

항공기 환경조절장치 기술

양 수 석

한국항공우주연구소 항공추진연구그룹
책 임 원 구 원

1. 머리말

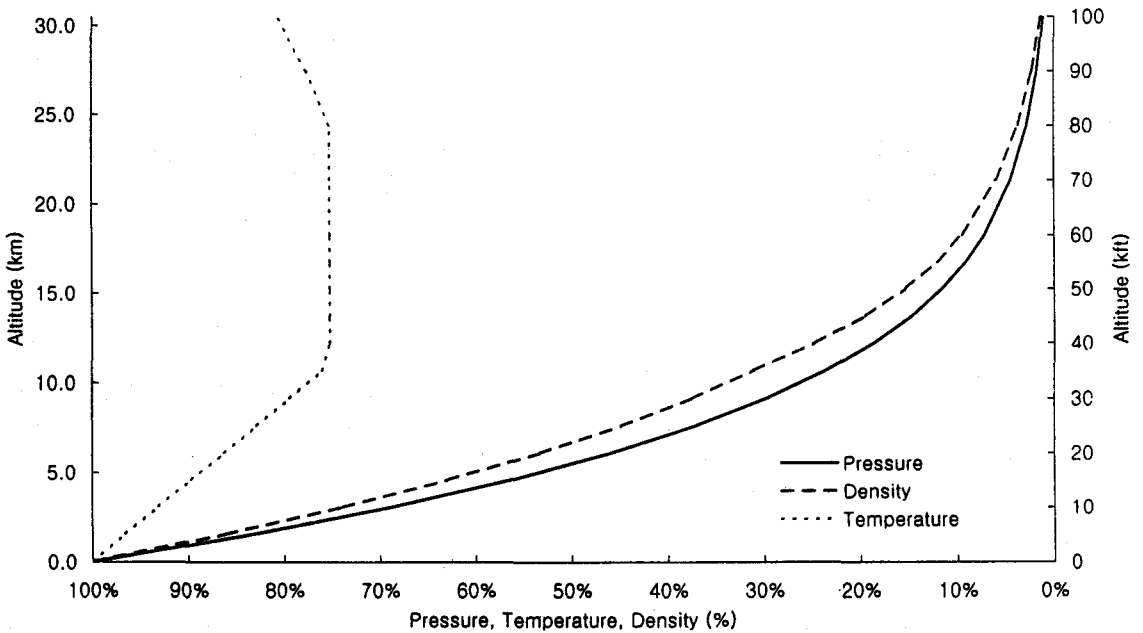
구름 한 점 없는 맑은 가을, 푸른 초원을 배경으로 달리고 있는 자동차를 생각해보자. 아무리 인공적으로 신선한 공기를 만들어내는 장치가 있어도 창문을 열고 자연의 공기를 호흡하고 싶지 않은 사람이 없으리라. 그러나 자동차의 운전 환경이 항상 이와 같이 좋을 수가 없고, 에어컨이 고장난 상태에서 푹푹 찌는 한여름 낮 도시의 매연사이클 창문을 열고 달려본 경험이 있는 사람이라면 자동차에 붙어 있는 한낱 에어컨 장치의 소중함을 깊이 깨달을 수 있었을 것이다.

이처럼 승객에게 안락함을 보장해주는 환경조절장치 중에서 가장 기본적인 수준인 자동차의 에어컨 장치에 비해서 가장 복잡하고, 정밀하고, 비싸며, 기술적으로 가장 높은 수준을 요구하는 장치가 항공기의 환경조절장치이다. 항공기의 환경조절장치는 단지 승객의 안락함을 제공해주는 것이 아니라 승객의 생명을 지켜주는 장치이기도 하다. 왜냐하면 우리를 미국이

며 유럽이며 원하는 세계 어느 곳으로도 날라다 주는 대형 여객기가 운항하는 고도가 대략 35,000ft 이며 그곳의 환경은 그림 1에 나타난 바와 같이 지상과 크게 다르다. 즉, 그곳의 압력은 지상의 1/4, 공기 밀도는 1/3, 온도는 -54℃ 정도가 되므로 항공기에 환경조절장치가 없다면 아무리 슈퍼맨이라도 견디기가 어려운 상황이 될 것이다.

군용기의 경우 일반 승객보다 고도로 훈련된 조종사가 타고 있기 때문에 여객기보다 환경조절장치의 필요성이 적을 것이라고 쉽게 생각할 수 있으나 군용기는 운용 가능 고도가 2 배 정도로 높을 뿐만 아니라 빠른 기동성이 요구되기 때문에 고도의 변화가 매우 심하게 되고 따라서 더욱 수준 높은 환경조절장치를 필요로 한다. 또한 현대전에서는 화학무기, 생물무기, 핵무기 등으로부터 조종사를 보호할 수 있는 환경조절장치를 요구하고 있기 때문에 한 단계 높은 기술 수준을 필요로 한다.

항공기에 사용되는 모든 부품이 그렇듯이 항공기용 환경조절장치는 엄격한 시험과 검증



The ARDC Atmosphere Tables of Temperature, Pressure, and Density
(Design Data For Aeroautics and Astronautics, 1961)

그림 1 고공환경변화

거친 후에 사용될 수가 있다. 관련 군사 규격으로는 MIL-E-87145 등이 있으며, 민간 규격으로는 FAR 25와 이를 만족시키기 위하여 각 항공기 제작사가 자체적으로 보유하고 있는 규격들이 있다. 따라서 모든 환경조절장치는 이러한 제 규정을 만족시킬 수 있도록 설계/제작되며, 해당 규격서에 규정된 모든 시험을 통과하여야 비로소 항공기에 사용될 수가 있다.

