

터보 축 엔진의 동적특성 해석 및 시뮬레이션

김세현* · 김해동* · 박성수** · 윤석준* · 김재환***

Simulation and Analysis of Dynamic Characteristics of a Turbo-shaft Engine

Sehyun Kim* · Haedong Kim* · Sungsu Park** · Sugjoon Yoon* · Jaehwan Kim***

ABSTRACT

A dynamic simulation of a turbo-shaft engine was performed for analysis of transient-state and engine-starting characteristics using the MATLAB/SIMULINK™. The turbo-shaft engine was modelled based on thermodynamic and rotor dynamic relations. The analysis of engine starting characteristics was performed by monitoring the rate of the pressure, temperature and mechanical torque changes along the engine stations by the torque input generated from the accessory power unit and transmitted to the power turbine. The simulation of the transient-state characteristics of the engine was performed under fuel flow rate increase from the steady-state condition. For the future study, engine control unit will be added to the basic turbo-shaft engine model to enhance capability of engine performance simulation.

초 록

MATLAB/SIMULINK™ 환경 기반에서 일반적인 터보 축 엔진의 천이상태 및 시동 특성 해석을 위한 동적 시뮬레이션을 수행하였다. 터보축 엔진 구성품을 열역학 및 로터 동역학적인 관계식을 이용하여 모델을 구성하였다. 엔진 시동 특성은 보조동력장치에서 발생한 축력을 엔진 터빈에 전달시켜 엔진 각 구성품에서의 압력, 온도 및 축력의 변화 등에 대한 해석을 수행하였으며, 정상상태에서 작동 중인 모델엔진의 연료유량 변화에 대한 엔진 작동상황을 모사해 봄으로써 엔진 천이 특성에 대한 해석을 수행하였다. 향후, 엔진 제어기능을 기본 모델에 추가함으로써 보다 다양한 엔진 성능 시뮬레이션이 가능할 것으로 사료된다.

Key Words: Turbo-shaft Engine(터보축엔진), Transient-state and Engine-starting Characteristics(천이상태 및 엔진시동 특성), MATLAB/SIMULINK™ Model (메트랩/시뮬링크 모델)

* 세종대학교 항공우주공학과

** 세종대학교 항공우주공학과

연락저자, E-mail: sungsu@sejong.ac.kr

*** KHP Engine Dept., Korea Aerospace Research Institute

1. 서 론

엔진은 대부분의 시간을 정상상태에서 운용되

지만 엔진의 천이 성능특성에 따라 극한 조건에서의 운용성능이 좌우된다. 시동특성을 포함한 엔진 천이상태의 운용성능은 엔진구성품의 개발이 이루어져 기계적인 완성품인 상태에서 시험을 통해 확보하는 것이 가장 정확한 결과를 확보할 수 있다고 하겠으나 안전성 문제를 비롯하여, 엔진의 개발 초기단계에서 시험 장치를 구성하기 힘든 경우, 엔진 구성품에 대한 수학적 모델에 기반한 시뮬레이션 프로그램을 통해, 개발 중인 엔진의 운용 조건에 따른 성능을 효율적으로 예측할 수 있다.

가스터빈 엔진 시뮬레이션 모델에 관한 발전 역사는 참고문헌[1]에 자세하게 나와 있으며 가스터빈 엔진 시뮬레이션 프로그램이 엔진 개발 과정에서 성능 구현을 위한 설계의 도구로서 뿐만 아니라, 엔진 제어나 고장진단의 역할을 수행하는데 까지 응용 범위를 확대하고 있다[2,3]. 최근 객체 지향 프로그래밍 기법을 가스터빈 엔진 시뮬레이션 프로그램에 적용하여, 엔진 모델을 구성품 단위의 모듈 별로 개발하여 다양한 엔진 구성 조합에 대한 시뮬레이션 프로그램 작성을 쉽고 용이하도록 하여 사용자의 편익을 도모하는 추세이다[4,5].

