

승용차용 Engine 제어에 관한 기술 현황

하 인 중

서울대학교 공과대학 제어계측공학과

Survey on Recent Technologies for Engine Control

In Joong Ha

Dept. of Control and Instrumentation Eng., Seoul National University.

Abstract

While the engine dynamics is, in nature, an uncertain nonlinear system, practical control methods for nonlinear systems are presently limited. This paper discusses important issues of engine control such as fuel economy, exhaust emission control, and driveability. Recent development in engine control technologies is reviewed. New control methods which appear to be useful for engine control are introduced.

I. 서론

자동차산업이 한국의 기간산업하나로 육성되면서 여러 대기업들이 자동차산업에 참여하고 있고 미주지역에서 국산차가 좋은 평판을 받고 있다. 이러한 추세로 봐서 자동차산업이 전자산업과 함께 한국 수출산업의 주종이 될 전망이다. 한편 유류자원(oil source)이 줄고 유류가격(oil price)이 상승함에 따라 70년대 중반에 들어 연료절약(fuel economy) 문제가 자동차 업계의 중요한 과제로 등장하였다. 대기오염에 자동차의 유해배기가스(exhaust emission)가 주요원인의 하나라는 것은 미국 LA시의 대기오염문제 연구 이후 잘 알려져 있다. 서울시의 심각한 대기오염도 자동차의 유해배기가스가 주요원인의 하나다. 이런 문제들의 해결도 중요하지만 운전자의 만족도(comfort) 또한 중요하다. 이러한 모든 문제들을 효과적으로 해결하기 위하여 엔진의 제어방식이 점점 복잡하고 정교해져 가는데, 70년대 후반 이후의 소형 컴퓨터 기술의 급속한 발전과 여러 싸고 정교한 sensor들의 개발로 이러한 경향은 점점 더 해갈 전망이다.

엔진제어는 처음에는 유해가스 배기량을 줄이는데 주안점을 두었으나 일단 이 문제가 해결되자 엔진의 연료 효율을 높이는 데 주력해 왔으며, 최근에는 운전자의 만족을 위한 운전성능(driveability) 향상이 엔진제어의 주요 과제로 등장했다. 한편, 이들 세 과제를 한꺼번에 최적으로 달성키 위한 통합제어(coordinated control)

에 관한 연구도 활발하다. 그러나, 엔진모델(Fig.1 참조)이 여러 불확실한 변수를 가진 비선형 시스템(nonlinear system)인데 반해 응용하기 쉬운 비선형제어 이론이 많지 않다. 본 논문은 이미 실용화 되었거나 활발히 거론되고 있는 여러 엔진제어방식들에 대해서 개괄적으로 설명하고 엔진 같은 비선형시스템 제어에 응용 가능할 것으로 생각되는 최근에 나온 몇가지 제어이론에 대해 간단히 소개한다.

II. 본론

II.1 유해배기가스제어(exhaust emission control)

유해배기가스란 주로 CO, Hc, 그리고 No_x 등을 말하는데 유해배기가스 감량에는 A/F(Air-Fuel ratio)와 EGR(Exhaust Gas Recirculation) 두 제어변수(control variable)가 주로 쓰인다. 먼저, A/F 제어방식을 설명한 후 EGR 제어방식에 대해 설명한다.

유해배기가스와 A/F 간의 관계는 Fig.2와 같다. 유해배기가스를 줄이기위해 3원 촉매(three way catalytic converter)를 썼는데 3원 촉매는 No_x를 화학감소제(chemical reductor)를 통해 제거하고 산소를 제공하여 Hc와 Co를 산소화시켜 내 보낸다. 이 3원 촉매의 효율은 A/F가 stoichiometric ration일 때 최대가 되므로(Fig.3 참조), 배기가스의 A/F가 stoichiometric ratio가 되도록 엔진분사 연료량을 조절하면서 3원 촉매를 함께 사용하면 Fig.1의 점선에서 보는 것 같이 유해가스 배기량을 현격히 줄일 수 있다. 이때문에 closed-loop A/F control에 대한 연구가 활발하다. 그러나, Fig.3에서 보는 바와 같이 3원 촉매가 최대 효율을 가지고 동작하게 하기 위해서는 배기가스의 A/F가 stoichiometric ratio의 ±0.1이내에 유지토록 closed-loop A/F control system을 설계하여야 하는데 아래 단에서 설명하는 바와 같은 이유로 그 달성이 쉽지 않다.

