

터보팬 및 터보샤프트 엔진 시운전실 Correlation 시험 절차 비교와 분석에 관한 연구

권주현^{1,†}, 고강명¹¹한화에어로스페이스

A Study on Comparison and Analysis of Correlation Test Procedure for a Turbofan and Turboshaft Engine Test Cell

Juhyeon Gwon^{1,†}, Kangmyung Ko¹¹Hanwha Aerospace

Abstract

Engine test cell should provide controlled test environment to properly verify requirements of engine performance and operational characteristics. However, since test cells cannot be perfectly identical to each other, new test cell requires processes to verify reliability of test results and correct differences through correlation testing using a baseline test cell. This paper studies about what should be considered when correlation testing is performed based on commonalities and differences between turbofan and turboshaft engine. It provides examples of correlation test procedure. In the future, it is expected that this study will help set up a standard that can certify test facility according to engine type.

초 록

엔진 시운전실은 엔진의 성능 및 운용 특성 요구도를 적절하게 검증할 수 있도록 통제된 시험 환경을 제공해야 한다. 하지만 시운전 설비마다 구조 및 특성이 완전히 같을 수는 없기 때문에, 신규 시운전실은 기존 시운전실과의 Correlation 시험을 통해 시험 결과의 신뢰성을 검증하고 차이점을 보정하는 과정이 필요하다. 본 논문에서는 터보팬과 터보샤프트 엔진의 공통점과 차이점을 바탕으로 Correlation 시험을 수행할 때 고려사항들을 연구하였으며, 경험에 따른 Correlation 시험 절차의 예시를 제시하였다. 향후 본 연구가 엔진 종류에 따른 시험 설비의 인증 표준을 설정하는 것에 도움을 줄 것으로 기대한다.

Key Words : Turbofan Engine(터보팬엔진), Turboshaft Engine(터보샤프트엔진), Engine Test Cell(지상시운전실), Correlation(성능 보정)

1. 서 론

엔진 생산업체는 생산된 엔진을 납품하기 전에 엔진의 성능 및 운용 특성이 요구도를 만족하는지 확인해야 한다. 일반적으로 승인된 수락시험계획서에 따라 수락시험을 수행하고, 고객사는 납품 승인 전 해당 결과를 정리한 수락시험보고서를 통해 요구도 만족 여부를 판단한다. 수락시험은 각 엔진 생산업체의 시운전

실 설비에서 수행되며, 생산된 엔진이 납품에 적합한 성능을 보유하고 있는지 평가하는 것이 엔진 시운전실의 주된 기능이다.

시운전실은 기본적으로 엔진의 압축기 서지가 일어나지 않는 엔진 운용이 가능하도록 안정적인 시험 환경을 제공해야 한다. 일반적으로 시험 설비의 환경이나 장비의 형상은 시험을 진행하는 동안 획득하는 데이터에 영향을 주며, 이러한 영향들이 동일 엔진을 서로 다른 시운전실에서 시험했을 때 엔진 성능이 다른 원인이다. 시운전실 Correlation은 이러한 차이점을 수치화하고 가능한 최소화하여, 적절한 시운전실 보정인

Received: Nov. 17, 2023 Revised: Feb. 08, 2024 Accepted: Feb. 13, 2024

† Corresponding Author

Tel: +82-70-7147-4398, E-mail: juhyeon.gwon@hanwha.com

© The Society for Aerospace System Engineering

자를 수립하는 과정이다[1].

시운전실의 구성은 가용 동력의 형태 별로 측정하고자 하는 주요 성능 인자에 따라 다르다. 항공용 가스 터빈 엔진은 연소기를 통해 가열된 고온/고압의 가스를 팽창시켜 두 가지 종류의 동력, 즉 회전 기계 에너지나 가스 추진에너지를 얻을 수 있는데, 각 에너지원의 적용 방법에 따라 터보제트, 터보팬, 터보프롭, 터보샤프트 엔진으로 나누어진다. 여기서 회전 기계 에너지는 터빈이 생성하는 토크가 중요한 성능 인자이며, 반면에 가스 추진에너지는 배기가스의 작용반작용에 의한 추력이 중요한 성능 인자가 된다. 따라서 시운전실의 Correlation에서 고려해야하는 항목도 각 엔진 형태에 따라 차이점이 있다.

