

강원권 및 동남권 지역의 파력발전 잠재성 평가

장미향¹ · 최요순^{1*}

Assessment of Wave Power Potential in the Kangwon and Dongnam Regions, Korea

Mi-Hyang JANG¹ · Yo-Soon CHOI^{1*}

요 약

본 연구에서는 강원권 및 동남권에 해당하는 동해와 남해일부 해역을 대상으로 파력발전 시스템을 도입함으로써 기대할 수 있는 잠재성을 평가하였다. 연구지역 해역에 750kW급 파력발전기 28대를 설치하는 것을 가정하고, 미국 국립해양대기청(NOAA)의 NWW3(Noaa Wave Watch III) 모델로부터 구축된 평균 유의파고 및 침투파주기 자료와 스텐포드 대학과 미네소타 대학이 공동 개발한 InVEST 소프트웨어를 이용하여 연간 전력 생산량과 경제적 효과를 분석하였다. 분석 결과 연구지역에서의 발전 전력량은 최대 1,207MWh/year, 최소 163MWh/year로 산정되었으며, 연안보다는 육지로부터 먼 해역으로 갈수록 발전 전력량이 점차 증가하는 공간적 분포 패턴을 보였다. 파력발전 시스템의 운영기간을 25년으로 가정하고 시스템 도입을 위해 투입되는 비용과 생산되는 전력의 판매 수익을 함께 고려하여 순현재가치(NPV)를 산정하였다. 그 결과 파력발전 시스템으로부터 생산된 전력을 해저 케이블과 강원권과 동남권 지역의 해안가에 위치한 10개의 발전소들의 설비를 이용하여 내륙으로 공급할 경우에는 NPV가 최대 5,882달러(약 6,600천원), 최소 -63,494달러(약 -71,000천원)인 것으로 분석되었다. 반면, 파력발전 시스템으로부터 생산된 전력을 울릉도와 독도의 전력망으로 공급할 경우, 해저 케이블 설치를 위해 투입되는 초기 비용이 크게 줄어들어 울릉도, 독도 인근 해역에서 NPV 값이 최대 28,095달러(약 31,600천원)까지 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 전력 판매단가가 증가할수록 동해상의 NPV의 손익분기선이 육지 쪽으로 가까워지는 것으로 분석되었으며, 울릉도, 독도 인근 해역에서는 전력 판매단가가 현재 수준보다 100원 상승할 경우 NPV 값이 최대 88,158달러(약 99,000천원)까지 증가하는 것으로 예측되었다.

주요어 : 파력발전, 재생에너지, 에너지분석

ABSTRACT

This study performed an assessment of wave power potential in the Kangwon and

2013년 9월 4일 접수 Received on September 4, 2013 / 2013년 10월 24일 수정 Revised on October 24, 2013
/ 2013년 11월 5일 심사완료 Accepted on November 5, 2013

¹ 부경대학교 에너지자원공학과 Department of Energy Resources Engineering, Pukyong National University

* Corresponding Author E-mail : energy@pknu.ac.kr; yspower7@gmail.com

Dongnam regions encompassing the East Sea and part of South Sea. Annual electricity production and economic effects of 28 wave energy converters with 750kW capacity were analyzed using significant wave height and peak wave period data(created from the NOAA' s NWW3 model) and InVEST software(developed by Stanford University and University of Minnesota). Annual electricity production was estimated to be up to 1,207MWh/year and at least 163MWh/year. The spatial pattern of annual electricity production showed that the sea far from land has higher wave power potential than the sea near coast. The net present value(NPV) of 28 wave energy converters was calculated by considering an operation period of 25 years. When assuming that the electricity produced from wave energy converters is transferred to onshore power plants through underwater cables, the NPV was estimated to be up to 5,883USD(6,600,000KRW) and at least -63,494USD(-71,000,000KRW). In contrast, the NPV increased up to 28,095 USD(31,600,000KRW) when assuming that the electricity is utilized in the Ulleungdo and Dokdo. In addition, it was found that the break-even line of NPV in the East Sea becomes closer towards the land according to the increment of electricity price. The NPV of wave energy converters near the Ulleungdo and Dokdo will be 88,158 USD(99,000,000KRW) if the increment of electricity price is 100KRW.

KEYWORDS : *Wave Energy, Renewable Energy, Energy Analysis*

서론

전 세계적으로 인구의 증가와 생활수준의 향상으로 인해 에너지의 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 또한, 기후변화 협약과 관련하여 온실가스 감축 부담이 가중 될 것으로 예상되는 포스트 교토 체제에 대비하기 위해 온실가스 감축과 관련한 다양한 노력들이 세계 각국에서 진행되고 있다(Oh *et al.*, 2011; Choi *et al.*, 2013). 이러한 노력의 하나로서 온실가스의 추가적인 발생 없이 에너지 수요 증가에 효과적으로 대응할 수 있는 신재생에너지 기술이 많은 연구자들에 의해 개발되고 있으며, 산업 전 분야에 보급되고 있다(Song and Choi, 2012; Kim *et al.*, 2012).

최근 신재생에너지 기술의 하나로서 지구면적의 71%를 차지하는 해양을 활용한 해양에너지 기술이 주목받고 있다. 해양에너지 기술에는 파력발전, 조류발전, 조력발전, 해수온도차 발

전, 염분농도차 발전 등이 포함된다. 이 중 파력발전 기술은 환경에 주는 영향이 작고 하루 종일 전력 생산이 가능한 장점이 있으며, 파랑이 모든 해역에 폭넓게 분포하고 있으므로 적용 가능한 지역이 광범위하다(Hong *et al.*, 2004).

파력발전 기술을 성공적으로 보급하기 위해서는 사회 구성원들이 파력발전 시스템의 잠재성을 이해할 수 있도록 기술적, 경제적 측면에서 정확한 정보를 제공할 필요가 있다. 최근까지 국내외적으로 파력발전의 잠재성 평가와 관련한 다양한 연구들이 수행되어 왔다(표 1). 그러나 우리나라의 해역을 대상으로 파력발전 잠재성을 광역적으로 분석하기 위한 연구는 현재까지 거의 시도되지 않았다.

