

XKT-1(수출형 KT-1) 항공기 열 환경시험에 관한 연구

김진석^{1,†}

¹세한대학교

Study on Thermal Environmental Test for XKT-1 (KT-1 Export Version) Aircraft

Jinseog Kim^{1,†}

¹Sehan University

Abstract

This paper delineates the applied thermal environmental test profiles using test conditions and procedures based on MIL-STD-810 Method 501 (High Temperature Test Method) and Method 502 (Low Temperature Test Method). The test profiles have been optimized in order to comply with export customer's requirements and product reliability in high and low temperature environment for XKT-1 (KT-1 Export Version) aircraft. Additionally, the tests are suitable for large sized environmental chambers, which is one of the facilities of ADD (Agency for Defense Development) according to ETEMP (Environmental Test and Evaluation Master Plan). The results of these test profiles and test executions satisfy the customer requirements and product reliability. The present paper can be applied to the other export programs with more severe temperature conditions.

초 록

본 논문은 MIL-STD-810 시험법 501(고온 시험법)과 시험법 502(저온 시험법)를 기반으로 XKT-1(수출형 KT-1) 항공기 고객의 운용 환경과 요구사항에 적합하도록 시험조건과 시험절차를 최적화하여 열 환경시험 프로파일을 제시하였다. 또한, 이렇게 최적화된 고온 및 저온시험 프로파일을 환경시험 종합평가 계획서에 반영하여 국방과학연구소의 기후환경 챔버에서 시험수행 하였다. 본 고온 및 저온 환경시험 프로파일로 XKT-1(수출형 KT-1) 항공기의 고온 및 저온 환경시험수행 결과, 고객 환경 요구사항을 만족하고 혹독한 열 환경에서 신뢰성 있음을 확인하였다. 특히 본 논문에서 제안된 고온 및 저온 환경 시험절차와 프로파일은 더 혹독한 환경시험 조건의 수출형 항공기 환경시험에도 응용할 수 있다.

Key Words : XKT-1(수출형 KT-1), KT-1 Export Version(수출형 KT-1), Aircraft(전기체), High Temperature Test(고온시험), Low Temperature Test(저온시험), Environment Test(환경시험), MIL-STD-810

1. 서 론

열 환경시험인 고온 및 저온시험은 환경시험 항목 중에서도 가장 기본적인 환경 신뢰성 시험이다. 최근에는 세계적 기후 변화에 따른 제품의 열 환

경 영향성 파악을 위한 환경시험의 중요성이 고조되고 있다.

국내에서도 이제 대형 기후 환경시험 챔버 시설 보유로 자연 노천환경에서는 담보할 수 없었던 열 환경시험이 계절 및 장소에 구애받지 않고 환경시험을 할 수 있게 되었을 뿐 아니라 시험의 재현성(reproducibility) 및 신뢰성(reliability)을 높일 수 있는 토대가 되었다. 또한 항공기 수출에서는 수출 대상국별 운용 환경 조건이 국내 자연환경과 다르므로 운용 온도 요구 조건 구

현에 대한 적합성(compliance) 입증시험에 어려운 점들이 있었으나 국내 기후 환경시험 챔버 시설 설치로 해소되었으며 환경 신뢰성 확보로 인한 항공기의 수출 확대에도 이바지하게 되었다.

MIL-STD-810 (Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests : 환경공학 고려사항과 시험실 시험)에서는 환경시험은 자연환경이나 유도 환경이 군수품에 미치는 영향을 측정하기 위한 체계적 절차라고 했고, 환경시험의 목적은 기후환경에서 제품의 안전성, 건전성, 성능상의 영향성을 평가하고 그 자료를 획득하는 것이라고 했으며, MIL-STD-810의 사용 용도는 1) 제품의 환경 스트레스(environmental stress) 순서, 노출 기간, 환경 스트레스 수준을 정의, 2) 제품의 환경 수명주기 관련한 최적화된 분석과 시험 기준 제공, 3) 수명주기 동안 환경 스트레스에 노출되었을 때 제품의 성능 평가, 4) 제품의 설계, 재료, 제작, 포장과 정비 방법에서 발생하는 결핍, 결점, 결함에 대한 인식, 5) 계약적 요구사항에 대한 적합성(compliance) 시험에 있다고 했다[1]. J. Y. Moon 등은 환경시험의 목적은 시험 대상 제품이 수명주기 중 겪을 수 있는 환경에 노출되었을 때 정상적인 기능을 할 수 있도록 설계·제조되었는지를 시험·평가하는 것이라고 했고[2], M. H. Kim 등은 열 환경 시험이란 제품이 제작된 이후 수명주기 동안 예상되는 각종 열 환경을 모사하여 시험함으로써 열 환경이 제품의 성능 및 수명에 미치는 영향을 평가하기 위한 시험이라고 했다[3].

