

항공기의 안전과 신뢰성 향상

최 용 설 · (주)대한항공 한국항공기술연구소, 책임연구원

e-mail : scheung@koreanair.com

이 글에서는 민간 항공기의 안전과 신뢰성을 향상시키기 위한 여러가지 노력과 시도에 대해 간략히 소개하고자 한다.

최 근 캄보디아에서 발생한 항공기 추락사고로 한국 사람 다수가 희생되어 이로 인해 해외여행을 계획하거나 준비하고 있는 사람들에게 다시 한 번 항공기 자체는 과연 안전하게 관리 및 유지(maintenance)되고 있으며 얼마나 신뢰성을 가지는 것일까 하는 의문을 다시 가져 보게끔 하는 계기가 되었다. 1903년 인류가 최초의 동력 비행을 시도한 이후에 항공산업은 눈부신 발전을 거듭하여 오늘날에는 남녀노소 누구나 경제적 여건이 갖추어지면 언제든지 지구상의 어느 목적지라도 하루 이내에 도착할 수 있을 정도로 우리네 생

활 속에 가까이 파고들어 항공기 사고를 접할 때 마다 내게도 이런 유사 사고가 발생하지 않을까 하는 두려운 마음을 마음 속에 담고 여행을 떠나고 있는 일반인들의 항공기에 대한 접근 자세가 아닐까 생각이 든다. 수만에서 수십만 개의 부품들로 구성된 항공기는 흔히 종합 공학 및 과학의 산물로 불린다. 즉, 기계공학, 전기/전자공학, 항공공학, 화학공학, 재료공학 및 생체공학 등의 결합으로 이루어져 완성된 산업의 꽃으로서 항공산업의 발전이 타 산업으로의 파급효과가 어느 산업 못지 않게 크다고 한다. 이와 같이 다학제간 연구결과로

서 이루어진 항공기의 안전성 내지 신뢰성 또한 항공기를 구성하는 각 부품의 부품 레벨 단위에서의 신뢰성의 확보에 크게 좌우되는 것 외에도 항공기 전체 시스템을 유지 보수하는 종합적인 관리 체계의 확보 여부와 함께 인적 구성원인 조종사를 포함한 승무원들과 지상에서 정비를 담당하는 정비사와 공항의 비행 통제/관리를 하는 관제사 등에 이르기까지 어느 하나의 관리소홀이나 실수가 전체 항공기 시스템의 안전 및 더 나아가 승객들의 아까운 생명까지 좌우하기 때문에 항공기의 신뢰성을 학문적으로 간단하게 다루기는 매우 어려

운 것임에 틀림이 없는 것 같다. 항공기를 이용하는 승객의 입장에서 항공기의 신뢰성 문제가 항공기 자체의 신뢰성 평가 내지 고장을 및 예상 수명 등등의 여러 가지 신뢰도 지수로 나타나는 숫자에 의해 체감하기보다는 항공기를 탑승한 순간부터 경험하게 되는 돌풍이나 낙뢰와 우박과 같은 자연현상에 대한 항공기의 반응, 조종사의 순간 착각이나 실수, 수년 전에 발생한 기체 손상의 수리 때 항공기 제작사나 정비사의 수리 실수 또는 계산 착오(실제로 1985년 일본 JAL(일본항공)의 B747 항공기는 경미한 후방 꼬리부분 손상으로 압력 벌크헤드(pressure bulkhead)를 수리하게 되었다. 이후 1만 회 이상의 비행 후에 수리부분의 노후화된 리벳 체결부의 파열로 발생한 기내 압력 누출로 후방 조종면이 파열 손상되어 조종불능상태로 산기슭에 추락하여 500여 명이 사망하였으며, 미국연방항공청 FAA의 사고 조사 결과, 2열로 체결해야 할 리벳 수리를 1열로 체결 수리한 것으로 밝혀져서 일종의 수리 실수로 발생한 사고로 조사됨), 공항의 이착륙 혼잡 등에 기인한 관제 불량, 이착륙 시의 조류 충돌 등의 온갖 원인을 항공기의 신뢰성 및 자신의 안전을 저해하는 요인으로 받아들여지게 된다. 최근 각 항공사 제작사 및 운항시간의 글로벌 경쟁이 가속화 됨에 따라 항공산업에

