

특성 곡선 전치 기법을 이용한 가스 터빈 엔진의 구성품 수준 습도 보정

이시우* · 정명균* · 임진식**

Component-Level Humidity Correction for Gas Turbine Engine Using Map Transposition Technique

S.W.Lee* · M.K.Chung* · J.S.Lim**

ABSTRACT

A systematic humidity correction technique that can be used for any type of engine control mode is developed to predict the variation of engine performance due to inlet humidity. Limitation of conventional method is first identified and then, a new method is proposed to take into account the humidity effects on each engine component characteristics and to find the variation of equilibrium running point through a re-match process between the components with a given engine control variable depending on the humidity of inlet. Comparisons are made between two methods for a single spool gas turbine engine, and it was found that the conventional method leads to invalid correction when a physical variable such as rotational speed is controlled for engine operation in humid environment. It was also found that the accuracy of the conventional method depends on the engine control mode and the engine configuration whereas the proposed method can be used for any type of engine control mode and engine configuration.

초 록

흡습에 따른 엔진 성능 변화량을 예측하기 위하여 모든 엔진 형식에 적용 가능한 체계적인 습도 보정 방법을 개발하였다. 우선 기존의 습도 보정 방법에 대한 적용 한계를 분명히 한 다음 흡습에 따른 엔진 구성품들의 성능 변화를 고려하고 엔진 제어 방식에 따라 구성품들간의 공력 체결함을 통하여 엔진 작동점의 변화를 계산하는 새로운 방법을 제시하였다. 단축 터보제트 엔진을 대상으로 두 가지 방법에 의한 습도 보정 내용을 비교 분석하여 기존의 방법은 회전수와 같은 물리적 성능 변수를 제어하는 경우에는 적용하기가 어렵다는 점을 밝혔다. 새로운 습도 보정 방법은 엔진 제어 방식이나 엔진 형식에 구애받지 않으나 기존의 방법은 엔진 제어 모드 및 엔진 형식에 따라 그 정확성이 크게 차이가 날 수 있음을 확인하였다.

* 한국과학기술원(KAIST)

** 국방과학연구소(Agency for Defence Development)

기호 설명

기호

- A : flow area
- a : polynomial coefficients
- Cp : specific heat at constant pressure
- D : characteristic diameter
- F : net thrust
- f : model function
- Δh : specific enthalpy rise
- M : Mach number
- m : mass flow rate
- N : rotational speed
- P : pressure
- P_v : vapor pressure of water
- R : special gas constant
- Re : Reynolds number
- T : temperature in Kelvin
- U : blade speed
- V : absolute velocity
- X : mass fraction to dry air
- δ : pressure correction factor, P_{std}=1atm
- φ : relative humidity
- γ : specific heat ratio
- η : adiabatic efficiency
- θ : temp. correction factor T_{std}=288.15K

아래 첨자

- 0 : ambient condition
- 2 : compressor inlet section
- 4 : turbine inlet section
- a : air(wet or dry)
- c : critical or sonic condition
- dry : dry air
- f : fuel
- i : inlet
- mix : gas mixture
- t : total or stagnation property
- w : water vapor
- wet : wet air

- x : dummy engine station number
- z : axial direction

1. 서론

가스 터빈 엔진은 'air breathing engine'으로서, 다른 종류의 열 기관에 비해 대용량의 공기를 흡입하여 작동 유체로 삼는다. 그러므로 가스 터빈 엔진의 공력 성능은 작동 유체인 공기의 물성 변화에 민감하게 반응한다. 공기의 물성 변화는 화학적 조성의 차이에서 비롯되는 것으로 그 대표적인 요인으로는 수증기 형태로 대기에 포함되어 있는 수분의 존재를 들 수 있다. 수증기를 포함한 공기인 습공기는 수증기 함유량에 따라 건공기와는 다른 화학적 조성을 가지며 건공기에 대한 습공기의 물성 변화 정도는 단위 체적 내에 포함되어 있는 수증기와 건공기의 질량비로 정의하는 절대 습도에 의하여 결정된다.

Table 1. Humidity correction factors by Samuels and Gale

성능 변수	보정 계수
회전 속도	$\frac{N_{wet}/\sqrt{\theta}}{N_{dry}/\sqrt{\theta}} = \sqrt{\frac{\gamma_{wet}R_{dry}}{\gamma_{dry}R_{wet}}}$
공기 유량	$\frac{m_{a,wet}\sqrt{\theta/\delta}}{m_{a,dry}\sqrt{\theta/\delta}} = \sqrt{\frac{\gamma_{wet}R_{dry}}{\gamma_{dry}R_{wet}}}$
연료 유량	$\frac{m_{f,wet}/\delta\sqrt{\theta}}{m_{f,dry}/\delta\sqrt{\theta}} = \frac{Cp_{wet}\sqrt{\gamma_{wet}R_{dry}}}{Cp_{dry}\sqrt{\gamma_{dry}R_{wet}}}$
진 추력	$\frac{F_{wet}/\delta}{F_{dry}/\delta} = \frac{\gamma_{wet}}{\gamma_{dry}}$

흡습에 따른 엔진의 공력 성능 변화에 대한 정량적 평가는 1950년대, NACA의 Samuels와 Gale¹⁾에 의하여 그 이론적 기반이 마련되었다. 그들은 작동 유체가 건공기일 때와 습공기일 때의 엔진 성능 비를 습도 보정 계수(humidity correction factor)로 정의하고 이를 통하여 흡습에 따른 터보제트(turbojet) 엔진의 성능 변화를

기술하였다. 그들은 습공기 흡입시에도 압축기 입구의 마하 수가 변하지 않는다는 가정 하에 작동 유체의 물성 변화만을 고려하여 흡습에 따른 엔진의 성능 변화를 이론적으로 분석하고 엔진 추력, 연료 유량, 공기 유량 및 엔진 속도에 대한 습도 보정 계수를 제시하였으며 관련 시험을 통하여 그 타당성을 입증하였다. Table 1에 정리되어 있는 Samuels와 Gale¹⁾의 습도 보정 계수는 복잡한 계산을 요하는 습도 효과를 간단히 보정할 수 있다는 장점 때문에 오늘날까지도 가스 터빈 분야에서 널리 사용되고 있다.

