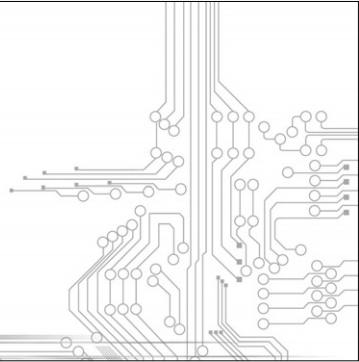


# 자동차 파워트레인 제어의 시스템 식별에 대한 기대

足立修一, 게이오대학 이공학부

橋本誠司, 군마대학 공학부



## 머리말

최근 자동차 산업을 중심으로 하여 모델 기반 개발(Model-Based Development, MBD)과 같이 ‘모델 기반 OO’라는 키워드가 주목을 받고 있다. OO에 들어가는 단어와 그 용어를 사용하는 입장에 따라 다양한 해석이 있지만, 본 고에서는 ‘모델 기반 제어’(Model-Based Control : 이하 MBC로 줄임)와 그것의 자동차에의 응용에 대해 논하고자 한다.

현대 제어, 로부스트 제어, 그리고 모델 예측 제어는 모두 MBC이다. 이러한 제어 이론은 대학 등에서는 활발하게 연구되고 있음에도 불구하고 실제 플랜트에 응용되는 사례가 많다고는 할 수 없다. 특히 프로세스 산업에서의 현실적인 문제로 인해 최종적으로는 PID 제어와 같은 고전 제어 이론을 적용하는 경우가 많았다. 여기에는 다양한 원인이 있다고 생각되지만 그 중 몇 가지를 열거해 본다.

(1) 기존과 동일한 정도의 제어 성능이 요구되고 있다면 무리를 해서 새로운 제어이론을 도입할 필요는 없다.

(2) MBC를 적용하기 위해서는 제어 대상의 수학 모델이 필요하게 되는데, 프로세스 제어에서는 일반적으로 모델링이 어렵다. 제1원리 모델링에서 얻을 수 있는 모델은 너무 복잡해 제어계 설계에는 이용하기 힘들고 조업중인 플랜트를 혼란스럽게 만드는 시스템 식별 실험은 가능하면 하고 싶지 않다.

(3) 첨단 제어 이론을 도입해도 그 후의 메인テナンス가 힘들다.

이에 대해 자동차 산업이 놓여 있는 현재의 입장은 상당히 다르다.

(1) 본 고에서 소개하는 배출가스 규제와 같이 매우 고정밀한 제어 성능이 요구되고 있다.

(2) 단기간 내에 다수 기종의 신차가 발표되고 있어 그것들에 대해 매회 다양한 제어계를 일일이 설계해내는 것은 매우 힘들다.

이것들에 대한 해결책 중 하나로 ‘모델에 기초한 제어계 설계’에 의한 제어계 설계 순서의 표준화가 있다. 특히 로부스트 제어이론의 등장에 의해 제어 대상의 수학 모델과 설계 사양을 부여할 수 있다면 설계자의 능력에 크게 의존하지 않는 제어계 설계법을 구축할 수 있게 되었다. 이 때 가장 필요한 것이 고정밀 수학 모델이며, 그것을 위해 로부스트 제어이론의 발전과 함께 모델링 시스템 식별의 중요성이 재인식되었다.

모델링의 왕도는 대상의 물리·화학적 제1원리에 기초한 제1원리 모델링이다. 그러나 제1원리 모델링에 의해 얻어지는 수학 모델은 통상 연립·비선형·편미분 방정식으로 부여되어 반드시 제어계 설계에 적합한 것은 아니다. 이 때에는 또 하나의 모델링법인 시스템 식별의 차례다. 자동차 제어를 위한 모델링을 고려한 경우 전술한 프로세스 산업과 결정적으로 다른 점은 시스템 식별 실험을 하는 것에 비교적 저항이 적다는 것을 들 수 있다.

자동차 산업에서는 지금까지도 많은 실험의 반복에 의해 제어

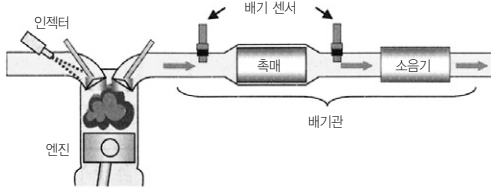


그림 1. 배출가스 정화 시스템의 구성

계 설계를 위한 모델(혹은 테이블)을 구축해 온 배경이 있다. 따라서 이론적으로 세련되며 시스템 식별법의 틀박수도 완비하고 있는 시스템 식별 이론은 자동차 산업에서 제1원리 모델과 어깨를 나란히 하는 강력한 모델링 툴이 될 수 있는 가능성을 숨기고 있다.

