

환경조절장치용 상변화열교환기의 개념설계연구

유영준* · 오창묵* · 이형주* · 민성기*

A Design Study of Phase Changing Heat Exchanger for Environmental Control System

Youngjune Yoo* · Changmook Oh* · Hyungjoo Lee* · Seongki Min*

ABSTRACT

Properties of bleed air that is air source of ECS(Environmental Control System) can be rapidly changed with airplane engine operating conditions during flight. Therefore, ECS can be operated at a high performance or not during flight. So, high performance ACM has to be developed in order to flight safely. A adaptability of phase changing heat exchanger was esteemed at ACM type ECS in this study. As a result of this study, it is found that ECS outlet temperature can be controlled in a certain range with the phase changing phenomenon.

초 록

냉각기계를 적용한 환경조절계통의 성능은 항공기의 비행환경에 따라 엔진의 운전상태가 달라지므로 환경조절장치로 취출되는 공기의 상태(온도와 압력)에 따라 급격히 바뀌게 된다. 즉, 항공기의 운전상태에 따라 환경조절장치는 운용성능을 100%만족하는 영역에서 운전될 수도 있고, 그렇지 않을 수도 있다. 그렇기 때문에, 일반적으로 냉각기계를 적용한 환경조절장치의 설계규격은 항공기에서 요구하는 개발규격보다 큰 설계여유를 갖도록 설계한다. 이로 인한 시스템적인 손실요인을 최소화하기 위하여 본 연구에서는 냉각기계형 환경조절장치에 상변화 물질의 적용가능성을 연구하였다. 그 결과 상변화 현상을 이용하여 환경조절장치의 출구온도를 일정온도 범위 이내로 제어하면, 현재 운용되는 냉각기계형 환경조절장치의 일반적인 성능여유보다 적은 성능여유에서도 환경조절장치에 요구되는 성능요구조건을 만족할 수 있는 것으로 분석되었다. 본 연구 결과 환경조절장치의 운용개념 변경을 통하여 환경조절장치의 시스템 적용성 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

Key Words: Environmental Control System(환경조절장치), Cooling System(냉각장치), Air Cycling Machine(냉각기계), Phase Changing Material(상변화물질)

1. 서 론

* 국방과학연구소 1본부 5부

† 교신저자, E-mail: yjyou@add.re.kr

일반적으로 항공기에 적용되는 환경조절장치

는 냉매의 상변화 과정을 이용하는 Vapor Cycle 방식과 엔진블리드 공기의 단열팽창효과를 이용하는 ACM(Air Cycle Machine) 적용형으로 구분될 수 있다[1-2]. 냉각기계를 적용하는 경우 추가전원의 소요가 적고, 소요공간이 적기 때문에 Vapor Cycle 방식에 비하여 상대적으로 장점이 있다. 따라서, 항공기와 같이 엔진을 통한 블리드 공기를 취출할 수 있거나, 램에어를 이용할 수 있는 경우에 효과적인 환경조절 방안으로, 이 냉각기계 적용형 환경조절장치에 대하여 그동안 많은 연구가 진행되어왔다[3-4]. 냉각기계 적용형의 경우 냉각기계를 순환하는 공기의 순환 방향에 따라 Bootstrap Cycle 혹은 Reverse Bootstrap Cycle로 구분되며, 압축기와 터빈 등의 수에 따라서도 2-wheel 또는 3-wheel로 구분되기도 하였다. 그런데, 엔진의 운전상태에 따라 환경조절장치로 취출되는 공기의 상태(온도와 압력)가 급격히 바뀌게 된다. 이와 같이 항공기의 비행조건과 엔진의 운전조건이 환경조절장치의 성능에 영향을 줄 수 있다. 그래서, 냉각기계를 적용한 환경조절장치의 설계시에는 일반적으로 항공기에서 요구하는 개발규격보다 다소 큰 여유를 갖도록 설계하게 된다. 그런데, 일반적으로 여유를 크게 하는 설계는 공간 및 무게 등 장착성이 나빠지는 결과를 초래하기 때문에 본 연구에서는 이를 완화할 수 있는 방안을 검토하게 되었다.

