

技術論文

한국형 기동 헬기 엔진 (T700/701K) 개발

김재환* · 안이기* · 이대성** · 성옥석*** · 성인경****

Development of T700/701K Engine for KUH

Jae Hwan Kim* · Iee Ki Ahn* · Dae Sung Lee** · Ok Suck Sung*** · In Kyung Sung****

ABSTRACT

This paper presents development activities of the T700/701K turbo-shaft engine for Korean Utility Helicopter(KUH). The T700/701K is the first rear-drive variant of the GE's T700 engine which is proven for military applications in the world. The main workscope of the development includes a modification from a front-drive engine to a rear-drive one, an performance enhancement of the power turbine and an incorporation of two channel FADEC(Full Authority Digital Engine Control) system for more reliable operation. The first engine run for development and qualification test was successfully completed in 2008. Since the PFRT(Preliminary Flight Rating Test) has been completed, the first flight of the engine installed in the first prototype of KUH has been successfully demonstrated in March, 2010 and the engine installation compatibility tests are being carried out during KUH flight test. The test and evaluation for qualification has been done except for the low cycle fatigue test up to date.

초 록

본 논문은 한국형 기동헬기(수리온)에 탑재되는 T700/701K 터보 샤프트 엔진의 개발 현황을 기술한다. T700/701K 엔진은 군용 헬기엔진으로 널리 사용되고 있는 GE사의 T700엔진을 후방 구동형으로 최초 개조 개발한 엔진이다. 주요 개발 내용은 크게 엔진 장착 요구조건에 의한 후방 구동형 개조, 동력터빈 성능 향상 및 엔진 운전 신뢰성 향상을 위한 2채널 FADEC 시스템 적용 등이다. 2006년 6월 사업이 착수되어 개발 및 인증시험용 엔진의 초도 운전이 2008년에 성공적으로 수행되었으며 예비비행 정격시험 수행을 통해 2010년 3월에 첫 비행을 성공적으로 수행하였다. 현재 저주기 피로 시험과 일부 해석을 제외하고 군 인증을 위한 해석 및 시험이 완료 되었으며 2011년 상반기에 인증완료 예정이다.

Key Words: KHP(한국형헬기사업), KUH(한국형기동헬기), Surion(수리온), Turbo Shaft Engine(터보 샤프트 엔진), T700/701K(701K 엔진), Power Turbine(동력터빈), Qualification(군 인증)

접수일 2010. 12. 6, 수정완료일 2011. 6. 15, 게재확정일 2011. 6. 22

* 정회원, 한국항공우주연구원 항공엔진팀

** 종신회원, 한국항공우주연구원 항공연구본부

*** 종신회원, 삼성테크윈(주) 파워시스템 연구소

**** 정회원, 국방과학연구소 KHP기술관리단 2실

† 교신저자, E-mail: kjaehwan@kari.re.kr

[이 논문은 한국추진공학회 2010년도 추계학술대회(2010. 11. 25-26, 제주 샤인빌리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

한국형헬기사업(KHP, Korean Helicopter Program)은 노후화된 대한민국 군용헬기(UH-1, 500MD 등) 대체를 위해 국내 고유 헬기를 개발

하는 사업이며, 이를 통해 한국형기동헬기 '수리온'(Fig. 1)이 개발된다. 2006년 사업이 착수되어 첫 수리온 시제기가 2009년 하반기에 조립되었으며 초도비행은 2010년 상반기에 성공적으로 착수되어 계획된 비행시험을 수행 중에 있다. 수리온의 동력공급을 책임지고 있는 엔진은 KHP 사업 계획 단계에서 GE사 T700엔진(T700-701D)의 개조를 통한 장착이 결정되었으며 개발 엔진의 모델명은 T700/701K로 하였다.

T700/701K 엔진은 GE사의 T700계열 엔진 중 최초의 후방 구동형 엔진이 되며 헬기 동력계통 앞쪽에 장착되어 동력을 공급한다. T700/701K 엔진 개발의 목적은 수리온 비행시험을 위한 적기납품 및 군 인증(Qualification)뿐만 아니라 향후 엔진 독자 개발에 필요한 핵심기술 및 경험 확보에도 있다. T700/701K 엔진개발은 한국항공우주연구원(이하 항우연), 삼성테크윈, GE사의 3개 주요 기관이 참여하여 기술협력개발 형태로 수행되었다. 개발주관기관인 항우연은 사업 및 기술관리 수행과 더불어 각 설계단계에서의 기술검토 및 일부 시험평가(동력터빈 리그시험, 고공환경시험)를 담당하였다. 국내협력업체인 삼성테크윈은 엔진 통합, 동력터빈 성능향상 및 FADEC 장착에 필요한 요구도 분석 및 설계업무를 GE사와 공동으로 수행하였으며, 핵심 부품의 국산화 및 엔진 조립을 담당하였다. 엔진 단위로 수행된 개발시험과 인증시험은 고공환경시험을 제외하고 모두 삼성테크윈이 수행하였다. T700계열 엔진의 원 제작사인 GE는 T700/701K 엔진의 성능, 비행 안전성 및 인증과 관련된 모