환경시험 최적화에 관하여, H. E. Kim 등은 MIL-STD-810에서 구체적 시험조건을 제시하지 않기 때문에 세부 시험절차, 시험조건, 시험 시간은 전부 최적화 과정을 통해서 결정되어야 한다고 했으며[4], J. M. Park 등은 환경시험 최적화의 가장 큰 목적은 과대 또는 과소 설계 및 시험을 방지하는 것으로 각각의 군수품들은 모두 다른 용도와 운용 범위를 갖기 때문에 모든 군수품에 일률적인 시험법과 시험 수준을 적용한 것은 적절하지 않다고 했다[5]. 그리고 T. K. Park 등은 열 환경시험 방법에 대한 고찰을 통해 사용지역에 따른 온도 조건과 시험절차에 따라 노출 시간과 반복 주기가 다르게 적용되어야 한다고 했다[6]. 이처럼 환경시험에 있어 시험조건, 시험절차, 노출 시간 조건 등

은 고객 요구사항 및 그 제품의 운용 환경 등을 고려하여 시험 설계 및 프로파일이 최적화되어야 고객 요구도 만족 및 제품 신뢰성을 확보할 수 있다.

J. H. Ahn 등 및 M. H. Kim 등은 T-50에 대한 열 환경시험[3, 7]과 S. G. Yun 은 무인기에 적용되었던 환경시험에 대해 제안하였다[8].

본 열 환경시험의 목적은 국방과학연구소 항공 시험장 기후환경 챔버 시설을 이용하여 열 환경 복합 환경 시험을 함으로써 수출 대상 고객의 열 환경요구사항에 대한 적합성(compliance) 입증과 향후 XKT-1 항공기의 수출 확대와 항공기 신뢰성 향상을 위해 열 환경 영향성을 파악하는 것이다.

본 연구는 MIL-STD-810의 시험법 501(고온 시험법)과 시험법 502(저온 시험법)를 기반으로 시험 조건 및 절차 등을 포함하는 열 환경시험 프로파일을 설계하였다. 열 환경시험 프로파일은 XKT-1 항공기 수출 계약 환경 요구사항을 반영하였을 뿐 아니라 KT-1 항공기의 파생형인 XKT-1 항공기의 특성과 향후 수출 지역 확대를 위한 시험조건 등이 고려되었다.

본 논문은 국내 개발 항공기로는 처음으로 국방과학연구소 항공 시험장 기후환경 챔버 시설에서 시험하였던 XKT-1 항공기 전기체 레벨 열 환경시험 프로파일과 그 결과를 제시하고자 한다.

본 연구는 2009년 MIL-STD-810F의 고온 및 저온 시험법을 기반으로 고객 요구사항과 운용 환경을 고려하여 열 환경시험 프로파일이 작성되고 시험 되었으나, 현재 최신 버전인 MIL-STD-810H의 시험절차와 대응 소이하므로 본 논문에서는 MIL-STD-810H 관점에서 고온 및 저온시험 절차 및 시험 결과를 서술하고 MIL-STD-810으로 용어를 통일하여 사용하였다.

2. 열 환경시험 공통 사항

2.1 시험 대상 : XKT-1(수출형 KT-1) 특성

XKT-1(수출형 KT-1) 항공기는 이미 개발된 기본형 KT-1 항공기의 파생형이다. 기본형 KT-1 항공기는 열 환경시험을 포함한 기술 시험(development test)과 운용 시험(operating test)을 거쳐 개발 완료되었으며 한국 공군 군용 훈련기로서 현재까지 10여 년간 다양하고 복합적인 국내 환경조건에서 실 운용을 통해 이미

검증되고 확인되었다. 따라서 KT-1 항공기의 파생형인 XKT-1 항공기는 신규 개발 항공기와 같은 수준의 중복 검증과 확인이 비효율적이다. 그러나 해외고객의 요구사항에 의해 XKT-1 항공기가 기본형인 KT-1 항공기와는 구성품(component)의 변경 및 추가와 국가별 운용 요구사항 및 환경조건이 달라질 수 있으므로 수출형 항공기 개발 시에 달라진 환경 요구사항 검증 및 확인은 필수적이다. 따라서 XKT-1 항공기가 파생형 항공기이면서 수출형 항공기인 점을 고려하여 열 환경 요구사항에 대한 신뢰성이 있으면서 비용 및 일정 측면에서 최적화된 시험조건 및 시험절차 설정이 필요하다. 즉, XKT-1 항공기 열 환경시험계획은 사용 용도와 의도에 맞는 시험 순서, 노출 기간, 시험조건 설정과, 수출 대상국 운용 환경에서의 제품 성능 영향성 파악과, 고객 요구도 만족을 위한 시험 등을 고려한 복합적이며 효율적 계획 수립이 필요하다고 할 수 있다.

2.2 열 환경시험 최적화 과정

고온, 저온, 상대 습도, 태양 복사 및 결빙과 같이 항공기 저장 및 작동에 영향이 큰 환경시험 항목의 경우, 먼저 항공기 전기체 시험의 위험을 줄이고 항공기 구성품 품질 입증을 위해, 구성품 레벨에서 환경 요소별 독립적 환경시험을 하여 구성품의 각 환경요소에 대한 신뢰성을 파악하였다. 구성품 레벨의 각 환경요소에 대한 독립적 환경시험이 완료되고 분석된 후, 전기체 레벨에서 고객 운용 환경과 고객 만족도를 고려하고 최적화한 복합시험 프로파일 설계와 전기체 레벨 환경시험을 하였다. 또한 구성품 레벨에서는 각 환경요소에 대한 독립적으로 수행되었던 고온시험의 세 가지(저장, 작동, 작동 대기) 독립 절차와 저온시험의 세 가지(저장, 작동, 조작) 독립 절차를 항공기 실제 운용 환경에 맞추어 고온 및 저온 단일 복합시험 프로파일로 최적화시켰다.

