가스 발생량을 측정하고 가스농도를 분석할 수 있도록 후단에 가스 포집백을 연결하였고, 반응기 하단에는 공기가 유입되지 않고 침출수를 배출할 수 있도록 U자형태의 관을 설치하였다.

## 2-2. 매립가스 발생 특성 확인

실제 매립폐기물을 이용한 파일럿 스케일 바이오리액터에서의 음폐수 주입에 따른 성상변화를 살펴보기 위해 강우를 이용한 대조군, 침출수 주입, 음폐수 주입으로 비교하였으며 메탄생성균주의 활성도에 영향을 미치는 pH와 침출수량 변화, 반응기 내부의 ORP 값을 측정하여 메탄생성균주의 대사과정이 이루어지는 환원분위기가 조성되는지를 비교하였고, 유출수의 유기물량을 확인하기

위해 TOC를 분석하여 음폐수 주입시 침출수 성상의 변화를 관찰하고 발생가스를 측정하여 메탄가스 발생량을 확인하였다.

## 2-3. 분석방법

파일럿 스케일 바이오리액터에서 발생하는 매립가스는 반응기 상부의 가스샘플링 포트에 디지털유량측정기 (Red-y smart controller version 5, Vögtlin Instruments AG, Switzerland)를 부착하여 가스발생량을 측정하였고, 포터블 가스측정기(Ga-2000, Geotech, UK)를 이용하여 메탄, 이산화탄소, 산소, 질소 등 가스성상을 분석하였다. 파일럿 스케일 바이오리액터 운전중 발생하는 침출수는 반응기 하부의 샘플링 포트에서 2주 간격으로 채취하여 pH미터(UB-5, Denver instrument, USA), ORP 전극(Orion 9678BNWP, Thermo, USA)이 부착된 수질 멀티분석기(Orion 5-star, Thermo, USA)를 이용하여 pH와 ORP를 분석하였으며, TOC는 TOC분석기(TOC 5000A, Shimadzu, Japan)로 측정하였다.

## 2-4. 재무적 타당성 분석

사업성 분석을 위해 개별 사업주체의 관점에서 현금흐름을 추정하고 재무적 수익성을 계산하는 재무적 타당성

분석방법을 사용하였고, 현금흐름할인법으로서 순현재 가치법(NPV; Net Present Value)과 내부수익율법(IRR; Internal rate of return)을 사용하여 최종적으로 수입의 현재가치를 비용의 현재가치로 나눈 수익성 지수(PI; Profitability Index)를 산출함으로써 매립가스 발생량이 증가될 경우와 그렇지 않을 경우를 비교하였다.

### 2-5. 매립가스 발생량 증대에 따른 온실가스 감축효과 분석

매립가스 발생량이 증가되어 매립가스를 안정적으로 에너지화할 수 있다면, 매립가스를 에너지로 사용한 만큼 매립가스 파괴에 대한 온실가스 감축효과를 산정할 수 있으나 이의 산출을 위해서는 매립가스 에너지화 이용시 전력사용량, 메탄가스 발생량 등 실제 모니터링자료가 필수적이라 할 수 있으나 실제 데이터 입수에 어려움이 있어 본 연구에서는 매립가스가 증대된 25만 m<sup>3</sup> 규모의 매립지를 대상으로 하여 UN에 CDM사업으로 기 등록되어 있는 국내 매립지활용사업인 대구방천리 매립가스 활용사업(Ref 0851)의 기초자료를 근거로 매립지 규모 및 매립량에 비례하여 온실가스 감축효과를 간접 산출하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 운전시간에 따른 침출수 변화추이

낮은 pH의 음폐수를 메탄생성 조건에 맞게 pH를 6.0으로 조정하고 상향류식 고정층 반응기를 통해 전처리한

다음 파이롯 스케일의 바이오리액터에 주입하여 운전한 결과 침출수의 pH, ORP, TOC 변화를 측정하였다.[18]

메탄생성균주의 활성도는 pH에 따라 달라지며, 최적 pH는 중성으로 알려져 있어 간접적으로 메탄이 잘 형성되는지를 파악할 수 있는 측정인자로 활용되는데 운전결과 강우를 이용한 대조군, 침출수, 음폐수의 세 가지 경우의 시료를 분석한 결과 pH는 6.5~7.8의 중성영역에서 측정되어 메탄생성균주가 잘 형성될 수 있는 조건임을 확인할 수 있었고, Fig. 2에 운전시간에 따른 침출수의 pH 변화 추이를 나타내었다.

