엔진 ECU 개발과 타 제어장치와의 통합

●1950년생.
●연소공학을 전공하였으며, 현재 대우자동차 연구소의 선행 기술연구 부문을 담당하고 있다.

이 귀 영
대우자동차(주) 기술연구소

●1963년생.
●내연기관 및 제어공학을 전공하였으며, 전자 제어 시스템 개발 업무에 종사하고 있다.

오 희 근
대우자동차(주) 기술연구소

1. 머리말

자동차에 있어서 전자 장치의 도입은 1960년대 실리콘 트랜지스터의 실용화에 따라 실질적으로 이루어졌으며, 전자 제어장치의 도입은 오일쇼크 및 배기가스 규제에 따라 엔진 제어에서 시작하였다.[1] 초창기의 제어장치는 자동차의 구성요소에 고유한 기계적인 기능 효율화 및 성능증대가 그 목적이었고, 이에 따라 자동차 전자 제어장치의 발전은 기존의 각 기계 요소별로 고유한 독립적인 전자 시스템의 도입에 주로 의존하였다.

1980년대에 이르러 각각의 분리된 제어 시스템의 기능상의 상호 보완성이 요구되고 중복되는 요소 및 부품의 효율화의 필요성에 대두되면서 시스템의 통합화가 시도되었으며 이러한 작업은 현재에 이르러 주요한 과제로 대두되어 있다.

이 글에서는 자동차 전자 제어장치의 기본이라 할 수 있는 엔진 ECU의 개발 현황 및 타 제어장치, 특히 샤시계 제어장치와의 통합 기술 동향에 대하여 기술하겠다.

2. 엔진 ECU

세계적으로 대두되고 있는 환경보호의 시대적 흐름에 따라 자동차 배출물에 대한 규제가 강화되면서 배출물의 원천인 엔진에의 전자 제어 시스템의 도입이 시작되어 현재에 있어서는 MPFI(multi-point fuel injection) 시스템이 그 주류를 이루고 있다.

현재 대부분의 ECU는 소위 "Ramp and Jump Back" 방식이라 불리우는 "Gain Scheduling Unconventional Perturbation PI" 방식을 채택하고 있으며 피드백 센서로서 스위칭특성(switching type)의 산소센서(O_2 sensor)를 이용하고 있다. 제어이론 측면에서 본 엔진의 공연비제어의 대표적 난점은 다음과 같은 세 가지로 대별할 수 있으며 이를 상기된 방식의 특성과 연계하여 설명한다.

2.1 열엔진의 심한 비선형 특성과 매우 넓은 운전영역

체적 효율로 대변되는 엔진의 흡기 특성은 심한 비선형 특성을 지니며 타 요소와의 Coupling이 매우 심하여 현재 잘 발달되어 있는 선형 해석법의 적용을 위해서는 선형화를 필요로 하는 한편 각각의 파라미터에 대한 독립된 해석을 매우 어렵게 한다. 그리고 엔진의 운전범위가 매우 넓고 운전상태의 변화가 매우 빠르기 때문에 빠른 반응속도를 지니는 제어기를 필요

로 한다. 현재 대부분의 엔진 ECU는 선형화에 필요한 체적효율의 Nominal 값을 Table Look-Up에 의하여 구한 다음 산소센서에 의한 피드백으로써 보정하는 Perturbation 방식을 이용하고 있고, 넓은 운전영역 보상을 위해 Gain-Scheduling을 이용하고 있다.

