

항공기용 보조동력장치(APU)의 개발 및 인증

이강이* · 진영권* · 이종희*

1. 서론

항공기용 보조동력장치(APU; auxiliary power unit)는 소형 가스터빈엔진의 일종으로서 주엔진이 고장 또는 정지 상태에 있을 때 발전기 및 유압펌프 등과 같은 보기에 동력을 공급하고 각종 공압계통에 압축공기를 공급함으로써 주엔진의 시동과 안전한 비행에 필요한 비상동력을 공급하는 역할을 한다.^{(1),(2)}

이와 같은 가스터빈 형식의 보조동력장치는 소형이면서 고출력이고, 부하 특성과 한랭 시동성 등이 우수하여 항공기용 비상 동력원으로 사용되어 왔으며, 최근에는 산업용과 군용 장비의 동력원으로도 널리 사용되고 있다.

국내에서 항공기에 탑재되는 보조동력장치는 항공기의 수입 또는 기술도입생산 시에 완제품으로도 도입하여 사용해 왔다. 국내에서 기술도입 국산화한 UH-60P와 최근에 개발하고 있는 T-50 고등훈련기에 사용되는 보조동력장치는 일부 부품의 국내 제작을 포함하여 기술도입으로 조립생산을 했거나 이를 계획하고 있다.

한편, 최근에 민간결용기술사업에 따라 국내에서 최초로 보조동력장치 연구개발을 완료했으며, 현재 군용 차량에 탑재되어 운용시험을 실시하고 있다.⁽³⁾ 이와 같은 기술을 바탕으로 한국형 다목적 헬기(KMH) 등에 사용할 수 있는 항공기용 보조동력장치에 대한 연구개발 추진을 위해 노력하고 있다.

보조동력장치의 개발은 설계, 제작, 시험, 인증의 단계로 이루어진다.

본 연구에서는 다목적 헬리콥터 및 소형 제트기에 적합한 보조동력장치의 성능해석을 수행하고 개발과정에서 고려해야 할 상세설계 요건, 인증시험, 그리고 인증에 대한 절차를 제시하고자 한다.

2. 보조동력장치 설계

2.1 설계사양 분석

항공기 형식별로 보조동력장치의 출력을 조사해 보면 100인승 이내의 중소형 제트비행기, 군용 전투기, 헬리콥터 등에는 총동가출력(TESHP) 150shp 내외의 보조동력장치가 널리 사용됨을 알 수 있다.⁽⁴⁾

헬리콥터에 사용되는 보조동력장치를 포함하여 세계적으로 가장 많이 생산된 보조동력장치 모델 3종에 대한 현황은 Table 1과 같다.⁽⁴⁾

비행기의 경우에는 동체 후방의 하부에 보조동력장치가 장착되고, 헬리콥터의 경우에는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 객실 뒤의 테일 붐 공간에 설치된다. 항공기용 보조동력장치의 대표적인 형상은 Fig. 2에서 보는 바와 같다.

Table 1 The Production of representative APUs

구 분	총출력 TESHP	개발 착수	인증 획득	총생산 (~'04)	헬기용 생산	비 고
Sundstrand T-62T	170shp	1950s	1960	19,209	8,000	CH-47 UH-60
Honeywell 36 Series	173shp	1960s	1970	15,317	3,500	AH-64 SH-60
Microturbo Saphir	70shp	1960s	1970	4,430	1,000	AS332 AS532

