

해안지역 주거시설을 위한 전력수요 변동 대응형 하이브리드 발전시스템 도입 효과 예측에 관한 사례연구

황광일[†]

(원고접수일 : 2013년 10월 10일, 원고수정일 : 2013년 11월 4일, 심사완료일 : 2013년 11월 4일)

A feasibility study on the hybrid power generation system considering of electricity needs' fluctuation of coastal area's houses

Kwang-Il Hwang[†]

요약: 본 연구는 섬 주거시설의 전력부하 변동특성에 적합한 태양광발전설비와 풍력발전설비로 구성된 하이브리드 발전시스템의 발전특성을 예측하고 성능을 평가하는 것을 목적으로, 경상남도 통영시에 소재하는 곤리도를 대상으로 수행한 사례연구 결과이다. 연구 결과, 시각별 전력부하 변동률, 시각별 풍력 발생 변동률, 시각별 일사량 변동률 등이 서로 다르기 때문에, 단순히 전력부하측과 풍력 혹은 태양광발전설비를 1:1로 조합한다면 상호간에 불균형이 발생하여 비효율적임을 알 수 있었다. 또한 부하용량선정 방법인 최대부하법과 일일부하법으로 하이브리드 발전시스템의 각 용량을 설정할 경우의 성능을 비교한 결과 두 방법 모두 축전지를 포함한 풍력발전설비만 설치했을 때가 가장 효과적인 것으로 나타났는데 이는 풍력은 태양광과 달리 24시간 지속적으로 발생하기 때문이다.

주제어: 해안지역, 주거시설, 전력수요, 신재생에너지, 하이브리드 발전

Abstract: Based on the consideration of the hourly patterns of the electricity power consumption, this study predicted the effectiveness of hybrid power generation system, which is composed with wind power generator and photovoltaic generator. And this case study is performed at Konrido, which is a affiliated island of Kyeongsangnam-do. As the results, it is obvious that it is not efficient to cover the whole electricity power consumption only with any single power generating system, because the hourly patterns of electricity power consumption, wind power generation and photovoltaic generation are quite different. And because the wind is being through almost 24 hours, it is also found out that wind power generating system with storage battery is the most efficient combination for this case study.

Keywords: Coastal area, Houses, Electricity needs, Renewable energy, Hybrid power generation

1. 서 론

우리나라는 “신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법”에 근거하여 정부기관, 정부투자기관 외 공공기관이 건물을 신축 혹은 일정규모 이상으로 증축하고자 할 때에는 태양, 풍력, 해양, 지열, 바이오, 연료전지 등을 활용한 신재생에너지시스

템 도입을 의무로 규정하고 있다[1]. 이 정책 시행 이후, 그리고 국제적인 유가상승이 지속되면서 국내 에너지 공급망 개선에 대한 사회적 의식수준이 높아져 신재생에너지 활용 시스템의 보급률은 빠른 속도로 상승하고 있으며, 특히 태양광발전, 풍력발전 등의 경우에는 주로 발전된 전력을 계통전

[†] Corresponding Author: Div. of Mechanical & Energy Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan, 606-791, Korea, E-mail: Khpark@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4368

력에 판매하는 방식으로 운영되고 있다.

그러나 우리나라의 3천여 개의 섬 중 면적이 넓은 일부 섬을 제외한 대부분의 섬들은 에너지공급망이 다양하지 못하기 때문에 에너지의 수요증가 혹은 예상하지 못한 수요변동에 대한 대처능력이 부족한 것이 현실이다. 또한 섬은 지리적으로 태양, 풍력, 해양 등 활용 가능한 자연에너지 부존량이 풍부함에도 불구하고 자연에너지 활용시스템의 보급률은 상대적으로 매우 낮고, 관련 연구도 부족한 상황이다. 그러므로 섬 주변에 무한히 존재하는 자연에너지를 활용해 에너지공급시스템을 다양화하고 이를 통해 섬 주민의 주거환경을 개선할 필요성이 있다.