본 연구에서는 냉각기계형 환경조절장치에 상변화 물질의 적용가능성을 평가하였다. 상변화 물질은 상변화 온도에서 상변화를 통하여 열량을 흡수하여 온도의 변화를 최소화하면서 열량을 흡수하는 물질이다. 예를 들어, 물은 0℃에서 얼음에서 물로 상변화를 하며, 100℃에서 물에서 수증기로 상변화를 하는데, 이 때 물의 온도변화는 없이 상(phase)만 변화하게 된다. 이와 같은 현상을 이용하여 환경조절장치의 출구 온도를 일정온도 범위 이내로 제어하면, 현재 운용되는 냉각기계형 환경조절장치의 일반적인 성능여유보다 적은 성능여유가 필요할 것으로 판단된다. 이와 같은 설계개념의 변경을 통하여 환경조절장치의 시스템 적용성 향상이 기대된다.

따라서, 상변화 물질을 적용하여 외부 환경요인에 따른 성능변화를 최소화 하고, 온도제어의 소요를 최소화 하여 기존의 냉각기계 적용형 환경조절장치에 비하여 단순하면서 최적화된 환경조절장치의 개념을 도출할 수 있었다.

2. 환경조절장치의 성능요구조건 분석

항공기의 운용환경은 전술한 바와 같이 온도, 압력, 고도 및 속도 등에 따라 다양하게 형성될 수 있으며, 냉각기계 적용형 환경조절장치의 경우 이와 같은 다양한 비행환경에서 정상적으로 동작되어야 한다. 이에 대한 분석을 위하여, 비행 중 경험하게 될 운용환경에 대한 분석을 수행하였으며, 그 결과를 환경조절장치의 입구온도 범위, 압력범위 및 압력비의 관계로 정리하여 Fig. 1과 Fig. 2에 도시하였다. 입구온도는, 입구 압력 및 입·출구 압력비가 각각 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 광범위하게 변화되는 것이 확인되었다.

입구온도는 온도비가 0.1부터 1.0까지 변화되는 것으로 분석되었으나, 순간적인 온도의 변화는 환경조절장치에 영향이 없는 것으로 판단하여 고온조건 중 장시간 비행하는 온도를 설계점 온도로 선정하였다.

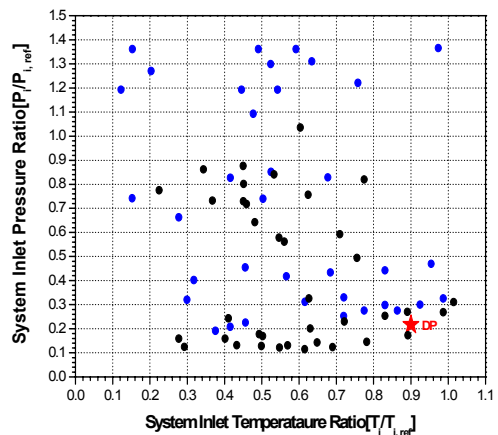


Fig. 1 Distribution of the system inlet conditions

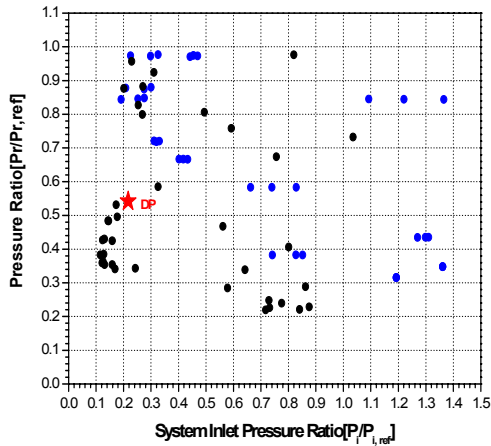


Fig. 2 Distribution of pressure ratios between inlet and outlet

환경조절장치 전방의 압력은 높을수록 환경조절장치의 설계에 유리하게 작용할 수 있기 때문에, 환경조절장치의 운용범위 확장을 위하여 장시간 비행 가능한 낮은 압력을 설계점으로 선정하였다.

입·출구 포트에서의 압력비는 작아질수록 터빈의 팽창비가 작아지기 때문에 입·출구포트의 압력비가 작은 점을 설계점으로 선정하여 환경조절장치의 개발규격으로 결정하였으며, 그 결과를 Table 1에 요약하여 정리하였다.

