

Coast Down 시험데이터를 이용한 가스터빈엔진 시동모델 연구

김선제^{a,*} · 김용련^a · 민성기^a

Study of Gas-turbine Cranking Model using the Coast Down Experimental Results

Sun Je Kim^{a,*} · Yeong Ryeon Kim^a · Seongki Min^a

^aThe 4th R&D Institute - 5th Directorate, Agency for Defense Development, Korea

*Corresponding author. E-mail: kimsj@add.re.kr

ABSTRACT

Appropriate selection of the starter is essential for successful starting of the gas-turbine engine. Thus, aerodynamic drag during starting phase should be analyzed to assess the feasibility of the starter. In this paper, aerodynamic drag is modeled based on the speed profile from the engine coast down test, and it is scaled with respect to the target engine by comparing the compressor load. Afterward, the govern equation of the starting phase is developed with the torque model of the starter, and the design scheme to select the feasible starter will be finally suggested. The proposed model of starting phase will be useful to perform a preliminary design of the starting system of the gas-turbine engine.

초 록

가스터빈엔진의 시동점화 조건 달성 및 시동가속을 위해서는 엔진에 적합한 시동기를 선정하여야 한다. 이를 위해서는 시동 크랭킹 과정의 공력저항을 예측하여 시동성능을 파악하여야 한다. 본 논문에서는 기 개발엔진의 Coast down 시험을 통하여 획득된 엔진속도 프로파일 데이터를 바탕으로 엔진 주축에 인가되는 공력저항을 도출하고, 압축기 부하를 기준으로 한 스케일링을 통해 대상엔진의 공력저항을 모델링하였다. 이후, 공력저항 모델과 공기시동기(ATS)의 토크 성능선도를 엔진 시동모델에 적용함으로써, 엔진시동에 적합한 시동기를 선정하는 방법을 제시한다.

Key Words: Gas-turbine Engine(가스터빈엔진), Air Turbine Starter(공기 시동기), Cranking(크랭킹), Aerodynamic Drag(공력저항), Coast Down Test(타행시험)

Received 10 June 2016 / Revised 30 December 2016 / Accepted 3 January 2017

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2016년도 춘계학술대회(2016. 5. 25-27, 제주 샤인빌리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

가스터빈엔진의 시동을 위해서는 외부 동력을

이용해 엔진을 가속시켜 연소기에 안정적인 점화가 가능한 공기를 공급해야 한다. 가스터빈엔진의 시동방식에는 공기시동기, 유압시동기, 전기시동기, 가스발생기 등을 이용한 강제시동 방식과 엔진 내부로 유입되는 공기를 이용하는 윈드밀링(Wind-milling) 방식이 있다. 이 중, 공기시동기(Air Turbine Starter, ATS)는 별도의 공기공급장치를 필요로 하지만, 중량 대 출력비가 높아 항공용 및 산업용으로 널리 사용된다[1]. 본 논문에서는 공기시동기를 이용한 강제시동 방식의 시동모델링에 대한 연구를 진행하였다.

엔진의 초기 시동 성능에는 오일 점성 저항, 기어시스템 및 펌프 계통의 기계적 손실과 부하조건, 엔진 로터축의 회전관성모멘트(Rotational inertia), 압축기에 의한 공력저항(Aerodynamic drag), ATS 성능, 연소기 성능 등이 관련된다[1]. 연소기에 점화가 일어나기 전인 크랭킹(Cranksing) 단계에서는 압축기의 공력저항이 시동 크랭킹 가속에 주요한 영향을 미친다. 하지만, 이러한 시동저항은 해석적으로 예측이 어려운 한계가 있다. 따라서, 본 논문에서는 크랭킹 단계에서의 압축기 공력저항을 엔진의 타행시험(Coast down test) 결과를 이용해 모델링하고자 한다. 또한, 이를 바탕으로 시동 신뢰성과 성능을 확보할 수 있는 공기터빈시동기를 선정하는 방법을 제안한다.

본 논문의 2장에서는 가스터빈엔진의 시동구간에서의 지배방정식을 유도하고, ATS 시동토크와 압축기 공력저항에 대한 관계를 기술한다. 3장에서는 Coast down 시험결과를 기반으로 압축기 공력저항을 모델링한다. 4장에서는 이러한 공력저항 모델과 ATS 토크모델을 이용해 시동시간을 예측하고, 적정 ATS 선정방안을 소개한다.