든 개발 업무 및 최종 기술 검토에 대한 우선적 책임을 갖고 있으며, 엔진 개발 전 과정 및 비행 시험 과정에서 기술지원을 담당하였다.

T700/701K 엔진 개발의 주요 범위는 크게 엔진 장착 요구조건에 의한 후방 구동형 개조, 동력터빈 성능 향상 및 엔진 운전 신뢰성 향상을 위한 2채널 FADEC 시스템 장착 등이다. 본 논문에서는 2006년 사업 착수 이래 현재까지의 엔진의 개발현황을 소개하고 이를 통해 얻은 교훈 및 향후 국내 항공용 엔진 개발 방향에 대해 간략한 의견을 제시하고자 한다.

2. T700/701K 엔진 개요

T700/701K 엔진(Fig. 2)은 코어는 5단 축류/1단 원심 압축기, 환형 연소기, 2단 가스발생기터빈, 2단 동력터빈으로 구성되어 있으며, 기존의 T700 계열 엔진과는 다르게 동력터빈 축이 엔진 후방으로 빠져있다. 엔진 전 운용영역에서의 효율적이고 서지에 안전한 운전을 위해 1단 가변 입구안내깃(VIGV, Variable Inlet Guide Vane), 2단 가변정익(VSV, Variable Stator Vane) 그리고 시동추기밸브가 압축기에 적용되어 있다. 또한 외부이물손상(FOD) 방지를 위해 입자분리기(Inlet Particle Separator)가 장착되어 공기 흡입시 모래나 먼지를 분리시킬 수 있다. 엔진 전방 상단부에 장착되어 있는 보기 모듈은 엔진 축으로 구동되는 기어박스과 여기에 장착되어 있는 연료/오일 시스템, 입자분리기 Blower, 엔진으로



Fig. 1 Korean Utility Helicopter 'SURION'



Fig. 2 T700/701K Engine

전기를 공급하는 발전기 등으로 구성된다. 후방 구동형 개조에 의해 엔진의 전방에는 신규로 Nose Cone이 장착되고 후방에는 직관(Straight) 대신 곡관(bifurcated)의 덕트가 장착되었다. 기계식 제어를 Back-up 으로 하는 전자식엔진제어 장치(DECU, Digital Engine Control Unit)가 적용된 T700-701D의 운용 신뢰도를 높이기 위해 T700/701K에는 2개의 독립적 channel을 갖는 전자제어장치(EECU, Electronic Engine Control Unit)가 모든 권한을 갖고 엔진을 전자식으로 제어하는 FADEC(Full Authority Digital Engine Control) 시스템이 적용되었다. FADEC 시스템은 크게 전기 시스템, 연료 시스템, 방빙/시동추기 시스템, 제어 법칙 및 로직으로 구성된다. FADEC 전기 시스템은 EECU, PMA(permanent magnetic alternator), 점화 가진기 및 점화기, 센서, 배선 등으로 구성된다. EECU는 엔진에 직접 장착(on-engine mounted)되며, 2개 채널이 하나의 케이스에 탑재된다. 하나의 EECU 채널이 'In-Control' 채널로 동작하며, 엔진 제어 신호를 출력한다. 나머지 채널은 'Standby' 채널로 동작하며, 모든 입력신호 처리와 소프트웨어 기능을 수행하나, 엔진 제어 신호는 출력하지 않는다. 연료 시스템은 접근성과 연료 라인 최소화를 위해 보조 기어 박스에 장착된다. 내부에 FMU(Fuel Metering Unit)가 포함되며, 압축기에 장착된 가변정익과 시동추기밸브와 연동하여 작동된다. 제어를 위한 FADEC 시스템의 제어입력 변수는 연료 유량과 압축기 가변 배인 위치이며, 이를 통하여 가스발생기 및 동력터빈 회전수, 터빈간 온도를 제어한다. 설계된 엔진 제어 법칙과 로직은 EECU 소프트웨어로 구현된다.