2.2 스위칭 형태의 산소센서

제어성능(control performance)을 측정하고 이에 따라 제어기에 피드백 신호를 제공하는 산소센서는 현재 Zirconia Type이 가장 널리 쓰이고 있다. 그런데 이 산소센서는 On-Off의 스위칭 형태로서 그림 1에 나타난 바와 같이

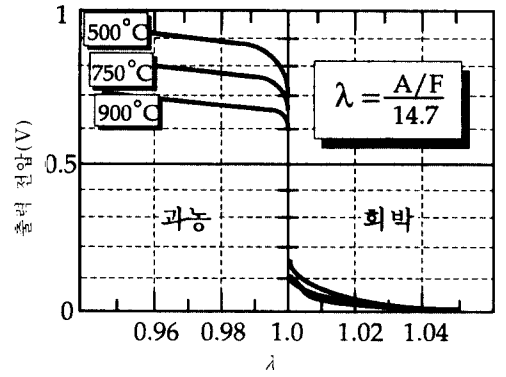

그림 1 일반적인 산소센서의 특성

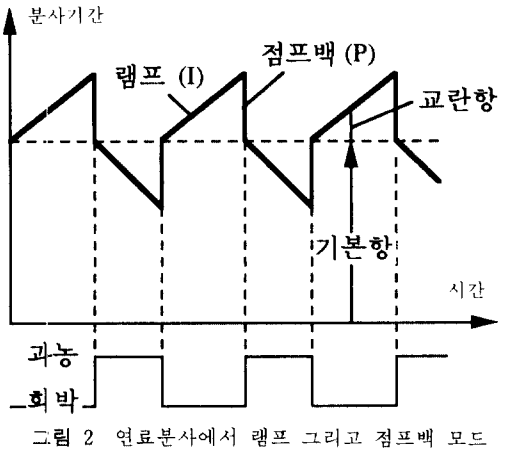

그림 2 연료분사에서 램프 그리고 점프백 모드

배기가스의 과농-희박에 대한 정보만을 제공하는 비선형 방식이므로 엔진의 공연비에 대한 정보를 ECU가 알 수 없다. 이러한 비선형 피드백 신호는 선형 제어기의 경우 특성의 차이로 인하여 제어성능을 크게 저하시킨다. 이러한 스위칭 특성에 의해 현재 널리 쓰이고 있는 비례-적분(PI) 방식이 비정상적이 되어 그림 2와 같이 "Ramp and Jump Back"의 특성이 나오게 된다.

2.3 시간지연

제어 시스템에서 피드백 신호의 검출과 작동기(actuator)로의 명령 사이의 시간지연은 제어 시스템의 안정성(stability)을 저해하고 제어 성능을 저하시키는 가장 큰 요인이다. 시간지연이 있는 경우 제어기는 현재의 제어 명령에 대한 결과를 알 수 없고 현 시점으로부터 지연시간 이전에 내린 명령에 대한 결과만을 알 수 있어 효과적인 보정작용을 할 수 없다.

엔진의 경우 시간지연은 크게 이송지연(transport delay ; intake to exhaust delay)과 센서 특성시간(sensor characteristic time)으로 구성된다. 이송지연은 일반적으로 크랭크축의 2회전에 상당하고 센서 특성시간은 센서에 따라 약 50~100ms사이의 값을 갖는다. 현재 이러한 시간지연을 적극적으로 보상하는 방법은 없다고 볼 수 있으나 LQ 등을 이용한 예측이 시도되고 있다.

3. 엔진 ECU의 개발현황

현재 엔진 ECU의 연구 및 개발방향은 주로 상기된 난점을 해결 보완하는 방향으로 이루어지고 있다. 국내에서의 연구방향도 이와 비슷하게 이루어지고 있으나 아직 구체적인 연구성과는 도출되고 있지 않는 실정이다. 이를 개략적으로 몇 가지 소개하면 다음과 같다.

3.1 신경 회로망을 이용한 공연비 추정[3]

앞서 말한 바와 같이 현재의 산소센서는 배

기가스의 공연비가 아닌 과농-희박만을 측정한다. 만약 공연비를 검출할 수 있다면 제어성능이 상당폭의 향상은 충분히 예측가능한 것이다. 현재 공연비를 측정할 수 있는 UEGO (universal emission gas oxygen) 센서가 나와 있으나 너무 고가여서 양산 적용에는 어려움이 있다. 최근에 현재의 스위칭 형태의 산소 센서를 부착한 엔진에 신경 회로망을 접목하여 공연비를 추정하려는 연구가 진행중이다. 현재 정상상태에서는 실제에 상당히 근접한 추정치를 내는데 성공하였다는 발표가 있었다. 그러나 천이상태에서의 성능에 대해서는 현재로서는 연구가 더 필요한 상태인 것으로 전해지고 있다.