본 연구에서는 MATLAB/SIMULINK™ 환경하에서 터보 축 엔진의 천이 상태 및 엔진 시동특성을 분석하였으며, 시동과정에서부터 아이들, 정상상태, 완전 출력까지의 과정에 대한 엔진 성능에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 터보축 엔진 모델링

본 연구에 적용된 엔진 모델은 Fig. 1에서와

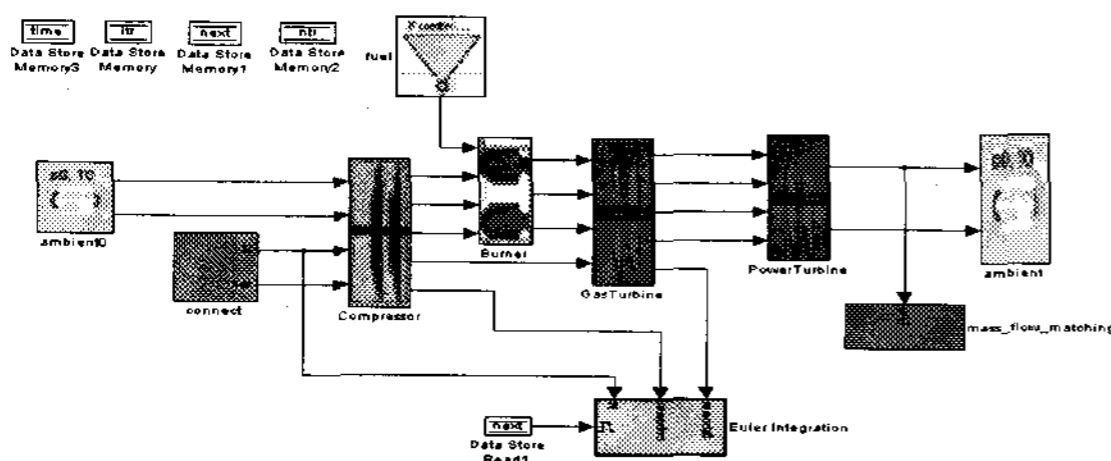
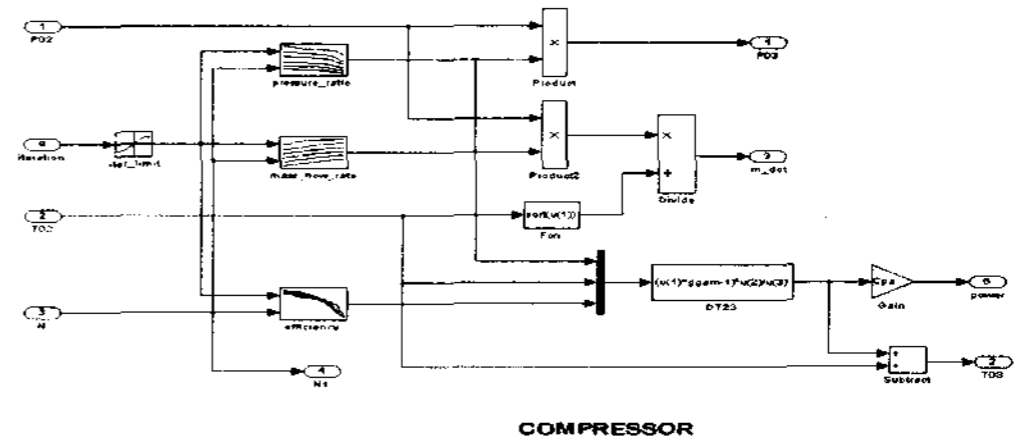
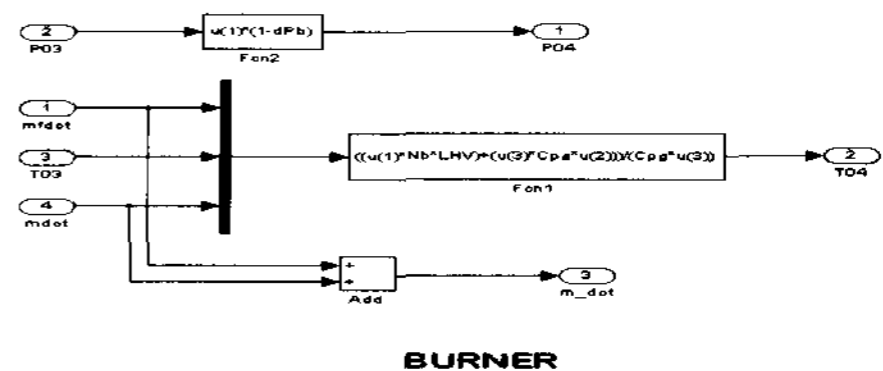


