

ORIGINAL ARTICLE

재생에너지(태양광, 풍력) 기술의 온실가스 감축산정: 국내를 대상으로

정재형* · 김기만¹⁾

창원시정연구원 도시공간연구소, ¹⁾녹색기술센터 정책연구부

The Estimation of Greenhouse Gas Reductions from Renewable Energy (Photovoltaic, Wind Power) : A Case Study in Korea

Jaehyung Jung*, Kiman Kim¹⁾

Urban Research Office, Changwon Research Institute, Changwon 51500, Korea

¹⁾Division of Policy Research, Green Technology Center, Seoul 04554, Korea

Abstract

This study estimates the greenhouse gas (GHG) emissions reduction resulting from photovoltaic and wind power technologies using a bottom-up approach for an indirect emission source (scope 2) in South Korea. To estimate GHG reductions from photovoltaic and wind power activities under standard operating conditions, methodologies are derived from the 2006 IPCC guidelines for national GHG inventories and the guidelines for local government greenhouse inventories of Korea published in 2016. Indirect emission factors for electricity are obtained from the 2011 Korea Power Exchange. The total annual GHG reduction from photovoltaic power (23,000 tons CO_{2eq}) and wind power (30,000 tons CO_{2eq}) was estimated to be 53,000 tons CO_{2eq}. The estimation of individual GHGs showed that the largest component is carbon dioxide, accounting for up to 99% of the total GHG. The results of estimation from photovoltaic and wind power were 63.60% and 80.22% of installed capacity, respectively. The annual average GHG reductions from photovoltaic and wind power per year per unit installed capacity (MW) were estimated as 549 tons CO_{2eq}/yr·MW and 647 tons CO_{2eq}/yr·MW, respectively. Finally, the results showed that the level of GHG reduction per year per installed capacity of photovoltaic and wind power is 62% and 42% compared to the CDM project, respectively.

Key words : Bottom-up approach, Greenhouse gas, Photovoltaic power, Renewable energy, Wind power

1. 서론

21세기 후반 이산화탄소 누적 배출량은 지구온난화에 상당한 영향을 미치고 있으며(IPCC, 2014), 인위적인 온실가스 배출이 주요한 원인으로 작용하고 있다(de_Richter et al., 2016). 특히, 인구증가와 과학의 발

달로 인한 자원의 소비증가는 기후변화, 환경오염 등의 문제를 야기 시키고 있어, 지속가능한 사회로의 변화에 대한 관심이 높아지고 있다(Omer, 2008; Griggs, 2013). 2015년 우리나라의 총 온실가스 배출량은 연간 690.2 백만톤CO_{2eq}으로 세계 12위, OECD (organization for economic co-operation and development) 회원국 중

Received 13 April, 2020; Revised 18 June, 2020;

Accepted 20 July, 2020

*Corresponding author: Jae-Hyung Jung, Urban Research office, Changwon Research Institute, Changwon 51500, Korea
Phone : +82-55-914-9014
E-mail : asap11@chari.re.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

미국, 일본, 독일, 멕시코, 캐나다에 이어 6위에 해당한다(GIR, 2017). 특히, 우리나라는 에너지부문 중 연료연소에 의한 연간 온실가스 배출량이 601.0 백만톤CO_{2eq}으로 국가온실가스 대비 87.1%의 비율을 차지하고 있고, 대부분의 온실가스 배출은 연료연소로 인한 것으로 나타나고 있다(GIR, 2017).

온실가스 배출을 감축하는 중요한 대응방안으로 신재생에너지의 역할이 중요하게 인식되고 있으며(Park et al., 2016; Hussain et al., 2017), 이는 화석연료를 대체함으로써 온실가스를 감축하고(Li et al., 2017) 친환경적 에너지로서 역할을 수행할 것으로 기대를 받고 있다(Rule et al., 2009). 또한, 신재생에너지는 미래의 새로운 에너지생산을 통한 에너지 전환의 기회를 제공하고 있어, 그 중요성이 크다(Inglesi-Lotz, 2016; Kafle et al., 2017). 특히, 전력부문은 국제 온실가스 배출의 31.8%를 차지하고 있으며, 태양광과 풍력발전으로부터 생산된 전력에너지를 통해 최소 50% 수준으로 온실가스를 감축하는 것의 필요성이 강조되고 있다(Sharifzadeh et al., 2017). 이에 온실가스 감축을 위한 미래 대체에너지원으로 태양광, 풍력발전 등을 활용한 재생에너지에 의한 온실가스 배출감축을 분석하는 것은 중요한 의미를 가진다(Sasaki, 2017).