3.2 Sliding Mode 이론을 적용한 공연비 제어기 설계

현재 공연비 제어로서 많이 이용되는 "비례-적분" 방식은 선형방식으로서 비선형 특성을 지니는 엔진에 적용되기 위해서는 관련 요소들의 선형화를 필요로 함과 동시에 현 산소센서의 스위칭 특성에 의해 제어 특성이 비정상적이 된다는 것은 이미 기술하였다.

Sliding Mode는 비선형 제어 시스템의 일종으로서[4] 선형화에 의하지 않고 비선형 시스템을 직접 제어할 수 있으며 또한 Switching Type의 피드백을 필요로 하므로 현재의 산소센서에 적절하다.[5] 현재 이 이론을 차량에 탑재된 엔진에 적용하여 가시적인 성과를 얻었으며 매우 활발한 연구가 진행중인 것으로 알려져 있다. 장점으로는 체적효율 Table Look-Up을 하지 않으므로 현재의 제어방식보다 Calibration 작업량을 줄일 수 있고 Gain Scheduling이 필요없는 Global Controller의 설계를 가능하게 하나, 현재의 ECU보다 큰 계산용량을 요구하며 엔진에 대해 상대적으로 정밀한 수학적 모델을 필요로 한다는 단점을 지니고 있다.

3.3 LQG 방식을 이용한 센서의 자기진단장치 설계[6]

현재의 자기진단장치의 논리는 이론적 접근이 아닌 다분히 경험적인 방법에 의하여 설계되고 있다. 이러한 경험적 접근 방식은 다량의 실험을 요구하고 또한 그 분야에서 상당한 지식과 경험을 쌓은 여러 명의 전문가를 필요로 한다. 또한 이식성이 매우 낮아 엔진 시스템의 일부가 변경된 경우에 모든 실험 및 결정 과정을 처음부터 다시 답습해야 하는 문제점 등을 안고 있다. 최근에 최적 제어이론에서의 LQG 방식을 이용하여 엔진 상태를 추정하고 이를 측정치에서 도출되는 실제 상태에 비교하여 시스템요소의 고장을 진단하는 방식에 대한 연구가 진행중이다. 장점으로는 현재의 경험적 방식보다 빠른 실시간 자기진단을 할 수 있고 높은 이식성을 지니고 있으나, 시스템의 고장이 복합적으로 발생하는 경우에 대한 비안정성의 문제 및 상당한 계산 용량과 상대적으로 정확한 모델링을 필요로 한다는 단점 등을 지니고 있다.

3.4 냉간 운전시의 공연비의 Cyclic Operation

일반적으로 TCC(three way catalytic converter)는 상온에서 엔진 시동후 수십초가 지나야 Light Off 온도(약 350~400℃) 이상으로 가열되어 정상적으로 작동하게 된다. 현재 규제 대상 배출물중 CO 및 THC는 TCC가 정상작동하기 전인 이 냉각 운전 영역에서 다량으로 배출되며, 특히 THC의 경우에는 LA-4 Mode Test를 예로 들면 총 배출량의 80% 정도의 양이 이 냉간 운전시에 배출된다. 그리고 산소센서는 냉각 운전시 빠른 활성화와 시간지연을 최소화하기 위하여 일반적으로 배기 다기관에 장착되어 있어 시동 후 약 10초 전후하여 정상작동으로 들어간다. 현재 대부분의 ECU는 시동 후 산소센서가 활성화되기까지 공연비에 대해 Open Loop 제어를 하다가 산소센서가 활성화되면 피드백 제어로 전환되어 배기가스의 공연비를 이론공연비로 제어하기 시작한다. 그러나 이 경우에도 TCC는 활성화되지 않았기 때문에 배출물의 정화효율은 30% 이하의 낮은

값을 갖게 된다.