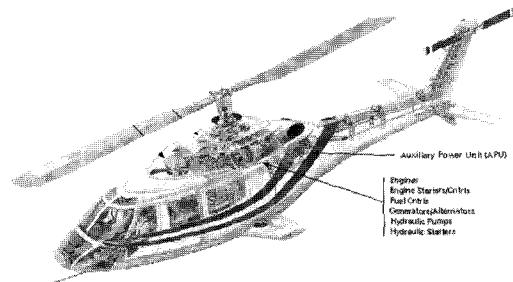


Fig. 1 The auxiliary power unit installed on a helicopter

* 한국항공우주연구원 품질인증센터
E-mail : kylee@kari.re.kr

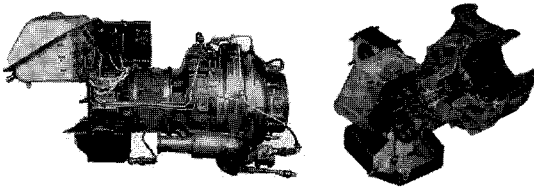


Fig. 2 T-62T-40 and APS 500 manufactured by Sundstrand

Table 2 Major design parameters in on-design simulation

구분	선정값	선정기준
축출력	40.0kW	소형항공기 비상동력 소요량
블리드공기유량	0.25kg/s	소형항공기 APU 블리드유량
압축기압력비	3.70	블리드공기 압력 요구치
압축기 효율	78.0%	고출력/중량비 APU 설계
연소기 효율	99.0%	가스터빈 연소기 일반 효율
터빈입구온도	1170K	베인 IN783, 블레이드 IN792
터어빈 효율	85.0%	고출력/중량비 APU 설계
연료발열량	42800kJ/kg	JP계열 연료의 평균 LHV 값

보조동력장치의 개발에 있어 세부적인 설계변수와 부품의 형식은 구매자의 요구성능조건(ROC), 운용환경, 개발자의 설계 및 생산 기술수준, 기존제품의 데이터 베이스, 감항기술기준, 그리고 시장동향 등에 따라서 결정된다.

2.2 성능해석 설계

본 연구에서 성능해석을 통해서 제안하고자 하는 보조동력장치는 원심형 압축기, 역류 환형 연소기, 반경류형 터빈을 가진 단일 축 형식으로 총등가출력 100shp급을 목표로 한다.

성능해석에 사용한 프로그램은 가스터빈엔진의 연구개발을 통해서 신뢰성이 입증된 시뮬레이션 코드이며, 보조동력장치의 사이클모델을 입력 데이터파일 형태로 읽고 시뮬레이션 조건에 따라 지정된 수렴범위까지 반복계산을 하도록 하였다.⁽⁵⁾

보조동력장치의 설계점 설계변수로 Table 2와 같이 선정하여 설계요구성능을 충족시킬 수 있도록 성능해석을 수행하였고, 압축기, 연소기, 터빈 등의 공력설계를 통해서 얻은 구성품 성능도(characteristic map)를 반영하여 탈설계점 성능해석을 하였다.⁽⁵⁾

운용한계 변수로 배기가스온도를 920K로 일정하게 유지하고, 축출력을 변화시키면서 대기온도의 변화에 따른 블리드공기의 온도, 압력, 유량의 변화특성 분석할 수

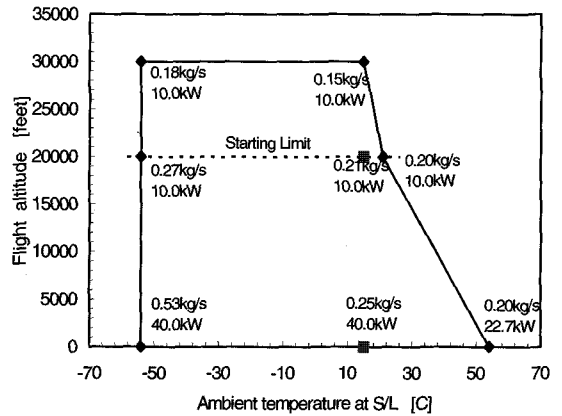


Fig. 3 Starting and operating envelope of the designed APU by off-design simulation

있다. 또한 블리드공기 유량이 일정할 때 축출력을 증가시키면 압축기의 서지마진이 감소하게 되므로 서지마진이 5%미만 또는 터어빈입구온도가 1170K를 초과하지 않게 하였다.

이와 같은 탈설계점 성능해석을 통하여 Fig. 3의 운용환경(고도, 온도)에 따른 시동 및 운용범위를 정의하였다. 고도 20,000~30,000feet에서 최소 축출력을 10.0kW, 주엔진의 재시동을 위한 블리드공기 유량을 0.20kg/s, 그리고 30,000 feet에서의 블리드공기 유량을 0.15kg/s로 할 수 있다. 지상 대기온도가 +54°C의 고온(hot day)조건에서는 고도가 증가함에 따라 대기압력의 저하로 인한 급격한 출력저하가 발생하므로 이 구역에서는 보조동력장치 엔진의 운용을 제한하는 것이 바람직하다.

