

발전용 소형가스터빈엔진 제어시스템 개발

홍성진^{**} · 김승민^{*} · 육심균^{*} · 남삼식^{*}

Development of Small-sized Gas Turbine Engine Control System for Power Generation

Seongjin Hong^{**}, Seungmin Kim^{*}, Simkyun Yook^{*}, Samsik Nam^{*}

Key Words : Gas Turbine Engine(가스터빈엔진), Control System(제어시스템)

ABSTRACT

Small-sized gas turbine engine could be applied to various fields such as propulsion, power generation, machine driving, etc., and Doosan has been developing 5MW class gas turbine engine for power generation since 2005. To verify its design performance and operating characteristics, a gas turbine engine test facility was constructed, and control system was also established to satisfy rapid and reliable control performance. In this paper, the hardware specification and structure of control system for gas turbine engine are introduced, and test result for starting characteristics analysis and loading is also presented.

1. 서 론

가스터빈은 가스 등의 연료를 압축 공기와 혼합/연소시켜 작동 유체에 열에너지를 준 다음, 고압, 고온의 가스를 생성하여 터빈에 공급함으로써 기계적 에너지로 변환하는 원동기이다. 그 중에서 소형 가스터빈은 1~10MW의 출력을 가지는 엔진으로서, 높은 비출력 및 다양한 연료의 사용이 가능하고 우수한 환경 친화성으로 인해 분산발전용 열병합 설비 및 추진 동력원, 기계 구동용 등의 다양한 분야에 적용되고 있다. 특히 발전분야에서는 발전 패러다임 변화에 따른 신속적 전원 공급을 위한 중·소규모의 단위발전 설비의 필요성이 증대되고 있는 상황이다. 이러한 추세에 맞춰 두산중공업에서는 2005년부터 5MW급 고효율 발전용 소형 가스터빈엔진 개발 과제를 수행해오고 있으며, 개발 엔진의 시동부터 최대 출력조건까지의 엔진 운전 상태를 효과적으로 재현하기 위한 성능시험설비를 구축하였다. 본 논문에서는 현재 개발 중인 가스터빈엔진의 운전 및 성능시험을 위해 성능시험설비에 구축한 제어시스템의 개발 내용 및 시험결과를 소개하고자 한다.

발전용 가스터빈의 제어시스템은 운전 단계에 따라 기동 제어, 가속제어 및 속도/부하 제어를 수행하게 되며, 모든 운전영역에 걸쳐 엔진 보호를 위한 보호로직이 동작하도록 구성된다.⁽¹⁾ 이를 위해 제어시스템은 엔진 및 각종 보기 시스템에 설치된 다양한 타입의 센서 및 액추에이터와 신호를 주고받을 수 있도록 설계되어야 하며, 빠른 제어응답 성능을 위해 높은 사양의 하드웨어 및 효율적인 소프트웨어 구조가 요구된다. 본 시스템은 고성능의 상용 PLC(programmable logic controller)를 채용한 control panel을 입출력 신호 타입에 따라 분리 구성하여 각기 다른 제어주기를 가지는 task에 효율적으로 대응할 수 있도록 하였다. 그리고 제어시스템에 오류가 발생하는 경우에도 엔진이 보호될 수 있도록 하드웨어적으로 구성된 ESD(emergency shutdown) Block 회로를 구현하였으며, 특히 엔진 운전시의 과속 방지를 위해 엔진이 정격속도의 5% 이상 상승하는 경우 제어시스템과 독립적으로 보호 회로를 수행할 수 있는 OPD(overspeed protection device)를 추가로 설치하였다. 구축된 제어시스템을 이용하여 가스터빈엔진의 시동 및 부하시험을 실시하였고, 그 결과를 본 논문에 수록하였다.

* 두산중공업 기술연구원

† 교신저자, E-mail : Seongjin.Hong@doosan.com

2. 가스터빈엔진 및 성능시험설비 개요

2.1 엔진 설계 사양

현재 두산중공업에서 개발 중인 발전용 가스터빈엔진 (DGT-5)의 설계 사양은 Table 1과 같다. 압축기는 축류 10단과 원심 1단으로 구성되는 hybrid type이며, 연소기는 8개의 다중 캔 타입(multi can type)으로 설치되어 있고, 터빈은 축류 3단으로 구성되어 있다.

