Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
Vol. 33, No. 4, August 2017, pp. 393-402
https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.4.393
p-ISSN 1598-7132, e-ISSN 2383-5346

바이오에너지(바이오가스, 바이오매스) 기술의 온실가스 감축산정: 국내를 대상으로

Estimation of Greenhouse Gas (GHG) Reductions from Bioenergy (Biogas, Biomass): A Case Study of South Korea

정 재 형 · 김 기 만[1),2),*]
창원시정연구원 도시정책연구실, [1)]녹색기술센터 정책연구부, [2)]고려대학교 과학기술학협동과정

(2017년 4월 18일 접수, 2017년 5월 24일 수정, 2017년 6월 22일 채택)

Jaehyung Jung and Kiman Kim[1),2),*]
Changwon Research Institute, Division of Urban Policy Office
[1)]*Green Technology Center, Division of Policy Research*
[2)]*Program in Science and Technology Studies, Korea University*

(Received 18 April 2017, revised 24 May 2017, accepted 22 June 2017)

Abstract

In this study, greenhouse gas (GHG) reductions from bioenergy (biogas, biomass) have been estimated in Korea, 2015. This study for construction of reduction inventories as direct and indirect reduction sources was derived from IPCC 2006 guidelines for national greenhouse gas inventories, guidelines for local government greenhouse inventories published in 2016, also purchased electricity and steam indirect emission factors obtained from KPX, GIR respectively. As a result, the annual GHG reductions were estimated as 1,860,000 tonCO_{2eq} accounting for 76.8% of direct reduction (scope 1) and 23.2% of indirect reduction (scope 2). Estimation of individual greenhouse gases (GHGs) from biogas appeared that CO_2, CH_4, N_2O were 90,000 tonCO_2 (5.5%), 55,000 tonCH_4 (94.5%), 0.3 tonN_2O (0.004%), respectively. In addition, biomass was 250,000 tonCO_2 (107%), −300 tonCH_4 (−3.2%), −33 tonN_2O (−3.9%). For understanding the values of estimation method levels, field data (this study) appeared to be approximately 85.47% compared to installed capacity. In details, biogas and biomass resulting from field data showed to be 76%, 74% compared to installed capacity, respectively. In the comparison of this study and CDM project with GHG reduction unit per year·installed capacity, this study showed as 42% level versus CDM project. Scenario analysis of GHG reductions potential from bioenergy was analyzed that generation efficiency, availability and cumulative distribution were significantly effective on reducing GHG.

Key words : Bioenergy, Biogas, Biomass, Bottom-Up Approach (BUA), Greenhouse gas (GHG) reduction

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)2-3393-3925, E-mail : kkim@gtck.re.kr

1. 서 론

우리나라는 2014년 690.6 백만톤CO_{2eq}의 온실가스를 배출하였으며, 이는 세계 7위에 해당하는 수치이다(GIR, 2016; IEA, 2016). 또한, 2014년 우리나라는 전체 온실가스 배출의 87.3%를 에너지 부문에서 배출하였으며, 대부분은 연료연소에 의한 것으로 분석되었다(KEEI, 2015). IEA(2016)에 의하면, 2014년 우리나라의 에너지소비량은 세계 9위이며(IEA, 2016), 2014년 우리나라의 최종 에너지원별 소비 구성비는 석탄 16.6%, 석유 48.1%, 천연가스 11.1%, 전력 19.2%, 열에너지 0.7%, 신재생에너지 4.4%의 비율로 에너지를 소비하고 있다(KEEI, 2015).

국제적으로 기후변화를 완화하기 위해서는 화석연료에서 신재생에너지로의 전환(shift)이 요구되고 있으며(Bentsen and Møller, 2017), 화석연료를 다량으로 소비하고 있는 국가에서는 화석연료를 대체할 수 있는 친환경 에너지원으로 신재생에너지가 중요한 방안으로 작용하고 있다(Rule *et al*., 2009). 온실가스를 감축하기 위한 신재생에너지 기술 중 바이오에너지는 온실가스 감축 효과에서 큰 역할을 가지고 있으며, 많은 국가에서 온실가스 감축을 위한 전략으로 바이오에너지를 활용한 경로(pathway)를 구축하고 있다(Welfle *et al*., 2017). 바이오에너지에 의한 온실가스 감축량은 에너지 생산과 소비의 지속가능성(sustainability)이 핵심으로 작용하고 있으며(Felten *et al*., 2013), 특히, 바이오매스 기반의 바이오에너지(biomass-based bioenergy)는 대기 중의 온실가스를 감축할 수 있는 탄소 중립성으로 각광을 받고 있다(Delivand *et al*., 2015).

신재생에너지를 활용한 온실가스 감축량 연구는 국 · 내외적으로 활발히 수행하고 있다. EEA(2015)에서는 EU 국가별 신재생에너지의 설치용량과 EU에서 개발한 배출계수를 활용한 온실가스 감축 연구가 수행되었고(EEA, 2015), IPCC(2012)에서는 국가별 신재생에너지 보급통계와 IPCC 기본 배출계수를 활용한 온실가스 감축과 이에 따른 미래시나리오를 분석하였다(IPCC, 2012). 또한, NREL(2015)에서는 미국의 주별 신재생에너지 보급통계와 NREL에서 개발한 배출계수를 활용한 온실가스 감축 연구가 진행되었고(NREL, 2015), Kim(2014)은 한국의 신재생에너지 국가 통계자료를 활용한 보급과 확산을 통한 효과적인 온실가스 감축 정책의 필요성에 관한 연구를 수행하였다(Kim, 2014).