ORP는 반응기 내부의 산화환원전위를 측정하는 값으로 (+)값을 뿜 경우 반응기 내부가 산화분위기임을 뜻하며, 반대로 (-)값은 환원분위기를 의미하는데, 메탄생성균주의 대사과정이 이루어지기 위해서는 환원분위기의 조건이 되어야 하며 이는 산소가 없는 상태를 의미하기도 한다. ORP 측정결과(-)값을 나타내고 있어 메탄생성을 위한 조건을 갖추고 있음을 확인하였으며, Fig. 3은 운전시간에 따른 침출수의 ORP 변화 추이를 나타낸 것이다.

유출수의 유기물량을 확인하기 위해 TOC를 분석하여 Fig. 4에 나타내었으며 운전기간동안 TOC는 약 1,000mg/l 이하로 확인되었는데, 생물학적 반응이 원활하게 이루어질 경우 반응 후 부산물 내 유기물질 농도는 약 4,000mg/l 이하로 보고된 바 있어 바이오리액터 내에서 메탄생성균주의 활성도가 원활하게 이루어지고 있음을 간접적으로 확인할 수 있었기 때문에 실제 매립지에 음폐수를 적용하여도 침출수 성상이 크게 변하지 않아 침출수 처리에 필요한 추가설비 없이도 기존의 침출수 처

