

항공기 전장품의 환경시험순서에 관한 연구*

양정호 · 김용수†

경기대학교 산업경영공학과

A Study on an Environmental Test Sequence for Electrical Units on Aircraft

Jung Ho Yang · Yong Soo Kim

Department of Industrial & Management Engineering, Kyonggi University

An environmental test has been performed in order to improve the lifetime and reliability of the electrical units on aircraft. However, faults occurring in the field of aircraft have been difficult to predict and prevent, and new concepts for reliability testing are desired. Therefore, a composite reliability test sequence was proposed in the conventional studies. This study introduces test sequence guidelines based on relevant principles and considerations for electronic testing according to International Standard IEC-60068-1 and the United States Military Standard MIL-STD-810G. In addition, we analyze possible causes of failure using two-step QFD based on aircraft operation scenarios. Finally, the proposed test sequence can reproduce various and realistic failure modes for electrical units on aircraft.

Keywords: Aircraft, Environmental Test, IEC 60068-1, MIL-STD-810G, Reliability

1. 서론

자동차가 같은 시기에 출고되더라도 어떤 환경에 노출되느냐, 운전자가 어떻게 사용 및 관리하느냐에 따라 폐차 시기가 달라진다. 이와 같이 항공기도 실제 운용환경이나 사용 및 관리환경에 따라 수명이 달라질 것이다. 여기서 항공기관 사람이나 물건을 싣고 공중을 비행할 수 있는 탈것을 통틀어 이르는 말로 미사일이나 우주로켓 같은 것은 포함하지 않는다. 현재 항공기는 사용, 운송 및 저장 환경에 따른 내성을 평가하기 위하여 각 전장품의 부품이나 모듈별로 고온 시험, 온도 충격 시험, 염수 분무 시험, 오존 노화 시험 등과 같은 환경시험을 개별적으로 실시하고 있다. 항공기 전장품이 이렇게 다양한 환경시험을 통과했음에도 불구하고 매년 항공기 전장품의 오동작은 끊임없이 발생하고 있다.

이러한 고장을 사전에 탐지하기 위한 환경시험은 항공기 뿐 아니라 자동차, 가전기기, IT 기기 및 부품소재산업에 이르기까지 여러 산업에서 적용되고 있다. 그러나 자동차 산업을 제외한 대부분의 산업 영역에서는 특정 시료에 대해 개별

적인 단일 환경시험을 실시할 뿐, 동일한 시료에 대해 여러 시험을 순서대로 실시하는 복합시험을 실시하지 않고 있다.

즉, 개별적 시험을 통과한 품목의 경우 독립적 환경에 대한 내성은 지녔다고 판단할 수 있으나, 다양한 환경의 스트레스로 인한 부품이나 모듈의 고장을 탐지하는 것은 불가능하다. 이를 보완하기 위해, 자동차 산업에서는 개별적으로 이루어지던 환경시험에 순서를 정하여 가지(leg)를 나누고 복합적으로 시험을 수행함으로써 다양한 고장을 재현하고 있다. 이러한 다양한 고장으로는 이종 물질간의 열팽창 계수 차이로 인하여 전자회로 상에서의 박리현상, 디바이스 온도 상승에 의해 금속막 중 물질이동이 일어나는 일렉트로마이그레이션, 습기 및 염수분무 등으로 인한 부식, 열 스트레스에 의한 균열 등이 있다. 따라서 항공무기체계의 구조 안정성과 신뢰성의 확보를 위해 다양한 복합 환경에 따른 내환경성을 평가하기 위한 항공기 전장품의 환경시험 순서에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 먼저 환경시험의 국제 규격과 국가지침을 바탕으로 항공기 전장품의 환경시험순서(environmental test sequence)의 가이드라인을 제시하고자 한다. 첫째, 환경시험

* 이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2013R1A1A1009816).

† 교신저자 kimys@kyonggi.ac.kr

2014년 3월 3일 접수; 2014년 4월 20일 수정본 접수; 2014년 5월 12일 게재 확정.

의 국제 규격인 IEC 60068-1을 바탕으로 시험 순서 구성에 관한 원칙 및 전제조건 등을 고찰한 다음, 국가지침인 미국방부 시험방법표준 MIL-STD-810G에서 제시한 시험 항목과의 배열 순서를 분석하였다. IEC 60068-1에서는 환경시험 순서에 대한 원칙을 기술하고 있으며, MIL-STD-810G에서는 환경시험의 명확한 순서는 언급하고 있지는 않으나, 각 개별 시험별로 전속 시험 및 후속 시험에 대한 대략적 가이드라인만을 제안하고 있다. 둘째, 발생 가능한 항공기의 운용 시나리오를 작성하고, 운용 시나리오와 환경 스트레스 간 연관분석을 실시한 다음, 환경 스트레스에 해당하는 시험항목을 결정하는 2단계 QFD(Quality Function Deployment)를 수행하였다. 이를 통해 항공기 전장품의 고장에 많은 영향을 미치는 주요 시험항목을 파악하였다. 셋째, 기존의 환경시험 규격으로부터 도출된 원칙 및 가이드라인과 2단계 QFD 분석을 통하여 도출된 주요 시험항목을 바탕으로 항공기 전장품의 내환경성을 위한 각 가지(leg)별 환경시험순서를 제안하였다.

