

강원도 연곡, 물노, 부영 폐광산 지역에서의 풍력발전과 태양광발전의 잠재성 비교

송진영¹⁾ · 최요순^{1)*} · 장미향¹⁾ · 윤석호²⁾

A Comparison of Wind Power and Photovoltaic Potentials at Yeongok, Mulno and Booyoung Abandoned Mines in Kangwon Province, Korea

Jinyoung Song, Yosoon Choi*, Mihyang Jang and Suk-Ho Yoon

(Received 17 June 2014; Final version Received 28 July 2014; Accepted 20 August 2014)

Abstract : This study assessed and compared wind power and photovoltaic potentials at the Yeongok, Mulno and Booyoung abandoned mines in the Kangwon province, Korea. Resources data of wind and solar for each abandoned mine were collected from the renewable energy data center in Korea Institute of Energy Research(KIER) and Korea Meteorological Administration(KMA). RETScreen software developed by Natural Resources Canada(NRC) was utilized for analyzing the electricity productions, reductions of greenhouse gas emission and net present values of the 600 kW wind power and photovoltaic systems at the three abandoned mines. As a result, we could know that the wind power potentials are higher than the photovoltaic potentials at the Yeongok and Mulno abandoned mines. However, the photovoltaic potential is higher than the wind power potential at the Booyoung abandoned mine when considers the net present value.

Key words : Abandoned Mine, Photovoltaic system, Wind power system, Renewable energy

요약 : 본 연구에서는 강원도 연곡, 물노, 부영 폐광산 지역을 대상으로 풍력발전과 태양광발전의 잠재성을 평가하고 그 결과를 비교하였다. 연구지역의 풍력 및 태양에너지 자원과 관련된 자료들을 한국에너지기술연구원 신재생에너지데이터센터와 기상청으로부터 수집하였다. 캐나다 천연자원부에서 개발한 RETScreen 소프트웨어를 이용하여 연구지역에 600 kW급 풍력발전 시스템과 600 kW급 태양광발전 시스템을 설치할 경우 기대할 수 있는 전력 생산량, 온실가스 감축량, 순현재가치를 분석하였다. 그 결과 연곡, 물노 폐광산 지역에서는 풍력발전이 태양광 발전에 비해 더 큰 잠재성을 가지는 것으로 평가되었다. 그러나 부영 폐광산 지역에서는 순현재가치를 고려했을 때 태양광발전의 잠재성이 풍력발전의 잠재성 보다 더 큰 것으로 분석되었다.

주요어 : 폐광산, 태양광발전 시스템, 풍력발전 시스템, 신재생에너지

서 론

현재 국내 광산의 약 90%가 휴광 또는 폐광된 상태이며 다수의 폐광산 부지들이 다른 용도로 이용되지 못하고 방치되어 있는 실정이다(MIRECO, 2012). 폐광산 지역에서는 지역 경제가 위축되고 지역 공동화 현상이 심화되는 등 다양한 사회문제들이 발생하고 있으며, 이는

국토의 균형 발전을 저해하는 요인이 되기도 한다(Jang *et al.*, 2013; Son *et al.*, 2014). 이러한 문제들을 해결하기 위해서는 폐광산 지역들에 대한 다양한 진흥정책을 통해 버려진 폐광산 부지들을 다시 활용할 수 있도록 유도할 필요가 있다.

최근 폐광산 부지의 재활용을 촉진하기 위한 진흥정책의 하나로서 폐광산 부지에 신재생에너지 발전 시스템을 설치한 사례들이 국내외에서 보고되고 있다. 미국에서는 와이오밍 주의 Dave Johnston 폐탄광 지역에 풍력발전 시스템이 설치되었으며 약 66,000 가구가 사용할 수 있는 전력을 생산하고 있다. 펜실베이니아 주의 Somerset 폐탄광 지역에서도 풍력발전 시스템이 설치되어 약 10,000

1) 부경대학교 에너지자원공학과

2) 한국광해관리공단 지역법제팀

*Corresponding Author(최요순)

E-mail; energy@pknu.ac.kr, yspower7@gmail.com

Address; Department of Energy Resources Engineering,
Pukyong National University, Busan, Korea

가구에 전력을 공급하고 있다. 또한, 테네시 주의 Buffalo mountain 폐광산 지역에는 29 MW급의 풍력발전 시스템이 설치되어 운영 중에 있다(Choi, 2013). 독일에서는 Leipzig 인근에 위치한 Meuro 폐광산 지역에 166 MW급의 태양광발전 시스템이 설치되었으며, 이는 현재까지 독일에 설치된 태양광발전 시스템 중 가장 큰 규모이다(Cichon and Runyon, 2012). 국내에서는 강원도 정선군 석공함백 산성광산배수 자연정화처리 시설에 85 kW급 태양광발전 시스템이 설치되었으며, 강원도 태백시의 석공함태 산성광산배수 물리화학적 정화처리 시설에도 80 kW급 태양광발전 시스템이 설치되었다(Choi, 2013).

폐광산 지역에 신재생에너지 발전 시스템을 설치한 사례들이 국내외에서 보고되고 있으나 이러한 프로젝트들이 항상 가능한 것은 아니다. 폐광산 지역의 기후 특성을 고려하여 신재생에너지 발전 잠재성을 평가하고, 이를 근거로 프로젝트의 타당성 여부를 판단해야 한다(Jang *et al.*, 2013; Choi *et al.*, 2013). 미국 환경보호국(Environmental Protection Agency, EPA)과 국립신재생에너지연구소(National Renewable Energy Laboratory, NREL)에서는 RE-Powering America's Land 프로젝트를 수행하면서 일부 폐광산 지역들을 대상으로 풍력발전 시스템과 태양광발전 시스템의 잠재성을 평가하는 연구를 수행하였다(USEPA, 2012). 국내에서는 Jang 등(2013)이 광역적인 규모에서 강원도 폐광산 지역의 풍력 발전을 통해 기대할 수 있는 연간 전력 생산량, 온실가스 감축량, 경제적 효과 등을 분석하였고, 상대적으로 풍력발전 시스템 도입이 유리한 폐광산 지역들을 제시하였다. Choi 등(2013)은 전라남도의 부곡, 성산, 영광 폐광

산 지역들을 대상으로 태양광발전 시스템 설치시 기대할 수 있는 연간 전력 생산량과 경제적 효과를 분석하였다. 또한, 폐광산 지역의 산성광산배수 자연정화처리 시설을 대상으로 현장조사를 통해 태양광발전 시스템의 부지 적합성을 평가하고 국지적인 규모에서 시스템의 잠재성을 분석하는 연구들도 수행되었다(Song *et al.*, 2013; Song *et al.*, 2014). 그러나 국내 폐광산 지역들을 대상으로 풍력발전 잠재성과 태양광발전 잠재성을 동시에 평가하여 그 결과를 상호 비교하는 연구는 현재까지 수행되지 않았다. 폐광산 지역의 기후 특성에 따라 신재생에너지 발전 시스템 도입시 상대적으로 유리한 신재생에너지원이 달라질 수도 있으므로 지역별로 풍력, 태양광과 같은 신재생에너지원의 잠재성을 상호 비교할 필요가 있다.

