

# 진공 및 단열재를 적용한 열전지의 단열 및 작동시간에 대한 연구

김찬후<sup>1</sup>, 김창수<sup>2</sup>, 박성영<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 일반대학원 기계공학과, <sup>2</sup>공주대학교 미래자동차공학과

## Study on Thermal Insulation and Operating Time of Thermal Battery using Vacuum and Insulators

Chan-Hoo Kim<sup>1</sup>, Chang-Su Kim<sup>2</sup>, Sung-Young Park<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kongju National University

<sup>2</sup>Department of Future Automotive Engineering, Kongju National University

**요약** 최근 발사 거리를 증대시키기 위하여 유도무기 전원장치의 작동시간 증대가 요구되고 있다. 단시간에 높은 전력 발생과 장시간 보관의 장점을 가진 열전지가 일반적으로 유도무기의 전원 장치로 사용되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 유도 무기의 작동시간을 증대시키기 위해서 전원 공급장치인 열전지의 단열성능을 향상시켜 작동시간을 증대시키고자 한다. 단열부의 내부 소재와 진공화를 변수로 설정하여 해석 모델을 구성하였다. 전해질의 평균온도가 발열을 시작해서 450°C 이하가 되는 시점까지 비정상 열전달 해석을 수행하였다. 해석결과, 진공과 단열재를 동시에 적용한 모델이 가장 우수한 작동시간을 나타내었으며, Model VIT는 기존 모델 대비 최대 8.3%(2분 11초)의 작동시간 증가를 나타내었다. 기존 열전지 대비 Model V와 Model VI의 열전달량은 측면과 하면에서는 감소하였으나, 상면에서는 각각 21%와 14%씩 증가하였다. 이는 Model V와 Model VI의 측면과 하면의 단열은 개선되었지만, 측면과 하면에서 방출되지 못한 열이 상면으로 전이되어 방출열량이 증가한 것으로 판단된다. 단위면적당의 열전달량에 대한 분석을 통하여, 하우징 상부의 추가적인 단열이 필요함을 확인하였다. 추가적인 상부 단열적용을 통하여 Model VIT는 기존 열전지 대비 측면 70%, 하면 92%, 상면 51%의 단열성능이 향상되었다. 이러한 결과는 열전지의 단열성능과 작동시간 개발에 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

**Abstract** Recently, increasing the operating time of the power supply of a guided weapon has been necessary to increase the launch distance of the weapon. Notably, thermal batteries are frequently used as a power supply of the guided weapon because of their high power generation in a short period of time and convenient long-term storage. Relatedly, this research studied increasing the operating time of a thermal battery by improving the insulation performance in the battery. In particular, internal materials and vacuum insulation were selected as simulation variables, and computational models of the thermal battery were constructed to study and improve the insulation performance. Subsequent to the construction of the models, an unsteady heat transfer simulation of the battery was performed from the start to the finish times of heat generation in the battery as the battery electrolyte temperature reached 450°C or lower. The simulation showed that the model with both vacuum and insulation in it had the longest operating time, and the operating time of the model VIT improved by up to 8.3% compared to the base model. In addition, compared to the base model, the heat transfer of models V and VI decreased on the side and bottom but increased on the top surface of the models by 21% and 14%, respectively. Moreover, the respective insulation of the side and bottom of models V and VI improved, but it was judged that the heat emitted from the side and bottom was transferred to the top surface of each model, increasing the amount of heat emitted through the top surface. Additionally, the analysis of heat transfer per unit area of each model confirmed that additional insulation of the upper part of the battery housing was required. Notably, after applying additional upper insulation, the insulation performance of the model VIT improved by 70%, 92%, and 51% on the side, bottom, and top of the model, respectively. Hence, it is believed that the results of this research can be used as basic data in the development of insulation performance and operating time of a thermal battery.

**Keywords** : Thermal Battery, Heat Transfer Rate, Operating Time, Vacuum, Insulators

본 논문은 방위산업기술지원센터의 지원을 받아 수행되었음.

\*Corresponding Author : Sung-Young Park(Kongju National Univ.)