2. 시동구간 가스터빈엔진 Dynamics

본 연구의 대상엔진은 단축 가스터빈엔진으로 다음을 가정한다. 1) 압축기와 터빈은 동일 축에 위치, 2) 크랭킹 상황에서 터빈에 의한 공력저항은 무시, 3) 엔진 주축 마찰 및 오일 점성에 의

한 감쇠, 손실은 무시, 4) ATS-엔진주축 간 기어손실은 무시한다. 2번 3번 가정에서 언급된 저항의 경우 시동크랭킹 단계에서는 압축기 공력저항에 비해 무시할 수 있는 값이므로 가정에 무리가 없다고 판단된다.

가스터빈엔진의 시동구간은 시동기 작동 및 연소실 점화상태에 따라서 크게 다음의 3구간으로 구분할 수 있다[2].

① Stage 1: 시동기 작동 구간(~20% 엔진 RPM)

엔진 시동크랭킹 초기단계로 압축기가 연소기에 공기를 송풍하는 수준으로 낮은 압축비를 생성시키면서, 시동기의 시동토크로만 엔진을 가속시킨다. 따라서 시동기에서 공급하는 토크($\tau_{ATS,I}$ [Nm])는 압축기의 공력저항에 의한 토크($\tau_{c,I}$ [Nm])와 주축의 회전관성에 의한 토크($I_R \dot{\omega}$, [kgm²/s²=Nm])와 동일하다.

$$\tau_{ATS,I} = \tau_{c,I} + I_R \dot{\omega} \quad (1)$$

② Stage 2: 시동기 + 터빈 작동 구간(<엔진 Idle RPM)

시동기를 이용한 크랭킹 후, 연소기의 점화 및 연소를 통해 엔진 가속을 위한 동력으로 터빈에 의한 가속토크($\tau_{t,II}$ [Nm])가 추가된다.

$$\tau_{ATS,II} + \tau_{t,II} = \tau_{c,II} + I_R \dot{\omega} \quad (2)$$

③ Stage 3: 터빈 작동 구간(>엔진 Idle RPM)

안정적인 터빈동력을 확보한 상황까지 엔진이 가속된 이후에 시동기는 엔진 주축에서 분리되고, 터빈에서 발생한 토크만으로 압축기를 작동시킨다.

$$\tau_{t,III} = \tau_{c,III} + I_R \dot{\omega} \quad (3)$$

Fig. 1은 앞서 언급한 엔진 작동 Stage 간 회전저항 및 회전토크에 대한 그래프이다[2]. Stage 1에서 회전토크는 공기시동기에 의한 토크로, 공기시동기의 출력 속도가 상승함에 따라서 출력

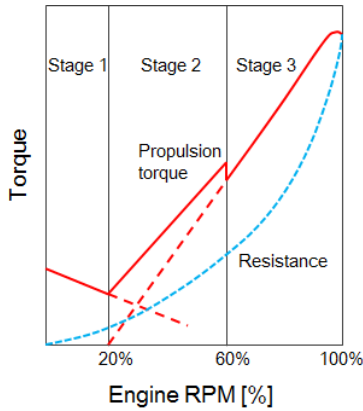


Fig. 1 Propulsion and resistance torques of the gas-turbine engine[2].

토크가 선형적으로 감소하는 경향을 갖는다[1]. 이후 Stage 2에서 공기시동기와 터빈 동력이 엔진을 가속시키고, Stage 3에 도달하여 공기시동기가 동력을 전달하지 않는 시점(60% RPM)에 회전 가속토크가 비연속적으로 감소되는 경향을 보인다. Fig. 1의 푸른색 파선은 회전저항으로, 압축기의 공력저항이 주요하여 회전속도가 증가함에 따라 다차 다항식 형태로 증가한다. Fig. 1에서 붉은색 실선(회전토크)과 파란색 파선(회전저항)의 차는 엔진을 가속시키는 토크를 의미한다.

3. Coast Down 시험기반 회전저항 모델

3.1 회전저항 모델링

가스터빈엔진 시동 시 회전저항은 압축기의 공력저항을 포함하여, 마찰저항, 동력축 간 에너지손실, 오일점성 등 여러 요인이 복합적으로 작용하기 때문에, 수치적으로 계산하기에는 어려움이 있다. 본 논문에서는 일반적으로 자동차 주행저항을 계산하는데 이용하는 타행시험(Coast down test)을 통해 시동 시 엔진에 작용하는 회전저항을 모델링하였다[3].

