〈연구논문〉 한국동력기계공학회지 제2권 제3호 pp. 68~73 1998년 12월

전자식 가버너를 이용한 디젤 자동차의 헌팅억제 제어에 관한 연구

A Study on Suppressed Hunting of Diesel Engine Truck Using Electronic Governor

홍 순 일 · 김 남 식

S. I. Hong and N. S. Kim

Key Words : Diesel Engine(디젤 엔진), Hunting(헌팅), Electronic Governor(전자식 가버너), Diesel Truck Drives(디젤 트럭 운전)

Abstract : The propulsion diesel engine have been widely applied with a mechanical governor to control the truck speed for a long time. But it was recently very difficult for mechanical governor to control the speed of long stock and diesel engine of truck because of hunting by dead time between fuel injection and power output.

This study is aimed to configure the modeling for performance simulation regarding to diesel truck operation which could be suppressed for hunting.

The modeling have been made on the base of dynamic characteristic such as electronic governor, injection of fuel system and operating states of diesel engine truck.

Real model system have been introduced for deciding reacting parameters and for the comparison of resulting performance in simulation. In results of simulation, we obtained items which diesel truck drives for suppressed hunting.

1. 서 론

디젤엔진은 소형의 농업기계에서 수전실의 비상 발전기 및 대형선박에 이르기 까기 여러 가지 동력원으로써 활용되고 있으며 연비가 좋은 장점도 있어 산업사회에 있어서 공헌도가 높다[1,2].

1919년 Trinks는 디젤엔진에서 원동기와 가버너의 상호작용에 관한 것을 고안하여 엔진의 속도제어에 이용되었고 Hort는 이것의 역학적인 관계를 해석하였다. 현재에는 기계식 가버너(Governor) 뿐만 아니라 유압식, 전기식, 가버너도 개발되어 사용 중에 있다[3,4].

자동차 기관의 엔진은 진동과 소음의 면에서 디젤엔진이 가솔린엔진에 뒤떨어지고 최근 배기가스의 문제도 클로즈업되고 있어 이것에 대한 연구가 요구되고 있다. 이러한 배경아래 최근 전자기술과 제어기술의 발전에 의해 디젤 자동차도 가솔린 자동차와 같이 진동, 소음, 배기가스 등의 문제를 해결하기 위해서 컴퓨터에 의한 전자제어가 도입되어 연구가 활발히 진행되고 있다[5].

디젤엔진의 연소형태는 압축행정에서 연료를 분사하여 자연발화가 일어나도록 하는 형태를 취한다. 기관의 속도제어는 엔진의 회전속도에 따라 래크위치를 제어하는 기계식 가버너가 많이 사용되고 있지만 최근 비교적 자유로운 제어규칙을 입력시킬 수 있는 전자식 가버너가 사용되고 있다[6].

디젤 자동차를 운전할 경우 회전속도의 난조현상인 헌팅이 발생하면 소음 또는 불쾌한 진동을 일으키므로 이 현상을 억제하여 운전특성 개선과 연비 개선이 필요하다. 또한 자동차의 디젤기관은 회전의 안정화를 도모하기 위해서 연료 분사펌퍼의 분사량을 가버너에 의해 래크(Rack)의 위치를 제어할 필요가 있다.

본 연구의 목적은 전자식 가버너를 사용한 디젤 자동차의 헌팅 시뮬레이션을 행하여 이것의 억제

접수일 : 1998년 9월 5일
홍순일 : 부경대학교 전기공학과
김남식 : 부경대학교 기계 · 자동차공학부

를 위한 제어방식에 대해서 검토를 행하고 실제의 차량운전에서 헌팅 발생을 억제하는 기본적인 사고를 부여하는 것이다.

본 연구에서는 헌팅을 억제할 목적으로 종래에 사용한 기계식 가버너 대신에 최근에 새로이 개발되어 비교적 자유로운 제어규칙을 갖도록 할 수 있는 전자식 가버너를 사용한 디젤자동차에서 속도제어 시스템을 모델링하고 이것에 기초하여 헌팅이 발생하는 조건을 시뮬레이션을 통하여 조사 검토 할 수 있음을 나타내었다. 이 결과에 기초하여 헌팅의 억제는 운전상태에 따라 행할 수 있는 헌팅억제 지침을 얻을 수 있음을 확인하였다.

