

가스터빈엔진 최적 제어시스템 구현을 위한 엔진 시뮬레이터 개발

임홍선*, 차영범*, 이범석*, 김종희**
 *삼성테크윈 파워시스템연구소, **국방과학연구소

Development of Engine Simulator for The Optimal Control System Implementation of Gas Turbine Engine

H.S.Lim*, Y.B.Cha*, B.S.Lee*, J.H.Kim**

*Samsung Techwin Power System R&D Center, **Agency for Defense Development

Abstract - This paper describes the development of a gas turbine engine simulator in detail. The simulator presented in this paper has a mathematical engine model based on a target gas turbine engine performance data and is developed for generating a gas turbine engine sensor signals between the hardwares and softwares of a gas turbine engine control system using Data Acquisition systems(DAS) and 1553B communication, a aeronautic standard communication specification. In addition, this paper proves the excellent performance of this simulator by showing the results of a gas turbine engine field test and simulation.

1. 서 론

가스터빈엔진은 고가의 제어 대상시스템으로 많은 인력과 개발비, 그리고 장기간의 개발 시간이 소요된다. 따라서 개발된 엔진을 시험하기 위해서 필요한 제어 시스템(엔진 제어기 및 제어 알고리즘)은 높은 신뢰성과 안전성 및 수정의 용이함 등이 요구된다. 그러나 현재 국내에서는 가스 터빈 엔진 개발에 대한 경험 부족으로 인해 많은 시행착오가 예상되고 있고 이에 따른 위험 부담이 크다. 이를 위해 엔진 시험에 적용되는 제어시스템을 사전에 시뮬레이션 하여 최적의 제어 시스템을 단기간에 효율적으로 개발할 수 있는 엔진 시뮬레이터 개발이 요구되었다. 현재 국내에서 개발된 엔진 시뮬레이터는 중용량 기력 발전소의 디지털 터빈 제어 시스템 신뢰성 검증을 위해 개발된 증기터빈용 시뮬레이터 외에는 발표된 것이 아직 없다.[1]

가스터빈 엔진용 시뮬레이터 개발을 위해 기본적으로 DAS(Data Acquisition Systems)에 대한 이해와 GUI 프로그램 및 항공용 통신 규격인 1553B에 대한 지식이 필요하다. 또한 무엇보다 대상 시스템인 가스터빈엔진에 대한 전문적인 지식과 엔진의 수학적 모델링을 위한 엔진성능에 대한 수치 데이터가 필요하다.

본 논문에서 제시한 엔진 시뮬레이터는 대상 가스터빈 엔진에 대한 성능 데이터를 기반으로 수학적 모델을 구현하여 실제 엔진 시험시 대상 엔진과 제어시스템의 H/W 및 S/W에 필요한 입력력 신호들을 DAS를 이용하여 실제와 동일한 신호를 모사 하도록 설계되었으며 항공용 표준 통신인 1553B통신 규격이 적용된 것이다.

본 논문에서는 앞에서 언급한 가스터빈 엔진 시뮬레이터를 국내 최초로 개발한 경험을 토대로 이에 대한 상세한 내용을 기술한다. 다음 장에서는 가스터빈 엔진 시뮬레이터 개발에 필요한 구성 시스템을 소개하고 시뮬레이터 개발 프로그램에 대하여 서술하였다. 이어서 본 논문에서 제시한 시뮬레이터의 시뮬레이션 결과를 실제 엔진 시험에서 얻은 결과와 비교하여 그 우수한 성능을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 엔진 시뮬레이터 소개

본 장에서는 가스터빈엔진 시뮬레이터 개발에 필요한 H/W 및 S/W에 대하여 각각 소개하도록 한다. 먼저 시뮬레이션을 위한 가스터빈엔진 제어 시스템의 전체적인 블록 다이어그램을 살펴해보도록 한다.