우리나라는 삼면이 바다로 이루어져 있어 해양에너지를 활용하기에 적합하며 전력망이 육지 내에 세밀히 구축되어 있기 때문에 파력발전소로부터 생산된 전력의 송전이 용이하다. 본 연구의 목적은 강원도, 경상북도, 경상남도의

TABLE 1. Previous studies for assessing wave power potential

Type	Title	Reference
Overseas	Wave energy resources in sheltered sea areas: a case study of the Baltic Sea	Bernhoff <i>et al.</i> (2006)
	Assessment of wave energy resources in Hawaii	Stopa <i>et al.</i> (2008)
	Analysis of the nearshore wave energy resource	Folley and Whittacker(2009)
	Case study feasibility analysis of the Pelamis wave energy convertor in Ireland, Portugal and North America	Dalton <i>et al.</i> (2010)
	Wave power potential along the Atlantic coast of the southeastern USA	Defne <i>et al.</i> (2009)
	Electricity generation from wave power in Canada	Dunnett and Wallace(2009)
	Offshore and inshore wave energy assessment: Asturias (N Spain)	Iglesias and Caballo(2010)
	National-scale wave energy resource assessment for Australia	Hughes and Heap(2010)
Domestic (Korea)	A study on optimal sites of wave power generation based on numerical wave model	Ryu(2006)
	Wave energy distribution at Jeju sea and investigation of optimal sites for wave power generation	Hong <i>et al.</i> (2004)

행정구역에 해당하는 동해와 남해일부 해역을 대상으로 파력발전 잠재성을 정량적으로 평가하는 것이다. 잠재성 평가를 위하여 미국 스탠포드 대학과 미네소타 대학에서 공동 개발한 에너지 분석 소프트웨어인 InVEST(<http://www.naturalcapitalproject.org/InVEST.html>)를 사용하며, 750kW급 파력발전기 28대를 설치하는 것을 가정하여 강원권 및 동남권 해역에서 파력발전을 통해 기대할 수 있는 연간 전력생산량과 경제적 효과를 분석해보고자 한다.

파력발전 시스템의 개요

파력발전 시스템은 파랑의 운동 및 위치에너지를 이용해 터빈을 구동하거나 기계장치를 운동하게 하여 전기를 생산하는 장치이다. 파력발전의 효율에 영향을 미치는 파랑의 인자에는 파고, 파주기, 파향 등이 있으며 파고가 높고 파주기가 긴 해역일수록 파력발전에 적합하다(Hong *et al.*, 2004). 파력발전 시스템은 작동 원리에 따라 가동물체형(rotating body type), 진동수주형(ocillating water column type), 월파형(wave overtopping reservoir type) 등이 있으며 설치방법에 따라 고정식과 부유식

으로 구분 할 수 있다(그림 1). 가동물체형은 파력발전의 가장 오래된 방법이다. 움직임에 반응하도록 만들어진 장치를 이용하여 파랑이 부딪칠 때 발생하는 물체의 움직임을 전기에너지로 변환하는 방식이다. 파랑을 직접적으로 이용하기 때문에 에너지의 변환 효율이 높지만 장치가 파랑의 충격을 직접 받게 되므로 내구성이 취약하다는 단점이 있다.

진동수주형 방식은 장치 내부로 유입된 수면이 파랑에너지에 의해 상하로 움직여 공기유동이 발생하여 장치 상부의 터빈을 회전시켜 전기를 생산하는 방식이다. 파랑의 형태와 무관하게 발전이 가능하고 효율적이라는 장점이 있다. 월파형은 파랑의 진행방향 전면부에 사면을 설치해 위치에너지로 변환하여 저수한 후 형성된 수두차를 이용해 터빈을 돌려 발전하는 방식이다. 상대적으로 변동성의 제어가 용이하지만 일정 수준 이상의 파고 조건에서만 발전이 가능하다(KEMCO, 2008).

연구지역

본 연구에서는 우리나라의 강원도, 경상북도, 경상남도의 행정구역에 해당하는 동해와 남해

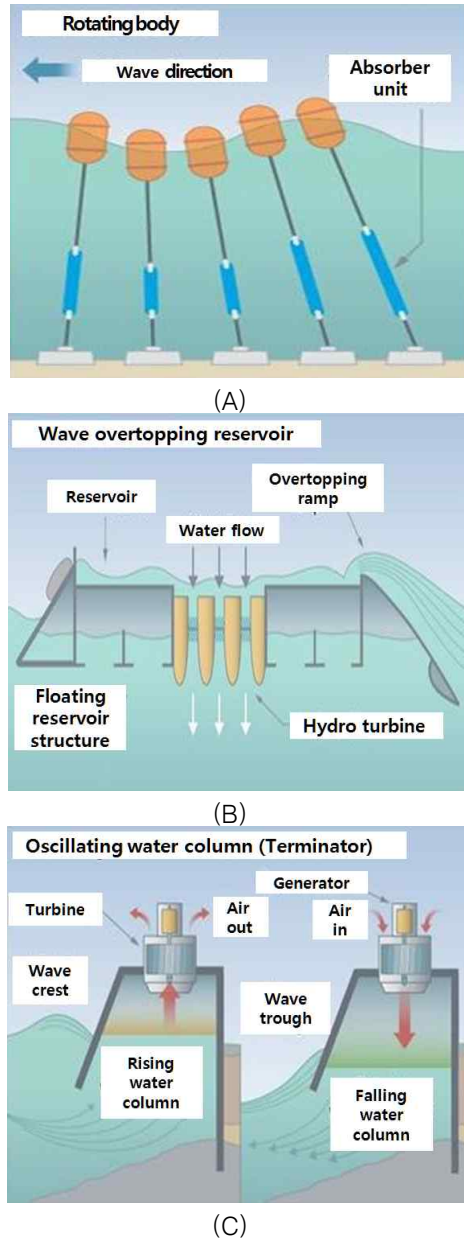


FIGURE 1. Conceptual views of wave power conversion systems. (A) Rotating body types of wave energy converters. (B) Oscillating water column type of wave energy converters. (C) Wave overtopping reservoir type of wave energy converters (http://en.openei.org/wiki/Marine_and_Hydrokinetic_Technology_Glossary)

일부 해역을 대상으로 파력발전 잠재성 분석을 수행하였다. 일본해와의 경계는 벨기에 해양연구소 (<http://www.marineregions.org>)에서 제