열 환경시험 프로파일은 다음과 같은 최적화 절차를 거쳐 결정되었다.

- 열 환경시험 관련 계약 요구사항에 대해 분석 후, 계약 요구사항에 일치하는 운용 환경을 MIL-HDBK-310[9]을 통하여 파악한다.
- MIL-HDBK-310 자료를 기본으로 계약 요구사항 및 수출 대상국 확대를 고려한 고온 및 저온

온도 조건 및 노출 시간 등을 환경시험 및 노출 조건으로 설정한다.

- MIL-STD-810의 고온 및 저온 시험법을 기반으로 수출 대상국 운용 환경에 최적화된 효율적인 시험절차를 수립한다. 이때 가능한 실제 운용 환경에 가장 적합한 절차가 되도록 복합시험절차를 고객과 협의하여 확정한다.
- 설정된 시험온도 조건과 노출 조건 및 협의가 이루어진 시험절차를 중심으로 최적화된 복합 시험 프로파일을 구성한다.
- 시험 프로파일과 함께 환경시험 평가 종합계획서(ETEMP: Environmental Test & Evaluation Master Plan)를[10] 작성한다. 환경시험 평가 종합계획서에는 개요, 시험장소, 시험체의 형상, 시험수행 조직 및 책임, 시험 평가 기준, 시험온도 조건 및 노출 시간 등이 포함된 시험 프로파일이 있다.
- 본 환경시험 평가 기준은 크게 두 가지로 분류하였다. 첫째, 고온 및 저온 작동시험을 포함하는 본 시험을 위해 항공기가 주어진 환경 요구 조건에서 각종 장비와 계기의 정상 작동 상태를 파악한다. 둘째, 예비 시험과 사후 비교 시험을 위해 표준 대기 온도 조건에서 본 시험 전과 후 비교 시험을 통한 차이점을 파악한다. 이러한 시험 평가 기준을 위해 환경 종합시험 평가 계획서(ETEMP)에 첨부(appendix)로 XKT-1 항공기 비행 교범(flight manual)을 근간으로 하는 상세 시험절차 및 시험 점검표 등을 작성한다.
- 고객과의 최종 합의로 열 환경시험 절차에 따라, 고객 참여를 통한 열 환경 입증시험을 한다.

2.3 기후 환경시험 시설

XKT-1 열 환경시험은 국방과학연구소 항공 시험장 기후환경시험 챔버 시설을 이용하여 고온 저장/작동/조종실 태양 복사(solar radiation) 및 저온 저장/작동/제빙/방빙에 대한 전기체 열 환경 영향성 시험을 하였다. 국방과학연구소 항공 시험장 기후환경 챔버 시설의 주요 환경시험 능력[11]은 Table 1과 같다.

기후환경시험 챔버에서 XKT-1 항공기 환경시험을 위한 온도제어는 온도 센서가 장착된 연료관 내부와 고

온 작동 대기 시험을 위한 조종실 내부의 온도 변화율이 분당 3 °C 이내로 온도 충격이 발생치 않도록 하였으며, 항공기의 안정화(stabilization)된 후 시험을 하였다.

Table 1 Environmental Test Capabilities

Environments Test	Capabilities
Low/High Temp.	-54 °C ~ +54 °C
Humidity	10% RH ~ 100% RH
Rain	13 mm/h ~ 610 mm/h
Snow	75 mm/h
Solar Radiation	55 W/m ² ~ 1,120 W/m ²
Wind	18 m/s
Jet Engine Running Test	Supplied air flow rate : 228 kg/sec

2.4 열 환경시험법 일반 기준 설정

환경시험의 사전 예비 시험과 사후 비교 시험의 표준외기 환경시험은 다음과 같은 기준으로 설정하였다.

- 온도 : 25 °C ± 10 °C(77 °F ± 18 °F)
- 상대 습도 : 20-80%RH
- 주위 압력 : 현장 압력

환경시험에서 시험의 재현성과 신뢰성을 확보하는데 있어 항공기 센서 위치 선정과 그 온도 안정화는 환경시험의 중요한 설정 요소이다. 따라서 본 열 환경시험의 기본적 온도 안정화 조건을 금속보다 상대적으로 비열비가 높은 연료관 내부의 연료 온도로 하였다. 고온 저장(storage) 및 작동대기(tactical standby to operational) 시험에서는 태양 복사(solar radiation)의 영향성을 받는 조종실 계기판 아래 은폐된 공간 온도를 안정화 대상 기준 온도로 하였다. 이는 MIL-STD-810과 시험 계획에 따른 것이다. 또한, 온도 안정화 기준은 내부 연료 또는 계기판 내부 온도가 시험온도에 도달한 후 시간당 ± 2 °C 이내를 유지한 상태에서 2시간 이상을 의미한다.

