
가스터빈엔진 최적 제어시스템 구현을 위한 엔진 시뮬레이터 개발

차영범* · 구본민* · 송도호* · 최중경*

Development of an Engine Simulator for Optimal Control System Implementation of
a Gas Turbine Engine

Young-Bum Cha* · Bon-Min Koo* · Do-Ho Song* · Jung-Keyng Choi*

본 논문은 산업자원부 지방기술혁신사업 [RTI04-01-03] 지원으로 수행되었습니다.

요 약

선진국에서는 가스터빈엔진을 개발하여 항공기, 대형선박, 유도무기용으로 많이 사용한다. 국내에서도 엔진부품 생산단계를 넘어 소형 가스터빈엔진을 개발하고 있으나, 가스터빈엔진에서 가장 중요한 핵심기술인 엔진제어 관련기술은 선진국에서 기술이전을 기피하고 있다. 본 논문은 가스터빈엔진 시뮬레이터 개발에 대한 연구이다. 논문에서 제시하는 시뮬레이터는 가스터빈엔진의 성능데이터를 기반으로 한 엔진 수학적 모델을 통하여 엔진 시뮬레이터를 개발함으로써 가스터빈엔진 제어알고리즘 개발을 쉽게 할 수 있도록 하고, 엔진제어기의 기능도 검증할 수 있도록 한다. 본 시뮬레이터에는 엔진센서 신호변환 보드를 설계하여 시뮬레이션 할 때 엔진모델 센서신호가 실제 센서와 같은 신호가 생성되도록 하였다. 가스터빈엔진에 대한 실제 엔진시험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 시뮬레이터의 성능을 입증하였다.

ABSTRACT

In advanced countries, a gas turbine engine is developed to use in aircraft, vessels, and target weapons. Our nation also passed the level of producing engine components and now, we are developing small-sized gas turbine engine. The most important point of the gas turbine engine, the engine control technique, is evaded by the advanced nations. This document contains the research about the development of the gas turbine engine simulator. The simulator presented in this document has a mathematical engine model based on a capacity data of the gas turbine engine to advance the engine simulator. Through this process, it eases the development of the gas turbine engine control algorithm and helps to check the engine controller function. In this simulator, the engine sensor signal conversion board is designed, so the engine model shows like a real sensor signal during the simulation. Also, this paper contrasts the actual engine test with the simulation results to verify the performance.

키워드

gas turbine engine, simulator, engine controller, LabVIEW.

I. 서론

가스터빈엔진 개발은 많은 인력과 막대한 개발비 그리고 장시간의 개발기간이 소요되는 대형시스템 개발 사업이고, 개발한 엔진의 성능을 시험·평가하는 데에도 많은 시간과 노력이 소요된다. 그래서 개발한 엔진을 효율적으로 시험하기 위해서는 높은 신뢰성과 안전성이 보장되고 제어알고리즘을 용이하게 변경할 수 있는 제어시스템이 필요하다. 최근 국내에서도 엔진 부품 생산단계를 넘어 소형 가스터빈엔진을 개발을 하고 있는 실정이다. 그러나 가스터빈엔진 개발에 대한 경험이 없어 엔진을 개발하는데 어려움과 개발지연에 대한 부담이 크다. 본 논문에서는 엔진시험에 대한 효율성을 높이며 엔진제어기의 기능을 쉽게 확인하고, 엔진제어 알고리즘 개발을 용이하게 하는 가스터빈엔진 시뮬레이터 개발에 대하여 제시한다.

가스터빈엔진 시뮬레이터를 개발하기 위하여 대상 시스템인 가스터빈엔진의 성능데이터와 엔진시험 데이터를 기반으로 엔진을 수학적으로 모델링하였고, 운용 프로그램은 GUI(Graphic User Interface) 방식으로 개발하였다. 항공용 통신규격인 MIL-STD-1553B 통신 프로토콜로 시뮬레이션 결과를 통신 하였다. 그리고 엔진에 장착되는 센서와 동일한 신호를 모사하기 위하여 센서신호 변환보드를 설계하여 시뮬레이터의 입출력 신호를 실제 센서에서 나오는 신호와 같도록 만들었다. 본 논문은 가스터빈엔진의 최적 제어시스템을 구현하는데 필요한 엔진 시뮬레이터 개발에 대하여 본문에서는 가스터빈엔진 시뮬레이터의 전체시스템에 대한 구성과 엔진 시뮬레이터 개발에 필요한 하드웨어에 대하여 기술하고, 엔진시뮬레이터에 탑재되는 엔진모델링과 연료시스템 모델링 방법에 대하여 제안한다. 그리고 엔진모델 구성도와 시뮬레이터에서의 시뮬레이션 결과를 실제 엔진시험에서 얻은 결과와 비교하여 시뮬레이터의 성능을 입증한다.

