研究論文

터빈엔진시험을 통한 제트연료 변경에 따른 엔진성능 변화 연구

김유일*† · 민성기**

Study on the effect of Jet Fuel alteration on Turbine Engine Performances through Turbine Engine Test

Youil Kim*† · Seongki Min**

ABSTRACT

The engine ground and altitude tests were carried out to investigate the effect of jet fuel alteration on the performance of a small turbojet engine. JP-S was supplied 8% higher than JP-8 by fuel metering system at the same command. The employment of JP-S showed the similar starting characteristic to that of JP-8, however, difference in the ignition time and acceleration rate of engine speed due to the difference of fuel flow rate by fuel metering system was observed. In spite of jet fuel alteration, the test results yield the similar steady-state engine performance in net thrust, air flow, exhaust gas temperature, etc. On the other hand, the fuel consumption of JP-S increased by 5 % compared with that of JP-8. In point of specific fuel consumption (SFC), SFC of JP-S was approximately 1.1~2.6 %, 5 % higher than that of JP-8 in ground and altitude tests respectively at the same thrust.

초 록

제트연료변경에 따른 엔진 운용 특성 변화를 살펴보기 위해 JP-8 연료와 JP-S 연료를 사용하여 소형터보제트엔진의 지상시험 및 고도시험을 수행하였다. 비중이 18% 높은 JP-S 연료에 대한 연료조절시스템 특성은 동일 연료공급명령에 대한 실 연료공급량이 JP-8 연료보다 8% 많이 공급되었다. 시동특성은 연료조절시스템의 명령 대비 공급량의 차이로 인한 점화시점 및 엔진 회전수 가속율 등의 변화를 제외하고는 유사한 특성을 보였다. 정상상태 성능 특성은 순 추력의 일부 구간을 제외하고는 순 추력과 공기유량, 배기가스온도 등 대부분의 엔진 성능 변수가 1% 이내로 유사하였으나 연료소모량만은 연료의 발열량 차이로 인해 최대 5 %이상 차이가 발생하였다. 이를 동일 추력 대비 비 연료소모율로 비교할 때 지상시험에서는 약 1.1~2.6 %, 고공환경시험에서는 5 % 이상 차이가 발생하였다.

Key Words: Small Turbojet Engine(소형터보제트엔진), Jet Fuel(제트연료), Ground Test(지상시험), Altitude Test(고공환경시험), Net Thrust(순 추력), Specific Fuel Consumption(비연료소모율)

접수일 2010. 11. 29, 수정완료일 2011. 2. 26, 게재확정일 2011. 3. 2
* 정회원, 국방과학연구소 1기술연구본부 5부
** 종신회원, 국방과학연구소 1기술연구본부 5부
† 교신저자, E-mail: yikim@add.re.kr
[이 논문은 한국추진공학회 2010년도 추계학술대회(2010. 11. 25-26, 제주 샤인빌리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

민간항공기용 터빈엔진과 달리, 군용 터빈엔진의 경우 운용온도, 저장환경 및 기간, 군수지원

상황, 적용 비행체 등에 따라 다양한 종류의 제트연료가 사용되며, 필요에 따라 특수 목적의 제트연료 또한 개발된다[1-3]. 이러한 경우, 적용 대상 제트연료들은 터빈엔진 적용 가능성을 검토하고, 터빈엔진 적용에 문제되지 않을 경우 공급, 운용된다.

일반적으로 변경된 제트연료의 터빈엔진 적용 가능성 판단을 위해서는, 변경 제트연료에 대한 터빈엔진 부품 소재의 적합성 검토와 엔진 수명, 성능, 점화, 시동, 가감속 등의 엔진 운용 특성 변화에 대한 영향성 평가를 수행한다. 실 예로, 미 공군과 해군에서는 적용 무기체계에 따라 1944년 JP-1 제트연료를 시작으로 다양한 JP 계열 연료와 Bio Jet Fuel 등을 개발하여 터빈엔진 소재 적합성 검토를 비롯하여 터빈엔진 적용 가능성에 대해 연구를 수행 중에 있다[4].