한편, 섬 지역 주거시설의 시각별 전력수요량(이하 전력부하량으로 표기)¹⁾ 변동 패턴은 도시의 주거시설과의 차이가 있으며^[2], 태양에너지를 대표하는 시각별 일사량 변화와 시각별 풍력 발생 특성은 서로 다르기 때문에^[3] 섬 지역의 주거시설을 위한 자연에너지원의 발전시스템을 구축하기 위해서는 부하변동패턴과 발전패턴에 대한 검토가 필요하다라는 점이 지적되었다.

이에 본 연구에서는, 현지 수요자 중심의 생산원리(On site demand & generation)에 기초하여, 섬 주거시설의 전력부하특성을 분석하고 태양광발전설비와 풍력발전설비로 구성된 하이브리드 발전시스템의 발전특성을 예측하며, 부하변동패턴과 각 발전설비 간의 용량비율 구성에 따른 발전량변동패턴을 비교함으로써 정량적 관점에서 섬에 알맞은 하이브리드 발전시스템을 제안하고자 한다.

2. 연구의 범위와 방법

2.1 연구의 범위와 방법

섬에 알맞은 하이브리드 발전시스템을 제안하기 위해 본 연구는 다음과 같은 순서로 수행되었다.

첫째, 섬 주거시설의 전력부하특성과 해당지역

의 태양광과 풍력의 부존 특성을 실측 분석한다. 현장실측은 2011년 9월과 10월에 수행되었다.

둘째, 본 연구에서는 하이브리드 발전시스템이 태양광발전기, 풍력발전기, 축전지, 수전장비(계통 전력)로 구성되는 것으로 정의한다.

셋째, 태양광 발전용량과 풍력 발전용량의 구성비율을 변화시키고 그에 따른 하이브리드 발전시스템의 발전특성을 예측한다.

넷째, 축전지 활용률과 계통전력으로부터의 수전비율이 가장 낮은 시스템을 선정한다.

단, 시스템 선정 과정에서는 태양광발전기와 풍력발전기기는 제조사별 작동특성과 가격이 서로 다르기 때문에 본 연구에서는 경제성평가를 수행하지 않으며, 부하량과 발전량(공급량) 비교라는 수량적 관점에서만 평가한다.

2.2 사례연구 대상지역 개요

실험대상 섬은 경상남도 통영시에 소재하는 곤리도이다. 이 섬의 전체면적은 958,669m², 가구구성은 111가구 237명이 거주하며, 주민의 연령은 60대 이상의 고령자가 전체 주민의 41.4%를 차지하고^[3], 대부분의 주민은 가두리 양식과 같은 어업에 종사하고 있다.

이 섬은 현재 육지로부터 직접 송배전이 이루어지고 있다. 그러나 공급되는 전기는 220V이기 때문에 어패류 보관 등 생산활동을 위해 섬 주민들은 모두 승압기를 사용하는 등 섬의 전력수요 특성이 고려되지 않은 실정이다.

Table 1: Outline of each household

Household	J	N	Y
Number of People	2	1	4
Ages	60s(2)	70s(1)	90s(1) 60s(2) 30s(1)
Working time per day [hours]	8	6	6

한편, 본 연구에서는 상세한 전력부하특성을 위해 1분 단위로 전력부하량을 측정하였는데, 측정장비를 집안에 설치해야 하는 번거로움이 있기 때문에, 곤리도 어촌계와 협의하여 섬의 가족 구성을

1) 전력수요량과 전력부하량은 유사한 의미로 사용되지만 설비적 관점에서는 전력부하량이라는 표현이 일반적이고 본 연구는 하이브리드 발전시스템에 관한 평가이므로 이하 전력부하량으로 표현을 통일하였다.

대표하는 고령자 중심 가구(J가구), 70대 할머니만 거주하는 독신 가구(N가구), 다양한 연령대가 함께 거주하는 가구(Y가구)를 선정하였다. Table 1은 3가구의 개요를 정리한 것이다.