2.1.1 전체 시스템 구성도

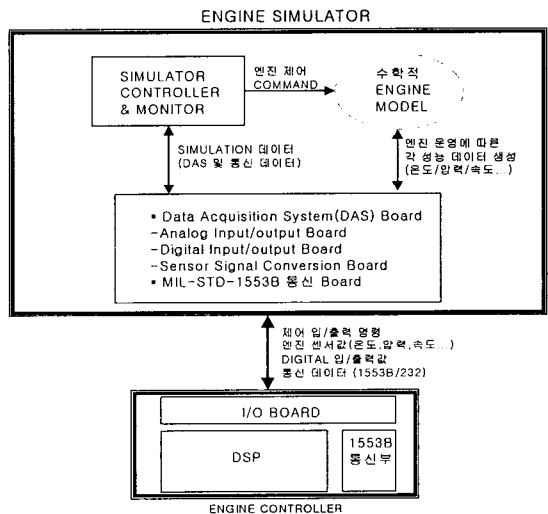


그림 1 전체 시스템 구성도

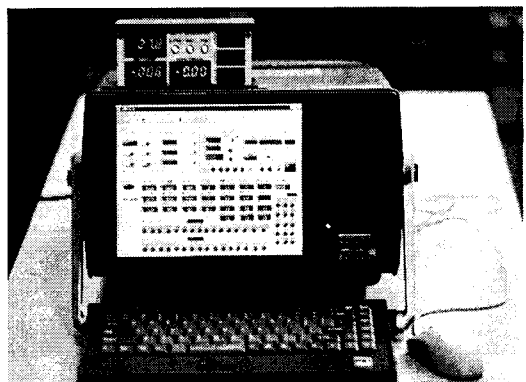


그림 2 가스터빈 엔진 시뮬레이터

위 그림 1에서 볼 수 있듯이 엔진 시뮬레이터는 실제 가스터빈 엔진의 성능 데이터를 모사할 수 있는 수학적 엔진 모델이 프로그램 안에 내장되어 있다. 따라서 실제 엔진을 운영하는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다. 즉, 엔진 운영 속도 및 운영 모드에 따라 엔진에 장착된 센서 값들을 성능 데이터로 산출하여 DAS쪽으로 넘겨주어 원하는 물리적인 센서 값을 생성하여 엔진제어기에 전달하도록 한다. 엔진 제어기는 실제 엔진에서 받는 것과 동일하게 모사된 신호 값을 시뮬레이터로부터 받아서 내장된 엔진제어 알고리즘을 통해 연산 및 제어를 수행하게 된다. 이러한 값은 통신(1553B/232)을 통해 시뮬레이터에 보내져서 현재 시뮬레이션 상태를 모니터링하고 또한 제어 명령을 만들어 줄 수 있도록 구성되어 있다. 이와 같은 구성으로 개발된 엔진 시뮬레이터를 그림 2에서 보여주고 있다

2.2 시뮬레이터 개발 H/W

여기서는 먼저 가스터빈엔진용 시뮬레이터를 개발하기 위해 DAS로 이용된 National Instruments사의 PXI 시스템을 먼저 소개하도록 한다[2].

PXI 시스템은 PCI eXtensions for Instrumentation의 약자로 기존의 개인용 컴퓨터에서 사용되고 있는 PCI bus의 확장성과 속도의 장점을 더 확장시킨 것으로 대표적인 장점을 요약하자면 다음과 같다.

- 기계적으로 Eurocard packaging 방식을 이용하고 있는 3U Type Board 이다.
- 전기적으로 VXI System의 장점인 Trigger 방식을 자유롭게 사용할 수 있다.
- Windows 운영체제에 적합하도록 설계되어 이용자가 사용하기 편리하다.

현재 기존의 PC 기반에서 쉽게 적용될 수 있고 성능과 가격 면에서 기존의 자동화 및 측정시스템에 이용되고 있는 측정 시스템보다 많은 장점을 가지고 있다. 현재 시뮬레이터에 사용되고 있는 PXI Board에 대하여 살펴보도록 한다.

시뮬레이터에서 사용되고 있는 제어기 및 DAS용 I/O Board는 앞서 설명한 바와 같이 PXI의 성능 및 가격 면에서 우수한 장점을 이용하여 아래와 같은 PXI I/O Board로 구성되었다

신 호	입 력	출 력
제어기	PXI-8170 사용 - Operating System : Windows OS - CPU : 700MHz Intel Pentium III - 3.5in 1.44MB F-DISK - Serial Port/ Parallel Port/ USB Port	
아날로그 보드	PXI-6071E 사용 - 12bit 32 DI Channels (64 SE/ 32 DI ±10V) - Sampling : 1.25MS/s	PXI-6713 사용 - 12bit 8Channels - Output Rate : 1MS/s - Digital I/O : 8TTL - Range : ± 10V
디지털 보드	PXI-6527 사용 - 48 Lines: 24 Optically Isolated Input Lines 24 Isolated, Solid-state Relay Output Lines - 0 ~ 28VDC Input Range - 0 ~ 55VDC Output Range - 120mA Current Drive	

표 1 시뮬레이터 H/W 보드 사양

DAS의 입출력 신호는 전압 값으로 실제 엔진 센서 값으로는 적당하지 않다. 온도와 압력 및 속도 센서와 같은 경우는 대부분 별도의 변환회로가 필요하다. 예를 들어 엔진 센서중 온도 센서의 경우 출력되는 값이 0~500uA의 경우 DAS에서 출력되는 전압 값을 미세한 전류 값으로 변환시켜서 엔진 제어기에 입력되어야 한다. 따라서 별도의 변환회로를 설계하여 다음과 같은 사양을 같은 센서 신호 변환 보드를 개발하였다.