시운전실 Correlation은 엔진 제작사의 시운전실을 신규로 설치하거나 기존 시설을 개조하는 경우 필요하며, 경우에 따라 항공사나 군 정비창에 엔진 유지보수를 위해 필요한 시설 설치를 위해서도 필요하다. 각각의 엔진 제작사는 일반적으로 이러한 인증된 시험 설비를 설치하기 위한 목적으로 시운전실 Correlation에 관련된 회사만의 업무표준을 보유하고 있다[1]. 하지만 국내에서는 엔진 구매 후 유지보수나 면허 생산을 위해 해외 엔진 제작사에서 Correlation을 수행하는 것 외에, 자체적인 Correlation 시험 절차 수립에 대한 논의가 부족했던 것이 사실이다. 향후 자체적으로 개발한 가스터빈엔진을 양산하고 해외로 수출하는 것을 고려하였을 때, 시운전실 Correlation 시험을 성능 인자의 형태에 따라 어떻게 수행 할 것인지에 대한 연구가 필요할 것이다.

본 논문에서는 신규 시운전실을 터보팬과 터보샤프트 엔진에 대해 각각 Correlation 수행할 때 고려사항들의 공통점과 차이점을 알아보고, 수년간의 라이선스 생산 경험을 바탕으로 가용 동력의 형태에 따른 Correlation 시험 절차 수립 방안을 제시하고자 한다. 기존 Correlation 지침에서는 상세히 설명되지 않은 데이터 처리 방식 및 보정인자 계산 방법 등의 테크닉을 기술하여 실제 시험 준비에 적용할 수 있도록 하였다. 논문에 제시된 Figure 및 Table은 현재 양산 중인 17,000lb 급 터보팬 엔진과 1,800hp 급 터보샤프트 엔진의 Correlation 시험으로부터 획득하였으며, 사내 기술 보안 관계로 본문에 제시되는 시험 데이터의 상세 수치는 제거되어 제공되었다.

2. 본 론

2.1 시운전실의 형태

공기의 흡입, 압축, 팽창, 배기로 구성된 가스터빈 엔진 기본 사이클의 특성상, 엔진은 운용되는 동안 지

속적으로 엔진 내부와 외부에 공기의 유동을 생성한다. 이러한 공기의 유동은 엔진을 둘러싼 공간에서 와류, 난류 그리고 균일하지 않은 온도와 압력과 같은 요소를 통해 엔진의 성능과 시험의 반복성에 영향을 준다. 따라서 시운전실은 안정적인 시험 조건을 제공하고 앞에서 언급된 요소들의 변동을 최소화하도록 설계되어야 한다[2].

시운전실은 원하는 성능과 설치 제약사항 등을 고려하여 여러가지 형상으로 시공되는데, 국내에서는 비교적 간단한 설계에 장소의 제약도 최소화되는 ‘U’ 형을 많이 채택하고 있다.

Figure 1과 같은 ‘U’ 형 시운전실은 흡입 시스템, 엔진 시험부, 배기 시스템으로 구성되어 있다. 흡입 시스템은 바람과 먼지와 같은 환경적인 요인과 소음을 최소화 시키고 흡입되는 공기를 균일화 하기 위해 Silencer, Flow Straightener, Screen 등으로 구성되어 있다. 엔진 시험부는 엔진이 실제 장착되는 곳으로 흡입된 공기의 속도가 증가되지 않도록 충분한 단면적을 가지고 있어야 하며, 공기 흐름을 방해하여 시험부 내의 비균일한 압력 분포를 생성하지 않도록 유로에 방해물을 최소화하도록 설계 해야한다. 배기 시스템은 가스터빈 엔진의 배기 가스를 외부로 배출시키는 역할을 하며, 고온의 가스가 엔진 시험부로 재흡입 되는 것을 방지하고 시운전실을 손상시키는 것을 막도록 설계 되어야한다[3].