3. 요구도 분석 및 검증방법

T700/701K 엔진 개발의 기준 문서는 엔진개발규격서(EMS, Engine Model Specification)이며 개발 요구도와 요구도 검증방법이 기술되어 있다. T700/701K 엔진개발규격서는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 T700-701C EMS에 한국형기동헬기

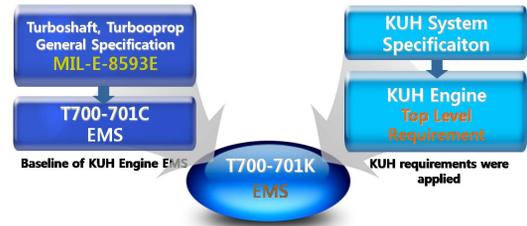


Fig. 3 T700/701K Engine Model Specification

장착에 필요한 고유의 요구도를 반영하여 작성되었다. 엔진개발규격서 상에 기술된 각각의 요구도에 대한 검증방법(시현, 해석, 시험, 유사성)은 정부를 포함한 각 관련기관의 기술적 및 사업적 검토를 통해 결정되었으며, 이와 관련된 상세방법, 일정, 시험설비 등에 대한 상세사항은 별도문서인 엔진인증계획서에 기술되어 KHP 사업의 기술관리기관의 승인을 받는다. T700/701K 엔진은 부품 및 모듈의 상당부분이 T700-701C 또는 T700-701D와 동일하기 때문에 요구도의 많은 부분이 유사성(Similarity) 해석을 통해 검증된다.

4. 설계 및 제작

4.1 개발 범위 및 설계

앞서도 언급한 바와 같이 T700/701K 엔진은 새롭게 개발되는 것이 아닌 헬기 체계의 요구조건에 맞게끔 기존의 T700계열 엔진을 개조 개발하는 것이다. 주 개발범위는 크게 후방 구동을 위한 개조, 동력터빈 성능향상, 운용 신뢰도 향상을 위한 FADEC 적용이다.

기존 전방 구동형 T700엔진의 후방 구동형 개조는 헬기 동력계통의 전방에 엔진을 배치해야 하는 헬기 체계의 요구조건에 의한 것이다. 이를 위하여 동력터빈의 축계가 변경되었으며, 이에 따라 베어링 시스템 및 윤활계통, 오일 벤트 시스템 등이 수정이 되었다. 베어링 시스템은 전방의 베어링을 제거하였으며, 이에 따라 오일 썸프의 형상이 변경되었다. 오일 벤트시스템은 동력터빈 축 가운데에 장착된 벤트시스템을 변경하여 외부 배관을 통하여 벤트를 수행하도록 변경

하였다.

한편, 기존 엔진이 후방 구동형으로 개조됨에 따라 곡관(bifurcated) 형태의 배기덕트가 장착되고 이에 따른 압력손실로 기존 엔진 대비 성능이 감소된다. 또한 한국형기동헬기 장착을 위해 기존 엔진 대비 동력터빈 회전수가 증가, 회전방향 변경 및 수명 증가가 요구되었다. 따라서 앞서 언급한 성능 손실을 보상하고 장착 요구조건에 부합되게끔 동력터빈의 성능향상 및 설계변경이 필요하였다. 설계 대상은 가스발생기 터빈과 동력터빈을 연결하는 트랜지션(Transition) 덕트와 3단 및 4단 동력터빈의 블레이드와 노즐이다. 블레이드는 회전속도가 증가하여 회전에 의한 응력증가가 예상되지만 요구수명이 증가했기 때문에 공력성능을 최대화 할 뿐 아니라 구조적으로 가장 낮은 응력설계를 수행하여 구조설계와 공력설계의 최적화를 수행하였다. 특히 블레이드에는 고효율을 달성하기 위하여 쉬라우드가 있으나 이것으로 인하여 블레이드의 하중이 높아지므로 최적의 쉬라우드 형상을 설계하기 위하여 여러 번의 반복설계를 수행하여 설계 요구도를 만족시키는 결과를 얻었다.