1970년, 러시아의 Fishbeyn과 Pervyshin²⁾은 Samuels와 Gale¹⁾이 개발한 습도 보정 방법과 습도 보정 계수의 개념을 바이패스 비(bypass ratio)가 0 - 4 정도의 범위에 있는 터보팬 엔진(turbofan engine)까지 확대함으로써 흡습의 영향을 평가하는데 있어 진일보한 측면을 보여주었다. Samuels와 Gale¹⁾과는 달리 그들은 흡습시에 압축기의 블레이드 마하 수(blade Mach number)가 변하지 않는다는 가정을 도입하고 습공기의 물성 변화를 고려하여 절대 습도의 이차 다항식 형태로 엔진 추력, 연료 유량, 공기 유량 및 엔진 속도에 대한 일반화된 습도 보정 관계식을 제시하였다.

Table 2. Order of magnitude of humidity effect on gas turbine engine performances

(mean values for various turbofan engines in case of constant mechanical speed)

성능 변수	moderate condition (24°C, $\phi=75\%$)	severe condition (30°C, $\phi=100\%$)
공기 유량	-0.9%	-1.6%
연료 유량	-0.7%	-1.3%
진 추력	-1.9%	-1.9%
SFC	+0.3%	+0.6%

Bird와 Grabe³⁾는 현재 운용되고 있는 여러 종류의 가스 터빈 엔진에 대하여 엔진 제작사가 제공한 습도 보정 계수와 Samuels와 Gale¹⁾

및 Fishbyen과 Pervyshin²⁾의 결과를 비교 분석하였다. 이에 따르면 Fig. 1과 2에서 보는 바와 같이 절대 습도가 증가함에 따라 연료 유량에 있어서는 예측 결과가 비교적 일치하고 있으나 엔진 출력의 경우에는 Samuels와 Gale¹⁾ 및 Fishbyen과 Pervyshin²⁾의 예측 결과와는 반대의 경향성을 지닌 엔진의 예들이 존재한다.

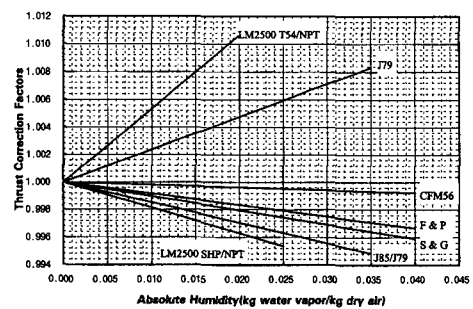


Fig. 1 Comparison of thrust correction factors

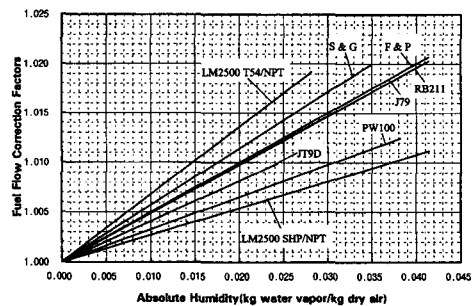


Fig. 2 Comparison of fuel flow correction factors

Table 2⁵⁾에는 바이패스 비가 0 - 6 범위에 있는 다양한 터보 팬 엔진들을 대상으로 기계적 회전수가 일정한 경우 습도가 각종 엔진 성능에 미치는 영향이 정량화되어 있다. 참고 문헌 6에서는 유사한 습도 조건(절대 습도 0.0265)에서 이와는 큰 차이가 있는 0.4%의 추력 감소와 1.3%의 연료 유량 증가를 추천하였는데, 이 값들은 바로 Samuels와 Gale¹⁾의 습도 보정 계수를 적용한 결과이다. 그러므로 Bird와 Grabe³⁾가 지적한 바처럼 압축기 입구의 마하 수 또는 블레이드 마하 수가 동일한 경우를 기준하여 얻은 습도 보정 계수는 실제 엔진에 적용하는데 큰 오차를 유발할 수 있다.

흡습에 따른 엔진의 공력 성능 변화는 근원적으로 작동 유체의 물성 변화에서 비롯된 구성품들의 공력 성능 변화와 이로 인한 구성품들 간의 공력 재결합(component rematch)의 결과이다. 그러므로 흡습의 영향을 제대로 평가하기 위해서는 먼저 흡습에 따른 구성품들의 성능 특성 변화를 분석하고 구성품들 간에 일어나는 복잡한 공력 재결합 과정을 면밀히 해석하여야 한다. (이 방법을 구성품 수준의 습도 보정이라 부르기로 한다.) 그러나 위에서 언급한 습도 보정 방법들은 모두 흡습에 따른 구성품들의 공력 성능 변화와 이로 인하여 구성품간의 공력적 결합(component matching)이 달라지는 복잡한 현상을 하나의 가정으로 대체하여 Table 1과 같은 습도 보정 계수를 제시하였다. (이 방법을 엔진 수준의 습도 보정이라 부르기로 한다.) 비록 이 가정을 통하여 엔진 수준의 습도 보정 방법이 경우에 따라서는 흡습에 따른 엔진 성능 변화량의 상대적 크기를 잘 예측할 수 있다 하더라도, 이 방법의 타당성은 터어빈 입구 온도나 엔진 회전수와 같은 엔진 제어 변수가 그 가정을 실제로 만족시키는가 여부에 달려 있다. Bird와 Grabe³⁾ 역시 1991년에 그들의 재고 논문에서 부분적으로 이러한 점을 지적하였다.

본 연구에서는 이러한 엔진 수준의 습도 보정 방법이 안고 있는 문제점들을 분석하여 그 적용 한계를 분명히 하고, 보다 근원적으로 흡습에 따른 엔진 성능 변화를 정량화하기 위하여 구성품 수준의 습도 보정 방법을 모색하였다. 구성품 단계에서는 흡습의 영향을 평가하기 위하여 건공기에 대한 구성품 성능 특성 데이터를 전치하는 기법을 사용하였으며, 구성품들 간의 공력 재결합을 통하여 엔진 성능 변화를 계산하는 단계에서는 위에서 언급한 두 가지 엔진 제어 변수(engine control variable)와의 연계성을 고려하여 엔진 성능 해석(cycle analysis)을 수행하였다. 그럼으로써 엔진 수준의 습도 보정 방법이 갖고 있는 한계를 극복하고 엔진 제어 변수에 따라 다르게 나타나는 흡습의 영향을 분석하고자 하였다.

