

Nacelle 내부에 장착된 열교환기 냉각성능의 수치적 평가방법

전상욱*† · 이상윤* · 허재성* · 박부민* · 임병준*

A Numerical Approach to the Evaluation of Cooling Performance of Heat Exchanger Installed Inside Nacelle

Sangook Jun*†, Sang Yoon Lee*, Jae-Sung Huh*, Poo Min Park*, Byeung Jun Lim*

Key Words : Heat exchanger(열교환기), Cooling performance(냉각성능), Nacelle(나셀), Hybrid electric propulsion(하이브리드 전기 추진), Thermal management(열관리)

ABSTRACT

This study presented that the cooling performance of a heat exchanger installed inside nacelle was evaluated and its improvement was explored using numerical analysis. For this end, heat exchanger was replaced with a porous model and the information required for heat transfer analysis - pressure loss coefficient, heat transfer coefficient, coolant inlet/outlet temperatures, heat, etc - was obtained from ϵ -NTU method. Since these values depend on the flow conditions of the coolant and air flowing into the heat exchanger, the neural network model were constructed for these and immediately provided them during numerical analysis. To verify this analysis method, the results of the cooling performance experiment for the nacelle with heat exchangers were compared. It was confirmed that the numerical approach in this study was appropriate for evaluating the cooling performance of the heat exchanger installed on the nacelle because of 1 % difference in the coolant inlet/outlet temperatures and 2 % difference in the heat dissipation of the heat exchanger. In addition, the analysis was performed considering the effect through the effects of the propeller downwash and the cooling fan mounted on the nacelle. It was confirmed that even if the propeller downwash does not enter the nacelle, the cooling performance of the heat exchanger installed inside the nacelle can satisfy the target if the cooling fan can suck 0.13 kg/s of air at 1 kPa.

1. 서 론

전기추진 시스템에서 모터, 인버터 등의 전자기기는 나셀(Nacelle) 혹은 포드(POD)에 장착된다. 이들 기기가 목표한 성능을 발휘하기 위해서는 내부 열관리가 중요⁽¹⁾하고 열교환기의 장착이 필요하다. 이를 위해서는 공기흡입구가 충분한 면적을 가져야 하고, 나셀 내부의 공기흐름을 막는 장애물이 없도록 공간이 여유로운 것이 유리하다. 하지만 나셀 내부에는 모터, 인버터, 와이어하네스, 열교환기, 경우에 따라 배터리, 냉각펌프 등 여러 구성품이 장착되고, 나셀의 크기가 클수록 항력이 증가하여 전체적인 비행성능을 저하시킬 수 있기 때문에 대체로 내부 공간은 협소하다. 이러한 환경은 열교환기 및 공기 흡입구 설치에 제약이 되며, 장착 시 열교환

기 냉각성능 저하 정도를 파악하기 어렵게 만든다.

일반적으로 열교환기에 균일하게 공기가 유입되는 이상적인 유동조건에 대해서는 ϵ -NTU와 같은 해석만으로도 냉각성능을 5 % 차이를 보일 정도로 유사하게 예측할 수 있지만, 좁은 공간에 장착된 열교환기의 경우 유입되는 공기의 유동조건을 파악하기 어렵기 때문에 단순 해석만으로는 곤란하다. 열교환기와 장착되는 나셀을 모두 모델링하여 수치해석(Computational Fluid Dynamics; CFD)을 수행하는 방법도 있겠지만 열교환기 전체에 격자를 만들어 해석을 하기에는 큰 계산비용이 요구되는 단점이 있다. 이러한 까닭에 다른 효율적인 방법으로 접근하려는 노력을 많이 한다.

Liu 등⁽²⁾은 캐빈(Cabin) 안에 있는 열교환기의 용량 증가를 위한 guide plate 설계를 수행하였다. 캐빈의 형상은 직

* 한국항공우주연구원 항공추진연구부(Aeropropulsion Research Division, Korea Aerospace Research Institute)