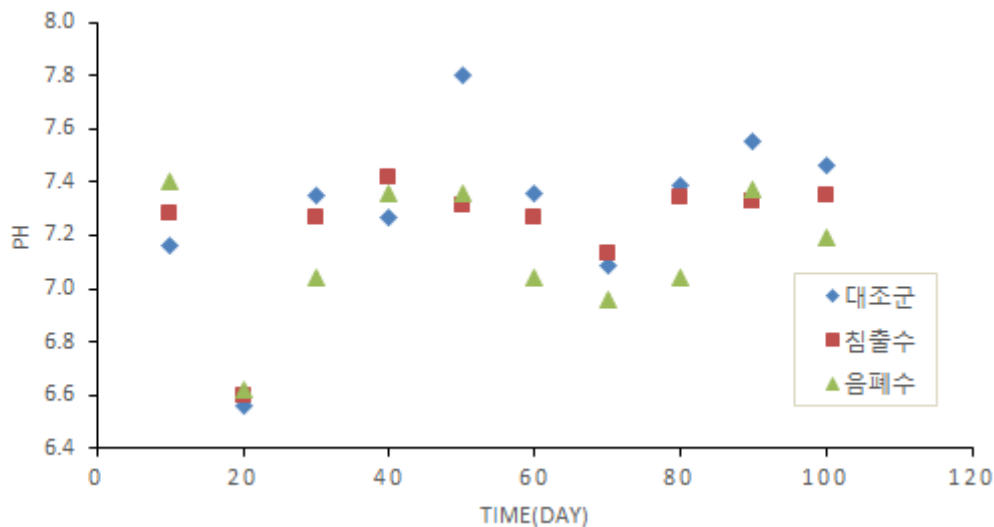


Fig. 2. The change of pH by retention time

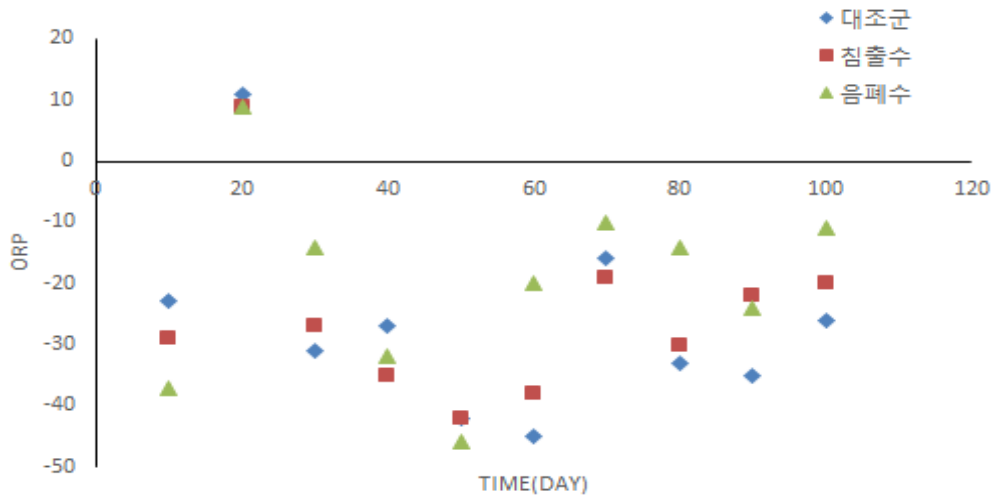


Fig. 3. The change of ORP by retention time

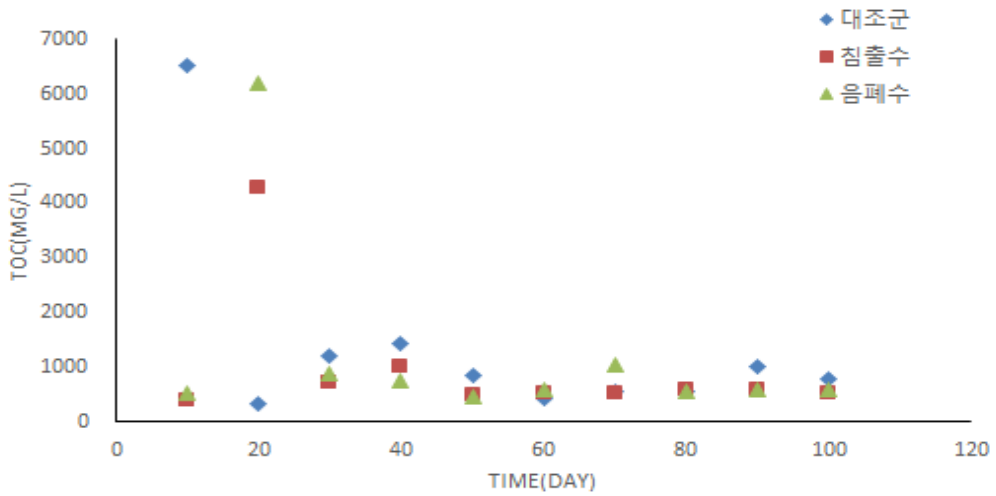


Fig. 4. The change of TOC by retention time

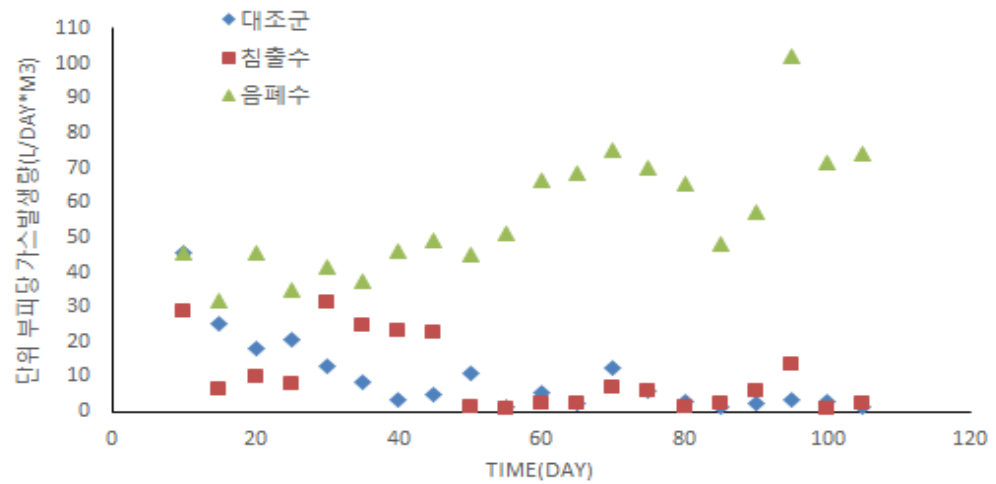


Fig. 5. The change of methane gas volume by retention time

**Table. 2.** Criteria of financial feasibility analysis

구 분	기 준	비 고
전력손실율	6.0%	변압 및 기타손실 + 소내소비
열 손실율	4.00%	한난평균손실율
SMP	130 원/kWh	SMP : 전력거래시장가격 (2014년 5월 평균)
REC	50 원/kWh	전력거래소_ 14년 5월 기준 50,000원 (매립가스 가중치 0.5)
열 판매단가	57,000 원/Gcal	연계수열단가 (1Gcal/h 당 57,000원)
용수단가	1,567 원/ton	지사 용수단가
용수사용량	0.034 ton/Gcal	
법인세율 (한계세율)	22.00%	200억 초과 22%
자기자본비율	30.00%	가정
타인자본 조달비용	4.78%	회사채 발행 금리
상환기간	10 년	3년거치 / 7년균등 상환
자기자본비용	7.93%	5년만기국고채 수익률 평균 : 3.65%
가중평균자본비용	4.99%	할인율, 리스크 프리미엄 = 0%
내용연수(감가상각)	20 년	사업기간과 동일, 건설기간 = 1년
인건비	25 백만원/년	2014년 제조부문 노임단가 (중소기업협동조합중앙회)
제경비	18 백만원/년	인건비의 70%
퇴직급여	3 백만원/년	인건비의 10%
건설기간 중 인원	2 명	운영기간 중 인원수 = 2인
수선유지비	634 백만원	
- 가스엔진	502 백만원/년	
- 송수전설비/반응조 등	128 백만원/년	
- 열배관수선유지비	3 백만원/년	열배관취득가액의 0.7%
보험료	12 백만원/년	직접투자비의 0.2%
제세금	6 백만원/년	직접투자비+토지비의0.1%
부지임차료	0 백만원/년	부지제공 조건