본 연구에서는 강원도 지역의 연곡, 물노, 부영 폐광산을 대상으로 풍력발전 시스템과 태양광발전 시스템을 설치할 경우 기대할 수 있는 전력 생산량, 온실가스 감축량, 순현재가치를 분석하고자 한다. 풍력발전 시스템과 태양광발전 시스템을 동일한 발전용량으로 설치하는 경우를 가정하여 분석을 수행하고, 그 결과를 상호 비교할 것이다. 폐광산 부지에 신재생에너지 발전 시스템을 설치하기 위해 필요한 인허가 등의 제도적인 문제에 관한 고려는 본 연구의 범위에 포함되지 않는다.

연구지역

연구지역으로는 강원도에 위치한 여러 폐광산 중에서 기상청 관측소 인근에 위치하여 신뢰할 수 있는 기상관측 자료의 확보가 용이한 연곡, 물노, 부영 폐광산을 선

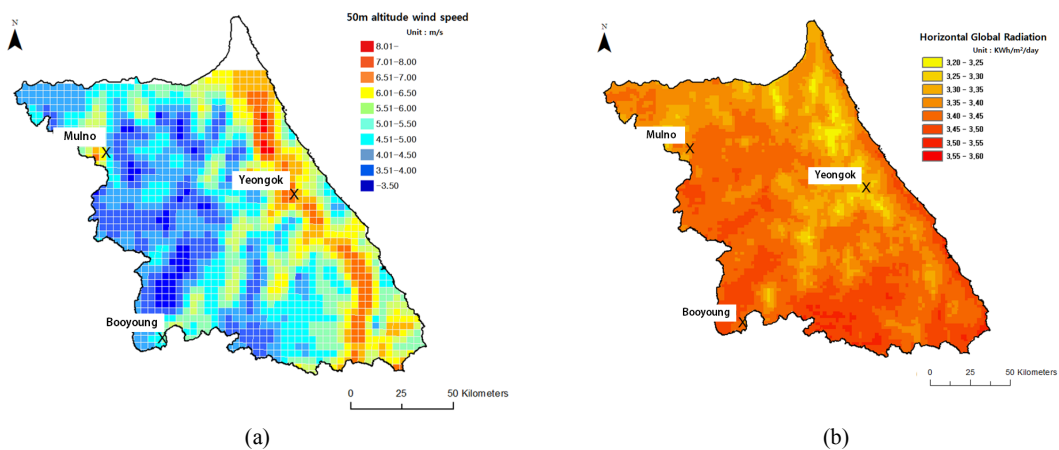


Fig. 1. Maps of wind and solar resources in the Kangwon province, Korea. (a) Annual mean wind speed (m/s) at the 50m altitude. (b) Annual mean daily global horizontal radiation ($\text{kWh/m}^2/\text{day}$) at the surface. The locations of Yeongok, Mulno and Booyoung abandoned mines are displayed.

정하였다. Fig. 1은 한국에너지기술연구원에서 제작한 3 km 해상도의 풍력에너지 자원지도(50 m 연평균 풍속, m/s)와 기상청에서 제작한 1 km 해상도의 태양에너지 자원지도(연평균 수평면 하루 전일사량, kWh/m²/day)상에 연구지역들의 위치를 표시한 것이다. 연곡 광산은 강원도 강릉시 연곡면에 위치하고 있으며 물리브덴을 생산하다가 2001년 폐광되었다. 물노 광산은 1986년 폐광된 금 광산이며 강원도 춘천시 북산면에 위치하고 있다. 마지막으로 부영 광산은 강원도 원주시 신림면에 위치하고 있으며 석회석을 채굴하다가 1993년 폐광되었다.

연구방법

캐나다 천연자원부에서 신재생에너지 프로젝트의 예비 타당성 평가를 위해 개발한 RETScreen 소프트웨어(<https://www.etscreen.net>)를 이용하여 풍력발전 시스템과 태양광발전 시스템을 설치할 경우 기대할 수 있는 전력 생산량, 온실가스 감축량, 순현재가치를 분석하였다. RETScreen 소프트웨어의 특징 및 활용방법은 Jang 등(2013)과 Choi 등(2013)에 자세하게 설명되어있다.

기상관측 자료의 수집

연구지역에 대하여 풍력발전 시스템의 분석을 위해 필요한 기상관측 자료들(지상 50 m 고도의 평균 풍속, 기압, 형인자, 기온)은 한국에너지기술연구원 신재생에너지 데이터센터로부터 수집하였으며, 태양광발전 시스템의 분석을 위해 필요한 기상관측 자료들(수평면 전일사량, 기온)은 원주, 춘천, 강릉 지방 기상청으로부터 확보하였다(Table 1). 부영 폐광산은 지상 50 m의 연평균 풍속이 5.4 m/s이며, 지표면에서의 연평균 하루 수평면 전일사량은 3.65 kWh/m²/day 정도이다. 물노 폐광산은 6.1 m/s의 연평균 풍속 조건과 3.70 kWh/m²/day의 연평균 하루 수평면 전일사량 조건을 가진다. 마지막으로 연곡 폐광산은 연평균 풍속이 7.3 m/s이며 연평균 하루 수평면 전일사량 조건은 3.69 kWh/m²/day이다. 기상관측 자료만을 검토해 보았을 때 연곡 폐광산 지역의 기후 조건이 풍력발전에 상대적으로 유리할 것으로 예상되며, 태양광발전의 경우 세 폐광산 지역들의 연평균 하루 수평면 전일사량 편차가 0.05 kWh/m²/day 정도로서 유사한 기후 조건을 가진다고 볼 수 있다.