email: sungyoung@kongju.ac.kr

Received May 19, 2022

Revised June 21, 2022

Accepted July 7, 2022

Published July 31, 2022

### 1. 서론

최근 드론 및 항공 플랫폼을 활용한 무기 체계에 관한 연구가 활발히 진행 중에 있으며, 무인기를 이용하여 목표 대상을 원격으로 타격이 가능한 유도 무기 체계가 각광받고 있다[1,2]. 이는 군인들의 인명 피해를 최소화 하며, 주야간 상관없이 작전이 가능하다는 장점으로 인하여 여러 전장에서 매우 높은 성과를 거두고 있다[3]. 이에 따라, 무인기에 장착되는 유도 무기체계의 수요가 높아지고 있다. 최근 유도 무기 추진체의 출력 및 지속시간이 향상됨에 따라 수십 킬로미터부터 수백 킬로미터까지 멀리 있는 목표대상에 타격이 가능하게 되었다. 또한, 증가된 발사 거리만큼 유도 무기 전원장치의 작동시간 증대도 요구되고 있다. 주로 유도 무기용 전원 공급 장치로 열전지가 사용되고 있으며, 이는 전해질이 평상시에 고체 상태로 있어, 장시간 보관해도 성능변화가 매우 작으며, 수 초 이내에 높은 출력을 얻을 수 있기 때문이다 [4,5]. 열전지는 고온의 열로 인해 전해질이 활성화되는 비축형 전지이며, 가혹한 저장 환경 및 요구조건을 만족시키기 위한 1차 전지의 일종이다[6]. Fig. 1은 열전지의 내부구조를 나타낸 것으로 집전체, 양극, 전해질, 음극, 열원, 집전체 순서로 구성된 Unit cell이 여러 층의 적층 구조로 이루어져 있다.

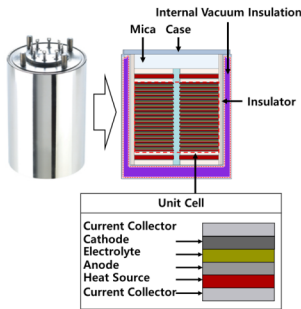


Fig. 1. Thermal battery unit cell structure

열전지는 상온에서 이온 전도도가 없는 고상 무기염 전해질을 화학 열원을 통해 순간적으로 용융점인 450℃ 이상으로 온도를 높이게 된다. 이 때, 고체를 액체 상태로 녹여 전해질이 높은 이온 전도성을 가지게 되어 음극과 양극에 이온전달이 발생하게 된다[7]. 하지만, 용융된 전해질의 온도가 450℃ 이하로 낮아지면 응고가 시작되면서 이온 전달량이 감소하게 된다[8,9]. 이온 전달량이 감소하면 전기 발생이 줄어들어 전지로서의 수명을 다하게 되므로 전해질의 온도를 용융점 이상 유지하는 것이

중요하다.

따라서, 본 연구에서는 유도장치의 전원 공급장치인 열전지의 단열성능을 향상시켜 작동시간을 증대시키고자 한다. 전해질의 온도가 450℃ 이상 유지하는 시간을 증가시키기 위해 단열성능이 뒷받침 되어야 한다. 단열성능을 향상시키기 위한 방법으로는 단열재의 소재 및 형상 변경이 있으나, 유도 무기 추진체의 특성상 제한적인 내부구조로 인해 형상 변경은 어려움이 있다[10]. 따라서, 동일 두께대비 단열성능이 우수한 소재가 적용해야 한다. 최근 건축용 단열재 소재 개발에 의해 동일 두께 대비 단열성능이 5배 이상 높은 진공 단열재에 관한 연구가 진행 중이다[11-13]. C. H. Kim & J. H. Choi 등은 진공 단열재를 열전지에 적용하여 단열성능에 따른 열전지 작동시간 증대에 관한 해석적 연구를 진행하였으며[14], J. H. Choi 등은 열전지 작동시험과 열전달 해석을 통해 열전지 작동성능 해석 기법 확립에 관한 연구를 진행하였다[15]. 본 연구에서는 선행된 연구들을 바탕으로 열전지의 단열성능 향상을 위해 기존 열전지의 일반 단열재를 동일 두께의 단열성능이 뛰어난 진공 단열재로 적용하여 해석을 진행하였다. 연구절차는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 해석용 모델 설계, 진공 물질 실험용 모델 제작, 하우징 표면 온도측정 실험, 진공 단열 물성 계산, 열전지 단열성능 해석 및 결과 고찰 순서로 진행하였다. 최종적으로, 진공 단열부의 열전도도 측정 및 계산을 작동성능 해석에 적용하여 단열성능을 비교 분석하고자 한다.