첫째로, 배기가스의 A/F를 정확히 측정할 수 있는 sensor가 있어야 하는데, 현재 쓰이고 있는 EGO(Exhaust Gas Oxygen) sensor들의 특성은 Fig.4에서 보는 바

와 같이 control window가 몹시 좁고 거의 bang-bang type에 가까운 output를 낸다. 둘째로, 연료와 흡입공기가 엔진의 Cylinder 까지 이르기 위해 거쳐가는 통로의 dynamics 즉 fuel flow dynamics와 air flow dynamics가 시간지연(time delay)를 포함하는 비선형 시스템일 뿐 아니라 엔진온도 및 속도등에 따라서도 그 특성이 달라진다.

전형적인 closed-loop A/F control system은 Fig.5와 같다. 앞단에서 설명한 이유로 해서 연료분사 조절(fuel metering)은 배기가스 A/F 뿐만 아니라 엔진온도 및 속도에 따라 결정된다. 이러한 closed-loop A/F control system에 의한 배기가스 A/F의 과도반응은 stoichiometric ratio 근처에서 limit cycle oscillation을 한다. 3연 촉매와 EGO sensor는 한랭온도에 서는 동작을 안고 fuel flow도 한랭온도에서 liquid film을 더 많이 형성하므로 한랭온도에서는 이 closed-loop A/F control system은 효과적이지 못하다.

앞서 말한 EGO sensor의 결점 때문에 다른 대체적인 방안도 연구되고 있는데 일례가 cylinder pressure로부터 A/F를 추정하는 방안이다. Cylinder Pressure는 crank angle, 점화지연시간(spark 시작부터 실제 점화 발생까지의 시간), 연소시간등의 함수로 표시할 수 있으므로 측정된 cylinder pressure로부터 이들 parameter를 적절한 방법으로 estimation 한 후 연소시간과 A/F간의 밀접한 관계를 이용해 A/F를 추정해 내는 것이다. 모델링 오차의 영향에 대한 분석이 필요하다.

이제 EGR 제어방식에 대하여 설명한다. 유해가스 배기량을 줄이기 위하여 배기가스를 재순환하는 방식은 1970년대 초에서부터 시작되었다. Fig.6에서 보는 바와 같이 EGR은 유해배기가스중 No_x 제거에 특히 효과가 있다. 이는 EGR이 combustion mixture를 희석시켜 산소 함유량을 줄이고 연소온도를 낮추기 때문이다. 지나친 EGR은 운전성능을 떨어뜨릴 뿐 아니라 오히려 다른 유해배기가스인 HC를 증가시키고 엔진효율을 떨어뜨리는 경향이 있다. 이때문에 이에 대한 대체 방안으로 lean burn 이 요즈음 활발히 연구되고 있는데 이에 대해서는 다음의 II.2에서 설명한다.

II.2. 연료절약(Fuel Economy)

대체로 점화시간 조절과 A/F 두 제어변수를 통하여 연료절약을 도모한다. 먼저, 점화시간 조절에 대해 설명하고 그다음에 A/F 제어에 대해 설명한다.

BSFC (Brake Specific Fuel Consumption)을 줄이기 위해서는 Cylinder 에 채워진 Combustion mixture를 가능한 한 compression ratio가 최대가 되는 때 연소시켜야 하므로 점화시간은 연소가 TDC 전후에서 일어나도록 충분히 일찍 시작되어야 한다. 실제로 최소 BSFC를 내기 위한 최적 점화시간(optimum spark timing)이 있는데 이 최적점화시간을 MBT(Minimum Advance for Best Torque)라 부른다. 이 MBT는 MAP (Intake Manifold Pressure) 및 엔진속도에 따라 변