Table 1. Meteorological data collected for analyzing wind power and photovoltaic potentials at the Mulno, Booyoung and Yeongok abandoned mines

Type	Parameter	Booyoung	Mulno	Yeongok
General	Latitude (deg)	37.4	37.9	37.6
	Meteorological station	Wonju	Chuncheon	Kangneung
Wind power	Wind speed (m/s)	5.4	6.1	7.3
	Atmospheric pressure (kPa)	93.2	95.3	93.8
	Shape factor	1.7	1.2	1.2
	Air temperature at the 50 m height (°C)	8.2	9.1	8.6
Photovoltaic	Global horizontal radiation (kWh/m ² /day)	3.65	3.70	3.69
	Air temperature at the surface (°C)	11.9	11.0	13.1

Table 2. Design parameters for the 600 kW wind power system considered in this study

Parameter	Value
Turbine manufacturer	NORDEX
Turbine model	N43
Unit	1
Power capacity (kW/unit)	600
Hub height (m)	50
Roter diameter (m)	43
Swept area (m ²)	1,452

시스템 설계

풍력발전 시스템

풍력발전 시스템의 경우 Table 2와 같이 각 지역에 Nordex N43 풍력터빈 1대를 설치하는 것으로 가정하여 분석을 수행하였다. Nordex N43 풍력터빈의 발전용량은

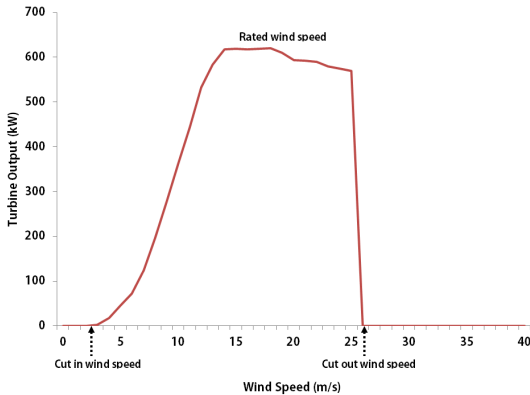


Fig. 2. The wind speed–power curve data of Nordex N43 wind turbine. It represents the total amount of energy produced from the wind turbine over a range of annual average wind speed (<http://www.nordex-online.com>).

600 kW이며, 허브(hub)의 높이는 50 m로 설계하였다. Nordex N43 풍력터빈의 풍속–출력곡선은 Fig. 2와 같다. 풍력터빈의 노후화를 고려하여 생산되는 전력은 매년 1%씩 감소하는 것으로 가정하였다.

태양광발전 시스템

각 지역에 설치될 태양광발전 시스템의 발전용량을 풍력발전 시스템과 동일하게 600 kW로 설계하기 위해서 250 W 태양전지 패널(panel)을 총 2,400장 설치하는 것으로 가정하였다(Table 3). 태양전지 어레이(array)는 고정형 방식으로 경사각은 설치 지역의 위도 값으로, 방위각은 남향으로 설정하였다. 그 외의 설계 인자들은 Table 3에 제시하였다. 태양광발전 시스템 역시 풍력발전 시스템과 마찬가지로 노후화로 인해 매년 1%씩 전력 생산량이 감소하는 것으로 가정하였다.

전력 생산량 분석

풍력발전 시스템

풍력발전 시스템의 전력 생산량을 분석하기 위해서는 시스템이 설치될 지역의 풍속분포 특성에 관한 정보와 풍력터빈의 성능에 관한 정보가 필요하다. 풍속분포 특성을 표현하기 위해 다양한 수학적 모델이 개발되었으며, 특히 Hiester와 Pennell(1981)가 제안한 Weibull 확률

Table 3. Design parameters for the 600 kW photovoltaic system considered in this study

Type	Parameter	Value
Photovoltaic panel	Material	mono-Si
	Manufacturer	SAMSUNG
	Model	LPC250SM
	Unit	2400
	Power capacity (kW/unit)	0.25
	Total power capacity (kW)	600
	Efficiency (%)	15.6
	Nominal operating cell temperature (°C)	45
	Temperature coefficient (%/°C)	0.4
	Solar collector area (m ²)	229
	Miscellaneous losses (%)	5
Inverter	Manufacturer	SMA America
	Model	ST36
	Efficiency (%)	97
	Unit	16
	Capacity (kW)	36
	Miscellaneous losses (%)	0

밀도함수(Eq. 1)가 풍력발전 시스템 분석시 주로 사용된다(Celik, 2003).

$$p(x) = \left(\frac{k}{c}\right) \times \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} \times \exp\left[-\left(\frac{x}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

여기서 $p(x)$ 는 풍속 x (m/s)가 발생할 확률, k 는 풍속분포의 편차를 나타내는 형인자(shape factor), c 는 등급계수(scale factor)를 의미한다. 형인자는 일반적으로 1에서 3까지의 값을 가지며 연구지역의 값은 Table 1에 제시하였다.

등급계수는 Eq. 2를 사용하여 결정할 수 있다(Heister and Pennell, 1981).

$$c = \frac{\bar{x}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (2)$$

여기서 \bar{x} 는 평균 풍속(m/s), Γ 는 gamma function 값을 나타낸다.

풍력터빈의 성능에 관한 정보는 풍속-출력곡선에 표시된다(Fig. 2). 풍속-출력곡선에는 전력 생산이 가능한 최소한의 풍속인 시동풍속(cut in wind speed)과 일정한 최대출력이 유지되는 정격풍속(rated wind speed), 시스템 안전을 위해 설정된 정지풍속(cut out wind speed) 등의 정보가 포함되며, 이와 관련된 정보는 풍력터빈의 제조사에서 제공한다.

풍력터빈이 설치될 지역의 풍속분포 특성과 풍속-출력곡선을 이용하여 풍력발전 시스템으로부터 기대할 수 있는 전력 생산량을 Eq. 3과 같이 근사적으로 계산할 수 있다.

$$\overline{E}_h = \sum_{x=0}^{25} P_x \times 1 \times p(x) \quad (3)$$

여기서 \overline{E}_h 는 시간당 평균 전력 생산량(kWh/hour), P_x 는 풍속 x 일 때 풍속-출력곡선으로부터 결정되는 풍력터빈의 출력(kW), 1은 한 시간(h), $p(x)$ 는 풍속 x 가 발생할 확률을 나타낸다. 풍속 x 는 0 m/s부터 25 m/s(정지풍속)까지 1 m/s 간격 정수 단위의 값으로 고려된다. 0에서 25까지 정수단위로 표현된 풍속 조건에서 한 시간 동안의 전력 생산량(kWh)과 풍속 발생 확률(0-1)을 곱한 후 모두 합산하여 평균 전력 생산량을 산정한다.

