

中速디젤 機關의 디지털 가바나 設計를 위한  
 툴 開發에 관한 研究

천 행 춘<sup>1)</sup>, 劉 永 昊<sup>2)</sup>

A Study on the Development of Tool for Digital  
 Governor Design of Medium Speed Diesel Engine

Haeng-Choon Chun , Yung-Ho Yu

Abstract

In speed control system of diesel engine the controller trends to change from mechanical governor to electronic governor due to extreme requirements of control performance for diesel engine and industrial plant. Recently, the digital governor which is able to exchange various information with other control devices and monitoring systems is applied to speed governing system of diesel engine.

This paper proposes the tool to develop the speed control algorithm on experimenting the real diesel engine. We construct the tool which is able to control speed of diesel engine on monitoring the control u, actuator position and rpm with on-line. This tool is composed with three parts which are speed estimating unit, control unit, actuator and it's driving unit. This can be also used to identify the various parameter of diesel engine like engine dead time and time constant.

This uses digital PID control algorithm first, but it'll be expanded to use a various kind of control algorithms like optimal state control and intelligent control.

Running experiment of diesel engine by the developed tool shows that the control parameter of the modeled engine to satisfy control specifications is different in starting condition and continuous running condition but almost same in different rpm. So this paper proposes that the digital governor is able to select gain when the error is inside or outside of Adjustable Error Window(AEW) to achieve good speed control performance of medium speed diesel engine.

1)한국해양대학교 제어계측공학과 석사과정 제어공학전공

2)한국해양대학교 제어계측공학과 교수

## 제 1 장 서론

디젤발전용 기관의 조속장치는 기계식 조속기(mechanical governor)에서 기계유압식 조속기(mechanical hydraulic governor)를 거쳐 현재는 전기전자식 조속기(electric-electronic governor)로 대부분 전환되고 있으며 그 전환속도가 점점 빨라지고 있다.<sup>10, 11)</sup>

디지털 조속기는 그 개발방법이 여러 가지가 있겠으나, 제어 파라미터(parameter)를 주어진 제어대상 디젤기관에 가장 적합하게 선정하기 위해서는 다양한 실제의 환경 하에서 기관 운전 실험을 거쳐야 한다. 여러 종류의 디젤 기관에 대해서 각각 가장 알맞은 디지털 조속기를 개발하기 위해서는 사용되는 기관의 종류와 환경에 따라 요구되는 제어조건을 만족하는 조속기의 파라미터를 온라인(on-line)으로 실제 기관 실험을 행하면서 조정하여 찾아낼 수 있고 또한 제어 성능을 검토할 수 있는 툴(tool)을 개발할 필요가 있다.

본 연구에서는 이러한 목적을 달성하기 위하여 윈도우즈(windows) 3.1 환경 하에서 메뉴 방식으로 운용되는 중속 디젤 발전기용 기관의 디지털 조속기 개발 툴을 우선 PID 콘트롤 알고리즘(control algorithm)을 사용하여 개발하고 각 파라미터의 값을 변경하여 가면서 실험대상기관의 무부하 운전실험을 행하였다.

## 제 2 장 기관 모델링(MODELING)과 제어 시스템 구성

### 2.1 중속 발전용 디젤 기관의 모델링

디젤기관은 연소계통과 회전계통으로 나누고 각각을 1차계통으로 모델링하는 경우가 많으나 중고속 디젤기관의 경우에는 연소기간이 상대적으로 짧으므로 이와 같이 모델링하는 것이 적당하지 않을 수도 있다. 또한 실제 비상 발전기로 사용되고 있는 많은 중소형 기관은 관성 모멘트 등을 알 수 없는 경우가 많으며 마찰계수 등을 이론적으로 구하는데는 많은 어려움이 따른다.

