

초대형 선박 폐열 열전발전시스템 내부 열전달 현상 규명

서명진* · 홍성빈* · 김재관** · 정재호*†

Elucidation of Heat Transfer Phenomena in a Thermoelectric Generator of Super-Capacity waste Heat from Ship

Myeong Jin Seo*, Seong Bin Hong*, Jae Gwan Kim**, Jae Ho Jeong*†

Key Words : CFD(전산유체해석); TEG(열전발전); Heat Exchanger(열교환기); porous Media(다공성 물질)

ABSTRACT

As environmental regulations on exhaust gas are being enforced around the world, and marine transportation is gradually being strengthened. It is believed that various methods will be attempted to the emission regulations. The thermoelectric power generation system can convert thermal energy into electrical energy. It can be applied without limiting the functions of the equipment and parts in the existing ship and has the advantage of not incurring large maintenance costs, which have spread to ship applications. In order to optimize the design of the thermoelectric power generation system, the heat transfer phenomenon due to the internal position was analyzed through CFD, and cross-validation was carried out through comparison with actual experimental values. Before conducting CFD of the thermoelectric power generation system, By setting the porous domain for the fin was applied to TEM to derive accurate results while reducing the calculation load. Comparing the fin that was applied to TEM and porous domain CFD results confirmed that the fin and porous domain CFD results have a great agreement with a maximum error of less than 0.5%. After that, performed a CFD of the entire thermoelectric power generation system, analyzed the heat transfer phenomena in a thermoelectric generator, and based on the results, conducted a comparison verification with the experimental results. The result of the comparison indicates the maximum error in the cooling jacket and power generation. This is analyzed in the experimental and CFD adiabatic efficiency difference, the heat loss difference at different locations in the actual experiment. In this study establishes an analysis methodology through comparative verification of experiments and CFD, It is expected that can optimize the design of thermoelectric power generation systems through the established methodology.

1. 서 론

배기가스에 대한 환경 규제가 전 세계적으로 강력하게 시행되고 있으며, 이는 해상 운송으로도 강화되고 있는 추세이다. 이에 따라 국제해사기구(ICS)는 전 세계 선박 온실가스 배출량을 2050년까지 2008년 기준 CO₂ 배출량을 50%까지 감축하도록 규제한다. 이를 위해 새로 만드는 선박은 EEDI(Energy Efficiency Design Index, 선박에너지효율설계지수)를 적용해 2015년에는 기준선 대비 10%, 2020년에는 기준선 대비 20%, 2025년부터는 기준선 대비 30%의 에너지 효율을 개

선하도록 강제한다. 강화되는 조치로 인해 2026년경에는 규제 대상이 아니었던 현존선에 대해 EEXI(Energy Efficiency Existing Ship Index, 현존선에너지 효율지수)를 EEDI와 동일한 수준으로 적용한다.

배출규제를 만족시키기 위해서 다양한 방법이 시도될 것으로 사료되며, 다양한 방법 중 열에너지를 전기 에너지로 변환 할 수 있는 열전 발전 시스템의 적용이 다른 방법에 비해 기존 선박 내 기자재 부품의 본 기능 제한 없이 적용 가능하고 유지보수에도 큰 비용이 발생하지 않는 장점을 가지고 있어 선박 적용의 파급효과는 클 것으로 예상된다.^(1,2)

* 가천대학교 기계공학과(Gachon University Mechanical Engineering)

** 삼성중공업(Samsung Heavy Industries Co., Ltd.)

† 교신저자, E-mail : jaeho.jeong@gachon.ac.kr

열전 발전은 열에너지를 직접적으로 전기에너지로 변환시키는 기술이다. 열전모듈의 양단에 온도 차이가 발생할 때 내부의 전하가 이동하면서 전기를 발생시키며 열전 발전 사업은 산업 현장이나 내연기관에서 발생하는 폐열을 회수할 수 있어 친환경 아이টে치로 많은 주목을 받고 있다.⁽³⁻⁵⁾

