技術論文 DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.11.934

항공기용 PAO-공기 열교환기 성능분석 연구

박동명*, 정용인*, 문우용*, 박성순**

A Study on the Performance Analysis of the PAO-AIR Heat Exchangers in an Aircraft

Dong-Myung Park*, Yong-In JOUNG*, Woo-Yong Moon* and Sung-Sun Park**

ABSTRACT

In this study, the performance validation of a PAO-AIR heat exchanger developed for the ECS(Environmental Control System) of a UAV(Unmanned Aerial Vehicle) has been carried out. The performance goals of a PAO-AIR heat exchanger were established by the system schematic analysis. And a heat exchanger to be met the ECS performance was developed by a detailed design and a precision manufacture. Using the developed heat exchanger, the experiment about pressure loss and effectiveness, overall heat transfer coefficient to prove the developed PAO-AIR heat exchanger performance in various conditions as well as a design point of heat exchanger was performed and the experimental results were analyzed. As the experimental results, the performance and characteristic of a PAO-AIR heat exchanger developed for the ECS of a UAV were analyzed and the development suitability was proved.

초 록

본 연구는 무인항공기의 환경제어계통에 적용되는 PAO-공기 열교환기에 대한 성능검증에 관한 것으로, 계통에 대한 성능분석을 통해 열교환기 성능목표를 설정하고 상세설계와 정밀제작을 통해 목표성능에 부합되는 열교환기를 개발하였다. 개발된 PAO-공기 열교환기의 성능을 입증하기 위해 열교환기의 설계점 외에 다양한 시험조건에 대한 압력손실과 열전달 유용도, 총괄열전달계수 등에 대해 시험을 수행하였다. 수행된 결과를 바탕으로, 무인항공기용 환경제어계통에 적용된 PAO-공기 열교환기의 성능과 특성을 분석하여 개발적합성에 대해 검증하였다.

Key Words : Unmanned Aerial Vehicle(무인항공기, UAV), Environmental Control System(환경제어계통, ECS), PAO-AIR Heat Exchangers(PAO-공기 열교환기), Design Point(설계점), Effectiveness(열전달 유용도), Overall Heat Transfer Coefficient(총괄열전달계수), Pressure Loss(압력손실)

† 2012년 05월 08일 접수 ~ 2012년 10월 11일 심사완료
* 정회원, 삼성탈레스(주)
교신저자, E-mail : dongmyung.park@samsung.com
경기도 용인시 처인구 남사면 창리 304번지
** 정회원, 국방과학연구소

Ⅰ. 서 론

항공기용 환경제어계통은 항공기에 탑재된 항전장비의 안정적 운용을 위해 항전베이(Avionics Bay) 내부 온도/압력을 유지하는 시스템이다[1].

Table 1. Characteristics of PAO

Item	PAO
Kinematic Viscosity	1,087 mm^2/s(@-73.1 ℃) 277 mm^2/s(@-40.0 ℃) 54 mm^2/s(@-17.8 ℃) 5.19 mm^2/s(@37.8 ℃)
Thermal Conductivity	0.1465 W/(m·k)(@-17.8 ℃) 0.1407 W/(m·k)(@37.8 ℃) 0.1302 W/(m·k)(@149.0 ℃)
Specific Heat	2,051.5 J/(kg·k)(@-17.8 ℃) 2,260.8 J/(kg·k)(@37.8 ℃) 2,637.7 J/(kg·k)(@149.0 ℃)
Resistivity	$4.5x10^{13}$ Ω·cm(@25 ℃)

일반적으로, 환경제어계통은 열교환기와 송풍팬, 제어밸브 등으로 구성되며, 환경제어계통의 핵심구성품이라 할 수 있는 열교환기는 항전베이 내부 항전장비의 발열량을 고려하여 과열과 과냉현상을 회피하기 위해 적정 용량으로 선정되어야 하고, 항공기의 임무시간(Mission Profile)을 고려하여 소형경량화 구현이 수반되어야 한다. 본 계통에서는 항공기의 운용환경(온도 등)을 고려하여 냉매를 저온에서 응고가 되지 않는 PAO (Polyalphaolefin)로 선정하였으며, 물리적 특성은 Table 1과 같다.