국내에서는 해성 I 유도무기의 추진기관으로 소형터보제트엔진이 국방과학연구소 주도하에 (주)삼성테크윈 등의 국내 시제업체를 활용하여 2002년도에 개발되었으며, 케로신 계열의 JP-8(MIL-T-83133) 제트연료를 사용하고 있다. 그러나 최근 해성 I 유도무기의 수출가능성이 제기됨에 따라, 수출 대상국가의 군수지원이 가능한 제트연료의 소형터보제트엔진 적용가능성 판단 검토가 요구되어 이를 대비한 터빈엔진의 연료 적합성 판단 방법 및 절차가 필요하게 되었다. 따라서 본 연구는 그 일환으로 터빈엔진 적용 제트연료 변경에 따른 엔진의 시동, 점화, 성능 등의 터빈엔진 운용특성 변화를 터빈엔진 지상시험 및 고공환경시험을 통해 연구하여 향후 다른 제트연료 변경에 대한 터빈엔진 적합성 평가시 참고할 예정이다.

2. 시험준비

2.1 시험대상 터빈엔진

본 시험의 대상엔진은 Fig. 1과 같이 대한민국 해군에서 운용 중인 해성 I 유도무기의 추진기관인 소형터보제트엔진인데, 추력 1,000 lbf 급 단축 터보제트엔진으로서 흡입구, 축류형 4단 압축기, 환형 직류형 연소기, 축류형 1단 터빈, 수축배기노즐로 구성된 엔진 본체와 발전기, 연료조절시스템, 윤활탱크, 디지털 엔진제어기 등의 보기류로 구성되었다. 이밖에도 동 엔진은 추가의 시동장치를 필요로 하지 않는 윈드밀 시동 능력을 보유하고 있다.

2.2 시험대상 제트연료

시험에 사용된 제트연료는 아래 Table 1과 같이 두 종류인데, 첫 번째 제트연료는 현재 해성 I 유도무기가 사용 중인 JP-8 연료로 원유로부터 추출된 케로신 계열의 연료이고, 두 번째 제트연료는 단위체적당 에너지가 JP-8보다 높은 JP-S 연료이다.

2.3 지상시험설비

소형터보제트엔진의 연료적용시험 중 지상시험은 (주)삼성테크윈에서 보유하고 있는 가스터빈엔진 시운전실을 활용하였다. 본 시운전실은

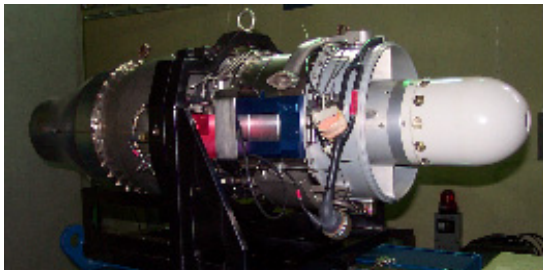

Fig. 1 Small Turbojet Engine

Table 1. Jet Fuel Properties

Properties	JP-8	JP-S
Approximate Formula	$C_{11}H_{21}$	$C_{10}H_{16}$
Flash Point, ℃, min	38	55
Freezing Point, ℃, max	-47	-79
Net Heating Value, MJ/㎥	34,561	39,434
Viscosity, cSt	8(@-20℃)	9(@-18℃)

가스터빈엔진 시험평가를 위해 1994년 미국 ASE사와 공동 개발된 것으로서, 연료공급을 위한 연료 시스템과 시동용 공기 및 각종 액추에이터 작동용 공기공급을 위한 공기공급장치, 시험실 각종 장비 운용을 위한 전원공급장치, 시험대상엔진 및 시험설비 측정변수를 획득, 저장하는 획득장치 등으로 구성되었으며 주기적인 검교정을 통해 아래 Table 2와 같은 정확도를 유지하고 있다. Fig. 2는 지상시험설비에 장착된 소형터보제트엔진을 보여주고 있다.