하지만, 선행연구들의 대부분은 신재생에너지 국가통계자료를 활용한 하향식 접근법(Top-Down Approach, TDA)을 중심으로 연구가 진행되고 있어, 신재생에너지 개별기술에 대한 실질적인 온실가스 감축 효과를 분석하기에는 한계점을 지니고 있다. 특히, 온실가스 산정계산의 정확도는 온실가스 감축 목표에 있어 온실가스 과대 혹은 과소산정의 관점에서 중요한 요인으로 작용하고 있으며(Buchholz *et al*., 2016), 온실가스 감축량 산정결과의 적절성은 온실가스 산정에 있어 산정 · 보고 · 인증(Measurement, Report, Verification, MRV) 적용의 중요성이 강조되고 있다(Downie *et al*., 2014). 따라서 신재생에너지 기술에 의한 감축량 결과의 신뢰성 확보와 개별기술에 대한 최적화된 문제를 해결할 수 있는 온실가스 산정방법론이 필요하며, 이러한 측면에서 개별기술의 운영수준에서 온실가스 감축량 영향을 분석하는 상향식접근법(Bottom-Up Approach, BUA)을 적용한 온실가스 감축량 연구가 필요하다(Kim *et al*., 2014).

따라서 본 연구는 신재생에너지 기술 중 2015년 기준 전력거래소에 등록된 바이오에너지(바이오가스, 바이오매스) 발전사업자를 대상으로 현장 운영자료 기반의 상향식접근법을 이용한 바이오에너지 기술단위의 온실가스 감축량을 분석하고, 발전효율, 가동률, 누적 보급량의 변화에 따른 바이오에너지 기술별 온실가스 감축잠재량 시나리오를 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구의 범위

본 연구의 공간적 범위는 한국, 시간적 범위는 2015년, 내용적 범위는 2015년 기준 전력거래소에 등록되어 있는 바이오에너지 발전사업자를 대상으로 온실가스 감축량 산정을 위한 목록구성을 하였다. 활동자료는 바이오에너지 기술의 현장 운영자료를 수집 및 구축하는 상향식접근법을 이용하였다. 표 1은 바이오에너지 기술에 대한 구축된 활동자료를 나타내었으며, 바이오에너지는 바이오가스와 바이오매스로 구분하여 분석하였다.

운영경계 설정에 의한 온실가스 배출원은 직접감축원(scope 1), 간접감축원(scope 2), 기타감축원(scope 3)으로 구분되며, 직접감축원은 연료연소 등에 의해 직접적으로 감축량 되는 감축원, 간접감축원은 구매전력, 구매스팀 등의 에너지원 사용에 의해 간접적으로 감축되는 감축원, 기타감축원은 직접감축원과 간접감축원 이외에서 감축되는 감축원이다(WRI, 2015).

본 연구는 바이오에너지 기술별 프로젝트 경계(project boundary)를 설정하고, 직접감축원(scope 1)은 연료연소 예를 들어, 바이오에너지의 투입에너지, 간접감축원(scope 2)은 순 전력생산량과 순 스팀생산량으로 구분하여, 온실가스 감축량을 산정하였다.

2.2 연구 대상물질

일반적인 주요 온실가스 물질은 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF_6)으로 구분되며, 본 연구에서는 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O)를 연구 대상물질로 선정하였다.

Table 1. Bioenergy (biogas and biomass) technology and activities.

Technology	Specific technology	Activity	Unit	Value
Bioenergy	Biogas	Electricity	MWh	203,275
		Biogas (landfill)	m^3/hr	23,548
	Biomass	Electricity	MWh/yr	769,619
		Steam	Gcal/yr	9,000
		Biomass (wood)	m^3/hr	563,000

본 연구는 감축된 온실가스 물질을 정량화하기 위하여 지구온난화지수(Global Warming Potential, GWP)를 적용하여 환산하였다. 지구온난화지수는 일정기간 동안(100년 기준) 이산화탄소 1 kg 대비 특정 온실가스 1 kg이 지구온난화에 미치는 정도를 나타내는 지표로, 온실가스 감축량을 이산화탄소 환산톤($CO_{2equivalent}$)으로 정량화하여 표현한다. 본 연구에서는 IPCC 5차 평가보고서에서 제시하고 있는 지구온난화지수 즉, 이산화탄소(CO_2) 1을 기준으로, 메탄(CH_4) 28, 아산화질소(N_2O) 265를 적용하여 온실가스 감축량을 정량화 하였다(IPCC, 2014).

