

## 환경조절장치(ECS)의 모델링 프로그램 개발에 관한 연구

유영준\* · 이형주\* · 고성희\*\* · 기자영\*\*

### A Study on Modeling Program Development of an Environmental Control System

Young-Joon Yoo\* · Hyung-Ju Lee\* · Seong-Hee Kho\*\* · Ja-Young Ki\*\*

#### ABSTRACT

A modeling and simulation program for an environmental control system (ECS) of a pod installed under wings of an aircraft was developed in order to estimate the system's performance during a flight. First, through the system configuration analysis in the main operational condition of the aircraft system, an ECS configuration adopting an air cycle machine (ACM) was selected. Therefore the modeling program was developed to simulate the ECS with an ACM. Second, the sensitivity analyses on performance variation of main components were conducted to complete the conceptual design of the ECS. A design point for the system and its components was obtained through the analysis with the modeling and simulation program. The design point for the system and components was obtained through the analysis with the modeling and simulation program. Third, in order to study the feasibility of the ECS configuration, off-design performances of the ECS on various flight conditions, such as take off, maneuver, cruise and landing etc were estimated. Dynamic characteristics were analyzed by transient performance evaluations.

#### 초 록

본 논문에서는 항공기 POD용 환경조절장치의 개발을 위한 모델링 및 시뮬레이션에 관한 연구를 수행하였다. 먼저, 시스템 요구성능을 분석하여 ACM 방식의 환경조절장치를 구성하고 성능모사를 위한 모델링을 수행하였다. 다음으로 각 구성품의 개념설계를 위해 주요구성품의 성능변화에 따른 민감도를 분석하고 시스템 요구성능을 만족하는 설계점 성능을 결정하였다. 다양한 비행환경에서의 탈설계 성능모사를 통해 전체 운용영역에서의 개념설계 타당성을 검토하고 천이 성능해석을 통해 동적 거동특성을 분석하였다.

Key Words: Environmental Control System(환경조절장치), Air Cycle Machine(냉각기계), M&S(모델링 및 시뮬레이션), Heat Exchanger(열교환기)

† 2009년 6월 12일 접수 ~ 2009년 8월 20일 심사완료

\* 정회원, 국방과학연구소 1기술본부 5부

\*\* 정회원, (주)이지가스터빈 전략사업부 기술1팀  
연락처, E-mail: habari@paran.com

항공기가 기동하게 되면 속도에 의한 마찰열 하중이 발생하게 되며 고도변화에 따라 온도변화도 발생한다. 이때 항공기 POD 내부의 장비를 보호하기 위해서는 장비 주변 온도를 일정 온도범위 내에서 유지되도록 조절할 수 있는 환경조절장치가 필요하다.

항공기에 적용되는 환경조절장치는 냉매의 상변화 과정을 이용하는 Vapor Cycle 방식과 엔진 블리드 공기의 단열팽창 효과를 이용하는 ACM(Air Cycle Machine) 방식이 있다[1]. 이 중 ACM 방식은 전원 소요가 적고 중량이 가벼워 항공기에 적합하나 엔진 블리드 공기를 이용하므로 운용환경의 영향을 많이 받게 된다. 따라서 ACM type 환경조절장치의 개발을 위해서는 다양한 운용환경에서의 성능을 예측하는 것이 매우 중요하다.

새로운 시스템의 개발을 위해서는 기능시험, 환경시험, 내구성시험 등 많은 시험을 거쳐야 한다. 그러나 시험에는 많은 비용과 자원이 소요되므로 최근에는 모델링과 시뮬레이션을 통해 개발 위험도를 줄이고 있다. 컴퓨터의 발달과 사용자 친화적인 공학용 S/W의 발전은 M&S(Modeling & Simulation) 분야의 발전을 가속화시키고 있다.

본 연구에서는 상용 시스템 모델링 프로그램을 이용하여 ACM type의 환경조절장치의 모델링 및 시뮬레이션을 수행하였다. 모델링을 통해 시스템의 요구성능을 만족할 수 있는 시스템 구성을 확립하고 다양한 운용환경에서의 성능모사를 통해 개념설계의 타당성을 검토하였다.

## 2. 시스템 요구 성능

항공기의 운용환경은 온도, 압력, 고도 및 속도 등에 따라 다양하게 형성 될 수 있으며, 냉각기계 적용형 환경조절장치의 경우 이와 같은 다양한 비행환경에서 정상적으로 동작되어야 한다. 따라서 예상되는 운용환경에 대한 분석을 수행한 결과가 Fig. 1과 Fig. 2와 같다.