그밖에 엔진룸, 항진 베이, 배터리 베이, 날개 좌우, 조종실 좌석 공간 등 향후 연구 필요 부분에 대하여도 온도 센서를 장착하였다.

2.5 열 환경시험 온도 조건

XKT-1 항공기의 경우, 제품에 대한 신뢰성 향상과 아울러 전기체 레벨 환경시험 위험도 완화 및 환경시험 비용 및 일정에 대한 영향성 등을 고려하여 고온시험 조건은 가장 혹독한 고온 환경 지역인 Table 2의 A1 기후 지역 온도 조건을 기반으로 하였고, 저온시험 조건은 대부분의 유럽, 미국 북부, 캐나다 남부, 남미, 알래스카 남부 지역이 포함되는 C1 기후 지역 온도 조건을 기반으로 하였다. 이는 수출 확대 및 제품의 신뢰성 향상을 위해 적절한 적용 기후를 선정한 것이다.

Table 2 MIL-HDBK-310 Climatic Categories

Climatic Design Type	Daily Cycle	Operational Condition		Storage & Transit Condition
		Ambient Air Temperature (°C)	Solar Radiation W/m ²	Induced Air Temperature (°C)
Hot	A1	32 to 49	0 to 1120	33 to 71
	A2	30 to 43	0 to 1120	30 to 63
Basic	A3	28 to 39	0 to 1020	28 to 58
	C0	-19 to -6	0	-21 to -10
	C1	-32 to -21	0	-33 to -25
Cold	C2	-46 to -37	0	-46 to -37
Severe Cold	C3	-51	0	-51

본 시험에 적용된 시험온도 안정화 조건은 전술한 대상 기후 지역을 기반으로 설정하였다.

고온 환경시험 온도 조건은 Table 2의 가장 혹독한 고온 조건인 A1 지역의 작동성(operation) 시험온도 조건으로 연료관 내부 안정화 온도를 49 °C로 하였고 저장(storage) 및 작동 대기(tactical standby to operational) 시험온도 조건은 태양 복사(1120 W/m²)로 유도되는 조종실 안정화 온도인 71 °C를 시험조건으로 설정하였다.

저온 환경시험 온도 조건은 자가 엔진 시동 (self start)은 -18 °C를 환경시험 조건으로 하였고 GPU (ground power unit)에 의한 엔진 시동 (normal engine start)은 C1 지역 작동(operation) 온도인 -32 °C이고, 저장(storage) 온도는 -33 °C이지만 작동 및 저장시험 구분 없이 본 저온 작동시험에서는 좀 더 가혹한 조건인 -33 °C를 저온 안정화 조건으로 하였다. 또한, 결빙 탐지(ice detection) 및 제빙(deicing) / 방빙(anti-icing) 조작 시험은 MIL-STD-810의 시험법

521(결빙 시험법) 중 절차 I(ice accretion, 결빙)에 따른 결빙 절차와 시험법 502(저온 시험법) 중 절차 III(manipulation, 조작)에 따른 조작 절차를 참고하여 결빙 탐지, 제빙, 방빙 시험절차를 최적화하여 연료관 내부 연료 온도가 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 도달하였을 때 조작 시험하는 것으로 결빙 시험조건을 설정하였다.

2.6 사전 예비 시험과 사후 비교 시험

예비 시험과 사후 비교 시험은 표준외기 조건인 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 최소 2시간 안정화 후 이루어지며, 항공기 외형 점검, 시험절차에 의한 항공기 엔진 시동, 모든 장비나 계기 정상 작동 여부 확인 등 점검 절차 및 기준에 따라 그 작동성을 기록한다. 예비 시험과 사후 비교 시험은 열 환경시험 전, 후에 각 한 번 하는 것을 원칙으로 하였다.

예비 시험, 본 시험 및 사후 비교 시험은 환경시험 평가 종합계획서에 첨부된 상세 시험절차와 판정 기준에 따른다.

3. 고온 환경 복합시험

3.1 고온 환경 노출 기간 및 시험법 설정

MIL-STD-810에서는 저장(storage) 시험절차(procedure I)로 해당 환경 기후 지역의 1% 발생 빈도를 고려하여 일 주기(diurnal cycle, 24시간) 기준 7주기(7 times cyclic) 시험절차 또는 정온 상태의 비작동(저장) 시험절차를 제시하였으며, 작동성(operation) 시험절차(procedure II)도 3주기(3 times cyclic) 시험, 혹은 정온(constant) 상태의 작동 시험절차가 있다. 또한 비작동 최고 온도 조건 노천 주기 환경에서의 성능 및 신뢰성 파악을 위한 작동 대기(tactical standby to operational) 시험절차(procedure III)가 있다. 작동 대기 시험절차는 항공기가 작동 대기 전 비 작동상태에서 밀폐된 조종실 등에 태양 복사열 등에 의한 열 영향을 파악하기 위한 절차로 항공기가 엔진 시동 전 노천에 대기하고 있는 상태를 모사하기 위한 절차이다.