Table 1. System requirements at the design point

구분	물성값	개발목표	비고
ECS	$T_i/T_{i,ref}$	0.9	
	$P_i/P_{i,ref}$	0.22	
	$Pr/Pr_{,ref}$	0.54	
Avionics	T_o	80℃	
Bay	Capacity	0.5 kW	

아울러, 시스템의 개발요구조건은 0.5 kW의 발열체가 있는 온도조절대상공간을 통과한 공기의 온도를 80℃ 이내로 설정하였다.

3. 환경조절장치의 기존설계개념 및 개선방안

3.1 환경조절장치의 초기개발개념

개발초기에는 개발요구조건을 만족시키기 위하여 Fig. 3 에서와 같이 항공기용 연료와 같은 냉매를 이용하는 방안을 고려하였다.[5]

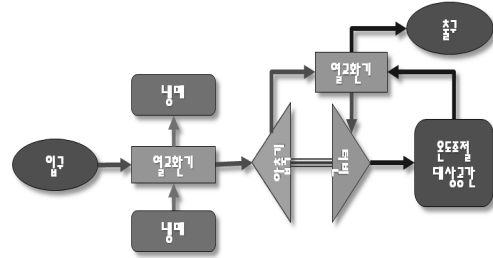


Fig. 3 Previous system configuration

3.2 환경조절장치 개발의 해결과제

냉매의 온도는 시간에 따라 상승되어 일정 시간 이후에는 환경조절장치의 성능에 영향을 주는 것으로 확인되었으며, 특히 운용조건 중 순간적으로 입·출구의 압력비(Pr)가 작아지는 경우 온도조절 대상공간으로 공급하는 공기의 온도가 설계목표온도를 초과하는 것을 확인하였다. 이와 같이 특정한 조건에서도 설계목표온도를 만족하기 위해서는 환경조절장치의 목표성능을 높게 설정하여야 하지만, 목표성능을 높게 설정하기 위해서는 시스템의 공간/무게 등의 개발요구조건을 만족시키기 어렵기 때문에 다른 방안을 강구하여야 했다.

3.3 환경조절장치의 개선방안

상변화 물질이 상변화를 하기위해 상변화 에너지를 흡수하는 동안 온도변화가 미미한 것에 착안하여, 일정시간동안 환경조절장치 터빈의 출구공기를 목표온도 이하로 유지하는 방안을 검토하였다. 즉, Fig. 4 에서와 같이 터빈출구와 온도조절 대상공간 사이에 상변화 열교환기를 설치하여 상변화 에너지를 이용한 온도조절 효과를 이용하는 것이다.

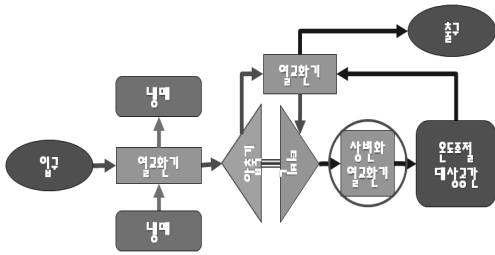


Fig. 4 Modified system configuration

4. 상변화 열교환기

4.1 상변화 열교환기의 동작원리

상변화 열교환기는 Fig. 5 에서와 같이 상변화 물질 내부의 공기유로를 통하여 상변화 물질과 열교환이 이루어지도록 제작된 열교환기이다. 내부 채널을 통하여 흐르는 공기의 온도가 상변화 물질의 상변화 온도보다 높은 경우는 상변화 물질의 상이 고체에서 액체로 변하면서 채널을 통과하는 공기로부터 열을 흡수하여 공기온도를 일정온도 이하로 유지시킬 수 있으며, 반대로 상변화온도보다 유입온도의 온도가 낮을 경우는 상변화물질의 상이 액체에서 고체로 변화하면서 공기로 열을 방출하여 공기온도가 일정온도 이상이 되도록 할 수 있다.[6]

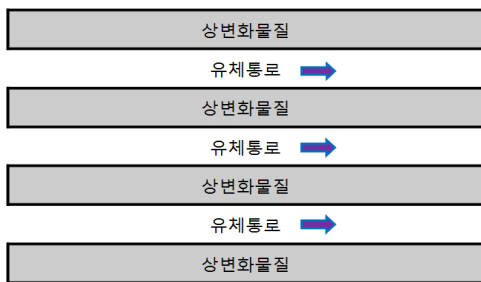


Fig. 5 Basic concept of a phase changing heat exchanger

4.2 상변화 열교환기의 온도관계식

3.2에서 도출된 상변화 열교환기의 환경조절장치 적용개념에 대한 적합성 검토를 위하여 상변화 열교환기를 시스템 시뮬레이션에서 다음과

같이 간단한 방법으로 고려하였다.

