

조속기 시험 시스템의 자동화 Automation of Governor Performance Test System

이일영 · 김지웅 · 강만곤
I. Y. Lee, J. W. Kim and M. G. Kang

Key Words : Governor(조속기), Performance Test(성능 시험), Test System(시험 시스템)

Abstract : Governors control the revolution speed of heat engines such as diesel engines, steam turbines and gas turbines. Precise and prompt tests for the control performances of governors are essential both in governors' manufacturing processes and in governors' maintenance processes. In the conventional governor test systems controlled by analog type electronic controllers, the incorporation of heat engine's dynamics to the test system have been considered very difficult to realize. This study suggests a new governor test system controlled by a digital controller using a personal computer. The application of the digital controller to the test system instead of the analog type electronic controller have brought about the following advancements; (1) heat engine's dynamics could be implemented easily in the test system, (2) automatic test data acquisition both in steady state and in transient state enables us to save test time and to enhance the reliability of the tests.

1. 서 론

열기관(예: 디젤기관, 증기터빈, 가스터빈 등)의 속도 제어에 사용되는 조속기(governor)는 열기관의 속도가 목표 속도로 유지되도록 열기관으로 공급되는 에너지(연료, 고온 증기 등)를 정밀하고, 신속하게 제어해주는 역할을 한다. 이러한 조속기의 제어 성능을 조속기 제조 공정 또는 보수 공정에서 신속, 정확하게 시험하는 것은 매우 중요하다.

그러나, 종래의 조속기 성능 시험장치(아날로그식 시험장치)로는 열기관의 동특성이 고려된 실제 기관에 가까운 상황에서의 성능 시험이 곤란하였다. 따라서 실제 열기관에서 발생하는 조속기의 헌팅(hunting) 현상, 지글링(jiggling) 현상과 같은 동특성의 재현 및 계측도 곤란하였다. 그리고, 조속기의 정상상태 성능, 동적 성능 시험시의 데이터의 자동 계측 및 시험 결과의 데이터 베이스화 기술이 확립되어 있지 않아서 시험 시간의 단축, 시험 결과의 보존 및 시험의 신뢰성 확보가 매우 어려웠다.

이 연구에서는 상기와 같은 종래의 아날로그식 조속기 시험 시스템이 갖는 문제점을 개선하기 위

하여, 종래의 조속기 시험 시스템 내의 아날로그식 제어기를 디지털식 제어기(퍼스널 컴퓨터)로 대체함으로써 아래 3가지 기술 개발 목표를 달성하고자 한다.

- (1) 조속기와 열기관의 동특성을 함께 고려한, 실제 열기관 제어 시스템에 매우 가까운 상황에서의 성능 시험을 가능하게 한다.
- (2) 실제 열기관에서 발생하는 조속기의 헌팅(hunting) 현상, 지글링(jiggling) 현상과 같은 동특성의 재현 및 계측을 가능하게 한다.
- (3) 조속기의 정상상태 성능, 동적 성능 시험 데이터의 자동계측 및 시험 결과의 데이터 베이스화 기술을 확립함으로써 시험 시간의 단축, 시험 결과의 보존 및 시험 신뢰성을 향상을 도모한다.

2. 조속기의 기능 및 새로운 조속기 시험 시스템의 제안

2.1 열기관에서 조속기의 역할

Fig. 1은 실제 열기관의 속도 제어계를 블록선도로 나타낸 것이다. Fig. 1에서와 같이 열기관의 회전속도 목표치(reference speed)가 조속기에 설정(입력)되면 조속기는 소정의 제어 동작을 일으켜서 출력신호(조작 레버의 각도)를 발생시킨다. 이 출력신호에 비례한 에너지가 열기관으로 입력(공급)되

접수일 : 2005년 10월 3일
이일영(책임저자) : 부경대학교 기계공학부
E-mail : iylee@pknu.ac.kr Tel. 051-620-1612
김지웅, 강만곤 : 부경대학교 대학원 기계공학부