II. 본론

2.1. 엔진 시뮬레이터 구성

본 절에서는 가스터빈엔진 시뮬레이터의 전체구성에 대하여 설명한 후 시뮬레이터 입출력 신호를 처리하는 하드웨어 구조에 대하여 서술한다.

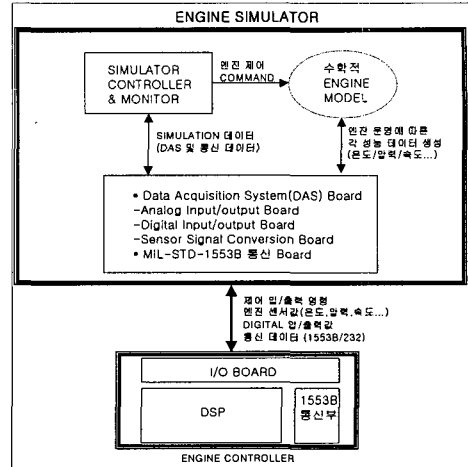


그림 1. 시뮬레이터의 구성도
Fig. 1. Block diagram of the Simulator

그림 1에서 볼 수 있듯이 엔진 시뮬레이터는 실제 가스터빈엔진의 성능 데이터를 모사하는 수학적 엔진 모델이 프로그램 형태로 내장되어 있어서 실제 엔진을 운영하는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다. 엔진 운영 속도 및 운영 모드에 따라 엔진에 장착된 센서 값들을 성능 데이터로 산출하여 DAS쪽으로 넘겨주고 원하는 물리적인 센서 값을 생성하여 엔진 제어기에 전달하도록 한다.

시뮬레이터에서 실제 엔진신호와 동일한 신호를 모사하는 방법을 실제 엔진에서 나오는 성능데이터를 엔진모델에 반영하여 적용함으로써 최종적으로 엔진과 같은 신호가 시뮬레이터를 통해 모사되는 것이 가능하다.

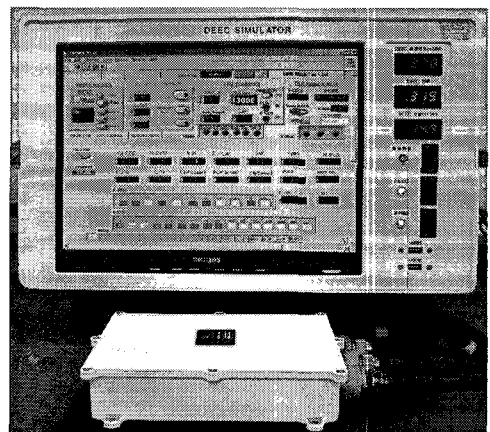


그림 2. 시뮬레이터와 엔진제어기의 사진
Fig. 2. Picture of the simulator and an engine controller

엔진제어기는 실제 엔진에서 받는 것과 동일하게 모사된 신호를 시뮬레이터로부터 받으며, 엔진제어기는 메모리에 내장된 엔진제어 알고리즘으로 연산 및 제어 동작을 수행한다. 그리고 엔진의 운용조건에 따라 다양한 모드로 시뮬레이션이 가능하도록 필요한 제어명령을 직접 입력할 수 있도록 구성되어 있다. 이렇게 함으로써 엔진을 지상시험모드, 크랭크모드, 고도시험모드, 가속모드 등 다양한 운용모드에 대한 엔진제어 알고리즘 확인도 가능하다. 그림 2는 엔진 회전속도 명령을 3,000rpm으로 설정하고 시뮬레이터와 엔진제어기가 연결되어 시뮬레이션을 수행하고 있는 사진이다.

