습도가 엔진성능에 미치는 영향에 대한 실험적 고찰

이보화*, 이경재**, 양수석***, 김춘택****

Study on the Humidity Effect on Gas turbine Engine Performances

BoHwa Lee*, KyungJae Lee**, SooSeok Yang***, ChunTaek Kim****

Abstract

The moisture in the atmosphere exerts a lot of influence upon Gas turbine engine performances. There is a noticeable influence of wet air at the summer sea level, high flight mach number and low engine rpm increasingly. An altitude Engine Test Facility is used to accomplish the engine performance tests at dry air condition and wet air condition, through which engine performance results is revealed. Also, Gas turbine Simulation Program is used to predict the variation of engine performance due to inlet humidity. In the result, net thrust and specific fuel consumption measured -2.826% and 1.325%, respectively at wet air condition compared to dry air condition.

초 록

대기 중의 수증기는 가스터빈엔진의 주요성능에 많은 영향을 끼친다. 습공기의 영향은 기온 및 기압이 높은 여름철 해면 고도, 높은 비행 마하수 그리고 낮은 엔진 회전수에서 이 더욱 두드러진다. 이러한 습공기 유입에 따른 가스터빈 엔진의 성능변화의 정도를 살펴보고자 가스터빈 시뮬레이션 프로그램(GSP)과 200lbf 급 초소형 터보제트 엔진의 고공환경 성능시험을 통해 습도가 엔진성능에 미치는 영향에 대하여 알아보았다. 고공환경 엔진시험을 통해, 건공기 유입에 비해 습공기 유입 시 순추력에서 2.826% 낮게, 비연료소모율에서 1.325% 높게 측정되었다.

키워드 : 고공환경 엔진시험설비 (Altitude Engine Test Facility), 엔진성능(Engine Performance) 습도영향(Humidity Effect), 가스터빈 시뮬레이션 프로그램(Gas turbine Simulation Program)

1. 서 론

한국항공우주연구원에서는 1999년 3,000lbf급 엔진 고공환경시험 설비(AETF)를 설치한 이래로 가스터빈 엔진의 고공환경 성능시험 수행을 위해 이를 활용해오고 있다. AETF는 시험부(test cell)

접수일(2010년 1월 6일), 수정일(1차 : 2010년 4월 13일, 2차 : 2010년 6월 23일, 게재 확정일 : 2010년 10월 1일)
* 추진기관팀/bhlee@kari.re.kr *** 추진기관팀 /lucia01@kari.re.kr ***추진기관팀/ssyang@kari.re.kr
**** KHP 엔진팀/ctkim@kari.re.kr

의 공간 내에 실제 엔진이 운용되는 고도 및 비행속도 그리고 대기환경조건(hot/cold/STD day condition)에 해당하는 환경조건을 만들어 주어 시험용 엔진의 실운용 특성을 파악하기 위한 것으로서 엔진개발에 필수적으로 필요한 설비이다. 따라서 이 고도 모사용 설비의 주요 요소들은 엔진의 입구와 주위에서의 공기온도 및 압력을 실제 엔진이 운용되는 환경에서의 조건과 동일하게 설정할 수 있도록 구성되어 있다.

가스터빈 엔진은 대용량의 공기를 흡입하여 작동 유체로 삼기 때문에 작동유체인 공기의 물성변화에 민감하게 반응한다. 공기의 물성변화는 대표적으로 수증기 형태로 대기에 포함되어 있는 수분의 존재를 들 수 있는데, 수증기를 함유한 습공기는 수증기 함유량에 따라 건공기와는 다른 화학적 조성을 가지며 건공기에 대한 습공기의 물성변화 정도는 단위 체적 내 포함되어 있는 수증기와 건공기의 질량비로 정의하는 절대 습도에 의하여 결정된다. 작동유체의 열역학적 물성치 중 가스터빈 엔진의 공력 성능과 직접적인 관련이 있는 것은 기체상수(R), 비열비(r)이며 그림 1과 같이 기체상수는 습도에 따라 그 값의 변화량이 비열비보다 훨씬 크다. 비열비는 유동장의 상사에 관련된 무차원수이므로 기체상수와 비열비의 변화는 곧 엔진 내 국부 마하수와 등엔프로피