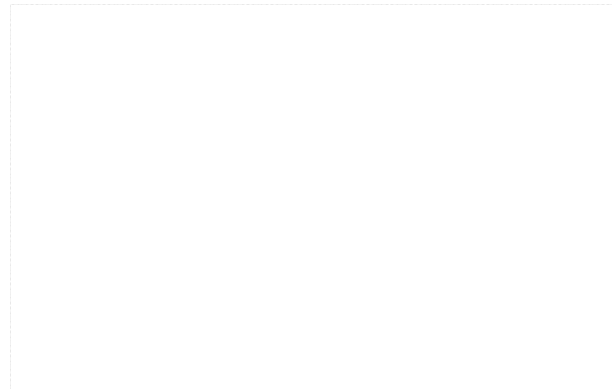


Fig. 1 Distribution of Temperatures vs. Pressures of the System Inlet

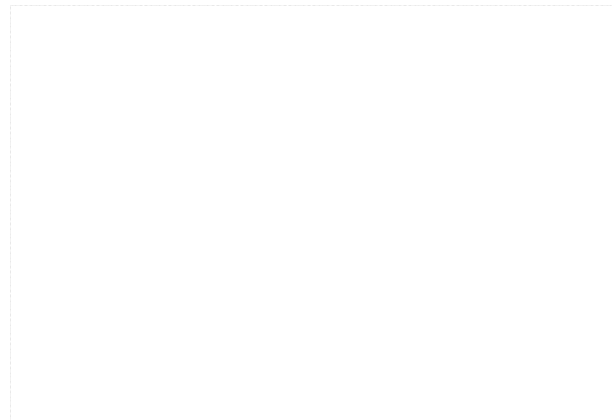


Fig. 2 Distribution of the Inlet Pressures vs. Pressure Ratios Between the Inlet and the Outlet

결과에 따르면 입구온도, 입구압력 및 입, 출구 압력비가 광범위하게 변화될 수 있는 것이 확인되었다. 또한 입출구 압력이 비교적 낮음을 확인할 수 있었다.

Table 1은 설계점에서의 시스템 요구성능이다. 여기에서,  $Pr = P_t/P_{out}$  이다.

Table 1. System Requirement at the Design Condition

ECS	$T_t/T_{ref}$	0.88
	$P_t/P_{ref}$	0.16
	$Pr/Pr_{ref}$	0.54
Chamber (Avionics Bay)	$T_{out}[^{\circ}C]$	80
	Cooling Capacity[kW]	1.5

시스템의 대상공간(Bay)은 개발하고자 하는 환경조절장치를 통해 항상 80°C 로 유지되어야 한다.

Table 1에서 보는 바와 같이 환경조절장치의 입구와 출구 압력비가 비교적 낮아 냉각효율의 향상을 위한 별도의 방안이 요구됨을 확인할 수 있었다.

### 3. 환경조절장치 구성도

일반적인 항공기의 환경조절장치는 압축기와 터빈으로 이루어진 냉각기계와 열교환기, 공기 조절 밸브, 제어기 등으로 구성된다. 그러나 본 연구에서는 냉각효율의 향상을 위해 열교환기 추가가 요구되었다. 이에 압축기 전방에 냉매를 이용한 열교환기를 추가한 Bootstrap 방식의 환경조절장치의 개념설계를 수행하였다.

Figure 3은 연구대상 환경조절장치의 개념도이다.

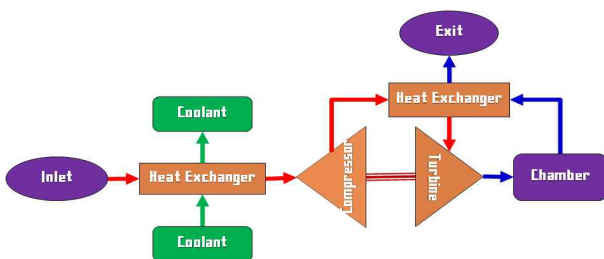


Fig. 3 The Schematic Diagram of the Environmental Control System

Figure 3에 따르면 흡입구에서 유입되는 고온의 공기는 열교환기1을 통해 1차 냉각된 후 Butterfly 밸브를 지나 냉각기계(ACM)의 압축기에서 압축된다. 압축된 공기는 열교환기2의 고온부(hot side)로 유입되어 2차 냉각된 후 터빈을 통해 팽창된다. 터빈을 통과한 저온의 공기가 대상공간을 냉각하고 열교환기2의 저온부(cold side)로 유입되어 고온부와 열교환이 이루어진 후 외부로 배출 된다.

