

# 모델추정 기법을 이용한 터보제트엔진의 상태추정

김중회\* · 김동춘\*\* · 이상정\*\*\*

## State Estimation of Turbojet Engine Using Nonlinear Model

Jung hoe Kim\* · Dongchoon Gim\*\* · Sang jeong Lee\*\*\*

### ABSTRACT

A propulsion controller for vehicles should be designed to overcome a sensor failure during a flight, and it is necessary to control the system properly at any circumstances. Therefore, the vehicles need to retain reliability on the sensor measurements by implementing extra sensors to replace the original control sensors in case of their failure. This paper presents the MIMO NARX model by simulation which substitutes measured values with estimated ones by the state estimation technique in case of a sensor failure in a turbojet engine. It is also presented that the NARX model can be adapted as an engine model in HILS equipments.

### 초 록

비행체의 경우 운용 중에 센서 등의 고장이 발생하더라도 이를 극복하고 지속적으로 운용이 가능하게 설계하여야 한다. 이러한 비행체에는 중요 센서의 고장에 대비하여 대체 가능한 센서를 여분으로 장착하여 측정값에 대한 신뢰성을 확보하고 있다.

본 논문에서는 시뮬레이션을 통하여 적용 대상 터보제트엔진의 센서 측정값을 MIMO NARX 모델을 사용하여 센서 결함이 발생하더라도 상태추정을 통하여 대체 가능함을 보였고, HILS 장비에 적용할 수 있는 엔진 모델로 사용가능함을 보였다.

Key Words: Nonlinear ARX Model (NARX), Nonlinear Model (비선형모델), State Estimation (상태추정), MIMO (Multiple-Input Multiple-Output, 다중입출력), Reconfiguration (재구성)

### 1. 서 론

비행체의 경우 운용 중에 센서 등의 고장이 발생하더라도 이를 극복하고 지속적으로 운용이 가능하게 설계하여야 한다. 특히 비행체의 핵심요소인 엔진의 경우 이러한 요구는 필수적이다. 이를 위하여 엔진에 적용되는 중요 센서에 대해서는

\* 국방과학연구소

\*\* (주)스마트텍

\*\*\* 충남대학교 전자전과정보통신공학부

† 교신저자, E-mail: mackim85@hanmail.net

고장에 대비하여 대체 가능한 센서를 여분으로 장착하여 센서 고장을 극복하거나[1], 소프트웨어적으로 고장난 센서의 측정값을 대체 또는 재구성 가능하게 하여 대비하고 있다[2, 7, 8].

본 논문에서는 하드웨어적인 센서 다중화를 통하지 않고 시스템 식별(System Identification)을 통하여 소프트웨어 적인 모델을 구성하여 센서 고장이 발생하더라도 센서값을 대체 또는 재구성할 수 있음을 보였다. 또한 구성된 추정모델을 엔진의 수학적 모델링을 대체하여 HILS 장비 등에 적용 가능성을 보였다.

## 2. 대상 시스템의 특성

### 2.1 연구 대상의 구성

본 논문에서 연구대상은 Fig. 1 과 같은 터보제트엔진으로 압축기의 입구에서 흡입되는 공기의 압력(Pcin) 과 온도(Tcin), 압축기 출구의 압력(Pcdis), 터빈 입구의 온도(Ttin), 압축기의 회전수(Nrpm) 등을 측정하며, 전류(Ivalve)를 이용하여 연료유량밸브를 제어하여 연료량을 조절한다.

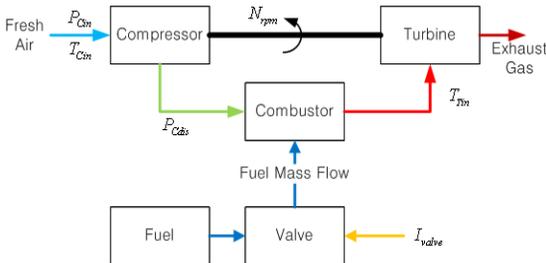


Fig. 1 System Model of Turbojet Engine

### 2.2 연구 대상의 특성

Figure 1 의 터보제트엔진은 고온, 고회전 환경하에서 동작하여 센서 결함에 대한 대책이 필수적이다. 본 연구의 대상 시스템은 센서의 다중화를 채용하지 않고 센서 결함 시에 단순하게 정상적으로 동작하는 센서의 물리량을 사용하여 결함 센서의 물리량을 산술적으로 계산하여 대체하는 알고리즘을 사용하고 있다.

