

수조식 양식장의 태양광발전시스템 리모델링 교체 효과: 시뮬레이션을 통한 에너지절감효과 분석

최현석* · 나중혁 · 이현영 · 노재엽
한국조명아이씨티연구원, 부천, 14523

The Effect of Remodeling Replacement of Photovoltaic Power Generation System in Fish Farm : Analysis of Energy Saving Effect through Simulation

Hyunseok Choi* · Jonghyuk Na · Hyunyoung Lee · Jayeop Noh

Korea Institute of Lighting & ICT, Bucheon 14523, Korea

Received December 3, 2020; Revised January 5, 2021; Accepted January 12, 2021

ABSTRACT: In the past, marine pollution caused by radioactivity and wastewater discharge caused mass destruction. As an alternative, the land farming system became common and operational. In recent years, safety and environmental problems caused by declining population due to aging of fishermen and underdeveloped facilities have always been lurking, so improvement is urgently needed. As part of the new renewable energy 3020 plan announced by the government in 2017, a new model was proposed to improve the environment as well as save energy when the roof of a water tank farm was remodeled into a solar power system. Study, when the existing roof was remodeled and replaced with a water tank farm in Busan as an empirical model, the energy saving rate was analyzed by comparing the actual electricity consumption and power generation.

Key words: Fish-farm, Photovoltaic system, Energy Saving, Solarpro

1. 서론

과거, 국내의 양식업은 방사능과 폐수 방류로 인한 해양오염이 발생하면서 수산물의 소비 기피 현상이 대두되었고, 기후환경으로 인한 적조, 바이러스, 질병으로 인한 대량폐사도 큰 문제가 되었다. 이러한 해양환경문제와 대량 폐사문제를 해결하기 위한 대안으로 육상 양식 시스템이 보편화되어 운영이 되고 있는 실정이다¹⁾.

하나, 최근에는 어업인의 고령화로 인한 인구 감소, 높은 투자비용 대비 낮은 효율의 구조적인 문제로 경영악화가 심화되고 있어 또 다른 어려움에 직면하고 있다.

최근 어류양식동향 보고서에 따르면, 2010년대부터 양식업 종사자 수는 꾸준히 감소하고 있으며, 2019년에는 총 5,500여명으로 전년 대비 100여명 감소하였다고 보고되고 있다. 또한 양식어종의 산지가격 및 판매가격이 지속적으로 하락세로 나타나 경

영체수 감소 및 어업 종사자 감소가 가속화되고 있는 실정이다²⁾.

또한, 대부분의 양식장에서는 Fig. 1, Fig. 2와 같이 기존의 시설물들이 매우 노후화되어 철골 구조물은 녹슨 채로 튀어나와 있거나, 석면슬레이트 지붕이 부서져 그대로 방치되고 있어 안전적으로나 환경적으로나 매우 위험한 상황에 놓여 있기 때문에 구조적인 개선을 통해 이러한 문제들을 반드시 해결해야 할 필요성이 있다.

최근, 정부에서는 재생에너지 3020 계획에서는 16년 기준 재생에너지 발전 비중 7%에서 30년에는 20%까지 보급하려는 목표를 제시하였고³⁾, 이 중 태양광은 전체 신재생에너지 발전용량 중에서 단연 돋보이는 증가 추세를 나타내고 있으며, 지형적 제약 없이 적용이 용이한 발전원이라는 점에서 활용가능성이 매우 높은 발전방식이다.

본 논문에서는 이러한 이점을 활용하여 수조식 양식장의 낙후된 지붕 시설을 태양광발전시스템으로 리모델링 교체하고, 발전되는 전력은 양식장의 운영전력으로 즉시 사용하여 운영비 절감 및 에너지 절감 등의 부가적인 수익창출도 가능한 새로운

*Corresponding author: vicgundam@kilt.re.kr



Fig. 1. Map of fish-farm site



Fig. 2. Deeteriorated fish-farm site

모델을 제시해보고자 하며, 부산 기장군의 한 수조식 양식장을 실증 모델로 하여 전력사용실태를 분석하고, 태양광발전시스템의 발전량을 시뮬레이션하여 에너지절감 효과를 예측분석하고자 한다.

