

고장허용 비행제어시스템

김 유 단

(서울대학교 항공우주공학과)

1. 서 론

최근 과학기술 분야에서는 불과 수 십년 전에는 상상할 수도 없었을 정도로 괄목할 만한 성장이 거듭되고 있으며, 이에 따라 매우 다양한 기능을 갖는 기계·전자 제품들이 생산되고 있다. 사용자들이 요구하는 복잡하고 다양한 사양들을 모두 수용하도록 시스템을 설계하는 과정에서 시스템이 매우 복잡해졌고, 따라서 고도로 복잡화된 시스템들이 늘어남에 따라 부분 요소들의 고장(fault or failure)에 의해 전체 시스템이 문제를 일으킬 가능성 역시 크게 증가하고 있다.

고장발생의 대표적인 결과는 동작의 중단이나 오동작 등으로 인한 경제적인 손실이겠지만, 고장의 발생이 곧바로 귀중한 인명에 영향을 끼치는 시스템 또한 적지 않다. 그 대표적인 예가 바로 항공기이다. 최근의 항공기 사고를 돌이켜 보면, 항공기에 발생하는 고장이 얼마나 참혹한 결과를 빚게 되는지 잘 알 수 있다. 이처럼 안전성이 가장 중요한 설계관심이 되는 시스템을 안전성-중요 (safety-critical) 시스템이라 부른다. 다루고 있는 대상 시스템에 따라 고장의 원인은 매우 다양하다. 특히, 항공기의 안전에 심각한 위협을 주는 것은 환경적인 요인일 수도 있고, 항공기의 노후화와 같은 운용상의 요인일 수도 있다. 이 글에서는 항공기 시스템의 고장을 진단하고 관리하는 방법과 최근의 연구동향에 대해서 살펴보기로 한다.

2. 비행제어시스템

항공우주선진국에서는 복잡한 기동이 가능한 고성능 전투기, 에너지를 효율적으로 절약하며 쾌적한 탑승감을 보장하는 대형 여객기, 그리고 인공위성을 원하는 궤도에 정확하게 투입하는 발사체를 개발하는 과정에서 복잡하고 다양한 기능을 갖는 비행제어시스템을 설계하여 장착하고 있다. 고성능 전투기는 기동성을 개선하기 위해서 추력벡터링 시스템을 도입하고 있으며, 스텔스(stealth) 기능을 고려하기

위해서 전통적인 개념에서 벗어난 항공기가 설계되고 있다. 또한, 새로운 특성을 갖는 작동기나 센서가 고려되거나, 부가적인 제어면(control surface)의 추가, 수직꼬리날개의 제거 등 새로운 형상의 비행체를 설계하고 있다. 여객기의 경우에는 추력에 의한 사고를 방지하기 위한 지면근접(ground-proximity) 경보시스템이나, 핵심부품의 상태를 모니터링하고 고장발생에 능동적으로 대처할 수 있는 비행관리시스템 등 안전성을 고려한 새로운 기능이 강력히 요구되고 있다. 이러한 요구를 만족시키기 위해 전기·전자·컴퓨터·정밀기계·재료·광학 등 다양한 분야에서 개발된 하드웨어 및 소프트웨어 기술이 항공기 시스템 설계에 반영되고 있다. 결국, 다양한 분야의 기술을 통합적으로 설계하고, 운영·관리하기 위한 비행관리시스템 기술의 중요성이 증대하고 있다. 즉, 새로이 개발되고 있는 스마트 작동기의 도입, 광학적으로 전달되는 신호에 의해 작동하는 센서/작동기를 이용한 Fly-By-Light 및 Power-By-Wire 시스템과 같은 첨단 핵심부품의 도입, 그리고 변화하는 캠버(camber)를 갖는 날개를 운용하기 위한 제어시스템 등과 같이 새로운 개념의 항공기 시스템을 개발하고자 함에 따라, 뛰어난(noble), 지능적이며(intelligent), 통합적인(integrated) 비행제어시스템 설계가 비행체 설계의 핵심기술로 차지하는 중요도가 급격히 증대하고 있는 것이다.