공하는 한일 배타적경제수역 (EEZ) 과 한일공동규제수역 자료를 참고하여 설정하였다. 또한, 행정구역상의 경계는 동해의 북쪽으로는 휴전

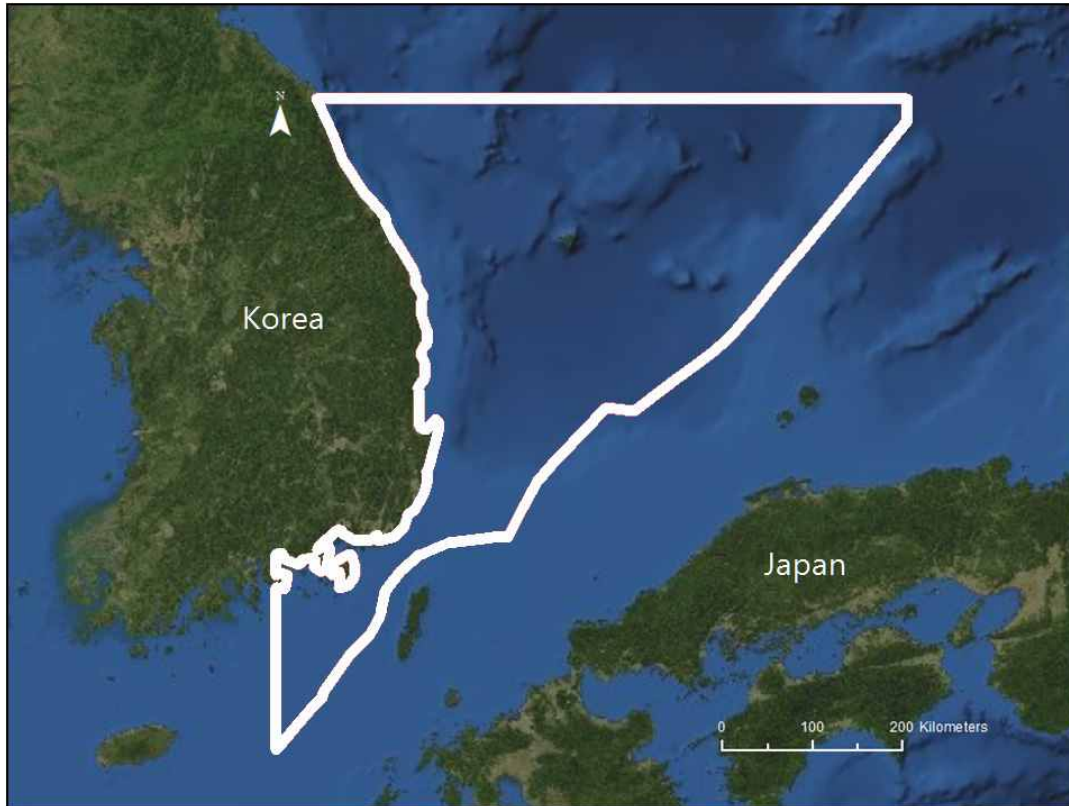


FIGURE 2. Map of study area with existing power plants

선, 남해의 서쪽으로 경상남도의 경계를 기준으로 연구지역을 설정하였다(그림 2).

연구방법

750kW급 파력발전기 28대를 설치하는 것을 가정하고 미국 스탠포드 대학과 미네소타 대학에서 공동 개발한 에너지 분석 소프트웨어인

서 파력발전을 통해 기대할 수 있는 연간 전력 생산량과 경제적 효과를 분석하였다. 분석 절차는 그림 3과 같다. 분석지역의 파랑특성을 이용하여 잠재적인 파력 자원량을 평가하고 파력발전 장치를 통해 생산되는 전력량을 산정하였다. 마지막으로 여러 가지 재정인자들을 고려하여 경제성을 평가하는 순서로 진행하였다. 경제성

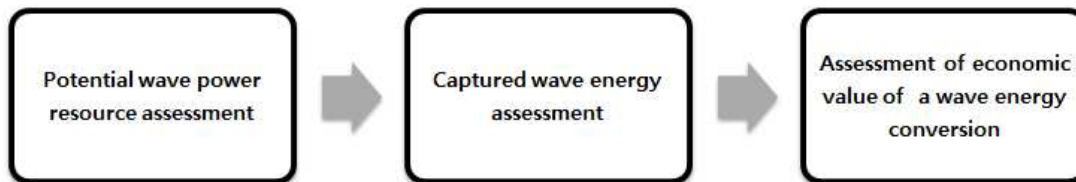


FIGURE 3. Flowchart for energy analysis of wave power conversion systems using InVEST
InVEST를 사용하여 강원권 및 동남권 해역에 분석은 파력발전 시스템으로부터 생산된 전력

을 해저 케이블과 강원도, 경상북도, 경상남도 지역의 해안에 위치한 10개 발전소들의 설비를 이용하여 내륙으로 공급하는 경우와 전력을 울릉도와 독도에서 직접 사용하는 경우를 구분하여 수행하였다. 또한, 분석 결과를 ArcGIS를 이용해 지도의 형태로 시각화하였다.

1. 잠재적인 파력 자원량 평가

파력발전 잠재성 평가의 첫 번째 단계는 연구지역의 파랑특성을 분석해 잠재적인 파력 자원량을 정량적으로 평가하는 것이다. 이를 위해서는 파랑 인자인 파고와 파주기에 대한 자료가 필요하다. 본 연구에서는 미국 국립해양대기청(NOAA)의 NWW3(Noaa Wave Watch III) 모델로부터 작성된 평균 유의파고 및 첨두파주기 자료를 사용하였다(<http://polar.ncep.noaa.gov/waves/index2.shtml>). 이 자료는 2005년부터 2010년까지 5년간의 자료를 NWW3 모델을 이용해 통계적으로 분석한 결과이며 54 km×54km 격자 크기의 그리드 형식으로 저장되어 있다. 이 자료를 이용하면 불규칙한 파도에 의해 전달되는 파고의 길이별 파력 에너지를 식 (1)과 같이 산정할 수 있다(Cornett, 2008).

$$P_n = \frac{\rho \times g}{16} H_s^2 C_g(T_e, h) \quad (1)$$

여기서 P_n 은 파력(kW/m), ρ 는 해수 밀도(1,028kg m⁻³), g 는 중력가속도(9.8m s⁻²), H_s 는 유의파고(m), C_g 는 파력 에너지 주기 T_e (sec)의 함수인 파동군의 속도(m s⁻¹)이며 h 는 수심(m)을 나타낸다. 유의파고란 특정기간 동안의 모든 파도의 파고를 높은 순서대로 정렬한 후 상위 3분 1에 해당하는 자료들의 값들은 평균한 것이다.