신 호	입 력	출 력
센서신호 변환 보드	- 온도 입력 : 4 Ch - 속도 입력 : 2 Ch - LVDT 입력 : 1 Ch	- 온도 센서값 출력 : 4 Ch - 속도 센서값 출력 : 2 Ch - LVDT 출력 : 1 Ch

표 2 센서 신호 변환 보드 사양

가스터빈엔진과 엔진제어기와의 통신을 위해 항공용 통신 규격 프로토콜인 1553B를 적용하고자 다음과 같은 사양을 가진 1553B 통신용 보드를 시뮬레이터에 내장하였다.

신 호	사 양
1553B 통신 보드	EXC-1553cPCI/P1 Card 사용 - Direct or Transformer Bus Coupling - Memory : 32K * 16 per channel

표 3 1553B 통신용 보드 사양

2.3 시뮬레이터 개발 S/W

본 시뮬레이터를 개발하기 위해 측정 및 자동화 환경에서 많이 사용되고 있는 그래픽 프로그램(GUI) S/W 로 외부 H/W와 연결이 편리하고 사용이 쉬운 NI사의 LabVIEW(LV)를 이용하여 전체적인 개발환경을 설계하였다. LV의 경우 별다른 컴파일 필요하지 않다. 또한 일반 계측장비와 같은 패널화면 구성을 통해 프로그램 할 수 있어서 설계자 및 사용자가 쉽게 접근이 가능하다. 그리고 패널 화면의 코드부분에 해당하는 프로그램 화면인 블록 다이어그램 화면이 있다. 실제 프로그램 코드에 해당하는 것으로 연산 및 제어 프로그램은 이 화면에서 수행된다. 또한 외부 소스 프로그램과의 연결이 용이하다는 장점을 가지고 있다. (3) 예를 들어 CIN(Code Interface Node)이 지원되어 C/C++로 작성된 프로그램을 연결하여 사용할 수 있다. 현재 본 시뮬레이터의 경우 엔진 모델을 C로 작성하여 CIN을 통해 LV와 연결하여 사용하고 있다.

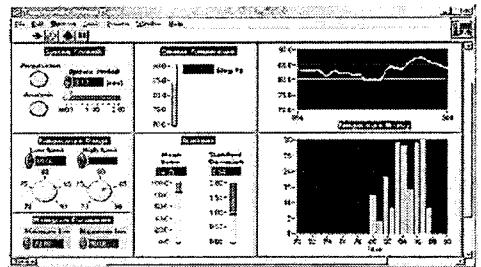


그림 3 LabVIEW 프로그램 패널 화면

2.3 시뮬레이터용 GUI 프로그램 개발

가스터빈엔진용 시뮬레이터 개발에 적용된 GUI LV 프로그램에 대한 내용과 그림 1에서 보여준 엔진의 수학적 모델링 구현 방법에 대한 내용을 살펴보고자 하겠다.

2.3.1 시뮬레이터용 GUI 프로그램

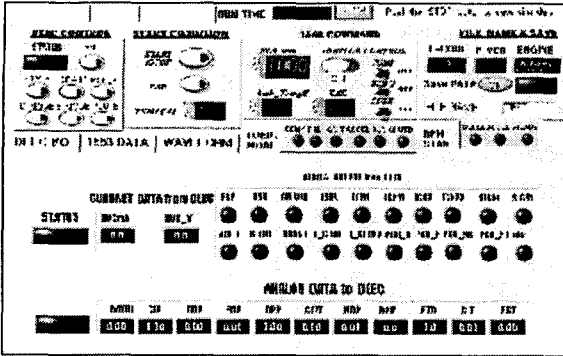


그림 4 GUI 시뮬레이션 프로그램 화면

개발 완료된 가스터빈엔진용 시뮬레이터의 LV 패널을 그림 4에서 보여주고 있다. LV 패널의 S/W적인 계층 구조를 알기 쉽도록 그림 7에서 그 구성도를 나타내주었다. 전체 화면이 작아 원하는 패널을 모두 구성하기 위해 LV의 탭(TAB) 기능을 이용하였다. 주요 3개의 탭(SIMULATION, GRAPH, OPEN DATA)을 통해서 시뮬레이션 및 결과를 볼 수 있도록 구성되어 있으며 시뮬레이션이 진행될 경우 시뮬레이션 패널 아래 3개의 탭(I/O, 1553 DATA, WAVEFORM)을 통해 그림5에서와 같이 각각 원하는 패널을 띄워 시뮬레이션 진행 도중 데이터를 살펴 볼 수 있도록 하였다.