2.3 온실가스 감축량 산정방법론

온실가스 감축량 산정방법은 IPCC (2006) 가이드라인과 지자체온실가스 배출량 산정지침, 전력거래소에서 제공하는 전력 간접배출계수 및 온실가스종합정보센터에서 제공하는 스팀 간접배출계수를 기반으로 산정하였다(KEC, 2016; GIR, 2013; KPX, 2012; IPCC, 2006). 표 2에 바이오에너지 기술별 온실가스 감축량 산정식을 제시하였다. 직접감축원(scope 1)인 연료연소 부문은 대상기술별 운영 자료를 이용하여 활동도를 추출하였으며, 온실가스 산정방법은 tier-2 수준을 적용하되, 국내배출계수가 부재한 경우에는 IPCC에서 제공하는 기본계수(tier-1)를 적용하였다. 간접감축원(scope 2)인 전력생산량과 스팀생산량은 운영기술별 2015년 1년간의 운영 자료를 획득하여 기술부문별 전력생산량 및 스팀생산량을 취합하여 한국전력거래소에서 제공하는 전력 간접배출계수와 온실가스종합정보센터에

Table 2. Methods of GHG reductions estimation in bioenergy.

GHG (Greenhouse Gas)			
Scope 1	Level	Scope 2	Level
$E_j = \sum_j (A_j \times EF_j)$ Where, j = biogas, biomass, start-up fuel etc.	Tier-1/2	$E_i = \sum_i (A_i \times EF_i)$ Where, i = electricity, steam	Tier-2
Technology	Equation	Generation energy	Fuel
Biogas	$E_{i,j} = \sum_{i,j} [(A_i \times EF_i) - (A_j \times EF_j)]$	Electricity	Biogas Start-up fuel
Biomass	$E_{i,j} = \sum_{i,j} [(A_i \times EF_i) - (A_j \times EF_j)]$	Electricity Steam	Biomass Start-up fuel

E: GHG reductions, A: Activity, EF: Emission Factor

Table 3. Comparison of total sample and installed capacity in Korea for the year of 2015.

Technology		Sample ratio			Installed capacity (2015)		
		Population (No.)	Sampled (No.)	Ratio (%)	Cumulative installed capacity (MW)	Sample capacity (MW)	Ratio (%)
Bioenergy	Average	–		30.5			44.3
	Biogas	6	1	17	66	50	75.8
	Biomass	9	4	44	868	111.2	12.8

Table 4. Summary of field data collection from bioenergy.

Technology	Installed capacity (MW)	Generating electricity (MWh/yr)	Generating heat (Gcal/yr)	Operating time (hr/yr)	Generation efficiency (%)	Rate of operation (%)
Average	38.9	197,840	9,000	7,195	33.8	78.7
Biogas	50	203,275	–	6,800	39.1	78.5
Biomass	27.8	192,404.8	9,000	7,590	28.5	78.8

서 제공하는 스팀 간접배출계수를 이용하여 tier-2 수준으로 순 전력생산량과 스팀생산량에 의한 온실가스 대체감축량을 산정하였다.

3. 연구 결과

3.1 운영자료

표 3과 4는 바이오에너지 기술의 자료 현황과 운영자료로 제시하였으며, 본 연구는 설문조사를 통하여 바이오에너지 기술의 운영자료를 수집하였다. 수집된 샘플은 5개로(전체모수는 15개) 설계용량(installed capacity) 기분 바이오가스와 바이오매스는 각각 75.8%, 12.8%의 비율로 운영자료를 수집하였다. 바이오에너지 기술의 평균 설계용량은 38.9 MW으로 나타났으며, 바이오가스 50.0 MW, 바이오매스 27.8 MW로 바이오가스 기술이 바이오매스 기술 대비 상대적으로 큰 설계용량을 가지고 있는 것으로 나타났다. 에너지의 수집형태는 전기에너지와 열에너지로, 바이오가스는 전기에너지, 바이오매스는 일반적으로 전기에너지를 생산하고 있었으며, 1개의 바이오매스에서 전기에너지와 열에너지를 모두 생산하는 시설로 나타났다. 바이오에너지 기술의 운영시간은 연간 약 7,000 내외의 시간으로 높은 운영시간을 보였다. 바이오에너지의 발전효율은 20~45%로 나타났으며, 일반적으로 바이오매스 가스화기 설비의 발전효율은 기존기술(conventional technology) 대비 35~40% 수준으로 보고되고 있으며, 발

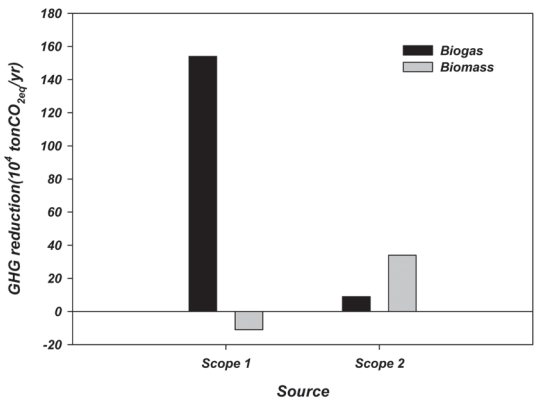

Fig. 1. The GHG reductions from bioenergy.

전효율이 40% 이상 되는 고효율 발전시설에 대해서도 일부 등장하고 있다(Strzalka *et al*., 2017). 본 연구에서의 가동률(availability)은 유지보수 시간을 제외한 것으로 본 연구에서의 가동률은 운영시간과 운영 대기시간(stand-by time)을 의미하는 것으로 정의하였다. 이에 따른, 바이오에너지 기술별 평균 가동률은 78.7%로 나타났으며, 바이오가스와 바이오매스는 각각 78.5%, 78.8%로 나타났다.

