

승용차의 가솔린엔진 제어에 관한 연구동향

金光培

韓國科學技術院 電氣制御研究室長



1. 서 론
2. 기본적인 엔진제어기술과 統合制御
 - 2.1 有害排氣가스
 - 2.2 燃費效率
 - 2.3 운전성능
 - 2.4 統合制御
3. Microcomputer를 이용한 엔진제어시스템
4. 결 론

1. 서 론

1970년대 미국과 일본의 대도시에서 자동차의 排氣가스에 의한 公害問題가 심각히 대두됨에 따라 미국에서는 EPA (Environmental Protection Agency)가 창설되어 본격적으로 자동차의 排氣가스를 규제하기 시작하였고 California 주의 CARB (California Air Resources Board)는 EPA보다 더욱 엄격한 排氣가스 기준을 적용하고 있으며 국내에서도 '87년 7월부터 EPA수준으로 排氣가스의 규제가 강화된다.

한편 1970년대 후반의 제 2차 오일 쇼크이후 자동차산업은 소형차화, 전륜구동화, 새로운 엔진의 개발 등 큰 변혁을 가져왔고 동시에 사회적인 요구에 부응하여 燃費效率 규제가 적용되게 되었다. 미국, 일본 등에서는 특정한 시험과정을 적용하여 燃費效率 및 排氣가스를 규제하고 있는데 미국내의 승용차에 대한 규제상황은 표 1, 표 2와 같다.

표 1. 燃費效率의 규제상황

년 도	mile/gal	km/ℓ
'78	18	7.61
'79	19	8.03
'80	20	8.45
'81~'82	22	9.3
'83~'84	24	10.15
'85~현재	27.5	11.62

표 2. 有害排氣가스의 규제상황

년 도	배 기 량 (g/mile)					
	California			미 연 방		
	HC	CO	NO _x	HC	CO	NO _x
'70	2.2	23.0	NONE	2.2	23.0	NONE
'75~'76	0.9	9.0	2.0	1.5	15.0	3.1
'77~'79	0.41	9.0	1.5	1.5	15.0	2.0
'80	0.41	9.0	1.0	0.41	7.0	2.0
'81~'84	0.41	7.0	0.7	0.41	3.4	1.0
'85~현재	0.39	7.0	0.4	0.41	3.4	1.0

이러한 燃費效率과 排氣가스 문제를 해결하기 위하여 엔진의 전자제어가 시도되었으며 반도체 기술의 발전으로 집적밀도의 상승, 연산속도의 고속화, 메모리 용량의 확대, 그리고 신뢰성의 향상 등이 이루어지고 가격이 저렴해짐에 따라 Microcomputer의 성능이 엔진제어용으로 충분히 적합하게 되었다. 또한 Microcomputer를 적용한 엔진제어 시스템은 제어의 정확성과 설계의 유연성을 증가시켰고 제어과정은 복잡하지만 전체적으로 最適化시킬 수 있게 되었다. 예를 들면 산소센서와 TWC (Three-way Catalysts : Rh, Pd, Pt)를 이용하고 엔진의 기본 제어변수를 제어함으로써 엄격한 排氣가스 규제를 극복할 수 있었고 엔진의 정상상태 시험을 통해 얻어진 最適點火時間과 最適 EGR (Exhaust Gas Recirculation)율을 사용하여 燃費效率도 개선시키게 되었다.^{7)~9)}

1977년 EST (Electronic Spark Timing) 제어만을 목적으로 개발된 최초의 엔진전자제어 시스템인 GM의 MISAR (Microprocessed Sensing and Automatic Regulation) 시스템을 비롯하여 많은 기능이 추가된 Ford의 EEC (Electronic Engine Control) 시스템 시리즈, Toyota의 TCCS (Toyota Computer Controlled System) 시스템 등이 계속해서 발표 되었는데 Ford의 EEC 시스템의 발전상황은 그림 1과 같다.^{7)~14)}

