

자연대류에 의한 열 특성 강화를 위한 차양판 열 제거 형상 최적 설계

홍성빈* · 박아미** · 이종학** · 정재호*†

Thermal Shape Optimization of Canopy Structure for Enhancing Heat Transfer Characteristics due to Natural Circulation

Seongbin Hong*, Ah-mi Park**, Jong Hak Lee**, Jae-Ho Jeong*†

Key Words : Camera(카메라), Naval gun system(함포), Thermal management(열 관리), Stack effect(굴뚝효과), CFD(전산유체역학)

ABSTRACT

Recently, an increased demand for the development of unmanned systems and surveillance technologies, as well as a rapid increase in demand for high-performance camera sensor, has been observed due to the export and advancement of defense technology. The heat generated by camera sensors is also increasing as a result of camera performance improvement, and the importance of camera can lead to reduces target detection accuracy, misidentification, and camera sensor failure. In this study, an optimal canopy shape inducing the stack effect was designed to enhance the heat removal performance of camera systems installed on naval vessels. Through Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis, a reduction of approximately 2.3 °C in the component temperature, measured by maximum temperature inside the camera sensor, was confirmed compared to the existing shape. The improvement in cooling performance is derived from the increased flow rate facilitated by natural convection, and it was observed that natural circulation flow rate significantly increases non-linearly as the curvature radius decrease, with a concurrent 43.76% increase in heat transfer rate. In conclusion, the optimization of camera sensor heat removal performance through natural convection, induced by the optimal design of the canopy, was achieved.

1. 서 론

최근 국내 방위산업 물자의 수출량 급증 및 해외시장에서의 기술력 입증 등을 통해 국내외 방위산업 물자의 수요가 급증하는 추세이다. 이로 인해 국내 방위산업체의 관련 기술 연구·개발 투자 또한 급증하고 있으며, 이 중 상당 부분은 무인체계 기술개발에 투자된 것으로 파악되고 있다.⁽¹⁾ 방위산업계에서의 무인 시스템 및 감시 기술 수요가 증가함에 따라, 극한 환경에서 안정적으로 작동할 수 있는 고성능 카메라 센서에 대한 수요 또한 급증하고 있다. 하지만 카메라 센서의 성능이 향상됨에 따라 센서 내 발열량 또한 증가하며 이에 대해 충분한 열 제거가 이루어지지 않을 경우, 성능 저하 또는 심지어 고장을 유발할 수 있다. 이로 인해 군사용 카메라 센서의 열 관리는 중요한 고려사항이며, 특히 항공감

시, 미사일 유도 및 함포와 같은 응용 분야에서는 그 중요성이 대두되고 있다.

Yan 등은 MWIR/LWIR 항공감시 카메라에 대해 항공기 운행 상황에서의 외기 조건을 적용해 열적 설계를 수행 및 유한요소법을 활용해 과도 해석을 수행했고 각 부품별 운용조건을 만족함을 확인했다.⁽²⁾ Engelhard 는 다양한 외기환경 및 운용조건 내에서 전투기 항공 감시 카메라 내부 온도를 실험 및 해석적으로 연구했다. 이를 통해 시스템 운용 시의 카메라 센서 온도는 요구 조건에서 1°C 내외로 조절 가능함을 확인했다.⁽³⁾ Liu 등은 항공용 장거리 초점 카메라의 주요 광학 시스템 구성 요소에 대한 열적 설계 및 열 제거 전략을 분석했다.⁽⁴⁾ 전도, 대류 및 복사에 의한 열전달을 각 분석해 광학 시스템의 요구 온도조건을 만족하는지 과도 해석을 수행했다.

* 가천대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Gachon University)

** LIG Nex1 C4ISTAR 기계융합연구소 4팀(LIG Nex1)

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

2023 한국유체기계학회 하계학술대회 발표 논문, 2023년 7월 5일~7월 7일, 평창 알펜시아

The KSFJ Journal of Fluid Machinery: Vol. 26, No. 5, October 2023, pp.99~104(Received 18 Jul. 2023; revised 08 Aug. 2023; accepted for publication 29 Aug. 2023)

한국유체기계학회 논문집: 제26권, 제5호, pp.99~104, 2023(논문접수일자: 2023.07.18, 논문수정일자: 2023.08.08, 심사완료일자: 2023.08.29)

함포에 탑재된 광학장비는 해상에서 운용되는데 태양 복사열에 대한 열전달을 막기 위해 차양판을 설치하고 있으며, 이는 외기의 자연대류로 인한 카메라 시스템 열 제거 성능에 영향을 미친다. 자연대류에 의한 열 제거는 추가적인 전력 소모 및 소음 발생이 없고, 열침원으로서의 거대한 열용량이 장점이다. 이로 인해서 내부적으로 냉각 공기를 통한 냉각 이외에도 외기의 자연대류로 인한 열 제거 성능 향상 또한 매우 중요하다.