운전자금	231 백만원	초기3년 평균매출액 × 회전기간 ÷ 365일
운전자금 회전기간	60 일	

리시설로 처리 가능함을 알 수 있었다.

### 3-2. 매립가스 발생량 측정 결과

전처리된 음폐수를 파이롯 스케일의 바이오리액터에 주입하여 매립가스 발생량을 확인한 결과를 Fig. 5에 나타내었는데, 음폐수를 주입한 경우 강우를 이용한 대조군에 비해 약 6배 이상의 메탄가스 발생량을 확인할 수 있었고 이는 음폐수가 포함하고 있는 높은 수분함량과 유기물함량에 기인한 것으로 전처리된 음폐수는 중성의 pH와 메탄생성균의 기질로서 이용이 용이한 가용화된 탄소원으로 인해 높은 메탄생산량을 보인 것으로 판단된다.

음폐수를 주입한 매립폐기물 이용시 바이오리액터의 메탄가스 발생량은 평균 56 l/day/m<sup>3</sup>으로 대조군 대비 약 6배 증가했으며, 이는 실제 매립지에 적용시 매립폐기물 1 m<sup>3</sup> 기준 연간 20 m<sup>3</sup>의 메탄가스 생성이 가능한 것을 의미한다.

### 3-3. 재무적 타당성 분석결과

음폐수를 주입하여 매립가스를 6배 향상시킨 매립지

에서 생산된 메탄가스를 집단에너지시설의 연료로 활용하여 생산된 전력은 전력거래소로 판매하고 생산된 열은 지역난방 열판매, REC(Renewable Energy Certificate; 신재생에너지공급인증서)를 수익구조로 하여 매립가스를 향상시키지 않은 대조군과 비교하여 재무적 타당성 분석을 수행하였다. 재무적 타당성 분석은 현금흐름할인법으로서 순현재가치법(NPV; Net Present Value)과 내부수익율법(IRR; Internal Rate of Return)에 대해서 수행하여 최종적으로 수입의 현재가치를 비용의 현재가치로 나눈 수익성 지수(PI; Profitability Index)를 산출한 결과 음폐수 주입시스템 적용시 25만m<sup>3</sup> 이상의 매립지에 적용시 사업성이 있는 것으로 평가되었다.

재무적 타당성 분석 기준은 Table 2에 나타내었는데, 분석기준의 시간적 기준은 본 연구가 수행되었던 2014년 기준 자료를 사용하였고 투자비 항목중 부지구입비는 대상지역에 따른 편차가 너무 크고 산정에 어려움이 있어 부지제공조건으로 평가하였으며 순현재가치법에 사용된 할인율은 가중평균자본비용 4.99%를 적용하였다.