† 교신저자, E-mail : sangookjun@kari.re.kr

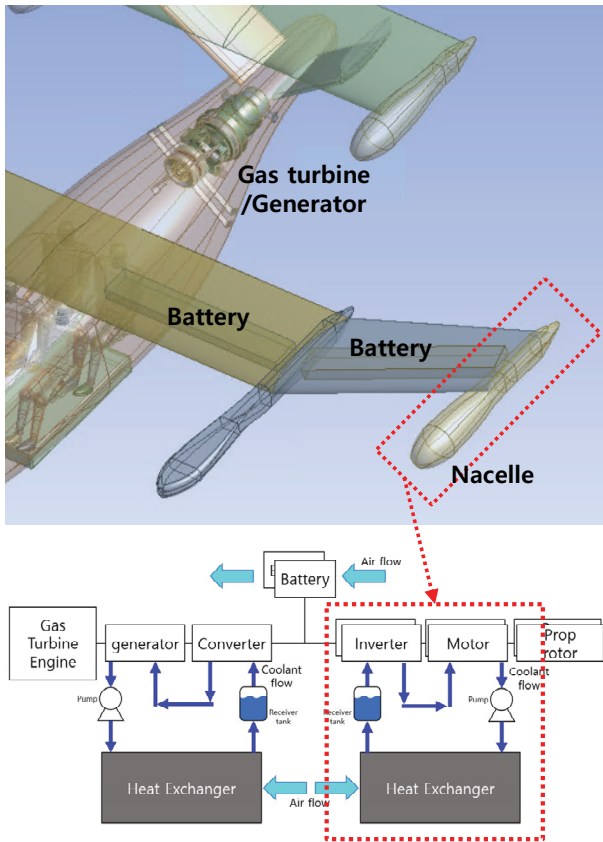


Fig. 1 Concepts of hybrid electric propulsion system⁽⁹⁾

육면체 형태로 단순화하고 4개의 채널로 구성된 열교환기를 해석하여 냉각성능을 평가하였다. Jun 등⁽³⁾과 Kang 등⁽⁴⁾은 열교환기를 다공성 모델(Porous media)로 처리하여 나셀 장착 시 압력손실을 최소화 할 수 있도록 공기측 유로를 설계 하였으며, Kim 등⁽⁵⁾ 역시 자동차용 열교환기를 다공성 모델로 대신하여 그릴(Grille) 설계를 위한 파라미터 스텐디를 수행했다. 한편 Lee와 Ahn⁽⁶⁾, Park 등⁽⁷⁾은 wave-slit fin을 가지는 열교환기의 공기측 성능 분석을 위해 반복되는 핀 형상의 주기성을 해치지 않도록 해석 도메인을 설정하고 1,000 만개 수준의 격자로 수치해석을 수행하였다. Kang 등⁽⁸⁾은 2 단 열교환기가 장착된 보일러 연소실의 연소 및 열전달 특성 해석을 위해 연소실의 1/6에 대해서만 CFD를 수행하였다. 이처럼 채널의 수가 적은 경우 열교환기 전체를 대상으로 해석을 수행하여 냉각성능을 평가하기도 하지만, 다공성 모델로 대체하거나 주기성을 가지는 부분만을 대상으로 수치해석을 수행하는 연구도 많이 이루어지고 있다. 그러나 장착환경을 고려하여 열교환기 성능을 평가하는 연구는 찾기 힘들다.

이러한 까닭에 본 연구에서는 항우연에서 개발 중인 하이브리드 전기추진시스템을 대상으로 나셀에 장착된 열교환기의 냉각성능을 수치적 방법을 이용해서 평가하고자 한다. 이를 위해 열교환기 냉각성능을 예측할 수 있는 해석적 방법(ϵ -NTU 해석)을 CFD와 연동하는 방법을 소개하고, 이 접근방법을 통해 구해진 냉각성능을 실험결과와 비교, 검증할

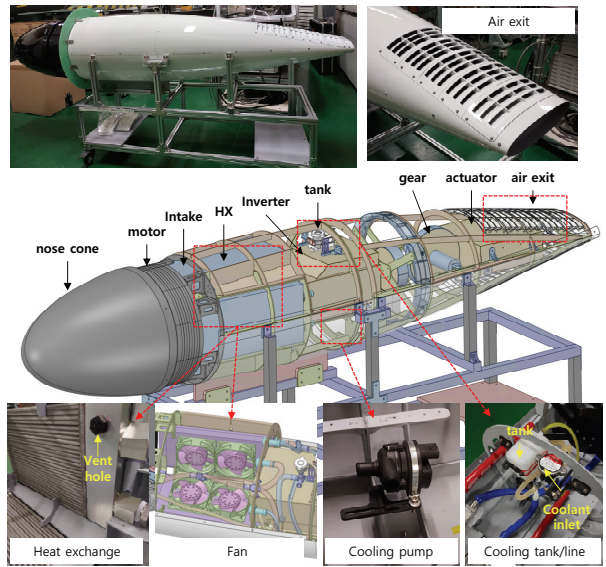


Fig. 2 Nacelle configuration

것이다. 또한 이를 이용해 냉각성능을 더 확보하기 위해 하이브리드 전기추진 시스템의 개선점을 제시하고자 한다.

2. 접근 방법

2.1 나셀 내부구조

하이브리드 전기추진 시스템의 냉각계통은 Fig. 1에 나타나 있는 것처럼 가스터빈/발전기, 배터리, 나셀 크게 3부분으로 나뉘는데 여기서는 나셀에 장착될 모터 쪽만을 대상으로 할 것이다. Fig. 2에는 나셀 내부구조를 나타낸 것으로, 스피너, 모터 뒤로 offset strip fin의 열교환기 4개가 환형으로 위치하고 있으며, 그 사이에 인버터, 냉각펌프, 탱크, 냉각수 주입구, 틸팅장치의 순으로 배치되어 있다. 열교환기의 공기 흡입구는 모터와 열교환기 사이의 공간에, 공기 토출부는 나셀 뒤쪽으로 루버(louver) 형태로 존재한다. 외부 공기는 모터 뒤의 흡입구를 통해 나셀로 유입되고, 이는 열교환기에서 열교환 후 인버터, 틸팅장치, 공기 토출부의 순으로 흐른다. 냉각수는 Fig. 1에 나타난 것처럼 열교환기에서 인버터를 먼저 냉각시키고 모터를 거쳐 다시 열교환기로 흐르는 구조를 가지고 있다. 이때 냉각수는 인버터로 공급될 때 50 °C 이하가 되어야 한다. 열교환기와 관련된 보다 자세한 내용은 아래 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Condition for heat exchanger installed inside nacelle