기존 T700-701D 엔진의 운용 신뢰도를 높이기 2개의 독립적인 channel을 갖는 FADEC이 적용되었으며, 수리온 헬기의 운용 요구조건에 맞게끔 인터페이스를 정의하고 소프트웨어가 변경되었다. 소프트웨어는 인터페이스 설계 및 ICD (Interface Control Document) 작성, 소프트웨어 요구사항 도출 및 SRS(Software Requirement Specification) 작성, 엔진제어법칙 및 로직 설계, 소프트웨어 설계 및 시험, 엔진 시뮬레이터 연동 시험, 엔진 시험, 비행 시험 과정을 통하여, RTCA DO-178B의 Level A를 만족하도록 개발되었다. 인터페이스 설계에서는 전기적 인터페이스, 기계적 인터페이스, 기능적 인터페이스, ARINC-429 데이터 버스 신호가 정의되며, FADEC 시스템과 전기적으로 연결되는 구성품과의 협의를 통하여 수행되었다.

4.2 제작

최근 항공기나 엔진의 개발은 개발기간 단축

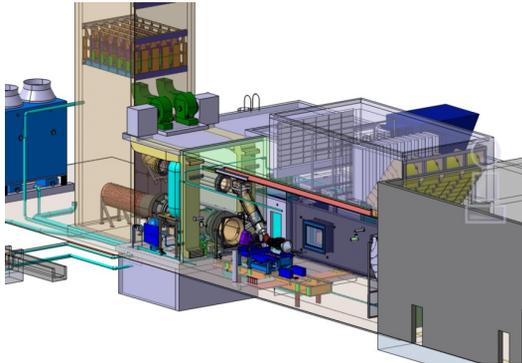
및 개발 효율성 제고를 위해 설계단계에서 제작이 동시에 진행되는 CPD(Concurrent Product Development) 방식이 적용되고 있으며, 본 엔진 개발 사업에도 개발일정 준수를 위해 설계단계부터 제작 관련 업무가 동시에 수행되었다. GE사는 기존 701D 엔진과의 공용 부품(Common Parts) 및 701K 고유 부품(Unique Parts)를 Kit형태로 삼성테크윈에 공급하고 삼성테크윈은 공급된 Kit와 자체 제작되는 국산화 부품을 이용하여 최종조립을 수행하였다. 부품 국산화 시 701D 공용부품은 701C 면허생산 시의 인프라를 이용해 생산되었으며 701K 고유부품은 신규로 공정설계 수행하고 품질관리 절차를 수립하였다. 개발시험, 인증시험 및 비행시험에 사용되는 엔진은 모두 국내 조립되었으며 2010년 상반기까지 수리온 비행시제 장착을 위한 모든 엔진이 단계적으로 정부에 납품된 후 체계종합업체인 한국항공우주산업으로 최종 관급되었다.

5. 시험평가

5.1 시험설비 구축

엔진 개발 및 인증을 위해서는 부품, 부 시스템, 모듈 그리고 엔진 단위의 시험이 필요하며 필요한 시험은 엔진의 개발범위에 의해 결정된다. 701K엔진 개조범위를 검토한 결과 개발 및 인증을 위해 필요한 시험은 대부분 엔진 단위의 시험으로 식별되었으며, 부품 또는 부 시스템 단위의 인증시험도 일부 식별되었다.

동력터빈 노즐 최적화 시험, 내구성 시험 등과 같은 엔진 단위의 개발시험 및 인증시험은 모두 국내에서 수행되었으며, 고공환경시험을 제외한 시험은 KHP사업을 통해 삼성테크윈에 새로 구축된 지상시험설비(Fig. 4)에서 수행되었다. 지상시험설비는 5,000마력 수준의 전방/후방 구동형 터보 샤프트 엔진의 성능시험이 가능하게끔 구축되었으며, 양산단계에서는 수락시험에 활용될 예정이다. Cell correlation을 포함한 설비검증 및 초도 엔진운전은 2008년 하반기에 성공적으로 완료되었다. 한편, 701K 엔진의 고공환경시험을



(a) Ground Test Facility in Samsung Techwin



(b) T700/701K Engine Test Cell

Fig. 4 Ground Test Facility in Samsung Techwin

위해 항우연에 설치된 기존 고공환경설비(Fig. 5.(a))의 환경모사능을 향상시키고 터보 샤프트용 Cell(Fig. 5.(b))을 새롭게 추가하였다. 새로 보완된 설비는 엔진 흡입공기 온도를 $-55^{\circ}\text{C} \sim +15^{\circ}\text{C}$ 범위에서 조절할 수 있으며, 30,000 ft의 고도를 모사할 수 있다. 본 고공환경시험 설비 및 Cell도 2008년 하반기에 검증을 마치고 2010년 상반기까지 엔진 제어로직과 관련된 개발시험, 예비비행정격시험 및 인증시험에 해당하는 고공환경시험을 수행하였다.