2. 디젤 자동차의 모델링

모델로 한 차량은 日野自動車工業(株) 중형트럭 4.5톤이고, 엔진은 수냉식 4사이클 직렬6기통 직접분사 디젤엔진이고 크랭크축이 120° 회전할 때마다 6개의 실린더 중에 어떤 1개에서 폭발이 일어난다.

디젤 엔진의 토크 및 속도제어는 엔진의 회전속도나 부하에 상관없이 실린더에 흡입되는 공기량은 항상 일정하고 연료 분사량의 증감에 의해서 행하게 된다. 연료 분사량의 조정은 연료 분사펌프의 분사량 조정봉(Rack, 이하 래크로 표기한다)의 위치제어로 행하여지고 이때 래크위치를 펌프의 외부로부터 조작 제어하는 기구를 가버너라고 한다.

Fig. 1은 전자가버너를 사용한 디젤 자동차의 속도제어 시스템의 블럭선도를 나타내고 전자가버너, 연료분사 펌프, 연소과정, 토크-속도 변환부 및 마이크로 컴퓨터로 구성된다.

동작원리는 회전속도가 목표 값보다 상승하면 이것을 내리도록 분사량을 줄이는 방향으로 가버너가 래크위치를 제어하고 반대로 목표값보다 내려가면 분사량을 증가하는 방향으로 가버너가 래크위치를 제어하여 운전을 안정화한다.

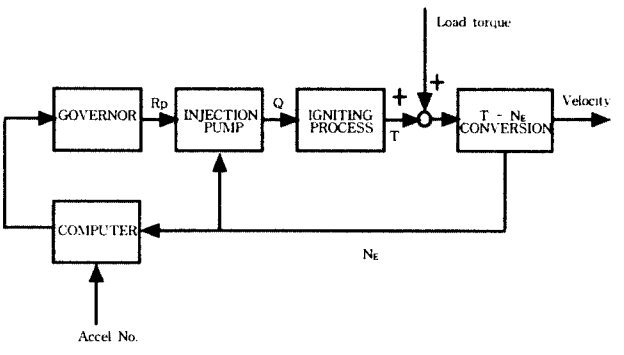

Fig. 1 Speed control system of the model truck with an electronic governor

2.1 전자식 가버너계의 모델

Fig. 2는 Botshu A형 전자식 가버너의 구조를 나타내고 동작원리는 가버너에 연결된 래크위치를 제어하여 분사량을 조정하고 래크위치의 이동은 리니어 솔레노이드형으로 된 액츄에이터에 의해서 이루어진다.

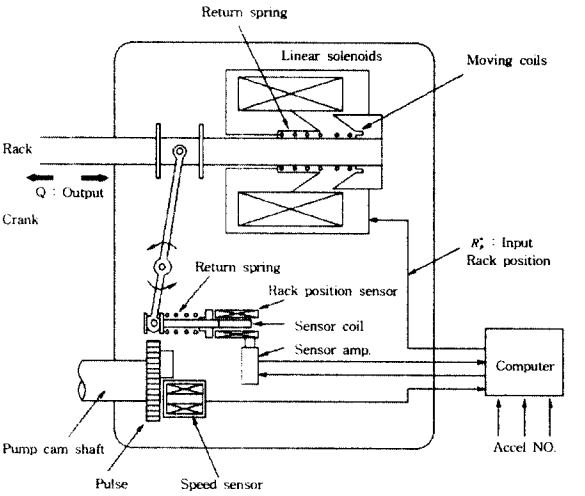

Fig. 2 Electronic governor

전자식 가버너는 이미 제품의 내부에 PID 보상회로가 있고 그것을 포함해서 측정한 스텝응답의 측정결과를 이용하여 가버너의 전달함수를 구하였다.

$$G(s) = e^{-0.01s}\frac{1436500}{s^3+150s^2+22425s+1436500} \quad (1)$$

모델링한 가버너계는 부동작 요소 + 3차계로 근사화 되고 부동작 시간은 10[ms] 이였다. 시뮬레이션 프로그램에서는 목표 분사량에서 산출하는 목표 래크위치를 이 전달함수의 입력으로 하고 그 출력이 실제의 래크 위치가 된다.

