

소형 항공기 개발 동정압계통 오차 확인 비행시험 사례

김찬조* · 서지한* · 이원중**

Study on Flight Test Practice of the Small Civil Airplane Development for Pitot-Static System's Error Identification

Chanjo Kim* · Jihan Seo* · Wonjoong Lee**

ABSTRACT

The air data measured from the static pressure, the dynamic pressure and etc. of an airplane is used for calculation of many flight parameters(altitude and airspeed and so on) and these values applied to flight safety and navigation flight. The pitot-static system of the development airplane is calibrated by finding of pitot-static system's error using tower fly-by, trailing cone method and etc. This paper is describing for the introduction of the trailing cone method and major items for test planning, preparation, operation and results for air data calibration flight test performed, considering efficiency and safety during KC-100 development project.

Key Words : Trailing Cone, Pitot-Static System, KC-100, Air Data Calibration, Flight Test, Bilateral Aviation Safety Agreement(BASA), Type Certification(TC)

1. 서 론

Air Data는 항공기 주변 Air Mass의 물리적인 특성으로 측정되는 물성치는 온도와 압력, 그리고 공기의 흐름각 등에서 추출될 수 있다. 이 기본 측정값으로 많은 비행 파라미터(속도, 고도, 받음각 등)를 계산할 수 있으며, 이런 정보는 비행안전, 항법 등에 다양하게 활용된다. 항

공기에 장착되어 Air Data를 측정하는 센서로는 압력을 측정하는 Pitot-Static Probe, Pitot Probe 등의 센서, 유동각을 측정하는 센서 및 외부 공기의 전 온도(Total Temperature)를 측정하는 온도센서 등이 있으며, 또한 최근 기술의 발전으로 이를 통합하여 하나의 센서로 활용될 수 있는 다기능 센서(Multi-Function Sensor) 등이 있다. 아울러 개발되는 항공기의 기준값으로 사용하기 위해 비행시험용 Test Boom이 장착되어 비행시험 기간 동안 활용되기도 한다.

대기자료 보정시험(ADC, Air Data Calibration Test, 또는 동정압 오차 확인시험)은 항공기의

†2013년 8월 9일 접수 ~ 20XX년 월 일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주산업(주)

** 정회원, 한국항공우주연구원

연락처, E-mail: kimcj@koreaaero.com

Air Data System(또는 동정압 계통)에서 측정된 대기 자료(Static Pressure, Total Pressure 등)와 항공기 주변의 실제 대기자료(Reference Data) 사이의 오차를 확인하여 이를 보정하여 항공기의 정확한 비행속도, 고도 등을 제공하기 위한 시험이다. 대기자료의 오차 요인은 위치오차, 계기오차 및 시스템 오차 등이 있으나 항공기 자체의 형상에 의한 것인 위치오차는, 항공기 주변의 공기 흐름의 변화로 실제 대기 정보의 측정이 불가하다. 따라서 대기정보 센서는 최대한 항공기 주위의 실제 대기 상태와 차이가 없는 위치를 선정하여 장착하여야 한다. 동정압 계통의 오차확인을 위한 비행시험 방법으로는 Tower Fly-by, Pacer 및 Trailing Cone 등이 있다. Table 1과 같이 초음속 고등훈련기인 T-50의 경우는 저고도에서 Low Altitude Fly-by 방법(Tower Fly-by의 변형)과 그 외 전 영역에서 DGPS 방법 등이 이용되었다[1].

Table 1. Application for ADC Test Methods[1]

기종	시험 방법
F-16	Tower Fly-by
	Pacer
	Tracking Radar
F-18	Tower Fly-by 기타 방법 미확인
F-22	Tower Fly-by
	Pacer
IDF	Tower Fly-by
	EOTS
T-50	Low Altitude Fly-by
	WPC/DGPS
	Pacer
KT-1	Trailing Cone
747	Trailing Cone

그림1과 같이 Trailing Cone 방법은 항공기 정압을 보정하기에 적합한 방법[2]으로 이 방법을 적용하기 위한 최대 속도는 속도를 점점 증가시킬 때 Trailing Cone이 불안정을 야기시키는 속도이다. Cone은 Static Line이 안정되도록

하는 역할을 하지만 Cone의 모양, 크기, Static Hole의 위치, 정압선의 길이와 항공기의 추진 방식, 형상, 크기 등의 변수에 따라 영향성이 있으므로 방법 선정에 이를 고려하여야 한다.

