

## 선망어선용 해수냉각시스템 경제성 분석

곽두영<sup>1</sup> · 이광석<sup>2</sup> · 문춘근<sup>3</sup> · 이정목<sup>4</sup> · 유인덕<sup>5</sup> · 손창효<sup>6</sup> · 윤정인<sup>†</sup>

(Received February 13, 2019 ; Revised February 22, 2019 ; Accepted February 22, 2019)

### Economic analysis of seawater cooling system for fishing vessel

Doo-Yeong Kwak<sup>1</sup> · Kwang-Seok Lee<sup>2</sup> · Choon-Geun Moon<sup>3</sup> · Jung-Mok Lee<sup>4</sup> · In-Duck You<sup>5</sup> · Chang-Hyo Son<sup>6</sup> · Jung-In Yoon<sup>†</sup>

**요약:** 본 논문에서는 현장실증에 앞서 할인회수기간법, 순현재가치법, 내부수익률법 그리고 편익비용비율법을 이용하여 예비 경제적 타당성을 분석하였다. 동남 707호에 설치된 냉각시스템 가격은 약 1억 3천만 원이었고, 설비비용은 해수냉각시스템 설치 공간을 확보하기 위한 비용을 포함하여 1억 7천만 원이었다. 연간 얼음 및 소금의 구매비용은 동남 707호의 실제 사용량을 이용하여 6천 3백만 원, 해수냉각시스템의 유지보수비용은 얼음의 용해열과 시스템의 성능을 이용하여 약 1천 8백만 원으로 추정하였다. 사회적 할인율 4.5%를 고려하여 회수기간을 확인한 결과 약 8.2년이었고 순현재가치가 약 2억8천만 원으로 계산되었다. 순수익이 현재의 투자가치와 동일하게 되는 할인율을 의미하는 내부수익률은 13.7%로 사회적 할인율보다 높은 값을 가졌고, 편익비용비율은 계산한 결과 약 3.43으로 1보다 큰 값을 가져 해수냉각시스템은 경제적이라고 분석할 수 있었다.

**주제어:** 해수냉각시스템, 성능계수, 만액식증발기, 경제성분석

**Abstract:** In this study, a preliminary economic feasibility analysis was conducted using the discounted payback period, the net present value, the internal rate-of-return method, and benefit-cost ratio method's prior to field demonstration. When the seawater cooling system was installed in the Dongnam-707, the machine cost was approximately KRW 130 million; the installation cost was KRW 170 million to secure the space for the installation. The annual cost of purchasing ice and salt was calculated at approximately KRW 63 million considering the actual amount of ice and salt used in the Dongnam-707; the cost of the operation of the seawater cooling system was calculated at approximately KRW 18 million per year. As a result of considering the social discount rate of 4.5%, the payback period was confirmed to be approximately 8.2 years and the net present value was calculated at approximately KRW 280 million. Moreover, the internal rate of return-namely the discount rate when the net benefit is equal to the initial investment cost-was 13.7%, which exceeded the social discount rate; the benefit-cost ratio was calculated to be 3.43, which exceeded the value of 1. Therefore, the seawater cooling system was confirmed to be economical.

**Keywords:** Seawater cooling system, Coefficient of performance, Flooded-type evaporator, Economic analysis

## 1. 서론

대형선망어선은 연간 12여 만 톤인 국내 고등어 어획량의 90%를 공급하는 업종으로 제주도 남부, 대마도 인근 해역 등 한중일 공동조업수역에서 주변국과 경쟁하고 있다.

대형선망어업이란 등선이 야간에 불을 밝혀 고등어, 정어리, 전갱이 등을 한 곳으로 유인한 뒤 그물을 둘러쳐 잡는 방식이며, 대형선망어선의 선단은 총 6척 (본선 1척, 등선 2척, 운반선 3척)으로 이루어져 있다. 그러나 6척의 조업경

<sup>†</sup>Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1099-3435>): Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-Gu, Busan 48513, Korea, E-mail: yoonji@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6180

1 M.S Candidate, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University, E-mail: en9902@daum.net, Tel: 051-629-6180

2 Researcher, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University, E-mail: suwe1862@gmail.com, Tel: 051-629-6180