2. 관련문헌 연구

항공기의 환경시험에 관련된 논문은 다양하게 이루어지고 있다. 연구결과, 김명호 외(2010)는 T-50 항공기에 대한 열 환경시험으로 크게 고온 시험과 저온 시험으로 나누어 시험 전반에 걸친 내용을 기술하였다. 진열 외(2012)는 항공기 이륙 시 충격하중을 흡수하고 지상이동시 항공기를 지지하는 착륙 장치의 진동 시험 수행 방안을 제시하였다. 이동호 외(2012)는 항공기용 추진기관 및 보조동력 장치로 활용되는 부품 중 하나인 가스터빈엔진에 모래 및 먼지가 유입되는 경우 성능 특성 및 내부 구성부품에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 김광로 외(1933)는 항공기의 지상진동 시험의 시험절차에 대해 연구하였다. 이와 같이 항공기의 환경시험 연구는 독립시험 위주로 이루어지고 있으며, 주로 기계류의 시험 항목에 초점이 맞추어져 있다. 황명신 외(2003)는 민간 항공기에 탑재되는 항공용 통신 장비의 환경시험에 대한 절차와 인증 방안에 대한 연구를 수행하였다. 즉, 상대적으로 항공기 전장품의 환경시험 연구는 드물게 수행되었으며, 복합적인 환경을 고려하여 시험 순서를 제시하는 연구는 거의 이루어지고 있지 않았다.

또한, 항공기 외에 환경시험도 다양하게 이루어지고 있었다. Saارينen *et al.*(2011)은 RFID 태그의 신뢰성을 위한 온도와 습도의 혼합 환경시험으로 고온고습일정 시험과 온습도 싸이클 시험을 수행하였다. Park *et al.*(2002)은 핸드폰 모듈의 신뢰성을 위한 환경시험으로 고온 및 저온 작동 시험, 고온 및 저온 방치시험, 열충격 시험과 가속수명시험을 수행하였다. Eckert *et al.*(2009)은 납땀과 관련된 기계장치의 온도 싸이클 시험과 진동 시험을 수행하였다. Catelani *et al.*(2012)은 전자 밸러스트 시스템의 환경시험과 신뢰성평가로 on/off 시험, 열시험, EMC 시험 외에 고온고습일정 시험을 수행하였다.

Firor *et al.*(1982)은 단결정 실리콘 태양광 전지의 환경시험으로 온습도 싸이클 시험, 온도 싸이클 시험, 열충격 시험, 압력 시험, 저온 충격 시험을 수행하였다. 강춘식 외(2000)는 다이캐스팅용 마그네슘 합금의 부식특성에 미치는 결정립 크기의 영향에 대해 조사하기 위해 염수분무 시험을 수행하였다.

위의 연구 모두 개별적인 환경시험을 수행 후 비교 및 평가하였고, 복합적인 고장을 재현하지 않았다. 따라서 본 논문에서는 다양한 고장을 재현할 수 있는 복합 환경시험순서를 제안하고자 한다.

본 연구에서는 환경시험의 국제규격(IEC 60068-1, 1988) 및 국가지침(MIL-STD-810G, 2008)을 바탕으로 복합 환경시험순서 제안을 위한 규격 연구를 수행하였다. 또한 항공기의 특성 및 운용 조건 등을 파악하기 위해, 항공기용 장비 환경조건 및 시험방법 규격(KS W ISO 7137, 2007)과 항공우주기기의 운용시나리오 분석을 위한 국내 시험 규격(KS W 0811, 2004)도 활용하고자 한다.

3. 환경시험 국제규격 및 국가지침 연구

3.1 IEC 60068-1

본 연구에서는 환경시험 국제규격 IEC 60068-1를 바탕으로 시험순서 가이드라인을 제안하였다. 이 규격에서는 시험 순서에 관한 원칙과 고려사항을 바탕으로 다음과 같은 네 가지 원칙을 제시하고 있다. 첫째, 고장 경향에 대한 정보를 얻기 위해 시험 순서의 초기 부분에서 엄격한 시험을 실시해야 한다. 그러나 시험이 너무 가혹해서 시료에 강한 영향을 주어 다음 시험의 영향을 받지 못하게 하는 시험은 마지막에 위치시킨다. 이러한 원칙은 개발시험이나 일반적으로 양산에 앞서 제작해보는 프로토타입의 역량에 대하여 조사할 때의 일부분으로 사용된다. 둘째, 시료가 손상되기 전에 가능한 많은 정보를 얻기 위해 가혹도가 낮은 시험부터 실시한다. 특히 시료의 수가 제한되어 있을 때 사용한다. 이 원칙도 첫 번째 원칙과 같은 부분에서 응용된다. 특히 시료의 수가 제한되어 있을 때 사용한다. 셋째, 어떤 시험은 이전의 시험에 의해 손상을 나타낼 수 있는 것과 같이 가장 중대한 영향을 미치는 시험의 순서를 적용한다. 이 원칙은 부품 및 장비의 표준화된 승인을 위한 형식 승인 시험의 목적으로 사용된다. 넷째, 실제로 가장 발생 가능성이 높은 환경을 모의 실험하는 순서를 사용한다. 이 원칙은 사용 조건이 알려져 있는 장비와 복합 시스템의 형식 승인 시험의 목적으로 사용된다.

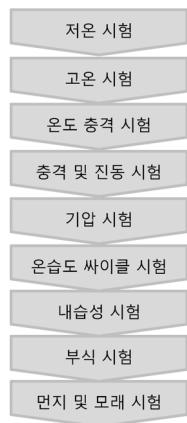
위의 원칙 중에서 부품 및 장비의 표준화된 승인을 위한 형식 승인 시험의 목적으로 사용되는 세 번째 원칙과 사용 조건이 알려져 있는 장비와 복합 시스템의 형식 승인 시험의 목적으로 사용되는 네 번째 원칙에 입각하여 다음 고려사항을 바탕으로 시험순서 가이드라인을 제시하고자 하였다. 첫 번째 원칙과 두 번째 원칙은 프로토타입의 역량에 대해 조사할 때

사용되기 때문에 제품 평가 및 설계 평가에 사용되는 형식 승인 시험의 원칙인 세 번째, 네 번째 원칙을 바탕으로 한다.