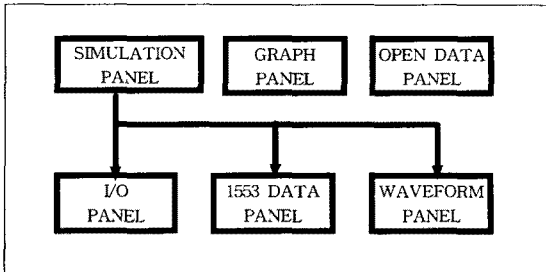


그림 5 시뮬레이터 GUI 프로그램 S/W 계층 구조

2.3.2 엔진 모델 구성도

본 엔진 시뮬레이터는 가스터빈엔진 시뮬레이션을 위한 엔진의 수학적 모델을 내부에 가지고 있다(그림 1). 이 모델이 시뮬레이터와 엔진제어기 사이에 오고가는 모든 데이터의 형태를 결정해주는 부분이라 할 수 있다. 즉 제어 명령을 전압형태의 입력신호로 받아서 실제 엔진 운영시에 측정 예상되는 각 센서 값들을 계산해서 DAS 입출력 보드와 주고받는 일을 한다. 이를 위해 개발엔진에 대한 온도, 압력 및 속도등 엔진 제어에 필요한 각각의 성능 분석 데이터가 요구된다. 오른쪽 그림 6에서 수학적 모델 내부 구성 요소를 블록 다이어그램으로 보여주었다.

H/W Interface 부분은 외부 DAS의 전압형태의 신호와 내부 모델의 각 센서 변수와 연결하기 위한 부분으로 각 신호의 순서와 크기 등을 정해준다

가스터빈엔진 해석 모듈은 실제적인 엔진 모델링에 해당하는 것으로 크게 3부분으로, 실시간 엔진 성능해석 모듈, 연료시스템 모델 그리고 성능 데이터 부분으로 구성되어 엔진의 동적 시뮬레이션을 유기적으로 진행할 수 있도록 한다.

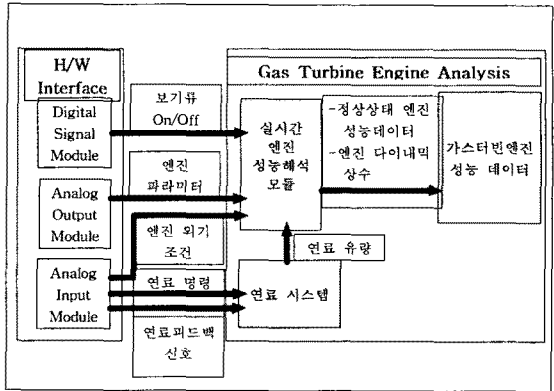


그림 6 가스터빈 엔진 수학적 모델 내부 구성도

2.4 시뮬레이션 및 엔진 시험 결과

개발된 시뮬레이터를 엔진 제어 알고리즘을 탑재한 가스터빈 엔진제어기와 연결하여 시뮬레이션한 결과를 실제 엔진 시험한 결과와 비교함으로써 개발된 가스터빈 엔진 시뮬레이터의 성능을 살펴보고자 한다. 먼저 그림에 사용된 변수는 아래 표 3에서 설명하였다.

변수 이름	내용
PLA	엔진 속도 명령
FMC	연료량 제어 명령
N_DEM	제어 알고리즘 내부 엔진 속도 명령
CDP	압축기 출구 압력
RPM	엔진 회전 속도

표 3 엔진 변수 설명

먼저 엔진 초기 시동 상태, 즉 0~73% RPM 구간을 엔진 시험 결과와 시뮬레이션 결과를 아래 그림 7 과 그림 8 각각 나타내었다. 변수 값은 모두 백분율(%)로 표시하였다. 그림 8에서 초기 시동시 50% RPM에서 N_DEM값이 동작하면서 페루프 제어 알고리즘이 적용되어 73% RPM 까지 상승한 후 정상상태에 도달함을 알 수 있다. 이때 FMC 값은 페루프 제어하는 50% RPM 이후 여러 엔진 변수 값의 제어 연산으로 인해 실제 시험 결과(그림 7)에 비해 약간의 떨림 현상이 있으나 전체적으로 초기 시동시 두 결과 비교할 때 거의 일치함을 알 수 있다.

