196 한국자동차공학회논문집 제 4 권 제 6 호, pp.196~204, 1996.

〈논 문〉 SAE NO. 96370132

소형디젤엔진용 연료분사장치 전자타이머의 동적모델링과 제어

Dynamic Modeling and Control of Electronic Timer in Fuel Injection System of Light-Duty Diesel Engines

한 도 영,* 김 중 열**
D. Han, J. Y. Kim

ABSTRACT

The simplified dynamic models of the timer assembly in the diesel engine fuel injection system were developed. The first order system with time delay was assumed and the various parameters in this model were obtained by experimental data. These simplified dynamic models were used for the development of control algorithm of the injection timing control system.

The PI control algorithm was modified to include the anti-windup property and disturbance compensation. This modified PI control algorithm was used for the control of the injection timing. Improved control accuracy and reduced control efforts were observed.

주요기술용어 : Fuel injection system (연료분사장치), Injection timing control (분사시기조절), Dynamic model(동적모델), Electronic control(전자제어), Anti-windup(반와인드업), Feedforward(피드포워드)

1. 서 론

디젤엔진은 가솔린엔진에 비해 공기 과잉의 상태에서 연소되기 때문에 HC, CO, NOx의 배출량이 가솔린 엔진보다 일반적으로 적다. 그러나 최근 차량의 급증으로 인한 심각한 환경오염으로 차량의 배기가스 규제가 점점 엄격해지고 있으며 엔진의 성능을 향상시키고 배기물질을 저감시키기 위하여 기계제어식 연료분사장치로는 한계에 도달하여 되었으므로, 전자제어식 연료분사장치의 적용이 필연적으로 필요하게 되었다. 이미 선진국에서는 전자제어식 연료분사장치를 개발하여 사용[1)~3)]하고 있으며, 국내에서도 일부 엔진에 적용되고 있지만 매우 미흡하며 일반적으로 필요성만 인식되고 실제 개발하여 사용되고는 있지않는 실정이다.

전자제어식 연료분사장치 개발에 있어서 주요 어려움 중의 하나는 적절한 분사시기와 분사량의 제어기술[4)]이다. 간단하면서도 실용적인 제어기

* 정회원, 국민대학교
** 국민대학교 대학원 기계공학부

술의 개발은 엔진의 성능향상은 물론 배기물질을 저감시킨다. 이러한 제어기술을 효과적으로 개발하기 위해서는 연료분사장치의 각 부분에 대하여 단순하면서도 효과적인 동적 모델의 개발[5),6)]이 요구된다.

따라서 본 논문에서는 분사펌프 연료분사장치의 분사시기를 조정하는 타이머에 대하여 단순하고 효과적인 동적모델을 개발하고, 그 모델을 사용하여 ECU(Electronic Control Unit)에 적용가능하도록 효율적이고 실용적인 제어알고리즘을 개발하는 것을 목적으로 한다.

2. 타이머 구조

분배형 분사펌프는 현재 승용차 및 소형 상용차의 디젤엔진에 많이 사용되고 있는 분사펌프이다. 전자제어식 연료분사장치의 분사시기 조절기는 그림 1과 같이 진각 조절을 위한 TCV(Timing Control Valve), 롤러홀더의 회전을 위한 TP(Timing Piston), TP 위치검출을 위한 TPS (Timing Piston Sensor) 등으로 구성[7),8)]되어 있다.

TCV는 고압실과 저압실사이에 위치하여, ECU로부터 들어오는 듀티구동신호에 의해 고압실의 압력을 조절하는 솔레노이드 밸브로써, TCV에 전류가 흐르지 않으면 고압실과 저압실이 차단되어 고압실이 고압을 유지하고, 전류가 흐르면 고압실과 저압실이 연결되어 고압실 압력이 떨어지게 된다. 고압실 압력이 변화하면 TP는 스프링이 장력에 의해 변환된 고압실측 압력과 균형을 이루는 위치까지 이동하게 되고 이에 따라 롤러홀더가 회전하게 되어 선형비례적으로 분사시기가 조절된다. TPS는 TP의 변위를 측정하는 센서로서, 코어-로드와 보빈으로 구성되어 있으며 코어-로드가 보빈사이를 움직일 때 보빈에 감긴 코일의 자속이 변화되어 해당하는