선박의 메인엔진에서 생성되는 전체 에너지 중 엔진의 흡기부와 배기부에서 폐열이 약 40% 정도 발생한다. 대부분의 선박이 배기부에 스팀보일러를 설치하여 일부 폐열을 회수하고 있다. 그러나 스팀 보일러를 사용하더라도 폐열이 남고 이를 활용하기 위해 다양한 시스템들이 연구되고 있으며 흡기부와 배기부에 열전발전시스템을 적용하여 폐열을 회수한다면 선박의 효율을 향상시킬 수 있다. 열전 발전량을 극대화하기 위해서는 열교환기의 성능향상이 중요하다.⁽⁶⁾

본 연구에서는 초대형 선박에서 폐열을 회수하기 위해 설치하는 열전발전시스템에서 위치에 따른 열전달 현상을 수치 해석적 연구를 통해 분석하고 실제 실험을 통해 얻은 결과값과 전산유체해석을 통해 얻은 결과값의 비교를 통해 실험값에 대한 교차 검증을 진행하였다.

2. 수치해석 방법론

2.1 해석모델링

초대형 선박에 폐열 열전발전시스템의 전체적인 모델링을 Fig. 1에 도시하였다. 열전발전시스템의 내부에는 Cooling Jacket, Shield, Wire box로 이루어져 있으며, Shield 외각에 Fig. 2와 같은 핀이 부착된 열전 모듈을 Cooling Jacket 양면에 배치해, 총 144개의 열전 모듈이 3단에 나누어 배치

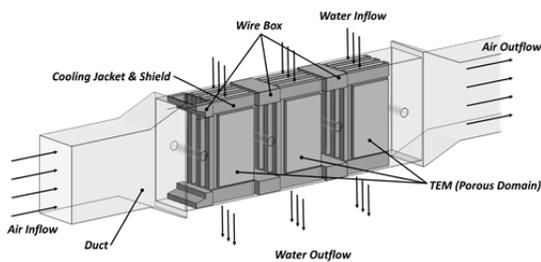


Fig. 1 Schematic of thermoelectric generator

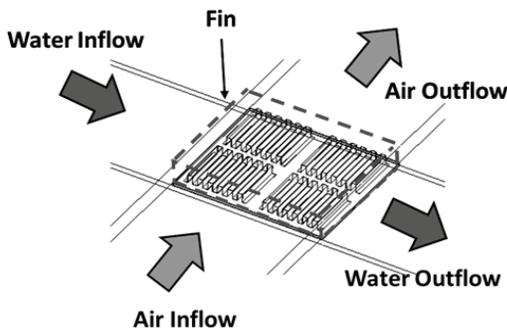


Fig. 2 Schematic of Fin Structure

Table 1 Boundary condition

Parameter	Value
Air Inlet	208.64°C, 13.17m/s
Water Inlet	19.92°C, 0.33m/s
Turbulence Model	k-ε
TEM Conductor Conductivity	1.1W/mk
FIN Material	Copper

되게 된다. 열전발전시스템으로 축 방향으로 고온의 유체가 흐르고 이에 수직방향으로는 냉각수가 흐르는 시스템으로 구성되어 있다. 열교환기의 상세 모델링 및 관련 세부 정보들은 특허 및 비밀 유지를 위해 정규화 하여 표시 하였다. 공기의 입구조건에 따른 폐열 열전발전시스템의 내부의 열 교환 현상을 확인하기 위해서 상용 소프트웨어인 ANSYS CFX를 이용하여 분석하였다.

2.2 경계조건

해석에 사용된 열전발전시스템의 경계조건을 Table 1에 나타내었다. 폐열 열전발전시스템의 고온의 공기의 온도와 유속은 208.64 °C와 13.171 m/s, 냉각수의 온도와 유속은 19.92 °C와 0.332 m/s로 입구조건을 주었으며 난류 모델은 k-ε모델을 사용하였다. 발전모듈의 모듈 반도체부분의 열전도도는 1.1 W/mk로 설정하였다. 격자는 약 6,000만개의 정렬격자로 구성하였다.