근래에 이러한 냉간 운전시의 낮은 정화효율을 높이기 위한 방법으로서 Electrically Heated TCC 등을 이용하는 방법이 제시되고 있으나 가격의 문제 및 가열에너지의 확보 등의 문제 등이 있다. 최근에 냉간 운전시 공연비를 낮은 주파수의 Cyclic Operation 해주면 이론 공연비로 일정하게 제어하는 경우보다 TCC의 정화효율을 높일 수 있다는 학계의 보고가 있었고[7] 따라서 이를 실제 적용하기 위한 연구가 진행 중이다. 그림 3에 공연비의 정상상태 운전시와 0.1 Hz의 Cyclic Operation시의 배기가스 온도에 대한 각 배출물의 정화효율이 도시되어 있다. 냉간 운전시 특히 THC의 정화효율이 두드러진다.

3.5 노킹감지기에 의한 점화시기 제어

현재 노킹에 의한 엔진의 손상을 피하면서 노킹 한계부근에서 점화시기를 조정하여 출력향상을 도모하는 시스템이 개발되어 외국에서는 일부 차량에 적용되고 있고 국내에서도 이에 대한 연구가 진행 중이다.[8]

노킹 발생을 감지하기 위하여 기관의 음향, 실린더 내의 압력, 진동, 냉각수 압력 등을 측정하는 방법 등이 있는데 내구성 및 가격 등의 이점이 있는 가속도계에 의한 진동 신호 등을 이용하는 것이 일반적이다. 이러한 진동신호를 이용하여 노킹을 검출하는 방법은 노킹이 발생하는 엔진과 발생하지 않는 엔진의 진동 신호를 비교하는 것이다. 현재 노킹에 의한 점화시기 제어는 제어기의 논리자체는 간단하나 노킹 발생의 정확한 검출에 어려움이 있다. 일반적으로 진동 신호의 주파수 특성 분석이 보다 효과적이나 실시간 제어에 직접 적용하는 데에는 시간적 어려움이 있다.

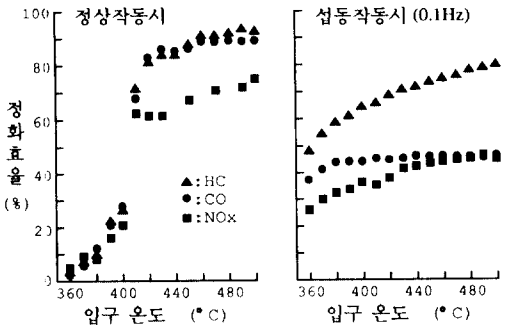

그림 3 공연비의 섭동운전에 의한 정화효율의 변화

3.6 국내 현황

지금까지 국내에서의 ECU 개발의 추이를 살펴보았다. 아쉬운 점은 아직까지 체계적이고 조직적인 연구가 진행되고 있다는 느낌을 받을 수 없다는 점과 국내에서 자체개발된 ECU의 적용 예가 없다는 점이다. 사실상 국내에서 요구되는 ECU는 전량 수입에 의존하고 있으며, 제어 논리 또한 자체 설계가 전혀 이루어지지 않고 있다. 현재 각 차량에 적용하기 위한 Calibration 정도가 국내 자동차회사에서 이루어지고 있다. 이에 따라 엔진 제어에 있어서의 새로운 기능의 추가나 새로운 방식의 접목은 사실상 국내에서 자체적으로 실험적으로나마도 시도해보기 어려운 상황이어서 자동차의 Life Cycle이 점점 단축되는 세계적 추세에 부응하기가 매우 어려운 실정이다. 다행스러운 점은 최근에 자동차 전자 제어장치의 중요성에 대한 인식이 높아져감에 따라 자동차회사를 중심으로 엔진 ECU에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있고, 현재 Prototype ECU를 제작하여 차량 상태의 실험이 진행되고 있는 것이 보고된 바 있다.