2.3 상세 설계 요건

보조동력장치의 상세 설계는 작동 중의 신뢰성을 충분히 보장할 수 있는 설계 특성을 갖고 이에 적합한 부품으로 구성하도록 한다. 모든 설계 특성과 부품의 적합성은 경험적인 데이터와 시험 및 분석을 통해서 확인되어야 한다.^{(2),(6),(7)}

보조동력장치의 상세 설계 시에 고려해야할 주요 설계 요건은 다음과 같다.

- (1) 재료 : 적합성과 내구성에 대한 시험, 분석, 공인규격 지정 등의 방법으로 강도와 특성을 규정한다.
- (2) 고고도 운용 : 보조동력장치의 기능과 성능을 충분히 발휘할 수 있는 고도한계와 운전범위를 설정한다.
- (3) 전자기 간섭 : 보조동력장치 운전 시에 발생하는 최

- 대 전도 및 방사 전자기 간섭을 시험으로 확인한다.
- (4) 운전 특성 : 실속, 서지, 연소정지 현상이 발생하지 않는 운전범위, 주요성능변수, 환경조건을 설정한다.
 - (5) 공기흡입구 : 작동영역 내에서의 결빙방지, 인화성 유체의 유입방지를 위한 쉬라우드링, 흡입구 압력손실 및 왜곡방지, 외부이물질투입을 고려하여 설계한다.
 - (6) 유허시스템 : 모든 운전자세와 운전영역에서 충분한 기능과 성능을 발휘할 수 있도록 오일배출구, 오일필터, 오일탱크 등을 설계한다.
 - (7) 연료시스템 : 모든 운전영역과 환경조건에서 충분한 기능과 성능을 발휘할 수 있도록 연료규격, 필터, 연료배출, 재료 등을 고려하여 시스템을 설계한다.
 - (8) 보기구동기구 : 출력축에 보기의 장탈착을 위한 기구를 갖추고 이에 작용하는 토크, 회전수, 회전방향, 하중, 오버행 모멘트를 결정한다.
 - (9) 온도 제어 : 최대허용온도 이하로 배기가스온도를 제한할 수 있는 자동온도감시기구를 갖추도록 한다.
 - (10) 회전수 및 가속 제어 : 최대허용회전수 및 가속율을 초과하지 않도록 모니터링 기구를 갖추도록 한다.
 - (11) 자동 정지 : 과열 또는 과속으로 인한 보조동력장치의 파손방지를 위해 과속변수 등을 이용하는 자동정지기구를 갖추도록 한다.
 - (12) 로터 및 블레이드 파손 봉쇄 : 압축기 및 터빈 로터, 반경류 로터의 베인, 엑스듀서, 인듀서, 그리고 축류 로터의 블레이드 등은 파손 시에 파편이 봉쇄될 수 있도록 설계한다.
 - (13) 응력 파열과 시동/정지 피로 : 회전하는 구성품에 대한 사이클한계, 시간수명한계, 크립성장한계 등을 시험 및 분석한다.
 - (14) 블리드 공기 인출기구 : 압축기 블리드 공기의 특성, 최대 오염도, 연결부에 작용하는 전단력, 하중, 모멘트의 크기를 결정한다.
 - (15) 점화시스템 : APU의 모든 운전범위에서 충분한 시동 및 재시동 능력을 갖도록 설계한다.

3. 보조동력장치 인증시험

3.1 시험의 구분

보조동력장치의 시험은 개발시험, 인증시험, 그리고 수락시험으로 분류할 수 있다.

개발시험은 보조동력장치를 구성하는 재료, 부품, 구

성품, 보기, 그리고 보조동력장치 완성품에 대하여 개발자가 모든 시험 및 검사를 통해서 설계의 적합성을 확인하는 것이다.

인증시험은 인증시험 규격과 인증 공인기관 또는 사용자가 지정한 요건에 따른 항목을 입증하는 것으로서 교정시험과 블록시험으로 구분하여 실시한다.

수락시험은 인증시험을 완료한 보조동력장치에 대하여 사용자에게 납품을 목적으로 실시되는 것으로서 수락시험 규격과 사용자가 지정한 요건에 따라서 필수적인 기능 및 성능을 입증하는 시험이다.