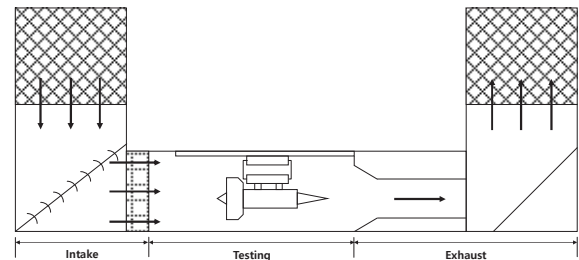


Fig. 1 Diagram of ‘U’ Type Test Cell

2.2 시험 설비 구성

엔진에 장착된 시험용 장비들을 포함한 모든 시험 설비들은 시험 동안 획득한 데이터에 영향을 준다. 이는 시험 설비의 구성이 엔진 성능에 직접적인 영향을 미칠 수 있다는 것을 보여준다. 따라서 기존에 사용되고 있는 기존 시운전실과 Correlation 대상이 되는 시운전실 사이의 차이점을 최소화할 수 있도록 같은 구성의 시험 설비를 준비하는 것이 추천된다.

엔진 시험 설비는 설비에 종속되어 엔진과의 기계적, 전기적 인터페이스를 구성하는 시운전실 시스템과 엔진에 종속되어 시험 환경 구성을 위한 장비나 엔진 측

정 센서로 이루어진 Dress Kit로 구분할 수 있다. 엔진 형태별로 시험 설비 구성은 공통점이 많지만 몇몇 부분에서 차이점도 존재한다.

시운전실 시스템의 구성인 Test Stand, 엔진 시동기, 시운전실 유량계, 배기 시스템, Data Acquisition과 Dress Kit의 구성인 Bellmouth, Inlet Screen, Instrumentation은 터보팬과 터보샤프트 엔진에서 공통적으로 필요한 설비이다. 반면 측정하고자 하는 성능 인자가 회전 기계 에너지인지 가스 추진에너지인지에 따라 터보팬 엔진은 Thrust Frame이, 터보샤프트 엔진은 다이나모미터와 토크미터가 각각 필요하다.

2.3 엔진 측정 및 데이터 정리

시운전실과 엔진에는 엔진의 안전한 운용과 적절한 성능 계산을 위해 여러가지 측정 장비 및 센서가 사용된다. 각 센서의 설계 및 교정은 설비 제작사나 전문기관에서 수행되며, Correlation 보고서에 교정 곡선 등의 교정 결과를 명시해야 한다.

Correlation 분석을 위해 수집된 데이터는 열역학적 사이클 기반의 성능 계산 프로그램의 입력 값으로 사용된다. 따라서 성능 계산에 필요한 온도, 압력, 유량 등의 측정 위치를 정의하고 측정된 데이터를 입력 형태로 처리하는 과정이 필요하다.

Table 1는 Correlation 시험에서 데이터 획득이 필요한 항목을 보여준다. 브레이튼 사이클을 따르는 가스터빈 엔진에서 필요한 데이터는 엔진의 종류에 따른 차이보다는 구성품의 유무에 따른 차이가 있을 뿐이다. 예를 들어 터보샤프트 엔진은 FAN 구성품이 없기 때문에 FAN 출구의 센서는 존재하지 않는다. 또한 경우에 따라서는 하나의 센서가 측정 지점을 대표할 수 없는 경우에는 복수의 센서를 설치하기도 한다.

Table 1 Data Requirement for Turbofan and Turboshaft

Item	Turbo Fan	Turbo Shaft	Multi Sensor
Inlet TEMP	○	○	○
Inlet total pressure	○	○	○
Inlet static pressure	○	○	○
Fan exit Pt rakes	○		○
Fan exit Tt rakes	○		○
COMP discharge pressure	○	○	○
COMP discharge TEMP	○	○	○
TURB discharge total pressure	○	○	○
TURB discharge TEMP	○	○	○

Lube pressures & TEMP	○	○	
Accelerometers	○	○	
Total facility fuel flow	○	○	
Engine fuel flows	○	○	
AB static pressures	○	○	○

시험을 위해 설치된 센서는 종종 여러가지 이유로 해당 위치의 물리량을 올바르게 측정하지 못하는 경우가 많다. 압력 센서의 경우 압력 라인의 누수나 수증기에 영향을 받으며, 온도의 경우 열전대의 접촉과 같은 설치 실수로 잘못된 값이 측정되기도 한다. 이러한 잘못된 측정 값을 그대로 사용하면 성능 계산 프로그램에서 정확한 계산이 불가능하기 때문에 수집된 데이터를 거르는 과정이 필요하다. 또한 같은 위치에서 복수의 센서를 사용하는 경우 각 센서의 값을 평균화하는 과정도 필요하다. 따라서 데이터 정리를 통해 잘못된 측정값을 제거하고 평균화하여 하나의 입력값을 만드는 데이터 정리 과정이 필요하다.

