

# 가스터빈 엔진용 공기터빈 시동기 성능에 관한 실험적 연구

김춘택<sup>\*\*</sup> · 양인영<sup>\*</sup> · 차봉준<sup>\*</sup>

## Experimental Research on the Performance of Air Turbine Starter for Gas Turbine Engines

Chun-Taek Kim<sup>\*\*</sup>, Inyoung Yang<sup>\*</sup>, Bong-Jun Cha<sup>\*</sup>

*Key Words* : Turboshaft engine(터보축 엔진), Performance Test(성능시험), Air Turbine Starter(공기터빈 시동기), Starting Torque(시동토크)

### ABSTRACT

Gas turbines for an aircraft have the start and restart capabilities within their flight envelop. It is an important item for engine qualification and substantiated with the test. Experimental investigations were carried out to find the relation between the corrected torque and the corrected rotating speed of an air turbine starter in this study. A dedicated air supply system for the air turbine starter and a special device to measure the torque and the rotating speed of the air turbine starter were developed and installed at the altitude engine test facility in Korea Aerospace Research Institute. Experimental results show that the relations between the corrected torque and the corrected rotating speed of the air turbine starter are linear and the inlet temperature and pressure conditions for the air turbine starter were found out to provide minimum required torque for the engine qualification test at various altitude. The start and restart tests for the currently developing engine were successfully performed using this experimental results.

### 1. 서론

항공기용 가스터빈 엔진은 지상 및 공중에서 엔진 시동영역 내에서 시동이 가능해야 하며 필요시 재시동의 요구조건을 충족하여야 한다.<sup>(1)</sup> 가스터빈 엔진의 시동/재시동에 필수적인 장치는 엔진의 점화와 관련된 시스템 이외에 엔진의 연소기 내부 상태가 점화 가능한 영역으로 유지할 수 있도록 엔진의 축을 회전시켜 엔진내부로 공기를 공급할 수 있는 시동기가 있어야 한다.

가스터빈 엔진의 시동기는 고압 축 또는 저압 축을 회전하는 방식이 있을 수 있는데, 일반적으로 고압 축을 회전시키는 방식의 경우 저압 축을 회전시키는 방식에 비해 시동시간을 단축시킬 수 있는 장점이 있으므로 널리 사용되는 방식이다.<sup>(2)</sup> 엔진의 시동기는 엔진 축의 저항을 이기고 엔진의 점화에 필요한 회전수를 달성할 수 있는 토크와 회전수를 제공하

여야 하므로 가스터빈 엔진의 시동 성능과 매우 밀접한 연관 관계를 가진다.

엔진의 시동기는 동력원에 따라 다음과 같은 몇 가지 형태로 분류될 수 있다.<sup>(3)</sup> 카트리지 시동기는 화학약품 등을 이용한 가스발생기를 자체 내장하고 있으며 발생한 가스로 터빈을 돌려서 엔진에 회전동력을 제공한다. 이 방식은 시동횟수가 제한이 되므로 소모성 가스터빈 엔진 등의 시동방식으로 주로 사용된다.

전기 시동기는 주로 직류(DC) 모터를 이용하여 구동하며 항공기의 배터리 전원이 충분할 때 사용할 수 있다. 이 방식은 저온에서 배터리의 성능에 영향을 받을 수 있으며 대형엔진의 경우 배터리 전력소모가 크므로 소형이고 공중에서 주로 사용되는 민간용 항공기용 엔진에 주로 적용 되는 방식이다.

유압 시동기는 소형 가스터빈 엔진에서 주로 사용되는 방식으로 유압 시스템의 작동을 위해서는 전기 동력이 소요되거나 축압기 등을 사용하여 저장된 고압의 유압으로 초기 시동이 가능하다.

가스터빈 시동기는 보조동력장치와 유사한 시동기가 주

\* 한국항공우주연구원 항공추진기관팀

† 교신저자, E-mail : ctkim@kari.re.kr

엔진에 직접 장착되어 엔진을 구동하는 방식으로 폴스로이스 Pegasus 엔진 등에 활용된 시동기이다. 이와 유사하게 내연기관을 주 엔진에 직접 연결하여 가스터빈을 구동하는 시동기의 형태가 존재한다.