3. 가능성 예측 평가2)

3.1 전력수요 특성

Table 2는 3가구의 9월, 10월 전력부하량을 정리한 것이다. 가구별로 차이가 있지만 전체적으로는 10월(708.1kWh)이 9월(418.3kWh)에 비해 부하량이 1.7배 많았다. Figure 1과 Figure 2는 각각 2달간의 전체전력부하량에 대한 일별평균전력부하율과 2달 동안의 일평균전력부하량에 대한 시각별평균전력부하율을 보여준다. Figure 2에서 19시 전후에 전력피크부하가 발생하고 8시 전후에 두 번째로 큰 전력부하가 발생함을 알 수 있다. 본 연구에서는 Figure 2에 표시된 평균(Average) 시각별평균전력부하특성을 섬 주거시설의 시각별전력부하특성으로 정의하였다.

Table 2: Monthly electric power consumption

[kWh/month]	J	N	Y	Sum
September	145.4	78.8	194.1	418.3
October	434.0	53.6	220.5	708.1

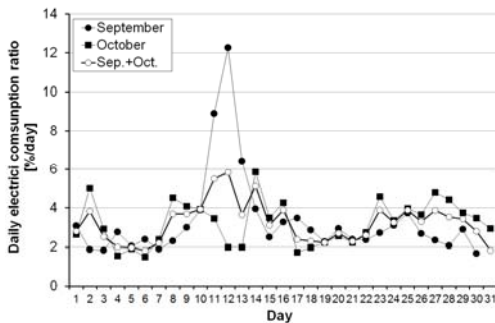


Figure 1: Average daily electric power consumption ratio of each month

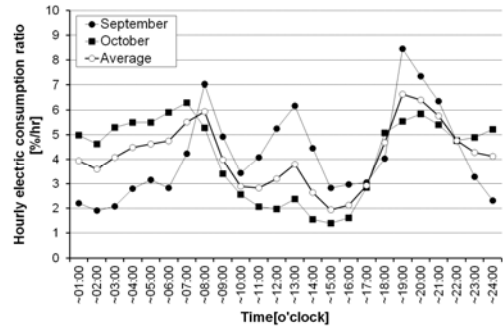


Figure 2: Average hourly electric power consumption ratio of each month

3.2 풍력 자원 특성

2011년 9월과 10월 곤리도에는 주로 북서풍이 불며, 남동풍도 적지 않게 발생한다는 것을 Figure 3의 바람장미(풍배도)가 보여주며, Figure 4의 Weibull 속도분포에서는 해당기간 동안의 풍량은 풍부하지 않은 것으로 측정되었다. 그러나 풍량의 다소(多少)는 장기적인 관측을 통해 평가되어야 한다고 판단되기 때문에, 본 연구에서는 시각별 풍속 변동에 관심을 갖고 해석을 수행했다.

일반적으로 동력계수를 반영한 터빈에 의해 추출되는 풍력발전기의 동력 P_{wind} 는 다음 식 (1)과 같이 표현된다[5].

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot u_o^3 \cdot A_T \quad (1)$$

이 때 C_p 는 동력계수 즉 터빈에 의해 추출된 동력의 비율, ρ 는 공기밀도, u_o 는 터빈상류에서의 풍속, A_T 는 터빈의 회전 단면적을 나타낸다. 상기 식은 시각별 풍속의 3승 값 변동률이 시각별 풍력발전량 변동률을 대신할 수 있음을 설명한다.

Figure 5는 풍속의 3승 값에 의해 예측된 일일 총발전량 대비 시각별 상당(equivalent) 풍력발전량 변동률 특성을 나타낸다. 24시간 계속 발전이 이루어지며, 3시~9시 시간대에 발전량이 적을 것으로 예측되었다. 본 연구에서는 Figure 5에 표시된 (Sep.+Oct.) 시각별 상당 풍력발전량 변동특성이 섬의 시각별풍력발전특성을 대표한다고 정의한다.

