

제트엔진 개발규격 및 확인시험 체계

Jet Engine Development Specifications and Qualification Test System

임진식(국방과학연구소), 민성기(*), 김승우(삼성항공 엔진연구소), 최태훈(*), 이시우(*)
JinShik Lim(ADD), SeongKi Min(*), SeungWoo Kim(SSA), TaeHoon Choi(*), SiWoo Lee(*)

요약문(Abstract)

항공기용 제트엔진의 개발은 수많은 개발시험에 의한 엔진의 신뢰성 보장을 필요로 하며, 이는 엔진의 설계사양결정 및 총개발비용에 크게 영향을 준다. 따라서 여기서는 항공기용 제트엔진의 개발을 위한 시험평가체계를 수립하고 그 시험방법 및 소요장비, 시험평가기준 등에 대해 기술함으로써, 차후 제트엔진의 개발사업을 착수할 경우 그 시험평가체계에 기준을 제시하고자 한다.

1. 개요

제트엔진의 개발 필요성은 새로운 항공기 개발의 착수에 따라 제기된다. 이때 제시되는 제트엔진의 체계요구조건 (System's Requirements) 즉, 제트엔진의 요구운영능력 (Requirements of Operational Capability) 은 동 엔진이 장착될 항공기의 설계요구운용 능력으로부터 도출된다. 따라서 제트엔진의 설계시발점이 된 요구운영능력에 대한 개발 완료단계에서의 시험평가는 동 제트엔진이 장착될 항공기의 요구운영능력에 대한 근본적인 성능확인작업의 일환이라 해도 과언이 아니다. 다시 말해, 새로이 개발되는 제트엔진의 개발시험체계 및 시험항목, 시험방법 등은 그것들이 제트엔진 및 나아가 동 제트엔진이 장착될 항공기의 요구운영능력에 대한 정확하고 충분한 시험평가를 가능케 해 줄 수 있도록 계획되고 집행되어야 하는 것이다.

국내 항공공업은 1970년대 초에 착수된 국산전투기(제공호, F-5E/A) 면허생산 사업을 통해 본격적으로 발전하여 20여년의 역사를 갖게 되었으며, 최근 착수된 차세대 전투기(F-16) 사업을 통해 좀더 진지한 발전방향을 모색케 되었다. 이에 따라 국내 항공기술진은 항공기의 동체, 항법전자장비 등 뿐만 아니라 항공기용 제트엔진에 대한 생산 및 설계능력의 일부를 확보하게 되었으며, 이중 제트엔진 기술에 대한 깊어진 이해는 현재

여러 업체 및 연구기관에 의한 다양한 응용 분야 즉 산업용 가스터빈 등의 개발 시도를 가능케 하고 있다. 또한 머지않은 장래에 국내에서의 독자적인 항공기용 가스터빈 엔진 즉 제트엔진의 개발착수도 희망적으로 전망된다고 말할 수 있을 것이다.

따라서 본 논문에서는 향후 항공기용 제트엔진 중 가장 기본적인 형식인 터보제트엔진을 개발할 경우, 시제작 구성품으로 조립 완료된 완성엔진(Test Prototype Engine)의 요구운영능력에 대한 성능시험평가체계를 연구 제시하고, 이 시험평가체계를 구성하는 각 단위시험평가항목의 시험기술 및 평가방법 등을 개괄적으로 서술코자 한다. 여기서 제시되는 시험평가체계는 항공기술 선진국들의 동 기술에 대한 경험 및 규정 등을 바탕으로 국내 산업의 실정을 감안하여 개발되었으며, 이는 전술한 바와 같이 개발하고자 하는 항공기 및 제트엔진의 형식과 요구운영능력에 따라 더욱 정밀한 형태로 발전되어야 할 것이다. 그러나 여기서 기술된 터보제트엔진의 요구운영능력에 대한 시험평가체계는 어떠한 종류의 제트엔진을 개발할 경우라도 그 시험평가의 기본적 골격으로 유지되어야 할 내용으로 판단되며, 차후 제트엔진 개발사업을 착수할 경우 개발초기에서의 시험평가에 대한 기술적 계획의 수립 및 시험수행을 효율적이고 정확하게 할 수 있도록 도움을 줄 것으로 여겨진다.

2. 제트엔진의 개발 체계규격

항공기 추진기관으로 널리 사용되고 있는 제트 엔진은 지상에서 운행하는 여타 동력 기관에 비해 높은 신뢰도를 가져야 하고 항공기와와의 장착성을 고려하여야 하므로 그 개발 체계규격 또한 매우 엄격하고 다양하다.