시험순서에 있어 고려할 사항은 다음과 같이 나열할 수 있다. 온도 충격이 있는 시험부터 시험을 시작해야 한다. 단자의 강도 및 납땜에 대한 시험 역시 초반부에 배치해야 한다. 그 후, 충격 시험을 실시함으로써 이전 시험인 온도 충격 시험으로부터 균열 또는 누설과 같은 민감한 고장을 야기할 수 있다. 저온 및 고온 상태는 단기간의 온도 영향을 인지할 수 있도록 기후 시험 순서의 초반부에 적용한다. 또한, 저온 상태와 저기압 상태에서 온습도 싸이클의 습기가 균열 내에 들어감으로써 고장을 더욱 원활히 재현할 수 있다. 경우에 따라 균열이나 누설의 신속한 검출을 위해 밀봉 시험을 실시할 필요가 있다. 습한 대기에서 부품의 장기간 양상을 확인하기 위해 내습성 시험은 전체 시험순서의 종료 시 또는 순서에 없는 경우 각각 시료에 적용할 수 있다. 부식, 낙하, 넘어짐, 태양복사와 같은 시험은 일반적으로 시험순서에 포함되지 않으나 필요한 경우 실시할 수 있다.

본 연구에서는 항공기 전장품의 개발 완료 시점에서 양산을 위한 승인 목적에 부합하는 셋째 및 넷째 원칙과 고려사항을 바탕으로 저온 시험, 고온 시험, 온도 충격 시험, 충격 및 진동 시험, 기압 시험, 온습도 싸이클 시험, 내습성 시험, 부식 시험, 먼지 및 모래 시험 순서로 <그림 1>과 같이 가이드라인을 제안하였다.

온도 관련 시험(저온, 고온, 온도 충격)을 통해 균열이 야기되고, 그 후 충격 및 진동 시험을 통해 균열이 성장된다. 또한 앞의 시험에서 받은 열 및 충격 스트레스의 영향이 기압시험 및 온습도 싸이클 시험을 통해 습도 흡착 및 결로 발생을 통해 발현될 수 있다. 끝으로 먼지 및 모래 시험은 이전의 습기 및 결로 발생 상태에서 부식을 쉽게 야기하거나 기존 고장을 더욱 성장시키게 된다.



<그림 1> IEC 60068-1을 바탕으로 한 시험순서 가이드라인 제시

3.2 MIL-STD-810G

본 연구에서는 국방부 시험방법표준 MIL-STD- 810G에서

제시하는 시험항목에 대한 내용을 고찰하고자 한다. 이 규격은 수명주기 동안 환경적 응력이 군수품에 미치는 영향을 고려하고 있다. MIL-STD-810G에서는 시험 순서를 명확하게 언급하고 있지는 않으나, 각 시험항목별로 전속 시험 및 후속 시험을 각각 제시하고 있다. 본 연구에서는 MIL-STD-810G에서 언급된 시험 항목 및 전속 시험, 후속 시험 등을 파악함으로써 고장의 영향도에 관한 분석을 실시하였다.

전장품 환경시험에 관련된 시험항목으로는 저압(고도), 고온, 저온, 온도 충격, 일사(일광), 강우, 습도, 곰팡이, 염수분무, 모래 및 먼지, 침수 등이 있다.

저압(고도) 시험은 손상 가능성이 한정되어 있고 수명주기 초기에 나타나기 때문에 시험초기에 수행한다. 그러나 저압 효과에 큰 영향을 주는 시험은 본 시험 이전에 수행한다. 예를 들어 저온 및 고온 시험, 진동 및 충격과 같은 물체에 작용하는 힘을 재현하는 동역학 시험, 비금속부품 시험은 저압효과에 큰 영향을 줄 수 있기 때문에 저압(고도) 시험 이전에 수행한다. 이는 시료의 운송 중에 온도의 영향을 먼저 받고 저압의 환경에 노출되는 것과 같은 자연적으로 나타날 수 있는 고장 메커니즘을 나타낸다. 고온 및 저온 시험은 시료의 수명을 유지하기 위해 손상이 적다고 판단되는 환경을 적용하려는 경우 시험순서 초기에 적용한다. 시너지 효과가 발생할 가능성을 최대화하기 위한 환경에서는 진동 및 충격과 같은 동역학 시험 후에 고온 및 저온 시험을 고려한다. 온도충격 시험은 시험 조건을 명확히 정의하기 위하여 고온 및 저온 시험으로부터 얻은 시료 반응 특성과 성능 결정 정보를 사용한다. 일사(일광) 시험은 모든 순서에서 적용을 고려한다. 고온 또는 자외선 영향은 재료의 강도나 치수에 영향을 미치므로 진동과 같은 후속 시험의 결과에 영향을 줄 수 있다. 강우 시험도 모든 단계에서 적용할 수 있으나 진동, 충격과 같은 동역학 시험 후 수행할 경우 고장을 재현하는 효과가 최대화 된다. 습도 시험은 되돌릴 수 없는 고장을 발생시킬 수 있으므로, 이 고장이 후속 시험의 결과에 영향을 미칠 수 있다면 습도 시험은 관련 시험 후에 수행한다. 또한, 환경영향을 대표하지 못하는 조합으로 염수분무, 모래 및 먼지 또는 곰팡이 시험이 이미 수행된 시료에서 습도 시험을 수행하는 것은 적합하지 않다. 동적환경은 습도 시험의 결과에 영향을 줄 수 있기 때문에 동역학 시험은 습도 시험 전에 수행한다. 곰팡이 시험은 잠재적인 환경 영향으로 염수분무, 모래 및 먼지 시험이 이미 수행된 표본에서 본 시험을 수행하는 것은 적합하지 않기 때문에 필요한 경우 염수분무, 모래 및 먼지 또는 습도 시험 전에 수행한다. 높은 염분은 발아하는 곰팡이 증식에 영향을 미칠 수 있으며 모래 및 먼지는 영양분을 제공할 수 있으므로 시료의 생물학적 고장을 유도할 수 있다. 염수분무 시험은 염 침전물이 다른 시험의 결과에 영향을 줄 수 있기 때문에 한번 이상의 기후 시험에 동일한 시료를 사용한 경우, 다른 기후 시험 이후에 수행하길 권장한다. 세 가지 결과누적이 비현실적인 염수분무, 곰팡이 및 습도 시험을 동일한 시험 표본에서 수행하는 것은 부적