상변화 열교환기로 유입된 공기가 상변화물질과의 열교환을 통하여 온도변화가 발생하였을 경우, 입·출구 온도차로부터 공기로부터 손실된 열량은 Eq.1으로 계산될 수 있고, 공기로부터 상변화 물질로 전달된 열량은 Eq.2로 계산될 수 있다. 이때, 공기의 온도는 입·출구온도의 평균온도(T_{mean})로 고려하며, 열저항(R_{th})은 Eq.3과 같이 계산할 수 있다. 본 열저항의 계산시 고려된 것은 공기측 유로에서의 강제대류 열전달계수와 열교환기 구조물을 통하여 상변화물질로 전달되는 열저항을 고려하였다.

한편, 상변화 열교환기를 통하여 공기가 잃은 열량과 상변화물질(PCM)으로 전달된 열량이 동일하므로 Eq.1의 우변과 Eq.2의 우변이 일치한다. 이와 같은 과정을 거쳐 Eq.5가 얻어진다.

$$Q_a = \dot{m}_a C_p (T_i - T_o) \quad (\text{Eq.1})$$

$$Q_{a \rightarrow P} = \frac{T_{mean} - T_{PCM}}{R_{th}} \quad (\text{Eq.2})$$

$$\text{여기서, } R_{th} = \frac{1}{h_a A_e} + \frac{t}{k A_e} \quad (\text{Eq.3})$$

$$T_{mean} = \frac{(T_i + T_o)}{2} \quad (\text{Eq.4})$$

$$T_o = \frac{\left(R_{th} \dot{m}_a C_p - \frac{1}{2} \right) T_i + T_{PCM}}{R_{th} \dot{m}_a C_p + \frac{1}{2}} \quad (\text{Eq.5})$$

여기서,

A_e : 공기와 PCM의 열교환면적

\dot{m}_a : PCM 열교환기로 유입되는 공기유량

C_p : 공기비열

T_i : PCM 열교환기 입구공기온도

T_o : PCM 열교환기 출구공기온도

T_{mean} : 열교환기 입·출구 평균공기온도

T_{PCM} : PCM의 상변화 온도

Q_a : 공기로부터 손실된 열량

$Q_{a \rightarrow P}$: PCM으로 전달되는 열량

4.3 상변화 열교환기의 총열용량 및 충전량

본 연구에서 검토한 상변화 물질의 물성치는 Table 2 와 같다.

Table 2. Properties of the considered PCM

구분	물성값	비고
상변화온도	22℃	
상변화 잠열	250 kJ/kg	
상변화물질 밀도	0.8 kg/l	

상변화 물질에서 흡수할 수 있는 열량은 상변화 물질의 질량 및 열용량에 따라 달라질 수 있다. 즉, 상변화물질로 전달되는 열량의 총합은 상변화 물질의 총열용량보다 클 수 없다.

$$\int_0^t \dot{Q} dt \leq Q_{total,PCM} = h_{sf} M_{total,PCM} \quad (\text{Eq.6})$$

여기서,

h_{sf} : PCM의 상변화 잠열

$M_{total,PCM}$: PCM의 총질량

실제로 환경조절장치에 상변화 열교환기를 적용하기 위해서는 Eq.6에 대한 평가를 수행하여야 하며 이 결과에 따라 상변화 물질의 충전량이 결정될 수 있다. 하지만, 개념설계 단계에서는 충전하는 상변화 물질의 양이 정해지지 않았고, 비행환경에서 설계영역을 벗어나는 경우가 많지 않아 상변화물질이 모두 상변화되는 현상은 없을 것으로 판단하여 위 식에 대한 구체적인 평가는 수행하지 않았다.