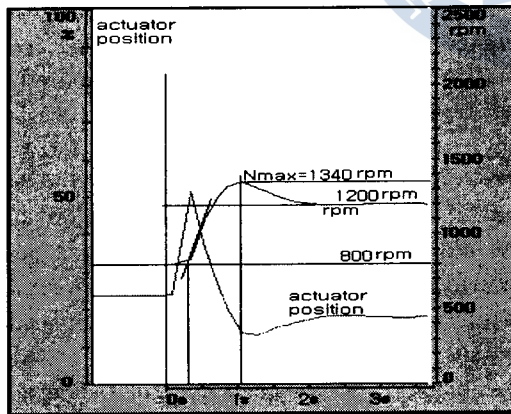


Fig. 2.1 Characteristic diagram of engine modeled with governor.

따라서 본 논문에서는 중고속 디젤기관에 적합한 모델링을 위하여 다음과 같이 비상발전기로 사용하고 있는 실제 기관을 상용화된 디지털 조속기에 의해 운전 시험을 행하여 백분율 오버슈트(percent overshoot), 지연시간(delay time), 상승시간(rise time), 정정(整定) 시간(settling time) 및 기관 데드타임(engine dead time)을 구하고 이와 유사한 응답을 주는 전달함수를 역으로 추정하는 방법을 사용하기로 한다. 모델로 사용한 디젤기관은 4 사이클(cycle) 6 기통(cylinder), 1800 rpm, 110 hp의 기관으로써 현재 상품화 되어있는 디지털 조속기를 장착하여 회전수 목표치를 800

rpm에서 1200 rpm으로 변화시켜 Fig. 2.1과 같은 응답곡선을 얻었다. 이를 근거로 하여 대상기관을 연소계통은 데드 타임을 포함한 영차 계통으로 회전계통을 1차계통으로 하여 Fig. 2.2와 같이 모델링할 수 있다.

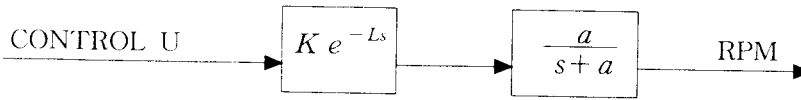


Fig. 2.2 Modeling of medium speed diesel engine system for generating.

이 시스템의 전달함수는

$$G(s) = K e^{-Ls} \frac{a}{s+a} \text{-----} (2.1)$$

기관 데드타임 L을 다음과 같이 나타내면

$$L = lT \text{-----} (2.2)$$

이 되며 이를 이산화 하면 이산전달함수 G(z)는

$$\begin{aligned} G(z) &= \frac{C(z)}{U(z)} = (1 - z^{-1}) Z \left\{ \frac{G(s)}{s} \right\} \\ &= K \frac{z-1}{z} \frac{1}{z^l} Z \left\{ \frac{a}{s(s+a)} \right\} \\ &= \frac{z-1}{z} \frac{1}{z^l} K \left\{ \frac{z(1 - e^{-aT})}{(z-1)(z - e^{-aT})} \right\} \\ &= K(1 - e^{-aT}) \frac{z^{-(l+1)}}{1 - z^{-1} e^{-aT}} \text{-----} (2.3) \end{aligned}$$

이 되고 입력을  $u(k)$ , 출력을  $c(k)$ 라 하면

$$c(k) = k_1 c(k-1) + k_2 u(k-l-1) \text{-----} (2.4)$$

단,  $k_1 = e^{-aT}$ ,  $k_2 = K(1 - e^{-aT})$  이 된다.

## 2.2 모델 기관의 파라미터 추정

모델링된 시스템의 파라미터를 추정하기 위하여 이 계통의 샘플링 타임 T는 0.015 sec(15 msec)로 하여 식(2.3)으로 주어진 이산 전달함수 G(z)는

$$G(z) = K \frac{(1 - e^{-0.015a})}{z^l (z - e^{-0.015a})} \text{-----} (2.5)$$

이 되며 실험용 조속기의 파라미터 값을 적용하여 Fig. 2.3과 같이 시뮬레이션(simulation)을 행하면 응답은 Fig. 2.4와 같다. Fig. 2.4는 Fig. 2.1과 정확히 일치하지는 않는다. 그것은 Fig. 2.1의 상용 디지털 조속기는 각 회전수마다 최적의 파라미터로 게인 조정(gain scheduling)을 하면서 제어하므로 실험기관응답과 유사한 응답을 구하였다.