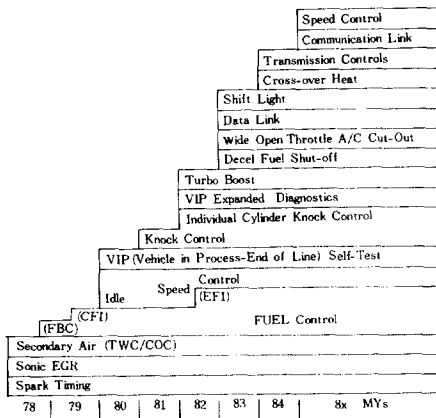


그림 1. Ford의 EEC 시스템의 발전상황

최근에는 엔진의 구조적 개선이 이루어지고 燃燒現狀 및 排氣가스에 대한 직접적인 정보를 제공하는 센서들이 개발되어 더욱 정확한 제어가 가능하게 되었다. 그러나 엔진은 시간지연을 갖는 비선형 시스템이기 때문에 정확한 모델링이 어렵고 적합한 비선형 제어이론이 많지 않기 때문에 일반적으로 Linear Perturbation 기법을 사용하여 얻어진 모델에 대하여 다변수제어 이론 등을 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다.^{15)~18)}

특히 단순한 선형모델로 취급할 수 있는 Idling時的 엔진에 대하여 ISC (Idle Speed Control)를 적용한 많은 연구가 성공적으로 수행되었다.^{19)~23)} 그러나 아직도 排氣가스를 고려한 정확한 動的 모델이 존재하지 않고, 모델링의 타당성을 입증할 만한 排氣 센서도 개발되지 못했기 때문에 이러한 분야에 대한 연구도 병행되고 있다.

2. 기본적인 엔진제어기술과 統合制御 (Coordinated Control)

일반적으로 가솔린엔진 시스템의 블록선도는 그림 2와 같은데 有害排氣가스를 줄이고 燃費效率을 향상시키며 운전성능 (Driveability)을 개선시키기 위하여 다양한 제어기술이 개발되어 단독으로 또는 조합된 형태로 사용되고 있다. 본 장에서는 기본적인 엔진제어기술과 엔진을 最適으로 제어하기 위한 統合制御 방법에 대하여 고찰해보겠다.^{1)~4), 40), 41)}

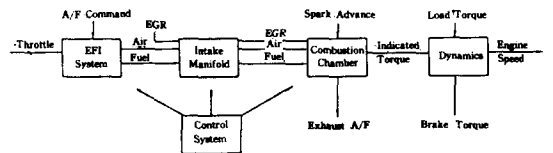


그림 2. 엔진 시스템의 블록 선도

2.1 有害排氣가스

排氣가스의 성분중에서 대기오염의 주요원인

인 HC, CO 그리고 NO_x (질소산화물)를 줄이는 것을 목적으로 A/F (Air/Fuel) 제어, EGR 제어, 그리고 2次空氣噴射制御 등이 사용된다. A/F에 따른 排氣가스의 성분은 그림 3과 같고 TWC의 A/F에 따른 변환효율은 그림 4와 같으므로 A/F를 Stoichiometry에 가까이 유지시키기 위하여 흡입공기량에 따른 적절한 연료를 噴射시키는 제어가 필요하다.

현재 대부분의 촉매변환기는 두 부분으로 나누어져 있는데 우선 TWC를 이용하여 HC와 CO의 산화, NO_x의 환원을 실행한 후 COC (Conventional Oxidation Converter)를 이용하여 HC와 CO를 더욱 산화시켜 排氣하게 된다. 燃料噴射裝置에 사용되는 計量方式에는 크게 두 종류가 있는데 흡입관의 압력으로부터 計量하는 방법과 공기유량을 검출하여 計量하는 방법이 있으며 Actuator로는 솔레노이드 밸브 또는 스

텡 모터를 사용한다. 또한 燃料噴射 방법에 따라 FBC (Feedback Carburetor), CFI (Central Fuel Injection 또는 TBI : Throttle Body Injection), EFI (Electronic Fuel Injection), 그리고 SFI (Sequential Fuel Injection) 등이 있는데 FBC는 종래의 기화기에 연료의 흐름을 제어할 수 있는 Actuator를 부착한 장치이고, CFI는 Single point 燃料噴射시스템, EFI는 Multi-point 燃料噴射시스템이며, SFI는 각 실린더에 순서적으로 燃料를 噴射하는 시스템이다.