데이터 정리는 여러가지 방식이 있지만 측정 데이터의 통계학적 특징을 고려하여 삼분위 평균값을 사용하는 방식이 추천된다. 삼분위 평균값을 계산하고 불확실성 수준을 고려하여 유효범위 내 존재여부에 따라 해당 센서의 건전성을 확인한다. Fig. 2는 삼분위 평균값을 이용한 데이터 정리의 예시를 보여준다. 예시에서는 삼분위 위치 Sensor 3과 Sensor 4의 평균값 50.5보다 +10% 범위 밖에 존재하는 Sensor 1과 Sensor 6가 제거됨을 보여준다. 필터링 범위는 각 센서 자체 오차와 물리적 위치 등을 고려하여 결정하며, Uncertainty Analysis를 통해 측정값의 영향성을 확인하고 센서 오류 허용 요구도를 설정하여 데이터가 유효함을 판단한다.

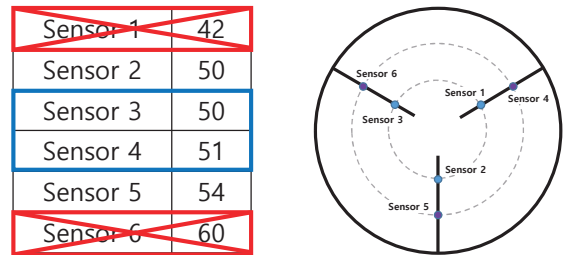


Fig. 2 Example of Sensor Average Method

추가적으로 가스터빈 유로 속에 방사형으로 센서를 설치할 경우 원주 방향과 반경 방향으로도 데이터 정리를 수행하는 것이 합리적이다. 이 경우 원주 방향으로 삼분위 평균값을 사용하는 것이 가능하지만, 반경 방향의 데이터는 경계층의 영향 때문에 평균값에

대한 편차의 의미가 없다. 따라서 유동 경계층에 따른 반경 방향의 측정값 분포 형태를 분석하여 센서의 유효범위를 선정하는 것이 바람직하다.

2.4 Correlation 고려사항

시운전실을 Correlation 하는 과정에서 엔진의 동력(터보팬의 경우 추력, 터보샤프트의 경우 동력 터빈의 토크 및 속도), 연료 유량, 터빈 회전속도, 공기 유량, 온도 및 압력, 흡입구 조건, 시운전실 환경조건, 진동 등 다양한 엔진 성능 인자들이 검증되어야 한다[1].

Correlation은 서로 다른 시운전실에서 측정된 성능 인자를 동일 조건에서 비교해야 하기 때문에, 각 인자들을 기준 조건으로 보정하는 것이 필요하다. 이러한 기준 조건들은 대기 조건, 연료 성질, 공기 역학적 조건과 같이 세계의 그룹으로 나눌 수 있다.

대기 조건과 연료 성질은 시험 환경을 통제하거나 무차원 인자를 사용하여 비교적 쉽게 보정할 수 있지만, 공기 역학적 조건은 시운전실 구조와 관련이 있기 때문에 별도 시험을 통해 영향성을 확인해야 한다. 단, 일반적으로 다이내모미터를 이용해 추마력만을 측정하는 터보샤프트 엔진 시운전실은 램 압력비나 시운전실 Bypass 유량의 상호작용이 성능 인자에 영향을 거의 미치지 않는다[4].