2.1.1 시뮬레이터 하드웨어

가스터빈엔진 시뮬레이터를 개발하기 위해서 DAS (Data Aquisition Systems)가 필요하다. 본 시스템에 사용한 DAS는 내셔널 인스트루먼트사의 PXI 시스템이다. PXI시스템은 PCI eXtensions for Instrumentation의 약자로 CompactPCI에 윈도즈운영 시스템과 통합된 모듈형 계측시스템 규격의 하나로 데스크톱 컴퓨터보다 높은 신뢰성, 통합성 및 확장성을 제공하고 CompactPCI와 호환성을 가지고 있으며 시스템에 내장된 타이밍과 트리거가 고속 PCI (Peripheral Component Interconnect)와 결합하여 다양한 응용 프로그램 수행을 신속하게 해주는 측정 및 데이터 수집 장치이다[2]. 아래 표1은 엔진 시뮬레이터에 적용한 하드웨어의 규격이다. 엔진 시뮬레이터에 사용한 제어기 본체와 신호처리 보드는 PXI 시스템 중에서 대상 가스터빈엔진에 가장 적합한 규격으로 보드를 선정하였다. DAS 보드를 직접 설계하는 것 보다 품질이 검증된 규격품을 사용하는 것이 개발기간이나 향후 유지보수에 더 유리하기 때문이다.

표 1. 시뮬레이터의 하드웨어 규격
Table 1. Hardware specification of the simulator

신호	입력	출력
제어기	<ul style="list-style-type: none"> • PXI-8170 - Operating System : Windows OS - CPU : 700MHz Intel Pentium - 3.5in 1.44MB F-DISK - Serial Port/ Parallel Port/ USB Port 	
신호처리 보드	<ul style="list-style-type: none"> • PXI-6071E - 12bit 32 Channels (64 SE/ 32 DI ±10V Sampling: 1.25MS/s - Counter/timer : 2Channels, 24bit 	<ul style="list-style-type: none"> • PXI-6713(x2) - 12bit 8 Channels - Output Rate: 1MS/s - Digital I/O: 8TTL - Counter/timer : 2Channels, 24bit

신호	입력	출력
디지털 보드	<ul style="list-style-type: none"> • PXI-6527 - 48 Lines: 24 Optically Isolated Input Lines - 24 Isolated, Solid-state Relay Output Lines - 0~28Vdc Input, 0~55Vdc Output Range - 120mA Current Drive 	

실제로 엔진에는 엔진을 제어하기 위하여 다양한 센서들이 장착되는데 시뮬레이터에서는 이러한 센서신호를 생성하기 위하여 PXI DAS 보드만으로는 구현할 수 없기 때문에 다양한 엔진센서 신호를 인터페이스 하는 센서신호 변환보드를 직접 설계하여 시뮬레이터에 적용하였다. PXI DAS의 입출력 신호는 실제 엔진센서 신호로 사용할 수 없다. 온도와 압력 및 속도 센서와 같은 경우는 대부분 별도의 변환회로가 필요하기 때문이다. 예로 엔진 센서 중에서 엔진 입구 온도를 측정하는 센서로 반도체 센서를 사용한다. 이 센서에서 출력되는 신호는 외기온도 0~500 °K에 대하여 0~500µA 전류이므로 DAS에서 전압을 미세한 전류로 변환시켜서 엔진제어기에 입력해야 한다. 그리고 배기가스 온도를 측정하기 위하여 Exhaust Gas Temperature (EGT) 센서는 측정온도가 높고 범위가 넓은 K형 열전대 센서를 사용한다. 배기가스 온도는 0~1,200°C 범위로 이 온도에 유기되는 K형 열전대의 열기전력은 0~48.8mV 전압이다. 넓은 온도 범위에 비해서 상당히 낮은 출력으로 1°C에 해당하는 전압은 40.4µV 이다. 이와 같이 센서신호를 엔진 시뮬레이터에서 만들기 위하여 센서신호 변환보드를 표 2와 같은 사양으로 만들어 엔진 모델에서 계산된 값이 PXI DAS의 전압 신호에서 해당 단위계의 센서신호로 바꾸어주는 센서신호 변환보드를 설계하여 엔진 시뮬레이터에 적용하였다[4].

표 2. 엔진센서 신호변환 보드의 사양
Table 2. Specification of an engine sensor signal transfer board

신호	입력	출력
센서 신호 변환 보드	<ul style="list-style-type: none"> -온도입력 : 4 Ch -속도입력 : 2 Ch -LVDT입력: 1 Ch 	<ul style="list-style-type: none"> -온도센서값 출력: 4 Ch -속도센서값 출력: 2 Ch -LVDT 출력 : 1 Ch

2.2. 엔진 모델링 및 제어기 구성

엔진에서 회전체 부분인 로터(rotor) 동특성에 관한 기본 방정식으로부터 도출할 수 있는 엔진의 특성 함수

는 비선형 함수로 표시할 수 있고, 이를 선형화하여 엔진 제어 알고리즘 설계에 이용 가능한 엔진의 전달함수와 엔진의 고유한 성질을 나타내는 엔진의 상태방정식을 얻을 수 있다. 상태 방정식 표현의 경우 설계자의 요구에 의하여 규정되어지는 매개변수를 통하여 출력방정식도 유도 가능하다[5].