면 열기관의 회전속도가 출력되고, 일정 기어비 (K_g) 만큼 증폭되어 조속기 회전축을 회전시킨다. 일반적으로 널리 사용되고 있는 유압식 조속기는 그 내부에 회전속도 검출 기능을 갖는 플라이볼 (fly-ball) 기구, 비례적분(PI) 제어기능을 갖는 유압식 제어기구를 가지며, 이러한 조속기의 기능에 의하여 열기관은 운전자가 설정한 목표치 회전속도에 근접한 회전속도로 운전될 수 있다. 근래에는 보다 우수한 속도제어 성능을 갖는 디지털식 조속기가 개발되어 적용되고 있다.

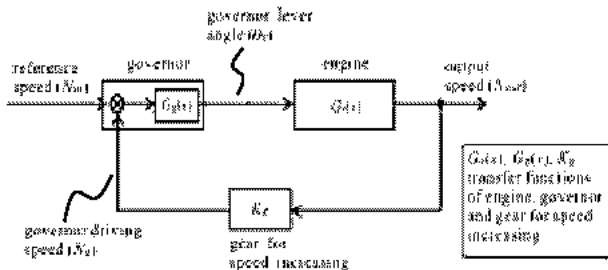


Fig. 1 Speed control system in actual heat engines

조속기의 제어 성능은 크게 나누어, (1) 정상상태 제어 성능, (2) 동적 제어 성능으로 구분할 수 있다. 정상상태 제어 성능은 기관이 일정한 속도로 회전하고 있을 때의 정상상태 속도오차 ($N_{out} \times K_g - N_{in}$)의 크기로부터 평가할 수 있다. 동적 제어 성능은 조속기를 포함한 열기관 속도 제어계의 응답속도, 속도 제어계의 안정성 즉 헌팅 및 지글링(hunting and jiggling) 등의 발생 가능성으로부터 평가할 수 있다.

상기와 같은 조속기의 제어 성능을 올바르게 평가하려면 원칙적으로는 조속기를 열기관에 직접 연결하여 기관을 정상적으로 운전하면서 평가해야 한다. 그러나, 조속기를 실제 열기관에 설치한 상태에서 조속기의 제어 인자를 변경시키면서 조속기의 속도 제어 성능을 시험하는 것은 큰 비용을 수반할 뿐만 아니라 때로는 사고를 유발시킬 수도 있으므로 실현하기가 매우 어렵다.

2.2 증래의 조속기 성능 시험장치(아날로그식)의 특징

조속기의 제어 성능을 올바르게 평가하려면, 조속기가 열기관에 직접 연결된 상태에서 평가되어야 하겠지만, 시험 수행의 어려움 때문에 Fig. 2와 같은 형태의 시험장치를 사용하여 조속기의 성능을 시험하는 것이 현재까지의 일반적인 경향이다.