식 (1)에서 C_g 는 다음과 같이 계산될 수 있다(식 2).

$$C_g = \frac{(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)}) \sqrt{\frac{g \tanh(kh)}{k}}}{2} \quad (2)$$

여기서 k 는 파도의 개수이며, 파랑의 주파수($w = 2\pi/T_e$)와 수심(h)으로 표현된 함수의 분산 관계를 이용하여 식 (3)과 같이 계산할 수 있다(Cornett, 2008).

$$k = w^2 / (g \cdot \sqrt{\tanh(w^2 \cdot h/g)}) \quad (3)$$

식 (3)에서 사용되는 T_e 는 파력에너지 주기(wave energy period)를 의미한다. 그러나 부이와 같은 관측 장비를 이용해 측정 또는 계산되는 파주기는 주로 첨두 파주기(peak wave period, T_p)이다. 따라서 관측 장비로부터 획득한 T_p 자료를 식 (1)에 사용하기 위해서는 다음의 식을 이용하여 T_e 로 변환해주어야 한다(식 4).

$$T_e = \alpha \cdot T_p \quad (4)$$

여기서 α 는 파 스펙트럼의 형태를 결정짓는 상수 값을 나타낸다. NWW3 모델에서는 JONSWAP 스펙트럼을 기준으로 설정하여 기본 값인 0.9를 이용해 파력에너지주기 산정을 수행하였다(Talis *et al.*, 2013)

2. 발전 전력량 산정

잠재적인 파력 자원량이 평가되면 파력발전 시스템을 통한 발전 전력량을 산정할 수 있다. 발전 전력량은 발전기의 성능에 따라 달라진다. 본 연구에서는 스코틀랜드 Pelamis wave power에서 개발한 750kW 정격용량의 부유식 가동 물체형 파력 발전기를 28대 설치하는 것으로 가정하여 분석을 수행하였다(그림 4). 이 파력 발전기는 발전효율이 높고 시설비가 적게 들며 유지보수가 용이하다는 장점이 있으며 2008년 포르투갈 해안에 설치된 2.25MW급 파력 발전소에 활용되었다(Li *et al.*, 2011).



FIGURE 4. View of the Pelamis wave energy converter(image source: www.greenlivinganswers.com)

또한, 장비의 규격, 성능 등과 같은 기술적인 정보들과 가격, 시공비용 등과 같은 경제적 인자 값들이 문헌상에 보고되어 있어 InVEST를 이용하여 분석을 수행하는 것이 용이하다(Kim *et al.*, 2012).

파력 발전기를 통해 생산 가능한 전력량 (WE)은 파고 및 파주기의 발생 시간을 나타내는 값들의 행렬(HR)과 파력발전기의 성능을 나타내는 값들의 행렬($PWEC$) 곱으로 식 (5)와 같이 산정된다(Kim *et al.*, 2012).

$$WE(H_s, T_p) = HR(H_s, T_p) \cdot PWEC(H_s, T_p) \quad (5)$$

여기서 HR 은 해역의 각 파고, 파주기의 발

생시간수를 나타낸 표 2와 같은 행렬 형태의 해면 상태표(sea-state bin)를 이용해 산정하며, $PWEC$ 는 파력발전기의 파력 에너지 흡수성을 나타낸 표 3와 같은 행렬 형태의 표를 이용하여 결정한다. InVEST에는 우리나라 동해와 남해의 HR 를 산정하기 위해 필요한 해면 상태표와 750 kW급 Pelamis 파력발전기에 대한 에너지 흡수성능표가 내장되어 있다.

3. 경제성 평가

발전전력량이 산정되면 파력발전 도입의 경제성을 평가할 수 있다. 본 연구에서는 경제성 평가를 위해 파력발전 도입시 필요한 비용과 전력 생산을 통한 수익을 고려하여 순현재가치

TABLE 2. An example of a sea-state bin which represents the occurrence hours of wave(Talis *et al.*, 2013)

		Wave Period (T_p) in sec								
		0.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
Wave Height (H _s) in m	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.0	0	0	0	2	0	13	12	12	6
	1.5	0	0	0	20	23	18	67	93	46
	2.0	0	0	0	12	76	34	26	131	96
	2.5	0	0	0	1	32	25	19	46	115
	3.0	0	0	0	0	6	25	16	45	72
	3.5	0	0	0	0	0	6	23	29	36
	4.0	0	0	0	0	0	1	5	15	29
	4.5	0	0	0	0	0	1	2	17	14
5.0	0	0	0	0	0	0	1	4	5	

TABLE 3. An example of table which provides the amount of energy absorption (kW) to a wave energy converter(Talis *et al.*, 2013)

		Wave Period(T_p) in sec								
		0.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
Wave Height (Hs) in m	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.0	0	0	0	11	27	50	62	64	57
	1.5	0	0	0	26	62	112	141	143	129
	2.0	0	0	0	66	109	199	219	225	205
	2.5	0	0	7	93	171	279	342	351	320
	3.0	0	0	91	180	246	402	424	417	369
	3.5	0	0	86	211	326	484	577	568	502
	4.0	0	105	216	326	394	632	616	583	585
	4.5	0	94	233	371	467	735	744	738	634
5.0	0	259	364	469	539	750	750	750	750	

(Net Present Value, NPV)를 산정하였다(식 6).

$$\sum_{t=1}^T (B_t - C_t)(1+i)^{-t} \quad (6)$$

여기서 T 는 파력발전장치의 수명(year)이며 B_t 는 전력 판매를 통한 수입, C_t 는 파력 발전기 도입/운영 비용, i 는 할인율을 나타낸다.

본 연구에서 사용한 경제성 관련인자는 표 4와 같다. 사용된 비용정보는 Dalton *et al.*(2010)의 Pelamis 파력 발전기를 사용한 타당성 평가 연구 사례를 참고하였다. 파력발전기로부터 생산한 전기 에너지를 내륙으로 전송하

기 위해서는 해저 케이블을 이용하여야 하므로 케이블 및 계류선 구입비용을 고려하였으며 그 외의 시설 유지 관리에 필요한 비용도 반영하였다.