굴뚝효과(Stack Effect)는 제한된 공간 내에서 밀도차가 발생하면서 수직적인 유동이 발생해 자연대류가 증가하는 현상을 의미한다. 일반적으로 고층건물 등에서 발생하고, 이로 인해 건물 내의 에너지 손실 및 고장을 일으키기 때문에 건물 구조 및 내부 공기 조건 변화를 통해 굴뚝효과를 감소시킨다. 하지만, 이는 강한 자연대류 현상을 유도하기 때문에 차양판 구조 변경을 통해 굴뚝효과를 발생시켜 자연대류에 의한 열 제거 성능을 향상할 수 있다.

본 연구에서는 굴뚝효과를 통해 자연대류에 의한 카메라 시스템 열 제거 성능 향상에 대해 ANSYS FLUENT를 통해 3D RANS 해석을 수행했으며, 차양판 구조 최적화를 위해 최적 열제거 성능을 도출했다.⁽⁵⁾

2. 수치해석 방법론

2.1 함포 광학장비 시스템 구성

본 논문에서는 함정에 탑재된 함포의 카메라집합체를 대상으로 열 제거 성능 향상에 관한 연구가 수행되었다. 카메라 시스템의 구성은 Fig. 1과 같으며, 내부에는 총 10개의 발열 소자가 존재한다. 차양판과 카메라 시스템 간 태양 복사열의 전도를 막기 위해 단열 소재로 구성된 thermal pad를 삽입하였으며, 내부에는 냉각 공기 공급을 통해 시스템 냉각이 가능하도록 구성되어있다.

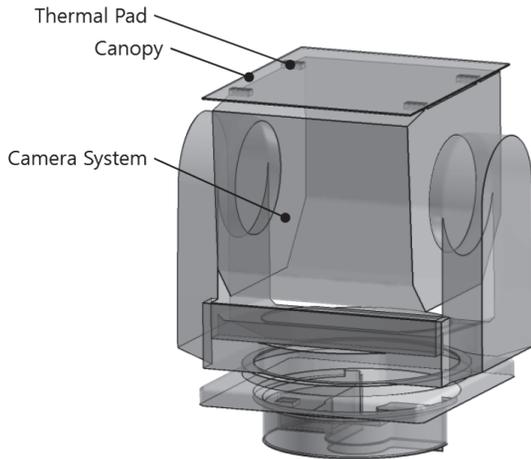


Fig. 1 Schematic of Camera System

2.2 해석 경계조건 지배방정식

수치해석을 위한 Solver로 ANSYS사의 Fluent 2021 R2를 사용했다. 3D RANS 방정식(Reynold averaged Navier-Stokes equations)을 적용했으며, $k-\epsilon$ 난류 모델을 활용해 카메라 내, 외부 유동을 계산했다.⁽⁶⁾ $k-\epsilon$ 난류 모델은 난류 생성 항 k 와 난류 소산율 ϵ 을 통해 난류를 모의한다. 또한, 벽면 주위에서의 경계층은 wall-function을 활용해 계산하므로 $k-\omega$ 및 $k-\omega$ SST 난류 모델 대비 효율적인 계산을 수행할 수 있다. $k-\epsilon$ 난류 모델은 식 (1) 및 (2)와 같이 나타낼 수 있다. G_k 는 평균 속도 구배에 의한 난류 운동에너지 생성, G_b 는 부력에 의한 난류 운동에너지 생성, Y_M 은 압축성 유동의 변동 팽창이 전체 난류 소산율에 미치는 영향을 나타내며 S_k 및 S_ϵ 은 각각 사용자 정의 가능한 난류 생성, 난류 소산율 항이다. 온도 차에 따른 외기의 자연대류 현상을 모의하기 위해서 boussinesq 모델을 사용했으며, 이는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁷⁾ ρ_{ref} 는 기준 밀도, β 는 유체의 팽창계수, y 및 y_{ref} 각각 유체의 질량 분율 및 기준 질량 분율이다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\mu} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon \\ & - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \end{aligned} \quad (2)$$

