15만 파운드급 테스트 셀을 이용한 엔진성능 시험기술

김우철*† · 김 철* · 김상백*

Aircraft Engine Performance Test Technologies by 150K lbf Thrust Test Cell

Woocheol Kim*† · Chul Kim* · Sangbaek Kim*

ABSTRACT

Major design targets such as test cell type, cell flow, cell bypass ratio, approach velocity, cell depression, front cell distortion, noise level and vibration level to construct a new 150,000 lbf thrust aircraft engine test facility were established. Based on the final aerodynamic and acoustic performance tests conducted at the newly constructed test facility, it was found that the new test facility is judged to be excellent and meets design targets.

초 록

항공기 엔진 지상 성능시험을 위한 15만 파운드 급 Test 설비를 구축하기 위해 Test Cell Type, Cell Flow, Cell Bypass Ratio, Approach Velocity, Cell Depression, Front Cell Distortion, Noise 및 Vibration 등의 주요 설계 목표를 설정 하였고, 설비 완공 후 최종 성능검사를 통해 목표 값을 충족하는 성능 데이터를 획득할 수 있었다.

Key Words: Engine Test Cell(엔진 테스트셀), Cell Flow(셀 유량), Cell Bypass Ratio(셀 바이패스비), Approach Velocity(접근 유속), Cell Depression(셀 압력강하), Front Cell Distortion Index(셀 전방 유속 왜곡 지표), Noise Level(소음 레벨), Vibration Level(진동 레벨)

1. 서 론

항공기 엔진 제작사 (OEM, Original Equipment Manufacturer) 에서는 엔진에 대해 Overhaul(대수리) 또는 기타 특정한 정비행위를 수행했을 경우, 항공기에서 운용하기 전 제작사에서 제공한 매뉴얼에 따라 엔진을 테스트하여 엔진 성능과 특성을 분석하도록 하고 있다.

엔진 테스트 방법으로는 크게 Outdoor Test와 Indoor Test가 있으며, Outdoor Test의 경우 항공기 운항조건과 유사하고 각종 한계시험에 유리하여 엔진 개발단계에서 주로 사용되고 있다. 또 다른 Outdoor Test의 일종으로 On-wing Test가 있으며, 항공기에 엔진이 장착된 상태에서 특정 정비행위 또는 검사행위가 이루어졌을

* 대한항공
† 교신저자, E-mail: wcheolkim@koreanair.com

경우 최종점검 사항으로서 수행된다. 마지막으로 Indoor Test는 엔진이 장탈 되어 수리 또는 검사 등의 정비행위 후 항공기에 재장착되기 전 엔진의 사용 가능 여부(Serviceability)를 최종적으로 확인하는 용도로 사용된다. Indoor Test는 Outdoor Test에 비해 기온이나 날씨 등 환경의 영향이 적어 안정적인 결과를 얻을 수 있고 주요 테스트 장비의 유지보수가 용이하여 대부분의 엔진 전문 정비 업체(MRO)에서 채택하고 있다.

대한항공은 자체 엔진 수리 능력을 보유한 세계적으로 몇 안되는 Airline 중의 하나이며, 국내에서는 유일하게 상용 항공기 엔진 Test 시설을 보유하고 있다. 부천에 위치한 대한항공의 1호 Engine Test Cell (ETC)은 지난 1984년도에 준공되어 현재까지도 운용되고 있다. 1호 ETC가 설계될 당시에는 엔진의 Fan Diameter가 크지 않았고 따라서 주요 디자인 Factor는 엔진 추력(Thrust)이었다. 하지만 약 30여년의 시간 동안 Fan Diameter가 급격이 커진 High Bypass Ratio 엔진들이 개발되어 엔진의 Airflow가 증가하였고 이에 따라 ETC 설계에 있어서 주요 고려 요소는 ETC가 수용할 수 있는 Airflow의 양으로 변화하게 되었다. 따라서 기존에 운용되고 있던 1호 ETC는 신형 엔진의 Airflow를 수용할 수 없어 신형 엔진 Test가 불가하였고, 이에 따라 신규 ETC의 필요성이 대두되었다.