Table 2의 2014년 분석기준에 입각하여 분석한 재무

**Table 3.** Result of financial feasibility analysis

구분	대조군	매립가스 생산 증대 시스템 적용
매립가스 발생	1.67 m <sup>3</sup> /min	10 m <sup>3</sup> /min
총 투자비	61억원 (가스엔진 0.2MW+0.2Gcal/h)	79억원 (가스엔진 1.0MW+1.0Gcal/h)

※ 손익계산 (20년 기준)

매출액	전력매출	4,282백만원	21,409백만원
	열매출	1,917백만원	9,587백만원
	REC	823백만원	4,117백만원
매출합계		7,023백만원	35,114백만원
총 비용 (인건비,유지비 등)		20,920백만원	22,778백만원
영업이익		-13,898백만원	12,295백만원
이자비용		-1,336백만원	-1,715백만원
당기순이익		-15,234백만원	8,692백만원
순현재가치 (NPV)		-9,444백만원	1,825백만원
내부수익률(IRR)		-	7.7%
수익성 지수(PI)		-	1.425

적 타당성 결과를 Table 3에 나타내었는데 내부수익률(IRR) 값이 7.7%로 나타나 분석당시에 적용한 할인율인 4.99%보다 높게 도출되었고 PI 또한 1.425로 산출되어 사업타당성이 있는 것으로 분석되었으나, 최근 SMP(System Marginal Price;계통한계가격)값이 하락추세에 있고, 2015년 SMP 평균단가 100원/kWh를 적용하고 금리 인하를 반영할 경우 내부수익률은 4.25%, PI는 1.286으로 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 최근 유가 및 SMP단가 하락에 따른 신재생에너지 사업의 사업타당성이 전반적으로 낮아진 것과 같은 맥락에 원인이 있다고 볼 수 있어 실제 사업 추진시에는 SMP값이나 기준금리 변동에 따른 민감도 분석이 추가적으로 더 필요할 것으로 사료된다.

### 3-4. 온실가스 감축효과 분석

음폐수 주입시스템을 25만 m<sup>3</sup> 규모의 매립지에 적용하여 발생된 매립가스를 집단에너지사업에 연료로서 이용할 경우 온실가스 감축효과를 CDM 방법론 중 통합방법론인 ACM001: Consolidated methodology for landfill gas project activities(ver.5)에 의거 실제 UN에 CDM 사업으로 등록되어 있는 대구방천리 매립가스 CDM사업(Ref 0851)[20]에서 사용된 기초자료에 준하여 매립지 규모와 매립량에 비례하여 간이 산출하였다.

본 방법론에 의한 온실가스 감축량은 매립가스 이용시설을 설치하지 않았을 때 매립지에서 배출되는 메탄가스 배출량을 베이스라인 배출량으로 하고, 매립가스를 에너지로 이용하였을 때 메탄가스 연소에 의한 메탄과피 후 이산화탄소로 배출되는 배출량을 프로젝트배출량으로 하여 그 차이 만큼을 온실가스 감축량으로 산출하게 되어 있는데, 이때 온실가스 감축량은 프로젝트 진행시 사용된 전력사용량, 화석연료사용량 등에 대한 온실가스 배출량을 고려하여 그 값을 차감한 후 감축량으로 산출하는 것이 타당하나 본 연구에서는 실제 데이터 입수의 어려움과 오차를 고려하여 기 등록된 CDM사업 자료를 기준으로 매립지규모 및 매립량에 비례하여 대략적인 온실가스 감축효과를 산출하였고, 방법론에 따른 온실가스 감축량 산출방법은 다음식과 같다.