3 Researcher, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University, E-mail: drmcg@gmail.com, Tel: 051-629-6180

4 Researcher, Korea Seal Tech Co, E-mail: kstljm@daum.net, Tel: 051-315-1663

5 Researcher, Korea Seal Tech Co, E-mail: kstljm@daum.net, Tel: 051-315-1663

6 Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University, E-mail: sonch@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6183

비가 많이 들고, 2016년 기준으로 선령 21년 이상인 어선이 92%에 달할 정도로 노후화되어있는 실정이다. 이에 해양수산부는 2016년부터 2019년까지 4년간 연구개발사업인 ‘대형선망어업 선진조업시스템 구축’을 추진하였다. 향후 새롭게 개발되는 대형선망어선은 기존 선단의 6척에서 4척(본선 1척, 등선 1척, 운반선 2척)으로 줄고, 어선원 후생공간도 개선되어, 어업비용 13%이상 절감과 함께 어선원 근로 여건도 크게 개선 될 것으로 기대된다.

이러한 배경 하에 선망어선용 해수냉각시스템은 어획물의 고부가가치화를 위해 제안되었다. 본 과제의 선망어선용 해수냉각시스템은 해수의 직접 냉각을 통해 어획물을 보관하기 때문에 기존에 사용 중인 담수 각 빙의 날카로운 결정과 염도 및 온도 변화로 인한 어획물 품질 저하, 그리고 구매 비용 등의 문제점을 보완할 수 있을 것으로 기대된다.

Yoon *et al.* [1]-[4]는 해수냉각시스템의 성능분석에 앞서 해수냉각시스템의 실험 장치를 15kW급으로 제작하여 열원수 온도에 따른 응축열량, 압축비 및 성능계수의 변화와 해수냉각시스템에 적용된 만액식 증발기 내부 전열관의 재료, 냉매, 핀에 따른 열전달 특성 변화를 연구하였다. E. Kolbe. [5]는 해수냉각시스템의 소비에너지에 영향을 주는 요인을 분석하고 이 시스템이 효율적이라는 것을 밝히고 있다.

기업의 신규계획사업 또는 현재진행사업에 대한 투자여부를 결정하는 가장 핵심적인 것은 사업의 경제성을 평가하는 것이다[6]. Hong *et al.* [7]은 제주지역 갈치 끝낙시 조업 자동화 시스템 개발의 경제성을 분석하기 위해 사회적 할인율 4.5%를 적용하여 순현재가치법과 내부수익률법, 그리고 편익비용비율법을 사용하였다. Choi *et al.* [8]은 바이오매스 열병합발전의 타당성을 연구하기 위해 Case를 나누어 순현재가치를 계산하고 내부수익률을 비교하여 경제성의 유무를 확인하였다. Lee *et al.* [9]는 LCC(Life Cycle Cost)를 산출하는데 있어 실질할인율을 계산하여 연등가액 현재가치환산계수를 이용하였다. Song *et al.* [10]은 태양광, 태양열, 지열시스템을 조합하여 설비에 적용할 때 그 비율에 따라 Case를 나누어 초기투자비, 에너지비용, 보수교체비 등의 생애주기비용을 산출하여 경제성을 비교하였다. Park *et al.* [11]은 회수기간법을 통해 마이크로펌프 생산 초소형공장의 경제성을 분석한 결과 회수기간을 약 4년으로 확인하였다.

본 논문에서는 기존 선박에 해수냉각시스템을 도입하는데 있어 순현재가치법, 내부수익률법, 편익비용비율법을 사용하여 경제적 타당성을 분석하고 장치의 투자회수기간을 확인하는데 목적이 있다.

## 2. 분석 자료 및 방법

### 2.1 해수냉각시스템 성능분석결과

해수냉각시스템의 성능분석을 위한 실험 장치는 실증시험에 앞서 육상실험용으로 제작되었으며, 선박과 유사한 성능실험을 위해 해수공급라인은 냉각탑과 보일러를 이용



Figure 1: Experimental equipment of the seawater cooling system

해 해수 유량 및 온도를 조절할 수 있도록 하였다. Figure 1은 실험장치의 사진을 나타낸 것이다.

성능 분석은 해수 순환 유량이 90m<sup>3</sup>/h에 맞게 조절하였고 어창 공급 해수온도가 고등어의 저장온도인 3℃를 유지할 때 해수냉각시스템의 정상상태라고 판단하여 20분 정도 측정하였다. 위 육상 실험장치를 이용하여 본선에 탑재된 238kW급 해수냉각시스템의 성능실험 결과는 Table 1과 같다.

