

방출 수 에너지 하베스팅을 위한 수차 설계에 관한 연구

정한석, 김충혁^{ID}

광운대학교 플라즈마바이오디스플레이학과

A Study of Hydraulic Turbine Design for The Discharge Water Energy Harvesting

Han Seok Cheong and Chung Hyeok Kim

Department of Plasmabiodisplay, Kwangwoon University, Seoul 01890, Korea

(Received November 27, 2020; Accepted December 3, 2020)

Abstract: We modeled the helical turbine and three modified helical turbines for the structure of the hydraulic turbine for discharge water energy harvesting. A structure that can reduce the load applied to the blade by placing a center plate is our basic concept. The shape was reduced to 1/5, fixed to a size of 240 mm in height and 247 mm in diameter, and modeled by changing the width and the angle of the hydraulic turbine blade. The pipe inner diameter of the simulation pipeline equipment is 309.5 mm, and the simulation section was 4 m in the entire section. The flow velocity was measured for two cases, 1.82 m/s and 2.51 m/s, with the parameters being the amount of power generation, hydraulic turbine's torque, and hydraulic turbine's rotation speed. The measurement results confirmed that the flow velocity at the center, which has no pipe surface resistance, has a great influence on the amount of power generation; therefore, the friction area of the turbine blade should be increased in the center area. In addition, if the center plate is placed on the helical turbine, durability can be improved as it reduces the stress on the blade.

Keywords: Energy harvesting, Discharge water, Micro hydropower, Hydraulic turbine

1. 서론

국내의 에너지 공급정책은 기후협약을 통해 교토의 정서를 채택하여 이산화탄소를 포함한 온실가스 6종의 단계적 감소 및 세계 각국의 에너지 자원 부족으로 인한 에너지 확보 경쟁 등 대외적인 환경 변화에 많은 영향을 받고 있다. 따라서 기존 화석연료 중심 에너지 공급 체계를 변화하여 새로운 에너지를 찾기 위해 많은 노력을 기울이고 있으며 이와 함께 기존 에너지를 재생 등 신재생에너지 중심으로 부존 대체에너지 개발에 많은 연구가 진행되고 있다.

특히 신재생에너지 분야의 태양광 및 풍력, 지열, 소수력 등은 에너지원으로 많은 연구 결과에 의해 실용화되어 대체에너지로 사용 중이며 이 중 소수력 분야는 적용 환경 및 효율 개선, 구조 안전성 등의 연구가 활발히 진행되고 있다 [1,3-5].

소수력 발전은 이산화탄소를 포함한 대기 온실가스 배출 등 화석연료에 의한 대기 환경문제 및 자연 형태의 인위적인 변경 등 생태 파괴에 대해서도 비교적 자유로우며 농업용수, 공업용수, 하수 처리시설, 화력발전소 배수, 양식장 배출 수 등 다양한 분야에 적용이 가능한 청정에너지원이다.

수력발전은 일반수력(hydropower)과 소수력(small-hydropower)으로 구분되며, 대체에너지개발 및 이용·보급촉진법에 따라 설비용량 3,000 kW 이하를 소수력으로 구분한다. 또한 2003년도에 동법이 개정되어 설비용량 10,000 kW 이하를 소수력으로 변경하였고, 2005

✉ Chung Hyeok Kim; hyeokkim@kw.ac.kr

Copyright ©2021 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

년도에 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급촉진법이 개정되어 수력설비용량 기준을 삭제하였다. 수력발전의 연구개발 및 보급대상은 주로 발전설비용량 10,000 kW 이하를 대상으로 하며, 신재생에너지공급의무화제도(RPS)는 수력발전 중 설비용량 5,000 kW 이하만 지원된다 [1-3,6].

수력발전은 중력에 의한 위치 에너지를 가지고 있는 물의 이동을 이용하여 수차를 회전시켜 이와 연결된 발전기에서 전기에너지를 생산하는 원리로 일반적으로 높은 곳에 위치한 유량을 유도해 위치 에너지를 증가시킨 낙차를 이용하여 수차에 회전력을 발생시키는 방식이 주로 사용되고 있다.

본 연구에서는 저유량의 일정 유속을 갖춘 양식장의 폐수로를 이용한 소수력 발전설비를 구축하기 위해 낙차가 아닌 유속에 의한 소수력 발전에 적합한 수차를 설계하기 위해 날개의 구조, 폭 등을 변경하여 동일 조건하에서 최적의 구조를 조사하였다. 또한, 제작된 수차를 모의 환경에서 발전효율을 조사하였다.