Coast Down 시험은 엔진을 크랭킹하여 일정 회전속도에 도달 시킨 후 무부하, 비연소 조건으로 정지 시까지의 회전속도 변화를 측정하는 시험이다. 본 연구에서는 기준이 되는 가스터빈 엔

진을 지상 시험조건(14.7 psia, 283 K 흡입구 조건)에서 고압공기를 터빈에 입력하여 주축속도를 최대 37% RPM까지 Dry 크랭킹을 통해 상승시킨 후 Coast Down을 수행하였다. 일정 시간 후, 32% RPM부터 정지 시까지 측정된 주축속도 데이터를 회전저항 모델링 자료로 사용하였다. 회전속도는 자체개발 속도센서를 이용하여 측정하였으며, 저역통과필터 및 비교기를 거친 후처리 과정을 통해 속도데이터를 확보하였다. 기준 엔진에 대한 Coast Down 시험을 통하여 코어부 로터의 회전속도와 속도변화율을 측정한 결과는 Fig. 2와 같다. Coast Down 시험 시 속도변화율과 회전저항 간의 관계는 다음 식으로 표현이 가능하므로, 엔진 회전속도 변화율($\dot{\omega}$)을 이용해 엔진의 회전저항(τ_R)을 구할 수 있다.

$$\tau_R + I_R \dot{\omega} = 0 \quad (4)$$

위 식을 통해 계산된 회전저항은 Fig. 3과 같다. 저속구간에서 점성 및 마찰손실로 인한 회전저항예측의 오차가 발생하나 전체적으로 항력이 압축기 Tip의 선속도의 제곱에 비례하기 때문에 속도의 제곱에 관한 식으로 표현이 가능하다.

$$\tau_{R,Fit} = a\omega^2 \quad (5)$$

회전저항모델의 계수인 a 는 실험적으로 구할 수 있으며, 이에 대한 물리적 의미는 다음 장에서 소개한다.

3.2 압축기성능 기반 모델 Scaling

앞장에서 도출한 회전저항 모델을 타 엔진에 적용하기 위해서 압축기의 유량, 압력비 및 압축효율에 관한 압축기성능을 기준으로 모델을 Scaling하는 방법에 대해서 제안하고자 한다.

시동 크랭킹 구간에서의 주요 회전저항인 압축기 공력저항은 단일조건에서의 압축기 일을 계산함으로써 유추할 수 있다. 압축기 전, 후단의 전온도차($T_{T2} - T_{T1}$)에 의해서 다음과 같이 압축기에 필요한 동력(\dot{E})을 계산할 수 있다.

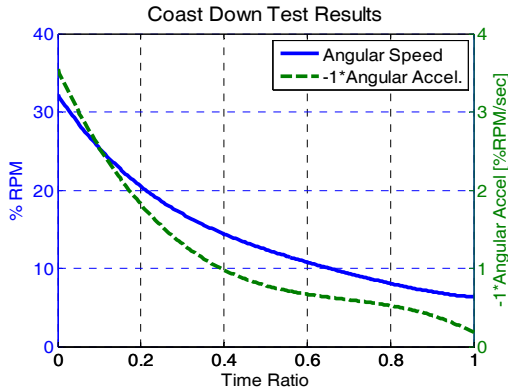


Fig. 2 Engine RPM result from the coast down test.

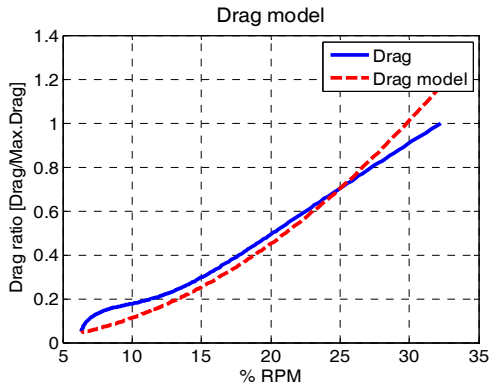


Fig. 3 Engine drag model based on the coast down test.

$$\dot{E} = \dot{m}c_p\Delta T = \dot{m}c_p(T_{T2} - T_{T1}) = \dot{m}\Delta h \quad (6)$$