IEA(2016)에 의하면, 2014년 우리나라의 에너지소비량은 세계 9위이며, 우리나라의 에너지소비량은 지속적으로 증가하고 있는 것으로 보고되고 있다(IEA, 2016). 우리나라는 2015년 연간 218,608 천toe의 최종에너지소비량을 보였으며, 최종 에너지원별 소비 구성비는 석탄 16.0%, 석유 49.1%, 천연가스 10.1%, 전력 19.0%, 열에너지 0.7%, 신재생에너지 5.1%로 나타났다. 우리나라의 최종에너지 소비 에너지원에서 화석연료(석탄, 석유, 천연가스)는 75.2%로 대부분을 차지하고 있는 반면 신재생에너지에 의한 에너지소비량은 5.1%로 미미한 수준이다(KEEI, 2016).

앞서 설명한 바와 같이, 우리나라의 에너지믹스는 화석연료를 다량으로 소비하는 구조로 이루어져 있으며, 온실가스를 감축하기 위해서는 화석연료에 의한 온실가스 배출을 줄이기 위한 노력이 반드시 필요하다(Omer, 2008; Kharecha and Hansen, 2013). 이에 따라, 최근 국내외적으로 신재생에너지에 의한 온실가스 감축연구가 활발히 수행 중에 있지만(IPCC, 2012; Kim, 2014;

EEA, 2015; NREL, 2015), 기존의 선행연구들은 국가 통계자료를 활용한 하향식접근법(top-down approach)을 중심으로 연구가 진행되고 있어, 신재생에너지 개별 기술에 의한 실질적인 온실가스 감축효과를 분석하기에는 한계점을 지니고 있다. 하향식접근법은 국가수준에서의 온실가스 배출영향 등을 분석하는 기법으로 세부기술에 대한 최적화된 문제를 해결하기에는 어려움이 있다(Kim et al., 2014). 반면, 상향식접근법(bottom-up approach)은 온실가스 감축사업 수준에서 온실가스 배출영향을 분석하는 것으로(Kim et al., 2014), 태양광과 풍력발전의 개별적 온실가스 감축분석이 가능하다.

본 연구는 신재생에너지 기술 중 2015년 우리나라 전력거래소에 등록된 태양광 및 풍력발전 사업자를 대상으로 기술수준의 운영자료 기반의 상향식접근법을 이용하여 기술별 온실가스 감축량을 분석하고자 한다. 이는 온실가스 감축사업 수준에서 국내 태양광, 풍력에 대한 온실가스 감축량을 확인함으로써 R&D 추진전략, 전력부분의 온실가스 감축을 위한 태양광, 풍력 활용 방안에 대한 시사점을 제공할 수 있다. 또한, 상향식접근법에 기반하여 도출한 온실가스 감축량의 의미를 확인하기 위해 태양광과 풍력발전 기술의 온실가스 감축수준을 청정개발체제(Clean Development Mechanism, CDM) 사업과 비교·분석한다.

2. 연구방법

2.1. 연구범위

본 연구의 공간적 범위는 우리나라 전역을 대상으로 하며, 시간적 범위는 2015년으로 하였다. 활동자료는 태양광과 풍력발전 사업자의 운영자료를 이용하여 자료를 수집 및 구축하는 상향식접근법을 이용하여 자료를 구축하였다. Table 1은 연구대상과 활동자료를 나타낸 것이다.

운영경계(boundary) 설정에 의한 온실가스 감축원은 직접감축(scope 1), 간접감축(scope 2), 기타감축(scope 3)으로 구분되며, 직접감축은 연료연소 등에 의해 직접적으로 감축 되는 감축원, 간접감축(scope 2)은 구매전력, 구매스팀 등의 에너지원 사용에 의해 간접적으로 감축되는 감축원, 기타감축은 직접감축원(scope 1)과 간접감축원(scope 2) 이외에서 감축되는 감축원이다

Table 1. Photovoltaic and wind power technologies and activities

Category	Specific sector	Type of activity	Unit	Value
Renewable energy	Photovoltaic	Electricity	MWh/yr	508,752
	Wind power	Electricity	MWh/yr	670,713

Table 2. Methods of GHG reductions estimation in renewable energy sector as photovoltaic, wind power in Korea

