

해군 함정 VRTU의 과열방지를 위한 열전소자 냉각장치의 적용에 따른 기관실 및 VRTU 내부 열 유동특성 분석

정영인
국방기술품질원

An Analysis of the Thermal Flow Characteristics in Engine-Room and VTRU in accordance with Application of Thermoelectric Device Cooling System to Prevent Overheating of the Korean Navy Ship VRTU

Young In Jung
Defense Agency for Quality and Technology

요약 본 연구에서는 대한민국 해군 함정의 하절기 운용 및 적도지병 파병 간 발생하고 있는 VRTU 과열로 인한 고온경보 발생과 장비정지 발생현상을 해결하기 위하여 해군 군수사령부 함정기술연구소와 공동연구를 수행하였다. 열전소자 냉각장치 설치에 따른 냉각효과를 확인하고, 전산 열 유동해석을 수행하여 VRTU 내부 열 유동특성을 분석하였다. 또 해석을 통해 기관실(디젤엔진룸) 내부의 온도분포를 살펴보고 VRTU 과열방지를 위한 최적의 설치위치를 알아보았다. 분석결과, 냉각장치를 설치함에 따라 VRTU 내부 평균 체적온도가 약 10 °C 감소하는 것을 확인하였으며 냉각장치에 설치된 Fan은 열 순환을 원활하게 하여 냉각효과를 높였다. 기관실 내부는 디젤엔진 상부에서 높은 온도분포를 나타냈고 통풍관 디퓨저 하부에서 가장 낮은 온도분포를 보였다. 열전소자 냉각장치는 높은 냉각성능을 나타내었으며, VRTU는 과열방지를 위하여 기관실의 통풍관 디퓨저 하부에 설치하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

Abstract This study conducted joint research with the Navy logistics command ship technology research institute to resolve the occurrence of naval vessel's high-temperature warning and equipment shutdown caused by VRTU overheating during summer operation and the dispatch of troops to equatorial regions. The cooling effect was checked according to the installation of a thermoelectric device cooling system, and heat flow and heat transfer characteristics inside VRTU was analyzed using Computational Fluid Dynamics. In addition, the temperature distribution inside the engine room was assessed through interpretation, and the optimal installation location to prevent VRTU overheating was identified. As a result, the average volume temperature inside the VRTU decreased by approximately 10 °C with the installation of the cooling system, and the fan installed in the cooling system made the heat circulation smooth, enhancing the cooling effect. The inside of the engine room showed a high-temperature distribution at the top of the engine room, and the end of the HVAC duct diffuser showed the lowest temperature distribution.

Keywords : VRTU(VME bus based Remote Terminal Unit), Thermoelectric Device Cooling System, Peltier Effect, Computational Fluid Dynamics, Thermal Distribution

*Corresponding Author : Young-In Jung(Defense Agency for Technology and Quality)
email: jungyi@daq.ac.kr