$$\vec{F} = \rho_{ref} g \beta (y - y_{ref}) \quad (3)$$

해석을 위한 경계조건은 Table 1과 같으며, 카메라 센서 내부 소자의 발열량조건은 Table 2와 같다. 외기 공간 모의

Table 1 Boundary Condition

Parameter	Value [Unit]
Cooling Air Inlet Temperature	23 [° C]
Cooling Air Inlet Velocity	5 [m/s]
Outlet Gauge Pressure	0 [Pa]
Ambient Temperature	34.6 [° C]
Ambient Air Pressure Outlet	1 [atm]
Housing Material	Aluminum [-]
Solar Irradiation	1,120 [W/m ²]
Housing Radiation Absorptivity	0.2 [-]
Turbulence Model	k-ε [-]
y+	30 < y+ < 300 [-]

Table 2 Heat Source

Module	Heat Capacity [W]
Gyro Sensor	7
MWIR	6
MWIR FPGA	4
Regulator	3.5
CMOS	2.4
TVSWIR	8
TVSWIR FPGA	10.6
LRF	18
Image Sensor FPGA	4
Motor	4.5
Total	68

를 위해 외기영역의 벽면은 1 atm의 압력조건을 적용했으며, 10년간 국내 해상기온 중 최고기온인 34.6 °C의 온도조건을 적용했다. 또한, 태양 복사열의 경우, 하루 중 최대 일사량인 1,120 W/m²을 적용하였다. 태양복사에 의한 온도 상승량 저감을 위해 단열 도료를 적용했기 때문에 하우징과 외기가 맞닿는 계면에 20%의 흡수율을 적용해 단열 도료에 의한 효과를 모의했다.

2.3 격자 및 난류 모델 민감도 분석

카메라 집합체 대상 전산유체해석 정확도를 위해 Table. 3과 같이 격자민감도 분석을 수행했다. 본 연구에서 사용된 격자수의 0.4배부터 1.6배의 격자수에 대해 시스템 입출구의 압력강하 및 출구온도를 통해 유동 및 열 해석에 대한 격자민감도를 분석했다. 압력강하와 출구 온도는 모두 기준 격자수에서의 값을 통해 무차원화하여 나타냈다. 격자민감도 분석을 통해 총 약 2000만개의 격자 수의 비정렬 격자계 해석도메인을 구성하여 전산유체해석을 수행했다.

카메라 집합체 대상 전산유체해석을 위해 Fig. 2와 같이 일반적으로 사용하는 3차원 RANS 난류모델 (SST $k-\omega$, Standard $k-\epsilon$, Standard $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$, Realizable $k-\epsilon$) 들을 활용한 해석 결과를 비교했을 때 Fig. 2, 3과 같이 입,

Table 3 Grid Sensitivity Study

Normalized Number of Grid	Normalized Pressure Drop	Normalized Outlet Temperature
0.4	0.721	1.21
0.6	0.84	1.13
0.8	0.91	1.06
1	1	1
1.2	1.02	1.01
1.4	1.015	0.994
1.6	1.03	0.998

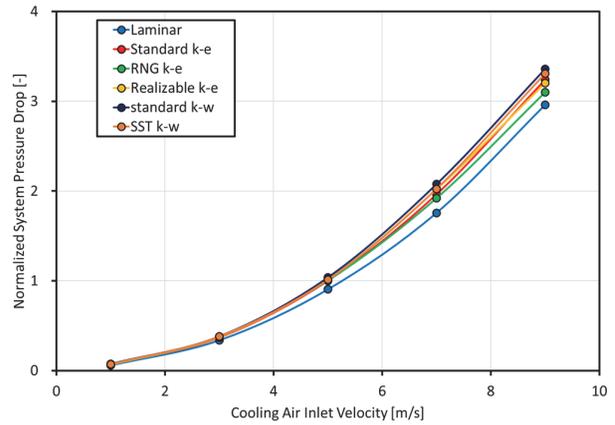


Fig. 2 Normalized Pressure Drop by Turbulence Model at Various Inlet Condition

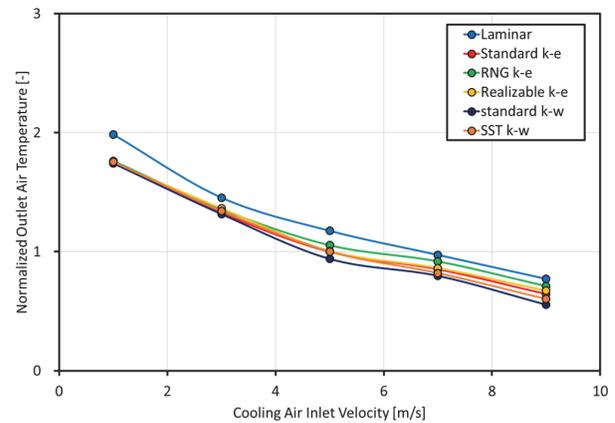


Fig. 3 Normalized Outlet Temperature by Turbulence Model at Various Inlet Condition