본 논문은 100 kW 미만의 마이크로수력이 가능한 양식장 방출수의 에너지 하베스팅에 관한 것으로 물의 유속에 의한 수차의 날개폭, 날개의 구조 등에 대한 구조 해석 및 유동 해석을 통해 최적의 수차 구조를 개발하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 소수력 발전 수차 및 모델링

2.1.1 소수력 발전 수차 모델링 조건

일반적으로 소수력 발전소에서 수차에 대한 규격을 먼저 결정하고 난 이후에 발전 가능 지점을 선정하지만, 본 연구에서는 현장을 결정하고 그 지역의 유량, 수두, 유속 등의 정보를 기초로 최적의 수차를 모델링하였다. 또한 낙차는 기존의 배수로를 그대로 이용하는 구조이며, 오픈 구조의 기본 관로를 수차 설치 부분에 원통형으로 설치하는 기본 구조를 가지고 수차를 설계하였다.

수차의 구조는 기존 헬리컬 수차 외에 3개를 모델링하였으며, 모델링 방법으로 날개의 각도, 넓이 등을 변화시키면서 유동 해석을 하였다.

본 연구에서 배관에 유체가 유입되어 터빈이 회전할 때 터빈 주위의 유동 해석과 터빈에 걸리는 토크 및

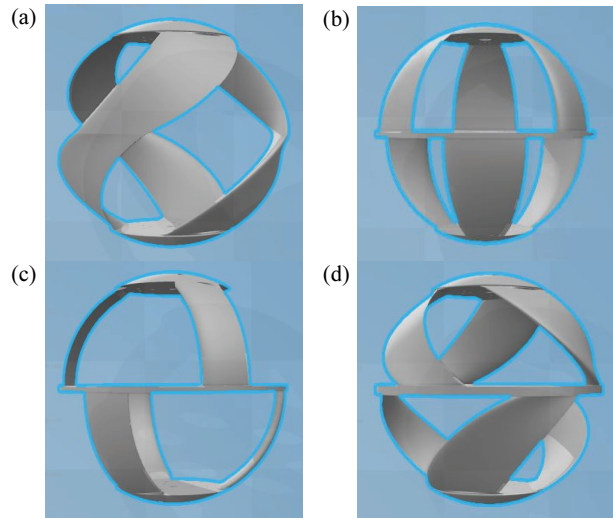


Fig. 1. Modelling geometry of (a) type 1, (b) type 2, (c) type 3, and (d) type 4.

항력을 추정하는 것을 목표로 CFD 해석의 경우 오픈 소스 CFD 툴킷을 이용하여 개발한 SNUFOAM을 이용하여 수행하였다. 시뮬레이션 조건은 임의의 배관 및 터빈 배치를 변화시켰으며, 일정한 압력이 가해지는 steady/급격한 압력 변동이 있는 unsteady 조건을 주었고, 터빈 회전을 유동 해석에 반영할 수 있도록 MRF (moving reference frame) 기능을 추가하여 설계하였다. 또한 터빈 회전 수 설정에 대한 해석 조건에서의 발전기 부하량 산출 및 이에 대한 유동 해석과 터빈 구조 해석을 터빈 블레이드 표면 압력에 대한 mapping을 설계하였다.

그림 1은 수차 모델링 형상을 나타낸 것으로 1(a)는 일반적인 헬리컬 수차의 형상이다. 그림에서 보는 바와 같이 중심층을 두어 날개에 가해지는 하중을 줄일 수 있는 구조를 기본 개념으로 형상은 실제 형상의 1/5로 축적하여 높이 240 mm, 지름 247 mm의 크기로 고정하여 수차 날개의 폭, 각도를 변화시켜 모델링 하였다. 그림 1(b)는 날개의 폭을 상단을 좁게 하단을 넓게 설계하였으며, 그림 1(c)는 날개의 폭이 일정하게 설계하였다. 그림 1(d)는 날개의 폭은 일정하게 하고, 일반적인 헬리컬 수차와 같이 S자의 모습을 구성하였다.