2. 기존의 엔진 수준 습도 보정 방법에 대한 고찰

Samuels와 Gale¹⁾의 엔진 수준의 습도 보정 방법에서는 흡습으로 인하여 작동 유체의 물성이 변하더라도 동일한 비행 마하 수 조건이라면 압축기 입구의 마하 수 M_2 는 변하지 않는다는 것을 전제로 한다. 이는 흡습시에도 환산 온도 T_{t4}/T_{t0} 는 변하지 않는다는 기본 가정에 따른 것으로, Samuels와 Gale¹⁾은 엔진 성능 해석을 통하여 여러 종류의 엔진 성능 변수들 가운데 T_{t4}/T_{t0} 가 습도에 가장 둔감하다는 점을 밝히고 이 가정이 부분적으로 타당하다는 것을 피력하였다. 본 연구에서는 먼저 이 환산 온도가 작동 유체의 물성 변화에 둔감한 원인을 밝히고 이로부터 엔진 수준의 습도 보정 방법에 내재되어 있는 본질과 그 적용 한계를 거론하고자 한다.

일반적으로 가스 터어빈 엔진의 공력 성능은 기온, 기압 및 비행 속도라는 세 가지 환경 변수와 연료 유량이라는 하나의 제어 입력변수에 의하여 완전히 결정된다. 그러므로 작동 유체의 물성 변화를 포함할 경우, 엔진 회전수나 진추력(net thrust), 공기 유량, 엔진 내부의 온도 및 유속과 같은 주요 성능 변수들은 차원 해석을 통하여 모두 다음과 같은 함수형으로 기술할 수 있다.

$$\frac{ND}{\sqrt{\gamma RT_0}}, \frac{F}{P_0 D^2}, \frac{T_{t4}}{T_0}, \frac{m_a \sqrt{\gamma RT_0}}{P_0 D^2}, M_x \\ = f\left(\frac{m_f}{P_0 D^2 \sqrt{\gamma RT_0}}; M_0; Re; \gamma\right) \quad (1)$$

여기서 함수 f 는 그 엔진 특유의 cycle model에 해당하며, 아래 첨자 x 는 엔진 단면 번호를 지칭한다.

이 식에서 독립 변수군에 포함되어 있는 Re 는 주요 구성품들의 특성 Reynolds 수가 임계치 이하로 떨어질 경우 이른바 'Reynolds number effect'를 고려하기 위한 것이다. 그러나 흡습 자체와 관련된 Reynolds 수의 변화는 무시할 만큼 작기 때문에 습도 보정과 관련하여 Reynolds 수는 사실상 아무런 관계가 없다. 그리고 작동 유

체의 물성을 고려하는 또 하나의 독립 변수 v 는 절대 습도로 0.037정도의 실제 직면 가능한 최대 습도 조건 하에서도 0.34% 밖에는 변하지 않으므로, 이를 무시한다 하더라도 결과적으로 야기되는 오차는 매우 작을 것이다.

그러므로 식 (1)의 독립 변수군은 Re 와 v 를 제외한 두 개의 독립 변수만을 포함하게 되며, Samuels와 Gale¹⁾이 취급하였던 바와 같이 이를 M_2 및 M_0 로 선정하면 엔진의 공력 성능을 기술하는 함수형은 다음과 같다.

$$\frac{ND}{\sqrt{\gamma RT_0}}, \frac{F}{P_0 D^2}, \frac{m_f}{P_0 D^2 \sqrt{\gamma RT_0}},$$

$$\frac{m_a \sqrt{\gamma RT_0}}{P_0 D^2}, \frac{T_{t4}}{T_0} = f(M_2; M_0) \quad (2)$$

작동 유체에 관계없이 그 엔진의 고유 특성인 cycle model f 는 항상 동일하므로 이 식으로부터 작동 유체의 물성이 변하는 경우에도 비행 마하 수 M_0 와 압축기 입구의 마하 수 M_2 만 같다면 엔진의 무차원 성능 변수는 불변으로 남는다는 사실을 확인할 수 있다. Samuels와 Gale¹⁾이 취급한 여러 종류의 성능 변수들 가운데 오직 압축기 입구의 마하 수 M_2 와 사이클 온도비 T_{t4}/T_0 만이 완전한 형태의 무차원 변수이므로 M_2 를 고정시키면 당연히 이 온도비는 불변으로 남게 될 것이다. Fishbeyn과 Pervyshin²⁾은 흡입 시에 압축기 입구의 마하 수 대신 임계 블레이드 마하 수(critical blade Mach number $U/\sqrt{\gamma RT_{c2}}$)가 일정하다고 가정하였는데 이 역시 완전한 형태의 무차원 변수이므로 그들의 가정은 본질적으로 Samuels와 Gale¹⁾의 가정과 동일하다.

식(2)를 보다 일반화하여, 두 개의 무차원 독립 변수 즉, 하나의 무차원 환경 변수 (비행 마하 수)와 하나의 무차원 제어 변수만 동일하다면 엔진의 무차원 성능 특성은 불변으로 남게 된다. 따라서 작동 유체가 건공기에서 습공기로 바뀌는 경우에도, 이 조건만 만족된다면 다음 관계식들이 성립한다.

$$\frac{(N/\sqrt{T_0})_{wet}}{(N/\sqrt{T_0})_{dry}} = \frac{\sqrt{\gamma_{dry} R_{dry}}}{\sqrt{\gamma_{dry} R_{wet}}}$$

$$\frac{(F/P_0)_{wet}}{(F/P_0)_{dry}} = 1$$

$$\frac{(m_f/P_0 \sqrt{T_0})_{wet}}{(m_f/P_0 \sqrt{T_0})_{dry}} = \frac{\sqrt{\gamma_{wet} R_{wet}}}{\sqrt{\gamma_{dry} R_{dry}}}$$

$$\frac{(m_a \sqrt{T_0}/P_0)_{wet}}{(m_a \sqrt{T_0}/P_0)_{dry}} = \frac{\sqrt{\gamma_{dry} R_{dry}}}{\sqrt{\gamma_{wet} R_{wet}}} \quad (3)$$

Table 1에서 $Cp/R = v/(v-1)$ 그리고 $v_{wet} \approx v_{dry}$ 임을 고려하면 이 식들은 바로 Samuels와 Gale¹⁾이 복잡한 1차원 유동 해석을 통하여 얻은 습도 보정 계수와 동일함을 알 수 있다. 이로부터 엔진 수준의 습도 보정에서 사용한 가정은 그 엔진이 갖고 있는 하나의 무차원 성능 변수를 제어하는 경우에만 타당하다는 것을 알 수 있다.