여기서는 기체와의 장착에 따른 제반 규격들을 제외하고 이른바 장착전 엔진 체계규격에 대하여 기술하고자 한다. 기체 장착전의 제트 엔진 체계규격은 엔진만의 운용 성능을 기술하는 것으로써, 크게 엔진 성능과 엔진 운용성으로 대별되며 표1에 나타난 바와 같다.

표1. 제트엔진 개발 체계규격

구 분	주요규격	규 격 내 용	관 련 시 험
엔진 성능	시동 시간	제트엔진의 시동이 가장 어려운 고온 환경(Hot Day), 최대 시동 고도에서 요구되는 시동 시간을 규정한다.	시동계통 성능 시험 엔진 시동 시험
	최대 추력	기체 이륙시 요구되는 최대 가용 추력과 연료 소모율을 규정한다. (최대 추력 지속 시간은 5분 이내이다.)	기본 성능 시험 상세 성능 시험 고도 시험
	최대 연속	기체 장착 엔진중 1기의 결함발생으로 나머지 1기만을 연속 가동할때 요구되는 최대 가용 추력과 연료소모율을 규정한다.	
	최대 상승	상승비행시 요구되는 최대 가용 추력 및 연료 소모율을 규정한다. (상승한도에 따라 통상 18 - 22분 이내이다.)	
	최대 순항	순항시 요구되는 최대 가용 추력 및 연료 소모율을 규정한다. (군용기의 경우 이를 최대 연속으로 분류한다.)	
	감응 시간	엔진의 가속 성능은 그 엔진이 보유하고 있는 공력적 안정성을 대변하는 것으로 가속이 가장 어려운 정지 상태에서 감응 시간(시동이 완료된 공회전 상태에서 최대 추력 발생까지의 엔진 가속 시간)을 규정한다.	
엔진 운용성	과속 한계	엔진의 기계적 안전성을 보장하기 위하여 지속 시간 5분 이내에 최대 허용 회전수 이상으로 운용가능한 과속 한계를 규정한다.	과속 시험
	과열 한계	엔진의 열적 안전성을 보장하기 위하여 최대 허용 온도 이상으로 운용가능한 과열 온도 한계를 규정한다.	과열 시험
	고온 환경	고온 환경하에서 요구되는 엔진의 운용성을 규정한다.	고온 환경 시험
	저온 환경	저온 환경하에서 요구되는 엔진의 운용성을 규정한다.	저온 환경 시험
	강우 환경	강우 또는 강설시 요구되는 엔진의 운용성을 규정한다.	강우 환경 시험

3. 시험 평가 체계 구성

엔진 시험 평가 체계에 대하여 개발 일정을 고려하여 살펴보면, 그림1과 같이 최초 체계 요구조건에 따라 엔진 시험 일정, 소요 엔진 수량, 성능 시험 항목별 주요 확인 사항(Check Point)을 결정하는 시험 계획서(Test Plan)를 작성하여 이를 근간으로 세부적인 부품 제작 및 조립 일정등을 수립하게 된다. 이에 따라 성능 시험 분야는 성능 시험 방법에 대한 개념 검토후 시험 설비 및 측정기구에 대한 사양을 결정해 나간다. 이 과정에서 성능 시험 절차에 대한 구체적인 검토가 이루어지는데, 이는 시험 계획서를 기초로 항목별 시험 방법, 측정 항목, 시험 결과 분석 방법 등을 포함하는 내용이다.

이와 같이 구체적인 성능 시험 절차를 통한 시험 설비 및 측정 기구가 결정되고 제반 설비 및 장치들이 실제로 구현되면, 기본적인 성능시험 준비가 이루어졌다고 할 수 있는데, 실제 시험에 들어가기 전에 반드시 이들 제반 설비 및 장치에 대한 체계적인 확인이 요구된다. 이를 System Shake-Down이라고 하는데 그 목적은 Test Tool Try-Out과 연료/운행 계통등 각종 설비 및 프로그램의 작동 상태를 확인하여 기본 성능 시험 설비 능력을 검사하기 위함이다.

System Shake-Down이 완료되면 엔진 설계 결과로부터 얻어진 제어 Schedule에 의한 연료/운행 계통, 각종 보기류 작동 확인, 엔진 시동 가능성, 엔진 운용 가능 범위 및 그 특성을 확인할 수 있는 기본 성능 시험이 이루어진다. 이 과정에서 엔진 분해 검사가 요구되는데 이는 문제 발생에 따른 해결 수단 또는 상세 성능 시험 준비를 위해 요구된다.