본 연구는 무인항공기의 환경제어계통에 적용되는 PAO-공기 열교환기에 대한 성능검증에 관한 것으로, 열교환기의 성능분석을 수행하고 다양한 시험조건에서 열교환기 자체의 특성시험을 수행하였다. 특히, 항공기의 특성상 환경제어계통은 복잡한 환경조건에서 안정적 운용과 효과도를 보장하기 위해 성능분석과 입증이 반드시 수반되어야 하며, 정확하고 신뢰성있는 자료가 확보되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 관점에서 기개발된 항공기용 PAO-공기 열교환기에 대해 특성 연구를 수행하였다.

II. 본 론

2.1 PAO-공기 열교환기 개발

2.1.1 환경제어계통 설계

Fig. 1에서와 같이, 환경제어계통은 항공기의 연료를 이용하여 항전베이(Bay#1/#2)를 냉각하는 시스템으로써, 냉매 순환용 펌프에 의해 냉매를 항전베이로 순환시켜 연료-PAO 열교환기를 통해 항전베이 내부의 열을 회수한다. 항전베이로부터 회수한 열은 냉매를 통해 연료-PAO 열교

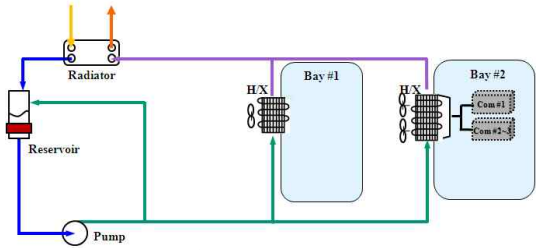


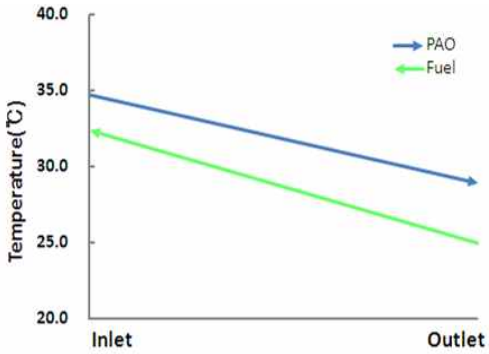
Fig. 1. ECS schematic diagram

환기에서 항공기 연료와 열교환되어 회수된 열을 방출하고, 다시 냉매 저장용기(Reservoir)를 거쳐 순환하게 된다. 이 때, 각 베이의 온도는 -10~50 ℃를 유지할 수 있어야 한다.

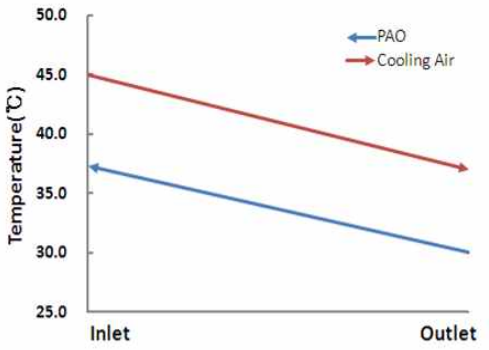
본 계통의 시스템 요구조건을 만족하기 위해 시스템 분석을 수행하고, 그 결과를 이용하여 각 열교환기의 설계점(Design Point)를 설정하였다.

2.1.2 열교환기 설계/제작

Fig. 2는 시스템 분석을 통해 연료-PAO 열교환기와 PAO-공기 열교환기 입출구 온도을 분석



(a) Fuel-PAO heat exchanger



(b) PAO-Air heat exchanger

Fig. 2. Fluid temperature variation of heat exchanger

Fig. 3. PAO-AIR heat exchanger

Fig. 4. Experimental setup

한 결과이며, 본 연구에서는 PAO-공기 열교환기만을 고려하였다. PAO-공기 열교환기는 입출구 온도에서 2.3 kw의 냉각용량과 0.6이상의 열전달 유용도를 만족하도록 설계되었다[2,3].

Fig. 3과 같이, PAO-공기 열교환기는 액체-기체 열교환방식의 열교환기로 핀-튜브형태로 제작하였다. 핀을 이용하여 열교환기의 전열면적을 극대화하고 공기의 유동 왜곡을 최소화하기 위해 유체의 흐름과 동일한 방향으로 판형 핀을 적용하였다. 또한, 저온측과 고온측 누설조건과 압력조건을 만족하기 위한 밀폐형으로 제작하였으며, 무게경량화를 위해 알루미늄합금을 사용하였다.