시간당 평균 전력 생산량이 산정되면 Eq. 4를 이용하여 연간 전력 생산량(E_U , kWh/year)을 계산할 수 있다.

$$E_U = \overline{E}_h \times 24 \times 365 \quad (4)$$

여기서 24는 하루 동안의 시간(h), 365는 연간 일 수를 나타낸다.

연간 총 에너지 생산량(E_G , kWh/year)은 풍력터빈이 설치될 지역의 온도와 압력 조건을 반영하여 보정한 값이며, Eq. 5를 이용하여 계산한다.

$$E_G = E_U \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \quad (5)$$

여기서 P 는 풍력터빈이 설치될 고도에서의 대기압(kPa), P_0 는 표준 대기압(101.3 kPa), T 는 풍력터빈이 설치될 고도에서의 기온(K), T_0 는 표준절대온도(288.1 K)이다.

풍력터빈이 생산한 에너지는 다양한 손실 요인들에 의해 감소되기 때문에, 전력망으로 공급된 에너지의 총량은 풍력터빈이 생산한 에너지의 총량보다 줄어들게 된다. 본 연구에서는 Ha와 Kim(2005)에 제시된 것과 상수 손실계수들이 사용된 단순화된 수식 Eq. 6을 이용하여 연간 전력망으로 공급된 에너지의 총량(E_S , kWh/year)을 계산하였다.

$$E_S = E_G \times (1 - \lambda_a) \times (1 - \lambda_s) \times (1 - \lambda_d) \times (1 - \lambda_m) \quad (6)$$

여기서 λ_a 는 풍력터빈 배열(array) 손실계수, λ_s 는 풍력터빈 날개에 결빙 또는 분진 흡착으로 인해 발생하는 손실계수(airfoil losses), λ_d 는 설비보수 등으로 인한 정지(downtime) 손실계수, λ_m 는 기타(miscellaneous) 손실계수를 의미한다.

본 연구에서는 풍력터빈을 한 대 설치하는 것으로 설계하였으므로 풍력터빈의 배열에 따른 손실계수는 0으로 설정하였다. 또한, Jang 등(2013)의 연구와 동일하게 풍력터빈 날개의 결빙 또는 분진 흡착으로 인해 발생하는 손실계수(λ_s)는 1%, 정지손실계수(λ_d)는 2%, 기타 손실계수(λ_m)는 2%로 설정하여 분석을 수행하였다.

태양광발전 시스템

태양광발전 시스템의 전력 생산량 분석을 위해서는 먼저 태양전지 어레이 표면으로 들어오는 일사량을 계산해야 한다. 태양전지 어레이에 도달하는 태양 복사 에너지의 성분은 직접 입사하는 직달일사(direct radiation), 구름 혹은 먼지에 의해 산란되어 입사하는 산란일사(diffuse

radiation), 지표면 등에 부딪혀 반사되어 입사하는 반사 일사(reflected radiation)로 구분된다. 태양광발전 시스템은 위 3가지 복사 에너지 성분을 모두 이용하여 전력을 생산하므로 태양전지 어레이 표면에 도달하는 전체 태양 일사량은 Eq. 7과 같이 산정한다.

$$H_t = H_b \times \left(\frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \right) + H_d \times \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + H_p \times \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \quad (7)$$

여기서 H_t 는 경사진 태양전지 어레이로 입사하는 전체 태양 일사량(W/m^2), H_b 는 수평면 직달 일사량(W/m^2), θ 는 태양전지 어레이에서의 직달일사 성분의 입사각(deg), θ_z 는 태양의 천정각(deg), H_d 는 수평면의 산란일사량(W/m^2), β 는 태양전지 어레이의 경사각(deg), H_p 는 지표 반사율을 의미한다(NRCAN, 2005).

태양전지 어레이에서 연간 생산되는 전력량은 Eq. 8과 같다.

$$E_A = H_t \times 365 \times 24 \times S \times \eta_r \times [1 - \beta_p \times (T_c - T_r)] \times (1 - \lambda_p) \times (1 - \lambda_c) \quad (8)$$

여기서 E_A 는 태양전지 어레이에서 연간 생산되는 전력량(kWh/year), 365는 연간 일 수, 24는 하루 동안의 시간(h), S 는 태양전지 어레이 면적(m^2), η_r 는 표준 실험조건에서의 태양전지 패널의 효율, β_p 는 태양전지 패널의 효율과 관련한 온도계수, T_c 는 패널의 평균 온도($^{\circ}C$), T_r 는 $25^{\circ}C$, λ_p 는 태양전지 어레이의 기타 손실계수, λ_c 는 전력 제어장치의 기타 손실계수를 의미한다(NRCAN, 2005).

태양전지 어레이의 연간 전력 생산량(E_A , kWh/year)에 인버터의 변환 효율(η_{inv})을 곱하면 Eq. 9와 같이 연간 계통선에 송출하는 전력량(E_S , kWh/year)을 산정할 수 있다.

$$E_S = E_A \times \eta_{inv} \quad (9)$$

온실가스 감축량 분석

온실가스 감축량 분석이란 풍력발전 시스템이나 태양광발전 시스템에서 생산되어 전력망에 공급된 전기 에너지와 등가의 에너지를 원자력발전, 화력발전 등 기존의

발전 시스템을 이용해 생산할 경우 발생하게 되는 온실가스의 양을 계산하는 것이다. RETScreen은 국가별 온실가스배출 기준 값(G)으로 연료유형별 단위 전력량(1 MWh)당 발생하는 온실가스 배출량(tCO_2) 자료를 제공한다. 국가별 온실가스배출 기준 값과 전력망에서 발생하는 송배전 손실율(β , %)을 함께 고려하면 Eq. 10과 같이 단위 전력량 당 온실가스 배출량(G_t , tCO_2/MWh)을 계산할 수 있다.

$$G_t = G \times (1 + \beta) \quad (10)$$

우리나라의 경우 온실가스배출 기준 값(G)은 0.467 (tCO_2/MWh)이며, 평균 송배전 손실율을 3.69% 이다(KEPCO, 2011). 따라서 단위 전력량 당 온실가스 배출량(G_t)은 0.485 (tCO_2/MWh)으로 계산된다. 앞서 에너지 분석을 통해 계산된 전력망으로 공급된 에너지 총량(E_S , MWh)과 단위 전력량 당 온실가스 배출량(G_t)을 고려하면 Eq. 11과 같이 풍력발전 시스템 또는 태양광발전 시스템 설치를 통해 기대할 수 있는 온실가스 감축량(G_N , tCO_2)을 계산할 수 있다.