3.2 온실가스 감축량

그림 1은 바이오에너지 기술에 의한 온실가스 감축량 산정결과이며, 본 연구의 온실가스 감축량에 대한 결과해석에서(−)는 온실가스 배출을, (+)는 온실가스

감축을 의미하는 것으로 정의하였다. 바이오에너지 기술에 의한 온실가스 감축량은 186 만tonCO_{2eq}/yr로 나타났으며, 직접감축(scope 1)은 143 만tonCO_{2eq}/yr(76.8%), 간접감축(scope 2)은 43 만tonCO_{2eq}/yr(23.2%)로 나타났다. 바이오가스는 메탄회피 효과에 의하여 직접감축이 154 만tonCO_{2eq}/yr(94%)로 크게 나타났으며, 전력생산에 의한 간접감축(scope 2)은 9 만tonCO_{2eq}/yr(6%)로 분석되었다. 바이오가스에 의한 온실가스 감축량은 다양한 발생원이 있으며, 특히 바이오가스 중 매립지에서 발생되는 가스를 포집하여 전력을 생산하는 시설은 환경학적 이익 측면에서도 중요하게 고려된다(Liu *et al*., 2012). 바이오매스는 투입되는 바이오매스에 의한 이산화탄소(CO_2)를 제외한 비이산화탄소(non-CO_2)인 메탄(CH_4)과 아산화질소(N_2O)를 포함하며, 설비시동연료(start-up fuel)와 연소혼소(fuel mix)로 인한 직접배출이 −11 만tonCO_{2eq}/yr(−24%)로 나타났으며, 전력과 열에너지 생산에 의한 간접감축(scope 2)은 34 만tonCO_{2eq}/yr(76%)로 나타났다.

그림 2는 바이오에너지 기술에 의한 국가 전체 설치용량 대비 온실가스 감축량을 제시하였다. 국가 전체 설치용량으로 확장(scale-up)한 결과, 바이오에너지에 의한 온실가스 감축량은 395 만tonCO_{2eq}/yr로 분석되었으며, 이는 2014년 국가 온실가스 배출량의 약 0.5%를 차지하고 있는 것으로 분석되었다(GIR, 2016).

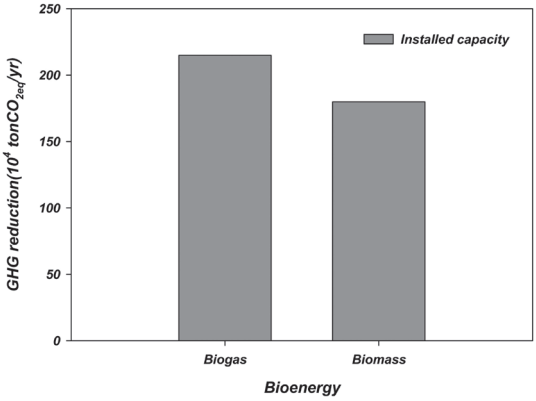

Fig. 2. Comparison of GHG reductions from bioenergy; sampled capacity versus installed capacity in Korea.

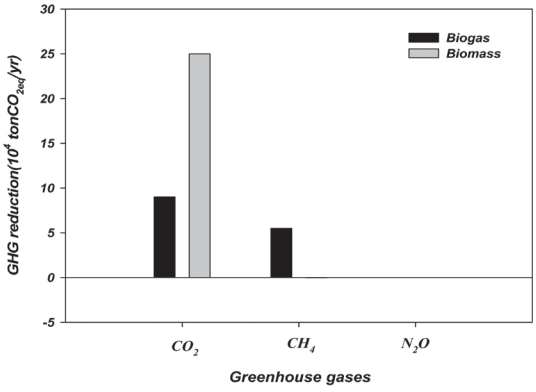

Fig. 3. The reductions of individual GHGs from bioenergy.

3.3 물질별 온실가스 감축량

그림 3에 2015년 바이오에너지 기술의 운영 자료를 활용한 기술별 및 온실가스 물질별 감축량을 제시하였다. 바이오에너지 기술에 의한 온실가스 감축량은 186 만tonCO_{2eq}/yr(100%)이며, 물질별 온실가스 감축량은 이산화탄소(CO_2) 34 만tonCO_{2eq}/yr(18.14%), 메탄(CH_4) 5.47 만tonCO_{2eq}/yr(82.31%), 아산화질소(N_2O) −0.0033 만tonCO_{2eq}/yr(−0.3%)로 나타났다. 여기서, 비율은 온실가스 온난화 지수로 환산한 물질별 비율을 의미한다. 바이오가스에 의한 온실가스 물질별 감축량은 이산화탄소(CO_2) 9 만tonCO_2/yr(5.5%), 메탄(CH_4) 5.5 만tonCH_4/yr(94.5%), 아산화질소(N_2O) 0.00003 만tonN_2O/yr(0.004%)의 비율로 나타났으며, 바이오매스에 의한 온실가스 물질별 감축량은 이산화탄소(CO_2) 25 만tonCO_2/yr(107%), 메탄(CH_4) −0.03 만tonCH_4/yr(−3.2%), 아산화질소(N_2O) −0.0033 만tonN_2O/yr(−3.9%)의 비율로 나타났다. 바이오가스는 90% 이상이 메탄에 의한 온실가스 감축 효과가 있는 것으로 나타났으며, 바이오매스는 목질계 바이오매스 등의 연소로 인하여 메탄(CH_4)과 아산화질소(N_2O)가 오히려 배출되는 것으로 조사되었다. 바이오에너지 세부기술별 온실가스 감축 물질의 형태가 상이한 차이가 있는 것으로 나타나고 있어, 바이오에너지 기술에 의한 효과적인 온실가스 감축을 위한 방법이 적용되어야 할 것으로 보인다.