출구 압력강하 및 출구 온도에 대한 오차는 각 평균 3.07%, 3.83% 이내로 발생하는 것을 확인했다.^(6,8-11) 자연대류는 층류 영역의 유동현상이지만, 카메라집합체 내부에서는 난류 영역의 유동현상이 발생하기 때문에 카메라집합체 내부에서의 압력강하 및 온도 계산결과가 Standard $k-\epsilon$ 난류 모델 대비 각 10.32%, 14.94% 발생함을 확인했다. 상기 결과들을 바탕으로 효율적인 계산을 위해 Standard $k-\epsilon$ 난류 모델을 사용해 카메라집합체 대상 전산유체해석을 수행했다.

3. 차양판 설계변수 및 최적화 방법론

차양판 설계를 위한 변수는 Fig. 4와 같이 곡률 반경과 동공 반경 총 2가지이다. Table 4와 같이 4가지 곡률 반경 및 4가지 동공 반경을 통해 총 16개의 Case에 대해 기준 형상과 소자의 온도를 비교했다. 설계 최적화를 위해 식 (4)와 같이 소자의 온도를 발열량에 대해 조화평균 하여 계산한 평균온도를 목적변수로 활용해 최대 냉각성능을 도출하는 차양판을 설계했다.

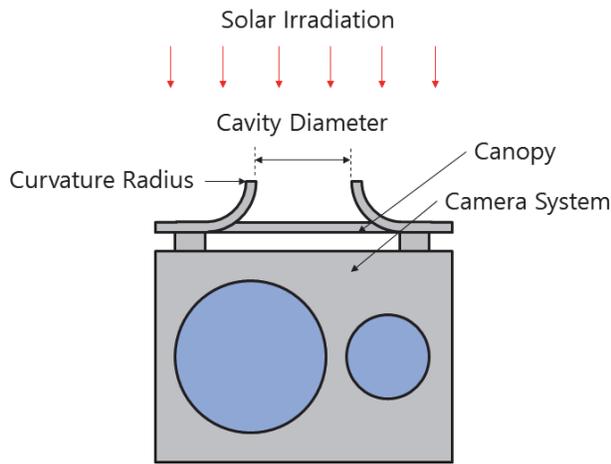


Fig. 4 Schematic of Canopy Design Parameters

Table 4 Design Cases and Parameters

Case	Curvature Radius [mm]	Cavity Diameter [mm]
Conventional	0	0
Case 01	20	20
Case 02	20	40
Case 03	20	60
Case 04	20	80
Case 05	40	20
Case 06	40	40
Case 07	40	60
Case 08	40	80
Case 09	60	20
Case 10	60	40
Case 11	60	60
Case 12	60	80
Case 13	80	20
Case 14	80	40
Case 15	80	60
Case 16	80	80

$$T_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{Q}_i \cdot T_{n,diff}}{\dot{Q}_{total}} \quad (4)$$

4. 결과 및 고찰

4.1 차양판 형상에 따른 열 제거 성능

Fig. 5와 같이 설계변수에 따른 발열소자 냉각성능 변화를 확인한 결과, Case 06에서 가장 높은 냉각성능 향상을 보였다. 이는 Case 10, 13, 14의 경우, 기존 차양판 형상 대비 발열소자의 냉각성능이 감소하였으며 이는 자연순환에 의한

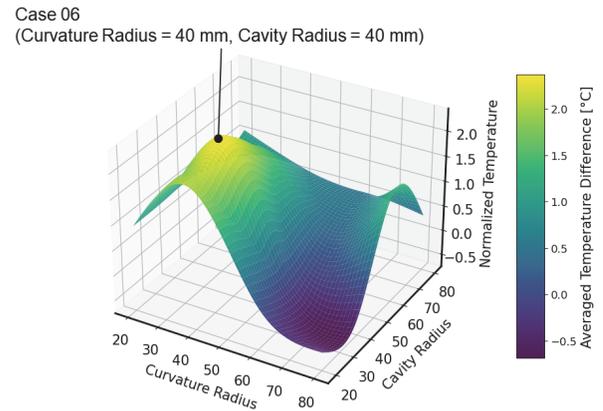


Fig. 5 Module Temperature Difference by Shape Variables

온도 감소량 대비 동공을 통해 전달되는 태양 복사열에 의한 온도 상승량이 더 높음으로부터 기인하는 것을 확인됐다.

