JDCS
디지털콘텐츠학회논문지
Journal of Digital Contents Society
Vol. 20, No. 5, pp. 1061-1067, May 2019

무인기 구동 제어기의 열 온도해석

유봉조[1]·김영식[1*]·오부진[2]·신부현[1]
[1]한밭대학교 기계공학과, [2]국방과학연구소

Thermal and Temperature Analysis for an Actuation Controller of an Unmanned Aerial Vehicle

Bong-Jo Ryu[1]· Youngshik Kim[1*] · Bu-Jin Oh[2] · Buhyun Shin[1]

[1]Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon, Korea
[2]Agency for Defense and Development, Daejeon, Korea

[요 약]

오늘날 무인기는 군사, 기계 , 항공 • 우주공학분야에서 정보수집, 정찰비행 및 수색작전 등을 위해 널리 사용된다. 무인기 구동제어기는 비행 시 발생하는 부하의 영향을 받게 되며, 이러한 부하상태에서 정밀한 위치제어가 실현되어야 한다. 구동 제어기가 사용되는 일반적인 주위의 환경 온도는 약 -30 ° C-50 ° C(243 ° K-323 ° K)이다. 구동 제어기가 신뢰성을 갖추기 위해 중요시되는 것은 구동 제어기 내의 열 발생이 어느 한계 수준(-25 ° C-105 ° C(243 ° K-378 ° K)내로 유지되어야 한다. 따라서 구동제어기 내의 열 • 유동 특성에 대한 연구와 분석이 필요하게 된다. 본 논문에서는 3-D 모델링을 위해 상용 소프트웨어인 Pro/E와 Solid-Works를, 수치 시뮬레이션을 위해서는 Cosmos/Flow Works를 사용하였다. 본 논문에서는 내부의 칩들과 보드들을 지니는 구동 제어기의 열 • 유동 특성을 통하여 안전한 구동 제어기의 설계를 제시한다.

[Abstract]

Recently, unmanned aerial vehicles are widely used for the collection of information, reconnaissance flight and a search operation in military fields, mechanical engineering, and aerospace and aeronautical engineering. An actuation controller of an unmanned aerial vehicle is seriously affected by payloads when the unmanned aerial vehicle is flying. It is important to ensure reliability of the actuation controller since its operation should be kept with a precision. The temperature of the environment where the actuation controller is used is about -30 ° C-50 ° C(243 ° K-323 ° K). Heat generated in the actuation controller should be maintained within certain threshold levels,(-30 ° C-95 ° C(243 ° K-368 ° K) to ensure reliability. Therefore, the study and analysis of the heat • flow characteristics in the actuation controller are required. In the paper, commercial software Solid-Works for 3-D modeling and Cosmos/Flow- Works for the numerical simulations were used. In this paper, safe design of the actuation controller is proposed by analyzing the thermal and flow characteristics inside of the actuation controller composed of chips and boards.

색인어 : 열 • 온도 해석, 온도 분포, 구동제어기, 무인 항공기, 안전 경계치

Key word : Thermal and temperature analysis, Temperature distribution, Actuation controller, Unmanned aerial vehicle, Safety threshold

http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2019.20.5.1061

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-CommercialLicense(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.

Received 15 April 2019; **Revised** 15 May 2019
Accepted 27 May 2019

***Corresponding Author; Youngshik Kim**

Tel: +82-42-821-1163
E-mail : youngshik@hanbat.ac.kr

I. 서 론

오늘날 무인항공기는 군사 분야 외에 물류, 통신, 교통, 구조 항공촬영, 농업, 감시 등의 민간분야로 급속히 확대되고 있고, 미래에 항공우주산업의 성장을 주도할 것으로 예측되고 있다. 무인기가 급격한 기동이나 고속비행 등 다양한 비행 환경에서도 안정적인 비행을 위해서는 구동제어기의 역할이 매우 중요한데, 이러한 구동제어기는 구동시 열 발생이 일어나므로 어느 사용 온도내의 경계치에서 사용되어야 신뢰도와 정밀도가 이루어질 수 있다.