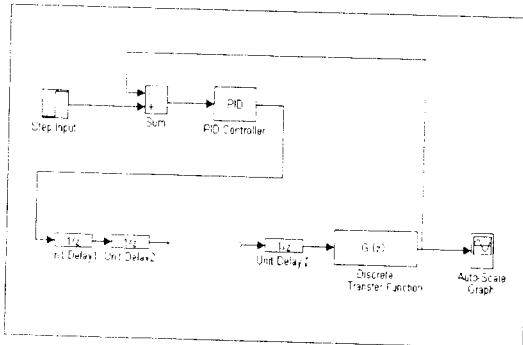


Fig. 2.3 Block diagram for simulation.

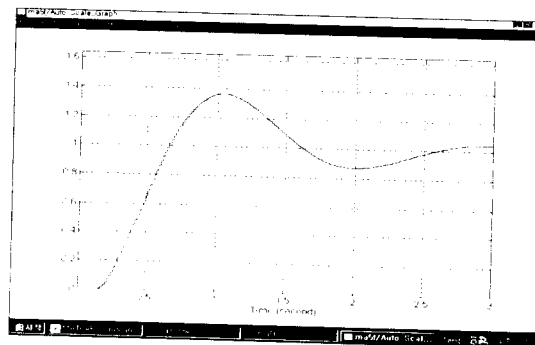


Fig. 2.4 Output diagram of simulation.

이렇게 하여 얻어진 각 파라미터는 백분율 오버슈트가 35%, 지연시간이 420 msec, 상승 시간이 380 msec, 정정시간이 2350 msec, 이고 데드타임  $L$ 이 150 msec 이었다. 또 이때의 최대 오버슈트 타임( $t_{max}$ )은 1050 msec이었다. 그리고 시정수  $T_E(1/a)$ 는 약 0.17 sec이고,  $K$ 는 1이었다.

### 2.3 제어 시스템 구성

제어 대상 기관에 적합한 파라미터와 제어성을 검토하기 위한 틀 그리고 제어 대상 기관을 포함한 제어 시스템의 전체적인 블럭선도를 그리면 Fig. 2.5와 같이 된다. 여기서  $K_p$ 는 비례계인이고,  $T_i$ ,  $T_d$ 를 각각 적분시간, 미분시간 이라고 하면  $K_i$ 는 적분파라미터로써

$\frac{K_p}{T_i}$ 이며,  $K_d$ 는 미분파라미터로  $K_p \cdot T_d$ 이다. 또  $K_{ap}$ ,  $K_a$ ,  $G_E(z)$ ,  $K_{af}$ ,  $K_r$ 는

각각 액츄에이터 콘트롤러(actuator controller) 전달함수, 액츄에이터 전달함수, 기관 전달함수, 액츄에이터 위치(position) 피드백 전달함수 및 회전수 피드백 계통의 전달함수 이다.