본 고온 환경시험에서는 XKT-1 항공기의 기본형인 KT-1이 이미 개발 단계에서 고온 환경 노천 주기 검사 입증에 완료되었고, 현재 고온 운용 환경에서도 특별한 결함 보고가 없으며, XKT-1 항공기에 탑재된 구

성품이 가장 가혹한 고온 온도 조건(A1)에서 이미 입증된 구성품이므로, 고온 저장 및 작동성 시험은 항공기 최대 반응 온도에서 MIL-STD-810의 정온 저장시험 절차(Method 501, 절차 I)와 정온 작동시험 절차(Method 501, 절차 II)를 복합하여 계획하였다. 고온 환경에서 정온 작동시험 절차는 작동 최고 반응 온도인 $49\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 항공기 엔진 가동하여 항공기 장비와 계기 작동상태를 점검한다. 이후 태양 복사(1120 W/m^2)를 이용하여 A1 기후 지역 최고 반응 온도인 $71\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 조종실 온도가 유도된 상태에서 전원 인가를 통해 작동 대기 시험절차에 따라 조종실 계기와 장비를 조작하고 평가 기준에 따라 상태 점검하는 고온 환경 복합시험 절차를 최적화하였다.

3.2 고온 환경 복합시험 프로파일

XKT-1 고온 환경시험은 A1 기후환경을 기본 시험 조건으로 시험 프로파일을 구성하였다.

사전 예비 시험은 표준 외기온도인 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 상세 시험절차와 기준에 따라 시험 전 점검, 엔진 Run-up, 시험 후 점검한다.

본 시험인 고온 정온 작동시험은 Table 2의 A1 기후 지역의 1% 최고 반응 온도인 인 $49\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 상세 시험절차와 기준에 따라 엔진 시동 후 장비와 계기의 고온 작동성을 먼저 시험한다.

이후 A1 기후 지역 태양 복사 가열(1120 W/m^2)로 유도된 $71\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 정온 저장 및 조종실 영향성 관련 작동 대기 시험을 상세 시험절차와 기준에 따라 전원 인가 후 장비와 계기 점검을 한다.

다시 표준 외기온도로 상승 안정화 후, 사후 비교 시험에서 부품의 손상 여부, 엔진 Run-up, 장비와 계기의 작동성 시험을 하여 그 결과를 사전 예비 시험 결과와 비교 분석하는 것으로 Fig. 1과 같이 고온 환경 복합시험 프로파일을 구성하였다.

XKT-1에 적용된 고온 환경 복합시험 세부 절차 및 순서는 다음과 같다.

- 1단계 : XKT-1 항공기를 챔버에 위치시킨다.
- 2단계 : $49\text{ }^{\circ}\text{C}$ 까지 챔버 온도를 조절시킨다.
- 3단계 : 연료 내부 온도가 $49\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에 도달한 후, 시험의 신뢰성을 위해 최소 2시간 이상의 안정화를 가진다.

- 4단계 : 고온 정온 작동시험 상세 시험절차와 평가 기준에 따라 항공기에 대한 육안, 엔진 가동, 작동성 검사를 통해 시험 평가하고 기록한다.
- 5단계 : 태양 복사열에 의한 저장 및 조작 시험을 위해 태양 복사열을 1120 W/m²로 작동시켜 조종실 계기판 센서 온도가 71 °C에 도달하고 2시간 이상 안정화되도록 한다.
- 6단계 : 항공기에 전원 인가를 하고 작동 대기시험 상세 시험절차와 평가 기준에 따라 장비와 계기 작동상태를 시험 평가하여 기록한다.
- 7단계 : 챔버 온도를 표준 외기온도 25 °C로 조절하고 연료 센서 온도가 안정화되도록 한다.
- 8단계 : 항공기 작동 상세 시험절차와 평가 기준에 따라 항공기에 대한 육안, 엔진 가동, 작동성 검사를 통해 시험 평가하고 그 결과를 사전 예비 시험 결과와 비교 분석한다.

3.3 고온 환경 복합시험 결과

고온 환경 작동시험은 49 °C에서 4시간의 온도 안정화를 거친 후 고온 작동시험 절차에 따라 시험 전 점검, 엔진 가동, 시험 후 점검이 이루어졌으며, 시험 평가 기준에 의한 항공기 각종 계기와 장비 작동 점검에서 정상 작동됨을 확인하였다.

고온 저장 및 작동 대기 시험은 태양 복사 환경에서 조종실 내부 온도 71 °C까지 계획보다 30분 지연된 2시간 30분이 소요되었고, 시험의 재현성과 제품의 신뢰성을 위해 조종실 안정화는 계획된 2시간보다 1시간 추가하여 3시간의 조종실 온도 안정화(71 °C)를 거친 후 작동 대기 시험절차와 시험 평가 기준에 의해 먼저 시험 전 점검으로 조종실 내부 부품의 손상 및 변형을 점검하였다. 이후 GPU에 의한 전원 인가를 통해 조종실 장비나 계기의 동작 상태 및 작동 점검에서 정상 작동됨을 확인하여 평가 기준에 적합한 결과를 확인하였다.

다시 표준 외기온도 안정화 상태에서 예비 작동시험과의 비교 분석을 위한 작동성 시험을 하였다.