구동제어기 내부는 많은 보드들(boards)로 이루어져 있고, 이 보드 내에는 칩(chip)들로 구성되어 있는데, 이러한 손톱크기의 반도체 칩들에서 발생하는 열은 손바닥 크기 만한 전구보다도 더 뜨거울 수 있다. 또한, 많은 반도체 칩들이 포함되는 구동제어기 내의 각종 보드들의 칩에는 더 많은 트랜지스터를 집적하여 부피를 줄여가는 추세이다. 크기를 축소함으로써, 전자의 이동통로가 짧아져 연산속도는 빨라지지만 열 발생이 많아지는 문제점이 발생한다. 열 발생이 많아지면 트랜지스터의 저항이 커져서 전류속도는 급격히 떨어지고 전기신호가 지연되는 현상도 발생할 수 있어, 회로의 정확도가 떨어짐으로 인해 오작동이 발생하게 된다.

무인기 구동 제어기가 사용되는 주위환경의 온도는 약 (248 $^\circ K$ ~323 $^\circ K$)이다. 구동 제어기에서 중요시 간주되는 문제 중의 하나는 제어기 내의 열 발생이 어느 한계수준(368 $^\circ K$) 이하로 유지되어야 하고 최악의 경우라도 378 $^\circ K$이하로 유지되어야만 정밀도와 신뢰성을 가질 수 있다.

이러한 전자 기판이나 기계류의 온도 및 열 해석에 관한 연구로서, Jones 등[1]은 여러가지 복잡한 형상의 유동에 저 레이놀즈수 $k-\epsilon$ 난류 모델을 이용하여 연구하였고, Garimella 등[2]은 단상(single phase) 강제 대류에서 볼록 요소 배열의 열전달 특성에 관한 연구를 하였다. Kim 등[3]과 Furukawa 등[4]은 맥동 채널(pulsating channel)에서의 두 개의 가열 블록(heated block)으로부터의 강제 대류 열전달 문제를 다루었거나, 열 발생 블록을 지닌 평행 보드(board)의 열 유동 흐름을 연구하였다.

Tsay 등[5]은 열 발생 블록에 탑재된 짧은 다수 보드(boards)를 지닌 채널에서의 대류 해석을 연구하였고, Defraeye 등[6~7]은 석고 보드의 대류 건조에 대한 수치 해석적 연구와 난류 경계층에 잠긴 육면체의 표면에서의 대류 열전달 문제를 전산 유체역학을 통하여 연구하였다.

최근 Ryu 등[8]은 무인기 제동장치 제어기의 온도 및 유동해석에 관한 수치 해석 연구를 하였는데 이들은 제어장치 제어기 내의 각종 보드들과 칩들의 열 발생과 유동 흐름에 대한 연구와 더불어 열 발생으로 인한 온도 상승억제의 대안을 제시하였다.

본 논문에서는 무인기 구동제어기를 구성하는 각종 칩이나 보드들을 3차원 모델링하고, 이 모델에 대해 열 온도 해석을 함으로써, 신뢰성 있는 구동제어기의 설계를 하는데 연구의 목적이 있다.

II. 본 론

2-1 해석 모델

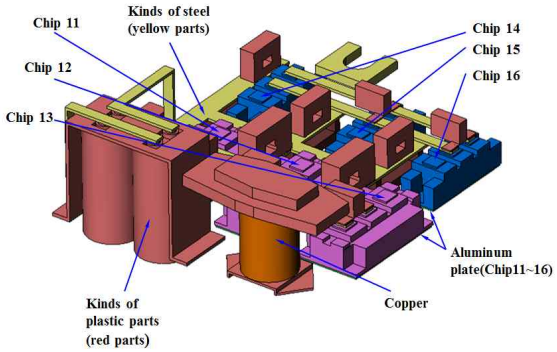


그림 1. 구동 제어기 내 상부 요소들의 3차원 모델
Fig. 1. 3-D model of upper parts for an actuation controller.

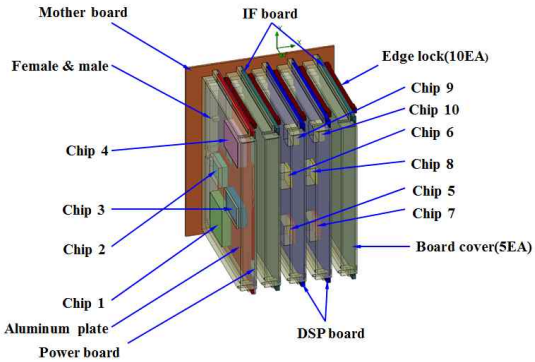


그림 2. 구동 제어기 내 하부 요소들의 3차원 모델
Fig. 2. 3-D model of lower parts for an actuation controller.

