

## 소형 스텔링 엔진을 이용한 태양열 발전 시스템

김기범<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>충북대학교 기계공학부

# Solar Power Generation System Using A Small-Sized Stirling Engine

Ki-Bum Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Mechanical Engineering, Chungbuk National University

**요 약** 태양 에너지 변환 효율이 높은 접시형 집광기와 스텔링 엔진을 이용한 발전 방식을 조사하기 위하여 본 연구에서는 소형 스텔링 엔진을 이용하여 좁은 공간에서 발전용으로 사용할 수 있는 시스템을 개발하였고, 기초 실험을 수행하였다. 본 연구에서 제작한 발전 시스템을 위하여 50만원의 제작비가 소요되었고, 제작한 시스템으로 최대 0.56 kWh의 전기를 발전하였으며, 에너지 변환 효율은 약 10%로 측정되었다. 시스템의 최적 설계를 통하여 더 높은 출력을 얻을 수 있으며, 본 연구의 기초 실험 데이터는 많은 태양열 발전 관련 분야에서 유용하게 사용될 것으로 사료된다.

**Abstract** To evaluate solar energy conversion efficiency of a solar power generation system that consists of a dish-type solar receiver in the combination with a Stirling engine, a solar power generation system using a small-sized Stirling engine was developed in this study, and preliminary experiments were carried out. The total capital fee was around five hundred thousand Won, and the developed system was found to produce an electricity of 0.56 kWh corresponding to 10% in the energy conversion efficiency. The better design of the system is expected to improve the system efficiency, and the experimental data obtained in this study will be used for other various applications associated with solar power generation.

**Key Words** : Solar Power Generation, Green Energy, Stirling Engine

### 1. 서론

현대 모든 산업분야에서 전기는 매우 중요한 자원이며, 현재 전체 전력 생산량 중 90% 이상이 화력발전과 원자력 발전을 통해 생산되고 있다. 화력 발전은 최근 화석 연료의 고갈과 환경오염이라는 문제에 직면해 있고, 원자력 발전은 높은 효율과 이산화탄소 배출이 적은 장점에도 불구하고 핵폭발이라는 잠재적 위험 요소를 항상 가지고 있다. 최근 신재생 에너지를 사용하여 화력이나 원자력 발전의 의존량을 줄이고 더 나아가 태양이나 풍력 에너지를 대체 에너지원으로 사용하고자 하는 연구개발이 활발히 진행되고 있다[1].

태양 에너지를 이용하는 발전 방식은 크게 태양열과 태양광을 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. 태양열은 주로 적도지방이나 고도가 높은 지역에 유리하기에 스페인이나 미국 캘리포니아, 또는 뉴멕시코 지역에서 많이 사용하고 있다[2]. 넓은 지역에 설치된 Heliostat을 이용하여 태양열을 모아 솔라타워에 설치된 열 교환기에 조사하여 스팀이나 기체 몰튼솔트 등을 만들고, 터빈을 구동하여 전기를 발생시키는 방식이다. 우리나라와 같이 고도가 낮고 적도에서 비교적 먼 거리에 있는 곳은 태양광 발전 방식이 좀 더 유리한 것으로 평가되고 있다. 특히 Heliostat과 같은 설비를 갖출 만큼 넓은 공간이 부족한 것도 태양광 발전이 유리한 이유 중 하나이다. 하지만 솔

본 논문은 2011학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

\*Corresponding Author : Kibum Kim

Tel: +82-43-261-2446 email: kimkb11@chungbuk.ac.kr

접수일 12년 05월 29일 수정일 (1차 12년 06월 07일, 2차 12년 06월 26일, 3차 12년 07월 02일) 게재확정일 12년 08월 09일

라셀의 높은 가격과 낮은 효율 때문에 태양광발전이 다른 기존의 발전 방식을 완전히 대체하기에는 아직까지 무리가 있다.