XKT-1 항공기는 A1 고온 저장/작동/작동 대기 환경에서 평가 기준에 의해 정상 작동됨을 고객과 함께 확인하였고, 사후 비교 시험(고온 저장 시험)도 사전 예비 시험 결과와 같은 것을 확인하였다.

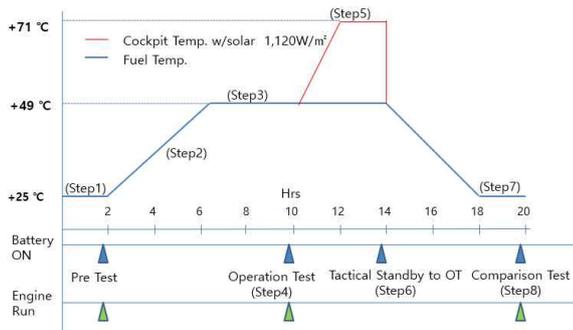


Fig. 1 High Temperature Test Profile



Fig. 2 High Temperature w/Solar Radiation Test

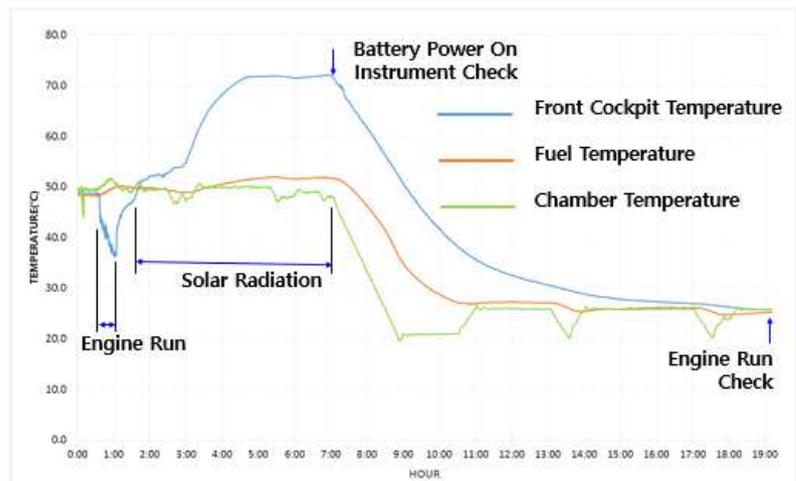


Fig. 3 High Temperature Test Data

4. 저온 환경 복합시험

4.1 저온 환경 노출 기간 및 시험법 설정

MIL-STD-810에서는 저온 저장환경에서의 제품 성능 및 신뢰성 영향성을 파악하는 저장(storage) 시험 절차(procedure I)와 저온 작동환경에서 작동 영향성을 파악하는 작동성(operation) 시험절차(procedure II)가 있으며, 저온 조작환경에서 얼마나 쉽게 정비를 포함하는 조작 용이 영향성을 조사하는 조작성(manipulation) 시험절차(procedure III)가 있다.

본 저온 환경시험에서는 XKT-1 항공기의 기본형인 KT-1이 이미 개발 단계에서 저온 환경 노천 주기 검사 입증에 완료되었고, 현재 저온 운용 환경에서도 특별한 결함 보고가 없으며, XKT-1 탑재 구성품이 이미 C1 저온 온도 조건(-32 ℃) 이하에서 개별적으로 입증된 구성품이므로, 저온 저장 및 작동시험은 항공기 최대 반응 온도에서 MIL-STD-810의 저온 정온 저장시험 절차(Method 502, 절차 I)와 저온 정온 작동시험 절차(Method 502, 절차 II)를 복합하여 계획하였다. 저온 정온 저장 및 작동시험은 저장 온도(-33 ℃)에서 연료관 내부 온도가 -33 ℃에 도달 후 시험의 재현성 및 신뢰성 확보를 위해 4시간 이상의 안정화 과정을 거치도록 하였다. 추가로 저온 환경에서 가장 중요한 요소인 배터리에 의한 자가 시동(self start) 시험을 저온 작동시험 전에 배터리 규격 제한치인 -18 ℃에서 시험하고, 저온 작동시험 후에는 -10 ℃ 이하에서 조작성 시험의 하나로 결빙 탐지(ice detection), 제빙(deicing), 방빙(anti-icing) 시험을 복합적으로 하는 것으로 효율적이며 보수적인 저온 환경 복합시험 절차를 최적화하였다.

4.2 저온 환경 복합시험 프로파일

XKT-1 저온 환경시험은 C1 기후환경을 기본 조건으로 시험 프로파일을 구성하였다.

사전 예비 시험은 표준 외기온도인 25 ℃에서 상세 시험절차와 기준에 따라 시험 전 점검, 엔진 Run-up, 시험 후 점검한다.

XKT-1 탑재 배터리에 의한 자가 시동 허용 제한 온도인 -18 ℃에서 엔진 가동을 하여, 시험절차와 기준에 따라 냉 시동성 및 장비와 계기의 작동성을 점검한다.

저장 및 작동 온도인 -33 ℃로 안정화 후 외부 GPU에 의한 엔진 가동을 하여 평가 기준에 따라 장비와 계기의 작동성을 점검한다. 이후 결빙 탐지, 제빙, 방빙 시험을 위해, 챔버 온도를 0 ℃까지 올리면서 항공기 결빙을 시켜, 결빙 감지기(ice detector) 작동, AOA/PITOT/TAT 방빙(anti-icing), Propeller 제빙(deicing) 조작 시험을 하는 것으로 구성하였다.