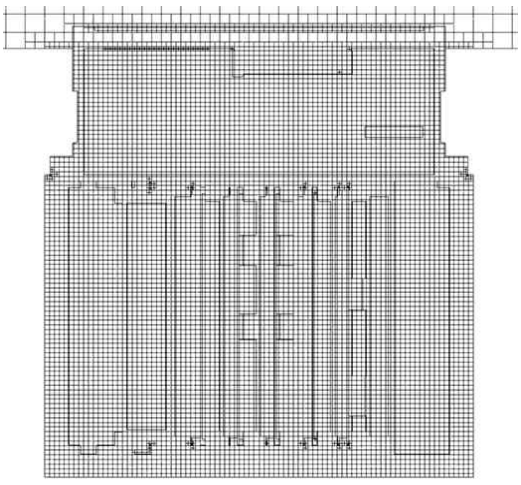


그림 3. 구동 제어기의 고체 및 내부 유체 격자
Fig. 3. Solid and interior fluid cells of a actuation controller.

구동 제어기 내의 상/하부 구성요소들과 구동제어기 전체 3차원 모델은 Fig. 1부터 Fig. 2에 나타난 바와 같다. 구동제어기 내 상하부 그림에서 알 수 있듯이, 16개의 칩과 Mother 보드, IF 보드, Power 보드, DSP 보드등으로 구동제어기를 구성하고 있다. Fig. 3은 열 온도 해석을 위한 구동제어기의 고체격자 및 내부 유체 격자들의 단면을 보여주고 있다.

Table 1은 유체격자, 고체격자 등 Fig. 3에 나타난 격자 모델의 종류와 격자 수를 나타낸다. 고체 격자 중에서도 얇은 보드부분은 partial로 처리하여 더 많은 격자가 적용되었으며, 총 격자 수는 1,575,657 격자가 사용되었다. 한편 해석 격자를 생성하기 전에 열 해석 결과에 영향이 적을 것이라 판단되는 미세 부품이나 형상에 대해서는 단순화시킴으로써, 과도한 수의 격자 생성을 피하였다. 또한, Table 1에서 irregular cell은 Fig. 3의 고체 및 내부 유체격자를 생성하는 과정에 있어, 불규칙한 격자의 생성을 나타내는데 본 연구에서는 하나도 나타나지 않았다.

표 1. 해석을 위해 사용된 격자 종류와 격자 수.
Table 1. Kinds and numbers of cells for analysis.

Kinds of cells	Number of cells
Total cells	1,575,657
Fluid cells	397,976
Solid cells	836,940
Partial cells	340,741
Irregular cells	0

2-2 지배방정식과 경계조건

본 논문에서 기체 유동은 정상상태의 난류 유동으로써, 지배방정식은 식 (1)-(3)으로 나타내지는 연속방정식, 운동량 방정식, 난류 운동에너지 방정식과 식 (4)-(5)로 표현되는 난류 운동에너지 소산율 방정식 등으로 표현된다. 또한, 난류 모델로서 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

한편, 경계조건은 내부 및 외부 공기 초기 온도와 고체부분 초기 온도를 $43^\circ C\,(316^\circ K)$로 하였고, 하우징 외벽과 외부의 공기의 열전달계수는 $h=5(W/m^{2\circ}K)$로 가정하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial \rho}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\, u_i u_j)+\frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij}+\tau_{ij}^R)+S_i \;\; where,\;\; i=1,2,3 \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t}+\frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}(u_j(\tau_{ij}+\tau_{ij}^R)+q_i) + \frac{\partial p}{\partial t}-\tau_{ij}^R\frac{\rho u_i}{\partial x_j}+\rho\epsilon+S_i u_i+Q_H \tag{3}$$

식 (3)에서, $H=h+\frac{u_i u_i}{2}$ 이다.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right)+S_k \tag{4}$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}\right)\frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}\right)+S_\epsilon \tag{5}$$

식 (1)-(5)에서, ρ는 밀도, u_i는 속도성분, τ_{ij}는 점성 전단응력 텐서, τ_{ij}^R는 Reynolds 응력 텐서, k는 난류운동에너지, ϵ는 소산율, H는 엔탈피를 나타낸다. 또한, $\frac{\partial}{\partial t}$는 시간 미분연산자, $\frac{\partial}{\partial x_i}$는 위치 미분연산자를 나타내며, h는 열전달계수를 나타낸다.