2.4 고공환경시험설비

고공환경시험설비는 엔진의 주변 조건을 실제 비행조건과 유사하게 모사해 주는 설비로서, 터빈엔진의 실 비행조건에서의 운용 특성 분석을 위해 활용된다. 국내에서는 1999년 10월 한국항공우주연구원에 구축된 3,000 lbf 급 고공환경시험설비가 있으며[5], 소형터보제트엔진의 고공환경 운용 조건에서의 연료적용시험은 동 설비를 활용하여 수행하였다. 설비사양 및 정확도는 Table 3, Table 4와 같으며 Fig. 3은 고공환경시험설비에 장착된 소형터보제트엔진을 보여주고 있다.

Table 2. Measured Parameter and Accuracy of Sea-level test facility

Parameter	Type	Accuracy
Thrust	Loadcell	± 0.5% FS
Fuel Flow	Coriolis Mass Flowmeter	± 0.5% FS
Ambient Temperature	Type K T/C	± 1.0℃
Static Pressure	PSI 8400	± 0.5% FS

Fig. 2 Sea-level test facility

3. 시험결과

3.1 지상시험

지상시험을 통해 연료변경에 따른 엔진 연료

Table 3. Altitude Engine Test Facility Specification

Specification	Value
Altitude	0～40,000 ft
Mach Number	0～1.0
Inlet Temperature	-75～110 ℃
Inlet Pressure	31～350 kPa
Max. Thrust	3,000 lbf

Table 4. Measured Parameter and Accuracy of Altitude Engine Test Facility

Parameter	Type	Accuracy
Air Flow	Subsonic Venturi	less than 1 % Rd
Fuel Flow	Coriolis Mass Flowmeter	± 0.2 % Rd
Temperature	Type K T/C	± 1.0℃
Pressure	Pneumatic	±0.05 % FS
Thrust	Load Cell	±0.027 % FS

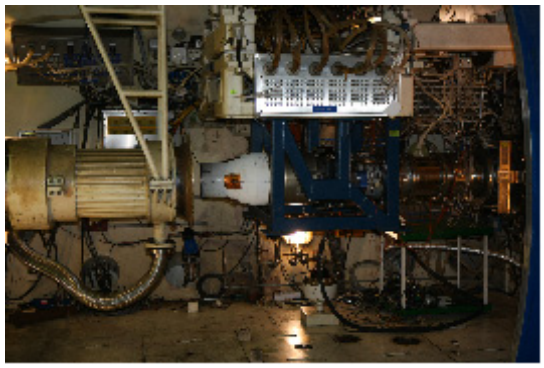

Fig. 3 Altitude Engine Test Facility

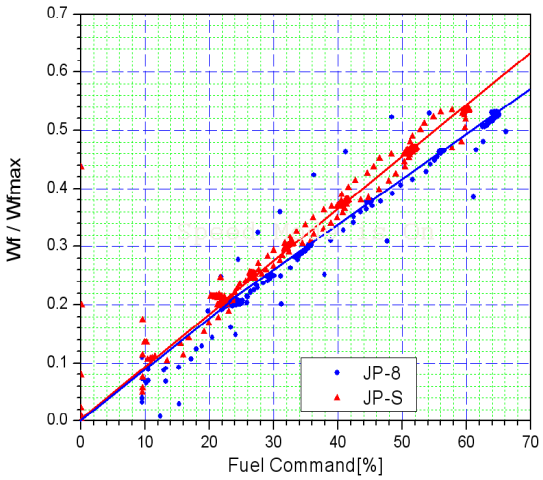

Fig. 4 Fuel Flow vs. Fuel Command

조절장치의 연료공급명령 대 실 연료공급량 특성과 엔진 시동 특성, 정상상태의 엔진 성능 특성 등을 확인하였다. 연료조절장치의 연료공급명령 대 실 연료공급량(Wf) 특성식은 시동, 점화, 가·감속 및 엔진 회전수 추종 등의 터빈엔진 제어를 위해 필요한 것으로서 제트연료 변경시 반드시 확인하여 엔진 제어로직에 적용되어야한다. Fig. 4는 동일 연료조절장치에 대한 두 연료의 연료공급명령 대 실 연료공급량 특성 곡선인데, 엔진제어를 위한 선형성은 유지되나 기울기가 달라져 최대연료공급명령의 60%에서 약 8%정도 JP-S 연료의 공급유량이 높다. 이는 비중 차이로 발생될 것으로 예상되는 18%보다는 낮은 값으로 연료 변경시 연료공급시스템의 특성이 변화하는 것을 확인할 수 있다.

