

## 技術論文

## T-50 엔진 공중재시동 시험

정주현\*, 이상효\*, 박선욱\*, 정인면\*, 이상백\*

## T-50 Engine Airstart Test

Joo-Hyun Jung\*, Sang-Hyo Lee\*, Sun-Wook Park\*, In-Myon Jeong\* and Sang-Baek Lee\*

## ABSTRACT

For single engine application like T-50, advanced supersonic jet trainer, airstart capability is very important. This paper presents the results of airstart tests performed to verify T-50 airstart capability for various flight condition. The tests include spooldown, APU assisted and auto-relight airstart tests. Except for the auto-relight tests T-50 engine was successfully restarted for all airstart tests. After modifying FADEC flameout detection schedule, auto-relight tests also were successfully demonstrated. Through T-50 engine airstart tests excellent T-50 airstart capability was validated.

## 초 록

T-50과 같이 단발 엔진을 장착한 항공기의 경우, 공중에서 엔진의 재시동 능력은 매우 중요한데, 본 논문에서는 T-50 엔진의 공중재시동 능력을 검증하기 위해 다양한 비행조건에서 수행한 Spooldown 공중재시동과 APU 보조 공중재시동(APU Assisted Airstart) 그리고 자동재점화(Auto-Relight) 공중재시동 시험 결과를 제시하였다. 자동재점화 공중재시동이 실패하기도 했으나, FADEC의 실화감지 스케줄을 수정한 후 재시동에 성공하는 등 계획된 시험은 모두 성공적으로 수행되어 T-50의 우수한 공중재시동 능력을 확인할 수 있었다.

**Key Words** : Airstart(공중재시동), Spooldown, APU Assisted Airstart(APU 보조 공중재시동), Auto-Relight(자동재점화), FADEC

## 1. 서 론

T-50의 각 계통과 전체 시스템에 대한 요구도를 검증하고, 항공기 운용에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 다양한 비행시험을 수행하였는데, 본 논문에서는 T-50 엔진의 공중재시동 능력을 검증하기 위해 실시한 시험 결과를 다루었다.

T-50과 같이 단발 엔진을 장착한 훈련기의 경우, 공중에서 엔진의 재시동 능력은 매우 중요하

다. 단발 엔진을 장착한 F-16의 경우에는 엔진과 항공기의 개발이 동시에 이루어져 F-16에 장착된 초기 F100 계열 엔진의 경우 엔진의 재시동 시험이 폭넓게 수행되었다. 하지만, 설계 변경 또는 성능 향상된 F100 엔진 파생형은 기본적인 하드웨어를 초기 엔진과 공유하고 있기 때문에 유사한 재시동 능력을 보유하고 있다고 판단되어 제한적인 공중재시동 시험이 이루어졌다.

T-50에 장착된 F404-GE-102 엔진은 F-18C/D형 등에 장착된 F404-GE-402 엔진의 주요 하드웨어를 유지한 채 FADEC을 적용하고 단발 엔진의 신뢰도와 안전성을 향상시키도록 개발되었다. 따라서, F404-GE-102 엔진의 공중재시동 능력은 F404-GE-402 엔진의 그것과 유사하다고 볼 수

† 2005년 12월 5일 접수 ~ 2006년 1월 4일 심사완료

\* 정회원, 한국항공우주산업(주)

연락처, E-mail : candyman@koreaero.com

경남 사천시 사남면 유천리 802번지

있다. 또한, 개발기간 중에 수행한 고고도 시험을 통해 F404-GE-102 엔진의 재시동 능력을 충분히 검증하였다[1]. 이러한 이유로 T-50의 공중재시동 시험은 새로 개발된 엔진을 장착한 경우와 같이 폭넓게 이루어지고 않고, 제한적인 범위 내에서 장착 엔진의 재시동 능력을 검증할 수 있도록 계획되었다[2].

T-50의 공중재시동 시험은 엔진과 APU 규격서의 내용을 토대로 재시동 가능 운용 영역 내의 다양한 비행조건에서 수행되었으며, 시험은 Spooldown 공중재시동과 APU 보조 공중재시동 그리고 자동재점화 공중재시동 등을 포함한다.