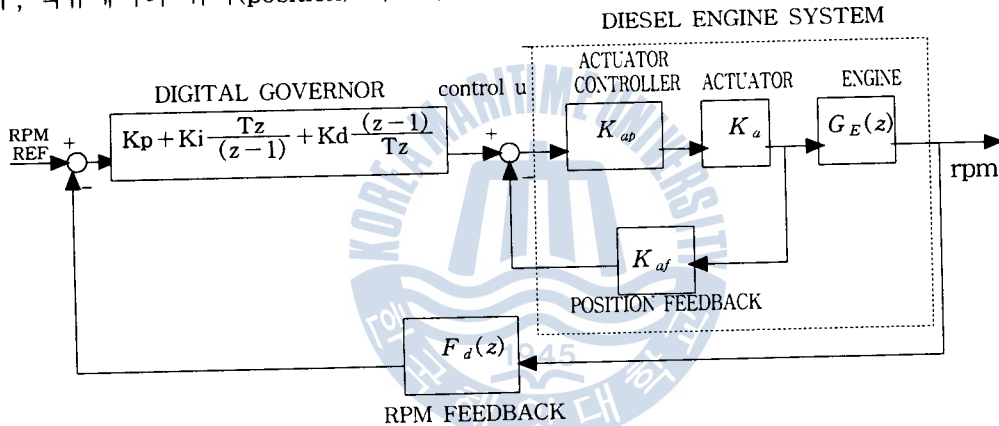
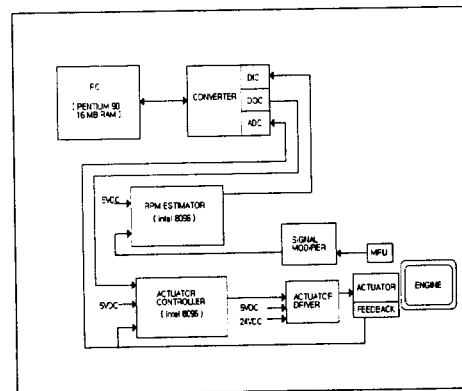


Fig. 2.5 Block diagram of tool with engine modeled.

## 제 3 장 실험 장치 와 소프트웨어(SOFTWARE)의 구성

### 3.1 실험 장치의 구성

Fig. 3.1은 틀의 구성으로써 PC( Pentium 90Mhz, main memory 16 Mb )는 디지털 제어기의 기능과 아울러 기관회전수, 연료 랙(rack) 위치(control  $u$ ) 및 디지털 가바나 출력 등의 제어성을 분석할 수 있는 각종의 데이터를 모니터링(monitoring)하고 표시(display)하는 기능을 가지고 있으며, 디지털 제어기의 파라미터, 샘플링 타임 및 시운전 방식 등은 다이얼로그 데이터 익스체인저(DDX:dialog data exchange) 방식에 의해 PC 상에서 온라인(online)으로 변경할 수 있게 구성하였다. PC에서 출력된 디지털 제어기의 출력은 신호 변환기(DOC:digital output converter)를 통하여 액츄에





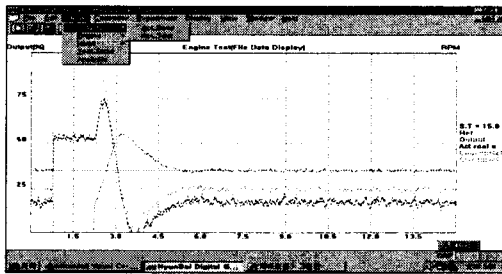


Fig. 3.3 Identification menu for actuator.

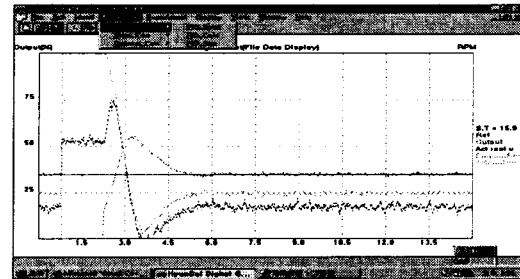


Fig. 3.4 Controller selection menu.

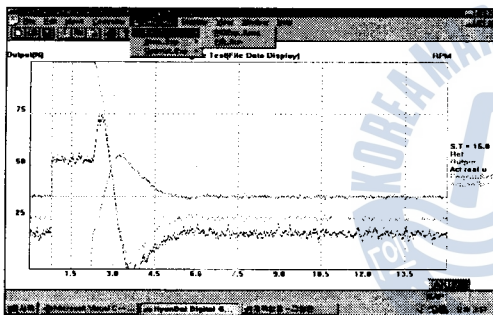


Fig. 3.5 Engine test menu.