공기터빈 시동기(ATS, Air Turbine Starter)는 항공기 내부의 공압을 이용하여 엔진을 구동하는 방식으로 시동기 자체가 가볍고 구조가 단순하기 때문에 최근에 가장 널리 사용되는 방식이다. 공기의 공급원으로는 보조동력장치 등이 될 수 있으며 다중 엔진이 장착되어 있을 경우 엔진 간의 블리이드 공기를 교차 사용하여 시동을 할 수도 있다.

본 연구에서는 고도에 따른 항공기용 엔진에 장착된 공기터빈 시동기의 성능에 대하여 실험적으로 연구를 수행하였다. 이를 위하여 한국항공우주연구원에 설치된 엔진고공환경시험설비에 공기터빈 시동기를 위한 별도의 공기 공급 장치를 구성하였으며 토크와 회전수 측정을 위한 장치를 제작하였다. 본 연구를 통하여 공기터빈 시동기의 성능을 파악하였으며 이 결과를 이용하여 현재 개발 중인 엔진의 시동/재시동 성능시험을 성공적으로 수행하였다.

## 2. 공기터빈 시동기 및 시험장치

### 2.1 공기터빈 시동기

공기터빈 시동기는 Fig. 1과 같이 흡입공기를 이용하여 터빈을 구동하고 터빈으로부터 얻어진 축 동력은 엔진 구동축에서 요구하는 회전수로 감속이 된 후 엔진 기어박스로 연결되어 엔진을 구동하게 된다. 엔진 점화 후에 엔진의 토크가 커지게 되고 엔진의 회전수가 증가하게 되면 공기터빈 시동기는 엔진출력의 손실요소가 되므로 엔진이 아이들(idle) 상태에 도달하기 전에 클러치를 이용하여 동력을 차단하게 된다. 일반적으로 공기터빈 시동기는 내장 윤활장치를 가지고 있으며 윤활 오일에 대한 별도의 냉각장치가 없으므로 시동 횟수 및 시간에 제약이 받게 된다.

모든 엔진은 Fig. 2와 같이 각 엔진이 요구하는 토크와 회전수의 관계를 가지며 이 관계는 엔진의 개발규격서에 명시되어 있다. 엔진을 점화하기 전에 공기터빈 시동기의 정상상태

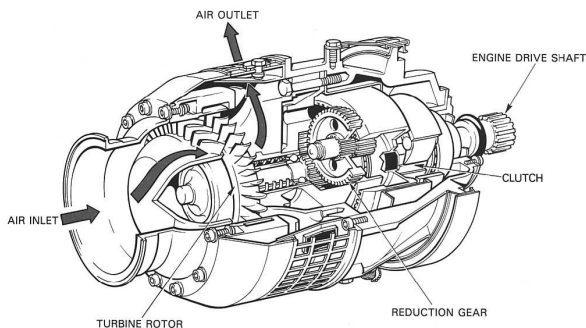


Fig. 1 Air Turbine Starter<sup>(3)</sup>

토크는 엔진의 윈드밀 저항과 동일하며, 이는 대기 온도, 압력 및 엔진 오일의 종류 등에 따라 달라진다. 이때 엔진의 회전수를 증가시키기 위하여 공기터빈 시동기에서 요구되는 토크는 정상상태에서 발생하는 토크값 이상으로 유지되어야 한다.

엔진의 회전수가 연소기에서 점화가 가능한 영역으로 접어들면 엔진으로 연료가 공급되고 점화장치에서는 점화가 발생하여 엔진으로부터 토크가 발생하게 된다. 엔진의 점화가 완료되어 엔진이 자력으로 운전이 가능한 회전수에 도달하기 전에 공기터빈 시동기의 클러치가 작동되어 공기터빈 시동기와 엔진의 축이 차단된다.