터빈엔진 시동특성은 Fig. 5와 같이, 앞서 언급한 연료공급명령 대 실 연료공급량 특성 차이로 인해 동일 연료공급명령 대비 JP-S 연료의 점화연료량 및 공급 연료량이 많아 점화시점이 빠르고 가속 구간에서의 엔진회전수(RPM) 증가율도 높았다. 이는 Fig. 5의 엔진배기가스온도(EGT)로 판단할 수 있는데 JP-S 연료의 점화시점이 JP-8 연료의 점화시점보다 약 0.4초 정도 빠르고 가속구간에서 최고 170℃ 정도 온도 차이가 발생하였다. 하지만 두 연료 모두 정상적으로 목표회전수에는 도달하였다.

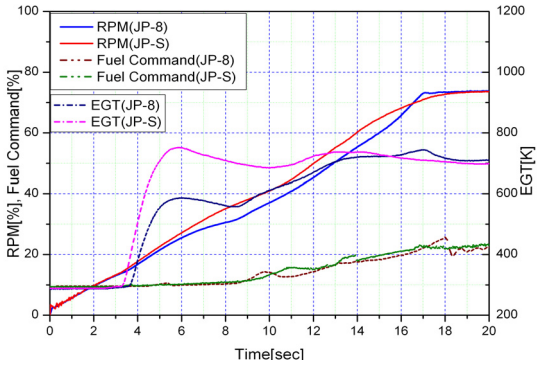

Fig. 5 Engine Speeds vs. Time in Start phase (Engine Ground Test)

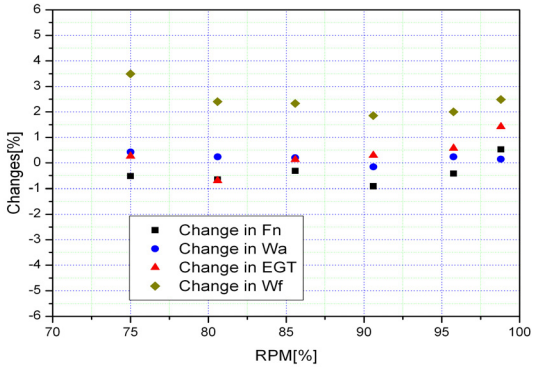

Fig. 6 Change in Engine Performances (Engine Ground Test)

JP-S 연료 적용에 따른 정상상태에서의 터빈엔진 성능 변화를 JP-8 적용 성능 기준 백분율로 $Change = \frac{X_{JP-S} - X_{JP-8}}{X_{JP-8}} \times 100$과 같이 정의하였는데, Fig. 6과 같이 순 추력(Fn)과 공기량(Wa), 엔진배기가스온도의 경우 JP-8 연료 적용 엔진 성능 대비 약 1% 이내로 성능 변화가 미미하나 연료소모량(Wf)은 약 1.9~3.5% 정도 증가하는 것을 알 수 있다. 이를 순 추력대비 비연료소모율(Specific Fuel Consumption, SFC)로 나타낼 경우, Fig. 7과 같이 JP-S 연료를 사용할 경우 약 1.1~2.6% 정도 비연료소모율이 높아짐을 알 수 있는데 이는 단순 순발열량을 고려하여 동일 추력을 내기위한 연료량 증가량 3% 보다는 조금 낮은 편이다.