Received May 13, 2020

Accepted September 4, 2020

Revised June 8, 2020

Published September 30, 2020

1. 서론

1.1 연구배경

근래 지구 대기로 배출되는 탄소량이 증가함에 따라 세계적으로 온난화현상이 심화되고 있다. 우리나라 또한 연평균기온이 점차 상승하고 있으며, 여름에는 연안의 표층해수 온도가 30 °C 이상까지 상승하곤 한다. 대한민국 해군에서 운용중인 함정들 중 세종대왕급 구축함은 중동 아프리카 지역(수에즈 운하 등)을 항해하는 대한민국 국적 상선을 해적으로부터 호위하고 연안 평화유지를 위하여 소말리아 등 적도지방으로 파병되어 장기간 임무를 수행하고 있다. 이처럼 대한민국 해군 함정들은 대내외적 환경요인들에 의하여 점점 더 높은 온도조건에서 임무를 수행하게 됨에 따라, 함정 내 고온구역(주방, 기관실, 보기실 등)의 평균 내부온도가 상승하고 있는 실정이다[1]. 함정에서 함 내부를 냉각하기 위해서 냉수제조장치(Chiller)를 사용하는데, 냉수제조장치 내부에 흐르는 차가운 냉매를 이용하여 청수를 냉각한 후, 냉각된 청수를 각 ACU(Air Conditioning Unit)들로 보내어 함 내 공기를 냉각하게 된다. 이 때 냉수제조장치에서 열 교환을 통해 청수를 냉각하면서 생성된 뜨거운 냉매는 Sea Chest를 통해 함 내로 유입되는 표층해수를 이용하여 냉각하게 되는데, 지구 온난화로 인하여 여름이나 적도지방 파병 간 표층해수의 온도가 높아져 냉수제조장치의 열 교환 효율이 낮아지게 되었다. 이로 인하여 함 내 냉방을 위해 필요한 냉수가 충분히 공급되지 못함에 따라 함 내 냉방용량을 충분히 만족하지 못하는 경우가 발생되며, 기관실과 같이 디젤엔진이나 가스터빈이 작동하는 격실의 경우에는 내부 온도가 급격히 상승하게 된다. 그래서 현재 대한민국 해군에서 운용중인 ○○○급 함정은 파병 간 기관실에 설치된 전자장비들의 과열현상으로 인하여 고온알람과 긴급정지현상이 발생되고 있으며, 특히 VRTU(디젤, 터빈, 발전기의 원격제어 단말기)에서 발생빈도가 매우 높다. VRTU는 이물질과 비산되는 유체의 유입을 차단하기 위하여 IP 등급¹⁾이 65등급으로 제작되었으나 냉각을 위한 적절한 공랭식, 수랭식 냉각장치가 설치되어 있지 않아 내부의 열이 외부로 발산되는 속도가 느리기 때문이다. 청해부대 파병함정인 ○○○함의 경우 VRTU가 총 8대가 설치되어 있는데, 파병 1진부터 20진까지 고온경보 ○○회, 긴급정지 ○○회 발생하여 작전에 심각한 영향을 초래하고 있는 것으로 확인되었다. 이는

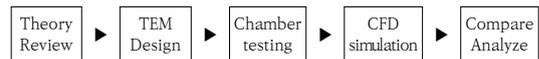
1) 방진 및 방수 보호등급(International Protection)

VRTU의 내부온도가 전자소자의 정상작동 범위인 65 °C를 초과하여 오작동을 일으키기 때문인 것으로 확인되었으며, 과열로 인한 오작동현상을 줄이기 위해 VRTU의 도어를 열어서 냉각하고 있으나 기관실 내의 먼지와 유증기에 노출되어 모듈의 고장 및 수명단축에 따른 신뢰성 저하가 우려되고 있는 실정이다[2].

1.2 연구목표

이를 해결하기 위하여 해군 군수사령부 함정기술연구소는 전력소모량 증가나 냉수제조장치의 추가 설치 없이 VRTU에 즉시 적용 가능한 냉각장치를 고안하였고, 열전소자(펄티어 소자)를 이용한 냉각장치를 제작하여 고온 시험용 챔버를 이용한 냉각성능 실험을 수행하였다. 국방기술품질원에서는 열전소자 냉각장치를 설치한 VRTU와 기관실(디젤엔진룸)을 모델링하고 전산 열 유동해석을 수행하여 열 유동특성을 분석하였다. 본 연구에서는 해석결과와 실험결과의 비교를 통해 결과의 일치성을 확인하고 냉각장치의 냉각효과를 예측하여 VRTU와 기관실 내부의 온도분포와 유동특성을 분석하여 추가적인 개선방안을 도출하는 것이다.

Table 1. Study Process



2. 본론

2.1 열전소자 냉각장치의 적용

열전소자(TEM : Thermoelectric module)의 펄티어 효과(Peltier effect)는 서로 다른 두 종류의 금속 끝을 접속시켜 전류를 흘려주면 각 단자의 끝에서 흡열 및 발열을 일으키는 현상을 의미한다. 펄티어 소자는 약한 전류에서도 작동이 가능하며 소형화가 가능하므로 민간 산업에서 PC나 전기전자장비의 냉각장치로 사용되고 있다. 장치의 구성이 간단하며 냉각된 외기의 유입이 필요 없이 때문에 VRTU와 같이 IP등급이 높은 밀폐된 장비 상자에 적용에 유리한 장점이 있다[3].

VRTU는 얇은 Steel 케이스로 제작되어 있으며 선체 벽면에 쇼크마운트로 설치되어 있으며 기관실의 체적평균온도 대비 VRTU의 내부 온도가 평균 10 °C가량 높다.