엔진 개발규격서에는 엔진의 안정적인 운전을 위하여 최소 요구토크와 엔진 및 공기터빈 시동기의 안전을 고려한 최대 허용토크가 명시되어 있다. 최소 요구토크 상태에서 엔진은 개발규격서에 명시된 시동시간을 충족하여야 하며 엔진의 시동 및 재시동이 이 시간 내에서 안정적으로 이루어지는지 여부를 판단하는 것이 군수규격 및 민수규격에서 정의하고 있는 시동 및 재시동 시험이다. 시동시간은 일반적으로 군수엔진의 경우 30~40 초이며 민수엔진의 경우 조금 더 긴 경향을 가지고 있다.

Fig. 2와 같은 시동특성 곡선은 고도에 따라 달라지므로 엔진고공환경시험에서는 각 시험 고도에 해당하는 엔진의 최소 요구토크에 따라 시험을 수행하여야 한다.

엔진고공환경시험에서 수행하는 시동 및 재시동 시험시 공기터빈 시동기가 발생하는 토크의 측정은 매우 중요하다. 공기터빈 시동기의 규격서에 회전수와 토크사이의 상관관계가 명시되어 있으나, 일반적으로 규격서에 명시된 값은 보증

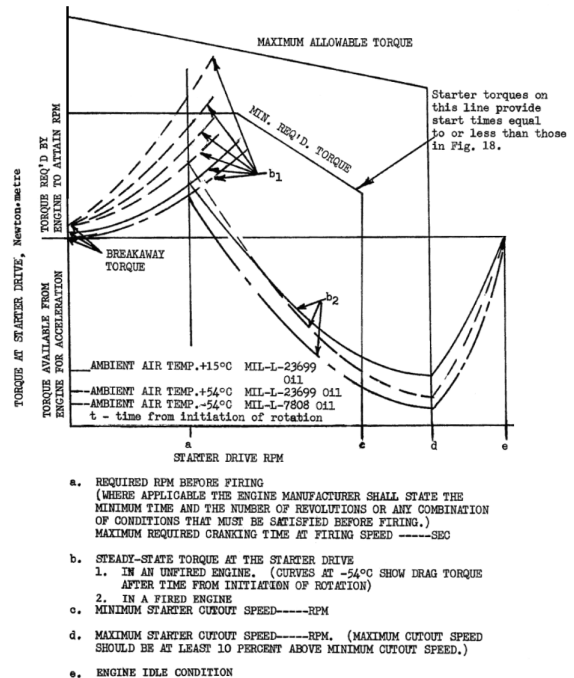


Fig. 2 Starting torque and speed requirements<sup>(1)</sup>

하는 최소값이 명시되어 있으며 제품 간의 편차가 반영되어 있지 않으므로 시험시 토크값을 측정하여 원하는 토크값이 엔진으로 제공될 수 있도록 하여야 한다.

Fig. 3은 공기터빈 시동기의 일반적인 토크 및 회전수의 관계를 나타낸다. 엔진에서 요구하는 공기터빈 시동기의 토크와 회전수를 제공하기 위해서는 이 그림과 같이 공기터빈 시동기의 팽창비에 따른 보정 토크 및 보정 회전수를 맞추어 주어야 한다.

보정 토크는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{\tau}{\delta_1}, \delta_1 = \frac{P_1}{P_{ref}}, P_{ref} = 101.325kPa \quad (1)$$

여기서,  $\tau$ 는 토크,  $P_1$ 은 공기터빈 시동기 입구 압력이다. 또한, 보정 회전수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{N}{\sqrt{\theta_1}}, \theta_1 = \frac{T_1}{T_{ref}}, T_{ref} = 288.15K \quad (2)$$

여기서,  $N$ 은 회전수,  $T_1$ 은 공기터빈 시동기 입구 압력이며,  $P_2$ 은 공기터빈 시동기 출구 압력이다.

이상의 관계와 같이 엔진에서 요구되는 시동 토크와 회전수에 영향을 미치는 주요 변수는 공기터빈 시동기의 입구 온도, 입구 압력 및 공기터빈 시동기의 출구 압력이다.