본 논문에서는 지난 2016년 6월에 완공된 대한항공의 2호 ETC (인천 영종도 위치)에 적용된 주요 기술 및 최종 성능 Test 결과를 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 ETC 주요 설계 기준 및 예상 수치

2.1.1. ETC Type

앞장에서 소개한 엔진 Test 방법 중에서 MRO 업체에서 일반적으로 선택하고 있는 Indoor Test의 방식을 선택하였다. Indoor Test 수행할 수 있는 Facility의 종류에는 크게 U-type, L-Type, Folded Inlet Type의 3가지가 있으며 [1] 신규 ETC의 경우 Fig. 1과 같은 U-type이 적용되었다.

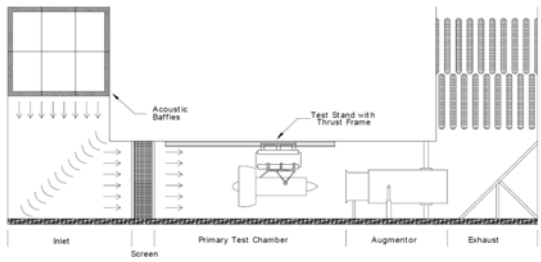

Fig. 1 U-Type Test Cell

U-type은 Airflow가 수직의 Inlet Stack을 통해 유입되어 Turning Vane을 거쳐 엔진에 도달하고 다시 수직의 Exhaust Stack을 통해 배출되는 형태로서, 측풍 (Cross-wind)의 영향을 적게 받아 균질한 Airflow에 유리하며 더불어 ETC 유입 또는 배출되는 Airflow로 인해 발생되는 소음을 최소화 하는데 유리하다.

2.1.2. Cell Flow 및 Cell Bypass Ratio

GE90-115B, GEnx-1B/2B, GP7200, PW4090 등 High Bypass Ratio를 가진 신형 엔진의 경우 과거 엔진에 비해 엔진으로 유입되는 Airflow의 양이 많기 때문에 ETC가 수용할 수 있는 Cell airflow는 이번 설계에 있어서 가장 큰 고려 요소였다. 현존하는 엔진 중 가장 큰 추력(Thrust)과 Mass Flow를 가진 엔진은 GE Aviation 社의 GE90-115B (Take Off 시 정격 추력 115,300 lbf, 엔진 Mass Flow 3,676 lb/sec)로서 이번 설계의 Main Model로 선정되었다. 다만 과거 ETC 운용 경험에 비추어 향후 약 30년 이상 운용하며 Future 엔진까지 수용 가능할 수 있도록, OEM 및 ETC design 社의 자문을 얻어 최대 150,000 lbf 의 추력을 가진 엔진까지도 Test 가능할 수 있도록 설계 값을 상향 조정 하였다.

엔진은 일반적으로 항공기 Wing의 아래쪽에 장착되어 엔진 Fan의 크기가 지나치게 클 경우

항공기 Landing 시 지면과의 충돌이 발생될 수 있기 때문에 향후 개발될 엔진의 크기는 지나치게 커지지는 않을 것이란 전망이 지배적이다. 현재 운용되고 있는 항공기 엔진 중 가장 큰 Fan Diameter를 가진 엔진은 GE 社 의 GE90-115B로 128 inch 의 Fan Diameter를 가지고 있어, Future 엔진은 GE90-150B 가 개발된다는 것을 전제로 Thrust와 Engine Mass Flow는 각각 150,000 lbf 와 5,000 lb/sec로 가정하였다. (Fig 2)