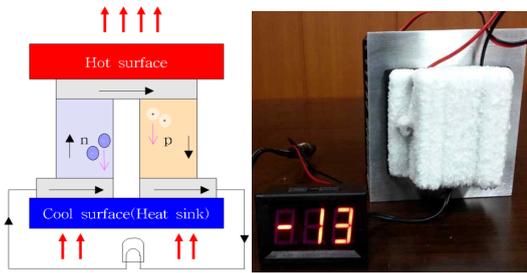


Fig. 1. Principal configuration of Peltier device

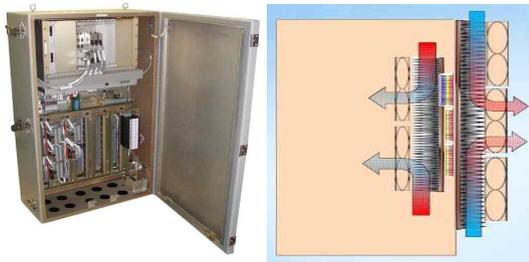


Fig. 2. Configuration of VRTU and cooler installation

그리고 VRTU에 인가되는 전력은 250 W이고 장비의 전기효율은 20%로 나머지 전력은 열로 소실된다고 가정하였다. 위의 정보를 바탕으로 필요 냉각용량을 산출하였다[4].

$$\cdot Q_e = Q_i - Q_s - Q_c \leq 0$$

(총발열량=내부발열량-전열열량-냉각열량)

$$\cdot Q_s = h \times A \times \Delta T$$

(전열열량=대류열전달계수×표면적×온도차)

$$\cdot h : 10 \text{ W/m}^2\text{K (Steel panel)}$$

$$\cdot A : 1.4\text{W} \times (\text{H}+\text{D}) + 1.8 \times \text{H} \times \text{D}$$

(Single enclosure for wall mount)

$$\cdot \text{W} \times \text{H} \times \text{D} = 0.65 \text{ m} \times 1.13 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$$

$$\cdot \Delta T : 10^\circ\text{C}$$

(기관실 최고온도 : 50 °C, VRTU 최고온도 : 60 °C)

계산에 따르면 이론상으로 20W 이상의 펠티어 소자를 설치하면 VRTU의 내부온도를 감소시킬 수 있으나, 저용량으로 설계하면 냉각시간이 매우 오래 걸릴 수 있고 열전소자는 Fig. 1에서 Hot Surface와 Cold Surface의 온도차가 커지면 제백효과²⁾(Seebeck effect)에 의해 소자의 효율이 감소하는 특성이 있기 때문에[5] 이를 고려하여 냉각용량 50 W의 열전소자를 직렬로 연결한

2) 두 개의 서로 다른 금속 접합부의 온도 차에 의해 기전력이 발생하는 현상.

200 W 용량의 냉각장치를 제작하였다. 냉각장치는 Fig. 2와 같이 VRTU 내부에서는 흡열이, 외부는 발열이 되도록 설치하고 각 흡열, 발열 발생 부위에 Fan을 설치하여 열 교환이 원활이 이루어지도록 제작하였다.

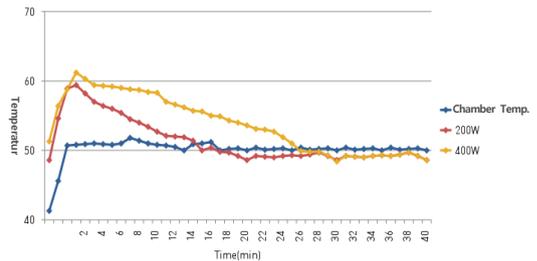


Fig. 3. Internal Temperature of VRTU

2.2 고온챔버 실험

제작한 열전소자 냉각장치의 냉각성능을 확인하기 위하여 VRTU 내부에 200 W 히터와 400 W 히터를 설치하여 고온챔버에 넣고 실험을 수행하였다. 챔버의 온도는 50 °C로 유지하여 하절기 및 적도지방 파병시의 기관실 온도를 모사하였고, 히터를 작동하여 내부발열을 모사하였다. Fig. 3과 같이 히터를 이용하여 VRTU 내부 온도를 60 °C 로 가열한 뒤 열전소자 냉각장치를 작동하였다.