항공기에서는 공기터빈 시동기의 입구 온도 및 입구 압력은 보조동력장치 등을 이용하여 조정하게 되며, 공기터빈 시동기의 출구 압력은 고도조건에 따라 결정이 된다. 이 경우 공기터빈 시동기의 토크는 최소 요구토크와 최대 허용토크 사이에서 운전이 되게 된다.

개발된 엔진의 고도인증시험을 위하여 고도에 따른 최소 요구 토크 곡선을 맞추어야 하므로 본 연구에서는 공기터빈 시동기의 입구 압력 및 입구 온도의 조절이 가능한 별도의 공기공급장치 및 가열기를 이용하여 시험을 수행하였다.

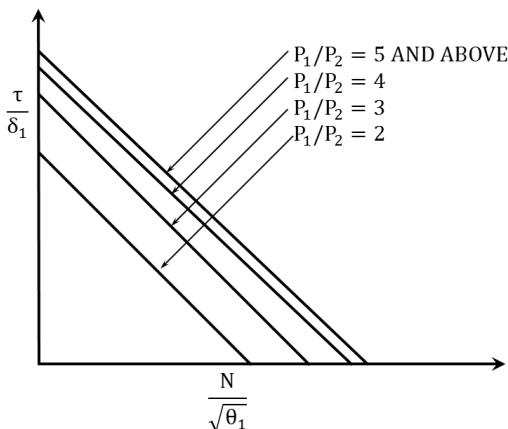


Fig. 3 Air turbine starter torque and rotating speed characteristics

## 2.2 시험설비

본 시험은 한국항공우주연구원에 설치된 엔진 고공환경시험설비에서 수행되었다. 공기터빈 시동기에서 원하는 토크와 회전수를 얻기 위하여 Fig. 4와 같은 시동공기 공급시스템을 별도로 구축하였다.

설비의 시동공기 탱크는 11 m<sup>3</sup> 용량으로 15 hp 압축기를 사용하여 최대 35 bar의 압력으로 압축공기를 저장하여 압력조절기를 통하여 배치탱크로 공기를 공급한다. 배치탱크는 1 m<sup>3</sup> 용량으로 시험부 근처에는 설치하여 시동공기 사용량이 많을 경우 압력 강하를 최소화 하도록 구성하였다. 배치탱크에는 75 hp의 압축기를 이용하여 9.3 bar로 압축공기를 공급하도록 구성이 되어 있으며 배치탱크 후단에는 압력조절 밸브를 장착하여 공기터빈 시동기의 입구 압력 조건을 조절하였다.

압력이 조절된 공기는 20 kW의 전기히터를 통과하도록 구성하여 공기터빈 시동기 입구 온도를 조절할 수 있도록 하였다. 공기터빈 시동기 직전에 압력 및 온도를 측정할 수 있는 센서를 장착하여 설정된 온도 및 압력을 피드백하여 제어를 수행하였다. 초기에 공기터빈 시동기에 공기를 공급하면 배관 등에서 온도 손실이 발생하여 설정한 온도에 도달되지 못하게 된다. 이를 방지하기 위하여 바이패스 밸브를 설치하여 온도와 압력이 정상상태에 도달할 때까지 시동공기를 대기로 방출할 수 있도록 구성하였다.

엔진의 시동 신호가 인가되면 엔진의 FADEC(Full Authority Digital Engine Control)은 공기터빈 시동기 입구 밸브를 열게 되고 이 밸브의 열림신호를 받아 바이패스 밸브를 닫게 된다. 이 동작은 1초 이내에 모두 완료되며 엔진의 시동이 완료되면 엔진 FADEC은 공기터빈 시동기 입구 밸브를 닫고 바이패스 밸브를 열게 된다.