현재 엔진 ECU는 하나의 큰 전환점을 맞고 있다고 할 수 있다. 제어장치의 통합과 더불어 자기진단 시스템의 강화를 그 예로 들 수 있다. 특히 한국 자동차 수출의 주요 대상국인 미국의 캘리포니아 주에서 1994년부터 적용되는 CARB OBD2는 ZEV(zero emission vehicle)와 더불어 미국 시장의 판도에도 영향을 미칠 것이라고 예상하고 있는 정도이다. OBD2는 1~2년 정도의 차를 두고 미국 전역으로 확대될 것으로 보이며, 제 외국도 이를 따를 것으로 예상된다. OBD2의 해결을 위한

선진 자동차회사들의 접근전략의 공통점 중의 하나는 OBD2를 위한 새로운 센서나 작동기를 가능한 한에서 최소화한다는 것이며, 이의 이유는 비용의 증가보다는 새로운 센서나 작동기의 진단을 위한 또 다른 진단 시스템을 필요로 하게 되고 이를 위한 또 다른 장치를 필요로 하게 되는 자기 재생산적이 될 수 있기 때문이다. 엔진 ECU의 소프트웨어의 비중이 높아지고 이에 따라 많은 계산 용량을 필요로 한다는 것을 의미한다. 이에 의해 OBD2의 적용을 위한 ECU는 현재의 8-Bit MCU에서 16-Bit로 대부분 옮겨가고 있다. 또한 배출물과 관련되는 각 구성 요소들의 기능 및 서로 간의 연관관계에 대한 정확한 이해 및 많은 실험량을 요구한다는 의미도 될 수 있어 ECU에 대한 이해 및 설계능력은 필수적이라고 할 수 있다. 국내에서는 아직 학계 및 업계에서 이에 대한 대비책을 사실상 강구하지 못하고 있는 것으로 알려지고 있어 이에 대한 새로운 인식의 전환이 절실한 형편이다.

4. 엔진 ECU와 타 제어장치와의 통합

자동차 전자제어 시스템의 선두 주자인 엔진 제어와 더불어 차량의 다른 부분들에 대한 전자제어의 적용은 최근 수 년간 비약적으로 증가하고 있다. 이들은 현시점에 와서 차량의 상품으로서의 부가가치를 높이는 중요한 수단임과 더불어 소비자들의 안전성, 쾌적성 등에 대한 인식이 높아져감에 따라 앞으로 필수적으로 부착이 되어져야 하는 것들도 상당수 있다. 이들은 각각 독자적으로 발전하여 왔으나 각각의 시스템이 가지는 결점을 최소한으로 줄이고 고유한 기능상의 장점을 확대하기 위하여 제어시스템의 통합이 많이 시도되고 있다.[2]

통합제어를 "복수의 전자제어 시스템의 일체화에 의해 차량의 제반 성능을 향상시키는 것"이라고 정의한다면[1] 수단으로서의 일체화와 효과로서의 차량성능 향상이 주요한 관점이 된다.

4.1 일체화

일체화의 과제에는 정보의 공유, 소프트웨어 및 하드웨어상의 일체화가 있다고 볼 수 있으며 이에 따라 광의의 일체화를 다음과 같은 세 개의 형식으로 분류할 수 있다.

(1) ECU의 상호 통신

각각의 ECU가 서로 필요한 정보를 교환하는 것이다. 사실상 통합화라 말하기 어려우며 통신의 속도, Wiring Harness의 제조면에서의 문제점 등으로 인해 지극히 기본적인 정보의 교환으로 한정되어 있으며, 이의 해결이 관건이라고 말할 수 있으며, 통합화의 과도기적 형태라고 말할 수 있다.

(2) ECU의 근접 배치

ECU의 상호통신 형식에서 진일보한 것이라고 할 수 있다. 각 Unit이 서로 독자적으로 작용하면서 고속의 상호통신을 가능하게 하는 형태이며, 센서 및 작동기의 공용화를 꾀할 수 있다.