$$G_N = E_S \times G_t \quad (11)$$

순현재가치 산정

본 연구에서는 풍력발전 시스템과 태양광발전 시스템의 설치에 따른 경제적 효과를 분석하기 위하여 시스템의 순현재가치(Net Present Value, NPV)를 Eq. 12와 같이 계산하였다.

$$NPV = \sum_{t=1}^N \frac{C_t}{(1+r)^t} - C_0 \quad (12)$$

여기서 NPV 는 순 현재가치(원), N 은 시스템 운영기간(년), C_t 는 연도별(t) 전력생산으로 얻게 되는 수입액과 지출비용의 차액(원), r 은 할인율, C_0 는 초기비용(원)을 의미한다. 초기자본회수기간(payback year)은 순현재가치를 0으로 만들 수 있는 시스템 운영기간(M)이다.

Eq. 12를 이용하여 순현재가치를 계산하기 위해서는 시스템 가격 및 시공비용을 포함한 초기 투자비와, 연간 운영비, 할인율, 프로젝트 기간, 대출 비율 등의 재무관련 인자들의 설정이 필요하다. 본 연구에서는 할인율 값으로 KDI(2013)가 제시한 사회적 할인율인 5.5% 를 적용하였으며, 대출은 받지 않는 것으로 가정하였다. 프로

젝트 기간은 태양전지 패널의 내구년 수를 고려하여 20년으로 가정하였다(Kim and Kim, 2008; Kang *et al.*, 2014).

시스템의 초기 투자비는 IEA(International Energy Agency)에서 제시한 국가별 재생에너지 시스템 초기 투자비용에 관한 기준 중 한국의 기준을 적용하여 산정하였다. 풍력발전 시스템은 IEA(2013a)의 기준에 따라 1 W당 1.85 USD의 초기 비용이 투입되는 것으로 가정하였으며, 태양광발전 시스템은 IEA(2013b)의 기준에 따라 1 W당 2.1 USD의 초기 투자비를 적용하였다. 시스템의 연간 운영비용은 미국 NREL과 IEA에서 제시하는 기준을 적용하였다. 즉, 풍력발전 시스템은 1 MWh당 10.25 USD(IEA, 2013a), 태양광발전 시스템은 1 kW당 19.04 USD(Rick *et al.*, 2010)의 연간 운영비용이 필요한 것으로 가정하였다. 미화로 산정된 비용들은 최근 5년간(2009-2013)의 국내 환율(외환은행 환율정보, <https://www.keb.co.kr>) 평균값인 1172.70원을 적용하여 한화로 환산하였다(Table 4).

전력생산으로 얻게 되는 수입액은 2012년에 시작된 RPS제도를 반영하였다. RPS 제도는 발전 사업자에게 총 발전량에서 일정비율을 신재생에너지로 공급하도록 의무화하는 제도이다. 본 연구에서는 RPS제도에 따라 한국전력거래소를 통해 전력을 판매하여 얻게 되는 수입(<http://www.kpx.or.kr>)과 공급인증서(REC) 시장에서 공급 의무자들 간의 거래를 통해 얻게 되는 수입(<http://rec.kpx.info/>)을 고려하여 전력판매 수익을 산정하였다. REC 가중치는 에너지관리공단에서 제시하는 기준을 반영하여 1.0으로 적용하였다. 그 결과 전력판매 수익은

풍력발전이 1 MWh당 258,979원, 태양광발전은 1 MWh당 334,444원으로 산정되었고, 이를 적용하여 분석을 수행하였다.

연구결과

연구지역에서 풍력발전 시스템과 태양광발전 시스템의 잠재성을 상호 비교하기 위해 시스템 발전용량이 600 kW로 동일한 경우를 가정하여 분석을 수행하였다. 600 kW급 풍력발전 시스템을 설치할 경우 연간 전력망으로 공급할 수 있는 에너지의 총량은 지역별로 큰 차이를 보였다(Table 5). 연곡 폐광산 지역에서는 1년차를 기준으로 연간 1,494 MWh의 전력을 공급할 수 있으며, 온실가스 감축량은 698 tCO₂, 전력 판매 수입액은 386 백만 원으로 평가되었다. 반면, 부영 폐광산 지역에서는 1년 차에서 공급 가능한 전력량이 873 MWh, 온실가스 감축량은 408 tCO₂, 전력 판매 수입액은 226 백만 원으로 평가되었다. 물노 폐광산 지역은 연간 전력 공급량, 온실가스 감축량, 연간 전력 판매 수입액 모두 부영 폐광산 지역 보다는 크게, 연곡 폐광산 지역 보다는 작게 평가되었다. 세 지역의 지상 50 m 고도 연평균 풍속 조건이 상이하기 때문에 600 kW급 풍력발전 시스템으로부터 생산되는 전력량도 큰 차이를 보이는 것으로 판단된다.

600 kW급 태양광발전 시스템이 전력망으로 공급할 수 있는 에너지의 총량은 물노 폐광산 지역이 가장 크게 나타났지만, 세 곳의 지역에서 큰 차이를 보이지는 않았다(Table 6). 이는 세 곳 폐광산 지역의 연간 수평면 하루 전일사량 조건이 유사하기 때문이다. 1년차를 기준

Table 4. Initial and annual costs of wind power and photovoltaic systems considered in this study

Parameter	Wind power system (600 kW)	Photovoltaic system (600 kW)
Initial cost (10 ⁶ KRW)	1,301.6	1,477.6
First year cost (10 ⁶ KRW/year)	292.9	13.3

Table 5. Assessment of 600 kW wind power potential at the Yeongok, Mulno and Booyoung abandoned mines

Type	Parameter	Booyoung	Mulno	Yeongok
Energy	Electricity exported grid in the first year (MWh/year)	873.0	1186.0	1494.0
Emission	Net annual GHG emission reduction (tCO ₂ /year)	408	557	698
Finance	First year income (10 ⁶ KRW)	226	308	386
	Net present value (10 ⁶ KRW)	5,318	7,776	10,102
	Equity payback (Year)	5.9	4.4	3.6

으로 태양광발전 시스템의 온실가스 감축량은 지역에 따라 373 tCO₂ - 388 tCO₂ 범위로 나타났으며, 판매 수입액은 지역에 따라 267 백만원 - 277 백만원 정도로 평가되었다.