2.2 연료 분사계의 모델

목표연료 분사량 Q_0은 Map no.를 데이터로 미리 정해두고 이 맵을 제어선의 기울기라고 정의하고 이것을 변경함으로서 $N_E - Q$(회전수와 연료 분사량의 관계)는 자유롭게 정할 수 있다. 시뮬레이션에서 결정한 3종류의 맵은 Map 1 = -5mm^3/100 rpm, Map 2 = -10mm^3/100 rpm, Map 3 = -15mm^3/100 rpm이고, Map 2가 일반적으로 많이 사용되고 있는 표준형이다.

분사 전후의 동적 상태를 고려한 연료 분사계는 아래 식이 성립된다.

$$Q_T + (V/E_1)\cdot P_1 = Q_D + (V/E_2)\cdot P_2 \quad (2)$$

Q_T : 펌프압송량(정적 분사량)
Q_D : 실분사량
P_1, P_2 : 분사전후의 분사관 내압
E_1, E_2 : 분사전후 연료의 체적탄성율
V : 분사관 전체적 용량

식 (2)에서 관내압 상태를 표시하는 (V/E)P 를 분사 포텐셜 Y라고 하면 분사량은 분사 포텐셜 Y_n과 그 때 정분사 포텐셜 Y_n* 의 차에서 결정되고 n 시점의 분사과정은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$Q_{Tn} = Q(R_P, N_E) \quad (3)$$
$$Q_{OVn} = d\cdot(Y_n - Y_n*) \quad (4)$$
$$Q_{Dn} = Q_{Tn} + Q_{OVn} \quad (5)$$
$$Y_n* = Y*(R_P, N_E) \quad (6)$$
$$Y_{n+1} = Y_n - Q_{OVn} \quad (7)$$

단 Q_{OVn} : n 점에서의 오버슛 분사량, R_p, N_E는 래크 위치 및 엔진 속도, d : 실험정수
연료 분사계는 식(3)~(7)로 모델링된다.

2.3 엔진(연소과정 및 토크 발생부분) 모델링

디젤기관이 연소과정을 거쳐 1회의 폭발연소에서 연료 분사량을 Q[mm^3/st]라 하면 발생하는 토크의 평균값 T_{ED} [Kg · m]은 식 (8)로 구해진다[2].

$$T_{ED} = \alpha Q - \beta \quad (8)$$

여기서, α, β는 정수이다.
엔진의 클러치를 분리한 상태에서 크랭크축(Crank shaft)상의 관성모우먼트를 I_o [$Kg\cdot s^2$], 크랭크축의 각도변위를 θ_0 [rad] 하고 클러치가 연결되지 않은 상태에서 엔진의 순시발생 토크 T_E[$Kg\cdot m$]와 부하사이에 다음 식이 성립한다.

$$T_E = I_0 \frac{d^2\theta_0}{dt^2} \quad (9)$$

2.4 자동차 운전과정 모델링

차속 영(이상적인 운전)에서 차량이 움직이기 시작할 때까지 운전과정을 모델로 구축한다. 실제 자동차에서는 클러치 다음에 변속기(Transmission), 프로펠러 축과 구동 액셀레이터 사이에 최종 감속기가 있지만 여기서는 1 자유도의 진동계로 간략화하기 위해 회전축은 클랭크 축상에 있는 것으로 환산한다.

또한, 감속비는 1단에서 약 1 : 28이다. 자동차의 동력 전달계는 크게 세 개의 관성모멘트를 가지는 부분으로 나눌 수 있다. 이상의 디젤자동차 운전상태 모델에서 운동 방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$I_0\frac{d^2\theta_0}{dt^2} = T_E - T_C - \eta_0\left(\frac{d\theta_0}{dt} - \frac{d\theta_1}{dt}\right) \quad (10)$$

$$I_1\frac{d^2\theta_1}{dt^2} = T_C - K(\theta_1 - \theta_2) \quad (11)$$

$$I_2\frac{d^2\theta_2}{dt^2} = K(\theta_1 - \theta_2) - T_L \quad (12)$$

여기서,
I_0 : 엔진부 관성 모우먼트 8.5 [Kg · cm^2]
I_1 : 클러치부 관성 모우먼트 6.2 [Kg · cm^2]
I_2 : 차량측의 관성 모우먼트 13.6 [Kg · cm^2]
K : 구동축나사 비틀림 정수 280 [Kg · cm/rad]
T_E : 엔진발생 토크
T_C : 클러치 전달토크
θ_1 : 클러치 회전각 [rad]
T_L : 부하토크(주행저항 = 120Kg + 공기저항 = $0.193v^2$)
θ_2 : 차량축 회전각[rad]
η_0 : 클러치에 의한 손실토크의 속도변동계수 (0.01)

여기서 $K(\theta_1 - \theta_2)$는 구동축의 비틀림 토크를 나타내고 시뮬레이션 프로그램은 동력 전달계 치차 등의 구조를 고려해서 구조에 상당하는 불감대(Dead zone)를 넣어서 행한다.