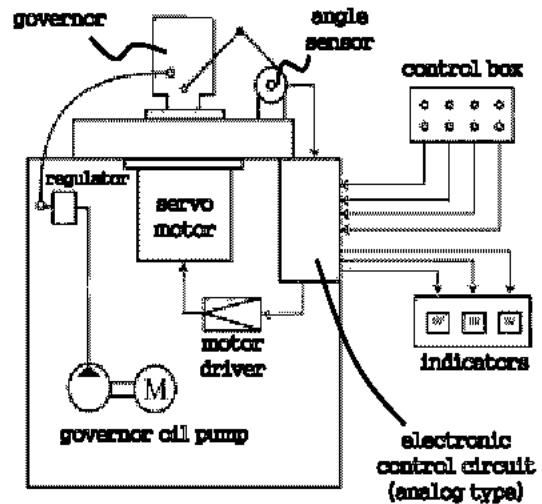


Fig. 2 Composition of a conventional governor test system

Fig. 2에 나타낸 시험장치(아날로그식)의 주요 구성 요소는 (i) 시험용 벤치, (ii) 서보 모터 및 드라이버, (iii) 조속기 시험 오일 펌프, (iv) 컨트롤 스위치 박스(모터 온/오프 스위치, 모터 초기속도 설정 단자, 열기관 제어 민감도 설정 단자, 부하외란 설정 단자 등이 설치됨), (v) 아날로그 지시기(조속기 입력 축 회전속도, 조속기 유압력, 시험 스탠드 유압력 등을 지시), (vi) 열기관 특성 모의 및 신호 처리용 전자회로 등이다^{1,2)}.

Fig. 2의 형태로 구성된 아날로그식 조속기 시험장치에서는 조속기 목표 회전속도(N_{in})의 변화, 부하 외란의 변화, 열기관 제어 민감도(sensitivity)의 변화, 조속기 드루프(droop) 설정치의 변화가 주어졌을 때의 조속기 레버 각도(θ_g) 및 기관 회전속도의 변화(N_g 로 표시됨)를 관찰할 수 있다. 그러나 Fig. 2의 형태로 구성된 아날로그식 시험장치로는 조속기가 설치되는 열기관의 특성치(예: 열기관의 응답 지연 시간, 열기관 시스템의 시정수 등) 차이에 따른 조속기 제어 성능의 차이를 시험할 수는 없다. 그리고, 조속기 성능 시험 데이터의 자동 저장 및 시험성적서 출력이 곤란하다.

2.3 개발된 조속기 성능 시험 자동화 시스템

본 연구에서 개발하는 조속기 성능 시험 시스템에서는 Fig. 1에 나타낸 열기관 속도 제어계를 Fig. 3에 나타낸 제어계로 대체함으로써, 열기관 시스템의 제어 거동을 실제 시스템과 매우 유사하게 재현하고자 한다. Fig. 1과 Fig. 3의 시스템을 비교해보