한다. 그 이유는 다음과 같다. 점화지연시간이 엔진 속도에 관계없이 일정한 반면 점화지연시간 동안의 crank angle 각도 증가량은 엔진속도에 비례하므로 엔진속도의 증가에 따라 점화시간도 빨라져야 한다. Flame speed는 MAP 증가에 따라 빨라진다. 따라서, pressure-rise period(실제 점화시작부터 flame front가 전면적으로 확산되기 까지의 시간)가 짧아지므로 점화시간도 MAP 증가에 따라 늦추어져야 한다. 때문에 MBT를 위한 점화시간은 MAP과 엔진속도의 look-up table을 on-board microcomputer에 기억시켜 현재의 MAP과 엔진속도에 따라 조정된다. MAP은 흡기유량(intake air flow rate)와 엔진속도의 함수이므로 MAP 대신 흡기유량을 점화시간조정 변수로 쓰는 경우가 더 최근 경향이다. 한편, A/F가 증가하면 flame speed가 감소하므로 점화시간을 앞당겨야 한다. 이때문에 유해배기가스를 줄이기 위해 EGR을 사용할 경우는, EGR 증가시 A/F가 증가하므로 EGR도 점화시간 조정 변수로 고려되어야 한다.

이런 open-loop type (일명 feed forward type)의 점화시간조정 방식에서는 엔진특성의 시간경과에 따른 변화가 고려되기 어렵다. 이때문에 점화시간의 closed-loop control 연구도 활발하다. 예를들면, 일정한 엔진동작상태(주로 엔진스피드와 토크로 표시됨)에서는 MBT 경우 peak cylinder pressure가 TDC로부터 대체로 일정한 각도에서 일어나므로 cylinder pressure를 직접 측정하여 peak pressure가 그 일정한 각도 θ_{opt} (desired crank angle for MBT)에 일어나게끔 점화시간을 closed-loop control 하는 방식이 있다.(Fig.7 참조) Combustion Knock(or detonation)은 cylinder pressure를 측정함으로써 그 발생여부를 추정할 수 있으므로 Knock control도 이와같은 closed-loop spark timing control에 함께 병행할 수 있다. Knock이 일어나면 점화시간을 일시적으로 MBT 보다 늦춘다.

이제 A/F 제어에 대해 설명한다. Fig.8에서 보는 것 처럼 BSFC가 최소가 되는 A/F는 stoichiometric ratio 보다 상당히 높은 값이다. 이 근처에서 BMEP (Brake Mean Effective Pressure) 또한 높다. 이와 같이 lean burn (high A/F)이 엔진 효율을 높이는 데 효과적임을 알 수 있다. 그러나 지나친 lean burn 은 운전성능을 떨어뜨린다. 운전성능 개선문제는 II.3에서 다룬다. 한편 Fig.2에서 보는 바와같이 A/F가 증가함에 따라 Co와 No_x 는 주나 HC는 증가하므로, lean burn의 경우 유해배기가스를 줄이기 위해서는 No_x curve 와 HC curve가 교차하는 점에 A/F를 유지하도록 closed-loop A/F control system을 설계해야 한다. lean burn condition에서는 II.1에서 설명한 3연 촉매의 화학감소제가 효과적으로 작동하므로 산소화 촉매(oxidizing converter)만으로 유해가스 배기량 기준을 맞추어 한다는 어려운 점이 있다. 뿐만 아니라, 기존 EGO sensor들은 stoichiometric ratio 근처에서만 동작하기 때문에 wide range EGO sensor의 개발이 요즈음 활발하다.

II.3. 운전성능 (driveability)

연료절약과 유해배기가스감소를 위한 lean burn의 장단점을 II.2에서 설명하였다. lean burn으로 인한 driveability 퇴화의 해결방안이 여러가지 있다.

첫째, compression ratio이 증가다. Brake Thermal Efficiency (BTE)와 BMEP가 compression ratio에 비례한다는 것은 잘 알려진 사실이나 compression ratio의 지나친 증가는 오히려 combustion knock을 유발한다. 둘째, 연소속도를 높이도록 연소실 (combustion chamber)를 재설계하는 것이다. 고연소 속도를 얻는 한 방법은 흡입공기에 swirl을 유도하여 compression stroke중에 미세한 turbulence를 많이 일어나게 하는 것이다. 셋째로는, 엔진의 기계적인 구조를 마찰손실을 줄일 수 있도록 변형하고 alternator와 에어콘의 compressor의 효율을 높여 accessories가 엔진에 부가하는 load를 줄이는 것이다.