대부분의 엔진들에 있어 출력 제어는 연료 유량의 조절을 통하여 출력과 가장 밀접한 관계를 갖고 있는 공기 유량을 제어한다. 공기 유량은 이를 'pumping'하는 팬 또는 압축기의 회전 속도에 의하여 지배를 받는 관계로, 실제의 엔진 출력 제어는 N 또는 $N/\sqrt{\theta}$ 형태의 회전 속도 제어로 구현된다. 회전 속도 N 은 물리적 성능 변수이며, $N/\sqrt{\theta}$ 는 기온 변화를 고려하는 무차원 성능 변수의 성격을 갖고 있으나 습도 변화를 고려하는 v 와 R 을 포함하고 있지 않으므로 흡습과 관련해서는 이 역시 물리적 성능 변수로 취급하여야 한다. 전술한 바와 같이, 엔진 수준의 습도 보정 방법은 전적으로 무차원 성능 변수를 일정하게 제어한다는 가정에 근거하고 있으므로 N 또는 $N/\sqrt{\theta}$ 형태의 물리적 성능 변수를 제어하는 대부분의 엔진 예들에는 이를 적용하기 어렵다. 이 방법이 안고 있는 이러한 적용 한계를 극복하기 위해서는 반드시 구성품 수준의 접근 방식이 요구되며 이를 통하여 다양한 엔진 제어 변수에 따른 흡습의 영향을 정량적으로 분석하여야 한다.

3. 구성품 수준의 새로운 습도 보정 방법

구성품 수준의 습도 보정에서는 먼저 엔진 각 구성품들의 성능 특성에 대하여 습도 보정을 행한 다음 구성품 간의 공력 재결합을 통하여 흡습에 따른 엔진 전체의 성능 변화를 계산한다. 그러므로 이 방법에서는 엔진 성능이 아니라 구성품 성능에 실질적인 습도 보정이 이루어지게 된다. 구성품 성능에 대한 습도 보정은 특히, 압축기 성능 시험과 관련하여 당시의 대기 조건으로부터 얻은 시험 데이터를 표준 대기 조건으로 환산하는 과정에서 업체 별로 다양한 방법이 개발되었는데 이 방법들은 모두 유사한 보정 결과를 보여 주지만⁵⁾ 이론적 근거는 미약한 편이다.

본 연구에서는 차원 해석을 이용하여 이른바 성능 곡선 전치법(map transposition technique)의 이론적 근거를 마련하고 이를 통하여 압축기 및 터어빈을 비롯한 주요 구성품들의 성능 특성을 보정하였다.

3.1 습공기의 열역학적 물성

가스 터어빈 엔진 내부에서는 공기 또는 연소 가스를 작동 유체로 하여 압축, 연소 및 팽창으로 이어지는 일련의 열역학적 과정들이 진행된다. 그러므로 각 엔진 구성품들의 공력 성능은 작동 유체의 열역학적 물성과 직접적인 관련이 있으며 따라서 공기 중에 포함된 수증기에 의해서도 영향을 받게 된다. 공기 중에 포함되어 있는 수증기의 양은 건공기와 수증기의 질량 비율로 정의되는 절대습도 X_w 로 나타내며 잘 알려진 바와 같이 기온, 기압 및 상대습도에 따라서 다음 식으로 계산한다.

$$X_w = 0.622 \frac{P_v}{P_\infty / \phi_w - P_v} \quad (4)$$

상온에서 물의 포화 증기압 P_v 는 P_∞ 에 비하여 대단히 작지만 온도에 따라서 급격히 증가하기 때문에 고온 환경에서는 높은 절대습도 수준에도 달할 수 있으며 더불어 습공기의 물성도 큰 폭으로 변할 수 있다.

작동 유체의 열역학적 물성들 가운데 가스 터어빈 엔진 및 그 구성품의 공력 성능과 직결되어 있는 것은 기체상수 R 과 비열비 γ 뿐이며 점성 계수나 기타 열 전달 특성에 관련된 물성치들은 습도에 매우 둔감하여 공력 성능에는 사실상 영향을 주지 않는다. 기체상수는 비열비보다 습도에 훨씬 더 민감하므로 구성품 공력 성능에 대한 습도 보정의 주 대상이 된다. 반면에, 비열비는 습도에 따라서 변하는 폭은 작지만 그 자체가 하나의 무차원 수인 관계로 구성품 내 유동장의 상사성 문제를 야기시킨다.

본 연구에서는 수증기 함유량에 따라 습공기 및 연소 가스의 열역학적 물성치를 정밀 계산하기 위하여 다음과 같은 이상기체의 혼합법칙을 적용하였다.

$$R_{mix} = \frac{R_a + X_f R_f + X_w R_w}{1 + X_f + X_w} \quad (5)$$

$$Cp_{mix} = \frac{Cp_a + X_f Cp_f + X_w Cp_w}{1 + X_f + X_w} \quad (6)$$

$$\text{여기서, } Cp_i = \sum_{k=1}^7 a_{i,k} \left(\frac{T}{1000} \right)^k$$

위 식에서 아래 첨자 i 는 혼합물의 주요 구성 성분에 해당하는 건공기(dry air), 연소 생성물(combustion product) 그리고 수증기(water vapor)를 가리킨다. 이들 물성치 계산 모형에서 정압 비열의 온도 계수들은 참고 문헌 7에 있는 데이터를 다항함수로 근사하여 구한 것이다. 한편, 연소 생성물의 화학적 조성은 연료의 종류에 따라 달라지는데 본 연구에서는 가스 터어빈 엔진에서 광범위하게 사용되고 있는 제트유, kerosin을 주 연료로 취급하였다.

식 (5)와 (6)의 물성치 계산 모형에 따른 습공기의 물성 변화는 Fig. 3에 나타나 있다. 이를 보면 전술한 바와 같이 절대습도가 증가함에 따라 건공기와 수증기 사이에 현격한 차이가 있는 기체상수 R 과 정압 비열 Cp 의 값은 큰 폭으로 변하지만 무차원 수인 비열비는 절대습도에 따라 그리 민감하게 변하지 않는다.

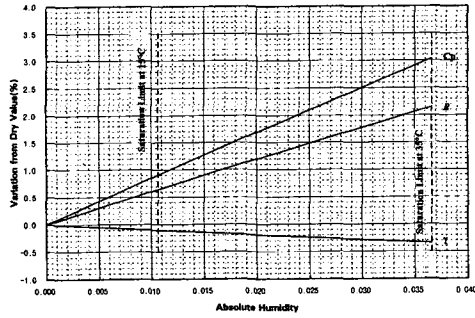


Fig. 3 Variation of thermodynamic properties of wet air at 15°C

3.2 터보기계의 성능 특성 보정

압축기나 터빈과 같은 유체 기계의 유동 특성은 정익(stator)과 동익(rotor blade)으로 구성된 익렬(cascade)내 유동장의 상사성에 그 이론적 근거를 두고 있다. 그래서 압축기나 터빈의 성능 특성은 일반적으로 상사 변수(similarity parameter)를 통하여 표현된다. 상사 변수들에는 기하학적 상사성을 비롯하여 다음과 같은 다양한 무차원 변수들이 포함된다.