그러나 A/F 제어를 효과적으로 수행하기 위하여 필요한 값싸고 신뢰성이 높은 排氣센서가 아직 개발되지 못하였기 때문에 현재는 산소농도를 측정하여 간접적으로 제어하는 방식이 채택되고 있다. 앞으로는 실린더 내의 연소상태를 직접 모니터링할 수 있는 실린더 압력센서를 사용하여 기존방식보다 정확한 A/F를 검출할 수 있을 것이다.²⁴⁾

EGR은 특히 NO_x 排氣량을 제어하는 효과적인 방법으로서 흡입혼합기를 묽게하기 위하여 흡기다기관으로 排氣가스의 일부를 再循環시키는 것이다. N₂와 O₂는 연소실 내의 온도가 1370°C를 초과하지 않으면 잘 결합하지 않으므로 적은 양(6~10%)의 排氣가스를 흡기 다기관으로 재순환시켜서 연소실 온도를 낮추는 방법이다. 그러나 지나친 EGR은 오히려 운전성능을 떨어뜨리고 다른 有害排氣가스를 증가시키는 경향이 있다.

2次空氣噴射制御는 적절한 양의 흡입공기를 배기관 내에 직접 가하여 TWC와 COC에서의 산화를 돕는 방법이다.

2.2 燃費效率

燃費效率을 향상시키기 위해서는 속도에 관계없이 TDC (Top Dead Center)를 통과하는 순간 최대압력이 작음하도록 點火時期를 제어하는 방법과 稀薄燃焼 (Lean-Burn)를 위한 A/F 제어방법이 사용된다.

點火時期制御는 최소의 BSFC (Brake Specific Fuel Consumption)를 위한 最適點火時期 MBT (Minimum Advance for Best Torque)

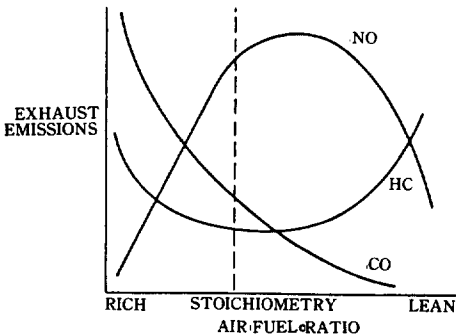


그림 3. A/F에 대한 排氣가스 성분

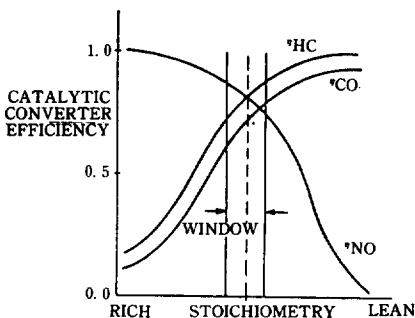


그림 4. A/F에 대한 TWC의 변환효율

에서 點火시킴으로써 제어하는 것으로서 일반적으로 MBT는 엔진의 회전수와 흡기관 내의 압력 등 엔진상태의 복잡한 함수로 주어지므로 각 엔진에 따른 MBT Map을 ROM에 기억시켜 사용하는 Look-up Table 방식이 대부분 적용되고 있다.

한편 BSFC가 최소가 되는 A/F는 Stoichiometry보다 약간 높은 값이므로 연료절약을 위해서는 稀薄燃焼 제어가 매우 효과적이며 이 경우 有害排氣가스 제어를 위해서는 그림 3에서 NO_x 곡선과 HC 곡선이 만나는 점 근처에서 A/F가 유지되도록 페루우프 제어를 할 필요가 있다. 그러나 稀薄燃焼 제어는 Knocking이 발생하기 쉬워서 운전성능이 떨어지는 경향이 있으며 이 경우의 設定 A/F에서는 TWC가 거의 효과가 없으므로 COC만으로 排氣가스 기준을 맞추어야 한다.