2) 본 절에서 활용한 측정데이터의 일부는 참고문헌 [2], [3]의 것을 포함하고 있으나 본 연구목적에 맞도록 데이터를 추가하고 새롭게 해석한 것이다.

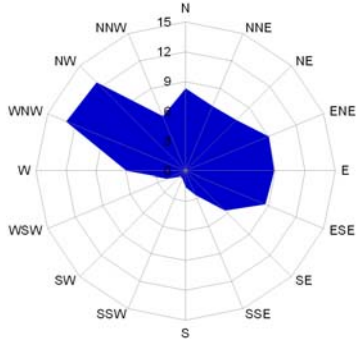


Figure 3: Wind rose of the island from september to october

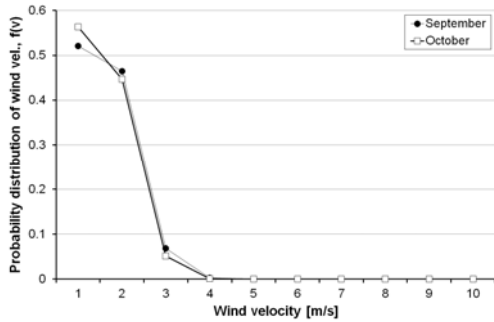


Figure 4: Weibull's probability distribution of wind velocity of each month

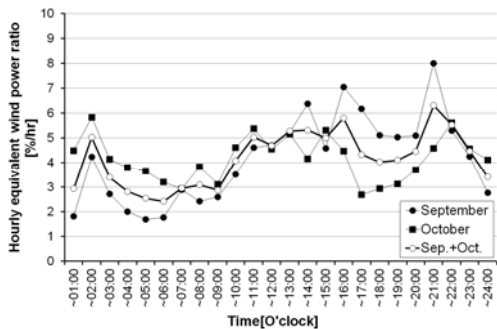


Figure 5: Average hourly equivalent wind power ratio of each month

3.3 태양광 자원 특성

태양전지의 출력(P_{solar})은 다음 식 (2)로 계산 된다[6].

$$P_{solar} = \eta \cdot A \cdot G_{on} \quad (2)$$

단, η 는 에너지 변환효율, A 는 태양전지 1유닛의 면적, G_{on} 은 태양전지에 수직으로 입사되는 태양 광에너지를 의미한다. 식 (2)는 측정된 시각별 일사량 변동률이 시각별 태양광발전량 변동률 특성을 대신할 수 있음을 설명한다.

Figure 6은 2개월 동안의 단위면적당 일평균 일사량을 나타낸 것으로, 최소 $5\text{kWh/m}^2\cdot\text{day}$ 에서 최대 $39\text{kWh/m}^2\cdot\text{day}$ 의 범위에서 일사량이 입사되고 있음을 알 수 있다. Figure 7은 시각별 일사량변동을 나타낸 것으로 12시에서 13시 사이에 최대 일사량이 입사되지만 9월과 10월의 변동차이는 매우 미미함을 보여준다. 본 연구에서는 Figure 7에 표시된 (Sep.+Oct.) 시각별 일사량 변동특성이 이 섬의 시각별태양광발전특성을 대표한다고 정의한다.