GHG (greenhouse gas)				
Scope 2	Level	Electricity emission factor		
$E_i = \sum_i (A_i \times EF_i)$	Tier-2	tonCO ₂ /MWh	kgCH ₄ /MWh	kgN ₂ O/MWh
Where, <i>i</i> =electricity		0.4415	0.005	0.0038
Technology	Equation	Generation energy	Input energy	
Photovoltaic	$E_i = \sum_i (A_i \times EF_i)$	Electricity	Natural energy	
Wind power	$E_i = \sum_i (A_i \times EF_i)$	Electricity	Natural energy	

a) E : reductions, b) A : activity, c) EF : emission factor

(WRI/WBCSD, 2004; WRI, 2015; KEC, 2016). 온실가스 감축원을 근거로 본 연구에서는 태양광 및 풍력발전 기술의 프로젝트 경계를 설정하고(OECD, 2002; WRI/WBCSD, 2005), 태양광과 풍력발전의 경우 전력만을 생산하기 때문에 순 전력생산량에 의한 간접감축원(scope 2)을 기준으로 운영형태에 따른 온실가스 감축을 분석하였다. 즉, 본 연구에서는 태양광과 풍력발전 기술별 프로젝트 단위로 운영경계를 설정하고, 태양광과 풍력발전 기술별 운영자료에 의한 온실가스 감축량을 산정하기 때문에 직접감축원(scope 1)과 기타감축원(scope 3)은 프로젝트 운영경계(project boundary)에서 제외하였다.

연구의 내용적 범위는 2015년 전력거래소(Korea power exchange)에 등록되어 있는 신재생에너지 기술 중 태양광과 풍력발전 사업자의 운영자료를 바탕으로 온실가스 감축산정 시스템을 데이터베이스화하여 온실가스 인벤토리 구축 및 온실가스 감축량을 산정하였다.

2.2. 연구 대상물질

본 연구에서는 산업공정에서 배출되는 온실가스 물질을 제외한 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O)를 연구 대상물질로 선정하였으며, 온실가스 물질을 정량화하기 위하여 지구온난화지수(Global Warming

Potential, GWP)를 적용하여 이산화탄소 환산톤(CO₂equivalent)으로 정량화하여 표현하였다. 특히, 본 연구는 IPCC 5차 평가보고서에서 제시하고 있는 지구온난화 지수 즉, 이산화탄소(CO₂) 1을 기준으로, 메탄(CH₄) 28, 아산화질소(N₂O) 265를 적용하여 온실가스 감축량을 정량화하였다(IPCC, 2014).

2.3. 온실가스 감축량 산정방법

온실가스 감축량 산정방법은 IPCC(2006) 가이드라인과 지자체 온실가스 배출량 산정지침, 전력거래소에서 제공하는 전력 간접배출계수를 기반으로 산정하였다(IPCC, 2006; KPX, 2012; KEC, 2016). Table 2에 태양광과 풍력발전 기술의 온실가스 감축 산정식을 제시하였다.

배출원별 온실가스 감축의 자세한 산정방법은 다음과 같다. 태양광과 풍력발전 기술은 전력에너지를 생산하는 기술로 직접감축원(scope 1)과 기타감축원(scope 3)을 제외한 간접감축원(scope 2)을 감축원으로 하여 대상기술의 운영자료를 이용하여 활동자료를 추출하였으며, 온실가스 산정방법은 tier-2 수준을 적용하였다. 간접감축원(scope 2)인 전력생산량은 운영기술별 2015년 1년간의 운영자료를 획득하여 기술부문별 전력생산량을 취합하여 전력거래소에서 제공하는 전력 간접배출계수를

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

Technology	Sample ratio			Installed capacity (2015)		
	Population (No.)	Sample (No.)	Ratio (%)	Cumulative installed capacity (MW)	Sample capacity (MW)	Ratio (%)
Photovoltaic	924	317	34.3	3,137	529.3	16.9
Wind power	41	15	36.5	844	414.8	49.2
Average	-	-	35.4	-	-	33.05

Table 4. Summary of field data collection from photovoltaic and wind power

Technology		Installed capacity (MW)	Generating electricity (MWh/yr)	Operating time (hr/yr)	Generation efficiency (%)	Availability (%)
Photovoltaic	Mean	1.7	1,605	1,440	17.2	77.4
	Min.	0.04	14	730	9.0	5.0
	Max.	99.9	34,214	4,503	37.0	104.0
Wind power	Mean	27.7	44,678	1,813	20.9	95.4
	Min.	1.7	2,166	1,095	10.0	91.6
	Max.	98.0	230,000	2,448	33.6	98.0

이용하여 tier-2 수준으로 순 전력생산량에 의한 온실가스 대체감축량을 산정하였다.