수입 부분에 해당하는 전력판매단가는 2012년 도입된 RPS제도에 따라 공급인증서 거래가격(<http://rts.kemco.or.kr>)과 전력판매가격(<http://www.kpx.or.kr>)을 합산하여 산정하였다. 2012년 9월부터 2013년 8월까지의 1년간의 자료를 사용하였으며 합산 결과 1kWh당 243.932원으로 계산되었다. 이를 미화로 환산하기 위하여 동일한 기간의 환율인 미화 1달러당 1123.94원을 적용해 변환한 결과 1kWh당 0.217 달러로 계산되었다. 할인율 역시 동일기간의 한국은행의 중앙은행 할인율인 1.27%를

TABLE 4. Parameters for the financial analysis of wave energy systems(Dalton *et al.*, 2010)

Parameter	Value
Maximum capacity of device (kW)	750
Capital cost per installed (\$/kW)	3671
Cost of mooring lines (\$/m)	20
Cost of underwater transmission line (\$/km)	101,609
Cost of overland transmission line (\$/km)	64,499
Operating & maintenance cost (\$/kWh)	0.042
Price of electricity (\$/kWh)	0.217
Discount rate (%)	1.27
Slack-moored(i.e. requires length of 3 * depth); 3 slack lines per machine required.	3

적용하였다(http://www.bok.or.kr). NPV 산정을 위한 운영기간은 파력발전기의 수명인 25년으로 설정하였다.

연구결과

파랑의 에너지를 추출하여 파력 발전기를 통해 연간 생산할 수 있는 전력량을 분석한 결과는 그림 5와 같다. 연구지역에서 예상되는 연간 전력 생산량은 최대 1,207MWh, 최소 163 MWh로 산정되었다. 연안보다 육지로부터 먼 해역이 최대 약 7배의 높은 전력량을 생산할 수 있음을 확인할 수 있다. 또한, 연안의 경우에는 지역적으로 남해보다 동해의 발전 전력량이 높은 것으로 분석되었다.

경제성 평가를 위해 파력발전 시스템으로부터 생산된 전력을 해저 케이블과 강원도, 경상북도, 경상남도지역의 해안에 위치한 10개 발전소들의 설비를 이용하여 내륙으로 공급하는 경우를 가정하여(시나리오 1) NPV를 산정해본

결과 최대 5,882달러(약 6,600천원), 최소 -63,494달러(약 -71,000천원)로 분석되었다(그림 6A). 발전 전력량 산정결과와 마찬가지로 육지로부터 멀어질수록 NPV값이 증가하며 우리나라의 경우 모든 연안지역에서 음의 NPV값을 갖는 것으로 평가되었다. 발전 전력량 및 NPV 결과를 비교해보았을 때 본 연구에서 가정한 설치 조건에서는 연간 1,100MWh 이상의 전력량을 생산할 수 있는 동해 먼 바다의 일부 해역에서만 NPV가 양으로 전환되어 파력발전 시스템 도입을 통한 이익을 기대할 수 있는 것으로 분석되었다.

파력발전 시스템으로부터 생산된 전력을 울릉도와 독도의 전력망으로 공급할 경우(시나리오 2)를 가정하여 NPV를 산정해본 결과는 그림 6B와 같다. 분석 결과 NPV가 최대 28,095달러(약 31,600천원), 최소 -63,494달러(약 -71,000천원)로 산정되었다. 울릉도, 독도 인근 해역은 NPV 값이 그림 6A와 비교할 때 크게 증가하였다.