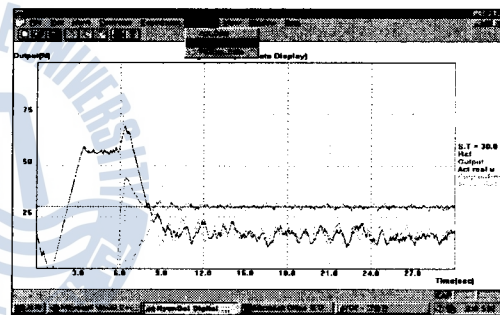


Fig. 3.6 Data display menu.

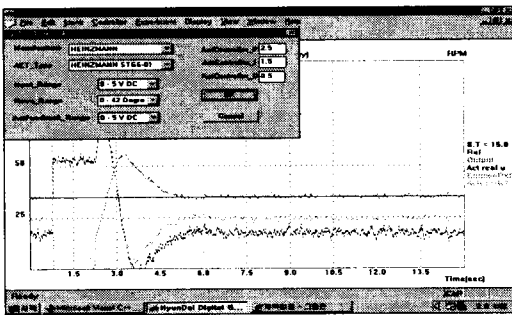


Fig. 3.7 Data input dialog box for actuator specification.

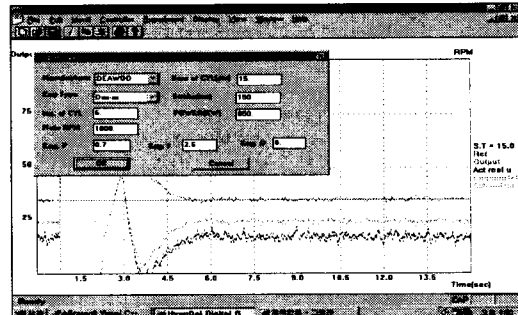


Fig. 3.8 Data input dialog box for engine specification.



## 제 4 장 실험 및 고찰

### 4.1 액츄에이터 테스트

사용한 액츄에이터는 독일의 HEINZMANN GOVERNOR CO. 의 StG 6-01 ( E6 ) 디스크 모터 타입 액츄에이터(disk motor type actuator)로써 Fig. 4.1은 목표치를 20% --> 20% UP --> 20% DOWN으로 변경하였을 때의 실험 결과이다. Fig. 4.1의 가로축은 경과 시간을 초로 나타내고 있으며 세로축은 액츄에이터의 최소 위치에서 최대 위치를 %로 나타내고 있다. 여기서 실선은 액츄에이터의 목표치를 나타내고 실선을 추종하며 잡음이 섞인 선은 액츄에이터의 피드백으로부터 얻은 실제 위치를 기록한 선이다.

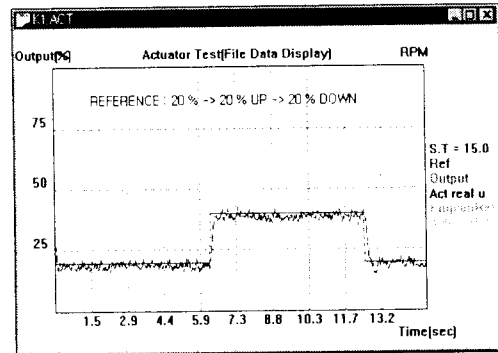


Fig. 4.1 actuator test.