이상의 방법으로는 엔진출력을 높일 수 있으나 운전 성능에 더욱 중요한 엔진출력 토크의 과도응답 개선을 위해서는 throttle angle의 electronic control이 필요하다. 기존 자동차에서는 운전자의 액셀 페달 위치가 바로 throttle angle을 결정하게 되어 있으므로 운전성능에 직접관계되는 hesitation, surge, sag, 그리고 stumble등 (Fig.9 참조)을 개선하기 어렵다. throttle angle의 electronic control에서는 throttle angle이 액셀 페달에 직접 연결되어 있지 않고 on-board microcomputer가 액셀 페달의 위치와 그때의 엔진 작동 상태 및 다른 제어변수들의 값에 따라 적절한 전기신호를 throttle actuator에 보내어 throttle angle을 dynamic 하게 제어한다. 현재 여러방법이 연구되고 있는데 일례를 들면 air flow dynamics를 fuel flow dynamics에 match 시키므로써 과도 (transient) A/F가 최적 A/F에서 크게 이탈하지 않도록 하는 방법이 있다. 이 방법은 엔진 토크 반응 속도를 느리게 하는 단점이 있다. 기존 방식은 액셀 페달의 속도에 따라 임의의 양의 fuel을 더 분사공급하는 acceleration pumping이다.

엔진 출력 토크의 과도반응제어는 본 논문에서는 언급왔던 powertrain control, anti-braking, 및 traction control 등에도 중요한 과제로서 앞으로 더욱 활발한 연구가 있을 전망이다.

II.4. 통합 제어 방식 (Coordinated Control)

앞의 절들에서 엔진제어의 3대 과제는 연료절약, 유해배기가스제거, 그리고 운전성능 향상들은 서로 깊은 상관 관계에 있다는 것을 보았다. 이들 과제들을 한꺼번에 같이 고려하여 제어 변수들 즉 점화시간, A/F, EGR 등을 결정하는 보다 systematic 한 해결방식이 최근 많이 발표되고 있다.

일례를 들자면 엔진작동상태를 나타내는 엔진온도, 엔진속도, 엔진출력토크, 및 MAP등을 엔진의 상태변수로 하고 제어변수들이 점화시간, A/F, EGR 등과 제어목표인 연료소비량, 유해가스 배출량간의 상관 관계를 steady

state engine test를 통하여 table을 작성한 다음 연료 소비량과 유해가스 배출량을 점화시간, A/F, EGR, 엔진온도, 엔진속도, 엔진출력토크, 그리고 MAP 등의 polynomial regression 함수로 근사시킨다. MAP은 엔진속도, throttle angle 등과 직접적으로 관련되어 지므로 throttle angle 이 간접적으로 고려되어 진다. 운전성능은 제어변수의 크기를 제한함으로써 고려되어진다. 유해가스 배기량은 emission standard 이하로 유지하면서 연료소비를 최소로 하는 제어변수를 구하는데 그 범위는 운전성능을 감안하여 지정된 크기내로 제한한다. 이와 같은 절차로 비선형계획 문제 (NPP: nonlinear programming problem)로 만든 다음 잘 알려진 optimization algorithm을 이용하여 computer로 푼다. 그와 같이 구해진 최적 제어변수값들은 엔진상태 변수들의 함수가 된다. 이 함수들은 on-board microcomputer에 저장되어 엔진제어에 사용되어진다. 단점은 이와같은 NPP 방식에서는 engine dynamics의 영향이 고려될 수 없다는 것이다.

engine dynamics를 고려하여 앞서 언급한 3대 목표를 최적으로 달성하기 위해서는 NPP 방식보다는 최적제어 이론 (optimal control theory)를 적용하여야 한다. 그러나, engine dynamics가 시간지연요소를 갖는 비선형 시스템이기 때문에 최적해 (optimal solution)을 구하기가 매우 힘들다. 여러가지 편법이 나오고 있는데 예를 들면 다음과 같다. 먼저, 대표적인 엔진작동상태 몇 경우를 택한다음 각 경우의 엔진작동상태를 평형상태 (equilibrium)라 가정하고 linear perturbation technique를 적용, 그 평형상태 근처에서 엔진 dynamics를 근사적으로 대표하는 선형시스템을 구한다. 그렇게 구해진 각 선형시스템에 대해 여러가지 잘 알려진 다변수 선형시스템 제어이론들을 응용한다.