## II. 본 론

### 2.1 T-50 시동시스템 및 지상 시동

T-50의 시동시스템은 Fig. 1과 같이 항공기에 탑재된 APU (Auxiliary Power Unit), ATS (Air Turbine Starter), AMAD (Aircraft Mounted Accessary Drive), PTO (Power Take Off)축 그리고 EMAD (Engine Mounted Accessary Drive) 등으로 구성되어 있다.

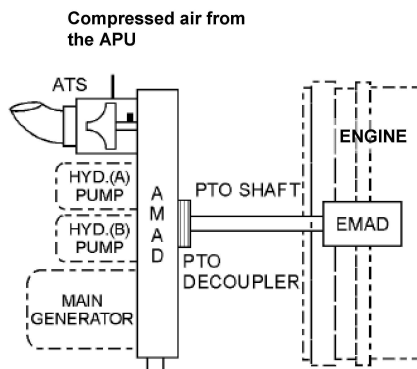


Fig. 1. Schematic of T-50 Starting System

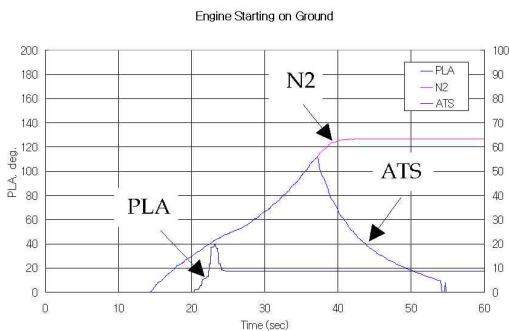


Fig. 2. Engine Start on Ground

시동 시 엔진의 가속 특성은 식 (1)과 (2)와 같은 시동관계식을 통해 간단히 살펴볼 수 있는데 [3], 이 식들은 공중재시동 특성을 이해하는 데에도 유용하다.

$$T_{net} = I_m \times \alpha \tag{1}$$

$$T_{net} = T_D + T_c - T_f - T_p - T_a \tag{2}$$

$T_{net}$  : Net accelerating torque

$I_m$  : Equivalent system mass moment of inertia

$\alpha$  : Resultant angular acceleration

$T_D$  : Torque delivered by starter

$T_c$  : Applied torque resulting from combustion of fuel

$T_f$  : Torque to overcome rotor bearing and shaft seal friction

$T_p$  : Torque to move air through the propulsion system (pumping torque)

$T_a$  : Torque to drive engine aircraft accessories (pump(s), generator(s), etc.)

T-50 엔진의 일반적인 지상 시동 절차는 조종사가 APU를 가동하고, APU에서 생성된 고압공기를 통해 ATS가 엔진을 특정 회전수까지 가속시키면 Power Lever Angle (PLA)을 OFF에서 아이들로 전진시키는 것으로 이루어져 있는데, Fig. 2에는 지상 시동 시에 ATS 회전수와 엔진의 코어회전수(N2) 그리고 PLA의 변화를 나타내었다.

Fig. 2를 살펴보면 시동 초기에는 ATS를 통해 제공되는 토크( $T_D$ )가 엔진축에 작용하는 저항들 ( $T_b$ ,  $T_p$ ,  $T_a$ )을 극복하고 엔진을 가속시키며, PLA를 아이들 (대략 20도)에 위치시킨 이후에는 연소기에서 점화가 이루어져 엔진 터빈에서 발생하는 토크( $T_c$ )가 엔진을 가속하는데 더해진다. 따라서, Fig. 2에서 점화가 이루어진 시점(대략 27초) 이후에는 엔진회전수의 증속율이 커진다. 이후 ATS가 엔진축에서 분리(Cutout)되면 엔진 터빈에서 발생하는 토크만이 작용하여 엔진을 아이들 회전수까지 가속시킨다.