절하다. 즉, 현실에서 모사될 가능성이 적은 시험 순서이므로 MIL-STD-810G에서는 이를 권장하지 않는다. 그러나 그렇게 하는 것이 필요한 경우 곰팡이 및 습도 시험 다음에 염수분무 시험을 수행하고, 염수분무 시험 후에 모래 및 먼지 시험을 수행한다. 모래 및 먼지 시험은 먼지 덮임이나 심한 마멸 등을 유발할 수 있으므로 습도, 곰팡이, 염수분무와 같은 타 시험방법의 결과에 영향을 줄 수 있다. 따라서 이를 고려하여 시험법을 적용해야 한다. 기타 환경 파라미터와 먼지가 결합하면 부식이나 증식이 발생할 수 있고, 고온다습 환경은 화학적 침식 먼지로 인한 부식이 발생할 수 있다. 폭발성 대기 시험은 실제 운용 환경과 비슷하도록 시료에 진동, 충격, 온도 시험을 먼저 수행하길 권장한다. 침수 시험은 전장품의 손상이 적다고 판단되는 환경인 경우, 기후 시험 전에 침수 시험을 적용한다. 고장을 최대화하는 환경을 적용하는 경우 동역학 시험에 대한 시험품의 저항력을 확인하는데 도움이 되도록 충격과 진동 같은 구조적 시험 전과 후에 침수 시험을 고려한다. 가속도 시험 전에 고온 시험을 수행한다. 진동 시험은 진동과 기타환경의 누적된 환경 영향을 평가할 때 일반적으로 진동 시험을 먼저 수행하고 모든 환경조건에 단일 시험품을 노출시킨다. 어떤 환경이 군수품을 진동에 더 민감하게 손상을 유발한다고 예상될 경우, 진동 시험 전에 해당 환경에서 시험을 수행한다. 소음 시험에서 진동과 같이 음향으로 유도되는 응력의 영향은 온도, 습도, 압력, 전자파 등과 같은 기타 환경 조건에서

시료 성능에 영향을 줄 수 있다. 충격 시험의 순서는 개발, 인증, 내구성 등의 시험 유형 및 시험용 시험품의 일반 가용성에 따라 달라진다. 일반적으로 충격 시험은 진동 시험 이후 초기에 수행한다. 이는 보통 진동 이후에 충격이 가해지게 되고, 진동 없이 충격을 주는 시험은 가혹하지 않아 큰 의미가 없기 때문이라고 판단된다. 산성대기 시험은 처음에 손상이 가장 적다고 판단되는 환경을 적용하여 시험품 수명을 보존하려는 경우 일반적으로 시험 순서의 마지막에 배치한다. 시너지 효과 가 나타날 가능성이 가장 높은 환경을 적용하는 경우 진동 및 충격과 같은 동역학 시험 후에 고려한다. 또한, 습도 또는 곰팡이 시험 후와 모래 및 먼지 시험 또는 보호 도막을 손상시키는 기타 시험 전에 수행한다. 발포 충격 시험의 경우 일반적으로 진동, 온도, 충격 시험 이후에 수행한다. 본 시험 전의 온도충격 시험을 수행하는 것은 발포의 잠재적인 열적 영향을 포함시킨다. 결빙/동결 강우 시험은 동결 강우나 동결 이슬비로 발생하는 고장을 재현하는 것으로 손상이 적은 환경을 먼저 적용해 시험품 수명을 보존하는 경우 남아있는 염분이 결빙을 방해할 수 있기 때문에 일반적으로 염수분무 시험 전 본 시험을 적용하고 강우 시험을 수행하며 시료가 이완될 수 있는 동역학 시험에 앞서 적용한다. 시너지 효과 가능성을 최대화 하는 환경을 적용하는 경우 결빙 시험 전에 동역학 시험을 수행한다. 위와 같은 다른 시험 방법과 배열하는 순서를 바탕으로 <표 1>과 같이 정리하였다.