2.4. 운영자료 구축

Table 3과 4는 태양광과 풍력발전 기술의 자료현황과 운영자료 제시하였으며, 본 연구는 현장 설문조사를 통하여 태양광과 풍력발전 기술의 운영자료를 수집하였다. 특히, 현장 설문조사는 기술일반과 운영자료로 구분하였고, 기술일반은 기술명, 설치지역, 설치년도, 시설용량, 설치면적이며, 운영자료는 연간전력생산량과 자가전력 소비량, 연간운영시간, 발전효율, 가동률이다. 수집된 샘플은 총 332개(태양광 317개, 풍력발전 15개)로 전체 누적보급량 대비 33.05%의 운영자료를 수집하였으며, 기술별로는 태양광 16.9%, 풍력발전 49.2%로 수집하였다. 특히, 평균값은 총 샘플수에 대한 태양광과 풍력발전 개별기술의 평균적인 운영수준을 그리고 최소값과 최대값은 개별기술의 운영범위를 나타낸다.

태양광과 풍력발전의 설계용량(installed capacity)은 각각 1.7 MW, 27.7 MW로 나타나, 태양광의 설계용량이 풍력발전의 설계용량 대비 용량이 작은 것으로 나타났다. 태양광과 풍력발전의 운영시간은 자연에너지를 이용하는 있는 기술로 각각 연간 1,440 시간, 1,813 시간으

로 운영되고 있으며, 1년 중 운영시간이 각각 16%, 20%로 일조시간, 풍력 등의 자연에너지를 이용하여 운영하는 기술은 한계조건이 있음을 간접적으로 파악할 수 있다. 특히, 자연에너지를 이용하여 운영하는 태양광 발전 시설은 국가별 일조시간이 다르게 나타나고 있으며, 운영시간도 다르게 나타나고 있다. 예를 들어, 터키의 경우 연간 일조시간은 2,993 시간을 보이고 있으며, 2015년 우리나라의 연간 일조시간 2,399.2 시간으로 우리나라의 연간일조시간은 터키의 약 80%의 수준으로 나타나고 있다(Adam and Apaydin, 2016; KMA, 2016). 풍력의 경우도 지역적 변동성이 크게 나타나고 있으며, 미국(2012년)은 전력의 3%를 풍력발전으로 공급하고 있는 반면 덴마크(2013년)는 전체 전력수요의 33% 이상을 풍력발전으로 공급하고 있어(Kumar et al., 2016), 풍력 발전에 의한 전력공급의 차이는 약 10배로 나타났다.

태양광과 풍력발전의 발전효율은 운영자료의 평균효율로 각각 17.2%, 20.9%로 조사되었다. 태양광과 풍력발전의 가동률(availability)은 유지보수 시간을 제외한 연간 가동할 수 있는 비율로 정의하며, 본 연구에서의 가동률은 운영시간과 대기시간을 포함하고 있다. 이에 따른, 태양광과 풍력발전의 평균 가동률은 각각 77.4%,

Table 5. Results of GHG reductions from photovoltaic and wind power, and comparison of GHG reduction between sampling capacity and installed capacity in Korea

Technology	Total GHG reductions		Sampling capacity vs. installed capacity		
	Total	Scope 2	Unit: 10 ⁴ tonCO _{2eq} /yr		
			GHG reduction (sampling capacity)	Ratio (%)	GHG reduction (installed capacity)
Total	53	53	53	33.05	197
Photovoltaic	23	23	23	16.9	136
Wind power	30	30	30	49.2	61

95.4%로 나타났다. KETEP(2013)에 의하면 태양광의 셀 효율은 20%, 가동률은 93% 그리고 풍력(육상풍력 기준)의 가동률은 95%로 제시하고 있어, 이와 같은 수치는 본 연구에서 수집한 현장 운영자료와 유사한 수준으로 나타났다(KETEP, 2013). 태양광의 발전효율은 기술별 다양한 범위에서 나타나고 있으며, STC (Standard Test Condition)에서의 태양광 발전효율은 15.5%~18.5%의 범위를 가지고 있으며(Kristjansdottir et al., 2016), 태양광 CSP (Concentrated Solar Power/Photovoltaic) 기술의 태양에너지에 의한 전력변환 효율은 8~30%로 보여주고 있다(Hussain et al., 2017). 또한, 하이브리드 태양광 시스템으로 태양광을 운영할 경우 태양광 발전효율은 40% 이상이 가능할 것으로 보인다(Ju et al., 2017).