터보팬 엔진 시운전실에서는 이러한 공기 역학적 조건이 추력을 측정하는데 상당한 영향을 미치는데, 특히 개방되어 있는 Outdoor 설비보다 Indoor 설비에서 두드러지게 나타난다. 가스터빈엔진이 Indoor 설비에서 운행될 때 엔진은 전방으로부터 공기를 흡입하여 시운전실 외부로 공기를 밀어내게 된다. 이 때 시운전실에 들어오는 공기의 일부분만 엔진 흡입구를 통해 지나가고 나머지 대부분의 공기 흐름은 사방이 폐쇄되어 있는 시운전실을 따라 엔진 주변으로 흘러가게 된다. 이러한 현상은 엔진이 시운전실 내 공기 흐름에 상대적인 속도를 가지고 마치 실내에서 비행하고 있는 효과를 만들어 낸다.

일반적으로 시운전실에서 수행하는 수락 시험은 지상 정지 상태의 엔진 성능을 기준으로 성능 요구도를 만족하는지 확인하게 된다. 하지만 위와 같은 현상 때문에 시운전실에서는 불가피하게 총추력에 흡입구 모멘텀을 포함한 순추력이 측정된다. 여기에 Dress Kit을 포함한 엔진 외부의 형상에 따라 추력과 반대 방향으로 작용하는 공기에 의한 마찰항력까지 고려해야 하므로 추력 측정 장치에 측정되는 값은 엔진의 실제 성능과는 차이가 있다.

결국, 터보팬 엔진에서 총추력을 계산하기 위해서는 Correlation 시험을 통해 로드셀에서 측정된 값을 보정할 보정인자를 계산해야 한다.

2.5 Correlation 시험 절차

터보팬과 터보샤프트 엔진에서 공통적으로 제안되는 세가지 Correlation 시험 방법으로는 'Back-to-Back', 'Cross-Cell' 그리고 'Correlation Engine' 방법이 있다 [1,4]. 일반적으로 서로 다른 시운전실 간에 Correlation 시험만을 위해 성능이 정의된 엔진을 사용하는 'Correlation Engine' 방법을 사용하는 것이 추천되는 가장 일반적인 Correlation 방식이다[1,4].

터보샤프트 엔진과는 다르게 터보팬 엔진은 공기 유동의 영향성을 고려하기 위해 엔진 전후방의 공기유량 모멘텀을 계산하는 과정이 추가된다. 하지만 경험적으로 분석적인 방법으로 계산된 값과 실제 3차원 공간에서 수행한 시험 데이터 사이에는 차이가 존재하기 때문에, 직접적으로 추력에 대한 Correlation 보정인자를 계산할 수 있는 '원추노즐 추력 보정' 방식이 제시된다. 이 방식은 기존에 장착된 노즐 대신에 이미 실험을 통해 알려진 노즐 총추력 계수를 가진 원추노즐을 장착하여 추가적인 엔진 시험을 수행한다. 노즐 총추력 계수는 해당 노즐이 얼마나 많은 추력을 발생시키는지 보여주는 계수이며, Eq. 1과 같이 총추력과 이론적인 이상 추력의 비로 나타낸다. 여기서 이론적인 이상 추력은 노즐이 등엔트로피적으로 대기압으로 팽창하여 모든 에너지가 손실없이 노즐 출구 속도를 증가 시킬 때의 추력값이다.

$$CFG = FG / IFG \quad (1)$$

CFG = 총추력 계수

FG = 총추력

IFG = 이론적인 이상 추력

원추노즐의 노즐 총추력 계수는 실험이나 유체 해석을 통해 확인할 수 있고 그 값은 단지 노즐의 출구의 각도와 노즐 출구 압력과 대기압의 비율에 의해 결정된다[5].

'Correlation Engine' 방법은 Fig. 3과 같이 기준 시운전실에서 수행하는 엔진 시험과 Correlation 대상이 되는 시운전실에서 수행하는 엔진 시험 두가지로 구성된다. 우선 안정적인 성능을 보여주는 엔진을 선정하여 기준 시운전실에서 성능을 측정하고, 시험에 사용된 엔진과 주변 장비들을 Correlation 대상이 되는 시운전실에 보내 같은 시험을 반복한다.