본 고에서는 온라인 시스템 식별법 중 하나인 가변 망각 요소를 이용한 촉차 최소 2승법(이하, RLS법으로 줄임)에 의한 배출가스 정화용 촉매 모델링과 열화 진단 사례를 소개한다.

## 시스템 식별법에 의한 배출가스용 촉매 모델링과 열화 진단

### 1. 촉매를 이용한 배출가스 정화 시스템

현재 주류인 배출가스 정화 시스템의 구성을 그림 1에 나타낸다. 엔진에서 배출되는 유해성분을 포함하는 가스는 촉매 내에서의 산화환원 반응과 산소 저장 능력을 이용한 화학반응에 의해 정화되어 대기중에 방출된다. 산소 저장 능력이란 환원반응에 의해 생긴 산소를 저장하는 능력으로 신제품 촉매일수록 저장 능력이 강하다.

이 저장 능력으로 축적된 산소 양에 의존하여 촉매 전후에 설치된 배기 센서의 출력신호 사이에 시간적인 응답 지연이 생긴다. 또한 이 저장량에 의존하여 정화율(산화환원의 반응 속도) 자체도 변화한다. 이러한 여러 효과는 촉매의 조성, 용량, 형상, 유속, 열화 상태 등에 영향을 받는다. 여기서 촉매가 열화하면 그 정화 능력이 떨어지고 유해 성분이 그대로 대기중으로 방출되게 된다.

이 촉매 열화의 정도는 운전자의 운전 방법에 따라 다르며, 자동차 주행거리와의 상관은 낮다. 따라서 단순하게 자동차가 일

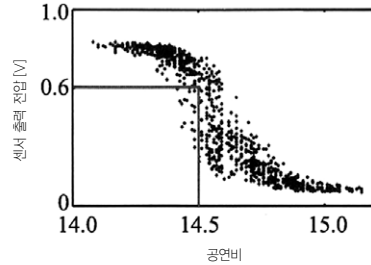


그림 2. 산소 센서의 출력 전압 특성

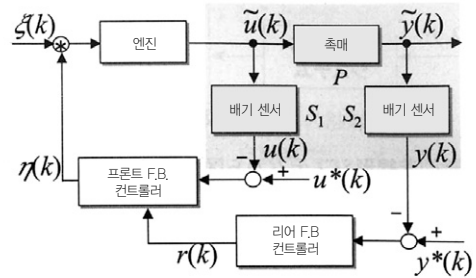


그림 3. 촉매 시스템 식별 실험을 위한 블록도

정 거리 주행했으므로 촉매가 열화되었다'고 판단할 수는 없다. 그림 1에서 보듯이 현재는 촉매 전후에 설치한 2개의 배기 센서 정보로부터 엔진 회전수가 흡기압 등 진단 대상의 운전 영역을 한정하여 간접적으로 열화 정도를 판단하고 있다. 따라서 실사용 조건 하에서의 촉매 열화 진단에는 반드시 충분한 것은 아니다. 환경 보전을 위해서도 촉매 열화를 차에서 실시간으로 감지하는 기술의 개발이 급선무이다.

그림 2에 배기 센서인 산소 센서의 출력 전압 특성을 나타낸다. 엔진의 공연비 제어에서 그 목표값은 가솔린이 완전 연소하는 이론 공연비(14.5) 또는 그에 대응하는 전압 출력(0.6V)으로 설정된다. 촉매의 정화 능력도 이 이론 공연비에서 최대가 된다. 따라서 촉매 정화성능의 유효 활용을 위해 촉매 전후에 설치한 배기 센서에 의해 2종류의 피드백 루프를 구성하여 공연비의 제어가 이루어지고 있다.

공연비 제어계의 블록 선도를 그림 3에 나타낸다.  $\xi$ 는 기본 연소 분사량이며 엔진 회전수나 흡기압에 의해 변화한다. 또한  $u$ 와  $y$ 는 각각 촉매의 입출력이 되는 공연비이며,  $\tilde{u}$ 와  $\tilde{y}$ 가 배기 센서에 의한 그 출력 전압이다. 프론트 피드백 컨트롤러의 출력  $r$

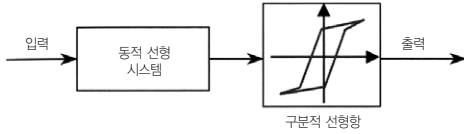


그림 4. 동적 비선형 시스템에서 구분적·동적 선형 시스템으로

는 연소 분사 보정량이라 불리고 있으며,  $\xi$ 를 몇 % 보정할 것인지와 같은 양이다. 따라서  $\eta$ 과  $\xi$ 의 편차가 아니라 곱을 산출하는 형식이 된다. 또한,  $r$ 은 리어 피드백 컨트롤러의 출력이며 이 신호에 의해 프론트 피드백 컨트롤러의 제어 오차를 보정하고 있다.