2.3 운전성능(Driveability)

앞에서 설명한 有害排氣가스 감소와 연료절약을 위한 제어를 행할 경우 운전성능이 떨어지게 되는데 이러한 문제를 해결하기 위하여 높은 압축비를 갖는 엔진의 개발과 흡입혼합기에 Swirl을 발생시켜 열효율을 높이려는 연구가 진행되고 있다.

엔진출력토크의 過渡應答 개선을 위해서는 Throttle Actuator가 가속 페달에 직접 연결되어 있는 기존방식으로부터 “Drive-by-Wire” 개념을 이용하여 가속 페달로부터의 신호가 제어

기로 들어가서 Throttle Actuator를 구동하는 방식으로의 연구가 수행되어 실현단계에 있다. 기존의 시스템과 “Drive-by-wire” 개념을 사용한 COMEC (Coordinated Microcomputer Engine Control) 시스템을 그림 5에 나타내었다.

2.4 統合制御

앞에서 언급한 有害排氣가스, 燃費效率, 운전성능을 위한 제어는 서로 밀접한 관계를 맺고 있으므로 적절한 제어입력을 찾기 위하여 最適制御理論을 적용하는 방법에 관하여 많은 연구가 수행되었다. 일반적으로 연료소비와 NO_x 발생을 최소화시키는 제어는 운전성능을 떨어뜨리며 엔진동작상태(속도, 부하, 온도 등)에 따라서 제어입력의 영향이 변하므로 엔진 및 동력계통에 대한 정확한 수학적 모델을 구한 후 有害排氣가스, 燃費效率, 그리고 운전성능 사이의 Trade-offs를 고려한 제어입력을 구해야 한다.

統合制御 방법에서 사용되는 모델은 Throttle, Spark Advance, A/F (또는 燃料噴射量), EGR 등의 제어변수들과 토오크, 속도, 연료소비량, 有害排氣가스, 운전성능 등의 출력사이의 靜的·動的 특성을 표현할 수 있어야 한다. 그러나 엔진은 시간지연이 있는 복잡한 비선형 시스템으로서 정확한 수학적 모델을 구하기 힘들고 다만 周波數應答 데이터로부터 非排氣변수들 (토오크, 속도 등)에 대한 動特性은 비교적 정확하게 구하고 있으나 非氣변수들(HC, CO, NO_x)등에 대해서는 최근에 와서 흡기와 燃焼現狀을 고려한 수학적 모델이 발표되기 시작하였다.

“Prabhakar”²⁵⁾ 등은 엔진제어문제를 처음으로 이론적으로 다루었는데 실험적으로 구한 정상상태의 有害排氣가스와 연료소비량을 엔진 상태변수들의 함수로써 해석적으로 표현한 후 그 수학적 모델로부터 FTP (Federal Test Procedure)에 대한 最適制御解를 구하였다. “Aulier”²⁶⁾, “Cassidy”²⁷⁾, “Dohner”^{28), 29)} 등도 유사한 과정으로 靜的의 모델을 구한 후 각각 다른 最適化技法을 사용하여 解를 구하였다.

또한 “Cassidy, Athans”^{30), 31)} 는 실험적으로

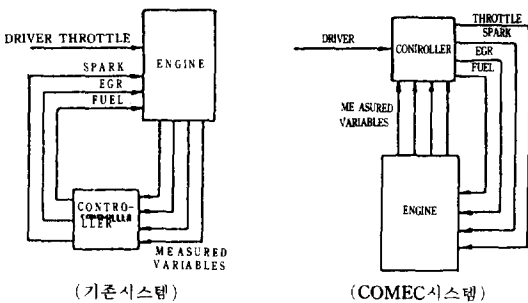


그림 5. 기존의 시스템과 COMEC 시스템의 비교

구한 정상상태 데이터들과 Linear Perturbation 기법을 사용하여 17개의 상태변수로 이루어진 모델을 구하고 그 모델에 대하여 LQ 이론을 적용한 제어를 설계하였으며 “Drive-by-Wire” 개념이 적용된 이러한 제어방식이 기존의 제어방식보다 여러면에서 우수함을 시뮬레이션을 통하여 보였다.