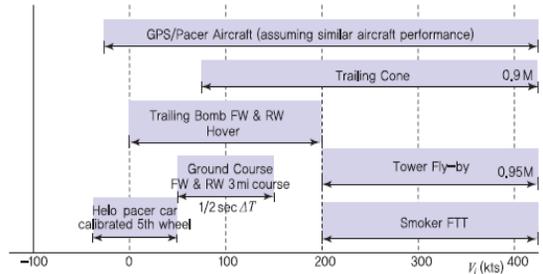


Fig. 1. Comparison by Airspeed for ADC Test Methods[1]

본 연구는 4인승 항공기로 국내 항공기 기술 기준(KAS, Korea Airworthiness Standard) Part 23급으로 형식증명(TC, Type Certification) 획득 및 한-미간 BASA(Bilateral Aviation Safety Agreement, 상호항공안전협정) 확대 체결을 위해 미 연방항공청(FAA)의 기준과 절차 등도 고려하여 개발된 Fig 2와 같은 소형항공기 KC-100(315마력, FADEC 및 Turbo-charger 적용)의 정압 계통의 오차 확인 및 보정 비행시험에 대해 시험계획, 준비, 수행 및 결과까지 일련의 절차에 있어서 효율과 안전을 고려하여 비행시험을 수행하기 위한 주요한 내용에 대해 소개하고자 한다.

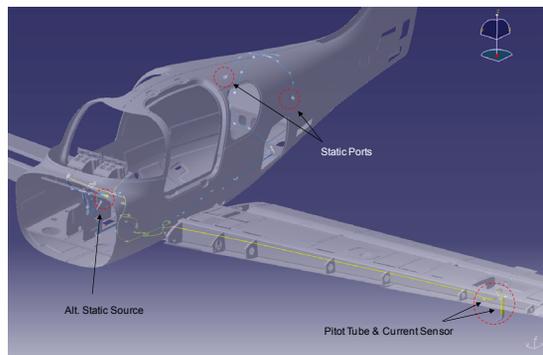


Fig. 2. KC-100 Pitot-Static System

2. KC-100 동정압 계통 및 검증기준

2.1 KC-100 동정압 계통

KC-100 항공기의 동/정압 센서는 풍동시험 및 전산유체해석 등을 통해 Fig 3과 같이 최적의 위치(Pressure Coefficient(C_p)=0, 특히 후방에 위치한 Baggage Door에 의한 영향 최소)인 후방 동체 양쪽에 정압원(Static Pressure Source)을, 피토티 튜브(Pitot Tube)는 좌측 주익 끝단 부분에 위치하도록 설계하였다.

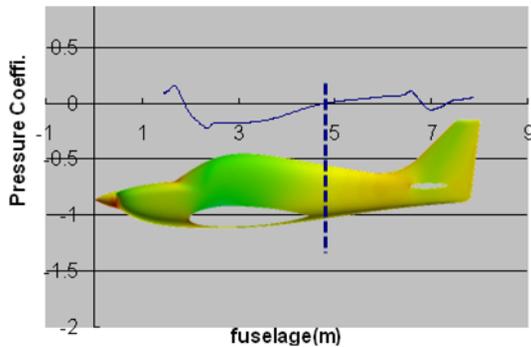


Fig. 3. KC-100 Pressure Coeffi. Analysis

2.2 동정압 계통 검증기준

항공기 기술기준 Part 23 기준 동정압 계통의 주요 입증기준은 다음과 같다.

§ 23.1323 Airspeed Indicating System

(a) 각 대기속도계 계통은 주어진 피토티 및 정압하에서 가능한 최소 계기눈금 오차로 진대기 속도(표준대기 해면상에서)를 지시하도록 보정되어야 한다.

(b) 각 대기속도계 계통은 비행을 통해 계통오차가 보정되어야 한다. 위치오차를 포함하나 대기속도계 자체의 오차가 제외된 계통오차는 다음의 전 속도범위를 통해 교정대기속도(Calibrated Airspeed)의 3% 또는 5노트 중 큰 값을 초과해서는 안된다.