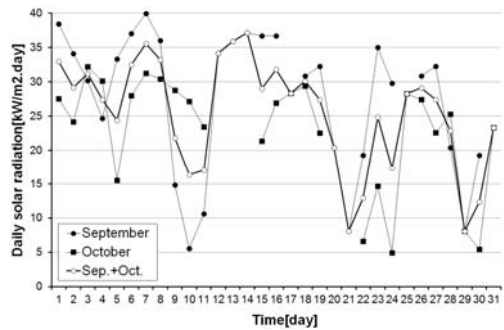


Figure 6: Average daily solar radiation of each month

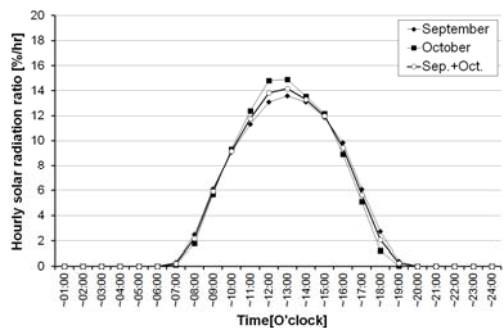


Figure 7: Average hourly solar radiation ratio of each month

3.4 하이브리드 도입 효과 예측평가

Figure 8은 지금까지 구한 전력부하패턴, 풍력발전패턴, 태양광발전패턴을 최대값을 1.0으로 설정하여 다시 표현한 것이다. 시각별 변동 패턴이 상호 다르다는 것을 명확히 알 수 있다. 전력부하패턴은 아침과 저녁시간대, 풍력발전패턴은 오후와 저녁시간대, 태양광발전은 정오경에 각각 부하 혹은 발생량이 많아 단순히 수요자와 발전설비를 1:1로 조합하면 상호간에 불균형이 발생함을 알 수 있다.

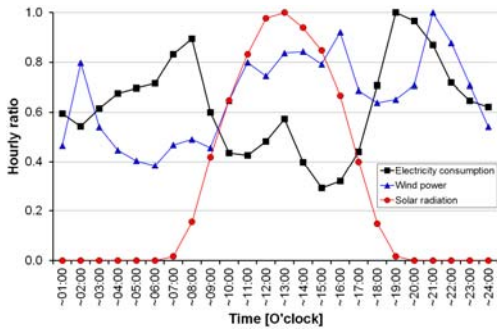


Figure 8: 3 patterns which represent electricity consumption, wind power and solar radiation, respectively

전술한 바와 같이 본 연구에서는 하이브리드 발전시스템의 도입효과를 평가함에 있어 양적인 비교평가만을 수행하였다. 일반적으로 양적평가에는 최대부하법과 일간부하법이 있다. 최대부하법은 시각별 전력부하량 중 최대부하량을 발전설비용량으로 설정하여 도입효과를 평가하는 것으로, 이때는 발전설비 각각의 최대발전량 합이 아니라 식 (3)에 표시한 것처럼 발생패턴이 다른 각 설비의 시각별 발전량 합이 최대가 되는 설비용량이 최대 전력부하량과 같도록 선정해야한다. 일간부하법은 식 (4)와 같이 각 발전설비의 일일 발전가능량 합이 일일전력부하량과 같도록 설계하는 방법이다.

식 (5)는 최대부하법 혹은 일일부하법으로 결정된 각 발전설비가 시각별로 운전되어 전력부하량 대비 잉여분은 축전지로 부족분은 축전지 혹은 계통전력 등 외부로부터 수전되는 양의 일일 총량을

식을 나타낸 것이다.

$$E(t)_{\max} = [mP_{wind}(t) + nP_{solar}(t)]_{\max} \quad (3)$$

$$\sum_{t=1}^{24} E(t) = \sum_{t=1}^{24} mP_{wind}(t) + \sum_{t=1}^{24} nP_{solar}(t) \quad (4)$$

$$\sum_{t=1}^{24} E(t) = \sum_{t=1}^{24} [mP_{wind}(t) + nP_{solar}(t) \pm S(t) \pm T(t)] \quad (5)$$

여기서 $E(t)$ 는 시각별 전력부하, m , n 은 풍력발전기와 태양광발전기의 각 용량계수³⁾, $S(t)$ 는 축전지로의 축전 혹은 수전, $T(t)$ 는 계통전력 등 외부로부터의 수전 혹은 역송전을 의미한다. 단지, 일일 부하법으로 하이브리드 발전시스템의 설비용량을 결정할 경우에는 일일 부하량과 발전량이 같기 때문에 계통전력으로의 수전/역송전은 발생하지 않는다.