대상공간의 출구 온도가 80°C를 유지하도록

하는 설계점에서의 기본 구성품 설계성능은 Table 2와 같다[2].

Table 2. Design Point Performance of the Environmental Control System

ACM	Compressor	PR	1.7
		EFF	0.72
	Turbine	PR	3.73
		EFF	0.75
Heat Exchanger1 (Air to Coolant)		Effectiveness	0.87
Heat Exchanger2 (Air to Air)		Effectiveness	0.75

### 4. AMESim을 이용한 ECS 모델링

본 연구에서는 모델링 프로그램의 개발을 위하여 AMESim 프로그램을 활용하였다. AMESim(Advanced Modeling Environment for Simulation of Engineering Systems)은 복잡한 멀티 도메인 시스템을 Graphical interface를 통해 빠르고 정확하게 모델링 및 해석이 가능한 Software 이다[3].

Table 2의 설계점 성능 및 Fig. 3의 개념도를 가지는 환경조절장치를 Fig. 4와 같이 모델링 하였다.

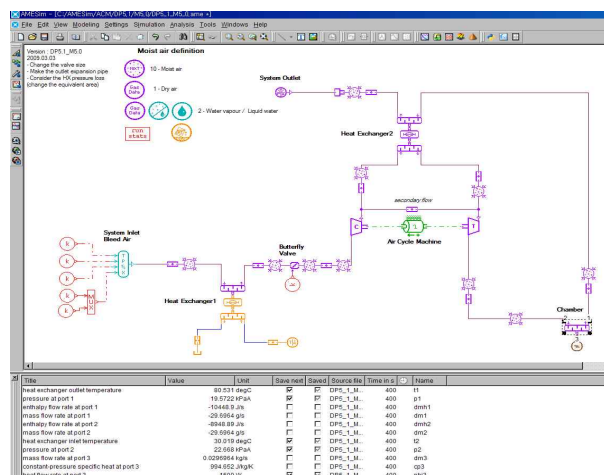


Fig. 4 Results of Modeling with AMESim S/W

Figure 4의 환경조절계통 모델링에는 AMESim의 Gas Mixture, Moist Air, Signal, Thermal Hydraulic, Mechanical, Thermal 등의 라이브러리가 사용되었으며, 구성된 각 구성품의 서브모델에는 제공받은 실제 형상 및 사이즈에 대한 데이터를 입력하였다.

Table 3은 모델링 프로그램에 반영된 구성품 항목 및 반영방법을 요약하여 정리하였다.

Table 3. The Summary of Modeling Results

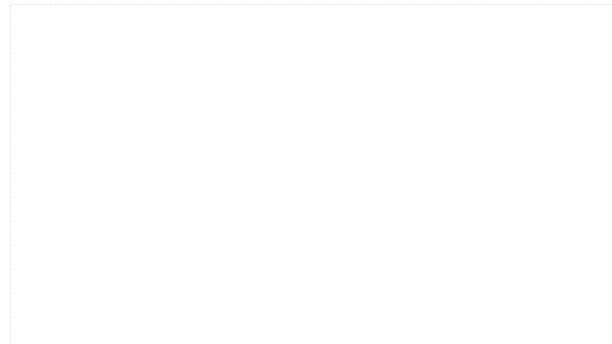
Items		Contents	
Program		DP5xM5.0	
Cooling capacity		1.5 kW	
Main components	Heat exchanger1	Performance map data	HFMV3.0
	Heat exchanger2	Performance map data	HAMV3.0
	Compressor	Performance map data	CPMV2.1
	Turbine	Performance map data	TPMV2.1
	Control valve	Flow function	
	Ducting system	Length and diameter	

프로그램에 입력된 열교환기의 성능선도(열교환기의 효율이 도시된 그래프)는 열교환기의 설계 결과로부터 유량변화에 대한 효율을 계산하여 도출하였으며 그 결과는 Fig. 5와 같다. 터빈과 압축기의 경우도 냉각기계의 1차 설계 결과를 반영하여 Fig. 6과 같은 성능선도를 도출하여 모델링 프로그램에 반영하였다. 한편, 배관과 같은 부속 구조물의 형상은 1차로 배치 설계된 결과를 반영하여 길이와 배관의 직경 등을 고려하여 모델링 시스템에 적용하였다[4][5].