Item	Condition & Target
Heat (Inverter+Motor)	Takeoff (8 kW) Cruise (6 kW)
Coolant flow rate	8 LPM
Coolant outlet T	50 °C ↓
Air inlet T	36 °C

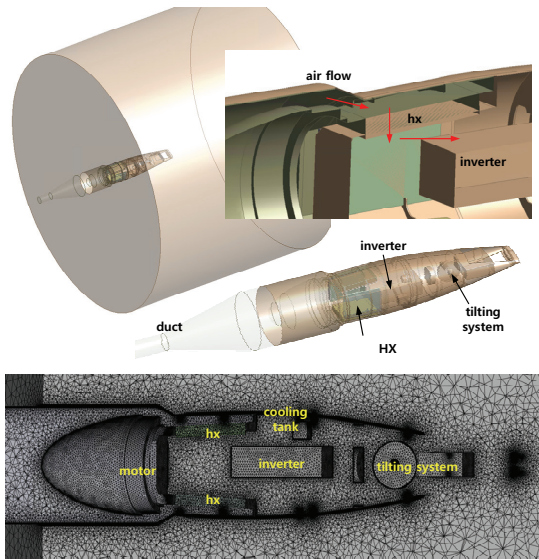


Fig. 3 Domain & mesh system for nacelle-rig model

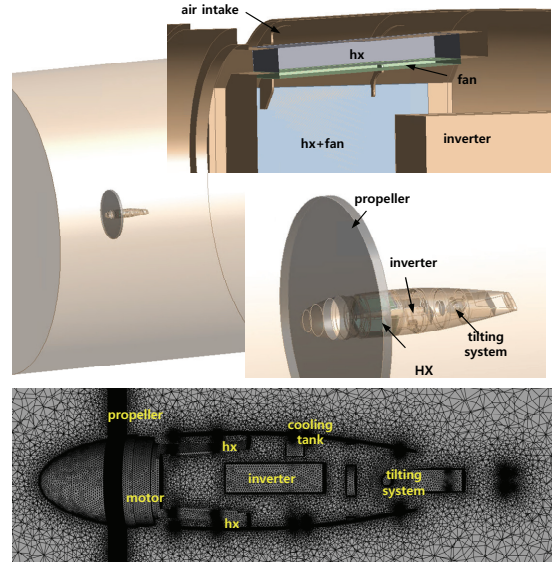


Fig. 4 Domain & mesh system for nacelle-propeller model

2.2 수치해석 방법 및 해석 조건

나셀에 장착된 열교환기의 냉각성능을 수치해석으로 평가하기 위해 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식 (RANS), 3차원 압축성 유동해석이 가능한 상용 소프트웨어 ANSYS CFX⁽¹⁰⁾를 사용하였다. 난류모델은 SST 모델을 적용하였으며, 열교환기는 해석의 효율성을 높이기 위해 다공성 모델로 하고, 열전달 해석에 필요한 압력손실계수, 열전달계수 등의 정보는 ϵ -NTU 방법으로 계산하였다.

우선 본 연구에서 이용하는 해석방법을 검증하기 위해 Fig. 3과 같은 해석 도메인을 정의하였다. 나셀 내부로 일정한 유량의 공기를 공급하기 위해 리그와 나셀을 결합한 형태로 시험리그가 구축되어 있어, 해석모델 역시 리그와의 연결 덕트에 나셀의 앞부분(스피너와 모터)이 들어가 있고 나셀(공기흡입구)에 덕트가 결합되어 있는 형상으로 구현하였다. 나셀 내부 구성품들(인버터, 틸팅장치 등)은 직육면체나 원기둥으로 단순화하였고, 냉각라인과 공기 토출부의 루버 형상은 고려하지 않았다. 또한 나셀의 형태를 지지하는 프레임은 유동 방향의 수직인 것들만 추가하였다. 격자계는 셀기준 2,100만개 정도의 비정렬격자로 만들어졌다. 한편 실환경(이착륙, 순항 등)에서 열교환기의 냉각성능을 예측하기 위해서 Fig. 4와 같이 나셀이 대공간(나셀 직경의 30배) 안에 들어가 있는 도메인을 설정하였다. 프로펠러 후류의 효과를 주기 위해 스피너 부분에 별도의 도메인을 만들었고, 나셀로 유입되는 공기유량을 증가시키기 위해 열교환기 하류에 냉각팬 도메인도 추가하였다. 이때 프로펠러 후류는 유속으로, 냉각팬의 효과는 압력변화로 조정하였다. 격자계는 리그시험 비교용 모델과 같이 비정렬격자를 이용해 2,600만개 수준으로 구축하였다.