2.2.1 엔진의 상태방정식 및 전달함수 유도

엔진은 복측 구조로서 식(1.1)과 같은 비선형 함수를 통하여 그 특성을 나타낼 수 있다.

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = \Delta T_1(N_1, N_2, G_f), \quad J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = \Delta T_2(N_1, N_2, G_f) \quad (1.1)$$

(N_1, ω_1 :압축기 회전수 및 각속도, N_2, ω_2 :터빈 회전수 및 각속도, G_f :연료량)

Taylor 급수로 엔진의 특성함수를 선형화하면 식(1.2)와 같다.

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = \left(\frac{\partial T_1}{\partial N_1}\right) \Delta N_1 + \left(\frac{\partial T_1}{\partial N_2}\right) \Delta N_2 + \left(\frac{\partial T_1}{\partial G_f}\right) \Delta G_f = \alpha \Delta N_1 + \beta \Delta N_2 + \gamma \Delta G_f$$

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = \left(\frac{\partial T_2}{\partial N_1}\right) \Delta N_1 + \left(\frac{\partial T_2}{\partial N_2}\right) \Delta N_2 + \left(\frac{\partial T_2}{\partial G_f}\right) \Delta G_f = \xi \Delta N_1 + \psi \Delta N_2 + \varphi \Delta G_f \quad (1.2)$$

각속도의 미분치를 회전수 변수 관련 식으로 바꾸고 이를 위의 식에 대입하면 상태방정식 식(1.4)를 얻는다.

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{J_1 \pi}{30} \frac{dN_1}{dt} = R_1 \Delta \dot{N}_1,$$

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{J_2 \pi}{30} \frac{dN_2}{dt} = R_2 \Delta \dot{N}_2 \quad (1.3)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta \dot{N}_1 \\ \Delta \dot{N}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\alpha}{R_1} & \frac{\beta}{R_1} \\ \frac{\xi}{R_2} & \frac{\psi}{R_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta N_1 \\ \Delta N_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\gamma}{R_1} \\ \frac{\varphi}{R_2} \end{pmatrix} \Delta G_f \quad (1.4)$$

식(1.4)를 라플라스 변환을 취한 후 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} [(sR_1 - \alpha)(sR_2 - \psi) - \beta\xi] \Delta N_1 &= [\beta\gamma + \gamma(sR_2 - \psi)] \Delta G_f \\ [(sR_1 - \alpha)(sR_2 - \psi) - \beta\xi] \Delta N_2 &= [\xi\gamma + \varphi(sR_1 - \alpha)] \Delta G_f \end{aligned} \quad (1.5)$$

여기서 최종적으로 엔진의 전달함수는 다음과 같이 유도된다.

$$G(s) = \frac{\begin{pmatrix} \Delta N_1 \\ \Delta N_2 \end{pmatrix}}{\Delta G_f} = \frac{\begin{pmatrix} [\beta\gamma + \gamma(sR_2 - \psi)] \\ [\xi\gamma + \varphi(sR_1 - \alpha)] \end{pmatrix}}{R_1 R_2 s^2 - (\psi R_1 + \alpha R_2) s + \alpha\psi - \beta\xi} \quad (1.6)$$

2.2.2 엔진의 출력방정식 유도

엔진의 출력으로는 Thrust, CDP, HPC output total temperature, HPC air flow, CDT, EGT의 6가지 변수를 선정하며 이는 아래의 비선형 출력 방정식으로 표현 가능하다.

$$y = g(N_1, N_2, G_f) \quad (1.7)$$

위의 식을 선형화 하여 6개의 변수에 대하여 정리하면 다음과 같은 출력방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{pmatrix} Thrust \\ CDP \\ CDT \\ EGT \\ Airflow \\ OutputT \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \eta_1 & \eta_2 \\ \eta_3 & \eta_4 \\ \eta_5 & \eta_6 \\ \eta_7 & \eta_8 \\ \eta_9 & \eta_{10} \\ \eta_{11} & \eta_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta N_1 \\ \Delta N_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \\ \delta_6 \end{pmatrix} \Delta G_f \quad (1.8)$$

이상과 같이 엔진의 상태방정식, 전달함수 그리고 출력방정식을 얻었으며, 엔진 성능해석 데이터에 근거하여 파라미터 확인(Identification) 과정을 수행하였다.