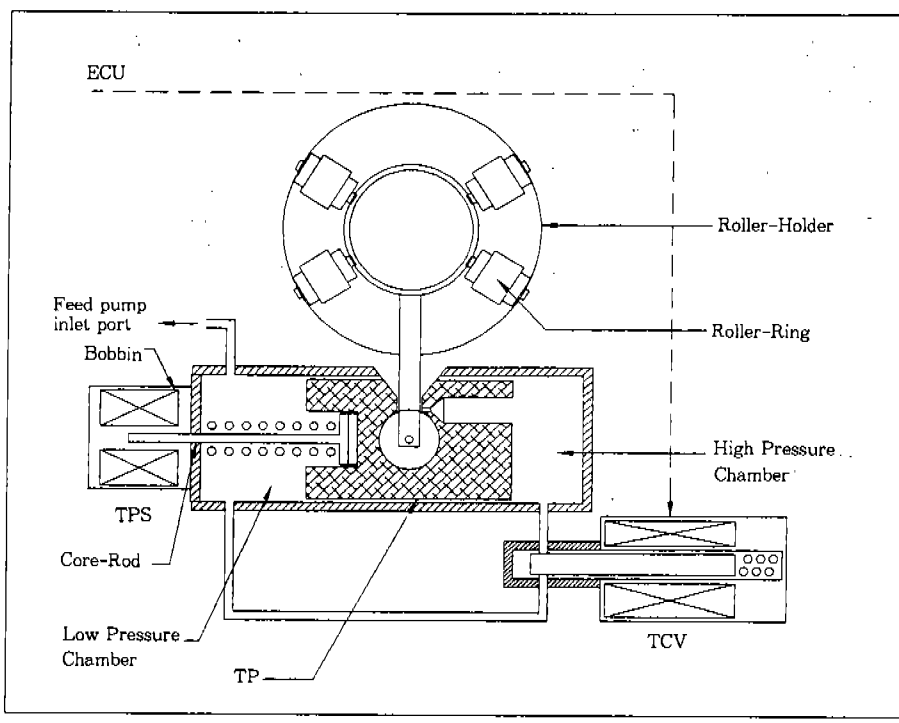

그림 1 연료분사장치의 타이머 구조

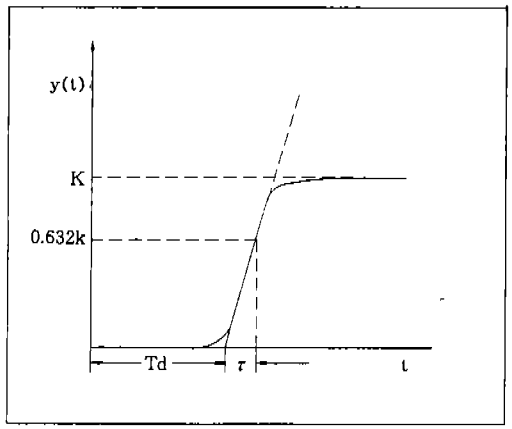

그림 2 프로세스의 반응곡선

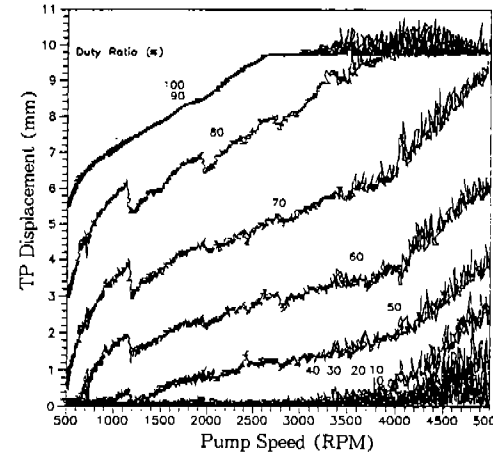

그림 3 정적 실험

전압이 출력된다.