2.2 가스터빈엔진 성능시험설비 구성

DGT-5의 성능시험을 위해 구축한 설비 구성 및 실제 설비 사진은 Fig. 1과 같다.

가스터빈엔진의 초기 기동을 위한 starting system은 2대의 전기모터로 구성되며, 엔진의 정격 및 부분부하 특성을 시험하기 위한 출력소비설비는 발전기 및 load bank를 이용하여 구성하였다. 그리고 윤활 시스템은 oil pumps, tank 및 compressor 등으로 구성되어 엔진 전/후방 베어링 및 기어박스에 윤활유를 공급하는 역할을 하며, fuel supply system은 4.5~5.5bar의 압력으로 공급되는 천연가스를 25bar로 승압하여 엔진에 공급하는 설비이다.

엔진 및 발전기의 기계진동 및 각 연소기의 연소진동 감시를 위해 VMS(vibration monitoring system)을 설치하여 진동센서의 buffered-out 신호가 제어시스템의 보호로직 입력으로 활용될 수 있도록 구성하였고, 빠른 데이터 수집 및 효율적인 시험설비 운영을 위해 DAS(data acquisition system) 및 integrated HMI(human machine interface) system을 구축하였다.

2.3 엔진 제어를 위한 Instrumentation

엔진 성능시험을 위한 주요 측정변수 및 제어변수들은 Fig. 2와 같다.

엔진 제어 및 보호를 위한 입출력 신호는 약 300 points (보기시스템 및 spare 채널 포함)가 사용되며, 그 중에서 엔진 속도, 압축기 출구 압력(CDP, compressor discharge pressure) 및 배기가스 온도(EGT, exhaust gas temperature) 등과 같

Table 1 Design specifications of gas turbine

Parameters	Value
Ambient temperature (K)	288.15
Ambient pressure (kPa)	101.3
Nominal Speed (rpm)	12840
Gearbox shaft power (MW)	5.25
Turbine inlet temperature (K)	1377
Exhaust gas temperature (K)	753
Pressure ratio	14
Thermal efficiency (%)	32

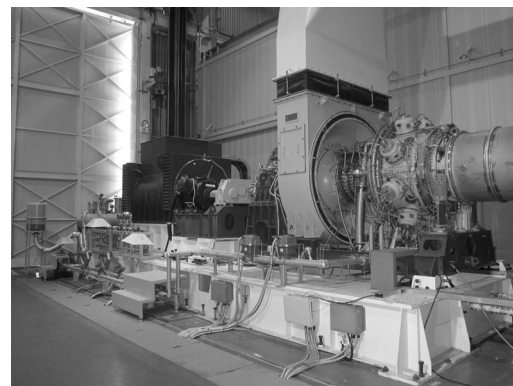
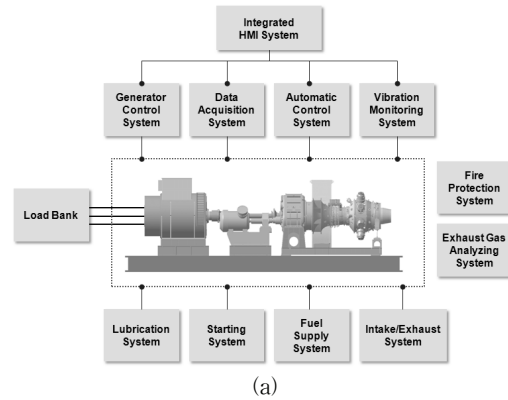


Fig. 1 (a) Configuration of test facility for gas turbine and (b) DGT-5 test cell

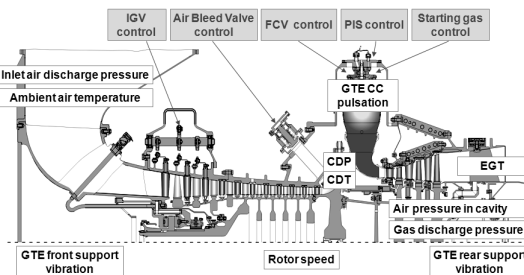


Fig. 2 Principal measuring & control parameters in DGT-5

은 중요한 물리 변수에 대해서는 센서를 다중으로 설치하여 측정 신호에 대한 신뢰성 및 안정성을 높였다. 속도센서는 Magnetic pickup 타입을 적용하여 회전 속도에 따른 주파수 신호를 출력하도록 하였고, 온도센서는 측정 범위에 따라 RTD(resistor temperature detector) 및 thermocouple 센서를 적용하였으며, 압력 및 진동신호는 transmitter 및 VMS를 경유하여 4~20mA 신호가 입력되도록 하였다.