여기에서는 항공기용 환경조절장치에 요구되는 요구사항 중에서 중요한 것들을 우선 알아보고 이를 만족시키기 위한 환경조절장치의 기술적 원리 및 현재 적용되고 있는 첨단 기술에 대한 간략한 설명, 그리고 마지막으로 이러한 항공용 환경조절장치를 타 분야로 응용할 경우

의 가능성에 대하여 언급하고 한다.

2. 성능 요구사항

2.1 온도 요구사항

온도 요구사항은 항공기의 종류와 운용 요구에 따라 다르며, 크게 두 가지로 구별된다. 첫째는 전투기와 훈련기처럼 승무원 혹은 조종사가 지정된 좌석에서 이동하지 않고 계속 임무를 수행하는 경우이고 다른 하나는 여객기나 수송기처럼 항공기에 타고 있는 사람들 간에 좌석 이동이 허용되는 경우이다. 전투기와 같이 고정된 공간에서는 전체 공간내의 평균 온도보다는 조종사 주위의 온도가 더욱 의미가

있으므로 Pilot Envelop Temperature를 정의하여 규정한다.

Pilot Envelop Temperature란 조종사의 발목, 무릎, 엉덩이, 가슴, 어깨, 머리 부근에서 측정된 온도들의 산술 평균 온도를 말하며 그림 2의 #2 및 #3 범위 내에서 유지되어야 한다. 그러나 이와 같이 정의된 온도를 만족한다고 하여도 주위의 온도, 공기의 속도, 습도, 태양 복사량 등 여러 가지 요인에 따라 실제적으로 조종사가 느끼는 안락함에는 큰 차이가 생기게 된다. 따라서 Wet Bulb Globe Temperature라는 또 하나의 온도를 식(1)과 같이 정의하며, 조종사의 머리와 어깨 근처에서 측정된 Wet Bulb Globe Temperature가 비행 중에는 90 °C, 지상 운용 중에는 95 °C를 넘지 않아야 하는 것으로 규정하고 있다.

$$T_{WBGT} = 0.7T_{WB} + 0.2T_{BG} + 0.1T_{DB} \quad (1)$$

여기에서, T_{WB} = 습구 온도

T_{BG} = 직경 5cm 흑구의 온도

T_{DB} = 건구 온도

여객기처럼 승객이 객실 내를 자유로이 다닐

수 있는 경우에는 위에서 정의한 온도와는 달리 Average Compartment Temperature를 사용하는 것이 더 합리적이며 그림 2의 #1 및 #2의 범위 내에 유지되어야 한다. 이 온도는 객실내의 여러 곳에서 측정된 건구 온도들의 산술 평균값을 말하며, 이 때 바닥으로부터 6인치 이내와 같은 특정한 곳의 온도는 제외한다. 객실내의 안락한 온도는 습도에 따라 달라지는 것을 그림 3에서 볼 수 있다. 즉, 승객이 안락하게 느끼는 온도가 습도가 높을 경우에는 70 ~ 80 °C 정도이지만 습도가 낮을 경우에는 85 °C 정도가 된다. 이와 같이 습도뿐만 아니라 실제로 승객이 느끼는 온도에 영향을 주는 여러 요인들이 있기 때문에 건구 및 습구 온도 그리고 바람의 속도를 감안한 Effective Temperature Chart를 그림 4과 같이 정의하여 승객이 느끼는 실제의 온도를 나타낸다.

2. 2 압력 요구조건

항공기의 환경조절장치에서 객실의 압력 조절은 승객의 생명과 직접적으로 연관되기 때문에 온도보다 더욱 중요하게 인식되고 있다. 주위의 기압 상태에 따라 나타나는 인체의 생리

표 2. 위성체 조립 시험환경의 청정도 관리 기준

고도 FEET	기압		신체적인 증상
	TORR	PSIA	
5,000	632	12.23	정상적인 야간 시야의 장애 발생
8,000	564	10.91	장기 비행이 가능한 최대 고도
10,000	522	10.11	산소결핍증 증상이 시작
20,000	350	6.76	경미한 감압증 증상이 시작
25,000	282	5.46	심한 감압증 증상이 시작
30,000	225	4.36	감압증 증상의 위험 고도
40,000	141	2.72	산소 호흡을 위해 별도의 압력장치 필요