본 논문에서는 팬(fan) 등과 같이 외부와 내부 사이에 강제적인 유동을 유발하는 인자가 없으므로, 가열과정에 의하여 생기는 유체의 밀도변화 때문에 일어나는 유동현상인 자연대류 열전달을 고려하기 위하여 자연대류를 일으키는 부력으로 중력을 택하였으며, 유동장은 정상 상태의 층류와 난류 유동으로 가정하였다.

2-3 수치 해석결과 및 검토

표 2. 구동 제어기의 구성요소의 물성치
Table 2. Specifications of components for an actuation controller.

Components	Materials	Density kg/m^3	Specific heat $J/kg^\circ K$	Coefficient of thermal conductivity $W/m^\circ K$
(Mother, IF, DSP Power) Boards	Epoxy resin	1,120	1,400	0.2
Chips	Silicon	2,330	705	150
Housing, Board cover, Edge lock, Al plate (chip 11~16)	Aluminum	2,689	902	237
Kinds of female & male	Plastic	1,075	340	0.182
Steel block	Steel	8,100	510	15.1
Copper parts	Copper	8,960	384	401

본 논문에서는 3-D 모델링을 위해 상용 소프트웨어인 Pro/E와 SolidWorks 2015를 사용하였으며, 수치 시뮬레이션을 위해서는 Cosmos/Flow Works를 사용하였다.

Table 2는 무인기 구동 제어기를 구성하는 각각의 부품에 대한 재질과 물성치를 나타내고, Table 3은 Table 2에 나타난 각각의 부품에 대한 발열 조건을 나타낸다.

표 3. 구동 제어기 구성요소의 발열량
Table 3. Heat sources of components for an actuation controller

Parts	Heat source values (W)	Parts	Heat source values (W)
Chip 1	5.9	Chip 6, 8	2
Chip 2	1.3	Chip 9. 10	5
Chip 3	2.7	DSP board	48
Chip 4	9.7	Chip11, 12, 13	1,351
Chip 5, 7	2	Chip14, 15, 16	110

Fig. 4는 열 해석을 위한 구동제어기 보드들의 각 단면들을 나타낸다.

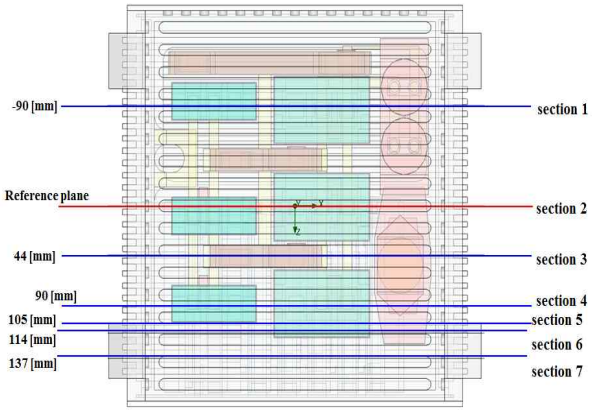
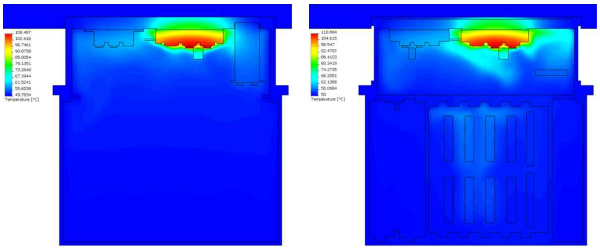
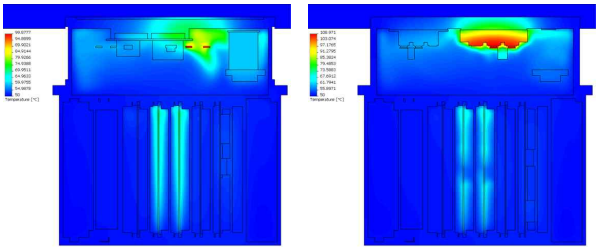