3. 시뮬레이션 프로그램

Fig. 3은 헌팅 시뮬레이션 프로그램의 플로우차트를 나타내고 대형계산기(IBM-3090)에서 포트란 언어로 작성하여 실행하였다. 미분방정식은 주어진 초기 값을 넣어 Runge-Kutta 법으로 수치 계산하여 분사시점에서 엔진의 회전속도와 래크위치 등을 출력한다.

여기서 회전수와 목표연료 분사량 Q_0의 관계는 가속기의 열린 정도를 나타낸 Accel No.와 이것을 파라미터로 하는 Map no. (제어선 기울기)를 데이터로 미리 결정해 두고 이 맵을 변경함으로서

N_E – Q_C의 관계는 자유롭게 정할 수 있다.

자동차 운전과정에서 출발할 초기의 클러치 조작이 중요한 포인트가 되므로 프로그램에서는 다음과 같은 클러치 조작모델을 가정하고 시뮬레이션 하였다.

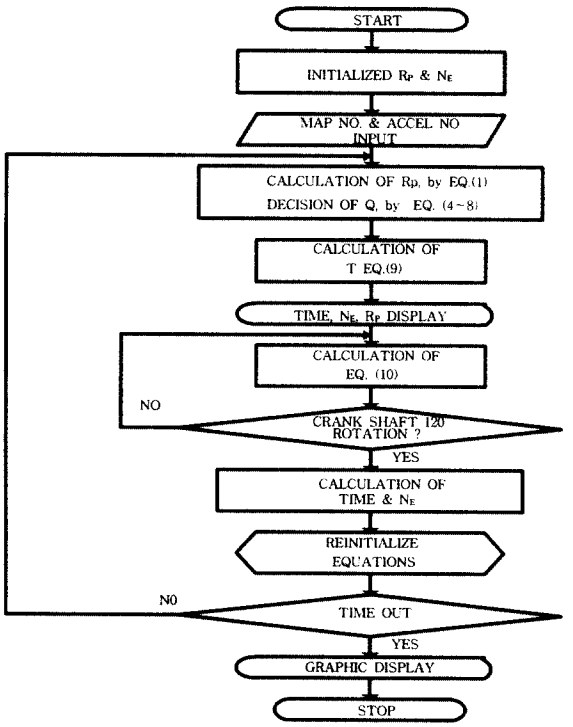

Fig. 3 Flow chart of simulation program

1) 시뮬레이션 개시 3초간은 이상적인 상태에서 가속기를 일정하게 밟는다.
2) 3초가 지나면 클러치의 전달토크를 4[Kg-m]으로 한다.
3) 3.3초가 되면 전달토크를 8[Kg-m]으로 올린다.
4) 4.0초가 되면 전달토크를 10[Kg-m]으로 올린다.
5) 엔진의 회전속도와 클러치의 회전속도가 90[%]로 일치하면 엔진과 클러치는 일체가 되어서 회전운동을 개시하게 된다.

이와 같은 클러치조작은 운전자가 클러치 패달을 3단계로 나누어서 올려 가는 조작이다.

4. 실험결과 및 검토

4.1 정지상태 운전

맵 변화에 대한 헌팅 발생에 미치는 영향에 대하여 조사한다. Fig. 4는 처음 3초간은 표준적인 제어선의 기울기 L = -10mm^3 /100 [rpm], Acel=2인 상태에서 운전하여 헌팅을 일으켜두고 그 후 제어선의 기울기를 S = -3mm^3 /100[rpm]로 변화시킨 것이다. 그 결과 기울기 S로 한 3초 후부터 헌팅의 억제가 되고 있음을 알 수 있다.