Fig. 1 터보축 엔진의 SIMULINK 모델

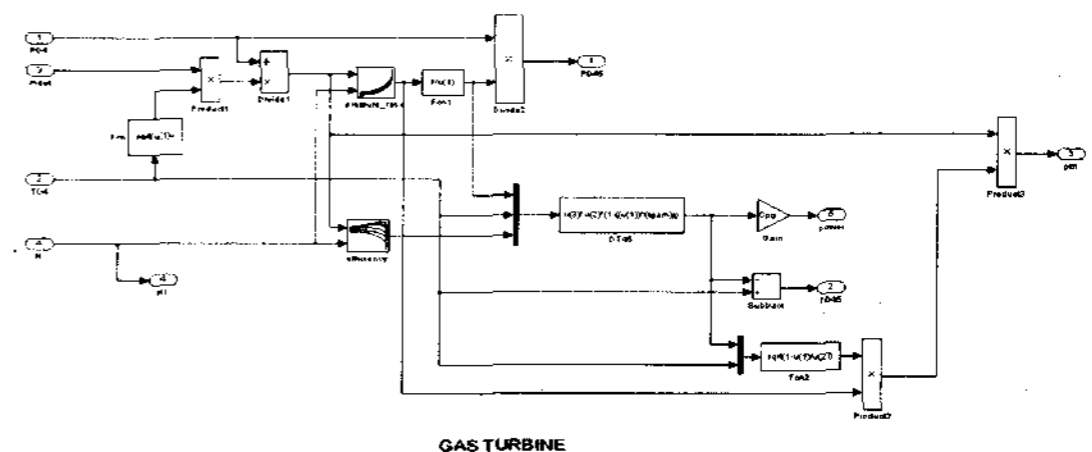
같이 SIMULINK 모델을 구축하였으며 터보축 엔진의 성능맵은 참고문헌[6]을 참조하였다.