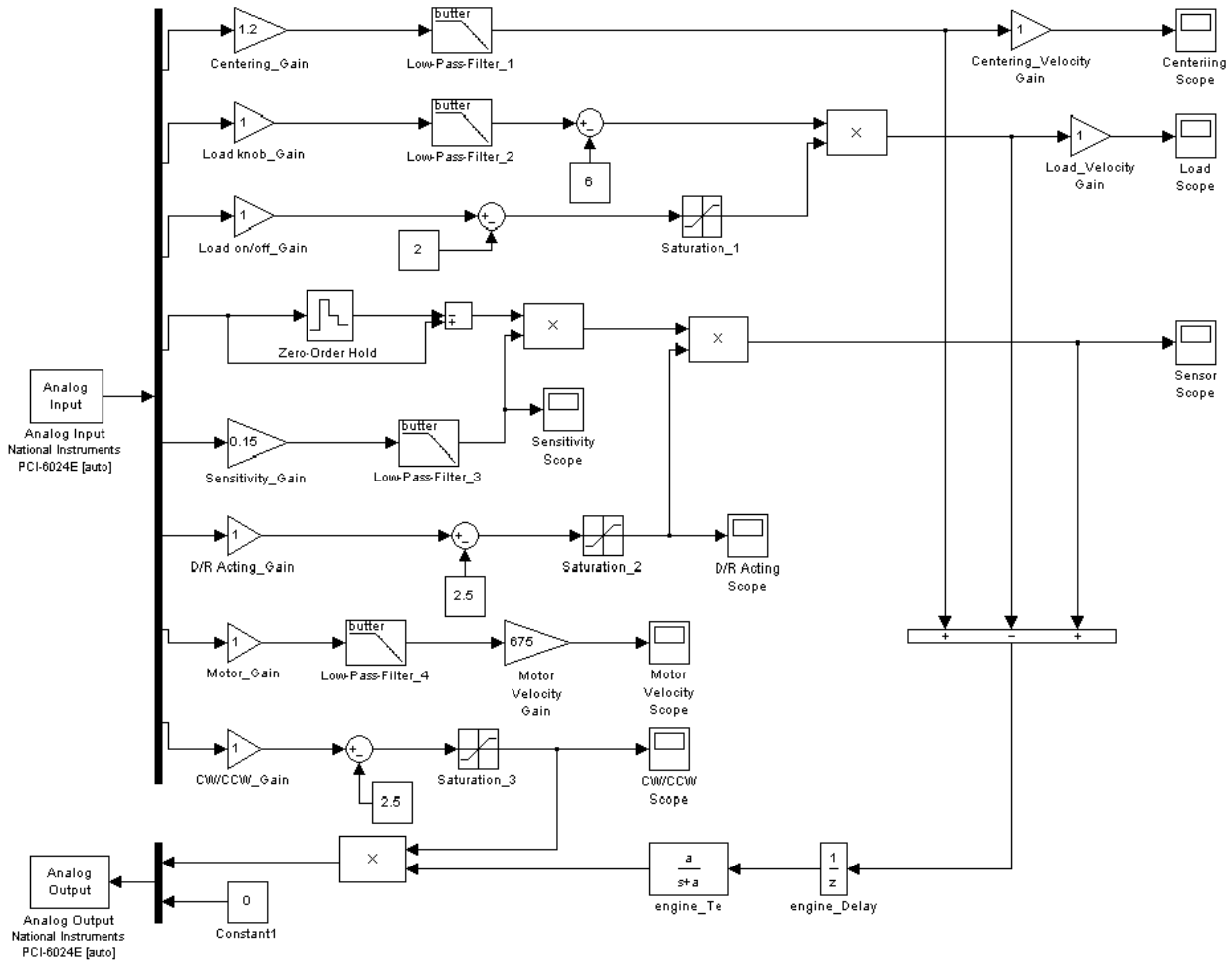


Fig. 7 Block diagram of the computer program

Fig. 5는 조속기 시험 시스템의 외관 사진이며, Fig. 6은 시험 시스템 주요 요소들의 사진을 나타낸 것이다. 이 시스템에 설치된 컨트롤 스위치 박스에 있는 단자들 가운데서 서보 모터 온/오프 스위치를 제외한 모든 단자(모터 초기속도 설정 단자, 열기관 제어 민감도 설정 단자, 부하외란 설정 단자, 부하외란 선택(on/off) 단자, 조속기 출력측 레버 각도의 설치방향(정/역) 단자, 모터 회전방향(CW/CCW) 설정 단자)들의 신호는 컴퓨터로 입력되도록 배선하였다. 따라서, Fig. 5의 시험 시스템 취급자는 종래의 아날로그식 시험장치에서와 거의 동일한 방법으로 시험을 수행할 수 있다.

4. 시험 시스템 제어용 컴퓨터 프로그램

개발한 조속기 시험 시스템은 Fig. 3에 나타낸 바와 같은 페루프계이며, 조속기로는 하드웨어가 직접 설치되고, 열기관 부분은 열기관 동력학을 모의하는

프로그램 부분과 서보 모터 드라이버 및 서보모터 부분으로 구성된다. Fig. 7에는 컴퓨터 내에서 수행되는 프로그램의 블록선도를 나타내었으며, 크게 나누어 열기관 동력학을 모의하는 부분, 각종 신호들이 시스템의 요구에 맞게 변환하는 부분, 시험 데이터를 출력/저장하는 부분들로 구성된다.

A/D변환기로부터 입력되는 신호들은 Fig. 7의 위쪽으로부터, (1) 모터 초기 회전속도 설정 신호, (2) 부하외란 입력 신호, (3) 부하외란 선택(on/off) 신호, (4)조속기 출력측 레버 각도 신호, (5) 열기관 제어 민감도(sensitivity) 설정 신호, (6) 조속기 출력측 레버 각도의 설치방향(정/역) 신호, (7) 모터의 회전속도 신호, (8) 모터 회전방향(CW/CCW) 설정 신호가 있다. D/A 변환기로 출력되는 신호에는 모터 드라이브로의 속도지령 신호가 있다.