$u^*$ 와  $y^*$ 는 각각  $u$ 와  $y$ 의 목표값이며 0.6V 근방의 값으로 설정된다. 같은 그림에서 알 수 있듯이 촉매의 정화 능력 향상, 나아가 열화 진단에서는 그 모델이 필요하게 되지만 촉매 전후에 설치된 산소 센서 출력을 이용해 모델링을 할 경우  $y = S_2PS_1^{-1}u$ 가 되며 촉매와 함께 센서의 특성도 식별 대상에 포함된다.

이와 같이 운전 조건이나 열화에 의한 특성 변화와 함께 공연비에 대한 출력 전압의 비선형 특성도 실시간 열화 진단을 곤란하게 하는 요인 중 하나이다.

이상에서 제1원리 모델링은 물론이고 최소2승법 등의 오프라인 선형 시스템 식별법으로도 고정밀 모델링은 곤란하게 된다.

## 2. 가변 망각 요소에 기초한 촉매의 열화진단 방법

전술한 바와 같이 촉매는 동적인 비선형 시간 변화 시스템이다. 시간 변화 시스템에 대해서는 RLS법과 같은 온라인 시스템 식별법을 적용하는 것은 일반적이지만 비선형성이 강한 시스템에서는 고정밀 모델링은 기대할 수 없다.

본 제어 대상은 촉매의 비선형성과 함께 산소 센서의 히스테리시스 특성이 지배적이기 때문에 대상을 동적 선형 시스템과 정적 비선형성으로 구성되는 위너 모델이라고 가정할 수 있다. 여기서 히스테리시스 특성을 4개, 혹은 6개와 같은 복수의 선형 구간의 조합이라고 생각하면, 그림 4와 같이 촉매의 특성을 동적·구분적 선형 시스템으로 나타낼 수 있다.

구분적 선형 시스템의 식별에 대해서는 하이브리드 모델링에 기초한 접근도 있지만 여기서는 특성 변화를 적응적으로 식별하

는 접근인 가변 망각 요소(VFF)를 이용한 RLS법을 적용한다. 따라서 가령 VFF를 작게 하여 RLS법을 적용하면 상승이나 하강, 그 구간에 따라 다른 촉매 특성을 분할적으로 식별할 수 있을 것으로 기대된다.

이어서 촉매의 열화에 대해서 살펴본다. 촉매는 산화환원과 산소 저장의 2가지 능력을 갖는다는 것은 전술한 바와 같다. 따라서 촉매의 열화 정도가 커짐에 따라 산소 센서의 히스테리시스 특성은 남지만 유해 성분을 정화하는 2가지 능력이 약해져 촉매 자체의 비선형성은 약해진다. 또한 사전 실험에 의해 촉매로부터의 출력신호  $y$ 의 상승이나 하강에 동반하여 망각 요소의 값은 크게 변화하는 것을 확인하고 있다. 이것은  $y$ 의 상승이나 하강 시에 산소 센서의 히스테리시스 특성으로 인해 대상이 변화했다가 망각 요소가 판단하고 있는 데 기인한다. 이상에서 열화 정도가 커짐에 따라  $y$ 의 변화도 빈번해지고, 망각 요소의 변화 정도도 커진다. 이 망각 요소의 변화 정도에 착안한 열화 진단 방법을 이하에 제안한다.

모든 샘플링 점에 대해 다음 식의 판정을 도입한다.

$$\lambda(k-i) \leq \lambda_b, \quad \forall i = 0, \dots, l \quad (1)$$

즉, 망각 요소의 값  $\lambda$ 가 현시각  $k$ 에서 1 샘플에 걸쳐 그 역치  $\lambda_b$  이하라면 식별 대상의 구분적 또는 동적으로 특성이 변화했다고 판단한다. 이 부등식을 만족하는 비율을 망각 요소 변화율  $R_{VFF}$ 로 하여 다음 식으로 정의한다.

$$R_{VFF} = \frac{T_\lambda}{T_{exp}} \times 100 \quad [\%] \quad (2)$$

단,  $T_\lambda$ 는 판정식 (1)을 만족시키는 샘플 수에 샘플링 시간을 곱한 값,  $T_{exp}$ 는 모든 식별 실험 시간에서 모두 단위는 초이다. 이  $R_{VFF}$ 의 값에 기초하여 열화 진단을 실시한다.