기본 성능 시험을 통하여 개략적인 엔진 특성을 파악한 후, 상세 성능 시험이 이루어지는데 설계치의 적정성을 입증하여 필요시 부품 형상 또는 제어 Logic 변경등을 수행함으로써 최적의 엔진개발이 될 수 있도록 하고, 시험 결과를 이후 수행될 엔진 시험의 기준으로 사용한다. 이 상세 성능 시험 역시 문제 해결 수단 또는 환경 시험 준비를 위한 엔진 분해 검사를 요구한다.

상세 성능 시험이 완료되면 엔진 수명을 입증하고 비나 눈속에서 엔진 운용 상태를 확인하는 강우 환경 시험(Water Injection Test)등 일련의 환경 시험이 수행된다.

이와같이 전체적인 성능 시험 결과는 인증 시험을 통해 체계 요구조건에 만족 여부가 확인되어야 하며 양산 엔진을 이용한 수락 시험을 통해 개발이 완료되었음을 입증한다.

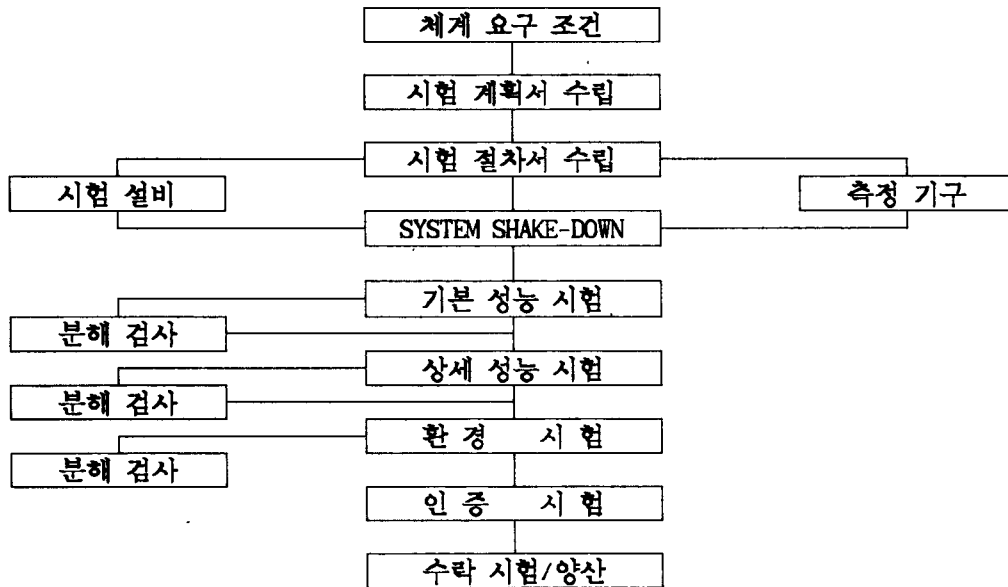


그림1. 제트엔진 성능 시험 평가 체계

4. 시험 평가 방법 및 평가 기준

4.1 시험 목적과 방법

제트엔진 개발시 수행되는 엔진 시험은 Engine Evaluation Test, Preliminary Flight Rating Test, Qualification Test와 양산엔진을 대상으로 수행하는 수락시험으로

크게 나눌 수 있으나(군사규격 기준) 여기서는 엔진 개발 시험 초기에 엔진 설계 결과와 시험 결과의 비교 분석을 위해 수행되는 Engineering Evaluation Test와 Preliminary Flight Rating Test의 시험 항목을 주로 기술하고자 하며 상세 사항은 표2, 표3 및 표4에 나타낸 바와 같다.