본 연구에서는 고층 건물의 옥상에 방사형 집열기와 Stirling엔진을 설치하여 발전하는 방식을 조사하기 위하여 발전 시스템의 소형 시제품을 제작하고 기초 실험을 수행하였다. Stirling 엔진은 증기기관과 같은 외연기관으로써 외부에서 열원을 받아 실린더 안의 작동유체가 팽창과 수축을 반복하면서 엔진이 작동한다. 태양열이나 다른 기관의 폐열 등 다양한 연료를 사용하여 구동할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 엔진의 구동 방식은 가열-팽창-냉각-수축과정 등의 4행정인 한 사이클을 이루게 된다. 이 때 팽창과 수축과정은 이론적으로 등온과정이므로 스텔링 엔진의 이론적인 효율은 카르노 사이클의 열효율과 같아 다른 내연기관의 열효율보다 높다. 하지만 비교적 실용적인 동력을 생산하기 위해서는 스텔링 엔진의 크기가 커야 하는 단점도 있다.

19세기 Robert Stirling에 의해 처음 고안된 이 엔진은 발전을 거듭하였고, 1930년 네덜란드의 필립스 회사가 초기 모델의 Stirling 엔진에 현대 기술을 적용하였다. 그 이후, 필립스 회사는 수백만 달러를 투자하여 Stirling 엔진 기술에 선두주자가 되었다[3]. 엔진이 가지고 있는 단점을 보완하고 장점을 부각시켜 효율을 극대화 하고자 하는 노력은 여러 연구 기관에 의해 계속 되고 있으며, 특히 태양열 에너지의 연구와 더불어 실용 발전 엔진으로 개발하고자 하는 연구가 많이 수행되고 있다 [4-5].

본 연구의 목표는 소형 스텔링 엔진을 협소한 공간에 설치하여 태양열 발전 가능 여부를 판단하기 위하여 시제품을 만들어서 엔진의 효율을 분석하고 발전 시스템으로부터 생산할 수 있는 전력량을 측정하였다. 실험 데이터를 분석하여 향후 실용성을 평가 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

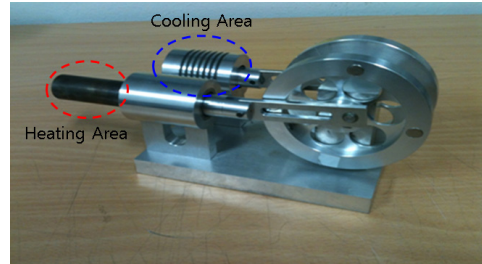
### 2.1 실험장치

#### 2.1.1 스텔링 엔진

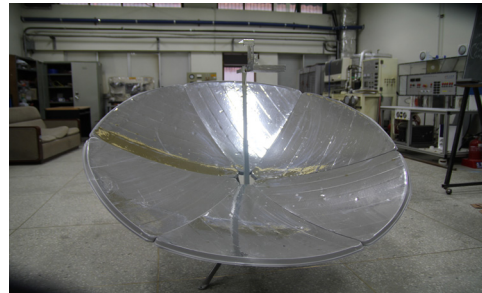
실험에 사용된 스텔링엔진은  $\alpha$ 형 엔진으로 1개의 파워 피스톤과 배재 피스톤으로 구성되어 있다.  $\alpha$ 형태의 스텔링 엔진은 압축비를 높이기 쉽고, 고출력을 얻기가 쉽다는 특징이 있다. 특히 엔진의 구조를 단순화 할 수 있는 장점이 있다. 그림 1은 본 실험에 사용된 스텔링 엔진(x-engine)이며, 엔진 구동을 위한 가열부와 냉각부를 그림에 표기하였다.

#### 2.1.2 집광기 제작

그림 2는 태양열을 집열하기 위하여 사용한 일체형 집광기로 지름이 1.5 m인 방사형이다.



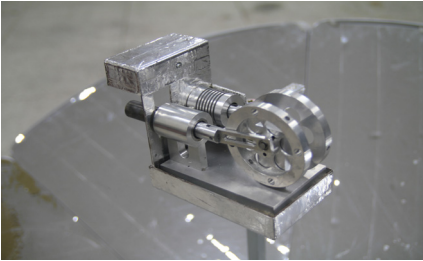
[그림 1] 태양열 발전을 위해 사용한 알파형 스텔링 엔진  
[Fig. 1] A Alpha-type Stirling Engine used for solar power generation



[그림 2] 본 연구에서 태양열을 집광하기 위해 사용된 집광기  
[Fig. 2] A solar receiver used in this study