2.1.2 관로 모델링

배수로는 그림 2와 같이 원통의 구조로 관로에 설계된 수차를 삽입하여 관로의 유속 흐름과 회전 후 후류 영역에서의 와류 등을 조사하였다. 관로의 벽은 유속이

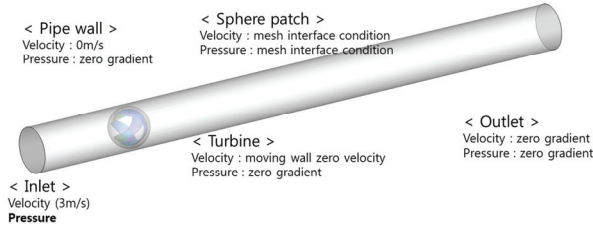


Fig. 2. Placement of pipeline and hydraulic turbine.

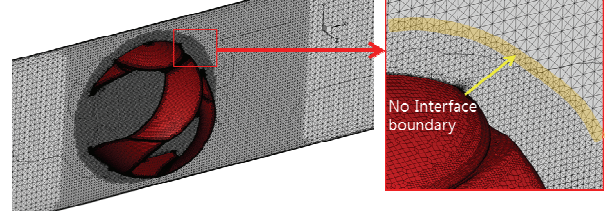


Fig. 3. Grid points geometry.

Table 1. Pipeline rated design criteria.

Classification	Unit	Value
Velocity of flow	m/s	10.89
Pipeline diameter	m	0.45
Turbine diameter	m	0.402
Turbine revolutions	RPM	1,000

0 m/s로 설정하였으며, 실증단지에서의 평균유속인 10.89 m/s로 설정하였다. 파이프 직경은 모의환경으로 제작된 관로 직경 0.45 m를 적용하였다.

CFD 해석 영역은 터빈 회전 영역과 파이프 고정 영역으로 구분하여 해석하기 위해 rotating dynamic mesh라고 불리는데 터빈 회전 영역 경계에서 유체의 물리량을 파이프 고정 영역에서 유체의 물리량을 이용하여 보간(interpolation)하기 때문에 큰 계산 용량을 요구한다는 단점을 가지고 있다. 따라서 좀 더 간단하고 계산 시간이 단축하는 기법인 MRF 기법을 이용한 해석자를 프로그램 기능에 추가하였다.

MRF 기법의 경우 격자를 회전시키는 것이 아니라 회전 영역을 고정시키고 유체를 돌리는 개념이기 때문에 앞서 설명한 것처럼 회전 영역이 물리적으로 회전하지 않는다는 장점이 있다. 즉, MRF 기법이란 회전하는 영역을 MRF zone으로 설정하고 이 MRF zone에서의 CFD 해석을 절대 좌표 기준이 아닌 회전하는 MRF 좌표(회전 좌표)로 수행하는 방법이다.

이때 MRF zone에서의 지배방정식과 그 외의 stationary zone에서의 지배방정식은 다음과 같이 표기되며 MRF zone에서의 지배방정식에 Coriolis force가 추가된다는 특징을 가지고 있다.

MRF zone과 stationary zone에서의 지배방정식은 식 (1), (2)와 같이 주어진다.

$$\nabla(u_r u_r) + \Omega \times u_I = -\nabla p + \nabla\{v(\nabla u_I + (\nabla u_I)^T)\} \quad (1)$$

$$\nabla u_R = 0$$

$$\nabla(u_I u_I) = -\nabla p + \nabla\{v(\nabla u_I + (\nabla u_I)^T)\} \quad (2)$$

$$\nabla u_R = 0$$

그림 3에서 MRF zone과 stationary zone이 분리되지 않았음을 보여주고 있는데, 이는 MRF 기법이 격자를 회전시키는 것이 아니라 회전 영역을 고정시키고 유체를 돌리는 개념이기 때문에 두 개의 해석방법에서 격자점의 형상이 중요하다.

2.1.3 모의 관로 장치

시뮬레이션에 사용된 모의 관로장치 전체 형상은 다음 그림 4와 같다. 관로의 외경은 318.5 mm이고 두께는 배관용 스테인레스 관 규격표(KS D3576)에서 호칭 두께 10S에 해당하는 4.5 mm를 사용하였다. 따라서 배관 내경의 경우 309.5 mm로 제작했다.