표2. 기본 성능 시험

평가 항목	평가 목적/방법	평가 기준
시동 계통 성능 시험	· 시동 계통의 성능 확인을 목적으로 엔진 점화 없이 시동 계통만으로 엔진을 구동시켜 시동 계통 성능을 분석한다.	· 시동 Torque 특성 및 가속 시간 · 연소기 입구 조건 분석 (공기 공급에 의한 방법)
엔진 시동 시험	· 엔진의 시동 성능 확인을 위하여 엔진이 공회전 상태에 이르는 과정을 시험한다. · 엔진 시동 Schedule에 따라 점화 시기가 결정되며 점화 유무, 점화 소요 시간 및 시동중 주변 계통의 기능을 분석한다.	· 점화 소요 시간 · 터어빈 입구 온도 또는 배기 온도 · Staring Bleed System 작동시점 · 엔진 진동 · Pressure Pulsation 특성
공회전 성능 시험	· 엔진 시동 시험을 통하여 얻은 최적의 시동절차에 따라 얻을 수 있는 안정된 공회전 상태에서 성능 Data를 입증하고 평가를 수행한다.	· 공회전 속도 결정 · 압축기 Stall 발생 유무 · 엔진 구성품의 성능 특성 분석 · 연료 계통의 응답 특성 분석

표3. 상세 성능 시험

평가 항목	평가 목적/방법	평가 기준
Bleed Air 성분 분석	· Bleed Air가 사용되는 장비 및 조종실 환경에 악영향을 미치지 않도록 할 목적으로 최대 연속 추력 조건에서 채취된 Bleed Air의 성분 분석을 수행한다.	· Bleed Air의 성분 분석 (CO, CO ₂ , NO, NOX)
온도 분포 검사 시험	· 열전대와 Thermal Paint를 사용하여 주요 고온부 부품의 온도분포를 구하고 이 결과를 설계 결과와 비교 분석한다.	· 부품별 온도 분포 특성 · 열응력에 의한 부품 수명 예측
엔진 성능 확인 시험	· 각 PLA Position별로 시험 결과와 설계 결과를 비교 분석할 목적으로 공회전에서 최대추력까지 일정간격의 Rating에 대한 성능 Data를 확인하고 이를 엔진 성능 한계치의 기준으로 활용한다. · 정특성과 동특성으로 구별하여 성능분석을 수행하며 가변 배기부를 갖는 엔진은 해면과 고도 조건에서 공력특성을 알고 있는 2종의 Fixed Conical Nozzle을 사용하여 시험을 수행한다.	· 엔진 성능 변수 · 윤활유의 공급 압력/온도 · 진동 · 연료/윤활유의 누설 · 윤활유 소모량 · 터빈 입구 온도 또는 배기 온도

표3. 계속

평가 항목	평가 방법/목적	평가 기준
Stall Margin	<ul style="list-style-type: none"> • 공회전 상태에서 최대 회전수까지 엔진 가속시 엔진의 Stall Margin을 측정하고 이로부터 가속 연료 Schedule과 Bleed Band 작동 시점을 최적화한다. • Stall Margin 시험에는 순간적으로 연료 유량을 변화시킬 수 있는 특수한 Rig가 필요하다. 	<ul style="list-style-type: none"> • Stall Margin • Pressure Pulsation • 배기 온도
배기 성분 분석	<ul style="list-style-type: none"> • 최대, 최대 연속, 75% 최대 연속 및 공회전 조건에서 배기 성분을 분석하는 시험으로 약 10분간에 걸쳐 엔진 작동을 안정화시킨 다음 Sample을 채취한다. • 엔진이 배기환경규제조건을 만족하는지 여부를 최종결정하며 성분분석을 통하여 연소효율을 계산한다. (Emission Test Kit 사용) 	<ul style="list-style-type: none"> • 배기 성분분석 (불연소 탄화수소, O₂, CO, CO₂, NOX)
Rotor Tip 간극 시험	<ul style="list-style-type: none"> • 정속 및 가속 운용시 Rotor Tip 간극을 측정하는 시험으로 엔진 성능 및 Stall Margin 평가시 기준 Data로 사용한다. • 각 단에서 3점 또는 4점에서 측정한다. 	<ul style="list-style-type: none"> • 정속 운용시 Tip 간극 • 가속 운용시 Tip 간극 특성
과속 시험	<ul style="list-style-type: none"> • 정속 운용시 최대 허용 회전수의 15% 조건에서 5분동안 엔진을 운용하는 시험으로 엔진의 분해 검사시 허용 이상의 결함이 발생하지 않아야 한다. 	<ul style="list-style-type: none"> • 엔진 부품의 결함 상태 분석
과열 시험	<ul style="list-style-type: none"> • 정속 운용시 최대 허용 온도보다 최소 42℃ 높은 조건에서 수행하는 시험으로 엔진 분해 검사시 허용 이상의 결함이 발생하지 않아야 한다. 	<ul style="list-style-type: none"> • 엔진 부품의 결함 상태 분석
제어 계통 조절 시험	<ul style="list-style-type: none"> • 공회전 상태에서 최대 회전수까지 급속한 가/감속을 통하여 제어 계통의 안정성을 평가함으로써 엔진 운용 범위내에서 제어 계통의 신뢰도를 확보한다. • 엔진 제어 계통의 성능에 영향을 주는 주요 인자들을 단계적으로 조절하여 Stall Margin 및 배기 온도의 가용 범위 내에서 제어 계통의 Transient Stability를 결정한다. 	<ul style="list-style-type: none"> • 최적 제어 Logic 결정