초점거리가 80 cm에 이르도록 집광기에 적당한 각을 두어 제작하였으며, 집광기 프레임 표면에 반사율이 좋은 코팅지를 부착하여 최대한 많은 태양열이 집열될 수 있도록 하였다. 방사형 집광기를 이용하여 빛이 모이는 지점에 스텔링 엔진의 가열부를 위치시키고, 냉각부는 빛의 초점부에서 멀리 위치시켜 냉각 효율을 높게 하였다. 가열부와 냉각부의 온도차가 높을수록 엔진의 효율을 향상된다. 집광기를 가지고 태양열을 모아서 엔진을 구동할 만큼 충분한 열원이 형성되면 비로소 스텔링 엔진이 구동하게 된다. 엔진의 휠의 회전 동력은 발전기를 통해 전기에너지로 변환된다. 실험에 사용된 집광기를 이용하여 태양열을 집열 하였을 경우 초점 부분의 지름은 약 10 cm이었다. 스텔링 엔진을 구동하기에 필요한 가열부의 크기보다 초점 부분 넓어 엔진의 냉각부까지 가열될 경우 엔진의 효율이 저하되기에 그림 3에서 보여지는 것과 같이 엔진 아래 부분에 케이스를 제작하였고, 케이스 아래에 알루미늄 반사 테이프를 부착하여 집광기로부터 반사

되는 빛을 역반 사시킴으로써 가열부를 제외한 다른 부분이 가열되는 것을 방지하였다.



[그림 3] 스텔링 엔진이 가열되는 것을 방지하기 위하여 제작된 케이스 모습  
[Fig. 3] A case to protect the engine to be overheated by solar energy

### 2.1.3 발전기 제작

본 연구에 사용된 스텔링 엔진에서 발생하는 회전 동력을 전기에너지로 변환하기 위하여 발전기를 그림 4와 같이 제작하였다. 제작한 스텔링 엔진의 최고 rpm은 1600 rpm에 이르지만, 토크가 낮아서 휠에 벨트나 기어를 추가적으로 장착하여 발전기를 구동하는 것은 부적합하다. 따라서 스텔링 엔진의 휠에 자석을 직접 부착하고 코일을 자석의 위치에 맞게 제작하여 휠이 회전 시에 전류가 발생하도록 제작하였다. 발전효율은 엔진의 회전수, 자석의 크기, 코일의 감긴 수에 비례하므로 세 가지 변수를 최대화하는 것이 중요하다. 우선 엔진의 최대 회전수는 설계 시 정해진 변수임으로 자석의 세기와 코일의 감긴 수를 가지고 발전기의 발전 성능을 향상 시켰다. 자석의 성능은 온도의 영향을 받는다. 자석을 엔진의 휠에 부착 시 자석의 무게와 엔진 부품이 자력의 영향을 받아 엔진의 회전수가 감소하는 것을 관찰하였다. 또한 코일을 감는 방향과 위치에 따른 전류 흐름 불균형 등으로 인해 전류를 측정하는 데 어려움이 발생했다.



[그림 4] 스텔링 엔진에 발전기를 부착한 모습  
[Fig. 4] A generator attached at the engine

자력에 영향을 받는 철 성분 부품(실린더와 피스톤의 연결부 지점 등)을 나무나 플라스틱 재질의 부품으로 대체하여 회전수에 영향을 받지 않도록 하였다. 그림 4에 나타난 것처럼 코일을 휠을 둘러싸고 감는 방식으로 하여 자석 자기장의 영향력을 극대화 하였다.

## 2.2 실험방법

실험은 실내 실험과 실외 실험으로 진행 하였다. 실내 실험에서는 토치를 이용하여 스텔링 엔진의 가열부의 온도를 제어하면서 엔진의 가열부와 냉각부의 온도차에 따른 엔진의 회전수를 타코메타(CEM, AT-8)를 이용하여 측정하였다. 가열부의 온도는 150℃, 170℃, 190℃, 210℃, 230℃, 250℃로 제어하였으며 총 10회의 실험을 하였다. 본 시스템에 사용된 스텔링 엔진으로부터 발전량을 측정하는 실험도 동일하게 수행하였다. 스텔링 엔진에 열을 가했을 경우, rpm에 따른 가열부와 냉각부의 온도의 차이와 발전기에서 생산되는 전류, 전압을 측정하였다. 실험의 오차를 줄이기 위해 3회 반복하여 실험을 수행하였다. 저항은 6Ω을 이용하여 측정하였다.