Table 1: Experimental results

Parameter	Unit	Value
Evaporator duty	kW	240.3
Pump power consumption	kW	50
Compressor power consumption	kW	72
Total power consumption	kW	122
Coefficient of performance	-	3.34

본 논문의 해수냉각시스템은 현재 선박 탑재까지 진행되었고 현장 실증을 진행중에 있다. Figure 2는 실증시험 중인 동남 707호의 사진을, Figure 3은 설치된 해수냉각시스템의 주요 부분 사진이다.

해수냉각시스템 설계 시 본선에서 적정하게 공급할 수 있는 전력량을 고려해 압축기의 용량은 75kW로 설정하였고 1대가 고장 시에도 대응이 가능하도록 같은 용량의 보조 압축기를 추가적으로 설치하였다. 또한 성능분석에 사용된 육상실험용 시스템은 성적계수가 약 3.3이었지만 해수환경 등에 의한 기계류들의 오손을 고려하여 성적계수 2.7로 설정하여 시스템 사양을 설계하였다.



Figure 2: Vessel Dongnam 707



Figure 3: Main components of seawater cooling system in vessel Dongnam 707 (Condenser, Evaporator, Compressor)

## 2.2 경제성 분석 방법

경제성을 분석하기 위한 방법으로는 할인회수기간법과 순현재가치법을 사용하였다. 이때 시스템의 수명인 20년을 내용연수로 고려하였고 할인율은 기획재정부의 ‘예비타당성조사 수행 총괄지침’을 참고하여 사회적 할인율 4.5%를 적용하였다. 할인율은 미래의 금액과 동일한 가치를 가지는 현재의 가치를 계산하기 위해 적용하는 비율을 의미한다.

### 2.2.1 생애주기비용(Life Cycle Cost)계산

생애주기비용은 일반적으로 제품의 생산부터 폐기처분까지 발생하는 비용의 합을 의미한다. 생애주기비용의 현재가치를 산출하는데 있어 연등가액(A)에 연등가액환산계수(PWAF)를 곱하여 계산할 수 있다[9]. 먼저, 연등가액환산계수를 계산하는 방법은 아래 식 (1)과 같다. 그 연등가액환산계수에 연등가액을 곱하여 식 (2)와 같이 계산하였다.

$$PWAF = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (1)$$

$$PV = PWAF \times A \quad (2)$$

여기서,  $i$ 는 할인율(%),  $PWAF$ 는 연등가액현재가치환산계수,  $A$ 는 연등가액이다.

### 2.2.2 할인회수기간법

할인회수기간법은 시스템 투자비용의 회수 기간을 분석하는데 있어 현금흐름을 할인현금흐름으로 분석하는 방법이다. 할인현금흐름으로 연등가액과 연등가액환산계수를 곱하여 계산한 생애주기비용을 계산하여 적용하였다. 이 방법은 평가요인이 시간이라는 평가자에게 분명히 필요한 판단 근거이기 때문에 자주 사용된다. 해수냉각시스템의 회수기간을 확인하기 위해 기존의 담수 각 빙을 이용한 냉각 방식과 해수냉각시스템을 이용하는 방식의 생애주기비용을 비교하였다.

### 2.2.3 순현재가치법

평가 요인이 순현재가치라는 한 가지 측면만을 명확히 보여주고 있어 순현재가치법은 경제성 평가에 자주 사용되는 방법 중 하나이다. 이때 순현재가치(Net Present Value)란 설정한 기간 동안의 순편익의 현금흐름을 현재가치로 환산하여 합한 값이다. 순현재가치는 아래 식 (3)으로 계산할

수 있다. 이러한 순현재가치가 0보다 크면 기술개발에 있어 경제성이 있으며 투자할 가치가 있다고 판단할 수 있는 방법이 순현재가치법이다.

$$NPV = -I + \sum_{r=1}^n \frac{B-C}{(1+i)^r} \quad (3)$$

여기서,  $NPV$ 는 순현재가치,  $I$ 는 초기투자비용,  $B$ 는 연간 발생하는 이익, 그리고  $C$ 는 연간 발생하는 비용이다.