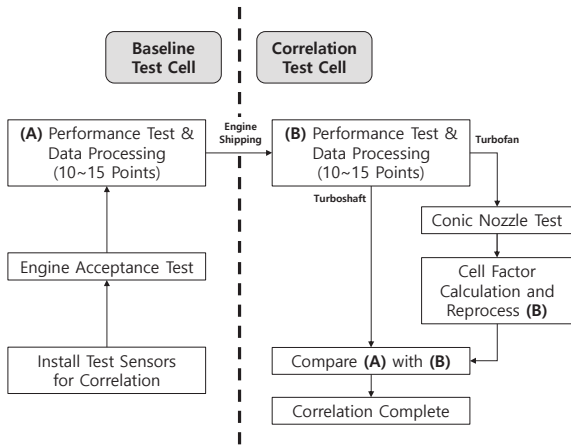


Fig. 3 Correlation Engine Process Map

각 시운전실에서 초기 시험 부분은 엔진 설치 및 센서류 부착과 확인, 그리고 기능 점검 시험을 포함한 일반적인 수락시험 절차를 따른다. 이후 전체 엔진의 추력 범위에서 충분한 성능 데이터를 획득하기 위해 10~15개 정도 성능 측정 지점에서 엔진을 운용한다. 특히 각 측정지점에서는 엔진이 해당 지점에서 열적평형 상태에 도달할 수 있도록 안정화 시간을 지정하여 정상상태의 데이터를 획득할 수 있도록 한다. Table 2와 Table 3는 각각 터보팬 엔진과 터보샤프트 엔진의 성능 측정 지점의 예시를 보여준다. 터보팬 엔진은 노즐에서 발생하는 추력이 주요 성능 인자이므로 파워 레버 각도를 기준으로 성능 측정 지점을 선정하고, 터보 샤프트 엔진은 파워 터빈의 출력이 중요 성능 인자이므로 회전속도와 토크를 기준으로 성능 측정 지점을 선정한다.

Table 2 Performance Test Points for Turbofan

Step	Power Lever Angle (Deg)	Power Rating	Stabilization (min)
1	20	IDLE	5
2	75	51% IRP	5
3	105	IRP	5
4	105	IRP	5
5	94	97% IRP	5
6	93	94% IRP	5
7	20	IDLE	5
8	Shutdown		

Table 3 Performance Test Points for Turboshaft

Step	Power Setting (Ft-lb)	Power Turbine Rotor Speed (RPM)	Stabilization (min)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8	Shutdown		

1	Idle	22,000	5
2	225	22,000	5
3	250	22,000	5
4	275	22,000	5
5	300	22,000	5
6	325	22,000	5
7	Idle	22,000	5
8	Shutdown		

2.6 Correlation 분석 방법

두개의 시운전실에서 엔진 시험이 완료되고 획득한 데이터에 특별한 문제가 없다면 데이터 분석을 수행한다. 데이터 분석은 Table 4와 같이 데이터 검증, 성능 변화 계산 그리고 Correlation 보정인자 계산과 같은 3단계로 이루어져 있다[1].

Table 4 Correlation Data Analysis Steps

Step	Turbo Fan	Turbo Shaft
Data Validation	. Flow Path Pressure/Temperature . Compressor Pressure Ratio . Fuel Flowmeter . Vibration	
Performance Shift Determination	. Inlet Airflow . Thrust/Shaft Power . Specific Fuel Consumption	
Correlation Factor Determination	Cell Factor Calculation accounting for: . Pressure Drag . Momentum Drag . Friction Drag	If Required

데이터 검증은 Fig. 4와 같이 기준시운전실과 Correlation 시운전실 사이의 측정 값을 비교할 수 있다. 두개의 시운전실 데이터의 특성을 쉽게 파악하기 위해 흡입구의 온도와 압력의 영향성을 최소화할 수 있는 보정 매개변수를 이용하여 비교한다. 만약 두 데이터 값의 차이가 계측 시스템의 불확실성 수준을 벗어나는 경우, 측정 시스템에 대한 점검 및 문제 해결 절차가 수행되어야 하며 경우에 따라서는 재시험을 수행한다.