그러나 실제로는 센서의 정확성과 신뢰성 문제로 인하여 Kalman Filter 또는 Observer를 사용하여 측정해야 할 상태변수의 수를 줄이는 연구가 필요하다.

한편 排氣변수들과 제어변수들의 관계를 맺어주는 정확한 動的 모델을 구하려는 노력이 계속되고 있으며 그 모델에 대하여 페루우프 제어를 하기 위한 값싸고 신뢰성있는 排氣센서의 개발이 활발히 진행중에 있다.

3. Microcomputer를 이용한 엔진제어 시스템

엔진제어용 Microcomputer는 實時間 제어와

고속의 데이터 처리를 목적으로 하고 있기 때문에 고속의 I/O를 위한 Hardware와 효율적인 Interrupt 처리기능을 요구한다. 현재까지 다양한 종류의 엔진제어용 Microcomputer가 개발되어 각각 특이한 기능을 갖고 있으며 위의 목적을 달성하기 위한 Microcomputer가 계속 개발되고 있다.^{7)~12)}

최근에 개발된 Microcomputer 중에서 엔진제어용으로 적합한 것은 NEC의 μ PD78312, Motorola의 MC68HC11, 그리고 Intel의 8396 등으로 이들은 모두 최대 64Kbytes의 Address Space를 갖고 256 Bytes의 On-chip RAM과 8 kbytes의 On-chip ROM를 갖고 있다. 또한 위의 Microcomputer들은 고속의 I/O를 위한 Hardware가 독자적으로 설계되어 있으며 5~8 개 Level의 Priority를 가진다. 그 중에서도 μ PD78312가 가장 풍부한 Timer/Counter를 갖고 다양한 종류의 PWM 출력이 가능하다.³⁰⁾