위에서 얻어진 상태방정식과 전달함수와 성능해석 데이터를 적용하여 지상표면 고도조건과 표준온도 조건에서 N_1 rpm 100%, 90%, 80% 에서 전달함수를 구하고 Root-locus를 이용하여 안정성을 검증하였다. 안정성 검증은 엔진이 운용되는 전 영역에 대해서 수행되었으며 본 논문에서는 그 해석량이 방대하므로 생략하였다.

2.2.3 연료시스템 모델링 및 제어 알고리즘

엔진 전체를 모델링하기 위하여 엔진의 연료제어를 위한 연료시스템에 대한 모델링과 해석이 필수이다. 가

스터빈엔진에 많이 사용하는 연료시스템은 FPMU (Fuel Pump & Metering Unit)로서 전류 입력(mA)에 대하여 구동 액츄에이터(actuator)내부에 있는 밸브 간극(mm)을 조절하여 최적 유량을 엔진에 공급한다. FPMU는 일반적인 밸브 시스템과 같이 적분기와 FPMU 고유의 동작 특성을 반영하는 추가항으로 전달함수가 식(1.9)와 같이 제시되고, 파라미터는 시간과 주파수 응답 특성에 따라 결정된다.

$$Wf(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)} = \frac{4}{s(0.1s + 1)} \quad (1.9)$$

주파수 응답으로 부터 전달함수의 파라미터를 구하기 위해 개루프 엔진제어기 시험 결과인 그림 3의 FPMU 개루프 주파수 응답 보드선도를 활용한다.

$\omega = 1$ 일 때, 적분 요소 성분은 사라지고 시정수에 의한 시스템 응답 또한 무시될 수 있기 때문에 분자 항은 아래와 같이 계산된다.

$$Mag = 20 \log \left| \frac{K}{s(Ts + 1)} \right|_{s=j\omega} = 20 \log K - 20 \log |j\omega| - 20 \log |j\omega T + 1|$$

$$Mag \approx 20 \log K = 12.1 \text{ at } \omega = 1, \therefore K \approx 4 \quad (1.10)$$

$2\pi fT = 1$ 일 때, 적분기가 포함된 전달함수의 위상은 -135° 이므로, 그 때의 주파수를 이용하여 시정수 T 를 구하면 아래 같다.

$$\text{at phase} = -135^\circ, 2\pi fT = 1, f = 1.59 \text{Hz} \quad (1.11)$$

$$\therefore T \approx 0.1s$$

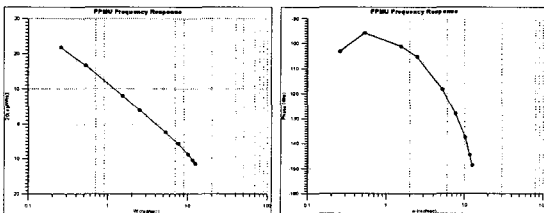


그림 3. FPMU의 개루프 주파수 응답(이득과 위상 보드선도)
Fig. 3. Open loop frequency response of a FPMU (gain & phase bode plot)

상기와 같이 정량화된 FPMU의 개루프 전달함수에 대한 시뮬레이션 결과와 실제 연료시험 데이터 간의 비교 그래프는 그림 4와 같다.

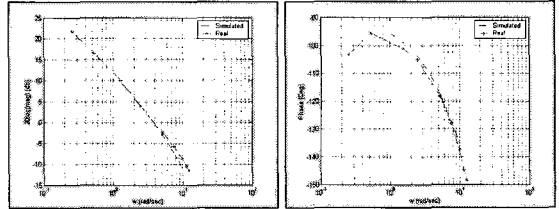


그림 4. FPMU 전달함수 대 연료 실험데이터의 비교
Fig. 4. Compare of a FPMU transfer function vs. fuel test data

그림 4는 전달함수의 보드선도와 실제 보드선도는 매우 흡사한 결과를 보여주고 있으며 이러한 결과에 따라 유도된 FPMU의 개루프 모델은 유효하다고 할 수 있다. 그리고 시뮬레이션을 통하여 수학적 모델과 실제 실험 데이터의 유사성과 타당성을 검증하였다.

FPMU 오픈루프 모델은 적분성분을 갖는 매우 불안정한 시스템이므로 오차에 대한 비례성분만으로 페루프를 구성하여 시스템 불안정성을 개선한다. FPMU 페루프 시스템 구성도는 그림 5와 같다.