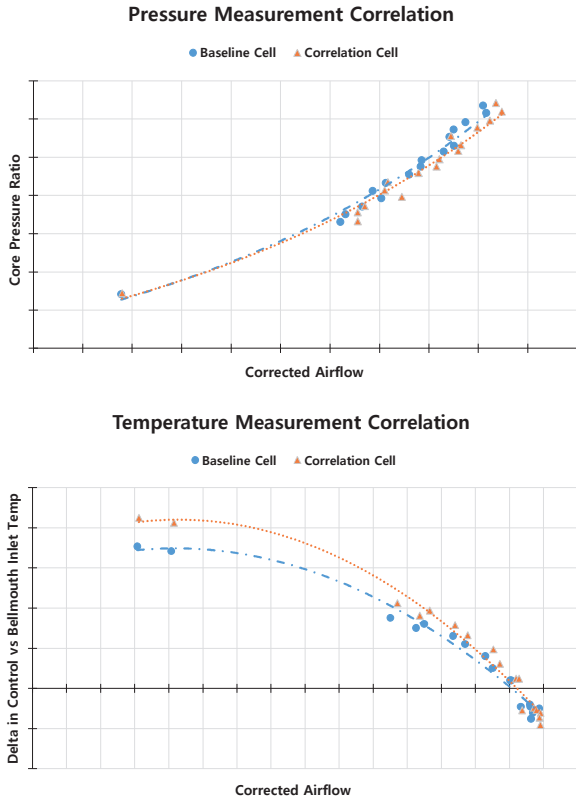


Fig. 4 Example of Sensor Measurement Correlation

데이터에 이상이 없다면 성능 계산 및 비교를 수행한다. 터보샤프트 엔진의 경우 측정 장치의 구성이 기준 시운전실과 큰 차이가 없다면 Table 5과 같이 축마력과 비연료소모율, 터빈 출구 온도와 같은 성능 인자를 이용하여 일대일 비교가 가능하다.

Table 5 Example of Turbohaft Engine Correlation

		Baseline vs correlation delta	REQ
SHP* [shp]	MAX	-0.1%	±1%
	IRP***	-0.4%	±1%
	MC****	-0.7%	±1%
SFC** [lbm/hr/ shp]	MAX	-0.4%	±0.8%
	IRP***	-0.2%	±0.8%
	MC****	+0.1%	±0.8%

*Shaft Horsepower, **Specific Fuel Consumption, ***Intermediate Rated Power, ****Max Continuous Power

반면에 터보팬 엔진의 경우 주요 성능 인자인 추력에 대한 Correlation 인자가 아직 결정되지 않았기 때문에 측정값을 이용하여 각 구성품의 성능을 계산하고 비교함으로써 시운전실 환경 변화에 따른 성능 변화를

확인할 수 있다.

앞서 수행한 분석 절차가 완료되어 획득한 데이터에 문제가 없고 각 시험 전후로 성능 열화가 발생하지 않았다는 것이 확인되면, 마지막으로 시운전실 영향성을 보상하기 위한 Correlation 보정인자 계산을 수행한다.

터보샤프트 엔진의 경우 앞서 설명한 것과 같이 시운전실 구성이 성능에 미치는 영향이 적기 때문에 필요하다고 판단될 경우에만 반영한다[4].

반면 터보팬 엔진은 시운전실 내 발생하는 공기역학적 힘에 영향을 받기 때문에, 총추력은 Eq. 2과 같이 측정된 추력에 Correlation 보정인자를 더한 값으로 나타낼 수 있다. Correlation 보정인자는 공기역학적 힘을 나타내며 Eq. 3과 같이 두가지 요소, 즉 압력에 관련된 항과 그 외 공기 마찰 저항을 포함한 시운전실 유동의 전체적인 영향을 포괄하는 항으로 구분될 수 있다. 압력에 관련된 항 F1은 압력차와 엔진 및 시운전실 면적으로 계산할 수 있지만, F2에 해당하는 실제 시운전실 유동의 영향은 분석적인 방법으로 계산하기 어려운 문제가 있다.