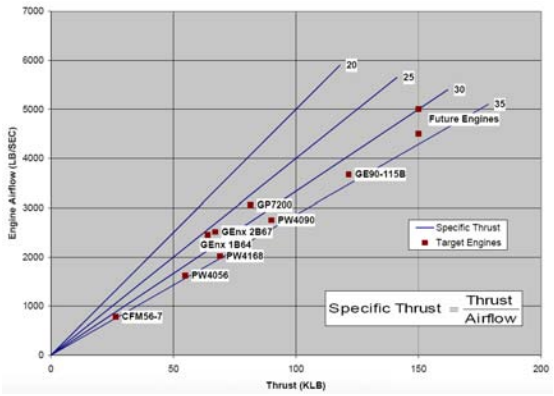

Fig. 2 Thrust & Engine Airflow

Cell Bypass Ratio는 엔진으로 유입되는 Airflow와 엔진 주변으로 Bypass 되는 Airflow 의 비를 수치화 한 것으로, 엔진 입구에서의 Vortex 또는 엔진 배기가스가 엔진으로 재 흡입되는 Recirculation을 방지하기 위한 이상적인 Cell Bypass Ratio는 0.8 이상이다. [2]

$$Cell\ Bypass\ Ratio = \frac{Cell\ Bypass\ Air flow}{Engine\ Air flow}$$

이번 설계에서는 안정적인 Airflow Margin 확보를 위해 150,000 lbf 급 엔진 Test 시 Cell Baypass Ratio 0.9 이상을 제시하였고, 이를 충족하기 위해 Test Chamber의 단면(Fig 3)은 14m X 14m 로 결정되었다.

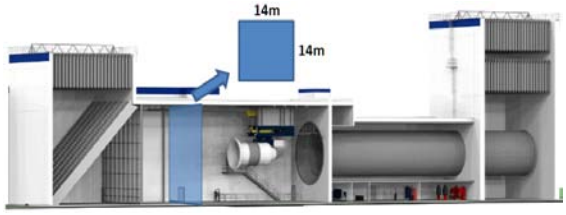

Fig. 3 Test Chamber Size (14mX14m)

그 결과 Table 1에서와 같이 Future 엔진 Mass flow 5,000 lb/sec 및 Test Chamber 단면 14m X 14m 로 가정 할 때 Cell flow 와 Cell Bypass Ratio는 각각 9,523 lb/sec 및 0.91로 예상되었다.

Engine Type	Thrust (lbs)	Engine Air (lb/sec)	Cell Flow (lb/sec)	Cell Bypass Ratio
CFM56-7B26	26,400	783	4,443	4.68
PW4056	54,770	1,695	6,151	2.63
PW4168	68,960	2,020	6,857	2.40
PW4090	93,000	2,800	7,798	1.79
GEnx-2B64	67,040	2,435	6,667	1.74
GE90-115B	115,000	3,676	8,565	1.33
GE90-150B	150,000	5,000	9,523	0.91

Table. 1 Projected Cell Flow & BPR

2.1.3 Approach Velocity & Cell Depression

Approach Velocity는 ETC 내부 엔진 Inlet과 Inlet Screen 간의 중앙에서 Airflow Velocity를 의미하며, OEM마다 권고하는 Approach Velocity는 다르지만 통상 60 ~ 65 ft/sec 미만이 Industry Standard로 권장되어진다. 이는 Indoor ETC의 터널형 구조의 통로를 통해 유입된 Airflow Velocity가 엔진 Airflow와 Cell Bypass Airflow에 미치는 영향으로 인해 엔진 Test 결과가 왜곡되는 것을 최소화하기 위한 기준이며, 신규 ETC에서는 150,000 lbf 추력을 가진 엔진에서 약 59 ft/sec 의 Approach Velocity를 갖는 것으로 나타났다. (Fig 4)

