

전자식 선박디젤엔진의 엔진제어기 개발/연구

심한섭*[#], 이민광**^{*}, 이강윤**

*경남과학기술대학교, **[주]컨트롤웍스

A Development Study on an Engine Control Module of an Electronic Marine Diesel Engine

Han-Sub Sim^{*#}, Min-Kwang Lee^{**}, Kang-Yoon Lee^{**}

*Gyeongnam National University of Science and Technology, **Control Works Inc.

(Received 29 Augst 2015; received in revised form 2 october 2015; accepted 6 october 2015)

ABSTRACT

A control program of an engine control module (ECM) was developed, and its control performance was verified on a 750Ps marine diesel engine. The control method was designed for an engine rotational speed control system. For ECM hardware, the commercial rapid control prototype (RCP) ECM was used. The programming tool for control algorithm development was the MatLab/Simulink. The main control algorithm assembled many control models as engine cranking, run, and stall. Each model has sub-models to input/output control signals. The target engine speed was input signal from a speed control lever, and control output signal of the ECM was sent to the unit-injectors for fuel injection. The engine test was performed under various conditions of engine rotational speeds and dynamometer loads. The test results show that the control function of the ECM is suitable for electrical marine diesel engines.

Key Words : Marine Diesel Engine(선박디젤엔진), Engine Control Module(엔진제어기), Speed Control System(회전속도 제어시스템), Control Algorithm(제어 알고리즘), Unit-Injector(유닛-인젝터)

1. 서 론

소형선박의 추진기관은 디젤엔진과 가솔린엔진이 주로 사용되고 있다. 그 중에서 디젤엔진은 열 효율, 토크 및 연료 경제성이 우수하다. 가솔린엔진은 출력/중량비가 우수하고 고속운전이 가능하므로 소형고속선박의 선외기에 주로 사용되고 있다.

선박디젤엔진의 제어시스템은 회전속도제어시스템이며, 속도제어레버(speed control lever)에 의하여 설정된 목표회전수를 추종하도록 설계된다. 회전속도제어시스템은 기계식과 전자식 제어장치가 있으며, 연료량을 조절하여 디젤엔진의 회전속도를 제어한다. 기계식 속도제어시스템은 연료분사펌프의 연료제어랙 (fuel control rack)와 조속기(governor)의 작용에 의하여 노즐에서 분사되는 연료량을 제어한다.

최근에는 해양에서의 대기환경 보호와 이에 따른

* Corresponding Author : hansub@gntech.ac.kr

Tel: +82-55-751-3644

국제해사기구(IMO) 및 국내법규의 강화로 인하여 선박디젤엔진의 전자화와 엔진제어기(ECM)에 대한 연구와 관심이 증가하고 있다. 전자식 속도제어시스템은 엔진제어기(ECM)에 의하여 인젝터(injector)로부터 분사되는 연료분사량을 변화시켜 회전속도를 제어한다. 엔진제어기 내부에는 회전속도제어를 위하여 미리 정해진 제어규칙(control algorithm)이 내장되어 있다. 따라서, 엔진제어기의 성능은 하드웨어와 소프트웨어에 의하여 결정된다.

선박디젤엔진의 엔진제어기에 대한 연구는 차량용 디젤엔진의 연구결과들이 참고적으로 많이 활용되었다.^[1,2] 선박디젤엔진에 대해서는 엔진 모델링, 제어방법 및 모의실험(simulation) 등이 연구되었으며, 실제 선박디젤엔진에 적용한 연구결과들은 매우 적다.^[3-7]

이 연구에서 엔진제어기의 하드웨어는 기존의 상용품을 사용하였으며, 엔진제어기에 내장되는 제어용 프로그램을 개발하고 선박디젤엔진에 적용하여 제어성능을 검증하고자 하였다.