$$FG = FS + CF \quad (2)$$

$$CF = F1 + F2 \quad (3)$$

$$CFG_{predicted} = FG / IFG \quad (4)$$

$$CFG_{tested} = (FS + F1) / IFG \quad (5)$$

FG = 총추력

FS = 측정추력

CF = 보정인자

F1 = 알려진 면적과 압력을 이용해 계산 가능한 저항

F2 = 그외 공력 저항

CFG_{predicted} = 예측된 노즐 총추력 계수

CFG_{tested} = 측정 노즐 총추력 계수

IFG = 이론적인 이상 추력

여기서 앞서 언급된 ‘원추노즐 추력 보정’ 방식을 사용할 수 있다. 원추노즐을 장착하여 수행한 시험의 데이터를 이용해서 Eq. 5와 같이 측정 노즐 총추력 계수 CFG_{tested}를 계산하고, 출구 각도에 따라 예측되는 노즐 총추력 계수 CFG_{predicted}와 비교한다. Eq. 4의 FG는 FS, F1, F2의 합이기 때문에 두 CFG의 차이는 F2에 의해 발생한 것이며, 이 차이를 Eq. 3의 F2에 반영한다. Fig. 5와 같이 CFG는 노즐 압력비에 따라 변하므로, 추력 설정에 따라 Curve Fit 하여 계산에 반영한다.

최종적으로 Eq. 2의 CF에 해당하는 Correlation 보정인자를 계산하여 측정추력에 더하면 시운전실 영향성을 고려한 엔진의 총추력을 계산할 수 있다.

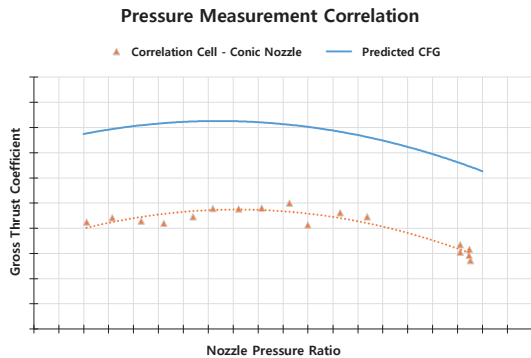


Fig. 5 Example of Gross Thrust Coefficient Correction

3. 결 론

본 논문에서는 신규 시운전실을 기준 시운전실과 Correlation할 때의 시험 절차와 고려사항에 대해 터보팬과 터보샤프트 엔진 각각의 공통점과 차이점을 알아보고 적용 가능한 Correlation 시험 절차를 제시하였다.

터보팬 엔진과 터보샤프트 엔진은 모두 기본적인 메커니즘이 브레이튼 사이클을 따르는 열기관이므로, 측정 장비나 데이터 획득 등의 많은 부분에서 공통적으로 고려해야 하는 사항들이 많았다. 반면에 주요 성능 인자가 다르기 때문에 시운전실의 구성과 Correlation 보정인자를 계산하는 방식에서 차이점을 보여주었다. 특히 터보팬 엔진은 시운전실 내의 공기 유동이 성능 인자인 추력에 직접적으로 영향을 주므로 단순히 1:1 비교가 아닌 원추노즐을 사용하여 공기역학적 저항을 계산하고 반영하는 방법에 대해서도 언급하였다.

향후 항공 엔진 수요가 증가하고 설계가 다양해짐에 따라 엔진의 생산, 유지보수, 더 나아가 수출을 위해 신규 시운전실을 설치하는 경우가 많아질 것으로 예상된다. 이런 경우에 품질의 신뢰성을 유지하기 위해 국내에서도 엔진 종류에 따라 시험 설비를 인증할 수 있는 표준을 설정하는 것이 필요할 것으로 보인다.

References

- [1] Federal Aviation Administration, "Turbofan and Turbojet Gas Turbine Engine Test Cell Correlation", Aerospace Recommended Practice ARP741D, 2023.
- [2] Federal Aviation Administration, "Correlation, Operation, Design, And Modification of Turbofan/Jet Engine Test Cells", FAA Advisory Circular AC 43-207, 2002.
- [3] G. B. Ramos, "Study of a Test Cell for Commercial Jet

Engines" Técnico Lisboa, The Master of Science Degree in Mechanical Engineering, pp. 23, 2015.

- [4] Federal Aviation Administration, "Turboshaft/Turboprop Gas Turbine Engine Test Cell Correlation", Aerospace Recommended Practice ARP4755C, 2016.
- [5] Hossein Mahdavy-Moghaddam and Mohamed Jahrom, "Investigation of effects of convergence and divergence half-angles on the performance of a nozzle for different operating conditions" *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, pp. 10-11, 2018.