Table 2 Boundary condition

inlet (Nacelle-Rig Model)	<ul style="list-style-type: none"> flow rate : 0.45, 0.7 kg/s T : 36 °C
far-field	<ul style="list-style-type: none"> opening (101 kPa, 36 °C)
wall	<ul style="list-style-type: none"> non-slip & adiabatic
heat exchanger	<ul style="list-style-type: none"> material : Al porosity loss coefficient for P loss interfacial area density heat transfer coefficient heat (source term)
propeller (Nacelle-Propeller Model)	<ul style="list-style-type: none"> Velocity : 0, 20, 40 m/s
fan (Nacelle-Propeller Model)	<ul style="list-style-type: none"> Pressure : 0~1.0 kPa

이들 두 해석 모델에 대한 경계조건은 Table 2에 정리하였으며, 앞서 언급한 두 종류의 해석 모델 중 어느 하나에만 해당할 경우 이를 괄호 안에 표시하였다. 열교환기를 다공성 모델로 적용하기 위해서 열전달 해석과 관련된 몇 가지 정보가 필요한 것을 알 수 있는데, 이들은 ϵ -NTU 방법⁽¹¹⁾을 이용해 계산할 수 있다. 이 방법은 열교환기 형상, 고온/저온부 유체의 유동 정보를 바탕으로 열교환기의 냉각성능을 계산하는 방법으로, 열교환기 내에서 두 유체가 섞이지 않고 직각을 이루면서 흐를 때 식 (1)과 같이 ϵ 과 NTU의 관계가 알려져 있다. 여기서 ϵ 은 열교환기의 effectiveness, NTU는 number of heat transfer unit, C_c 은 두 작동유체의 capacity rate ratio를 의미한다. 총괄 열전달 계수(UA)와 두 유체 중 작은 capacity rate를 이용하여 NTU가 계산되면 식 (1)로부터 ϵ 을 구할 수 있다. 이를 이용하여 식 (2)에서 열교환기의 열전달율을 구하고, 다시 식 (3)에서 각 작동유

체의 입출구 온도변화를 계산하게 된다. 이 때 열을 잃었으면 q 는 음수, 얻었으면 양수이다. 보다 자세한 내용은 참고 문헌 11에 기술되어 있다.

$$\varepsilon = 1 - \exp\left(\frac{\exp(-C_r NTU^{0.78}) - 1}{C_r NTU^{0.22}}\right), \quad (1)$$

where $NTU = UA/C_{min}$

$$q = \varepsilon C_r (T_{hot,in} - T_{cold,in}) \quad (2)$$

$$T_{out} = T_{in} + q/C \quad (3)$$

본 연구처럼 열교환기 형상이 고정되어 있을 경우 냉각수(Hot side)와 공기(Cold side)의 유동 조건만으로 열교환기 성능을 예측할 수 있다^(9,11-13). 냉각수는 비압축성 유동을 가정, 발열량(인버터와 모터의 발열량, 8 kW)과 유량(8 LPM)이 이미 주어지고, 공기는 수치해석을 통해 열교환기 상류 유동조건을 알 수 있기 때문에 앞서 언급한 ε -NTU 방법으로 열전달 계수, 방열량 등을 계산할 수 있다. 이때 냉각수의 유량과 온도는 해석 중에 항상 고정된 값으로 사용되지만 공기의 유량과 온도는 해석이 수렴해 가는 과정 중에 계속 변하게 된다. 그러므로 ε -NTU 방법으로 구해진 정보들이 수치해석에 적용될 수 있도록 계속 전달되어야 하는데, 이를 위해서 인공 신경망으로 근사모델⁽¹⁴⁾을 만들었으며, 이를 CFX의 Expression으로 구현해 적용하였다. 이러한 계산 흐름을 Fig. 5에 나타내었다. 작동유체가 공기인 Nacelle 외부 및 열교환기를 포함한 내부 유동은 RANS를 이용하고, 작동유체가 냉각수인 열교환기의 유동정보는 ε -NTU 기반으로 구축된 신경망 모델을 이용한다. 여기서 사용된 신경망 모델은 6개의 노드를 가지는 은닉층과 입력층, 출력층을 포함하는 모델로 구축되었으며, 이를 위해서 냉각수와 공기의 유동 조건을 입력변수로 하고, 실험점이 입력변수의 공간에 최대한 골고루 존재할 수 있도록 실험점의 분산을 최대로 하는 D-optimal 실험계획법⁽¹⁴⁾으로 총 100개의 데이터를 선정하