III. 결론

이상에서 최근의 엔진제어방식에 대해 개략적으로 설명하였다. 소형컴퓨터 기술의 괄목적인 발전으로 정교한 엔진제어가 가능하게 되었다. 그러나, 엔진이 시간지연요소를 갖는 비선형 시스템인데 반하여 비선형시스템에 적합한 제어이론은 여전히 빈약하다. 이 때문에, 엔진 제어에 쓰이는 controller들은 여러 sensor를 사용하는 PI (Proportional and Integral) 또는 PID (Proportional, Integral, and Derivative) controller가 대부분이다. 물론, 잘 발달된 선형시스템 제어이론이 전혀 쓸모가 없다는 것은 아니다. 예를들면, 본 논문에서는 소개하지 않았지만 idle speed control에는 선형시스템 제어이론이 많이 쓰이고 있다. 왜냐하면 Idle 상태의 엔진 dynamics는 선형시스템에 가깝기 때문이다.

응용 가능한 비선형시스템 제어이론으로는 잘 알려진 describing function technique 이 있고 최근 활발한 연구가 진행되고 있는 linearization technique이 있다. 이 방식은 linear perturbation technique와는 달리, 비선형시스템을 적절한 비선형 되먹임 (nonlinear feedback)을 사용하여 그 비선형시스템 특성이 선형시스템과

가도록 변형한 다음 잘 발달된 선형시스템 제어이론을 적용한다.

엔진제어방식이 복잡해지고 여러 sensor와 전자부품들이 사용되므로서 reliability가 중요한 과제로 등장하고 있다. 부품수가 늘수록 고장 빈도수가 일반적으로 높아진다. 때문에 고장탐지를 하는 장치가 필요하고 어떤 부분에 고장이 있더라도 여전히 작동하는 부분만으로도 제어를 하여 운전자의 위험을 피하는 이른바 fault free control 방식도 중요한 연구과제다. 전자식제어 시스템이 고장이 날 경우 back-up 하기 위하여 기존의 기계식 제어 시스템을 함께 부착하는 것도 한 방법이나 그만큼 비용이 올라가는 문제가 있다.

참고문헌

1. 고명삼, 이종형, "자동차 전자 장치의 실태와 경향에 대하여, " 한국자동차기술학회 강연회 초록집, 1980.
2. 김광배, "자동차제어기술의 현황과 전망, " 전기학회지, vol.35, No.2, 1986.
3. Andreadakis, S.K., " Estimation of combustion duration, ignition delay, and equivalent ratio for a spark ignition engine, " S.M.Thesis, MIT, Dep. of Mechanical Engineering, 1982.
4. Baumgartner, C.E., Geering, H.P., Onder, C. H., and Shafai, E., " Robust multivariable idle speed control, " Proc. American Control Conf., pp.258-265, 1986.
5. Cassidy, J.F., " Electronic engine control : a techno revolution for the automotive industry, " Proc. Joint Automatic Control Conf., Aug., 1980.
6. Cassidy, J.F., Athans, M., and Lee, W.H., " On the design of electronic automotive engine controls using linear quadratic control theory, " IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.AC-25, No.5, pp.901-902, 1980.
7. Dohner, A.R., " Optimal control solution of the automotive emission-constrained minimum fuel problem, " Automatica, Vol.17, No.3, pp.441-458, 1981.
8. Dobner, D.J., " A mathematical engine model for development of dynamic engine control, " SAE paper No.800054, 1980.
9. Gerhard, Jr., J.B., Matsuda, M., and Funabashi, K., " Advanced microcomputer for engine control, " SAE paper No.860484, 1986.
10. Glasier, I. and Powell, J.D., " Optimal closed-loop spark control of an automotive engine, " SAE paper No.810058, 1981.
11. Hamburg, D.R. and Shulman, M.A., " A closed-loop A/F control model for internal combustion engines, " SAE paper No.800826, 1980.
12. Haslett, R.A. and T.M. Edison, " Equivalent ratio meter, " SAE paper No.770219, 1977.
13. Hata, Y. and Asano, M., " New trends in electronic engine control to the next stage, " SAE paper NO.860592, 1986.
14. Hubbard, M., Dobson, P.D., and Powell, J.D., " Closed loop control of spark advance using a cylinder pressure sensor, " ASME J. Dynamic Sys. Meas. & Control, DEc. 1976.