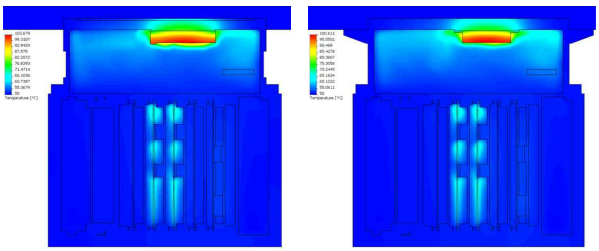
그림 4. 열 해석을 위한 구동 제어기의 각 단면
Fig. 4. Cross sections of an actuation controller for thermal analysis.



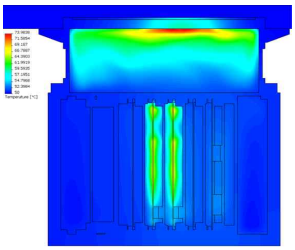
(a) Section 1 (b) Section 2



(c) Section 3 (d) Section 4



(e) Section 5 (f) Section 6



(g) Section 7

그림 5. 구동제어기 각 단면에서의 고체부분 온도 분포
Fig. 5. Solid parts temperature distributions of an actuation controller at each sections.

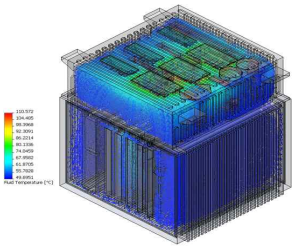


그림 6. 구동제어기 내부의 공기온도 분포
Fig. 6. Interior air temperature distributions of an actuation controller.

Fig. 5와 6은 각각 Fig. 4에서의 구동제어기 각 단면에서의 온도분포와 구동제어기 내부의 공기 온도분포를 보여준다. 각 그림들에서 온도를 나타내는 숫자가 아주 작게 보이므로 이를 다시 표시하면 먼저 section 1에서의 최고 및 최저 온도는 각각 108.49 ° C, 49.08 ° C 이고, section 2는 110.68 ° C, 50 ° C, section 3은 99.88 ° C, 50 ° C, section 4는 108.97 ° C, 50 ° C, section 5는 103.68 ° C, 50 ° C, section 6은 100.61 ° C, 50 ° C,

section 7은 73.98 ° C, 50 ° C이고, Fig. 6의 구동제어기 내부의 공기의 최고 및 최저 온도는 각각 110.57 ° C, 49.70 ° C를 나타내었다. 즉, 전체적으로 고체 및 유체부분의 최고온도는 110.68 ° C, 최저온도는 49.08 ° C이다. 이 최고온도는 본 연구에서 구동제어기의 최악의 온도 조건인 105 ° C(378 ° K)를 약간 상회하므로 구동제어기내의 일부분에 방열판을 설치하여, 열을 좀 더 방출 시킬 수 있는 대책이 필요하다고 판단된다.

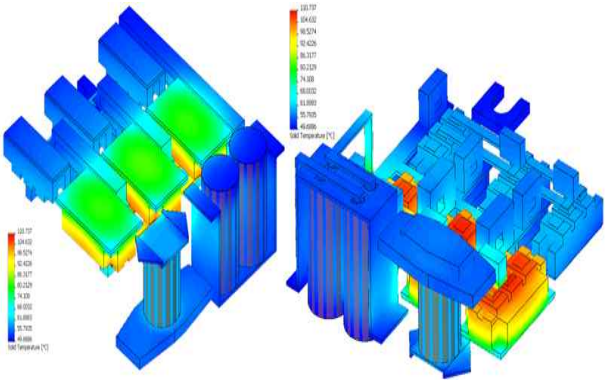


그림 7. 구동제어기 상부 내부 고체 표면온도 분포
Fig. 7. Temperature distributions of upper interior solid surfaces of an actuation controller.