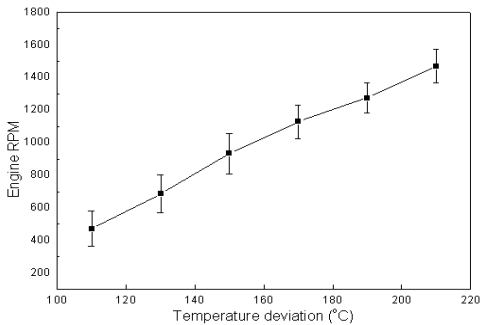
실외 실험은 집광기와 스텔링엔진을 이용하여 8월부터 10월까지 오후 12시에서 1시 사이의 법선면 일사량이 최고가 되는 시간에 스텔링엔진을 구동 시 가열부의 온도를 측정하는 실험을 수행하였다. 또한 집광기에서 반사되어 나오는 빛의 초점의 분포를 측정하는 실험을 하였다. 실험 특성상 보통 집광기의 온도가 300℃~400℃ 올라가기 때문에 일반 온도계나 thermocouple을 사용하여 측정하기 어려움이 있고, 측정한다 하더라도 많은 오차가 발생할 여지가 있기에, 적외선 온도계(CME, DT-8865)를 사용하여 온도를 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서 제작한 스텔링 엔진 발전 시스템의 효율을 평가하기 위하여 온도에 따른 엔진의 회전수를 측정 하였다. 그림 5는 엔진의 가열부와 냉각부 온도 차이에 따른 엔진의 회전수이다. 가열부의 온도를 제어하여 각 조건 당 10회의 실험을 수행하여 실험적 오차를 최소화 하였다. 가열부의 온도를 150℃부터 250℃까지 20℃ 간격으로 변화하면서 휠의 rpm을 측정하였는데 예상대로 온도가 올라 갈수록 rpm도 증가 하였다. 평균적으로 최소 rpm은 473 rpm, 최대 rpm은 1469 rpm으로 측정 되었다. 스텔링 엔진의 최대 출력을 위해선 가열부의 온도를 최대한도 높이거나 냉각부의 온도 제어도 중요하다.

실험 시 가열부에 온도를 가할수록 작동유체가 냉각부로 이동하면서 냉각부도 온도가 증가하는 것을 관찰 하였다. 따라서 온도가 올라갈수록 냉각부의 온도도 같이 올라가 어느 일정 온도부터는 출력이 일정 할 것으로 예상된다. 냉각부의 온도를 일정하게 유지하려면 냉각부에 냉각을 시켜줄 수 있는 열교환 장치가 필요하다. 만약 냉각부에 온도가 일정하게 유지된다면 가열부에 온도가 올라갈수록 실린더 내부에 온도차가 커지면서 최대의 출력을 끌어 낼 수 있다.

본 연구에서 개발한 태양열 발전 시스템을 이용하여 2011년 8월에서 10월까지 3달 동안 습도와 날씨 온도 등을 측정 한 후 가열부, 냉각부, 작동유체, 온도분포 등을 측정하였다. 그림 6은 시스템을 이용하여 on-sun test를 수행하는 사진이다. 본 연구에서 사용한 스텔링 엔진은 가열부의 온도가 150℃ 이상에서 냉각부와 가열부의 온도차가 120℃ 이상일 때 작동을 하였다. 일사량은 계절뿐만 아니라 날씨에도 많은 영향을 받으므로 10일 이상의 데이터를 평균하여 날씨에 의한 영향을 최소화 하였다.

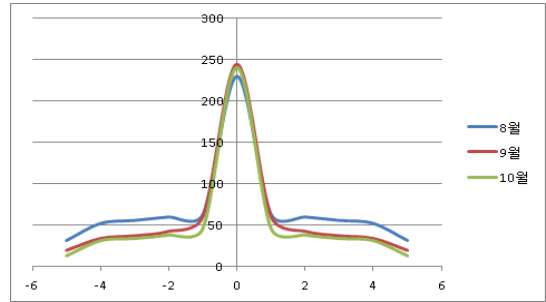


[그림 5] 엔진의 가열부와 냉각부의 온도차에 따른 스텔링 엔진의 회전수  
 [Fig. 5] Engine rpm for temperature deviation between heating area and cooling area in the engine