최대부하법으로 하이브리드 발전시스템의 각 용량을 설정하고 도입효과를 예측한 결과를 Figure 9와 Table 3에 정리하였다. Figure 9는 풍력발전설비(W)와 태양광발전설비(S)의 용량 구성비에 따른 시각별 발전량변동패턴을 보여준다. 구성비에 따른 발전량이 시간대에 따라 변동이 크게 발생하고 있다. 또한 Table 3은 풍력발전설비(W)와 태양광발전설비(S)의 구성비 변화에 따른 하루 동안의 축전지로의 축전량과 수전량, 그리고 부족분에 대한 계통전력으로부터의 수전량을 각각 나타낸 것이다.

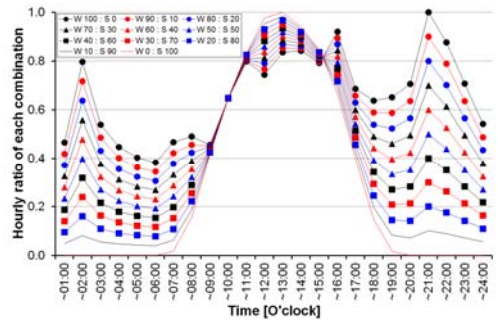


Figure 9: 11 patterns which mean the hourly output capacity ratio of each hybrid system(Scenario 2)

³⁾ 본 연구에서 용량계수는 풍력발전설비의 대수, 태양광발전설비의 기본패널 장수를 의미한다.

Table 3: Storage battery usages ratio of each hybrid system and the capacity ratio supplied from outside

[%/day]	Storage battery		From power plant
	To	From	
W 100 : S 0	23.28	18.08	- 5.2
W 90 : S 10	21.12	21.76	0.63
W 80 : S 20	19.94	26.40	6.46
W 70 : S 30	19.44	31.73	12.29
W 60 : S 40	19.37	37.49	18.12
W 50 : S 50	19.39	43.35	23.95
W 40 : S 60	19.42	49.20	29.78
W 30 : S 70	19.45	55.06	35.61
W 20 : S 80	19.48	60.92	41.44
W 10 : S 90	19.59	66.86	47.27
W 0 : S 100	19.81	72.91	53.10

풍력발전설비만으로 전력부하량 전체를 공급하는 경우를 제외하고 모든 경우에 계통전력으로부터의 수전이 필요한 것으로 평가되었다.

한편, 일일부하법으로 하이브리드 발전시스템을 구성하는 각 발전설비의 용량을 설정하고 도입효과를 예측한 결과는 **Figure 10**과 **Table 4**와 같다.

Figure 10은 각 발전설비의 용량 구성비에 따른 시각별 발전량변동패턴을 보여준다. **Table 4**는 각 발전설비의 구성비 변화에 따른 일일전력부하 대비 축전지 활용 비율과 최대전력부하 대비 하이브리드 발전시스템의 발전가능량을 비율적으로 각각 정리한 것이다. 풍력발전설비만으로 공급할 때를 제외한 모든 경우의 발전설비 발전가능량은 최대 전력부하를 초과하며 태양광만으로 공급할 경우에는 최대 213.2%의 과대설비를 구축하게 된다는 사실을 알 수 있다.

또한, 전술한 바와 같이 최대부하법은 각 구성비에서의 풍력발전설비용량과 태양광발전설비용량의 합계가 최대전력부하량을 만족시켜야 하고, 일일부하법은 일일발전량, 즉 곡선하부면적이 구성비에 관계 없이 모두 같아야한다는 큰 개념적 차이가 **Figure 9**와 **Figure 10** 변동패턴의 차이로 나타난 것으로 분석된다.