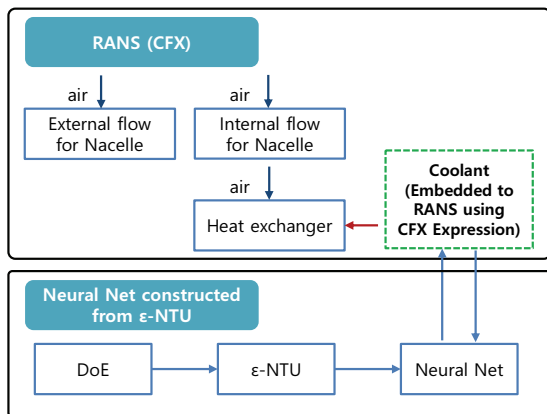


Fig. 5 Schematic diagram for nacelle & heat exchanger

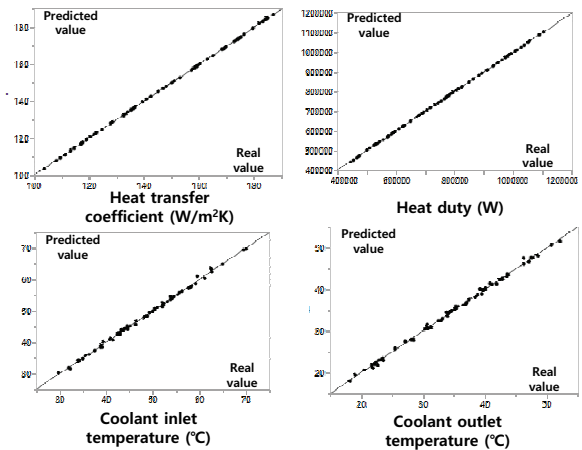


Fig. 6 Real & predicted values of neural network model

였다. 이 데이터를 바탕으로 열전달 계수, 방열량, 냉각수 유출입 온도를 출력변수로 하는 신경망 모델을 구축하였다. 아래 Fig. 6에서 알 수 있듯이 각 출력변수의 예측값과 실제값이 거의 유사하게 표시되고 있고, 결정계수(R^2)가 0.9966 이상으로 구축된 신경망 모델이 높은 정확도로 열전달 해석과 관련된 정보를 계산할 수 있음을 확인할 수 있었다.

2.3 나셀 내부 열교환기 성능측정 시험리그

열교환기의 냉각성능을 측정하기 위해 Fig. 7과 같이 공기유량 1.3 kg/s까지 가능한 블로어와 공기의 공급 온도를 조절하기 위한 열교환기(냉각기), 공기유량 측정을 위한 벤츄리, 나셀과의 연결을 위한 덕트, 냉각수 공급을 위한 펌프와 히터, 데이터 수집기로 시험리그를 구성하였다^(12,13). 열교환기의 냉각성능 측정이 주목적이기 때문에 공급되는 공기

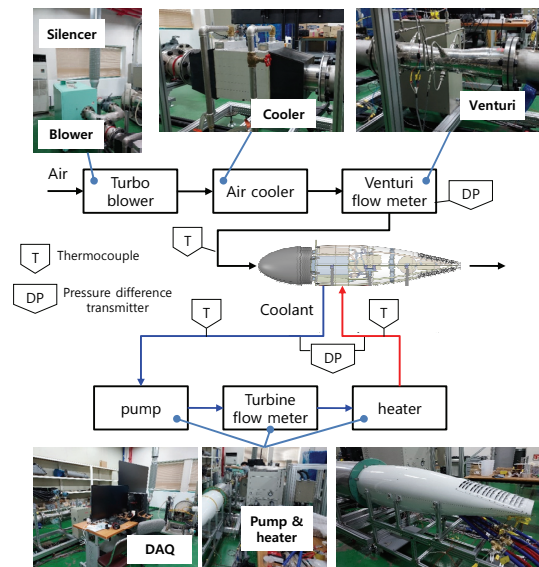


Fig. 7 Cooling performance test rig for the heat exchanger installed inside nacelle

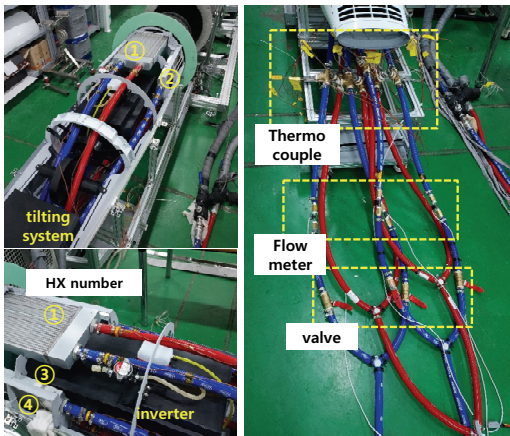


Fig. 8 Nacelle internal configuration & coolant measurement part

유량을 정확히 알기 위해 시험리그에서 공급되는 공기가 나셀의 공기 흡입구로 모두 유입될 수 있도록 덕트로 연결하였다. 또한 Fig. 8과 같이 나셀 내부 환경을 유사하게 구성하기 위해 모터, 인버터, 틸팅장치 등은 실물이 아닌 단순화된 터미모형을 장착하였다. 이러한 까닭에 인버터, 모터와 열교환 후의 냉각수를 열교환기에 공급할 수 없어 외부의 냉각펌프와 히터를 이용하였다. 각 냉각수 공급라인은 실리콘으로 제작된 자동차용 튜브를 이용했고, 각 열교환기로 공급되는 유량을 측정, 조절하기 위해 최대 5 LPM까지 측정 가능한 유량계와 밸브, 온도측정을 위해 k-type 열전대를 설치하였다.

3. 결과 및 토의

앞 장에서 서술한 수치해석 방법을 이용해 나셀 내부에 장착된 열교환기 냉각성능을 계산한 결과와 시험결과를 비교하여 Table 3에 정리하였다. 냉각수 유량 8 LPM, 공기 유입 온도 36 °C로 고정하고 냉각수 발열량 6 kW(순항)일 때 공기

Table 3 Comparison between experiment and numerical analysis results

	Case 1		Case 2		Case 3	
	EXP	CFD	EXP	CFD	EXP	CFD
Air flow rate (kg/s)	0.45	0.45	0.45	0.45	0.70	0.70
Air T (°C)	36.70	36.70	35.87	35.87	36.00	36.00
Coolant flow rate (LPM)	8.04	8.04	8.04	8.04	8.04	8.04
Coolant inlet T(°C)	58.53	58.47 (0.02 %)	65.94	66.62 (0.20 %)	61.33	59.10 (0.67 %)
Coolant outlet T(°C)	47.87	47.22 (0.2 %)	51.58	51.16 (0.13 %)	46.41	44.06 (0.74 %)
Heat duty (kW)	5.87	5.96 (1.56 %)	7.88	8.02 (1.81 %)	8.20	8.02 (2.22 %)