그러나 다중 센서 결함이 발생할 경우 운전이 불안정하게 되거나 지속적인 운용이 불가능하게 될 가능성이 있다. 또한 연료유량밸브를 조절하는 계통에서 고장이 발생할 경우 엔진을 전혀 제어할 수 없는 상황에 처하는 One-Point Failure 를 가지고 있다.

본 논문에서는 대상 시스템이 가지고 있는 이중화 부재 등의 한계 내에서 이를 극복할 수 있는 센서의 재구성 방안 및 상태 추정을 통한 엔진 모델 수립의 가능성을 확인하고자 한다.

## 3. 추정모델의 설계

### 3.1 추정모델

시스템에 입출력에 대한 수학적 모델을 정확히 알기 힘든 시스템에 대해서 시스템 식별(System Identification)하는 방법에는 ARX, ARMAX, OE, FIR 등이 있으나 각각의 시스템 특성에 따라서 적합한 방법을 이용하여야 한다 [3]. 본 논문에서는 사전 연구등을 통하여 NARX 가 효과적임을 보였다[7]. 본 논문에서는 시간영역에서의 입력 및 측정된 출력의 시리저를 Sigmoid Network 함수를 이용하여 시스템 식별을 수행하는 구조를 사용하였다[4, 5, 6]. Figure 2 및 Figure 3 은 본 논문에서 채택한 NARX 의 형식 및 구조를 나타내고 있다.

$$y_k = F(u_k, u_{k-1}, u_{k-2}, \dots, y_{k-1}, y_{k-2}, \dots) + \epsilon_k$$

$u$  : 입력 신호 (Ivalve, Pcin, Tcin)

$y$  : 출력 신호 (Nrpm, Pcdis, Ttin)

$F$  : Sigmoid Network

각 첨자는 다음과 같이 정의된다.

I=전류, P=압력, T=온도, N=회전속도

c = 압축기, t = 터빈

in = inlet, dis = discharge

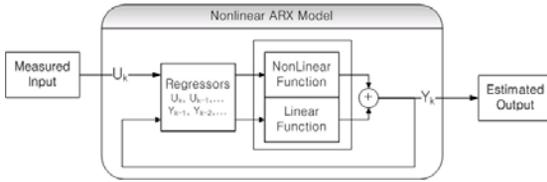


Fig. 2 Nonlinear ARX Model

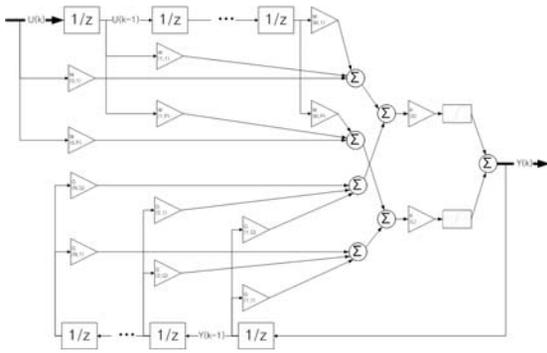


Fig. 3 Structure of NARX

### 3.2 다중입출력 NARX 모델 설계

추정모델을 단일입출력(SISO : Single-Input Single-Output)으로 구성할 수 있으나 엔진의 운용 고도, 비행체의 속도 및 대기 조건 등을 극복하기에는 한계가 있다. 이러한 비선형성을 극복하려면 다중입출력(MIMO : Multiple-Input Multiple-Output) 형태의 추정 모델이 유효하다 [4,6,8]. 본 논문에서는 압축기 입구의 압력 및 온도 측정값 및 밸브제어 출력값을 추정모델의 다중입력으로 사용하고 압축기 출구 압력, 엔진 회전속도, 터빈 입구 온도를 추정출력으로 나타나는 모델을 Figure 4 와 같이 설계하였다. 또한 다중 센서 결함에 대비하여 Figure 5 와 같이 밸브제어, 엔진 회전속도, 터빈 입구 온도를 입력으로 하고 압축기 입구의 온도 및 압력을 추정출력으로 하는 모델에 대해서도 병렬로 구성하여 설계하였다.