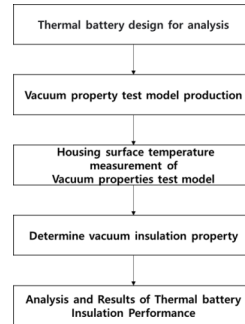


Fig. 2. Process chart of research

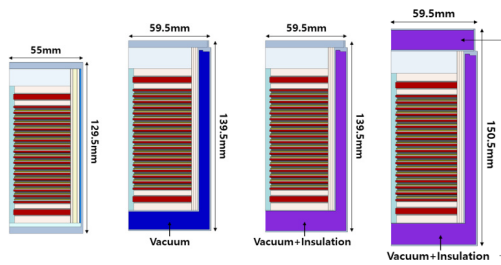
### 2. 본론

#### 2.1 해석용 모델 및 진공물성치 실험모델

Fig. 3은 열전지 단열성능 비교를 위한 열전지 해석 모델 4종을 보여주고 있다. Model B(Base Model)는 기

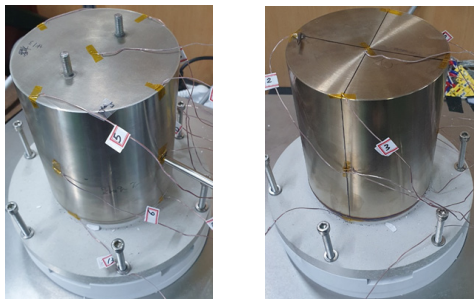
존 열전지의 모델로 외부 하우징 반지름은 55 mm, 높이는 129.5 mm이다. 상면, 측면 및 하면의 단열은 적층구조의 단열재로 이루어져 있다. Model V는 0.1 MPa의 진공 단열부를 측면과 하면에 적용한 모델로 내벽 두께는 1 mm를 적용하였다. 진공 단열부 구성으로 인해 외부 하우징의 반지름은 59.5 mm, 높이는 139.5 mm로 Base Model 대비 증가하였다. Model VI는 Model V의 외부형상과 동일하지만, 진공 단열부에 단열재를 추가한 모델로, 내벽두께는 0.5 mm이다. Model VIT는 Model VI 모델과 외부하우징의 직경은 동일하나, 상부 진공 단열부를 추가한 모델로 높이가 150.5 mm 증가하였다.

따라서, 열전지 외부 하우징의 표면적은 Model B 대비 Model V, VI, VIT에서 상면은 17.53%, 하면은 17.03% 증가하였다. 측면의 면적은 Model V 및 VI는 21.74%, Model VIT는 22.51% 증가하였다. 이때, 증가된 면적은 열전달량을 증대시켜 단열성능을 저해 할 수 있다.



(a) Model B (b) Model V (c) Model VI (d) Model VIT  
Fig. 3. Thermal battery model

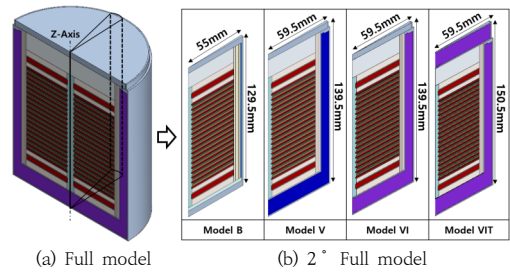
Fig. 4는 Model V와 Model VI의 실험용 모델로 진공단열부의 진공상태에서의 표면온도를 측정하기 위해 제작하였다. Model V-EXP는 진공 단열부에 0.1 MPa의 진공 압력을 가압하였으며, Model VI-EXP는 Model V-EXP와 구조는 동일하지만, 진공 단열부에 단열재를 추가한 모델이다.



(a) Model V-EXP (b) Model VI-EXP  
Fig. 4. Housing surface temperature measurement device

## 2.2 열전지 단열성능 해석조건 및 하우징 표면 온도 측정 방법

Fig. 5는 해석시간을 단축하기 위하여 Full model을 2° 모델로 모델링하여 해석을 수행하였다. 2° 모델은 Z축을 기준으로 Axially Periodic Boundary Condition을 적용하였다[16]. 열전지 단열 성능 해석에 적용된 소재의 물성치는 각종 문헌을 참고하였으며, Table 1과 같다[17].



(a) Full model (b) 2° Full model  
Fig. 5. Axially periodic boundary condition of thermal battery

Table 1. Material properties of thermal battery

Solid Part	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Thermal Conductivity [W/m·K]	Specific Heat [J/kg·K]
Case	7,930	21.50	500.0
Insulator	1,400	0.09	979.7
Current collector	8,000	21.50	500.0
Electrolyte	2,170	1.00	857.0
Heat source	3,082	21.90	745.3
Cathode	1,091	1.00	480.0
Anode	3,369	5.50	480.0
Mica	2,600	0.44	880.0

열전지의 열전달 해석을 위하여 상용소프트웨어인 STAR-CCM+를 사용하였다. STAR-CCM+내의 Mesher 기능을 사용하여 약 68,000개의 계산격자를 생성하였으며, 계산 격자는 Polyhedral이고, Prism layer는 3개를 적용하였다. 복사 물성은 흡수율 0.1, 방사율 0.8, 굴절률 0.1을 적용하였고[18], 진공단열의 복사 모델은 Gray thermal radiation을 적용하였다. 적용된 계산격자 및 조건은 Table 2와 같다.

Table 2. Computational grid and initial conditions

Properties	Value	Unit
Mesh Type	Polyhedral	-
Mesh Base	3	mm
Number of Prism Layers	3	-
Prism Layer Thickness	0.3	mm
Initial Temperature	26	℃

Fig. 6은 열전지 표면 온도 측정 실험장치구성을 나타낸 그림으로, 실험장치 구성은 Thermocouple, Data logger, Heat source controller, Vacuum pressure gage, Vacuum pump 등으로 구성되어 있다. 열원을 450℃의 일정 온도로 제어하였으며, 진공펌프로 진공 단열부의 내부 진공압력을 0.1 MPa로 유지하였다. 열전지 모델별 외부 하우징 중심(Point A)에서 표면온도를 측정하였다. 진공 단열부의 열전도도를 예측하기 위하여, 측정된 표면온도를 열해석의 목표 값으로 설정하였다.