본 장에서는 燃料噴射裝置를 갖춘 6-실린더 4-사이클 가솔린 엔진의 제어시스템 설계에 μ PD78312를 이용하는 방법에 대하여 고찰해 본

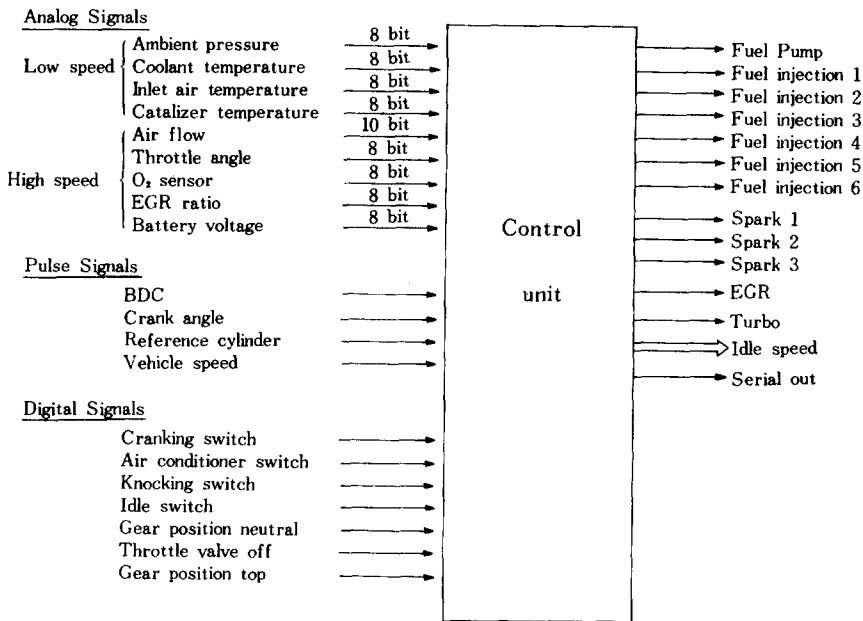


그림 6. μ PD78312의 I/O 신호들

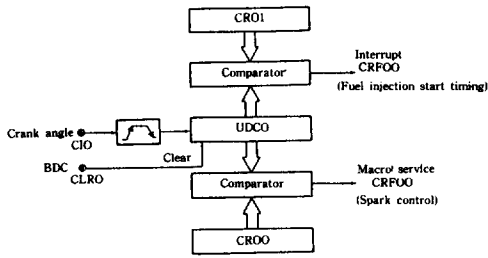


그림 7. 16 - Bit Up/Down Counter UDC0

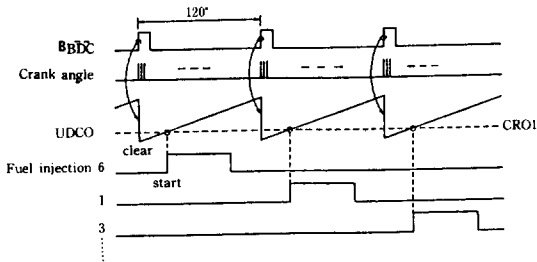


그림 8. 燃料噴射時期制御에 대한 타이밍

다. μ PD78312의 I/O 신호들은 그림 6과 같으며 여기서는 燃料噴射와 點火時期의 제어에 대해서만 구체적으로 논하겠다.

燃料噴射時期와 點火時期는 Counter UDC0에 의해 제어되는데 그림 7에서처럼 UDC0는 각 실린더에 대한 BDC (Bottom Dead Center) 신호에 의해 Clear된 후 크랭크 각도를 측정하기 위한 펄스(1pulse/1deg)를 센다. 2개의 Register CR01과 CR00는 각각 燃料噴射時點과 點火時點에 대한 크랭크 각도를 저장하고 있으며 UDC0의 내용과 CR01의 내용이 일치하면 Interrupt Request CRF01이 발생되고 software Interrupt Routine이 燃料噴射 사이클을 시작한다. 그림 8은 燃料噴射時期制御에 대한 타이밍을 나타낸다.

燃料噴射사이클의 지속시간을 제어하기 위하여 사용하는 Interval Timer TM0는 1MHz로 카운트 다운을 함으로 1 μ sec의 정확도로 제어할 수 있다.

또한 UDC0의 내용이 CR00의 내용과 일치하면 Interrupt Request CRF00가 발생되며 I/O Port 5의 High order 3bits가 點火코일을

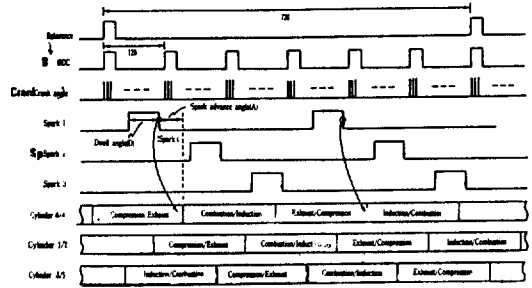


그림 9. 點火時期制御에 대한 타이밍

Energizing하기 위하여 지정된 양으로 로딩된다. 계산된 Dwell각이 끝나면 點火코일이 De-energizing되어 대응하는 點火플러그에서 스파크가 발생한다. 그림 9에 點火時期制御에 대한 타이밍을 나타내었다.

그밖에 PWM출력과 적절한 Software를 이용함으로써 스텝 모터를 구동하여 ISC를 행할 수 있고, 솔레노이드를 동작시킴으로써 EGR 밸브도 제어할 수 있다.

4. 결 론

현재 세계의 자동차산업은 有害排氣가스의 감소, 燃費效率의 향상, 그리고 차량의 운전성을 개선하기 위한 복합된 목적을 달성하기 위하여 Microcomputer를 이용한 엔진의 전자제어 시스템을 대부분의 승용차에 채용하고 있다. 또한 燃燒現狀과 排氣가스에 대한 직접적인 정보를 제공해주는 센서들이 개발되어 더욱 정확한 제어를 할 수 있게 되었다.