<표 1> MIL STD-810G가 제안한 시험 항목에 따른 전속 시험과 후속 시험

| 전속 시험 | 시험 항목 | 후속 시험 |
|----------------------------------|----------|----------------------------------|
| 저온 및 고온 시험, 동역학 시험, 비금속 부품 시험 | 저압(고도) | - |
| 진동 및 충격과 같은 동역학 시험 | 고온 및 저온 | - |
| - | 온도 충격 | - |
| 기후 시험 | 유체 오염 | - |
| - | 일사(일광) | - |
| 동역학 시험 | 습도 | - |
| - | 곰팡이 | 염수분무, 모래 및 먼지 습도 시험 |
| 기후 시험, 곰팡이 및 습도 시험 | 염수분무 | 모래 및 먼지 시험 |
| - | 모래 및 먼지 | - |
| 진동, 충격, 온도 시험 | 폭발성 대기 | - |
| 충격, 진동 같은 구조적 시험 | 침수 | 기후 시험, 충격, 진동 같은 구조적 시험 |
| 고온 시험 | 가속도 | - |
| - | 진동 | - |
| - | 소음 | - |
| 진동 시험 | 충격 | - |
| 진동 및 충격과 같은 동역학 시험, 습도 또는 곰팡이 시험 | 산성 대기 | 모래 및 먼지 시험 또는 보호 도막을 손상시키는 기타 시험 |
| 진동, 온도, 충격 시험 | 발포충격 | - |
| 동역학 시험 | 결빙/동결 강우 | 강우 시험, 염수분무 시험, 동역학 시험 |

<그림 2>는 <표 1>과 같은 시험 배열 순서를 참조하여 몇 가지를 제안한 것이다.

첫째, 진동 시험, 충격 시험, 고온 및 저온 시험, 저압 시험 순서로 배열할 수 있다. 둘째, 진동 시험, 충격 시험, 습도 시험 순서로 배열할 수 있다. 셋째, 곰팡이 시험, 습도 시험, 염수분무 시험, 모래 및 먼지 시험 순서로 배열할 수 있다. 넷째, 침수 시험, 진동 시험, 충격 시험, 침수 시험으로 배열할 수 있다. 다섯째, 진동, 충격 시험과 습도 시험 후에 산성대기 시험, 모래 및 먼지 순서로 배열할 수 있다. 끝으로 진동 시험, 충격 시험, 결빙/동결 강우 시험 순으로 배열 할 수 있다. MIL-STD-810G 에서 언급한 전속 시험과 후속 시험간의 관계를 파악함으로써, 일반적인 전장품 환경 시험의 대략적인 선후 관계를 파악 하였다. 본 연구에서는 항공기 전장품의 시험 순서를 결정할 때 이와 같은 순서를 고려하고자 한다.

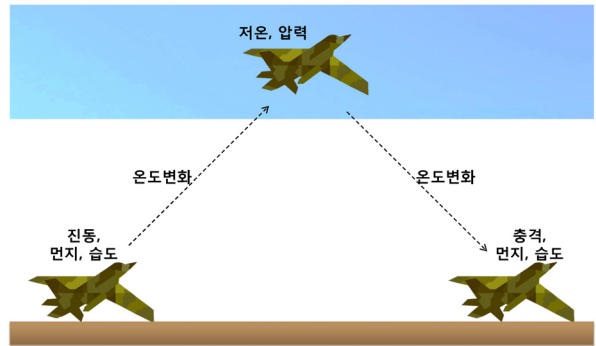


<그림 2> MIL-STD-810G를 바탕으로 한 시험순서 가이드라인 제시

4. 운용 시나리오 분석

본 연구에서는 먼저 강우 시 해상에서의 비행, 겨울 또는 추운 지역에서 비행 및 착륙, 이글루에서 항공기 보관 등 여러 상황에 대한 항공기의 운용 시나리오를 작성하였다. 일반적인 이륙 및 착륙 운용 시나리오와 환경 스트레스는 <그림 3>과 같다.

일반적으로 이륙 및 착륙을 할 때 이륙에서는 부품이나 모듈의 진동이 있을 수 있으며 주변 환경에 먼지나 습도가 작동의 원인이 될 수 있다. 비행 중에는 고도가 높아 육상보다 저온이며 압력을 받을 수 있다. 착륙하는 과정에서는 항공기에 충격이 있을 수 있으며 이륙과 같이 먼지나 습도가 고장의 원인이 될 수 있다. 또한, 이륙에서 비행 또는 비행에서 착륙하는 과정에서 온도변화가 있을 것이다. 지상 및 상공에서의 급격한 온도차가 발생할 경우, 이중 물질간의 열팽창 계수 차이로 인하여 전자회로 상에서 바리현상이 발생할 수 있다.



<그림 3> 일반적인 이륙 및 착륙 운용 시나리오

이러한 기본적인 이륙 및 착륙을 포함한 여러 상황에 대한 항공기의 운용 시나리오는 <표 2>와 같다.

<표 2> 항공기의 운용 시나리오

| 번호 | 운용 시나리오 |
|----|------------------------|
| 1 | 강우 시 이륙 후 해상에서 비행 및 착륙 |
| 2 | 추운 날 이륙 후 해상에서 비행 및 착륙 |
| 3 | 더운 날 이륙 후 해상에서 비행 및 착륙 |
| 4 | 강우 시 이륙 후 비행 및 착륙 |
| 5 | 이륙 후 추운 나라에서 비행 및 착륙 |
| 6 | 이륙 후 더운 나라에서 비행 및 착륙 |
| 7 | 이륙 후 사막에서 비행 및 착륙 |
| 8 | 강우 시 항공기를 이글루까지 운송 |
| 9 | 추운 날 항공기를 이글루까지 운송 |
| 10 | 더운 날 항공기를 이글루까지 운송 |
| 11 | 항공기를 이글루에서 보관 |

작성한 운용 시나리오를 바탕으로 환경 스트레스 간의 관계 정도를 분석하는 1단계 QFD(Quality Function Deployment)를 통하여 영향도를 평가하였다. 환경 스트레스는 KS W ISO 7137의 규격에서 운용 시나리오를 통해 파악할 수 있는 항목으로 작성하였다. 환경 스트레스 중 착빙은 항공기의 날개나 프로펠러 등에 얼음이 부착하는 현상을 말한다. 방수성은 물이 스며들거나 배어들지 못하게 하는 성질을 의미한다. 유체 감수성은 액체 및 기체로 인해 자극을 받는 스트레스를 말한다. 곰팡이 저항성이란 곰팡이가 생기지 않도록 하는 기기의 성질로 곰팡이가 생기는 환경 스트레스에 의해 영향을 받는다. 정상상태 가속은 점진적으로 변화하는 가속 환경을 말한다.