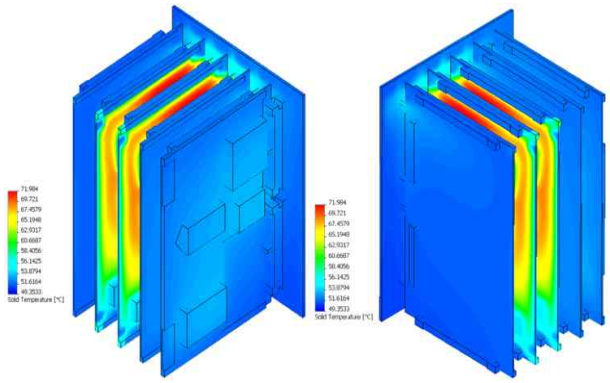


그림 8. 구동제어기 하부 내부 고체 표면온도 분포
Fig. 8. Temperature distributions of lower interior solid surfaces of an actuation controller.

Fig. 7과 8은 각각 구동제어기 상 하부 내부의 고체표면 온도 분포를 나타내고 있다. 상부에서의 표면 고체온도의 최고 및 최저 값은 각각 110.74 ° C, 49.69 ° C, 하부에서의 표면 고체온도의 최고 및 최저 값은 각각 71.98 ° C, 49.35 ° C이다. 이 경우도 상부에서의 최고 온도 값이 최악의 조건 온도값을 약간 상회하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 칩 1번부터 10번까지의 위치를 나타낸 그림이고, Fig. 10은 칩 11번부터 16번, 다양한 보드들의 위치를 나타낸 그림이다.

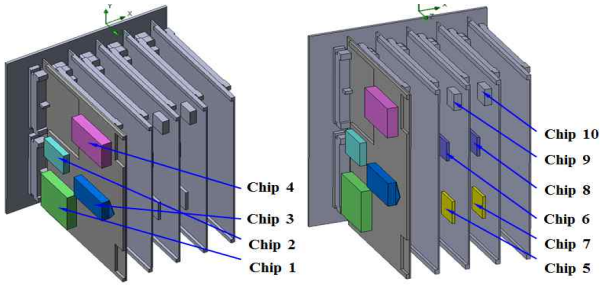


그림 9. 칩 1번부터 10번까지의 위치
Fig. 9. Positions from chip number 1 to chip number 10.

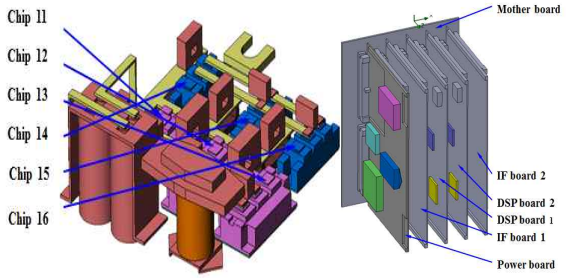


그림 10. 칩 11번부터 16번, 다양한 보드들의 위치
Fig. 10. Positions from chip number 11 to chip number 16 and boards.

Table 4는 각종 칩들과 다양한 보드들의 최고 및 최저 온도를 보여준다.

표 4. 각종 칩들과 보드들의 최고 및 최저 온도
Table 4. Maximum and minimum temperatures of chips and various boards.

Parts	Minimum temperature	Maximum temperature
Chip 1	52.49	53.32
Chip 2	53.28	53.35
Chip 3	52.53	53.24
Chip 4	52.75	53.37
Chip 5	53.06	53.15
Chip 6	52.96	53.05
Chip 7	53.47	53.55
Chip 8	53.37	53.45
Chip 9	53.84	54.36
Chip 10	53.64	54.10
Chip 11	65.32	108.88
Chip 12	68.59	110.74
Chip 13	66.07	109.08
Chip 14	52.89	60.46
Chip 15	53.11	61.08
Chip 16	53.00	60.72
Power board	51.24	53.46
IF board 1	51.26	54.37
DSP board 1	51.25	72.19
DSP board 2	51.13	72.18
IF board 2	50.97	54.09
Mother board	50.80	56.53

III. 결 론

무인기 구동 제어기의 열 온도 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1)구동제어기 내부 하부의 칩 1번부터 10번과 각종 보드들은 board cover에 직접적으로 접촉되어 열전달이 잘 이루어지므로 DSP 보드를 제외하고는 대부분 54 ° C내외의 온도 분포를 보이고 있어 안전하고, DSP보드들도 최고온도가 72 ° C 약간 상회하는 정도로 안전 경계치의 온도 값보다는 훨씬 아래에 분포하고 있다.