공기 공급시스템과 함께 공기터빈 시동기에서 발생하는 회전수와 토크의 측정은 매우 중요하다. 엔진과 공기터빈 시동기 사이에 Fig. 5와 같은 토크 측정장치<sup>(4)</sup>를 제작하여 설치하였다. 토크 측정장치 및 공기터빈 시동기는 엔진 시동시 엔진의 움직임을 방해하지 않아야 하므로 외팔보 형태로 엔진에 장착되어야 한다. 토크 측정장치는 공기터빈 시동기와 연결되는 엔진 플랜지의 허용 하중을 만족하기 위하여 최대한 짧고, 가벼운 재질로 제작되었다.

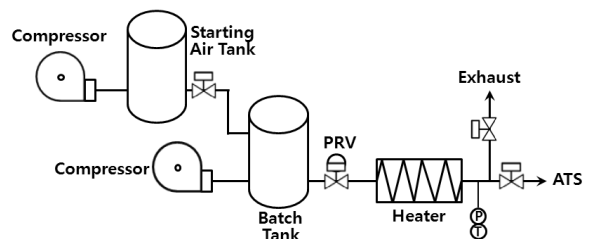


Fig. 4 ATS air supply system

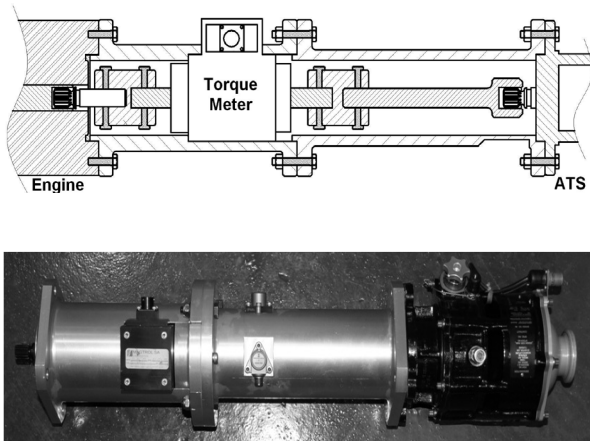
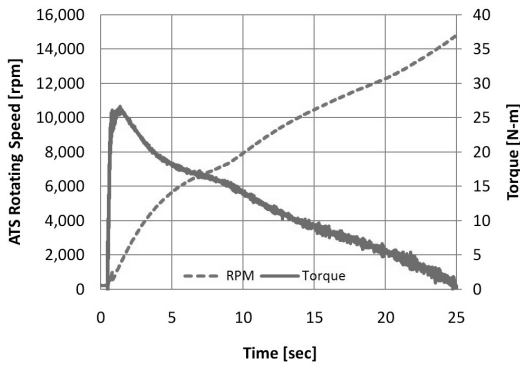


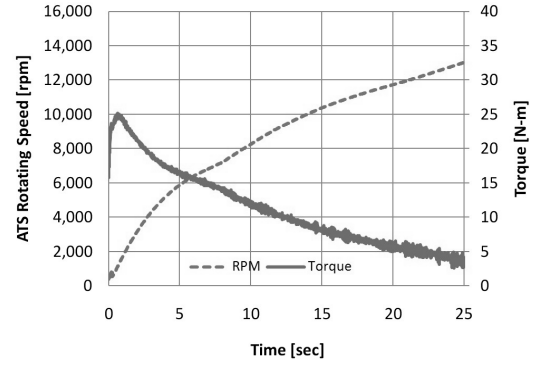
Fig. 5 ATS torque measurement device

본 시험에 사용된 공기터빈 시동기는 Honeywell 사의 ATS18-3A이였으며, 토크미터는 Magtrol사의 TMHS 310 모델<sup>(5)</sup>을 사용하였으며 최대 측정 토크는 50 Nm이다.