조속기 레버 각도 센서로부터 계측되는 출력전압의 초기(시험 시스템 작동에 앞서서 컴퓨터 프로그램을 가동한 직후) 계측치가 0V가 아닌 임의의 값

일 때는 초기 입력값을 항상 0으로 맞추어 주기 위하여 영차 홀더(zero order hold)를 사용하였고, 이때의 홀딩 시간은 총 시험시간보다 충분히 긴 시간으로 설정하였다. 또한, 모터 초기 회전속도 설정 신호, 부하외란 신호 등의 신호전달 경로 4개소에는 고주파의 전기적 노이즈 제거를 위하여 저주파 통과 필터(low-pass-filter)를 설치하였다.

Fig. 7의 시스템에서 열기관의 동역학은 응답 지연 시간을 포함하는 1차계로 모델링하였다³⁾. 이 시험 시스템에서는 열기관 동역학을 소프트웨어로 설정하기 때문에, 열기관에서의 연료분사 및 연소에 관련한 응답 지연 시간, 열기관의 수확 모델, 열기관의 동특성 기술을 위한 물리 파라미터의 변화를 시험 시스템에 손쉽게 즉시 반영할 수 있는 이점이 있다.

5. 시험 데이터의 예시 및 고찰

조속기가 시험 시스템에 설치되고, 전원 투입, PC 작동 등의 시험 준비가 완료되면, 먼저 조속기 초기 속도 설정용 단자를 조작하여 대상 조속기가 제어 가능 회전속도 범위(조속기에 따라 다름) 내의 적절한 속도로 운전되도록 한다. 이 상태에서, 조속기 목표 회전속도의 변화, 부하 외란의 변화(연속, 단속적 변화), 열기관 민감도의 변화, 조속기 드루프(droop) 설정치의 변화, 열기관의 동역학적 특성치(응답 지연 시간, 시정수 등)의 변화에 따른 조속기의 제어 성능을 조속기 레버 각도 신호 및 열기관 회전속도 신호를 관찰함으로써 조사할 수 있다.

이 연구에서 개발한 조속기 성능 시험 시스템을 사용한 시험 결과의 예들을 Fig. 8~11에 나타내었다. 시험 대상 조속기는 W사가 제조한 선박기관용 유압식 조속기이며, 기관의 시정수, 응답 지연 시간 설정치 변화에 따른 서보모터의 회전속도, 조속기 출력축 레버 각도의 동적인 변화를 나타내었다.

Fig. 8은 열기관의 시정수를 1초, 응답 지연 시간을 0초로 설정했을 때의 시험 결과이다. 그림에서 시험 시작 후 약 15초 이후의 시각부터는 조속기를 1480 rpm으로 운전하였으며, 약 21.7초의 시각에서 부하 외란이 인가되고 약 36초에서 부하외란이 해제되었다. 부하외란 인가 및 해제 시에는 열기관 모의장치(서보 모터)의 회전속도 및 조속기 레버각도 신호에서 과도적인 진동이 관측되었다. 그러나 조속기의 제어 작용으로 인하여 열기관 모의장치(서보

모터)의 회전속도는 원래의 속도로 회복되어, 조속기의 기능이 올바르게 수행되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 열기관의 시정수를 0.1초, 응답 지연 시간을 0초로 설정했을 때의 시험 결과를 나타낸 것이다. 즉, Fig. 9는 Fig. 8에 비하여 열기관의 시정수가 매우 작은 조건일 때의 시험 결과이며, 이 때에는 부하외란 인가 및 해제 시에 열기관 모의장치(서보 모터)의 회전속도 응답 및 조속기 레버 각도 응답이 매우 신속하게 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 응답의 차이는 실제 열기관에서 경험하는 응답의 차이와 동일한 경향을 보이는 것이며, 타당한 결과이다.