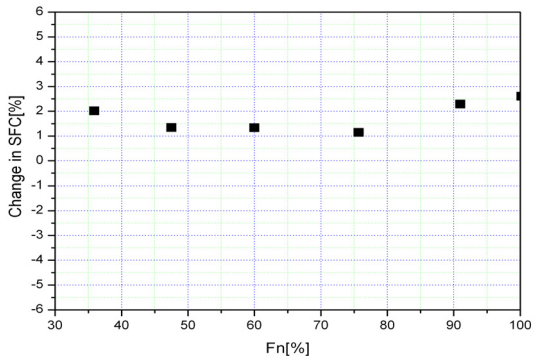

Fig. 7 Change in Specific Fuel Consumption vs. Net Thrust (Engine Ground Test)

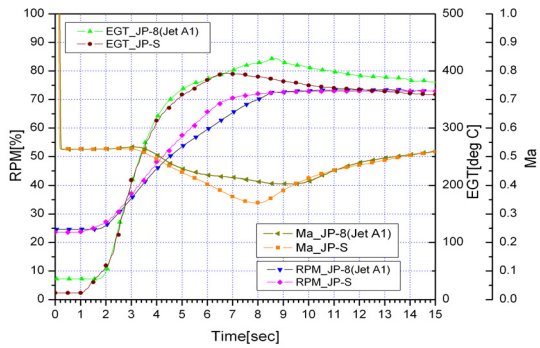

Fig. 8 Engine Speeds vs. Time in Start phase (Engine Altitude Test)

3.2 고공환경시험

고공환경시험에서도 지상시험과 동일하게 두 종류의 연료에 대해 각각 시동시험과 성능시험을 실시하여 그 결과를 비교하였다. 시험 수행시 JP-8 연료를 대신하여 JP-8과 연료 물성치가 동일하고 민수용으로 구매 가능한 Jet A1 연료를 사용하였다.

시동시험은 해면고도(Sea Level, SL), 표준대기온도(Standard Day, 15℃), 엔진 입구 마하수(Ma) 0.5 기준의 윈드밀링 시동으로 수행되었다. 시험결과 Fig. 8과 같이 동일 입구 마하수 기준에서 약 0.8초 정도의 점화시점 차이는 발생하였으나 가속 구간에서의 EGT 증가 경향과 73% 공회전수 도달시간 약 8.5초 등 전체적으로 두 종류 연료에 대한 시동 특성은 유사한 것으로 판단된다.

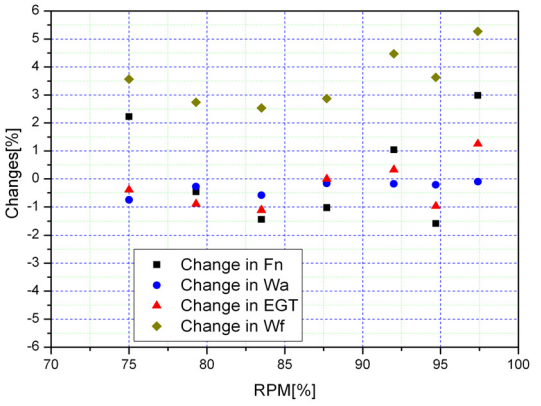

Fig. 9 Change in Engine Performances (Engine Altitude Test)

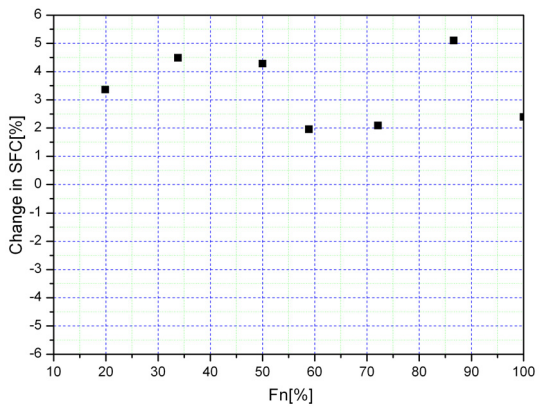

Fig. 10 Change in Specific Fuel Consumption vs. Net Thrust (Engine Altitude Test)

시동 이후 정상상태에서의 엔진 성능시험은 Ma 0.85, 해면고도, 표준대기온도 조건에 대해 수행되었다. Jet A1 연료 대비 JP-S 연료의 성능 특성 변화는 Fig. 9와 같이 순 추력의 경우 최대회전수 부근에서 약 3% 증대하는 것으로 평가되었으며 공기유량과 배기가스온도의 경우 1% 이내로 유사하였다. 하지만 연료소모량은 발열량의 차이에 의해 최대회전수 부근에서 약 5% 정도 증가하였다. 연료소모량을 순 추력대비 비연료소모율(Specific Fuel Consumption, SFC)로 나타낼 경우, Fig. 10과 같이 JP-S 연료를 사용하면 최대 5% 이상 비연료소모율이 높아짐을 알 수 있다.