항공우주선진국에서 개발하고 있는 고성능 항공기는 대부분 비행조종 컴퓨터를 탑재한 전자식 비행관리시스템을 채택하고 있다. 이러한 비행제어시스템은 미국의 NASA를 중심으로 하여 X-29, X-31과 같은 시험기에 탑재하여 기술적 타당성을 검증하였고, 기존의 항공기를 개조한 YF-16, AFTI/F-16, F/A-18E/F Super Hornet, F/A HARV 등을 이용한 다양한 시험비행을 통하여 실제 시스템에 적용이 가능함을 검증하였다. 이렇게 검증된 비행제어시스템 기술은 F-22, Eurofighter 2000, 러시아의 Su-37 등으로 실용화되고 있다. 선진국에서 개발되고 있는 고성능 전투기, 중대형 여객기, 소형 Business Jet 등과 같은 고성능 항공기에는 디지털 FBW(Fly-By-Wire) 또는 광신호에 의해 작동되는 FBL(Fly-By-Light)를 채용하여, 원하는 비행성능을 발휘하기 위해서 비행조종 컴퓨터가 감지기로부터 얻은 신호

를 이용하여 직접 각종 작동기에 명령을 내릴 수 있게 되었으므로 항공기의 조종성능이 획기적으로 개선되었다. 특히, 조종사의 수동조작에 의해서는 근본적으로 불가능한 복잡한 조종문제를 디지털 컴퓨터를 통해 해결하여, 항공기 이착륙 비행을 용이하게 할 뿐만 아니라, 안전성 향상, 탑승감 개선 등 기능면에서도 비약적인 발전을 가능하게 하고 있다. 전투기의 경우에는 디지털 컴퓨터의 도움을 받아 임무를 수행하는 통합 비행제어시스템 기술이 응용되고 있는데, 이 시스템은 조종시스템과 화기관제시스템, 추진시스템 등 모든 시스템을 통합제어하여 성능을 최대로 향상시키고 있다. 맥도널더글러스사와 NASA가 공동으로 설계하여 F-15에 장착한 시험용 자기진단 비행제어시스템은 항공기 조종면에 부분적인 고장이 일어났을 때에도 소프트웨어에 의해 고장발생 여부를 판단하여, 항공기가 정상적으로 비행할 수 있도록 비행제어시스템을 자동적으로 재편성하는 기능을 가지고 있다. 이 시스템 개발을 위해서 신경회로망 이론을 적용하여 고장이 발생한 항공기를 실시간으로 진단하며 제어시스템을 학습시키는 지능형 통합 비행제어시스템을 개발하였으며, 1999년에 보잉사에서 개조한 F-15를 이용하여 고장이 발생하였을 경우에도 안전하게 비행하여 착륙할 수 있도록 하는 지능형 비행제어시스템을 탑재한 첫 비행시험에 성공하였다. 또한, 변화하는 비행환경이나 고장이 발생할 때에도 항공기가 최적의 조건으로 정상운항이 가능하도록 하기 위해, 비행제어시스템에 시스템 식별기법을 통합 적용하거나, 강건제어이론, 신경회로망 이론, 적응제어이론 등 최신 제어이론을 이용하여 비행제어시스템을 개선하고자 하는 연구도 활발히 수행하고 있다. 특히, 파손과 같은 고장에 적응할 수 있도록 신경회로망에 기반을 둔 재형상(reconfigurable) 통합 비행제어시스템을 연구하고 있는데, 2000년에는 이러한 연구결과를 응용하여 NASA Dryden 연구소, NASA Ames 연구소, 보잉사, 미공군(USAF)과 공동으로 수직꼬리날개가 없는(tailless) 형상의 무인시험기 X-36에 적용한 비행시험에 성공하였다. 한편, 유럽에서 개발하고 있는 Eurofighter 2000의 조종계통은 4중 FBW로 되어 있으며, 조종시스템이 고도로 자동화되어 있고 조종계통의 자기진단이 가능하다. 최근 개발되고 있는 여객기들도 기본적으로 다중화된 비행관리시스템을 장착하고 있다.

3. 고장진단 및 분리 (Fault Detection and Isolation)

제어공학에서는 구동기(actuator)와 주 구조물(main structure), 그리고 감지기(sensor) 등의 부분 시스템의 동특성에 급격한 변화가 발생하였을 경우에 고장이라 정의한다. 시스템 고장에 대해 제어공학 분야가 가장 관심을 갖는 내용은 감지기와 구동기에 발생하는 고장에 대해 고장허용성(fault

tolerance)을 갖는 제어시스템을 설계하는 것이다. 전통적으로 이 같은 고장허용성은 다중의 감지기와 다중의 구동기를 장착하여 고장에 대처하는 하드웨어 여분(hardware redundancy)에 의해 확보되어 왔으며, 이를 다중화관리(Redundancy Management) 시스템이라고 한다. 현재 운항 중인 대부분의 항공기 역시 3중 또는 4중의 중첩된 구동기와 감지기를 장착하고 있다. 그러나 이와 같은 방식은 비용과 설치장소의 낭비, 그리고 소프트웨어의 복잡성 등의 단점을 지닐 수 밖에 없다. 따라서 최근 20여년 동안 적은 수의 감지기와 구동기로도 고장에 잘 대처할 수 있도록 제어시스템을 설계하고자 하는 연구들이 활발히 수행되어 왔다. 이와 같이 고장과 관련된 연구들은 크게 고장을 정확히 진단(fault diagnosis)하는 분야의 연구들과 진단된 고장정보를 바탕으로 고장을 견뎌낼 수 있는 제어시스템(fault tolerant control system)을 개발하고자 하는 연구들로 구별될 수 있다. 고장진단 분야 중에서도 감지기나 구동기의 고장 발생여부와 고장 위치를 찾아내는 고장검출 및 분리(FDI: Fault Detection and Isolation) 분야의 연구는 매우 활발하였으며, 이제 거의 실용단계에 접어들었다.