- (1) 플랩 올림상태로 $1.3V_{S1}$ 에서 V_{NE} 까지
- (2) 플랩 내림상태로 $1.3V_{S1}$ 에서 V_{FE} 까지

§ 23.1325 Static Pressure System

(a) 표준대기 해면상에서 계기 눈금오차를 제외한

지시기압 고도의 오차가 플랩내림에서 $1.3V_{S0}$ 와 플랩 올림에서 $1.8V_{S1}$ 사이의 속도범위 내에 대응되는 형태로서 $51.4m/s(100노트)$ 속도당 $\pm 9.14m(\pm 30ft)$ 이하가 되도록 설계하고 장착하여야 한다. 그러나 오차는 $\pm 9.14m(\pm 30ft)$ 보다 적을 필요는 없다.

3. KC-100 동정압 계통 비행시험

3.1 비행시험 계획

Trailing Cone을 이용한 동정압 계통 오차확인 비행시험은 크게 두 단계로 계획되었다. 첫 번째 단계인 고속활주 시험은 Trailing Cone을 끌며 이/착륙시 활주로 Groove 등에 따른 영향을 확인하기 위함이다. 두 번째 단계인 동정압 오차 확인시험은 Trailing Cone 방법을 이용하여 KAS Part 23 요구도에 대한 적합성 데이터를 획득하는 시험이다. 이 시험은 다양한 c.g 범위와 중량 범위로 특정 고도에서 플랩별(TO, LD, CR) 전 속도범위인 저속에서 고속까지, 그리고 AC-23의 가이드에 따라 중량별 영향성을 확인하기 위해 특히, 중량에 따른 반응각 차이가 많이 나는 저속에서 최소중량으로도 계획하였다[2].

3.2 비행시험 Setup

주요 시험 장치로는 Fig 4 및 5와 같이 항공기 후방에 장착되어 정압의 기준 데이터 획득을 위한 Trailing Cone, Trailing Cone에서 획득되는 정압과 항공기의 정압과의 차이를 획득할 수 있는 차압센서(Differential Pressure Transducer)이다.

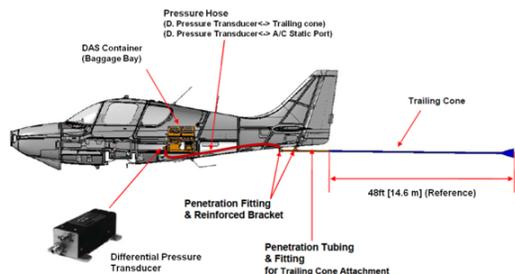


Fig. 4. KC-100 ADC Test Setup



Fig. 5. Trailing Cone Installation

3.3 비행시험 세부 절차

3.3.1 이륙 전 절차

항공기에 장착된 Trailing Cone을 연결 브라켓에 고정된 상태로 활주로로 이동시킨 후 항공기를 활주로에 최종 Line-up된 상태에서 지상요원이 Trailing Cone을 전개 및 정렬한다.

3.3.2 비행 중 절차

이착륙은 정풍 방향에서 수행하고, 목표 고도 및 속도에서 주어진 Tolerance를 유지하도록 한다. 수평 조건으로 트립된 상태에서 충분한 데이터를 획득한다. 또한 데이터를 획득하는 동안 Throttle도 유지되도록 한다. 데이터 획득은 Fig 6과 7과 같이 수평비행을 기본으로 하고, 최대속도(V_{NE})까지 데이터 획득을 위해 강하 가속비행을 수행한다.



Fig. 6. Level Flight Profile for ADC Test

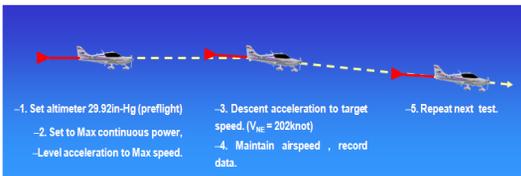


Fig. 7. Descent Acceleration for ADC Test

3.3.3 착륙 후 절차

착륙 후 항공기를 활주로에 정지시키며, 지상요원이 항공기에 접근하여 Trailing Cone을 연결 브라켓에 고정 후 Taxi Back하여 격납고로 이동한다.