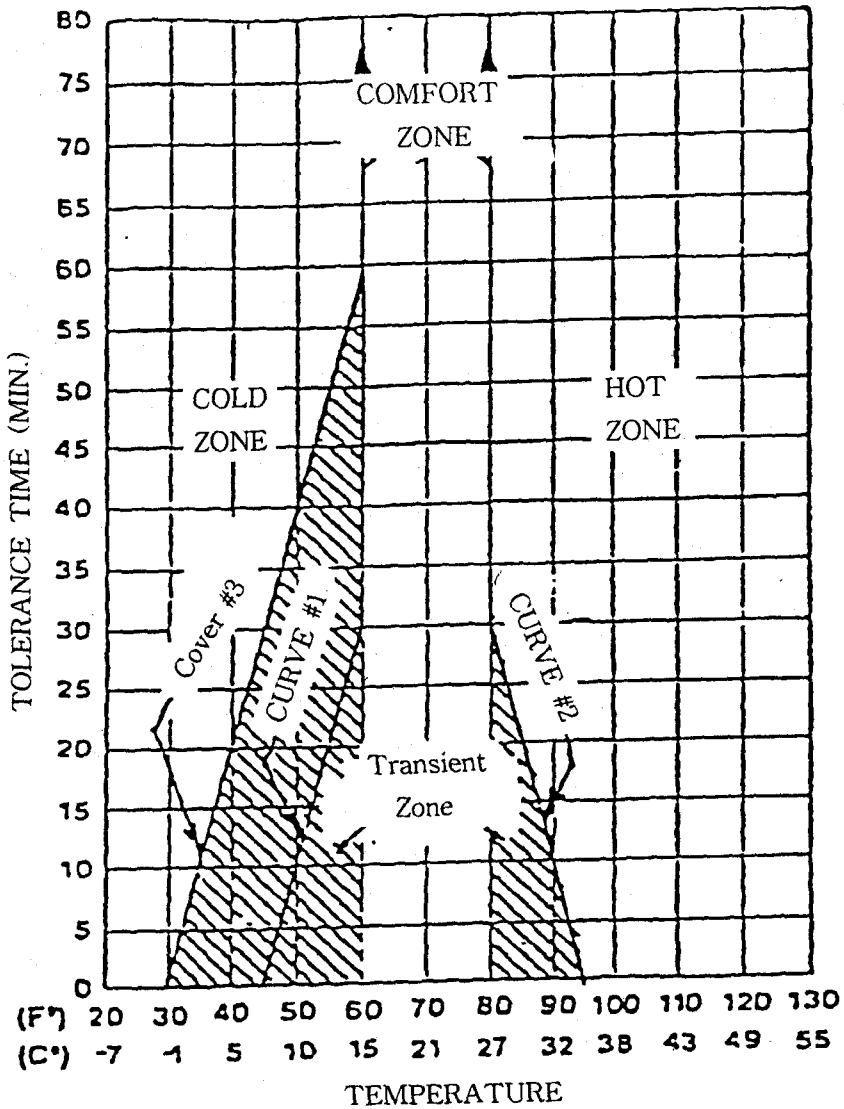


그림 2 항공기내 온도 허용기준

학적인 한계를 나타내는 표 1을 보면 객실을 압력을 8,000 ft로 유지시켜주는 이유를 알 수 있다. 표 1에서 나타낸 바와 같이 고도가 10,000 ft에 이르면 인체는 산소결핍증(Hypoxia)을 보이기 시작하며, 20,000 ft에 이르면 복부 통증과 함께 감압증(Decompression Sick-

ness)을 보인다. 따라서 20,000 ft 이상을 비행하는 항공기는 필수적으로 압력조절장치를 갖추고 있어야 하며 객실내의 압력 조절은 항공기의 종류에 따라 달리 규정되어진다.

전투기의 경우를 살펴보면 8,000 ft 까지는 조종실을 가압하지 않은 상태로 그대로 두며,

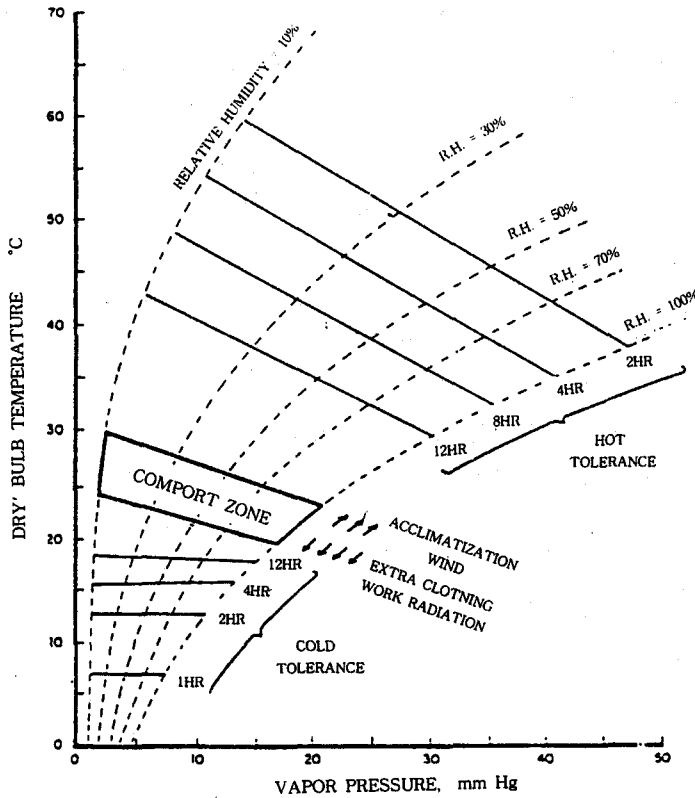


그림 3 객실내의 안락한 온도, 습도 조건

8,000 ft 이상의 고도에서는 조종실내의 압력이 8,000 ft를 유지하도록 가압을 한다. 고도가 23,000 ft 이상이 되면 대기와 조종실내의 압력차가 너무 커지게 되고 이를 구조적으로 견디기 위해서는 항공기의 무게가 증가되는 손해를 가져오게 된다. 따라서 23,000 ft 이상에서는 압력 차를 5 psi로 유지하면서 조종실내의 고도를 8,000 ft 이상으로 증가시키는 방법을 사용하게 되며 이와 같은 압력조절을 따르면 조종실내의 압력은 고도에 따라 그림 5와 같은 변화를 겪게된다. 이 같은 압력조절을 따를 경우 항공기의 고도가 27,000 ft 일 때 조종실의

압력은 10,000 ft 이상이 되므로 조종사의 산소 결핍증(Hypoxia)을 방지해 줄 수 있는 별도의 산소공급장치를 필요로 한다. 또한 일반적으로 전투기의 운용 고도가 60,000 ft 이내로 한정되기 때문에 이 같은 압력조절을 따를 경우 조종실의 압력은 25,000 ft 이내로 유지되며 조종사의 감압증은 방지된다.