3. 연구결과

3.1. 온실가스 감축량 산정

본 절은 태양광과 풍력발전 기술의 운영자료를 활용하여 온실가스 감축량을 분석하였으며, 그 결과는 Table 5에 나타내었다. 태양광과 풍력발전 기술의 온실가스 감축을 산정하기 위하여 온실가스 감축원에 대한 운영경계 설정 후 태양광과 풍력발전 기술의 운영자료와 온실가스 산정방법론을 적용하여 온실가스 감축량을 산정하였다.

태양광과 풍력발전에 의한 총 온실가스 감축량은 53만 tonCO_{2eq}/yr로 나타났으며, 간접감축(scope 2)이 100%로 나타났다. 즉, 태양광과 풍력발전은 전력만 생산하기 때문에 간접감축(scope 2)이 100% 차지하고 있으며, 각각 23만 tonCO_{2eq}/yr, 30만 tonCO_{2eq}/yr으로 나타났다.

태양광과 풍력발전에 의한 국가 전체 설치용량 대비 온실가스 감축량을 산정하기 위하여, 전력거래소 태양광과 풍력발전 기술의 국내 발전시설 설치용량에 의한 온실가스 감축량을 산정하였다. 태양광과 풍력발전의 국내 설치용량에 의한 온실가스 감축량에 대한 scale-up하여 분석한 결과, 온실가스 감축량은 197만 tonCO_{2eq}/yr로 분석되었으며, 이는 2015년 국가 온실가스 배출량의 0.28% 수준으로 분석되었다(GIR, 2017).

3.2. 물질별 온실가스 감축량 산정

Table 6에 2015년 태양광과 풍력발전의 운영 자료를 활용한 기술별 및 온실가스 물질별 감축을 제시하였다. 태양광과 풍력발전 기술에 의한 온실가스 감축량은 53만 tonCO_{2eq}/yr(100%)이며, 물질별 온실가스 감축은 이산화탄소(CO₂) 52만 tonCO₂/yr(99.7%), 메탄(CH₄) 0.0007만 tonCH₄/yr(0.03%), 아산화질소(N₂O) 0.0005만 tonCO_{2eq}/yr(0.2%)으로 나타났다. 여기서, 비율은 온실가스 온난화지수로 환산한 물질별 비율을 의미한다. 태양광과 풍력발전에 의한 온실가스 물질별 감축은 이산화탄소(CO₂)가 대부분을 차지하고 있는 것으로 분석되었으며(Iwata and Okada, 2010; Dountio et al., 2016), 태양광과 풍력발전 기술에 대한 온실가스 물질이 유사하게 나타나고 있는 것으로 나타났다.

태양광과 풍력발전 기술에 대한 물질별 온실가스 감축은 각각 동일한 형태로 나타나고 있으며, 자연에너지를 이용하는 태양광과 풍력발전은 전력에너지를 생산하고 있어 온실가스 간접감축이 100%로 나타났다. 태양광과 풍력발전의 온실가스 감축물질에 대한 특성은 다음과 같다. 태양광의 온실가스 물질별 감축은 이산화탄소(CO₂) 22.4만 tonCO₂/yr(99.7%), 메탄(CH₄) 0.0003만

Table 6. Results of GHG reductions from photovoltaic and wind power by source individual greenhouse gases

Technology	Source	GHG reductions (unit: 10 ⁴ ton/yr)			
		CO _{2eq}	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Total		53	52	0.0007	0.0005
Ratio (%)		100	99.7	0.03	0.2
Photovoltaic	Sub-total	23	22.4	0.0003	0.0002
	Ratio (%)	100	99.7	0.03	0.2
	Scope 2	23	22.4	0.0003	0.0002
Wind power	Sub-total	30	29.6	0.0004	0.0003
	Ratio (%)	100	99.7	0.03	0.2
	Scope 2	30	29.6	0.0004	0.0003

Table 7. 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	
Photovoltaic	0.07	0.11	63.60
Wind power	1.97	2.46	80.22
Average			71.91

tonCH₄/yr(0.03%), 아산화질소(N₂O) 0.0002만 ton N₂O/yr(0.2%)의 비율로 나타났으며, 풍력발전에 의한 온실가스 물질별 감축은 이산화탄소(CO₂) 29.6만 tonCO₂/yr(99.7%), 메탄(CH₄) 0.0004만 tonCH₄/yr (0.03%), 아산화질소(N₂O) 0.0003만 tonN₂O/yr(0.2%)로 분석되었다.