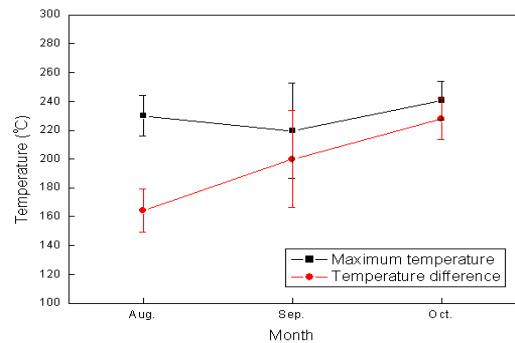
[그림 6] 소형 태양열 발전기를 이용하여 on-sun test를 수행하는 모습  
 [Fig. 6] On-sun test conducted using a small-sized solar power generation system

본 연구에 사용된 집광기를 이용하여 초점거리가 80 cm일 때 지름이 약 10 cm에 이르는 초점이 형성되었지만, 이 초점의 크기는 본 연구에 사용된 소형 스텔링 엔진의 가열부보다 더 넓다. 8월부터 10월까지 실험 시에 초점 안의 온도 분포를 그림 7에 나타내었다.



[그림 7] 본 연구에 사용된 집광기를 이용하여 집열된 초점부의 온도 분포  
 [Fig. 7] Temperature distribution in focused area using a solar receiver used in this study

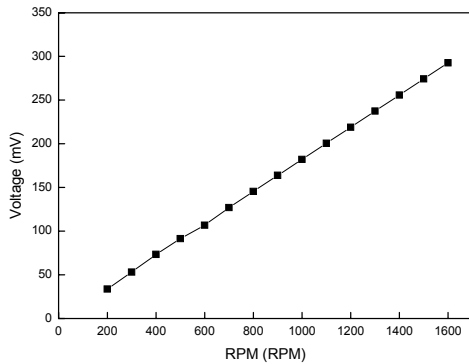
그림 8은 2011년 8월, 9월 10월 청주지역에서 본 연구 시스템을 이용하여 실험한 데이터의 최고 온도와 냉각부와 가열부의 온도 차이를 나타내는 그래프이다. 2011년 8월 청주지역은 장마가 심하여 비가 오고 흐린 날이 많아서 실험에 어려움이 있었다. 매달 10일 이상 법선면 일사량이 최대인 정오 시간에 측정 한 데이터이며, 기상 상태에 따라 측정 데이터의 실험 오차를 에러바로 표시하였다.



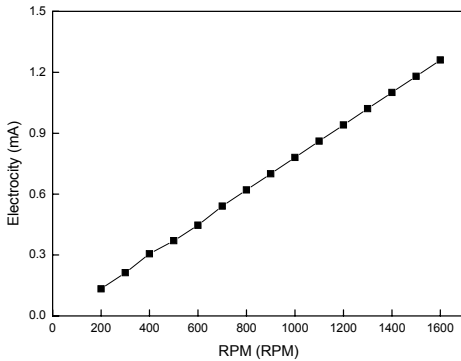
[그림 8] 계절에 따른 엔진의 최고온도와 온도차  
 [Fig. 8] The maximum temperature and temperature difference in the engine measured from August to October in 2011

그림에서 알 수 있는 것처럼 엔진 가열부의 최고 온도는 계절에 따라 큰 차이가 없는 것을 관찰 할 수 있다. 하

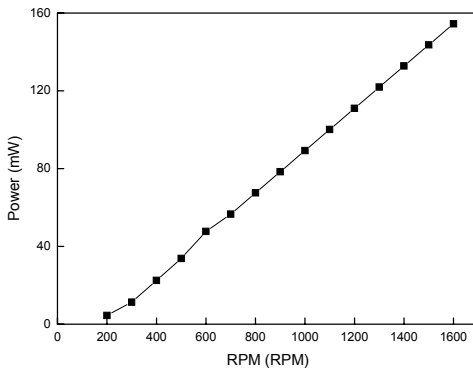
지만 가을에 이르러서 대기 온이 저감되어 냉각부의 온도가 낮아지고 이로 인하여 시스템의 온도차이는 증가하였다. 앞서 얘기했듯이 가열부와 냉각부의 온도의 차이가 나면 날수록 스텔링 엔진의 효율은 점점 커지는 것을 알 수 있으며, 엔진의 발전 효율을 고려할 때 자연 대류 냉각 시에는 여름 보다 겨울에 효율이 높을 것으로 예상된다.