3. 수학적 모델

대부분의 고차 시스템의 계단입력에 대한 동적 반응은 그림 2와 같이 S-형태의 곡선으로 나타나고, 이런 플랜트의 전달함수는 1차 시스템과 시간 지연으로 표현[9]될 수 있다.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = K\,\frac{e^{-T_d s}}{\tau s+1} \qquad (1)$$

여기에서, U(s)는 플랜트의 입력, Y(s)는 출력, K는 정상상태에서의 게인, T_d는 시간지연, τ는 시정수를 의미한다.

3.1 정상상태 게인

듀티비와 펌프회전수에 의해 TCV의 압력이 변화하고 이에 따라 TP의 변위가 변화함으로, 듀티비를 0에서 100%까지 매 10%마다 일정하게 유지하면서 펌프회전수를 500에서 5000rpm까지 변화시키며 TP의 변위를 측정하였다. 측정된 정적 실험자료가 그림 3에 수록되어 있다. 특정회전수에서 불연속이 보이는 것은 60Hz의 TCV 듀티구동신호와 상호작용하여 일어나는 특이현상이며, 회전수가 증가할수록 TP의 변동이 심해지는 것은 고압실내의 압력이 증가하여 TP의 반응이 예민해지기 때문이다. 이 실험자료를 토대로 구해진 듀티비와 펌프회전수에 의한 TP변위의 정상상태 게인값이 표 1에 기록되어 있다. 표 1에 기록된 이외의 듀티비에서의 정상상태 게인은 선형보간하였고 정상상태에서의 TPS의 변위와 전압사이의 관계는 센서제조회사의 자료를 사용하여 다음과 같이 선형식으로 모델링하였다.

$$V_{TPS} = -0.1867 \times Y + 2.61 \qquad (2)$$

3.2 시간지연과 시정수

펌프회전수를 1000에서 5000rpm까지 매 1000rpm마다 일정하게 유지하면서 듀티비를 0에서 100%로 계단입력하며 TP변위의 동적반응을 측정한 결과가 그림 4에 도시되어 있으며, 이 자료를 토대로 구해진 시간지연과 시정수의 값이 표 2에 기록되어 있다. 표 2에 기록된 이외의 펌프회전수에 따른 시간지연과 시정수는 선형보간하였다.

또한 TPS의 동적반응은 전자기적반응으로 시스템의 동적응답보다 매우 빠르므로, 시간지연과 시정수를 0으로 가정하였다.

표 1 정상상태 게인

Duty ratio [%]	Pump speed [rpm]	Steady state gain (K)
0	>3000	1.7772×10^(-11)×rpm^3−1.0241×10^(-7)×rpm^2+0.0001723×rpm−0.075968
	≤3000	0
10	>3800	-7.6370×10^(-10)×rpm^3+9.7603×10^(-6)×rpm^2−0.040916×rpm+56.542
	≤3800	0
20	>3800	-6.1931×10^(-10)×rpm^3+7.0973×10^(-6)×rpm^2−0.033663×rpm+46.893
	≤3800	0
30	>3500	1.7291×10^(-10)×rpm^3−1.49998×10^(-6)×rpm^2+0.00424×rpm−3.788
	≤3500	0
40	>3000	1.0169×10^(-10)×rpm^3−5.7647×10^(-7)×rpm^2+0.00095177×rpm−0.3429
	≤3000	0
50	>1180	1.6397×10^(-10)×rpm^3−1.311×10^(-6)×rpm^2+0.0038669×rpm−2.9400
	≤1180	2.832×10^(-9)×rpm^3−6.41515×10^(-6)×rpm^2+0.00498059×rpm−1.19893
60	>1170	1.8088×10^(-10)×rpm^3−1.4533×10^(-6)×rpm^2+0.00444011×rpm−2.1081
	≤1170	-1.8517×10^(-8)×rpm^3+4.45396×10^(-5)×rpm^2−0.0311263×rpm+6.83593
70	>1180	1.7183×10^(-10)×rpm^3−1.3220×10^(-6)×rpm^2+0.00431743×rpm−0.363036
	≤1180	6.9632×10^(-9)×rpm^3−2.39998×10^(-5)×rpm^2+0.029389×rpm−8.90004
80	>4500	13.0
	3850~4500	12.2
	3500~3850	7.07428×10^(-8)×rpm^3−0.000787114×rpm^2+2.91915×rpm−3599.04
	2700~3500	-1.140581^(-8)×rpm^3+0.00010559×rpm^2−0.322688×rpm+333.95
	1950~2700	0.00199801×rpm+2.63078
	1150~1950	0.00215902×rpm+2.8435
	≤1150	-6.98263×10^(-6)×rpm^2+0.0161201×rpm−3.326866
90	>4500	13.0
	3850~4500	12.2
	2700~3850	10.35
	≤2700	-6.0719×10^(-13)×rpm^4+4.3186×10^(-9)×rpm^3 -1.0987×10^(-5)×rpm^2+0.0132058×rpm+1.4585
100	>4500	13.0
	3850~4500	12.2
	2700~3850	10.35
	≤2700	-6.83866×10^(-13)×rpm^4+4.72978×10^(-9)×rpm^3 -1.16417×10^(-5)×rpm^2+0.0135897×rpm+1.17322