15. Ina.T., Obayashi, H., and Shigematsu, T., " Lean limit A/F control system by using engine speed variation, " SAE paper No.860413, 1985.
16. Kaneko, Y., Kobayashi, H., Komagome, R., Nakagami, T., and Fugui, T., " Catalyst system development, " SAE paper No.770197, 1977.
17. Keranen, T.W. and Wertheimer, H.P., " Spark ignition engine control variable study, " SAE paper No.730004, 1973.
18. Kokotovic, P.V., " Recent trends in feedback design : an overview, " Automatica, Vol.21, No.3, pp.225-236, 1985.
19. Mizutani, S. and Otake, T., " Recent sensor technology in Japan, " SAE paper No.860410, 1986.
20. Powell, B.K., Wu, Ho, and Aquino, C.F., " Stoichiometric air-fuel ratio: control analysis, " SAE paper No.810274, 1981.
21. Randall, K.W. and Powell, J.D., " A cylinder pressure sensor for spark advance control and knock detection, " SAE paper No.790139, 1979.
22. Rao, H. S., Cohen, A.I., Tennant, J.A., and Van Voorbies, K.L., " Engine control optimization via nonlinear programming, " SAE paper No.790177.
23. Schwab, M., " Electronic control of a 4-speed automatic transmission with lock-up clutch, " SAE paper No.840448.
24. Seiter, R.E. and Clark, R.J., " Ford three-way catalyst and feedback fuel control system, " SAE paper No.780203, 1978.
25. Stivender, D.L., " Engine air control-basis of a vehicular systems control hierarchy, " SAE paper No.780346, 1978.
26. Suzuki, A. and Hedrick, J.K., " Nonlinear controller design by an inverse random input describing function method, " Proc. American Control Conf., pp. 1236-1241, 1985.
27. Suzuki, S., Sasayama, T., Miki, M., Tanaka, S., Veno, S., and Ichikawa, N., " Air-fuel ratio sensor for rich, stoichiometric and lean ranges, " SAE paper No.860408, 1986.
28. Sweet, L.M., " Control system for automotive vehicle fuel economy : a literature review, " ASME J. Dynamic Sys. Meas. & Control, Vol.103, pp.173-180, 1981.
29. Taylor, J.H. and Strobel, K.L., " Nonlinear compensator synthesis via sinusoidal-input describing functions, " Proc. American Control Conf., pp.1242-1247, 1985.
30. Tennant, J.A., Giacomazzi, R.A., Powell J.D., and Rao, H.S., " Development and validation of engine models in automated dynamometer tests, " SAE paper No.790178, 1979.
31. Veno, S., Ichikawa, N., Suzuki, S., and Terakado, K., " Wide-range air-fuel ratio sensor, " SAE paper No.860409, 1986.
32. Vora, L.S., " Computerized five parameter engine mapping, " SAE paper No.770079, 1977.
33. Wilsky, A.S., " A survey of design methods for failure detection in dynamic systems, " Automatica, Vol.12, pp.601-611, 1979.
34. Yuen, W.W. and Servati, H., " A mathematical engine model including the effect of engine emissions, " SAE paper No.840036, 1984.
35. Zechall, R., Baumann, G., and Eisele, H., " Closed-loop exhaust emission control system with electronic fuel injection, " SAE paper No.730566, 1973.