표4. 환경 시험

평가 항목	평가 방법/목적	평가 기준
고도 시험	· 항공기 운용 영역에서의 엔진 성능 및 시동 특성을 분석하는 시험으로써 주요 운용점의 대기 온도, 압력등 환경조건을 조성하여 엔진 시험을 수행한다.	· 엔진 안정성 · 엔진 성능 · 주변 계통 기능
저온 환경 시험	· 주변 온도 -54℃에서 수행하며 주 배어링 온도가 -54℃에 도달한지 10시간후 엔진 시험을 수행하여 엔진 성능을 확인한다.	· 윤활 계통 점검 · 연료 계통 점검 · 엔진 시동/가속 성능 확인
고온 환경 시험	· 주변 온도 71℃에서 수행하며 주 배어링 온도가 71℃에 도달한지 10시간후 엔진 시험을 수행하여 엔진 성능을 확인한다.	· 윤활 계통 점검 · 연료 계통 점검 · 엔진 시동/가속 성능 확인
정하중시험	· 비행중 작용하는 하중 조건을 모사하는 시험으로 가속 조건에 상응하는 하중을 가한후 엔진 성능 변화량을 분석한다.	· 엔진 성능 변화량 확인
강우 환경 시험	· 정속 및 가/감속 운용 조건에서 공기중 물의 함량이 0.5-4%가 되도록 물을 분사 하면서 시험을 수행한다. · 본 시험은 비행중 일어나는 강우 조건을 모사하는 시험으로 엔진 전방에 물 분사 노즐을 장착하여 시험한다.	· Flame Out 발생 유무 · Stall 발생 유무 (Low Water Flow Rate) · 추력 손실 발생 · 물 분사후 엔진 손상 발생 유무

4.2 제트엔진 성능 시험 설비

제트엔진의 성능평가시험에 사용되는 설비는 기본 엔진 성능 시험과 상세 엔진 성능 시험을 위해 사용되는 지상 성능 시험 설비 (그림2)와 고도 시험을 위한 고도 시험 설비

(그림3) 및 특수 환경 시험 설비가 있다.

지상 시험 설비에서는 기본 성능 시험 및 상세 성능 시험의 대부분이 수행되고, 고도 시험 설비에서는 고도 시험 및 환경 시험 일부가 수행된다.