## 3. 식별 실험과 열화 진단의 결과

여기서는 제안하는 VFF를 이용한 RLS법에 의한 촉매의 열화 진단법의 유효성을 식별 실험에 의해 검증한다. 시스템 동정에

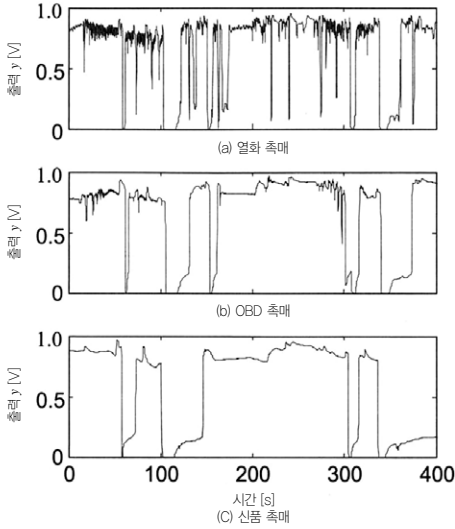


그림 5. 각 촉매에 대한 출력 데이터의 비교

서는  $u$ 가 입력,  $y$ 가 출력이 되며, 그 문제는 그림 3에서 명확히 했듯이 오픈 루프 시스템 식별 문제가 된다. 그러나  $\xi$ 가 운전 조건의 차이에 의해 변화하기 때문에 시각 설정의 외부 입력이 존재하고 있다고 생각할 수 있으며, 직접법의 가식별성은 보증되지 않는다.

실험에서는 열화 정도가 서로 다른 3종류의 촉매, 1) 열화 촉매 : 일반 평가 시에 사용하는 촉매(6만 km 주행에 상당하는 열화의) 10배 열화한 촉매, 2) OBD 촉매 : 일반 평가 시에 사용하는 촉매의 4배 열화한 촉매. 3) 신품 촉매 : 열화하지 않은 신품 촉매를 이용했다.

운전 조건으로서는 현재 이용되고 있는 10-15 모드와 앞으로 도입 예정인 JC08 모드의 2가지 주행 패턴을 이용했다. 10-15 모드는 가속이나 정상이 직선으로 연결되어 있는 데 대해 JC08 모드는 과도 상태가 많아 실제 실험 조건에 가깝다. 여기서는 각 주행 모드별로 2회(라벨 1, 라벨 2로 하여 구별), 총 4회의 식별 실험을 실시했다. 식별 실험에서의 샘플링 주기는 0.1초, 실험시간은 1,400초로 했다.

일례로서 그림 5에 JC08 모드, 라벨 1에 대한 각종 촉매에서의 출력 데이터(일부분 0~400초를 기재)를 나타낸다. 지면 관계상 입력 데이터는 할애했지만 모든 동일 조건 하에서의 실험

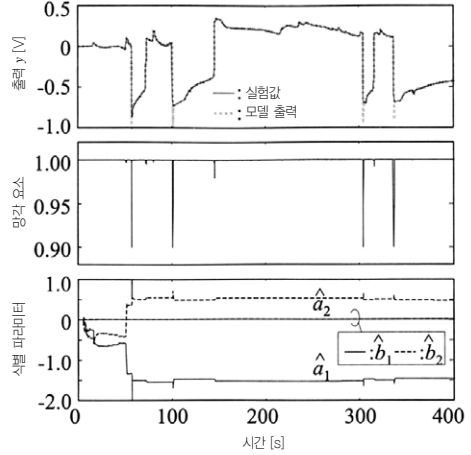


그림 6. 가변 망각 요소를 이용한 RLS법의 식별 결과

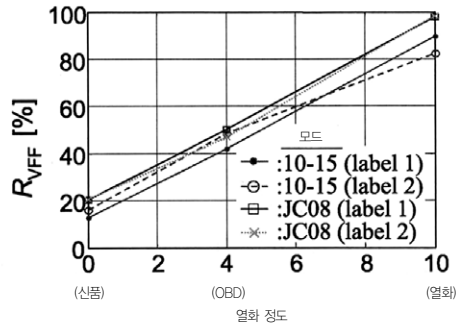


그림 7. 촉매 열화에 대한 망각 요소의 변화율

을 실시했기 때문에 모두 동일한 특성을 나타낸다. 그림 5에서 열화 촉매는 고주파 성분을 포함해 비교적 진동적인 응답을 보이는 데 대해 신품 촉매가 됨에 따라 고주파 성분이 없어짐을 확인할 수 있다. 또한, 0.1V와 0.8V 근방의 값을 취하는 경우가 많아지고 있는데, 이것은 그림 2에 나타난 산소 센서의 비선형 스위칭 특성에 기인하고 있다.