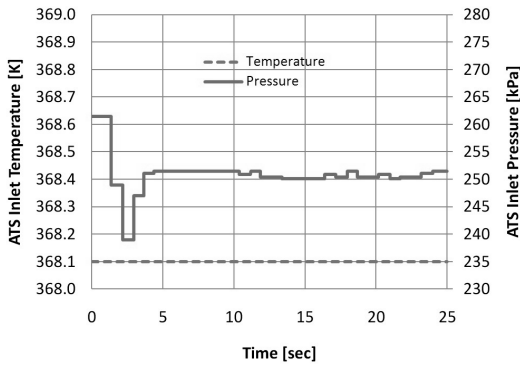
공기터빈 시동기의 회전수는 3가지 방법으로 측정이 가능하였다. 공기터빈 시동기 자체에서 회전수에 대한 정보를 얻을 수 있고 장착된 토크미터에서도 회전수 정보를 얻을 수 있으며 엔진과 일정한 기어비로 장착되어 있으므로 엔진의 회전수로부터 계산을 할 수 있다. 각 측정 센서의 시간 지연으로 과도상태에서는 미소한 차이가 발생하므로 본 연구에서는 토크신호와 시간 지연을 없애기 위하여 토크미터에서 얻어진 회전수를 사용하였다.



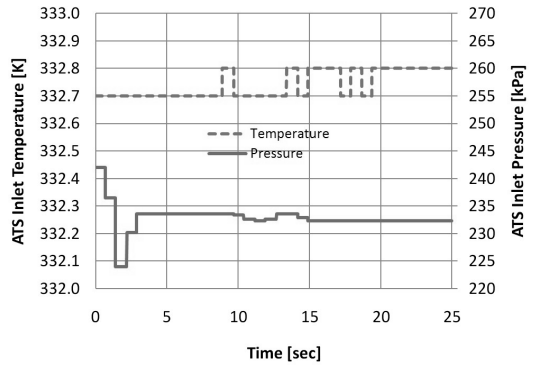
(a) ATS rotating speed and torque



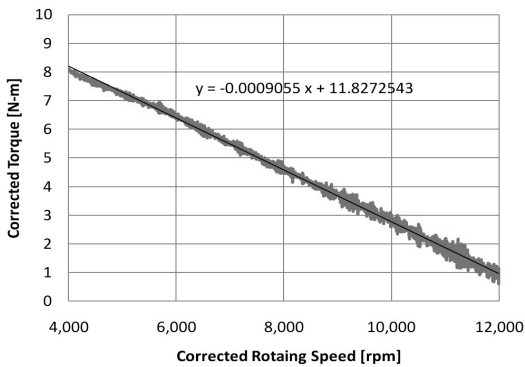
(a) ATS rotating speed and torque



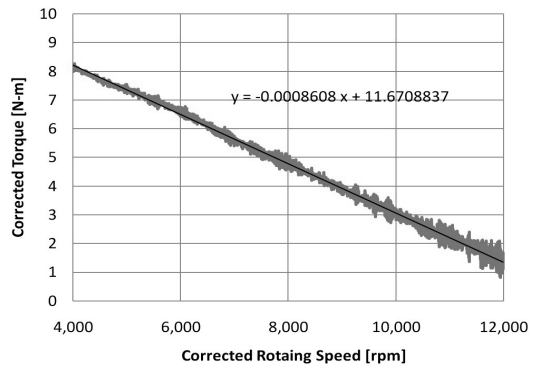
(b) ATS inlet temperature and pressure



(b) ATS inlet temperature and pressure



(c) ATS torque and rotating speed characteristic



(c) ATS torque and rotating speed characteristic

Fig. 6 ATS performance at SL

Fig. 7 ATS performance at 5 kft



### 3. 성능시험결과

공기터빈 시동기의 성능시험은 지상, 5 kft, 10 kft, 20 kft 의 고도조건에서 수행이 되었다. 시간에 따른 엔진의 회전수는 엔진의 윈드밀 특성에 따라 좌우되며 이에 영향을 미치는 인자는 고도, 엔진 입구온도, 엔진의 윤활유 특성 등이다.

본 시험에서 엔진의 윤활유는 MIL-L-23699를 사용하였으며 엔진의 입구온도는 엔진의 가속 시간에 주로 영향을 미치므로 공기터빈 시동기의 보정 토크 및 보정 회전수 특성에 미치는 영향은 미미하다. 그러므로 본 시험에서 엔진의 온도는 대기온도 조건으로 시험을 수행하였다.