다시 표준 외기온도로 상승 안정화 후, 사후 비교 시험에서 부품의 결빙 및 손상 여부, 엔진 Run-up, 장비와 계기의 작동성 시험을 하여 그 결과를 사전 예비 시험 결과와 비교 분석하는 것으로 Fig. 4와 같이 저온 환경 복합시험 프로파일을 구성하였다.

이렇게 구성된 저온 환경 복합시험 프로파일은 시험 계획서에 반영되어 고객과 협의 후 시험수행이 고객의 참관 아래 이루어졌다.

XKT-1에 적용된 저온 환경 복합시험 세부 절차는 다음과 같다.

- 1단계 : XKT-1항공기를 챔버에 위치시킨다.
- 2단계 : 챔버 온도를 -33 ℃까지 조절한다.
- 3단계 : 저온 냉 시동 상세 시험절차와 평가 기준에 따라 항공기 연료관 센서 내부 온도가 규정된 온도(-18 ℃)에 도달 후 자체 배터리로만 엔진 시동을 시도하여 항공기에 대한 육안, 엔진 가동, 작동성 검사를 통해 시험 평가하고 기록한다.
- 4단계 : 항공기 연료관 센서 내부 온도가 규정된 온도(-33 ℃)에 도달 후 추가로 약 4시간 이상 안정화를 유지한다.
- 5단계 : 저온 정온 상세 시험절차와 평가 기준에 따라 -33 ℃에서 외부 GPU를 이용하여 엔진 시동을 시도하여 항공기에 대한 육안, 엔진 가동, 작동성 검사를 통해 시험 평가하고 기록한다.
- 6단계 : 0 ℃까지 챔버 온도를 상승 조절한다.
- 7단계 : 연료관 내부 센서 온도가 -10 ℃에 도달했을 때 결빙 상세 시험절차와 평가 기준에 따라 항공기에 물을 분사하여 결빙을 유도하고 결빙 감지기 및 제빙과 방빙 시험을 한다.
- 8단계 : 챔버 온도를 표준 외기온도 25 ℃로 조절하고 연료 센서 온도가 안정화되도록 한다.
- 9단계 : 항공기 작동 상세 시험절차와 평가 기준

에 따라 항공기에 대한 육안, 엔진 가동, 작동성 검사를 통해 시험 평가하고 그 결과를 사전 예비 시험 결과와 비교 분석한다.

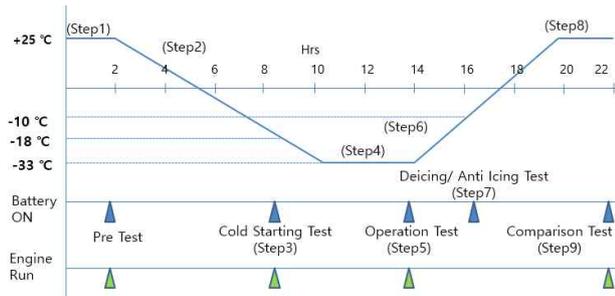


Fig. 4 Low Temperature Test Profile

4.3 저온 환경 복합시험 결과

XKT-1의 저온 환경시험은 표준외기 온도에서 예비 작동시험을 상세 시험절차와 평가 기준에 따라 수행하였으며, 표준외기 온도 조건의 예비 시험 후 저온시험의 위험성을 고려하여 -10 °C에서 탑재 배터리에 의한 항공기 엔진 시동을 시행하여 엔진 작동과 항공기 장비와 계기 이상 유무를 검사하였다.

항공기 안전성을 확인 후 -18 °C에서 배터리에 의한

자가 시동성 시험을 하고, -33 °C에서 온도 안정화 후 GPU에 의한 엔진 시동 시험과 작동시험을 하였다. -10 °C의 연료관 내부 온도 상승 때에 제빙 및 방빙 시험 등을 통한 조작성 시험을 하였다. 표준외기 온도에서 예비 사전 시험 결과와의 사후 비교 시험하였다.

XKT-1 저온 환경 복합시험 결과, 축전지에 의한 자가 엔진 시동은 저온시험 조건 환경(-18 °C)에서도 정상 작동되었다.

저장/작동시험을 위한 8시간의 안정화(-33 °C) 온도에서 항공기 GPU에 의한 엔진 시동에서도 평가 기준에 적합한 결과를 얻었다.

-10 °C 결빙 시험에서 결빙 감지기(ice detector)는 얼음 축적에 따라 정상 작동하였으며, TAT, Pitot, AOA 방빙(anti-icing) 시험과 Propeller 제빙(deicing) 시험(조작성 시험)도 정상 작동됨을 확인하였다.

다시 표준 외기온도 안정화 상태에서 예비 작동시험과의 비교 분석을 위한 작동성 시험을 하였다.

XKT-1 항공기는 C1 저온 저장/작동/결빙 환경에서 본 시험(저온 작동/조작 시험)과 사후 비교 시험(저온 저장 시험)이 사전 예비 시험 결과와 같은 것을 확인하였다.