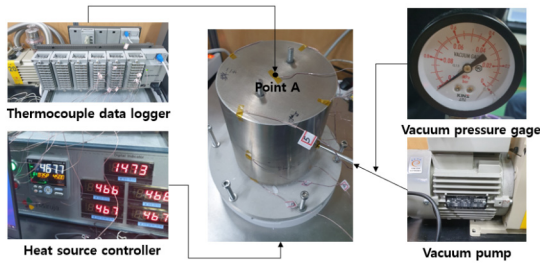


Fig. 6. Housing surface temperature measurement device

### 2.3 진공단열 물성치 결정

Fig. 7은 외부 하우징 중심점인 Point A에서의 온도 측정결과를 보여주고 있다. Model V-EXP는  $t=4,200$ sec 이후 71.71℃로 수렴하였으며, Model VI-EXP는  $t=4,400$ sec 이후 44.4℃로 수렴하였다.

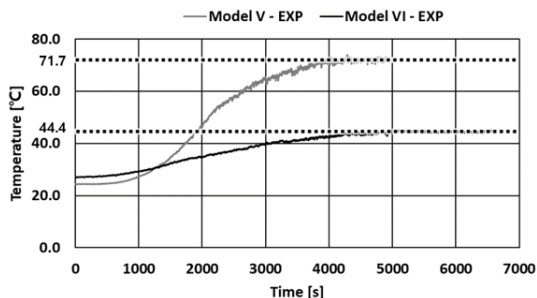


Fig. 7. Measured housing surface temperature at point A

본 연구에서는 열전지 진공단열부의 열전도도를 해석적인 접근을 통하여 획득하였다. 열전도도 계산을 위한 하우징 표면의 기준 온도는 Fig. 7의 온도측정 결과를 해석의 목표조건으로 적용하였다. Fig. 8은 해석용 열전지 모델의 내부구조와 계산격자를 보여주고 있다. 정상상태 열전달을 계산하기 위해 약 380만개의 계산격자가 적용되었다. 해석은 측정된 표면온도가 계산되는 열전도도를 보간법으로 추정하였다.

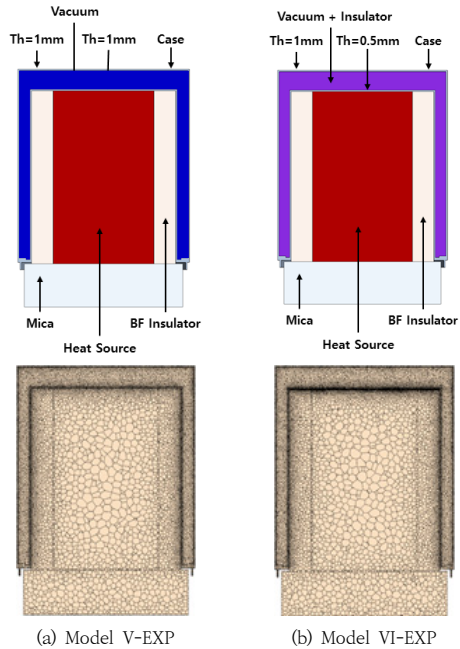


Fig. 8. Thermal battery model and computational grid

Fig. 9는 진공단열부에 다양한 열전도도를 적용하였을 때 나타나는 Point A의 온도 결과이다. Model V-EXP 및 Model VI-EXP에서 목표온도를 예측하는 열전도도는 각각 0.0323 W/m·K 및 0.0104 W/m·K로 계산되었다.

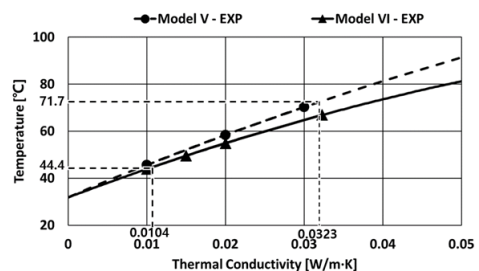


Fig. 9. Thermal conductivity calculation

### 2.4 단열성능 해석결과

단열재 적용 Model B와 진공 단열을 적용한 열전지의 단열 성능을 비교하기 위하여, 비정상 상태 열전달 해석을 수행하였다. 기존 열전지의 실험결과를 바탕으로, 전해질의 평균온도가 450℃ 이상이면 열전지가 정상적으로 작동하는 것으로 가정하였다[12]. Fig. 10은 각 모델별 전해질의 평균 온도가 450℃가 되는 시간을 해석한 결과이다. Model B는 기존 열전지 모델로 1,512 sec, Model V는 진공단열만 적용한 모델로 1,429 sec, Model VI는 진공 단열부 내 단열재를 삽입한 모델로 1,602 sec, Model VIT는 Model VI에 상부 단열을 보완한 모델로 1,639 sec 동안 작동하였다. Model B 대비 각각 -5%, 6%, 8% 작동시간이 증가하였다. Model V는 진공 단열부를 적용한 모델이지만, Model B 대비 작동시간이 -5% 줄어들어 단열성능이 저하된 것처럼 보이고 있다. 이는 Model V의 열전지 외부 하우징 표면적 Model B 대비 상면 17.53%, 하면 17.03%, 측면은 21.74% 증가하였기 때문에, 대류로 방출되는 열전달량이 증가되어 작동시간이 줄어든 것이다. 따라서, 총 증가된 표면적(21.68%) 대비 작동시간 감소량(5%)은 매우 작기 때문에 단열성능이 향상된 것으로 판단된다.