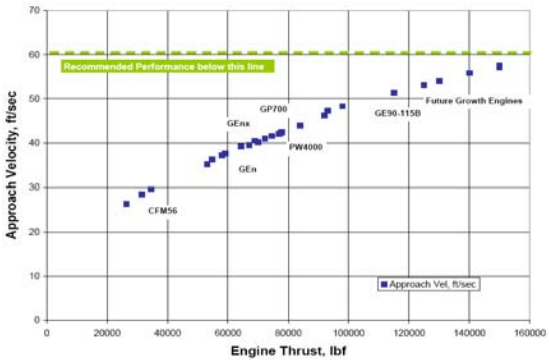

Fig. 4 Projected Approach Velocity at 14m ETC

ETC로 유입되는 공기는 일정한 유속을 갖기 때문에 ETC 내의 압력은 항상 대기압보다 작게 된다. Cell Depression은 ETC 외부 대기압과 ETC 내부 정압과의 차이로서, 주로 Approach Velocity의 영향을 받으며 Door, Window, Airflow treatment 장비 등 Soft Structure 또한 Pressure loss의 원인이 된다. Cell Depression은 그 차이가 너무 작을 경우 Test Chamber 내에 Vortex나 엔진 Exhaust Gas의 Re-circulation을 유발할 수 있으며, 반대로 차이가 너무 클 경우 엔진에 부적절한 Airflow를 형성 및 ETC 구조물에 과도한 Load를 유발할 수 있다. 업계에서는 통상 8 inches of water 미만을 권장하며 이번 설계에서도 같은 기준을 적용하였다.

2.1.4 Front Cell Distortion Index

Front Cell Distortion Index는 Cell 안으로 유입된 Airflow Uniformity 정도를 나타내는 지표이다. Uniform하지 않은 Airflow가 ETC로 유입되면 최악의 경우 엔진 Stall을 유발시킬 수도 있기 때문에, 이와 같은 현상을 방지하고 더 좋은 Test Performance 확보를 위해 ETC에는 2.2절에서 소개될 Aerodynamic treatment를 통해 Airflow를 정류하고, 추가적으로 내부 표면의 마감처리를 매끄럽게 하여 불필요한 Vortex 등의 생성 조건을 최소화 하고 있다.

$$Cell\ Distortion = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{avg}}$$

Front Cell Distortion은 Max. 35% 미만이 권장되며 [2], 신규 ETC에는 더 나은 Uniformity를 위해 25% 미만을 기준으로 적용하였다.

2.1.5 Noise & Vibration

OEM에서는 엔진 소음을 감소시키기 위해 많은 노력을 기울이고 있지만, 여전히 엔진 Operation 시에는 상당한 소음이 발생된다. Indoor Test를 수행한다 하더라도 흡기 및 배기 Area는 개방되어 있기 때문에 개방된 Area로부터 나오는 소음의 규모는 ETC 설계에 있어서 중요한 요소이다.

소음은 가청음과 불가청음으로 구분되어 나타난다. 가청음은 사람의 귀로 들을 수 있는 음의 크기를 가중치 필터를 적용하여 상대적 단위로 나타낸 값을 의미한다. 가중치 필터로는 A형, B형, C형이 있으며 사람의 귀는 주파수 1,000 Hz 이하의 조용한 소리에서는 주파수가 낮아질수록 덜 민감하게 느끼기 때문에 실제로는 시끄러워도 주파수가 낮으면 조용하게 느끼는데, 이러한 특성을 반영한 것이 A형 (dBA)으로 가청음의 척도로서 보편적으로 사용된다. 국내 환경법 기준 소음 규제치는 아침과 저녁에 60 dBA 로서 이는 시설물의 부지경계선을 기준으로 한다. 따라서 이번 설계에서는 이 기준을 적용하여 부지경계선에서 60 dBA으로 설정 하였다.

불가청음(Infrasound)은 소음의 일종이지만 10Hz 미만의 소음이기 때문에 보통 사람의 귀보다는 진동의 형태로 느끼게 되며 이러한 저주파 진동은 건축물의 구조적 문제를 야기할 수 있다. 또한, Work Bay에서 작업자가 Infrasound에 노출될 경우 어지러움이나 메스꺼움을 느끼는 등의 현상이 발생할 수 있다. 국내법에서는 Infrasound에 대한 규제는 없으며 진동에 대해서만 부지경계선 기준 주, 야간 65 dBV로 규정하고 있다. 따라서 부지경계선에서의 설계 진동은 65 dBV로 설정하였고, OEM의 권고를 바탕으로 작업장 내에서의 Infrasound Target을 100 dB로 설정하였다.