여객기의 경우에는 최고 고도에서도 객실의 압력이 8,000 ft 이하를 유지하도록 설계되어야 한다. 또한 압력조절장치의 고장에도 불구하고 객실의 압력이 15,000 ft를 초과해서는 안되며, 또한 예상치 못한 사고의 경우에도 승객이

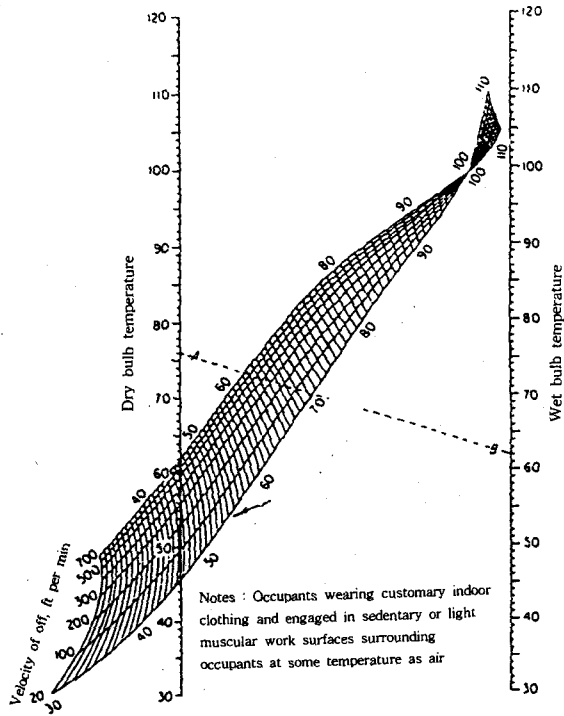
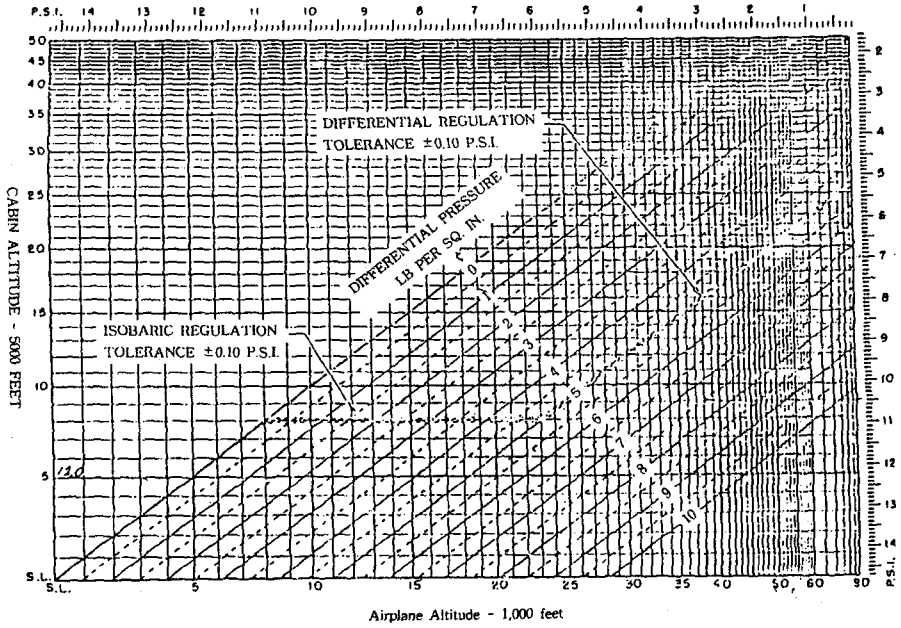


그림 4 Effective Temperature Chart



MIL-E-87145 (USAF)
APPENDIX A

28

그림 5 고도에 따른 조종실내의 압력

25,000 ft의 압력에 2분 이상 노출되어서는 안 되는 규정을 지키도록 설계되고 있다.

항공기의 압력조절장치는 객실 압력의 절대 값 뿐만 아니라 변화율도 조절해야 한다. 즉, 일반인들은 0.2 psi/sec의 압력 변화에는 어렵지 않게 적응을 하지만 압력의 변화율이 이보다 커지면 불쾌감을 느끼게 된다. 따라서 전투기의 경우 허용 압력 변화율을 0.2 psi/sec로 규정하고 있고 비상시에는 최대 승압율을 0.5 psi/sec, 최대 감압율을 1.0 psi/sec로 규정하고 있다. 이것은 인체가 감압을 더 잘 견디기 때문이다. 여객기의 경우에는 압력 변화에 대한 규정이 더욱 강화되어 승압시에 0.003 psi/sec,

감압시에 0.004 psi/sec로 규정하여 설계되어진 다.

앞서 언급한 바와 같이 항공기에 장착되는 환경조절장치에는 별도의 산소공급장치를 필요로 한다. 이것은 인체의 호흡에는 일정량의 산소가 필요하며 이것을 정의하는 것이 호흡기의 산소 분압과 폐포의 산소 분압이다. 표 2에서 볼 수 있는 것처럼 지상에서 호흡할 때 호흡기의 산소 분압은 149 torr, 폐포의 산소 분압은 103 torr 정도가 된다. 10,000 ft 고도에서 공기로 호흡하면 호흡기의 산소 분압은 100 torr로 폐포의 산소 분압은 61 torr로 떨어지게 되며 인체는 산소 결핍증을 겪게 된다.

표 2. 고도에 따른 호흡 관련 분압

등가 고도		호흡 매체	기관의 산소분압	포상의 분압		호흡교환율 V_{CO_2}/V_{O_2}
FEET	TORR			P_{O_2}	P_{CO_2}	
지상 34,000	760 188	공기 산소	149 141	103 101	40 40	0.85
5,000 36,500	632 167	공기 산소	123 120	80 82	38 38	0.87
10,000 39,500	523 145	공기 산소	100 98	61 62	36 36	0.90
15,000 42,000	429 128	공기 산소	80 81	46 48	33 33	0.95
18,000 44,000	380 117	공기 산소	70 70	38 39	31 31	0.98
20,000 45,000	350 111	공기 산소	64 64	34 34	30 30	1.00

그러나 순수한 산소로 호흡하는 경우에는 34,000 ft의 고도에서 호흡기와 폐포의 산소 분압을 지상에서 공기로 호흡하는 수준과 같게 유지시켜준다. 따라서 전투기의 경우에는 조종실의 압력이 25,000 ft 이상이 되기 때문에 산소공급장치를 반듯이 장착하여야 하며 여객기

의 경우에도 비상 사고시를 대비하여 산소공급장치를 갖추고 있어야 한다.