3.4 산정수준별 온실가스 감축비교

표 5는 온실가스 산정수준에 따른 바이오에너지 기술의 온실가스 감축량 산정결과를 나타내었으며, 이를

위하여 운영자료 기준의 온실가스 감축량 산정과 설계용량 기준의 온실가스 감축량을 산정하여 비교 · 분석하였다. 동일한 바이오에너지 기술에 대한 운영자료와 설계용량 기준(일반적으로 산정하는 방식)을 비교한 결과 설계용량 대비 운영자료는 평균적으로 약 85.47%의 온실가스 감축수준으로 나타났다. 이는 설계용량 기준의 온실가스 감축량 산정은 현장 운영기준의 온실가스 감축량 산정과의 차이가 있음을 의미한다. 국가 에너지이용과 에너지믹스의 구성에 따라 신재생에너지 기술에 의한 국가 온실가스 배출 영향은 국가별 차이를 가지고 있으며, 국가 실질적 온실가스 감축을 위한 신재생에너지 기술의 실행계획(action plan)의 제한요인(limitation)으로 작용할 수 있다(Blindheim, 2015).

바이오가스의 운영자료와 설계용량에 의한 온실가스 감축량은 각각 9.0 만tonCO_{2eq}/yr, 11.8 만tonCO_{2eq}/yr로 설계용량 대비 운영자료는 76.16%의 상대적으로 낮은 온실가스 감축수준을 보였다. 바이오매스의 운영자료와 설계용량에 의한 온실가스 감축량은 각각 8.6 만tonCO_{2eq}/yr, 8.7 만tonCO_{2eq}/yr로 설계용량 대비 운영자료는 98.05%의 비율로 바이오가스 대비 상대적으로 높은 온실가스 감축수준이 있는 것으로 나타났다.

3.5 온실가스 감축원단위 비교

본 연구는 국내 바이에너지 발전사업자를 대상으로 실제 현장의 운영 자료를 바탕으로 기술별 온실가스 감축량을 산정하고, 이를 기반으로 기술별 온실가스 감축원단위를 도출하였다. 이를 비교하기 위하여, 본 연구에서는 한국이 수행한 청정개발체계(Clean Development Mechanism, CDM) 사업(91건)을 대상으로 온실가스 감축량과 기술용량을 이용하여 기술별 온실가스 감축원단위를 분석하여, 최종적으로 본 연구와 비교 · 분석하였다(UNFCCC, 2016). 표 6은 본 연구에서 산정한 기술별 온실가스 감축원단위와 CDM 사업의 온실가스 감축원단위를 비교한 것으로, CDM 사업으로 인한 온실가스 감축원단위는 운영수준 기반의 온실가스 감축원단위 대비 높은 것으로 나타났다.

바이오에너지의 온실가스 감축원단위는 17,092 tonCO_{2eq}/yr · MW이며, CDM 사업에 의한 온실가스 감축원단위는 41,206 tonCO_{2eq}/yr · MW로 42% 수준으로 나타났다. 바이오가스의 온실가스 감축원단위는 32,653 tonCO_{2eq}/yr · MW이며, CDM 사업에 의한 바이오가스 온실가스 감축원단위는 75,449 tonCO_{2eq}/yr · MW로 43% 수준으로 나타났다. 바이오가스의 생산물에 따라 발생특성의 차이를 가지고 있으며, Esfandiari *et al*. (2011)의 연구에서는 동물폐기물(animal waste)에 의한 바이오가스의 발효과정을 통해 생성된 바이오가스를 이용하여 온실가스 감축원단위는 17,178 tonCO_{2eq}/yr · MW으로 본 연구의 온실가스 감축원단위 대비 52% 수준으로, 바이오가스 기술특성에 따라 온실가스 감축원단위가 다르게 나타나고 있다(Esfandiari *et al*., 2011). 바이오매스의 온실가스 감축원단위는 1,530 tonCO_{2eq}/yr · MW이며, CDM 사업에 의한 바이오매스 온실가스 감축원단위는 6,962 tonCO_{2eq}/yr · MW로 22% 수준으로 나타났다.

운영기반의 온실가스 감축량 원단위는 국제수준의 CDM 사업에 의한 온실가스 감축량 원단위가 바이오가스와 바이오매스가 각각 43%, 22% 수준으로 나타나

Table 5. Comparison of GHG reductions by estimation method.

Technology	GHG reductions (Unit: 10^4 tonCO_{2eq}/yr)		
	Level of estimation method		Ratio (%)
	Operation-based estimation	Capacity-based estimation	
Bioenergy	17.6	20.5	85.47%
Biogas	9.0	11.8	76.16%
Biomass	8.6	8.7	98.05%

Table 6. Comparison of GHG estimation with this study and CDM project.