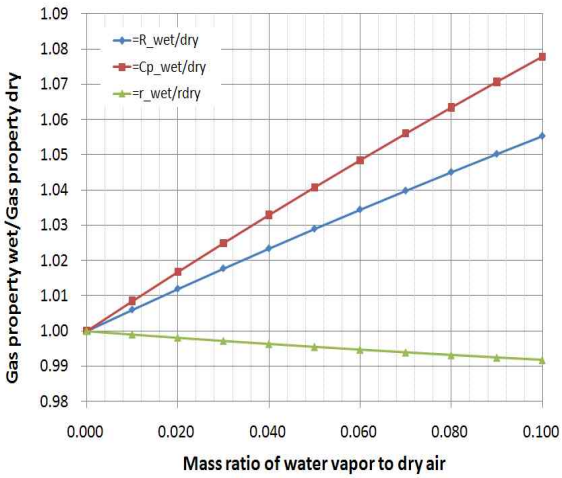

그림1 Gas property variation according to mass ratio of water vapor to dry air

지수값의 변화를 의미하므로 공기의 물성변화에 따라 엔진 성능변화가 나타나게 되는 것이다.

습도의 영향에 대해서는 측정한 엔진의 주요 성능 인자(연료유량, 엔진회전수, 공기유량, 추력, 비연료소모율)을 건공기 조건으로 제조정하는 것이 필요하다.

습공기 유입에 따른 엔진 성능변화에 대한 정량적 평가는 1950년대 NACA의 Samuels & Gale에 의해 처음으로 이루어졌으며[1], Fishbeyn & Pervyshin은 바이패스 비가 0에서 4정도의 범위에 있는 터보팬 엔진까지 확대하여 흡습의 영향을 평가하였다[2]. Bird & Grabe는 엔진 출력의 경우 Samuels & Gale 및 Fishbeyn & Pervyshin의 예측 결과와 반대되는 경향을 지닌 엔진의 예가 있음을 밝혔다[3]. 구성품 수준의 습도 보정기법이 AGARD에서 보고되었으며[4], 이시우 등에 의해서 엔진 성능변수에 대한 차원 해석을 바탕으로 구성품 수준의 습도 보정을 수행하였다. 습공기 유입에 따른 영향은 대상 엔진의 형식에 따라 그 정도가 다르게 나타나므로 보다 정확한 평가를 위해서는 구성품 수준의 습도보정이 적용되어야 하며 물리적 성능 변수를 제어하는 경우에는 구성품 단위로 성능 특성 변화를 고려해야 하므로 본 논문에서 사용한 습도보정기법은 AGARD와 이시우 등에 의해 제시한 방법을 사용하였다[5].

2. 고공환경 시험설비

고공환경 시험설비를 사용하여 터보제트 엔진의 성능에 영향을 미치는 습도의 정도를 정량적으로 고찰하기 위해 습공기 및 건공기를 엔진 입구로 유입시켜 그때의 성능의 변화정도를 살펴보았다. 습공기를 시험설비를 사용하여 모사해 줄 방법은 따로 없기 때문에 비오는 여름철(또는 비오는 날 Hot day 엔진성능시험) 시험한 결과를 활용하는 것이 최적의 방법이다. 또한, 건공기를 시험설비를 사용하여 모사해 줄 방법은 공기제습기(Dryer)를 사용하는 것이다. 고공환경시험설비에서 저온시험을 위해 액체공기를 사용할 때는