각 입출력 데이터간 코히어런스 해석 결과에서는 신품 촉매, OBD 촉매, 열화 촉매 순으로 상관성이 증가하지만 열화 촉매에서도 그 최대값은 0.6 정도여서 전체적인 선형성은 낮다. 따라서 통상의 일괄처리적인 선형 식별법에서는 식별이 곤란한 시스템임을 알 수 있다.

이어서 VFF를 이용한 RLS법에 의해 각 촉매의 식별을 실시했다. 실험 데이터에서는 상승 하강의 응답 사이에 50~100점의

데이터가 존재하고 있으며, 그 사이에서 망각 요소를 작게 함으로써 상승이나 하강에서 서로 다른 특성을 분할적으로 식별할 수 있는 가능성이 있다.

여기서는 식별 모델을 ARX 모델로 하고 차수는 스펙트럼 해석법과 비교해 2차로 했다. 또한 낭비 시간은 1로 했다. 오프셋 제거에는 확률 근사법의 알고리즘에 의해 샘플 평균값을 온라인 추정하고, 얻어진 입출력 데이터에서 뺐다. 망각 요소의 하한값  $\lambda_{min}$ 은 0.9로 하고 메모리 호라이즌(horizon)을 최단 10은 확보할 수 있도록 했다.

일례로서 비선형성이 가장 강하다고 생각되는 신폼 촉매의 식별 결과를 그림 6에 나타낸다. 상단은 모델 출력과 실험 출력, 중간단은 망각 요소의 값, 하단은 ARX 모델의 파라미터 추정값  $[\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{b}_1, \hat{b}_2]$ 를 나타내고 있다. 그림에서 모든 촉매에 대해 모델 출력(점선)과 실험 출력(실선)을 구별할 수 없을수록 일치하고 있어 고정밀 식별을 달성하고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 실험 출력의 상승과 하강에 동반하여 망각 요소의 값은 크게 감소하고 있다. 이것은 산소 센서의 히스테리시스 특성에 의한 구분 선형적 변화에 대해 망각 요소를 감소시킴으로써 과거의 데이터를 빠르게 망각하고 고정밀 파라미터 식별을 축차적으로 하고 있는 데 기인한다.

촉매 열화에 따르는 실험 출력의 변화도 빈번하게 발생하지만 이 증대에 따른 망각 요소의 변화율이 증가한다는 사실로부터도 히스테리시스 특성에 기인한 구분 선형적 변화의 메커니즘을 확

인할 수 있다. 또한, 신폼 촉매와 마찬가지로 OBD 촉매, 열화 촉매에서도 양호한 식별 결과를 얻을 수 있었던 점 및 오프라인 최소2승법에서는 구분 선형성을 고려할 수 없기 때문에 비교적 식별 조건이 좋은 열화 촉매에서조차 모델 출력이 실험 출력을 따라가지 못했다는 것도 부기해 둔다.

각 모드의 모든 데이터에 대해 열화 정도에 대한 망각 요소 변화율을 도입한 결과를 그림 7에 나타낸다. 여기서는 몇 회의 시행착오 결과  $\lambda = 0.9999$ ,  $l = 10$ 으로 했다. 그림의 가로축은 전술한 6만 km 주행에 상당하는 열화를 열화 정보 1로 규격화한 경우의 열화 정도를 나타낸다. 이로써 열화 정도에 대해 거의 선형으로 망각 요소 변화율이 증가하고 있어 이 값을 촉매 열화 진단에 이용하는 것의 타당성이 검증되었다.

## 맺음말

본 고에서는 자동차 배출가스 정화용 촉매의 모델링과 열화 진단 사례를 소개했다. 자동차에서는 오프라인, 온라인 쌍방의 환경에서 다양한 데이터(신호)를 계측할 수 있으며, 그것들을 적극적으로 활용한 모델링법인 시스템 식별에 대한 기대가 크다.

마지막으로 본 연구 수행에 크게 협력해준 우츠노미야 대학원생(당시)인 오카다 야스시(岡田康志) 씨, 오쿠다 히로유키(奥田裕之) 씨에게 감사를 전한다. 