2. 선박엔진 제어시스템

2.1 선박디젤엔진의 제어시스템

대부분의 선박에서는 Fig. 1과 같이 추진기관은 하부 엔진실에 설치되며 운항실을 상부에 위치하고 있다. 선박디젤엔진의 엔진제어기는 운항실에 설치된 속도제어레버에 의하여 설정된 디젤엔진의 목표속도를 맞추기 위하여 디젤엔진의 연소실 내부로 분사되는 연료량을 증감시키고 이에 따라 토크증감에 의하여 엔진회전수를 제어하는 회전속도제어시스템이다. 변속기(또는 감속기)의 제어는 운항실에 설치된 변속레버(T/M control lever)에 의하여 3단 변속(전진-중립-후진)이 가능하다.

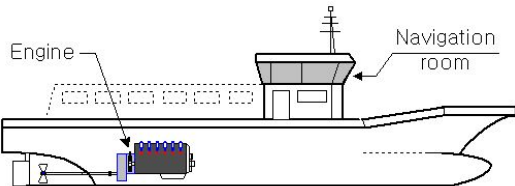


Fig. 1 Layout design of a small ship

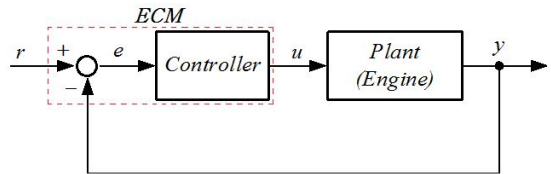


Fig. 2 Speed control system of a marine diesel engine

선박디젤엔진의 속도제어시스템을 블록선도로 간략하게 표시하면 다음 Fig. 2와 같다. 여기서, 각종 기호는 다음과 같다.

- r : 요구되는 엔진의 목표 회전속도(회전수)
- y : 엔진 회전속도(회전수)
- e : 오차(r-y)
- u : 제어신호

디젤엔진의 목표 회전속도(r)는 선박 운항실의 속도제어레버(speed control lever)를 이용하여 선박 조종자가 설정하는 회전속도 목표값이다. 이 신호는 엔진제어기로 입력된다. 엔진 회전속도(y)는 디젤엔진의 회전속도센서(speed sensor)로부터 측정되는 신호이며, 이 신호는 엔진제어기로 입력된다. 엔진 회전속도센서는 플라이휠의 외부에 설치되어 있다. 오차(e)는 목표 회전속도(r)와 디젤엔진의 현재 회전속도(y)의 차이를 나타낸다. 제어신호(u)는 오차(e) 값에 따라 엔진제어기에 내장된 제어규칙에 의해 정해지는 제어출력이다. 이 신호는 선박 디젤엔진의 연소실 상부에 설치된 유닛 인젝터(unit-injector)에서 분사되는 연료량을 결정하는 신호이며, 분사기간(시간)으로 변환되어 출력된다. 이에 따라서 인젝터에서 분사되는 연료량이 변화되고, 연료의 연소에 의하여 토크증감이 발생하며 이어서 엔진회전속도가 제어된다. 엔진제어기는 마이크로컨트롤러(micro-controller)를 포함한 제어회로와 제어 프로그램이 내장된 전자식 디지털 제어기(digital controller)이다. 따라서, 엔진제어기의 제어성능은 제어기를 구성하는 전자회로(하드웨어) 뿐만 아니라 내장되는 제어규칙(소프트웨어)에 따라 결정된다. 제어규칙은 다양한 제어이론을 적용할 수 있으며, 전자회로 및 선박디젤엔진의 제어특성을 고려해야 한다.