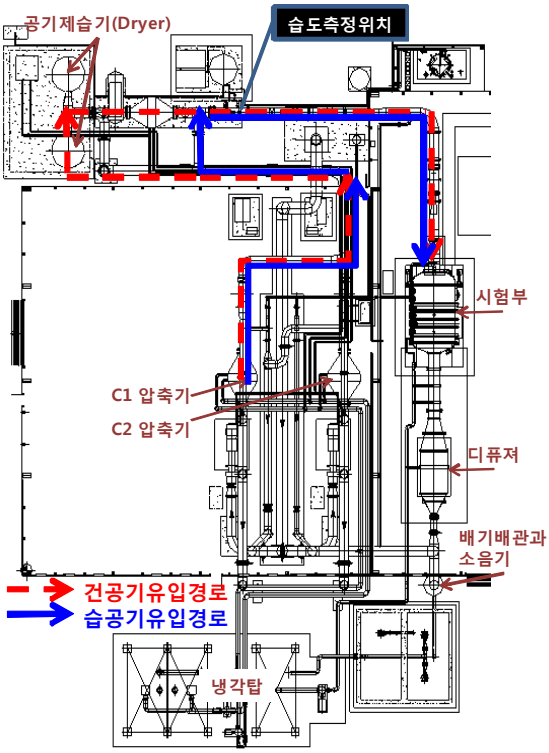

그림 2 AETF Layout

공기의 결빙을 막기 위해 공기의 이슬점을 낮추어주는 Dryer를 사용한다. Dryer를 통해 유입된 공기 중의 수분 제거가 가능한데, 이를 사용하여 건공기를 모사할 수 있다. 제습과정 동안 제습제가 흡수한 습기는 재생 싸이클 동안 제습기에 315℃까지 가열된 공기를 공급함으로써 제거된다. 재생 싸이클은 AETF의 별도 배관으로 이루어지며, 이때 공기 가열에 필요한 에너지는 천연가스용 히터(natural gas fired heater)로부터 제공되고, 또한 재생 싸이클 동안 제습기 내부의 공기 순환을 위하여 송풍기(blower)가 사용된다. AETF의 주요시험설비 Layout 및 습도측정위치는 그림 2와 같으며 외부의 습공기가 유입되는 경로와 유입된 외부 습공기가 Dryer를 거쳐 건공기로 공급되는 유로를 나타내었다. 절대습도 및 이슬점온도를 측정하기 위해 사용된 센서는 VAISALA HMT334모델로 영하 40도씨에서 100도씨까지의 측정레인지를 가진다.

이러한 방법을 통해 습도가 엔진성능에 미치는 영향을 고공환경 시험설비를 사용하여 수행할 수 있고, 그 영향의 정도를 정량적으로 파악할 수 있을 것이다. 고도에 따른 온도 분포와 상대습도 100%에서 고도에 따른 절대 습도의 영향을 살펴보면 가스터빈 엔진 성능에 습도의 영향이 가장 두드러지게 나타날 조건은 기온 및 기압이 높은 여름철 해면 고도이고 높은 비행 마하수, 낮은 엔진 회전수에서도 그 영향이 더욱 두드러진다[6].

이와 같이 습도가 엔진 성능에 미치는 영향을 알아보고자 시험설비를 사용하여 고공환경 성능시험을 수행할 엔진은 200 lbf급 Single Spool 터보제트 엔진으로 사류형 압축기, 슬링거형 연소기, 축류형 터빈, 수축형 배기노즐, PWM 연료공급시스템, 연료에 의한 베어링 윤활, 영구 자석형 고속발전기 및 PCU, 디지털 전자식 엔진제어기로 구성되어 있다.