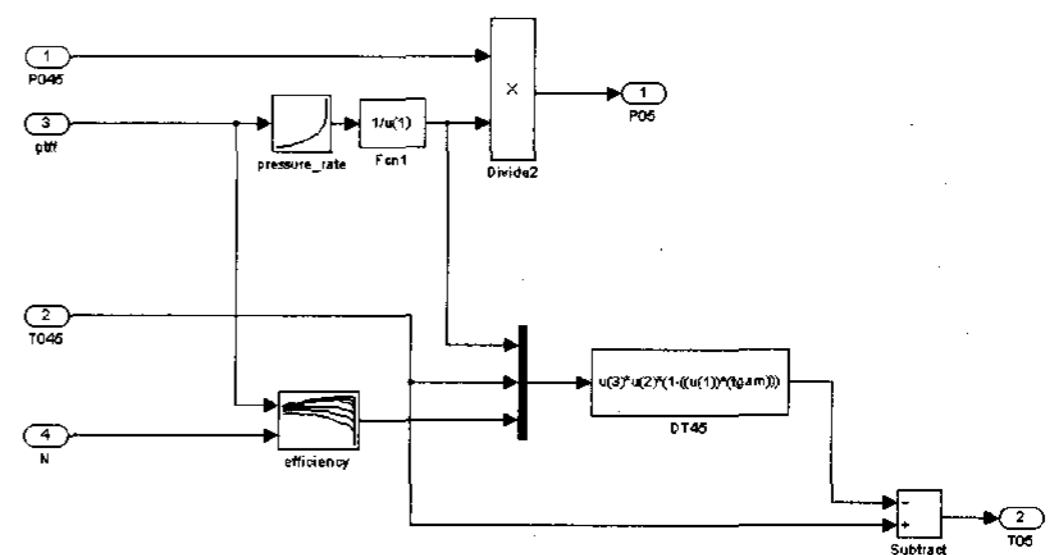
(a) compressor



(b) Burner



(c) Gas generator



(d) Power Turbine

Fig. 2 터보축 엔진의 각 구성품별 SIMULINK 모델

Fig. 2는 엔진의 대표적인 구성품별 모델링을 나타내며 사용된 수학적 모델링은 참고문헌[6]에 자세히 기술되어있다. 구성품 조합의 제약조건은 질량 보존 법칙과 엔진 끝단의 압력(P_{05})

은 대기 압력(P_a)과 같다 것으로부터 로터 동역학 방정식을 구성하며 Euler 적분식을 이용하여 시간적분을 수행한다. (Fig. 3 참조)