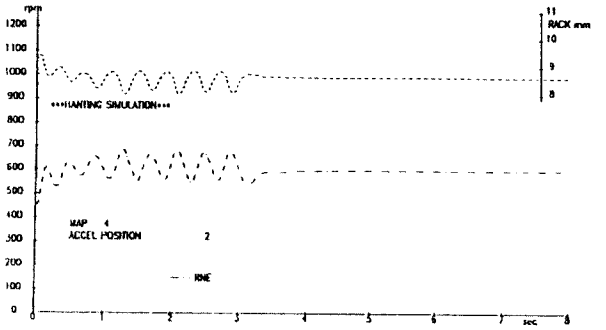

Fig. 4 Hunting simulation according to change of map L and S

Fig. 5는 제어선의 기울기를 S로 일정하게 하고 5[sec] 후에 얼마간의 외란을 인가한 상태에서 엔진의 폭발에 따라 발생 토크가 동일하게 감소하는 경우를 시뮬레이션 한 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 것과 같이 기울기의 크기가 작으면 충분한 조속성능을 얻을 수 있지만 회전속도를 일정하게 유지할 수 없다.

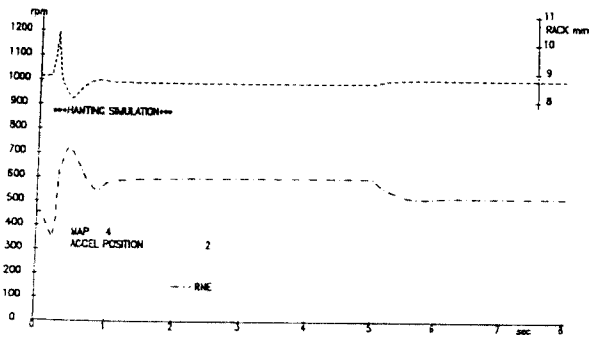

Fig. 5 Hunting simulation in map S with disturbance after 5[sec]

4.2 가변 맵에 의한 헌팅 억제의 시험과 검토

디젤 자동차의 과속과정에서 가변맵의 조작이 시뮬레이션 상에서 헌팅발생에 어떤 영향을 주는지 조사한다. 그림에서 —·—·— 는 엔진의 회전속도, ·····는 클러치의 회전속도, ——— 는 차량측의 회전속도를 나타내고, ---- 은 래크의 위치를 나타낸다.

이 시뮬레이션에 있어 운전상황은 다음 세 개의 상태로 실험한다.

1) 이상적인 상태는 제어선 기울기 L로 하여 출발하고 3초 후 S로 한다.
2) 반클러치의 상태는 제어선의 기울기 M = -5.5mm^3/100[rpm]로 운전한다.
3) 클러치가 완전히 연결된 상태에서는 주행 중에 변동하는 주행 저항 등의 부하에 충분히 대응할 수 있도록 제어선의 기울기를 L로 한다.

Fig. 6은 이상과 같이 세 개의 운전상태에서 맵을 변화시켰을 때 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 이 지침에서 헌팅억제의 효과를 확실하게 하기 위해 약 1.5[sec]까지는 헌팅을 발생시켜 두고 그 이후 상기와 같이 맵기울기의 변화를 실행시켰다.

이 결과에서 이상적인 상태 및 반클러치 상태의 구간(1.5[sec]~4.7[sec])에서는 헌팅이 잘 억제되고 있는 것을 알 수 있지만 클러치가 완전히 연결된 뒤 즉, 기울기를 표준의 L로 하고 나서 약 1[sec]간 엔진의 회전속도에 급격한 변동이 나타나고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 6에서 제시한 헌팅억제 규칙은 2)의 반클러치 까지는 잘 억제할 수 있었지만 3)의 경우 클러치가 완전히 연결된 상태의 처음 약 1[sec]간은 맵 변화의 불연속에 의한다고 생각되는 엔진회전수의 변동이 심하게 일어났다.

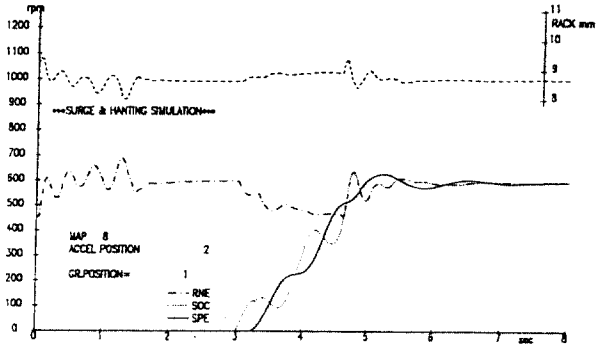

Fig. 6 Suppressed hunting by adjustable map(1)

이 부분의 개선을 위한 제어지침을 얻기 위하여 회전속도의 차가 10[rpm] 이내로 되는 것은 엔진의 분사·폭발의 타이밍 시점에서 15회 이상이었던 시점이므로 이 시점에서 맵을 변화시킨 것으로 하였다. Fig. 7은 이와 같이 맵 변화를 개선을 하여 시뮬레이션 한 결과를 나타낸다.