Technology	GHG reductions (Unit: tonCO_{2eq}/yr · MW)				Ratio (%)
	Korea level (This study)		UNFCCC level (CDM)		
	Range	Mean	Range	Mean	
Bioenergy	338~32,653	17,092	6,962~269,915	41,206	42
Biogas	32,653	32,653	12,150~269,915	75,449	43
Biomass	338~2,129	1,530	6,962	6,962	22

Table 7. Construction of scenario analysis on GHG reductions from bioenergy.

Technology	Scenario	Scenarios			
		Baseline	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Unit			%		
Biogas	Generation efficiency	39.1	44.1	49.1	54.4
Biomass		28.5	33.5	38.5	45.5
Unit			%		
Biogas	Availability	78.5	90	95	100
Biomass		78.8	90	95	100
Unit			MW		
Biogas	Cumulative distribution	66	69	73	76
Biomass		868	911	955	998

Table 8. Result of scenario analysis on GHG reduction potential for bioenergy.

Technology	Scenario	Baseline	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
		Unit: 10^4 tonCO_{2eq}/yr			
Bioenergy	Generation efficiency	189	196	202	208
	Availability	190	192	195	197
	Cumulative distribution	348	366	383	405
Biogas	Generation efficiency	163	164	166	167
	Availability	166	167	168	169
	Cumulative distribution	216	226	237	248
Biomass	Generation efficiency	26	31	36	42
	Availability	23.9	24.1	26	28
	Cumulative distribution	133	139	146	157

고 있으며, 국내의 운영기반에 의한 온실가스 감축량 원단위가 상대적으로 낮게 나타났다.

3.6 온실가스 감축시나리오

3.6.1 시나리오 구성

표 7은 온실가스 감축시나리오 구성을 나타나낸 것으로, 본 연구는 바이오에너지 기술의 변화에 따른 온실가스 감축잠재량을 분석하였다. 바이오에너지 기술의 온실가스 감축시나리오는 본 연구에서 적용한 2015년을 기준시나리오로 하여 발전효율, 가동률, 누적보급량의 변화에 따른 온실가스 감축잠재량을 분석하였다. 발전효율은 5%, 10%, 15% 상승, 가동률은 90%, 95%, 100%로 향상, 보급률 변화 시나리오는 2015년 국내 누적보급량을 기준으로 5%, 10%, 15% 상승으로 하였으며(Korea Energy Agency, 2015), 본 연구에서 도출한 바이오에너지 기술의 온실가스 감축원단위를 이용하여 누적보급량의 변화에 따른 기술별 온실가스 감축잠재량을 산정하였다.

3.6.2 시나리오 분석

표 8은 발전효율, 가동률 및 누적보급량의 변화에 따른 온실가스 감축잠재량을 나타내었으며, 바이오에너지는 바이오가스와 바이오매스에 대한 각각의 감축시나리오 변화에 따른 온실가스 감축예상량 산정 후 합산하여 분석하였다. 발전효율 변화 시나리오 분석에서 바이오에너지의 발전효율이 상승함에 따라 각각 196 만tonCO_{2eq}/yr, 202 만tonCO_{2eq}/yr, 208 만 tonCO_{2eq}/yr의 온실가스 감축잠재량을 보였다. 바이오가스는 발전효율이 상승함에 따라 각각 164 만tonCO_{2eq}/yr, 166 만 tonCO_{2eq}/yr, 167 만tonCO_{2eq}/yr의 온실가스 감축잠재량을 보였으며, 바이오매스는 발전효율이 상승함에 따라 각각 31 만tonCO_{2eq}/yr, 36 만tonCO_{2eq}/yr, 42 만tonCO_{2eq}/yr의 온실가스 감축잠재량을 보였다. 가동률의 변화 시

Table 9. Result of 1% change scenario for bioenergy.

Technology	Scenario	1% increase (Unit: 10^4 tonCO_{2eq}/yr)	Ranking	Level (%)
Bioenergy	Generation efficiency	1.25	2	28.6
	Availability	0.54	3	12.3
	Cumulative distribution	4.38	1	100
Biogas	Generation efficiency	0.23	2	10.7
	Availability	0.15	3	7.0
	Cumulative distribution	2.16	1	100
Biomass	Generation efficiency	1.02	2	46.0
	Availability	0.39	3	17.5
	Cumulative distribution	2.23	1	100

나리오 분석에서 바이오에너지의 가동률이 상승함에 따라 각각 192 만tonCO_{2eq}/yr, 195 만tonCO_{2eq}/yr, 197 만 tonCO_{2eq}/yr의 온실가스 감축잠재량을 보였다. 바이오가스는 가동률이 상승함에 따라 각각 167 만tonCO_{2eq}/yr, 168 만tonCO_{2eq}/yr, 169 만tonCO_{2eq}/yr의 온실가스 감축잠재량을 보였으며, 바이오매스는 각각 24.1 만tonCO_{2eq}/yr, 26.1 만tonCO_{2eq}/yr, 28 만tonCO_{2eq}/yr의 온실가스 감축잠재량을 보였다. 누적보급량의 변화 시나리오 분석에서 바이오에너지의 누적보급량이 상승함에 따라 각각 366 만tonCO_{2eq}/yr, 383 만tonCO_{2eq}/yr, 405 만tonCO_{2eq}/yr의 온실가스 감축잠재량을 보였다. 바이오가스의 누적보급량이 상승함에 따라 각각 226 만tonCO_{2eq}/yr, 237 만tonCO_{2eq}/yr, 248 만tonCO_{2eq}/yr의 온실가스 감축잠재량을 보였으며, 바이오매스는 각각 139 만tonCO_{2eq}/yr, 146 만tonCO_{2eq}/yr, 157 만tonCO_{2eq}/yr의 온실가스 감축잠재량을 보였다.