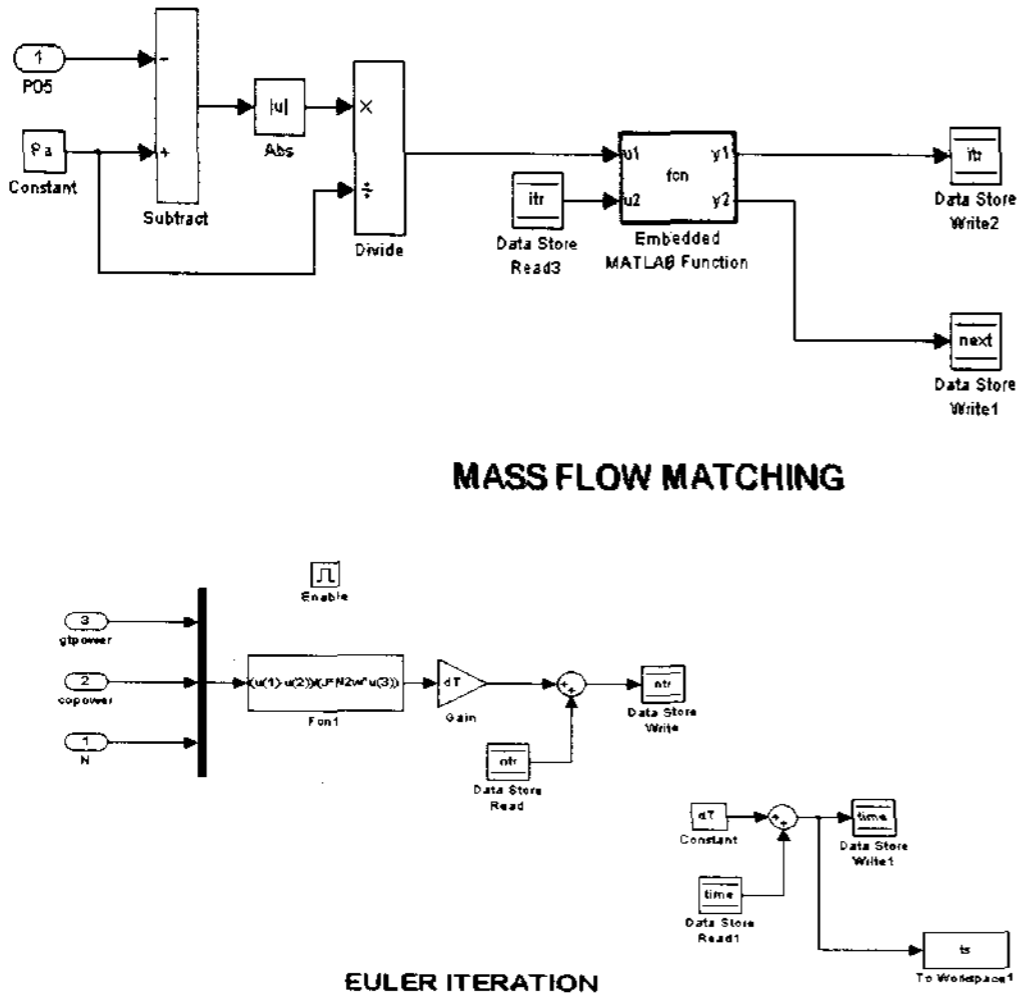


Fig. 3 질량모델bfd 보존과 Euler 적분 모델

Euler iteration subsystem은 가스터빈과 파워 터빈의 조합이 이루어 졌을 때에만 실행되게 하기 위해 SIMULINK 'enable block'을 이용하였다. 새롭게 설정되어진 회전 속도는 다시 압축기에 적용되어야 하는데 이때 SIMULINK Loop error를 피하기 위해 'data store memory block'을 사용하였다.

3. 엔진 시동특성 모델링

가스터빈 엔진의 시동과정은 엔진의 크기에 따라, 1-2분 정도의 짧은 시간에 걸친 급격한 천이과정이라 할 수 있다.

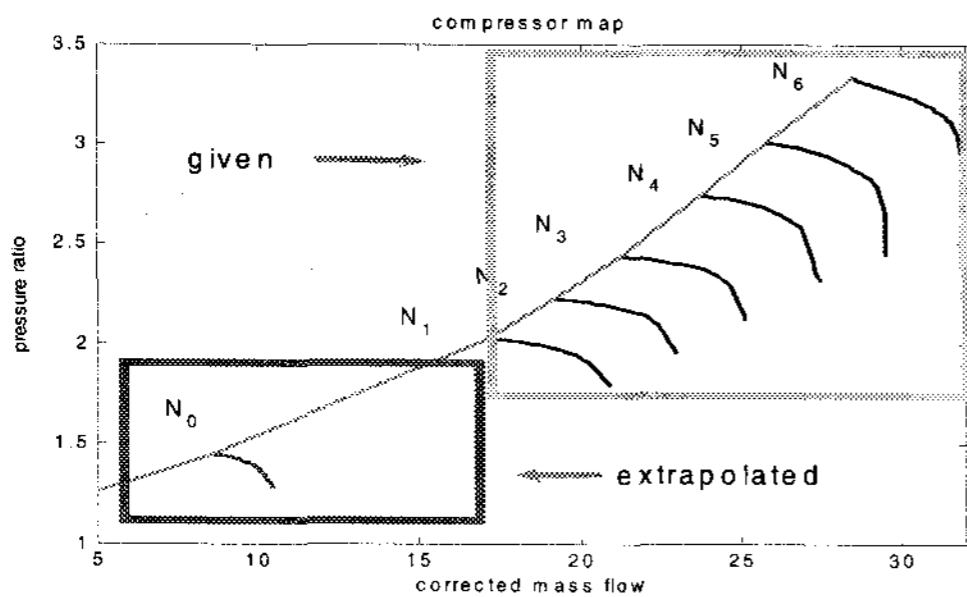


Fig. 4 시동특성 압축기 성능맵 외삽

작동유체와 엔진 구성품 간의 상호작용을, 엔진 점화 이전까지의 단순한 형태의 엔진 스타터 토크 입력과 엔진 점화 이후 아이들 상태까지의 엔진 성능 맵 외삽을 통해 모델링하였다. Fig. 4는 아이들 상태의 엔진회전수에서의 압축기 성능곡선으로부터 아이들 이하 회전수 영역으로의 성능곡선 외삽을 도시한다.

4. 시뮬레이션 결과

터보 축 엔진의 SIMULINK 모델을 구성하여 엔진연료 스케줄링 입력에 대한 시동 및 천이상태의 엔진성능을 시뮬레이션 하였다.