태양열 복사 및 내부 발열에 의해 가열된 카메라집합체 주위 외기는 차양판 상부 외기온도 대비 고온이기 때문에 reverse stack effect가 발생해 상부의 외기가 차양판 동공을 통해 카메라집합체 주위로 공급된다. Case 10, 13, 14에서는 차양판 구조체 높이 대비 동공 반경이 작음으로 인해 stack effect에 의한 자연순환이 충분히 발달되지 못하고, 열 제거 성능 향상 대비 태양복사열에 의한 카메라집합체 온도 상승량이 높아지는 것으로 분석됐다. 일반적으로 광학장비에 사용되는 센서의 작동 한계는 80 - 85 °C임을 고려했을 때, 최적 차양판 형상을 통한 평균 2.3 °C의 소자 온도 냉각은 작동 한계 대비 2.353%의 온도 마진을 확보했음을 확인할 수 있다.

4.2 최적 형상 유동 구조 및 열적 거동

Fig. 6-9은 각 차양판 주위 유동 구조, 게이지압력 분포, 정규화된 온도 분포를 나타낸다. Fig. 8, 9의 경우, 외기온도를 통해 정규화하여 나타냈다. Fig. 6, 7에 나타난 것과 같이 Case 06의 차양판 구조물 상, 하부의 압력 차이로 인해 자연순환이 유도되는 것을 확인할 수 있다. 그로 인해 Fig. 8과 같이 차양판 및 카메라 집합체 사이 외기의 기온은 Case 06이 기존 차양판 형상 대비 저온을 유지한다. 또한, Fig. 9과 같이 차양판의 공동 주위 온도는 기존 형상 대비 0.974배의 온도가 나타난다. 카메라 집합체 내부 발열량 중 외기 자연대류에 의해 제거되는 열전달률은 37.48 W로, 기존 차양판 형상에서의 26.07 W 대비 약 43.76 % 향상됨을 확인했다.

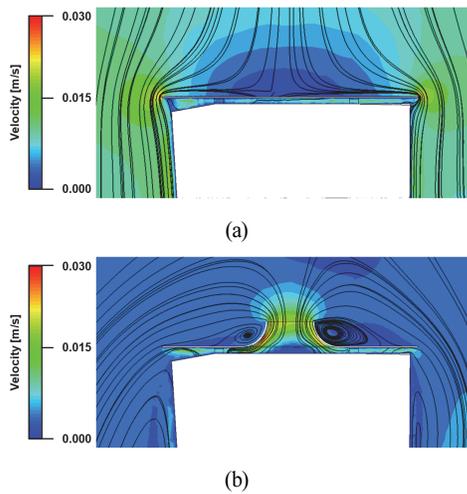


Fig. 6 Velocity Distribution of Ambient Air (a) at Conventional Case, (b) at Case 06

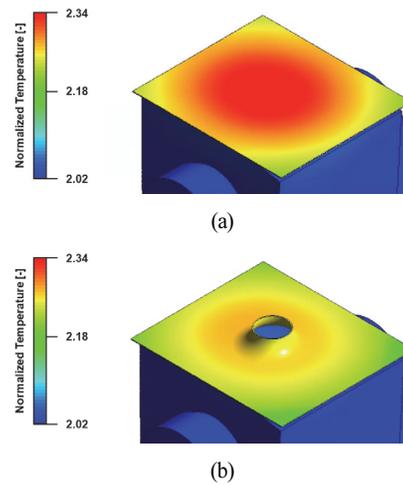


Fig. 9 Normalized Temperature Distribution of Canopy (a) at Conventional Case, (b) at Case 06