3.3. 산정수준별 온실가스 감축량 비교·분석

Table 7은 온실가스 산정수준에 따른 태양광과 풍력발전 기술의 온실가스 감축량 산정결과를 비교하였다. 본 연구에서는 운영자료를 이용하여 태양광과 풍력발전 기술의 온실가스 감축량을 산정하였으며, 이를 비교·분석하기 위하여 설계용량을 기준으로 온실가스 감축량을 산정하였다. 운영자료와 설계용량 기준의 태양광과 풍력발전의 온실가스 감축은 개별기술에 대한 온실가스 감축량 산정결과의 전체 평균값을 이용하여 비교하였다.

동일한 연구대상 기술을 대상으로 태양광과 풍력발전 기술에 대한 운영자료와 설계용량 기준(일반적으로 산정하는 방식)을 비교한 결과 설계용량 대비 운영자료는 평균적으로 71.91%의 온실가스 감축수준으로 나타났다.

이는 설치용량 기준의 온실가스 감축량 산정은 현장 운영기준의 온실가스 감축량 산정과의 차이가 있음을 의미한다. 다시 말해, 국가 에너지이용과 에너지믹스의 구성에 따라 신재생에너지 기술에 의한 국가 온실가스 배출 영향은 국가별 차이를 가지고 있으며, 국가수준의 실질적 온실가스 감축을 위한 신재생에너지 기술의 실행계획의 제한요인으로 작용할 수 있음을 보여준다(Blindheim, 2015).

태양광의 운영자료와 설계용량에 의한 온실가스 감축량은 각각 0.07만 tonCO_{2eq}/yr, 0.11만 tonCO_{2eq}/yr으로 설계용량 대비 운영자료는 63.6%의 상대적으로 낮은 온실가스 감축수준을 보였다. 풍력발전의 운영자료와 설계용량에 의한 온실가스 감축량은 각각 1.97만 tonCO_{2eq}/yr, 2.46만 tonCO_{2eq}/yr으로 설계용량 대비 운영자료는 80.22%으로 태양광 대비 온실가스 감축수준은 상대적으로 높게 나타났다. 태양광과 풍력발전의 온실가스 감축수준의 차이를 보이고 있어, 자연에너지를 활용한 재생에너지 일지라도 운영수준이 상이하게 나타나는 것을 알 수 있다.

Table 8. Results of GHG estimation method between Korea and UNFCCC levels

Technology	GHG reductions (unit: tonCO _{2eq} /yr·MW)				Ratio (%)
	Korea level (This study)		UNFCCC level (CDM)		
	Range	Mean	Range	Mean	
Photovoltaic	1-1,422	549	565-1,702	874	62
Wind power	223-1,304	647	1,237-1,927	1,552	42

3.4. 온실가스 감축원단위 비교·분석

본 연구는 국내 태양광과 풍력발전 사업자를 대상으로 현장 운영자료를 바탕으로 기술별 온실가스 감축량을 산정하고, 이를 기반으로 기술별 온실가스 감축원단위를 도출하였다. 이를 비교하기 위하여, 본 연구에서는 국내 외에서 수행한 우리나라 전체 CDM 사업계획서 91건을 바탕으로 온실가스 감축량과 기술용량을 이용하여 기술별 온실가스 감축원단위를 분석하여, 최종적으로 본 연구와 비교·분석하였다(UNFCCC, 2016). Table 8은 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.

운영자료 기반의 태양광의 온실가스 감축원단위는 549 tonCO_{2eq}/yr·MW이며, CDM 사업에 의한 온실가스 감축원단위는 874 tonCO_{2eq}/yr·MW로 운영자료 기반의 온실가스 감축원단위는 약 63% 수준으로 조사되었다. Breyer et al.(2015)의 연구에서 전과정 관점에서의 태양광 시스템별 온실가스 감축은 661~820 kgCO_{2eq}/MWh의 범위로 나타나고 있으며, 국가와 기준 에너지(reference energy)의 차이에 따라서도 온실가스 감축의 차이를 보이고 있다(Breyer et al., 2015). 또한, Park et al.(2015)에서는 fixed solar panels은 830.43 kgCO_{2eq}/yr·kw, flat plate solar panels는 280.42 kgCO_{2eq}/yr·kw을 제시하고 있어(Park et al., 2015), 동일한 태양광 시스템 일지라도 다양한 범위에서 온실가스 감축 효과가 있는 것을 알 수 있다.