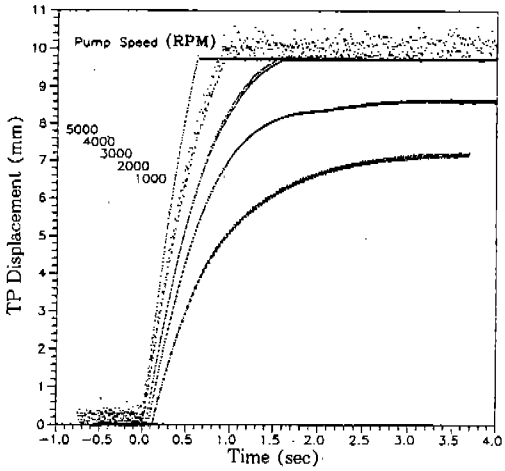

그림 4 동적 실험

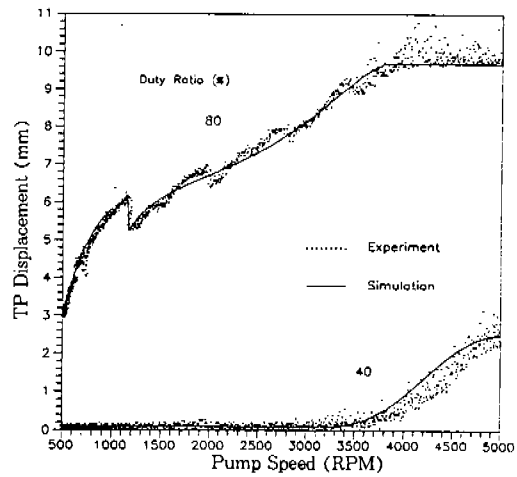

그림 5 펌프회전수에 따른 정적실험과 시뮬레이션 결과

표 2 시정수와 시간지연

Pump speed [rpm]	Time constant(τ) [sec]	Time delay(T_d) [sec]
1000	0.7311	0.110
2000	0.5611	0.078
3000	0.5599	0.048
4000	0.5564	0.021
5000	0.4416	0.010

3.3 컴퓨터 시뮬레이션

주어진 듀티비와 펌프회전수에 대하여 시간지연을 갖는 1차 시스템으로 가정한 타이머의 동적변위를 계산할 수 있는 시뮬레이션 프로그램을 개발한 후 정상상태와 과도상태에 대한 실험 값과 시뮬레이션 계산값을 비교분석하였다.

듀티비가 각각 40, 80%로 주어졌을 때 펌프회전수의 변화에 따른 정상상태에서의 변위가 그림 5에 주어져 있으며, 펌프회전수가 2000, 4000rpm으로 각각 주어졌을 때 듀티비의 변화에 따른 정상상태에서의 변위가 그림 6에 주어져 있다. 정적변위는 약 5% 오차로 잘 일치함을 볼 수 있다.

펌프회전수가 1000, 2000, 3000, 4000, 5000rpm으로 각각 주어지고, 듀티비를 0에서 100%로 계단입력시켰을 때의 변위의 시간에 대한 반응이 그림 7에 주어져 있다. 동적변위는 약 2% 오차로 잘 일치함을 볼 수 있다.