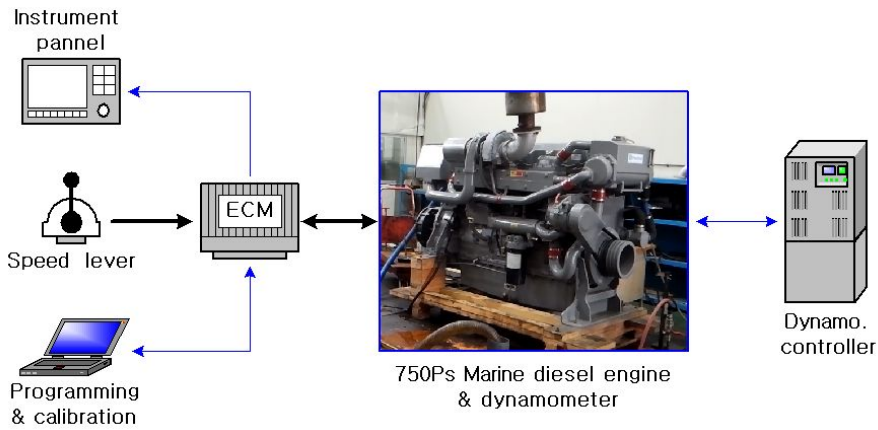


Fig. 3 Control and development system for the marine engine control system

2.2 엔진제어 프로그램의 개발환경

엔진제어 프로그램 개발을 위한 여러 가지 개발 및 시험장치는 Fig.3에 간략하게 나타내었다. Table 1은 엔진제어기 개발 및 시험장치의 주요 사양을 나타낸 것이다. 선박디젤엔진은 725Ps, 직렬 6기통 디젤엔진이며, 전자식 엔진제어기, 유닛 인젝터 및 여러 가지 제어용 센서들이 적용된 전자 제어식 디젤엔진이다. 또한, 엔진출력을 향상시키기 위하여 과급기(turbocharger)와 인터쿨러(intercooler)를 적용하여 흡입공기량을 증대시켰으며, 선박엔진에 적합하게 수냉식 열교환기, 수냉식 배기관을 적용하였다.^[8] 속도제어레버는 가변저항 센서로서 레버의 설정위치에 따라 엔진의 회전수가 정해진다. 엔진제어기는 32-bit RCP(rapid control prototype) ECU(ECM-0565-128)이며, 이 연구에서 개발하여 내장된 제어 프로그램에 의하여 디젤엔진을 제어한다. 엔진제어용 프로그램은 PC와 개발용 소프트웨어를 이용하여 개발한다. 또한, 선박엔진의 운전정보를 표시하는 계기판(instrument panel)이 설치되어 있다. 선박엔진에 적용하는 부하조건은 엔진동력계(1500Ps, 수동력계)를 이용하여 다양하게 조절할 수 있다. 따라서 다양한 부하조건에서 엔진제어기에 의하여 제어되는 선박엔진의 제어상태를 확인/검증할 수 있다. 제어용 프로그램의 개발이 완료된 이후에는 PC는 분리되고, 엔진제어기만으로 제어기능을 수행한다.

Table 1 Specifications of development system

Systems	Specification
- Diesel engine	- 750Ps, inline 6-cylinder, 15.2ℓ
- ECM	- Woodward ECM-0565-128
- Fuel control	- Unit injector and ECM
- Speed control lever	- DC 0~5V, variable resistance
- Instrument panel	- Display of engine operation
- PC and software	- Programming and calibration
- Dynamometer	- Load control



Fig. 4 Unit injector and cylinder head

다음 Fig. 5는 디젤엔진의 제어에 필요한 각종 신호의 흐름과 정보들이 간략하게 표시한 것이다. 속도제어레버는 디젤엔진의 목표 회전속도를 결정한다. 가속레버에는 가변저항기가 결합되어 있으며, 이 신호의 크기(0~5V)에 따라 공회전에서 최고속도까지 목표속도를 설정한다. 계기판은 엔진 운전에는 필요한 핵심적인 정보를 표시하며, 이상신호 경보기능도 있다. 엔진제어기(ECM)는 디젤엔진의 회전속도제어를 포함하여 운전에는 필요한 제어와 디젤엔진의 각종 정보를 계기판으로 보낸다. 또한 디젤엔진으로부터 얻은 각종센서의 신호로부터 디젤엔진의 제어상황을 판단하고, 내장된 제어 규칙에 따라 연료분사신호를 출력한다. 연료분사 제어 신호는 인젝터 드라이버로 전달되며, 인젝터를 구동하여 연료를 분사한다. 인젝터 드라이버는 ECM에서 출력되는 분사신호(TTL Level)가 작아서 인젝터를 직접 구동할 수 없으므로, 인젝터를 24V로 구동할 수 있게 스위칭 작용을 한다. PC는 엔진 제어 프로그램의 작성, 모니터링을 할 수 있으며, 엔진제어기의 개발시에 필요하다.