### 2.2.4 내부수익률법

미래의 순수익이 현재의 투자가치와 동일하게 되는 즉, 순현재가치가 0이 되는 할인율을 의미하는 내부수익률이 사회적 할인율보다 높으면 경제적이라고 판단하는 방법이다. 이 내부수익률을 계산하는 방법은 아래 식 (4)와 같다.

$$0 = -I + \sum_{r=1}^n \frac{B-C}{(1+IRR)^r} \quad (4)$$

여기서,  $IRR$ 는 내부수익률(%)이다.

### 2.2.5 편익비용비율법

장치의 총 편익과 총 비용의 할인율을 적용한 금액의 비율을 의미하는 편익비용비율이 1보다 클 경우 경제적이라고 판단하는 방법이다. 이 편익비용비율법은 편익과 비용을 선정하는 것이 힘들다는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 경제성 분석에서는 편익을 해수냉각장치를 사용함으로 인해 소비되지 않는 얼음과 소금의 구매량으로 선정하였고 비용은 해수냉각시스템의 유지관리비용으로 선정하였다. 편익비용비율의 계산은 아래 식 (5)와 같다.

$$B/C \text{ ratio} = \frac{\sum_{r=1}^n \frac{B}{(1+i)^r}}{\sum_{r=1}^n \frac{C}{(1+i)^r}} \quad (5)$$

여기서,  $B/C \text{ ratio}$ 는 편익비용비율이다.

## 3. 경제성 분석 조건

대상으로 한 선망어선은 1회 조업 시 얼음 사용량 70ton, 소금 사용량 367kg으로 조사되었다. 이 사용량에 부산공동어시장 기준 얼음의 단가 kg당 40원, 소금의 단가 kg당 545원을 고려하여 연간 얼음과 소금의 구매비용이 6천 3백만 원으로 계산되었다.

본 어선 동남 707호에 설치된 해수냉각시스템의 가격은 1억 3천만 원이고 설비비용은 동남 707호에 해수냉각시스템 설치 공간을 확보하기 위한 비용을 포함하여 1억 7천만 원으로 조사되었다. 따라서 총 3억 원이 초기투자비용으로 사용되었다. 또한 연간 보수비용은 초기투자비용의 2%인 6백만 원, 유지비용은 약 1천 2백 4십만 원으로 계산되었고 계산 방법은 다음과 같다.

기존의 얼음 사용량 70ton의 용해열을 해수환경 등을 고려해 선박에 설계된 증발기의 증발열량 201kW로 나누어 1회 조업 시 시스템 운전시간을 32시간으로 계산하였다. 또한, 선박의 발전기의 경우 항해와 정박 중에는 50~70% 부하 영역에서 주로 운전된다[12]. 그래서 안전율 10% 포함 시스템의 소요전력 137.5kW를 고려하여 정격출력 275kW인 디젤발전기 모델의 50% 출력일 때 연료소모량 36.2L/h로 조사하였다 [13]. 결과적으로, 연간 발전기 연료 소모량 24,326.4L에 한국석유공사에서 제공하는 2017년 월별 선박용 경유의 평균가인 507.98원/L를 고려하여 약1천2백만 원으로 계산되었다. Table 2는 동남 707호의 기존 얼음 및 소금의 구매 비용과 해수냉각시스템의 초기투자비용 및 유지관리비용을 나타내었다.

Table 2: Initial investment and maintenance cost

Parameter	Value (thousand won)
Seawater cooling system machine price	130,000
Seawater cooling system facilities price	170,000
Annual crushed ice and salt cost (Existed case)	63,000
Annual maintenance cost (seawater cooling system)	18,357

#### 4. 경제성 분석 결과

##### 4.1 회수기간 확인

시스템의 회수기간을 분석하기 위해 담수 각 빙을 이용한 냉각방식과 해수냉각시스템을 이용한 냉각방식의 생애주기 비용을 비교하였다. 생애주기비용을 계산하는데 있어 사회적 할인율 4.5%를 적용하여 연등가액현재가치환산계수(PWAF)를 계산하고 그 계수를 연간 얼음 및 소금 구매비용과 해수냉각시스템의 초기투자비용, 연간 유지보수비용에 곱해주었다. 그 결과는 Figure 4와 같다. Figure 4에 따르면 해수냉각시스템을 기존의 냉각방식과 비교하였을 때 해수냉각시스템은 투자회수기간을 약 8.2년 이후임을 확인할 수 있었다.