2.3 Porous domain을 활용한 fin modeling

폐열열전발전시스템의 해석 대상인 열전발전모듈의 해석 시간을 줄이면서 정확도 높은 결과를 도출하기 위해 porous domain을 설정하였다.⁽⁷⁻⁹⁾ Porous domain을 설정하기 위해서 Fig. 2와 같이 단일 열전발전모듈을 Table 2의 경계조건으로 공기의 입구 속도를 10 ~ 20 m/s로 2 m/s간격으로 총 5가지에 대해 전산유체해석을 진행 하였고 단일 열전발전 모듈에 대해 위치별 온도 차이에 대한 상세 해석을 진행하였다. 단일 열전발전모듈에 대한 해석결과를 바탕으로 해석 대상인 열전발전모듈의 Fin을 1 pitch로 나누어 porous domain 설정을 위한 해석을 진행하였다. 1 pitch fin의 해석에 대한 개략도를 Fig. 3에 도시하였다.

Table 2 Boundary Conditions for Single TEM

parameter	Value
Air Inlet	237.15°C, 10~20m/s
Water Inlet	20.15°C, 0.5m/s
Turbulence Model	SST
TEM Conductor Conductivity	1.1 W/mk

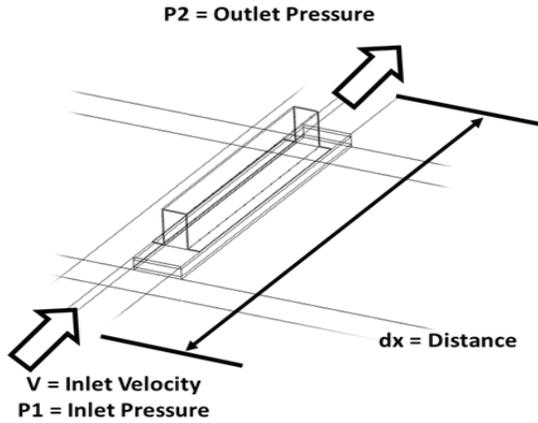


Fig. 3 Analysis for Porous Domain Input Parameter Calculation

Fig. 3에서 v 는 1 pitch fin 방향으로 유입되는 유체의 입구속도, P_1 는 1 pitch fin의 입구의 압력, P_2 는 1 pitch fin의 출구압력, d_x 입구압력과 출구압력의 측정 거리를 나타낸다.

Fig. 3의 해석 결과를 토대로 Porous domain의 투과율 계수(permeability)와 손실계수(loss coefficient)를 구하기 위한 식을 식 (1)에 나타내었다. 식 (1)에서 P_1 은 입구압력, P_2 는 출구압력, d_x 는 압력을 측정하는 위치 사이의 거리, k_{loss} 는 손실계수, v 는 입구 속도, k_{perm} 는 투과율 계수, ρ 는 공기의 밀도, μ 는 동점성 계수를 나타낸다.⁽¹⁰⁾

$$\frac{dP}{dx} = \frac{d(P_1 - P_2)}{dx} = -k_{loss} \cdot \frac{\rho}{2} v^2 - \frac{\mu}{k_{perm}} v \quad (1)$$

1 pitch fin에 대한 해석결과를 통해 porous domain의 투과율 계수와 손실계수를 식 (1)을 이용하여 계산하였다. 열전발전시스템의 열전발전모듈과 porous domain의 결과 값의 오차를 비교하기 위한 전산유체해석의 경계조건을 Table 3에 나타내었다. 난류모델은 fin과 porous domain 각각 SST 모델과 k- ϵ 모델을 사용하였으며 격자는 정렬격자로 구성하였다. 실제 열전발전모듈과 porous domain 해석을 통한 결과 값을 비교를 통해 열전발전모듈의 고온단의 오차가 0%, 저온단의 오차가 0.4%, 고온단과 저온단의 온도차의 오차가 0.07%, 압력강하의 오차가 0.03%로 porous domain의 정확도가 우수함을 확인하였다.