표 9는 바이오에너지 기술의 온실가스 감축시나리오의 1% 변화에 따른 온실가스 감축잠재량과 우선순위 및 수준을 나타낸 것이다. 바이오에너지의 기준시나리오 대비 각각의 시나리오별 1% 변화에 따른 온실가스 감축잠재량은 발전효율 1.25 만tonCO_{2eq}/yr, 가동률 0.54 만tonCO_{2eq}/yr, 누적보급량 4.38 만tonCO_{2eq}/yr로 나타나, 바이오에너지는 누적보급량에 의한 온실가스 감축잠재량이 가장 큰 것으로 분석되었다. 바이오가스의 기준시나리오 대비 각각의 시나리오별 1% 변화에 따른 온실가스 감축잠재량은 발전효율 0.23 만tonCO_{2eq}/yr, 가동률 0.15 만tonCO_{2eq}/yr, 누적보급량 2.16 만tonCO_{2eq}/yr로 나타나, 바이오가스는 누적보급량에 의한 온실가스 감축잠재량이 가장 큰 것으로 분석되었다. 바이오가스는 누적보급량에 의한 온실가스 감축잠재량 이외의 발전효율과 가동률에 의한 온실가스 감축잠재량이 각각 10.7%, 7%로 누적보급량 대비 상대적으로 낮은 수준을 보였다. 바이오매스의 기준시나리오 대비 각각의 시나리오별 1% 변화에 따른 온실가스 감축잠재량은 발전효율 1.02 만tonCO_{2eq}/yr, 가동률 0.39 만 tonCO_{2eq}/yr, 2.23 만tonCO_{2eq}/yr로 나타나, 바이오매스는 누적보급량에 의한 온실가스 감축잠재량이 가장 큰 것으로 분석되었다. 바이오매스는 발전효율에 의한 온실가스 감축잠재량은 누적보급량 대비 46% 수준으로 나타나, 발전효율 상승에 의한 온실가스 감축잠재량도 함께 고려되어야 할 것으로 보인다. 시나리오 분석결과 바이오에너지 기술별 국가계획 등을 적용한 시나리오 구성을 통하여 보다 정확하고, 신뢰성 있는 온실가스 감축잠재량 산정이 이루어져야 할 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구는 2015년 국내 전력거래소 바이오에너지(바이오가스, 바이오매스) 발전사업자 등록사업자를 대상으로 현장 운영자료를 이용한 상향식접근법의 온실가스 감축량과 기술의 변화에 따른 온실가스 감축잠재량 시나리오를 분석하였다. 바이오에너지 기술의 운영자료는 누적보급량 대비 44.3%, 개별기술로는 바이오가스 75.8%, 바이오매스 12.8%의 자료가 수집되었다. 바이오에너지 기술에 의한 온실가스 감축량은 186 만 tonCO_{2eq}/yr로 나타났으며, 직접감축(scope 1)은 143 만 tonCO_{2eq}/yr(76.8%), 간접감축(scope 2)은 43 만tonCO_{2eq}/yr(23.2%)로 나타났다. 바이오에너지 개별기술별 온실가스 감축량 물질에서 바이오가스는 이산화탄소(CO_2)

9 만tonCO_2/yr(5.5%), 메탄(CH_4) 5.5 만tonCH_4/yr(94.5%), 아산화질소(N_2O) 0.00003 만tonN_2O/yr(0.004%)의 비율로 나타났으며, 바이오매스는 이산화탄소(CO_2) 25 만tonCO_2/yr(107%), 메탄(CH_4) −0.03 만tonCH_4/yr(−3.2%), 아산화질소(N_2O) −0.0033 만tonN_2O/yr(−3.9%)의 비율로 나타났다. 산정수준에 따른 온실가스 감축량 비교결과 바이오에너지 기술의 평균 운영자료와 설계용량은 약 85.47% 수준으로 나타났으며, 기술별로는 바이오가스 76%, 바이오매스 74%로 분석되었다. 운영자료 기반의 온실가스 감축산정과 설계용량 기반의 온실가스 감축량 산정의 차이는 산정방법에 따라 온실가스 감축산정에 대한 신뢰성과 연관된 사항으로 이를 개선하기 위한 바이오에너지 세부기술 수준에서의 온실가스 감축량 고도화 산정연구가 필요한 것으로 보인다. 본 연구결과와 UNFCCC CDM 사업과의 온실가스 감축원단위 비교결과, CDM 사업으로 인한 온실가스 감축원단위가 본 연구에서 도출한 온실가스 감축원단위 대비 높은 수치를 보였다. 시나리오 분석결과 바이오에너지 기술의 온실가스 감축잠재량 측면에서 발전효율(기술개발), 가동률(운영기술), 누적보급량(보급정책) 모두 온실가스 감축효과가 있는 것으로 나타났다. 특히, 바이오가스와 바이오매스 모두 누적보급량에 의한 온실가스 감축잠재량이 가장 큰 것으로 분석되었다. 하지만 바이오가스는 누적보급량 대비 발전효율과 가동률에 의한 온실가스 감축잠재량이 10% 수준으로 낮게 나타난 반면 바이오매스는 누적보급량 대비 발전효율은 46% 수준으로 상대적으로 높은 수준으로 분석되었다.