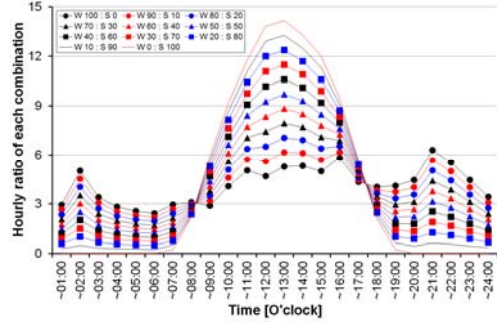


Figure 10: 11 patterns which mean the hourly output capacity ratio of each hybrid system(Scenario 1)

Table 4: Storage battery capacity ratio of each hybrid system and the maximum capacity ratio against maximum electric needs

	To/From storage battery [%/day]	Hourly max. capacity ratio [%/hr]
W 100 : S 0	20.1	95.1
W 90 : S 10	23.3	106.9
W 80 : S 20	27.6	118.7
W 70 : S 30	32.1	130.5
W 60 : S 40	37.2	142.3
W 50 : S 50	42.5	154.2
W 40 : S 60	47.8	166.0
W 30 : S 70	53.1	177.8
W 20 : S 80	58.3	189.6
W 10 : S 90	63.6	201.4
W 0 : S 100	68.9	213.2

4. 결 론

본 연구에서는 현지 수요자 중심의 생산 원리에 기초하여, 섬 주거시설의 전력부하 변동특성을 고려한 태양광발전설비와 풍력발전설비로 구성된 하이브리드 발전시스템의 발전특성을 예측 비교하는 것을 목적으로, 경상남도 통영시에 소재하는 곤리도를 대상으로 수행한 사례연구 결과이다. 연구성과를 정리하면 다음과 같다.

시각별 전력부하 변동률, 시각별 풍력 발생 변동률, 시각별 일사량 변동률 등이 서로 다르기 때문에, 단순히 전력부하측과 풍력발전설비 혹은 태양

광발전설비를 1:1로 조합한다면 상호간에 불균형이 발생하여 비효율적임을 알 수 있었다.

최대부하법과 일일부하법으로 하이브리드 발전시스템의 각 용량을 설정할 경우의 성능을 비교한 결과 두 방법 모두 축전지를 포함한 풍력발전설비만 설치했을 때가 효과적인 것으로 나타났는데 이는 풍력은 태양광과 달리 24시간 지속적으로 발생하기 때문으로 주거시설의 전력부하가 24시간 발생하기 때문이며, 만약 공급대상을 주로 주간시간대에 집중되는 사무시설, 교육시설 등을 대상으로 하였다면 다른 결론이 도출되었을 것으로 예상된다.

본 연구는 정량적 관점에서 하이브리드 발전시스템의 도입효과를 예측한 것으로, 경제성과 풍력발전설비와 태양광발전설비 각각의 기기고유특성에 대한 부분이 배제되어 있기 때문에 다음단계 연구에서 이를 보완할 계획이다.

후 기

본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 연구재단의 지원을 받아 수행한 기초연구사업(NRF-2010-0025312)과 해양수산부의 지원을 받아 수행한 해양에너지 전문인력 양성사업의 연구결과이다.

참고문헌

- [1] Ministry of Government Legislation, Act on The Promotion of The Development, Use and Diffusion of New and Renewable Energy, Act No. 10445, Korea, Mar. 9, 2011.
- [2] K. I. Hwnag, "Measurement of electric power consumption of residences in southeastern fishing village of Korea", Journal of Korean Navigation and Port Research, vol. 36, no. 6, pp. 501-506, 2012 (in Korean).
- [3] K. I. Hwang, "Measurement of wind and solar radiation for energy resources survey on islands around Namhae-Tongyoung, Korea", Journal of Korean Navigation and Port Research, vol. 37, no. 1, pp. 79-84, 2013 (in Korean).

- [4] Korean Statistical Information Service, <http://kosis.kr>, Statistics Korea, Accessed May 12, 2011 (in Korean).
- [5] J. H. Jang, "Wind power generation", Renewable Energy Engineering, GS Intersivision, 2010 (in Korean).
- [6] J. H. Jang, "Solar energy usages and transformation", Renewable Energy Engineering, GS Intersivision, 2010 (in Korean).