Fig. 5 Low Temperature w/Icing Test

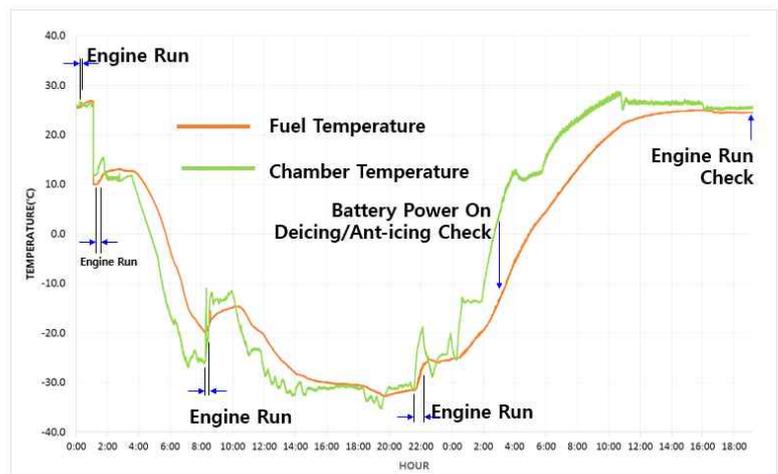


Fig. 6 High Temperature Test Data

5. 결 론

본 논문은 MIL-STD-810을 기본으로 국방과학연구소 기후환경 챔버 시설을 이용하여 XKT-1(수출형 KT-1) 전기체 열 환경시험에 적용된 시험조건, 시험절

차, 시험 프로파일과 그 시험 결과를 제시하고 있다.

본 연구의 주요 성과는 다음과 같다.

첫째, 본 시험을 통해 XKT-1(수출형 KT-1) 항공기가 세계적으로 가장 혹독한 고온 환경 지역인 A1과 저온 환경 지역 국가 중 가장 많은 국가를 포함하는 C1 기후 지역에서의 환경 스트레스에 대한 신뢰성 있음을 확인할 수 있었다.

둘째, 본 시험은 자연 노천환경에서는 재현하기 어려운 열 환경에 대한 실내 시험(laboratory test)으로 개발 항공기에 처음으로 적용한 사례이며, XKT-1(수출형 KT-1) 항공기 전기체 레벨 열 환경 고객 요구사항에 대한 입증 자료로 활용하는데 충분하였다.

셋째, 본 연구에서 제안된 열 환경시험 절차는 더 가혹한 환경시험 조건에 대하여도 적용할 수 있다.

후 기

본 논문은 세한대학교 2021년도 교내연구비 지원으로 쓰인 것입니다.

References

- [1] Department of Defense, “MIL-STD-810H: Environment Engineering Consideration and Laboratory Test”, Revision F, Arlington, USA, Jan. 2019
- [2] J. Y. Moon, D. G. Kim, I. C. Sung, and Y. W. Hong, “A Study on the Temperature Guidelines for Weapon System Test and Evaluation in the Korean Peninsula”, *Journal of the Korean Data & Information Science Society*, vol. 27 no. 6, pp. 1593-1600, 2016
- [3] M. H. Kim, and J. R. Kim, “Thermal Environment Test of T-50 Aircraft Utilizing the Environmental Test Facility”, *Proc. of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences Fall Conference*, pp. 1298-1301, Jeju, Korea, Nov. 2010
- [4] H. E. Kim, B. S. Kang, and C. Kim, “High Temperature Test Method by the MIL-STD-810F”, *Journal of the Applied Reliability*, vol. 6 no. 2, pp. 105-103, 2006
- [5] J. M. Park, J. W. Lee, and R. S. Myong, “Environmental Test Tailoring for Fighter Aircraft Intended for Operating in Korean Peninsular”, *Journal of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, vol. 47, no. 5, pp 344-357, 2019
- [6] T. K. Park, B. O. Choi, B. S. Kang, G. C. Lee, C. K. Yang, and T. J. Song, “Study on the High and Low Temperature Test Method of MIL-STD-810G w/Change 1”, *Proc. of the Korea Society of Mechanical Engineering Fall Conference*, pp. 2222-2226, Dec. 2016
- [7] J. H. Ahn, T. H. Kim, S. C. Woo, Y. K. Jo, and D. W. Kim, “Ground High/Low Temperature Test for FA-50 Aircraft”, *Journal of the Korea Society of Systems Engineering*, vol. 6 no. 1, pp. 41-46, 2010
- [8] S. U. Yun, “A Study on the Establishment of Environmental Test Procedures for the UAV”, *Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 87-94, 2019
- [9] Department of Defense, “MIL-HDBK-310: Global Climatic Data For Developing Military Products”, Arlington, USA, Jun. 1997
- [10] Korea Aerospace Industry, “KT-1T Environmental Test & Evaluation Master Plan, Appendix 1. KT-1T Environmental Test Procedures / Appendix 2. KT-1T Environmental Test & Evaluation Check List”, K9-03-SEC-234, March 13, 2009
- [11] Aerospace Systems T&E Center, Test & Evaluation, “<https://www.add.re.kr>”