있어서도 빠른 시간 내에 미래에 예측되는 고장을 예방하고 고객이 요구하는 신뢰성을 보증할 수 있는 신뢰성 개념적용의 중요성과 필요성이 서서히 인식되고 있다. 그러므로 여기에서는 이 글의 특성상 신뢰성 척도 등에 대한 정량적인 기술보다 정성적인 측면에서 항공기의 수리 및 유지와 연관된 항공기의 안전과 신뢰성의 향상에 대해 가벼운 마음으로

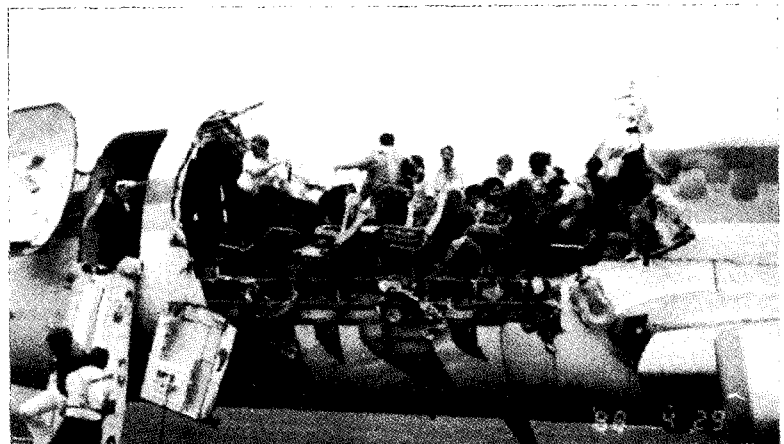
살펴보고자 한다.

항공기의 노후에 따른 항공기 신뢰성의 저하

와이드 바디형 민간 항공기인 보잉사의 점보 B747기가 1970년 상용화된 지 30여 년이 지났지만, 아직도 B747기가 각 항공기 운항사의 중추적 역할을 맡고 있는 것을 헤아려 보면, 전세계



이착륙 시의 조류에 의한 항공기 사고 위험성의 증대



항공기 산업 및 발전에 막대한 영향을 준 1988년 항공기 사고(미국 Aloha Airlines, B737항공기 243편의 착륙 후의 현장)

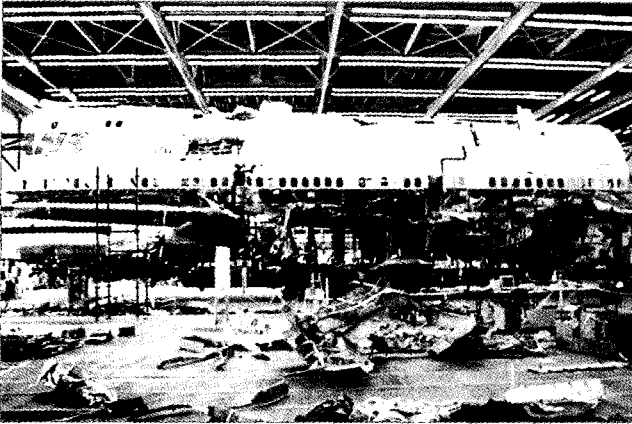
항공사가 보유하고 있는 민간항공기의 상당수가 설계수명을 넘어 지금도 운항이 되고 있을 정도로 노후화 되어, 이들에 대한 수명 연장 연구나 수리보수 등의 문제가 각 항공사들의 화두가 되고 있는 실정이다. 민간항공기의 노후화 문제뿐만 아니라 군용항공기의 노후화도 심각한 문제로 대두되고 있는데, 미국 공군의 경우, 2007년 현재 보유 중인 항공기의 평균나이가 25년 정도로 알려져 있어 노후 항공기에 관련된 신뢰성 평가기준이나 적용기법에 대한 연구가 요구되고 있는 실정이다. 최근에 문제시되고 있는 노후항공기가 안고 있는 최대 문제는 이들 항공기가 알루미늄 합금을 주구성 재료로 사용하여 부식 등이 항공기 내부 쪽으로 상당히 진행되어 있다는 점이다. 이들 부식된 항공기의 유지보수 비용으로 미국 공군은 2004년도에만 약 15.2억\$을 지출하였고 이들 비용은 해마다 큰 폭으로 증가하는 추세이다. 이들 노후 항공기에 관련된 문제는 한국의 경우에도 예외는 아니어서 고정익 및 회전익 군용 항공기의 경우 중요한 문제로 대두 되고 있는 실정이다. 민간 항공기의 경우 아시아권의 민간 항공기는 항공시장이 형성된 지 그리 오래 되지 않고 경제성장이 최근에야 급격히 이루어져서 보유하고 있는 민항기의 나이는 유럽 및 미국 등의 선진 항