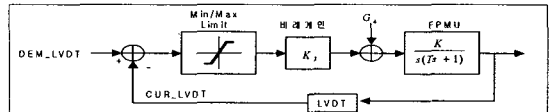


그림 5. FPMU 페루프 제어시스템의 구성도
Fig. 5. Structure of a FPMU closed loop control system

페루프 제어기의 비례 이득 값을 정하기 위하여 이미 얻은 FPMU 전달함수를 기본으로 시간 응답 특성을 비례 이득 K_2 를 범위 1-12 사이에서 시뮬레이션 하였다. 그 결과 이 범위에서 안정성은 유지되지만 비례 이득 값이 커짐에 따라 시간 응답은 조금씩 나빠지기 시작하면서 오실레이션이 나타나기 시작하는 것을 알 수 있다.

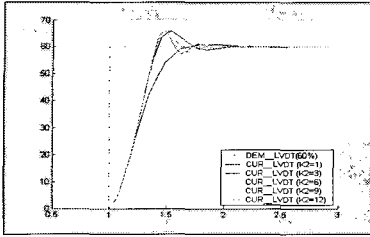


그림 6. FPMU 페루프 제어시스템의 시간 응답특성
Fig. 6. Time response characteristic of a FPMU closed loop control system

따라서 실제 FPMU가 구동할 때 크기가 큰 비례 이득 값은 사용하지 않는 것이 유리함을 알 수 있었으며, Root-locus를 참조하여 이득 설정 기준을 정하였다.

2.2.4 엔진 모델 구성도

앞에서 말한 바와 같이 엔진 시뮬레이터에는 가스 터빈엔진을 시뮬레이션하기 위하여 엔진의 수학적 모델을 내부에 가지고 있다[그림 7]. 이 모델이 시뮬레이터와 엔진제어기 사이에 오고가는 모든 데이터를 결정해주는 부분이라 할 수 있다. 즉 제어명령을 전압형태의 입력 신호로 받아서 실제 엔진 운영 시에 측정 예상되는 각 센서 값들을 계산해서 DAS 입출력 보드와 주고받는 일을 한다. 이를 위해 개발엔진에 대한 온도, 압력 및 속도 등 엔진 제어에 필요한 각각의 성능 분석 데이터가 필요하다. 그림 7은 이와 같은 기능을 하는 엔진 모델을 도시화하였다.

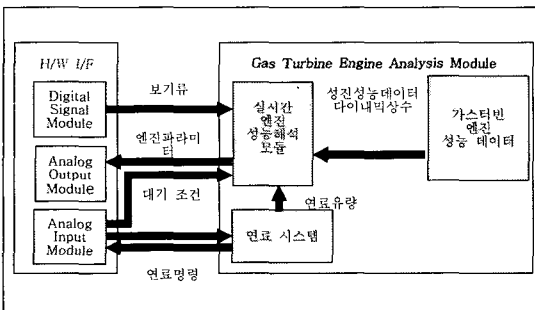


그림 7. 가스터빈엔진의 모델 구성도
Fig. 7. Structure of the gas turbine engine model

하드웨어 인터페이스(H/W I/F) 부분은 외부 DAS의 전압 형태의 신호와 내부 모델의 각 센서 변수와 연결하기 위한 부분으로 각 신호의 순서와 크기 등을 정해준다. 가스터빈엔진 해석 모듈은 엔진 전체 모델링에 해당되

며 크게 세부분으로 엔진 성능 해석 모델, 연료시스템 모델 그리고 성능 데이터 부분으로 구성된다.

2.3. 시뮬레이션과 엔진시험 비교

엔진의 수학적 모델이 탑재된 엔진 시뮬레이터와 엔진제어 알고리즘이 프로그램 되어 있는 엔진제어기를 연결하여 시뮬레이션을 수행한 결과와 엔진 TEST CELL에서 실제 가스터빈엔진으로 시험한 결과에서 나오는 데이터를 비교하여 개발한 가스터빈엔진 시뮬레이터의 성능을 확인 하였다. 본 논문에서는 가스터빈엔진의 여러 변수들 중에서 엔진제어에 중요한 변수인 속도와 연료제어에 관련된 변수를 중심으로 비교하였고 각 변수들의 이름과 기능은 표 4에 나타내었다.

시험은 엔진과 엔진 주변의 보기(Accessory)시스템(연료·윤활·점화)들이 가장 빠르게 동작하고 엔진제어기가 제일 복잡한 연산을 하는 엔진시동 구간과 엔진이 아이들(Idle)속도에 도달된 뒤 정속 운전할 때 PLA 명령에 따라 정상상태로 엔진을 운전하는 정속구간에서 데이터를 비교하였고, 시뮬레이션 시간을 실제 엔진시험 시간과 일치시키는 것은 불가능하지만 최대한 맞추어 시뮬레이션을 수행한 결과이다.