(a) Voltage (mV)



(b) Current (mA)



(c) Power (mW)

[그림 9] 엔진 회전수에 따른 발전량  
[Fig. 9] (a) Voltage, (b) Current, (c) Power for engine rpm

마지막으로 엔진의 회전수에 따른 스텔링 엔진의 발전량을 측정하였다. 그림 9는 엔진의 회전수에 따른 전류, 전압, 발전량을 보여준다. 엔진의 가열부와 냉각부의 온도차가 증가할수록 엔진의 rpm도 증가하므로 발전량 또한 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 발전량을 늘리기 위해 가장 용이한 방법은 코일의 감은수를 증가시키는 방법이므로 에나멜선의 감은수를 200, 400, 600순으로 늘리면서 실험을 수행 하였다. 코일의 감은수가 400번 이였을 경우 약 0.47 mA 정도의 전류가 발생하는 것을 측정하였다. 실제 발전기의 형상은 에나멜봉치가 매우 균일해야하고 자기장의 방향등, 여러 가지를 고려해야함으로 에나멜선은 한 방향으로 엔진을 감싸듯이 감아서 감은횟수와 발전량이 비례하는지 확인하였다. 자석의 자기장 안에 코일을 최종 1200회 감았을 때, 본 발전기 타입으로 약 1.26 mA 의 전류를 생산해 냈으며 본 시스템으로 최대 155 mW의 발전량을 얻는 것으로 관찰했다. 이를 열량으로 변환하면 0.56 kWh로 청주 지역 연평균 청명일 법선면 일사량이 5.81 kWh인 경우 본 시스템의 에너지 변환 효율은 약 10%정도이다[6].

#### 4. 결론

본 연구에서는 태양열을 이용한 소형 자가 발전 시스템으로 협소한 공간에 설치하여 발전할 수 있는 소형 스텔링 엔진 발전 시스템의 시제품을 제작하여 기초 테스트를 수행 하였다. 방사형 집광기의 직경이 1.5 미터였으며 반사율이 낮은 재질로 제작이 되었음에도 불구하고 초점부의 평균 온도가 240°C까지 측정 되었다. 이 조건에서 소형 스텔링 엔진의 회전수가 1600 rpm으로 측정 되었으며, 0.56 kWh의 발전량을 얻었고, 태양열의 전기 변환 효율은 10%이었다. 본 시스템을 제작하는데 소요된 비용이 약 50만원이었으며, 현재 시중에 0.1 kWh 급 태양전지모듈 (0.4 m<sup>2</sup>)의 가격이 약 50만 원 정도이므로 본 연구에서 개발한 시스템과 동일한 효율이 되도록 하기 위해서는 5개의 태양전지모듈이 필요하다. 따라서 본 연구에서 개발한 방사형 집광기와 스텔링 엔진을 이용하는 발전 시스템이 태양광 발전에 비해 공간 이용률뿐만 아니라 시설 투자비면에서도 유리하며, 최적 설계 시에 실용화가 가능하리라 사료된다.

#### References

[1] R. Christopher, et al., "Concentrating Solar Power Global Outlook 09: Why Renewable Energy Is Hot,

- Greenpeace, SolarPACES, and ESTELA, 2009.
- [2] K. Kim, et al., "A Study of Solid Particle Flow Characterization in Solar Particle Receiver", Solar Energy, pp. 1784-1793, 2009.
- [3] Y. A. Cengel, et al., "Thermodynamics: An Engineering Approach, 7th Ed., McGraw-Hill, pp. 499-501, 2008
- [4] H. Y. Seo, et al., "Study on the Characteristics of Stirling Engine Receiver for Parabolic Dish Concentrator", KSES, pp. 165-170, November, 2010.
- [5] S. N. Lee, et al., "Analysis on the Operating Characteristics of 10 kW Dish Type Solar Thermal Power System", KSES, pp. 363-370, April, 2010.
- [6] D. K. Jo, et al., "A Detailed Survey of Direct Normal Radiation and Clear-day for the Construction of Solar Concentrating System in Korea", JKSES, pp. 53-62, 2006.
- 

김 기 범(Ki-Bum Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 충남대학교 선박해양공학과 (공학사)
- 2003년 8월 : University of Florida, 기계공학과 (공학석사)
- 2006년 8월 : University of Florida, 기계공학과 (공학박사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 충북대학교, 기계공학부, 조교수

<관심분야>

친환경 에너지 시스템