- 1) 형상과 관련된 기하학적 상사 변수들:
 - 반경비(hub-tip ratio)
 - 종횡비(aspect ratio)
 - 팁 간극(tip clearance) 등
- 2) 속도 삼각형과 관련된 상사 변수들
 - 유량 계수(flow coefficient), V_f/U
 - 블레이드 마하 수, $U/\sqrt{\gamma RT}$
 - 하중 계수(work coefficient), $\Delta h_f/U^2$
- 3) Reynolds 수
- 4) Prandtl 수
- 5) 작동유체의 압축성과 관련된 비열비, γ

이 상사 변수들 가운데 Re는 주요 구성품들의 특성 Reynolds 수가 임계치 이하로 떨어질 경우 이른바 'Reynolds number effect'를 고려하기 위한 것으로 흡습 자체와 관련된 Reynolds 수의 변화는 무시할 만큼 작기 때문에 습도 보정과 관련하여 Reynolds 수는 사실상 아무런 관계가 없다. 또 작동 유체의 Prandtl 수는 유동의

열 전달 특성과 관련이 있을 뿐, 압축기나 터빈의 공력 성능 특성에는 거의 영향을 미치지 않는다. 그리고 본 연구에서 다루고자 하는 작동 유체의 물성 변화와 관련하여 기하학적 상사 변수들은 사실상 아무런 관계가 없으며, 따라서 속도 삼각형에서 얻어지는 유량 계수, 하중 계수 및 블레이드 마하 수 그리고 유체 물성치와 직결되어 있는 비열비만이 주요 고려 대상이다.

엄밀하게는 작동 유체의 물성 변화가 수반될 경우, 유동장을 지배하는 하나의 상사 변수인 γ 가 같지 않기 때문에 이를 별도의 독립 변수로 추가하지 않으면 압축기나 터빈의 성능 특성을 완전히 기술할 수 없다. 그러나 전술한 바와 같이, 수증기 함유율이 증가함에 따라 습공기의 기체 상수는 최대 2.15%까지 증가하지만 무차원 수인 비열비는 0.34% 정도만 감소하기 때문에 수증기 함유율은 압축기나 터빈의 무차원 유동 특성 또는 무차원 성능 특성에 근소한 변화만을 야기시킬 뿐이다. 그러므로 절대 습도라는 하나의 독립 변수를 추가하지 않더라도 수증기 함유율에 따른 비열비의 차이만을 적절히 보상할 수 있다면 충분히 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다.

다만, 기존의 압축기 또는 터빈의 성능 예측이나 성능 시험시에 실제로는 무차원 수를 직접 사용하는 대신, 무차원 수에 포함되어 있는 주요 물리 상수를 생략하여 사용하기 때문에 이로 인하여 오히려 유동의 상사 변수가 아닌 기체 상수의 변화를 별도로 보정하여야 한다. 실제로 압축기나 터빈의 성능 특성 변수들은 속도 삼각형을 정의하는 세 개의 무차원 변수들로부터 파생된 것으로, 이들 성능 특성 변수들은 회전 속도와 관계되는 $N/\sqrt{T_{01}}$, 유량과 관계되는 $m\sqrt{T_{01}/P_{01}}$, 단위 유량당의 공력 하중과 관계되는 $\Delta h_f/T_{01}$ 그리고 단열 효율 η 이다. 이 가운데 단열 효율만이 실제적인 무차원 수이나 관행상 이 성능 변수들도 무차원 속도, 무차원 유량, 무차원 하중 등으로 칭하며 무차원 수로 취급한다. 이들에 대한 엄밀한 무차원 수의 정의는 다음과 같다.

$$\text{무차원 속도} : \frac{ND}{\sqrt{\gamma RT_{ti}}}$$

$$\text{무차원 유량} : \frac{m_i \sqrt{\gamma RT_{ti}}}{D^2 P_{ti}}$$

$$\text{무차원 하중} : \frac{\Delta h_t}{\gamma RT_{ti}}$$

단열효율은 압축기나 터빈의 익렬내 각 중손실과 관련된 것으로 유동장을 묘사하는 속도 삼각형과는 직접적인 관계가 없지만 나머지 세 개의 성능 변수들은 속도 삼각형을 구성하는 세 개의 무차원 변수들과 밀접한 관계가 있다. 즉,

$$\frac{ND_i}{\sqrt{\gamma RT_{ti}}} = \frac{60}{\pi} \frac{\left(\frac{U_i}{\sqrt{\gamma RT_{ti}}} \right)}{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_i^2 \right)} \quad (7)$$

$$\frac{m_i \sqrt{\gamma RT_{ti}}}{A_i P_{ti}} = \gamma M_i \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_i^2 \right)^{\frac{-(\gamma+1)}{2(\gamma-1)}} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta h_t}{\gamma RT_{ti}} = \frac{\Delta h_t}{U_i^2} \frac{\left(\frac{U_i}{\sqrt{\gamma RT_{ti}}} \right)^2}{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_i^2 \right)^2} \quad (9)$$

입구 마하 수 M_i 를 유량 계수와 블레이드 마하 수의 곱으로 표현하면, 위 식들은 모두 다음과 같은 함수형으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{ND_i}{\sqrt{\gamma RT_{ti}}}, \frac{m_i \sqrt{\gamma RT_{ti}}}{A_i P_{ti}}, \frac{\Delta h_t}{\gamma RT_{ti}} = f \left(\frac{V_{z,i}}{U_i}, \frac{U_i}{\sqrt{\gamma RT_{ti}}}, \frac{\Delta h_t}{U_i^2}; \gamma \right) \quad (10)$$

이로부터 미미한 비열비의 영향을 제외한다면 속도 삼각형을 구성하는 세 개의 무차원 변수들 V_z/U_i , $U_i/\sqrt{\gamma RT_{ti}}$ 그리고 $\Delta h_t/U_i^2$ 은 압축기나 터빈의 성능 특성을 완전히 결정지을 수 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 흡습으로 인한 작동유체의 물성 변화가 압축기나 터빈의 유동 특성 또는 성능 특성에 미치는 영향을 정량화하기 보다는