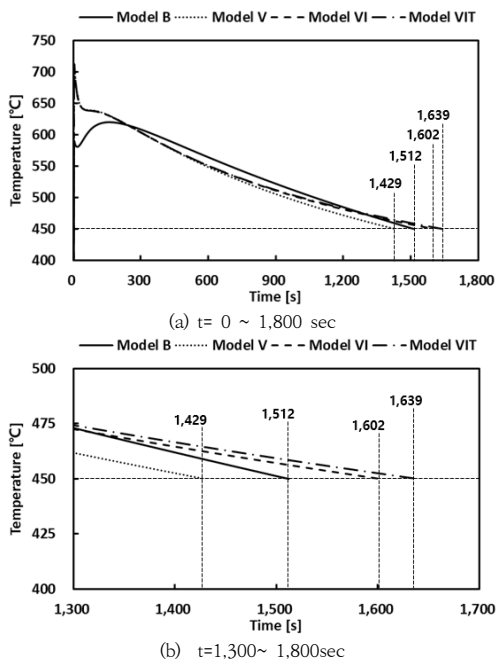


Fig. 10. Mean temperature of battery electrolyte

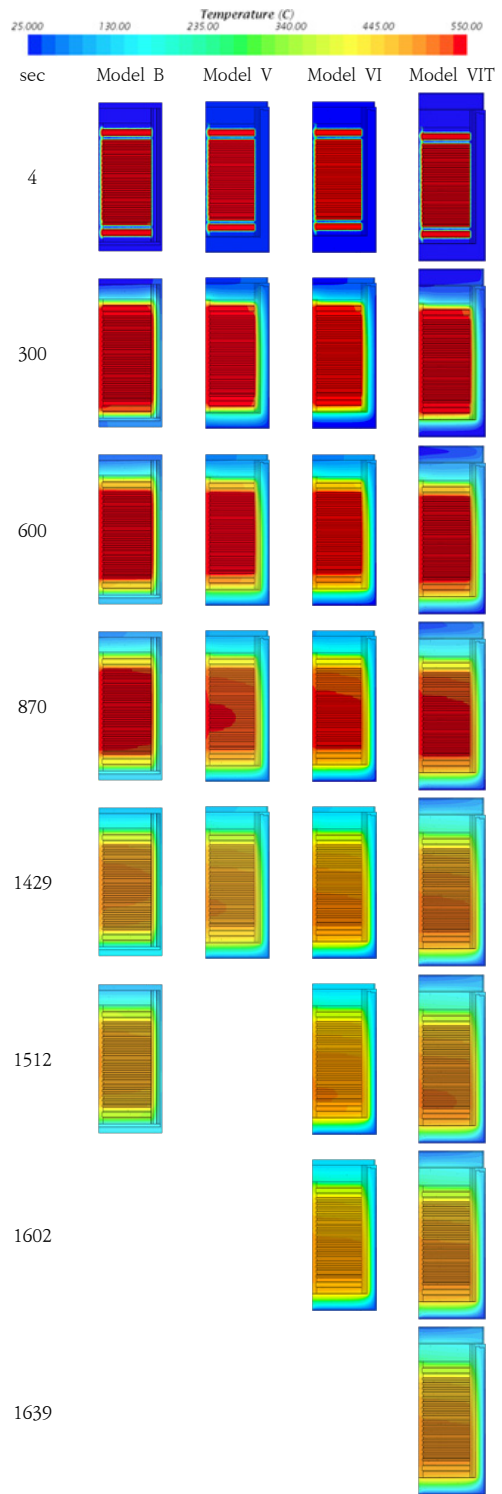


Fig. 11. Temperature distribution

Fig. 11은 열전지의 열 방출 특성을 분석하기 위해 전해질의 평균온도가 450℃ 이하가 되는 시점까지 열전지 내부 온도분포를 나타내었다. t=600 sec일 때, 내부 셀들의 온도가 450℃ 이상으로 유지되어 내부 단열재 및 구조물을 통해 측면 및 상하면으로 열전도가 발생하는 것을 확인할 수 있다. t=870 sec에서 내부 셀들의 온도분포가 Model V, Model VI, Model VIT 및 Model B 순으로 온도분포가 높은 것을 볼 수 있다. Model B의 내부온도 분포가 넓게 분포하여 단열성능이 가장 우수한 것과 같이 보이나, 외부 하우징 크기 및 내부 단열구조로 인하여 t=1,300 sec 이후에 열전지의 내부 온도분포가 Model VIT, Model VI, Model B, Model V 순서임을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 9(a)에서도 확인 가능한 부분으로 Model B의 전해질 평균온도가 t=600 sec일 때 가장 높았으나, t=1,300 sec 이후에 급격히 감소함을 보이고 있다. t=1,429 sec일 때, 열전지의 열 방출 특성 분석결과 Model B는 하우징 표면의 전체면(상면, 측면 및 하면)으로 열이 방출되어 내부 온도가 낮아진 것을 확인할 수 있다. Model V, VI는 상면 및 측면으로 열이 방출되고 있으며, 특히 상면으로 많은 열전달이 발생하고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 12는 작동시간 동안 방출되는 열량에 대한 상대 비교를 위해 열전지 하우징의 하면, 측면 및 상면에서의 열전달율을 나타낸 그래프이다. 