$$1) ER_y = BE_y - PE_y$$

- ER<sub>y</sub> : 온실가스 감축량
- BE<sub>y</sub> : 베이스라인 배출량
- PE<sub>y</sub> : 프로젝트 배출량

$$2) BE_y = BE_{CH_4,y} + BE_{EC,y} + BE_{NG_4,y}$$

- BE<sub>CH<sub>4</sub>,y</sub> : 매립지의 메탄관련 배출량
- BE<sub>EC,y</sub> : 전력생산관련 배출량
- BE<sub>HG,y</sub> : 열생산 관련 배출량

$$3) PE_y = PE_{EC,y} + PEF_{C,y}$$

- PE<sub>EC,y</sub> : 프로젝트 전력사용량
- PEF<sub>C,y</sub> : 프로젝트 화석연료 사용량

대구방천리 매립지는 총매립용량 32,378,541m<sup>3</sup> 규모로 연간 22,153,041Nm<sup>3</sup>의 메탄가스를 이용하고 있으며, 2012년까지의 기매립 누적량은 10,343,941m<sup>3</sup> 인 것으로 환경부 통계자료[19]에서 확인할 수 있는데, 등록된 CDM사업의 예상 온실가스 감축량은 연간 404,872톤이고 실제 운영결과 모니터링 보고서상의 온실가스 감축량은 운전현황에 따라 예상감축량과는 다소 차이가 있는 것으로 나타났다.

이를 근거로 매립용량 25만m<sup>3</sup>의 매립지에 음폐수 주입시설을 설치하여 6배의 메탄가스 발생량이 증가될 경우를 가정할 경우 약 4~5만톤의 온실가스 감축효과를 산출할 수 있으며, 25만m<sup>3</sup> 이상 규모의 운영중인 매립지가 전국적으로 89개소로 전체 매립지의 40%를 차지하는 것으로 보았을 때 매립가스 향상에 따른 매립가스 활용증가 및 이에 따른 온실가스 감축효과는 상당할 것으로 사료된다.

## 4. 결론

신기후체제 대비를 위한 온실가스 감축 수단으로써 신재생에너지원인 매립가스의 에너지이용 확대를 위해 현장 매립폐기물에 음폐수를 주입하여 파이롯 스케일 바이오리액터 운전을 통해 침출수의 성상변화, 메탄가스 발생량, 사업성평가 및 온실가스 감축효과를 분석하였다.

침출수의 성상변화 관찰을 위해 pH, ORP, TOC 변화를 측정된 결과 pH는 6.5~7.8의 중성영역에서 측정되었고, ORP 측정결과 (-)값을 나타내고 있어 메탄생성을 위한 조건을 갖추고 있음을 확인하였으며, 유출수의 유기물질 확인을 위해 분석한 TOC 값은 운전기간동안 약 1,000mg/ℓ 이하로 확인되어, 바이오리액터 내에서 메탄생성균주의 활성도가 원활하게 이루어지고 있음을 간접적으로 확인함에 따라, 실제 매립지에 음폐수를 적용하여도 침출수 성상이 크게 변하지 않아 침출수 처리에 필요한 추가설비 없이도 기존의 침출수 처리시설로 처리



가능함을 알 수 있었다.

메탄가스 발생량은 음폐수 주입시 강우를 활용한 대조군에 비해 6배의 매립가스 증가율을 보였으며, 평균 매립가스 발생량은  $56 \ell/\text{day}/\text{m}^3$ 으로  $1 \text{ m}^3$  매립지용적에서 연간 약  $20 \text{ m}^3$ 의 메탄가스가 생산 가능함을 확인하였고 매립가스 발생량이 향상되어 이를 에너지원으로 활용할 경우  $25\text{만m}^3$  이상의 매립지에 적용시 사업성이 있는 것으로 평가되었으나, 최근 유가 및 SMP 하락으로 본 연구의 사업타당성 분석 기준시점인 2014년에 비해 사업타당성이 낮아져 실제 사업 추진시에는 유가 및 SMP 단가에 따른 민감도 분석 등 추가적인 분석 후 신중한 사업추진이 필요하다고 사료된다.

그러나, CDM으로 기 등록된 대구방천리 매립가스 활용사업을 기준으로  $25\text{만m}^3$  규모의 매립지의 온실가스 감축량을 간이 산출한 결과 약 4만톤의 온실가스 감축효과가 있어, 89개에 달하는 대상규모 이상의 매립지로 사업을 확대할 경우 온실가스 감축효과는 상당할 것으로 판단되므로 2015년부터 국내에서도 온실가스 배출권거래제가 시행되어 배출권이 톤당 17,000원(한국거래소 2016.6월말 기준) 상당에 거래되고 있는 점, 2030년까지 국가 온실가스 배출량을 37%까지 감축해야 된다는 당위성을 고려할 때 비록 사업타당성이 결여된다 하더라도 신재생에너지사업 및 국가 온실가스 감축을 위해 사업을 긍정적으로 추진하는 것이 바람직하다고 사료된다.