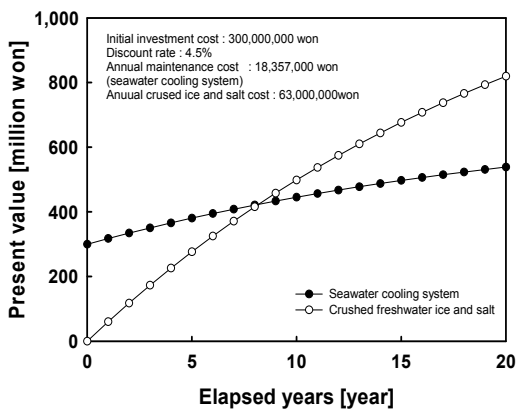


Figure 4: Payback period of seawater cooling system

##### 4.2 순현재가치 계산

할인율에 따른 순현재가치를 계산해 Figure 5와 같은 결과가 나왔다. 계산하는데 있어 해수냉각시스템의 연간 발생하는 이익은 시스템을 사용함으로써 소비되지 않는 연간 얼음 및 소금 구매 비용으로 계산하였다. 또한 해수냉각시스템의 연간 발생 비용은 앞에서 계산한 유지보수비용으로 계산하였다. Figure 5에 따르면 할인율이 약 13.7%를 넘어가면서부터 순현재가치가 0보다 낮아짐을 확인할 수 있고 이 할인율이 내부수익률이다.

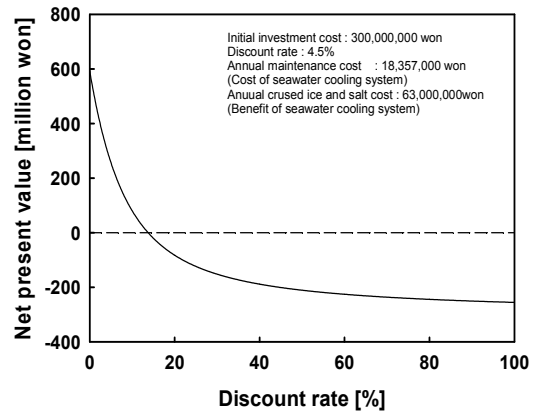


Figure 5: Net present value of seawater cooling system based on discount rate

##### 4.3 다양한 할인율에서의 경제성 분석

해수냉각시스템의 사회적 할인율 수준의 다양한 할인율 일 때 할인율에 따른 경제성분석 결과는 Table 3과 같다. Table 3에 따르면 사회적 할인율 4.5%일 경우 시스템의 순현재가치는 약 2억 8천만 원, 회수기간은 8.2년으로 확인되었고 3%, 6%일 때는 각각 약 3억 6천4백만 원, 2억 1천2백만 원의 순현재가치와 약 7.6년, 8.9년의 회수기간을 확인할 수 있었다. 또한 내부수익률은 약 13.7%로 사회적 할인율보다 높은 할인율을 보였고, 편익비용비율은 약 3.43으로 1보다 큰 값을 보였다.

Table 3: NPV based on discount rate

Discount rate (%)	3	4.5	6
NPV (million won)	364.2	280.7	212.1
IRR (%)	13.7		
B/C ratio (-)	3.43		
Payback period (years)	7.6	8.2	8.9

#### 5. 결론

어획물 고부가가치화를 위해 제안된 해수냉각시스템의 현장실증검증에 앞서 예비 경제성 타당성분석 결과는 다음과 같다.

사회적 할인율 4.5%를 고려하여 해수냉각시스템의 회수 기간을 분석한 결과 약 8.2년인 것을 확인할 수 있었다.

다양한 할인율일 때 회수기간을 분석한 결과 할인율이 3%일 때 7.6년, 6%일 때는 8.9년임을 확인할 수 있었으며, 이때 순현재가치는 각각 약 3억 6천4백만 원, 2억 1천2백만 원으로 계산되었다.

사회적 할인율 4.5%를 적용하여 순현재가치를 계산한 결과 약 2억 8천만 원으로 나타났다.

할인율에 따른 시스템의 순현재가치를 계산한 결과 내부 수익률이 13.7%로 사회적 할인율보다 큰 값을 가졌다.