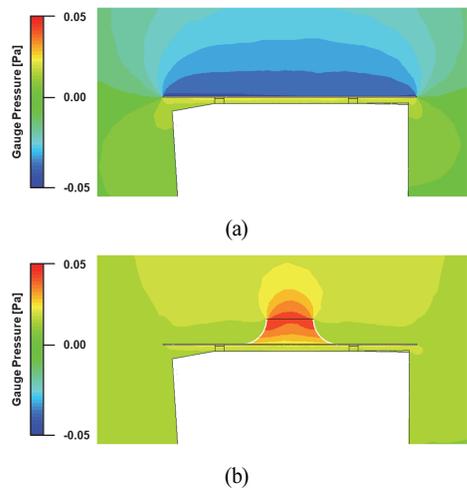


Fig. 7 Gauge Pressure Distribution of Ambient Air (a) at Conventional Case, (b) at Case 06

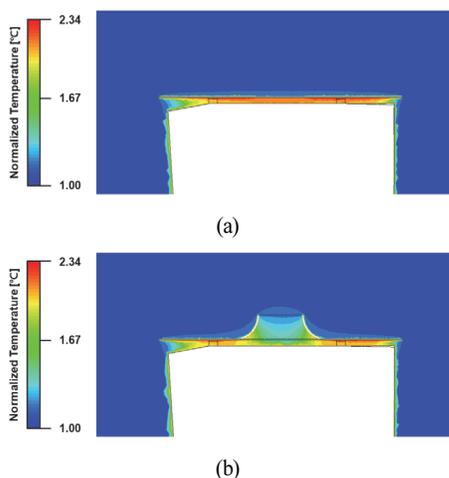


Fig. 8 Normalized Temperature Distribution of Ambient Air (a) at Conventional Case, (b) at Case 06

5. 결론

본 연구에서는 굴뚝효과를 통해 자연순환을 유도하는 차양판 형상을 설계 및 CFD를 통해 자연순환에 의한 카메라집합체 냉각성능 향상을 확인했고, 이에 대해 결론은 하기와 같다.

- (1) 최적 차양판 형상 도출을 통해 굴뚝효과를 활용한 자연순환을 유도했으며, 이로 인해 외기를 통한 카메라 집합체 열 제거 성능을 확보했다.
- (2) 기존 형상 대비 최적화된 차양판 형상은 카메라집합체 내부 소자의 온도를 평균 약 2.3°C 저감시켰다.
- (3) 자연순환량의 증가로 인해 차양판 온도는 기존 형상 대비 약 0.974배의 최고 온도가 나타남.
- (4) 동일한 내부 발열량 및 외기 조건에서 최적 차양판 형상은 기존 형상 대비 외기를 통한 열전달률이 약 43.76% 향상됨을 확인했다.

후 기

본 연구는 (주) 삼성 오토메이션과 LIG Nex1의 지원을 받아 진행된 연구임을 밝힙니다. (202210540001, CIWS II)

References

- (1) Changwon Industry Promotion Agency, 2022, "Trends in the domestic and international defense industry in 2022", Vol. 5, pp. 7.
- (2) Gao Yan, Zhan Bao, Chen Liheng, Xu Buqian, Gu Guochao, 2019, "Thermal design and analysis of the high resolution MWIR/LWIR aerial camera" Optik – International Journal for Light and Electron Optics, Vol. 179, pp. 37–46.

- (3) Michel Engelhardt, 2007, Thermal Control of an Airborne Electronicsbay, American Institute of Aeronautics and Astronautics: 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting Exhibit.
- (4) Liu W., Ding Y., Wu Q. W., Jia J. Q., Gio L., Wang L. H., 2012, "Thermal analysis and design of the aerial camera's primary optical system components", Applied Thermal Engineering, Vol. 38, pp. 40-47.
- (5) ANSYS, Fluent, "ANSYS Fluent Theory Guide", ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, USA, 2018.
- (6) Launder, B.E., Spalding, D.B., "The numerical computation of turbulent flows", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, March 1974, pp. 269-289.
- (7) J. Boussinesq, 1897, "Theorie Analytique de la Chaleur", Gauthier-Villars, Paris.
- (8) Menter, F. R., "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, August 1994, pp. 1598-1605.
- (9) Wilcox, D. C., "Formulation of the k-omega Turbulence Model Revisited," AIAA Journal, Vol. 46, No. 11, 2008, pp. 2823-2838.
- (10) Yakahot, V., Orszag, S., Thangam, S., Gatski, T., Speziale, C., Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. Phys. Fluids A Fluid Dyn, Vol. 4, 1992, pp. 1510-1520 (1989~1993).
- (11) T.-H. Shih, W.W. Liou, A. Shabbir, J. Zhu. A, "A New $k-\epsilon$ Eddy viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows Model Development and Validation", Computer Fluids, Vol. 24, 1995, pp. 227-238.