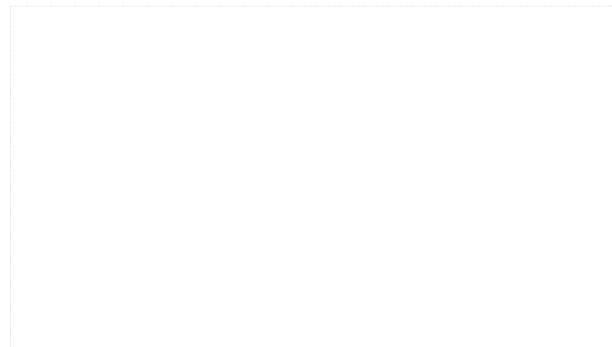
### 5. 성능 해석

시스템을 구성하는 각 구성품의 성능에 따른 민감도 분석을 통해 요구성능을 만족하는 주요 구성품 설계성능을 확립하였다.

결정된 설계점을 모델링 프로그램에 반영하여

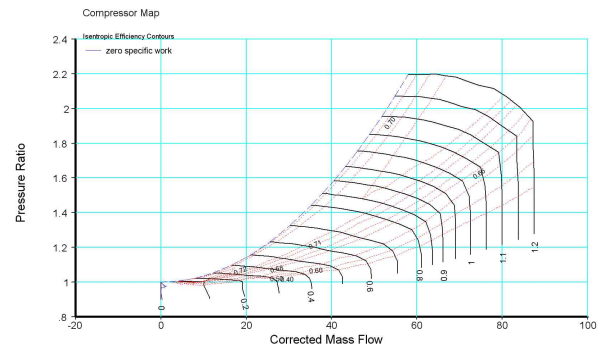


(a) Air to Coolant Heat Exchanger(HFMV3.0)

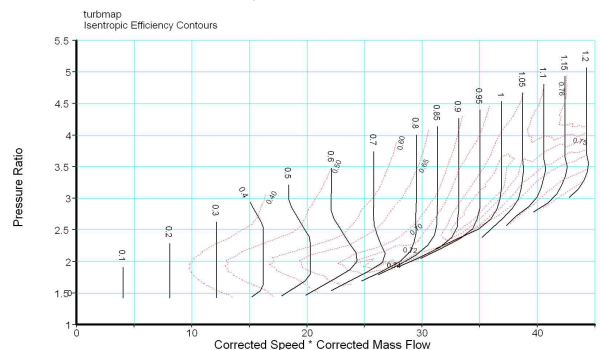


(b) Air to Air Heat Exchanger(HAMV3.0)

Fig. 5 Heat Exchanger Performance Map



(a) Compressor (CPMV2.1)



(b) Turbine (TPMV2.1)

Fig. 6 Air Cycle Machine Performance Map

운용환경에 따른 탈설계 성능해석과 천이 성능 해석을 통해 개념설계의 타당성을 검토하였다.

5.1 민감도 분석

ACM을 구성하고 있는 압축기와 터빈의 효율, 열교환기의 effectiveness 및 효율 변화에 따른 성능 민감도 분석을 수행하였다. 여기에서, 주요 구성품의 성능 변화는 Table 4와 같은 조건으로 하였다.

Table 4. Components Performance Variation

Component	Parameter	Performance variation
HX1	Heat flow rate	-12%~13%
HX2	Effectiveness	-10%~10%
Compressor	Efficiency	-10%~10%
Turbine	Efficiency	-12%~13%