### 2.2 T-50 엔진 공중재시동 시험

T-50 엔진의 공중재시동 시험은 비행 중인 항공기에 엔진 실화(Flameout)가 발생할 경우, 조종사가 비상절차에 따라 수행하는 재시동 방법인 Spooldown과 APU 보조 공중재시동, 그리고 조종사의 조작과 무관하게 FADEC이 엔진 실화를 미리 정해진 로직에 따라 감지하여 재점화를 수

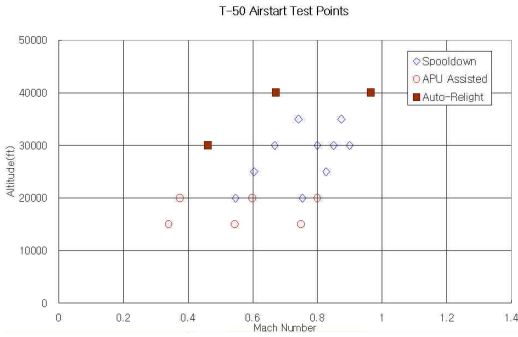


Fig. 3. T-50 Airstart Test Points

행하는 공중재시동 시험 등으로 구성되었다. 구체적인 시험 조건이나 방법은 단발 훈련기의 안전을 최우선적으로 고려하고 엔진 및 APU 규격서에 나와있는 시동관련 요구도와 엔진의 고고도 시험결과 등에 대한 기술적인 분석을 통해 결정하였는데, T-50에서 수행한 공중재시동 시험조건을 Fig. 3에 나타내었다.

2.2.1 Spooldown 공중재시동

Spooldown 공중재시동은 실화 후 엔진이 감속중인 상태에서 연소기 내의 연료를 다시 점화시켜 시동을 거는 것을 일컫는데, 재시동 중에 시동터빈은 작동하지 않고, 엔진 터빈에서 생성되는 토크에 의해서만 엔진이 가속된다. 그러므로, 재시동의 성공여부는 식 1)과 2)에서 알 수 있듯이 엔진에서 생성되는 토크( $T_e$ )가 저항들( $T_b$ ,  $T_p$ ,  $T_a$ )을 극복하고 엔진을 가속시킬 수 있을 정도로 충분한가에 달려있다.  $T_p$ 는 항공기의 비행속도와 관련이 있는데, 속도가 증가하면 윈드밀 효과에 의해  $T_p$ 가 감소하여 공중재시동이 용이해진다. 하지만, 충분한 토크가 발생하지 않을 경우 엔진은 오히려 감속(Roll Back)이 되거나 아이들회전수까지 가속되지 못하고 특정회전수에 머물러(Hung Start) 있을 수도 있다.

시험 절차는 조종사가 PLA를 OFF에 위치시킴으로써 엔진으로 공급되는 연료를 의도적으로 차단하여 실화를 유도한 다음, 다시 PLA를 아이들에 위치시켜 연료를 공급함과 동시에 점화장치를 작동시켜 재시동을 수행하는 것으로 이루어져 있다. 이때, 항공기는 재시동이 완료될 때까지 주어진 시험 속도를 일정하게 유지하도록 강하(Dive)한다.

2.2.2 APU 보조 공중재시동

APU 보조 공중재시동은 지상시동과 같이 ATS의 도움을 받아 공중재시동을 수행하는 것인데, 지상시동 시에는 정지된 상태에서 엔진을 구

동하여 가속하는 데 비해 공중재시동 시에는 감속중인 엔진과 ATS가 결합된 후, 엔진이 가속된다.

공중에서 APU의 작동방식은 엔진회전수와 관계가 있는데, 엔진회전수가 ATS 이탈회전수보다 높으면 ATS로 가는 고압공기를 차단하고, 이탈회전수보다 낮으면 공중재시동을 위해 ATS로 고압공기를 제공한다.

시험 절차는 APU가 작동 중인 시험조건에서 조종사가 PLA를 OFF에 위치시킨 후, 엔진이 ATS 이탈회전수이하로 감속되고 ATS가 구동되어 엔진축과 결합된 것을 확인한 다음, 다시 PLA를 아이들에 위치시켜 재시동을 수행하는 것으로 이루어져 있다. 이때, 항공기는 재시동이 완료될 때까지 일정한 고도를 유지하도록 수평비행을 하거나 일정한 속도를 유지하도록 강하한다.

2.2.3 자동재점화 공중재시동

FADEC에는 실화가 발생했을 경우 이를 감지하여 조종사가 인지하기 전에 또는 조종자의 조작과 무관하게 점화장치를 작동시킴으로써 공중재시동을 수행하는 기능이 있다.