Fig. 6은 지상고도에서 공기터빈 시동기의 시험결과를 나

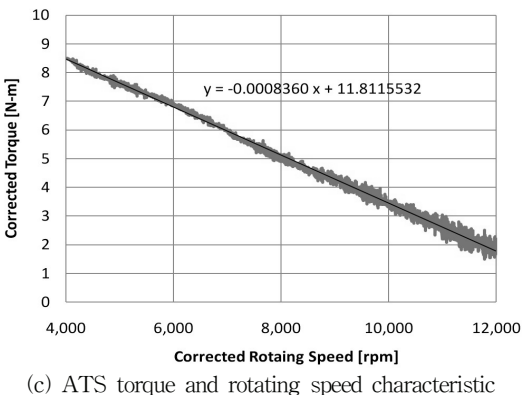
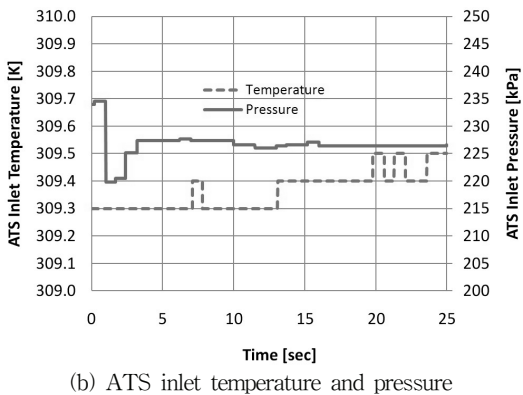
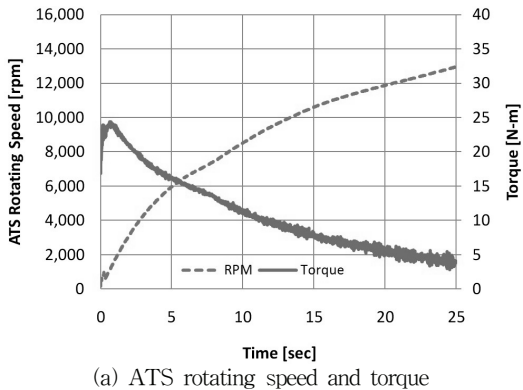


Fig. 8 ATS performance at 10 kft

타낸다. 공기터빈 시동기로 시동공기가 유입되면서 토크가 발생하여 회전수가 상승하였으며, 토크는 회전수의 증가에 따라 감소하였다.

공기터빈 시동기 작동되는 동안 유입되는 공기의 온도의 변화는 1°C 이내였으며, 압력은 시동초기를 제외하고 최대

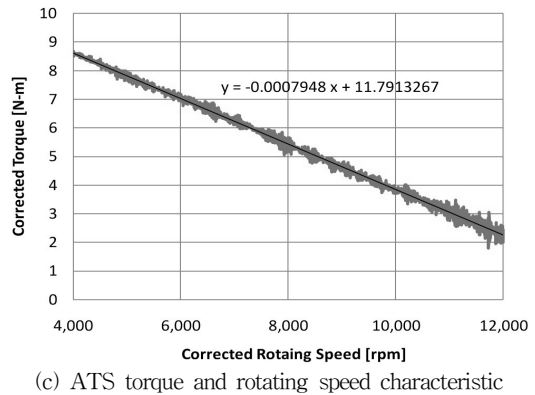
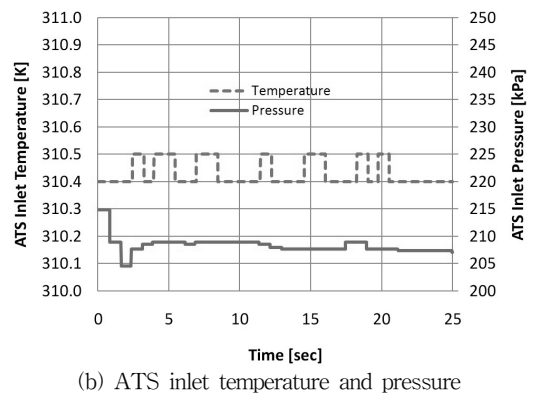
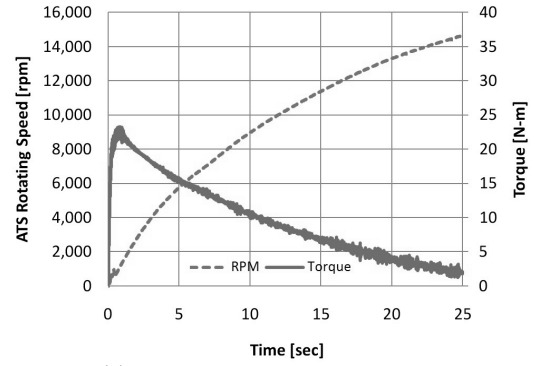