Table 2.의 상변화 물질 물성값을 기초로 하여 소요시간에 대한 상변화 물질의 열용량을 검토한 결과 총 열용량은 240 kJ로써, 상변화 열교환기에 충전량은 960 g으로 확인되었다.

4.4 상변화 열교환기의 설계검토

4.4.1 상변화 열교환기의 개략구조

본 연구에서는 상변화 열교환기를 미세채널 구조를 이용하여 개발하는 방안을 검토하였다.

미세채널구조는 일반적으로 유로의 수력직경에 따라 마이크로 채널, 미니채널 및 컨벤셔널 채널로 구분될 수 있다.[7] 미세채널 내에 Fig.5와 같이 미세채널내에 상변화 물질을 충전하고 그 층 사이로 공기의 유로를 설치하였다. 이와 같은 열교환기의 구조를 개략적으로 도시하면 Fig. 6와 같다.

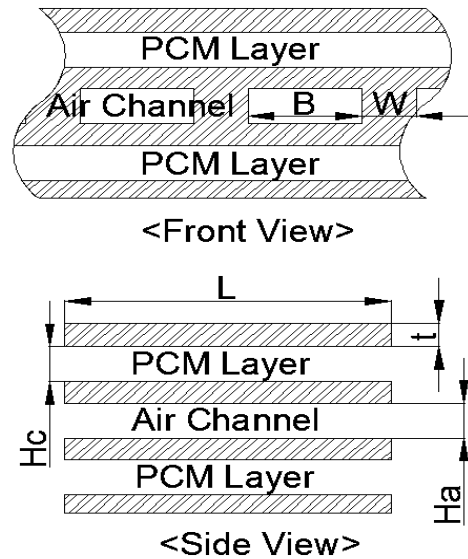


Fig. 6 Schematics of a PCM heat exchanger

4.4.2 상변화 열교환기 설계인자검토

상변화 열교환기는 수십개의 미세채널이 여러 층인 열교환기로서 Fig. 6의 개략도와 같은 내부 구조를 갖는다. 이와 같은 열교환기의 설계를 다음과 같은 절차로 검토하였다. 이는 열교환기의 장착공간이 제한될 수 있기 때문에 동일한 공간에서 열교환기의 효율변화를 확인하기 위해서 열교환기의 체적(V)은 제한된 것으로 간주하였다. 이 때, Fig. 6에서 채널의 수를 m으로 하고, 층수를 n으로 하는 열교환기의 경우 열교환기 체적(V)과 유로 단면적(A_a)는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$V = mnL(B+W)(H_a + H_c + 2t) \quad (\text{Eq.7})$$

$$A_a = mnBH_a \quad (\text{Eq.8})$$

$$D_h = \frac{4BH_a}{P} \quad (\text{Eq.9})$$

여기서, $P=2(B+H_a)$

$$V_a = \frac{\dot{m}RT}{PA_a} \quad (\text{Eq.10})$$

$$Re_d = \frac{4\dot{m}RT}{mnP^2\nu} \quad (\text{Eq.11})$$

여기서, V_a : 채널을 통과하는 공기의 속도

Re_d : 채널내부 공기의 Renolds 수

\dot{m} : 채널내부를 흐르는 공기유량

상변화 열교환기의 입·출구 온도를 각각 12°C와 50°C로 가정할 경우, 평균온도는 85°C이며, 상변화 물질의 상변화온도가 22°C 이므로 상변화 물질과 공기와의 온도차는 63°C가 된다. 아울러, 채널 내부를 지나는 공기의 유속이 빠르지 않아 Re_d 를 확인해본 결과 층류영역이고, 정사각형 채널 내부에서 완전히 발달한 층류유동의 Nusselt number가 2.98(등온조건)이다.[8] 또, 내부 공기의 열전도도(k)를 0.02 W/m°C로 가정하고, 공기의 비열을 1 kJ/kg°C로 가정하면, 채널 내부를 통과하는 공기로부터 상변화 물질로 전달되는 열전달량은

$$\dot{Q} = 3.75 \left\{ \frac{mnL(B+H_a)(B+2H_a)}{BH_a} \right\} \quad (\text{Eq.12})$$

과 같이 계산될 수 있다.