T-50 엔진의 점화계통은 PLA 조작에 의해 작동되나, 공중에서는 FADEC의 실화 감지로직에 의해 실화의 가능성이 있는 경우 또는 실화가 발생하였을 경우에도 작동된다. FADEC에 의한 실화의 감지는 고도와 PLA에 의해 결정되는 EGT(Exhaust Gas Temperature) 참조값보다 측정된 EGT가 작고, 엔진회전수 감소율이 설정한 값보다 큰 경우에 이루어진다.

실제 항공기 운용 중에는 엔진으로 유입되는 연료의 일시적인 차단이나 엔진의 서지(Surge) 등으로 실화가 발생할 경우 자동재점화가 이루어질 수 있는데, 이를 모사하기 위해 자동재점화 시험은 조종사가 PLA를 OFF에 위치시킴으로써 실화를 유도한 다음, 대략 1초 후에 다시 PLA를 아이들에 위치시키는 절차로 수행되었다. 실화 후 PLA를 다시 아이들에 위치시켰을 때 엔진회전수가 상대적으로 높은 경우에는 FADEC의 실화감지로직에 의해 점화장치가 작동되는데, 이것이 Spooldown 공중재시동과 다른 점이다. 자동재점화 시험의 경우 엔진회전수가 높은 상황에서 재점화가 이루어지기 때문에 Spooldown보다 재시동 성공 가능성이 높다. 하지만, 대기의 온도와 밀도가 낮은 고고도에서는 재시동 시에 엔진회전수가 높다 하더라도 점화 후 엔진에서 생성되는 토크( $T_e$ )가 엔진을 아이들회전수로 원활하게 가속시킬 만큼 충분히 크지 않을 수도 있다. 따라서, 자동재점화 시험은 재시동 난이도를 고려하여 고고도에서만 이루어졌다.

2.3 공중재시동 시험 결과

2.3.1 Spooldown 공중재시동

단발 항공기의 안전을 고려하여 먼저 지상에서 Spooldown 재시동 능력을 검증하기 위한 시험을 수행하였는데[4], Fig. 4에 그 결과를 나타내었다. 지상시험에서는 PLA를 OFF에 위치시킨 이후 엔진이 빨리 감속하므로 공중재시동 시험에 비해 짧은 시간 내에 PLA를 다시 아이들로 전진시켰다. 초기 아이들 엔진회전수는 대략 70%이고, PLA를 OFF에 위치한 후에 엔진은 감속되다가 PLA를 다시 아이들로 전진시킨 후에 엔진은 가속되어 아이들회전수로 안정화되었다.

Spooldown 공중재시동 시험은 총 10개의 시험 조건에서 이루어졌는데, Fig. 5에는 고도 20,000 피트, 마하수 0.75인 조건에서 수행한 Spooldown 공중재시동의 결과를 나타내었다. Fig. 5의 Spooldown 공중재시동 결과를 Fig. 4의 지상재시동 결과와 비교해 보면, 공중재시동의 경우 PLA를 OFF에 위치시킨 후에 엔진회전수가 감소하는 정도는 Fig. 4의 지상 모사 시험결과에 비해 완만함을 알 수 있다. 이는 비행속도와 고도 차이에 따른 대기 밀도 감소로 인해 식 (2)의  $T_p$

Table 1. Spooldown Airstart Test Results

kft/Mach	① (%N2)	② (sec)	③ (%N2)	④ (%N2)	⑤ (sec)
20/0.75	83	10	50	43	12
20/0.55	83.6	11.5	48.1	41	19.4
25/0.83	87.3	13	53.2	48.5	15
25/0.6	83.7	10	53.3	46.3	16.6
30/0.85	87	7.4	60	52.3	13.8
30/0.67	83	5.9	60	51.9	14.6
35/0.87	78	2.5	70	64.3	8
35/0.74	87	2.3	70	66.6	5.4
30/0.9	89.5	44	38	36	16
30/0.8	85	69	25	24	26

- ① Initial RPM
- ② Dwell time at OFF
- ③ RPM when PLA set to IDLE
- ④ RPM at turn around
- ⑤ Time to IDLE RPM after PLA set to IDLE

가 작아지기 때문이다. 비행속도로 인해 외부의 공기를 엔진으로 흡입하기가 쉽고, 밀도 저하로 흡입하는 공기 유량이 줄어들어  $T_p$ 가 작아진다. PLA가 아이들에 위치된 이후 엔진회전수가 다시 증가하기 시작하면  $T_p$  차이로 인해 공중재시동의 경우 아이들 회전수까지 더 빨리 가속되어 안정화된다. 참고로, 공중재시동의 경우 초기 PLA가 아이들을 초과하여 위치하므로 초기 회전수는 재시동 이후의 아이들 회전수보다 높다.