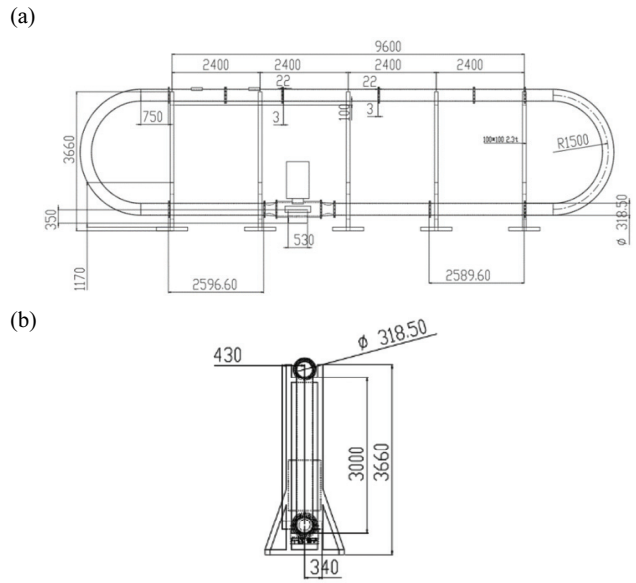


Fig. 4. (a) Front view and (b) side view drawings of simulated pipeline equipment.

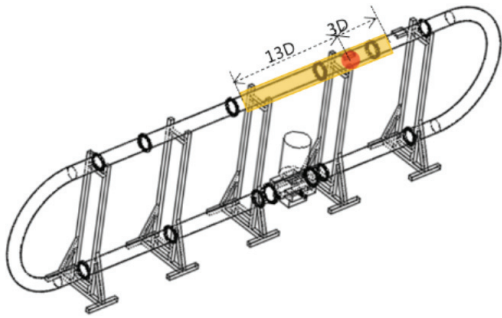


Fig. 5. CFD analysis area.

발전량은 유속을 1.82 m/s와 2.51 m/s로 두 가지 경우 각각에 대하여 발전량, 수차 회전 토크와 수차 회전 속도를 측정하였다.

시뮬레이션에서는 전체 관로를 해석하는 데 많이 시간이 소요되기 때문에 실제 관로를 모의하는 구간만을 해석하고 실증실험 장치에 1/5로 축소된 모형을 삽입하여 발전량, 회전속도 등을 실험하였다. 시뮬레이션 관로는 전체 중 4 m의 구간을 모델링하였으며, 내경 309.5 mm에 유량이 유입되는 것으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수차 표면의 압력 분포

MRF 기법 적용했을 때와 마찬가지로 파이프 유입구 유속 3 m/s, 터빈 회전 각속도 375 rpm인 조건으로 해석을 수행하였다. 실제 터빈의 회전에 의한 물리적 유동 현상과 시간에 따른 토크 및 항력 등을 정량적으로 산출하였다.

터빈의 구조 해석은 CFD 해석에서 구한 터빈 표면에서의 압력 값을 적용하였으며, 터빈 구조 해석을 수행하기 위해 터빈 표면에서의 압력 값을 해석 조건(유입 속도 3 m/s, 회전수 955 rpm)에 대한 CFD 해석을 수행하였으나, CFD 해석 결과 압력 값은 터빈 표면 격자 중심에서의 값으로 출력이 되지만 node point는 표면 격자의 꼭짓점으로 출력이 되기 때문에 node point에서 압력 값을 구하기 위해 표면 격자 중심의 압력 값을 보간하였다.

이때 보간을 하여 구한 node point에서의 압력이 타당한지 검사하기 위하여 구조해석 과정에서 터빈 표면의 압력을 적분하여 얻을 수 있는 터빈에 걸리는 항력과 CFD 해석 결과 구한 터빈의 항력을 비교하였고

그 결과 아래와 같다. CFD 해석을 통해 구한 압력을 보간하여 구한 node point에서의 압력이 서로 유사한 것을 확인할 수 있었다.

그림 6은 CFD 해석을 통한 수차에 가해지는 토크의 변화를 나타낸 것으로 초기에 변화폭이 크게 나타났으며, 540 deg. 이후부터 안정화되기 시작했다. 이에 수차에 가해지는 토크의 형상은 안정화 이후에 최대 토크가 걸리는 565 deg.에서 터빈 표면의 압력 값을 추출하였으며, 그림 7에서 나타내었다.

그림 7에서 보는 바와 같이 기존 헬리컬 수차에서는 날개의 중간 부분과 날개에 많은 토크를 받는 것을 확인할 수 있었으며, 중심판을 설치함으로써 날개의 표면이 아닌 수차 날개의 날 부분에 토크가 집중되는 것을 확인할 수 있었다. 날개 면에 가해지는 토크는 발전량의 증가보다는 날개의 파손 우려가 더 크기 때문에 중심판을 삽입한 형태가 더 안정적으로 동작할 것으로 판단된다.