다중화관리의 하드웨어 해법은 항공기 시스템의 하드웨어에 대한 전반적인 이해를 바탕으로 구축된다. 다양한 센서와 액츄에이터, 비행조종 컴퓨터, 데이터 통신버스 등 다중화되어 있는 항공기의 핵심부품과 시스템에 대해 구현되는 다중화관리 시스템의 기능은 3중 데이터버스와 다중화된 컴퓨터 시스템에서 각종 하드웨어의 고장진단 기능과 분리 및 관리기능을 구현할 수 있어야 하며 안정된 성능을 보장하여야 한다. 이러한 다중화관리 시스템의 하드웨어 해법 구현의 예는 [그림 1]과 같다.

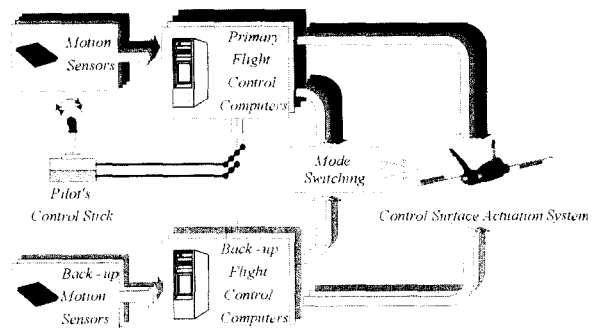


그림 1. 하드웨어 다중화관리 시스템

한편, 시스템의 수학적 모델에 신호를 입력시켜 발생되는 출력과 실제로 측정된 시스템의 출력을 비교하여 고장을 찾아내는 방법을 해석적 여분(analytical redundancy)을 이용한 고장진단기법이라고 한다. 이는 하드웨어 여분을 이용하는 기법이 단지 고장의 유무를 선언하는 정성적(qualitative) 기법인데 비해, 수학적 모델을 기준으로 하여 고장의 검출 및 분리를 수행한다는 점에서 정량적(quantitative)인 기법이라고 이해할 수 있다. 다중화관리 시스템의 해석적 알고리즘 구조도는 [그림 2]와 같다.

수학적 모델과 실제 시스템의 출력으로부터 계산되는 잔차(residual)는 해석적 여분을 이용한 고장진단기법의 공통적인 특성이라고 할 수 있으며, 잔차를 어떻게 만들어내느냐에 따라 고장검출 및 분리기법들은 다양하게 분류된다. 해석적 다중화관리 시스템의 가장 대표적인 잔차 생성방법으로는 관측기를 이용한 방법을 들 수 있다. 고장검출필터(Fault Detection Filter)와 미지입력 관측기(Unknown Input Observer), 그리고 고유공간지정법(Eigenstructure Assignment Technique)을 통해 설계되는 강인한 진단관측기(Diagnostic Observer) 등이 대표적인 기법들이다. 또한, Parity 공간접근방법을 이용하여 잔차를 생성하는 고장진단기법들이 있다. 이 기법은 주로 80년대 후반에 활발히 연구되었는데, 90년대 들어 Parity 공간을 이용한 기법들과 상태관측기법의 동가성(equivalence)이 알려지면서, 상태추정기법과 같은 범주로 이해되고 있다. 고장의 영향을 매개변수로 표현한 후에, 매개변수 추정기법에 의해 잔차를 만들어 내는 고장진단기법에 대한 연구도 활발히 수행되고 있다. 특히, 매개변수 추정의 과정에서 신경회로망, 혹은 신경회로망에 의한 패턴 인식기법을 이용하는 연구들은 매개변수의 변화가 급격하거나 비선형성이 강한 문제들에도 적용될 수 있다는 장점을 지니고 있다. 이러한 기법들 이외에 최근 들어서는 인공지능기법들을 응용하여 고장검출 및 진단을 시도하는 연구들도 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 고장진단의 과정에서 고장의 검출과 총괄적 의사결정(supervision)은 서로 분리된 것으로 설계되고 있지만, 인공지능기법의 하나인 Fuzzy 논리기법을 응용한 정성적인 기법들은 고장의 검출과 의사결정의 과정을 하나로 통합하고자 시도하고 있다. 이러한 기법들은 정성적인 고장검출기법이라고 이해될 수 있으며, 지식기반 여분(knowledge based redundancy)을 이용한 고장진단기법이라고 불리기도 한다. 또한, 확률적인 지식을 이용하여 고장의 유무를 판단하는 전통적인 기법들도 다양한 인공지능기법들과 결합하면서 확장되어 가고 있어서, 정성적인 고장진단기법들과 정량적인 고장진단기법들이 서로 상호보완적인 형태로 발전해 나가는 것이 앞으로 고장진단 연구의 추세가 될 것이라고 예측할 수 있다.