2. 본 론

2.1 실증사이트의 사전 조사

2.1.1 실증사이트의 운영상황

본 연구에 앞서, 실증사이트로 선정된 부산 기장군 일광면에 소재한 수조식 양식장의 운영 상황을 알아보고자 직접 방문하여 운영현황 및 규모에 대해 사전조사하였다.

실증사이트의 총 대지면적은 4,220 m² 규모로 9 m × 9 m 사이즈의 콘크리트 수조가 약 40여 개 구성되어 있다. 주 어종은 강도다리와 넙치였고, 연간 출하량은 정확하지는 않으나, 2019년도의 강도다리와 넙치의 kg당 단가가 8,000원~11,000원 사이의 금액으로 형성되었던 통계 자료와 연 7억원 정도라는 매출집계 자료로 미루어 볼 때, 70톤~80톤 사이로 추정해 볼 수 있었다⁴⁾.

2.1.2 실증사이트의 전력사용실태

양식장에서 실제로 소비되고 있는 전력소비량을 파악하기 위해 19년 12월부터 20년 11월까지 약 1년간 모니터링하여 데이터를 수집하였다. 전력소비량은 각 전력설비에 CT센서를 설치하여 일별 적산 형식으로 데이터를 수집하였으며, DB 구축은 측정된 데이터를 일별/월별 전력량으로 각각 취합하여 소비패턴을 분석하였다.

수조식 양식장은 양식어종의 생육환경을 유지하기 위해서는 수온조절, 산소공급, 해수공급을 위한 펌프 설비들이 상시 가동되어야 한다⁵⁾. 특히, 해수공급을 담당하는 양수펌프는 해수를 24시간 펌핑하여 양식장에 공급한 후 다시 바다로 방출하는 형태로 운영되고 있다.

데이터수집 결과를 Table 1에 나타냈다. 월평균 107,405 kWh의 전력사용량을 보이고 있는데, 이 중 대부분(전체 사용량의

Table 1. Monthly electricity energy consumption

Category	Water lift pump	Oxygen pump	Heat pump	Management booth	Mixer	Sum
Nov. 19	86,752	6,164	1,069	654	40	97,494
Dec. 19	116,283	10,142	378	1,136	84	133,375
Jan. 20	100,638	8,713	446	877	78	115,401
Feb. 20	93,221	6,902	4,560	955	75	109,492
Mar. 20	123,096	8,619	29,658	737	120	165,295
Apr. 20	112,152	8,084	3,388	649	86	127,207
May. 20	101,060	6,291	829	571	49	112,215
June. 20	85,605	4,202	900	1,168	25	93,181
July. 20	74,155	4,580	3,014	509	32	83,181
Aug. 20	75,032	5,222	12,617	509	15	94,125
Sep. 20	65,769	4,100	496	368	21	71,479
Oct. 20	80,778	4,568	408	460	6	86,422
Total energy consumption	1,114,542	77,584	57,763	8,294	631	1,288,867
Monthly average consumption	92,878	6,465	4,813	691	52	107,405

90%)은 양수펌프를 가동하는데 사용한다.

히트펌프는 양식 어종의 생존을 위한 적정 수온을 조절하기 위해 기상 상황에 따라 유동적으로 가동한다. 주로 치어의 입식 시기인 2~3월과 고수온 시기인 7~8월에 가동하게 되는데, 수집된 데이터에서도 특정기간동안 수온 유지를 위해 집중적으로 사용한 것으로 나타났으며, 29,658 kWh의 사용량을 보였다. 8월에는 고수온 시기로서 집단폐사 방지를 위해 펌프가 가동되었으며, 12,617 kWh의 사용량을 보였다.

산소펌프는 양식장 수조 내에 산소 공급을 위해 상시 가동되며, 치어의 입식 시기(2~3월)에는 히트펌프와 마찬가지로 더 많은 가동량을 보인다. 그 외에는 기상환경이나 해수의 수질 상태에 따라 유동적으로 가동하며 4,100 kWh~10,142 kWh의 사용량을 나타냈다.

작업자의 휴식 및 냉난방 설비를 운영하는 관리동에서는 여름철과 겨울철에 집중적으로 전력을 사용하여 368 kWh~1,168 kWh의 사용량을 나타냈다.