영향도 평가는 공군 내 항공기 정비 담당자 3인의 판단을 종합하여 1점, 3점, 5점 척도로 점수를 부여하였으며, 총 영향도를 바탕으로 강화해야 할 시험과 가지(leg)에서 수행해야 할 시험을 판단하였다. 1단계 QFD 분석은 <표 3>과 같다. <표 2>에서 언급된 운용 시나리오는 간략하게 번호로 표기하였다.

<표 3> 1단계 QFD 분석

| 환경 스트레스 ↙ 운용 시나리오 번호 ↘ | 온도 및 고도 | 온도 변화 | 습도 | 착빙 | 방수성 | 유체 감수성 | 모래 및 먼지 | 곰팡이 저항성 | 염수 분무 | 운용 충격 | 진동 | 정상 상태 가속 | 음향 진동 |
|--|---------------|----------|----|----|-----|-----------|---------------|------------|----------|----------|----|----------------|----------|
| 1 | 5 | 3 | 5 | | 5 | | 3 | | 5 | 3 | 3 | 5 | 5 |
| 2 | 5 | 3 | 3 | 3 | | | 3 | | 5 | 3 | 3 | 5 | 5 |
| 3 | 5 | 3 | 3 | | | | 3 | 3 | 5 | 3 | 3 | 5 | 5 |
| 4 | 5 | 3 | 5 | | 5 | | 3 | | | 3 | 3 | 5 | 5 |
| 5 | 5 | 3 | 1 | 3 | | | 3 | | | 3 | 3 | 5 | 5 |
| 6 | 5 | 3 | | | | | 3 | 3 | | 3 | 3 | 5 | 5 |
| 7 | 5 | 3 | | | | | 5 | | | 3 | 3 | 5 | 5 |
| 8 | 3 | | 5 | | 5 | 1 | 3 | | | 1 | 3 | | 3 |
| 9 | 3 | | | 3 | | 1 | 3 | | | 1 | 3 | | 3 |
| 10 | 3 | | | | | 1 | 3 | 3 | | 1 | 3 | | 3 |
| 11 | 1 | | 1 | | | | 1 | | | | | | |
| 영향도 (점수 합) | 45 | 21 | 23 | 9 | 15 | 3 | 33 | 9 | 15 | 24 | 30 | 35 | 44 |

1단계 QFD 분석 수행 결과 항공기는 온도 및 고도 45점, 정상상태 가속 35점, 모래 및 먼지 33점, 진동 30점 등의 순서로 환경 스트레스의 영향을 받는다고 판단된다. 유체 감수성이나 착빙, 곰팡이 저항성 같은 환경 스트레스는 10점 이하로 비교적 낮게 평가되었다.

1단계 QFD 분석을 바탕으로 환경 스트레스로부터 판단 가능한 KS W 0811의 시험항목과의 2단계 QFD 분석을 수행하였다. KS W 0811의 각각 시험 항목은 다음과 같이 설명할 수 있다. 저압(고도) 시험은 기압의 감소가 기기에 미치는 영향을 판정하기 위한 것이다. 고온 시험은 기기가 저장 중 또는 실용 상태의 어떤 것인가를 불문하고 운용수명 중에 고온도에 대해 저항성을 판정하기 위한 것이다. 저온 시험은 기기가 보호 포장 없이 저장되어 있는 동안 또는 실용 중에 받는 저온도의 영향을 판정하기 위한 것이다. 온도충격 시험은 주위 대기의 급격한 온도 변화가 기기에 미치는 영향을 판정하기 위한 것이다. 온도-고도 시험은 저압과 고저온의 변동 조건을 동시에 받을 때에 만족하게 동작할 능력을 지니고 있는 것을 판정하기 위한 것이다. 일사 시험은 지구 대기 중에 놓인 기기에 대한 태양 방사 에너지의 영향을 측정하기 위한 것이다. 강우 시험은 기기를 강우로부터 가리기 위한 보호 커버나 케이스의 유효성을 판정하기 위한 것이다. 습도 시험은 온난 고습도 대기의 영향에 대한 기기의 저항성을 판정하기 위한 것이다. 곰팡이 시험은 기기가 어느 정도까지 곰팡이를 발생시키고 어떤 영향을 미치는지에 대해 평가하기 위한 것이다. 염무 시험은 염분을 포함한 대기의 영향에 대한 기기의 저항성을 판정하기 위한 것이다. 먼지 시험은 기기가 건조 먼지를 수반한 대기의 영향에 견디는 능력을 가지고 있는지 확인하기