3.3.4 세부 임무계획

Trailing Cone을 이용한 동정압 오차 확인 비행시험을 위한 비행 당일 세부 임무계획은 Table 2와 같이 정리될 수 있겠다.

Table 2. Detailed Time Table for Trailing Cone Error Finding Test

시간(hr)	내용	장소	비고
T-1.5	전체 브리핑		Wind<10kts
T-0.3	Taxi Out	격납고 -LCI	
이륙전	Trailing Cone 전개	활주로	항공기 축선과 일치
이륙	활주상태 점검	활주로	활주로 통제관
임무	실시간 기상정보 전송	Ground Station	
착륙	Trailing Cone 수납	활주로	활주로 상 항공기 정지

3.4 비행시험 위험도 분석

비행시험 계획단계에서 시험항목별 시험내용을 분석하여 시험 수행시 발생 가능한 위험(Hazard)요소를 식별하고, 이에 대한 원인(Cause)과 영향성(Effect)를 파악하여 이를 사전에 방지 또는 축소하기 위한 경감 절차(Minimization Procedure)를 수립하는 시험위험도분석(THA, Test Hazard Analysis)을 수행한다. 아울러 이렇게 수립된 절차를 적용시 잔류 위험이 수락 가능한 수준이고, 이에 대한 이행사항을 비행시험 실행단계에서 확인 후 비행시험을 실시한다. 위험도 평가는 일반적으로 FAA Order 등에서도 제시하고 있는 발생 빈도(Probability)와 심각도(Severity)가 고려된다[3]. Trailing Cone을 이용한 동정압 오차 확인 비행시험을 준비하면서 식별된 시험위험도분석 결과의 한 사례는 Table 3과 같다.

Table 3. THA Example for ADC Test

구분	내용																																			
Hazard	Loss of trailing cone on takeoff / landing																																			
Cause	.Mis-installation of the trailing cone .Caught on the ground object .Impact with ground due to over takeoff rotation and landing flare																																			
Effect	Destruction/damage to airplane																																			
Minimization Procedure	.Inspect the trailing cone installed properly before flight .Establish taxi, takeoff, landing procedures for the trailing cone .Brief and practice the system operation .Confirm operation safety with Taxi																																			
Corrective Action	.Continue takeoff .Try long touch down landing after runway verified FOD free																																			
Risk Level	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Hazard Category</th> <th colspan="5">Subjective Probability of Occurrence</th> </tr> <tr> <th>high</th> <th>probable</th> <th>occasional</th> <th>remote</th> <th>improbable</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>catastrophic</td> <td>High</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>critical</td> <td></td> <td></td> <td>Medium</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>marginal</td> <td></td> <td>Low</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>negligible</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Low</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Low(After minimization procedure)</p>	Hazard Category	Subjective Probability of Occurrence					high	probable	occasional	remote	improbable	catastrophic	High					critical			Medium			marginal		Low				negligible				Low	
Hazard Category	Subjective Probability of Occurrence																																			
	high	probable	occasional	remote	improbable																															
catastrophic	High																																			
critical			Medium																																	
marginal		Low																																		
negligible				Low																																

3.5 비행시험 결과

AC23-8C에 명시된 관계식을 활용한 속도오차 (ΔV)는 플랩 형상별 5노트 기준 이내이며, 고도오차(ΔH)도 주어진 속도 전 범위에서 기준 이내의 값을 Fig 8과 9와 같이 확인하였다.

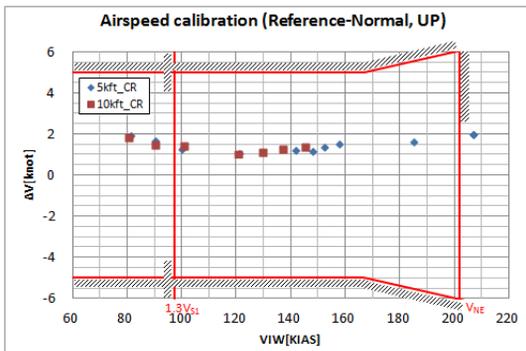


Fig. 8. Airspeed Error Finding Results(CR)