Fig. 6은 선박디젤엔진의 엔진제어 프로그램의 개발과정을 나타낸 것이다. 프로그램 개발을 위하여 MotoHawk(Woodward), Matlab & Simulink(MathWorks), RTW(Real-time workshop, 자동 코드 생성), MotoTune(Woodward) 등이 사용되었다. ①은 MotoHawk 화면이며 Simulink 제어알고리즘을 결합하고 편집할 수 있다. ②는 Simulink이며, 선박디젤엔진의 제어에 필요한 알고리즘을 작성한다. ③은 RTW 코드생성기를 사용하여 제어프로그램이 생성되는 과정을 보여준다. 또한, 실험결과에 대한 보고서(④)가 만들어진다. 컴파일과 링커의 실행에 의하여 엔진제어기에서 실행이 가능한 제어 프로그램 파일(⑤)과 ⑥의 Mototune 디버깅(debugging) 파일이 생성된다. ⑤의 실행파일은 엔진제어기에 다운로드(download)하여 내장된다. 그 다음 과정에서는 선박디젤엔진을 동작시키면서 엔진제어기의 제어기능을 확인/검증한다. 제어 프로그램의 검증과정에서는 ⑥의 디버깅(debugging) 화면을 활용하여 각종 변수설정 및 교정(calibration)을 진행하여 프로그램 개발을 완성한다.

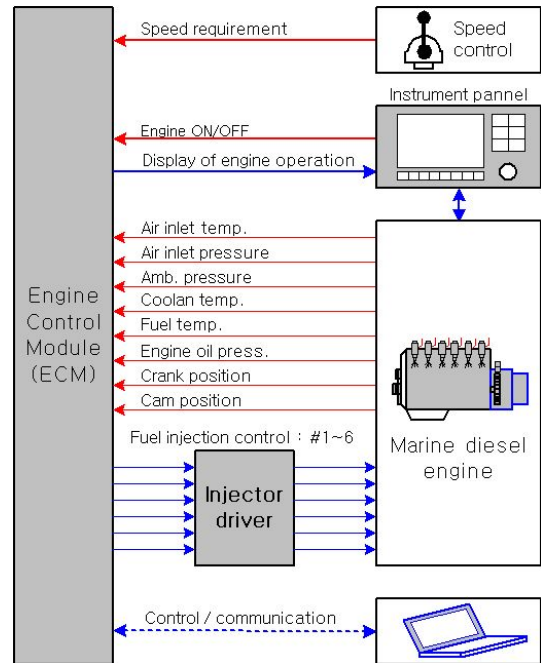


Fig. 5 Control I/O signal diagram

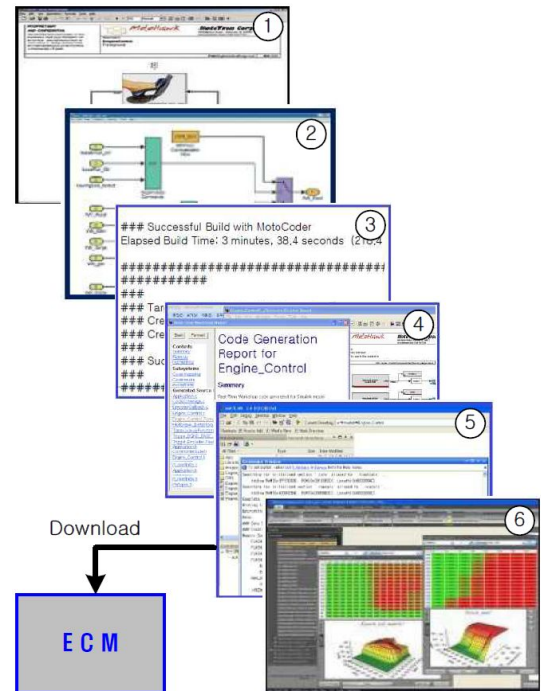


Fig. 6 Programming process of control program

3. 엔진제어프로그램의 구조

엔진제어기에 내장되는 제어프로그램 중에서 주요 제어기능을 구성하는 여러 가지 Simulink 블록 선도를 Fig. 7 ~ Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 7의 제어 프로그램 블록선도는 엔진 제어 알고리즘 전체를 나타내는 블록선도이다. 여러 가지 엔진의 구동상태(Stall, Crank, Run)에 각각 다른 제어 알고리즘을 포함하고 있다. 또한 엔진시동장치, 배기가스재순환(EGR) 등의 보조장치 제어(Acc. control) 기능도 포함되어 있다.