초기에는 엔진의 정상상태 데이터로부터 最適 點火時間과 EGR율을 구하여 Microcomputer에 기억시켜 사용하였으나 '70년대 말부터 엔진의 수학적 모델에 대하여 다변수제이론, 最適制御理論 등을 적용하는 연구가 활발히 진행되어 출력토크의 過渡應答 개선, 有害排氣 가스의 감소 등 여러면에서 우수함을 시뮬레이션을 통하여 보여주고 있다.

또한 엔진제어시스템의 Hardware가 복잡해짐에 따라 센서, Actuator를 비롯한 시스템의

신뢰성 향상을 위하여 自己診斷機能이 추가되었고 自己診斷을 위한 Expert 시스템에 AI(Artificial Intelligence)의 응용이 시작되고 있으며 앞으로 엔진제어에 중요한 도구가 될 것이다.

한편 국내에서는 아직까지 수출용 차량과 '87년부터 강화되는 排氣가스 규제에 대처하기 위하여 개발 중이거나 개발된 승용차는 대부분 외국기술에 의존하고 있으므로 독자적인 국내기술 축적이 빠른 시일안에 이루어져야 한다.

참 고 문 헌

- 1) 김광배外, "승용차의 가솔린 엔진 제어에 관한 연구", KAIST 최종보고서, 1987. 3.
- 2) 김광배, 김권호, "승용차의 전자용용기술의 개발", KAIST 최종보고서, 1986. 3.
- 3) 김광배, "자동차의 전자제어기술의 현황과 전망", 대한전기학회지, Vol. 35, No. 2, 1986.
- 4) 하인중, "승용차용 Engine 제어에 관한 기술현황", '86한국 자동차제어 학술회 논문집, Vol. 1, pp. 404-408, 1986.
- 5) 田地一行, "公害問題", 自動車技術, Vol. 39, No. 6, pp. 724-731, 1985.
- 6) 秦好孝, 保坂明夫, "ガソリンエンジン電子制御の動向", 自動車技術, Vol. 38, No.2, pp.165-171, 1984.
- 7) T.J. Flis, "The Use of Microprocessors for Electronic Engine Control", IEEE Trans. Ind. Elec., Vol. IE-30, No. 2, pp. 75-87, 1983.
- 8) J. Bereisa, "Applications of Microcomputers in Automotive Electronics", IEEE Trans. Ind. Elec., Vol. IE-30, No. 2, pp. 87-96, 1983.
- 9) T. W. Evernham, D. G. Guetersloh, "MISAR-The Microprocessor Controlled Ignition System", SAE Paper No. 780666, 1978.
- 10) J. Lappington, L. A. Caron, "Chrysler Microprocessor Spark Advance Control", SAE Paper No. 780117, 1978.
- 11) D. F. Hagen, D. F. Wilkie, "EEC-IV Tomorrow's Electronic Engine Controls Today", SAE Paper No. 820900, 1982.
- 12) H. Ono, et al., "Toyota's New Microprocessor-Based Engine and Transmission Control System", SAE Paper No. 830423, 1983.
- 13) J. H. Hoard, R. D. Berry, "New State-of-the-Art in Engine controls", SAE Paper No. 810061, 1981.
- 14) Y. Hata, M. Asano, "New Trends in Electronic Engine Control-To the Next Stage", SAE Paper No. 860592, 1986.
- 15) M. Athans, "The Role of Modern Control Theory for Automotive Engine Control", SAE Paper No. 780852, 1978.
- 16) L. M. Sweet, "Control Systems for Automotive Vehicle Fuel Economy : A Literature Review", ASME J. of Dyn. Sys., Meas., and Control, Vol. 103, pp. 173-180, 1981.
- 17) L. M. Sweet, "Automotive Applications of Modern Control Theory", SAE Paper No. 820913, 1982.
- 18) 秦好孝, 鷲野翔一, "エンジンにおける電子制御の将来展望", 自動車技術, Vol. 40, No. 9, pp. 1091-1097, 1986.
- 19) 長谷川俊平, "電子燃料噴射とアイドルリング", 自動車技術, Vol. 37, No. 9, pp. 986-991, 1983.
- 20) T. Takahashi, et al., "A Simple Model for Idle Speed Control", SAE Paper No. 850291, 1985.
- 21) H. P. Geering, "Coordinated Control of Air, Fuel, and Spark in an IC-Engine", Proc. American Control Conf., pp. 1422-1426, 1985.
- 22) R. L. Woods, "Development of an Idle Speed Control System for Spark-Igintion Engines", Proc. American Control Conf., pp. 1445-1450, 1985.
- 23) C. E. Baumgartner, et al., "Robust Multivariable Idle Speed Control", Proc. American Control Conf., pp. 258-265, 1986.
- 24) R. J. Hosey, J. D. Powell, "Closed Loop, Knock Adaptive Spark Timing Control Based on Cylinder Pressure", ASME J. of Dyn. Sys., Meas., and Control, Vol. 101, pp. 71-76, MAR., 1979.
- 25) R. Prabhakar, S. J. Citron, R. E. Goodson, "Optimization of Automotive Engine Fuel Economy and Emissions", ASME J. of Dyn. Sys., Meas., and Control, pp. 109-117, JUN., 1977.
- 26) J. E. Aulier, J. D. Zbrozek, P. N. Blumberg, "Optimization of the Automotive Engine Calibrations for Better Fuel Economy-Methods and Applications", SAE Paper No. 770076, 1978.
- 27) J. F. Cassidy, "A Computerized On-Line Approach to Calculating Optimum Engine Calibrations", SAE Paper No. 770078, 1978.
- 28) A. R. Dohner, "Optimal Control Solution of the Au-