연곡 폐광산 지역에서 600 kW급 풍력발전 시스템과 600 kW급 태양광발전 시스템의 분석결과를 상호 비교해 보면 공급할 수 있는 전력량은 1년차를 기준으로 풍력발전 시스템이 약 685 MWh 정도 더 많게 나타났다. 온실가스 감축량도 전력 공급량에 비례하여 풍력발전 시스템이 321 tCO₂ 더 많게 분석되었다. 전력 판매 수입액은 전력 공급량에 비례하지는 않았으나 역시 풍력발전 시스템이 116 백만원 더 크게 평가되었다. 초기투자 비용과 수입 및 지출액을 모두 고려하여 순현재가치를 산정한 결과 연곡 폐광산 지역에서는 600 kW급 풍력발전

시스템의 가치가 600 kW급 태양광발전 시스템의 가치보다 약 3,410 백만원 더 크게 평가되었으며, 초기자본 회수기간도 풍력발전 시스템이 약 1.6 년 더 빠른 것으로 나타났다. 따라서 연곡 폐광산 지역에는 풍력발전의 잠재성이 태양광발전의 잠재성보다 더 크다고 할 수 있다.

연곡 폐광산의 풍력발전 시스템과 태양광발전 시스템의 현금 흐름 그래프를 작성하였다(Fig. 3). 연곡 폐광산은 풍력발전으로 회수할 수 있는 금액이 태양광발전에 비해 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 풍력발전 시스템으로부터 생산되는 전력량이 태양광발전 시스템으로 생산되는 전력량에 비해 많기 때문이다. 시스템의 노후화로 인해 생산되는 전력이 연간 1%씩 감소하는 것으로 가정하였기 때문에 시간이 흐를수록 전력 판매에 따른 수익이 점차 감소하는 패턴을 보인다.

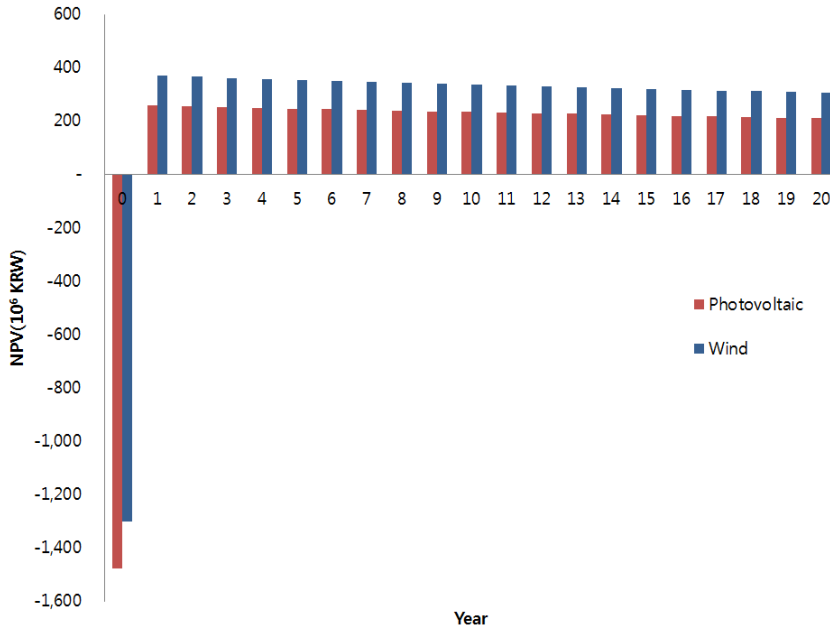


Fig. 3. Cash flow diagram of the 600 kW wind power and photovoltaic systems at the Yeongok abandoned mine.

Table 6. Assessment of 600 kW photovoltaic potential at the Yeongok, Mulno and Booyoung abandoned mines

Type	Parameter	Booyoung	Mulno	Yeongok
Energy	Electricity exported grid in the first year (MWh/year)	789.7	830.5	808.5
Emission	Net annual GHG emission reduction (tCO ₂ /year)	373	388	377
Finance	First year income (10 ⁶ KRW)	267	277	270
	Net present value (10 ⁶ KRW)	6,390	6,922	6,692
	Equity payback (Year)	5.3	5.1	5.2

물노 폐광산 지역의 분석결과를 살펴보면 600 kW급 풍력발전 시스템이 600 kW급 태양광발전 시스템 보다 전력 공급량, 온실가스 감축량, 전력 판매 수입액 모두 크게 나타났다. 그 결과 순현재가치는 풍력발전 시스템이

7,746 백만원, 태양광발전 시스템이 6,922 백만원으로 풍력발전 시스템의 순현재가치가 824 백만원 더 크게 평가되었다. 초기자본회수기간도 풍력발전 시스템이 0.7년 정도 더 짧게 분석되었다. 따라서 물노 폐광산 지역에서도

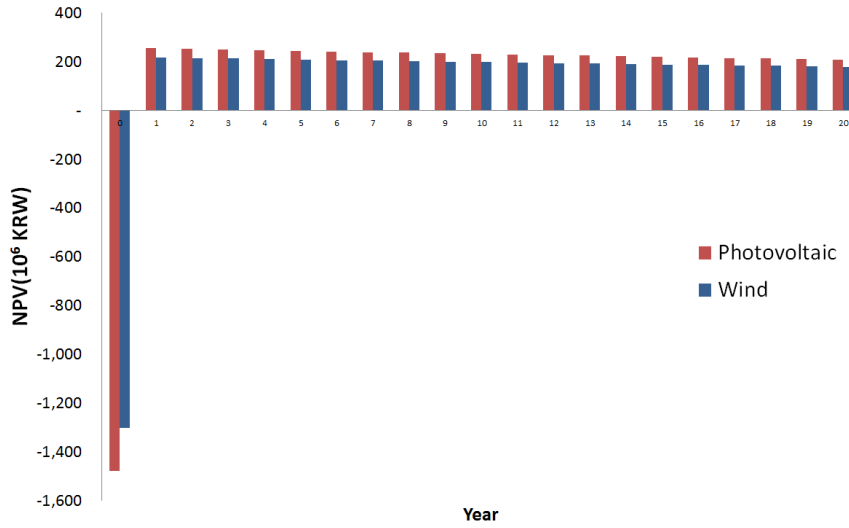


Fig. 4. Cash flow diagram of the 600 kW wind power and photovoltaic systems at the Booyoung abandoned mine.