공사에 비해 젊은 편에 속하고 있다. 이들 노후 항공기의 문제는 최근에 잇달아 나타나고 있는 후진국의 경우, 열악한 환경하에서의 노후 항공기의 무리한 운항이나 정비부족과 승무원 및 항공사 경영진의 인식부족 등의 총체적 결과가 사고로 전환되어 애꿎은 고객들이 희생되고 있음을 알 수 있다. 항공사의 노후화 문제는 언급한 바와 같이 후진국만의 문제가 아니라 선진국의 큰 문제가 되어, 전세계적으로 이에 대한 수명연장 연구와 잔류 수명 예측 기법의 개발을 통해 노후항공기의 신뢰성 향상 연구가 시급히 요구되고 있다.

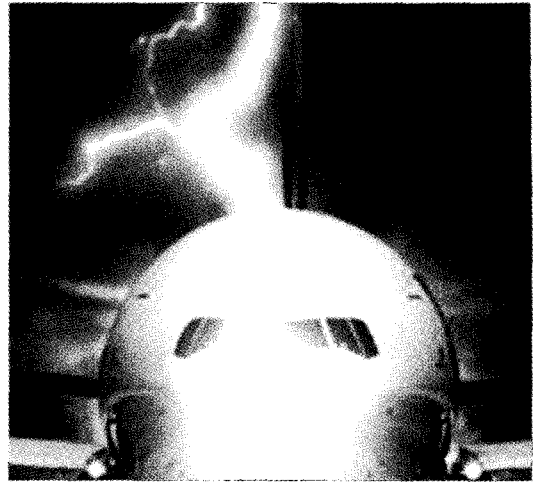
항공기의 결함발생에 의한 신뢰성 저하방지

국제항공운송협회(IATA; International Air Transport Association)가 조사한 항공기 운항 중 발생한 손상(damage)의 원인은 약 36%가 지상에서의 사람의 조작 실수, 30%가 습기 및 화학약품, 약 11%가 설계결함이나 과열현상, 약 8%가 우박 및 조류 충돌, 8%가 활주로 상에서의 돌 등, 그리고 약 7%가 낙뢰등인 것으로 보고되었다. 이들 알려진 크고 작은 손상이 항공기의 직·간접적인 사고로 연결되는 고장 발생의 원인이 되고 있어, 다양한 손상 원인 등에 대한 원인

제거 및 결함 발생에 대한 대처법을 연구함으로써 항공기의 신뢰도를 높일 수 있다. 또한 알려진 원인별 항공기 사고율은 조종사 실수가 전체의 약 66%, 항공기 문제가 약 14%, 날씨가 약 10%, 유지불량이 약 5%, 공항의 문제가 약 3%로 각각 알려져 있다. 또한 항공기의 경우 통계상으로는 1년에 2회 정도 비행 중에 낙뢰(lightning strike)를 받고 1회 가격 시에도 평균 10회의 후속 타격이 있는 것으로 보고되고 있다. 이와 같은 낙뢰에 의한 고장은 원인 분류상으로는 천재지변에 의한 우발고장에 속한다고 볼 수 있다. 낙뢰는 대부분 항공기가 구름과 지상 사이를 비행함으로써 유발되는 유발낙뢰(triggered lightning)가 대부분으로, 이들 낙뢰에 의한 항공기의 피해는 낙뢰의 직접적인 영향이라 할 수 있는 구조물의 소손 공동(holes burned)이나 천공(puncturing) 등의 기계적인 손상과 간접영향으로 낙뢰가 기체를 통전함으로써 발생하는 고정밀 전자 기기의 오작동이나 고장 발생을 들 수 있다. 기존의 금속재 중심 항공기의 낙뢰방지 기술은 구조물 자체의 전기전도도가 우수하므로 낙뢰 가격에 대한 금속 구조물의 신뢰성이 잘 확보되어 있으나 최근에는 항공기의 설계개념이 변화하여 기존의 알루미늄 중심의 설계 및 제작