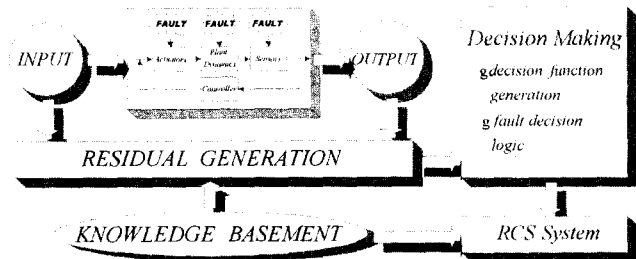


그림 2. 해석적 다중화관리 시스템 구조도

고장진단 분야의 연구자들이 오랫동안 계속해서 관심을 기울이고 있는 주제는 고장의 진단과정이 시스템에 발생할 수 있는 다양한 고장들을 어떻게 서로 분리할 수 있는가

하는 문제와 외란, 잡음, 비선형 효과, 그리고 고장이 아닌 정상적인 매개변수 변화와 같은 비고장 요소들과 고장을 어떻게 구별하는가 하는 강인성(robustness) 문제로 정리될 수 있다.

4. 고장허용제어 (Fault Tolerant Control)

고장허용 제어시스템이란 강인하거나(robust) 재형상이 가능한(reconfigurable) 제어시스템이라고 정의될 수 있다. 여기서 강인한 시스템이란 매개변수의 변화나 부분 시스템의 고장이 발생한 경우에도 만족스러운 성능을 발휘할 수 있는 시스템을 일컫는 말이다. 이에 비해 재형상 제어시스템이란 고장으로 인해 시스템의 구조나 특성이 변화했을 때 제어시스템의 구조가 바뀌어 대처하는 시스템을 일컫는다. 이때 재형상 제어시스템은 미리 특정한 고장상황에 맞게 설계되어 있을 수도 있고, 실시간으로 재설계될 수도 있다.

일반적으로 고장을 고려하지 않는 모든 제어시스템들도 강인성을 갖도록 설계된다. 그러나 강인성을 증대 시키는 것과 시스템의 성능을 향상시키는 것은 제어 목적상 서로 상충되고 있으므로, 모든 고장에 견딜 수 있을 만큼 강인한 제어시스템을 설계하는 것은 현실적인 방법이 아니다. 따라서 대개의 고장허용 제어시스템은 매개변수 변화에 대해 어느 정도의 강인성을 확보하도록 설계되지만, 만약 심각한 고장이 발생하는 경우에는 제어시스템의 구조를 바꾸도록 하여 강인성을 가지고 있으면서 동시에 재형상이 가능한 형태로 설계된다. 즉, 고장허용 시스템은 적응 시스템인 동시에 고장이 발생한 후에도 제어성능을 발휘할 수 있을 정도의 여유도를 가지도록 설계된다는 의미에서 여분(redundant) 시스템이기도 하다.

시스템의 강인성을 극대화하여 어느 정도의 고장에 대처하고자 하는 시도는 고장이 불확실성의 일종이라는 점에서 매우 자연스러운 발상이라고도 할 수 있다. 특히, 80년대 이후 다양한 강인제어기법들이 각광을 받음에 따라 이들을 이용하여 높은 강인성을 갖는 시스템을 설계하고자 하는 연구들이 활발하게 이루어져 왔다. 이러한 연구 중에서 특별히 고장에 대한 강인성을 고려한 연구들도 있는데, 이와 같은 방법에 의해 설계된 제어시스템을 수동적인(passive) 고장허용 제어시스템이라고 분류한다. 이와 더불어 강인 최적화 과정에 고장검출 성능까지 포함한 연구도 이루어지고 있다.

비행제어시스템의 경우, 항공기 조종면을 구동하는 서보에 고장이 발생하거나, 제어면 손실, 날개 또는 동체의 일부 손실과 같은 비상사태에서도 항공기의 생존성을 높이기 위해서 재형상 비행제어가 필요하다. 재형상 비행제어시스템은 비행체의 사소한 고장에 대해서는 고장여부에 관계없이 주어진 임무를 수행할 수 있도록 해 주어야 하며, 중대한 이상현상이 발생할 경우에는 최소한 가까운 공항 또는 기

