

# IMM 필터를 이용한 고장허용 제어기법 및 비행 제어시스템에의 응용

## Fault Tolerant Control Design Using IMM Filter with an Application to a Flight Control System

°김주호\*, 황태현\*\*, 최재원\*\*\*

\* 부산대학교 기계공학부(Tel: 051-510-3203; Fax: 051-510-2470; E-mail: jhokim@hyowon.pusan.ac.kr)  
\*\* 부산대학교 기계공학부(Tel: 051-510-3203; Fax: 051-510-2470; E-mail: hevhai@hyowon.pusan.ac.kr)  
\*\*\* 부산대학교 기계공학부(Tel: 051-510-2470; Fax: 051-510-2470; E-mail: choijw@hyowon.pusan.ac.kr)

**Abstract :** In this paper, an integrated design of fault detection, diagnosis and reconfigurable control for multi-input and multi-output system is proposed. It is based on the interacting multiple model estimation algorithm, which is one of the most cost-effective adaptive estimation techniques for systems involving structural and/or parametric changes. This research focuses on the method to recover the performance of a system with failed actuators by switching plant models and controllers appropriately. The proposed scheme is applied to a fault tolerant control design for flight control system.

**Keywords :** fault detection and diagnosis, interacting multiple model estimation, fault tolerant control

### 1. 서론

시스템이 복잡해질수록 시스템을 구성하는 각 요소들에 고장(fault)이 발생할 가능성은 커진다. 이러한 고장은 시스템의 안정성(stability)에 큰 영향을 미칠 수도 있기 때문에 항공기와 같은 비행 제어 시스템에서는 작은 고장으로도 큰 인적, 물적 손실이 발생할 수 있다. 이러한 고장에 대처하기 위하여 1980년대 중반까지 시스템의 고장 탐지 및 진단(fault detection and diagnosis, FDD) 등에 대한 많은 연구가 진행되어왔다. 그러나, FDD는 시스템에 발생한 고장의 유무, 크기, 위치 등만 알 수 있을 뿐, 고장이 발생한 시스템(faulty system)의 제어에 직접 관여할 수는 없다. 1980년대 중반 이후 고장허용 제어(fault tolerant control, FTC)의 개념이 등장하였다[1-5]. FTC란 시스템에 고장이 발생하더라도 고장에 상관없이 원하는 성능이나 안정성을 얻을 수 있도록 제어기를 설계하는 방법을 말하는 것으로, 수동적인 접근법(passive approach)과 능동적인 접근법(active approach)으로 나눌 수 있다. 수동적인 접근법은 견실 제어 기법(robust control techniques)을 이용하여 임의의 고장 입력에 대한 폐루프 시스템(closed-loop system)의 민감도(sensitivity)를 낮추는 방법이며, 능동적인 접근법은 고장이 발생한 시스템이 공칭 시스템(nominal system)과 유사한 성능이나 안정성을 가지도록 새롭게 제어 파라미터(control parameters)들을 결정하는 방법으로 적응제어(adaptive control), 통합 접근법(integrated approach), 다목적 문제(multi-objective problem), 감독 제어(supervised control) 등의 방법을 사용한다[2]. 이러한 FTC의 개념이 등장하면서 고장이 발생한 시스템에 대한 재구성 제어(reconfigurable control)에 대한 연구가 진행되고 있다[3]. 재구성 제어란 시스템에 고장이 발생할 경우에 고장이 발생한 시스템에 대하여 제어기를 재구성하고 공칭 시스템에 대하여 설계된 제어기를 재구성된 제어기로 교체하여 고장에 상관없이 공칭 시스템과 유사한 성능이나 안정성을 얻을 수 있도록 제어하는 방법이다. 그러므로, FDD 과정을 통하여 시스템의 고장에 대한 정확한 정보를 얻는 것이 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다. 그런데, 대부분의 재구성 제어에 대한 연구에서는 FDD 과정이 완벽하게 된다고 가정하고, 단지 고장의 종류에 따른 재구성 제어기 설계에만 몰두하고 있다. 그러므로, FDD 과정에서의 시간지연(time delay), 불확실

성(uncertainty) 등에 대한 영향을 고려할 수 없으므로, 재구성 제어만으로 고장이 발생한 시스템을 제어하는 데에는 무리가 있다. 따라서, FDD와 재구성 제어를 통합하는 연구가 필요하다[3-5].

본 논문에서는 F-16 전투기의 조종면(control surface)이 물리적으로 파손되어 고장이 발생한 경우에 대하여 FDD와 재구성 제어가 통합된 고장허용 제어기를 설계한다. 우선, 발생 가능한 F-16 전투기 조종면의 파손에 대하여 미리 고장 모델군(model bank)과 그에 따른 재구성 제어기를 설계해두고, 고장이 발생할 경우 상호 작용 다중모델(interaction multiple-model, IMM) 필터(filter)[5]를 이용하여 고장 모델군 중에 가장 적절한 모델을 선택하여, 제어기를 그에 대응하는 재구성 제어기로 교체하는 방법을 사용하여 고장에 대처할 수 있는 방법을 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 본 서론에 이어, 2장에서는 F-16 전투기의 고장 모델군을 구성하는 방법에 대하여 기술하고, 3장에서는 각 고장 모델에 대응하는 재구성 제어기를 설계하는 방법을 기술하며, 4장에서는 고장이 발생할 경우 IMM 필터를 이용하여 고장 모델군 중에서 가장 적절한 모델을 선정하는 방법을 기술한다. 그리고, 5장에서는 시뮬레이션을 통하여 제안한 방법의 성능을 평가하고, 마지막으로 6장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

### 2. 고장 모델군 구성

서론에서 간단하게 언급한 바와 같이 본 논문에서는 발생 가능한 F-16 전투기 조종면의 파손에 대하여 미리 고장 모델군과 그에 따른 제어기를 설계해두고, 고장이 발생할 경우 IMM 필터를 이용하여 고장 모델군 중에 가장 적절한 모델을 선택하여 제어기를 교체하는 방법을 사용한다. 따라서, 조종면 고장에 대한 고장 모델군과 그에 대응하는 재구성 제어기가 미리 설계되어 있어야 한다. 본 장에서는 조종면 고장에 따른 고장 모델군 구성방법에 대하여 기술한다.

시스템에 고장이 발생하면 시스템의 상태방정식(state equation)은 다음과 같이 변한다.

$$\dot{x} = (A + \Delta A)x + (B + \Delta B)u \quad (1)$$