비행 중 날개 안 연료탱크 내의 전선 단락에 의한 전기방전으로 폭발한 B747-100 항공기의 사고 후 기체 재조립 모습(230명 사망, TWA 항공사 800편, 1997. 7. 17)

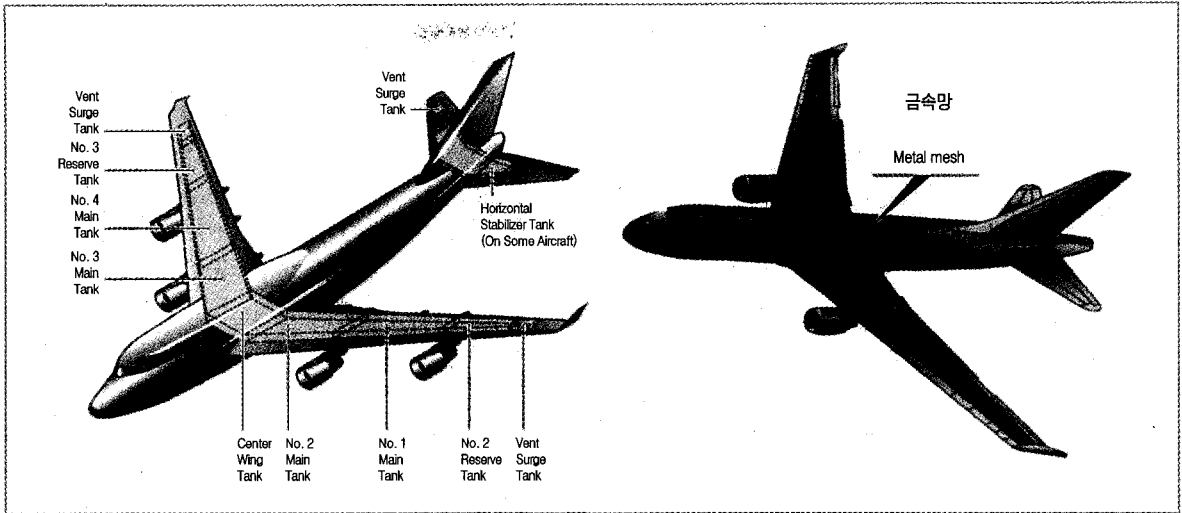


항공기에의 낙뢰 가격

에서 최근에는 B787과 같이 전체 구조물 무게의 50%까지 탄소 섬유/에폭시 복합재료를 사용하여 설계 제작하는 것처럼, 복합재료의 적용이 기존에 불가능하다고 여겨졌던 대형항공기의 동체 및 날개 등의 주구조물에게까지 적용하는 추세로 변화하고 있다. 새로운 복합재료 신기술의 적용으로 항공기의 성능이 향상되고 운용비가 20% 이상 절감되기 때문에 항공운항사들이 구매예약을 많이 하여 지금 주문하면 2014년에 인도될 정도로 항공기의 인기가 대단하다. 하지만 복합재료를 구성하는 에폭시가 전기를 통하지 않는 부도체라서 기존 알루미늄 동체가 보여주던 우수한 낙뢰에 대한 특성이 저감되어 낙뢰 시 기존의 금속재 항공기에 비해 심각한 피해가 우려되고 있다. 이는 최첨단 항공기의 재료 변경을 시도한 항공기 제작사에게는 우

수한 낙뢰방지 기술의 개발이라는 또 다른 해결해야 할 과제가 나타난 것이라고 할 수 있다. 특히 대부분의 항공기는 날개가 막대한 양의 항공유를 담은 연료탱크의 역할을 병행하기 때문에 낙뢰 시에 낙뢰 전류가 원활하게 대기 중으로 방전되지 않으면 항공기의 폭발까지 예상될 정도로 심각한 문제가 발생할 수 있다. 이와 같은 폭발 사례는 기존의 알루미늄 합금 적용 항공기의 경우에도 여러 번 발생한 바 있어 복합소재 적용 항공기에는 기존 낙뢰방지 기술보다 좀더 높은 요구 수준의 방지기술이 적용되어야 새로운 첨단 항공기의 신뢰성이 금속재 항공기만큼 보존될 듯 하다. 보잉사는 B787기에 적용된 낙뢰방지 기술로서 연료탱크 내의 연료가 소모됨에 따라 빈 공간을 채우는 연료증기(vapor of fuel)와 유입된 산소의 전기 접화에