압축기 후단 전온도를 압축기 효율(η_c)과 등엔트로피조건에서의 전온도(T'_{T2})로 치환하고, 이를 다시 압력비(P_{T2}/P_{T1})로 치환하면 다음의 식으로 정리가 가능하다.

$$\dot{E} = \frac{\dot{m}c_p}{\eta_c}(T'_{T2} - T_{T1}) = \frac{\dot{m}c_p}{\eta_c}T_{T1}\left(\left(\frac{P_{T2}}{P_{T1}}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right) \quad (7)$$

이때, 압축기 유입유량은 엔진 회전속도에 비례하고, 압축기 일은 엔진 회전속도의 제곱에 비례하기 때문에[4], Reference 조건에서의 압축기 성능과 비교하여 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$\left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_{ref}}\right) = k_m \left(\frac{\omega}{\omega_{ref}}\right) \quad (8)$$

$$\left(\frac{\Delta h}{\Delta h_{ref}}\right) = k_h \left(\frac{\omega}{\omega_{ref}}\right)^2 \quad (9)$$

위 두식을 앞선 압축기 동력에 관한 식에 대입하고, 토크 값으로 변환하기 위해, 회전속도로 나누면 다음의 식으로 정리된다.

$$\tau_c = \dot{m}_{ref}\Delta h_{ref}k_mk_h\frac{\omega^2}{\omega_{ref}^3} \quad (10)$$

이를 앞장에서 유도한 회전속도의 2차에 대한 회전저항모델에 대입하면, 회전저항모델의 계수 a 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$a = \frac{\dot{m}_{ref}\Delta h_{ref}k_mk_h}{\omega_{ref}^3} \quad (11)$$

이때, Reference 조건으로는 엔진 시동크랭킹 속도구간과 가장 근접한 설계조건, 즉 엔진 Idle 조건을 적용하는 것이 타당하다.

성능이 다른 타엔진에 대한 회전저항모델은 앞서 계산한 회전저항 모델의 계수 a 값을 서로 비교함으로써, Scaling을 할 수 있다. 이때, k_m 과 k_h 는 값 1을 기준으로 엔진마다 약간의 편차가 있을 수 있으나, 본 논문에서는 새로운 엔진에 대한 시험데이터가 전무한 조건을 산정하여 Reference 엔진과 동일한 값으로 가정한다. 따라서 다음의 모델로 회전저항($\tau_{R,B}$)을 예측할 수 있다.

$$\tau_{R,B} = \frac{\dot{m}_{ref,B}\Delta h_{ref,B}\omega_{ref,A}^3 a \omega_B^2}{\dot{m}_{ref,A}\Delta h_{ref,A}\omega_{ref,B}^3} \quad (12)$$

4. ATS를 이용한 엔진시동 분석

4.1 시동 간 ATS 부하

시동 크랭킹 구간에서 각 속도조건에서 엔진

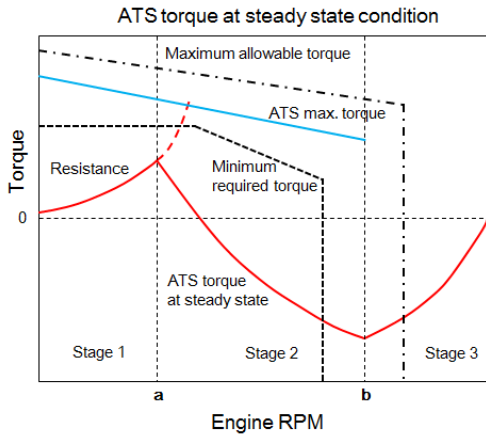


Fig. 4 Required torque of the air turbine starter at steady state condition[1].

과 ATS의 토크 선도를 그래프로 표현하면 Fig. 4와 같다[1]. 'a' 지점까지는 ATS의 동력만으로 엔진을 크랭킹하기 때문에 ATS의 정상상태 토크(Steady state torque)는 엔진의 회전저항과 동일하다. 'a' 지점 이후, 연소에 의한 터빈동력이 발생하게 되면, 정상상태 ATS 토크는 점차 감소하게 되고, 일정 속도에서는 터빈동력이 회전저항을 모두 감당할 수 있게 되어, ATS의 정상상태 토크는 음의 값이 된다. 하지만, 여기서 음의 ATS 토크는 가속이 없는 정상상태에서의 토크를 의미하므로, 가속이 발생하는 실제 시동상황에서 ATS에 역부하가 걸리는 것을 의미하지는 않는다. 'b' 지점 이후는 ATS 동력이 차단된 상태를 의미한다. Fig. 4에서 최소 요구 토크와 최대 허용 토크 사이에 위치하는 ATS 토크(파란색 실선, ATS max. torque)와 ATS 정상상태 토크의 차이가 엔진 회전 가속도를 발생시키는 동력을 의미한다.