2.2 Airflow & Noise Treatment

앞장에서 소개한 다양한 요구 조건을 충족시키기 위해 ETC에는 여러 가지의 특수 장비 또는 시설물이 사용된다. 이번 장에서는 그 중에서도 Airflow와 Noise Treatment 에 사용되는 기술을 소개하기로 한다. (Fig. 5) 아래에 소개되는 모든 수치는 CFD, Scale Model 및 풍동실험을 통해 검증되었다.

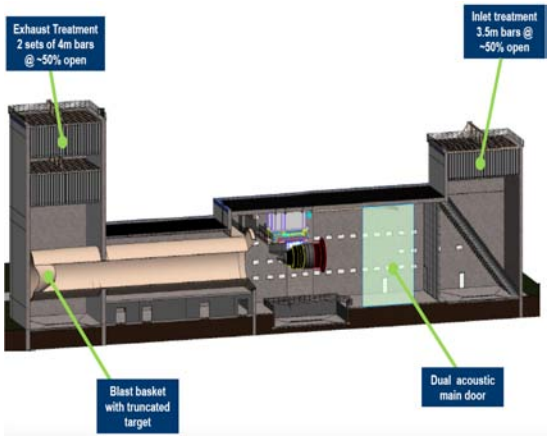

Fig. 5 Airflow & Noise Treatment

2.2.1 Bar Silencers

Bar Silencer는 Airflow & Noise Treatment 를 위한 시설물로서 타공면을 가진 사각튜브 형태의 금속 구조물 내부에 흡음재(Basalt Wool Pillow)가 삽입되어 있다. Bar Silencer Array는 Inlet Stack과 Exhaust Stack 에 길이방향이 수직을 이루도록 설치되며 각 opening 면적의 약 50%를 점유한다. 주로 Airflow distribution uniformity, Peak air velocity reduction, Cross wind effect reduction 및 Noise absorbtion 등의 주요 기능을 가지고 있으며, 약 10년 간 GE, Pratt and Whitney, Rolls Royce 등 OEM을 포함하여 약 10여 곳 이상의 ETC에서 사용되어 그 성능이 입증되었다. 이번 설계에서는 3.5m X 0.4m X 0.4m 규격의 Bar Silencer 1 set 를 Inlet Stack에, Exhaust Stack에는 4m X 0.4m X 0.4m 규격의 Bar Silencer 2 set를 설치하도록 결정되었다. (Fig. 6)

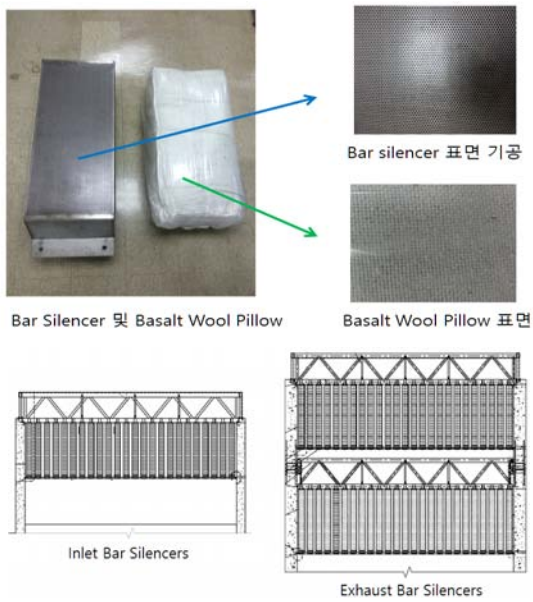

Fig. 6 Bar Silencers

2.2.2 Flow Conditioning Screen

Flow conditioning screen은 Airflow가 엔진으로 유입되기 전 마지막 단계로 거치게 되는 Mesh 형태의 구조물(Fig. 7)로서 Airflow를 마지막으로 정류하는 기능을 가진다. 또한 엔진 Test 시 Inlet Stack으로부터 외부물질(FOD, Foreign Object Debris)이 유입될 경우 엔진 손상으로 이어질 수 있으므로, 이러한 외부물질로부터 엔진을 보호하는 역할을 한다. 신규 ETC에 설치된 Flow Screen은 인치 당 2mm 두께의 Mesh 3개를 배열하여 약 57.6%의 Opening을 갖는다.