2.2 PAO-공기 열교환기 성능시험

2.2.1 성능시험장치

성능시험장치는 PAO-공기 열교환기 성능평가를 위해 Fig. 4와 같이 PAO-공기 열교환기와 송풍팬, 냉매온도조절용 GVCS(Ground Vapor Cooling System), 공기냉각용 열교환장치와 냉각장치(Chiller), 공기가열용 가열장치(Heater)로 구성되며, 자료 획득을 위한 계측센서(온도센서, 온도/압력센서, 차압센서, 습도센서, 유량센서)와 자료획득장치로 구성하였다[4]. 또한, 열교환기에 공급되는 저온측(Cold Side) 유체(PAO)는 GVCS의 냉각/가열 기능을 이용해 설정 온도를 유지하였으며, 고온측(Hot Side) 유체(공기)는 냉각장치와 공기냉각용 열교환장치, 히터가 내장된 가열장치를 이용해 설정온도를 유지하였다.

고/저온측 유체의 입출구 온도는 RTD 센서(Resistance Temperature Detector Sensor)를 이용해 측정하였고, 압력손실은 압력센서와 차압센서를 이용하여 측정하였다. 온도센서와 압력센서는 불필요한 외부 열전달을 최소화하기 위해 시험부 가까이 위치시키고, 센서간 상호간섭을 최소화하는 위치에 장착하였다. 저온측 유량은 볼밸브를 이용해 제어하고, 고온측 유량은 인버터를 통해 제어하면서 각각의 유량을 유량계로 계측하였다.

2.2.2 성능시험 방법

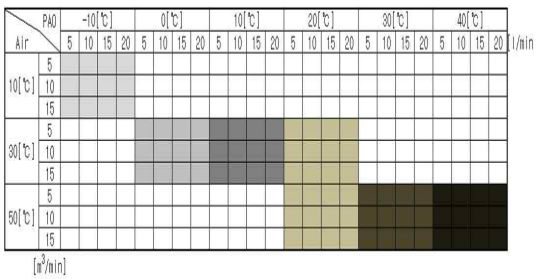
열교환기의 성능시험을 위하여 실제 항공기에서 요구하는 환경조건을 고려하여 시험범위를 설정하고, 고/저온측 유량과 온도를 변수로하여 계측점을 Table 2와 같이 선정하였다. 또한, 설계점과 계측점에 대한 자료 획득은 시험오차를 최소화하기 위해 정상상태 조건에서 수행하였다. 고/저온측 유체 온도는 계측점 온도의 ±2 ℃ 이내로 설정하고, 정상상태에서 온도변화가 ±0.2 ℃가 유지될 때 자료를 획득하였다. 유량은 계측점 유량의 ±5 % 이내로 설정하고, 정상상태에서 유량변화가 ±1 %를 유지할 때 데이터를 획득하였다.

2.3 열교환기 성능시험 결과 분석

2.3.1 설계점에 대한 충족도 분석

고/저온측의 압력손실 $\triangle P$는 열교환기 입출구의 압력변화를 나타내며, 식 (1)과 같이 정의된다[5].

Table 2. Measuring points of PAO-Air heat exchanger



$$\triangle P = P_{in} - P_{out} \quad (1)$$

여기서, P_{in}과 P_{out}은 각각 열교환기 입출구의 전압(Total Pressure, Pa)을 나타낸다.

이 때, 압력손실이 열교환기의 입출구 온도에 독립적이기 위해 *Sigma Delta P*를 식 (2)~(4)와 같이 정의된다.

$$Sigma\ Delta\ P = \sigma \times \triangle P \quad (2)$$

$$\sigma = 35.3 \times (\frac{\overline{P}}{\overline{T}}) \quad (3)$$

$$\overline{P} = \frac{(P_{in} + P_{out})}{2} \quad (4)$$

$$\overline{T} = \frac{(T_{in} + T_{out})}{2}$$

여기서, $\overline{P}$과 $\overline{T}$는 열교환기의 입출구 압력과 온도에 대한 산술평균을 나타낸다.

열교환기의 열교환 능력인 열용량률 $\dot{Q}$는 식 (5)와 같다[6,7].

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \triangle T \quad (5)$$

여기서, $\dot{m}$와 c_p는 각각 유체의 질량유량과 정압비열을 나타낸다.