본 3,000lbf급 고공환경 엔진시험설비를 사용하여 200lbf 급 미만의 초소형 터보제트 엔진의 고공시험을 수행하기 위해서는 엔진 성능을 결정하는 주요인자의 측정 가능 여부 판단 및 설비의 수정, 보완이 필요하다는 판단으로 초소형 터보제트 엔진의 고공시험을 수행하기 위해 공기유량

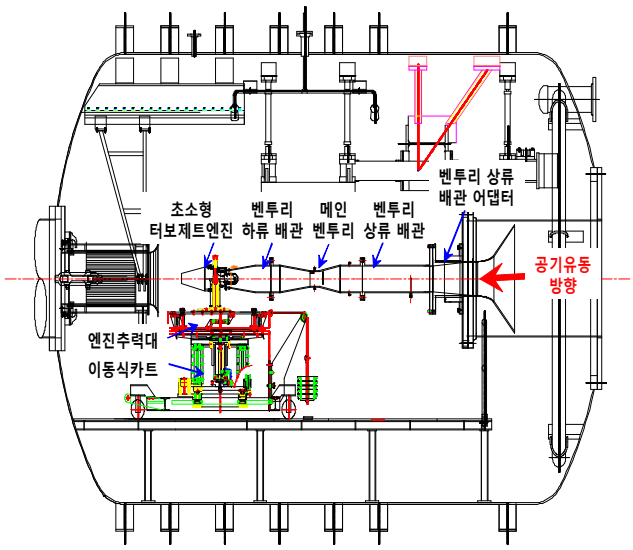

그림 3 Miniature turbojet Engine installation

측정, 연료유량 측정, 추력측정시스템 부분에서 필요한 시험 설비의 수정, 보완 방법을 수행하였다[7].

본 논문에서는 먼저 GSP(Gas turbine Simulation Program)를 이용하여 초소형 터보제트 엔진의 성능모사를 수행하고, 그 결과값을 실제 시험결과와 비교하여 GSP의 사용여부의 유용성을 확인하였다. 그런 다음, GSP를 사용하여 습도가 엔진성능에 미치는 영향과 초소형 터보제트 엔진의 고공환경성능시험을 통한 실험값을 근거로 하여 습도가 엔진성능에 미치는 영향에 대하여 알아보고자 한다. 또한, AGARD와 이시우 등에 의해 제시된 습도보정기법을 사용하여 습도보정에 의한 효과를 보고자 한다.

3. Gas Turbine Simulation Program

3.1 GSP 검증

GSP는 가스터빈 엔진의 성능예측 및 탈설계점 해석을 하기 좋은 프로그램으로 사용이 간편하고 사용자 임의대로 각 component를 조합하여 엔진을 모델링할 수 있는 소프트웨어이다[8].

그림 4와 같이 흡입구, 압축기, 연소기, 터빈, 노즐 component를 조합하고 각 component에 설계점에 해당하는 주요인자(흡입공기유량, 전압력 회수율, 연료유량, 압축비 등등)를 설정하고 GSP를 구동하게 되면, 보고자 하는 조건에서의 탈설계점에 해당하는 정상상태성능을 볼 수 있다. GSP에 입력해야 되는 각 component의 주요 운용변수에 대하여 설계점을 해면고도, 마하수 0.6, PLA 9.14V로 설정하고, 탈설계점으로는 해면고도, 마하수 0.4, PLA 0V에서 10V까지 GSP로 시뮬레이션 한 결과와 초소형 터보제트엔진의 실험결과를 비교한 결과는 Fig 5, 6, 7과 같다.

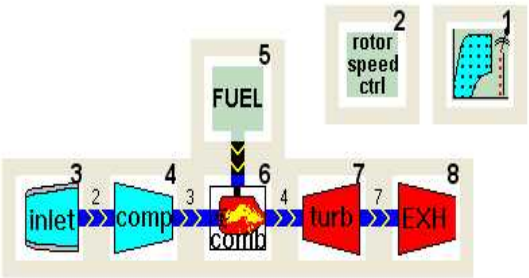

그림 4 GSP for Miniature turbojet engine

Figure 5~7에서는 0VDC에서 9.9VDC까지 Power Lever Angle(PLA)를 증가시키면서 0V, 2V, 4V, 6V, 8V, 10V 지점에서 정상상태에서 얻은 실험값과 GSP를 사용하여 얻은 결과로 PLA에 따른 공기유량, 순추력, 연료유량을 나타낸다.