의한 폭발을 원천적으로 방지하기 위해서 자동으로 불연성 기체인 질소를 기화시켜 채워주는 장치를 설치하였다. 또한 날개 제작 시 외피와 내부 스파 및 리브 사이의 미세 간극을 없애기 위해 paste소재를 채워 매워 주고 볼트 및 리벳 연결부의 체결강도를 엄밀히 조절하여 간극을 없애므로써 폭발 위험을 크게 줄였다. 낙뢰가격 시에 동체 및 날개의 손상을 최소화하기 위해 최종 외피에 구리망사를 포함하는 복합재료 층을 적층하여 성형하는 기법을 적용하고 있으며, 보잉사는 이들 신기술 적용 뿐만 아니라 탄소 나노 튜브 등과 같이 전기 전도성이 매우 우수한 나노 소재를 응용하여 복합재료 구조물의 전기 전도도를 향상시키기 위한 기초 연구를 자체 수행하거나 대학에 많은 연구기금을 출연하고 있다.



연료탱크를 날개 내부에 장착한 민간항공기(B747)와 낙뢰방지를 위한 금속망을 사용한 복합재료 항공기(B787)

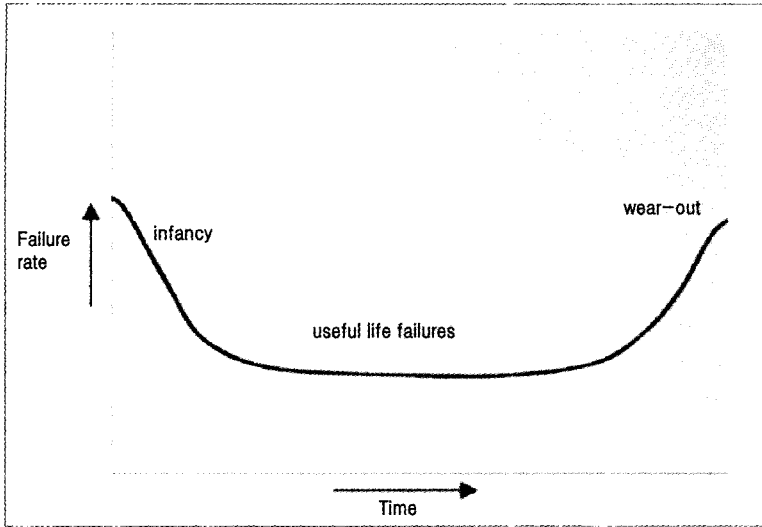
또한 FAA와 같은 국가 인증 기관이 일반 항공기 부품에 대해 일정 수준 이상의 요구조건을 걸고 이에 대해 인증 획득을 요구하는 것과 같이, 위에서 언급한 낙뢰의 간접 피해를 받기 쉬운 항공전자 부품 등에 대해서는 낙뢰 방호를 위해 낙뢰 시 비행에 치명적인 영향을 주는 부품과 필수기능을 담당하는 부품을 대상으로 별도의 낙뢰시험을 통한 인증을 요구하고 있어 낙뢰가격에 대한 항공기의 안전과 신뢰성을 높이고 있다.

항공기의 유지보수와 신뢰성 향상

항공기는 수십만 개의 부품으로 이루어져 각각의 부품이 제 기능을 하도록 유지하고 보수하는 일은 항공기 운항사뿐만 아니

라 고객차원에서든 아무리 강조해도 지나치지 않다. 아무리 첨단 새 항공기라 하여도 신뢰도 측면에서는 초기의 고장률이 높기 때문에 갓 도입한 새 항공기라 해서 고장이 없을 것이라는 것도 장담하지는 못할 듯하다. 그렇다고 항공기의 노후화가 20년 이상 되었다 하더라도 노후 항공기에 대한 유지 보수 등이 규정대로 철저히 지켜지고 상당한 관심이 주어진다면 새 항공기 만큼 안전성을 확보할 수 있는 것이 또한 항공기라 할 수 있다. 항공기의 고장(failure)이란 항공기가 요구 기능을 수행하지 못하거나 요구 성능을 못하게 되는 사건을 의미한다. 이때 항공기가 요구기능(즉 이착륙을 하거나 정상적인 비행을 하는 경우)을 수행하지 못하는 원인으로서는 항공기에 내재된 결함발생 등이 안전진단에서 검