하우징 전체 표면(상면, 측면 및 하면)의 열전달량 계산 결과, 상면과 하면 대비 면적이 큰 측면에서 가장 많은 열이 방출되고 있다. Model VIT는 상부 진공단열재의 적용으로 타 모델대비, 상면으로 방출되는 열전달율이 최소화되었다. 하면에서 Model B 대비 Model V, Model VI 및 Model VIT는 하부 진공 및 진공단열재 적용으로 인하여 열전달량이 감소하고 있음을 보여주고 있다. 또한, 상부와 하부에 진공단열재를 적용한 Model VIT가 타 모델 대비 가장 우수한 열전달량을 보여주고 있다.

Fig. 13은 열전지 하우징의 하면, 측면 및 상면에서의 작동시간동안 방출된 에너지량을 비교 분석하기 위하여 Fig. 11의 결과를 적분하여 나타내었다. Model B 대비 Model V는 열전달량이 측면 44%, 하면 67% 감소하였으며, 반대로 상면은 21% 증가하였다. Model VI는 열전달량이 측면 68%, 하면 89% 감소하였으며, 상면은 14% 증가했다. Model V와 Model VI는 하면과 측면의 단열을 보완했지만, 측면과 하면에서 방출되지 못한 열이 상면으로 방출되어, 상면에서 열방출량이 증가하였다. Model VIT는 Model VI에서 상부로 방출되는 열을 막기 위해 상부 단열을 보완한 모델로 Model B 대비 열전달량이 측면 70%, 하면 92%, 상면 51% 감소하였다.

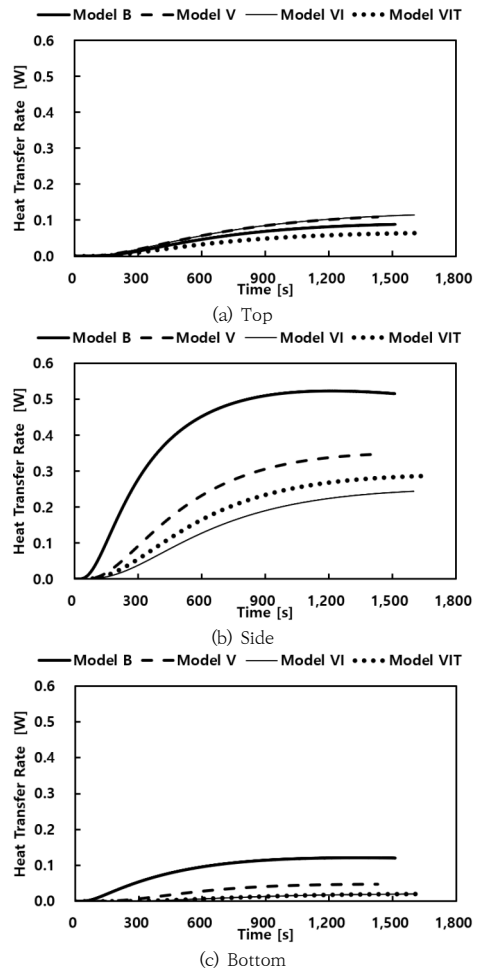


Fig. 12. Mean heat transfer rate

	Model B [J]	Model V [J]	Model VI [J]	Model VIT [J]
Top	230	281	264	112
Side	1821	1016	575	529
Bottom	403	130	40	31