총 전열계수와 전열면적의 곱인 UA는 열용량률(Heat Capacity Rate)과 대수평균온도차(LMTD)를 이용하여 식 (6)~(7)과 같이 정의할 수 있다[8].

$$UA = \frac{\dot{Q}}{\triangle T_{LMTD}} \quad (6)$$

$$\triangle T_{LMTD} = \frac{(T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,out} - T_{c,in})}{\ln(\frac{T_{h,in} - T_{c,out}}{T_{h,out} - T_{c,in}})} \quad (7)$$

여기서, $\triangle T_{LMTD}$는 대수평균온도차를 나타낸다.

열전달 유용도 ε은 열교환기의 실제 열용량률과 최대 가능한 열용량률의 비로써, 식 (8)~(9)와 같이 정의된다[9].

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}} = \frac{C_h(T_{h,in} - T_{h,out})}{C_{\min}(T_{h,in} - T_{c,in})} = \frac{C_c(T_{c,out} - T_{c,\in})}{C_{\min}(T_{h,in} - T_{c,in})} \quad (8)$$

$$C_h = \dot{m}_h c_{p,h},\ C_c = \dot{m}_c c_{p,c} \quad (9)$$

여기서, $C_{\min}$은 C_h와 C_c를 비교하여 작은 값을 나타내고, 하첨자 h와 c는 각각 고/저온측을 의미하며 in과 out은 각각 열교환기의 입출구를 나타낸다.

$C_c = C_{\min}$일 경우, 식 (10)과 같이 정의된다.

$$\varepsilon = \frac{T_{c,out} - T_{c,in}}{T_{h,in} - T_{c,in}} \quad (10)$$

전달단위수(Number of Transfer Units) NTU는 식 (11)과 같이 정의된다.

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} \quad (11)$$

따라서, 열교환기의 성능평가를 위해 상기 식을 이용해 압력손실과 열용량률을 구하고, 열교환기 성능계수인 열전달 유용도와 총괄전열계수의 자료를 획득하여 항공기용 PAO-공기 열교환기의 성능을 분석하였다.

2.3.2 열교환기 성능 분석

Table 3는 설계점에서 열교환기가 요구성능을 만족하는지 시험한 결과이다. 시험조건이 정상상태를 유지한 후, 35분간 5분 간격으로 7번 측정하여 평균하여 요구성능과 비교하였다. 그 결과, 열교환기는 설계점에서 요구하는 열용량률 2.3 kw를 만족함을 확인하였다.

Fig. 5는 고온측 유체인 공기의 풍량변화에 따른 압력손실을 측정한 결과이다. 풍량변화에 따

Table 3. Test results at design point

Item	Air		PAO		HCR $\dot{Q}$ [kw]
	T_{in} [℃]	F/R [m^3/m]	T_{in} [℃]	F/R [m^3/m]	
Design Point	45.00	14.40	30.00	10.71	2.30
Result	44.97	14.78	29.89	10.71	2.36
	44.97	14.78	29.96	10.71	2.34
	44.98	14.78	29.97	10.71	2.36
	44.99	14.78	29.98	10.71	2.33
	44.98	14.78	29.96	10.71	2.34
	44.97	14.78	29.98	10.71	2.34
	44.98	14.78	30.0	10.71	2.36
	44.98	14.78	29.96	10.71	2.35