T-50 공중재시동 시험에서 수행한 Spooldown 시험 결과를 Table 1에 요약하였다. 고도 20,000 피트에서 마하수 0.75와 0.55인 조건에서 각각 수행한 시험결과를 비교해 보면, 속도가 높은 경우 PLA를 다시 아이들로 전진시켰을 때, 아이들회전수에 도달하는 시간이 단축된다. 이와 같이 비행속도가 높으면 엔진회전수가 낮은 경우에도 Spooldown 공중재시동이 성공할 가능성이 높는데, 고도 30,000피트, 마하수 0.8에서 수행한 시험의 경우 엔진이 도달한 최소 회전수는 24%로 매우 낮았지만, 엔진은 정상적으로 재시동되었다.

2.3.2 APU 보조 공중재시동

APU 운용영역을 고려하여 APU 보조 공중재시동 시험은 총 6개의 시험조건에서 이루어졌는데, Fig. 6에는 고도 20,000피트, 마하수 0.6인 조건에서 수행한 시험결과를 나타내었다.

비행 중에 APU가 작동 중인 상황에서 엔진회전수가 특정회전수 아래로 떨어지면 신속한 공중재시동을 위해 ATS가 작동되는데, Fig. 6에서 알

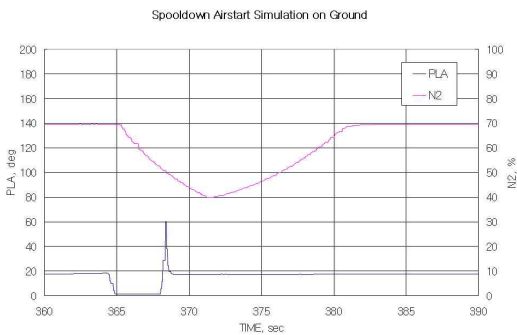


Fig. 4. 지상 모사 Spooldown 재시동

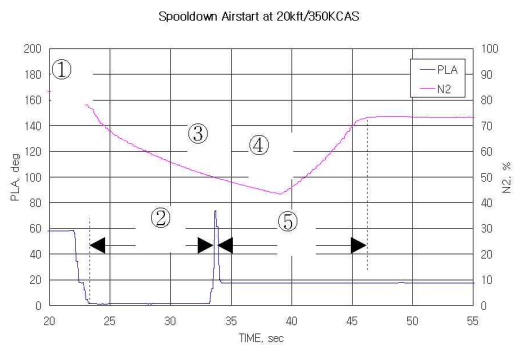


Fig. 5. Spooldown Airstart Result

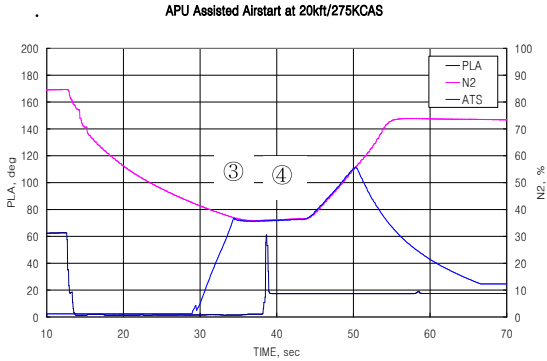


Fig. 6. APU Assisted Airstart Result

Table 2. APU Assisted Airstart Test Results

kft/Mach	① (%N2)	② (sec)	③ (%N2)	④ (%N2)	⑤ (sec)
20/0.39	87.7	58.4	36.2	34	22
20/0.6	85	25	36.9	36	20
20/0.8	76.9	30.4	39.7	38.5	17.4
15/0.35	87.7	70	35.1	34	25
15/0.55	87	23	35	34.3	18
15/0.75	76.3	27.4	37	37.2	17.3

- ① Initial RPM
- ② Dwell time at OFF
- ③ RPM at ATS engagement
- ④ RPM when PLA set to IDLE
- ⑤ Time to IDLE RPM after PLA set to IDLE

수 있듯이 PLA가 OFF에 위치해 있더라도 ATS가 구동되어 가속되고 감속중인 엔진축과 결합된다. APU 보조 공중재시동의 경우 Fig. 2의 지상시동과 달리 엔진회전수가 높을 때 ATS가 엔진축과 결합된다.