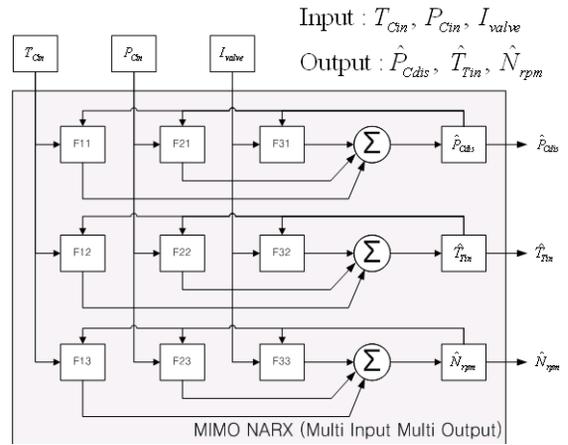


Fig. 4 MIMO NARX : Forward Case

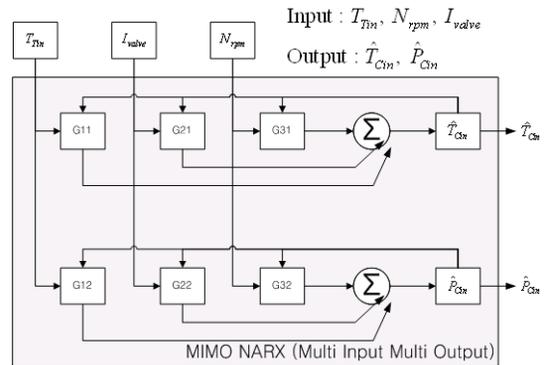


Fig. 5 MIMO NARX : Backward Case

## 4. 시뮬레이션

3.2에서 설계된 모델을 사용하여 NARX 를 구성하여 Figure 6의 실제엔진의 시험 결과를 데이터로 하여 시뮬레이션 한 결과 Table 1 및 Table 2 의 결과를 얻을 수 있었다. 비선형이 강한 특성을 가지고 있음에도 전반적으로 추정 오차가 최대 6 % 를 넘지 않는 양호한 성능을 나타내고 있다.

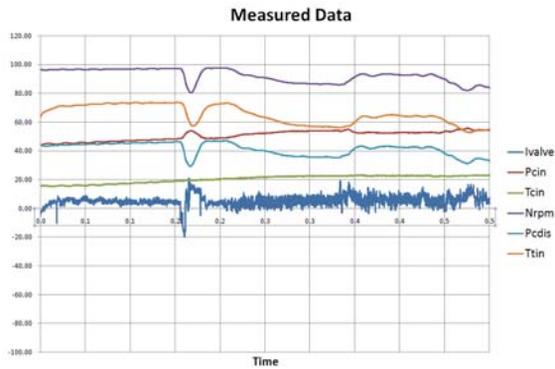


Fig. 6 Measured Data

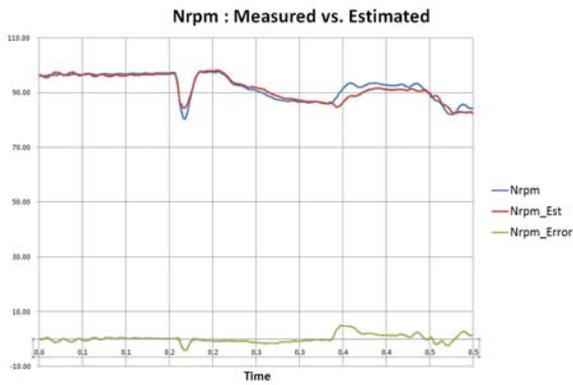


Fig. 7 Measured vs. Estimated : Nrpm (Forward Case)