높은 PLA에서 GSP결과와 실험값과의 차이가 발생하는데 이는 GSP의 각 구성품인 압축기, 연소기, 터빈용 맵을 터보제트 엔진으로부터 얻은

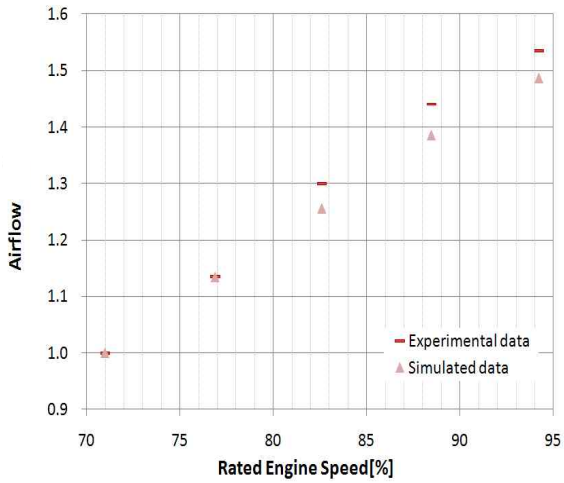

그림 5 Airflow at Ma0.4 SLS*

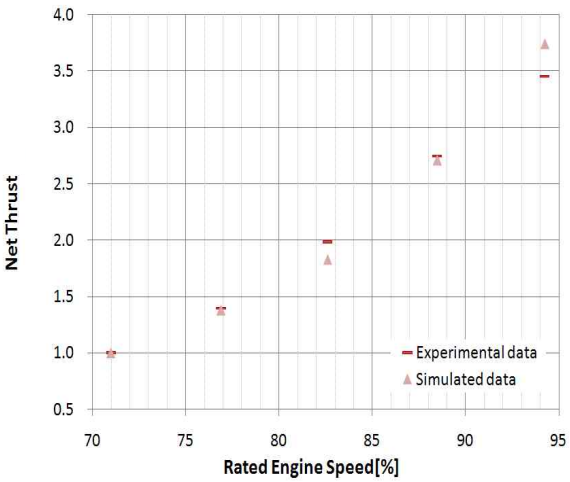

그림 6 Net thrust at Ma0.4 SLS*

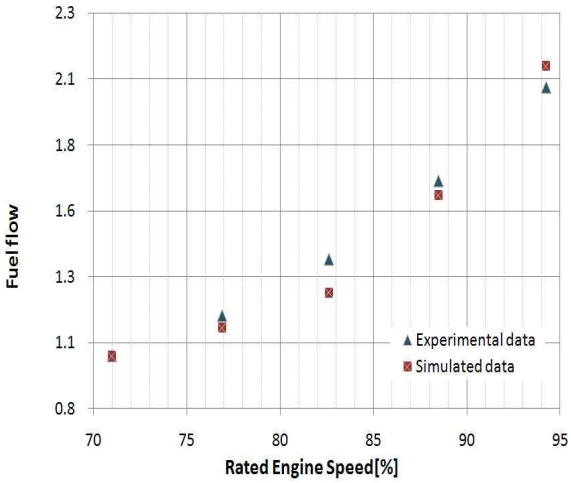

그림 7 Fuelflow at Ma0.4 SLS*
*: 무차원화

정보를 입력해야 되는데 GSP가 자체적으로 보유하고 있는 터보제트 엔진용 맵을 그대로 사용하였기에 차이가 나는 것으로 보고 본다.

GSP 결과를 실제 실험값과 비교했을 때 어느 정도 정확하게 모사할 수 있는지를 알아봤을 때 데이터의 정확한 성능예측에는 무리가 있으나, 습도의 영향은 상대적으로 낮은 엔진회전수에서는 크게 나타나므로 어느 정도의 경향 파악에는 문제가 없을 것으로 보인다.