Fig. 7 Flow Conditioning Screen

2.2.3 Main Acoustic Door

Inlet stack과 Flow screen을 거치며 정류된 Airflow는 마침내 엔진이 있는 Test Chamber로 유입된다. 이 공간은 엔진 Test 중 Airflow에 미치는 영향을 최소화하는 방향으로 설계된다. 그 중 엔진 Test에 가장 많이 영향을 끼치는 엔진 전방, 즉 Flow screen과 엔진 사이의 공간에는 엔진과 각종 장비의 이동을 위한 대형 Door가 설치되어 있다. 이 Door는 Airflow에 끼치는 영향이 적으면서 Test Chamber 내의 압력을 견뎌야 하며, 동시에 소음과 진동을 차단하는 역할을 수행한다. 따라서 Door의 재질과 표면처리는 설계에 있어서 가장 중요한 요소이다. 신규 ETC에 적용된 Door는 40cm의 두께를 가진 두 개의 대형 철근콘크리트 Door(각 140톤, 9m X 14m)이다. (Fig. 8) 콘크리트는 표면처리 및 유지보수가 용이하고 압축력에 강한 반면 인장력에는 취약한 특성을 가진다. 또한 기온 변화에 따른 팽창과 수축 작용 및 Test Chamber 내의 압력과 반복 진동에 의해 균열이 발생할 가능성이 높다. 따라서 내부에 적정 수준의 철근과 Door 내/외부에 철제 Frame을 적용하였다. 소음과 진동의 관점에서도 철근콘크리트 Door의 두께와 비교적 높은 밀도는 넓은 주파수 대역에서의 소음 저감과 진동 Damping에 유리하다.

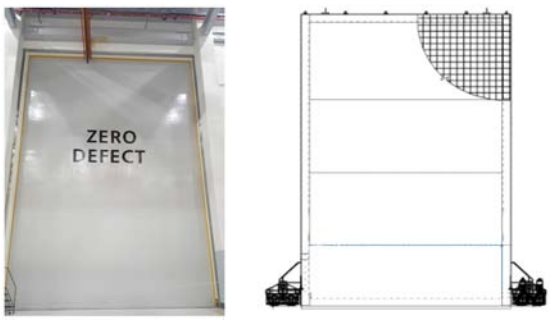

Fig. 8 Main Acoustic Door

2.2.4 Augmentor Tube

엔진의 배기가스는 엔진 주변의 Bypass Air와 함께 혼합되어 Exhaust Stack을 통해 외부로 배출된다. Augmentor Tube는 엔진 후방에 위치하여 Airflow가 최종적으로 Exhaust Stack을 통해 배출되기 전에 거치게 되는 일종의 통로로서 원형의 철제 튜브 몸통과 Blast Basket (원추형의 타공 구조물)로 이루어져 있다. (Fig. 9)

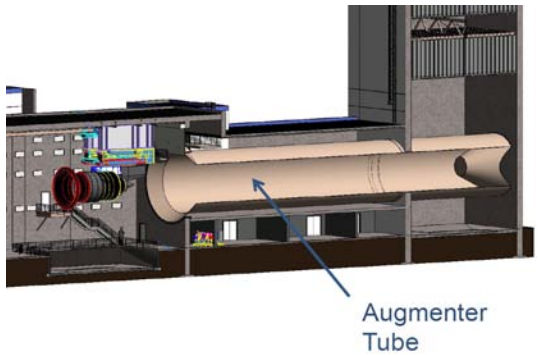

Fig. 9 Augmentor Tube

엔진 Test 시에는 고속의 배기가스가 발생되고 이로 인한 Ejector pumping 현상으로 인해 엔진 주변의 Bypass air 또한 함께 배출되게 된다. 이 때, 엔진 주변의 Bypass Air 가 빠르게 혼합되어 배출되지 않을 경우 고열로 인한 시설, 장비, 엔진 등의 손상을 초래할 수 있으며, 심한 경우 배기가스가 엔진 입구로 재 흡입되는 역류 현상이 일어나게 된다.