공중재시동 시험에서는 시동터빈이 결합된 이후에 엔진회전수가 크게 증가하지 않고 안정화되는데, 이는 식 (2)에서 ATS가 생성하는 토크와 저항들이 균형을 이루어 가속에 사용될 순토크가 거의 없기 때문이다. PLA를 아이들에 위치시키면 연소기 내에서 점화가 이루어지고 주엔진 터빈에서 생성된 토크가 비로소 엔진을 가속하게 된다. 한편, PLA가 아이들에 위치할 시점보다 조금 늦게 엔진이 가속되기 시작하는데, 이는 연소기 내에서 전체적인 화염이 형성되고 주엔진 터빈에서 생성된 토크가 엔진축에 작용하는 관성을 극복하고 가속되는데 어느 정도 시간이 소요되기 때문이다.

Table 2에는 APU 보조 공중재시동 시험 결과

를 요약하였다. Spooldown 공중재시동 결과와 마찬가지로 동일한 고도에서 비행속도가 높으면 PLA를 다시 아이들에 위치시켰을 때 엔진이 아이들회전수에 도달하는 시간이 짧아진다.

### 2.3.3 자동재점화 공중재시동

자동재점화 공중재시동 시험은 고도 40,000피트, 마하수 0.67인 조건에서 최초로 이루어졌는데, Fig. 7에서와 같이 재시동 중에 엔진이 아이들회전수에 도달하지 못하는 Hung 시동이 초래되었다. 엔진이 아이들회전수에 도달하지 못하자 조종사는 대략 170초쯤에서 PLA 조작에 따른 엔진 반응을 점검하였는데, 엔진회전수의 변화가 나타나지 않았다. 이와 같이 자동재점화에 의한 공중재시동이 실패했음을 확인한 후, 조종사는 계획된 대로 고도 강하를 통해 항공기의 속도를 상승시킴과 동시에 Spooldown 공중재시동 절차를 수행하여 엔진 재시동에 성공하였다.

자동재점화에 의한 재시동이 실패한 원인은 FADEC의 실화 감지로직 상의 스케줄 문제로 실화 감지가 예상보다 지연되어 신속한 점화가 이루어지지 않았기 때문이다. 실화로 인해 엔진이 감속중인 상태에서 점화가 지연되면 낮은 회전수에서 점화가 이루어지는데, 이런 경우에는 엔진

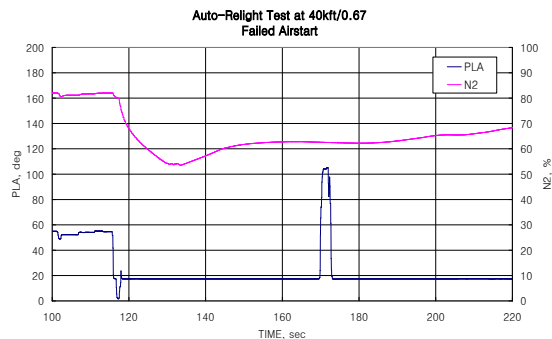


Fig. 7. Failed Auto-Relight Test

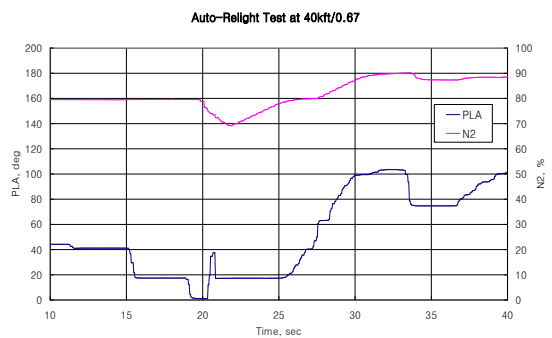


Fig. 8. Auto-Relight Test Result

으로 유입되는 유량이 작고 연소기 내의 압력이 낮아 재점화 후 엔진 터빈이 생성하는 토크가 크지 않다. 재시동의 성공 여부는 식 (1)과 (2)에서와 같이 엔진의 작동 상태와 관련이 있는데, 대기의 온도, 압력 그리고 밀도가 낮은 고고도에서는 낮은 회전수에서 재점화가 이루어지면 엔진이 아이들회전수까지 가속되지 못하고 Hung 시동과 같은 현상이 발생할 수 있다.