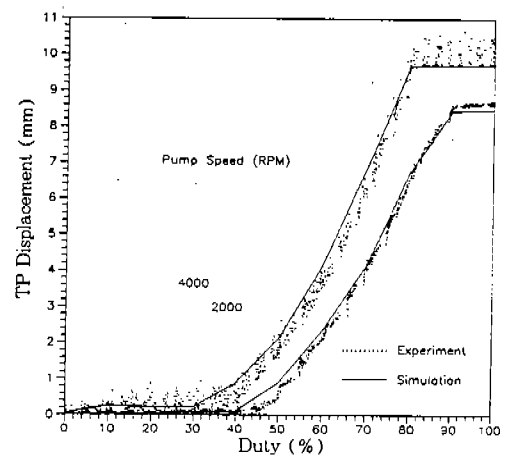

그림 6 듀티비에 따른 정적실험과 시뮬레이션 결과

4. 타이머 제어

4.1 제어 시스템

그림 8은 타이머 제어시스템의 시스템 블럭선

도를 나타낸다. 그림 8에서 보듯이 분사시기의 설정 신호는 펌프회전수와 액셀 페달의 밟음 정도에 의해서 계산되어, 수온, 에어컨 작동과 스타트 신호에 의해 보정된다. 보정된 설정치는 변위센서를 통해 읽혀진 실제 변위와 비교하여 오차신호가 생성된 후, 이를 이용하여 제어알고리즘에서 제어출력을 계산하며, 계산된 제어출력은 듀티비 신호로 전환되어 이것으로 TCV 코일의 전류를 조절함으로써 타이머의 진각시기를 제어하게 된다.

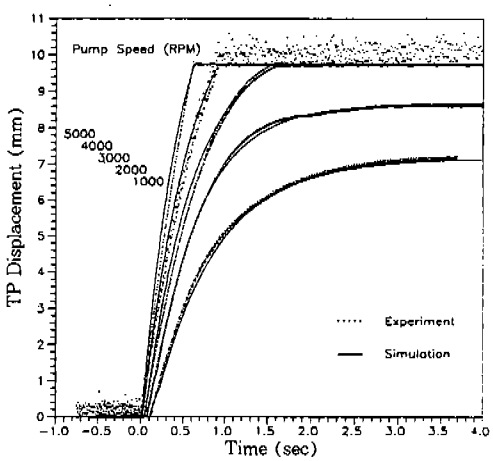

그림 7 동적실험과 시뮬레이션 결과

4.2 제어알고리즘

4.2.1 비례-적분 제어알고리즘

비례-적분 제어알고리즘은 다음의 방정식으로 표시된다.

$$C(s)=K_P\left[1+\frac{1}{T_I s}\right]E(s) \qquad (3)$$

여기에서, K_P는 비례상수, T_I는 적분시간, E(s)는 설정치와 측정치의 오차, C(s)는 제어기에서 출력되는 제어출력을 의미한다. 비례항은 오차에 비례하여 제어기의 출력을 조절하며, 적분항은 오차를 시간에 대하여 적분하여 제어기의 출력을 조절한다.