풍력발전의 온실가스 감축원단위는 647 tonCO_{2eq}/yr·MW이며, CDM 사업에 의한 온실가스 감축원단위는 1,552 tonCO_{2eq}/yr·MW로 운영자료 기반의 온실가스 감축원단위는 42% 수준으로 나타났다. Park et al.(2015)의 연구에서는 소형 풍력터빈에 대해 73 kgCO_{2eq}/yr·kw의 온실가스 감축량을 제시하였으며

(Park et al., 2015), 풍력발전에 의한 온실가스 감축산정에 핵심계수인 배출계수는 산정방법의 수준에 따라 2~21%의 변동성을 보이고 있어, 온실가스 산정결과의 신뢰성 향상을 위한 노력이 필요하다(Thomson et al., 2017). 풍력발전 시스템 배출계수의 변동에 따른 온실가스 감축산정의 정확성 및 시스템별 온실가스 감축범위가 다양하게 보이고 있는 것으로 나타났다.

운영기반의 온실가스 감축원단위는 국제수준의 CDM 사업에 의한 온실가스 감축원단위가 태양광과 풍력발전이 각각 62%, 42% 수준으로 나타나 기술별 수준의 차이는 있지만, 국내의 운영기반에 의한 온실가스 감축원단위가 상대적으로 낮게 나타났다. 하지만, 동일한 기술일지라도 산정결과의 변동성을 가지고 있어 상향식 접근법을 이용한 온실가스 감축산정의 신뢰성 확보가 중요한 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구는 2015년 국내 태양광과 풍력발전의 운영자료를 이용한 상향식접근법의 온실가스 감축산정을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다. 태양광과 풍력발전 기술의 운영자료는 누적보급량 대비 약 33.05%를 대상으로 하였으며, 태양광은 16.9%, 풍력발전은 49.2%로 자료가 수집되었다. 태양광과 풍력발전 기술에 의한 온실가스 감축량은 53 만tonCO_{2eq}/yr으로 간접감축(scope 2)이 100%로 나타났다. 온실가스 감축물질별 살펴보면 이산화탄소(CO₂) 52 만tonCO₂/yr, 메탄(CH₄) 0.0007 만tonCH₄/yr, 아산화질소(N₂O) 0.0005 만tonN₂O/yr으로 나타났으며, 이산화탄소가 약 99% 수준을 보였다. 산정수준별 온실가스 감축량 비교결과 태양광과 풍력발전에 대한 운영자료는 설계용량 대비 평균적으로 71.91%을 보였으며, 태양광은 63.6%, 풍력발전은 80.22%의 수준을 보였다. 본 연구에서 적용한 운영

수준과 국제수준의 대표적 온실가스 감축사업인 CDM 사업과의 온실가스 감축원단위 비교결과, CDM 사업 대비 운영수준의 온실가스 감축원단위는 태양광 62%, 풍력발전 42%로 나타났으며, 본 연구에서 도출한 온실가스 감축원단위가 CDM 사업으로 인한 온실가스 감축원단위 대비 낮은 수치를 보였다. 특히, CDM 사업 대비 낮은 온실가스 감축원단위는 태양광과 풍력발전 기술의 보급용량 뿐만 아니라 운영기술에 따라 온실가스 감축효과의 변동성이 크다는 것을 시사하고 있다.

본 연구를 바탕으로 태양광과 풍력발전 기술에 의한 효율적인 온실가스 감축량 산정을 위한 기초자료와 함께 태양광과 풍력발전 기술에 대한 정책이 통합적으로 관리되는 온실가스 감축량 산정 및 예측 연구가 지속적으로 진행되어야 할 것으로 보인다.