그 결과, 200 W 히터를 작동시킨 VRTU는 약 14분 후, 400 W 히터를 작동시킨 VRTU는 약 27분 후 온도가 50 °C 이하로 수렴하는 것을 확인하였다. 이를 통하여 열전소자 냉각장치의 냉각성능을 확인하였으며, 실제 VRTU 내부에서 발생하는 발열량(210 W)에서는 약 15분 이내에 50 °C 이하로 냉각될 것으로 예상된다.

Table 2. Time spent on temperature reduction 10 °C

Cooler Capacity	Heater Capacity	
	200 W	400 W
200 W	14 Min (-12 °C)	27 Min (-11 °C)

2.3 열 유동해석

위 실험결과를 바탕으로 함에 실제 탑재되어 있는 VRTU에 제작한 열전소자 냉각장치를 설치하였을 때의 효과와 열 유동특성을 예측해보기 위하여 VRTU모델링하여 전산 열 유동해석을 수행하였다.

그리고 기관실에서 가장 저온영역을 형성하는 부분을 식별하여 VRTU 과열방지를 위한 최적의 설치장소를 도출하기 위하여 ○○○ 함정의 기관실 내부를 단순화하여 전산 열 유동해석을 수행하였다.

전산 열 유동해석에 사용한 프로그램과 해석조건은 다음과 같다.

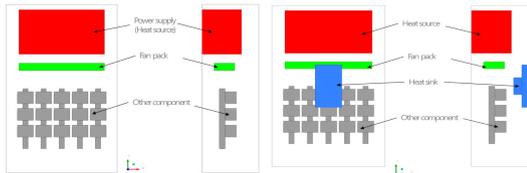


Fig. 4. Modeling configuration of simplified VRTU

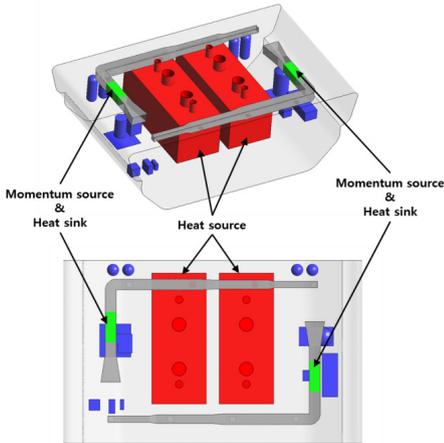


Fig. 5. Modeling configuration of Simplified Diesel-Engine Room

[모델링, 격자생성 및 해석 사용 프로그램]

- 모델링 : ANSYS Design Modeler, SpaceClaim 18.0
- 격자생성 : ANSYS Meshing 및 ICED CFD 18.0
- 유동해석 : ANSYS CFD 18.0

[열 유동해석 수행 공통적용 조건]

- 정상상태(Steady-state) 유동해석[6]
- Turbulence Numerics : First Order
- Advection Scheme : High resolution
- Ideal gas Air

[VRTU 내부 열 유동해석 경계조건]

- $k-\epsilon$ 난류모델
- 열전달 : 전도, 대류 반영, 복사 미반영
- 열전소자 Fan 영역 Momentum source 적용

- 외벽조건 : 분위기 온도 50 °C
- 대류열전달계수 $10 W/m^2K$
- [기관실 내부 열 유동해석 경계조건]
- Shear Stress Transport 난류 모델
- 열전달 : 자연대류 및 강제 대류
- 통풍관 Fan 영역 Momentum source 적용
- 외벽조건 : 해수영역과 공기영역 분할하여 분위기 온도와 대류열전달 계수 적용

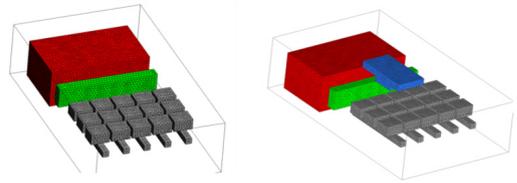


Fig. 6. Configuration of VRTU mesh generation

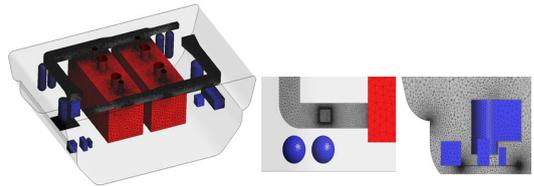


Fig. 7. Configuration of diesel-engine room mesh generation

해석 격자계는 사면체(Tetrahedral) 격자계와 삼각기둥(Prism) 격자계를 혼용하여 구성하였으며 구조물 벽면을 비롯한 모든 벽면에는 유체 점성효과와 온도구배를 구체적으로 묘사하기 위하여 삼각기둥 형태의 격자계를 조밀하게 배치하였다[7]. VRTU의 총 격자는 627,667개, 총 노드는 186,782개 생성하였고 기관실의 총 격자는 29,568,934개, 노드는 6,556,650개 생성하였다.