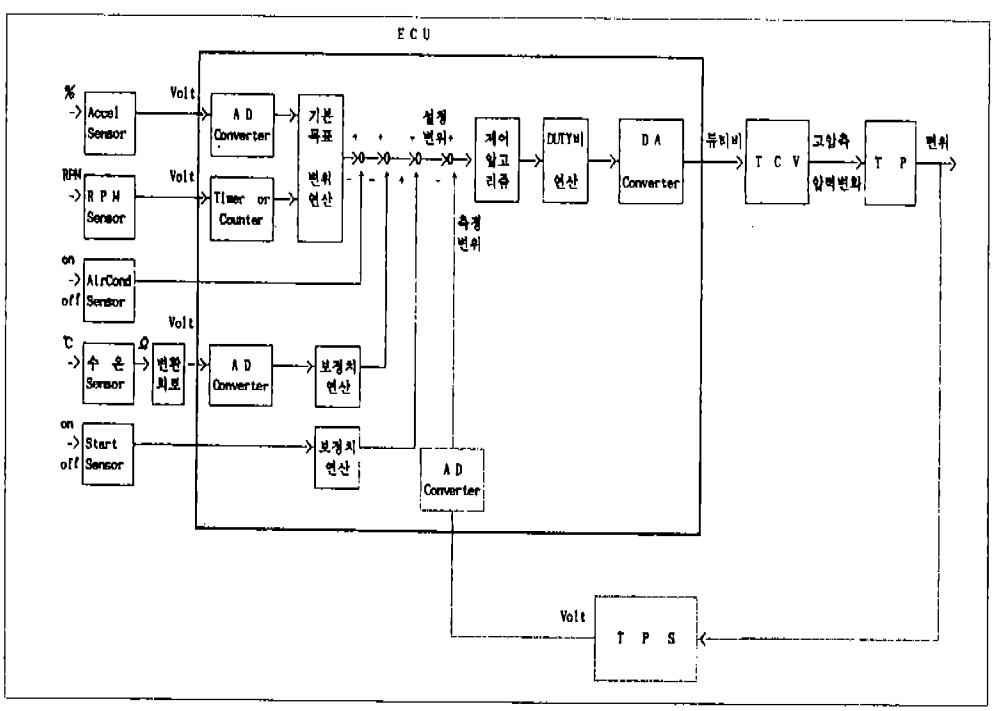

그림 8 타이머 제어시스템 블럭선도

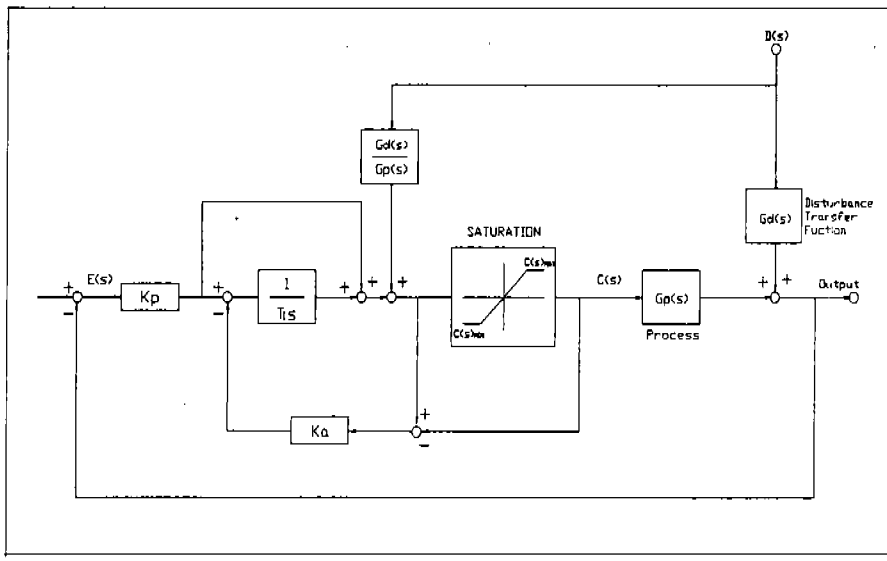

그림 9 수정 비례-적분 알고리즘 블럭선도

4.2.2 수정 비례-적분 제어알고리즘

그림 9에서 보듯이 개발된 수정 비례-적분 제어알고리즘에는 액튜에이터(Actuator) 포화에 의해 발생되는 와인드업 문제를 보완하기 위한 보정항[9]을 추가시켰으며 펌프 실내압의 변화에 의한 외란의 영향을 최소화할 수 있는 보정항[10]도 포함시켰다. 그림에서 D(s)는 외란을 나타내며, 외란의 전달함수($G_d(s)$)는 $(0.1s+1)^{-1}$로 가정하고, 프로세스의 전달함수($G_p(s)$)는 펌프 회전수 3000rpm을 기준하여 $(0.5599s+1)^{-1}$를 선정하여 사용하였다.

파라미터는 1차적으로 Ziegler-Nichols의 방법[9]을 사용하여 선정한 후, 적절한 응답을 고려하여 $K_p=K_a=3.477$, $T_I=0.143$으로 선택하였으며, 또한 제어기 하한 값과 상한 값은 듀티발생기의 포화를 고려하여 −0.57, 1.9로 각각 선택하여 사용하였다.