REFERENCES

- Adam, A. D., Apaydin, G., 2016, Grid connected solar system as a tool for green house gas emission reduction in Turkey, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 53, 1086-1091.
- 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., Koskinen, O., Blechinger, P., 2015, Profitable climate change mitigation: the case of greenhouse gas emission reduction benefits enabled by solar photovoltaic systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 49, 610-628.
- de_Richter, R. K., Ming, T., Caillo, S., Liu, W., 2016, Fighting global warming by GHG removal: destroying CFCs and HFCs in solar-wind power plant hybrid producing renewable energy with no-intermittency, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 49, 446-472.
- Dountio, E. G., Meukam, P., Tchaptchet, D. L. P., 2016, Electricity generation technology options under the greenhouse gases mitigation scenario: case study of Cameroon, *Energy Strategy Reviews*, 13-14, 191-211.
- EEA (European Environment Agency), 2015, Renewable energy in Europe: approximated recent growth and knock-in effects.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea), 2017, <http://www.gir.go.kr>.
- Griggs, D., 2013, Sustainable development goals for people and planet, *Nature*, 495.
- Hussain, A., Arif, S. M., Aslam, M., 2017, Emerging renewable and sustainable energy technologies: state of the art, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 71, 12-28.
- IEA (International Energy Agency), 2016, 2016 CO₂ emissions from fuel combustion.
- Inglesi-Lotz, R., 2016, The impact of renewable energy consumption to economic growth: a panel data application, *Energy Economics*, 53, 58-63.
- 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.
- Iwata, H., Okada, K., 2010, Greenhouse gas emissions and the role of the Kyoto Protocol, *Munich Personal RePEc Archive*, 22299.
- Ju, X., Xu, C., Hu, Y., Han, X., Wei, G., Du, X., 2017, A Review on the development of photovoltaic/concentrated solar power (PV-SCP) hybrid system, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 161, 305-327.
- Kafle, S., Parajuli, R., Bhattarai, S., Euh, S. H., Kim, D. H., 2017, A Review on energy systems and GHG emissions reduction plan and policy of the Republic of Korea: past, present and future, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 73, 1123-1130.
- KEC (Korea Environment Corporation), 2016, Guidelines for local government greenhouse gas inventories (Ver.4.0).
- KEEI (Korea Energy Economics Institute), 2016, Yearbook of regional energy statistics.
- KETEP (Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning), 2013, 2013 Energy technology vision roadmap.
- Kharecha, P. A., Hansen, J. E., 2013, Prevented mortality and greenhouse gas emission from historical and projected nuclear power, *Environ. Sci. Technol.*, 47, 4889-4895.
- Krisjansdottir, T. F., Good, C. S., Inman, M. R., Schlanbusch, R. D., Andresen, I., 2016, Embodied

- greenhouse gas emissions from PV in Norwegian residential zero emission pilot buildings, 133, 155-171.
- Kim, H. G., Paik, C. H., Chung, Y. J., Kim, Y. J., 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.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2016, <http://www.kma.go.kr/index.jsp>.
- KPX (Korea Power exchange), 2012, <http://www.kpx.or.kr/>.
- Kumar, I., Tynner, W. E., Sinha, K. C., 2016, Input-output life cycle environmental assessment of greenhouse gas emissions from utility scale wind energy in the united State, *Energy Policy*, 89, 294-301.
- Li, S., Chang, T. H., Chang, S. L., 2017, The policy effectiveness of economic instrument for the photovoltaic and wind power development in the European Union, *Renewable Energy*, 101, 660-666.
- NREL (National Renewable Energy Laboratory), 2015, Sustainable NREL, Site sustainability plan FY 2016.
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development), 2002, Development guidance on monitoring and project boundaries for greenhouse gas projects, 27.
- Omer, A. M., 2008, Energy: Environment and sustainable development, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 12, 2265-2300.
- Park, M., Tae, S., Suk, S., Ford, G., Smith, M. E., Steffen, R., 2015, A Study on the sustainable building technology considering to performance of greenhouse gas emission reduction, *Procedia Engineering*, 118, 1305-1308.
- Park, S. Y., Yun, B. Y., Yun, C. Y., Lee, D. K., Choi, D. G., 2016, An Analysis of the optimum renewable energy portfolio using the bottom-up model: focusing on the electricity generation sector in South Korea, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 53, 319-329.
- Rule, B. M., Worth, Z. J., Boyle, C. A., 2009, Comparison of life cycle carbon dioxide emissions and embodied energy in four renewable electricity generation technologies in New Zealand, *Environ. Sci. Technol.*, 43, 6406-6413.
- Sasaki, W., 2017, Predictability of global offshore wind and wave power, *International Journal of Marine Energy*, 17, 98-109.
- Sharifzadeh, M., Lubiano-Walochik, H., Shah, N., 2017, Integrated renewable electricity generation considering uncertainties: the UK roadmap to 50% power generation from wind and solar energies, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 72, 385-398.
- Thomson, R. C., Harrison, G. P., Chick, J. P., 2017, Marginal greenhouse gas emission displacement of wind power in Great Britain, *Energy Policy*, 101, 201-210.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change), 2016, UNFCCC DTU partnership, <http://www.cdmpipeline.org>.
- WRI (World Resources Institute), 2015, Global protocol for community-scale greenhouse gas emission inventories: an accounting and reporting standard for cities.
- WRI/WBCSD (World Resources Institute/World Business Council for Sustainable Development), 2004, The greenhouse gas protocol: a corporate accounting and reporting standard.
- WRI/WBCSD (World Resources Institute/World Business Council for Sustainable Development), 2005, The greenhouse gas protocol: the GHG protocol for project accounting.

• Research Fellow. Jae-Hyung Jung
Urban Research Office, Changwon Research Institute
asap11@chari.re.kr

• Senior Researcher. Ki-Man Kim
Division of Policy Research, Green Technology Center
kkim@gtck.re.kr