유량 0.45 kg/s, 8 kW(이착륙)일 때 0.45와 0.7 kg/s로 총 3가지 케이스에 대해 수행하였다. 실험과 해석 간의 차이는 냉각수 유출입 온도의 경우 1 %, 열교환기 방열량은 2 % 내외로 상당히 일치하였다. 그러므로 본 연구에서 사용한 ϵ -NTU와 결합된 수치해석 방법은 장착 시 열교환기 냉각성능을 평가하기에 적절하다고 판단된다. 한편 Case 1과 3에서 발열량 6 kW일 때 공기 0.45 kg/s, 8 kW에서는 0.7 kg/s가 열교환기로 공급되어야 목표한 냉각수 유출 온도(50 °C 이하)가 만족되는 것을 확인할 수 있었다. 그런데 이 표는 블로어에 의해 발생한 공기가 모두 나셀 내부로 공급되도록 해석과 실험이 수행된 결과이기 때문에 실제 환경-프로펠러 후류에 의한 공기 공급-에서 공급될 공기 유량을 검토할 필요가 있다.

이를 위해서 발열량 8 kW와 냉각수 유량 8 LPM으로 고정하고 프로펠러 후류를 0, 20, 40 m/s로 했을 때 냉각수 유출입 온도와 공기 유량을 Fig. 9에 도시하였다. 프로펠러 후류가 30 m/s 이전에는 냉각수 유출 온도가 50 °C 이상으로 목표를 만족하지 못했지만, 30 m/s부터는 나셀에 약 0.5 kg/s 이상의 공기가 공급되면서 냉각수 유출온도가 50 °C 이하로 떨어졌다. 또한 Table 3의 Case 3과 같이 발열량 8 kW일 때

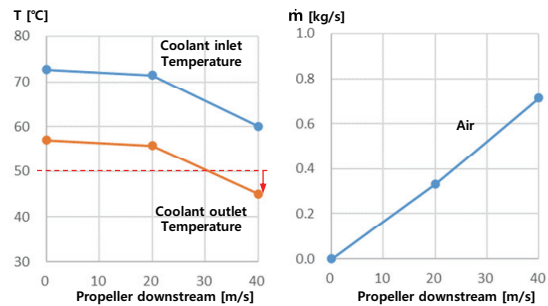
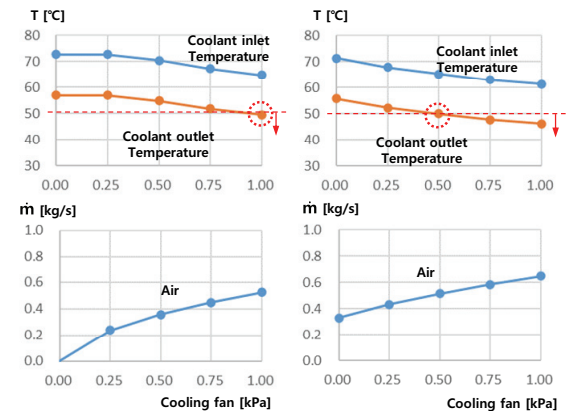


Fig. 9 Coolant temperature & air mass flow rate (entering the nacelle) for propeller downwash



(a) propeller downwash 0 m/s (b) propeller downwash 20 m/s

Fig. 10 Coolant temperature & air mass flow rate (entering the nacelle) for cooling fan

0.7 kg/s의 공기를 열교환기로 공급하기 위해서는 프로펠러 후류가 40 m/s에 도달해야 가능함을 알 수 있었다. 그런데 프로펠러 후류가 항상 30 m/s 이상으로 제공되기는 어렵기 때문에 낮은 후류 속도에서도 나셀 내부 냉각이 가능하도록 냉각팬의 영향을 조사하였다.

프로펠러 후류 0과 20 m/s일 때 냉각팬 차압 변화에 대한 열교환기 유출입 온도 및 유량을 Fig. 10에 나타내었고, 이때 발열량과 냉각수 유량은 각각 8 kW와 8 LPM으로 고정하였다. 후류가 없는 경우 냉각팬 차압 1 kPa일 때 공기 유량이 0.5 kg/s로 냉각수 유출온도 50 °C 이하가 되고, 후류 20 m/s인 경우 냉각팬 차압이 0.5 kPa부터 목표 온도를 만족하는 것을 확인할 수 있었다. Figures 11~13은 이때의 열교환기 주위의 압력, 속력, 온도 분포를 도시한 것으로, 냉각팬의 영향으로 인해 열교환기 부근의 압력이 나셀 바깥쪽(공기 흡입구 근처) 보다 5 kPa 정도 낮게 형성되고 그렇지 않은 경우(프로펠러 후류 20 m/s, 냉각팬 차압 0 kPa) 2~3 kPa