3. 가스터빈엔진 제어시스템

3.1 하드웨어 구성

DGT-5의 성능시험을 위한 제어시스템은 실질적인 엔진

제어를 담당하는 control panel과 운전원과의 인터페이스를 담당하는 operator station으로 구성된다.

3.1.1 Control Panel

Control panel은 아날로그 신호와 디지털 신호를 분리하여 처리할 수 있도록 2대의 cabinet으로 구분되어 설계되었으며, Fig. 3과 같이 각각 power supply, controller 및 signal conditioner 등으로 구성된다.

각 cabinet은 이중화된 220VAC 전원을 공급받도록 구성함으로써 main 전원에 오류가 발생했을 때 자동으로 backup 전원(UPS 전원)으로 절체되도록 되어 있으며 cabinet 내부의 power supply에서 직류 전원으로 변환하여 controller 및 signal conditioner로 전원을 공급하게 된다.

Controller는 엔진 기동 및 정지, cold cranking 및 보호 로직을 담당하는 sequence control logic과 속도, 부하 및 배기가스 온도에 따른 연료량 및 IGV(inlet guide vane) 제어를 담당하는 governing algorithm로 구분하여 구성되어 있으며, 고성능의 하드웨어를 채용하여 빠른 제어응답 성능에 대응할 수 있도록 하였을 뿐만 아니라 각기 다른 제어주기를 가지는 task를 분리하여 구현함으로써 효율적인 엔진 제어가 이루어지도록 하였다. Controller 간의 데이터 교환은 이중화된 필드버스 통신을 이용하여 이루어지며, controller와 operator station간에는 Ethernet 통신으로 연결된다.

Controller에 오류가 발생하는 경우에 엔진을 안전하게 보호할 수 있는 있도록 독립적인 하드웨어로 구성되는 ESD Block 회로를 구현하였으며, 엔진 운전시의 과속 방지를 위한 이중화된 보호장치로서 엔진이 정격속도의 5% 이상 상승하는 경우 제어시스템과 독립적으로 보호 회로를 수행하는 OPD를 추가로 설치하였다.

엔진 속도 및 온도, 압력 등 엔진에 설치된 센서 신호는 signal conditioner를 경유하여 controller의 입출력 모듈과 인터페이스하게 되는데, 제어용 신호 및 감시용 신호에 따라 각 센서별로 scan time을 다르게 설정하여 각각의 task에서

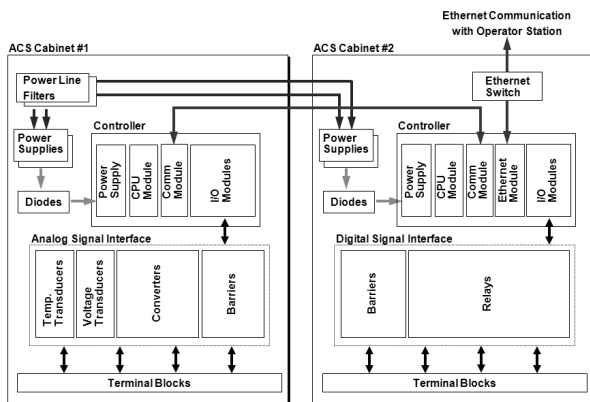


Fig. 3 Configuration Diagram of Control Panel

요구하는 샘플링 주기에 대응할 수 있도록 하였다.

3.1.2 Operator Station

Operator station은 엔진 및 보기시스템의 상태 감시 및 운전 지령 입력 등 운전원과의 인터페이스 역할을 하는 OIS (operator interface station) 기능과 제어로직 수정 및 제어기와의 인터페이스 역할을 하는 EWS(engineering workstation) 기능, 그리고 trend 분석을 위해 운전데이터를 저장하는 historian 기능을 동시에 수행하며, Fig. 4와 같이 PC 및 비상시 운전 조작용의 auxiliary operating box로 구성된다. 운전데이터는 1Hz 간격으로 데이터베이스에 저장되어 real-time/historical trend 화면에서 표시 가능하다.