2. 3 청정도 요구조건

항공기 객실 내부에 필요한 산소 요구량을 공급하며 과도한 이산화탄소의 농도를 막을 뿐

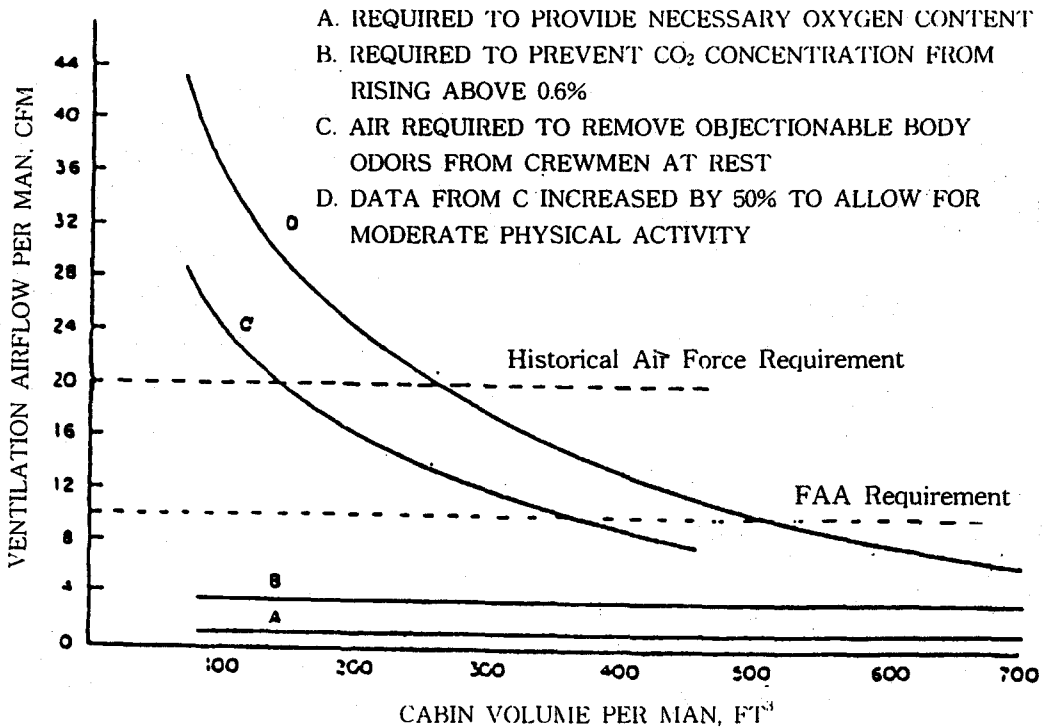


그림 6 객실의 체적에 따른 환기량

만 아니라 습기를 제거하고 또한 오염 및 냄새를 방지하기 위하여 신선한 공기로 환기를 시켜주는 것이 필요하다. 그림 6은 객실의 체적에 따른 환기량을 규정하고 있으며 이 규정에 의하면 군용기는 한 사람 당 20 CFM, 여객기는 10 CFM의 환기량을 필요로 한다.

항공기에는 객실의 공기를 오염시킬 수 있는 여러 요인들이 있으며, 그 중 대표적인 것으로는 엔진의 배기 가스, 연료계통, 유압 오일 등이 있으며 여기에서 생성되는 폭발성 혹은 인체에 해로운 가스가 객실로 유입되지 않도록 설계되어야 한다. 객실의 공기 중에서 포함된 일산화탄소의 허용량은 50 ppm이며, 이산화탄

소는 전체 체적의 0.5%, 오존은 0.25 ppm으로 규정되고 있다. 또한 유압계통의 고장 혹은 파손이 생겼을 경우에도 유압 오일의 오염이 5.0 mg/m³을 초과하지 않아야 한다.

항공기의 환경조절장치는 객실뿐 만 아니라 전자장비의 냉각을 담당하므로 전자장비의 내부로 먼지 등이 유입되지 않도록 필터를 사용하여 냉각 공기를 여과시켜주어야 한다. 전자장비로 유입되는 냉각공기는 공기 1 파운드당 0.001 그램 이상의 먼지가 포함되어 있지 않아야 하며, 입자의 95%는 크기가 20 마이크로 이하이어야 하며 50 마이크로 이상의 입자를 포함하고 있지 않아야 한다.