Fig. 8은 선박엔진이 정상적인 구동(Run) 상태일 때 연료분사량, 분사시기 등의 제어규칙을 포함하고 있다. 제어규칙(또는 제어알고리즘)은 속도제어레버(speed control lever)의 변화에 따라 설정된 엔진속도제어(Speed governing)를 위한 적합한 연료분사량(fuel mass)의 계산, 연료분사시기(Injection timing) 결정, 연료제한(Fuel limit) 등의 블록으로 구성된다.

Fig. 9는 디젤엔진의 회전속도제어를 위한 All speed governor의 제어 알고리즘이다. 제어기는 PID 제어를 사용하였다. 이 블록은 속도제어레버의 목표 회전속도(RPM setpoint)를 추종하기 위해 디젤엔진의 회전수를 제어하는 블록이다. 엔진 회전속도의 검출은 크랭크센서로부터 입력된다.

Fig. 10은 엔진 동작 상태 및 연료 제어 방식에 따라 요구되는 연료량을 결정한다. 엔진회전속도 제어규칙(All speed governor, PID control)에 따라 연료 요구량을 선택하고 감속 시 Fuel-cut 알고리즘을 적용하여 최종 요구 연료량을 계산한다. 제어규칙 및 기본연료량에 따라 엔진동작에 요구되는 연료분사시간(FPC)을 계산한다. 이때, 기본연료량(BaseFPC), All speed Gov.값을 기본으로 Cooling Fan 및 시동에 요구되는 연료량 Offset과 기본 엔진 RPM을 유지하기 위한 연료량을 계산한다. 그 다음에 감속 시 Fuel cut 알고리즘을 통해 보완되며, All speed Governor의 상태에 따라 DFC_FPC와 Base FPC를 근거로 최종적으로 엔진 구동에 요구되는 연료량(FPCDesired)을 결정한다. 연료량은 유닛인적터의 분사시간으로 결정된다.