그림 9와 그림 10에서는 73%와 95% RPM 사이 변속 구간에서 엔진시험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교해서 나타내었다. 초기 시동상태와 마찬가지로 엔진 속도가 변할 때의 변수 값들의 경향이 엔진 시험결과와 시뮬레이션 결과가 서로 거의 일치함을 보여 주고 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 국내에서 처음 개발된 가스터빈 엔진 시뮬레이터 개발에 대한 내용을 소개하였다. 이를 위해 개발에 필요한 시뮬레이터 H/W 와 운영 S/W 및 수학적 엔진 모델 내부구성에 대하여 설명하였고 또한 개발된 시뮬레이터를 통한 엔진 시험 시뮬레이션 결과와 실제 엔진 시험 데이터가 거의 일치함을 보여줌으로써 그 우수한 성능을 입증하였다. 본 시뮬레이터를 통해 앞으로 개발되는 가스터빈 엔진에 대한 제어시스템 개발에 시간 및 비용 그리고 신뢰성 등에 있어 많은 효과를 얻으리라 예상된다.

(참 고 문 헌)

- [1] 최인규, 우주희, "중용량 증기터빈 제어기의 신뢰성 검증을 위한 시뮬레이터 구현", 대한전기학회 하계학술대회, pp.2578-2580, 2000
- [2] NATIONAL INSTRUMENTS, "PXI Solutions", pp. 12-14, 2000
- [3] NATIONAL INSTRUMENTS, "LabVIEW User Manual", July, 2000

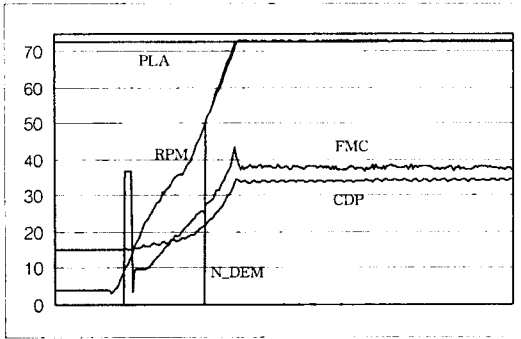


그림 7 가스터빈 엔진 초기 시동시험 데이터

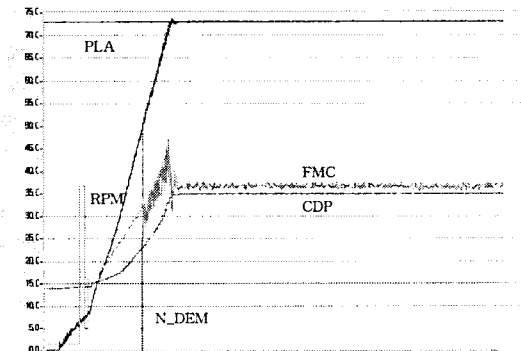


그림 8 시뮬레이터 초기 시동상태 시뮬레이션 데이터

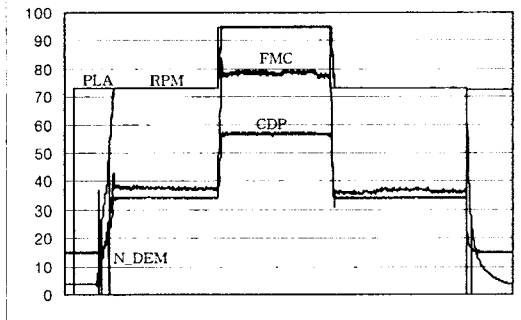


그림 9 RPM 가변상태 가스터빈 엔진 시험 데이터

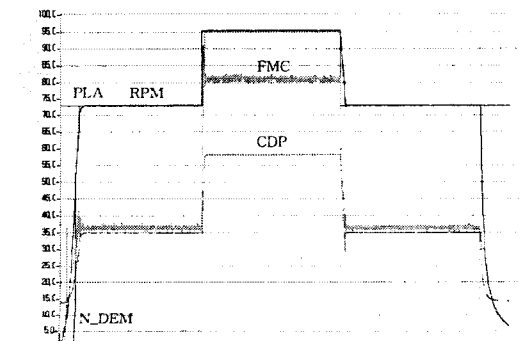


그림 10 RPM 가변상태 시뮬레이터 데이터