위한 것이다. 침수 시험은 기기를 물속에 침지했을 때 용기 내에 물이 새지 않는 능력을 판정하기 위한 것이다. 가속도 시험은 기기가 예상되는 정상상태의 응력에 견딜만한 구조인가를 판정하고 가속도 환경에 의해 성능저하나 기능불량이 발생하지 않는다는 것을 보증하기 위한 것이다. 진동 시험은 기기가 예상되는 동적 진동 응력에 견딜 수 있는 구조인지를 판정하고 다시 실용시의 진동 환경에 의해 성능저하나 기능불량이 생기지 않는 것을 보증하기 위한 것이다. 소음 시험은 공기 중 불규칙한 힘과 소음에 수반하는 압력장이 기기에 미치는 영향을 판정하기 위한 것이다. 충격 시험은 기기가 예상되는 동적 충격 응력에 견딜 만한 구조인가를 판정하고 실제 충격 환경에 의해 성능저하나 기능불량이 발생하지 않는 것을 확인하기 위한 것이다. 온도-습도-고도 시험은 기기가 극한 환경 사이를 비행함으로써 사용 중에 받을 수 있는 저온 저압과 고온 고습도 사이의 주기적 변동에 의한 영향을 판정하기 위한 것이다.

2단계 QFD 분석 또한 공군 내 항공기 정비 담당자 3인의 판단을 종합하여 1점, 3점, 5점 척도로 특정 환경 스트레스를 재현하기 위한 시험 항목에 대한 영향도를 점수로 부여함으로써 총 영향도를 계산하였다. 총 영향도로부터 어떤 시험항목이 중요한지 판단할 수 있다. 2단계 QFD 분석은 <표 4>와 같다.

2단계 QFD 분석 수행 결과 온도-습도-고도 시험 276점, 온도충격 시험 240점 저압(고도)과 온도-고도 시험 225점 순서로 높은 점수를 나타냈으며 그 다음으로 소음 시험, 가속도 시험, 더스트 시험, 고온 시험, 진동 시험, 저온 시험, 강우 시험, 충격 시험, 습도 시험, 침수 시험, 발포 진동 시험, 염무 시험, 일사 시험, 곰팡이 시험 순서로 중요함을 알 수 있다.

<표 4> 2단계 QFD 분석

| 시험항목 환경 스트레스 | 시험항목 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------|-----|-----|----------|-----------|----|-----|-----|-----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|------------------|----------|
| | 저압 (고도) | 고온 | 저온 | 온도 충격 | 온도- 고도 | 일사 | 강우 | 습도 | 곰팡이 | 염무 | 먼지 | 침수 | 가속도 | 진동 | 소음 | 충격 | 온도- 습도- 고도 | 발포 진동 |
| 온도 및 고도 | 45 | 5 | 3 | 3 | 3 | 5 | 1 | | | | | | | | | | 3 | |
| 온도 변화 | 21 | | | | 5 | | 1 | | | | | | | | | | | |
| 습도 | 23 | | | | | | | 3 | 5 | | | 1 | | | | | 3 | |
| 착빙 | 9 | | | 1 | | | | | | | | | | | | | 5 | |
| 방수성 | 15 | | | | | | | 5 | | | | 5 | | | | | | |
| 유체 감수성 | 3 | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | |
| 모래 및 먼지 | 33 | | | | | | | | | | 5 | | | | | | | |
| 곰팡이 저항성 | 9 | | 3 | | | | | | 5 | | | | | | | | 3 | |
| 염수 분무 | 15 | | | | | | | | | 5 | | | | | | | | |
| 운용 충격 | 24 | | | | | | | | | | | | | | | 5 | | |
| 진동 | 30 | | | | | | | | | | | | | 5 | | | | 3 |
| 정상 상태 가속 | 35 | | | | | | | | | | | 5 | | | | | | |
| 음향 진동 | 44 | | | | | | | | | | | | | | 5 | | | |
| 총 영향도 | 225 | 162 | 144 | 240 | 225 | 66 | 144 | 115 | 45 | 75 | 168 | 98 | 175 | 150 | 220 | 120 | 276 | 90 |

5. 항공기 전장품의 환경 시험순서 제안

앞선 연구의 환경시험 국제규격, 국가지침 연구로 시험항목들의 순서 가이드라인을 제안할 수 있었다. 이는 항공기 전장품을 대상으로 하였고 QFD 분석을 바탕으로 하였기 때문에 일반적인 운용 시나리오 환경이 고려되어 적용되었다. 또한, 항공기의 운용 시나리오를 환경 스트레스와 시험 항목과의 QFD 분석을 통하여 어떤 시험 항목이 중요한지 판단할 수 있었다. 본 논문에서는 이러한 연구를 바탕으로 가지(leg)를 나누어 시험순서를 제안하였다. QFD 분석을 통하여 도출된 중요도가 높은 시험 항목인 온도-습도-고도, 온도충격 시험 등은 여러 가지(leg)에서 시험하도록 하면서 규격연구에서 제안한 순서를 따르도록 제안하였다.

먼저 저온 및 고온 상태는 단기간의 온도 영향을 인지할 수 있도록 기후 시험 순서의 초반부에 적용하는 IEC 60068-1에 따라 모든 가지(leg)에 저온 및 고온 시험을 수행하도록 하였다. QFD 결과 중요성이 높은 온도-습도-고도 시험과 온도충격 시험은 2~3가지(leg)에서 수행하도록 하였다. 또한, 현실에서 세 가지 결과누적이 비현실적인 염무, 곰팡이 및 습도 시험을 동일한 시험 표본에서 수행하는 것은 부적절하다는 MIL-STD-810G에 따라 염무 시험을 곰팡이 시험, 습도 시험과 다른 가지(leg)에서 수행하도록 하였다. 전체적으로 온도에 관한 시험을 수행한 후에 동역학 시험이나 부식 시험을 수행하도록 하고, 일사 시험과 같은 그 외의 시험은 다른 가지(leg)에서 수행하도록 하였다. 이 밖에 제안하는 가지(leg)별 최적시험순서는 <그림 4>와 같다.