Fig. 9 ATS performance at 20 kft

Table 1 ATS operating conditions

Altitude [kft]	$P_1$ [kPa]	$T_1$ [K]	$P_1/P_2$
0	250.8	368.1	2.5
5	232.8	332.7	2.8
10	226.7	309.4	3.2
20	208.5	310.4	4.5

2 kPa 이내였다. Fig. 6(c)에는 공기터빈 시동기의 보정토크와 보정회전수의 특성곡선을 나타내고 있다. Fig. 2의 최소 요구토크 영역에서 두 변수의 관계는 선형적으로 나타나는 것을 확인하였다.

Fig. 7, 8, 9는 각각 고도 5 kft, 10 kft, 20 kft에서 공기터빈 시동기의 특성을 나타낸다. 고도 조건에서 공기터빈 시동기의 특성은 지상과 유사하였으나 고도가 상승하면서 엔진 입구공기의 밀도가 감소하여 엔진의 윈드밀 저항이 감소하였으며, 이로 인해 공기터빈 시동기의 최소 요구토크도 감소하였다.

본 성능시험을 통하여 Table 1과 같이 고도에 따른 엔진이 요구하는 최소 요구토크를 제공하기 위한 공기터빈 시동기의 입구 온도 및 입구압력 조건을 찾을 수 있었다.

#### 4. 결 론

항공기용 가스터빈 엔진은 지상 및 공중에서 엔진 시동영역 내에서 시동 및 재시동의 요구조건을 충족하여야 한다. 이는 엔진의 인증을 위한 주요 항목으로 시험을 통하여 검증하여야 한다.

엔진 시동기로는 여러 가지 형태가 있을 수 있으나 본 연구에서는 공기터빈 시동기를 이용하여 시동기 의하여 엔진

에 주어지는 토크와 회전수의 관계를 실험적으로 연구하였다. 이를 위하여 한국항공우주연구원에 설치된 엔진고공환경시험설비에 공기터빈 시동기를 위한 별도의 공기 공급 장치를 구성하였으며, 토크와 회전수 측정을 위한 장치를 제작하였다.

시험결과 공기터빈 시동기의 보정 토크와 보정 회전수의 관계는 선형으로 나타났으며 엔진의 인증시험을 위한 최소 요구 토크를 제공하기 위한 공기터빈 시동기의 입구조건을 찾을 수 있었다. 이 실험 결과를 이용하여 현재 개발 중인 엔진의 시동/재시동 성능시험을 성공적으로 수행할 수 있었다.

#### 참고문헌

- (1) MIL-E-8333A, 1975, "Military Specifications Engines, Aircraft, Turboshaft and Turboprop General Specification for."
- (2) A. G. Pascoe, 2005, "Start Systems for Aero Gas Turbines," Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Vol. 77, Issue 6 pp. 448~454.
- (3) Rolls-Royce plc., 1986, "The Jet Engine."
- (4) 김춘택, 2010, "가스터빈엔진의 시동토크 측정장치," 특허출원번호 10-2010-0117229, 특허청.
- (5) www.magtrol.com