Table 3 Boundary Conditions for Porous Domain

parameter	Value
Air Inlet	241°C, 15m/s
Water Inlet	18.5°C, 5.25m/s
TEM Conductor Conductivity	1.1 W/mk

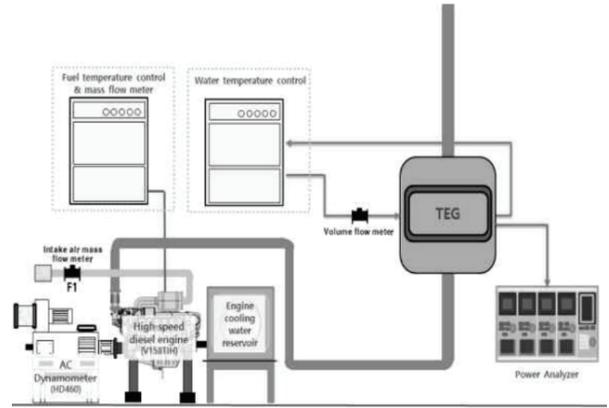


Fig. 4 Schematic of experimental setup

2.4 실험장치 및 방법

실험장치는 ‘그린십 기자재 시험인증센터’의 고속엔진 테스트베드를 활용하였으며, 실험에 사용된 분석장치 및 동력 계통의 실험장치 구성 개략도는 Fig. 4에 나타내었다.

최소 600초 이상의 엔진 안정화 이후 데이터 측정이 이루어 졌으며, 열전발전시스템에서 전력분석기를 사용하여 voltage 수치의 안정화 이후 발전되는 전력량을 측정하였다.

3. 수치해석 결과

3.1 열전발전시스템 내부 유동장 비교

열전발전시스템의 전산유체해석 결과를 바탕으로 열교환기의 내부 유동의 유선분포를 Fig. 5에 나타내었다.

이를 통해 열전발전시스템의 Shield와 wire box에 의한 유속의 증가를 확인할 수 있었다. 열교환기의 디퓨저와 노즐의 전후단에서와 wire box와 steam blower 후단에서 유동 박리가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이때 발생한 유동 박리에 의해 유속이 저하 되는 현상이 나타났다.