Table 2. Hydraulic turbine drag comparison.

(Unit: mN)	X-axis	Y-axis	Z-axis
Turbine drag at flow analysis (N)	895.5	163.2	154.5
Turbine drag at pressure integral (N)	895.8	166.4	162.1
Difference in value (%)	0.03	1.96	4.92

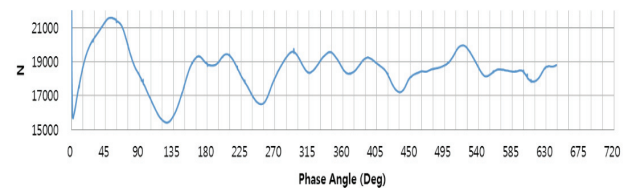


Fig. 6. Torque change by CFD analysis.

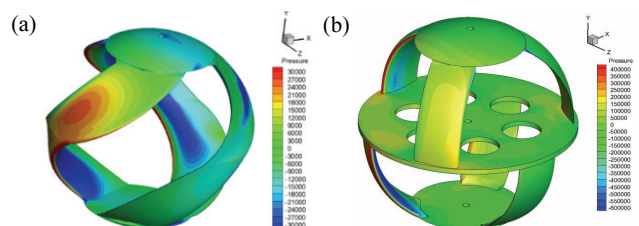


Fig. 7. Pressure distribution of (a) helical turbine and (b) helical turbine with center plate.

3.2 모의 관로의 발전 특성

모의 관로 발전 특성을 확인하기 위하여 실제 설치할 터빈의 20% 크기로 4가지 형태의 터빈을 제작하였으며, 실증지의 평균유속인 10.89 m/s의 20%에 해당하는 유속의 오차범위 3%를 적용하여 각각 1.82 m/s, 2.51 m/s의 두 가지 유속 조건으로 모의실험을 실시하였다.

그 결과 두 가지 유속 조건에서 기존 헬리컬 타입

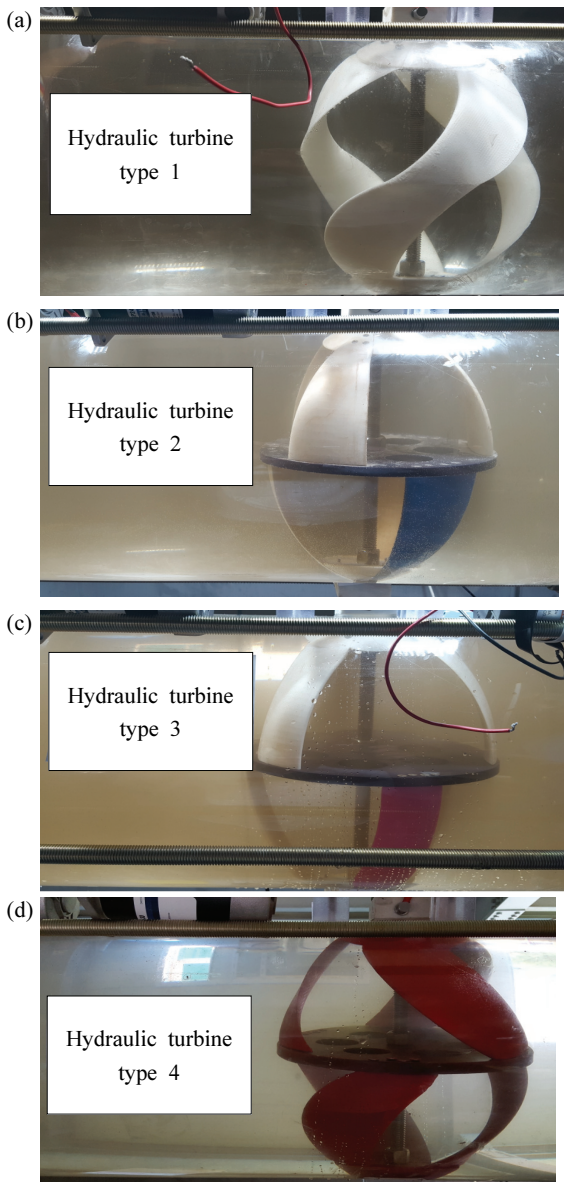


Fig. 8. Test of (a) turbine type 1, (b) turbine type 2, (c) turbine type 3, and (d) turbine type 4.