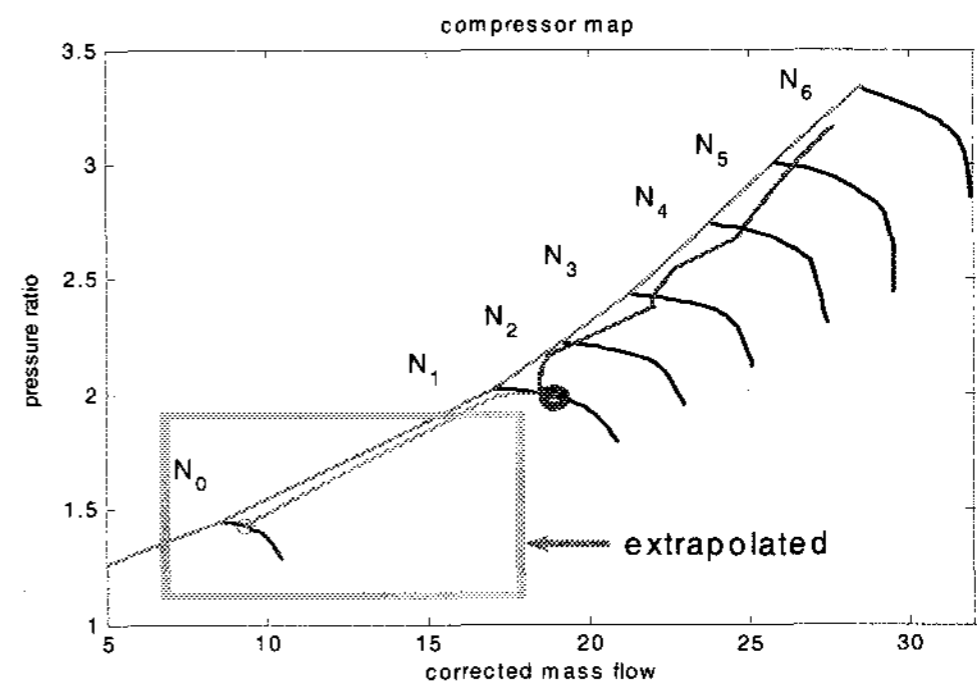


Fig. 5 압축기 성능맵상의 천이과정 궤적

Fig. 5는 압축기 성능맵상의 천이과정의 궤적을 나타내며 Fig. 6은 엔진 연료 스케줄링 입력에 대한 천이상태의 엔진성능 결과를 나타낸다.

시뮬레이션 과정은 두 단계로 진행하였다. 우선 스타터에서 제공하는 시동 토크 입력을 바탕으로 회전 속도 0에서 아이들 스피드의 50%까지, 엔진의 점화 이전 상태의 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 아이들 스피드의 50%에서 엔진이 점화되었다고 가정하고, 엔진의 동력만으로 아이들 스피드까지 외삽된 엔진 성능 맵을 기반으로 시뮬레이션을 수행 하였다. 그 다음 단계로 아이들스피드에서 정격 스피드까지 Fig. 6의 엔진 연료 스케줄링에 따라 천이상태의 시뮬레이션 수행하였다.

SIMULINK 모델로 구현된 기존의 알고리즘과 달리[5], 반복계산법에 기초한 FORTRAN 기반 시뮬레이션과 유사한 결과를 얻었다.

대할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 KHP 위탁과제 “터보샤프트 엔진 시동특성 및 비정상 해석”의 수행 결과 중 일부이며, 지원에 감사드립니다.