3.2 습도보정기법 적용

AGARD에 보고되어 있는 압축기에서의 습도보정기법 Eqn. 1~3에 나타내었고, 터빈에서의 습도보정기법은 Eqn. 4~6에 나타내었다.

$$\frac{(N/\sqrt{T})_{wet}}{(N/\sqrt{T})_{dry}} = \sqrt{\frac{\gamma_{wet}R_{wet}}{\gamma_{dry}R_{dry}}} \quad (1)$$

$$\frac{(\dot{m}_a\sqrt{T}/P)_{wet}}{(\dot{m}_a\sqrt{T}/P)_{dry}} = \sqrt{\frac{\gamma_{wet}R_{wet}}{\gamma_{dry}R_{dry}}} \quad (2)$$

$$\frac{(\triangle h/T)_{wet}}{(\triangle h/T)_{dry}} = \frac{\gamma_{wet}R_{wet}}{\gamma_{dry}R_{dry}} \quad (3)$$

$$\frac{(N/\sqrt{T})_{wet}}{(N\sqrt{T})_{dry}} = \sqrt{\frac{\gamma_{wet}R_{wet}(1+\gamma_{dry})}{\gamma_{dry}R_{dry}(1+\gamma_{wet})}} \quad (4)$$

$$\frac{(\dot{m}_a\sqrt{T}/P)_{wet}}{(\dot{m}_a\sqrt{T}/P)_{dry}} = \sqrt{\frac{\gamma_{wet}R_{dry}}{\gamma_{dry}R_{wet}}}\left(\frac{2}{1+\gamma_{wet}}\right)^{\frac{(\gamma_{wet}+1)}{2(\gamma_{wet}-1)}}\left(\frac{1+\gamma_{dry}}{2}\right)^{\frac{(\gamma_{dry}+1)}{2(\gamma_{dry}-1)}} \quad (5)$$

$$\frac{(\triangle h/T)_{wet}}{(\triangle h/T)_{dry}} = \frac{\gamma_{wet}R_{wet}(1+\gamma_{dry})}{\gamma_{dry}R_{dry}(1+\gamma_{wet})} \quad (6)$$

또한, 이시우 등에 의해 제시된 구성품 수준의 습도 보정 기법은 Eqn. 7~9에 나타내었다.

$$\frac{(ND_i/\sqrt{T_i})_{wet}}{(ND_i/\sqrt{T_i})_{dry}} = \sqrt{\frac{\gamma_{wet}R_{dry}}{\gamma_{dry}R_{wet}}}\sqrt{\frac{1+\frac{\gamma_{dry}-1}{2}M_i^2}{1+\frac{\gamma_{wet}+1}{2}M_i^2}} \quad (7)$$

$$\frac{(\dot{m}_i\sqrt{T_i}/P_i)_{wet}}{(\dot{m}_i\sqrt{T_i}/P_i)_{dry}} = \sqrt{\frac{\gamma_{wet}R_{dry}}{\gamma_{dry}R_{wet}}}\frac{\left(1+\frac{\gamma_{dry}-1}{2}M_i^2\right)^{\frac{(\gamma_{dry}+1)}{2(\gamma_{dry}-1)}}}{\left(1+\frac{\gamma_{wet}-1}{2}M_i^2\right)^{\frac{(\gamma_{wet}+1)}{2(\gamma_{wet}-1)}}}$$

$$\frac{(\triangle h/T)_{wet}}{(\triangle h/T)_{dry}} = \frac{\gamma_{wet}R_{wet}}{\gamma_{dry}R_{dry}}\left(\frac{1+\frac{\gamma_{dry}-1}{2}M_i^2}{1+\frac{\gamma_{wet}-1}{2}M_i^2}\right) \quad (9)$$

초소형 터보제트 엔진의 성능시험을 통해 엔진회전수 71%, 77%, 82%, 88.5%, 94%, 100%일 때, Sea Level, standard day, 마하수 0.6일 때 AGARD와 이시우 등에 의해 제시된 compressor