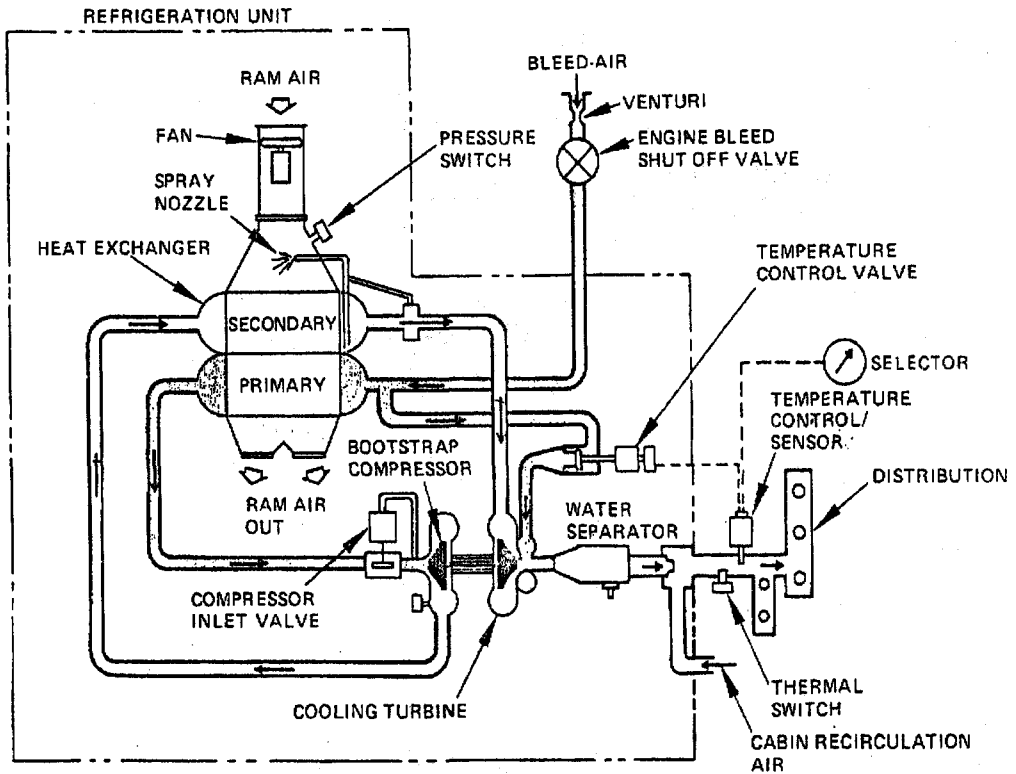


그림 7 환경조절장치의 개략도

3. 핵심기술의 원리

항공기에 장착되는 환경조절장치의 개략도는 그림 7에 표시한 바와 같다. 여기에서 냉각공기가 생성되는 가장 중요한 부품은 ACM(Air Cycle Machine)이며 이것을 사용함으로써 프레온 냉매를 사용하는 재래적인 냉각 방식을 탈피할 수 있었다. 따라서 환경조절장치의 핵심 부품인 ACM의 기술 원리에 대한 간단한 소개를 먼저 하고자 한다.

다음으로는 ACM에 최근 적용되고 있는 첨단 기술인 AFB(Air-Foil Bearing) 기술에 대한

소개를 하고자 한다. 보통 ACM은 60,000 rpm 이상의 고속회전을 하기 때문에 윤활 오일을 필요로 하며 이같은 재래적인 ACM의 문제점은 오일의 누설로 인해 공기에 윤활유가 섞이는 결과를 가져오게 된다. 따라서 오래 전부터 고속회전 시에도 윤활 오일을 필요로 하지 않는 기술이 연구되어졌으며 이 중 하나로써 현재 AFB가 실용화되어 사용되고 있다.

윤활 오일을 사용하지 않는 AFB 등을 사용하여도 환경조절장치에는 오염 물질이 포함될 우려가 많기 때문에 정하여진 공기 청정도의 규정을 만족시키기 위해서는 여러 곳에 필터를

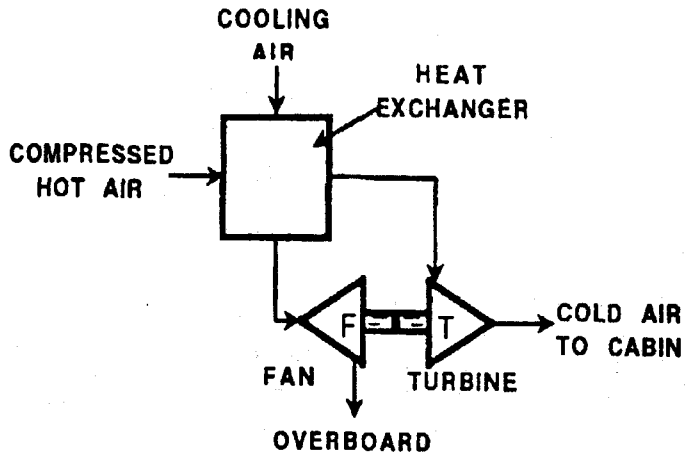


그림 8 Simple Cycle

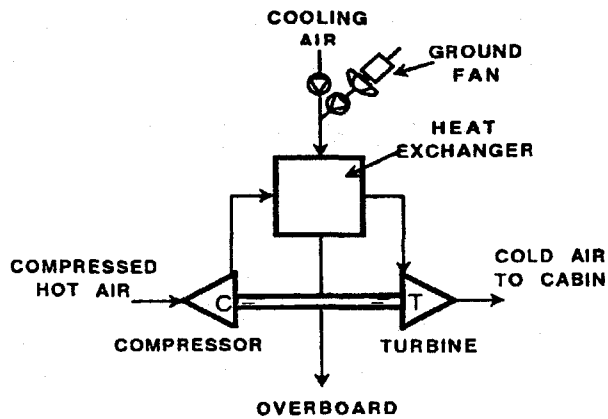


그림 9 Bootstrap Cycle

사용할 수밖에 없다. 따라서 필터는 환경조절 장치에서는 빠질 수 없는 중요한 부품이며 여기에서는 이러한 필터의 최신 기술에 대한 소개도 첨부하고자 한다.

3. 1 ACM(Air Cycle Machine) 원리

ACM의 가장 간단한 형태가 그림 8에 표시한 Simple Cycle이다. 여기에서는 열교환기를 통과

하면서 온도가 낮아진 고압공기가 터빈으로 유입되면 터빈 내부에서 급격한 팽창을 하면서 온도가 급격히 떨어지게 된다. 이 때 터빈에서 발생한 동력은 팬의 구동력으로 사용된다. 이러한 Simple Cycle은 구조가 간단한 장점이 있으나 고압 공기의 압력이 낮으면 냉각용량이 매우 떨어지는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 일반적으로 많이 사용하는 형태가 그림 9에 표시한 Bootstrap Cycle이다. 여기에서는 터빈에서 발생한 동력으로 압축기를 구동하기 때문에 터빈 입구의 압력을 높일 수가 있으며 따라서 고압 공기의 압력이 낮은 경우에 냉각용량이 떨어지는 Simple Cycle의 단점을 없앨 수가 있다.