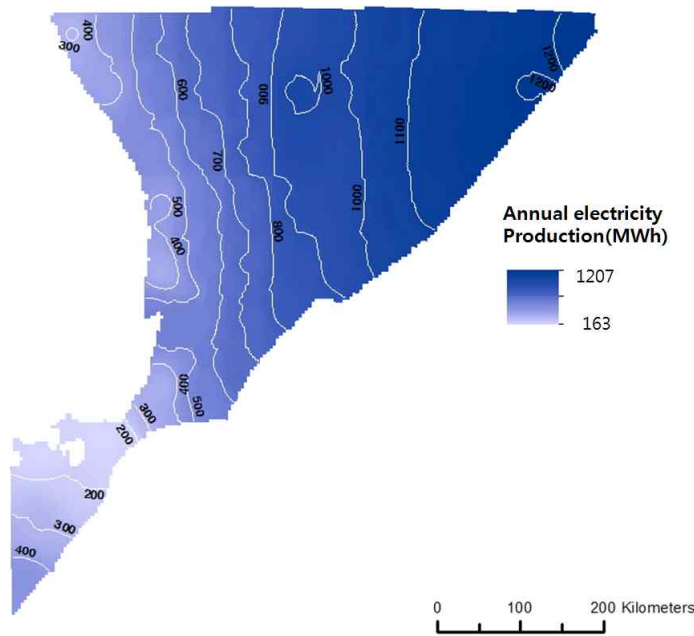


FIGURE 5. Assessment of annual electric power production in the study area

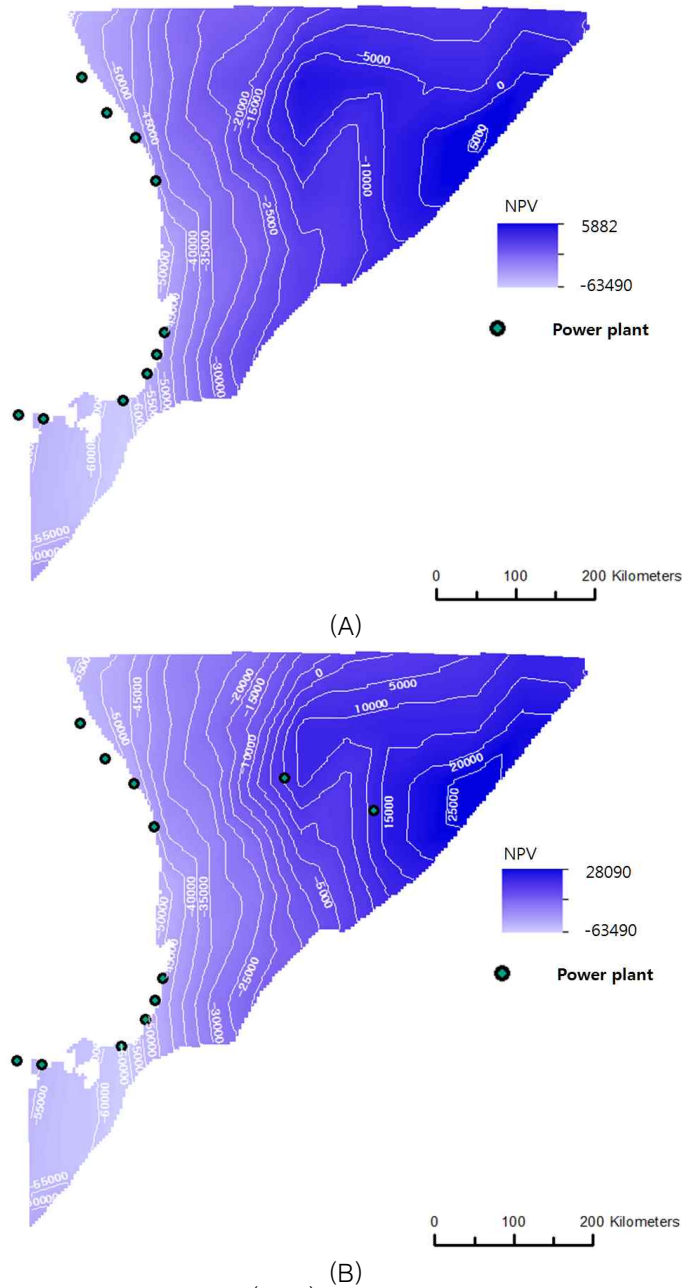


FIGURE 6. Maps of net present value(NPV) calculated from the study area. (A) Scenario 1. The electricity is transferred to onshore power plants through underwater cables. (B) Scenario 2. The electricity is utilized in the Ulleungdo and Dokdo

울릉도, 독도의 전력망을 이용하기 때문에 내륙 10개 발전소의 전력망에 송전할 경우에 비해 해저

케이블 설치를 위해 투입되는 초기 비용이 크게 줄어들었으며, 그 결과 NPV 값이 증가한 것으로

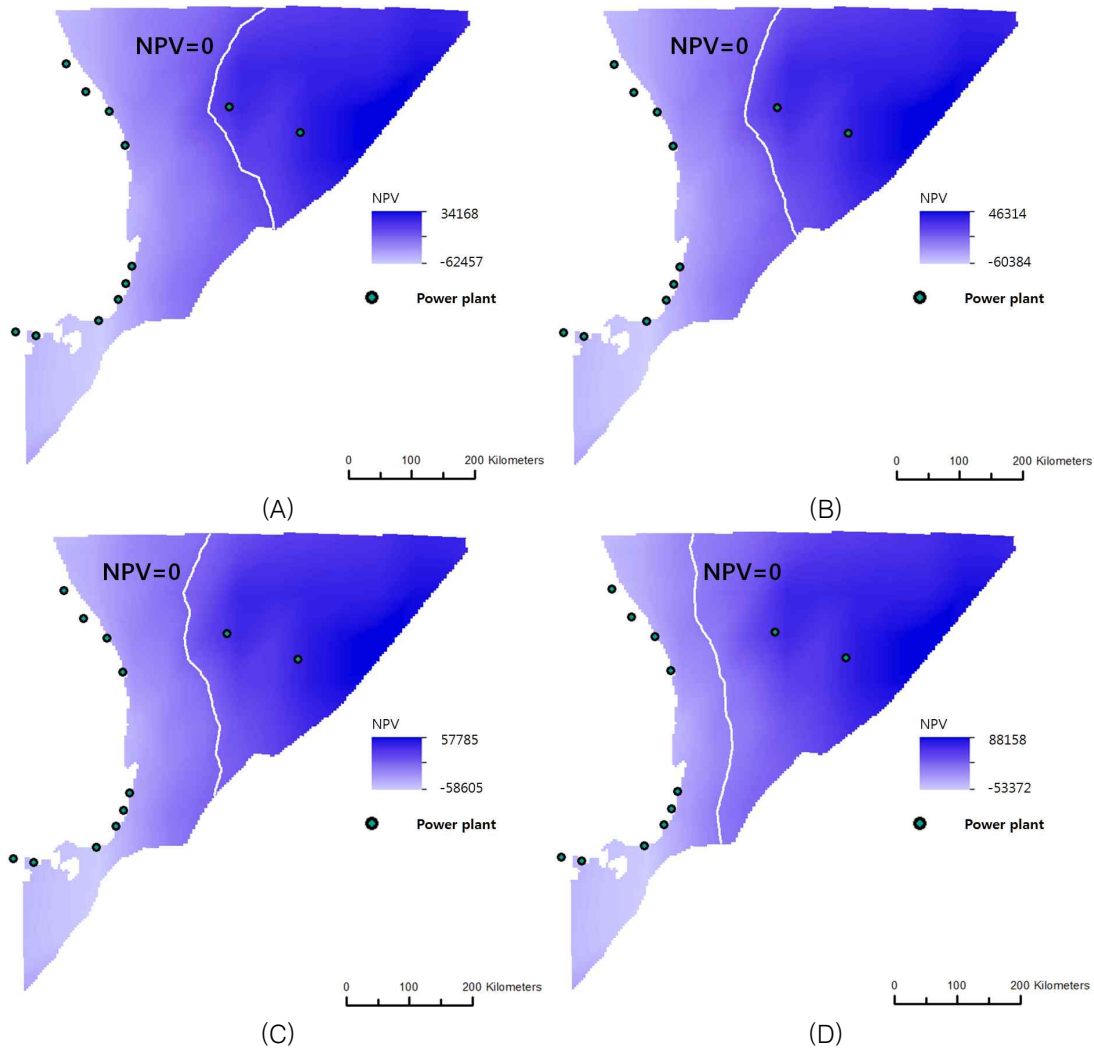


FIGURE 7. Maps of net present value(NPV) calculated from the study area when the increment of electricity price is (A) 10 KRW/kWh, (B) 30 KRW/kWh, (C) 50 KRW/kWh and (D) 100 KRW/kWh

판단된다. 울릉도, 독도로 부터 멀리 떨어져 있는 해역에서는 내륙의 발전소로 해저 케이블을 연결하는 것이 보다 경제적이기 때문에 그림 6A와 비교할 때 NPV 산정 결과에 변화가 나타나지 않았다. 그림 6B의 NPV의 손익분기선(NPV=0)도 그림 6A와 비교할 때 서쪽으로 이동하여 울릉도 서쪽 해역에 위치하고 있음을 확인할 수 있었다. 추가적으로 전력 판매단가가 10원단위로 증