* F/R: Flow Rate, HCR: Heat Capacity Rate

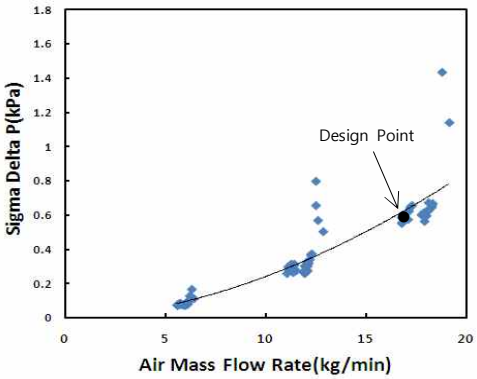


Fig. 5. Sigma Delta P at various air mass flow rate

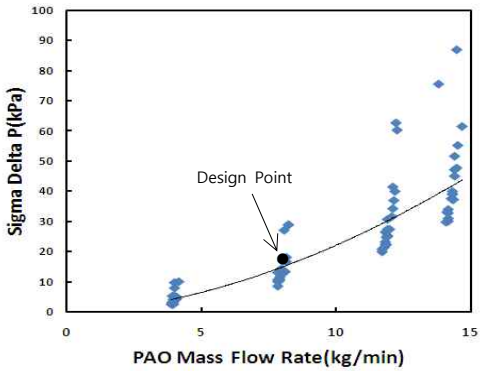


Fig. 6. Sigma Delta P at various PAO mass flow rate

른 압력손실이 일정하게 분포되는 것으로 실험결과의 적합성을 확인할 수 있으며, 풍량이 증가함에 따라 압력손실이 속도의 제곱에 비례하여 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한, 열교환기에 착상현상이 발생할 때, 유량에 따른 압력손실의 경향성을 확인하기 위해 저온측 유체인 PAO를 -10 ℃, 습공기는 50 %이상의 상대습도를 유지하여 시험을 수행하였다.

추세선의 외곽에 분포된 데이터는 열교환기에 착상이 발생했을 때의 시험결과이다. 시험결과와 같이, 습공기의 냉각으로 인해 열교환기에 착상이 발생하여 압력손실이 증가함을 알 수 있었다 [10,11]. 또한, 설계점에 대한 압력손실 측정결과는 추세선 상에 있어 결과의 정확성을 확인할 수 있으며, 설계 요구조건을 만족함을 알 수 있었다.

Fig. 6은 저온측 유체인 PAO의 유량변화에 따른 압력손실을 측정한 결과이다. 유량변화에 따른 압력손실이 일정하게 분포되는 것으로 실험결과의 적합성을 확인할 수 있다. 다만, 고온측 유체인 공기의 유량증가에 따른 압력손실 그래프와 달리 동일한 유량에서 압력손실 분포가 서서히 증가함을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 PAO가 공기에 비해 더 큰 점성을 가지고 있으며, 온도가 감소할수록 급격한 점성 증가를 보이기 때문이다. 추세선에서 가장 멀리 떨어진 시험결과는 PAO가 -10 ℃일 때의 결과로 PAO가 0℃이하일 때에 급격한 점성증가를 나타낸다. 설계점에 대한 압력손실 결과는 추세선 상에 있어 결과의 정확성을 확인할 수 있으며, 계측된 자료를 통해 설계 요구조건에 만족함을 확인하였다.

Fig. 7은 열교환기의 저온측 유체인 PAO와 고온측 유체인 공기의 풍량변화에 따른 총괄열전달계수의 변화를 측정한 결과이며, 유량이 증가할

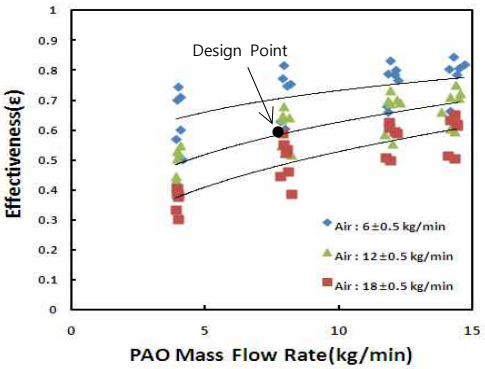


Fig. 7. Effectiveness at various AIR/PAO mass flow rate

수록 열전달 유용도도 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 유량이 증가함에 따라 총괄열전달계수도 증가하기 때문에 최대 열용량률대비 실제 열용량률의 증가를 가져온 결과이다. 설계점에 대한 열전달 유용도 결과는 0.55이상으로 열전달 유용도와 열용량률을 만족하였다. 또한, 추세선은 각각의 풍량에 대한 열전달 유용도의 변화 추이를 보여준다.

Fig. 8은 시험을 통해 획득한 자료를 이용하여 열교환기의 UA를 구한 결과이며, UA는 총괄열전달계수와 전열면적의 곱으로 열교환기의 열전달 특성을 나타내는 지표가 된다. UA는 열교환기로 유입되는 풍량과 유량이 증가할수록 증가하였다. 또한, 열교환기의 입구측 온도에 따라서 총괄열전달계수가 크게 증가함을 확인하였다. 설계점에 대한 UA 결과는 Fig. 6과 같으며, 열교환기의 운용환경 중 높은 총괄열전달계수를 가지고 열교환기가 작동됨을 확인할 수 있다.