3.2 소프트웨어 구성

DGT-5의 제어 소프트웨어는 sequence control logic과 governing algorithm이 별도의 controller에서 구현되어 독립적으로 동작하며, IEC 61131-3 표준⁽²⁾에 규정된 프로그래밍 언어를 사용하여 작성함으로써 소스코드에 대한 가독성 및 호환성을 높였다. 각 모듈에 구현된 task는 Table 2와 같이 제어동작에 따라 다른 제어주기를 설정함으로써 시스템의 효율성 및 성능을 극대화하고자 하였다.

3.2.1 Sequence control logic

Sequence control logic은 DGT-5의 기동/정지 및 cold cranking을 위한 순차제어, 각 액추에이터의 on/off 제어, 엔진 보호로직 수행 및 HMI와의 통신 등을 담당한다.

Cold cranking은 엔진 시동 전 보기시스템 점검, 엔진 점화시험 후 엔진 내의 잔존가스 배출을 위한 퍼지(purge) 및



Fig. 4 Operator Station

Table 2 Control period

Task	Period Time (ms)
Sequence control logic	250
Fuel governing & IGV control	25
Communication with HMI	1000

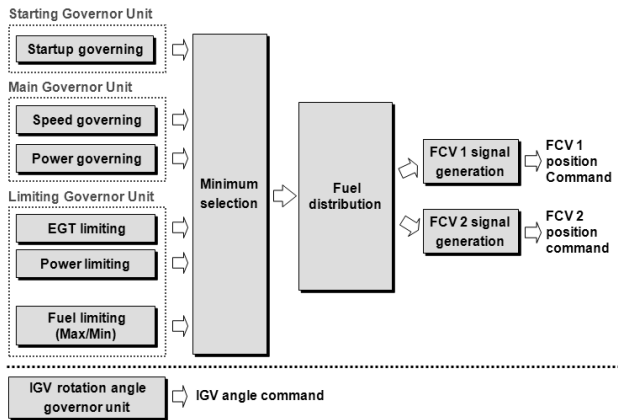


Fig. 5 Structure of governing algorithm

엔진 냉각 등을 위하여 점화를 하지 않고 시동 시스템만으로 일정 시간동안 일정 속도로 엔진을 운전하는 모드이다.

Cold cranking을 통한 보기시스템 점검 후 엔진 기동 명령을 수행하며, 시동모터 출력, 점화 연료량 및 연료 가속량, 추기 밸브 조합 등의 조정을 통해 최적의 시동 스케줄을 도출하게 된다.

엔진 보호로직은 엔진 과속, 배기가스 과열, 엔진 및 발전기의 기계진동, 연소기의 맥동(pulsation) 및 화염 소실, 엔진 전/후방 베어링 및 기어박스 과열 등이 발생하는 경우에 엔진을 보호하기 위해 구현되며, 발생 수준에 따라 경고(warning), 부하 탈락(limiting) 및 비상정지(emergency shutdown)로 나뉘게 된다.

HMI와의 통신은 OPC(OLE for Process Control) 방식을 이용하여 구현되며, 1Hz 간격으로 데이터를 업로드하게 된다.

3.2.2 Governing algorithm

Governing algorithm은 엔진 점화 후 연료공급시점부터 동작하기 시작하며, 엔진 기동 및 가속 시에는 정해진 연료 공급 스케줄에 따른 개루프 제어를 수행하고 엔진이 정격 속도에 도달하면 운전모드에 따라 엔진의 회전속도 또는 발전기 출력, 그리고 배기가스 온도에 대한 피드백 제어를 수행하여 최종적으로 연료조절밸브에 대한 개도 명령을 출력한다. 또한 압축기 입구 유입 공기량의 조절을 통해 배기가스 온도를 제어하기 위한 IGV 제어루프도 함께 구현된다. Fig. 5는 본 제어시스템에 적용된 governing algorithm의 구성을 나타낸다.