열교환기의 폭과 높이를 열교환기의 길이(L)의 절반으로 가정할 경우, 채널수(m)과 층수(n)은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$m = (L/2)/(B+W),$$

$$n = (L/2)/(H_a+H_c+2t)$$

이 결과를 이용하면, Eq.12 는 Eq.13 같이 정리될 수 있다.

$$\dot{Q} = \frac{0.9375L^3}{BH_a} \left\{ \frac{(B+H_a)(B+2H_a)}{(B+W)(H_a+H_c+2t)} \right\} \quad (\text{Eq.13})$$

위 식을 이용하여 체적(L/2×L/2×L)이 일정한 상변화 열교환기에 대하여, 열교환기 형상변수인 채널 폭(B) 채널벽폭(W), 채널의 유로높이(H_a) 및 상변화 물질층 높이(H_c)에 대한 검토결과 Fig.7 부터 Fig.10 까지 도시하였다.

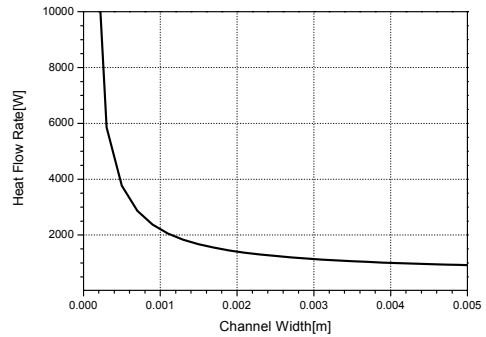


Fig. 7 Heat flow rate with regard to channel width variation

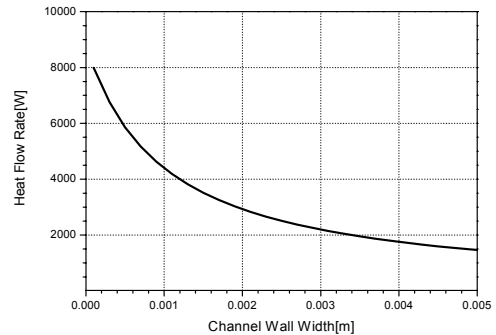


Fig. 8 Heat flow rate with regard to wall width variation

Figure 7, 8과 같이 채널의 폭과 채널벽의 폭을 증가시켰을 경우, 채널수가 감소하여 상변화 열교환기를 통한 열전달율이 감소하는 경향을 보인다. 또한, 열전달율은 채널폭에 따른 계산 결과에 더 크게 변화하는 것으로 볼 때, 열전달을 증가를 위하여 채널폭의 미세구조화가 필요할 것으로 검토되었다.

Figure 9, 10와 같이 채널의 높이와 상변화물질 층의 높이를 변경시킨 경우, 전체높이가 L/2로 제한되었기 때문에, 층수가 감소하여 열전달

율이 감소하는 경향을 보이나, 채널높이의 변화를 고려한 경우는 채널높이가 1mm 이상인 경우 채널높이가 증가할수록 미세하지만, 열전달율이 증가하는 경향을 보이는 것으로 확인되었다.

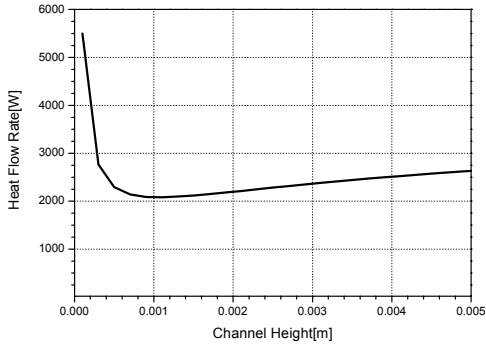


Fig. 9 Heat flow rate with regard to channel height variation

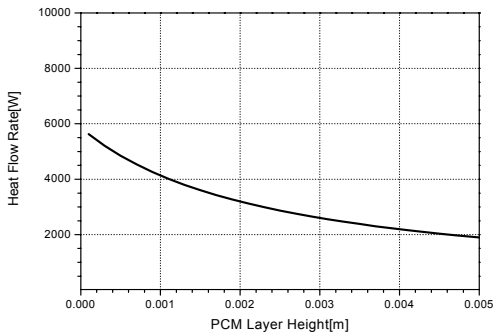


Fig. 10 Heat flow rate with regard to PCM layer height variation

위 결과 채널의 형상 및 채널 벽의 폭이 작아질수록 열전달율이 상승되는 것을 확인하였으며, 높이의 경우도 작아질수록 열전달율이 상승하는 것을 확인하였다.