따라서, 고고도에서 FADEC의 실화 감지 기능을 통해 신속한 재점화가 이루어지도록 고도와 PLA에 의해 결정되는 EGT 참조값을 상향 조정 한 이후에 자동재점화 시험을 다시 수행하였고, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 반복된 시험에서는 실화를 유발한 이후 PLA를 다시 아이들에 위치시켰을 때 비교적 높은 회전수인 70% 부근에서 FADEC에 의한 재점화가 신속히 이루어졌고, 엔진은 아이들회전수로 원만하게 가속되어 안정화되었다.

고도 40,000피트, 마하수 0.96인 조건과 고도 30,000피트, 마하수 0.46인 조건에서 각각 수행한 자동재점화 시험도 Fig. 8과 유사한 결과를 보였다.

### III. 결 론

T-50 엔진 공중재시동 시험을 통해 다양한 비행조건에서 Spooldown, APU 보조, 자동재점화 공중재시동 시험들을 수행하여 T-50 엔진의 공중재시동 능력을 확인할 수 있었다. 특히, 실화감지 스케줄과 관련된 문제로 고고도에서 수행한 자동재점화 공중재시동이 실패했을 때에도 연이은 Spooldown 공중재시동이 성공적으로 수행되는 등 T-50 엔진은 뛰어난 공중재시동 능력을 보여주었다.

시험결과를 통해서도 알 수 있듯이 일반적으로 비행속도가 높은 경우에는 Spooldown 공중재시동이 성공할 가능성이 높다. 따라서, 고고도에서 엔진실화가 발생하면 항공기의 속도를 증가시키면서 공중재시동 절차를 수행하는 것이 바람직하다. 그런데, T-50 흡입구 풍동 시험 결과에

의하면 비행속도가 높고 흡입 유량이 낮은 경우에는 흡입구 덕트 내의 공진 현상 때문에 엔진으로 유입되는 유동의 불안정성이 증가한다. 이런 현상이 공중재시동에 영향을 미칠 수도 있는데, 마하수가 높고 엔진회전수가 낮아 흡입유량이 작은 조건에서 수행한 Spooldown 공중재시동들이 성공적으로 수행되어 흡입구 풍동시험에서 나타난 유동 불안정성이 재시동에 별다른 영향을 미치지 않음을 확인하였다. T-50 비행교범에는 고고도에서 엔진 실화가 발생하면 항공기의 마하수를 증가시키면서 Spooldown 공중재시동을 수행하도록 하는 비상절차와 APU 작동 영역 내에서 수행하는 APU 보조 공중재시동과 관련된 비상절차 등이 제시되어 있는데, 공중재시동 시험을 통해 비행교범에 제시된 비상절차의 타당성을 검증할 수 있었다.

실화의 가능성이 있거나 실화가 발생하였을 때, 이를 감지하여 조종사가 인지하기 전에 또는 조종사의 조작과 무관하게 점화장치를 작동시킴으로써 실화를 예방하거나 신속한 공중재시동을 수행하는 FADEC의 자동재점화 기능은 매우 중요하다. T-50 엔진 공중재시동 시험 중 실시한 자동재점화 시험을 통해 FADEC의 실화감지 스케줄 상의 문제를 확인하고, 이를 수정할 수 있었다.

### 참고문헌

- 1) F404-GE-102 Engine 983002-1A Altitude Test, GE Aircraft Engines, Nov. 2001.
- 2) Test Information Sheet for Propulsion Test, Korea Aerospace Industries, Ltd., Oct. 2003.
- 3) Introduction to Starting Systems, AIR4151, SAE, 1996.
- 4) 정주현, 이상효, 박선욱, 최태훈, 이충환, 이동규, "T-50 엔진 초기 공중재시동 시험", 한국항공우주학회 춘계학술발표회 논문집, 2004, pp. 663~666.