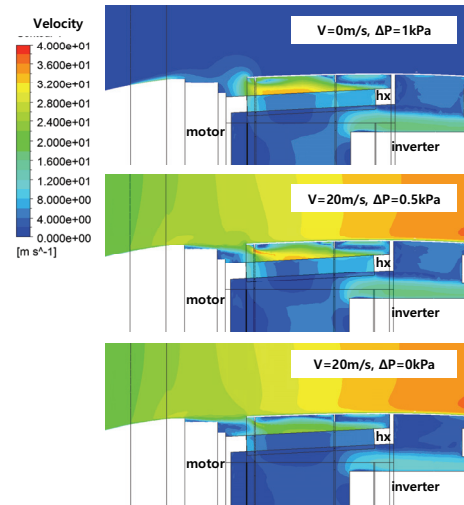


Fig. 13 Velocity distribution around heat exchanger for propeller downwash & pressure change of fan

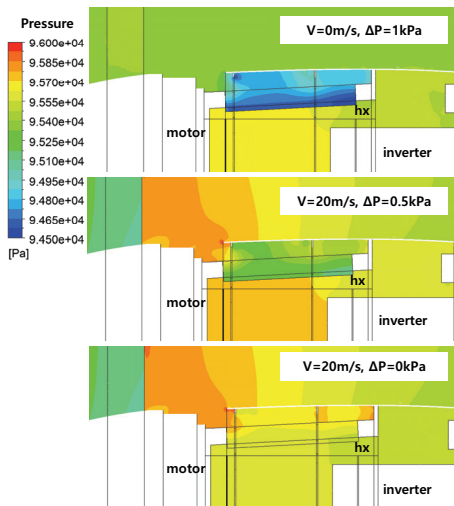


Fig. 11 Pressure distribution around heat exchanger & fan effect

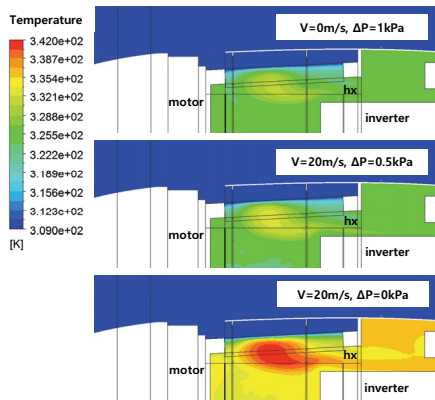


Fig. 12 Temperature distribution around heat exchanger for propeller downwash & pressure change of fan

인 것에 비해 약 2배 정도 차이가 발생하는 나는 것을 볼 수 있다. 이로 인해 열교환기로 유입되는 공기 유속은 더 빨라지고 유량이 커진 것을 알 수 있었다. 한편 열교환기 출구 근처 온도분포 그림에서 보여주듯이, 열교환기의 중앙 부근보다 안쪽 깊은 곳에서 열교환이 보다 더 잘 일어나고 있음을 확인할 수 있는데, 이것은 열교환기로 들어가는 유로에 수직으로 세워진 나셀 지지구조물의 영향 때문인 것으로 판단된다.

본 연구에서는 프로펠러 후류가 없을 때에도 나셀 내부 구성품의 냉각이 가능하도록 차압 1 kPa에 0.5 kg/s의 공기를 공급할 수 있는 냉각팬 장착을 제안한다. 이 하이브리드 전

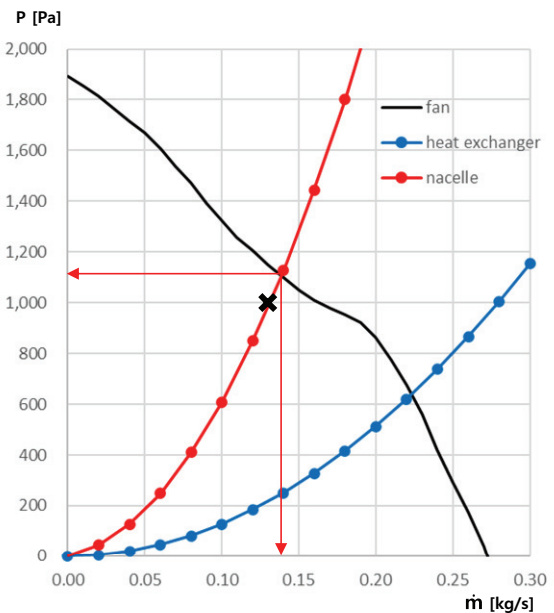


Fig. 14 Performance curve of cooling fan & flow resistance curve of nacelle

기추진 시스템에는 4개의 열교환기를 사용하고 있으므로 열교환기 각각에 장착해 0.13 kg/s의 공기를 제공할 수 있으면 된다. 현재 적용 예정인 Delta사의 THD1348HE⁽⁴⁵⁾ 냉각팬이 적합한지 여부를 나셀의 유동저항을 고려하여 Fig. 14와 같이 검토하였다. 김은선은 팬의 성능곡선을, 파란선은 열교환기의 유동저항을, 빨간선은 나셀의 유동저항(열교환기를 포함)을 나타내며, 검정색 X 표시는 제안한 냉각팬 성능을 의미한다. 팬의 성능곡선과 나셀의 유동저항이 만나는 점이 실제 열교환기로 유입되는 유량이므로, 해당 팬을 열교환기에 장착하게 되면 0.14 kg/s의 공기가 열교환기로 유입될 것이다. 즉, 제안된 냉각팬의 성능(검정색 X)보다 큰 유량을 공급할 수 있으므로 해당 팬을 장착하면 프로펠러 후류가 없어도 나셀 내부의 냉각이 가능함을 의미한다.