이와 같은 현상을 방지하기 위한 Augmentor Tube의 Pumping 성능은 ETC가 수용할 수 있는 Airflow의 양을 결정짓는 중요한 요소 중의 하나이다. Augmentor Tube의 직경과 길이는 Pumping 성능을 좌우하게 되며, 설계 기준인 9,500 lb/sec의 Airflow를 수용하기 위해 각각 6.85m와 30m로 설계되었다. 이는 ETC가 수용 가능한 Airflow의 양으로 볼 때, 2017년 현재 기준 세계 최대 규모이다.

2.3 Aerodynamic & Acoustic Measurement

ETC 시설물 건립 및 각종 Equipment 설치를 완료 후 Design Target 충족 여부 확인을 위해 GE90-115 엔진을 실제로 Run-up 하며 Aerodynamic & Acoustic Measurement를 실시하였다.

2.3.1 Aerodynamic Measurement Setup

GE90-115B 엔진 전방에 수직 기둥을 설치하여, 7X5 (35) Point가 측정되었으며, 이 기둥은 Test Cell 의 전체 폭에 걸쳐 이동되었다. 하단 Fig. 10 및 Fig. 11 에서와 같이, Flow Screen 과 Bellmouth Inlet 면 사이의 중간 위치에 측정 면이 위치하며 7개의 Pitot probes는 각 기둥에 수직 방향으로 설치(2m 간격) 되었다.

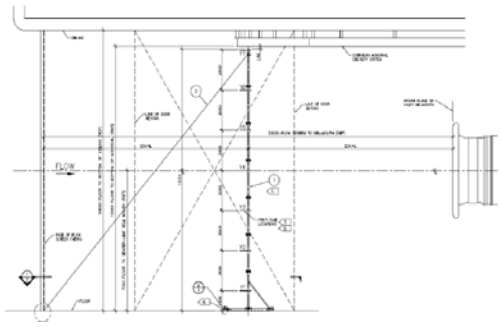

Fig. 10 Pitot Static Probes Location

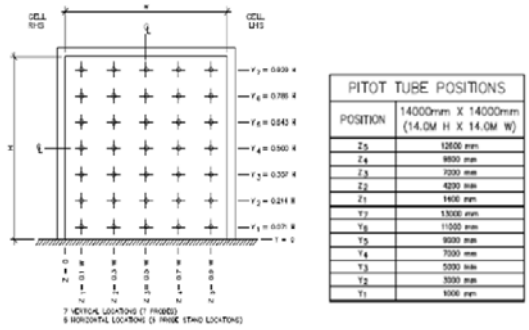

Fig. 11 Pitot Static Probes Matrix

Initial Test에서 이 기둥은 Z1 지점에 위치하여 엔진 run-up 및 3개의 Thrust Level에서 Stabilization 후, Pressure 및 Temperature를 측정하였다. 그 후, 엔진을 정지시켜 기둥을 Z2 위치로 수동으로 이동시킨 후 엔진 Run-up 및 Stabilized를 반복한다. 이 과정을 Z5위치까지 총 5번 반복하여 Full Cross-section map이 완성되었다. 총 35 set (7X5)의 Pressure 측정 Point가 수집 및 분석되었다.

2.3.2 Acoustic Measurement Setup

Acoustic Measurement 또한, Aerodynamic Measurement와 동시에 수행 되었다. 4 개의 저주파 무지향 마이크를 사용하여, 신규 14m Test Cell 시설 내/외부의 특정 지점에서 소음을 측정하였다. 각각의 마이크는 바람막이를 장착한 후 지상에서 약 1.2m 지점에 삼각대를 사용하여 설치되었으며 Test 실시 전 교정을 완료하였다.

소음 레벨은 4채널 주파수 분석기를 사용하여 엔진 가동 시 Min 30초 동안 각 측정지점에서 기록되었다. 소음 측정은 엔진 Max T/O power에서만 측정되었으며 배경 잡음(Background noise level)은 각 측정 지점에서 엔진 가동 이전에 측정되었다. 모든 소음 측정은 불가청(Infrasound/5~50Hz) 및 가청 주파수(Audible/20Hz~10kHz) 대역을 포함하는 5Hz~10kHz 주파수 대역에 걸쳐 이루어졌다.