- tomotive Emission-constrained Minimum Fuel Problem with a Driveability", ASME Pub. 78-WA/DSC-25, 1978.
- 29) A. R. Dohner, "Optimal Control Solution of the Automotive Emission-Constrained Minimum Fuel Problem", *Automatica*, Vol. 17, No. 13, pp. 441-458, 1981.
- 30) J. F. Cassidy, "A State Variable Model for Engine Control Studies", GM Research Lab., ET-180, 1978.
- 31) J. F. Cassidy, M. Athans, W. H. Lee, "On the Design of Electronic Automotive Engine Controls Using LQ Control Theory", *IEEE Trans. Auto. Cont.*, Vol. AC-25, No. 5, pp. 901-912, 1980.
- 32) R. A. Grimm, R. J. Bremer, S. P. Stonestreet, "GM Microcomputer Engine Control System", SAE Paper No. 800053, 1980.
- 33) S. J. Sobolak, "Simulation of the Ford Vehicle Speed Control System", SAE Paper No. 820777, 1982.
- 34) 守田榮之, 松本直勝, "機関-負荷系シミュレーションモデル", 日本機械學會論文集(B編), Vol. 49, No. 438, pp. 526-532, 1983.
- 35) W. W. Yuen, H. Servati, "A Mathematical Engine Model Including the Effects of Engine Emissions", SAE Paper No. 840036, 1984.
- 36) F. B. Gerhard, M. Matsuda, K. Funabashi, "Advanced Microcomputer for Engine Control", SAE Paper No. 860484, 1986.
- 37) M. Athans, P. L. Falb, "Optimal Control", McGraw-Hill Book Co., New York, 1966.
- 38) H. Kwackernaak, R. Sivan, "Linear Optimal Control Systems", J. Wiley and Sons, New York, 1972.
- 39) B. D. O. Anderson, J. B. Moore, "Linear Optimal Control", Prentice Hall Englewood Cliffs, N. J., 1971.
- 40) 紺谷和夫, 齊藤敬三, 田中誠, "カーエレクトロニクス入門", 啓學出版, 1984.
- 41) 志賀擴, 水谷集治, "カーエレクトロニクス", 山海堂, 1986.