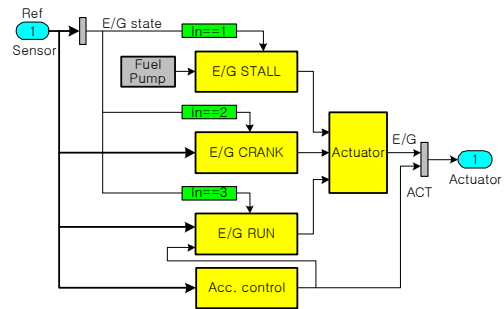


Fig. 7 Main control algorithm

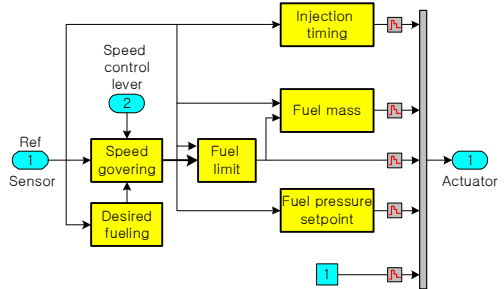


Fig. 8 Fuel injection algorithm on engine run state

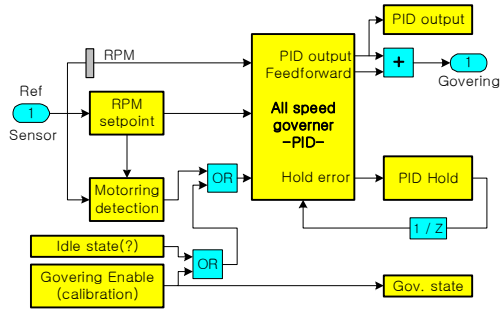


Fig. 9 Engine speed control algorithm

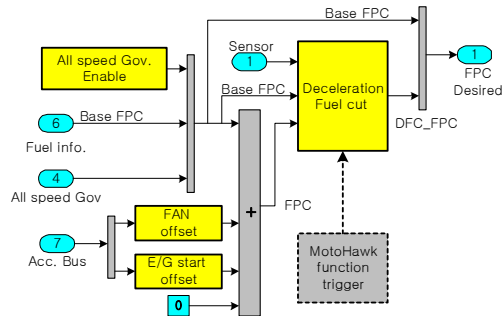


Fig. 10 Final fuel injection control algorithm

4. 실험결과 및 고찰

선박디젤엔진 엔진제어기의 제어용 프로그램의 제어성능 검증을 위한 실험결과는 Fig. 11에 나타나 있다. 엔진실험은 속도제어레버와 엔진동력계의 부하를 조절하면서 다양한 조건에서 진행하였다. 표시된 측정값은 속도제어레버의 설정값[%], 엔진회전속도, 연료분사기간(FPC)이다. 연료분사기간은 엔진제어기의 연료분사신호 출력에 의해 유닛인젝터에서 연료가 분사되는 기간(각도, degree)이다. 0~140초정도까지는 시동과 공회전 구간이다. 엔진은 시동후에 바로 공회전속도(700rpm)에 도달하며, 공회전속도를 적정하게 유지되는 것을 관찰할 수 있다. 140~200초 구간에서는 공회전저누 스텝응답특성을 관찰할 수 있다. 속도제어레버의 스텝입력(2회)에 따라 엔진의 회전속도도 단계별로 증가하는 특성을 보이고 있다. 200~590초 구간은 0~25% 부하가 증가할 때 엔진회전속도와 연료분사기간이 나와 있다. 부하가 증가하는 200~260초 정도의 구간에서 디젤엔진의 회전속도를 유지하기 위하여 연료분사기간이 증가되는 것을 관찰할 수 있다. 590~1150초 구간에서는 엔진의 정지-시동을 2회 시도하였으며, 고온시동 및 공회전속도제어 특성이 양호한 것을 알 수 있다. 1150~1500초 사이에서는 초기의 양호한 스텝응답특성, 50% 부하에서 회전속도제어 응답특성이 우수한 것을 관찰할 수 있다. 디젤엔진에 작용하는 부하가 증가하는 1190초부터는 연료분사기간이 증가되면서 엔진회전속도가 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 1570~1680초 정도의 구간은 75% 엔진부하에서 엔진회전속도제어 특성을 나타내고 있으며, 일정한 회전수를 유지하고 있다. 1720초 이후에는 속도제어레버의 하향(down) 조작에 대하여 엔진회전속도는 양호한 스텝응답특성을 보이고 있으며, 공회전 속도를 잘 유지하는 것을 관찰할 수 있다. 전체적인 특징으로는 50%, 75% 엔진부하 구간에서는 연료분사기간과 그것의 변동이 저부하의 경우보다 증가하고 있다. 이상의 결과로부터 속도제어레버의 변화에 따라 부하변동이 발생하더라도 엔진회전수제어가 적절하게 제어되고 있음을 알 수 있으며, 엔진제어기의 제어성능이 양호함을 알 수 있다.