ACM에 사용하는 압축기는 원심 압축기, 터빈은 구심 터빈의 형태를 일반적으로 가진다. 원심 압축기는 구조가 간단하고 단당 압축비가 큰 장점이 있으며 ACM의 경우에는 보통 2 정도의 압축비에서 운용된다. 터빈의 경우도 구

조가 간단하고 단당 팽창비가 큰 구심 터빈을 주로 사용하며 보통 3 정도의 팽창비에서 운용된다. 터빈 입구에서 고압 공기의 조건이 50℃, 3 기압이라고 할 때 아래식 (2)로 터빈 출구의 온도를 계산하면 -28℃가 된다.

$$\frac{T_{out}}{T_{in}} = 1 - \eta_t \left\{ 1 - \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right\} \quad (2)$$

여기에서 T_{in} 및 T_{out} 는 터빈의 입구 및 출구의 온도, P_{out} 및 P_{in} 는 터빈 입구 및 출구의 압력, η_t 는 터빈의 효율을 나타낸다. 이처럼 환경조절장치에서 터빈 출구가 가장 낮은 온도를 형성하게 되며 터빈 출구에서 만들어진 저온의 공기를 고온의 공기와 상황에 따라 적당히 섞어 0℃에서 15℃ 정도의 온도로 만든 뒤 객실의 냉각에 사용한다.

3. 2 AFB(Air-Foil Bearing) 기술

고속 회전체에서 반듯이 필요한 베어링 분야

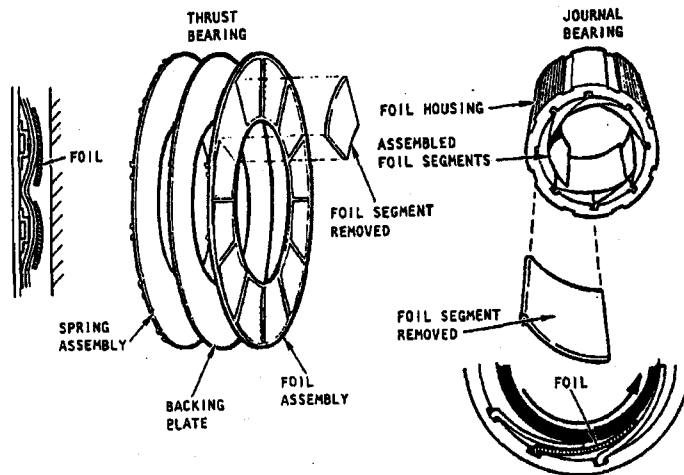


그림 10 Air-Foil Bearing

에서 획기적인 발전의 하나가 윤활을 필요로 하지 않는 AFB(Air-Foil Bearing)의 개발이다. 특히 윤활유의 누설이 문제를 발생시키는 경우에는 AFB의 사용이 절대적으로 유리하다. ACM에서는 청정한 공기를 공급해야하는 요구 조건을 만족시키기 위하여 이러한 AFB의 사용이 적극적으로 시도되었다.

AFB는 그림 10에서 보는 것처럼 유연성 있

는 포일이 저널 하우징(Journal Housing)의 안쪽 면과 스러스트 깃(Thrust Collar)의 양면에 부착되어 있다. 따라서 축이 회전을 하지 않을 경우에는 포일이 회전축과 직접 닿게 된다. 축이 회전을 하게 되면 점성력이 포일과 축 사이에 공기막을 형성하게 되어 회전축은 공기중에 부양되어 회전을 하게된다. 이때 포일의 유연성은 진동과 충격을 흡수하는 역할을 한다.

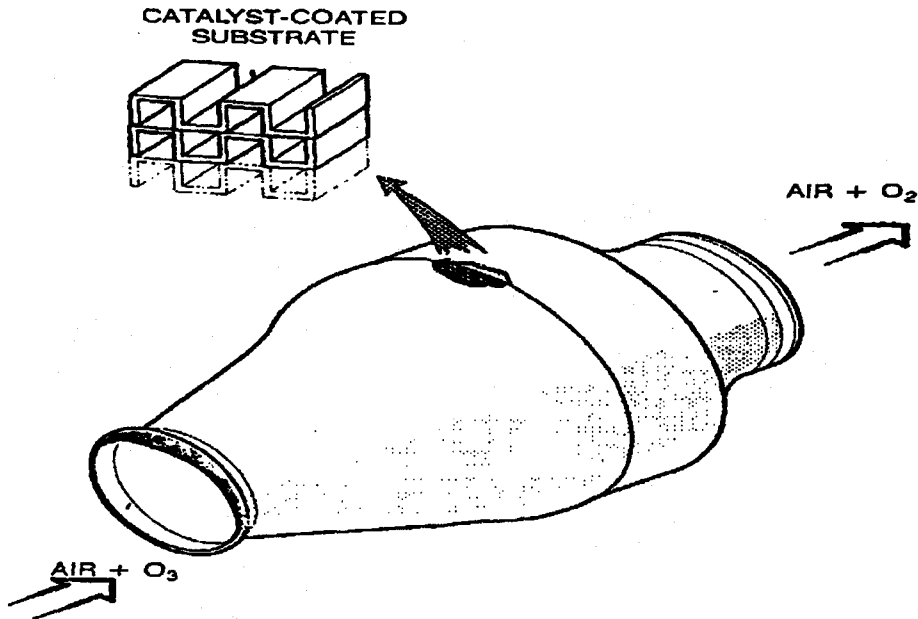


그림 11 촉매 필터

3. 3 필터장치

항공기의 고도가 높아지면 대기 공기 중에 포함된 오존의 농도가 규정치 보다 높아지게 된다. 따라서 대기의 공기를 가압하여 환경조절장치로 보내기 전에 그림 11과 같이 공기 중

의 오존을 제거할 수 있는 장치를 통과시켜 공기 중에 있는 오존의 농도를 감소시키는 촉매 필터를 최근에 사용하고 있다.