사 후 운항중지가 되어 수리 중에 있는 경우이거나, 정기적인 주기검사에서 발견이 안된 결함이 운항 중에 두드러지게 나타나 항공기의 조종면이나 기타 기능에 악영향을 주어 기능이상이 발생하거나, 비행 등의 기능에 치명적인 영향이 발생시킨 경우거나, 중대한 수리요구사항이 발생한 경우라고 볼 수 있다. 하찮은 작은 부품의 결함이나 기능 이상이 뜻하지 않은 대형참사로 이어지는 것을 많이 보아 왔기 때문에 오늘날의 항공기의 신뢰성 적용 개념은 유지, 수리 및 오버홀(MRO; Maintenance Repair & Overhaul) 등과 밀접하게 연관되어 있어 신뢰성 중심 유지(RCM; Reliability Centered Maintenance)기법이 개발되어 적용됨으로써 MRO 소요시간을 줄이고 MRO 업무능률 등이 지



전형적인 욕조곡선

속적으로 개선되고 있다. 기존의 신뢰성기법 중의 하나인 MTBF (Mean Time Between Failure, 수리 가능한 아이템의 평균 고장 간격시간), MTTF(Mean Time To Failure, 수리 불가능한 아이템의 평균 고장시간) 대신에 MTBUR(Mean Time Between Unscheduled Repair), MTTR (Mean Time To Repair), MTBM(Mean Time Between Maintenance), 또는 MTBO (Mean Time Between Overhaul) 등의 수리와 관련된 수명 개념이 항공기 신뢰성 기법으로 사용되기도 한다. 지면관계상 용어들에 대한 개념 설명은 차후로 미루고 관심있는 독자들은 참조문헌(J. Wiksten and M Johansson, Maintenance and Reliability with Focus on Aircraft Maintenance and

Spares Provisioning, 2006.)을 살펴보면 그 개념을 이해할 수 있을 것이라 생각한다.

항공기의 고장발생과 욕조곡선

어떤 아이템의 신뢰성 개념을 논할 때 처음으로 접하는 것 중의 하나가 욕조곡선(Bathtub curve)이다. 욕조곡선은 아이템의 시간에 따른 고장률을 매우 간단히 표시한 것으로서 많은 분야에서 언급되어 널리 사용되고 있다. 이 욕조곡선을 항공기 아이템에 적용하여 보면, 항공기의 초기 고장률(Infancy 영역)은 항공기의 잠재적인 설계나 제조상의 결함으로서 비교적 높게 나타난다. 최근 비교적 생산된 지 얼마 안 되는 KF-16의 잦은 추락은 항공기 부품의 노후에 기인한 것

이 아닌 기체나 엔진을 구성하는 구조물 또는 부품의 설계 잘못이나 제조결함으로 유추되는 데 이는 초기 고장률 영역에 속하는 기간에 발생한 사고이기 때문이라 볼 수 있다.

항공기를 운항사에 인도할 때에 초기에는 정상적인 항공기로 판정되지만 소비자인 공군이나 항공사가 사용하기까지 저장, 운송, 물류, 설치과정 중에 스트레스를 받아 결함이 드러나서 고장이 발생하기도 하는데 이들 고장은 제품의 철저한 품질관리를 통한 개선 및 품질 안정화에 따라 줄어드는 경향을 보인다. 우발고장 기간인 고장률이 일정한 부분(Useful life failure)에서는, 설계나 제조상의 결함이 제거되어 품질 안정화가 이루어져 고장률이 일정한 영역이며, 설계과정 중에 예기치 못한 최선의 검사방법으로도 탐지되지 않은 결함, 낮은 안전계수, 과부하, 남용이나 사용자의 실수에 의해 고장이 우발적으로 발생하는 기간으로서 이 기간의 고장시간은 지수분포로 모형화될 수 있다(MIL-HDBK-217과 Telcordia SR-332의 경험적 모델들은 지수분포를 가정하고 있다). 이를 예방하려면 사용 환경이나 최악의 경우를 고려한 설계를 수행하고 사용자의 과오를 방지하여야 한다. 항공기의 경우, 조종사의 훈련을 통해 실수를 방지할 수 있다. 하지만 이 구간을 항공기에 적용하는 경우 고장