Fig. 6과 Fig. 7을 비교해 보면 Fig. 7에서는 클러치가 완전히 접속한 뒤에 엔진의 부자연스런 회전속도변동이 억제되고 있는 것을 알 수 있고 제시한 그림의 방식이 헌팅억제의 효과가 있음을 확인하였다.

이 검토에서 단순히 이상적인 운전 중의 헌팅를 억제하는 것만이 아니라 다양한 운전상황에 대해서 엔진 회전수의 안정화를 검토하기 위해 차속영에서의 가속 시뮬레이션모델을 구축하였고 시뮬레이션 모델에 기초하여 어떤 방법으로 헌팅의 발생을 억제할지를 검토하였다. 그 결과 운전상황에 대응해서 제어선의 기울기를 적절히 변화시키는 것으로 헌팅의 억제가 가능하게 됨과 동시에 주행시에는 변경전과 같은 차량 회전속도의 조속성능을 얻을 수 있다고 예측할 수 있다.

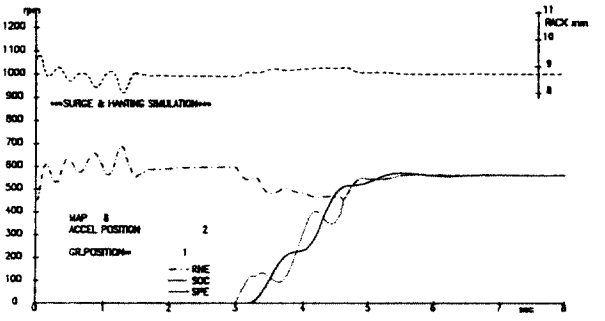

Fig. 7 Suppressed hunting by adjustable map(2)

5. 결 론

본 연구는 디젤 자동차에 있어서 전자가버너를 사용했을 때에 헌팅이 발생하는 현상을 검토하여 아래 헌팅억제 지침을 얻었다.

1) 디젤 엔진의 속도제어 시스템을 모델링하였고 시뮬레이션에서 헌팅의 발생은 제어선 기울기인 맵의 차이에 의해서 헌팅발생에 차이가 있는 것을 알 수 있다.
2) 헌팅발생 원인에 근거하여 헌팅의 억제에 대해서 검토한 결과 맵의 변화에 따라 헌팅을 억제하는 방법을 제시하였다. 그 결과 맵 제어선의 기울기를 운전상황에 맞게 변화시키면 헌팅이 억제됨과 동시에 차량 및 엔진의 회전속도의 안정화가 가능함을 알 수 있다.
3) 디젤 자동차의 헌팅 억제의 방법으로서 맵의 기울기를 운전상황에 맞게 변화시키는 기본적인 방식을 제안하였고 그것에 기초한 헌팅억제 규칙의 구축을 행할 수 있는 기본 바탕을 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. 藤澤英夜, 川井靜男, "デイ-ゼル 燃料噴射" 山海堂 pp. 15~46, 1990
2. Wellstead, P. E. and P. M. Zanker, "Application of self tuning to engine control", IEEE Control engineering series, 15, pp. 282~295, 1981
3. 田村直樹, 佐藤 勳, 岸本 功, "電子ガバナ制御パラメタ の最適化 システム の開發", 日本舶用機械學會誌, 第24卷, 第6號, pp. 26~35, 1989
4. 鎌田 實, "デイ-ゼル自動車 サジ の 研究", 東京大學 舶用機械 學位論文, 1990
5. 石原智男, "動力傳達裝置", 山海堂 pp. 2~15, 1991
6. Tsutomu Tble, Masahiro Ohba, "On the application of modern control theory to automotive engine control", IEEE Transactions on Industrial Elec. Vol. IE-34, N0. 1, Feb., pp. 35~39, 1987
7. 尾埼紀男, "自動車工學", 森北出版, pp. 182~189, 1990