사료 공급을 위한 배합작업장에서는 평균적으로 90 kWh의 전력 사용량을 나타내고 있으며, 3월에는 최대 120 kWh의 전력량을 나타내고 있다. 치어의 입식 시기인만큼 평소보다 많은 사료 공급을 위해 설비를 가동한 것으로 판단할 수 있다.

2.2 태양광발전시스템의 시뮬레이션 분석

2.2.1 시뮬레이션 프로그램 개요

본 논문에서 태양광시스템의 발전량 예측은 Solarpro Ver 4.5 시뮬레이션 프로그램을 활용하였으며, 태양광발전시스템에 관련된 모든 요소의 설정을 손쉽게 변경이 가능하며, 3D 이미지로 실제 환경을 유사하게 표현이 가능하다⁶⁾.

2.2.2 태양광발전 시스템의 구성

1) 태양광 모듈 및 인버터의 선정

실증사이트에 실제 적용될 모듈은 S사의 385 W급 단결정 Perc 모듈로 19.3%의 발전효율 특성을 지니고 있다. 인버터는 D사의 50 kW급 모델이며, 최대효율 98% 이상의 성능을 갖고 있다. 실증사이트에 구축될 태양광발전 용량은 총 200 kW급이므로 인버터의 출력 용량에 맞춰 총 4대로 구성하였다.

각 모듈과 인버터의 정보가 프로그램 내에서 제공되지 않을 경우에는 사용자가 추가적으로 입력하여 적용이 가능하며 각각의 세부사양은 Table 2, Table 3와 같다.

2) 부산지역의 기상정보

시뮬레이션 분석에 활용된 기상데이터는 한국에너지기술연구원(KIER)에서 제공되는 데이터와 기상청(KMA)에서 제공하는 데이터를 선택하여 사용할 수 있으며, 그 외에 제공되지 않는 지역의 기상데이터는 추가적으로 입력하여 적용이 가능하다. 입력해야하는 추가 정보로는 위치정보를 나타내는 위도, 경도와 기

Table 2. Specification of Photovoltaic

Model	SS-DM385
Ouput (Wp)	385
Maximum output voltage (Vmp)	48.84
Maximum output current (Imp)	10.21
Open circuit voltage	39.65
Short circuit current	9.91
Size	1000 ×1994×35
Efficiency	19.3

Table 3. Specification of Inverter

Category	article	Specification
Input	Maxtimum DC power	52,000 W
	Maxtimum Input Voltage	1000 V
	MPPT Max current	28.5 A/19 A
	Operating Voltage	250 V
	Voltage excursion	200~1000 V
	Output MPPT Voltage excursion	540~800 V
Output	Rated output	50,000 W
	Max apparent electric power	50,000 VA
	Systematic connection	3-phase 4-wire system
	Rated Voltage	3-phase 380 V
	Voltage range	335 V~419 V
	Rated frequency	60 Hz
	Power factor	0.999
	Max efficiency	98%

상정보를 나타내는 일사량, 외기온도에 대한 정보들이다.

3) 태양광 어레이의 구성

어레이의 직병렬 구성은 인버터의 전압 전류 특성을 고려하여 사양에 가장 적합한 16직렬 8병렬이며, 총 4개의 어레이로 구성하였다.

양식장에 구축하게 될 태양광 어레이는 기존의 석면플레이트 지붕을 대체하는 용도이면서, 기존의 시설물을 해치지 않는 환경적인 요소도 함께 고려해야 한다. 또한 양식환경 특성상, 태양광 어레이가 햇빛으로부터 수조를 충분히 가려줄 수 있는 구조여야 한다⁷⁾. 이러한 조건을 충분히 고려하여 시뮬레이션에서는 어레이의 경사각을 10~30도까지 다양하게 변화시켜 발전량을 분석하였다. 어레이의 설치간격은 양식장의 실제환경을 고려하여 수조의 간격에 맞게 22 m로 고정하였으며, 어레이의 방향은 정남향으로 구성하였다.

4) 음영에 의한 발전전력 손실 확인

태양광발전시스템은 구성된 태양광모듈 및 어레이에 음영이 발생할 경우 전기적인 특성차이로 인해 출력전력의 손실이 발

생하게 된다⁸⁾.