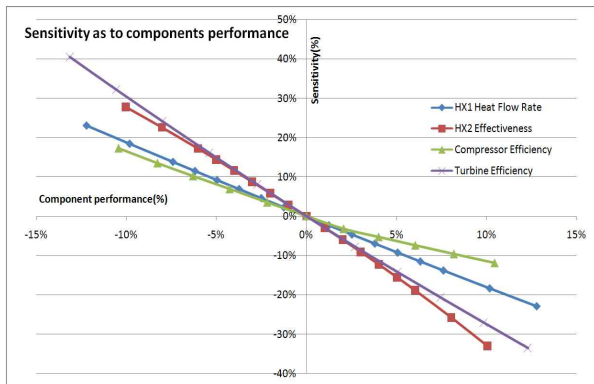


Fig. 7 Sensitivity as to Components Performance

Figure 7은 주요 구성품의 성능변화에 따라 대상공간 출구의 온도 민감도를 분석한 결과이다. 구성품의 성능이 5% 저하 되었을 때 터빈과 HX2의 성능이 대상공간 출구의 온도에 가장 민감한 반응을 나타내었고, 10% 성능저하가 되었을 때는 터빈의 성능이 대상공간 출구의 온도에 가장 민감한 반응을 보였다. 이와 같은 민감도 분석을 통하여 최적의 설계점을 선정 할 수 있었다.

민감도 분석 결과 Table 5와 같이 주요구성품의 1차 설계점 성능이 결정되었고, 개발된 모델링 프로그램에 반영하여 설계점에서의 성능해석

을 수행하였다(Fig. 8).

요구 설계점과 모델링 설계점 해석 결과를 비교해 보면 HX2 출구 온도에서 최대 3.6%의 오차가 발생하였고, 대상공간 출구 온도가 80.53°C로 설계점의 해석결과와 거의 일치하는 것을 확인 할 수 있었다.

추후 냉각기계, 열교환기 등의 실제 실험으로 획득한 성능 데이터를 이용하여 성능선도를 수정하면 보다 실제시스템의 성능을 반영할 수 있을 것으로 예상되며 오차를 더욱 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

Table 5. Performance Analysis Results at Design Point

Items	Exit temperature		Error
	Design point	Modeling result	
HX1	126	128	1.6%
HX2	220	212	3.6%
Compressor	266	259	2.6%
Turbine	30	30	0.0%
Chamber (Avionics Bay)	80	80.53	0.7%

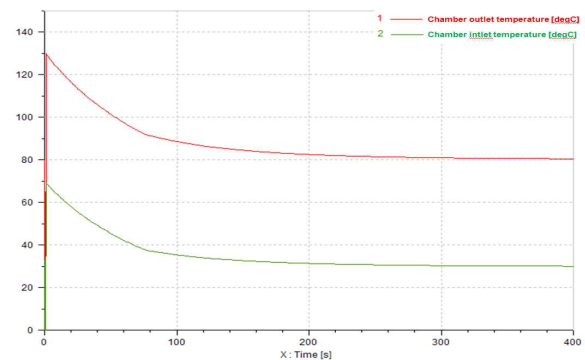


Fig. 8 Design Point Performance Analysis Result

5.2 탈설계점 성능해석

본 연구에서 검토한 운용조건은 표준대기, 저온대기, 고온대기 일 때, 특정한 점에서의 운용 조건으로 12가지 경우를 산정하였다.

Table 6과 같은 운용조건에서, 개발된 모델링 프로그램을 활용하여 환경조절장치의 탈설계점 성능해석을 수행하였다.

Table 6. Off Design Conditions

Conditions	Standard Day			Conditions	Cold Day			Conditions	Hot Day		
	T <sub>t</sub> /T <sub>ref</sub>	P <sub>t</sub> /P <sub>ref</sub>	Pr/Pr <sub>ref</sub>		T <sub>t</sub> /T <sub>ref</sub>	P <sub>t</sub> /P <sub>ref</sub>	Pr/Pr <sub>ref</sub>		T <sub>t</sub> /T <sub>ref</sub>	P <sub>t</sub> /P <sub>ref</sub>	Pr/Pr <sub>ref</sub>
CASE-S01	0.44	0.87	0.32	CASE-C01	0.12	0.87	0.32	CASE-H01	0.53	0.87	0.32
CASE-S02	0.41	0.61	0.37	CASE-C02	0.15	0.54	0.33	CASE-H02	0.51	0.62	0.38
CASE-S03	0.49	0.54	0.52	CASE-C03	0.27	0.48	0.47	CASE-H03	0.66	0.61	0.58
CASE-S04	0.56	0.31	0.64	CASE-C04	0.31	0.29	0.62	CASE-H04	0.67	0.32	0.67
CASE-S05	0.60	0.23	0.68	CASE-C05	0.29	0.23	0.70	CASE-H05	0.71	0.24	0.72
CASE-S06	0.71	0.18	0.78	CASE-C06	0.37	0.14	0.59	CASE-H06	0.85	0.20	0.85
CASE-S07	0.76	0.20	0.81	CASE-C07	0.41	0.15	0.61	CASE-H07	0.91	0.22	0.88
CASE-S08	0.81	0.22	0.90	CASE-C08	0.45	0.17	0.68	CASE-H08	0.97	0.24	0.98
CASE-S09	0.81	0.32	0.92	CASE-C09	0.45	0.33	0.94	CASE-H09	0.94	0.34	0.97
CASE-S10	0.74	0.89	0.75	CASE-C10	0.47	0.80	0.68	CASE-H10	0.95	1.0	0.84
CASE-S11	0.51	0.95	0.43	CASE-C11	0.20	0.93	0.42	CASE-H11	0.62	0.96	0.43
CASE-S12	0.48	1.0	0.35	CASE-C12	0.15	1.0	0.35	CASE-H12	0.58	1.0	0.35