<그림 4> 항공기 전장품의 환경 시험순서 제안

6. 결론

항공기 부품 또는 모듈이 다양한 환경의 누적된 스트레스로 인하여 고장이 발생하는 것을 모사하기 위해서는 여러 시험 항목을 순서에 따라 실시하여야 한다. 기존에 사용되는 단일 환경시험을 실시할 경우, 항공기 부품이나 모듈이 다양한 환경의 스트레스로 인한 고장을 탐지하기 어려울 것이다.

따라서 본 연구에서는 개별적으로 이루어지던 환경시험에 순서를 정하여 가지(leg)를 나누고 복합적으로 시험을 수행함으로써 다양한 고장을 재현할 수 있도록 하며 항공무기체계의 구조 안정성과 신뢰성을 확보할 수 있게 하였다.

이를 위하여 본 연구에서는 환경시험의 국제규격 IEC 60068-1의 중대한 영향을 미치는 시험이나 발생 가능성이 높은 시험은 형식승인 시험에 응용될 수 있다는 원칙에 입각하여 시험순서 가이드라인을 파악하였다. 국가지침인 MIL-STD-810G를 연구함으로써 시험항목 간의 권장 배열순서 파악을 통해 저온 시험 다음에 고온 시험을 수행해야 하고, 진동 시험 다음에 충격 시험이 수행해야 한다는 등의 가이드라인을 제시하였다. 또한, 항공기의 운용시나리오를 환경 스트레스와 1단계 QFD 분석 통해 영향도를 파악하고, 2단계 QFD 분석으로 환경 스트레스와 항공기 시험항목 간 영향도를 평가하였다. 평가 결과 온도-습도-고도 시험과 온도 충격 시험 등이 중요하다고 판단하였다.

이러한 환경시험 규격연구와 항공기 운용 시나리오 분석을 바탕으로 최적시험순서를 제안하였다. 운용 시나리오에서 중요도가 비슷한 항목은 여러 가지(leg)에서 수행할 수 있도록 구성하면서 규격 연구에서 도출된 시험순서를 최대한 따르도록 제안하였다. 본 연구에서 제안한 환경시험순서는 6개의 가지(leg)로 구성되어 있으며, 모든 가지(leg)의 초기에 전처리 개념으로 저온 및 고온 시험을 수행할 것을 제안한다. 이러한 시험을 통해 항공기 전장품의 현실성 있는 고장을 재현할 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] 강춘식 · 이충도 · 신광선 (2000), 염수분무환경에서 AZ91D

- 마그네슘 합금의 부식거동에 미치는 결정립 크기의 영향, 대금속재료 학회지, 제38권, 제9호, pp. 1263-1268.
- [2] 김광로 · 조장민 · 유홍주 (1993), 항공기 지상진동 시험, 한국항공우주학회 논문집, pp. 42-48.
- [3] 김명호 · 김정렬 (2010), 환경시험시설을 이용한 T-50 항공기의 열 환경 시험, 한국항공우주학회 추계학술대회 논문집, pp. 1298-1301.
- [4] 이동호 · 임병준 · 안이기 · 구현철 · 김지희 (2012), 대기 중 모래 먼지 유입이 소형 가스터빈엔진에 미치는 영향에 대한 연구, 대한기계학회 논문집 B권, 제36권, 제8호, pp. 791-796.
- [5] 진 열 · 이승규 · 김태욱 · 정상준 (2012), 항공기 착륙장치 진동 시험, 한국항공우주학회 추계학술대회 논문집, pp. 1534-1538.
- [6] 황명신 · 이강웅 · 박욱제 · 홍진근 · 박선춘 · 윤장홍 (2003), 항공기 탑재 통신 장비의 환경시험 절차 및 인증 방안 에 관한 연구, 한국항공우주학회 추계학술대회 논문집, pp. 354-361.
- [7] Catelani, M. and Ciani, L. (2012), Experimental tests and reliability assessment of electronic ballast system, *Microelectronics Reliability*, Vol. 52, No. 9~10, pp. 1833-1836.
- [8] Eckert, T., Muller, W. H., Nissen, N. F., and Reichl, H. (2009), Modeling solder joint fatigue in combined environmental reliability tests with concurrent vibration and thermal cycling, *Electronics Packaging Technology Conference*, pp. 712-718.
- [9] Firor, K. and Hogan, S. (1982), Environmental testing of single-crystal silicon solar cells with screen-printed silver contacts, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. R-31, No. 3, pp. 270-275.
- [10] IEC 60068-1 (1988), *Environmental testing- part 1: general and guidance*.
- [11] KS W 0811(2004), 항공우주기기의 환경 시험 방법, 지식경제부 기술표준원.
- [12] KS W ISO 7137 (2007), 항공기-항공기용 장비 환경 조건 및 시험방법, 산업자원부 기술표준원.
- [13] MIL-STD-810G (2008), *Environmental engineer -ring considerations and laboratory tests*.
- [14] Park, S. J., Ha, J. S., Choi, W. S., and Park, S. D. (2002), Improving the reliability of a newly- designed mobile phone by environmental tests and accelerated life tests, *Proceeding of the reliability and maintainability symposium*, pp. 642-646.
- [15] Saarinen, K., Frisk, L., and Ukkonen, L. (2011), Effects of different combinations of environmental tests on the reliability of UHF RFID tags, *Microelectronics and packaging conference (EMPC)*, pp. 1-5.