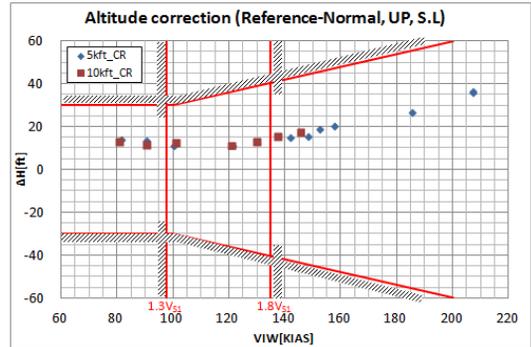


Fig. 9. Altitude Error Finding Results(CR)

또한, 최소 중량에 대한 영향성 확인을 위해 Spot Check 결과 최대 중량과 차이가 없음을 확인할 수 있었다. 아울러 이렇게 확인된 플랩 위치에 따른 고도 및 속도에 대한 오차의 정보는 항공기 운영자인 조종사에게 좀 더 정확한 정보를 제공하기 위해 Fig 10과 같이 비행교범(AFM or POH)에 반영하였다.

KIAS	KCAS		
	FLAPS UP	FLAPS TAKE OFF	FLAPS LAND
55	CORRECTION TO BE ADDED-feet		
60	Normal Static Source-KIAS		
70	Density		
80	PILOT'S OPERATING HANDBOOK AND MLTM APPROVED AIRPLANE FLIGHT MANUAL		
90	Korea Aerospace Industries KC-100		
100	Registration No. _____		
110	Type of Certification No. _____		
120	THIS HANDBOOK INCLUDES THE MATERIAL REQUIRED TO BE FURNISHED TO THE PILOT BY THE KAS PART 23 AND ADDITIONAL INFORMATION PROVIDED BY THE MANUFACTURER, AND CONSTITUTES THE MLTM APPROVED AIRPLANE FLIGHT MANUAL.		
130	This Handbook meets GAMA Specification No. 1, Specification for Pilot's Operating Handbook, Issued February 15, 1975 and revised October 18, 1996.		
140	Approved by the MLTM Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs)		
150	By: _____ Manufacturer's Name: KAI		
160	Date: _____ Address: REPUBLIC OF KOREA		
170			
180			
190			
200			
210			

Fig. 10. Airspeed/Altitude Calibration Table on AFM(Example)

4. 결 론

국내 최초로 형식증명 절차에 따라 항공기 기술기준에 의거하여 소형항공기인 KC-100의 개발 비행시험을 수행하였으며, 그 중 동정압 계통에 의해 시험되는 속도 및 고도에 대한 오차 확인 비행시험은 Trailing Cone Method을 적용하여 정압에 대한 위치오차를 확인 및 이를 바탕으로 고도 및 속도를 보정하였다. 본 논문에서는 이를 위한 최적의 시험계획, 시험장치, 안전하고 효율적인 비행운영 방법, 비행시험위험도 분석 및 시험결과에 대해 기술하였다. 또한, 시험 데이터로부터 AC23-8C의 Appendix 9에 기술된 정압, 속도 및 고도에 대한 일반적인 오차 확인 관계식을 이용하여 확인한 결과 항공기 기술기준에서 요구하는 기준 이내에 있음을 확인하여 풍동시험 및 전산유체해석 등을 통해 최적의 위치로 선정된 정압원의 위치가 적절함을 알 수 있었다. 하지만, 시험결과 고도 및 속도의 오차가 기준이내의 미미한 값일지라도, 운영 조종사

에게 좀 더 정확한 정보를 제공하기 위해 비행 교범에 플랩별 속도 및 고도의 오차 내용을 반영하였다.

후 기

본 논문은 '국토교통부'가 출연하고 '국토교통과학기술진흥원'에서 위탁 시행한 '항공안전 기술개발사업'으로 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] 김찬조, "T-50 개발 경험으로 쓴 실전 비행 시험", 청문각, 2007, pp.156-173
- [2] FAA AC23-8C, "Flight Test Guide for Certification for Part 23 Airplanes", 2011, pp. 148-152
- [3] FAA Order 4040.26B, "Aircraft Certification Service Flight Test Risk Management Program", 2012, pp. C1-C3, D1-D2