Figure 9, 10, 11는 환경조절장치의 주요 설계 목표인 환경조절 대상공간의 온도에 대한 해석 결과를 제시한 것이다. 여기에서 CASE 0은 설계 점을 나타낸다.

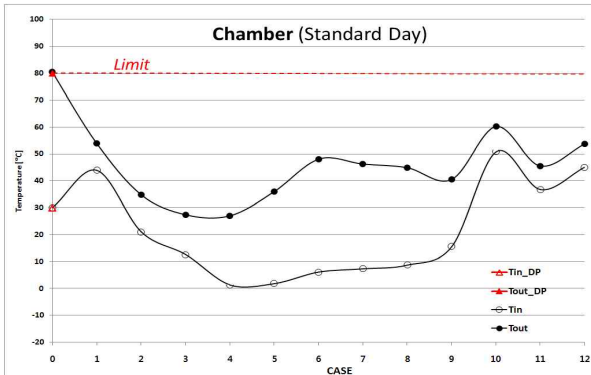


Fig. 9 Modeling Results in Standard Day Condition

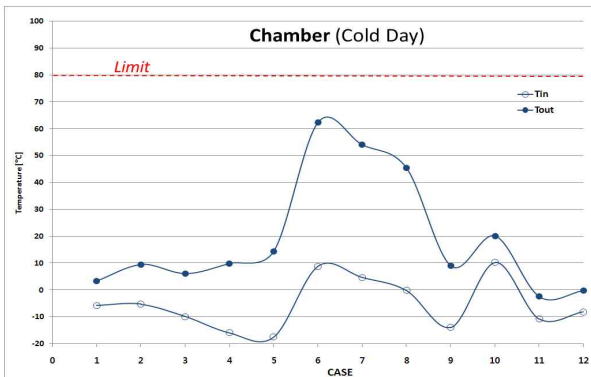


Fig. 10 Modeling Results in Cold Day Condition

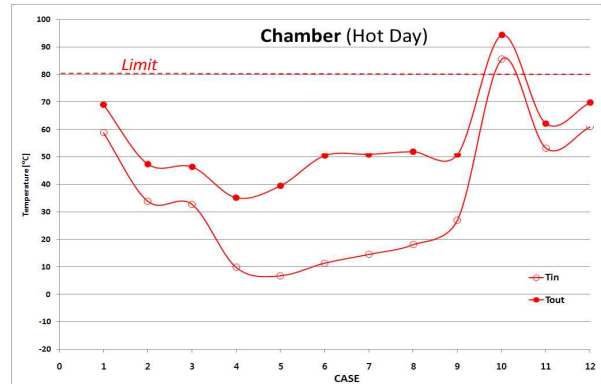


Fig. 11 Modeling Results in Hot Day Condition

탈설계점 해석 결과 Fig. 11(고온대기조건)의 CASE 10에서 환경조절 대상공간의 온도가 허용 온도 범위를 벗어나는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 이에 대한 보완 설계가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

5.3 천이 성능해석

Table 7과 같이 시간에 따른 운용조건 변화에서 주요 구성품 및 대상공간의 요구성능이 만족하는지 해석하였다.