건공기를 작동 유체로 하여 예측 또는 시험한 압축기 및 터빈의 성능 특성치들을 가지고 건공기와 습공기의 물성 차이를 보정하여 줌으로써 습공기를 흡입하는 가스 터빈 엔진의 성능 특성을 효과적으로 규명하는데 그 목적이 있다. 이를 위하여 속도 삼각형과 관련된 세 개의 무차원 변수들이 동일한 상태에서 작동 유체가 건공기인 경우와 습공기인 경우를 비교하면, 식 (10)으로부터 무차원 성능 변수들 역시 동일한 값을 가져야 한다. 따라서,

$$\left(\frac{ND_i}{\sqrt{\gamma RT_{ti}}} \right)_{wet} = \left(\frac{ND_i}{\sqrt{\gamma RT_{ti}}} \right)_{dry} \quad (11)$$

$$\left(\frac{m_i \sqrt{\gamma RT_{ti}}}{A_i P_{ti}} \right)_{wet} = \left(\frac{m_i \sqrt{\gamma RT_{ti}}}{A_i P_{ti}} \right)_{dry} \quad (12)$$

$$\left(\frac{\Delta h_t}{\gamma RT_{ti}} \right)_{wet} = \left(\frac{\Delta h_t}{\gamma RT_{ti}} \right)_{dry} \quad (13)$$

이 식들을 각각 식 (7), (8) 및 (9)와 결합하면 터보기계류의 습도 보정과 관련된 최종적인 관계식들을 얻을 수 있다.

$$\frac{\left(\frac{ND_i}{\sqrt{T_{ti}}} \right)_{wet}}{\left(\frac{ND_i}{\sqrt{T_{ti}}} \right)_{dry}} = \sqrt{\frac{\frac{R_{wet}}{\gamma_{dry}} \frac{1 + \frac{\gamma_{dry}-1}{2} M_i^2}{\gamma_{dry}}}{\frac{R_{dry}}{\gamma_{wet}} \frac{1 + \frac{\gamma_{wet}-1}{2} M_i^2}{\gamma_{wet}}}} \quad (14)$$

$$\frac{\left(\frac{m_i \sqrt{T_{ti}}}{P_{ti}} \right)_{wet}}{\left(\frac{m_i \sqrt{T_{ti}}}{P_{ti}} \right)_{dry}} = \sqrt{\frac{\frac{R_{dry}}{\gamma_{dry}} \left(1 + \frac{\gamma_{dry}-1}{2} M_i^2 \right)^{\frac{(\gamma_{dry}+1)}{2(\gamma_{dry}-1)}}}{\frac{R_{wet}}{\gamma_{wet}} \left(1 + \frac{\gamma_{wet}-1}{2} M_i^2 \right)^{\frac{(\gamma_{wet}+1)}{2(\gamma_{wet}-1)}}}} \quad (15)$$

$$\frac{\left(\frac{\Delta h_t}{T_{ti}} \right)_{wet}}{\left(\frac{\Delta h_t}{T_{ti}} \right)_{dry}} = \frac{\left(\frac{R_{wet}}{\gamma_{dry}} \right) \frac{1 + \frac{\gamma_{dry}-1}{2} M_i^2}{\gamma_{dry}}}{\left(\frac{R_{dry}}{\gamma_{wet}} \right) \frac{1 + \frac{\gamma_{wet}-1}{2} M_i^2}{\gamma_{wet}}} \quad (16)$$

다단 압축기 또는 터빈의 경우라도 전체를 하나의 단으로 간주하면, 일반적으로 입구 단면에서 작동 유체는 완전히 축 방향으로 흐르기 때문에 이를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$M_i \equiv \frac{V_i}{\sqrt{\gamma RT_i}} = \frac{V_{z,i}}{\sqrt{\gamma RT_i}} = \frac{U_i}{\sqrt{\gamma RT_i}} \frac{V_{z,i}}{U_i} \quad (17)$$

지금은 건공기 및 습공기에 대하여 유량 계수와 블레이드 마하 수가 같은 경우를 비교하고 있기 때문에 식 (17)로부터 $M_{i,wet} = M_{i,dry} = M_i$ 라는 관계가 성립한다. 그러므로 단열 효율을 제외하면, 입구 Mach 수를 기준으로 건공기에 대한 모든 성능 특성들이 습도 보정 관계식 (14), (15) 및 (16)을 통하여 습공기에 대한 성능 특성으로 전치될 수 있다. 식 (14)와 (15)에 따른 속도 및 유량 보정 관계식들은 각각 Fig. 4와 5에 도시되어 있으며 하중 보정 관계식 (16)은 정확히 속도 보정 관계식 (14)의 제곱과 같다.

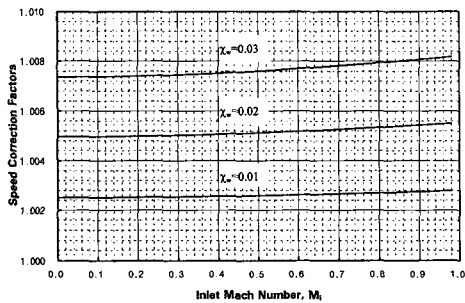


Fig. 4 Speed transposition of turbomachinery

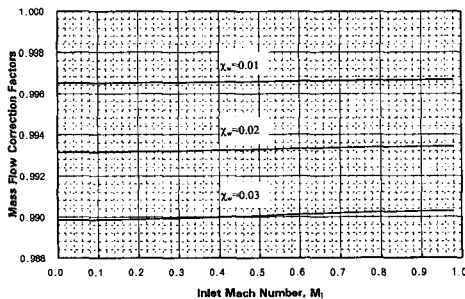


Fig. 5 Mass flow transposition of turbomachinery

한편, 단열 효율을 결정하는 공력 손실량은

유속의 제곱에 비례하는 비압축성 손실과 충격과 발생으로 인한 압축성 손실로 구분할 수 있는데 위에서 언급한 바와 같이 비열비의 차이만 무시할 수 있다면 작동 유체가 건공기에서 습공기로 바뀌더라도 입구 Mach 수가 같은 경우라면 이 두 가지 손실은 거의 변하지 않는다. 그러므로 터보기계의 입구 Mach 수를 기준으로 그 성능 특성을 전치하면, 작동 유체가 건공기에서 습공기로 바뀔 때에 기준 Mach 수가 같기 때문에 단열 효율도 함께 전치되는 효과를 가져온다.

3.3 연소기 및 기타 구성품들의 성능 특성 보정

연소기 및 기타 구성품들의 성능은 습도의 영향을 거의 받지 않으나 식(5)와 (6)을 근간으로 작동 유체의 물성치 변화를 고려하였다.