본 시험을 통해 획득한 입구측 유량과 온도

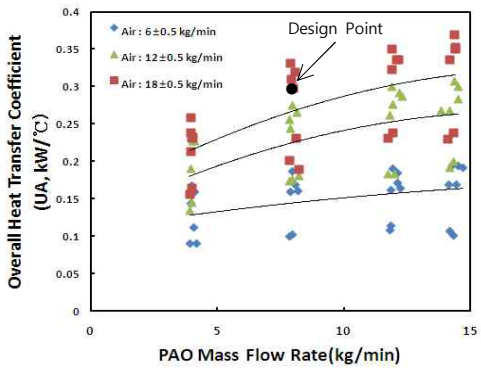


Fig. 8. Overall heat transfer coefficient at various Air/PAO mass flow rate

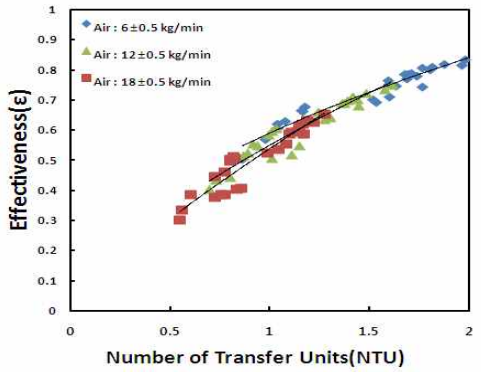


Fig. 9. Correlation between Effectiveness and Number of Transfer Units

변수에 따른 UA는 탈설계점에서 열전달량을 예측하는데 기본 자료가 될 수 있을 것이다. 또한, 추세선은 각각의 풍량에 대한 총괄열전달계수의 변화 추이를 보여준다.

Fig. 9는 열교환기의 열전달 유용도(ϵ)와 열전달단위수(NTU)를 측정한 결과이다. 열전달 유용도는 열전달단위수가 증가할수록, 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과는 열전달단위수가 증가함에 따라 열전달율이 증가하기 때문임을 알 수 있다.

III. 결 론

본 연구에서는 실제 항공기의 환경제어계통에 사용되는 PAO-공기 열교환기의 압력손실과 입출구 온도, 유량 등 열전달 특성과 관련된 데이터를 성능시험을 통해 획득하였다.

획득한 데이터를 통해 PAO-공기 열교환기의 성능과 특성을 확인한 결과, 열교환기의 설계점에 대한 요구성능을 만족함을 확인할 수 있었다.

또한, PAO-공기 열교환기의 시스템 해석을 통해 확인하기 힘든 착상현상과 각 유체의 점성이 압력손실에 영향을 주는 경향성을 확인할 수 있었다.

따라서, 본 연구를 통해 얻은 다양한 유량조건과 온도조건 등에 대한 시험결과는 환경제어계통의 시스템 열적 안정성 평가와 냉방능력을 예측/분석하는데, 기본 자료를 제공함과 동시에 환경제어계통의 시스템 성능해석에 대한 신뢰도를 향상시켰다.

참고문헌

1) 차재병, 강병찬, 오태식, “항공기 환경제어계통의 열역학적 특성”, *대한기계학회논문집*, 제19권 제4호, 1995, pp.1116~1124.

2) Yunus A. Cengel, Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill, NewYork.

3) 김장강, 냉동 및 공기조화공학, 보성각, 2001

4) 정용인, 박동명, 문우용, 강석순, 박성순, “환경제어계통(ECS)의 성능검증을 위한 실험적 연구”, *2012년도 한국항공우주학회 춘계학술대회 논문집(I)*, 2012, pp.730~734.

5) Frank M. White, Fluid Mechanics, McGraw-Hill, NewYork.

6) T. Kuppan, Heat Exchangers Design Handbook, 2000.

7) 강병하, 김도규, “판형열교환기의 열에너지 성능평가”, *한국수소 및 신에너지 학회 논문집*, 제14권 제1호, 2003, pp.53~60.

8) W. M. Kays, and A. L. London, Compact Heat Exchangers, McGraw-Hill, NewYork.

9) 김윤호, 이규정, 서장원, 전승원, “직관채널의 마이크로 판형열교환기 열적 성능 특성”, *설비공학논문집*, 제20권 제11호, 2008, pp.767~774.

10) Y. S. Muzychka, and M. M. Yovanovich, “Modeling the f and j characteristics for Transverse Flow Through an Offset Strip Fin at Low Reynolds Number,” *Enhanced Heat Transfer*, Vol.8, 2001, pp.243-259.

11) MIL-PRF-87252C, Coolant Fluid, Hydrolytically Stable, Dielectric, 2004.