4.2.3 제어 결과

타이머시스템의 동적 제어반응을 보기위해 펌프회전수 3000rpm에서, 변위를 0mm에서 안정시킨 후 설정변위를 5mm로 계단변화시켜 변위와 듀티비의 동적 제어반응을 관찰한 후, 시스템이 정상상태에 도달하면 다시 설정변위를 7mm로 계단변화시켜 동적반응을 관찰하였다.

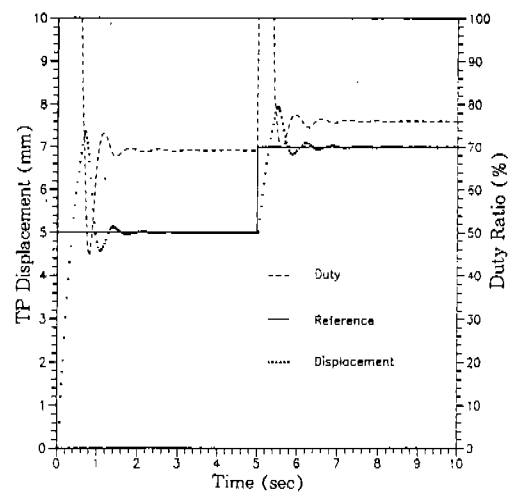

그림 10 계단입력에 대한 타이머의 반응 (비례- 적분 알고리즘)

그림 10에서 나타나듯이 타이머시스템에 비례-적분 제어알고리즘을 사용할 경우 초기 설정변위를 0에서 5mm로 계단변화시킬 때 정상상태에서의 오차는 0으로 수렴하였지만 과도상태에서의 오버슈트(overshoot) 50%, 최대시간(peak-

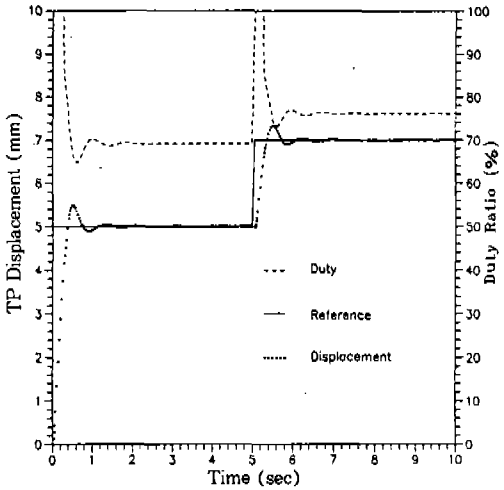

그림 11 계단입력에 대한 타이머의 반응(수정 비례-적분 알고리즘)

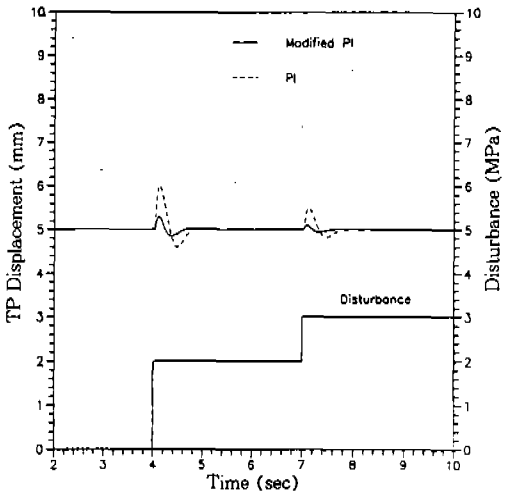

그림 12 계단외란에 대한 타이머의 반응

time) 0.8초, 1% 오차범위내 정착시간(settling time)은 1.7초가 되었고, 설정변위를 5에서 7mm로 계단변화시킬 때 오버슈트 51%, 최대시간 0.6초, 1% 오차범위내 정착시간은 1.2초가 됨을 보여주었다. 또한 듀티비의 구동특성에서 보듯이 설정변위를 0에서 5mm로 계단변화시킬 때 최대시간까지 100%의 듀티비로 계속적인 구동기포화를 보여주었고 그 때문에 안정되기까지 심한 진동현상을 보여주었으며, 반응이 안정된 후 다시 설정변위를 5에서 7mm로 계단입력할 때 듀티비는 최대시간까지 계속 포화된 후 민감하게 증감하는 과도상태를 나타내어 시스템이 불필요하게 구동되는 비효율적인 제어특성을 보여주었다.