(3) 협의의 일체화

통합 제어 일체화의 최종 목표이다. 이는 반드시 한 개의 프로세서를 이용한다는 것만을 의미하지 않으며, 여러 개의 독자적 Unit의 유기적인 연결까지를 포함한다고 할 수 있다.

4.2 통합에 의한 성능 향상

차량의 제반 성능의 향상에는 협의의 성능 외에 신뢰성과 공간 효율의 향상 및 중량, 가격, 소비전력의 저감 등이 있다. 통합 제어에 의한 성능 향상의 구현은 그림 4와 같이 표현할 수 있다.[2] 일반적으로 하나의 제어(A)에 의해 의도한 성능(a)은 많은 부분 향상하기 마련이지만 의도하지 않았던 다른 성능(b)은 다소 저하하기 마련이다. 이는 상대편에 서 있는 성능에 대한 제어에서도 마찬가지의 형태를 띄게 되며, 두 개의 제어를 단순하게 조합하면 A+B 점으로 표현되는 단순한 벡터합의 효과만을 나타내게 되나 이를 효과적으로 통합 제어하면 서로의 기능상의 단점을 상호 보완하여 벡터합 이상의 효과를 나타내게 된다. 결국 통

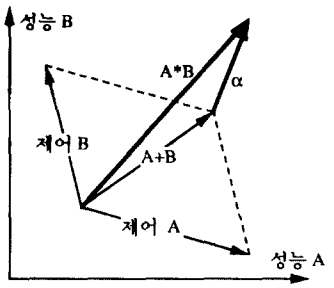

그림 4 통합 제어의 성능향상 효과

합 제어의 성능상의 목표는 그림 4에서의 α로 표시할 수 있다.

실질적으로 ABS 정도를 제외한 나머지 대부분의 제어 시스템은 엔진 ECU에서 쓰이는 정보의 일부분 혹은 대부분을 필요로 한다. 이에 따라 엔진 ECU는 자동차 전자제어 장치 통합의 중핵에 위치해 있다고 할 수 있다. 자동차 전자제어 장치의 통합의 효시는 엔진 ECU와 TCM(automatic transmission control module)의 통합이라고 말할 수 있다. 선진국에서는 이미 실용화의 단계까지 와 있으나 국내에서는 단순한 형태의 상호통신이 적용된 차량이 나와 있을 뿐이다. 이외에 엔진 ECU와의 통합 제어의 필요성이 강하게 제시되고 있는 것이 TRC(traction control)이다. 여기에서는 TRC에 대한 간단한 소개와 함께 엔진 ECU와 통합의 필요성 및 그 효과에 대해 고찰해 보기로 한다.

4.3 트랙션 제어

트랙션 제어는 눈길 등의 미끄러지기 쉬운 노면에서의 차량의 발진 가속성, 조종 안전성 등을 확보하기 위한 시스템으로서 소비자들의 안전에 대한 관심의 증가 및 스파이크 타이어에 의한 환경오염 문제에 대한 대처방안으로서 선진국에서는 그 장착률이 증가하고 있는 장치이나,[9] 아직 국내에서는 승용차에 장착된 예가 없다. 이 시스템의 구체적인 목표는 구동륜 속도를 차체 속도보다 약 10~15% 높게 제어하는 것인데, 이는 일반적으로 상기된 미끄러짐 비율에서 구동력이 최대로 되기 때문이다. 이에 따라 운전자의 과도한 가속 페달 조작에 의해 발생된 과잉 구동력을 저감시키는 구조가 필요한데 이 방법에는 흡입 공기량 제어(drive by wire에 의한 드로틀 제어), 연료분사 및 점화시기 제어, 제동장치 제어, 그리고 자동장치의 제어 등이 있다. 이들 중에서 연료 분사 제어는 배출물 증가의 가능성, 그리고 차동장치의 제어는 근본적으로 과잉 구동력을 저감시킬 수 없다는 점 때문에 독자적으로는 거의 사용되지 않고 있다. 가장 많이 사용되고 있는 방법은 흡입 공기량 제어와 연료분사 및 점화시기의 제어의 조합, 그리고 흡입 공기량 제어와 제동장치 제어의 조합 형태이다.