(2)칩 11부터 13번은 최고온도가 110 ° C내외로 안전 경계치를 상회하고 있어, 외부로 열을 방출할 수 있는 알루미늄 판을 장착시켜 온도를 낮추도록 설계를 하여야 할 것으로 판단된다. 향후, 알루미늄 판 등을 부착한 상태에서의 열 및 온도해석이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] W. P. Jones and B. E. Launder, “The Calculation of Low-Reynolds-number Phenomena with a Two-equation Model of Turbulence”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 16, pp. 1119-1130, 1973.

[2] S. V. Garmella and P. A. Eibeck, “Heat Transfer Characteristics of an Array of Protruding elements in Single Phase Forced Convection”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, pp. 2659～2669, 1990.

[3] S. Y. kim, B. H. Kang and Pallares, “Forced Convection Heat Transfer from Two Heated Blocks in Pulsating Channel Flow”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 625～634, 1998.

[4]T. Furukawa and W. J. Yang, “Thermal Fluid Flow in Parallel Boards with Heat Generating Blocks”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 5005～5015, 2006.

[5] Y. L. Tsay, and J. C. Cheng, “Analysis of Convective Heat Transfer Characteristics for a Channel Containing Short Multi-Boards Mounted with Heat Generating Blocks”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, pp. 145-154, 2008.

[6] T. Defraeye, B. Brocken and J. Cameliet, “CFD Analysis of Convective Heat Transfer at the Surface of a Cube Immersed in a Turbulent Boundary Layer”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 297~308, 2010.

[7] T. Defraeye, G. Houvenaghel, J. Cameliet and D. Derome, “Numerical Analysis of Convective Drying of Gypsum Boards”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 2590~2600, 2012.

[8] B. J. Ryu, Y. S. Kim, B. J. Oh and B. H. Shin, “Temperature and Flow Analysis for Brake Control Units of an Unmanned Aerial Vehicle”, *Journal of Digital Contents Society,* Vol. 19, No. 11, pp. 2167~2172, 2018.

유봉조(Bong-Jo Ryu)

1981년 : 연세대학교 기계공학과 (공학사)
1983년 : 연세대학교 대학원 (공학석사)
1988년 : 연세대학교 대학원 (공학박사)
1989년~1989년: 삼성종합기술원
1991년~1992년: 일본 대판부립대학 객원교수
1989년~현 재 : 한밭대학교 기계공학과 교수
※관심분야 : 구조물 진동해석, 제어, 추력을 받는 보 구조물의 탄성 안정성

김영식(Youngshik Kim)

2003년 : University of Utah대학원(공학석사)
2008년 : University of Utah대학원(공학박사)
2008년~2009년: University of Utah
2009년~2009년: 방위사업청
2009년~2011년: DGIST
2011년~현 재 : 한밭대학교 기계공학과 교수

※관심분야 : 스마트액추에이터(smart actuator), 모션제어 (motion control),생체모방로봇(bio-inspired robot), 센서융합(sensor fusion) 등

오부진(Bu-Jin Oh)

2002년 2월 : 한밭대학교 기계설계공학과 대학원(석사)
2011년 8월 : 충남대학교 기계설계공학과 대학원(박사)
2007년 3월~2013년 8월 : 한밭대학교 시간강사
2015년 6월~2016년 9월 : 아이겐스코프(주)
2016년 10월~현재 :국방과학연구소 선임기술원
※관심분야 : 구조 및 진동해석, 구조물 진동/제어

신부현(Buhyun Shin)

2001년 : 서울대학교 기계항공공학부(공학사)
2007년 : 서울대학교 기계항공공학부 대학원 (공학박사)
2007년~2009년 : 삼성전자 반도체총괄 책임연구원
2009년~2012년 : 서강대학교 기계공학과 BK21 연구교수
2012년~현 재 : 한밭대학교 기계공학과 교수
※관심분야 : 전자기 구동기(electromagnetic actuator), 스마트 구동기(smart actuator) 생체모방로봇 (bio-inspired robot), 등