Table 7. Virtual Flight Profiles

Time[sec]	Case	T <sub>t</sub> /T <sub>ref</sub>	P <sub>t</sub> /P <sub>ref</sub>	Pr/Pr <sub>ref</sub>
0	CASE-S09	0.81	0.32	0.92
10	CASE-S09	0.81	0.32	0.92
12	CASE-S10	0.74	0.89	0.75
14	CASE-S11	0.51	0.95	0.43
16	CASE-S12	0.48	1	0.35
18	CASE-H10	0.95	1	0.84
20	CASE-H10	0.95	1	0.84

해석결과 Fig. 12와 같이 170 sec 이후 구간에서 대상공간의 온도가 허용범위를 초과하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 마지막 구간에서 대상공간의 안전성을 확보하기 위해 보완 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

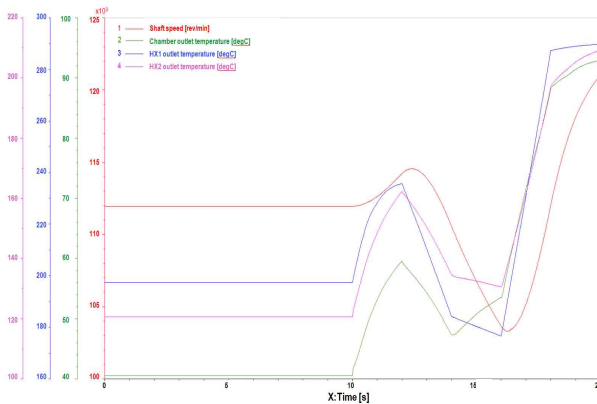


Fig. 12 Transient Performance Analysis Results

이상과 같이, 모델링 프로그램을 통하여 설계점에서의 시스템 성능뿐만 아니라 탈설계점에서의 성능을 예상하고, 요구성능의 만족여부를 미리 확인 할 수 있었으며, 동 결과를 바탕으로 해당 시스템의 개념설계 내용에 대한 보완 소요를 확인 할 수 있었다.

## 6. 결 론

환경조절장치의 개발에 앞서 시스템 M&S를 통하여 초기 설정된 시스템 개발 규격의 타당성 검증 및 문제점을 사전에 예측하고, 실제 운용되는 다양한 조건에서의 해석이 가능한 환경조절장치 모델링 프로그램을 개발하였다.

환경조절장치의 모델링 및 성능해석을 위해 상용 프로그램인 AMESim을 이용하였다.

연구대상 환경조절장치는 압축기와 터빈으로 이루어진 냉각기계(ACM)와 HX 1(Air to Coolant), HX 2(Air to Air), 공기 유량 조절 밸브, 배관 등으로 구성하였다. 모델링 프로그램도 각각의 구성품 특성과 시스템의 구성도에 부합하도록 구성하였다.

시스템을 구성하는 각 구성품의 성능에 따른 민감도 분석을 통해 요구성능을 만족하는 주요 구성품의 설계성능을 확립하였다.

설계점 성능해석 확인을 통해 시스템 모델링의 검증 후, 요구 운용조건 변화에 따른 탈설계점 성능해석을 수행하였고, 그 결과를 분석하였다. 또한 시간에 따른 여러 운용조건에서의 성능해석을 통해 대상공간의 요구성능 만족 여부를 검토해 보았다. 해석 결과 마지막 구간에서 대상공간의 온도가 허용 범위를 초과하여 안전성 확보를 위한 보완 연구 소요를 확인 할 수 있었다.

추후 개발 시스템의 실험을 통한 주요 구성품의 성능 데이터를 확보하여 모델링 프로그램에 반영하고, 제어를 구성하여 대상공간 출구 온도가 최적 조건이 되도록 제어 할 예정이다.

개발된 ECS 모델링 프로그램을 이용한 해석 결과는 시스템 체계 개발 및 구성품 설계에 필요한 정보를 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

1. 현용익, 김진한, 김춘택, 차봉준, 이대성, 김승우, 천익정, "항공기용 ACM(Air Cycle Machine) 설계 및 공력성능시험," 유체기계 연구개발 발표회 논문집, 1997, pp.58-73
2. 유영준 외 5명, 국방과학연구소 기술보고서, ADDR 413-090119, 2009
3. AMESim Reference Manual, Rev 8B, LMS IMAGINE S.A., 2008
4. J. F. Sellers and C.J. Daniele, Technical Report TN-D-7901, NASA Lewis Research Center, 1975
5. J. Kurzke, Smooth C (version 8), Smooth T (version 7) Manual, 2002