률이 일정한 경우에도 노후화(aging)는 계속 발생하고 있다는 것을 반영하지 못하는 단점이 있다. 끝으로 마모고장구간(wear out)은 항공기의 재료나 부품이 열화되어 고장률이 증가하게 되는데 항공기의 노후화에 의한 부식 및 산화, 마모 및 피로, 재료의 노화, 불충분한 정비, 부적절한 완전 분해정비(overhaul) 등이 원인이 되며, 장비의 고장률 감소를 위한 노화 부품의 교체, 수명이 낮은 부품의 개선, 우수한 재질의 부품(부식에 강하고 피로 특성이 매우 우수한 탄소섬유계 복합재료를 적용하여 마모고장을 줄일 수 있다)을 선택하여 설계를 하면 이 부분의 고장을 줄일 수 있다. 최근에는 노후화된 항공기의 수명 연장을 위하여 내부 부품을 통째로 교체하거나 전면 수리를 하는 경우가 이들 구간에서의 고장률을 현격히 감소시키는 행위라 할 수 있다.

글을 마치며

항공기는 매우 복잡한 구조의 엔진과 비행하중을 견디는 날개 및 동체 등의 주구조물과 러더, 수평미익, 수직미익들의 조종면 등으로 구성되어, 보통 수십만 개

의 부품과 각종의 첨단 전자장비 등이 복합화된 기계장치로서 육상이나 해상의 운송수단에 비해 우수한 성능뿐만 아니라 매우 높은 안전성과 신뢰성이 요구되고 있다. 이러한 이유로 항공기와 관련 부품들은 설계와 제조 및 최종 운용에 있어서 각종 까다로운 환경조건 및 하중조건을 부여한 시험 등을 수행하는 등의 법적인 인증절차를 거쳐 인증을 받도록 되어 있다. 인증을 통해 기본적인 안전성을 확보하는 것 외에도 운항사나 공군 등의 고객에게 항공기를 인도하기 전의 생산단계에서 불량률 제로의 품질을 확보하려는 개념에 속하는 인증제도뿐만 아니라 최근에는 운용 중에 고장률의 감소 및 고장발생 시의 원인분석 등을 통해 항공기의 안전도를 높이려는 신뢰성 개념이 적용되기 시작하고 있다. 항공기의 부품을 생산하는 제작사는 각 부품에 대한 신뢰성 향상을 위한 고장모드와 영향분석(FMEA; Failure Modes and Effects Analysis)과 결함수 분석(FTA; Fault Tree Analysis) 등을 작성하여 결함발생 시에 이를 제거하기 위한 절차를 확립하고 각 부품의 사용환경에서의 고장률 및 수명특성을 파악하여 제품의

신뢰성을 확보하는 것과 이들 수많은 부품의 조합으로 최종 조립 생산된 이들 항공기의 안전성과 신뢰성을 높이기 위해서는 구조적 측면에서의 설계단계에서 항공기의 구조물의 손상에 대비하여 손상 허용성(damage tolerance)이 만족되도록 구조물을 설계하여야 한다. 항공기 구조물의 제작 중에는 비파괴 전문가에 의해 해당 구조물의 재질 특성 및 구조 특성에 알맞은 비파괴 검사 등을 수행하여 제작 중에 발생하는 발견 가능한 모든 결함 등을 철저히 탐지하여 생산 중의 결함원인을 제거하여야 한다. 또한 항공사에서 운용되는 항공기 구조물은 임무종료시점까지 주기적인 검사와 진단이 요구되며 발견된 손상이나 결함은 항공기 제작사가 제공한 수리교범에 따라 정비하고 관리하여야 한다. 또한 항공기 제작사와 운항사는 항공기 손상에 대한 정보 교환을 통하여 보다 나은 안전운항을 기할 수 있고, 궁극적으로는 운항 승객의 불안을 해소시키고, 발생 가능한 모든 결함 및 고장에 대해 최대한의 신뢰성을 확보할 수 있다 하겠다.