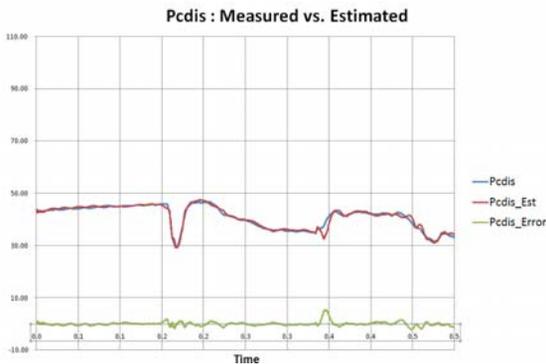


Fig. 8 Measured vs. Estimated : Pcdis (Forward Case)

Table. 1 Result of Forward Case

Error	Nrpm_Error	Pcdis_Error	Ttin_Error
Max	5.04	5.37	3.76
Min	-4.12	-3.62	-3.83

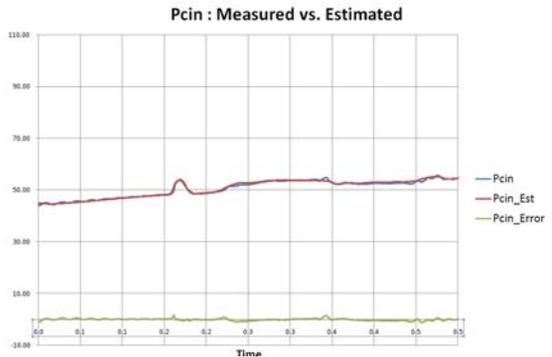


Fig. 9 Measured vs. Estimated : Pcin (Backward Case)

Table. 2 Result of Backward Case

Error	Pcin_Error	Tcin_Error
Max	1.57	0.79
Min	-2.47	-0.72

## 6. 결론

본 논문에서는 터보제트엔진의 모델구성 및 센서 측정값 재구성을 위하여 MIMO NARX 모델을 시스템 식별을 통하여 구성하여 시뮬레이션을 통하여 상태를 추정하여 6 % 이내의 오차로 상태값을 추정할 수 있음을 보였다.

그러나 다중 센서 결함이 발생하여 모델에 입력으로 사용되는 상태값을 신뢰할 수 없는 경우에 상태 추정을 통한 센서 측정값의 재구성 자체가 불가능하게 되는 문제가 있다. 입력으로 사용되는 상태값에 대해서는 Backward Case 뿐만 아니라 비행체의 운영 환경(고도, 속도, 대기 조

건 등)을 기반으로 하는 상태추정에 대한 추가 연구가 필요하다. 이를 포함하여 앞으로 다음과 같은 연구를 수행할 계획이다.

- 다중 센서 결합에 대한 고장 진단
- 엔진 내부상태값 추정모델을 이용한 엔진 HILS 의 구성
- 엔진 HILS 을 이용한 센서 결합에 대한 측정값 재구성 및 고장 배제를 통한 강인한 엔진제어 연구

#### 참 고 문 헌

1. Guillaume J.J. Ducard, "Fault-tolerant Flight Control and Guidance Systems," 2nd ed., Springer-Verlag, 2009
2. Israel Koren, C. Mani Krishna, "Fault-Tolerant Syatems," Elsevier, Inc., 2007
3. Christiaan Heij, André Ran, Freek van Schagen, "Introduction to Mathematical Systems Theory Linear Systems, Identification and Control," Birkhäuser Verlag, 2007
4. E. Radmaneshfar, M. Karrari, "A New Method for Structure Detection of Nonlinear ARX model," Proceedings of the World Congress on Engineering 2007 Vol I WCE 2007, July 2 - 4, 2007, London, U.K.
5. Steven W. Smith, "The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing," 2nd ed., DSPguide.com. 1999
6. J.S. Sakellariou and S.D. Fassois, "Nonlinear ARX (NARX) based identification and fault detection in a 2 DOF system with cubic stiffness," International Conference on Noise and Vibration Engineering, Sep 16-18, 2002, Leuven, Belgium
7. 김중희, 김동춘, 이상정, "비선형 ARX 모델을 이용한 센서 고장에 강인한 추진체 제어기 설계," 한국추진공학회 추계학술대회, 2011
8. Erkan Kaplanoğlu, Koray K. Şafak, H. Selçuk Varol, "Real-Time Parameter Estimation of a MIMO System," IMECS 2008, pp19-21 March, 2008, Hong Kong