4.2 ATS 토크 모델링 및 시동시간 예측

ATS는 일반적으로 Fig. 5와 같은 토크 및 파워 출력선도를 갖는다. 입력 공기압에 따라서 토크 출력량은 달라지나, ATS RPM 대비 출력 토크는 선형적으로 감소하는 경향을 가진다. 따라서, ATS 출력토크는 Eq. 13과 같은 선형식으로 근사 모델링을 할 수 있다[1].

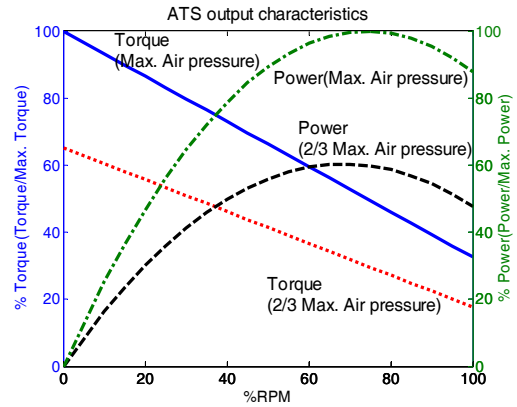


Fig. 5 Torque and power characteristics of the air turbine starter with variable inlet air pressure.

$$\tau_{ATS} = c\omega_{ATS} + d \tag{13}$$

이때, d 는 ATS 최대 출력토크이며, c 는 ATS RPM에 따른 토크 감소율을 의미한다.

본 논문에서는 연소기에 점화가 일어나기 전인 드라이 크랭킹(Dry cranking)상황에 집중하여, 적정 ATS를 선정하고자 한다. 따라서, 앞선 2장에서 설명한 Stage 1의 상태식에 ATS 토크 모델과 3장의 회전저항 모델식을 대입하여 시동 크랭킹 시간을 예측한다.

$$k(c\omega_{ATS} + d) = a\omega^2 + I_R\dot{\omega} \tag{14}$$

이 때, 백래쉬와 PTO축의 비틀림을 무시할 경우 ATS 속도는 PTO 축의 기어 및 기어박스 기어비($k = \omega_{ATS}/\omega$)를 통해 표현이 가능하므로, 위의 식은 다시 다음의 식으로 정리된다.

$$k^2 c\omega + kd = a\omega^2 + I_R\dot{\omega} \tag{15}$$

위 식은 시간에 대한 미분항($\dot{\omega}$)을 포함하고 있으므로, 수치적인 계산을 위해 미소시간에 대한 $\Delta\omega/\Delta t$ 로 이를 치환하고, 미소시간에 대한 각속도 및 토크를 계산하였다. 이를 통해 ATS를 이용한 점화 RPM까지의 시동시간과 각속도 선도, 최대 크랭킹 RPM을 계산할 수 있다. Fig. 6은

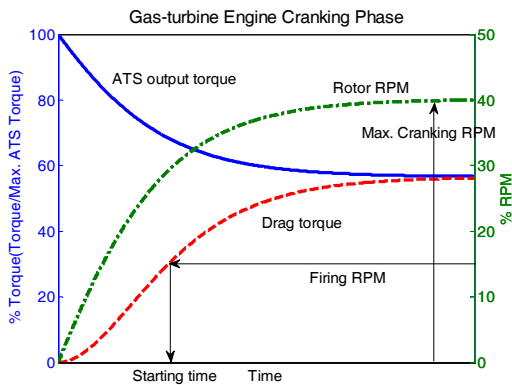


Fig. 6 Engine resultant speed with ATS and resistance torques during cranking phase.