### 4.2 기관 시동 테스트(STARTING TEST)

Fig. 4.2 - Fig. 4.5는 기관 시동시험의 결과로써 기관시동 명령이 입력되면 액츄에이터를 60% 로 올려놓고, 전기시동 모터에 의해 기관이 크랭킹(cranking)되면 주어진 제어기의 파라미터 에 의하여 운전된다. Kp 값을 각각 1.0, 1.5 및 Ki 값을 각각 1.5, 3.0으로 변경하여 시동을 실시한 결과이며 그림에서 보여주는 바와같이 Ki 값은 시동 시에는 오버슈트에 별로 영향을 미치지 못하나 시동후 운전 상태에 많은 영향을 주는 것을 알 수 있다. 따라서 연속운전 실험시의 제어기 파라미터 와 비교하여 시동 시에는 오버슈트가 작아지도록 Kp를 선정하고, 시동 후에는 회전수, 액츄에이터 변동 등이 작아지도록 Ki를 조정할 필요가 있다.

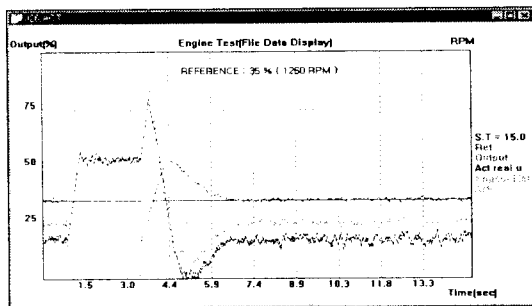


Fig. 4.2 Starting test with Kp changing, 1(Kp=1.0,Ki=2.6,Kd=0.0).

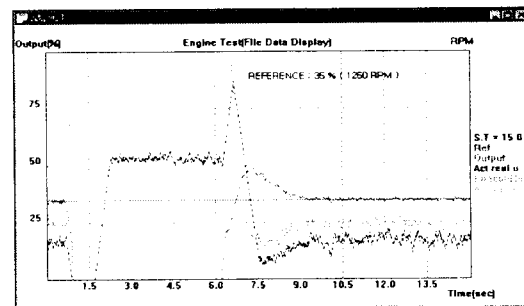


Fig. 4.3 Starting test with Kp changing, 2(Kp=1.5,Ki=2.6,Kd=0.0).

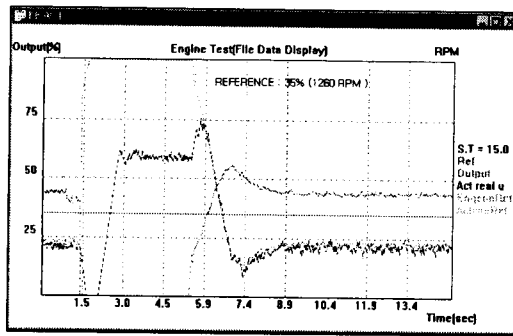


Fig. 4.4 Starting test with Ki changing,  
3( $K_p=0.7, K_i=1.5, K_d=0.0$ ).

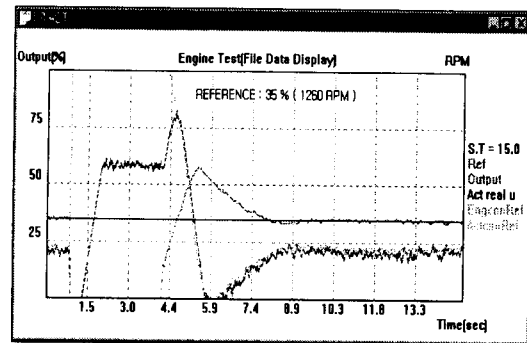


Fig. 4.5 Starting test with Ki changing,  
4( $K_p=0.7, K_i=3.0, K_d=0.0$ ).

#### 4.3 연속 운전 시험

연속운전시험은 제어기의 성능 중에서 가장 중요한 것으로써 주어진 목표치에서 가능하면 벗어나지 않고 운전되어야 하며 부하변동이나 목표치 변동에 신속히 추종해야 한다. Fig. 4.6 - Fig. 4.7은 연속운전 시험으로써 정격회전수까지 각각의 목표 회전수에서 가장 제어 성능이 좋은 제어기 파라미터로써 운전한 결과의 그래프이다. 세로축은 각각의 데이터에 대한 %를 나타내고 있다. 여기서 출력이 회전수의 경우는 정격 회전수를 50 %에 두고 위로의 오버슈트와 아래로의 언더슈트를 관찰할 수 있도록 조정하였다.