여객기와 같이 큰 객실에 신선한 공기를 규정치 이상으로 계속 공급하기 위해서는 상당한 비용이 소모된다. 따라서 규정되어 있는 환기

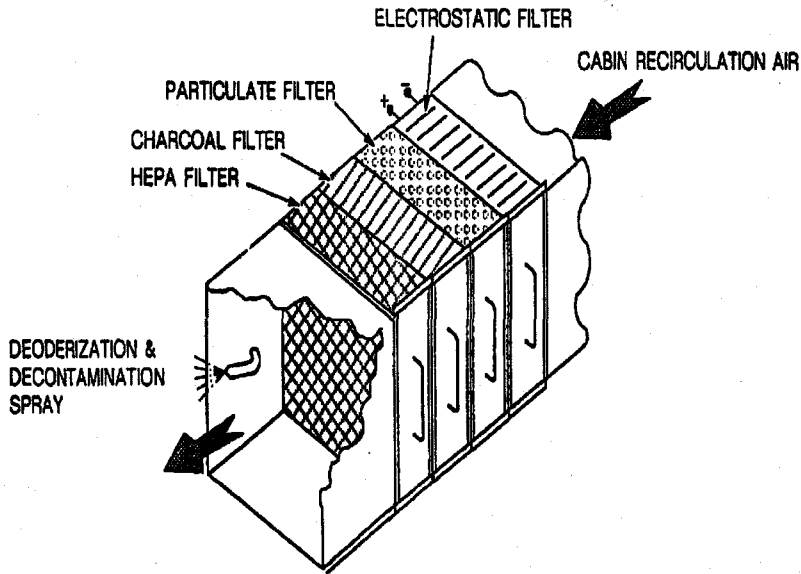


그림 12 필터 장치

량을 만족하면서도 비용을 최소화하는 방법이 객실에 공급된 공기를 재 순환하여 사용하는 방법이다. 그러나 객실에 일단 공급된 공기는 여러 가지 냄새, 먼지 오염 물질 등으로 인해 이미 규정된 청정도를 만족하지 못하기 때문에 재 사용하기가 곤란하다. 최근에는 이러한 오염된 공기를 그림 12와 같은 필터를 통과시켜 각종 오염 물질을 여과하는 기술이 발달함에 따라 재 순환 공기의 양을 증가시킴으로써 환경조절장치를 운용하는 비용을 절감하고 있다.

4. 응용 분야

항공기에 사용되는 환경조절장치는 첨단 기술을 사용하기 때문에 일반 산업 분야로의 기술 파급 효과가 매우 크다. 즉, 환경조절장치의

국내 개발은 설계/엔지니어링 기술을 비롯하여 고정밀 가공 기술, 자동 제어 기술, 청정 기술, 고정밀 계측기 기술 등 다양한 분야의 기술을 발전시키는 계기가 될 것이다.

관련 기술 뿐만 아니라 환경조절장치를 필요로 하는 모든 시스템에 직접 적용이 가능하기 때문에 항공기 뿐만 아니라 선박, 자동차, 탱크, 플랜트 등 다양한 시스템에 적용을 넓혀나갈 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 우선 자동차에 적용 가능성을 살펴보면, ACM형 환경조절장치를 사용하기 위한 필수조건이 고압 공기원이므로 현재의 내연기관을 사용하는 자동차에는 사용할 수가 없다. 그러나 현재 터보 제너레이터형 자동차의 개발이 진행되고 있기 때문에 고압 공기를 쉽게 얻을 수 있게 되고 따

라서 자동차에서도 프레온 냉매를 사용하는 에어컨 방식을 탈피할 수가 있다. 최신형 탱크의 경우에도 이미 ACM형 환경조절장치를 채택하는 것이 주류가 되었고 특히 현대전의 경우에 화생방전이 매우 중요하므로 에어 필터의 기술에서는 가장 최첨단 기술이 적용되고 있는 실정이다. 선박의 경우에도 재래적인 내연기관을 주 엔진으로 사용하는 것으로부터 점차 가스터빈엔진으로 바뀌어 가고 있으며 이와 연계하여 항공기의 환경조절장치에 사용된 기술들이 많이 응용될 것이다. 일반 플랜트의 경우에도 대부분 고압 공기원을 자체적으로 확보하고 있기 때문에 쉽게 ACM형 환경조절장치를 사용할 수 있으며 안락한 환경에 대한 요구도가 커지면 커질수록 항공기용 환경조절장치의 기술들이 적용되어 운용 될 날이 멀지 않았다고 보인다.

5. 맺음말

항공기의 환경조절장치에 사용되는 각종 기술은 일반 산업분야로 활용될 때 기술 파급 효과가 매우 큰 첨단 기술이다. 향후 이러한 기술의 활용도를 높이기 위한 여러 방면의 연구가 활성화되기를 바란다.

- 참고 문헌 -

1. MIL-E-87145, "Environmental Control, Airborne", 1980.
2. MIL-E-18927E, "Environmental Control Systems, Aircraft, General Requirements For", 1985.
3. MIL-E-38453A, "Environmental Control, Environmental Protection, And Engine Bleed Air Systems, Aircraft, General Specification For", 1971.
4. Federal Aviation Regulations Part 25-Airworthiness Standard, 1998.
5. Environmental Control System Specification, Boeing Company, 1990.
6. Familiarization Training Course Manual for Environmental Control Systems, Allied Signal Inc., 1975.
7. Air Cycle Environmental Control Systems for Small Turbine-Powered Aircraft, Allied Signal Aerospace Company, 1989.
8. Kim Linnett and Ronald Crabtree, "What's Next in Commercial Aircraft Environmental Control System?" SAE-932057, 1993.