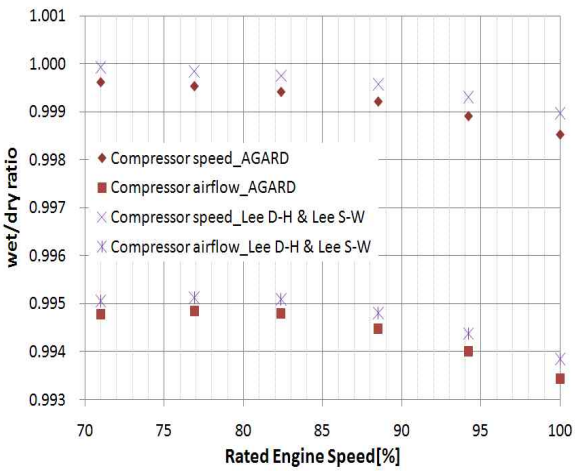

그림 8 Wet/dry ratio Ma=0.6, STD, SL

speed와 공기유량의 습도보정계수를 그래프로 나타내보면 그림 8과 같은 경향을 보임을 확인할 수 있다.

4. 엔진성능시험 결과 검토

4.1 엔진성능시험 및 GSP결과 비교

고공환경시험설비를 이용하여 습도에 의한 엔진성능의 변화를 알아보고자 상대습도가 각각 0.53%, 58.2%에서 엔진성능시험을 실시하였다. 실시한 시험조건은 마하수 0.7, Sea Level, PLA 0V(엔진회전수 80%)로 공기유량이 작아 엔진입구온도를 설정하는데 많은 시간이 걸려 Hot day(347K)에 미치지 못한 입구온도 326K에서 수행하였다. 시험조건이 설정되어 정상상태가 된 후 공기유량(Wa), 연료유량(Wf), 추력(Fn), 비연료소모율(SFC)에 대하여 5초간 10Hz로 저장하여 평균한 값을 corrected parameter를 사용하여 표 1과 같이 비교하였다.

또한 GSP를 사용하여 마하수 0.7, Sea Level, 326K에서 상대습도 0.53%일 때와 58.2%일 때의 simulation 결과를 표 1에 나타내었다. 시험데이터 및 시뮬레이션 결과 상대습도가 58.2%일 경우가 0.53%일 경우에 비해 공기유량, 연료유량, 추력이 낮고 비연료소모율은 더 높음을 알 수 있다.

ISO 17025에 따라 공기유량, 연료유량, 추력, 비연료소모율에 대한 측정불확도를 추정해 본 결과는 표 2와 같다. 특히 연료유량과 순추력에서 상대습도 0.53%일 경우와 58.2%일 경우의 불확도가 서로 차이가 나는 이유는 50회 반복측정에 의한 평균의 표준편차가 서로 다르기 때문이다.

표 1. Data comparison at wet/dry condition*
*: 임의의 정수배

Condition	0.53 % RH		58.2 % RH	
	Exp	GSP	Exp	GSP
Wa_c [kg/s]	1.05	1.05	1.04	1.04
Wf_c [kg/h]	42.41	42.96	41.63	41.86
Fn_c [N]	285.89	285.62	277.81	276.32
SFC_c [kg/h/N]	0.151	0.153	0.153	0.154

표 2. Uncertainty of experiment data

Condition	0.53 % RH	58.2 % RH
Wa [kg/s]	± 0.0024	± 0.0024
Wf [kg/h]	± 0.172	± 0.169
Fn [N]	± 2.705	± 2.513
SFC [kg/h/N]	± 0.0072	± 0.0071

표 3. Humidity correction results*
*: 임의의 정수배

Condition	AGARD	Lee D-H & Lee S-W
Wa_{c_dry} [kg/s]	1.050	1.049
Wf_{c_dry} [kg/h]	42.04	41.75
Fn_{c_dry} [N]	279.49	278.63