4.4 통합의 필요성 및 효과

트랙션 제어에 있어서 흡입 공기량 제어는 필수적 요소라 할 수 있으며, 이는 엔진 ECU에서도 핵심적인 정보이다. 그리고 부가적으로 연료분사 및 점화시기의 제어는 기본적으로 엔진 ECU의 영역이다. 제동장치 제어는 일반적으로 ABS와 병행하여 사용되고 있는데 이는 ABS에서 작동기로 쓰이는 Hydraulic Unit을 공유하기 위함이다. ABS가 장착되지 않은 차량의 경우 특별한 작동기의 부가없이 소프트웨어의 처리만으로도 가능한 연료분사 및 점화시기의 제어가 바람직하다. 이 경우 트랙션 제어 Unit과 엔진 ECU와의 긴밀한 협조가 필요하며, 이에 의해 근접 배치 혹은 일체화의 필요성이 요구된다.

현재 트랙션 제어는 구동륜에서의 미끄러짐이 발생한 다음에야 비로소 작동한다. 엔진 ECU와의 통합을 이루고 충분한 시험 및 조정을 이룬다면 과도한 미끄러짐이 발생하기 이전에 구동력의 효과적인 제어에 의해 성능을 증대시킬 수 있을 것이다.

5. 맺음말

엔진 ECU의 개발 현황과 타 제어장치와의

통합 문제 특히 트랙션 제어와의 통합 문제를 개괄적으로 서술하였다. 현대의 자동차에 있어서 전자 제어장치는 필수 불가결한 요소로서 등장한 지 오래고 그 비중이 날로 커지고 있음은 주지의 사실이다. 국내에서의 자동차 전자 제어장치의 개발이 최근에 와서야 그 중요성의 인식이 제고되고 있어 후발 주자로서의 시기적, 기술적 어려움이 예상된다. 이러한 가운데 더욱 효과적이고 체계적인 연구를 위해서는 업계와 학계 간의 긴밀한 협조체계가 필요하며 선진국과의 격차를 빠른 시일내에 줄여 나가기 위해서는 업계 간의 공동 노력이 절실하다 할 수 있다.

참고문헌

(1) Yoshiyuki, K., 1992, "Technical Trend of Car Electronics," Journal of JSAE, Vol. 46, No.2, pp.70~72.

(2) Sato, H., Yokoya, Y., Tabata, M., Minabe, H., Hiraiwa, N. and Okada, A., 1992, "Technical Trends of Integrated Chassis Control," Journal of JSAE, Vol.46, No.1, pp.55~61.

(3) 최종호, 1991, "신경회로망의 소개 및 계측응용," 대한기계학회 정밀계측기술강습회 교재, pp.144~163.

(4) Utikin, V.I., 1991, "Variable Structure Systems with Sliding Mode," A Survey, IEEE Trans. Autom. Control 22, pp. 212~222.

(5) Cho, D. and Hedrick, J., 1988, "Sliding Mode Fuel Injection Controller : Its Advantages," ASME, 88-WA/DSC-38.

(6) Chow, E.Y. and Willsky, A.S., 1984, "Analytic Redundancy and the Design of Robust Failure Detection Systems," IEEE Trans. Autom. Control 29, pp.603~614.

(7) 조병권, 1991, "Performance of Noble Metal Catalysts for Automotive Emission Control : Transient Response to Oscillatory Feedstream Composition," Presented in 한국 자동차부품 종합기술연구소 주최 자동차 배출가스 규제현황 및 대응 기술개발 세미나, pp.63~100.

(8) 김연준, 1992, "녹크센서를 이용한 점화시기 피이드백 제어에 관한 연구," 서울대학교 대학원 석사학위논문.

(9) Ito, M. and Isoda, K., 1992, "The Present and Future Trends of Traction Control System," Journal of JSAE, Vol.46, No.2, pp.32~37.