따라서, 향후 음폐수를 이용하여 기존 매립지의 매립가스 발생을 향상시켜 매립가스 활용사업의 사업타당성이 어느 정도 상승하고 국가적인 온실가스 저감이라는 대의명분에 기여하면서 매립가스 활용사업이 활성화되기를 바란다.

## References

1. Espagne, E., 2016, Climate Finance at COP21 and After: Lessons Learnt. CEPII, Policy Brief, (9).
2. "Adoption of The Paris Agreement" 2015, UNFCCC, cp/2015/1.9/Rev.1
3. S.H.Bae, 2015, "Greenhouse gas reduction goal, 37% reduction from BAU." Electric Power vol. 9(7), pp. 42-43.
4. S.W. Park, 2016, "Post-2020 Climate Regime and Paris Ageement", Environment Law and Policy, vol. 16, pp. 285-322
5. Augenstein, D. 1992, The Greenhouse Effect and US Landfill Methane. Global Environmental Change, pp. 311-328.
6. Augenstein, D., R. Yazdani, K. Dahl and R. Moore, 1998, Yolo County Controlled Landfill Project. Proceedings, California Integrated Waste Management Board (CIWMB) Landfill Gas Assessment and Management Symposium, Ontario, CA April. CIWMB, Sacramento, CA.
7. Augenstein, D. R. Yazdani, L. Sinderson, J. Kieffer M. Byars, 2000, Proceedings, Second International Methane Mitigation Symposium, US EPA and Russian Academy of Sciences (Siberian Branch) Akademgorodok, Novosibirsk, Siberia, Russia. Available from EPA, Washington DC).
8. Augenstein, D. R. Wise D. L., Wentworth R. L. and Cooney C. L., 1976, Fuel Gas Recovery from Controlled Landfilling of Municipal Waste. Resource Recovery and Conservation 2, pp. 103-117.
9. Halvadakis, C. A. Robertson and J. Leckie. 1983, Landfill Methanogenesis, Literature Review and Critique. Stanford Civil Engineering Department Report 271. Available from US National Technical Information Service.
10. D. T. Sponza, O. N. 2004, "Impact of leachate recirculation and recirculation volume on stabilization of municipal solid wastes in simulated anaerobic bioreactors", Process Biochemistry, vol. 39, pp. 2157-2165
11. I. San, T. T. Onay, 2001, "Impact of various leachate recirculation regimes on municipal solid waste degradation", Journal of Hazardous Materials B, vol. 87, pp. 259-271
12. D. R. Reinhart, 1996, "Full-scale experiences with leachate recirculating landfills: Case studies", Waste Management and Research, vol. 14, pp. 347-365
13. D. R. Reinhart, A. B. Al-Yousfi, 1996, "The impact of leachate recirculation on municipal solid waste landfill operating characteristics", Waste Management and Research, vol. 14, pp. 337-346
14. D. R. Reinhart, P. T. McCreanor, T. Townsend, 2002, "The bioreactor landfill: its status and future", Waste Management and Research, vol. 20, pp. 172-186

15. Yuen, S.T.S., 2001. Bioreactor landfills: do they work? In: Geoenvironment 2001: 2nd ANZ Conference on Environmental Geotechnics, Newcastle, Australia, November.
16. Pohland F. G., 1980, "Leachate recycling as landfill management option", Journal of Environmental Engineering, vol. 106(6), pp. 1057-1069
17. Pohland, F.G., 1995. Landfill Bioreactors, Historical Perspective, Fundamental Principles, and New Horizons in Design and Operations. US EPA/600/R-95/146. US Environmental Protection Agency Seminar Publication: Landfill Bioreactor Design and Operation. Wilmington D.E., Washington.
18. K.S. Moon, et al., 2014, Characteristic of Anaerobic Acid Fermentation with Food Waste leachate by Reactor Type of Retention Time for Landfill Site Injection, Journal of Energy Engineering, Vol. 23, No. 3, pp.125~131
19. 2012 Korea waste statistics, 2013, MOE of Korea
20. Project 0851; Daegu Bangcheon-Ri Landfill Gas CDM Project, <http://cdm.unfccc.int>