4. 시험결과

4.1 엔진 시동시험

엔진 시동시험은 연소기의 점화 시점 및 점화 연료량, 연료 가속량, 시동모터 출력, 압축공기 추기밸브 제어 등을 통해 점화 안정성, 배기가스 온도 제한, 압축기 운전성능 및 기동 시

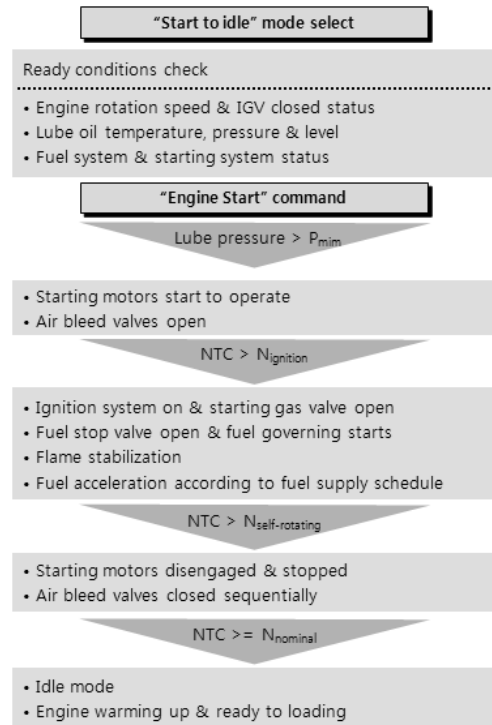


Fig. 6 Starting sequence of DGT-5

간 등을 만족하는 최적화된 시동 로직을 도출하는 것이며, DGT-5 엔진의 일반적인 시동 시퀀스를 Fig. 6에 나타내었다.

엔진의 설계 데이터 및 각 구성품 시험 결과를 바탕으로 하여 1차적으로 엔진 시동 데이터가 확보되면 압축기의 작동 안정성을 만족하는 조건에서 엔진의 시동시간 단축 및 배기가스 성능 향상 등을 위해 연료 공급 스케줄 변경 및 압축기 후단의 추기밸브 제어 최적화를 수행하게 되며, Fig. 7은 각각의 조건 변경에 따른 시동 특성 개선 예를 보여준다. (a)에서는 점화 연료량 및 연료 가속량을 변경하여 시동시간을 기존대비 약 7% 단축하였으며, (b)에서는 동일한 연료 공급 스케줄 조건에서 추기밸브의 제어 조합 및 시퀀스를 최적화하여 배기가스 온도를 기존대비 약 13% 낮춤으로써 시동 성능을 개선하였다.

4.2 부하 시험

DGT-5 엔진시험설비에는 엔진 부하시험을 위해 발전기와 load bank로 구성된 출력소비설비가 구축되어 있다. Load bank는 부하 크기별로 세분화하여 정격부하의 1%에서 106%까지 인가할 수 있도록 구성되어 있으며, 다양한 부하 조합을 통해 부분부하 성능 및 부하 변동에 따른 동적 응답 성능을 평가할 수 있다.

엔진 시동 시 주어진 연료 공급 스케줄에 따른 개루프 제어에 의해 정격속도까지 상승하여 엔진이 FSNL(full speed no load) 상태에 도달하면 governing algorithm은 엔진 속도에 대한 피드백 제어를 수행하게 된다. 그리고 부하 인가

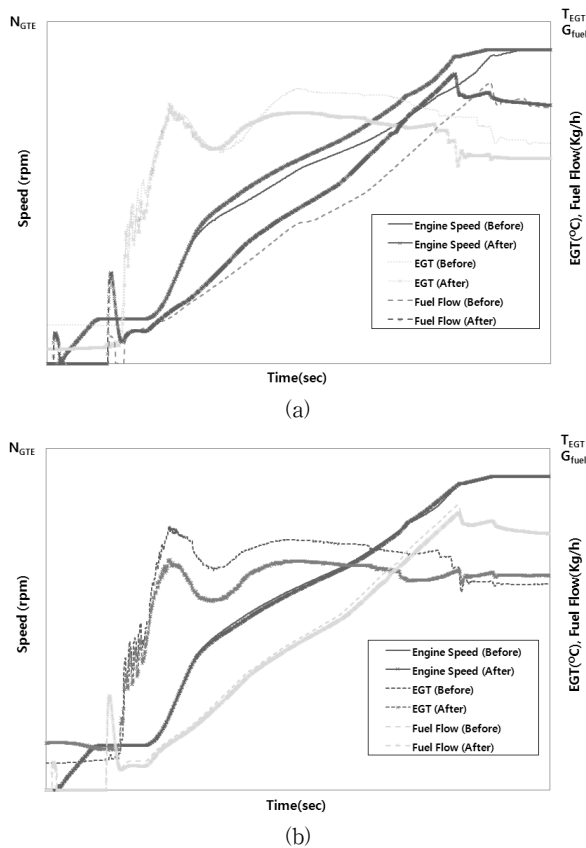


Fig. 7 (a) Examples of starting optimization by fuel supply schedule adjustment and (b) air bleed valve control adjustment