소음 측정과는 별도로, Test Cell로부터 떨어진 지점에서의 지표 진동을 평가하기 위해 GE90-115B 엔진 가동 중에 두 번의 진동(vibration) 측정이 수행되었다. 측정에는 Single-axis seismic accelerometer가 사용되었으며, 첫 번째 가속도계는 건물 내부 Test cell에 근접한 철제 계단 하부 바닥에 설치되었고, 두 번째 가속도계는 Exhaust Stack Sideline을 기준으로 75m 떨어진 지점 도로 근처 바닥에 설치되었다. 각각의 가속도계는 바닥면과 가속도계 바닥의 충분한 접착력을 위해 에폭시 접착제를 사용하여 콘크리트 바닥면에 접착되었다. 진동(Vibration/수직가속도) 레벨은 4채널 주파수 분석기를 사용하여 엔진 Take off power에서 0~200Hz 대역에 걸쳐 Min 30초 동안 기록되었다.

2.3.3 Measurement Result

GE90-115B엔진의 Take off Power에서 측정된 주요 Aerodynamic performance value는 기존 설정한 Target 을 충족하는 것으로 확인되었다. Table 2 및 Table 3에 나타난 바와 같이 모든 주요 측정값들이 Target과 일치하거나 거의 근사하게 나타났다.

Table 2. Aerodynamic Measurement Result

No	Description	Target	Predicted @ 115K lbf	40K lbf	80K lbf	115K lbf
1	Cell Distortion	< 0.25	-	0.17	0.15	0.16
2	Cell Deprssion (inch of water)	< 8	4.2	-	-	4.2
3	Approach Velocity (ft/sec)	< 60	53	32.42	45.44	52.68
4	Total Test Cell Flow Rate (lb/sec)	9,500	8,565	5,275	7,395	8,572
5	Engine Mass Flow (lb/sec)	-	-	2,190	3,120	3,676
6	Baypass Ratio	>0.9	1.33	1.41	1.37	1.33
7	No gas circulation	-	-	No	No	No

Table 3. Acoustic Measurement Result

Location	Target	Measured
75m in-line with exhaust stack	< 60 dBA	59.6 dBA
75m side-line with exhaust stack	< 60 dBA	58.5 dBA
Center of Ground Floor Office	< 65 dBA	49.2 dBA
Center of Prep Building	< 70 dBA	64.8 dBA
Center of Control Room	< 65 dBA	59.3 dBA
Center of 2nd Floor office	< 65 dBA	49.9 dBA
Center of 2nd Floor conference room	< 65 dBA	48.4 dBA
Infrasound at 75m from test cell in each onethird octave band between 5 Hz and 50 Hz	< 100 dB	< 100 dB
Ground vibration level at 75m from test cell	< 65 dBV	44.6 dBV

3. 결 론

본 논문에서는 항공기 Engine Test Cell 을 Design 하는데 있어서 주요 고려 요소를 소개하고 Target Value와 Measured Value 를 비교해 보았다. 그 결과 신규 건립된 Test Cell은 Design Target에 근접한 성능을 가져 Future 엔진에 대한 기존 예측치 또한 실제로 충족 가능함을 유추해 볼 수 있다.

현재 신규 Test Cell은 최종 준공 단계를 거쳐 GE90-115B, PW4090 및 PW4168 엔진에 대한 Correlation Test를 마치고 성능 시험을 성공적으로 수행하고 있으며, Trend Monitoring 을 통한 Test Cell Performance Validity 유지를 위해 Program을 연구 개발 및 적용 예정이다.

참 고 문 헌

1. "Correlation, Operation, Design, And Modification of Turbofan/Jet Engine Test Cells", FAA Advisory Circular AC 43-207, Federal Aviation Administration, Washington, DC, U.S.A, 2012
2. "Design Considerations for Enclosed Turbofan/Turbojet Engine Test Cells", SAE Aerospace Information Report AIR4869A, Society of Automotive Engineers, Warrandale, PA, U.S.A., 2015