시뮬레이션 프로그램 내에서 앞서 입력된 위치 정보(위도, 경도)를 기반으로 하여 일조 시간에 따른 그림자 영향에 의한 발전량 손실도 예측가능하다.

2.2.3 시뮬레이션 결과

1) 경사각에 따른 발전량 분석

Table 4는 어레이의 경사각에 따른 발전량을 비교하기 위해 5°간격으로 시뮬레이션한 분석결과이다.

분석결과 경사각 15도에서 발전량 257,511 kWh로 가장 높은 결과값을 나타낸다. 10~20도에서는 경사각이 증가함에 따라 연간 발전량이 증가하는 반면, 20~30도에서는 경사각이 증가하더라도 연간 발전량이 감소하는 것을 알 수 있다⁹⁾.

경사각 15도를 기준으로 하여 여러 각도에서의 연발전량의 상대적 비율을 분석해보면, 경사각 10도는 99.9%, 경사각 20도는 99.6%, 경사각 25도는 98.9%, 경사각 30도는 97.8%로 경사각의 변화에 비해 연발전량은 큰 변화가 없는 것으로 볼 수 있다. 따라서, 실제 환경에서의 최종 어레이 경사각은 연발전량보다는 양식장의 적절한 생육환경 조성을 고려해 햇빛을 차단할 수

Table 4. Analysis of power to inclination angle (Unit : kWh)

	10°	15°	20°	25°	30°
January	17,454	17,805	18,056	18,254	18,345
February	16,870	17,028	17,113	17,128	17,085
March	23,932	23,966	23,920	23,780	23,547
April	25,531	25,409	25,185	24,874	24,494
May	29,718	29,453	29,081	28,610	28,045
June	25,046	24,791	24,445	24,015	23,520
July	24,340	24,107	23,785	23,385	22,920
August	23,963	23,795	23,548	23,219	22,812
September	20,517	20,471	20,353	20,166	19,901
October	19,576	19,687	19,712	19,677	19,549
November	15,105	15,311	15,462	15,541	15,566
December	15,367	15,688	15,937	16,119	16,233
Sum	257,419	257,511	256,597	254,768	252,017

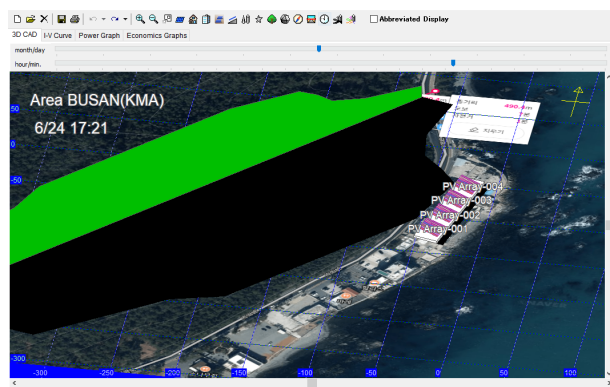


Fig. 3. Shading effect by surrounding terrain

있는 경사각을 선택하는 것이 바람직할 것으로 보인다.

2) 음영에 따른 발전량 감소 분석

실증사이트의 지형적 특성을 살펴보면, 양식장의 뒤 쪽으로 해발 400 m 가량의 작은 산이 존재하고 있다. 1년 중 태양의 고도가 가장 높고 일사 시간이 가장 긴 하지일을 기준으로 그림자의 영향 유무를 시뮬레이션하였고, 그 결과를 Fig. 3에 나타냈다. 산으로 인해 음영이 발생하는 시간은 오후 5시부터 일몰 시간까지이며, 음영 유무에 따른 발전량 감소율은 0.05%로 그 차이가 매우 미미한 것으로 나타났다.

2.3 에너지절감을 분석

2.3.1 전력소비량 대비 발전전력 비교

앞서 수집한 월별 전력소비량 데이터와 시뮬레이션을 통해 예측한 월별 발전량이다. 에너지절감율은 소비량 대비 발전량의 비율이며, 그 결과를 Table 5로 나타냈다.