전에 IGTV를 완전히 오픈하여 배기가스 온도를 일정수준 낮춘 후 부하 증발을 시작한다. Fig. 8은 DGT-5의 부하 증발 시험 결과이며, 각 부하 단계별로 load bank의 조합에 따른 부분부하 탈락 및 재인가로 인한 과도응답을 보여주고 있지만, 시험조건 하에서의 최대 부하까지 안정되게 load switching 하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 최대 부하운전 상황에서 엔진 보호로직 동작으로 인해 발전기의 차단기가 개방되면서 갑작스런 부하 탈락이 발생했을 때의 엔진 거동을 나타내고 있다. 이 때 정격속도 대비 약 1.45%의 엔진 회전수 변동이 발생하였으나 과속도 트립되지 않고 엔진 속도에 대한 피드백 제어를 통해 안정적으로 FSNL 모드에 도달하는 응답 성능을 보여주고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 두산중공업에서 개발하고 있는 발전용 소형가스터빈엔진의 운전 및 성능 시험을 위한 제어시스템의 개발 내용 및 시험 결과를 기술하였다.

제어시스템은 빠른 제어응답 성능을 만족할 수 있도록 고성능의 하드웨어 채용 및 sequence control logic과 governing algorithm이 분리된 효율적인 시스템 구조를 채용하였으며,

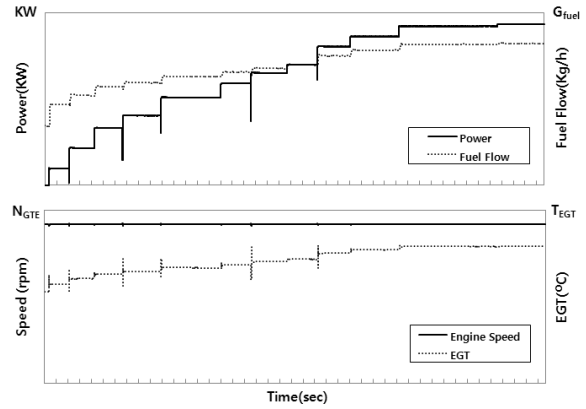


Fig. 8 Load increasing with load bank

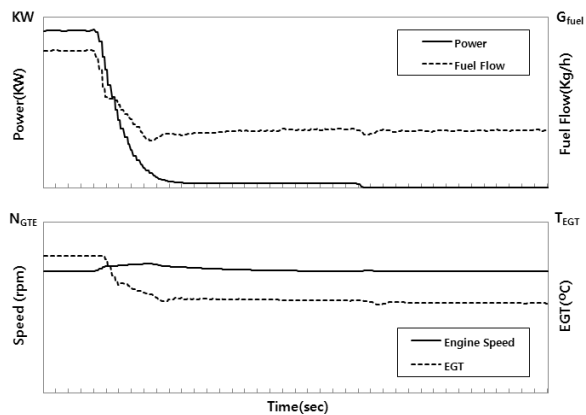


Fig. 9 Load rejection characteristics to FSNL mode

시스템 오류 및 주요 제어 변수에 대한 이중화된 보호 회로를 설치하여 시스템의 신뢰성을 향상시켰다.

구축된 제어시스템을 이용하여 엔진 시동시험 및 부하시험을 수행하였으며, 시동시험에서는 연료 공급 스케줄 및 압축공기 추기밸브 제어로직 변경을 통하여 압축기의 작동 안정성을 만족하는 조건에서 시동 시간 및 배기가스 온도 성능을 개선하였으며, load switching 및 부하 탈락 실험을 통해 부하 변동에 대한 안정적인 제어 성능을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부, 한전 전력산업연구개발사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 한전 발전교육원, 2004, “가스터빈 실무”.
- (2) IEC 61131-3 International Standard, 2003, Programmable Controllers-Part 3: Programming Languages.