2.4 전산 열 유동해석 수행결과

먼저 열전소자 냉각장치의 냉각효과를 분석하기 위하여 냉각장치가 설치되지 않은 VRTU와 설치된 VRTU를 모델링하여 내부 온도를 비교하였다.

Fig. 8에서 열전소자 냉각장치를 설치하여 작동하였을 때 VRTU 내부에서 낮은 온도분포를 보이는 것을 확인할 수 있었다. Table. 3에서와 같이 내부 체적온도는 약 12.2 °C 감소하였으며, Power supply 표면 평균온도는 약 11.6 °C 감소하였다. 열전소자 설치 전에는 VRTU 고온경보나 긴급정지가 발생할 수 있는 50 °C를

넘어섰으나 냉각기 작동 후에는 45.9 °C까지 온도가 감소하였으며 열 발생량이 가장 많은 Power Supply의 표면온도 또한 50.7 °C 까지 감소되는 것으로 나타났다.

Table 3. Temperature comparison between peltier cooler installed VRTU and not installed VRTU

Temperature	Peltier Cooler Installed	Peltier Cooler Not Installed
Volumetric Average temperature(°C)	45.90	58.14
Power supply Surface temperature(°C)	50.73	62.35

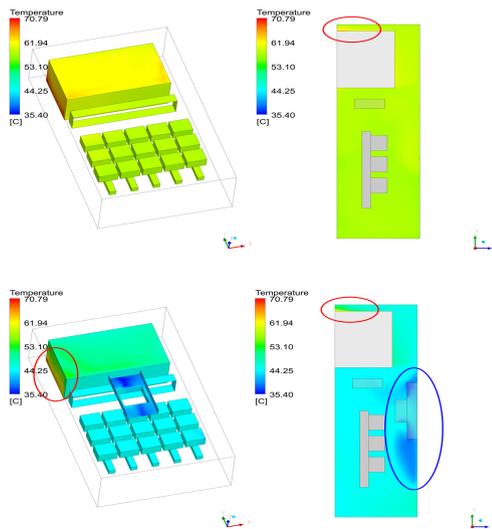


Fig. 8. Surface heat distribution in VRTU with respect to peltier cooler installation

Fig. 9는 열전소자 냉각장치 설치여부에 따른 내부 공기 흐름의 속도 벡터를 나타낸 것으로 냉각장치가 작동함에 따라서 공기의 순환이 활발해지는 것을 확인할 수 있었다. 특히 냉각장치에 설치된 Fan에 의해 VRTU 하부로 공기를 밀어내 주는 유동을 확인할 수 있었고 이러한 유동은 상대적으로 더 큰 대류열전달계수를 가지게 하여 열전달 효율을 높여주게 된다. 그러나 Power supply의 상부와 측면부에서는 공기의 흐름이 원활하지 못하였고 이에 따라 국부적으로 고온영역이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또 VRTU 상부에 비교적 높은 온도분포가 나타났는데, Power supply의 발열의 영향과 더불어 밀도가 낮은 고온의 공기가 대류현상에 의해 상부로 이동하면서 발생하는 것으로 보인다. 따라서

Power supply를 VRTU 하부로 이동시킬 경우 열 대류 현상에 의한 공기순환을 유도하여 열전달 효율을 높일 수 있을 것으로 생각된다.