분석결과, 봄-여름철에는 수온조절을 위한 펌프의 가동이 잠시 중단되면서 전력소비량은 줄어들고, 태양의 고도는 높아짐에 따라 발전량이 상승하게 되면서 최고 29.0%의 에너지 절감율을 예측할 수 있다. 수온을 높이기 위해 히트펌프를 많이 가동하게 되는 가을-겨울철 및 치어의 입식시기(2~3월)에는 에너지절감율이 감소하게 된다. 종합적으로 살펴보면 연평균 19.9%의 에너지절감율을 기대할 수 있다.

2.4 태양광발전시스템의 경제성분석

2.4.1 LCC (Life Cycle Cost) 경제성 분석 조건

본 연구에서는 태양광발전시스템 설치 시 경초기 설치비, 정부지원금, 할인율, 연간유지 및 교체비용 등을 고려하여 투자회수기간을 계산하는 생애주기분석(LCC) 기법을 활용하여 경제

Table 5. Analysis of Energy saving rate

	Power generation	Power consumption	Energy saving rate
January	17,805	115,401	15.4
February	17,028	109,422	15.5
March	23,966	165,295	14.5
April	25,409	127,207	20.0
May	29,453	112,215	26.2
June	24,791	93,181	26.6
July	24,107	83,181	29.0
August	23,795	94,125	25.3
September	20,471	71,479	28.6
October	19,687	86,422	22.8
November	15,311	97,494	15.7
December	15,688	133,375	11.8
Annual Sum	257,511	1,288,867	19.9

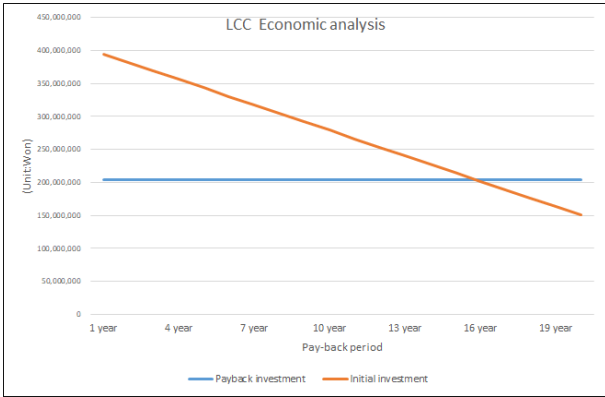


Fig. 4. LCC economic analysis

성을 분석하였다.

LCC 기법에서 총비용은 현재까지 기준으로 적용하였으며, 그 비용은 제조업체 및 공급업체에 개략적으로 요청한 가견적 을 토대로 추정하였다. 가견적에는 모듈과 인버터의 구매비용, 전기공사 및 전기실 구축비용, 기존시설의 철거비용이 포함되어 있다.

정부에서 지원해주는 보조금은 신재생에너지 시스템 설치시 소요 시설비용의 50% 이내로 지원이 가능하며¹⁰⁾, 연간 유지보 수비용은 초기 투자비용의 약 0.5%로 설정하였다.

발전전력의 에너지 절감비용 단가는 실증사이트에서 생산되는 전기를 즉시 사용하는 형태인 점을 고려하여, 한국전력공사 의 농업용 전력요금표를 참조해 kWh당 50원으로 산정하였다¹¹⁾. 마지막으로 시스템의 경제성 평가기간은 20년으로 설정하였다.

2.4.2 LCC (Life Cycle Cost) 경제성 분석 결과

LCC 분석을 통한 태양광발전시스템의 경제성 평가 결과를 아래의 Fig. 4에 나타냈다.

분석 결과, 초기투자비용은 15년만에 회수되고, 연간 12,875,000 원의 전기요금을 절감할 수 있는 것으로 추정할 수 있으나, 물가 상승률 및 실질할인율은 적용하지 않아 회수기간 및 연간 절감 비용은 약간의 오차가 발생할 수 있다.

3. 결론

실증모델이 되는 부산 기장군의 한 수조식 양식장에서 실제 소비되는 전력소비량과 태양광발전시스템의 예측가능한 발전 전력, 전력소비량 대비 발전전력에 의한 에너지절감율, 초기투 자비용 대비 회수기간에 대 경제성을 분석한 내용을 요약하면 아래와 같다.