4.2 습도보정 기법을 통한 보정결과

표 1의 상대습도 58.2%에서의 corrected된 시험결과를 습공기가 함유된 결과로 보고 AGARD와 이시우 등에 의해 제시된 구성품 수준의 습도보정기법을 적용한 결과를 표 3을 통해 나타내었다. 공기유량과 연료유량, 순추력에 대해 습도보정기법을 적용한 결과와 표 1의 상대습도 0.53%에서의 시험결과를 비교해보면 특히 순추력의 경우 시험결과와 큰 차이를 보임을 알 수 있는데 정확한 경향 파악을 위해서는 다른 급의 엔진에 대하여 추가적인 시험이 필요할 것으로 보인다.

5. 결 론

습도가 초소형 터보제트 엔진성능에 미치는 영향에 대해 알아보고자 고공시험설비를 사용한 엔진시험에서 건공기 및 습공기 유입을 모사하였다. GSP 성능해석 프로그램을 검증하기 위해 마하수 0.4에서의 실제 시험데이터와 비교함으로써 프로그램을 검증하였다.

추력 200lbf급 초소형 터보제트 엔진시험 데이터와 습도 효과를 고려하여 예측된 GSP 성능해석 결과를 비교함으로써 습도가 가스터빈 엔진의 성능에 미치는 영향을 상대습도가 각각 0.53%, 58.2%인 경우에 대해 수행하였다. 습도에 의한 영향은 높은 마하수, 낮은 엔진회전수, 낮은 해면고도 및 고온에서 그 영향이 두드러지므로 시험조건은 마하수 0.7, SL, PLA 0V, 입구온도 326K에서 시험하였다. 그 결과 추력에서는 2.826% 감소와 비연료소모율에서는 1.325% 증가하였고 이를 통해 습도가 엔진성능을 저하시키는 것을 알 수 있었다. 따라서 측정한 엔진의 주요 성능 인자(연료유량, 엔진회전수, 공기유량, 추력, 비연료소모율)을 건공기 조건으로 제조정하는 것이 필요하다.

습공기 유입에 따른 엔진성능의 변화를 습도보정계수를 사용하여 확인한 결과 순추력에서 시험데이터와 차이가 남을 알 수 있었는데 이는 다른 급의 엔진에 대한 추가적인 시험을 통해 원인을 알아보고자 한다.

참 고 문 헌

1. Samuels, J. C. and Gale, B. M., "Effects of Humidity on Performance of Turbojet Engines," NACA, Washington, D. C., Tech. Note 2119, 1950
2. Fishbeyn, B. D. and Pervyshin. N. V., "Determination of the Effect of Atmospheric Humidity on the Characteristics of a Turbofan Engine, " Translation by Foreign Technology Divition, Wright-Patterson AFB OH, FTD-HT-23-290-68, 1970
3. Bird, J. and Grabe, W., "Humidity Effects on Gas Turbine Performance," ASME 91-GT-329, International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Orlando, FL, June 3-6, 1991
4. Keith R. Garwood, "Recommended Practice for the Assessment of the Effects of Atmospheric Water Ingestion on the Performance and Operability of Gas Turbine Engines," AGARD-AR-332, 1995
5. 이시우, 정명균, "가스 터어빈 엔진 성능에 대한 구성품 차원의 습도보정," 한국추진공학회지, 제8권 2호, 2008, pp.32-38
6. 한국항공우주연구원, "비행체 추진기관 고공성능시험의 신뢰도 향상과 비정상상태 시험기술에 관한 연구," 과학기술부, 2004.
7. 이보화, 이경재, 오중환, 양수석, 김유일, "초소형 터보제트엔진 고공환경 성능시험 소개," 한국항공우주학회 추계학술대회, 2009, pp.573-576
8. GSP, "GSP 10 User Manual," National Aerospace Laboratory NLR, 2004.