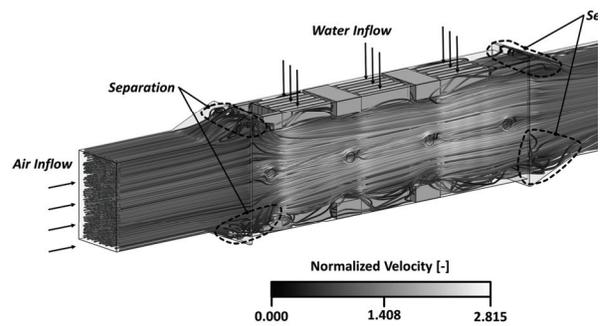


Fig. 5 3D-Streamline distribution of thermoelectric generator

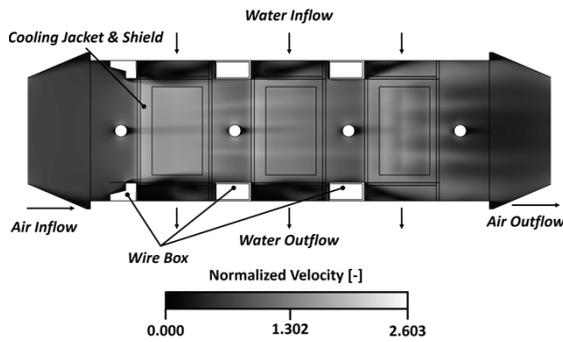


Fig. 6 Velocity distribution of thermoelectric generator

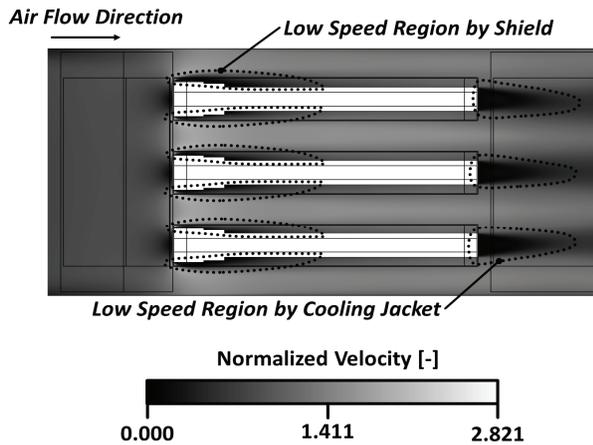


Fig. 7 Velocity distribution of thermoelectric generators vertical direction

열전발전시스템 내부의 유선분포를 토대로 벽면으로부터 40mm 지점의 cooling jacket 사이의 내부 평면 유동장을 Fig. 6에 나타내고, 1단 cooling jacket에 수직 단면에 대한 유동장을 Fig. 7에 나타내었다. 유선분포에서와 마찬가지로 평면 유동장에서 디퓨저, 노즐, wire box 전, 후단 및 steam blower 후단에 유동박리 현상으로 인해 유속이 0에 가까운 저유속 구간이 발생하는 것을 확인하였다.

수직 단면에 대한 유동장에서 shield 및 cooling jacket에 의해 유동박리 현상이 발생하고 이로인해 cooling jacket 하단에 유속이 0에 가까운 저유속 구간이 생기게 된다. 저유속 구간에서 비교적 높은 fouling이 생성되게 되고 이는 열전발전모듈에 영향을 미쳐 열전발전성능이 저하가 될 것으로 예상된다.

3.2 열전발전시스템 내부 온도장 비교

열전발전시스템에서 벽면으로부터 40mm 지점의 내부 온도장을 Fig. 8에 나타내었다. 정규화된 1의 고온 유체가 열전발전기 안으로 유동할 때 열전발전기 상단에서 0.987, 1단 열전발전모듈을 통과 후 0.869, 2단 열전발전모듈을 통과

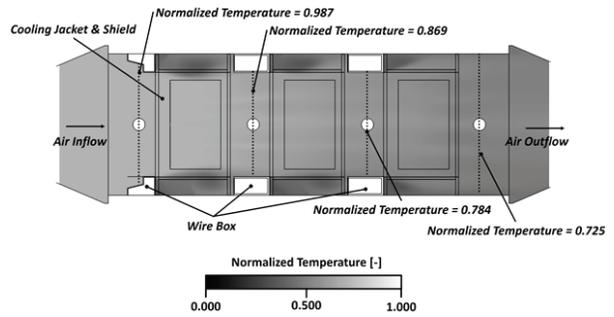


Fig. 8 Temperature distribution of thermoelectric generator

후 0.784, 3단 열전발전모듈을 통과 후 0.725로 열전발전모듈 1단을 통과 할 때마다 약 0.9의 온도가 감소함을 확인할 수 있었다.

Wire box에서는 1단에서 고온 유체에 의해 최대 0.968의 고온을 나타내고 2단, 3단에서는 각 약 0.799, 약 0.766을 나타내어 고온의 온도가 유입되는 상단에서 가장 큰 온도를 나타내고 cooling jacket을 통과할수록 고온의 유체의 영향을 상대적으로 적게 받는 것을 확인 할 수 있었다.

3.3 열전발전시스템 내부 압력 강하 비교

열전발전시스템에서 벽면으로부터 40mm 지점의 내부 압력장을 Fig. 9에 나타내었다. 압력은 입구조건에 따라서 열전발전시스템 전단에서 최대 0.977에서 cooling jacket 한 단을 통과할 때마다 감소해 열전발전시스템 하단에서 최소 -0.016의 압력감소가 발생했다.

유체의 흐름에 대해서 Wire Box에 의한 유로단면적 이 감소해 처음으로 압력 변화가 발생하였고 이어서 2단, 3단 Cooling Jacket에 의한 영향으로 압력 변화가 연속적으로 발생했다.

1단 Cooling Jacket 과 3단 Cooling Jacket 전후에서 각각 약 200 Pa의 압력 강하가 일어난 반면 2단 cooling jacket의 전후에서는 약 100 Pa의 압력 강하로 1단 3단에서 2단에 비해 약 2배 높은 압력 강하가 발생하는 것을 확인하였다.