Table 3. Simulation results at 1.82 m/s.

Type No.	Shaft RPM	Torque (Nm)	Power (Watt)
Type 1	310	0.98	31.8
Type 2	385	1.09	43.9
Type 3	100	0.43	4.5
Type 4	283	1.03	30.5

Table 4. Simulation results at 2.51 m/s.

Type No.	Shaft RPM	Torque (Nm)	Power (Watt)
Type 1	390	1.01	41.2
Type 2	555	1.09	63.3
Type 3	147	0.85	13.1
Type 4	443	1.06	49.1

(type 1)의 최대 발전이 각각 31.8 W와 41.2 W를 보였으며, 터빈 중심층 부위 날개가 넓은 폭을 가진(type 2)에서는 각각 43.9 W와 63.3 W로 가장 좋은 값을 나타내었다. 중심층을 기준으로 날개폭이 일정하게 제작된(type 3) 터빈은 각각 4.5 W, 13.1 W로 발전량이 가장 낮은 값을 나타내었는데 이는 유속 흐름이 표면 마찰이 없는 중심에서 가장 빠르기 때문에 상단부의 넓은 면적은 도리어 회전을 방해하는 것으로 동작하기 때문이라고 판단된다.

따라서 type 2와 같이 터빈 중심층 부위 날개가 넓은 폭을 가진 수차 형태가 유속을 이용한 소수력 발전에서 유효 발전량을 가장 크게 얻을 수 있다는 것을 시뮬레이션과 실증을 통해 확인할 수 있었다. 본 연구는 소수력 발전 하나의 형태인 유속을 이용한 발전에 있어 수차의 형태를 연구했다. 이후에 소수력 발전의 다른 형태인 수압에 의한 발전 모델을 연구함으로써 상호 비교를 통해 발전 현장에 적합한 유형을 찾아가는 것이 필요하다고 생각한다.

4. 결론

양식장 폐수로를 활용한 소수력 발전용 수차 설계에 대한 시뮬레이션 결과 기존 헬리컬 수차보다 중심층을 두고 중심층과 가까울수록 마찰 면을 넓힌 수차의 경우 1.82 m/s에서 약 38%, 2.51 m/s에서 약 54%의 전력 생산을 높일 수 있는 것을 확인하였고 이는 관로에서의 유속은 관로 표면 저항이 없는 중심부의 유속

이 발전량에 많은 영향을 미치고 있어서 수차 날개는 중심부에 마찰 면적을 넓혀야 하는 것을 확인할 수 있었다.

또한 기존의 헬리컬 수차에 중심판을 설치하고 날개의 꼬임을 없애면 마찰 면이 넓은 중심부 날개 표면 스트레스를 줄이고 날개 날에 토크를 집중시키는 효과가 있어 수차 내구성이 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 본 논문에서는 저유량이지만 상시 일정 유속의 방출수를 가지고 있는 곳에서 에너지를 회수하기 위해 기존 버려지고 있는 양식장 폐수를 마이크로수력 발전을 통해 에너지 하베스팅이 가능함을 확인하였으며, 이것은 양식장에 24시간 순환수 공급을 위한 펌프 가동 등 매우 높은 전력 소비의 일정 부분을 해소하는 효과를 기대할 수 있다.

ORCID

Chung Hyeok Kim

<https://orcid.org/0000-0003-2694-0431>

REFERENCES

- [1] Y. S. Park, K. J. Kim, and B. D. Youn, *J. Korea Inst. Struct. Maint. Insp.*, **21**, 126 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.11112/jksmi.2017.21.6.126>]
- [2] W. S. Park, *The Magazine of Korean Solar Energy Society*, **3**, 11 (2004).
- [3] I. H. Jee and S. J. Kang, *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, **65**, 428 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2016.65.3.428>]
- [4] D. Borkowski and T. Węgiel, *IEEE Trans. Energy Convers.*, **28**, 452 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2013.2247605>]
- [5] H. G. Kim, C. R. Lee, B. Kim, J. E. Lee, and E. M. Jo, *Korean Soc. Mech. Technol.*, **18**, 680 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.17958/ksmt.18.5.201610.680>]
- [6] S. C. Kim, B. G. Choi, C. H. Woo, S. H. Jang, D. J. Kim, and S. W. Kim, *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, **68P**, 25 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEEP.2019.68.1.025>]