5.2 시험평가

701K 엔진개발 및 인증을 위한 시험평가 항목은 앞서 언급한 바와 같이 요구도 분석, H/W 및 S/W 개조범위 및 사업적 요소를 고려하여



(a) Altitude Facility in KARI



(b) T700/701K Engine Test Cell

Fig. 5 Altitude Test Facility in KARI

결정되었다. 701K 엔진 시험은 크게 설계검증을 위한 개발시험, 비행시험 적용 검증을 위한 예비비행정격시험(PFRT, Preliminary Flight Rating Test) 및 군 인증(Qualification)을 위한 인증시험의 3가지로 분류된다.

대표적인 개발시험은 항우연에서 수행된 동력터빈 리그 시험(Fig. 6)이며, 이 시험은 새롭게 설계된 동력터빈의 성능확인 및 최적 형상 확정을 위해 계획 되었으며 2008년 하반기에 완료되어 동력터빈 최종형상 확정에 적용되었다.

예비비행정격시험은 엔진의 비행시제 적용 적합성 평가하기 위한 일련의 시험, 해석 및 시험을 의미하며, 미 군사규격 MIL-E-8593A에 명확히 기술되어 있다[1]. 예비비행정격시험은 엔진 개발과 체계개발이 동시에 진행될 경우 적용된 사례가 많으며, KHP사업도 이에 해당된다. 701K의 예비비행정격시험은 2010년 초에 완료되었고



Fig. 6 Power Turbine Test Rig

이에 근거하여 수리온 비행시제의 초도비행이 2010년 3월에 성공적으로 수행되었다.

2010년 10월 현재까지 부품, 부 시스템, 모듈 단위의 인증시험은 모두 종료되었으며 엔진 단위의 인증 시험은 저주기 피로 시험을 제외하고 모두 종료되었다. 저주기 피로시험 및 엔진 인증에 필요한 나머지 해석, 유사성 분석 등도 2011년 상반기까지 종료하여 엔진 인증을 완료할 계획이다.

6. 결 론

본 논문에서는 한국형 기동헬기 '수리온'에 탑재되는 T700/701K 엔진의 개발 현황을 소개하였다. 2006년 6월 사업 착수 이래 2010년까지 개발시험, 인증시험 및 비행시험 용 엔진의 설계 및 제작이 완료되었으며, 예비비행정격시험을 근거한 2010년 3월 초도비행 착수 이후 현재까지 계획된 비행시험을 수행 중에 있다. 현재 저주기 피로 시험과 일부 해석을 제외하고 군 인증을 위한 해석 및 시험이 완료 되었으며 2011년 상반기에 인증완료 예정이다.

T700/701K 엔진개발 사업은 국내에서 수행된 최초의 유인기용 장수명 엔진 개발 프로그램으로 평가할 수 있다. 아울러 선진 엔진 제작사의 개발과정을 경험하고 유인기용 장수명 엔진 설계 및 인증 시험평가 기술이 확보 되었다는 측면에서 국내 항공용 엔진 연구개발에 새로운 국면을 맞게 되었다. 하지만 유인기 엔진 개발 사업의 계속 수행, 미 확보 기술 획득 및 개발 인프라 유지 등이 지속되지 않을 경우 국내 독자 엔진 개발 및 시장진입은 가까운 미래에 실현이 불투명 하다. 따라서 국내에서의 엔진개발은 정부의 항공산업발전 기본계획('10년 1월) 상에 언급된 바와 같이 MRO (Maintenance, Repair & Overhaul)나 RSP (Risk Share Partner)참여를 통한 기술축적 및 시장진입이 단계적으로 수행되어야 한다. 이를 위해서는 현재 계획되어 있는 항공기 체계 개발 시 엔진 공동개발을 통해 관련 핵심기술을 단계적으로 확보함과 동시에 선진사의 기술이전이나 협력이 어려운 분야에 대해서는 독자적 기술 확보가 필요하다.

후 기

본 연구개발 사업은 지식경제부의 헬기기술자립화사업 및 국방부의 한국형헬기사업의 지원으로 수행 되었습니다.

참 고 문 헌

1. MIL-E-8593A, MILITARY SPECIFICATION, ENGINES, AIRCRAFT, TURBOSHAFT AND TURBOPROP GENERAL SPECIFICATION FOR, 1975