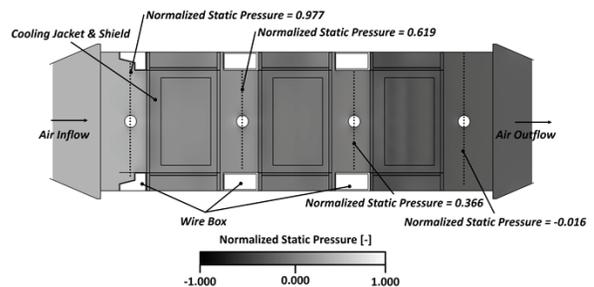


Fig. 9 Pressure distribution of thermoelectric generator

3.4 열전발전시스템 열전모듈 고온단 저온단 온도 비교

열전모듈의 고온단의 평균온도는 108.34 °C 이고, 그 외 cooling jacket 면의 평균온도는 76.66 °C이다. 열전모듈에서 배기덕트와 맞닿은 1단 cooling jacket에서 비교적 많은 공기유량으로 인해 2단, 3단 cooling jacket에 비해 상대적으로 높은 온도를 보이며 열전모듈에서 최대 약 50 °C의 온도차를 보이는 것을 확인하였다.

열전모듈의 저온단의 평균온도는 43.23 °C이다. 고온단과 동일하게 1단 cooling jacket에서 비교적 많은 공기유량으로 인해서 상대적으로 높은 온도를 보이며, 후단으로 갈수록 고온 유체의 온도가 감소하게 되어 3단 cooling jacket에서는 최저 33.8 °C의 온도를 보이는 것을 확인하였다.

3.5 열전발전시스템 전산유체해석 실험 비교 검증

상기 전산유체해석을 통해 해석한 열전달 현상을 실제 실험결과와 비교검증에 대해서 Table 4에 요약하였다. 실험과 전산유체해석 결과를 비교 검증 시 오차율은 공기의 출구온도에서 실험 164.64 °C, 전산유체해석 177.81 °C로 오차율은 10.0 %, cooling jacket에서 실험 44.20 °C, 전산유체해석 36.94 °C로 오차율은 16.42 %, 발전량은 실험 159.41 W 전산유체해석 188.88 W로 오차율은 18.49%로 오차율이 가장 크게 발생하였다.

오차가 발생하게 된 원인으로 첫째, 전산유체해석시에는 100 % 완전단열이 가능하나 실제 실험시에는 단열제의 단열효율이 100 %가 되지 않아 열량이 손실된다. 둘째, 실제 실험장비의 입출구 챔버와 유로 하나하나 사이에서 열손실이 발생한다. 셋째, 전산유체해석을 위한 격자 구성과정에서 정렬 격자 구성을 위해 형상 단순화 과정에서 실제 실험장비와의 차이에 의해 오차가 발생한다. 넷째, 실험 시 온도측정장치의 부착 조건으로 인해 전산유체해석과의 오차가 발생한다는 점으로 오차의 원인을 분석하였다.

Table 4 Summary of CFD and Experimental Validation

Parameter	Experiment	CFD	Error
Air Inlet Temp	208.64 °C	208.64 °C	0.00 %
Air Outlet Temp	161.64 °C	177.81 °C	10.00 %
Air Differential Temp	47 °C	30.83 °C	34.4 %
Air Average Temp	185.14 °C	193.23 °C	4.37 %
Water Inlet Temp	19.92 °C	19.92 °C	0.00 %
Water Outlet Temp	25.30 °C	23.14 °C	8.53 %
Water Differential Temp	5.38 °C	3.22 °C	40.1 %
Cooling Jacket	44.20 °C	36.94 °C	16.42 %
Power generation	159.41 W	188.88 W	18.49 %