Fig. 10에는 열기관의 시정수를 1초, 응답 지연 시간을 0.01초로 설정했을 때의 시험 결과를 나타내었다. 즉, Fig. 10은 Fig. 8에 비하여 열기관의 응답 지연 시간이 다소 존재하는 조건일 때의 시험 결과이다. 이 때에는 Fig. 8의 경우에 비하여 부하외란 인가 및 해제 시에 열기관 모의장치(서보 모터)의 회전속도 응답 및 조속기 레버 각도 응답에서 과도적 진동이 약간 증가하였으며, 열기관의 응답 지연이 시스템의 안정성 저해를 초래함을 알 수 있다.

Fig. 11은 열기관의 시정수를 1초, 응답 지연 시간을 0.1초로 설정했을 때의 시험 결과를 나타낸 것이다. 즉, Fig. 11은 Fig. 10의 경우보다도 열기관의 응답 지연 시간이 더욱 증가했을 때의 시험 결과이다. 이 때에는 열기관 모의장치(서보 모터)의 회전속도 응답 및 조속기 레버 각도 응답에서 지속적인 미세 진동 즉, 지글링이 발생하였다. 이러한 시험 결과는 응답 시간 지연이 긴 열기관 시스템에 단순한 PI 제어 기능만을 갖는 종래의 조속기를 적용했을 때에는 안정한 속도제어의 수행이 어려울 수도 있음을 보이는 사례이다.

종래의 아날로그식 조속기 성능시험 시스템에서는 조속기가 적용될 열기관의 동역학적 특성을 단지 열기관의 제어 민감도 변화에 의해서만 고려할 수 있었지만²⁾, 이 연구에서 개발한 시험 시스템에서는 이상의 시험 결과에서 본 바와 같이 열기관의 동역학적 특성을 자유롭게 변경시키는 것이 가능하여, 실제 열기관 제어 시스템에 매우 가까운 상황에서 조속기 성능 시험을 수행할 수 있음을 확인하였다.

또한, 상기 시험 결과에서 본 바와 같이 조속기의 정상상태 성능, 동적 성능 시험 데이터의 자동계측

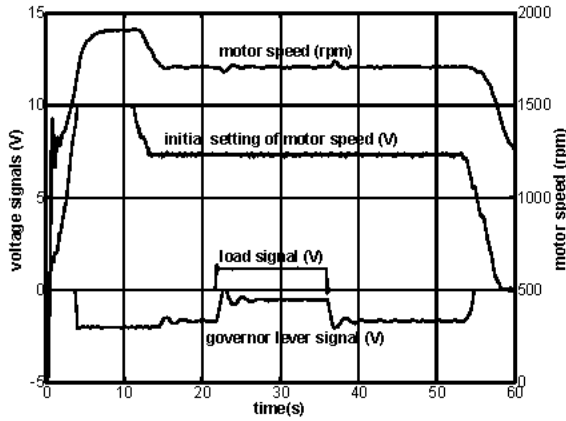


Fig. 8 Governor performances test records
(time constant: 1 s, delay time: 0 s)

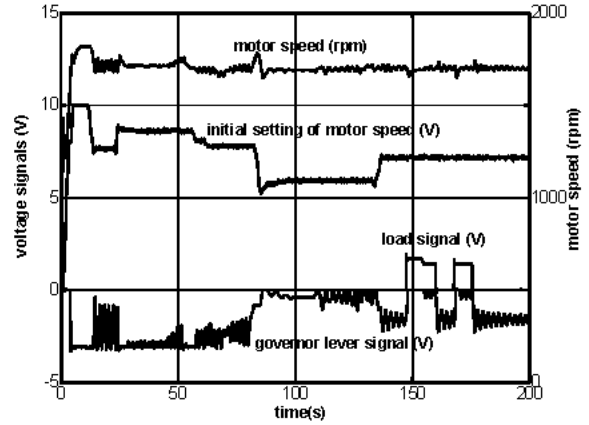


Fig. 11 Governor performances test records
(time constant: 1 s, delay time: 0.1 s)