- (1) 실증사이트로 선정된 양식장에서는 양식 어종의 생육환경 유지를 위해 각종 펌프들이 상시 가동되고 있으며, 이 중 바 다의 해수를 공급하기 양수펌프가 전력소비량의 대부분

(90%)을 차지한다. 데이터 수집 결과, 연 1,300 MWh급의 전력사용하는 것으로 분석되었다.

- (2) 태양광발전시스템에서 어레이의 경사각에 따른 발전량을 비교분석한 결과, 경사각 15도에서 최대 발전량을 나타내고 있으며, 시뮬레이션 결과, 연 257,511 kWh의 발전량을 나타 내었다. 경사각 변화에 따른 발전량의 차이는 크지 않은 것 으로 분석되었다. 양식장의 생육환경 상수조는 햇빛이 차단 되어 그늘져 있는 환경을 갖추는 것이 중요하므로, 10~15도 의 경사각을 갖추는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
- (3) 수조식 양식장의 낙후된 기존 시설물을 태양광발전시스템 으로 교체할 경우, 안전·환경적인 개선이 가능할 것이며, 발 전전력을 즉시 소비할 경우 연 19.9%의 에너지 절감효과를 기대할 수 있다.
- (4) LCC 기법을 활용하여 초기투자비용 대비 회수기간에 대한 경제성을 평가해보면, 현재치로 환산한 투자회수 기간은 15 년이며, 연간 1280만원 정도의 전기요금 절감 효과를 창출할 수 있는 것으로 추정되었다.

본 연구를 통해 낙후된 수조식 양식장 시설물에 대하여 기존 시설물의 교체에 따른 환경 개선 및 태양광발전시스템에서 발 생하는 발전전력에 의한 에너지 절감 등 부가수익을 창출할 수 있는 새로운 모델을 제시할 수 있었다는 점에서 큰 의의를 찾고 자 한다.

하지만 양식장 전체가 아닌 일부 구역만 교체하였을 경우에 대해서 연구를 진행하였으므로 양식장의 노후된 환경이 전체적 으로 개선될 것이라 보기에는 다소 무리가 있을 수 있다. 양식장 전체 공간에 대한 교체 및 경제성 분석에 대해 충분한 검토 후, 실 증으로 이뤄진다면 더욱 의미있는 연구 사례가 될 수 있을 것으 로 사료된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가 원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구결과입니다(No.201942 10100170).

References

1. Korea Maritime Institute, <https://www.kmi.re.kr/web/trebo ok/view.do?rbsIdx=273&page=7&idx=162>
2. Statistics Korea, http://kostat.go.kr/portal/korea/kor_nw/1/ 1/index.board?bmode=read&aSeq=381312
3. MOTIE, http://www.motie.go.kr/motiee/presse/press2/bbs/ bbsView.do?bbs_seq_n=159996&bbs_cd_n=81
4. Noryangjin Fishries Wholesale Market, <https://www.susansij ang.co.kr>
5. Kim, D. H., "A Study on on Energy Consumption by the Fish

- Farm Building Types,” Journal IAK, Vol. 37, No. 1, pp. 279-282, 2017.
6. Park, J. B., “A Study on the Generating Power Analysis of Vertical Array in Photovoltaic system,” Journal KIIEE, Vol. 33, No. 10, pp. 52-61, 2019.
 7. Eh, Y. Y., “An Environmental Effect on Productivity of Flounder Culture Farms,” Journal FBA, Vol. 42, No. 3, pp. 79-93, 2011.
 8. Ko, S. H., “The Characteristics of PV Module under the Partial Shading Condition and with a Failure of Bypass Diode with Short,” Journal KSES, Vol. 36, No. 4, pp. 41-47, 2016.
 9. Choi, D. J., “Comparison Researches for Installation of the Module Angles and Array Spacing on Photovoltaic System,” Journal KIIEE, Vol. 23, No. 1, pp. 162-168, 2009.
 10. MOTIE, https://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_cd_n=81&bbs_seq_n=160642
 11. KEPCO, <https://cyber.kepco.co.kr/ckepco/front/jsp/CY/H/C/CYHCHP00201.jsp>