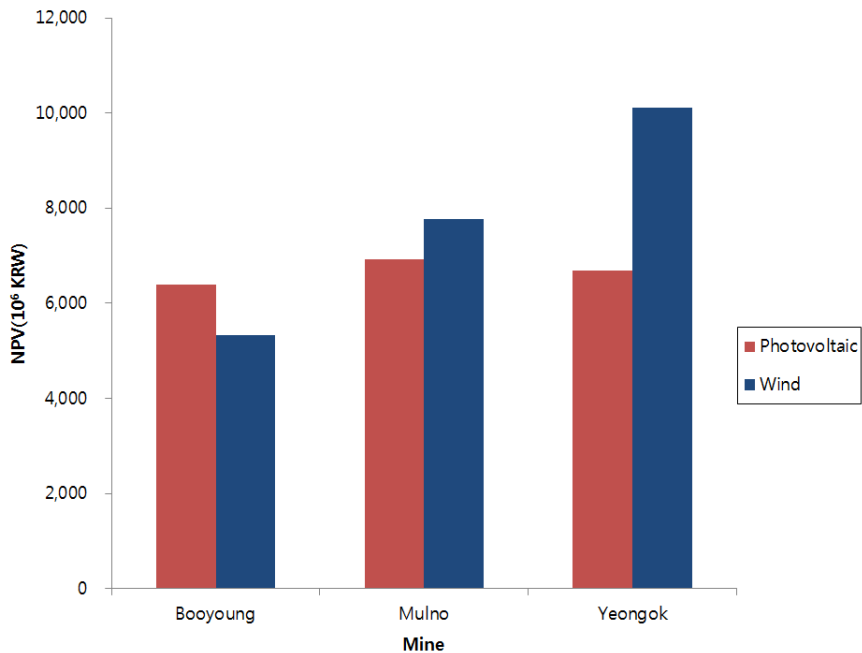


Fig. 5. Net present values of the 600 kW wind power system and those of the 600 kW photovoltaic system at the Yeongok, Mulno and Booyoung abandoned mines.

풍력발전의 잠재성이 태양광발전의 잠재성보다 더 크다고 볼 수 있다.

부영 폐광산 지역은 600 kW급 풍력발전 시스템이 600 kW급 태양광발전 시스템 보다 전력 공급량과 온실가스 감축량은 더 큰 것으로 분석되었다. 그러나 전력 판매 수입액은 풍력발전 시스템이 태양광발전 시스템보다 오히려 작게 분석되었다. 이는 RPS 제도에서 풍력발전 시스템과 태양광발전 시스템의 전력 판매 단가가 서로 다르기 때문이다. 그 결과 부영 폐광산 지역에서는 600 kW급 태양광발전 시스템의 순현재가치가 600 kW급 풍력발전 시스템의 순현재가치보다 1,072 백만원 더 크게 산정되었으며, 초기자본회수기간도 태양광발전 시스템이 0.6년 정도 더 짧게 분석되었다. 따라서 부영 폐광산 지역에서는 경제성 측면에서 태양광발전의 잠재성이 풍력발전 잠재성보다 더 크다고 할 수 있다. Fig. 4는 부영 폐광산의 풍력발전 시스템과 태양광발전 시스템의 현금흐름 그래프를 보여준다. 부영 폐광산은 연곡, 물노 폐광산과는 달리 풍력발전보다 태양광발전 시스템으로부터 회수할 수 있는 금액이 더 큰 것으로 확인할 수 있다.

세 폐광산 지역에서의 600 kW급 풍력발전 시스템과 600 kW급 태양광발전 시스템의 순현재가치를 상호 비교하면 Fig. 5와 같다. 풍력발전 시스템의 순현재가치는 태양광발전 시스템에 비해 지역별로 그 편차가 큰 것을 알 수 있다. 본 연구에서 가정된 분석 조건에서는 연곡 폐광산 지역과 물노 폐광산 지역에서 풍력발전 시스템의 순현재가치가 더 크며, 부영 폐광산 지역에서는 태양광발전 시스템의 순현재가치가 더 큰 것을 확인할 수 있다.

결 론

본 연구에서는 강원도 연곡, 물노, 부영 폐광산 지역을 대상으로 600 kW급 풍력발전 시스템과 600 kW급 태양광발전 시스템을 설치할 경우 기대할 수 있는 전력 생산량, 온실가스 감축량, 순현재가치를 분석하였고, 그 결과를 상호 비교하였다. 풍력발전 시스템으로부터 공급할 수 있는 전력량, 온실가스 감축량, 전력 판매 수입액은 연곡 폐광산 지역이 가장 많고 부영 폐광산 지역이 가장 적은 것으로 평가되었다. 이는 각 지역의 연평균 풍속 조건에 영향을 받은 것으로 판단된다. 태양광발전 시스템으로부터 공급할 수 있는 전력량, 온실가스 감축량, 연간 전력 판매 수입액은 물노 폐광산 지역이 가장 많고 부영 폐광산 지역이 가장 적은 것으로 평가되었으나 그 편차는 풍력발전 시스템에 비해 상대적으로 작았다.

폐광산 지역별로 풍력발전 잠재성과 태양광발전 잠재성을 상호 비교할 경우, 공급할 수 있는 전력량과 온실가스

감축량은 세 지역 모두 600 kW급 풍력발전 시스템을 도입하는 것이 600 kW급 태양광발전 시스템을 도입하는 것 보다 유리한 것으로 분석되었다. 그러나 순현재가치나 초기자본회수기간 등과 같은 경제성 측면을 고려할 경우에는 연곡 폐광산과 물노 폐광산 지역에서는 풍력발전 시스템을 도입하는 것이 유리하며, 부영 폐광산 지역에서는 태양광발전 시스템을 도입하는 것이 유리한 것으로 나타났다. 이는 풍력발전 시스템과 태양광발전 시스템에서 생산된 전력의 판매 단가가 상이하기 때문인 것으로 판단된다.

일반적으로 강원도 지역은 좋은 풍속 조건을 가지고 있기 때문에 강원도 폐광산 지역에 신재생에너지 발전 시스템을 도입할 경우 풍력발전 시스템을 우선적으로 고려하게 된다. 그러나 본 연구의 결과에서 볼 수 있듯이 강원도 내에서도 지역별로 기후 조건이 상이하기 때문에 상대적으로 풍속 조건이 좋지 않는 폐광산 지역에서는 풍력발전 시스템보다 태양광발전 시스템을 도입하는 것이 보다 높은 경제적 효과를 기대할 수 있다.