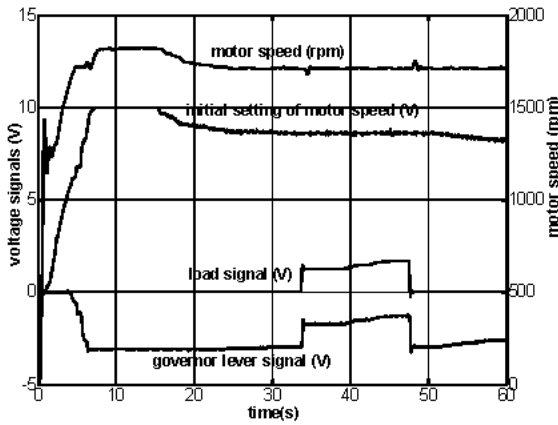


Fig. 9 Governor performances test records
(time constant: 0.1 s, delay time: 0 s)

및 시험 결과의 데이터 베이스화 기술이 확립됨으로써 시험 시간의 단축, 시험 결과의 보존이 매우 손쉽게 이루어질 수 있게 되었다.

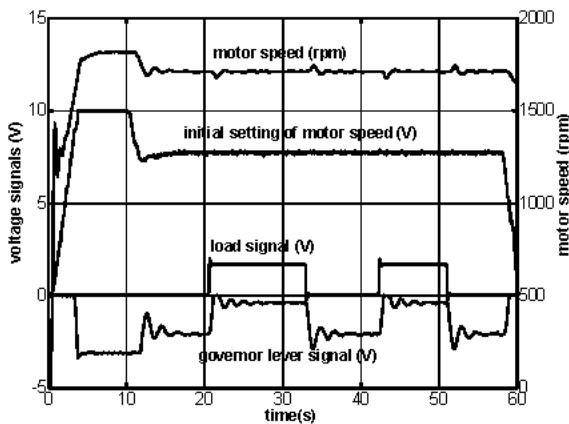


Fig. 10 Governor performances test records
(time constant: 1 s, delay time: 0.01 s)

6. 결 론

이 연구에서는 종래의 아날로그식 조속기 성능 시험 시스템을 개선한 디지털식 조속기 성능 시험 시스템을 개발하였다.

이 연구에서 얻어진 성과를 요약하면 아래와 같다.

(1) 조속기가 적용될 열기관의 동역학적 특성을 컴퓨터 프로그램에서의 계수 설정만으로 간편하게 고려할 수가 있게 되어, 실제 열기관 제어 시스템에 매우 가까운 상황에서 조속기 성능 시험을 수행할 수 있게 되었다.

(2) 실제 선박기관에서 발생하는 조속기의 헌팅(hunting) 현상, 지글링(jiggling) 현상과 같은 동특성의 재현 및 계측이 가능하게 되었다.

(3) 조속기의 정상상태 성능, 동적 성능 시험시의 데이터의 자동계측 및 시험 결과의 데이터 베이스화 기술을 확립함으로써 시험 시간의 단축, 시험 결과의 보존 및 시험의 신뢰성 향상이 가능하게 되었다.

후 기

이 논문은 2002학년도 부경대학교발전기금재단의 지원에 의하여 연구되었음

참고문헌

1. <http://www.woodward.com>
2. Woodward Governor Co., 1998, "Governor Test Stand Manual 25805", pp. 1-66

3. 정병건, 1996, "선박용 디젤기관의 로바스트 속도 제어기 설계에 관한 연구", 부산수산대학교 박사 학위논문, pp. 14-16.