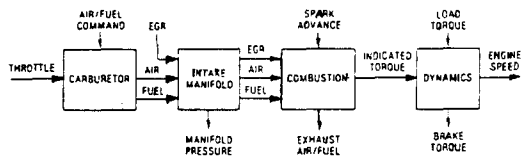


Fig. 1 - Engine model description

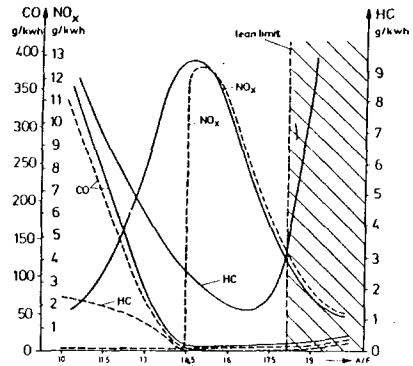


Fig. 2 - Relationship between A/F and exhaust emission (solid curves : without 3-way catalytic converter, dotted curves : with 3-way catalytic converter)

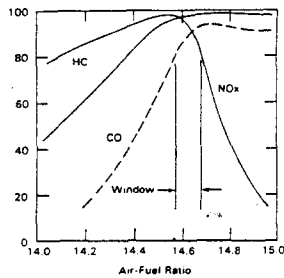


Fig. 3 - Effect of A/F on conversion efficiency of a 3-way catalytic converter.

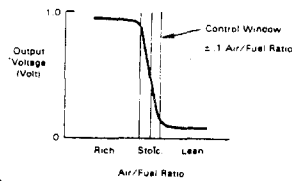


Fig. 4 - Voltage characteristic of an EGO sensor

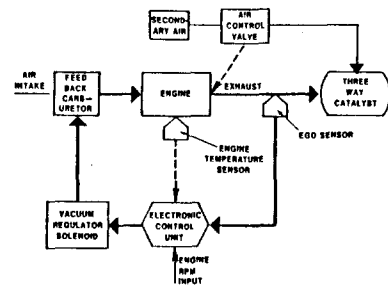


Fig. 5 - Three-way catalyst/feedback control system block diagram.

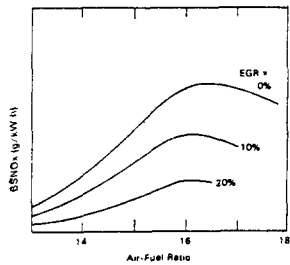


Fig. 6 - Effect of EGR on NO_x

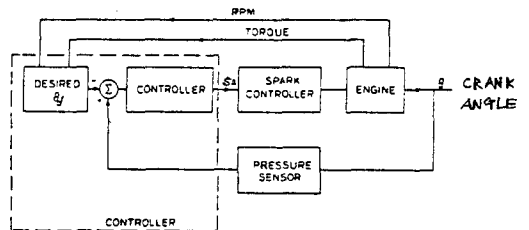


Fig. 7 - Cylinder pressure feedback spark timing control system block diagram.

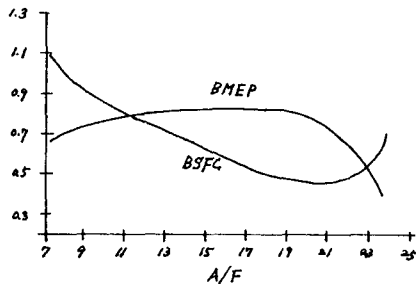


Fig. 8 - Effect of A/F on BMEP and BSFC at fixed engine speed and throttle

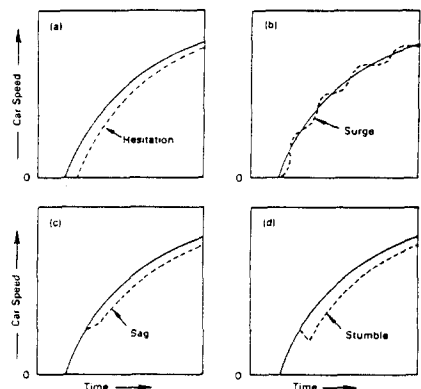


Figure 9 - Certain Types of Driveability Problems Can be Characterized by Deviations from a Smooth Monotonic Response of Vehicle Speed to Driver Commands.