위 결과를 바탕으로 상변화열교환기의 설계시 검토된 자료들에 대하여 제작성이 허용하는 범위에서 유로의 폭과 유로벽의 두께를 작게 하는 방안을 검토해야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문은 환경조절장치의 시스템 개념설계과정에 상변화열교환기의 적용가능성에 대한 검토를 수행하고 상변화열교환기를 시스템에 적용하기 위한 형상인자를 검토한 결과를 기술한 것으로 연구결과 상변화열교환기를 적용함으로써, 큰 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 이 과정에서 도출된 기술적인 사항들에 대하여 다음과 같이 요약정리 할 수 있다.

1) 환경조절장치의 개발과정에 초기의 개념수립단계에서 일반적인 환경조절장치의 개념설계안의 경우 운용조건에 따른 급격한 성능저하에 대한 대안마련이 어려워 환경조절장치의 터빈출구와 온도조절 대상공간 사이에 상변화 열교환기를 설치하는 방안을 도출하였다.

2) 상변화열교환기의 1차원 해석방법을 제시하였으며, 상변화열교환기 입·출구의 온도를 추정하는 방안을 제시하였다. 이 결과, 운용개념에 따라 소요되는 상변화 물질의 양은 약 960 g인 것으로 확인되었다.

3) 상변화 열교환기의 형상설계 인자중 성능에 미치는 영향인자(채널폭, 채널벽두께, 채널높이 및 상변화물질 충전공간 높이 등)를 중심으로 열전달율에 미치는 영향을 검토하였다. 검토결과 미세채널의 열전달율이 일반채널에 비하여 월등히 큰 것을 확인할 수 있었다.

4) 비행환경의 변화에 따른 순간적인 엔진의 운용조건과 같이 환경조절장치 운용조건에 순간적인 변화에 대하여 성능변화를 최소화하기 위한 환경조절장치의 개발가능성을 검토한 결과 상변화열교환기의 적용개념이 도출되었다.

이상의 결과로부터 상변화 열교환기를 적용한 환경조절장치의 개발개념을 도출하였으며, 환경조절장치의 성능해석에 적용가능한 상변화 열교환기의 해석방법도 도출할 수 있었다. 차후에 본 논문에서 검토된 상변화 열교환기의 개념설계결과를 바탕으로 상변화 열교환기를 적용한

냉각기계형 환경조절장치에 대한 성능해석 및 개념연구를 진행할 예정이다.

참 고 문 헌

1. 유영준, 민성기, 임진식, "모델링을 활용한 환경조절시스템의 개념설계 연구", 2009 유도 무기 학술대회, 2009
2. 유영준, 이형주, 고성희, 기자영, "환경조절장치의 모델링 프로그램 개발에 관한 연구", 한국추진공학회지, 제13권 제5호, 2009.10
3. Youngjune Yoo, Seongki Min, Jinshik Lim Seonghee Kho, Jayoung Ki, "A Study on Modeling Program Development of an Environmental Control System using AMESim S/W", Proceedings of ASME Turbo Expo 2010, GT2010-22862, 2010
4. Richard M. G, Todd W. K. and Gil E. L, "A Ram Air Driven Air Cycle Cooling System for Avionics Pods", AIAA, 1986
5. 유영준외, 국방과학연구소 보고서, 국방과학연구소, ADDR-413-090119, 2009.
6. 유영준, 오창목, 민성기, "파형유로를 갖는 마이크로채널 PCM 열교환기의 전산해석 연구", 한국군사과학기술학회 종합학술대회 발표 논문집., 2010
7. Ghiaasiaan, S.M, Two-Phase Flow, Boiling, and Condensation - in Conventional and Miniature Systems, Cambridge University Press, 2008
8. Frank P. Incropera, David P. Dewitt, Introduction to Heat Transfer, John Wiley & Sons Inc. 1985