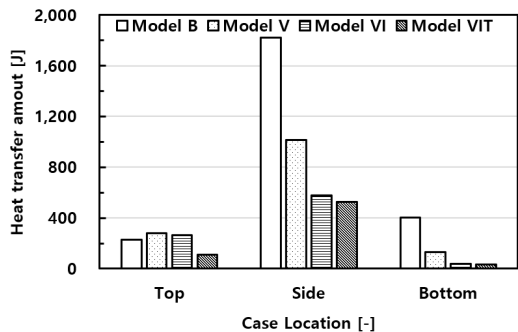


Fig. 13. Heat transfer amount of housing surface

Fig. 14는 각 면에서의 총 열전달량을 나타내고 있다. 모든 열전지 모델에서 측면으로 가장 많은 열이 방출되는 것으로 나타나나, 이는 측면의 면적이 가장 넓기 때문이다. 방출되는 열량의 특성을 분석하기 위하여, 단위면적당 방출열량을 Fig. 13에 나타내었다. Model B의 단위면적당 열전달량은 하면 7.62 MJ/m<sup>2</sup>, 측면 7.35 MJ/m<sup>2</sup>, 상면은 4.36 MJ/m<sup>2</sup>이다. 하면, 측면 및 상면 순서로 단위면적당 열전달량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이 결과를 보면, Model B는 측면과 하면의 개선이 필요한 것을 알 수 있다. 하면과 측면 단열을 보완한 모델인 Model V와 Model VI는 각각 하면 2.11, 0.65 MJ/m<sup>2</sup>, 측면 3.49, 1.97 MJ/m<sup>2</sup> 및 상면 4.78, 4.49 MJ/m<sup>2</sup>로 개선되었다. 이는 Model V와 Model VI가 Model B 대비 각각 측면 52%와 74%, 하면 72%와 91%로 급격한 개선을 보이고 있다. 하지만, 여전히 상면으로 4.78, 4.49 MJ/m<sup>2</sup>의 많은 단위면적당 열전달량이 방출되고 있다. 단열성능 극대화를 위하여 상면에도 진공단열재를 추가한 모델인 Model VIT는 하면 0.5 MJ/m<sup>2</sup>, 측면 1.68 MJ/m<sup>2</sup>, 상면 1.97 MJ/m<sup>2</sup>으로 Model B 대비 93%, 77%, 56% 감소되어 계산 모델 중 가장 뛰어난 단열성능을 보였다.

	Model B [MJ/m <sup>2</sup> ]	Model V [MJ/m <sup>2</sup> ]	Model VI [MJ/m <sup>2</sup> ]	Model VIT [MJ/m <sup>2</sup> ]
Top	4.36	4.78	4.49	1.91
Side	7.35	3.49	1.97	1.68
Bottom	7.62	2.11	0.65	0.50

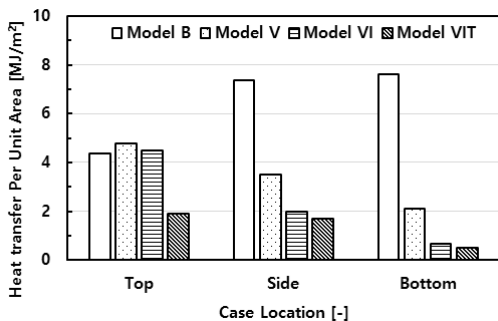


Fig. 14. Heat transfer per unit area

### 3. 결론

본 연구에서는 유도 무기의 작동시간 증대를 위해 전 원 공급장치인 열전지의 단열성능을 향상시켜 작동시간

을 증대시키고자 한다. 기존 열전지와 단열을 개선한 추가 모델들의 단열성능을 비교분석하기 위하여 열유동 해석을 수행하였다. 해석결과를 분석하여 열전지의 작동시간, 하우징 위치별 열전달량 및 면적당 방출 열전달량을 비교 분석하였다. 분석결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 기존 열전지의 단열성능을 향상시켜 작동시간을 증대하기 위하여 다양한 단열조건을 적용하여 열유동 해석을 수행하였다. 진공과 단열재를 동시에 적용한 모델이 가장 우수한 작동시간을 나타내었으며, Model VIT는 기존 모델 대비 최대 8.3%의 작동시간 증가를 나타내었다.
2. 기존 열전지 대비 Model V와 Model VI의 열전달량은 측면과 하면에서는 감소하였으나, 상면에서는 각각 21%와 14%씩 증가하였다. 이는 Model V와 Model VI의 측면과 하면의 단열은 개선되었지만, 측면과 하면에서 방출되지 못한 열이 상면으로 전이되어 방출열량이 증가한 것으로 판단된다.
3. 단위면적당의 열전달량에 대한 분석을 통하여, 하우징 상부의 추가적인 단열이 필요함을 확인하였으며, 추가적인 상부 단열적용을 통하여 Model VIT는 기존 열전지 대비 측면 70%, 하면 92%, 상면 51%의 단열성능이 향상되었다.

본 연구에서는 진공 및 단열재를 적용하여 열전지의 열적 특성을 개선하였다. 열전지의 단열과 작동성능에 대한 본 연구의 해석결과는 설계 및 개발의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 향후 해석된 모델을 바탕으로 성능이 향상된 진공단열 열전지를 제작하여 진공 단열부의 단열성능을 실험적 연구방법을 통해 연구를 진행할 계획이다.