3.4 구성품간의 공력 재결합

엔진의 각 구성품들은 엔진 제어 입력에 따라 공력 결합 조건을 만족하는 하나의 평형 작동점 (equilibrium running point)을 만들어 낸다. 여기서 공력 결합 조건이란 구성품 상호간의 유량 및 동력 전달의 일치 조건과 기타 압력 경계 조건 등을 포함하는 일종의 구속 조건으로써, 엔진 구성 및 제어 입력에 따라 고유하게 설정된다. 이로써, 각 엔진 구성품의 성능 특성들은 공력적으로 결합되어 엔진 성능으로 나타난다.

4. 계산 결과 및 검토

4.1 대상 엔진

본 연구에서는 엔진 수준의 습도 보정 방법과 구성품 수준의 습도 보정 방법에 따른 결과를 직접 비교하기 위하여, 참고 문헌 1과 유사한 터보 제트 엔진을 대상으로 선정하여 흡습의 영향을 평가하였다. 대상 엔진은 4단 축류 압축기와 환형 연소기, 1단 축류 터빈 그리고 원주형 분사 노즐로 구성된 단축 터보제트 형식으로 그 모식도는 Fig. 6에 나타낸 바와 같다.

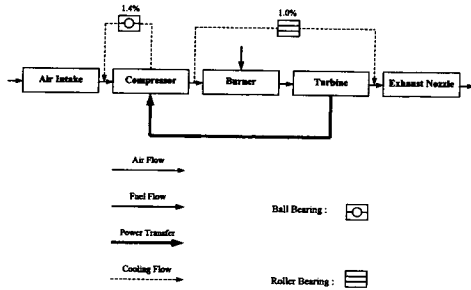


Fig. 6 Schematic diagram of model engine

대상 엔진의 환경 사양은 Fig. 7에 나타나 있으며 이를 기준할 때 각 고도별 최대 습도 수준 즉, 상대 습도가 100%일 때의 절대 습도는 Fig. 8에 나타나 있다. 이를 보면 다습 환경은 기온 및 기압이 높은 여름 철, 해면 고도에서 형성된다. 해수면을 따라서 비행하는 엔진들에 있어 절대 습도가 높은 이러한 환경 조건은 상대적으로 큰 엔진 성능 저하를 초래할 수 있으므로 흡습과 관련된 연구에서 가장 중요하게 취급된다.

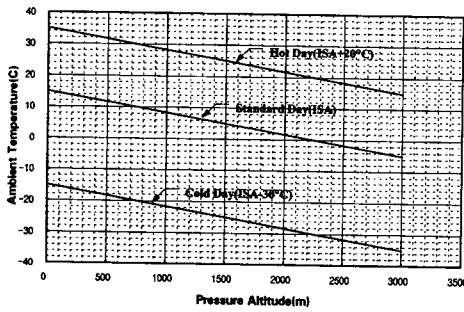


Fig. 7 Engine environmental envelope

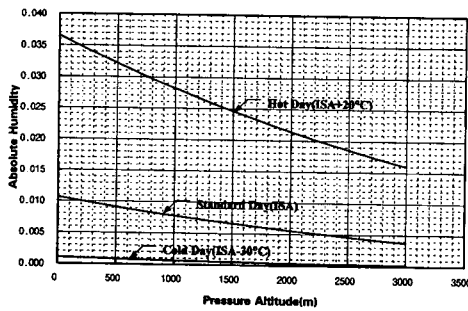


Fig. 8 Maximum possible level of humidity

4.2 프로그램 검증

구성품 수준의 습도 보정 방법은 흡습으로 인한 작동 유체의 물성 변화 및 구성품 성능 특성 변화 그리고 엔진 제어 변수에 따른 구성품 간의 공력 재결합을 고려할 수 있는 복잡한 엔진 성능 해석을 필요로 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 GESH라는 전용 프로그램을 새로 개발하였다. GESH의 정확성은 대상 엔진의 지상 시험 데이터를 이용하여 비교 검증하였다. Fig. 9 와 10에 나타난 추력 및 연료 유량에 대한 비교 결과를 보면, 75 - 100% 속도 범위에서 GESH의 cycle data는 2% 오차 범위 내에서 시험 결과를 정확히 예측한다.

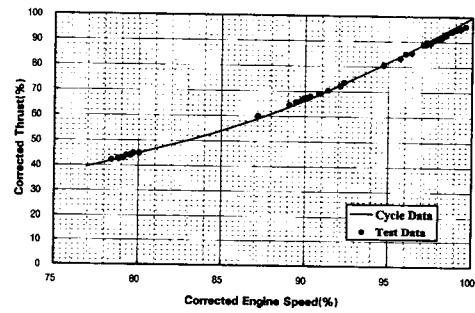


Fig. 9 Comparison of net thrust between cycle data and test data

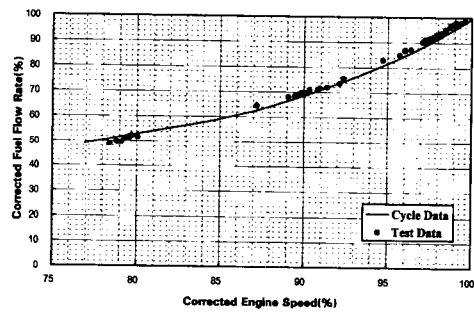


Fig. 10 Comparison of fuel flow between cycle data and test data

4.3 제어 변수에 따른 흡습의 영향

위에서 검증한 프로그램 GESH를 사용하여 절대 습도의 증가에 따른 엔진 성능 변화를 해석하였다. 제어 변수에 따라 습도 효과가 다르

게 나타나는 정도를 규명하기 위하여 대상 엔진의 무차원 성능 변수와 물리적 성능 변수를 일정하게 제어하는 경우로 나누어 엔진 성능 해석을 수행하였다.

무차원 성능 변수를 제어하는 경우에는 엔진 수준의 습도 보정(ELHC) 방법에서 사용한 가정이 타당하므로 이 경우에는 엔진 수준의 습도 보정 계수와 구성품 수준의 습도 보정(CLHC) 계수를 직접 비교함으로써 구성품 수준의 습도 보정 방법에 대한 타당성 여부를 검증할 수 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 참고 문헌 1에서와 같이 지상 정지 조건에서 T_{04}/T_{01} 이 일정한 경우에 대하여 절대 습도에 따른 주요 엔진 성능 변화량을 계산하였다. Fig. 11에 나타낸 계산 결과를 보면, 두 가지 방법으로부터 얻은 습도 보정 계수들이 매우 유사한 수준임을 알 수 있다. 두 결과 사이에 존재하는 약간의 차이는 서로 다른 엔진 구성품들의 성능 특성 차이에 기인하는 것이며 이로부터 본 연구를 통하여 체계화된 구성품 수준의 습도 보정 방법이 타당하다는 것을 확인하였다.