4. 결 론

제트연료변경에 따른 엔진 운용 특성 변화를 살펴보기 위해 JP-8 연료와 JP-S 연료를 사용하여 소형터보제트엔진의 지상시험 및 고도시험을 수행하였다.

지상시험에서 엔진제어에 활용되는 연료조절장치의 연료공급명령 대 실 연료공급량 특성이 변화되는 것을 확인하였는데, 18%의 비중차이가 나는 두 연료에 대하여 동일 연료공급명령에 대한 실 연료공급량은 지상시험 최대 운용 연료량 기준 약 8% 차이를 보였다. 이는 엔진에 사용되는 연료가 변경될 경우 연료의 비중 변경만을 고려한 연료시스템 특성 변화를 예측해서는 안된다는 것을 의미하는 것으로서, 이와 같이 엔진 적용 제트연료 변경시 연료시스템 리그시험과 엔진 적용시험을 통해 연료조절시스템의 연료공급 특성식을 확인해야한다.

지상시험과 고공환경시험 결과로부터 확인된 본 시험에 사용된 두 연료에 대한 시동특성 변화는 제어되는 연료량의 차이로 인해 발생된 점화시점, 가속율 등의 변화를 제외하고는 유사한 성능 특성을 보였다. 따라서 앞서 언급한 바와 같이 연료조절시스템의 연료공급 특성 식을 보다 정확히 엔진제어기에 반영하면 시동특성 변화는 더욱 낮아질 것으로 판단된다.

연료변경에 따른 엔진 정상상태 성능 특성은 순 추력의 일부 구간을 제외하고는 공기유량, 배기가스온도 등 대부분의 엔진 성능 변수가 1% 이내로 유사하였다. 단, 연료소모량은 연료의 발열량 차이로 인해 최대 5 %이상 차이가 발생하였다. 이를 동일 추력 대비 비 연료소모율로 비교할 때 지상시험에서는 약 1.1~2.6 %, 고공환경시험에서는 5% 이상 차이가 발생하였다.

따라서 향후 엔진 적용 제트연료의 변경이 발생할 때, 구성품 리그시험부터의 연료적합성 연구를 수행해야하나 예산 및 기간 등으로 인해 불가능할 경우 본 연구에서 수행한 바와 같이 변경 연료에 대한 연료조절시스템 연료공급 특성식을 우선 확인하고 이후 지상시험 및 고공환경시험 등을 통해 엔진 운용 특성을 확인해서 변경 연료에 대한 엔진 적합성을 확인한다. 이 밖에도 본 연구에는 포함되지 않았지만 변경연료에 대한 내구수명, 소재 적합성 등에 대한 검토가 추가되어야한다.

참 고 문 헌

1. Tim Edwards, "Liquid Fuel and Propellants for Arespace Propulsion:1903-2003," Journal of Propusion and Power, Vol. 19, No. 6, November-December 2003, pp.1089-1107
2. D.R.Ballai, "Jet Fuel Technology and Ground Applications," AIAA 93-0129
3. S. P. Heneghan, S. Zabarnick, D. R. Ballal, W. E. Harrison, III, "JP-8+100 - The development of high thermal stability jet fuel," AIAA 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV Jan 15-18, 1996
4. Burdette, G. W., Lander, H. R., and McCoy, J. R., “High-Energy Fuels for Cruise Missiles,” Journal of Energy, Vol. 2, No. 5, 1978, pp.289-292
5. 이진근, 김춘택, 양수석, 이대성, “고공 환경 엔진 시험,” 한국추진공학회지, 제9권, 제4호, 2005, pp.104-111
6. 전용민, 양인영, 남삼식, 김춘택, 양수석, 이대성, “소형 터보제트 엔진 시험 및 불확도 분석,” 한국항공우주연구원, 제30권, 제5호, 2002. 8, pp.118-126