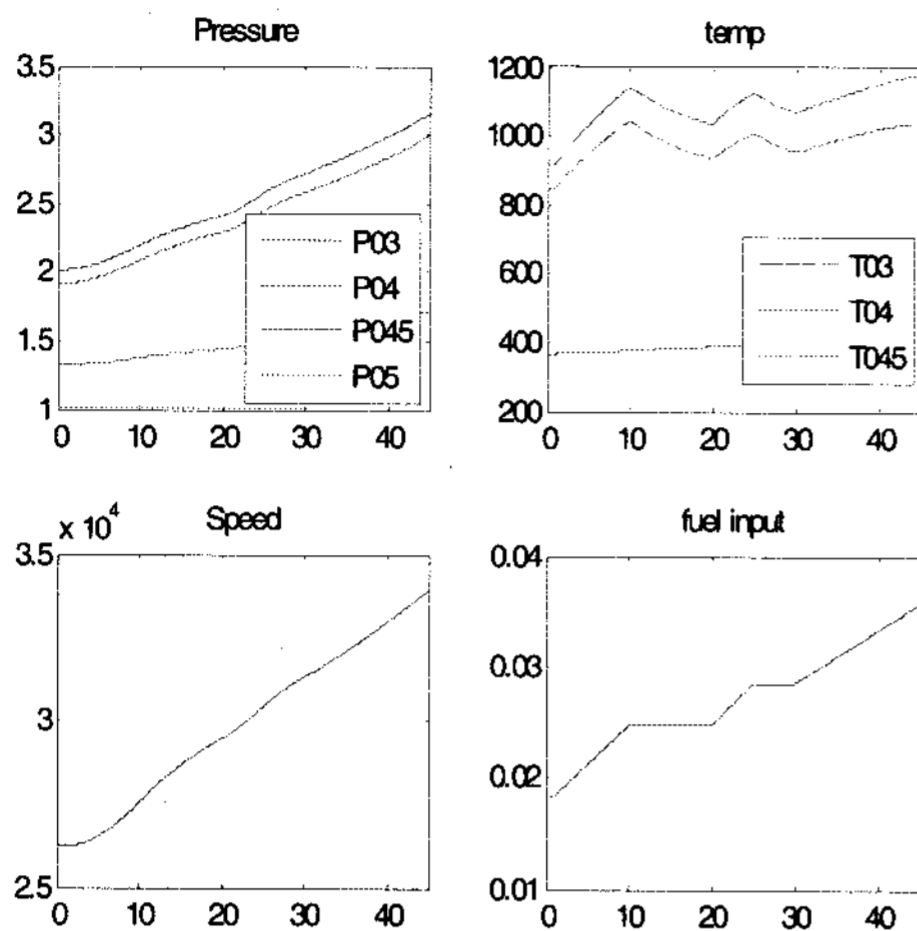


Fig. 6 시동 및 천이상태 시뮬레이션 결과
(Top Left : 압력비, Top Right: 온도
Bottom Left : 엔진 회전수, Bottom Right: 연료량)

참고문헌

1. Sanghi, V., Lakshmanan, B. K. and Sunderarajan, V., "Survey of Advancements in Jet Engine Thermodynamic Simulation," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 16, No. 5, 2000, pp.797-807
2. Chappell, M. A. and McLaughlin, P. W., "Approach to Modeling Continuous Turbine Engine operation from Startup to Shutdown," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 9, No. 3, May-June, 1993, pp.466-471
3. Walsh, P. P., *Gas Turbine Performance*, 2nd ed., Blackwell Science, 2004.
4. Drummond, Colin. K., Follen, Gregory. J. and Putt, Charles. W., "Gas Turbine System Simulation: An Object-Oriented Approach," NASA TM 106044, 1992
5. Kim, S., Pilidis, P and Yin, J., "Gas Turbine Dynamic Simulation Using SIMULINK," ASME paper 2000-01-3647, 2000,
6. 공창덕, 기자영, "다목적 소형 터보샤프트 엔진의 정상상태 성능해석 및 동적거동동 모사에 관한 연구", *한국추진공학회지*, 27권, 3호, pp. 119-126, 1999

5. 결 론

터보 축엔진의 시동특성을 포함한 천이상태의 동적 시뮬레이션을 구현하였다. 실 엔진의 성능맵과 토크 특성에 대한 자료의 부재로 인해 단순화된 시동 토크 입력과 아이들 이전 상태 회전수 영역에서의 엔진 성능맵의 외삽을 바탕으로, 시동에서부터 정격 회전수 영역까지의 동적 시뮬레이션을 수행하였다. 아이들 이전 상태의 엔진 성능맵과 엔진 구성품의 구체적인 파라미터 값의 확보를 통해 보다 세련된 엔진 시동 특성 모델이 가능 할 것으로 사료되며 이를 바탕으로 향후에는 엔진 성능 예측 뿐만 아니라, 엔진 연료의 스케줄링 최적화나 엔진 제어기 설계용 시뮬레이션 코드의 개발로 응용범위를 확