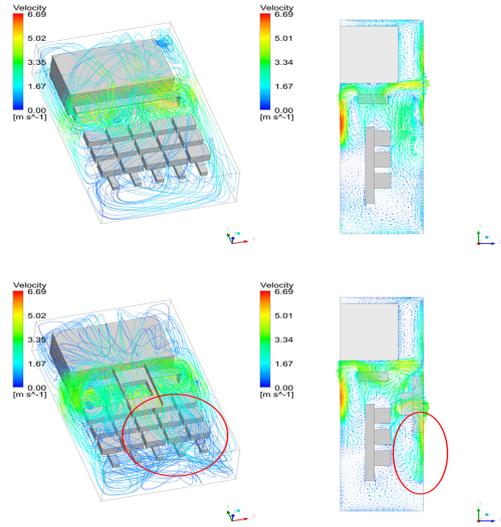


Fig. 9. Air flow vector distribution with respect to peltier cooler installation

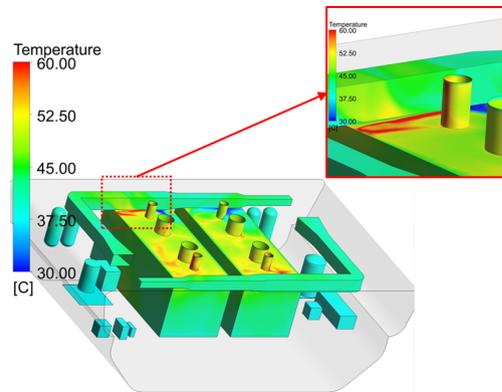


Fig. 10. Heat distribution in diesel engine room

Fig.10에서 기관실 모델링을 통한 열 유동해석 분석결과, VRTU 해석 결과에서와 같이 기관실 상부에서 고온영역이 발생하는 것을 확인하였다. 이는 엔진에서 발생된 열이 기관실 상부로 상승하고 공기순환이 활발하지 못하여 발생하는 것으로 보인다. 반면 Fig.11과 같이 통풍판 디퓨저 하부에서는 토출되는 차가운 공기에 의해 낮은 온도분포를 보였으며, Fig. 12와 같이 차가운 공기는 기관실 하부에 낮게 분포되면서 전체적으로 기관실 상부는 고온, 하부는 저온의 온도분포를 나타내었다.

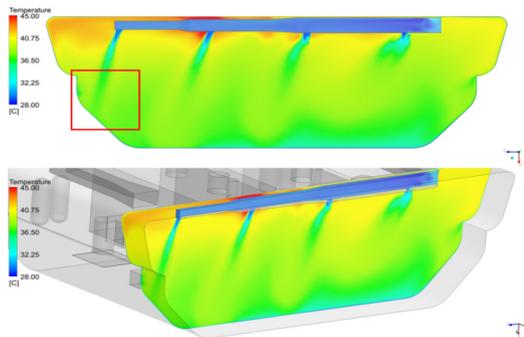


Fig. 11. Heat distribution under the duct diffuser

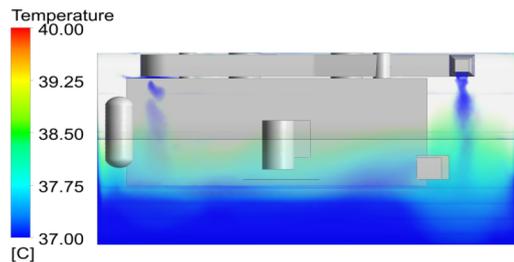


Fig. 12. Heat distribution in diesel engine room (Elevation view)

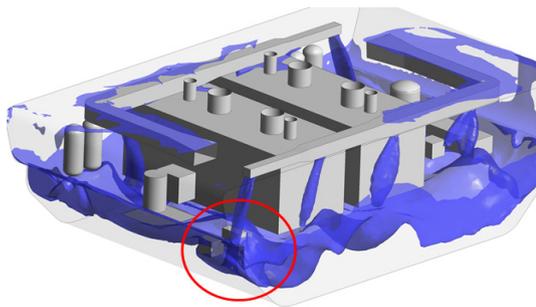


Fig. 13. Distribution of temperature under 37.5 °C

Fig.13은 기관실 내에서 온도가 37.5 °C 이하인 영역을 나타내어 주는 것으로, 대체적으로 기관실의 외벽 하부에 분포하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이는 공기 온도차에 의한 밀도차가 발생하여 차가운 공기가 하부에 분포되며 기관실 중앙 엔진에서 발생된 열이 외벽에서 영향을 적게 받기 때문인 것으로 보인다. 기관실 내부 유동의 흐름은 Fig.14에서와 같이 Duct의 끝단에 위치한 디퓨저에서 토출된 차가운 공기가 선체 외벽을 따라 빠른 속도로 이동하는 것을 확인할 수 있었다. VRTU 과열 방지를 위한 최적의 설치장소는 온도가 낮고 유속이 빨

라 열 교환이 활발한 구역이 좋기 때문에 Fig.13,14에 표시된 위치에 VRTU를 설치하는 경우 과열방지에 효과적일 것으로 판단된다.