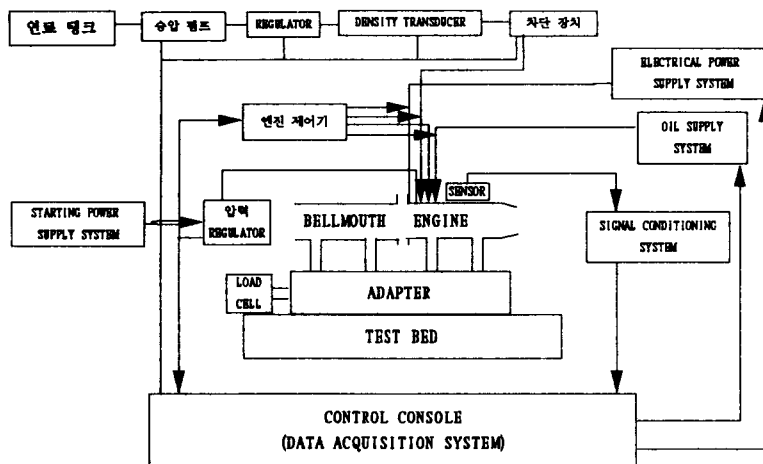


그림 2. 지상 성능 시험 설비 구성도

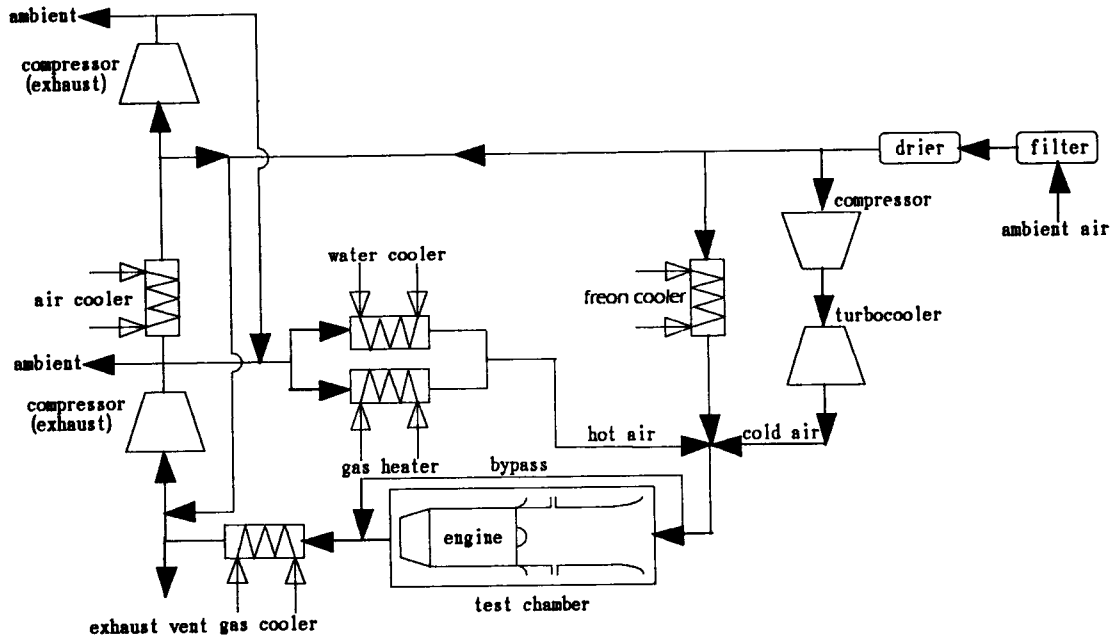


그림 3. 고도 시험 설비 구성도

5. 결론

제트엔진의 개발은 여타 공업제품과 마찬가지로 설계, 시제작, 시험평가의 과정으로 진행된다. 이중 시제작후 시험평가작업은 개발주체가 설계 제작의 기술을 어느정도 보유했느냐와 상관없이 거의 일정한 소요기간과 작업량을 필요로 한다. 이는 항공기용 제트엔진의 경우 그 신뢰성의 보장이 어느 항공기 부품보다 더욱 중요하여, 이를 보증하기 위해 실시하여야 할 시험의 종류 및 각 시험에서 측정 분석되어야 하는 변수들이 전술한 바와 같이 상당한 양에 이르기 때문이다. 따라서 제트엔진의 총개발기간 중 시험평가 기간이 차지하는 비율은 거의 30% 이상을 상회하며, 이에 따라 총소요비용에의 비율도 엄청난 규모이다.

따라서 제트엔진의 개발을 착수하였을 때는 주어진 체계규격과 엔진의 설계사양 및 시험평가를 서로 일관성있고 경제적인 형태로 진행될 수 있도록 각각을 서로 연계하고, 이에 근거한 시험평가계획을 구상하는 것이 매우 중요하다. 이는 제트엔진 개발의 성공 및 총개발소요비용의 최소화를 보장할 수 있는 주요한 시발점이 될 수 있다. 그러므로,

제트엔진의 개발을 착수하기 이전에 제트엔진의 개발시험은 어떠한 절차로 구성되며, 그 세부시험은 어떠한 기술과 장비를 요구하는지 등을 사전 조사해 놓는 것이 매우 중요하다. 또한 이에 대한 비용도 아울러 검토하여 엔진 설계규격의 결정단계에서 차후 개발 시험소요를 연계해 초기설계를 진행하는 것이 바람직하다. 이를 위해 본 논문에서 서술한 시험체계가 그의 기반으로 준용될 수 있으며, 개발하고자 하는 엔진사양에 따라 발전적 확대 혹은 축소조정 등을 거쳐 실제 개발에 적용해 볼 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. JIS B 8041, 가스-빈 실험방법,
2. ISO 2314, Acceptance Test, 1989
3. MIL-E-5007D, 1982
4. John W. Sawyer, Sawyer's Gas Turbine Engineering Handbook, Turbomachinery International Publications, 1985
5. AEDC Test Facilities handbook, Arnold Engineering Development Center, May 1992
6. AEDC-TR-77-42, Arnold Engineering Development Center January 1978