### References

- [1] Z. Xiaoning, "Analysis of Military Application of UAV Swarm Technology", *2020 3<sup>rd</sup> International Conference on Unmanned Systems(ICUS)*, Harbin, China, pp.1200-1204, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICUS50048.2020.9274974>
- [2] J. H. Noh, K. K. Cho, S. J. Kim, W. S. Kim, J. S. Jeong, J. W. Sang, C. W. Park, M. S. Gong, "Development of application for guidance and controller unit for low cost and small UAV missile based on smartphone",

- The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol.45, No.7, pp.610-617, 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.7.610>
- [3] H. T. Kang, "Direction of Operation of ROKA RPA for Future Warfare", *Korea Institute for Defense Analyses*, Vol.35, No.1, pp.7-33, 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.22883/jdps.2019.35.1.001>
- [4] R. A. Guidotti & P. Masset, "Thermal Activated (Thermal) Battery Technology. Part I: An Overview", *Journal of Power Sources*, Vol.161, pp.1443-1449, 2006.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.06.013>
- [5] H. W. Cheong, "Status and Strategy of Thermal Battery Development", *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, Vol.22, No.7, pp.24-33, 2009.
- [6] J. H. Ji, "A Study on the Basic Model for Simulating Performance of Thermal Batteries", *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol.11, No.1, pp.102-111, 2008.
- [7] H. W. Cheong, S. H. Kang, K. Kim, J. H. Cho, B. Ryu & S. S. Baek, "Performance Analysis of Pyrotechnic Devices on the Reliability of Thermal Batteries", *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol.23, No.1, pp.116-123, 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.6108/KSPE.2019.23.1.116>
- [8] P. Masset, S. Schoeffert, J. Y. Poinso & J. C. Poignet, "LiF-LiCl-LiI vs. LiF-LiBr-KBr as molten salt electrolyte in thermal batteries", *J. Electrochem. Soc.*, Vol.152, No.2, pp.A405-A410, 2005.  
DOI: <https://doi.org/10.1149/1.1850861>
- [9] S. Fujiwara, M. Inaba & A. Tasaka, "New molten salt systems for high-temperature molten salt batteries: LiF-LiCl-LiBr-based quaternary systems", *J. Power Sources*, Vol.195, No.22, pp.7691-7700, 2010  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.05.032>
- [10] S. H. Kang, B. J. Park, C. N. Im, S. B. Cho, H. W. Cheong & J. Yi, "State of the Art and Research Trends on Electrode Materials of Thermal Batteries", *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, Vol.28, No.12, pp.765-770, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.12.765>
- [11] H. S. Jeon, H. J. Choi, G. S. Choi, J. S. Kang & S. E. Lee, "Thermal Property Characteristics of Super insulation Vacuum Panel", *The Society of Air-Conditioning and Refrigeration Engineers of Korea*, Vol.6, pp.599-602, 2009.
- [12] C. J. Yoo, M. C. Kim & S. S. Go, "A Study on The Thermal Insulation Performance of Vacuum Insulation Panel Using Dry Processing Glass Fiber Core", *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol.35, No.6, pp.121-128, 2015.  
DOI: [https://doi.org/10.5659/AIK\\_SC.2019.35.6.121](https://doi.org/10.5659/AIK_SC.2019.35.6.121)
- [13] H. Y. Jung, M. J. Bae, G. S. Choi, Y. T. Kim, "Study on Effective Thermal Conductivity of Vacuum Insulation Panels Manufactured by Different Envelope Materials", *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, Vol.14, No.6, pp.719-730, 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.22696/JKIAEBS.20200061>
- [14] C. H. Kim, J. H. Choi, S. Y. Park, H. C. Lee, S. J. Lee & G. Kim, "Analytical Study of Insulation Characteristics of Thermal Batteries with Vacuum", *Defect and Diffusion Forum*, Vol.412, pp.141-147, 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.412.141>
- [15] J. H. Choi, S. Y. Park, H. C. Lee, S. J. Lee, G. Kim & J. E. Byun, "Heat Transfer Simulation and Analysis of Thermal Battery", *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, Vol.7, No.12, 2022.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s40866-022-00126-1>
- [16] CD-Adapco, Star-CCM+ver. 16.04 User Guide, 2020
- [17] Matweb, LLC. Matweb, 1996, Available From: <http://www.matweb.com/services/services.aspx>
- [18] The Engineering ToolBox, Engineering ToolBox, 2001, Available From: <https://www.Engineeringtoolbox.com>

김 찬 후(Chan-Hoo Kim)

[준회원]



- 2021년 2월 : 공주대학교 기계자 동차공학부 (공학사)
- 2021년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계공학과 석·박 통합과정

<관심분야>

열유체 해석, 내연기관 성능개발

김 창 수(Chang-Su Kim)

[정회원]



- 2009년 2월 : 공주대학교 기계자 동차공학부 (공학사)
- 2011년 2월 : 공주대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2017년 2월 : 공주대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2020년 9월 ~ 현재 : 공주대학교 미래자동차공학과, 연구교수

<관심분야>

열유체 해석, 내연기관 성능개발



박 성 영(Sung-Young Park)

[종신회원]



- 1993년 2월 : 충남대학교 기계공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 충남대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2002년 5월 : Texas A&M Univ. 기계공학과 (공학박사)
- 2006년 4월 ~ 현재 : 공주대학교 미래자동차공학과, 정교수

<관심분야>

열유체 해석, 내연기관 성능개발