ATS 출력토크(τ_{ATS})와 엔진의 회전저항(τ_R), 그리고 이에 따른 엔진속도(ω) 변화를 표현한 그래프이다. 시간이 흐름에 따라 엔진 RPM은 증가하고, 이로인해 공력저항이 증가하기 때문에 회전저항은 증가하게 된다. ATS는 RPM에 따라 선형 감소형태의 토크출력을 가지기 때문에 RPM이 증가함에 따라 토크가 감소하게 된다. 그래프의 ATS 토크 선도와 시동저항간의 차이는 주축의 각속도 변화량과 일치한다. 따라서, 각속도는 초반 최대 ATS 토크가 주어질 때 급격하게 증가하다가 일정 시간이 지나면 회전저항과 ATS 토크가 서로 일치하게 되어, 더 이상 증가하지 않고 포화(Saturation) 상태를 유지한다. 이때 포화상태의 RPM이 최대 크랭킹 RPM (Max. Cranking RPM)이다. Fig. 6에 표시된 것처럼, 점화 RPM (Firing RPM)까지의 시간이 시동시간(Starting time)이며, 이는 체계의 요구조건에 맞춰 목표를 설정하여야 한다.

4.3 적정 ATS 선정방법

적정 ATS를 선정하기 위해서는 먼저, 개발 대상엔진에 대해 3, 4장에서 유도한 가스터빈엔진 및 ATS성능모델을 구현한다. 이때, 선정 대상 ATS 성능을 공기 공급유량, 공급압력을 기준으로 ATS의 성능모델을 보정해야 한다. 다음으로, 점화가 일어나는 엔진 속도를 설정한 후에, 해당 속도에 도달하는데 소요되는 시간을 4.2장의 Eq.

15를 통해 구한다. ATS만으로 크랭킹할 수 있는 최대 엔진 속도는 Fig. 6과 같이 예측할 수 있다. 이는, 연소 효율 즉, 연소에 의한 시동동력이 부족한 경우를 대비하여 최대 크랭킹 속도 마진을 확보하기 위한 것으로, 시동 가속구간의 시동 성능 마진으로 확보할 수 있게 된다. 이러한 과정을 통해, 점화가능 속도 도달시간 및 최대 크랭킹 속도의 평가를 통하여, 최적의 ATS를 선정한다. 이러한, 일련의 과정은 ATS 선정뿐만 아니라, 기어박스의 기어비를 설계하는데 이용할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 가스터빈엔진의 시동크랭킹 시 부하로 작용하는 회전저항을 Coast Down 시험을 통해 모델링하고, 이를 압축기의 공력 저항식에 기반하여 모델링하는 기법에 대해 소개하였다. 이는, 엔진 압축기의 저속구간 성능, 즉 고입사각의 압축기 운용에 따른 압축기 성능의 해석적 접근이 어려운 회전저항을 Coast down 시험 자료를 기준으로 공력저항으로 근사함으로써, 시동구간에서의 엔진의 거동을 단순화할 수 있는 방법이다. 이와 더불어, ATS의 성능 모델을 대입하여 시동 크랭킹 구간에서의 엔진 크랭킹 시간을 예측하는데 적용함으로써, 개발엔진에 대한 시동시스템 설계에 유용하게 활용할 수 있을 것이다.

본 시동모델은 추후 다양한 엔진의 시동 크랭킹 가속 시험과 Coast Down 시험데이터를 확보함으로써 모델 정확도를 높일 수 있을 것이며, 엔진 점화 후 터빈의 동력특성을 모델에 반영함으로써, 엔진 점화, 시동가속 구간까지 모델링하여 엔진 시동모델링을 완성하는 데 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 방위사업청의 선도형 핵심기술개발

과제 중 '무인항공기용 터보팬 코어엔진 시제개발 및 성능평가' 과제의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Lim, B., Rhee, D. and Ahn, I., "Preliminary Design Procedure of Electric Starting System for Small GasTurbine Engine," *Proceedings of the 2010 KSPE Fall Conference*, Jeju, Korea, pp. 829-832, Nov. 2010.
2. Alabin, M.A., Kats, B.M. and Litvinov, Y.A., "Starting of Aircraft Gas Turbine Engines," Foreign Science and Technology Center, FSTC-HT-23-766-70, 1972.
3. Park, J.G., "Introduction of Road Load Measurement Method using the Coastdown Test," *Journal of Korea Society of Automotive Engineers*, Vol. 22, No. 2, pp. 43-48, 2000.
4. Agrawal, R.K., Yunis, M. "A Generalized Mathematical Model to Estimate Gas Turbine Starting Characteristics," *Transactions of the ASME*, Vol. 104, Issue 1, pp. 194-201, 1982.