본 연구에서는 풍력발전과 태양광발전의 잠재성을 광역적인 규모에서 비교하는 것을 목표로 하였으므로 신재생에너지 발전 시스템을 설치하기 위해 필요한 인허가 문제와 현장 부지 적합성 문제 등은 고려하지 않았다. 그러나 현실에서는 신재생에너지 발전 시스템의 잠재성이 높다고 하더라도 인허가와 같은 제도적인 문제나 지역주민들의 민원과 같은 사회적인 문제로 인해 폐광산 지역의 신재생에너지 프로젝트의 진행이 어려운 경우도 많다. 또한, 본 연구에서는 순현재가치 산정에 있어서 부지 매입이나 임대비용은 별도로 고려하지 않았으나 보다 정확한 분석을 위해서는 이에 대한 고려도 필요할 것이다. 마지막으로 향후 연구에서는 태양광발전과 풍력발전의 핵심기술지표 변화에 따른 민감도 분석과 미래 전력 판매 가격의 변동성을 반영한 분석이 필요할 것이라 판단된다.

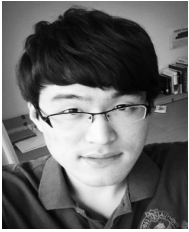
사 사

본 연구는 2014년 한국광해관리공단의 광해방지기술 개발사업(신재생 에너지 사업을 통한 폐광지역 진흥사업의 다각화 연구)의 지원으로 수행되었다.

References

- Celik, A.N., 2003, "Assessing the suitability of wind speed probability distribution functions based on wind power density," *Renewable Energy*, Vol. 28, No. 10, pp. 1563-

- 1574.
- Choi, Y., 2013, "Utilization of Renewable Energy Technology in the Mining Industry," *J. of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 50, No. 3, pp. 422-429.
- Choi, Y., Choi, Y., Suh, J., Park, H.D., Jang, M. and Go, W.R., 2013, "Assessment of Photovoltaic Potentials at Buguk, Sungsan and Younggwang Abandoned Mines in Jeollanam-do, Korea," *J. of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 50, No. 6, pp. 827-837.
- Cichon, M. and Runyon, J., 2012, *Renewable Energy Projects of the Year Highlight the Industry's Best Achievements*, RenewableEnergyWorld.com, <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2012/12/renewable-energy-projects-of-the-yearhighlight-the-industrys-best-achievements-part-1> (assessed at 16 June 2014).
- Ha, J.W. and Kim, S.D., 2005, "A Study on the Wind Power Generation and Its Economic Feasibility at Daekwanryung," *J. of Energy Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 123-132.
- Hiester, T.R. and Pennell, W.T., 1981, *The Siting handbook for Large Wind Energy System*, Windbooks, New York, USA. pp. 6-18.
- IEA, 2013a, *Technology Roadmap: Wind energy*, International Energy Agency, http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Wind_Roadmap.pdf (assessed at 16 June 2014).
- IEA, 2013b, *Trends 2013 in Photovoltaic Applications*, International Energy Agency, http://iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/FINAL_TRENDS_v1.02.pdf (assessed at 16 June 2014).
- Jang, M., Choi, Y., Park, H.D. and Go, W.R., 2013, "Assessment of Wind Power Potential at Abandoned Mines in Kangwon Province, Korea," *J. of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 50, No. 4, pp. 470-481.
- Kang, S., Choi, B.S., Kim, S., Mun, H.D., Lee, J., Park, N.B. and Jeon, E.C., 2014, "A Study on the Application Effect of Central-Grid PV System at a Streetlamp using RETScreen," *J. of the Climate Change Research*, Vol. 5, No. 1, pp. 1-12.
- KDI, 2013, *A Study on General Guidelines for Preliminary Feasibility Studies*, Korea Development Institute, http://pimac.kdi.re.kr/guide/rguide_list.jsp (assessed at March 2013).
- KEPCO, 2011, *KEPCO in Brief*, Korea Energy Management Corporation, <http://www.kepcoco.kr> (assessed at 16 June 2014).
- Kim, C.M. and Kim, K.Y., 2008, "A study on economic analysis of new renewable energy power(photovoltaic, wind power, small hydro, biogas)," *J. of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 28, No. 6, pp. 70-77.
- MIRECO, 2012, *2012 Yearbook of MIRECO Statistics*, Mine Reclamation Corporation, <http://www.mireco.or.kr> (assessed at 04 June 2013).
- NRCAN, 2005, *Clean Energy Project Analysis: RetScreen Engineering & Cases Textbook*, Minister of Natural Resources Canada, <http://www.retScreen.net> (assessed at 16 June 2014).
- Rick, T., Joel, B., Nick R. and Stu K., 2010, *Cost and Performance Assumptions for Modeling Electricity Generation Technologies*, National Renewable Energy Laboratory, www.nrel.gov/docs/fy11osti/48595.pdf (assessed at 16 June 2014).
- Son, J., Choi, Y., Park, H.D. and Go, W.R., 2014, "GIS-based Decision Support Model for Establishing Promotion Policy of Abandoned Mining Areas with Considering Local Characteristics," *J. of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 51, No. 1, pp. 41-54.
- Song, J., Choi, Y., Cheong, Y.W., Yim, G.J. and Park, H.S., 2013, "Site Suitability Assessment for Installing Photovoltaic Systems using Fisheye-lens Camera and SOLPOS Calculator," *J. of the Korean Society for Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 50, No. 6, pp. 789-798.
- Song, J., Choi, Y., Cheong, Y.W., Yim, G.J. and Park, H.S., 2014, "Design of Photovoltaic Systems for Supplying Electric Power to Aerators in Natural Purification Treatment Facilities of Acid Mine Drainage," *J. of the Korean Society for Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 51, No. 1, pp. 19-29.
- USEPA, 2012, *A Breath of Fresh Air for America's Abandoned Mine Lands: Alternative Energy Provides a Second Wind*, US Environmental Protection Agency, http://www.epa.gov/aml/revital/wind_energy.pdf (assessed at 16 June 2014).

**송진영**

현재 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과, 학사과정
(E-mail; sean2249@gmail.com)

장미향

현재 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과, 석사과정
(本學會誌 第50卷 第6号 參照)

최요순

현재 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 조교수
(本學會誌 第51卷 第2号 參照)

**윤석호**

1994년 한양대학교 도시공학과 공학사
1996년 한양대학교 도시공학과 공학석사

현재 한국광해관리공단 기술연구센터 선임연구원
(E-mail; yoon912@hanmail.net)