표 4. 엔진 제어 변수
Table 4. Engine control variables

변수이름	기능
PLA	엔진 제어 속도 명령
FMC	연료량 제어 명령
N_DEM	제어 알고리즘 내부의 엔진속도 명령
CDP	엔진 내부 압축기 출구 압력
RPM	엔진 회전 속도

엔진이 점화되어 아이들에 도달하는 속도인 0에서 73% RPM 사이 시동구간의 엔진시험 결과와 시뮬레이션 결과를 그림 8과 그림 9에 각각 나타내었다. 엔진 시동하여 회전속도가 50% rpm 이하에서는 엔진제어 알고리즘에서 오픈 루프로 제어하고 50% rpm 이상에서는 엔진속도 명령인 N_DEM로 피드백 제어를 하는 알고리즘이 적용되어 엔진 아이들 회전속도인 73% RPM까지 도달하는 것을 그림 8에서 보여준다.

그림 9의 시뮬레이터에 의한 엔진 시동시험 그래프에서는 엔진제어 알고리즘이 적용되어 피드백 제어가 개시되는 50% rpm 이후부터 FMC가 떨어지는 현상이 있는

데, 이것은 센서신호들이 장비전원 간섭, 연결 케이블의 유도 노이즈 영향, 그리고 많은 제어변수들이 연산으로 인해 실제 엔진시험과 다소 다르게 약간의 떨림 현상이 있으나 전체적으로 볼 때 두 결과를 비교하면 거의 일치한다. 그리고 시뮬레이터에서는 더 빠른 샘플링 타임으로 데이터를 저장하기 때문에 더 많이 떨어져 보이는 경향도 있다. 엔진시험을 하는 TEST CELL에서는 엔진의 제어성능 뿐만 아니라 구조 및 공력적인 성능을 평가하기 위하여 진동, 온도, 압력, 변위 등 엔진에서 획득해야 하는 데이터의 양이 많아 0.1초마다 저장하고, 시뮬레이터에서는 제어 변수만 저장하기 때문에 더 빠른 시간인 0.01초마다 데이터를 저장한다.

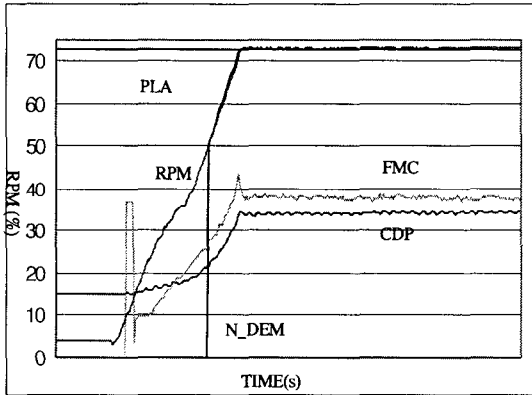


그림 8. 가스터빈엔진에 의한 시동 그래프
Fig. 8. Starting graph by the gas turbine engine

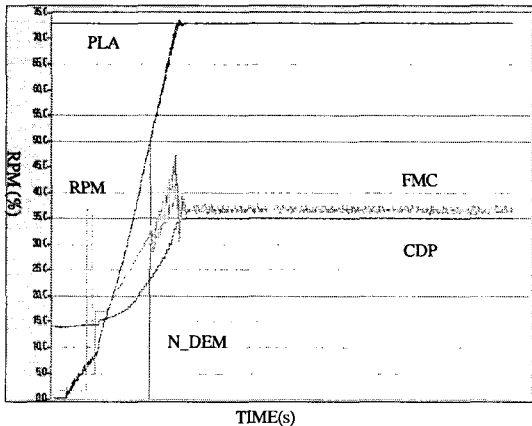


그림 9. 시뮬레이터에 의한 시동 그래프
Fig. 9. Starting graph by the simulator

엔진이 아이들 속도에 도달된 뒤 정속구간에서 PLA 명령에 따라 정상상태로 엔진을 동작할 때 시험 데이터를 그림 10과 그림 11에서 나타내었다. 엔진속도가 73%에서 95% rpm 사이에서 엔진시험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교한 그래프이다. 시동구간 때와 마찬가지로 PLA에 따라 정속구간에서도 엔진시험 결과와 시뮬레이션 결과가 서로 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