3.2 인증시험 세부항목

보조동력장치는 항공기용으로서의 신뢰성 및 성능에 따라 카테고리 1과 카테고리 2로 분류한다. 카테고리 1의 보조동력장치는 최소성능표준의 기본요건을 충족하고, 결빙방지, 외부이물질투입, 자동정지, 점화시스템 등의 추가요건을 만족하는 것을 말하며, 카테고리 2의 보조동력장치는 최소성능표준의 기본요건만을 충족하는 것을 말한다.⁽²⁾

항공기용 보조동력장치는 다음과 같은 세부 인증시험을 통해서 기능, 성능, 그리고 감항기준에 대한 적합성을 입증해야 한다.

(1) 교정시험

교정시험을 통해서 보조동력장치의 출력 및 블리드 공기 특성을 결정하고, 내구성 시험에 필요한 사항을 설정한다.

교정시험을 통해서 얻은 출력 축의 동력, 토크, 회전수, 블리드 공기의 유량, 온도, 압력, 그리고 연료유량 등의 데이터를 배기가스온도와 비교하여 분석한다.

(2) 내구성시험

보조동력장치의 내구성시험은 총 150시간을 요구하고 있으며, 이 때 주구성품에 파손의 흔적이나 지나친 마멸이 생기지 않고 보조동력장치가 적정한 기능을 발휘할 수 있어야 한다. 또한 회전수와 가스온도제어 기구는 정격출력 조건에서 관련 변수를 규정된 공차 이내로 유지할 수 있어야 하고, 시험 완료 후의 보조동력장치는 주구성품을 교환하지 않는 범위로 창정비 가능한 상태가 되어야 한다.

다음과 같이 7시간 30분으로 구성된 스케줄에 따라 20회 운전되도록 한다.

- ① 정격 5분, 무부하 5분, 정격 1시간, 무부하 5분
- ② 정격 5분, 무부하 5분, 75%정격1시간, 무부하 5분
- ③ 정격 5분, 무부하 5분, 정격 1시간, 무부하 5분
- ④ 정격 5분, 무부하 5분, 50%정격1시간, 무부하 5분
- ⑤ 정격 5분, 무부하 5분, 정격 1시간, 무부하 5분
- ⑥ 정격 5분, 무부하 5분, 25%정격1시간, 무부하 5분

보조동력장치의 시동시험은 최소한 100회 이상의 시동을 실시한다. 시동시험 중에 25회의 시동마다 최소 2시간 동안 정지하도록 한다.

(3) 재교정시험

내구성시험을 완료한 보조동력장치에 대하여 내구성시험 이전에 실시한 교정시험과 동일한 방법으로 재교정시험을 실시한다. 첫 번째 교정시험의 결과와 비교할 때 재교정시험 시에는 출력은 95% 이상, 연료소모율은 105%를 초과하지 않아야 한다.

(4) 완전분해검사

내구성시험과 재교정시험을 완료한 보조동력장치를 완전히 분해하여 각 부품에 대한 세부검사를 수행한다. 검사결과에 따라 임계치수 및 형상으로 확인된 부품에 대해서는 재검사를 실시하고 과도하게 피로를 받거나 마멸된 구성품은 재설계 제작하여 다시 시험하도록 한다.

(5) 로터 강건성시험

압축기와 터빈의 로터조립체에 대해서 과속시험과 과온시험을 실시하여 강건성을 입증하도록 한다.

과속시험은 115% 또는 엔진제어시스템에 의한 가장 높은 회전수에서 5분 동안 운전하여 압축기와 터빈 로터의 초과응력 마진을 입증하는 시험이다.

과온시험은 정격 배기가스온도보다 42℃(75°F) 이상 높은 배기가스온도에서 5분 이상 운전하여 터빈로터에 대한 초과응력 마진을 입증하는 시험이다.

(6) 로터 및 블레이드 봉쇄시험

보조동력장치의 회전수에 대한 로터 및 블레이드의 봉쇄시험은 엔진제어시스템에 의한 가장 높은 회전수에서 실시한다.

터빈입구 또는 배기가스온도에 대한 봉쇄시험은 정격출력일 때의 온도보다 높은 온도에서 실시한다.

로터 및 블레이드의 모든 파편을 봉쇄하지 못할 경우에는 로터 케이싱 부근에 설치되는 부품을 보강하여

재설계하거나 파편의 궤적 및 에너지 수준을 설정하도록 한다.