Fig. 4.7은 목표치 회전수가 정격 회전수의 67 %로써 운전하였을 때의 회전수 제어 성능 곡선이고 Fig. 4.8은 목표치 회전수가 정격 회전수인 100 %로 운전하였을 때의 회전수 그래프로 일정 회전수로 운전되기 위해서 제어기의 파라미터는 거의 동일함을 알 수 있다.

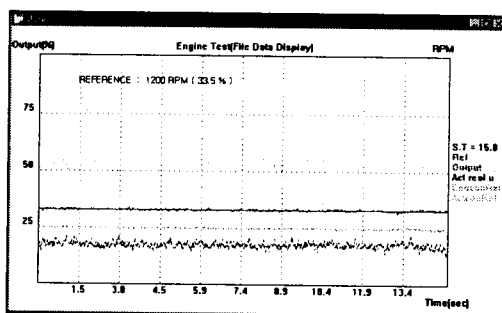


Fig.4.6 Continuous running test 1  
( $K_p=0.13, K_i=2.55, K_d=0.0$ )

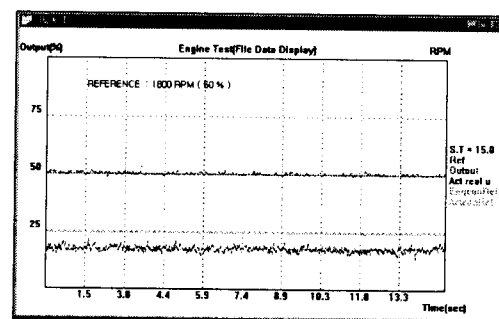


Fig.4.7 Continuous running test 2  
( $K_p=0.1, K_i=2.54, K_d=0.0$ )

#### 4.4 회전수 목표치(RPM REFERENCE) 변경 운전 실험

다음은 회전수 목표치를 변경 시켜가면서 운전실험 하였다. Fig. 4.8과 Fig. 4.9는 목표치



를 35%(1260 rpm)로 운전하다가 5%(180 rpm) 상승 시키고 다시 5%(180 rpm) 하강시키면서 이때에 회전수, 액츄에이터 컨트롤  $u$ (actuator control  $u$ ), 및 액츄에이터 위치를 그릴 것이다.  $K_p$  값을 크게 하면 응답성은 좋아지나 기관 회전수 목표치에 빠르게 추종하기 위해 액츄에이터 컨트롤  $u$ 가 심하게 진동하게되고 액츄에이터에 심한 지글링(jiggling)이 나타난다. 또  $K_i$  값이 작아지면 오프셋이 나타나고  $K_i$  값이 크면 헛팅이 나타났다.

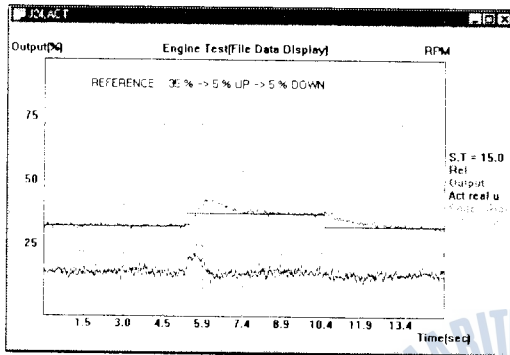


Fig.4.8 Running test with RPM reference changing 1 ( $K_p=0.1, K_i=2.6, K_d=0.0$ )

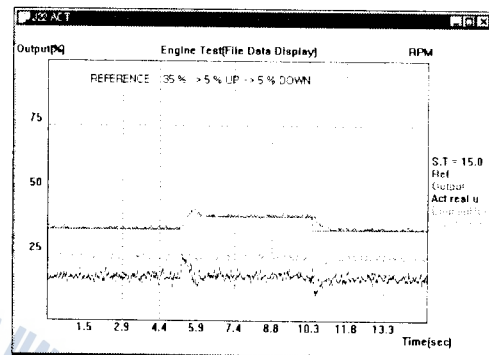


Fig. 4.9 Running test with RPM reference changing 2 ( $K_p=0.7, K_i=2.6, K_d=0.0$ ).