이상으로 그 타당성을 입증한 구성품 수준의 습도 보정 방법을 이용하여 물리적 성능 변수를 제어하는 경우의 습도 보정 계수를 계산하였다. 엔진에서 그 한계치를 넘지 않도록 설계치 이하로 유지해주어야 할 물리적 성능 변수는 회전 속도, 온도, 압력 등 다양하지만, 여기서는 이 가운데 가장 대표적인 회전 속도에 대하여 지상 정지 조건에서 습도 보정 계수를 계산하였다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 물리적 성능 변수를 일정하게 제어하는 경우에는 무차원 성능 변수를 일정하게 유지하는 경우보다 흡습의 영향이 상대적으로 크게 나타날 뿐만 아니라 그 경향성 면에서도 반대의 성향을 보인다. 게다가 비행과 관련하여 가장 중요한 추력 및 연료 유량에 대한 습도 보정이 제대로 이루어지지 않는다. 그러므로 엔진 수준의 습도 보정 방법으로는 적절한 습도 보정 계수를 얻을 수 없으며 본 연구에서 체계화된 구성품 수준의 습도 보정 방법이 적용되어야 한다.

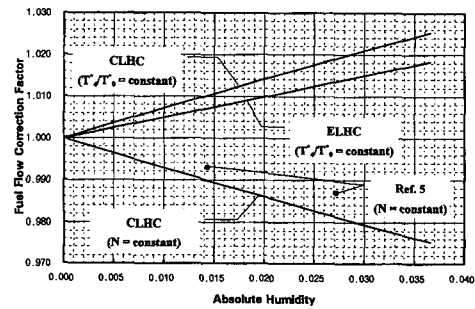
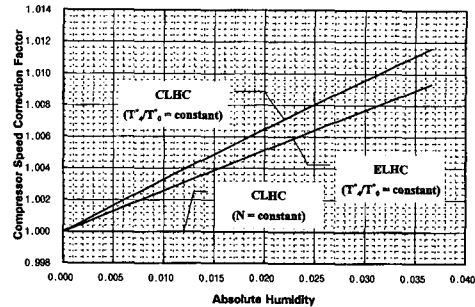


Fig. 12 Comparison of fuel flow correction factors

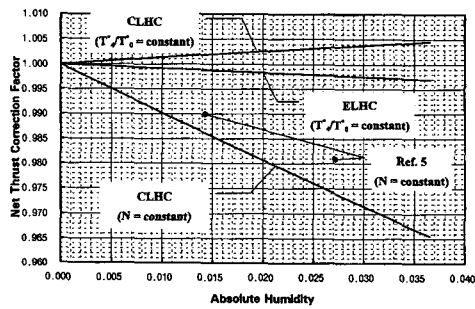
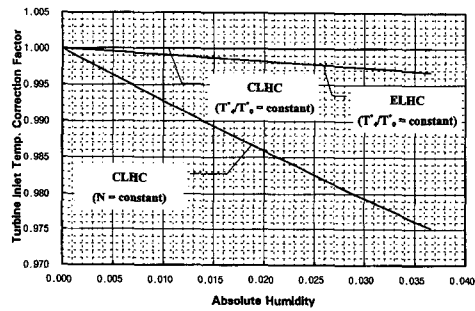


Fig. 11 Comparison of humidity correction factors

물리적 성능 변수를 일정하게 제어하는 경우에 대한 습도 보정 계수의 정확성 여부는 Fig. 11에 나타낸 것과 같이, 참고 문헌 5에 나와 있는 흡습 데이터와 비교함으로써 확인할 수 있다. 비교 결과, 본 연구에서 예측한 습도 효과는 참고 문헌 5의 값보다 다소 크게 평가되어 있는데, 이는 터보 제트 형식(바이패스 비 = 0)인 본 연구의 대상 엔진과는 달리 참고 문헌 5에서는 바이패스 비가 0 - 6 범위에 있는 다양한 엔진을 대상으로 하여 얻은 습도 효과를 평균한 것이기 때문이다. 이러한 습도 효과의 차이는 대상 엔진의 형식에서 비롯된 것으로 보다 정확히 습도 효과를 평가하기 위해서는 반드시 구성품 수준의 습도 보정 방법이 적용되어야 함을 의미한다.

5. 결 론

이상의 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 가스 터빈 분야에서 보편적으로 사용되고 있는 엔진 수준의 습도 보정 방식은 그 기초 가정의 타당성 문제로 인하여 물리적 성능 변수를 제어하는 경우에는 적용할 수 없다.
- 2) 물리적 성능 변수를 제어하는 경우에는 반드시 흡습에 따른 구성품 단위의 성능 특성 변화를 고려하는 구성품 수준의 습도 보정을 행하여야 한다.
- 3) 습도 효과는 대상 엔진의 형식에 따라 그 정도가 다르게 나타나므로 보다 정확한 평가를 위해서는 구성품 수준의 습도 보정 방법이 적용되어야 한다.
- 4) 본 연구에서 체계화된 구성품 수준의 습도 보정 방법은 엔진 형식에 관계없이 임의의 엔진 제어 변수에 대하여 적용 가능하다.
- 5) 구성품 수준의 습도 보정은 고비용의 엔진 시험을 수행하지 않더라도 흡습 효과를 충분히 정확하게 예측할 수 있는 체계적인 방법이다.

참 고 문 헌

1. Samuels, J.C. and B.M. Gale, "Effects of humidity on performance of turbojet engines", NACA, Washington, D.C., Tech. Note 2119, 1950
2. Fishbeyn, B.D. and N.V. Pervyshin, "Determination of the effects of atmospheric humidity on the characteristics of a turbofan engine, Translation by Foreign Technology Division, Wright-Patterson AFB, OH, FTD-HT-23-290-68 (AD 715232), 1970
3. Bird J. and W. Grabe, "Humidity effects on gas turbine performance", ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Orlando, FL, June 3-6, 1991, Paper No. 91-GT-329, 1991
4. Grabe, W.K. and J.W. Bird, "Humidity effects on gas turbine performance", National Research Council of Canada, Institute for Mechanical Engineering, Ottawa Ontario, Technical Report TR-ENG-003, 1988
5. Keith R. Garwood, "Recommended practices for the assessment of the effects of atmospheric water ingestion on the performance and operability of gas turbine engines", AGARD-AR-332, August 1994
6. AIR 1703, "In-flight thrust determination", Society of Automotive Engineers, Inc., 1985
7. Mikhaylovskiv, S.A., "Thermodynamic calculations on processes of vapor-gas mixture, 1962