(7) 결빙방지시험

수송용 항공기에 장착되는 보조동력장치는 연방향 공규정(FAR Part 25, App. C)에 명시된 최대연속결빙 영역과 최대일시결빙 영역 내의 작동범위에서 운전될 때 흡입구의 결빙으로 인하여 기능 및 성능 저하를 유발하지 않도록 설계되어야 하고 시험을 통해서 이를 입증한다.

(8) 외부이물질투입시험

보조동력장치의 흡입구에 물, 얼음, 모래, 자갈, 기타 경질물질이 일정량 투입되었을 때 보조동력장치의 작동에 미치는 영향에 대해서 시험을 통해서 입증한다.

(9) 자동정지

보조동력장치의 비행 중 자동정지 기능은 잠재적 위험상태가 인지되었을 때만 작동해야 하며, 이를 시험 및 분석을 통해서 입증한다.

(10) 점화시스템

보조동력장치의 점화시스템은 계속감항검사 및 정비 주기 중에는 충분히 만족스럽게 작동함을 시험이나 분석을 통해서 입증한다.

4. 보조동력장치 인증절차

4.1 인증절차 일반

항공기, 엔진, 프로펠러는 고도의 신뢰성과 안전성이 요구되므로 설계, 생산, 운항에 있어서 정부의 감항당국 또는 지정된 전문기관으로부터 인증을 받아야 한다.

미국의 경우에 이와 같은 항공기 등의 인증은 감항기준에 대한 적합성의 평가를 통해서 이루어지며, 형식증명, 생산증명, 그리고 감항증명으로 구분된다. 한편 항공기 관련 부품 및 소재에 대해서는 부품생산자 승인, 기술표준품 허가 등으로 구분할 수 있다.⁽⁶⁾

형식증명은 항공기, 엔진, 프로펠러의 설계가 감항기준에 적합하다는 것을 입증하는 것으로 설계 착수 시점에 신청하여 모든 시험 및 검사에 합격하고 설계에 대한 적합성 입증이 완료되면 발급된다.

생산증명은 형식증명을 통해서 승인된 항공기 및

관련부품의 설계를 제품으로 구현하고 이를 대량으로 생산하는데 적합한 제조시설, 기술인력, 품질관리시스템 등을 승인하는 것이다.

감항증명은 생산증명을 통해 제작된 항공기가 승인된 형식설계에 합치하고 안전하게 작동할 수 있음을 입증하는 것으로 개별 항공기마다 감항증명을 받아야 비행 및 운항이 가능하다.

형식증명을 받은 항공기에 교환 장착될 목적으로 제조 및 판매되는 재료, 공정, 부품, 기기류 등에 대해서는 제품의 설계와 시험 및 검사 결과가 해당 항공기의 감항기준에 적합하고 이에 필요한 제조검사시스템을 갖춰서 부품생산자 승인을 받아야 한다.

항공기용 재료, 공정, 부품, 기기류 중에 특정한 항공기 형식 및 모델에만 사용하는 것으로 제한되지 않는 표준 제품을 기술표준품이라고 하며, 보조동력장치를 비롯하여 120여종의 품목이 지정되어 있다. 기술표준품으로 지정된 제품은 기술표준지시서에 의한 최소성능표준의 요건을 충족하기 위하여 시험, 검사, 분석 등의 방법으로 설계에 대한 적합성을 입증하고, 제조시설 및 품질관리시스템에 대한 평가를 통해서 기술표준품 허가를 받아야 한다.

한편, 항공기, 엔진, 프로펠러, 관련 부품 등을 외국에 수출하기 위해서는 수입국 당국과 상호항공안전협정(BASA; bilateral aviation safety agreement)을 체결해야 하고, 이에 따른 절차에 의거하여 해당 품목별 감항 요건을 충족해야 한다.

4.2 보조동력장치 인증절차

보조동력장치는 기술표준품으로 지정되어 있는 품목이므로 설계와 생산에 대한 적합성 입증을 통해서 기술표준품 허가를 받아야 한다.^{(8),(9),(10)}

보조동력장치의 기술표준품지시서에 명시된 최소성능표준에 따라서 설계에 대한 적합성 입증과 시험 및 검사를 실시하고, 이를 제작하기 위한 생산 및 품질관리시스템에 대한 평가를 통해서 기술표준품으로 허가를 받게 된다. 기존의 항공기에 사용하던 보조동력장치를 새로운 모델로 교체하거나 신규로 개발하는 항공기에 적합한 보조동력장치를 선정할 때는 기술표준품으로 생산이 허가된 보조동력장치를 항공기에 장착하여 비행시험을 실시함으로써 최종적인 성능을 입증하게 된다.