이에 반해 수정 비례-적분 제어알고리즘을 사용할 경우 그림 11에서 보듯이 설정변위를 0에서 5mm로 계단입력할 경우 정상상태 오차가 0으로 수렴할 뿐만 아니라 과도상태에서의 오버슈트 12%, 최대시간 0.5초, 1% 오차범위내 정착시간은 0.9초로 나타났으며, 설정변위를 5에서 7mm로 계단변화시킬 때 오버슈트 15%, 최대시간 0.5초, 정착시간 0.9초로 보다 안정된 반응을 보였다. 듀티비도 0에서 5mm로 계단입력할 경우 양호한 반응을 나타내는 것은 물론 시스템이 안정화된 후 5에서 7mm로 계단입력시에도 빠르게 안정되어 불필요한 출력을 효과적으로 감소시켰으므로 비례-적분 제어알고리즘을 사용한 경우보다 적은 에너지를 쓰며 보다 정확한 제어를 함을 보여주었다.

또한 외란에 대한 강인성을 보기위해 시뮬레이션 시작 후 정상상태에 이르렀을 때, 외란을 0에서 2MPa로 계단입력하고, 다시 2에서 3MPa로 계단입력하여 시스템의 동적 제어반응을 관찰하였다. 비례-적분 알고리즘과 수정 비례-적분 알고리즘의 비교가 그림 12에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 수정 비례-적분 알고리즘은 비례-적분알고리즘을 사용했을 때의 20% 수준으로 외란의 영향을 감쇠시킴을 보여주었다.

따라서 분사시기 제어를 위해 수정 비례-적분 제어알고리즘을 사용하면 비례-적분 제어알고리즘을 사용할 경우에 비해 제어량의 변화가 작게 되어 에너지 절약과 더불어 부품의 수명을 연장시킬 수 있을 뿐만 아니라, 외란의 영향을 효과적으로 감쇠시키고 제어성능도 증진시킬 수 있는 이중의 효과를 보게 된다.

5. 결 론

소형디젤엔진용 연료분사장치 전자타이머의 제어알고리즘 개발을 통하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1) 분사시기 제어시스템을 시간지연을 갖는 1차 시스템으로 모델링한 결과, 실험결과와 잘 일치하였다.
2) 개발된 단순화된 동적모델은 보다 나은 제어알고리즘을 개발하기 위하여 매우 효과적으로 사용될 수 있다.
3) 비례-적분 제어알고리즘의 단점을 보완한 수정 비례-적분 제어알고리즘이 분사시기 제어에 보다 효과적이다.

참 고 문 헌

1. A. Maynard, "A New Electronically Controlled Injection Pump for Diesels", SAE paper 850169, 1985.
2. R. Schwartz, "High-Pressure Injection Pumps with Electronic Control for Heavy-Duty Diesel Engines", SAE paper 850170, 1985.
3. M. Shiozaki, N. Hobo, and I. Akahori, "Development of a Fully Capable Electronic Control Systme for Diesel Engines", SAE paper 850172, 1985.
4. M. Yang, and S. C. Sorenson, "Direct Digital Control of Diesel Enginers", SAE Paper 940372, 1994.
5. K. Kumar, R. r. Gaur, R. D. Garg, and M. K. Gajeudra Babu, "A Finite Difference Scheme for the Simulation of a Fuel Injection System", SAE paper 831337, 1983.
6. M. Yang, and S. C. Sorenson, "Modelling of the Dynamic Processes in and Electronic Diesel Fuel Injection System", SAE Paper 920240, 1992.
7. 川合靜男, "ディーゼル燃料噴射", 尾島甲一郎, pp. 177~220, 1963
8. T. K. Garrett, "Automotive Fuels and Fuel Systems", pp. 169~173, 1991.
9. G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, "Feedback Control of Dynamic Systems", Addison Wesley, pp. 191, pp. 196~199, 1994.
10. F. G. Shinskey, "Process Control Systems", Mcgraw-Hill, pp. 253~290, 1988.