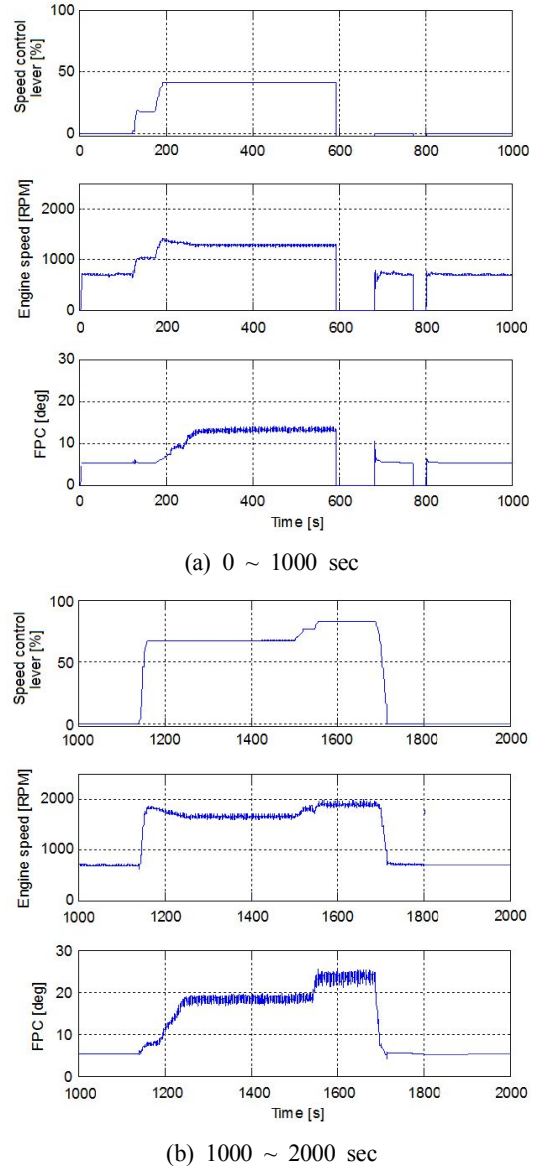


Fig. 11 Programming process of control program

4. 결론

소형선박 디젤엔진에 대한 엔진제어기의 제어 프로그램의 개발과 제어성능의 검증실험을 통하여 다

음과 같은 결론을 얻었다.

1. 소형선박 디젤엔진에 적용 가능한 엔진제어기를 개발하였다.
2. 엔진제어용 프로그램(또는 알고리즘)은 선박엔진에 적합한 엔진회전속도 제어시스템으로 설계되었다. 제어규칙은 All speed governor, PID-제어기가 사용되었다.
3. 개발된 제어용 프로그램을 내장한 엔진제어기의 제어성능을 검증하기 위하여 750Ps급 선박디젤엔진에 적용하여 실험하였다. 디젤엔진 엔진제어기의 입출력 제어신호를 분석한 결과, 속도제어레버의 다양한 목표 속도입력과 부하변동에 대하여 디젤엔진의 목표속도를 적절하게 추종하였다.

위의 결론으로부터 소형선박 디젤엔진의 엔진제어기의 제어성능이 적정한 것을 확인하였다. 향후, 소형선박에 적용하여 디젤엔진 및 엔진제어기의 제어성능을 확인할 예정이다.

후 기

이 논문은 경남과학기술대학교 연구년(2014.02.01~2015.01.31) 지원에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

1. Tsai, S. C. and Goyal, M. R., "Dynamic Turbocharged Diesel Engine Model for Control Analysis and Design", SAE paper No. 860455, pp. 1-6, 1986.
2. Lee J. K., Kim D. I., and Kim M. S., "Development of DEUI System for Diesel Engines", KSAE Autumn Conference, pp. 350-355. 2000.
3. Woodward, J. B. and Latorre, R. G., "Modeling of Diesel Engine Transient Behavior in Propulsion Analysis", Transactions - Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 92, pp. 33-49, 1984.
4. Ha J. S. and Oh S. J., "Design of Intelligent Speed Control System for Marine Diesel Engines", J. of the Korean Society of Marine Engineers, Vol. 21, No. 4, pp. 414-420, 1997.
5. Jung C. J., Han M. C., Ha I. C., Yang S. Y., Chung H. S., and Kim S. Y., "Robust Controller Design for the Speed Control of Underwater Vehicle Diesel Engine", J. of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 68-78, 2000.
6. Ryu S. H., Kim Y. T., and Kim S. S., "PID Speed Controller for Medium Speed Diesel Engine", Korean Institute of Intelligent Systems, Proceedings of KFIS Busan, Winter Annual Conference, Vol. 13, pp. 95-98, 2005.
7. So M. O., Park J. S., Lee Y. H., Yoon H. J., and Cho J. J., "Speed Control of Marine Main Diesel Engine using RCGA", Proceedings of Spring Conference, Korean Society of Marine Engineers, pp.151-157, 2003.
8. Sim H. S., "A Study for Development of a Marine Diesel Engine from a 500Ps Commercial Vehicle Diesel Engine", Journal of KSMPE, Vol. 12, No. 6, pp. 125-131, 2013.