가할 때 NPV가 어떻게 변화하는지 분석한 결과 전력 판매단가가 증가할수록 NPV의 손익분기선이 내륙방향으로 가까워짐을 확인할 수 있다(그림 7). 또한, NPV 산정 결과의 최대값들이 전력 판매단가가 10원 증가한 경우 34,168 달러(약 38,000천원), 30원 증가한 경우 46,314달러(약 52,000천원), 50원 증가한 경우 57,785달러(약 64,000천원), 100원 증가

TABLE 5. Comparisons of significant wave height and peak wave period measured from Korea Meteorological Administrationa) with those provided by NOAA's NWW3 modelb)

No.	Observation site	Latitude (deg)	Longitude (deg)	Significant wave height (m)	Error	Peak wave period (sec)	Error
1	Donghae ^{a)}	N 37.52	E 130.00	1.30	-0.13	6.20	-0.08
	44701 ^{b)}	N 37.50	E 130.00	1.13			
2	Ulleungdo ^{a)}	N 37.45	E 131.10	1.40	0.02	3.70	0.58
	22948 ^{b)}	N 37.50	E 131.00	1.43			
3	Pohang ^{a)}	N 36.35	E 129.77	1.30	-0.17	5.70	0.00
	22579 ^{b)}	N 36.50	E 130.00	1.08			
4	Gwangan ^{a)}	N 35.12	E 129.13	0.40	0.68	5.10	0.09
	19604 ^{b)}	N 35.00	E 129.00	0.67			
5	Liduckseo ^{a)}	N 35.57	E 129.47	0.90	-0.12	6.10	-0.03
	28680 ^{b)}	N 35.50	E 129.50	0.79			

한 경우 88,158달러(약 99,000천원)로 변화하는 것을 알 수 있다. 그러나 손해를 나타내는 NPV 산정 결과의 최소값들은 전력 판매단가의 변화에도 차이가 비교적 크지 않았다. NPV 최소값들이 주로 전력 생산량이 거의 없는 동남권 연안 지역에 분포하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

토 의

본 연구에서는 NOAA에서 NWW3 모델을 이용해 작성한 2005년부터 2010년까지의 5년간의 유의파고 및 첨두파주기 모델링자료를 이용하였다. 국내에서도 기상청과 국립해양조사원 등에서 파고 및 파주기 자료를 제공하고 있으나 대부분 1년간의 관측을 통해 작성된 자료들이다. 따라서 본 연구에서는 파랑의 연간 변동성에 의한 불확실성을 경감하기 위하여 관측 기간이 상대적으로 긴 NOAA의 NWW3 모델 자료를 기반으로 연구지역의 파력발전 잠재성 평가를 수행하였다.

NWW3 모델 자료는 국내 관측소에서 실제 측정된 파고 및 파주기 자료와 차이가 있을 수 있다. 표 5는 우리나라 기상청에서 제공하는 자료와 NWW3 모델 자료를 비교한 결과이다. 비교결과 유의파고는 최대 오차 0.69m, 평균제곱

오차는 0.10m의 차이를 나타냈다. 또한, 첨두파주기는 최대오차 0.58sec, 평균제곱오차 0.07sec의 차이가 있는 것으로 분석되었다. 따라서 지역에 따라 발전 전력량이나 NPV 값이 다소 과대평가되거나 과소평가되었을 가능성이 있다. 향후 연구에서는 입력되는 유의파고 및 첨두파주기 자료의 오차가 파력발전 잠재성 평가 결과에 얼마나 영향을 미치는지에 대한 민감도 분석이 필요할 것으로 판단된다.

결 론

본 연구에서는 강원도, 경상북도, 경상남도의 행정구역에 해당하는 동해와 남해일부 해역을 대상으로 750kW급 Pelamis 파력발전기 28대를 도입했을 때의 전력 생산량 및 경제적 효과를 분석하였다. 그 결과 연구지역에서 파력발전을 통해 기대할 수 있는 전력 생산량은 최대 1,207MWh/year, 최소 163MWh/year로 산정되었으며, 육지로부터 멀리 떨어진 해역일수록 연간 발전 전력량이 많은 것으로 분석되었다. 또한, 남해보다는 동해의 발전 전력량이 높은 것으로 분석되었다.

파력발전 시스템으로부터 생산된 전력을 해저 케이블과 강원권과 동남권 지역의 해안가에 위치한 10개의 발전소들의 설비를 이용하여 내

록으로 공급하는 것으로 가정하여 경제성 분석을 수행한 결과, NPV가 최대 5,882달러(약 6,600천원), 최소 -63,494달러(약 -71,000천원)로 분석되었으며 동해 먼 바다의 일부 해역을 제외한 대부분의 해역에서는 파력발전 시스템 도입의 경제성을 확보하기 어려운 것으로 나타났다. 반면, 파력발전 시스템으로부터 생산된 전력을 울릉도와 독도의 전력망을 통해 추가적으로 공급할 경우에는 해저 케이블 설치를 위해 투입되는 초기 비용이 크게 줄어들어 울릉도, 독도 인근 해역에서 NPV 값이 최대 28,095달러(약 31,600천원)까지 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 전력 판매단가가 증가할수록 동해상의 NPV의 손익분기선이 내륙 쪽으로 가까워지는 것을 볼 수 있으며, 울릉도, 독도 인근 해역에서는 전력 판매단가가 현재 수준보다 100원 상승할 경우 NPV 값이 최대 88,158달러(약 99,000천원)까지 증가할 것으로 예측되었다.