4. 결 론

본 연구에서는 초대형 선박 내 열전발전시스템에서 위치에 따른 열전달 현상을 전산유체해석을 통해 고찰하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 열전발전모듈에 대한 porous domain을 설정하여 전산유체해석의 시간을 줄이며 최대 오차가 0.4 % 미만으로 정확도 높은 결과를 도출하였다.
- 2) 전산유체해석의 속도장 Fig. 5~7를 통해 열전발전시스템 내부의 유동이 디퓨저, 노즐, cooling jacket에 의한 유동박리 현상이 발생함을 확인하였으며, 이러한 저유속 구간에서 발생하는 fouling 및 유속 감소로 인한 열전발전성능 저하를 확인하였다.
- 3) 전산유체해석의 온도장 Fig. 8를 통해 열전발전시스템 내부 구조물에 의한 온도 변화가 열교환기 시작 부분 1에서 0.725로 감소함을 확인하였다.
- 4) 전산유체해석의 압력장 Fig. 9를 통해 열전발전시스템 내부의 압력강하에 대해 확인하였으며 cooling jacket의 1단 3단에서 2단에 비해 약 2배 높은 압력강하가 발생하는 것을 확인하였다.
- 5) 열전발전기 열전모듈의 고온부 저온부의 온도차이를 확인하였으며 열교환기 상류에서 상대적으로 많은 공기 유량으로 인해 하류보다 높은 온도를 유지하는 것을 확인할 수 있었다.
- 6) 열전발전시스템의 열전달 현상을 전산유체해석을 통해 분석하고 실제 실험의 실험값에 대한 교차검증을 진행하였으며 cooling jacket에서 16.42 %, 발전량에서 18.49%의 최대 오차가 발생하였다. 오차의 발생 원인으로서는 실제 실험 시에 단열제의 단열효율이 100 %가 되지 않아 손실되는 열량으로 인해 오차가 발생한 것으로 분석하였다.

본 연구에서 최종적으로 실험과 전산유체해석의 비교검증을 통한 해석 방법론을 수립하였으며 수립한 방법론을 통해 열전발전시스템의 설계를 최적화 할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 연구한 과제입니다.

(No. 2021202080023B) (No. 20224000000140)

본 연구는 2020년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 2020R1G1A1099560)입니다.

본 연구는 LG이노텍의 열전발전모듈을 지원받아 연구한 과제입니다.

References

- (1) Evert A. Bouman, Elizabeth Lindstad, Agathe I. Riialand, Anders H. Strømman, 2017, "State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review" Vol 52, Part A, pp. 408-421.
- (2) DNV-GL. 2019. Maritime Forecast to 2050(Energy transition outlook 2019). pp. 24.
- (3) Jae Kwang Lee, Jin Won Kim, Jea Young Lee, 2016, "Current Status of Thermoelectric Power Generation Technology", Applied Chemistry for Engineering Vol. 27, No. 4, pp. 353~357.
- (4) yiping Wang, Shuai Li, Xu Xie, Yadong Deng, Xun Liu, Chuqi Su, 2018, "Performance evaluation of an automotive thermoelectric generator with inserted fins or dimpled-surface hot heat exchanger", Applied Energy, Vol 218, pp. 391~401.
- (5) Jae-Hyeong Seo, Kunal Sandip Garud, Moo-Yeon Lee, 2021, "Grey relational based Taguchi analysis on thermal and electrical performances of thermoelectric generator system with inclined fins hot heat exchanger", Applied Thermal Engineering Vol. 184.
- (6) Fankai Meng, Lingen Chen, Yuanli Feng and Bing Xiong, 2017, "Thermoelectric generator for industrial gas phase waste heat recovery," energy, Vol. 135, pp. 83~90.
- (7) Weiping Wang, Jinxing Guo, Shuwen Zhang, Jian Yang, Xiangting Ding, Xuehua Zhan, 2014, "Numerical study on hydrodynamic characteristics of plate-fin heat exchanger using porous media approach", Computers & Chemical Engineering, Vol. 61, pp. 30~37.
- (8) A. Abouei Mehrizi, M. Farhadi, K. Sedighi, M. Aghajani Delavar, 2013, "Effect on fin position and porosity on heat transfer improvement in a plate porous media heat exchanger", Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, Vol. 44, pp. 420~431.
- (9) Nikolai Efimov-Soini, Mikhail Kiauka, Aleksey Borovkov, 2020, "Method of finned pipe heat exchanger modelling using porous medium", proceedings of the 7th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering.
- (10) ANSYS Inc., ANSYS CFX Theory Guide, 14.0, 2011.