본 연구를 바탕으로 바이오에너지 개별기술에 의한 효율적인 온실가스 감축량 산정을 위한 자료제공과 함께 바이오에너지 기술에 대한 기술발전과 추진정책 등 종합적이고, 세부기술을 반영한 온실가스 감축량 연구가 지속적으로 진행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 2016년도 녹색기술센터 주요사업으로 수행한 연구과제(No. R16111)의 일환으로 수행되었으며, 본 논문은 과제내용을 수정 · 보완하여 작성하였습니다.

References

Bentsen, N.S. and I.M. Møller (2017) Solar energy conserved in biomass: sustainable bioenergy use and reduction of land use change, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 71, 954-958.

Blindheim, B. (2015) A missing link? The case of Norway and Sweden: dose increased renewable energy production impact domestic greenhouse gas emissions?, Energy Policy, 77, 207-215.

Breyer, C., O. Koskinen, and P. Blechinger (2015) Profitable climate change mitigation: the case of greenhouse gas emission reduction benefits enabled by solar photovoltaic systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49, 610-628.

Buchholz, T., M.D. Hurteau, J. Gunn, and D. Saah (2016) A global meta-analysis of forest bioenergy greenhouse gas emission accounting studies, Bioenergy, 8, 281-289.

Delivand, M.K., A.R.B. Cammerino, and P. Garofalo (2015) Optimal location of bioenergy facilities, biomass spatial availability, logistics costs and GHG (greenhouse gas) emissions: a case study on electricity production in South Italy, Journal of Cleaner Production, 99, 129-139.

Downie, A., D. Lau, A. Cowie, and P. Munroe (2014) Approaches to greenhouse gas accounting methods for biomass carbon, Biomass & Bioenergy, 60, 18-31.

EEA (European Environment Agency) (2015) Renewable energy in Europe: approximated recent growth and knock-in effects.

Esfandiari, S., R. Khorokhavar, and M. Sekhavat (2011) Greenhouse gas emission reduction through a biogas plant: A case study of waste management system at FEKA dairy farm, 2nd International Conference on Environmental Science and Technology, 6, 445-448.

Felten, D., N. Fröba, J. Fries, and C. Emmerling (2013) Energy balances and greenhouse gas-mitigation potentials of bioenergy cropping systems (Miscanthus, rapeseed, and maize) based on farming conditions in Western Germany, Renewable Energy, 55, 160-174.

GIR (Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea) (2013) http://www.gir.go.kr/

GIR (Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea) (2016) http://www.gir.go.kr/

IEA (International Energy Agency) (2016) 2016 CO_2 missions from fuel combustion.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2006) 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2012) Renewable energy sources and climate change mitigation.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014) Fifth assessment report.

KEC (Korea Environment Corporation) (2016) Guidelines for local government greenhouse gas inventories (ver. 4.0).

KEEI (Korea Energy Economics Institute) (2015) Yearbook of regional energy statistics.

Kim, H.G., C.H. Paik, Y.J. Chung, and Y.J. Kim (2014) Mathematical properties and constraints representation for bottom-up to the evaluation of GHG mitigation policies. Transportation Research, 32, 48-56.

Kim, H.S. (2014) Regional supply strategies for renewable energy sources based on contribution level of GHG emission reduction, Agriculture and life science, 32(4), 215-223.

Korea Energy Agency (2015) New and renewable energy statistics 2014 (2015 Edition).

KPX (Korea Power eXchange) (2012) http://www.kpx.or.kr/

Liu, X., X. Gao, W. Wang, Lei. Zheng, Y. Zhou, and Y. Sun (2012) Pilot-scale anaerobic co-digestion of municipal biomass waste: focusing on biomass production and GHG reduction, 44, 463-468.

NREL (National Renewable Energy Laboratory) (2016) Sustainable NREL, site sustainability plan FY 2016.

Park, M., S. Tae, S. Suk, G. Ford, M.E. Smith, and R. Steffen (2015) A study on the sustainable building technology considering to performance of greenhouse gas emission reduction, Procedia Engineering, 118, 1305-1308.

Rule, B.M., Z.J. Worth, and C.A. Boyle (2009) Comparison of life cycle carbon dioxide emissions and embodied energy in four renewable electricity generation technologies in New Zealand, Environmental Science and Technology, 43, 6406-6413.

Strzalka, R., D. Schneider, and U. Eicker (2017) Current status of bioenergy technologies in Germany, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 72, 801-820.

UNFCCC DTU partnership (2016) CDM pipeline overview, http://www.cdmpipeline.org/publications/CDMPipeline.xlsm/

Welfle, A., P. Gilbert, P. Thornley, and A. Stephenson (2017) Generating low-carbon heat from biomass: life cycle assessment of bioenergy scenarios, Journal of Cleaner Production, 149, 448-460.

WRI (World Resources Institute) (2015) Global protocol for community-scale greenhouse gas emission inventories: an accounting and reporting standard for cities.