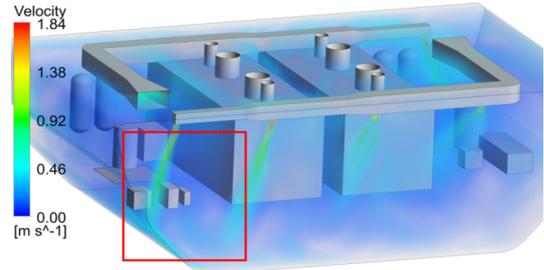


Fig. 14. Air flow velocity distribution

3. 결론

본 연구에서는 함정에서 발생하는 VRTU 과열로 인한 고온경보 및 긴급정지 현상을 해결하기 위하여 열전소자 냉각장치를 제작하여 적용해 보았다. 고온챔버 시험을 통해 냉각장치의 성능을 확인하였으며 전산 열 유동해석을 통하여 VRTU 내부와 기관실 내부 열 분포와 유동특성을 확인하였다. 이번 연구결과에 따라 해군 군수사령부 함정기술연구소에서는 열전소자 냉각장치를 실제 파병함정에 적용하여 적도지방으로 파병된 ○○○함의 3개월(17. 9.28~11.18.)간의 VRTU의 온도를 측정 데이터를 확인한 결과, 열전소자 냉각장치를 미설치한 VRTU는 과열로 인한 고온경보가 2회 발생하였으나, 냉각장치를 설치하여 작동한 VRTU는 내부 온도가 45 °C 유지되어 고온경보가 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 열전소자 냉각장치가 실제 임무 환경에서도 효과적으로 VRTU 과열을 억제하는 것을 검증하였다. 해군에서는 타 함정에 확대 적용하기 위한 방안을 강구하고 있으며 이에 본 연구결과를 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

References

- [1] Y.I.Jung, S.M.Choi, "A study on the internal temperature reduction of PKG-A water-jet-room by subsituting heat insulation materials," Journal of Korean Society for Quality management, Vol.47, no.3, pp.425-435, 2019.
DOI : <https://dor.org/10.7466/JKSQM.2019.47.3-425>
- [2] Y.H.Jeon, Y.G.Chang, M.Y.Kang, J.H.Kim, "A study on

- Development Direction of Cooling Improvement of Equipment control panel," *Naval technology*, Vol.86, pp.148-169, 2018.
- [3] D.H.Kim, G.H.Lee, "Development status of new technology for thermoelectric cooling element," *Machinery and Materials, Korea Institute of Materials Science*, vol.16, no.2, pp.95-103, 2004.
- [4] S.Y.Yoo, J.P.Hong, W.S.Sim, "A study on the performance of thermoelectric module and thermoelectric cooling system," *Korean Journal of air-conditioning and refrigeration engineering*, Vol.16, no.1, pp.62-69, 2004.
- [5] G.G.Lee, B.C.U, H.W.Lee, "Current status of development and application technology for thermoelectric semiconductor," *Machinery and Materials, Korea Institute of Materials Science*, Vol.11, no.39, pp.31-41, April 1999.
- [6] Syaza Yasim, *CFD Modeling of Thermoelectric Air Duct System for Cooling of Building Envelope*, Bachelor, Universiti Teknologi PETRONAS, 2017.
- [7] TaeSungSNE "The Standard of CAE, Application of ANSYS CFD," pp.6-9.
-

정 영 인(Young -In Jung)

[정회원]



- 2013년 8월 : 경북대학교 기계공학과(공학사)
- 2015년 8월 : 과학기술연합대학원대학교(UST) 한국항공우주연구원(KARI) 항공우주시스템공학(공학 석사)
- 2015년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

〈관심분야〉

공기역학, 열유체역학, 잠수함 선체의장, HVAC,

복합소재, RAM분석