결과를 종합하면 강원권과 동남권 인근 해역은 파랑 에너지 밀도가 상대적으로 낮아 파력 발전을 통해 생산되는 전력의 양이 충분하지 못하다는 것을 알 수 있다. 먼 바다의 경우에는 발전 전력량은 증가하지만 파력 발전을 통해 생산된 전력을 해저 케이블을 통해 육지로 수송할 경우에는 파력발전 시스템 도입의 경제성을 확보하기 어려울 것으로 판단된다. 반면, 동해 먼 바다에 파력 발전기를 설치하고 생산된 전력을 울릉도, 독도 지역에서 직접 사용하는 경우에는 파력발전 시스템 도입의 경제성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

현재 울릉도에는 수력발전, 내연발전으로 전력수급이 이루어지고 있으며, 독도에는 소규모의 태양광 발전소가 설치되어 있다. 그러나 울릉도에서는 갈수기의 발전용수 부족으로 인해 수력발전이 중단되거나 고유가로 화력발전이 어려워질 수 있으며, 독도에서는 지리적 특성상 염해로 인한 태양광 발전 시스템의 고장 등 운영에 어려움을 겪을 수 있다. 따라서 울릉도, 독도에서는 전력수급의 방법을 더욱 다변화할 필요가 있으며, 파력발전은 에너지원의 다변화

를 위한 하나의 대안이 될 수 있을 것이라 기대한다. **KAGIS**

REFERENCES

- Bernhoff, H., E. Sjostedt and M. Leijon. 2006. Wave energy resources in sheltered sea areas: a case study of the Baltic sea. *Renewable Energy* 31 (13):2164-2170.
- Choi, B.S., S.R. Oh, K.H. Lee, G.H. Lee and H.H. Kwon. 2013. Large-scale slope stability analysis using climate change scenario (1): methodologies. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 16(3): 193-210 (최병습, 오성렬, 이건혁, 이기하, 권현한. 2013. 기후변화 시나리오를 이용한 광역 사면안정 해석(1): 방법론. *한국지리정보학회지* 16(3):193-210).
- Cornett, A.M. 2008. A global wave energy resource assessment. *Proceedings of the Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. Vancouver, BC, Canada, July 6-11, pp. 1-9.
- Dalton, G.J., R. Alcorn and T. Lewis. 2010. Case study feasibility analysis of the Pelamis wave energy convertor in Ireland, Portugal and North America. *Renewable Energy* 35(2):443-455.
- Defne, Z., K.A. Hass and H.M. Fritz. 2009. Wave power potential along the Atlantic coast of the southeastern USA. *Renewable Energy* 34(10):2197-2205.
- Dunnett, D. and J.S. Wallace. 2009. Electricity generation from wave power in Canada. *Renewable Energy* 34(1):

- 179-195.
- Folley, M. and T.J.T. Whittaker. 2009. Analysis of the nearshore wave energy resource. *Renewable Energy* 34(7): 1709-1715.
- Hong, K.Y., H.J. Ryu, S.H. Shin and S.W. Hong. 2004. Wave energy distribution at Jeju sea and investigation of optimal sites for wave power generation. *Journal of the Korean Society of Ocean Engineers* 18(6):8-9 (홍기용, 류황진, 신승호, 홍석원. 2004. 파력발전 적지 선정을 위한 제주 해역 파랑에너지 분포특성 연구. *한국해양공학회지* 18(6):8-9).
- Hughes, M.G. and A.D. Heap. 2010. National-scale wave energy resource assessment for Australia. *Renewable Energy* 35(8):1783-1791.
- Iglesias, G. and R. Carballo. 2010. Offshore and inshore wave energy assessment: Asturias (N Spain). *Energy* 35(5):1964-1972.
- KEMCO. 2008. Ocean. Bookhill. Seoul. pp. 3-121 (에너지관리공단. 2008. 해양. 북스힐. 서울. 3-121쪽).
- Kim, C.H., J.E. Toft, M. Papenfus, G. Verutes, A.D. Guerry, M.H. Ruckelshaus, K.K. Arkema, G. Guannel, S.A. Wood, J.R. Bernhardt, H. Tallis, M.L. Plummer, B.S. Halpern, M.L. Pinsky, M.W. Beck, F. Chan, K.M.A. Chan, P.S. Levin and S. Polasky. 2012. Catching the right wave: evaluating wave energy resources and potential compatibility with existing marine and coastal uses. *PLOS ONE* 7(11):1-14.
- Kim, D.K., C.Y. Yun, M.H. Jo and S.J. Kim. 2012. Development of a suitability analysis system for wind energy facilities using 3D Web GIS. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 15(3):81-90 (김광득, 윤창열, 조명희, 김성재. 2012. 3차원 Web GIS 기반 풍력에너지 시설물 적지분석 시스템 개발. *한국지리정보학회지* 15(3):81-90).
- Li, K.M., N. Parthasarathy, Y.G. Park, H.Y. Jung, Y.H. Choi and Y.W. Lee. 2011. Study on the motion of floater structure for design of wave energy generation in ocean. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering* 35(5):632-639 (Li, K.M., Parthasarathy, N., 박영규, 정호윤, 최윤환, 이연원. 2011. 해양 파력발전 시스템 설계를 위한 부유체 거동에 관한 연구. *한국마린엔지니어링학회지* 35(5):632-639).
- Oh, S.H., D.W. Kim, J.W. Ryu, J.G. Cha and E.H. Jung. 2011. A study for construction of CO₂ inventory using GIS. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 14(2):40-52 (오상학, 김대욱, 류지원, 차재규, 정응호. 2011. 지리정보시스템을 활용한 CO₂ 인벤토리 구축 방안에 관한 연구. *한국지리정보학회지* 14(2):40-52).
- Ryu, H.J. 2006. A study on optimal sites of wave power generation based on numerical wave model. Ph.D. Dissertation, Univ. of Hongik, Jochiwon, Korea. pp. 1-293 (류황진. 2006. 수치파랑모델을 이용한 파력발전 적지선정에 대한 연구. *홍익대학교 대학원 박사학위논문*. 1-293쪽)
- Song, J. and Y. Choi. 2012. Assessment of rooftop photovoltaic potential in the Pukyong National University for establishing a green campus. *Journal of*

- the Korean Society for Geosystem Engineering 49(3):369-378 (송진영, 최요순. 2012. 그린캠퍼스 조성을 위한 부경대학교 옥상 태양광 발전 시스템의 잠재성 평가. 한국지구시스템공학회지 49(3):369-378).
- Stopa, J.E., K.F. Cheung and Y.L. Chen. 2011. Assessment of wave energy resources in Hawaii. Journal of Renewable Energy 36(2):554-567.
- Talis, H.T., T. Ricketts, A.D. Guerry, S.A. Wood, R. Sharp, E. Nelson, D. Ennaanay, S. Wolny, N. Olwero, K. Vigerstrol, D. Pennington, G. Mendoza, J. Aukema, J. Foster, J. Forrest, D. Cameron, K. Arkema, E. Lonsdorf, C. Kennedy, G. Verutes, C.K. Kim, G. Guannel, M. Papenfus, J. Toft, M. Marsik, J. Bernhardt and R. Griffin. 2013. InVEST 2.5.1 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford, CA, USA. pp.24-42. 