## 제 5 장 결론

디지털 조속기 개발을 위한 기초 연구로써 제어기 파라미터의 변화에 따라 온라인으로 기관 운전 성능을 평가할 수 있는 툴을 구축하고 툴의 타당성이 검토되기 위해 무부하에서 회전수를 변화하여가며 실 기관 실험을 행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 툴로써의 각종 파라미터 변동 및 데이터 검토 분석 등을 운전중에 쉽게 할수 있었고 온라인으로 디스플레이(display) 및 모니터링이 가능했으므로 툴의 역할을 하는 데는 손색이 없었다.

2. PID제어기의 파라미터를 변경 하면서 실험대상 기관을 실제 운전 하여 제어 성능을 검토 분석한 결과 시동시에는 오버슈트가 작도록 PID제어기의 파라미터중  $K_p$ 를 크게 유지하는 것이 좋으며( $K_p:1.8, K_i:2.6, K_d:0.0$ ), 정상운전시는 회전수를 안정하게 유지하도록  $K_p$ 를 작게 하는 것이( $K_p:0.1, K_i:2.55, K_d:0.0$ ) 좋은 특성을 나타냈다.

3. 따라서 실험용 기관의 전 운전 범위를 다 만족하기 위해서는 목표 회전수에 따라서 적절한 회전수편차를 가진 파라미터 변동용 윈도우(window)의 설정이 필요하며 이 윈도우의 크기는 목표회전수에 따라 자동으로 설정되도록 알고리즘을 바꾸면 시동 및 운전이 원활하게 이루어 질 것으로 본다.

본 연구에서는 PID 제어기만을 적용했지만 앞으로 여러 가지 알고리즘을 가진 툴로 개발해나간다면 디지털 가바나 개발을 쉽게 하고 개발비용절감, 개발 기간 단축 및 개발성공 확률을 높이라고 본다. 그러나 운전 조건에 따라 제어기의 파라미터를 자동적으로 조정(tuning)하는 방법을 추가 연구할 필요가 있으리라 본다.

## 참고문헌.

- 1) Gene F. Franklin, J. David Powell, Michael L. Workman, "Digital Control of 파라미터 Systems", ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, 1990, PP 13-95, PP 159-229
- 2) 나 종래, 문 세홍, 강민구, "인텔 i8096 A. 프로그래밍", Ohm 사, 1993,
- 3) "intel Embedded Applications", intel, 1993,
- 4) 가남사 편집부, "디지털 LS-TTL IC 데이터북", 가남사, 1991.
- 5) Charles L. Phillips, H. Troy Nagle, "DIGITAL CONTROL SYSTEM ANALYSIS AND DESIGN", PRENTICE HALL, 1995, PP 281-327.
- 6) "StG-6 GOVERNOR", HEINZMANN GOVERNOR CO., 1995,
- 7) "721 DIGITAL SPEED CONTROL FOR RECIPROCATING ENGINES", WOODWARD GOVERNOR CO., 1993.
- 8) David J. Kruglinski, KMK 정보산업연구원 역 "Inside 1.5 비주얼 C++ 프로그래밍", 도서출판 삼각형, 1996.
- 9) P.P. Kanjilal, "Adaptive prediction and predictive control", peter peregrinus Ltd., 1995, pp111-115.
- 10) 하 주식, 박 진길 외 12명, "선박용 디젤기관의 디지털가바나 및 주변기기 S/W 개발", 상공자원부, 1994.
- 11) 유 영호, "박용 디젤기관의 속도제어에 관한 연구", 한국해양대학 대학원, 1990.