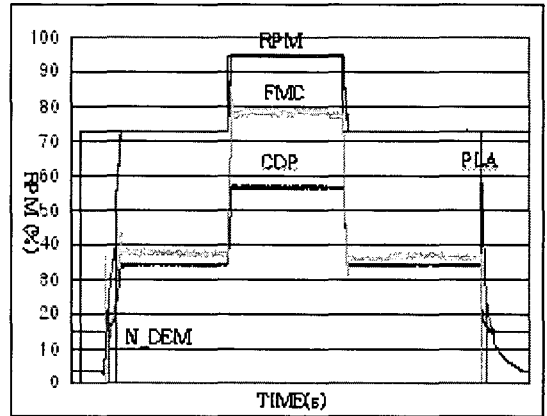


그림 10. RPM 가변상태 엔진시험 그래프
Fig. 10. Engine test graph of RPM variable status

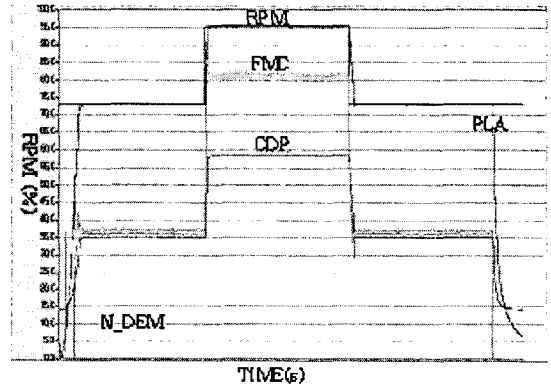


그림 11. RPM 가변상태 시뮬레이션 그래프
Fig. 11. Simulation graph of RPM variable status

III. 결론

본 논문에서는 가스터빈엔진 시뮬레이터 개발에 적용한 하드웨어와 엔진의 수학적 모델에 대하여 설명하

였고, 또한 개발된 시뮬레이터에 의한 시뮬레이션 결과가 실제 엔진 시험 데이터와 거의 일치함을 보여줌으로써 그 우수한 성능을 입증하였다. 본 논문의 결과가 국내에서 개발하는 가스터빈엔진과 엔진 제어시스템 개발에 많은 이용될 수 있을 것으로 판단한다.

참고문헌

- [1] 최인규, 우주희, “중용량 증기터빈 제어기의 신뢰성 검증을 위한 시뮬레이터 구현”, 대한전기학회 하계 학술대회, pp.2578-2580, 2000.
- [2] NATIONAL INSTRUMENTS, “PXI Solutions”, pp.12-14, 2000.
- [3] NATIONAL INSTRUMENTS, “LabVIEW User Manual”, July, 2000.
- [4] 윤만수, 오학준, 원용규, “센서제어공학”, 일진사, 2002.
- [5] 홍용식, “가스터빈엔진 이론과 응용”, 청문각, 1989.
- [6] 노명수, “항공기 가스터빈엔진”, 성안당, 1995.

저자소개

차 영 범(Young-Bum Cha)



1990년 2월 경북대학교 전자공학과
공학사
1996년 8월 충남대학교 전자공학과
공학석사

2006년 12월 창원대학교 전자공학과 공학박사
1990년 1월 ~ 2006.7월 삼성테크윈(주) 파워시스템엔
구소 전자그룹장
※관심분야: 서보모터제어, DSP보드설계, 센서신호
처리, 가스터빈엔진제어, 엔진시뮬레이터.

구 본 민(Bon-Min Koo)



1999년 2월 창원대학교 전자공학과
공학사
2001년 2월 창원대학교 전자공학과
공학석사

2006년 8월 창원대학교 전자공학과 공학박사
2002년 2월 ~ 현재 KnTech 대표
※관심분야: 서보모터제어, DSP보드설계, 로봇제어.

송 도 호(Do-Ho Song)



1973년 2월 광운대학교 전기공학과
공학사
2001년 2월 창원대학교 전자공학과
공학석사

2005년 3월 창원대학교 전자공학과 공학박사수료
1979년 ~ 현재 한국기계연구원 표준실장
※관심분야: 디지털회로설계, 센서응용회로.

최 중 경(Jung-Keyng Choi)



1986년 2월 고려대학교 전기공학과
공학사
1988년 2월 고려대학교 전기공학과
공학석사

1992년 3월 고려대학교 전기공학과 공학박사
1992년 ~ 현재 창원대학교 전자공학과 정교수
※관심분야: 서보기기제어, 자동동조제어, 마이크로
프로세응용, DSP응용, 영상제어.