편익비용비율을 계산한 결과 3.43으로 1보다 큰 값을 가졌다.

본 논문의 경제성 분석에는 어획물의 어가상승 등이 고려되지 않았기 때문에 실제 경제성 분석에는 더 높은 경제성을 보일 것으로 사료된다.

## 후 기

이 논문은 2018년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임. (선망 어선용 해수냉각 시스템 도입 연구, 20150480)

## Author Contributions

The following statements should be used “Economic Analysis, J. I. Yoon and D. Y. Kwak; Methodology, C. G. Moon and K. S. Lee; Validation, I. D. Yoo and D. Y. Kwak; Investigation, J. M. Lee and I. D. You; Resources, D. Y. Kwak; Data Curation, D. Y. Kwak; Writing–Original Draft Preparation, C. G. Moon and C. H. Son; Writing–Review & Editing, J. I. Yoon; Supervision.”

## References

[1] J. I. Yoon, C. H. Son, H. M. Han, K. S. Lee, J. M. Lee, and I. D. You, “Heat transfer characteristics of flooded type evaporator for seawater cooling system,” *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, MATEC Web of Conference, vol. 167, no.8, 2018 [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816702014>

[2] J. I. Yoon, C. H. Son, J. M. Lee, and I. H. Kang, “Performance characteristics of flooded type evaporator for seawater cooling system with heat source temperature of mid-year,” *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, vol. 21, no. 2, pp 64-69, 2017 (in Korean).

[3] J. I. Yoon, C. H. Son, K. H. Choi, S. H. Jung, H. M. Han, and S. H. Seal, “Heat transfer characteristics of flood-type evaporator using R22 and R134a for

fishing vessels,” *Heat Transfer Engineering*, 2018 [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/01457632.2018.1450331>

[4] C. H. Son, K. H. Choi, S. H. Jung, H. M. Han, J. M. Lee, and J. I. Yoon, “Performance comparison of seawater cooling system using refrigerants R22 and R134a,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 42, no 3, pp. 155-160, 2018 (in Korean).

[5] E. Kolbe, “Refrigeration energy prediction for flooded tanks on fishing vessels,” *American Society of Agricultural Engineers*, vol. 6, no. 5, pp 624-628, 1990.

[6] I. K. Yoo, “Optimal choice of economic evaluation method for engineering projects,” *Proceedings of the Korean Academic Society Of Business Administration annual meeting*, pp. 392-403, 2014 (in Korean).

[7] S. H. Hong, U. K. Yang, M. K. Kim, Y. S. Park, K. I. Park, and D. H. Kim, “An economic feasibility analysis of the automatic operation system development for hairtail trolling line in Jeju region, Korea,” *Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology*, vol. 54, no. 2, pp. 164-172, 2018 (in Korean).

[8] J. Y. Choi and Y. G. Shul, “The feasibility analysis of 9.9MW biomass cogeneration system,” *The Korean Society For New And Renewable Energy*, vol. 10, no. 2, pp. 40-47, 2014 (in Korean).

[9] J. B. Kee, S. H. Cho, B. C. Min, D. Y. Hong, and W. J. Lee, “A study on the reliability method development for the LCC analysis,” *Proceedings of Spring Conference of the Korean Reliability Society*, pp. 319-328, 2011 (in Korean).

[10] H. Y. Song and J. U. Kim, “A study of renewable energy optimal design using the LCC analysis,” *Journal of Energy Engineering*, vol. 24, no. 2, pp 45-50, 2015 (in Korean).

[11] S. H. Park, S. H. Jang, M. Subramaniam, S. I. Choi, J. Y. Song, and C. W. Lee, “Economic analysis of micro factory for the production of micro pump using payback-period method,” *Proceedings of 2008 Society of CAD/CAM Engineers*, pp. 814-818, 2008 (in Korean).

[12] K. S. Jung, “Energy efficiency improvements in part load for a marine auxiliary diesel engine,” *Journal of the Korea Society of Marine Engineering*, vol. 38, no. 7, pp 877-882, 2014 (in Korean).

[13] B. H. Lee, “A study on methodology of optimal op-

eration of BESS and diesel generation in a microgrid considering efficiency characteristics according to the power ratios of diesel generators,” The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 64, no. 4, pp 539-546, 2016 (in Korean).