기술표준품 허가를 받기 위해서는 적합성 입증서,

관련된 세부기술 자료, 품질관리시스템 기술서 등을 민간항공당국에 제출하여 평가를 받아야 한다. 이때 신청자는 최소성능표준에 대한 적합성을 입증하기 위해 지정기술대표자(DER)를 선임할 수도 있다.

기술표준품 허가를 발급 받은 제조자는 허가 요건에 따른 제조, 시험 및 검사, 품질관리시스템을 유지해야 하며, 항공기 인증시스템 평가 프로그램(ACSEP)에 의거한 정기 또는 수시 감사를 받게 된다. 제조자는 생산된 제품에 기술표준품 관련 제품정보를 표기할 수 있고, 지정제조검사원(DMIR)도 임명할 수 있다. 또한 해당 기술표준지시서가 개정 또는 폐기되어도 허가 당시의 요건에 의거하여 기술표준품을 계속 생산할 수 있는 권리가 주어진다.

기술표준품을 수출하기 위해서는 수입국가와 상호항공안전협정이 체결되어 있어야 하고 이를 통해서 수입국 민간항공당국으로부터 기술표준품 설계 승인서를 발급 받아야 한다. 수출국의 민간항공당국으로부터 해당 기술표준품 규격에 만족한다는 증명과 수출 감항증명을 발급 받고 관련 기술자료를 첨부하여 수입국 민간항공당국에 기술표준품 설계 승인을 신청한다.

5. 결 론

헬리콥터를 비롯한 중소형 항공기에 사용할 수 있는 총동가출력 100shp급의 보조동력장치에 대하여 설계점 성능과 탈설계점 세부성능을 정의하였으며, 이를 바탕으로 상세설계 및 인증시험을 위한 기본 요건을 설정하였다.

보조동력장치는 민간항공당국으로부터 기술표준품으로 인증을 받아야 한다. 이를 위해 보조동력장치의 설계, 제조시설, 기술인력, 시험 및 검사결과를 분석하여 기술기준에 대한 적합성을 입증하고, 제조자의 인증시스템과 품질관리시스템에 대한 평가를 받아야 한다. 아울러, 보조동력장치의 수출을 위해서는 국가간 상호항공안전협정(BASA) 체결이 필요하며, 이를 통해서 기술표준품 설계 승인을 받을 수 있다.

후 기

본 연구는 기획예산처에서 지원한 항공기 품질인증 체제 구축사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) 이강이, 이시우, 김승우, 1996, "APU 개발동향 및 개념설계 절차," 한국항공우주학회지, 제24권 제5호, pp. 173~180.
- (2) Technical Standard Order, "TSO-C77b; Gas Turbine Auxiliary Power Units," FAA Aircraft Certification Service, December 2000.
- (3) 김영성, 한영민, 양수석, 이대성, 2000, "보조동력 장치용 환형 역류형 연소기 성능 시험(Ⅰ)," 한국항공우주학회지, 제28권 제8호, pp. 109~114.
- (4) Forecast International, "Gas Turbine Forecast: Small Engines/APUs," DMS Market Intelligence Report, 1995.
- (5) 이강이, 배충식, 1999, "연소기블리드시스템을 고려한 보조동력장치(APU) 엔진의 성능해석," 한국항공우주학회지, 제27권 제1호, pp. 128~134.
- (6) 이호성, 이종희, 1994, "항공기 구조용 재료의 인증," 한국항공우주학회지, 제22권 제5호, pp. 126~133.
- (7) Military Specification, "MIL-P-8686(ASG); General Specification for Aircraft Auxiliary Power Units," US DoD, November 1955.
- (8) Department of Transportation, "FAR Part 21; Certification Procedures for Products and Parts," March 2002.
- (9) FAA, "Order 8120.2C; Production Approval and Certification Management Procedures," AIR-200, April 2002.
- (10) FAA, "Order 8150.1B; Technical Standard Order Program," AIR-120, May 2002.