4. 결 론

이상에서 살펴본 바와 같이 하이브리드 전기추진 시스템의 나셀 내부에 장착된 열교환기의 냉각성능을 수치적 방법을 이용해 평가하였고, 냉각성능을 더 확보하기 위한 개선방향을 제시하였다. 이 과정을 통해서 다음과 같은 결론을 구할 수 있었다.

첫째, CFD를 이용한 수치해석과 ϵ -NTU 방법을 함께 이용해서 나셀에 장착된 열교환기의 냉각성능을 계산하였으며, 이를 시험결과와 비교, 검토하였다. 해석과 시험의 결과 온도차는 1%, 방열량은 2% 내외의 차이를 보일 정도로 상당히 일치하였으며, 이와 같은 냉각성능 평가방법이 적절한 것을 확인하였다.

다음으로 앞서 언급한 해석방법을 이용해 순항, 이착륙과 같은 실제 환경조건을 프로펠러 후류의 형태로 모사하여 그 영향을 검토하였다. 최소 30 m/s의 후류가 존재해야 나셀로 유입되는 공기가 0.5 kg/s가 되어 방열량 8 kW(이착륙)일 때 목표한 냉각성능을 만족할 수 있었다.

마지막으로 냉각성능을 보다 확보하기 위해 후류가 없는 상태에서도 나셀 내부의 냉각이 가능하도록 차압 1 kPa에 0.5 kg/s의 공기를 공급할 수 있는 냉각팬 장착을 제안했다. 본 연구에서는 열교환기가 4개이므로 열교환기 마다 냉각팬을 장착한다면 차압 1 kPa에 0.13 kg/s의 공기를 공급할 수 있는 팬이면 충분하다.

후 기

본 논문은 한국항공우주연구원 기본사업 ‘(Sub1)가스터빈 기반 하이브리드 전기추진시스템 기술개발’ 과제의 지원으로 수행되었습니다.

References

- (1) Champman, J.W., Haseeb, H., and Schnulo, S., 2020, "Thermal Management System Design for Electrified Aircraft Propulsion Concept," 2020 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS).
- (2) Liu, Z., Sun, M., Huang, Y., Li, K., Li, Z., Gan, B., and Xiao, M., 2022, "Performance of Parallel Plate-fin Heat Exchanger for Piston Aero-engines with Front-placed Guide Plate at High Altitude," Applied Thermal Engineering, 214, 2022, 118829.
- (3) Jun, S., Lee, S., Park, P., Lim, B., and Huh, J., 2023, "Cooling System Design within POD of Electric Propulsion System," The 2023 KSFM winter conference.
- (4) Kang, S., Jun, S., Lim, B., and Park, P., 2023, "Design of Two-Way Cooling Inlet for eVTOL Tilt-Prop," The 2023 KSPE Fall Conference.
- (5) Kim, J., Kim, K., Ha, S., Kim, M., Kim, Y., and Kim, Y., 2014, "A Numerical Parametric Study for Grille Opening Shape of Small Passenger Car to Improve Aerodynamic and Cooling Performance," KSAE 2014 Annual Conference, pp.856-857.
- (6) Lee, S., and Ahn, J., 2022, "The Air-Side Thermal Hydraulic Performance Analysis of Slit Wavy Fin-Tube Heat Exchanger with Small Diameter Using CFD," Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol.46, No.11, pp.603-610.
- (7) Park, S., Kang, H., and Ahn, J., 2024, "Air-Side Performance Analysis by Geometric Parameters of Hybrid-Wave-Slit Fin Using CFD," Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol.48, No.6, pp.361-369.
- (8) Kang, S., Choi, K., and Kwon, J., 2010, "Numerical Analysis of Combustion and Heat Transfer of Domestic Gas Boiler Equipped with 2-stage Heat Exchanger," Journal of the Korean Institute of Gas, Vol.14, No.5, pp.1-5.
- (9) Jun, S., Huh, J., Lim, B., Park, P., Kang, S., Lee, S., Kim, I., Moffatt, C., Blair, O., and Jalayer, S., "Development of Thermal Management System in Nacelle for Hybrid Electric Propulsion System," Proceeding of the 2022 KSAS Fall Conference, 2022, pp.378-379.
- (10) ANSYS CFX-Solver Modeling Guide 2020R1, ANSYS, Canonsburg, PA, 2020.
- (11) Shah, R. K. and Sekulic, D. P., "Fundamentals of Heat Exchanger Design," John Wiley & Sons, NewYork, 2003.
- (12) Lee, S., Huh, J., Jun, S., Park, P., Lim, B., and Kang, S., "Performance Evaluation of Heat Exchanger to Design Thermal Management System for the Nacelle of the Hybrid Electric Propulsion System for Advanced Air Mobility," Proceeding of the 2023 KSAS Spring Conference, 2023, pp.649-650.

- (13) Lee, S., Jun, S., and Huh, J., "Evaluation of Cooling Performance of Heat Exchanger Considering Installation Environment Inside a Nacelle," Proceeding of the 2024 KSAS Spring Conference, 2024, pp.53-54.
- (14) SAS Institute Inc. 2020-2021., JMP 16 Documentation Library., Cary, NC, SAS Institute Inc., 2021.
- (15) Delta Electronics, Inc., 2017, Specification for approval, Delta Model No. THD1348HE